

## Application of numerical model Simclast for studying the development of Red river delta in late Pleistocene-Holocene

Mai Duc Dong<sup>1</sup>, Phung Van Phach<sup>1</sup>, Nguyen Trung Thanh<sup>1</sup>, Duong Quoc Hung<sup>1</sup>,  
Pham Quoc Hiep<sup>1</sup>, Nguyen Van Diep<sup>1</sup>, Renat Shakirov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Marine Geology and Geophysics, VAST, Vietnam*

<sup>2</sup>*Far East Geological Institute, FEB RAS, Russia*

\*E-mail: [ducdong.geo@gmail.com](mailto:ducdong.geo@gmail.com)

Received: 29 December 2018; Accepted: 28 June 2019

©2019 Vietnam Academy of Science and Technology (VAST)

### Abstract

The Simclast model has been verified and applied effectively in simulating the delta development for some major deltas in the world. In this study, we applied the model Simclast for simulating the history of the Red river delta development in late Pleistocene-Holocene. Results of the model reveal that the mainland of study area had reduced rapidly during transgression period (10,000-8,000 BP). The morphology changed significantly in the paleo-Red and Day river systems, but slightly in the paleo Thai Binh river system. The paleo-river network had been active in upper part before 11,000 BP and then shifted seaward until 2,000 BP. The river-sea interaction causes erosion and accumulation; as a result the morphology changed remarkably. The paleo-Thai Binh river had been inactive until 5,500 BP and then it was active but the morphology had not varied remarkably. The recent coastline generated from Simclast is relatively in accordance with the present coastline.

**Keywords:** Simclast model, delta development, Red river delta, late Pleistocen-Holocene

## Ứng dụng mô hình số Simclast nghiên cứu sự phát triển của châu thổ sông Hồng giai đoạn Pleistocen muộn-Holocen

Mai Đức Đông<sup>1</sup>, Phùng Văn Phách<sup>1</sup>, Nguyễn Trung Thành<sup>1</sup>, Dương Quốc Hưng<sup>1</sup>,  
Phạm Quốc Hiệp<sup>1</sup>, Nguyễn Văn Diệp<sup>1</sup>, Renat Shakirov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Viện Địa chất và Địa vật lý biển, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Việt Nam

<sup>2</sup>Viện Địa chất Viễn Đông, Viện Hàn lâm Khoa học Liên bang Nga, Liên bang Nga

\*E-mail: [ducdong.geo@gmail.com](mailto:ducdong.geo@gmail.com)

Nhận bài: 29-12-2018; Chấp nhận đăng: 28-6-2019

### Tóm tắt

Mô hình Simclast đã được kiểm chứng và áp dụng có hiệu quả trong mô phỏng quá trình hình thành và phát triển một số châu thổ lớn trên thế giới thông qua quá trình tương tác sông - biển chu kỳ dài và sau đó đã được thực hiện tại châu thổ sông Hồng. Kết quả mô hình đã chỉ ra rằng phân lục địa khu vực nghiên cứu thu hẹp nhanh sau giai đoạn biển tiến (10.000-8.000 năm BP), bề mặt địa hình chủ yếu thay đổi mạnh ở ngoài khơi hệ thống sông Hồng, sông Đáy và ít thay đổi ngoài khơi hệ thống sông Thái Bình. Hoạt động của các lòng sông cổ cũng có sự khác biệt, hệ thống sông Hồng cổ có thời gian hoạt động mạnh mẽ ở thượng nguồn đến khoảng 11.000 năm BP và kéo dài tới khoảng 2.000 năm BP làm cho quá trình bồi - xói liên tục gây thay đổi hình thái địa hình. Hệ thống sông Thái Bình cổ đánh dấu sự hoạt động bình ổn cho đến 5.500 năm BP và hoạt động mạnh mẽ hơn kể từ đây đến giai đoạn hiện đại nhưng ít gây xáo trộn về địa hình. Đường bờ hiện đại từ mô hình số tương đối phù hợp với đường bờ hiện nay.

**Từ khóa:** Mô hình số Simclast, phát triển châu thổ, châu thổ sông Hồng, Pleistocen muộn – Holocen.

### MỞ ĐẦU

Châu thổ được định nghĩa là một thể địa chất nổi lên tách biệt với xung quanh bởi đường bờ được hình thành nơi sông đổ ra đại dương, biển kín, hồ, hoặc đầm phá và được tích tụ dưới sự chi phối bởi các quá trình động lực khu vực và có thể tái phân bố bởi các quá trình của bồn [1]. Các châu thổ hiện đại trên thế giới hình thành như là kết quả của sự suy giảm tốc độ mực nước biển dâng vào khoảng 8.500-6.500 năm cách ngày nay [2]. Châu thổ sông Hồng (CTSH) nằm ở phía tây vịnh Bắc Bộ, là một trong hai châu thổ lớn của đất nước bắt đầu hình thành cách ngày nay khoảng 8.500-8.000 năm BP [3, 4]. Các nghiên cứu về tiến hóa trầm tích đã chỉ ra rằng, lịch sử hình thành và phát

triển châu thổ trong Holocen (11.700 năm BP) phụ thuộc chủ yếu vào các yếu tố như dao động mực nước biển, lưu lượng trầm tích của các hệ thống sông, tốc độ tích tụ trầm tích, địa hình đáy, chế độ động lực và hoạt động tân kiến tạo trong khu vực [4–7]. Các kết quả nghiên cứu về dao động mực nước biển trong giai đoạn Holocen - hiện đại, lịch sử hình thành và tiến hóa CTSH có thể chia ra 3 giai đoạn chính: Giai đoạn từ cực đại băng hà cuối cùng đến 11.000 năm BP, mực nước biển ở độ sâu tương ứng khoảng (–)45–50 m, hoạt động của sông chi phối khu vực đồng bằng châu thổ, từ 11.000 năm BP đến 8.500 năm BP mực nước biển dâng cao hơn lên đến –7 m đã biến khu vực nghiên cứu trở thành môi trường estuary và từ

8.500 năm BP đến nay đánh dấu sự hình thành và phát triển châu thổ sông Hồng hiện đại. Tác động phức tạp của các quá trình sông - biển chu kỳ dài dưới ảnh hưởng của sự thay đổi mực nước biển đã được xây dựng lại chi tiết trên cơ sở mô hình lý thuyết thông qua Simclast [8], sau đó được áp dụng trên châu thổ sông Mekong [9], khu vực thềm Nha Trang (Nha Trang shelf) [10] đã cho thấy kết quả có thể ứng dụng được để quan sát nghiên cứu quá trình tiến hóa của châu thổ. Trong đó, các yếu tố đầu vào của mô hình (các yếu tố thủy thạch động học), đặc biệt là dao động mực nước biển có ảnh hưởng rất lớn tới kết quả mô hình. Khu vực CTSH, theo các công trình trước đây, với sự tương đồng về lịch sử tiến hóa có thể mô phỏng lại lịch sử tiến hóa tương tự các châu thổ khác. Vì vậy, mục tiêu của nghiên cứu này là áp dụng mô hình số Simclast cho khu vực nghiên cứu nhằm phác họa lại một số đặc điểm của quá trình tiến hóa châu thổ sông Hồng trong mối liên hệ với tổ hợp các yếu tố thủy thạch động học và xem xét ảnh hưởng của các tác động nhân sinh lên quá trình tiến hóa tự nhiên trong khu vực nghiên cứu.

## TỔNG QUAN KHU VỰC NGHIÊN CỨU

Địa hình Châu Á nói chung, Việt Nam nói riêng là kết quả của quá trình tương tác các mảng thạch quyển trong các giai đoạn khác nhau. Sự va chạm giữa mảng Ấn-Úc và Á-Âu khoảng 50-45 triệu năm trước [11, 12] đã phá hủy hoàn toàn bề mặt cổ khu vực trung tâm Châu Á và hình thành nên các đới nâng và các đứt gãy kiến tạo lớn cỡ hành tinh. Sự nâng lên của địa hình tại Tây Tạng được xem như thượng nguồn của các hệ thống sông chính trong khu vực như sông Trường Giang, sông Hồng và sông Cửu Long... Sông Hồng xuất phát từ tỉnh Vân Nam, Trung Quốc, kéo dài theo đứt gãy phương tây bắc - đông nam [13] qua biên giới Việt Nam tại tỉnh Lào Cai. Sông có kiểu đơn nhánh ở thượng và trung lưu, đến khu vực hạ lưu sông Hồng phân nhánh và đổ ra vịnh Bắc Bộ. Do sự phân nhánh phức tạp của các sông nhánh, có thể phân chia chúng thành ba nhóm sông cơ bản như (hình 1). Các kết quả nghiên cứu trước đây cho thấy lưu lượng dòng chảy sông Hồng lên tới  $120 \text{ km}^3/\text{năm}$  đồng thời vận chuyển ra biển một lượng trầm tích khoảng

