



Đánh giá mức độ ảnh hưởng của các yếu tố địa hình đến hiện tượng trượt lở tại khu vực Quảng Ninh - Lệ Thủy, tỉnh Quảng Trị

Đào Minh Nhật^a, Phan Thị Mai Hoa^b, Nguyễn Quốc Phi^{b*}

^aLiên đoàn Địa chất Tây Bắc, Cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam

^bKhoa Môi trường, Trường Đại học Mỏ-Địa chất, Việt Nam

***Tác giả liên hệ:**

Họ và tên: Nguyễn Quốc Phi

Điện thoại: (+84) 123-456-789

Email: nguyenquocphi@humg.edu.vn

Tóm tắt

Trượt lở đất là một trong những thiên tai nghiêm trọng thường xuyên gây thiệt hại tại các khu vực miền núi tỉnh Quảng Trị. Nghiên cứu này tập trung đánh giá định lượng mức độ ảnh hưởng của tám yếu tố địa hình chủ đạo gồm: độ dốc (slope), hướng dốc (aspect), độ cao (elevation), chỉ số cân bằng khối (MBI), chỉ số ẩm địa hình (TWI), chỉ số sức mạnh dòng chảy (SPI), chỉ số vận chuyển trầm tích (STI) và chỉ số gồ ghề địa hình (TRI) đối với sự phát sinh trượt lở tại hai huyện Quảng Ninh và Lệ Thủy. Trên cơ sở phân tích không gian kết hợp tổng hợp dữ liệu thực địa, kết quả cho thấy độ dốc là yếu tố chi phối mạnh nhất, tiếp theo là nhóm chỉ số phản ánh động lực dòng chảy và điều kiện ẩm (SPI, TWI). Trong khi đó, các yếu tố như hướng dốc và những chỉ số phản ánh đặc trưng hình thái chi tiết có vai trò thứ yếu hơn trong quy mô phân tích toàn vùng. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn bộ biến đầu vào ưu tiên khi xây dựng bản đồ nhạy cảm trượt lở, đồng thời hỗ trợ đề xuất giải pháp phòng ngừa và giảm thiểu rủi ro phù hợp với điều kiện địa hình đặc thù của địa phương.

Từ khóa: *trượt lở đất; yếu tố địa hình; độ dốc; chỉ số ẩm địa hình (TWI); chỉ số sức mạnh dòng chảy (SPI).*



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trượt lở đất được hiểu là quá trình dịch chuyển khối đất đá xuống sườn dốc dưới tác động của trọng lực, thường xảy ra khi trạng thái cân bằng cơ học của sườn bị phá vỡ bởi các yếu tố kích hoạt như mưa lớn kéo dài, động đất, hoặc can thiệp nhân sinh (Petley, 2012; Wang et al., 2023). Ở Việt Nam, trượt lở đất xuất hiện phổ biến tại những vùng núi có địa hình chia cắt mạnh, độ dốc lớn, tầng phong hóa phát triển và chế độ mưa tập trung theo mùa, từ đó gây thiệt hại đáng kể về người, tài sản và hạ tầng giao thông (Tran et al., 2016; Tran et al., 2025).

Trong bối cảnh đó, khu vực Quảng Ninh và Lệ Thủy của tỉnh Quảng Trị là không gian điển hình cho dạng địa hình chuyển tiếp từ vùng núi cao dãy Trường Sơn xuống đồng bằng ven biển hẹp, đồng thời chịu tác động trực tiếp của bão, mưa lớn và lũ lụt. Đây là một trong những khu vực ghi nhận nhiều điểm trượt lở, đặc biệt trong các đợt mưa lũ cực đoan, tiêu biểu là sự kiện tháng 10 năm 2020 (Luu et al., 2020). Từ góc nhìn địa mạo - thủy văn, các yếu tố địa hình được xem là nhóm nhân tố điều kiện nền (control factors) quyết định tiềm năng phát sinh và mức độ nhạy cảm trượt lở của một khu vực (Reichenbach et al., 2018). Các yếu tố

