

Nghiên cứu biến động hình thái không gian và các yếu tố chi phối các đảo nổi lớn thuộc quần đảo Trường Sa từ dữ liệu ảnh viễn thám đa thời gian

Nguyễn Xuân Tùng^{1,2*}, Nguyễn Minh Huân², Nguyễn Kim Cương²
Đặng Thanh Tùng³, Lê Thị Hoa Huệ³

¹Viện Các Khoa học Trái đất, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam (VAST)

²Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội

³Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội

*Email tác giả liên hệ: nxtung@ies.vast.vn

<https://doi.org/10.67484/mgc.112>

Tóm tắt: Biến động hình thái các đảo san hô phản ánh sự tương tác giữa động lực biển, đặc điểm địa hình rạn và các hoạt động nhân sinh, đồng thời là cơ sở quan trọng phục vụ quản lý tài nguyên và không gian biển đảo. Nghiên cứu này sử dụng chuỗi ảnh vệ tinh đa nguồn gồm SPOT-2, SPOT-4, Landsat-8 và Sentinel-2 tại các thời điểm năm 2007, 2012, 2017 và 2022 để đánh giá biến động hình thái không gian của năm đảo nổi lớn thuộc quần đảo Trường Sa gồm Song Tử Tây, Sơn Ca, Nam Yết, Sinh Tồn và Trường Sa Lớn. Đường bờ được trích xuất từ ảnh viễn thám sau khi hiệu chỉnh hình học và chuẩn hóa dữ liệu, sau đó tích hợp trong môi trường GIS và phân tích bằng phần mềm Digital Shoreline Analysis System (DSAS). Bốn chỉ số định lượng gồm tốc độ thay đổi chiều dài đường bờ (Length Change Rate – LCR), tốc độ thay đổi diện tích đảo (Area Change Rate – ACR), tốc độ dịch chuyển trọng tâm (Centroid Shift Rate – CSR) và tốc độ biến động đường bờ (End Point Rate – EPR) được sử dụng để đánh giá xu thế biến đổi hình thái của từng đảo. Kết quả cho thấy tất cả các đảo đều có xu hướng mở rộng diện tích trong giai đoạn nghiên cứu, tuy nhiên mức độ biến động khác nhau đáng kể giữa các đảo. Đảo Sơn Ca có tốc độ tăng diện tích lớn nhất với ACR đạt 27,79 m²/năm, trong khi Song Tử Tây chỉ đạt 3,65 m²/năm. Chiều dài đường bờ cũng gia tăng ở hầu hết các đảo với LCR dao động từ 0,12 đến 3,76 m/năm, phản ánh quá trình phát triển không đồng đều của hình thái đảo. Chỉ số CSR cho thấy trọng tâm các đảo dịch chuyển theo nhiều hướng khác nhau, trong đó Trường Sa Lớn có mức dịch chuyển lớn nhất, phản ánh sự phát triển bất đối xứng của hình thái đảo. Phân tích EPR xác định các khu vực xói lở và bồi tụ tập trung chủ yếu tại các đoạn bờ chịu tác động trực tiếp của sóng và dòng chảy theo mùa. Kết quả tổng hợp cho thấy chế độ sóng gió mùa, vận chuyển trầm tích, cấu trúc rạn san hô và hoạt động cải tạo đảo là những yếu tố chi phối chính đối với quá trình biến động hình thái của các đảo nổi thuộc quần đảo Trường Sa. Nghiên cứu khẳng định hiệu quả của việc tích hợp dữ liệu ảnh viễn thám đa thời gian, GIS và DSAS trong giám sát biến động hình thái đảo san hô, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học phục vụ cập nhật cơ sở dữ liệu địa lý, quản lý tài nguyên và bảo vệ chủ quyền biển đảo.

Từ khóa: Quần đảo Trường Sa; biến động hình thái; viễn thám đa thời gian; DSAS; LCR; ACR; CSR; EPR.

Ngày nhận bài: 12/06/2026 Ngày sửa lại: 15/07/2026 Ngày chấp nhận đăng: 18/07/2026 Ngày xuất bản: 30/08/2026

Spatial Morphological Evolution and Driving Factors of Major Coral Islands in the Truong Sa Archipelago Based on Multi-Temporal Remote Sensing Data

Nguyen Xuan Tung^{1,2*}, Nguyen Minh Huan², Nguyen Kim Cuong²
Dang Thanh Tung³, Le Thi Hoa Hue³

¹ Institute of Earth Sciences, VAST

² VNU University of Science, Vietnam National University, Hanoi

³ Hanoi University of Natural resources and Environment (Hunre)

*Corresponding Author Email: nxtung@ies.vast.vn

Abstract: The spatial morphology of coral islands reflects the combined effects of marine hydrodynamics, reef geomorphology, sediment transport, and human activities, providing essential information for coastal monitoring and sustainable marine management. This study investigates the spatial morphological evolution of five major coral islands in the Truong Sa Archipelago, Vietnam, including Song Tu Tay, Son Ca, Nam Yet, Sinh Ton, and Truong Sa Lon, using multi-temporal satellite imagery acquired from SPOT-2, SPOT-4, Landsat-8, and Sentinel-2 in 2007, 2012, 2017, and 2022. Shorelines were extracted from geometrically corrected satellite images and integrated within a Geographic Information System (GIS), while shoreline dynamics were quantified using the Digital Shoreline Analysis System (DSAS). Four quantitative indicators, namely Length Change Rate (LCR), Area Change Rate (ACR), Centroid Shift Rate (CSR), and End Point Rate (EPR), were employed to characterize spatial

morphological changes and shoreline evolution. The results reveal that all investigated islands exhibited an overall expansion trend during the study period, although the magnitude of change varied considerably among islands. Son Ca Island experienced the highest area growth with an ACR of 27.79 m²/year, whereas Song Tu Tay Island recorded the lowest increase of 3.65 m²/year. Shoreline length generally increased, with LCR values ranging from 0.12 to 3.76 m/year, indicating heterogeneous morphological development among islands. CSR analysis revealed multidirectional centroid migration, with Truong Sa Lon Island showing the largest spatial displacement, suggesting asymmetric island development. EPR analysis further identified erosion and accretion hotspots primarily distributed along shorelines directly exposed to seasonal wave and current regimes. The observed spatial morphological evolution is mainly controlled by seasonal wave climate, sediment transport processes, reef geomorphology, and island reclamation activities. The proposed integration of multi-temporal remote sensing, GIS, and DSAS provides an effective framework for long-term monitoring of coral island morphology and offers valuable scientific support for coastal management, geospatial database updating, and sustainable management of the Truong Sa Archipelago.

Keywords: *Truong Sa Archipelago; coral islands; spatial morphological evolution; multi-temporal remote sensing; DSAS; shoreline change; driving factors.*

Submission received: 12/06/2026

Revised: 15/07/2026

Accepted: 18/07/2026

Published: 30/08/2026

1. Giới thiệu

Các đảo san hô là những dạng địa hình tích tụ có quy mô nhỏ, độ cao thấp và đặc biệt nhạy cảm trước sự thay đổi của điều kiện tự nhiên cũng như tác động của con người. Hình thái đảo được duy trì thông qua sự cân bằng động giữa nguồn cung vật liệu, quá trình vận chuyển trầm tích trên mặt rạn và sự tái phân bố vật liệu dưới tác động của sóng, dòng chảy, thủy triều và các hiện tượng thời tiết cực đoan. Khi trạng thái cân bằng này thay đổi, đường bờ có thể dịch chuyển, diện tích đảo tăng hoặc giảm, hình dạng đảo bị tái cấu trúc và trọng tâm hình thái dịch chuyển theo thời gian. Bên cạnh chức năng địa mạo, hệ thống đảo và rạn san hô còn cung cấp nhiều dịch vụ hệ sinh thái quan trọng, bao gồm bảo vệ bờ, duy trì đa dạng sinh học, cung cấp nguồn lợi thủy sản và hỗ trợ các hoạt động kinh tế biển [1], [2].

Trong những thập kỷ gần đây, các hệ thống đảo san hô đang chịu tác động đồng thời của biến đổi khí hậu, dao động mực nước biển, các sự kiện sóng lớn và sự gia tăng hoạt động nhân sinh. Tuy nhiên, phản ứng hình thái của đảo san hô không diễn ra đồng nhất. Một số đảo có xu hướng thu hẹp hoặc xói lở tại các đoạn bờ đón sóng, trong khi những đảo khác vẫn duy trì hoặc gia tăng diện tích nhờ quá trình tái phân bố trầm tích, bồi tụ tự nhiên hoặc hoạt động cải tạo mặt bằng. Vì vậy, chỉ sử dụng biến động diện tích để đánh giá mức độ ổn định của đảo có thể chưa phản ánh đầy đủ quá trình tiến hóa hình thái. Việc phân tích đồng thời sự thay đổi chiều dài đường bờ, diện tích, vị trí trọng tâm và tốc độ dịch chuyển tại từng đoạn bờ là cần thiết để nhận diện đầy đủ cả biến động tổng thể và biến động cục bộ.

Các phương pháp khảo sát trực tiếp như đo đạc địa hình bằng GNSS, đo sâu hồi âm đơn tia hoặc đa tia và khảo sát mặt cắt có thể cung cấp số liệu với độ chính xác cao. Tuy nhiên, các phương pháp này thường yêu cầu nguồn lực lớn, thời gian thực hiện dài và phụ thuộc đáng kể vào điều kiện khí tượng – hải văn. Đối với các đảo xa bờ, vùng nước nông rộng, địa hình rạn phức tạp và khả năng tiếp cận hạn chế, việc tổ chức khảo sát lặp lại trong thời gian dài gặp nhiều khó khăn. Trong bối cảnh đó, viễn thám trở thành công cụ phù hợp nhờ khả năng quan sát trên phạm vi rộng, thu nhận dữ liệu lặp lại và cung cấp chuỗi ảnh lịch sử phục vụ phân tích biến động đa thời gian [2], [3]. Các nghiên cứu tổng quan cho thấy dữ liệu viễn thám có thể được sử dụng để xác định phạm vi rạn, phân loại sinh cảnh đáy, xây dựng bản đồ độ sâu vùng nước nông và giám sát biến động môi trường rạn san hô.

