

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Phạm Lê Khương

**ỨNG DỤNG SỐ LIỆU SÓNG VÔ TUYẾN VÀ MÔ HÌNH SỐ
TRỊ ĐỂ NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ MỘT SỐ THÔNG SỐ
KHÍ QUYỂN TẠI MỘT SỐ KHU VỰC CỦA VIỆT NAM**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Hà Nội - 2025

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

Phạm Lê Khương

ỨNG DỤNG SỐ LIỆU SÓNG VÔ TUYẾN VÀ MÔ HÌNH SỐ
TRỊ ĐỂ NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ MỘT SỐ THÔNG SỐ
KHÍ QUYỂN TẠI MỘT SỐ KHU VỰC CỦA VIỆT NAM

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Ngành: Vật lý địa cầu

Mã số: 9.44.01.11

Xác nhận của Học viện
Khoa học và Công nghệ

Người hướng dẫn 1

Người hướng dẫn 2

TS. Nguyễn Xuân Anh

TS. Nguyễn Văn Hiệp

Hà Nội, 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án “**Ứng dụng số liệu sóng vô tuyến và mô hình số trị để nghiên cứu đánh giá một số thông số khí quyển tại một số khu vực của Việt Nam**” là công trình nghiên cứu của chính mình dưới sự hướng dẫn khoa học của TS. Nguyễn Xuân Anh và TS. Nguyễn Văn Hiệp. Luận án sử dụng thông tin trích dẫn từ nhiều nguồn tham khảo khác nhau và các thông tin trích dẫn được ghi rõ nguồn gốc. Các kết quả nghiên cứu của tôi được công bố chung với các tác giả khác đã được sự nhất trí của đồng tác giả khi đưa vào luận án. Các số liệu, kết quả được trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ một công trình nào khác ngoài các công trình công bố của tác giả. 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..

Hà Nội, ngày 14 tháng 4 năm 2025

Tác giả luận án



Phạm Lê Khương

LỜI CẢM ƠN

Trước hết, tôi xin được gửi lời chân thành cảm ơn tới TS. Nguyễn Xuân Anh và TS. Nguyễn Văn Hiệp đã hướng dẫn, chỉ bảo và giúp đỡ tôi trong quá trình nghiên cứu, học tập và thực hiện luận án này.

Tôi cũng xin gửi lời cảm ơn các nhà khoa học, các Thầy, các Cô giảng dạy và nghiên cứu tại Khoa Các khoa học Trái Đất - Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, đã giúp đỡ, tận tình giảng dạy và hướng dẫn tôi trong quá trình nghiên cứu, học tập và thực hiện luận án tại đây.

Tôi xin gửi lời cảm ơn đến Ban lãnh đạo Học viện Khoa học và Công nghệ, Ban lãnh đạo Viện Vật lý địa cầu, giáo vụ phụ trách đào tạo và tập thể Phòng Vật lý khí quyển, các đồng nghiệp tại Viện Vật lý địa cầu đã tạo điều kiện, giúp đỡ tôi trong suốt quá trình nghiên cứu, học tập và thực hiện luận án này. Tôi xin trân trọng gửi lời cảm ơn đến các thầy, cô tham gia các Hội đồng và hội thảo, đã cho nhận xét, góp ý để tôi hoàn thiện luận án.

Cuối cùng, tôi xin gửi lời cảm ơn đặc biệt tới gia đình, người thân và bạn bè, những người đã luôn hỗ trợ, giúp đỡ và động viên tôi trong suốt quá trình học tập và thực hiện luận án này.

Hà Nội, ngày 14 tháng 4 năm 2025

Tác giả luận án



NCS. Phạm Lê Khương

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC.....	iii
DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT	v
DANH MỤC CÁC BẢNG.....	viii
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ.....	x
MỞ ĐẦU.....	1
Chương 1. TỔNG QUAN VỀ SỬ DỤNG SỐ LIỆU SÓNG VÔ TUYẾN VÀ MÔ HÌNH SỐ TRỊ ĐỀ NGHIÊN CỨU KHÍ QUYỀN	7
1.1. Tổng quan về sử dụng dữ liệu sóng vô tuyến để nghiên cứu đánh giá các thông số khí quyển	7
1.1.1. Tổng quan các công trình nghiên cứu ở nước ngoài	7
1.1.2. Tổng quan các công trình nghiên cứu ở trong nước.....	21
1.2. Tổng quan về sử dụng mô hình WRF mô phỏng thông số khí quyển...	23
1.2.1. Tổng quan các công trình nghiên cứu ở nước ngoài	23
1.2.2. Tổng quan các công trình nghiên cứu trong nước.....	25
Kết luận chương 1	27
Chương 2. SỐ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	30
2.1. Số liệu	30
2.1.1. Số liệu wetPf2.....	30
2.1.2. Số liệu thám không vô tuyến (bóng thám không)	31
2.1.3. Số liệu GNSS.....	32
2.1.4. Số liệu tổng ẩm khí quyển từ trạm AERONET.....	34
2.2.5. Dữ liệu trạm thời tiết tự động.....	34
2.2.6. Dữ liệu tọa độ tâm bão	35
2.2.7. Dữ liệu trên lưới và dữ liệu tái phân tích	36
2.2. Phương pháp nghiên cứu	37
2.2.1. Phương pháp che khuất vô tuyến	37
2.2.2. Tính toán tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu GNSS	39
2.2.3. Đánh giá các thông số khí quyển tính toán từ dữ liệu sóng vô tuyến	44
2.2.4. Phương pháp nghiên cứu các trường khí quyển trong bão.....	51

2.2.5. Phương pháp sử dụng mô hình.....	51
Kết luận Chương 2	54
Chương 3. ĐẶC ĐIỂM CỦA MỘT SỐ TRƯỜNG KHÍ QUYỂN TRÊN KHU VỰC VIỆT NAM VÀ LÂN CẬN SỬ DỤNG SỐ LIỆU WETPF2.....	55
3.1. Đánh giá dữ liệu wetPf2 ở khu vực Việt Nam và lân cận	55
3.1.1. So sánh với dữ liệu thám không vô tuyến	55
3.1.2. So sánh với dữ liệu mô phỏng bằng mô hình WRF	64
3.2. Đặc điểm một số trường khí quyển ở khu vực quần đảo Hoàng Sa và quần đảo Trường Sa	67
3.2.1. Đặc điểm trường nhiệt độ không khí.....	68
3.2.2. Đặc điểm trường độ ẩm tương đối	73
3.2.3. Sự khác biệt giữa trường nhiệt độ, độ ẩm của khối không khí biển và khối không khí lục địa ở cùng vĩ độ.....	76
3.3. Đặc điểm một số trường khí quyển ở khu vực Việt Nam và lân cận khi có bão hoạt động từ dữ liệu wetPf2	81
3.3.1. Đặc điểm trường nhiệt độ.....	81
3.3.2. Đặc điểm trường độ ẩm tương đối	84
3.3.3. Đặc điểm trường áp suất hơi nước	86
3.3.4. Đặc điểm trường chỉ số khúc xạ khí quyển.....	88
Kết luận chương 3	89
Chương 4. ĐẶC ĐIỂM TỔNG ẨM KHÍ QUYỂN TẠI KHU VỰC NGHĨA ĐÔ SỬ DỤNG DỮ LIỆU HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ TOÀN CẦU (GNSS) VÀ KẾT QUẢ MÔ HÌNH.....	92
4.1. Đánh giá số liệu tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNNS tại khu vực Nghĩa Đô	92
4.2. Đặc điểm của tổng ẩm khí quyển ở khu vực Nghĩa Đô, Hà Nội.....	103
Kết luận chương 4	119
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	121
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN .	123
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO	124

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

1. 3DhybEnVar: Đồng hóa lai tổ hợp biến phân 3 chiều.
2. 3Dvar: Hệ thống đồng hóa biến phân 3 chiều.
3. AERONET: Aerosol Robotic Network, Mạng trạm quan trắc sol khí.
4. AIRS: Atmospheric InfraRed Sounder, Dữ liệu hệ thống đo hồng ngoại khí quyển.
5. ANN: Artificial Neural Networks, Mạng thần kinh nhân tạo.
6. APPS: Phần mềm xử lý tín hiệu GPS của Phòng thí nghiệm động cơ phản lực.
7. CALIOP: Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization, Hệ thống Lidar đo đặc mây- sol khí phân cực.
8. CHAMP: CHAllenging Minisatellite Payload, Hệ thống vệ tinh nhỏ nhằm nghiên cứu và ứng dụng trong địa khoa học và khí quyển của Đức.
9. COSMIC/FORMOSAT-3: Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate, Hệ thống quan trắc vệ tinh phục vụ khí tượng học, tầng điện ly và khí hậu.
10. COSMIC-2: Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate -2: Hệ thống quan trắc vệ tinh phục vụ khí tượng học, tầng điện ly và khí hậu thế hệ thứ 2.
11. CSRS-PPP: Canadian Spatial Reference System - Precise Point Positioning, Hệ thống tham chiếu không gian của Canada – Định vị điểm chính xác.
12. ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Trung tâm Dự báo Thời tiết hạn vừa Châu Âu.
13. ERA5: ECMWF Reanalysis v5, Dữ liệu tái phân tích của Trung tâm Dự báo Thời tiết hạn vừa Châu Âu.
14. ERA-Interim: ECMWF Re-Analysis Project ERA-Interim, Dữ liệu tái phân tích của Trung tâm Dự báo Thời tiết hạn vừa Châu Âu.
15. FNL: Final, Dữ liệu tái phân tích.
16. GAMIT: Phần mềm xử lý dữ liệu GPS.
17. GAPS: Phần mềm xử lý tín hiệu GPS của Đại học New Brunswick.
18. GNSS: Global Navigation Satellite System, Hệ thống vệ tinh định vị toàn cầu.
19. GPS/MET: Global Positioning System/Meteorology: Hệ thống định vị toàn cầu/ Khí tượng.

20. GPS: Global Positioning System: Hệ thống định vị toàn cầu.
21. GPSRO: Global Positioning System Radio Occultation, Che khuất vô tuyến sử dụng tín hiệu hệ thống định vị toàn cầu.
22. GRACE: Gravity Recovery and Climate Experiment, Hệ thống vệ tinh quan trắc Trái Đất của Đức.
23. GSI: Gridpoint Statistical Interpolation, Nội suy thống kê điểm lưới.
24. IGS: International GPS Service, Dịch vụ GPS quốc tế.
25. JPL: Jet Propulsion Laboratory, NASA: Phòng thí nghiệm động cơ phản lực của Cơ quan hàng không vũ trụ Hoa Kỳ.
26. LEO: Low Earth Orbit, Vệ tinh quỹ đạo thấp.
27. Magic-PPP: Phần mềm xử lý tín hiệu GPS online.
28. MERRA: The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Bộ dữ liệu phân tích trong quá khứ cho nghiên cứu và ứng dụng của Cơ quan mô hình hóa và đồng hóa toàn cầu của Cơ quan hàng không vũ trụ Hoa Kỳ.
29. MetOp: Meteorological Operational satellite, Hệ thống vệ tinh quan trắc khí tượng của Châu Âu.
30. NCAR: National Center for Atmospheric Research, Trung tâm Nghiên cứu Khí quyển Quốc gia Hoa Kỳ.
31. NCEP: National Centers for Environmental Prediction, Trung tâm Dự báo Môi trường Quốc gia, Hoa Kỳ.
32. NCS: Nghiên cứu sinh.
33. NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, Cơ quan Khí quyển và Đại dương Quốc gia.
34. RMSE: Root Mean Square Error, Sai số bình phương trung bình (Sai số quân phương).
35. RO: Radio Occultation, Che khuất vô tuyến.
36. RS41: Thiết bị quan trắc thám không vô tuyến RS41 của Vaisala.
37. RS92: Thiết bị quan trắc thám không vô tuyến RS92 của Vaisala.
38. SAC-C: Satellite de Aplicaciones Cientificas C, Hệ thống vệ tinh quan trắc Trái đất của Argentina.
39. SSM/I: Special Sensor Microwave Imager, Cảm biến chụp ảnh vi sóng.
40. TPW: Total Precipitable Water, Tổng ẩm khí quyển.

- 41. UCAR: University Corporation for Atmospheric Research, Tập đoàn Đại học Nghiên cứu Khí quyển.
- 42. VNGEONET: Viet Nam Geodetic Network, Mạng trạm trắc địa Việt Nam.
- 43. WRF: Weather Research and Forecasting Model, Mô hình nghiên cứu và dự báo thời tiết.
- 44. ZHD: Zenith Hydrostatic Delay, Độ trễ thủy tĩnh thiên đỉnh.
- 45. ZTD: Zenith Tropospheric Delay, Độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu.
- 46. ZWD: Zenith Wet Delay, Độ trễ ướt thiên đỉnh.

DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 2.1. Thông số kỹ thuật chính thiết bị S800A của Stonex	33
Bảng 2.2. Thông số kỹ thuật của thiết bị trạm thời tiết tự động	35
Bảng 2.3. Nhóm số liệu lựa chọn cặp số liệu so sánh.....	46
Bảng 3.1. Giá trị sai số của nhiệt độ và độ lệch chuẩn tính trung bình tất cả các mực của 9 trường hợp giữa dữ liệu wetPf2 và thám không vô tuyến.....	57
Bảng 3.2. Hệ số tương quan nhiệt độ giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến ở từng mực áp suất tương ứng 9 trường hợp so sánh.....	57
Bảng 3.3. Giá trị sai số của độ ẩm tương đối và độ lệch chuẩn tính trung bình tất cả các mực của 9 trường hợp giữa dữ liệu wetPf2 và thám không vô tuyến.....	59
Bảng 3.4. Hệ số tương quan của độ ẩm tương đối giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến tại từng mực độ cao tương ứng với 9 trường hợp so sánh.	61
Bảng 3.5. Giá trị sai số của chỉ số khúc xạ khí quyển và độ lệch chuẩn trung bình tất cả các mực của 9 trường hợp giữa dữ liệu wetPf2 và thám không vô tuyến.....	62
Bảng 3.6. Hệ số tương quan của chỉ số khúc xạ khí quyển giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến tại từng mực khí áp tương ứng với 9 trường hợp.....	63
Bảng 3.7. Sai số nhiệt độ trung bình (°C) giữa dữ liệu wetPf2 và mô phỏng bằng mô hình WRF tại các mực khí áp tương ứng với 3 hạn dự báo và tại các khu vực cách tâm bão khoảng cách $R1 \leq 100\text{km}$, $500\text{km} < R2 \leq 600\text{km}$, $< 1100\text{km} < R3 \leq 1200\text{km}$	64
Bảng 3.8. Độ lệch chuẩn của sai số nhiệt độ (°C) giữa dữ liệu wetPf2 và mô phỏng bằng mô hình WRF tại các mực khí áp tương ứng với 3 hạn dự báo và tại các khu vực cách tâm bão $R1 \leq 100\text{km}$, $500\text{km} < R2 \leq 600\text{km}$, $< 1100\text{km} < R3 \leq 1200\text{km}$	65
Bảng 3.9. Sai số độ ẩm tương đối trung bình (%) giữa dữ liệu wetPf2 và mô phỏng mô hình WRF tại các mực khí áp tương ứng với 3 hạn dự báo và tại các khu vực cách tâm bão khoảng cách $R1 \leq 100\text{km}$, $500\text{km} < R2 \leq 600\text{km}$, $< 1100\text{km} < R3 \leq 1200\text{km}$	66
Bảng 3.10. Độ lệch chuẩn của sai số độ ẩm tương đối (%) giữa dữ liệu wetPf2 và mô phỏng bằng mô hình WRF tại các mực khí áp tương ứng với 3 hạn dự báo và tại các khu vực cách tâm bão $R1 \leq 100\text{km}$, $500\text{km} < R2 \leq 600\text{km}$, $< 1100\text{km} < R3 \leq 1200\text{km}$	67

Bảng 4.1. So sánh giữa giá trị hàm lượng hơi nước tổng cộng tính từ số liệu GNSS (TPW_GPS) và từ số liệu Aeronet (TPW_AER), số liệu thám không vô tuyến (TPW_RS), số liệu tái phân tích (TPW_WRF).....	97
Bảng 4.2. Kết quả ME, MAE và RMSE giữa TPW tính toán từ dữ liệu GNSS và sản phẩm TPW từ những nguồn dữ liệu khác của các công trình nghiên cứu trước đây	101

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

Hình 1.1. Mô tả phương pháp che khuất vô tuyến [1]	8
Hình 2.1. COSMIC-2 cung cấp khoảng 5000 thám sát một ngày (màu xanh) so với 1300 thám sát của trạm thám không vô tuyến (màu đỏ) [17]	30
Hình 2.2. Cấu trúc file dữ liệu thám không vô tuyến.....	32
Hình 2.3. Dữ liệu GNSS được chuyển sang định dạng RINEX.	33
Hình 2.4. Cấu trúc file dữ liệu của thiết bị quan trắc thời tiết tự động	35
Hình 2.5. Ví dụ về dữ liệu Best Track	36
Hình 2.6. Sơ đồ mô tả phương pháp che khuất vô tuyến [3]	37
Hình 2.7. Phần mềm đi kèm thiết bị	40
Hình 2.8. Cấu trúc file dữ liệu đầu ra của công cụ CSRS-PPP	42
Hình 2.9. Sơ đồ các bước tính toán giá trị tổng ẩm khí quyển	44
Hình 2.10. Vị trí 3 trạm thám không vô tuyến và các khối khí	45
Hình 2.11. Vị trí trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô và trạm thám không vô tuyến Hà Nội (Láng).....	50
Hình 2.12. Sơ đồ cấu trúc của mô hình WRF [83]	52
Hình 2.13. Miền tính của mô hình WRF.....	53
Hình 3.1. Sai số trung bình và độ lệch chuẩn của sai số nhiệt độ được tính toán giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến ở các độ cao khác nhau. Các hình a, b, c, d, e, f, g, h và i lần lượt tương ứng với các trường hợp GP1, GP2, GP3, GP4, GP5, GP6, GP7, GP8 và GP9. Trục tung biểu thị mực khí áp, trục hoành phía dưới biểu thị giá trị sai số nhiệt độ và trục hoành phía trên biểu thị số lượng mẫu. Đường liền màu đen là giá trị sai số trung bình, đường đứt nét màu đỏ minh họa độ lệch chuẩn của sai số và đường liền nét (+) màu xanh biểu thị số lượng mẫu.	56
Hình 3.2. Sai số trung bình và độ lệch chuẩn của sai số về độ ẩm tương đối giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến của chín trường hợp tại 10 độ cao. (a) sai số trung bình của độ ẩm tương đối và (b) độ lệch chuẩn của sai số ($SD_{\Delta RH}$)	59
Hình 3.3. Sai số trung bình và độ lệch chuẩn của sai số về chỉ số khúc xạ khí quyển giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến của chín trường hợp so sánh tại 10 mực khí áp. (a) sai số trung bình của chỉ số khúc xạ khí quyển và (b) độ lệch chuẩn của sai số.	61

Hình 3.4. Kết quả biến đổi nhiệt độ trung bình của bốn mùa trên khu vực quần đảo Hoàng Sa ($13^{\circ}\text{N} - 18^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} - 115^{\circ}\text{E}$)	69
Hình 3.5. Kết quả biến đổi gradient nhiệt độ trung bình của bốn mùa trên khu vực quần đảo Hoàng Sa ($13^{\circ}\text{N} - 18^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} - 115^{\circ}\text{E}$).....	70
Hình 3.6. Kết quả biến đổi nhiệt độ trung bình của bốn mùa trên khu vực quần đảo Trường Sa ($07^{\circ}\text{N} - 12^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} - 115^{\circ}\text{E}$)	70
Hình 3.7. Kết quả biến đổi gradient nhiệt độ trung bình của bốn mùa trên khu vực quần đảo Trường Sa ($07^{\circ}\text{N} - 12^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} - 115^{\circ}\text{E}$)	72
Hình 3.8. Profile thẳng đứng của sự khác biệt nhiệt độ giữa hai khối khí trên khu vực quần đảo Hoàng Sa và quần đảo Trường Sa trong mùa hè (đồ thị màu đỏ) và trong mùa đông (đồ thị màu xanh)	72
Hình 3.9. Kết quả biến đổi độ ẩm tương đối trung bình của bốn mùa trên khu vực quần đảo Hoàng Sa ($13^{\circ}\text{N} - 18^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} - 115^{\circ}\text{E}$)	73
Hình 3.10. Kết quả biến đổi độ ẩm tương đối trung bình của bốn mùa trên khu vực quần đảo Trường Sa ($07^{\circ}\text{N} - 12^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} - 115^{\circ}\text{E}$)	75
Hình 3.11. Profile nhiệt độ trung bình trong những tháng nóng (tháng 4, 5, 6) ở trên đất liền (màu đỏ), trên biển (màu xanh) và trong mùa đông (tháng 12, 1, 2) trên đất liền (màu đen), trên biển (màu tím)	76
Hình 3.12. Chênh lệch profile nhiệt độ giữa khu vực đất liền và khu vực quần đảo Hoàng Sa, trung bình tháng 4,5,6 (màu đỏ), trung bình mùa đông (màu đen)	77
Hình 3.13. Giá trị trung bình dài hạn (1991-2020) của nhiệt độ (màu, $^{\circ}\text{C}$) và véc tơ gió (véc tơ, m/s) trong tháng 4 từ dữ liệu tái phân tích ERA5.....	78
Hình 3.14. Giá trị trung bình dài hạn (1991-2020) của nhiệt độ (màu, $^{\circ}\text{C}$) và véc tơ gió (véc tơ, m/s) trong tháng 2 từ dữ liệu tái phân tích ERA5.....	78
Hình 3.15. Profile độ ẩm tương đối trung bình (%) trong mùa hè (tháng 6, 7, 8) ở trên đất liền (màu đỏ), trên biển (màu xanh) và trong mùa đông (tháng 12, 1, 2) trên đất liền (màu đen), trên biển (màu tím)	79
Hình 3.16. Dị thường nhiệt độ ($^{\circ}\text{C}$) so với giá trị trung bình tháng từ dữ liệu wetPf2 theo độ cao và khoảng cách so với tâm bão trong thời gian bão di chuyển vào Biển Đông mùa bão năm 2020	81
Hình 3.17. Độ lệch nhiệt độ của profile nhiệt độ trung bình trong khu vực bán kính 100km từ tâm bão với khu vực bán kính từ 500 km – 600 km (màu xanh) và khu vực từ 1100 km – 1200 km (màu đỏ).....	83

Hình 3.18. Profile vận tốc thẳng đứng trung bình trong khu vực bán kính $\leq 100\text{km}$ từ tâm bão (màu xanh), khu vực bán kính từ $500\text{ km} - 600\text{ km}$ (màu đỏ) và khu vực bán kính từ $1100\text{ km} - 1200\text{ km}$ (màu đen).....	84
Hình 3.19. Dị thường độ ẩm tương đối (%) so với giá trị trung bình tháng từ dữ liệu wetPf2 theo độ cao và khoảng cách so với tâm bão trong thời gian bão di chuyển vào Biển Đông mùa bão năm 2020.....	85
Hình 3.20. Profile thẳng đứng của độ ẩm tương đối trung bình tương ứng với các khoảng cách từ tâm bão đến 100km (màu xanh), khu vực từ $500\text{ km} - 600\text{ km}$ (màu đỏ) và khu vực từ $1100\text{ km} - 1200\text{ km}$ (màu đen).....	86
Hình 3.21. Dị thường áp suất hơi nước (hPa) so với giá trị trung bình tháng từ dữ liệu wetPf2 theo độ cao và khoảng cách so với tâm bão trong thời gian bão di chuyển vào Biển Đông mùa bão năm 2020.....	87
Hình 3.22. Profile thẳng đứng của áp suất hơi nước trung bình tương ứng với các khoảng cách từ tâm bão đến 100km (màu xanh), khoảng cách từ $500\text{ km} - 600\text{ km}$ (màu đỏ) và khoảng cách từ $1100\text{ km} - 1200\text{ km}$ (màu đen)	88
Hình 3.23. Dị thường chỉ số khúc xạ so với giá trị trung bình tháng từ dữ liệu wetPf2 theo độ cao và khoảng cách so với tâm bão trong thời gian bão di chuyển vào Biển Đông mùa bão năm 2020	89
Hình 4.1. Biến đổi tổng ẩm khí quyển trung bình ngày tính từ số liệu GNSS (TPW_GPS) (dấu +, màu xanh) và từ trạm AERONET (TPW_AER) (đường tròn, màu đỏ) tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô.....	93
Hình 4.2. Sai số giữa tổng ẩm khí quyển trung bình ngày tính từ số liệu GNSS và sản phẩm từ dữ liệu AERONET tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô.	93
Hình 4.3. Sai số tương đối (Relative Absolute Error) giữa tổng ẩm khí quyển trung bình ngày tính từ số liệu GNSS và sản phẩm từ dữ liệu AERONET tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô.	94
Hình 4.4. Tương quan giữa giá trị trung bình ngày của tổng ẩm khí quyển tính toán từ GNSS (TPW_GPS) và từ số liệu AERONET (TPW_AER), đường biểu diễn xu thế (màu đỏ).	95
Hình 4.5. Biến đổi của tổng ẩm khí quyển thời điểm 7h và 19h tại khu vực Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội tính từ số liệu GNSS (TPW_GPS) (dấu +, màu xanh) và từ số liệu thám không vô tuyến (TPW_RS) (hình tròn, màu đỏ).....	96
Hình 4.6. Sai số giữa tổng ẩm khí quyển tại các thời điểm 7h và 19h (giờ địa phương) tính từ số liệu GNSS và từ số liệu thám không vô tuyến tại khu vực Hà Nội	96

Hình 4.7. Sai số tương đối (Relative Absolute Error) giữa tổng ẩm khí quyển tại các thời điểm 7h và 19h (giờ địa phương) tính từ số liệu GNSS và từ số liệu thám không vô tuyến tại khu vực Hà Nội	97
Hình 4.8. Tương quan giữa giá trị tổng ẩm khí quyển tính toán từ GNSS (TPW_GPS) và từ số liệu thám không vô tuyến tại Hà Nội (TPW_RS) tại thời điểm 7h và 19h (giờ địa phương), đường biểu diễn xu thế (màu đỏ).....	98
Hình 4.9. Sai số giữa tổng ẩm khí quyển tại các thời điểm 7h và 19h (giờ địa phương) tính từ số liệu GNSS và từ số tái phân tích được tăng độ phân giải bằng mô hình WRF (TPW_WRF) tại khu vực Hà Nội	99
Hình 4.10. Tương quan giữa giá trị tổng ẩm khí quyển tính toán từ GNSS (TPW_GPS) và từ số liệu tái phân tích FNL được tăng độ phân giải đến 6km bằng mô hình WRF (TPW_WRF) tại khu vực Hà Nội thời điểm 7h và 19h (giờ địa phương), đường biểu diễn xu thế (màu đỏ)	100
Hình 4.11. Biến đổi theo thời gian của độ trễ thiên đỉnh ướt (ZWD) trong khoảng thời gian từ 22/09/2022 đến 31/3/2023 ở trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô	103
Hình 4.12. Biến đổi theo thời gian của tổng ẩm khí quyển (TPW) trong khoảng thời gian từ 22/09/2022 đến 31/3/2023 ở trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô	104
Hình 4.13. Biến trình ngày của tổng ẩm khí quyển trong khoảng thời gian từ 22/09/2022 đến 31/3/2023 ở trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô	104
Hình 4.14. Biến đổi theo thời gian của tổng ẩm khí quyển (TPW) trung bình tháng trong khoảng thời gian từ 10/2022 đến 3/2023 ở trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô	105
Hình 4.15. Sự biến đổi của giá trị trung bình ngày của TPW tính toán từ dữ liệu GNSS (TPW_GPS) (+, màu xanh) và tổng lượng mưa ngày ở Trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô (biểu đồ cột, màu đỏ).....	106
Hình 4.16. Sự biến đổi của giá trị trung bình ngày của TPW tính toán từ dữ liệu GNSS (TPW_GPS) (+, màu xanh) và giá trị trung bình ngày của nhiệt độ ở Trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô (ô vuông, màu đỏ). Đường tròn màu đen thể hiện ngày không khí lạnh ảnh hưởng đến khu vực Hà Nội.	107
Hình 4.17. Biến đổi của tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS (TPW_GPS) (màu xanh, mm), từ mô hình (TPW_WRF) (+, màu tím) và nhiệt độ không khí (màu đỏ, °C) tại Trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô thời gian không khí lạnh ảnh hưởng đến khu vực Trạm. Ô vuông màu vàng là ngày không khí lạnh bắt đầu ảnh hưởng đến khu vực Đồng bằng Bắc Bộ	108

Hình 4.18. Phân bố của trường tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu tái phân tích FNL được tăng độ phân giải đến 6km bằng mô hình WRF: (a) 7h00 09/10/2022, (b) 13h00 09/10/2022, (c) 1h00 10/10/2022, (d) 13h00 10/10/2022.....	110
Hình 4.19. Phân bố của trường tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu tái phân tích FNL được tăng độ phân giải đến 6km bằng mô hình WRF: (a) 13h00 30/11/2022, (b) 19h00 30/11/2022, (c) 07h00 01/12/2022, (d) 19h00 01/12/2022.....	112
Hình 4.20. Biến đổi của tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS (đường màu xanh), mô hình WRF (+, màu tím) và nhiệt độ không khí (đường màu đỏ, °C) tại Trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô trong khoảng thời gian từ 18/10/2022 đến 20/10/2022. Ô vuông màu vàng là ngày không khí lạnh bắt đầu ảnh hưởng đến khu vực Đồng bằng Bắc Bộ	114
Hình 4.21. Phân bố của các trường nhiệt độ 2m (màu, °C), áp suất bề mặt (đường đồng mức màu xanh, mb), gió 10m (véc tơ, knots) tại thời điểm 19h00 ngày 19/10/2022 từ dữ liệu tái phân tích FNL của NCEP được tăng độ phân giải đến 6km bằng mô hình WRF.	115
Hình 4.22. Phân bố của các trường độ ẩm tương đối (màu, %), trường gió (véc tơ, knots), trường độ cao (đường đồng mức màu xanh) tại mực 850mb tại thời điểm 19h00 ngày 19/10/2022 từ dữ liệu tái phân tích FNL của NCEP được tăng độ phân giải đến 6km bằng mô hình WRF.	116
Hình 4.23. Phân bố của các trường độ ẩm tương đối (màu, %), trường gió (véc tơ, knots), trường độ cao (đường đồng mức màu xanh) tại mực 500mb tại thời điểm 19h00 ngày 19/10/2022 từ dữ liệu tái phân tích FNL của NCEP được tăng độ phân giải đến 6km bằng mô hình WRF.	116
Hình 4.24. Phân bố của trường tổng ẩm khí quyển tại thời điểm 19h00 ngày 19/10/2022 từ dữ liệu tái phân tích FNL của NCEP được tăng độ phân giải đến 6km bằng mô hình WRF.	117
Hình 4.25. Biến đổi của TPW (đồ thị màu xanh) và nhiệt độ không khí (đồ thị màu đỏ) tính trung bình của 14 đợt không khí lạnh trong khoảng thời gian ± 48 giờ từ thời điểm TPW đạt giá trị cực đại.	118

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Nhiệt độ, áp suất, độ ẩm là các thông số đặc trưng cơ bản nhất của khí quyển. Việc xác định được các thông số này ở khu vực nhất định có ý nghĩa quan trọng, giúp chúng ta xác định được trạng thái khí quyển, điều kiện thời tiết và khí hậu ở khu vực đó. Đây là các thông số cơ bản và quan trọng được sử dụng trong công tác dự báo thời tiết và khí hậu. Ngoài ra, việc xác định được các thông số này cũng có ý nghĩa quan trọng đối với các lĩnh vực khác như: phát triển kinh tế, xã hội, phục vụ an ninh quốc phòng, giảm nhẹ thiên tai, hiệu chỉnh số liệu vệ tinh, giảm sai số trong định vị và dẫn đường bằng vô tuyến và nhiều lĩnh vực khác. Các thông số khí quyển này có thể được xác định bằng nhiều phương pháp khác nhau: phương pháp đo trực tiếp, các phương pháp viễn thám hoặc có thể xác định bằng việc sử dụng các mô hình số trị.

Các phương pháp viễn thám sử dụng dữ liệu sóng vô tuyến để xác định các thông số khí quyển đã thể hiện được tính ưu việt và được sử dụng ngày càng phổ biến trên thế giới. Một trong số đó là phương pháp sử dụng vệ tinh quỹ đạo thấp (LEO) để thám sát khí quyển Trái Đất. Phương pháp này sử dụng kỹ thuật che khuất vô tuyến (RO) để xác định profile các thông số khí quyển theo chiều cao (nhiệt độ, độ ẩm tương đối, độ ẩm tuyệt đối, áp suất, áp suất hơi nước, chỉ số khúc xạ khí quyển) từ dữ liệu sóng vô tuyến truyền từ vệ tinh GPS đến vệ tinh LEO. Dữ liệu quan trắc này được gọi chung là dữ liệu GPSRO. Dữ liệu GPSRO có đặc điểm tương tự như số liệu thám sát không vô tuyến. Ưu điểm nổi bật của phương pháp này là cung cấp các profile thông số khí quyển trên phạm vi toàn cầu. Ngày nay, GPSRO đã trở thành một nguồn dữ liệu quan trọng, đặc biệt tại các khu vực đại dương, vùng cực nơi có rất ít dữ liệu quan trắc khí quyển cao không.

Một phương pháp khác sử dụng sóng vô tuyến để thám sát khí quyển được ứng dụng phổ biến trên thế giới là phương pháp sử dụng dữ liệu hệ thống định vị toàn cầu (GNSS) thu được tại bề mặt. Phương pháp này cho phép xác định được thông số độ trễ tầng đối lưu (ZTD) và tổng ẩm khí quyển (TPW). Với số lượng các thiết bị thu GNSS tại mặt đất ngày càng nhiều, nó trở thành nguồn dữ liệu quan trắc khí quyển quan trọng trong nghiên cứu và dự báo khí tiết, khí hậu. Dữ liệu này có thể được sử

dụng để giám sát sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển gần thời gian thực hoặc đồng hóa vào mô hình dự báo số.

Ở nước ta, việc quan trắc các thông số khí quyển theo chiều thẳng đứng chủ yếu được thực hiện, đo đạc thông qua mạng lưới trạm quan trắc thám không vô tuyến (đài cao không). Các thông số này được quan trắc từ 1 lần/ngày đến 2 lần/ngày tùy từng trạm. Mạng lưới trạm quan trắc thám không vô tuyến của nước ta gồm 6 trạm. Trong đó 05 trạm được bố trí trên khu vực đất liền và 01 trạm trên đảo ven bờ. Như vậy, số liệu quan trắc các thông số khí quyển trên cao từ trạm thám không vô tuyến có rất ít hoặc gần như không có ở trên khu vực Biển Đông. Do đó, dữ liệu GPSRO trở thành một nguồn dữ liệu thám sát khí quyển trên cao quan trọng bổ sung cho số liệu thám không vô tuyến ở khu vực Việt Nam và đặc biệt trên khu vực Biển Đông. Tuy nhiên việc đánh giá chất lượng và ứng dụng dữ liệu này trong nghiên cứu khí quyển, thời tiết ở khu vực Việt Nam còn chưa được các nhà khoa học quan tâm nhiều. Ngoài ra, ở nước ta, số lượng các trạm thu tín hiệu GNSS tại bề mặt được lắp đặt ngày càng nhiều, lượng dữ liệu thu thập được ngày càng lớn. Tuy vậy, việc ứng dụng dữ liệu này trong nghiên cứu khí quyển, thời tiết và khí hậu còn hạn chế. Một số tác giả đã sử dụng dữ liệu này để tính toán tổng ẩm khí quyển tại một số thời điểm trong ngày và nghiên cứu quy luật biến đổi trong năm của tổng ẩm khí quyển. Việc tính toán tổng ẩm khí quyển với độ phân giải đến phút và ứng dụng dữ liệu này để nghiên cứu sự biến đổi tổng ẩm khí quyển trong một số hiện tượng thời tiết vẫn chưa được thực hiện. Trên cơ sở đó nghiên cứu sinh (NCS) lựa chọn đề tài luận án là **“Ứng dụng số liệu sóng vô tuyến và mô hình số trị để nghiên cứu đánh giá một số thông số khí quyển tại một số khu vực của Việt Nam”**.

Việt Nam nằm ở khu vực Đông Nam Á với chiều dài bờ biển hơn 3000km. Thời tiết, khí hậu của nước ta chịu tác động mạnh mẽ của các khối không khí trên Biển Đông. Việc nghiên cứu đặc trưng của khối không khí này có ý nghĩa quan trọng. Với việc trải dài trên nhiều vĩ độ và sự ảnh hưởng mạnh mẽ của hai hệ thống gió mùa (gió mùa tây nam, gió mùa đông bắc) dẫn đến có sự khác biệt về các điều kiện nhiệt độ và độ ẩm giữa khối khí ở Bắc Biển Đông và Nam Biển Đông. Để nghiên cứu đặc trưng của khối khí trên khu vực Biển Đông, cần thiết phải lựa chọn các khu vực nghiên cứu tương ứng với hai khu vực trên. Khu vực quần đảo Hoàng Sa và quần đảo

Trường Sa được lựa chọn tương ứng đại diện cho khu vực Bắc Biển Đông và Nam Biển Đông. Do không có trạm thám không vô tuyến nên quan trắc profile thẳng đứng các thông số khí quyển ở những khu vực này chủ yếu từ nguồn dữ liệu GPSRO. Trong đó, COSMIC-2 là nguồn dữ liệu tốt nhất trong các nguồn dữ liệu GPSRO hiện có. Vì vậy trong luận án, dữ liệu wetPf2 của COSMIC-2 được lựa chọn là nguồn dữ liệu quan trắc để phân tích đặc trưng nhiệt độ và độ ẩm của khối không khí biển trên khu vực quần Đảo Hoàng Sa và quần đảo Trường Sa.

Hàng năm, bão nhiệt đới là một trong những hiện tượng thời tiết cực đoan, gây ra các thiệt hại lớn về người và kinh tế đối với nước ta. Để giảm nhẹ thiệt hại của bão, việc quan trắc, nghiên cứu đặc trưng, cấu trúc các trường khí quyển trong bão có ý nghĩa quan trọng. Việc quan trắc trực tiếp các trường khí quyển trong bão đòi hỏi công nghệ hiện đại và chi phí rất cao, không thể thực hiện được trong điều kiện thực tế của nước ta hiện nay. Với điểm mạnh của loại dữ liệu GPSRO là cung cấp được các dữ liệu quan trắc khí quyển trong mọi điều kiện thời tiết bao gồm bão nhiệt đới, nên dữ liệu wetPf2 được sử dụng để nghiên cứu được cấu trúc các trường khí quyển trong bão ở khu vực Biển Đông.

Một nguồn số liệu sóng vô tuyến khác được thu thập ngày càng nhiều ở nước ta là dữ liệu GNSS tại bề mặt. Cho đến nay, dữ liệu này rất ít được sử dụng để nghiên cứu trong lĩnh vực khí quyển ở nước ta. Để nâng cao hiệu quả sử dụng dữ liệu này, việc sử dụng dữ liệu GNSS để tính toán tổng ẩm khí quyển với độ phân giải thời gian cao hơn và ứng dụng nguồn dữ liệu này để nghiên cứu, giám sát sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển gắn với các hiện tượng thời tiết và dự báo thời tiết là cần thiết. Để tính toán được tổng ẩm khí quyển với độ phân giải cao theo thời gian, ngoài dữ liệu GNSS liên tục, đòi hỏi phải có dữ liệu nhiệt độ có độ phân giải cao quan trắc tại bề mặt. Khu vực Nghĩa Đô là một trong những khu vực đáp ứng được điều kiện về số liệu (số liệu GNSS, số liệu trạm thời tiết tự động). Ngoài ra, khu vực này còn có các nguồn số liệu quan trắc khác để đối sánh nên khu vực Nghĩa Đô được lựa chọn để nghiên cứu thử nghiệm trước khi nhân rộng ở khu vực khác. Trong khuôn khổ của luận án, dữ liệu GNSS đã được sử dụng để tính toán tổng ẩm khí quyển ở khu vực Nghĩa Đô. Kết quả được đánh giá bằng cách so sánh với sản phẩm tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu Aeronet, dữ liệu thám không vô tuyến và mô phỏng mô hình WRF. Kết quả tính toán đã được

sử dụng để phân tích biến trình ngày, sự biến đổi theo tháng của tổng ẩm khí quyển. Tiếp đến, kết quả tính toán cũng được sử dụng để phân tích sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển trong điều kiện ảnh hưởng của không khí lạnh. Đây là một hình thể thời tiết đặc trưng vào mùa đông ở khu vực Miền Bắc nước ta.

Trong luận án, mô hình WRF đã được sử dụng để mô phỏng các trường khí quyển. Sản phẩm của mô hình WRF được dùng để đánh giá chất lượng của dữ liệu sóng vô tuyến. Ngoài ra, kết quả mô phỏng của mô hình được sử dụng để phân tích rõ hơn các điều kiện khí quyển tương ứng với một số hiện tượng thời tiết.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Nghiên cứu đánh giá được khả năng quan trắc, chất lượng và đặc trưng một số thông số khí quyển (chỉ số khúc xạ khí quyển, độ ẩm, nhiệt độ) tại một số khu vực của Việt Nam sử dụng số liệu sóng vô tuyến và mô hình WRF.

Nghiên cứu ứng dụng được các nguồn số liệu quan trắc vô tuyến và mô phỏng mô hình WRF các thông số khí quyển trong nghiên cứu một số hiện tượng thời tiết cực đoan tại một số khu vực của Việt Nam.

3. Nội dung nghiên cứu

Để đạt được mục tiêu trên, các nội dung cần thực hiện gồm:

- Nghiên cứu tổng quan về các phương pháp quan trắc vô tuyến, tính toán mô hình, đánh giá các thông số khí quyển liên quan.
- Nghiên cứu phương pháp sử dụng số liệu sóng vô tuyến (số liệu GPSRO và GNSS bề mặt) và sản phẩm mô hình WRF để tính toán một số thông số khí quyển.
- Đánh giá dữ liệu wetPf2 và dữ liệu GNSS ở khu vực Việt Nam bằng cách so sánh với các nguồn dữ liệu dữ liệu thám không vô tuyến, Aeronet, sản phẩm mô hình.
- Sử dụng dữ liệu wetPf2 để nghiên cứu đặc trưng nhiệt, ẩm của khối khí biển trên khu vực Biển Đông (đại diện là khu vực quần đảo Hoàng Sa và quần đảo Trường Sa). Ứng dụng dữ liệu wetPf2 để phân tích cấu trúc các trường khí quyển trong điều kiện thời tiết cực đoan (bão) trên khu vực Biển Đông và lân cận.
- Sử dụng dữ liệu GNSS để tính toán tổng ẩm khí quyển với độ phân giải cao theo thời gian (1 phút) và ứng dụng kết quả tính toán vào nghiên cứu biến trình ngày, sự biến đổi theo thời gian của tổng ẩm khí quyển. Sau đó kết quả tính toán và kết quả

mô phỏng mô hình được sử dụng để nghiên cứu sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển gắn với không khí lạnh ở khu vực Nghĩa Đô.

4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu

Ứng dụng dữ liệu sóng vô tuyến (wetPf2 và GNSS) và kết quả mô hình để nghiên cứu đặc trưng của các thông số khí quyển (nhiệt độ, độ ẩm tương đối, chỉ số khúc xạ khí quyển, tổng ẩm khí quyển).

Phạm vi nghiên cứu

Phạm vi không gian: Khu vực Việt Nam và lân cận trong đó tập trung vào khu vực Biển Đông và khu vực Nghĩa Đô (Hà Nội).

Phạm vi thời gian: 10/2019-9/2023.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Ý nghĩa khoa học của luận án

- Đánh giá được chất lượng của dữ liệu wetPf2 ở khu vực Việt Nam.
- Kết quả nghiên cứu đã làm rõ đặc trưng biến đổi của các trường độ ẩm tương đối, nhiệt độ của khối khí biển trên khu vực quần đảo Hoàng Sa và quần đảo Trường Sa. Kết quả cũng làm rõ cấu trúc các trường nhiệt độ, độ ẩm tương đối, áp suất hơi nước và chỉ số khúc xạ khí quyển ở khu vực Biển Đông trong điều kiện bão hoạt động.

- Đánh giá được chất lượng của tổng ẩm khí quyển với độ phân giải cao tính toán từ dữ liệu GNSS ở khu vực Nghĩa Đô. Làm rõ được biến trình ngày của tổng ẩm khí quyển ở khu vực Nghĩa Đô và sự biến đổi đại lượng này gắn với không khí lạnh, một hình thái thời tiết đặc trưng trong mùa đông ở Miền Bắc nước ta.

Ý nghĩa thực tiễn của luận án

- Kết quả đánh giá chất lượng của dữ liệu COSMIC-2 có thể làm cơ sở cho việc ứng dụng nguồn dữ liệu này trong nghiên cứu khí quyển, khí hậu cũng như công tác dự báo thời tiết, góp phần phòng chống, giảm nhẹ thiên tai ở khu vực Việt Nam.
- Kết quả nghiên cứu cũng làm rõ chất lượng của tổng ẩm khí quyển với độ phân giải cao tính toán từ dữ liệu GNSS tại bề mặt, qua đó góp phần làm tăng hiệu quả sử dụng dữ liệu GNSS tại bề mặt để giám sát diễn biến của một số hiện tượng thời tiết và dự báo thời tiết.

6. Những đóng góp mới của luận án

- Làm rõ được chất lượng của dữ liệu wetPf2 ở khu vực Việt Nam và lân cận. Phân tích rõ được các đặc trưng biến đổi của trường nhiệt độ và độ ẩm tương đối đại diện cho Bắc Biển Đông (khu vực quần đảo Hoàng Sa) và Nam Biển Đông (khu vực quần đảo Trường Sa) và cấu trúc dị thường của một số trường khí quyển trong điều kiện thời tiết cực đoan (bão) ở khu vực Biển Đông và lân cận.

- Tính toán và đánh giá được độ tin cậy của tổng ẩm khí quyển với độ phân giải 1 phút, xác định được biến trình ngày và đặc trưng biến đổi của tổng ẩm khí quyển gắn với không khí lạnh từ dữ liệu GNSS tại khu vực Nghĩa Đô.

Chương 1. TỔNG QUAN VỀ SỬ DỤNG SỐ LIỆU SÓNG VÔ TUYẾN VÀ MÔ HÌNH SỐ TRỊ ĐỂ NGHIÊN CỨU KHÍ QUYỂN

Trong chương này trình bày tổng quan tình hình nghiên cứu, sử dụng số liệu sóng vô tuyến bao gồm số liệu từ phương pháp che khuất vô tuyến (GPSRO) và số liệu từ thiết bị thu tín hiệu hệ thống định vị toàn cầu tại mặt đất (GNSS) và mô hình Nghiên cứu và dự báo thời tiết (WRF) để nghiên cứu đánh giá các thông số khí quyển và các vấn đề liên quan trên thế giới và Việt Nam.

1.1. Tổng quan về sử dụng dữ liệu sóng vô tuyến để nghiên cứu đánh giá các thông số khí quyển

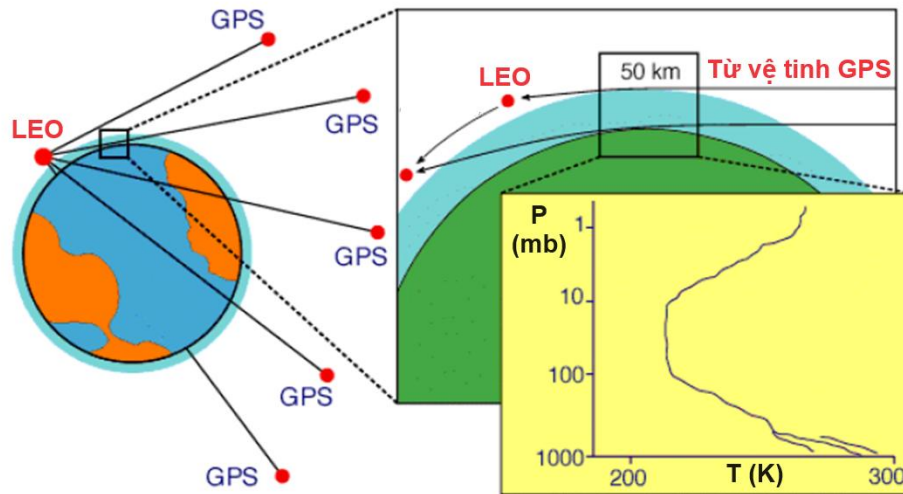
1.1.1. Tổng quan các công trình nghiên cứu ở nước ngoài

Thông tin, dữ liệu khí quyển, thời tiết, khí hậu có vai trò quan trọng đối với đời sống xã hội. Để có được các dữ liệu khí quyển, thời tiết, khí hậu chính xác, kịp thời, hoạt động quan trắc các yếu tố khí quyển, thời tiết, khí hậu ngày càng được quan tâm phát triển. Ngoài các phương pháp quan trắc truyền thống (trạm khí tượng bề mặt, quan trắc thám không vô tuyến), các phương pháp quan trắc khí quyển, thời tiết phi truyền thống ngày càng thông dụng và quan trọng. Với sự phát triển nhanh về công nghệ, phương pháp che khuất vô tuyến (RO) và phương pháp sử dụng thiết bị thu tín hiệu hệ thống định vị toàn cầu (GNSS) tại bề mặt để thám sát khí quyển nằm trong số những phương pháp quan trắc phi truyền thống được sử dụng rộng rãi trên thế giới. Trong đó, phương pháp che khuất vô tuyến sử dụng dữ liệu sóng vô tuyến phát ra từ hệ thống vệ tinh định vị toàn cầu xác định được profile thẳng đứng của các thông số khí quyển. Phương pháp sử dụng thiết bị thu tín hiệu GNSS tại bề mặt xác định được thông số tổng ẩm của khí quyển.

Phương pháp che khuất vô tuyến để xác định các thông số khí quyển

Khi tín hiệu sóng vô tuyến đi qua khí quyển Trái Đất, thành phần pha của nó bị nhiễu loạn liên quan với độ khúc xạ dọc theo đường truyền. Các phép đo đặc sự nhiễu loạn pha này có thể xác định được độ khúc xạ, từ đó tính toán được profile thẳng đứng của các thông số của khí quyển. Phương pháp xác định các thông số khí quyển từ dữ liệu sóng vô tuyến này được gọi là phương pháp che khuất vô tuyến (RO). Trong quá trình di chuyển, vệ tinh quỹ đạo thấp (LEO) liên tục thu nhận tín hiệu truyền đến từ hệ thống vệ tinh định vị toàn cầu, những tín hiệu này sẽ lần lượt đi

qua các độ cao khác nhau của khí quyển Trái Đất. Trên cơ sở sự biến đổi của những tín hiệu sóng vô tuyến này, người ta xác định được profile thẳng đứng của các thông số khí quyển bao gồm: mật độ, áp suất, nhiệt độ, độ ẩm tương đối, độ ẩm tuyệt đối, áp suất hơi nước (Hình 1.1).



Hình 1.1. Mô tả phương pháp che khuất vô tuyến [1].

Phương pháp RO được phát triển, ứng dụng đầu tiên trong dự án Mariners 3 và 4 từ những năm 1960. Khi đó phương pháp này được sử dụng để thăm dò Mặt Trăng và các hành tinh khác trong hệ mặt trời từ Trái Đất [1]. Đến những năm 1995, phương pháp RO đã được phát triển và ứng dụng vào dự án vệ tinh GPS/MET. Profile thẳng đứng của nhiệt độ khí quyển đã được tính từ chỉ số khúc xạ khí quyển trong khoảng từ độ cao 5-7km cho đến độ cao 40km, với độ phân giải theo chiều cao 1km. Độ chính xác lý thuyết của thông số nhiệt độ nhỏ hơn 0.5°C ở đỉnh tầng đối lưu [2]. Sau đó, tác giả [3] đã phát triển và hoàn thiện phương pháp này. Độ phân giải theo phương thẳng đứng của profile các thông số khí quyển đã được tăng lên đến 0.5km.

Vào năm 2001, phương pháp che khuất vô tuyến đã được áp dụng trên Vệ tinh CHAMP để xác định profile thẳng đứng của nhiệt độ khô và độ ẩm tuyệt đối của khí quyển [4]. Cho đến hiện nay phương pháp che khuất vô tuyến đã được ứng dụng cho nhiều dự án như SAC-C [5], GRACE [6], COSMIC/FORMOSAT-3 [7], MetOp [8]. Gần đây nhất, phương pháp RO được ứng dụng xử lý tín hiệu sóng vô tuyến trong dự án COSMIC-2/FORMOSAT-7. Dự án này cung cấp khoảng 5000 profile quan trắc mỗi ngày với các thông tin về độ ẩm, nhiệt độ của khí quyển ở khu vực nhiệt đới

[9]. Dữ liệu quan trắc khí quyển sử dụng phương pháp che khuất vô tuyến được gọi chung là dữ liệu GPSRO.

Độ tin cậy của dữ liệu GPSRO

Sau gần ba thập kỷ phát triển và hoàn thiện, phương pháp che khuất vô tuyến đã được ứng dụng trong nhiều dự án vệ tinh quỹ đạo thấp để quan trắc khí quyển. Đến nay phương pháp này đã cung cấp một lượng số liệu GPSRO rất lớn. Việc đánh giá độc lập chất lượng, độ tin cậy của nguồn số liệu GPSRO trên phạm vi toàn cầu cũng như ở từng khu vực riêng lẻ đã được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu.

Như chúng ta đã biết, số liệu thám không vô tuyến là nguồn dữ liệu quan trắc khí tượng cao không có độ tin cậy nhất hiện nay. Do đó phương pháp đánh giá chất lượng dữ liệu GPSRO bằng cách so sánh với dữ liệu thám không vô tuyến được áp dụng phổ biến nhất. Tác giả [10] đã tiến hành so sánh số liệu thu thập được từ dự án CHAMP với số liệu thám không vô tuyến ở một số khu vực khác nhau trên thế giới. Trong nghiên cứu của mình các tác giả đã sử dụng số liệu CHAMP thu được trong phạm vi cách vị trí thám không vô tuyến 300km và 2h để tiến hành so sánh. Các số liệu này được thu thập trong giai đoạn từ 6/2001 – 3/2004. Trong nghiên cứu, các tác giả đã tiến hành so sánh thông số chỉ số khúc xạ khí quyển (N) thu được từ số liệu CHAMP và giá trị N tính toán từ số liệu thám không vô tuyến và số liệu phân tích của Trung tâm Dự báo hạn vừa Châu Âu (ECMWF) trong độ cao từ 5km đến 25km. Kết quả cho thấy giá trị độ lệch trung bình là 0,18% ở khu vực Australia và 0,19% ở khu vực Trung Quốc. Giá trị độ lệch trung bình của 3 khu vực khác là 0,82% (Ấn Độ), 0,30% (LB Nga) và 0,26% (Nhật Bản). Theo các tác giả, dữ liệu CHAMP có độ chính xác cao đủ để phân biệt sự khác biệt về hiệu suất giữa các loại máy thám không vô tuyến khác nhau. Sự khác biệt tương ứng về chỉ số khúc xạ giữa dữ liệu CHAMP và dữ liệu phân tích ECMWF nhỏ hơn sự khác biệt về chỉ số khúc xạ giữa dữ liệu CHAMP và dữ liệu thám không vô tuyến. Phương pháp RO có thể là một phương pháp giám sát khí hậu tốt [10].

Việc đánh giá độ tin cậy cũng được thực hiện với một nguồn dữ liệu GPSRO khác là dữ liệu COSMIC trên phạm vi toàn cầu. Số liệu profile thẳng đứng của nhiệt độ, độ ẩm, chỉ số khúc xạ khí quyển của dữ liệu COSMIC được so sánh với số liệu thám không vô tuyến trong khoảng thời gian từ 4/2008 đến 10/2009. Các tác giả đã

lựa chọn điều kiện so sánh giữa hai loại số liệu là các thám sát cách nhau $\leq 6h$ và $\leq 250km$. Kết quả cho thấy, trong tầng đối lưu từ mực 850hPa đến mực 200hPa, độ lệch chuẩn của sai số trung bình trên toàn cầu đối với thông số nhiệt độ là 0,35K (3h) và 0,42K (100km), độ ẩm tương đối là 3,3% (3h) và 3,1% (100km), chỉ số khúc xạ là 0,33% (3h) và 0,36% (100km) [11].

Một công trình khác đánh giá chất lượng dữ liệu COSMIC trên phạm vi toàn cầu bằng cách so sánh các trường nhiệt độ không khí, độ ẩm tuyệt đối và áp suất hơi nước của dữ liệu COSMIC với dữ liệu thám không vô tuyến trong khoảng thời gian 4 năm từ 2007 đến 2010. Trong khoảng thời gian này, những cặp thám sát thỏa mãn điều kiện khoảng cách giữa thám sát COSMIC với vị trí trạm thám không vô tuyến theo phương ngang là $\leq 100km$ và sai khác theo thời gian $\leq 1h$. Các đặc trưng thống kê sai số trung bình và độ lệch chuẩn của sai số đối với dữ liệu trong lớp khí quyển từ mực 925hPa đến 10hPa đã được phân tích. Kết quả cho thấy, số liệu nhiệt độ của COSMIC phù hợp tốt với số liệu thám không vô tuyến. Sai số trung bình toàn cầu là -0,09K và độ lệch chuẩn là 1,72K. Sai số trung bình toàn cầu của độ ẩm tuyệt đối trong lớp không khí từ độ cao mực 925hPa đến 200hPa là -0,012g/kg với độ lệch chuẩn là 0,666g/kg. Sai số tương đối của áp suất riêng hơi nước là 33,3% và độ lệch chuẩn là 107,5% [12].

Bên cạnh việc đánh giá chất lượng dữ liệu GPSRO trên phạm vi toàn cầu, dữ liệu này cũng được đánh giá chất lượng ở phạm vi khu vực. Tác giả [13] đã tiến hành so sánh chỉ số khúc xạ khí quyển thu được từ số liệu COSMIC và kết quả tính từ số liệu thám không vô tuyến trên khu vực Australia và Nam Cực. Trong công trình này, các tác giả đã sử dụng số liệu thám không vô tuyến tại 38 trạm và số liệu COSMIC trong khoảng thời gian một năm từ 15/7/2006 đến 15/7/2007. Các tác giả đã tiến hành phân chia thành các tổ hợp khác nhau giữa số liệu COSMIC và số liệu thám không vô tuyến với điều kiện khác biệt theo không gian ($\leq 100km$, $\leq 200km$, $\leq 300 km$) và khác biệt theo thời gian ($\leq 1h$, $\leq 2h$, $\leq 3h$). Kết quả cho thấy giá trị sai số trung bình của chỉ số khúc xạ khí quyển trên tất cả các mực độ cao và tập số liệu của các tổ hợp tương ứng đều $< 0,19\%$ [13].

