TÁC ĐỘNG THỦY VĂN - SINH THÁI CỦA HỆ THỐNG THỦY LỢI CÁI LỚN-CÁI BÉ ĐẾN SẢN XUẤT TÔM-LÚA VÀ CÂY TRỒNG NƯỚC NGỌT: PHÂN TÍCH QUAN TRẮC TRƯỚC- SAU VẬN HÀNH

Phạm Văn Tùng
Viện Kỹ thuật Biển
Nguyễn Đăng Tính, Nguyễn Trịnh Chung
Trường Đại học Thủy lợi

Tóm tắt: *Nghiên cứu đánh giá mối liên hệ giữa biến động thủy văn (độ mặn, mực nước) và hiệu quả sản xuất nông-thủy sản sau khi hệ thống thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé vận hành thử (2021-2023). Bộ dữ liệu gồm chuỗi quan trắc tại 12 điểm đo (2020-2023) và số liệu năng suất tôm, lúa theo các vụ Đông Xuân, Hè Thu, Mùa. Dữ liệu được chuẩn hóa theo mùa vụ; tính chỉ số phơi nhiễm mặn (SI) và hệ số biến thiên (CV) để đặc trưng mức độ và độ ổn định mặn-nước; đồng thời ước lượng mô hình hồi quy tuyến tính đa biến (OLS) liên hệ năng suất với SI, mực nước trung bình mùa vụ và thời điểm lấy nước đầu vụ. Kết quả cho thấy sau vận hành, độ mặn trung bình giảm 10-20%, biên độ dao động mặn ngày giảm khoảng 50%, và thời gian duy trì mặn ổn định cho nuôi tôm tăng thêm 10-15 ngày; mực nước nội đồng ổn định trong khoảng ±0,15 m. Tương ứng, năng suất tôm tăng 10-12% và lúa tăng 6-8%, đặc biệt rõ ở vùng chuyển tiếp An Biên - Gò Quao. Mô hình hồi quy đạt $R^2 = 0,76$; $F\ p < 0,001$, với hệ số của SI âm có ý nghĩa thống kê, còn H_{avg} và M_{intake} dương, khẳng định vai trò then chốt của kiểm soát mặn-nước đối với năng suất. Nghiên cứu kiến nghị vận hành theo chế độ lấy mặn sớm, xả mặn-tích ngọt cuối vụ, kết hợp giám sát tự động và vận hành cộng đồng, nhằm tối ưu hóa hiệu quả kinh tế-sinh thái và tăng khả năng thích ứng khí hậu cho vùng tôm-lúa và ngọt hóa.*
Từ khóa: *Cái Lớn - Cái Bé; thủy văn - sinh thái; tôm-lúa; độ mặn; năng suất; cửa sổ triều; OLS.*

Summary: *This study evaluates the relationship between hydro-ecological variations (salinity and water level) and agro-aquaculture productivity following the pilot operation of the Cai Lon - Cai Be irrigation system during 2021-2023. The dataset includes observations from 12 monitoring stations (2020-2023) and production data of shrimp and rice across the Winter-Spring, Summer-Autumn, and Main cropping seasons. Data were standardized by season, and two indicators were derived: the Salinity Exposure Index (SI) and the Coefficient of Variation (CV), reflecting salinity magnitude and stability. A multivariate linear regression model (OLS) was then applied to quantify the effects of SI, average water level, and timing of initial water intake on yield. Results show that after system operation, mean salinity decreased by 10-20%, daily salinity fluctuation declined by nearly 50%, and the stable salinity duration for shrimp culture increased by 10-15 days; meanwhile, water level variation within the canal network was maintained within ±0.15 m. Correspondingly, shrimp yield increased by 10-12% and rice yield by 6-8%, with the most notable improvement observed in the transitional zone of An Bien - Go Quao. The regression model achieved $R^2 = 0.76$; F, $p < 0.001$, indicating a statistically significant relationship, where SI negatively and H_{avg} and M_{intake} positively affect yield. The findings suggest that operating the system under a tidal-window regime allowing early salinity intake and late freshwater flushing combined with automated monitoring and community-based regulation, can optimize hydro-ecological balance and enhance climate resilience for shrimp-rice and freshwater farming zones.*
Keywords: *Cai Lon - Cai Be; hydro-ecology; shrimp-rice; salinity; productivity; tidal window; OLS regression.*

1. GIỚI THIỆU

Vùng Bán đảo Cà Mau (BĐCM) nằm ở cực Nam của Việt Nam, được bao bọc bởi biển Tây và biển Đông, là khu vực chuyển tiếp đặc trưng giữa hai hệ sinh thái nước ngọt và nước lợ - mặn. Hệ thống sông ngòi ở đây có mạng lưới phân lưu chằng chịt, nối liền sông Hậu, sông Cái Lớn, sông Gành Hào và các kênh ven biển, tạo điều kiện cho dòng triều xâm nhập sâu vào nội đồng trong mùa khô. Sự giao thoa

Ngày nhận bài: 05/2/2026
Ngày thông qua phản biện: 26/3/2026
Ngày duyệt đăng: 02/4/2026

phức tạp của các yếu tố thủy văn - khí tượng - triều biển khiến BĐCM trở thành khu vực có tính nhạy cảm cao về thủy văn và sinh thái, nơi các biến động nhỏ về độ mặn hay mực nước đều tác động trực tiếp đến năng suất và sinh kế nông dân [14].

Trong bối cảnh đó, mô hình tôm-lúa được xem là giải pháp canh tác thích ứng nổi bật, hài hòa giữa lợi ích kinh tế và cân bằng sinh thái. Mô hình này dựa trên quy luật mùa vụ tự nhiên: mùa khô duy trì độ mặn thích hợp để nuôi tôm, còn mùa mưa chuyển sang nước ngọt để trồng lúa. Tuy nhiên, những năm gần đây, do biến đổi khí hậu, nước biển dâng và sự thay đổi chế độ dòng chảy từ thượng nguồn sông Mekong, xâm nhập mặn diễn biến ngày càng sớm và sâu, trong khi khả năng ngọt hóa nội đồng giảm, làm rút ngắn chu kỳ canh tác và tăng rủi ro thất mùa [7],[13]. Các nghiên cứu quốc tế cũng ghi nhận rằng biến động mặn-ngọt đột ngột làm tăng stress thẩm thấu, giảm tăng trưởng và tăng tỷ lệ bệnh trên tôm nuôi, đặc biệt ở pha chuyển mùa [8],[11].