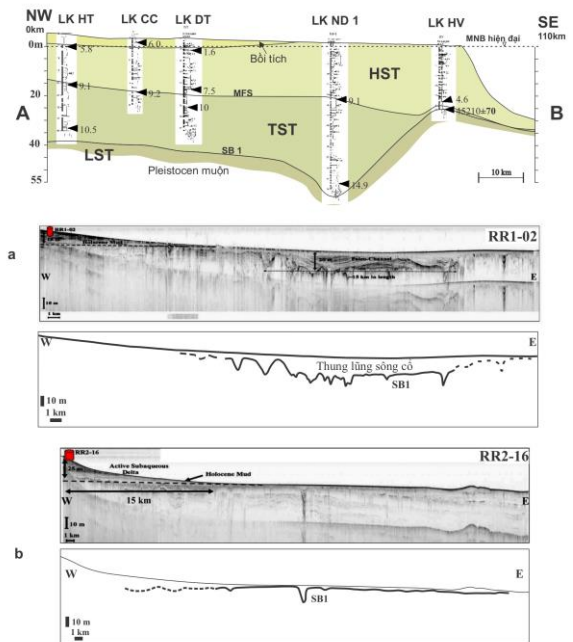
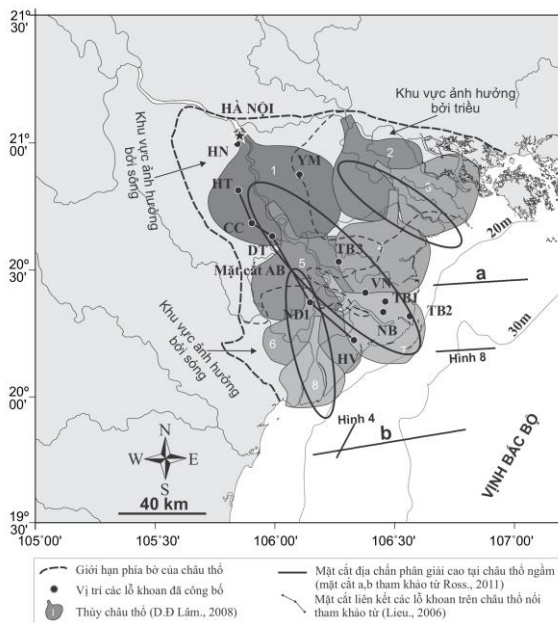
100–130 triệu tấn/năm [14]. Lưu lượng trầm tích đổ ra biển lớn trong suốt 8 nghìn năm qua kết hợp với sự thay đổi mực nước biển thời kỳ này đã hình thành nên một vùng đồng bằng châu thổ lớn như ngày nay.

Bản đồ địa chất [15] và bản đồ địa hình hiện đại cho thấy khu vực nghiên cứu có dạng tam giác phía đỉnh và hai bên được bao bọc bởi các địa hình đồi núi cao với các đá gốc hình thành trước Đệ Tứ. Các quá trình trầm tích giai đoạn cuối Pleistocen muộn-Holocen diễn ra chủ yếu ở vùng phía trong của tam giác. Vì vậy, hình thái địa hình khu vực nghiên cứu cũng là một yếu tố quan trọng chi phối đến quá trình hình thành và phát triển châu thổ. Các nghiên cứu về thạch học, trầm tích giai đoạn Holocen-hiện đại đã cho thấy sự thay đổi tương ứng của bề dày trầm tích với các giai đoạn dao động mực nước biển. Theo đó, bề dày trầm tích gia tăng từ 20 m đến 70 m với thành phần chủ yếu là bùn sét về phía lục địa - biển và có xu thế dày hơn về phía nam [16–19]. Các nghiên cứu về thành phần vật chất, vi cổ sinh và tuổi tuyệt đối  $^{14}\text{C}$  được công bố trong các năm qua [4, 7, 19–21] đã tóm lược và xây dựng mô hình theo thời gian về quá trình phát triển của châu thổ giai đoạn Holocene-hiện đại. Đây được xem là cơ sở quan trọng để thực hiện các nghiên cứu tiếp theo về châu thổ sông Hồng.

Dao động mực nước biển kể từ sau cực đại băng hà là một trong các yếu tố chính ảnh hưởng tới quá trình tiến hóa châu thổ, đặc biệt là khu vực nó tác động trực tiếp. Dưới ảnh hưởng của nó cùng với các yếu tố khác, bề mặt ranh giới bào mòn trầm tích được thiết lập vào thời kỳ cực đại băng hà cuối cùng, chịu tác động phần nào của quá trình biến tiến sau đó đã được xác định trên mặt cắt địa chấn nông phân giải cao [10, 22, 23] và tài liệu lỗ khoan [3–5, 7, 19–21, 24]. Các kết quả nghiên cứu về châu thổ sông Hồng trong các năm qua chủ yếu dựa trên kết quả phân tích mẫu các lỗ khoan. Đây là những kết quả có độ chính xác cao, phản ánh toàn bộ quá trình tiến hóa châu thổ. Tuy nhiên, nó có những hạn chế nhất định do lượng lỗ khoan không đủ lớn để có thể xây dựng một bối cảnh tiến hóa châu thổ theo diện. Cho đến nay, hầu hết các công trình vẫn dựa trên các mặt cắt và vạch lên các ranh giới địa chất chủ yếu dựa vào các dự đoán và kết quả khảo sát địa mạo bề mặt. Trong nghiên cứu tiến hóa châu thổ theo

diện, Doãn Đình Lâm (2003) đã công bố các bề mặt cơ sở được xây dựng dựa trên nội suy kết quả tài liệu lỗ khoan, các bề mặt này có giá trị thực tế cao, tuy nhiên chưa phản ánh được mối quan hệ giữa chúng. Thông thường, các dạng bề mặt địa tầng được hình thành ở các thời kỳ khác nhau dưới các điều kiện và quá trình chi phối khác nhau. Để có thể hiểu được quá trình trên việc xây dựng mô hình tiến hóa đa yếu tố

là cần thiết nhằm giúp chúng ta hiểu biết sâu sắc hơn về quá trình phát triển của châu thổ. Tuy nhiên, việc xây dựng mô hình tiến hóa phải dựa trên sự kế thừa nguồn số liệu công bố nhằm cho ra kết quả gần đúng với các số liệu thực tế. Các nghiên cứu thực tế gần đây cho thấy mô hình Simclast có thể đáp ứng được yêu cầu này [9, 10].



**Hình 1.** Vị trí khu vực châu thổ sông Hồng và lân cận. Đường nét đứt mỏng phân chia khu vực đồng bằng châu thổ chịu ảnh hưởng bởi sông, triều và sóng dựa trên quan điểm địa mạo học [25, 26]. Viết tắt: LK: Lỗ khoan, LST: Hệ thống trầm tích (HTTT) biển thấp, TST: HTTT biển tiến, HST: HTTT biển cao, SB1: bề mặt ranh giới tập, MFS: mặt ngập lụt cực đại. Các mặt cắt bên phải nguồn tài liệu từ Lieu (2006) [21] (mặt cắt trên) và Ross (2011) [27] (hai mặt cắt dưới)

