

Nhận dạng nguồn phát sinh động đất kích thích hồ thủy điện Sông Tranh 2 trên cơ sở phân tích kết hợp tài liệu địa chất - địa vật lý

Cao Đình Trọng¹, Mai Xuân Bách¹, Thái Anh Tuấn¹, Đặng Thanh Hải¹, Cao Đình Triều^{2*}

¹*Viện Vật lý Địa cầu, VAST, 18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam*

²*Viện Địa vật lý ứng dụng, Liên hiệp các Hội Khoa học và Kỹ thuật Việt Nam, 42C/41/210 Đội Cấn, phường Đội Cấn, quận Ba Đình, Hà Nội, Việt Nam*

Ngày nhận bài 26/10/2021; ngày chuyển phản biện 29/10/2021; ngày nhận phản biện 15/11/2021; ngày chấp nhận đăng 19/11/2021

Tóm tắt:

Trận động đất M4,7 xảy ra vào cuối năm 2012 đã thêm phần khẳng định về mức độ nguy hiểm của động đất kích thích ở khu vực thủy điện Sông Tranh 2, nơi chưa có ghi nhận về động đất kích thích trước khi hồ thủy điện được tích nước vào năm 2010. Đánh giá độ nguy hiểm của động đất kích thích và dự báo tác động của nó đến đập thủy điện là nhiệm vụ vô cùng cấp thiết. Để nâng cao độ chính xác trong đánh giá tác động này, cần chính xác hóa vùng nguồn phát sinh động đất kích thích, động đất xảy ra do ảnh hưởng của việc tích nước hồ chứa. Trong bài báo này, các tác giả trình bày tổ hợp phương pháp phân tích kết hợp tài liệu địa chất - địa vật lý trong nhận dạng nguồn phát sinh động đất kích thích hồ thủy điện Sông Tranh 2 với quy trình phân tích 3 bước. Kết quả nghiên cứu đã xác định được 5 nguồn phát sinh động đất kích thích hồ thủy điện Sông Tranh 2 liên quan tới 4 đứt gãy hoạt động liên thông với hồ chứa.

Từ khóa: động đất kích thích, đới nhạy cảm tại biến địa chất, đứt gãy sâu, hồ Sông Tranh 2, nguồn phát sinh động đất.

Chỉ số phân loại: 1.5

Identification of triggered seismic sources in Song Tranh 2 reservoir based on the geological - geophysical data

Dinh Trong Cao¹, Xuan Bach Mai¹, Anh Tuan Thai¹, Thanh Hai Dang¹, Dinh Trieu Cao^{2*}

¹*Institute of Geophysics, VAST, 18 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam*

²*Institute of Applied Geophysics, Vietnam Union of Science and Technology Associations, 42C/41/210 Doi Can Street, Doi Can Ward, Ba Dinh District, Hanoi, Vietnam*

Received 26 October 2021; revised 15 November 2021; accepted 19 November 2021

Abstract:

The M4.7 earthquake that occurred at the end of 2012 confirmed the danger of triggered earthquakes in the Song Tranh 2 hydropower region, where earthquakes have not ever been recorded before the impoundment in 2010. The task of assessing the triggered earthquake hazard and forecasting its impact on the hydroelectric dam is extremely urgent. To improve the accuracy of this impact assessment, it is necessary to access the active faults for triggered earthquakes to be more effective in earthquake seismic hazard assessment. In this paper, the authors presented a combination of analytical methods combining geological - geophysical data in identifying active sources of triggered earthquakes that stimulate Song Tranh 2 hydropower reservoir with a 3-step analysis process. Research results have identified 5 sources of earthquakes related to 4 active faults connected with the Song Tranh 2 hydropower reservoir.

Keywords: deep fault, geological hazardous sensitive area, seismic source, Song Tranh 2 reservoir, triggered earthquake.

Classification number: 1.5

1. Mở đầu

Động đất kích thích có cấp độ mạnh trung bình ($M=4,0\div5,0$) đã xảy ra tại các hồ thủy điện Hòa Bình, Sông Tranh 2 và Sơn La của Việt Nam [1]. Hai đặc điểm chung của các hồ thủy điện này là độ sâu đáy lớn nhất của các hồ chứa là hơn 90 m và đặc trưng cấu trúc địa chất khu vực lòng hồ gồm các đá biến chất (amphibolite, amphibolite schist...), gabrodiorite, granit hoặc

đá vôi đặc xít bị cà nát, đập vỡ mạnh. Động đất kích thích hồ Hòa Bình xảy ra vào ngày 23/5/1989 ($M_{qs,max}=4,9$) sau khi được tích đầy nước vào tháng 12/1988; động đất kích thích xảy ra tại Sông Tranh 2 ($M_{qs,max}=4,7$) vào ngày 15/11/2012 sau khi được tích đầy nước vào tháng 10/2010; động đất kích thích hồ Sơn La ($M_{qs,max}=4,3$) xảy ra vào ngày 19/7/2014, sau khi được tích đầy nước vào tháng 4/2012 [1].

*Tác giả liên hệ: Email: cdtrieu@gmail.com

Sự khác biệt lớn nhất giữa biểu hiện hoạt động động đất tại hồ Sông Tranh 2 so với hồ Hòa Bình và Sơn La là ở chỗ [1]: hồ Sông Tranh 2 được xây dựng tại nơi chưa từng có động đất tự nhiên xảy ra, trong khi hồ Hòa Bình và Sơn La được xây dựng tại vùng hoạt động động đất mạnh nhất Việt Nam; biểu hiện hoạt động động đất kích thích tại hồ Hòa Bình và Sơn La không kéo dài, chỉ trong khoảng 5 năm là kết thúc, trong khi đó động đất kích thích hồ Sông Tranh 2 vẫn có biểu hiện hoạt động liên tục đến nay. Đó cũng là lý do thu hút sự quan tâm của các nhà địa chấn Việt Nam và thế giới đối với hồ thủy điện Sông Tranh 2.