Một nghiên cứu khác đã thực hiện đánh giá độ tin cậy của dữ liệu GPSRO thu được từ CHAMP và COSMIC ở khu vực Australia. Trong đó, số liệu profile nhiệt độ

khí quyển thu thập được từ hệ thống CHAMP (từ 5/2001 đến 10/2008) và COSMIC (từ 7/2006 đến 12/2009) được so sánh với số liệu đo đạc tại 38 trạm thám không vô tuyến của Australia. Tác giả đưa ra điều kiện lựa chọn tập mẫu để so sánh là các thám sát GPSRO cách trạm thám không vô tuyến $\leq 100\text{km}$, $\leq 200\text{km}$, $\leq 300\text{km}$ và theo thời gian $\leq 1\text{h}$, $\leq 2\text{h}$, $\leq 3\text{h}$ tạo thành 9 tổ hợp so sánh. Đặc trưng thống kê được sử dụng để phân tích là sai số trung bình và độ lệch chuẩn của sai số được tính trung bình cho 16 mức áp suất khác nhau. Kết quả cho thấy sai số nhiệt độ trung bình giữa dữ liệu CHAMP và thám không vô tuyến là $0,39^\circ\text{C}$ (với độ lệch chuẩn của sai số là $1,20^\circ\text{C}$) và giữa dữ liệu COSMIC và dữ liệu thám không vô tuyến là $0,37^\circ\text{C}$ (với độ lệch chuẩn là $1,24^\circ\text{C}$). Theo các tác giả, dữ liệu CHAMP và COSMIC phù hợp tốt với số liệu thám không vô tuyến [14].

Ngoài khu vực Australia, dữ liệu GPSRO cũng được đánh giá chất lượng ở khu vực Trung Quốc. Các tác giả đã so sánh số liệu profile một số thông số khí quyển của COSMIC với số liệu thám không vô tuyến quan trắc tại 120 trạm trong khu vực trong giai đoạn 2014 – 2015. Trong nghiên cứu này, đại lượng thống kê sai số trung bình từ 0 đến độ cao 40km của các thông số nhiệt độ, chỉ số khúc xạ, áp suất và áp suất hơi nước được sử dụng để đánh giá. Kết quả cho thấy sai số trung bình của nhiệt độ, áp suất và áp suất hơi nước tương ứng là $-0,10\text{K}$, $0,69\text{hPa}$ và $-0,01\text{hPa}$. Đối với trường hợp chỉ số khúc xạ khí quyển sai số trung bình là 0.17N . Theo các tác giả, sai số của nhiệt độ có tương quan dương với độ cao của trạm, trong khi sai số áp suất và áp suất hơi nước là tương quan âm với vĩ độ của trạm. Sai số tăng lên ở khu vực cao nguyên Tây Tạng có thể liên quan đến địa hình phức tạp của khu vực này và những hạn chế trong điều kiện mặt đệm của mô hình tính toán profile của COSMIC. Sai số chỉ số khúc xạ giữa số liệu COSMIC và số liệu thám không vô tuyến có giá trị âm ở phía dưới 5km và giá trị lớn ở khu vực ẩm ướt phía nam Trung Quốc, với giá trị $<1\%$. Điều này có thể liên quan đến điều kiện ẩm ướt và siêu khúc xạ [15].

Việc đánh giá chất lượng dữ liệu GPSRO cũng được thực hiện thông qua so sánh giữa số liệu COSMIC của trung tâm UCAR và trung tâm JPL với dữ liệu tái phân tích ERA-Interim, MERRA và AIRS. Kết quả cho thấy dữ liệu độ ẩm tuyệt đối từ COSMIC có sự phù hợp cao đối với các nguồn dữ liệu ERA-Interim, MERRA và AIRS, dữ liệu COSMIC nắm bắt được tương tự về độ lớn và hình dạng của các biến

đôi của độ ẩm tuyệt đối trung bình của từng đới trong từng tháng và dị thường giữa các năm trên quy mô thời gian hàng năm và giữa các năm. Theo các tác giả, các quan trắc GPSRO có thể được sử dụng như một biến khí hậu, nhưng cần phải phân tích kỹ lưỡng hơn để đánh giá sự sai khác giữa các nguồn dữ liệu của từng trung tâm (UCAR và JPL) với dữ liệu gốc [16].

Vào năm 2019, Đài Loan (Trung Quốc) đã hợp tác với Hoa Kỳ để phóng hệ thống vệ tinh COSMIC-2. Hệ thống này là hệ thống vệ tinh đầu tiên sử dụng phương pháp RO tập trung thám sát khí quyển ở khu vực nhiệt đới của Trái Đất [17]. So với các dữ liệu GPSRO khác, COSMIC-2 có tỉ số tín hiệu so với nhiễu cao hơn, điều này làm cho tỉ lệ phần trăm profile đạt đến bề mặt đất trong vùng nhiệt đới ẩm cao hơn. Các đánh giá ban đầu cho thấy sai số của góc lệch đường truyền và khúc xạ giữa dữ liệu COSMIC-2 với dữ liệu thám không vô tuyến, kết quả dự báo hạn ngắn và dữ liệu tái phân tích MERRA-2 trong lớp từ độ cao 2km đến 40km là rất nhỏ [9].

Số liệu COSMIC-2 cũng được đánh giá độ tin cậy trên phạm vi toàn cầu. Dữ liệu GPSRO của COSMIC-2 được xử lý bởi hai tổ chức UCAR và NOAA đã được đánh giá bằng cách so sánh yếu tố nhiệt độ và độ ẩm tuyệt đối từ hai nguồn dữ liệu này với dữ liệu thám không vô tuyến (loại RS41 và loại RS92). Kết quả cho thấy sự khác biệt nhiệt độ giữa kết quả xử lý của UCAR và NOAA dao động trong khoảng $\sim 0,1K-0,2K$ ở độ cao từ 8km đến 11km. So sánh giữa dữ liệu COSMIC-2 từ UCAR và loại thiết bị RS41 cho thấy, sai số nhiệt độ trung bình là $0,22K$ (tại độ cao từ 8km đến 11km) và $0,00K$ (tại độ cao từ 12,5km đến 16,5km) với độ lệch chuẩn tương ứng là $0,95K$ và $1,10K$. Sai số trung bình độ ẩm tuyệt đối là $-0,28g/kg$ (tại độ cao dưới 4,2km) và $0,01g/kg$ (độ cao từ 4,8km đến 8,4km) với độ lệch chuẩn là $1,24g/kg$ và $0,5g/kg$. Tương tự như vậy với loại thiết bị RS92, sai số nhiệt độ là $0,16K$ (tại độ cao từ 8km đến 11km) và $-0,01K$ (tại độ cao từ 12,5km đến 16,5km) với độ lệch chuẩn tương ứng là $0,93K$ và $1,09K$. Sai số trung bình độ ẩm tuyệt đối là $-0,21g/kg$ (tại độ cao dưới 4,2km) và $0,05g/kg$ (tại độ cao từ 4,8km đến 8,4km) với độ lệch chuẩn là $1,25g/kg$ và $0,58g/kg$. So sánh giữa dữ liệu COSMIC-2 từ NOAA và loại thiết bị RS41 cho thấy, sai số nhiệt độ trung bình là $0,39K$ (tại độ cao từ 8km đến 11km) và $-0,04K$ (tại độ cao từ 12,5km đến 16,5km) với độ lệch chuẩn tương ứng là $1,13K$ và $1,19K$. Sai số độ ẩm tuyệt đối trung bình là $-0,33g/kg$ (tại độ cao dưới 4,2km) và

0,01g/kg (tại độ cao từ 4,8km đến 8,4km) với độ lệch chuẩn là 1,33g/kg và 0,54g/kg. Tương tự đối với loại thiết bị RS92, sai số nhiệt độ trung bình là 0,35K (tại độ cao từ 8km đến 11km) và -0,01K (tại độ cao từ 12,5km đến 16,5km) với độ lệch chuẩn tương ứng là 1,14K và 1,18K. Sai số độ ẩm tuyệt đối trung bình là -0,23g/kg (tại độ cao dưới 4,2km) và 0,06g/kg (tại độ cao từ 4,8km đến 8,4km) với độ lệch chuẩn là 1,37g/kg và 0,63g/kg. Việc so sánh số liệu GPSRO (tính từ UCAR và NOAA) và số liệu thám không vô tuyến giúp chúng ta có thể đánh giá định lượng về mức độ chênh lệch nhiệt độ và độ ẩm giữa các loại thiết bị thám không vô tuyến khác nhau và các thuật toán tính toán RO khác nhau [18].

Dữ liệu COSMIC-2 cũng được đánh giá ở khu vực gió mùa mùa hè châu Á, yêu tố nhiệt độ và độ ẩm tương đối của COSMIC-2 được so sánh với dữ liệu thám không vô tuyến trong khu vực. Theo các tác giả, profile nhiệt độ của COSMIC-2 và thám không vô tuyến có sự thống nhất rất tốt, chênh lệch trung bình tuyệt đối nhỏ hơn 0,5K với độ lệch chuẩn nhỏ hơn 2,5 K. Chênh lệch trung bình của độ ẩm tương đối giữa hai nguồn dữ liệu là 10% với độ lệch chuẩn dao động 15–20%. Cũng theo các tác giả, những kết quả này chỉ ra rằng các profile của COSMIC-2 có độ chính xác cao và có phạm vi bao phủ toàn cầu tốt, đặc biệt là ở các vùng nhiệt đới và cận nhiệt đới [19].

Gần đây một công trình khác đã đánh giá chất lượng dữ liệu COSMIC-2 bằng cách so sánh với dữ liệu thám không vô tuyến, trong đó các tác giả đã phân chia thành khu vực vĩ độ thấp và khu vực vĩ độ cao. Kết quả cho thấy, sự chênh lệch profile nhiệt độ giữa dữ liệu COSMIC-2 và dữ liệu bóng thám không tương đối nhỏ giữa các vĩ độ với sai số quân phương thay đổi ít theo độ cao. Đối với profile độ ẩm tương đối, dưới mực 700mb, độ lệch chủ yếu có giá trị âm. Độ lệch chuyển thành dương ở trên độ cao này. Sai số quân phương tăng nhanh trên mực 400hPa, đã cho thấy độ lệch dương đáng kể giữa profile ẩm của dữ liệu COSMIC-2 và thám không vô tuyến ở các độ cao này [20].

Các nghiên cứu trước đây đã cho thấy rằng số liệu GPSRO được đánh giá chủ yếu bằng cách so sánh với nguồn số liệu quan trắc thám không vô tuyến, ngoài ra dữ liệu này có thể được so sánh với dữ liệu tái phân tích và một số nguồn dữ liệu khác. Các yếu tố được sử dụng để đánh giá là chỉ số khúc xạ, nhiệt độ, độ ẩm tương đối, độ

âm tuyệt đối và áp suất hơi nước. Trong số các nguồn dữ liệu GPSRO, dữ liệu COSMIC-2 là nguồn dữ liệu có độ phân giải không gian và thời gian cao nhất ở khu vực nhiệt đới.

Sử dụng dữ liệu GPSRO để nghiên cứu đặc trưng biến đổi của các thông số khí quyển

Hiện nay, số liệu GPSRO đã được sử dụng nhiều trong nghiên cứu và dự báo trong lĩnh vực khí tượng. Số liệu này được đồng hóa vào dữ liệu đầu vào của mô hình số trị và đã cải thiện kỹ năng dự báo của mô hình. Dữ liệu GPSRO được đồng hóa vào hệ thống đồng hóa dữ liệu toàn cầu của NCEP, nó đã cải thiện đáng kể kỹ năng tương quan dị thường và làm giảm sai số và RMSE [21]. Đối với dự báo bão ở khu vực Tây Bắc Thái Bình Dương, đồng hóa dữ liệu GPSRO đã cải thiện sai số dự báo quỹ đạo của bão [22]. Dữ liệu GPSRO cũng được sử dụng để nghiên cứu cấu trúc nhiệt trong bão [23, 24], sự biến đổi của nhiệt độ và độ ẩm ở một số khu vực [25].

Với độ phân giải theo chiều cao là 100m, dữ liệu nhiệt độ từ COSMIC được sử dụng để xác định độ cao đỉnh mây và cấu trúc nhiệt ở khu vực này trong điều kiện bão. Độ cao đỉnh mây được so sánh với dữ liệu vệ tinh CALIOP. Kết quả cho thấy tương quan giữa độ cao đỉnh mây xác định từ vệ tinh CALIOP và từ số liệu COSMIC có giá trị cao (khoảng 0,84), sai số khoảng 500m và độ lệch chuẩn khoảng 1km. Khi phân tích cấu trúc nhiệt, tác giả thấy có sự tồn tại của dị thường nhiệt độ dương ở khu vực giữa tầng đối lưu, dị thường nhiệt độ âm ở lớp phía trên. Nghịch nhiệt mạnh xuất hiện tại khu vực đỉnh mây bão [23]. Một công trình khác cũng sử dụng dữ liệu COSMIC để nghiên cứu cấu trúc nhiệt trong bão cho thấy, dị thường dương của nhiệt độ tồn tại trong lớp độ cao từ 5km đến 15km ở khu vực tâm bão. Khu vực dị thường âm của nhiệt độ tồn tại trong lớp có độ cao >15km ở gần tâm bão [24].

Một công trình nghiên cứu khác đã sử dụng số liệu nhiệt độ và độ ẩm từ dữ liệu GPSRO và số liệu GPS mặt đất để phân tích các biến đổi của thông số khí tượng ở khu vực Australia. Sự biến đổi của nhiệt độ và độ ẩm ở các vùng khí hậu khác nhau (Ấn Độ Dương, Thái Bình Dương, Nam Cực và Australia) đã được xem xét dựa trên số liệu GPSRO và số liệu thám không vô tuyến. Các xu thế của nhiệt độ khí quyển trên khu vực Nam Cực dựa trên chuỗi số liệu RO và thám không vô tuyến đã được phân tích, kết quả cho thấy có sự làm lạnh mạnh ở phía dưới của tầng bình lưu và sự

nóng lên trong tầng đối lưu phía trên Nam Cực đã được xác nhận, điều này phù hợp với kết quả của mô hình khí hậu [25].

Sử dụng dữ liệu GNSS để tính toán tổng ẩm khí quyển

Một phương pháp khác sử dụng tín hiệu sóng vô tuyến phát ra từ vệ tinh GNSS để nghiên cứu, thám sát khí quyển là xử lý tín hiệu thu được từ các trạm thu GNSS tại mặt đất. Tín hiệu GNSS bị trễ do ảnh hưởng của bầu khí quyển khi truyền từ vệ tinh GNSS đến thiết bị thu tại mặt đất. Điều này dẫn đến việc kéo dài đường hình học của đường truyền, thường được gọi là độ trễ tầng đối lưu. Từ tín hiệu sóng vô tuyến thu được từ thiết bị thu mặt đất, người ta xác định được độ trễ thiên đỉnh tổng cộng (ZTD) của tầng đối lưu và độ trễ thiên đỉnh ẩm (ZWD), từ đó sẽ tính toán được tổng ẩm khí quyển của tầng đối lưu. Phương pháp này được giới thiệu từ những năm 1990s của thế kỷ trước [26].

Đến nay, rất nhiều các phương pháp, kỹ thuật và phần mềm đã được phát triển để tính toán độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu và tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu GPS. Trong đó, phương pháp định vị điểm chính xác PPP là một trong những phương pháp xử lý dữ liệu GPS để xác định thông số ZTD thông dụng nhất hiện nay. Phương pháp PPP sử dụng dữ liệu GPS kết hợp với dữ liệu quỹ đạo và đồng hồ của Dịch vụ GPS quốc tế (IGS) để tính toán ZTD. Phương pháp này tính toán ZTD với độ chính xác đến xen-ti-met [27]. Việc áp dụng phương pháp PPP cho phép xác định được ZTD và tổng ẩm khí quyển gần thời gian thực. Tác giả [28] đã nghiên cứu tính toán tổng ẩm khí quyển gần thời gian thực từ dữ liệu trạm GNSS mặt đất ở Áo sử dụng phương pháp PPP. Giá trị tổng ẩm khí quyển được xác định từ dữ liệu trạm GNSS bề mặt với độ phân giải theo thời gian là 1h và trễ so với thời gian thực là <1h [28].

Tác giả [29] đã tính toán thông số ZTD gần thời gian thực từ dữ liệu của 22 trạm GPS bề mặt phân bố trên toàn thế giới. Trong nghiên cứu này các tác giả sử dụng phần mềm BKG Ntrip Client để xử lý dữ liệu GPS. Kết quả ZTD tính toán từ 22 trạm có giá trị phù hợp với sản phẩm của IGS và thám không vô tuyến. Sai số trung bình giữa ZTD tính toán với sản phẩm của IGS là 0,21cm và với sản phẩm từ thám không vô tuyến là từ 1-2cm.

Độ tin cậy của dữ liệu TPW tính toán từ dữ liệu GNSS bề mặt

Dữ liệu GNSS được sử dụng để tính toán tổng ẩm khí quyển ngày càng thông dụng trên thế giới nên việc đánh giá dữ liệu này cũng được nhiều tác giả quan tâm nghiên cứu. Thông thường các dữ liệu này có thể được so sánh với kết quả tính toán từ số liệu thám không vô tuyến. Với chuỗi số liệu thu thập được trong 02 tháng (tháng 11-12 năm 1995) ở hai trạm Cape Grim và Hobart, kết quả so sánh dữ liệu tổng ẩm khí quyển với dữ liệu thám không vô tuyến cho thấy giá trị sai số trung bình là 0,3mm, độ lệch chuẩn là 2,7mm, sai số bình phương trung bình là 1,5mm [30].

Số liệu tổng ẩm khí quyển xác định từ dữ liệu GPS cũng được so sánh với số liệu thám không vô tuyến tại các khu vực Pháp, Argentina, Algeria. Tác giả [31] đã so sánh dữ liệu tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GPS với kết quả tính từ dữ liệu thám không vô tuyến. Khi so sánh giữa dữ liệu tính từ GPS và dữ liệu thám không vô tuyến đã cho thấy giá trị tổng ẩm tính từ dữ liệu GPS lớn hơn so với kết quả tính từ dữ liệu thám không vô tuyến. Sự khác biệt vào thời gian ban đêm là <0,5mm và tăng đến 2mm vào thời gian ban ngày [31].

Tại Argentina, số liệu tổng ẩm khí quyển được xác định bằng 3 phương pháp khác nhau (sử dụng mô hình nhiệt độ trung bình của Bevis, Sapucci và dữ liệu tái phân tích) từ chuỗi số liệu 1 năm (2006 – 2007) tại 3 trạm GPS liên tục. Sau đó các kết quả được so sánh với giá trị tính toán từ số liệu thám không vô tuyến. Kết quả cho thấy, sai số trung bình giữa hai nguồn số liệu này dao động trong khoảng từ -1,21mm đến 0,87mm và độ lệch chuẩn dao động từ 1,50mm đến 2,72mm [32].

Cũng như khu vực Argentina, tại Algeria, số liệu GPS liên tục tại 3 trạm (Algiers, Bechar, Tamanrasset) đã được sử dụng để xác định tổng ẩm khí quyển bằng 3 phương pháp khác nhau (nhiệt độ trung bình từ ERA-Interim, Bevis và Boutiouta). So sánh với dữ liệu thám không vô tuyến cho thấy sai số quân phương tương ứng tại thời điểm 12Z dao động trong khoảng 0,92mm đến 3,34mm và giá trị sai số này dao động từ 1,35mm đến 4,07mm tại thời điểm 00Z [33].

Bên cạnh việc đánh giá chất lượng số liệu tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS bằng cách so sánh với sản phẩm từ dữ liệu thám không vô tuyến, số liệu này còn được đánh giá bằng cách so sánh với dữ liệu tái phân tích. Tại khu vực Ấn Độ, số liệu tổng ẩm khí quyển được xác định từ dữ liệu GPS liên tục tại 18 trạm trong thời gian 3/2013 đến 02/2014 đã được đánh giá bằng cách so sánh với dữ liệu tái phân

tích ERA-I của Trung tâm Dự báo hạn vừa Châu Âu. Kết quả cho thấy sai số quân phương (RMSE) giữa hai nguồn dữ liệu này là 7,7mm, giá trị sai số này nhỏ hơn 20% giá trị trung bình [34].

Số liệu tổng ẩm khí quyển xác định từ dữ liệu GPS cũng được đánh giá chất lượng bằng cách so sánh với dữ liệu tái phân tích ở khu vực Algeria. Kết quả cho thấy sai số quân phương của kết quả tổng ẩm khí quyển tính từ ba phương pháp khác nhau với số liệu tổng ẩm khí quyển của ERA-Interim dao động trong khoảng từ 1,39mm đến 2,88mm (tại thời điểm 12Z) và từ 1,94mm đến 3,12mm (tại thời điểm 0Z) [33].

Một phương pháp khác được áp dụng để đánh giá chất lượng số liệu tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu GPS là so sánh với số liệu quan trắc từ thiết bị vi sóng (MWR). Khi so sánh số liệu tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GPS và kết quả quan trắc từ MWR tại Pháp cho thấy sai số trung bình giữa hai nguồn số liệu này đạt khoảng 1mm vào thời gian ban ngày và khoảng 0,2mm vào thời gian ban đêm [31]. Tại khu vực Australia, sai số quân phương giữa số liệu tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu GPS và kết quả quan trắc từ thiết bị vi sóng là 1,4mm [30].

Nhìn chung các công trình nghiên cứu trước đây đều cho thấy tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS bề mặt có sự phù hợp tốt với các loại dữ liệu khác như thám không vô tuyến, số liệu tái phân tích và kết quả quan trắc từ thiết bị vi sóng.

Sử dụng phần mềm CSRS-PPP để xử lý dữ liệu GNSS

Như đã đề cập ở bên trên, phương pháp định vị điểm chính xác (PPP) là một trong những phương pháp thông dụng nhất để xác định độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu từ dữ liệu GNSS bề mặt. Một trong những ưu điểm nổi bật là phương pháp này cho phép xác định được thông số độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu chỉ cần sử dụng dữ liệu từ một trạm GNSS bề mặt. Hiện nay, phương pháp PPP được ứng dụng trong nhiều phần mềm xử lý tín hiệu GNSS khác nhau. Một trong những phần mềm nổi tiếng áp dụng phương pháp này là phần mềm trực tuyến CSRS-PPP của Cơ quan Tài nguyên Thiên nhiên Canada [35].

Năm 2003, Phòng Khảo sát trắc địa của Cơ quan Tài nguyên Canada đã giới thiệu phần mềm CSRS-PPP. Phần mềm này là một phần mềm xử lý dữ liệu GNSS trực tuyến. Phần mềm trực tuyến CSRS-PPP cho phép người dùng tính toán được độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu bằng việc sử dụng dữ liệu từ một trạm GNSS bề mặt [36].

Vào tháng 10/2020, phần mềm trực tuyến CSRS_PPP đã được nâng cấp lên phiên bản 3 [37]. Phần mềm trực tuyến CSRS-PPP đã được sử dụng rộng rãi trên thế giới để tính toán độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu và tổng ẩm khí quyển. Tác giả [38] đã tiến hành sử dụng bốn phần mềm trực tuyến CSRS-PPP, APPS, GAPS, Magic-PPP để tính toán độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu từ dữ liệu của 23 trạm IGS trên toàn thế giới. Dữ liệu độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu tính toán đã được đánh giá bằng cách so sánh với sản phẩm từ IGS. Kết quả cho thấy độ chính xác của số liệu độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu xác định từ dữ liệu GNSS đạt đến 1-2cm. Theo tác giả, giá trị độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu tính từ phần mềm CSRS-PPP phù hợp với sản phẩm của IGS [38].

Phần mềm này cũng được sử dụng để tính toán ZTD từ dữ liệu của 400 trạm GNSS trên toàn thế giới. Giá trị tính toán ZTD đã được so sánh với sản phẩm tương ứng của IGS. Kết quả cho thấy ZTD tính từ phần mềm trực tuyến CSRS-PPP có giá trị rất sát với sản phẩm từ IGS [39].

Phần mềm trực tuyến CSRS-PPP cũng được ứng dụng để xác định độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu tại nhiều khu vực khác. Tác giả [40] đã sử dụng bốn phần mềm trực tuyến trong đó có phần mềm CSRS-PPP để tính toán ZTD cho khu vực Ai Cập. Kết quả so sánh với giá trị của IGS cho thấy ZTD tính toán từ phần mềm trực tuyến CSRS-PPP phù hợp tốt với sản phẩm của IGS, giá trị sai số bình phương trung bình (RMSE) là <17mm [40].

Tại khu vực Iran, các tác giả [35] đã sử dụng phần mềm trực tuyến CSRS-PPP để tính toán ZTD trên chuỗi số liệu của 46 trạm trong khoảng thời gian 8 ngày. Kết quả cho thấy ZTD tính từ CSRS-PPP có sự phù hợp rất cao với kết quả ZTD tính từ phần mềm GAMIT. Hệ số tương quan, sai số quân phương RMSE, sai số trung bình giữa hai số liệu này tương ứng là 0,976, 3,38mm và 0,42mm [35].

Đối với khu vực Ấn Độ, phần mềm trực tuyến CSRS-PPP đã được sử dụng để tính toán ZTD và tổng ẩm khí quyển. Tổng ẩm khí quyển xác định từ dữ liệu GPS được so sánh với sản phẩm từ dữ liệu thám không vô tuyến. Kết quả cho thấy hệ số tương quan của tổng ẩm khí quyển giữa hai nguồn dữ liệu này đạt 0,872 và sai số quân phương RMSE đạt 4,6261mm. Kết quả cho thấy có sự phù hợp cao giữa 2 nguồn số liệu này [41].

Gần đây, phần mềm trực tuyến CSRS-PPP được sử dụng để tính toán tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu GNSS cho khu vực sa mạc Atacama (Chile) trong khoảng thời gian từ tháng 04/2021-04/2022. Trường hợp chỉ sử dụng riêng dữ liệu GNSS thì kết quả tổng ẩm khí quyển tính toán được có sai số hệ thống lên đến 1,08mm. Khi kết hợp dữ liệu GNSS với dữ liệu khí áp tại bề mặt thì kết quả tổng ẩm khí quyển có sai số hệ thống -0,05mm [42].

Nhìn chung phần mềm trực tuyến CSRS-PPP đã được ứng dụng để xử lý dữ liệu GNSS mặt đất ở nhiều khu vực khác nhau trên thế giới. Các nghiên cứu cho thấy kết quả độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu và tổng ẩm khí quyển tính toán được từ dữ liệu GNSS sử dụng phần mềm trực tuyến CSRS-PPP có sự phù hợp tốt với sản phẩm từ các nguồn dữ liệu khác (thám không vô tuyến, IGS, dữ liệu tái phân tích) và kết quả của các phần mềm khác (GAMIT).

Sử dụng dữ liệu GNSS bề mặt để nghiên cứu đặc trưng biến đổi của các thông số khí quyển

Như đề cập ở bên trên, các nghiên cứu cho thấy việc sử dụng dữ liệu trạm GNSS bề mặt để tính toán giá trị tổng ẩm khí quyển cho kết quả tin cậy và phù hợp với các nguồn dữ liệu độc lập khác. Với chất lượng tốt như vậy, dữ liệu GNSS tại bề mặt đã được sử dụng để nghiên cứu đặc trưng khí hậu của tổng ẩm khí quyển tại một khu vực nhất định. Dữ liệu từ mạng lưới 33 trạm GPS bề mặt trong khoảng thời gian 10 năm đã được sử dụng để nghiên cứu sự ổn định và xu thế biến đổi của tổng ẩm khí quyển trên khu vực Thụy Điển và Phần Lan. Kết quả cho thấy xu thế biến đổi tuyến tính của tổng ẩm khí quyển trong một thập kỷ tại mỗi trạm dao động từ 0,2 kg/m² /thập kỷ - 1,0kg/m² /thập kỷ [43].

Dữ liệu GPS cũng được sử dụng để nghiên cứu đặc trưng biến đổi của tổng ẩm khí quyển trong khu vực Vịnh Cadiz (khu vực Tây Nam của Tây Ban Nha). Trên cơ sở chuỗi số liệu 5 năm, nghiên cứu này đã cung cấp đặc trưng dài hạn đầu tiên của tổng ẩm khí quyển ở khu vực Tây Nam của Châu Âu. Kết quả tính toán trung bình tháng nhiều năm cho thấy tổng ẩm khí quyển của khu vực này biến đổi theo mùa với giá trị cực đại (26mm) vào mùa hè và cực tiểu (14mm) vào mùa đông [44].

Bên cạnh việc sử dụng dữ liệu GNSS bề mặt để nghiên cứu xu thế và đặc trưng biến đổi của tổng ẩm khí quyển theo thời gian, dữ liệu này còn được sử dụng để

nghiên cứu đặc trưng biến đổi theo không gian của tổng ẩm khí quyển. Trên cơ sở dữ liệu quan trắc tại 125 trạm GNSS bề mặt ở Ba Lan và khu vực lân cận, các tác giả [45] đã xây dựng được phân bố 2 chiều và 3 chiều của tổng ẩm khí quyển ở khu vực này. Phân bố ba chiều của tổng ẩm khí quyển tính toán từ GNSS có phân bố phù hợp với đầu ra của mô hình dự báo số trị (NWP) [45].

Các trạm GNSS tại bề mặt thu nhận tín hiệu từ hệ thống vệ tinh định vị toàn cầu liên tục nên khi mật độ trạm GNSS tại bề mặt đủ dày sẽ cho phép xác định được các giá trị độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu và tổng ẩm khí quyển có độ phân giải cao theo không gian và thời gian. Trong trường hợp này, dữ liệu GNSS có thể được sử dụng để giám sát một số hiện tượng thời tiết. Theo [46], ưu điểm của việc sử dụng công nghệ GNSS mặt đất là nó có khả năng cung cấp các quan trắc liên tục về tổng ẩm khí quyển trước, trong và sau các sự kiện mưa với độ phân giải rất cao theo thời gian. Độ phân giải theo không gian phụ thuộc vào vị trí địa lý và mật độ trạm GNSS mặt đất. Để có được khả năng giám sát sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển tốt hơn theo không gian đòi hỏi một mạng lưới trạm thu dày đặc. Do đó, những trạm GNSS mặt đất có thể giúp mô tả được đặc điểm của các sự kiện mưa, phương pháp này không thể trực tiếp dự báo lượng mưa, nhưng nó có thể mô tả được sự phân bố của hơi nước trong khí quyển bao gồm cả những biến đổi ngắn hạn [46]. Trên cơ sở tổng ẩm khí quyển tính toán được từ dữ liệu của 15 trạm GPS mặt đất tại khu vực Victoria (Australia), Tác giả [25] đã theo dõi được sự di chuyển của front trong khu vực này thông qua sự tương phản của giá trị tổng ẩm khí quyển giữa các trạm [25].

Dữ liệu GNSS từ 38 trạm GNSS mặt đất được sử dụng để giám sát sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển trong một số đợt mưa lớn ở khu vực Địa Trung Hải của Tây Ban Nha. Sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển theo không gian và thời gian đã được phân tích. Kết quả cho thấy mức độ tăng trung bình của tổng ẩm khí quyển đạt khoảng 30kg/m^2 trước khi có hiện tượng mưa lớn. Một số trạm có tổng ẩm khí quyển tăng đến 100%. Các tác giả cũng cho rằng sự biến động của tổng ẩm khí quyển có tương quan tốt đến lượng mưa, sự tăng của tổng ẩm khí quyển kết hợp với sự giảm áp suất có thể được sử dụng làm dấu hiệu để dự báo mưa lớn ở khu vực này [47].

Tại Ấn Độ, dữ liệu GNSS mặt đất cũng được sử dụng để nghiên cứu sự biến đổi của độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu trong một số sự kiện mưa ở khu vực Kerala.

Kết quả cho thấy độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu thường tăng lên đến cực đại trước khi xuất hiện mưa lớn. Thời điểm độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu đạt cực đại trước khi xuất hiện mưa lớn một khoảng thời gian từ 5:45 giờ đến 6:45 giờ. Trong khoảng thời gian có mưa lớn, giá trị độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu dao động trong khoảng từ 2,65m đến 2,75m [41].

Tại khu vực Đông Nam Á, việc nghiên sử dữ liệu GNSS để tính toán tổng ẩm khí quyển cũng đã được một số tác giả quan tâm nghiên cứu. Các tác giả [48] đã nghiên cứu biến đổi của tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu các trạm GNSS CORS của Thái Lan. Dữ liệu GPS cũng được sử dụng để nghiên cứu sự phân bố theo không gian của các biến động theo mùa, hằng năm và nửa năm của tổng ẩm khí quyển ở khu vực Sumatra (Indonesia) [49]. Tại Philippines, dữ liệu GNSS được sử dụng để nghiên cứu sự biến đổi theo thời gian của tổng ẩm khí quyển trong những ngày mưa [50].

Các nghiên cứu trên thế giới đã cho thấy chuỗi dữ liệu GNSS mặt đất đủ dài có thể sử dụng tốt cho nghiên cứu đặc trưng biến đổi theo thời gian của tổng ẩm khí quyển. Mạng trạm GNSS mặt đất đủ dày cho phép chúng ta sử dụng dữ liệu này để giám sát sự di chuyển của front và giám sát sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển và độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu gắn với một số hiện tượng thời tiết.

1.1.2. Tổng quan các công trình nghiên cứu ở trong nước

Các nghiên cứu trong nước liên quan đến vấn đề sử dụng số liệu GPSRO và GNSS bề mặt để nghiên cứu khí quyển còn ít và hạn chế. Số liệu GPSRO đã được sử dụng để tính toán chỉ số đối lưu khí quyển. Các tác giả [51] đã sử dụng dữ liệu COSMIC trong khoảng thời gian từ 04/2006 đến 07/2007 để tính toán các chỉ số đối lưu trên phạm vi toàn cầu. Các tác giả đã xây dựng được các biểu đồ biến đổi của các chỉ số đối lưu với độ phân giải 5x5 độ kinh vĩ. Theo các tác giả số liệu COSMIC kết hợp với các nguồn số liệu khác sẽ rất hữu ích trong việc nghiên cứu các dạng đối lưu ẩm [51].

Bên cạnh đó, dữ liệu GPSRO cũng được sử dụng để đồng hóa vào mô hình dự báo số trị. Các tác giả [52] đã thiết lập hệ thống đồng hóa GSI vào mô hình WRF để thử nghiệm dự báo định lượng mưa ở khu vực Nam Bộ. Hệ thống GSI được thử nghiệm với các phương pháp 3Dvar, 3DhybEnVar đối với 3 loại số liệu (số liệu GPSRO, số liệu cao không, số liệu quan trắc khí tượng bề mặt). Kết quả cho thấy

trường hợp thử nghiệm 3DhybEnVar với số liệu GPSRO đã cho dự báo về diện mưa và ngưỡng mưa vừa (16-50mm) tốt hơn các trường hợp còn lại [52].

Gần đây, dữ liệu COSMIC đã được sử dụng để xác định chỉ số khúc xạ và điều kiện lan truyền sóng vô tuyến trong tầng đối lưu khu vực Hà Nội. Kết quả cho thấy giá trị chỉ số khúc xạ khí quyển trung bình cao nhất là 370 (đơn vị N). Tại các độ cao lớn, giá trị chỉ số khúc xạ khí quyển gần giống với giá trị từ mô hình chuẩn của ITU-R. Tại các độ cao thấp, chênh lệch giữa hai nguồn đạt đến 60 (đơn vị N) [53].

Đến nay, thiết bị thu GNSS tại bề mặt ngày càng được lắp đặt phổ biến ở Việt Nam. Các dữ liệu GNSS đã được nhiều tác giả quan tâm sử dụng để nghiên cứu về hàm lượng điện tử tổng cộng (TEC) [54, 55], dịch chuyển kiến tạo [56, 57]. Tuy nhiên, việc sử dụng dữ liệu GNSS để nghiên cứu về độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu và tổng ẩm khí quyển vẫn chưa được quan tâm nhiều, số lượng các công trình nghiên cứu theo hướng này còn ít.

Các tác giả [58] đã sử dụng dữ liệu GPS tại 3 trạm Hà Nội, Huế, TP. Hồ Chí Minh để đánh giá độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu và tổng ẩm khí quyển (hay hàm lượng hơi nước tổng cộng tầng đối lưu). Trong nghiên cứu này các tác giả đã sử dụng phần mềm GAMIT và chuỗi số liệu GPS trong thời gian 2 năm để tính toán độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu. Tiếp đó các tác giả sử dụng dữ liệu độ trễ tầng đối lưu và dữ liệu nhiệt độ, áp suất từ số liệu tái phân tích để tính toán tổng ẩm khí quyển. Kết quả tính toán đã được so sánh với dữ liệu tổng ẩm khí quyển của mô hình toàn cầu. Theo các tác giả, dữ liệu tổng ẩm tính toán được từ dữ liệu GPS tại 3 trạm chủ yếu có giá trị lớn hơn kết quả của mô hình toàn cầu với độ lệch tuyệt đối trung bình là 11,7kg/m², 4,4kg/m² và 5,7kg/m² tương ứng với các trạm Hà Nội, Huế và TP. Hồ Chí Minh. Các tác giả cũng sử dụng dữ liệu tính toán được để nghiên cứu xu thế biến thiên trong năm của tổng ẩm khí quyển ở những khu vực này. Kết quả chỉ ra rằng tổng ẩm khí quyển đạt giá trị cực đại vào khoảng tháng 7 đến tháng 9 và đạt giá trị cực tiểu vào tháng 01 hoặc 02 tùy từng trạm. Biên độ biến thiên trong năm đạt 50kg/m², 40kg/m² và 30kg/m² tương ứng với trạm Hà Nội, Huế và Thành phố Hồ Chí Minh. Biên độ năm giảm dần từ bắc vào nam [58].

Một nghiên cứu khác đã sử dụng dữ liệu (trong một số ngày) của Hệ thống trạm định vị vệ tinh quốc gia VNGEONET để tính toán tổng ẩm khí quyển. Các tác

giả đã sử dụng phương pháp định vị điểm chính xác (PPP) để xác định độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu ZTD. Kết quả tính toán tổng ẩm khí quyển đã được so sánh với giá trị tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu thám không vô tuyến và dữ liệu tái phân tích ERA5 của Trung tâm Dự báo hạn vừa Châu Âu. Các tác giả đã chỉ ra rằng sai số của tổng ẩm khí quyển tính toán từ GPS tại 5 trạm (Điện Biên, Hà Nội, Vinh, Đà Nẵng, Thành phố Hồ Chí Minh) và dữ liệu thám không vô tuyến trong khoảng từ 2mm đến 6mm. Sai số quân phương (RMSE) đạt 1,81mm. Tổng ẩm khí quyển tính toán từ GPS tại các trạm còn lại được so sánh với tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu ERA5. Sai số quân phương (RMSE) đạt 5,42mm. Theo các tác giả các dữ liệu tổng ẩm khí quyển tính toán được từ GPS đã tiệm cận sát với số liệu thám không vô tuyến và khá phù hợp với dữ liệu ERA5. Tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GPS có độ tin cậy cao và có thể được sử dụng trong nghiên cứu khoa học và dự báo khí tượng [59].

Các nghiên cứu trên cho thấy rằng dữ liệu GPSRO đã được ứng dụng vào nghiên cứu khí quyển và dự báo thời tiết ở Việt Nam. Tuy nhiên, dữ liệu GPSRO mới được sử dụng để tính toán các chỉ số đối lưu khí quyển, đánh giá chỉ số khúc xạ khí quyển và bước đầu đồng hóa vào mô hình dự báo số trị. Việc đánh giá chất lượng của nguồn dữ liệu này và ứng dụng chúng trong nghiên cứu đặc trưng biến đổi theo độ cao và theo thời gian (mùa trong năm) của các thông số khí quyển (nhiệt độ, độ ẩm tương đối) cũng như cấu trúc của các thông số khí quyển trong một số điều kiện thời tiết nhất định trên khu vực Việt Nam chưa được quan tâm thực hiện. Trong khi đó dữ liệu GNSS mặt đất đã được sử dụng để nghiên cứu đặc trưng biến đổi theo năm và không gian của các yếu tố độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu và tổng ẩm khí quyển ở khu vực Việt Nam. Tuy nhiên các kết quả tính toán tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu GNSS trong những nghiên cứu trên có độ phân giải theo thời gian không cao (khoảng 6h), nên việc ứng dụng dữ liệu GNSS để xác định biến trình ngày của tổng ẩm khí quyển, phân tích xu thế biến đổi của tổng ẩm khí quyển gắn với các hiện tượng thời tiết chưa được thực hiện ở khu vực Việt Nam.

1.2. Tổng quan về sử dụng mô hình WRF mô phỏng thông số khí quyển

1.2.1. Tổng quan các công trình nghiên cứu ở nước ngoài

Mô hình Nghiên cứu và Dự báo Thời tiết (WRF) là mô hình dự báo thời tiết số trị quy mô vừa. Mô hình được phát triển cho mục đích ứng dụng nghiên cứu và dự

báo thời tiết. Mô hình WRF được phát triển bởi sự cộng tác của nhiều cơ quan tổ chức lớn trên thế giới như: Trung tâm quốc gia Nghiên cứu Khí quyển Quốc gia Hoa Kỳ (NCAR), Trung tâm Dự báo Môi trường Quốc gia Hoa Kỳ (NOAA), Phòng Thí nghiệm hải quân (Hoa Kỳ), Trường đại học Oklahoma v.v. (<https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>).

Hiện nay, mô hình WRF đang được sử dụng rộng rãi trong dự báo thời tiết nghiệp vụ cũng như trong nghiên cứu ở nhiều quốc gia trên thế giới. Mô hình WRF đã được sử dụng để mô phỏng khí hậu khu vực của Châu Âu trong khoảng thời gian 60 năm (1950–2010). Mô hình sử dụng lưới 25km với đầu vào là dữ liệu phân tích NCEP 2,5 độ. Kết quả cho thấy mô hình WRF có thể mô phỏng được các xu hướng biến đổi nhiệt độ (trung bình, tối đa, tối thiểu, tối đa theo mùa và tối thiểu theo mùa) trên hầu hết các khu vực của Châu Âu ngoại trừ Bán đảo Iberia, Địa Trung Hải và các khu vực ven biển [60].

Tại một số khu vực của Hàn Quốc, nhiệt độ gần bề mặt vào ban đêm với độ phân giải cao (20m) cũng được mô phỏng bằng mô hình WRF-LES (Mô hình WRF-Mô phỏng xoáy lớn). Kết quả cho thấy độ lệch trung bình tối đa so với số liệu quan trắc tại trạm thời tiết tự động là $-1,75^{\circ}\text{C}$ và cực tiểu là $-0,68^{\circ}\text{C}$ vào mùa xuân. Giá trị sai số bình phương trung bình dao động trong khoảng $2,13^{\circ}\text{C}$ và $3,00^{\circ}\text{C}$ [61].

Trong khi đó tại Trung Quốc, mô hình WRF cũng được dùng để mô phỏng trường nhiệt độ 2m với độ phân giải cao theo thời gian (1 giờ) và không gian (30m) ở khu vực Chongli (Hebei). Kết quả cho thấy sai số bình phương trung bình (RMSE) với trạm thời tiết tự động giảm xuống $0,87^{\circ}\text{C}$ và sai số tuyệt đối trung bình giảm đi $0,71^{\circ}\text{C}$ [62].

Ngoài việc sử dụng mô hình WRF mô phỏng các trường khí tượng cơ bản, mô hình này còn được sử dụng để mô phỏng trường tổng ẩm khí quyển. Mô hình WRF được sử dụng để mô phỏng giá trị tổng ẩm khí quyển ở khu vực La Palma (Tây Ban Nha). Kết quả mô phỏng đã được so sánh với kết quả quan trắc, hệ số tương quan giữa hai nguồn dữ liệu là 0,951 và 0,904 tương ứng với thời hạn dự báo 24h và 48h. Sai số trung bình đạt 1,75mm và 1,99mm tương ứng với 24h và 48h [63].

Tại Iran, mô hình WRF cũng được ứng dụng để tính tổng ẩm khí quyển. Kết quả cho thấy hệ số tương quan giữa giá trị mô phỏng trong miền tính có độ phân giải

3km và dữ liệu thám không vô tuyến là 0,81 và độ lệch bình phương trung bình đạt 2,98mm. Theo các tác giả kết quả đã minh chứng rằng mô hình WRF có thể được sử dụng để tính toán tổng ẩm khí quyển với độ chính xác chấp nhận được trong các điều kiện khí tượng khác nhau [64].

Mô hình WRF cũng được sử dụng để tính toán tổng ẩm khí quyển ở khu vực Ba Lan. Kết quả cho thấy có sự phù hợp tốt giữa giá trị mô phỏng bằng mô hình với giá trị tính toán từ dữ liệu thám không vô tuyến. Sự phù hợp trong phần dưới của tầng đối lưu vào những tháng mùa đông là tốt nhất. Trong lớp từ 1,5km đến 10km, giá trị mô phỏng bằng mô hình cao hơn giá trị tính toán từ dữ liệu thám không vô tuyến. Nhưng trong lớp dưới 1,5km, kết quả mô phỏng bằng mô hình có giá trị nhỏ hơn [65].

1.2.2. Tổng quan các công trình nghiên cứu trong nước

Ở nước ta, mô hình WRF được sử dụng rộng rãi để nghiên cứu và dự báo các trường khí tượng. Trong đó, hướng nghiên cứu sử dụng mô hình WRF để mô phỏng và dự báo trường mưa là một trong những hướng nhận được quan tâm nhiều nhất. Các tác giả [66] đã ứng dụng mô hình WRF trong dự báo lượng mưa trên lưu vực sông Đồng Nai. Sau khi ứng dụng mô hình WRF với 3 sơ đồ để dự báo 3 ngày mưa (12, 13, 14/7/2011), kết quả cho thấy mô hình dự báo tương đối chính xác về diện mưa của cả 3 ngày. Tuy nhiên, lượng mưa dự báo luôn có xu hướng nhỏ hơn lượng mưa quan trắc thực tế [66].

Mô hình WRF cũng được nghiên cứu đánh giá khả năng dự báo mưa đối với khu vực Nam Bộ và Nam Tây Nguyên khi có bão hoạt động trên Biển Đông thời kỳ 2010 - 2014. Kết quả cho thấy mô hình thường cho kết quả dự báo cao hơn quan trắc về cả lượng mưa và diện mưa. Với trường hợp mưa lớn điển hình liên quan đến cơn bão Utor mô hình mô phỏng khá tốt về diện mưa trên khu vực nghiên cứu [67].

Cũng tại khu vực Nam Bộ, mô hình WRF với phương pháp đồng hóa số liệu biến phân bốn chiều 4D-Var đã được nghiên cứu để dự báo mưa ở khu vực Nam Bộ. Sau khi đồng hóa số liệu quan trắc mưa từ trạm đo mưa tự động và số liệu radar, mô phỏng thực tế cho thấy so với trường hợp không đồng hóa, phương pháp đồng hóa cải thiện dự báo ở cả hạn dự báo 12h và 24h, sai số giảm ở các ngưỡng mưa nhỏ dưới 30 mm và mưa lớn trên 70mm [68].

Đối với khu vực Trung Trung Bộ, khả năng dự báo mưa do hình thể thời tiết không khí lạnh kết hợp với gió đông trên cao bằng mô hình WRF với thời hạn 2 ngày cũng được nghiên cứu đánh giá. Kết quả đánh giá cho thấy, hạn dự báo 24h nên sử dụng ngưỡng mưa vừa (16-50mm/ngày) và mưa to (50-100mm/ngày) để tham khảo dự báo lượng và diện mưa. Hạn dự báo 48h nên sử dụng ngưỡng mưa vừa (16-50mm/ngày) để tham khảo cho dự báo mưa lớn. Ngưỡng mưa trên 100mm, các hạn dự báo cho kết quả dự báo kém, hầu như không dự báo được [69].

Tại khu vực Bắc Bộ, mô hình WRF-ARW được thử nghiệm để dự báo đợt mưa lớn vào tháng 7/2015. Các kết quả đánh giá cho thấy ở hạn dự báo 24h tại các ngưỡng mưa lớn (50mm/24h và 100mm/24h) việc sử dụng các sơ đồ tham số hóa đối lưu (CPS) cho kết quả tốt hơn so với việc không sử dụng sơ đồ tham số hóa đối lưu (noCPS) trên lưới tính phân giải cao 5km [70].

Gần đây, các tác giả [71] đã sử dụng lượng mưa của 150 trạm quan trắc để đánh giá chất lượng dự báo định lượng mưa từ mô hình WRF ở các hạn dự báo 24h, 48h và 72h trong hai năm 2019-2020. Kết quả cho thấy, mô hình WRF có xu thế dự báo thiên thấp về lượng ở hầu hết các ngưỡng mưa và hạn dự báo. Tính chung trên phạm vi cả nước, ở cả 3 hạn dự báo, chất lượng dự báo mưa định lượng trong hai năm của mô hình WRF với khoảng 30–40% thành công ở ngưỡng có mưa (1 mm/ngày) và giảm dần theo các ngưỡng mưa, đạt khoảng 20% ở ngưỡng mưa vừa (16 mm/ngày) và khoảng 15% ở ngưỡng mưa to (50 mm/ngày) và chất lượng dự báo không tốt ở hạn dự báo 72h. Kết quả dự báo về diện cho thấy, mô hình dự báo diện mưa lớn hơn so với thực tế ở ngưỡng mưa nhỏ nhưng lại dự báo nhỏ hơn so với thực tế ở ngưỡng mưa vừa và mưa to ở cả 3 hạn dự báo [71].

Ngoài lượng mưa, mô hình WRF cũng được sử dụng để mô phỏng trường nhiệt độ không khí. Tác giả [72] đã sử dụng mô hình WRF để dự báo thời tiết hạn vừa ở Việt Nam. Kết quả cho thấy mô hình đã phản ánh khá tốt về trường nhiệt và trường ẩm cũng như sự biến đổi theo thời gian của những trường này [72].

Việc đồng hóa các nguồn dữ liệu truyền thống vào mô hình WRF để dự báo thời tiết ở khu vực Việt Nam cũng được quan tâm nghiên cứu. Số liệu quan trắc bề mặt và số liệu cao không được đồng hóa vào mô hình WRF đã cải thiện chất lượng

dự báo. Sai số nhiệt độ giảm khoảng $0,2 - 1,0^{\circ}\text{C}$ với hạn dự báo 24h và nhỏ hơn với hạn dự báo 48h [73].

Các tác giả [74] dự báo thử nghiệm từ 1 đến 3 ngày cho nhiệt độ không khí bề mặt và lượng mưa tích lũy 24h cho các trạm trên khu vực Hà Nội trong tháng 1 và tháng 7 năm 2016 bằng mô hình WRF. Kết quả cho thấy mô hình dự báo tốt với hạn 24 và 48h. Đối với nhiệt độ bề mặt, mô hình dự báo kết quả thấp hơn so với quan trắc [74].

Mô hình WRF còn được sử dụng để nghiên cứu cơ chế và vai trò của vận tải ẩm tới đợt mưa lớn tháng 11 năm 1999. Trong nghiên cứu này các tác giả đã sử dụng mô hình WRF để mô phỏng trường tổng ẩm khí quyển, trường gió, trường mưa ở khu vực Việt Nam và lân cận. Kết quả mô phỏng tổng ẩm khí quyển có giá trị gần tương đương với giá trị ước lượng từ vệ tinh SSM/I [75].

Kết luận chương 1

Trên cơ sở tổng quan tình hình về nghiên cứu trong nước và nước ngoài về việc sử dụng dữ liệu sóng vô tuyến và mô hình số trị để nghiên cứu, đánh giá các thông số khí quyển NCS rút ra một số vấn đề sau:

- Dữ liệu sóng vô tuyến bao gồm dữ liệu GPSRO và dữ liệu GNSS đã được đánh giá và sử dụng rộng rãi để tính toán và nghiên cứu sự biến đổi của các thông số khí quyển trên phạm vi toàn cầu và ở nhiều khu vực khác nhau trên thế giới bao gồm:
 - + Đánh giá dữ liệu GPSRO bằng cách so sánh với dữ liệu thám không vô tuyến, dữ liệu mô hình trên phạm vi toàn cầu và các khu vực khác nhau.
 - + Sử dụng dữ liệu GPSRO để nghiên cứu cấu trúc nhiệt trong bão, biến đổi của các thông số nhiệt độ và độ ẩm theo thời gian, theo độ cao.
 - + Đánh giá dữ liệu GNSS bằng cách so sánh với dữ liệu thám không vô tuyến, dữ liệu Aeronet, sản phẩm mô hình.
 - + Sử dụng dữ liệu GNSS để nghiên cứu sự biến đổi theo thời gian, không gian của tổng ẩm khí quyển.

- Việt Nam nằm ở khu vực Đông Nam Á với chiều dài bờ biển hơn 3000km. Thời tiết, khí hậu của nước ta chịu nhiều tác động của các khối khí trên Biển Đông. Hàng năm các cơn bão hình thành hoặc di chuyển qua Biển Đông vào đất liền đã gây ra những thiệt hại lớn về người và kinh tế. Việc nghiên cứu đặc trưng của khối khí và

cấu trúc nhiệt, ẩm của bão trên khu vực Biển Đông và lân cận có ý nghĩa hết sức quan trọng cho công tác dự báo thời tiết và giảm nhẹ thiên tai. Với số lượng trạm thám không vô tuyến là 6 trạm và được bố trí trên đất liền và khu vực biển ven bờ nên số liệu GPSRO (cụ thể dữ liệu wetPf2) là một nguồn số liệu quan trọng bổ sung thêm vào nguồn dữ liệu quan trắc cao không ở khu vực Việt Nam, đặc biệt ở khu vực Biển Đông trong điều kiện có bão hoạt động. Tuy nhiên việc nghiên cứu đánh giá dữ liệu GPSRO ở khu vực Việt Nam chưa được thực hiện, có rất ít các công trình sử dụng dữ liệu này để tính toán chỉ số đối lưu hoặc sử dụng đồng hóa dữ liệu vào mô hình số trị. Ngoài ra, một nguồn số liệu sóng vô tuyến khác được thu thập ngày càng nhiều ở nước ta là dữ liệu GNSS tại bề mặt. Dữ liệu GNSS liên tục cho phép tính toán tổng ẩm khí quyển với độ phân giải cao theo thời gian. Đến nay, dữ liệu này chưa được sử dụng để tính toán tổng ẩm khí quyển với độ phân giải cao (1 phút) và sử dụng để nghiên cứu sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển gắn với các hiện tượng thời tiết ở khu vực Việt Nam. Để góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng của nguồn số liệu sóng vô tuyến thu thập được ở khu vực Việt Nam trong lĩnh vực nghiên cứu khí quyển, dự báo thời tiết và giảm nhẹ thiên tai, luận án sẽ thực hiện:

- + Đánh giá dữ liệu wetPf2 và dữ liệu GNSS ở khu vực Việt Nam bằng cách so sánh với các nguồn dữ liệu thám không vô tuyến, Aeronet, sản phẩm mô hình.

- + Sử dụng dữ liệu wetPf2 là nguồn dữ liệu quan trắc để nghiên cứu đặc trưng nhiệt, ẩm của khối khí biển trên khu vực Biển Đông, bao gồm: khu vực Bắc Biển Đông với đại diện là khu vực quần đảo Hoàng Sa, khu vực Nam Biển Đông với đại diện là khu vực quần đảo Trường Sa. Đồng thời dữ liệu này cũng được sử dụng để phân tích cấu trúc các trường khí quyển trong điều kiện bão hoạt động ở khu vực Biển Đông và lân cận.

- + Tính toán tổng ẩm khí quyển từ số liệu GNSS với độ phân giải cao (1 phút) và ứng dụng dữ liệu này vào nghiên cứu biến trình ngày, sự biến đổi theo thời gian của tổng ẩm khí quyển. Sau đó dữ liệu này được sử dụng để nghiên cứu sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển gắn với hình thái thời tiết đặc trưng ở khu vực Miền Bắc vào mùa đông là không khí lạnh. Để tính toán được tổng ẩm với độ phân giải cao theo thời gian, ngoài dữ liệu GNSS liên tục còn đòi hỏi phải có dữ liệu nhiệt độ quan trắc tại bề mặt có độ phân giải cao. Khu vực Nghĩa Đô là một trong những khu vực đáp

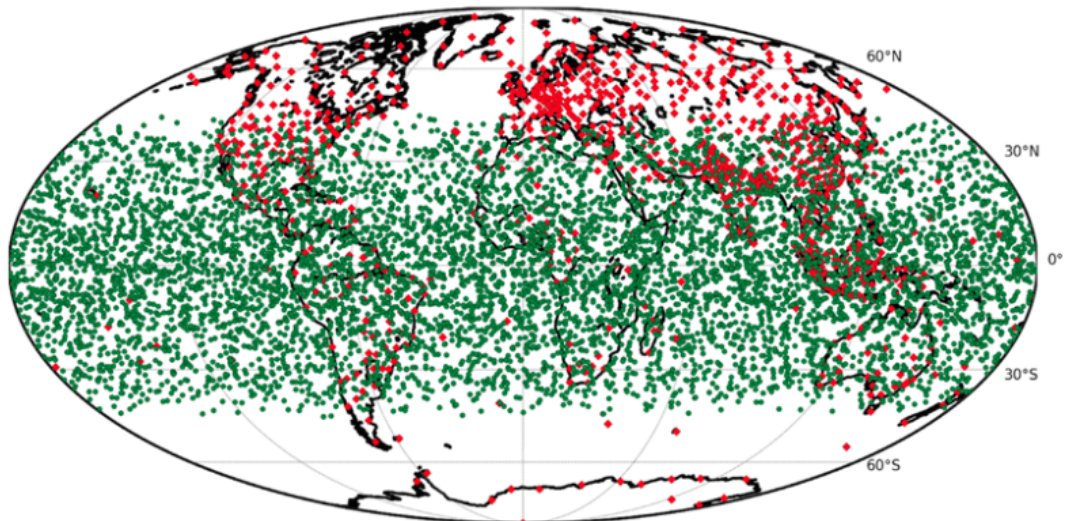
ứng điều kiện về số liệu (số liệu GNSS, số liệu trạm thời tiết tự động). Ngoài ra, khu vực này còn có các nguồn số liệu quan trắc khác để đối sánh nên khu vực Nghĩa Đô được lựa chọn để nghiên cứu thử nghiệm trước khi nhân rộng ở khu vực khác.

Chương 2. SỐ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Số liệu

2.1.1. Số liệu *wetPf2*

Dự án COSMIC-2/FORMOSAT-7 là dự án hợp tác giữa Đài Loan (Trung Quốc) và Hoa Kỳ sử dụng vệ tinh quỹ đạo thấp để quan trắc đo đặc khí quyển. Dự án gồm 06 vệ tinh quỹ đạo thấp (LEO) bay xung quanh Trái Đất. Dự án đã áp dụng phương pháp che khuất vô tuyến (RO) để xác định một số thông số khí quyển từ sự biến đổi tín hiệu sóng vô tuyến truyền từ vệ tinh GPS đến vệ tinh quỹ đạo thấp của dự án. COSMIC-2 cung cấp khoảng 5000 thám sát mỗi ngày trong khu vực từ vĩ độ thấp đến vĩ độ trung bình (Hình 2.1). So với các nguồn dữ liệu GPSRO khác, COSMIC-2 là nguồn cung cấp dữ liệu GPSRO có độ phân giải theo không gian và thời gian tốt nhất.