Nhằm giải quyết tình trạng đó, Chính phủ Việt Nam đã đầu tư xây dựng Hệ thống công trình thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé [1], một dự án hạ tầng thủy lợi đa mục tiêu có quy mô lớn nhất khu vực BĐCM, hoàn thành giai đoạn 1 vào năm 2021. Theo Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam [5], hệ thống có diện tích ảnh hưởng trực tiếp khoảng 384.120 ha, trong đó 147.340 ha là vùng sản xuất tôm-lúa và cây trồng nước ngọt. Mục tiêu chính của hệ thống là kiểm soát mặn, cấp ngọt, tiêu úng, trữ nước và hỗ trợ vận hành linh hoạt cho các vùng sản xuất đặc thù của Kiên Giang, Bạc Liêu và Cà Mau, đồng thời góp phần ổn định sinh kế và giảm thiểu rủi ro khí hậu.

Trước khi công trình vận hành, khu vực này thường xuyên đối mặt với nhiều rủi ro thủy văn - sinh thái nghiêm trọng: mặn đến sớm (tháng 1-2), ngọt đến muộn (tháng 6-7), khiến người dân khó bố trí mùa vụ; ngập đầu vụ và thiếu nước cuối vụ xảy ra phổ biến ở vùng ven biển An Minh - An Biên và vùng chuyển tiếp Phước Long - Vĩnh Thuận. Những bất ổn này không chỉ làm giảm năng suất mà còn gây biến động về môi trường đất và chất lượng nước, đặc biệt là hiện tượng phèn hóa khi chuyển mặn-ngọt đột ngột [6].

Sau khi hệ thống CLCB được đưa vào vận hành thử nghiệm từ cuối năm 2021, điều kiện thủy văn vùng BĐCM đã có nhiều thay đổi đáng kể. Các kết quả quan trắc [5] cho thấy ranh mặn được kiểm soát hiệu quả hơn, độ mặn trong vùng nuôi tôm được duy trì ổn định 8-12‰ trong suốt thời gian sinh trưởng, trong khi vùng sản xuất lúa vụ Hè Thu duy trì nước ngọt <1‰ tới 90% thời gian vụ. Nhờ vậy, tính ổn định sinh thái được phục hồi, và mô hình tôm-lúa luân phiên bắt đầu cho thấy hiệu quả rõ rệt hơn so với giai đoạn trước vận hành [6].

Tuy nhiên, việc đánh giá khoa học định lượng về tác động thủy văn - sinh thái của hệ thống CLCB đến sản xuất nông-thủy sản vẫn còn hạn chế. Hầu hết các nghiên cứu trước đây mới dừng ở mức định tính hoặc tập trung vào mô hình thủy lực - mặn mà chưa phân tích sâu về mối liên hệ giữa đặc trưng thủy văn (độ mặn, mực nước, thời gian lấy nước) với hiệu quả sản xuất thực tế. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm cung cấp một cách tiếp cận tích hợp, vừa định lượng biến động thủy văn sau vận hành, vừa xác định các chỉ số sinh thái có ảnh hưởng đến năng suất vùng tôm-lúa và cây trồng nước ngọt.

Cụ thể, mục tiêu nghiên cứu gồm ba nội dung chính: (i) Lượng hóa thay đổi thủy văn và mặn trong vùng CLCB giai đoạn sau vận hành; (ii) Phân tích mối quan hệ định lượng giữa điều kiện thủy văn (độ mặn, mực nước) và năng suất nông-thủy sản; (iii) Đề xuất giải pháp vận hành thích ứng, nhằm đảm bảo cân bằng sinh thái và phát triển bền vững cho hệ thống trong điều kiện biến đổi khí hậu và nước biển dâng ngày càng phức tạp.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Dữ liệu sử dụng

Nghiên cứu sử dụng ba nhóm dữ liệu chính gồm: quan trắc thủy văn - mặn, số liệu sản xuất nông-thủy sản và kết quả mô phỏng thủy

lực bằng mô hình MIKE 11. Chuỗi dữ liệu thủy văn được thu thập tại 12 trạm đo đại diện cho các tiểu vùng sinh thái trong hệ thống Cái Lớn - Cái Bé, phân bố từ ven biển đến nội đồng (Gò Quao, Xẻo Rô, Kim Quy, Cái Tư, Vĩnh Thuận, Phước Long...). Các trạm đo mực nước và độ mặn theo chu kỳ 1 giờ/lần, tăng cường 15 phút/lần trong giai đoạn vận hành cống, sử dụng thiết bị Cond 3310 SET1 (WTW - Đức) và SAL-1700 (Trung Quốc). Dữ liệu được chuẩn hóa theo hệ cao độ Hòn Dấu và kiểm định sai số bằng phương pháp Z-score [5].

Số liệu sản xuất bao gồm năng suất tôm sú, tôm thẻ và lúa các vụ Đông Xuân, Hè Thu, Mùa, thu thập từ Sở NN&PTNT (nay là Sở NN&MT) Kiên Giang [4] và Bạc Liêu [3] giai đoạn 2020-2023, đồng thời đối chiếu với điều tra tại bốn vùng trọng điểm: An Biên, An Minh, Vĩnh Thuận và Phước Long.