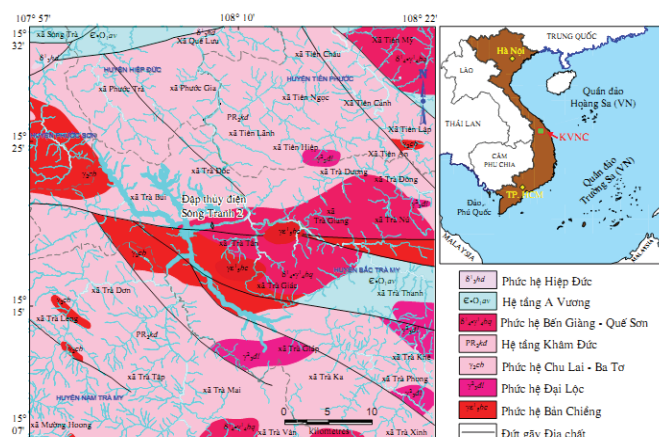
Một mạng lưới gồm 10 trạm quan trắc động đất vẫn hoạt động và đang ghi nhận các trận động đất từ M1.0 xảy ra tại đây. Đồng thời, cũng đã có khá nhiều kết quả nghiên cứu về động đất kích thích hồ Sông Tranh 2 được công bố, chủ yếu đề cập tới: tổng quát về đặc điểm địa chất, kiến tạo và đứt gãy hoạt động [2, 3]; biểu hiện hoạt động động đất kích thích và cơ cấu chấn tiêu [3-8]; mối quan hệ giữa biểu hiện hoạt động động đất với độ cao mực nước hồ và thay đổi ứng suất lỗ rỗng [9, 10]; mô hình sóng địa chấn [11]; độ nguy hiểm động đất [12] và gia tốc dao động nền [13-15].

Bài báo đề cập đến vấn đề nghiên cứu xác định cấu trúc nguồn phát sinh động đất kích thích hồ thủy điện Sông Tranh 2. Phạm vi khu vực nghiên cứu giới hạn trong khung tọa độ: $\lambda=107^{\circ}57' \div 108^{\circ}22' \text{ E}$; $\varphi=15^{\circ}07' \div 15^{\circ}32' \text{ N}$ (ở tỷ lệ 1:50000).

2. Đặc điểm địa chất, địa mạo khu vực hồ thủy điện Sông Tranh 2 và kế cận

2.1. Đặc điểm vận động kiến tạo trong Kainozoi

Ở khu vực Sông Tranh 2 và kế cận (hình 1), chuyển động kiến tạo tương phản trong Kainozoi có tính chất khối tăng, bắt đầu từ Oligocen cho đến nay. Trong đó, vận tốc nâng trung bình đạt giá trị 0,04 mm/năm thuộc cấu trúc phương tây bắc - đông nam, còn các cấu trúc phương á vĩ tuyến là các cấu trúc hạ lún yếu có vận tốc khoảng -0,02 mm/năm [2, 3, 16-19].



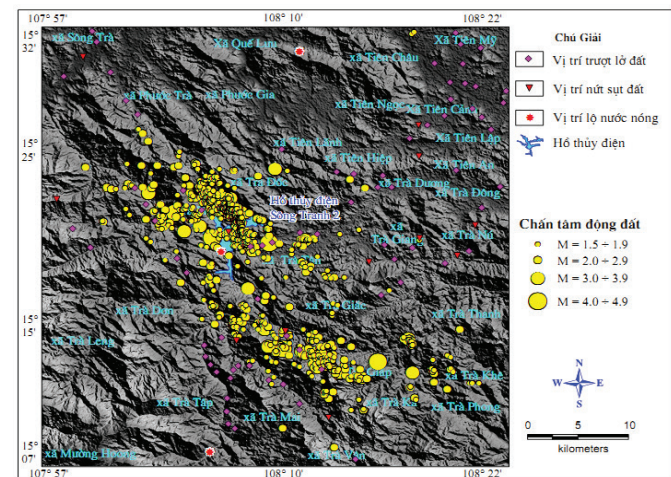
Hình 1. Cấu trúc địa chất khu vực hồ thủy điện Sông Tranh 2 và kế cận.

2.2. Đặc trưng cấu trúc địa chất

Vùng ngập nước hồ thủy điện Sông Tranh 2 (hình 1) tồn tại 3 phân vị địa tầng địa chất sau [16]: (1) Hệ tầng Khâm Đức (PR_{kd} , Meso-Neoproterozoic): feldspar-hornblende schist; two-mica garnet schist, quartz-biotite schist, biotite-disthene schist; amphibolite, amphibolite schist; biotite schist, quartz-biotite-disthene-garnet schist; amphibolite, quartz-muscovite schist; dolomitic marble; (2) Phức hệ Bến Giằng - Quế Sơn ($\delta^1_4-\gamma^1_4$ bq, Late Paleozoic): gabrodiorite, diorit, hornblende-biotite; granodiorite, porphyritic hornblende granodiorite; hornblende-biotite granite; (3) Phức hệ Chu Lai - Ba Tơ (γ^2_{cb} , Neoproterozoic): granodiorite, granite, granite-migmatite. Các thành phần của hệ tầng nêu trên đều có phương chung á vĩ tuyến, bị phân phiến khá dốc, có nhiều hệ thống khe nứt (hình 1). Khi bị phong hóa, làm thay đổi tính chất cơ lý của đá, dẫn đến không còn bền vững, dễ bị trượt lở.

