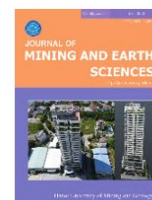




Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <http://jmes.humg.edu.vn>



A review of sediment provenance methods applied to the fluvial sediments in the East Sea based on clay mineralogy and Sr-Nd isotope



Hiep Huu Nguyen ^{1,*}, Sang Nhu Pham ¹, Hung The Khuong ¹, Din Bui Dao ², Bac Hoang Bui ¹, Huy Quoc Chu ³

¹ Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

² Ministry of Natural Resources and Environment, Hanoi, Vietnam

³ North Vietnam Geological Mapping Division, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13rd Mar. 2022

Revised 27th June 2022

Accepted 02nd Aug. 2022

Keywords:

Clay minerals,
East Sea,
Sediment provenance,
Sr-Nd isotope,
Terrigenous sediments.

ABSTRACT

Studying sediment provenance in the marine environment particularly plays an important role in interpretation of paleoclimate, lithology of the source regions as well as tectonism controlling weathering, erosion, transportation, and deposition processes (source-to-sink analysis). However, defining sediment sources and controlling elements require quantitative data and micro-analysis as they are influenced significantly by many factors such as lithology, tectonics, and climate condition in the source regions as well as sea-level changes, oceanic circulation, and their differential setting in the sea. A number of methods are employed to elucidate sediment provenance, but not all of them are useful in the East Sea. In this study, clay mineralogy and Sr-Nd isotope of sediment cores and surrounding river sediments in this region from previous studies are reused to evaluate their effectiveness in determining sediment provenance. In comparison between sediment cores and river sediments indicates that clay mineral assemblages and Sr-Nd isotopic composition of river sediments frequently contain feature information of the source regions that are preserved in marine sediments well, implying they contain valuable information of sediment provenance. Thus, these methods have been widely utilized to identify sediment provenance in the East Sea. This study displays that sediment provenance methods based on clay mineralogy and Sr-Nd isotope are effective tools in elucidating sediment provenance in the East Sea.

Copyright © 2022 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: nguyenhuuhiep@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2022.63(4).04



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>



Tổng quan về nghiên cứu nguồn trầm tích biển Đông từ các hệ thống sông dựa trên kết quả luận giải thành phần khoáng vật sét và đồng vị Sr-Nd

Nguyễn Hữu Hiệp ^{1,*}, Phạm Như Sang ¹, Khương Thế Hùng ¹, Đào Bùi Din ², Bùi Hoàng Bắc ¹, Chu Quốc Huy ³

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

² Bộ Tài nguyên và Môi trường, Hà Nội, Việt Nam

³ Liên Đoàn Bản đồ Địa chất miền Bắc, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 13/03/2022

Sửa xong 27/6/2022

Chấp nhận đăng 02/8/2022

Từ khóa:

Biển Đông,
Đồng vị Sr-Nd,
Khoáng vật sét,
Nguồn gốc trầm tích,
Trầm tích lục nguyên.

TÓM TẮT

Nghiên cứu nguồn gốc trầm tích trong môi trường biển đóng một vai trò đặc biệt quan trọng trong quá trình luận giải điều kiện cổ khí hậu, đặc điểm thạch học của đá gốc, hoạt động kiến tạo khu vực khổng chế quá trình phong hóa, bóc mòn và vận chuyển trầm tích từ nguồn tới nơi lắng đọng. Tuy nhiên, việc xác định nguồn trầm tích từ đâu đến, điều kiện vận chuyển và tích tụ của chúng đòi hỏi những số liệu phân tích định lượng và vi lượng bởi trong quá trình hình thành và vận chuyển các vật liệu trầm tích bị chi phối mạnh mẽ bởi không chỉ các yếu tố trên nguồn trầm tích như thành phần thạch học của đá, hoạt động kiến tạo, điều kiện thời tiết mà còn cả sự thay đổi môi trường trầm tích dưới đáy biển như mực nước biển dâng, dòng hải lưu và đặc trưng lắng đọng của từng vật liệu trầm tích. Hiện nay có nhiều phương pháp xác định nguồn gốc trầm tích nhưng không phải tất cả trong số chúng đều ứng dụng hiệu quả ở biển Đông. Trong nghiên cứu này, kết quả phân tích tổ hợp khoáng vật sét và đồng vị Sr-Nd của một số lỗ khoan nông và mẫu trầm tích sông xung quanh khu vực biển Đông đã được thực hiện trong các nghiên cứu trước sẽ được tổng hợp, luận giải để đánh giá tính hiệu quả của chúng trong việc xác định nguồn gốc vật liệu trầm tích. Quá trình luận giải, tổng hợp, và đối sánh kết quả phân tích giữa các lỗ khoan ở biển và các trầm tích sông cho thấy tổ hợp khoáng vật sét và đồng vị Sr-Nd thường mang những đặc trưng riêng cho từng lưu vực sông xung quanh biển Đông và những thông tin này được bảo tồn tốt trong trầm tích biển, ngụ ý rằng chúng chứa đựng những thông tin quý giá về nguồn gốc trầm tích. Vì vậy, khoáng vật sét và đồng vị Sr-Nd đã được xác nhận là tổ hợp phương pháp có tính phổ biến và hiệu quả trong việc xác định nguồn gốc trầm tích ở biển Đông.

© 2022 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

*Tác giả liên hệ

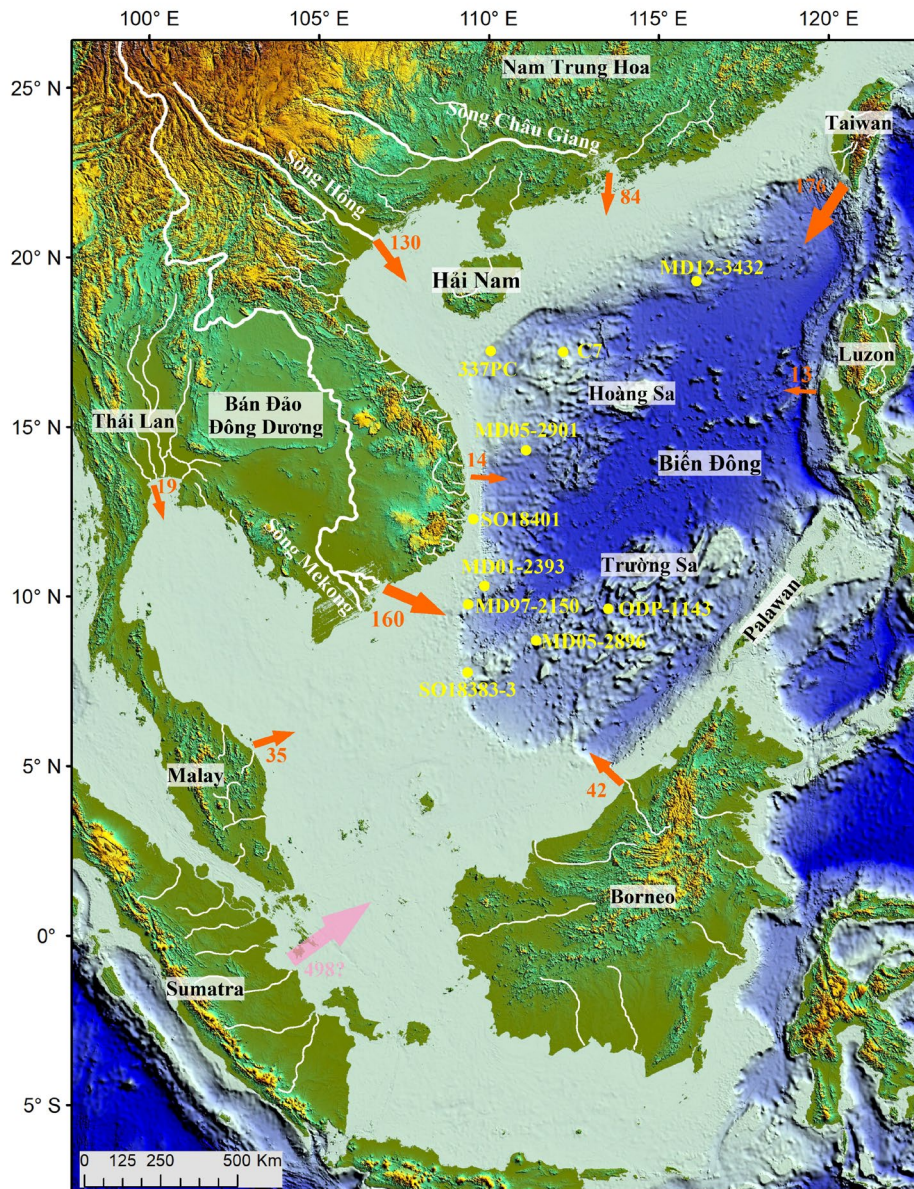
E - mail: nguyenuuhip@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2022.63(4).04

1. Mở đầu

Biển Đông là một trong những cấu trúc biển rìa lớn nhất ở phía Tây Thái Bình Dương, nó tiếp giáp với Nam Trung Hoa và Đài Loan ở phía Bắc, bán đảo Đông Dương ở phía Tây, bán đảo Malay, Sumatra và Borneo ở phía Nam, Luzon và Palawan ở phía Đông (Hình 1). Khu vực này nhận được hơn 700 triệu tấn trầm tích hàng năm và được vận

chuyển đến chủ yếu bởi các con sông chảy ra từ lục địa xung quanh, đặc biệt là các sông lớn như sông Mekong, sông Hồng và sông Châu Giang (Milliman và Syvitski, 1992; Milliman và nnk., 1999; Milliman và Farnsworth, 2011). Trầm tích lục nguyên được cung cấp bởi các con sông này phần lớn là sản phẩm phong hóa ở các lục địa lân cận xung quanh biển Đông và chúng bị chi phối mạnh mẽ bởi các quá trình phong hóa trên đất liền