Ngoài dữ liệu thực đo, nghiên cứu còn khai thác kết quả mô phỏng từ mô hình MIKE 11, được hiệu chỉnh và kiểm định trong báo cáo Rà soát, điều chỉnh Quy trình vận hành tạm thời hệ thống CLCB [5]. Mô hình đạt R^2 = 0,88-0,93 và NSE = 0,79-0,86 đảm bảo độ tin cậy khi nội suy mặn - nước không gian [6]. Phạm vi nghiên cứu bao phủ hơn 380.000 ha vùng hưởng lợi trực tiếp của hệ thống, trong đó 147.340 ha là đất tôm-lúa; chuỗi phân tích chia hai giai đoạn: trước vận hành (2020-2021) và sau vận hành (2022-2023) để đánh giá tác động thủy văn - sinh thái của hệ thống.

2.2. Phương pháp xử lý và phân tích dữ liệu

Quy trình xử lý dữ liệu được thực hiện theo ba bước chính nhằm bảo đảm tính tin cậy và ổn định của chuỗi số liệu. Thứ nhất, các giá trị ngoại lai được loại bỏ bằng phương pháp Z-score ($|Z| > 3$) đối với chuỗi mặn và mực nước theo giờ, đồng thời kiểm tra chéo với nhật ký vận hành cống để loại trừ sai số thiết bị hoặc thời điểm chuyển chế độ. Thứ hai, dữ liệu sau khi làm sạch được làm mượt bằng bộ lọc trung bình trượt 3-5 điểm nhằm giảm nhiễu do dao động triều ngắn hạn nhưng vẫn giữ được đặc trưng biến động theo mùa vụ. Thứ ba, chuỗi cuối cùng được lọc theo điều kiện thủy văn - sinh thái: chỉ giữ lại các giá trị trong khoảng thời gian canh tác thực tế của từng vụ và loại bỏ các thời điểm khi độ mặn < 0,1‰ hoặc mực nước dưới ngưỡng đo tin cậy của thiết bị. Bộ dữ liệu sau xử lý được chuẩn hóa về ngày - mùa vụ, dùng làm đầu vào tính chỉ số SI, CV và mô hình hồi quy OLS.

Các chuỗi số liệu thủy văn - mặn được xử lý và phân tích theo phương pháp thống kê mô tả kết hợp mô hình hồi quy đa biến. Trước hết, dữ liệu được chuẩn hóa theo mùa vụ (Đông Xuân, Hè Thu, Mùa) để loại trừ ảnh hưởng của biến động khí hậu và triều. Độ mặn trung bình, mực nước trung bình và thời gian lấy nước đầu vụ được tổng hợp cho từng khu vực, làm cơ sở tính toán chỉ số phơi nhiễm mặn (Salinity Index - SI) phản ánh mức độ ảnh hưởng của mặn đến cây trồng, vật nuôi. Chỉ số này được xác định theo công thức:

$$SI = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{C_{th}} \quad (1)$$

trong đó C_i là nồng độ mặn trung bình ngày (‰), C_{th} là ngưỡng mặn chịu đựng của đối tượng (4‰ đối với lúa, 25‰ đối với tôm sú). Chỉ số SI > 1 cho thấy mức độ mặn vượt ngưỡng sinh trưởng tối ưu. Song song, hệ số biến thiên (CV) được tính để đánh giá mức độ ổn định của độ mặn và mực nước trong mùa vụ:

$$CV = \frac{\delta}{\mu}100\% \quad (2)$$

với σ là độ lệch chuẩn và μ là giá trị trung bình. Giá trị CV nhỏ thể hiện điều kiện thủy văn ổn định hơn, thuận lợi cho sinh trưởng và giảm rủi ro sốc mặn.

Để lượng hóa mối quan hệ giữa điều kiện thủy văn và năng suất sản xuất, nghiên cứu áp dụng mô hình hồi quy tuyến tính đa biến (Ordinary Least Squares - OLS) dưới dạng:

$$Y=a+b_1SI+b_2H_{avg}+b_3M_{intake}+\varepsilon \quad (3)$$

trong đó Y là năng suất (tấn/ha), SI là chỉ số phơi nhiễm mặn, H_{avg} là mực nước trung bình trong mùa vụ, và M_{intake} là thời điểm lấy nước đầu vụ (tháng). Hệ số hồi quy b_i thể hiện mức độ và hướng tác động của từng biến độc lập đến năng suất; các hệ số này được ước lượng với mức ý nghĩa thống kê α=0,05.

Mô hình được kiểm định bằng hệ số xác định (R^2), kiểm định F, và phân tích phần dư để đảm bảo tính tuyến tính và không vi phạm giả định thống kê. Việc kết hợp đồng thời chỉ số SI, CV và mô hình OLS giúp đánh giá định lượng tác động thủy văn - sinh thái của hệ thống CLCB đến hiệu quả sản xuất vùng tôm-lúa và cây trồng nước ngọt một cách khách quan và có cơ sở khoa học [5],[6].

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Biến động thủy văn - mặn sau vận hành hệ thống CLCB

Sau khi hệ thống thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé được đưa vào vận hành thử nghiệm giai đoạn 2021-2023, đặc trưng thủy văn - mặn trong vùng đã thay đổi rõ rệt cả về không gian lẫn thời gian. Kết quả quan trắc của Viện Kỹ thuật Biển [6] và Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam [5] cho thấy chế độ dao động mực nước, ranh mặn và thời gian phơi nhiễm mặn chuyển dần theo hướng ổn định hơn, phù hợp hơn với cơ cấu sản xuất tôm - lúa và cây trồng nước ngọt.

Về mặn, số liệu tại 12 trạm cho thấy độ mặn trung bình mùa khô ở các khu ven biển như An Biên, An Minh, Vĩnh Thuận duy trì ở mức 8-15‰, thấp hơn 10-20% so với trước vận hành; các trạm phía trong như Phước Long, Hồng Dân giảm từ khoảng 2,3‰ xuống 0,6-0,8‰, vụ lúa Hè Thu 2023 hầu hết ngày đều dưới 1‰ [5]. Độ mặn cực đại tại Xẻo Rô mùa khô 2023 còn 17,5‰, thấp hơn 5-7‰ so với giai đoạn 2016-2020[5]. Biên độ dao động mặn ngày ở vùng chuyển tiếp Gò Quao - Đông Yên giảm từ 8-10‰ xuống 3-5‰, phù hợp với các nghiên cứu quốc tế cho thấy tôm sú, tôm thẻ rất nhạy với dao động mặn nhanh (>5‰/ngày), dễ xuất hiện stress thẩm thấu và giảm tỷ lệ sống [9],[12]. Hệ số biến thiên độ mặn tại các trạm chính giảm 35-45%, trong khi vùng ngọt hóa phía trong (Phước Long - Hồng Dân) duy trì nước ngọt > 90% thời gian vụ, phản ánh hiệu quả điều phối dòng chảy và kiểm soát mặn theo cửa sổ triều (lấy mặn đầu vụ, xả ngọt cuối vụ)[6].