này chi phối sự phân bố năng lượng địa hình, quy luật hội tụ - phân kỳ dòng chảy mặt và quá trình tích nước/bão hòa trong đất; đây là những cơ chế then chốt liên quan trực tiếp đến sự suy giảm sức chống cắt và mất ổn định mái dốc (Saito et al., 2009; Rahmati et al., 2019). Tuy nhiên, vai trò và mức độ đóng góp của từng chỉ tiêu địa hình cụ thể, chẳng hạn độ dốc, hướng dốc, hay các chỉ số phái sinh như TWI và SPI, chúng không phải là bất biến mà phụ thuộc mạnh vào điều kiện địa chất, khí hậu, thảm phủ và cả quy mô phân tích của từng nghiên cứu (Lee & Pradhan, 2007; Crawford et al., 2021).

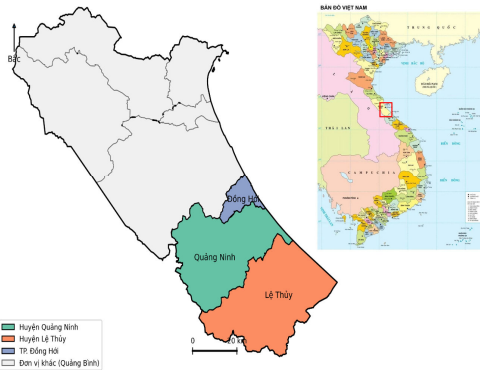
Vì vậy, việc đánh giá định lượng mức độ ảnh hưởng của các yếu tố địa hình tại một khu vực cụ thể như Quảng Ninh - Lệ Thủy là cần thiết nhằm xác định những nhân tố then chốt có ý nghĩa kiểm soát, từ đó cung cấp cơ sở cho khoanh vùng cảnh báo nguy cơ và đề xuất giải pháp quản lý rủi ro thiên tai hiệu quả tại địa phương.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Khu vực nghiên cứu

Khu vực nghiên cứu bao gồm hai huyện Quảng Ninh và Lệ Thủy (tỉnh Quảng Trị) với tổng diện tích khoảng 2.706 km² (hình 1). Địa hình phân hóa rõ rệt theo hướng

tây-đông: phía tây là vùng núi cao thuộc dãy Trường Sơn, địa hình chia cắt mạnh và nhiều khu vực có độ dốc lớn ($>25^\circ$), trong khi phía đông là vùng đồng bằng ven biển thấp. Khí hậu mang tính nhiệt đới gió mùa, lượng mưa trung bình năm khoảng 2.000-2.500 mm và tập trung chủ yếu vào các tháng 9-11, trùng với thời kỳ bão lũ. Về địa chất, khu vực đồi núi chủ yếu là đá granit và đá biến chất bị phong hóa mạnh, hình thành lớp vỏ phong hóa dày, một điều kiện thuận lợi cho quá trình trượt lở phát triển khi gặp mưa lớn kéo dài và bão hòa nước.

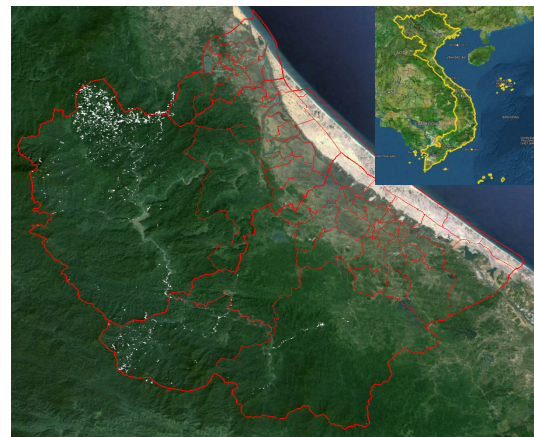


Hình 1: Khu vực nghiên cứu

2.2. Dữ liệu

Nghiên cứu sử dụng ba nhóm dữ liệu chính. Thứ nhất là bản đồ hiện trạng trượt lở được xây dựng từ khảo sát thực địa, giải đoán ảnh viễn thám và trong các đề án nghiên cứu trước, trong đó ghi nhận khoảng 2.200 điểm trượt lở trong khoảng