Hình 1. Sơ đồ vị trí một vài lỗ khoan nông ở biển Đông và các hệ thống sông xung quanh. Mũi tên màu cam, màu hồng và số đi kèm để chỉ lượng trầm tích theo đơn vị triệu tấn đổ ra biển hàng năm từ các con sông xung quanh biển Đông. Nguồn tài liệu lỗ khoan MD01-2393, MD97-2150 và MD05-2901 từ Liu và nnk. (2004, 2007b), 337PC từ Wan và nnk. (2015), ODP-1143 từ Wan và nnk. (2017), MD12-3432 từ Zhao và nnk. (2018), SO18383-3 từ Jiwarungrueangkul và nnk. (2019), C7 từ Cai và nnk. (2020), SO18401 và MD05-2896 từ Sang và nnk. (2019, 2022).

dưới ảnh hưởng qua lại giữa điều kiện khí hậu (lượng mưa và nhiệt độ), thành phần thạch học của đá và hoạt động kiến tạo trên các lưu vực sông (Chamley, 1989; Liu và nnk., 2007a, 2009, 2012; Sang và nnk., 2018). Ngoài ra, việc vận chuyển trầm tích lục nguyên trong biển Đông chịu ảnh hưởng lớn bởi các dòng chảy bề mặt dưới tác động đáng kể bởi sự thay đổi theo mùa của gió mùa Đông Á và mực nước biển dâng (Wang và nnk., 1995; Liu và nnk., 2003, 2007b, 2016; Sang và Liu, 2021). Bên cạnh đó, sự phân bố của các trầm tích lục nguyên ở biển Đông cũng bị ảnh hưởng bởi nguồn gốc trầm tích và đặc trưng vận chuyển và lắng đọng của từng loại vật liệu (Liu và nnk., 2016). Chính nhờ sự chứa đựng những thông tin hữu ích trên, biển Đông đã trở thành nơi lý tưởng để nghiên cứu sự tương tác giữa đất liền và biển và thu hút được rất nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu (Liu và Statteger, 2014).

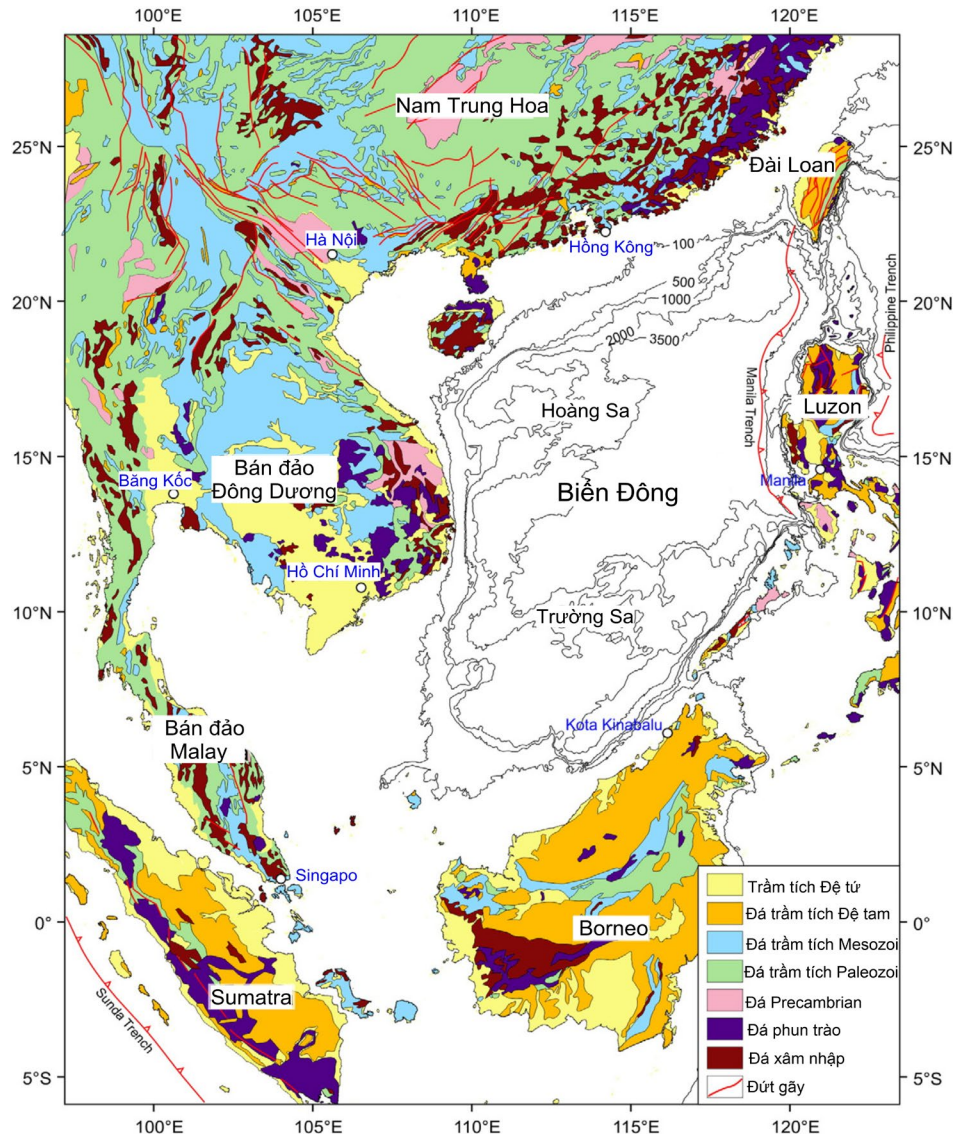
Trong nghiên cứu trầm tích biển, việc xác định nguồn gốc trầm tích đóng vai trò đặc biệt quan trọng và cần được tiến hành đầu tiên. Đối với quá trình trầm tích, những thay đổi về nguồn gốc trầm tích có thể dẫn đến những thay đổi về thành phần nguyên tố và thành phần khoáng vật (Liu và nnk., 2016; Sang và Liu, 2021). Bên cạnh sự thay đổi về điều kiện cổ môi trường, những thay đổi thành phần trầm tích còn bị khống chế bởi thành phần đá gốc và các hoạt động kiến tạo, magma, biến chất liên quan. Vì vậy, việc phân tích nguồn gốc vật liệu trầm tích có thể dẫn đến những luận giải sai nếu không sử dụng tổ hợp các phương pháp trầm tích và địa hóa phù hợp. Việc nhầm lẫn này có thể gây ra những nhận định, đánh giá sai lầm và dẫn đến những kết luận không hợp lý. Do đó, nhiều phương pháp xác định nguồn gốc trầm tích biển đã được nghiên cứu và phát triển dựa trên thành phần nguyên tố chính, nguyên tố vết, đồng vị Sr-Nd-Hf, khoáng vật sét, phương pháp định tuổi U-Pb zircon, phương pháp định tuổi Ar/Ar muscovit và dấu vết phân hạch apatit (apatite fission track) (Clift và nnk., 2015). Tuy nhiên, không phải tất cả những phương pháp xác định nguồn gốc trầm tích này đều hoạt động hiệu quả ở biển Đông. Clift và nnk. (2015) đã chỉ ra rằng phương pháp xác định nguồn gốc trầm tích ở biển Đông dựa trên dấu vết phân hạch apatit là hiệu quả hơn cả. Mặc dù vậy, trên thực tế phương pháp này không phải là phương pháp được sử dụng rộng rãi trong việc nghiên cứu nguồn gốc trầm tích

ở biển Đông. Trái lại, phương pháp xác định nguồn gốc trầm tích dựa trên khoáng vật sét và đồng vị Sr-Nd mới được sử dụng rộng rãi và cho hiệu quả cao trong việc xác định nguồn gốc trầm tích ở khu vực này (Ví dụ: Liu và nnk., 2003, 2004, 2007b; 2010, 2016; Wan và nnk., 2015; Zhao và nnk., 2018; Sang và nnk., 2019; Jiwarungrueangkul và nnk. 2019; Cai và nnk., 2020). Bên cạnh đó, hai phương pháp trên cũng được sử dụng rộng rãi ở nhiều vùng biển trên thế giới như vịnh Bengan (Colin và nnk., 1999; Jousain và nnk., 2017), biển Hoa Đông (Yang và nnk., 2003; Wang và nnk., 2015). Do đó, trong nghiên cứu này nhóm tác giả tập trung xem xét và đánh giá tại sao 2 phương pháp này lại hiệu quả và được sử dụng phổ biến trong việc xác định nguồn gốc trầm tích ở biển Đông.

2. Đặc điểm khu vực nghiên cứu

2.1. Đặc điểm địa chất

Biển Đông có vị trí kiến tạo nằm ở giữa các mảng Á-Âu, Thái Bình Dương và Ấn-Úc (Hình 2). Trong báo cáo nghiên cứu của chương trình khoan đại dương tổng hợp số hiệu Expedition 349 (2014) cho thấy khu vực này phát triển từ sự tách giãn rìa lục địa trong Kainozoi và đã trải qua gần như một chu kỳ hoàn chỉnh từ quá trình phá hủy lục địa đến tách giãn cực đại của đại dương và hút chìm của mảng Thái Bình Dương bên dưới lục địa Áu-Á. Việc mở rộng biển Đông diễn ra từ ~32 đến ~16 triệu năm trong kỷ Oligocen và đầu Miocen (Taylor và Hayes, 1980, 1983; Briaies và nnk., 1993). Các giả thuyết cho cơ chế mở rộng được gộp vào hai mô hình kiến tạo: (1) sự thúc đẩy từ phía Đông Nam của bán đảo Đông Dương dọc theo đới đứt gãy Ailao Shan-Sông Hồng do va chạm giữa mảng Ấn Độ và mảng Áu-Á (Tapponnier và nnk., 1982; Briaies và nnk., 1993) và (2) mô hình kéo và hút chìm biển Đông về phía Nam (Taylor và Hayes, 1980, 1983; Hall, 2002). Thông qua quá trình tiến hóa kiến tạo mảng của biển Đông, các đặc trưng kiến tạo và thạch học ở các lục địa và đảo xung quanh có sự khác biệt khá rõ. Bán đảo Đông Dương ở phía Tây biển Đông với cao nguyên Tây Tạng lân cận chủ yếu bao gồm các đá trầm tích tuổi Paleozoi-Mesozoi với lượng nhỏ đá magma xâm nhập và phun trào (Liu và nnk., 2007b; Hình 2). Một lượng nhỏ đá magma và đá biến chất tiền Cambri lộ ra dọc theo đới đứt gãy Ailao Shan-Sông



Hình 2. Sơ đồ địa chất khu vực xung quanh biển Đông theo Commission for the Geological Map of the World. (1975) và Liu và nnk. (2016).