Về mực nước, dao động nội đồng tại các trạm trung tâm (Đông Yên, Kim Quy, Vĩnh Thuận) được giữ trong khoảng ±0,15 m quanh cao trình trung bình 0,65 m, thay vì ±0,30 m trước năm 2021; mực nước cực đại giảm 0,20-0,25 m, qua đó giảm nguy cơ ngập đầu vụ và hỗ trợ duy trì mực nước nền tương đối cao trong thời kỳ khô (tháng 3-4), có lợi cho cả ao nuôi tôm và vùng canh tác ven biển[5].

Không gian phân bố mặn - ngọt cũng dịch chuyển theo hướng thuận lợi hơn. Ranh mặn 4‰ mùa khô 2023 - ngưỡng phân định vùng tôm - lúa - được đẩy lùi ra gần tuyến Gò Quao - Xẻo Rô, xa hơn vị trí năm 2016 khoảng 12-15 km về phía biển; khu nội đồng Vĩnh Thuận, Phước Long vốn chịu mặn 1-2‰ vào tháng 2, nay chỉ còn 0,3-0,6‰ và duy trì nước ngọt trong suốt vụ lúa Hè Thu. Nhìn chung, kết quả cho thấy hệ thống CLCB đã góp phần tái lập ranh giới mặn - ngọt rõ rệt hơn, tạo vùng đệm bảo vệ cho các khu sản xuất nước ngọt phía trong. Kết quả tổng hợp trong Bảng 1 minh họa rõ xu thế giảm mặn và ổn định thủy văn tại các vị trí đặc trưng sau khi hệ thống đi vào vận hành.

Bảng 1: Thay đổi đặc trưng độ mặn và mực nước tại các trạm tiêu biểu giai đoạn trước và sau vận hành

Trạm đo	Vị trí	Độ mặn trung bình (‰)		Giảm (%)	Hệ số biến thiên - CV		Mực nước trung bình (m)	Nhận xét chính
		Trước 2021	Sau 2021		Trước 2021	sau 2021		
Gò Quao	Vùng chuyển tiếp	12,5	10,8	-14	0,35	0,21	0,68	Mặn ổn định, thích hợp nuôi tôm
Xẻo Rô	Ven biển	15,3	13,9	-9	0,38	0,25	0,72	Giảm dao động triều, ổn định mặn

Trạm đo	Vị trí	Độ mặn trung bình (‰)		Giảm (%)	Hệ số biến thiên - CV		Mực nước trung bình (m)	Nhận xét chính
		Trước 2021	Sau 2021		Trước 2021	sau 2021		
Vĩnh Thuận	Trung gian	7,4	6,2	-16	0,32	0,18	0,66	Ổn định mực nước, hạn chế xâm mặn
Phước Long	Nội đồng ngọt hóa	2,1	0,8	-62	0,42	0,17	0,63	Ngọt duy trì quanh năm, an toàn cho lúa

Nhìn chung, kết quả quan trắc và phân tích cho thấy sau khi vận hành, độ mặn giảm 10-20%, biên độ dao động mặn ngày giảm gần 50%, và thời gian duy trì mặn ổn định phục vụ nuôi tôm tăng thêm 10-15 ngày. Đồng thời, mực nước nội đồng ổn định hơn, góp phần giảm ngập đầu vụ và cải thiện khả năng điều tiết sinh thái vùng tôm-lúa. Những thay đổi này chứng minh vai trò điều hòa thủy văn rõ rệt của hệ thống CLCB, tạo nền tảng cho các phân tích tiếp theo về tác động sinh thái và hiệu quả sản xuất.

3.2. Ảnh hưởng đến năng suất nông - thủy sản

Sự thay đổi điều kiện thủy văn - mặn sau vận hành hệ thống CLCB đã tác động rõ rệt đến hiệu quả sản xuất nông - thủy sản trong vùng tôm-lúa và ngọt hóa. Dữ liệu năng suất giai đoạn 2020-2023 cho thấy năng suất trung bình của cả tôm và lúa đều tăng, đặc biệt tại các vùng chuyển tiếp có điều kiện mặn-ngọt luân phiên được điều tiết ổn định hơn.

Trước thời điểm vận hành, các vùng An Biên và Vĩnh Thuận thường chịu ảnh hưởng mặn sớm, khiến năng suất tôm trung bình chỉ đạt 0,55-0,60 tấn/ha/vụ, lúa Hè Thu đạt 4,8-5,0 tấn/ha. Sau khi vận hành, năng suất tôm tăng lên 0,62-0,68 tấn/ha, tương ứng mức tăng 10-12%; năng suất lúa tăng lên 5,3-5,4 tấn/ha, tức tăng 6-8% [4],[5]. Tăng năng suất này phản ánh hiệu quả của việc duy trì độ mặn ổn định, mực nước thích hợp và giảm tần suất ngập đầu vụ.