Sự phát triển của các hệ thống vệ tinh Landsat, SPOT và Sentinel-2 đã mở rộng đáng kể khả năng nghiên cứu hình thái đảo san hô. Landsat cung cấp chuỗi dữ liệu dài, thích hợp cho phân tích xu thế trong nhiều thập kỷ; SPOT có độ phân giải không gian tương đối cao, thuận lợi cho nhận dạng các đảo có kích thước nhỏ; trong khi Sentinel-2 kết hợp độ phân giải 10 m với chu kỳ thu nhận ngắn, cho phép phân biệt tốt hơn ranh giới đất – nước và các thành phần vùng nước nông. Hedley và cộng sự [4] đã chứng minh Sentinel-2 có khả năng hỗ trợ hiệu quả việc lập bản

đồ địa mạo rạn, sinh cảnh đáy và độ sâu vùng nước nông, đồng thời cung cấp mức độ chi tiết cao hơn so với Landsat 8 trong nhiều điều kiện ứng dụng.

Tuy nhiên, việc phân tích ảnh quang học trong môi trường rạn san hô gặp nhiều thách thức do ảnh hưởng của mây, bóng mây, lóe mặt nước, độ sâu cột nước, độ trong của nước và sự tương đồng phổ giữa cát san hô, đáy nước nông và phần đất nổi. Vì vậy, các kỹ thuật như loại bỏ lóe mặt nước, hiệu chỉnh ảnh hưởng cột nước, phân tích hướng đối tượng và hiệu chỉnh trực quan thường được sử dụng nhằm nâng cao độ chính xác của quá trình giải đoán [5]–[7]. Đối với nghiên cứu biến động đường bờ, sai số còn có thể phát sinh do khác biệt về độ phân giải không gian, sai số đồng đăng ký giữa các ảnh và dao động mực nước tại thời điểm vệ tinh thu nhận. Do đó, dữ liệu đa nguồn cần được chuẩn hóa về hệ tọa độ, độ phân giải và độ chính xác hình học trước khi so sánh.

Trong phân tích biến động đường bờ, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) là công cụ được sử dụng phổ biến để xây dựng đường chuẩn, thiết lập các mặt cắt vuông góc với bờ và tính toán tốc độ dịch chuyển đường bờ. Chỉ số End Point Rate (EPR) được xác định từ khoảng cách giữa đường bờ đầu kỳ và cuối kỳ chia cho khoảng thời gian phân tích, qua đó thể hiện xu thế xói lở hoặc bồi tụ tại từng mặt cắt [8]. Tuy nhiên, EPR chủ yếu phản ánh biến động cục bộ dọc theo đường bờ. Để đánh giá đầy đủ sự thay đổi của toàn bộ đảo, cần kết hợp với các chỉ số phản ánh biến động chiều dài đường bờ, diện tích đảo và dịch chuyển trọng tâm hình thái. Hướng tiếp cận đa chỉ số giúp phân biệt trường hợp đảo mở rộng đồng đều với trường hợp mở rộng lệch về một hướng, đồng thời nhận diện các đoạn bờ xói lở vẫn tồn tại trong bối cảnh tổng diện tích đảo gia tăng. Tài liệu hướng dẫn DSAS 5.1 của USGS xác định đây là hệ thống chuyên dụng để tính toán và biểu diễn thống kê biến động đường bờ từ các tập dữ liệu đa thời gian [8].

Gần đây, Li và cộng sự [9] đã sử dụng 96 ảnh vệ tinh đa nguồn để phân tích sự tiến hóa hình thái không gian của các đảo và rạn san hô trên Biển Đông trong khoảng 15 năm. Nghiên cứu đánh giá sự thay đổi diện tích, mức độ ổn định hình thái, xu hướng dịch chuyển không gian và các yếu tố chi phối. Kết quả cho thấy phản ứng hình thái có sự khác biệt đáng kể giữa các khu vực, đồng thời nhấn mạnh sự cần thiết phải kết hợp nhiều chỉ số thay vì chỉ đánh giá biến động diện tích. Đây là cơ sở phương pháp quan trọng cho các nghiên cứu chuyên sâu ở quy mô từng quần đảo. Tuy nhiên, do phạm vi nghiên cứu rộng, mức độ phân tích chi tiết đối với từng đảo nổi và sự phân hóa xói lở – bồi tụ dọc đường bờ còn hạn chế.

Tại Việt Nam, công nghệ viễn thám và GIS đã được ứng dụng trong thành lập bản đồ phân bố san hô và đánh giá biến động các hệ sinh thái biển. Nguyễn Hào Quang và cộng sự [10] đã nghiên cứu phân bố san hô ven đảo Lý Sơn bằng dữ liệu viễn thám và GIS. Nguyễn Văn Long và Tổng Phước Hoàng Sơn [11] đánh giá hiện trạng và biến động diện tích các hệ sinh thái biển tiêu biểu trong vịnh Nha Trang. Tại quần đảo Trường Sa, Đỗ Huy Cường và cộng sự [12] sử dụng ảnh VNREDSat-1 và QuickBird để nghiên cứu môi trường biển và phân bố san hô khu vực đảo Nam Yết. Các công trình này khẳng định giá trị của ảnh vệ tinh đối với nghiên cứu rạn san hô tại Việt Nam, nhưng chủ yếu tập trung vào phân bố sinh cảnh, độ phủ san hô hoặc biến động diện tích hệ sinh thái. Việc định lượng đồng thời biến động chiều dài đường bờ, diện tích đảo, dịch chuyển trọng tâm và tốc độ xói lở – bồi tụ cho một nhóm đảo nổi lớn vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ.

Bên cạnh các kết quả quan sát từ viễn thám, phân tích động lực biển có ý nghĩa quan trọng trong việc giải thích cơ chế biến đổi hình thái. Nghiên cứu của Nguyen Xuan Tung và cộng sự [13] về động lực trầm tích và biến đổi đáy biển quanh đảo Trường Sa Lớn đã mô phỏng tương tác giữa sóng, dòng chảy, trầm tích lơ lửng và diễn biến đáy. Kết quả cho thấy sự thay đổi địa hình đáy phân bố không đồng đều quanh đảo và có quan hệ rõ với trường sóng theo mùa, đặc biệt tại các khu vực chịu tác động trực tiếp của sóng. Nghiên cứu cung cấp cơ sở thủy động lực để giải thích sự phân hóa xói lở – bồi tụ tại Trường Sa Lớn, nhưng chưa đánh giá biến động dài hạn của phần đảo nổi hoặc so sánh với các đảo khác bằng dữ liệu viễn thám đa thời gian.

Từ các nghiên cứu đã công bố có thể nhận thấy ba khoảng trống chính. Thứ nhất, các nghiên cứu tại Việt Nam còn thiếu chuỗi quan sát đồng nhất để so sánh biến động hình thái giữa nhiều đảo nổi thuộc quần đảo Trường Sa. Thứ hai, phần lớn công trình chỉ sử dụng một hoặc hai chỉ tiêu như

diện tích hoặc tốc độ dịch chuyển đường bờ, chưa tích hợp đồng thời các chỉ số phản ánh biến động tổng thể và cục bộ. Thứ ba, mối quan hệ giữa kết quả biến động quan sát từ ảnh vệ tinh với các yếu tố chi phối như chế độ sóng gió mùa, vận chuyển trầm tích, đặc điểm hình thái rạn và hoạt động cải tạo đảo chưa được phân tích đầy đủ.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này sử dụng chuỗi ảnh SPOT-2, SPOT-4, Landsat-8 và Sentinel-2 tại các thời điểm năm 2007, 2012, 2017 và 2022 để đánh giá biến động hình thái không gian của năm đảo nổi lớn gồm Song Tử Tây, Sơn Ca, Nam Yết, Sinh Tồn và Trường Sa Lớn. Các mục tiêu cụ thể gồm: (i) xây dựng cơ sở dữ liệu đường bờ đa thời gian đã được chuẩn hóa; (ii) định lượng biến động hình thái thông qua tốc độ thay đổi chiều dài đường bờ (LCR), tốc độ thay đổi diện tích đảo (ACR), tốc độ dịch chuyển trọng tâm (CSR) và tốc độ biến động điểm cuối đường bờ (EPR); (iii) so sánh mức độ và xu thế biến động giữa các đảo; và (iv) phân tích vai trò của chế độ sóng, vận chuyển trầm tích, cấu trúc rạn san hô và hoạt động cải tạo đảo đối với sự thay đổi hình thái. Kết quả nghiên cứu góp phần hoàn thiện phương pháp tích hợp viễn thám đa thời gian, GIS và DSAS trong giám sát đảo san hô, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học phục vụ cập nhật cơ sở dữ liệu địa lý và quản lý không gian biển đảo tại quần đảo Trường Sa.