Hồng và trong dãy núi ven biển của bán đảo ở phía Đông. Leloup và nnk. (2001), Replumaz và nnk. (2001) và Schoenbohm và nnk. (2004) đã chỉ ra rằng hệ thống đứt gãy sông Hồng đang hoạt động trượt bằng phải từ Pliocen đến nay với tốc độ trượt trung bình tối thiểu ~5 mm/năm. Đá trầm tích Mesozoi bao gồm chủ yếu là đá cát kết và bột kết, chúng xuất hiện phổ biến ở phía Nam bán đảo Đông Dương, trong đó một lượng lớn đá bazan tuổi Neogen nhô lên. Bên cạnh đó ở phía Bắc biển Đông, khu vực Nam Trung Hoa chủ yếu được cấu tạo bởi đá granit tuổi Mesozoi-Kainozoi và đá trầm tích Paleozoi (đá vôi, đá phiến sét và cát kết)

ở phần phía Đông và đá carbonat tuổi Paleozoi-Mesozoi (chủ yếu là đá vôi tuổi Carbon-Permian-Trias) ở phần phía Tây (Commission for the Geological Map of the World, 1975; Hình 2). Khu vực Nam Trung Hoa đã thể hiện khá ổn định về mặt kiến tạo kể từ Mesozoi.

Ngược lại, đảo Đài Loan là khu vực hoạt động kiến tạo rất mạnh mẽ, nó được phát triển bởi sự hút chìm về phía Đông của thạch quyển đại dương biển Đông bên dưới mảng biển Philippines sau vụ va chạm giữa vòng cung và lục địa ở giai đoạn ~6,5 triệu năm trước (Huang và nnk., 1997). Đá trầm tích Đệ tam (chủ yếu là cát kết và bột kết) với các

đá biến chất liên quan trước Đệ tam và phức hệ vòng cung núi lửa ở duyên hải tạo nên địa tầng Kainozoi của đảo Đài Loan.

Ở phía Đông biển Đông, mảng Á-Âu và mảng biển Philippin hội tụ trên quần đảo Luzon qua hai vùng hút chìm chính, rãnh Manila nghiêng về phía Đông ở phía Đông biển Đông và rãnh Philippin ở phía Tây Thái Bình Dương (Liu và nnk., 2009b; Hình 2). Quần đảo này được đặc trưng bởi các đứt gãy trượt trong vòng cung đang hoạt động. Đá trầm tích và đá phun trào từ Creta đến Đệ tứ và các đá xâm nhập trung tính tuổi Kainozoi phân bố rất rộng rãi trên quần đảo (Commission for the Geological Map of the World, 1975). Trầm tích núi lửa Pliocen-Đệ tứ có thành phần chủ yếu là andesit và bazan với các đá dacit và các đá có liên quan, chủ yếu xuất hiện ở phía Nam quần đảo Luzon. Ngược lại, các địa tầng chưa bị biến đổi có tuổi Creta-Paleogen, thường là trầm tích núi lửa lại phân bố ở hầu hết các vùng núi của quần đảo Luzon. Khác với Luzon, quần đảo Palawan bao gồm hai địa tầng chính (Suzuki và nnk., 2000; Steuer và nnk., 2013). Phía Bắc Palawan là đá vôi tuổi Permi và Trias, cát kết và đá bazan, trong khi phía Nam Palawan được cấu tạo chủ yếu bởi các tập ophiolit. Hall, R. (2002) chỉ ra rằng phía Bắc Palawan đã trôi dạt từ Nam Trung Hoa đến vị trí hiện tại trong thời kỳ biển Đông mở rộng trong Oligocen đến đầu Miocen.

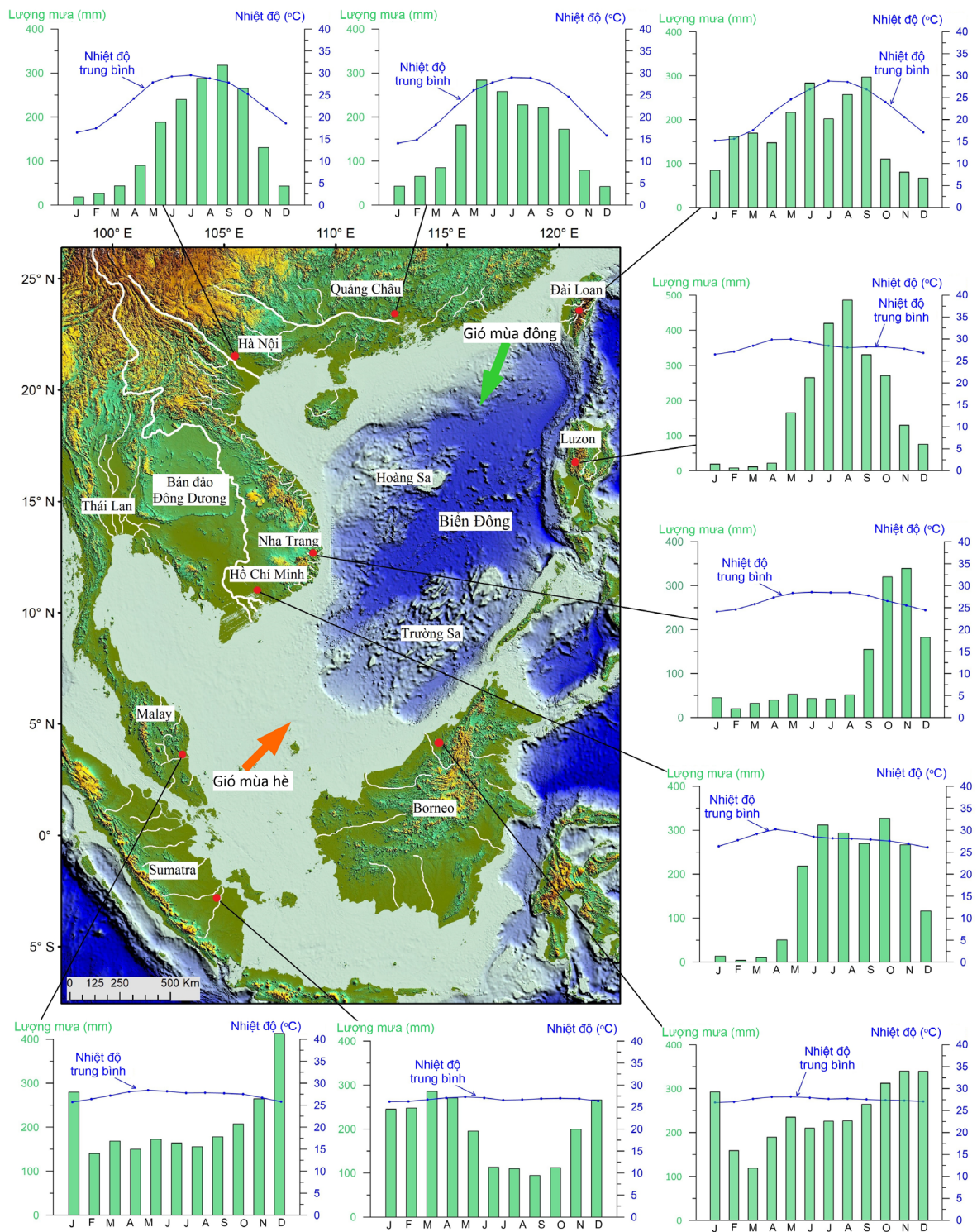
Ở phía Nam, Borneo chủ yếu là các đá trầm tích Đệ tam, với sự phân bố rộng rãi của đá trầm tích tuổi Paleozoi-Mesozoi ở phần trung tâm, các thành tạo xâm nhập granit, granodiorit tuổi Paleozoi-Mesozoi và đá phun trào Đệ tam ở phần phía Tây Nam (Liu và nnk., 2012; Hình 2). Đá trầm tích chủ yếu là đá phiến, một phần xen kẽ với các vỉa than, cát kết và đá cacbonat (Hutchison, 2005). Rải rác là đá phun trào Đệ tam và đá xâm nhập siêu bazơ tuổi Mesozoi được tìm thấy trong các vành đai kiến tạo trung tâm. Bán đảo Malay chủ yếu bao gồm đá granit, granodiorit tuổi Paleozoi-Mesozoi và đá trầm tích tuổi Paleozoi (Liu và nnk., 2012). Một lượng nhỏ đá trầm tích Mesozoi và đá phun trào cũng có mặt nằm rải rác trong khu vực. Đá trầm tích chủ yếu là đá cát kết, bột kết và đá vôi, xen kẽ với đá phun trào andesit (Hutchison, 1968; Sultan và Shazili, 2009). Sumatra được bao phủ chủ yếu bởi đá phun trào Đệ tứ (phần lớn có tuổi Holocen) có thành phần từ trung tính đến bazơ và xuất hiện ở phần sườn núi phía Tây Nam (Liu và

nnk., 2012). Các thành tạo phun trào, xâm nhập và đá trầm tích tuổi Paleozoi-Mesozoi và đá bazan Đệ tam cũng phân bố một cách thưa thớt. Borneo có hoạt động kiến tạo nâng cao mạnh nhất trong thời kỳ Oligocen-Miocen (Hall, 2002; Hutchison, 2005). Kết quả định tuổi tuyệt đối bằng phương pháp K-Ar trên các đá biến chất cho tuổi từ ~6-10 triệu năm tại Kinabalu ở Bắc Borneo, cho thấy hoạt động nâng kiến tạo nhanh chóng vào cuối Miocen (Rangin và nnk., 1990). Sumatra có hoạt động mạnh mẽ về mặt kiến tạo kể từ kỷ Đệ tam, được khống chế bởi sự hút chìm về phía Đông Bắc của mảng Ấn Độ Dương dọc theo rãnh Sunda ở phía Đông Ấn Độ Dương và đứt gãy Sumatra phía Tây Nam (Barber và Crow, 2009). Sự phân bố rộng rãi của đá phun trào trung tính và bazơ có tuổi Đệ tứ trên đỉnh núi và trên các sườn dốc cho thấy lịch sử phun trào núi lửa rất mạnh mẽ. Tuy nhiên, bán đảo Malay có hoạt động kiến tạo yếu và ổn định kể từ Mesozoi (Hutchison, 1968).

