

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Phạm Ngọc Hoài

**TUYỂN TRÙNG SÔNG BA LAI TRONG ĐIỀU KIỆN TRẦM TÍCH
TỰ KHÍ HYDRO SULFUA, METAN LÀM CHỈ THỊ PHỤC VỤ
GIÁM SÁT VÀ QUẢN LÝ MÔI TRƯỜNG**

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ SINH HỌC
NGÀNH SINH THÁI HỌC**

Mã số: 9 42 01 20

Hà Nội – Năm 2026

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Người hướng dẫn khoa học:

1. Người hướng dẫn 1: PGS.TS. Ngô Xuân Quảng – Viện Khoa học sự sống, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.
2. Người hướng dẫn 2: TS. Nguyễn Minh Ty – Trường Đại học Thủ Dầu Một, Ủy ban nhân dân Thành phố Hồ Chí Minh.

Phản biện 1: PGS.TS. Phạm Thanh Lưu

Phản biện 2: PGS.TS. Trần Ngọc Diễm My

Phản biện 3: TS. Nguyễn Trần Thiện Khánh

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện, họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi 09 giờ 00 phút, ngày 02 tháng 02 năm 2026.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
- Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết

Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) thuộc châu thổ sông Mê Kông, có vai trò chiến lược trong phát triển kinh tế – nông nghiệp của Việt Nam, đồng thời được xem là một trong những “vựa lúa” lớn của thế giới, cung cấp nguồn lương thực quan trọng, đặc biệt là lúa gạo, trái cây và thủy sản cho thị trường nội địa và quốc tế [1, 2]. Tuy nhiên, khu vực này đang chịu tác động mạnh mẽ của biến đổi khí hậu và suy giảm nguồn nước ngọt từ thượng nguồn, dẫn đến xâm nhập mặn và hạn hán nghiêm trọng [3]. Để ứng phó, nhiều công trình thủy lợi, trong đó có các đập và cống ngăn mặn, đã được xây dựng nhằm điều tiết nguồn nước và bảo vệ sản xuất nông nghiệp. Năm 2002, đập Ba Lai là công trình lớn đầu tiên thuộc Dự án Thủy lợi Bắc Bến Tre, được xây dựng chắn ngang cửa sông Ba Lai, một nhánh của hệ thống sông Mê Kông [4]. Việc vận hành cống đập Ba Lai đã mang lại nhiều lợi ích trong kiểm soát lũ, ngăn mặn, trữ ngọt và tưới tiêu, góp phần nâng cao năng suất nông nghiệp và cải thiện đời sống người dân địa phương [5, 6]. Tuy nhiên, song song với các lợi ích đó, đập cũng gây ra những tác động tiêu cực đối với chất lượng môi trường thủy vực. Nhiều nghiên cứu ghi nhận sự thay đổi rõ rệt về đặc điểm hóa-lý và sinh học sau khi đập đi vào hoạt động: tổng chất rắn lơ lửng, kim loại nặng (Hg, Pb) và chất dinh dưỡng (phosphat, nitrat) tăng mạnh ở trong đập [7, 8], trong khi oxy hòa tan giảm và độ đục nước gia tăng [9, 10]. Trầm tích bị giữ lại phía trong đập gây hiện tượng bồi lắng, hình thành vùng nước tù đọng, dẫn đến giảm dung tích chứa nước và gây tình trạng thiếu oxy tầng đáy [11]. Hệ thống sông dần chuyển sang trạng thái “sông - hồ nông”, thúc đẩy quá trình yếm khí, phát sinh metan (CH_4) và hydro sulfua (H_2S), hai khí có ảnh hưởng lớn đến cân bằng sinh thái và chất lượng môi trường [12].

Trong các hệ sinh thái thủy vực, H_2S là chất độc đối với hầu hết sinh vật, có ảnh hưởng mạnh đến khu hệ động vật đáy, đặc biệt là nhóm tuyến trùng [13]. Trong khi đó, tác động của metan đến tuyến trùng còn ít được nghiên cứu, dù khí này thường xuất hiện đồng thời với H_2S trong các trầm tích yếm khí [14]. Nồng độ khí metan và hydro sulfua trong trầm tích có thể làm suy giảm số lượng giống loài và độ phong phú của quần xã tuyến trùng [15]. Tuyến trùng là nhóm sinh vật chỉ thị nhạy cảm, phản ánh nhanh sự thay đổi

môi trường và được sử dụng rộng rãi trong giám sát, đánh giá tác động của con người lên các thủy vực [16].

Từ thực tế đó, nghiên cứu “Tuyến trùng sông Ba Lai trong điều kiện trầm tích tụ khí hydro sulfua, metan làm chỉ thị phục vụ giám sát và quản lý môi trường” được thực hiện, nhằm góp phần xây dựng cơ sở khoa học cho việc đề xuất các giải pháp bảo vệ, sử dụng hợp lý, phục hồi và duy trì bảo tồn đa dạng sinh học ở lưu vực sông Ba Lai là cấp thiết.

2. Mục tiêu nghiên cứu

- Xác định nồng độ khí hydro sulfua và metan phát thải từ trầm tích sông Ba Lai.

- Đánh giá đặc điểm quần xã và cấu trúc phân bố quần xã tuyến trùng sống tự do trong trầm tích sông Ba Lai dưới tác động của các yếu tố môi trường, chủ yếu là khí hydro sulfua và metan.

- Đề xuất ứng dụng tuyến trùng làm công cụ chỉ thị trong quan trắc và quản lý môi trường sông Ba Lai.

3. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

❖ Ý nghĩa khoa học: Kết quả luận án cung cấp cơ sở dữ liệu về phân bố của các giống tuyến trùng sống tự do trong sông Ba Lai phục vụ tra cứu, tham khảo, làm tiền đề cho các nghiên cứu sâu hơn trong công tác bảo tồn đất ngập nước và quản lý môi trường thủy vực. Ngoài ra, bổ sung hoàn thiện phương pháp luận ứng dụng quần xã tuyến trùng là một công cụ chỉ thị ưu việt trong đánh giá chất lượng môi trường nước.

❖ Ý nghĩa thực tiễn: Kết quả nghiên cứu của luận án chỉ ra những tác động của khí CH_4 , H_2S lên quần xã tuyến trùng, khái quát được ảnh hưởng của khí CH_4 , H_2S lên môi trường và hệ sinh vật đáy ở thủy vực. Qua đó, có các giải pháp phù hợp bảo vệ tài nguyên đa dạng sinh học đất ngập nước, và xây dựng cơ sở khoa học cho việc sử dụng, giám sát và quản lý môi trường một cách bền vững. Ngoài ra, nghiên cứu còn mở ra khả năng ứng dụng tuyến trùng làm công cụ quan trắc sinh học để giám sát chất lượng môi trường tại sông Ba Lai và các thủy vực tương tự. Luận án cũng làm rõ tác động của đập chắn đối với môi trường và hệ sinh vật đáy thông qua quần xã tuyến trùng - nhóm sinh vật chỉ thị quan trọng này. Mặt khác cũng góp phần cung cấp luận chứng khoa học quan trọng cho việc xây dựng, vận hành và quản lý các công trình đập chắn - hồ chứa, hướng đến giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN TÀI LIỆU

Chương 1 gồm 29 trang, tổng hợp nghiên cứu trong và ngoài nước về hiện trạng xây dựng đập và các tác động của đập chắn đến chế độ thủy văn, điều kiện lý – hóa, quần xã thủy sinh và sinh thái trầm tích. Mô tả cơ chế hình thành và phát thải khí H_2S , CH_4 và ảnh hưởng của khí H_2S , CH_4 đến đặc điểm thành phần loài, cấu trúc phân bố, đa dạng sinh học quần xã tuyến trùng sống tự do trong trầm tích thủy vực có đập chắn. Khái quát nghiên cứu về đặc điểm sinh thái, mật độ, phân bố của quần xã tuyến trùng vùng cửa sông trên thế giới và ở Việt Nam, đặc biệt vùng cửa sông Mê Kông, và tổng quan tài liệu về đặc điểm tự nhiên – môi trường sông Ba Lai, Bến Tre. Khoảng trống nghiên cứu tại Việt Nam là chưa có sự kết hợp giữa khí H_2S , CH_4 và tuyến trùng trong đánh giá sinh thái vùng cửa sông bị chia cắt.

CHƯƠNG 2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

Chương 2 gồm 11 trang, trình bày về địa điểm khu vực thu mẫu, thời gian nghiên cứu và các phương pháp nghiên cứu sử dụng trong luận án.

2.1 Khu vực và thời gian nghiên cứu: Thu mẫu tại 16 vị trí vùng triều sông Ba Lai (ký hiệu từ G1 đến G16) theo trình tự từ ngoài cửa sông đến thượng nguồn. Mẫu được thu 02 lần trong năm, tương ứng vào mùa khô (tháng III) - khi cống đập đóng và mùa mưa (tháng X)- lúc cống đập mở. Khảo sát 04 đợt thu mẫu: mùa mưa (2019 và 2020), mùa khô (2020 và 2021).

2.2. Phương pháp phân tích khí hydro sulfua (H_2S), khí metan (CH_4) và các yếu tố môi trường trầm tích sông Ba Lai

- Mẫu trầm tích mặt (có sâu 0–10 cm) được thu bằng ống core. Các thông số môi trường (pH, ORP, độ mặn) được đo tại hiện trường bằng thiết bị máy cầm tay; đối với kích thước hạt trầm tích phân tích bằng máy sàng rây RETSCH (Đức) tại phòng thí nghiệm theo Zancanaro và cộng sự (2020) [216].

- Phân tích nồng độ khí hydro sulfua (mM) bằng phương pháp điện cực màng chọn lọc ion theo Brown và cộng sự (2011) [217] và đo nồng độ khí metan (μM) bằng phương pháp sắc ký khí (GC) có đầu dò detector ion hóa ngọn lửa (FID) theo Leloup và cộng sự (2007) [218].

