VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology
Journal homepage: https://js.vnu.edu.vn/NST

Original Article

Morphological Variations of the Mudskipper *Oxuderces nexipinnis* (Cantor, 1849) in the Mekong Delta, Vietnam

Tran Thi Lua[1], Lam Thi Huyen Tran[2], Nguyen Huu Duc Ton[3], Nguyen Minh Hoang[4], Dinh Minh Quang[3,*]

[1]*Institute of Food and Biotechnology, Can Tho University, Ninh Kieu, Can Tho, Vietnam*
[2]*Cuu Long University, 1A Highway, Phu Quoi, Vinh Long, Vietnam*
[3]*Can Tho University, 3/2 Street, Ninh Kieu, Can Tho, Vietnam*
[4]*Nguyen Khuyen High School, 118 Nguyen Hue, Vinh Chau, Can Tho, Vietnam*

Received 31st August 2025
Revised 19th October 2026; Accepted 28th October 2026

Abstract: This study provides data on the morphological variations of the mudskipper *Oxuderces nexipinnis*. A total of 616 specimens (223 females and 393 males) were collected continuously over a 12-month period (from August 2024 to July 2025) at four coastal sites in Vinh Long Province, Ca Mau Province, and Can Tho City. The analysis revealed that morphological traits such as eye diameter (*ED*), body depth (*BD*), head length (*HL*), and mouth width (*MD*) varied significantly between sexes, whereas interorbital distance (*IO*) showed no marked difference between males and females. All five traits (*ED, IO, BD, MD, HL*) fluctuated with season and ecological zone. The ratios *ED/HL*, *IO/HL*, *BD/HL*, and *MD/HL* were influenced jointly by sex, season, and sampling location. Notably, the interaction between sex and ecological zone had significant effects on *ED/HL* and *MD/HL*, indicating that sexual dimorphism in morphology varied across habitats. Moreover, the interaction between season and ecological zone strongly affected *ED/HL* and *IO/HL*, suggesting a potential morphological response to hydrological fluctuations and food availability between dry and wet seasons. These findings provide useful insights for species identification and enhance the understanding of ecological adaptation in *O. nexipinnis* within the Mekong Delta.

Keywords: Oxuderces nexipinnis, mudskipper, Mekong Delta, morphological traits.

* Corresponding author.
E-mail address: dmquang@ctu.edu.vn

https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5934

Sự biến động một số thông số hình thái của cá thòi lòi *Oxuderces nexipinnis* (Cantor, 1849) tại vùng Đồng bằng sông Cửu Long

Trần Thị Lụa[1], Lâm Thị Huyền Trân[2], Nguyễn Hữu Đức Tôn[3], Nguyễn Minh Hoàng[4], Đinh Minh Quang[3,*]

[1]*Viện Công nghệ sinh học và Thực phẩm, Đại học Cần Thơ, Đường 3/2, Ninh Kiều, Cần Thơ, Việt Nam*
[2]*Trường Đại học Cửu Long, Quốc Lộ 1A, Phú Quới, Vĩnh Long, Việt Nam*
[3]*Trường Sư phạm, Đại học Cần Thơ, Đường 3/2, Ninh Kiều, Cần Thơ, Việt Nam*
[4]*Trường trung học phổ thông Nguyễn Khuyến, 118 Nguyễn Huệ, Vĩnh Châu, Cần Thơ, Việt Nam*

Nhận ngày 31 tháng 8 năm 2025
Chỉnh sửa ngày 19 tháng 10 năm 2026; Chấp nhận đăng ngày 28 tháng 10 năm 2026

Tóm tắt: Nghiên cứu này cung cấp dữ liệu về sự biến động các thông số hình thái của cá thòi lòi *Oxuderces nexipinnis*. Tổng số 616 cá thể (223 cá cái và 393 cá đực) được thu thập liên tục trong 12 tháng (từ tháng 8/2024 đến tháng 7/2025) tại bốn điểm ven biển thuộc tỉnh Vĩnh Long, Cà Mau và thành phố Cần Thơ. Kết quả phân tích cho thấy các thông số hình thái như đường kính mắt (*ED*), chiều cao thân (*BD*), chiều dài đầu (*HL*) và độ rộng miệng (*MD*) biến động rõ rệt theo giới tính, trong khi khoảng cách giữa hai mắt (*IO*) không có sự khác biệt đáng kể giữa cá đực và cá cái. Các thông số *ED, IO, BD, MD* và *HL* thay đổi theo mùa và vùng sinh thái. Các tỉ lệ hình thái *ED/HL, IO/HL, BD/HL* và *MD/HL* chịu tác động đồng thời của giới tính, mùa vụ và địa điểm thu mẫu. Đáng chú ý, sự tương tác giữa giới tính và vùng sinh thái ảnh hưởng có ý nghĩa thống kê đến các tỉ lệ *ED/HL* và *MD/HL*, phản ánh sự khác biệt hình thái giữa cá đực và cá cái thay đổi theo khu vực phân bố. Bên cạnh đó, tương tác giữa mùa vụ và vùng sinh thái tác động mạnh đến các tỉ lệ *ED/HL* và *IO/HL*, gợi ý loài có khả năng điều chỉnh hình thái nhằm thích nghi với biến động thủy văn và nguồn thức ăn giữa mùa khô và mùa mưa. Những kết quả này bổ sung thông tin hữu ích cho công tác định loại cũng như hiểu biết về sự thích nghi sinh thái của loài *O. nexipinnis* tại vùng Đồng bằng sông Cửu Long.

Từ khóa: cá thòi lòi, Đồng bằng sông Cửu Long, *Oxuderces nexipinnis*, thông số hình thái.

1. Mở đầu

Đặc điểm hình thái bên ngoài của cá không chỉ phục vụ cho việc phân loại và định danh loài mà còn là cơ sở để phân biệt các quần thể trong cùng một loài. Sự khác biệt về hình dạng, kích thước và cấu trúc các bộ phận cơ thể thường chịu ảnh hưởng đồng thời của yếu tố di truyền và môi trường [1]. Các yếu tố môi trường tác động đến biến đổi hình thái có thể bao gồm pH, nhiệt độ, độ mặn, tốc độ dòng chảy, áp lực săn mồi và nhiều điều kiện sinh thái khác [2]. Khả năng thích nghi về hình thái giúp cá nâng cao khả năng sống sót, đồng thời đóng vai trò quan trọng trong tiến hóa [3]. Vì vậy, hình thái được xem là công cụ đơn giản, hiệu quả và phổ biến để nhận dạng đàn cá, xác định cấu trúc quần xã và phân biệt các quần thể [4, 5]. Ngoài ra, nghiên cứu hình thái học còn đóng góp thiết thực cho công tác quản lý, bảo tồn quần thể, làm sáng tỏ các vấn đề về tiến hóa, sinh thái, hành vi, cũng như hỗ trợ đánh giá nguồn lợi thủy sản [6-8].