## MÔ HÌNH VÀ TÀI LIỆU NGHIÊN CỨU

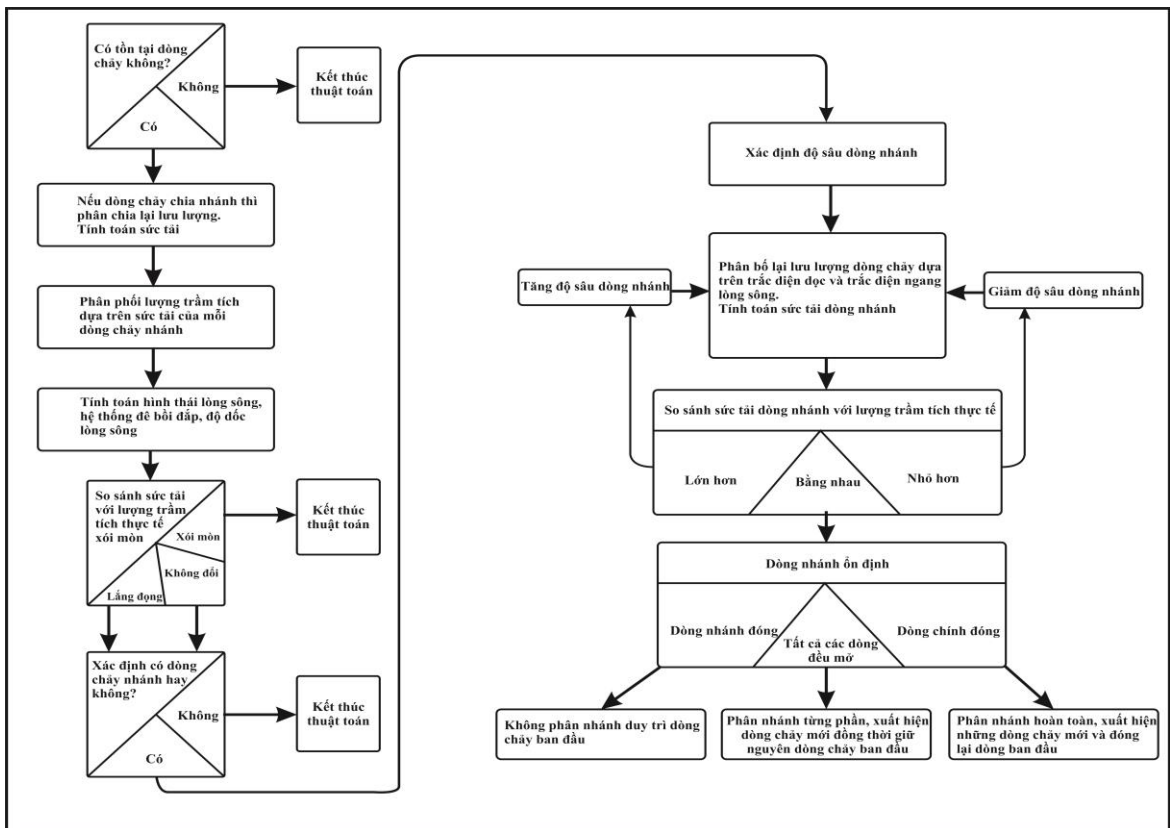
### Mô hình Simclast

Simclast (Multi-scale simulation of fluvio-deltaic and shallow marine stratigraphy) là mô hình số có thể áp dụng nghiên cứu về tiến hóa châu thổ, cho phép xây dựng quá trình hình thành và phát triển đồng bằng châu thổ thông qua sử dụng mô hình 3D dựa vào tính toán các quá trình tương tác sông-biển dưới sự chi phối của yếu tố dao động mực nước biển. Mô hình đã được phát triển từ năm 2004 đến năm 2008 tại Trung tâm Công nghệ thuộc Đại học Công nghệ Delft, Hà Lan. Mô hình này cho phép

nghiên cứu mối liên hệ qua lại giữa quá trình sông và quá trình biển. Đặc điểm chính của mô hình dựa trên khả năng mô phỏng đa tỷ lệ (multi-scale). Trong đó, mô hình của chu trình ngắn hạn với độ phân giải cao kết hợp với mô hình địa tầng chu kỳ dài bằng cách kết hợp các quá trình của các ô lưới phụ có tỷ lệ nhỏ hơn (sub-grid) thành mô hình với tỷ lệ lớn (large-scale). Nói cách khác, để tăng hiệu quả và giảm thời gian tính toán, khu vực nghiên cứu rộng lớn được chia thành các ô lưới nhỏ hơn và tính ảnh hưởng của các quá trình sông-biển thông qua các phương trình vật lý, sau đó tiến hành

liên kết kết quả cho toàn khu vực. Trong trường hợp này mô hình tính toán sẽ trở nên rất phức tạp. Theo các nghiên cứu trước đây, khu vực châu thổ sông Hồng, hình thành và phát triển chủ yếu chịu sự ảnh hưởng của ba quá trình sông - triều - sóng [25, 26]. Do đó để giảm bớt sự phức tạp, mô hình chỉ tập trung vào tương tác của sông ngòi và dao động mực nước biển giai đoạn cuối Pleistocen muộn-Holocen. Các tương tác khác của biển (thủy triều, sóng) lên lục địa được thiết đặt bằng các giá trị trung bình từ các kết quả đo đạc hiện nay. Về cơ bản, khu vực đồng bằng châu thổ được hình thành liên quan tới quá trình lấp đầy các thung lũng cắt xẻ của hệ thống sông cổ trong khu vực và sự phát triển của trầm tích châu thổ trong mối

liên quan với dao động mực nước biển. Các tương tác sông-biển được mô phỏng lại, dựa trên mô hình tính toán các ô lưới phụ và được mô tả trong sơ đồ khối tại hình 2. Trong nghiên cứu này, mô hình sử dụng có độ phân giải 4 km theo không gian và 1 năm theo thời gian đã được lựa chọn để phù hợp với mục đích nghiên cứu và quy mô về độ lớn của khu vực. Các kết quả tính toán đầu ra gồm 100 file mỗi loại của các bề mặt, bảng tính giá trị (lưu lượng, độ hạt...) được lấy giá trị trung bình trong 130 năm. Ngoài ra, mô hình độ phân giải 1 km theo không gian và 1 năm theo thời gian cũng được thực hiện tại các cửa sông sẽ được báo cáo ở những nghiên cứu chi tiết sau này.



Hình 2. Sơ đồ thuật toán trong mô hình Simclast [8]

### Tài liệu nghiên cứu

Tham số đầu vào của mô hình bao gồm: Bề mặt cơ sở (initial topography) tính từ thời điểm 0 thực hiện chạy mô hình (13.000 năm BP); dữ liệu hệ thống sông và các thông số lưu lượng

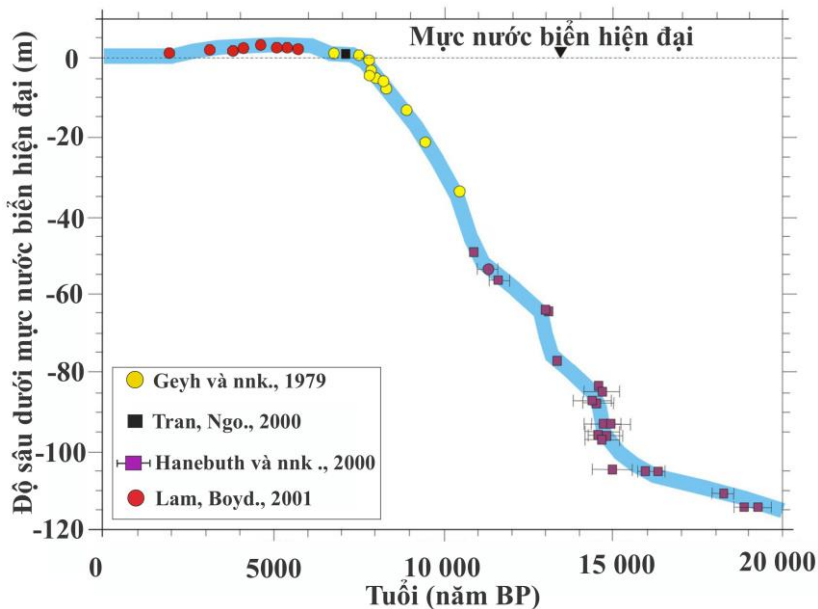
cũng như tải trọng trầm tích từng sông tại một số thời kỳ (bảng 1 và bảng 2); dữ liệu lượng mưa trung bình thay đổi theo thời gian; tốc độ sụt lún khu vực; dao động mực nước biển toàn khu vực nghiên cứu từ cuối Pleistocen muộn

đến nay; tốc độ gió và hướng gió hoặc độ cao sóng cùng hướng lan tỏa sóng; vị trí và vận tốc dòng chảy biển; các tham số về vận chuyển trầm tích; kích thước hạt và mật độ trầm tích; hướng/chiều các lòng dẫn. Trong đó ba tham số quan trọng bao gồm bề mặt cơ sở, tải trọng trầm tích và dao động mực nước biển cần được quan tâm và chính xác hóa. Do sự phức tạp trong quá trình tính toán tổ hợp các điều kiện tham số đầu vào, ảnh hưởng của các điều kiện khác ngoài ba tham số trên được thiết đặt ở giá trị trung bình theo các công bố có trước nhằm mục đích giảm thiểu sự phức tạp của mô hình. Chi tiết các tham số được trình bày dưới đây.

### Dao động mực nước biển

Dao động mực nước biển là yếu tố giữ vai trò chủ đạo ảnh hưởng tới quá trình tiến hóa trầm tích châu thổ giai đoạn Pleistocen muộn-Holocen. Dao động mực nước biển khu vực

được nghiên cứu lại chịu ảnh hưởng của dao động mực nước biển toàn cầu và hoạt động kiến tạo hiện đại. Hoạt động kiến tạo khu vực CTSH tương đối bình ổn (khoảng 0,04–0,12 mm/năm) [28]. Như vậy, vai trò của hoạt động kiến tạo là không đáng kể so với ảnh hưởng của dao động mực nước biển. Trong khu vực này, dao động mực nước biển chịu sự chi phối bởi ba chu kỳ ấm và lạnh của trái đất [29], chúng ảnh hưởng tới tốc độ dâng lên và hạ xuống của mực nước biển và ảnh hưởng tới hình thành đặc điểm các hệ thống trầm tích trong khu vực nghiên cứu. Các giai đoạn đánh dấu sự thay đổi của tập/hệ thống trầm tích gắn liền với các giai đoạn dâng hạ hay bình ổn trong thời gian dài của mực nước biển. Dữ liệu dao động mực nước biển theo chuẩn format đầu vào được tạo ra dựa trên dao động mực nước biển chuẩn từ Tanabe et al., (2006) [19].