2.3. Phương pháp nghiên cứu quần xã tuyến trùng sống tự do trong trầm tích sông Ba Lai

Dùng ống core cắm sâu xuống nền đáy khoảng 15 cm và thu toàn bộ mẫu trầm tích lớp mặt ở độ sâu 10 cm. Lấy 100gram trầm tích cho vào lọ nhựa thể tích 300 mL, sau đó cố định bằng dung dịch formaldehyde 7%, nóng ở 60°C ngoài hiện trường, và mẫu được bảo quản lạnh vận chuyển về phòng thí nghiệm để tiến hành xử lý và phân tích.

Gạn lọc lấy phần trầm tích từ 38 μm - 1 mm bằng rây, sau đó tách lấy mẫu tuyến trùng bằng phương pháp sử dụng dung dịch Ludox - TM50 (tỉ trọng 1,18) [219]. Nhuộm mẫu với dung dịch Rose Bengal 1% rồi dùng kính lúp soi nổi SZ-COUS PM 01 để xác định mật độ. Gấp ngẫu nhiên 100 cá thể tuyến trùng (mẫu nào dưới 100 thì gấp toàn bộ) xử lý lên tiêu bản theo phương pháp của De Grisse (1969) [220]. Định đến cấp độ giống (genus) theo các khóa phân loại của Platt và Warwick (1983, 1988) [221, 222], Warwick và cộng sự (1988) [223], định danh các giống tuyến trùng nước ngọt theo Zullini (2010) và Nguyễn Vũ Thanh (2007) [224, 225]. Ngoài ra, tham khảo thêm dữ liệu tuyến trùng trực tuyến NEMYS của Đại học Ghent, Vương quốc Bỉ [226].

2.4. Phương pháp phân tích thống kê

2.4.1. Phân tích thống kê số liệu khí CH_4 , H_2S và các thông số môi trường

Dữ liệu khí được xử lý dưới dạng trung bình \pm độ lệch chuẩn bằng phần mềm Microsoft Excel 2019. Kiểm định Shapiro-Wilk và Levene dùng để đánh giá giả định thống kê, dữ liệu không đạt sẽ được chuyển đổi log hoặc căn bậc hai. Nếu thỏa điều kiện, ANOVA hai yếu tố được áp dụng để kiểm tra ảnh hưởng của “mùa”, “vị trí” và tương tác giữa chúng; nếu không, sử dụng phi tham số PERMANOVA hai yếu tố. Phân tích hậu kiểm Tukey HSD hoặc so sánh cặp được thực hiện khi có khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$). Tương quan Pearson được áp dụng để đánh giá mối liên hệ giữa khí CH_4 , H_2S và yếu tố môi trường, và mô hình hồi quy được xây dựng dựa trên R^2 cao và p -value $< 0,05$. Phân tích thực hiện bằng Statgraphics Centurion 18 và PRIMER v.6 + PERMANOVA.

2.4.2. Phân tích thống kê số liệu về quần xã tuyến trùng

Số liệu mật độ và đa dạng QXTT được kiểm định phân phối chuẩn (Shapiro-Wilk) và phương sai đồng nhất (Levene). Nếu thỏa mãn, ANOVA hai yếu tố và Tukey HSD được sử dụng; nếu không, dữ liệu được chuyển đổi hoặc phân tích bằng PERMANOVA. Phân tích đa biến gồm CLUSTER +

SIMPROF và MDS đánh giá sự khác biệt và cấu trúc phân bố QXTT. Tương quan giữa QXTT, thông số môi trường và khí H₂S, CH₄ được xác định bằng Spearman. Phân tích thực hiện bằng STATISTICA 7.0, Excel 2019 tích hợp XLSTAT-R engine, PRIMER 6.0 và Statgraphics Centurion 18.

2.5. Phương pháp đánh giá sức khỏe sinh thái nền đáy sông Ba Lai

Sức khỏe sinh thái nền đáy được đánh giá thông qua phân loại tuyến trùng theo hệ số c-p (1–5) phản ánh mức độ chịu đựng và phục hồi sinh thái. Chỉ số sinh trưởng tuyến trùng (MI) được tính theo Bongers (1991) nhằm đánh giá mức độ xáo trộn môi trường. Đa dạng sinh học được xác định bằng chỉ số Shannon–Weiner (H'), trong khi chỉ số đa dạng dinh dưỡng tuyến trùng (ITD) phản ánh mức thay đổi nguồn dinh dưỡng. Ngưỡng giá trị các chỉ số MI, H' và ITD được đối chiếu với bảng 2.3 phân loại chất lượng môi trường theo Moreno và cộng sự (2011). Trường hợp các chỉ số cho kết quả không đồng nhất, chất lượng môi trường được xác định theo trung bình cộng các hạng đánh giá theo Chen và cộng sự (2018) (Hình 2.8).

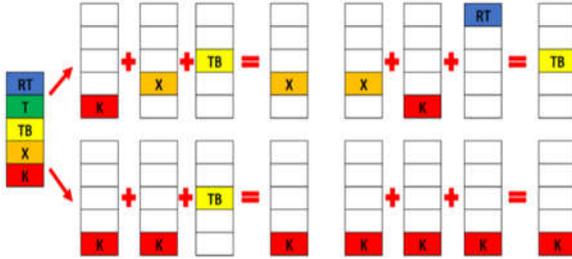
Bảng 2.3. Ngưỡng phân loại chất lượng môi trường theo các đặc điểm của quần xã tuyến trùng được sử dụng bởi Moreno và cộng sự (2011) [186]

Chất lượng môi trường	% c-p	Chỉ số MI (Maturity Index)	Chỉ số Shannon – Weiner (H')	Chỉ số ITD
Rất tốt	c-p 2 ≤ 50% c-p 4 > 10%	MI > 2,8	H' > 4,5	0 < ITD ≤ 0,25
Tốt	c-p 2 ≥ 50% c-p 4 > 10%	2,8 ≤ MI < 2,6	3,5 < H' < 4,5	0,25 < ITD ≤ 0,4
Trung bình	c-p 2 ≥ 50% 3 < c-p 4 < 10%	2,6 ≤ MI < 2,4	2,5 < H' < 3,5	0,4 < ITD ≤ 0,6
Xấu/thấp	c-p 2 > 60% c-p 4 < 3%	2,4 ≤ MI < 2,2	1 < H' ≤ 2,5	0,6 < ITD ≤ 0,8
Kém	c-p 2 > 80%	MI ≤ 2,2	0 < H' ≤ 1	0,8 < ITD ≤ 1

- Phương pháp xác định các giống tuyến trùng nhạy cảm và chống chịu đối với khí hydro sulfua và khí metan:

Mật độ các giống tuyến trùng ghi nhận trong nghiên cứu sẽ được phân tích tương quan phân hạng Spearman với hàm lượng từng khí H₂S và CH₄ có trong trầm tích. Những giống tuyến trùng có mật độ tương quan thuận có ý nghĩa thống kê với hàm lượng khí H₂S và CH₄ sẽ được ghi nhận là giống

tuyến trùng có khả năng chống chịu với khí H_2S và CH_4 vì khi hàm lượng khí tăng sẽ dẫn đến tăng mật độ cá thể do giống tuyến trùng này có khả năng thích nghi với môi trường có hàm lượng khí hydro sulfua và khí metan cao. Ngược lại, các giống tuyến trùng có mật độ tương quan nghịch có ý nghĩa thống kê với hàm lượng khí H_2S và CH_4 sẽ được ghi nhận là giống tuyến trùng có nhạy cảm với khí hydro sulfua và khí metan do chúng suy giảm mật độ khi ở môi trường có hàm lượng khí hydro sulfua và khí metan cao.



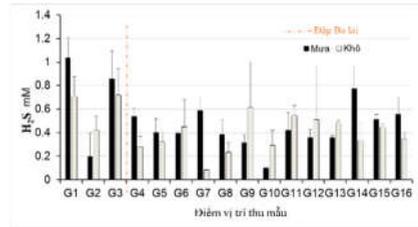
Hình 2.8. Nguyên tắc đánh giá chất lượng môi trường tổng hợp từ các chỉ số khác nhau (Điều chỉnh từ Chen và cộng sự, 2018) [235]

CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc điểm thông số môi trường trầm tích sông Ba Lai

3.1.1. Khí hydro sulfua

Vào cả mùa mưa và mùa khô, nồng độ khí H_2S tại sông Ba Lai có xu hướng cao ở ba khu vực chính: ngoài đập, trong chân đập và thượng nguồn, trong khi đoạn giữa sông luôn ghi nhận giá trị thấp. Mùa mưa, H_2S ngoài đập dao động từ 0,19 đến 1,03 mM, cao hơn trong đập (0,1-0,77 mM), với nồng độ cao tập trung ở cửa sông (trừ G2), khu vực chân đập (G4-G7), và thượng nguồn (G14-G16). Mùa khô ghi nhận quy luật tương tự, với H_2S ngoài đập từ 0,42 đến 0,71 mM, trong chân đập (G4-G6) từ 0,27 đến 0,44 mM và thượng nguồn (G11-G16) từ 0,33 đến 0,54 mM. Đoạn giữa sông, khu vực giao với kênh An Hóa và sông Bến Tre (G7-8), luôn duy trì nồng độ thấp nhất, chỉ từ 0,08 đến 0,31 mM (Hình 3.1). Nhìn chung, giữa mùa mưa và mùa khô giá trị H_2S không có sự khác biệt ý nghĩa ($p = 0,14$), tuy nhiên so sánh giữa các vị trí lại có sự khác biệt thống kê ($p <$

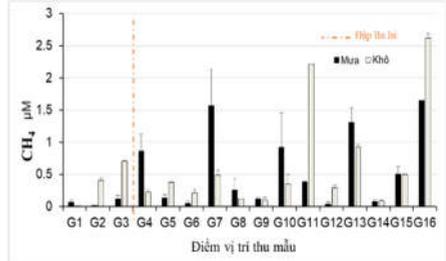


Hình 3.1. Nồng độ khí H_2S đo tại các vị trí khảo sát trên sông Ba Lai vào mùa mưa và mùa khô

0,001), cụ thể G1 và G3 có nồng độ khí H₂S cao hơn so với các vị trí khác (Hình 3.2, và Phụ lục 2).