2.2. Điều kiện khí hậu

Biển Đông và các khu vực lân cận có điều kiện khí hậu bị chi phối mạnh mẽ bởi gió mùa Đông Á. Sự xen kẽ chế độ gió theo mùa đông và mùa hè của gió mùa Đông Á đã tạo ra chế độ mưa và dòng chảy theo mùa và một phần quyết định sự phát triển của các thảm thực vật cũng như chi phối quá trình phong hóa trên lục địa (Webster, 1994; Wang và nnk., 2003). Trong mùa đông, gió mùa đi kèm theo sự lạnh đi của lục địa và sự phát triển của áp suất cao trên khu vực Bắc Á đã tạo ra gió Đông Bắc trên biển Đông (Hình 3). Mùa hè thì ngược lại, gió mùa hè đi kèm với hiện tượng nóng lên ở lục địa, sự phát triển của áp suất thấp trên vùng trung tâm Trung Quốc và gió Tây Nam thổi qua biển Đông. Hiện nay, gió mùa đông hoạt động mạnh kéo dài gần sáu tháng từ tháng 11 đến tháng 4, trong khi đó gió mùa hè yếu hơn và kéo dài khoảng 4 tháng từ tháng 5 đến tháng 9 (Chu và Wang, 2003). Tuy nhiên, ở mỗi khu vực lân cận khác nhau xung quanh biển Đông lại cho thấy những giá trị nhiệt độ và lượng mưa không tương đồng (Hình 3). Điều này cho thấy điều kiện thời tiết của các khu vực lân cận xung quanh biển Đông là rất phức tạp và có thể tạo ra những nét rất riêng, chịu ảnh hưởng của yếu tố địa hình của từng khu vực.

Ở phía Bắc biển Đông, điều kiện khí hậu ở Hà Nội, Quảng Châu và Đài Loan khá tương đồng về



Hình 3. Lượng mưa và nhiệt độ trung bình tại các trạm đo ở các khu vực xung quanh biển Đông. Tài liệu được lấy từ các trạm đo ở Hà Nội (1989÷1990), Thành phố Hồ Chí Minh (1906÷1990), thành phố Nha Trang (1898÷1990), Borneo (1971÷2000), Luzon (1971÷2000), Đài Loan (1961÷1990), Sumatra (1961÷1990), Malay (1898÷1975) từ trang the World Weather Information Service (<http://www.worldweather.org/>), Quảng Châu (1971÷2000) từ the China Meteorological Data Sharing Services Network (<http://cdc.cma.gov.cn>).

nhệt độ nhưng lượng mưa có khác đôi chút (Hình 3). Nhiệt độ trung bình dao động trong khoảng $14\div 25^{\circ}\text{C}$ vào mùa đông và $\sim 16\div 29^{\circ}\text{C}$ vào mùa hè, lượng mưa hàng năm ở Hà Nội đạt ~ 1700 mm với $\sim 91\%$ lượng mưa xảy ra vào mùa hè, ở Quảng Châu lượng mưa hàng năm là ~ 1700 mm và lượng mưa ở mùa hè chiếm $\sim 80\%$ cả năm, trong khi đó ở Đài Loan lượng mưa khá cao ~ 2000 mm/năm và mùa hè chiếm $\sim 68\%$. Điều kiện khí hậu ở Nha Trang, miền Trung Việt Nam khá đặc trưng và khác với các vùng lân cận xung quanh biển Đông. Lượng mưa hàng năm khoảng 1300 mm và mùa mưa chiếm $\sim 75\%$ cả năm, cùng với nhiệt độ trung bình các tháng ổn định là $\sim 26^{\circ}\text{C}$. Ở thành phố Hồ Chí Minh, nhiệt độ trung bình khá cao và ổn định trung bình 28°C , lượng mưa hàng năm đạt khoảng 1900 mm với $\sim 93\%$ lượng mưa xảy ra vào mùa hè. Ở phía Nam biển Đông, bán đảo Malay, Sumatra và Borneo có điều kiện khí hậu tương đối giống nhau. Nhiệt độ trung bình hàng tháng ở những khu vực này là khá cao và ổn định $\sim 27^{\circ}\text{C}$, với lượng mưa hàng năm rất dồi dào 2900 mm ở Malay và Borneo, ở Sumatra lượng mưa thấp hơn chút nhưng vẫn ở mức cao ~ 2500 mm.

2.3. Đóng góp trầm tích sông ở biển Đông

Xung quanh biển Đông có rất nhiều hệ thống sông và chúng đóng vai trò quan trọng trong việc đóng góp trầm tích cho khu vực này (Hình 1). Theo Huang (2004) và Huang & Wang (2006), khoảng 80% trầm tích tầng mặt được cung cấp bởi các hệ thống dòng chảy lân cận và những con sông này đóng góp khoảng 63% tổng lượng trầm tích tính từ khi biển Đông được hình thành. Các trầm tích còn lại chủ yếu là các trầm tích cacbonat, silicat sinh học và một phần nhỏ từ vật liệu núi lửa. Có nhiều con sông xung quanh biển Đông trong đó có 3 con sông lớn hàng đầu thế giới là sông Mekong, sông Hồng và sông Châu Giang. Lưu vực của ba hệ thống sông lớn này cung cấp khoảng 3,7% tổng lượng trầm tích hàng năm của các con sông trên thế giới đổ ra biển (Dadson và nnk., 2003; Milliman và Farnsworth, 2011; Liu và nnk., 2012; Zhang và nnk., 2012). Các con sông lớn lân cận như sông Mekong (160 triệu tấn/năm), sông Hồng (130 triệu tấn/năm) và sông Châu Giang (84 triệu tấn/năm) đóng góp phần lớn trầm tích cho biển Đông và các sông nhỏ ở Đài Loan (176 triệu tấn/năm) cũng đóng góp một vai trò quan trọng bởi đặc điểm đặc biệt của địa hình và điều kiện

thời tiết ở đảo này (Milliman và Syvitski, 1992; Milliman và nnk., 1999; Milliman và Farnsworth, 2011; Hình 1). Tuy nhiên, các sông nhỏ ở các khu vực khác như ở Borneo (42 triệu tấn/năm), bán đảo Malay (35 triệu tấn/năm), Thái Lan (19 triệu tấn/năm), Miền Trung Việt Nam (14 triệu tấn/năm), Luzon (13 triệu tấn/năm) và đảo Hải Nán (4 triệu tấn/năm) đóng vai trò không lớn.

3. Thảo luận

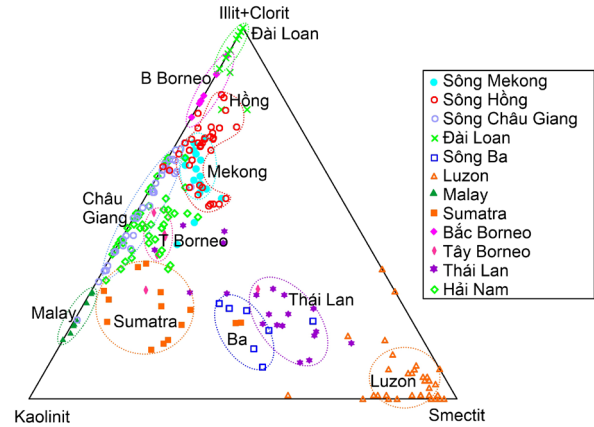
3.1. Nghiên cứu nguồn gốc trầm tích ở biển Đông dựa trên thành phần khoáng vật sét

Trong trầm tích biển, khoáng vật sét có thể cung cấp thông tin quan trọng về nguồn gốc xuất xứ trầm tích, đặc biệt là trong các trầm tích hạt mịn xa nguồn, nơi hầu hết các hạt thô được lắng đọng trên thềm lục địa hoặc gần cửa sông. Phương pháp này dựa trên sự khác biệt về thành phần khoáng vật học của trầm tích trong các hệ thống sông hiện đang cung cấp cho các bể trầm tích và đại dương, với những thay đổi được ghi nhận trong thành phần khoáng vật sét của trầm tích biển (Chen, 1978; Liu và nnk., 2016). Phương pháp này mang tính chất bán định lượng, trong đó tỷ lệ tương đối của các khoáng vật sét chính khác nhau được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (X-ray Diffraction-XRD) (Holtzapffel, 1985). Độ chính xác của các phương pháp được áp dụng tốt nhất để giải quyết sự khác biệt tương đối lớn trong các tập hợp khoáng vật sét và thường lớn hơn 5%. Sự khác biệt nhỏ hơn trong tập hợp khoáng sét có thể khó nhận biết trong quá trình phân biệt và xác định nguồn gốc trầm tích.

