

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



NGUYỄN MINH HẢI

**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC HOẠT ĐỘNG KINH TẾ
XÃ HỘI VÀ BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU ĐẾN MÔI TRƯỜNG NƯỚC
VEN BỜ CÁT BÀ - HẠ LONG**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ QUẢN LÝ TÀI NGUYÊN VÀ MÔI TRƯỜNG

Hải Phòng - Năm 2025

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

NGUYỄN MINH HẢI

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC HOẠT ĐỘNG KINH TẾ
XÃ HỘI VÀ BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU ĐẾN MÔI TRƯỜNG NƯỚC
VEN BỜ CÁT BÀ - HẠ LONG

LUẬN ÁN TIẾN SĨ QUẢN LÝ TÀI NGUYÊN VÀ MÔI TRƯỜNG

Ngành: Quản lý Tài nguyên và môi trường

Mã số: 9850101

Xác nhận của Học viện
Khoa học và Công nghệ

Người hướng dẫn 1
(Ký, ghi rõ họ tên)

Người hướng dẫn 2
(Ký, ghi rõ họ tên)



TS. Vũ Duy Vĩnh



PGS. TS. Trần Đình Lân

Hải Phòng - Năm 2025

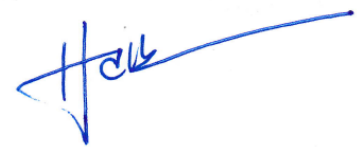
LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án “Nghiên cứu ảnh hưởng của các hoạt động kinh tế xã hội và biến đổi khí hậu đến môi trường nước ven bờ Cát Bà - Hạ Long” là công trình nghiên cứu của riêng cá nhân tôi. Các số liệu về kết quả nghiên cứu trong luận án này là trung thực và chưa từng được công bố bởi tác giả khác. Số liệu và tài liệu trong luận án được sử dụng chủ yếu từ đề tài “Nghiên cứu phát triển và áp dụng bộ công cụ mô hình 3D tích hợp thủy nhiệt động lực-chất lượng nước phục vụ giám sát và quản lý tai biến môi trường dưới tác động của con người và biến đổi khí hậu”, mã số NĐT.97.BE/20 và đề tài “Nghiên cứu tác động do sự gia tăng nguồn ô nhiễm hữu cơ, dinh dưỡng từ hoạt động của con người và biến đổi khí hậu đến năng suất sơ cấp vùng biển ven bờ Cát Bà-Hạ Long”, mã số VAST05.05/21-22. Đây là các đề tài mà nghiên cứu sinh là thư ký khoa học và đã được sự cho phép của chủ nhiệm đề tài.

Luận án được hoàn thành trong thời gian tôi làm nghiên cứu sinh tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Hải Phòng, ngày 23 tháng 07 năm 2025

Tác giả luận án



Nguyễn Minh Hải

LỜI CẢM ƠN

Trước tiên, cho phép tôi được bày tỏ lời cảm ơn sâu sắc tới **PGS.TS. Trần Đình Lân** và **TS. Vũ Duy Vĩnh** - những người thầy luôn tận tình hướng dẫn, truyền đạt kiến thức, kinh nghiệm, hướng dẫn tôi thực hiện đề tài và viết luận án, đồng thời luôn động viên tôi trong suốt quá trình thực hiện luận án.

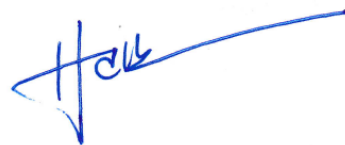
Trong quá trình thực hiện luận án, NCS cũng đã nhận được sự động viên, giúp đỡ của Học viện Khoa học và Công nghệ, lãnh đạo Viện Tài Nguyên và Môi trường biển cùng đồng nghiệp tại Phòng Vật lý biển - nơi NCS công tác và các nhà khoa học tại Viện Tài nguyên và Môi trường biển.

Luận án cũng đã nhận được hỗ trợ về tài liệu, số liệu từ đề tài “Nghiên cứu phát triển và áp dụng bộ công cụ mô hình 3D tích hợp thủy nhiệt động lực-chất lượng nước phục vụ giám sát và quản lý tai biến môi trường dưới tác động của con người và biến đổi khí hậu”, mã số NĐT.97.BE/20 và “Nghiên cứu tác động do sự gia tăng nguồn ô nhiễm hữu cơ, dinh dưỡng từ hoạt động của con người và biến đổi khí hậu đến năng suất sơ cấp vùng biển ven bờ Cát Bà-Hạ Long”, mã số VAST05.05/21-22. NCS xin chân thành cảm ơn Ban chủ nhiệm và các thành viên hai đề tài trên.

Cuối cùng, tôi xin bày tỏ lòng biết ơn tới những người thân trong gia đình, đã luôn là chỗ dựa vững chắc trong những lúc khó khăn khi thực hiện luận án.

Hải Phòng, ngày 23 tháng 07 năm 2025

Tác giả luận án



Nguyễn Minh Hải

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN.....	i
LỜI CẢM ƠN	ii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT.....	v
DANH MỤC CÁC BẢNG.....	vi
DANH MỤC HÌNH	vii
MỞ ĐẦU.....	1
1. Sự cần thiết phải tiến hành nghiên cứu	1
3. Các nội dung nghiên cứu chính của luận án.....	3
4. Phạm vi và đối tượng nghiên cứu	4
5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn	5
6. Điểm mới của luận án.....	7
7. Cấu trúc của luận án	7
Chương 1. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ VÀ KHU VỰC NGHIÊN CỨU	8
1.1. Tổng quan về ảnh hưởng của hoạt động kinh tế xã hội và biến đổi khí hậu đến môi trường nước	8
1.1.1. Tổng quan về ảnh hưởng của hoạt động kinh tế xã hội đến môi trường nước	8
1.1.2. Tổng quan tác động tích hợp của hoạt động kinh tế xã hội và biến đổi khí hậu đến môi trường nước	13
1.2. Điều kiện tự nhiên, kinh tế xã hội và môi trường khu vực nghiên cứu	21
1.2.1. Điều kiện tự nhiên.....	21
1.2.2. Đặc điểm kinh tế xã hội liên quan đến chất lượng nước khu vực nghiên cứu	28
1.2.3. Hiện trạng chất lượng môi trường nước	32
Chương 2. TÀI LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	41
2.1. Tài liệu.....	41
2.2. Cách tiếp cận	44
2.2.1. Tiếp cận hệ thống.....	44
2.2.2. Tiếp cận từ mô hình	44
2.2.3. Tiếp cận liên ngành	45
2.2.4. Kế thừa các tài liệu đã có	45
2.3. Phương pháp nghiên cứu	46

2.3.1. Phương pháp phân tích thống kê	46
2.3.2. Phương pháp mô hình	48
Chương 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN	56
3.1. Các biểu hiện của biến đổi khí hậu ở khu vực Cát Bà-Hạ Long	56
3.1.1. Xu thế dâng cao của mực nước biển.....	56
3.1.2. Xu thế tăng của nhiệt độ nước biển	64
3.2. Hiệu chỉnh và kiểm chứng mô hình	80
3.2.1. Mô hình thủy động lực	80
3.2.2. Mô hình chất lượng nước	84
3.3. Ảnh hưởng của hoạt động kinh tế xã hội và biến đổi khí hậu đến điều kiện môi trường	88
3.3.1. Dòng chảy	88
3.3.2. Nhiệt độ nước.....	90
3.3.3. Độ muối	94
3.4. Ảnh hưởng của hoạt động phát triển kinh tế xã hội và biến đổi khí hậu đến chất lượng môi trường nước khu vực Cát Bà-Hạ Long	99
3.4.1. Ảnh hưởng do hoạt động của kinh tế xã hội.....	99
3.4.2. Ảnh hưởng do biến đổi khí hậu	106
3.4.3. Ảnh hưởng tích hợp của hoạt động kinh tế xã hội và biến đổi khí hậu.	110
3.5. Đề xuất giải pháp quản lý	115
3.5.1. Nhóm giải pháp tuyên truyền	115
3.5.2. Kiểm soát các nguồn ô nhiễm đưa vào khu vực Cát Bà-Hạ Long	116
3.5.3. Nhóm giải pháp tăng cường nghiên cứu về biến đổi khí hậu và các giải pháp thích ứng.....	117
3.5.4. Nhóm giải pháp lồng ghép biến đổi khí hậu vào quy hoạch phát triển kinh tế xã hội.....	118
3.5.5. Nhóm giải pháp bảo vệ hệ sinh thái và vùng nhạy cảm.....	119
3.5.6. Giải pháp quy hoạch phát triển bền vững	119
3.5.7. Ứng dụng khoa học công nghệ trong việc giám sát và cảnh báo sớm ..	120
KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ.....	121
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN	123
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	125
PHỤ LỤC.....	138

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT

BĐKH	Biến đổi khí hậu
BTNMT	Bộ Tài nguyên Môi trường
CB-HL	Cát Bà-Hạ Long
CLN	Chất lượng nước
CV	Coefficient of Variation - Hệ số biến thiên
GCM	Global Climate Model - Mô hình khí hậu toàn cầu
GDP	Gross Domestic Product - Tổng sản phẩm quốc nội
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Ocean-Bản đồ địa hình tổng hợp của đại dương
GHCP	Giới hạn cho phép
GMSL	Global mean sea level - Mức nước biển trung bình toàn cầu
HST	Hệ sinh thái
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change - Ủy ban Liên chính phủ về biến đổi khí hậu
KCN	Khu công nghiệp
KTXH	Kinh tế xã hội
NBD	Nước biển dâng
NCEP	National Centers for Environmental Prediction - Trung tâm dự báo môi trường Hoa Kỳ
NTTS	Nuôi trồng thủy sản
QCVN	Quy chuẩn Việt Nam
RCM	Regional Climate Model - Mô hình khí hậu khu vực
RCP	Representative Concentration Pathways - Kịch bản nồng độ khí nhà kính đặc trưng
STD	Standard Deviation - Độ lệch chuẩn
TĐL	Thủy động lực
TTLL	Trầm tích lơ lửng
WMO	World Meteorological Organization - Tổ chức Khí tượng thế giới

DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 2. 1. Tải lượng các chất ô nhiễm ở khu vực CB-HL vào năm 2019 và 2030 (tấn/năm) [40].....	42
Bảng 2. 2. Diện tích lấn biển vào năm 2010 và 2019 ở khu vực CB-HL và lân cận [40].....	43
Bảng 2. 3. Các nhóm kịch bản tính toán mô phỏng.....	54
 Bảng 3.1. Xu hướng dâng cao mực nước (mm/năm) tại trạm Hòn Dấu	61
Bảng 3.2. Xu hướng dâng cao mực nước (mm/năm) tại trạm Bãi Cháy sử dụng phương pháp MK và Sen's Slope	62
Bảng 3.3. Đặc trưng thống kê của nhiệt độ nước (°C) tại trạm Hòn Dấu (1995-2020) [153].....	65
Bảng 3.4. Đặc trưng thống kê của nhiệt độ nước (°C) tại trạm Bãi Cháy (1995-2020)	67
Bảng 3.5. Phân tích xu thế của nhiệt độ nước tại trạm Hòn Dấu giai đoạn 1995-2020 [153].....	73
Bảng 3.6. Phân tích xu thế của nhiệt độ nước tại trạm Bãi Cháy giai đoạn 1995-2020	74
Bảng 3.7. Phân tích xu thế của nhiệt độ nước tại trạm Hòn Dấu trong giai đoạn 2008-2020 [153]	75
Bảng 3.8. Phân tích xu thế của nhiệt độ nước tại trạm Bãi Cháy trong giai đoạn 2008-2020.....	76
Bảng 3.9. Chỉ số đánh giá hiệu chỉnh và kiểm chứng của mô hình TĐL.....	81
Bảng 3.10. Tóm tắt các tham số hiệu chỉnh của mô hình thủy động lực.....	83
Bảng 3.11. Chỉ số đánh giá hiệu chỉnh và kiểm chứng của mô hình CLN	85
Bảng 3.12. Các tham số cơ bản của mô hình chất lượng nước	86
Bảng 3.13. Sự biến động của các chất so với kịch bản hiện trạng dưới tác động của con người (%).....	101
Bảng 3.14. Sự biến động của các chất so với kịch bản hiện trạng dưới tác động của lấn biển (%).....	105
Bảng 3.15. Sự biến động của các chất so với kịch bản hiện trạng dưới tác động của BĐKH (%)	109
Bảng 3.16. Hàm lượng DO (mg/l) giảm theo các kịch bản.....	112
Bảng 3.17. Sự biến động của các chất so với kịch bản hiện trạng dưới tác động của con người và BĐKH (%).....	114

DANH MỤC HÌNH

Hình 1. 1. Khu vực ven bờ CB-HL.....	22
Hình 1. 2. Hoa gió khu vực nghiên cứu: a-trạm Bãi Cháy, b- trạm Hòn Dấu.....	23
Hình 1. 3. Nhiệt độ trung bình tháng nhiều năm (1979-2020) tại trạm Hòn Dấu	24
Hình 1. 4. Đặc trưng mực nước: a-trạm Hòn Dấu, b-trạm Bãi Cháy	25
Hình 1. 5. Trường dòng chảy mùa mưa, tầng mặt: a-pha triều xuống, b-pha triều lên	26
Hình 1. 6. Trường sóng khu vực CB-HL: a) mùa gió Đông Bắc; b) mùa gió chuyển tiếp Đông Bắc sang Tây Nam, c) mùa gió Tây Nam, d) mùa gió chuyển tiếp Tây Nam sang Đông Bắc [88].....	27
Hình 1. 7. Hoa sóng khu vực nghiên cứu: a-trạm Bãi Cháy (1974-2020),.....	28
Hình 1. 8. Sản lượng khai thác và NTTS của Hải Phòng (a) và Quảng Ninh (b).....	29
Hình 1. 9. Khách du lịch tới thành phố Hạ Long (1996-2022)	31
Hình 1. 10. Sơ đồ vị trí khảo sát của đề tài NĐT.97.BE/20 (a) và đề tài VAST05.05/21-22 (b)	33
Hình 1. 11. Hàm lượng DO trung bình tại một số vị trí (2016-2020)	33
Hình 1. 12. Hàm lượng các chất dinh dưỡng từ kết quả khảo sát	35
Hình 1. 13. Hàm lượng NH_4^+ trung bình tại một số vị trí (2016-2020)	36
Hình 1. 14. Hàm lượng PO_4^{3-} trung bình năm 2018 và 2019 tại một số địa điểm.....	37
Hình 1. 15. Giá trị các chất hữu cơ từ kết quả khảo sát	38
Hình 1. 16. Hàm lượng TTLT từ kết quả khảo sát: (a) LT1, (b) trạm mặt rộng	40
 Hình 2. 1. Vị trí khu vực Cát Bà-Hạ Long (a): Lưới thô-màu xanh (b), lưới chi tiết (c) và lưới độ sâu (d).....	51
 Hình 3. 1. Mực nước trung bình năm tại trạm Hòn Dấu (1961-2020)	56
Hình 3.2. Mực nước trung bình tháng tại trạm Hòn Dấu (1961-2020)	57
Hình 3.3. Mực nước trung bình năm tại trạm Bãi Cháy (1981-2020).....	57
Hình 3.4. Mực nước trung bình tháng tại trạm Bãi Cháy (1981-2020).....	58
Hình 3.5. Số ngày mực nước lớn hơn 210 cm tại trạm Hòn Dấu.....	58
Hình 3.6. Số ngày mực nước nhỏ hơn 170 cm tại trạm Hòn Dấu.....	59
Hình 3.7. Số ngày mực nước lớn hơn 210 cm tại trạm Bãi Cháy	59
Hình 3.8. Số ngày mực nước nhỏ hơn 170 cm tại trạm Bãi Cháy.....	60

Hình 3.9. Nhiệt độ nước tháng (trung bình, cực đại, cực tiểu) và STD (cột đồ) tại trạm Hòn Dấu giai đoạn 1995-2020	66
Hình 3.10. Nhiệt độ nước tháng (trung bình, cực đại, cực tiểu) và STD (cột đồ) tại trạm Bãi Cháy giai đoạn 1995-2020.....	67
Hình 3.11. Nhiệt độ trung bình trong giai đoạn 1995-2000 tại trạm Hòn Dấu: (a) năm, (b) mùa đông (tháng 12 đến tháng 3), (c) mùa hè (tháng 6 đến tháng 9)	69
Hình 3.12. Xu thế tăng nhiệt độ tháng giai đoạn 1995-2020 tại trạm Hòn Dấu.....	70
Hình 3.13. Nhiệt độ trung bình trong giai đoạn 1995-2020 tại trạm Bãi Cháy: (a) năm, (b) mùa đông (tháng 12 đến tháng 3), (c) mùa hè (tháng 6 đến tháng 9)	71
Hình 3.14. Xu thế tăng nhiệt độ tháng giai đoạn 1995-2020 tại trạm Bãi Cháy	72
Hình 3.15. So sánh giữa mực nước quan trắc và mô hình: trạm Hòn Dấu- a) tháng 1/2021, b) tháng 10/2021; trạm Bãi Cháy-c) tháng 1/2021, d) tháng 10/2021.....	81
Hình 3.16. So sánh dòng chảy giữa quan trắc và mô hình năm 2021:	82
Hình 3.17. So sánh chất hữu cơ và dinh dưỡng giữa quan trắc và mô hình:	85
Hình 3.18. So sánh trường dòng chảy trung bình tầng mặt vào mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam theo một số kịch bản: (a) 2010, (b) 2019, (c) 2030, (d) 2050.....	89
Hình 3.19. So sánh trường dòng chảy trung bình tầng mặt vào mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc theo một số kịch bản: (a) 2010, (b) 2019, (c) 2030, (d) 2050.....	90
Hình 3.20. So sánh trường nhiệt độ trung bình mùa gió Đông Bắc theo các kịch bản: (a) tầng mặt, 2019; (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng mặt, 2050; (d) tầng đáy, 2019; (e) tầng đáy, 2030; (f) tầng đáy, 2050.....	91
Hình 3.21. So sánh trường nhiệt độ trung bình mùa gió chuyển tiếp từ gió Đông Bắc sang Tây Nam theo các kịch bản: (a) tầng mặt, 2019; (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng mặt, 2050; (d) tầng đáy, 2019; (e) tầng đáy, 2030; (f) tầng đáy, 2050.....	92
Hình 3.22. So sánh trường nhiệt độ trung bình mùa Tây Nam theo các kịch bản: (a) tầng mặt, 2019; (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng mặt, 2050; (d) tầng đáy, 2019; (e) tầng đáy, 2030; (f) tầng đáy, 2050.....	93
Hình 3.23. So sánh trường nhiệt độ trung bình mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc theo các kịch bản: (a) tầng mặt, 2019; (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng mặt, 2050; (d) tầng đáy, 2019; (e) tầng đáy, 2030; (f) tầng đáy, 2050.....	94
Hình 3.24. So sánh trường độ muối trung bình mùa gió Đông Bắc theo các kịch bản: (a) tầng mặt, 2019; (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng mặt, 2050; (d) tầng đáy, 2019; (e) tầng đáy, 2030; (f) tầng đáy, 2050.....	95

Hình 3.25. So sánh trường độ muối trung bình mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam theo các kịch bản: (a) tầng mặt, 2019; (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng mặt, 2050; (d) tầng đáy, 2019; (e) tầng đáy, 2030; (f) tầng đáy, 2050.....	96
Hình 3.26. So sánh trường độ muối trung bình mùa gió Tây Nam theo các kịch bản: (a) tầng mặt, 2019; (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng mặt, 2050; (d) tầng đáy, 2019; (e) tầng đáy, 2030; (f) tầng đáy, 2050.....	97
Hình 3.27. So sánh trường độ muối trung bình mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc theo các kịch bản: (a) tầng mặt, 2019; (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng mặt, 2050; (d) tầng đáy, 2019; (e) tầng đáy, 2030; (f) tầng đáy, 2050.....	98
Hình 3.25. Phân bố DO vào mùa gió Đông Bắc trong pha triều lên: (a) tầng mặt-hiện trạng, (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng đáy-hiện trạng, (d) tầng đáy - 2030	100
Hình 3.29. Hàm lượng DO trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và tăng nguồn ô nhiễm (2030): a- mùa gió Đông Bắc, b-mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang đông.....	101
Hình 3.30. So sánh hàm lượng DO trong mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc trong pha triều xuống: tầng mặt- (a) 2010, (b) 2019; tầng đáy- (c) 2010, (d) 2019	103
Hình 3.31. Hàm lượng DO tầng mặt trong tháng trung bình tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và trước khi lấn biển (2010): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc	104
Hình 3.32. Phân bố DO mùa gió Đông Bắc trong pha xuống: (a) tầng mặt, hiện trạng, (b) tầng mặt, 2050; (c) tầng đáy, hiện trạng (d) tầng đáy, 2050.....	107
Hình 3.33. Hàm lượng DO trung bình tầng mặt tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019), BDKH (2030) và BDKH (2050): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc	108
Hình 3.34. Phân bố DO trong pha triều xuống vào mùa gió Đông Bắc theo các kịch bản: tầng mặt - (a) 2019, (b) 2030bđkh, (c) 2030cn, (d) 2030cn-bđkh; tầng đáy- (e) 2019, (f) 2030bđkh, (g) 2030cn, (h) 2030cn-bđkh	111
Hình 3.35. Biến động hàm lượng DO trung bình tại một số khu vực: a) mùa gió Đông Bắc, b) mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c) mùa gió Tây Nam, d) mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc	113

MỞ ĐẦU

1. Sự cần thiết phải tiến hành nghiên cứu

Với dải ven biển kéo dài trên 3260km và hơn 1 triệu km² diện tích thềm lục địa, nước ta có các điều kiện rất thuận lợi cho phát triển kinh tế biển như vận tải hàng hóa, du lịch dịch vụ, khai thác nuôi trồng hải sản. Sau thời kỳ đổi mới, kinh tế xã hội (KTXH) nước ta đã có sự phát triển nhanh chóng, đặc biệt là ở vùng ven biển. Các tỉnh thành ven biển với trên 44 triệu người hiện chiếm khoảng 50% tổng GDP của cả nước, trong đó có sự đóng góp lớn từ các ngành kinh tế biển (giai đoạn 2011-2022). Tuy nhiên, sự phát triển KTXH nhanh chóng trong những năm gần đây đã và đang gây ra những áp lực rất lớn đến môi trường biển. Trong đó, chủ yếu là sự gia tăng mạnh của các chất thải qua các cửa sông, nguồn thải của các cơ sở sản xuất, kinh doanh dịch vụ du lịch ven biển, hoạt động nuôi trồng thủy sản ven biển và trên mặt nước... Điển hình là sự cố môi trường do nguồn thải lớn từ tổ hợp nhà máy của Công ty Formosa Hà Tĩnh đưa ra vùng ven biển đã gây ra thảm họa về môi trường cho 4 tỉnh miền Trung (Hà Tĩnh, Quảng Bình, Quảng Trị, Thừa Thiên - Huế). Sự cố này đã gây ra những ảnh hưởng nặng nề đến sự phát triển KTXH của các tỉnh miền Trung, làm giảm 0,3% GDP của Việt Nam năm 2016.

Không chỉ khi xuất hiện các sự cố môi trường, ngay cả khi có sự kiểm soát các nguồn gây ô nhiễm do phát triển KTXH trong thời gian vừa qua cũng đã làm suy giảm nghiêm trọng chất lượng môi trường nước ở nhiều vùng ven biển của nước ta. Mặc dù quy mô ảnh hưởng ở những vùng nhỏ (Nha Trang, Cát Bà- Hải Phòng, Đà Nẵng, Quảng Bình, Quảng Trị, vịnh Hạ Long, Thừa Thiên –Huế ..v.v) và thiệt hại không nặng nề như sự cố môi trường Formosa nhưng cũng đã gây ra những thiệt hại đáng kể đến các ngành du lịch dịch vụ, nuôi trồng, khai thác thủy hải sản, suy giảm nguồn lợi và tài nguyên sinh vật biển.

Ngoài những sức ép từ sự gia tăng nguồn ô nhiễm do hoạt động KTXH của con người đưa ra vùng ven biển. Khu vực này cũng chịu những ảnh hưởng do biến đổi khí hậu (BĐKH) với các biểu hiện ngày càng rõ nét, đặc biệt là nước biển dâng (NBD) và sự tăng lên của nhiệt độ. Theo kết quả dự báo BĐKH cho Việt Nam đối với kịch bản RCP8.5, đến cuối thế kỷ 21, NBD ở vùng biển ven bờ Việt Nam có thể đạt từ 51-106 cm. Trong khi đó, vào đầu thế kỷ 21, nhiệt độ có mức tăng phổ biến

từ 1,8-2,3°C. Khu vực phía bắc tăng từ 2,0-2,3°C, phía nam tăng từ 1,8-1,9°C. Đến cuối thế kỷ 21, nhiệt độ phía bắc tăng từ 3,3-4°C và ở phía nam tăng từ 3,0-3,5°C [1]. Sự dâng cao mực nước sẽ chủ yếu ảnh hưởng đến các quá trình thủy động lực (TĐL), vận chuyển bùn cát, bồi xói vùng cửa sông ven bờ. Trong khi đó, sự gia tăng của nhiệt độ có thể ảnh hưởng đến sự chuyển hóa vật chất, các quá trình sinh-địa-hóa cũng như chất lượng nước (CLN) ở vùng ven biển. Qua đó, có thể tăng cường nguy cơ gây ô nhiễm, suy giảm chất lượng môi trường nước vùng cửa sông ven biển Việt Nam.

Khu vực Cát Bà-Hạ Long (CB-HL) là vùng biển có khu di sản thiên nhiên và địa chất của thế giới vịnh Hạ Long và khu dự trữ sinh quyển thế giới Cát Bà. Quần đảo Cát Bà và vịnh Hạ Long vừa được công nhận là di sản thiên nhiên thế giới vào tháng 9/2023. Những năm gần đây, KTXH của tỉnh Quảng Ninh và thành phố Hải Phòng đã có những bước phát triển nhanh chóng. Hai địa phương này cũng là các cực tăng trưởng quan trọng trong tam giác phát triển của vùng kinh tế trọng điểm Bắc Bộ với sự tập trung của các ngành kinh tế mũi nhọn như công nghiệp khai thác than, cảng và giao thông thủy, du lịch dịch vụ, nuôi trồng, chế biến và khai thác thủy - hải sản... Tuy nhiên, sự phát triển đó làm gia tăng mâu thuẫn giữa phát triển kinh tế và bảo vệ tài nguyên, cảnh quan môi trường biển của khu vực. Sự suy giảm chất lượng môi trường nước, gia tăng quá trình bồi lắng, suy giảm nguồn lợi và đa dạng sinh học, phá vỡ cảnh quan đang là vấn đề được quan tâm. Chỉ riêng các hoạt động du lịch dịch vụ ở CB-HL đã kéo theo không chỉ sự gia tăng trực tiếp các nguồn ô nhiễm đưa vào vùng biển ven bờ mà còn gây ra những ảnh hưởng gián tiếp thông qua các hoạt động khác như lấn biển, san lấp, nạo vét làm thay đổi không gian của khu vực.

Chính vì vậy, môi trường nước vùng biển CB-HL đã nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu từ các nhà khoa học, quản lý. Dự án thực hiện bởi JICA năm 1998, đã điều tra đánh giá tài nguyên, môi trường, KTXH theo hướng quy hoạch tổng hợp khu vực vịnh Hạ Long. Đề tài các cấp như “Nghiên cứu đánh giá sức tải môi trường và đề xuất các giải pháp quản lý, bảo vệ môi trường vịnh Hạ Long - Bái Tử Long”; “Đánh giá sức tải môi trường đảo Cát Bà và đề xuất giải pháp phát triển bền vững”; “Nghiên cứu, ứng dụng mô hình sinh thái phục vụ bảo vệ đa dạng sinh học và các hệ sinh thái vùng biển CB-HL” đã đánh giá được hiện trạng CLN, dự báo các chất

gây ô nhiễm dựa vào quy hoạch phát triển KTXH. Tuy nhiên, những nghiên cứu này được thực hiện từ nhiều năm trước, khi điều kiện KTXH ở khu vực này có mức phát triển thấp hơn hiện nay rất nhiều. Trong khi đó, tốc độ tăng trưởng kinh tế nhanh (Hải Phòng là 16,5% năm 2019; Quảng Ninh là 12,1% năm 2019) cũng như quy mô, các hoạt động KTXH của các địa phương đã tăng nhiều so với thời kỳ 10 năm về trước. Ngoài ra, các biểu hiện của BĐKH ngày càng trở lên rõ rệt hơn. Do đó, những ảnh hưởng tích hợp do hoạt động KTXH của con người và BĐKH trong thời gian sắp tới sẽ càng ngày càng sâu sắc hơn. Khu vực CB-HL với nguồn tài nguyên biển phong phú và giá trị cảnh quan đặc sắc góp phần trong việc thu hút khách du lịch. Vì vậy, bên cạnh việc khai thác để phát triển KTXH thì việc quản lý và bảo vệ môi trường nước theo hướng phát triển bền vững càng ngày càng trở nên cấp thiết. Các câu hỏi như: Những hoạt động KTXH của con người đang tác động đến môi trường nước vùng biển CB-HL hiện nay như thế nào? Tác động của BĐKH trong thời gian tới cũng như tác động kết hợp của hoạt động KTXH và BĐKH đến môi trường nước của khu vực sẽ ra sao? Trả lời được các câu hỏi trên sẽ là cơ sở đề xuất các giải pháp quản lý, giảm thiểu tác động của các hoạt động KTXH của con người và BĐKH đến môi trường nước ở khu vực.

Trước thực trạng đó, đề tài luận án **“Nghiên cứu ảnh hưởng của các hoạt động kinh tế xã hội và biến đổi khí hậu đến môi trường nước ven bờ Cát Bà-Hạ Long”** đã được triển khai với các mục tiêu và nội dung như sau.

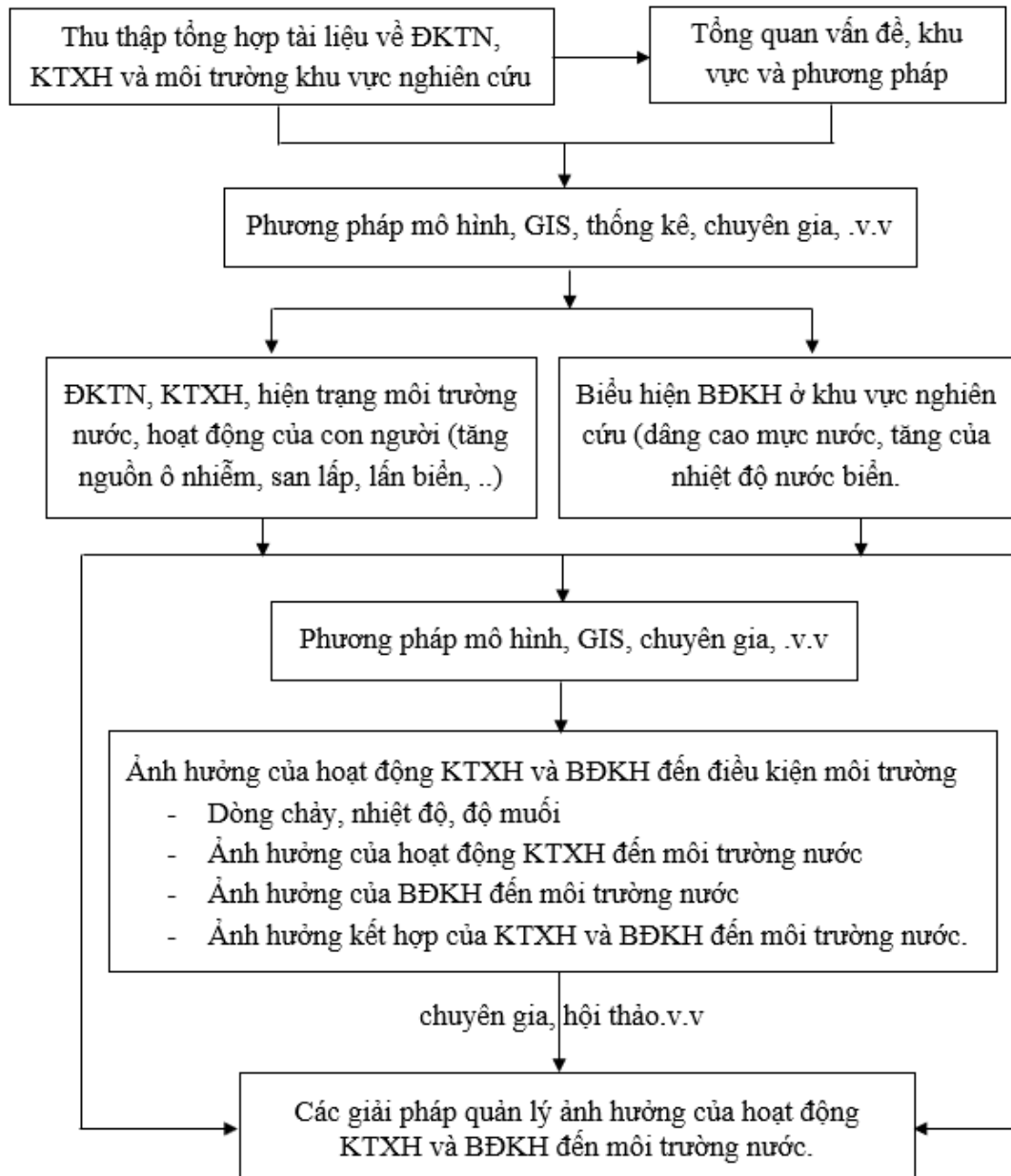
2. Mục tiêu nghiên cứu

Đánh giá/dự báo được những ảnh hưởng do các nguồn ô nhiễm hữu cơ và dinh dưỡng từ hoạt động KTXH của con người và BĐKH đến chất lượng môi trường nước khu vực ven bờ CB-HL.

3. Các nội dung nghiên cứu chính của luận án

Trên cơ sở các mục tiêu đã đặt ra, các nội dung nghiên cứu của luận án với 6 nhóm vấn đề chính theo logic giải quyết vấn đề, gồm: 1) Thu thập, tổng hợp các tài liệu về điều kiện tự nhiên, KTXH và môi trường ở khu vực nghiên cứu; 2) Tổng quan về ảnh hưởng của hoạt động KTXH và BĐKH đến môi trường nước; 3) Phân tích đánh giá điều kiện tự nhiên, KTXH và hiện trạng môi trường; 4) Đánh giá biểu hiện BĐKH ở khu vực CB-HL; 5) Đánh giá ảnh hưởng của các hoạt động KTXH

và BĐKH đến môi trường nước; 6) Đề xuất các giải pháp quản lý ảnh hưởng của hoạt động KTXH và BĐKH đến môi trường nước ở khu vực nghiên cứu. Các nội dung chính và phương pháp nghiên cứu của luận án được tóm tắt trong sơ đồ sau:



Sơ đồ tóm tắt nội dung và phương pháp nghiên cứu của luận án

4. Phạm vi và đối tượng nghiên cứu

Phạm vi không gian: Khu vực nghiên cứu của luận án tập trung vào vùng nước ven bờ CB-HL và lân cận (hình 1.1), bao gồm nơi phát sinh các nguồn chất gây ô nhiễm do hoạt động KTXH của con người. Tuy nhiên, để đánh giá mức độ lan truyền các chất gây ô nhiễm từ các điểm nguồn thải/điểm phát sinh các chất gây ô nhiễm, giới hạn vùng biển phía ngoài của luận án có thể được mở rộng về phía biển:

phía đông đến kinh độ 107°15' Đông, phía nam mở rộng xuống vĩ độ 20°40' Bắc.

Vấn đề nghiên cứu: Phân tích và đánh giá tác động của các hoạt động KTXH và BDKH đến CLN ở vùng biển CB-HL.

Đối tượng nghiên cứu:

Các hoạt động KTXH của con người làm phát sinh rất nhiều chất gây ô nhiễm như các chất dinh dưỡng, hữu cơ, kim loại nặng, hoá chất, các chất hữu cơ khó phân hủy, nhựa và vi nhựa..v.v. Trong đó, các nhóm chất dinh dưỡng hòa tan cung cấp dinh dưỡng cho sinh vật phù du, hỗ trợ chuỗi thức ăn biển, đồng thời có thể gây phú dưỡng, tảo nở hoa, thiếu oxy. Trong khi các chất hữu cơ từ các điểm nguồn thải đưa ra nhiều có thể làm giảm DO, gây “vùng nước chết”, ảnh hưởng sinh vật. Chính vì vậy, trong nghiên cứu này, đối tượng nghiên cứu sẽ tập trung vào nhóm chất dinh dưỡng, hữu cơ. Đây cũng là các thành phần thiết yếu trong chu trình sinh địa hóa của hệ sinh thái biển và phản ánh mức độ ô nhiễm do hoạt động KTXH.

- Các nhóm chất (dinh dưỡng hoà tan của Nitơ và photphas: NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} ; các chỉ số ô nhiễm hữu cơ: BOD, COD) và oxy hòa tan (DO).
- Các nguồn chất dinh dưỡng, hữu cơ từ ven bờ do hoạt động KTXH của con người đưa vào môi trường nước ở khu vực ven bờ CB-HL thông qua các điểm nguồn thải.
- Sự tăng nhiệt độ và NBD do BDKH ở khu vực CB-HL.
- Các quá trình lan truyền, phát tán chất gây ô nhiễm từ nguồn thải và ảnh hưởng của chúng đến môi trường nước ở khu vực CB-HL.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Ý nghĩa khoa học

Các nghiên cứu về diễn biến môi trường nước ở khu vực cửa sông ven biển dưới ảnh hưởng của các hoạt động KTXH đã được thực hiện nhiều nơi trên thế giới và một số vùng ven biển Việt Nam. Để cung cấp các kết quả nghiên cứu định lượng về diễn biến môi trường nước ở khu vực cửa sông ven biển dưới ảnh hưởng của các điều kiện khác nhau (nguồn thải, điều kiện khí tượng hải văn, .v.v.) thì phương pháp mô hình toán vẫn là một trong những phương án tối ưu nhất cho đến thời điểm hiện nay. Việc áp dụng phương pháp mô hình không chỉ khắc phục những hạn chế khó khăn của các phương pháp khảo sát truyền thống mà còn là hướng nghiên cứu tất yếu cần phát triển trong bối cảnh cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ 4 đang đến gần. Tuy nhiên, do nhiều nguyên nhân khác nhau, khả năng áp dụng mô hình toán

để nghiên cứu các quá trình CLN ở Việt Nam còn gặp nhiều khó khăn do hạn chế về cả nguồn nhân lực hoạt động trong lĩnh vực, thiếu thốn về công cụ mô hình, thiết bị tính toán, nguồn số liệu đầu vào cho mô hình. Điều này được minh chứng qua số lượng các công bố quốc tế về việc ứng dụng các mô hình CLN của các tác giả Việt Nam còn rất ít.

Trong nghiên cứu này, hệ thống mô hình 3D đã được sử dụng lần đầu tiên để nghiên cứu đánh giá riêng lẻ và tích hợp các ảnh hưởng do tăng nguồn gây ô nhiễm và BĐKH (tăng nhiệt độ nước và mực nước biển) đến môi trường nước vùng biển CB-HL. Các kết quả nhận được đã cho thấy vai trò ảnh hưởng khác nhau của con người và BĐKH, cũng như tích hợp của cả hai yếu tố đó. Thông qua các kết quả nghiên cứu này, có thể thấy rõ mức độ tác động khác nhau và cộng hưởng do hoạt động KTXH của con người và BĐKH đến môi trường nước ở khu vực ven bờ CB-HL trong điều kiện hiện tại (2019) và tương lai (2030, 2050). Với các kết quả này, luận án có thể được dùng làm tài liệu tham khảo trong nghiên cứu, giảng dạy ở một số lĩnh vực có liên quan.

Ý nghĩa thực tiễn

Là một đất nước đang phát triển, nhu cầu khai thác sử dụng các nguồn tài nguyên tự nhiên ngày càng nhiều, do đó các áp lực do phát triển KTXH đến môi trường nước cũng ngày càng tăng, đặc biệt là ở các vùng ven biển. Mặt khác, việc bảo vệ môi trường nước và duy trì các nguồn tài nguyên tự nhiên cũng là xu hướng phát triển tất yếu trong thời gian tới. Hơn nữa, Việt Nam là một trong những quốc gia chịu tác động nghiêm trọng nhất của BĐKH [2], ảnh hưởng của BĐKH thậm chí còn diễn biến nhanh hơn so với dự kiến. Vì vậy, để hỗ trợ cho việc quản lý cũng như hoạch định các chính sách khai thác tài nguyên hợp lý, phục vụ phát triển KTXH, gắn với bảo vệ môi trường biển và thích ứng với BĐKH thì rất cần các kết quả nghiên cứu định lượng. Với việc ứng dụng mô hình toán, luận án cho thấy bức tranh biến động theo không gian và thời gian diễn biến chất lượng môi trường nước ở vùng biển CB-HL trong tương lai dưới ảnh hưởng do hoạt động phát triển KTXH của con người và BĐKH. Qua đó, có thể xác định phạm vi, mức độ tác động của các nguồn ô nhiễm ven bờ đến chất lượng môi trường nước ở khu vực CB-HL.

Kết quả mô phỏng/dự báo về môi trường nước ở vùng biển CB-HL dưới các ảnh hưởng do phát triển KTXH và BĐKH sẽ là cơ sở để hoạch định các chính sách

phát triển KTXH (lựa chọn những ngành, lĩnh vực ít có tác động đến môi trường nước) gắn với yêu cầu bảo vệ môi trường nước và thích ứng với BĐKH.

6. Điểm mới của luận án

- Các biểu hiện của BĐKH (dâng cao mực nước biển và tăng nhiệt độ nước biển) ở vùng biển CB-HL dựa trên các kết quả phân tích từ số liệu quan trắc mới nhất đến 2020 (thời điểm thực hiện luận án).

- Các ảnh hưởng riêng biệt/kết hợp của hoạt động KTXH (tăng nguồn ô nhiễm và lấn biển) và BĐKH (dâng cao mực nước biển và tăng nhiệt độ) đến chất lượng môi trường nước vùng biển CB-HL dựa trên kết quả tính toán/dự báo của mô hình số trị.

7. Cấu trúc của luận án

Bên cạnh phần mở đầu, kết luận và tài liệu tham khảo, luận án được cấu trúc thành 03 chương chính như sau:

Chương 1. Tổng quan vấn đề và khu vực nghiên cứu: cung cấp thông tin tổng quan về tác động của hoạt động KTXH và BĐKH đến môi trường nước cũng như các thông tin về điều kiện tự nhiên, KTXH và hiện trạng CLN ở khu vực nghiên cứu. Cũng trong chương này, các phương pháp nghiên cứu và việc áp dụng các phương pháp này trên thế giới và ở Việt Nam cũng được phân tích, đánh giá.

Chương 2 trình bày tài liệu, cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu để giải quyết các mục tiêu đã đặt ra của luận án, gồm: tiếp cận hệ thống; tiếp cận mô hình; tiếp cận liên ngành và kế thừa các tài liệu. Các phương pháp nghiên cứu cũng được trình bày chi tiết, trong đó tập trung vào phương pháp phân tích thống kê để đánh giá các biểu hiện của BĐKH và phương pháp mô hình (thiết lập mô hình, các kịch bản tính toán dự báo).

Chương 3 trình bày toàn bộ các kết quả nghiên cứu, gồm các kết quả về biểu hiện BĐKH ở khu vực CB-HL, trong đó tập trung vào xu thế dâng cao mực nước và tăng nhiệt độ dựa trên số liệu quan trắc; ảnh hưởng của hoạt động KTXH và BĐKH đến điều kiện môi trường và môi trường nước vùng biển CB-HL theo các nhóm kịch bản khác nhau như ảnh hưởng do lấn biển, do gia tăng nguồn chất gây ô nhiễm và những ảnh hưởng do BĐKH. Dựa trên các kết quả phân tích, đánh giá, dự báo những ảnh hưởng (cả riêng biệt và tích hợp), các giải pháp quản lý môi trường ở khu vực CB-HL cũng sẽ được đưa ra.

Chương 1. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ VÀ KHU VỰC NGHIÊN CỨU

1.1. Tổng quan về ảnh hưởng của hoạt động kinh tế xã hội và biến đổi khí hậu đến môi trường nước

1.1.1. Tổng quan về ảnh hưởng của hoạt động kinh tế xã hội đến môi trường nước

1.1.1.1. Nghiên cứu về ảnh hưởng do các hoạt động kinh tế xã hội đến môi trường nước vùng ven biển trên thế giới

Từ lâu, vùng nước ven bờ được coi là một trong những khu vực quan trọng nhất trên thế giới bởi nó cung cấp khoảng 22% giá trị của các dịch vụ hệ sinh thái (HST) toàn cầu [3]. Khu vực này có năng suất sơ cấp cao, HST đa dạng và nhiều yếu tố thuận lợi cho con người sinh sống. HST ven biển còn là vùng chuyển tiếp giữa hai HST khác nhau và liên kết, nơi có sự cộng hưởng và tương tác giữa các quá trình tự nhiên và nhân tạo. Tuy nhiên, khu vực này rất nhạy cảm và dễ bị tổn thương trước các hoạt động của con người như phát triển KTXH, mở rộng đô thị, tăng dân số và nguồn ô nhiễm, đặc biệt là sự tích tụ của các chất ô nhiễm hữu cơ, dinh dưỡng, phóng xạ trong hệ sinh thái.

Những tác động nhân sinh đã và đang làm thay đổi trạng thái tự nhiên và chức năng của hệ thống trái đất và môi trường [4], đặc biệt là ở các vùng ven biển. Những thay đổi này diễn ra với cường độ, quy mô khác nhau và gây ra những sức ép lớn đối với vùng ven biển, đặc biệt khi cộng hưởng với các tai biến thiên nhiên như mưa lớn bất thường, siêu bão .v.v. [5]. Dân số tăng nhanh cùng với tiến bộ của khoa học cho phép con người can thiệp nhiều hơn vào tự nhiên, làm thay đổi cảnh quan, môi trường sống và HST thông qua quá trình đô thị hóa cũng như hoạt động công nghiệp và nông nghiệp. Ước tính rằng trên 50% diện tích đất [6] và hơn 50% đường bờ biển [7] thế giới đã bị con người tác động, thông qua các hoạt động như làm đê, kè, cải tạo đất và bảo vệ bờ biển..., khiến hình thái và HST ven biển thay đổi đáng kể so với trạng thái tự nhiên ban đầu. Xói mòn bờ biển và đô thị hóa đã khiến nhiều vùng đất ngập nước ven biển bị mất, với khoảng 50% đầm lầy, 35% rừng ngập mặn, 30% rạn san hô và 29% cỏ biển đã biến mất trong vài thập kỷ qua [8]. Ngoài ra các hoạt động của con người cũng làm thay đổi cân bằng vật chất giữa lục địa và biển, thúc đẩy bồi/xói ven biển và làm biến đổi các chu trình dinh dưỡng [4], ảnh hưởng

nghiêm trọng đến môi trường và HST ven biển, thậm chí vượt xa so với các tác động của tự nhiên [9-10]. Các bằng chứng cho thấy các tác động nhân sinh lên môi trường nước toàn cầu tiếp tục tích lũy và ngày càng trở lên rõ rệt hơn [11]. Sự gia tăng nhiệt độ nước, mực NBD và sự giảm pH là những thay đổi toàn cầu, đặt ra thách thức lớn đối với các cộng đồng ven biển; trong khi đó, phát triển KTXH, gia tăng dân số và mở rộng hạ tầng càng làm trầm trọng thêm sự suy thoái môi trường [12], suy giảm, thậm chí làm biến mất một số HST [13]. Ví dụ, CO₂ tạo ra bởi hoạt động của con người góp phần quan trọng trong việc tăng nhiệt độ và axit hóa đại dương [14-15]. Các hoạt động lấn biển và cải tạo vùng ven bờ đã làm thay đổi mạnh mẽ cảnh quan, đường bờ và điều kiện động lực, gây ra xói lở [16] và gia tăng nguy cơ tác động của mực NBD đến không gian sống ven biển [17]. Đồng thời, những hoạt động này còn phát sinh lượng lớn nước thải sinh hoạt và sản xuất, khiến môi trường ven biển, các HST ngày càng suy thoái [18]. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng tác động của con người là nguyên nhân chính gây suy giảm CLN vùng ven biển [19].

Gần đây, tác động của con người đến môi trường nước ven biển đang chuyển dịch từ các quốc gia phát triển sang các nước đang phát triển, nơi nhu cầu khai thác tài nguyên để phát triển KTXH ngày càng gia tăng, dẫn đến khai thác không bền vững và hạ thấp tiêu chuẩn bảo vệ môi trường, như tiêu chuẩn xả thải. Việc xây dựng đập chứa làm giảm dòng trầm tích ra biển, góp phần làm xói lở khoảng 28.000 km² bờ biển toàn cầu trong giai đoạn 1984-2015, gấp đôi so với diện tích được bồi tụ [19]. Hoạt động nhân sinh cũng làm gia tăng ô nhiễm dinh dưỡng, gây ra hiện tượng tảo nở hoa và thiếu oxy [20-21]. Trong những thập kỷ gần đây, sự mở rộng dân cư và phát triển tại vùng ven biển đã ảnh hưởng nghiêm trọng đến khả năng phục hồi của tài nguyên ven biển. Theo Chỉ thị khung về nước [22], 93% diện tích biển châu Âu chịu tác động từ các hoạt động nhân sinh, khoảng 28% đường bờ biển đã bị thay đổi.

Tác động nhân sinh không chỉ ảnh hưởng đến môi trường nước mà còn đe dọa nghiêm trọng tài nguyên sinh vật vùng ven bờ. Từ những năm 1970, 16 quốc gia ven bờ Địa Trung Hải cùng Cộng đồng Châu Âu đã triển khai Kế hoạch hành động cho Địa Trung Hải (MAP) dưới sự bảo trợ của Chương trình Môi trường Liên Hiệp

Quốc (UNEP) nhằm bảo vệ môi trường và phát triển bền vững [23]. Năm 2016, Chương trình giám sát tổng hợp IMAP được thông qua, lần đầu tiên tích hợp giám sát đa dạng sinh học, loài xâm lấn, ô nhiễm và rác thải biển [24]. Trong khi vùng nước ngoài khơi của biển Địa Trung Hải thiếu dinh dưỡng nghiêm trọng, vùng biển ven bờ chịu ảnh hưởng đáng kể của chất ô nhiễm dinh dưỡng từ tự nhiên và con người, đặc biệt lưu vực Adriatic [25]. Các tác động kết hợp giữa con người và biến động tự nhiên có thể gây suy giảm chất lượng môi trường vùng ven biển, trong đó ô nhiễm là mối đe dọa chính đối với HST [26]. Đô thị hóa và gia tăng dân số tiếp tục làm trầm trọng thêm ô nhiễm từ công nghiệp và nước thải sinh hoạt [27].

Phần lớn tác động nhân sinh đến môi trường nước diễn ra tại vùng ven biển và dọc sông, do đó việc quản lý khu vực này cần được thực hiện trên quy mô lưu vực, có tính đến các ảnh hưởng tổng hợp từ hoạt động KTXH của con người [28]. Đồng thời, cần đánh giá rủi ro môi trường để phục vụ công tác quản lý và bảo tồn vùng bờ [29]. Tuy nhiên, hiện nay các nghiên cứu vẫn chủ yếu đánh giá riêng lẻ từng yếu tố. Việc đánh giá tổng hợp các nguồn gây ô nhiễm từ hoạt động nhân sinh đến CLN ven biển là cần thiết để hiểu rõ tác động tổng thể của nhiều yếu tố kết hợp.

1.1.1.2. Nghiên cứu về ảnh hưởng do các hoạt động kinh tế xã hội của con người đến môi trường nước vùng ven biển ở Việt Nam

Việt Nam có điều kiện thuận lợi để phát triển kinh tế biển, với đường bờ biển dài và diện tích thềm lục địa rộng lớn. Tuy nhiên, quá trình phát triển KTXH đang gây áp lực lớn lên môi trường biển, đặc biệt là ô nhiễm từ đất liền, sản xuất, du lịch và nuôi trồng thủy sản. Nhận thức được những tác động to lớn do hoạt động KTXH của con người đến môi trường biển cũng như nguồn tài nguyên ven bờ, ngay từ những năm 90, nhóm tác giả Phạm Văn Ninh [30] đã đánh giá khá cơ bản lượng chất gây ô nhiễm hằng năm ở các cửa sông lớn ở Việt Nam đổ ra biển dựa trên số liệu khảo sát. Tuy nhiên, nghiên cứu này chưa có điều kiện đi sâu vào quá trình thay đổi và chuyển hóa các chất gây ô nhiễm cũng như những tác động của chúng. Tác giả Lê Trình và cộng sự [31] đã tập trung vào đánh giá CLN, tải lượng nước thải đưa ra khu vực sông Sài Gòn - Đồng Nai và các cơ chế chuyển hóa của một số chất gây ô nhiễm đến khả năng tự làm sạch. Bên cạnh đó, để đánh giá và cảnh báo hiện trạng ô nhiễm môi trường nước ở vùng ven bờ, Cục bảo vệ Môi trường (Bộ Tài

nguyên và Môi trường) đã xây dựng và tiến hành quan trắc định kỳ hằng năm ở các vị trí xác định dọc bờ biển Việt Nam. Các kết quả báo cáo môi trường hằng năm đã cho thấy xu thế tăng lên của các chất gây ô nhiễm trong môi trường nước thời gian gần đây. Do số lượng mẫu quan trắc hằng năm khá nhỏ lại trải dài trên phạm vi rộng lớn, vì vậy kết quả này chủ yếu vẫn dừng lại ở mức độ giám sát cảnh báo. Trong giai đoạn này, các nghiên cứu phần nhiều vẫn dựa trên các cách tiếp cận truyền thống và chưa đánh giá/dự báo được lan truyền, phát tán của các chất ô nhiễm.

Gần đây, cùng với sự phát triển mạnh mẽ của các phương tiện tính toán và khả năng chia sẻ dữ liệu qua internet, việc ứng dụng mô hình toán trong nghiên cứu TĐL và CLN tại Việt Nam đã có những bước tiến đáng kể. Nhiều cơ quan chuyên ngành như Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi Khí hậu, Viện Tài nguyên và Môi trường Biển, Khoa Khí tượng Thủy văn và Hải dương học (ĐHQGHN), cùng các viện nghiên cứu khác đã triển khai ứng dụng các mô hình tiên tiến như SWAT, HEC-RAS, QUAL2K, QUAL2E, WQI, và đặc biệt là mô hình Delft3D trong một số nghiên cứu quan trọng.

Tuy nhiên, các mô hình CLN là hệ thống phức tạp, tích hợp hàng trăm tham số thuộc các quá trình sinh-địa-hóa và TĐL. Chỉ một thay đổi nhỏ ở một tham số cũng có thể dẫn đến sai lệch đáng kể trong kết quả mô phỏng. Điều này đòi hỏi người vận hành mô hình không chỉ am hiểu về các quá trình vật lý, hóa học, sinh học trong môi trường nước mà còn phải có kiến thức sâu về cấu trúc mô hình, thuật toán tính toán, cũng như mối liên kết giữa các module mô phỏng. Bên cạnh đó, tính thiếu đồng bộ, độ tin cậy chưa cao và sự hạn chế của dữ liệu đầu vào (như dữ liệu quan trắc CLN, tải lượng xả thải, điều kiện khí hậu...) cũng là một trong những rào cản lớn đối với việc nâng cao hiệu quả ứng dụng mô hình.

Một số nghiên cứu gần đây đã cho thấy tiềm năng của việc ứng dụng mô hình trong đánh giá CLN. Chẳng hạn, mô hình MIKE 11 đã được sử dụng để tính toán dòng chảy và mô phỏng/dự báo diễn biến CLN khu vực hạ lưu sông Sài Gòn - Đồng Nai. Tuy nhiên, nghiên cứu này vẫn chỉ dừng lại ở việc ứng dụng mô hình một chiều (1D), nên còn hạn chế trong khả năng phản ánh sự phân bố không gian và biến động thời gian của các chất gây ô nhiễm trong môi trường nước [32]. Ngoài ra, hiện trạng CLN, sự lan truyền, biến động của chất gây ô nhiễm từ sông (điểm xả thải) và dự

báo CLN dựa trên kịch bản khác nhau nhằm hỗ trợ đánh giá khả năng tiếp nhận chất ô nhiễm ở một số thủy vực (đầm Thị Nại, vịnh Đà Nẵng, sông Bạch Đằng) cũng được mô phỏng, đánh giá dựa trên mô hình Delft3D [33]. CLN vùng biển Thanh Hóa cũng được đánh giá dưới ảnh hưởng của các chất ô nhiễm từ khu kinh tế Nghi Sơn dựa trên các kịch bản xả thải kiểm soát và kịch bản khi sự cố xảy ra. Kết quả chỉ ra trong điều kiện xả thải có kiểm soát (tăng các chất thải nhưng có sự kiểm soát lưu lượng thải), giá trị chất gây ô nhiễm có tăng nên nhưng chủ yếu diễn ra ở khu vực gần vị trí xả thải. Ngược lại, trong điều kiện sự cố xảy ra từ khu kinh tế, lượng chất ô nhiễm gia tăng đáng kể cả về giá trị và mức độ ảnh hưởng [34].

Khu vực CB-HL là vùng có ý nghĩa đặc biệt, với vịnh Hạ Long được UNESCO công nhận là Di sản thiên nhiên thế giới và Cát Bà là Khu dự trữ sinh quyển thế giới. Do đó, CLN tại đây thu hút sự quan tâm lớn từ giới khoa học và quản lý. Tiêu biểu, nhóm tác giả **Vũ Duy Vĩnh** [35], đã sử dụng mô hình Delft3D mô phỏng lan truyền các chất dinh dưỡng, hữu cơ theo nhiều kịch bản khác nhau, qua đó đánh giá ảnh hưởng đến năng suất sơ cấp vùng biển CB-HL. Các nghiên cứu tiếp theo đã mở rộng đánh giá lan truyền chất hữu cơ, dinh dưỡng, kim loại nặng, trầm tích lơ lửng tại khu vực vịnh Hạ Long - Bái Tử Long theo các điều kiện khí tượng, hải văn và tải lượng thải khác nhau [36]. Ngoài ra, các mô phỏng dựa trên mô hình Delft3D tại vùng cửa sông ven biển Hải Phòng cũng được thực hiện, tập trung vào sự lan truyền các nhóm chất ô nhiễm từ sông và điểm xả thải ven bờ ra biển dưới tác động của các quá trình sinh-địa-hóa và tương tác lục địa-biển [37]. Tác động từ các nguồn xả của KCN Đình Vũ cũng được phân tích qua các kịch bản, cho thấy nguy cơ ảnh hưởng lớn đến CLN khi xảy ra sự cố [38]. Đồng thời, tải lượng các chất ô nhiễm từ thượng nguồn về các sông lớn và vùng ven bờ Hải Phòng được đánh giá chi tiết theo thời gian (ngày, mùa) và không gian, cho thấy sự phụ thuộc vào biến nguồn nước sông và thủy triều [39]. Đặc biệt, mô hình COHERENS được sử dụng để đánh giá CLN vùng vịnh Hạ Long dưới tác động kết hợp của hoạt động nhân sinh và BĐKH. Kết quả cho thấy CLN có xu hướng suy giảm khi gia tăng các nguồn ô nhiễm trong bối cảnh BĐKH [40].

Các nghiên cứu trên đã một phần đánh giá lan truyền và phát tán của các chất gây ô nhiễm cũng như ảnh hưởng của hoạt động KTXH đến môi trường, sinh thái ở

vùng biển Hải Phòng-Quảng Ninh nói chung và khu vực CB-HL nói riêng. Tuy nhiên khu vực CB-HL là hai thủy vực liền kề nên các hoạt động phát triển KTXH ở đây đều bị ảnh hưởng. Ngoài ra, sự lan truyền, phát tán các chất gây ô nhiễm luôn luôn có sự trao đổi giữa hai khu vực. Vì vậy cần xem xét, đánh giá tác động của hoạt động KTXH đến các chất ô nhiễm trên cả hai khu vực cùng một lúc để tạo một bức tranh tổng hợp về môi trường nước khu vực CB-HL.

1.1.2. Tổng quan tác động tích hợp của hoạt động kinh tế xã hội và biến đổi khí hậu đến môi trường nước

1.1.2.1. Biểu hiện của biến đổi khí hậu trên thế giới

Theo Ủy Ban liên chính phủ về BĐKH (IPCC), BĐKH là sự biến đổi về trạng thái của hệ thống khí hậu, có thể được nhận biết qua sự biến đổi về trung bình và biến động các thuộc tính của nó, được duy trì ổn định trong một thời gian dài, điển hình là hàng thập kỉ hoặc dài hơn. Nguyên nhân của BĐKH có thể do tự nhiên hoặc con người, đặc biệt tăng hiệu ứng nhà kính làm biến đổi thành phần cấu tạo của khí quyển [41]. Theo Bộ Tài nguyên và Môi trường [42], BĐKH là sự biến đổi của khí hậu trong một thời gian dài dưới ảnh hưởng của các yếu tố tự nhiên và hoạt động nhân sinh. Biểu hiện của BĐKH là sự ấm lên toàn cầu, mực NBD và gia tăng các hiện tượng thời tiết cực đoan.

Nhiều phương pháp khác nhau được sử dụng để nghiên cứu BĐKH. Theo Ide [43], trong số 76 bài báo được công bố từ năm 2007 đến 2015 trên các tạp chí hàng đầu về BĐKH, khoảng 60% sử dụng phương pháp thống kê, đây cũng là phương pháp được trích dẫn thường xuyên trong các báo cáo chính sách. Các nghiên cứu dựa trên phương pháp thống kê, thường là phân tích hồi quy, dùng để đánh giá các biểu hiện hoặc hậu quả dự đoán của BĐKH. Tuy nhiên, phương pháp phân tích thống kê thường bị hạn chế do dữ liệu không đủ dài hoặc thiếu loại dữ liệu cần thiết. Nhiều nghiên cứu về BĐKH đã kết hợp các kỹ thuật nghiên cứu với các công cụ thống kê. Các phân tích tích hợp như vậy đã được tiến hành cho các vùng của Kenya [44-45] Sudan [46] Ethiopia [47] Mali [48] và Bolivia, Mali, Nicaragua, Việt Nam và Zambia [49].

Ngày nay khi công nghệ phát triển mạnh mẽ thì việc áp dụng các công cụ mô hình khí hậu trở nên phổ biến hơn. Nó có thể khắc phục được những nhược điểm

của các phương pháp khác. Bên cạnh đó, các mô hình khí hậu có thể mô phỏng khí hậu trong quá khứ và dự tính được khí hậu trong tương lai dựa trên các kịch bản khác nhau. Tuy nhiên hầu hết các mô hình toàn cầu (Global Climate Model- GCM) đều có độ phân giải thấp. Vì vậy các mô hình khí hậu khu vực (RCM - Regional Climate Model) được xây dựng nhằm mô phỏng chi tiết hơn khí hậu khu vực. Đây là những công cụ chính được sử dụng để đánh giá xu thế và mức độ biến đổi của khí hậu tương lai, đặc biệt là các cực đoan khí hậu.

Trong thế kỷ 21, BĐKH là một trong những vấn đề thách thức lớn nhất của nhân loại với biểu hiện rõ rệt nhất là nhiệt độ tăng và sự dâng cao của mực nước biển. Theo báo cáo đặc biệt về BĐKH và đất đai (SRCCL - Special Report on Climate Change and Land) và báo cáo đặc biệt về Đại dương và Vùng băng tuyết trong bối cảnh BĐKH (SROCC - Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate) [50-51], nhiệt độ bề mặt toàn cầu quan trắc được giai đoạn 2005-2016 đã tăng $0,87^{\circ}\text{C}$ so với thời kỳ tiền công nghiệp (1850-1900). Đặc biệt trong 10 năm gần đây (2009-2018), mức độ tăng của nhiệt độ còn nhanh hơn, với $1,06^{\circ}\text{C}$ ($0,95 \div 1,17^{\circ}\text{C}$). Xu hướng tăng của nhiệt độ trên bề mặt trái đất nhanh hơn so với nhiệt độ bề mặt đại dương trong giai đoạn này, tương ứng là $1,44^{\circ}\text{C}$ và $0,89^{\circ}\text{C}$. Từ năm 1975 trở lại đây, tốc độ tăng trung bình của nhiệt độ bề mặt toàn cầu là $0,15 \div 0,2^{\circ}\text{C}/\text{thập kỷ}$ [42].

Tổ chức Khí tượng Thế giới (WMO) thông báo rằng nhiệt độ trung bình toàn cầu đã tăng khoảng $0,7^{\circ}\text{C}$ kể từ đầu thế kỷ 20; nhưng sự gia tăng này không hoàn toàn tuyến tính. Nhiệt độ trung bình của trái đất đã tăng mạnh ở mức $0,18^{\circ}\text{C}$ mỗi thập kỷ từ cuối những năm 1970. Những năm 1990 là thập kỷ ấm nhất với mức tăng trung bình lần lượt là $0,38^{\circ}\text{C}$ và $0,23^{\circ}\text{C}$ ở Bắc và Nam bán cầu so với giá trị trung bình 30 năm [52]. Hơn nữa, theo công bố của WMO về thập kỷ ấm nhất, những năm 2000 ấm hơn thập kỷ những năm 1990 [53]. Mười năm ấm nhất đối với nhiệt độ bề mặt trái đất đều xảy ra sau năm 1990 và năm 2005 là năm ấm nhất được ghi nhận [54]. Theo IPCC [55], vào cuối thế kỷ 21 nhiệt độ tăng $1,1 \div 2,6^{\circ}\text{C}$ (RCP4.5) và $2,6 \div 4,8^{\circ}\text{C}$ (RCP8.5) so với trung bình thời kỳ 1986-2005. Cực đoan nhiệt độ có xu thế tăng, nhiệt độ ngày lạnh nhất có thể tăng trong khoảng $5 \div 10^{\circ}\text{C}$; nhiệt độ ngày nóng nhất tăng $5 \div 7^{\circ}\text{C}$.

Mức nước biển trung bình toàn cầu (GMSL) đang tăng và tốc độ ngày càng nhanh trong những thập kỷ gần đây. Mức tăng tổng cộng của GMSL trong giai đoạn 1902-2015 là 0,16 m ($0,12 \div 0,21$ m) với xu thế tăng 1,5 mm/năm ($1,1 \div 1,9$ mm/năm). Tốc độ tăng của GMSL là 3,16 mm/năm ($2,8 \div 3,5$ mm/năm) trong giai đoạn 1993-2015; 3,6 mm/năm ($3,1 \div 4,1$ mm/năm) trong giai đoạn 2006–2015, tăng gấp 2,5 tốc độ trong thời kỳ 1901-1990 là 1,4 mm/năm ($0,8 \div 2,0$ mm/năm).

Theo báo cáo SROCC [51], GMSL dâng theo kịch bản RCP2.6 là 39 cm ($26 \div 53$ cm) trong giai đoạn 2081 - 2100 và 43 cm ($29 \div 59$ cm) vào năm 2100 so với giai đoạn cơ sở 1986 – 2005. Dự tính mực NBD đến năm 2100 trong SROCC là 84 cm ($61 \div 110$ cm). Tốc độ tăng của GMSL được dự tính sẽ đạt 15 mm/năm ($10 \div 20$ mm/năm) theo kịch bản RCP8.5 vào năm 2100, và dự kiến sẽ vượt quá vài centimet mỗi năm trong thế kỷ 22. Theo RCP2.6, tốc độ tăng sẽ đạt 4 mm/năm ($2 \div 6$ mm/năm) vào năm 2100. Các kết quả của mô hình chỉ ra mực nước biển dự tính sẽ dâng cao vào năm 2300, với $2,3 \div 5,4$ m đối với RCP8.5 và $0,6 \div 1,1$ m theo RCP2.6) [51].

1.1.2.2. Các biểu hiện của biến đổi khí hậu ở Việt Nam

Việt Nam là một trong những quốc gia chịu ảnh hưởng nặng nề BĐKH, vì vậy các biểu hiện của BĐKH đã và đang được quan tâm nghiên cứu sâu rộng. Trong đó, các phương pháp phổ biến để đánh giá biểu hiện của BĐKH bao gồm phân tích thống kê, mô hình khí hậu và xây dựng kịch bản phát thải nhằm mô phỏng xu hướng và dự báo tương lai khí hậu [56]. Phân tích thống kê thường dựa trên chuỗi số liệu quan trắc dài hạn tại các trạm khí tượng, tuy nhiên tính liên tục của dữ liệu nhiều khi bị gián đoạn do chiến tranh, thay đổi vị trí Để khắc phục nhược điểm này, các mô hình khí hậu đã được sử dụng phổ biến hơn trong thời gian gần đây. Trong quá trình cập nhật kịch bản BĐKH cho Việt Nam, sáu RCM đã được áp dụng, bao gồm: cIWRF, PRECIS, CCAM (Úc), RegCM (Italia), AGCM/MRI (Nhật Bản) và RCA3 (Thụy Điển). Những mô hình này phát triển dựa trên các mô hình khí hậu toàn cầu (GCM) thuộc báo cáo CMIP5 [55], với tổng cộng 26 phương án tính toán khác nhau. Phương pháp chi tiết hóa động lực là công cụ chính trong việc xây dựng kịch bản BĐKH cho Việt Nam năm 2020. Mặc dù các mô hình đã được cải tiến về cả động lực và các thông số vật lý, chúng vẫn tồn tại một số sai số nhất định [42].

Dựa trên số liệu quan trắc từ năm 1961 đến 2018 của Bộ Tài nguyên và Môi

trường [42] cho thấy nhiệt độ cao nhất và thấp nhất năm đều có dấu hiệu tăng lên ở hầu hết các nơi, với giá trị lần lượt là 0,2-1,7°C và 1,0-1,8°C. Nhiệt độ năm tăng khoảng 1,5-2,4°C và 3,0-4,2 °C lần lượt theo kịch bản RCP4.5 và RCP8.5 và có xu hướng tăng nhanh hơn ở khu vực phía Bắc so với khu vực phía Nam. Số ngày rét đậm ở khu vực Bắc Bộ có xu hướng giảm từ 5-20 ngày (RCP4.5) và 10-30 ngày (RCP8.5) vào cuối thế kỷ 21 [42].

Kết quả phân tích mực nước tại các trạm hải văn dọc ven biển Việt Nam cho thấy mực nước biển có xu thế tăng rõ ràng ở 11/15 trạm, với tốc độ tăng 2,7 mm/năm, đặc biệt một số trạm có tốc độ tăng trên 6 mm/năm như trạm Bạch Long Vỹ, Cửa Ông và Côn Đảo. Tốc độ tăng trung bình từ số liệu đo thấp hơn tốc độ tăng trung bình từ số liệu vệ tinh giai đoạn 1993-2018 (3,6 mm/năm) [42]. Theo kịch bản RCP4.5 của Bộ Tài nguyên Môi trường, vùng biển CB-HL nằm trong dải ven biển Móng Cái-Hòn Dấu, mực NBD vào năm 2050 thấp nhất so với cả nước, với giá trị 22 cm (14 ÷ 30 cm), nhỏ hơn so với trung bình toàn dải ven biển là 23 cm (13 ÷ 31 cm). Xu hướng này tiếp tục được giữ cho đến cuối thế kỷ 21, với giá trị tăng lên 52 cm (33 ÷ 75 cm) và 53 cm (32 ÷ 76 cm) lần lượt cho khu vực ven biển Móng Cái - Hòn Dấu và trung bình toàn dải ven biển [42].

1.1.2.3. Ảnh hưởng tích hợp do hoạt động của kinh tế xã hội và biến đổi khí hậu đến môi trường nước trên thế giới

Hội nghị lần thứ 13 về Công ước BĐKH năm 2007 (UNFCCC) tại Bali (Indonesia) và báo cáo của IPCC về BĐKH [41], các nhà khoa học và các nhà hoạch định chính sách đã đều thống nhất khẳng định rằng BĐKH thực sự đang diễn ra và xu hướng biểu hiện ngày càng rõ rệt hơn. Theo Báo cáo lần thứ năm của Ủy ban liên chính phủ về BĐKH (IPCC), đến năm 2100, diễn biến môi trường nước ở các vùng ven biển có thể sẽ bị xấu đi do mực NBD, tăng nhiệt độ nước, tần suất và cường độ của hiện tượng thời tiết cực đoan và các yếu tố khác [41].

Mặc dù có nhiều cảnh báo về tác động của BĐKH đối với môi trường nước, đặc biệt là ở vùng ven bờ nhưng đến nay, phần lớn các nghiên cứu vẫn tập trung đánh giá tác động của BĐKH đến đa dạng sinh học, axit hóa đại dương và thay đổi độ mặn. Sự nóng lên của đại dương và axit hóa gây ra bởi sự giải phóng CO₂ [57-58]. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng sự gia tăng CO₂ trong nước mặt không chỉ dẫn

đến những thay đổi hóa học mà còn làm giảm độ pH xuống 0,14 ~ 0,35 đơn vị vào năm 2100 theo kịch bản phát thải trung bình [59]. Những tác động này không chỉ gây hại cho các loài và HST ven biển [60-61] mà còn ảnh hưởng đến sức khỏe con người [62-63] và các hoạt động phát triển kinh tế.

Nhiệt độ tăng do BĐKH là yếu tố chính ảnh hưởng đến CLN [64]. Nhiệt độ nước kiểm soát các quá trình cân bằng lý-hóa như nitrat hóa, khoáng hóa, nên sự tăng lên của nhiệt độ nước sẽ làm thay đổi sự vận chuyển, phát tán chất ô nhiễm và giảm oxy hòa tan trong nước [65]. Nghiên cứu [66] chỉ ra rằng, nhiệt độ tăng làm giảm nồng độ nitơ và phospho từ sông đưa vùng ven bờ do sự phát triển mạnh của thực vật phù du đã thúc đẩy các quá trình tiêu thụ - quang hợp của tảo trong sông, kết quả này phù hợp với Alam và cộng sự [67]. Nghiên cứu [66] cũng cho thấy với sự gia tăng của nhiệt độ (không khí và nước) ở khu vực sông Qu'Appelle (Canada), hàm lượng oxy hòa tan đều có dấu hiệu suy giảm ở hầu hết các tháng trong năm. Dự báo tại sông Thames cũng cho thấy DO sẽ giảm đáng kể đến năm 2080 do nhiệt độ tăng và nhu cầu oxy sinh hóa [68].

Một số nghiên cứu đã chỉ ra mối liên hệ giữa biến đổi khí hậu (BĐKH) và sự chuyển hóa chất hữu cơ, dinh dưỡng trong môi trường nước. Nghiên cứu khác [69] cho thấy, sự suy giảm dòng nước vào mùa hè làm tăng BOD và PO_4^{3-} ở một số vùng cửa sông tại Anh, trong khi NH_4^+ giảm do quá trình nitrat hóa tăng, dẫn đến nguy cơ xuất hiện thủy triều đỏ ngay cả mùa hè. Lloret và cộng sự [70] sử dụng mô hình quang hợp và thí nghiệm để chứng minh rằng mực nước biển tăng do BĐKH tại đầm phá Mar Menor (Tây Ban Nha) làm suy giảm ánh sáng xuống đáy, mất tảo vĩ mô và gia tăng thực vật phù du. Ngoài ra, lượng và cường độ mưa lớn cũng làm tăng dòng chảy mang chất ô nhiễm từ đất vào nguồn nước [71]. Một vài các nghiên cứu khác đã đánh giá tác động của BĐKH đến TĐL và mầm bệnh trong nước/vi khuẩn chỉ thị [72-73]. Sự thay đổi về độ mặn cũng là một tác động của BĐKH đối với CLN biển. Bất kể độ mặn tăng hay giảm, các nghiên cứu gần đây chỉ ra rằng sự biến động này đều ảnh hưởng đến HST biển và đa dạng sinh học [74-75]. Ngoài ra, giảm độ mặn kết hợp với nhiệt độ nước cao có thể làm tăng độc tính của một số kim loại nặng, trong khi lại làm giảm độc tính của các hợp chất photphat hữu cơ [76].