2.3. Đặc điểm về địa mạo

Biểu hiện biến dạng địa hình (hình 2) trong phạm vi khu vực nghiên cứu được ghi nhận như sau: (1) Địa hình thung lũng sông suối lớn đều phát triển dọc theo các đới đứt gãy hoạt động, sụt bậc địa hình thấp dần về phía đông bắc và tây nam (từ trên 1000 m xuống 10-30 m); (2) Đới đứt gãy Trà My - Trà Bồng gây biến dạng và chi phối phương phát triển địa hình thung lũng Sông Tranh và Trà Bồng, hướng núi phát triển theo phương vĩ tuyến chạy từ khu vực Bồng Sơn đến Khâm Đức tạo các mặt đứt gãy kiến tạo cắm về phía bắc rất rõ [2, 17].



Hình 2. DEM và các yếu tố về tai biến địa chất khu vực hồ thủy điện Sông Tranh 2 và kế cận.

2.4. Biểu hiện hoạt động động đất, nứt sụt và trượt lở đất

Động đất tự nhiên: tuy chưa có tài liệu nghiên cứu nào chứng minh rằng đã có động đất tự nhiên xảy ra tại khu vực hồ Sông Tranh 2 (trong phạm vi bán kính 30 km), song theo dự báo thì cấp độ mạnh tối đa của động đất tự nhiên, $M=5,8 \div 5,9$ có nguy cơ xảy ra tại khu vực này [2].

Động đất kích thích: Theo số liệu thống kê của Viện Vật lý Địa cầu thì từ tháng 8/2011 (bắt đầu xuất hiện động đất kích thích) đến hết tháng 2/2019 tại khu vực lòng hồ Sông Tranh 2 và lân cận đã quan sát được 1161 động đất có cấp độ mạnh $M=1,5 \div 4,7$ ($\geq 1,5$), trong đó có 731 động đất có $M=1,5 \div 1,9$; 392 động đất có $M=2,0 \div 2,9$; 33 động đất có $M=3,0 \div 3,9$; 5 động đất có $M \geq 4,0$; mạnh nhất là động đất $M_{qs,max}=4,7$ (ngày 12/10/2012).

Nứt sụt đất: Các điểm nứt - sụt đất khu vực nghiên cứu (hình 2) chủ yếu là các khe nứt kiến tạo hoạt động với các $\Delta g(x, y)$ là kiểu nguồn gốc khác nhau [2, 17]: khe nứt cắt, tách giãn và nén ép. Chúng được hình thành và phát triển trong bối cảnh địa động lực hiện đại với trường ứng suất nén ép theo phương á kinh tuyến, kiểu trượt và trượt - giãn; hoạt động trượt bằng - thuận của các đứt gãy 14 hoạt động theo phương tây bắc - đông nam và đông bắc - tây nam, tách sụt với các đứt gãy phương á kinh tuyến.

Trượt lở đất: Trượt lở đất chủ yếu diễn ra trong các kiểu vỏ phong hóa ferosialit và siafelit của các đá magma axit biến chất và trên các tầng trầm tích Đệ tứ hỗn hợp vụn - thô - bờ rời có độ dính kết yếu. Đặc biệt, trượt - lở đất diễn ra khá mạnh mẽ ở những nơi có chiều dày vỏ phong hóa lớn, đạt 30-40 m như trên địa bàn huyện Tiên Phước, Bắc Trà My và Nam Trà My. Một phần không lớn các cá thể trượt - lở đất xảy ra trong cả vỏ phong hóa lẫn đá gốc. Những khối trượt này thường đi kèm với nứt đất, hình thành và bị khống chế bởi các khe nứt kiến tạo [2, 17].

3. Phương pháp phân tích và kết quả thu được

Các bước phân tích tài liệu nhằm nhận dạng đứt gãy tiềm ẩn nguy cơ tại biến địa chất gồm: 1) Khẳng định sự tồn tại của đứt gãy sâu thông qua giá trị gradient ngang toàn phần cực đại (G_{max}) dị thường trọng lực, từ và sử dụng bộ lọc bản đồ Theta cải tiến (Modified Theta Map Filter - MTM); 2) Xác định đới nhạy cảm tại biến địa chất (hay còn gọi là đới động lực đứt gãy [19, 20] trên cơ sở chồng chập các chỉ số kiến tạo địa mạo, sử dụng công nghệ GIS; 3) Các đứt gãy tiềm ẩn nguy cơ tại biến địa chất là các đứt gãy sâu có biểu hiện nguy cơ cao về tai biến địa chất (được phản ánh trên kết quả phân tích bước 1 và 2) [19-29].

3.1. Phát hiện G_{max} và MTM cho tài liệu dị thường trọng lực Bouguer

Cả hai cách tiếp cận G_{max} và MTM đều được sử dụng để xác định vị trí đứt gãy, tuy nhiên khi sử dụng G_{max} ở các độ sâu nâng trường khác nhau cho chúng ta được hướng cảm của đứt gãy, một kết quả bổ sung hơn so với MTM. Việc sử dụng đồng thời 2 cách tiếp cận giúp nâng cao độ chính xác trong xác định đứt gãy, thông số quan trọng nhất trong nhiệm vụ đánh giá độ rủi ro tai biến địa chất.

Phương pháp G_{max} được sử dụng để xác định ranh giới giữa các khối địa chất có mật độ khác nhau. Gradient ngang toàn phần (G) trên lưới số liệu dị thường trọng lực Bouguer

(hay từ) được tính theo công thức:

$$G = \sqrt{\left(\frac{\Delta g(x,y)}{dx}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g(x,y)}{dy}\right)^2} \quad (1)$$

với $\Delta g(x, y)$ là dị thường trọng lực Bouguer tại điểm (x, y) . Tổng giá trị gradient ngang tại điểm tính toán (coi là điểm trung tâm) được so sánh với giá trị của 8 điểm gần nhất theo 4 hướng (đọc theo hàng, cột và 2 đường chéo), nếu nó thỏa mãn là điểm có giá trị G lớn nhất so với 8 điểm xung quanh thì đây chính là điểm G_{max} cần tìm. Các điểm G_{max} phân bố theo dạng tuyến sẽ phản ánh sự tồn tại của đứt gãy.