15 năm trở lại đây (hình 2). Thứ hai là mô hình số độ cao (DEM) độ phân giải 10m làm nền tảng để trích xuất địa hình và tính toán các chỉ số phái sinh. Thứ ba là bộ tám yếu tố địa hình được trích xuất từ DEM gồm: độ dốc, hướng dốc, độ cao, MBI, TWI, SPI, STI và TRI.



Hình 2: Các điểm giải đoán trượt lở

2.3. Trích xuất và ý nghĩa các tham số địa hình

Từ DEM, các tham số hình học cơ bản gồm độ dốc, hướng dốc và độ cao được tính trực tiếp bằng các phép toán vi phân không gian. Các chỉ số địa mạo và thủy văn được tính dựa trên tích lũy dòng chảy (flow accumulation), độ dốc và một số phép biến đổi khác. Trong đó, TWI (Topographic Wetness Index) là chỉ số mô tả xu hướng tích ẩm của địa hình, thường được xác định theo công thức:

$$TWI = \ln \left(\frac{a}{\tan \beta} \right) \quad (1)$$



Trong đó A_s là diện tích đóng góp theo đơn vị chiều dài đường đồng mức (specific catchment area) và β là góc dốc (slope angle). Chỉ số này phản ánh mức độ hội tụ dòng chảy và khả năng bão hòa nước của đất; giá trị TWI cao thường liên quan đến khu vực lũng, chân sườn, nơi dễ tích nước và tăng áp lực nước lỗ rỗng, làm suy giảm sức chống cắt và kích hoạt trượt lở (Rahmati et al., 2019; Saito et al., 2009).

SPI (Stream Power Index) phản ánh “sức mạnh” hay năng lượng xói mòn của dòng chảy bề mặt, thường được biểu diễn dưới dạng:

$$SPI = A_s \cdot \tan \beta \quad (2)$$

Trong đó A_s là diện tích đóng góp dòng chảy (thường lấy từ flow accumulation) và β là góc dốc. SPI cao hàm ý dòng chảy có năng lượng lớn, làm tăng nguy cơ xói lở và khoét chân dốc, từ đó làm mất ổn định mái dốc (Pradhan & Youssef, 2010).

STI (Sediment Transport Index) được xem là chỉ số tiềm năng vận chuyển trầm tích liên quan đến cơ chế xói mòn và tái phân bố vật liệu trên sườn dốc. Chỉ số này thường được suy ra từ kết hợp tích lũy dòng chảy và độ dốc theo các dạng hàm mũ (tùy thuật toán GIS cụ thể), nhằm phản ánh

khả năng vận chuyển trầm tích trong điều kiện dòng chảy tập trung, thường được biểu diễn dưới dạng:

$$STI = \left(\frac{A_s}{22.13}\right)^{0.6} \times \left(\frac{\sin \beta}{0.0896}\right)^{1.3} \quad (3)$$

TRI (Terrain Ruggedness Index) là chỉ số biểu thị mức độ gồ ghề của địa hình, thường tính dựa trên chênh lệch độ cao giữa một ô lưới với các ô lân cận; TRI càng cao thể hiện địa hình càng phân cắt, nhiều vách dốc và biến đổi độ cao mạnh theo không gian, những điều kiện dễ đi kèm trạng thái bất ổn (Reichenbach et al., 2018). Ngoài ra, MBI (Mass Balance Index) được sử dụng nhằm phản ánh xu thế cân bằng vật chất địa hình, hỗ trợ nhận dạng các khu vực có xu hướng bóc mòn hay tích tụ vật liệu theo hình thể địa mạo; đây là chỉ số có ý nghĩa hỗ trợ trong giải thích bối cảnh địa mạo liên quan trượt lở.