Trong tương lai các ảnh hưởng của phát triển KTXH và BĐKH đến CLN vùng

ven bờ là mối quan tâm chính trên thế giới [77]. Nhiều nghiên cứu trên thế giới chỉ ra hoạt động KTXH của con người cùng với BĐKH đã gây ra những sức ép đáng kể lên CLN vùng cửa sông ven biển, thông qua các quá trình sinh hóa khác nhau [78] và tùy thuộc vào đặc điểm riêng ở từng khu vực [65]. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu hiện nay vẫn đang đánh giá riêng rẽ tác động của BĐKH và phát triển KTXH đến dòng chảy và CLN [77, 79].

Sự gia tăng của nhiệt độ và thay đổi lượng mưa kết hợp với các nhân tố con người như tăng dân số, chăn nuôi, thay đổi sử dụng đất sẽ tiếp tục ảnh hưởng đến dòng chảy, CLN khu vực ven bờ [79]. Hạn hán làm gia tăng nồng độ chất ô nhiễm, tăng quá trình khoáng hóa Nitơ, phục hồi chậm từ quá trình axit hóa [80-81]. Trong thời kỳ hạn hán, dòng chảy nhỏ có thể làm suy yếu sự pha loãng của một số chất ô nhiễm [82-83]. Wallace và cộng sự [84] đã nghiên cứu trầm tích và nồng độ dinh dưỡng trong nước lũ của 13 trận lũ xảy ra từ năm 2006 đến 2008 tại vùng lũ Tully - Murray, Australia và thấy rằng việc xả nước trong lũ đã đóng góp lớn (30 ~ 50%) vào trầm tích biển và tải chất dinh dưỡng.

Ngoài việc sử dụng số liệu đo thì phương pháp mô hình cũng được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực hải dương học và môi trường biển để mô phỏng dòng chảy, lan truyền chất ô nhiễm và các quá trình khuếch tán - lắng đọng [85]. Nhiều loại mô hình đã được phát triển và ứng dụng nhằm mô phỏng tác động BĐKH và các hoạt động nhân sinh đến dòng chảy và CLN, trong đó nổi bật là mô hình thủy văn [86-87], mô hình khái niệm [88], mô hình phân tích [89], và mô hình dựa trên dữ liệu quan trắc [90]. Gần đây, mô hình thủy động lực tích hợp sinh thái đã phát triển mạnh, cho phép mô phỏng đồng thời các quá trình vật lý và sinh-địa-hóa [91-92]. Sự tiến bộ trong công nghệ tính toán và thuật toán đã cho phép tối ưu hóa mô hình với khả năng xử lý khối lượng dữ liệu lớn [91]. Hàng trăm mô hình và phần mềm như STELLA, VISSIM, Ecopath with Ecosim, MIKE, COHERENS, DELFT3D, SHYFEM, ERSEM, và ECOHAM đã được phát triển nhằm phục vụ nghiên cứu và quản lý môi trường nước [93-94].

Một số quốc gia đã ban hành các hướng dẫn sử dụng mô hình trong quản lý môi trường nước, điển hình như USEPA (2002), UKEA [95], Hàn Quốc [96], và Trung Quốc. Tuy nhiên, hiệu quả mô phỏng phụ thuộc lớn vào kỹ năng hiệu chỉnh

tham số và hiệu chuẩn mô hình [97-98]. Ngoài ra, các yếu tố không chắc chắn trong mô hình, đặc biệt là dữ liệu đầu vào và mối liên hệ giữa BĐKH và các quá trình CLN vẫn còn là thách thức [65].

Jeppesen và cộng sự [99] đã sử dụng mô hình để dự báo tác động tổng hợp của gia tăng nguồn dinh dưỡng từ lục địa và BĐKH, cho thấy đây là các quá trình phức tạp với sự tương tác giữa dinh dưỡng, điều kiện ánh sáng, nhiệt độ và các quá trình TĐL. Trong tương lai gần, sự kết hợp giữa nhiệt độ nước tăng và nguồn dinh dưỡng đưa ra vùng ven bờ sẽ tạo điều kiện thuận lợi cho sự phát triển của tảo, đặc biệt là tảo lam. Đồng thời, nguồn dinh dưỡng Nito gia tăng từ các hoạt động nhân sinh, khi kết hợp với BĐKH, có thể làm tăng mạnh hàm lượng Nitorat. Kết quả này tương đồng với nghiên cứu [100] ở khu vực cửa sông Thames, trong đó dự báo hàm lượng Nitorat có thể tăng từ 4-18 mg/l dưới ảnh hưởng kết hợp giữa nhiệt độ và nguồn dinh dưỡng. Tương tự, nghiên cứu tại vịnh Chesapeake (Mỹ) [101] cũng chỉ ra rằng sự gia tăng nhiệt độ nước khoảng 0,8-1,1°C cùng với gia tăng dinh dưỡng do phát triển KTXH đã làm tăng sinh khối thực vật phù du và tần suất xuất hiện các đợt thủy triều đỏ.

BĐKH và các hoạt động phát triển KTXH của con người có thể gây ra những tác động nghiêm trọng đối với các khu vực ven biển, đặc biệt là các châu thổ và vùng đất thấp - những nơi dễ bị tổn thương nhất trước các hiện tượng như NBD, xói lở, hay xâm nhập mặn. Theo IPCC, mực nước biển trung bình đã tăng từ 10–20 cm trong thế kỷ trước và có thể tăng từ 20-88 cm vào cuối thế kỷ này nếu không có các biện pháp can thiệp kịp thời, gây ra nguy cơ lớn đối với các thành phố ven biển, đường bờ và tài nguyên nước [41]. Bên cạnh đó, các hoạt động nhân sinh như thay đổi mục đích sử dụng đất cũng góp phần làm trầm trọng thêm các tác động này. Nghiên cứu của Hany và cộng sự [102] tại châu thổ sông Nile (Ai Cập), sử dụng dữ liệu GIS, viễn thám (RS) và mô hình số, đã cho thấy đường bờ biển đã dịch chuyển vào sâu trong đất liền từ năm 1974 đến 2023, với tốc độ xói lở tăng từ 14 m/năm (1974-2000) lên 16 m/năm (2001-2023) và được dự báo sẽ tiếp tục ở mức 12 m/năm đến năm 2044. Trong 50 năm qua (1974-2023), sự phát triển đô thị làm gia tăng 18% diện tích đô thị, 22% độ che phủ thực vật, 40% vùng nước và khu nuôi trồng thủy sản, đồng thời làm giảm 60% diện tích đất trống.

Nhiều nghiên cứu trên thế giới cũng đã chỉ ra rằng việc đánh giá dự báo ảnh hưởng tích hợp do phát triển KTXH của con người và BĐKH luôn là một quá trình phức tạp, đặc biệt là ở các vùng ven biển. Vì vậy, cần có cách tiếp cận mang tính tổng hợp, trong đó phải tính đến các ảnh hưởng qua lại/tương tác giữa các yếu tố tự nhiên, môi trường và KTXH [103-104], qua đó mới xác định được nguyên nhân và ảnh hưởng của chúng đến môi trường nước vùng ven biển.

1.1.2.4. Ảnh hưởng tích hợp do hoạt động kinh tế xã hội và biến đổi khí hậu đến môi trường nước ở Việt Nam

Trong bối cảnh hiện nay, ngoài những tác động đến từ sự gia tăng nguồn thải do hoạt động KTXH của con người, một số tài liệu nghiên cứu của các tác giả nước ngoài đã cho thấy BĐKH đã có những tác động nhất định đến môi trường nước ở vùng ven biển [64, 78]. Việt Nam là một trong các quốc gia chịu ảnh hưởng nặng nề nhất của BĐKH [2, 41]. Theo các đánh giá về xu hướng tăng nhiệt độ ở nước ta cho thấy nhiệt độ có xu thế gia tăng ở hầu hết trạm quan trắc, đặc biệt trong giai đoạn gần đây. Trong giai đoạn từ năm 1958 đến 2014, nhiệt độ trung bình năm của cả nước tăng khoảng $0,62^{\circ}\text{C}$, đặc biệt tăng khoảng $0,42^{\circ}\text{C}$ cho giai đoạn 1985-2014 [1]. Trong khi đó, mực nước có xu hướng tăng đáng kể với giá trị khoảng $2,45\text{ mm/năm}$ tại các trạm hải văn của Việt Nam. Trong thời kỳ 1993-2014, NBD trung bình tại các trạm khoảng $3,34\text{ mm/năm}$. BĐKH đã khiến cho các thiên tai như bão, lũ lụt, hạn hán ngày càng nghiêm trọng hơn. Theo kịch bản RCP8.5, đến cuối thế kỷ 21 nhiệt độ sẽ tăng lên khoảng $3,3\div 4,0^{\circ}\text{C}$ ở phía Bắc và $3,0\div 3,5^{\circ}\text{C}$ ở phía Nam. Trong khi đó cũng với kịch bản RCP8.5, mực NBD khoảng 77 cm (từ $51\div 106\text{ cm}$) vào cuối thế kỷ 21. Nếu NBD 1 m thì khoảng $16,8\%$ diện tích vùng đồng bằng sông Hồng, $1,47\%$ diện tích đất các tỉnh ven biển miền Trung, $38,9\%$ diện tích vùng đồng bằng sông Cửu Long có nguy cơ ngập lụt [1]. Mặc dù ở nước ta, các nghiên cứu về BĐKH khá nhiều, tuy nhiên các nghiên cứu về ảnh hưởng của nó đến CLN vùng ven bờ còn khá hạn chế, chủ yếu tập trung đánh giá ảnh hưởng của BĐKH đến tài nguyên nước trên lục địa. Chẳng hạn như NBD do BĐKH gây ra sự xâm nhập mặn sâu vào nội địa, ảnh hưởng trực tiếp đến CLN cho sinh hoạt và nông nghiệp như các nghiên cứu [105-106]. Nijssen và cộng sự [107] đã đánh giá tác động của BĐKH đối với dòng chảy của lưu vực sông Mekong trong bối cảnh nóng lên toàn cầu và

dự đoán rằng dòng chảy lưu vực sông Mekong sẽ giảm do BĐKH.

Ở Việt Nam, các biểu hiện của BĐKH như NBD, thay đổi lượng mưa, tăng số lượng bão mạnh và tăng nhiệt độ [1]. Trong đó, yếu tố có thể tác động rõ rệt đến CLN là nhiệt độ. Nhiệt độ tăng làm các quá trình vật lý bị thay đổi, TĐL, qua đó làm thay đổi chu trình sinh-địa-hóa, quá trình chuyển hóa và vận chuyển vật chất trong thủy vực [108-109]. Tăng nhiệt độ nước ở các vùng ven bờ còn dẫn đến lắng đọng các chất khoáng và hữu cơ, gây ảnh hưởng đến thức ăn của sinh vật thủy sinh. Nhiệt độ tăng thúc đẩy quá trình bốc hơi nước làm hàm lượng chất ô nhiễm bị gia tăng ở các sông suối ao hồ, tăng nguy cơ làm xuất hiện các đợt thủy triều đỏ vùng ven biển. Những nghiên cứu đánh giá tác động của phát triển KTXH trong bối cảnh BĐKH ở nước ta còn khá hạn chế. Điển hình nhất, gần đây, trong khuôn khổ “Đánh giá tác động của BĐKH đến điều kiện tự nhiên, tài nguyên thiên nhiên và môi trường khu vực cửa sông ven biển vùng đồng bằng sông Hồng và đề xuất giải pháp khai thác sử dụng hợp lý”, mã số BĐKH/16-20 đã kết hợp số liệu đo đạc với công cụ mô hình, bước đầu đánh giá được tác động của BĐKH đến yếu tố tự nhiên, tài nguyên thiên nhiên và môi trường vùng cửa sông ven biển thuộc đồng bằng sông Hồng.

Như vậy, ở nước ta có rất ít nghiên cứu nào về ảnh hưởng tích hợp do hoạt động KTXH của con người và ảnh hưởng của BĐKH đến môi trường nước vùng cửa sông ven biển. Dù đã có nhiều nghiên cứu đề cập đến áp dụng mô hình để mô phỏng lan truyền chất ô nhiễm, đánh giá dự báo CLN ở vùng cửa sông ven biển.

1.2. Điều kiện tự nhiên, kinh tế xã hội và môi trường khu vực nghiên cứu

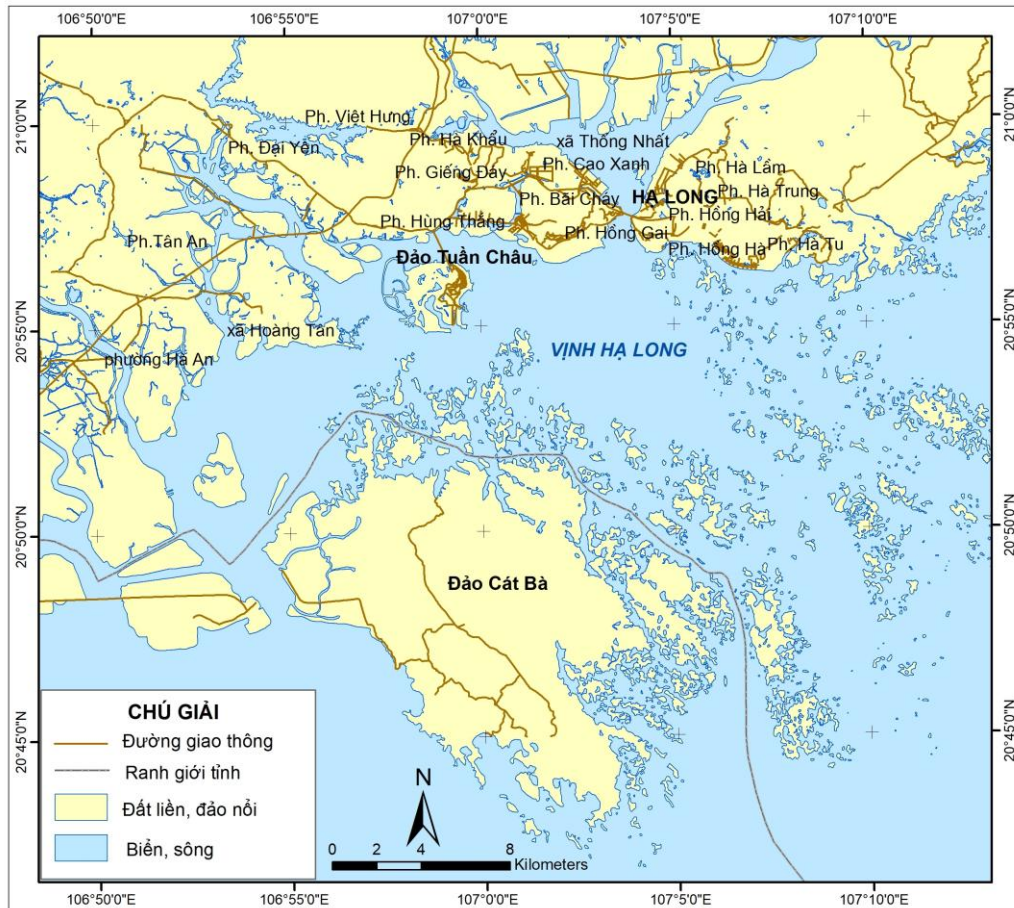
1.2.1. Điều kiện tự nhiên

1.2.1.1. Vị trí, địa hình khu vực nghiên cứu

Vùng biển CB-HL nằm ở vùng ven bờ phía Đông Bắc Việt Nam, cách Hà Nội khoảng 130 km về phía Đông-Đông Nam. Nó nằm ở mép ngoài phía Đông Bắc của của tam giác châu thổ lớn nhất miền Bắc - châu thổ sông Hồng (hình 1.1). Đây là một trong những vùng biển có giá trị sinh thái, cảnh quan và kinh tế biển đặc biệt quan trọng. Khu vực này nổi bật với hàng nghìn hòn đảo đá vôi kỳ vĩ, hang động tự nhiên, cùng HST đa dạng gồm rừng ngập mặn, rạn san hô, cỏ biển và rừng trên đảo. CB-HL không chỉ là nơi sinh sống của nhiều loài động thực vật quý hiếm, mà còn đóng vai trò thiết yếu trong phát triển du lịch sinh thái, thủy sản và bảo tồn biển.

Đặc biệt khu vực CB-HL vừa được công nhận là di sản thiên nhiên thế giới vào tháng 9/2023.

Khu vực CB-HL có địa hình phức tạp, bị chia cắt bởi trên 2367 hòn đảo lớn nhỏ. Độ sâu của khu vực biển đổi chủ yếu trong khoảng từ 3-10m, cá biệt xuất hiện độ sâu từ 10-20m tại các lạch hẹp nằm giữa các đảo (hình 1.1).



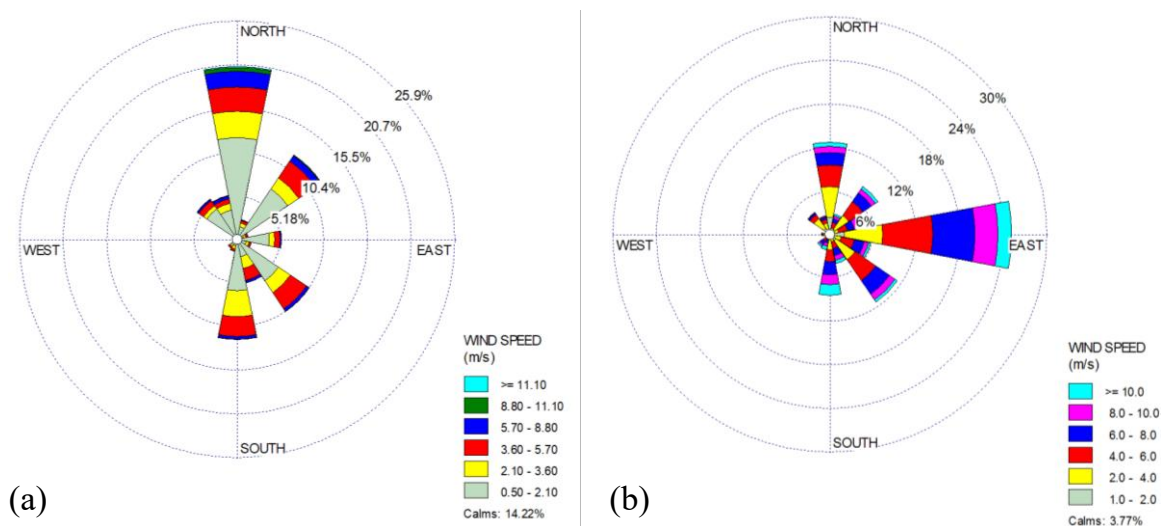
Hình 1. 1. Khu vực ven bờ CB-HL

1.2.1.2. Đặc điểm khí hậu

Gió

Khu vực CB-HL mang tính chất khí hậu nhiệt đới với hai mùa rõ rệt. Phân tích từ các số liệu đo trong quá trình thực hiện luận án này cho thấy: mùa hạ (tháng 5-tháng 10) thường trùng vào mùa mưa bão, khí hậu nóng ẩm, mưa nhiều. Mùa đông (tháng 11-tháng 3) lạnh, ít mưa. Mùa chuyển tiếp (tháng 4 và 10) thời tiết trở nên ôn hòa hơn do sự tranh giành, ảnh hưởng của các khối không khí. Bên cạnh đó, vùng này còn chịu sự chi phối của khí hậu mang đặc trưng biển do nằm ở phía Tây của vịnh Bắc Bộ. Các đặc trưng của khí hậu như gió, mưa, nhiệt độ... luôn có sự thay đổi theo thời gian (mùa, ngày). Kết quả quan phân tích gió tại trạm Bãi Cháy giai đoạn 1978-2020, hướng gió có tần suất lớn nhất là Bắc chiếm 20,5%, sau đó đến

hướng Đông Bắc (12,1%), hướng Nam (11,9%), hướng Đông Nam (10,4%), Tây Nam (5,8%), hướng Bắc Tây Bắc, Nam Đông Nam, Đông (5,3-5,4%). Gió chủ yếu có vận tốc trong khoảng 0,5-2,0 m/s chiếm tần suất cao nhất khoảng 51,3%. Tốc độ trong khoảng 2,1-3,6 m/s và 3,6-5,7 m/s đều chiếm 14,5%. Gió có vận tốc vượt quá 8,8m/s chỉ chiếm khoảng 1% (hình 1.2a). Tại Hòn Dấu, kết quả phân tích số liệu từ 1960 đến 2020, hướng gió có tần suất thịnh hành là Đông, Bắc, Đông Bắc và Đông Nam tương ứng là 25,08%; 12,71% và 11,34%. Vận tốc nhỏ hơn 6 m/s chiếm tần suất tới 60,35%. Tần suất gió có vận tốc từ 2-6 m/s chiếm khoảng 49,02%. Tần suất gió trên 10 m/s chỉ chiếm khoảng 7,26% (hình 1.2b).

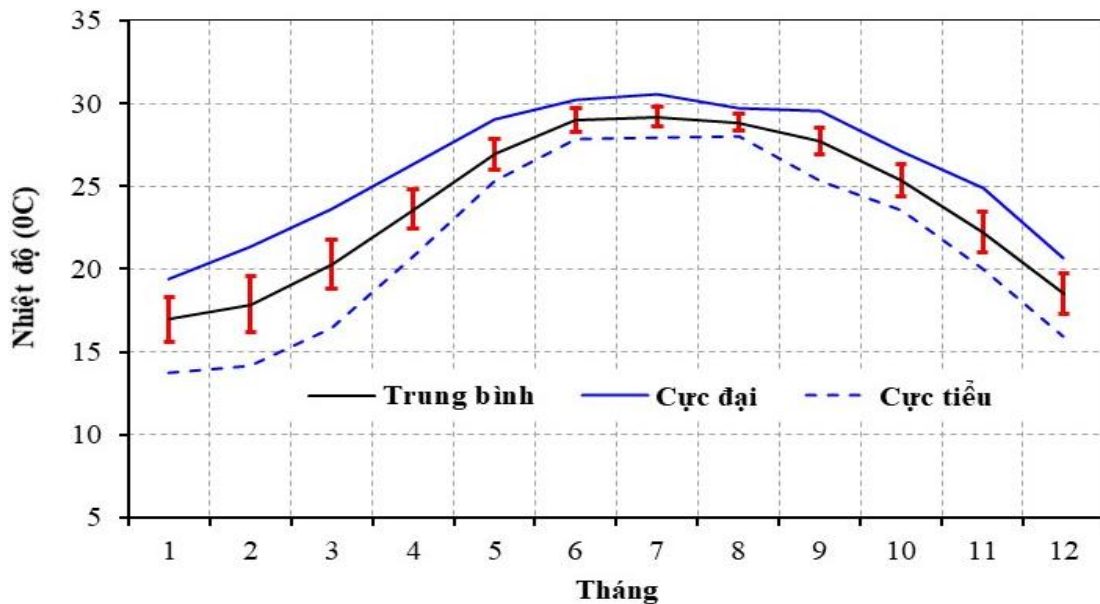


Hình 1. 2. Hoa gió khu vực nghiên cứu: a-trạm Bãi Cháy, b- trạm Hòn Dấu

Nhiệt độ

Chế độ nhiệt ở khu vực CB-HL chịu sự chi phối của gió mùa Đông Bắc và Tây Nam. Kết quả tính toán nhiệt độ nhiều năm tại trạm Hòn Dấu (1979-2020) chỉ ra nhiệt độ trung bình năm thay đổi trong khoảng 22,8°C-25,1°C. Mùa hạ nóng, nhiệt độ trung bình tháng nhiều năm đều lớn hơn 27,7°C kéo dài từ tháng 6 đến tháng 9, đặc biệt vào tháng 7 có thể đạt 29,1°C.

Mùa đông lạnh, khu vực thường xuyên chịu ảnh hưởng của các đợt gió mùa Đông Bắc, nền nhiệt độ hạ xuống dưới 18,5°C kéo dài từ tháng 12 đến tháng 2 năm sau. Nhiệt độ trung bình tháng nhiều năm thấp là 16,9°C rơi vào tháng 1. Độ lệch chuẩn tháng của nhiệt độ, dao động 0,48-1,7°C, xem hình 1.3.



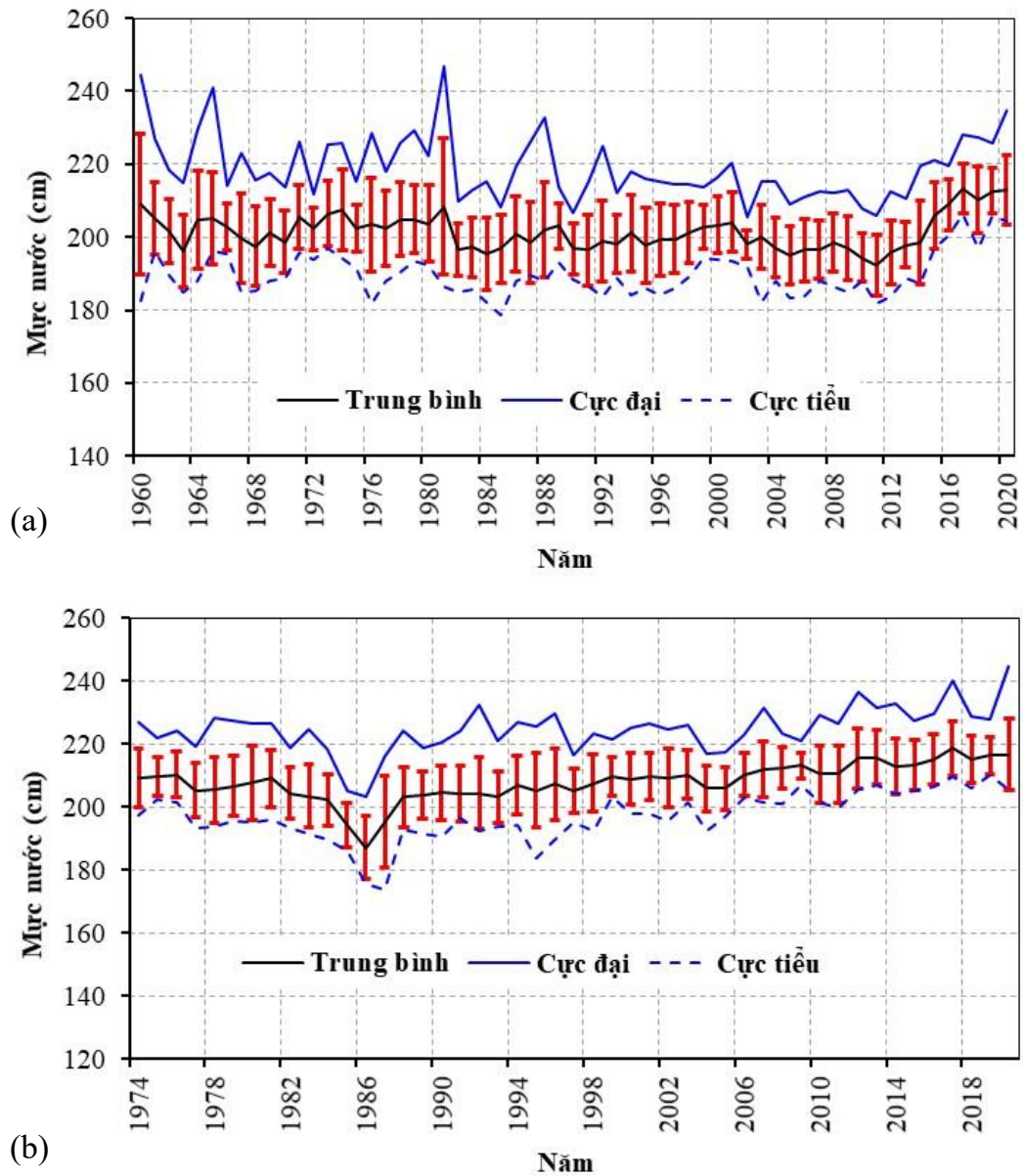
Hình 1. 3. Nhiệt độ trung bình tháng nhiều năm (1979-2020) tại trạm Hòn Dấu

1.2.1.3. Đặc điểm hải văn

a) Thủy triều và mực nước

Thủy triều ở vùng biển CB-HL mang tính chất nhật triều đều, với biên độ triều có thể lên tới 4,6 m. Vào thời kỳ triều cường, mực nước trung bình đạt 3,9 m, ngược lại vào kỳ triều kém chỉ khoảng 1,9 m. Chế độ TĐL và khả năng trao đổi nước ở vùng biển CB-HL chịu sự chi phối của dao động mực nước với biên độ triều lớn.

Theo kết quả phân tích mực nước giai đoạn 1974-2020 tại Bãi Cháy cho thấy mực nước trung bình năm dao động là 187,1-28,5 cm, với mực nước nhiều năm là 207,9 cm (hình 1.4a). Trạm Hòn Dấu, mực nước trung bình nhiều năm (1960-2020) là 190,54 cm. Mực nước trung bình năm thấp nhất là 165,2 cm (1963) và cao nhất là 206,1 cm (2017). Mực nước có xu hướng cao trong thời gian gần đây, đặc biệt từ năm 2016 đến nay, mực nước cao hơn 210 cm tại trạm Bãi Cháy và 202cm tại trạm Hòn Dấu. Mực nước trung bình tháng nhiều năm tại các trạm đều có chung xu hướng là cao hơn vào các tháng 9-11, đặc biệt là tháng 10 và thấp nhất trong các tháng từ tháng 2 đến 4 (hình 1.4b).

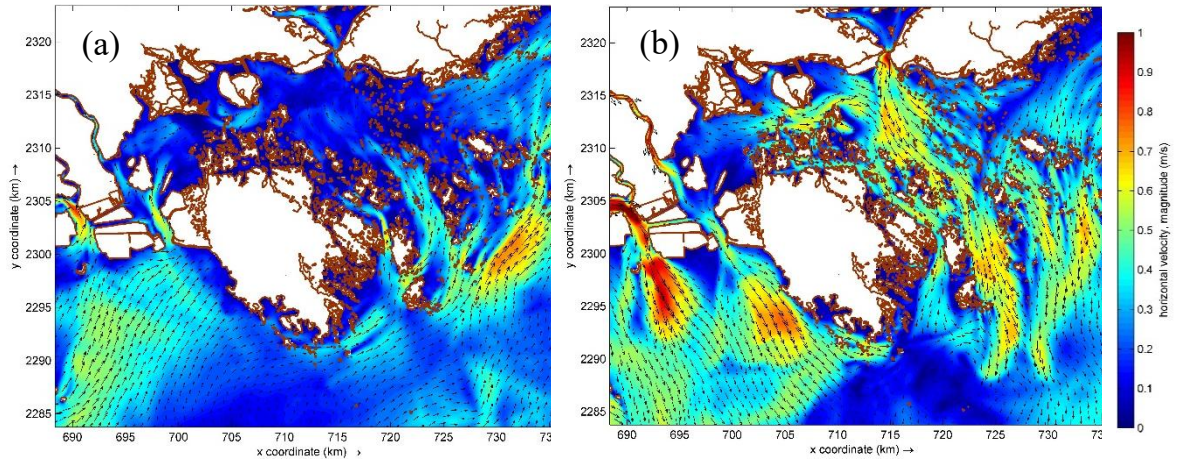


Hình 1. 4. Đặc trưng mực nước: a-trạm Hòn Dấu, b-trạm Bãi Cháy

b) Dòng chảy

Từ kết quả tính toán mô phỏng của mô hình trong khuôn khổ của luận án này cho thấy: dòng chảy của vùng biển CB-HL là dòng chảy tổng hợp của dòng triều, gió và dòng chảy từ sông. Dòng chảy biến động theo pha triều (ngày, giờ) và theo mùa. Vào mùa khô, do lưu lượng nước từ sông đưa ra rất nhỏ nên dòng triều quyết định trường dòng chảy ở khu vực với sự ảnh hưởng của trường gió ở các lớp trên tầng mặt. Vận tốc dòng chảy mùa này khá nhỏ, đặc biệt vào lúc nước lớn và có giá trị lớn hơn trong giai đoạn triều lên hoặc xuống. Trong pha triều xuống, sự kết hợp của khối nước từ sông và dòng triều, tốc độ dòng chảy thường lớn hơn so với trong pha triều lên. Dòng chảy có hai hướng chính là hướng Nam-Tây Nam và Đông Nam

(trong pha triều xuống) và hướng Bắc-Đông Bắc-Tây Bắc (trong pha triều lên). Trường dòng chảy ở khu vực CB-HL bị phân tán về hướng và độ lớn do địa hình phức tạp và bị phân chia bởi nhiều đảo nhỏ. Vận tốc dòng chảy trên 0,8 m/s thường xuất hiện ở các lạch giữa các đảo.



Hình 1. 5. Trường dòng chảy mùa mưa, tầng mặt: a-pha triều xuống, b-pha triều lên

Vào mùa mưa, sự kết hợp giữa khối nước từ sông đưa ra và dòng triều nên vận tốc dòng chảy vùng ven biển CB-HL lớn hơn mùa khô, đặc biệt là trong pha triều xuống, tuy nhiên dòng tổng hợp vẫn mang đặc trưng của dòng triều. Trong pha triều lên, dòng chảy từ phía đông đảo Cát Bà đi vào vịnh Hạ Long, tách thành hai hướng: một hướng vào vịnh Hạ Long, Cửa Lục sau đó xuống phía nam đảo Tuần Châu; hướng còn lại đi lên phía Đông Bắc sang vịnh Bái Tử Long. Dòng chảy từ cửa Lạch Huyện đi vào vịnh Hạ Long qua khu vực đảo Tuần Châu với vận tốc nhỏ hơn 0,3 m/s. Trong pha triều này, vận tốc dòng chảy dao động trong khoảng 0,2-0,8 m/s, có thể đạt 0,7-0,8 m/s tại một số lạch hẹp giữa các đảo (hình 1.5a). Vận tốc dòng chảy trong pha triều xuống thường lớn hơn so với pha triều lên do sự kết hợp của dòng triều và dòng chảy từ sông đưa ra (hình 1.5b).

Do độ sâu khu vực nghiên cứu không lớn và bị chia cắt bởi các đảo nhỏ nên sự phân tầng về hướng không thể hiện một cách rõ rệt. Tuy nhiên, tốc độ dòng chảy ở tầng đáy nhỏ hơn so với tầng mặt.

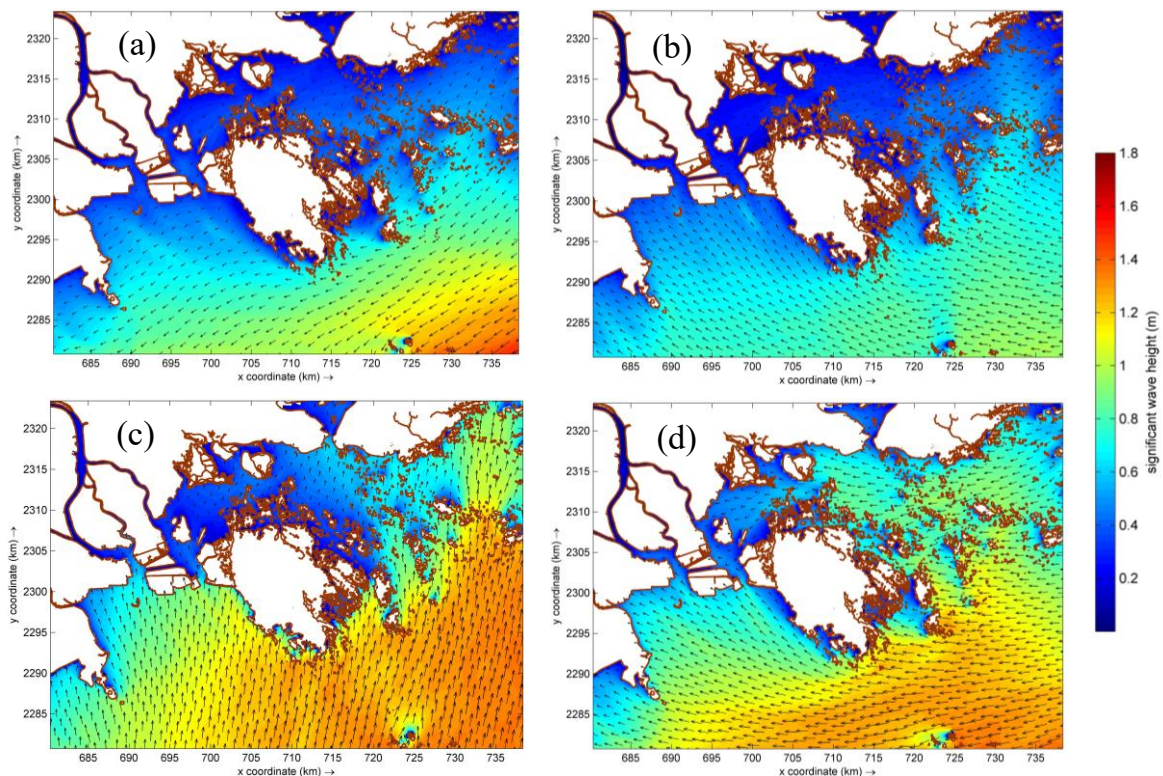
c) Sóng

Ảnh hưởng của hướng bờ và địa hình, sóng biển khu vực CB-HL nói chung không lớn, ngoại trừ sóng bão và tần suất lạng sóng đạt 28,2%. Trong thời kỳ gió mùa Đông Bắc, hướng sóng thịnh hành Đông và Đông Bắc, với độ cao sóng trung

bình đạt 0,5-0,6 m (hình 1.6a). Độ cao sóng cực đại phổ biến trong khoảng 1,2-2,0 m, cao nhất là 2,5 m (9/11/1990), thấp hơn so với độ cao sóng thời kỳ gió mùa hè.

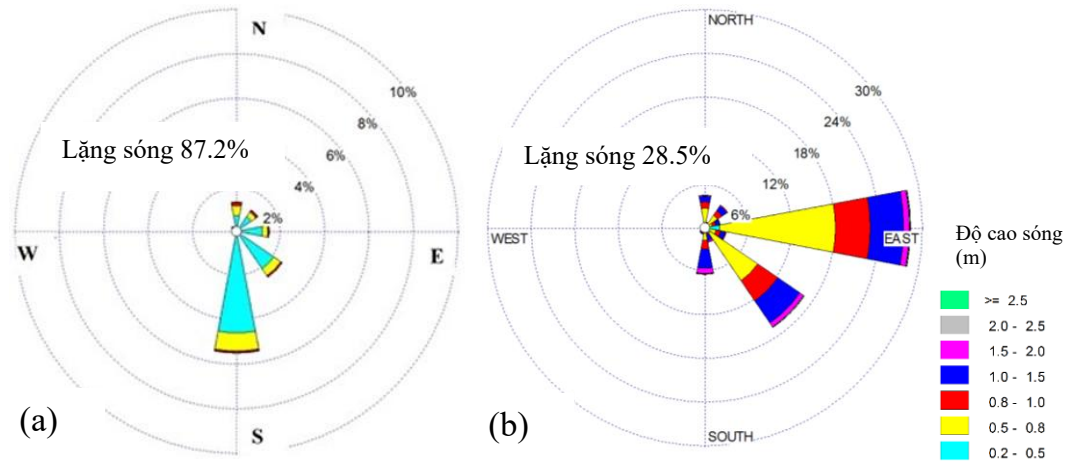
Vào mùa hè, độ cao sóng trung bình 0,6-0,8 m, sóng thịnh hành hướng Đông Nam với tần suất 27% và hướng Nam với tần suất 22%, lớn hơn mùa đông. Vào mùa hè chế độ sóng gió có đặc điểm ngược lại so với mùa đông (hình 1.6c). Độ cao sóng cực đại theo số liệu quan trắc từ năm 1985 đến năm 2017 rơi vào mùa hè, trùng với thời gian xuất hiện của bão (4,2 m vào ngày 22/07/1986). Tháng 4 và 10 (tháng chuyển tiếp), sóng hướng Đông và Đông Nam ưu thế, tần suất 25,3-31,9%, độ cao trung bình 0,75 m (hình 1.6b, d).

Vào mùa hè, độ cao sóng trung bình 0,6-0,8 m, sóng thịnh hành hướng Đông Nam với tần suất 27% và hướng Nam với tần suất 22%, lớn hơn mùa đông. Vào mùa hè chế độ sóng gió có đặc điểm ngược lại so với mùa đông (hình 1.6c). Độ cao sóng cực đại theo số liệu quan trắc từ năm 1985 đến năm 2017 rơi vào mùa hè, trùng với thời gian xuất hiện của bão (4,2 m vào ngày 22/07/1986). Tháng 4 và 10 (tháng chuyển tiếp), sóng hướng Đông và Đông Nam ưu thế, tần suất 25,3-31,9%, độ cao trung bình 0,75 m (hình 1.6b, d).



Hình 1. 6. Trường sóng khu vực CB-HL: a) mùa gió Đông Bắc; b) mùa gió chuyển tiếp Đông Bắc sang Tây Nam, c) mùa gió Tây Nam, d) mùa gió chuyển tiếp Tây Nam sang Đông Bắc [110]

Kết quả phân tích thống kê số liệu đo sóng trong nhiều năm (1979-2020) tại trạm Bãi Cháy cho thấy sóng ở khu vực chủ yếu nhỏ hơn 0,25 m chiếm tới 87,28%. Sóng có độ cao từ 0,3-0,5 m chiếm 9,89%; 0,5-0,8 m là 2,23%; 0,8-1,0 m là 0,47%; 1,0-1,5 m là 0,1%; độ cao sóng lớn hơn 2,5 m chỉ chiếm khoảng 0,02% (hình 1.7a).



Hình 1. 7. Hoa sóng khu vực nghiên cứu: a-trạm Bãi Cháy (1974-2020),
b- trạm Hòn Dấu (1960-2020)

Kết quả phân tích thống kê số liệu quan trắc sóng trong nhiều năm (1970-2020) tại Hòn Dấu cho thấy các hướng sóng chủ yếu tác động vào khu vực này là Đông, Đông Nam, Nam và Bắc với tần suất lần lượt là 28,2; 16,5; 6,5 và 4,6%. Độ cao sóng nhỏ hơn 0,8 m chiếm tới 67,4% (trong đó khoảng 28,4% là lặng sóng), độ cao sóng lớn hơn 1,5 m chỉ chiếm khoảng 4% tổng số số liệu (hình 1.7b).

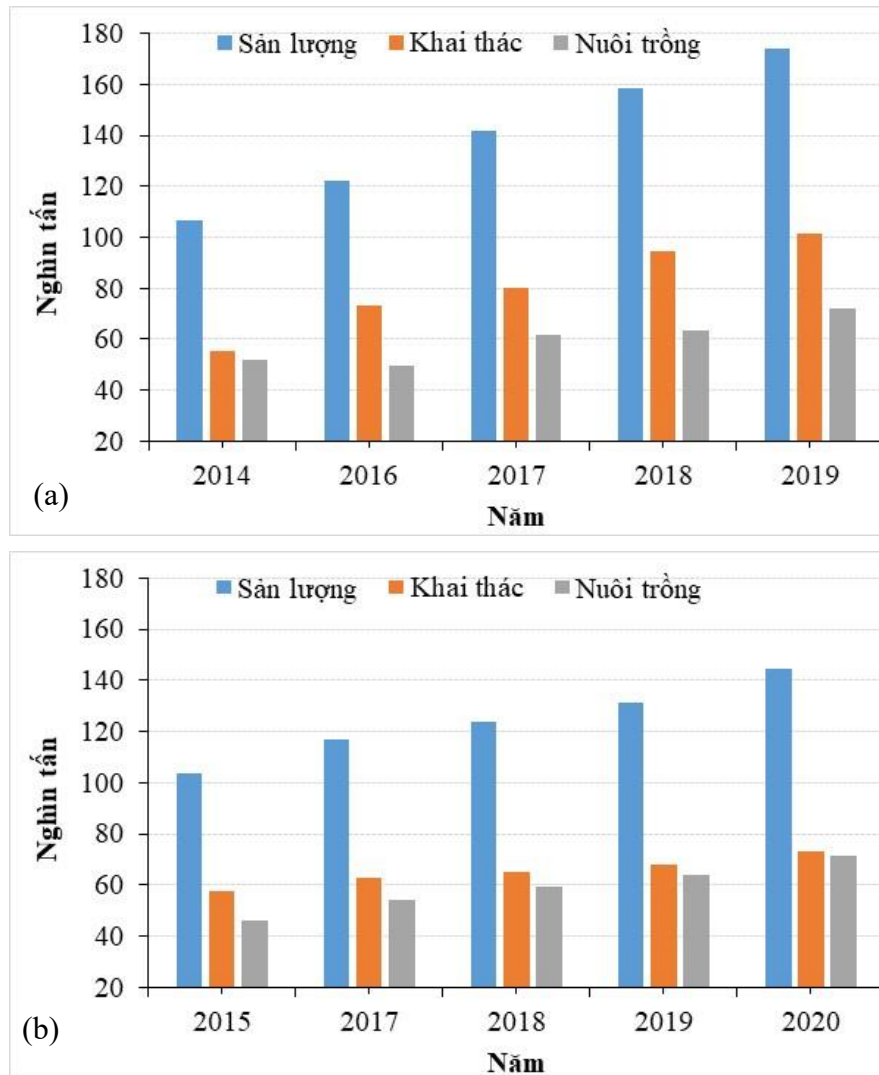
1.2.2. Đặc điểm kinh tế xã hội liên quan đến chất lượng nước khu vực nghiên cứu

1.2.2.1. Hoạt động nuôi trồng, đánh bắt thủy hải sản

Diện tích nuôi trồng thủy sản (NTTS) của Hải Phòng là 12.556,85 ha năm 2019, bao gồm diện tích nuôi nước ngọt là 6.918,12 ha chiếm 55% tổng diện tích, diện tích nuôi nước lợ, mặn là 5.638,73 ha chiếm 45% tổng diện tích [111]. Diện tích NTTS của tỉnh Quảng Ninh là 23.446,2 ha năm 2020, với 3.592,4 ha (chiếm 15%) là diện tích nuôi nước ngọt và 5.638,73 ha (chiếm 85%) là diện tích nuôi nước lợ, mặn [112].

Sản lượng nuôi trồng và khai thác ở Hải Phòng và Quảng Ninh đều có xu hướng gia tăng qua các năm. Ở Hải Phòng tổng sản lượng qua các năm là: 106,91 nghìn tấn (2014); 122,39 nghìn tấn (2016); 141,67 nghìn tấn (2017); 158,48 nghìn tấn (2018) và 173,79 nghìn tấn (2019). Sản lượng khai thác qua các năm luôn cao hơn sản lượng nuôi trồng [111]. Đối với tỉnh Quảng Ninh, tổng sản lượng vào năm

2020 đạt 144,5 nghìn tấn cao hơn so với năm 2015 là 41 nghìn tấn. Sản lượng khai thác cao hơn sản lượng nuôi trồng từ 1,7 (2020) đến 11,9 nghìn tấn (2015), [hình 1.8](#).



Hình 1. 8. Sản lượng khai thác và NTTS của Hải Phòng (a) và Quảng Ninh (b)

Khu vực vịnh Hạ Long, diện tích NTTS năm 2020 là 21.123 ha, diễn ra chủ yếu ở Quảng Yên với các sản phẩm như cá, tôm nuôi, nhuyễn thể, cua, ghẹ.... Tại Cẩm Phả chủ yếu nuôi cá biển, tại Hạ Long chủ yếu nuôi cá và trai ngọc. NTTS tại Cát Bà diễn ra chủ yếu tại vịnh Cát Bà, vịnh Lan Hạ, vịnh Bến Bèo, vịnh Trà Báu, vịnh Gia Luận. Hiện có 441 cơ sở NTTS, 516 nhà chòi, 8.216 ô lồng, 58.790 m² giàn treo nhuyễn thể với 1.298 nhân khẩu. Hiện thành phố Hải Phòng đang tiến hành phá dỡ, di dời các hộ NTTS về khu quy hoạch nuôi mới là Vụng O thuộc vịnh Bến Bèo và bến Gia Luận. Các sản phẩm thủy sản tại Cát Bà chủ yếu là nuôi cá lồng và nhuyễn thể trong đó sản lượng cá ước khoảng 5.000 tấn/năm [112].

Nghề NTTS trên biển thời gian gần đây được phát triển nhanh chóng, đặc biệt nghề nuôi nhuyễn thể được các công ty, cá nhân, hộ gia đình đầu tư mở rộng phát

triển, đa dạng hoá các đối tượng nuôi vào nuôi trồng thủy sản đã có hiệu quả kinh tế, giải quyết được nhiều việc làm. Tuy nhiên, do nhu cầu phát triển nuôi trồng tăng cao, các hoạt động nuôi tự phát của nhiều hộ gia đình gây nguy cơ làm mất mỹ quan, ô nhiễm ảnh hưởng tới môi trường biển, những phức tạp trong quản lý trật tự an ninh, giao thông biển và hoạt động du lịch. Lượng rác thải ở khu vực phần lớn do hoạt động đánh bắt, NTTS gây ra và có xu hướng tăng lên mỗi năm.

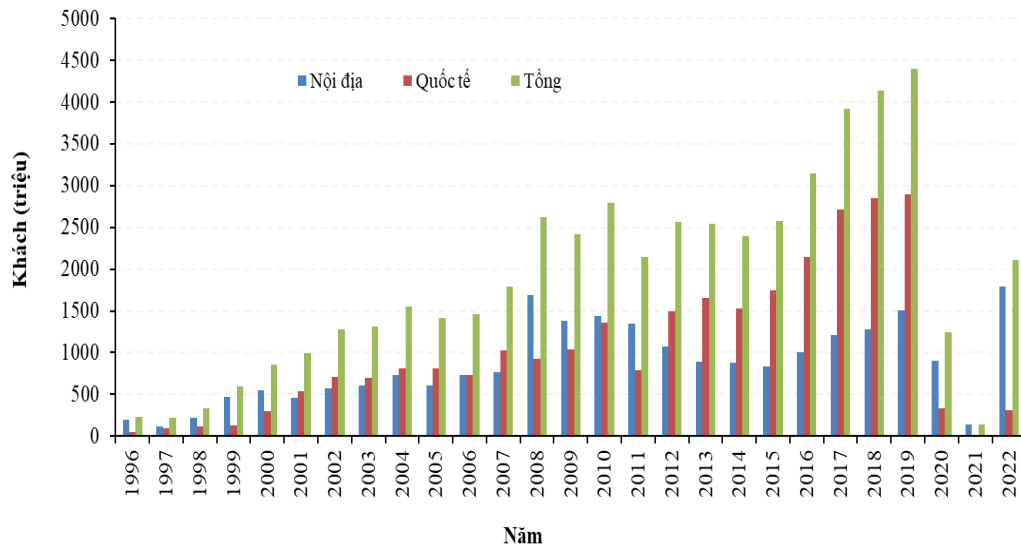
1.2.2.2. Hoạt động du lịch

Lượng khách du lịch đến thành phố Hải Phòng giai đoạn 2017-2020 dao động ở mức 6,7-9,0 triệu người, đặc biệt năm 2019 đạt 9,0 triệu người. Lượng khách du lịch vào năm 2020 (7,5 triệu người) giảm đáng kể so với năm 2019, giảm 1,5 triệu người do ảnh hưởng của dịch bệnh Covid-19 [111].

Tổng lượng khách du lịch thành phố Hạ Long giai đoạn 2016-2020 ước đạt 44,96 triệu lượt, bằng 1,9 lần giai đoạn 2011-2015, tăng bình quân 11,7%/năm, trong đó khách quốc tế là 17,5 triệu lượt, bằng 1,5 lần giai đoạn 2011-2015, tăng bình quân 10%/năm; tổng thu du lịch ước đạt 79.230 tỷ đồng, tăng bình quân 32,9%/năm, bằng 5,6 lần giai đoạn 2011-2015; thời gian lưu trú của khách du lịch tăng dần từ 2,2 ngày/người (năm 2015) lên 3 ngày/người (năm 2020). Năm 2021 khách du lịch thăm Hạ Long giảm rõ rệt do ảnh hưởng của dịch Covid19 (hình 1.8). Tổng khách du lịch khoảng 140.755 người, trong đó khách nội địa là chủ yếu với 136.765 người và có khoảng 3.990 khách quốc tế. Tổng thu của ngành du lịch năm 2019 chỉ khoảng 7,2 tỷ đồng. Đến năm 2022 khi dịch Covid19 lắng xuống, du lịch có dấu hiệu phục hồi. Khách du lịch đến Hạ Long vào năm 2022 khoảng 2,1 triệu người trong đó khách nội địa khoảng 1,79 triệu người và khách quốc tế khoảng 0,31 triệu người. Trên địa bàn thành phố Hạ Long năm 2020, tổng số cơ sở lưu trú du lịch đã xếp hạng và chưa xếp hạng khoảng trên 900 cơ sở, trong đó có 784 cơ sở lưu trú du lịch đã xếp hạng với 18.721 phòng, cụ thể: 148 khách sạn xếp hạng từ 1-5 sao; 63 khách sạn đáp ứng điều kiện tối thiểu về cơ sở vật chất kỹ thuật và dịch vụ; 349 nhà nghỉ du lịch; 49 nhà ở có phòng cho khách du lịch, 175 tàu thủy lưu trú du lịch xếp hạng từ 1-2 sao [113].

Du lịch, dịch vụ phát triển bên cạnh tạo việc làm cho người dân, còn thúc đẩy quảng bá hình ảnh khu vực CB-HL và Việt Nam ra thế giới. Đó là nguồn tài nguyên vô cùng lớn mà khu vực mang lại cho ngành công nghiệp không khói. Tuy nhiên,

du lịch cũng gây ra những thách thức không nhỏ đối với công tác bảo tồn các giá trị của di sản, kỳ quan thế giới CB-HL.



Hình 1. 9. Khách du lịch tới thành phố Hạ Long (1996-2022)

1.2.2.3. Hoạt động sản xuất công nghiệp

Hải Phòng và Quảng Ninh là 2 địa phương có giá trị ngành công nghiệp rất lớn. Hiện nay, Hải Phòng có 23 KCN và Cụm công nghiệp đang hoạt động và phát triển; đặc biệt có 9 dự án KCN và khu chức năng trong khu kinh tế Đình Vũ - Cát Hải đã được đầu tư xây dựng với tổng diện tích 5.788,76 ha, bao gồm: KCN Đình Vũ; KCN MP Đình Vũ; KCN Tràng Duệ; khu đô thị, công nghiệp và dịch vụ VSIP Hải Phòng, khu phi thuế quan và KCN Nam Đình Vũ. Đây đều là những nơi mà các nhà đầu tư nhất là các nhà đầu tư nước ngoài quan tâm. Tỉnh Quảng Ninh có 15 KCN và cụm công nghiệp đang hoạt động, trong đó 9 KCN tác động trực tiếp đến CLN biển vùng CB-HL đó là: KCN Cái Lân-thành phố Hạ Long có diện tích 242,8 ha, KCN Đông Mai - thị xã Quảng Yên với diện tích 168 ha, KCN Việt Hưng-thành phố Hạ Long có diện tích 301 ha, KCN Sông Khoai-thị xã Quảng Yên với diện tích 700 ha, KCN dịch vụ đầm nhà Mạc-thị xã Quảng Yên với diện tích 3710 ha, KCN Quán Triều- Đông Triều với diện tích 150 ha, KCN Hoành Bồ với diện tích 681 ha, KCN Phương Nam và KCN Chạp Khê - Uông Bí [112-113].

Hiện nay, thành phố Hải Phòng có 16 doanh nghiệp khai thác khoáng sản với 21 giấy phép còn hiệu lực, trong đó tại khu vực Lạch Huyện có 7 doanh nghiệp được cấp phép với trữ lượng khoảng 27,5 triệu m³ trên diện tích 695,66 ha; khu vực Nam đảo Đình Vũ, quận Hải An có 6 doanh nghiệp được cấp phép với tổng trữ

lượng hơn 23,2 triệu m³ trên diện tích 565,3 ha; khu vực ven biển thuộc quận Đồ Sơn có 2 doanh nghiệp được cấp phép với tổng trữ lượng gần 5,2 triệu m³ trên diện tích 130,06 ha; khu vực cửa sông Văn Úc có 5 doanh nghiệp được cấp phép khai thác với trữ lượng 20,5 triệu m³ trên diện tích 479,94 ha [111].

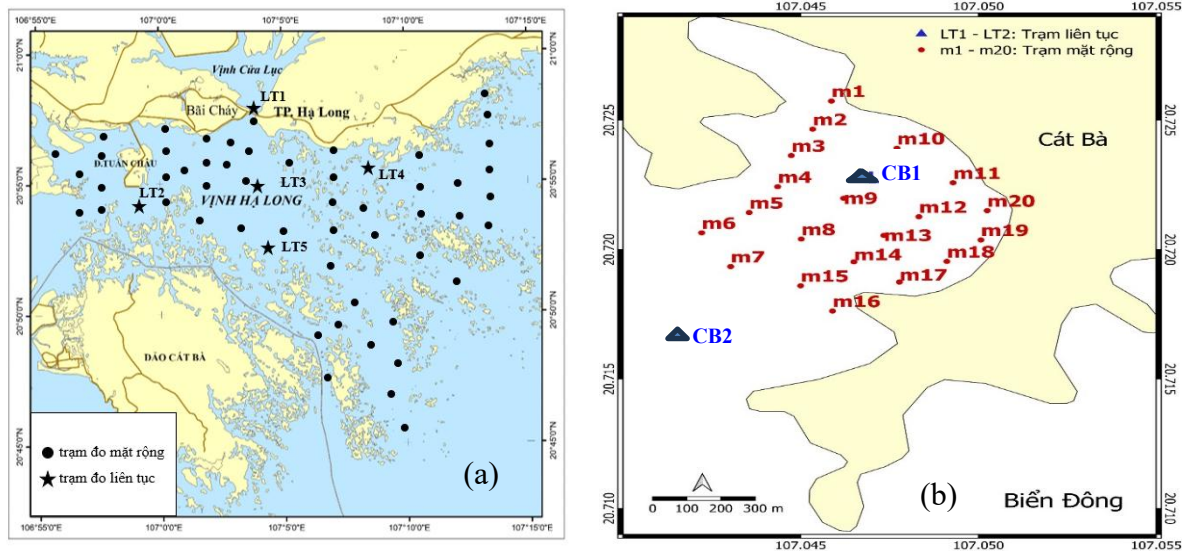
1.2.2.4. Hoạt động đô thị hóa ven bờ

Nước thải đô thị là một trong các nguồn lớn gây ô nhiễm môi trường nước khu vực ven bờ CB-HL. Khối lượng nước thải đổ vào vịnh Hạ Long ước tính khoảng 15,3 nghìn m³ mỗi ngày đêm nhưng lượng nước được xử lý trước khi thải ra biển vẫn còn khá hạn chế. Khu vực có 4 trạm xử lý nước thải, với tổng công suất khoảng 40-50% tổng lượng thải đưa vào vịnh. Trong những năm trở lại đây, mặc dù tốc độ đô thị hoá diễn ra nhanh hơn nhưng các nguồn thải đưa vào khu vực cũng được kiểm soát chặt chẽ hơn bởi các quy định liên quan đến bảo vệ môi trường.

Bên cạnh nguồn thải từ hoạt động đô thị hoá ở vùng ven bờ, các quá trình lấn biển cũng làm thay đổi không gian ở vùng ven bờ CB-HL. Phân tích từ dữ liệu ảnh vệ tinh 2019 và so sánh với đường bờ khu vực này năm 2010 cho thấy xu thế thu hẹp không gian do các hoạt động lấn biển ở khu vực. Chỉ trong vòng trên 10 năm, khu vực vịnh Cửa Lục đã bị lấn biển với tổng cộng lên tới 419,2 ha. Trong khi đó, ở vùng ven bờ Bãi Cháy-Tuần Châu, diện tích mặt nước giai đoạn trước năm 2010 là 4770,3 ha, nhưng do các hoạt động lấn biển diễn ra mạnh mẽ trong những năm gần đây, đến năm 2019, diện tích mặt nước khu vực ven bờ này đã thu hẹp xuống còn 3546,1 ha, giảm tới 1224,2 ha. Ở khu vực ven bờ Cẩm Phả cũng là nơi diễn ra nhiều các hoạt động lấn biển, với diện tích giảm từ 7132,5 ha trong giai đoạn trước năm 2010 xuống còn 6553,8 ha vào thời điểm năm 2021, giảm khoảng 579 ha [40].

1.2.3. Hiện trạng chất lượng môi trường nước

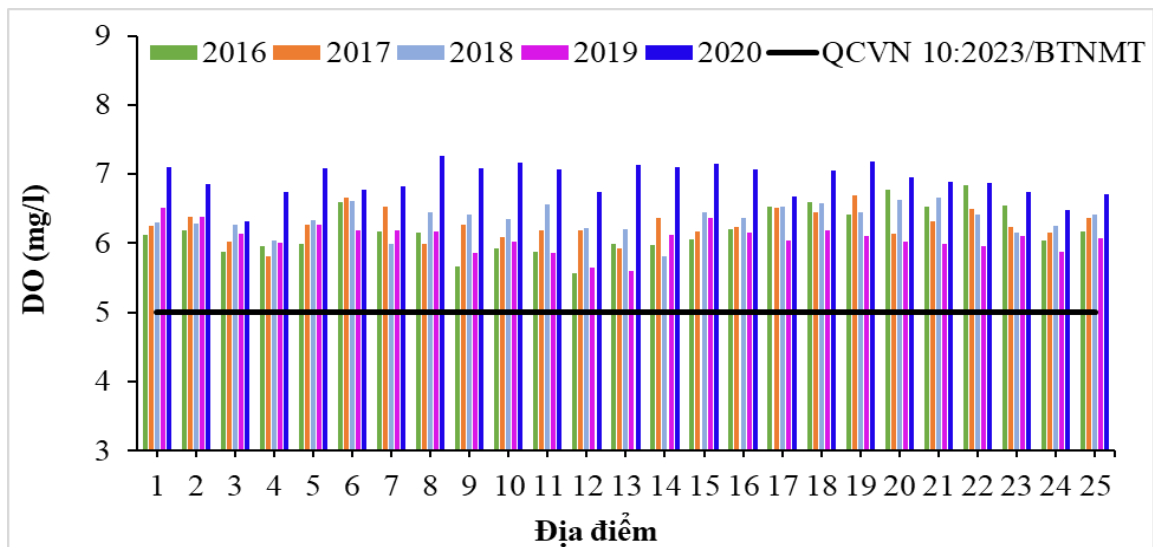
Hiện trạng môi trường nước ở vùng biển CB-HL được đánh giá dựa vào số liệu khảo sát định kỳ của Ban Quản lý vịnh Hạ Long giai đoạn 2016-2020. Ngoài ra hiện trạng nước cũng được đánh giá dựa vào số liệu khảo sát tại 05 trạm liên tục (LT1-LT5), mỗi trạm quan trắc 3 ngày đêm và 40 trạm mặt rộng (MR1-MR40) của nhiệm vụ nghị định thư Việt-Bỉ, mã số NĐT.97.BE/20 (hình 1.10a) và 02 trạm liên tục (CB1-CB2), mỗi trạm quan trắc 01 ngày đêm và 20 trạm mặt rộng (m1-m20) của đề tài VAST mã số VAST05.05/21-22 (hình 1.10b).



Hình 1. 10. Sơ đồ vị trí khảo sát của đề tài NĐT.97.BE/20 (a) và đề tài VAST05.05/21-22 (b)

1.2.3.1. Oxy hòa tan

Kết quả quan trắc theo quý của Ban Quản lý vịnh Hạ Long giai đoạn 2016-2020 cho thấy hàm lượng DO trung bình năm dao động từ 5,6 đến 7,3mg/l đều đáp ứng được tiêu chuẩn môi trường sống dưới nước theo QCVN 10:2023/BTNMT đối với chất lượng nước (hình 1.11). Tuy nhiên vào một số thời điểm, DO thấp hơn so với QCVN 10:2023/BTNMT như Cổng CENCO5, cảng Vân Đồn và Bãi Dải vào quý 2 năm 2019 và cảng Hòn Nét vào quý 1 năm 2018, hàm lượng DO dưới 5mg/l.



Hình 1. 11. Hàm lượng DO trung bình tại một số vị trí (2016-2020)

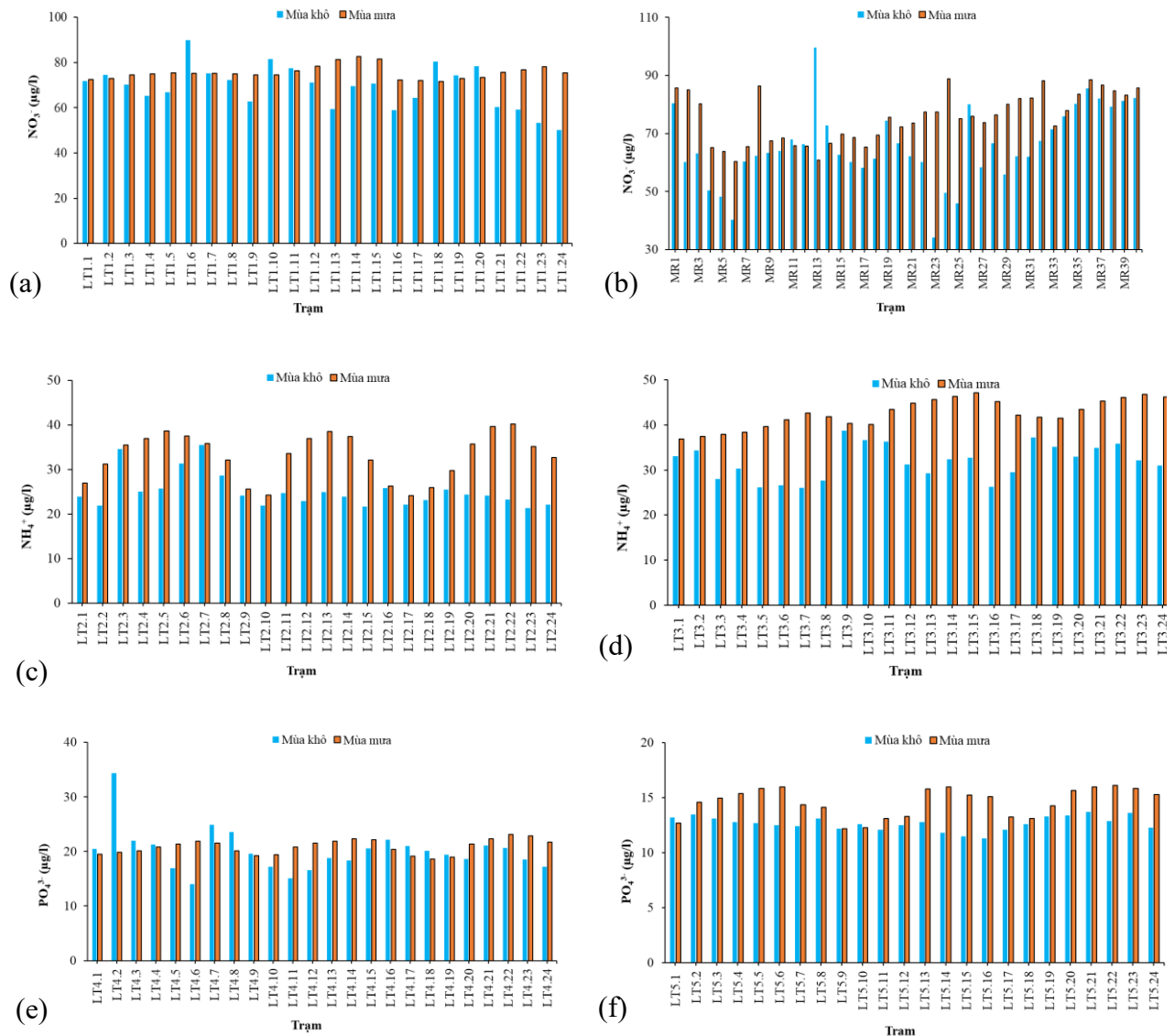
(1-giữa cầu Bãi cháy; 2- Cảng B12; 3- Cảng Cái Lân; 4- Cổng CENCO5; 5-Hòn Gạc; 6- Cảng tàu Tuần Châu; 7- Bãi tắm Bãi Cháy; 8- sau chợ Hạ Long 1; 9- Cảng Vũng Đục; 10-Nhiệt điện- Tuyển than; 11- cảng Cửa Ông; 12- Cảng Vân Đồn; 13- Bãi Dải; 14-cảng Hòn Nét; 15- Luồng Cửa Ông; 16-Lạch Vông-Cổng Thê; 17-Thiên Cung-Đầu Gỗ; 18-Đảo Titop; 19-khu nghỉ đêm Lờm Bò; 20-khu nghỉ đêm Cổng Đỏ; 21-Làng Chài Ba Hang; 22-Làng chài Hoa Cường; 23- Làng chài Cửa Vạn; 24-Làng chài Vông Viêng; 25-Luồng giữa Cửa Lục)

1.2.3.2. Dinh dưỡng hòa tan

Các kết quả phân tích cho thấy trong mùa khô (tháng 1/2021), giá trị nitrat trung bình tại các trạm dao động từ 32,5 mg/l đến 72,39 $\mu\text{g/l}$. Hàm lượng NO_3^- trung bình lớn nhất tại trạm LT3 và nhỏ nhất tại trạm LT5. Giá trị NO_3^- cực đại tại trạm LT4 (96,56 $\mu\text{g/l}$), sau đó đến trạm LT1 (89,76 $\mu\text{g/l}$), LT3 (86,81 $\mu\text{g/l}$), LT2 (71,46 $\mu\text{g/l}$) và nhỏ nhất vẫn tại trạm LT5 (41,5 $\mu\text{g/l}$). Giá trị cực tiểu tại các trạm đều nhỏ hơn 62 $\mu\text{g/l}$: lớn nhất tại trạm LT3 (61,51 $\mu\text{g/l}$) và bé nhất tại trạm LT5 (28,2 $\mu\text{g/l}$). Vào mùa mưa (10/2021) cho thấy giá trị trung bình nitrat hầu hết cao hơn mùa khô: LT1 (75,53 $\mu\text{g/l}$); LT2 (72,8 $\mu\text{g/l}$); LT4 (74,34 $\mu\text{g/l}$); LT5 (37,32 $\mu\text{g/l}$), ngoại trừ tại trạm LT3 (68,46 $\mu\text{g/l}$). Ngược lại, giá trị cực đại tại các trạm vào mùa này lại hầu như nhỏ hơn mùa khô: LT1 (82,51 $\mu\text{g/l}$); LT3 (72,54 $\mu\text{g/l}$); LT4 (78,51 $\mu\text{g/l}$); LT5 (42,12 $\mu\text{g/l}$), ngoại trừ tại trạm LT2 (75,89 $\mu\text{g/l}$). Giá trị cực tiểu tại các trạm hầu như cao hơn so với mùa khô, dao động trong khoảng 33,62 $\mu\text{g/l}$ đến 71,56 $\mu\text{g/l}$. Hàm lượng NO_3^- lớn nhất tại trạm LT1 (71,56 $\mu\text{g/l}$), sau đó đến LT4 (70,28 $\mu\text{g/l}$), LT3 (64,15 $\mu\text{g/l}$), LT2 (45,3 $\mu\text{g/l}$) và nhỏ nhất tại LT5 (33,62 $\mu\text{g/l}$). Tại các trạm mặt rộng, vào mùa khô sự biến động của NO_3^- rộng hơn so với mùa mưa. Vào mùa khô, hàm lượng NO_3^- biến động từ 34,17 $\mu\text{g/l}$ đến 99,57 $\mu\text{g/l}$ và giá trị trung bình tất cả các trạm là 65,64 $\mu\text{g/l}$. Trạm có hàm lượng NO_3^- nhỏ nhất là MR23 (34,17 $\mu\text{g/l}$) và lớn nhất tại trạm MR13. Hàm lượng NO_3^- không có sự chênh lệch nhau nhiều giữa các trạm vào mùa mưa: lớn nhất tại trạm MR4 (88,9 $\mu\text{g/l}$), nhỏ nhất tại trạm MR6 (60,3 $\mu\text{g/l}$) (hình 1.12 a, b). So với GHCP được quy định trong QCVN 8:2023/BTNMT (2000 $\mu\text{g/l}$) thì nước tại tất cả các trạm không bị ô nhiễm nitrat.

Kết quả đo đạc của Ban Quản lý vịnh Hạ Long theo quý từ năm 2016-2020, hàm lượng Amoni dao động trong khoảng 13-840 $\mu\text{g/l}$, trong đó có khoảng một nửa các số liệu có hàm lượng Amoni vượt QCVN 10:2023/BTNMT (100 $\mu\text{g/l}$) từ 1,1-8,4 lần. Tương tự, hàm lượng Amoni tại các điểm đo cũng hơn một nửa là vượt tiêu chuẩn cho phép. Khu vực có hàm lượng Amoni cao cổng CENCO5, Hòn Gạc, sau chợ Hạ Long 1, cảng Vũng Đục và cảng Vân Đồn, có hàm lượng Amoni vượt tiêu chuẩn cho phép từ 3-7 lần. Tuy nhiên hàm lượng Amoni cao rơi chủ yếu từ năm 2016 đến 2019, năm 2020 do ảnh hưởng của dịch Covid19 hoạt động du lịch hạn chế nên hàm lượng Amoni giảm đáng kể, hầu như trong giới hạn (ngoại trừ khu vực

Cổng CENCO 5, cảng tàu Tuần Châu, Bãi tắm Bãi Cháy, sau chợ Hạ Long 1 và cảng Vũng Đục), xem hình 1.13.

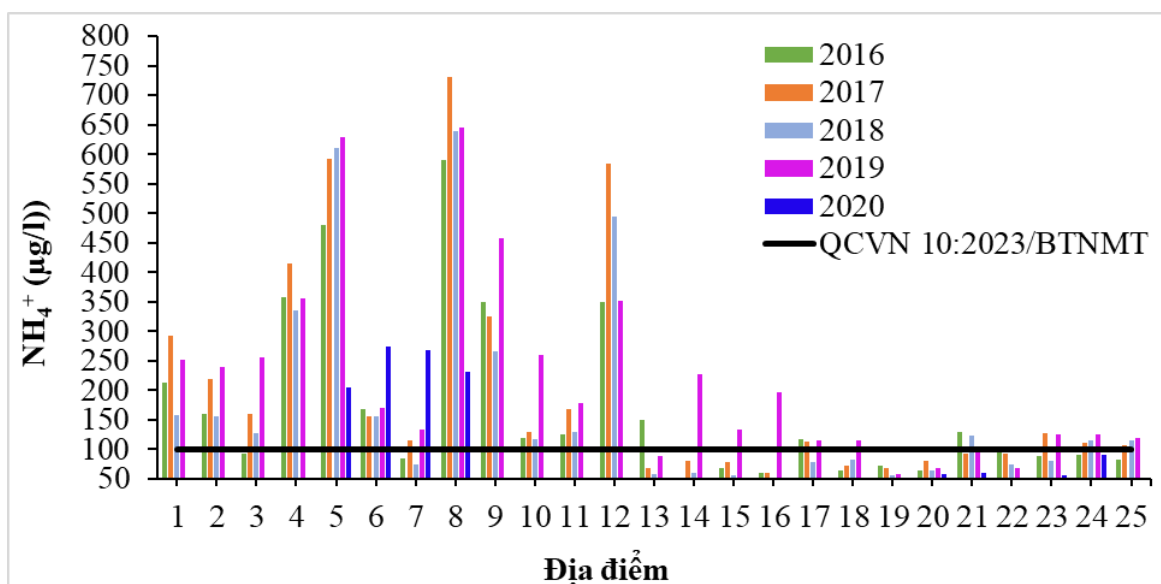


Hình 1. 12. Hàm lượng các chất dinh dưỡng từ kết quả khảo sát

(a)-LT1, NO₃⁻; (b)- trạm mặt rộng, NO₃⁻; (c)-LT2, NH₄⁺; (d)-LT3, NH₄⁺; (e)-LT4, PO₄³⁻; (f)-LT5, PO₄³⁻

Giá trị amoni trung bình vào mùa khô dao động từ 14,23 µg/l đến 41,68 µg/l tại các trạm. Giá trị amoni trung bình lớn nhất tại trạm LT1 và nhỏ nhất tại trạm LT5. Giá trị amoni cực đại tại trạm LT1 (66,98 µg/l), sau đó đến trạm LT2 (35,49 µg/l), LT3 (38,72 µg/l), LT4 (25,98 µg/l) và nhỏ nhất vẫn tại trạm LT5 (15,8 µg/l). Giá trị cực tiểu tại các trạm đều nhỏ hơn 30 µg/l: lớn nhất tại trạm LT1 (28,94 µg/l) và bé nhất tại trạm LT5 (13,3 µg/l). Vào mùa mưa, giá trị amoni lớn hơn mùa khô. Hàm lượng amoni trung bình cao nhất tại trạm LT1 (58,6 µg/l), sau đó LT3 (42,59

$\mu\text{g/l}$); LT2 (33,01 $\mu\text{g/l}$); LT4 (25,0 $\mu\text{g/l}$), và thấp nhất tại trạm LT5 (16,31 $\mu\text{g/l}$). Giá trị cực đại tại các trạm vào mùa này dao động trong khoảng 18,5 $\mu\text{g/l}$ đến 69,1 $\mu\text{g/l}$. Giá trị cực tiểu lớn nhất tại trạm LT1 (45,5 $\mu\text{g/l}$), sau đó đến LT3 (36,9 $\mu\text{g/l}$), LT2 (24,1 $\mu\text{g/l}$), LT4 (24,1 $\mu\text{g/l}$) và nhỏ nhất tại LT5 (13,2 $\mu\text{g/l}$). Tại các trạm mặt rộng, vào mùa khô sự biến động của amoni lớn hơn mùa mưa. Hàm lượng amoni biến động từ 14,77 $\mu\text{g/l}$ đến 43,02 $\mu\text{g/l}$ vào mùa khô trong khi mùa mưa dao động 30,1 $\mu\text{g/l}$ -45,4 $\mu\text{g/l}$. Mẫu nước tại tất các trạm không bị ô nhiễm amoni theo QCVN 10:2023/BTNMT (100 $\mu\text{g/l}$) (hình 1.12 c, d).