Bảng 2: Năng suất trung bình và biến động mặn tại các vùng trọng điểm trước và sau vận hành

Vùng	Mô hình sản xuất	Năng suất (tấn/ha)		Thay đổi (%)	SI trung bình	Ghi chú
		Trước 2021	Sau 2021			
An Biên	Tôm sú - lúa	0,58 / 4,9	0,65 / 5,3	+12/+8	0,74	Ổn định mặn 8-12‰
An Minh	Tôm sú - lúa	0,56 / 4,8	0,62 / 5,1	+11/+6	0,78	Giảm dao động mặn đầu vụ
Vĩnh Thuận	Tôm thẻ	0,69	0,77	+11,6	0,81	Mặn ổn định, ít sốc
Phước Long	Lúa 2 vụ	5,1	5,4	+5,9	0,25	Ngọt duy trì quanh năm

Để lượng hóa mối liên hệ giữa đặc trưng thủy văn và năng suất, mô hình hồi quy tuyến tính đa biến (OLS) được áp dụng với ba biến độc lập chính: chỉ số phơi nhiễm mặn (SI), mực nước trung bình mùa vụ (H_{avg}) và thời điểm lấy nước đầu vụ (M_{intake}). Kết quả hồi quy cho thấy mô hình đạt $R^2 = 0,76$, giá trị $F = 15,42$ ($p < 0,001$), chứng tỏ các yếu tố thủy văn khi xét đồng thời có ảnh hưởng thống kê rất rõ đến năng suất nông - thủy sản trong vùng.

Kết quả cho thấy hệ số $b_1 = -0,482$ có ý nghĩa cao ($p < 0,01$), chứng tỏ khi chỉ số phơi nhiễm mặn tăng 0,1 đơn vị, năng suất trung bình giảm khoảng 0,05 tấn/ha. Ngược lại, hệ số $b_2 = +0,325$

cho thấy mực nước ổn định có tác động tích cực đến năng suất: khi mực nước trung bình mùa vụ tăng 0,1 m, năng suất tăng trung bình 0,03 tấn/ha. Biến M_{intake} có hệ số dương (+0,154; $p < 0,05$) phản ánh việc chủ động lấy nước sớm đầu vụ giúp giảm rủi ro thiếu nước và ổn định chu kỳ nuôi tôm - trồng lúa.

Bảng 3: Kết quả hồi quy đa biến giữa năng suất và các yếu tố thủy văn (OLS)

Biến độc lập	Hệ số hồi quy (b_i)	Sai số chuẩn	Giá trị t	Sig. (p)	Ảnh hưởng
Hằng số	4,215	0,284	14,85	0,000	—
SI (chỉ số phơi nhiễm mặn)	-0,482	0,091	-5,29	0,001	Giảm năng suất khi mặn cao
H_{avg} (mực nước trung bình, m)	+0,325	0,078	4,16	0,002	Tăng năng suất khi mực nước ổn định
M_{intake} (tháng lấy nước đầu vụ)	+0,154	0,059	2,61	0,027	Lấy nước sớm có lợi cho vụ nuôi
R^2	0,76				
F (3,10)	15,42			$p < 0,001$	Mô hình có ý nghĩa thống kê

Giá trị $R^2 = 0,76$ cho thấy 76% biến động năng suất trong vùng có thể được giải thích bởi các yếu tố thủy văn đã xét, phần còn lại chịu ảnh hưởng của các yếu tố sinh học, kỹ thuật và quản lý. Kiểm định $F = 15,42$ ($p < 0,001$) khẳng định mô hình hồi quy có ý nghĩa tổng thể rất cao, tức là các biến SI, H_{avg} và M_{intake} khi xét chung đều có ảnh hưởng đáng kể đến năng suất.

Kết quả này chứng minh rằng việc điều tiết mặn - nước của hệ thống CLCB không chỉ ổn định môi trường sinh thái mà còn mang lại hiệu quả trực tiếp đối với năng suất sản xuất. Đặc biệt, vùng chuyển tiếp An Biên - Gò Quao là khu vực thể hiện tác động rõ nhất: năng suất tôm tăng trung bình 12%, lúa tăng 7-8%, cao hơn hẳn vùng ven biển và nội đồng. Ở vùng ngọt hóa Phước Long, năng suất lúa tăng nhẹ nhưng ổn định hơn, phản ánh vai trò của kiểm soát mặn trong đảm bảo an toàn sản xuất [3].

Như vậy, mô hình OLS đã lượng hóa được mối quan hệ thủy văn - năng suất một cách rõ ràng và thống kê đáng tin cậy, cho thấy các yếu tố vận hành cống, đặc biệt là thời điểm lấy mặn đầu vụ và duy trì mực nước ổn định, có ý nghĩa then chốt trong việc tối ưu hóa hiệu quả sinh thái - kinh tế của hệ thống CLCB.

3.3. Ảnh hưởng sinh thái và cân bằng nước

Việc vận hành hệ thống Cái Lớn - Cái Bé không chỉ điều chỉnh dòng chảy và kiểm soát mặn phục vụ sản xuất, mà còn tạo ra những biến đổi tích cực về môi trường sinh thái và cân bằng nước trong toàn vùng. Các quan trắc của Viện Kỹ thuật Biển [6] cho thấy sau khi hệ thống đi vào vận hành, cấu trúc phân bố mặn - ngọt được duy trì ổn định hơn theo mùa, giúp phục hồi cân bằng sinh thái tự nhiên giữa các vùng tôm-lúa, vùng chuyên canh lúa ngọt và vùng ven biển lợ - mặn.

Trước đây, các khu vực cửa sông và vùng chuyển tiếp như An Minh - An Biên thường chịu biến động mặn đột ngột theo chu kỳ triều, khiến nhiều ao nuôi tôm xảy ra hiện tượng sốc mặn, dẫn đến tôm chết rải rác hoặc chậm tăng trưởng. Sau vận hành, biên độ dao động mặn ngày giảm gần 50%, giúp ổn định hệ vi sinh vật nước, đặc biệt là nhóm phytoplankton và zooplankton đóng vai trò dinh dưỡng trong ao nuôi. Các nghiên cứu về ao nuôi tích hợp cũng chỉ ra rằng ổn định mặn - nước là yếu tố then chốt duy trì quần xã vi sinh ổn định và giảm stress sinh lý của tôm[6],[10]. Các kết quả đo sinh học của Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam [5] ghi nhận mật độ plankton trung bình tăng 20-25% so với giai đoạn 2020-2021, trong khi tỷ lệ DO (oxy hòa tan) trong ao đạt mức ổn định hơn 5 mg/L, một chỉ báo quan trọng về chất lượng nước sinh thái.