3.1.2. Khí metan

Trong mùa mưa, phần lớn các vị trí khảo sát trên sông Ba Lai có nồng độ khí CH₄ thấp (0,01-0,51 μM), ngoại trừ một số điểm như G4, G7, G10, G13 và G16 có giá trị cao bất thường (lên đến 1,64 μM). Sang mùa khô, nồng độ CH₄ tăng đáng kể và có sự khác biệt thống kê so với mùa mưa ($p = 0,02$). Một số vị trí



Hình 3.4. Nồng độ khí CH₄ đo tại các vị trí khảo sát trên sông Ba Lai vào mùa mưa và mùa khô

như G13 và G16 tiếp tục duy trì nồng độ CH₄ cao trong mùa khô (lần lượt là 0,91 và 2,62 μM), trong khi các điểm G4, G7 và G10 giảm. Ngược lại, các vị trí G2, G3, G11 và G16 ghi nhận mức CH₄ tăng mạnh vào mùa khô, với G11 và G16 đạt giá trị rất cao, lần lượt là 2,21 và 2,62 μM (Hình 3.4). Kết quả phân tích hậu kiểm Tukey HSD cho thấy G16 có nồng độ CH₄ cao khác biệt với các vị trí còn lại, ngoài ra, nhóm các vị trí như G7, G11, G13 cũng có nồng độ CH₄ cao khác biệt ý nghĩa với các vị trí còn lại (Hình 3.5b, Phụ lục 2).

3.1.3. Một số đặc điểm môi trường khác

3.1.3.1. Độ pH

Mùa mưa ghi nhận giá trị pH từ $6,78 \pm 0,03$ đến $7,28 \pm 0,008$. Các vị trí có giá trị pH > 7 bao gồm G2, G8 có giá trị pH lần lượt là $7,28 \pm 0,008$ và $7,26 \pm 0,04$; ngược lại G12 và G13 có pH khá thấp, chỉ đạt $6,84 \pm 0,05$ và $6,78 \pm 0,03$. Hầu hết các vị trí còn lại có giá trị pH gần trung tính. Dễ thấy pH mùa mưa cao hơn hẳn khi so với mùa khô ($p\text{-mùa} < 0,001$). Vị trí G2 và G3 ngoài đập Ba Lai tiếp tục ghi nhận pH cao, nhất là G2 với pH là $7,20 \pm 0,04$. Nhóm các vị trí trong chân đập Ba Lai (G4, G5, G6) có pH thấp, tương ứng là $6,93 \pm 0,09$; $6,78 \pm 0,03$; $6,81 \pm 0,05$. Tương tự, nhóm các vị trí thượng nguồn Ba Lai cũng có giá trị pH thấp, đặc biệt là G12, G13, và G14 với $6,77 \pm 0,01$; $6,69 \pm 0,01$; $6,76 \pm 0,05$.

3.1.3.2. Độ mặn

Trừ vị trí G1 có độ mặn mùa khô và mùa mưa gần tương đương nhau (mưa: $19,47 \pm 0,87$ g/L; khô: $18,07 \pm 0,48$ g/L), các vị trí còn lại đều ghi nhận độ mặn mùa mưa thấp hơn mùa khô ($p\text{-mùa} < 0,001$). Giống như các con sông khác trong hệ thống sông Mê Kông, mùa mưa (tháng 6-12) là lúc nước ngọt từ thượng nguồn đổ về, làm giảm độ mặn vùng cửa sông. Độ mặn sông Ba Lai chia làm 2 phần rõ rệt: độ mặn trong đập thấp và độ mặn ngoài đập cao ($p\text{-vị trí} < 0,001$). Trong mùa mưa, các vị trí ngoài đập Ba Lai có độ mặn từ $7,52 \pm 0,16$ g/L đến $19,47 \pm 0,97$ g/L, trong đập từ $0,26 \pm 0,0005$ g/L đến $1,54 \pm 0,31$ g/L. Sang mùa khô, độ mặn tăng lên ở cửa sông từ $15,36 \pm 0,01$ g/L lên $19,43 \pm 0,47$ g/L, trong đập từ $1,61 \pm 0,11$ g/L tăng lên $4,41 \pm 0,20$ g/L.

3.1.3.3. Thế oxy hóa khử

Trong cả hai mùa, giá trị ORP tại các vị trí khảo sát trên sông Ba Lai đều âm, phản ánh môi trường có tính khử do trầm tích giàu chất hữu cơ. Mùa mưa ghi nhận ORP dao động từ $-339,95$ mV (G4) đến $-170,50$ mV (G12), còn mùa khô có phạm vi biến động từ $-266,85$ mV (G13) đến $-117,1$ mV (G2). Một số vị trí như G2, G6 và G12 có ORP khá thấp vào mùa khô. Nhìn chung, ORP có xu hướng tăng nhẹ vào mùa mưa ($p = 0,045$), do nước mưa giàu H^+ làm tăng khả năng ion hóa và thúc đẩy phản ứng oxy hóa khử trong môi trường trầm tích, từ đó ảnh hưởng đến sự biến động của các hợp chất khí và thành phần nền mẫu.

3.1.3.4. Thành phần trầm tích

Cả hai mùa khảo sát đều cho thấy tỷ lệ bùn chiếm ưu thế rõ rệt trong thành phần trầm tích tại tất cả các vị trí, phản ánh đặc trưng trầm tích mịn của sông Ba Lai. Tuy nhiên, tỷ lệ bùn có xu hướng giảm nhẹ từ mùa mưa sang mùa khô ($p = 0,001$), trong khi tỷ lệ cát và sét lại có xu hướng tăng ($p_{\text{cát}} = 0,002$; $p_{\text{sét}} = 0,01$). Cụ thể, mùa mưa ghi nhận tỷ lệ bùn cao nhất đến $94,15\%$ (G7), trong khi mùa khô tỷ lệ bùn dao động thấp hơn, tối đa chỉ $91,03\%$ (G9). Tỷ lệ cát và sét mùa mưa nhìn chung thấp, nhưng tăng rõ rệt vào mùa khô, đặc biệt ở một số vị trí như G14 và G16 (cát) hay G5 và G7 (sét). Sự thay đổi này phản ánh quá trình bồi lắng và tái phân bố hạt trầm tích theo mùa, có thể chịu ảnh hưởng từ lưu lượng dòng chảy, hoạt động khai thác nước, và biến động về nguồn vật chất từ thượng nguồn.

3.1.4. Mối liên hệ giữa khí metan, khí hydro sulfua trong trầm tích và một số đặc điểm yếu tố môi trường sông Ba Lai

Mùa mưa ghi nhận nồng độ khí chỉ tương quan với độ mặn, trong khi H₂S ghi nhận tương quan thuận với độ mặn ($p = 0,027$, $r = 0,391$) thì CH₄ tương quan nghịch với độ mặn ($p = 0,018$, $r = -0,417$). Sang mùa khô, độ mặn tiếp tục tương quan thuận với H₂S ($p = 0,046$, $r = 0,355$) nhưng không ghi nhận tương quan với CH₄. Khí H₂S ngoài tương quan thuận với độ mặn thì còn ghi nhận tương quan nghịch với % sét ($p = 0,008$, $r = -0,460$). Ngoài ra, mùa khô ghi nhận CH₄ có tương quan thuận với % cát ($p = 0,011$, $r = -0,441$) và tương quan nghịch với % bùn ($p = 0,033$, $r = -0,377$). Khi phân tích tổng hợp 2 mùa khảo sát thì ghi nhận H₂S tương quan thuận với độ mặn ($p = 0,041$, $r = 0,257$), tương quan nghịch với % sét ($p = -0,298$, $r = 0,017$) và ngược lại CH₄ tương quan nghịch với độ mặn ($p = 0,044$, $r = -0,252$).

3.2. Đặc trưng quần xã tuyến trùng sống tự do trong trầm tích sông Ba Lai theo mùa

3.2.1. Cấu trúc thành phần loài quần xã tuyến trùng sống tự do trong trầm tích sông Ba Lai

Cả 02 mùa khảo sát ghi nhận 190 giống, 67 họ, 11 bộ, và 2 lớp. Nhìn chung, trong QXTT sông Ba Lai, lớp Chromadorea vẫn chiếm ưu thế tuyệt đối (90,54%) khi so với Enoplea (9,46%). Bộ Monhysterida chiếm ưu thế tuyệt đối trong quần xã với 60,65%, sau đó là Araeolaimida (14,15%), Chromadorida (8,27%), và Enoplida (7,17%). Họ Xyalidae và Monhysteridae có vai trò quan trọng trong quần xã, với tỷ lệ ưu thế lần lượt là 37,10% và 12,88%, sau đó sẽ là các họ Axonolaimidae (9,70%), Linhomoeidae (9,52%), Chromadoridae (5,47%), và Comesomatidae (4,11%). Sự ưu thế của họ Xyalidae là do đóng góp của 2 giống thuộc họ này là *Daptonema* và *Theristus*. Ngoài ra, một số giống khác như *Parodontophora*, *Terschellingia*, và *Monhystera* cũng có ưu thế khá cao trong quần xã.

3.2.2. Mật độ quần xã

Mật độ trung bình quần xã tuyến trùng trên sông Ba Lai ghi nhận sự biến động rõ rệt theo mùa và vị trí khảo sát. Vào mùa mưa, mật độ dao động từ 76 ± 7 cá thể/10cm² tại vị trí G6 đến 2379 ± 63 cá thể/10cm² tại G3, trong khi các vị trí ngoài cửa sông như G1 và G2 cũng có mật độ cao, lần lượt là 430 ± 215 và 911 ± 303 cá thể/10cm². Ngược lại, các vị trí trong đập Ba Lai

như G9, G14 và G16 ghi nhận mật độ thấp dưới 100 cá thể/10cm², với các vị trí còn lại dao động từ 117 ± 59 đến 895 ± 208 cá thể/10cm². Mật độ có xu hướng tăng dần từ cửa sông vào trong đập, vị trí ngoài đập thường cao hơn trong đập, đặc biệt vị trí chân đập ghi nhận mật độ khá cao, tuy nhiên các vị trí còn lại không theo quy luật rõ ràng. Trong mùa khô, mật độ trung bình tăng lên, dao động từ 173 ± 21 cá thể/10cm² tại G15 đến 1642 ± 1215 cá thể/10cm² tại G2. Một số vị trí như G1, G3, G5, G7 và G8 ghi nhận mật độ cao từ 793 đến 1946 cá thể/10cm², trong khi vị trí thượng nguồn G16 và G6 cũng có mật độ khá cao. Mật độ trong mùa khô cũng có xu hướng tăng từ cửa sông vào đập, với đoạn giữa sông (G5-G8) ghi nhận mật độ khá cao, còn thượng nguồn đa phần thấp ngoại trừ G16. Phân tích ANOVA 2 yếu tố và hậu kiểm Tukey HSD cho thấy mật độ QXTT mùa khô cao hơn đáng kể so với mùa mưa ($p < 0,001$) và có sự khác biệt ý nghĩa giữa các vị trí ($p < 0,001$), trong đó các vị trí G2, G3, G5, G7, G8 có mật độ cao và khác biệt rõ ràng so với các vị trí còn lại.