Khoáng vật sét là sản phẩm của quá trình phong hóa vật lý và phong hóa hóa học từ các loại đá trên bề mặt Trái đất và chúng có liên quan mật thiết với các yếu tố điều kiện khí hậu, thành phần thạch học của đá và các hoạt động kiến tạo (Chamley, 1989; Liu và nnk., 2007a, 2012). Quá trình phong hóa hóa học làm thay đổi thành phần của đá gốc thông qua quá trình thủy phân các khoáng vật của đá gốc và tạo ra khoáng vật thứ sinh, điển hình là khoáng vật sét smectit và kaonilit. Khoáng vật sét smectit thường liên quan đến phong hóa hóa học của đá phun trào dưới điều kiện ẩm và ẩm (Bluth và Kump, 1994; Dessert và nnk., 2001). Phần lớn khoáng vật sét này được tìm thấy với hàm lượng cao trong sản phẩm phong hóa của đá phun trào và nó có xu hướng hình

thành trên các vật liệu như các loại đá giàu Fe-Mg hoặc ryolit (Chamley, 1989). Xung quanh biển Đông, khoáng vật sét smectit có thể tìm thấy phổ biến ở phần trung lưu và vùng hạ lưu của lưu vực sông Mekong (Liu và nnk., 2004), lưu vực sông Ba ở miền Trung Việt Nam (Sang và nnk., 2018) và các lưu vực sông ở quần đảo Luzon trong vùng khí hậu nhiệt đới (Liu và nnk., 2009), nơi đá phun trào chiếm ưu thế (Hình 4; Bảng 1).

Khoáng vật sét kaolinit thường được hình thành trong quá trình thủy phân mạnh mẽ hơn, dưới điều kiện khí hậu nóng ẩm (Chamley, 1989). Sự hình thành của khoáng vật này thường liên quan đến các đá có chứa các khoáng vật giàu nguyên tố kiềm như đá granit, granodiorit và ryolit. Trong các lưu vực sông Châu Giang trong điều kiện khí hậu cận nhiệt đới, các lưu vực sông vừa và nhỏ ở đảo Hải Nam và bán đảo Malay trong điều kiện khí hậu nhiệt đới và chứa nhiều đá xâm nhập axit hoặc đá phun trào axit, hàm lượng khoáng vật sét kaolinit xuất hiện khá phổ biến trong các trầm tích sông (Liu và nnk., 2007a, 2012; Hu và nnk., 2014; Hình 4; Bảng 1).



Hình 4. Thành phần khoáng vật sét các lưu vực sông xung quanh biển Đông. Tài liệu sông Mekong, sông Hồng, sông Châu Giang, các sông nhỏ ở Đài Loan, Luzon, Sumatra, Malay, Thái Lan từ Liu và nnk. (2007a, 2008, 2009, 2012, 2016), đảo Hải Nam từ Hu và nnk. (2014) và sông Ba từ Sang và nnk. (2018).

Bảng 1. Tổng hợp đồng vị Sr-Nd và thành phần khoáng vật sét chính smectit, illit, kaolinit và clorit ở các sông và một số khu vực xung quanh và một vài lỗ khoan điển hình ở biển Đông.

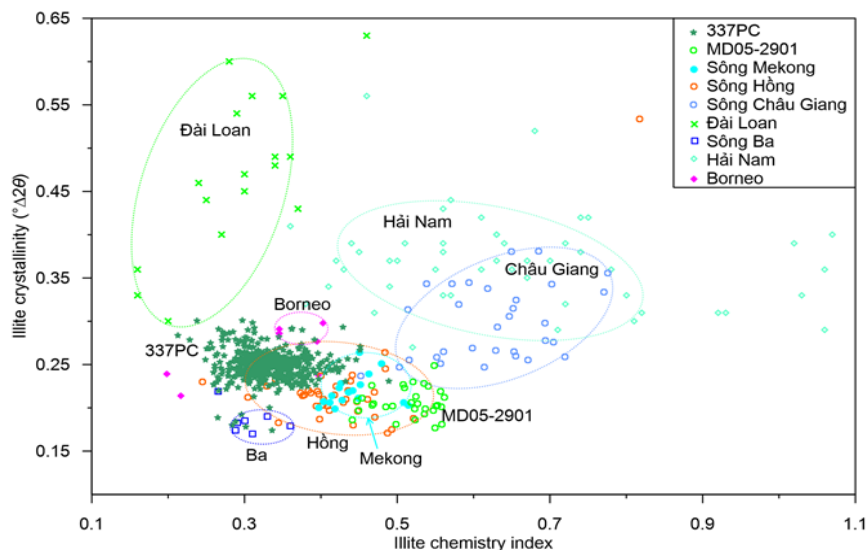
Mẫu	Smectit (%)	Illit (%)	Kaolinit (%)	Clorit (%)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	ϵ_{Nd}	Nguồn tài liệu
Trầm tích sông							
Sông Mekong	9	37	31	23	0,7213	-10,4	Liu và nnk., 2007a
Sông Hồng	7	44	26	23	-	-	
Sông Châu Giang	1	35	46	18	-	-	
Đài Loan	4	56	4	36	0,7188	-12,9	Liu và nnk., 2008
Luzon	86	1	9	4	-	-	Liu và nnk., 2009
Borneo	0	64	22	14	0,7173	-7,1	Liu và nnk., 2012; Wu và nnk., 2021
Sumatra	19	8	57	16	-	-	
Malay	1	17	78	4	0,7346	-9,2	
Hải Nam	4	17	49	30	0,7198	-8,4	Hu và nnk., 2014
Thái Lan	42	17	32	9	0,7243	-11,6	Liu và nnk., 2016
Sông Ba	43	11	37	9	-	-	Sang và nnk., 2018
Lỗ khoan trầm tích							
MD01-2393	31	33	19	17	0,7217	-11,4	Liu và nnk., 2004
MD97-2150	21	40	18	22	-	-	
MD05-2901	25	38	14	23	-	-	Liu và nnk., 2007b
337PC	29	48	14	9	0,7229	-11,1	Wan và nnk., 2015
ODP-1143	39	44	12	5	0,7205	-8,4	Wan và nnk., 2017
MD12-3432	39	33	7	21	0,7199	-11,4	Zhao và nnk., 2018
S018383-3	40	29	15	17	-	-	Jiwarungrueangkul và nnk., 2019
S018401	47	21	16	15	-	-	Sang và nnk., 2019
MD05-2896	46	24	16	14	0,7250	-10,4	Sang và nnk., 2022

Khác với quá trình phong hóa hóa học, quá trình phong hóa vật lý chỉ dẫn đến sự phá vỡ đá gốc mà không làm thay đổi thành phần hóa học và khoáng vật của đá. Quá trình này là giai đoạn đầu của quá trình phong hóa và sản sinh ra các khoáng vật sét illit và clorit (Chamley, 1989). Quá trình phong hóa vật lý sẽ xảy ra mạnh mẽ ở những vùng có điều kiện khí hậu tương đối khô và lạnh, hoặc có điều kiện kiến tạo nâng trời mạnh mẽ làm cho quá trình xói mòn có điều kiện phát triển và các đá không có thời gian để bị phong hóa hóa học. Xung quanh khu vực này, khoáng vật illit và clorit được tạo ra khá phổ biến trong sản phẩm phong hóa ở thượng lưu sông Mekong và sông Hồng nơi các đá chịu ảnh hưởng mạnh mẽ của hoạt động nâng kiến tạo và điều kiện khí hậu khô và lạnh (Liu và nnk., 2004, 2007a). Bên cạnh đó, đảo Đài Loan có hoạt động nâng kiến tạo mạnh mẽ nên các trầm tích sông cũng chứa nhiều khoáng vật illit và clorit mặc dù lượng mưa rất phong phú và nhiệt độ hàng năm khá cao (Liu và nnk., 2008). Qua đó có thể thấy rằng, thành phần của khoáng vật sét thường mang những đặc trưng riêng biệt cho từng lưu vực sông xung quanh biển Đông và chúng có thể được sử dụng để đại diện cho từng lưu vực.

Bên cạnh đó, mức độ của quá trình phong hóa hóa học còn khống chế các giá trị chỉ số địa hóa (illite chemistry index) và cấu trúc tinh thể của illite (illite crystallinity) (Chamley, 1989). Giá trị chỉ số địa hóa của illit cao hơn 0,40 cho thấy khoáng vật sét này giàu nguyên tố Al và liên quan

tới quá trình thủy phân mạnh mẽ, trái lại với chỉ số địa hóa nhỏ hơn 0,40 thì chúng chứa nhiều nguyên tố Fe và Mg và liên quan chủ yếu tới quá trình xói mòn và phong hóa vật lý (Hu và nnk., 2014). Nhìn trên Hình 5, chúng ta có thể thấy các khoáng vật sét illit ở các đảo Đài Loan và Borneo bị chi phối mạnh mẽ bởi quá trình xói mòn và phong hóa vật lý làm cho chỉ số địa hóa của illit của chúng nhỏ hơn 0,40. Trong khi đó, các giá trị chỉ số địa hóa của illit ở đảo Hải Nam và lưu vực sông Châu Giang lại có giá trị lớn hơn 0,40, điều này chủ yếu do quá trình phong hóa ở hai khu vực này diễn ra mạnh mẽ. Điều này là hợp lý bởi khu vực đảo Đài Loan và Borneo có mức độ phong hóa yếu, nhưng các đá ở đảo Hải Nam và lưu vực sông Châu Giang chịu sự chi phối của quá trình phong hóa mạnh (Liu và nnk., 2007, 2008; Hu và nnk., 2014). Những điều này cho thấy, đặc trưng của mức độ phong hóa của mỗi khu vực là không giống nhau và tạo ra sự khác biệt trong chỉ số địa hóa và tinh thể của illite. Từ đây, hai chỉ số này của illit đã được sử dụng rộng rãi để xác định và phân biệt các nguồn gốc trầm tích với nhau (Petschick và nnk., 1996; Gingeles và nnk., 2001; Liu và nnk., 2008).