Bộ cá bống (Gobiiformes) gồm 8 họ, 321 giống và hơn 2000 loài [9]. Ở Việt Nam, bộ này có 102 loài thuộc 51 giống phân bố rộng từ

* Tác giả liên hệ.
Địa chỉ email: dmquang@ctu.edu.vn

https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5934

vùng nước mặn đến nước ngọt, với nhiều loài có giá trị kinh tế [10]. Gobiidae là họ cá bống lớn nhất gồm hơn 210 giống và 1950 loài thuộc 5 phân họ [11]. Ở Việt Nam, họ Gobiidae có 5 phân họ: Cá bống dài Amblyopinae, Cá bống trắng Gobiinae, Cá bống đá Gobionellinae, Cá bống kèo Oxudercinae, Cá bống lụa Tridentigerinae [12]. Ở Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL), họ Gobiidae được xác định gồm 32 giống và 58 loài. Riêng vùng ven biển ĐBSCL, họ Gobiidae đã được xác định gồm 12 giống và 16 loài [13].

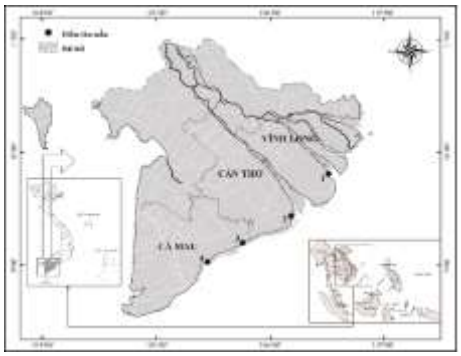
Loài *Oxuderces nexipinnis* (Cantor, 1849) thuộc họ Oxudercidae, bộ cá bống Gobiiformes có khả năng thích nghi với cả môi trường cạn và dưới nước [14, 15]. Sinh cảnh của loài này thường tập trung tại các bãi bùn, rừng ngập mặn và vùng nước nông, ưa thích các thủy vực nông với lớp nước mỏng [16]. Trước đây, *O. nexipinnis* được xem là đồng danh của *Oxuderces dentatus*, nhưng các nghiên cứu gần đây đã khẳng định đây là một loài độc lập [17].

Mặc dù có vai trò sinh thái quan trọng và giá trị nghiên cứu trong việc tìm hiểu quá trình chuyển tiếp từ thủy sinh sang lối sống bán cạn ở động vật có xương sống [14], thông tin về sinh học và phân bố của *O. nexipinnis* tại ĐBSCL vẫn còn rất hạn chế [15]. Xuất phát từ thực tiễn đó, nghiên cứu này được tiến hành nhằm xác định một số đặc điểm hình thái của *O. nexipinnis* tại bốn địa điểm: Mỹ Long – Vĩnh Long (MLVL), Trần Đề – Cần Thơ (TDCT), Hiệp Thành – Cà Mau (HTCM) và Gành Hào – Cà Mau (GHCM). Kết quả nghiên cứu sẽ bổ sung cơ sở dữ liệu khoa học, góp phần phục vụ công tác định loại cũng như hiểu rõ hơn về khả năng thích nghi sinh thái của loài *O. nexipinnis* ở khu vực nghiên cứu.

2. Phương pháp nghiên cứu

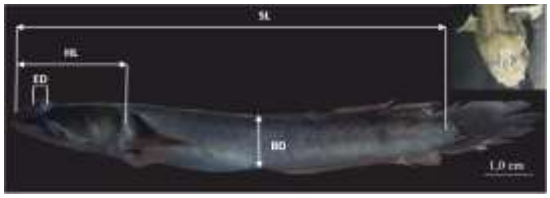
2.1. Thu và phân tích mẫu

Mẫu cá *O. nexipinnis* được thu thập tại bốn khu vực ven biển gồm: Mỹ Long – Vĩnh Long, Trần Đề – Cần Thơ, Hiệp Thành – Cà Mau và Gành Hào – Cà Mau (Hình 1). Tổng cộng 616 cá thể được thu liên tục từ tháng 8/2024 đến tháng 7/2025. Việc thu mẫu tiến hành định kỳ hàng tháng, bằng phương pháp bắt trực tiếp bằng tay tại các bãi bồi ven biển vào thời điểm thủy triều xuống.



Hình 1. Bản đồ vị trí các điểm thu mẫu (•: Điểm thu mẫu; 1: Mỹ Long - Vĩnh Long; 2: Trần Đề - Cần Thơ; 3: Hiệp Thành - Cà Mau; 4: Gành Hào - Cà Mau; Nguồn: Dinh [18]).

Tại đây, cá được xác định giới tính dựa vào gai sinh dục và vây lưng [19]. Sau đó, cá được đo các chỉ tiêu hình thái như: cao thân (*BD*), dài đầu (*HL*), đường kính mắt (*ED*), khoảng cách giữa hai mắt (*IO*), rộng miệng (*MD*) (Hình 2) và xác định các tỉ lệ hình thái như *ED/HL, BD/HL, IO/HL, MD/HL*.



Hình 2. Cách đo các chỉ tiêu hình thái của *Oxuderces nexipinnis* (*HL*: chiều dài đầu; *ED*: đường kính mắt; *IO*: khoảng cách mắt; *BD*: chiều cao thân; *SL*: chiều dài chuẩn).

2.2. Phân tích dữ liệu

Sự khác biệt *HL, BD, ED, IO, MD* giữa cá đực và cá cái; vùng sinh thái; mùa khô (từ tháng 11 đến tháng 4) và mùa mưa (từ tháng 5 đến tháng 10) được thực hiện bằng kiểm định Mann-Whitney U. Sự dao động của các tỉ lệ hình thái *ED/HL, IO/HL, BD/HL* và *MD/HL* dưới tác động đồng thời của nhiều yếu tố được thực hiện bằng mô hình hỗn hợp tuyến tính

(Linear Mixed Model, Hình 3), trong đó biến phụ thuộc là tử số và biến hiệp phương sai là mẫu số của từng tỉ lệ, giới tính, mùa, nhóm chiều dài (chưa thành thục sinh dục và đã trưởng thành), điểm thu mẫu là nhân tố cố định (fixed factors), tháng là nhân tố ngẫu nhiên (random factor).