Hình 3. Đường cong dao động mực nước biển khu vực nghiên cứu trong giai đoạn 20.000 năm BP [19]

### Dữ liệu hệ thống sông

Trên cơ sở các hệ thống sông cổ phát hiện được từ mặt cắt địa chấn nông phân giải cao trong luận văn thạc sĩ của Ross (2011) [27], các mặt cắt địa chấn nông phân giải cao đo đạc trong khuôn khổ đề tài VAST.ĐTCB.02/16–17, bản đồ tương đá cổ địa lý, hệ thống các thùy

châu thổ của Doãn Đình Lâm (2003, 2008) [30, 31], cũng như sự tác động mạnh mẽ của các hệ thống sông hiện đại, nhóm tác giả đã phân chia khu vực nghiên cứu thành ba nhóm sông chính bao gồm: Nhóm sông Hồng, nhóm sông Thái Bình và nhóm sông Đáy, gọi tắt là sông Hồng, sông Thái Bình và sông Đáy (hình 1). Dữ liệu

của các hệ thống sông này bao gồm lưu lượng trầm tích và lưu lượng dòng chảy là số liệu cần thiết được đưa vào mô hình.

Thông tin về lưu lượng vận chuyển trầm tích của hệ thống sông trong khu vực nghiên cứu kê từ cực đại băng hà lần cuối (LGM) đã được đề cập đến trong một số nghiên cứu trước đây. Mặt khác, chúng ta có thể tính toán dòng trầm tích hàng năm cho từng khu vực cụ thể dựa theo công thức:

$$\text{Lưu lượng trầm tích [tấn/năm]} = \text{Tốc độ bóc mòn [m/10}^6\text{ năm]} * \text{Mật độ đá [tấn/m}^3\text{]} * \text{Diện tích lưu vực [10}^4\text{ m}^2\text{]}$$

Trong đó: Giá trị tốc độ bóc mòn trầm tích = 440 m/10<sup>6</sup> năm [32]; Giá trị mật độ đá trầm tích = 2,5 tấn/m<sup>3</sup> được lấy là giá trị giả định và trung bình. Từ đó các giá trị lưu lượng trầm tích các sông khu vực nghiên cứu được thể hiện trên bảng dưới đây.

**Bảng 1.** Giá trị lưu lượng trầm tích các sông khu vực châu thổ sông Hồng

Tên sông	Tốc độ bóc mòn trung bình (m/10 <sup>6</sup> năm)	Diện tích lưu vực sông (km <sup>2</sup> )	Mật độ (tấn/m <sup>3</sup> )	Lưu lượng trầm tích (triệu tấn/năm)	Ghi chú
Sông Hồng	440	60800	2,5	66,88	Diện tích chỉ tính trong khu vực nghiên cứu.
Sông Đáy	440	7500	2,5	8,25	Tính toán cho báo cáo
Sông Thái Bình	440	12700	2,5	13,97	Tính toán cho báo cáo
Hệ thống sông Hồng	440	120000	2,5	~130	Toàn bộ lưu vực (Tham khảo Milliman and Syvitski., (1992) [33])

Kết quả tính toán lưu lượng trầm tích của hệ thống sông Hồng theo Miliman và Syvitski (1992) [32] (~130 triệu tấn/năm) tương đối phù hợp với kết quả tính toán của Einsele (2000) [34] cũng như kết quả từ mô hình, hoặc giá trị đo được từ các trạm trong một số nghiên cứu ở bảng 2 đã được nhiều các nhà khoa học chứng nhận là có độ tin cậy cao và được sử dụng rộng rãi. Chính vì vậy, các giá trị tính toán cho ba nhóm sông trong khu vực nghiên cứu theo diện tích lưu vực sông giai đoạn hiện đại cũng có độ tin cậy cao và được sử dụng làm tham số đầu vào cho mô hình tính.

Do chưa xác định được chính xác lưu lượng dòng chảy trong điều kiện phân lưu - chi lưu ở

thời điểm bắt đầu chạy mô hình (13.000 năm BP) nên lưu lượng này được lấy giá trị trong giai đoạn hiện đại để chạy mô hình số. Ngoài tham số lưu lượng dòng chảy, mô hình còn sử dụng nhiều tham số khác. Mặc dù có những hạn chế nhất định, việc ứng dụng mô hình số để nghiên cứu quá trình tương tác sông biển chu kỳ dài cũng có thể xem là một hướng tiếp cận mới và đạt được một số kết quả nhất định.

Dựa trên tính toán lưu lượng của các hệ thống sông, tỷ lệ phần trăm lưu lượng của từng nhóm sông có thể ước tính như sau: Sông Hồng ~75%, sông Đáy ~5% và sông Thái Bình ~15%. Đây là căn cứ để áp dụng cho các mô phỏng sau này.

**Bảng 2.** Tổng hợp các kết quả tính toán lưu lượng dòng chảy

Tác giả	Giai đoạn	Vị trí	Thông số	Giá trị
Dang et al., (2010) [35]	1989–2006	Hệ thống S. Hồng	Lưu lượng trung bình [m <sup>3</sup> /s]	3.426
Dang et al., (2010) [35]	1960–1988	Hệ thống S. Hồng	Lưu lượng trung bình [m <sup>3</sup> /s]	3.557
Vinh et al., (2014) [36]	1960–1979	Hệ thống S. Hồng	Lưu lượng nước trung bình hàng năm [m <sup>3</sup> /s]	3.680
Vinh et al., (2014) [36]	1989–2010	Hệ thống S. Hồng	Lưu lượng nước trung bình hàng năm [m <sup>3</sup> /s]	3.350
Le et al., (2007) [38]	1902–1990	Trạm Sơn Tây	Lưu lượng trung bình [m <sup>3</sup> /s]	3.740

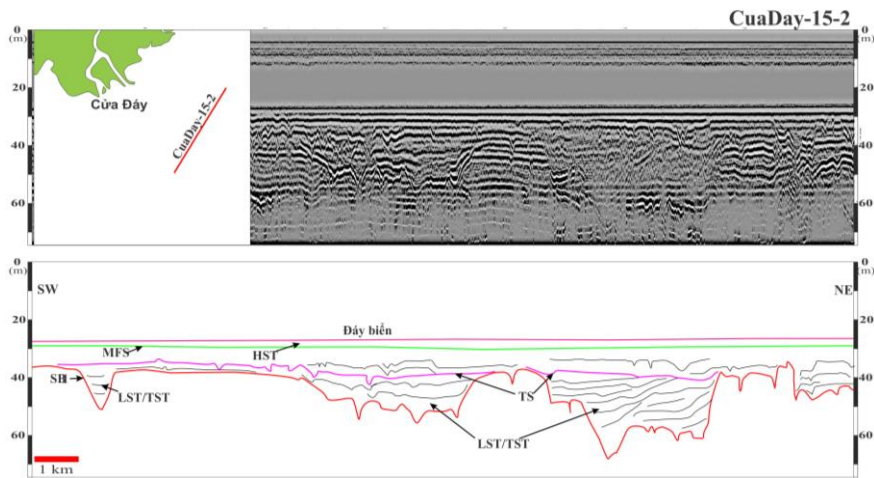
**Bề mặt cơ sở**

Lưới tính toán cho mô hình trong khu vực nghiên cứu được chia thành một vùng có kích

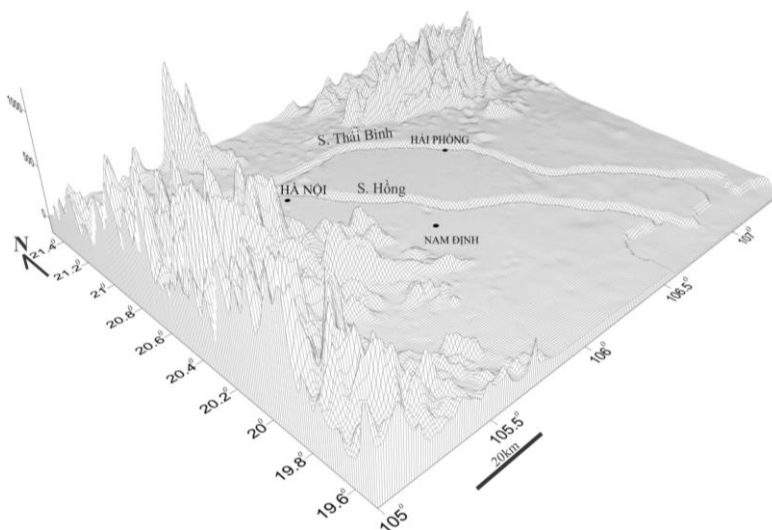
thước 116 hàng và 140 cột, trong đó khu vực nghiên cứu được chia thành các ô lưới phụ (16.240 ô), mỗi ô lưới phụ có kích thước 4 × 4

km. Các kết quả của quá trình tương tác sông-biển trên toàn khu vực nghiên cứu được tính ảnh hưởng lên từng ô lưới phụ. Lưới tính này được thực hiện trên bề mặt địa hình cổ được gọi là bề mặt cơ sở. Bề mặt cơ sở được hình thành sau quá trình phong hóa do thời tiết nóng ẩm khi lộ ra trong quá trình mực nước biển giảm xuống trong giai đoạn băng hà cực đại cuối cùng. Bề mặt này được coi là bề mặt phong hóa, nhiều nơi được đánh dấu bởi thành tạo sét loang lổ cứng được tìm thấy cả trên đồng bằng và thềm lục địa hiện đại. Bề mặt này

được xác định bằng tài liệu lỗ khoan ở khu vực đồng bằng và bằng tài liệu địa chấn nông phân giải cao khu vực thềm lục địa lân cận. Việc xác định bề mặt SB1 thông qua lỗ khoan được đề cập tới trong một số nghiên cứu [3–5, 7, 19, 21, 30]. Bề mặt SB1 trên các mặt cắt địa chấn [23] được thể hiện qua dấu hiệu phản xạ mạnh của bề mặt với tính liên tục cao và kiểu bề mặt với hình thái bị đào khoét mạnh, lộ ra bề mặt cứng được tìm thấy khá tương đồng trong một số vị trí ống phóng trọng lực trên vịnh Bắc Bộ [37] và xác định như trên hình 1a, 1b, 4, 8.