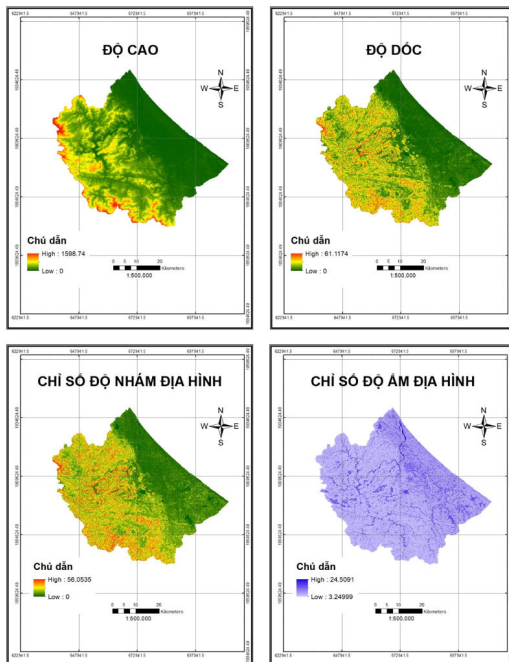
2.4. Chuẩn hóa và tích hợp dữ liệu

Sau khi tính toán xong các lớp bản đồ (độ dốc, hướng dốc, TRI, TWI, MBI, SPI, STI) ở độ phân giải gốc 10m, toàn bộ raster này được tái mẫu về độ phân giải 30m để thống nhất với các lớp dữ liệu khác. Phương pháp nội suy song tuyến (bilinear) được áp dụng cho các bản đồ liên tục (như độ dốc, TWI) nhằm giữ sự mượt mà dữ liệu; phương pháp láng giềng gần (nearest neighbor)

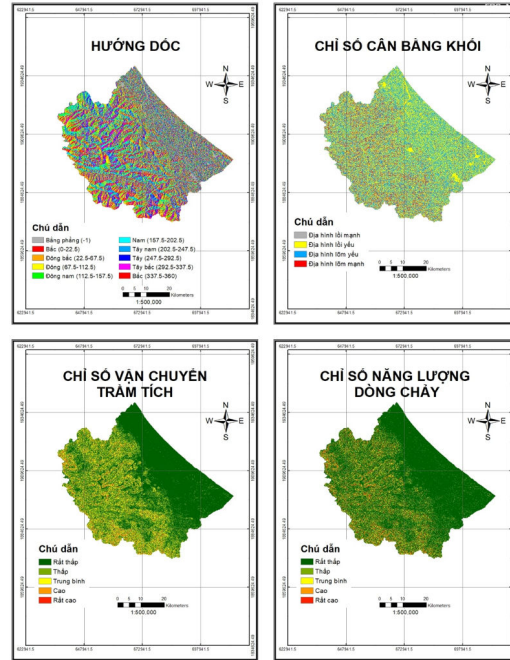
được dùng cho dữ liệu phân loại (hướng dốc) nhằm bảo toàn giá trị phân lớp. Các raster kết quả cuối cùng được căn chỉnh lưới (grid) phù hợp. Kết quả là một bộ dữ liệu địa hình đa lớp sẵn sàng để chồng xếp với các nhóm dữ liệu khác phục vụ phân tích trượt lở. Các bước xử lý trên sử dụng kết hợp phần mềm ArcGIS và SAGGIS để tận dụng ưu thế của từng công cụ trong thao tác địa hình số.

3. KẾT QUẢ

Nhóm bản đồ địa hình gồm tám lớp raster Độ cao, Độ dốc, Hướng dốc, TRI, TWI, MBI, SPI, STI đã được xây dựng (hình 3 và 4).