Dựa trên những đặc điểm đặc trưng về nguồn gốc nơi chúng được sinh ra, khoáng vật sét đã được sử dụng khá rộng rãi ở biển Đông trong việc xác định nguồn gốc của trầm tích hạt mịn. Ở phía Nam biển Đông, bằng việc phân tích thành phần khoáng vật sét sông Mekong đã được chứng minh



Hình 5. So sánh giá trị chỉ số địa hóa (illite chemistry index) và cấu trúc tinh thể illit (illite crystallinity) của 2 lỗ khoan MD05-2901 từ Liu và nnk. (2007b) và 337PC từ Wan và nnk. (2015) với các nguồn trầm tích tiềm năng giống như Hình 4.

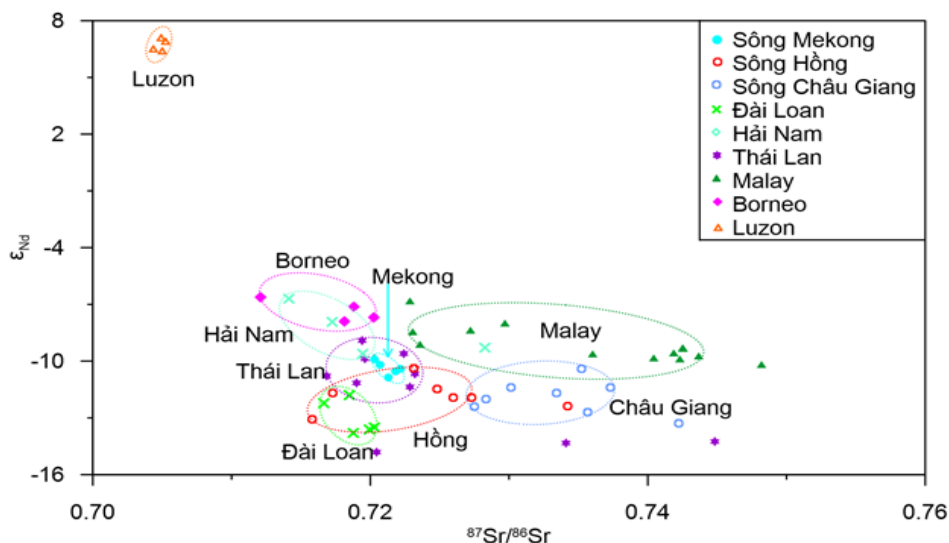
là nguồn cung cấp quan trọng nhất cho các tập trầm tích tại lỗ khoan MD01-2393 và MD97-2150 (Liu và nnk., 2004), SO18383-3 (Jiwarungrueangkul và nnk., 2019) và MD05-2896 (Sang và nnk., 2022) (Hình 1). Ở phần xa bờ miền Trung Việt Nam, Liu và nnk. (2007b) sử dụng lỗ khoan MD05-2901 đã cho thấy rằng sông Châu Giang là nguồn cung cấp chủ yếu khoáng vật kaolinit, sông Mekong và sông Hồng vận chuyển chủ yếu illit và clorit tới khu vực này, còn smectit thì chủ yếu đến từ các sông ở Sumatra (Hình 4). Về phía Tây Bắc biển Đông, dựa trên đặc trưng của khoáng vật sét, Wang và nnk. (2015) đã chứng minh sông Hồng là nguồn cung cấp trầm tích chủ yếu cho lỗ khoan 337PC. Ở thềm lục địa miền Trung Việt Nam, Sang và nnk. (2019) cho thấy rằng các khoáng vật sét chủ yếu đến từ các sông nhỏ ở miền Trung Việt Nam chứ không phải đến từ sông Mekong và sông Hồng.

3.2. Nghiên cứu nguồn gốc trầm tích ở biển Đông dựa trên đồng vị Sr-Nd

Đồng vị Sr-Nd trong trầm tích biển đã được kết hợp và được coi là công cụ hiệu quả trong việc xác định nguồn gốc trầm tích (Colin và nnk., 1999, 2006; Wan và nnk., 2015; Liu và nnk., 2016). Giá trị đồng vị này trong sản phẩm phong hóa thường phụ thuộc vào thành phần thạch học và kiến tạo của từng lưu vực sông. Depaolo và nnk. (1979) chỉ ra rằng, lớp vỏ phong hóa từ các đá có tuổi già hơn thường sản sinh ra $\epsilon_{Nd} < -6$ và giá trị tỷ lệ $^{87}Sr/^{86}Sr$

lớn hơn, nhưng các đá trẻ lại bị phong hóa và tạo ra $\epsilon_{Nd} > 5$ và giá trị tỷ lệ $^{87}Sr/^{86}Sr$ thấp hơn. Bên cạnh đó, Nd thường kém linh động trong quá trình phong hóa hơn Sr, nên Nd có xu hướng được làm giàu trong quá trình phong hóa, còn Sr dễ bị loại bỏ trong vỏ phong hóa và có thành phần thấp hơn. Giá trị ϵ_{Nd} và tỷ lệ $^{87}Sr/^{86}Sr$ có thể bị ảnh hưởng bởi kích thước của các hạt trong trầm tích và phương pháp này được áp dụng tốt hơn cả cho trầm tích hạt mịn (Revel và nnk., 1996; Innocent và Fagel, 2000). Tuy hai đồng vị này bị ảnh hưởng bởi quá trình phong hóa và thành phần độ hạt, nhưng trong trầm tích biển chúng đã được sử dụng rộng rãi và đem lại hiệu quả cao trong việc xác định nguồn gốc trầm tích ở biển Đông (Ví dụ: Colin và nnk., 2006; Wei và nnk., 2012; Wan và nnk., 2015; Liu và nnk., 2016; Zhao và nnk., 2018; Cai và nnk., 2020; Sang và nnk., 2022).

Giá trị ϵ_{Nd} và tỷ lệ $^{87}Sr/^{86}Sr$ của các lưu vực sông xung quanh biển Đông được biểu thị trên Hình 6 cho thấy chúng thường không giống nhau và mang những đặc trưng cho từng vùng miền. Ở Đông Bắc biển Đông, trầm tích có thể đến từ các sông bắt nguồn từ miền Nam Trung Hoa, điển hình là sông Châu Giang, đảo Đài Loan và quần đảo Luzon (Hình 1). Chúng ta có thể thấy giá trị ϵ_{Nd} và tỷ lệ $^{87}Sr/^{86}Sr$ của ba khu vực này không giống nhau, làm cho giá trị của 2 đồng vị Sr-Nd có thể sử dụng để xác định nguồn gốc vật liệu trầm tích của khu vực này. Ở phía Tây Bắc biển Đông, trầm tích có thể được cung cấp bởi sông Hồng và sông



Hình 6. Tương quan giá trị ϵ_{Nd} và tỷ lệ $^{87}Sr/^{86}Sr$ của các sông xung quanh biển Đông. Tài liệu sông Mekong, sông Hồng, sông Châu Giang, Đài Loan, Borneo, Luzon, Malay, Thái Lan từ Liu và nnk. (2007a, 2008, 2016), đảo Hải Nam từ Hu và nnk. (2014) và Malay từ Wu và nnk. (2021).

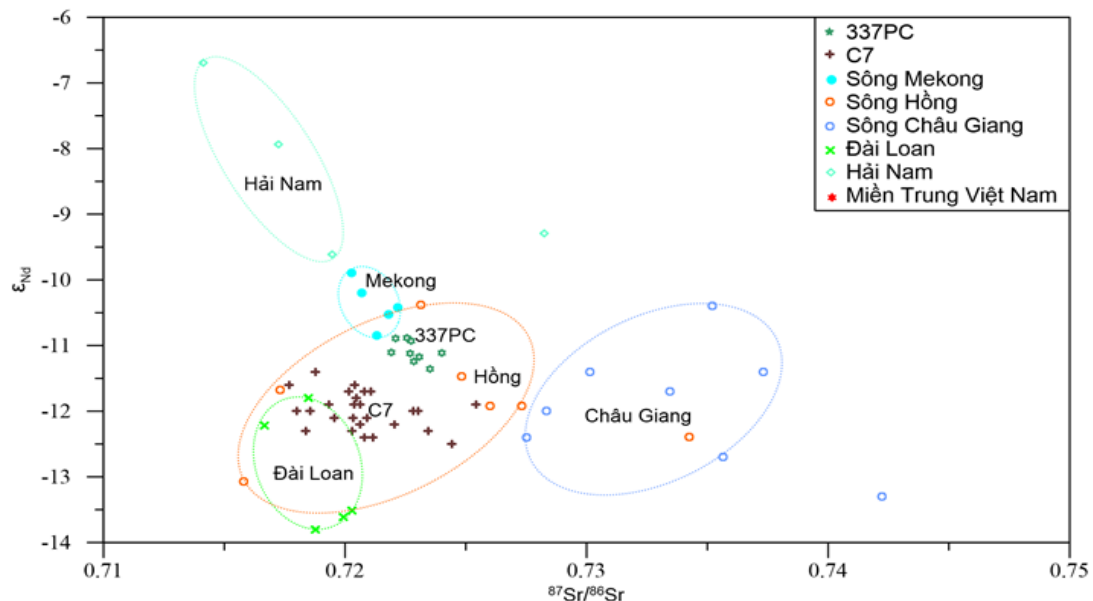
Mekong chảy qua bán đảo Đông Dương, sông Châu Giang chảy qua khu vực Nam Trung Hoa và các sông nhỏ ở đảo Hải Nam, Đài Loan. Các khu vực này có giá trị ϵ_{Nd} và tỷ lệ $^{87}Sr/^{86}Sr$ khác biệt nhau tương đối nhiều, nên chúng sẽ hiệu quả trong việc sử dụng để xác định nguồn gốc trầm tích. Điển hình của việc ứng dụng của hai đồng vị này là hai nghiên cứu từ lỗ khoan 337PC (Wan và nnk., 2015) và C7 (Cai và nnk., 2020), đã chứng minh rằng trầm tích của khu vực này đến chủ yếu từ sông Hồng (Hình 7). Tương tự như vậy, khu vực phía Nam biển Đông, trầm tích có thể được cung cấp bởi sông Mekong ở bán đảo Đông Dương, các sông nhỏ ở Thái Lan, bán đảo Malay, Borneo, và Sumatra. Qua so sánh ta có thể thấy, các giá trị ϵ_{Nd} và tỷ lệ $^{87}Sr/^{86}Sr$ cũng khác nhau tương đối nhiều, chỉ có sông Mekong và các sông nhỏ ở Thái Lan là có giá trị ϵ_{Nd} và tỷ lệ $^{87}Sr/^{86}Sr$ khá tương đồng. Tuy nhiên, sông Mekong và các con sông ở Thái Lan có vị trí khá xa nhau và hầu hết trầm tích của sông Thái Lan chủ yếu được vận chuyển vào vịnh Thái Lan, còn phía Nam biển Đông thì sông Mekong là nguồn đóng góp quan trọng nhất. Chính vì vậy, đồng vị Sr-Nd vẫn được sử dụng rộng rãi và hiệu quả trong việc xác định nguồn gốc trầm tích ở khu vực phía Nam biển Đông (Ví dụ: Liu và nnk., 2005, Wan và nnk., 2017, Sang và nnk., 2022).