Kỹ thuật phát hiện đới ranh giới cấu trúc (vật thể) địa chất ẩn sâu bằng MTM được sử dụng rộng rãi trong thăm dò địa vật lý. MTM đã chứng tỏ rất có hiệu quả trong nghiên cứu phát hiện đới ranh giới cấu trúc (đứt gãy) và các thể xâm nhập [23-29]. MTM được xây dựng theo công thức sau:

$$MTM = \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{f_{zx}^2 + f_{zy}^2}}{\sqrt{f_{zx}^2 + f_{zy}^2 + f_{zz}^2}} \right) \quad (2)$$

trong đó: f_{zz} là đạo hàm bậc 2 theo trục z (độ sâu); f_{zx} và f_{zy} là đạo hàm bậc 2 theo trục z với x, y tương ứng.

3.2. Xác định đới nhạy cảm tại biến địa chất trên cơ sở chồng chập các chỉ số kiến tạo địa mạo, sử dụng công nghệ GIS

Xác lập hệ tiêu chí nhận dạng đới nhạy cảm tại biến địa chất: Trên cơ sở nghiên cứu xác lập đứt đoạn đứt gãy trong động đất Tuần Giáo ngày 24/6/1983, M6,7, Cao Đình Triều và Nguyễn Đức Vinh (2012) [30] đã đưa ra hệ thống gồm 9 chỉ số kiến tạo địa mạo nhận dạng đới nhạy cảm tại biến địa chất và phân đoạn đứt gãy hoạt động phục vụ tính toán cực đại động đất cho Việt Nam. Đối với khu vực hồ thủy điện Sông Tranh 2 và kế cận, chúng tôi sử dụng 7 tiêu chí tiêu biểu nhận dạng đới nhạy cảm tại biến địa chất như sau [31, 32]: DH1 - Mật độ Foto lineament và đứt gãy địa chất theo tổng chiều dài; DH2 - Mật độ nút giao của đứt gãy địa chất, lineament và sông - suối; DH3 - Mật độ nứt sụt đất, trượt lở đất và xuất lộ nước nóng trong diện tích một ô lưới được chia theo diện phủ đầy; DH4 - Độ dốc địa hình; DH5 - Mật độ độ dài sông suối; DH6 - Tỷ số giữa bề rộng đáy và độ cao của thung lũng (the width/height ratio of the valley - Vf); DH7 - Chỉ số gradient chiều dài dòng chảy (Hack index or the stream gradient index - SL).

Phân cấp các nhân tố: Phân cấp mức độ xảy ra tai biến địa chất theo 3 cấp: thấp (hoặc không biểu hiện nguy cơ), trung bình và cao. Các yếu tố thành phần DH1 - DH7 đều được phân định thành 3 cấp theo mức độ nhạy cảm nêu trên.

Tính trọng số dựa trên phương pháp phân tích hệ thống phân cấp (Analytic Hierarchy Process - AHP): Phương pháp phân tích thứ bậc (hay còn gọi là phương pháp mô hình p - trọng số) được chúng tôi sử dụng trong xác định đới nhạy cảm tại biến địa chất trên cơ sở chồng chập các chỉ số kiến tạo địa mạo, sử dụng công nghệ GIS [33-35]. Nội dung

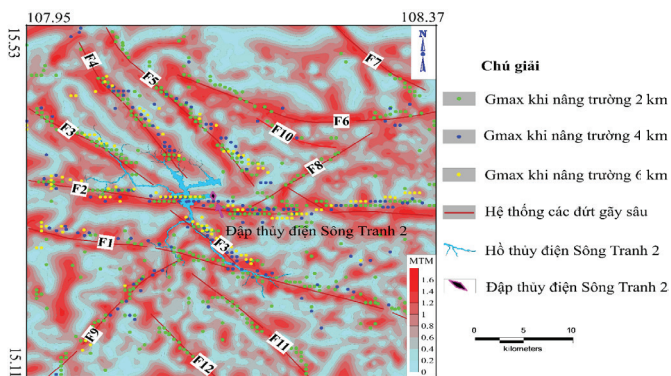
của phương pháp bao gồm việc xây dựng một hệ thống các cặp ma trận so sánh giữa các yếu tố khác nhau. Cách tiếp cận này có thể được mô tả như là sự phân bậc tầm quan trọng của các yếu tố đối với việc nhận dạng đới nhạy cảm tại biến địa chất, mỗi yếu tố được so sánh với các yếu tố khác để xác định tầm quan trọng của chúng. Trọng số của các yếu tố thành phần được tính toán tương quan theo công thức:

$$\text{LSI} = 0,3215 \cdot \text{DH1} + 0,2313 \cdot \text{DH2} + 0,2172 \cdot \text{DH3} + 0,1040 \cdot \text{DH4} + 0,0644 \cdot \text{DH5} + 0,0398 \cdot \text{DH6} + 0,0217 \cdot \text{DH7} \quad (3)$$

Độ tin cậy của đánh giá trọng số được thể hiện qua giá trị của tỷ lệ nhất quán CR (Consistency ratio), giá trị thu được trong tính toán này đạt 0,025, nhỏ hơn so với ngưỡng giá trị chấp nhận được 0,1 [34, 35] đã khẳng định tính chính xác của nội dung phân tích.