II. Khu vực nghiên cứu và dữ liệu

2.1. Khu vực nghiên cứu

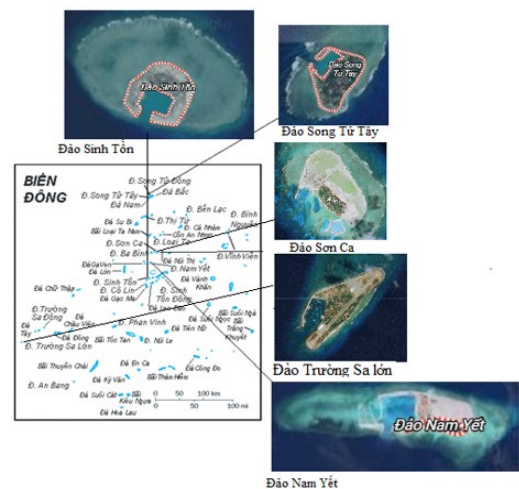
Quần đảo Trường Sa nằm ở khu vực trung tâm Biển Đông, trong khoảng từ $6^{\circ}30'$ đến $12^{\circ}00'$ vĩ độ Bắc và $111^{\circ}30'$ đến $117^{\circ}20'$ kinh độ Đông, gồm hơn 100 đảo, đá, bãi cạn và rạn san hô phân bố trên diện tích biển khoảng 160.000–180.000 km^2 . Đây là khu vực có vị trí chiến lược quan trọng về kinh tế, quốc phòng và an ninh biển đảo của Việt Nam, đồng thời là nơi tồn tại các hệ sinh thái rạn san hô phát triển với mức độ đa dạng sinh học cao.

Các đảo nổi trong quần đảo Trường Sa chủ yếu được hình thành trên nền các rạn san hô vòng hoặc rạn viền, có diện tích nhỏ, cao trình thấp và chịu tác động mạnh của các quá trình thủy động lực. Hình thái của các đảo thường xuyên biến đổi dưới ảnh hưởng của sóng, dòng chảy, thủy triều, vận chuyển trầm tích và các hoạt động cải tạo đảo. Do đó, đây là khu vực điển hình để nghiên cứu quá trình tiến hóa hình thái đảo san hô trong điều kiện biển nhiệt đới.

Nghiên cứu lựa chọn năm đảo nổi lớn gồm Song Tử Tây, Sơn Ca, Nam Yết, Sinh Tồn và Trường Sa Lớn (Hình 1). Đây là các đảo có diện tích lớn, phân bố tương đối đại diện trong quần đảo và có đầy đủ chuỗi dữ liệu ảnh vệ tinh trong giai đoạn nghiên cứu. Đồng thời, các đảo này có sự khác biệt rõ rệt về quy mô, hình thái rạn san hô, mức độ cải tạo và điều kiện thủy động lực, tạo điều kiện thuận lợi để so sánh đặc điểm biến động hình thái giữa các đảo.

Về điều kiện động lực biển, khu vực nghiên cứu chịu ảnh hưởng trực tiếp của hai chế độ gió mùa chính. Gió mùa Đông Bắc hoạt động từ tháng 11 đến tháng 3 năm sau, tạo trường sóng có hướng chủ yếu từ đông bắc với năng lượng lớn, trong khi gió mùa Tây Nam từ tháng 5 đến tháng 9 tạo trường sóng theo hướng tây nam với cường độ nhỏ hơn. Sự luân phiên của hai chế độ gió mùa cùng với đặc điểm địa hình rạn san hô quyết định hướng vận chuyển trầm tích và quá trình xói lở – bồi tụ quanh các đảo. Ngoài ra, trong một số năm khu vực còn chịu ảnh hưởng của áp thấp nhiệt đới và bão, góp phần làm gia tăng biến động hình thái cục bộ.

Các nghiên cứu mô hình động lực gần đây cho thấy trường sóng và vận chuyển trầm tích quanh đảo Trường Sa Lớn có sự phân hóa rõ theo mùa, trong đó khu vực phía đông và đông bắc đảo thường chịu tác động mạnh của sóng mùa Đông Bắc, tạo điều kiện phát triển các quá trình xói lở cục bộ, trong khi khu vực phía tây và tây nam có xu hướng tích tụ trầm tích [13]. Những



Hình 1. Khu vực nghiên cứu

kết quả này là cơ sở quan trọng để phân tích các yếu tố chi phối sự biến đổi hình thái của các đảo trong nghiên cứu này.

2.2. Dữ liệu nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng chuỗi dữ liệu ảnh viễn thám đa thời gian gồm ảnh SPOT-2, SPOT-4, Landsat-8 OLI và Sentinel-2 MSI tại bốn thời điểm đại diện là 2007, 2012, 2017 và 2022. Các ảnh được lựa chọn trong mùa biển tương đối ổn định, ưu tiên thời gian có độ che phủ mây thấp nhằm đảm bảo khả năng nhận dạng chính xác ranh giới đất – nước.

Trước khi phân tích, toàn bộ dữ liệu được chuẩn hóa về hệ tọa độ WGS84/UTM Zone 49N, kiểm tra sai số hình học, đồng đăng ký giữa các thời kỳ và hiệu chỉnh bức xạ nhằm đảm bảo tính thống nhất trong phân tích biến động đa thời gian. Đường bờ được xác định theo cùng một nguyên tắc giải đoán nhằm hạn chế sai số do sự khác biệt giữa các nguồn ảnh.

Ngoài dữ liệu ảnh vệ tinh, nghiên cứu còn sử dụng:

- Bản đồ nền địa hình và hải đồ khu vực Trường Sa;
- Dữ liệu đường bờ hiện trạng phục vụ kiểm tra kết quả giải đoán;
- Dữ liệu khí tượng – hải văn gồm sóng, gió và dòng chảy phục vụ phân tích các yếu tố chi phối;

• Kết quả mô hình MIKE 21 Coupled FM về động lực sóng, vận chuyển trầm tích và biến đổi địa hình đáy biển quanh đảo Trường Sa Lớn đã được công bố trước đây [13].

Các nguồn dữ liệu được tích hợp trong môi trường GIS để xây dựng cơ sở dữ liệu không gian thống nhất phục vụ phân tích biến động hình thái.

Bảng 1. Dữ liệu sử dụng trong nghiên cứu

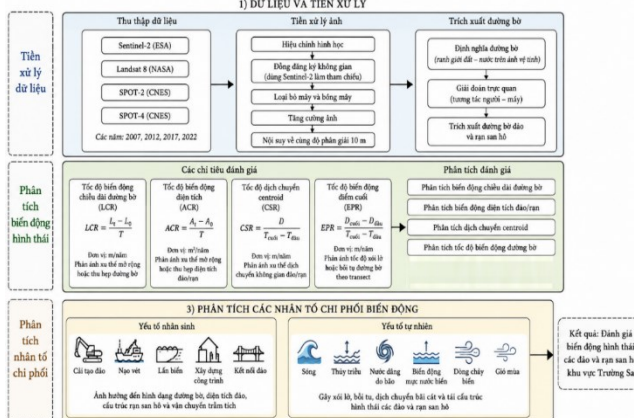
Dữ liệu	Nguồn	Độ phân giải	Mục đích
SPOT-2	Airbus	20 m	Trích xuất đường bờ năm 2007
SPOT-4	Airbus	20 m	Trích xuất đường bờ năm 2012
Landsat-8 OLI	USGS	30 m	Đối chiếu và bổ sung thông tin
Sentinel-2 MSI	ESA	10 m	Trích xuất đường bờ năm 2017, 2022
Hải đồ	Hải quân Việt Nam	—	Kiểm tra hình thái đảo
Dữ liệu sóng, dòng chảy	MIKE 21/3 Coupled FM	—	Phân tích yếu tố chi phối
GIS Database	Tự xây dựng	—	Phân tích không gian

3. Phương pháp nghiên cứu

3.1. Quy trình nghiên cứu

Quy trình nghiên cứu được xây dựng nhằm đánh giá biến động hình thái không gian và các

yếu tố chi phối đối với các đảo nổi lớn thuộc quần đảo Trường Sa thông qua việc tích hợp dữ liệu ảnh viễn thám đa thời gian, hệ thống thông tin địa lý (GIS) và các phương pháp phân tích biến động đường bờ. Toàn bộ quy trình gồm ba nhóm nội dung chính: (i) thu thập và tiền xử lý dữ liệu; (ii) phân tích biến động hình thái; và (iii) phân tích các yếu tố chi phối (Hình 2). Trong giai đoạn đầu, chuỗi ảnh vệ tinh SPOT-2, SPOT-4, Landsat-8 OLI và Sentinel-2 MSI của các năm 2007, 2012, 2017 và 2022 được thu thập để xây dựng cơ sở dữ liệu đa thời



Hình 2. Sơ đồ quy trình nghiên cứu

gian. Sau khi tiền xử lý, đường bờ được trích xuất bằng phương pháp giải đoán trực quan kết hợp tương tác người–máy. Các đường bờ sau đó được chuẩn hóa và đưa vào môi trường GIS để tính toán các chỉ số hình thái gồm tốc độ biến động

chiều dài đường bờ (LCR), tốc độ biến động diện tích đảo (ACR), tốc độ dịch chuyển trọng tâm (CSR) và tốc độ biến động điểm cuối đường bờ (EPR). Cuối cùng, kết quả được tổng hợp với các yếu tố động lực tự nhiên và hoạt động nhân sinh nhằm phân tích cơ chế chi phối biến động hình thái các đảo nổi.

3.2. Tiền xử lý dữ liệu và trích xuất đường bờ

Nguồn dữ liệu sử dụng trong nghiên cứu bao gồm ảnh SPOT-2, SPOT-4, Landsat-8 OLI và Sentinel-2 MSI. Các ảnh được lựa chọn trong khoảng thời gian tháng 9–11, ưu tiên điều kiện ít mây, sóng nhỏ và mực nước biển tương đối tương đồng nhằm giảm thiểu sai số khi xác định đường bờ.

Toàn bộ ảnh được xử lý trên phần mềm ArcGIS Pro thông qua các bước gồm hiệu chỉnh hình học, đồng đăng ký không gian, loại bỏ mây và bóng mây, tăng cường chất lượng ảnh và chuẩn hóa về cùng độ phân giải không gian 10 m. Trong đó, ảnh Sentinel-2 được sử dụng làm ảnh tham chiếu cho quá trình đồng đăng ký nhờ có độ phân giải cao và độ chính xác hình học ổn định.