Hình 2.1. COSMIC-2 cung cấp khoảng 5000 thám sát một ngày (màu xanh) so với 1300 thám sát của trạm thám không vô tuyến (màu đỏ) [17].

Trong khuôn khổ của luận án, dữ liệu *wetPf2* của COSMIC-2/FORMOSAT-7 là một trong những nguồn dữ liệu chính được thu thập. Số liệu *wetPf2* chứa profile thẳng đứng của nhiệt độ, áp suất, áp suất hơi nước, chỉ số khúc xạ, độ ẩm tương đối, độ ẩm tuyệt đối. Độ phân giải theo độ cao của số liệu này là 50m ở các mực dưới độ cao 20km và độ phân giải là 100m ở các mực có độ cao lớn hơn 20km. Đến thời điểm hiện tại, số liệu *wetPf2* có độ phân giải theo phương thẳng đứng cao nhất trong các loại dữ liệu GPSRO. Số liệu này được thu thập trong khoảng thời gian 4 năm từ

10/2019 đến 09/2023 trên khu vực Việt Nam và lân cận từ nguồn dữ liệu của Cơ quan Khí tượng Đài Loan (Central Weather Administration) tại trang web https://tacc.cwa.gov.tw/data-service/fs7rt_tdpc/daily_tar/. Dữ liệu wetPf2 được lưu dưới dạng netcdf. Dữ liệu này được sử dụng để nghiên cứu, phân tích các đặc trưng biến đổi của trường nhiệt độ và độ ẩm tương đối của khối khí biển trên khu vực quần đảo Hoàng Sa và quần đảo Trường Sa. Số liệu này cũng được sử dụng để phân tích đặc trưng biến đổi của các thông số khí quyển ở khu vực Biển Đông trong điều kiện bão hoạt động.

2.1.2. Số liệu thám không vô tuyến (bóng thám không)

Quan trắc thám không vô tuyến (bóng thám không) là một trong những thành phần quan trọng trong hệ thống quan trắc dữ liệu khí tượng thủy văn trên toàn cầu. Phương pháp này quan trắc các thông số khí quyển bằng cách gắn các thiết bị đo vào bóng bay tự do và được thả đồng thời từ các trạm đo trên toàn thế giới. Thám không vô tuyến là nguồn dữ liệu quan trắc profile khí quyển có độ tin cậy cao nhất. Ở Việt Nam có 6 trạm quan trắc thám không vô tuyến, gồm: Trạm Láng (Hà Nội), Bạch Long Vĩ, Điện Biên, Vinh, Đà Nẵng, Tân Sơn Hòa (TP. Hồ Chí Minh). Theo quy định của Việt Nam, sai số của cảm biến áp là $\pm 1\text{hPa}$, sai số tối đa đối với nhiệt độ $< 1^\circ\text{C}$ và của độ ẩm tương đối là 10% [76]. Trong khuôn khổ của luận án, profile nhiệt độ, độ ẩm tương đối, áp suất từ dữ liệu thám không vô tuyến được thu thập tại 3 trạm: Trạm Láng (Hà Nội), Đà Nẵng, Tân Sơn Hòa (TP. Hồ Chí Minh) trong khoảng thời gian từ tháng 10/2019 đến tháng 9/2023. Những trạm này thường cung cấp 02 dữ liệu quan trắc trong ngày vào thời điểm 7 giờ (00 GMT) và 19 giờ (12 GMT). Dữ liệu thám không vô tuyến được thu thập từ trang web của Đại học Wyoming (<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Hình 2.2 là ví dụ về dữ liệu thám không vô tuyến ở Trạm Đà Nẵng vào thời điểm 7 giờ (00GMT) ngày 01/10/2019. Trong đó:

PRES: Áp suất khí quyển (hPa)

HGHT: Độ cao (m)

TEMP: Nhiệt độ không khí ($^\circ\text{C}$)

DWPT: Nhiệt độ điểm sương ($^\circ\text{C}$)

RELH: Độ ẩm tương đối của không khí (%)

MIXR: Tỷ số xáo trộn của không khí (g/kg)

DRCT: Hướng gió (độ)

SKNT: Vận tốc gió (knot)

THTA: Nhiệt độ thế vị (K)

THTE: Nhiệt độ thế vị tương đương (K)

THTV: Nhiệt độ thế vị ảo (K)

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1011.0	7	25.0	22.1	84	16.88	0	0	297.2	346.2	300.2
1000.0	101	24.8	21.4	81	16.33	225	2	297.9	345.5	300.9
994.0	154	25.4	20.7	75	15.72	224	2	299.1	345.1	301.9
944.0	608	24.0	16.0	61	12.26	214	6	302.1	338.6	304.3
925.0	786	22.6	16.6	69	13.01	210	8	302.4	341.1	304.8
884.0	1180	21.2	16.2	73	13.28	268	9	304.9	344.8	307.3
876.0	1259	20.6	16.4	77	13.53	280	10	305.0	345.7	307.5
857.0	1448	19.0	16.7	87	14.16	302	10	305.3	347.9	307.9
850.0	1519	18.6	16.1	85	13.73	310	10	305.6	347.0	308.1
846.0	1559	18.3	15.9	85	13.58	315	10	305.8	346.7	308.2
801.0	2025	15.3	13.1	86	11.93	275	10	307.3	343.6	309.6
771.0	2351	13.2	11.1	87	10.88	269	10	308.4	341.7	310.4
729.0	2821	10.6	8.0	84	9.32	260	10	310.6	339.4	312.3
728.0	2833	10.6	7.6	82	9.09	260	10	310.7	338.9	312.4
701.0	3148	10.4	-2.6	40	4.53	284	12	313.8	328.5	314.7
700.0	3160	10.4	-1.6	43	4.89	285	12	314.0	329.7	314.9
699.0	3172	10.4	-0.6	46	5.27	285	12	314.1	331.0	315.1
695.0	3219	10.1	-1.3	45	5.03	285	12	314.3	330.5	315.3
682.0	3375	9.3	-3.7	40	4.30	285	10	315.1	329.1	315.9
609.0	4306	4.2	-17.8	18	1.56	357	0	319.6	325.0	319.9
606.0	4347	4.4	-19.9	15	1.31	0	0	320.2	324.9	320.5
600.0	4428	4.8	-24.2	10	0.91	12	1	321.6	324.9	321.8
566.0	4900	2.6	-28.0	8	0.68	80	10	324.4	327.0	324.6
557.0	5030	2.0	-29.0	8	0.63	73	10	325.2	327.6	325.4
529.0	5441	-1.2	-29.3	10	0.64	50	12	326.2	328.6	326.3

Hình 2.2. Cấu trúc file dữ liệu thám không vô tuyến.

Số liệu nhiệt độ, áp suất, độ ẩm tương đối từ dữ liệu thám không vô tuyến được sử dụng làm số liệu tham chiếu để đánh giá chất lượng, độ tin cậy của dữ liệu COSMIC-2. Ngoài dữ liệu về nhiệt độ, áp suất, độ ẩm tương đối từ dữ liệu thám không vô tuyến, sản phẩm tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu thám không vô tuyến cũng được thu thập tại trạm Hà Nội. Dữ liệu này cũng được sử dụng làm dữ liệu tham chiếu trong việc đánh giá chất lượng và độ tin cậy của tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS bề mặt.

2.1.3. Số liệu GNSS

Số liệu GNSS sử dụng trong luận án này được thu thập từ thiết bị đo GNSS đặt tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô (21,048°N, 105,799°E), trên nóc tòa nhà 9

tầng. Thiết bị được sử dụng để đo đạc là S800A của hãng Stonex. Một số thông số kỹ thuật của thiết bị này được nêu trong Bảng 2.1.

Bảng 2.1. Thông số kỹ thuật chính thiết bị S800A của Stonex.

Tên thông số	Thông số kỹ thuật
Tín hiệu thu	GPS: L1 C/A, L1C, L1P, L2C, L2P, L5
	GLONASS: L1 C/A, L1P, L2C, L2P
	BEIDOU: B1, B2, B3
	GALILEO: E1, E5a, E5b
	QZSS: L1 C/A, L1C, L2C, L5
	SBAS: L1, L5
Số lượng kênh	394
Tần suất lấy mẫu	1Hz
Độ chính xác theo phương ngang	2.5 mm + 1 ppm RMS
Độ chính xác theo phương thẳng đứng	5.0 mm + 1 ppm RMS

```

10242651a.22O
File Edit View
3.02 OBSERVATION DATA M (MIXED) RINEX VERSION / TYPE
Assistant 1.0 20230412 222911 LCL PGM / RUN BY / DATE
G = GPS R = GLONASS C = COMPASS COMMENT
S = SBAS J = QZSS E = GALILEO COMMENT
1024 MARKER NAME
1 MARKER NUMBER
S813590301024 Stonex S800A 0.23.190501(STO OBSERVER / AGENCY
0 STXS800A REC # / TYPE / VERS
-1621464.8653 5730201.4535 2276350.4279 ANT # / TYPE
0.0192 0.0000 0.0000 APPROX POSITION XYZ
G 16 C1C L1C D1C S1C C2P L2P D2P S2P C2C L2C D2C S2C C5I ANTENNA: DELTA H/E/N
LSI DSI SSI SYS / # / OBS TYPES
R 8 C1P L1P D1P S1P C2P L2P D2P S2P SYS / # / OBS TYPES
DBHZ COMMENT
1.000 INTERVAL
2022 09 22 01 31 55.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
2022 09 23 01 16 51.0000000 GPS TIME OF LAST OBS
0 RCV CLOCK OFFS APPL
G L1C 0.00000 SYS / PHASE SHIFT
G L2P 0.00000 SYS / PHASE SHIFT
G L2C -0.25000 SYS / PHASE SHIFT
G L5I 0.00000 SYS / PHASE SHIFT
R L1P 0.25000 SYS / PHASE SHIFT
R L2P 0.25000 SYS / PHASE SHIFT
22 R01 1 R02 -4 R03 5 R04 6 R05 1 R06 -4 R07 5 R08 6 GLONASS SLOT / FRQ #
R09 -2 R10 -7 R11 0 R12 -1 R13 -2 R14 -7 R15 0 R16 -1 GLONASS SLOT / FRQ #
R17 4 R18 -3 R19 3 R20 2 R21 4 R23 3 GLONASS SLOT / FRQ #
C1C 0 C1P 0 C2C 0 C2P 0 GLONASS COD/PHS/BIS
18 LEAP SECONDS
31 1 0.0000 ANT MEASURE TYPE/HEIGHT COMMENT
0.0725 0.0490 0.0682 0.0607 0.0000 COMMENT
BASE STATION COMMENT
END OF HEADER
> 2022 09 22 01 31 55.0000000 0 19 0.000000000000
G02 22900430.602 7 120342543.49817 1364.891 45.726 22900439.891 7
93773419.76917 1063.557 43.578
G05 20794891.781 7 109277873.63817 143.387 46.438 20794902.543 7
85151625.55017 111.975 44.741 20794903.516 6 85151623.305 6 111.896
Ln 1, Col 1 312,449,995 characters 100% Windows (CRLF) UTF-8

```

Hình 2.3. Dữ liệu GNSS được chuyển sang định dạng RINEX.

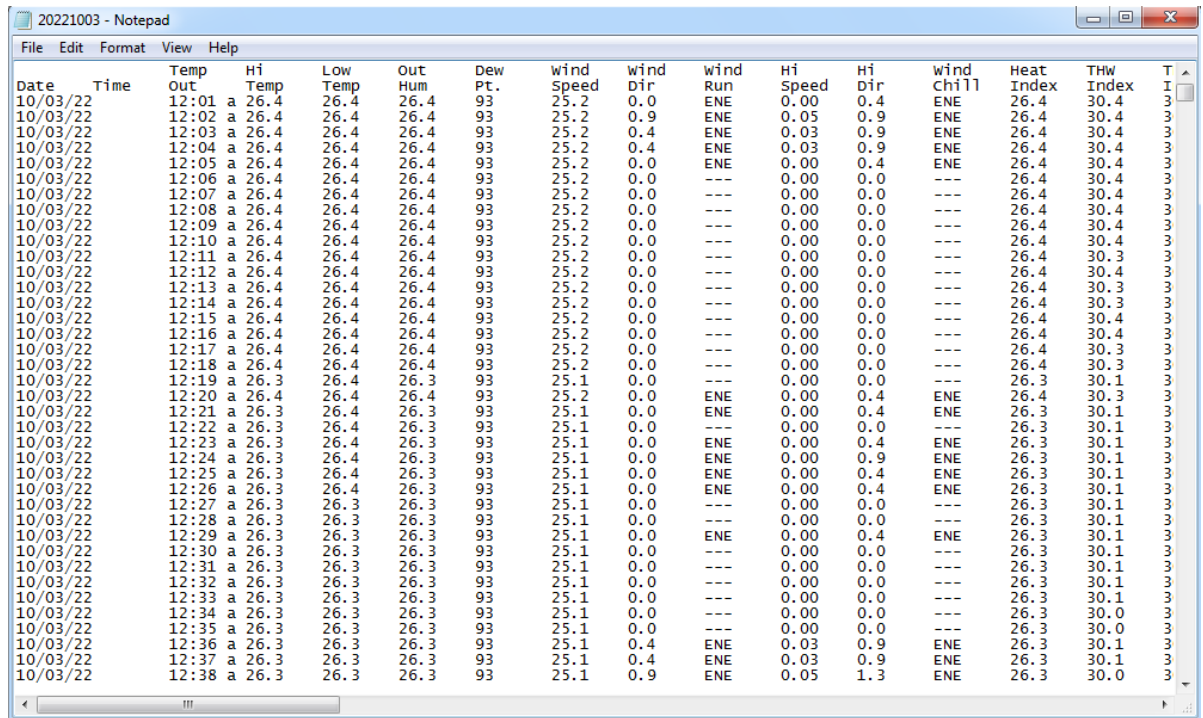
Dữ liệu GNSS được thu thập trong khoảng thời gian từ 22/09/2022 – 31/03/2023. Thiết bị S800A được cài đặt thu tín hiệu vệ tinh với tốc độ lấy mẫu là 1Hz. Dữ liệu sau khi quan trắc được ghi dưới dạng file *.DAT. Dữ liệu này sau đó được chuyển sang định dạng RINEX. Trong Hình 2.3 là ví dụ về dữ liệu sau khi đã được chuyển đổi định dạng sang RINEX. Dữ liệu GNSS được sử dụng để tính toán thông số độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu, sau đó dữ liệu này được sử dụng để tính toán tổng ẩm khí quyển.

2.1.4. Số liệu tổng ẩm khí quyển từ trạm AERONET

Số liệu tổng ẩm khí quyển là một trong những sản phẩm được tính toán từ dữ liệu đo của thiết bị CE318T, là một phần của mạng trạm quan trắc sol khí (AERONET - Aerosol Robotic Network). Thiết bị này đo bức xạ mặt trời ở chín dải bước sóng, số liệu tổng ẩm khí quyển được tính toán dựa trên số đo trong dải bước sóng 937nm. Do dữ liệu được tính toán từ giá trị bức xạ mặt trời nên dữ liệu tổng ẩm khí quyển từ trạm AERONET chỉ có vào những ngày nắng. Trong khuôn khổ của luận án giá trị tổng ẩm khí quyển trung bình ngày được thu thập trong khoảng thời gian từ 22/09/2022 – 31/03/2023 tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô (Hà Nội) từ cơ sở dữ liệu AERONET của NASA (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>). Trong giai đoạn này có tất cả 90 giá trị tổng ẩm khí quyển trung bình ngày được thu thập. Dữ liệu tổng ẩm khí quyển được lưu trữ dưới dạng file *.TEXT. Đơn vị tính của dữ liệu là mm. Dữ liệu tổng ẩm khí quyển này được sử dụng làm dữ liệu tham chiếu để đánh giá chất lượng và độ tin cậy của tổng ẩm khí quyển tính toán từ số liệu thám không vô tuyến.

2.2.5. Dữ liệu trạm thời tiết tự động

Dữ liệu về nhiệt độ và lượng mưa 24h được thu thập từ thiết bị quan trắc thời tiết tự động Davis 6162 Vantage Pro2 của hãng Davis Instruments tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô. Thiết bị này được lắp đặt trên nóc tòa nhà 9 tầng. Thiết bị quan trắc thời tiết tự động cung cấp dữ liệu đo đạc các thông số nhiệt độ, độ ẩm tương đối, áp suất, gió, lượng mưa, bức xạ tổng cộng với độ phân giải theo thời gian là 1 phút. Độ chính xác của dữ liệu xem trong Bảng 2.2. Dữ liệu quan trắc được lưu theo từng ngày dưới dạng file *.TXT. Trong hình 2.4 là cấu trúc file dữ liệu quan trắc từ trạm thời tiết tự động.



Date	Time	Temp Out	Hi Temp	Low Temp	Out Hum	Dew Pt.	wind Speed	wind Dir	wind Run	Hi Speed	Hi Dir	wind chill	Heat Index	THW Index	T
10/03/22	12:01 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.0	ENE	0.00	0.4	ENE	26.4	30.4	3	3
10/03/22	12:02 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.9	ENE	0.05	0.9	ENE	26.4	30.4	3	3
10/03/22	12:03 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.4	ENE	0.03	0.9	ENE	26.4	30.4	3	3
10/03/22	12:04 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.4	ENE	0.03	0.9	ENE	26.4	30.4	3	3
10/03/22	12:05 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.0	ENE	0.00	0.4	ENE	26.4	30.4	3	3
10/03/22	12:06 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.0	---	0.00	0.0	---	26.4	30.4	3	3
10/03/22	12:07 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.0	---	0.00	0.0	---	26.4	30.4	3	3
10/03/22	12:08 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.0	---	0.00	0.0	---	26.4	30.4	3	3
10/03/22	12:09 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.0	---	0.00	0.0	---	26.4	30.4	3	3
10/03/22	12:10 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.0	---	0.00	0.0	---	26.4	30.4	3	3
10/03/22	12:11 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.0	---	0.00	0.0	---	26.4	30.3	3	3
10/03/22	12:12 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.0	---	0.00	0.0	---	26.4	30.4	3	3
10/03/22	12:13 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.0	---	0.00	0.0	---	26.4	30.3	3	3
10/03/22	12:14 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.0	---	0.00	0.0	---	26.4	30.3	3	3
10/03/22	12:15 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.0	---	0.00	0.0	---	26.4	30.4	3	3
10/03/22	12:16 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.0	---	0.00	0.0	---	26.4	30.4	3	3
10/03/22	12:17 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.0	---	0.00	0.0	---	26.4	30.3	3	3
10/03/22	12:18 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.0	---	0.00	0.0	---	26.4	30.3	3	3
10/03/22	12:19 a	26.3	26.4	26.3	93	25.1	0.0	---	0.00	0.0	---	26.3	30.1	3	3
10/03/22	12:20 a	26.4	26.4	26.4	93	25.2	0.0	ENE	0.00	0.4	ENE	26.4	30.3	3	3
10/03/22	12:21 a	26.3	26.4	26.3	93	25.1	0.0	ENE	0.00	0.4	ENE	26.3	30.1	3	3
10/03/22	12:22 a	26.3	26.4	26.3	93	25.1	0.0	---	0.00	0.0	---	26.3	30.1	3	3
10/03/22	12:23 a	26.3	26.4	26.3	93	25.1	0.0	ENE	0.00	0.4	ENE	26.3	30.1	3	3
10/03/22	12:24 a	26.3	26.4	26.3	93	25.1	0.0	ENE	0.00	0.9	ENE	26.3	30.1	3	3
10/03/22	12:25 a	26.3	26.4	26.3	93	25.1	0.0	ENE	0.00	0.4	ENE	26.3	30.1	3	3
10/03/22	12:26 a	26.3	26.4	26.3	93	25.1	0.0	ENE	0.00	0.4	ENE	26.3	30.1	3	3
10/03/22	12:27 a	26.3	26.3	26.3	93	25.1	0.0	---	0.00	0.0	---	26.3	30.1	3	3
10/03/22	12:28 a	26.3	26.3	26.3	93	25.1	0.0	---	0.00	0.0	---	26.3	30.1	3	3
10/03/22	12:29 a	26.3	26.3	26.3	93	25.1	0.0	ENE	0.00	0.4	ENE	26.3	30.1	3	3
10/03/22	12:30 a	26.3	26.3	26.3	93	25.1	0.0	---	0.00	0.0	---	26.3	30.1	3	3
10/03/22	12:31 a	26.3	26.3	26.3	93	25.1	0.0	---	0.00	0.0	---	26.3	30.1	3	3
10/03/22	12:32 a	26.3	26.3	26.3	93	25.1	0.0	---	0.00	0.0	---	26.3	30.1	3	3
10/03/22	12:33 a	26.3	26.3	26.3	93	25.1	0.0	---	0.00	0.0	---	26.3	30.1	3	3
10/03/22	12:34 a	26.3	26.3	26.3	93	25.1	0.0	---	0.00	0.0	---	26.3	30.0	3	3
10/03/22	12:35 a	26.3	26.3	26.3	93	25.1	0.0	---	0.00	0.0	---	26.3	30.0	3	3
10/03/22	12:36 a	26.3	26.3	26.3	93	25.1	0.4	ENE	0.03	0.9	ENE	26.3	30.1	3	3
10/03/22	12:37 a	26.3	26.3	26.3	93	25.1	0.4	ENE	0.03	0.9	ENE	26.3	30.1	3	3
10/03/22	12:38 a	26.3	26.3	26.3	93	25.1	0.9	ENE	0.05	1.3	ENE	26.3	30.0	3	3

Hình 2.4. Cấu trúc file dữ liệu của thiết bị quan trắc thời tiết tự động.

Bảng 2.2. Thông số kỹ thuật của thiết bị trạm thời tiết tự động.

Cảm biến	Đơn vị đo	Khoảng đo	Độ phân giải	Sai số
Áp suất	hPa	540 hPa – 1100 hPa	0,1 hPa	±0,3 hPa
Nhiệt độ	°C	-40 °C – 65 °C	0,1 °C	±0,5 °C
Độ ẩm tương đối	%	0 % - 100 %	1 %	±3 %
Mưa	mm	0-999,8mm	0,2mm	±0,2mm

2.2.6. Dữ liệu tọa độ tâm bão

Trong luận án, dữ liệu tọa độ tâm bão được thu thập từ dữ liệu Best Track của Cơ quan Khí tượng Nhật Bản từ địa chỉ website <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack.html>. Dữ liệu này được sử dụng để xác định vị trí các thám sát wetPf2 so với tâm bão trong phân tích các trường khí tượng ở khu vực Biển Đông khi có bão hoạt động. Dữ liệu tọa độ tâm bão được thu thập trong thời gian hoạt động của 13 cơn bão năm 2020. Đây là những cơn bão hình thành hoặc di chuyển vào khu vực Biển Đông, bao gồm: bão Nuri (bão số 1), bão Sinlaku

(bão số 2), bão Mekkhala (bão số 3), bão Higos (bão số 4), bão Noul (bão số 5), bão Linfa (bão số 6), bão Nangka (bão số 7), bão Saudel (bão số 8), bão Molave (bão số 9), bão Goni (bão số 10), bão Etau (bão số 12), bão Vamco (bão số 13), bão Krovanh (bão số 14).

66666	2016	015	0018	2016	0	6		NANGKA	20210115
20101100	002	2	167	1199	1004		000		
20101106	002	2	168	1194	1002		000		
20101112	002	2	170	1187	1002		000		
20101118	002	2	172	1180	1000		000		
20101200	002	2	176	1172	1000		000		
20101206	002	3	176	1160	998	035	00000	0000	80210 0150
20101212	002	3	178	1145	996	040	00000	0000	80240 0150
20101218	002	3	179	1134	996	040	00000	0000	80270 0150
20101300	002	3	183	1120	992	045	00000	0000	80300 0150
20101306	002	3	186	1112	992	045	00000	0000	80300 0150
20101312	002	3	190	1104	990	045	00000	0000	20270 0150
20101318	002	3	198	1086	990	045	00000	0000	20270 0150
20101400	002	3	199	1072	996	040	00000	0000	20240 0120
20101406	002	3	199	1066	998	035	00000	0000	20240 0120
20101412	002	2	199	1059	1000	000			

Hình 2.5. Ví dụ về dữ liệu Best Track.

Cấu trúc dữ liệu Best Track thể hiện trong hình 2.5. Dữ liệu Best Track cung cấp các thông tin về bão với độ phân giải theo thời gian là 6h. Đối với số liệu tọa độ bão, vị trí tâm bão được xác định đến 0.1 độ kinh vĩ.

2.2.7. Dữ liệu trên lưới và dữ liệu tái phân tích

Trong luận án này dữ liệu trên lưới và dữ liệu phân tích cũng được thu thập bao gồm FNL, GFS và ERA5. Dữ liệu FNL và GFS được sử dụng làm đầu vào của mô hình WRF trong việc mô phỏng một số trường khí tượng. Dữ liệu ERA5 được sử dụng để tính toán đặc trưng khí hậu của trường nhiệt độ và gió bề mặt vào tháng 2 và tháng 4 ở khu vực Việt Nam và lân cận.

Dữ liệu FNL

Dữ liệu FNL là dữ liệu phân tích được cung cấp bởi Trung tâm Dự báo Môi trường Quốc gia Hoa Kỳ (NCEP). Đây là sản phẩm của Hệ thống đồng hóa dữ liệu toàn cầu (GDAS), liên tục thu thập dữ liệu quan trắc từ Hệ thống viễn thông toàn cầu (GTS) và các nguồn khác. Dữ liệu FNL có độ phân giải theo phương thẳng đứng là 26 mực độ cao (từ 1000mb đến 10mb). Trong nghiên cứu này, số liệu FNL với độ phân giải ngang $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ kinh vĩ được thu thập và sử dụng. Độ phân giải theo thời gian của dữ liệu FNL là 6h (tại 00UTC, 06UTC, 12UTC và 18UTC). Dữ liệu FNL chứa dữ liệu của 27 trường khí tượng. Số liệu FNL được thu thập từ địa chỉ <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/dataaccess/#grib2-202210> trong khoảng thời

gian từ 00UTC ngày 22/09/2022 đến 18UTC ngày 31/03/2023. Dữ liệu này được sử dụng là một trong các dữ liệu tham chiếu để đánh giá chất lượng tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu GNSS. Ngoài ra dữ liệu này còn được sử dụng làm đầu vào của mô hình WRF để mô phỏng các trường khí quyển phục vụ mục đích phân tích, làm rõ hơn các hình thái thời tiết.

Dữ liệu GFS

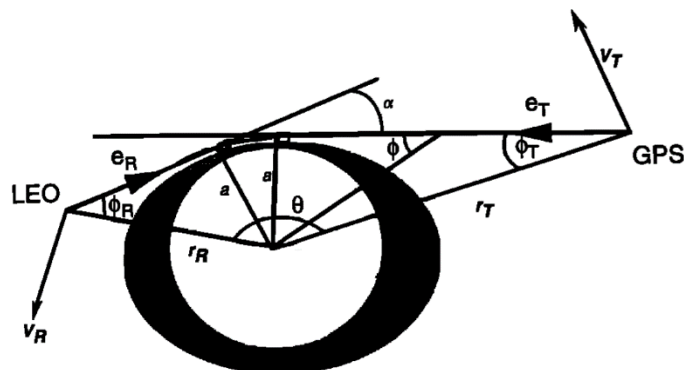
Số liệu dự báo GFS là sản phẩm của Hệ thống Dự báo Toàn cầu do NCEP cung cấp, bao phủ trên lưới có độ phân giải $0,25 \times 0,25$ độ kinh vĩ. Độ phân giải theo thời gian dự báo tại từng thời điểm là khoảng 3 giờ từ 0 đến 240 giờ. Số liệu GFS được thu thập từ địa chỉ <https://rda.ucar.edu/datasets/d084003/dataaccess/#> trong khoảng thời gian hoạt động trên Biển Đông của 13 cơn bão năm 2020. Dữ liệu này được sử dụng làm đầu vào của mô hình WRF để mô các trường khí quyển phục vụ mục đích đánh giá số liệu wetPf2 và phân tích kết quả.

Dữ liệu ERA5

ERA5 là số liệu phân tích thể hệ thứ 5 của Trung tâm Dự báo hạn vừa Châu Âu (ECMWF) về khí hậu và thời tiết toàn cầu. ERA5 cung cấp các dữ liệu hàng giờ một số lượng lớn các biến về khí quyển, đại dương- sóng, và đất liền. ERA5 có độ phân giải ngang là $0,25$ độ kinh vĩ. Trong khuôn khổ của luận án, dữ liệu nhiệt độ 2m và gió 10m của tháng 2 và tháng 4 được thu thập trong khoảng thời gian 30 năm từ năm 1991 đến 2020 để tính giá trị trung bình khí hậu phục vụ cho việc minh giải kết quả khi phân tích đặc trưng nhiệt, ẩm của khối khí biển từ dữ liệu wetPf2. Dữ liệu ERA5 được thu thập từ địa chỉ <https://cds.climate.copernicus.eu>.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phương pháp che khuất vô tuyến



Hình 2.6. Sơ đồ mô tả phương pháp che khuất vô tuyến [3].

Trong phép tính gần đúng quang học hình học đối với sự lan truyền của sóng điện từ, một tín hiệu sóng điện từ truyền qua khí quyển sẽ bị khúc xạ tuân theo định luật Snell do gradient thẳng đứng của mật độ khí quyển và được gọi là chỉ số khúc xạ. Ảnh hưởng tổng thể của khí quyển có thể được đặc trưng bởi tổng góc lệch α , khoảng cách tia tiệm cận a và bán kính tiếp tuyến r_t như trong hình 2.6.

Khi tia tín hiệu đi xuống hoặc đi lên trong quá trình truyền qua lớp khí quyển Trái Đất, sự biến đổi của α theo a hoặc r phụ thuộc vào profile thẳng đứng của chỉ số khúc xạ khí quyển n [3].

$$\alpha(a) = 2 \int_{r_t}^{\infty} d\alpha = 2a \int_{r_t}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{r^2 n^2 - a^2}} \frac{dn(n)}{dr} dr \quad (1)$$

Trong đó r là khoảng cách từ tâm của đường cong. Phương trình trên tính giá trị $\alpha(a)$ tương ứng với $n(r)$ xác định trước. Phương trình này có thể được nghịch đảo bằng phép biến đổi Abelian để tính $n(r)$ từ các thông số α và a .

$$n(r) = \text{Exp} \left[\frac{1}{\pi} \int_{a_1}^{\infty} \frac{\alpha}{\sqrt{a^2 - a_1^2}} da \right] \quad (2)$$

Trong đó $a_1 = nr$ là tham số ảnh hưởng của tia có bán kính tiếp tuyến là r .

Chỉ số khúc xạ khí quyển có thể được tính gần đúng bằng phương trình như sau [77]:

$$N = (n - 1) \times 10^6 = 77,6 \frac{P}{T} + 3,73 \times 10^5 \frac{P_w}{T^2} \quad (3)$$

Trong đó N là chỉ số khúc xạ khí quyển, P là áp suất, T nhiệt độ, P_w là áp suất hơi nước. Số hạng thứ nhất và thứ hai của vế phải tương ứng đặc trưng cho sự đóng góp của thành phần thủy tĩnh và thành phần ẩm vào chỉ số khúc xạ. Để có thể tính toán được P , T , P_w từ giá trị N xác định, phương trình cân bằng thủy tĩnh và định luật khí lý tưởng được sử dụng:

$$\frac{dP}{dh} = -g\rho \quad (4)$$

$$\rho = \rho_d + \rho_w = \frac{m_d P}{TR} + \frac{(m_w - m_d) P_w}{TR} \quad (5)$$

Trong đó:

h : độ cao

g : gia tốc trọng trường

ρ : mật độ tổng cộng của không khí

ρ_d : mật độ không khí khô

ρ_w : mật độ không khí ướt

m_d : khối lượng phân tử trung bình của không khí khô

m_w : khối lượng phân tử trung bình của không khí ướt

T : nhiệt độ

R : hằng số khí

Kết hợp phương trình (4) và (5) và thay thế P/T trong phương trình (3) vào kết quả thu được:

$$\frac{dP}{dh} = -\frac{gm_d}{a_1 R} N + \frac{a_2 gm_d}{a_1 R} \frac{P_w}{T^2} + \frac{g(m_d - m_w)}{R} \frac{P_w}{T} \quad (6)$$

Với giá trị N xác định, phương trình (1) kết hợp với phương trình (6) thành hệ hai phương trình với ba biến gồm: P , T , P_w . Bởi vì áp suất hơi nước bão hòa giảm theo hàm số mũ đối với sự giảm của nhiệt độ, tỉ số xáo trộn hơi nước đạt khoảng một phần triệu trong tầng giữa của khí quyển do đó P_w có thể được bỏ qua trong phần trên của tầng đối lưu từ độ cao tương ứng với nhiệt độ $\sim 230K$. Tại các độ cao này, tham số T và P có thể tính toán được từ tham số N thông qua hệ phương trình (3) và (6). Trong trường hợp P_w là đáng kể, như ở trong lớp giữa và dưới của tầng đối lưu, cần thiết biết được một tham số độc lập trong ba tham số (P , T , P_w) để có thể tính toán được 2 tham số còn lại. Do đó cách tiếp cận để xác định các tham số này là giả thiết xác định được tham số $T(h)$ và áp suất tại một số mực độ cao dưới dạng một điều kiện biên sau đó hệ phương trình gồm phương trình (3) và (6) được giải lặp lại (phương pháp số trị) như sau: (1) đầu tiên giả thiết $P_w(h) = 0$; (2) tích phân theo phương trình (6) để nhận được tham số $P(h)$; (3) thay $P(h)$ và $T(h)$ vào phương trình (3) để tính toán tham số $P_w(h)$; (4) lặp lại các bước (2) và (3) cho đến khi thỏa mãn điều kiện hội tụ [77].

2.2.2. Tính toán tổng ảm khí quyển từ dữ liệu GNSS

Dữ liệu từ Hệ thống vệ tinh định vị toàn cầu (GNSS) quan trắc tại bề mặt ở trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô được sử dụng để tính toán giá trị tổng ảm của khí quyển. Trước tiên độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu và độ trễ thiên đỉnh ướt (ZWD) được tính toán từ dữ liệu GNSS.

Như chúng ta đã biết, tín hiệu phát ra từ hệ thống vệ tinh định vị toàn cầu (GNSS) truyền đến thiết bị thu tại mặt đất sẽ bị trễ do ảnh hưởng của khí quyển Trái Đất trong đó có tầng đối lưu. Tầng đối lưu là phần thấp nhất của khí quyển, độ dày

của tầng này biến đổi trong khoảng từ 7km - 8km ở vùng cực đến hơn 16km ở vùng nhiệt đới [78]. Độ trễ của tín hiệu phát ra từ hệ thống vệ tinh định vị toàn cầu truyền đến bề mặt Trái Đất do ảnh hưởng của tầng đối lưu được gọi là độ trễ tầng đối lưu. Độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu được xác định như sau [31]:

$$ZTD = \int_H^{+\infty} [n(z) - 1] dz \quad (7)$$

Trong đó ZTD là độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu, $n(z)$ là chỉ số khúc xạ của khí quyển tại độ cao z , H là độ cao của thiết bị thu. ZTD là tổng của hai thành phần độ trễ của khí quyển: độ trễ thiên đỉnh thủy tinh (ZHD) và độ trễ thiên đỉnh ướt (ZWD) [31]:

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (8)$$



Stonex S800A S813590301024						English
Select	Name	Size (MB)	Antenna Height (m)	Start Time	End Time	Operation
☐	10240271.dat	415.502	0.000	2024-01-27 11:27:29	2024-01-27 17:07:53	Convert Download Delete Edit
☐	10240291.dat	347.066	0.000	2024-01-29 17:07:57	2024-01-29 13:27:38	Convert Download Delete Edit

Hình 2.7. Phần mềm đi kèm thiết bị.

Trong luận án này, phần mềm trực tuyến CSRS-PPP của Cơ quan Tài nguyên Thiên nhiên Canada được sử dụng để tính toán giá trị ZHD và ZWD từ dữ liệu thu tín hiệu GNSS tại mặt đất. Trước tiên, các dữ liệu quan trắc từ thiết bị thu GNSS tại mặt đất được chuyển về file định dạng RINEX bằng phần mềm đi kèm được cài đặt trong thiết bị (Hình 2.7). RINEX là định dạng file đầu vào của phần mềm trực tuyến CSRS-PPP. Tiếp đó, dữ liệu RINEX được upload vào phần mềm CSRS-PPP qua địa chỉ <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/geodetic-reference-systems/data/10923>. Để tính toán ZWD và ZHD, khung quy chiếu quốc tế ITRF2020 được lựa chọn trong giao diện của phần mềm. Phần mềm trực tuyến CSRS-PPP được xây dựng dựa trên phương trình tính trị đo pha và trị đo khoảng cách [79].

$$\Phi_i = \rho + c(dT - dt) + TD - I_i + \lambda_i N_i + A_i - a_i + (W_\Phi - w_\Phi) \lambda_i + B_{\Phi_i} - b_{\Phi_i} + D + RE + M_{\Phi_i} + n_{\Phi_i} \quad (9)$$

$$P_i = \rho + c(dT - dt) + TD + I_i + A_i - a_i + B_{P_i} - b_{P_i} + D + RE + M_{P_i} + n_{P_i} \quad (10)$$

Trong đó:

Φ_i : trị đo pha đối với tần số thứ i

P_i : trị đo giả khoảng cách thứ i

ρ : khoảng cách giữa vệ tinh và thiết bị thu

c : vận tốc ánh sáng trong chân không

dT : sai số đồng hồ của thiết bị thu

dt : sai số đồng hồ của vệ tinh

TD : độ trễ tầng đối lưu

I_i : độ trễ do tầng điện ly đối với tần số thứ i

λ_i : bước sóng của tần số thứ i

N_i : tham số đa trị đối với tần số thứ i

A_i : tham số hiệu chỉnh biến đổi hướng của anten đối với tần số thứ i

a_i : tham số hiệu chỉnh biến đổi hướng của vệ tinh đối với tần số thứ i

W_Φ : hiệu ứng đối với trị pha của anten máy thu

w_Φ : hiệu ứng đối với trị pha của anten vệ tinh

B_{Φ_i} : sai số do thiết bị thu đến trị đo pha tương ứng tần số thứ i

B_{P_i} : sai số do thiết bị thu đến trị đo giả khoảng cách tương ứng với tần số thứ

i

b_{Φ_i} : sai số do vệ tinh đến trị đo pha tương ứng tần số thứ i

b_{P_i} : sai số do vệ tinh đến trị đo giả khoảng cách tương ứng với tần số thứ i

D : kết hợp của các hiệu ứng dịch chuyển vị trí trạm do Trái Đất, thủy triều đại dương và tải trọng của khí quyển.

RE : hiệu ứng tương đối

M_{Φ_i} : ảnh hưởng của đa đường đến trị đo pha tương ứng với tần số thứ i

M_{P_i} : ảnh hưởng của đa đường đến trị đo giả khoảng cách tương ứng với tần số thứ i

n_{Φ_i} : nhiễu quan trắc trị đo pha và các hiệu ứng không được mô hình hóa khác tương ứng với tần số thứ i

n_{P_i} nhiều quan trắc trị đo giả khoảng cách và các hiệu ứng không được mô hình hóa khác tương ứng với tần số thứ i

Để loại bỏ ảnh hưởng trễ do tầng điện ly, việc kết hợp hai dải tần số của thiết bị thu được sử dụng để tính toán trị đo pha và trị đo giả khoảng cách như sau:

$$\Phi_{IF} = (f_1^2 \cdot \Phi_1 - f_2^2 \cdot \Phi_2) / (f_1^2 - f_2^2) \quad (11)$$

$$P_{IF} = (f_1^2 \cdot P_1 - f_2^2 \cdot P_2) / (f_1^2 - f_2^2) \quad (12)$$

Trong đó Φ_{IF} và P_{IF} là trị đo pha và trị đo giả khoảng cách đã loại bỏ ảnh hưởng của tầng điện ly, f_1 và f_2 là tần số tương ứng với 2 dải tần của thiết bị thu.

```

%TRO 0.01 EMR 23:102:56438 EMR 22:265:05520 22:266:04590 P 1024
+TROP/DESCRIPTION
*      KEYWORD      VALUE(S)
ELEVATION CUTOFF ANGLE 7.5
SAMPLING INTERVAL      30
TROP MAPPING FUNCTION   VMF1_HT
SOLUTION_FIELDS_1       TRODRY TROWET STDDEV TGN TOT STDDEV TGETOT STDDEV
-TROP/DESCRIPTION
+TROP/STA_COORDINATES
*SITE PT SOLN T STA_X STA_Y STA_Z SYSTEM REMRK
1024 A 1 P -1621445.433 5730192.133 2276347.036 IGB14 CSRS-PPP
-TROP/STA_COORDINATES
+TROP/SOLUTION
*SITE EPOCH TRODRY TROWET STDDEV TGN TOT STDDEV TGETOT STDDEV
1024 22:265:05520 2297.6 368.5 14.4 -2.5 1.3 0.6 1.5
1024 22:265:05550 2297.6 368.5 14.2 -2.5 1.3 0.6 1.5
1024 22:265:05580 2297.8 368.6 14.1 -2.5 1.3 0.6 1.5
1024 22:265:05610 2297.8 368.6 14.0 -2.5 1.3 0.6 1.5
1024 22:265:05640 2297.6 368.5 13.8 -2.5 1.3 0.6 1.5
1024 22:265:05670 2297.7 368.5 13.7 -2.5 1.3 0.6 1.5
1024 22:265:05700 2297.6 368.5 13.6 -2.5 1.3 0.6 1.5
1024 22:265:05730 2297.7 368.6 13.5 -2.5 1.3 0.6 1.5
1024 22:265:05760 2297.7 368.6 13.4 -2.5 1.3 0.6 1.4
1024 22:265:05790 2297.7 368.6 13.3 -2.5 1.3 0.6 1.4
1024 22:265:05820 2297.7 368.6 13.2 -2.5 1.3 0.6 1.4
1024 22:265:05850 2297.6 368.6 13.1 -2.5 1.3 0.6 1.4
1024 22:265:05880 2297.6 368.6 13.0 -2.5 1.3 0.6 1.4
1024 22:265:05910 2297.6 368.6 12.9 -2.5 1.3 0.6 1.4
Ln 1, Col 1 194,443 characters 100% Unix (LF) UTF-8

```

Hình 2.8. Cấu trúc file dữ liệu đầu ra của công cụ CSRS-PPP.

Sau khi sử dụng phần mềm trực tuyến CSRS-PPP để tính toán, kết quả tính toán được lưu trong file có định dạng *.TRO. Cấu trúc của file dữ liệu trong file gồm 2 phần chính: phần chứa các thông tin chung (14 dòng đầu) và phần dữ liệu (từ dòng 15). Trong hình 2.8 là cấu trúc file đầu ra của phần mềm trực tuyến CSRS-PPP. Phần dữ liệu được phân chia thành 9 cột tương ứng với các thông số: tên trạm, thời gian, độ trễ thiên đỉnh thủy tĩnh, độ trễ thiên đỉnh ướt, độ lệch chuẩn tương ứng với (95%)

độ trễ thiên đỉnh ướt, gradient ước tính tầng đối lưu theo hướng bắc (Estimated North Tropospheric Gradient), độ lệch chuẩn tương ứng, gradient ước tính tầng đối lưu theo hướng đông (Estimated East Tropospheric Gradient) và độ lệch chuẩn tương ứng. Dữ liệu này có độ phân giải theo thời gian là 30 giây.

Số liệu độ trễ thiên đỉnh ướt tính toán từ phần mềm trực tuyến CSRS-PPP ở bên trên sẽ được sử dụng để tính toán giá trị tổng ẩm của khí quyển. Theo các tác giả [31], giá trị tổng ẩm khí quyển (mm) sẽ được tính toán từ dữ liệu ZWD (mm) như sau:

$$TPW = ZWD/k \quad (14)$$

Trong đó k là hệ số được tính bằng công thức thực nghiệm như sau:

$$k = 461,5 * 10^{-5} * \left[3,719 * \frac{10^5}{T_m} + 16,4221 \right] \quad (15)$$

Trong đó T_m là giá trị nhiệt độ trung bình của cột khí quyển.

Giá trị T_m có thể được tính toán bằng nhiều công thức thực nghiệm khác nhau tùy thuộc từng khu vực. Trong các nghiên cứu ở Việt Nam, các tác giả [58] đã sử dụng công thức tính giá trị T_m trung bình của [26] từ dữ liệu nhiệt độ bề mặt của mô hình toàn cầu. Gần đây, các tác giả [80] đã xây dựng công thức tính toán nhiệt độ trung bình cột khí quyển cho khu vực Việt Nam. Tuy nhiên theo các tác giả công thức tính toán này mới được khẳng định có độ chính xác cao trong tháng 01/2022 và cần phải đánh giá thêm độ chính xác đối với các mùa trong năm. Sau khi phân tích xem xét, phương pháp tính nhiệt độ trung bình cột khí quyển theo công thức của [26] được lựa chọn.

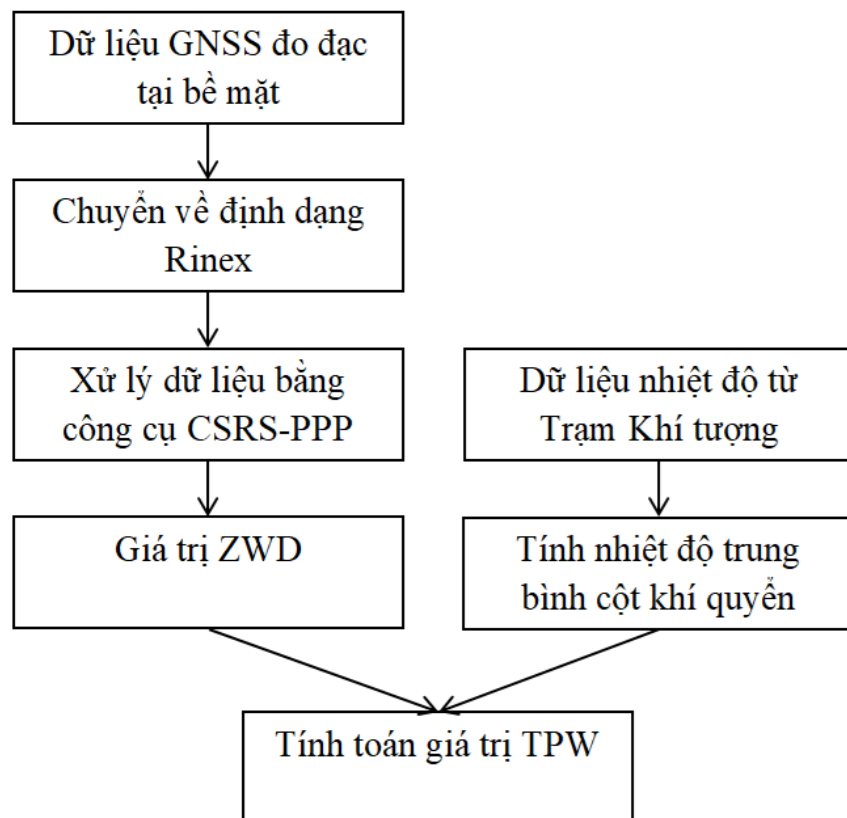
T_m (K) có thể được xấp xỉ bằng cách [26]:

$$T_m = 70,2 + 0,72 * T_s \quad (16)$$

T_s (K) là nhiệt độ quan trắc tại bề mặt.

Trong luận án, giá trị nhiệt độ không khí quan trắc từ trạm thời tiết tự động được lắp đặt tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô (cách thiết bị đo GNSS khoảng 5m) đã được sử dụng để tính toán giá trị nhiệt độ trung bình cột khí quyển. Đối với các công trình nghiên cứu trước đây ở Việt Nam, các tác giả thường sử dụng dữ liệu nhiệt độ bề mặt từ mô hình toàn cầu để tính toán nhiệt độ trung bình của cột khí quyển, phương pháp này chỉ tính toán được tại một số thời điểm trong ngày. Việc tính toán sử dụng dữ liệu nhiệt độ quan trắc tại trạm cho phép tính toán được dữ liệu nhiệt độ

trung bình cột khí quyển với độ phân giải thời gian rất cao. Số liệu nhiệt độ đo đạc từ trạm thời tiết tự động có độ phân giải theo thời gian là 1 phút. Trong khi đó, giá trị độ trễ ướt thiên đỉnh có độ phân giải theo thời gian là 0,5 phút, để phù hợp với độ phân giải của dữ liệu nhiệt độ từ số liệu trạm thời tiết tự động, số liệu độ trễ ướt thiên đỉnh được đưa về với độ phân giải theo thời gian là 1 phút. Trong trường hợp này, giá trị ZWD được chọn tại thời điểm tròn phút. Hình 2.9 trình bày sơ đồ các bước tính toán giá trị tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu GNSS.



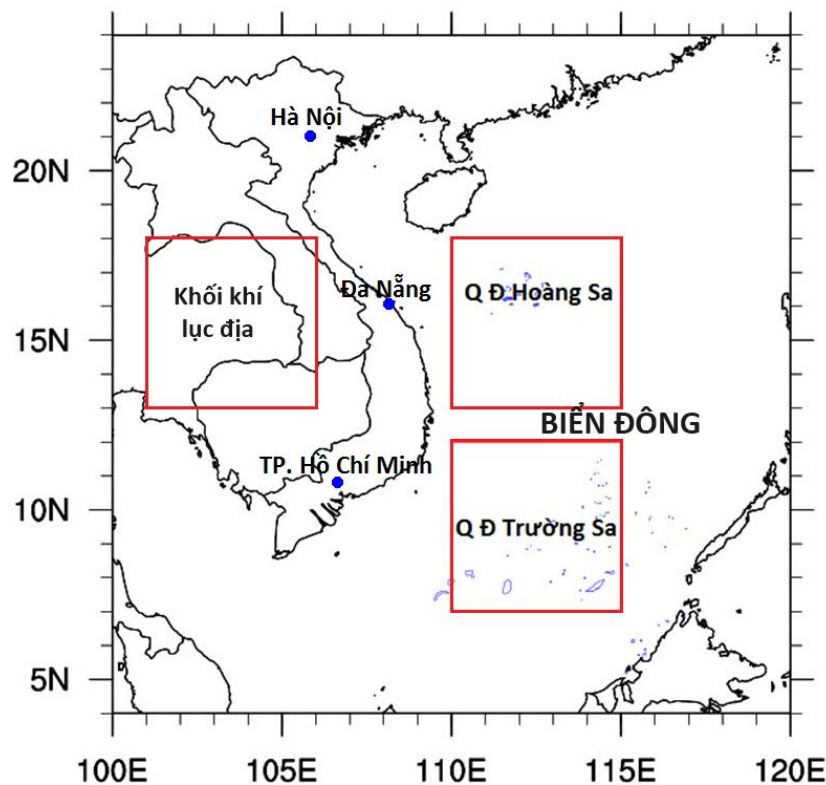
Hình 2.9. Sơ đồ các bước tính toán giá trị tổng ẩm khí quyển.

2.2.3. Đánh giá các thông số khí quyển tính toán từ dữ liệu sóng vô tuyến

2.2.2.1. Đánh giá số liệu nhiệt độ, độ ẩm tương đối, chỉ số khúc xạ khí quyển từ dữ liệu wetPf2

Để đánh giá chất lượng của số liệu GPSRO trong việc quan trắc các trường khí quyển, các nghiên cứu trước đây thường so sánh các thông số khí quyển như (nhiệt độ không khí, áp suất hơi nước, chỉ số khúc xạ khí quyển, độ ẩm tương đối, độ ẩm tuyệt đối) từ số liệu GPSRO với các đại lượng tương ứng đo đạc từ thám không vô

tuyến và số liệu tái phân tích toàn cầu. Trong luận án này, để đánh giá chất lượng số liệu COSMIC-2 trên khu vực Việt Nam và lân cận, profile của nhiệt độ không khí, độ ẩm tương đối, chỉ số khúc xạ khí quyển từ dữ liệu wetPf2 (COSMIC-2) được so sánh với các thông số tương ứng từ dữ liệu thám không vô tuyến quan trắc tại 3 trạm: Hà Nội (Láng) ($21,01^{\circ}\text{N}$ $105,80^{\circ}\text{E}$), Đà Nẵng ($16,03^{\circ}\text{N}$ $108,20^{\circ}\text{E}$), Tân Sơn Hòa (Thành phố Hồ Chí Minh) ($10,81^{\circ}\text{N}$ $106,66^{\circ}\text{E}$). Đây là những trạm thám không vô tuyến chính quan trắc hai lần một ngày tại thời điểm 7h (00UTC) và 19h (12UTC). Vị trí ba trạm thám không vô tuyến được biểu diễn trong hình 2.10. Ba trạm thám không vô tuyến này phân bố tại 3 miền (Miền Bắc, Miền Trung, Miền Nam) của Việt Nam nên việc so sánh giữa số liệu COSMIC-2 với số liệu quan trắc tại 3 trạm này cho phép đánh giá được chất lượng của số liệu COSMIC-2 ở khu vực Việt Nam.



Hình 2.10. Vị trí 3 trạm thám không vô tuyến và các khối khí.

Một trong các bước quan trọng để đánh giá số liệu GPSRO là lựa chọn cặp số liệu GPSRO và số liệu thám không vô tuyến tương ứng để so sánh. Nhiều tác giả đã đề xuất các tiêu chí lựa chọn cặp số liệu so sánh khác nhau trong nghiên cứu của họ.

Các tiêu chí này đều dựa trên sự chênh lệch về khoảng cách và thời gian giữa 2 số liệu: chênh lệch 300km và 2h [14]; chênh lệch 100km, 200km, 300km và 1h, 2h, 3h [11, 13]; chênh lệch 100km và 1h [15]; chênh lệch 25km, 75km, 125km, 175km, 225km, 275km và 0,5h, 1,5h, 2,5h, 3,5h, 4,5h, 5,5h [12]. Trong luận án này, tiêu chuẩn lựa chọn các cặp dữ liệu dựa trên sự chênh lệch lớn nhất về thời gian là 1h, 2h, 3h và chênh lệch lớn nhất về không gian là 100km, 200km, 300km để tạo thành các nhóm số liệu so sánh, bao gồm 9 nhóm số liệu (Bảng 2.3). Do dữ liệu quan trắc từ các trạm thám không vô tuyến tại hai thời điểm trong ngày (7h và 19h giờ địa phương), nên các profile dữ liệu wetPf2 được lựa chọn cách thời điểm 7h và 19h tương ứng là 1h, 2h và 3h. Cách phân chia nhóm như trên cho phép đánh giá được chi tiết ảnh hưởng sự khác biệt về thời gian và sự khác biệt về không gian đến sai số giữa hai nguồn dữ liệu.

Bảng 2.3. Nhóm số liệu lựa chọn cặp số liệu so sánh.

	Chênh lệch $\leq 1h$	Chênh lệch $\leq 2h$	Chênh lệch $\leq 3h$
Khoảng cách $\leq 100km$	GP1	GP2	GP3
Khoảng cách $\leq 200km$	GP4	GP5	GP6
Khoảng cách $\leq 300km$	GP7	GP8	GP9

Khoảng cách giữa vị trí thám sát wetPf2 và số liệu thám không vô tuyến được tính theo công thức:

$$d = \text{acos}(\sin\varphi_1 \cdot \sin\varphi_2 + \cos\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2 \cdot \cos(\lambda_2 - \lambda_1)) \cdot Re \quad (17)$$

Trong đó d là khoảng cách giữa vị trí thám sát wetPf2 và vị trí của trạm thám không vô tuyến, φ_1, λ_1 là vĩ độ và kinh độ của trạm thám không vô tuyến, φ_2, λ_2 là vĩ độ và kinh độ của thám sát wetPf2, Re là bán kính trái đất (6371km).

Sau khi lựa chọn được các cặp số liệu tương ứng với các nhóm số liệu bên trên, số liệu nhiệt độ, độ ẩm tương đối, chỉ số khúc xạ khí quyển từ dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến sẽ được nội suy về cùng mức độ cao. Do số liệu GPSRO có độ phân giải theo phương thẳng đứng là 50m và cao hơn so với số liệu thám không vô tuyến nên để giảm sai số trong quá trình nội suy số liệu GPSRO thường được nội suy về cùng mức với số liệu thám không vô tuyến. Các nghiên cứu trước đây đã cho thấy có hai phương pháp đưa các loại dữ liệu này về cùng mức độ cao: (1) Phương

pháp nội suy số liệu GPSRO về cùng độ cao so với bề mặt của số liệu thám không vô tuyến [15, 81]; (2) Phương pháp nội suy số liệu GPSRO về cùng mực khí áp của số liệu thám không vô tuyến [11, 12, 14]. Trong luận án này, phương pháp nội suy số liệu nhiệt độ, độ ẩm tương đối, chỉ số khúc xạ của wetPf2 về các mực đẳng áp chuẩn 925mb, 850mb, 700mb, 500mb, 400mb, 300mb, 250mb, 200mb, 150mb, 100mb được lựa chọn theo phương pháp của [12]. Các thông số nhiệt độ, độ ẩm tương đối và chỉ số khúc xạ được nội suy về 10 mực áp suất theo công thức bên dưới:

$$T = \alpha \cdot T_1 + \beta \cdot T_2 \quad (18)$$

$$RH = \alpha \cdot RH_1 + \beta \cdot RH_2 \quad (19)$$

$$N = \alpha \cdot N_1 + \beta \cdot N_2 \quad (20)$$

$$\alpha = \frac{\ln P - \ln P_2}{\ln P_1 - \ln P_2} \quad (21)$$

$$\beta = \frac{\ln P_1 - \ln P}{\ln P_1 - \ln P_2} \quad (22)$$

Trong đó T, RH và N tương ứng là nhiệt độ, độ ẩm tương đối và chỉ số khúc xạ của khí quyển tại mực áp suất P; T_1 , RH_1 , N_1 là nhiệt độ, độ ẩm tương đối và chỉ số khúc xạ của khí quyển tại mực áp suất P_1 ; T_2 , RH_2 , N_2 là nhiệt độ, độ ẩm tương đối và chỉ số khúc xạ của khí quyển tại mực áp suất P_2 .

Do sự biến đổi của độ ẩm tương đối trong tầng đối lưu là đáng kể, việc nội suy các giá trị giữa các mực khác nhau, đặc biệt là ở lớp phía trên của tầng đối lưu (250mb, 200mb, 150mb, 100mb hoặc gần với đỉnh tầng đối lưu), có thể đưa ra các sai số không mong muốn. Mặc dù không thể tránh khỏi những sai số không mong muốn nhưng với độ phân giải theo chiều thẳng đứng của dữ liệu wetPf2 là rất cao (khoảng cách 50m), việc áp dụng phương pháp nội suy có trọng số (công thức 19) để nội suy độ ẩm tương đối trong tập dữ liệu này có thể làm giảm các sai số nội suy.