3.3. Các đứt gãy tiềm ẩn nguy cơ tại biến địa chất khu vực Sông Tranh 2 và kế cận

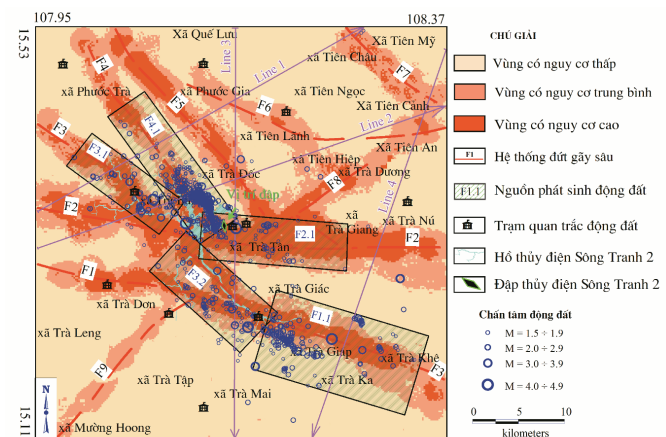
Kết quả tính toán dựa trên tài liệu dị thường trọng lực Bouguer [36, 37], xác định các điểm Gmax ở các mức độ sâu 2, 4 và 6 km cùng giá trị MTM được trình bày ở hình 3. Vị trí đứt gãy sâu được phản ánh rõ nét trên 2 loại tài liệu này.



Hình 3. Phân bố Gmax và giá trị MTM (cột phân bố màu) khu vực Sông Tranh 2 và kế cận.

Từ các bản đồ thành phần, qua quá trình chồng chập, sử dụng phần mềm ArcGIS 10.0, các tác giả đã thành lập sơ đồ phân bố đới nhạy cảm tai biến địa chất khu vực hồ Sông Tranh 2 và kế cận ở tỷ lệ 1/50000 (hình 4).

Các đứt gãy sâu trùng với đới nhạy cảm cao tại biển địa chất được gọi là đứt gãy tiềm ẩn nguy cơ cao về tai biến địa chất. Tổng cộng đã phát hiện được 12 đứt gãy sâu tiềm ẩn nguy cơ cao về tai biến địa chất tại khu vực hồ thủy điện Sông Tranh 2 và kế cận (được ký hiệu từ F1 đến F12), bao gồm: F1 - Đứt gãy sông Trà Bồng; F2 - Đứt gãy Trà My; F3 - Đứt gãy sông Nước Lẻ; F4 - Đứt gãy sông Trà Nô; F5 - Đứt gãy sông Vu Gia; F6 - Đứt gãy sông Hồ Khánh; F7 - Đứt gãy sông Tiên; F8 - Đứt gãy sông Trăm; F9 - Đứt gãy sông Nước Đen; F10 - Đứt gãy Tiên Hiệp; F11 - Đứt gãy Rào Quán - A Lưới; F12 - Đứt gãy sông Nước Xa.



Hình 4. Các nguồn phát sinh động đất kích thích hồ thủy điện Sông Tranh 2.

3.4. Các nguồn phát sinh động đất kích thích hồ Sông Tranh 2

Khi nước hồ chứa thẩm thấu vào đới cát đập vỡ của các đứt gãy tiềm ẩn nguy cơ tai biến địa chất, làm thay đổi trạng thái ứng suất lỗ rỗng theo chiều hướng kích thích động đất xảy ra [38, 39]. Đối với khu vực hồ Sông Tranh 2, kết quả nghiên cứu của chúng tôi cho thấy có tới 4 đứt gãy tiềm ẩn nguy cơ tai biến địa chất liên thông với hồ chứa (khi được tích nước lên cao trình tối đa): F1 - Đứt gãy sông Trà Bồng; F2 - Đứt gãy Trà My; F3 - Đứt gãy sông Nước Lẻ; F4 - Đứt gãy sông Trà Nô.

Phân bố chấn tâm động đất kích thích có $M=1,5\div 4,7$ được trình bày ở hình 4 và bảng 1 cho thấy có sự tồn tại của 5 cụm chấn tâm động đất gắn liền với đới đứt gãy có nguy cơ cao về tai biến địa chất: F1.1 (thuộc đứt gãy sông Trà Bồng); F2.1 (thuộc đứt gãy Trà My); F3.1 và F3.2 (thuộc đứt gãy sông Nước Lẻ) và F4.1 (thuộc đứt gãy sông Trà Nô). Thống kê về biểu hiện hoạt động động đất kích thích ở bảng 1 cho thấy:

- Động đất kích thích có cấp độ mạnh lớn nhất: $M_{q.s.max}=4,7$ xảy ra tại đoạn nguồn F2.1 (đứt gãy Trà My); tại F1.1 (đứt gãy sông Trà Bồng), $M_{q.s.max}=4,2$; tại F3.1 và F3.2 (đứt gãy sông Nước Lè) có $M_{q.s.max}=4,1$; $M_{q.s.max}=3,6$ tại F4.1 (đứt gãy sông Trà Nô). Chiều dày tầng phát sinh động đất lớn nhất đạt 16 km thuộc về F3.2 (từ 2 đến 18 km), F2.1 (12 km); F1.1 và F3.1 (9 km), 8 km thuộc về F4.1.

- Động đất kích thích sớm nhất quan sát thấy tại F1.1, M4,2 (ngày 3/9/2012), tiếp đến là tại F3.2, M4,1 (ngày 7/9/2012), F3.1, M4,1 (ngày 23/9/2012), F2.1, M4.6 ngày (12/10/2012), muộn nhất là tại F4.1 và M3,6 (ngày 19/10/2012).

Bảng 1. Các nguồn phát sinh động đất kích thích hồ thủy điện Sông Tranh 2.