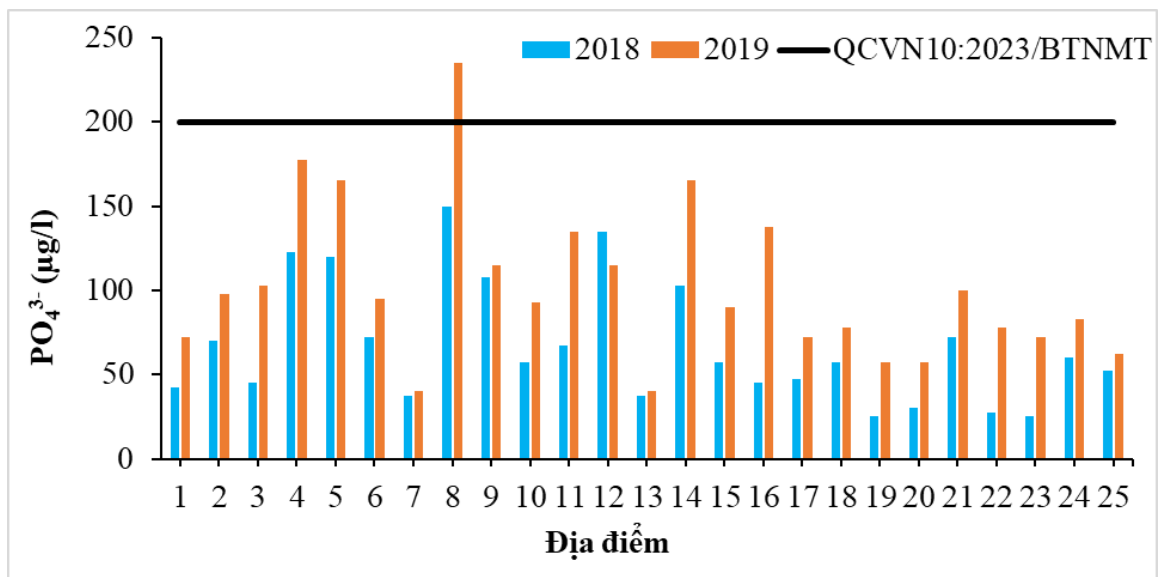
Hình 1. 13. Hàm lượng NH_4^+ trung bình tại một số vị trí (2016-2020)

(1-giữa cầu Bãi Cháy; 2- Cảng B12; 3- Cảng Cái Lân; 4- Cổng CENCO5; 5-Hòn Gạc; 6- Cảng tàu Tuần Châu; 7- Bãi tắm Bãi Cháy; 8- sau chợ Hạ Long 1; 9- Cảng Vũng Đục; 10-Nhiệt điện- Tuyển than; 11- cảng Cửa Ông; 12- Cảng Vân Đồn; 13- Bãi Dải; 14-cảng Hòn Nét; 15- Luồng Cửa Ông; 16-Lạch Vông-Cổng Thẻ; 17-Thiên Cung-Đầu Gỗ; 18-Đảo Titop; 19-khu nghỉ đêm Lờm Bò; 20-khu nghỉ đêm Cổng Đỏ; 21-Làng Chài Ba Hang; 22-Làng chài Hoa Cương; 23- Làng chài Cửa Vạn; 24-Làng chài Vông Viêng; 25-Luồng giữa Cửa Lục)

Kết quả quan trắc của Ban Quản lý vịnh Hạ Long định kỳ năm 2018-2020 cho thấy hàm lượng phosphat đều nằm trong GHCP theo QCVN10:2023/BTNMT (<200 $\mu\text{g/l}$) với mục đích nhằm bảo vệ sức khỏe con người và HST, ngoại trừ khu vực sau chợ Hạ Long 1 vào năm 2019 vượt GHCP. Hàm lượng phosphat năm 2020 nhỏ hơn 10 $\mu\text{g/l}$ (hình 1.14).

Giá trị phosphat trung bình trong tháng 1/2021 (mùa khô), tại các trạm dao động từ 12,67 $\mu\text{g/l}$ đến 20,1 $\mu\text{g/l}$. Giá trị tại trạm LT4 lớn nhất và nhỏ nhất tại trạm LT5. Giá trị phosphat cực đại lớn nhất tại trạm LT4 (34,32 $\mu\text{g/l}$), sau đó đến trạm

LT3 (24,15 $\mu\text{g/l}$), LT3 (22,72 $\mu\text{g/l}$), LT1 (20,01 $\mu\text{g/l}$) và nhỏ nhất vẫn tại trạm LT5 (13,7 $\mu\text{g/l}$). Giá trị cực tiểu tại các trạm đều nhỏ hơn 14,2 $\mu\text{g/l}$: lớn nhất tại trạm LT4 (14,06 $\mu\text{g/l}$) và bé nhất tại trạm LT5 (11,3 $\mu\text{g/l}$). Giá trị phosphat vào mùa mưa không có sự chênh lệch nhiều so với mùa khô. Hàm lượng phosphat trung bình cao nhất tại trạm LT3 (20,89 $\mu\text{g/l}$), sau đó LT2 (20,14 $\mu\text{g/l}$); LT2 (18,74 $\mu\text{g/l}$); LT1 (18,07 $\mu\text{g/l}$), thấp nhất tại trạm LT5 (14,6 $\mu\text{g/l}$). Giá trị cực đại tại các trạm vào mùa này dao động trong khoảng 16,14 $\mu\text{g/l}$ đến 24,15 $\mu\text{g/l}$. Giá trị cực tiểu lớn nhất tại trạm LT4 (18,65 $\mu\text{g/l}$), sau đó đến LT2 (16,8 $\mu\text{g/l}$), LT3 (15,76 $\mu\text{g/l}$), LT1 (15,11 $\mu\text{g/l}$) và nhỏ nhất tại LT5 (12,18 $\mu\text{g/l}$). Tại các trạm mặt rộng, vào mùa khô, hàm lượng phosphat biến động từ 13,3 $\mu\text{g/l}$ đến 30,16 $\mu\text{g/l}$, với hàm lượng trung bình tất cả các trạm là 21,52 $\mu\text{g/l}$. Vào mùa mưa, hàm lượng amoni không có sự chênh lệch nhau nhiều giữa các trạm: lớn nhất tại trạm MR30 (39,9 $\mu\text{g/l}$), nhỏ nhất tại trạm MR13 (19,8 $\mu\text{g/l}$). Hàm lượng phosphat tại tất cả các trạm đều nằm trong GHCP theo QCVN 10:2023/BTNMT đối với nước mặt (200 $\mu\text{g/l}$) (hình 1.12 e, f).



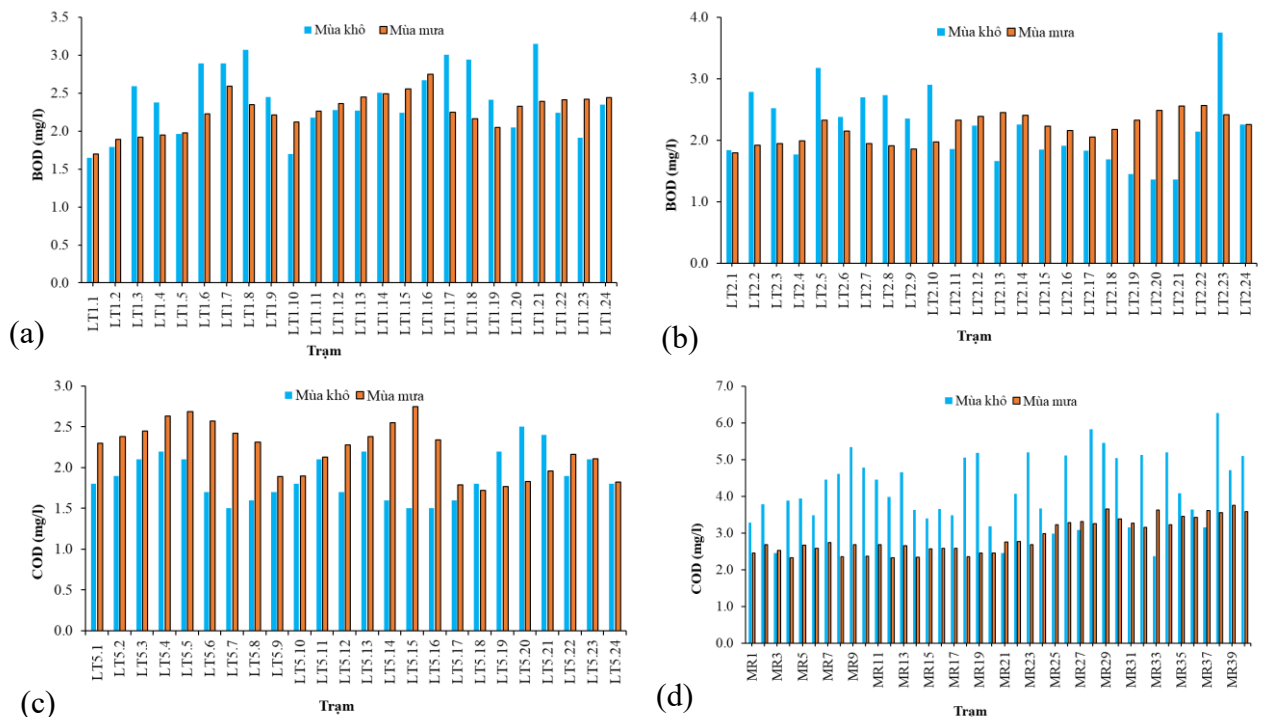
Hình 1. 14. Hàm lượng PO_4^{3-} trung bình năm 2018 và 2019 tại một số địa điểm

(1-giữa cầu Bãi Cháy; 2- Cảng B12; 3- Cảng Cái Lân; 4- Cống CENCO5; 5-Hòn Gạc; 6- Cảng tàu Tuần Châu; 7- Bãi tắm Bãi Cháy; 8- sau chợ Hạ Long 1; 9- Cảng Vũng Đục; 10-Nhiệt điện- Tuyển than; 11- cảng Cửa Ông; 12- Cảng Vân Đồn; 13- Bãi Dải; 14-cảng Hòn Nét; 15- Luồng Cửa Ông; 16-Lạch Vông-Cống Thê; 17-Thiên Cung-Đầu Gỗ; 18-Đảo Titop; 19-khu nghỉ đêm Lờm Bò; 20-khu nghỉ đêm Cống Đỏ; 21-Làng Chài Ba Hang; 22-Làng chài Hoa Cương; 23- Làng chài Cửa Vạn; 24-Làng chài Vông Viêng; 25-Luồng giữa Cửa Lục)

1.2.3.3. Các chất hữu cơ

Kết quả phân tích số liệu đo tháng 1/2021 (mùa khô) cho thấy giá trị BOD trung bình lớn nhất tại trạm LT3 (2,61 mg/l), sau đó đến LT4 (2,44 mg/l); LT1 (2,4 mg/l), LT2 (2,2 mg/l) và nhỏ nhất tại trạm LT5 (1,6 mg/l). Giá trị BOD lớn nhất đều lớn hơn 3,15 mg/l, ngoại trừ tại trạm LT5 (2,3 mg/l). Giá trị BOD nhỏ nhất tại các trạm dao động trong khoảng 1,1-1,75 mg/l (hình 1.15a, b).

Tại các trạm mặt rộng (MR1-MR40), BOD trong mùa khô biến động mạnh hơn mùa mưa. Giá trị BOD dao động từ 1,29 mg/l đến 4,19 mg/l, trung bình 2,7 mg/l trong mùa khô. Giá trị BOD tại trạm mặt rộng và liên tục trong đợt khảo sát mùa khô đều nằm trong GHCP theo QCVN 08:2023/BTNMT đối với nước mặt là 4 mg/l – loại A1: dùng để bảo tồn động thực vật thủy sinh, ngoại trừ trạm mặt rộng (MR38) là vượt GHCP (4,19 mg/l).



Hình 1. 15. Giá trị các chất hữu cơ từ kết quả khảo sát
(a) LT1, BOD; (b) LT2, BOD; (c) LT5, COD; (d) trạm mặt rộng, COD

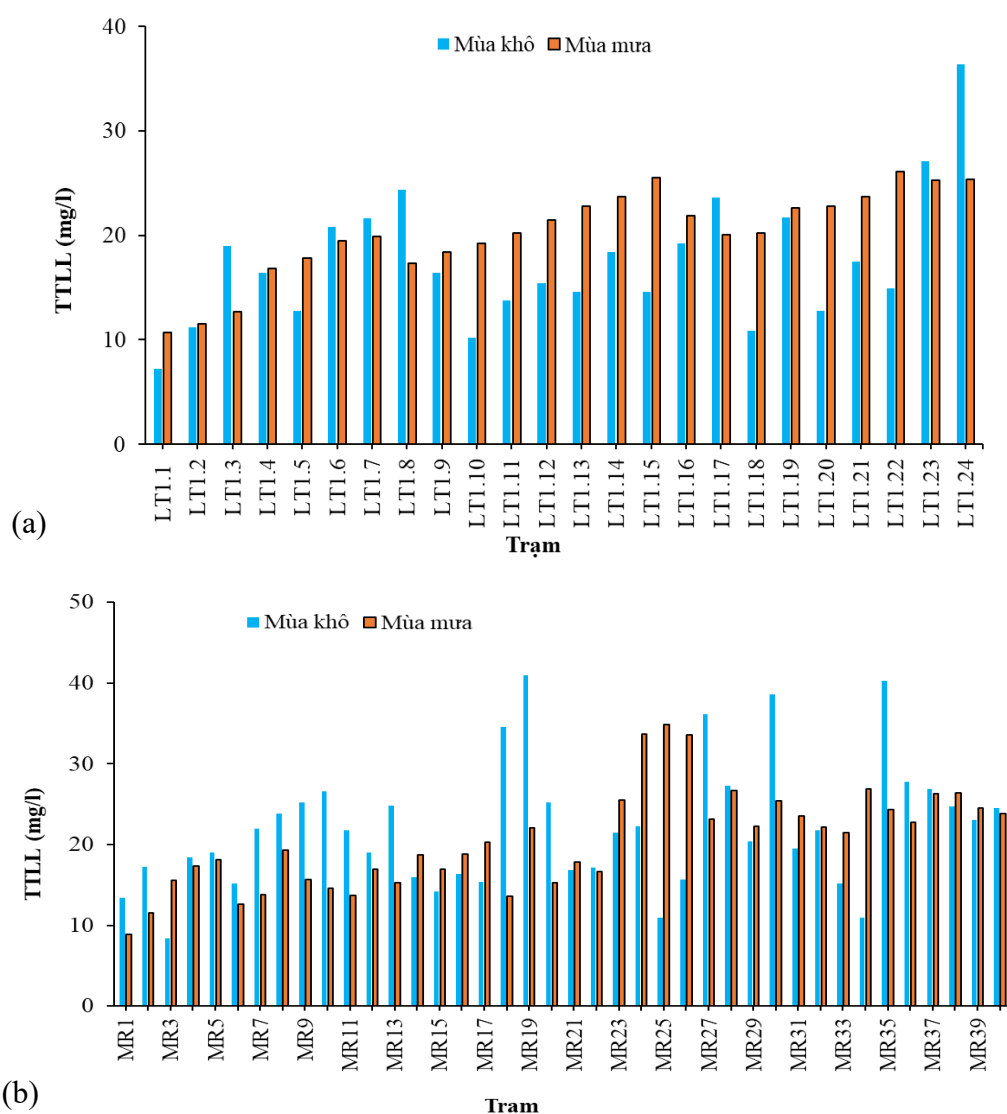
Trong tháng 1/2021 (mùa khô), COD trung bình tại các trạm đều lớn hơn 3,3 mg/l, ngoại trừ trạm LT5 (1,89 mg/l). Tại các trạm, giá trị trung bình không có sự khác nhau nhiều, lớn nhất tại LT3 (3,74 mg/l), sau đó đến LT1 (3,58 mg/l); LT4 (3,47 mg/l), LT2 (3,3 mg/l) và nhỏ nhất tại trạm LT5 (1,89 mg/l). COD cực đại dao

động từ 2,5-5,48 mg/l, lớn nhất tại trạm LT1 và LT2 (5,48 mg/l) và nhỏ nhất vẫn tại trạm LT5 (2,5 mg/l). Giá trị COD cực tiểu tại các trạm đều nhỏ hơn 2,5 mg/l, đặc biệt tại trạm LT5 chỉ 1,5 mg/l. Ở các trạm mặt rộng (MR1-MR40), giá trị COD trong mùa khô biến động mạnh hơn mùa mưa. Giá trị COD dao động từ 2,37 mg/l đến 6,27 mg/l, trung bình 4,2 mg/l vào mùa khô (hình 1.17 c, d).

1.2.3.4. Trầm tích lơ lửng

Kết quả quan trắc theo quý của Ban Quản lý vịnh Hạ Long giai đoạn 2016-2020 chỉ ra trầm tích lơ lửng (TTLL) ở khu vực CB-HL hầu hết trong phạm vi cho phép theo QCVN10:2023/BTNMT đối với nước biển nhằm bảo vệ môi trường sống trong nước (<50mg/l). Tuy nhiên tại khu vực cảng Vũng Đục và Nhiệt điện-Tuyên than có hàm lượng TTLL vượt GHCP ở hầu hết các đợt quan trắc từ năm 2016 đến 2019, ngoại trừ năm 2020 hàm lượng TTLL nhỏ hơn 10mg/l do ảnh hưởng của đại dịch Covid19 nên các hoạt động du lịch, kinh tế chậm lại.

Phân tích từ số liệu đo tại 5 trạm liên tục (LT1-LT5) ở khu vực vịnh Hạ Long cho thấy hàm lượng TTLL dao động từ 7,0 mg/l đến 51 mg/l. Hầu như hàm lượng TTLL đều nằm trong GHCP theo QCVN10:2023/BTNMT đối với khu bảo tồn thủy sinh (50 mg/l). Hàm lượng TTLL. Vào đợt quan trắc tháng 1/2021 (mùa khô), hàm lượng TTLL trung bình của các trạm LT1, LT2, LT3, LT4, LT5 lần lượt là 17,5 mg/l; 18,8 mg/l; 25,4 mg/l; 23,7 mg/l; 8,5 mg/l. Hàm lượng TTLL trung bình trong tháng 1/2021 (mùa khô) tại các trạm LT1, LT2, LT3, LT4, LT5 lần lượt có các giá trị là 17,5 mg/l; 18,8 mg/l; 25,4 mg/l; 23,7 mg/l; 8,5 mg/l. Trong khi đó vào mùa mưa, TTLL tại các trạm là 20,2 mg/l (LT1); 19,1 mg/l (LT3); 22,2 mg/l (LT3); 20,9 mg/l (LT4); 11,7 mg/l (LT5), hình 1.16a.



Hình 1. 16. Hàm lượng TTLL từ kết quả khảo sát: (a) LT1, (b) trạm mặt rộng

Kết quả đo vào mùa khô của 40 trạm mặt rộng (MR1-MR40) ở vịnh Hạ Long, TTLL trung bình các trạm là 21,9 mg/l. Hàm lượng TTLL lớn nhất tại trạm MR19, với giá trị 41 mg/l và nhỏ nhất chỉ khoảng 8,4 mg/l (MR3). Hàm lượng TTLL trung bình là 20,5 mg/l vào mùa mưa, nhỏ hơn không đáng kể so với mùa khô. Hàm lượng TTLL lớn nhất và nhỏ nhất vào mùa này lần lượt là 34,9 mg/l (MR25) và 8,9 mg/l (MR1), xem [hình 1.16b](#). Hàm lượng TTLL đều nằm trong GHCP theo QCVN10:2023/BTNMT đối với khu bảo tồn thủy sinh (50mg/l).

Chương 2. TÀI LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Tài liệu

Để phục vụ cho các nội dung nghiên cứu của luận án, các nhóm tài liệu sau đây đã được sử dụng, bao gồm:

Nhóm tài liệu về điều kiện tự nhiên, KTXH, môi trường ở vùng biển CB-HL:

- Số liệu KTXH từ niên giám thống kê tỉnh Quảng Ninh và thành phố Hải Phòng qua các năm trong giai đoạn 2018-2023 được dùng để đánh giá đặc điểm KTXH ở khu vực CB-HL.

- Số liệu mực nước tại trạm Hòn Dấu từ năm 1961-2020, trạm Bãi Cháy từ 1981-2020 và nhiệt độ nước tại trạm Hòn Dấu và Bãi Cháy giai đoạn 1995-2000 được sử dụng để đánh giá xu hướng dâng của mực nước biển và xu hướng tăng của nhiệt độ nước.

- Số liệu khảo sát của các đề tài “Nghiên cứu phát triển và áp dụng bộ công cụ mô hình 3D tích hợp thủy nhiệt động lực-CLN phục vụ giám sát và quản lý tai biến môi trường dưới tác động của con người và biến đổi khí hậu”, mã số mã số NĐT.97.BE/20 và “Nghiên cứu tác động do sự gia tăng nguồn ô nhiễm hữu cơ, dinh dưỡng từ hoạt động của con người và BDKH đến năng suất sơ cấp vùng biển ven bờ CB-HL”, để đánh giá hiện trạng môi trường nước ở khu vực ven bờ CB-HL. Các số liệu đo đạc bao gồm:

+ Số liệu độ muối, dòng chảy, nhiệt độ, độ đục, mực nước giá trị BOD, COD, NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} tại 5 trạm liên tục (đo 3h/lần liên tục trong 3 ngày đêm), 40 trạm mặt rộng và 40 trạm nguồn thải trong mùa khô và mùa mưa ở khu vực CB-HL của đề tài NĐT.97.BE/20 (hình 1.10a).

+ Số liệu về dòng chảy, các chất hữu cơ (COD, BOD), dinh dưỡng (NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}), nhiệt độ và độ muối ở Cát Bà trong mùa mưa và mùa khô. Trong mỗi mùa, đã đo đạc tại 02 trạm liên tục (3h/lần trong 1 ngày đêm) và 20 điểm khảo sát mặt rộng tại khu vực ven bờ Cát Bà của đề tài VAST05.05/21-22 (hình 1.10b).

Nhóm tài liệu sử dụng để thiết lập mô hình:

- Số liệu độ sâu và đường bờ ở khu vực được số hóa từ bản đồ địa hình UTM hệ tọa độ địa lý VN 2000 tỷ lệ 1:50000 và 1:25000 do Cục Đo đạc Bản đồ (Bộ Tài

nguyên và Môi trường Việt Nam) xuất bản năm 2017. Địa hình và độ sâu khu vực phía ngoài và lân cận cũng như vùng vịnh Bắc Bộ được sử dụng từ cơ sở dữ liệu GEBCO -1/8 (General Bathymetric Chart of the Ocean) của Trung tâm tư liệu Hải dương học Vương quốc Anh (British Oceanographic Data Centre-BODC) [114-115].

- Số liệu đo mực nước tại trạm Hòn Dấu, Bãi Cháy năm 2021 (tần suất 1 giờ/lần) được dùng để hiệu chỉnh mô hình. Các hằng số điều hòa thủy triều bao gồm: M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , MF , MM , M_4 , MS_4 , MN_4 từ cơ sở dữ liệu của mô hình thủy triều toàn cầu TPXO8, có độ phân giải không gian $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ được sử dụng để thiết lập biên mở phía biển của mô hình TĐL [116].

Bảng 2. 1. Tải lượng các chất ô nhiễm ở khu vực CB-HL vào năm 2019 và 2030 (tấn/năm) [40]

Chất	Sinh hoạt	Nuôi trồng thủy sản	Chăn nuôi	Công nghiệp	Tổng
Năm 2019					
COD	18688,6	201,53	13079,4	160965	192934,5
BOD	11680,4	57,21	8179,8	57535,3	77452,7
$\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$	28,5	0,37	64,1	672	764,99
NH_4^+	854,7	8,87	1539,5	16504,4	18907,48
PO_4^{3-}	85,5	14,92	282,9	462,7	846
Năm 2030					
COD	32092,3	206,5	16921,3	327670,5	376890,6
BOD	20057,6	58,7	10582,8	120742,8	151441,8
$\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$	48,9	0,4	85,1	923,6	1058,04
NH_4^+	1467,6	9,1	2042,6	23210,2	26729,49
PO_4^{3-}	146,7	15,3	367,5	988,6	1518,1

- Số liệu khí tượng: trường khí tượng (gió, áp suất, nhiệt độ không khí) được lấy từ cơ sở dữ liệu khí tượng ECMWF Re-analysis-5 (ERA5) [117], với độ phân giải $0.125^\circ \times 0.125^\circ$. Ngoài ra, dữ liệu về nhiệt độ nước và độ mặn ở vịnh Bắc Bộ được thu thập từ Chương trình quan trắc trái đất Copernicus của cộng đồng Châu Âu (European Union's Earth Observation Programme: Copernicus Marine

Environment Monitoring Service 2021). Những dữ liệu này là sự kết hợp của mô hình số, quan trắc và dữ liệu hình ảnh vệ tinh, với độ phân giải $1/12^\circ$ (khoảng 8 km) [118].

- Tài liệu thủy văn sông: chuỗi số liệu đo lưu lượng nước sông do Trung tâm Khí tượng Thủy văn Quốc gia thực hiện tại một số trạm thủy văn trong khu vực như Cửa Cấm, Trung Trang, Quyết Chiến và số liệu lưu lượng trung bình tháng tại các sông khác từ các dự án, đề tài thực hiện ở khu vực.

- Số liệu khảo sát bao gồm dòng chảy và các chất gây ô nhiễm ở khu vực nghiên cứu của đề tài mã số NĐT.97.BE/20 và VAST05.05/21-22 được sử dụng để hiệu chỉnh và kiểm chứng mô hình.

- Tổng tải lượng chất ô nhiễm năm 2019 và tổng tải lượng các chất ô nhiễm dự báo vào năm 2030 ở khu vực CB-HL được tham khảo từ nhiệm vụ NĐT.97.BE/20 (bảng 2.1). Ngoài ra, các kết quả tính toán trong các giai đoạn năm 2010 và hiện nay (tính đến 2019) cũng cho thấy xu thế thu hẹp không gian do hoạt động lấn biển ở khu vực. Chỉ trong khoảng 10 năm, khu vực vịnh Cửa Lục đã bị lấn biển với tổng cộng lên tới 419,2 ha. Trong khi đó, ở vùng ven bờ Bãi Cháy-Tuần Châu, diện tích mặt nước giai đoạn trước năm 2010 là 4770,3 ha, nhưng do các hoạt động lấn biển diễn ra mạnh mẽ trong những năm gần đây, đến năm 2019, diện tích mặt nước khu vực ven bờ này đã thu hẹp xuống còn 3546,1 ha, giảm tới 1224,2 ha (bảng 2.2). Kịch bản tăng nhiệt độ và NBD được tham khảo từ Kịch bản BĐKH của Bộ Tài nguyên và Môi trường năm 2019.

Bảng 2. 2. Diện tích lấn biển vào năm 2010 và 2019 ở khu vực CB-HL và lân cận [40]

Khu vực	2010	2019	Chênh lệch giảm/điện tích lấn biển
Vịnh Cửa Lục	2288,0	1868,8	419,2
Bãi Cháy-Tuần Châu	4770,3	3546,1	1224,2
Cầm Phả	7132,5	6553,8	578,8
Cầm Phả-Vân Đồn	16851,9	16060,8	791,1

2.2. Cách tiếp cận

2.2.1. Tiếp cận hệ thống

Theo cách tiếp cận hệ thống, vùng biển ven bờ CB-HL được coi là một hệ thống thủy vực ven bờ có độ khép kín tương đối về mặt hình thái. Đó cũng là một hệ động lực thống nhất, có sự phân hoá nhất định theo không gian và biến đổi theo thời gian. Hệ thống này đặc trưng bởi hoàn lưu nội tại, có quan hệ dòng vật chất với hệ lực địa phía trong và hệ biển hở phía ngoài. Hệ thống thủy vực ven bờ này nhận nước, chất gây ô nhiễm từ lục địa, tích lũy và chuyển hoá ở vùng ven bờ, đồng thời cũng trao đổi với khu vực phía ngoài. Các chất gây ô nhiễm ở khu vực không chỉ chịu tác động của các quá trình sinh - địa - hóa mà còn chịu tác động của các quá trình động lực, các hoàn lưu của khu vực.

Cũng theo cách tiếp cận này, lượng chất ô nhiễm phát sinh không chỉ nằm yên tại nguồn mà sẽ di chuyển, phát tán ra các khu vực khác nhau theo chuyển động của các khối nước. Chính vì vậy, việc nghiên cứu, đánh giá quá trình vận chuyển, phát tán các chất ô nhiễm do hoạt động KTXH và BDKH tại khu vực đóng vai trò quan trọng cho nghiên cứu dự báo ảnh hưởng của con người và BDKH đến môi trường nước ở khu vực nghiên cứu.

2.2.2. Tiếp cận từ mô hình

Quá trình lan truyền, phát tán chất ô nhiễm từ lục địa và nội tại khu vực CB-HL đều mang tính chất địa phương, chịu sự chi phối của các quá trình TĐL - yếu tố luôn biến động mạnh theo không gian và thời gian. Các kết quả đo đạc có thể cung cấp thông tin về hiện trạng tại vị trí và thời điểm khảo sát. Tuy nhiên để có được cái nhìn toàn diện về các chất ô nhiễm ở toàn bộ khu vực thì cần khảo sát nhiều vị trí gây tốn kém về chi phí, nhân lực. Trong khi đó các mô hình toán hiện nay có thể tích hợp được hầu hết các quá trình tác động liên quan đến đối tượng được nghiên cứu thông qua các tham số, hệ số trong các hệ phương trình tính toán.

Với cách tiếp cận này, sẽ đánh giá và dự báo được tác động của hoạt động KTXH và BDKH đến CLN ở khu vực theo thời gian và không gian một cách toàn diện, nhanh chóng, đảm bảo độ tin cậy. Đặc biệt mô hình toán còn là công cụ hữu hiệu giúp đưa ra các dự báo tác động riêng lẻ chỉ do hoạt động của KTXH hoặc chỉ do BDKH hoặc tác động tích hợp cả hoạt động của KTXH và BDKH đến CLN khu

vực CB-HL. Mô hình được sử dụng để mô phỏng và dự báo tác động do hoạt động KTXH và BĐKH đến CLN ở vùng biển CB-HL là Delf3D.

2.2.3. Tiếp cận liên ngành

Tác động do hoạt động KTXH đến CLN ở khu vực CB-HL không chỉ do một ngành, lĩnh vực mà từ nhiều hoạt động KTXH khác nhau như nông nghiệp, thủy sản, du lịch, dân số, công nghiệp.... Bên cạnh đó, vùng biển CB-HL cũng chịu những ảnh hưởng của BĐKH như tăng nhiệt độ và NBD. Tất cả những ảnh hưởng này sẽ cùng tác động đến CLN ở khu vực. Do vậy khi đánh giá cũng như dự báo tác động của các hoạt động KTXH và BĐKH đến CLN ở khu vực cần dựa trên phương pháp tiếp cận liên ngành và tổng hợp.

2.2.4. Kế thừa các tài liệu đã có

Luận án đã kế thừa nguồn tài liệu, dữ liệu phong phú, có hệ thống và các kết quả đo đạc, khảo sát có giá trị liên quan đến các quá trình TĐL, các quá trình sinh địa hóa, nguồn thải, hiện trạng môi trường nước; các số liệu điều tra, quan trắc về khí tượng-thủy văn, địa hình đáy, trầm tích... ở vùng biển CB-HL. Đặc biệt là việc kế thừa các nguồn tài liệu số liệu từ các dự án, đề tài đã thực hiện ở khu vực này như nhóm các đề tài đã được thực hiện trong giai đoạn 2008-2009, bao gồm ĐT.MT.2008.498 (Đánh giá hiện trạng môi trường và xác định các vấn đề ưu tiên phục vụ quản lý tổng hợp vùng bờ biển Hải Phòng), ĐT.MT.2008.499 (Đánh giá khả năng tích tụ các chất ô nhiễm hữu cơ bền và kim loại nặng trong môi trường nước, trầm tích, sinh vật ven bờ biển Hải Phòng), ĐT.MT.2008.500 (Nghiên cứu đánh giá lan truyền các chất ô nhiễm khu vực cửa sông ven biển hải phòng bằng mô hình toán học). Đề tài thực hiện giai đoạn 2009-2010 “Nghiên cứu đánh giá sức tải môi trường và đề xuất các giải pháp quản lý, bảo vệ môi trường vịnh Hạ Long - Bái Tử Long”; Đề tài thực hiện năm 2020-2022 “Đánh giá tải lượng và vận chuyển chất gây ô nhiễm từ thượng nguồn đến các sông lớn tại Hải Phòng” và Đề tài nghị định thư Việt-Bỉ “Nghiên cứu phát triển và áp dụng bộ công cụ mô hình 3D tích hợp thủy nhiệt động lực-CLN phục vụ giám sát và quản lý tai biến môi trường dưới tác động của con người và BĐKH”.

Cách tiếp cận này cho phép khai thác và kế thừa các tài liệu và kinh nghiệm đã có nhằm tiết kiệm thời gian và kinh phí nghiên cứu. Ngoài ra, việc so sánh tài liệu

lịch sử còn rất có ý nghĩa cho việc đánh giá các yếu tố, quá trình xảy ra vùng biển ven bờ khu vực CB-HL.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

2.3.1. Phương pháp phân tích thống kê

Trong luận án này, phương pháp phân tích thống kê được sử dụng để phân tích các đặc trưng thống kê của mực nước, nhiệt độ nước biển, nhằm đánh giá những biểu hiện của BĐKH ở khu vực CB-HL. Phương pháp này được sử dụng để phục vụ cho nội dung nghiên cứu 3.1 và các nội dung liên quan khác của luận án.

2.3.1.1. Phương pháp kiểm nghiệm tham số Mann-Kendal

Phương pháp kiểm nghiệm tham số Mann- Kendall là phương pháp được phát triển bởi Mann [119] và Kendall [120]. Đây là phương pháp phi tham số để xác định xu hướng của chuỗi số liệu theo thời gian [121-123]. Trong khi phương pháp tham số dựa vào mô hình tuyến tính và lý thuyết thông thường, do đó cần giả định rằng các phần dư được phân bố chuẩn và độc lập [121]. Phương pháp MK không bị ảnh hưởng bởi phân bố thực tế của dữ liệu và ít nhạy cảm hơn với các giá trị ngoại lai, do đó nó phù hợp để phát hiện xu hướng của chuỗi số liệu theo thời gian [124-126]. Kiểm nghiệm MK và độ dốc của Sen được áp dụng bởi nhiều nhà nghiên cứu [127-130] để xác định các xu hướng đơn điệu trong các tập dữ liệu theo thời gian ở nhiều lĩnh vực khác nhau, bao gồm khoa học, y học và khí tượng học [121].

Kiểm nghiệm Mann-Kendall tránh các giá trị cực đại cực bộ của chuỗi dữ liệu. Giả thuyết không, H_0 , là dữ liệu so sánh độ lớn tương đối của các phần tử trong chuỗi dữ liệu, tập hợp các giá trị không theo bất kỳ xu hướng nào. Giả thuyết thay thế, H_1 , là dữ liệu theo một xu hướng đơn điệu rõ ràng.

Thống kê S của Mann-Kendall được tính bằng cách phân tích tất cả các cặp số liệu trong tập dữ liệu. Tham số thống kê Mann-Kendall, S được tính như sau:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(X_j - X_i) \quad (1)$$

Trong đó X_j và X_i là các biến ngẫu nhiên (chia chuỗi số liệu theo thời gian đã cho X thành hai chuỗi, như $X_1, X_2, \dots, X_i$, và $X_{i+1}, X_{i+2}, \dots, X_j$). Trong nghiên cứu này, X cũng là các số liệu trung bình tháng của mực nước (hoặc nhiệt độ nước).

$$\text{Sign}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } X_j - X_i > 0 \\ 0 & \text{if } X_j - X_i = 0 \\ -1 & \text{if } X_j - X_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Phương sai của S, $VAR(S)$ được tính bởi:

$$VAR(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^m t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (3)$$

Thống kê Z_s được tính như sau:

$$Z_S = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{for } S > 0 \\ 0 & \text{for } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{for } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó n là số lượng điểm dữ liệu, m là số lượng giá trị duy nhất (không có giá trị trùng lặp) và t_i là tần suất của giá trị thứ i. Nếu $|Z_s|$ lớn hơn $Z_{\alpha/2}$, trong đó α đại diện cho mức ý nghĩa đã chọn ($\alpha=10\%$ tại mức độ tin cậy 90% với $Z_{0.05} = 1.65$; $\alpha=5\%$ tại mức độ tin cậy 95% với $Z_{0.025} = 1.96$; $\alpha=1\%$ tại mức độ tin cậy 99% với $Z_{0.005} = 2.58$), thì giả thuyết H_0 không có giá trị, chuỗi số liệu có xu hướng.

Z có giá trị dương cho thấy xu hướng tăng và giá trị âm cho thấy xu hướng giảm. H_0 bị bác bỏ nếu $P < \alpha$.

2.3.1.2. Phương pháp đánh giá độ dốc Sen's Slope

Cách tính độ dốc Sen được phát triển vào năm 1950 bởi Theil và sau đó được Sen phát triển vào năm 1968 [131], theo công thức:

$$Q = \frac{x'_i - x_i}{i' - i} \quad (5)$$

Trong đó: Q là độ dốc giữa hai điểm x_i và x'_i ($i=1,2,3..n$); x'_i dữ liệu đo tại thời điểm i' ; x_i dữ liệu đo tại thời điểm i ; i' thời gian sau thời gian i . Trong nghiên cứu này, các giá trị x là mực nước trung bình tháng.

Ước tính độ dốc của Sen là do độ dốc trung bình (Q'), được hiện hiện theo công thức:

$$Q' = \begin{cases} Q \left[\frac{N+1}{2} \right], & N = \{2k + 1, \forall k \in \mathbb{Z}\} \\ \frac{Q[N+1] + Q[N+2]}{2}, & N = \{2k, \forall k \in \mathbb{Z}\} \end{cases} \quad (6)$$

Nếu Q' mang giá trị dương thì giá trị của độ dốc của Sen cho thấy xu hướng tăng và giá trị âm cho thấy xu hướng giảm [132].

2.3.2. Phương pháp mô hình

Phương pháp mô hình được sử dụng để mô phỏng, dự báo các quá trình thủy động lực, chất lượng nước. Phương pháp này phục vụ cho các nội dung nghiên cứu 3.2, 3.3 và 3.4.

2.3.2.1. Cơ sở lý thuyết của mô hình

a) Mô hình thủy động lực

Trong nghiên cứu này, mô hình Delft3D để mô phỏng quá trình TĐL và CLN ở khu vực CB-HL. Đây là mô hình tổng hợp 3 chiều (3D) được nghiên cứu và phát triển bởi Viện Thủy lực Delft (Hà Lan), gồm module TĐL (Delft3D-Flow), sóng (Delft3D-Wave), vận chuyển bùn cát (Delft3D-Sed), CLN (Delft3 - Waq) và sinh thái học (Delft3D - Eco). Mô hình này mô phỏng tốt các điều kiện TĐL-sóng, vận chuyển bùn cát, CLN ở vùng ven bờ [133] và đã được ứng dụng nhiều trong các nghiên cứu liên quan ở Việt Nam .

Module TĐL (Delft3D-Flow) có thể tính toán kết hợp đồng thời (online coupling) với các module khác như sóng (Delft3D-Wave), vận chuyển trầm tích (Delft3D-Sed). Đối với mô hình sinh thái-CLN, module TĐL và CLN có thể được tính toán riêng biệt. Kết quả của mô hình TĐL sẽ được dùng để tính toán mô hình sinh thái-CLN.

Cơ sở toán học của mô hình TĐL trong Delft3D là giải phương trình Navier Stokes với chất lỏng không nén trong nước nông và phương pháp xấp xỉ Boussinesq. Sự biến đổi của thành phần vận tốc thẳng đứng trong phương trình động lượng được bỏ qua. Với mô hình 3 chiều, thành phần vận tốc thẳng đứng được tính toán từ phương trình liên tục [133].

Phương trình liên tục cho độ sâu trung bình (trong hệ tọa độ cong trục giao):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U \sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)V \sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \quad (7)$$

trong đó: ξ, η : là các thành phần bình lưu trong hệ tọa độ cong trục giao.

$\sqrt{G_{\xi\xi}}, \sqrt{G_{\eta\eta}}$: là các hệ số chuyển đổi từ hệ tọa độ cong trục giao sang hệ tọa độ Đề các;
 d : là độ sâu tại điểm tính (độ sâu của nước dưới đường chuẩn (0 hải đồ)); ζ : là mực nước tại điểm tính (mực nước trên một đường chuẩn); U, V : lần lượt là các thành

phần vận tốc trung bình theo các hướng ξ , η ; q_{in} và q_{out} : lần lượt là nguồn nước đưa vào và ra trên 1 đơn vị thể tích; H : là độ sâu tại điểm tính ($H = d + \zeta$); P , E : lần lượt là lượng mưa và bốc hơi.

Trong phương trình (7):

$\frac{\partial \zeta}{\partial t}$ - biểu diễn sự thay đổi mực nước theo thời gian

$\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi}$ biểu diễn sự thay đổi của vận tốc dòng chảy trung bình

U theo hướng ξ

$\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta}$ biểu diễn sự thay đổi của vận tốc dòng chảy trung bình

V theo hướng η

Với Q thể hiện sự thêm vào hay mất của nguồn nước, sự bốc hơi và mưa trên 1 đơn vị diện tích:

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E \quad (8)$$

b) Mô hình chất lượng nước

Module thủy Delft3D-Waq (CLN) là module Waq của hệ thống mô hình Delft3D. Phần mềm thương mại của Viện thủy lực Hà Lan đã được Viện Tài nguyên và Môi trường biển mua bản quyền phục vụ công tác nghiên cứu và đào tạo. Bộ phần mềm Delft3D bao gồm nhiều mô-đun để tính toán các yếu tố khác nhau như dòng chảy, sóng, thủy triều, CLN, sinh thái biển, hình thái học, vận chuyển trầm tích... Các mô-đun này có khả năng triển khai độc lập hoặc được điều khiển bằng một chương trình chính liên kết các mô-đun khác nhau để thực hiện các tính toán, mô phỏng phức tạp. Delft-Waq là module được sử dụng để tính toán và mô phỏng sự lan truyền, biến đổi và các quá trình liên quan tới CLN.

Cơ sở toán học của mô hình lan truyền ô nhiễm là phương trình lan truyền và khuếch tán vật chất [133]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} - u_x C \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} - u_y C \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} - u_z C \right) \quad (9)$$

Nếu tính cả nguồn đưa từ ngoài vào thì:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} - u_x C \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} - u_y C \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} - u_z C \right) + F(C, t) \quad (10)$$

Trong các phương trình trên: D_x, D_y, D_z là các hệ số khuếch tán theo các phương x, y, z ; $F(C, t)$ là nguồn thêm vào hoặc mất đi; C : hàm lượng vật chất

Mô hình CLN được chia thành các nhóm, mỗi nhóm thường bao gồm một hoặc nhiều chất có cùng, hoặc tương tự về đặc tính vật lý, hóa học. Ví dụ, nhóm chất dinh dưỡng bao gồm Ni-tơ-rát, A-mô-ni, Phốt-phát, Si-líc được gộp vào một nhóm vì chúng được sử dụng trong quá trình quang hợp, tạo ra năng suất sinh học sơ cấp. Trong khi đó muối, clo và các vật chất bảo toàn là những chất đặc biệt trong mô hình CLN vì chúng không tham gia vào các quá trình CLN mà chỉ tham gia vào quá trình vận chuyển. Do không tham gia vào các quá trình biến đổi CLN nên các chất này sẽ giúp ta phân biệt được giữa ảnh hưởng của quá trình vận chuyển và sự thay đổi do các quá trình CLN đối với các chất khác nhau [133].

Các quá trình cơ bản: Việc tính toán, mô phỏng nhóm chất hữu cơ trong nước được thực hiện thông qua bài toán chuẩn về ô-xy hòa tan đã được Delft-3D xây dựng dựa trên nền tảng mô hình của Streeter và Phelps (1925). Trong bài toán chuẩn này, ngoài DO, có thêm hai biến trạng thái được sử dụng là chất hữu cơ thể hiện thông qua chỉ số BOD và A-mô-ni (NH_4^+). Bài toán này thực hiện mô phỏng các quá trình: phân hủy của các chất hữu cơ, quá trình ni-tơ-rát hóa NH_4^+ và sự bổ sung ô-xy hòa tan thông qua sự trao đổi với không khí (reaeration). Ngoài các quá trình nêu trên cũng tính đến cả lượng ô-xy hòa tan được sử dụng trong các quá trình phân hủy các chất hữu cơ diễn ra trong lớp trầm tích bề mặt (SOD).

2.3.2.2. Thiết lập mô hình

a) Mô hình thủy động lực

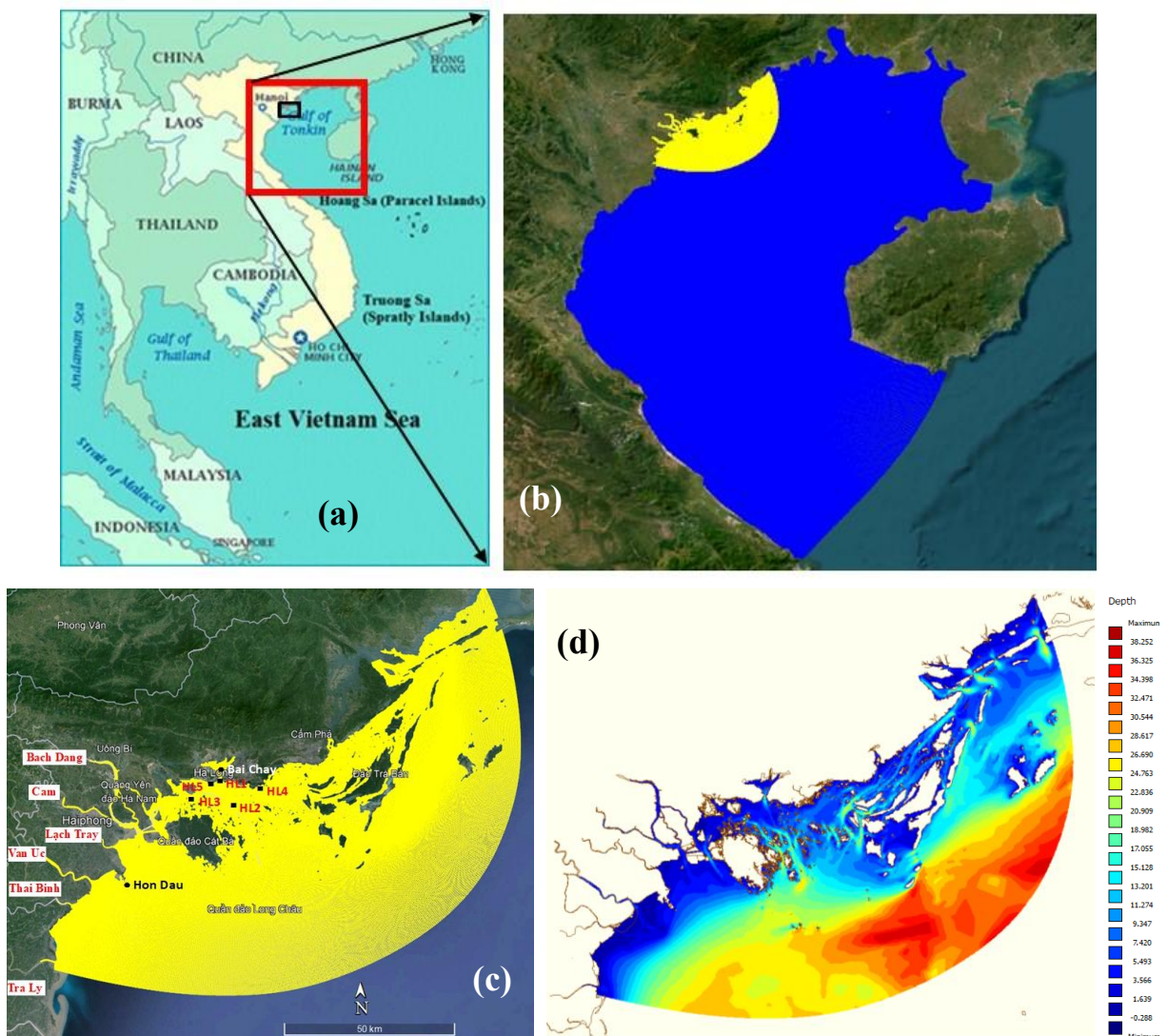
Lưới tính và lưới độ sâu của mô hình: Mô hình TĐL cho khu vực cửa sông ven bờ CB-HL sử dụng lưới cong trục giao. Mô hình có phạm vi tính toán bao gồm khu vực cửa sông ven biển trải dài từ vùng biển phía bắc vịnh Hạ Long đến phía nam cửa Trà Lý. Kích thước của miền tính khoảng 144 km theo chiều đông - tây và 120 km theo chiều bắc nam, đông nam, với diện tích của lưới tính (không kể đất) khoảng 7690km² được chia thành 696 x 306 điểm tính với kích thước của ô lưới biến đổi từ 17,7 đến 670,3 m (hình 2.1). Theo chiều thẳng đứng, các ô lưới

sử dụng hệ toạ độ σ , được chia thành 5 lớp nước với tỷ lệ đều nhau.

Số liệu địa hình sau khi xử lý, được gắn với lưới tính của mô hình tạo ra lưới độ sâu cho mô hình tính ở khu vực. Lưới độ sâu được xử lý và phân tích bằng phần mềm QUICKIN, tạo thành dưới dạng file số.

Điều kiện ban đầu: Kết quả mô phỏng các lần chạy trước đó trong mô hình Delft3D được sử dụng cho điều kiện ban đầu của mô hình thông qua các restart file. Đối với mô hình cho vùng biển CB-HL, điều kiện ban đầu của các kịch bản là các kết quả tính toán trước đó 1 tháng.

Điều kiện biên tại các biên mở: Có hai loại điều kiện biên mở được dùng trong mô hình: đó là các biên sông (gồm những sông chính vào khu vực như: Bạch Đằng, Cấm, Lạch Tray, Văn Úc, Thái Bình, Trà Lý, một số biên sông ở khu vực vịnh Cửa Lục, Cửa Ông) và biên mở biển.



Hình 2. 1. Vị trí khu vực Cát Bà-Hạ Long (a): Lưới thô-màu xanh (b), lưới chi tiết (c) và lưới độ sâu (d)

Đối với các biên sông, sử dụng các giá trị lưu lượng nước, độ mặn, nhiệt độ, hàm lượng chất gây ô nhiễm trung bình theo mùa. Kết quả tính dao động mực nước, độ muối, nhiệt độ từ mô hình phía ngoài được sử dụng cho biên biển (phương pháp NESTHD). Số liệu nhiệt muối của mô hình từ cơ sở dữ liệu Copernicus với độ phân giải $1/12^\circ$.

Các quá trình cơ bản: Mô hình tính được lựa chọn kiểu liên kết đồng thời của quá trình TĐL- sóng - TTLL. Trong đó các yếu tố chính được tính đến bao gồm: độ muối; nhiệt độ; ảnh hưởng của gió bề mặt; tương tác với sóng (tính đồng thời kết hợp sóng-online coupling).

Điều kiện khí tượng: Trong nghiên cứu này, có xét tới ảnh hưởng của gió, độ ẩm, lượng mưa, bức xạ, nhiệt độ không khí, áp suất khí quyển từ cơ sở dữ liệu ERA5 với độ phân giải $0,125^\circ \times 0,125^\circ$.

Mô hình sóng

Mô hình sóng trong nghiên cứu này được thiết lập chạy đồng thời (online coupling) với mô hình TĐL và vận chuyển trầm tích. Tại mỗi thời điểm tính toán (1h), mô hình sóng sẽ sử dụng lưới tính, trường gió, các kết quả tính độ sâu, mực nước, dòng chảy của mô hình TĐL.

- Điều kiện biên mở của mô hình sóng còn được tham khảo từ kết quả dự báo sóng Wave Climate ở vùng vịnh Bắc Bộ [134] trong năm 2019-2021.

- Kiểu ma sát đáy trong mô hình sóng ở nghiên cứu này được lựa chọn là phổ JONSWAP với hệ số ma sát đáy có giá trị 0,067 [133]. Mô hình B&J [135] được lựa chọn để tính ảnh hưởng của nước nông nơi diễn ra quá trình sóng đổ [133].

Các tham số tính toán khác của mô hình TĐL

- Các giá trị liên quan đến điều kiện rói được xác định do người dùng như là một hằng số, hoặc tham số thay đổi theo không gian hoặc tính toán với cách tiếp cận HLES (mô phỏng xoáy lớn bình lưu - Horizontal Large Eddy Simulation). Mô hình HLES gần đây đã được tích hợp trong hệ thống mô hình Delft3D theo lý thuyết của Uittenbogaard [136] và được thảo luận trong nghiên cứu của Van Vossen [137]. Mô hình khép kín rói 2 chiều và 3 chiều Delft3D lần lượt là mô hình HLES và mô hình k- ϵ . Mô hình khép kín k- ϵ cho thấy sự phù hợp với quan trắc trong khu vực cửa sông/vùng ven biển tốt hơn [138]. Do đó, mô hình khép kín rói 3 chiều k- ϵ được

sử dụng trong nghiên cứu này.

b) Mô hình chất lượng nước

Mô hình CLN được thiết lập 3 chiều (3D) với 3 lớp độ sâu: tầng mặt, giữa và tầng đáy. Phạm vi miền tính bao phủ toàn bộ vùng biển khu vực vịnh Bắc Bộ. Mô hình CLN sử dụng kết quả từ mô hình TĐL. Đó là các kết quả:

- Phạm vi miền tính, lưới tính, độ sâu khu vực
- Kết quả tính mực nước, biến đổi độ sâu theo thủy triều của cột nước khu vực tính toán.

- Kết quả tính của trường dòng chảy theo các lớp độ sâu
- Kết quả tính phân bố và biến động của các trường nhiệt độ- độ muối

Các đối tượng tính toán mô phỏng, trong báo cáo này, các đối tượng tính toán chính chủ yếu là:

- Oxy hòa tan (DO); Nhóm các chất hữu cơ (BOD, COD)
- Nhóm các chất dinh dưỡng của Nitơ (NH_4^+ , NO_3^-), Phot pho (PO_4^{3-})

Điều kiện biên của mô hình CLN: dựa trên các kết quả hàm lượng các nhóm chất gây ô nhiễm thu thập được từ các nguồn khác nhau.

Đối với mô hình CLN điều kiện ban đầu là hàm lượng vật chất cần mô phỏng tại thời điểm bắt đầu tính toán. Các giá trị này có thể mặc định bằng “0” hoặc người sử dụng chọn giá trị theo số liệu đã có. Trong nghiên cứu này, giá trị trung bình của các chất cần mô phỏng sẽ được dùng làm điều kiện ban đầu. Sau đó, điều kiện ban đầu của mô hình được lấy từ kết quả của lần chạy trước khoảng 1 tháng.

Dữ liệu nguồn thải của mô hình CLN được tính toán và phân bố chi tiết cho toàn vùng biển CB-HL. Lượng chất thải đưa vào khu vực được thiết kế và phân bố trên cơ sở kết quả tính toán tải lượng thải thời điểm 2019 và dự báo cho năm 2030.

2.3.2.3. Các kịch bản tính toán mô phỏng

Để đánh giá được những tác động KTXH của con người và BĐKH đến môi trường nước vùng nghiên cứu, các nhóm kịch bản mô phỏng đã được thiết lập, bao gồm:

Nhóm kịch bản hiệu chỉnh và kiểm chứng mô hình: được thiết lập cho các tháng trong năm 2021 với các điều kiện như địa hình, khí tượng, thủy văn, điều kiện môi trường,.. của năm 2021. Nhóm kịch bản này được dùng để hiệu chỉnh và kiểm chứng

mô hình thông qua việc so sánh với kết quả khảo sát đã thực hiện ở khu vực CB-HL vào tháng 1 và tháng 10 năm 2021.

Nhóm kịch bản hiện trạng: trên cơ sở số liệu về KT-XH như dân số, du lịch-dịch vụ, công nghiệp, nông nghiệp và khả năng xử lý các nguồn chất thải này để tính lượng chất thải đưa vào khu vực CB-HL vào năm 2019 (bảng 2.1), các kịch bản cho điều kiện hiện trạng đã được mô phỏng vào năm 2019 (bảng 2.3).

Nhóm kịch bản dự báo ảnh hưởng do hoạt động KTXH của con người: trên cơ sở phương hướng phát triển về KT-XH vào năm 2030 như dân số, ngành du lịch-dịch vụ, công nghiệp, nông nghiệp và khả năng xử lý các nguồn chất thải này để tính lượng chất thải đưa vào khu vực CB-HL (bảng 2.1). Nhóm kịch bản được thiết lập và mô phỏng đánh giá ảnh hưởng của sự gia tăng nguồn chất gây ô nhiễm vào năm 2030 đến vùng biển CB-HL. Vào năm 2050 được giả thiết, các chất thải do các hoạt động KT-XH đều được kiểm soát, xử lý và giữ nguyên giá trị như năm 2030. Ngoài ra, nghiên cứu cũng đánh giá ảnh hưởng của hoạt động lấn biển bằng cách thiết lập và mô phỏng kịch bản trước khi có hiện tượng lấn biển vào năm 2010 và so sánh với kịch bản hiện trạng vào năm 2019 (bảng 2.3).

Bảng 2. 3. Các nhóm kịch bản tính toán mô phỏng

Năm	Nhóm kịch bản 1: BDKH (RCP8.5)	Nhóm kịch bản 2: Ảnh hưởng của con người	Nhóm kịch bản 3: Kết hợp BDKH và con người
2019	Kịch bản hiện trạng (2019)		
2010		Trước khi có hoạt động lấn biển (2010)	
2030	- Tăng nhiệt độ không khí: 0.9 °C - NBD: 13 cm (2030bđkh)	Tăng nguồn các chất ô nhiễm: BOD (+ 95.5%); COD (+ 95.3%) NO ₃ (+ 38.3 %); NH ₄ (+ 41.4 %); PO ₄ (+ 79.4 %) (2030cn)	Kết hợp nhóm kịch bản 1 và 2 (2030cn-bđkh)
2050	- Tăng nhiệt độ không khí: 2°C - NBD: 26 cm (2050bđkh)	- Nguồn thải được kiểm soát và giữ nguyên như năm 2030	Kết hợp nhóm kịch bản 1 và 2 (2050cn-bđkh)

Nhóm kịch bản dự báo tác động của BĐKH: gồm tăng nhiệt độ và NBD vào năm 2030 và 2050 dựa trên kịch bản BĐKH của Bộ tài nguyên và môi trường năm 2020 (bảng 2.3).

Nhóm kịch bản dự báo ảnh hưởng tích hợp hoạt động KTXH của con người và BĐKH: tăng nhiệt độ, NBD và tăng các chất gây ô nhiễm vào năm 2030; tăng nhiệt độ, NBD vào năm 2050 và nguồn thải được kiểm soát và xử lý nên giá trị các chất gây ô nhiễm được giữ như năm 2030 (bảng 2.3).

Mỗi kịch bản được thiết lập và mô phỏng trong 4 mùa: mùa gió Đông Bắc (tháng 1), mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam (tháng 5), mùa gió Tây Nam (tháng 7) và mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc (tháng 10). Mỗi kịch bản được chạy với bước thời gian 30 giây.

2.3.2.4. Hiệu chỉnh kiểm chứng kết quả mô hình

Mức độ tin cậy trong các tính toán sẽ được đánh giá dựa trên các chỉ số như sai số bình phương trung bình (Root Mean Squared Error-RMSE), độ lệch BIAS và chỉ số Nash và Sutcliffe (NSE). Chỉ số NSE xác định mức độ chính xác của dự báo. Giá trị NSE nằm trong khoảng 0,75-1 thì các kết quả dự báo rất tốt; NSE nằm trong khoảng 0,65-0,75 thì kết quả dự báo tốt; NSE trong khoảng 0,5-0,65 thì kết quả dự báo thỏa mãn; $NSE < 0,5$ thì kết quả dự báo không thỏa mãn [139]. Khi NSE mang dấu âm (-), các đặc trưng trung bình tính từ chuỗi quan trắc cho kết quả dự báo tốt hơn từ mô hình [140]. BIAS chỉ sai số trung bình của dự báo và cho kết quả tốt khi BIAS tiến tới 0. RMSE đo lường sai số trung bình của mô hình so với dữ liệu thực tế. Giá trị RMSE càng nhỏ thì mô hình càng tốt [141].

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (9)$$

Trong đó: O_i - giá trị quan trắc, đo đạc; $\bar{O}$ - giá trị quan trắc trung bình; P_i - giá trị tính toán, dự báo; $\bar{P}$ - giá trị trung bình dự báo.

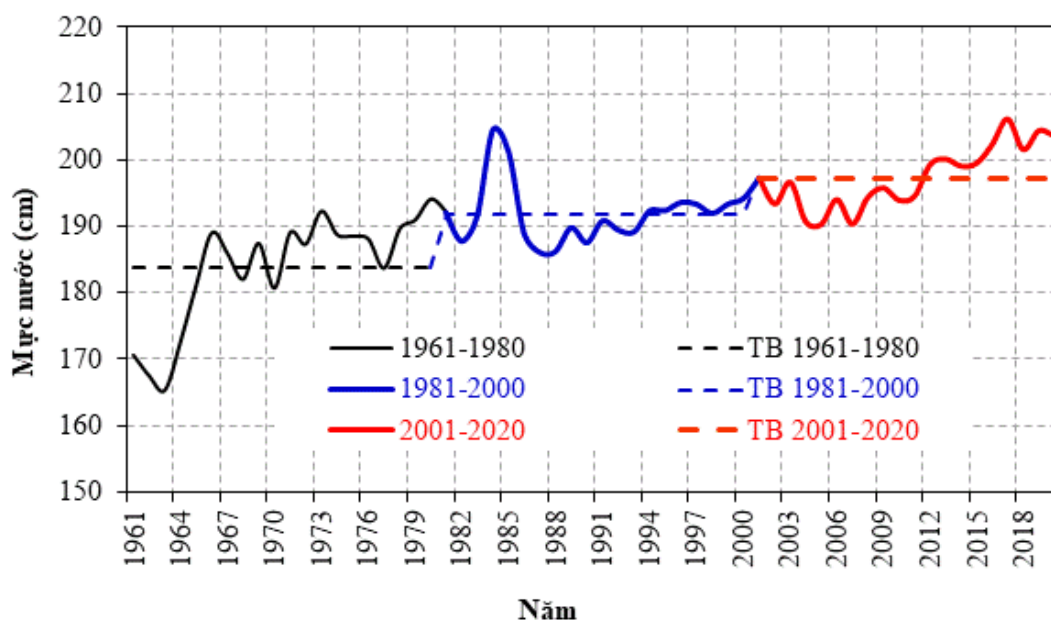
Chương 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Các biểu hiện của biến đổi khí hậu ở khu vực Cát Bà-Hạ Long

3.1.1. Xu thế dâng cao của mực nước biển

3.1.1.1. Biến đổi mực nước theo thời gian

Tại trạm Hòn Dấu, mực nước trung bình nhiều năm (1961-2020) là 190,54 cm. Mực nước trung bình năm thấp nhất là 165,2 cm (1963) và cao nhất là 206,1 cm (2017). Mực nước trung bình năm có xu hướng tăng trong những năm gần đây, đặc biệt từ năm 2016 đến nay, mực nước trung bình năm đều trên 202 cm. Mực nước thay đổi ở các giai đoạn: từ 183,66 cm trong thời kỳ 1961-1980 đến 191,68 cm giai đoạn 1981-2000 và đạt 197,27 cm đối với giai đoạn 2001-2020 (hình 3.1).

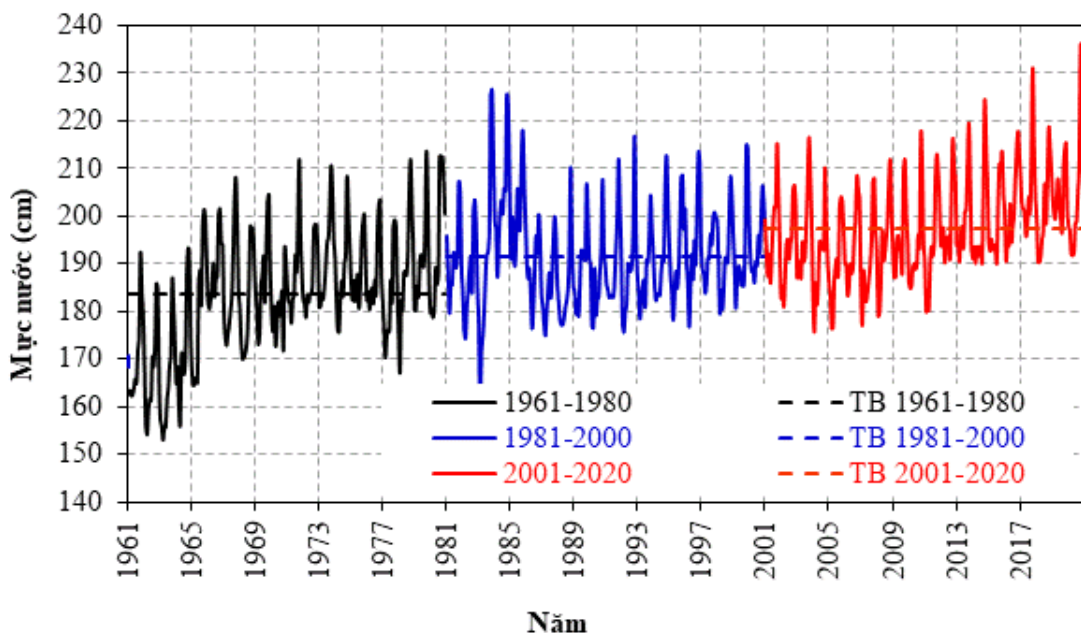


Hình 3. 1. Mực nước trung bình năm tại trạm Hòn Dấu (1961-2020)

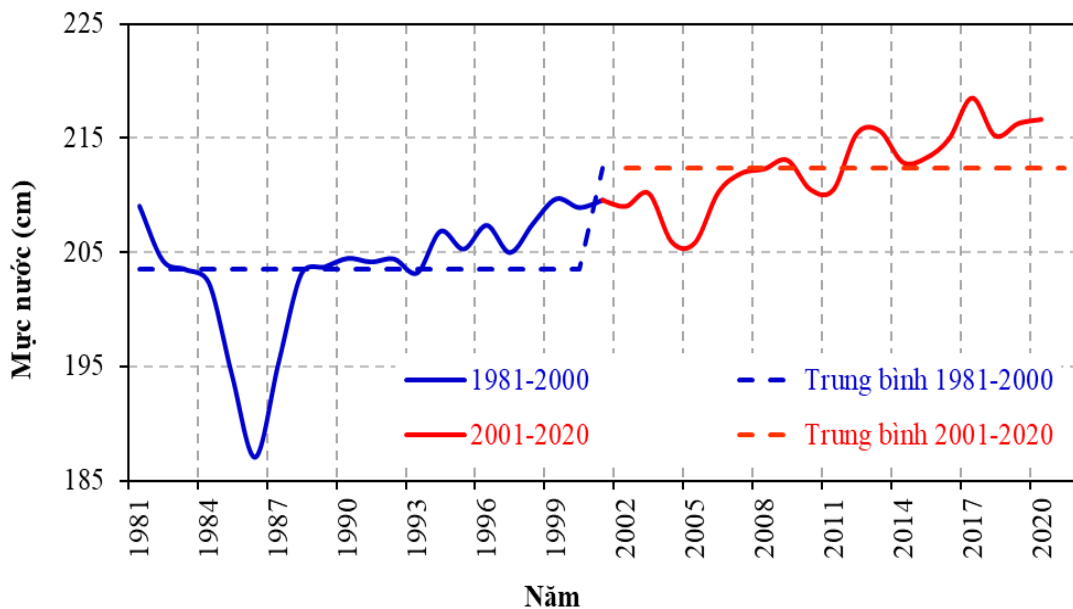
Trước năm 1983, mực nước trung bình tháng thấp hơn mực nước trung bình nhiều năm (190,54 cm) ngoại trừ các tháng cuối năm (tháng 9, 10, 11 và 12). Tuy nhiên, từ năm 1984, mực nước trung bình tháng cao hơn mực nước trung bình nhiều năm có xu hướng tăng lên (tháng 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12). Mực nước trung bình tháng thấp thường rơi vào các tháng 2 và tháng 3 với giá trị 152,68-179,61 cm và lớn nhất vào tháng 10 (208,26 cm) (hình 3.2). Mực nước trung bình tháng có xu hướng tăng trong những giai đoạn gần đây. Số tháng có mực nước cao hơn mực nước trung bình tăng từ 65 tháng đối với giai đoạn 1961-1980, tăng lên 112 tháng đối với giai đoạn 1981-2000 và 174 tháng đối với giai đoạn 2001-2020.

Đối với trạm Bãi Cháy, mực nước trung bình nhiều năm (1981-2020) là 207,93

cm, cao hơn mực nước trung bình nhiều năm tại trạm Hòn Dấu. Mực nước trung bình năm thấp nhất là 187,08 cm (1986) và cao nhất là 218,56 cm (2017). Mực nước trung bình năm có xu hướng tăng trong những năm gần đây, đặc biệt từ năm 2006 đến nay, mực nước trung bình năm đều trên 210 cm. Mực nước thay đổi ở các giai đoạn: từ 203,47 cm trong thời kỳ 1981-2000 tăng lên 212,39 cm giai đoạn 2001-2020 (hình 3.3). Số tháng có mực nước trung bình tháng lớn hơn mực nước trung bình năm cả giai đoạn cũng tăng đáng kể. Giai đoạn 1981-2000, số tháng có mực nước trung bình tháng lớn hơn mực nước trung bình năm là 68 tháng thì giai đoạn 2001-2020, có đến 160 tháng có mực nước lớn hơn trung bình nhiều năm (hình 3.4).

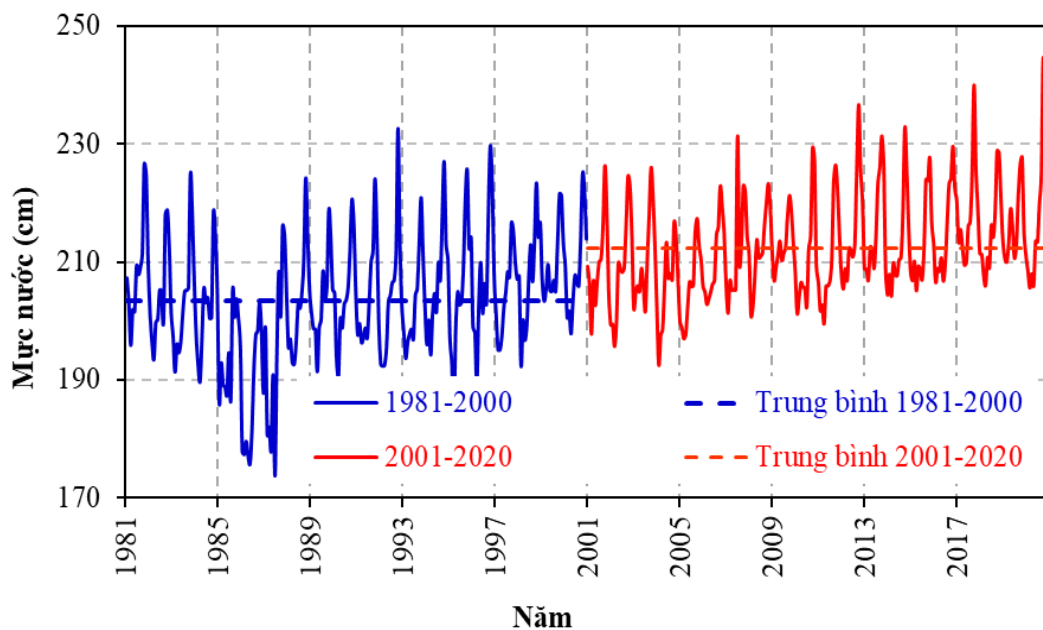


Hình 3.2. Mực nước trung bình tháng tại trạm Hòn Dấu (1961-2020)

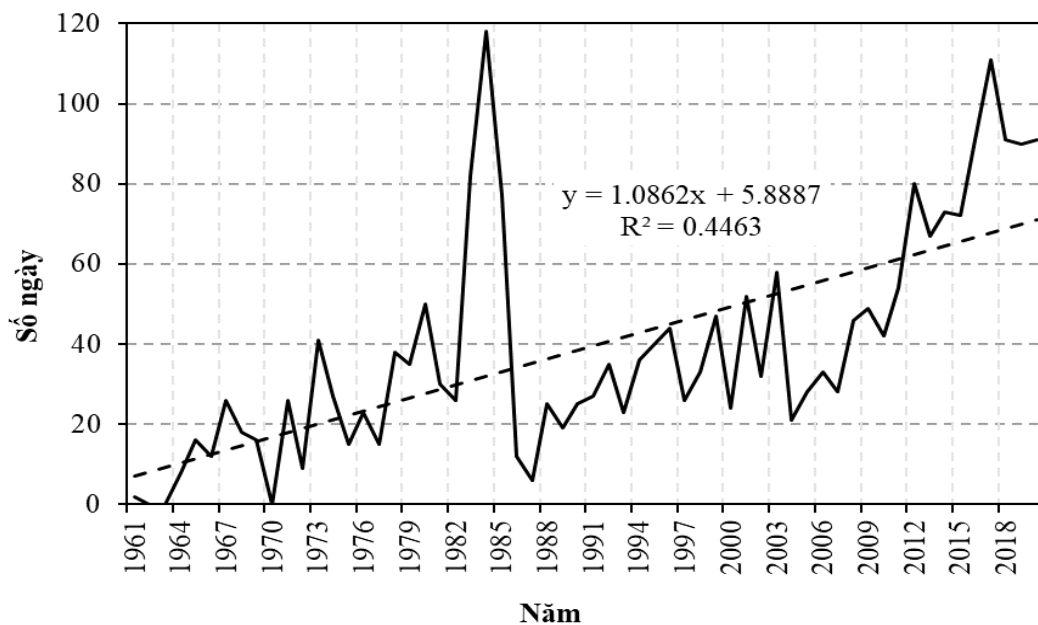


Hình 3.3. Mực nước trung bình năm tại trạm Bãi Cháy (1981-2020)

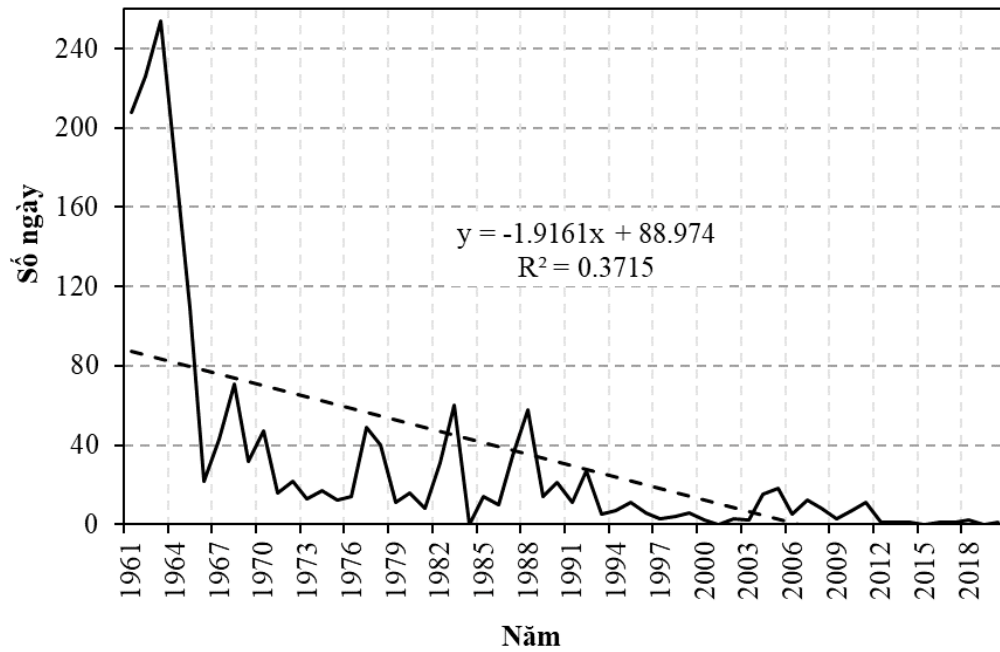
Để đánh giá sự thay đổi bất thường của mực nước, số ngày mực nước lớn hơn 210 cm và nhỏ hơn 170 cm được tính toán. Kết quả chỉ ra tại trạm Hòn Dấu có 2341 ngày mực nước lớn hơn 210 cm và 1832 ngày có mực nước nhỏ hơn 170 cm. Trong giai đoạn 1961-2020, số ngày có mực nước lớn hơn 210 cm thay đổi theo các thời kỳ khác nhau: có 98 ngày có mực nước lớn hơn 210 cm trong giai đoạn 1961-1970, tăng lên 279 ngày trong giai đoạn 1971-1980, đặc biệt tăng lên 420 ngày trong thời kỳ 1981-1990, sau đó, số ngày có mực nước lớn hơn 210 cm có xu hướng giảm nhẹ trong giai đoạn 1991-2000 (335 ngày) và tăng trở lại trong giai đoạn 2001-2010 (389 ngày), đặc biệt trong giai đoạn 2011-2020 tăng lên tới 820 ngày (hình 3.5).