3.2.3. Đa dạng sinh học quần xã

3.2.3.1. Chỉ số phong phú giống (S)

Chỉ số phong phú về giống (S) của QXTT trên sông Ba Lai biến động theo mùa và vị trí. Mùa mưa, chỉ số S cao nhất tại G2 (32,00 ± 3,00) và ngoài đập Ba Lai (G1: 31,00 ± 2,65; G3: 25,67 ± 3,79), thấp tại G12 (14,33 ± 4,04) và một số vị trí trong đập (G5, G6, G14, G16). Mùa khô, chỉ số S tiếp tục cao ở ngoài đập (G1-G3: 26-29) và các vị trí thượng nguồn (G10-G15: 27,33-38,00), thấp nhất tại G16 (12,00 ± 1,73). Phân tích ANOVA 2 yếu tố cho thấy chỉ số S có sự khác biệt có ý nghĩa theo mùa ($p < 0,001$), vị trí ($p < 0,001$) và tương tác mùa*vị trí ($p < 0,001$). Hậu kiểm Tukey HSD chỉ ra mùa khô có chỉ số S cao hơn mùa mưa, đồng thời vị trí G16 có chỉ số thấp hơn rõ rệt so với các vị trí khác.

3.2.3.2. Chỉ số đa dạng Margalef (d)

Chỉ số đa dạng Margalef (d) của QXTT trên sông Ba Lai thay đổi theo mùa và vị trí khảo sát. Vào mùa mưa, chỉ số d dao động từ 2,46 ± 0,16 tại G5 đến 5,53 ± 0,77 tại G9. Chỉ số d có xu hướng giảm dần từ cửa sông về đập Ba Lai, với các giá trị 5,02 ± 0,28; 4,59 ± 0,61 và 3,18 ± 0,39 lần lượt ở G1, G2 và G3. Trong đập Ba Lai, vị trí G4 và G12 ghi nhận chỉ số d thấp, tương ứng 2,88 ± 0,37 và 2,85 ± 0,63, trong khi các vị trí đoạn giữa sông (G7-G11) có chỉ số d cao hơn, từ 3,66 ± 0,60 đến 5,53 ± 0,77. Ở thượng

nguồn (G14-G16), chỉ số d nằm trong khoảng từ $3,66 \pm 0,94$ đến $4,60 \pm 0,56$. Nhìn chung, vào mùa mưa, hầu hết các vị trí có chỉ số đa dạng cao, ngoại trừ các vị trí gần chân đập Ba Lai. Sang mùa khô, chỉ số d dao động từ $1,64 \pm 0,26$ tại G16 đến $6,94 \pm 1,50$ tại G11. Ở ba vị trí ngoài đập Ba Lai (G1, G2, G3), chỉ số d tương đương nhau, lần lượt là $3,85 \pm 1,36$; $3,73 \pm 0,10$ và $3,92 \pm 0,61$. Đoạn giữa sông Ba Lai (G5-G9) có chỉ số d thấp hơn, từ $2,69 \pm 0,27$ đến $3,34 \pm 0,35$, trong khi thượng nguồn (G10-G15) ghi nhận chỉ số d khá cao, từ $5,13 \pm 0,61$ đến $6,94 \pm 1,50$. Tổng quan mùa khô, vị trí ngoài đập và thượng nguồn sông Ba Lai có chỉ số đa dạng cao hơn. Phân tích ANOVA 2 yếu tố cho thấy chỉ số Margalef không có khác biệt ý nghĩa theo mùa ($p = 0,053$), nhưng có sự khác biệt theo vị trí ($p < 0,001$) và tương tác mùa * vị trí có ý nghĩa ($p < 0,001$). Hậu kiểm Tukey HSD xác định vị trí G16 có chỉ số d thấp khác biệt có ý nghĩa so với các vị trí còn lại (Hình 3.27, Phụ lục 6).

3.2.3.3. Chỉ số đa dạng Shannon-Weiner ($H' \log_2$)

Chỉ số đa dạng Shannon-Weiner (H') của quần xã tuyến trùng mùa mưa thấp tại các vị trí G4, G5, G6, G12, G13 (2,25–2,73), trong khi các vị trí còn lại cao hơn, đặc biệt ngoài đập Ba Lai (G1–G3), đạt giá trị cao (3,11–4,12). Mùa khô, H' dao động từ $2,19 \pm 0,09$ (G16) đến $4,47 \pm 0,22$ (G10), với các vị trí ngoài đập vẫn giữ giá trị cao (dao động 3,6–3,9), trong khi các vị trí như G7–G9 và G16 có H' thấp (dao động 2,2–2,6). Phân tích ANOVA cho thấy chỉ số H' khác biệt có ý nghĩa theo mùa ($p < 0,001$), vị trí ($p < 0,001$) và tương tác mùa * vị trí ($p < 0,001$). Hậu kiểm Tukey HSD xác định mùa khô có H' cao hơn, và G16 là vị trí có chỉ số H' thấp khác biệt so với các vị trí khác.

3.2.3.4. Chỉ số đồng đều Pielou (J')

Vào mùa mưa, chỉ số đồng đều Pielou (J') của tuyến trùng dao động từ $0,55 \pm 0,16$ (G6) đến $0,83 \pm 0,06$ (G14), với các vị trí ngoài đập như G1, G2 đạt khoảng 0,82, còn các vị trí trong đập như G4, G5, G13 có chỉ số thấp hơn (0,55–0,66). Mùa khô, J' thay đổi từ $0,56 \pm 0,14$ (G7) đến $0,84$ (G10, G11, G15), trong đó G1 ngoài đập cũng cao $0,84 \pm 0,04$, còn thượng nguồn G16 thấp nhất $0,61 \pm 0,02$. Phân tích ANOVA cho thấy J' không khác biệt theo mùa ($p = 0,063$), nhưng khác biệt theo vị trí ($p < 0,001$) và tương tác mùa* vị trí ($p < 0,001$). Hậu kiểm Tukey HSD xác định G6 và G7 có J' thấp hơn đáng kể so với G1, G11 và G14.

3.2.3.5. Chỉ số đa dạng Hill (N_1, N_2, N_{inf})

Vào mùa mưa, chỉ số đa dạng Hill (N_1 , N_2 , N_{inf}) của tuyến trùng ngoài đập Ba Lai cao, với N_1 từ $11,83 \pm 1,90$ đến $17,69 \pm 3,95$; N_2 từ $7,45 \pm 0,50$ đến $12,14 \pm 4,08$; N_{inf} từ $3,77 \pm 0,58$ đến $5,73 \pm 1,35$. Khu vực chân đập (G4–G6) và G12, G13 có chỉ số thấp hơn (N_1 : $5,27 \pm 2,83$ đến $6,72 \pm 1,27$). Đoạn giữa sông và thượng nguồn có giá trị trung bình cao (N_1 : $8,73 \pm 1,76$ đến $12,80 \pm 1,25$). Mùa khô, chỉ số Hill tăng ở ngoài đập và thượng nguồn (N_1 : $12,48 \pm 2,27$ đến $22,34 \pm 3,19$), đặc biệt chân đập tăng mạnh (N_1 : $18,52 \pm 3,68$). Tuy nhiên, G5-G9 và G16 có chỉ số thấp hơn. Phân tích ANOVA cho thấy chỉ số đa dạng Hill khác biệt theo mùa, vị trí và có sự tương tác giữa hai yếu tố ($p < 0,001$), với mùa khô có giá trị cao hơn và G16 thấp hơn đáng kể so với các vị trí khác. Quần xã tuyến trùng ở sông Ba Lai có mật độ và đa dạng sinh học tương đối cao khi so với một số khu vực trên Thế giới, khu vực Đông Nam Á và Việt Nam, thí dụ ở bờ biển Northumberland, Anh [260]; Địa Trung Hải [261]; các sông Elbe, Oder, Rhine, Đức [262]; sông Taro và Ticino, Italy [263] (Phụ lục 7). Khi so sánh QXTT với các nghiên cứu khác cùng lưu vực sông Ba Lai (tỉnh Bến Tre cũ) cho thấy, QXTT vùng triều (trong nghiên cứu này, Ngo và cộng sự (2016) [7], Tran và cộng sự (2022) [173], Nguyen và cộng sự (2022) [170]) thường mật độ và đa dạng sinh học cao hơn vùng dưới triều (Bảng 3.2).