Số TT	Nguồn	Thuộc đứt gãy (ĐG)	Động đất lớn nhất quan sát được ($M_{qs,max}$)	Ngày xảy ra động đất đầu tiên	Phân bố độ sâu chấn tiêu (tầng phát sinh động đất) (km)
1	F _{1,1}	Sông Trà Bồng	4,2	3/9/2012	2÷11
2	F _{2,1}	Trà My	4,7	12/10/2012	2÷14
3	F _{3,1}	Sông Nước Lẻ	4,1	23/9/2012	2÷11
4	F _{3,2}	Sông Nước Lẻ	4,1	7/9/2012	2÷18
5	F _{4,1}	Sông Trà Nô	3,6	19/10/2012	2÷10

4. Bàn luận

Kết quả phân bố đứt gãy khu vực nghiên cứu thể hiện ở hình 3 cho thấy, các đứt gãy (12 đứt gãy) khu vực nghiên cứu gồm: F1 - Đứt gãy sông Trà Bồng; F2 - Đứt gãy Trà My; F3 - Đứt gãy sông Nước Lẻ; F4 - Đứt gãy sông Trà Nô; F5 - Đứt gãy sông Vu Gia; F6 - Đứt gãy sông Hồ Khánh; F7 - Đứt gãy sông Tiên; F8 - Đứt gãy sông Tràm; F9 - Đứt gãy sông Nước Đen; F10 - Đứt gãy Tiên Hiệp; F11 - Đứt gãy Rào Quán - A Lưới; F12 - Đứt gãy sông Nước Xa.

Kết quả thu được cho thấy rõ hệ thống đứt gãy phương tây bắc - đông nam và á vĩ tuyến, còn lại chỉ có 2 đứt gãy phương đông bắc - tây nam (F8, F9). Kết quả thu được tương đồng với hệ thống đứt gãy địa chất của khu vực trong công bố của [4, 40, 41], tuy nhiên mạng lưới đứt gãy nhỏ phương đông bắc - tây nam hay á kinh tuyến như đứt gãy 13, 14, 15 [40] thì không nhận dạng được trên tài liệu Gmax và MTM.

Các đứt gãy có biểu hiện rõ trong đánh giá hướng cấm F1-F5, có hướng cấm đông bắc cũng tương đồng với kết quả của các nghiên cứu trước đây [4, 40, 41], tuy nhiên những đứt gãy khác F6-F13 biểu hiện hướng cấm theo giá trị Gmax không rõ, lý giải do những đứt gãy F1-F5 là những đứt gãy sâu khu vực nghiên cứu [40]. Theo C.A. Guo và cs (2017) [29] thì phương pháp MTM sử dụng tốt trong nhận dạng đứt gãy với chiều sâu trung bình hoặc sâu. Như vậy có thể thấy sự kết hợp giữa Gmax và MTM đều dùng để nhận dạng đứt gãy sâu, các đứt gãy nông sẽ khó có biểu hiện. Điều này cũng dễ hiểu do những nơi tồn tại đứt gãy trung bình hoặc sâu thì biểu hiện về biến thiên tài liệu trọng lực hay từ cũng sẽ rõ nét hơn. Theo hình 3 thì tồn tại 5 đứt gãy chính liên thông đến hồ thủy điện sông Tranh 2, đó là F1, F2, F3, F4 và F9.

Kết quả nghiên cứu của chúng tôi (hình 4) cho thấy có 5 đứt gãy: F1 (sông Trà Bồng), F2 (Trà My), F3 (sông Nước Lẻ), F4 (sông Trà Nô) và F9 (sông Nước Đen) là liên thông với hồ Sông Tranh 2, nhưng trong đó biểu hiện hoạt động động đất chỉ có 4 đứt gãy (từ F1 đến F4). Với 4 đứt gãy này, dựa vào danh mục động đất phân thành 5 vùng nguồn đứt gãy hoạt động có phát sinh động đất kích thích (bảng 1): F1.1 thuộc đứt gãy sông Trà Bồng; F2.1 thuộc đứt gãy

Trà My; F3.1 và F3.2 thuộc đứt gãy sông Nước Lẻ và F4.1 thuộc đứt gãy sông Trà Nô. Giá trị Mmax quan sát trên các đoạn nguồn được thể hiện ở bảng 1, hình dạng đoạn nguồn được thể hiện ở hình 4.

Theo đặc trưng cơ cấu chấn tiêu, G. Lizurek và cs (2017) [8] đã phân vùng động đất kích thích khu vực sông Tranh 2 thành 2 vùng, vùng phía bắc và nam của hồ thủy điện sông Tranh 2 dựa trên danh mục động đất đến năm 2016, cũng tương tự với sự phân chia của T.A. Tuan và cs (2017) [10]. Hai vùng phân chia tương đồng với vùng F1.1 và F3.2 trong nghiên cứu này. Kết quả phân chia trong nghiên cứu này thể hiện rõ tính chi tiết cao hơn, một trong những lý do là nhờ danh mục động đất với độ chi tiết khác nhau, trong kết quả này thì danh mục động đất sử dụng các trận động đất kích thích ghi nhận đến hết tháng 2/2019, bao gồm 1161 trận động đất kích thích với cấp độ mạnh từ M1,5 do Viện Vật lý Địa cầu cung cấp. Đồng thời, sự phân chia dựa trên phân bố của đứt gãy hoạt động cũng giúp nâng cao tính chi tiết của phân nhóm động đất kích thích trong mối tương quan chặt chẽ với các vùng nguồn phát sinh.

Xác định được đứt gãy hoạt động của động đất kích thích (hay nguồn phát sinh động đất kích thích) sẽ giúp nâng cao độ chính xác của bài toán đánh giá độ nguy hiểm động đất (PSHA) không chỉ dừng ở mức đánh giá chung với hệ thống đứt gãy địa chất thuần túy như công bố của [12] tính toán giá trị PSHA cho khu vực trong bán kính 100 km tính từ đập thủy điện sông Tranh 2. Với độ chi tiết của nguồn phát sinh động đất kích thích thì giá trị PSHA sẽ sát với thực tế và nâng cao hiệu quả của cảnh báo tai biến.