Đường bờ được xác định là ranh giới đất – nước thể hiện trên ảnh vệ tinh tại thời điểm thu nhận ảnh. Việc trích xuất được thực hiện bằng phương pháp giải đoán trực quan kết hợp tương tác người–máy, đồng thời sử dụng chỉ số NDWI/MNDWI để tăng cường khả năng phân biệt giữa đất và nước. Tại các khu vực có địa hình rạn san hô phức tạp, kết quả được hiệu chỉnh trực quan nhằm bảo đảm tính liên tục và độ chính xác của đường bờ.

Sau khi trích xuất, toàn bộ đường bờ được chuẩn hóa topology, chuyển sang dữ liệu vector và tích hợp trong môi trường GIS phục vụ phân tích biến động đa thời gian.

3.3. Phân tích biến động hình thái

Biến động hình thái các đảo nổi được đánh giá thông qua bốn chỉ tiêu định lượng gồm Length Change Rate (LCR), Area Change Rate (ACR), Centroid Shift Rate (CSR) và End Point Rate (EPR).

Tốc độ biến động chiều dài đường bờ (LCR)

LCR phản ánh sự thay đổi chiều dài đường bờ theo thời gian và được xác định theo công thức:

$$LCR = \frac{(L_t - L_0)}{T}$$

Trong đó L_t và L_0 lần lượt là chiều dài đường bờ tại thời điểm cuối và đầu kỳ; T là khoảng thời gian nghiên cứu. Giá trị dương biểu thị xu hướng gia tăng chiều dài đường bờ, trong khi giá trị âm phản ánh xu hướng suy giảm.

Tốc độ biến động diện tích đảo (ACR)

Mức độ mở rộng hoặc thu hẹp diện tích đảo được xác định theo:

$$ACR = \frac{(A_t - A_0)}{T}$$

Trong đó A_t và A_0 lần lượt là diện tích đảo tại thời điểm cuối và đầu kỳ. Giá trị ACR dương phản ánh quá trình bồi tụ hoặc mở rộng đảo, trong khi giá trị âm phản ánh xu thế thu hẹp diện tích.

Tốc độ dịch chuyển trọng tâm (CSR)

CSR phản ánh mức độ dịch chuyển hình thái tổng thể của đảo và được tính theo:

$$CSR = \frac{D}{T}$$

Trong đó D là khoảng cách dịch chuyển giữa hai vị trí trọng tâm của đảo. Chỉ tiêu này cho phép đánh giá xu hướng phát triển không đối xứng của đảo theo thời gian.

Tốc độ biến động điểm cuối đường bờ (EPR)

Tốc độ xói lở – bồi tụ dọc theo đường bờ được xác định bằng chỉ số End Point Rate (EPR) trong phần mềm Digital Shoreline Analysis System (DSAS) theo công thức:

$$EPR = \frac{(D_{\text{đầu}} - D_{\text{cuối}})}{T}$$

Trong đó $D_{\text{đầu}}$ và $D_{\text{cuối}}$ là khoảng cách từ đường bờ đầu kỳ và cuối kỳ đến đường chuẩn (baseline). Giá trị dương phản ánh bồi tụ, còn giá trị âm phản ánh xói lở.

Việc kết hợp đồng thời bốn chỉ tiêu trên cho phép đánh giá toàn diện sự thay đổi về kích thước, hình dạng, vị trí không gian và động thái đường bờ của các đảo nổi trong giai đoạn nghiên cứu.

3.4. Phân tích các yếu tố chi phối

Để làm rõ nguyên nhân của biến động hình thái, nghiên cứu xem xét đồng thời các yếu tố tự nhiên và yếu tố nhân sinh.

Các yếu tố tự nhiên bao gồm sóng, thủy triều, nước dâng do bão, biến động mực nước biển, dòng chảy và chế độ gió mùa, là những quá trình thủy động lực quyết định vận chuyển trầm tích, xói lở và bồi tụ quanh đảo.

Các yếu tố nhân sinh gồm cải tạo đảo, nạo vét, lấn biển, xây dựng công trình và kết nối đảo, có khả năng làm thay đổi trực tiếp hình dạng đường bờ, diện tích đảo và cấu trúc rạn san hô.

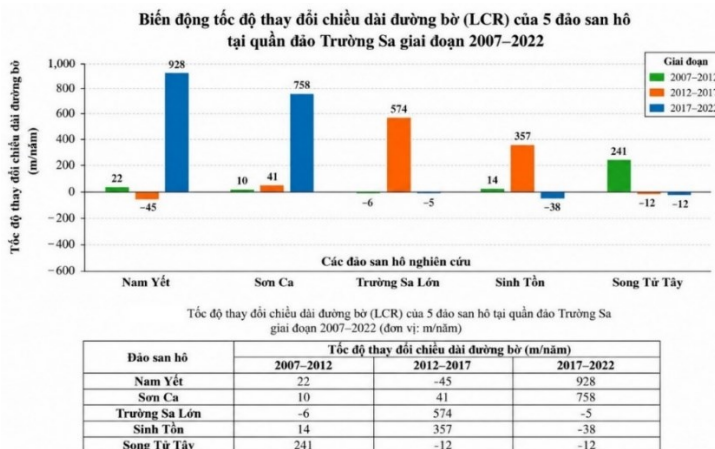
Kết quả phân tích các chỉ số LCR, ACR, CSR và EPR được tổng hợp với thông tin về các yếu tố chi phối nhằm đánh giá đặc điểm tiến hóa hình thái không gian của các đảo nổi lớn thuộc quần đảo Trường Sa và xác định vai trò của từng nhóm yếu tố trong quá trình biến động.

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Biến động chiều dài đường bờ các đảo nổi

Kết quả phân tích tốc độ thay đổi chiều dài đường bờ (LCR) cho thấy cường độ biến động hình thái của các đảo nổi tại quần đảo Trường Sa có sự khác biệt rõ rệt giữa các giai đoạn nghiên cứu (Hình 3). Nhìn chung, tốc độ biến động thấp trong giai đoạn 2007–2012, tăng mạnh trong giai đoạn 2012–2017 tại một số đảo và đạt giá trị lớn nhất trong giai đoạn 2017–2022 đối với các đảo chịu tác động mạnh của quá trình mở rộng hình thái.

Trong số các đảo nghiên cứu, Nam Yết có tốc độ biến động lớn nhất với giá trị LCR đạt 928 m/năm trong giai đoạn 2017–2022, tiếp theo là Sơn Ca với 758 m/năm. Đây là hai đảo có cường độ biến đổi đường bờ mạnh nhất trong toàn bộ khu vực nghiên cứu, phản ánh quá trình mở rộng hình thái diễn ra nhanh trong những năm gần đây. Trường Sa Lớn và Sinh Tồn ghi nhận tốc độ biến động lớn nhất trong giai đoạn 2012–2017, lần lượt đạt 574 m/năm và 357 m/năm, sau đó giảm và chuyển sang giá trị âm trong giai đoạn 2017–2022, cho thấy quá trình tái điều chỉnh hình thái sau giai đoạn mở rộng mạnh. Trong khi đó, Song Tử Tây có tốc độ biến động thấp hơn, chỉ tăng đáng kể trong giai đoạn 2007–2012 (241 m/năm) và gần như ổn định ở các giai đoạn tiếp theo.



Hình 3. Biến động tốc độ thay đổi chiều dài đường bờ (LCR) của 5 đảo san hô tại quần đảo Trường Sa giai đoạn 2007 -2022

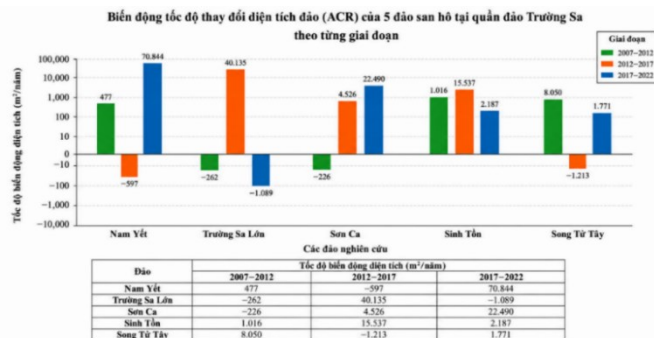
Sự khác biệt về giá trị LCR giữa các đảo phản ánh mức độ biến động hình thái không đồng đều trong khu vực nghiên cứu. Các đảo có giá trị LCR cao thường gắn với sự gia tăng nhanh chiều dài đường bờ và sự thay đổi rõ rệt về hình dạng đảo, trong khi các đảo có giá trị thấp hoặc âm thể hiện xu thế ổn định hoặc tái cân bằng hình thái. Kết quả này cho thấy quá trình biến động đường

bờ tại quần đảo Trường Sa chịu ảnh hưởng tổng hợp của động lực biển và các hoạt động cải tạo đảo, trong đó giai đoạn sau năm 2017 ghi nhận cường độ biến động mạnh nhất tại Nam Yết và Sơn Ca.

4.2. Biến động tốc độ thay đổi diện tích đảo (ACR)

Kết quả phân tích tốc độ thay đổi diện tích đảo (Area Change Rate – ACR) cho thấy quá trình mở rộng và thu hẹp diện tích các đảo nổi tại quần đảo Trường Sa diễn ra với cường độ khác nhau giữa các giai đoạn nghiên cứu (Hình 4). Trong giai đoạn 2007–2012, phần lớn các đảo có giá trị ACR nhỏ, phản ánh trạng thái hình thái tương đối ổn định. Sang giai đoạn 2012–2017, tốc độ biến động tăng rõ rệt tại một số đảo, đặc biệt là Trường Sa Lớn và Sinh Tồn. Đến giai đoạn 2017–2022, cường độ biến động đạt giá trị lớn nhất tại Nam Yết và Sơn Ca, cho thấy đây là thời kỳ các đảo có sự mở rộng diện tích mạnh nhất.