Trong số liệu thám không vô tuyến không đo đạc trực tiếp chỉ số khúc xạ khí quyển, số liệu chỉ số khúc xạ khí quyển được tính toán thông qua các số liệu đo đạc khác (nhiệt độ, áp suất và độ ẩm tương đối) của dữ liệu thám không vô tuyến. Trước tiên, giá trị áp suất riêng của hơi nước bão hòa được tính toán thông qua giá trị nhiệt độ không khí [82]:

$$P_{ws} = 6,112 * e^{\frac{17,62t}{243,12+t}} \quad (\text{khi } t \geq -45^\circ\text{C}) \quad (23)$$

$$P_{ws} = 6,112 * e^{\frac{17,62t}{243,12+t}} * F(P) \quad (\text{khi } t < -45^\circ\text{C}) \quad (24)$$

$$F(P) = 1,0016 + 3,15 * 10^{-6} * P - \frac{0,074}{P} \quad (25)$$

Trong đó P_{ws} là áp suất riêng của hơi nước bão hòa, t là nhiệt độ ($^{\circ}\text{C}$), P là áp suất (hPa).

Tiếp đến tính toán giá trị áp suất của hơi nước từ độ ẩm tương đối (RH, %) và áp suất riêng của hơi nước bão hòa (P_{ws} , hPa):

$$P_w = RH * P_{ws}/100 \quad (26)$$

Chỉ số khúc xạ khí quyển (N) được tính toán theo công thức [12]:

$$N = 77,6 \frac{P}{T} + 3,73 * 10^5 \frac{P_w}{T^2} \quad (27)$$

Trong đó N là chỉ số khúc xạ của khí quyển, P_w (hPa) là áp suất riêng của hơi nước, RH là độ ẩm tương đối (%), P là áp suất (hPa), T là nhiệt độ không khí (K).

Sau khi các thông số nhiệt độ không khí, độ ẩm tương đối, chỉ số khúc xạ khí quyển của dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến được đưa về cùng mực áp suất, các chỉ số thống kê sai số trung bình, độ lệch chuẩn của sai số và hệ số tương quan giữa số liệu wetPf2 và số liệu thám không vô tuyến được sử dụng để đánh giá chất lượng của số liệu wetPf2.

$$\Delta T = T^W - T^R \quad (28)$$

$$\Delta T_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta(T_i^W - T_i^R) \quad (29)$$

$$\Delta RH = RH^W - RH^R \quad (30)$$

$$\Delta RH_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta(RH_i^W - RH_i^R) \quad (31)$$

$$\Delta N = N^W - N^R \quad (32)$$

$$\Delta N_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta(N_i^W - N_i^R) \quad (33)$$

$$SD_{\Delta T} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \Delta T_m)^2} \quad (34)$$

$$SD_{\Delta RH} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta RH_i - \Delta RH_m)^2} \quad (35)$$

$$SD_{\Delta N} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta N_i - \Delta N_m)^2} \quad (36)$$

Trong đó: T^W , RH^W và N^W là nhiệt độ, độ ẩm tương đối và chỉ số khúc xạ khí quyển của số liệu wetPf2; T^R , RH^R và N^R là nhiệt độ, độ ẩm tương đối và chỉ số

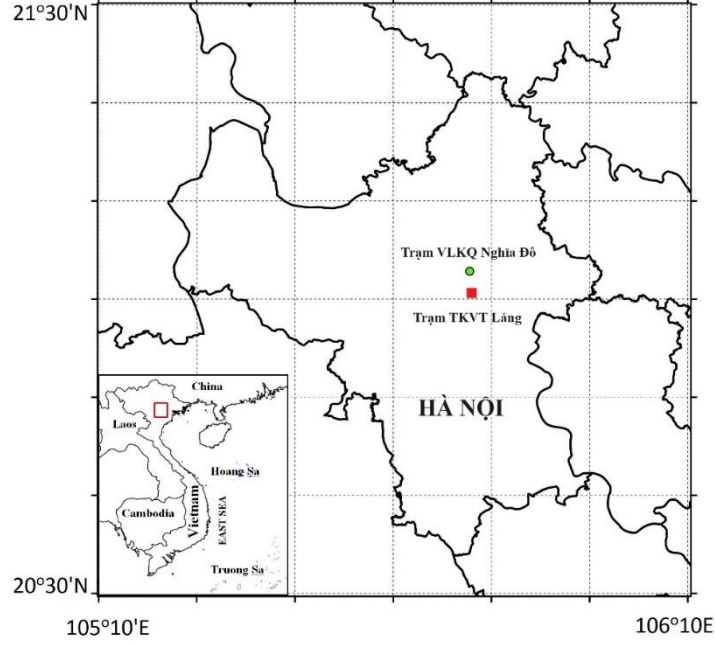
khúc xạ khí quyển của số liệu thám không vô tuyến hoặc kết quả mô phỏng từ mô hình WRF; ΔT , ΔRH và ΔN là sai số của nhiệt độ, độ ẩm tương đối và chỉ số khúc xạ khí quyển giữa số liệu wetPf2 và số liệu thám không vô tuyến hoặc kết quả mô phỏng từ mô hình; ΔT_m , ΔRH_m và ΔN_m là sai số trung bình của nhiệt độ, độ ẩm tương đối và chỉ số khúc xạ khí quyển; $SD_{\Delta T}$, $SD_{\Delta RH}$ và $SD_{\Delta N}$ là độ lệch chuẩn của sai số nhiệt độ, độ ẩm tương đối và chỉ số khúc xạ khí quyển; n số lượng mẫu (cặp số liệu so sánh).

2.1.2.2. Đánh giá số liệu tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS

Để đánh giá chất lượng của số liệu tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS nói chung và GPS nói riêng, các nghiên cứu trước đây thường so sánh dữ liệu tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS với tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu thám không vô tuyến [50, 83], dữ liệu AERONET [84, 85] và dữ liệu tái phân tích [58, 59]. Trên cơ sở tham khảo các nghiên cứu trước đây, việc đánh giá chất lượng tổng ẩm tính toán từ dữ liệu GNSS tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô được thực hiện bằng cách so sánh với sản phẩm tổng ẩm từ số liệu thám không vô tuyến quan trắc tại trạm Láng (Hà Nội) và từ dữ liệu AERONET quan trắc tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô. Do đặc thù của dữ liệu thám không vô tuyến là quan trắc 2 lần/ ngày nên số liệu tổng ẩm khí quyển tức thời tại 7h và 19h (giờ địa phương) xác định từ dữ liệu GNSS bề mặt được so sánh với dữ liệu thám không vô tuyến. Đối với trường hợp so sánh tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS và sản phẩm của trạm AERONET, giá trị tổng ẩm khí quyển trung bình ngày được sử dụng. Giá trị tổng ẩm khí quyển trung bình ngày từ dữ liệu GNSS bề mặt được tính trung bình từ chuỗi số liệu tức thời trong khoảng thời gian từ 0:01 UTC đến 24:00UTC để tương ứng với số liệu tổng ẩm khí quyển trung bình ngày của AERONET.

Vị trí của Trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô (21,048°N, 105,799°E) và trạm thám không vô tuyến Hà Nội (Láng) (21,01°N 105,80°E) được thể hiện trong hình 2.11. Các thiết bị AERONET và thiết bị thu GNSS cùng được lắp đặt ở trạm Nghĩa Đô, khoảng cách giữa hai thiết bị này khoảng 3m. Khoảng cách giữa trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô và trạm thám không vô tuyến Hà Nội (Láng) khoảng 4km. Với những khoảng cách như vậy, việc sử dụng dữ liệu tổng ẩm khí quyển quan trắc từ trạm thám không vô tuyến Hà Nội và từ hệ thống AERONET tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa

Đồ để đánh giá tổng ẩm khí quyển tính toán từ GNSS tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô
Đồ là hợp lý.



Hình 2.11. Vị trí trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô (hình tròn màu xanh) và trạm thám không vô tuyến Hà Nội (Láng) (hình vuông màu đỏ).

Trong luận án này, các đại lượng thống kê sai số trung bình, sai số tuyệt đối trung bình, sai số tương đối trung bình, sai số bình phương trung bình và hệ số tương quan được sử dụng để đánh giá chất lượng kết quả tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{GPS} - X_{PRO}) \quad (37)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{GPS} - X_{PRO})^2} \quad (38)$$

$$RMAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{GPS} - X_{PRO}}{X_{GPS}} \right| 100\% \quad (39)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{GPS} - \bar{X}_{GPS})(X_{PRO} - \bar{X}_{PRO})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{GPS} - \bar{X}_{GPS})^2 \sum_{i=1}^n (X_{PRO} - \bar{X}_{PRO})^2}} \quad (40)$$

trong đó ME, RMSE, RMAE, R tương ứng là sai số trung bình, sai số bình phương trung bình, sai số tương đối trung bình và hệ số tương quan, X_{GPS} là tổng ẩm khí quyển tính từ số liệu GNSS, X_{PRO} là sản phẩm tổng ẩm khí quyển từ số liệu

Aeronet, dữ liệu thám không vô tuyến và kết quả mô phỏng mô hình WRF, $\overline{X_{GPS}}$ và $\overline{X_{PRO}}$ là giá trị trung bình của X_{GPS} và X_{PRO} , N là số lượng mẫu, i là số liệu thứ i .

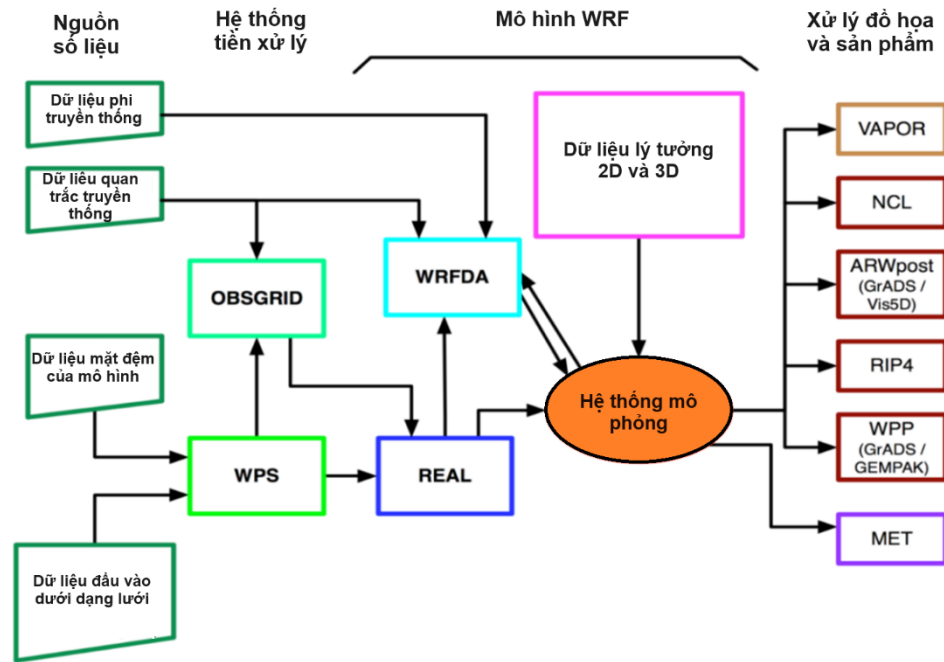
2.2.4. Phương pháp nghiên cứu các trường khí quyển trong bão

Từ dữ liệu tọa độ của tâm bão với độ phân giải theo thời gian 6h, tọa độ của bão được nội suy về độ phân giải thời gian 1h. Các profile dữ liệu từ wetPf2 sẽ được lựa chọn vào 12 nhóm theo khoảng cách từ vị trí tâm bão đến vị trí thám sát (0-100 km, 100-200 km, 200-300 km, 300-400 km, 400-500 km, 500-600 km, 600-700 km, 700-800 km, 800-900 km, 900-1000 km, 1000-1100km, 1100-1200 km). Khoảng cách giữa tâm bão và vị trí thám sát wetPf2 được tính theo công thức (6).

Để tính toán giá trị dị thường, profile nhiệt độ, độ ẩm tương đối, áp suất hơi nước, chỉ số khúc xạ khí quyển được trừ đi profile giá trị trung bình tháng tương ứng của nhiệt độ, độ ẩm tương đối, áp suất hơi nước, chỉ số khúc xạ khí quyển [23, 24]. Trong đó, giá trị profile trung bình tháng tương ứng từng yếu tố được tính trung bình theo từng tháng, trong ô lưới $2^\circ \times 2^\circ$ độ kinh vĩ trên tập dữ liệu wetPf2 trong bốn năm (10/2019 – 09/2023).

2.2.5. Phương pháp sử dụng mô hình

Như trong tổng quan đề đề cập, mô hình độ phân giải cao WRF là mô hình dự báo thời tiết số trị quy mô vừa. Mô hình WRF được phát triển cho mục đích ứng dụng nghiên cứu và dự báo thời tiết. Mô hình WRF đã được sử dụng rộng rãi trên thế giới để mô phỏng các trường khí tượng. Ở Việt Nam, mô hình này được sử dụng phổ biến để nghiên cứu, mô phỏng các trường khí tượng và dự báo thời tiết. Độ tin cậy của mô hình cũng đã được đánh giá và khẳng định. Với các đặc tính ưu việt của mô hình WRF và điều kiện kỹ thuật cho phép, mô hình WRF đã được lựa chọn sử dụng để mô phỏng một số trường khí tượng cho mục đích đánh giá và phân tích kết quả của luận án. Trong hình 2.12 là sơ đồ cấu trúc của mô hình WRF. Mô hình WRF gồm một số phần chính: hệ thống tiền xử lý (WPS), hệ thống đồng hóa dữ liệu (WRFDA), hệ thống mô phỏng (ARW), công cụ xử lý đồ họa và sản phẩm của mô hình (Post-processing & Visualization).



Hình 2.12. Sơ đồ cấu trúc của mô hình WRF [86].

Hệ thống tiền xử lý (WPS) có chức năng xác định lưới cho mô hình WRF, tạo các thông tin bản đồ, độ cao và dữ liệu đất cho mô hình WRF, thực hiện phân tích/dự báo dữ liệu từ mô hình khác và nội suy dữ liệu này về lưới tính của mô hình WRF.

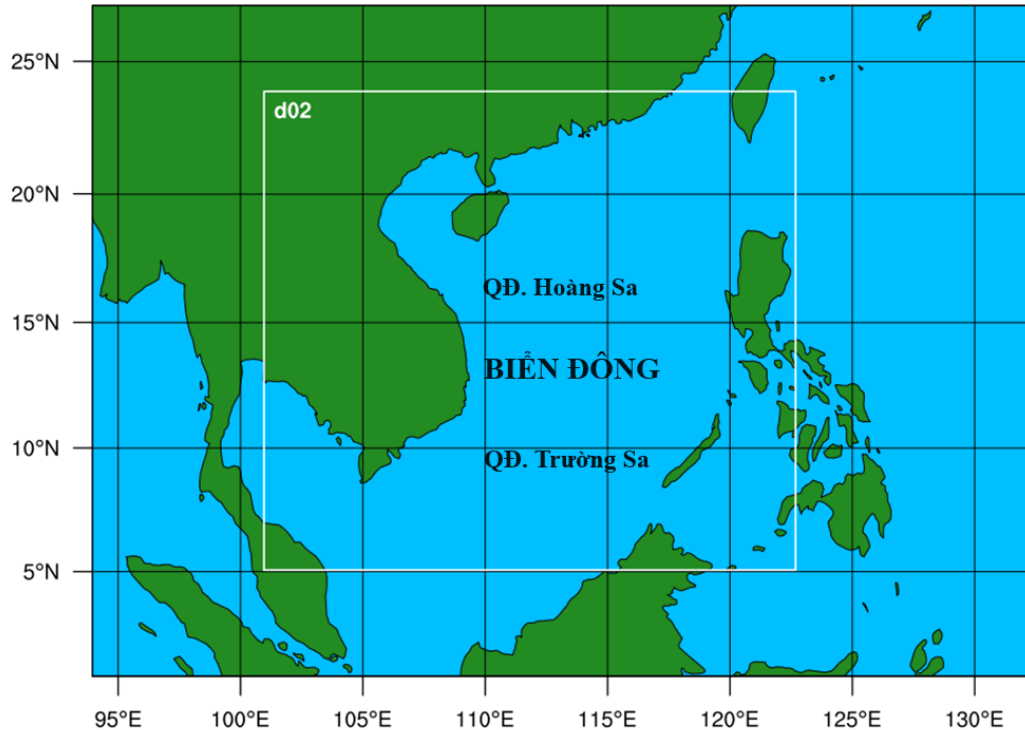
Hệ thống đồng hóa dữ liệu (WRFDA) có chức năng đồng hóa các nguồn dữ liệu quan trắc khác vào trường ban đầu của mô hình WRF.

Hệ thống mô phỏng (ARW) là hệ thống chính của mô hình WRF, nó có chức năng mô phỏng, dự báo dữ liệu thực theo các bước thời gian.

Công cụ xử lý đồ họa và sản phẩm của mô hình (Post-processing & Visualization) gồm một số công cụ, chương trình cho phép hiển thị và xử lý sản phẩm đầu ra của mô hình WRF.

Trong luận án, miền tính của mô hình được lựa chọn gồm 2 miền tính, với độ phân giải ngang của miền tính d01 là 18km và miền tính d02 là 6km (Hình 2.13). Trên cơ sở tổng quan các bộ sơ đồ đã được các tác giả khác nhau lựa chọn cho mô hình WRF để mô phỏng các trường khí quyển ở khu vực Việt Nam, bộ sơ đồ tham số hóa của tác giả [71] được lựa chọn sử dụng trong khuôn khổ của luận án. Bộ sơ đồ tham số hóa vật lý gồm: Sơ đồ tham số hóa vi vật lý là sơ đồ Goddard (7); sơ đồ tham số hóa đối lưu là sơ đồ Kain-Fritsch (1); sơ đồ tham số hóa lớp biên hành tinh YSU (1); sơ đồ tham số hóa sóng dài RRTMG (4); sơ đồ tham số hóa sóng ngắn RRTMG (4). Bộ sơ đồ tham số hóa vật lý này hiện nay đang được sử dụng để chạy mô hình

WRF phục vụ dự báo nghiệp vụ của Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu. Ngoài ra, bộ tham số hóa vật lý này cũng đang được sử dụng để chạy mô hình WRF phục vụ nghiên cứu tại Viện Vật lý địa cầu.



Hình 2.13. Miền tính của mô hình WRF.

Trong luận án, mô hình WRF được sử dụng để mô phỏng các trường khí tượng ở khu vực Việt Nam bao gồm: nhiệt độ không khí, độ ẩm tương đối, gió ngang, gió thẳng đứng, tổng ẩm khí quyển, khí áp mực biển và độ cao địa thế vị. Trong đó trường nhiệt độ không khí và độ ẩm tương đối mô phỏng từ mô hình được sử dụng để so sánh, đánh giá với dữ liệu wetPf2. Trường gió thẳng đứng mô phỏng từ mô hình được sử dụng để hỗ trợ khi phân tích kết quả các trường dị thường trong bão. Kết quả mô phỏng tổng ẩm của mô hình được sử dụng làm số liệu so sánh, đánh giá kết quả tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS. Dữ liệu này cũng được sử dụng kết hợp với kết quả tính toán từ dữ liệu GNSS để phân tích sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển gắn liền với hiện tượng không khí lạnh. Kết quả mô phỏng nhiệt độ, gió, khí áp, và độ cao địa thế vị được sử dụng để phân tích các điều kiện khí quyển tương ứng với một số hiện tượng thời tiết trong quá trình phân tích kết quả.

Kết luận Chương 2

Các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước đã chỉ ra rằng dữ liệu GPSRO được đánh giá bằng cách so sánh các trường thông số (nhiệt độ, chỉ số khúc xạ khí quyển, áp suất hơi nước, độ ẩm tương đối, độ ẩm tuyệt đối) trong dữ liệu này với các nguồn dữ liệu thám không vô tuyến, dữ liệu tái phân tích hoặc dữ liệu phương pháp đo vi sóng. Trong đó, việc lựa chọn các cặp mẫu được thực hiện dựa trên khác biệt về thời gian và không gian. Để đánh giá chất lượng dữ liệu wetPf2 (COSMIC-2) ở khu vực Việt Nam, luận án đã so sánh yếu tố nhiệt độ, độ ẩm tương đối, chỉ số khúc xạ khí quyển của dữ liệu wetPf2 với dữ liệu quan trắc tại 3 trạm thám không vô tuyến ở Việt Nam và dữ liệu mô phỏng của mô hình WRF.

Dữ liệu wetPf2 được sử dụng để nghiên cứu đặc trưng trường nhiệt độ và độ ẩm tương đối của khối khí biển ở khu vực quần đảo Hoàng Sa và Trường Sa thông qua các đại lượng trung bình theo từng mùa. Ngoài ra dữ liệu wetPf2 cũng được sử dụng để nghiên cứu đặc trưng cấu trúc của các trường khí tượng trong điều kiện bão. Trong đó, đặc trưng dị thường của các trường khí tượng so với trung bình tháng được phân tích theo khoảng cách tính từ tâm bão.

Ngoài ra trên cơ sở các phương pháp tính từ các công trình nghiên cứu ở trong nước và trên thế giới, luận án đã lựa chọn được phương pháp tính toán tổng ẩm khí quyển bằng cách ứng dụng phần mềm trực tuyến CSRS-PPP trên tập dữ liệu GNSS bề mặt và nhiệt độ quan trắc từ trạm thời tiết tự động tại trạm Nghĩa Đô. Kết quả tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS đã được so sánh với sản phẩm từ các nguồn dữ liệu AERONET và thám không vô tuyến thông qua các đại lượng thống kê. Sau đó, kết quả tính toán được sử dụng để phân tích đặc trưng biến đổi của tổng ẩm khí quyển trong một số đợt không khí lạnh ảnh hưởng đến khu vực trạm.

Chương 3. ĐẶC ĐIỂM CỦA MỘT SỐ TRƯỜNG KHÍ QUYỂN TRÊN KHU VỰC VIỆT NAM VÀ LÂN CẬN SỬ DỤNG SỐ LIỆU WETPF2

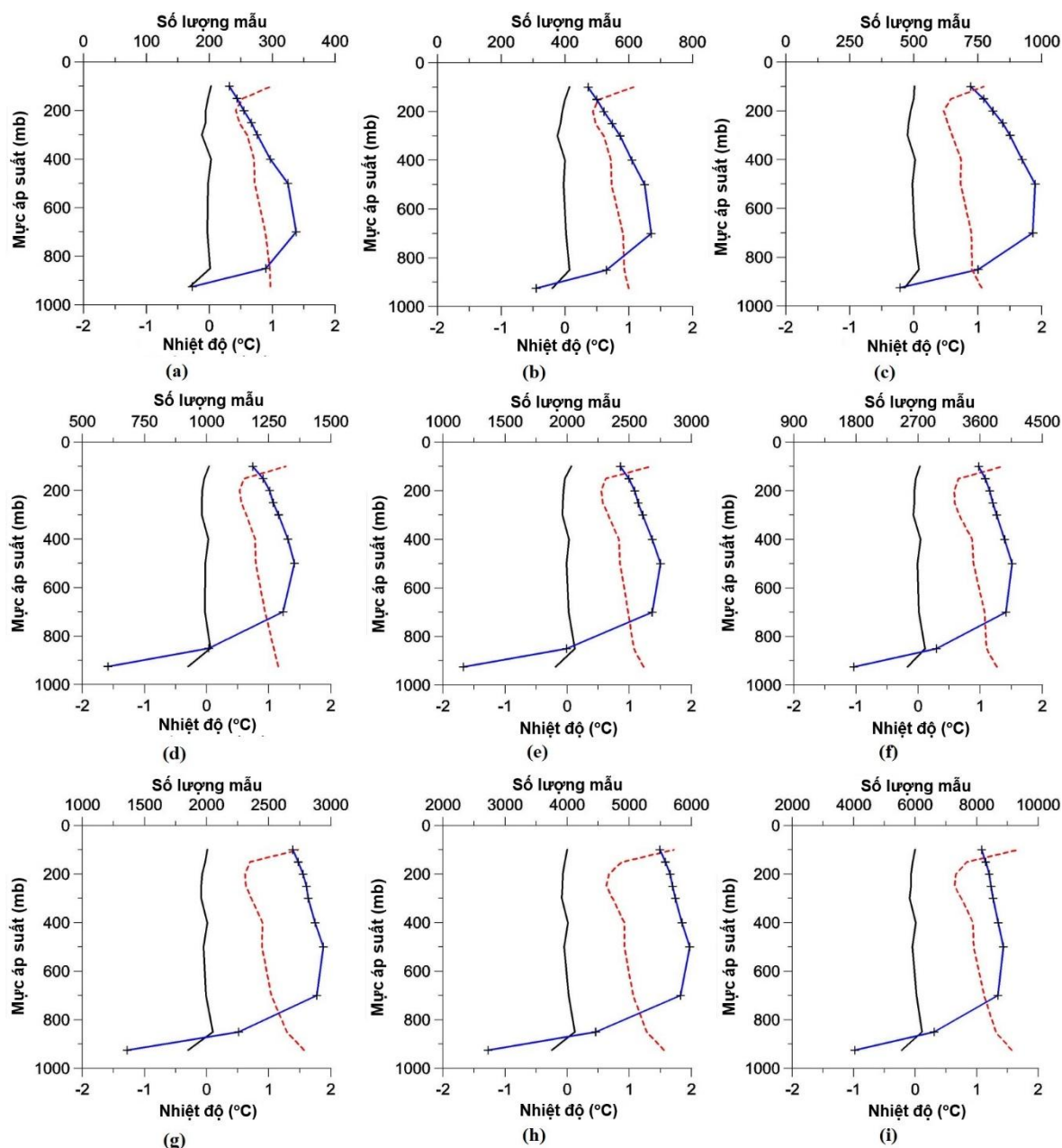
Trong chương này trình bày kết quả đánh giá chất lượng số liệu wetPf2 ở khu vực Việt Nam và lân cận bằng cách so sánh profile nhiệt độ, độ ẩm tương đối và chỉ số khúc xạ khí quyển với dữ liệu thám không vô tuyến tại Hà Nội, Đà Nẵng và Thành phố Hồ Chí Minh. Dữ liệu này cũng được so sánh với kết quả mô phỏng từ mô hình WRF. Sau đó dữ liệu wetPf2 trong khoảng thời gian từ 10/2019 đến 9/2023 được sử dụng để nghiên cứu đặc trưng trường nhiệt độ và độ ẩm tương đối của khối khí biển trên khu vực Biển Đông. Hai khu vực cụ thể đã được lựa chọn là khu vực quần đảo Hoàng Sa (đại diện cho Bắc Biển Đông) và khu vực quần đảo Trường Sa (đại diện cho Nam Biển Đông). Tiếp đó, dữ liệu wetPf2 được sử dụng để nghiên cứu cấu trúc các trường nhiệt độ, độ ẩm tương đối, áp suất hơi nước và chỉ số khúc xạ khí quyển trong bão ở khu vực Biển Đông trong mùa bão năm 2020.

3.1. Đánh giá dữ liệu wetPf2 ở khu vực Việt Nam và lân cận

3.1.1. So sánh với dữ liệu thám không vô tuyến

Để có thể đánh giá được chất lượng dữ liệu wetPf2 ở khu vực Việt Nam, số liệu nhiệt độ, độ ẩm tương đối và chỉ số khúc xạ khí quyển từ dữ liệu wetPf2 được so sánh với giá trị tương ứng từ dữ liệu thám không vô tuyến tại các trạm Hà Nội (Láng), Đà Nẵng và Tân Sơn Hòa (Thành phố Hồ Chí Minh). Giá trị sai số trung bình (ΔT_m) (đường liền nét màu đen), độ lệch chuẩn của sai số nhiệt độ ($SD_{\Delta T}$) (đường đứt nét màu đỏ) giữa hai nguồn dữ liệu trên ở 10 mực độ cao (925mb, 850mb, 700mb, 500mb, 400mb, 300mb, 250mb, 200mb, 150mb và 100mb) và số lượng mẫu của tập mẫu (đường liền nét (+) màu xanh) tương ứng với 9 nhóm dữ liệu so sánh (GP1 đến GP9) được trình bày trong hình 3.1. Kết quả cho thấy rằng nhóm GP1 có số lượng mẫu ít nhất và GP9 có số lượng mẫu nhiều nhất. Tại mực 925mb có số lượng mẫu thấp nhất, điều này là do hạn chế của loại dữ liệu GPSRO, mực thấp nhất có dữ liệu của wetPf2 ở khu vực đất liền (đặc biệt khu vực đồi núi) có giá trị lớn. Nhìn chung xu thế biến đổi giá trị ΔT_m tại các mực độ cao của 9 nhóm dữ liệu không khác biệt nhiều. Giá trị của ΔT_m ở mọi độ cao trong tất cả các nhóm dữ liệu nằm trong khoảng từ $-0,31^\circ\text{C}$ đến $0,12^\circ\text{C}$. Ở độ cao 925mb, 300mb, 250mb và 200mb, tất cả các giá trị ΔT_m đều âm, cho thấy dữ liệu wetPf2 thường có giá trị nhiệt độ thấp hơn so với dữ liệu quan

trắc thám không vô tuyến (Hình 3.1). Giá trị sai số trung bình tất cả các mực của các nhóm dữ liệu dao động trong khoảng từ $-0,06^{\circ}\text{C}$ đến $-0,02^{\circ}\text{C}$ (Bảng 3.1).



Hình 3.1. Sai số trung bình và độ lệch chuẩn của sai số nhiệt độ được tính toán giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu trắc thám không vô tuyến ở các độ cao khác nhau. Các hình a, b, c, d, e, f, g, h và i lần lượt tương ứng với các trường hợp GP1, GP2, GP3, GP4, GP5, GP6, GP7, GP8 và GP9. Trục tung biểu thị mực khí áp, trục hoành phía dưới biểu thị giá trị sai số nhiệt độ và trục hoành phía trên biểu thị số lượng mẫu. Đường liền màu đen là giá trị sai số trung bình, đường đứt nét màu đỏ minh họa độ lệch chuẩn của sai số và đường liền nét (+) màu xanh biểu thị số lượng mẫu.

Kết quả tính toán độ lệch chuẩn ($SD_{\Delta T}$) cho thấy giá trị $SD_{\Delta T}$ ở mọi độ cao đều nhỏ hơn $1,7^{\circ}\text{C}$. Giá trị $SD_{\Delta T}$ giảm từ 925mb đến 200mb. Ở 200mb, $SD_{\Delta T}$ là nhỏ nhất,

dao động từ $0,42^{\circ}\text{C}$ đến $0,67^{\circ}\text{C}$. Từ 200mb đến 100mb, giá trị $SD_{\Delta T}$ tăng dần, dao động từ $0,98^{\circ}\text{C}$ đến $1,71^{\circ}\text{C}$ tại mực 100mb (Hình 3.1). Giá trị độ lệch chuẩn trung bình của từng trường hợp dao động từ $0,73^{\circ}\text{C}$ đến $1,04^{\circ}\text{C}$. Độ lệch chuẩn trung bình trong trường hợp GP1 là nhỏ nhất, với giá trị là $0,73^{\circ}\text{C}$. Độ lệch chuẩn trung bình trong trường hợp GP9 là lớn nhất, với giá trị là $1,04^{\circ}\text{C}$ (Bảng 3.1). Trong khi đó, độ lệch chuẩn của sai số nhiệt độ trung bình giữa dữ liệu COSMIC và thám không vô tuyến ở khu vực Australia là $1,24^{\circ}\text{C}$ [14], trung bình toàn cầu là $1,72\text{K}$ [12], giữa dữ liệu COSMIC-2 và dữ liệu thám không vô tuyến ở khu vực gió mùa mùa hè Châu Á là $2,5\text{K}$ [19]. So với các khu vực khác và trung bình toàn cầu, số liệu nhiệt độ từ dữ liệu wetPf2 cho chất lượng khá tốt so với dữ liệu thám không vô tuyến ở khu vực Việt Nam. Điều này thể hiện rõ thông qua độ lệch chuẩn của sai số nhiệt độ có giá trị nhỏ hơn.

Bảng 3.1. Giá trị sai số của nhiệt độ và độ lệch chuẩn tính trung bình tất cả các mực của 9 trường hợp giữa dữ liệu wetPf2 và thám không vô tuyến.

	GP1	GP2	GP3	GP4	GP5	GP6	GP7	GP8	GP9
ΔT_m trung bình ($^{\circ}\text{C}$)	-0,06	-0,03	-0,03	-0,05	-0,02	-0,02	-0,02	-0,04	-0,04
$SD_{\Delta T}$ trung bình ($^{\circ}\text{C}$)	0,73	0,74	0,76	0,83	0,87	0,90	0,90	1,04	1,04

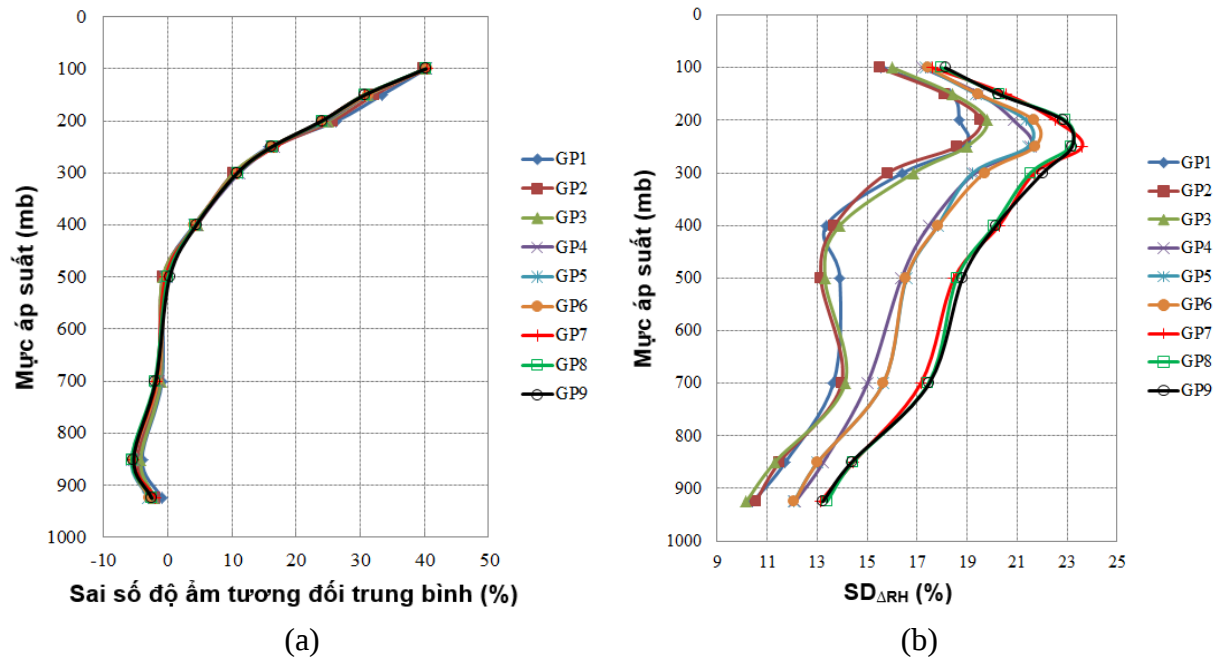
Bảng 3.2. Hệ số tương quan nhiệt độ giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến ở từng mực áp suất tương ứng 9 trường hợp so sánh.

Mực áp suất	GP1	GP2	GP3	GP4	GP5	GP6	GP7	GP8	GP9
925mb	0,97	0,97	0,96	0,94	0,94	0,93	0,89	0,90	0,89
850mb	0,96	0,96	0,96	0,94	0,95	0,94	0,91	0,91	0,91
700mb	0,89	0,88	0,88	0,87	0,86	0,83	0,84	0,83	0,80
500mb	0,87	0,87	0,87	0,87	0,85	0,83	0,84	0,82	0,81
400mb	0,90	0,88	0,88	0,90	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84
300mb	0,93	0,92	0,93	0,92	0,91	0,92	0,90	0,89	0,89
250mb	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91
200mb	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,91	0,90	0,90
150mb	0,93	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,89	0,84	0,85
100mb	0,91	0,91	0,90	0,87	0,86	0,85	0,83	0,78	0,79
Trung bình	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,86

Ngoài ra để đánh giá mức độ tương quan giữa giá trị nhiệt độ không khí của hai nguồn dữ liệu, hệ số tương quan đã được sử dụng trong luận án. Bảng 3.2 trình bày các giá trị hệ số tương quan ($R(T)$) của nhiệt độ giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến tại từng độ cao tương ứng với 9 trường hợp so sánh. Kết quả cho thấy giá trị $R(T)$ ở tất cả các độ cao đều $\geq 0,78$. Tại độ cao mực khí áp 700mb và 500mb, giá trị $R(T)$ thấp hơn ở các mực khác. Sự thay đổi về giá trị của $R(T)$ liên quan đến chênh lệch thời gian (1h đến 3h) nhỏ hơn sự thay đổi liên quan đến khoảng cách (100km đến 300km) (Bảng 3.1). Xem xét giá trị trung bình tất cả các mực của hệ số tương quan cho thấy rằng trường hợp GP1 có giá trị $R(T)$ trung bình cao nhất (0,93) và trường hợp GP9 có giá trị $R(T)$ trung bình thấp nhất (0,86). Điều này có nghĩa là chênh lệch về thời gian và khoảng cách giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu quan trắc thám không vô tuyến càng nhỏ thì hệ số tương quan của thông số nhiệt độ giữa hai nguồn dữ liệu này càng tốt. Nhìn chung, kết quả so sánh cho thấy mối tương quan giữa số liệu nhiệt độ của dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến là khá tốt.

Tương tự như trường hợp nhiệt độ không khí, các đại lượng thống kê như sai số trung bình và độ lệch chuẩn cũng được sử dụng để đánh giá chất lượng số liệu độ ẩm tương đối của dữ liệu wetPf2. Hình 3.2 trình bày sự biến đổi của sai số trung bình và độ lệch chuẩn của sai số độ ẩm tương đối giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến ở các mực độ cao tương ứng với 9 trường hợp so sánh. Số lượng mẫu tương ứng với 9 trường hợp giống như số lượng mẫu trên hình 3.1. Xu thế biến đổi của độ ẩm tương đối (ΔRH_m) của 9 trường hợp so sánh nhìn chung tăng dần theo độ cao. Giá trị ΔRH_m ở độ cao dưới 400mb dao động trong khoảng từ -5,6% đến 4,6%. Đối với các mực độ cao bên trên mực 400mb, giá trị ΔRH_m thay đổi trong khoảng từ 10,3% đến 40,5%. Tại các độ cao này giá trị áp suất riêng của hơi nước là rất nhỏ, nên có sự khác biệt nhỏ của nó giữa hai nguồn dữ liệu cũng sẽ dẫn đến giá trị ΔRH_m lớn. Giá trị ΔRH_m không khác biệt nhiều giữa 9 trường hợp so sánh, hầu hết chênh lệch trong cùng mực độ cao giữa các trường hợp nhỏ hơn 2,7% (Hình 3.2a). Giá trị ΔRH_m trung bình tất cả các mực của chín trường hợp dao động trong khoảng từ 11,6% đến 12,5% (Bảng 3.3). Phân tích sự biến đổi của độ lệch chuẩn của sai số độ ẩm tương đối ($SD_{\Delta RH}$) kết quả cho thấy giá trị $SD_{\Delta RH}$ có xu thế tăng dần từ mực độ cao thấp cho đến độ cao mực 250mb và 200mb và giá trị $SD_{\Delta RH}$ cực đại xuất hiện ở

độ cao mực 250mb và 200mb tùy từng trường hợp. Giá trị $SD_{\Delta RH}$ tại độ cao mực 925mb của tất cả 9 trường hợp đạt giá trị cực tiểu (Hình 3.2b). Giá trị $SD_{\Delta RH}$ trung bình tất cả các mực của trường hợp GP1 là nhỏ nhất (15,1%), trong khi đó trường hợp GP9 có giá trị lớn nhất (19,06%) (Bảng 3.3). Kết quả cũng chỉ ra rằng sự khác biệt của giá trị $SD_{\Delta RH}$ theo chênh lệch về thời gian nhỏ hơn nhiều so với theo chênh lệch về khoảng cách. So sánh với các kết quả nghiên cứu ở khu vực gió mùa mùa hè Châu Á, độ lệch chuẩn sai số đối với giá trị độ ẩm tương đối là 15-20% [19], kết quả sai số trung bình và độ lệch chuẩn trong nghiên cứu này cho thấy thông số độ ẩm tương đối từ dữ liệu wetPf2 ở khu vực Việt Nam có chất lượng tương tự so với các khu vực đó.



Hình 3.2. Sai số trung bình và độ lệch chuẩn của sai số về độ ẩm tương đối giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến của chín trường hợp tại 10 độ cao. (a) sai số trung bình của độ ẩm tương đối và (b) độ lệch chuẩn của sai số ($SD_{\Delta RH}$).

Bảng 3.3. Giá trị sai số của độ ẩm tương đối và độ lệch chuẩn tính trung bình tất cả các mực của 9 trường hợp giữa dữ liệu wetPf2 và thám không vô tuyến.

	GP1	GP2	GP3	GP4	GP5	GP6	GP7	GP8	GP9
ΔRH_m trung bình (%)	12,45	12,02	11,94	11,94	11,63	11,70	11,79	11,67	11,73
$SD_{\Delta RH}$ trung bình (%)	15,11	15,04	15,29	17,27	17,39	17,51	18,95	18,98	19,06

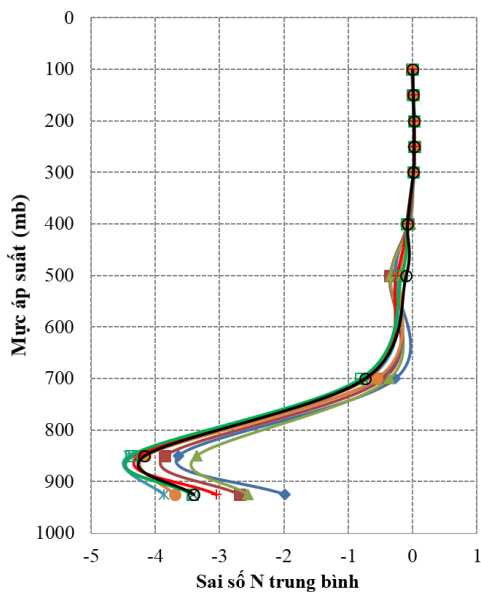
Kết quả cũng cho thấy rằng độ lệch chuẩn của sai số độ ẩm tương đối được chia thành 3 nhóm tương ứng với 3 trường hợp chênh lệch về khoảng cách giữa thám sát wetPf2 và trạm thám không vô tuyến: 100km, 200km và 300km. Điều này cho thấy sai số trung bình (chênh lệch trung bình giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến) có ba nguồn bao gồm: (i) sai số do chất lượng bản thân của dữ liệu wetPf2 ở cùng vị trí với trạm thám không vô tuyến, (ii) sai số về dữ liệu do sự thay đổi theo thời gian của các đặc tính bên trong của khối không khí (do thời gian quan trắc của dữ liệu wetPf2 không trùng với thời gian quan trắc tại trạm thám không vô tuyến), (iii) chênh lệch do vị trí quan trắc của dữ liệu wetPf2 và vị trí của trạm thám không vô tuyến trong các khối không khí khác nhau (Hình 3.2b). Trong tương lai, nếu có sẵn một tập dữ liệu đủ dài để lọc dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến dựa trên thời gian và địa điểm, thì các lỗi trong tập dữ liệu sẽ chỉ xuất phát từ chất lượng quan trắc của dữ liệu wetPf2. Điều này có khả năng dẫn đến giảm đáng kể sự khác biệt tổng thể so với các sai số có trong tập dữ liệu hiện tại được sử dụng trong nghiên cứu này.

Hệ số tương quan của độ ẩm tương đối ($R(RH)$) giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến tại từng mực độ cao của 9 trường hợp so sánh được trình bày trong Bảng 3.4. Kết quả cho thấy sự thay đổi đáng kể về giá trị $R(RH)$ giữa các mực độ cao và các trường hợp so sánh. Ở độ cao mực 925mb và 850mb, giá trị $R(RH)$ tương đối thấp, dao động từ 0,43 đến 0,70. Đối với độ cao từ mực 700mb đến 250mb, $R(RH)$ thể hiện giá trị cao hơn so với các độ cao khác ($R(RH) > 0,60$). Đáng chú ý, giá trị cực đại của $R(RH)$ được nhận thấy ở độ cao 500mb, giá trị này dao động từ 0,81 đến 0,91, tùy thuộc vào từng trường hợp so sánh. Ở mực độ cao thấp hơn mực 500mb, hoạt động đối lưu làm cho độ ẩm tương đối (RH) thay đổi đáng kể theo không gian và thời gian, dẫn đến sự khác biệt rõ rệt hơn giữa dữ liệu RH tại các trạm thám không vô tuyến và dữ liệu wetPf2, đặc biệt là ở mực 925mb (Hình 3.2a). Kết quả cũng cho thấy sai số trung bình của RH ở mực 500mb nhỏ hơn tại các mực thấp hơn. Ở các mực cao hơn 500mb, lượng hơi ẩm trong khí quyển (tỷ lệ xáo trộn) tương đối nhỏ, dẫn đến sai số RH tương đối lớn hơn (Hình 3.2a). Ngoài ra, số lượng mẫu lớn hơn ở mực 500mb (Hình 3.1) làm cho số liệu thống kê $R(RH)$ tốt hơn. Những yếu tố này có thể là nhân tố góp phần quan trọng làm cho hệ số tương quan giữa hai nguồn dữ liệu tại mực 500mb là lớn nhất so với các mực còn lại. Giá trị $R(RH)$ trung bình của trường hợp GP1 là cao nhất (0,76) và giá trị $R(RH)$ trung bình của trường hợp GP9 là thấp nhất (0,63). So sánh giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến đã cho thấy rằng trường hợp GP1 cho kết quả so sánh tốt nhất với số lượng mẫu hiện

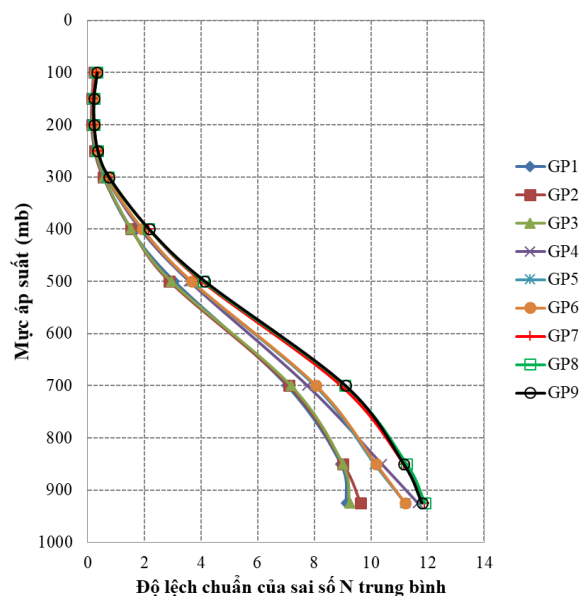
có nhỏ nhất. Ngược lại, trường hợp GP9 cho kết quả so sánh kém nhất mặc dù có số lượng mẫu lớn nhất.

Bảng 3.4. Hệ số tương quan của độ ẩm tương đối giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến tại từng mực độ cao tương ứng với 9 trường hợp so sánh.

Mực áp suất	GP1	GP2	GP3	GP4	GP5	GP6	GP7	GP8	GP9
925mb	0,67	0,68	0,70	0,55	0,55	0,54	0,47	0,43	0,44
850mb	0,65	0,63	0,67	0,55	0,56	0,57	0,46	0,45	0,46
700mb	0,84	0,84	0,84	0,82	0,80	0,81	0,77	0,76	0,76
500mb	0,90	0,91	0,91	0,86	0,86	0,86	0,82	0,82	0,81
400mb	0,90	0,90	0,89	0,83	0,83	0,82	0,77	0,78	0,78
300mb	0,85	0,85	0,83	0,78	0,78	0,77	0,72	0,72	0,71
250mb	0,78	0,77	0,76	0,70	0,69	0,69	0,63	0,65	0,64
200mb	0,73	0,70	0,70	0,69	0,66	0,65	0,62	0,60	0,60
150mb	0,60	0,63	0,63	0,63	0,63	0,62	0,59	0,59	0,59
100mb	0,67	0,67	0,66	0,61	0,60	0,58	0,57	0,55	0,54
Trung bình	0,76	0,76	0,76	0,70	0,69	0,69	0,64	0,64	0,63



(a)



(b)

Hình 3.3. Sai số trung bình và độ lệch chuẩn của sai số về chỉ số khúc xạ khí quyển giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến của chín trường hợp so sánh tại 10 mực khí áp. (a) sai số trung bình của chỉ số khúc xạ khí quyển và (b) độ lệch chuẩn của sai số.

Cũng tương tự như đối với thông số nhiệt độ và độ ẩm tương đối, sai số trung bình và độ lệch chuẩn của sai số chỉ số khúc xạ khí quyển giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến được tính trung bình tại từng mực độ cao tương ứng với 9 trường hợp so sánh (Hình 3.3). Kết quả cho thấy xu thế biến đổi về độ lớn của giá trị sai số chỉ số khúc xạ khí quyển trung bình (ΔN_m) tại từng mực khí áp của tất cả các trường hợp so sánh đạt giá trị cực trị tại độ cao mực 850mb và giá trị ΔN_m giảm dần theo độ cao từ mực 850mb đến mực 100mb. Tại mực 850mb, giá trị ΔN_m dao động trong khoảng từ -4,41 đến -3,36 (đơn vị N). Tại mực 700mb, giá trị ΔN_m dao động trong khoảng từ -0,81 đến -0,27 (đơn vị N). Giá trị ΔN_m ở độ cao từ mực 400mb đến 100mb, dao động trong khoảng từ -0,1 đến -0,03. Kết quả trên cho thấy giá trị chỉ số khúc xạ khí quyển quan trắc từ wetPf2 có xu hướng nhỏ hơn so với giá trị chỉ số khúc xạ khí quyển tính toán từ số liệu thám không vô tuyến ở khu vực Việt Nam. Kết quả cũng cho thấy, biên độ sai khác của ΔN_m giữa các trường hợp giảm dần theo độ cao. Tại mực 900mb, sự khác biệt của ΔN_m giữa 9 trường hợp đạt giá trị cực đại là 1,89. Đến độ cao 100mb, sự khác biệt của ΔN_m giảm xuống còn rất nhỏ chỉ khoảng 0,01 (Hình 3.3a). Giá trị sai số trung bình tất cả các mực của 9 trường hợp so sánh dao động trong khoảng từ -0,92 (GP5) đến -0,62 (GP1) (Bảng 3.5). Phân tích sự biến đổi của độ lệch chuẩn của sai số chỉ số khúc xạ khí quyển ($SD_{\Delta N}$) cho thấy giá trị $SD_{\Delta N}$ có xu thế giảm dần theo độ cao từ mực 925mb đến mực 150mb. Giá trị $SD_{\Delta N}$ của tất cả 9 trường hợp đạt giá trị cực đại tại mực 925mb. Giá trị $SD_{\Delta N}$ dao động từ 9,14 (GP1) đến 11,91 (GP8). Tại mực 150mb, giá trị $SD_{\Delta N}$ của 9 trường hợp chỉ dao động trong khoảng từ 0,15 đến 0,23. Tương tự như trường hợp độ ẩm tương đối, $SD_{\Delta N}$ cũng có sự khác biệt đáng kể theo các nhóm khoảng cách (Hình 3.3b). Giá trị độ lệch chuẩn trung bình tất cả các mực của các nhóm dữ liệu dao động trong khoảng từ 3,10 (GP1) đến 4,04 (GP8) (Bảng 3.5).

Bảng 3.5. Giá trị sai số của chỉ số khúc xạ khí quyển và độ lệch chuẩn trung bình tất cả các mực của 9 trường hợp giữa dữ liệu wetPf2 và thám không vô tuyến.

	GP1	GP2	GP3	GP4	GP5	GP6	GP7	GP8	GP9
ΔN_m trung bình (đơn vị N)	-0,62	-0,74	-0,66	-0,85	-0,92	-0,87	-0,83	-0,88	-0,84
$SD_{\Delta N}$ trung bình (đơn vị N)	3,10	3,15	3,13	3,68	3,66	3,67	4,00	4,04	4,03

Tương tự như đối với nhiệt độ và độ ẩm tương đối, giá trị hệ số tương quan ($R(N)$) của chỉ số khúc xạ khí quyển giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến được tính trung bình tại từng mực áp suất tương ứng với 9 trường hợp. Kết quả cho thấy giá trị $R(N)$ ở tất cả các mực áp suất đều $\geq 0,62$. Trong tất cả các trường hợp, giá trị $R(N)$ tại mực khí áp 925mb và 850mb thấp hơn ở các mực khác. Theo độ cao sự biến đổi của $R(N)$ có 2 cực đại, các cực đại này xuất hiện tại mực 500mb và tại mực 200mb. Sự thay đổi về giá trị của $R(N)$ liên quan đến chênh lệch thời gian (1h đến 3h) nhỏ hơn sự thay đổi liên quan đến khác biệt khoảng cách (100 km đến 300 km) (Bảng 3.6). Xem xét giá trị trung bình tất cả các mực khí áp của hệ số tương quan cho thấy trường hợp GP1 có giá trị $R(N)$ trung bình cao nhất (0,87) và trường hợp GP9 có giá trị $R(N)$ trung bình thấp nhất (0,76). Điều này cho thấy chênh lệch về thời gian và khoảng cách giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu quan trắc thám không vô tuyến càng nhỏ thì hệ số tương quan của thông số chỉ số khúc xạ khí quyển giữa hai nguồn dữ liệu này càng tốt. Nhìn chung, kết quả so sánh cho thấy mối tương quan giữa số liệu chỉ số khúc xạ của khí quyển của dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến là khá tốt.

Bảng 3.6. Hệ số tương quan của chỉ số khúc xạ khí quyển giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến tại từng mực khí áp tương ứng với 9 trường hợp.

Mực áp suất	GP1	GP2	GP3	GP4	GP5	GP6	GP7	GP8	GP9
925mb	0,79	0,79	0,81	0,64	0,69	0,69	0,62	0,63	0,64
850mb	0,75	0,74	0,75	0,66	0,69	0,69	0,60	0,60	0,61
700mb	0,87	0,88	0,88	0,85	0,84	0,84	0,81	0,80	0,80
500mb	0,90	0,92	0,92	0,87	0,87	0,87	0,84	0,83	0,83
400mb	0,89	0,89	0,89	0,84	0,83	0,82	0,78	0,78	0,78
300mb	0,85	0,84	0,81	0,77	0,75	0,74	0,69	0,68	0,67
250mb	0,90	0,88	0,86	0,82	0,81	0,80	0,77	0,77	0,76
200mb	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,88	0,87	0,87
150mb	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,89	0,85	0,86
100mb	0,91	0,90	0,90	0,87	0,86	0,85	0,83	0,80	0,80
Trung bình	0,87	0,87	0,87	0,82	0,82	0,81	0,77	0,76	0,76

3.1.2. So sánh với dữ liệu mô phỏng bằng mô hình WRF

Một phương pháp khác để đánh giá dữ liệu wetPf2 là so sánh dữ liệu này với dữ liệu mô phỏng của mô hình. Trong khuôn khổ của luận án, dữ liệu trường nhiệt độ, độ ẩm tương đối từ dữ liệu wetPf2 đã được so sánh với giá trị tương ứng mô phỏng bằng mô hình WRF với các hạn dự báo khác nhau (6h, 24h và 48h) trong điều kiện có bão hoạt động trên Biển Đông. Kết quả cho thấy sai số trung bình của nhiệt độ không khí giữa dữ liệu wetPf2 và kết quả mô phỏng bằng mô hình dao động trong khoảng $-0,54^{\circ}\text{C}$ đến $0,62^{\circ}\text{C}$ tại các mực khí áp $\geq 150\text{mb}$ trong 3 hạn dự báo <6h, 24h và 48h. Trong khoảng cách bán kính cách tâm bão $R1 \leq 100\text{km}$, sai số nhiệt độ trung bình tại các mực trong cả 3 hạn dự báo chủ yếu có giá trị âm, điều này thể hiện rằng tại khu vực này giá trị nhiệt độ từ dữ liệu wetPf2 có xu hướng thấp hơn so với nhiệt độ mô phỏng từ mô hình WRF. Tại các khu vực cách tâm bão bán kính từ $500\text{km} - 600\text{km}$ và từ $1100\text{km} - 1200\text{km}$ thì ngược lại, sai số nhiệt độ trung bình tại các mực khí áp trong cả 3 hạn dự báo chủ yếu có giá trị dương tương ứng với dữ liệu wetPf2 có xu hướng cao hơn so với nhiệt độ mô phỏng từ mô hình WRF. Tại mực 100mb , sai số trung bình của nhiệt độ đều âm, kết quả này cho thấy nhiệt độ từ dữ liệu wetPf2 có xu thế lớn hơn so với nhiệt độ mô phỏng bằng mô hình (Bảng 3.7).

Bảng 3.7. Sai số nhiệt độ trung bình ($^{\circ}\text{C}$) giữa dữ liệu wetPf2 và mô phỏng bằng mô hình WRF tại các mực khí áp tương ứng với 3 hạn dự báo và tại các khu vực cách tâm bão khoảng cách $R1 \leq 100\text{km}$, $500\text{km} < R2 \leq 600\text{km}$, $< 1100\text{km} < R3 \leq 1200\text{km}$.

Mực áp suất	Hạn dự báo <6h			Hạn dự báo 24h			Hạn dự báo 48h		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
925mb	-0,14	-0,04	0,31	-0,54	-0,10	0,38	-0,35	-0,11	0,22
850mb	-0,34	0,04	0,06	-0,15	-0,06	0,14	-0,18	0,13	0,04
700mb	-0,29	0,10	0,23	-0,05	-0,03	0,33	-0,13	0,18	0,29
500mb	0,25	0,26	0,27	0,00	0,22	0,24	-0,14	0,16	0,27
400mb	0,02	0,26	0,43	-0,07	0,22	0,30	0,05	0,20	0,34
300mb	-0,17	0,31	0,19	-0,14	0,33	0,29	0,17	0,36	0,56
250mb	-0,13	0,34	0,43	0,19	0,37	0,34	-0,05	0,44	0,47
200mb	0,00	0,33	0,29	0,20	0,40	0,33	-0,36	0,51	0,47
150mb	0,09	0,43	0,41	0,37	0,54	0,55	-0,07	0,62	0,55
100mb	-0,83	-1,99	-2,07	-1,65	-2,35	-2,15	-1,88	-2,62	-2,50

Phân tích kết quả biến đổi độ lệch chuẩn của sai số nhiệt độ giữa dữ liệu wetPf2 và mô phỏng bằng mô hình WRF cho thấy giá trị độ lệch chuẩn tại từng mực khí áp tương ứng với 3 hạn dự báo và tại các khu vực cách tâm bão khoảng cách R1, R2, R3 dao động trong khoảng từ 0,38°C đến 1,29°C tại các mực khí áp $\geq 150\text{mb}$. Tại mực 100mb, giá trị độ lệch chuẩn của sai số nhiệt độ dao động trong khoảng từ 1,33°C đến 2,0°C, giá trị này cao hơn đáng kể so với các mực độ cao $\geq 150\text{mb}$. Giá trị độ lệch chuẩn của sai số nhiệt độ tính trung bình cho 10 mực đẳng áp dao động trong khoảng 0,62°C đến 0,93°C. Nhìn chung, giá trị độ lệch chuẩn trung bình này có xu hướng giảm khi khoảng cách đến tâm bão tăng và tăng theo hạn dự báo (Bảng 3.8). So sánh với độ lệch chuẩn của sai số nhiệt độ giữa dữ liệu wetPf2 và số liệu thám không vô tuyến, giá trị độ lệch chuẩn giữa dữ liệu wetPf2 và mô phỏng mô hình WRF không có sự khác biệt nhiều.