5. Kết luận

Các đoạn đứt gãy sâu tiềm ẩn nguy cơ cao về tai biến địa chất, liên thông với hồ Sông Tranh 2 khi tích nước tới cao trình tối đa là nơi phát sinh động đất kích thích. Đó là các đoạn nguồn: F1.1 thuộc đứt gãy sông Trà Bồng; F2.1 thuộc đứt gãy Trà My; F3.1 và F3.2 thuộc đứt gãy sông Nước Lẻ; F4.1 thuộc đứt gãy sông Trà Nô.

Động đất kích thích cấp độ mạnh lớn nhất, $M_{qs,max}=4,7$ xảy ra tại đoạn đứt gãy Trà My bị ngập nước. Chấn tâm của động đất này nằm tại vị trí sâu nhất của hồ Sông Tranh 2 và các động đất có $M \geq 4,0$ đều nằm trong phạm vi ngập nước của hồ chứa.

Có biểu hiện rõ nét sự khác biệt về thời gian xuất hiện động đất giữa các đoạn nguồn khác nhau: sớm nhất ngày 3/9/2012 và chậm nhất ngày 19/10/2012. Về cấp độ mạnh, $M_{qs,max}$ nhỏ nhất (3,6) xảy ra tại đứt gãy sông Trà Nô và lớn nhất (4,7) xảy ra tại đứt gãy Trà My. Bề dày tầng phát sinh động đất cũng có sự khác nhau giữa các đoạn nguồn khác nhau, dao động từ 8 đến 16 km.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] C.D. Trong, T.A. Tuan, C.D. Trieu, et al. (2018), "Demonstration of stimulated earthquake activity at some hydroelectric reservoirs in Vietnam", *Vietnam Journal of Science and Technology - MOST*, **60(6)**, pp.25-31 (in Vietnamese).
- [2] C.D. Trieu (2012), *Assessing the Situation of Earthquake Activity in Song Tranh 2 Area and Proposing Solutions to Prevent and Mitigate Damage*, Summary Report of Vietnam Union of Science and Technology Associations on Critical Consulting Project, 131pp (in Vietnamese).
- [3] L.H. Minh, N.A. Duong, N.H. Phuong (2016), *Research on Seismic and Tectonic Impacts on the Stability of Song Tranh 2 Hydropower Project, Bac Tra My Area, Quang Nam Province*, Comprehensive report on an independent state-level project, 400pp (in Vietnamese).
- [4] C.D. Trieu, C.D. Trong, L.V. Dung, et al. (2014), "Triggered earthquake study in Tranh River No.2 (Vietnam), hydropower reservoir", *Journal Geological Society of India*, **84**, pp.319-325, DOI: 10.1007/s12594-014-0135-x.
- [5] B.V. Duan, H.T. Giang, N.A. Duong, et al. (2015), "Some factors related to the occurrence of earthquakes in the Song Tranh 2 hydropower reservoir area in the period 2011-2014", *Vietnam Journal of Earth Sciences*, **37(3)**, pp.228-240 (in Vietnamese).
- [6] J. Wiszniowski, N.V. Giang, B. Plesiewicz, et al. (2015), "Preliminary results of anthropogenic seismicity monitoring in the region of Song Tranh 2 reservoir, central Vietnam", *Acta Geophysica*, **63**, pp.843-862, DOI: 10.1515/ageo-2015-0021.
- [7] N.V. Giang, J. Wiszniowski, B. Plesiewicz, et al. (2015), "Some characteristics of seismic activity in the Song Tranh 2 reservoir, Quang Nam, Vietnam by local seismic network data", *Earth Sciences*, **4(3)**, pp.101-111, DOI: 10.11648/j.earth.20150403.13.
- [8] G. Lizurek, N.V. Giang, J. Wiszniowski, et al. (2017), "Clustering and stress inversion in the Song Tranh 2 reservoir, Vietnam", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **107(6)**, pp.2636-2648, DOI: 10.1785/0120170042.
- [9] T.A. Tuan, K. Gahalaut, N.P. Rao (2016), "Rapid and delayed earthquake triggering by the Song Tranh 2 reservoir, Vietnam", *Bull Seismol. Soc. Am.*, **106(5)**, pp.2389-2394, DOI: 10.1785/0120160106.
- [10] T.A. Tuan, K. Gahalaut, N.P. Rao, et al. (2017), "Evidence that earthquakes have been triggered by reservoir in the Song Tranh 2 region, Vietnam", *Journal of Seismology*, **21(5)**, pp.1131-1143, DOI: 10.1007/s10950-017-9656-2.
- [11] C.D. Trong, P.N. Hung, D.Q. Van, et al. (2014), "Seismic wave tomography model in Song Tranh 2 hydropower area", *Journal of Geology*, **341-345**, pp.291-298 (in Vietnamese).
- [12] N.H. Phuong, P.T. Truyen, N.T. Nam (2016), "Probabilistic seismic hazard assessment for the Tranh river hydropower plant No2 site, Quang Nam province", *Vietnam Journal of Earth Sciences*, **38(2)**, pp.188-201, DOI: 10.15625/0866-7187/38/2/8601.
- [13] T.T.M. Thanh, N.L. Minh, V.V. Vung, et al. (2014), "Values for peak ground acceleration and peak ground velocity using in seismic hazard assessment for Song Tranh 2 hydropower region", *Vietnam Journal of Earth Sciences*, **36(4)**, pp.462-469, DOI: 10.15625/0866-7187/36/4/6434.
- [14] T.T.M. Thanh, V.V. Vung, H. Miyake, et al. (2015), "Simulating the earthquake on October 22, 2012, M=4.6 in Song Tranh 2 hydropower area", *Vietnam Journal of Earth Sciences*, **37(3)**, pp.241-251 (in Vietnamese).
- [15] N.T. Lu, N.K. Kapustian, G.N. Antonovskaia, et al (2015), "Some results of assessing the stability of Song Tranh 2 hydroelectric dam and its surrounding geological environment using a combination of seismic methods", *Vietnam Journal of Earth Sciences*, **37(2)**, pp.170-177 (in Vietnamese).
- [16] N.H. Cat (1991), *Report on Geological Surveying and Mineral Exploration of The Tam Ky - Hiep Duc Newspaper Group, Scale 1:50,000* (in Vietnamese).