Trong số các đảo nghiên cứu, Nam Yết ghi nhận giá trị ACR lớn nhất, đạt 70.844 m²/năm trong giai đoạn 2017–2022, phản ánh quá trình mở rộng đảo với quy mô rất lớn trong thời gian ngắn. Sơn Ca đứng thứ hai với 22.490 m²/năm, trong khi Sinh Tồn duy trì tốc độ gia tăng diện tích ở mức 2.187 m²/năm. Đối với Song Tử Tây, giá trị ACR chỉ đạt 1.771 m²/năm, cho thấy mức độ biến động thấp và hình thái đảo tương đối ổn định. Ngược lại, Trường Sa Lớn có giá trị ACR âm (–1.089 m²/năm) trong giai đoạn 2017–2022, phản ánh sự giảm nhẹ diện tích sau giai đoạn mở rộng mạnh trước đó.

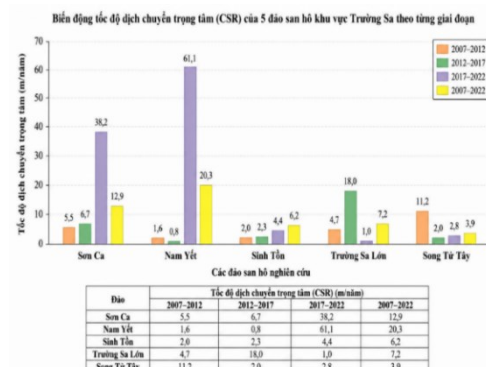


Hình 4. Biến động tốc độ thay đổi diện tích (ACR) của 5 đảo san hô tại quần đảo Trường Sa giai đoạn 2007–2022

Kết quả cũng cho thấy sự khác biệt rõ rệt về thời điểm biến động giữa các đảo. Trong khi Trường Sa Lớn đạt tốc độ mở rộng lớn nhất ở giai đoạn 2012–2017 (40.135 m²/năm), thì Nam Yết và Sơn Ca lại có mức tăng mạnh nhất ở giai đoạn 2017–2022. Điều này cho thấy quá trình biến đổi hình thái không diễn ra đồng thời trên toàn bộ khu vực mà phụ thuộc vào điều kiện động lực biển và thời điểm diễn ra các hoạt động cải tạo tại từng đảo.

Nhìn chung, xu thế biến động của chỉ số ACR phù hợp với kết quả phân tích diện tích đảo và chiều dài đường bờ. Các đảo có tốc độ gia tăng diện tích lớn cũng đồng thời ghi nhận giá trị LCR cao, phản ánh quá trình mở rộng hình thái diễn ra đồng bộ cả về diện tích và cấu trúc đường bờ. Tuy nhiên, mức độ gia tăng diện tích không hoàn toàn tỷ lệ với sự thay đổi chiều dài đường bờ, do còn chịu ảnh hưởng của hình dạng đảo, cấu trúc reef flat, hướng phát triển không gian và đặc điểm phân bố của các khu vực bồi tụ hoặc cải tạo.

4.3. Dịch chuyển trọng tâm các đảo nổi (CSR)



Kết quả phân tích tốc độ dịch chuyển trọng tâm (Centroid Shift Rate – CSR) cho thấy các đảo nổi tại quần đảo Trường Sa đều có sự thay đổi vị trí không gian trong giai đoạn 2007–2022, tuy nhiên cường độ và hướng dịch chuyển khác nhau giữa các đảo (Hình 5 và Hình 6). Sự dịch chuyển trọng tâm phản ánh quá trình mở rộng hoặc thu hẹp không đối xứng của đảo dưới tác động của vận chuyển trầm tích, chế độ sóng – dòng chảy và các hoạt động cải tạo đảo.

Hình 5. Biến động tốc độ dịch chuyển trọng tâm (CSR) của 5 đảo san hô tại quần đảo Trường Sa giai đoạn 2007–2022

Kết quả cho thấy Nam Yết là đảo có tốc độ dịch chuyển trọng tâm lớn nhất, đạt 61,1 m/năm trong giai đoạn 2017–2022 và 20,3 m/năm tính trung bình cho toàn giai đoạn nghiên cứu. Tiếp theo là Sơn Ca, với tốc độ dịch chuyển đạt 38,2 m/năm trong giai đoạn 2017–2022 và trung bình 12,9 m/năm. Đây cũng là hai đảo có mức biến động hình thái lớn nhất, phù hợp với kết quả phân tích chiều dài đường bờ và diện tích đảo.

Đối với Trường Sa Lớn, tốc độ dịch chuyển trọng tâm lớn nhất xuất hiện trong giai đoạn 2012–2017, đạt 18,0 m/năm, sau đó giảm đáng kể trong giai đoạn 2017–2022. Trong khi đó, Sinh Tồn có tốc độ dịch chuyển thấp hơn, dao động từ 2,0–4,4 m/năm, phản ánh quá trình biến đổi hình thái diễn ra tương đối ổn định. Song Tử Tây là đảo có mức dịch chuyển nhỏ nhất, với giá trị trung bình toàn giai đoạn chỉ khoảng 3,9 m/năm, cho thấy hình thái đảo ít thay đổi hơn so với các đảo còn lại.

Phân tích quỹ đạo dịch chuyển trọng tâm (Hình 8) cho thấy phần lớn các đảo có xu hướng dịch chuyển theo hướng tây bắc hoặc bắc – tây bắc. Xu hướng này phản ánh sự mở rộng không đối xứng của đảo và cho thấy quá trình vận chuyển trầm tích chịu ảnh hưởng mạnh của chế độ sóng và dòng chảy theo mùa. Đối với Nam Yết và Sơn Ca, quỹ đạo dịch chuyển có biên độ lớn và tập trung chủ yếu trong giai đoạn 2017–2022, phù hợp với giai đoạn các đảo ghi nhận tốc độ gia tăng chiều dài đường bờ và diện tích lớn nhất. Ngược lại, Trường Sa Lớn và Song Tử Tây có quỹ đạo dịch chuyển ngắn hơn, phản ánh trạng thái hình thái ổn định hơn sau các giai đoạn mở rộng.

Nhìn chung, kết quả phân tích CSR cho thấy sự khác biệt rõ rệt về mức độ biến động hình thái giữa các đảo nghiên cứu. Nam Yết và Sơn Ca là hai đảo có cường độ dịch chuyển mạnh nhất, Trường Sa Lớn và Sinh Tồn có mức biến động trung bình, trong khi Song Tử Tây thể hiện tính ổn định cao hơn. Kết quả này phù hợp với xu thế biến động của các chỉ số LCR và ACR, đồng thời khẳng định rằng quá trình tiến hóa hình thái các đảo nổi tại quần đảo Trường Sa chịu tác động tổng hợp của điều kiện thủy động lực và các hoạt động cải tạo đảo.

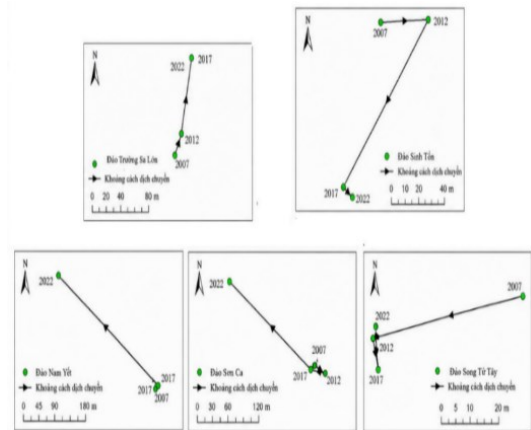
4.4. Đặc điểm xói lở – bồi tụ đường bờ theo chỉ số EPR

Kết quả phân tích chỉ số End Point Rate (EPR) cho thấy quá trình biến động đường bờ tại năm đảo nghiên cứu diễn ra đồng thời theo hai xu thế xói lở và bồi tụ, tuy nhiên cường độ và phạm vi phân bố khác nhau giữa các đảo (Hình 7A–G). Các chỉ tiêu EPR phản ánh đặc điểm biến động hình thái thông qua tốc độ dịch chuyển đường bờ, tỷ lệ các đoạn bờ đang trong trạng thái xói lở hoặc bồi tụ và giá trị cực đại của từng quá trình.

Kết quả Hình 7A cho thấy Nam Yết có tốc độ biến động đường bờ trung bình lớn nhất (3,76 m/năm), tiếp theo là Sơn Ca (2,85 m/năm). Sinh Tồn và Trường Sa Lớn có tốc độ biến động trung bình tương đương nhau, lần lượt đạt 1,29 m/năm và 1,17 m/năm, trong khi Song Tử Tây chỉ đạt 0,12 m/năm. Điều này cho thấy Nam Yết và Sơn Ca là hai đảo có cường độ biến đổi hình thái mạnh nhất, còn Song Tử Tây duy trì trạng thái hình thái tương đối ổn định trong giai đoạn nghiên cứu.

Hình 7B cho thấy Trường Sa Lớn có tỷ lệ các mặt cắt đang ở trạng thái xói lở lớn nhất (65,66%), tiếp theo là Song Tử Tây (50,7%). Nam Yết và Sinh Tồn có tỷ lệ xói lở lần lượt là 33,8% và 28,15%, trong khi Sơn Ca chỉ có 2,08% chiều dài đường bờ đang bị xói lở. Kết quả này phản ánh quá trình xói lở chiếm ưu thế tại Trường Sa Lớn, trong khi Sơn Ca có đường bờ tương đối ổn định và ít chịu tác động xói lở.