Công thức chung của mô hình hồi quy đa biến (Linear Mixed Model):

$$Y_{ij} = \beta_0 + \sum_{k=1}^{p} \beta_k X_{kij} + b_j + \varepsilon_{ij}$$

Trong đó:

Y_{ij} là biến phụ thuộc của quan sát thứ (i) trong tháng thứ (j);

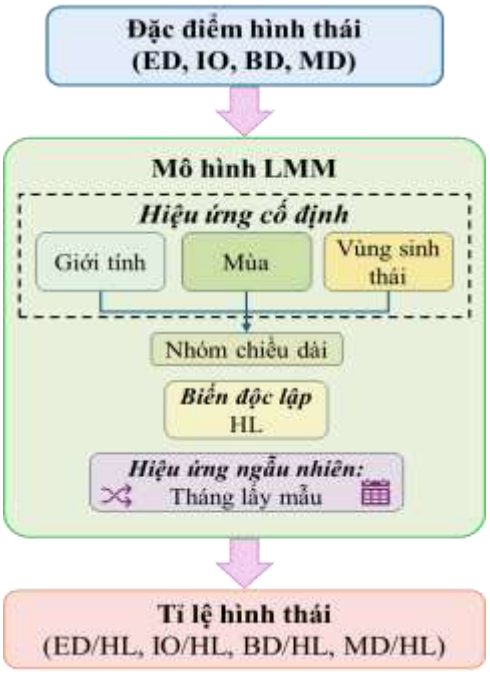
β_0 là hệ số chặn (intercept);

β_k là hệ số hồi quy của biến cố định thứ (k);

X_{kij} là các biến giải thích (giới tính, mùa thu mẫu, nhóm kích thước, vùng sinh thái và các tương tác);

b_j là hiệu ứng ngẫu nhiên của tháng thu mẫu, với $b_j \sim N(0, \sigma_b^2)$;

ε_{ij} là sai số ngẫu nhiên, với $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$.



Hình 3. Khung phân tích Mô hình hỗn hợp tuyến tính.

Ngoài ra, phân tích thành phần chính (Principal Component Analysis, PCA) được thực hiện nhằm trực quan hóa xu hướng phân nhóm hình thái của *O. nexipinnis* theo giới tính, nhóm kích thước, mùa vụ và vùng sinh thái. PCA được thực hiện trên bốn tỉ lệ hình thái gồm *ED/HL*, *IO/HL*, *BD/HL* và *MD/HL* nhằm hạn chế ảnh hưởng của kích thước tuyệt đối và phản ánh rõ hơn sự biến động hình thái tương đối giữa các cá thể. Các biến được chuẩn hóa trước khi phân tích. Mức độ phù hợp của dữ liệu đối với PCA được đánh giá thông qua chỉ số Kaiser–Meyer–Olkin (KMO) và kiểm định Bartlett. Hai thành phần chính đầu tiên, PC1 và PC2, được sử dụng để biểu diễn xu hướng phân bố mẫu trên không gian hai chiều. Phân tích PCA được thực hiện bằng phần mềm Jamovi.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Hình thái bên ngoài của Oxuderces nexipinnis

Các đặc điểm hình thái bên ngoài của loài *O. nexipinnis* được ghi nhận như sau: cơ thể thon dài, dẹt dần về phía sau, phần đầu phía trước lõm rõ rệt. Mắt nằm trên đỉnh đầu, hướng về phía trước. Miệng rộng, kéo dài đến hoặc vượt quá mép sau của mắt. Hàm trên có một răng nanh nổi bật, màu ngà, hướng ra phía trước nhưng cong xuống ở mỗi bên khớp tiền hàm; răng ở cả hai hàm được sắp xếp thành một hàng. Đầu và thân có màu xám xanh, trên đường giữa thân có 7 đốm xám xanh kéo dài từ gốc vây lưng thứ nhất đến khoảng 75% chiều dài vây lưng thứ hai (*D2*). Phần nửa sau của thân có sự phân bố các vảy ánh xanh bóng, kèm theo 6 đốm sẫm màu dạng "yên ngựa" trên lưng. Vây lưng thứ nhất (*D1*), vây đuôi, vây hậu môn và vây chậu trong suốt. Tuy nhiên, vây lưng thứ hai (*D2*) có một sọc mờ ở giữa và một đốm đen lớn gần nhóm bốn tia cuối cùng, vây ngực có một đốm sẫm màu rõ rệt ở trên gốc vây. Vùng gáy có các vân dạng lưới sẫm màu. Viền trước của lỗ mũi trước có màu đen. Bụng có màu trắng ánh bạc [17, 20, 21].

3.2. Sự biến động đường kính mắt, khoảng cách mắt, chiều cao thân, chiều dài đầu, độ rộng miệng

Kết quả phân tích cho thấy các thông số hình thái của *O. nexipinnis* có sự biến động đáng kể theo giới tính, mùa và vùng sinh thái (Bảng 1–3).

Theo giới tính (Bảng 1), các chỉ số *BD, MD* và *HL* ở cá cái đều cao hơn cá đực với mức ý nghĩa thống kê rất rõ rệt ($p < 0,001$). Cụ thể, *BD* trung bình ở cá cái đạt 9,59 ± 0,16 mm, trong khi ở cá đực chỉ đạt 8,50 ± 0,11 mm ($Z = –5,48$; $p < 0,0001$). *MD* ở cá cái đạt 9,90 ± 0,12 mm, cao hơn so với 9,28 ± 0,11 mm ở cá đực ($Z = –3,88$; $p = 0,0001$). *HL* cũng cho thấy sự khác biệt rõ rệt, với giá trị trung bình 19,13 ± 0,24 mm ở cá cái so với 17,88 ± 0,20 mm ở cá đực ($Z = –4,03$; $p < 0,0001$). Ngược lại, *ED* lại cao hơn ở cá đực (1,80 ± 0,03 mm) so với cá cái (1,67 ± 0,03 mm; $Z = –3,31$; $p < 0,001$). Riêng *IO* không cho thấy sự khác biệt có ý nghĩa giữa hai giới ($Z = –1,24$; $p = 0,21$). Như vậy, các đặc điểm liên quan đến thân và đầu (*BD, MD, HL*) phát triển nổi trội hơn ở cá cái, trong khi cá đực có đường kính mắt (*ED*) lớn hơn.