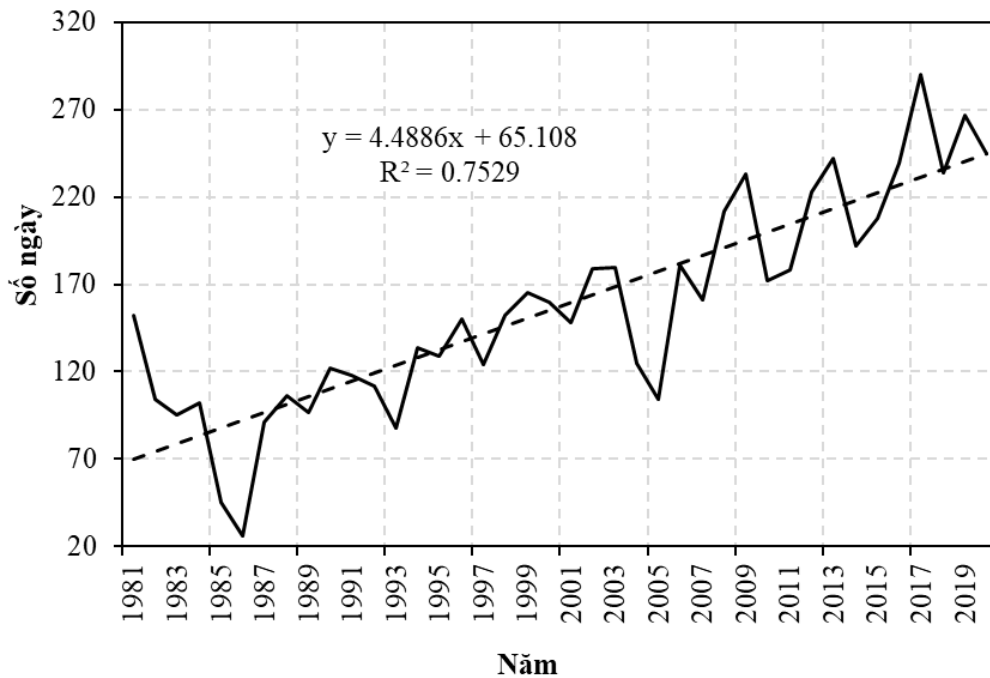
Hình 3.4. Mực nước trung bình tháng tại trạm Bãi Cháy (1981-2020)



Hình 3.5. Số ngày mực nước lớn hơn 210 cm tại trạm Hòn Dấu



Hình 3.6. Số ngày mực nước nhỏ hơn 170 cm tại trạm Hòn Dấu

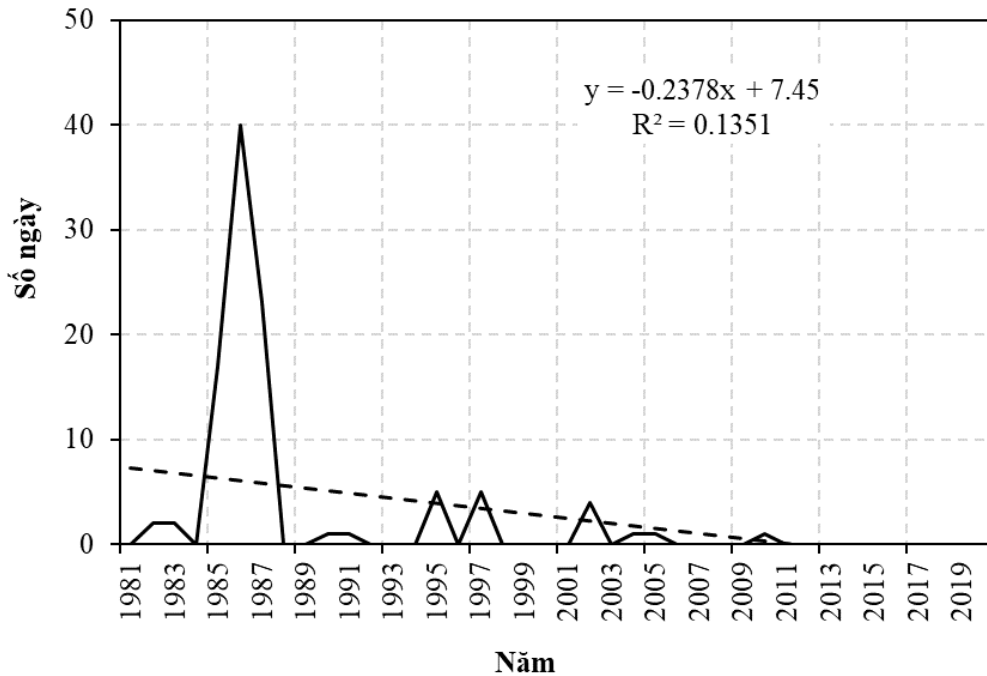


Hình 3.7. Số ngày mực nước lớn hơn 210 cm tại trạm Bãi Cháy

Ngoài ra, số ngày có mực nước nhỏ hơn 170 cm là 1197 ngày, chiếm tới 65,3% trong giai đoạn 1961-1970. Sau đó, nó giảm xuống còn 210 ngày giai đoạn 1971-1980 và tăng nhẹ lên 251 ngày giai đoạn 1981-1990. Từ năm 1991, số ngày có mực nước nhỏ hơn 170 cm giảm rõ rệt: 82 ngày (1991-2000), 73 ngày (2001-2010), 19 ngày (2010-2020) và chỉ còn vài ngày trong những năm gần đây (hình 3.6).

Tương tự tại trạm Hòn Dấu, để phân tích sự bất thường của mực nước, số ngày có mực nước lớn hơn 210 cm và nhỏ hơn 170 cm cũng được tính toán tại trạm Bãi Cháy trong giai đoạn 1981-2020. Kết quả chỉ ra có 6285 ngày có mực nước lớn hơn

210 cm và số ngày này có sự thay đổi theo các thời kỳ khác nhau (chu kỳ 10 năm). Ví dụ chỉ có 940 ngày với giá trị lớn hơn 210 cm đối với giai đoạn 1981-1990, tăng lên 1332 ngày trong giai đoạn 1991-2000, 1695 ngày trong thời kỳ 2001-2010, đặc biệt trong giai đoạn 2011-2020 đã lên đến 2318 ngày. Trong toàn bộ giai đoạn 1981-2020, số ngày mực nước lớn hơn 210 cm, có xu hướng tăng lên rõ rệt, với hệ số tương quan $R^2 = 0,7529$ (hình 3.7).



Hình 3.8. Số ngày mực nước nhỏ hơn 170 cm tại trạm Bãi Cháy

Bên cạnh đó, tổng số ngày có mực nước trung bình nhỏ hơn 170 cm chỉ là 103 ngày, chiếm khoảng 1,6% tổng số ngày trong giai đoạn 1981-2020. Trong giai đoạn 1981-1990, tổng số ngày mực nước trung bình nhỏ hơn 170 cm là 85 ngày, thì đến giai đoạn 1991-2000 chỉ còn 11 ngày và 7 ngày cho giai đoạn 2001-2010, đặc biệt không có ngày nào mực nước trung bình nhỏ hơn 170 cm trong giai đoạn 2011-2020. Trong toàn giai đoạn (1981-2020), tổng số ngày mà mực nước trung bình ngày nhỏ hơn 170 cm có xu hướng giảm, hệ số tương quan $R^2 = 0,1351$ (hình 3.8).

3.1.1.2. Xu thế dâng cao mực nước

Dựa trên số liệu quan trắc, xu thế dâng mực nước tại trạm Hòn Dấu phân tích dựa trên phương pháp Man-Kendall và Sen'Slope theo các thời kỳ khác nhau: 1961-1980, 1981-2000, 2001-2020 và 1961-2020 được trình bày trong bảng 3.1. Kết quả chỉ ra giá trị P cho tất cả các tháng đều bằng 0 trong giai đoạn 1961-2020, với độ tin cậy 99%. Do đó, giả thiết H_0 được loại bỏ, chuỗi số liệu có ý nghĩa thống kê.

Mức nước tất cả các tháng tại trạm Hòn Dấu đều có xu hướng tăng ($Z > 0$). Tốc độ tăng của mực nước trung bình ở các tháng thời kỳ 1961-2020 đều lớn hơn 3,0 mm/năm, ngoại trừ tháng 9 (2,68 mm/năm). Mực nước dâng cao thường vào các tháng 3, 4, 5 (mùa chuyển tiếp), với giá trị 3,86-3,99 mm/năm, mực nước tăng thấp hơn vào tháng 9 (2,68 mm/năm). Tốc độ tăng của mực nước trong giai đoạn 1961-2020 là 3,38 mm/năm.

Giai đoạn từ năm 1961 đến 1980, mực nước trung bình hàng tháng cũng có xu hướng tăng lên, với mức độ ý nghĩa từ 95-99%, với tốc độ dao động từ 8,17-13,91 mm/năm, cao nhất so với các giai đoạn khác. Trong giai đoạn này, tốc độ tăng cao nhất và thấp nhất lần lượt là 13,91 mm/năm (tháng 5) và 8,17 mm/năm (tháng 1). Giá trị của NBD trong giai đoạn 1961-1980 là 10,33 mm/năm, cao hơn 6,95 mm/năm so với toàn giai đoạn 1961–2020 (bảng 3.1).

Bảng 3.1. Xu hướng dâng cao mực nước (mm/năm) tại trạm Hòn Dấu

Tháng	1961-2020		1961-1980		1981-2000		2001-2020	
	P	NBD	P	NBD	P	NBD	P	NBD
1	0,0000	3,69	0,0478	8,17	0,5813	0,77**	0,0003	9,20
2	0,0000	3,78	0,0026	10,36	0,4173	2,37**	0,0125	7,03
3	0,0000	3,99	0,0017	12,95	0,0644	4,03*	0,0071	7,7
4	0,0000	3,92	0,0025	11,47	0,4555	1,67**	0,0071	7,29
5	0,0000	3,86	0,0004	13,91	0,1629	3,51**	0,0149	5,06
6	0,0000	3,00	0,0026	10,38	0,8203	-0,69**	0,0058	4,59
7	0,0000	3,00	0,0086	10,81	0,8711	0,09**	0,0179	4,87
8	0,0000	3,03	0,0026	11,87	0,0252	8,49	0,1119	3,04**
9	0,0000	2,68	0,0252	12,16	0,4957	1,56**	0,0026	7,20
10	0,0000	3,55	0,0011	9,89	0,0252	8,49	0,0048	8,11
11	0,0000	3,63	0,0002	10,63	0,7703	1,55**	0,0001	6,98
12	0,0000	3,70	0,0252	8,49	0,0855	5,96*	0,0179	5,79
Năm	0,0000	3,38	0,0000	10,33	0,0855	2,70*	0,0002	7,16

(* Độ tin cậy 90%, ** Không có xu hướng)

Trong giai đoạn 1981-2000, giá trị P thay đổi giữa 0,02518 và 0,87113, cho thấy mức độ ý nghĩa từ 13-97,5%. Trong khoảng thời gian này, giá trị P cho hầu hết các tháng đều cao hơn 0,1 (tháng 1, 2, 4, 5, 6, 7, 9 và tháng 11), cho thấy không có xu hướng đáng kể nào trong các tháng này. Chỉ có 4 tháng (tháng 3, 8, 10, và tháng 12) có giá trị P thấp hơn 0,1, phản ánh sự tăng lên của mực nước biển, với mức độ

tin cậy 90-95%. Tốc độ tăng của mực nước biển trong những tháng này dao động từ 4,03 đến 8,49 mm/năm. Trong giai đoạn 1981-2000, mực nước biển tăng với tỷ lệ thấp nhất, ở mức 2,7 mm/năm (mức ý nghĩa 90%), xem [bảng 3.1](#).

Trong giai đoạn 2001-2020, mực nước tăng hàng tháng dao động 3,04-9,20 mm/năm (mức ý nghĩa 89-99%). Tốc độ tăng cao nhất vào tháng 1 với 9,2 mm/năm và thấp nhất vào tháng 9 với 3,04 mm/năm (mức độ tin cậy 89%). Tốc độ tăng của mực nước trong giai đoạn này là 7,17 mm/năm, cao gần gấp đôi toàn giai đoạn (1961-2020), xem [bảng 3.1](#).

Bảng 3.2. Xu hướng dâng cao mực nước (mm/năm) tại trạm Bãi Cháy sử dụng phương pháp MK và Sen's Slope

Tháng	1981-2020		1981-2000		2001-2020	
	P	NBD	P	NBD	P	NBD
1	0,0000	4,59	0,1273	4,08**	0,0013	5,87
2	0,0000	4,77	0,1629	2,25**	0,0005	5,51
3	0,0000	5,48	0,0980	4,17*	0,0013	6,72
4	0,0000	4,65	0,0980	3,61*	0,0086	4,58
5	0,0000	4,16	0,0350	4,59	0,0556	3,53*
6	0,0000	3,09	0,2299	2,47**	0,1192	1,97**
7	0,0000	2,73	0,0744	3,26*	0,0644	3,48*
8	0,0000	3,42	0,2843	1,23**	0,0013	3,99
9	0,0000	4,54	0,0039	6,83	0,0028	5,23
10	0,0012	3,03	0,2299	3,14**	0,0086	6,57
11	0,0000	4,42	0,9741	0,19**	0,0002	5,69
12	0,0000	4,37	0,0125	6,02*	0,0048	5,12
Năm	0,0000	4,18	0,0026	3,53	0,0000	4,72

(* Độ tin cậy 90%, ** Không có xu hướng)

Tương tự như tại trạm Hòn Dấu, phương pháp Man-Kendall và Sen'Slope cũng được áp dụng để phân tích mực nước tại trạm Bãi Cháy trong thời gian 1981-2020 và theo 2 giai đoạn nhỏ: 1981-2000 và 2001-2020, xem [bảng 3.2](#). Kết quả phân tích chỉ ra trong giai đoạn 1981-2020, giá trị P cho tất cả các tháng dao động từ 0-0,00115, giả thiết Ho được loại bỏ, chuỗi số liệu có ý nghĩa thống kê với độ tin cậy trên 95%. Mực nước trung bình năm ở trạm Bãi Cháy có xu hướng tăng, với giá trị trong toàn giai đoạn là 4,18 mm/năm. Mực nước trung bình tất cả các tháng giai đoạn 1981-2020 vẫn có xu hướng tăng, với giá trị hầu hết các tháng đều lớn hơn 4,0

mm/năm, ngoại trừ tháng 6, 7, 8 và 10. Mức nước tăng với tốc độ lớn vào các cuối mùa khô (tháng 1 và 2) và đầu mùa chuyển tiếp (tháng 3, 4), với giá trị 4,59-5,48 mm/năm, cao nhất vào tháng 3 (5,48 mm/năm). Mức nước tăng với tốc độ thấp hơn thường rơi vào các tháng mùa mưa (tháng 6, 7, 8, 10), với giá trị 2,73-3,42 mm/năm.

Đối với giai đoạn 1981-2000, mức nước trung bình trong cả giai đoạn có xu hướng tăng với độ tin cậy đạt 95%. Mức nước trong giai đoạn này tăng với tốc độ là 3,53 mm/năm thấp hơn so với tốc độ tăng giai đoạn 1981-2020. Mức nước trung bình tháng cũng có xu hướng tăng, nhưng không rõ ràng đối với các tháng 1, 2, 6, 8, 10, 11 (mức độ tin cậy nhỏ hơn 90%). Xu hướng tăng ở các tháng còn lại với độ tin cậy đạt 90% vào các tháng 3, 4, 7 và 12, độ tin cậy trên 95% vào các tháng 5 và 9. Tốc độ tăng lớn nhất vào tháng 9 (6,83 mm/năm), sau đó đến tháng 12 (6,02 mm/năm), tháng 5 (4,59 mm/năm), tháng 3 (4,17 mm/năm), tháng 4 (3,61 mm/năm) và nhỏ nhất vào tháng 7 (3,26 mm/năm) (bảng 3.2).

Giai đoạn 2001-2020, mức nước trung bình năm tăng, với độ tin cậy trên 95%. Tốc độ tăng của mức nước trong giai đoạn này là 4,72 mm/năm cao hơn so với các giai đoạn khác (1981-2020 và 1981-2000). Các tháng trong giai đoạn này đều có xu hướng tăng ứng với độ tin cậy 90-95% ngoại trừ tháng 6. Tốc độ tăng của mức nước tháng dao động 3,48 mm/năm đến 6,72 mm/năm. Tốc độ tăng của mức nước cao thường vào vào mùa chuyển tiếp, mùa khô (tháng 10 đến tháng 3). Tốc độ tăng của mức nước thấp hơn thường rơi vào các tháng mùa hè (tháng 5, 7, 8) (bảng 3.2).

NBD tại trạm Hòn Dấu và Bãi Cháy được phân tích bằng kiểm nghiệm MK và Sen's Slope qua các khoảng thời gian liên tiếp 20 năm. Kết quả cho thấy NBD ở trạm Hòn Dấu là 3,38mm/năm (1961-2020) và 4,18 mm/năm (1981-2020) ở trạm Bãi Cháy phù hợp với các nghiên cứu [1, 142]. Tuy nhiên tốc độ tăng mức nước ở trạm Hòn Dấu thấp hơn so với kết quả [142] trong giai đoạn 1957-2012 (3,78 mm/năm). Ngược lại tốc độ NBD tại trạm Bãi Cháy cao hơn so với kết quả nghiên cứu [142] cho giai đoạn 1962-2012 (2,07 mm/năm) và cao hơn so với tính toán [1] từ dữ liệu quan trắc của trạm Bãi Cháy trong giai đoạn 1962-2014 (1,54 mm/năm). Trong cùng thời kỳ, mức tăng mức nước biển trung bình được ước tính bởi AVISO (<https://www.aviso.altimetry.fr/msl/>, truy cập lần cuối: 10 tháng 2 năm 2022) cho toàn cầu và khu vực Bắc Thái Bình Dương lần lượt là 3,33 mm/năm và 2,85

mm/năm. Điều này cho thấy mực nước biển ở vùng biển CB-HL tăng nhanh hơn mức trung bình toàn cầu và ở khu vực Bắc Thái Bình Dương. Kết quả ước tính tốc độ gia tăng mực nước biển thời kỳ 2001-2020 của AVISO cho toàn cầu là 3,68 mm/năm và khoảng 3,24 mm/năm cho khu vực Bắc Thái Bình Dương, thấp hơn khoảng 1,1-2 lần so với NBD ở khu vực ven biển CB-HL.

Tốc độ tăng của mực nước cũng khác nhau trong các thời kỳ khác nhau. Xu hướng mực nước biển tăng lên thấp nhất trong giai đoạn 1981-2000 với chỉ 2,7 mm/năm tại trạm Hòn Dấu và 3,53 mm/năm tại trạm Bãi Cháy. Kết quả này tương đối nhất quán với [Jevrejeva và cộng sự \[143\]](#), cho thấy tỷ lệ NBD trung bình ở Tây Thái Bình Dương khoảng 0-2,0 mm/năm trong giai đoạn 1980-2000. Trên quy mô toàn cầu, [Church và các cộng sự \[144\]](#) đã công bố xu hướng tăng của NBD trong giai đoạn 1980 đến 2000, tăng dần từ khoảng 1,2-3,0 mm/năm. Ngoài ra, mực nước biển toàn cầu cũng cho thấy sự biến đổi đáng kể về tốc độ của nó. Trong khi mực nước biển trung bình đã tăng rất ít trong quá khứ, các phân tích gần đây cho thấy có một sự tăng lên đáng kể của mực nước biển toàn cầu, với 1,5-2,0 mm/năm trong thế kỷ 20 [\[145\]](#) và cao gấp 10 lần so với các thế kỷ trước [\[146\]](#). Báo cáo mới nhất của [IPCC \[147\]](#) chỉ ra rằng tốc độ trung bình của mực nước biển đã tăng nhanh hơn mong đợi trong những thập kỷ trở lại đây: 1,3 mm/năm trong giai đoạn 1901-1971, 1,9 mm/năm trong giai đoạn 1971-2006, và 3,7 mm/năm trong giai đoạn 2006-2018. Nguyên nhân của sự gia tăng này xuất phát từ hai quá trình chính: sự giãn nở nhiệt của đại dương do sự biến đổi nhiệt của biển và sự xâm nhập của khối nước ngọt vào biển do sự tan chảy của các tảng băng ở cực và các sông băng trên núi, cũng như các trao đổi tiềm năng với các hồ chứa nước lục địa [\[148-150\]](#). Ngoài ra, các vụ phun trào núi lửa của núi Agung vào năm 1963, El Chichon vào năm 1982, và núi Pinatubo vào năm 1991 có khả năng đã góp phần vào sự giảm nhỏ của mực nước biển trong vài năm tiếp theo [\[151-152\]](#).

3.1.2. Xu thế tăng của nhiệt độ nước biển

3.1.2.1. Biến đổi nhiệt độ nước

Khu vực CB-HL nằm chịu ảnh hưởng của chế độ khí hậu nhiệt đới gió mùa nên nhiệt độ nước ở khu vực cũng thay đổi theo mùa. Theo kết quả phân tích nhiệt độ trung bình tháng tại trạm Hòn Dấu giai đoạn 1995-2020 cho thấy nhiệt độ nước

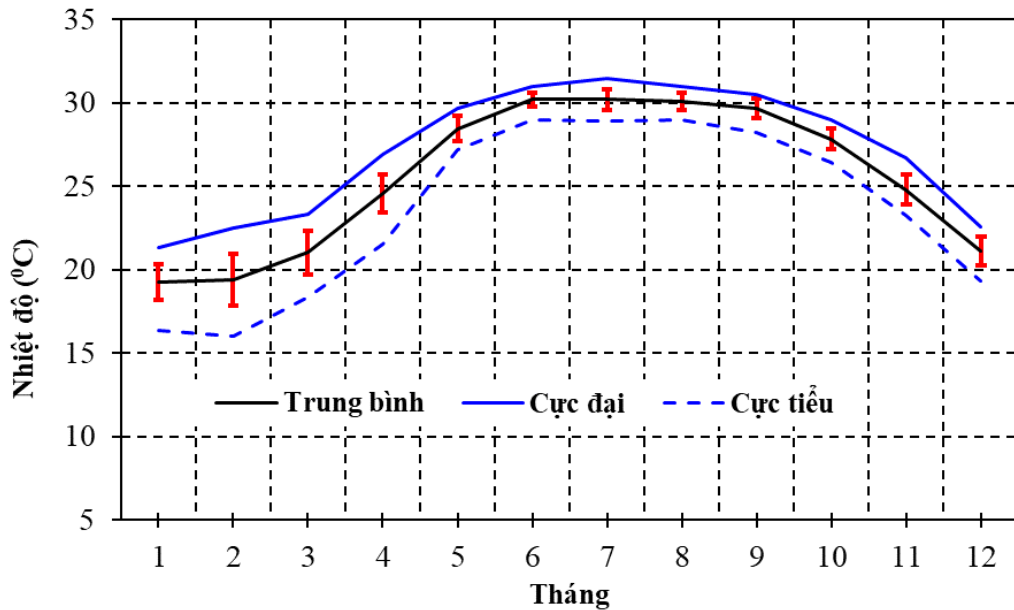
tăng dần từ tháng 1 đến tháng 3 và tăng nhanh từ tháng 3 đến tháng 5 sau đó đạt giá trị lớn nhất vào tháng 6-7 (với khoảng 30,2°C), sau đó giảm dần đến tháng 1. Nhiệt độ trung bình nước biển đều trên 28°C từ tháng 5 (28,5°C) cho đến tháng 9 (29,7°C). Ngược lại, nhiệt độ hầu như dưới 22°C từ tháng 12 (21,1°C) cho đến tháng 3 (21°C), với nhiệt độ thấp nhất rơi vào tháng 1 (19,3°C) (bảng 3.3, hình 3.9). Tại trạm Hòn Dấu, nhiệt độ trong các tháng mùa hè (tháng 6-tháng 9) thường lớn hơn 29,66° và nhỏ hơn 19,32°C trong các tháng mùa đông (tháng 12- tháng 3). Sự khác biệt nhiệt độ giữa các tháng mùa đông và mùa hè lên tới 10°C.

Bảng 3.3. Đặc trưng thống kê của nhiệt độ nước (°C) tại trạm Hòn Dấu (1995-2020) [153]

Tháng\năm	Cực đại	Cực tiểu	Trung bình	STD (°C)	CV(%)
1	21,35	16,39	19,27	1,10	5,69
2	22,51	16,01	19,39	1,56	8,02
3	23,34	18,35	21,03	1,30	6,19
4	26,91	21,57	24,56	1,13	4,60
5	29,67	27,23	28,46	0,76	2,67
6	30,98	29,01	30,21	0,43	1,43
7	31,49	28,95	30,21	0,62	2,04
8	30,99	29,01	30,08	0,51	1,70
9	30,50	28,21	29,66	0,58	1,96
10	28,96	26,43	27,83	0,62	2,23
11	26,69	23,25	24,81	0,92	3,69
12	22,59	19,32	21,12	0,86	4,08
Năm	26,60	24,63	25,55	0,43	1,69

Nhiệt độ lớn nhất quan trắc được các tháng thay đổi từ 21,35°C vào tháng 1 đến 31,49°C vào tháng 7. Khoảng thời gian giữa tháng 6 và 9, giá trị lớn nhất của nhiệt độ nước biển đều lớn hơn 30°C. Trong khi trong các tháng mùa đông, nhiệt độ lớn nhất chưa bao giờ vượt quá 23,5°C (bảng 3.3, hình 3.9). Độ lệch chuẩn (STD) cũng chỉ ra nhiệt độ tầng mặt nước biển gần giá trị nhiệt độ trung bình, với STD nhỏ hơn 1°C và hệ số biến thiên (CV) khoảng 2% trong các tháng 6, 8 và tháng 9 (bảng 3.3). STD cao hơn trong các tháng mùa đông, dao động trong khoảng 0,9 đến 1,6°C với CV thay đổi 4,1-8%, điều này cho thấy nhiệt độ trung bình nước thay đổi trong

khoảng rộng hơn trong mùa này. Nhiệt độ nhỏ nhất tại trạm Hòn Dấu thay đổi từ 16°C trong tháng 2 đến $29,1^{\circ}\text{C}$ trong khoảng giữa tháng 6 và 8. Trong mùa đông, nhiệt độ tháng thấp nhất không vượt quá $19,32^{\circ}\text{C}$ và không lớn hơn $27,3^{\circ}\text{C}$ trong các tháng mùa hè (bảng 3.3).



Hình 3.9. Nhiệt độ nước tháng (trung bình, cực đại, cực tiểu) và STD (cột đỏ) tại trạm Hòn Dấu giai đoạn 1995-2020

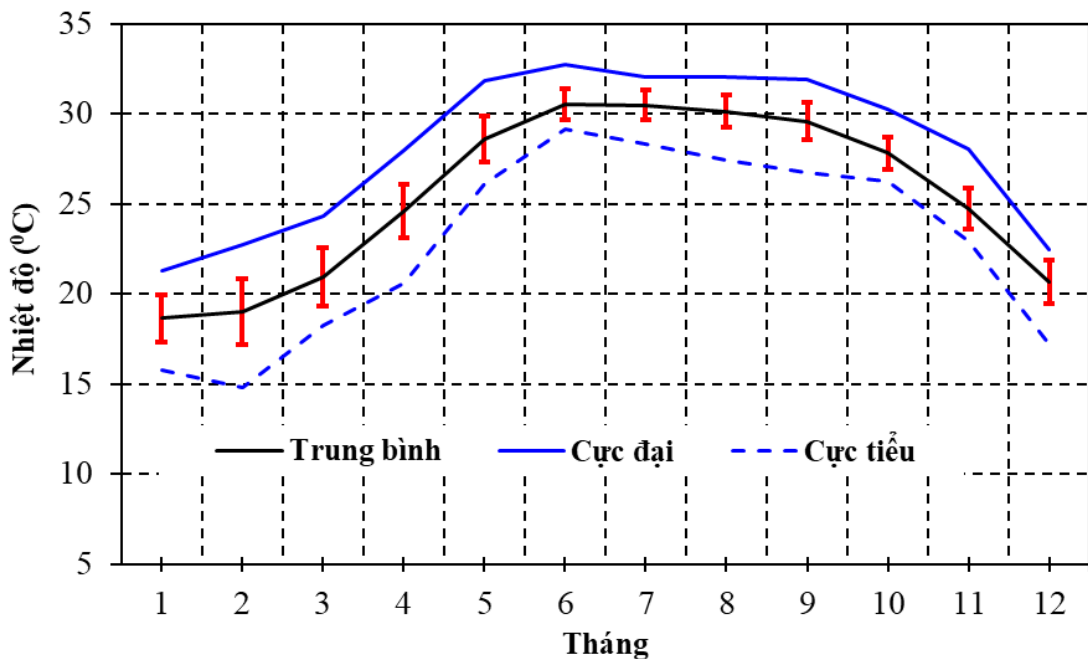
Kết quả phân tích nhiệt độ trung bình tháng tại trạm Bãi Cháy giai đoạn 1995-2020 cho thấy nhiệt độ nước tăng dần từ tháng 1 đến tháng 3, tăng nhanh từ tháng 4 đến tháng 5 và đạt giá trị lớn nhất vào tháng 6-7 (với khoảng $30,5^{\circ}\text{C}$), sau đó giảm dần đến tháng 12. Nhiệt độ trung bình nước biển đều trên 28°C từ tháng 5 ($28,6^{\circ}\text{C}$) cho đến tháng 9 ($29,59^{\circ}\text{C}$). Ngược lại, nhiệt độ hầu như dưới 22°C từ tháng 12 ($20,67^{\circ}\text{C}$) cho đến tháng 3 ($20,94^{\circ}\text{C}$), với nhiệt độ thấp nhất rơi vào tháng 1 ($18,64^{\circ}\text{C}$) (bảng 3.4, hình 3.10). Nhiệt độ trong các tháng mùa hè (tháng 6-tháng 9) thường lớn hơn $29,5^{\circ}$, đặc biệt trong khoảng giữa tháng 6 và 8 đều trên 30°C . Nhiệt độ nhỏ hơn $20,67^{\circ}\text{C}$ trong các tháng mùa đông (tháng 12- tháng 3). Chênh lệch nhiệt độ giữa các tháng mùa đông và mùa hè lên tới $11,86^{\circ}\text{C}$.

STD cũng chỉ ra nhiệt độ tầng mặt nước biển gần giá trị nhiệt độ trung bình, với STD nhỏ hơn 1°C và CV nhỏ hơn 3,3% trong các tháng 6, 7, 8 và tháng 10 (bảng 3.4). STD cao hơn vào tháng cuối mùa đông và mùa chuyển tiếp từ đông sang hè (từ tháng 1 đến tháng 4), với giá trị trong khoảng 1,29 đến $1,47^{\circ}\text{C}$ với CV thay đổi 5,98-9,68%, điều này chỉ ra nhiệt độ trung bình nước thay đổi trong khoảng rộng

hơn trong những tháng này.

Bảng 3.4. Đặc trưng thống kê của nhiệt độ nước ($^{\circ}\text{C}$) tại trạm Bãi Cháy (1995-2020)

Tháng	Cực đại	Cực tiểu	Trung bình	STD ($^{\circ}\text{C}$)	CV(%)
1	21,31	15,77	18,64	1,29	6,93
2	22,73	14,78	19,01	1,84	9,68
3	24,29	18,26	20,94	1,62	7,72
4	28,00	20,62	24,60	1,47	5,98
5	31,86	26,13	28,60	1,27	4,46
6	32,76	29,13	30,50	0,86	2,83
7	32,08	28,31	30,49	0,82	2,69
8	32,01	27,44	30,13	0,91	3,01
9	31,93	26,71	29,59	1,03	3,47
10	30,26	26,22	27,80	0,92	3,30
11	28,07	22,91	24,73	1,15	4,65
12	22,46	17,21	20,67	1,19	5,76
Năm	27,99	23,64	25,48	0,82	3,23



Hình 3.10. Nhiệt độ nước tháng (trung bình, cực đại, cực tiểu) và STD (cột đồ) tại trạm Bãi Cháy giai đoạn 1995-2020

Nhiệt độ lớn nhất quan trắc được các tháng thay đổi từ 21,31 $^{\circ}\text{C}$ vào tháng 1 đến 32,76 $^{\circ}\text{C}$ vào tháng 6. Trong khoảng thời gian giữa tháng 5 và 10, giá trị lớn nhất của nhiệt độ đều lớn hơn 30,26 $^{\circ}\text{C}$, đặc biệt vào 3 tháng 6, 7, 8 nhiệt độ lớn nhất đều

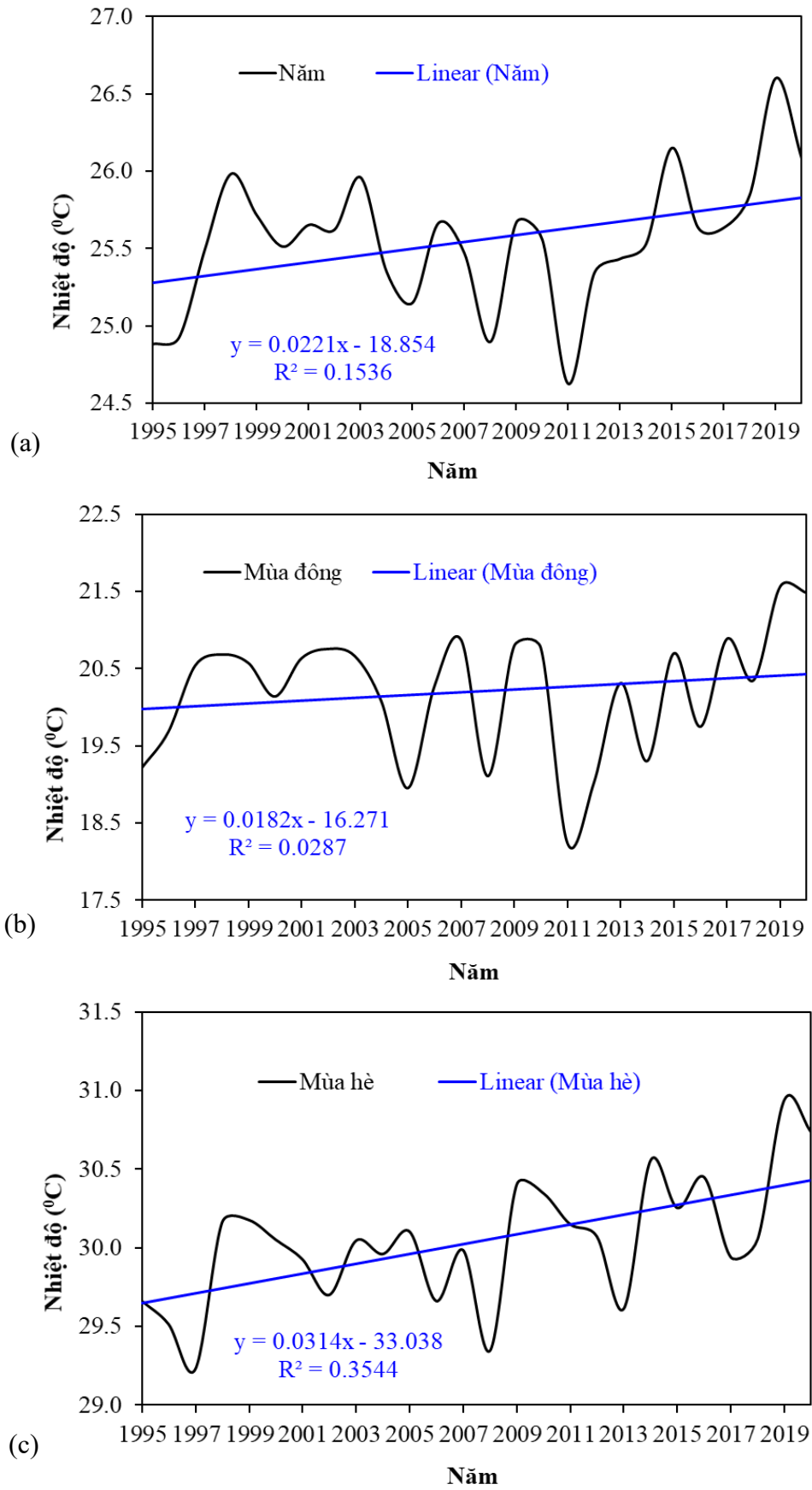
trên 32°C. Trong khi trong các tháng mùa đông, nhiệt độ lớn nhất chưa bao giờ vượt quá 23°C (tháng 12, 1 và 2) (bảng 3.4, hình 3.10). Nhiệt độ nhỏ nhất tại trạm Hòn Dấu thay đổi từ 14,78°C trong tháng 2 đến 29,13°C trong tháng 6. Trong mùa đông, nhiệt độ tháng thấp nhất không vượt quá 18,26°C (tháng 12, 1-3), trong khi chúng có thể đạt 27,44-29,13°C trong các tháng mùa hè (tháng 6-8) (bảng 3.4).

3.1.2.2. Xu thế tăng nhiệt độ

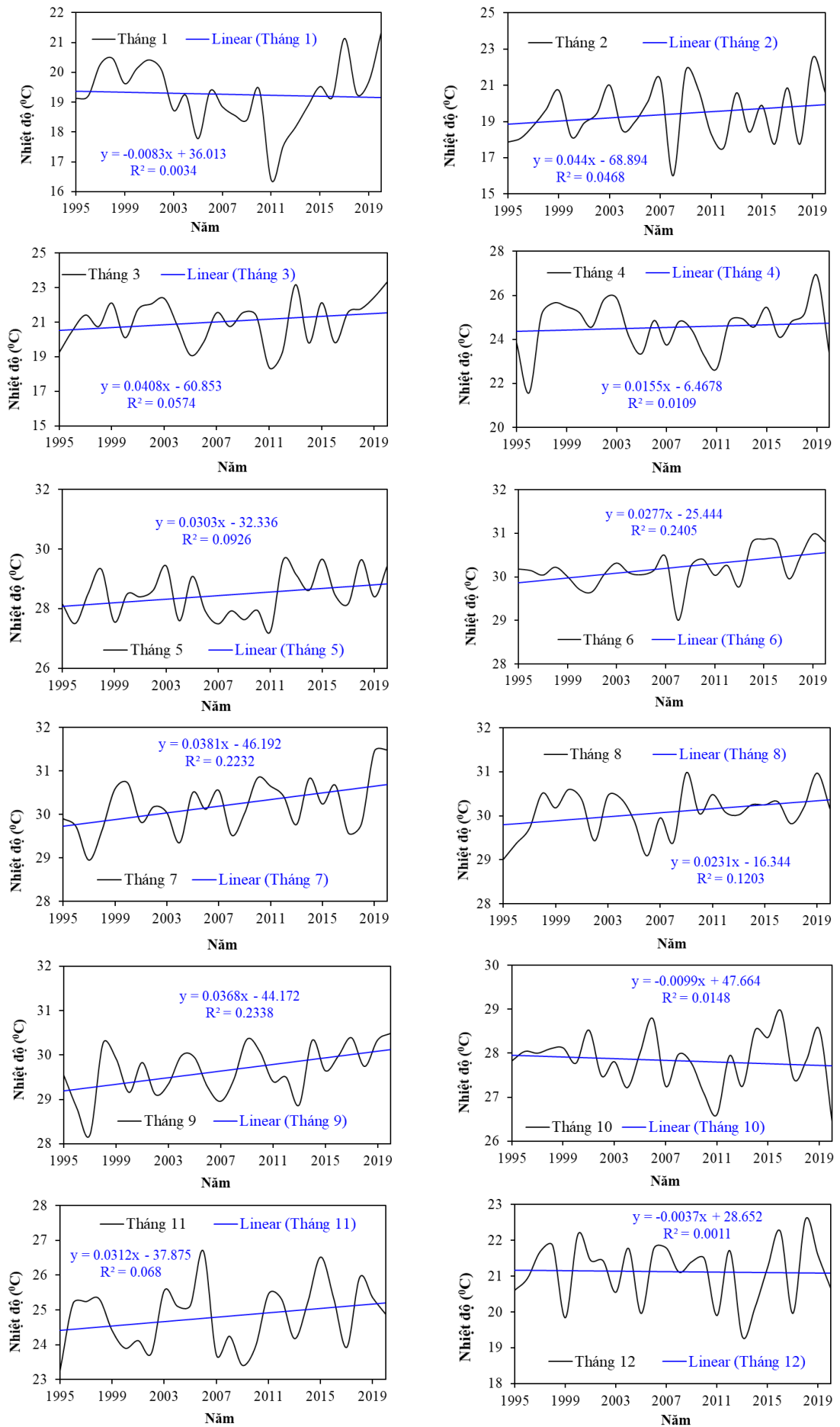
Nhiệt độ trung bình năm bề mặt nước biển tại trạm Hòn Dấu giai đoạn 1995-2020 thay đổi đáng kể qua các năm, với giá trị trung bình trong 26 năm là 25,55°C. Năm 2016 có nhiệt độ trung bình nước biển lớn nhất là 26,6°C, lớn hơn 1,1°C so với toàn giai đoạn. Trong khi đó, năm 2011 có nhiệt độ trung bình năm nhỏ nhất là 24,63°C, thấp hơn so với nhiệt độ toàn giai đoạn là 0,9°C. Theo kết quả tính toán cũng chỉ ra nhiệt độ trung bình hàng năm gần với nhiệt độ trung bình nhiều năm với STD khoảng 0,4°C và CV nhỏ hơn 2%. Theo thời gian nhiệt độ trung bình năm tại trạm Hòn Dấu có xu hướng tăng, với phương trình hồi quy tuyến tính có độ dốc dương ($a = 0,0221$) và hệ số $R^2 = 0,1536$. Do đó, khoảng 15% sự khác nhau của nhiệt độ nước biển bề mặt hàng năm được giải thích bằng mô hình hồi quy tuyến tính (hình 3.11a).

Trong khi nhiệt độ nước biển bề mặt vào mùa hè chỉ ra xu hướng tăng tương tự như xu hướng năm theo phương pháp hồi quy tuyến tính ($R^2 = 0.3094$) thì xu hướng này lại không rõ ràng vào mùa đông ($R^2 = 0.011$). Vào mùa hè, mô hình hồi quy tuyến tính giải thích khoảng 31% sự thay đổi giữa các năm của nhiệt độ nước biển bề mặt (hình 3.11b, hình 3.11c). Các phân tích nhiệt độ trung bình hàng tháng tại trạm Hòn Dấu cho thấy xu thế khác nhau trong năm. Theo phương pháp hồi quy tuyến tính, nhiệt độ nước biển dường như có xu hướng tăng từ tháng 2 đến tháng 9 và tháng 11, xu hướng giảm vào tháng 10, 12 và tháng 1. Đặc biệt vào các tháng 6, 7 và 9 có hệ số tương quan lớn hơn các tháng khác ($R^2 = 0,22-0,24$) (hình 3.12).

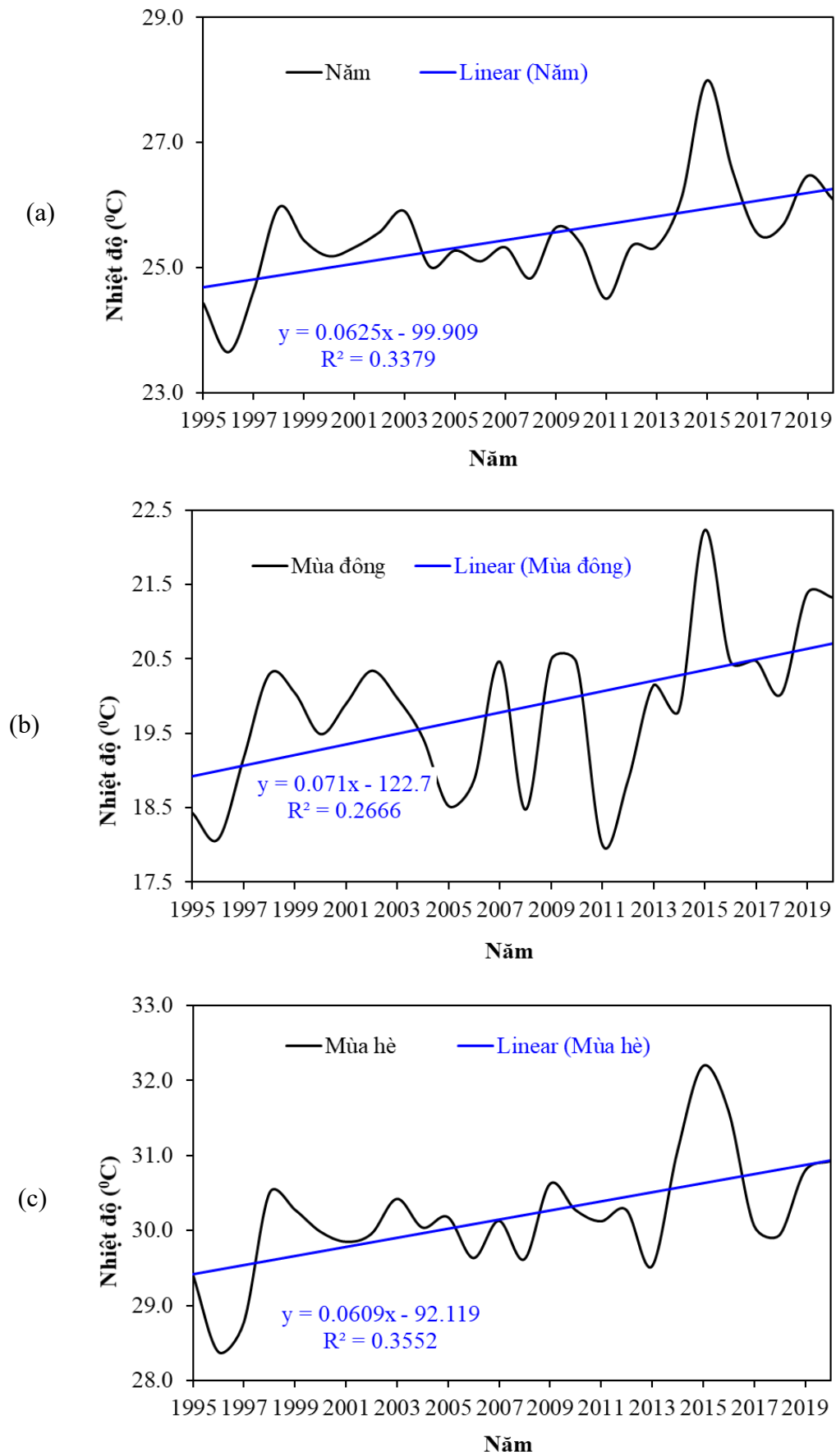
Xu hướng của nhiệt độ nước bề mặt tại trạm Hòn Dấu cũng được phân tích bằng kiểm nghiệm Mann-Kendall và Sen. Kết quả chỉ ra giá trị S trong giai đoạn 1995-2020 dương (77), $Z = 1,68$, $P = 0,094$ cho thấy xu hướng tăng với độ tin cậy 90% trong giai đoạn này. Nhiệt độ nước bề mặt trong giai đoạn 1995-2020 tăng khoảng 0,02°C/năm (bảng 3.5).



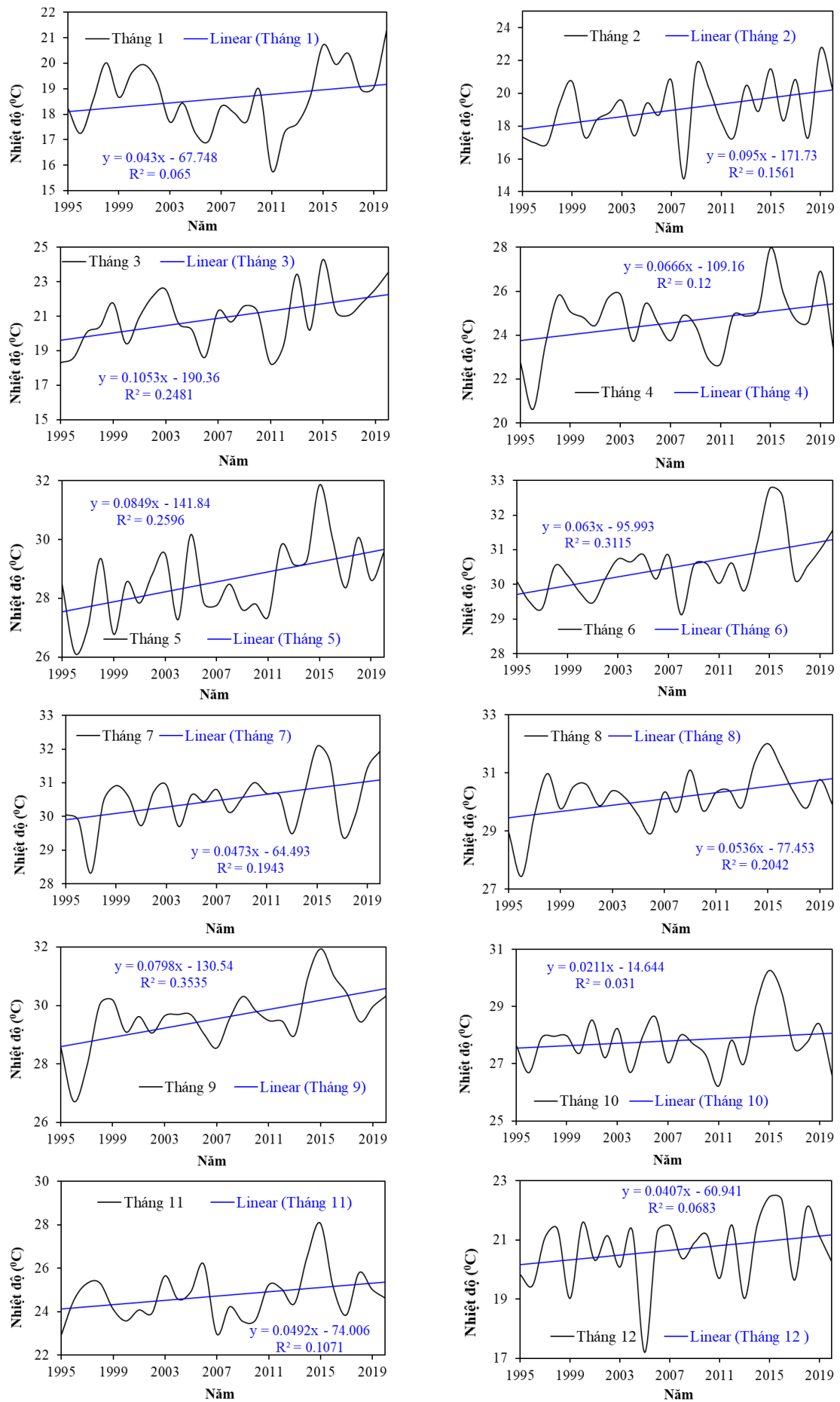
Hình 3.11. Nhiệt độ trung bình trong giai đoạn 1995-2000 tại trạm Hòn Dấu: (a) năm, (b) mùa đông (tháng 12 đến tháng 3), (c) mùa hè (tháng 6 đến tháng 9)



Hình 3.12. Xu thế tăng nhiệt độ tháng giai đoạn 1995-2020 tại trạm Hòn Dấu



Hình 3.13. Nhiệt độ trung bình trong giai đoạn 1995-2020 tại trạm Bãi Cháy: (a) năm, (b) mùa đông (tháng 12 đến tháng 3), (c) mùa hè (tháng 6 đến tháng 9)



Hình 3.14. Xu thế tăng nhiệt độ tháng giai đoạn 1995-2020 tại trạm Bãi Cháy

Bảng 3.5. Phân tích xu thế của nhiệt độ nước tại trạm Hòn Dấu giai đoạn 1995-2020 [153]

Thời gian	P	MK (Z)	MK Test (S)	α	Slope (°C/năm)	Xu hướng
1	0,7243	-0,35	-17	0,1	-0,018	Không có ý nghĩa thống kê
2	0,2901	1,06	49	0,1	0,061	Không có ý nghĩa thống kê
3	0,1457	1,45	67	0,1	0,053	Không có ý nghĩa thống kê
4	0,9648	-0,04	-3	0,1	-0,001	Không có ý nghĩa thống kê
5	0,1339	1,50	69	0,1	0,032	Không có ý nghĩa thống kê
6	0,0153	2,42	111	0,05	0,027	Có ý nghĩa thống kê
7	0,0383	2,07	95	0,05	0,039	Có ý nghĩa thống kê
8	0,2339	1,19	55	0,1	0,023	Không có ý nghĩa thống kê
9	0,0119	2,51	115	0,05	0,036	Có ý nghĩa thống kê
10	0,6277	-0,48	-23	0,1	-0,007	Không có ý nghĩa thống kê
11	0,2011	1,28	59	0,1	0,022	Không có ý nghĩa thống kê
12	0,9648	-0,04	-3	0,05	-0,003	Không có ý nghĩa thống kê
Năm	0,0939	1,68	77	0,1	0,020	Có ý nghĩa thống kê
Mùa đông	0,1457	1,45	67	0,1	0,019	Không có ý nghĩa thống kê
Mùa hè	0,0082	2,64	121	0,05	0,030	Có ý nghĩa thống kê

Ghi chú: α là mức ý nghĩa (significance level)

Khi áp dụng kiểm nghiệm MK cho thấy hầu hết các tháng đều không có xu hướng rõ ràng. Nhiệt độ các tháng 1, 4, 10 và 12 có xu hướng giảm ($S < 0$). Ngược lại ở các tháng 6, 7 và 9 có xu hướng tăng, với giá trị S lần lượt là 111, 95 và 115 (bảng 3.5), giá trị P là 0,0153; 0,0383 và 0,0120; $Z = 2,07-2,51$ chỉ ra xu hướng tăng trong những tháng này với độ tin cậy đạt 95%. Tốc độ tăng của nhiệt độ ở các tháng 6, 7 và 9 lần lượt là 0,027°C/năm, 0,039°C/năm và 0,036°C/năm. Nhiệt độ trong các tháng 2, 3, 5, 8 và 11 cũng có xu hướng tăng ($S > 0$), tuy nhiên không có ý nghĩa thống kê (bảng 3.5).

Trong mùa đông, kết quả chỉ giá trị kiểm nghiệm MK dương ($S=67$), cho thấy xu hướng tăng của nhiệt độ nước biển theo thời gian. Tham số $Z=1,45$ nhỏ hơn $Z_{0,05}=1,67$, $P=0,15$, chỉ ra xu hướng tăng này có mức độ tin cậy nhỏ hơn 90%. Vào mùa hè, nhiệt độ cũng chỉ ra một xu hướng tăng theo thời gian ($S=139$). Tham số $Z=2,64$ lớn hơn $Z_{0,005}=2,58$, $P=0,008$, chỉ ra xu hướng tăng của nhiệt độ với độ tin cậy đạt 99%. Phương pháp phân tích Sen chỉ ra xu hướng tăng của nhiệt độ trong mùa hè với tốc độ $0,03^{\circ}\text{C}/\text{năm}$ trong giai đoạn 1995-2020 (bảng 3.5).

Bảng 3.6. Phân tích xu thế của nhiệt độ nước tại trạm Bãi Cháy giai đoạn 1995-2020

Thời gian	P	MK (Z)	MK Test (S)	α	Slope ($^{\circ}\text{C}/\text{năm}$)	Xu hướng
1	0,2339	1,19	55	0,1	0,041	Không có ý nghĩa thống kê
2	0,0472	1,98	91	0,1	0,099	Có ý nghĩa thống kê
3	0,0093	2,6	119	0,1	0,117	Có ý nghĩa thống kê
4	0,2704	1,1	51	0,1	0,042	Không có ý nghĩa thống kê
5	0,0136	2,47	113	0,05	0,085	Có ý nghĩa thống kê
6	0,0082	2,64	121	0,05	0,055	Có ý nghĩa thống kê
7	0,0580	1,9	87	0,1	0,047	Có ý nghĩa thống kê
8	0,0580	1,9	87	0,1	0,042	Có ý nghĩa thống kê
9	0,0153	2,42	111	0,05	0,062	Có ý nghĩa thống kê
10	0,6277	0,49	23	0,1	0,011	Không có ý nghĩa thống kê
11	0,1584	1,41	65	0,1	0,042	Không có ý nghĩa thống kê
12	0,2011	1,28	59	0,1	0,037	Không có ý nghĩa thống kê
Năm	0,0235	3,04	139	0,01	0,052	Có ý nghĩa thống kê
Mùa đông	0,0093	2,6	119	0,05	0,066	Có ý nghĩa thống kê
Mùa hè	0,0119	2,51	115	0,05	0,05	Có ý nghĩa thống kê

Ghi chú: α là mức ý nghĩa (significance level)

Tại trạm Bãi Cháy, nhiệt độ trung bình năm bề mặt nước biển giai đoạn 1995-2020 thay đổi đáng kể qua các năm, với nhiệt độ trung bình trong 26 năm là $25,48^{\circ}\text{C}$. Nhiệt độ trung bình nước biển lớn nhất là $27,99^{\circ}\text{C}$ vào năm 2015, lớn hơn $2,52^{\circ}\text{C}$ so với nhiệt độ toàn giai đoạn. Trong khi nhiệt độ trung bình năm nhỏ nhất là

23,65°C vào năm 1996, thấp hơn so với nhiệt độ trung bình toàn giai đoạn là 1,82°C. Theo kết quả tính toán cũng chỉ ra nhiệt độ trung bình hàng năm khá gần với nhiệt độ trung bình nhiều năm, với STD khoảng 0,82°C và CV là 3,23%. Theo thời gian nhiệt độ trung bình năm ở trạm Bãi Cháy có xu hướng tăng, ứng với phương trình hồi quy tuyến tính với độ dốc dương ($a = 0,0625$) và hệ số $R^2 = 0,3379$. Do đó, khoảng 33% sự khác nhau của nhiệt độ nước biển bề mặt hàng năm được giải thích bằng mô hình hồi quy tuyến tính (hình 3.13a).

Bảng 3.7. Phân tích xu thế của nhiệt độ nước tại trạm Hòn Dấu trong giai đoạn 2008-2020 [153]

Thời gian	P	MK (Z)	MK Test (S)	α	Tốc độ (°C/năm)	Xu hướng
1	0,0087	2,62	44	0,05	0,237	Có ý nghĩa thống kê
2	0,5022	0,67	12	0,1	0,069	Không có ý nghĩa thống kê
3	0,0441	2,01	34	0,05	0,197	Có ý nghĩa thống kê
4	0,2464	1,16	20	0,1	0,078	Không có ý nghĩa thống kê
5	0,1272	1,53	26	0,1	0,109	Không có ý nghĩa thống kê
6	0,0327	2,14	36	0,05	0,080	Có ý nghĩa thống kê
7	0,2464	1,16	20	0,1	0,066	Không có ý nghĩa thống kê
8	0,7603	0,31	6	0,1	0,016	Không có ý nghĩa thống kê
9	0,0995	1,65	28	0,1	0,047	Có ý nghĩa thống kê
10	0,6693	0,43	8	0,1	0,047	Không có ý nghĩa thống kê
11	0,2464	1,16	20	0,1	0,096	Không có ý nghĩa thống kê
12	0,5022	0,67	12	0,1	0,077	Không có ý nghĩa thống kê
Năm	0,0124	2,50	42	0,05	0,093	Có ý nghĩa thống kê
Mùa đông	0,0586	1,89	32	0,1	0,187	Có ý nghĩa thống kê
Mùa hè	0,2464	1,16	20	0,1	0,057	Không có ý nghĩa thống kê

Ghi chú: α là mức ý nghĩa (significance level)

Nhiệt độ nước biển bề mặt trong cả mùa hè và mùa đông giai đoạn 1995-2020, đều có xu hướng tăng khá rõ ràng, với hệ số R^2 lần lượt là 0,36 và 0,27. Mô hình hồi quy tuyến tính giải thích khoảng 36 và 27% sự thay đổi giữa các năm của nhiệt độ nước biển bề mặt trong mùa hè và mùa đông (hình 3.13 b, hình 3.13c).

Bảng 3.8. Phân tích xu thế của nhiệt độ nước tại trạm Bãi Cháy trong giai đoạn 2008-2020

Thời gian	P	MK (Z)	MK Test (S)	α	Tốc độ (°C/năm)	Xu hướng
1	0,0239	2,26	38	0,05	0,266	Có ý nghĩa thống kê
2	0,5022	0,67	12	0,1	0,207	Không có ý nghĩa thống kê
3	0,0995	1,65	28	0,1	0,301	Có ý nghĩa thống kê
4	0,5022	0,67	12	0,1	0,09	Không có ý nghĩa thống kê
5	0,0995	1,65	28	0,1	0,142	Có ý nghĩa thống kê
6	0,0768	1,77	30	0,1	0,12	Có ý nghĩa thống kê
7	0,2997	1,04	18	0,1	0,094	Không có ý nghĩa thống kê
8	0,5022	0,67	12	0,1	0,019	Không có ý nghĩa thống kê
9	0,6693	0,43	8	0,1	0,027	Không có ý nghĩa thống kê
10	0,8548	0,18	4	0,1	0,034	Không có ý nghĩa thống kê
11	0,2997	1,04	18	0,1	0,09	Không có ý nghĩa thống kê
12	0,6693	0,43	8	0,1	0,087	Không có ý nghĩa thống kê
Năm	0,0586	1,89	32	0,1	0,103	Có ý nghĩa thống kê
Mùa đông	0,0769	1,77	30	0,1	0,21	Có ý nghĩa thống kê
Mùa hè	0,3601	0,92	16	0,1	0,078	Không có ý nghĩa thống kê

Ghi chú: α là mức ý nghĩa (significance level)

Các phương pháp phân tích hồi quy tuyến tính chỉ ra nhiệt độ trung bình hàng tháng tại trạm Bãi Cháy có xu thế chung là tăng trong giai đoạn 1995-2020, với hệ số tương quan thay đổi từ 0,031 đến 0,353 (hình 3.14). Điều này cũng khá tương đồng khi áp dụng kiểm nghiệm MK cho nhiệt độ các tháng. Nhiệt độ các tháng trong mùa đông (tháng 11-12 và 1) và các tháng trong mùa chuyển tiếp (tháng 4 và 10) có xu thế tăng nhưng không rõ ràng (mức độ tin cậy dưới 90%). Nhiệt độ các tháng

còn lại (tháng 2, 3, tháng 5-9) có xu hướng tăng rõ ràng hơn, với độ tin cậy đạt trên 90%. Tốc độ tăng của nhiệt độ trong các tháng này lớn nhất là $0,117^{\circ}\text{C}/\text{năm}$ vào tháng 3 và nhỏ nhất là $0,042^{\circ}\text{C}$ vào tháng 8.

Kết quả phân tích tại trạm Bãi Cháy chỉ ra giá trị S trong giai đoạn 1995-2020 dương (139), $Z = 3,04$, $P = 0,023$ cho thấy xu hướng tăng với độ tin cậy 99% trong giai đoạn này. Tốc độ tăng của nhiệt độ nước bề mặt tại trạm Bãi Cháy trong giai đoạn 1995-2020 là $0,052^{\circ}\text{C}/\text{năm}$, lớn hơn gấp 2,6 lần so với sự gia tăng tại trạm Hòn Dấu (bảng 3.6)

Xu thế tăng trong cả mùa đông và mùa hè của nhiệt độ tại trạm Bãi Cháy cũng được chỉ ra khi sử dụng kiểm nghiệm MK, với tham số S lần lượt là 119 và 115. Tham số Z trong cả hai mùa đều lớn hơn $Z_{0,025} = 1,96$, chỉ ra xu hướng tăng này có mức độ tin cậy đạt 95%. Phương pháp phân tích Sen chỉ ra xu hướng tăng của nhiệt độ trong mùa đông và mùa hè với tốc độ lần lượt là $0,066^{\circ}\text{C}/\text{năm}$ và $0,05^{\circ}\text{C}/\text{năm}$ trong giai đoạn 1995-2020 (bảng 3.6). Tại trạm Bãi Cháy, nhiệt độ nước biển trong mùa đông có xu hướng tăng rõ ràng hơn so với tại trạm Hòn Dấu và tốc độ tăng của nhiệt độ cũng nhanh hơn.

Để đánh giá xu hướng tăng của nhiệt độ nước tại khu vực CB-HL trong giai đoạn gần đây, luận án cũng phân tích nhiệt độ nước tại trạm Hòn Dấu và Bãi Cháy trong thời gian từ năm 2008 đến 2020. Kết quả phân tích tại trạm Hòn Dấu cho thấy trong giai đoạn 2008-2020 đều cho thấy nhiệt độ trung bình tháng, mùa và năm có xu hướng tăng với tham số $S > 0$. Đối với xu hướng năm, tham số $Z = 2,5 > 1,65$, giá trị $P = 0,0124$ nhỏ hơn mức ý nghĩa $\alpha = 0,05$ cho thấy xu hướng tăng của nhiệt độ năm với độ tin cậy đạt 95%. Dựa vào phân tích Sen cho thấy tốc độ tăng của nhiệt năm trong giai đoạn này $0,093^{\circ}\text{C}$, cao gấp 4,65 lần so mức độ tăng trong giai đoạn 1995-2020 (bảng 3.7).

Trong mùa đông, tham số $Z = 1,89 > 1,65$, giá trị $P = 0,059$ nhỏ hơn mức ý nghĩa $\alpha = 0,1$, điều này cho thấy xu hướng tăng của nhiệt độ trong mùa này với tốc độ $0,187^{\circ}\text{C}/\text{năm}$. Vào mùa hè, giá trị $P = 0,246$ lớn hơn mức ý nghĩa $\alpha = 0,1$, cho thấy mức độ tin cậy tăng của nhiệt độ trong mùa này nhỏ hơn 90% (bảng 3.7).

Tương tự như giai đoạn 1995-2020, hầu hết các tháng (tháng 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11 và 12) trong giai đoạn 2008-2020 đều không có xu hướng rõ ràng, với giá trị P

$< 0,1$. Những tháng còn lại (tháng 1, 3, 6 và tháng 9) có xu hướng tăng với độ tin cậy 90% vào tháng 9 và 95% vào các tháng 1, 3 và 6. Tốc độ tăng của nhiệt độ lớn nhất vào tháng 1 với $0,237^{\circ}\text{C}$, tiếp theo là tháng 3, 6 và tháng 9 với giá trị tương ứng là $0,197^{\circ}\text{C}$, $0,08^{\circ}\text{C}$ và $0,047^{\circ}\text{C}$ (bảng 3.7). Đáng chú ý nhiệt độ nước trung bình trong tháng 6 và 9 chỉ ra xu hướng tăng rõ ràng trong cả hai giai đoạn (1995-2020 và 2008-2020) (bảng 3.5 và bảng 3.7).

Kết quả phân tích tại trạm Bãi Cháy giai đoạn 2008-2020 đều cho thấy xu hướng tăng của nhiệt độ trung bình tháng, mùa và năm, với tham số $S > 0$, tuy nhiên xu thế này không rõ ràng, chỉ có ý nghĩa ở một số tháng nhất định. Đối với xu hướng năm, tham số $Z = 1,89 > 1,65$, giá trị $P = 0,0124$ nhỏ hơn mức ý nghĩa $\alpha = 0,1$ cho thấy xu hướng tăng của nhiệt độ năm với độ tin cậy đạt 90%. Dựa vào phân tích Sen cho thấy tốc độ tăng của nhiệt độ năm trong giai đoạn này $0,103^{\circ}\text{C}$, cao gấp gần 2 lần so với mức độ tăng trong giai đoạn 1995-2020 (bảng 3.8).

Trong mùa đông, tham số $Z = 1,77 > 1,65$, giá trị $P = 0,059$ nhỏ hơn mức ý nghĩa $\alpha = 0,1$, điều này cho thấy xu hướng tăng của nhiệt độ trong mùa này có độ tin cậy 90%. Tốc độ tăng của nhiệt độ trong mùa đông đạt $0,21^{\circ}\text{C}/\text{năm}$, cao hơn 3 lần so với thời kỳ 1995-2020. Vào mùa hè, nhiệt độ có xu hướng tăng (giá trị $S > 0$), tuy nhiên xu hướng này không rõ ràng (bảng 3.8)

Nhiệt độ từng tháng trong giai đoạn 2008-2020 tăng với $S > 0$, tuy nhiên xu hướng tăng không rõ ràng và chỉ có ý nghĩa thống kê đối với một số tháng trong năm. Các tháng 2, 4, 7-12 có xu hướng tăng không rõ ràng, với giá trị $P > 0,1$. Chỉ có 4 tháng trong năm là tháng 1, 3, 5, 6 có xu hướng tăng với độ tin cậy đạt 90-95%. Trong bốn tháng này, tốc độ tăng của nhiệt độ lớn nhất vào tháng 3 với $0,301^{\circ}\text{C}/\text{năm}$, sau đó đến tháng 1 với $0,266^{\circ}\text{C}/\text{năm}$, tháng 5 với $0,142^{\circ}\text{C}/\text{năm}$ và nhỏ nhất vào tháng 6 với $0,12^{\circ}\text{C}/\text{năm}$ (bảng 3.8).

Trong nghiên cứu này, xu hướng tăng của nhiệt độ xảy ra ở hầu hết các tháng, tuy nhiên chỉ có một số tháng có ý nghĩa thống kê. Tốc độ tăng của nhiệt độ là $0,02^{\circ}\text{C}/\text{năm}$ và $0,052^{\circ}\text{C}/\text{năm}$ cho các giai đoạn 1995-2020 tương ứng với trạm Hòn Dấu và Bãi Cháy. Nhiệt độ nước biển có xu hướng tăng nhanh trong giai đoạn gần đây, với tốc độ tăng lên $0,093^{\circ}\text{C}/\text{năm}$ (Hòn Dấu) và $0,103^{\circ}\text{C}/\text{năm}$ (Bãi Cháy). Xu hướng tăng của nhiệt độ cũng được công bố bởi tác giả [Vũ Thanh Ca \[142\]](#) với nhiệt

độ tăng lên $0.010 \pm 0.012^{\circ}\text{C}/\text{năm}$ (1956-2012) tại trạm Hòn Dấu, tuy nhiên lại không có xu hướng rõ ràng ở trạm Bãi Cháy trong giai đoạn 1962-2012. Một lý do cho sự chênh lệch giữa các kết quả là sự tăng nhanh chóng của nhiệt độ nước trong thời gian gần đây. Theo NOAA [154], nhiệt độ bề mặt toàn cầu theo thập kỷ cho giai đoạn 2011-2020 là $0,82^{\circ}\text{C}$ và vượt qua giá trị thập kỷ trước đó (2001-2010) là $0,62^{\circ}\text{C}$. Fang và cộng sự [155] đã chỉ ra sự gia tăng nhiệt độ bề mặt biển ở Biển Đông với tốc độ $0,026^{\circ}\text{C}/\text{năm}$ và $0,05^{\circ}\text{C}/\text{năm}$ tương ứng với các giai đoạn 1982-2004 và 1993-2003. Điều đáng chú ý, xu hướng tăng nhiệt độ vào tháng 6 và 9 trong cả 2 giai đoạn 1995-2020 và 2008-2020 ở khu vực nghiên cứu gợi ý khả năng mùa hè sẽ có nhiệt độ cao hơn kéo dài hơn do BĐKH. Đây là những nhận định ban đầu, nhưng chúng nhất quán với cảnh báo của Wang và cộng sự [156] rằng từ năm 1952 đến 2011, độ dài mùa hè đã tăng từ 78 lên 95 ngày và độ dài của mùa xuân, mùa thu và mùa đông giảm tương ứng từ 124 xuống 115, 87 xuống 82, và 76 xuống 73 ngày.

Nhiệt độ nước biển thay đổi đáng kể tùy thuộc vào các yếu tố khí hậu ở khu vực. Cụ thể, nhiệt độ nước Biển Đông, cũng như ở khu vực nghiên cứu, chủ yếu bị ảnh hưởng bởi gió mùa thổi ngược chiều: từ phía Tây Nam vào mùa hè và từ phía Đông Bắc vào mùa đông [157] dao động Nam Thái Bình Dương (ENSO). Các kết quả từ ảnh vệ tinh và số liệu đo đạc cũng chỉ ra sự ấm lên đáng kể của khu vực Biển Đông thời kỳ El Niño, do gió bất thường gây ra [158]. Ví dụ, nhiệt độ nước biển hàng năm cao hơn vào các năm 1998, 2015 cũng tương ứng với các sự kiện El Niño xảy ra trong giai đoạn 1997-1998 và 2015-2016. Ngược lại, nhiệt độ nước biển hàng năm thấp hơn vào năm 2008 và 2011 tương ứng với các sự kiện La Niña mạnh mẽ vào các năm 2007-2008 và 2010-2011 [153]. Tuy nhiên, không phải lúc nào điều này cũng xảy ra tương ứng như vậy mà các yếu tố khác cũng ảnh hưởng đến sự thay đổi của nhiệt độ nước biển. Ví dụ, vào năm 2019, đã có một sự kiện El Niño yếu ($\text{ONI tối đa} = 0,9$), nhưng nhiệt độ nước biển trung bình hàng năm có thể đạt $26,6^{\circ}\text{C}$ trong giai đoạn 1995-2020. Ngược lại, nhiệt độ trung bình hàng năm tương đối cao ($25,51^{\circ}\text{C}$) vào năm 2000 khi các sự kiện La Niña cực đoan xảy ra trong năm này. ENSO mất khoảng 8 tháng mới ảnh hưởng đến nhiệt độ nước biển ở khu vực nghiên cứu, với giá trị thay đổi có thể lên tới $1,2^{\circ}\text{C}$ [153].