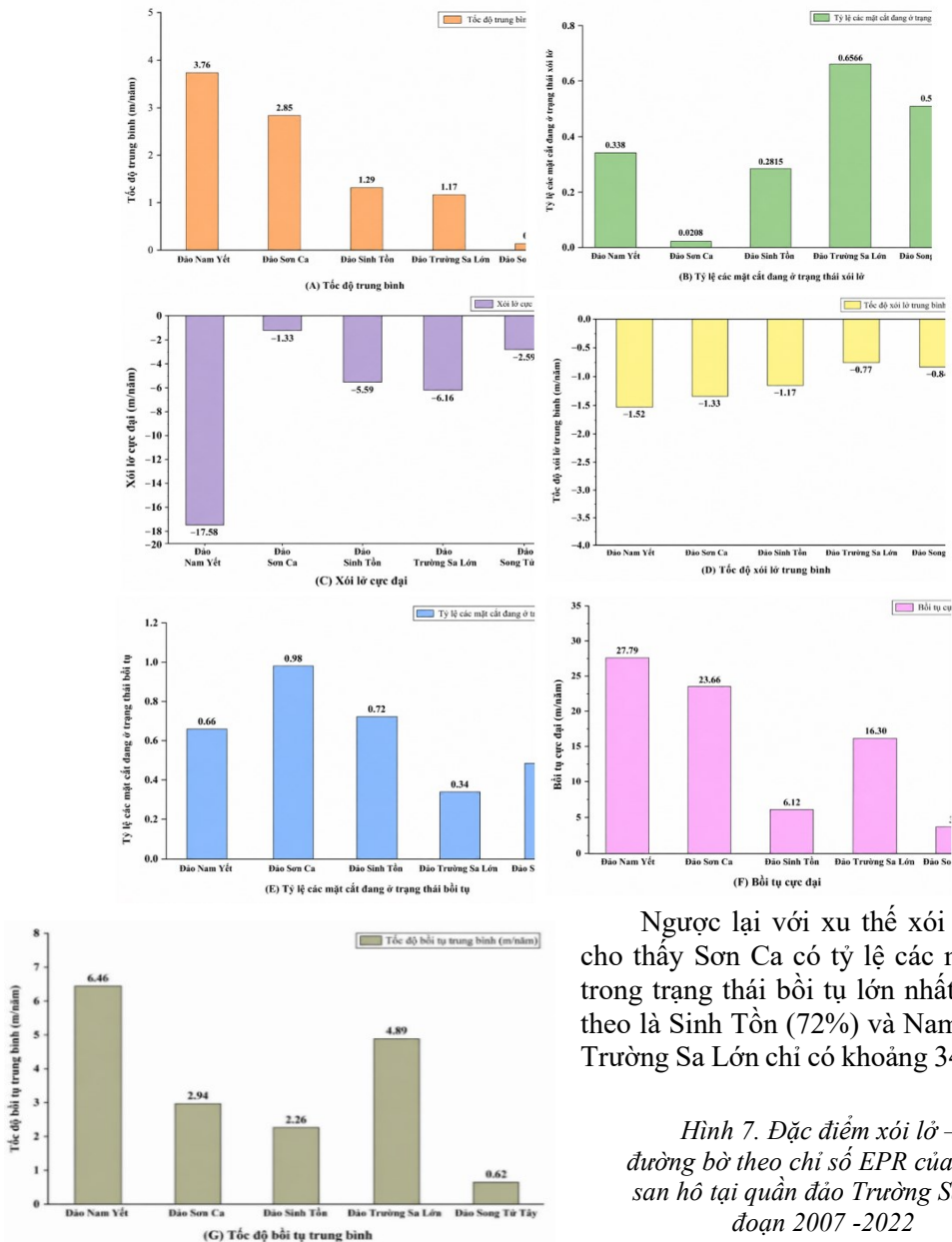
Giá trị xói lở cực đại (Hình 7C) ghi nhận lớn nhất tại Nam Yết, đạt $-17,58$ m/năm, cao hơn



Hình 6. Quỹ đạo dịch chuyển trọng tâm của 5 đảo san hô tại quần đảo Trường Sa giai đoạn 2007 -2022

đáng kể so với các đảo còn lại. Trường Sa Lớn và Sinh Tồn có giá trị xói lở cực đại lần lượt là $-6,16$ m/năm và $-5,59$ m/năm, trong khi Sơn Ca chỉ đạt $-1,33$ m/năm.

Tốc độ xói lở trung bình (Hình 7D) cũng cho thấy xu hướng tương tự khi Nam Yết có giá trị lớn nhất ($-1,52$ m/năm), tiếp theo là Sơn Ca ($-1,33$ m/năm) và Sinh Tồn ($-1,17$ m/năm). Mặc dù Trường Sa Lớn có tỷ lệ các đoạn bờ bị xói lở cao nhất, tốc độ xói lở trung bình chỉ đạt $-0,77$ m/năm, cho thấy xói lở phân bố trên diện rộng nhưng cường độ tại từng vị trí không quá lớn.



Ngược lại với xu thế xói lở, Hình 7E cho thấy Sơn Ca có tỷ lệ các mặt cắt đang trong trạng thái bồi tụ lớn nhất (98%), tiếp theo là Sinh Tồn (72%) và Nam Yết (66%). Trường Sa Lớn chỉ có khoảng 34% chiều dài

Hình 7. Đặc điểm xói lở – bồi tụ đường bờ theo chỉ số EPR của 5 đảo san hô tại quần đảo Trường Sa giai đoạn 2007 -2022

đường bờ đang bồi tụ, thấp nhất trong số các đảo nghiên cứu.

Về bồi tụ cực đại (Hình 7F), Nam Yết tiếp tục ghi nhận giá trị lớn nhất (27,79 m/năm), tiếp theo là Sơn Ca (23,66 m/năm) và Trường Sa Lớn (16,30 m/năm). Kết quả tốc độ bồi tụ trung bình (Hình 7G) cũng cho thấy Nam Yết đạt giá trị cao nhất (6,46 m/năm), tiếp theo là Trường Sa Lớn (4,89 m/năm) và Sơn Ca (2,94 m/năm). Song Tử Tây có tốc độ bồi tụ trung bình thấp nhất (0,62 m/năm), phản ánh mức độ biến động hình thái nhỏ hơn so với các đảo còn lại.

Tổng hợp các chỉ tiêu EPR cho thấy Nam Yết là đảo có cường độ biến động mạnh nhất với

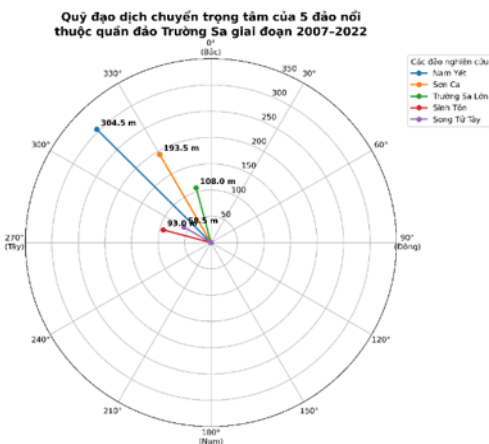
cả xói lở và bồi tụ đều đạt giá trị lớn, phản ánh quá trình tái cấu trúc hình thái diễn ra mạnh mẽ trong giai đoạn nghiên cứu. Sơn Ca có xu thế bồi tụ chiếm ưu thế, thể hiện qua tỷ lệ bồi tụ rất cao và mức xói lở thấp. Trường Sa Lớn là đảo có tỷ lệ xói lở lớn nhất, mặc dù vẫn xuất hiện các khu vực bồi tụ cục bộ với tốc độ tương đối cao. Trong khi đó, Sinh Tồn có mức biến động trung bình, còn Song Tử Tây thể hiện trạng thái hình thái tương đối ổn định.

4.5. Thảo luận

4.5.1. Mối quan hệ giữa các chỉ số LCR, ACR, CSR và EPR

Kết quả nghiên cứu cho thấy bốn chỉ số hình thái gồm tốc độ thay đổi chiều dài đường bờ (LCR), tốc độ thay đổi diện tích đảo (ACR), tốc độ dịch chuyển trọng tâm (CSR) và tốc độ biến động điểm cuối đường bờ (EPR) có mối quan hệ chặt chẽ trong việc phản ánh quá trình tiến hóa hình thái các đảo nổi thuộc quần đảo Trường Sa. Trong đó, LCR phản ánh mức độ biến đổi hình học của đường bờ, ACR thể hiện quy mô mở rộng hoặc thu hẹp diện tích đảo, CSR mô tả hướng và mức độ dịch chuyển của toàn bộ đảo trong không gian, còn EPR phản ánh chi tiết đặc điểm xói lở và bồi tụ tại từng đoạn đường bờ. Việc kết hợp bốn chỉ số cho phép đánh giá toàn diện cả quy mô, hướng và cơ chế biến động hình thái.

Kết quả cho thấy các đảo có giá trị LCR và ACR lớn cũng đồng thời có CSR và EPR cao. Điển hình là Nam Yết, nơi ghi nhận tốc độ thay đổi chiều dài đường bờ lớn nhất (928 m/năm), tốc độ mở rộng diện tích đạt 70.844 m²/năm trong giai đoạn 2017–2022, tốc độ dịch chuyển trọng tâm trung bình toàn kỳ đạt 20,3 m/năm và khoảng cách dịch chuyển trọng tâm tích lũy khoảng 304,5 m (Hình 8). Đồng thời, đảo này cũng có tốc độ bồi tụ trung bình và bồi tụ cực đại lớn nhất, cho thấy quá trình mở rộng hình thái diễn ra mạnh mẽ và có tính định hướng rõ rệt.



Hình 8. Quỹ đạo dịch chuyển trọng tâm của 5 đảo san hô tại quần đảo Trường Sa giai đoạn 2007-2022

Đối với Sinh Tồn và Song Tử Tây, khoảng cách dịch chuyển trọng tâm lần lượt khoảng 93,0 m và 68,5 m, nhỏ hơn đáng kể so với Nam Yết và Sơn Ca. Các đảo này cũng có giá trị LCR, ACR và CSR thấp hơn, phản ánh mức độ biến động hình thái nhỏ hơn trong giai đoạn nghiên cứu. Đặc biệt, Song Tử Tây có tốc độ biến động đường bờ trung bình chỉ khoảng 0,12 m/năm, cho thấy đảo duy trì trạng thái hình thái tương đối ổn định.