Theo mùa vụ (Bảng 2), hầu hết các chỉ tiêu đều cho sự khác biệt rõ rệt ($p < 0,0001$). Các giá trị *HL, BD* và *MD* cao hơn đáng kể vào mùa mưa. *HL* trong mùa mưa đạt 19,25 ± 0,18 mm, cao hơn so với 15,83 ± 0,22 mm trong mùa khô ($Z = –9,86$; $p < 0,0001$). Tương tự, *BD* tăng từ 7,91 ± 0,15 mm (mùa khô) lên 9,26 ± 0,11 mm (mùa mưa; $Z = –6,86$; $p < 0,0001$), còn *MD* tăng từ 8,60 ± 0,12 mm lên 9,84 ± 0,10 mm ($Z = –7,70$; $p < 0,0001$). *IO* cũng tăng từ 3,27 ± 0,09 mm ở mùa khô lên 3,79 ± 0,06 mm ở mùa mưa ($Z = –5,94$; $p < 0,0001$). Ngược lại, *ED* lại có xu hướng ngược chiều, với giá trị cao hơn trong mùa khô (2,05 ± 0,04 mm) so với mùa mưa (1,65 ± 0,02 mm; $Z = –8,52$; $p < 0,0001$). Điều này cho thấy mùa mưa là giai đoạn mà các bộ phận thân và đầu phát triển mạnh, trong khi thị giác (*ED*) lại nổi trội hơn vào mùa khô.

Theo khu vực thu mẫu (Bảng 3), các thông số hình thái cũng có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,0001$). *HL* đạt giá trị cao nhất tại Nam sông Hậu (19,58 ± 0,18 mm), cao hơn rõ rệt so với Bắc sông Hậu (15,69 ± 0,21 mm; $Z = –11,94$; $p < 0,0001$). *BD* tại Nam sông Hậu (9,47 ± 0,11 mm) cũng cao hơn so với Bắc sông Hậu (7,67 ± 0,13 mm; $Z = –9,55$; $p < 0,0001$). *IO* dao động từ 3,19 ± 0,10 mm (Bắc sông Hậu) đến 3,86 ± 0,05 mm (Nam sông Hậu; $Z = –6,36$; $p < 0,0001$). Ngược lại, *ED* có xu hướng cao hơn tại Bắc sông Hậu (1,87 ± 0,04 mm) so với Nam sông Hậu (1,70 ± 0,02 mm; $Z = –4,12$; $p < 0,0001$). Đối với *MD*, Bắc sông Hậu ghi nhận giá trị trung bình 8,61 ± 0,16 mm, thấp hơn Nam sông Hậu (9,93 ± 0,09 mm; $Z = –8,16$; $p < 0,0001$).

Như vậy, các thông số hình thái chính của *O. nexipinnis* biến động theo cả ba yếu tố: giới tính, mùa và vùng sinh thái. Cá cái có *BD, MD* và *HL* phát triển hơn cá đực, trong khi cá đực có *ED* lớn hơn. Mùa mưa là giai đoạn gia tăng mạnh các đặc điểm thân và đầu, ngoại trừ *ED* cao hơn trong mùa khô. So sánh không gian cho thấy Nam sông Hậu có *HL, BD, IO* và *MD* vượt trội, trong khi Bắc sông Hậu chỉ có ED cao hơn.

Điều này có thể phản ánh vai trò quan trọng hơn của thị giác ở cá đực, giúp nâng cao khả năng phát hiện đối thủ và tìm kiếm bạn tình trong mùa sinh sản. Sự khác biệt về hình thái này phù hợp với những nhận định trước đây về tính biệt hóa giới tính ở nhiều loài cá đáy thuộc phân bộ Gobioidei, trong đó cá cái thường tăng trưởng kích thước cơ thể nhằm phục vụ sinh sản, còn cá đực phát triển các đặc điểm hỗ trợ hành vi giao phối hoặc bảo vệ lãnh thổ [22].

Bảng 1. So sánh các thông số hình thái của *Oxuderces nexipinnis* theo giới tính

Thông số hình thái	Giới tính	Số lượng	Trung bình (mm)	Sai số chuẩn	Z	p
ED	Cá cái	223	1,67	0,03	–3,31	p < 0,001
	Cá đực	393	1,80	0,03		
IO	Cá cái	223	3,77	0,07	–1,24	0,21
	Cá đực	393	3,58	0,07		

Thông số hình thái	Giới tính	Số lượng	Trung bình (mm)	Sai số chuẩn	Z	p
BD	Cá cái	223	9,59	0,16	–5,48	<0,0001
	Cá đực	393	8,50	0,11		
MD	Cá cái	223	9,90	0,12	–3,88	0,0001
	Cá đực	393	9,28	0,11		
HL	Cá cái	223	19,13	0,24	–4,03	<0,0001
	Cá đực	393	17,88	0,20		

Mùa vụ là một trong những yếu tố quan trọng chi phối sự phát triển hình thái của cá bống miệng rộng *O. nexipinnis* (Bảng 2). Vào mùa mưa, hầu hết các thông số hình thái có giá trị cao hơn so với mùa khô, cho thấy điều kiện mùa mưa thuận lợi hơn cho tăng trưởng ($p < 0,05$). Như vậy, mùa mưa được ghi nhận là giai đoạn thuận lợi cho sự gia tăng kích thước các bộ phận cơ thể quan trọng như đầu, miệng và thân.

Bảng 2. So sánh các thông số hình thái của *Oxuderces nexipinnis* theo mùa

Thông số hình thái	Mùa	Số lượng	Trung bình (mm)	Sai số chuẩn	Z	p
ED	Mùa khô	165	2,05	0,04	–8,52	<0,0001
	Mùa mưa	451	1,65	0,02		
IO	Mùa khô	165	3,27	0,09	–5,94	<0,0001
	Mùa mưa	451	3,79	0,06		
BD	Mùa khô	165	7,91	0,15	–6,86	<0,0001
	Mùa mưa	451	9,26	0,11		
MD	Mùa khô	165	8,60	0,12	–7,70	<0,0001
	Mùa mưa	451	9,84	0,10		
HL	Mùa khô	165	15,83	0,22	–9,86	<0,0001
	Mùa mưa	451	19,25	0,18		

Xét theo vùng sinh thái, các thông số *ED, IO, BD, HL* và *MD* của *O. nexipinnis* đều có sự khác biệt đáng kể ($p < 0,0001$; Bảng 3). Sự biến động này có thể bắt nguồn từ đặc trưng môi trường ở từng khu vực, đặc biệt là sự khác biệt về độ mặn và pH. Kết quả cho thấy phần lớn các thông số hình thái đạt giá trị cao hơn ở khu vực Nam sông Hậu, ngoại trừ *ED* cao hơn ở Bắc sông Hậu. Sự phân hóa hình thái giữa các quần thể *O. nexipinnis* ủng hộ giả thuyết về tính linh hoạt kiểu hình dưới tác động của các điều kiện sinh thái đặc thù tại từng khu vực nghiên cứu, như đặc điểm thủy văn và sự khác biệt về nguồn thức ăn giữa các khu vực trong hệ thống sông Hậu đã ảnh hưởng đến các chỉ số hình thái của loài.