Hình 3: Bản đồ các chỉ số độ cao, độ dốc, TRI và TWI



Hình 4: Bản đồ các chỉ số hướng dốc, MBI, STI, SPI

Bản đồ độ cao cho thấy địa hình khu vực nghiên cứu phân hóa rất rõ theo hướng tây sang đông. Vùng phía tây và tây nam nổi bật với các khối núi cao, địa hình bị chia cắt mạnh, trong khi phía đông chủ yếu là địa hình thấp và tương đối bằng phẳng. Sự chuyển tiếp cao độ từ miền núi xuống đồng bằng diễn ra liên tục và hợp lý, qua đó cho thấy DEM 10m nội suy từ đường đồng mức đã tái hiện được xu thế địa hình chung của lưu vực. Lớp độ cao vì vậy đóng vai trò nền tảng, bởi toàn bộ các chỉ số địa hình còn lại đều được dẫn xuất trực tiếp từ DEM. Tuy nhiên, để tăng độ tin cậy khi sử dụng cho phân tích trượt lở, cần kiểm soát



chất lượng DEM thông qua rà soát sai số số hóa và xử lý các hố trũng giả, cũng như loại bỏ các điểm bất thường có thể gây nhiễu trong các lớp dẫn xuất.

Trên cơ sở DEM, bản đồ độ dốc phản ánh khá chi tiết cấu trúc sườn dốc của khu vực. Các dải độ dốc lớn tập trung ở miền núi phía tây, khu vực trung tâm và ven rìa các thung lũng sâu, thể hiện những không gian có tiềm năng mất ổn định mái dốc cao khi gặp tác nhân kích hoạt như mưa cực đoan hoặc hoạt động cắt xẻ taluy. Ngược lại, phần đồng bằng và các đồi thoải phía đông có độ dốc nhỏ hơn, tương ứng mức nguy cơ trượt lở thấp. Độ phân giải 10m giúp làm rõ cả các sườn hẹp và biến thiên địa hình ở quy mô nhỏ, phù hợp với mục tiêu đánh giá nguy cơ theo lưu vực. Dù vậy, do độ dốc là đại lượng nhảy, sai số nhỏ của DEM có thể bị khuếch đại khi tính độ dốc, đặc biệt ở ranh giới ô lưới hoặc vùng nội suy kém, vì vậy cần thận trọng khi chồng ghép với các lớp khác và khi diễn giải kết quả.

Bản đồ hướng dốc cho thấy sự đa dạng rõ rệt về hướng phơi sườn trên toàn bộ khu vực, phản ánh tính phức tạp của hệ thống núi và thung lũng. Các hướng bắc, đông bắc, đông, đông nam, nam, tây nam, tây và tây bắc xen kẽ nhau theo cấu trúc địa mạo

địa phương. Thông tin hướng phơi có ý nghĩa khi xem xét vi khí hậu, chế độ bức xạ, khả năng giữ ẩm và sự phát triển thảm thực vật trên sườn dốc. Khi đặt cạnh các lớp mưa và lớp phủ, hướng dốc hỗ trợ giải thích vì sao những sườn có điều kiện địa chất tương tự nhưng khác hướng phơi lại có mức độ phong hóa và trạng thái ổn định khác nhau. Đồng thời, bản đồ cũng cho thấy diện tích bề mặt gần như phẳng không lớn, phù hợp đặc trưng núi thấp xen đồi của Quảng Ninh và Lệ Thủy.