Hình 8 cho thấy mặc dù cường độ biến động khác nhau, cả năm đảo đều có xu hướng dịch chuyển trọng tâm về phía tây bắc (khoảng 300°–330°). Xu hướng này phản ánh sự phát triển không đối xứng của các đảo, trong đó vật liệu trầm tích và khu vực mở rộng tập trung chủ yếu về phía tây bắc. Đây là bằng chứng cho thấy quá trình tiến hóa hình thái không chỉ làm gia tăng diện tích và chiều dài đường bờ mà còn làm thay đổi vị trí hình học của toàn bộ đảo theo một hướng ưu thế.

Nhìn chung, các chỉ số LCR, ACR, CSR và EPR phản ánh các khía cạnh khác nhau nhưng có mối liên hệ thống nhất trong đánh giá biến động hình thái đảo nổi. LCR và ACR thể hiện quy mô mở rộng hình thái; CSR phản ánh hướng phát triển không gian; còn EPR làm rõ cơ chế xói lở

Sơn Ca là đảo có mức độ biến động lớn thứ hai với giá trị LCR đạt 758 m/năm, ACR đạt 22.490 m²/năm và khoảng cách dịch chuyển trọng tâm khoảng 193,5 m. Đảo này có tỷ lệ các đoạn bờ đang bồi tụ lên tới 98%, trong khi tỷ lệ xói lở chỉ khoảng 2,08%, chứng tỏ quá trình mở rộng hình thái chủ yếu được chi phối bởi bồi tụ. Ngược lại, Trường Sa Lớn mặc dù có khoảng cách dịch chuyển trọng tâm tương đối lớn (108,0 m) nhưng lại có tỷ lệ các đoạn bờ đang xói lở cao nhất (65,66%). Điều này cho thấy sự gia tăng diện tích và chiều dài đường bờ của đảo không diễn ra đồng đều mà là kết quả của quá trình xói lở và bồi tụ xen kẽ giữa các khu vực khác nhau quanh đảo.

Đối với Sinh Tồn và Song Tử Tây,

và bồi tụ tạo nên các biến đổi đó. Sự tương đồng giữa các chỉ số khẳng định rằng các đảo có mức mở rộng diện tích và chiều dài đường bờ lớn cũng là những đảo có sự dịch chuyển trọng tâm mạnh và cường độ bồi tụ cao. Điều này chứng minh việc tích hợp đồng thời bốn chỉ số hình thái là cách tiếp cận hiệu quả để đánh giá quá trình tiến hóa không gian của các đảo nổi tại quần đảo Trường Sa.

4.5.2. Vai trò của các yếu tố tự nhiên đối với biến động hình thái

Kết quả nghiên cứu cho thấy biến động hình thái của các đảo nổi tại quần đảo Trường Sa không chỉ phản ánh tác động của các hoạt động cải tạo đảo mà còn chịu ảnh hưởng đáng kể của các yếu tố tự nhiên, đặc biệt là chế độ sóng, gió mùa, dòng chảy ven rạn và đặc điểm địa hình rạn san hô (reef flat). Các yếu tố này quyết định quá trình vận chuyển, tái phân bố và tích tụ vật liệu trầm tích, từ đó chi phối xu hướng xói lở – bồi tụ và sự thay đổi hình thái của các đảo theo thời gian. Trong khu vực nghiên cứu, chế độ gió mùa Đông Bắc là yếu tố động lực chi phối trong phần lớn thời gian trong năm. Sóng do gió mùa Đông Bắc tạo ra thường có cường độ lớn và tác động trực tiếp lên các sườn đảo hướng đông và đông bắc, làm gia tăng quá trình xói lở tại các khu vực đón sóng. Sau khi truyền qua đới rạn (reef crest), năng lượng sóng bị suy giảm trên bề mặt reef flat, đồng thời hình thành các dòng chảy ven rạn có khả năng vận chuyển vật liệu theo phương dọc bờ đến các khu vực khuất sóng. Cơ chế này giải thích xu hướng bồi tụ tại các đoạn bờ phía tây và tây bắc của nhiều đảo trong khu vực nghiên cứu.

Kết quả phân tích chỉ số CSR cho thấy phần lớn các đảo đều có xu hướng dịch chuyển trọng tâm về phía tây bắc hoặc bắc – tây bắc. Xu hướng này thể hiện rõ nhất tại Nam Yết và Sơn Ca, hai đảo có khoảng cách dịch chuyển trọng tâm lớn nhất trong giai đoạn nghiên cứu. Điều đó cho thấy sự mở rộng diện tích đảo không diễn ra đồng đều theo mọi hướng mà tập trung chủ yếu tại khu vực khuất sóng, nơi vật liệu được vận chuyển và tích tụ nhiều hơn. Sự dịch chuyển có tính định hướng của trọng tâm đảo là bằng chứng cho thấy trường sóng và dòng chảy đóng vai trò quan trọng trong việc điều khiển quá trình tiến hóa hình thái đảo san hô.

Ngoài sóng và gió mùa, dòng chảy ven rạn cũng là yếu tố kiểm soát quá trình vận chuyển trầm tích. Khi sóng vỡ trên reef crest sẽ tạo nên chênh lệch mực nước giữa phía ngoài và phía trong rạn, hình thành các dòng chảy hướng ra biển thông qua các kênh rạn (reef channels) hoặc dọc theo bề mặt reef flat. Những dòng chảy này có khả năng tái phân bố vật liệu san hô vụn và trầm tích cát từ các khu vực năng lượng cao sang các khu vực năng lượng thấp hơn. Vì vậy, trên cùng một đảo có thể đồng thời xuất hiện các đoạn bờ bị xói lở mạnh và các khu vực bồi tụ mạnh, như kết quả đã ghi nhận từ chỉ số EPR. Đặc điểm hình thái của reef flat cũng có ảnh hưởng rõ rệt đến mức độ ổn định của từng đảo. Những đảo có reef flat rộng và tương đối liên tục có khả năng tiêu tán năng lượng sóng tốt hơn trước khi sóng tác động vào đường bờ, nhờ đó quá trình bồi tụ thường chiếm ưu thế và hình thái đảo ổn định hơn. Ngược lại, tại các đảo có reef flat hẹp hoặc địa hình rạn không đồng đều, năng lượng sóng dễ tập trung vào một số đoạn bờ, làm gia tăng cường độ xói lở và tạo nên sự phân hóa mạnh giữa các khu vực xói lở và bồi tụ. Điều này giải thích sự khác biệt về đặc điểm biến động hình thái giữa các đảo nghiên cứu mặc dù đều nằm trong cùng một khu vực biển.

Bên cạnh các quá trình động lực thường xuyên, các hiện tượng thời tiết cực đoan như bão và áp thấp nhiệt đới cũng góp phần thúc đẩy biến động hình thái đảo. Mặc dù tần suất bão ảnh hưởng trực tiếp đến quần đảo Trường Sa không lớn, nhưng các đợt sóng mạnh trong mùa bão có thể gây xói lở cục bộ, làm thay đổi hình dạng đường bờ trong thời gian ngắn và tái phân bố lượng lớn vật liệu san hô quanh đảo. Những biến động đột ngột này thường làm gia tăng mức độ phân hóa giữa các khu vực xói lở và bồi tụ, đặc biệt tại các đảo có cấu trúc địa hình phức tạp.

4.5.3. Ảnh hưởng của hoạt động cải tạo đảo đến quá trình tiến hóa hình thái

Bên cạnh các yếu tố tự nhiên, kết quả nghiên cứu cho thấy hoạt động cải tạo và mở rộng đảo là một trong những nhân tố quan trọng làm thay đổi quá trình tiến hóa hình thái của các đảo nổi tại quần đảo Trường Sa trong giai đoạn 2007–2022. Những thay đổi được ghi nhận từ các chỉ số LCR, ACR, CSR và EPR cho thấy biến động hình thái không chỉ phản ánh quá trình vận chuyển trầm tích tự nhiên mà còn mang dấu ấn rõ rệt của các hoạt động bồi đắp, san lấp và xây dựng công

trình ven đảo.

Kết quả phân tích cho thấy sự gia tăng mạnh của chiều dài đường bờ và diện tích đảo tại Nam Yết và Sơn Ca trong giai đoạn 2017–2022 diễn ra đồng thời với sự gia tăng đáng kể của tốc độ dịch chuyển trọng tâm. Điều này cho thấy quá trình mở rộng đảo không diễn ra đồng đều theo mọi hướng mà tập trung tại các khu vực được bồi đắp hoặc gia cố. Sự dịch chuyển trọng tâm về phía tây bắc phản ánh hướng phát triển không gian ưu thế của đảo sau quá trình cải tạo, đồng thời cho thấy các hoạt động xây dựng đã làm thay đổi cân bằng hình thái vốn được hình thành dưới tác động của các quá trình tự nhiên.

Tại Trường Sa Lớn, mặc dù tốc độ mở rộng diện tích đạt giá trị cao trong giai đoạn 2012–2017, kết quả EPR lại cho thấy phần lớn chiều dài đường bờ vẫn đang trong trạng thái xói lở. Điều này phản ánh rằng hoạt động cải tạo không loại bỏ hoàn toàn các quá trình xói lở tự nhiên mà chủ yếu làm thay đổi sự phân bố không gian của chúng. Các công trình bảo vệ bờ có thể làm giảm xói lở tại khu vực được gia cố, nhưng đồng thời làm thay đổi trường sóng và dòng chảy, dẫn đến hiện tượng chuyển dịch vùng xói lở sang các đoạn bờ lân cận. Hiện tượng này thường được ghi nhận tại các đảo san hô có hệ thống kè và bờ nhân tạo phát triển. Đối với Sinh Tồn và Song Tử Tây, mức độ biến động hình thái nhỏ hơn cho thấy các quá trình tự nhiên vẫn đóng vai trò chi phối trong giai đoạn nghiên cứu. Sự thay đổi diện tích và chiều dài đường bờ diễn ra với cường độ thấp hơn, trong khi tốc độ dịch chuyển trọng tâm cũng nhỏ hơn đáng kể so với Nam Yết và Sơn Ca. Điều này phản ánh quá trình tiến hóa hình thái của hai đảo vẫn chủ yếu được điều khiển bởi vận chuyển trầm tích và chế độ thủy động lực tự nhiên, với mức độ tác động của các hoạt động cải tạo thấp hơn.