Hình 4. Kết quả minh giải tài liệu địa chấn địa tầng mặt cắt địa tầng phân tập. MFS: Mặt ngập lụt cực đại, TS: Mặt biên tiến, SB1: Ranh giới tập. LST: Hệ thống trầm tích (HTTT) biển thấp, TST: HTTT biển tiến, HST: HTTT biển cao



Hình 5. Bề mặt cơ sở khu vực nghiên cứu thời điểm 13.000 năm BP



Bề mặt SB1 được xác định bao gồm hai phần, phần trên đất liền được xác định tương đối trùng với bề mặt địa hình vùng đồi núi luôn cao hơn mực nước biển trong Holocen và phần luôn chịu quá trình bóc mòn trên khu vực đồng bằng nơi châu thổ sông Hồng hiện nay hình thành và phát triển được xác định từ tài liệu lỗ khoan, phần trên biển được xác định từ tài liệu địa chấn nông phân giải cao. Bề mặt cơ sở xây dựng từ các tài liệu trên được biểu diễn trên hình 5. Bề mặt này cùng với một số tham số khác sẽ được đưa vào mô hình. Kết quả là các giá trị cho phép mô phỏng tiến hóa quá trình hình thành và phát triển châu thổ.

### Các số tham số khác

Ngoài các tham số chủ yếu trình bày ở trên, các tham số khác được thu thập từ các công trình công bố có trước và được thiết đặt bởi giá trị trung bình, bao gồm:

Lượng mưa: Mùa mưa (từ tháng 5 đến tháng 10) xen kẽ với mùa khô và chiếm 85–95% tổng lượng mưa cả năm. Trong giai đoạn 1997–2004, lượng mưa trung bình hàng năm vào khoảng 1.590 mm trên toàn lưu vực [38]. Lượng mưa trên đồng bằng châu thổ cao hơn một chút, trung bình khoảng 1.667 mm trong giai đoạn 1996–2006 được công bố bởi Luu et al., (2010) [39].

Dòng chảy gần bề mặt với tốc độ  $< 1$  m/s và có hướng thay đổi theo mùa [40].

Độ cao sóng trung bình 0,88 m; lớn nhất 5 m [28].

Độ cao thủy triều trung bình 2,0–2,6 m [41]. Độ cao thủy triều lớn nhất 3,2–4 m [25, 26, 28].

Kích thước hạt trung bình D50 trầm tích bề mặt trung bình là 0,35, 0,16 và 0,175 mm tương ứng với sông Đà, sông Thao, sông Lô [42]. Giá trị kích thước hạt trung bình D50 giữa ngã ba sông Đà, sông Thao và ở đỉnh phần trên của hai nhánh sông là 0,2 và 0,18 mm tại sông Hồng và 0,22 mm tại sông Đuống [42]. Phía hạ lưu, tại phần cửa sông và khu vực bờ, D50 tại đây có giá trị khoảng từ 0,005–0,196 mm [33]. Do vậy, giá trị 0,2 mm được chọn làm giá trị trung bình cho toàn vùng nghiên cứu.

## KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

### Hình thái địa hình

Hình thái bề mặt địa hình cổ ít có sự thay đổi cho đến thời điểm khoảng 11.000 năm BP.

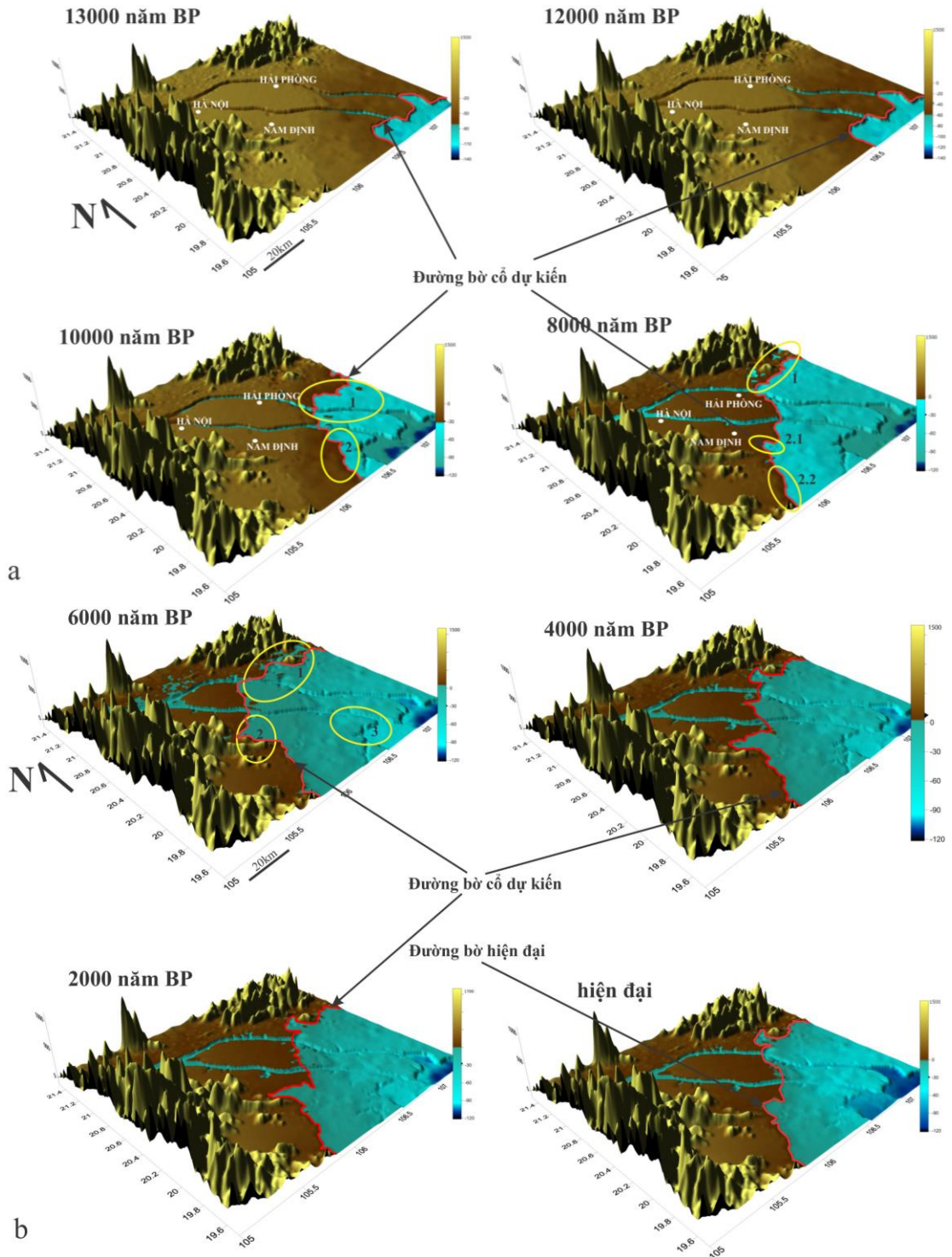
Vì vậy, về cơ bản tương tác của sông-biển không được quan sát rõ ràng. Sau đó, địa hình được bồi lấp tương đối vào khoảng 11.000–10.000 năm BP ở khu vực có độ sâu khoảng 140–120 m, nước biển tiến sâu vào đất liền tập trung tại khu vực cửa sông và phân chia thành hai vùng (1 và 2) như trên hình 6. Vùng 1 thể hiện xu thế tiến vào bờ của nước biển mạnh hơn tương đối đã cho thấy yếu tố biển chiếm ưu thế và biển lấn trong khoảng 2.000 năm (từ 12.000–10.000 năm BP). Trong khoảng 1.000 năm tiếp sau đó, biển tiến sâu hơn vào đất liền, tuy nhiên sự thay đổi này chỉ xảy ra cục bộ. Cho đến khoảng 8.000 năm BP, biển tiến sâu vào đất liền gây ngập lụt một vùng rộng lớn trên phạm vi của đồng bằng châu thổ. Tại vùng 1 sự phân dị địa hình mạnh và xuất hiện một số hình thái đảo. Tại vùng 2 tương tác sông biển mạnh mẽ hơn so với trước 8.000 năm BP được quan sát thấy.