Bảng 3. So sánh các thông số hình thái của *Oxuderces nexipinnis* theo khu vực thu mẫu

Thông số hình thái	Vùng sinh thái	Số lượng	Trung bình (mm)	Sai số chuẩn	Z	p
ED	Bắc sông Hậu	197	1,87	0,04	–4,12	<0,0001
	Nam sông Hậu	419	1,70	0,02		
IO	Bắc sông Hậu	197	3,19	0,10	–6,36	<0,0001
	Nam sông Hậu	419	3,86	0,05		
BD	Bắc sông Hậu	197	7,67	0,13	–9,55	<0,0001
	Nam sông Hậu	419	9,47	0,11		

Thông số hình thái	Vùng sinh thái	Số lượng	Trung bình (mm)	Sai số chuẩn	Z	p
MD	Bắc sông Hậu	197	8,61	0,16	–8,16	<0,0001
	Nam sông Hậu	419	9,93	0,09		
HL	Bắc sông Hậu	197	15,69	0,21	–11,94	<0,0001
	Nam sông Hậu	419	19,58	0,18		

So sánh với các nghiên cứu trước đây trên những loài cá thuộc họ Gobiidae hoặc Oxudercidae, kết quả của chúng tôi cho thấy sự biến động hình thái ở *O. nexipinnis* vừa có điểm tương đồng vừa có đặc thù riêng. Chẳng hạn, *Glossogobius giuris* đã được ghi nhận có sự khác biệt hình thái rõ rệt giữa các quần thể tại ba sinh cảnh nước khác nhau ở miền Trung Việt Nam, phản ánh sự thích nghi kiểu hình với điều kiện môi trường [23]. Điều này củng cố nhận định rằng biến động hình thái của *O. nexipinnis* theo mùa và vùng sinh thái liên quan mật thiết đến nguồn thức ăn, điều kiện thủy văn – sinh thái và chiến lược sinh tồn qua mùa.

3.3. Sự biến động của một số tỉ lệ hình thái

Đối với tỷ lệ *ED/HL*, mô hình Linear Mixed Model cho thấy Log*HL* không có ảnh hưởng rõ rệt ($F = 2,04$; $p = 0,15$). Các biến có ý nghĩa thống kê bao gồm kích cỡ cá ($F = 12,00$; $p < 0,001$) và mùa thu mẫu ($F = 6,21$; $p = 0,03$). Cá trưởng thành có tỷ lệ *ED/HL* cao hơn cá chưa trưởng thành, trong khi mùa mưa có tỷ lệ *ED/HL* thấp hơn mùa khô. Ngoài ra, nhiều tương tác có ý nghĩa gồm giới tính × kích cỡ cá ($F = 7,13$; $p < 0,01$), kích cỡ cá × mùa thu mẫu ($F = 16,36$; $p < 0,0001$), giới tính × vùng sinh thái ($F = 9,45$; $p < 0,01$), mùa thu mẫu × vùng sinh thái ($F = 26,22$; $p < 0,0001$) và giới tính × mùa thu mẫu × vùng sinh thái ($F = 6,35$; $p = 0,01$). Mô hình có $R^2 = 0,48$, trong đó thành phần ngẫu nhiên tháng chiếm 35,6% biến thiên (ICC). Các phân tích hậu nghiệm xác nhận sự khác biệt giữa cá trưởng thành và chưa trưởng thành ($p < 0,001$), giữa mùa mưa và mùa khô ($p = 0,03$), trong khi không có sự khác biệt có ý nghĩa giữa giới tính ($p = 0,12$) hay địa điểm ($p = 0,14$).

Đối với tỷ lệ *IO/HL*, biến giải thích chính là Log*HL* ($F = 85,72$; $p < 0,0001$). Ngoài Log*HL*, chỉ có tương tác mùa thu mẫu × vùng sinh thái có ý nghĩa ($F = 20,17$; $p < 0,0001$), cho thấy sự khác biệt theo mùa thay đổi giữa các địa điểm khảo sát. Các yếu tố còn lại như giới tính ($p = 0,98$), kích cỡ cá ($p = 0,93$), mùa thu mẫu ($p = 0,35$) và vùng sinh thái ($p = 0,97$) đều không có ý nghĩa. Mô hình đạt $R^2 = 0,54$, với tháng đóng góp lớn (ICC = 43,9%). Hậu nghiệm không cho thấy khác biệt giữa các mức giới tính, kích cỡ cá, mùa thu mẫu hoặc vùng sinh thái khi xét riêng lẻ ($p > 0,30$).

Đối với tỷ lệ *BD/HL*, Log*HL* là biến dự báo mạnh nhất ($F = 309,93$; $p < 0,0001$). Các yếu tố khác gồm giới tính ($p = 0,79$), kích cỡ cá ($p = 0,06$), mùa thu mẫu ($p = 0,50$) và vùng sinh thái ($p = 0,79$) đều không có ý nghĩa thống kê. R^2 của mô hình đạt 0,67 và Month chiếm 41,5% biến thiên (ICC). Hậu nghiệm cho thấy không có sự khác biệt rõ rệt giữa các nhóm giới tính, mùa thu mẫu hay vùng sinh thái ($p > 0,50$), trong khi kích cỡ cá tiệm cận mức ý nghĩa ($p = 0,06$).

Đối với tỷ lệ *MD/HL*, Log*HL* có tác động rất rõ rệt ($F = 134,79$; $p < 0,0001$). Bên cạnh đó, nhiều tương tác có ý nghĩa thống kê được ghi nhận: giới tính × kích cỡ cá ($F = 5,16$; $p = 0,02$), kích cỡ cá × mùa thu mẫu ($F = 11,42$; $p < 0,001$), giới tính × vùng sinh thái ($F = 4,67$; $p = 0,03$) và đặc biệt là tương tác bốn chiều giới tính × kích cỡ cá × mùa thu mẫu × vùng sinh thái ($F = 7,07$; $p < 0,01$). Các yếu tố đơn lẻ như giới tính ($p = 0,78$), kích cỡ cá ($p = 0,96$), mùa thu mẫu ($p = 0,38$) và vùng sinh thái ($p = 0,12$) không có ý nghĩa. Mô hình có $R^2 = 0,46$, với ICC theo tháng là 12,4%. Hậu nghiệm không phát hiện sự khác biệt đáng kể giữa giới tính, kích cỡ cá, mùa thu mẫu hay vùng sinh thái khi xét riêng lẻ ($p > 0,10$).