Bảng 3.8. Độ lệch chuẩn của sai số nhiệt độ (°C) giữa dữ liệu wetPf2 và mô phỏng bằng mô hình WRF tại các mực khí áp tương ứng với 3 hạn dự báo và tại các khu vực cách tâm bão $R1 \leq 100\text{km}$, $500\text{km} < R2 \leq 600\text{km}$, $< 1100\text{km} < R3 \leq 1200\text{km}$.

Mực áp suất	Hạn dự báo <6h			Hạn dự báo 24h			Hạn dự báo 48h		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
925mb	0,89	0,66	0,64	0,70	0,66	0,77	0,81	0,67	0,56
850mb	0,71	0,65	0,71	0,51	0,74	0,71	1,00	0,76	0,78
700mb	0,81	0,67	0,54	0,50	0,74	0,48	0,53	0,79	0,70
500mb	0,91	0,62	0,55	1,09	0,67	0,57	1,02	0,71	0,64
400mb	0,86	0,57	0,46	1,08	0,72	0,58	1,00	0,81	0,70
300mb	0,51	0,60	0,53	0,84	0,60	0,66	1,29	0,72	0,65
250mb	0,50	0,51	0,38	0,79	0,56	0,60	1,24	0,62	0,73
200mb	0,69	0,45	0,40	0,62	0,56	0,54	1,08	0,53	0,52
150mb	0,73	0,52	0,56	0,60	0,63	0,53	0,71	0,62	0,85
100mb	2,00	1,33	1,44	1,16	1,80	1,93	0,61	1,50	1,81
Trung bình	0,86	0,66	0,62	0,79	0,77	0,74	0,93	0,77	0,79

Đối với trường hợp so sánh giữa độ ẩm tương đối từ dữ liệu wetPf2 và mô phỏng bằng mô hình WRF, kết quả tính toán cho thấy sai số trung bình của độ ẩm tương đối tại từng mực độ cao tương ứng với 3 hạn dự báo và tại các khu vực cách

tâm bão khoảng cách R1, R2, R3 dao động trong khoảng từ -6,1% đến 20,0% trong các mực khí áp $\geq 400\text{mb}$. Với hạn dự báo $< 6\text{h}$, giá trị độ ẩm tương đối từ dữ liệu wetPf2 có xu hướng thấp hơn so với kết quả mô phỏng bằng mô hình WRF (Bảng 3.9). Giá trị sai số trung bình của độ ẩm tương đối trong trường hợp này không chênh lệch nhiều so với giá trị sai số trung bình của độ ẩm tương đối giữa dữ liệu wetPf2 và số liệu thám không vô tuyến. Đối với hạn dự báo 24h và 48h, kết quả tính toán lại thể hiện theo chiều ngược lại, giá trị độ ẩm tương đối từ dữ liệu wetPf2 có xu hướng cao hơn so với kết quả mô phỏng bằng mô hình WRF (Bảng 3.9). Giá trị sai số trung bình của độ ẩm tương đối trong các trường hợp này lớn hơn so với giá trị sai số trung bình của độ ẩm tương đối giữa dữ liệu wetPf2 và số liệu thám không vô tuyến. Trong khi đó tại các mực khí áp $< 400\text{mb}$, sai số trung bình giữa độ ẩm tương đối từ dữ liệu wetPf2 và mô phỏng mô hình là tương đối lớn, giá trị trung bình lớn nhất đạt 63,2% (tại mực 100mb). Giá trị độ ẩm từ dữ liệu wetPf2 thường lớn hơn so với mô phỏng mô hình. Nhìn chung kết quả biến đổi của sai số trung bình của độ ẩm tương đối giữa dữ liệu wetPf2 và mô phỏng mô hình có giá trị tăng dần theo độ cao tương tự như kết quả so sánh giữa dữ liệu wetPf2 và số liệu thám không vô tuyến (Bảng 3.9).

Bảng 3.9. Sai số độ ẩm tương đối trung bình (%) giữa dữ liệu wetPf2 và mô phỏng mô hình WRF tại các mực khí áp tương ứng với 3 hạn dự báo và tại các khu vực cách tâm bão khoảng cách $R1 \leq 100\text{km}$, $500\text{km} < R2 \leq 600\text{km}$, $< 1100\text{km} < R3 \leq 1200\text{km}$.

Mực áp suất	Hạn dự báo $< 6\text{h}$			Hạn dự báo 24h			Hạn dự báo 48h		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
925mb	-0,9	-2,3	-5,9	-0,8	-1,4	-6,1	1,3	-0,7	-3,1
850mb	-1,7	-1,5	-3,2	-3,9	0,4	-0,8	1,6	-0,6	2,4
700mb	-3,8	-0,8	-2,7	-1,0	2,9	-1,5	1,7	1,9	4,0
500mb	-4,7	-1,1	0,4	0,3	2,6	2,7	5,2	7,2	5,4
400mb	7,4	9,1	3,4	20,0	13,4	8,6	18,7	15,7	13,7
300mb	16,8	16,0	14,0	28,2	19,4	17,3	5,7	21,1	11,9
250mb	27,2	25,6	19,0	34,2	30,5	25,6	23,4	30,4	23,1
200mb	32,7	31,5	26,4	43,8	37,9	32,4	39,9	37,8	38,8
150mb	39,6	35,8	35,9	44,3	45,8	42,8	41,1	47,3	48,5
100mb	39,0	50,6	49,1	50,5	58,1	54,4	61,8	63,2	58,7

Kết quả tính toán độ lệch chuẩn của sai số độ ẩm tương đối giữa dữ liệu wetPf2 và mô phỏng mô hình cho thấy độ lệch chuẩn của sai số tại các mực khí áp $\geq 400\text{mb}$ thường có giá trị nhỏ hơn so với các mực khí áp $< 400\text{mb}$. Tại khu vực cách tâm bão $\leq 100\text{km}$, độ lệch chuẩn của sai số độ ẩm tương đối thường có giá trị nhỏ nhất tại mực 500mb. Tại các khu vực R2 và R3, độ lệch chuẩn của sai số thường có giá trị nhỏ nhất ở các mực khí áp 925mb và 850mb. Phân bố độ lệch chuẩn của sai số độ ẩm tương đối cho thấy, đại lượng này có giá trị tăng dần theo hạn dự báo. Độ lệch này có giá trị nhỏ nhất trong hạn dự báo $< 6\text{h}$ và có giá trị lớn nhất trong hạn dự báo 48h (Bảng 3.10). So sánh với độ lệch chuẩn của sai số độ ẩm tương đối giữa dữ liệu wetPf2 và số liệu thám không vô tuyến, giá trị độ lệch chuẩn giữa dữ liệu wetPf2 và mô phỏng mô hình WRF trong hạn dự báo $< 6\text{h}$ có giá trị nhỏ hơn. Nhưng trong các hạn dự báo 24h và 48h, độ lệch chuẩn của sai số độ ẩm tương đối giữa dữ liệu wetPf2 và mô hình có giá trị lớn hơn so với trường hợp so sánh giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến.

Bảng 3.10. Độ lệch chuẩn của sai số độ ẩm tương đối (%) giữa dữ liệu wetPf2 và mô phỏng bằng mô hình WRF tại các mực khí áp tương ứng với 3 hạn dự báo và tại các khu vực cách tâm bão $R1 \leq 100\text{km}$, $500\text{km} < R2 \leq 600\text{km}$, $< 1100\text{km} < R3 \leq 1200\text{km}$.

Mực áp suất	Hạn dự báo <6h			Hạn dự báo 24h			Hạn dự báo 48h		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
925mb	7,8	7,9	9,2	3,6	6,8	9,7	10,7	7,6	8,0
850mb	6,8	9,1	7,8	7,1	10,0	11,4	9,9	11,0	12,1
700mb	5,1	11,9	8,2	7,8	12,4	8,6	11,9	14,4	12,6
500mb	4,3	12,3	10,2	5,5	14,8	12,3	8,6	20,1	14,5
400mb	7,5	12,2	12,6	16,8	18,6	13,9	32,0	20,3	15,5
300mb	9,1	17,0	13,5	21,1	19,2	19,0	41,0	21,9	17,8
250mb	12,0	16,4	13,8	13,7	17,2	19,1	27,2	19,7	18,0
200mb	12,7	14,8	14,7	18,9	18,5	18,1	27,0	19,6	19,5
150mb	7,0	16,7	14,9	10,6	17,8	17,3	9,5	19,9	22,1
100mb	19,1	15,9	17,1	17,3	21,8	21,4	14,2	20,1	22,8

3.2. Đặc điểm một số trường khí quyển ở khu vực quần đảo Hoàng Sa và quần đảo Trường Sa

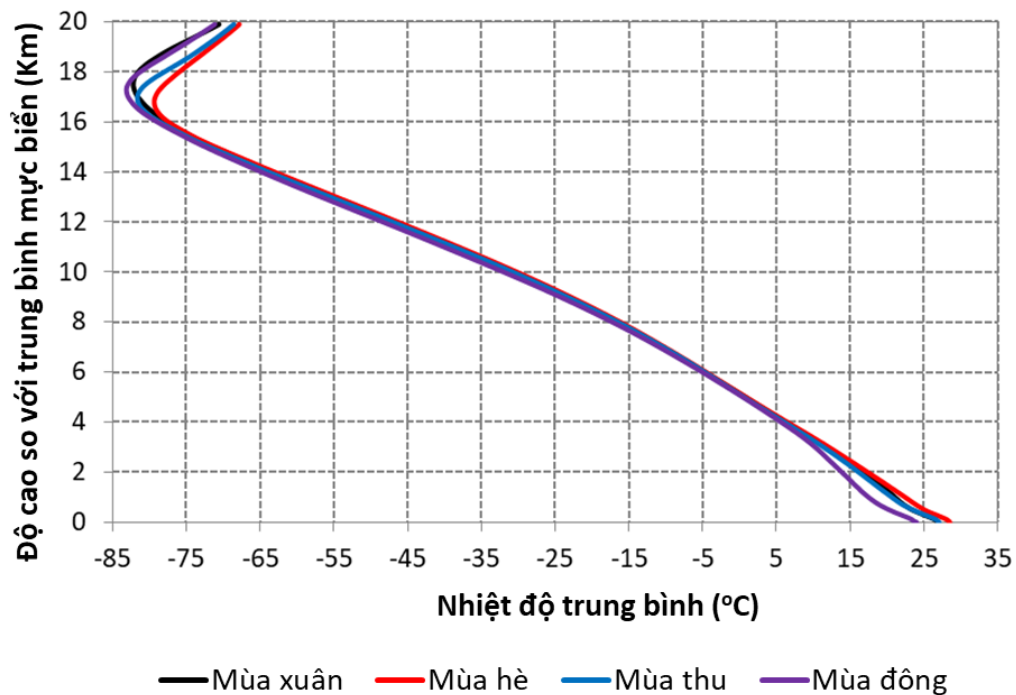
Nhìn chung, giá trị sai số trung bình, độ lệch chuẩn và hệ số tương quan trung bình giữa dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến cho thấy dữ liệu wetPf2 ở

khu vực Việt Nam có chất lượng tốt so với các khu vực khác. Ngoài ra theo quy định về quan trắc khí tượng trên cao của Việt Nam, yêu cầu độ chính xác đối với việc đo nhiệt độ là $<1^{\circ}\text{C}$ và độ ẩm tương đối là 10%. Do đó, việc sử dụng dữ liệu wetPf2 có độ phân giải theo độ cao lớn hơn dữ liệu của trạm thám không vô tuyến là phù hợp để nghiên cứu sự biến đổi của nhiệt độ và độ ẩm tương đối ở khu vực quần đảo Hoàng Sa và Trường Sa, nơi hiện không có trạm thám không vô tuyến hoạt động.

3.2.1. Đặc điểm trường nhiệt độ không khí

Trong khoảng thời gian từ tháng 10/2019 – 9/2023 trên khu vực quần đảo Hoàng Sa (13°N - 18°N , 110°E - 115°E) có tổng cộng 6215 thám sát wetPf2. Trên cơ sở tập số liệu này, nhiệt độ trung bình theo mùa (T_m) trong bốn mùa được tính toán tại từng mực độ cao (Hình 3.4). Đồ thị màu đen biểu diễn nhiệt độ trung bình của mùa xuân (tháng 3, 4, 5), đồ thị màu đỏ tương ứng với mùa hè (tháng 6, 7, 8), đồ thị màu xanh tương ứng với mùa thu (9, 10, 11), đồ thị màu tím tương ứng với mùa đông (12, 1, 2). Với độ phân giải cao theo chiều thẳng đứng (50m), các kết quả đã thể hiện rõ đặc trưng biến đổi nhiệt độ giữa các mùa trong năm và theo chiều thẳng đứng của nhiệt độ khối không khí trên khu vực này. Nhiệt độ giảm dần từ bề mặt lên đỉnh tầng đối lưu (từ 16,8 km đến 17,5 km). Biến trình năm của T_m tại từng độ cao thể hiện quy luật rõ ràng, T_m trong mùa hè có giá trị cao nhất, T_m trong mùa đông có giá trị thấp nhất. Profile T_m trong lớp từ 0km đến 3,5km cho thấy T_m biến đổi tương đối lớn theo mùa. Biên độ biến đổi của T_m tại từng mực độ cao dao động từ $1,3^{\circ}\text{C}$ đến $5,0^{\circ}\text{C}$. Gần bề mặt, giá trị T_m là $24,0^{\circ}\text{C}$ vào mùa đông và $28,5^{\circ}\text{C}$ vào mùa hè. Sự biến đổi lớn của T_m theo mùa đã thể hiện sự ảnh hưởng mạnh của gió mùa mùa đông đối khu vực này. Vào mùa đông, gió mùa mùa đông đã vận chuyển khối khí lạnh từ phía bắc đến làm cho nhiệt độ ở khu vực này thấp hơn đáng kể so với mùa hè. Ngoài ra, do có sự ảnh hưởng của đốt nóng và xáo trộn rối gần bề mặt Trái Đất, biên độ biến đổi năm của nhiệt độ trong lớp biên lớn hơn nhiều so với trong lớp khí quyển tự do bên trên. Trong lớp từ 3,5km đến 16km, T_m biến đổi nhỏ theo mùa. Biên độ biến đổi theo mùa của T_m tại từng mực độ cao dao động từ $0,4^{\circ}\text{C}$ đến $2,1^{\circ}\text{C}$. Lớp có độ cao trên 16km, sự biến đổi của T_m theo mùa lớn hơn lớp dưới, biên độ biến đổi của T_m dao động từ $1,6^{\circ}\text{C}$ đến $5,8^{\circ}\text{C}$. Giá trị T_m cực tiểu là $-83,1^{\circ}\text{C}$ (vào mùa đông) và $-79,4^{\circ}\text{C}$ (vào mùa hè). Theo tác giả [87] nhiệt độ cực tiểu ở đỉnh tầng đối lưu trong

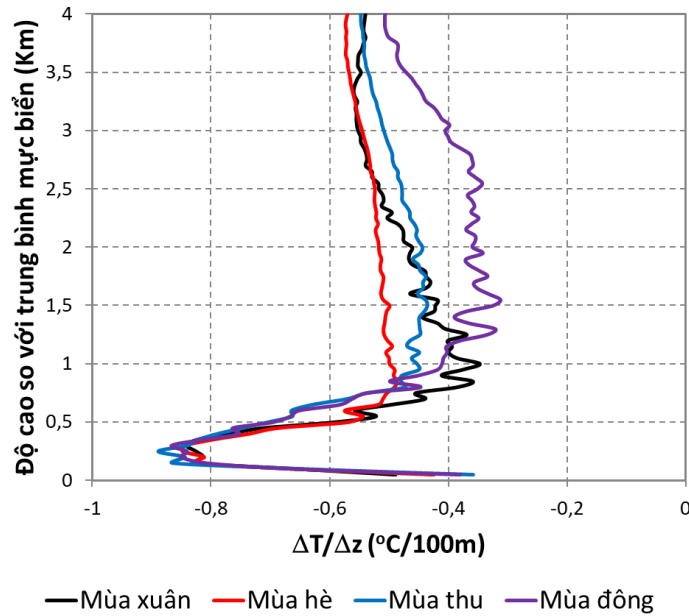
khu vực Bắc Thái Bình Dương đạt từ 194,0K đến 194,1K ($-79,1^{\circ}\text{C}$ đến $-79,0^{\circ}\text{C}$) vào mùa hè và 189,4K đến 190,6K ($-83,7^{\circ}\text{C}$ đến $-82,5^{\circ}\text{C}$) vào mùa đông. So với kết quả của tác giả [87], kết quả tính toán từ dữ liệu wetPf2 trong luận án là khá phù hợp. Cũng theo tác giả [87] ở khu vực đỉnh tầng đối lưu có một vùng nhiệt độ thấp thường tồn tại ở vùng xích đạo bán cầu đông và mở rộng về phía tây bắc và tây nam trong vùng cận nhiệt đới tạo ra cấu trúc hình yên ngựa. Do ảnh hưởng của vùng nhiệt độ thấp này mà biên độ biến đổi năm của nhiệt độ ở đỉnh tầng đối lưu trên khu vực Hoàng Sa là lớn.



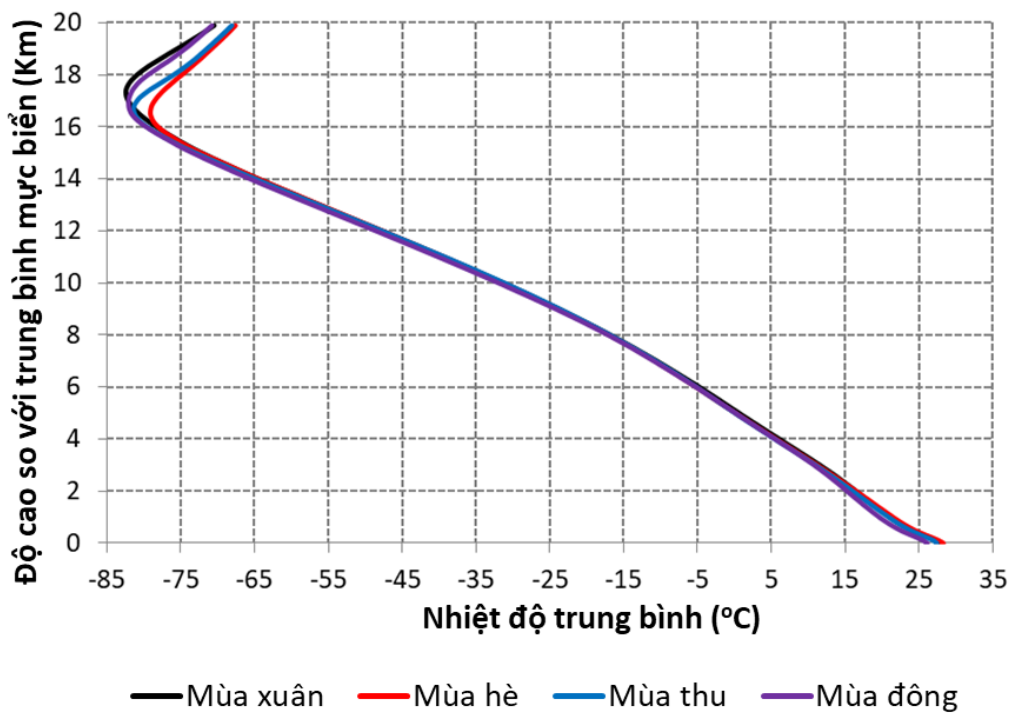
Hình 3.4. Kết quả biến đổi nhiệt độ trung bình theo độ cao của bốn mùa trên khu vực quần đảo Hoàng Sa ($13^{\circ}\text{N} - 18^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} - 115^{\circ}\text{E}$).

Để thấy rõ hơn sự biến đổi của nhiệt độ không khí theo độ cao, đại lượng gradient nhiệt độ theo phương thẳng đứng cũng được phân tích. Trong hình 3.5 trình bày kết quả biến đổi của gradient thẳng đứng của nhiệt độ trung bình mùa với độ phân giải 50m trong lớp từ bề mặt đến 4km trên khu vực quần đảo Hoàng Sa. Kết quả cho thấy gradient nhiệt độ đạt giá trị lớn nhất ($-0,84^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ đến $-0,88^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ tùy từng mùa) tại độ cao khoảng 0,25km. Lớp có độ cao $<0,5\text{km}$, sự giảm nhiệt độ theo chiều cao lớn hơn các lớp bên trên, giá trị gradient nhiệt độ chủ yếu nhỏ hơn $-0,7^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Trong lớp này, giá trị gradient nhiệt độ trung bình các mùa không có sự khác biệt nhiều. Gradient nhiệt độ theo độ cao trung bình mùa thể hiện sự giảm nhiệt độ theo độ cao nhỏ nhất trong lớp từ độ cao 1km đến 3km. Trong lớp này, sự giảm nhiệt độ

theo độ cao lớn nhất trong mùa hè và nhỏ nhất trong mùa đông. Gradient nhiệt độ theo độ cao không có sự khác biệt nhiều giữa mùa xuân và mùa thu. Điều này đã cho thấy rằng khối không khí ở khu vực quần đảo Hoàng Sa có điều kiện bất ổn định mạnh nhất vào mùa hè và yếu nhất vào mùa đông (Hình 3.5).



Hình 3.5. Kết quả biến đổi gradient nhiệt độ trung bình theo độ cao của bốn mùa trên khu vực quần đảo Hoàng Sa ($13^{\circ}\text{N} - 18^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} - 115^{\circ}\text{E}$).

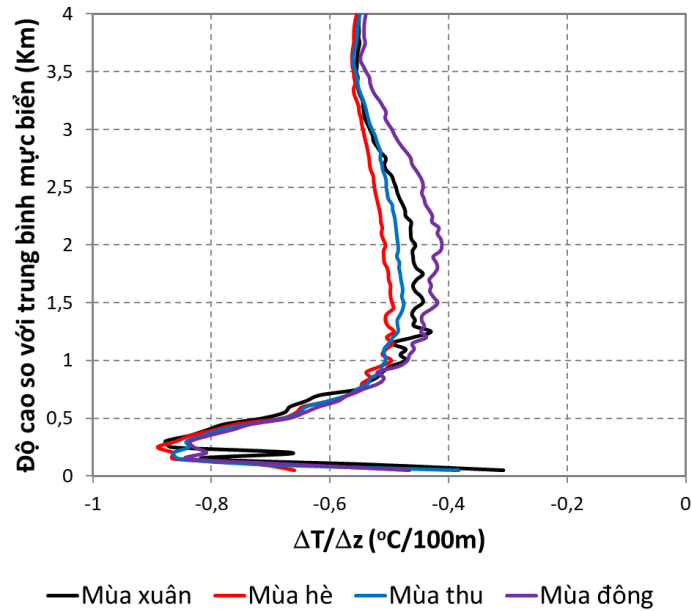


Hình 3.6. Kết quả biến đổi nhiệt độ trung bình theo độ cao của bốn mùa trên khu vực quần đảo Trường Sa ($07^{\circ}\text{N} - 12^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} - 115^{\circ}\text{E}$).

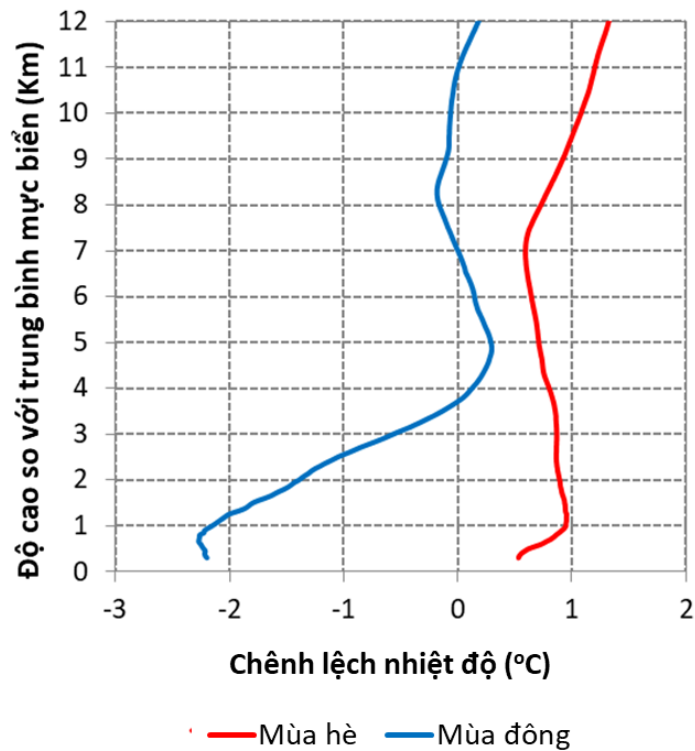
Tại khu vực quần đảo Trường Sa có tổng cộng 7730 thám sát, số lượng thám sát nhiều hơn so với khu quần đảo Hoàng Sa. Profile thẳng đứng Tm của bốn mùa ở khu vực quần đảo Trường Sa được trình bày trong hình 3.6. Đồ thị màu đen biểu diễn nhiệt độ trung bình của mùa xuân (tháng 3, 4, 5), đồ thị màu đỏ tương ứng với mùa hè (tháng 6, 7, 8), đồ thị màu xanh tương ứng với mùa thu (9, 10, 11) và đồ thị màu tím tương ứng với mùa đông (12, 1, 2). Kết quả thể hiện rõ xu thế biến đổi Tm theo độ cao tương tự như tại khu vực quần đảo Hoàng Sa, giảm dần từ bề mặt đến đỉnh tầng đối lưu. Về biến trình năm của Tm, trong lớp không khí từ bề mặt đến 2,0km, Tm của mùa hè có giá trị lớn nhất, Tm của mùa đông có giá trị thấp nhất. Biên độ biến đổi của Tm tại từng mực độ cao dao động từ 1,2°C đến 2,2°C. Gần bề mặt, giá trị Tm là 26,1°C (vào mùa đông) và 28,3°C (vào mùa hè). So với khu vực quần đảo Hoàng Sa, biên độ biến đổi nhiệt theo mùa trong năm ở khu vực quần đảo Trường Sa nhỏ hơn nhiều. Điều này thể hiện ảnh hưởng của gió mùa mùa đông đến khu vực này yếu hơn, dẫn đến giá trị Tm trong mùa đông ở khu vực này lớn hơn và biên độ biến đổi nhiệt độ trong năm nhỏ hơn so với khu vực quần đảo Hoàng Sa. Từ độ cao 2,0 km đến 15,8 km, giá trị Tm vào mùa xuân cao hơn so với các mùa còn lại. Giá trị Tm tại từng mực trong lớp này biến đổi nhỏ theo mùa, biên độ biến đổi của Tm dao động từ 0,3°C đến 1,4°C. Lớp không khí bên trên 15,8km, giá trị Tm của mùa hè có giá trị lớn nhất. Biên độ biến đổi của Tm trong lớp này lớn hơn lớp bên dưới, biên độ biến đổi của Tm dao động từ 1,4°C đến 6,1°C. Giá trị cực tiểu của Tm là -79,1°C (vào mùa hè) và -82,1°C (vào mùa đông). Biên độ biến đổi của nhiệt độ trong lớp ở đỉnh tầng đối lưu trong khu vực này có giá trị lớn, điều này có thể là do ảnh hưởng của sự biến đổi của vùng nhiệt độ thấp hình yên ngựa trong năm.

Đối với gradient thẳng đứng của nhiệt độ, sự biến đổi của đại lượng này ở khu vực quần đảo Trường Sa cũng giống như khu vực quần đảo Hoàng Sa. Gradient nhiệt độ thẳng đứng đạt giá trị lớn nhất (-0,84°C/100m đến -0,89°C/100m tùy từng mùa) tại độ cao khoảng 0,25km. Lớp có độ cao <0,5km, sự giảm nhiệt độ theo chiều cao lớn hơn các lớp bên trên. Trong lớp từ độ cao 1km đến 3km, sự giảm nhiệt độ theo chiều cao trong mùa hè là lớn nhất (dao động từ -0,54°C/100m đến -0,49°C/100m), sự giảm nhiệt độ theo chiều cao trong mùa đông là nhỏ nhất (dao động từ -0,50°C/100m đến -0,41°C/100m). Trong lớp này, sự giảm nhiệt độ theo độ cao

vào mùa thu lớn hơn so với mùa xuân, sự khác biệt này là không đáng kể. Điều này đã cho thấy rằng khối không khí ở khu vực này có điều kiện bất ổn định mạnh nhất vào mùa hè và yếu nhất mùa đông (Hình 3.7).



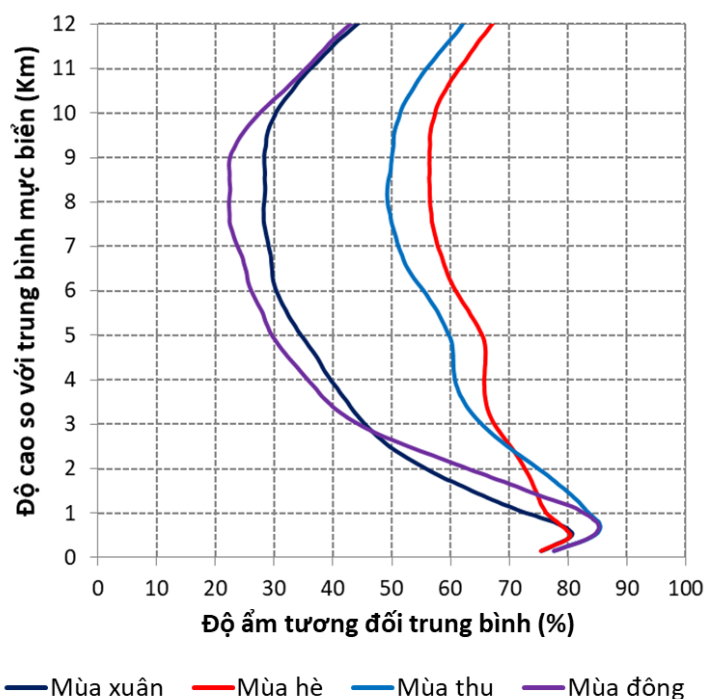
Hình 3.7. Kết quả biến đổi gradient nhiệt độ trung bình theo độ cao của bốn mùa trên khu vực quần đảo Trường Sa ($07^{\circ}\text{N} - 12^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} - 115^{\circ}\text{E}$).



Hình 3.8. Profile thẳng đứng của sự khác biệt nhiệt độ giữa hai khối khí trên khu vực quần đảo Hoàng Sa và quần đảo Trường Sa trong mùa hè (đồ thị màu đỏ) và trong mùa đông (đồ thị màu xanh).

Để thấy rõ sự khác biệt giữa nhiệt độ của khối không khí ở khu vực Bắc Biển Đông và Nam Biển Đông vào các thời điểm khác nhau trong năm, profile chênh lệch nhiệt độ theo độ cao đã được tính toán cho khối khí biển trên khu vực quần đảo Hoàng Sa và Trường Sa trong mùa hè (đồ thị màu đỏ) và mùa đông (đồ thị màu xanh). Kết quả cho thấy vào mùa hè chênh lệch nhiệt độ giữa hai khối không khí là không đáng kể (Hình 3.8). Một hiệu ứng làm mát đáng kể ($-1,0$ đến $-2,3^{\circ}\text{C}$) trong lớp khí quyển thấp hơn của khối không khí phía bắc (phía trên quần đảo Hoàng Sa) so với khối không khí phía nam (phía trên quần đảo Trường Sa) trong mùa đông. Sự chênh lệch nhiệt độ đáng kể vào mùa đông chủ yếu do ảnh hưởng của gió mùa mùa đông mang theo khối khí lạnh từ các vĩ độ cao hơn đến khu vực miền Bắc Việt Nam và Biển Đông. Gió mùa mùa đông đã mang khối không khí có nhiệt độ thấp đến khu vực quần đảo Hoàng Sa và Trường Sa, khối không khí này đã chi phối profile nhiệt độ phía trên ở hai khu vực này. Trong đó, khối không khí di chuyển đến khu vực quần đảo Trường Sa đi qua quãng đường trên khu vực biển nhiệt đới dài hơn, nó bị biến tính mạnh hơn và nhiệt độ của khối khí này cao hơn so với khi di chuyển đến khu vực quần đảo Hoàng Sa. Bên cạnh đó, độ dày của khối không khí lạnh di chuyển đến khu vực Bắc Biển Đông từ các vĩ độ cao tập trung chủ yếu ở lớp thấp của tầng đối lưu (dưới 3 km) đã làm cho nhiệt độ trong lớp dưới của tầng đối lưu (dưới 3 km) ở khu vực quần đảo Hoàng Sa lạnh hơn so với quần đảo Trường Sa.

3.2.2. Đặc điểm trường độ ẩm tương đối

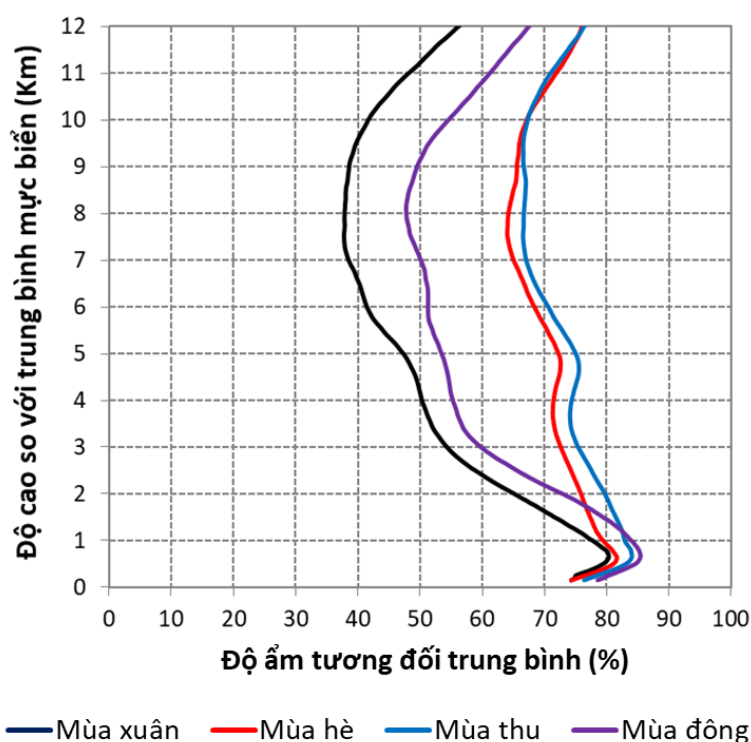


Hình 3.9. Kết quả biến đổi độ ẩm tương đối trung bình theo độ cao của bốn mùa trên khu vực quần đảo Hoàng Sa (13°N - 18°N , 110°E - 115°E).

Tương tự như nhiệt độ khí quyển, độ ẩm tương đối cũng được tính toán trung bình theo từng mùa. Profile thẳng đứng của độ ẩm tương đối trung bình mùa (RHm) trong lớp từ 0km đến 12km ở khu vực quần đảo Hoàng Sa với độ phân giải theo độ cao 50m được trình bày trong hình 3.9. Kết quả cho thấy giá trị RHm trong lớp biên khí quyển lớn hơn trong lớp khí quyển tự do. Trong lớp sát bề mặt giá trị độ ẩm trung bình mùa dao động từ 75,4% (mùa hè) đến 77,6% (mùa đông). Giá trị RHm tăng theo độ cao và đạt giá trị cực đại tại độ cao khoảng 0,6 km đến 0,7 km. Độ cao này thường là vị trí của mực ngưng kết nâng (LCL). Giá trị cực đại của RHm là 80,7% (mùa xuân), 80,5% (mùa hè), 85,5% (mùa thu) và 85,3% (mùa đông). Do ảnh hưởng của gió mùa mùa đông, luồng không khí lạnh mang theo không khí có nhiệt độ thấp từ Bắc Á đến Biển Đông khiến nhiệt độ tiến gần tới nhiệt độ điểm sương. Điều này dẫn đến giá trị độ ẩm tương đối cao nhất ở khu vực này vào mùa đông trong lớp không khí từ bề mặt đến độ cao 400m. Trong lớp khí quyển tự do, RHm của mùa xuân, mùa thu, mùa đông giảm theo độ cao đến giá trị cực tiểu tại mực ở giữa tầng đối lưu, sau đó RHm tăng theo độ cao. Riêng profile RHm của mùa hè, một cực đại phụ tồn tại ở mực độ cao khoảng 4,8km. Giá trị cực đại phụ này có thể liên quan đến mực nhiệt độ 0°C trong các đám mây đối lưu. Kết quả cho thấy rằng biên độ biến đổi theo chiều cao của RHm nhỏ nhất trong mùa hè và lớn nhất trong mùa đông. Giá trị cực tiểu của RHm là 28,2% (mùa xuân), 56,4% (mùa hè), 49,2% (mùa thu) và 22,3% (mùa đông) ở độ cao 8 đến 9 km. Biên độ biến đổi năm của RHm ở trong lớp khí quyển tự do lớn hơn nhiều trong lớp biên khí quyển, đạt giá trị cực đại là 35,8% (Hình 3.9). Giá trị RHm mùa hè lớn hơn nhiều so với mùa đông trong lớp khí quyển tự do. Sự giảm độ ẩm lớn theo chiều cao vào mùa đông trong khi trong mùa hè độ ẩm tương đối ít biến đổi theo chiều cao có thể liên quan tới vai trò quan trọng của hoạt động đối lưu mạnh mang ẩm mực thấp lên các tầng khí quyển cao hơn vào mùa hè. Kết quả biến đổi của gradient nhiệt theo độ cao trong hình 3.5 đã cho thấy khối không khí ở khu vực này vào mùa hè bất ổn định mạnh hơn so với trong mùa đông.

Tại khu vực quần đảo Trường Sa, profile thẳng đứng của độ ẩm tương đối trung bình mùa (RHm) cũng được tính toán trong lớp từ 0km - 12km. Kết quả cho thấy giá trị độ ẩm trung bình mùa dao động từ 74,3% (mùa hè) đến 78,5% (mùa đông) ở lớp gần bề mặt. Tương tự như khu vực quần đảo Hoàng Sa, giá trị RHm tăng theo

độ cao và đạt cực đại ở độ cao 0,65km. Giá trị cực đại của RHm là 80,3% (mùa xuân), 81,6% (mùa hè), 84% (mùa thu) và 85,4% (mùa đông). Tiếp đó RHm giảm dần và đạt giá trị cực tiểu tại giữa tầng đối lưu. Giá trị RHm trong lớp biên khí quyển lớn hơn trong lớp khí quyển tự do. Trong lớp dưới 1,25km, biên độ biến đổi trong năm của RHm nhỏ ($<7,5\%$). Độ ẩm tương đối trung bình vào mùa đông và mùa thu có giá trị cao hơn mùa hè và mùa xuân. Điều này có thể là do ảnh hưởng của gió mùa mùa đông và các hoạt động của dải hội tụ liên nhiệt đới (ITCZ). Gió mùa mùa đông đã vận chuyển không khí có nhiệt độ thấp đến Biển Đông, kết hợp với ITCZ có đối lưu tích cực di chuyển về các vĩ độ thấp hơn (gần và trên khu vực quần đảo Trường Sa) trong những tháng đầu mùa đông. Điều này dẫn đến độ ẩm tương đối cao trong khối không khí vào mùa đông và mùa thu (Hình 3.10).



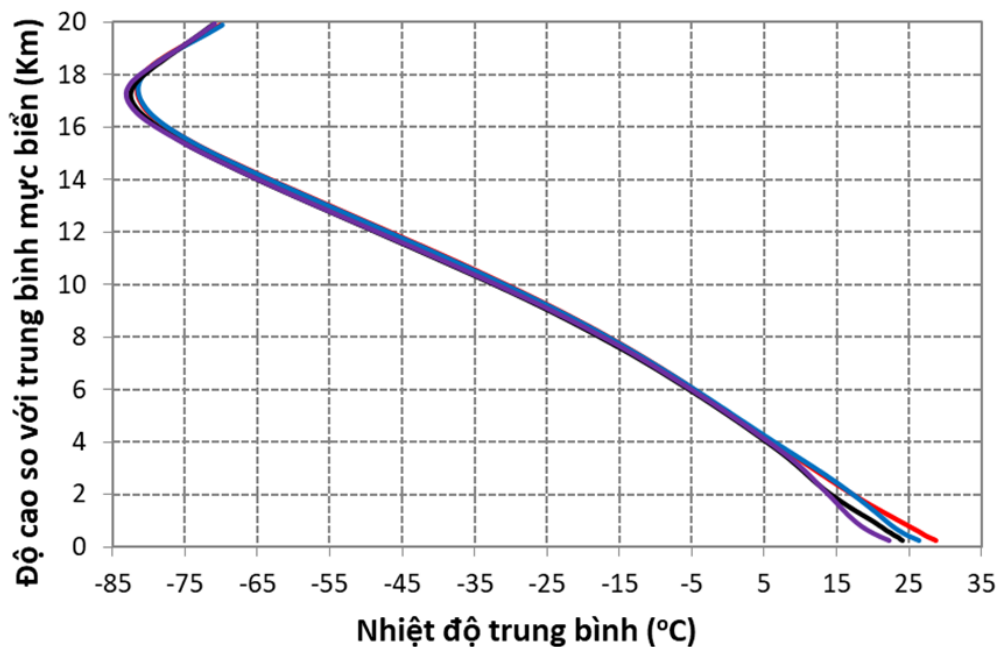
Hình 3.10. Kết quả biến đổi độ ẩm tương đối trung bình theo độ cao của bốn mùa trên khu vực quần đảo Trường Sa ($07^{\circ}\text{N} - 12^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} - 115^{\circ}\text{E}$).

Trong lớp khí quyển tự do, RHm của mùa hè và mùa thu lớn hơn mùa đông và mùa xuân. Biên độ biến đổi theo chiều cao của RHm trong mùa hè và mùa thu nhỏ hơn so với mùa xuân và mùa đông. Trong khi đó, biên độ biến đổi năm của RHm tại từng mực đạt giá trị cực đại là 29,2% (Hình 3.10), nhỏ hơn so với khu vực quần đảo Hoàng Sa. Giá trị RHm vào mùa hè và mùa thu không thay đổi đáng kể theo chiều cao so với mùa đông và mùa xuân. Đặc điểm này có thể liên quan đến vai trò quan

trọng của hoạt động đối lưu mạnh mang không khí ẩm ở tầng thấp lên các tầng khí quyển cao hơn trong mùa hè và mùa thu. Kết quả biến đổi của gradient nhiệt theo độ cao trong hình 3.7 cũng đã cho thấy khối không khí ở khu vực này vào mùa hè bất ổn định mạnh hơn so với trong mùa đông. Sự bất ổn định trong mùa đông ở khu vực này mạnh hơn so với khu vực quần đảo Hoàng Sa.

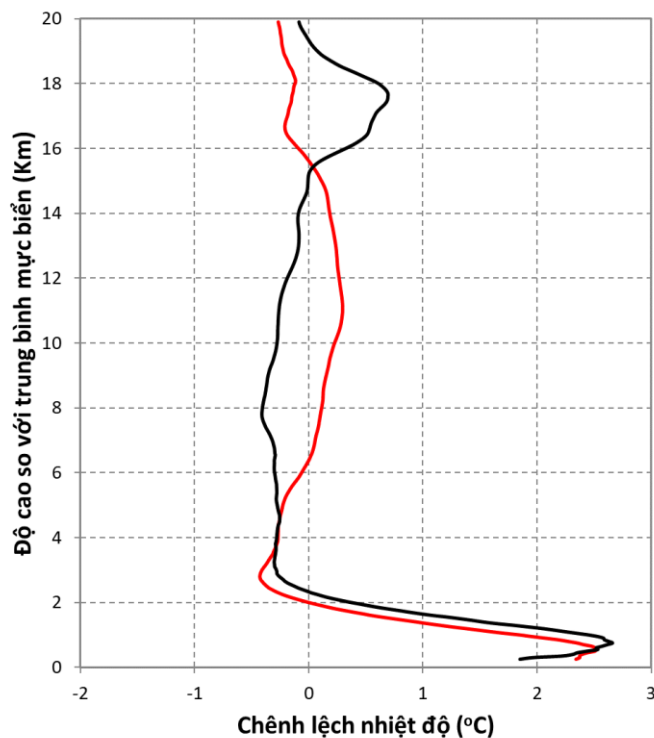
3.2.3. Sự khác biệt giữa trường nhiệt độ, độ ẩm của khối không khí biển và khối không khí lục địa ở cùng vĩ độ

Để làm nổi bật đặc trưng của khối không khí trên biển, đặc điểm biến đổi của trường nhiệt và độ ẩm tương đối của khối khí biển trên khu vực quần đảo Hoàng Sa được so sánh với khối khí trên khu vực đất liền ($13^{\circ}\text{N} - 18^{\circ}\text{N}$, $101^{\circ}\text{E} - 106^{\circ}\text{E}$). Khu vực đất liền được lựa chọn có cùng vĩ độ với khu vực trên biển (quần đảo Hoàng Sa) để làm giảm sự ảnh hưởng theo vĩ độ. Dựa trên số liệu thống kê về nhiệt độ của trạm bề mặt, khu vực đất liền có nhiệt độ nóng nhất vào thời kỳ cuối mùa xuân đến đầu mùa hè [88]. Do đó, nhiệt độ trung bình tháng 4, 5 và 6 được chọn để đặc trưng cho những tháng mùa nóng. Thời kỳ mùa đông (tháng 12, 01, 02) được lựa chọn để phân tích đặc điểm nhiệt độ của hai khối không khí trong những tháng lạnh nhất.

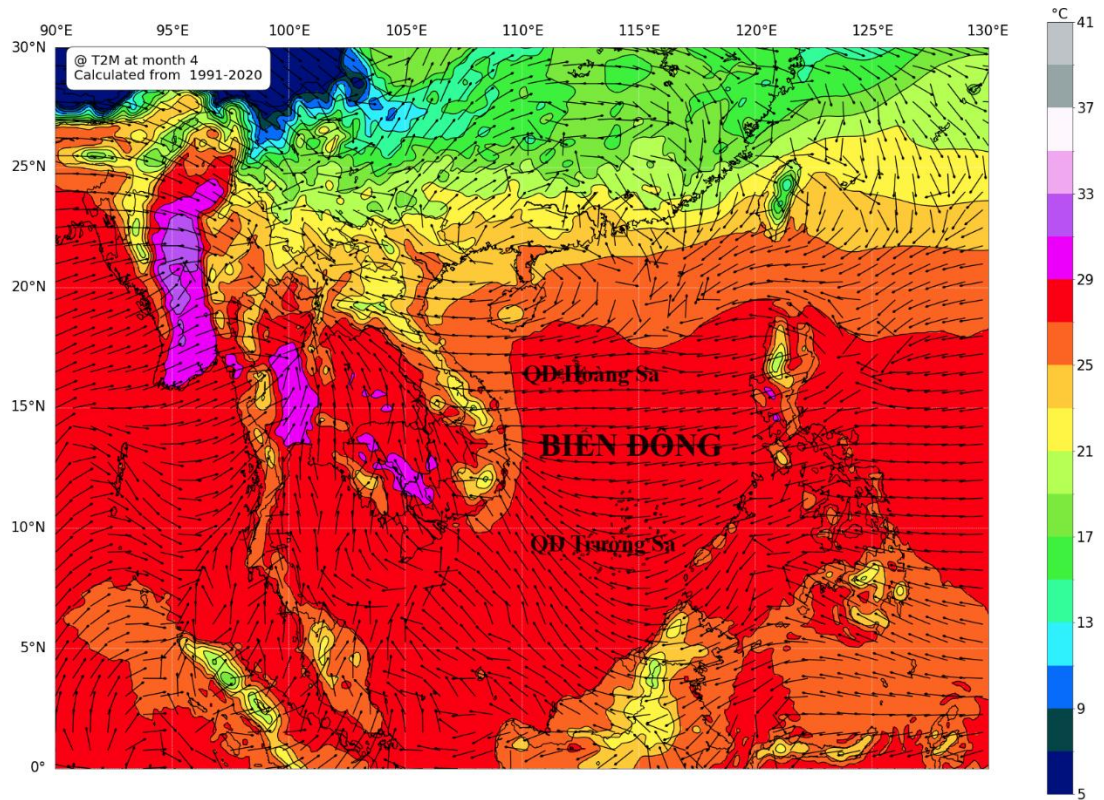


Hình 3.11. Profile thẳng đứng của nhiệt độ trung bình trong những tháng nóng (tháng 4, 5, 6) ở trên đất liền (màu đỏ), trên biển (màu xanh) và trong mùa đông (tháng 12, 1, 2) trên đất liền (màu đen), trên biển (màu tím).

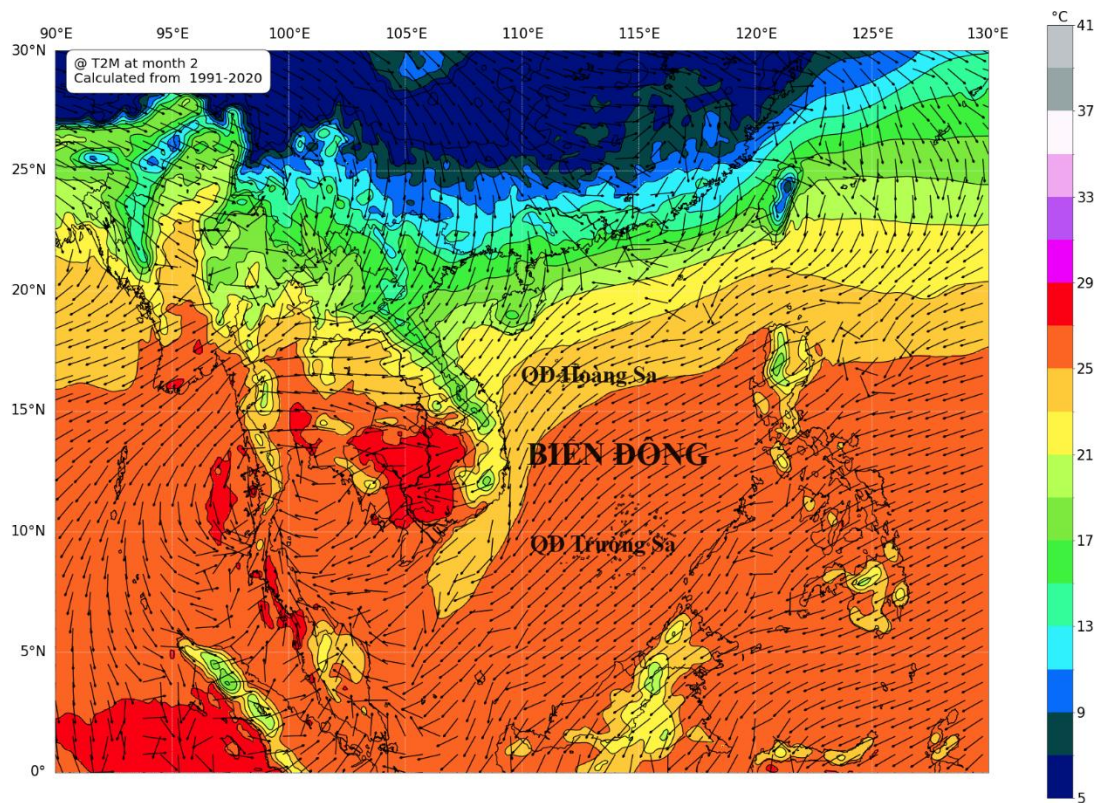
Khi so sánh profile nhiệt độ trung bình trong những tháng nóng nhất và trung bình mùa đông giữa khu vực quần đảo Hoàng Sa và khu vực đất liền, kết quả tính toán cho thấy rằng xu thế biến đổi theo chiều cao và theo mùa của nhiệt độ trung bình trên khu vực đất liền và khu vực quần đảo Hoàng Sa khá tương tự nhau. Trong lớp từ độ cao 3km đến 15km, biên độ biến đổi mùa là tương đối nhỏ. Trong lớp <3km, biên độ biến đổi theo mùa lớn hơn lớp bên trên ở cả hai khu vực. Nhìn chung, profile nhiệt độ trung bình mùa của khối không khí trên khu vực Hoàng Sa và khu vực đất liền khác biệt không đáng kể trong lớp >1,5km. Tuy nhiên, ở các mực độ cao thấp hơn (dưới 1,5 km), nhiệt độ trung bình mùa trên đất liền cao hơn so với trên khu vực quần đảo Hoàng Sa (Hình 3.11). Trong lớp dưới 1,5km, nhiệt độ trung bình các tháng 4, 5, 6 của khối không khí trên đất liền có giá trị cao hơn nhiệt độ của khối không khí trên biển từ 1°C đến 2,5°C (Hình 3.12) sự khác biệt này là do mặt đất bị đốt nóng mạnh hơn trên mặt biển. Mặt đất có nhiệt độ cao hơn dẫn đến sự truyền nhiệt từ mặt đất vào lớp không khí gần bề mặt lớn hơn so với trên biển dẫn đến nhiệt độ của không khí trong lớp biên ở trên đất liền cao hơn so với trên biển. Sự khác biệt này phù hợp với số liệu thống kê nhiều năm từ dữ liệu tái phân tích.



Hình 3.12. Chênh lệch profile thẳng đứng của nhiệt độ giữa khu vực đất liền và khu vực quần đảo Hoàng Sa, trung bình tháng 4,5,6 (đường màu đỏ), trung bình mùa đông (đường màu đen).



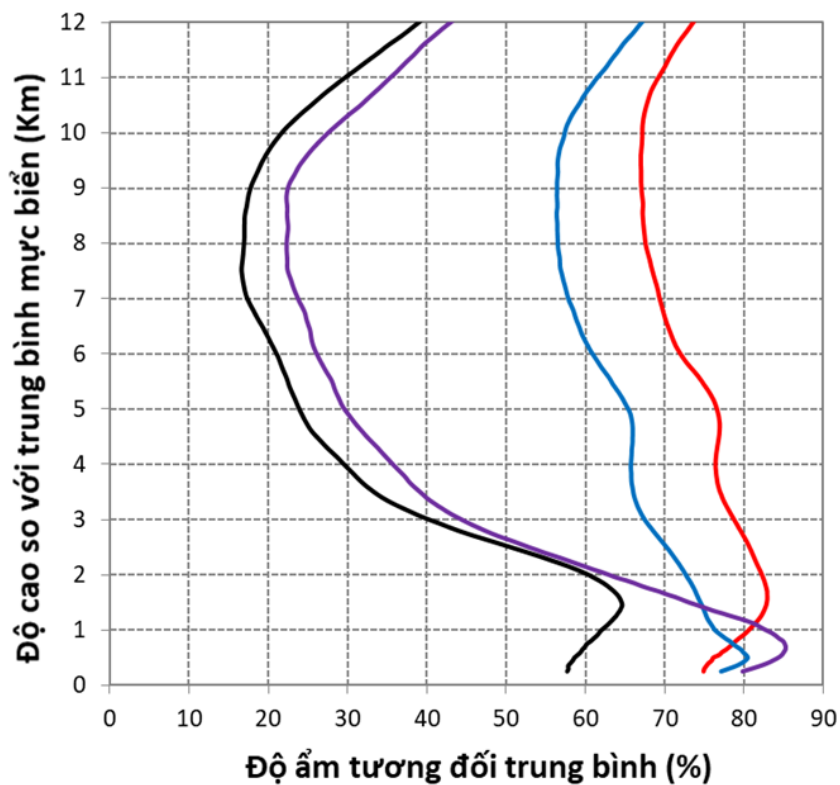
Hình 3.13. Giá trị trung bình dài hạn (1991-2020) của nhiệt độ (màu, °C) và véc tơ gió ngang (véc tơ, m/s) trong tháng 4 từ dữ liệu tái phân tích ERA5.



Hình 3.14. Giá trị trung bình dài hạn (1991-2020) của nhiệt độ (màu, °C) và véc tơ gió ngang (véc tơ, m/s) trong tháng 2 từ dữ liệu tái phân tích ERA5.

Hình 3.13 trình bày giá trị trung bình dài hạn (30 năm) của nhiệt độ không khí 2m và vectơ gió 10m vào tháng 4 từ dữ liệu phân tích ERA5 của Trung tâm Dự báo hạn vừa Châu Âu. Kết quả cho thấy khối không khí lục địa có nhiệt độ cao hơn đáng kể so với khối không khí trên khu vực quần đảo Hoàng Sa.

Trong những tháng mùa đông, hệ thống gió mùa mùa đông hoạt động mạnh, mang khối không khí lạnh từ khu vực phía bắc xuống ảnh hưởng mạnh đến khối không khí ở khu vực quần đảo Hoàng Sa. Do ảnh hưởng của địa hình, gió mùa mùa đông ảnh hưởng đến khu vực đất liền yếu hơn nên nhiệt độ trong đất liền cao hơn trên biển từ 1°C đến 2,6°C trong lớp dưới 1,5km (Hình 3.12). Sự khác biệt này phù hợp với số liệu thống kê nhiều năm. Kết quả trung bình 30 năm của nhiệt độ từ số liệu phân tích ERA5 cho thấy nhiệt độ không khí ở các mực thấp hơn trong khối không khí trên đất liền ấm hơn từ 1°C đến 2°C so với không khí trên biển trong tháng 2 (Hình 3.14).



Hình 3.15. Profile thẳng đứng của độ ẩm tương đối trung bình (%) trong mùa hè (tháng 6, 7, 8) ở trên đất liền (màu đỏ), trên biển (màu xanh) và trong mùa đông (tháng 12, 1, 2) trên đất liền (màu đen), trên biển (màu tím).

Đối với trường độ ẩm tương đối, profile độ ẩm tương đối trong mùa hè và mùa đông của hai khối khí cũng được phân tích, so sánh để làm rõ sự khác biệt giữa khối

khí trên đất liền và khu vực quần đảo Hoàng Sa. Vào mùa hè, RHm trung bình của cả hai khu vực đều có giá trị cao (Hình 3.15). Lớp dưới 0.8km, khối không khí biển có giá trị RHm cao hơn khối không khí trên đất liền. Giá trị RHm trung bình mùa hè của khối không khí trên biển cao hơn ở phần dưới của lớp biên, có thể liên quan đến vai trò của các chuyển động rối, nó đã vận chuyển ẩm dồi dào từ mặt biển vào trong lớp biên khí quyển. Tuy nhiên, trong tầng khí quyển tự do, giá trị RHm trung bình vào mùa hè của khối không khí trên đất liền cao hơn giá trị RHm trung bình trong khu vực quần đảo Hoàng Sa (Hình 3.15). Nguyên nhân có thể là do trong mùa hè, gió mùa tây nam đã vận chuyển khối không khí có độ ẩm cao từ Ấn Độ Dương đến khu vực đất liền [89]. Dưới ảnh hưởng của yếu tố địa phương và địa hình đã làm cho đối lưu phát triển mạnh vận chuyển ẩm lên các mức cao hơn trong lớp khí quyển tự do. Đây có thể là nhân tố quan trọng dẫn đến giá trị RHm ở khu vực đất liền cao hơn trên biển trong lớp khí quyển tự do vào mùa hè.