Ở vùng ngọt hóa phía trong (Phước Long,

Hồng Dân), chế độ nước được duy trì ổn định quanh năm, giúp giảm quá trình phèn hóa đất và hạn chế tích tụ muối trong tầng canh tác. Trước đây, do mặn xâm nhập sớm và rút ngọt muộn, nhiều khu vực bị tích muối Cl^- cao trong tầng 0-20 cm, làm giảm năng suất lúa Hè Thu. Sau khi hệ thống vận hành, độ mặn trong tầng đất mặt giảm từ 1,8‰ xuống dưới 0,5‰; pH đất tăng nhẹ từ 4,3-4,5 lên 5,2-5,5 [5]. Những thay đổi này cho thấy chế độ nước được điều tiết hợp lý đã cải thiện rõ môi trường đất - nước, góp phần nâng cao tính bền vững của hệ sinh thái đồng ruộng.

Một chỉ báo sinh thái quan trọng phản ánh hiệu quả vận hành của hệ thống là thời gian lưu nước trong nội đồng. Trước khi hệ thống được điều tiết, các kênh vùng An Minh - Vĩnh Thuận chỉ có thời gian lưu nước trung bình khoảng 3-5 ngày trong mùa khô do chế độ triều chi phối mạnh, nước mặn - lợ tự chảy ra biển nhanh, dẫn đến thất thoát nguồn nước phục vụ nuôi tôm và giảm khả năng duy trì ổn định môi trường. Sau khi vận hành theo chế độ cửa sổ triều, thời gian lưu nước đã tăng lên 10-12 ngày, cho phép duy trì độ mặn ổn định hơn, giảm tần suất cấp nước nhân tạo và nâng cao khả năng tự làm sạch của hệ sinh thái thủy vực [6]. Đồng thời, việc duy trì mực nước nền ổn định 0,6-0,8 m trong các kênh trục chính giúp tăng dung tích trữ nước ngọt cuối vụ, tạo nguồn bổ sung cho giai đoạn chuyển mùa và phục vụ vụ lúa kế tiếp, góp phần tăng tính bền vững cho chuỗi sản xuất tôm-lúa trong vùng.

Cân bằng nước nội vùng cũng được cải thiện đáng kể. Các kết quả mô phỏng MIKE 11 - MIKE 21 của Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam [5] cho thấy tổng lượng nước trữ nội đồng trong vùng dự án tăng trung bình 28-32 triệu m^3 so với trước vận hành, tương đương khoảng 8-10% tổng dung tích hữu ích của hệ thống. Lượng nước này góp phần duy trì dòng chảy cơ sở trong mùa khô, giảm nguy cơ khô hạn cục bộ tại các vùng ven biển. Cùng với đó, việc vận hành phối hợp các cống Cái Lớn, Cái Bé và Xẻo Rô theo chu kỳ triều kép đã làm giảm tần suất mực nước vượt ngưỡng ngập 1,2 m trong vùng tôm-lúa từ 16% xuống còn 7%, qua đó giảm đáng kể nguy cơ ngập đầu vụ và xói mòn bờ kênh.

Từ góc độ sinh thái hệ thống, việc vận hành hệ thống Cái Lớn - Cái Bé đã góp phần phục hồi chu trình trao đổi vật chất tự nhiên, khi quá trình giao lưu giữa nước mặn và nước ngọt được điều tiết linh hoạt theo chu kỳ triều, thay vì bị cắt dòng hoàn toàn như trong các mô hình ngăn mặn truyền thống. Dòng triều được điều phối có chọn lọc vào thời điểm thích hợp đã mang lại hiệu ứng sinh thái kép: vừa bổ sung nguồn dinh dưỡng hữu cơ và vi khoáng cho các ao nuôi tôm, vừa loại bỏ lớp nước ô nhiễm tích tụ, qua đó giảm hiện tượng lắng đọng hữu cơ và phát sinh khí độc trong đáy ao. Đây là bước chuyển căn bản trong tư duy quản lý thủy lợi, từ cách tiếp cận đóng kín và kiểm soát tuyệt đối sang điều tiết linh hoạt và cân bằng sinh thái, phù hợp với định hướng quản lý tài nguyên nước thích ứng sinh thái được khuyến nghị bởi Ủy hội sông Mekong [13] và nhiều tổ chức quốc tế.

Ngoài ra, sự ổn định thủy văn còn góp phần cải thiện môi trường sinh thái tự nhiên: các khu vực cửa sông Cái Bé, Xẻo Rô xuất hiện trở lại nhiều loài thủy sinh bản địa như cá rô phi, cá chẽm, cua đinh và các loài chim nước, phản ánh hệ sinh thái nước lợ đang dần phục hồi sau nhiều năm chịu biến động mặn cực đoan. Sự phục hồi đa dạng sinh học này là chỉ báo quan trọng cho thấy hệ thống CLCB không chỉ mang lại lợi ích kinh tế mà còn đóng vai trò bảo vệ cân bằng sinh thái vùng hạ lưu Bán đảo Cà Mau.

Các kết quả trên có thể khẳng định rằng, vận hành hệ thống CLCB đã thiết lập được trạng thái cân bằng nước - mặn mới, ổn định và thích nghi hơn với điều kiện tự nhiên, góp phần nâng cao năng suất, phục hồi hệ sinh thái và giảm thiểu rủi ro khí hậu cho toàn vùng.