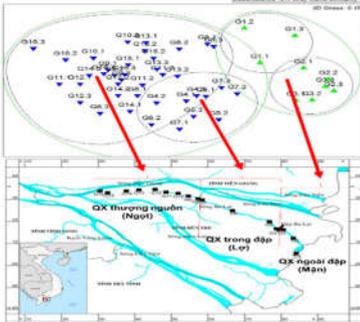
3.2.4. Cấu trúc phân bố

3.2.4.1. Mùa mưa

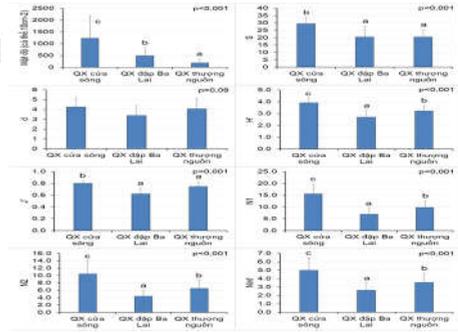
Áp dụng phân tích đa biến MDS cho quần xã tuyến trùng sông Ba Lai vào mùa mưa cho thấy, cấu trúc phân bố ở mức tương đồng 30% thì toàn bộ QXTT chia thành 2 quần xã: Ngoài đập (G1-G3), trong đập (G4-G16). Tuy nhiên, khi phân tích ở mức độ tương đồng 40% thì QXTT sông Ba Lai chia làm 3 quần xã: Ngoài đập (G1-G3, bao gồm 2 quần xã nhỏ là cửa sông G1 và ngoài gần chân đập Ba Lai G2, 3), trong đập bao gồm 2 quần xã nhỏ là trong đập G4-7 và thượng nguồn G8-16) (Hình 3.36).

Kết quả phân tích PERMANOVA cho thấy 03 quần xã tại sông Ba Lai có sự khác biệt rõ rệt về cấu trúc thành phần quần xã ($p = 0,001$), phản ánh đặc điểm sinh thái riêng biệt phù hợp với từng điều kiện môi trường. Quần xã ngoài đập ghi nhận mật độ và đa dạng sinh học cao nhất với mật độ khoảng 1240 ± 953 cá thể/10 cm², trong khi QX đập Ba Lai và thượng nguồn có mật độ thấp hơn, lần lượt là 492 ± 356 và 188 ± 169 cá thể/10 cm². Các chỉ số đa dạng như số giống (S), chỉ số Shannon-Wiener (H'), chỉ số đồng đều Pielou

(J') và chỉ số Hill đều cho thấy QX ngoài đập vượt trội hơn so với 02 quần xã còn lại. Cụ thể, chỉ số H' ở QX ngoài đập đạt $3,92 \pm 0,37$, trong khi QX đập Ba Lai và thượng nguồn chỉ có giá trị lần lượt là $2,70 \pm 0,57$ và $3,22 \pm 0,44$. Mặc dù mật độ QX thượng nguồn thấp hơn QX đập Ba Lai, nhưng đa dạng sinh học tại thượng nguồn lại cao hơn.



Hình 3.36. Phân tích MDS cấu trúc phân bố trung bình của QXTT vào mùa mưa



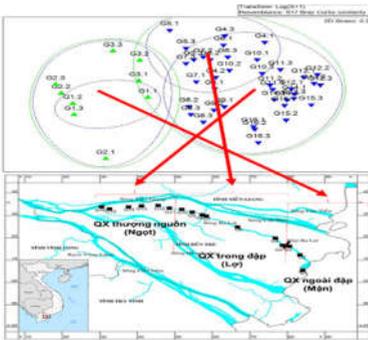
Hình 3.37. Đặc trưng sinh thái của 3 QXTT sông Ba Lai vào mùa mưa. (Kết quả hậu kiểm Tukey HSD thể hiện qua ký tự a, b, c cùng ký tự thì không khác biệt)

Phân tích ANOVA ghi nhận sự khác biệt ý nghĩa về mật độ và hầu hết các chỉ số đa dạng (trừ chỉ số đa dạng Margalef, d) giữa các quần xã. Kết quả hậu kiểm Tukey HSD cho thấy mật độ, chỉ số H' và Hill của quần xã cửa sông (ngoài đập) cao hơn đáng kể so với QX thượng nguồn và đập Ba Lai, trong khi chỉ số S và J' không có sự khác biệt đáng kể giữa QX thượng nguồn và đập Ba Lai (Hình 3.37).

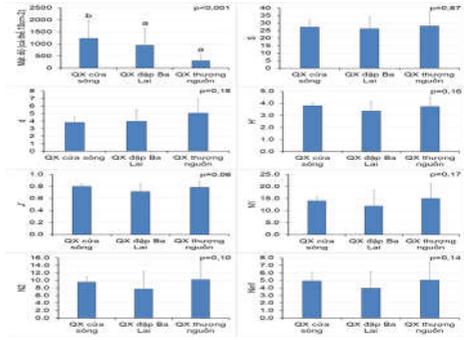
Kết quả phân tích SIMPER tỷ lệ tương đồng và các giống đóng góp vào sự tương đồng của từng nhóm quần xã tuyến trùng sông Ba Lai (ở mùa mưa) thể hiện trong Bảng 3.3. Tỷ lệ tương đồng ở từng nhóm quần xã gần như tương đương nhau, từ 49,90% đến 50,74%. Các giống *Daptonema*, *Parodontophora*, *Terschellingia*, và *Theristus* có khả năng thích nghi cao nên xuất hiện ở cả 3 quần xã. Các giống *Leptolaimoides*, *Linhystra*, *Paracomesoma*, *Spilophorella*, và *Trissonchulus* là những giống thuần mặn, xuất hiện ở quần xã ngoài đập. Các giống thuần ngọt bao gồm *Adoncholaimus*, *Eumonhystra*, *Monhystrilla* ưu thế quần xã trong đập Ba Lai.

3.2.4.2. Mùa khô

Áp dụng phân tích đa biến MDS cho cấu trúc QXTT trong mùa khô cho thấy phân bố ở mức tương đồng 30% thì QXTT vẫn chia thành 2 quần xã: Ngoài đập (G1-G3), trong đập (G4-G16). Tuy nhiên, nếu phân tích ở mức độ tương đồng 40% thì QXTT sông Ba Lai vẫn tiếp tục chia làm 3 quần xã: Ngoài đập (G1-G3), trong đập (G4-G10), thượng nguồn (G11-G16). Rõ ràng, sang mùa khô quần xã trong đập đã được mở rộng ra đến vị trí G10, tức vượt qua ngã ba An Hóa (Hình 3.38). Trong khi mùa mưa, quần xã trong đập chỉ giới hạn từ G4-G7, từ ngã ba An Hóa đến đập Ba Lai.



Hình 3.38. Phân tích MDS cấu trúc phân bố trung bình của QXTT vào mùa khô



Hình 3.39. Đặc trưng sinh thái của 3 QXTT sông Ba Lai vào mùa khô. (Kết quả hậu kiểm Tukey HSD thể hiện qua ký tự a, b, c cùng ký tự thì không khác biệt)

Kết quả phân tích PERMANOVA tiếp tục cho thấy 03 quần xã trên sông Ba Lai có sự khác biệt rõ rệt trong cấu trúc thành phần quần xã (Pseudo-F = 10,95; $p = 0,001$), khẳng định mỗi quần xã mang đặc điểm riêng và đại diện cho các điều kiện môi trường khác nhau. Nhìn chung, QX ngoài đập có mật độ cá thể và đa dạng sinh học cao hơn đáng kể so với QX trong đập Ba Lai và thượng nguồn (p -mật độ < 0,001), với mật độ lần lượt là 1236 ± 735 cá thể/10cm² ngoài đập, 953 ± 704 cá thể/10cm² trong đập và 307 ± 244 cá thể/10cm² ở thượng nguồn. Phân tích hậu kiểm Tukey HSD cho thấy mật độ giữa QX trong đập Ba Lai và thượng nguồn không khác biệt ý nghĩa, đồng thời các chỉ số đa dạng không ghi nhận sự khác biệt có ý nghĩa giữa 03 quần xã ($p > 0,05$) (Hình 3.39). Sang mùa khô, phạm vi phân bố của QX đập Ba Lai được mở rộng, tuy nhiên các chỉ số đa dạng giữa các quần xã vẫn không

có khác biệt ý nghĩa, chỉ có sự khác biệt rõ ràng về cấu trúc thành phần loài giữa các quần xã. Điều này cho thấy cấu trúc thành phần loài phản ứng nhạy bén hơn với biến đổi môi trường so với các chỉ số đa dạng, phản ánh sự thay đổi và điều kiện môi trường tại từng khu vực của sông Ba Lai.

Phân tích SIMPER tỷ lệ tương đồng và các giống đóng góp vào sự tương đồng của từng nhóm quần xã tuyển trùng sông Ba Lai mùa khô thể hiện trong Bảng 3.7. Tỷ lệ tương đồng ở quần xã ngoài đập và quần xã trong đập khá thấp, chỉ 43,83% và 45,11%, trong khi quần xã thượng nguồn tỷ lệ tương đồng cao hơn (51,67%). Mùa khô xuất hiện nhiều giống có khả năng phân bố rộng, xuất hiện ở ít nhất 2 hệ sinh thái: *Daptonema*, *Dichromadora*, *Eumonhystera*, *Linhystera*, *Monhystera*, *Mononchulus*, *Parodontophora*, *Sphaerolaimus*, *Sphaerotheristus*, *Terschellingia*, *Thalassomonhystera*, *Theristus*, *Tobrilus*. Ở quần xã ngoài đập, xuất hiện nhiều giống thuần mặn điển hình như: *Aegialoalaimus*, *Anoplostoma*, *Eleutherolaimus*, *Halalaimus*, *Haliplectus*, *Hopperia*, *Onyx*, *Paracomesoma*, *Paracyatholaimus*, *Pierrickia*, *Pseudolella*, *Sabatieria*, *Sphilophorella*, *Trissonchulus*. Rõ ràng, hầu hết các giống ưu thế ở 2 quần xã trong đập Ba Lai là các giống có phân bố rộng, thích nghi với môi trường nước ngọt, lợ.

3.2.5. Chỉ số c-p (colonizer-persister) và chỉ số sinh trưởng MI (Maturity Index) của quần xã tuyển trùng

Trong mùa mưa, nhóm tuyển trùng c-p 1&2 chiếm ưu thế tại hầu hết các vị trí, đặc biệt tại chân đập Ba Lai (G4: 94,01%; G5: 92,46%) và ngoài đập (G2: 68,35%-G3: 88,00%), trong khi các vị trí giữa sông như G8 và G10 có tỷ lệ thấp (40,86% và 51,44%). Mùa khô, xu hướng tương tự nhưng tỷ lệ giảm tại ngoài đập (G2: 43,67%). Phân tích ANOVA 02 yếu tố cho thấy sự khác biệt theo vị trí ($p = 0,009$), nhưng không theo mùa ($p = 0,96$); vị trí G3, G4, và G16 nhìn chung có tỷ lệ nhóm c-p 1&2 thấp hơn các vị trí còn lại (Hình 3.41, Phụ lục 8).