Chỉ số cân bằng khối MBI làm nổi bật sự đối lập giữa các khu vực địa hình lồi và lõm, từ đó gợi ý xu thế bóc mòn hay tích tụ vật chất theo không gian. Miền núi phía tây và phía nam xuất hiện dày các miền lồi và lõm mạnh, trùng với nơi địa hình bị chia cắt sâu bởi mạng lưới sông suối và các thung lũng hẹp. Đây thường là các không gian nhạy cảm với quá trình xói mòn bề mặt và bào mòn chân sườn, làm mất cân bằng vật chất và tạo điều kiện thuận lợi cho phát sinh trượt lở. Trái lại, vùng đồng bằng và đồi thấp phía đông chủ yếu biểu hiện các trạng thái lồi, lõm yếu hơn, hàm ý bề mặt tương đối ổn định về mặt cân bằng vật liệu. Nhờ đó, MBI trở thành lớp chỉ thị hữu ích để định hướng nhận diện vùng nguồn cung vật liệu trượt và vùng tích tụ ở chân



sườn hoặc lòng thung lũng, góp phần giải thích cơ chế tiến hóa tại biển trong lưu vực. Bản đồ SPI thể hiện rõ các dải tập trung năng lượng dòng chảy cao, thường phân bố dọc theo các thung lũng chính, lòng suối và các sườn có độ dốc lớn. Những khu vực có SPI cao cho thấy dòng chảy mặt có khả năng xói mòn mạnh, dễ khoét chân sườn và làm suy yếu kết cấu ổn định của mái dốc lân cận, qua đó làm tăng xác suất trượt lở, đặc biệt ở nơi taluy hoặc chân sườn bị tác động bởi dòng chảy tập trung. Ở phía đông bắc, do địa hình thấp và ít chia cắt, SPI nhìn chung nhỏ, phản ánh điều kiện xói mòn sâu hạn chế hơn. Sự đồng biến về mặt không gian giữa SPI lớn và các vùng dốc cao cũng cho thấy quy trình tính toán từ DEM đã tái hiện đúng mối quan hệ cơ bản giữa địa hình và động lực dòng chảy. Lớp SPI vì vậy rất hữu ích khi đối chiếu với các điểm trượt lở để đánh giá vai trò của xói lở chân sườn trong cơ chế phát sinh tai biến. Các vùng có STI cao tập trung ở miền núi phía tây và dọc những dải sườn bị chia cắt mạnh, hàm ý khả năng vừa cung cấp vật liệu từ sườn dốc, vừa vận chuyển chúng theo rãnh xói xuống vùng thấp. Trong khi đó, khu vực đồng bằng phía đông thường có STI thấp hơn, gợi ý vai trò chủ đạo là vùng tiếp nhận và tích tụ vật liệu. Khi đối

chiếu với mạng lưới sông suối và phân bố điểm trượt, nhiều vị trí trượt lở có xu hướng xuất hiện trong hoặc gần các dải STI cao, cho thấy quá trình rửa trôi mạnh và vận chuyển vật liệu có thể góp phần duy trì và mở rộng phạm vi ảnh hưởng của trượt lở, đặc biệt trong các kịch bản mưa cực đoan tạo lũ bùn đá. Do vậy, STI có giá trị thực tiễn trong nhận diện các hành lang vận chuyển vật liệu nguy hiểm theo không gian lưu vực.

Vùng TRI cao tập trung ở vùng núi và đồi cao phía tây và nam, nơi bề mặt địa hình phức tạp, nhiều gò, mòm, vách và rìa sườn. Những đặc điểm này thường đi kèm điều kiện thuận lợi cho hình thành khe nứt, mặt trượt cũ hoặc bậc địa hình, làm tăng tính dễ bị tổn thương của khối đất đá. Ngược lại, vùng đồng bằng và đồi thấp phía đông có TRI thấp, phản ánh bề mặt tương đối phẳng hoặc lượn sóng nhẹ. Đáng chú ý, có những khu vực độ dốc chỉ trung bình nhưng TRI lại cao do địa hình biến thiên mạnh ở quy mô nhỏ, đây là nhóm vị trí cần được ưu tiên xem xét vì vẫn có thể tiềm ẩn nguy cơ trượt lở theo cơ chế cục bộ.