3.4. Đánh giá vùng chuyển tiếp và hàm ý vận hành

Kết quả phân tích không gian cho thấy vùng An Biên - Gò Quao là khu vực thể hiện rõ nhất hiệu quả của vận hành hệ thống Cái Lớn - Cái Bé. Đây là vùng chuyển tiếp giữa khu vực ven

biển mặn - lợ và vùng nội đồng ngọt hóa, nơi các điều kiện thủy văn biến động mạnh và nhạy cảm nhất đối với quá trình điều tiết mặn - ngọt. Trước khi hệ thống đi vào vận hành, khu vực này thường xuyên chịu ảnh hưởng của xâm nhập mặn sớm và mưa trái mùa, làm mất cân bằng sinh thái giữa hai mô hình canh tác tôm và lúa. Tuy nhiên, sau khi vận hành theo cơ chế cửa sổ triều, các thông số mặn, mực nước và thời gian lấy nước được điều tiết hợp lý hơn, giúp ổn định môi trường sinh thái và nâng cao năng suất. Theo số liệu quan trắc của Viện Kỹ thuật Biển [6], thời gian duy trì độ mặn ổn định 8-12‰ tại An Biên kéo dài trung bình 65-70 ngày, dài hơn 15 ngày so với giai đoạn trước 2021, trong khi khu vực Gò Quao duy trì mặn dưới 4‰ trong 85% thời gian vụ lúa Hè Thu. Sự ổn định này đã tạo điều kiện thuận lợi cho mô hình tôm-lúa luân phiên, khi vụ tôm được cấp mặn đúng thời điểm sinh trưởng và vụ lúa được đảm bảo nguồn nước ngọt đầu vụ.

Phân tích hồi quy đa biến cũng cho thấy mực nước trung bình và thời điểm lấy nước đầu vụ là hai yếu tố có ảnh hưởng dương và có ý nghĩa thống kê cao đối với năng suất ($p < 0,05$). Điều này phản ánh rằng mực nước ổn định và chủ động lấy nước sớm là những yếu tố then chốt quyết định thành công của mô hình tôm-lúa. Vùng An Biên - Gò Quao đạt được điều này nhờ đặc điểm địa hình bằng phẳng, hệ thống kênh trục lớn, khả năng lưu nước cao và mật độ cống điều tiết dày đặc, cho phép điều phối nước linh hoạt giữa các tiểu vùng. Ngược lại, vùng ven biển An Minh - Vĩnh Thuận chịu ảnh hưởng triều mạnh, đôi khi mặn tăng đột ngột 18-20‰ trong các đợt triều cường, còn vùng ngọt hóa Phước Long - Hồng Dân đôi khi thiếu nước đầu vụ do đóng cống sớm, làm chậm thời vụ lúa Đông Xuân [5]. Những khác biệt này cho thấy hiệu quả vận hành của hệ thống CLCB phụ thuộc mạnh vào đặc trưng thủy văn từng vùng, do đó cần được điều chỉnh linh hoạt theo đơn vị sinh thái chứ không nên áp dụng quy trình đồng nhất cho toàn hệ thống.

Từ kết quả phân tích, có thể rút ra một số hàm ý vận hành sinh thái quan trọng. Thứ nhất, cần tiếp tục duy trì cơ chế vận hành cửa sổ triều linh hoạt, cho phép lấy mặn sớm đầu vụ (tháng 12-1) để phục vụ nuôi tôm và xả mặn dần vào tháng 5-6 để chuẩn bị cho vụ lúa. Thứ hai, nên phân vùng vận hành cụ thể theo điều kiện sinh thái: vùng ven biển tập trung tiêu mặn, vùng chuyển tiếp duy trì luân phiên mặn-ngọt, vùng ngọt hóa ưu tiên tích ngọt sớm và giữ mực nước nền ổn định. Thứ ba, cần tăng cường giám sát tự động và vận hành cộng đồng thông qua hệ thống cảm biến mặn - mực nước trực tuyến, giúp các tổ chức thủy nông và hợp tác xã chủ động điều chỉnh theo diễn biến thực tế. Cuối cùng, việc xây dựng bản đồ vận hành sinh thái tích hợp dữ liệu quan trắc, sản xuất và GIS là cần thiết để xác định rõ ngưỡng vận hành tối ưu cho từng mô hình.

Nhìn chung, vùng An Biên - Gò Quao có thể được xem là mô hình điển hình cho vận hành thích ứng sinh thái của hệ thống CLCB, khi sự kết hợp giữa điều tiết mặn đầu vụ, xả ngọt cuối vụ và duy trì mực nước hợp lý đã mang lại hiệu quả kép: năng suất tôm tăng 10-12%, năng suất lúa tăng 7-8%, đồng thời môi trường thủy văn - sinh thái được cân bằng và ổn định hơn. Đây cũng là cơ sở thực tiễn quan trọng để hoàn thiện Quy trình vận hành chính thức theo hướng một hệ thống - nhiều vùng sinh thái, đảm bảo phát triển bền vững vùng Bán đảo Cà Mau trong điều kiện biến đổi khí hậu ngày càng phức tạp.

3.5. Rủi ro ngọt hóa - phèn - biến động triều trong bối cảnh BĐKH

Mặc dù điều kiện thủy văn sau vận hành hệ thống ổn định hơn, nhưng vùng dự án vẫn đối mặt với một số rủi ro mới trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nước biển dâng. Thứ nhất, việc ngọt hóa kéo dài vào cuối vụ có thể làm tăng nguy cơ phèn tiềm tàng ở các vùng đất phèn hoạt động, đặc biệt khi mực nước xuống thấp đột ngột trong các đợt nắng nóng, gây oxy hóa pyrit và làm giảm pH cục bộ. Thứ hai, nước biển dâng và triều cường mạnh hơn theo chu kỳ nhiều năm có thể tạo ra các đợt xâm nhập mặn bất thường, khiến ranh mặn di chuyển nhanh và vượt qua khả năng điều tiết trong các

thời điểm cực trị. Thứ ba, biến động triều ngày càng khó dự báo trong mùa khô, đặc biệt khi kết hợp với hạn thượng nguồn, có thể làm giảm thời gian cửa sổ triều lấy mặn - xả ngọt. Những rủi ro này cho thấy vận hành hệ thống cần tiếp cận linh hoạt theo kịch bản khí hậu, tăng cường giám sát tự động và điều chỉnh theo từng tiểu vùng để giảm thiểu các tác động bất lợi trong tương lai.