Thời điểm mực nước biển tiến sâu nhất vào đất liền (6.000 năm BP) theo kết quả mô hình (hình 6), đánh dấu tương tác sông và biển rất mạnh kể từ 8.000 năm BP đến 6.000 năm BP. Các đảo ở Đông Bắc khu vực nghiên cứu đã lộ rõ so với trước đó nhưng hoạt động của vùng này (vùng 1) không đáng kể. Đáng chú ý là vùng 2 đánh dấu sự hoạt động mạnh mẽ của quá trình biển tiến sâu vào đất liền, kết quả này khá tương đồng với vị trí của thùy châu thổ số 5, 6 và 8 tương ứng với thùy Nam Định, Ninh Bình và Kim Sơn trong nghiên cứu của Doãn Đình Lâm (2008) [31] (hình 1). Ngoài ra, vùng 3 đánh dấu đặc trưng cho quá trình tiếp tục bồi lấp và hoạt động mạnh mẽ của nhánh sông Hồng. Do đó, nhánh sông này khó quan sát hơn trên bề mặt địa hình hiện đại. Như vậy, địa hình đã có sự thay đổi mạnh mẽ trên toàn khu vực nghiên cứu. Nơi dễ nhận biết sự thay đổi hình thái địa hình nhất là khu vực ngoài khơi cửa Ba Lạt hiện đại do các quá trình động lực tích cực cửa sông, ven bờ. Kết quả là ở thời điểm hiện đại (trên hình 6), hình thái địa hình tại cửa này tương đối bằng phẳng, hệ thống sông cổ bị lấp đầy mạnh mẽ so với các khu vực khác.

Như vậy, trong khoảng 13.000 năm qua, tương tác sông biển chi phối sự thay đổi hình thái địa hình tại khu vực 1 diễn ra mạnh mẽ

trong giai đoạn 13.000-9.000 năm BP, sau đó đi vào ổn định. Trong khi tại vùng 2 tương tác

sông-biển chi phối hình thái địa hình diễn ra tích cực cho đến thời điểm hiện tại.

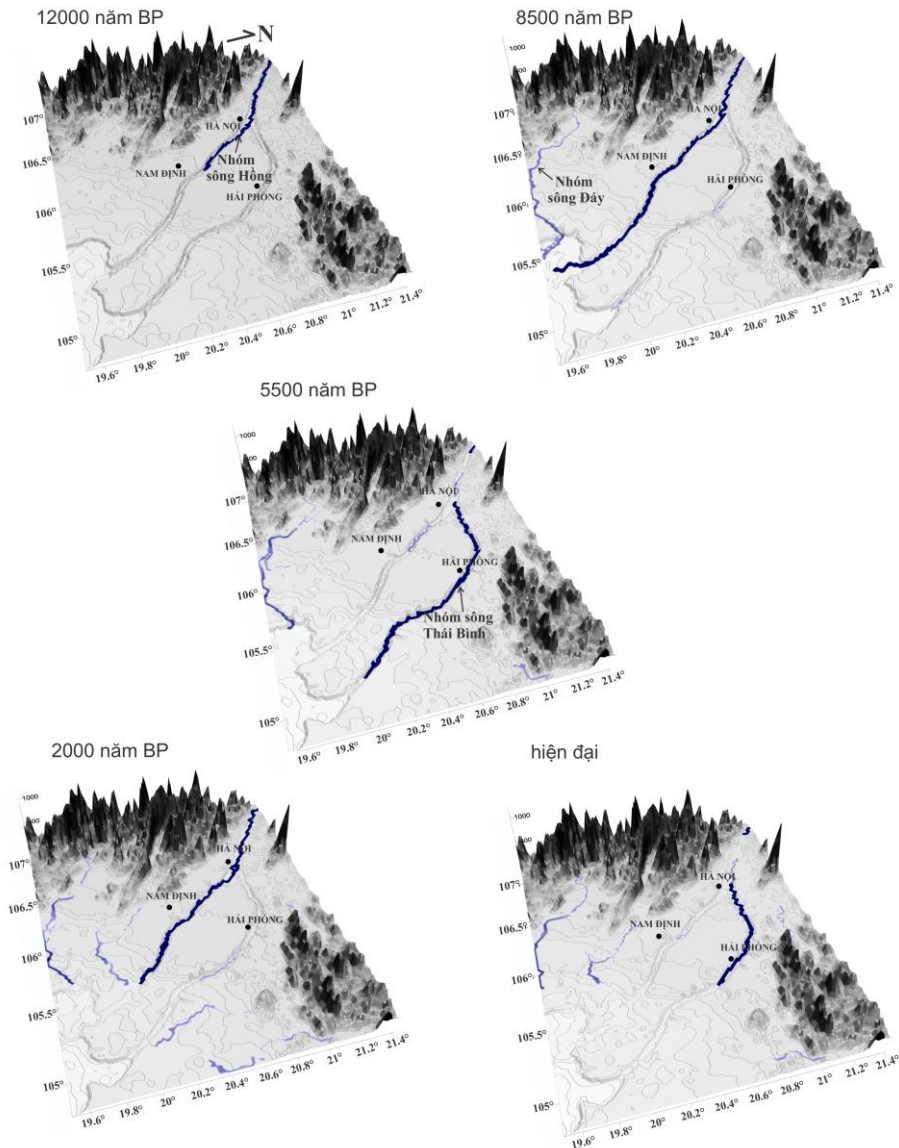


Hình 6. Hình thái bề mặt địa hình các thời điểm khác nhau từ kết quả mô hình khu vực CTSH

### Hoạt động của các lòng sông cổ

Hoạt động của các lòng sông cổ khu vực nghiên cứu trong các giai đoạn đặc trưng được thể hiện trên hình 7. Vào giai đoạn Holocen sớm xu thế hoạt động của nhóm sông Hồng cổ chủ yếu ở trên phần thượng nguồn với các trầm tích nhận được từ sông Lô và sông Thao. Hoạt động này được kéo dài cho đến khoảng 2.000 năm BP, ở phía dưới nhóm sông Đáy được cho

là bắt đầu hoạt động kể từ 10.000 năm BP làm quá trình bồi - xói các khu vực cửa sông Hồng và cửa sông Đáy mạnh mẽ gây thay đổi mạnh về địa hình. Ngược lại, nhóm sông Thái Bình cổ ít hoạt động cho đến khoảng 5.500 năm BP và có xu thế hoạt động mạnh dần cho tới ngày nay. Điều này dễ dàng được quan sát thấy trên các bề mặt địa hình (vùng 3 trên hình 6) và trên dữ liệu vệ tinh Google Earth.

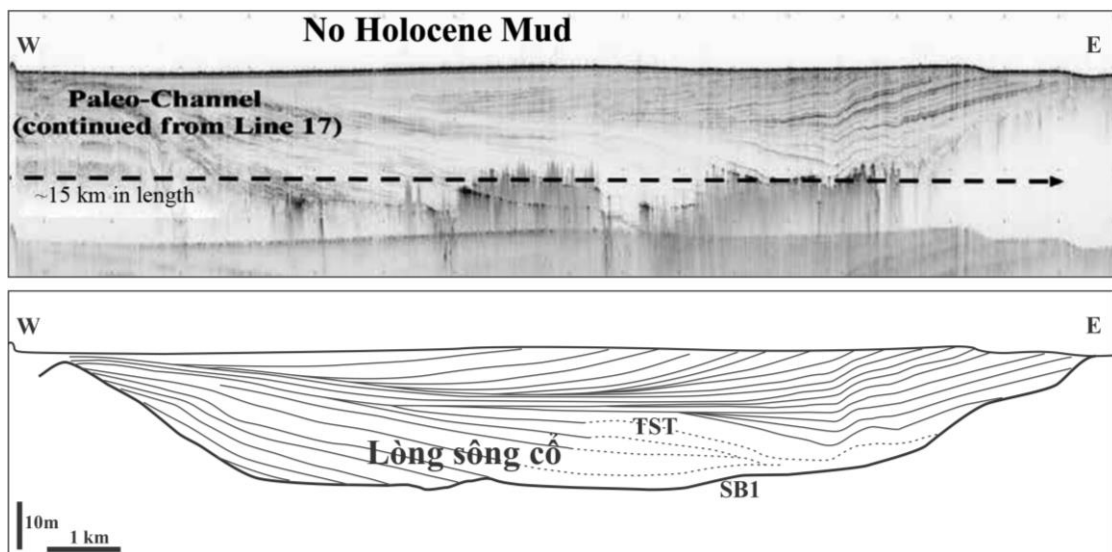


Hình 7. Hoạt động của các nhóm sông cổ các giai đoạn. Vị trí màu sẫm chỉ thị cho hoạt động của sông. Nhóm sông Hồng cổ hoạt động mạnh mẽ tới khoảng 2.000 năm BP, nhóm sông Đáy hoạt động kể từ khoảng 10.000 năm BP, nhóm sông Thái Bình chủ yếu bình ổn giai đoạn đầu và hoạt động mạnh mẽ từ khoảng 5.500 năm BP tới hiện đại