3.2. Hiệu chỉnh và kiểm chứng mô hình

3.2.1. Mô hình thủy động lực

3.2.1.1. Hiệu chỉnh các tham số của mô hình thủy động lực

a) Hệ số nhám đáy (bottom roughness)

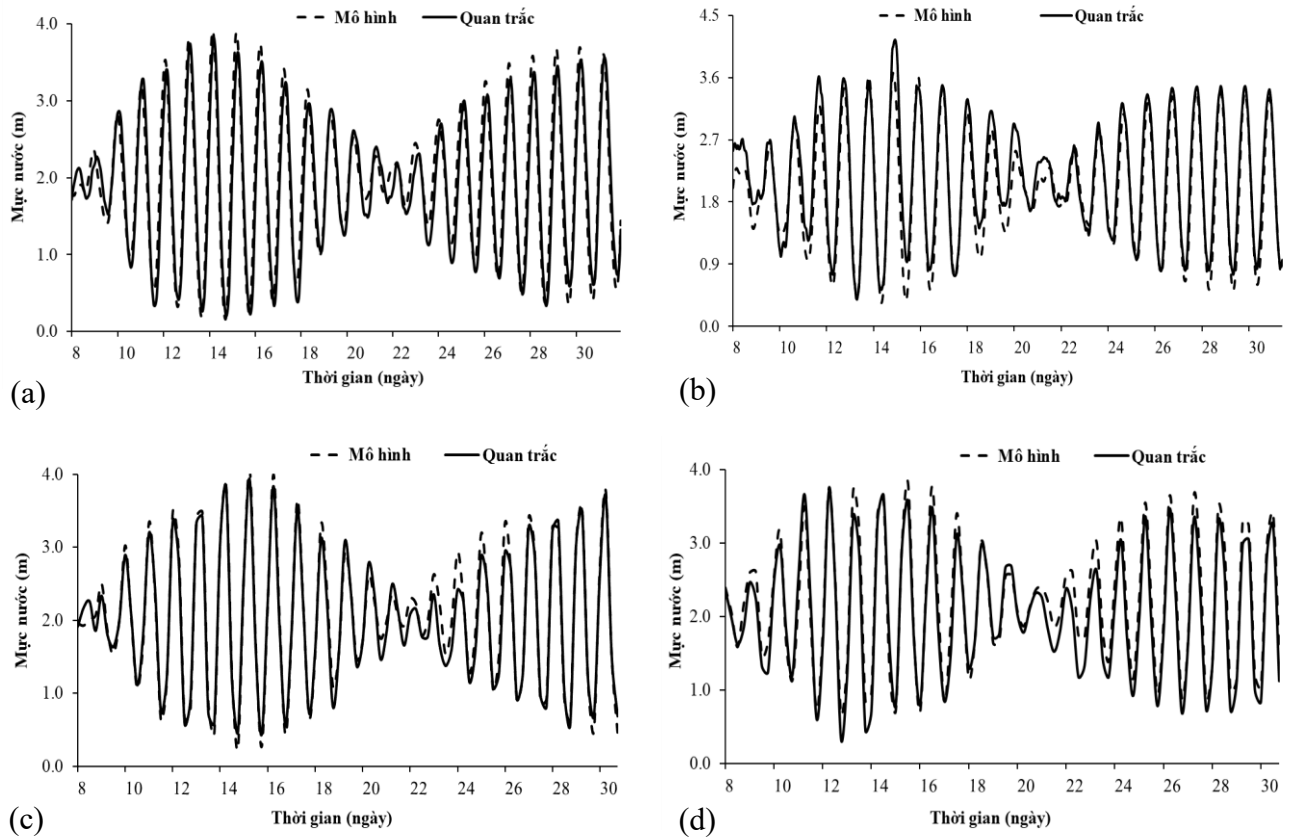
Mô hình thủy động lực có thể sử dụng một số tham số như Manning, White-Colebrook, Chezy hoặc Z_0 để hiệu chỉnh hệ số nhám đáy. Trong nghiên cứu này, lựa chọn sử dụng hệ số Manning (n) biến đổi theo không gian với giá trị 0,018-0,023 $\text{m}^{-1/3}\text{s}$. Các hệ số Manning lớn hơn ở điều kiện trầm tích đáy là vật liệu thô và nhỏ hơn ở điều kiện trầm tích đáy là hạt mịn. Căn cứ để tính toán các hệ số này dựa vào bản đồ phân bố trầm tích tầng mặt và Tài liệu hướng dẫn lựa chọn các hệ số Manning [159-160]. Sau nhiều lần hiệu chỉnh, hệ số Manning cho mô hình ở khu vực CB-HL được chọn bằng 0,022 $\text{m}^{-1/3}\text{s}$

b) Hệ số nhót và khuếch tán theo phương ngang

Các hệ số nhót và khuếch tán theo phương ngang là các hệ số hiệu chỉnh để đưa vào sơ đồ khép kín rời của mô hình thủy động lực. Chúng phụ thuộc vào kích thước lưới tính của mô hình. Mô hình có kích thước lưới chi tiết như mô hình CB-HL thì hệ số nhót và khuếch tán theo phương ngang dao động trong khoảng 1-10 m^2/s . Trong khi đó mô hình có kích thước lưới thô (vài trăm mét trở lên) thì các hệ số này dao động từ 10 đến 100 m^2/s . Cả hai hệ số này được xác định trong quá trình hiệu chỉnh [133]. Sau nhiều lần hiệu chỉnh, hệ số khuếch tán rời và nhót rời nền theo phương ngang được lựa chọn lần lượt là 2.0 và 10.0 m^2/s . Các hệ số khuếch tán và nhót rời theo phương thẳng đứng có giá trị khá nhỏ chỉ khoảng 10^{-8} - 10^{-5} . Sau lần hiệu chỉnh và kiểm định cuối, các hệ số khuếch tán và nhót rời theo phương thẳng đứng đối với mô hình CB-HL được chọn là $2 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$.

3.2.1.2. Hiệu chỉnh và kiểm chứng mô hình thủy động lực

Mực nước của trạm Hòn Dấu và Bãi Cháy vào tháng 1 và 10 năm 2021 được sử dụng để hiệu chỉnh và kiểm chứng mô hình. Sau lần hiệu chỉnh cuối cùng, kết quả mô phỏng được so sánh lại với số liệu quan trắc cho thấy hệ số NSE dao động 0,91-0,93 đối với hiệu chỉnh (hình 3.15a, c và bảng 3.9) và 0,93-0,97 đối với kết quả kiểm chứng (hình 3.15b, d và bảng 3.9), chỉ ra sự phù hợp tốt giữa số liệu quan trắc và kết quả mô hình. Các hệ số khác cũng cho kết quả phù hợp giữa quan trắc và mô phỏng với BIAS khoảng -0,12 đến 0,17 m, và RMSE dao động từ 0,15 đến 0,23 m (bảng 3.9).



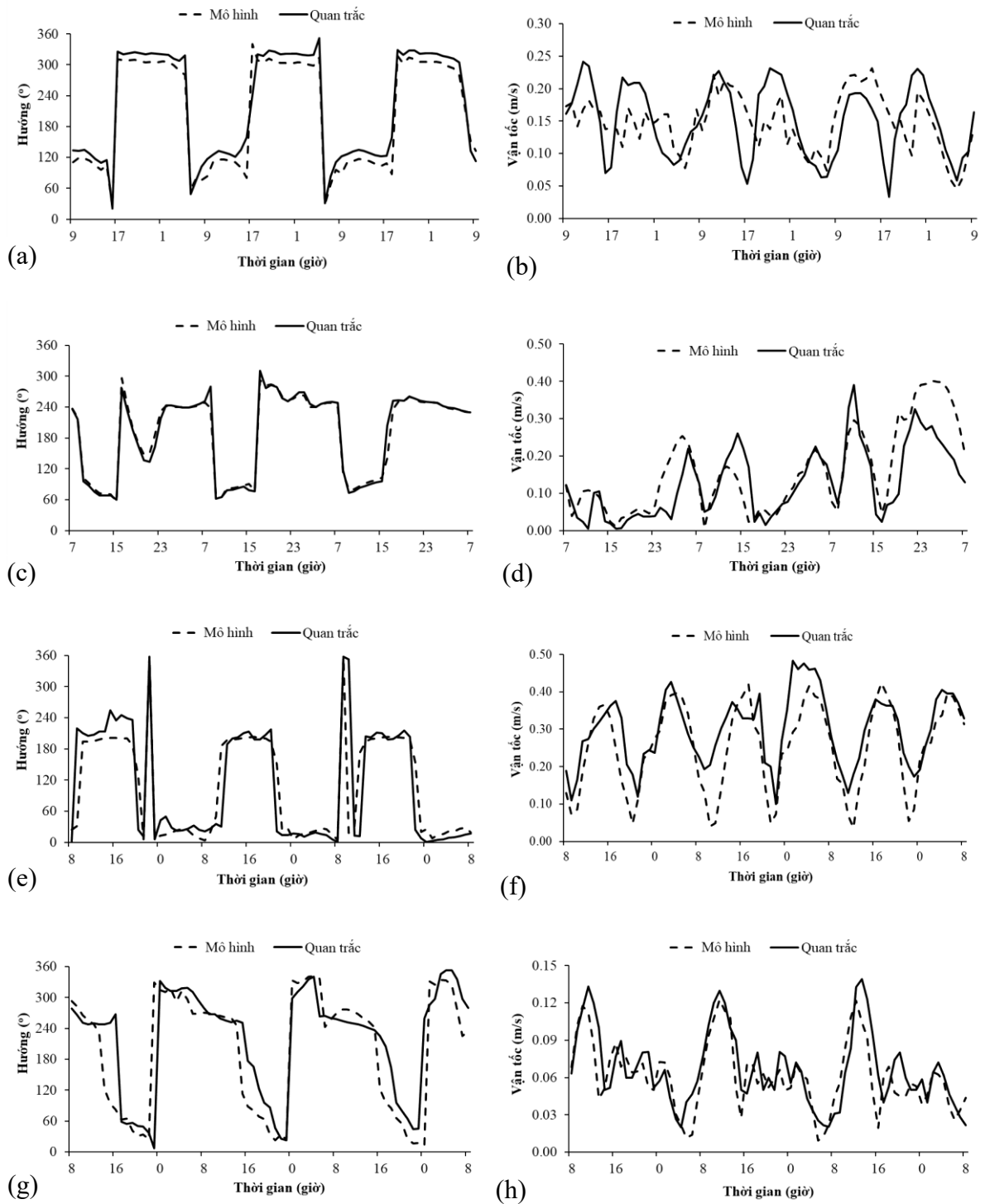
Hình 3.15. So sánh giữa mực nước quan trắc và mô hình: trạm Hòn Dấu- a) tháng 1/2021, b) tháng 10/2021; trạm Bãi Cháy- c) tháng 1/2021, d) tháng 10/2021

Tương tự, vận tốc dòng chảy cũng được hiệu chỉnh và kiểm chứng bằng cách so sánh giữa số liệu đo tại các trạm LT1, LT2, LT3, LT4 và LT5 (hình 1.10) và kết quả mô hình vào tháng 1 và 10 năm 2021, chỉ ra sự phù hợp nhất định giữa kết quả mô phỏng và đo đạc (hình 3.16). Sau lần hiệu chỉnh cuối cùng, hệ số NSE biến đổi từ 0,54-0,62 và 0,55-0,68 tương ứng với độ lớn và hướng dòng chảy. Hệ số NSE đối với kiểm chứng mô hình là 0,55-0,65 đối với vận tốc và 0,58-0,71 đối với hướng dòng chảy (bảng 3.9).

Bảng 3.9. Chỉ số đánh giá hiệu chỉnh và kiểm chứng của mô hình TĐL

Trạm	Tham số	Hiệu chỉnh			Kiểm chứng		
		NSE	RMSE	BIAS	NSE	RMSE	BIAS
Hòn Dấu	Mực nước	0,91	0,27	-0,03	0,91	0,23	0,17
Bãi Cháy		0,93	0,17	-0,02	0,97	0,15	-0,12
LT1, LT2, LT3, LT4, LT5	Vận tốc	0,54-0,62	0,03-0,07	-0,05-0,08	0,55-0,65	0,03-0,05	-0,03-0,06
	Hướng dòng chảy	0,55-0,68	25,2-36,3	-10,2-15,3	0,58-0,71	23,2-35,5	-10,2-20,3

(Đơn vị của RMSE, BIAS đối với mực nước (m); vận tốc dòng chảy (m/s); hướng dòng chảy (độ))



Hình 3.16. So sánh dòng chảy giữa quan trắc và mô hình năm 2021:

(a) hướng dòng chảy tầng đáy, LT3, tháng 1; b) vận tốc tầng đáy, LT3, tháng 1; c) hướng dòng chảy tầng mặt, LT2, tháng 1; d) vận tốc tầng mặt, LT2, tháng 1; e) hướng tầng giữa, LT1, tháng 10; f) vận tốc tầng giữa, LT1, tháng 10; g) hướng tầng mặt, LT4, tháng 10; h) vận tốc tầng mặt, LT4, tháng 10.

Sự khác biệt trung bình giữa mô phỏng và đo đạc (BIAS) khoảng -0,03 đến 0,06 m/s (tốc độ) và -10,2 đến 20,3° (hướng). Sai số RMSE là từ 23,2 đến 35,5° cho hướng và từ 0,03-0,05 m/s cho vận tốc (bảng 3.9). Mặc dù vẫn còn một số sai khác

giữa số liệu đo thực tế và kết quả mô phỏng từ mô hình, mô hình vẫn được đánh giá là chấp nhận được, xét đến đặc điểm địa hình cực kỳ phức tạp với nhiều đảo nhỏ thực tế mà dữ liệu địa hình đầu vào của mô hình chưa thể mô tả đầy đủ. Hình 3.16 minh họa một số ví dụ về kết quả so sánh giữa tốc độ dòng chảy đo được và kết quả mô hình tại một số trạm.

3.2.1.3. Các tham số đối với mô hình thủy động lực

Sau khi hiệu chỉnh và kiểm chứng mô hình thủy động lực, các tham số được lựa chọn và sử dụng trong mô hình. Các tham số này được trình bày trong [bảng 3.10](#).

Bảng 3.10. Tóm tắt các tham số hiệu chỉnh của mô hình thủy động lực

Thông số, hệ số	Giá trị
Số điểm tính	M=696, N=306
Kích thước lưới (Dx, Dy)	17,7-670,3m
Bước thời gian	30 giây
Ngưỡng giữa khô và ướt	0,1 m
Số tầng tính toán	5
Hệ số nhớt theo phương ngang (Horizontal eddy viscosity)	2.0m ² /s
Hệ số nhớt theo phương đứng (Vertical eddy viscosity)	2.0 x 10 ⁻⁶ m ² /s
Hệ số khuếch tán theo phương ngang (Horizontal eddy diffusivity)	10.0 m ² /s
Hệ số khuếch tán theo phương đứng (Vertical eddy diffusivity)	2.0 x 10 ⁻⁶ m ² /s
Hệ số nhám Manning	0,022 s/m ^{1/3}
Mô hình khép kín rối (Turbulence closure model)	k-ε
Sơ đồ bình lưu (Advection scheme)	Cyclic method (Phương pháp Cyclic)
Hiệu chỉnh hệ tọa độ Sigma (Sigma-coordinate correction)	On (Mở)
Forrester filter vertical	On (Mở)
Forrester filter horizontal	Off (Đóng)
(Mô hình dòng nhiệt khí quyển) Atmospheric heat flux model	Net incoming solar radiation (Bức xạ mặt trời hiệu dụng)

3.2.2. Mô hình chất lượng nước

3.2.2.1. Hiệu chỉnh tham số trong mô hình chất lượng nước

Mô hình CLN là một hệ thống phức tạp, bao gồm nhiều tham số có mối quan hệ tương tác lẫn nhau. Quá trình hiệu chỉnh mô hình CLN trong Delft3D là một bước quan trọng nhưng đầy thách thức, do có khoảng 85 tham số có thể ảnh hưởng đến kết quả mô phỏng. Vì vậy, việc xác định các tham số chính có ảnh hưởng quyết định đến mô hình tính toán ở khu vực và là bước cần thiết nhằm tiết kiệm thời gian tính toán mà vẫn đảm bảo kết quả của mô hình. Thông qua quá trình hiệu chỉnh mô hình, một số tham số chính được lựa chọn bao gồm:

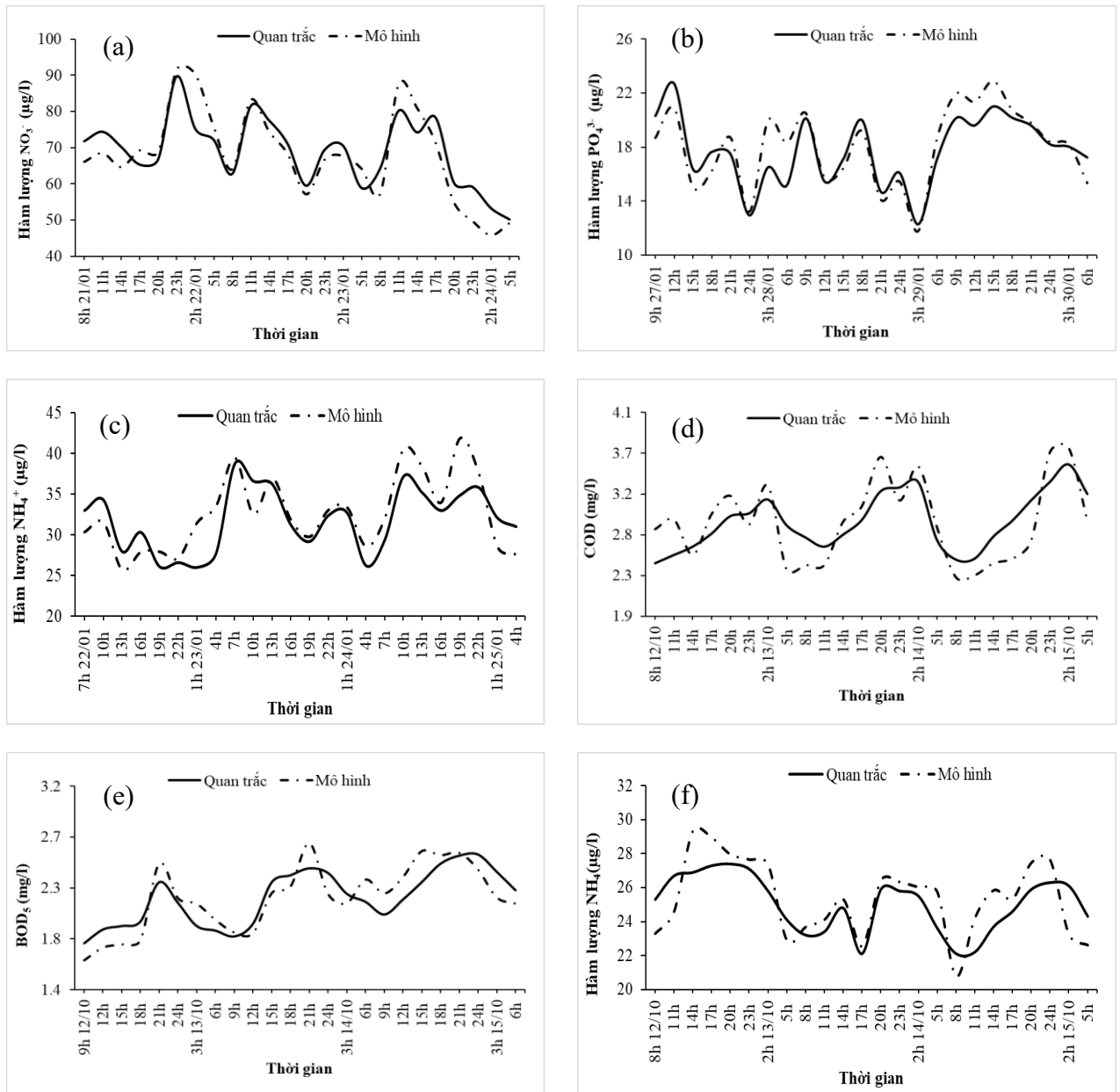
- Nhóm các tham số liên quan đến khả năng quang hợp của tảo: tốc độ quang hợp của tảo và các hằng số bán bão hòa của Nitơ, Phospho, Silic đối với tảo
- Nhóm các tham số liên quan khả năng phân hủy chất hữu cơ như phân hủy chất hữu cơ, các hệ số nhiệt độ
- Nhóm tham số liên quan đến khả năng thoát khí như hệ số cấp khí K_{lrear}
- Nhóm tham số liên quan đến khả năng hấp thụ của Phosphat như hằng số tốc độ chuyển hóa từ phosphat hòa tan sang phosphat hấp thụ, hệ số cân bằng hấp thụ.
- Nhóm tham số liên quan đến quá trình nitrat hóa và đề nitrat hóa: hằng số tốc độ phản ứng đề nitrat hóa, hằng số tốc độ phản ứng nitrat hóa.

3.2.2.2. Kiểm chứng mô hình chất lượng nước

Kết quả mô phỏng đã được so sánh với các chất hữu cơ (BOD_5 , COD) và dinh dưỡng (NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-}) quan trắc tại các trạm LT1-LT5. Sau các lần hiệu chỉnh, kết quả kiểm chứng cho thấy sự khá tương đồng giữa kết quả mô phỏng và quan trắc, với hệ số NSE tương ứng dao động từ 0,54 đến 0,67 và 0,56-0,68 (hình 3.17 và bảng 3.11). Giá trị RMSE dao động từ 0,15 đến 0,29 mg/l và từ 3,3 đến 5,2 μ g/l tương ứng với các chất hữu cơ và dinh dưỡng. Hệ số BIAS biến động trong khoảng từ -0,001 đến 0,004 mg/l đối với các chất hữu cơ và từ -1,79 đến 0,91 μ g/l đối với các chất dinh dưỡng, chỉ ra sự phù hợp có giữa các mô phỏng và quan trắc (bảng 3.11).

Bảng 3.11. Chỉ số đánh giá hiệu chỉnh và kiểm chứng của mô hình CLN

Trạm	Tham số	Hiệu chỉnh			Kiểm chứng		
		NSE	RMSE	BIAS	NSE	RMSE	BIAS
LT1, LT2, LT3, LT4, LT5	BOD ₅ , COD	0,56-0,71	0,03-0,04	-0,002-0,003	0,54-0,67	0,15-0,29	-0,001-0,004
	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , PO ₄ ³⁻	0,55-0,67	2,2-4,3	-1,2-0,78	0,56-0,68	3,3-5,2	-1,79-0,91



Hình 3.17. So sánh chất hữu cơ và dinh dưỡng giữa quan trắc và mô hình:

(a) NO₃⁻, LT1, tháng 1; (b) PO₄³⁻, LT2, tháng 1; (c) NH₄⁺, LT3, tháng 1; (d) COD, LT1, tháng 10; (e) BOD₅, LT3, tháng 10; (f) NH₄⁺, LT4, tháng 10

3.2.2.3. Tham số mô hình chất lượng nước

Các tham số trong mô hình thay đổi và khác nhau trong từng khu vực và điều kiện tính toán. Sau quá trình hiệu chỉnh và kiểm chứng mô hình, các tham số tính toán chính của mô hình CLN ở khu vực CB-HL đã được lựa chọn (bảng 3.12). Đây là các tham số cho kết quả tính toán của mô hình so với kết quả quan trắc có độ sai khác ít nhất. Ngoài ra, nhằm đánh giá những tác động chỉ do hoạt động KTXH của con người kết hợp với BDKH, đồng thời loại bỏ những yếu tố nhiễu động khác, các tham số tính toán của mô hình CLN được dùng chung cho các nhóm kịch bản hiện trạng (2019) và dự báo (2030 và 2050).

Bảng 3.12. Các tham số cơ bản của mô hình chất lượng nước

Tham số	Giá trị	Đơn vị
BOD₅, COD, DO		
Tốc độ phân hủy BOD ₅ ở nhiệt độ 20 ⁰ C	0,01	1/ngày
Tốc độ phân hủy COD ở nhiệt độ 20 ⁰ C	0,05	1/ngày
Hệ số nhiệt độ phân hủy BOD ₅	1,04	
Hệ số nhiệt độ phân hủy COD	1,02	
Hiệu suất của phương pháp Cr đối với COD	0,9	
Hiệu suất của phương pháp Mn đối với COD	0,5	
Tốc độ lắng đọng của BOD ₅	0,1	m/ngày
Lượng oxi tiêu thụ (0-BOD, 1-COD, 2- cả hai)	2	
Công thức cho sự tương tác oxi (1-12) SWRear	7	
Hệ số tương tác oxi	1	m/ngày
Nhu cầu oxi trầm tích –SOD	1,5	gO ₂ /m ³
PO₄³⁻		
PO ₄ ³⁻ hấp phụ	0,1	gP/m ³
Tốc độ hấp phụ PO ₄ ³⁻	1	1/ngày
Hệ số nhiệt độ để khoáng hóa các mảnh vụn Phospho	1,09	
Sự khoáng hóa PO ₄ ³⁻ trong trầm tích bậc 0	0,03	gP/m ² /ngày
Tốc độ khoáng hóa PO ₄ ³⁻ trong trầm tích bậc 1	0,01	1/ngày
Tỷ số P: C trong tảo khác	0,02	gP/gC
Tỷ số P: C trong tảo cát	0,02	gP/gC

NO₃⁻, NH₄⁺		
Tốc độ khử Nito bậc 1 trong nước	0,1	1/ngày
Hệ số nhiệt độ cho sự khử Nito	1,07	
Hằng số bão hòa cho sự Nitrat	0,5	gN/m ³
Tiêu chuẩn nhiệt độ cho quá trình khử Nito	3	°C
Hàm lượng oxi bão hòa cho sự khử Nito	1	g/m ³
Tốc độ khử Nito bậc 1	0,1	1/ngày
Tỷ số N: C trong tảo khác	0,16	gN/gC
Tỷ số N: C trong tảo cát	0,16	gN/gC
Tốc độ khử Nito bậc 1 trong trầm tích	0,006	1/ngày
Hàm lượng Amoni tiêu chuẩn	0,01	mgN/m ³
Tốc độ oxi hóa Amoni ở 20°C	0,1	gN/m ³ /ngày
Silic		
Tỷ số S: C trong tảo cát	0,49	gSi/gC
Hệ số tự phân của tảo cát và tảo khác	0,3	
Hệ số nhiệt độ để khoáng hóa muối Silic	1,09	
Tốc độ khoáng hóa bậc 1 của muối Silic	0,015	
Ngưỡng nhiệt độ xảy ra sự khoáng hóa muối Silic	3	°C
Tảo cát (Diatoms) và tảo khác (non- diatoms)		
Tốc độ sản xuất tối đa của tảo cát	2,3	1/ ngày
Tốc độ sản xuất tối đa của tảo khác	1,8	1/ ngày
Trạng thái hô hấp đảm bảo của tảo cát	0,036	
Trạng thái hô hấp đảm bảo của tảo khác	0,045	
Tốc độ chết của tảo khác	0,35	1/ ngày
Tốc độ chết của tảo cát	0,28	1/ ngày
Giá trị nửa bão hòa của N trong tảo cát	0,005	gN/m ³
Giá trị nửa bão hòa của P trong tảo cát	0,001	gP/m ³
Giá trị nửa bão hòa của Si trong tảo cát	0,027	gSi/m ³
Giá trị nửa bão hòa của N trong tảo khác	0,005	gN/m ³
Giá trị nửa bão hòa của P trong tảo khác	0,001	gP/m ³

3.3. Ảnh hưởng của hoạt động kinh tế xã hội và biến đổi khí hậu đến điều kiện môi trường

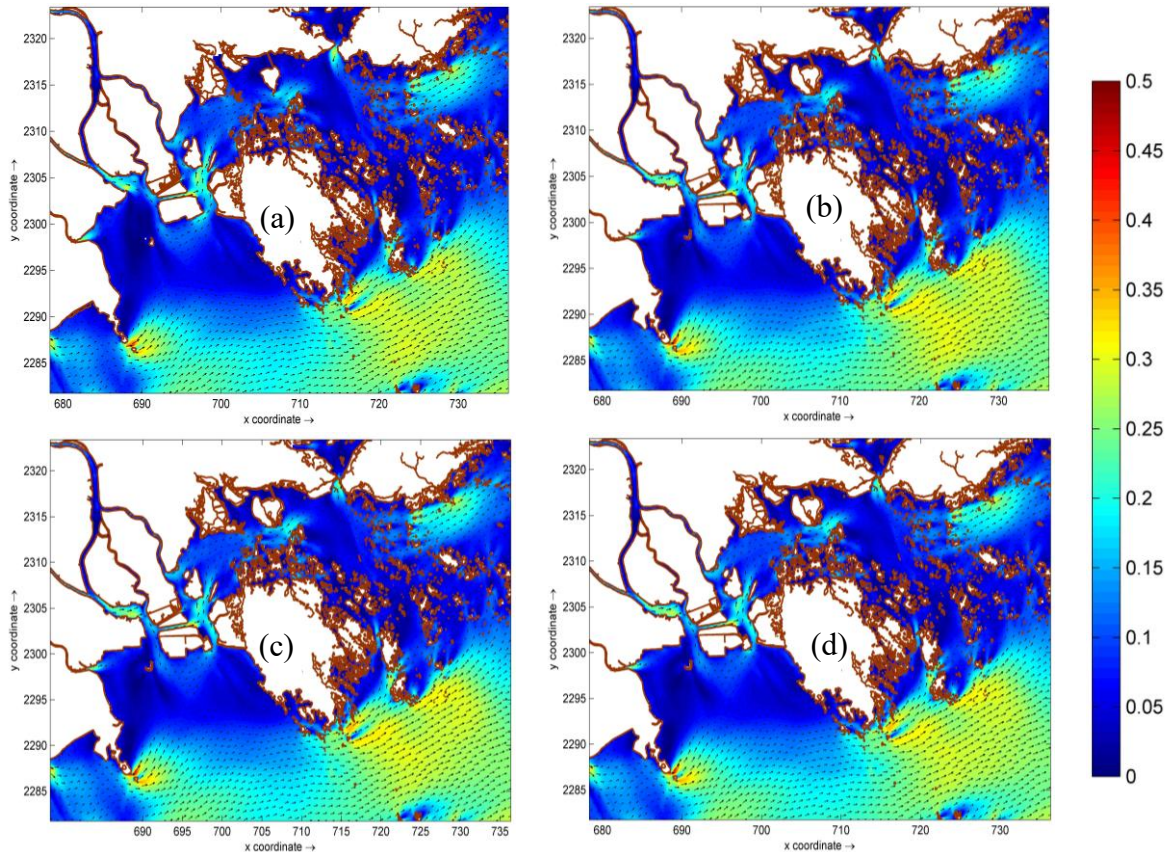
3.3.1. Dòng chảy

Ảnh hưởng của hoạt động KTXH và BĐKH đến dòng chảy ở khu vực CB-HL được đánh giá dựa trên đặc điểm dòng chảy trung bình trước lần biến, hiện trạng và BĐKH (2030, 2050). Đây là dòng chảy sau khi được loại bỏ các thành phần có chu kỳ bằng cách lấy trung bình trường dòng chảy trong một hoặc nhiều chu kỳ triều, sau đó so sánh với nhau. Một chu kỳ triều bao gồm cả triều cường và triều kém, thường là 14,75 ngày [161]. Trong nghiên cứu này, dòng chảy trung bình (dòng chảy dư) được tính bằng cách lấy trung bình qua hai chu kỳ thủy triều (14,75 ngày $\times 2 = 29,5$ ngày). Kết quả mô hình cho thấy dòng chảy dư ở khu vực CB-HL là khá nhỏ, với giá trị gần như dưới 0,5 m/s so với vận tốc dòng chảy tức thời. Vào tháng 1 (mùa gió Đông Bắc), khu vực có dòng chảy dư lớn thường xuất hiện ở phía ngoài vịnh Cửa Lục và phía cửa Cẩm - Nam Triệu (0,25-0,3 m/s). Các khu vực khác, dòng chảy dư ở tầng mặt nhỏ hơn 0,2 m/s. Dòng chảy dư vào tháng 1 cho thấy sự phân tán đáng kể về hướng. Các dòng chảy di chuyển về phía Nam từ vịnh Cửa Lục, sau đó chia thành hai hướng: một hướng chảy về phía Tây Nam ở khu vực Tây Bắc của đảo Cát Bà, trong khi hướng kia chảy về phía Đông Nam và Nam ở phía Đông Bắc và Đông đảo Cát Bà.

Vào mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam (tháng 5), vận tốc dòng dư hầu như nhỏ hơn 0,4m/s, đặc biệt phía Nam, Đông Nam, Đông đảo Cát Bà vận tốc có thể đạt 0,45m/s. Hướng của dòng chảy dư vào mùa này vẫn thể hiện sự phân kỳ rõ rệt giữa các khu vực. Hướng dòng chảy dư ở khu vực Nam, Đông Nam đảo Cát Bà chủ yếu lên phía Bắc, Đông Bắc, một phần hướng về phía vịnh Hạ Long kết hợp với dòng chảy từ trong vịnh Cửa Lục và dòng chảy phía Tây Nam đi vào vịnh Hạ Long tạo thành dòng chảy đi lên phía Đông Bắc. Dòng chảy dư vịnh Hạ Long và ven bờ phía Đông, Đông Bắc, Tây Nam đảo Cát Bà có vận tốc hầu như nhỏ hơn 0,25m/s (hình 3.18).

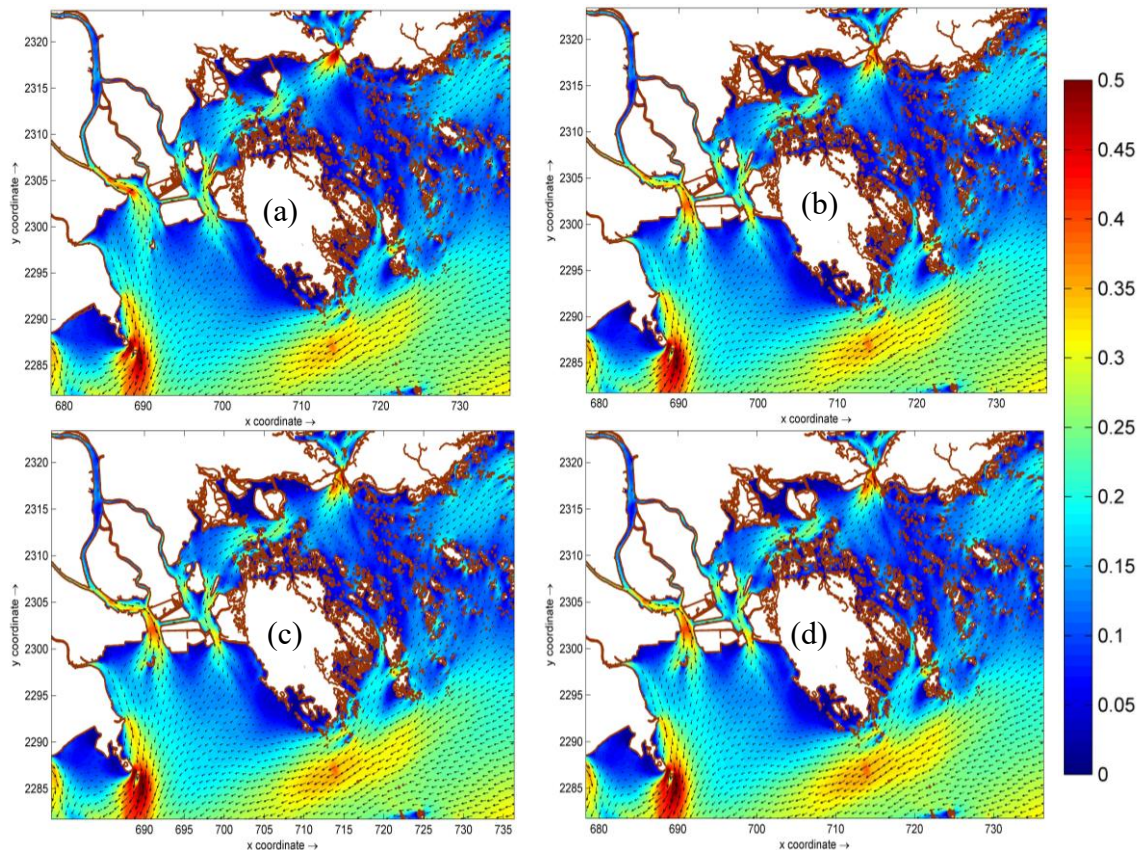
Vào mùa gió Tây Nam (tháng 7), vận tốc dòng dư lớn được tìm thấy ở khu vực cửa vịnh Cửa Lục, cửa Cẩm-Nam Triệu, với giá trị 0,3-0,5m/s. Hướng dòng chảy dư từ trong sông ra ngoài, lên phía Đông Bắc ở khu vực phía Nam và Đông Nam đảo Cát Bà. Vận tốc dòng chảy dư tăng lên đáng kể vào mùa gió chuyển tiếp từ Tây

Nam sang Đông Bắc. Toàn khu vực vận tốc dòng dư dao động 0,2-0,5m/s. Khu vực vịnh cửa Lục, cửa Cẩm-Nam Triệu, Lạch Huyện, phía Đông Nam đảo Cát Bà, bán đảo Đồ Sơn vận tốc có thể đạt 0,3-0,5m/s. Hướng của dòng chảy từ cửa sông ra ngoài, Nam và Tây Nam (hình 3.19).



Hình 3.18. So sánh trường dòng chảy trung bình tầng mặt vào mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam theo một số kịch bản: (a) 2010, (b) 2019, (c) 2030, (d) 2050

Những ảnh hưởng do hoạt động nhân sinh đến điều kiện TĐL ở khu vực CB-HL thể hiện rõ nhất là từ hoạt động lấn biển, san lấp, thay đổi địa hình ở vùng biển ven bờ khu vực Hạ Long, Hòn Gai, Bãi Cháy, Cẩm Phả và Tuần Châu. Kết quả so sánh cho thấy dòng chảy dư ở khu vực cũng có sự thay đổi đáng kể so với khi hoạt động lấn biển chưa diễn ra như hiện nay. Vào mùa gió Đông Bắc, ảnh hưởng lớn nhất là xu hướng tăng lên của dòng chảy ở phía ngoài vịnh cửa Lục. Trong khi ở khu vực phía Tây Nam vịnh Hạ Long, dòng chảy có xu hướng giảm sau khi các hoạt động lấn biển. Vào mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, sau khi có hoạt động lấn biển, dòng chảy ở ven bờ Bãi Cháy có xu hướng tăng nhẹ so với trước kia. Điều này có thể giải thích do không gian của vịnh bị thu hẹp, làm tăng nhẹ thiết diện của lòng dẫn, gây ra tăng nhẹ vận tốc dòng chảy (hình 3.18a và b).



Hình 3.19. So sánh trường dòng chảy trung bình tầng mặt vào mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc theo một số kịch bản: (a) 2010, (b) 2019, (c) 2030, (d) 2050

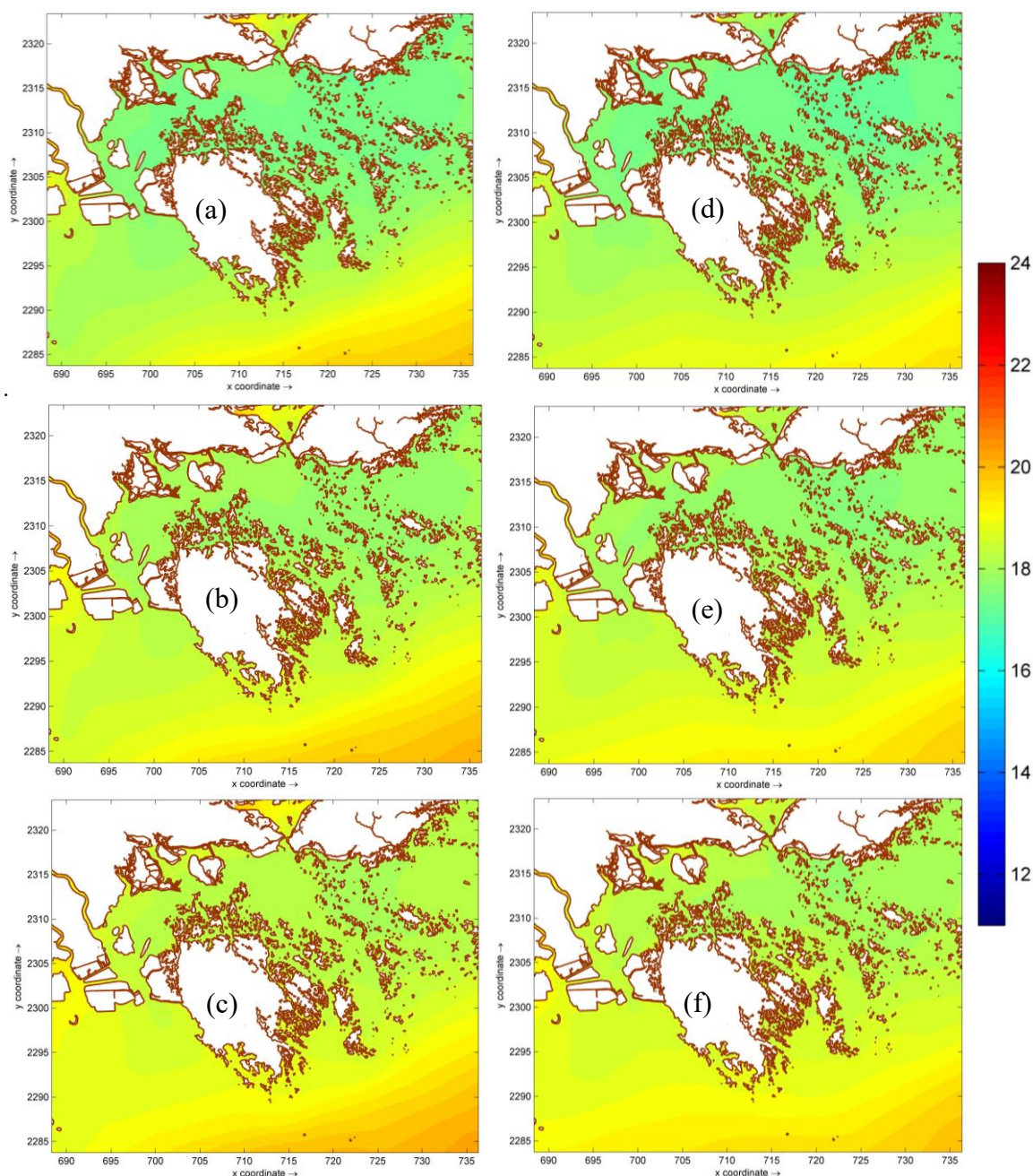
Vào mùa gió Tây Nam, ảnh hưởng nhân sinh do hoạt động lấn biển làm giảm nhẹ dòng chảy từ khu vực phía ngoài vịnh Cửa Lục đến đông Nam Vịnh Hạ Long. Trong khi ở các khu vực khác, trường dòng chảy không có sự thay đổi đáng kể. Xu hướng tương tự cũng xuất hiện đối với trường dòng chảy ở khu vực phía Tây vịnh Hạ Long vào mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc (hình 3.19a, b).

Những ảnh hưởng của BĐKH (chủ yếu là sự dâng lên của mực nước biển và tăng nhiệt độ) đến điều kiện dòng chảy của khu vực CB-HL trong giai đoạn 2019, 2030 và 2050 được tính toán. Kết quả tính toán chỉ ra, những ảnh hưởng của BĐKH đến điều kiện TĐL của khu vực này khá nhỏ, không thể hiện rõ thành các xu hướng (hình 3.18b, c, d và hình 3.19b, c, d).

3.3.2. Nhiệt độ nước

Nhiệt độ khu vực CB-HL có sự biến động rõ rệt theo mùa. Vào mùa gió Đông Bắc (tháng 1) do ảnh hưởng của khối không khí lạnh, nền nhiệt độ trung bình khá thấp, dao động chủ yếu trong khoảng 17-20°C (hình 3.20a). Tuy nhiên nền nhiệt ở khu vực tăng đáng kể vào mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam (tháng 5), do khối không khí lạnh suy yếu. Nhiệt độ trung bình dao động trong khoảng 26-

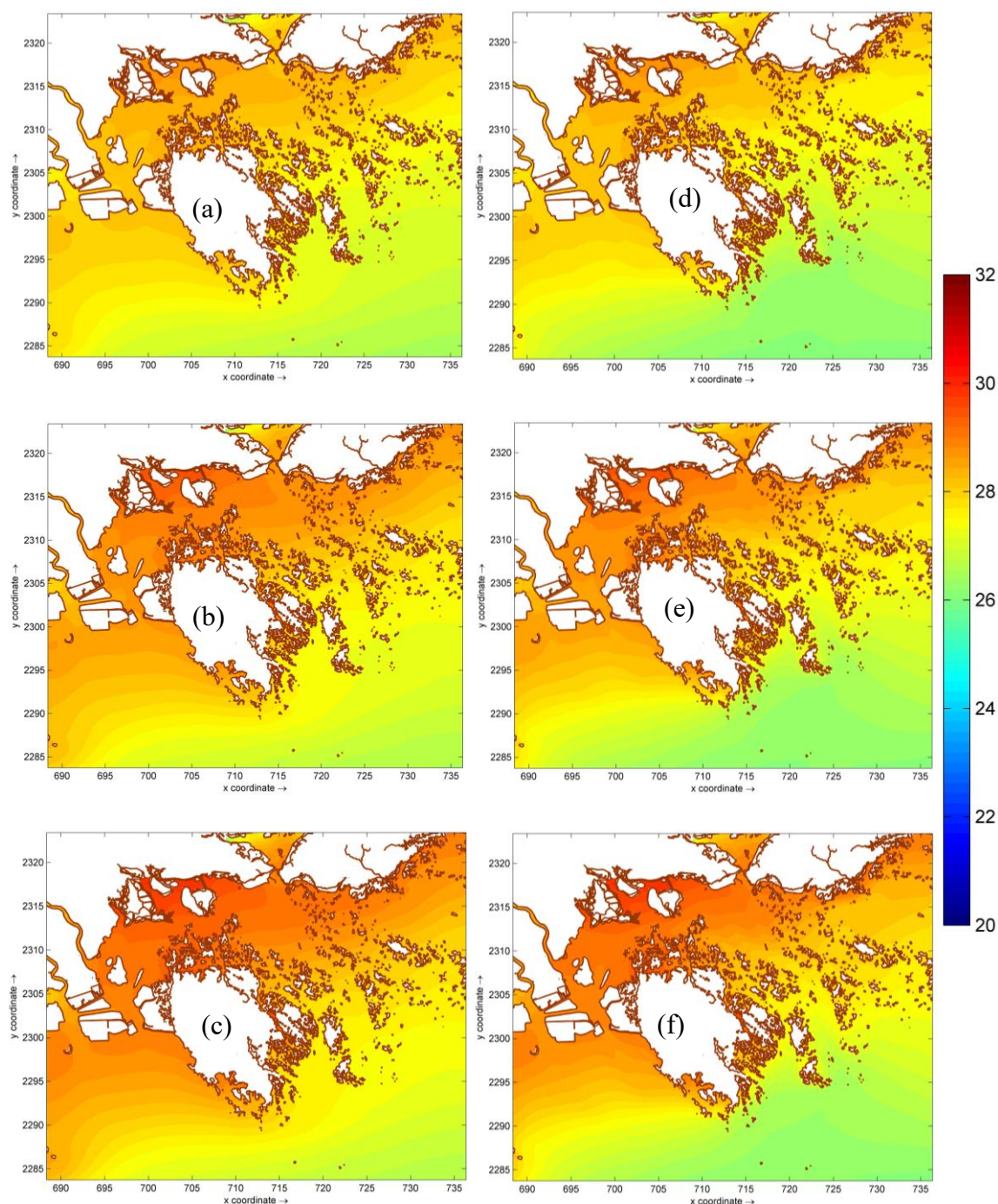
31°C. Khu vực có nhiệt độ cao hơn tập trung chủ yếu ở dải ven bờ với nền nhiệt chủ yếu 28-31°C và giảm dần ra phía ngoài với giá trị 26-28°C (hình 3.21a).



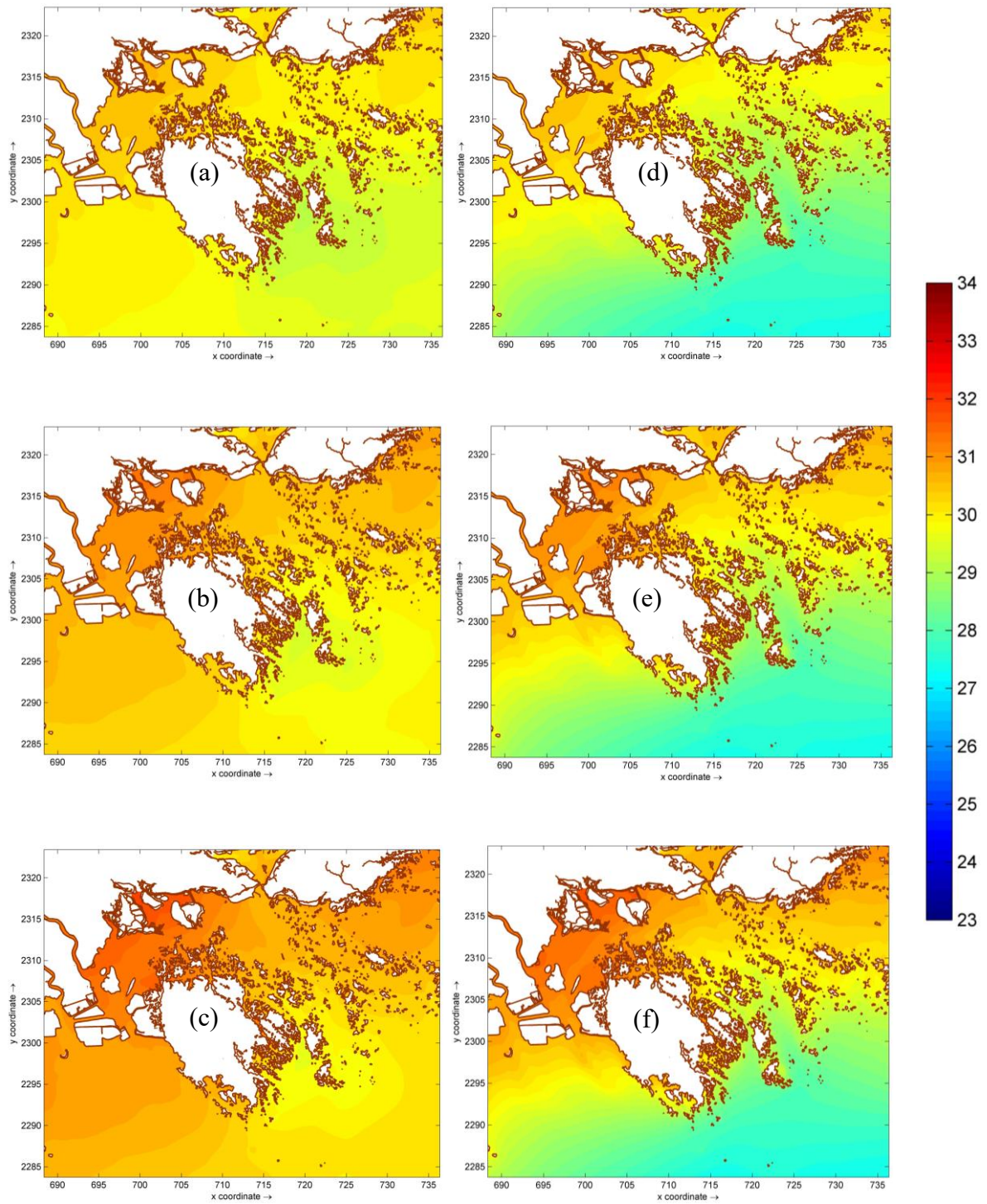
Hình 3.20. So sánh trường nhiệt độ trung bình mùa gió Đông Bắc theo các kịch bản: (a) tầng mặt, 2019; (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng mặt, 2050; (d) tầng đáy, 2019; (e) tầng đáy, 2030; (f) tầng đáy, 2050

Nhiệt độ nước tiếp tục tăng lên trong mùa gió Tây Nam (tháng 7), với nền nhiệt dao động 27-33°C (hình 3.22a). Nền nhiệt độ khu vực giảm vào mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc, với giá trị dao động chủ yếu 24-28°C (hình 3.23a). Nhiệt độ nước có xu hướng giảm dần từ mặt xuống đáy, tuy nhiên do khu vực này có độ sâu không lớn nên chênh lệch giữa các tầng không lớn. Nhiệt độ tầng mặt thường cao hơn tầng đáy khoảng 0,5-1,0°C (hình 3.20d - hình 3.23d).

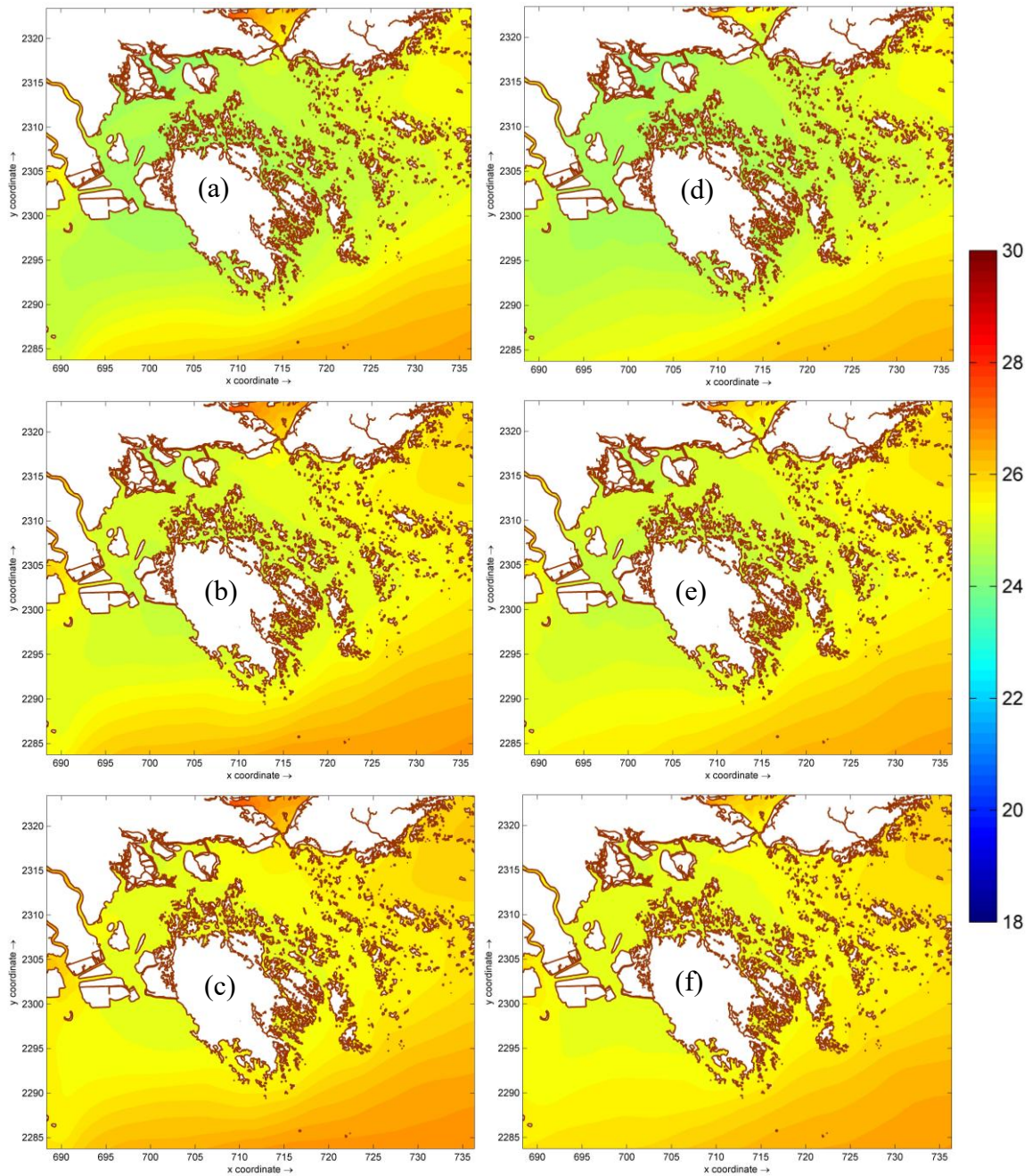
Dưới ảnh hưởng của BĐKH (tăng nhiệt độ không khí và NBD), xu hướng biến đổi nhiệt độ nước vào năm 2030 và 2050 khá tương đồng về giá trị với trong các kịch bản hiện trạng. Tuy nhiên nền nhiệt độ nước khu vực nghiên cứu trong kịch bản dự báo tăng lên rõ rệt so với kịch bản hiện trạng (2019), với giá trị khoảng 0,5-1,0°C (kịch bản dự báo năm 2030) và 1,0-2,0°C (kịch bản dự báo năm 2050), xem [hình 3.20-hình 3.23](#).



Hình 3.21. So sánh trường nhiệt độ trung bình mùa gió chuyển tiếp từ gió Đông Bắc sang Tây Nam theo các kịch bản: (a) tầng mặt, 2019; (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng mặt, 2050; (d) tầng đáy, 2019; (e) tầng đáy, 2030; (f) tầng đáy, 2050



Hình 3.22. So sánh trường nhiệt độ trung bình mùa Tây Nam theo các kịch bản: (a) tầng mặt, 2019; (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng mặt, 2050; (d) tầng đáy, 2019; (e) tầng đáy, 2030; (f) tầng đáy, 2050

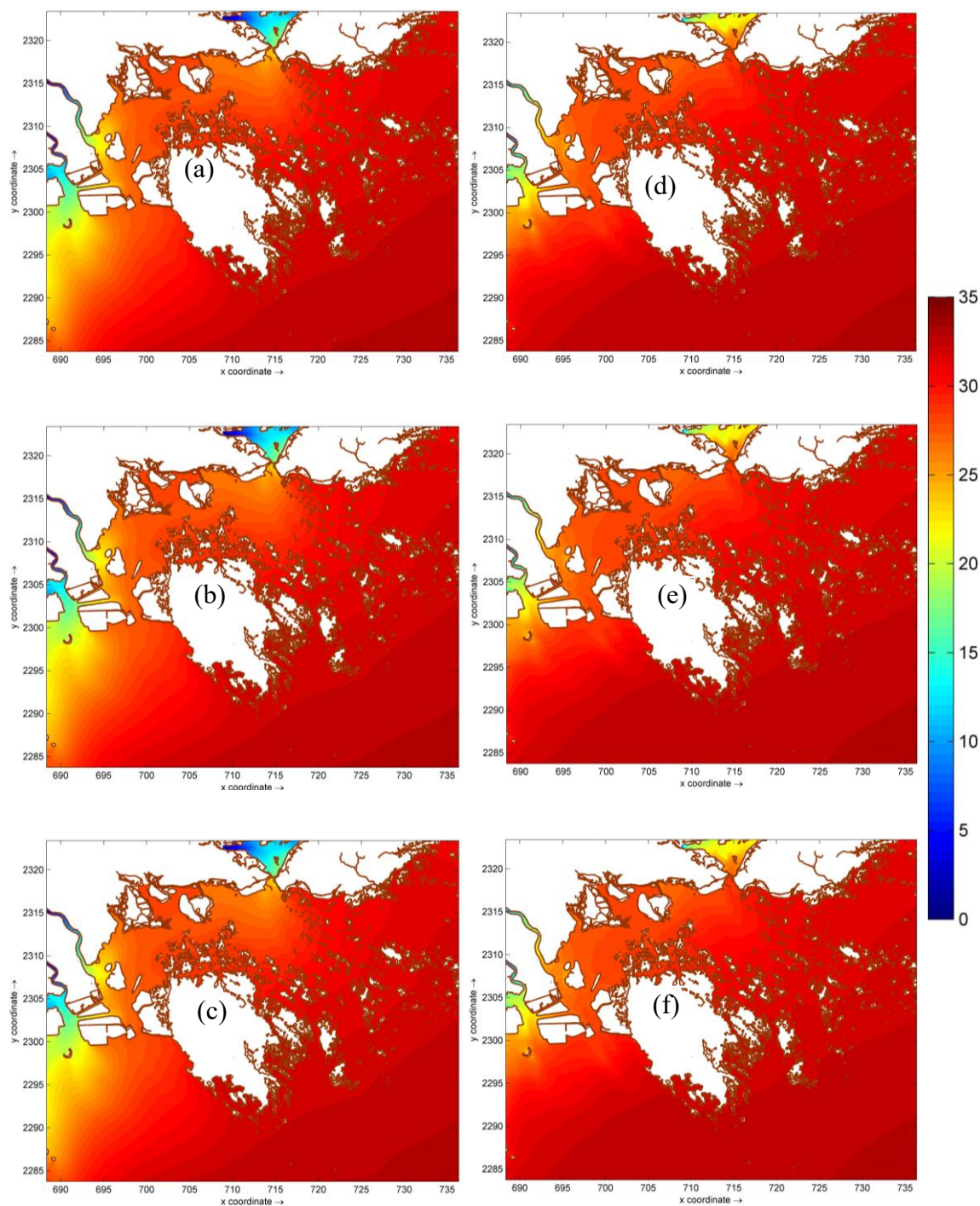


Hình 3.23. So sánh trường nhiệt độ trung bình mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc theo các kịch bản: (a) tầng mặt, 2019; (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng mặt, 2050; (d) tầng đáy, 2019; (e) tầng đáy, 2030; (f) tầng đáy, 2050

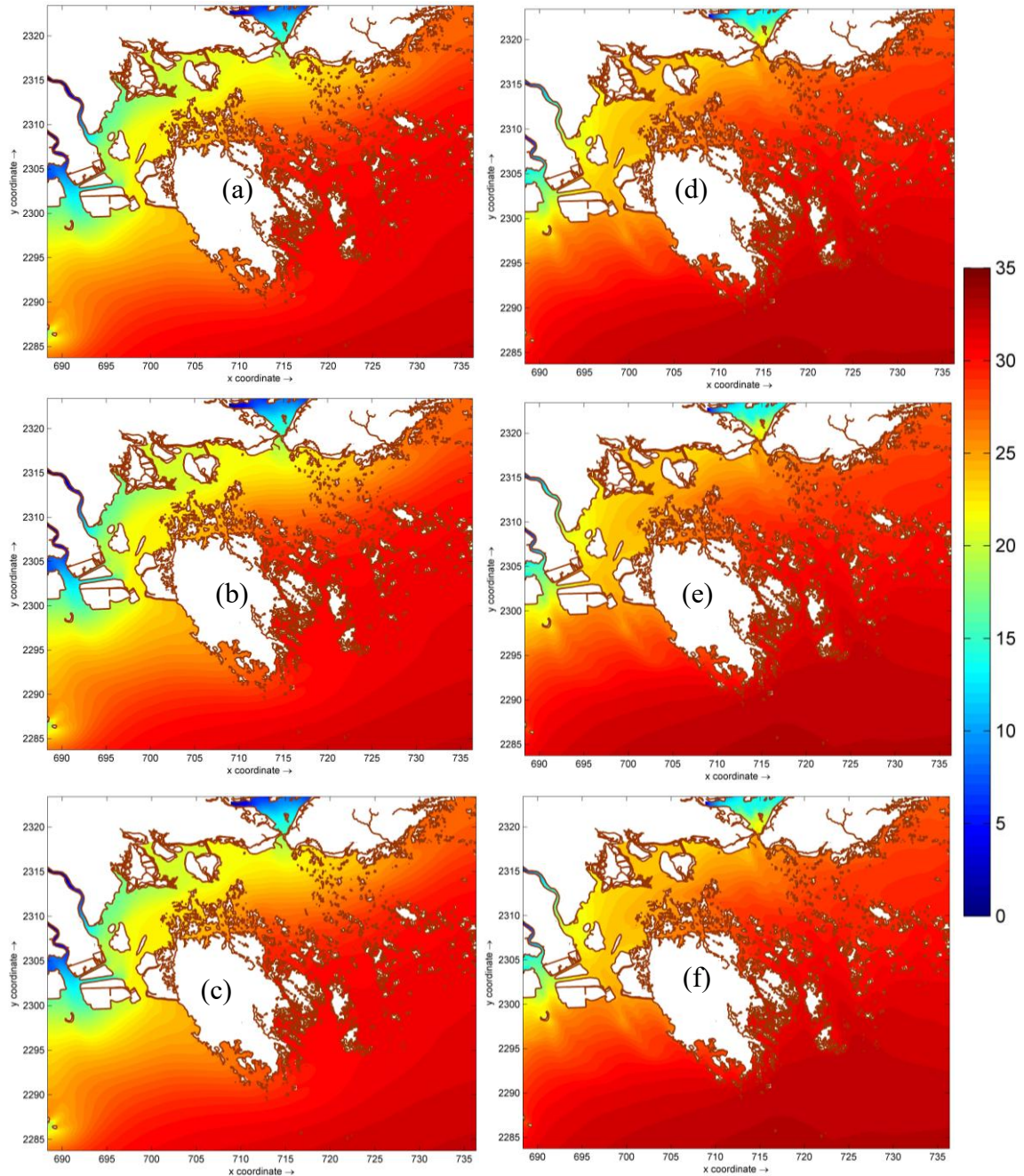
3.3.3. Độ muối

Độ muối ở vùng biển CB-HL biến động theo không gian và thời gian phụ thuộc vào dao động mực nước thủy triều, lưu lượng nước từ sông. Độ muối ở khu vực có xu hướng tăng từ ven bờ ra ngoài khơi và từ tầng mặt xuống tầng đáy. Vào mùa gió Đông Bắc (tháng 1), độ muối ở khu vực dao động từ 5-35‰. Khu vực có độ muối thấp tập trung chủ yếu ở khu vực cửa sông ven bờ như vịnh Cửa Lục, sông Chanh, Cửa Cẩm-Nam Triệu, với độ muối 5-20‰, đặc biệt vịnh Cửa Lục và trong sông chỉ

khoảng 5-10‰. Khu vực vịnh Hạ Long và ven bờ phía Tây, Tây Bắc đảo Cát Bà, độ muối khoảng 24-28‰, thì khu vực phía Đông, Đông Bắc, Đông Nam đảo Cát Bà, độ muối trên 30‰ (hình 3.24a). Độ muối ở tầng đáy tăng đáng kể so với tầng mặt, với giá trị hầu như lớn hơn 28‰, ngoại trừ khu vực trong sông, vịnh cửa Lục chỉ khoảng 20-25‰ (hình 3.24b).



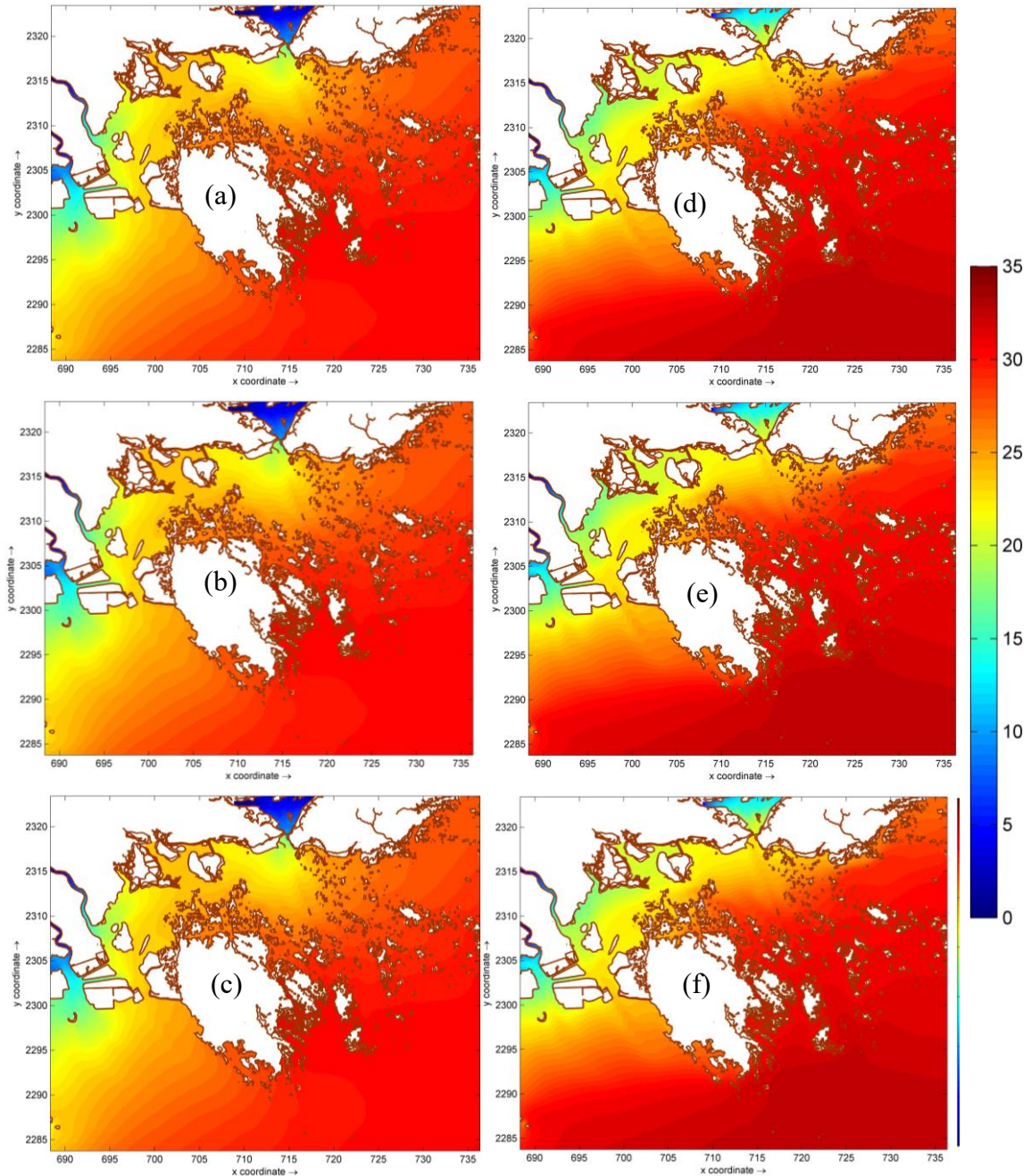
Hình 3.24. So sánh trường độ muối trung bình mùa gió Đông Bắc theo các kịch bản: (a) tầng mặt, 2019; (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng mặt, 2050; (d) tầng đáy, 2019; (e) tầng đáy, 2030; (f) tầng đáy, 2050



Hình 3.25. So sánh trường độ muối trung bình mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam theo các kịch bản: (a) tầng mặt, 2019; (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng mặt, 2050; (d) tầng đáy, 2019; (e) tầng đáy, 2030; (f) tầng đáy, 2050

Độ muối khu vực cửa sông ven bờ có xu hướng giảm vào mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam do lưu lượng nước sông đưa ra tăng. Toàn bộ khu vực ven bờ từ Cẩm Phả đến cửa Nam Triệu độ muối dao động trong khoảng 5-22‰, đặc biệt khu vực trong vịnh Cửa Lục, sông Chanh, Bạch Đằng độ muối chỉ 5-15‰. Khu vực phía Nam, Đông Nam, Đông và Đông Bắc đảo Cát Bà độ muối vẫn trên 26‰ (hình 3.25a). Độ muối tầng đáy tăng so với tầng mặt: trong vịnh Cửa Lục, phía trong sông (10-15‰); khu vực phía tây, Tây Nam đảo Cát Bà và vịnh Hạ Long (22-25‰);

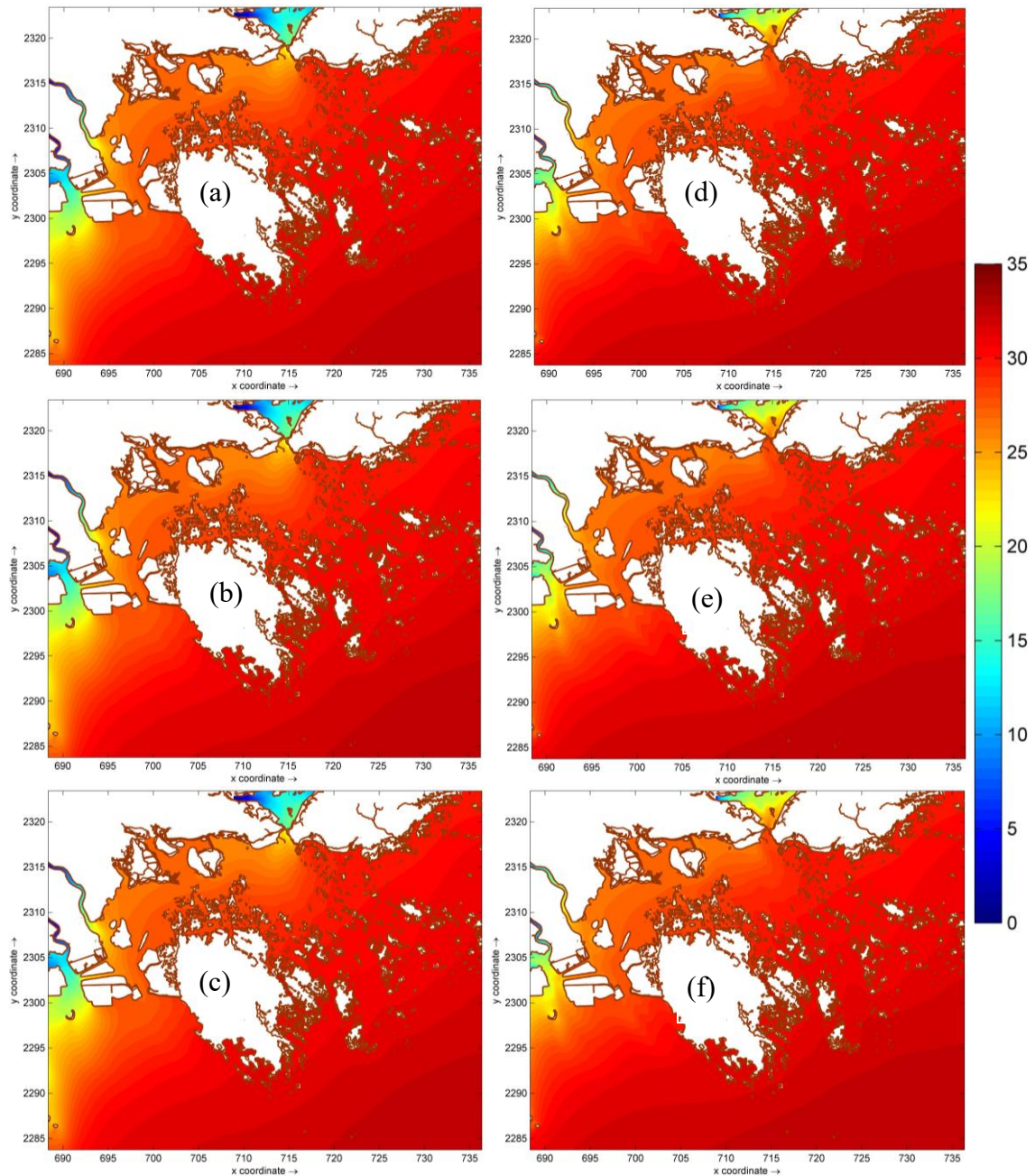
khu vực phía Nam, Đông Nam đảo Cát Bà (lớn hơn 32‰) (hình 3.25b).