3.6. Hạn chế của nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng dữ liệu quan trắc giai đoạn 2020-2023, do đó thời gian sau vận hành hệ thống CLCB còn tương đối ngắn, chưa phản ánh hết biến động liên năm và tác động của các cực trị khí hậu hiếm gặp. Bộ số liệu sản xuất (tôm, lúa) mang tính tổng hợp cấp huyện, vì vậy chưa phân tách được ảnh hưởng của kỹ thuật canh tác và quản lý ao/hộ sản xuất. Ngoài ra, mô hình hồi quy OLS mới xem xét các biến thủy văn chính (SI, mực nước, thời điểm lấy nước), chưa tích hợp đầy đủ các yếu tố sinh học và kinh tế - xã hội có thể ảnh hưởng đến năng suất. Những hạn chế này cho thấy cần có các nghiên cứu theo chuỗi dài hơn, phân giải theo hộ/cánh đồng, và tích hợp mô hình sinh thái - kinh tế để đánh giá toàn diện hơn hiệu quả vận hành hệ thống.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết quả khoa học

Kết quả nghiên cứu cho thấy sau khi vận hành, hệ thống thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé đã góp phần định hình lại cân bằng thủy văn - sinh thái vùng Bán đảo Cà Mau trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nước biển dâng. Vận hành theo cơ chế chu kỳ triều giúp kiểm soát và điều tiết mặn - ngọt hợp lý hơn, tái lập ranh giới sinh thái giữa vùng tôm - lúa và vùng ngọt hóa, đồng thời cải thiện chất lượng môi trường nước và đất. Độ mặn và mực nước mùa khô được duy trì trong khoảng phù hợp hơn với sản xuất, đi kèm với mức tăng quan sát được của năng suất tôm khoảng 10-12% và lúa 6-8%. Mô hình hồi quy đa biến với $R^2 = 0,76$ cho thấy mối liên hệ chặt chẽ và có ý nghĩa thống kê giữa các yếu tố thủy văn (độ mặn, mực nước, thời điểm lấy nước đầu vụ) và năng suất nông - thủy sản, hàm ý rằng thay đổi chế độ mặn - nước sau vận hành là một trong những nhân tố quan trọng ảnh hưởng đến hiệu quả sản xuất và ổn định sinh thái, bên cạnh các yếu tố nội đồng như giống, kỹ thuật canh tác và dịch bệnh.

Ý nghĩa chính sách và quản lý

Từ các kết quả trên, nghiên cứu kiến nghị tiếp tục duy trì cơ chế vận hành linh hoạt đầu vụ - cuối vụ, theo hướng lấy mặn sớm phục vụ nuôi tôm và xả mặn dần để bảo đảm ngọt hóa cho vụ lúa kế tiếp. Cần tăng cường hệ thống giám sát tự động và chia sẻ dữ liệu cộng đồng để hỗ trợ ra quyết định theo thời gian thực, đồng thời xây dựng bản đồ vận hành sinh thái tích hợp dữ liệu quan trắc, sản xuất và GIS nhằm xác định ngưỡng vận hành tối ưu cho từng vùng. Bên cạnh đó, việc hoàn thiện cơ chế phối hợp đa ngành - đa cấp giữa các địa phương và tiến tới quản lý tổng hợp tài nguyên nước theo lưu vực sẽ giúp phát huy vai trò của hệ thống CLCB như một hạ tầng thủy lợi quan trọng trong điều hòa mặn - ngọt, hỗ trợ sinh kế và duy trì cân bằng sinh thái vùng Bán đảo Cà Mau trong dài hạn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tài liệu tiếng Việt

[1] Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn. (2021). *Quyết định số 4789/QĐ-BNN-TCTL ngày 15/11/2021: Ban hành Quy trình vận hành tạm thời hệ thống công trình thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé*. Hà Nội.

[2] Nguyễn, V. B., Trần, T. B., & Lê, V. D. (2020). Ảnh hưởng của xâm nhập mặn đến sản xuất tôm-lúa vùng Bán đảo Cà Mau. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ, 56*(2), 12-22.

[3] Sở Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn Bạc Liêu. (2023). *Tổng hợp sản xuất vùng tôm-lúa và ngọt hóa Phước Long - Hồng Dân*. Bạc Liêu.

[4] Sở Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn Kiên Giang. (2023). *Báo cáo tổng kết sản xuất thủy sản và lúa vùng CLCB, giai đoạn 2020-2023*. Rạch Giá.

[5] Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam (SIWRR). (2024). *Báo cáo thuyết minh kỹ thuật: Rà soát, điều chỉnh Quy trình vận hành hệ thống thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé*. TP. Hồ Chí Minh.

[6] Viện Kỹ thuật Biển. (2023). *Đánh giá hiệu quả vận hành thử nghiệm hệ thống thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé giai đoạn 2021-2023*. TP. Hồ Chí Minh.

Tài liệu tiếng Anh

[7] Anh, P. T., et al. (2010). Integrated rice-shrimp farming systems in the Mekong Delta: water quality and ecological interactions. Aquaculture International.

[8] Arias, M. E., Cochrane, T. A., & Piman, T. (2020). The flood pulse of the Mekong River and its ecological importance. *Ecohydrology & Hydrobiology, 20*(3), 401-416.

[9] Bosma, R. H., et al. (2016). Environmental stress and resilience in integrated shrimp-rice farming. Aquaculture Research.

[10] Boyd, C., & Tucker, C. (1998). Pond Aquaculture Water Quality Management.

[11] De Silva, S. S., & Anderson, T. A. (1995). Fish Nutrition in Aquaculture. (dù là cá, nhưng thường được trích rộng cho stress môi trường trong thủy sản).

[12] Joffre, O., et al. (2015). Rice-shrimp systems in the Mekong Delta: ecological thresholds and salinity constraints. Agricultural Systems.

[13] Kumar, V., et al. (2018). Salinity fluctuations and osmoregulatory stress in penaeid shrimp. Aquaculture Reports.

[14] Mekong River Commission. (2023). *State of the Basin Report 2023*. Vientiane, Lao PDR.

[15] Phan, T. D., & Luu, T. T. (2021). Salinity intrusion and adaptive farming in the Mekong Delta, Vietnam. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 37*, 100911.