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, tổ hợp khoáng vật sét và đồng vị Sr-Nd từ một số lỗ khoan trầm tích điển hình dưới đáy biển và các hệ thống sông xung quanh biển Đông đã được tổng hợp và luận giải lại nhằm đánh giá khả năng sử dụng chúng trong việc xác định nguồn gốc trầm tích. Nghiên cứu đã cho thấy rằng, các lưu vực sông xung quanh biển Đông thường có điều kiện địa chất và khí hậu không tương đồng dẫn đến sự khác nhau về tổ hợp khoáng vật sét và đồng vị Sr-Nd. Bên cạnh đó, tổ hợp khoáng vật sét và đồng vị Sr-Nd được bảo tồn khá tốt trong trầm tích biển. Việc chứa đựng những thông tin quý giá về nguồn gốc trầm tích và bảo tồn tốt trong trầm tích biển đã làm cho tổ hợp khoáng vật sét và đồng vị Sr-Nd được sử dụng rộng rãi và hiệu quả trong việc xác định nguồn gốc trầm tích ở biển Đông. Nghiên cứu đã góp phần làm sáng tỏ thêm việc sử dụng phương pháp nào trong việc nghiên cứu nguồn gốc trầm tích là hiệu quả cả về độ tin cậy và kinh phí trong quá trình nghiên cứu.

Đóng góp của tác giả

Nguyễn Hữu Hiệp - lên ý tưởng, xử lý dữ liệu và viết bản thảo; Phạm Như Sang - xử lý và phân tích dữ liệu, dựng mô hình 3D; Khương Thế Hùng,



Hình 7. Tương quan giá trị ϵ_{Nd} và tỷ lệ $^{87}Sr/^{86}Sr$ của lỗ khoan 337PC (Wan và nnk., 2015) và C7 (Cai và nnk., 2020) ở khu vực phía Tây Bắc biển Đông với các nguồn gốc tiềm năng sông Hồng, sông Châu Giang, các sông nhỏ ở Hải Nam, Đài Loan và sông Mekong (Liu và nnk., 2007a, 2008; Hu và nnk., 2014).

Đào Bùi Din - thu nhận dữ liệu và rà soát bản thảo;
Bùi Hoàng Bắc - lọc và kiểm tra dữ liệu, rà soát bản
thảo; Chu Quốc Huy - lên ý tưởng và xây dựng quy
trình.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát
triển khoa học và công nghệ Quốc gia với mã số đề
tài 105.99-2019.302.

Tài liệu tham khảo

- Barber, A. J., & Crow, M. J. (2009). Structure of Sumatra and its implications for the tectonic assembly of Southeast Asia and the destruction of Paleotethys. *Island Arc*, 18, 3-20.
- Bluth, G. J. S., Kump, L. R. (1994). Lithologic and climatologic controls of river chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 2341-2359.
- Briaies, A., Patriat, P., Tapponnier, P. (1993). Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the tertiary tectonics of Southeast Asia. *Journal Geophysical Research: Solid Earth*, 98, 6299-6328.
- Cai, G., Li, S., Zhao, L., Zhong, L., & Chen, H. (2020). Clay minerals, Sr-Nd isotopes and provenance of sediments in the northwestern South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 202, 104531.
- Chamley, H. (1989). *Clay sedimentology*. Springer, New York, pp. 263.
- Chen, P. Y. (1978). Minerals in bottom sediments of the South China Sea. *Geological Society of America Bulletin*, 89, 211-222.
- Chu, P. C., & Wang, G. (2003). Seasonal variability of thermohaline front in the central South China Sea. *Journal of Oceanography*, 59, 65-78.
- Clift, P. D., Harff, J., Wu, J., & Yan, Q. (2015). Assessing effective provenance methods for fluvial sediment in the South China Sea. In: Clift, P.D., Harff, J., Wu, J., Yan, Q., (eds.) *River-Dominated Shelf Sediments of East Asian Seas*. Geological Society, London, Special Publications, 429.
- Colin, C., Turpin, L., Bertaux, J., Desprairies, A., & Kissel, C. (1999). Erosional history of the Himalayan and Burman ranges during the last two glacial-interglacial cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, 171, 647-660.
- Colin, C., Turpin, L., Blamart, D., Frank, N., Kissel, C., & Duchamp, S. (2006). Evolution of weathering patterns in the Indo-Burman Ranges over the last 280 kyr: Effects of sediment sources on $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios tracer. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7, 1-16.
- Commission for the Geological Map of the World. (1975). *Geological World Atlas, scale 1:10,000,000*. UNESCO Education Science and Culture Organization, Paris.
- Dadson, S. J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W. B., Hsieh, M. L., Willett, S. D., Hu, J. C., Horng, M. J., Chen, M. C., Stark, C. P., Lague, D., & Lin, J. C. (2003). Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. *Nature*, 426, 648-651.
- DePaolo, D. J., & Johnson, R. W. (1979). Magma Genesis in the New Britain Island-Arc: Constraints from Nd and Sr Isotopes and Trace-Element Patterns. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70, 367-379.
- Dessert, C., Dupre, B., Francois, L. M., Schott, J., Gaillardet, J., Chakrapani, G., & Bajpai, S. (2001). Erosion of Deccan Traps determined by river geochemistry: Impact on the global climate and the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of seawater. *Earth Planet Science Letter*, 188, 459-474.
- Expedition 349 Scientists. (2014). *South China Sea tectonics: opening of the South China Sea and its implications for southeast Asian tectonics, climates, and deep mantle processes since the late Mesozoic*. International Ocean Discovery Program Preliminary Report 349.
- Gingele, F. X., Deckker, P. D., & Hillenbrand, C. (2001). Clay mineral distribution in surface sediments between Indonesia and NW Australia: Source and transport by ocean currents. *Marine Geology*, 179, 135-146.

- Hall, R. (2002). Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20, 353-431.
- Holtzapffel, T. (1985). Les minéraux argileux: Préparation, analyse diffractométrique et détermination. *Society Géologique Nord Publication*, 12, 1-136.
- Hu, B., Li, J., Cui, R., Wei, H., Zhao, J., Li, G., & Fang, X. (2014). Clay mineralogy of the riverine sediments of Hainan Island, South China Sea: implications for weathering and provenance. *Journal Asian Earth Sciences*, 96, 84-92.
- Huang, C. Y., Wu, W. Y., Chang, C. P., Tsao, S., Yuan, P. B., Lin, C. W., & Xia, K. Y. (1997). Tectonic evolution of accretionary prism in the arc-continent collision terrane of Taiwan. *Tectonophysics*, 281, 31-35.
- Huang, W. (2004). *Sediment Distributional Patterns and Evolution in the South China Sea Since the Oligocene*. Doctoral Dissertation (in Chinese with English abstract), Tongji University, Shanghai, 113 pp.
- Huang, W., & Wang, P. X. (2006). Sediment mass and distribution in the South China Sea since the Oligocene. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 49, 1147-1155.
- Hutchison, C. S. (1968). Dating Tectonism in the Indosinian - Thai - Malayan Orogen by Thermoluminescence. *Geological Society of America Bulletin*, 79, 375-386.
- Hutchison, C.S. (2005). *Geology of North-West Borneo: Sarawak, Brunei and Sabah*. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 444.
- Innocent, C., Fagel, N. (2000). Sm-Nd isotope systematics in deep-sea sediments: Clay-size versus coarser fractions. *Marine Geology*, 168, 79-87.
- Jiwarungrueangkul, T., Liu, Z., Stattegger, K., & Sang, P. N. (2019). Reconstructing Chemical Weathering Intensity in the Mekong River Basin Since the Last Glacial Maximum. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 34, 1710-1725.
- Joussain, R., Liu, Z., Colin, C., Duchamp-Alphonse, S., Yu, Z., Moreno, E., Fournier, L., Zaragosi, S., Dapoigny, A., Meynadier, L. and Bassinot, F. (2017). Link between Indian monsoon rainfall and physical erosion in the Himalayan system during the Holocene. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(9), 3452-3469.
- Leloup, P. H., Arnaud, N., Lacassin, R., Kienast, J. R., Harrison, T. M., Trinh, P., Replumaz, A., & Tapponnier, P. (2001). New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone, SE Asia. *Journal of Geophysical Research*, 106, 6683-6732.
- Liu, Z., Trentesaux, A., Clemens, S.C., Colin, C., Wang, P., Huang, B., & Boulay, S. (2003). Clay mineral assemblages in the northern South China Sea: Implications for East Asian monsoon evolution over the past 2 million years. *Marine Geology*, 201, 133-146.
- Liu, Z., Colin, C., Trentesaux, A., Blamart, D., Bassinot, F., Siani, G., & Sicre, M. A. (2004). Erosional history of the eastern Tibetan Plateau since 190 kyr ago: Clay mineralogical and geochemical investigations from the southwestern South China Sea. *Marine Geology*, 209, 1-18.
- Liu, Z., Colin, C., Trentesaux, A., Siani, G., Frank, N., Blamart, D., & Farid, S. (2005). Late Quaternary climatic control on erosion and weathering in the eastern Tibetan Plateau and the Mekong Basin. *Quaternary Research*, 63, 316-328.
- Liu, Z., Colin, C., Huang, W., Phon Le, K., Tong, S., Chen, Z., & Trentesaux, A. (2007a). Climatic and tectonic controls on weathering in south China and Indochina Peninsula: Clay mineralogical and geochemical investigations from the Pearl, Red, and Mekong drainage basins. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8, 1-18.
- Liu, Z., Zhao, Y. L., Li, J. R., & Colin, C. (2007b). Late Quaternary clay minerals off Middle Vietnam in the western South China Sea: Implications for source analysis and East Asian monsoon