So sánh tổng hợp cho thấy các tỉ lệ hình thái của *O. nexipinnis* có mức độ đáp ứng khác nhau

trước các yếu tố sinh học và môi trường. Trong đó, *BD/HL* là tỉ lệ tương đối ổn định nhất, chủ yếu liên quan đến Log*HL* và ít chịu ảnh hưởng trực tiếp của các yếu tố giới tính, mùa vụ, nhóm kích thước và vùng sinh thái. *IO/HL* chủ yếu phụ thuộc vào Log*HL*, nhưng vẫn chịu ảnh hưởng đáng kể của tương tác mùa vụ × vùng sinh thái. Ngược lại, *ED/HL* chịu ảnh hưởng rõ hơn bởi kích thước cá, mùa vụ và nhiều tương tác giữa các yếu tố sinh học – môi trường. Tỉ lệ *MD/HL* thể hiện tính biến động phức hợp, với các ảnh hưởng chủ yếu đến từ các tương tác giữa giới tính, nhóm kích thước, mùa vụ và vùng sinh thái, trong khi các yếu tố đơn lẻ ít có ý nghĩa thống kê. Thành phần biến thiên theo tháng, với ICC dao động từ 12,4% đến 43,9%, cũng cho thấy yếu tố thời gian và biến động ngắn hạn là nguồn sai khác quan trọng trong sự biến động hình thái của loài. Những phát hiện này cho thấy sự đa dạng trong cơ chế chi phối hình thái của *O. nexipinnis*, từ các quan hệ đồng dạng tương đối ổn định đến những đặc điểm nhạy cảm với bối cảnh sinh thái – sinh học.

Khi so sánh với các nghiên cứu trước đây, xu hướng biến đổi hình thái của *O. nexipinnis* cho thấy nhiều điểm tương đồng với các loài cá bống khác trong phân họ Oxudercinae. Nghiên cứu trên 1.031 cá thể *Periophthalmus chrysospilos* đã ghi nhận sự biến đổi đáng kể của các tỷ lệ hình thái như *ED/HL*, *IO/HL*, *BD/TL* theo giới tính, mùa và khu vực địa lý; cá cái trong mùa mưa tại các khu vực từ Trà Vinh đến Cà Mau có chỉ số hình thái cao hơn [24]. Kết quả này tương đồng với số liệu của *O. nexipinnis*, trong đó các tỷ lệ hình thái chịu ảnh hưởng đồng thời của yếu tố giới tính, mùa và vùng sinh thái.

Bảng 4. Giá trị trung bình (±SE) các tỉ lệ hình thái của *O. nexipinnis* theo giới tính, mùa và vùng sinh thái

Nhóm		*ED/HL*	*IO/HL*	*BD/HL*	*MD/HL*
Giới tính	Cá cái	0,092 ± 0,003	0,199 ± 0,004	0,505 ± 0,007	0,529 ± 0,008
	Cá đực	0,106 ± 0,002	0,200 ± 0,004	0,478 ± 0,004	0,531 ± 0,006
Mùa thu mẫu	Mùa khô	0,131 ± 0,003	0,205 ± 0,005	0,500 ± 0,007	0,556 ± 0,010
	Mùa mưa	0,091 ± 0,002	0,198 ± 0,003	0,483 ± 0,004	0,521 ± 0,006
Vùng sinh thái	BSH	0,122 ± 0,003	0,201 ± 0,006	0,489 ± 0,005	0,556 ± 0,009
	NSH	0,092 ± 0,002	0,199 ± 0,003	0,487 ± 0,005	0,518 ± 0,005

Bảng 4 cho thấy tỷ lệ *ED/HL* dao động từ 0,092 ± 0,003 ở cá cái đến 0,106 ± 0,002 ở cá đực và từ 0,091 ± 0,002 trong mùa mưa đến 0,131 ± 0,003 trong mùa khô. Tỷ lệ *IO/HL* ít dao động hơn, từ 0,198 ± 0,003 trong mùa mưa đến 0,205 ± 0,005 trong mùa khô. Đối với *BD/HL* và *MD/HL*, sự khác biệt giữa các nhóm không thể hiện theo một xu hướng đơn lẻ rõ ràng, mà cần được diễn giải trong mối liên hệ với các tương tác giữa giới tính, mùa vụ, nhóm kích thước và vùng sinh thái trong mô hình LMM.

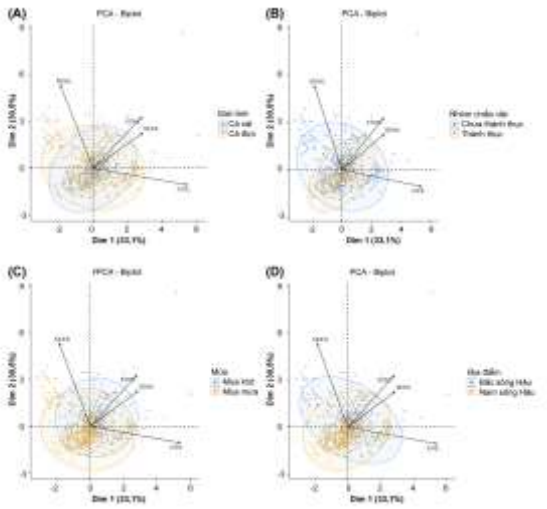
Kết quả kiểm định từ mô hình Linear Mixed Model cho thấy tương tác giới tính × vùng sinh thái ảnh hưởng có ý nghĩa đến *ED/HL* ($F = 9,45$; $p < 0,05$) và *MD/HL* ($F = 4,67$; $p < 0,05$), trong khi tương tác mùa × vùng sinh thái ảnh hưởng đáng kể đến *ED/HL* ($F = 26,22$; $p < 0,05$) và *IO/HL* ($F = 20,17$; $p < 0,05$). Các kết quả này tương đồng với nghiên cứu trên *Caragobius urolepis*, trong đó các chỉ số hình thái vùng đầu như *ED* và *MD* có sự khác biệt theo giới tính và thay đổi theo môi trường sống [22]. Ngoài ra, nghiên cứu về *Periophthalmodon septemradiatus* ở hạ lưu sông Hậu cũng cho thấy mô hình tăng trưởng và hệ số điều kiện cơ thể thay đổi theo mùa và địa điểm [15]. Điều này phù hợp với kết quả ở *O. nexipinnis*, khi các tỷ lệ hình thái biến động theo mùa và vùng sinh thái. Tương tự, nghiên cứu về *Glossogobius olivaceus* ở rừng ngập mặn miền Bắc Việt Nam cũng ghi nhận một số chỉ tiêu

hình thái thay đổi đáng kể theo điều kiện thủy văn và nguồn thức ăn, trong khi các chỉ tiêu khác ổn định hơn [25]. Nhìn chung, các tỷ lệ hình thái của *O. nexipinnis* cho thấy mức độ đáp ứng khác nhau trước các yếu tố sinh học và môi trường: *ED/HL* và *MD/HL* chịu ảnh hưởng phức hợp hơn, *IO/HL* chủ yếu được chi phối bởi Log*HL*, với ảnh hưởng bổ sung của tương tác mùa × vùng sinh thái, trong khi các yếu tố khác không có ý nghĩa. Trong đó, các tương tác giới tính × vùng sinh thái và mùa × vùng sinh thái là đáng chú ý nhất, phản ánh sự biến dị hình thái dưới tác động kết hợp của cả yếu tố sinh học và điều kiện thủy văn tại vùng hạ lưu sông Mê Kông.