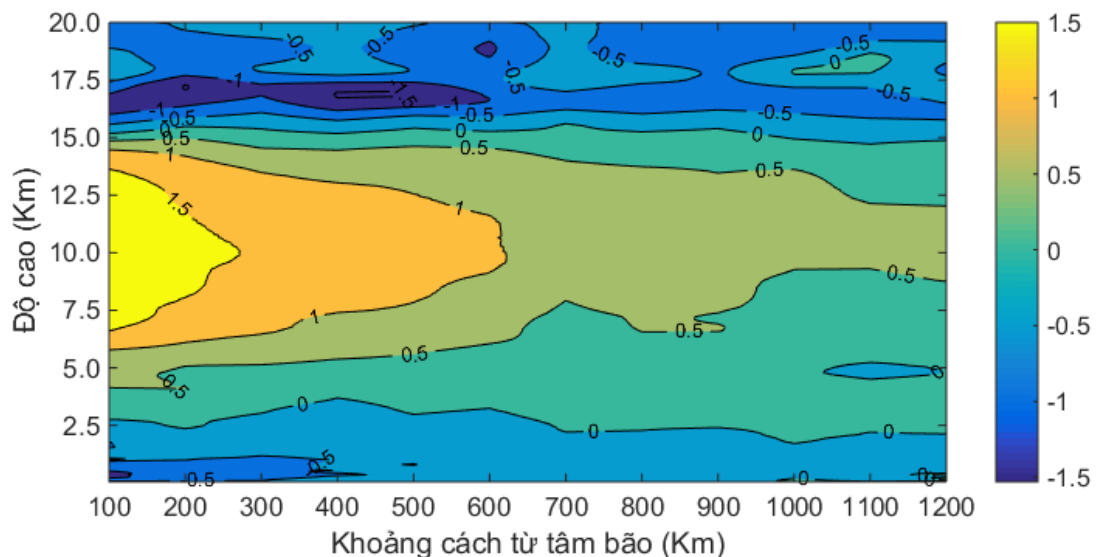
Vào mùa đông, profile độ ẩm tương đối trung bình thể hiện sự khác biệt đáng kể giữa RHm trung bình của hai khối không khí trong lớp biên khí quyển (dưới 2 km). Trên khu vực đất liền, độ ẩm tương đối trung bình mùa đông nhỏ hơn so với mùa hè. Trong khi đó, độ ẩm tương đối của khối không khí trên khu vực quần đảo Hoàng Sa lại ngược lại, mùa đông có giá trị cao hơn mùa hè. Khi so sánh trong cùng thời điểm mùa đông, giá trị RHm trên khu vực đất liền thấp hơn nhiều so với khu vực quần đảo Hoàng Sa. Vào mùa đông, gió mùa đông bắc mang khối không khí khô và lạnh đến khu vực này [89]. Do ảnh hưởng của gió mùa đông bắc khô, độ ẩm tương đối của khối không khí trong lớp biên khí quyển trên khu vực đất liền thấp hơn so với khu vực quần đảo Hoàng Sa. Trong lớp khí quyển tự do, giá trị độ ẩm tương đối của hai khối không khí không khác biệt đáng kể, giá trị độ ẩm tương đối của khu vực đất liền thấp hơn so với khu vực quần đảo Hoàng Sa (Hình 3.15).

Kết quả cho thấy sự thay đổi độ ẩm tương đối giữa mùa hè và mùa đông cao nhất trên đất liền xấp xỉ 52,75%. Trong khối không khí biển, giá trị này là 35,83%. Qua đây ta có thể thấy được biên độ biến đổi độ ẩm tương đối giữa mùa hè và mùa đông trong khối không khí trên đất liền cao hơn nhiều so với khối không khí biển (Hình 3.15).

3.3. Đặc điểm một số trường khí quyển ở khu vực Việt Nam và lân cận khi có bão hoạt động từ dữ liệu wetPf2

Bão nhiệt đới là một trong những hiện tượng thời tiết nguy hiểm. Nó gây ra các thiệt hại lớn về người và kinh tế đối với các quốc gia ven biển trong đó có Việt Nam. Trung bình năm có khoảng 8 - 13 xoáy thuận nhiệt đới trên khu vực Biển Đông [90]. Cường độ của bão được điều khiển chủ yếu bằng việc giải phóng ẩn nhiệt trong hệ thống mây bão. Mức độ giải phóng ẩn nhiệt trong mây bão cũng liên quan chặt chẽ đến đối lưu có tổ chức, phân bố độ ẩm và cấu trúc nhiệt bên trong và bên ngoài các đám mây. Việc quan trắc cấu trúc các trường khí quyển trong bão có ích cho công tác theo dõi và dự báo bão. Để quan trắc trực tiếp các trường này trong điều kiện bão hoạt động, người ta thường sử dụng máy bay bay qua tâm bão và thả các thiết bị quan trắc. Nó đòi hỏi công nghệ, chi phí rất cao và không thể thực hiện được trong điều kiện thực tế của nước ta hiện nay. Với phương pháp che khuất vô tuyến (RO) cho phép đo đạc được các thông số khí quyển trong mọi điều kiện thời tiết bao gồm bão nhiệt đới, nên việc sử dụng dữ liệu GPSRO hoàn toàn cho phép chúng ta có thể nghiên cứu được cấu trúc các trường khí quyển trong bão ở khu vực Biển Đông.

3.3.1. Đặc điểm trường nhiệt độ



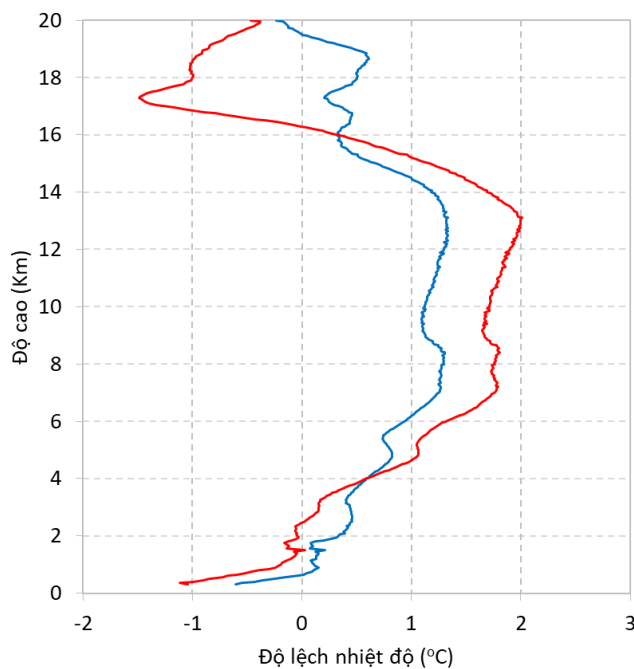
Hình 3.16. Dị thường nhiệt độ ($^{\circ}\text{C}$) so với giá trị trung bình tháng từ dữ liệu wetPf2 theo độ cao và khoảng cách so với tâm bão trong thời gian bão di chuyển vào Biển Đông mùa bão năm 2020.

Thông thường khi đề cập đến cấu trúc nhiệt độ trong bão, các nghiên cứu thường tập trung vào phân bố của dị thường nhiệt độ. Trong luận án, dị thường nhiệt

độ được xác định bằng cách so sánh giá trị quan trắc với giá trị trung bình tháng sử dụng dữ liệu wetPf2. Sau đó dị thường nhiệt độ được tính trung bình theo độ cao và theo khoảng cách so với tâm bão đối với 13 cơn bão hình thành hoặc đi vào Biển Đông trong mùa bão 2020. Kết quả cho thấy vùng dị thường nóng tồn tại ở độ cao từ 2,5km – 15km ở tất cả các khoảng cách từ tâm bão đến 1200km. Giá trị dị thường cực đại đạt 1,5°C ở độ cao từ 6,5km – 13,5km trong khu vực cách tâm bão dưới 100km. Dị thường nhiệt độ giảm dần khi khoảng cách so với tâm bão tăng lên, vùng có dị thường nhiệt độ $>1^{\circ}\text{C}$ mở rộng đến khoảng cách 600km từ tâm bão. Kết quả cũng cho thấy có các vùng dị thường lạnh ở các độ cao dưới 2,5km và trên 16km. Vùng dị thường lạnh ở dưới 2,5km có giá trị cực đại $<-0,5^{\circ}\text{C}$, trải rộng từ tâm bão đến khoảng cách khoảng 400km. Vùng dị thường lạnh có giá trị $<-1,0^{\circ}\text{C}$ xuất hiện tại độ cao từ 16km – 17,5km và trải rộng từ tâm bão đến khoảng cách 600km (Hình 3.16). Theo tác giả [91] cho thấy, vùng dị thường nóng của nhiệt độ trong bão đạt cực đại tại độ cao mực khí áp 350mb – 250mb (8 km – 11 km) và vùng dị thường lạnh của nhiệt độ ở trong mực 100mb – 50mb [91]. Phân bố dị thường nóng của nhiệt độ tính trung bình cho 322 cơn bão trên toàn cầu từ dữ liệu COSMIC cho thấy vùng dị thường nóng trong tầng đối lưu mở rộng đến độ cao 15km và vùng dị thường lạnh của nhiệt độ phía trên 16km [24]). Sự phân bố của dị thường nhiệt độ tính toán từ dữ liệu wetPf2 trong luận án là tương đối phù hợp với nghiên cứu trước đây [24, 91].

Để thấy rõ hơn cấu trúc trường nhiệt độ trong bão, độ lệch của profile nhiệt độ trung bình được xem xét và phân tích. Hình 3.17 biểu diễn độ lệch của profile nhiệt độ trung bình của khu vực bán kính $\leq 100\text{km}$ từ tâm bão với profile nhiệt độ trung bình của khu vực bán kính từ 500km – 600km (màu xanh) và khu vực bán kính từ 1100km – 1200km (màu đỏ) từ dữ liệu wetPf2 trong mùa bão 2020. Nhìn chung profile nhiệt độ trung bình của khu vực bán kính $\leq 100\text{km}$ từ tâm bão chủ yếu lớn hơn so với profile nhiệt độ trung bình của vùng bán kính từ 500km – 600km. Trong lớp từ độ cao 6 m – 14,5km, mức độ chênh lệch giữa profile nhiệt độ trung bình của hai khu vực $>1^{\circ}\text{C}$. Giá trị chênh lệch lớn nhất đạt đến 1,34°C tại độ cao 12,75 km. Kết quả mô phỏng vận tốc thẳng đứng từ mô hình WRF tương ứng với các vị trí dữ liệu wetPf2 cho thấy profile trung bình vận tốc gió thẳng đứng tương ứng với các vị trí dữ liệu wetPf2 cách tâm bão bán kính $\leq 100\text{km}$ đều có giá trị >0 tại tất cả các mực khí

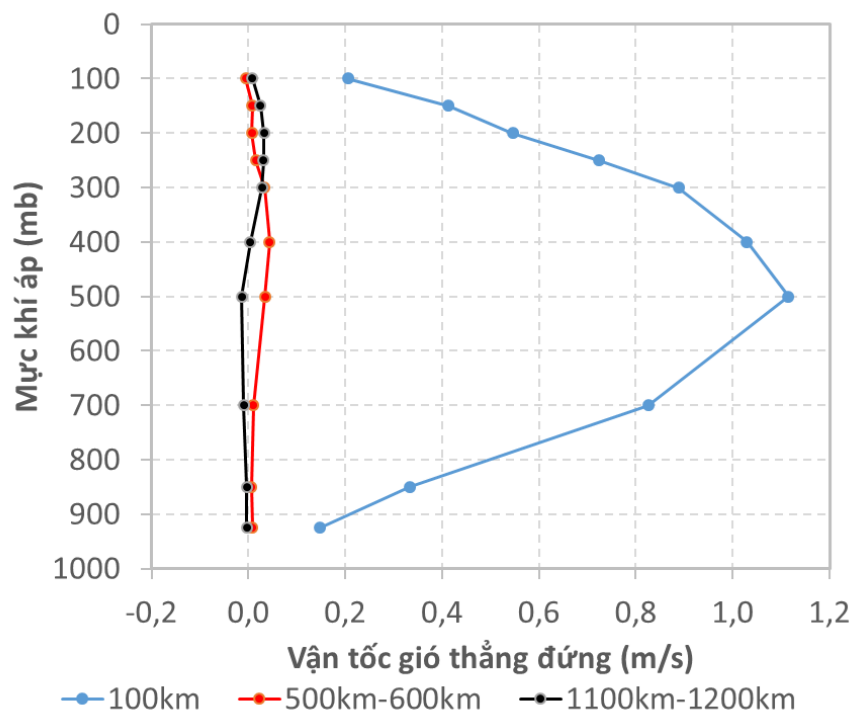
áp. Cụ thể, giá trị vận tốc gió thẳng đứng trung bình dao động từ 0,15m/s đến 1,11m/s. Trong khi đó, profile trung bình vận tốc gió thẳng đứng tương ứng với các vị trí dữ liệu wetPf2 cách tâm bão khoảng cách từ 500km đến 600km có giá trị >0 tại các mực khí áp $\geq 150\text{mb}$. Giá trị vận tốc gió thẳng đứng trung bình dao động từ -0,01m/s đến 0,04m/s (Hình 3.18). Kết quả này là minh chứng cho thấy dòng thẳng mạnh hơn dẫn đến giải phóng ẩn nhiệt lớn hơn ở khu vực tâm bão so với rìa cơn bão là nguyên nhân chính cho sự chênh lệch nhiệt độ trung bình giữa khu vực tâm bão ($\leq 100\text{km}$) và khu vực từ 500km đến 600km.



Hình 3.17. Độ lệch nhiệt độ của profile nhiệt độ trung bình trong khu vực bán kính 100km từ tâm bão với khu vực bán kính từ 500 km – 600 km (màu xanh) và khu vực từ 1100 km – 1200 km (màu đỏ).

Kết quả cũng cho thấy độ lệch giữa profile nhiệt độ trung bình của khu vực bán kính $\leq 100\text{km}$ từ tâm bão và khu vực bán kính từ 1100km – 1200km có giá trị lớn trong lớp từ độ cao 6km – 14,5km. Tại hầu hết các mực, giá trị độ lệch $>1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Giá trị cực đại đạt 2°C tại độ cao 13km. Lớp từ 16,3km trở lên, profile nhiệt độ trung bình của khu vực bán kính $\leq 100\text{km}$ từ tâm có giá trị nhỏ hơn so với khu vực bán kính từ 1100km – 1200km. Những kết quả này chứng tỏ lớp từ độ cao 6km – 14,5km ở khu vực bán kính $\leq 100\text{km}$ từ tâm bão có dị thường nóng và khu vực từ trên 16,3 km xuất hiện dị thường lạnh (Hình 3.17). Kết quả mô phỏng tại các vị trí dữ liệu wetPf2 cách tâm bão từ 1100km đến 1200km cho thấy giá trị vận tốc trung bình <0 tại các mực

khí áp $\geq 500\text{mb}$ và có giá trị >0 tại các mực khí áp $<500\text{mb}$. Giá trị vận tốc gió thẳng đứng trung bình dao động từ $-0,014\text{m/s}$ đến $0,032\text{ m/s}$ (Hình 3.18). Giá trị này cho thấy khu vực độ cao thấp hơn mực 500mb gió thẳng đứng chủ yếu là dòng giáng, không có sự giải phóng ẩn nhiệt. Do đó sự chênh lệch nhiệt độ không khí giữa khu vực gần tâm bão (bán kính cách tâm bão $\leq 100\text{km}$) và khu vực cách tâm bão từ 1100km đến 1200km lớn hơn so với khu vực cách tâm bão từ 500km đến 600km. Điều này cũng minh chứng số liệu wetPf2 là một nguồn số liệu tốt sử dụng để nghiên cứu cấu trúc trường nhiệt độ của bão ở khu vực Biển Đông và lân cận.

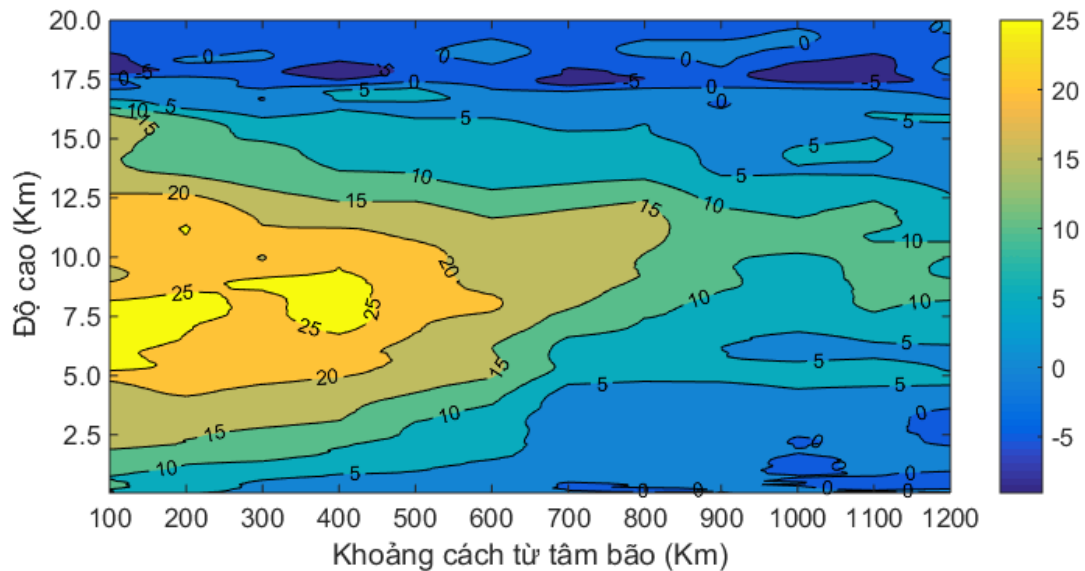


Hình 3.18. Profile vận tốc thẳng đứng trung bình trong khu vực bán kính $\leq 100\text{km}$ từ tâm bão (màu xanh), khu vực bán kính từ 500 km – 600 km (màu đỏ) và khu vực bán kính từ 1100 km – 1200 km (màu đen).

3.3.2. Đặc điểm trường độ ẩm tương đối

Để thấy rõ cấu trúc của trường độ ẩm tương đối trong bão, dị thường độ ẩm tương đối cũng được phân tích trong luận án này. Dị thường độ ẩm tương đối được tính toán tương tự như dị thường nhiệt độ. Kết quả tính toán cho thấy trong điều kiện ảnh hưởng của bão, giá trị độ ẩm tương đối trong tầng đối lưu tăng lên so với giá trị trung bình tháng. Vùng có giá trị độ ẩm tương đối tăng nhiều nhất tập trung ở khu vực cách tâm bão $<600\text{km}$, giá trị tăng cao nhất $>25\%$. Vùng có giá trị tăng của độ

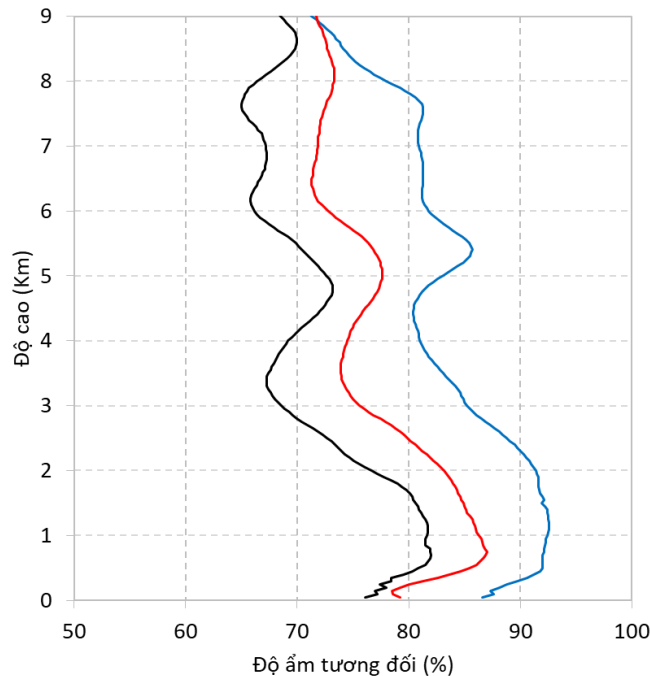
ẩm tương đối đạt đến $>20\%$ tập trung chủ yếu tại các độ cao từ 5km đến 12,5km. Trong lớp dưới 2,5km của khu vực từ tâm bão đến 300km, độ ẩm tương đối tăng trung bình từ 5%-15%. Ở các khoảng cách lớn hơn 800km từ tâm bão, sự gia tăng độ ẩm tương đối là nhỏ hơn nhiều so với khu vực cách tâm bão <600 km. Giá trị tăng của độ ẩm tương đối trong khu vực này chủ yếu $<10\%$, chỉ một số khu vực từ độ cao 7,5km đến 12,5km có giá trị tăng của độ ẩm tương đối là trên 10%. Tại các độ cao trên 17km, sự gia tăng của độ ẩm tương đối so với giá trị trung bình tháng không rõ ràng. Kết quả đã thể hiện rõ ràng sự khác biệt đáng kể về mức độ tăng độ ẩm tương đối giữa khu vực từ tâm bão đến 600km và khu vực cách tâm bão từ 600km đến 1200km. Điều này tương đối phù hợp vì khu vực từ tâm bão đến 600km nằm trong vùng đối lưu mạnh của bão (Hình 3.19).



Hình 3.19. *Dị thường độ ẩm tương đối (%) so với giá trị trung bình tháng từ dữ liệu wetPf2 theo độ cao và khoảng cách so với tâm bão trong thời gian bão di chuyển vào Biển Đông mùa bão năm 2020.*

Biến đổi profile độ ẩm tương đối trung bình tương ứng với 3 khu vực khác nhau theo bán kính từ tâm bão đã được phân tích để làm rõ hơn sự biến đổi của trường độ ẩm tương đối (Hình 3.20). Profile độ ẩm tương đối trung bình (đường màu xanh) của khu vực bán kính 100km từ tâm bão có giá trị lớn nhất. Trong lớp từ bề mặt đến độ cao 2,5km, giá trị độ ẩm tương đối trung bình thường lớn hơn 90%. Lớp từ độ cao 2,5km đến 8km, giá trị độ ẩm tương đối luôn trên 80%. Profile độ ẩm tương đối trung bình của khu vực cách tâm bão từ 1100km – 1200km trong tầng đối lưu có giá trị nhỏ

nhất trong ba trường hợp. Trong lớp dưới 2km, độ ẩm tương đối trung bình dao động xung quanh 80%. Lớp từ độ cao 2km đến 9km, độ ẩm tương đối trung bình luôn <75%, nó còn đạt đến giá trị khoảng 65% tại độ cao 7,6km. Kết quả biến đổi của độ ẩm tương đối trung bình đã thể hiện rõ sự giảm dần của độ ẩm tương đối từ tâm bão ra phía rìa của bão. Ở trong khu vực bán kính 100km từ tâm bão, profile độ ẩm tương đối có giá trị cao ở hầu hết các mực là do đối lưu mạnh mang ẩm từ mực thấp lên. Sự phân bố của độ ẩm tương đối theo khoảng cách từ tâm bão từ dữ liệu wetPf2 phía trên cho thấy việc có thể sử dụng dữ liệu wetPf2 để nghiên cứu cấu trúc trường ẩm của bão ở khu vực Biển Đông.

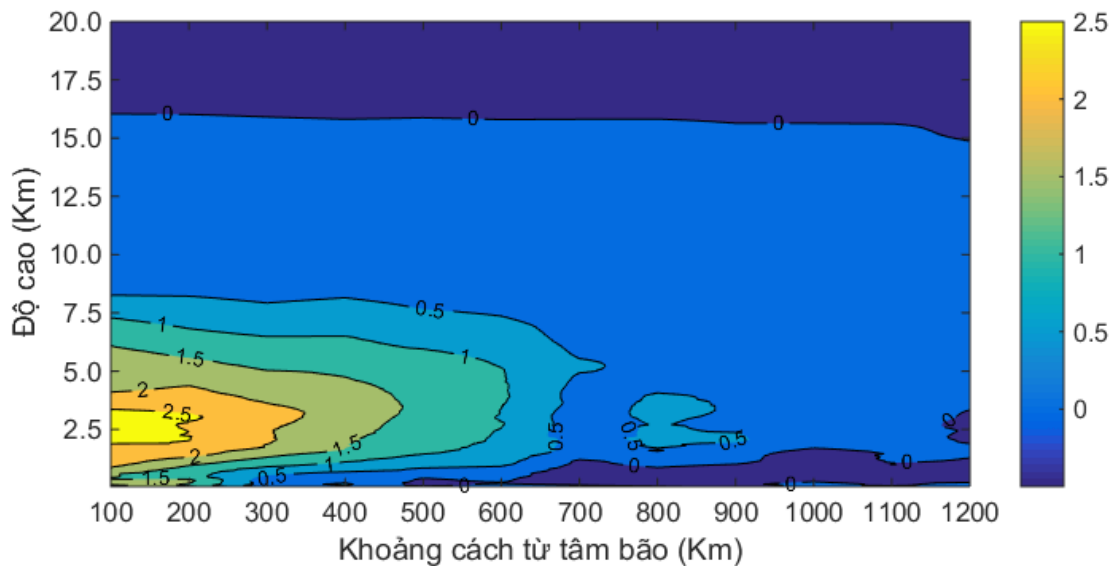


Hình 3.20. Profile thẳng đứng của độ ẩm tương đối trung bình tương ứng với các khoảng cách từ tâm bão đến 100km (màu xanh), khu vực từ 500 km – 600 km (màu đỏ) và khu vực từ 1100 km – 1200 km (màu đen).

3.3.3. Đặc điểm trường áp suất hơi nước

Tương tự như trường dị thường nhiệt độ, trường dị thường áp suất hơi nước được tính trung bình theo độ cao và khoảng cách so với tâm bão từ dữ liệu wetPf2. Kết quả cho thấy vùng dị thường tăng của áp suất hơi nước trong hoàn lưu bão tồn tại trong lớp từ bề mặt đến độ cao 16km trong khu vực tâm bão đến 600km và từ độ cao 1,5km đến 16km trong khu vực cách tâm bão từ 600km – 1200km. Giá trị dị

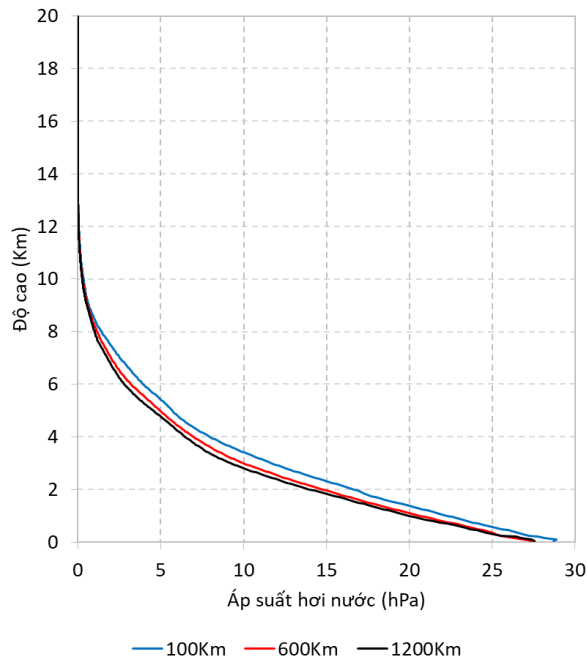
thường của áp suất hơi nước có giá trị cực đại ở khu vực tâm bão và giảm dần theo khoảng cách từ tâm bão. Khu vực từ tâm bão đến 200 km, vùng dị thường có giá trị cực đại nằm trong lớp có độ cao từ 2km đến 3km với giá trị đạt $>2,5\text{hPa}$. Tại khu vực cách tâm bão từ 500km đến 600km, giá trị dị thường tăng của áp suất hơi nước cực đại giảm xuống còn khoảng 1hPa. Trong khu vực cách tâm bão từ 700km đến 1200km, dị thường tăng của áp suất hơi nước chủ yếu dưới 0,5hPa. Dị thường của trường áp suất hơi nước đã thể hiện sự khác biệt rõ ràng giữa khu vực từ tâm bão đến 600km và khu vực cách tâm bão $>600\text{km}$ (Hình 3.21). Sự khác biệt rõ ràng này là do vùng từ tâm bão đến 600km nằm trong vùng đối lưu của bão.



Hình 3.21. Dị thường áp suất hơi nước (hPa) so với giá trị trung bình tháng từ dữ liệu wetPf2 theo độ cao và khoảng cách so với tâm bão trong thời gian bão di chuyển vào Biển Đông mùa bão năm 2020.

Để thấy rõ đặc điểm biến đổi của áp suất hơi nước trong bão, profile thẳng đứng áp suất hơi nước trung bình tương ứng với 3 khu vực khác nhau theo bán kính từ tâm bão được tính toán từ dữ liệu wetPf2. Kết quả tính toán cho thấy profile áp suất hơi nước trung bình trong khu vực bán kính 100km gần tâm bão (đường màu xanh) có giá trị lớn nhất. Giá trị của profile áp suất hơi nước trung bình của khu vực này chênh lệch đáng kể so với hai khu vực còn lại trong lớp 9km dưới cùng của tầng đối lưu. Sự chênh lệch này đạt cực đại (2,7 hPa) ở độ cao khoảng 2 km. Sự chênh lệch đáng kể này là do ảnh hưởng của đối lưu trong bão đã vận chuyển hơi nước lên các độ cao lớn hơn. Profile áp suất hơi nước trung bình trong khu vực khoảng cách

đến tâm bão từ 1100km – 1200km (đường màu đen) và khu vực từ 500km – 600km (đường màu đỏ) có sự chênh lệch tương đối nhỏ. Vì khu vực cách tâm bão từ 500km – 600km là vùng rìa của vùng đối lưu trong bão nên hoạt động đối lưu ở khu vực này yếu dẫn đến sự khác biệt của profile áp suất hơi nước của vùng này và vùng cách tâm bão từ 1100 km – 1200 km là nhỏ (Hình 3.22).

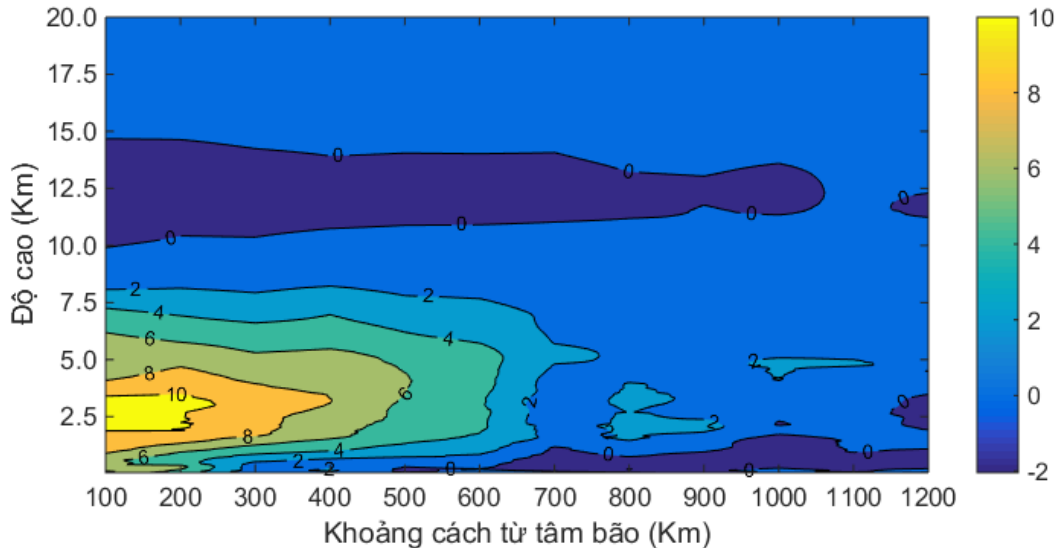


Hình 3.22. Profile thẳng đứng của áp suất hơi nước trung bình tương ứng với các khoảng cách từ tâm bão đến 100km (màu xanh), khoảng cách từ 500 km – 600 km (màu đỏ) và khoảng cách từ 1100 km – 1200 km (màu đen).

3.3.4. Đặc điểm trường chỉ số khúc xạ khí quyển

Chỉ số khúc xạ khí quyển của sóng vô tuyến là tỉ số của tốc độ truyền sóng vô tuyến trong môi trường chân không và vận tốc truyền sóng vô tuyến trong khí quyển. Sự lan truyền sóng vô tuyến trong khí quyển bị quyết định bởi sự thay đổi của chỉ số khúc xạ khí quyển ở trong tầng đối lưu. Trong phương pháp RO, chỉ số khúc xạ khí quyển có vai trò quan trọng trong việc xác định các thông số khí quyển. Hình 3.23 biểu diễn dị thường chỉ số khúc xạ khí quyển so với giá trị trung bình thẳng tính trung bình theo độ cao và khoảng cách so với tâm bão từ dữ liệu wetPf2. Kết quả cho thấy xu thế biến đổi dị thường của chỉ số khúc xạ khí quyển có dạng khá tương đồng với xu thế biến đổi của áp suất hơi nước. Sự tăng của chỉ số khúc xạ khí quyển ở trong khu vực từ tâm bão đến 600km lớn hơn so với khu vực khoảng cách từ tâm bão >600km. Trong khu vực từ tâm bão đến 600km, vùng dị thường tăng của chỉ số khúc

xạ khí quyển nằm trong lớp từ bề mặt đến độ cao khoảng 10km. Giá trị tăng của chỉ số khúc xạ khí quyển cực đại đạt (10 đơn vị) trong lớp có độ cao từ 2km – 3km trong khu vực từ tâm bão đến khoảng cách 200km.



Hình 3.23. Dị thường chỉ số khúc xạ so với giá trị trung bình tháng từ dữ liệu wetPf2 theo độ cao và khoảng cách so với tâm bão trong thời gian bão di chuyển vào Biển Đông mùa bão năm 2020.

Kết luận chương 3

Kết quả cho thấy sai số trung bình của dữ liệu wetPf2 và dữ liệu thám không vô tuyến đối với nhiệt độ không khí nằm trong khoảng từ $-0,06^{\circ}\text{C}$ đến $-0,02^{\circ}\text{C}$, với độ lệch chuẩn dao động trong khoảng từ $0,73^{\circ}\text{C}$ đến $1,04^{\circ}\text{C}$ và hệ số tương quan nằm trong khoảng từ 0,86 đến 0,93. Sai số trung bình của độ ẩm tương đối giữa hai nguồn dữ liệu dao động trong khoảng từ 11,63% đến 12,45%, với độ lệch chuẩn nằm trong khoảng từ 15,04% đến 19,06% và hệ số tương quan nằm trong khoảng từ 0,63 đến 0,76. Sai số trung bình của chỉ số khúc xạ khí quyển dao động từ -0,92 đến -0,62, với độ lệch chuẩn trung bình nằm trong khoảng từ 3,10 đến 4,04 và hệ số tương quan đạt từ 0,76 đến 0,87. Kết quả so sánh với dữ liệu thám không vô tuyến cho thấy profile nhiệt độ và độ ẩm tương đối từ số liệu wetPf2 ở khu vực Việt Nam có chất lượng tốt so với khu vực gió mùa mùa hè Châu Á và các khu vực khác trên thế giới. Kết quả này xác nhận rằng dữ liệu wetPf2 có thể sử dụng trong nghiên cứu khí quyển và nghiệp vụ dự báo thời tiết trong khu vực Việt Nam.

Kết quả cho thấy sai số trung bình của nhiệt độ không khí giữa dữ liệu wetPf2 và kết quả mô phỏng bằng mô hình dao động trong khoảng $-0,54^{\circ}\text{C}$ đến $0,62^{\circ}\text{C}$ tại các mực khí áp $\geq 150\text{mb}$. Giá trị độ lệch chuẩn trung bình có xu hướng giảm khi khoảng cách đến tâm bão tăng và tăng theo hạn dự báo. Kết quả biến đổi của sai số trung bình của độ ẩm tương đối giữa dữ liệu wetPf2 và mô phỏng mô hình có giá trị tăng dần theo độ cao và hạn dự báo.

Với độ phân giải theo phương thẳng đứng là 50 mét, dữ liệu wetPf2 cung cấp thông tin chi tiết về sự thay đổi theo chiều cao và theo mùa của nhiệt độ và độ ẩm trên khu vực quần đảo Hoàng Sa và quần đảo Trường Sa. Cụ thể, biên độ biến đổi năm của nhiệt độ trong khối không khí bên trên khu vực quần đảo Hoàng Sa, đại diện cho phần phía bắc của Biển Đông, là xấp xỉ $5,0^{\circ}\text{C}$. Giá trị này cao hơn đáng kể so với $2,2^{\circ}\text{C}$ trong khối không khí bên trên khu vực quần đảo Trường Sa, đại diện cho phần phía nam của Biển Đông. Sự khác biệt này có thể là do ảnh hưởng của hệ thống gió mùa mùa đông đến khu vực quần đảo Hoàng Sa mạnh hơn khu vực quần đảo Trường Sa. Do ảnh hưởng của đốt nóng và chuyển động rối ở gần bề mặt Trái Đất, biên độ biến đổi năm của nhiệt độ trong lớp biên lớn hơn nhiều so với trong lớp khí quyển tự do.

Biên độ biến đổi năm của độ ẩm tương đối cho thấy giá trị độ ẩm tương đối trung bình mùa hè và mùa thu lớn hơn so với mùa đông và mùa xuân. Trong lớp biên khí quyển trên biển, biên độ biến đổi năm của độ ẩm tương đối là nhỏ. Ngược lại trong lớp khí quyển tự do, biên độ biến đổi năm của độ ẩm tương đối là rất lớn. Giá trị cực đại của chênh lệch độ ẩm tương đối trung bình giữa mùa đông và mùa hè đạt 35,83% trên khu vực quần đảo Hoàng Sa và 29,2% trên khu vực quần đảo Trường Sa.

Sự biến đổi của độ ẩm tương đối theo chiều thẳng đứng cho thấy giá trị cực đại của độ ẩm tương đối trung bình mùa trong cả hai khối không khí trên khu vực quần đảo Hoàng Sa và quần đảo Trường Sa xuất hiện độ cao khoảng 0,65km, giá trị cực tiểu xuất hiện ở giữa tầng đối lưu. Biến đổi theo chiều cao của độ ẩm tương đối trung bình mùa đông là lớn, trong khi đó trong mùa hè giá trị này là nhỏ. Biến đổi theo độ cao của độ ẩm tương đối trung bình mùa hè nhỏ hơn mùa đông có thể là

do vai trò quan trọng của hoạt động đối lưu mạnh đã đưa không khí ẩm lên các tầng khí quyển cao hơn trong mùa hè.

Kết quả phân tích cho thấy dị thường nóng của nhiệt độ xuất hiện trong lớp độ cao từ 2,5km đến độ cao khoảng 15km và vùng dị thường lạnh ở độ cao >16 km. Vùng dị thường nóng đạt đến giá trị $\geq 1,5^{\circ}\text{C}$ tại độ cao từ khoảng 6,5 km đến 13,5 km trong khu vực gần tâm bão. Độ ẩm tương đối trong bão tăng mạnh so với giá trị trung bình tháng, đạt đến $\geq 20\%$ trong lớp từ 5km đến 12,5 km trong khu vực bán kính 600 km từ tâm bão. Dị thường tăng của áp suất hơi nước lớn hơn 0,5 hPa trong lớp từ bề mặt đến độ cao 16km trong khu vực bán kính 600 km từ tâm bão. Lớp có giá trị tăng lớn nhất đạt $\geq 2,5$ hPa từ độ cao 2 km – 3 km trong khu vực bán kính 200 km từ tâm bão. Dị thường tăng của chỉ số khúc xạ khí quyển với xu thế biến đổi tương tự như trường áp suất hơi nước.

Với chất lượng số liệu đã được khẳng định ở trên và độ phân giải thẳng đứng cao cũng như quan trắc trong mọi điều kiện thời tiết, số liệu GPSRO có thể sử dụng trong nghiên cứu khí quyển như xác định cấu trúc trung bình khí quyển trong nghiên cứu khí hậu trên biển; đồng hóa dữ liệu trong dự báo thời tiết nâng cao chất lượng dự báo, cũng như nghiên cứu cấu trúc trường nhiệt ẩm trong mây, cấu trúc khí quyển tại các thời điểm cụ thể, đặc biệt là trên biển nơi có rất ít số liệu thám không vô tuyến.

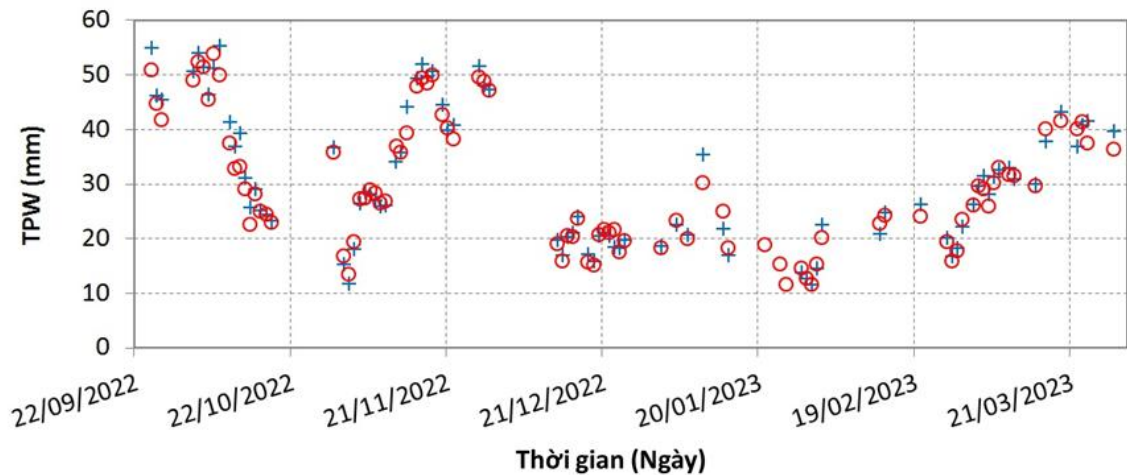
Chương 4. ĐẶC ĐIỂM TỔNG ẨM KHÍ QUYỂN TẠI KHU VỰC NGHĨA ĐÔ SỬ DỤNG DỮ LIỆU HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ TOÀN CẦU (GNSS) VÀ KẾT QUẢ MÔ HÌNH

Trong Chương III đã sử dụng dữ liệu quan trắc ẩm khí quyển bằng phương pháp sử dụng sóng vô tuyến để nghiên cứu đặc trưng ẩm khí quyển theo hướng nghiên cứu khí hậu, cụ thể là nghiên cứu đặc trưng trung bình không thời gian của các khối khí lục địa, khối khí biển khu vực Việt Nam và Biển Đông. Trong Chương IV này sẽ tập trung nghiên cứu ứng dụng dữ liệu quan trắc ẩm khí quyển đo bằng phương pháp sóng vô tuyến đối với mảng thời tiết. Cụ thể là nghiên cứu hiện tượng thời tiết khi có không khí lạnh, mưa trong không khí lạnh tại các thời điểm cụ thể, tại vị trí cụ thể là khu vực Nghĩa Đô. Nguồn dữ liệu sóng vô tuyến được sử dụng là dữ liệu GNSS quan trắc tại bề mặt. Dữ liệu GNSS tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô đã được xử lý bằng phần mềm trực tuyến CSRS-PPP để tính toán độ trễ thiên đỉnh tầng đối lưu (ZTD) và độ trễ ướt thiên đỉnh (ZWD) với độ phân giải 0,5 phút. Tiếp đó, những dữ liệu này được sử dụng để tính toán tổng ẩm khí quyển với độ phân giải 1 phút. Để đánh giá độ tin cậy, tổng ẩm khí quyển xác định từ GNSS được so sánh với sản phẩm từ dữ liệu thám không vô tuyến và AERONET. Tiếp đến, dữ liệu này được sử dụng để phân tích đặc trưng biến đổi của tổng ẩm khí quyển gắn với một số hiện tượng thời tiết ở khu vực Nghĩa Đô, Hà Nội. Trong chương này mô hình WRF được sử dụng để mô phỏng các trường khí tượng phục vụ cho việc so sánh với kết quả tính toán từ dữ liệu GNSS, phân tích kết quả tổng ẩm khí quyển và làm rõ hơn các hình thái thời tiết trong quá trình phân tích kết quả.

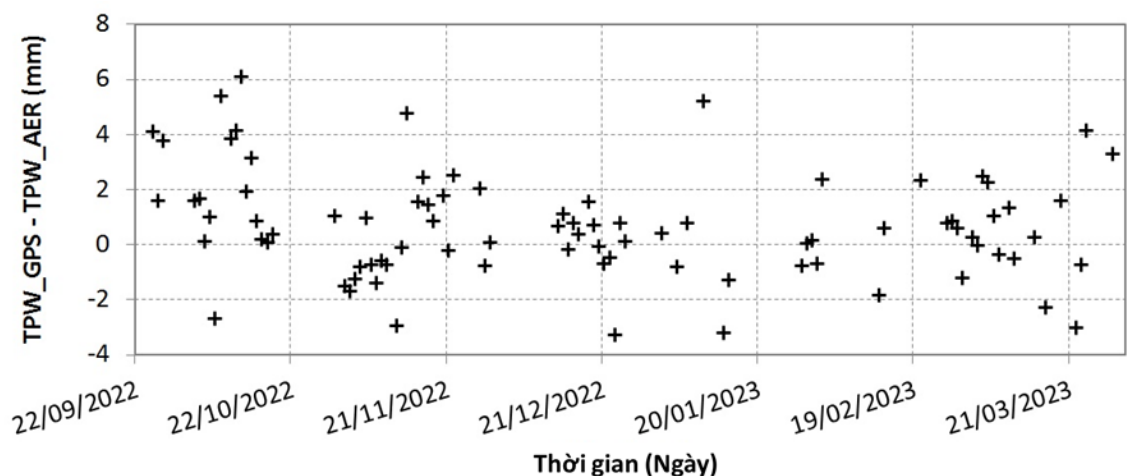
4.1. Đánh giá số liệu tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS tại khu vực Nghĩa Đô

Các nghiên cứu trước đây cho thấy rằng để đánh giá tổng ẩm khí quyển xác định từ dữ liệu GNSS (TPW_GPS), thông số này sẽ được so sánh với giá trị tổng ẩm khí quyển từ các nguồn số liệu độc lập khác. Trong luận án, chất lượng của tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô đã được đánh giá bằng cách so sánh với các sản phẩm tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu AERONET (TPW_AER) tại trạm Nghĩa Đô, dữ liệu thám không vô tuyến (TPW_RS) quan trắc tại trạm Hà Nội (Láng) và kết quả mô phỏng từ mô hình WRF. Trong đó, thiết bị

GNSS và thiết bị AERONET đều được lắp đặt tại cùng trạm và cách nhau khoảng 3m. Trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô cách Trạm thám không vô tuyến Hà Nội (Láng) khoảng 4 km. Với khoảng cách giữa các thiết bị và các trạm tương đối gần cho phép hạn chế đáng kể sai số gây ra do sự biến đổi theo không gian trong quá trình so sánh những dữ liệu này. Trước tiên, tổng ẩm khí quyển TPW_GPS được so sánh với sản phẩm từ dữ liệu AERONET bằng cách sử dụng giá trị trung bình ngày. Trong giai đoạn nghiên cứu, tập mẫu so sánh gồm 90 cặp dữ liệu được sử dụng. Nhìn chung, sự khác biệt giữa giá trị trung bình ngày của TPW_GPS và TPW_AER là không đáng kể. Xu thế thay đổi theo thời gian của hai nguồn dữ liệu này khá giống nhau, với giá trị trong tháng 12 và tháng 1 nhỏ hơn so với các tháng khác (Hình 4.1).



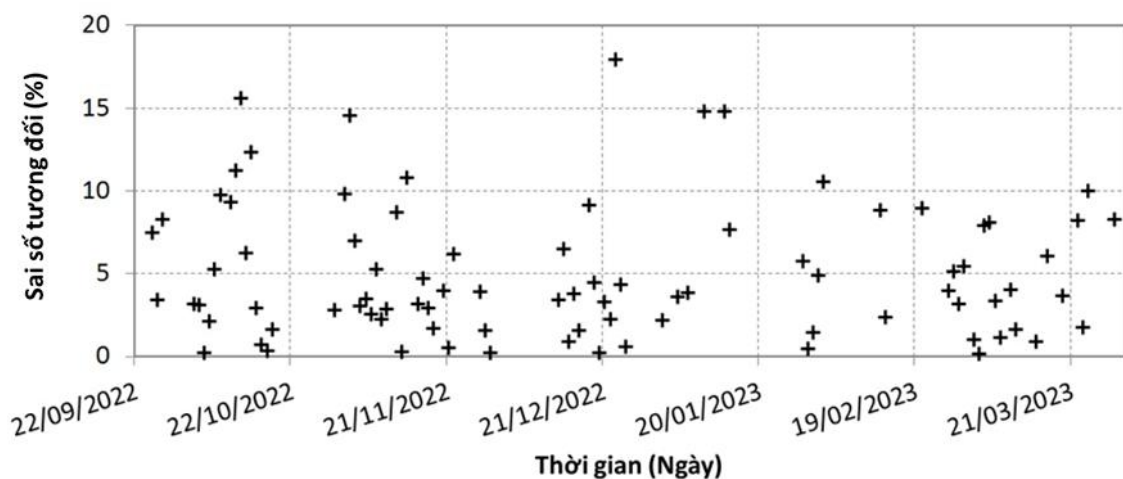
Hình 4.1. Biến đổi tổng ẩm khí quyển trung bình ngày tính từ số liệu GNSS (TPW_GPS) (dấu +, màu xanh) và từ trạm AERONET (TPW_AER) (đường tròn, màu đỏ) tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô.



Hình 4.2. Độ lệch giữa tổng ẩm khí quyển trung bình ngày tính từ số liệu GNSS và sản phẩm từ dữ liệu AERONET tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô.

Kết quả so sánh cho thấy, độ lệch giữa tổng ẩm khí quyển TPW_GPS và TPW_AER trong giai đoạn nghiên cứu dao động trong khoảng từ -3,28mm đến 6,11mm. Số lượng giá trị âm ít hơn giá trị dương chứng tỏ rằng TPW_GPS có xu thế lớn hơn TPW_AER (Hình 4.2). Trong đó, giá trị độ lệch trung bình (ME) đạt 0,68mm. Giá trị độ lệch tuyệt đối trung bình (MAE) là 1,53mm và độ lệch bình phương trung bình (RMSE) là 2,05mm (Bảng 4.1). Nhìn chung, giá trị sai số giữa tổng ẩm khí quyển TPW_GPS và TPW_AER là tương đối nhỏ.

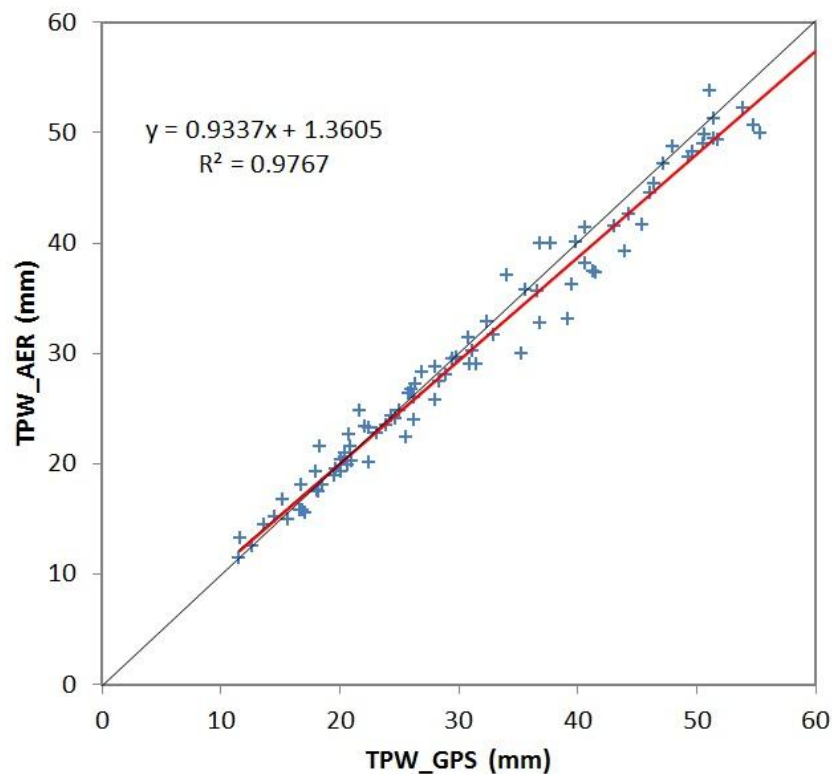
Ngoài độ lệch tuyệt đối, độ lệch tương đối giữa giá trị trung bình ngày của tổng ẩm khí quyển TPW_GPS và TPW_AER cũng được xem xét. Kết quả tính toán cho thấy, độ lệch tương đối giữa tổng ẩm khí quyển trung bình ngày của hai nguồn số liệu này dao động trong khoảng từ 0,14% đến 17,92%. Phần lớn độ lệch tương đối có giá trị <10% (Hình 4.3). Độ lệch tương đối trung bình (RMAE) trên tập dữ liệu đạt khoảng 5,04%.



Hình 4.3. Độ lệch tương đối giữa tổng ẩm khí quyển trung bình ngày tính từ số liệu GNSS và sản phẩm từ dữ liệu AERONET tại trạm Vật lý khí quyển Nghiã Đô.

Bên cạnh các đại lượng sai số thống kê, hệ số tương quan cũng được sử dụng để đánh giá mức độ khác biệt giữa giá trị trung bình ngày của tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS và sản phẩm từ AERONET. Kết quả cho thấy, hệ số tương quan giữa giá trị trung bình ngày của tổng ẩm khí quyển TPW_GPS và TPW_AER đạt 0,988 ($R^2 = 0,9767$). Điều này thể hiện rằng giá trị tổng ẩm khí quyển từ hai nguồn dữ liệu này có sự phù hợp rất cao. Kết quả cũng cho thấy rằng khi giá trị tổng ẩm khí

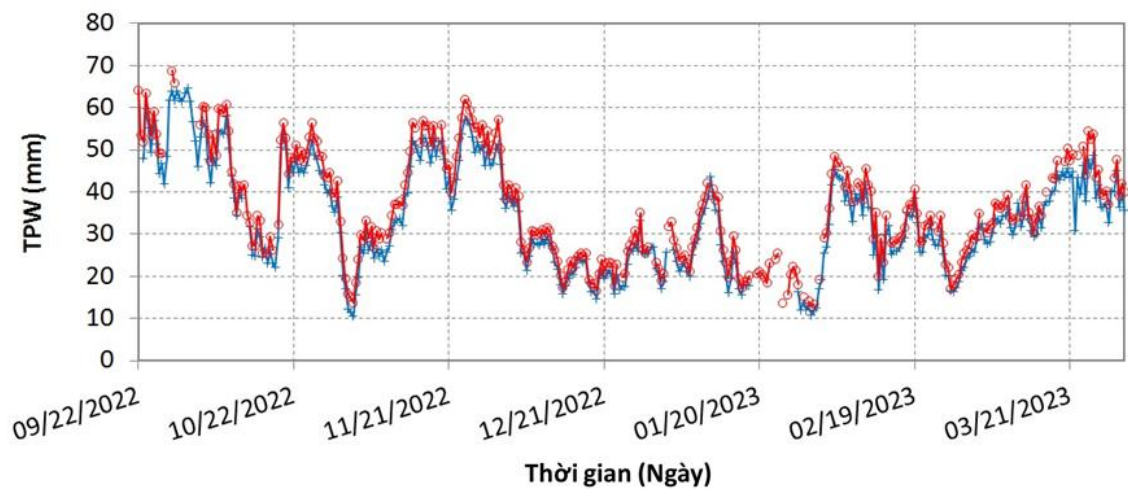
quyển trung bình ngày nhỏ hơn 30mm, số lượng trường hợp giá trị trung bình ngày của tổng ẩm khí quyển TPW_GPS lớn và nhỏ hơn TPW_AER không khác biệt nhiều. Nhưng khi giá trị tổng ẩm khí quyển trung bình ngày lớn hơn 30mm, giá trị trung bình ngày của tổng ẩm khí quyển TPW_GPS thường lớn hơn so với TPW_AER, giá trị sai số cũng có xu hướng lớn hơn (Hình 4.4). Điều này có thể là do vào những ngày có tổng ẩm khí quyển lớn có thể gắn với một số hiện tượng có mây hoặc mưa, khi đó số liệu AERONET không đo được. Nên khi tính giá trị trung bình ngày, những thời điểm tổng ẩm khí quyển có giá trị cao bị bỏ qua từ đó dẫn đến giá trị trung bình ngày thấp hơn.



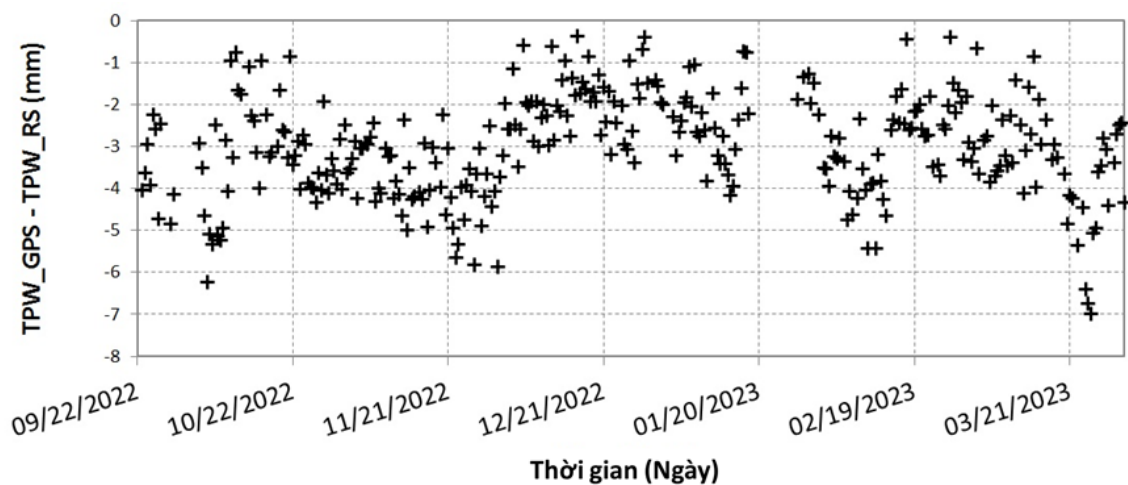
Hình 4.4. Tương quan giữa giá trị trung bình ngày của tổng ẩm khí quyển tính toán từ GNSS (TPW_GPS) và từ số liệu AERONET (TPW_AER), đường biểu diễn xu thế (màu đỏ).