- evolution. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 50, 1674-1684.
- Liu, Z., Tuo, S., Colin, C., Liu, J. T., Huang, C. Y., Selvaraj, K., Chen, C. T. A., Zhao, Y., Siringan, F. P., Boulay, S., & Chen, Z. (2008). Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation. *Marine Geology*, 255, 149-155.
- Liu, Z., Zhao, Y., Colin, C., Siringan, F. P., & Wu, Q. (2009). Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major-element geochemistry of river sediments. *Applied Geochemistry*, 24, 2195-2205.
- Liu, Z., Colin, C., Li, X. J., Zhao, Y. L., Tuo, S. T., Chen, Z., Siringan, F. P., Liu, J. T., Huang, C. Y., You, C. F., & Huang, K. F. (2010). Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: Source and transport. *Marine Geology*, 277, 48-60.
- Liu, Z., Wang, H., Hantoro, W. S., Sathiamurthy, E., Colin, C., Zhao, Y., & Li, J. (2012). Climatic and tectonic controls on chemical weathering in tropical Southeast Asia (Malay Peninsula, Borneo, and Sumatra). *Chemical Geology*, 291, 1-12.
- Liu, Z., & Stattegger, K. (2014). South China Sea fluvial sediments: An introduction. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79, 507-508.
- Liu, Z., Zhao, Y., Colin, C., Stattegger, K., Wiesner, M. G., Huh, C. A., Zhang, Y., Li, X., Sompongchaiyakul, P., You, C. F., Huang, C. Y., Liu, J. T., Siringan, F. P., Le, K. P., Sathiamurthy, E., Hantoro, W. S., Liu, J., Tuo, S., Zhao, S., Zhou, S., He, Z., Wang, Y., Bunsomboonsakul, S., & Li, Y. (2016). Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea. *Earth-Science Reviews*, 153, 238-273.
- Milliman, J. D., & Syvitski, J. P. M. (1992). Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers. *The Journal of Geology*, 100, 525-544.
- Milliman, J. D., Farnsworth, K. L., & Albertin, C. S. (1999). Flux and fate of fluvial sediments leaving large islands in the East Indies. *Journal of Sea Research*, 41, 97-107.
- Milliman, J. D., & Farnsworth, K. L. (2011). *River discharge to the coastal ocean: A global synthesis*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 382.
- Petschick, R., Kuhn, G., & Gingele, F. (1996). Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport, and relation to oceanography. *Marine Geology*, 130, 203-229.
- Rangin, C., Bellon, H., Benard, F., Letouzey, J., Muller, C., & Sanudin, T. (1990). Neogene arc-continent collision in Sabah, Northern Borneo (Malaysia). *Tectonophysics*, 183, 305-319.
- Replumaz, A., Lacassin, R., Tapponnier, P., & Leloup, P. H. (2001). Large river offsets and PlioQuaternary dextral strike-slip rate on the Red River fault (Yunnan, China). *Journal of Geophysical Research*, 106, 819-836.
- Revel, M., Sinko, J. A., & Grousset, F. E. (1996). Sr and Nd isotopes as tracers of North Atlantic lithic particles' Paleoclimatic implications. *Paleoceanography*, 11, 95-113.
- Sang, P. N., Liu, Z., Zhao, Y., Zhao, X., Pha, D. P., & Long, H. V. (2018). Chemical weathering in central Vietnam from clay mineralogy and major-element geochemistry of sedimentary rocks and river sediments. *Heliyon*, 4, e00710.
- Holocene and Younger Dryas: Clay mineralogy and elemental geochemistry from the Vietnam Shelf, western South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 179, 1-10.
- Sang, P. N., & Liu, Z. (2021). Terrigenous sediment variations in the western South China Sea and their implications to East Asian monsoon evolution during the last glacial-interglacial cycle. *Quaternary International*, 580, 1-10.
- Sang, P. N., Liu, Z., & Colin, C. (2022). Chemical weathering of the Mekong River basin with implication for East Asian monsoon evolution during the late Quaternary: Marine sediment records in the southern South China Sea. *Frontiers in Earth Science*, 10, 1-17.
- Schoenbohm, L. M., Whipple, K. X., Burchfiel, B. C., & Chen, L. (2004). Geomorphic constraints on

- surface uplift, exhumation, and plateau growth in the Red River region, Yunnan Province, China. *Geological Society of America Bulletin*, 116, 895-909.
- Steuer, S., Franke, D., Meresse, F., Savva, D., Pubellier, M., Auxietre, J. L., & Aurelio, M. (2013). Time constraints on the evolution of southern Palawan Island, Philippines from onshore and offshore correlation of Miocene limestones. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76, 412-427.
- Sultan, K., & Shazili, N. A. (2009). Distribution and geochemical baselines of major, minor and trace elements in tropical topsoils of the Terengganu River basin, Malaysia. *Journal of Geochemical Exploration*, 103, 57-68.
- Suzuki, S., Shizuo, T., Graciano, P. Y., Sevillo, D. D., & Daniel, K. A. (2000). Composition and provenance of the upper cretaceous to Eocene sandstones in central Palawan, Philippines: constraints on the tectonic development of Palawan. *Island Arc*, 9, 611-626.
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A.Y., Armijo, R., & Cobbold, P. (1982). Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10, 611-616.
- Taylor, B., & Hayes, D. E. (1980). The tectonic evolution of the South China Basin. In: Hayes, D.E. (Ed.), *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands. Geophysical Monograph*, 23, 89-104.
- Taylor, B., & Hayes, D. E. (1983). Origin and history of the South China Sea Basin. In Hayes, D.E. (Ed.), *the tectonic and geologic evolution of Southeast Asian seas and islands* (Pt. 2). *Geophysical Monograph*, 27, 23-56.
- Wang, B., Clemens, S. C., & Liu, P. (2003). Contrasting the Indian and East Asian monsoons: implications on geological timescales. *Marine Geology*, 201, 5-21.
- Wan, S., Toucanne, S., Clift, P. D., Zhao, D. B., Bayon, G., Yu, Z. J., Cai, G. Q., Yin, X. B., Revillon, S., Wang, D. W., Li, A. C., & Li, T. G. (2015). Human impact overwhelms long-term climate control of weathering and erosion in Southwest China. *Geology*, 43, 439-442.
- Wan, S., Clift, P. D., Zhao, D., Hovius, N., Munhoven, G., France-Lanord, C., Wang, Y., Xiong, Z., Huang, J., Yu, Z., Zhang, J., Ma, W., Zhang, G., Li, A., & Li, T. (2017). Enhanced silicate weathering of tropical shelf sediments exposed during glacial low stands: A sink for atmospheric CO₂. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 200, 123-144.
- Wang, J., Li, A., Xu, K., Zheng, X., & Huang, J. (2015). Clay mineral and grain size studies of sediment provenances and paleoenvironment evolution in the middle Okinawa trough since 17 ka. *Marine Geology*, 366, 49-61.
- Wang, P., Wang, L., Bian, Y., & Jian, Z. (1995). Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea: Surface circulation and carbonate cycles. *Marine Geology*, 127, 145-165.
- Webster, P. J. (1994). The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interactions. *Review Geophysical*, 32, 427-476.
- Wei, G. J., Liu, Y., Ma, J. L., Xie, L. H., Chen, J. F., Deng, W. F., & Tang, S. (2012). Nd, Sr isotopes and elemental geochemistry of surface sediments from the South China Sea: Implications for provenance tracing. *Marine Geology*, 319, 21-34.
- Wu, K., Shi, X., Lou, Z., Wu, B., Li, J., & Zhang, H. (2021). Sedimentary Responses to Climate Changes and Human Activities Over the Past 7400 Years in the Western Sunda Shelf. *Frontiers in Earth Science*, 9, 1-16.
- Yang, S. Y., Jung, H. S., Lim, D., & Li, C. X. (2003). A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea. *Earth Science Review*, 63, 93-120.
- Zhao, S., Liu, Z., Colin, C., Zhao, Y., Wang, X., & Jian, Z. (2018). Responses the East Asian summer monsoon in the low-latitude South China Sea to high-latitude millennial-scale climatic changes during the last glaciation: Evidence from a high-resolution clay mineralogical record. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 33, 1-20.
- Zhang, W., Wei, X. Y., Zheng, J. H., Zhu, Y. L., & Zhang, Y. J. (2012). Estimating suspended sediment loads in the Pearl River Delta region using sediment rating curves. *Continental Shelf Research*, 38, 35-46.