- [17] D.M. Duc, T.M. Lieu, T.Q. Binh, et al (2020), *Research on Forecasting the Risk of Slope Landslides Along Key Traffic Routes in Mountainous Areas of Quang Nam Province and Propose Solutions to Respond*, Summary report of a high-level independent project nation (in Vietnamese).
- [18] N.T. Nguyen (2003), *Earthquake Hazard Assessment in Song Tranh 2 Hydropower Project Area*, Institute of Geophysics (in Vietnamese).
- [19] C.D. Trieu, P.H. Long, D.V. Linh, et al. (2013), *Modern Geodynamics of Vietnam's Territory*, Publishing House for Science and Technology, Vietnam, 205pp (in Vietnamese).
- [20] C.D. Trieu, P.H. Long, D.V. Canh, et al. (2019), *Tectonic Deformation in the East Sea of Vietnam and Adjacent Areas During the Cenozoic*, Publishing House for Science and Technology, Vietnam, 308pp (in Vietnamese).
- [21] D.T. Cao (2000), *Gravity and Gravity Exploration Methods*, Science and Technics Publishing House, 294pp (in Vietnamese).
- [22] K.T. Van, H.V. Vuong, D.D. Thanh, et al. (2018), "Improving a maximum horizontal gradient algorithm to determine geological body boundaries and fault systems based on gravity data", *Journal of Applied Geophysics*, **152**, pp.161-166, DOI: 10.1016/j.jappgeo.2018.03.023.
- [23] W.R. Roest, J. Verhoef, M. Pilkington (1992), "Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal", *Geophysics*, **57(1)**, pp.116-125, DOI: 10.1190/1.1443174.
- [24] C. Wijns, C. Perez, P. Kowalczyk (2005), "Theta map: Edge detection in magnetic data", *Geophysics*, **70(4)**, pp.39-43, DOI: 10.1190/1.1988184.
- [25] W.N. Zhou, X.J. Du, J.Y. Li (2013), "The limitation of curvature gravity gradient tensor for edge detection and a method for overcoming it", *Journal of Applied Geophysics*, **98**, pp.237-242, DOI: 10.1016/j.jappgeo.2013.09.008.
- [26] G.Q. Ma, C. Liu, D.N. Huang (2015), "The removal of additional edges in the edge detection of potential field data", *Journal of Applied Geophysics*, **114**, pp.168-173, DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.01.007.
- [27] J. Wang, X.H. Meng, F.Li (2015), "Improved curvature gravity gradient tensor with principal component analysis and its application in edge detection of gravity data", *Journal of Applied Geophysics*, **118**, pp.106-114, DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.04.013.
- [28] Y. Yuan, Q.L. Yu (2015), "Edge detection in potential-field gradient tensor data by use of improved horizontal analytical signal methods", *Pure and Applied Geophysics*, **172**, pp.461-472, DOI: 10.1007/s00024-014-0880-1.
- [29] C. An-Guo, Z. Tao-Fa, L. Dong-Jia, et al. (2017), "Application of an enhanced Theta-based filter for potential field edge detection: A case study of the Luzong ore district", *Chinese Journal of Geophysics*, **60(2)**, pp.203-218, DOI: 10.1002/cjg2.30039.
- [30] C.D. Trieu, N.D. Vinh (2012), "Fault segmentation in assessing maximum earthquakes in Vietnam", *Journal of Geology*, **331-332**, pp.59-68 (in Vietnamese).
- [31] F. Shahzad, R. Gloaguen (2011), "TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 1: Drainage network preprocessing and stream profile analysis", *Computers & Geosciences*, **37(2)**, pp.250-260, DOI: 10.1016/j.cageo.2010.06.008.
- [32] R. Gloaguen, P.R. Marpu, I. Niemeier (2007), "Automatic extraction of faults and fractal analysis from remote sensing data", *Nonlinear Processes in Geophysics*, **14(2)**, pp.131-138, DOI: 10.5194/npg-14-131-2007.
- [33] T.L. Saaty (1980), *The Analytical Hierarchy Process*, McGraw-Hill, 287pp.
- [34] T.L. Saaty, L.G. Vargas (1994), *Decision Making in Economic, Political, Social, and Technological Environments with the Analytic Hierarchy Process*, RWS Publications, 330pp.
- [35] T.L. Saaty (1995), *Decisions Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*, RWS Publications, 315pp.
- [36] Federation of Geophysics (1995), *Anomaly Map From Aircraft, Ata Component, Quang Nam - Da Nang Area* (in Vietnamese).
- [37] Federation of Geophysics (2011), *Ground Bouguer Gravity Anomaly Map (Agb), Quang Nam - Da Nang Area* (in Vietnamese).
- [38] H.K. Gupta (1992), *Reservoir Induced Earthquakes*, Elsevier, 382pp.
- [39] H.K. Gupta (2012), *Reservoir Triggered Seismicity and Earthquake Recurrence at Koyna, India*, General Assembly of Asian Seismological Commission, pp.10-12.
- [40] L.T.T. Hoai, N.V. Vuong (2014), "Fault and fault characteristics in relation to earthquake-triggered reservoirs in Song Tranh 2 hydropower planning, Bac Tra My district, Quang Nam province", *VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology*, **30**, pp.21-32 (in Vietnamese).
- [41] V.C. Nguyen (2016), *Research and Detailed Assessment of The Characteristics of The Geological - Tectonic Region and Their Impact on The Stability of STR2 Hydroelectric Projects in Bac My District, Quang Nam Province*, Institute Earth Physics (in Vietnamese).