## THẢO LUẬN

Hình thái bề mặt địa hình khu vực nghiên cứu chịu ảnh hưởng lớn bởi các yếu tố thủy động lực, đặc biệt là tương tác sông biển tại các cửa sông cổ. Hình thái bề mặt địa hình ít thay đổi đến khoảng 11.000 năm BP ở giai đoạn này địa hình lục địa chủ yếu chịu hoạt động của nhóm sông Hồng cổ. Hình thái bề mặt địa hình sau đó thay đổi phức tạp. Diện tích đất liền khu vực đồng bằng châu thổ bị thu hẹp nhanh sau giai đoạn biển tiến, khu vực biển nông gần hệ thống sông cổ thay đổi mạnh (vùng 3). Sự thay đổi này diễn ra do quá trình xói lở - bồi tụ tích cực ở cửa sông cổ gây ra. Quá trình này làm các dấu tích của lòng sông cổ sông Hồng không được biểu hiện rõ trên các mặt cắt địa chấn

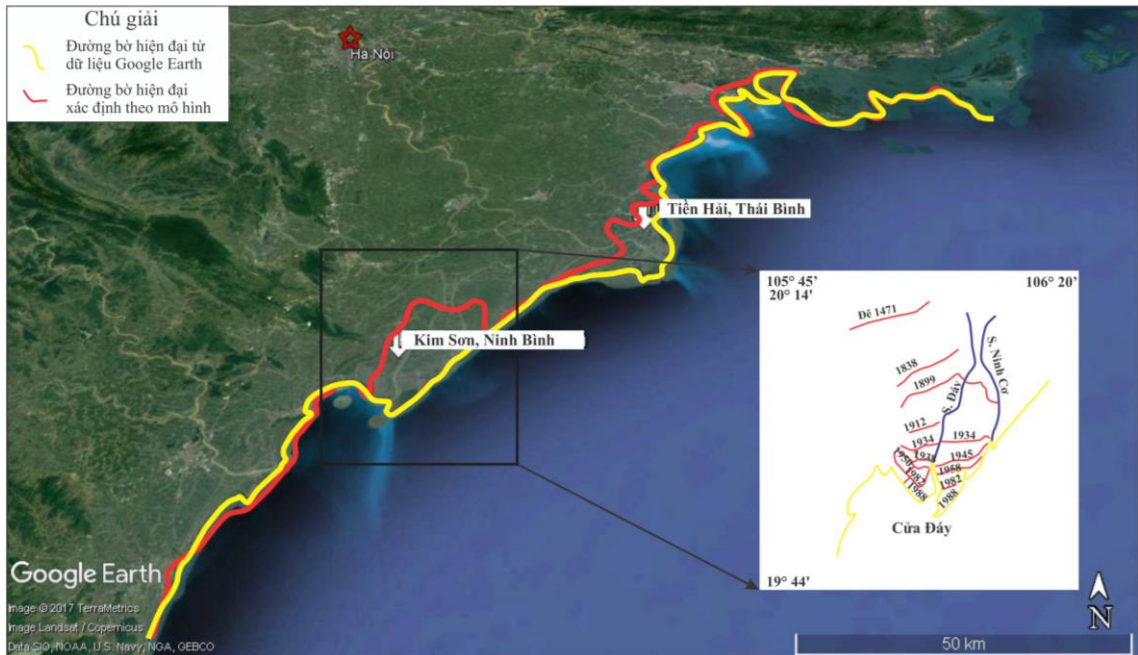
phân giải cao (hình 1b). Sự hoạt động của nhóm sông Đáy cổ cũng đã gây ra sự thay đổi bề mặt địa hình nhưng chỉ có thể nhận thấy sự hoạt động của các sông địa phương hiện nay và phát hiện được trên một số mặt cắt địa chấn (ví dụ hình 4). Địa hình khu vực bị ảnh hưởng bởi sông Thái Bình cổ ít có sự thay đổi, trái ngược hẳn với khu vực còn lại. Sự hoạt động bình ổn của nhóm sông này có thể làm cho các trầm tích ít có xáo trộn và cũng có thể quan sát trên các mặt cắt địa chấn phân giải cao khu vực, đây là điều kiện rất tốt để xác định dấu tích của lòng sông cổ trên các mặt cắt địa chấn với các cấu tạo xiên chéo rõ ràng (hình 1a và hình 8) bởi quá trình lắng đọng trầm tích ổn định trong lòng sông trong suốt thời kỳ biển tiến.



Hình 8. Ảnh hưởng của dòng chảy ổn định trong lòng sông cổ trên mặt cắt RR2-18. Mặt cắt gốc (trên) tham khảo từ Ross (2011) [27], mặt cắt minh giải (dưới) tham khảo từ Đông và nnk., [22]

Hoạt động của con người có ảnh hưởng lớn tới các quá trình tự nhiên, đặc biệt tại cửa các con sông lớn, nơi phù sa liên tục được bồi đắp. Quá trình bồi tụ/xói lở diễn ra mạnh tại cửa sông Hồng và sông Đáy sẽ làm đường bờ thay đổi đáng kể. Đường bờ dự kiến từ kết quả mô hình (hình 6) tại thời điểm 10.000 năm BP khá tương đồng với kết quả nghiên cứu trên quy mô khu vực của Yao et al., (2009) [43], trong giai đoạn 10.000-6.000 năm BP chưa có sự tương đồng với kết quả xác định đường bờ cổ chi tiết hơn so với Tanabe và nnk., (2006) [19]. Vị trí đường bờ kê từ 6.000 năm BP đến hiện đại

tương đồng với các nghiên cứu trước đây. Nguyên nhân có thể kể đến mức độ chi tiết của tài liệu, mục tiêu nghiên cứu... Nhưng đường bờ hiện đại khi so sánh với đường bờ hiện tại từ dữ liệu từ Google Earth lại khá tương đồng, ngoại trừ vị trí cửa Ba Lạt và cửa Đáy (hình 9). Như vậy, có thể nói rằng nếu bỏ qua các tác động của con người thì đường bờ biển tại thời điểm hiện đại xuất ra từ mô hình số Simclast tương đối trùng khớp với đường bờ của sông châu thổ thực tế hiện nay khi so sánh với đường bờ, địa hình, hoạt động của lòng sông cổ Thái Bình và sông Hồng.



Hình 9. Kết quả so sánh đường bờ hiện đại theo dữ liệu vệ tinh Google Earth và kết quả mô hình

## KẾT LUẬN

Trên cơ sở nghiên cứu sự phát triển của đồng bằng châu thổ sông Hồng giai đoạn Pleistocen muộn-Holocene bằng mô hình số Simclast cho phép rút ra một số kết luận như sau:

Địa hình khu vực nghiên cứu ít có sự thay đổi vào đầu Holocen, lục địa bị thu hẹp nhanh sau giai đoạn biển tiến, hình thái bề mặt địa hình thay đổi mạnh ngoài khơi khu vực sông Hồng, sông Đáy và ít thay đổi khu vực ngoài khơi sông Thái Bình. Cùng với quá trình này, xu thế hoạt động của các sông cổ cũng có sự khác biệt: Nhóm sông Hồng cổ có thời gian hoạt động mạng mẽ ở thượng nguồn giai đoạn đầu (đến 11.000 năm BP) và kéo dài tới khoảng 2.000 năm BP làm cho quá trình bồi-xói liên tục gây thay đổi địa hình. Nhóm sông Thái Bình cổ đánh dấu sự hoạt động bình ổn ở giai đoạn trước 5.500 năm BP và sau đó hoạt động mạnh mẽ hơn cho đến hiện đại nhưng ít gây xáo trộn về hình thái địa hình. Dao động mực nước biển là một trong các yếu tố chi phối mạnh mẽ tới sự hình thành và phát triển châu thổ.

Sự dịch chuyển đường bờ trong giai đoạn 6000 năm qua cho thấy sự tương quan nhất định với xu thế xâm lấn của đồng bằng châu

thổ. Đường bờ xuất ra từ mô hình vào thời điểm hiện tại cho thấy sự tương đồng với đường bờ hiện tại. Một số sự khác biệt có thể đến từ hoạt động nhân sinh.