Một đặc điểm đáng chú ý là mặc dù hoạt động cải tạo làm gia tăng nhanh diện tích đảo và chiều dài đường bờ, quá trình tiến hóa hình thái sau cải tạo vẫn tiếp tục chịu sự điều chỉnh của các yếu tố tự nhiên. Các kết quả EPR cho thấy trên cùng một đảo vẫn tồn tại đồng thời các khu vực bồi tụ và xói lở. Điều này chứng tỏ sau khi hình thành các bề mặt bồi đắp mới, hệ thống sóng, dòng chảy và vận chuyển trầm tích sẽ tiếp tục tái phân bố vật liệu nhằm thiết lập trạng thái cân bằng hình thái mới. Vì vậy, sự mở rộng đảo không phải là trạng thái ổn định cuối cùng mà là giai đoạn khởi đầu của một quá trình điều chỉnh hình thái kéo dài dưới tác động của điều kiện thủy động lực.

Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy các đảo có mức độ cải tạo lớn thường ghi nhận giá trị cao đồng thời ở các chỉ số LCR, ACR và CSR. Điều này phản ánh mối liên hệ chặt chẽ giữa sự gia tăng quy mô đảo với sự thay đổi hình dạng và vị trí không gian của đảo. Tuy nhiên, mức độ biến động của chỉ số EPR không hoàn toàn tỷ lệ với LCR hoặc ACR, bởi EPR phản ánh biến động cục bộ tại từng đoạn bờ. Do đó, một đảo có diện tích tăng mạnh vẫn có thể xuất hiện nhiều khu vực xói lở nếu trường sóng và dòng chảy bị thay đổi sau quá trình cải tạo.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã sử dụng chuỗi dữ liệu ảnh viễn thám đa thời gian giai đoạn 2007–2022 kết hợp với các phương pháp phân tích không gian trong môi trường GIS để đánh giá biến động hình thái của năm đảo nổi gồm Sơn Ca, Nam Yết, Sinh Tồn, Trường Sa Lớn và Song Tử Tây thuộc quần đảo Trường Sa. Thông qua việc tích hợp bốn chỉ số hình thái gồm tốc độ thay đổi chiều dài đường bờ (LCR), tốc độ thay đổi diện tích đảo (ACR), tốc độ dịch chuyển trọng tâm (CSR) và tốc độ biến động điểm cuối đường bờ (EPR), nghiên cứu đã đánh giá toàn diện quá trình tiến hóa hình thái không gian của các đảo nổi dưới tác động của các yếu tố tự nhiên và hoạt động cải tạo đảo.

Kết quả nghiên cứu cho thấy các đảo nổi tại quần đảo Trường Sa đều có sự biến đổi hình thái trong giai đoạn nghiên cứu nhưng với mức độ khác nhau. Nam Yết là đảo có cường độ biến động lớn nhất với tốc độ thay đổi chiều dài đường bờ, tốc độ mở rộng diện tích, dịch chuyển trọng tâm và tốc độ bồi tụ đều đạt giá trị cao nhất. Sơn Ca cũng ghi nhận quá trình mở rộng mạnh với bồi tụ chiếm ưu thế trên phần lớn chiều dài đường bờ. Trường Sa Lớn có mức độ biến động trung bình nhưng tỷ lệ các đoạn bờ đang xói lở lớn nhất, phản ánh quá trình tái cấu trúc hình thái sau giai đoạn mở rộng mạnh. Sinh Tồn có xu hướng mở rộng tương đối ổn định, trong khi Song Tử

Tây duy trì trạng thái hình thái tương đối cân bằng với mức biến động nhỏ nhất trong số các đảo nghiên cứu. Phân tích chỉ số CSR cho thấy phần lớn các đảo có xu hướng dịch chuyển trọng tâm theo hướng tây bắc hoặc bắc – tây bắc, phản ánh quá trình mở rộng đảo không diễn ra đồng đều mà có tính định hướng rõ rệt. Kết quả này phù hợp với phân bố không gian của các khu vực xói lở và bồi tụ được xác định từ chỉ số EPR, đồng thời cho thấy vai trò quan trọng của chế độ sóng, dòng chảy ven rạn và quá trình vận chuyển trầm tích trong việc chi phối sự tiến hóa hình thái của các đảo.

Kết quả thảo luận cho thấy biến động hình thái của các đảo nổi tại quần đảo Trường Sa là kết quả của sự tương tác giữa các quá trình tự nhiên và hoạt động cải tạo đảo. Trong đó, trường sóng, gió mùa Đông Bắc, dòng chảy ven rạn và đặc điểm reef flat quyết định xu hướng vận chuyển và tích tụ trầm tích, còn các hoạt động bồi đắp, san lấp và xây dựng công trình đã làm gia tăng đáng kể quy mô và tốc độ biến đổi hình thái tại một số đảo. Sau quá trình cải tạo, các đảo vẫn tiếp tục điều chỉnh hình thái dưới tác động của các quá trình thủy động lực nhằm thiết lập trạng thái cân bằng mới.

Đóng góp nổi bật của nghiên cứu là xây dựng khung đánh giá tích hợp dựa trên bốn chỉ số LCR, ACR, CSR và EPR, cho phép phân tích đồng thời sự thay đổi chiều dài đường bờ, diện tích đảo, hướng dịch chuyển hình thái và đặc điểm xói lở – bồi tụ. Cách tiếp cận này không chỉ nâng cao khả năng đánh giá tiến hóa hình thái không gian của các đảo nổi mà còn cung cấp cơ sở khoa học phục vụ theo dõi biến động lâu dài, hỗ trợ quản lý tài nguyên, bảo vệ môi trường và quy hoạch phát triển bền vững khu vực quần đảo Trường Sa.

Trong thời gian tới, nghiên cứu cần được mở rộng theo hướng tích hợp dữ liệu viễn thám độ phân giải rất cao với mô hình thủy động lực và mô hình vận chuyển trầm tích, đồng thời kết hợp các số liệu khảo sát thực địa để làm rõ hơn cơ chế chi phối quá trình tiến hóa hình thái của các đảo san hô trong bối cảnh biến đổi khí hậu, nước biển dâng và các tác động nhân sinh ngày càng gia tăng.

Tài liệu tham khảo

- [1] Moberg, F., Folke, C. (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics*, 29(2), 215–233. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00009-9).
- [2] Hedley, J.D., Roelfsema, C.M., Chollett, I., et al. (2016). Remote sensing of coral reefs for monitoring and management: A review. *Remote Sensing*, 8(2), 118. <https://doi.org/10.3390/rs8020118>.
- [3] Mumby, P.J., Skirving, W., Strong, A.E., et al. (2004). Remote sensing of coral reefs and their physical environment. *Marine Pollution Bulletin*, 48(3–4), 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2003.10.031>.
- [4] Hedley, J.D., Roelfsema, C.M., Brando, V.E., et al. (2018). Coral reef applications of Sentinel-2: Coverage, characteristics, bathymetry and benthic mapping with comparison to Landsat 8. *Remote Sensing of Environment*, 216, 598–614. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.014>.
- [5] Hedley, J.D., Harborne, A.R., Mumby, P.J. (2005). Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*, 26(10), 2107–2112. <https://doi.org/10.1080/01431160500034086>.
- [6] Lyzenga, D.R. (1981). Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, 2(1), 71–82. <https://doi.org/10.1080/01431168108948342>.
- [7] Roelfsema, C.M., Phinn, S.R., Jupiter, S., Comley, J., Albert, S. (2013). Mapping coral reefs at reef to reef-system scales, 10s–1000s km², using object-based image analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 34(18), 6367–6388. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.800660>.
- [8] Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., Farris, A.S. (2021). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.1 User Guide. U.S. Geological Survey Open-File Report 2021-1091. <https://doi.org/10.3133/ofr20211091>.
- [9] Li, F., Wu, W., Zhang, P., Zhang, B., Su, F. (2025). A study on the spatial morphological evolution and driving factors of coral islands and reefs in the South China Sea based on multi-source satellite imagery. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(4), 820. <https://doi.org/10.3390/jmse13040820>.
- [10] Nguyễn Hào Quang và cs. (2015). Nghiên cứu phân bố san hô ven đảo Lý Sơn bằng công nghệ GIS

- và viễn thám. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển, 15(3), 264–272. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/15/3/7222>.
- [11] Nguyễn Văn Long, Tống Phước Hoàng Sơn (2017). Hiện trạng và biến động diện tích các hệ sinh thái biển tiêu biểu trong vịnh Nha Trang. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển, 17(4), 469–479. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/17/4/8459>.
- [12] Đỗ Huy Cường và cs. (2019). Nghiên cứu môi trường biển và phân bố san hô khu vực đảo Nam Yết sử dụng ảnh VNREDSat-1 và QuickBird. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển, 19(3B), 189–202. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/19/3B/14525>.
- [13] Nguyen Xuan Tung, Nguyen Minh Huan, Nguyen Kim Cuong, Pham Duc Hung, Luc Anh Tuan (2025). Wave-induced sediment dynamics and seabed changes around the Truong Sa Island, Vietnam. Vietnam Journal of Earth Sciences, 48(2), 199–218. <https://doi.org/10.15625/2615-9783/23852>.

[Article © 2026 by Magazine of Geodesy - Cartography is licensed under CC BY 4.0](#)