Hình 3.26. So sánh trường độ muối trung bình mùa gió Tây Nam theo các kịch bản: (a) tầng mặt, 2019; (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng mặt, 2050; (d) tầng đáy, 2019; (e) tầng đáy, 2030; (f) tầng đáy, 2050

Vào mùa gió Tây Nam (tháng 7) trùng với mùa mưa, lưu lượng nước từ sông đưa ra lớn hơn so với các mùa khác nên độ muối khu vực CB-HL giảm đáng kể và thấp hơn so với các mùa khác. Ở tầng mặt, khu vực có độ muối thấp khu vực ven bờ, đặc biệt khu vực trong vịnh Cửa Lục độ muối chỉ khoảng 5-10‰. Khu vực vịnh Hạ Long, ven bờ phía Bắc, Tây Bắc, Tây và Tây Nam đảo Cát Bà, độ muối biến đổi từ 18-23‰. Khu vực Đông Bắc, đông, đông nam, nam, độ muối dao động 25-30‰

(hình 3.26a). Độ muối tăng đáng kể khi xuống tầng đáy. Khu vực ven bờ độ muối khoảng 15-23‰, tăng dần ra phía ngoài với giá trị hầu như lớn hơn 28‰ (hình 3.26b).



Hình 3.27. So sánh trường độ muối trung bình mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc theo các kịch bản: (a) tầng mặt, 2019; (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng mặt, 2050; (d) tầng đáy, 2019; (e) tầng đáy, 2030; (f) tầng đáy, 2050

Độ muối có xu hướng tăng hơn trong mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc. Tầng mặt, độ muối thấp vẫn tập trung chủ yếu ở trong vịnh Cửa Lục, trong sông do ảnh hưởng của khối nước ngọt từ sông đưa ra, với giá trị 10-20‰. Độ muối tăng dần khi ra phía ngoài (lớn hơn 30‰) (hình 3.27a). Ở tầng đáy độ muối khu vực ven bờ lớn hơn so với tầng mặt do khối nước biển xâm nhập chủ yếu ở tầng

thấp trong khi khối nước sông chủ yếu ở tầng phía trên. Độ muối thấp vẫn chủ yếu vịnh Cửa Lục và khu vực trong sông ra đến cửa, với giá trị 15-20‰, tăng dần ra phía ngoài, với giá trị lớn hơn 30‰ (hình 3.27b).

Dưới ảnh hưởng của BĐKH (tăng nhiệt độ không khí và NBD), xu hướng biến đổi độ muối vào năm 2030 và 2050 khá tương đồng với kịch bản hiện trạng (2019). Độ muối vùng ven bờ biến động theo mùa và theo pha triều, đặc biệt phụ thuộc chủ yếu vào khối nước ngọt từ sông đưa ra. Độ muối thấp vẫn chủ yếu tập trung vịnh Cửa Lục, khu vực trong sông ra đến cửa và ổn định hơn khi ra phía ngoài. Mặc dù nhiệt độ tăng và NBD do BĐKH nhưng ảnh hưởng của chúng đến độ muối phân bố độ muối khu vực không đáng kể, xem hình 3.24-hình 3.27.

3.4. Ảnh hưởng của hoạt động phát triển kinh tế xã hội và biến đổi khí hậu đến chất lượng môi trường nước khu vực Cát Bà-Hạ Long

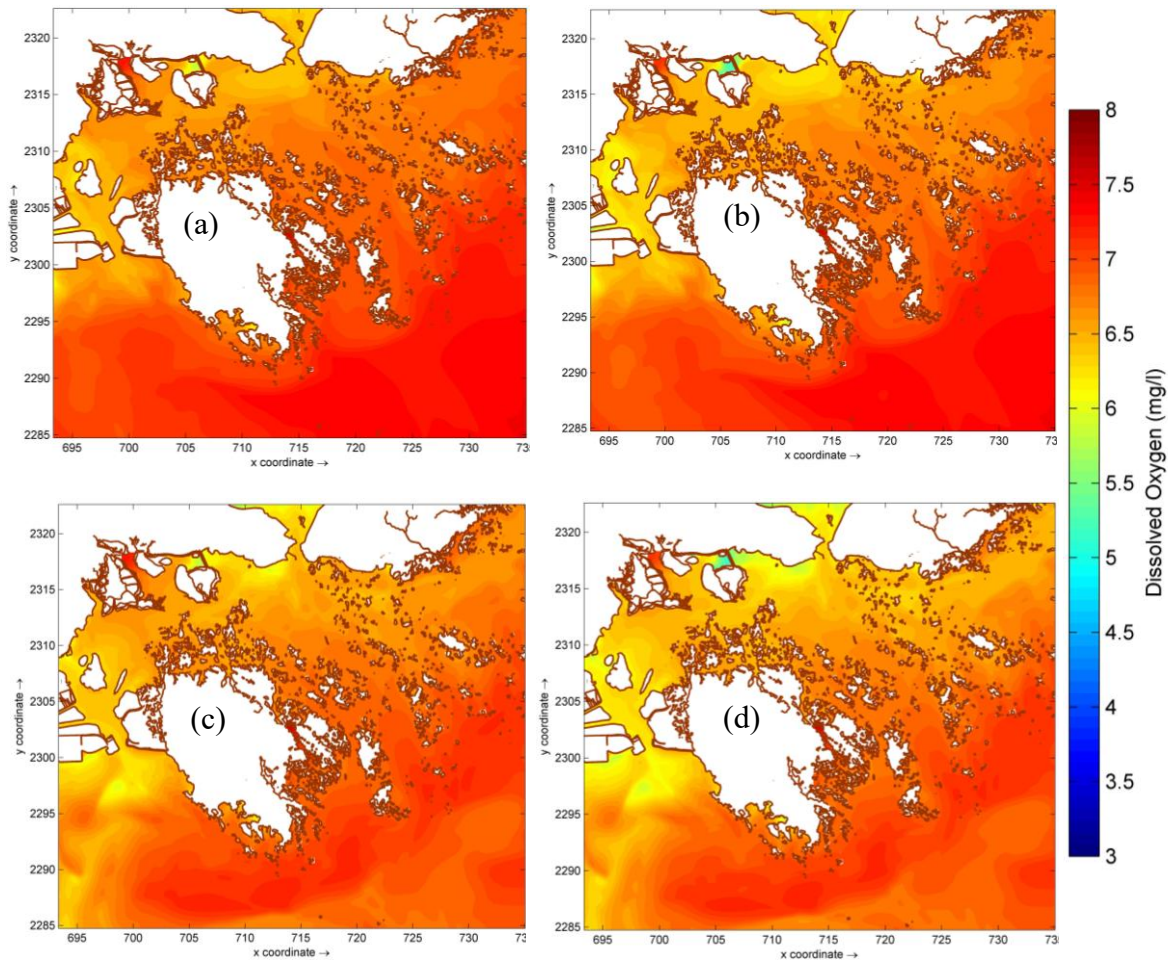
3.4.1. Ảnh hưởng do hoạt động của kinh tế xã hội

3.4.1.1. Ảnh hưởng riêng do tăng nguồn chất gây ô nhiễm

Để đánh giá ảnh hưởng tăng nguồn ô nhiễm do hoạt động KTXH của con người đến CLN vùng biển CB-HL, kịch bản đánh giá riêng tăng nguồn ô nhiễm đã được thiết lập và mô phỏng (bảng 2.3). Kết quả cho thấy khi tăng các nguồn chất ô nhiễm vào khu vực nghiên cứu thì hàm lượng DO có sự thay đổi nhất định và biến động theo thời gian và không gian. Sự phân bố của DO cũng khá tương đồng với kịch bản hiện trạng. Tuy nhiên, sự gia tăng của nguồn chất gây ô nhiễm đã làm giảm đáng kể hàm lượng DO trong nước ở khu vực nghiên cứu, đặc biệt là ở vùng ven bờ như vịnh Cửa Lục, vịnh Hạ Long, khu vực Tây Nam đảo Cát Bà, đặc biệt là khu vực phía bắc đảo Tuần Châu (hình 3.28).

Phân tích hàm lượng DO trung bình tại một số điểm (hình 2.2) ở khu vực nghiên cứu như Cửa Lục (HL1), Hạ Long (HL2), Tuần Châu (HL3), Cẩm Phả (HL4), Bãi Cháy (LH5) cho thấy xu hướng chung khi tải lượng chất gây ô nhiễm tăng vào năm 2030 thì hàm lượng DO giảm so với kịch bản hiện trạng và có sự biến động rất rõ rệt và khác nhau theo mùa. Vào mùa gió Đông Bắc hàm lượng DO giảm 0,15-0,21 mg/l (2,6-3,4%). Trong đó, ở khu vực Bãi Cháy có hàm lượng DO giảm nhiều nhất so với các khu vực khác với giá trị 0,21 mg/l, tiếp đến khu vực phía nam đảo Tuần Châu (0,18 mg/l), khu vực Cửa Lục, Cẩm Phả (0,17 mg/l) và nhỏ nhất khu vực giữa vịnh Hạ Long (0,15 mg/l) (hình 3.29a). Vào mùa gió chuyển tiếp từ

Đông Bắc sang Tây Nam, hàm lượng DO nhỏ hơn so với các mùa khác, tuy nhiên xu hướng giảm rõ rệt hơn, đặc biệt là khu vực phía Nam đảo Tuần Châu và vịnh Hạ Long có thể đạt trên 0,4 mg/l (hình 3.29b).



Hình 3.28. Phân bố DO vào mùa gió Đông Bắc trong pha triều lên: (a) tầng mặt-hiện trạng, (b) tầng mặt, 2030; (c) tầng đáy-hiện trạng, (d) tầng đáy - 2030

Trong khi đó vào mùa gió Tây Nam, với sự gia tăng của nguồn dinh dưỡng và hữu cơ DO cũng có xu hướng giảm khoảng 0,14-0,16 mg/l (2,2-2,5%) và không có sự khác nhau nhiều giữa các khu vực (bảng 3.13, hình 3.29c). Vào mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc, khi gia tăng nguồn chất gây ô nhiễm đưa vào khu vực nghiên cứu, hàm lượng DO trong nước ở vùng biển CB-HL giảm nhẹ so với kịch bản hiện trạng. Giá trị DO trung bình giảm 0,07-0,15 mg/l (1,0-2,5%), nhỏ nhất trong các mùa (bảng 3.13, hình 3.29d).

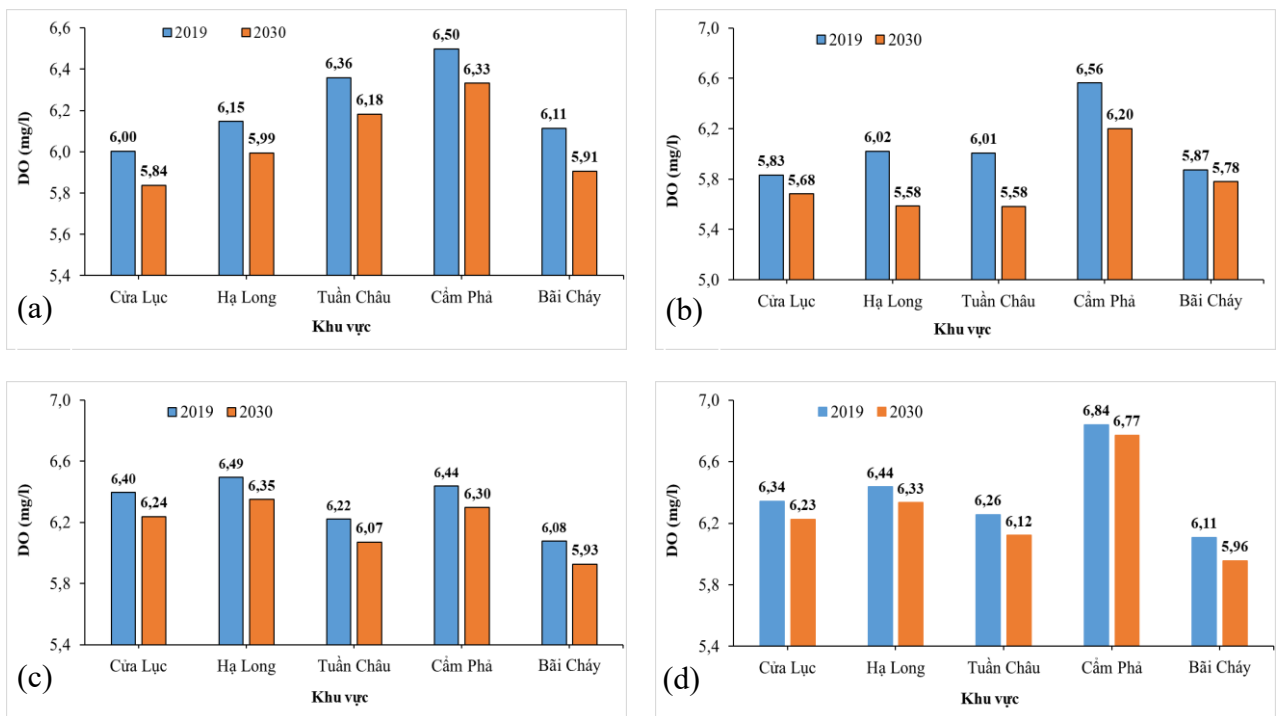
Ngược lại sự gia tăng hàm lượng các chất gây ô nhiễm do hoạt động KTXH đã làm tăng hàm lượng các chất dinh dưỡng và hữu cơ ở vùng ven bờ. Giá trị BOD, COD, NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} tăng lần lượt với các giá trị 0,1-0,29g/m³ (3,2-19,3%), 0,1-0,3g/m³ (3,3-19,5%), 0,006-0,025g/m³ (7,8-108%), 0,01-0,02g/m³ (3,3-95,1%) và

0,001-0,01g/m³ (0,8-85,5), trong đó các chất đều tăng lớn nhất trong mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam (bảng 3.13, hình A.1-hình A.5).

Bảng 3.13. Sự biến động của các chất so với kịch bản hiện trạng dưới tác động của con người (%)

Các chất	Mùa gió			
	Đông Bắc	Đông Bắc sang Tây Nam	Tây Nam	Tây Nam sang Đông Bắc
DO	2,6-3,4	1,6-7,2	2,2,-2,5	1,0-2,5
BOD	5,1-8,8	10,1-19,3	5,7-9,4	3,2-6,8
COD	4,7-8,5	9,8-19,5	3,8-8,7	3,3-6,7
NO₃⁻	13,8-19,2	54,4-108	28,1-45,6	7,8-19,6
NH₄⁺	7,0-21,2	30,4-95,1	4,1-49,2	3,3-35,1
PO₄³⁻	9-11,1	38,3-85,5	0,8-7,1	4,5-10,8

(Ghi chú: Số đậm tương ứng giảm, không đậm tương ứng với tăng)



Hình 3.29. Hàm lượng DO trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và tăng nguồn ô nhiễm (2030): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang đông

Ngược lại sự gia tăng hàm lượng các chất gây ô nhiễm do hoạt động KTXH

đã làm tăng hàm lượng các chất dinh dưỡng và hữu cơ ở vùng ven bờ. Giá trị BOD, COD, NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} tăng lần lượt với các giá trị 0,1-0,29g/m³ (3,2-19,3%), 0,1-0,3g/m³ (3,3-19,5%), 0,006-0,025g/m³ (7,8-108%), 0,01-0,02g/m³ (3,3-95,1%) và 0,001-0,01g/m³ (0,8-85,5), trong đó các chất đều tăng lớn nhất trong mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam (bảng 3.13, hình A.1-hình A.5).

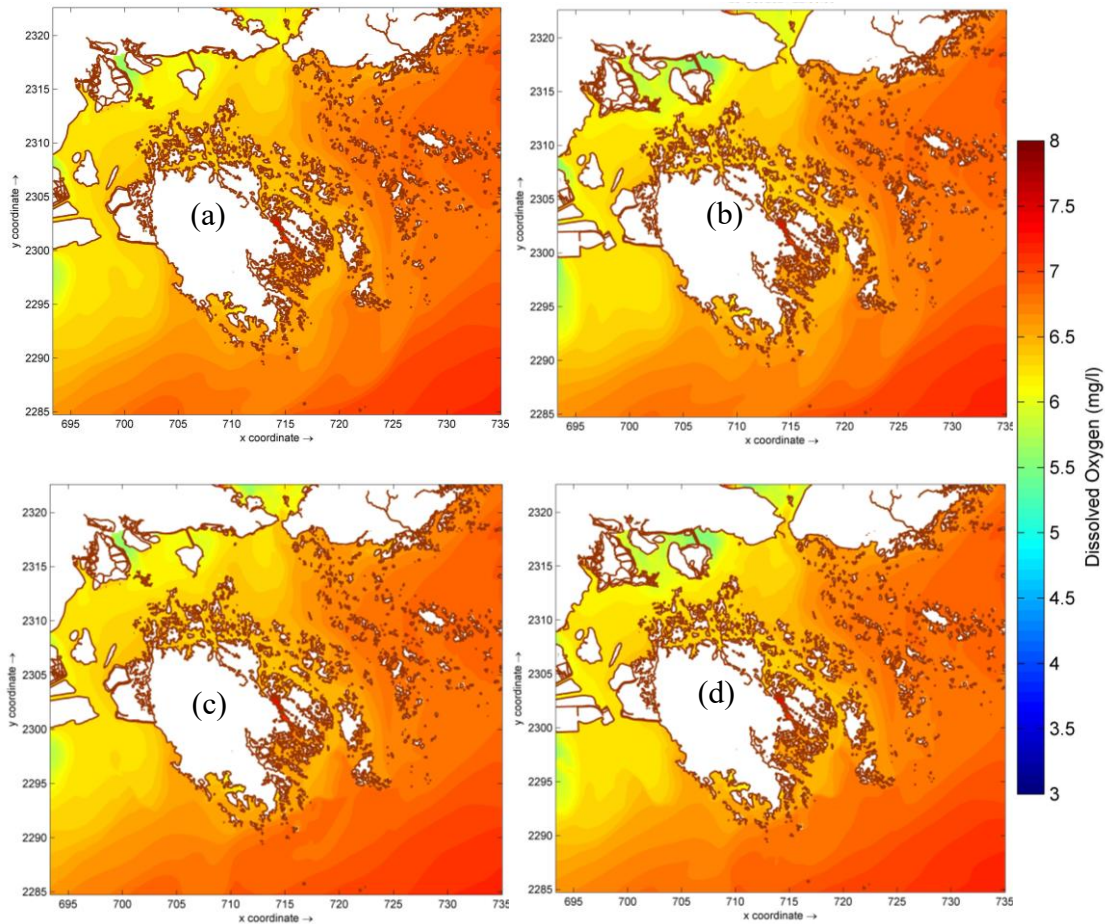
Các hoạt động phát triển KTXH ở khu vực CB-HL chủ yếu là tăng dân số, du lịch, hoạt động NTTS, chăn nuôi, công nghiệp đã làm phát sinh các chất gây ô nhiễm ra môi trường nước ở khu vực: khoảng 192 nghìn tấn COD, 77 nghìn tấn BOD, 765 tấn $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, 18,9 nghìn tấn NH_4^+ và 846 tấn PO_4^{3-} . Dự báo tổng lượng chất thải phát sinh từ các nguồn sinh hoạt-du lịch, công nghiệp, chăn nuôi, NTTS tại khu vực nghiên cứu cho thấy đến năm 2030, các chất đã tăng đáng kể so với năm 2019: BOD, COD, NO_3^- , NH_4^+ và PO_4^{3-} với các giá trị lần lượt là 95,5%, 95,3%, 38,3%, 41,4 % và 79,4 %. Đây là các nguồn chính ảnh hưởng đến CLN ở khu vực nghiên cứu, đặc biệt nguồn từ hoạt động công nghiệp. Các mô phỏng ảnh hưởng từ KCN Nghi Sơn (tỉnh Thanh Hóa), Đình Vũ (Hải Phòng) cũng cho thấy có những ảnh hưởng đến CLN vùng biển ven bờ, đặc biệt khi sự cố từ KCN xảy ra [34, 38].

Các nghiên cứu liên quan cũng đã chỉ ra rằng, hoạt động KTXH của con người là nguyên nhân chủ yếu dẫn đến suy thoái môi trường nước ở các vùng ven biển [11, 17], là mối đe dọa lớn đối với HST [26]. Sự phát triển đô thị cùng với sự tăng dân số làm tăng nguồn ô nhiễm do nước thải sinh hoạt, công nghiệp....ra môi trường nước [27]. Kết quả dự báo vào năm 2030 ở vùng biển CB-HL cho thấy hoạt động KTXH của con người đã làm tăng các chất hữu cơ (BOD lên khoảng 0,29 g/m³, COD khoảng 0,3 g/m³), dinh dưỡng (NO_3^- khoảng 0,025 g/m³), NH_4^+ khoảng 0,02 g/m³ và PO_4^{3-} khoảng 0,01 g/m³, đồng thời làm giảm hàm lượng oxy (khoảng 0,29mg/l) trong nước. Các nghiên cứu [20-21] cũng cho kết quả tương tự: tác động do con người làm tăng chất dinh dưỡng hòa tan và chất gây ô nhiễm ra vùng ven bờ còn làm tăng hiện tượng tảo nở hoa và gây thiếu oxy ven biển.

3.4.1.2. Ảnh hưởng riêng do lấn biển, xây dựng các công trình ven biển

Những ảnh hưởng do hoạt động lấn biển ở khu vực ven bờ CB-HL đã làm thay đổi các điều kiện TĐL ở vùng biển ven bờ. Đây là một nhân tố chính gây ra sự phát tán và vận chuyển các chất gây ô nhiễm ở khu vực CB-HL. Các kết quả mô phỏng

và phân tích theo các kịch bản trước (năm 2010) và sau (năm 2019) khi có hoạt động lấn biển cho thấy hoạt động lấn biển gây ra những ảnh hưởng nhất định đến môi trường nước của khu vực. Chẳng hạn như trong mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc, ảnh hưởng của lấn biển có thể làm giảm hàm lượng DO ở vịnh Hạ Long, khu vực đảo Tuần Châu, đặc biệt phía bắc đảo Tuần Châu (hình 3.30).

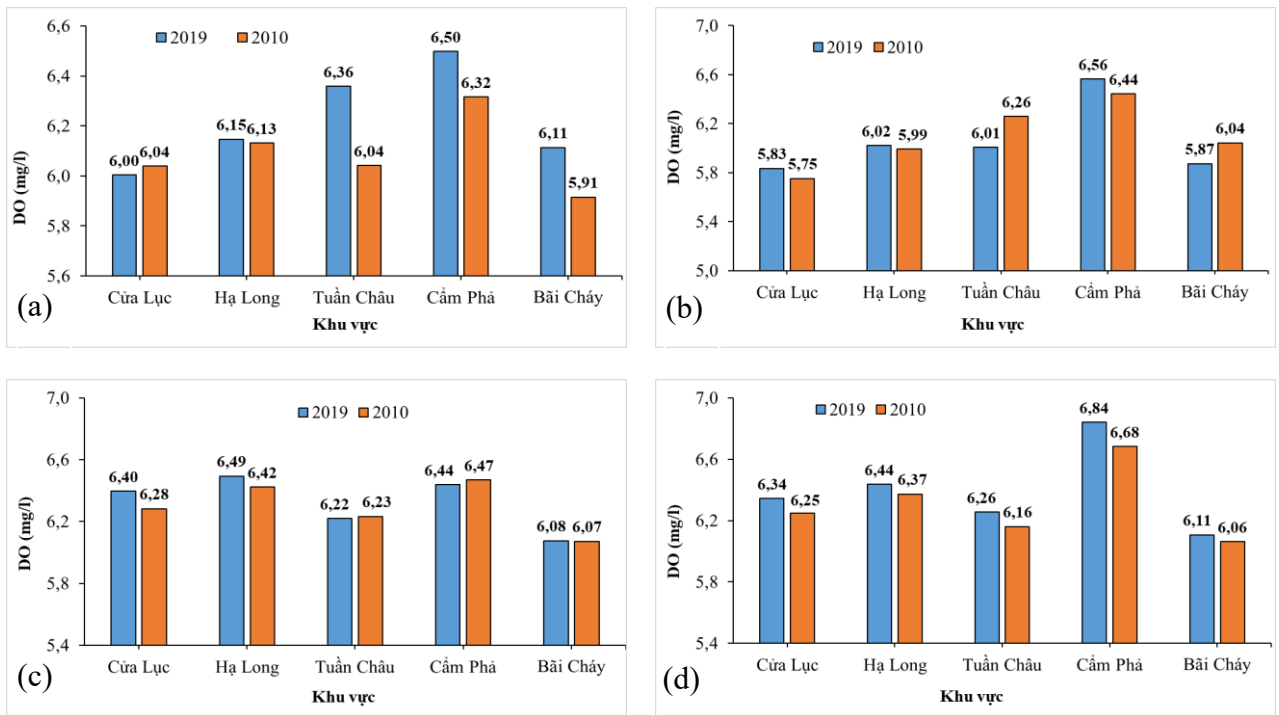


Hình 3.30. So sánh hàm lượng DO trong mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc trong pha triều xuống: tầng mặt- (a) 2010, (b) 2019; tầng đáy- (c) 2010, (d) 2019

Ngoài ra, để đánh giá của lấn biển đến CLN ở khu vực nghiên cứu, DO, các chất hữu cơ và dinh dưỡng tại các điểm kiểm tra (Cửa Lục, Hạ Long, Tuần Châu, Cẩm Phả và Bãi Cháy, hình 2.3) được trích xuất và so sánh trước và sau khi có hoạt động lấn biển. Các kết quả phân tích cho thấy vào mùa gió Đông Bắc, khu vực vịnh Cửa Lục, hàm lượng DO trung bình giảm nhẹ 0,04 mg/l (0,4%), ngược lại ở các khu vực khác đều có xu hướng tăng sau khi có hoạt động lấn biển (0,2-5,3%), bảng 3.14. Lượng DO tăng nhiều hơn ở khu vực phía nam đảo Tuần Châu (0,32 mg/l), sau đó đến ven bờ Bãi Cháy (0,2 mg/l), ven bờ Cẩm Phả (0,18 mg/l) và nhỏ nhất ở vịnh Hạ Long (0,02 mg/l) hình 3.31a. Vào mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam,

ảnh hưởng của lần biển lại làm giảm DO ở khu vực ven bờ Bãi Cháy và phía nam Tuần Châu với giá trị lần lượt là 0,17 mg/l (2,8%) và 0,25 mg/l (4,0%), ngược lại, ở các khu vực còn lại, lần biển làm tăng nhẹ DO lên 0,03-0,12 mg/l (0,5-1,9%), xem [hình 3.31b](#), [bảng 3.14](#).

Vào mùa gió Tây Nam, trong khi ở một số khu vực như phía nam Tuần Châu, ven bờ Cẩm Phả, hàm lượng DO giảm nhẹ (0,01-0,03 mg/l, 0,2-0,5%) thì ở những khu vực như Cửa Lục, Hạ Long, Bãi Cháy, ảnh hưởng của lần biển lại làm tăng DO với giá trị 0,07-0,11 mg/l (0,1-1,8%), xem [hình 3.31c](#) và [bảng 3.14](#). Xu hướng biến động của DO trong nước ở khu vực khá đồng nhất trong mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc, với giá trị tăng lên của DO sau khi có hoạt động lần biển là 0,05-0,16 mg/l (0,8-2,4%), xem [hình 3.31d](#) và [bảng 3.14](#).



Hình 3.31. Hàm lượng DO tầng mặt trong tháng trung bình tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và trước khi lần biển (2010): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc

Sau lần biển, BOD trung bình xu hướng tăng vào các mùa trong năm chiếm ưu thế ở hầu hết các khu vực, với giá trị 0,002-0,172 g/m³ (0,1-9,5%). Giá trị BOD tăng lớn nhất xảy ra vào mùa gió Đông Bắc với giá trị 0,172 g/m³ (9,5%) ở khu vực Cửa Lục. Tuy nhiên ở khu vực Cửa Lục, Hạ Long, Cẩm Phả trong mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam và khu vực Cửa Lục, phía nam đảo Tuần Châu

trong mùa gió Tây Nam có BOD giảm so với trước khi có hoạt động lấn biển, với giá trị lần lượt trong khoảng 0,047-0,068 g/m³ (3,1-3,3%) và 0,009-0,063 g/m³ (0,4-3,0%), xem [bảng 3.14](#) và [hình A.6, Phụ lục A](#).

Giá trị COD trung bình sau khi có hoạt động lấn biển có xu thế tăng chủ yếu vào mùa gió Đông Bắc và mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc với giá trị 0,002-0,076 g/m³ (0,1-4,5%), ngoại trừ khu vực Cẩm Phả có xu hướng giảm (0,21 g/m³, 7,9%). Ngược lại vào mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam và mùa gió Tây Nam, COD có xu hướng giảm chiếm đa số với giá trị 0,02-0,1 g/m³ (1,2-4,7%), ngoại trừ khu vực phía nam đảo Tuần Châu có xu hướng tăng (7,5%), xem [bảng 3.14](#) và [hình A.7, Phụ lục A](#).

Bảng 3.14. Sự biến động của các chất so với kịch bản hiện trạng dưới tác động của lấn biển (%)

Các chất	Mùa gió			
	Đông Bắc	Đông Bắc sang Tây Nam	Tây Nam	Tây Nam sang Đông Bắc
DO	0,2-5,3; 0,6	0,5-1,9; 2,8-4,0	0,1-1,8; 0,2-0,5	0,8-2,4
BOD	1,2-9,5	0,4-6,7; 3,1- 3,3	0,1-4,8; 0,4-3,0	0,1-4,6
COD	1,3-2,9; 7,9	7,5 3,3-4,7	1,2-3,8	0,1-4,5
NO₃⁻	13,8-23,1	1,7-27,6; 13,9-28,3	0,6-3,9; 8,8- 20,2	1,9; 0,2-14,6
NH₄⁺	2,0-6,9	20,5-48,3	1,0-11,4; 2,0-3,9	0,6-20,4
PO₄³⁻	12,5-30,8	5,0; 8,3-28,9	15,7-54,5	2,2-7,3; 2,9

(Ghi chú: Số đậm tương ứng giảm, không đậm tương ứng với tăng)

Hàm lượng NO₃⁻ trung bình cũng có xu hướng tăng/giảm tại các vị khác nhau trong các mùa. Vào mùa gió Đông Bắc, xu hướng tăng của NO₃⁻ được thấy ở cả 5 khu vực dưới ảnh hưởng của lấn biển, với giá trị tăng 0,004-0,007 g/m³ (13,8-23,1%). Ngược lại xu thế giảm xuất hiện ở hầu hết các khu vực trong các mùa còn lại, với giá trị 0,0001-0,01 g/m³ (0,2-28,3%), ngoại trừ một số vị trí có xu hướng tăng như ven bờ Bãi Cháy, phía nam đảo Tuần Châu trong mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam (1,7-27,6%); khu vực vịnh Hạ Long và ven bờ Bãi Cháy

trong mùa gió Tây Nam (0,6-3,9%); ven bờ Bãi Cháy trong mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc (1,9%), xem [bảng 3.14](#) và [hình A.8, Phụ lục A](#).

Sau khi có hoạt động lấn biển, hàm lượng NH_4^+ trung bình có xu hướng tăng trong mùa gió Đông Bắc và mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc với giá trị 0,0001-0,0064 g/m³ (0,6-20,4%). Xu hướng tăng của NH_4^+ trong mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc thể hiện rõ hơn so với trong mùa gió Đông Bắc. Ngược lại xu hướng giảm ở cả 5 khu vực được tìm thấy trong mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam (20,5-48,3%) và chỉ xuất hiện ở khu vực phía Nam đảo Tuần Châu và Cẩm Phả trong mùa gió Tây Nam (2,0-3,9%), xem [bảng 3.14](#) và [hình A.9, Phụ lục A](#).

Đối với PO_4^{3-} trung bình sau khi có hoạt động lấn biển thì xu hướng tăng xuất hiện ở hầu hết các điểm trong mùa gió Đông Bắc, mùa gió Tây Nam và mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc (ngoại trừ khu vực Cẩm Phả), với giá trị 0,001-0,007 g/m³ (2,2-54,5%). Xu hướng ngược lại xảy ra vào mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, với giá trị giảm 0,003-0,007 g/m³ (8,3-28,9%), ngoại trừ khu vực phía nam đảo Tuần Châu có xu hướng tăng nhẹ (0,001 g/m³), xem [bảng 3.14](#) và [hình A.10, Phụ lục A](#).

Những phân tích trên cho thấy ảnh hưởng của hoạt động lấn biển đến môi trường nước khu vực nghiên cứu khá phức tạp. Các mức độ ảnh hưởng khác nhau (cả tích cực và tiêu cực) thay đổi theo thời gian/mùa trong năm và giữa các vị trí/khu vực khác nhau ở vùng ven bờ CB-HL.

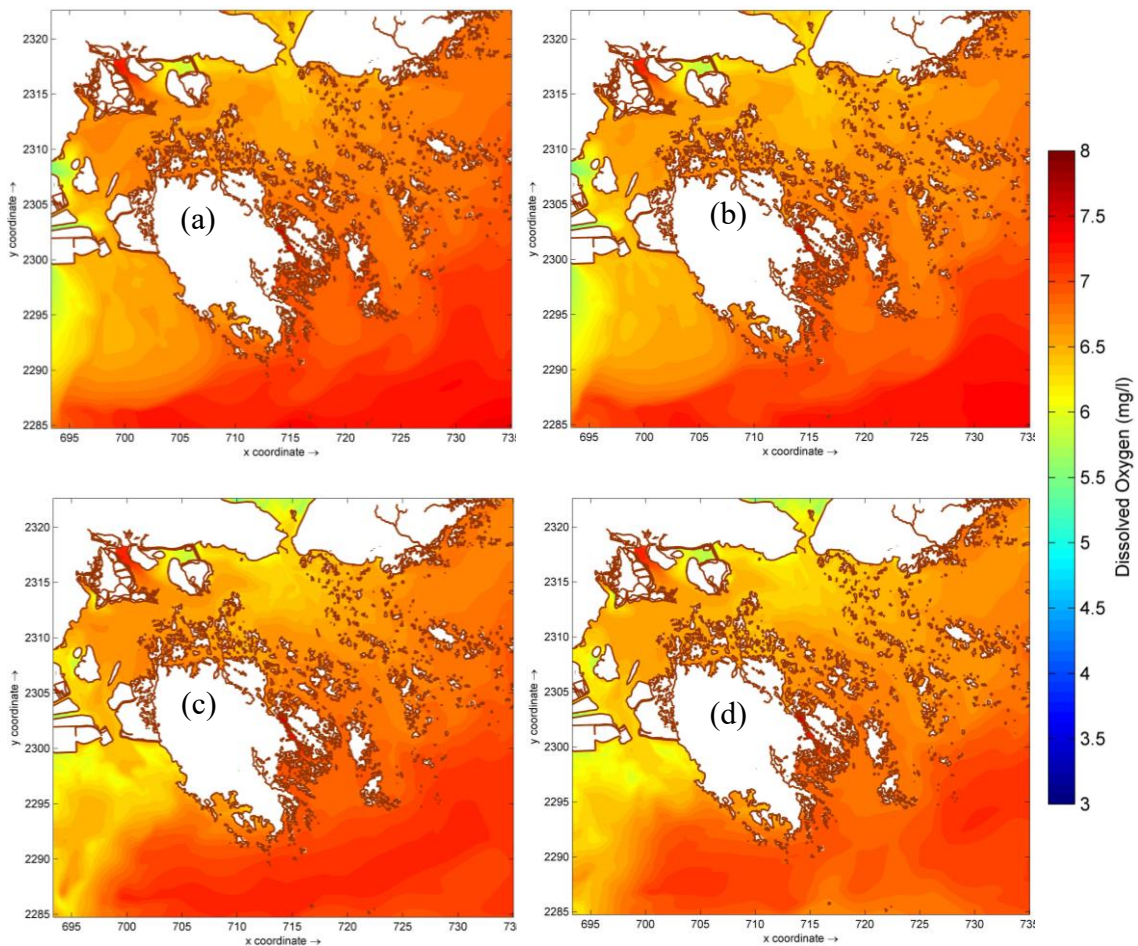
3.4.2. Ảnh hưởng do biến đổi khí hậu

Để đánh giá những ảnh hưởng riêng lẻ của BĐKH đến chất lượng môi trường nước của khu vực nghiên cứu, các kịch bản dự báo dâng cao mực nước/tăng nhiệt độ trong thời gian 2030, 2050 đã được thiết lập mô phỏng và so sánh với kịch bản hiện trạng (2019). Các kết quả phân tích cho thấy xu thế biến động theo không gian/thời gian của chất lượng môi trường nước dưới ảnh hưởng của BĐKH không khác nhiều so với điều kiện hiện tại ([hình 3.32](#)).

Ngoài ra để đánh giá định lượng những thay đổi về chất lượng môi trường nước của khu vực dưới ảnh hưởng của BĐKH, biến động theo thời gian, các giá trị trung bình của một số yếu tố CLN đã được phân tích dựa trên các kết quả của mô

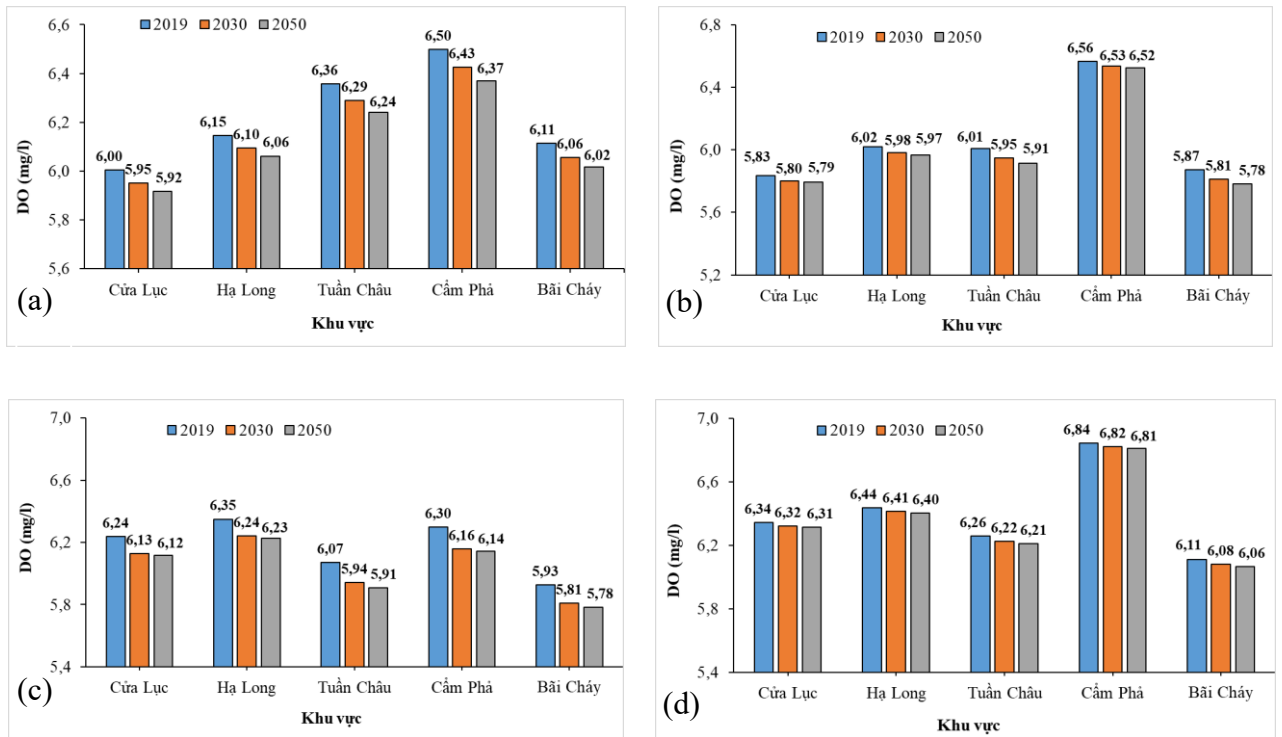
hình tại các vị trí khác nhau như vịnh Cửa Lục, ven bờ Cẩm Phả, phía Nam đảo Tuần Châu, giữa vịnh Hạ Long và ven bờ Bãi Cháy.

Các kết quả phân tích cho thấy dưới ảnh hưởng của các điều kiện BĐKH, hàm lượng DO trong nước có xu hướng giảm khá rõ. Trong đó, vào mùa gió Đông Bắc hàm lượng DO giảm nhẹ 0,05-0,07 mg/l (0,8-1,1%) và 0,08-0,13 mg/l (1,4-2,0%) tương ứng với kịch bản năm 2030 và 2050 (hình 3.33a, bảng 3.15). Vào mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, hàm lượng DO theo các kịch bản BĐKH 2030 và 2050 lần lượt giảm 0,03-0,06 mg/l (0,5-1,0%) và 0,04-0,09 mg/l (0,6-1,6%), xem hình 3.33b và bảng 3.15. Xu hướng giảm diễn ra rõ rệt hơn vào mùa gió Tây Nam khi hàm lượng DO ở các khu vực kiểm tra theo kịch bản BĐKH 2030 và 2050 lần lượt giảm 0,25-0,28 mg/l (3,9-4,5%) và 0,27-0,31 mg/l (4,1-5,0%), xem hình 3.33c và bảng 3.15. Vào mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc, hàm lượng DO giảm lần lượt 0,02-0,033 mg/l (0,3-0,5%) và 0,03-0,05 mg/l (0,5-0,7%) cho các kịch bản BĐKH vào năm 2030 và 2050 (hình 3.33d, bảng 3.15).



Hình 3.32. Phân bố DO mùa gió Đông Bắc trong pha xuống: (a) tầng mặt, hiện trạng, (b) tầng mặt, 2050; (c) tầng đáy, hiện trạng (d) tầng đáy, 2050

Sự tăng lên của mực nước và nhiệt độ có thể làm giảm BOD vùng ven bờ với các giá trị 0,005-0,011 g/m³ (0,04-0,7%) và 0,019-0,046 g/m³ (0,8-3,9%), tương ứng với mùa gió Đông Bắc và mùa gió chuyển tiếp Đông Bắc sang Tây Nam. Giá trị BOD có xu hướng tăng nhẹ trong kịch bản mô phỏng cho năm 2030 với giá trị lần lượt là 0,004-0,017 g/m³ (0,2-0,9%) ở tất cả vị trí kiểm tra trong mùa gió Tây Nam và 0,072 g/m³ (3,8%) tại khu vực vịnh Hạ Long trong mùa gió chuyển tiếp Tây Nam sang Đông Bắc. Xu hướng ngược lại được tìm thấy trong kịch bản mô phỏng vào năm 2050: giảm 0,002-0,07 g/m³ (0,1-4,1%) và 0,005-0,028 g/m³ (0,3-1,5%) tương ứng với gió mùa Tây Nam và mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc, xem [bảng 3.15](#) và [hình B.1](#), [Phục lục B](#).



Hình 3.33. Hàm lượng DO trung bình tầng mặt tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019), BĐKH (2030) và BĐKH (2050): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc

Giá trị COD có xu hướng giảm ở hầu hết các khu vực ở các kịch bản, đặc biệt là giảm nhiều hơn ở kịch bản mô phỏng dưới tác động của BĐKH vào năm 2050. Vào các mùa gió Đông Bắc, mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam và mùa gió chuyển tiếp Tây Nam sang Đông Bắc, COD giảm với các khoảng giá trị lần lượt là 0,006-0,012g/m³ (0,04-0,7%); 0,024-0,053g/m³ (0,8-3,2%) và 0,009-0,019 g/m³ (0,1-1,3%). Trong khi vào mùa gió Tây Nam, COD có xu hướng tăng

nhẹ ở kịch bản vào năm 2030 với giá trị 0,004-0,02 g/m³ (0,2-0,9%) và giảm ở kịch bản vào năm 2050 với giá trị 0,006-0,027 g/m³ (0,1-4,1%), xem [bảng 3.15](#) và [hình B.2, Phụ lục B](#).

Bảng 3.15. Sự biến động của các chất so với kịch bản hiện trạng dưới tác động của BĐKH (%)

Các chất	Mùa gió							
	Đông Bắc		Đông Bắc sang Tây Nam		Tây Nam		Tây Nam sang Đông Bắc	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
DO	0,8-1,1	1,4-2,0	0,5-1,0	0,6-1,6	3,9-4,5	4,1-5,0	0,3-0,5	0,5-0,7
BOD	0,04-0,4	0,1-0,7	0,8-1,3	1,6-3,9	0,2-0,9	0,1-4,1	3,8; 0,1-0,9	0,3-1,5
COD	0,04-0,4	0,1-0,7	0,8-1,5	1,7-3,2	0,2-1,2	0,3-1,3	0,1-0,6	0,2-1,3
NO ₃ ⁻	1,0-7,6	1,0-13,3	0,5-1; 0,2-0,9	0,9-4,2	0,7-2,6	0,3-4,3	0,4-1,5	0,1-1,8; 0,2-0,3
NH ₄ ⁺	3,8-4,5	7,2-8,6	5,0-6,2	9,7-12,9	0,5-1,7	0,4-3,2	2,0-3,7	4,1-7,3
PO ₄ ³⁻	1,0; 1,5-1,6	1,6; 3,1-3,4	2,3-4,1	5,4-8,9	3,3-8,8	1,1-6,3	0,5-1,4	1,4-2,9

(Ghi chú: Số đậm tương ứng giảm, không đậm tương ứng với tăng)

Dưới ảnh hưởng của BĐKH, các chất dinh dưỡng trong nước cũng có sự thay đổi nhất định so với kịch bản hiện trạng. Hàm lượng NO₃⁻ tại 5 khu vực có thể tăng/giảm với giá trị tương ứng 0,0001-0,003 g/m³ (0,1-13,3%) và 0,0004-0,0012 g/m³ (0,2-4,3%). Hàm lượng NH₄⁺ có xu hướng giảm ở tất cả vị trí và các khu vực với giá trị 0,0001-0,006 g/m³ (0,4-12,9%), giảm nhiều nhất đối với kịch bản vào năm 2050 trong mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam (9,7-12,9%). Đối với PO₄³⁻ dưới ảnh hưởng của BĐKH xu hướng giảm chiếm đa số với giá trị 0,0001-0,002 g/m³ (0,5-8,9%), đặc biệt vào cả hai mùa gió chuyển tiếp có xu hướng giảm ở các vị trí kiểm tra và cả 2 kịch bản BĐKH năm 2030 và 2050. Ngược lại xu hướng tăng được tìm thấy ở khu vực ven bờ Cẩm Phả trong mùa gió Đông Bắc và tất cả các vị trí trong mùa gió Tây Nam, với giá trị trong khoảng 0,0003-0,0016 g/m³ (1,0-6,3%), xem [bảng 3.15](#) và [hình B.3-B.5, Phụ lục B](#).

Sự tăng lên của nhiệt độ do BĐKH cũng đã được ghi nhận là một yếu tố chính

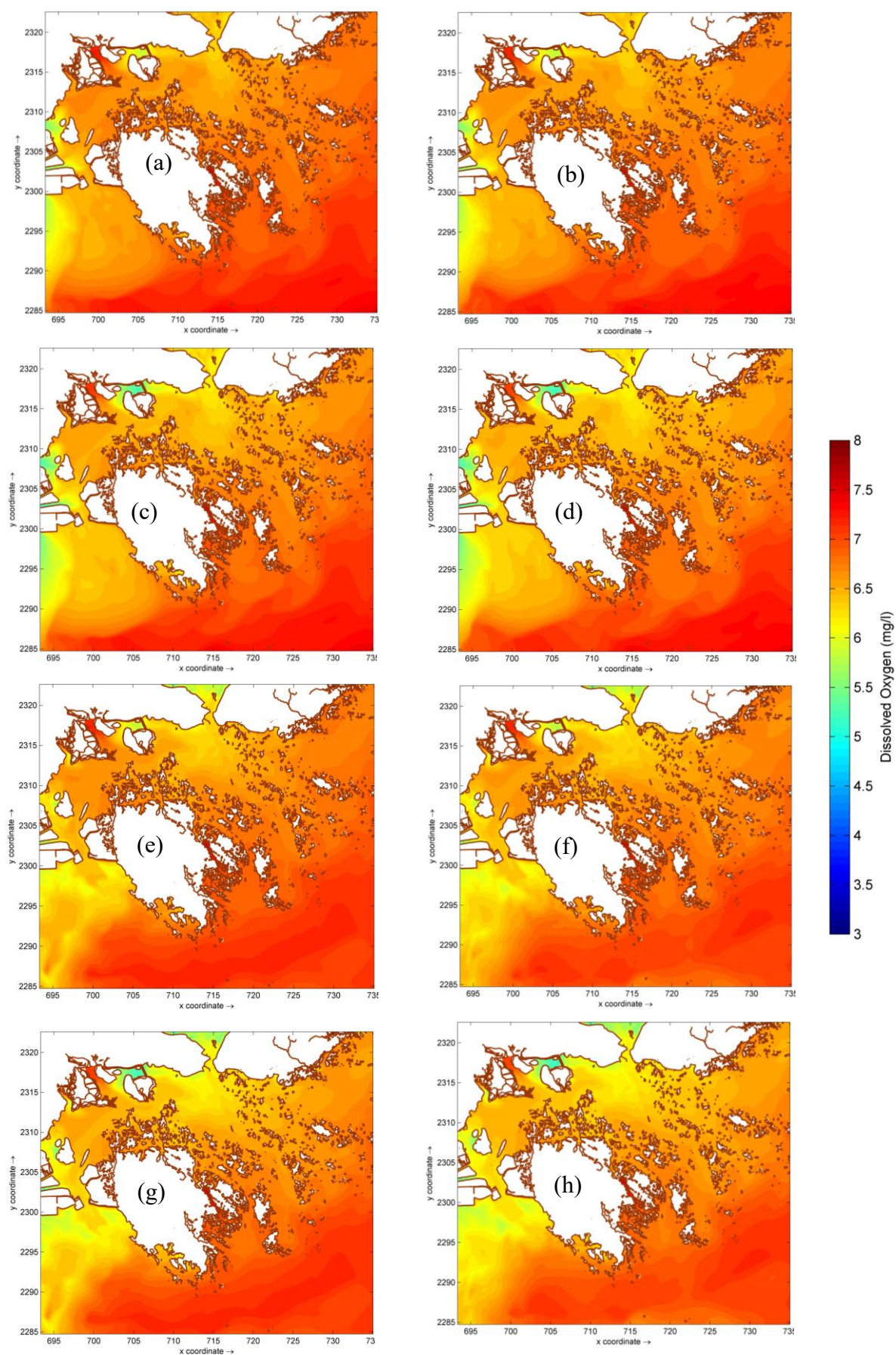
có ảnh hưởng đến CLN [64]. Nhiệt độ nước biển là yếu tố kiểm soát các quá trình cân bằng lý-hóa (như quá trình Nitrat hóa, quá trình khoáng hóa của các hợp chất hữu cơ) và vì vậy sự thay đổi của nhiệt độ nước sẽ làm thay đổi sự vận chuyển, phát tán của các nhóm chất hữu cơ, dinh dưỡng hòa tan ở các vùng cửa sông ven biển [65].

Kết quả nghiên cứu ở vùng biển CB-HL chỉ ra rằng dưới ảnh hưởng của BĐKH (nhiệt độ tăng, NBD) hàm lượng oxy trong nước suy giảm với giá trị trung bình khoảng 0,02-0,28 mg/l (vào năm 2030) và 0,03-0,31mg/l (năm 2050). Kết quả nghiên cứu này phù hợp với các nghiên cứu của [65] là khi nhiệt độ tăng lên gây ra sự suy giảm hàm lượng oxy hòa tan và oxy bão hòa trong nước. Kết quả nghiên cứu [66] cũng cho thấy với sự tăng lên của nhiệt độ (không khí và nước) ở khu vực sông Qu'Appelle (Canada), hàm lượng oxy hòa tan có xu hướng giảm ở hầu hết các tháng trong năm. Cox and Whitehead [68] cũng dự báo sự suy giảm đáng kể của hàm lượng DO ở sông Thames đến năm 2080 trong đó có vai trò của sự tăng nhiệt độ và nhu cầu oxy sinh hóa.

Ngoài ra, ảnh hưởng của BĐKH làm suy giảm hàm lượng NH_4^+ ($0,005 \text{ g/m}^3$) và cũng có thể làm tăng/giảm NO_3^- and PO_4^{3-} khoảng $0,001 \text{ g/m}^3$ ở khu vực CB-HL. Một nghiên cứu gần đây về ảnh hưởng của nhiệt độ đến chất lượng môi trường nước [66-67] cho thấy khi nhiệt độ nước tăng có thể làm giảm hàm lượng các nhóm chất dinh dưỡng của Nito và Phospho từ sông đưa ra vùng ven biển do sự tăng lên của các quá trình tiêu thụ-quang hợp của tảo trong sông do các thực vật phù du phát triển mạnh khi nhiệt độ nước tăng.

3.4.3. Ảnh hưởng tích hợp của hoạt động kinh tế xã hội và biến đổi khí hậu

Bên cạnh việc đánh giá ảnh hưởng riêng lẻ do hoạt động KTXH của con người, do BĐKH nhóm kịch bản đánh giá tác động kết hợp do hoạt động KTXH và BĐKH đến môi trường nước của khu vực nghiên cứu cũng được mô phỏng vào năm 2030 và 2050. Các kết quả phân tích cho thấy xu hướng biến động theo không gian của môi trường nước khu vực giữa các kịch bản không khác nhau nhiều. Sự phân bố theo không gian của các chất gây ô nhiễm đều có chung xu thế: hàm lượng các chất cao hơn tập trung chủ yếu khu vực cửa sông ven bờ từ vịnh cửa Lục đến phía Nam đảo Cát Hải, đặc biệt là các khu vực như vịnh cửa Lục, sông Chanh, phía Bắc đảo Tuần Châu (hình 3.34).



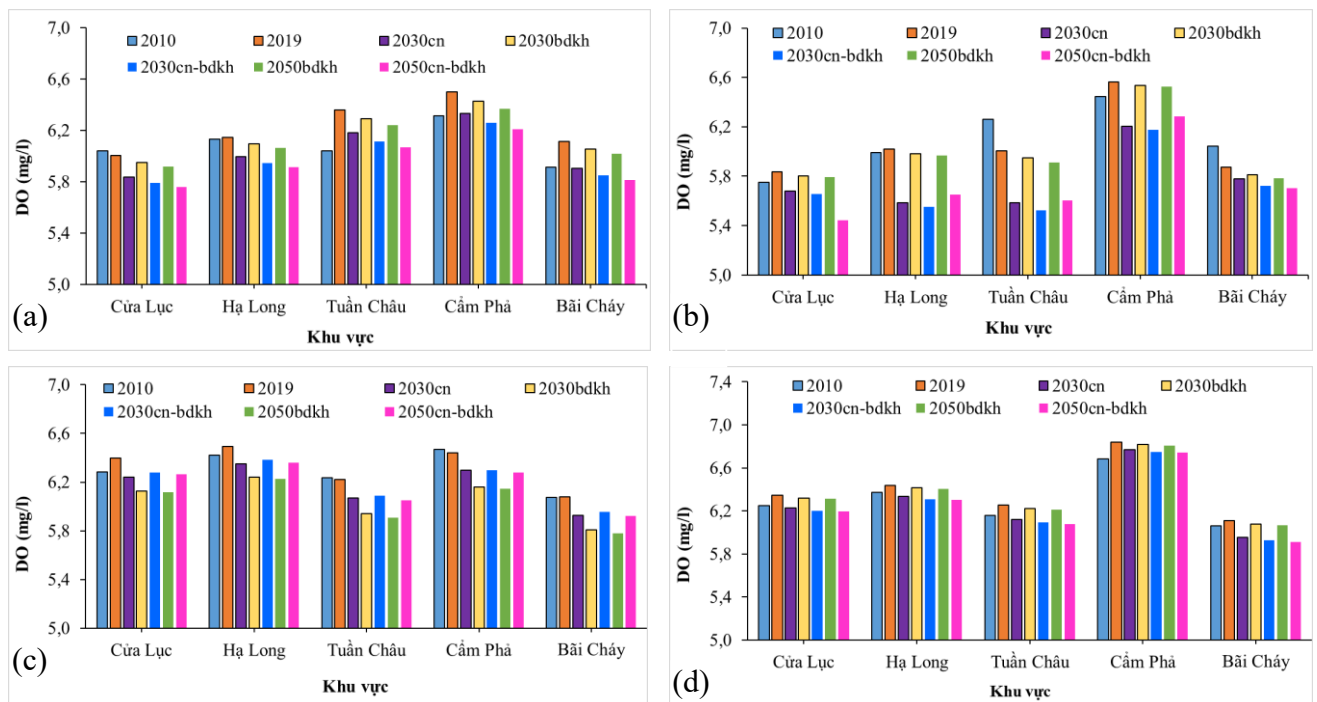
Hình 3.34. Phân bố DO trong pha triều xuống vào mùa gió Đông Bắc theo các kịch bản: tầng mặt - (a) 2019, (b) 2030bđkh, (c) 2030cn, (d) 2030cn-bđkh; tầng đáy- (e) 2019, (f) 2030bđkh, (g) 2030cn, (h) 2030cn-bđkh

Các nhóm kịch bản tác động kết hợp con người và BĐKH và kịch bản chỉ do con người thường làm tăng đáng kể các chất hữu cơ, dinh dưỡng, đồng thời làm giảm DO so với các nhóm kịch bản hiện trạng và kịch bản chỉ xét đến BĐKH. Điều này được thể hiện rõ ở khu vực cửa sông ven bờ, tuy nhiên sự khác nhau giữa các kịch bản hầu như không đáng kể khi ra xa bờ. Trong khi đó, xu thế biến động theo thời gian của các khối nước ô nhiễm chủ yếu vẫn theo dao động của mực nước thủy triều và không có sự khác biệt nhiều giữa các kịch bản.

Bảng 3.16. Hàm lượng DO (mg/l) giảm theo các kịch bản

Thời gian	Khu vực	Kịch bản				
		2030cn	2030bdkh	2030cn-bdkh	2050bdkh	2050cn-bdkh
Mùa gió Đông Bắc	Cửa Lục	0,17	0,05	0,22	0,09	0,25
	Hạ Long	0,15	0,05	0,20	0,08	0,23
	Tuần Châu	0,18	0,07	0,24	0,12	0,29
	Cẩm Phả	0,17	0,07	0,24	0,13	0,29
	Bãi Cháy	0,21	0,06	0,26	0,10	0,30
	Trung bình	0,17	0,06	0,23	0,10	0,27
Mùa chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam	Cửa Lục	0,15	0,03	0,18	0,04	0,39
	Hạ Long	0,44	0,04	0,47	0,05	0,37
	Tuần Châu	0,42	0,06	0,48	0,09	0,40
	Cẩm Phả	0,36	0,03	0,39	0,04	0,28
	Bãi Cháy	0,09	0,06	0,15	0,09	0,17
	Trung bình	0,29	0,04	0,33	0,06	0,32
Mùa gió Tây Nam	Cửa Lục	0,16	0,27	0,12	0,28	0,13
	Hạ Long	0,14	0,25	0,11	0,27	0,13
	Tuần Châu	0,15	0,28	0,13	0,31	0,17
	Cẩm Phả	0,14	0,28	0,14	0,29	0,16
	Bãi Cháy	0,15	0,27	0,12	0,30	0,15
	Trung bình	0,15	0,27	0,13	0,29	0,15
Mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc	Cửa Lục	0,12	0,02	0,14	0,03	0,15
	Hạ Long	0,10	0,02	0,13	0,03	0,14
	Tuần Châu	0,13	0,03	0,16	0,05	0,18
	Cẩm Phả	0,07	0,02	0,09	0,03	0,10
	Bãi Cháy	0,15	0,03	0,18	0,04	0,20
	Trung bình	0,12	0,03	0,14	0,04	0,15

Phân tích từ các điểm kiểm tra ở một số khu vực cho thấy ảnh hưởng kết hợp của hoạt động KTXH và BDKH có các mức độ ảnh hưởng khác nhau đến môi trường nước theo thời gian và các vị trí khác nhau ở khu vực nghiên cứu. Các kết quả phân tích đánh giá cho thấy xu thế chung là khi gia tăng các nguồn ô nhiễm, lượng chất gây ô nhiễm, hàm lượng DO trong nước đều có xu hướng giảm so với các điều kiện hiện trạng (2019). Vào mùa gió Đông Bắc, dưới tác động kết hợp của con người và BDKH hàm lượng DO giảm nhiều hơn so với các kịch bản khác, với giá trị 0,2-0,26 mg/l (3,3-4,3%) và 0,23-0,3 mg/l (3,8-4,9%) tương ứng với kịch bản vào năm 2030 và 2050 (hình 3.35a, bảng 3.16 và 3.17). Hàm lượng DO giảm mạnh dưới tác động của con người và BDKH vào mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam với giá trị trong khoảng 0,15-0,48 mg/l (2,6-8,0%) và 0,17-0,4 mg/l (2,9-6,75) đối với kịch bản vào năm 2030 và 2050 (hình 3.35b, bảng 3.16 và 3.17). Trong mùa gió Tây Nam, xu hướng DO giảm vẫn được duy trì trong các kịch bản và có giá trị nhỏ hơn so với các mùa khác, 0,11-0,14 mg/l (1,8-2,2%) vào năm 2030 và 0,13-0,17 mg/l (2,0-2,8%) vào năm 2050 (hình 3.35c, bảng 3.16 và 3.17).



Hình 3.35. Biến động hàm lượng DO trung bình tại một số khu vực: a) mùa gió Đông Bắc, b) mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c) mùa gió Tây Nam, d) mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc

Vào mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc, tác động kết hợp của con người và BDKH làm giảm hàm lượng DO trong nước nhiều hơn so với các kịch

bản riêng lẻ, với giá trị 0,09-0,18 mg/l (1,3-3,0%) và 0,1-0,2 mg/l (1,5-3,2%) lần lượt tương với với kịch bản vào năm 2030 và 2050 (hình 3.35d, bảng 3.16 và 3.17).

Bảng 3.17. Sự biến động của các chất so với kịch bản hiện trạng dưới tác động của con người và BĐKH (%)

Các chất	Mùa gió							
	Đông Bắc		Đông Bắc sang Tây Nam		Tây Nam		Tây Nam sang Đông Bắc	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
DO	3,3-4,3	3,8-4,9	2,6-8,0	2,9-6,7	1,8-2,2	2,0-2,8	1,3-3,0	1,5-3,2
BOD	4,7-8,2	4,3-7,7	9,1-17,9	11,3-19,1	5,8-9,5	4,3-8,0	3,0-6,1	2,8-5,3
COD	4,6-8,0	4,0-7,5	8,7-18,2	11,4-19	4,3-8,7	2,8-7,2	3,1-6,0	3,0-5,2
NO₃⁻	16,2-21,5	16,1-27,1	56,7-106,9	22,6-29,8	27,3-41,9	27,8-38,8	9,2-20	9,5-19,4
NH₄⁺	3,1-16,7	8,2-12,6	24,4-86,2	7,0-34,5	6,2-46,3	6,1-43,1	1,2-30,8	21,4-26,5
PO₄³⁻	7,2-11,4	5,5-11,5	45-80,6	12,5-15,5	4,9-10,9	2,5-8,0	3,9-9,3	3,0-7,6

(Ghi chú: Số đậm tương ứng giảm, không đậm tương ứng với tăng)

Trong kịch bản mô phỏng ảnh hưởng kết hợp của con người và biến đổi khí hậu năm 2030 và 2050 đều làm tăng các chất hữu cơ (BOD và COD) ở khu vực nghiên cứu. BOD và COD có xu hướng khá tương đồng nhau, với giá trị tăng dao động lần lượt trong khoảng 0,074-0,3 g/m³ (2,8-19,1%) và 0,078-0,32 g/m³ (2,8-19,0%). Chỉ số hữu cơ đều tăng nhiều trong mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam: BOD (9,1-19,1%), COD (8,7-19%). Ngược lại, chỉ số này có xu hướng tăng ít hơn trong mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc: BOD (2,8-6,1%), COD (3,0-6,0%), xem bảng 3.17 và hình C.1-C.2, C.5-C.6, C.9, C.13-C.14, Phụ lục C.

Dưới ảnh hưởng kết hợp của hoạt động KTXH và BĐKH đã làm tăng hàm lượng các chất dinh dưỡng ở các khu vực ở tất cả các mùa với giá trị tăng là 0,006-0,025 g/m³ (9,2-106,9%); 0,006-0,019 g/m³ (1,2-86,2%) và 0,002-0,011 g/m³ (3,0-80,6%) tương ứng với NO₃⁻; NH₄⁺ và PO₄³⁻, xem bảng 3.17 và hình C.3-C.4, C7-C.8, C.10-C.12, C.15-C.17, Phụ lục C.

Dưới tác động của con người (làm gia tăng các chất ô nhiễm, lấn biển) kết hợp ảnh hưởng của BĐKH (tăng nhiệt độ và NBD) làm tăng các chất hữu cơ (0,32 g/m³),

đinh dưỡng (0.025 g/m^3), ngược lại làm suy giảm nồng độ oxy hòa tan (0.33 mg/l) ở vùng biển CB-HL. Jeppesen và cộng sự [99] khi dùng mô hình để dự báo tác động do sự tăng lên của nguồn dinh dưỡng từ lục địa đưa ra và BĐKH đã cho rằng đây là các quá trình hết sức phức tạp, với sự ảnh hưởng tương tác qua lại giữa các nguồn dinh dưỡng, với điều kiện ánh sáng, nhiệt độ và các quá trình TĐL. Trong tương lai gần, khi các nguồn dinh dưỡng đưa ra ven bờ tăng kết hợp với sự tăng lên của nhiệt độ nước, sẽ là điều kiện rất thuận lợi cho sự phát triển của tảo, đặc biệt là tảo lam. Đồng thời, sự gia tăng nguồn dinh dưỡng Nito từ hoạt động KTXH của con người khi tích hợp với ảnh hưởng của BĐKH có thể làm tăng mạnh hàm lượng Nitrat ở các khu vực đó. Những nhận định này cũng khá tương đồng với kết quả nghiên cứu [100] ở khu vực cửa sông Thames: dự báo hàm lượng Nitrat có thể tăng từ $4\text{-}18 \text{ mg/l}$ khi có sự ảnh hưởng tích hợp của các nguồn dinh dưỡng đưa ra và tăng nhiệt độ do BĐKH. Một công bố khác cũng cho thấy với sự tăng lên của nhiệt độ nước khoảng $0,8\text{-}1,1$ độ C ở vịnh Chesapeake (Mỹ) kết hợp với nguồn dinh dưỡng gia tăng do phát triển KTXH đã làm tăng mạnh sinh khối của thực vật phù du và xuất hiện thường xuyên hơn các đợt thủy triều đỏ ở khu vực này [101].

Sự tăng lên của nhiệt độ và thay đổi lượng mưa kết hợp với các nhân tố con người như tăng dân số, hoạt động chăn nuôi, thay đổi sử dụng đất sẽ tiếp tục ảnh hưởng đến dòng chảy, CLN ở các sông và vùng ven bờ [79]. Hạn hán làm tăng nồng độ chất ô nhiễm, tăng quá trình khoáng hóa Nito, phục hồi chậm từ quá trình axit hóa [80-81].

3.5. Đề xuất giải pháp quản lý

3.5.1. Nhóm giải pháp tuyên truyền

Trong nghiên cứu này, các biểu hiện của BĐKH đến khu vực ven biển CB-HL và tác động của BĐKH đến môi trường nước ở khu vực nghiên cứu đã được phân tích đánh giá. Mặc dù ảnh hưởng của BĐKH đến môi trường nước ở khu vực CB-HL còn nhỏ hơn so với các tác động của con người nhưng những biểu hiện của BĐKH đối với khu vực này lại là điều hết sức đáng lo ngại, đặc biệt là sự dâng cao mực nước và tăng nhiệt độ nước biển. Chính vì vậy, cần tuyên truyền tới người dân ý thức, trách nhiệm giữ gìn bảo vệ hành tinh, hạn chế phát thải khí nhà kính, giảm quá trình ấm lên toàn cầu. Đây không chỉ là hành động bảo vệ hành tinh mà chính

là bảo vệ cho nơi mình sống, khu vực ven bờ CB-HL.

Các kết quả nghiên cứu cho thấy, nguồn chất gây ô nhiễm cũng là nguyên nhân chính làm suy giảm chất lượng môi trường nước của khu vực, đặc biệt là ở các vùng nước ven bờ, gần các điểm nguồn thải. Chính vì vậy, từ các kết quả nghiên cứu của luận án, cần nâng cao nhận thức của cộng đồng trong việc bảo vệ tài nguyên và môi trường biển. Việc bảo vệ tài nguyên và môi trường biển có tầm quan trọng lớn đối với sự phát triển KTXH ở khu vực CB-HL, đặc biệt khi định hướng phát triển kinh tế của khu vực này lấy du lịch dịch vụ làm mũi nhọn.

Trong nghiên cứu này, kết quả phân tích đánh giá cho thấy nguồn chất gây ô nhiễm xuất phát từ nhiều hoạt động khác nhau. Do đó, cần tăng cường vai trò của cộng đồng: Khi người dân, doanh nghiệp, các nhà quản lý nhận thức được việc bảo vệ tài nguyên và môi trường biển là yếu tố sống còn, gắn liền với sự phát triển KTXH của địa phương nơi mình sinh sống thì nguồn phát sinh chất gây ô nhiễm, các nguy cơ đe dọa tài nguyên biển sẽ được hạn chế tối đa.

Truyền thông và giáo dục: Sử dụng mô hình trực quan (bản đồ động, hình ảnh lan truyền ô nhiễm), từ các kết quả tính toán định lượng, các hình vẽ phân bố chất ô nhiễm, DO hoà tan của mô hình trong luận án này để giáo dục và nâng cao nhận thức cho học sinh, người dân, khách du lịch.

3.5.2. Kiểm soát các nguồn ô nhiễm đưa vào khu vực Cát Bà-Hạ Long

Kết quả nghiên cứu trong luận án này cho thấy các hoạt động phát triển KTXH ở khu vực CB-HL chủ yếu là tăng dân số, du lịch, hoạt động NTTS, chăn nuôi, công nghiệp đã làm phát sinh các chất gây ô nhiễm ra môi trường nước ở khu vực: khoảng 192 nghìn tấn COD, 77 nghìn tấn BOD, 765 tấn $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, 18,9 nghìn tấn NH_4^+ và 846 tấn PO_4^{3-} . Dự báo tổng lượng chất thải phát sinh từ các nguồn này đến năm 2030 tăng đáng kể so với năm 2019: BOD, COD, NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} với các giá trị lần lượt là 95,5%, 95,3%, 38,3%, 41,4 % và 79,4 %, trong đó nguồn công nghiệp chiếm 60-89%.

Mặc dù các kết quả tính toán mô phỏng từ mô hình cho thấy các nguồn ô nhiễm hiện nay không ảnh hưởng nhiều đến chất lượng môi trường nước vùng biển CB-HL. Tuy nhiên hoạt động KTXH của con người là nhân tố chính gây ra những sự ô

nhễm cục bộ ở một số thời điểm, gây ra sự mất mỹ quan, suy giảm chất lượng môi trường nước ở một số vùng ven bờ như vịnh Cửa Lục, Hạ Long, đảo Tuần Châu, phía tây và tây bắc đảo Cát Bà, do vậy cần kiểm soát các nguồn ô nhiễm đưa vào khu vực CB-HL. Do đó, cần xử lý các nguồn nước thải trước khi xả ra môi trường; giám sát, đo đạc CLN ở các vị trí xả thải.

Việc quan trắc chất lượng môi trường nước ở khu vực CB-HL được Ban quản lý vịnh Hạ Long thực hiện định kỳ theo quý. Tuy nhiên các kết quả quan trắc chỉ được thực hiện tại những vị trí và thời điểm nhất định, khó đánh giá, cũng như đưa ra bức tranh tổng thể môi trường nước khu vực CB-HL. Mô hình Delft3D sử dụng trong luận án đã được thiết lập mô phỏng tốt CLN theo các kịch bản khác nhau. Đây là một trong những công cụ hữu ích, đánh giá được sự phát tán, lan truyền các chất ô nhiễm ở khu vực CB-HL. Do vậy, khu vực CB-HL cần ứng dụng các kỹ thuật tiên tiến như mô hình Delft3D để giám sát sự lan truyền, phát tán các chất ô nhiễm ở vùng biển CB-HL, đặc biệt trong trường hợp sự cố xảy ra để có các biện pháp ứng phó kịp thời.

Tăng cường hỗ trợ nguồn lực cho công tác quản lý môi trường nước: Tăng cường đầu tư xây dựng mạng lưới các điểm quan trắc môi trường nước ở vùng biển CB-HL; Cần tăng cường đào tạo, bồi dưỡng kiến thức về quản lý nhà nước với tài nguyên môi trường nước; Tăng cường thanh tra, kiểm tra việc thực hiện các cam kết về bảo vệ môi trường cũng như các cam kết trong giấy phép xả thải vào nguồn nước.

3.5.3. Nhóm giải pháp tăng cường nghiên cứu về biến đổi khí hậu và các giải pháp thích ứng

Các kết quả nghiên cứu về biểu hiện của BĐKH trong luận án này mới dừng lại đến năm 2021. Trong khi đó, các biểu hiện cũng như tác động của BĐKH ngày càng diễn biến phức tạp, khó dự báo, khó đánh giá. Đây là hiện tượng tự nhiên, xảy ra liên tục, lâu dài với những biểu hiện diễn ra có tốc độ rất chậm, chỉ có thể thấy sau hàng thập kỷ hoặc hàng trăm năm. Chính vì vậy, những tác động hay biểu hiện của BĐKH trong những khoảng thời gian ngắn có thể sẽ bị bỏ qua và không được chú ý đến. Những nghiên cứu về tác động của BĐKH cũng mới chỉ được quan tâm đến trong vài chục năm trở lại đây. Các tính toán về dâng cao mực nước và tăng nhiệt độ dựa trên số liệu quan trắc nhiều năm cho thấy khu vực CB-HL cũng chịu

ảnh hưởng của BĐKH (NBD 3,38-4,18 mm/năm, nhiệt độ tăng 0,02-0,052°C/năm), đặc biệt trong giai đoạn gần đây mức độ tăng nhanh hơn (NBD là 4,72-7,16 mm/năm, nhiệt độ tăng 0,093-0,103°C/năm). Vì vậy, cần tăng cường nghiên cứu về BĐKH và các tác động của BĐKH đến CLN ở vùng biển CB-HL để có cái nhìn sâu sắc, toàn diện hơn về cả những mặt tích cực và tiêu cực của hiện tượng này đến môi trường nước và các HST.

Tăng cường nghiên cứu các giải pháp thích ứng với BĐKH: Là hiện tượng tự nhiên có quy mô toàn cầu, BĐKH không chỉ là vấn đề riêng của mỗi quốc gia, mỗi khu vực mà là vấn đề mang tính chất toàn cầu. Vì vậy, giải quyết vấn đề này gần như là không thể mà chỉ có thể là hiểu biết một cách sâu sắc về nguyên nhân cơ chế, các quá trình vận động và xu thế của hiện tượng này cũng như các quá trình tác động của BĐKH đến môi trường nước, các HST. Kết quả dự báo ảnh hưởng của BĐKH (tăng nhiệt độ và NBD) đến CLN ở khu vực CB-HL hiện tại không ảnh hưởng nhiều. Nhưng đây là quá trình diễn ra liên tục và có sự tích lũy theo thời gian. Do vậy cần có các nghiên cứu dự báo, mô phỏng ảnh hưởng không chỉ là NBD, tăng nhiệt độ mà còn có các hiện tượng thời tiết cực đoan đến CLN ở khu vực CB-HL để có thể đưa ra các giải pháp thích ứng.

3.5.4. Nhóm giải pháp lồng ghép biến đổi khí hậu vào quy hoạch phát triển kinh tế xã hội

Trong nghiên cứu này, những tác động do hoạt động phát triển KTXH của con người và BĐKH đến môi trường nước ở khu vực nghiên cứu thể hiện rất phức tạp. Nước ta là một trong những quốc gia sẽ chịu ảnh hưởng nặng nề nhất của BĐKH [2, 41]. Đặc biệt trong bối cảnh sự phát triển KTXH ở khu vực ngày càng diễn ra mạnh mẽ hơn, và các biểu hiện của BĐKH như dâng cao mực nước biển và tăng nhiệt độ nước cũng càng ngày càng tăng với tốc độ cao hơn trước, thì cần thiết phải có giải pháp lồng ghép BĐKH vào quy hoạch phát triển KTXH ở khu vực CB-HL. Giải pháp này đưa ra nhằm đảm bảo sự bền vững, lâu dài, cân đối giữa phát triển và thích ứng, cũng như hạn chế các hoạt động có tính nhạy cảm đối với môi trường trong bối cảnh BĐKH [162-164]. Đối với khu vực nghiên cứu, khi thực hiện giải pháp này cần:

- Tích hợp nội dung thích ứng với BĐKH trong các quy hoạch phát triển KTXH,

đặc biệt là vấn đề nước biển dâng và tăng nhiệt độ.