Phân tích thành phần chính (PCA) được bổ sung nhằm trực quan hóa xu hướng phân bố hình thái của *O. nexipinnis* dựa trên bốn tỉ lệ hình thái *ED/HL, IO/HL, BD/HL* và *MD/HL*. Kết quả cho thấy hai thành phần chính đầu tiên giải thích 63,59% tổng phương sai của bộ dữ liệu, trong đó PC1 giải thích 33,11% và PC2 giải thích 30,48%. Kiểm định Bartlett có ý nghĩa thống kê (χ^2 = 179,79; df = 6; p < 0,0001), cho thấy các biến hình thái có tương quan với nhau. Tuy nhiên, chỉ số KMO tổng thể đạt 0,336, cho thấy mức độ phù hợp của dữ liệu đối với PCA còn hạn chế; vì vậy, kết quả PCA trong nghiên cứu này được sử dụng chủ yếu như một phân tích khám phá nhằm hỗ trợ trực quan hóa xu hướng phân bố mẫu.

Về hệ số tải, PC1 có liên quan mạnh nhất với *IO/HL* (loading = 0,890), đồng thời có sự đóng góp của *ED/HL* và *BD/HL*. Trong khi đó, PC2 có liên quan mạnh nhất với *MD/HL* (loading = 0,873), cùng với sự đóng góp của *ED/HL*. Kết quả PCA-biplot cho thấy các cá thể có sự chồng lấn đáng kể giữa các nhóm trên không gian PC1–PC2, đặc biệt khi phân nhóm theo giới tính và nhóm kích thước. Tuy vậy, khi phân nhóm theo mùa vụ và vùng sinh thái, sự phân bố mẫu vẫn ghi nhận xu hướng khác biệt tương đối, gợi ý rằng biến động hình thái của *O. nexipinnis* có thể chịu ảnh hưởng đồng thời của nhiều yếu tố sinh học và điều kiện môi trường tại khu vực thu mẫu.

Sự chồng lấn giữa các nhóm trên không gian PCA cho thấy các tỉ lệ hình thái của *O. nexipinnis* không phân tách hoàn toàn theo một yếu tố đơn lẻ. Điều này phù hợp với kết quả từ mô hình Linear Mixed Model, trong đó nhiều tỉ lệ hình thái chịu ảnh hưởng bởi các tương tác giữa giới tính, nhóm kích thước, mùa vụ và vùng sinh thái. Do đó, PCA trong nghiên cứu này không được sử dụng như bằng chứng độc lập để khẳng định sự phân nhóm rõ rệt, mà đóng vai trò hỗ trợ trực quan cho nhận định rằng sự biến động hình thái của loài là kết quả của tác động tổng hợp giữa đặc điểm sinh học cá thể và điều kiện sinh thái tại ĐBSCL.



Hình 4. Biểu đồ PCA-biplot dựa trên bốn tỉ lệ hình thái *ED/HL, IO/HL, BD/HL* và *MD/HL* của *Oxuderces nexipinnis*. (A) phân nhóm theo giới tính; (B) phân nhóm theo nhóm kích thước; (C) phân nhóm theo mùa vụ; (D) phân nhóm theo vùng sinh thái. PC1 và PC2 lần lượt giải thích 33,11% và 30,48% tổng phương sai. Các mũi tên biểu thị hướng và mức độ đóng góp của các biến hình thái; các điểm biểu thị từng cá thể.

4. Kết luận

Loài *O. nexipinnis* thể hiện sự biến động rõ rệt về các đặc điểm hình thái dưới tác động của giới tính, mùa vụ và vùng sinh thái. Cá cái nhìn chung có *BD, HL* và *MD* cao hơn cá đực, trong khi *ED* lại trội hơn ở cá đực. Hầu hết các thông số hình thái biến đổi theo mùa, thường đạt giá trị cao hơn vào mùa mưa, ngoại trừ *ED* lớn hơn trong mùa khô. Khác biệt theo vùng sinh thái cũng được ghi nhận rõ, với *HL, BD, IO* và *MD*

cao hơn tại Nam sông Hậu, trong khi *ED* cao hơn tại Bắc sông Hậu.

Các tỉ lệ hình thái *ED/HL*, *IO/HL*, *BD/HL* và *MD/HL* cho thấy mức độ đáp ứng khác nhau trước các yếu tố sinh học và môi trường. Trong đó, *BD/HL* và *MD/HL* thể hiện mức độ biến động phức hợp hơn, liên quan đến nhiều tương tác giữa giới tính, nhóm kích thước, mùa vụ và vùng sinh thái; *IO/HL* chịu ảnh hưởng rõ của Log*HL* và tương tác mùa vụ × vùng sinh thái; trong khi *BD/HL* là tỉ lệ tương đối ổn định nhất. Kết quả PCA bổ sung cho thấy các nhóm cá có sự chồng lấn đáng kể trên không gian PC1–PC2, nhưng vẫn ghi nhận xu hướng khác biệt tương đối theo mùa vụ và vùng sinh thái. Những kết quả này bổ sung dữ liệu cho công tác định loại, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho việc đánh giá khả năng thích nghi sinh thái của *O. nexipinnis* trong điều kiện môi trường biến động ở vùng ven biển ĐBSCL.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc Gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 106.05-2023.02. Chúng tôi xin cảm ơn Lý Văn Vương, Trần Thị Cẩm Ly cùng các bạn học viên và sinh viên đã hỗ trợ trong quá trình thu và phân tích mẫu.

Tài liệu tham khảo

[1] G. W. Barlow, Causes and Significance of Morphological Variation in Fishes, Systematic Zoology, Vol. 10, 1961, pp. 105-117, https://doi.org/10.2307/2411595.

[2] A. V. Gispert, S. Yavno, J. Naspleda, L. Zamora, R. M. Amich, M. G. Fox, Patterns of Morphological Variation among Native and Non-native Pumpkinseed (*Lepomis gibbosus*) Populations: Shared and Unique Aspects of Diversification, Environmental Biology of Fishes, Vol. 100, 2017, pp 969-980, https://doi.org/10.1007/s10641-017-0626-x.

[3] R. B. Langerhans, T. J. DeWitt, Shared and Unique Features of Evolutionary Diversification, The American Naturalist, Vol. 164, 2004, pp. 335-349, https://doi.org/ 10.1086/422857.