Nhóm c-p 3 có tỷ lệ tương đối thấp trong mùa mưa, phổ biến từ 4,33% (G12) đến 12,78% (G2), ngoại trừ G8 tăng đột biến đạt 29,96%. Khu vực chân đập (G4-G6) ghi nhận tỷ lệ rất thấp (0,79%-1,88%). Trong mùa khô, tỷ lệ nhóm này tăng rõ rệt và khác biệt có ý nghĩa so với mùa mưa ($p < 0,001$),

đặc biệt tại G2 (50,23%) và G3 (34,77%). Chân đập Ba Lai cũng ghi nhận mức tăng đáng kể (G4: 17,88%; G5: 12,79%; G6: 12,44%), trong khi khu vực thượng nguồn duy trì ổn định (4,00%-13,15%).

Nhóm c-p 4&5 có tỷ lệ cao hơn trong mùa mưa, đặc biệt tại G6 (21,68%) và G10 (36,46%), trong khi mùa khô giảm mạnh tại hầu hết các vị trí. Sự khác biệt rõ rệt theo mùa ($p < 0,001$), nhưng không theo vị trí ($p = 0,28$). Mùa mưa cao hơn mùa khô, trái ngược với xu hướng nhóm c-p 1&2, vốn mùa khô cao hơn mùa mưa.

Chỉ số sinh trưởng (MI) mùa mưa thấp tại khu vực cửa sông và chân đập (G1 - G5: dao động 2,1 - 2,2), cao hơn tại thượng nguồn (G12 - G16: dao động 2,4 - 2,9). Mùa khô, MI vẫn thấp tại giữa sông (G6-G9: dao động 2,1-2,3) và một số vị trí chân đập, nhưng cao hơn tại thượng nguồn (G10-G15: dao động 2,4 - 2,6). Phân tích ANOVA cho thấy MI khác biệt theo mùa ($p = 0,03$) mùa mưa có chỉ số MI cao hơn mùa khô và có sự khác biệt vị trí ($p = 0,02$), với các vị trí G1, G2, G5 có MI thấp hơn đáng kể so với các vị trí còn lại.

3.2.6. Kiểu dinh dưỡng và chỉ số dinh dưỡng ITD của quần xã tuyến trùng

Tỷ lệ nhóm tuyến trùng có kiểu dinh dưỡng 1A (bacterivores - ăn vi khuẩn) cao hơn rõ rệt ở khu vực ngoài đập trong cả hai mùa. Mùa mưa, các vị trí G1-G3 đạt từ 31,35% đến 36,67%, trong khi bên trong đập dao động lớn, từ 4,34% (G6) đến 36,14% (G10). Mùa khô, G2 và G3 vẫn giữ tỷ lệ cao (27,06% - 28,64%), còn trong đập G4, G5, G13 có tỷ lệ từ 25,50% - 31,69%. Phân tích ANOVA 2 yếu tố cho thấy sự khác biệt theo mùa ($p = 0,03$) và vị trí ($p < 0,001$).

Nhóm 1B (bacterivores miệng lớn) duy trì tỷ lệ cao trong đập cả hai mùa, từ 43,05% đến 93,78%, trong khi ngoài đập thấp hơn (20,80% - 46,08%). Khác biệt có ý nghĩa theo vị trí ($p = 0,01$), không khác biệt theo mùa ($p = 0,18$).

Nhóm 2A (fungivores-ăn nấm) có tỷ lệ cao ngoài đập (mùa mưa: 22,38% - 41,73%; mùa khô: 25,93% - 34,87%) và một số vị trí trong đập như G7,

G8, G15 mùa khô đạt 23,95 – 33,48%. Khác biệt theo vị trí ($p = 0,002$), nhưng không có sự khác biệt theo mùa ($p = 0,15$).

Nhóm 2B (carnivores/predators - ăn thịt) phân bố chủ yếu ở giữa sông trong cả hai mùa. Mùa mưa, G6-G12 đạt 14,38%-27,16%, còn ngoài đập thấp hơn ($< 4\%$). Mùa khô, tỷ lệ giảm nhẹ; không có khác biệt đáng kể theo mùa ($p = 0,15$) hoặc vị trí ($p = 0,79$).

Chỉ số dinh dưỡng ITD thấp hơn vào mùa mưa, đặc biệt tại G1-G3 (khoảng 0,38) và G7-G10 (0,33-0,45). Ngược lại, chân đập G4 - G6 và thượng nguồn có ITD cao (0,47-0,69). Mùa khô, chỉ số ITD tăng ở phần lớn vị trí trong đập (0,43-0,89), trong khi ngoài đập vẫn thấp (0,40 - 0,42). Phân tích ANOVA 2 yếu tố xác định sự khác biệt có ý nghĩa theo mùa ($p = 0,04$) và vị trí ($p < 0,001$), với mùa khô có chỉ số ITD cao hơn. Các vị trí G6, G3, và G4 có ITD thấp hơn đáng kể so với các vị trí còn lại.

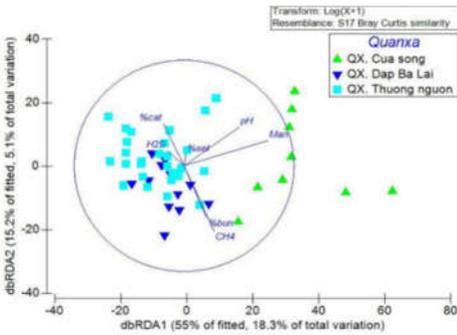
3.3. Mối liên hệ giữa các đặc điểm quần xã tuyến trùng và thông số môi trường trầm tích sông Ba Lai

3.3.1. Tương quan giữa các đặc điểm quần xã tuyến trùng và điều kiện môi trường trầm tích sông Ba Lai

3.3.1.1. Mùa mưa

Phân tích DistLM cho thấy 02 trục dbRDA giải thích 70,27% sự biến thiên cấu trúc quần xã tuyến trùng (QXTT) mùa mưa, trong đó dbRDA1 chiếm 55,05% và dbRDA2 là 15,22%. Các yếu tố môi trường có tương quan ý nghĩa với cấu trúc QXTT gồm: độ mặn ($p = 0,001$), pH ($p = 0,002$), % bùn ($p = 0,021$) và CH₄ ($p = 0,042$), theo thứ tự ảnh hưởng: độ mặn $>$ pH $>$ % bùn $>$ CH₄ (Hình 3.57). Độ mặn và pH chi phối mạnh quần xã ngoài đập, còn CH₄ và % bùn ảnh hưởng đến khu vực trong đập Ba Lai.

Ngoài ra, các đặc điểm QXTT có tương quan nghịch với H₂S và % sét, nhưng thuận với CH₄, pH, độ mặn, ORP, % cát và % bùn. Tuy nhiên, H₂S có tác động chi phối mạnh hơn CH₄ và ảnh hưởng toàn diện đến QXTT. Trong trầm tích, % bùn và % sét chi phối mạnh hơn % cát. Nhìn chung, pH, độ mặn và ORP là các yếu tố môi trường chính ảnh hưởng đến mật độ và đa dạng sinh học QXTT, với pH và độ mặn có mối tương quan thuận rõ rệt.



Hình 3.57. Phân tích DistLM mô tả mối quan hệ giữa các điều kiện môi trường và cấu trúc QXTT vào mùa mưa

3.3.1.2. Mùa khô

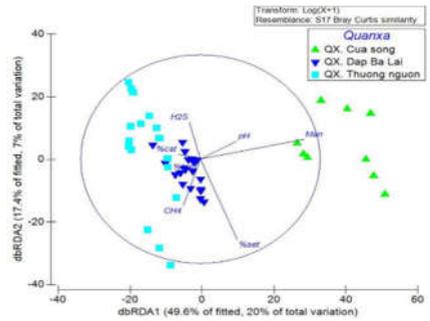
Kết quả phân tích DistLM cho thấy hai trục dbRDA giải thích 67,06% sự biến thiên trong cấu trúc phân bố QXTT mùa khô, với dbRDA1 chiếm 49,63% và dbRDA2 là 17,43%. Các yếu tố môi trường có tương quan ý nghĩa với cấu trúc QXTT gồm: độ mặn ($p = 0,001$), % sét ($p = 0,001$), CH_4 ($p = 0,001$) và pH ($p = 0,033$), theo thứ tự ảnh hưởng: độ mặn > % sét > CH_4 > pH (Hình 3.58). Trong đó, độ mặn và pH tiếp tục chi phối mạnh quần xã cửa sông, còn % sét và CH_4 ảnh hưởng đến quần xã trong đập Ba Lai và thượng nguồn.

Vào mùa khô, các đặc điểm QXTT tương quan với H_2S , CH_4 , pH, độ mặn và % sét. Độ mặn và pH vẫn tương quan thuận với mật độ QXTT nhưng không cho thấy tương quan với chỉ số đa dạng. CH_4 có mối tương quan nghịch với đa dạng QXTT, tuy nhiên ảnh hưởng của CH_4 trở nên mạnh hơn so với mùa mưa. Khí CH_4 có tương quan thuận với mật độ, còn H_2S lại tương quan thuận với chỉ số H' và J'. Tỷ lệ % sét mùa khô vẫn ghi nhận tương quan nghịch (ngoại trừ mật độ QXTT) và toàn diện với các đặc điểm QXTT giống như ở mùa mưa (Bảng 3.14).