**Lời cảm ơn:** Bài báo được thực hiện trong khuôn khổ Nhiệm vụ Hợp tác quốc tế Nghị định thư Việt Nam - Trung Quốc mã số NĐT.01.CHN/15. Bài báo xin cảm ơn đề tài Điều tra cơ bản mã số VAST.ĐTCB.02/16-17, Nhiệm vụ Hợp tác Quốc tế QTRU02.01/18-19 đã bổ sung các số liệu để công trình được hoàn thiện.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Elliott, T., 1986. Deltas. In: Reading, H. G. (Ed.), *Sedimentary Environments and Facies*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 113-154.
- [2] Stanley, D. J., and Warne, A. G., 1994. Worldwide initiation of Holocene marine deltas by deceleration of sea-level rise. *Science*, 265(5169), 228-231.
- [3] Hori, K., Tanabe, S., Saito, Y., Haruyama, S., Nguyen, V., and Kitamura, A., 2004. Delta initiation and Holocene sea-level change: example from the Song Hong

- (Red river) delta, Vietnam. *Sedimentary Geology*, 164(3–4), 237–249.
- [4] Tanabe, S., Hori, K., Saito, Y., Haruyama, S., Sato, Y., and Hiraide, S., 2003. Sedimentary facies and radiocarbon dates of the Nam Dinh-1 core from the Song Hong (Red River) delta, Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(5), 503–513.
- [5] Funabiki, A., Haruyama, S., Van Quy, N., Van Hai, P., and Thai, D. H., 2007. Holocene delta plain development in the Song Hong (Red river) delta, Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(3–4), 518–529.
- [6] Hanebuth, T. J., Saito, Y., Tanabe, S., Vu, Q. L., and Ngo, Q. T., 2006. Sea levels during late marine isotope stage 3 (or older?) reported from the Red river delta (northern Vietnam) and adjacent regions. *Quaternary International*, 145, 119–134.
- [7] Tanabe, S., Hori, K., Saito, Y., Haruyama, S., and Kitamura, A., 2003. Song Hong (Red river) delta evolution related to millennium-scale Holocene sea-level changes. *Quaternary Science Reviews*, 22(21–22), 2345–2361.
- [8] Dalman, R. A. F., 2009. Multi-scale simulation of fluvio-deltaic and shallow marine stratigraphy. Thesis in Delft University of Technology, Netherland. 156 p.
- [9] Kabuth, A. K., 2009. Geomorphological Modelling of Late Pleistocene to Holocene Evolution of the Southeast Vietnamese Shelf and the Mekong Delta (Doctoral dissertation). *Coastal Research Laboratory Research and Technology Centre Christian Albrechts University Kiel, Germany*. 74 p.
- [10] Bui, V. D., 2011. The Late Quaternary Evolution of the Southern Vietnamese Continental Shelf. *Doctoral dissertation, Christian-Albrechts Universität Kiel*. 136 p.
- [11] Tapponnier, P., Peltzer, G., and Armijo, R. On the mechanics of the collision between Asia and India. *Collision Tectonics*, 115–157.
- [12] Apponier, P., Peltzer, G. L. D. A. Y., Le Dain, A. Y., Armijo, R., and Cobbold, P., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10(12), 611–616.
- [13] Rangin, C., Klein, M., Roques, D., and Le Pichón, X., 1995. The Red river fault system in the Tonkin Gulf, Vietnam. *Tectonophysics*, 243(3–4), 209–222.
- [14] Milliman, J. D., 1995. River discharge to the sea: a global river index (GLORI). *LOICZ reports and studies*, 2.
- [15] Ngo Quang Toan, Dang Van Doi, Dang Mai, Dau Hien, 1999. Map of the weathering crust and Quaternary sediments in Vietnam, scale 1:1.000.000. North Vietnam geological mapping division, 346 p. (in Vietnamese).
- [16] Haruyama, S., D. D. Lam and N. D. Dy., 2001. On the Pleistocene/Holocene boundary and Holocene stratigraphy in the Bac Bo plain. *Journal of Geology Series B*, No. 17/18-1, 1–9.
- [17] Minh, T and Dan, N. V., 1991. Groundwater resources in Hanoi area. *Geological Survey of Vietnam*. (in Vietnamese).
- [18] Saito, Y., Tanabe, S., Vu, Q. L., Hanebuth, T. J. J., Kitamura, A., and Ngo, Q. T., 2004. Stratigraphy and Holocene evolution of the Song Hong (Red river) delta, Vietnam. *Stratigraphy of Quaternary System in Deltas of Vietnam. Department of Geology and Minerals of Vietnam, Hanoi, Vietnam*, pp. 6–24.
- [19] Tanabe, S., Saito, Y., Vu, Q. L., Hanebuth, T. J., Ngo, Q. L., and Kitamura, A., 2006. Holocene evolution of the Song Hong (Red river) delta system, northern Vietnam. *Sedimentary Geology*, 187(1–2), 29–61.
- [20] Doan, D. L., 2001. Some facts of sea-level fluctuation during the Late Pleistocene-Holocene in HaLong bay and Ninh Binh area. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 23(2), 86–91.
- [21] Lieu. N. T. H., 2006. Holocene evolution of the Central Red river delta, Northern Vietnam. *PhD Thesis. Germany*, 130 p.
- [22] Mai Duc Dong, Nguyen Trung Thanh, Nguyen Van Diep, Le Duc Anh, Pham

- Quoc Hiep, Vu Thi Thu Anh., 2016. Some reveal boundaries sequence stratigraphy in the Red river delta area based in high-resolution seismic data. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> Academy of Science and Technology Youth conference* ISBN987-604-913-494-4. pp 107–117 (in Vietnamese).
- [23] Nguyen Trung Thanh, Paul Jing Liu, Mai Duc Dong, Dang Hoai Nhon, Do Huy Cuong, Bui Viet Dung, Phung Van Phach, Tran Duc Thanh, Duong Quoc Hung, Ngo Thanh Nga, 2018. Late Pleistocene-Holocene sequence stratigraphy of the subaqueous Red River delta and the adjacent shelf. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 40(3), 271–287.
- [24] Tran, N., and Ngo, Q. T., 2000. Development history of deposits in the Quaternary of Vietnam. *The weathering crust and Quaternary sediments in Vietnam. Department of Geology and Minerals of Vietnam, Hanoi*, pp. 177–192.
- [25] Mathers, S., Davies, J., and McDonald, A. Zalasiewicz, Ja, And Marsh, S., 1996. The Red river delta of Vietnam. *British Geological Survey Technical Report*. 41 p.
- [26] Mathers, S., and Zalasiewicz, J., 1999. Holocene sedimentary architecture of the Red river delta, Vietnam. *Journal of Coastal Research*, 314–325.
- [27] Ross, K., 2011. Fate of Red river Sediment in the Gulf of Tonkin, Vietnam. *Master Thesis. North Carolina State University*.
- [28] Tran Duc Thanh and Dinh Van Huy, 2000. Coastal development of the modern Red River Delta. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 51, 276.
- [29] Li, Z., Saito, Y., Matsumoto, E., Wang, Y., Tanabe, S., and Vu, Q. L., 2006. Climate change and human impact on the Song Hong (Red river) delta, Vietnam, during the Holocene. *Quaternary International*, 144(1), 4–28.
- [30] Doan Dinh Lam, 2003. Development history of sediment in Red river delta. *Ph.D thesis of Geology, Vietnam National University, Hanoi*. 193 p, (in Vietnamese).
- [31] Doan Dinh Lam, 2008. Delta lobes of the Red River Delta. *Journal of Geology*, series A, No. 308, 59–67. (in Vietnamese).
- [32] Milliman, J. D., and Syvitski, J. P., 1992. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *The journal of Geology*, 100(5), 525–544.
- [33] Nhuan, M. T., Van Ngoi, C., Nghi, T., Tien, D. M., van Weering, T. C., and van den Bergh, G. D., 2007. Sediment distribution and transport at the nearshore zone of the Red River delta, Northern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(4), 558–565.
- [34] Einsele, G., 2000. Sedimentary Basins: Evolution, Facies, and Sediment Budget. *SpringerVerlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest*, 792 p
- [35] Dang, T. H., Coynel, A., Orange, D., Blanc, G., Etcheber, H., and Le, L. A., 2010. Long-term monitoring (1960–2008) of the river-sediment transport in the Red river Watershed (Vietnam): Temporal variability and dam-reservoir impact. *Science of the Total Environment*, 408(20), 4654–4664.
- [36] Vinh, V. D., Ouillon, S., Thanh, T. D., and Chu, L. V., 2014. Impact of the Hoa Binh dam (Vietnam) on water and sediment budgets in the Red River basin and delta. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(10), 3987–4005.
- [37] Tran Duc Thanh, 1995. Lower limit and stratigraphy of Holocene sediments in the Tonkin Gulf shelf. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 33(2), 22–30.
- [38] Le, T. P. Q., Garnier, J., Gilles, B., Sylvain, T., and Van Minh, C., 2007. The changing flow regime and sediment load of the Red river, Vietnam. *Journal of Hydrology*, 334(1–2), 199–214.
- [39] Luu, T. N. M., Garnier, J., Billen, G., Orange, D., Némery, J., Le, T. P. Q., Tran, H. T., and Le, L. A., 2010. Hydrological regime and water budget of the Red River Delta (Northern Vietnam). *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(3), 219–228.

- [40] Vinh, V. D., and Thanh, T. D., 2014. Characteristics of current variation in the coastal area of red river delta-results of resaerch using the 3D numerical model. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 14(2), 139–148.
- [41] Coleman, J. M., and Wright, L. D., 1975. Modern river deltas: variability of processes and sand bodies. In: Broussard, M.L. (Ed.), *Deltas: Models for Exploration*. Houston Geological Society, Houston, pp. 99–149.
- [42] Ministry of Agriculture and Rural Development, 2009. Research application on the use of MIKE21 model to assess, predict and prevent river bank erosion (north, central and south Vietnam). *Technical report of the project 2006–2008 of the Ministry of Agriculture and Rural Development, Hanoi, Vietnam*. (in Vietnamese).
- [43] Yao, Y., Harff, J., Meyer, M., and Zhan, W., 2009. Reconstruction of paleocoastlines for the northwestern South China Sea since the Last Glacial Maximum. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(8), 1127–1136.