[4] Q. Q. Cheng, D. R. Lu, L. Ma, Morphological Differences between Close Populations Discernible by Multivariate Analysis: A Case Study of Genus *Coilia* (Teleostei: Clupeiforms), Aquatic Living Resources, Vol. 18, 2005, pp. 187-192, https://doi.org/ 10.1051/Alr:2005020.

[5] M. A. B. Siddik, M. A. Hanif, M. R. Chaklader, A. Nahar, S. Mahmud, Fishery Biology of Gangetic Whiting *Sillaginopsis panijus* (Hamilton, 1822) Endemic to Ganges Delta, Bangladesh, The Egyptian Journal of Aquatic Research, Vol. 41, No. 4, 2015, pp. 307–313, https://doi.org/10.1016/j.ejar.2015.11.001.

[6] M. R. Chaklader, M. A. B. Siddik, A. N. Ashfaqun Nahar, M. A. Hanif, M. J. Alam, S. M. Sultan Mahmud, Morphometric Parameters and Allometric Growth in Paradise Threadfin *Polynemus paradiseus* (Linnaeus, 1758) from a Coastal River of Bangladesh, Journal of Aquaculture Research and Development, Vol. 7, Art, No. 417, 2016, https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000417.

[7] H. AnvariFar, A. Khyabani, H. Farahmand, S. Vatandoust, H. AnvariFar, S. Jahageerdar, Detection of Morphometric Differentiation between Isolated Up-and Downstream Populations of Siah Mahi (*Capoeta capoeta gracilis*) (Pisces: Cyprinidae) in the Tajan River (Iran), Hydrobiologia, Vol. 673, 2011, pp. 41-52, https://doi.org/ 10.1007/S10750-011-0748-7.

[8] Q. M. Dinh, T. T. H. Lam, T. H. D. Nguyen, Study on External Morphology of *Butis humeralis* in the Coastline Regions of Mekong Delta, Science and Technology Journal of Agriculture and Rural Development, No. 10, 2021, pp. 146–153 (in Vietnamese).

[9] J. S. Nelson, T. C. Grande, M. V. H. Wilson, Fishes of the World, 5th ed., John Wiley and Sons, Hoboken, USA, 2016, pp. 326–330.

[10] H. V. Nguyen, Freshwater Fish of Vietnam, Agriculture Publishing House, Hanoi, Vol. II, 2005 (in Vietnamese).

[11] J. S. Nelson, Fishes of the World, Wiley, 2006.

[12] Y. D. Mai, T. V. Nguyen, T. V. Nguyen, Y. H. Le, L. B. Hua, Identification of Freshwater Fishes of South Vietnam, Ha Noi: Science and Technology Publishing House, 1992 (in Vietnamese).

[13] D. D. Tran, K. Shibukawa, T. P. Nguyen, P. H. Ha, X. L. Tran, V. H. Mai, K. Utsugi, *Fishes of Mekong Delta, Vietnam*, Can Tho University Publisher, 2013 (in Vietnamese).

[14] Q. M. Dinh, T. H. D. Nguyen, T. T. H. Lam, T. T. K. Nguyen, G. V. Tran, Z. Jaafar, Foraging Ecology of the Amphibious Mudskipper *Periophthalmus chrysospilos* (Gobiiformes: Gobiidae), PeerJ, Vol. 9, 2021, pp. E12582, https://doi.org/10.7717/peerj.12582.

[15] V. H. Mai, Reproductive Ecology of Two Species of the Mudskippers, *Periophthalmodon septemradiatus* and *Periophthalmus modestus*, PhD Thesis, Nagasaki University, 2020, pp. 1-79.

[16] G. Polgar, V. Bartolino, Size Variation of Six Species of Oxudercine Gobies along the Intertidal Zone in a Malayan Coastal Swamp, Marine Ecology Progress Series, Vol. 409, 2010, pp. 199-212, https://doi.org/10.3354/meps08597

[17] L. R. Parenti, Z. Jaafar, The Natural Distribution of Mudskippers, In Fishes Out of Water, CRC Press, 2017, pp. 37-68.

[18] L. T. T. Vo, A. N. Tran, T. Q. Phan, Q. M. Dinh, Morphometrics Variations of *Mystus mysticetus* Roberts, 1992 in the Mekong Delta, Vietnam, Aquaculture, Aquarium, Conservation and Legislation, Vol. 14, 2021, pp. 3423-3431.

[19] Q. M. Dinh, Aspects of Reproductive Biology of the Red Goby *Trypauchen vagina* (Gobiidae) from the Mekong Delta, Journal of Applied Ichthyology, Vol. 34, 2018, pp. 103-110, https://doi.org/10.1111/jai.13521.

[20] Z. Jaafar, E.O. Murdy, Fishes Out of Water: Biology and Ecology of Mudskippers, CRC Press, United States, 2017.

[21] E. O. Murdy, A Taxonomic Revision and Cladistic Analysis of the Oxudercine Gobies (Gobiidae, Oxudercinae), Australian Museum Journal, Vol. 11, 1989, pp. 1-93, https://doi.org/10.3853/j.0812-7387.11.1989.93.

[22] P. L. H. Nguyen, L. T. C. Tran, T. T. A. Phan, T. K. Nguyen, L. T. T. Vo, Q. M. Dinh, Morphometrics Allometry Changes and Sexual Dimorphism in *Caragobius urolepis* (Gobiiformes: Gobiidae), Veterinary Integrative Sciences, Vol. 21, 2023, pp. 29-36, https://doi.org/10.12982/VIS. 2023.003.

[23] D. T. Nguyen, T. K. A. Tran, T. Nguyen, Body Shape Variations of Tank Goby *Glossogobius giuris* (Hamilton 1822) in three Distinct Water Bodies of Central Vietnam, Croatian Journal of Fisheries, Vol. 82, No. 3, 2024, pp. 91–100, https://doi.org/10.2478/cjf-2024-0012.

[24] H. Le Trung, M. Q. Dinh, V. U. Hua, H. D. T. Nguyen, The Morphological Measurement Variations of *Periophthalmus chrysospilos* along the Coastline in the Mekong Delta, VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology, Vol. 38, No. 1, 2021,
https://doi.org/10.25073/2588-1140/vnunst.5245.

[25] T. Ta, N. Chu, N. Nguyen, H. Tran, T. Tran, L. Ha, Morphometrics and Body Condition of *Glossogobius olivaceus* in Mangrove Forests of Northern Vietnam, The Journal of Animal and Plant Sciences, Vol. 32, No. 3, 2022, pp. 845–854, https://doi.org/10.36899/JAPS.2022.3.0485.