3.3.2. Ảnh hưởng của thông số môi trường trầm tích lên đặc điểm của quần xã tuyến trùng sông Ba Lai

3.3.2.1. Ảnh hưởng của khí hydro sulfua và metan

Nghiên cứu cho thấy các yếu tố môi trường như khí H_2S và CH_4 có ảnh hưởng rõ rệt đến đặc điểm của QXTT, đặc biệt là đa dạng giống, chủ yếu



Hình 3.58. Phân tích DistLM mô tả mối quan hệ giữa các điều kiện môi trường và cấu trúc QXTT vào mùa khô

trong khu vực bên trong đập Ba Lai (gồm QX đập Ba Lai và QX thượng nguồn). Cả hai khí này đều có tác động tiêu cực đến đa dạng sinh học tuyến trùng, tuy nhiên CH_4 lại có mối tương quan thuận với mật độ QXTT trong mùa khô, có thể do sự tồn tại của các vi sinh vật hóa tổng hợp trong điều kiện kỵ khí giàu khí CH_4 và H_2S .

3.3.2.2. Ảnh hưởng của pH

Về pH, quần xã tuyến trùng phát triển tốt trong môi trường trung tính đến kiềm ($\text{pH} > 7$), và giảm mạnh trong điều kiện axit ($\text{pH} < 6,5$). Hoạt động của đập làm hạn chế tuần hoàn nước, dẫn đến tích tụ phù sa giàu hữu cơ và phát thải khí độc như CH_4 và H_2S , đặc biệt ở khu vực gần đập (G3-G6).

3.3.2.3. Ảnh hưởng của độ mặn và thành phần trầm tích

Độ mặn và thành phần trầm tích cũng ảnh hưởng mạnh đến QXTT. Mật độ và đa dạng tuyến trùng có xu hướng giảm từ hạ lưu lên thượng nguồn do độ mặn giảm. Bên cạnh đó, trầm tích giàu bùn (kích thước lớn, thoáng khí, giàu hữu cơ) hỗ trợ đa dạng sinh học cao hơn so với trầm tích giàu sét (kích thước nhỏ, yếm khí, giữ chất độc cao), vốn làm hạn chế sự phát triển của nhiều loài sinh vật. Tổng thể, nghiên cứu cho thấy QXTT ở sông Ba Lai chịu ảnh hưởng đồng thời của nhiều yếu tố môi trường, trong đó H_2S , CH_4 , pH, độ mặn và thành phần trầm tích đóng vai trò chi phối mạnh đến cấu trúc, mật độ và đa dạng sinh học của quần xã.

3.4. Ứng dụng quần xã tuyến trùng trong quan trắc, đánh giá chất lượng môi trường sông Ba Lai

3.4.1. Các giống tuyến trùng nhạy cảm và chống chịu với khí hydro sulfua và khí metan

Mùa mưa ghi nhận 34 giống có tương tác với khí H_2S và CH_4 , trong đó có 10 giống có khả năng chống chịu khí H_2S (tương quan thuận với H_2S), 21 giống chống chịu khí CH_4 (tương quan thuận với CH_4), 1 giống *Pseudolella* nhạy cảm với H_2S (tương quan nghịch với H_2S), và 2 giống *Halichoanolaimus* và *Halipletus* nhạy cảm với CH_4 (tương quan nghịch với CH_4) (Bảng 3.13). Trong số các giống tuyến trùng có phản ứng với khí, số giống chống chịu nhiều hơn số giống nhạy cảm do khả năng thích nghi cao của tuyến trùng. Ngoài ra, số giống có khả năng chống chịu khí CH_4 nhiều

hơn số giống có khả năng chống chịu khí H₂S, điều đó gợi ý rằng khí H₂S có thể gây độc tính cao hơn khi so với khí CH₄.

Mùa khô số giống tuyển trùng có tương tác với khí giảm khi so với mùa mưa (giảm xuống chỉ còn 10 giống). Trong số này, không ghi nhận giống nhạy cảm với H₂S và CH₄. Mùa khô, số giống chống chịu với H₂S là 6 giống, (gồm giống *Aphanonchus*, *Heterocephalobus*, *Paramonhystera*, *Parascolaimus*, *Stephanolaimus*, *Tobrilus*), trong khi có 4 giống (*Axonolaimus*, *Eumonhystera*, *Monhystera*, *Theristus*) có khả năng chống chịu với CH₄ (Bảng 3.14).

3.4.2. Tương quan giữa các chỉ số sinh học với các đặc điểm thông số môi trường trầm tích

Trong mùa mưa, các chỉ số H', MI, %c-p 3 và %c-p 4&5 tương quan thuận với pH và ORP, trong khi %c-p 1&2 tương quan nghịch. Nhóm c-p 4&5 là nhóm duy nhất nhạy cảm với CH₄ ($r = -0,311$; $p = 0,033$). Chỉ số ITD tương quan nghịch với pH và ORP (bảng 3.15), cho thấy ITD, MI, H' và các nhóm c-p cao phản ánh chất lượng nền đáy theo cùng một xu hướng tăng.

Nhóm dinh dưỡng 1B tăng theo H₂S và CH₄, phù hợp với điều kiện trầm tích giàu hữu cơ, có khả năng làm gia tăng vi khuẩn – nguồn thức ăn của nhóm này.

Trong mùa khô, MI và H' tương quan nghịch với tỷ lệ sét (bảng 3.16). Độ mặn làm giảm %c-p 1&2 nhưng làm tăng %c-p 3, trong khi %c-p 4&5 tương quan nghịch với độ mặn, cho thấy các chỉ số này kém ổn định hơn so với mùa mưa. ITD lại nhạy hơn, tương quan nghịch rõ với độ mặn và phản ánh chính xác hơn sự biến đổi chất lượng nền đáy.

3.4.3. Đánh giá tổng thể hiện trạng chất lượng môi trường sinh thái nền đáy sông Ba Lai theo quần xã tuyển trùng

Mùa mưa, khu vực ngoài đập có chất lượng môi trường nền đáy tốt nhất, thể hiện qua H' cao, ITD thấp và tỷ lệ c-p 4&5 tương đối cao; trong khi khu vực MI trong đập và thượng nguồn chỉ đạt mức trung bình (Bảng 3.17).

Sang mùa khô, đa dạng quần xã tuyến trùng tăng nhưng sự gia tăng nhóm c-p 1&2 và giảm c-p 4&5 làm giảm chỉ số sinh trưởng tuyến trùng MI và chỉ số dinh dưỡng tuyến trùng ITD tăng, khiến cả ba khu vực đều được xếp loại trung bình (Bảng 3.18).

Các chỉ số H', MI, %c-p và ITD cho thấy hiệu quả cao trong đánh giá chất lượng môi trường sinh thái nền đáy sông Ba Lai, trong đó chỉ số ITD có phần nhạy cảm

hơn vào mùa khô. Tổng thể, nền đáy sông Ba Lai có chất lượng tốt vào mùa mưa nhưng giảm xuống trung bình vào mùa khô. Do đó, cần có biện pháp quản lý và theo dõi diễn biến chất lượng môi trường nền đáy sông Ba Lai trong thời gian tới.

3.5. Giải pháp ứng dụng quần xã tuyến trùng để quản lý môi trường ở các thủy vực tù đọng, hồ chứa do ảnh hưởng của đập chắn

Kết quả luận án cho thấy quần xã tuyến trùng (QXTT) là công cụ sinh học hiệu quả để đánh giá và theo dõi chất lượng môi trường nền đáy tại các hồ chứa và thủy vực chịu ảnh hưởng của đập chắn. Các chỉ số H', MI, c-p và ITD phản ánh nhạy các biến động nền đáy theo mùa, đặc biệt trong điều kiện biến đổi thủy văn.

Bảng 3.17. Hiện trạng chất lượng môi trường sinh thái nền đáy sông Ba Lai vào mùa mưa, đánh giá theo các chỉ số H', %c-p, MI, và ITD

Khu vực	% c-p		Chỉ số sinh trưởng tuyến trùng (MI)		Chỉ số đa dạng Shannon - Weiner (H')		Chỉ số dinh dưỡng tuyến trùng (ITD)		Chất lượng môi trường	
	Giá trị	Phân loại	Giá trị	Phân loại	Giá trị	Phân loại	Giá trị	Phân loại	Điểm số trung bình	Phân loại
Ngoài đập	c-p 1&2: 71,03 c-p 3: 9,15 c-p 4&5: 19,81	Tốt	2,46	Trung bình	3,91	Tốt	0,39	Tốt	2	Tốt
Trong đập	c-p 1&2: 74,11 c-p 3: 7,83 c-p 4&5: 18,06	Tốt	2,43	Trung bình	2,70	Trung bình	0,51	Trung bình	3	Trung bình
Thượng nguồn	c-p 1&2: 73,48 c-p 3: 8,25 c-p 4&5: 18,27	Tốt	2,44	Trung bình	3,23	Trung bình	0,44	Trung bình	3	Trung bình

Bảng 3.18. Hiện trạng chất lượng môi trường sinh thái nền đáy sông Ba Lai vào mùa khô, đánh giá theo các chỉ số H', %c-p, MI, và ITD

Khu vực	% c-p		Chỉ số sinh trưởng tuyến trùng (MI)		Chỉ số đa dạng Shannon - Weiner (H')		Chỉ số dinh dưỡng tuyến trùng (ITD)		Chất lượng môi trường	
	Giá trị	Phân loại	Giá trị	Phân loại	Giá trị	Phân loại	Giá trị	Phân loại	Điểm số trung bình	Phân loại
Ngoài đập	c-p 1&2: 75,73 c-p 3: 18,05 c-p 4&5: 6,22	Trung bình	2,30	Kém	3,80	Tốt	0,49	Trung bình	3	Trung bình
Trong đập	c-p 1&2: 66,21 c-p 3: 21,76 c-p 4&5: 12,02	Tốt	2,42	Trung bình	3,36	Trung bình	0,60	Trung bình	3	Trung bình
Thượng nguồn	c-p 1&2: 80,00 c-p 3: 10,73 c-p 4&5: 9,26	Trung bình	2,28	Kém	3,75	Tốt	0,45	Trung bình	3	Trung bình

Chương trình giám sát nên được triển khai tối thiểu hai lần mỗi năm (mùa mưa – mùa khô), với các điểm quan trắc đại diện cho ba vùng sinh thái (ngoài đập, trong đập, thượng nguồn). Việc giám sát QXTT cần kết hợp các thông số lý-hóa (pH, DO, độ mặn, dinh dưỡng, khí nhà kính, cấu trúc hạt trầm tích) nhằm hỗ trợ diễn giải cơ chế biến động sinh thái.