Một phương pháp khác để đánh giá chất lượng của tổng ẩm khí quyển xác định từ dữ liệu GNSS tại trạm Nghĩa Đô là so sánh với sản phẩm từ dữ liệu thám không vô tuyến tại trạm Hà Nội (Láng). Do trạm thám không vô tuyến Hà Nội quan trắc 2 lần trên ngày nên dữ liệu được lựa chọn để so sánh là giá trị tổng ẩm khí quyển tức thời tính toán tại thời điểm 7h00 và 19h00 (giờ địa phương). Tập mẫu thu thập được gồm 319 cặp dữ liệu tổng ẩm khí quyển xác định từ dữ liệu GNSS (TPW_GPS) và

dữ liệu thám không vô tuyến (TPW_RS). Kết quả cho thấy giá trị tổng ẩm khí quyển TPW_GPS tại các thời điểm 7h và 19h trong khoảng thời gian này biến đổi từ 10,5mm đến 64,6mm. Trong khi đó giá trị tổng ẩm khí quyển TPW_RS biến đổi từ 12,8mm đến 68,8mm. So sánh biểu đồ biến đổi của TPW_GPS và TPW_RS trong khoảng thời gian này cho thấy rằng xu thế biến đổi của hai biểu đồ rất giống nhau. Các thời điểm cực đại và cực tiểu là trùng nhau. Tại cùng thời điểm, giá trị TPW_GPS nhỏ hơn so với TPW_RS. Cả hai loại số liệu đều cho thấy giá trị tổng ẩm khí quyển thấp nhất trong thời gian từ 12/2022 - 01/2023 (Hình 4.5).

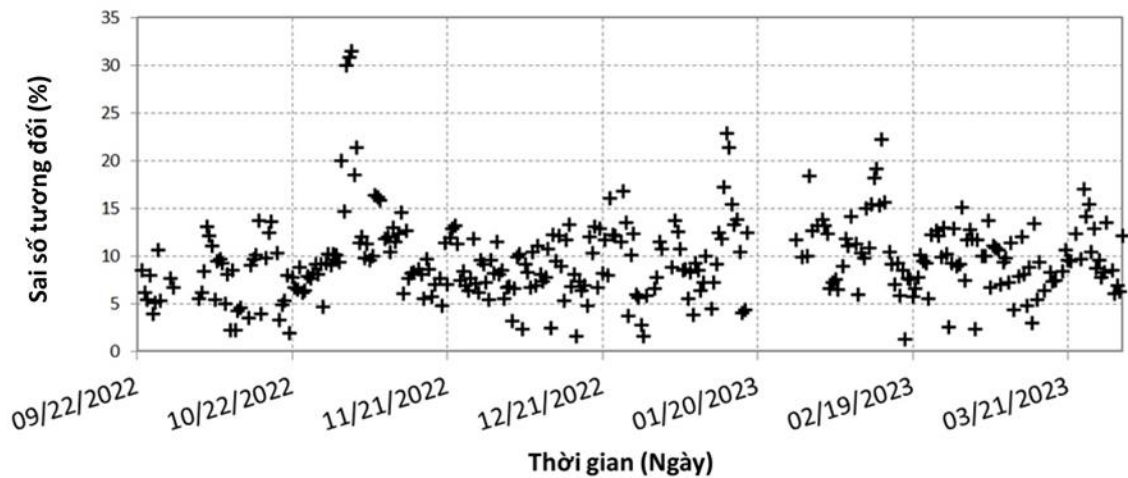


Hình 4.5. Biến đổi của tổng ẩm khí quyển thời điểm 7h và 19h tại khu vực Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội tính từ số liệu GNSS (TPW_GPS) (dấu +, màu xanh) và từ số liệu thám không vô tuyến (TPW_RS) (hình tròn, màu đỏ).



Hình 4.6. Sai số giữa tổng ẩm khí quyển tại các thời điểm 7h và 19h (giờ địa phương) tính từ số liệu GNSS và từ số liệu thám không vô tuyến tại khu vực Hà Nội.

Tương tự như trường hợp đánh giá chất lượng tổng ẩm khí quyển TPW_GPS bằng TPW_AER, các đại lượng sai số thống kê cũng được sử dụng trong trường hợp này. Kết quả tính toán cho thấy sai số giữa giá trị tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu GNSS và dữ liệu thám không vô tuyến luôn âm, dao động trong khoảng từ -6,99mm đến -0,37mm (Hình 4.6). Giá trị sai số trung bình (ME) đạt -3,01mm. Giá trị sai số tuyệt đối trung bình (MAE) và sai số quân phương (RMSE) tương ứng là 3,01mm và 3,24mm (Bảng 4.1).



Hình 4.7. Sai số tương đối giữa tổng ẩm khí quyển tại các thời điểm 7h và 19h (giờ địa phương) tính từ số liệu GNSS và từ số liệu thám không vô tuyến tại khu vực Hà Nội.

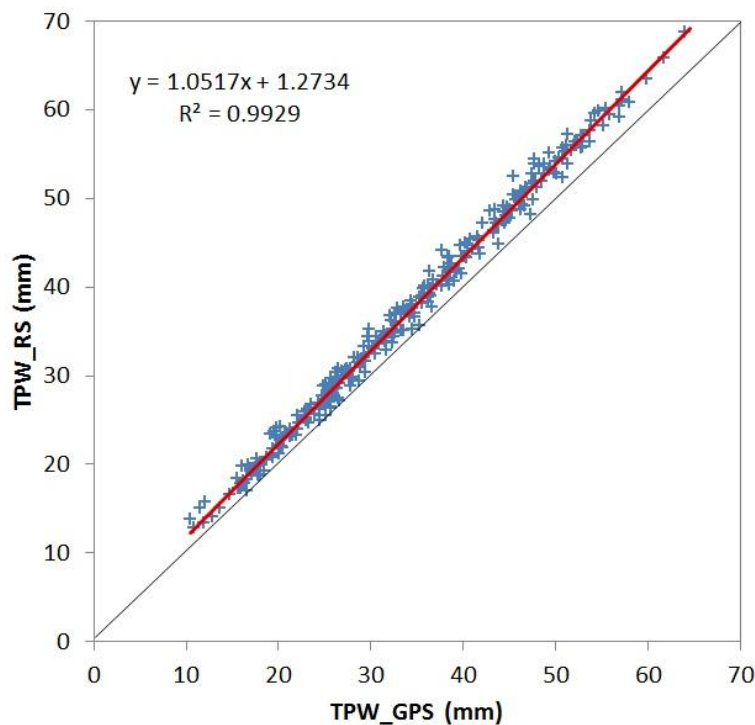
Bảng 4.1. So sánh giữa giá trị hàm lượng hơi nước tổng cộng tính từ số liệu GNSS (TPW_GPS) và từ số liệu Aeronet (TPW_AER), số liệu thám không vô tuyến (TPW_RS), số liệu tái phân tích (TPW_WRF).

	ME (mm)	MAE (mm)	RMSE (mm)
TPW_GPS và TPW_AER	0.68	1.53	2.05
TPW_GPS và TPW_RS	-3.01	3.01	3.24
TPW_GPS và TPW_WRF	-2.12	2.45	3.03

Phân tích sai số tương đối giữa tổng ẩm khí quyển TPW_GPS tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô và tổng ẩm khí quyển TPW_RS từ trạm thám không vô tuyến Láng (Hà Nội) cho thấy rằng giá trị sai số nằm trong khoảng từ 1,28% đến 31,49%. Đa số các trường hợp sai số tương đối có giá trị nhỏ hơn 15%. Kết quả cũng cho thấy 3 trường hợp sai số tương đối có giá trị khoảng 30%, tại những thời điểm này giá trị

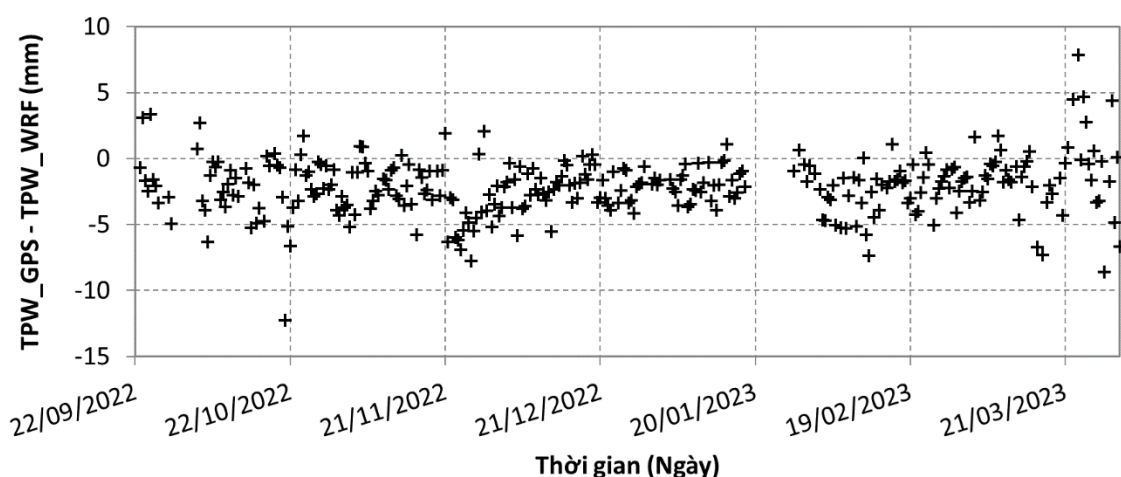
sai số không lớn (dao động trong khoảng từ -3,6mm đến -3,3mm) tuy nhiên giá trị của tổng ẩm khí quyển thấp (từ 10,5mm – 12,1mm) đã dẫn đến sai số tương đối cao (Hình 4.7). Sai số tuyệt đối trung bình tương đối (RMAE) là 9,56%. Nhìn chung, sai số giữa tổng ẩm khí quyển TPW_GPS và TPW_RS có giá trị cao hơn sai số của tổng ẩm khí quyển giữa TPW_GPS và TPW_AER.

Để đánh giá mức độ phù hợp giữa tổng ẩm khí quyển TPW_GPS và TPW_RS, hệ số tương quan giữa hai nguồn dữ liệu này đã được tính toán. Kết quả cho thấy hệ số tương quan giữa tổng ẩm khí quyển TPW_GPS và TPW_RS đạt 0,996 ($R^2 = 0,9929$), cao hơn hệ số tương quan giữa tổng ẩm khí quyển TPW_GPS và TPW_AER. Điều này thể hiện rằng giá trị tổng ẩm khí quyển tính toán từ số liệu GNSS có sự phù hợp rất cao đối với giá trị tổng ẩm khí quyển từ số liệu thám không vô tuyến ở khu vực Hà Nội. Kết quả cũng cho thấy, giá trị tổng ẩm khí quyển càng lớn đường xu thế càng cách xa đường cân bằng. Điều này thể hiện rằng giá trị tổng ẩm khí quyển càng lớn thì độ lệch giữa TPW_GPS và TPW_RS càng lớn. Giá trị tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS luôn luôn thấp hơn so với giá trị tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu thám không vô tuyến ở khu vực Nghĩa Đô (Hình 4.8).



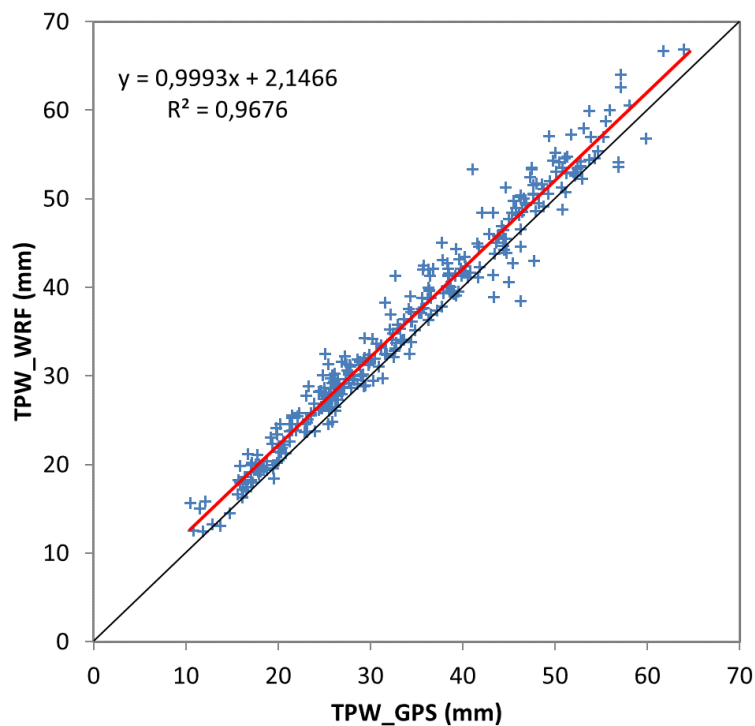
Hình 4.8. Tương quan giữa giá trị tổng ẩm khí quyển tính toán từ GNSS (TPW_GPS) và từ số liệu thám không vô tuyến tại Hà Nội (TPW_RS) tại thời điểm 7h và 19h (giờ địa phương), đường biểu diễn xu thế (màu đỏ).

Như đã đề cập trong phần tổng quan, một phương pháp đánh giá chất lượng tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS khác ngoài hai phương pháp bên trên là so sánh số liệu này với giá trị tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu mô phỏng mô hình. Trong luận án này, giá trị tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu tái phân tích FNL sau khi được tăng độ phân giải ngang 6km bằng mô hình WRF (TPW_WRF) đã được làm số liệu tham chiếu để đánh giá tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS tại khu vực Nghĩa Đô. Để có thể so sánh với kết quả đánh giá của tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu GNSS và dữ liệu thám không vô tuyến, trong trường hợp so sánh tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu GNSS và dữ liệu TPW_WRF, tập dữ liệu so sánh được lựa chọn trùng với thời điểm 7h và 19h (giờ địa phương), tập mẫu gồm 319 cặp dữ liệu. Kết quả so sánh cho thấy độ lệch giữa tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS và sản phẩm từ mô hình WRF dao động trong khoảng từ -12,24mm đến 7,84mm. Trong đó, các giá trị độ lệch chủ yếu tập trung trong khoảng từ -5,0mm đến 0,0mm. Điều này cho thấy, giá trị tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS có xu thế nhỏ hơn so với giá trị tổng ẩm khí quyển từ mô phỏng mô hình WRF (Hình 4.9). Tính trung bình trên tập số liệu (319 cặp giá trị), giá trị độ lệch trung bình, độ lệch tuyệt đối trung bình và độ lệch bình phương trung bình tương ứng là -2,12mm, 2,45mm và 3,03mm (Bảng 4.1). Các giá trị độ lệch này nhỏ hơn so với sai số giữa dữ liệu tổng ẩm khí quyển tính toán từ GNSS và dữ liệu thám không vô tuyến tại cùng thời điểm.



Hình 4.9. Độ lệch giữa tổng ẩm khí quyển tại các thời điểm 7h và 19h (giờ địa phương) tính từ số liệu GNSS và từ số tái phân tích được tăng độ phân giải bằng mô hình WRF (TPW_WRF) tại khu vực Hà Nội.

Tương tự như bên trên, để đánh giá mức độ phù hợp giữa tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS và sản phẩm tổng ẩm khí quyển từ mô phỏng mô hình WRF, sự tương quan giữa hai nguồn dữ liệu này đã được xem xét, phân tích. Kết quả cho thấy rằng, giá trị tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu GNSS chủ yếu nhỏ hơn so với so với dữ liệu tái phân tích. Đường xu thế biến đổi (màu đỏ) của sai số giữa hai nguồn số liệu này song song với đường cân bằng, điều này cho thấy xu thế biến đổi chung của sai số giữa hai nguồn số liệu này không có sự khác biệt nhiều theo giá trị của tổng ẩm khí quyển. Hệ số tương quan giữa hai nguồn số liệu này rất cao, đạt 0,984 ($R^2 = 0,9676$). Kết quả này cho thấy tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS tại khu vực Nghĩa Đô phù hợp rất cao với sản phẩm từ dữ liệu tái phân tích trong khoảng thời gian nghiên cứu (Hình 4.10).



Hình 4.10. Tương quan giữa giá trị tổng ẩm khí quyển tính toán từ GNSS (TPW_GPS) và từ số liệu tái phân tích FNL được tăng độ phân giải đến 6km bằng mô hình WRF (TPW_WRF) tại khu vực Hà Nội thời điểm 7h và 19h (giờ địa phương), đường biểu diễn xu thế (màu đỏ).

Bảng 4.2. Kết quả sai số ME, MAE và RMSE giữa TPW tính toán từ dữ liệu GNSS và sản phẩm TPW từ những nguồn dữ liệu khác (mô hình toàn cầu, aeronet, thám không vô tuyến) của các công trình nghiên cứu trước đây.

Tác giả nghiên cứu	So sánh giữa TPW_GPS và TPW từ nguồn dữ liệu khác	ME (mm hoặc kg/m²)	MAE (mm hoặc kg/m²)	RMSE (mm hoặc kg/m²)	R	Khu vực nghiên cứu
Lê Huy Minh và nnk (2009) [58]	TPW từ mô hình toàn cầu		11,7 4,4 5,7		0,95 0,91 0,75	Hà Nội Huế TP. Hồ Chí Minh
Lại Văn Thủy và nnk (2022) [59]	TPW từ dữ liệu ERA5			5,42		Việt Nam
Zhao và nnk (2020) [85]	TPW từ dữ liệu AERONET			1,13- 2,04	0,93- 0,97	Trung Quốc
Gui và nnk (2017) [84]	TPW từ dữ liệu AERONET	-0,09		2,53	0,98	Trung Quốc
Domingo và Ernest (2022) [50]	TPW dữ liệu thám không vô tuyến	-13,39 - -0,18		1,86 – 2,29	~0,97	Philippines
Zhao và nnk (2022) [83]	TPW dữ liệu thám không vô tuyến	-0,69 - 0,61	0,66 – 3,54	0,86 – 3,24		Trung Quốc
Kết quả luận án	TPW từ dữ liệu AERONET	0,68	1,53	2,05	0,988	Hà Nội
Kết quả luận án	TPW dữ liệu thám không vô tuyến	-3,01	3,01	3,24	0,996	Hà Nội
Kết quả luận án	TPW từ dữ liệu mô phỏng WRF	-2,12	2,45	3,03	0,984	Hà Nội

Ngoài ra kết quả đánh giá sai số tổng ẩm khí quyển xác định từ dữ liệu GNSS tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô cũng được so sánh với các kết quả nghiên cứu trước đây. Kết quả nghiên cứu trước đây cho thấy giá trị MAE giữa tổng ẩm khí quyển TPW_GPS và tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu mô hình toàn cầu lần lượt là 11,7 kg/m², 4,4 kg/m² và 5,7 kg/m² đối với các trạm Hà Nội, Huế và Thành phố Hồ

Chí Minh [58]. Trong khi đó, giá trị RMSE giữa tổng ẩm khí quyển TPW_GPS và sản phẩm tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu ERA5 của Trung tâm Dự báo thời tiết hạn vừa Châu Âu là 5,42 mm tại khu vực Việt Nam [59]. Nhìn chung, giá trị MAE và RMSE giữa tổng ẩm khí quyển TPW_GPS và sản phẩm tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu AERONET và dữ liệu thám không vô tuyến ở khu vực trạm Nghĩa Đô là nhỏ hơn so với các kết quả nghiên cứu trước đây. Không những thế tổng ẩm khí quyển TPW_GPS có tương quan cao với các sản phẩm tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu AERONET và dữ liệu thám không vô tuyến, giá trị hệ số tương quan cao hơn so với kết quả nghiên cứu trước đây ở khu vực Việt Nam (Bảng 4.2). Kết quả so sánh giữa số liệu TPW_GPS và số liệu TPW_WRF có sai số tuyệt đối trung bình nhỏ hơn so với trường hợp nghiên cứu trước đây [58].

So sánh với các kết quả nghiên cứu ở khu vực Trung Quốc, độ lệch bình phương trung bình (RMSE) giữa các giá trị tổng ẩm khí quyển TPW_GPS và sản phẩm tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu AERONET tại trạm Nghĩa Đô có giá trị tương đương với các nghiên cứu đó. Trong khi hệ số tương quan giữa hai nguồn dữ liệu này ở khu vực Nghĩa Đô cao hơn so với các kết quả ở khu vực Trung Quốc (Bảng 4.2) [84, 85].

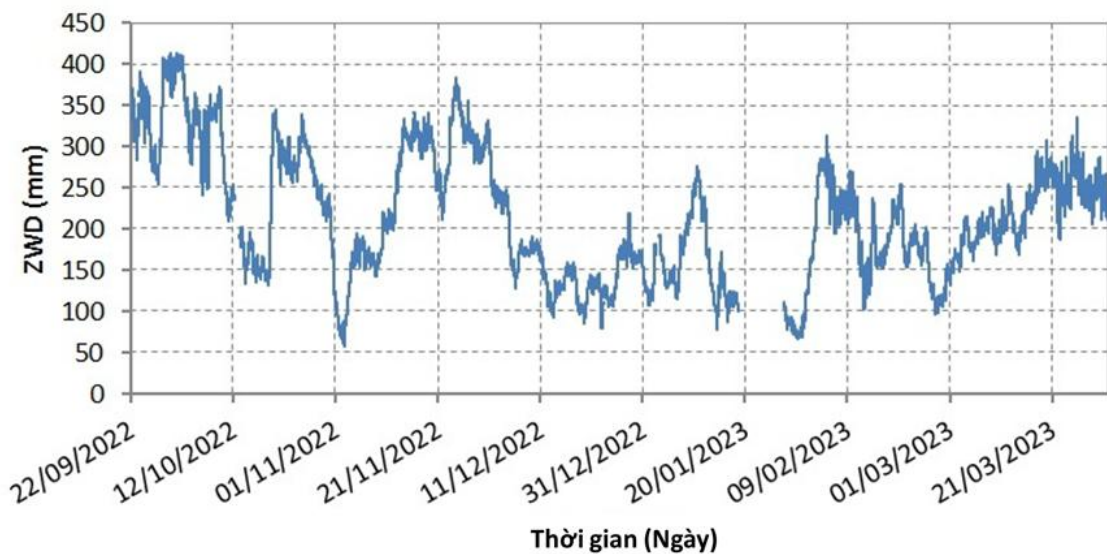
Bảng 4.2 cũng cho thấy giá trị sai số quân phương (RMSE) giữa tổng ẩm khí quyển TPW_GPS và sản phẩm tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu thám không vô tuyến ở khu vực Nghĩa Đô có giá trị tương tự với kết quả nghiên cứu ở khu vực Trung Quốc [83] và lớn hơn kết quả nghiên cứu ở khu vực Philippines [50]. Hệ số tương quan giữa hai nguồn dữ liệu này ở khu vực Nghĩa Đô có giá trị cao hơn so với khu vực Philippines.

Kết quả so sánh bên trên đã chứng minh rằng việc sử dụng dữ liệu GNSS tại trạm Nghĩa Đô để tính toán tổng ẩm khí quyển với độ phân giải cao theo thời gian cho độ tin cậy cao. Kết quả nghiên cứu ở khu vực Nghĩa Đô một lần nữa minh chứng phần mềm trực tuyến CSRS-PPP là một phần mềm xử lý dữ liệu GNSS tại bề mặt hiệu quả. Nó cho phép tính toán các tham số ZTD và ZHD từ một trạm duy nhất mà không cần trạm tham chiếu [36, 92]. Thời gian xử lý dữ liệu tương đối nhanh, phần mềm thường hoàn thành việc xử lý trong thời gian ngắn (khoảng 10 phút) sau khi dữ liệu được gửi đi. Tuy nhiên, hạn chế của phần mềm trực tuyến CSRS-PPP là không

xử lý được những tệp có dung lượng lớn (>300Mb) cũng như không cho phép xử lý các tệp chứa dữ liệu quan trắc trong thời gian dài (>5 ngày).

4.2. Đặc điểm của tổng ẩm khí quyển ở khu vực Nghĩa Đô, Hà Nội

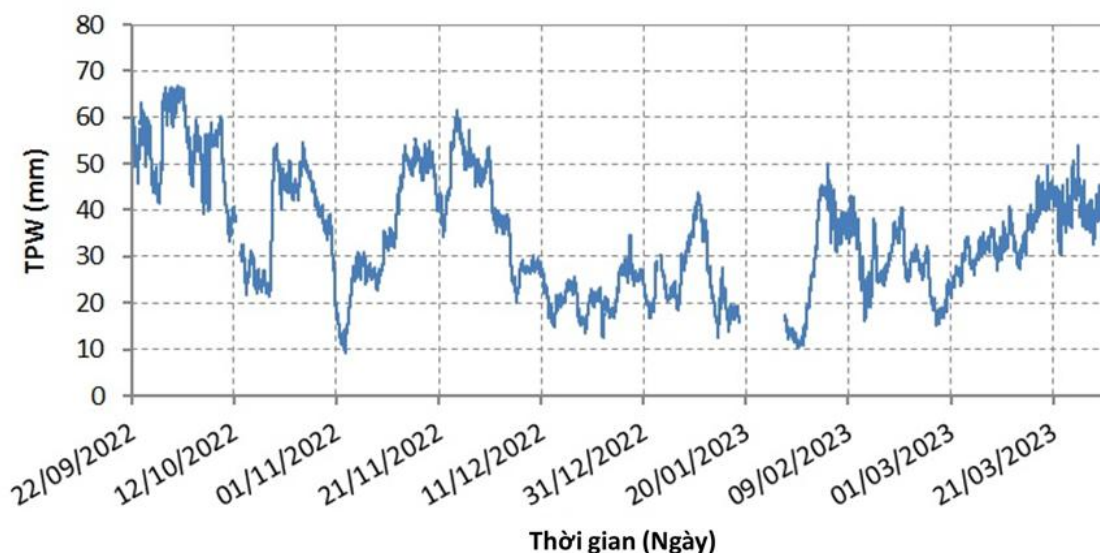
Trên cơ sở 183 ngày dữ liệu GNSS và dữ liệu nhiệt độ được quan trắc liên tục tại trạm Nghĩa Đô (Hà Nội) trong khoảng thời gian từ 22/9/2022 đến 31/3/2023, tổng ẩm khí quyển đã được tính toán với độ phân giải 1 phút theo thời gian. Trước tiên, số liệu GNSS được chuyển đổi sang định dạng RINEX, sau đó phần mềm trực tuyến CSRS-PPP được sử dụng để tính toán độ trễ ướn thiên đỉnh (ZWD). Hình 4.11 trình bày sự biến đổi theo thời gian của các giá trị ZWD tính toán được từ dữ liệu GNSS quan trắc tại trạm Nghĩa Đô. Giá trị ZWD biến đổi trong khoảng từ 57,2 mm (vào ngày 2 tháng 11 năm 2022) đến 413,7 mm (vào ngày 30 tháng 9 năm 2022). Nhìn chung, xu hướng biến động của ZWD cho thấy các giá trị trong tháng 12 và tháng 1 nhỏ hơn so với các tháng khác.



Hình 4.11. Biến đổi theo thời gian của độ trễ thiên đỉnh ướn (ZWD) trong khoảng thời gian từ 22/09/2022 đến 31/3/2023 ở trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô.

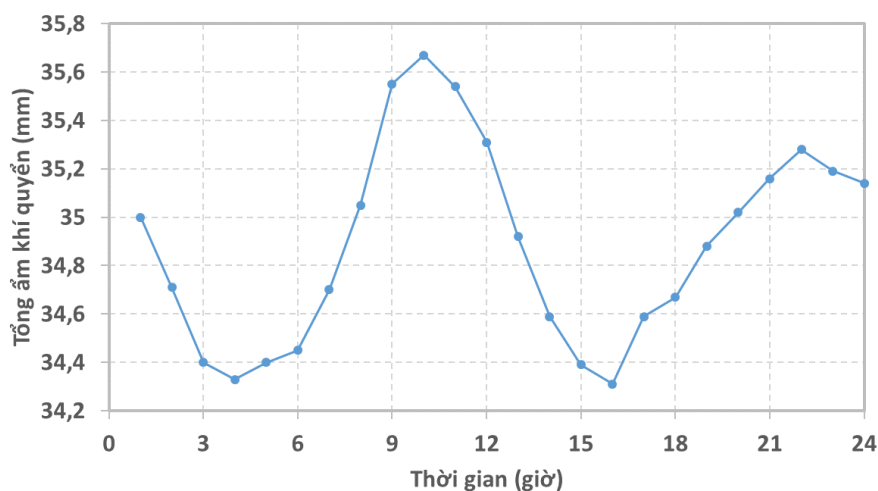
Dữ liệu độ trễ ướn thiên đỉnh ZWD kết với dữ liệu nhiệt độ không khí quan trắc từ thiết bị trạm thời tiết tự động (độ phân giải theo thời gian là 1 phút) được sử dụng để tính toán giá trị tổng ẩm khí quyển (TPW). Giá trị TPW được tính toán từ dữ liệu GNSS với độ phân giải thời gian 1 phút, độ phân giải thời gian này cao hơn đáng kể so với các nghiên cứu trước đây ở khu vực Việt Nam. Trong những công trình đó, các tác giả thường tính toán TPW từ dữ liệu GNSS tại một số thời điểm trong ngày [58, 59]. Hình 4.12 biểu diễn sự biến đổi theo thời gian của các giá trị TPW tính toán

từ dữ liệu GNSS tại trạm Nghĩa Đô, Hà Nội. Giá trị TPW biến đổi trong khoảng từ 9,3 mm (ngày 02/11/2022) đến 66,8 mm (ngày 30/9/2022). Kết quả cũng cho thấy rằng xu thế biến đổi của TPW khá tương tự với xu thế biến đổi của ZWD. Nhìn chung, xu hướng thay đổi cho thấy giá trị TPW trong tháng 12 và tháng 1 thấp hơn so với các tháng khác.



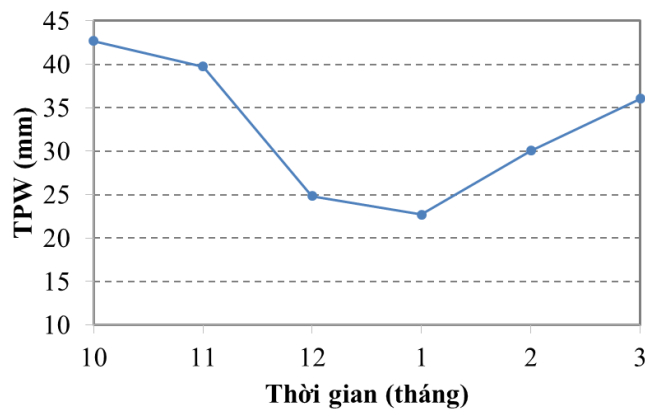
Hình 4.12. Biến đổi theo thời gian của tổng ẩm khí quyển (TPW) trong khoảng thời gian từ 22/09/2022 đến 31/3/2023 ở trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô.

Xem xét biến trình ngày của tổng ẩm khí quyển trong thời gian này cho thấy rằng sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển có hai thời điểm đạt cực đại và 2 thời điểm đạt giá trị cực tiểu ở trong ngày. Giá trị cực đại tại thời điểm 10h và 22h (giờ địa phương). Giá trị cực tiểu tại thời điểm 4h và 16h (giờ địa phương) (Hình 4.13).



Hình 4.13. Biến trình ngày của tổng ẩm khí quyển trong khoảng thời gian từ 22/09/2022 đến 31/3/2023 ở trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô.

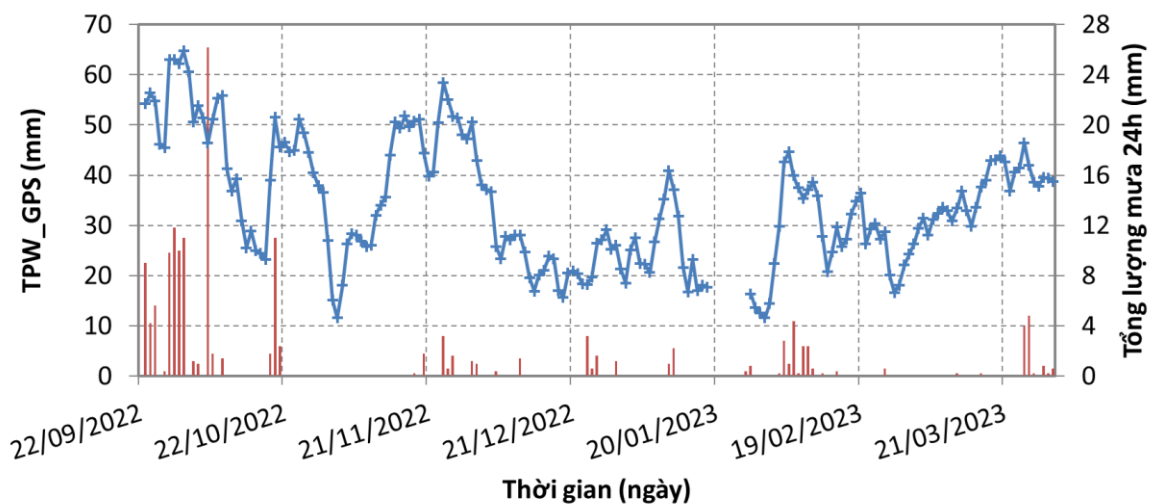
Để thấy được xu thế biến đổi của tổng ẩm khí quyển theo các tháng, tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS đã được tính trung bình theo từng tháng trong khoảng thời gian từ tháng 10/2022 đến tháng 03/2023 tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô, kết quả cho thấy tổng ẩm trung bình tháng 1 có giá trị thấp nhất, giá trị đạt 22,73mm (Hình 4.14). Xu thế biến đổi tổng ẩm khí quyển trung bình thấp nhất vào tháng 1 tại khu vực trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô phù hợp với các kết quả nghiên cứu trước đây cho khu vực Hà Nội [58].



Hình 4.14. Biến đổi theo thời gian của tổng ẩm khí quyển (TPW) trung bình tháng trong khoảng thời gian từ 10/2022 đến 3/2023 ở trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô.

Với độ phân giải theo thời gian 1 phút, dữ liệu tổng ẩm khí quyển xác định từ dữ liệu GNSS có thể được sử dụng để nghiên cứu sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển gắn liền với các hiện tượng thời tiết. Với chuỗi số liệu không dài, tổng ẩm khí quyển xác định từ dữ liệu GNSS bước đầu được sử dụng để phân tích các đặc điểm của biến đổi của tổng ẩm khí quyển trong các đợt không khí lạnh ảnh hưởng đến khu vực trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô. Hình 4.15 biểu diễn sự biến đổi theo thời gian của giá trị trung bình ngày của tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS (TPW_GPS) và dữ liệu tổng lượng mưa ngày (24h) quan trắc tại trạm Nghĩa Đô trong khoảng thời gian từ ngày 22 tháng 9 năm 2022 đến ngày 31 tháng 3 năm 2023. Tương tự như xu thế biến đổi chi tiết của tổng ẩm khí quyển Hình 3.12, xu thế biến đổi giá trị trung bình ngày của tổng ẩm khí quyển cũng cho thấy có sự biến đổi mạnh giữa các ngày trong khoảng thời gian tháng 10 và đầu tháng 11. Giá trị trung bình ngày của tổng ẩm khí quyển dao động từ 11,6 mm đến 64,7 mm. Tổng ẩm khí quyển trung bình ngày trong các tháng 12 và tháng 1 có giá trị thấp hơn so với các tháng còn lại. Trong khoảng

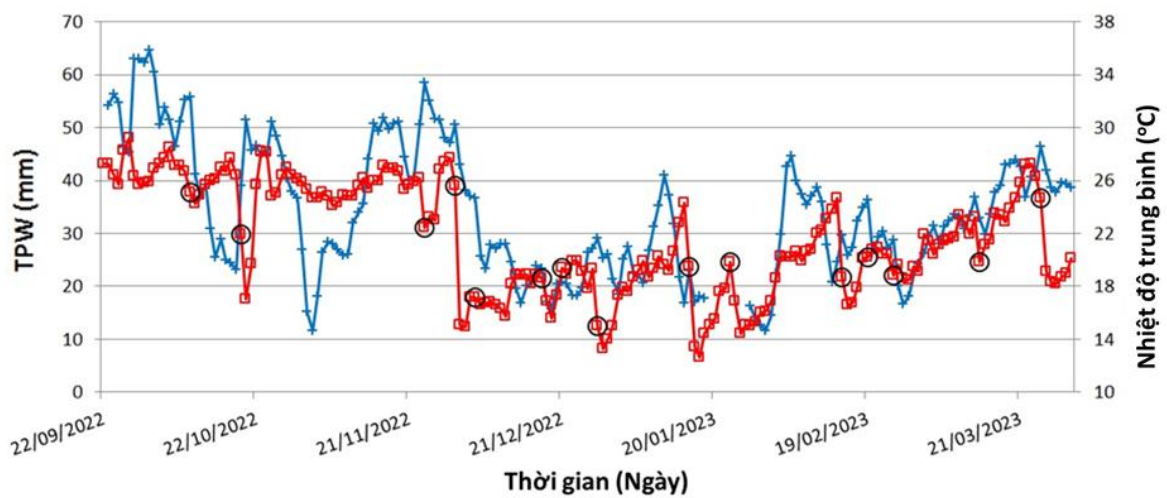
thời gian này có 52 ngày có mưa tại trạm. Ngày có lượng mưa lớn nhất là ngày 06 tháng 10 năm 2022, với lượng mưa 24 giờ đạt 26,2mm. Kết quả biến đổi tổng ẩm khí quyển trung bình ngày và tổng lượng mưa ngày tại trạm Nghĩa Đô cho thấy rằng giá trị tổng ẩm khí quyển vào những ngày có mưa thường có giá trị cao. Trong khoảng thời gian từ ngày 22 tháng 9 đến ngày 09 tháng 10 năm 2022 khu vực trạm Nghĩa Đô có 13/18 ngày mưa. Trong khoảng thời gian này, tổng ẩm khí quyển trung bình ngày có giá trị khá cao, dao động từ 45,41mm đến 64,70mm. Trong khoảng thời gian này, tổng ẩm khí quyển có giá trị cao nhất trong khoảng thời gian nghiên cứu. Trong các đợt mưa 19-21 tháng 10, đợt mưa 24-26 tháng 11, đợt mưa 30 tháng 11 năm 2022, đợt mưa 10-11 tháng 01, đợt mưa 02-09 tháng 02, đợt mưa 25-27 tháng 03 năm 2023, kết quả tính toán đều thể hiện rằng, tổng ẩm khí quyển trong khoảng thời gian này đều có giá trị cao hơn so với những ngày xung quanh. Những kết quả này đã thể hiện rõ ràng rằng, tổng ẩm khí quyển thường có giá trị tăng lên trong những ngày có mưa ở khu vực Nghĩa Đô.



Hình 4.15. Sự biến đổi của giá trị trung bình ngày của TPW tính toán từ dữ liệu GNSS (TPW_GPS) (+, màu xanh) và tổng lượng mưa ngày ở Trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô (biểu đồ cột, màu đỏ).

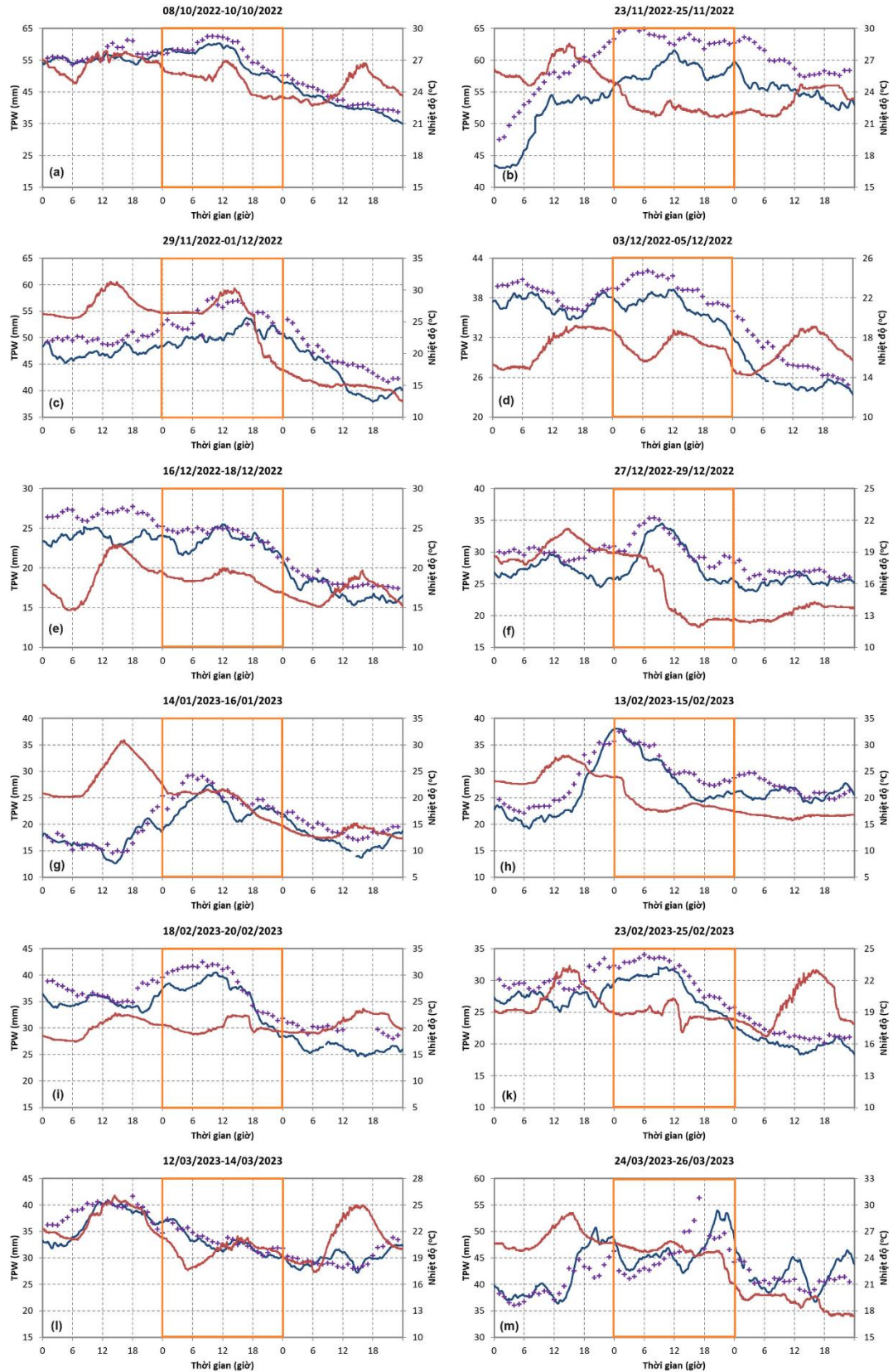
Hình 4.16 biểu diễn sự biến đổi theo thời gian của giá trị trung bình ngày của tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS (TPW_GPS) và nhiệt độ trung bình ngày tại trạm Nghĩa Đô trong khoảng thời gian từ ngày 22 tháng 9 năm 2022 đến ngày 31 tháng 3 năm 2023. Trong khoảng thời gian này, khu vực Hà Nội chịu ảnh

hưởng của 15 đợt không khí lạnh. Xem xét sự thay đổi của nhiệt độ trung bình ngày, có thể thấy rõ trong đợt không khí lạnh ảnh hưởng đến Hà Nội, giá trị nhiệt độ trung bình ngày giảm đột ngột (Hình 4.16). Mức độ giảm nhiệt độ này phụ thuộc vào cường độ của đợt không khí lạnh và điều kiện môi trường trên khu vực trạm. Nhiệt độ trung bình hàng ngày có thể giảm đáng kể (khoảng $12,8^{\circ}\text{C}$ vào ngày 30 tháng 11 năm 2022) hoặc giảm nhẹ hơn (khoảng $0,4^{\circ}\text{C}$ vào ngày 04 tháng 12 năm 2022). Kết quả cũng cho thấy rằng sau ngày không khí lạnh ảnh hưởng đến khu vực trạm, giá trị tổng ẩm trung bình ngày có xu thế giảm xuống.



Hình 4.16. Sự biến đổi của giá trị trung bình ngày của TPW tính toán từ dữ liệu GNSS (TPW_GPS) (+, màu xanh) và giá trị trung bình ngày của nhiệt độ ở Trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô (ô vuông, màu đỏ). Đường tròn màu đen thể hiện ngày không khí lạnh ảnh hưởng đến khu vực Hà Nội.

Hình 4.17 biểu diễn sự thay đổi TPW tính toán từ dữ liệu GNSS, tổng ẩm khí quyển mô phỏng bằng mô hình WRF và nhiệt độ không khí tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô trong các đợt không khí lạnh ảnh hưởng đến khu vực Đồng Bằng Bắc Bộ. Kết quả cho thấy rằng một số trường hợp nhiệt độ giảm đột ngột trong ngày khi không khí lạnh bắt đầu ảnh hưởng đến khu vực Hà Nội. Trong những trường hợp như vậy, chúng ta có thể sử dụng sự thay đổi nhiệt độ không khí tại trạm để xác định thời điểm không khí lạnh bắt đầu ảnh hưởng đến khu vực trạm. Cụ thể, các đợt không khí lạnh ảnh hưởng đến khu vực Hà Nội vào các ngày: 09/10/2022, 30/11/2022, 28/12/2022, 14/02/2023, 24/02/2023 và 25/03/2023.

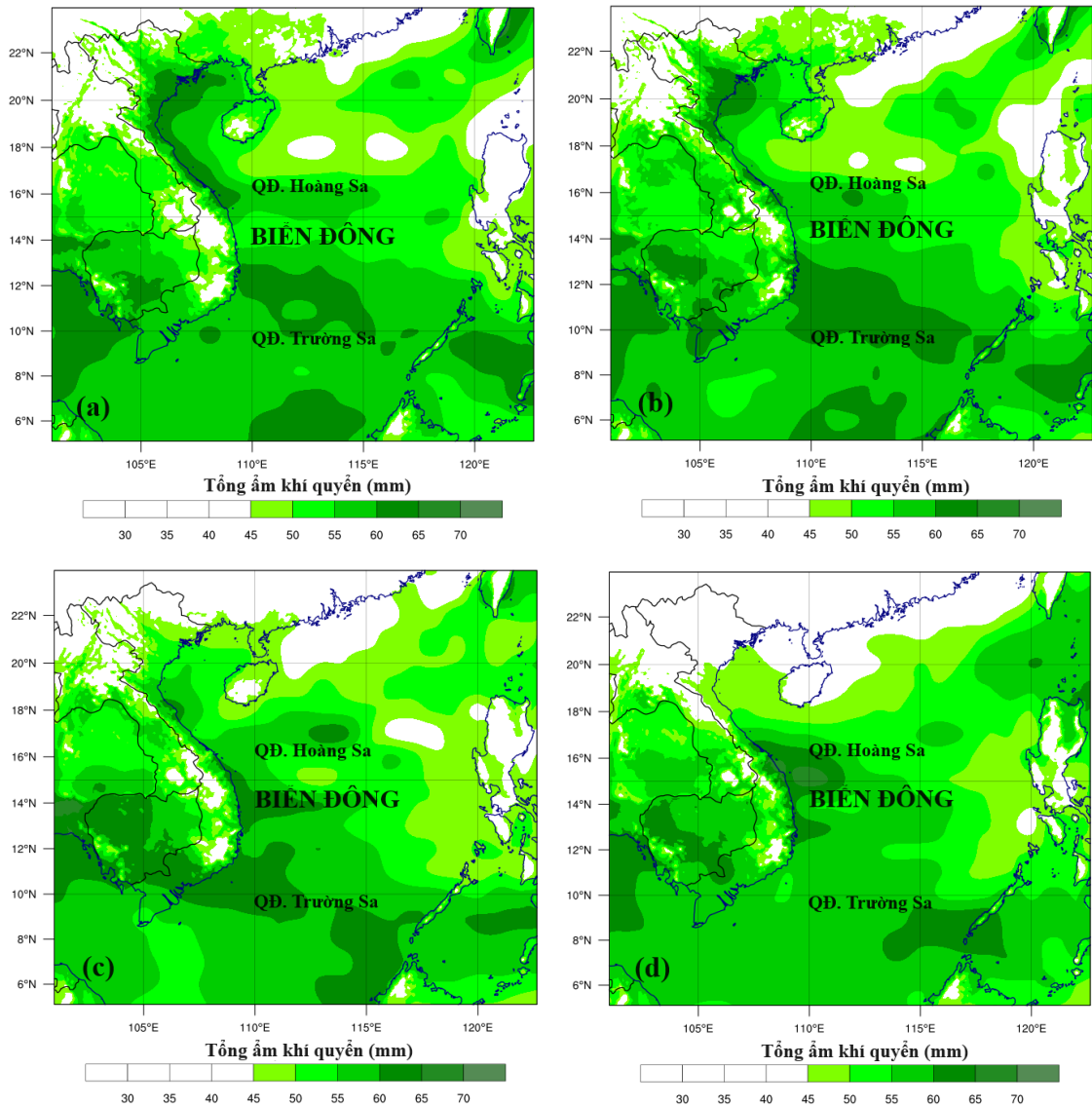


Hình 4.17. Biến đổi của tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS (TPW_GPS) (màu xanh, mm), từ mô hình (TPW_WRF) (+, màu tím) và nhiệt độ không khí (màu đỏ, °C) tại Trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô thời gian không khí lạnh ảnh hưởng đến khu vực Trạm. Ô vuông màu vàng là ngày không khí lạnh bắt đầu ảnh hưởng đến khu vực Đồng bằng Bắc Bộ.

Trong đợt không khí lạnh ảnh hưởng đến khu vực Hà Nội ngày 09/10/2022, kết quả biến đổi của nhiệt độ đã cho thấy nhiệt độ không khí tại trạm bắt đầu giảm nhanh sau 12h30 (giờ địa phương), báo hiệu không khí lạnh bắt đầu ảnh hưởng đến khu vực trạm (Hình 4.17a). Giá trị tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS (TPW_GPS) đã thể hiện sự gia tăng trước khi có không khí lạnh ảnh hưởng đến trạm. Sau khi không khí lạnh ảnh hưởng đến khu vực trạm, giá trị TPW_GPS có xu hướng giảm xuống. Trong trường hợp này, giá trị tổng ẩm TPW_GPS giảm khoảng 18.8mm sau 24h. Kết quả mô phỏng tổng ẩm khí quyển bằng mô hình TPW_WRF cho thấy giá trị TPW_WRF biến đổi tăng lên trước khi không khí lạnh di chuyển đến trạm sau đó giảm nhanh sau khi không khí lạnh ảnh hưởng đến khu vực trạm. So với xu thế biến đổi của tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS, tổng ẩm khí quyển TPW_WRF có xu thế biến đổi tương tự, giá trị lớn hơn và thời điểm giá trị tổng ẩm khí quyển giảm xuống sớm hơn (Hình 4.17a).

Phân tích trường tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu tái phân tích FNL được tăng độ phân giải đến 6km bằng mô hình WRF, phần lớn diện tích khu vực Đồng bằng Bắc Bộ có tổng ẩm khí quyển dao động từ 60-65mm tại thời điểm 7h00 ngày 09/10/2022. Vùng có giá trị tổng ẩm này tồn tại ở khu vực ven biển và biển ven bờ từ Quảng Ninh đến Thừa Thiên Huế. Giá trị tại khu vực Nghĩa Đô đạt 60,57mm (Hình 4.18a). Đến thời điểm 13h00 ngày 09/10/2022, vùng tổng ẩm khí quyển có giá trị 60-65mm thu hẹp lại và tồn tại trên khu vực phần lớn Đồng bằng Bắc Bộ đến khu vực ven biển Nghệ An, Hà Tĩnh và một phần Vịnh Bắc Bộ. Tại khu vực Nghĩa Đô, tổng ẩm khí quyển mô phỏng có giá trị là 61,67mm. Ở khu vực Trung Quốc, tổng ẩm khí quyển có giá trị <55mm (Hình 4.18b). Đến thời điểm 01h00 ngày 10/10/2022, khu vực tổng ẩm khí quyển có giá trị 60-65mm, đã thu hẹp lại thành một vùng nhỏ ở khu vực biển ven bờ Hà Tĩnh. Khu vực Đồng bằng Bắc Bộ có tổng ẩm khí quyển dao động từ 45-55mm. Tại khu vực Nghĩa Đô, giá trị tổng ẩm khí quyển là 50,19mm. Khu vực phía nam Trung Quốc, giá trị tổng ẩm khí quyển giảm xuống <45mm (Hình 4.18c). Đến 13h00 ngày 10/10/2022, giá trị tổng ẩm khí quyển ở khu vực Đồng bằng Bắc Bộ giảm xuống đến <45mm. Tại khu vực Nghĩa Đô, tổng ẩm khí quyển đạt 40,51mm (Hình 4.18d). Kết quả mô phỏng của mô hình cho thấy gió mùa đông bắc mang khối không

khí khô hơn từ phía bắc đến khu vực trạm đã làm cho giá trị tổng ẩm khí quyển tại khu vực trạm Nghĩa Đô giảm xuống.



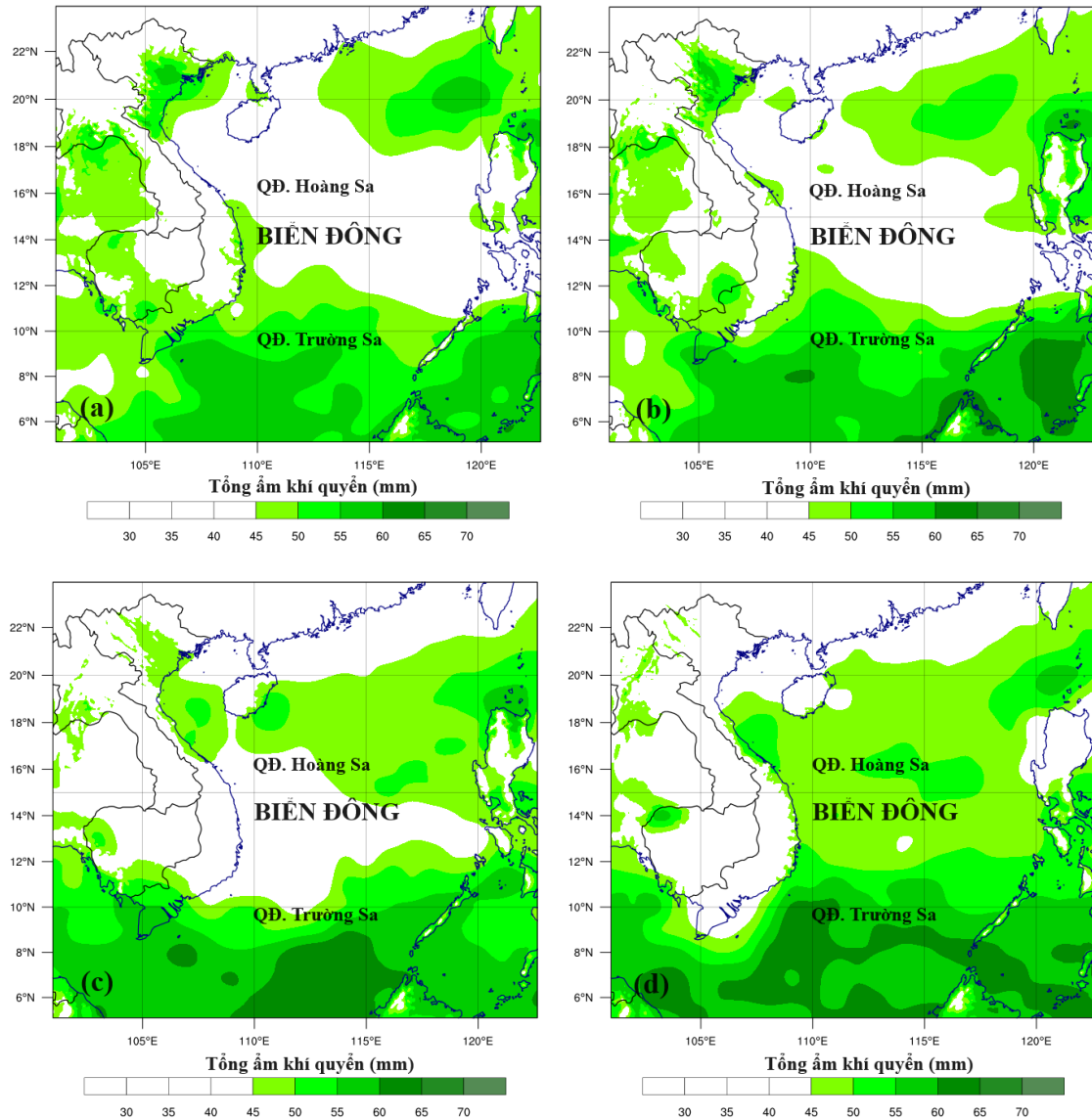
Hình 4.18. Phân bố của trường tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu tái phân tích FNL được tăng độ phân giải đến 6km bằng mô hình WRF: (a) 7h00 09/10/2022, (b) 13h00 09/10/2022, (c) 1h00 10/10/2022, (d) 13h00 10/10/2022.

Trong trường hợp không khí lạnh ảnh hưởng đến khu vực Hà Nội trong ngày 30/11/2022 (Hình 4.17c), kết quả cho thấy nhiệt độ không khí (đường màu đỏ) giảm nhanh sau 18h20 (giờ địa phương), điều này thể hiện không khí lạnh di chuyển qua và ảnh hưởng đến thời tiết khu vực trạm. Sự biến đổi tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS (đường màu xanh) trong khoảng thời gian này thể hiện rõ xu thế tăng lên sau đó giá trị tổng ẩm khí quyển giảm mạnh theo thời gian. Thời điểm tổng ẩm

khí quyển có xu thế giảm xuống xuất hiện trước khi có sự giảm đột ngột của nhiệt độ. Điều này đã cho thấy giá trị tổng ẩm khí quyển tăng lên trước khi không khí lạnh di chuyển đến khu vực trạm. Sau khi không khí lạnh di chuyển qua khu vực trạm do ảnh hưởng của khối không khí có đặc điểm khô và lạnh, giá trị tổng ẩm khí quyển đã giảm xuống rất nhanh. Mức độ giảm xuống của tổng ẩm khí quyển lớn hơn so với mức độ tăng lên trước đó, giá trị tổng ẩm khí quyển TPW_GPS giảm xuống 14,3mm sau 24h. Kết quả mô phỏng tổng ẩm khí quyển bằng mô hình TPW_WRF (dấu + màu tím) cũng cho thấy giá trị tổng ẩm khí quyển TPW_WRF biến đổi tăng lên sau đó giảm nhanh theo thời gian tương tự như xu thế biến đổi của tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS. Tuy nhiên giá trị tổng ẩm khí quyển TPW_WRF có giá trị lớn hơn và thời điểm xu thế giảm xuống xuất hiện sớm hơn so với tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS (Hình 4.17c).