- Khuyến khích, lựa chọn sản xuất sạch, thân thiện môi trường, ít gây ra nguồn chất gây ô nhiễm đưa vào vịnh Hạ Long và Cát Bà, hạn chế, tiến tới loại bỏ hoạt động nuôi trồng thủy hải sản trong khu vực.
- Tính tới các ảnh hưởng của thời tiết cực đoan, nước biển dâng, các sự cố, tai biến môi trường do BĐKH gây ra trong việc quy hoạch các khu dân cư, cụm công nghiệp ven biển.

3.5.5. Nhóm giải pháp bảo vệ hệ sinh thái và vùng nhạy cảm

Trong nghiên cứu này, các kết quả từ mô hình CLN cho thấy ảnh hưởng của các nguồn ô nhiễm diễn ra mạnh chủ yếu ở vùng ven bờ, gần các điểm nguồn thải. Mặc dù mức độ ảnh hưởng của các nguồn ô nhiễm ven bờ đến các HST, vùng nhạy cảm xa bờ khu vực vịnh Hạ Long và Cát Bà chưa lớn, nhưng trong một số trường hợp, điều kiện cụ thể (ví dụ như pha triều xuống của kỳ triều cường), các nguồn ô nhiễm ven bờ đã ảnh hưởng đến CLN ở những khu vực này. Do đó, trên cơ sở các kết quả tính của mô hình, cần có giải pháp bảo vệ các HST, vùng nhạy cảm, thông qua các giải pháp như:

- Lập danh mục các vùng nước, hệ sinh thái dễ bị ảnh hưởng do nguồn ô nhiễm ven bờ, giám sát môi trường nước ở khu vực này bằng các đo đạc, phân tích chất lượng môi trường nước định kỳ (theo tháng, mùa).
- Thông qua các kết quả của mô hình, xác định các nguyên nhân, nguồn ô nhiễm nào từ ven bờ ảnh hưởng đến môi trường nước các khu vực đó để đưa ra giải pháp hạn chế.

3.5.6. Giải pháp quy hoạch phát triển bền vững

Quy hoạch không gian biển: Các quy hoạch cần được xây dựng dựa trên các kết quả nghiên cứu về điều kiện động lực, môi trường của khu vực. Sử dụng kết quả mô hình như đặc điểm dòng chảy, khả năng trao đổi nước, mức độ lan truyền, phát tán chất gây ô nhiễm. ..v.v để quy hoạch khu vực dành cho du lịch, khu vực cấm khai thác, khu vực bảo tồn, khu neo đậu tàu thuyền nhằm giảm thiểu xung đột sử dụng không gian biển và tận dụng khả năng phục hồi môi trường tự nhiên của vùng biển khu vực CB-HL.

Ngoài ra, từ các kết quả tính toán của mô hình cũng cho thấy mặc dù ảnh hưởng của các nguồn chất gây ô nhiễm vẫn còn giới hạn gần các điểm phát sinh nguồn thải nhưng về về lâu dài, cần có tính toán xác định các giới hạn tiếp nhận chất gây ô nhiễm từ các nguồn phát sinh ven bờ cho toàn bộ vùng biển CB-HL. Trên cơ sở đó, có thể giúp các nhà quản lý đưa ra các quyết định cân bằng giữa mục tiêu phát triển KTXH với bảo vệ môi trường của khu vực.

3.5.7. Ứng dụng khoa học công nghệ trong việc giám sát và cảnh báo sớm

Các kết quả tính toán, mô phỏng trong luận án này cho thấy sự suy giảm chất lượng môi trường nước ở khu vực nghiên cứu đều chủ yếu bắt nguồn từ các điểm nguồn thải ven bờ đưa ra. Nếu phát sinh thêm một nguồn ô nhiễm thì sau khoảng thời gian nhất định sẽ ảnh hưởng đến môi trường nước ở khu vực đó và vùng lân cận. Ngoài ra, các kết quả tính toán cũng sẽ cung cấp thông tin về các khu vực dễ chịu ảnh hưởng/tác động của nguồn chất gây ô nhiễm ven bờ đưa ra. Dựa vào các kết quả này, có thể xây dựng hệ thống giám sát môi trường tự động, đặt tại các vị trí có thể xảy ra nguy cơ ô nhiễm cao, các vị trí dễ bị ảnh hưởng do nguồn ô nhiễm từ hoạt động KTXH của con người. Việc lựa chọn các vị trí giám sát môi trường nước giúp tiết kiệm các chi phí nhưng vẫn đảm bảo được tính hiệu quả, kịp thời trong việc ngăn chặn, xử lý sớm các sự cố môi trường ở khu vực CB-HL.

Bên cạnh đó, các cán bộ kỹ thuật môi trường của Ban quản lý vịnh Hạ Long cũng cần được trang bị, các công nghệ, kỹ thuật tiên tiến, để phục vụ, hỗ trợ cho việc quản lý môi trường nước ở khu vực vịnh Hạ Long. Chẳng hạn như có thể khai thác sử dụng ảnh viễn thám để giám sát môi trường nước, dùng các công cụ mô hình để đánh giá dự báo môi trường nước, mô phỏng phát tán chất gây ô nhiễm khi xảy ra sự cố.

KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

Kết luận

Nhằm đánh giá, dự báo những ảnh hưởng do hoạt động KTXH của con người và BĐKH (tăng nhiệt độ và NBD) đến CLN ở vùng biển CB-HL, một hệ thống mô hình TĐL-sóng-CLN trên cơ sở mô hình Delft3D đã được thiết lập. Để phục vụ cho việc thiết lập và kiểm chứng kết quả của mô hình, các bộ số liệu liên quan ở khu vực đã được thu thập và xử lý. Các kết quả so sánh giữa tính toán bằng mô hình và quan trắc cho thấy đã có sự phù hợp tương đối và mô hình này có thể được sử dụng như một công cụ hiệu quả để nghiên cứu dự báo ảnh hưởng từ các hoạt động KTXH của con người và BĐKH đến CLN vùng biển CB-HL. Các nhóm kịch bản mô phỏng khác nhau đã thiết lập: kịch bản kiểm chứng mô hình (2021), kịch bản hiện trạng (2019); kịch bản ảnh hưởng của BĐKH (2030 và 2050); kịch bản ảnh hưởng của KTXH (tăng nguồn ô nhiễm 2030 và kịch bản khi chưa có hoạt động lấn biển 2010); kịch bản kết hợp ảnh hưởng của KTXH và BĐKH (2030 và 2050). Kết quả đánh giá biểu hiện BĐKH cũng như ảnh hưởng của KTXH và BĐKH đến CLN vùng biển CB-HL như sau:

Biểu hiện của BĐKH ở khu vực CB-HL đã được phân tích, đánh giá bằng phương pháp Mann-Kendall và Sen's Slope thông qua một số yếu tố nhiệt độ nước, mực nước ở các trạm như Bãi Cháy và Hòn Dấu. Kết quả cho thấy mực nước tại cả trạm Bãi Cháy và Hòn Dấu đều có xuồng tăng với giá trị lần lượt là 4,18mm/năm (1981-2020) và 3,38mm/năm (1961-2020). NBD có xu hướng tăng nhanh trong giai đoạn gần đây (2001-2020) có thể đạt 4,72mm/năm (trạm Bãi Cháy) và 7,16mm/năm (trạm Hòn Dấu). Nhiệt độ tại trạm Hòn Dấu tăng 0,02°C/năm và có xu hướng tăng nhanh hơn ở trạm Bãi Cháy với 0,052°C/năm trong giai đoạn 1995-2020. Tốc độ tăng của nhiệt nước đạt 0,093°C tại trạm Hòn Dấu và 0,103°C tại trạm Bãi Cháy trong giai đoạn 2008-2020.

Ảnh hưởng của KTXH và BĐKH trong mùa gió Đông Bắc và 2 mùa chuyển tiếp đều làm giảm CLN (DO) nhưng ảnh hưởng của BĐKH chỉ với 0,02-0,13 mg/l (0,3-2,0%) nhỏ hơn so với ảnh hưởng của hoạt động KTXH là 0,07-0,44 mg/l (1,0-7,2%) và kịch bản có sự kết hợp từ hoạt động KTXH và BĐKH là 0,09-0,48 mg/l

(1,3-8,0%). Trong khi đó, vào mùa gió Tây Nam, xu thế này lại có diễn biến ngược lại: ảnh hưởng do BĐKH làm suy giảm mạnh chất lượng môi trường nước với giá trị 0,25-0,31 mg/l (3,9-5,0%) lớn hơn ảnh hưởng do hoạt động của KTXH là 0,14-0,16 mg/l (2,2-2,5%) và ảnh hưởng kết hợp do hoạt động KTXH và BĐKH là 0,13-0,17 mg/l (1,8-2,8%). Ảnh hưởng kết hợp hoạt động KTXH và BĐKH đã làm tăng các chỉ số hữu cơ, với giá trị tăng dao động trong khoảng 0,074-0,3 g/m³ (2,8-19,1%) đối với BOD và 0,078-0,32 g/m³ (2,8-19,0%) đối với COD. Các chất dinh dưỡng ở các khu vực cũng tăng với giá trị là 0,006-0,025 g/m³ (9,2-106,9%), 0,006-0,019 g/m³ (1,2-86,2%) và 0,002-0,011 g/m³ (3,0-80,6%) tương ứng với NO₃⁻, NH₄⁺ và PO₄³⁻.

Trên cơ sở đánh giá các ảnh hưởng riêng rẽ KTXH, BĐKH và ảnh hưởng kết hợp KTXH và BĐKH đến CLN vùng biển CB-HL, một số nhóm giải pháp đã được đưa ra bao gồm: 1) Nhóm giải pháp tuyên truyền; 2) Kiểm soát nguồn ô nhiễm đưa vào khu vực CB-HL; 3) Nhóm giải pháp tăng cường nghiên cứu về biến đổi khí hậu và các giải pháp thích ứng; 4) Nhóm giải pháp lồng ghép biến đổi khí hậu vào quy hoạch phát triển kinh tế xã hội; 5) Nhóm giải pháp bảo vệ hệ sinh thái và vùng nhạy cảm; 6) Giải pháp quy hoạch phát triển bền vững; 7) Ứng dụng khoa học công nghệ trong việc giám sát và cảnh báo sớm.

Khuyến nghị

Trong khuôn khổ của luận án, nghiên cứu sinh chỉ đánh giá ảnh hưởng của con người làm gia tăng các chất gây ô nhiễm từ hoạt động phát triển KTXH, chưa đánh giá trong trường hợp sự cố xảy ra như từ KCN đến CLN ở khu vực CB-HL. Do ảnh hưởng sự cố từ các KCN có thể gây hậu quả nghiêm trọng đến HST cũng như CLN, điển hình là sự cố Formosa ở miền Trung Việt Nam vào năm 2016 đã gây thiệt hại nặng nề đến KTXH và môi trường của 4 tỉnh Hà Tĩnh, Quảng Bình, Quảng Trị và Thừa Thiên Huế. Nghiên cứu này tập trung đánh giá các ảnh hưởng đến môi trường nước dựa trên các nhóm chất gây ô nhiễm hữu cơ, dinh dưỡng và oxy mà chưa đánh giá đến các chất khác cũng như các HST ở khu vực CB-HL. Ngoài ra, ảnh hưởng của BĐKH trong nghiên cứu này mới chỉ tính đến sự gia tăng nhiệt độ và NBD mà chưa tính đến các hiện tượng thời tiết cực đoan như mưa, lũ, bão... Tất cả các hạn chế này sẽ được nghiên cứu sinh khắc phục trong các nghiên cứu tương lai.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

Bài báo:

1. **Hai, N.M.**; Vinh,V.D.; Ouillon, S.; Lan, T.D.; Duong, N.T. Modelling Impacts of Climate Change and Anthropogenic Activities on Ecosystem State Variables of Water Quality in the Cat Ba–Ha Long Coastal Area (Vietnam). *Water* 2025, 17, 319. <https://doi.org/10.3390/w17030319>
2. **Minh Hai Nguyen**, Duy Vinh Vu, Duc Thinh Nguyen, Thanh Duong Nguyen (2024). Numerical investigations on seasonal variation of waves in the Cat Ba – Ha Long coastal area (Vietnam) in 2021. *Regional Studies in Marine Science* 79 (2024) 103828. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103828>
3. Vu Duy Vinh, **Nguyen Minh Hai**, Saheed Puthan Purayil, Genevieve Lacroix, Nguyen Thanh Duong (2024). Seasonal variation of coastal currents and residual currents in the Cat Ba –Ha Long coastal area (VIET NAM): Results of coherens model. *Regional Studies in Marine Science* 80 (2024) 103874. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103874>
4. **Nguyen, Hai M.**, Sylvain Ouillon, and Vinh D. Vu (2022). Sea Level Variation and Trend Analysis by Comparing Mann–Kendall Test and Innovative Trend Analysis in Front of the Red River Delta, Vietnam (1961–2020), *Water*, 14(11):1709. <https://doi.org/10.3390/w14111709>
5. **Nguyen Minh, H.**, Ouillon, S., & Vu Duy, V. (2022). Sea-level rise in Hai Phong coastal area (Vietnam) and its response to enso - evidence from tide gauge measurement of 1960-2020. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 44(1), 109–126. <https://doi.org/10.15625/2615-9783/16961>.
6. Vu Duy, V., Ouillon, S., & **Nguyen Minh, H.** (2022). Sea surface temperature trend analysis by Mann-Kendall test and sen’s slope estimator: a study of the Hai Phong coastal area (Vietnam) for the period 1995-2020. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 44(1), 72–91.
7. **Nguyen Minh Hai**, Vu Duy Vinh (2022). How climate change affected on water level in Ha Long coastal area in the period 1974–2020: results from the mann-kendall test and sen’s slope. *Vietnam Journal of Marine Science and Technolog*, 22(3) 257–269. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/1695624>.
8. **Nguyen , M. H.**, Ouillon, S., & Vu, D. V., 2021. Seasonal variation of suspended sediment and its relationship with turbidity in Cam - Nam Trieu estuary, Hai Phong (Vietnam). *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 21(3). <https://doi.org/10.15625/1859-3097/16076>.

9. Vu Duy, V., Ouillon, S., & **Nguyen Minh, H.**, 2021. Suspended sediment floc size in the Cam - Nam Trieu estuary (Hai Phong, Vietnam), in wet season. Vietnam Journal of Marine Science and Technology, 21(3). <https://doi.org/10.15625/1859-3097/16074>

Tham dự hội thảo:

1. Hội thảo Quốc tế LOTUS, Hà Nội 5/11/2024, bài trình bày “Water quality under anthropogenic impacts and climate change: in case for Cat Ba-Ha Long coastal area (Vietnam)”
2. The 3rd “International Vietnam Conference on Earth and Environmental Sciences- iVCEES-2023”, Quy Nhon, 27 Nov-1 Dec, 2023, bài trình bày “Numerical investigations on seasonal variation of waves in the Cat Ba - Ha Long coastal area”
3. Hội nghị quốc tế “Biển Đông 2022”: Thế kỷ Khoa học Công nghệ biển vì tương lai của Đại dương, Nha Trang, 13-14/9/2022, bài trình bày “Sea level trend in Hai Phong - Ha Long coastal areas under the influence of climate change: Results from the Mann-Kendall method and the Innovative Trend Analysis”
4. Hội thảo Quốc tế LOTUS, Ninh Bình 28-29/06/2022, bài trình bày “Impact of climate change on sea-level rise and sea surface temperature on Hai Phong coastal area”.
5. Hội thảo trực tuyến về Nghiên cứu Khoa học Biển ở khu vực biển Đông được tổ chức bởi Viện Hải Dương học số 1, Trung Quốc từ ngày 26-27/09/2029, bài trình bày “Sea-level and sea surface temperature due to climate change in the Haiphong-Quangninh: Results from measured data 1960-2020”.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Bộ Tài nguyên và Môi trường biển, 2021, *Kịch bản biến đổi khí hậu*, NXB Tài nguyên Môi trường và bản đồ Việt Nam.
2. Dasgupta S., Lanplante B., Meisner C., Wheeler D., Yan J., 2007, *The Impact of Sea level Rise on Developing Countries: A Comparative Analysis*. World Bank Policy Research Working Paper 4136, February 2007.
3. Costanza R., De Groot R., Sutton P., Van der Ploeg S., Anderson S.J., Kubiszewski, I., Turner, R.K., 2014, Changes in the global value of ecosystem services. *Glob. Environ. Chang.* 2014, 26, 152–158
4. Saxena V., 2025. Water Quality, Air Pollution, and Climate Change: Investigating the Environmental Impacts of Industrialization and Urbanization. *Water Air Soil Pollut* **236**, 73 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07702-4>
5. Fan S.F., Feng M.Q., Liu Z., 2009. Simulation of water temperature distribution in Fenhe reservoir, *Water Science and Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 32–42, 2009.
6. Roger L.B., Hooke., José F., Martín-Duque., Pedraz J., 2012, Land transformation by humans: A review. *Science*, 22 (12), 4-10.
7. Dafforn K.A., Glasby T.M., Airolidi L., Rivero N., Mayer-Pinto M., Johnston E.L., 2015, Marine urbanization: An ecological framework for designing multifunctional artificial structures. *Frontier in Ecology and Environment*, 13, 82-90
8. Barbier E.B., Hacker S.D., Koch E.W., Stier A.C., Silliman B.R., 2012, *Estuarine and coastal ecosystems and their services*. In *Ecological economics of estuaries and coasts*. Edited by M. van den Belt and R. Costanza. Academic Press, Waltham, Mass., USA. pp. 109–127.
9. Vegas-Vilarrubia T., Hernandez E., Rull V., Vegas E.R., 2015, The orinoco megadelta as a conservation target in the face of the ongoing and future sea level rise. *Sci. Total Environ.* 515-516, 129–142.
10. Karl T.R., Trenberth K.E., 2003, Modern global climate change. *Science* 302 (5651), 1719–1723.
11. Halpern B.S., Walbridge S., Selkoe K.A., Kappel C.V., Micheli F., Agrosa C.D., Bruno J.F., Casey K.S., Ebert C., Fox H.E., Fujita R., Heinemann D., Lenihan H.S., Madin E.M.P., Perry M.T., Selig E.R., Spalding, M., Steneck R., Watson R., 2008, A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*. 2008;319:948-952
12. World Meteorological Organization, 2025. State of the Global Climate 2024, WMO-No. 1368, ISBN 978-92-63-11368-5.
13. Jackson J.B.C., Kirby M.X, Berger W.H. ,Bjorndal K.A., Botsford L.W., Bourque W.J., Bradbury R.H., Cooke R., Erlandson J., Estes J.A., Hughes T.P., Kidwell S., Lange C.B., Lenihan H.S., Pandolfi J.M., Peterson C.H., Steneck R.S., Tegner M.J., Warner R.R., 2001, Historical overfishing and the recent

- collapse of coastal ecosystems. *Science*. 2001;293(5530):629-637.
14. Beman J.M., Chow C.E., King A.L., Feng Y., Fuhrman J.A., Andersson A., Bates N.R., Popp B.N., Hutchins D.A., 2011, Global declines in oceanic nitrification rates as a consequence of ocean acidification. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 108 (1), 208–213.
 15. Dehghani, M. R., Ebrahimi, P., Kafi, M., Nikraves, H., & Kazemzadeh, Y., 2025. Estimation the pH of CO₂-saturated NaCl solutions using gene expression programming: Implications for CO₂ sequestration. *Results in Engineering*, 25, 104047. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104047>.
 16. Dong WS, Ismailluddin A, Yun LS, Ariffin EH, Saengsupavanich C, Abdul Maulud KN, Ramli MZ, Miskon MF, Jeofry MH, Mohamed J, Mohd FA, Hamzah SB, Yunus K. The impact of climate change on coastal erosion in Southeast Asia and the compelling need to establish robust adaptation strategies. *Heliyon*. 2024 Feb 8;10(4):e25609. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25609. PMID: 38375273; PMCID: PMC10875370.
 17. Guild, R., Wang, X., & Quijón, P. A., 2025. Climate change impacts on coastal ecosystems. *Environmental Research: Climate*, 3(4), 042006. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ad9f90>
 18. Elliott M., Cutts N.D., Trono A., 2014, A typology of marine and estuarine hazards and risks as vectors of change: a review for vulnerable coasts and their management. *Ocean Coast. Manag.* 93, 88–99.
 19. Mentaschi L., Voudoukas M.I., Pekel J.F., Voukouvalas E., Feyen L, Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Sci. Rep.* 2018, 8, 1–11. [CrossRef] [PubMed]
 20. Vitousek P.M., Aber J.D., Howarth R.W., Likens G.E., Matson P.A., Schindler D.W., 1997, Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. *Ecological Applications*. 1997;7:737-750.
 21. Malone T.C., Newton A., The globalization of cultural eutrophication in the Coastal Ocean: Causes and consequences. *Frontiers in Marine Science*. 2020;7:670.
 22. EC., 2000, *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. 2000
 23. Nations., 2015. *United and Unepmed WG.473Inf. United Nations Environment Programme Mediterranean Action Plan*.
 24. UNEP/MAP., 2016. *Integrated Monitoring and Assessment Programme of the Mediterranean Sea and Coast and Related Assessment Criteria (IMAP)*, Official document series 1/2016; ISBN 978-92-807-3592-5. 2016. Available from: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/10576/IMAP_Publication_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y
 25. UNEP MAP., 2017. *Mediterranean Quality Status Report*
 26. Bini M., Rossi V., Climate Change and Anthropogenic Impact on Coastal Environments. *Water* 2021, 13, 1182. <https://doi.org/10.3390/w13091182>

27. Atasoy M., Palmquist R.B., Phaneuf D.J., 2006, Estimating the effects of urbanresidential development on water quality using microdata. *Journal of Environmental Management* 79:399-408.
28. EC., 2019, *The EU Blue Economy Report*. Luxembourg: European Commission, Publications Office of the European Union; 2019
29. Torresan S., Critto A., Rizzi J., Marcomini A., 2012, Assessment of coastal vulnerability to climate change hazards at the regional scale: the case study of the North Adriatic Sea. *Nat. Hazard Earth Syst.* 12 (7), 2347–2368.
30. Phạm Văn Ninh, 1995. *Ô nhiễm biển do sông tải ra*. Báo cáo đề tài thuộc chương trình biển KT.03. Bộ Khoa học, công nghệ và môi trường, 186tr.
31. Lê Trình, 1995. *Nghiên cứu khả năng tiếp nhận tải lượng ô nhiễm do nước thải, khả năng tự làm sạch của các sông Sài Gòn, Đồng Nai, Nhà Bè xây dựng các cơ sở khoa học đề xuất các phương án xử lý nước thải và quản lý môi trường các sông lớn tại thành phố Hồ Chí Minh*. Báo cáo tổng kết đề tài cấp Bộ Khoa học và Công nghệ, 217tr.
32. Trần Hồng Thái, 2009. *Nghiên cứu ứng dụng mô hình toán, dự báo ô nhiễm và xác định nguồn gây ô nhiễm cho hạ lưu sông Sài Gòn- Đồng Nai*. Báo cáo tổng kết đề tài cấp Bộ tài nguyên và Môi trường.
33. Vũ Duy Vĩnh, 2015. *Mô phỏng lan truyền chất ô nhiễm trong nước khu vực đầm Thị Nại*. Báo cáo chuyên đề thuộc đề tài cấp nhà nước KC09.17/11-15 “Đánh giá sức tải môi trường của một số thủy vực tiêu biểu ven bờ biển Việt Nam phục vụ phát triển bền vững”
34. Nguyen Minh Hai, Vu Duy Vinh, 2021, Impact simulation of organic and nutrient pollutants from Nghi Son economic zone to thanh hoa coastal waters. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 21(1), 23–36. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/15091> .
35. Vũ Duy Vĩnh, 2008. *Nghiên cứu, ứng dụng mô hình sinh thái phục vụ bảo vệ đa dạng sinh học và các hệ sinh thái vùng biển Cát Bà -Hạ Long*. Báo cáo tổng kết đề tài cấp Viện Hàn Lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.
36. Vũ Duy Vĩnh, 2010. *Xây dựng mô hình lan truyền các chất ô nhiễm cho khu vực vịnh Hạ Long -Bái Tử Long*. Báo cáo tổng kết đề tài cấp tỉnh Quảng Ninh.
37. Vũ Duy Vĩnh, 2010. *Nghiên cứu đánh giá lan truyền các chất ô nhiễm khu vực cửa sông ven biển Hải Phòng bằng mô hình toán học*. Báo cáo tổng kết đề tài cấp thành phố Hải Phòng.
38. Vu Duy Vinh, Nguyen Minh Hai, Do Gia Khanh, 2020, Impacts of pollution discharges from Dinh Vu industrial zone on water quality in the Hai Phong coastal area. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 20(2), 173–187.[doi:10.15625/1859-3097/20/2/14071](https://doi.org/10.15625/1859-3097/20/2/14071).
39. Vũ Duy Vĩnh, Đỗ Thị Thu Hương và Nguyễn Minh Hải, 2022. *Đánh giá tải lượng và vận chuyển chất gây ô nhiễm từ thượng nguồn đến các sông lớn khu vực Hải Phòng*. Báo cáo tổng kết đề tài cấp thành phố Hải Phòng.
40. Vũ Duy Vĩnh, Nguyễn Minh Hải, 2024, *Nghiên cứu phát triển và áp dụng bộ*

công cụ mô hình 3D tích hợp thủy nhiệt động lực-chất lượng nước phục vụ giám sát và quản lý tai biến môi trường dưới tác động của con người và biến đổi khí hậu. Báo cáo tổng kết nhiệm vụ theo chương trình hợp tác khoa học và công nghệ theo nghị định thư Việt Nam-Vương quốc Bỉ.

41. IPCC., 2007, *Fouth Assessment Report Sumary for Policymakers*
42. Bộ Tài nguyên và môi trường, 2020, *Kịch bản biến đổi khí hậu*, NXB tài nguyên – môi trường và bản đồ Việt Nam.
43. Ide T, Scheffran J. On climate, conflict and cumulation: suggestions for integrative cumulation of knowledge in the research on climate change and violent conflict. *Glob Change Peace Secur* 2014, 26:263–279.
44. Ember CC, Adem TA, Skoggard I, Jones EC. Livestock raiding and rainfall variability in northern Kenya. *Civil Wars* 2012, 14:159–181.
45. Linke AM, O’Loughlin J, McCabe JT, Tir J, Witmer FDW. Rainfall variability and violence in rural Kenya: investigating the effects of drought and the role of local institutions with survey data. *Glob Environ Change* 2015, 34:35–47.
46. De Juan A. Long-term environmental change and geographical patterns of violence in Darfur, 2003–2005. *Polit Geogr* 2015, 45:22–33.
47. Bogale A, Korf B. To share or not to share? (Non-) Violence, scarcity and resource access in Somali Region, Ethiopia. *J Dev Stud* 2007, 43:743–765.
48. Benjaminsen T, Alinon K, Buhaug H, Buseth JT. Does climate change drive land-use conflict in the Sahel? *J Peace Res* 2012, 49:97–111.
49. Ravnborg HM, Bustamante R, Cissé A, Cold-Ravnkilde SM, Cossio V, Djiré M, Funder M, Gómez LI, Le P, Mweemba C, et al. Challenges of local water governance: the extent, nature and intensity of local water-related conflict and cooperation. *Water Policy* 2012, 14:336–357.
50. IPCC., 2019, *Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems (SRCCL)*.
51. IPCC., 2019, *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC)*.
52. World Meteorological Organization (WMO)., 2005, *Statement on the Status of the Global Climate in 2005*. http://www.wmo.int/pages/index_en.html
53. World Meteorological Organization (WMO)., 2009. *2000-2009, the Warmest Decade*. Press Release No. 869 http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_869_en.html
54. Hansen J., Ruedy R., Sato M., Lo K., 2006, *GISS Surface Temperature Analysis: Global Temperature Trends: 2005 Summation*. National Aeronautics and Space Administration (NASA). <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/2005/>
55. IPCC., 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T,F, D, Qin, G,-K, Plattner, M, Tignor, S,K, Allen,

- J, Boschung, A, Nauels, Y, Xia, V, Bex and P,M, Midgley (eds,)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
56. P. V. Tân and N. Đ. Thành, “Biến đổi khí hậu ở Việt Nam: Một số kết quả nghiên cứu, thách thức và cơ hội trong hội nhập quốc tế,” *Tạp chí Khoa học ĐHQGHN, Các Khoa học trái đất và môi trường*, vol. 19, no. 2, pp. 42–55, 2013.
 57. Ferrari M.C.O., Dixon L.D., Munday L.P., McCormick I.M., Meekan M., Sih A., Chivers P.D., 2011, Intrageneric variation in antipredator responses of coral reef fishes affected by ocean acidification: implications for climate change projections on marine communities. *Global Change Biol.*, 17, 2980-2986. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02439.x>.
 58. Galaz V., Crona B., Österblom H., Olsson P., Folke C., 2011, Polycentric systems and interacting planetary boundaries-Emerging governance of climate change-ocean acidification-marine biodiversity, *Ecological Economics. Elsevier*, vol. 81(C), pages 21-32
 59. Carere M., Miniero R., Cicero, R.M., 2011, Potential effects of climate change on the chemical quality of aquatic biota. *TrAC Trends Anal. Chem.*, 30(8), 1214-1221. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trac.2011.06.006>.
 60. Rabalais N.N., Turner R.E., Díaz R.J., 2009, Global change and eutrophication of coastal waters. *Marine Science*. 2009 Available from: <https://academic.oup.com/icesjms/article-abstract/66/7/1528/656749>
 61. Howarth R.W., 2008, Coastal nitrogen pollution: A review of sources and trends globally and regionally. *Harmful Algae*. 2008;8:14-20
 62. Milieu Ltd., 2017, *Study for the Strategy for a Non-Toxic Environment of the 7th Environment Action Programme*. Brussels, Belgium: European Commission (DG ENV)
 63. Wear S.L., Acuña V., McDonald R., Font C., 2021, Sewage pollution, declining ecosystem health, and cross-sector collaboration. *Biological Conservation*. 2021;255:109010
 64. Delpla I., Jung V.A., Baures E., Clement M., Thomas O., 2009, Impacts of climate change on surface quality in relation to drinking water production. *Environ. int.*, 35(8), 1225-1233. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2009.07.001>.
 65. Whitehead P., Wilby R., Battaree W.R., Kernan M., Wade J.A., 2009, A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrol. Sci. J.*, 54(1), 101-123. <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.54.1.101>
 66. Hosseini N., Johnston J., Lindenschmidt K.E., 2017, Impacts of Climate Change on the Water Quality of a Regulated Prairie River. *Water* 2017, 9, 199.
 67. Alam A., Badruzzaman A.B.M., Ali M.A., 2013, Assessing effect of climate change on the water quality of the Sitalakhya river using WASP model. *J. Civ. Eng.* 2013, 41, 21–30.
 68. Cox B.A., Whitehead P.G., 2009, Impacts of climate change scenarios on dissolved oxygen in the River Thames, UK. *Hydrol. Res.* 2009, 40, 138.

69. Conlan K., Lane S., Ormerod S., Wade T., 2007, *Preparing for climate change impacts on freshwater ecosystems*, PRINCE: results. Environment Agency Science Report SC030300/SR, Bristol, UK.
70. Lloret J., Marín A., Marín-Guirao L., 2008. Is coastal lagoon eutrophication likely to be aggravated by global climate change? *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 78(2), 403-412. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2008.01.003>
71. Chang H., Evans B.M., Easterling D.R., 2001. The effects of climate change on stream flow and nutrient loading. *Journal of the American Water Resources Association* 37:973~986.
72. Jalliffier-Verne I., Leconte R., Huaranga-Alvarez U., Heniche M., Madoux-Humery A.S., Autixier L., Galarneau M., Servais P., Prévost M., Dorner S., 2017. Modelling the impacts of global change on concentrations of *Escherichia coli* in an urban river. *Adv. Water Resour.* 108, 450-460. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.10.001>.
73. Liu W.C., Chan, W.T., 2015, Assessment of the climate change impacts on faecal coliform contamination in a tidal estuarine system. *Environ. Monit. Assess.* 187 (12), 1–15.
74. Fukunaga A., Anderson J. M., Webster-Brown J. G., 2011. Assessing the nature of the combined effects of copper and zinc on estuarine infaunal communities, *Environmental Pollution*, 159(1), 116-124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2010.09.012>.
75. Hicks N., Bulling M. Solan M., Raffaelli D., White P., Paterson, D., 2011. Impact of biodiversity-climate futures on primary production and metabolism in a model benthic estuarine system. *BMC ecol.*, 11(1), 7. <http://dx.doi.org/10.1186/1472-6785-11-7>.
76. Allinson G., Hagen T., Salzman S., Wightwick A., Nuggeoda D., 2011. Effect of increasing salinity on the acute toxicity of a commercial endosulfan formulation to the bdelloid rotifer *Philodina acuticornis odiosa*. *Toxicol. Environ. Chem.*, 93(4), 722-728. <http://dx.doi.org/10.1080/02772248.2011.556639>
77. Whitehead P., Barbour E., Futter M., Sarkar S., Rodda H., Caesar, J., Butterfield D., Jin, L., Sinha R., Nicholls R., 2015, Impacts of climate change and socio-economicscenarios on flow and water quality of the Ganges, Brahmaputra and Meghna (GBM) river systems: low flow and flood statistics. *Environ. Sci. Process. Impacts* 17 (6), 1057–1069.
78. Valle D. M., Codato E., Marcomini A., 2007, Climate change influence on POPs distribution and fate: A case study. *Chemosphere*, 67(7), 1287-1295. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.12.028>.
79. Jin L., Whitehead P., Sarkar S., Sinha R., Futter M., Butterfield D., Caesar J., Crossman J., 2015, Assessing the impacts of climate change and socio-economic changes on flow and phosphorus flux in the Ganga river system. *Environ. Sci. Process Impacts* 17 (6), 1098–1110.
80. Ducharne A., Baubion C., Beaudoin N., Benoitc M., Billena G., Brissond N.,

- Garniera J., Kiekene H., Lebonvalletd S., Ledoux E., Maryf B., Mignoletc C., Poux X., Saubouaf E., Schottc C., Therya S., Viennotb P., 2007, Long term prospective of the Seine River system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Sci. Total Environ.*, 375(1-3), 292-311. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.011>.
81. Monteith D.T., Stoddard L.J., Evans D.C., Wit A.H., Forsius M., Høgåsen T., Wilander A., Skjelkvåle L.B., Jeffries S.D., Vuorenmaa J., Keller B., Kopáček J., Vesely, J., 2007, Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry. *Nature*, 450(7169), 537-540. <http://dx.doi.org/10.1038/nature06316>.
 82. Zwolsman J., Bokhoven, V.A., 2007, Impact of summer droughts on water quality of the Rhine River: a preview of climate change? *Water sci. technol.*, 56(4), 45-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.01.00>
 83. Elsdon T.S., DeBruin M.A.N.B., Diepe J.N., Gillandersa M.B., 2009, Extensive drought negates human influence on nutrients and water quality in estuaries. *Sci. Total Environ.*, 407(8), 3033-3043. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.01.012>.
 84. Wallace J., Stewart, L., Hawdon A., Keen, R., Karim F., Kemei J., 2009, Flood water quality and marine sediment and nutrient loads from the Tully and Murray catchment in north Queensland, Australia. *Mar. Freshw. Res.*, 60 (11), 1123-1131. <http://dx.doi.org/10.1071/MF08356>
 85. ASMO, 1998. *Report of the ASMO workshop on Modelling Transport and Fate of Contaminants*. 4-7 November 1997 The Hague, The Netherlands, in: Assessment and Monitoring, Evaluation and surveillance continued, Ospar Commission
 86. Kazemi H., Hashemi H., Maghsood F.F., Hosseini S.H., Sarukkalige R., Jamal, S., Berndtsson R, Assessment of streamflow decrease due to climate vs. human influence in a semiarid area. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2020. Available online: <https://hess.copernicus.org/preprints/hess-2019-618/> (accessed on 7 August 2022).
 87. Zhang H., Wang B., Liu D.L., Zhang M., Feng P., Cheng L., Yu Q., Eamus D., 2019, Impacts of future climate change on water resource availability of eastern Australia. *J. Hydrol.* 2019, 573, 49–59.
 88. Bai P., Liu W., Guo M., 2014, Impacts of climate variability and human activities on decrease in streamflow in the Qinhe River, China. *Theor. Appl. Climatol.* 2014, 117, 293–301.
 89. Wang W., Shao Q., Yang T., Peng S., Xing W., Sun F., Luo Y., 2013, Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes: A case study in four catchments of the Haihe River basin, China. *Hydrol. Process.* 2013, 27, 1158–1174.

90. Zhang L., Zhao F.F., Brown A.E., 2012, Predicting effects of plantation expansion on streamflow regime for catchments in Australia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012, 16, 2109–2121.
91. Chen Q., Mynett A.E., Teng L., 2004, *Predicting algal blooms in the Dutch coast by integrated numerical and fussy cellular automata*, 4th International Conference on Hydroinformatics, Liong, Phoon & Babovic (Eds.), World Scientific Publishing Company, ISBN 981-238-787-0.
92. Carere, M., Miniero, R., and Cicero, R.M, 2011, Potential effects of climate change on the chemical quality of aquatic biota. *TrAC Trends Anal. Chem.*, 30(8), 1214-1221. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trac.2011.06.006>.
93. Jørgensen S. E., 2001. *Fundamental of ecological modelling*. Third edition. Elsevier Sciences Ltd.
94. Vaz N., Mateus M., Plecha S., Sousa M.C., Leitão P.C., Neves R., Dias J.M., 2015, Modeling SST and chlorophyll patterns in a coupled estuary-coastal system of Portugal: The Tagus case study. *J. Mar. Syst.* 2015, 147,123–137.
95. Qinggai W., Shibei L., Peng J., Changjun Q., Feng D., 2013, A Review of Surface Water Quality Models, *The Scientific World Journal*, vol. 2013, Article ID 231768, 7 pages, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/231768>
96. Lee B. K., 2015, Water environment management master plan outline (2006–2015)—clean water, Eco River 2015, *Korea Environmental Policy Bulletin*, vol. 4, no. 3, pp. 1–10, 2006.
97. Moriasi D.N., Wilson B.N., Douglas-Mankin K.R., Arnold J.G., Gowda P.H., 2012, Hydrologic and water quality models: use, calibration, and validation, *Transactions of the ASABE*, vol. 55, no. 4, pp. 1241–1247, 2012
98. Liangliang G., Daoliang L., 2014, A review of hydrological/water-quality models. *Front. Agric. Sci. Eng.* 2014, 1, 267–276
99. Jeppesen E., Sondergaard M., Jensen J.P., Havens K.E., Anneville O., Carvalho L., Coveney M.F., Deneke R., Dokulil M.T., Foy B., Gerdeaux D., Hampton S.E., Hilt S., Kangur K., Kohler J., Lammens E.H.H.R., Lauridsen T.L., Manca M., Miracle M.R., Moss B., Noges P., Persson G., Phillips G., Portielje R., Romo S., Schelske C.L., Straile D., Tatrai I., Willen E., Winder M., 2005, Lake responses to reduced nutrient loading—an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies. *Freshwater Biology* 50, 1747–1771.
100. Whitehead P.G., Wilby R.L., Futter M., 2006, *Impacts of climate change on hydrology, nitrogen and carbon in upland and lowland streams: assessment of adaptation strategies to meet Water Framework Directive objectives*. Proceedings Durham Meeting, British Hydrological Society, UK.
101. Miller W.D., Harding W.L., 2007, Climate forcing of the spring bloom in the Chesapeake Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 331, 11–22.
102. Hany R.N., Emad A.S.H., 2023, *Using of Remote Sensing and GIS to Estimate Environmental Sensitivity to Desertification in East Nile Delta Using MEDALUS Model*.

103. Schirmer M., Schuchardt B., 2001, Assessing the impact of climate change on the Weser estuary region: an interdisciplinary approach. *Climate Res.* 18, 133–140
104. Mujere N., Moyce W., 2017, *Climate Change Impacts on Surface Water Quality*. In Ganpat, W., & Isaac, W. (Ed.), *Environmental Sustainability and Climate Change Adaptation Strategies* (pp. 322-340). IGI Global. <http://doi:10.4018/978-1-5225-1607-1.ch012>
105. Đỗ Ngọc Thực, Phan Văn Trường, 2016, Nghiên cứu ảnh hưởng của nước biển dâng do biến đổi khí hậu đến diễn biến xâm nhập mặn nước dưới đất vùng đồng bằng ven biển tỉnh Hà Tĩnh. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường* –số 53 (6/2016).
106. Phạm Tất Thắng, Nguyễn Thu Hiền, 2012, Ảnh hưởng của biến đổi khí hậu-nước biển dâng đến tình hình xâm nhập mặn dải ven biển đồng bằng Bắc Bộ. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường* –số 37 (6/2012)
107. Nijssen B., O'Donnell G.M., Hamlet A.F., Lettenmaier DP., 2001, Hydrologic Sensitivity of Global Rivers to Climate Change. *Climatic Change* 50, 143–175 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1010616428763>
108. Arnell N.W., Halliday S.J., Battarbee R.W., Skeffington R.A., Wade A.J., 2015, The implications of climate change for the cwater environment in England. *Prog Phys Geogr* 39(1):93–120. <https://doi.org/10.1177/0309133314560369>
109. Duran-Encalada J.A., Paucar-Caceres A., Bandala E.R., Wright G. H., 2017, The impact of global climate change on water quantity and quality: A system dynamics approach to the US–Mexican transborder region. *European Journal of Operational Research*, 256(2), 567–581. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.06.016>.
110. Minh Hai Nguyen, Duy Vinh Vu, Duc Thinh Nguyen, Thanh Duong Nguyen, 2024. Numerical investigations on seasonal variation of waves in the Cat Ba – Ha Long coastal area (Vietnam) in 2021. *Regional Studies in Marine Science* 79 (2024) 103828. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103828>
111. Cục thống kê thành phố Hải Phòng, 2020. *Niên giám thống kê thành phố Hải Phòng*. Nxb, Thống kê Hà Nội
112. Cục thống kê tỉnh Quảng Ninh, 2020. *Niên giám thống kê tỉnh Quảng Ninh*. Nxb. Thống kê. Hà Nội
113. Cục thống kê tỉnh Quảng Ninh, 2023. *Niên giám thống kê tỉnh Quảng Ninh*. Nxb. Thống kê. Hà Nội
114. Becker G.C., Dalziel B.D., Kersch-Becker M.F., Park M.G., Mouchka M., 2013. Indirect Effects of Human Development Along the Coast on Coral Health. *Biotropica* 2013, 45, 401–407, doi:10.1111/btp.12019.
115. Weatherall P., Marks K.M., Jakobsson M., Schmitt T., Tani S., Arndt J.E., Rovere M., Chayes D., Ferrini, V., Wigley R., 2015, A new digital bathymetric model of the world's oceans. *Earth and Space Science*, 2, <https://doi.org/10.1002/2015EA000107>
116. Egbert G.D., Svetlana Y.E., 2002. Efficient Inverse Modeling of Barotropic

- Ocean Tides. *J. Atmos. Ocean Technol.* 2002, 19, 183–204, doi:[https://doi.org/10.1175/15200426\(2002\)019%3C0183:EIMOBO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200426(2002)019%3C0183:EIMOBO%3E2.0.CO;2).
117. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., 2020. The ERA5 Global Reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020, 146, 1999–2049, doi:10.1002/qj.3803.
 118. *Copernicus Marine Service Global Ocean Physics Analysis and Forecast* Available online: https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/description (accessed on 3 October 2022).
 119. Mann H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13:245–259
 120. Kendall MG., 1975. *Rank correlation methods*.
 121. Griffin., London Khaliq M.N., Ouarda T.B.M.J., Gachon, P., Sushama L., St-Hilaire A., 2009, Identification of hydrological trends in the presence of serial and cross correlations: a review of selected methods and their application to annual flow regimes of Canadian rivers. *Journal of Hydrology*, vol. 368, no. 1–
 122. Neel Kamal., Sanjay Pachauri., 2018, Mann-Kendall Test - A Novel Approach for Statistical Trend Analysis. *International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)* - Volume 63 Number 1, ISSN: 2231-2803
 123. Marsick A., André H., Khelf I., Leclère Q., Antoni J., 2024, Benefits of Mann–Kendall trend analysis for vibration-based condition monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 216, 1 July 2024, 111486. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111486>.
 124. Khaled H., Hamed., 2008, Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, Volume 349, Issues 3–4, 1 February 2008, Pages 350–363. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009>
 125. Duan Z., Tuo Y., Liu J., Gao H., Song X., Zhang Z., 2019, Hydrological evaluation of open-access precipitation and air temperature datasets using SWAT in a poorly gauged basin in Ethiopia. *J. Hydrol.* 569, 612–626. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.12.026
 126. Gao H., Birkel C., Hrachowitz M., Tetzlaff D., Soulsby C., Savenije H.H.G., 2019, A simple topography-driven and calibration-free runoff generation module. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 23, 787–809. doi: 10.5194/hess-23-787-2019.
 127. Chandler R.E., Scott E.M., 2011, *Statistical Methods for Trend Detection and Analysis in the Environmental Sciences*, 368 p., John Wiley, Chichester, U. K
 128. Ozgenc Aksoy A., 2017, Investigation of sea level trends and the effect of the north atlantic oscillation (NAO) on the black sea and the eastern mediterranean sea. *Theor Appl Climatol* 129, 129–137. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1759-0>
 129. Serinaldi F., Kilsby C.G., Lombardo F., 2018, Untenable nonstationarity: an assessment of the fitness for purpose of trend tests in hydrology. *Adv. Water*

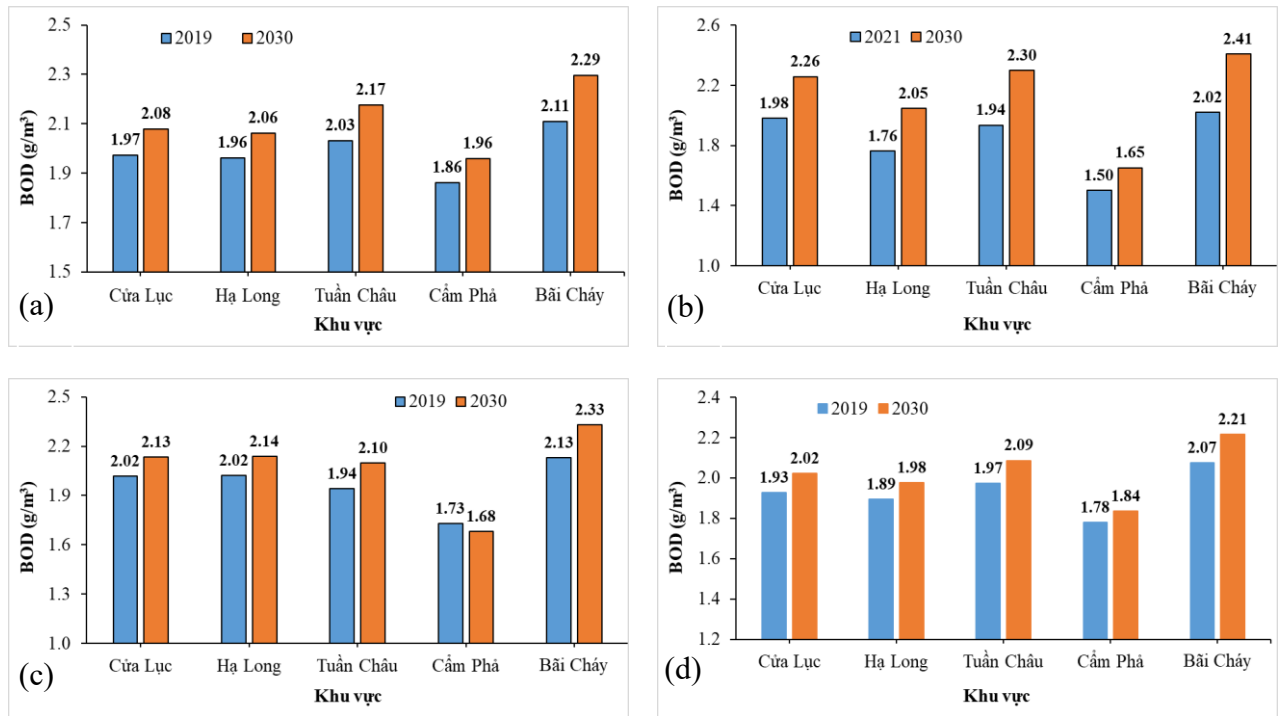
- Resour.* 111, 132–155. doi: 10.1016/j.advwatres.2017.10.015
130. Wang S., Zuo H., Yin Y., Hu C., Yin J., MX., 2019, Interpreting rainfall anomalies using rainfall's nonnegative nature. *Geophys. Res. Lett.* 46, 426–434. doi: 10.1029/2018GL081190
 131. Sen P.K., 1968, Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association.* 1968;63(324):1379. Available from: <https://doi.org/10.2307/2285891>. 33.
 132. Azad A.S., Hasan M.K., Rahman M.A.I, et al., 2014, *Exploring the Behavior and Changing Trends of Rainfall and Temperature Using Statistical Computing Techniques*. In: Islam T, Srivastava PK, Gupta M, et al (eds) *Computational Intelligence Techniques in Earth and Environmental Sciences*, Dordrecht: Springer Netherlands. 2014; p. 53–78. Available from: https://doi.org/10.1007/978-94-017-8642-3_3.
 133. WL| Delft hydraulic (1999, 2003). *Delft3D-WAQ User Manual version 3.1*, Delft, the Netherlands.
 134. BMT Argoss, 2011, *Overview of the service and validation of the database waveclimate*. Reference: RP_A870, www.waveclimate.com
 135. Battjes J., Janssen J., 1978, *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*,. In *Proceedings 16th International Conference Coastal Engineering*, ASCE, pages 569-587. 47, 133, 134, 138, 139, 188.
 136. Uittenbogaard R.E., 1998, *Model for eddy diffusivity and viscosity related to sub-grid velocity and bed topography*. Note, WL | Delft Hydraulics.
 137. Van Vossen B., 2000, *Horizontal Large Eddy Simulations; evaluation of computations with DELFT3D-FLOW*. Report MEAH-197, Delft University of Technology.
 138. Ralston D.K., Geyer W.R., Lerczak J.A., Scully M., 2010, Turbulent mixing in a strongly forced salt wedge estuary. *J. Geophys. Res.* 115, C12024.
 139. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L., 2007, *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulation*. American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0001–2351, Vol. 50(3): 885-900
 140. Nash J.E., Sutcliffe J.V., 1970, River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I-A Discussion of Principles. *J. Hydrol.* 1970, 10, 282–290, doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
 141. Chai T., Draxler R.R., 2014, Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE)? -Arguments against Avoiding RMSE in the Literature. *Geosci. Model Dev.* 2014, 7, 1247–1250, doi:10.5194/GMD-7-1247-2014.
 142. Ca V.T., 2017, *A Climate Change Assessment via Trend Estimation of Certain Climate Parameters with In Situ Measurement at the Coasts and Islands of Viet Nam*. *Climate* 2017, 5, 36. <https://doi.org/10.3390/cli5020036>
 143. Jevrejeva S., Grinsted A., Moore J.C., Holgate S., 2006, Nonlinear trends and

- multi-year cycles in sea level records. *J Geophys Res.*, 2006, 111:C09012. doi:10.1029/2005JC003229
144. Church J., White N., Aarup T., Wilson S.W., Woodworth P., Domingues C., Hunter J., Lambeck K., 2008, Understanding global sea levels: past, present and future. *Sustain Sci.*, 2008, 3:9–22. doi:10.1007/s11625-008-0042-4
 145. Douglas B. C., Peltier W. R., 2002, The puzzle of global sea-level rise. *Physics Today*, 55 (3): 35-40.
 146. Cheikh A.T., Mouhamadou M.M., Mahdi H., Issa, S., 2021, Estimation of Sea-level Rise on the West African Coasts: Case of Senegal, Mauritania and Cape Verde. *International Journal of Geosciences*, 2021, 12, 121-137 <https://www.scirp.org/journal/ijg>
 147. IPCC, 2021, *Climate change 2021: the physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [masson-delmotte, v., p. zhai, a. pirani, s.l. connors, c. péan, s. berger, n. caud, y. chen, l. goldfarb, m.i. gomis, m. huang, k. leitzell, e. lonnoy, j.b.r. matthews, t.k. maycock, t. waterfield, o. yelekçi, r. yu, and b. zhou (eds.)]. cambridge university press.
 148. Cazenave A., Meyssignac B., Palanisamy H., 2018, *Global Sea-Level Budget 1993-Present*. *Earth System Science Data*, 10, 1551-1590. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1551-2018>.
 149. Cogley J.G., 2009, Geodetic and direct mass-balance measurements: comparison and joint analysis. *Ann Glaciol* 50:96–100, <https://doi.org/10.3189/172756409787769744>
 150. Oerlemanns J., Dyurgerov M., Van de Wal R.S.W., 2007, Reconstructing the glacier contribution to sea-level rise back to 1850, *The Cryosphere*, 1, 59-65. <https://doi.org/10.5194/tc-1-59-2007>
 151. Gregory J.M., Lowe J.A., Tett S.F.B., 2006, Simulated global-mean sea-level changes over the last half-millennium. *J Clim* 19:4576–4591, <https://doi.org/10.1175/JCLI3881.1>
 152. Domingues C.M., Church J.A., White N.J., Gleckler P.J., Wijffels S.E., Barker P.M., Dunn J.R., 2008, Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature* 453:1090–1093. doi:10.1038/nature07080.
 153. Vu Duy V., Ouillon S., Nguyen Minh H., 2022, Sea surface temperature trend analysis by Mann-Kendall test and sen's slope estimator: a study of the Hai Phong coastal area (Vietnam) for the period 1995-2020. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 44(1), 72–91. <https://doi.org/10.15625/2615-9783/16874>
 154. NOAA National Centers for Environmental Information, 2021, *State of the Climate: Global Climate Report for Annual 2020*, published online January 2021, retrieved on October 7, 2021 from <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202013>.
 155. Fang G., Chen H., Wei Z., Wang Y., Wang X., Li, C., 2006, Trends and interannual variability of the South China Sea surface

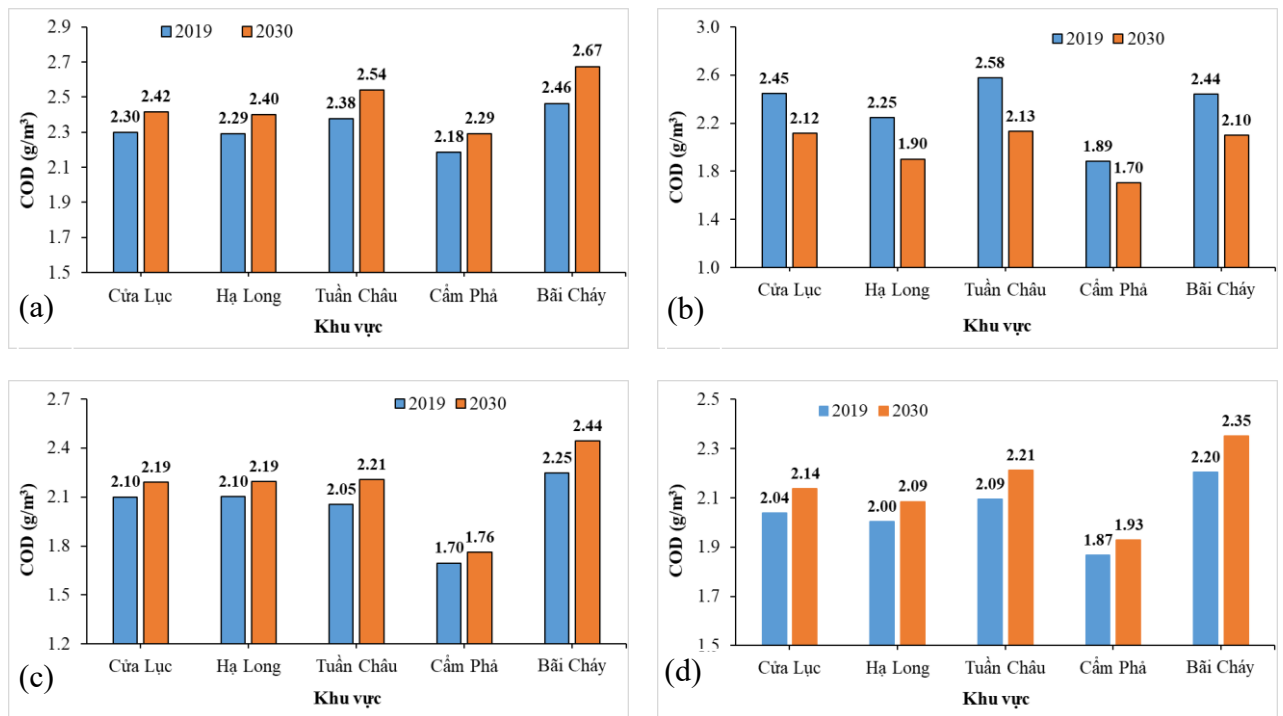
- winds, surface height, and surface temperature in the recent decade. *Journal of Geophysical research*, Vol. 111, C11S16, doi:10.1029/2005JC003276, 2006
156. Wang J., Guan Y., Wu L., Guan X., Cai W., Huang J., Dong W., Zhang B., 2021. Changing lengths of the four seasons by global warming. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091753. <https://doi.org/10.1029/2020GL091753>.
 157. Kuo Y.C., Tseng Y.H., 2020, Impact of ENSO on the South China Sea during ENSO decaying winter–spring modelled by a regional coupled model (a new mesoscale perspective). *Ocean Modelling*, 101655. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101655>
 158. Xiao F., Zeng L., Liu Q.Y., Zhou W., Wang D., 2018, Extreme subsurface warm events in the South China Sea during 1998/99 and 2006/07: observations and mechanisms. *Clim. Dyn.* 50 (1–2), 115–128. doi:10.1007/s00382-017-3588-y
 159. Arcement G.J., Schneider V.R., 1989, Guide for Selecting Manning’s Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains.U.S. *Geological Survey Water Supply Paper* 2339, 38 p.
 160. Simons, D.B., Senturk, F., 1992, Sediment Transport Technology – Water and Sediment Dynamics., *Water Resources Publications*.
 161. Calle L., Green B., Xie Z., Lapointe B.E., 2016, Effects of tidal periodicities and diurnal foraging constraints on the density of foraging wading birds. *Article in Ornithology*, Volume 133, 2016, pp. 378–396. DOI: 10.1642/AUK-15-234.1
 162. Agrawala, 2004, *Adaptation, Development Assistance and Planning: Challenges and Opportunities*.
 163. Smith, J. B., Klein, R. J. T., & Huq, S. (2003). *Climate Change, Adaptive Capacity and Development*. PUBLISHED BY IMPERIAL COLLEGE PRESS AND DISTRIBUTED BY WORLD SCIENTIFIC PUBLISHING CO. <https://doi.org/10.1142/p298>.
 164. Huq, S., Reid, H., Konate, M., Rahman, A., Sokona, Y., & Crick, F. (2004). Mainstreaming adaptation to climate change in Least Developed Countries (LDCs). *Climate Policy*, 4(1), 25–43. <https://doi.org/10.1080/14693062.2004.9685508>.

PHỤ LỤC

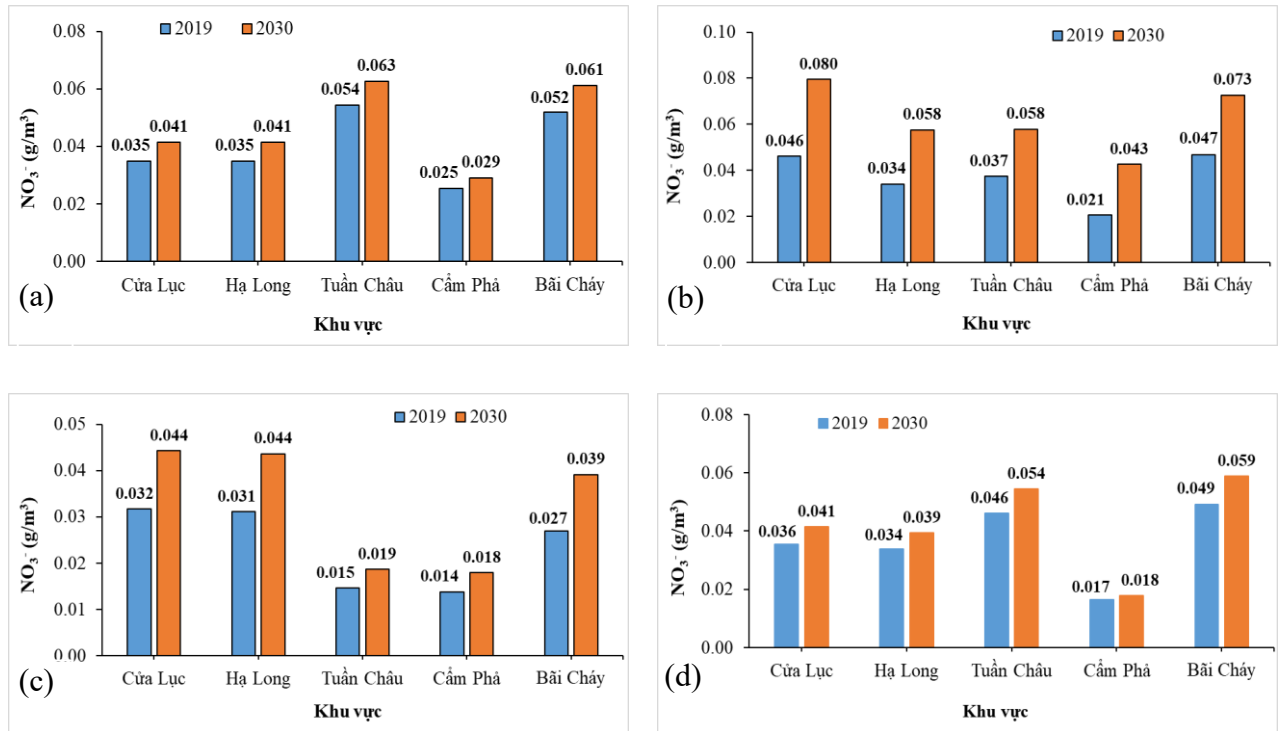
PHỤ LỤC A. ẢNH HƯỞNG DO HOẠT ĐỘNG KTXH



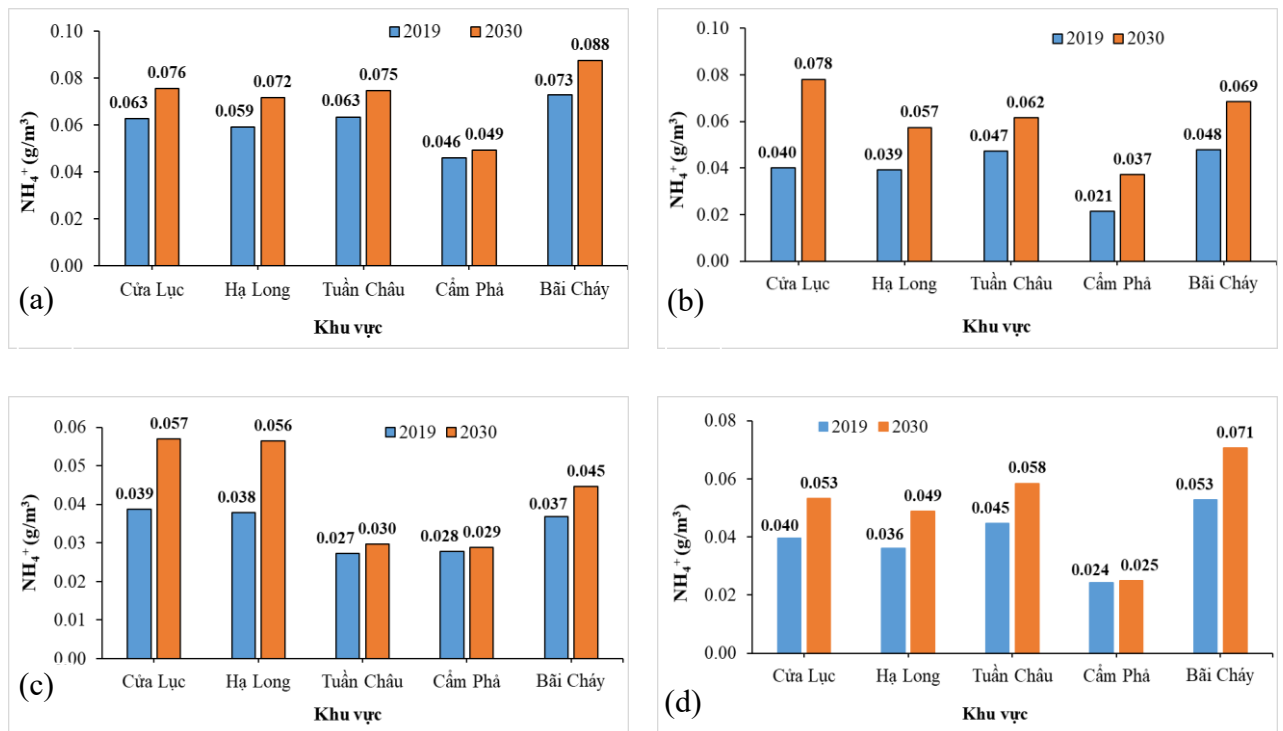
Hình A. 1. Hàm lượng BOD trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và tăng nguồn ô nhiễm (2030): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc



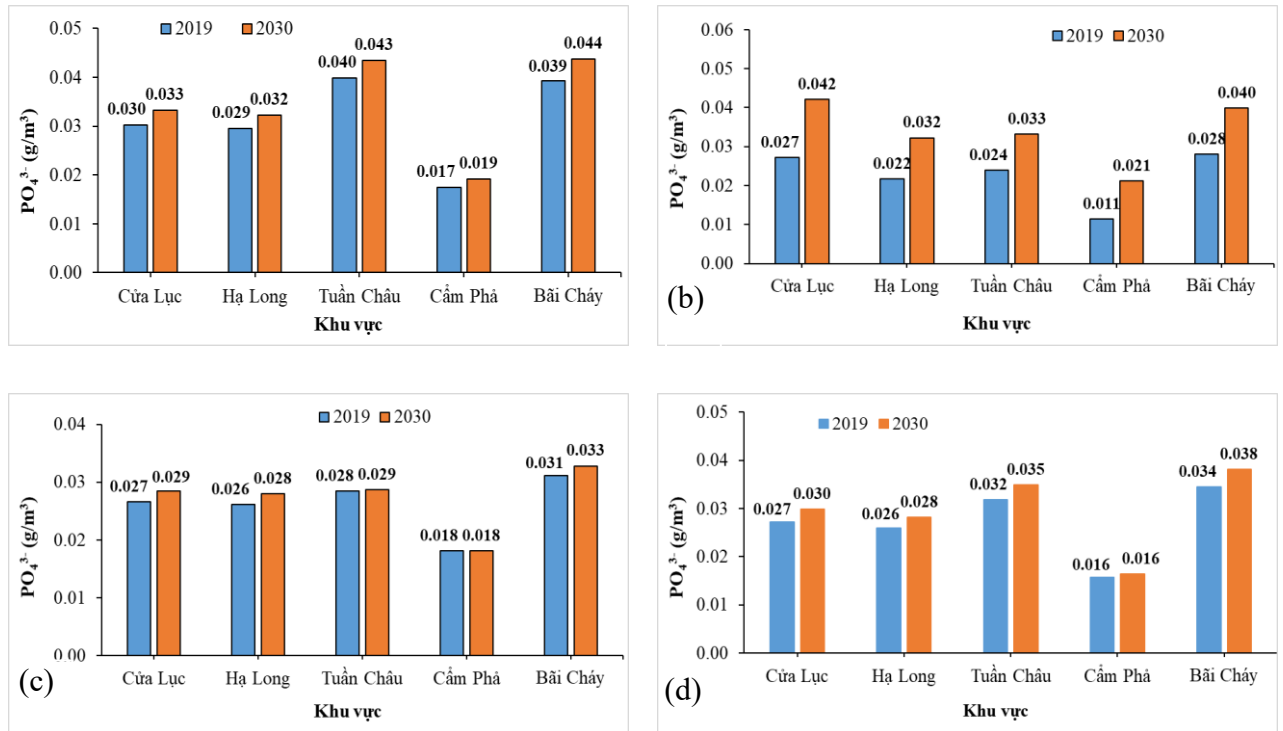
Hình A. 2. Giá trị COD trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và tăng nguồn ô nhiễm (2030): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc



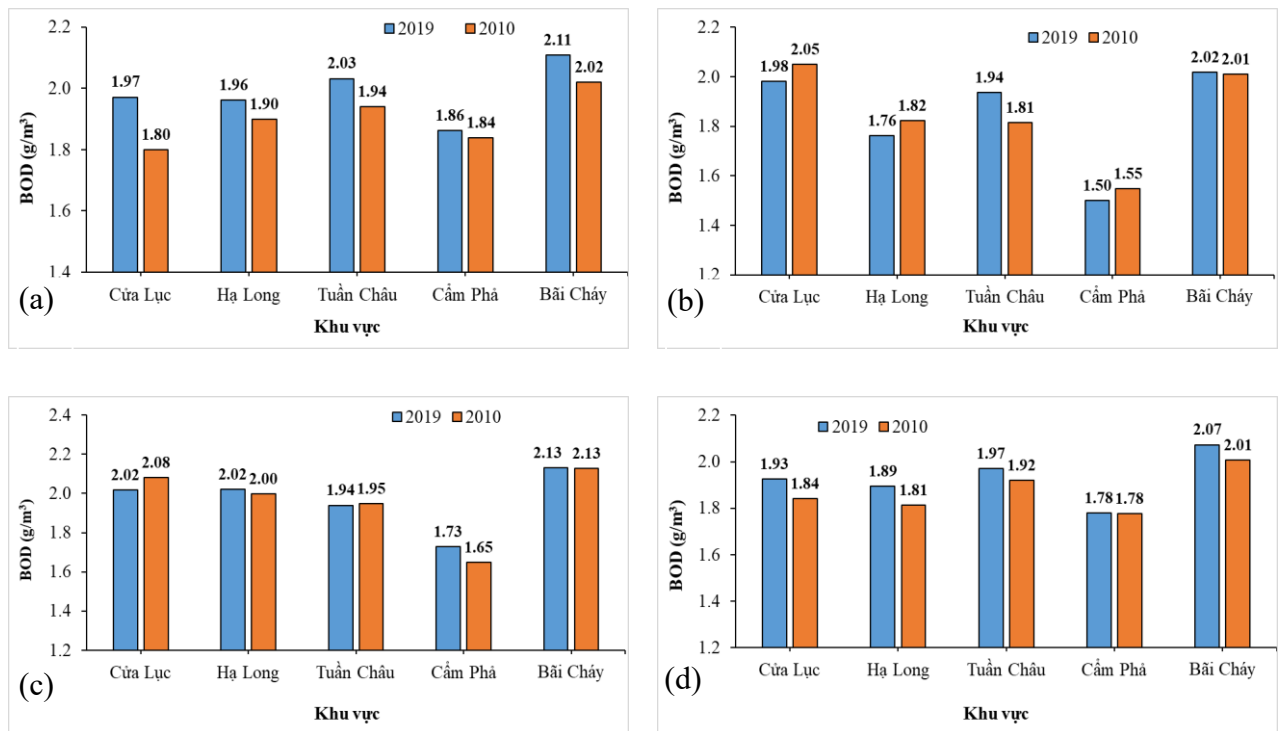
Hình A. 3. Hàm lượng NO_3^- trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và tăng nguồn ô nhiễm (2030): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc



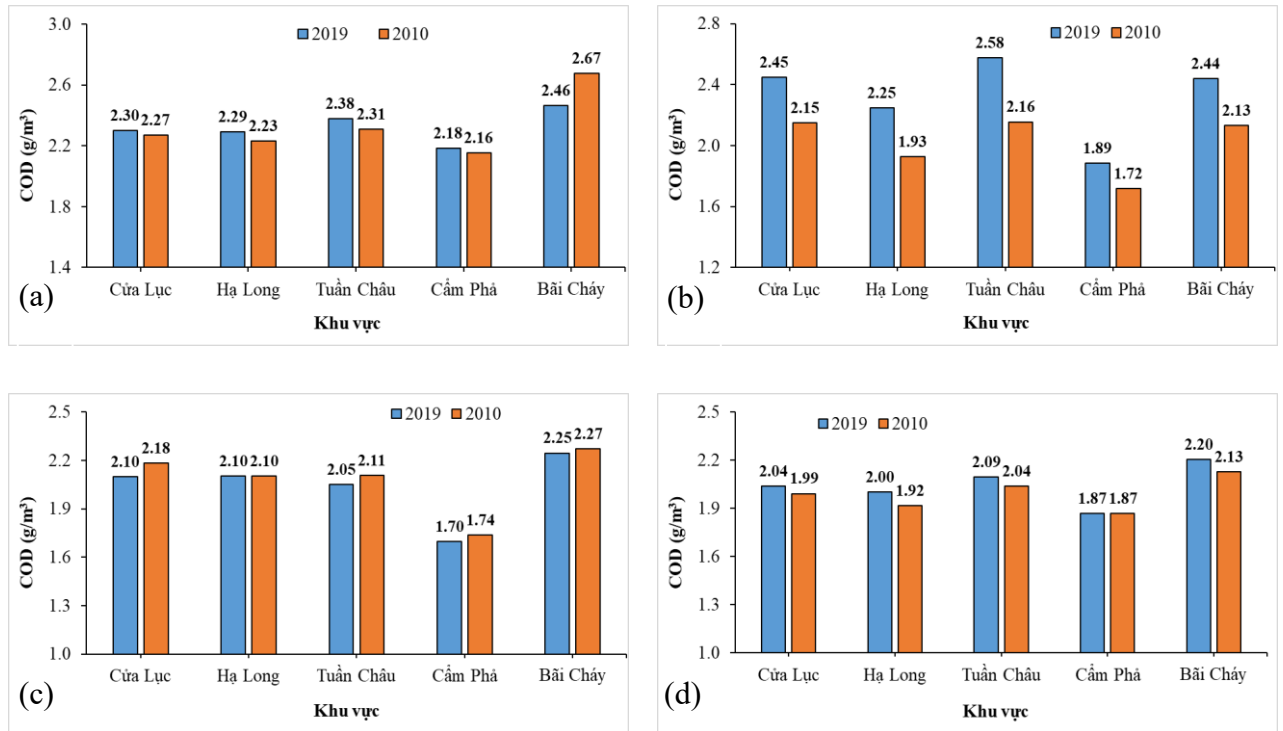
Hình A. 4. Hàm lượng NH_4^+ trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và tăng nguồn ô nhiễm (2030): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc



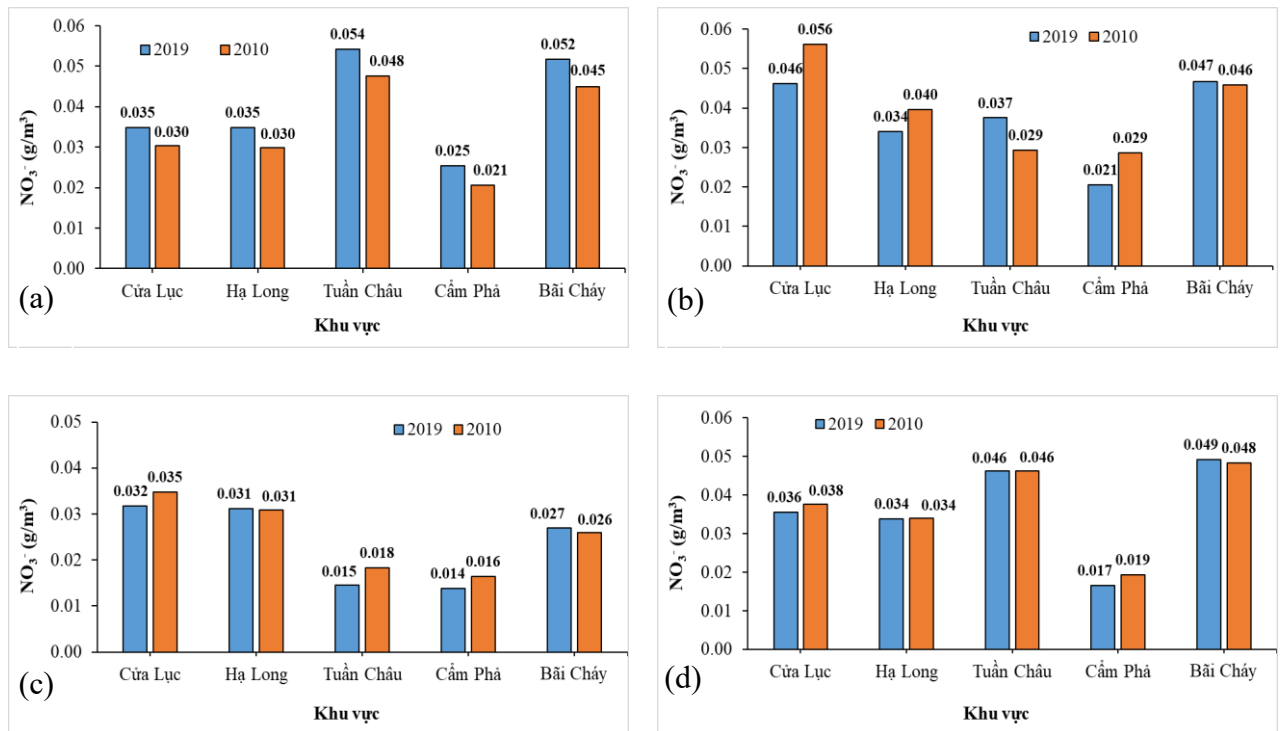
Hình A. 5. Hàm lượng PO_4^{3-} trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và tăng nguồn ô nhiễm (2030): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc



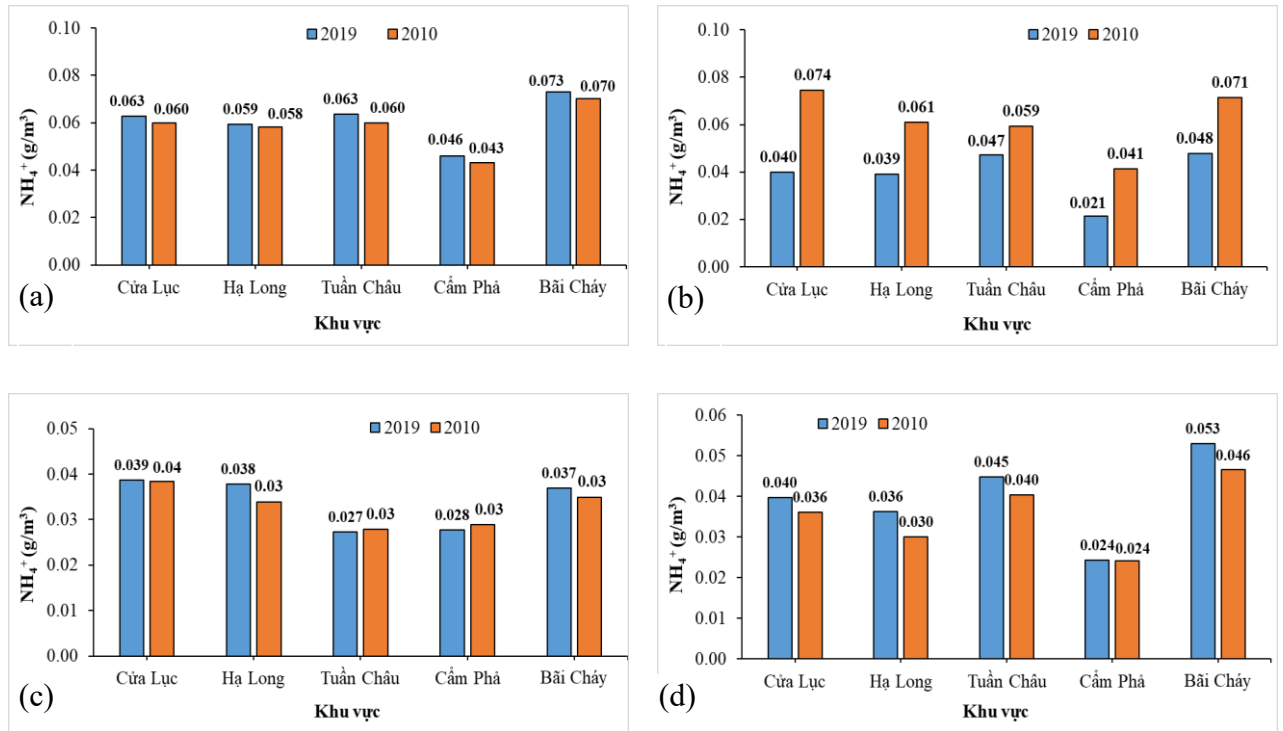
Hình A. 6. Giá trị BOD trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và trước lần biến (2010): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc



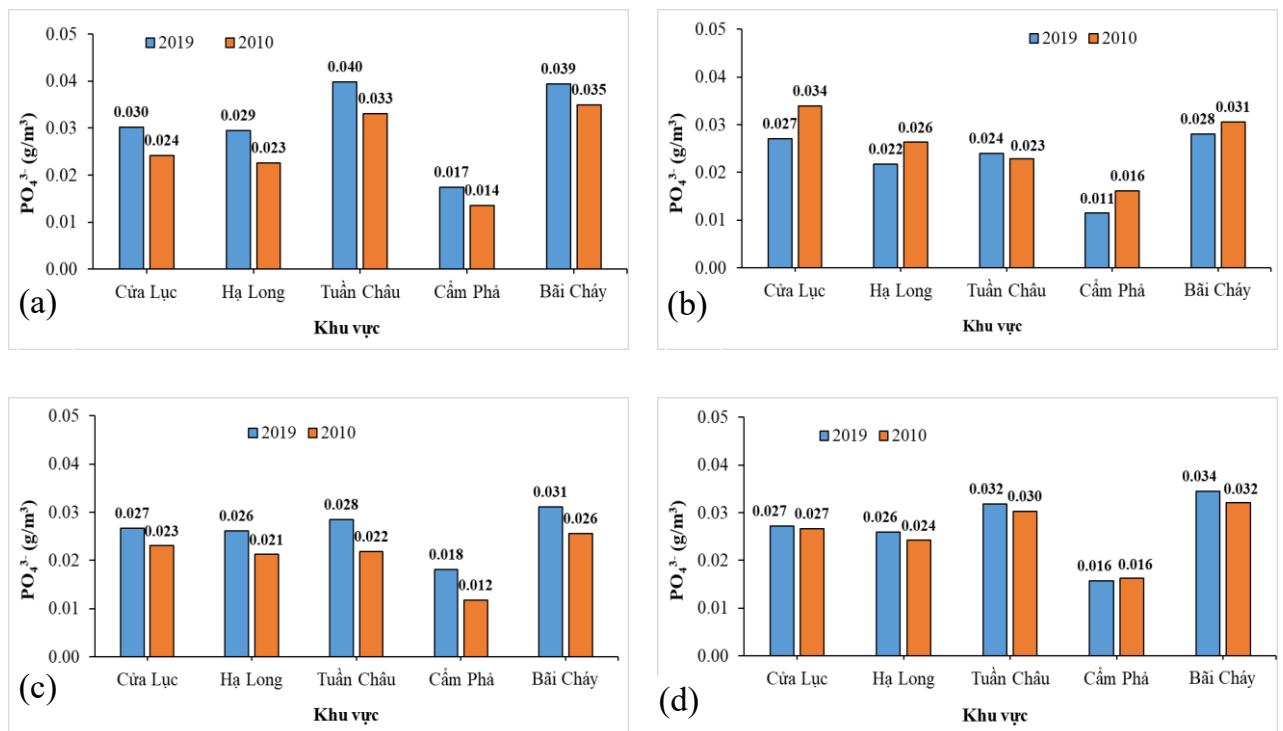
Hình A. 7. Giá trị COD trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và trước lần biến (2010): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc



Hình A. 8. Hàm lượng NO_3^- trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và trước lần biến (2010): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc

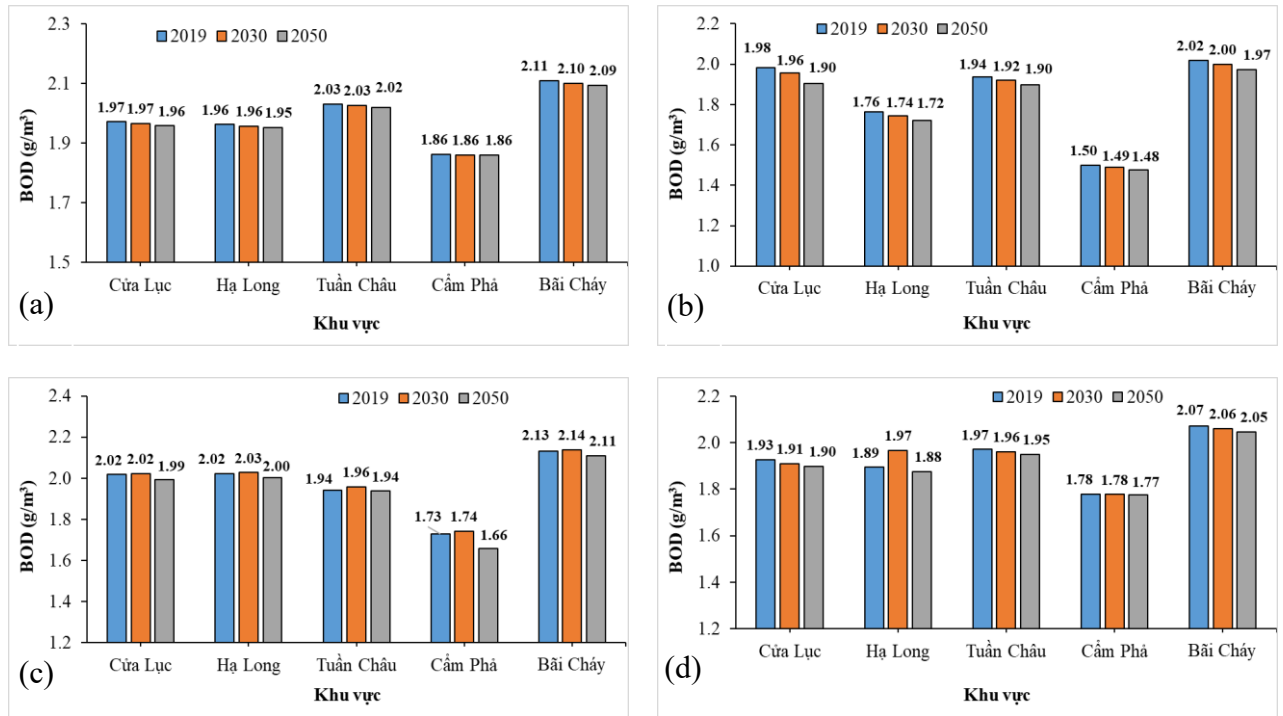


Hình A. 9. Hàm lượng NH_4^+ trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và trước lần biển (2010): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc

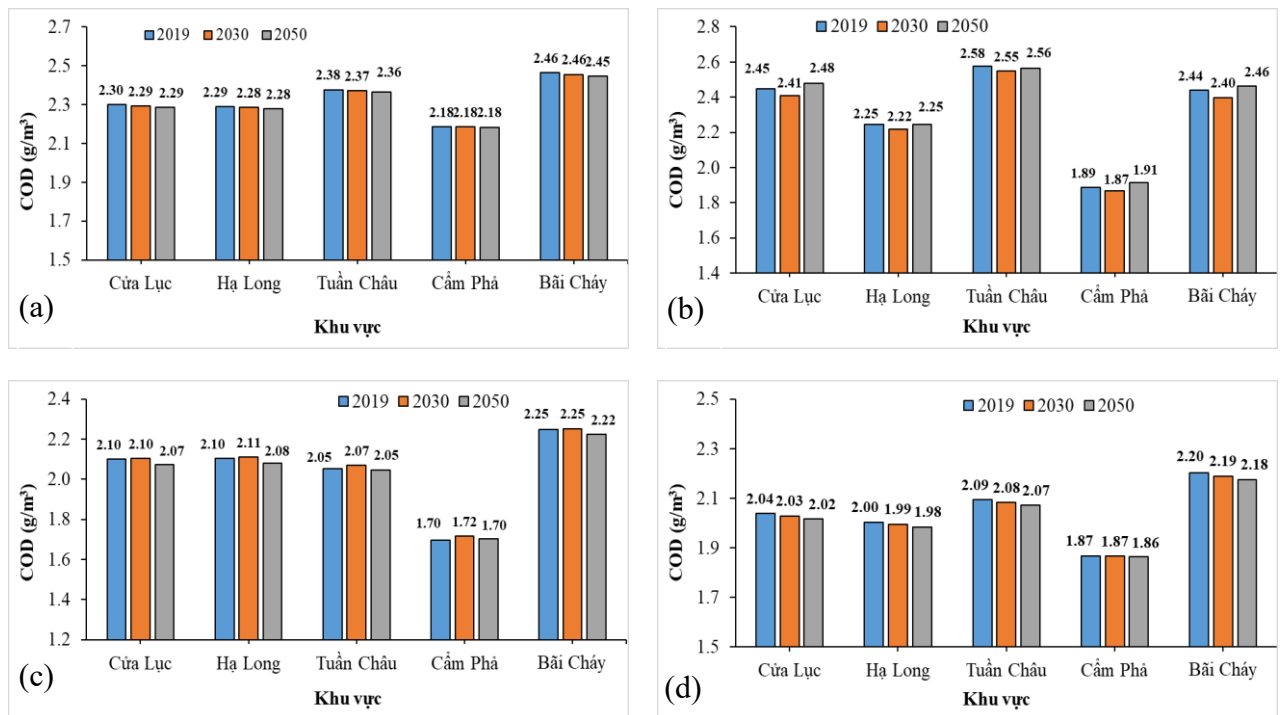


Hình A. 10. Hàm lượng PO_4^{3-} trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và trước lần biển (2010): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc

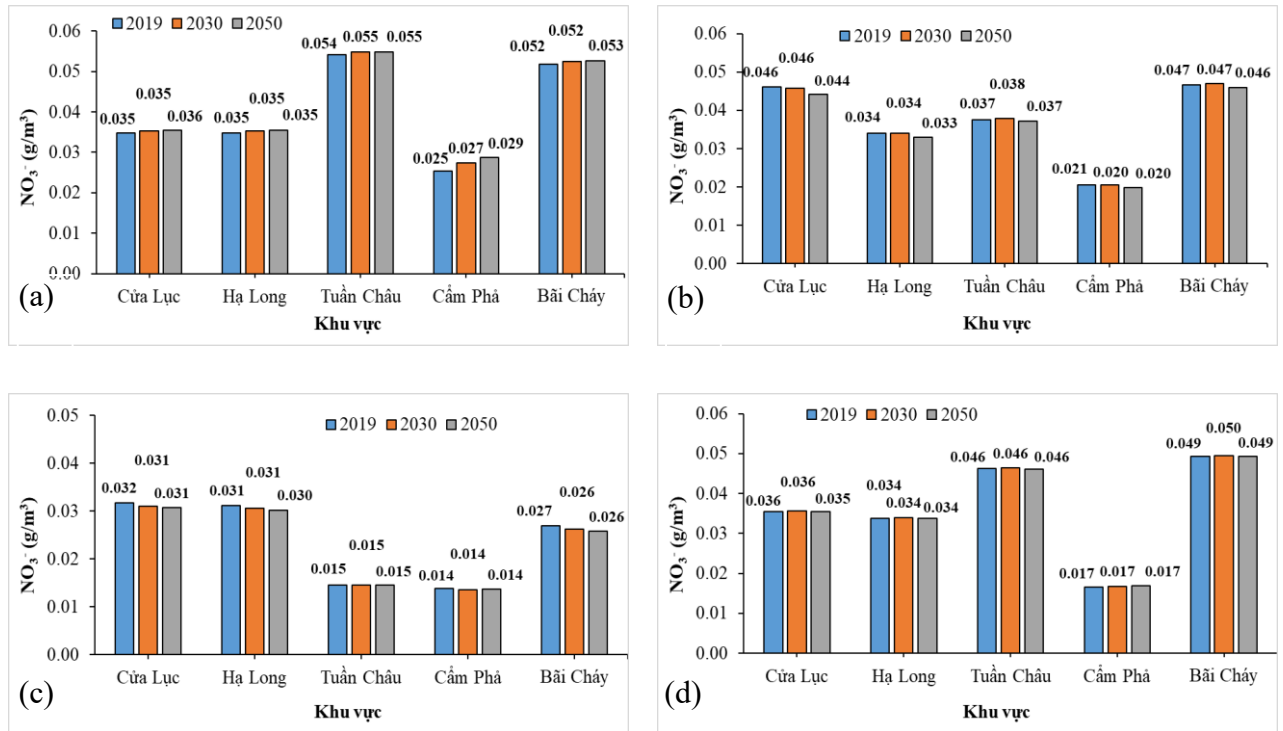
PHỤ LỤC B. ẢNH HƯỞNG DO BĐKH



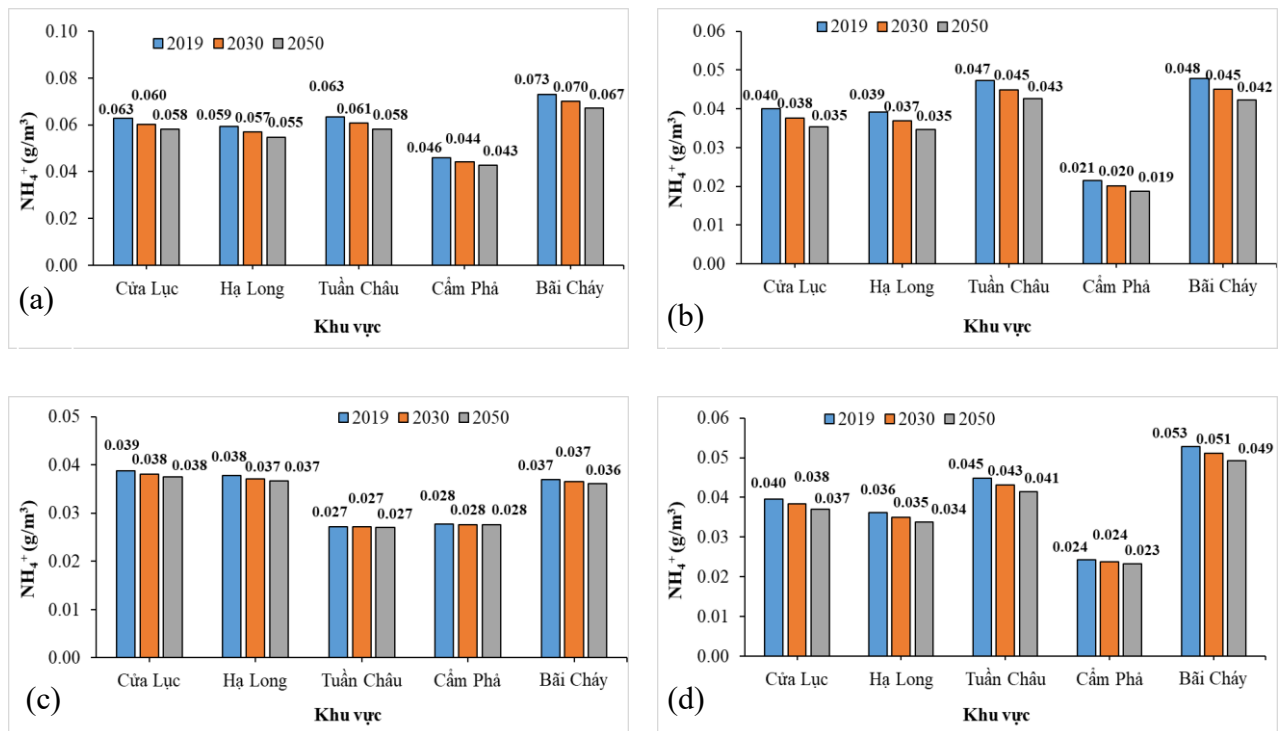
Hình B. 1. Giá trị BOD trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và BĐKH (2030, 2050): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc



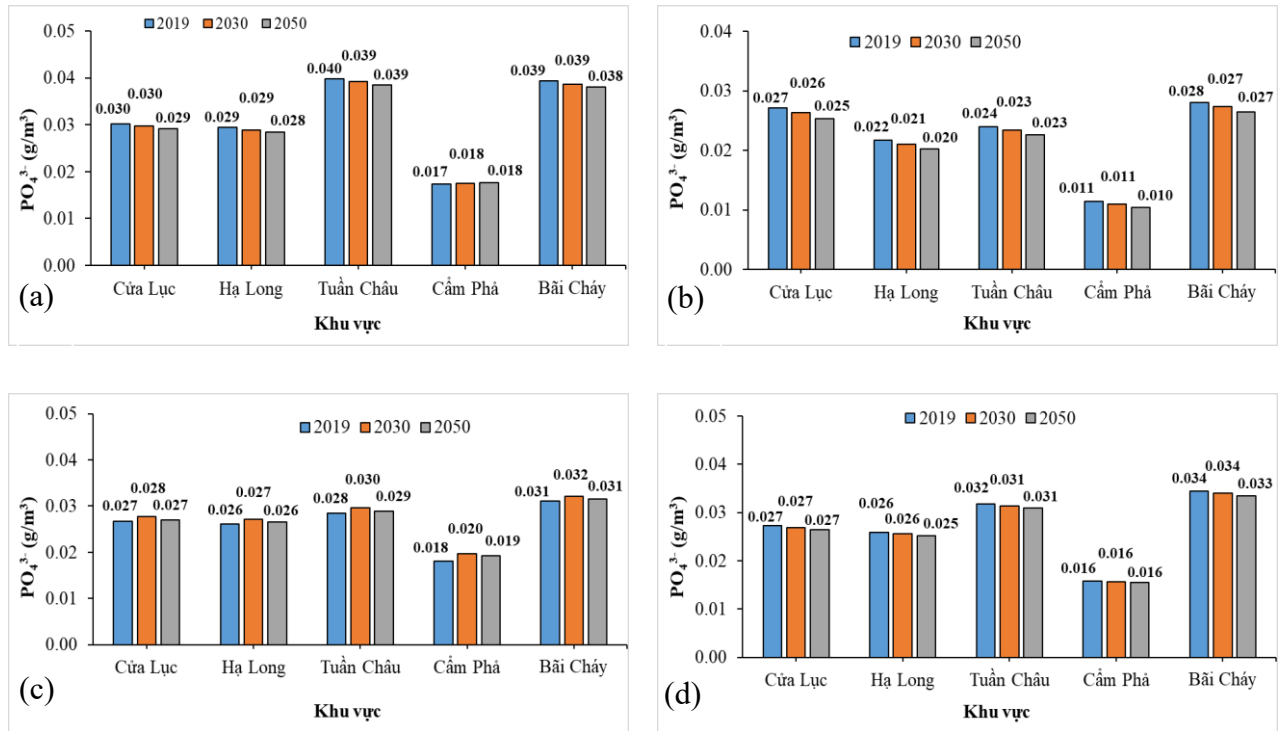
Hình B. 2. Giá trị COD trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và BĐKH (2030, 2050): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc



Hình B. 3. Hàm lượng NO_3^- trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và BĐKH (2030, 2050): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc

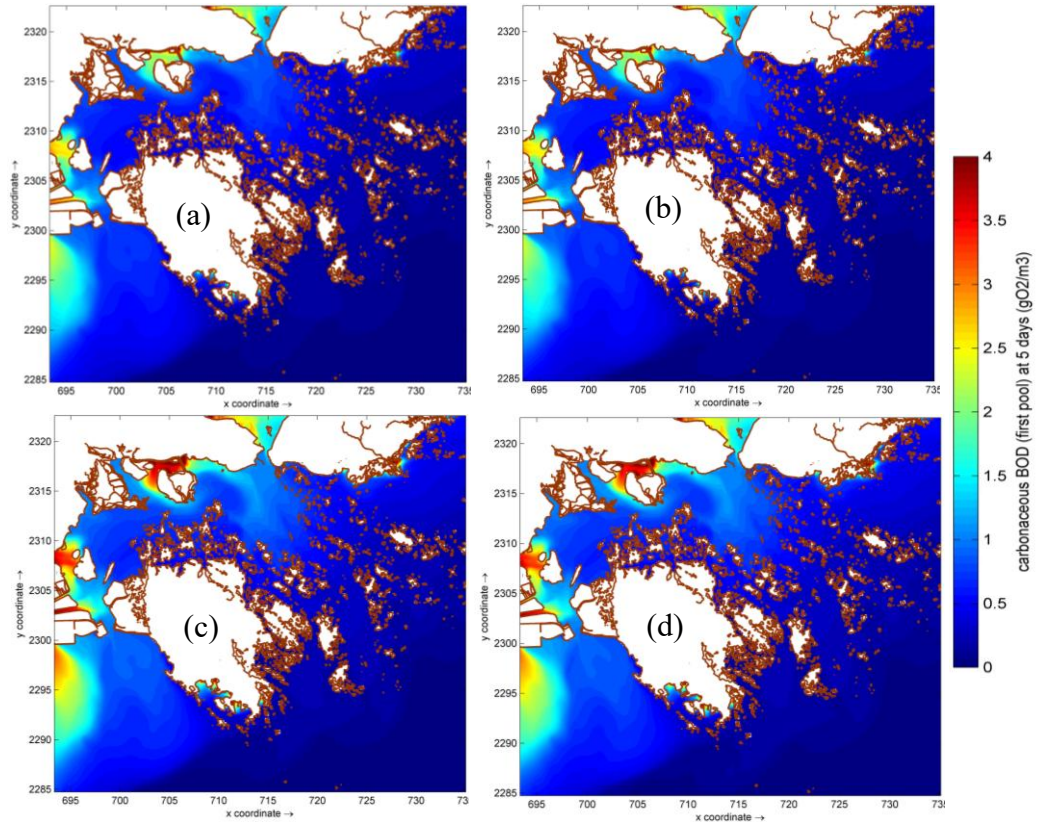


Hình B. 4. Hàm lượng NH_4^+ trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và BĐKH (2030, 2050): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc

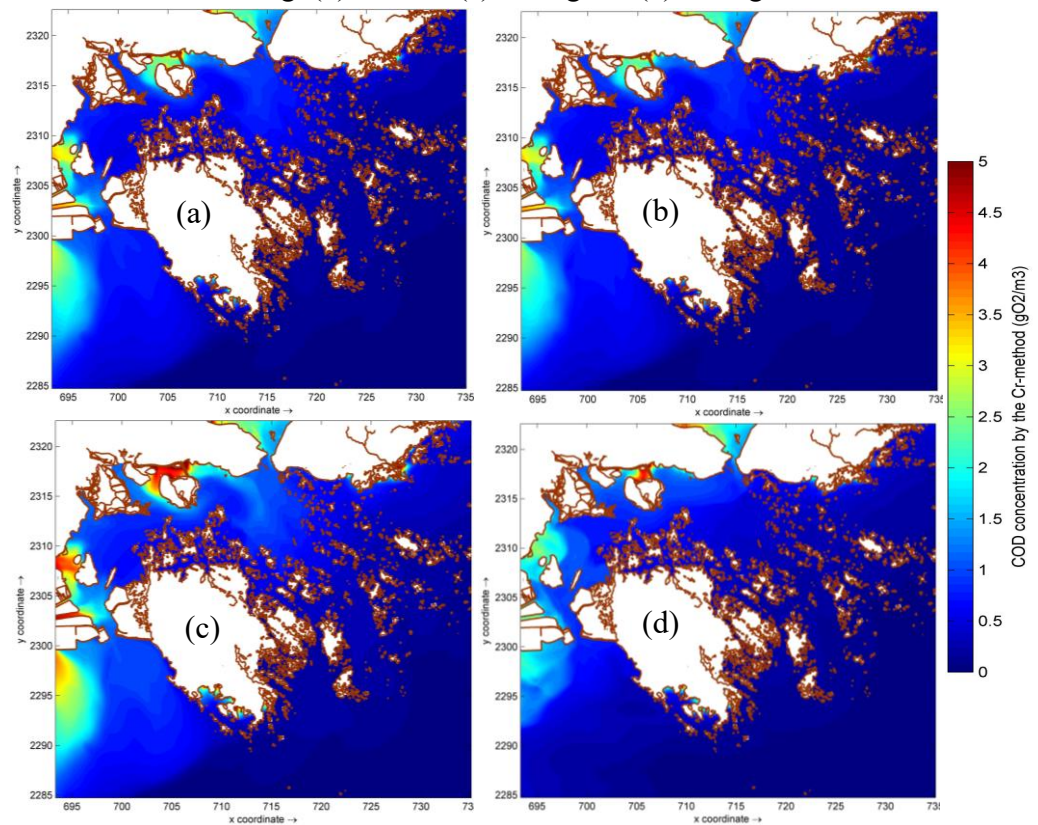


Hình B. 5. Hàm lượng PO_4^{3-} trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và BĐKH (2030, 2050): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc

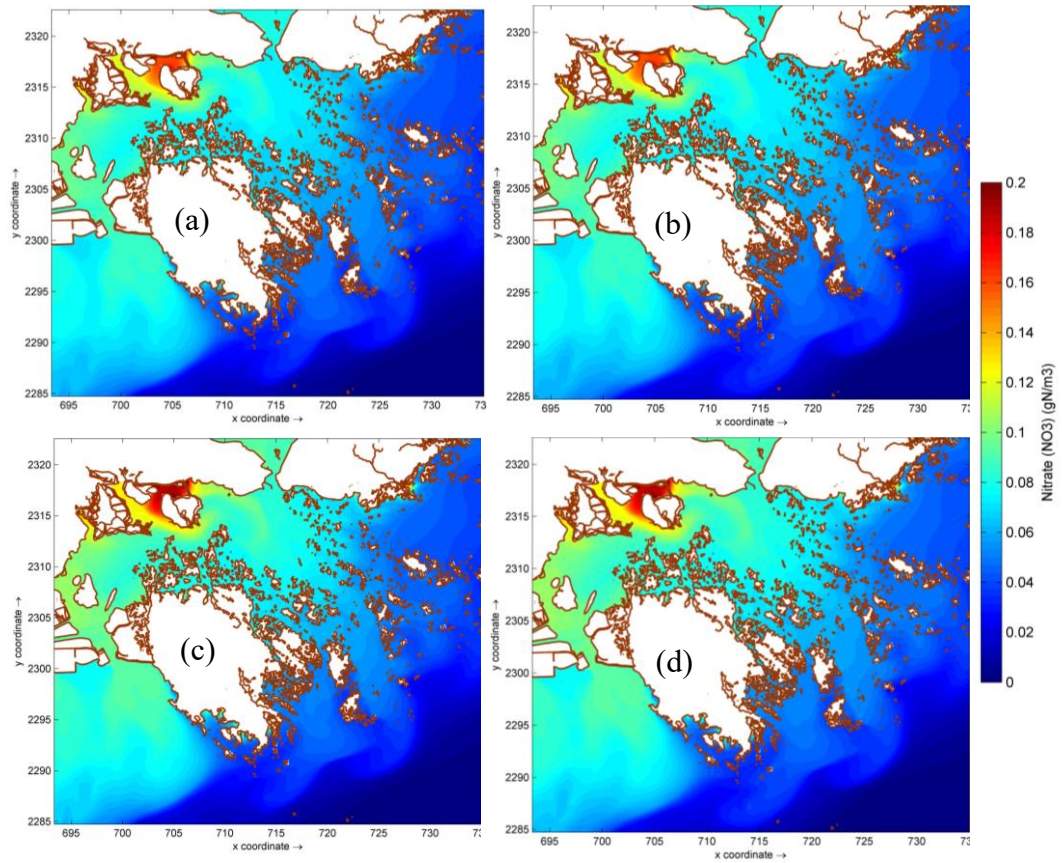
PHỤ LỤC C. ẢNH HƯỞNG DO HOẠT ĐỘNG KTXH VÀ BDKH



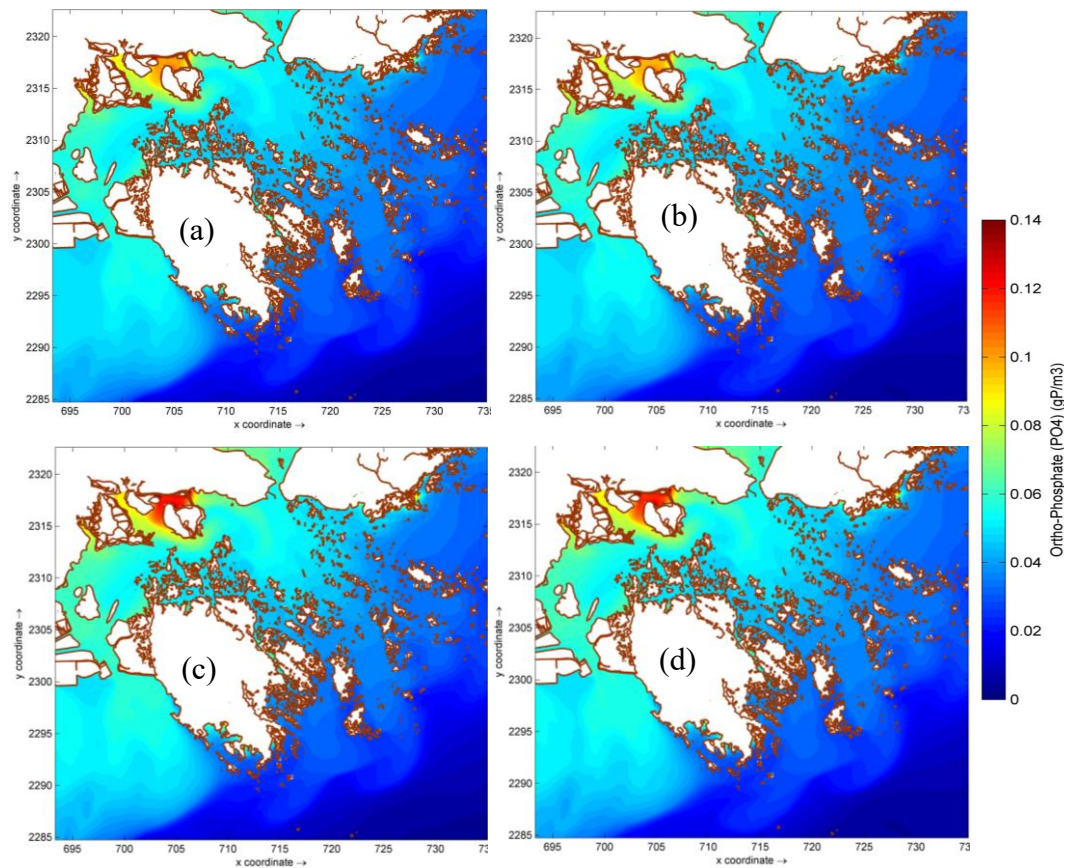
Hình C. 1. Phân bố BOD trong pha triều xuống tầng mặt vào mùa gió Đông Bắc theo các kịch bản: hiện trạng, (b) BDKH, (c) con người, (d) con người và BDKH



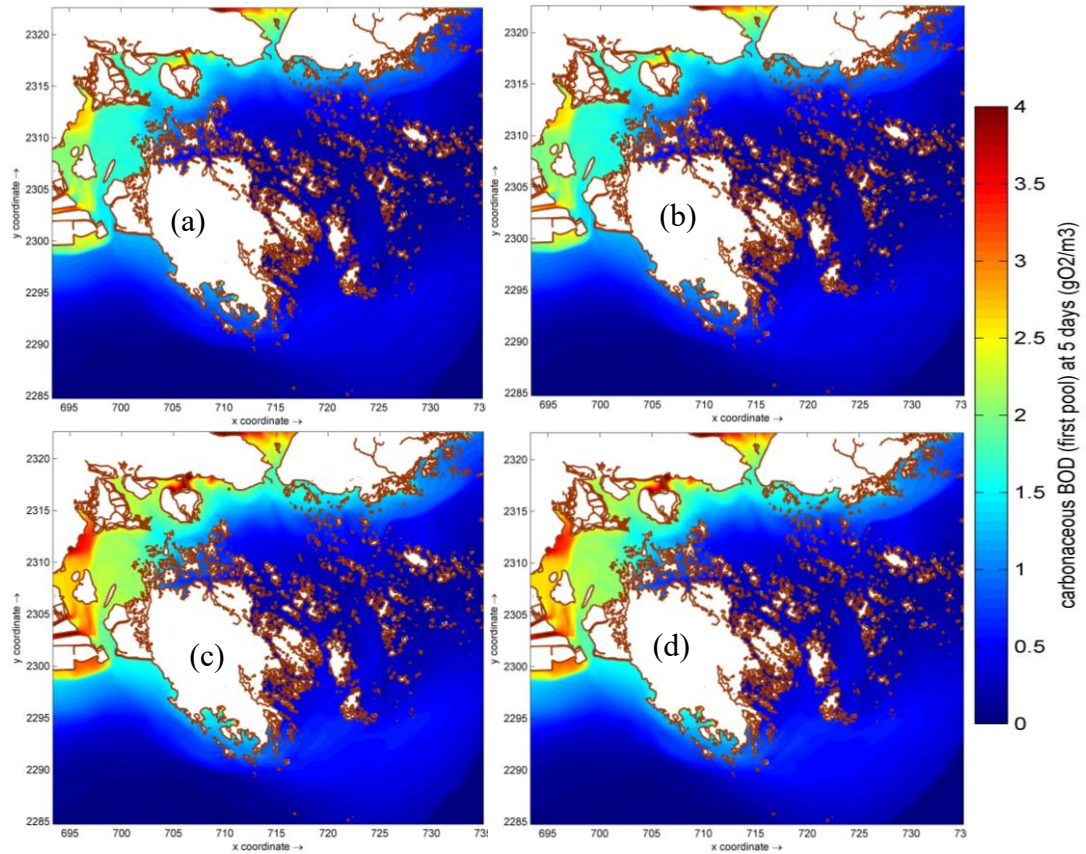
Hình C. 2. Phân bố COD trong pha triều xuống tầng mặt vào mùa gió Đông Bắc theo các kịch bản: (a) hiện trạng, (b) BDKH, (c) con người, (d) con người và BDKH



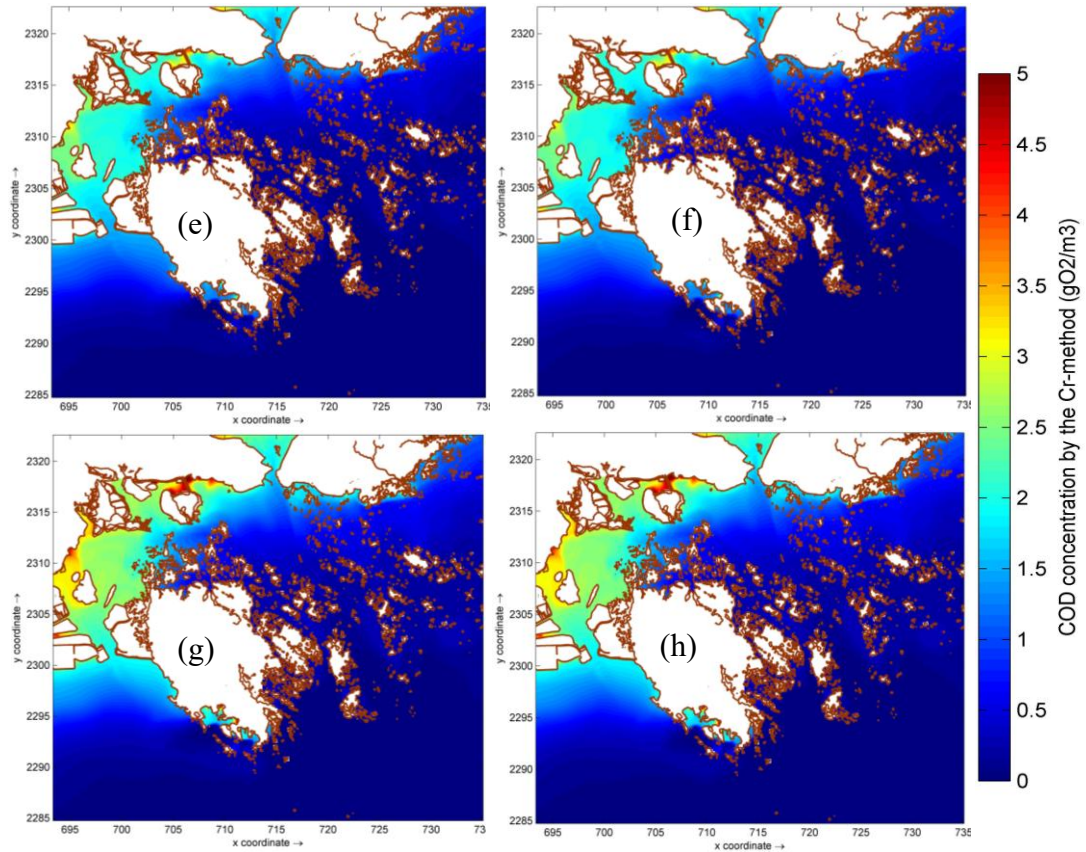
Hình C. 3. Phân bố NO_3^- trong pha triều xuống tầng mặt vào mùa gió Đông Bắc theo các kịch bản: (a) hiện trạng, (b) BDKH, (c) con người, (d) con người và BDKH



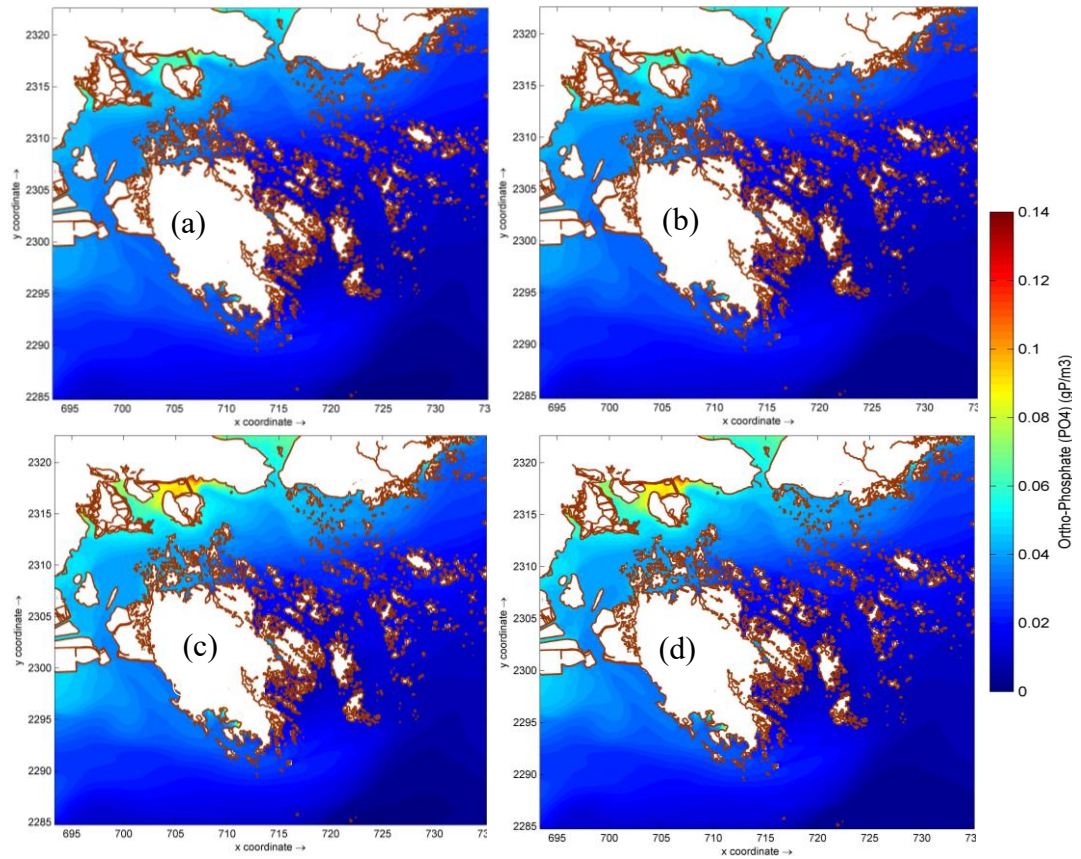
Hình C. 4. Phân bố PO_4^{3-} trong pha triều xuống tầng mặt vào mùa gió Đông Bắc theo các kịch bản: (a) hiện trạng, (b) BDKH, (c) con người, (d) con người và BDKH



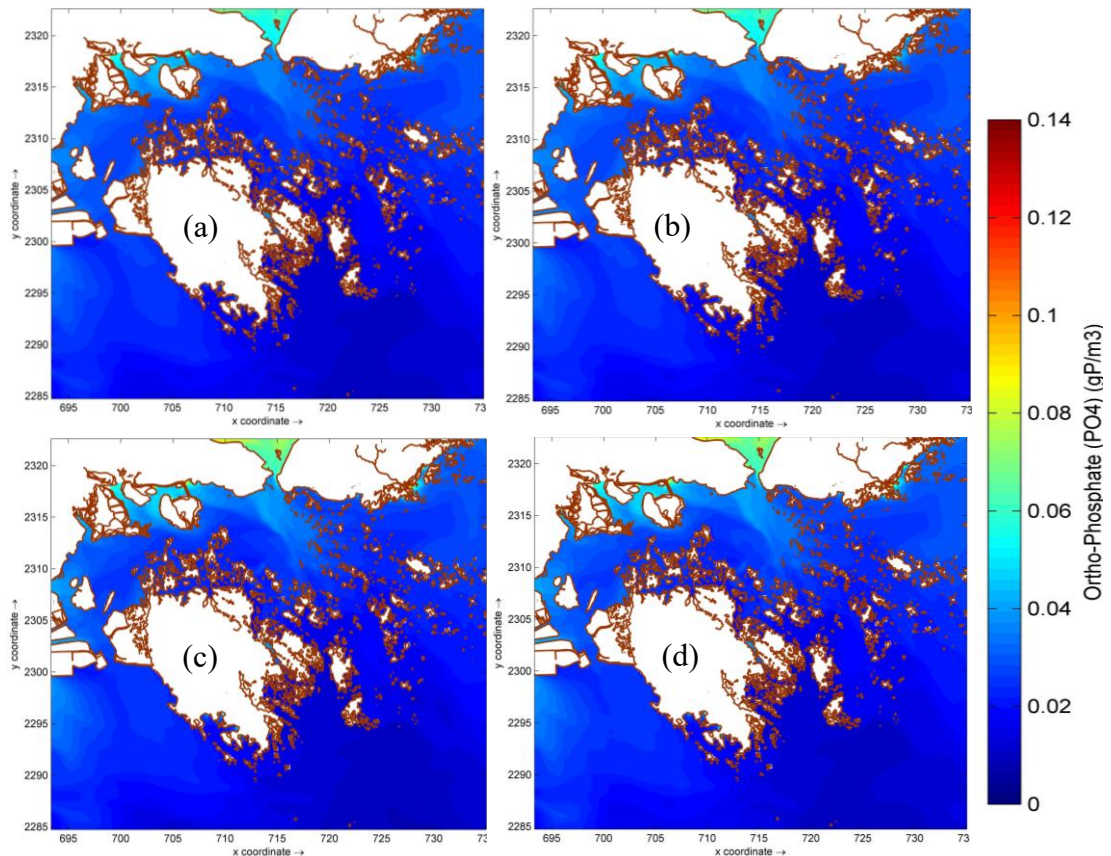
Hình C. 5. Phân bố BOD trong pha triều lên vào mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam theo các kịch bản: tầng mặt-(a) hiện trạng, (b) BDKH, (c) con người, (d) con người và BDKH



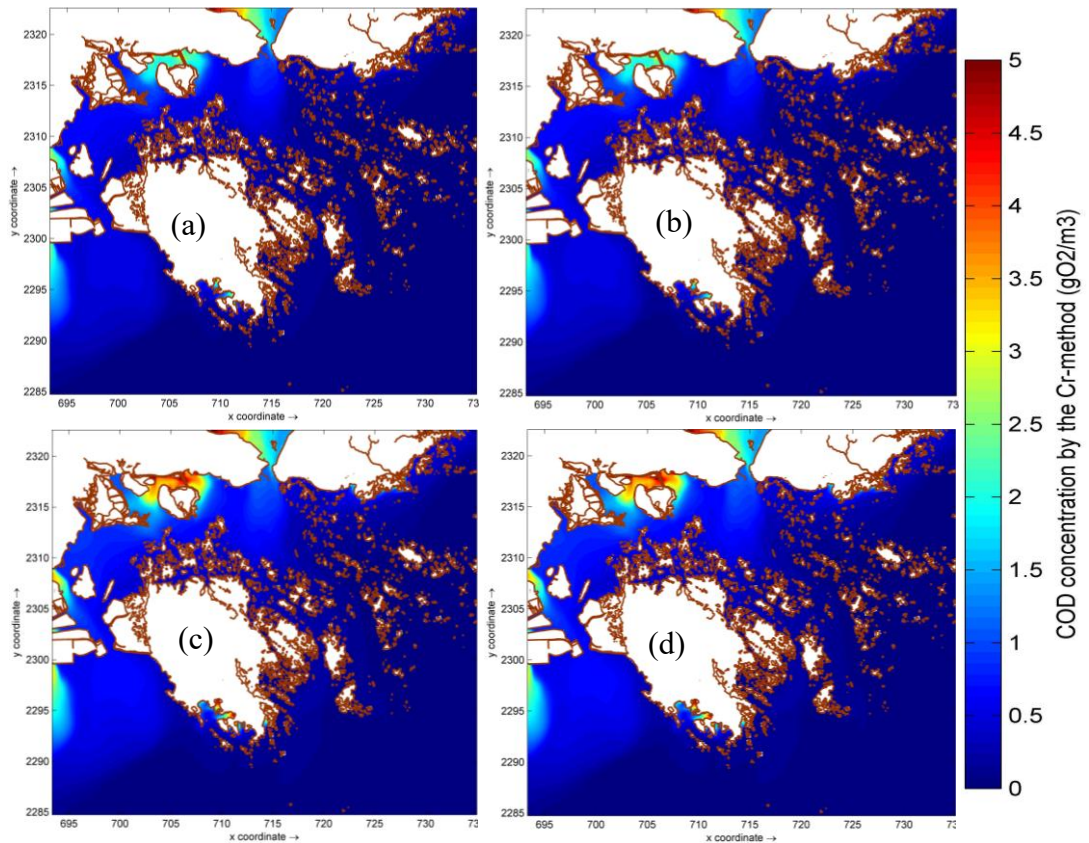
Hình C. 6. Phân bố COD trong pha triều lên, tầng đáy vào mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam theo các kịch bản: tầng mặt-(a) hiện trạng, (b) BDKH, (c) con người, (d) con người và BDKH



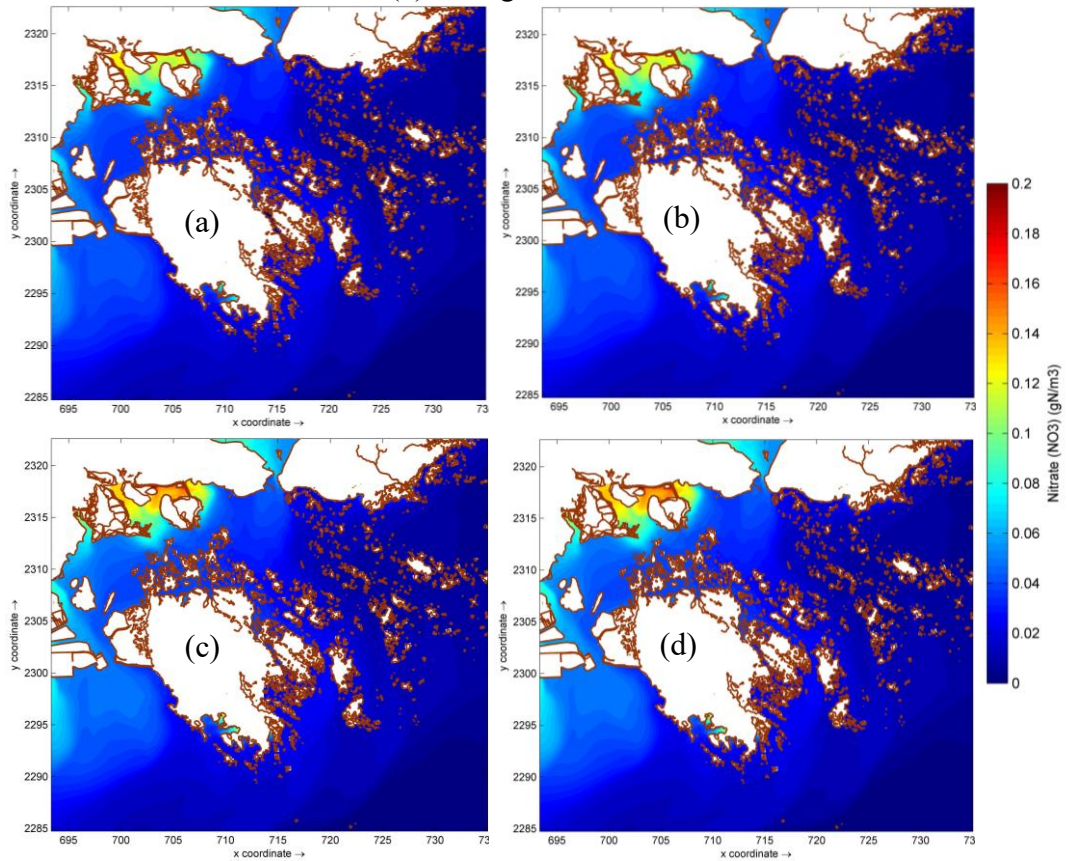
Hình C. 7. Phân bố PO_4^{3-} trong pha triều xuống vào mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam theo các kịch bản: tầng mặt-(a) hiện trạng, (b) BDKH, (c) con người, (d) con người và BDKH



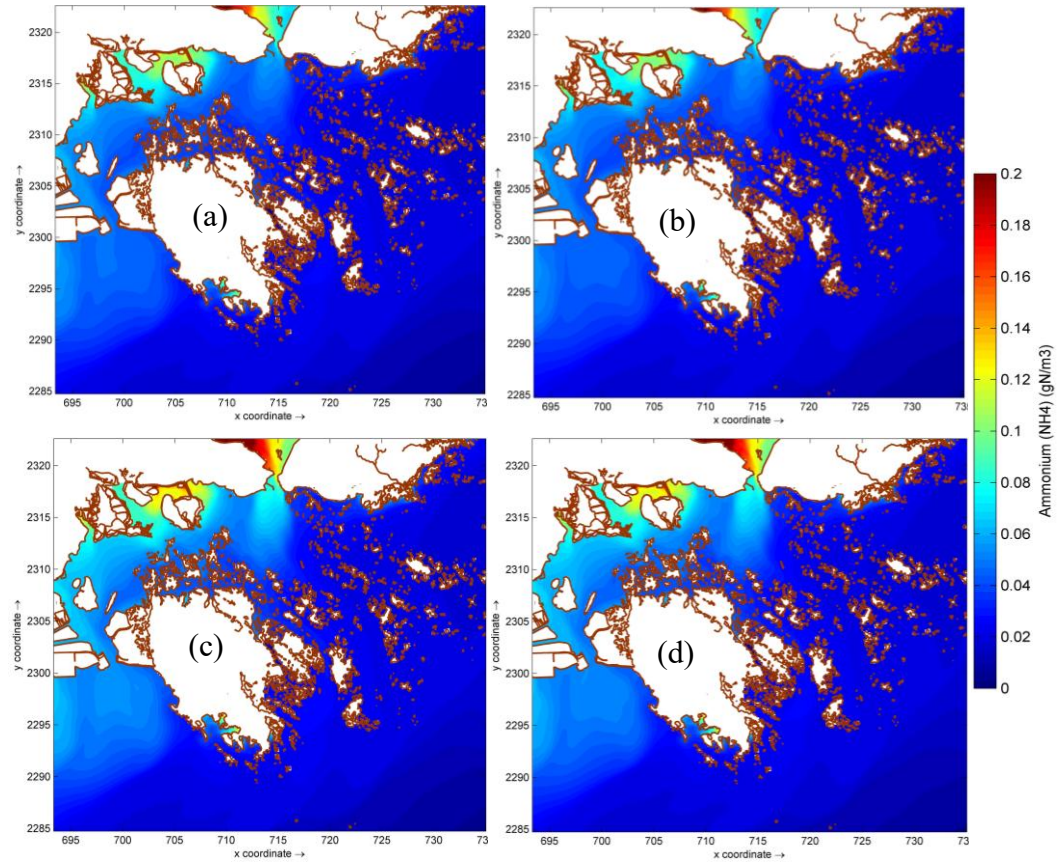
Hình C. 8. Phân bố PO_4^{3-} trong pha triều xuống vào mùa gió Tây Nam theo các kịch bản: tầng mặt-(a) hiện trạng, (b) BDKH, (c) con người, (d) con người và BDKH



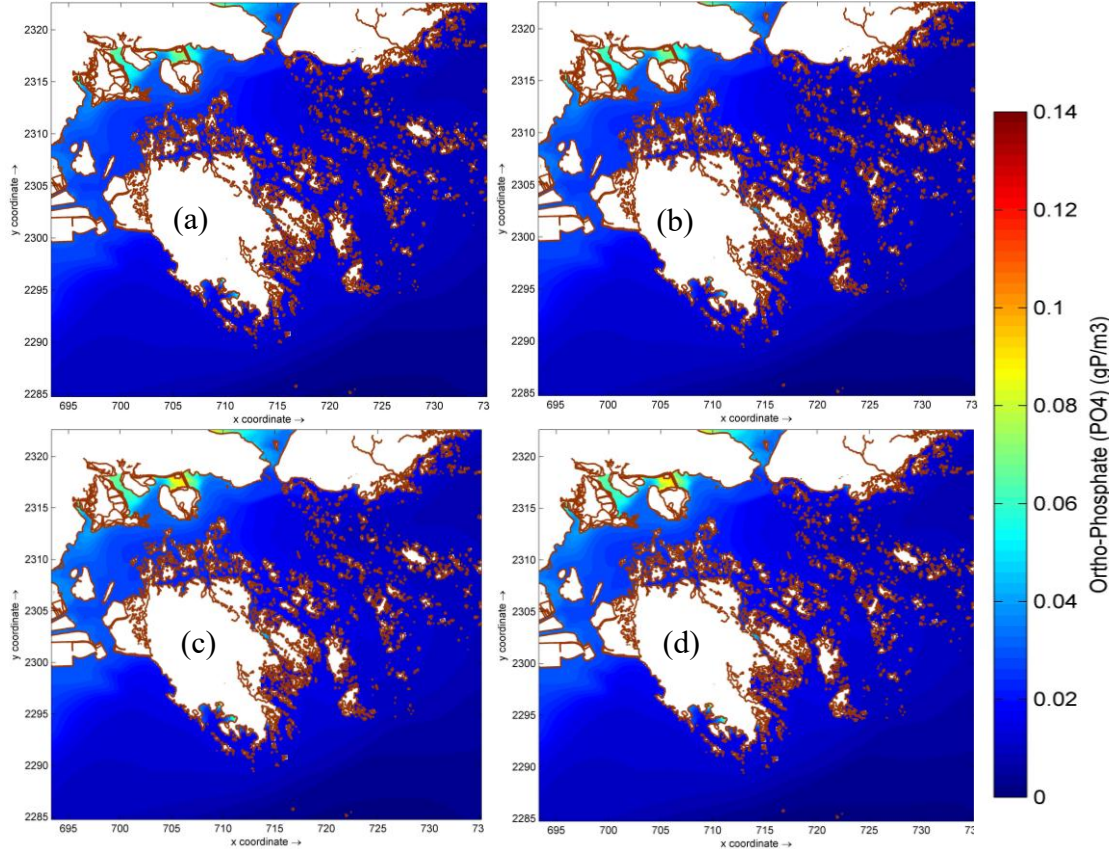
Hình C. 9. Phân bố COD trong pha triều xuống, tầng mặt vào mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc theo các kịch bản: (a) hiện trạng, (b) BDKH, (c) con người, (d) con người và BDKH



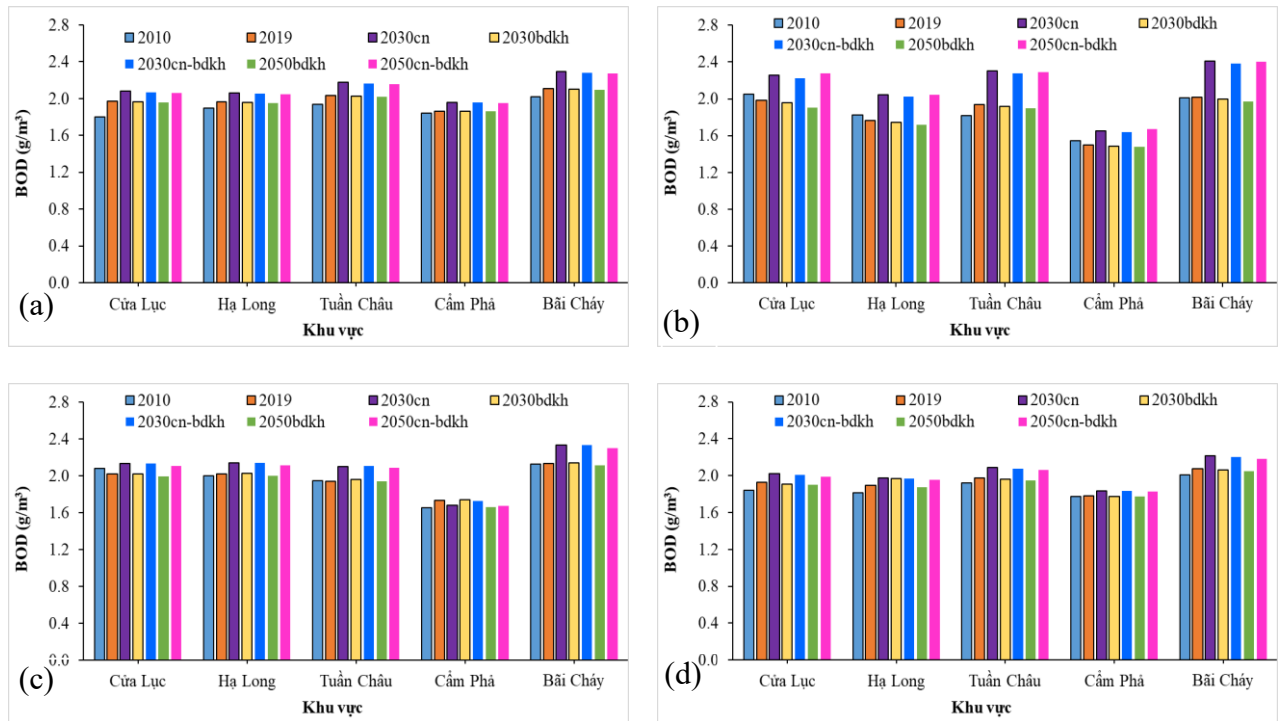
Hình C. 10. Phân bố NO₃⁻ trong pha triều xuống, tầng mặt vào mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc theo các kịch bản: (a) hiện trạng, (b) BDKH, (c) con người, (d) con người và BDKH



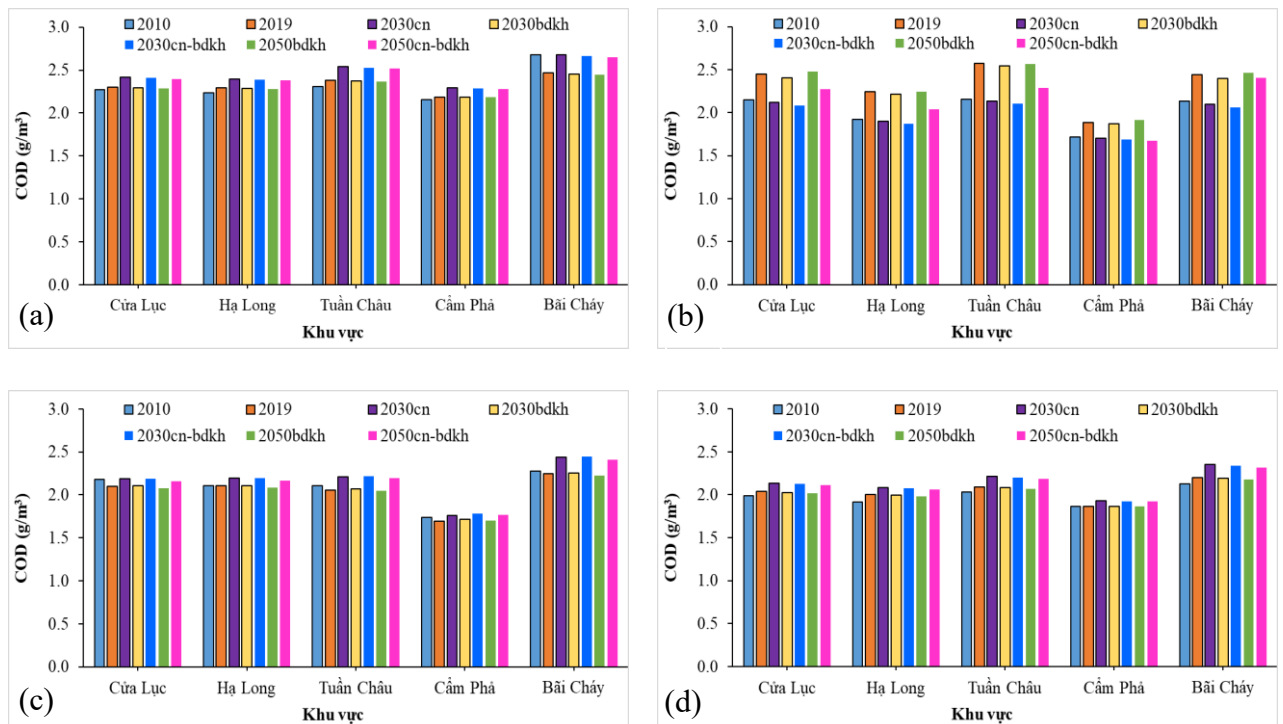
Hình C. 11. Phân bố NH_4^+ trong pha triều xuống, tầng mặt vào mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc theo các kịch bản: (a) hiện trạng, (b) BDKH, (c) con người, (d) con người và BDKH



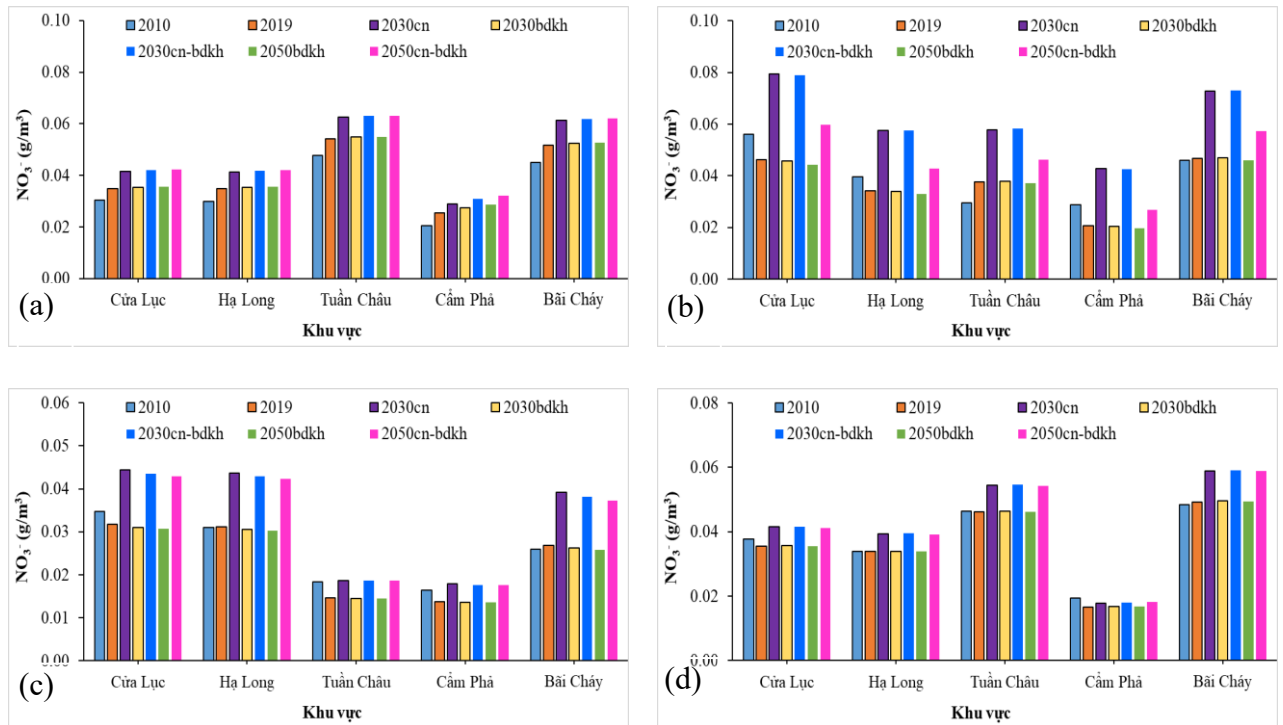
Hình C. 12. Phân bố PO_4^{3-} trong pha triều lên, tầng mặt vào mùa gió chuyển tiếp Tây Nam sang Đông Bắc theo các kịch bản: (a) hiện trạng, (b) BDKH, (c) con người, (d) con người và BDKH



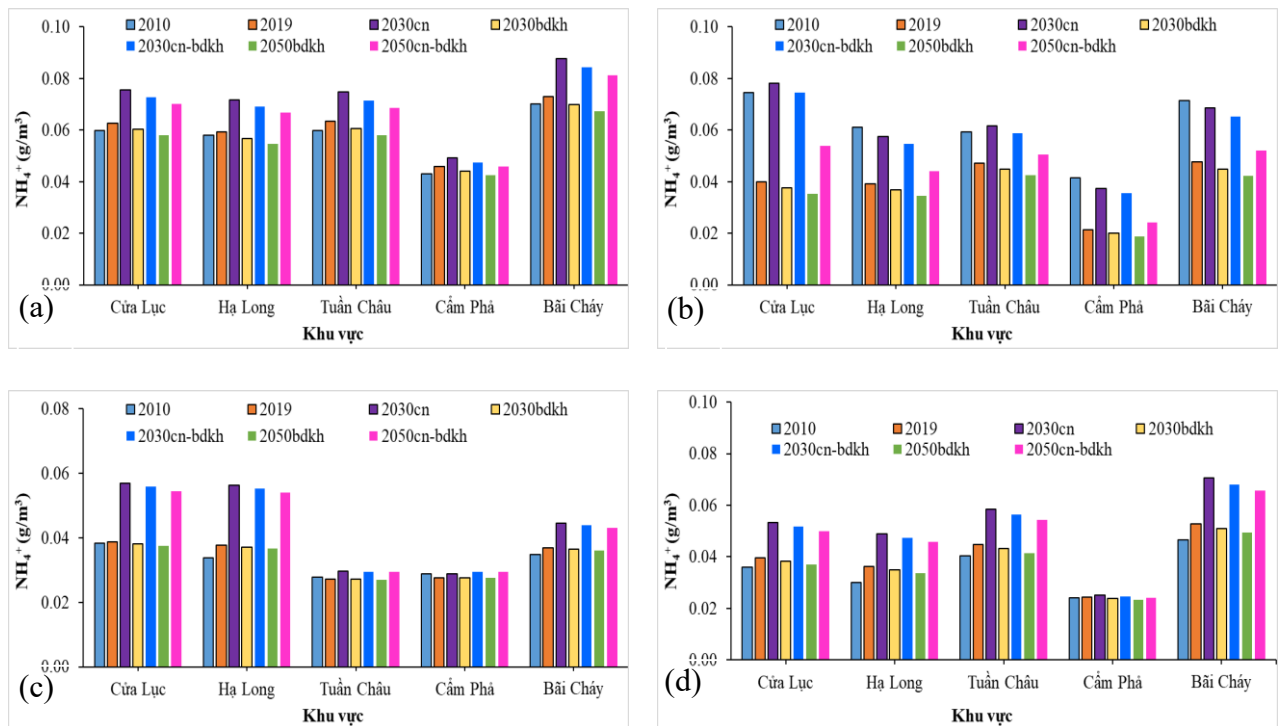
Hình C. 13. Giá trị BOD trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và kịch bản kết hợp con người và BĐKH (2030, 2050): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc



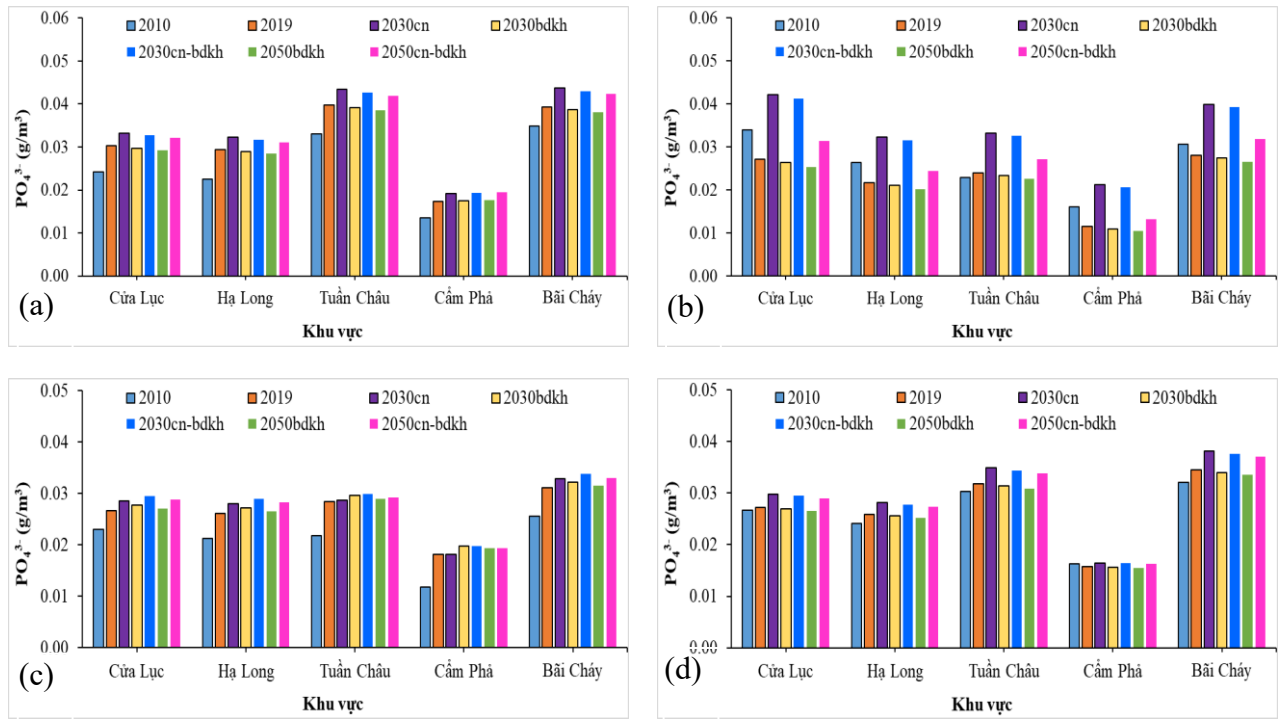
Hình C. 14. Giá trị COD trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và kịch bản kết hợp con người và BĐKH (2030, 2050): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc



Hình C. 15. Hàm lượng NO_3^- trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và kịch bản kết hợp con người và BĐKH (2030, 2050): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc



Hình C. 16. Hàm lượng NH_4^+ trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và kịch bản kết hợp con người và BĐKH (2030, 2050): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc



Hình C. 17. Hàm lượng PO_4^{3-} trung bình tháng tại một số khu vực theo các kịch bản hiện trạng (2019) và kịch bản kết hợp con người và BĐKH (2030, 2050): a- mùa gió Đông Bắc, b- mùa gió chuyển tiếp từ Đông Bắc sang Tây Nam, c- mùa gió Tây Nam, d- mùa gió chuyển tiếp từ Tây Nam sang Đông Bắc