Đánh giá chất lượng nền đáy có thể dựa trên hệ thống ngưỡng cảnh báo dạng “đèn giao thông”, trong đó vùng xanh phản ánh điều kiện tốt, vùng vàng biểu thị dấu hiệu suy giảm cần tăng cường giám sát, còn vùng cam–đỏ cho thấy suy thoái rõ rệt và yêu cầu can thiệp quản lý. Các ngưỡng cụ thể cần được thiết lập phù hợp với đặc thù từng hồ hoặc đập.

Khi phát hiện dấu hiệu suy giảm chất lượng nền đáy, các biện pháp quản lý ưu tiên bao gồm: (1) kiểm soát và giảm tải nguồn thải hữu cơ, dinh dưỡng đầu vào; (2) quản lý và nạo vét trầm tích khi cần thiết; (3) điều chỉnh chế độ vận hành đập để tăng lưu thông nước; và (4) áp dụng các giải pháp dựa vào tự nhiên như vùng đệm thực vật hoặc đầm lầy nhân tạo nhằm lọc và hấp thu dinh dưỡng trước khi vào hồ chứa.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết luận

Nghiên cứu đã phân tích được phát thải khí H_2S và CH_4 trong trầm tích sông Ba Lai. Mặc dù đều là sản phẩm của quá trình phân hủy kỵ chất hữu cơ nhưng có sự khác biệt trong hàm lượng phát thải của 2 khí này theo mùa cũng như theo các vị trí khảo sát. Trong khi khí H_2S không ghi nhận sự khác biệt hàm lượng theo mùa thì lượng phát thải khí CH_4 mùa khô cao hơn mùa mưa. H_2S có xu hướng phát thải cao ở các vị trí ngoài đập, ngược lại CH_4 phát thải cao ở một số vị trí bên trong đập. Nguyên nhân đến từ ảnh hưởng của một số đặc điểm môi trường trầm tích, đặc biệt là độ mặn và thành phần trầm tích.

Quần xã tuyến trùng sông Ba Lai có sự đa dạng cao về cấu trúc quần xã khi so với các nghiên cứu trước đây ở trong và ngoài nước, gồm 190 giống, 67 họ, 11 bộ, và 2 lớp (Chromadorea và Enoplea). Ngoài ra, mật độ và đa dạng sinh học của quần xã tuyến trùng sông Ba Lai cũng ghi nhận ở mức cao khi so với các nghiên cứu trên thế giới. Mật độ và đa dạng sinh học tuyến trùng đều ghi nhận có sự khác biệt theo mùa và theo vị trí khảo sát. Tuy nhiên

thể hiện rõ nhất theo mùa với mùa khô có mật độ và đa dạng cao hơn mùa mưa. Cấu trúc phân bố của quần xã tuyến trùng sông Ba Lai, thể hiện đậm nét sự chia cắt và ảnh hưởng của đập chắn, quần xã này bị chia cắt thành quần xã trong và ngoài đập. Quần xã trong đập bao gồm 2 nhóm nhỏ là trong đập (khu vực gần đập Ba Lai) và thượng nguồn. Đặc điểm về đa dạng sinh học ở các quần xã bị chia cắt có sự khác nhau nhưng chỉ thể hiện rõ vào mùa mưa, mùa khô không rõ ràng. Ngược lại, sự khác biệt trong cấu trúc ở các quần xã bị chia cắt đều lớn ở cả 2 mùa khảo sát. Do đó, cấu trúc thành phần loài nhạy cảm hơn với sự thay đổi của môi trường, khi so với các chỉ số đa dạng.

Một số đặc điểm khác của quần xã tuyến trùng sông Ba Lai cũng được phân tích và đánh giá như chỉ số c-p, chỉ số sinh trưởng MI, các kiểu dinh dưỡng và chỉ số dinh dưỡng ITD. Nhìn chung các đặc điểm này đều có sự biến động theo không gian và thời gian. Tuy nhiên thể hiện rõ nhất theo mùa với mùa mưa có trung bình giá trị MI và ITD cao hơn mùa khô. Ngoài ra, nghiên cứu đã sử dụng các chỉ số H', MI, c-p, ITD để đánh giá chất lượng môi trường sinh thái nền đáy sông Ba Lai. Theo đó, chất lượng môi trường sinh thái nền đáy của sông Ba Lai ghi nhận mức khá tốt vào mùa mưa và trung bình vào mùa khô. Tuy nhiên, nên kết hợp nhiều chỉ số sinh học khác nhau của QXTT trong đánh giá chất lượng nền đáy để đưa ra nhận định toàn diện và chính xác nhất.

Khí H_2S , CH_4 , pH, độ mặn, thành phần trầm tích đều ghi nhận có ảnh hưởng đến đặc điểm của quần xã tuyến trùng sông Ba Lai. Khí H_2S và CH_4 chủ yếu ảnh hưởng đến QXTT bên trong đập Ba Lai, 2 khí này nhìn chung làm giảm đa dạng sinh học QXTT, ít ảnh hưởng đến mật độ. Như vậy, quần xã tuyến trùng có tiềm năng dùng làm chỉ thị cho phát thải khí H_2S và CH_4 , sinh ra từ điều kiện tù đọng ở các đập chắn, hồ chứa.

Kiến nghị

Việc sử dụng các chỉ số đa dạng sinh học truyền thống chưa thể đánh giá được biến động trong cấu trúc thành phần loài dưới tác động của các yếu tố môi trường. Do đó, nghiên cứu trong tương lai cần sử dụng thêm các chỉ số đa dạng liên quan đến các bậc phân loại (taxonomic resolution) như taxonomic distinctness ($\Delta+$) và variation in taxonomic distinctness ($\Delta+$). Đồng thời, so sánh sự nhạy cảm với môi trường các chỉ số này với các chỉ số

đa dạng truyền thống (Shannon-Wiener H' , Margalef d , Pielou's evenness J' , ...).

Để ứng dụng thực tiễn QXTT vào đánh giá chất lượng môi trường trầm tích. Nghiên cứu trong tương lai cần tiếp tục đánh giá tương quan của QXTT với nhiều yếu tố môi trường như: Dinh dưỡng (như nitơ tổng (TN), photpho tổng (TP), chất hữu cơ tổng (OM), Chlorophyll (Chl), TOC, NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-}), kim loại nặng, ... để có cái nhìn bao quát về thay đổi trong cấu trúc và đặc điểm QXTT dưới ảnh hưởng của điều kiện môi trường, nhất là các yếu tố gây ô nhiễm.

Nguyên nhân dẫn đến sự khác biệt trong cấu trúc và thành phần loài giữa các quần xã bị chia cắt hiện vẫn chưa được lý giải rõ ràng. Một giả thuyết cho rằng sự khác biệt về nguồn thức ăn và cấu trúc mạng lưới dinh dưỡng có thể đóng vai trò quan trọng trong quá trình này. Do đó, nghiên cứu đồng vị ổn định (stable isotopes) để theo dõi sự biến đổi trong mạng lưới thức ăn của tuyến trùng có thể cung cấp bằng chứng giúp giải thích sự khác biệt về thành phần loài giữa các quần xã.

NHỮNG ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN

1. Nồng độ khí CH_4 và H_2S trong toàn chiều dài sông Ba Lai lần đầu tiên được nghiên cứu đầy đủ theo không gian và thời gian trên vùng cửa sông duy nhất thuộc hệ thống cửa sông Cửu Long bị đập chắn trên dòng chính;

2. Phát hiện và ghi nhận được các mức độ ảnh hưởng của khí CH_4 và H_2S đối với các đặc tính của quần xã tuyến trùng sống tự do như độ phong phú, mật độ phân bố, các tính chất đa dạng thông qua các chỉ số đại diện, cấp độ của các nhóm chỉ thị, các nhóm ưu thế cũng như các tính chất nội tại khác của quần xã tuyến trùng sống tự do trong nền đáy trầm tích sông Ba Lai;

3. Đánh giá chất lượng môi trường sông Ba Lai thông qua quần xã tuyến trùng làm chỉ thị. Đồng thời, cung cấp những dữ liệu khoa học, phương pháp luận liên quan trong việc ứng dụng nhóm động vật này làm chỉ thị phục vụ giám sát và quản lý môi trường nước.

DANH MỤC CÁC BÀI BÁO ĐÃ XUẤT BẢN LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. Quang N.X., Yen N.T.M., Thai T.T., Yen N.T.H., Van Dong N., **Hoai P.N.**, Lins L., Vanreusel A., Veettil B.K., Hiep N.D., Bang H.Q., Quan N.H., Prozorova L., 2022, Impact of a dam construction on the intertidal environment and free-living nematodes in the Ba Lai, Mekong Estuaries, Vietnam, *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(Suppl 2):770, pp. 1-23.
2. **Phạm Ngọc Hoài***, Trần Thành Thái, Nguyễn Thị Mỹ Yến, Phan Thị Thanh Huyền, Ngô Xuân Quảng, 2022, Biến động theo mùa trong cấu trúc phân bố quần xã tuyến trùng sống tự do ở sông Ba Lai, tỉnh Bến Tre. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Thái Nguyên*, 227(05), pp.3-11.
3. **Phạm Ngọc Hoài***, Trần Thành Thái, Nguyễn Thị Mỹ Yến, Nguyễn Thị Hải Yến, Phan Thị Thanh Huyền, Ngô Xuân Quảng, 2021, Ảnh hưởng của yếu tố mùa tới sự đánh giá sức khỏe sinh thái nền đáy sông Ba Lai thông qua quần xã tuyến trùng sống tự do, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Thái Nguyên*, 226(10), pp.170-177.
4. Tran Thanh Thai, Nguyen Thi My Yen, **Pham Ngoc Hoai**, Nguyen Van Dong, Nguyen Lu Nguyet Hang, Ngo Xuan Quang*, 2023, Greenhouse gases concentrations influence on vertical distribution of nematode communities in the Ba Lai River, Vietnam, *Academia Journal of Biology - Vietnam Academy of Science and Technology*, 45(2), pp.105–122.