Phân tích trường tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu tái phân tích FNL được tăng độ phân giải đến 6km bằng mô hình WRF trong khoảng thời gian này cho thấy trên khu vực Đồng bằng Bắc Bộ tồn tại một vùng có tổng ẩm khí quyển dao động từ 55-60mm tại thời điểm 13h00 ngày 30/11/2022. Vùng có giá trị tổng ẩm khí quyển này bao phủ trên khu vực Hà Nội. Giá trị tổng ẩm khí quyển tại khu vực Nghĩa Đô đạt 56,67mm. Khu vực Nam Trung Quốc tổng ẩm khí quyển có giá trị <45mm (Hình 4.19a). Đến thời điểm 19h00 ngày 30/11/2022, vùng bao phủ của tổng ẩm khí quyển có giá trị 55-60mm thu hẹp lại và di chuyển về phía nam đến khu vực nam Hà Nội, Hòa Bình, Phú Thọ. Tại khu vực Nghĩa Đô, tổng ẩm khí quyển mô phỏng có giá trị là 54,78mm. Vùng tổng ẩm khí quyển có giá trị <45mm đã xâm nhập vào khu vực các tỉnh biên giới phía bắc của nước ta (Hình 4.19b). Tại thời điểm 07h00 ngày 01/12/2022, tổng ẩm khí quyển ở khu vực Đồng bằng Bắc Bộ có giá trị giảm xuống so với các thời điểm trước, giá trị tổng ẩm khí quyển cao nhất dao động trong khoảng từ 45-50mm. Tại khu vực Nghĩa Đô, giá trị tổng ẩm khí quyển giảm xuống đến 48,5mm. Trong khi đó khối khí có giá trị tổng ẩm khí quyển <45mm tiếp tục dịch chuyển xuống phía nam (Hình 4.19c). Đến 19h00 ngày 01/12/2022, giá trị tổng ẩm khí quyển ở khu vực Đồng bằng Bắc Bộ giảm xuống đến <45mm. Tại khu vực Nghĩa Đô, tổng ẩm khí quyển đạt 42,7mm (Hình 4.19d). Kết quả mô phỏng của mô hình trong khoảng thời gian này đã thể hiện được rằng không khí lạnh vận chuyển khối không khí khô hơn từ phía bắc

đến vực trạm đã làm cho giá trị tổng ẩm khí quyển tại khu vực trạm Nghĩa Đô giảm đi tương tự như trường hợp bên trên.



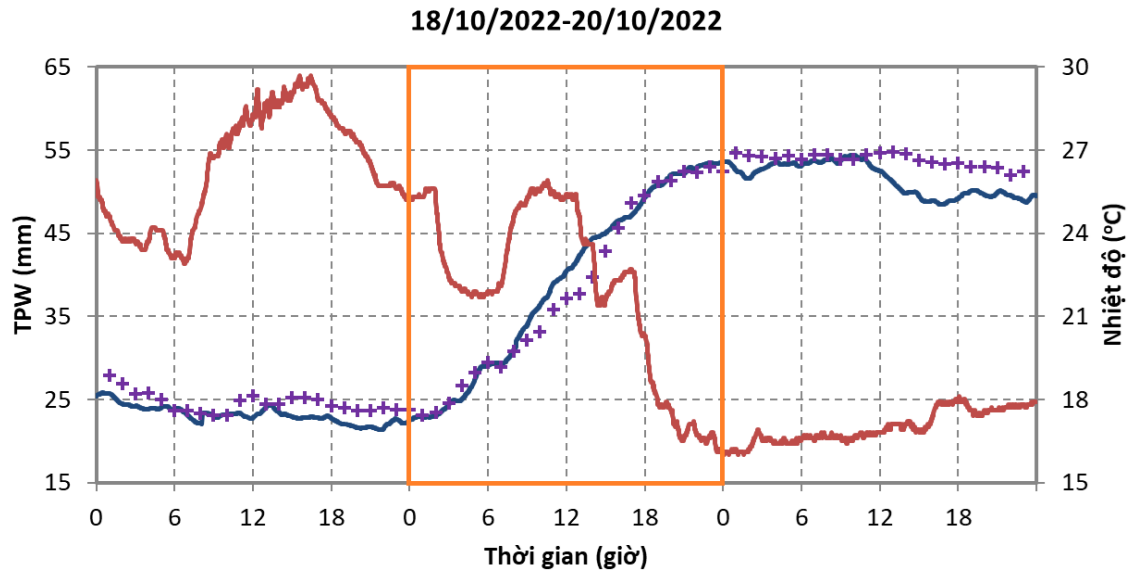
Hình 4.19. Phân bố của trường tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu tái phân tích FNL được tăng độ phân giải đến 6km bằng mô hình WRF: (a) 13h00 30/11/2022, (b) 19h00 30/11/2022, (c) 07h00 01/12/2022, (d) 19h00 01/12/2022.

Sự biến đổi của nhiệt độ không khí và tổng ẩm khí quyển trong các đợt không khí ảnh hưởng đến khu vực Hà Nội trong những ngày 28/12/2022, 14/02/2023, 24/02/2023 và 25/03/2023 cũng tương tự như hai đợt không khí nêu trên (hình 4.17f, 4.17h, 4.17k, 4.17m). Trong các đợt không khí lạnh này ảnh hưởng đến khu vực Hà Nội, xu thế biến đổi của nhiệt độ cũng thể hiện sự giảm nhiệt độ ngọt (đường màu đỏ). Đó là dấu hiệu không khí lạnh di chuyển đến trạm. Kết quả biến đổi tổng ẩm khí quyển trong khoảng thời gian này cho thấy sự thay đổi giá trị tổng ẩm khí quyển tính

từ dữ liệu GNSS (TPW_GPS) (đường màu xanh) cũng tuân theo một xu hướng nhất quán trong các trường hợp này, xu thế biến đổi giá trị của tổng ẩm khí quyển trước hết tăng lên sau đó giảm nhanh theo thời gian. Thời điểm tổng ẩm khí quyển có xu thế giảm xuống xuất hiện trước khi có sự giảm đột ngột của nhiệt độ. Điều này cũng thể hiện rõ ảnh hưởng của không khí lạnh đã làm giảm tổng ẩm khí quyển ở khu vực trạm Nghĩa Đô. Biên độ giảm của tổng ẩm khí quyển TPW_GPS lần lượt là 8,6 mm, 11,0 mm, 12,2 mm và 8,8 mm sau 24h tương ứng với các đợt không khí lạnh trong các ngày 28/12/2022, 14/02/2023, 24/02/2023 và 25/03/2023. Trong khi đó, sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển mô phỏng bằng mô hình TPW_WRF (dấu + màu tím) có xu thế biến đổi tương tự và đa số giá trị cao hơn so với tổng ẩm khí quyển TPW_GPS. Trước tiên giá trị tổng ẩm khí quyển TPW_WRF tăng lên sau đó giảm nhanh theo thời gian. Thời điểm giá trị tổng ẩm khí quyển TPW_WRF giảm xuống thường xuất hiện sớm hơn so với tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS.

Theo dữ liệu thu thập được từ Tổng cục Khí tượng Thủy văn, khu vực Hà Nội bắt đầu chịu ảnh hưởng của các đợt không khí lạnh khác trong các ngày 24/11/2022, 04/12/2022, 17/12/2022, 15/01/2023, 19/02/2023 và 13/03/2023. Tuy nhiên kết quả quan trắc của nhiệt độ không khí tại trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô (đồ thị màu đỏ) trong những khoảng thời gian này không thấy sự giảm nhiệt độ đột ngột trong các trường hợp này (Hình 4.17b, 4.17d, 4.17e, 4.17g, 4.17i, 4.17l). Việc xác định thời điểm không khí lạnh di chuyển đến trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô trong những trường hợp này là rất khó khăn nếu chỉ sử dụng dữ liệu nhiệt độ không khí tại trạm. Kết quả biến đổi của tổng ẩm khí quyển tại trạm Nghĩa Đô cho thấy sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS TPW_GPS (đồ thị màu xanh) tại trạm trong những ngày không khí lạnh bắt đầu ảnh hưởng đến khu vực Hà Nội đều có đặc điểm chung: giá trị tổng ẩm khí quyển tăng lên, sau đó nó giảm xuống nhanh theo thời gian. Sự thay đổi của tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS trong các trường hợp này cũng tương tự như trong các trường hợp có sự biến đổi đột ngột của nhiệt độ không khí khi không khí lạnh ảnh hưởng đến trạm đã nêu ở bên trên. Trong khi đó, kết quả tổng ẩm khí quyển mô phỏng từ mô hình TPW_WRF (dấu + màu tím) cũng thể hiện xu thế biến đổi trong khoảng thời gian này là trước tiên tăng lên sau đó giá trị của nó giảm nhanh theo thời gian. Cả hai loại số liệu tổng ẩm khí quyển (tính từ

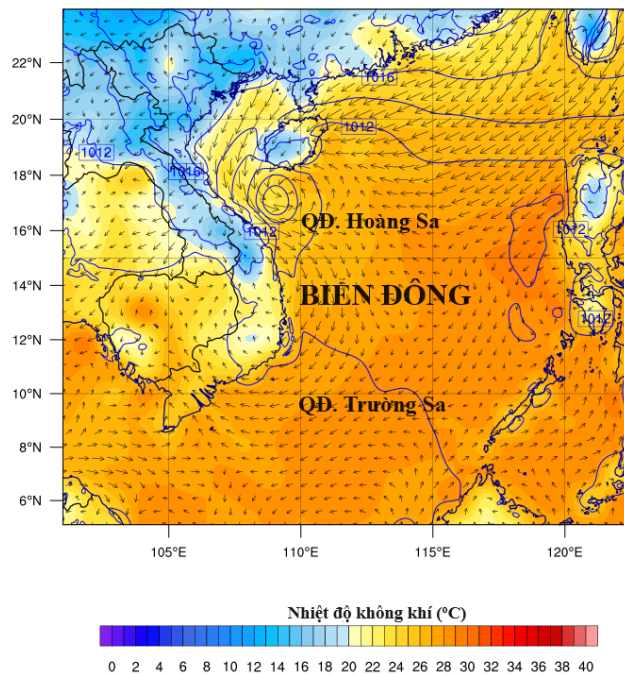
dữ liệu GNSS và mô phỏng bằng mô hình WRF) đều cho thấy có sự giảm nhanh theo thời gian của tổng ẩm khí quyển trong khoảng thời gian này, điều này đã thể hiện rõ sự giảm nhanh này là do ảnh hưởng của khối không khí khô từ gió mùa đông bắc mang đến khu vực trạm. Kết quả biến đổi của tổng ẩm bên trên đã cho thấy rằng dữ liệu tổng ẩm khí quyển có độ phân giải cao có thể được sử dụng như là một dấu hiệu để xác định thời điểm các đợt không khí lạnh di chuyển đến trạm.



Hình 4.20. Biến đổi của tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS (đường màu xanh), mô hình WRF (+, màu tím) và nhiệt độ không khí (đường màu đỏ, °C) tại Trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô trong khoảng thời gian từ 18/10/2022 đến 20/10/2022. Ô vuông màu vàng là ngày không khí lạnh bắt đầu ảnh hưởng đến khu vực Đồng bằng Bắc Bộ.

Trong các đợt không khí lạnh ảnh hưởng đến nước ta trong khoảng thời gian từ 22/09/2022 đến 31/03/2023, đợt không khí lạnh ảnh hưởng đến Hà Nội vào ngày 19/10/2022 là một trường hợp khá đặc biệt. Ngày 19/10/2022 là ngày không khí lạnh ảnh hưởng bắt đầu ảnh hưởng đến khu vực Hà Nội. Kết quả cho thấy có sự giảm nhanh của nhiệt độ (đồ thị màu đỏ). Tuy nhiên sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS (đồ thị màu xanh) tăng lên và không giảm xuống khi không khí lạnh di chuyển qua trạm. Xu thế biến đổi tổng ẩm khí quyển từ mô phỏng TPW_WRF (dấu +, màu tím) tương tự như như tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS TPW_GPS. Giá trị tổng ẩm khí quyển mô phỏng TPW_WRF cũng có xu thế tăng lên theo thời gian và có giá trị chủ yếu cao hơn so với giá trị tổng ẩm khí quyển TPW_GPS (Hình 4.20). Sự biến đổi này của tổng ẩm khí quyển khác biệt so với các trường hợp không khí

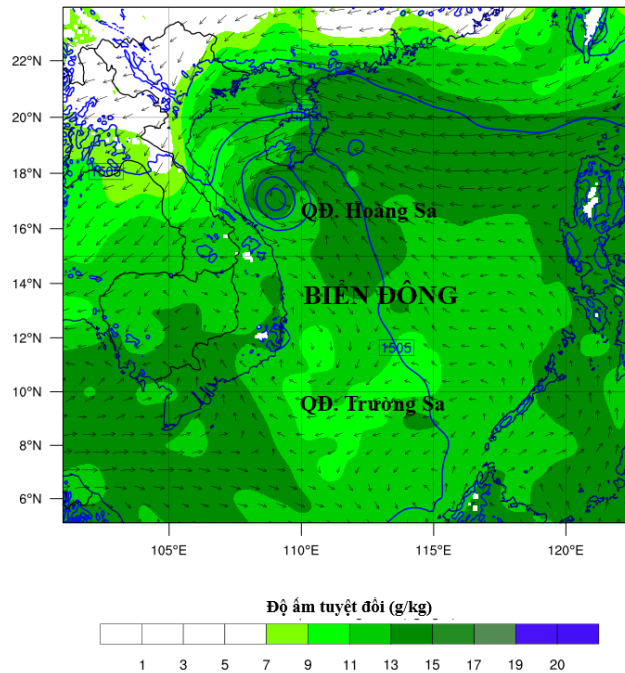
lạnh di chuyển đến trạm ở bên trên. Trong khoảng thời gian này, khu vực Đồng bằng Bắc Bộ chịu ảnh hưởng của không khí lạnh tăng cường kết hợp với hoàn lưu cơn bão số 6 (Nesat). Hình 4.21 biểu diễn phân bố của các trường nhiệt độ không khí, áp suất mực biển và gió tại mực bề mặt thời điểm 19h00 (giờ địa phương) ngày 19/10/2022. Chúng ta nhận thấy rằng cơn bão Nesat đã di chuyển đến khu vực $17,6^{\circ}\text{N}$ $112,4^{\circ}\text{E}$. Tại bề mặt khu vực Đồng bằng Bắc Bộ có gió đông bắc. Nhiệt độ không khí tại khu vực Bắc Bộ hầu như $<20^{\circ}\text{C}$.



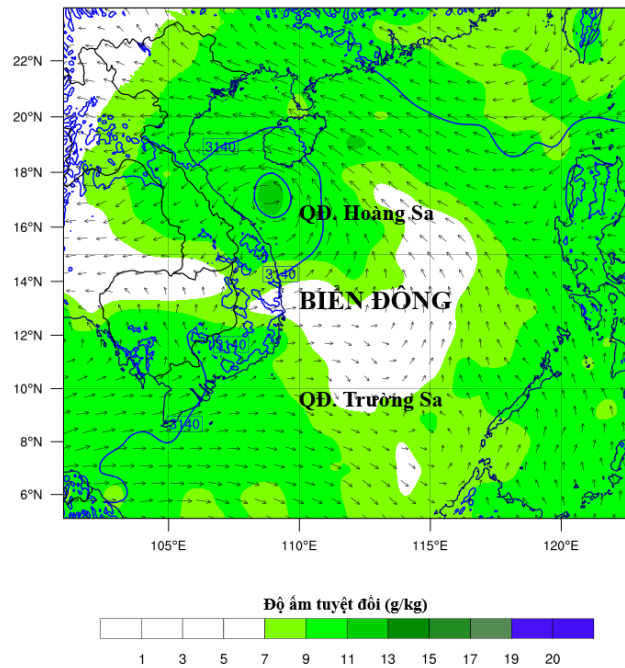
Hình 4.21. Phân bố của các trường nhiệt độ 2m (màu, $^{\circ}\text{C}$), áp suất bề mặt (đường đồng mức màu xanh, mb), gió 10m (véc tơ, knots) tại thời điểm 19h00 ngày 19/10/2022 từ dữ liệu tái phân tích FNL của NCEP được tăng độ phân giải đến 6km bằng mô hình WRF.

Để thấy rõ hơn hình thái thời tiết ảnh hưởng đến khu vực này, một số trường khí tượng mô phỏng từ mô hình WRF đã được phân tích. Hình 4.22 – 4.23 trình bày phân bố của trường độ ẩm tuyệt đối và trường gió tại các mực 850mb và 700mb thời điểm 19:00 ngày 19 tháng 10 năm 2022, từ dữ liệu phân tích NCEP FNL. Dữ liệu được nội suy về độ phân giải ngang 6km bằng Mô hình Dự báo và nghiên cứu thời tiết (WRF). Kết quả cho thấy vùng có độ ẩm cao ($>11\text{g/kg}$) kéo dài từ Vịnh Bắc Bộ đến Đồng bằng Bắc Bộ. Tại mực 850mb, hoàn lưu gió ở phía bắc của cơn bão đã mang ẩm từ biển vào khu vực Đồng bằng Bắc Bộ. Trong khi đó tại mực 700mb, gió

đông và đông đông nam đã vận chuyển không khí ẩm từ biển vào khu vực Đồng bằng Bắc Bộ.

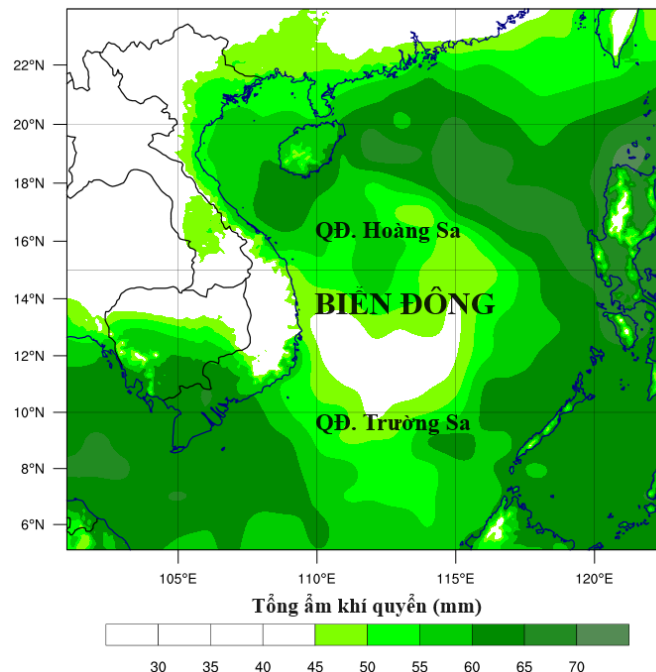


Hình 4.22. Phân bố của các trường độ ẩm tuyệt đối (màu, g/kg), trường gió (véc tơ, knots), trường độ cao (đường đồng mức màu xanh) tại mực 850mb tại thời điểm 19h00 ngày 19/10/2022 từ dữ liệu tái phân tích FNL của NCEP được tăng độ phân giải đến 6km bằng mô hình WRF.



Hình 4.23. Phân bố của các trường độ ẩm tuyệt đối (màu, g/kg), trường gió (véc tơ, knots), trường độ cao (đường đồng mức màu xanh) tại mực 500mb tại thời điểm 19h00 ngày 19/10/2022 từ dữ liệu tái phân tích FNL của NCEP được tăng độ phân giải đến 6km bằng mô hình WRF.

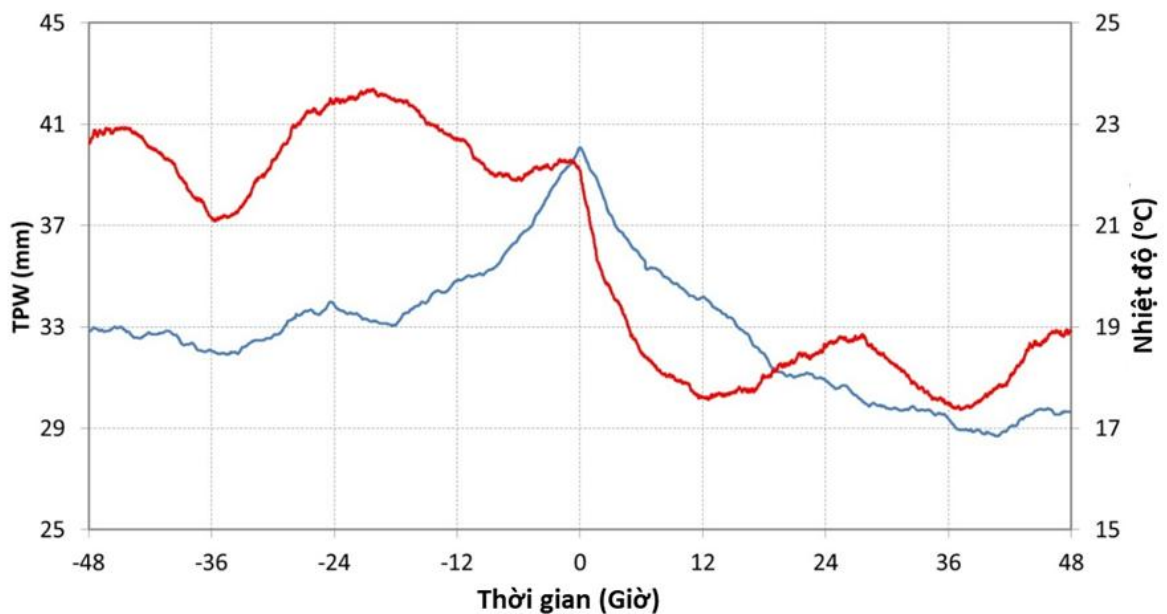
Xem xét sự phân bố tổng ẩm khí quyển, khu vực hoàn lưu bão có giá trị tổng ẩm khí quyển cao (60mm-65mm). Vùng có tổng ẩm khí quyển cao này mở rộng từ khu vực tâm bão đến khu vực Đồng bằng Bắc Bộ. Tại khu vực Đồng bằng Bắc Bộ, tổng ẩm khí quyển có giá trị lớn hơn 50mm (Hình 4.24). Trong trường hợp này, hoàn lưu của bão Nesat và nhiễu động trong đới gió đông trên cao đã vận chuyển hơi ẩm từ biển vào khu vực Đồng bằng Bắc Bộ, điều này đã làm tăng độ ẩm của không khí trong khu vực Đồng bằng Bắc Bộ trong đó có khu vực trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô. Do đó, giá trị tổng ẩm khí quyển ở trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô không giảm sau khi không khí lạnh di chuyển và ảnh hưởng đến thời tiết khu vực.



Hình 4.24. Phân bố của trường tổng ẩm khí quyển tại thời điểm 19h00 ngày 19/10/2022 từ dữ liệu tái phân tích FNL của NCEP được tăng độ phân giải đến 6km bằng mô hình WRF.

Để xem xét tổng quan về sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển trong điều kiện không khí lạnh di chuyển, ảnh hưởng đến khu vực trạm, giá trị nhiệt độ không khí và tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS đã được tính trung bình dựa trên số liệu của 14 đợt không khí lạnh. Hình 4.25 trình bày kết quả của sự thay đổi tổng ẩm khí quyển và nhiệt độ trung bình theo từng phút trong khoảng thời gian ± 48 giờ kể từ thời điểm tổng ẩm khí quyển đạt giá trị cực đại (được biểu thị bằng giờ 0 trên biểu đồ).

Kết quả cho thấy thời điểm tổng ẩm khí quyển trung bình đạt giá trị cực đại gần với thời điểm nhiệt độ trung bình bắt đầu giảm nhanh theo thời gian. Giá trị nhiệt độ trung bình đã giảm đi khoảng $4,5^{\circ}\text{C}$ trong khoảng 12h sau thời điểm tổng ẩm khí quyển đạt giá trị cực đại. Điều này là minh chứng rõ ràng tổng ẩm khí quyển tăng trước khi không khí lạnh di chuyển đến vị trí trạm và giảm sau khi không khí lạnh di chuyển qua vị trí trạm. Giá trị tổng ẩm khí quyển trung bình tăng khoảng 5,25 mm trong khoảng thời gian 12 giờ trước khi không khí lạnh di chuyển đến trạm. Giá trị tổng ẩm khí quyển trung bình giảm khoảng 5,9mm trong khoảng thời gian 12 giờ sau khi không khí lạnh ảnh hưởng đến khu vực trạm. Theo các tác giả [93], front cực đới hình thành khi lưỡi áp cao cực đới lấn về phía nam trong vùng không khí nhiệt đới. Khi đó, không khí lạnh giống như một lưỡi nêm, di chuyển và đẩy lùi không khí nhiệt đới nóng ẩm, buộc khối khí này bốc lên cao dẫn đến sự tạo thành mây dày đặc dọc vùng biên giới hai khối khí. Chuyển động thẳng của khối khí trước front lạnh có thể là nguyên nhân dẫn đến sự gia tăng của tổng ẩm khí quyển trước khi không khí lạnh di chuyển đến trạm.



Hình 4.25. Biến đổi của TPW (đồ thị màu xanh) và nhiệt độ không khí (đồ thị màu đỏ) tính trung bình của 14 đợt không khí lạnh trong khoảng thời gian ± 48 giờ từ thời điểm TPW đạt giá trị cực đại.

Kết quả bên trên đã chỉ ra rằng, khi có không khí lạnh ảnh hưởng đến khu vực trạm, sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển thể hiện những đặc điểm riêng biệt: tổng ẩm khí quyển tăng lên khi không khí lạnh di chuyển đến trạm và nó sẽ giảm mạnh sau

khi không khí lạnh di chuyển qua trạm. Với đặc trưng biến đổi này, tổng ẩm khí quyển hoàn toàn có thể được sử dụng như là một dấu hiệu để xác định thời điểm không khí lạnh ảnh hưởng đến khu vực trạm. Tuy nhiên, điều quan trọng cần lưu ý là khi sử dụng dữ liệu tổng ẩm khí quyển để xác định thời điểm không khí lạnh di chuyển đến trạm, chúng ta sẽ phải loại trừ ảnh hưởng của các hệ thống quy mô trung bình khác, chẳng hạn như: bão, áp thấp nhiệt đới và nhiễu động trên đới gió đông. Những hệ thống này có thể tác động đáng kể đến điều kiện thời tiết địa phương. Trong những trường hợp như vậy, tổng ẩm khí quyển có thể bị ảnh hưởng chủ yếu bởi các hệ thống mây đối lưu sâu từ một hệ thống thời tiết khác thay vì chỉ chịu ảnh hưởng của không khí lạnh.

Kết luận chương 4

Giá trị sai số trung bình (ME), sai số bình phương trung bình (RMSE) và hệ số tương quan giữa tổng ẩm khí quyển tính từ dữ liệu GNSS và sản phẩm tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu AERONET lần lượt là 0,68mm, 2,05mm và 0,988. Giá trị ME, RMSE và các hệ số tương quan giữa tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS và từ dữ liệu thám không vô tuyến lần lượt là -3,01mm, 3,24mm và 0,996. Giá trị ME, RMSE và các hệ số tương quan giữa tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS và mô phỏng mô hình lần lượt là -2,12mm, 3,03mm và 0,984. Các kết quả so sánh cho thấy sự phù hợp cao giữa tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS tại Trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô bằng công cụ CSRS-PPP và sản phẩm tổng ẩm khí quyển từ dữ liệu AERONET, dữ liệu thám không vô tuyến và mô phỏng mô hình. Các kết quả so sánh này cung cấp bằng chứng cho thấy việc áp dụng kỹ thuật CSRS-PPP để tính toán TPW từ dữ liệu GNSS tại Trạm Vật lý khí quyển Nghĩa Đô mang lại kết quả tốt.

Với độ phân giải theo thời gian là 1 phút, tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS có thể được sử dụng để phân tích chi tiết về biến đổi theo thời gian của tổng ẩm khí quyển. Kết quả cho thấy biến trình ngày của tổng ẩm khí quyển có 2 cực đại và 2 cực tiểu. Giá trị của độ trễ ước thiên đỉnh và tổng ẩm khí quyển tại trạm Nghĩa Đô thấp nhất vào tháng 12 và tháng 01. Sự giảm của độ trễ ước thiên đỉnh và tổng ẩm khí quyển vào tháng 12 và tháng 01 có thể là do gió mùa mùa đông hoạt động mạnh đã mang khối không khí lạnh và khô từ phía bắc đến khu vực trạm.

Với những đợt không khí lạnh, trong đó không có ảnh hưởng của các hệ thống quy mô vừa, xu thế biến đổi của tổng ẩm khí quyển trong quá trình di chuyển của không khí lạnh đến khu vực trạm đã thể hiện đặc điểm riêng biệt. Trước khi không khí lạnh di chuyển đến trạm, tổng ẩm khí quyển có xu hướng tăng lên. Sự gia tăng này có thể liên quan đến hoạt động đối lưu phía trước front lạnh. Sau khi không khí lạnh di chuyển qua khu vực trạm, giá trị tổng ẩm khí quyển tại khu vực trạm sẽ giảm xuống do gió mùa đông bắc đã mang khối khí có tính chất lạnh và khô từ phía bắc đến khu vực trạm. Sự biến đổi này của tổng ẩm khí quyển có thể được sử dụng như là một trong các tiêu chí để xác định thời điểm không khí lạnh di chuyển đến khu vực trạm.

Với độ phân giải cao theo thời gian, dữ liệu GNSS quan trắc tại bề mặt có thể được sử dụng để nghiên cứu sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển gắn với các hiện tượng thời tiết khác ngoài không khí lạnh (mưa dông, mưa lớn,...) từ đó đánh giá khả năng ứng dụng dữ liệu GNSS trong việc cảnh báo mưa lớn, mưa dông ở khu vực trạm. Ngoài ra với số lượng trạm đủ nhiều, dữ liệu GNSS quan trắc tại bề mặt có thể được sử dụng để nghiên cứu sự di chuyển của không khí lạnh và các hiện tượng thời tiết khác.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

KẾT LUẬN

Công trình nghiên cứu đã ứng dụng được số liệu GNSS, số liệu GPSRO và mô hình số trị để nghiên cứu đánh giá một số thông số khí quyển tại một số khu vực của Việt Nam. Trên cơ sở các kết quả nêu trên, có thể rút ra một số kết luận như sau:

1. Dữ liệu nhiệt độ, độ ẩm tương đối và chỉ số khúc xạ khí quyển từ số liệu wetPf2 phù hợp tốt với dữ liệu thám không vô tuyến trên khu vực Việt Nam và lân cận. Hệ số tương quan giữa hai nguồn dữ liệu dao động trong khoảng 0,86-0,93, 0,63-0,76, 0,76-0,87 tương ứng với nhiệt độ, độ ẩm tương đối và chỉ số khúc xạ khí quyển. Dữ liệu wetPf2 cũng phù hợp tốt với dữ liệu mô phỏng bằng mô hình WRF trong điều kiện bão. Kết quả này xác nhận rằng dữ liệu wetPf2 là một nguồn số liệu quan trắc độc lập tốt bổ sung vào nguồn dữ liệu cao không để nghiên cứu khí quyển và sử dụng trong nghiệp vụ dự báo thời tiết tại khu vực Việt Nam và lân cận.

2. Trên khu vực quần đảo Hoàng Sa và quần đảo Trường Sa, biên độ biến đổi năm của nhiệt độ trong lớp biên lớn hơn trong lớp khí quyển tự do. Biên độ biến đổi năm của nhiệt độ ở khu vực Hoàng Sa đạt $\sim 5^{\circ}\text{C}$, lớn hơn so với khu vực quần đảo Trường Sa ($2,2^{\circ}\text{C}$). Ngược lại, biên độ biến đổi năm của độ ẩm tương đối trong lớp biên khí quyển là nhỏ, biên độ này có giá trị rất lớn trong lớp khí quyển tự do.

3. Cấu trúc của các trường khí quyển trong bão ở khu vực Biển Đông và lân cận từ dữ liệu wetPf2 thể hiện khá rõ ràng vùng dị thường nóng của nhiệt độ tồn tại ở khu vực gần tâm bão từ độ cao 2,5km đến 15km có liên quan đến sự giải phóng ẩn nhiệt do ngưng kết. Vùng dị thường lạnh ở độ cao >16 km liên quan đến hoạt động làm lạnh do bay hơi. Vùng dị thường tăng của độ ẩm tương đối tồn tại trong lớp từ 5km đến 12,5 km trong khu vực bán kính 600 km từ tâm bão liên quan đến hoạt động đối lưu mạnh trong vùng gần tâm bão đã mang ẩm từ mực thấp đến lớp khí quyển bên trên. Vùng dị thường tăng của áp suất hơi nước và chỉ số khúc xạ khí quyển có độ cao thấp hơn, trong lớp từ độ cao 2km đến 3km ở khu vực gần tâm bão.

4. Các kết quả đã khẳng định tổng ẩm khí quyển tính toán từ dữ liệu GNSS với độ phân giải 1 phút là đáng tin cậy và phù hợp với các nguồn dữ liệu khác. Sai số RMSE (hệ số tương quan) giữa tổng ẩm khí quyển xác định từ dữ liệu GNSS và dữ

liệu AERONET, thám không vô tuyến và mô phỏng mô hình tương ứng là 2,05mm (0,988), 3,24mm (0,996) và 3,03mm (0,984).

5. Sự biến đổi của tổng ẩm khí quyển cho thấy biến trình ngày của tổng ẩm khí quyển có 2 cực đại tại 10h và 22h và 2 cực tiểu tại thời điểm 4h và 16h. Tổng ẩm khí quyển có xu hướng tăng lên trước khi không khí lạnh di chuyển đến trạm. Sau đó nó sẽ giảm xuống sau khi không khí lạnh di chuyển qua khu vực trạm. Sự biến đổi này của tổng ẩm khí quyển có thể được sử dụng như là một trong các tiêu chí để xác định thời điểm không khí lạnh di chuyển đến khu vực trạm.

KIẾN NGHỊ

Dữ liệu GPSRO và GNSS tại bề mặt đã được khẳng định là các nguồn dữ liệu tin cậy để sử dụng trong nghiên cứu khí quyển, thời tiết, khí hậu và nghiệp vụ dự báo ở khu vực Việt Nam. Trong luận án, việc sử dụng số liệu COSMIC-2 để nghiên cứu đặc điểm cấu trúc các trường khí tượng trong bão mới chỉ áp dụng trong mùa bão 2020 với số lượng bão còn ít nên chưa thể đại diện hết cho các mùa bão. Việc đồng hóa dữ liệu này vào mô hình cũng chưa được thực hiện. Trong các nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung vào sử dụng dữ liệu COSMIC-2 và các số liệu GPSRO khác để phân tích các đặc trưng trường khí tượng đối với các mùa bão khác ở Biển Đông, phân tích đặc trưng của các trường khí quyển khác như độ dày lớp biên khí quyển, biến đổi của độ cao đỉnh tầng đối lưu, cũng như nghiên cứu đồng hóa dữ liệu này vào mô hình WRF để dự báo quỹ đạo, cường độ bão và mưa trong bão.

Việc sử dụng số liệu GNSS để tính toán tổng ẩm khí quyển với độ phân giải cao đã cho thấy tiềm năng sử dụng dữ liệu này để giám sát biến đổi khí hậu. Trong luận án đã sử dụng dữ liệu này để phân tích đặc trưng tổng ẩm khí quyển gắn với không khí lạnh, tuy nhiên số lượng đợt không khí lạnh chưa nhiều và đây cũng là những kết quả bước đầu nên cần thiết phải có những nghiên cứu tiếp theo với chuỗi số liệu dài hơn, và có thể với các hiện tượng thời tiết cực đoan khác như mưa lớn. Ngoài ra cũng cần tập trung vào nghiên cứu đồng hóa dữ liệu GNSS vào mô hình WRF trong nghiên cứu mô phỏng và dự báo mưa ở khu vực Hà Nội.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

- 1) **Khuong Le Pham**, Anh Xuan Nguyen, Hiep Van Nguyen, Son Hai Hoang, Vinh Nhu Nguyen, Thang Van Vu. *Application of WetP_f2 Data for Investigating Characteristics of Temperature and Humidity of Air Masses over Paracel and Spratly Islands*. Advances in Meteorology, 2024, Vol 2024.
- 2) **Pham Le Khuong**, Nguyen Xuan Anh, Hiep Van Nguyen, Hoang Hai Son, Nguyen Nhu Vinh, Bui Ngoc Minh. *Precipitable Water Characterization Using Global Navigation Satellite System Data: A Case Study in Nghia Do Area, Vietnam*. Vietnam Journal of Earth Sciences, 2024, Vol 46, No. 1, pp 82-99.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Yunck T., 2002, An overview of atmospheric radio occultation, *Journal of Global Positioning Systems*, 1(1), pp. 58–60.
2. Ware R., Exner M., Feng D., Gorbunov M., Hardy K., Herman B., Kuo Y., Meehan T., Melbourne W., Rocken C., Schreiner W., Sokolovskiy S., Solheim F., Zou X., Anthes R., Businger S., and Trenberth K., 1996, GPS sounding of the atmosphere from low Earth orbit: preliminary results, *Bulletin of The American Meteorological Society*, 77, pp. 19–40.
3. Kursinski E.R., Hajj G.A., Schofield J.T., Linfield R.P., and Hardy K.R., 1997, Observing earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*, 102 (D19), pp. 23429–23465.
4. Wickert J., Reigber C., Beyerle G., König R., Marquardt C., Schmidt T., Grunwaldt L., Galas R., Meehan T.K., Melbourne W.G., Hocke K., 2001, Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP, *Geophysical Research Letters*, 28(17), pp. 3263–3266.
5. Schmidt T., Heise S., Wickert J., Beyerle G., and Reigber C., 2005, GPS radio occultation with CHAMP and SAC-C: global monitoring of thermal tropopause parameters, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, pp. 1473–1488
6. Beyerle G., Schmidt T., Michalak G., Heise S., Wickert J., Reigber C., 2005, GPS radio occultation with GRACE: Atmospheric profiling utilizing the zero difference technique, *Geophysical Research Letters*, 32(13).
7. Anthes R.A., Bernhardt P.A., Chen Y., Cucurull L., Dymond K.F., Ector D., Healy S.B., Ho S.-P., Hunt D.C., Kuo Y.-H., Liu H., Manning K., McCormick C., Meehan T.K., Randel W.J., Rocken C., Schreiner W.S., Sokolovskiy S.V., Sydergaard S., Thompson D.C., Trenberth K.E., Wee T.-K., Yen N.L., Zeng Z., 2008, The COSMIC/FORMOSAT-3 Mission: Early results, *Bulletin of The American Meteorological Society*, 89, pp. 313–333.
8. Gorbunov M.E., Lauritsen K.B., Benzon H.-H., Larsen G.B., Syndergaard S., Sørensen M.B., 2011, Processing of GRAS/METOP radio occultation data recorded in closed-loop and raw-sampling modes, *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(6), pp. 1021–1026.
9. Schreiner W.S., Weiss J., Anthes R., Braun J., Chu V., Fong J., Hunt D., Kuo Y., Meehan T., Serafino W., Sjöberg J., Sokolovskiy S., Talaat E., Wee T.K., Zeng Z., 2020, COSMIC-2 Radio Occultation Constellation: First Results, *Geophys.*

Res. Lett., 47.

10. Kuo Y. H., Schreiner W.S., Wang J., Rossiter D.L., Zhang Y., 2005, Comparison of GPS radio occultation soundings with radiosondes, *Geophysical Research Letters*, 32(5), pp. 1–4.
11. Sun B., Reale A., Seidel D.J., Hunt D.C., 2010, Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115(23), pp. 1–16.
12. Wang B.R., Liu X.Y., Wang J.K., 2013, Assessment of COSMIC radio occultation retrieval product using global radiosonde data, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(4), pp. 1073–1083.
13. Xu X., Luo J., Shi C., 2009, Comparison of COSMIC radio occultation refractivity profiles with radiosonde measurements, *Advances in Atmospheric Sciences*, 26(6), pp. 1137–1145.
14. Zhang K., Fu E., Silcock D., Wang Y., Kuleshov Y., 2011, An investigation of atmospheric temperature profiles in the Australian region using collocated GPS radio occultation and radiosonde data, *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(10), pp. 2087–2092.
15. Xu G., Yue X., Zhang W., Wan X., 2017, Assessment of atmospheric wet profiles obtained from COSMIC radio occultation observations over China, *Atmosphere*, 8(11).
16. Vergados P., Mannucci A.J., Ao C. O., Verkhoglyadova O., Iijima B., 2018, Comparisons of the tropospheric specific humidity from GPS radio occultations with ERA-Interim, NASA MERRA, and AIRS data, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, pp. 1193–1206.
17. Anthes R., Schreiner W., 2019, Six new satellites watch the atmosphere over Earth's equator. *Eos*, 100. <https://doi.org/10.1029/2019EO131779>.
18. Shao X., Ho S. -P., Zhang B., Zhou X., Kireev S., Chen Y., Cao C., 2021, Comparison of COSMIC-2 radio occultation retrievals with RS41 and RS92 radiosonde humidity and temperature measurements, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences journal*, 32(6), pp. 1015-1032.
19. Veenus V., Das S. S., Sama B., Uma K. N., 2022, A comparison of temperature and relative humidity measurements derived from COSMIC-2 radio occultations with radiosonde observations made over the Asian summer monsoon region, *Remote Sensing Letters*, 13 (4), pp. 394-405.
20. Song Z., Bai W., Zhang Y., Wang Y., Xu X., Xin J., 2024, Evaluation of Satellite-

- Derived Atmospheric Temperature and Humidity Profiles and Their Application as Precursors to Severe Convective Precipitation. *Remote Sens.*, 16(24).
21. Cucurull L. and Derber J. C., 2008, Operational implementation of COSMIC observations into NCEP's global data assimilation system, *Weather Forecast*, 23, pp. 702–711.
 22. Chen Y.-C., Hsieh M.-E., Hsiao L.-F., Kuo Y.-H., Yang M.-J., Huang C.-Y., Lee C.-S., 2015, Systematic evaluation of the impacts of GPSRO data on the prediction of typhoons over the northwestern Pacific in 2008–2010, *Atmos. Meas. Tech.*, 8, pp. 2531–2542.
 23. Biondi, R., Ho S.-P., Randel W., Syndergaard S., Neubert T., 2013, Tropical cyclone cloud-top height and vertical temperature structure detection using GPS radio occultation measurements, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, pp. 5247–5259.
 24. Rivoire L., Birner T., Knaff J., 2016, Evolution of the upper-level thermal structure in tropical cyclones, *Geophys. Res. Lett.*, 2016, 43, pp. 10530–10537.
 25. Kuleshov Y., Choy S., Fu E.F., Chane-Ming F., Liou Y. A., Pavelyev A.G., 2016, Analysis of meteorological variables in the Australasian region using ground- and space-based GPS techniques, *Atmospheric Research*, 176–177, pp. 276–289.
 26. Bevis M., Businger S., Herring T. A., Rocken C., Anthes R. A., Ware R. H., 1992, GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, *Journal of Geophysical Research*, 97(D14), pp. 15787–15801.
 27. Kouba J., Heroux P., 2001, Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products, *GPS Solutions*, 5(2), pp. 12–28.
 28. Karabatić A., Weber R., Haiden T., 2011, Near real-time estimation of tropospheric water vapour content from ground based GNSS data and its potential contribution to weather now-casting in Austria, *Advances in Space Research*, 47(10), pp. 1691–1703.
 29. Ahmed F., Václavovic P., Teferle F. N., Douša J., Bingley R., Laurichesse D., 2014, Comparative analysis of real-time precise point positioning zenith total delay estimates, *GPS Solutions*, 20(2), pp. 187–199.
 30. Tregoning P., Boers R., O'Brien D., Hendy M., 1998, Accuracy of absolute precipitable water vapor estimates from GPS observations, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D22), pp. 28701–28710.
 31. Baelen J.V., Aubagnac J. -P., Dabas A., 2005, Comparison of Near-Real Time Estimates of Integrated Water Vapor Derived with GPS, Radiosondes, and Microwave Radiometer, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22,

- pp. 201-210.
32. Fernández L.I., Salio P., Natali M. P., Meza A.M., 2010, Estimation of precipitable water vapour from GPS measurements in Argentina: Validation and qualitative analysis of results, *Advances in Space Research*, 46(7), pp. 879–894.
 33. Namaoui H., Kahlouche S., Belbachir A.H., Van Malderen R., Brenot H., Pottiaux E., 2017, GPS water vapor and its comparison with radiosonde and ERA-Interim data in Algeria, *Advances in Atmospheric Sciences*, 34(5), 623–634.
 34. Gopalan K., Shukla B.P., Sharma S., Kumar P., Shyam A., Gaur A., Sunda S., 2021, An Observational Study of GPS-Derived Integrated Water Vapor over India, *Atmosphere*, 12, 1303.
 35. Khanian A.S., Farzaneh S., 2021, Tropospheric delay efficiency from CSRS-PPP online service for meteorologists in Iran, *Numerical Methods in Civil Engineering*, 5-3 (2021), pp. 67-77.
 36. Tetreault P., Kouba J., Heroux P., Legree P., 2005, CSRS-PPP: An internet service for GPS user access to the Canadian Spatial Reference frame, *Geomatica*, 59(1), pp. 17-28.
 37. Banville S., Hassen E., Lamothe P., Farinaccio J., Donahue B., Mireault Y., Goudarzi M.A., Collins P., Ghoddousi-Fard R., Kamali O., 2021, Enabling ambiguity resolution in CSRS-PPP, *NAVIGATION*, 68(2), pp. 433–451.
 38. Guo Q., 2015, Precision comparison and analysis of four online free PPP services in static positioning and tropospheric delay estimation, *GPS Solutions*, 19(4), pp. 537-544.
 39. Astudillo J.M., Lau L., Tang Y.-T., Moore T., 2018, Analysing the Zenith Tropospheric Delay Estimates in On-line Precise Point Positioning (PPP) Services and PPP Software Packages, *Sensors*, 18(2), 580.
 40. El-Mewafi M., Zarzoura F.H., Saber M., 2019, Studying and Assessment the Tropospheric Delay at Different Weather Conditions in Egypt, *Journal of Scientific and Engineering Research*, 6(10), pp. 185-198.
 41. Rose M.S., Sunil P.S., Zacharia J., Sreejith K.M., Sunda S., Mini V.K., Sunil A.S., Kumar K.V., 2023, Early detection of heavy rainfall events associated with the monsoon in Kerala, India using GPS derived ZTD and PWV estimates: A case study, *Journal of Earth System Science*, 132, 23.
 42. Sugiyama J., Nishino H., Kusaka A., 2024, Precipitable water vapour measurement using GNSS data in the Atacama Desert for millimetre and submillimetre astronomical observations, *MNRAS* 528, pp. 4582–4590.

43. Nilsson T., Elgered G., 2008, Long-term trends in the atmospheric water vapor content estimated from ground-based GPS data, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(19).
44. Torres B., Cachorro V.E., Toledano C., Ortiz De Galisteo J.P., Berjón A., De Frutos A. M., Bennouna Y., Laulainen, N., 2010, Precipitable water vapor characterization in the Gulf of cadiz region (southwestern Spain) based on Sun photometer, GPS, and radiosonde data, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115(18).
45. Bosy J., Kaplon J., Rohm W., Sierny J., Hadas T., 2012, Near real-time estimation of water vapour in the troposphere using ground GNSS and the meteorological data, *Annales Geophysicae*, 30(9), pp. 1379–1391.
46. Bonafoni S., Biondi R., 2016, The usefulness of the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) in the analysis of precipitation events, *Atmospheric Research*, 167, pp. 15–23.
47. Priego E., Jones J., Porres M.J., Seco A., 2017, Monitoring water vapour with GNSS during a heavy rainfall event in the Spanish Mediterranean area, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8:2, pp. 282-294.
48. Meunram P., Satirapod C., 2019, Variation of Precipitable Water Vapor derived from GNSS CORS Observations in Thailand, *E3S Web of Conferences*, 94.
49. Wijaya D. D., Putri N. S. E., Wibowo S. T., Kuntjoro W., 2022, Seasonal and annual variations of the GPS-based precipitable water vapor over Sumatra, Indonesia, *Atmospheric Research*, 275.
50. Domingo A.L.S., Ernest P.M., 2022, Temporal Analysis of GNSS-Based Precipitable Water Vapor during Rainy Days over the Philippines from 2015 to 2017, *Atmosphere*, 13 (3), 430.
51. Nguyễn Xuân Anh, Phạm Lê Khương, 2008, *Đánh giá các chỉ số đối lưu khí quyển qua số liệu Formosat-3/cosmic*, Tuyển tập các công trình vật lý địa cầu 2008, NXB KHTN&CN, tr 321-329.
52. Phạm Quang Nam, Mai Văn Khiêm, Nguyễn Quang Trung, Vũ Văn Thắng, 2019, Thử nghiệm hệ thống đồng hóa GSI trong bài toán dự báo định lượng mưa trên khu vực Nam Bộ, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 698, tr. 1-10.
53. Chi Cong Pham, Xuan Anh Nguyen, Hoai Trung Tran, 2021, Determination of radio wave propagation conditions in the atmosphere of Hanoi using the meteorological data, *Journal of Science and Technique: Section on Information and Communication Technology*, 10(2), pp. 32-49.
54. Le Huy Minh, Tran Thi Lan, Fleury R., Le Truong Thanh, Nguyen Chien Thang,

- Nguyen Ha Thanh, 2016, TEC variations and ionospheric disturbances during the magnetic storm in March 2015 observed from continuous GPS data in the Southeast Asia region, *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 38(3), pp. 287-305.
55. Nguyen Thanh D., Le Huy M., Amory-Mazaudier C., Fleury R., Saito S., Nguyen Chien T., Le Truong T., Pham Thi Thu H., Nguyen Ha T., Nguyen Thi, M., Le Q., 2023, Ionospheric quasi-biennial oscillation of the TEC amplitude of the equatorial ionization anomaly crests from continuous GPS data in the Southeast Asian region, *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 45(1), pp. 1-18.
 56. Tran Dinh Trong, Nguyen Quoc Long, Nguyen Dinh Huy, 2021, General Geometric Model of GNSS Position Time Series for Crustal Deformation Studies – A Case Study of CORS Stations in Vietnam, *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 1(2), pp. 183-197.
 57. Tran D.T., Nguyen D.H., Vu N.Q., Nguyen Q.L., 2023, Crustal displacement in Vietnam using CORS data during 2018 – 2021, *Earth Sciences Research Journal*, 27(1), pp. 27-36.
 58. Lê Huy Minh, Frédéric Masson, P. Lassudrie Duchesne, A. Bourdillon, Trần Thị Lan, Phạm Xuân Thành, Nguyễn Chiến Thắng, Trần Ngọc Nam, Hoàng Thái Lan, 2009, Kết quả đánh giá độ trễ thiên đỉnh và hàm lượng hơi nước tổng cộng tầng đối lưu từ số liệu GPS ở Việt Nam, *Tạp chí Các khoa học về Trái Đất*, 31(3), tr. 201-211.
 59. Lại Văn Thủy, Du Đức Tiến, Mai Khánh Hưng, 2022, Giải pháp và kết quả tính tổng lượng hơi nước cột khí quyển (PWV) từ dữ liệu GNSS ở Việt Nam, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 744, tr. 93-103.
 60. Dasari H. P., Salgado R., Perdigao J., Challa V. S., 2014, A Regional Climate Simulation Study Using WRF-ARW Model over Europe and Evaluation for Extreme Temperature Weather Events, *International Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 2014, pp. 1- 22.
 61. Noh I., Lee S.-J., Lee S., Kim S.-J., Yang S.-D., 2021, A High-Resolution (20 m) Simulation of Nighttime Low Temperature Inducing Agricultural Crop Damage with the WRF–LES Modeling System, *Atmosphere*, 12(12).
 62. Zhang G., Zhu S., Zhang N., Zhang G., Xu Y., 2022, Downscaling hourly air temperature of WRF simulations over complex topography: A case study of Chongli District in Hebei Province, China, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2021JD035542.
 63. Pérez-Jordán wG. Castro-Almazán J.A., Muñoz-Tuñón C., 2018, Precipitable water vapour forecasting: a tool for optimizing IR observations at Roque de los

- Muchachos Observatory, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 477(4), pp. 5477-5485.
64. Hassanli H., Rahimzadegan M., 2019, Investigating extracted total precipitable water vapor from Weather Research and Forecasting (WRF) model and MODIS measurements, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 193.
 65. Ojrzyńska H, Błaś M, Kryza M., 2022, Precipitable Water Content Climatology over Poland, *Atmosphere*, 13(6):988.
 66. Trương Hoài Thanh, Nguyễn Văn Tín, Bùi Chí Nam, 2011, Khảo sát độ nhạy của một số sơ đồ tham số hóa đối lưu trong dự báo định lượng mưa trên lưu vực sông Đồng Nai dựa trên mô hình WRF, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 611, tr. 43-50.
 67. Vũ Văn Thăng, Vũ Thế Anh, Trần Duy Thức, Trương Bá Kiên, Nguyễn Văn Hiệp, 2017, Đánh giá khả năng dự báo mưa mùa hè của mô hình WRF đối với khu vực Nam Bộ và Nam Tây Nguyên khi có bão trên biển Đông, *Tạp chí Khoa học Biến đổi khí hậu*, 2, tr. 43-51.
 68. Vũ Văn Thăng, Trần Duy Thức, Nguyễn Quang Trung, 2019, Thử nghiệm đồng hóa số liệu bằng WRF 4D-Var trong dự báo mưa ở khu vực Nam Bộ, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, EME2, tr. 174-185.
 69. Nguyễn Tiến Toàn, Công Thanh, Phạm Thị Phụng, Vũ Tuấn Anh, 2018, Đánh giá khả năng dự báo mưa lớn của mô hình WRF do hình thể không khí lạnh kết hợp với gió đông trên cao cho khu vực Trung Trung Bộ, *Tạp chí Khoa học ĐHQGHN: Các Khoa học Trái đất và Môi trường*, 34 (1S), tr. 133-137.
 70. Dư Đức Tiến, Hoàng Đức Cường, Mai Khánh Hưng, Hoàng Phúc Lâm, 2019, Đánh giá tác động của việc sử dụng tham số hóa đối lưu trong dự báo đợt mưa lớn tháng 7 năm 2015 trên khu vực Bắc Bộ bằng mô hình phân giải cao, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 699, tr. 1-8.
 71. Trương Bá Kiên, Phạm Thị Thanh Nga, Trần Duy Thức, Phùng Thị Mỹ Linh, Vũ Văn Thăng, 2022, Đánh giá chất lượng dự báo mưa định lượng của mô hình WRF cho khu vực Việt Nam, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 738, tr. 1-11.
 72. Đỗ Huy Dương, 2004, Bước đầu nghiên cứu và thử nghiệm mô hình WRF để dự báo thời tiết hạn vừa ở Việt Nam, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 528, tr. 13-21.
 73. Hoàng Đức Cường, 2011, Nghiên cứu ứng dụng sơ đồ đồng hóa số liệu 3DVAR cho mô hình WRF để dự báo thời tiết ở Việt Nam, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 610, tr. 37-42.
 74. Chu Thị Thu Hường, Nguyễn Tiến Mạnh, Nguyễn Trần Hoàng, Trần Đức Việt, 2018, Thử nghiệm dự báo nhiệt độ và lượng mưa trên khu vực Hà Nội bằng mô hình WRF, *Tạp chí Khoa học Tài nguyên và Môi trường*, 19, tr. 51-57.

75. Đàng Hồng Như, Nguyễn Văn Hiệp, 2016, Nghiên cứu vai trò của vận tải ẩm trong đợt mưa lớn tháng 11 năm 1999 ở miền trung bằng mô hình WRF, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 663, tr. 3-7.
76. QCVN 46:2022/BTNMT của Bộ Tài nguyên và Môi trường về Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về quan trắc khí tượng.
77. Kursinski E.R., Hajj G.A., 2001, A comparison of water vapor derived from GPS occultations and global weather analyses, *J. Geophys. Res.*, 106(D1), pp. 1113–1138.
78. Lutgens F.K., Tarbuck E.J., Herman R.L., 2018, *The atmosphere: An Introduction to Meteorology*, Pearson, pp. 1-1912.
79. Alkan R. M., Erol S., Ozulu I. M., Ilci V., 2020, Accuracy comparison of post-processed PPP and real-time absolute positioning techniques, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), pp. 178–190.
80. Lại Văn Thủy, Du Đức Tiến, Mai Khánh Hưng, Lê Thị Tuyết Nhung, 2021, Xây dựng công thức tính nhiệt độ trung bình cột khí quyển trên lãnh thổ Việt Nam, *Tạp chí Khoa học Đo đạc và Bản đồ*, 50, tr. 16-21.
81. He W., Ho S.P., Chen H., Zhou X., Hunt D., Kuo, Y.H., 2009, Assessment of radiosonde temperature measurements in the upper troposphere and lower stratosphere using COSMIC radio occultation data, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L17807.
82. World Meteorological Organization, 2008, Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, Appendix 4B, WMO-No. 8 (CIMO Guide), Geneva 2008.
83. Zhao Q., Zhang X., Wu K., Liu Y., Li Z., Shi Y., 2022, Comprehensive Precipitable Water Vapor Retrieval and Application Platform Based on Various Water Vapor Detection Techniques, *Remote Sens.*, 14, 2507.
84. Gui K., Che H., Chen Q., Zeng, Z., Liu, H., Wang, Y., Zheng, Y., Sun, T., Liao, T., Wang, H., Zhang, X., 2017, Evaluation of radiosonde, MODIS-NIR-Clear, and AERONET precipitable water vapor using IGS ground-based GPS measurements over China, *Atmospheric Research*, 197, 461–473.
85. Zhao Q., Yang P., Yao W., Yao Y., 2020, Hourly PWV Dataset Derived from GNSS Observations in China, *Sensors*, 20(1), 231.
86. National Center for Atmospheric Research (2013), ARW Version 3 Modeling System User's Guide.
87. Nishimoto E. and Shiotani M., 2012, Seasonal and interannual variability in the temperature structure around the tropical tropopause and its relationship with

- convective activities, *Journal of Geophysical Research*, 117 (D2).
88. Senapeng P., Prahadchai T., Guayjarernpanishk P., Park J.-S., Busababodhin P., 2022, Spatial Modeling of Extreme Temperature in Northeast Thailand, *Atmosphere*, 13(4), 589.
 89. Khedari J., Sangprajak A., Hirunlabh J., 2002, Thailand climatic zones, *Renewable Energy*, 25, pp. 267-280.
 90. Đinh Bá Duy, Ngô Đức Thành, Nguyễn Thị Tuyết, Phạm Thanh Hà, Phan Văn Tân, 2016, Đặc điểm hoạt động của xoáy thuận nhiệt đới trên khu vực Tây Bắc Thái Bình Dương, Biển Đông và vùng trực tiếp chịu ảnh hưởng trên lãnh thổ Việt Nam giai đoạn 1978-2015, *Tạp chí Khoa học ĐHQGHN: Các Khoa học Trái đất và Môi trường*, 32 (2), tr. 1-11.
 91. Frank W. M., 1977, The Structure and Energetics of the Tropical Cyclone: I. Storm Structure, *Monthly Weather Review*, 105, pp. 1119-1135.
 92. Vázquez-Ontiveros J.R., Padilla-Velazco J., Gaxiola-Camacho J.R., Vázquez-Becerra G.E., 2023, Evaluation and Analysis of the Accuracy of Open-Source Software and Online Services for PPP Processing in Static Mode, *Remote Sens.*, 15, 2034.
 93. Phạm Ngọc Toàn, Phan Tất Đắc, 1993, *Khí hậu Việt Nam*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, tr. 1-312.