Bản đồ TWI nhấn mạnh các vùng có xu thế tích tụ ẩm cao, chủ yếu dọc lòng thung lũng, sườn thấp và các vị trí trũng nơi dòng chảy dễ hội tụ. Những khu vực có TWI lớn



thường có khả năng bão hòa nước kéo dài hơn sau mưa, làm tăng áp lực nước lỗ rỗng và giảm sức kháng cắt của đất, nhất là khi vật liệu phong hóa dày hoặc bờ rời. Trong bối cảnh mưa cực đoan, điều kiện bão hòa này là cơ chế quan trọng dẫn đến trượt đất nông và sụt trượt dọc sườn. Ngược lại, các đỉnh núi và sườn cao thường có TWI thấp, nước khó lưu giữ và chủ yếu thoát nhanh, nên nguy cơ bão hòa thấp hơn. Vì vậy, TWI là lớp thông tin then chốt để diễn giải vai trò của trạng thái ẩm và phân bố nước đối với sự tập trung không gian của trượt lở, đặc biệt khi được liên hệ với dữ liệu mưa và vị trí trượt quan sát.

Khi xem xét tổng hợp các lớp bản đồ, có thể nhận thấy quy luật không gian khá nhất quán. Miền núi phía tây là nơi đồng thời xuất hiện nhiều điều kiện bất lợi, bao gồm độ dốc lớn, TRI cao, các dải SPI và STI mạnh theo thung lũng, cùng với TWI biến thiên cao ở các vùng hội tụ dòng chảy. Sự cộng hưởng của các chỉ số này tạo thành các vùng tổ hợp rủi ro, nơi khả năng phát sinh trượt lở được dự báo cao hơn so với phần còn lại của lưu vực. Trái lại, khu vực đồng bằng phía đông đặc trưng bởi cao độ thấp, độ dốc nhỏ, TRI thấp và SPI, STI hạn chế, nên nhìn chung ít thuận lợi cho trượt lở hơn. Nhận định này phù hợp logic địa

mạo của vùng chuyển tiếp núi, đồng bằng và có giá trị thực tiễn cho việc ưu tiên khoanh vùng cảnh báo và bố trí khảo sát chi tiết trong các bước đánh giá nguy cơ tiếp theo.

4. THẢO LUẬN

Trên cơ sở phân bố không gian, cơ chế tác động và đối chiếu các nghiên cứu trước, có thể xếp hạng mức độ ảnh hưởng của tám yếu tố địa hình tại khu vực Quảng Ninh-Lệ Thủy thành ba nhóm chính. Nhóm ảnh hưởng hàng đầu là độ dốc, đóng vai trò điều kiện kiểm soát cơ bản và có tính quyết định đối với tiềm năng trượt lở. Kết quả này nhất quán với nhiều nghiên cứu quốc tế và khu vực, trong đó độ dốc thường là biến có sức giải thích cao nhất trong bản đồ nhạy cảm trượt lở (Ohlmacher, 2003; Ghasemian et al., 2022).

Nhóm ảnh hưởng mức cao gồm SPI và TWI, phản ánh trực tiếp các cơ chế kích hoạt quan trọng trong điều kiện khí hậu mưa lớn tập trung ở Quảng Trị. SPI thể hiện nguy cơ xói lở và khoét chân dốc bởi dòng chảy mặt là một nguyên nhân trực tiếp có thể làm sườn mất ổn định. TWI lại phản ánh xu thế bão hòa nước và gia tăng áp lực nước lỗ rỗng, làm giảm sức chống cắt của vật liệu phong hóa. Việc SPI đôi khi thể hiện vai trò nổi bật hơn TWI trong



một số phân tích có thể cho thấy động lực dòng chảy mặt mạnh và xói lở chân dốc là cơ chế chủ đạo tại một số tiểu khu vực.

Nhóm ảnh hưởng mức trung bình gồm độ cao và TRI, trong đó độ cao liên quan gián tiếp tới phân bố vật liệu phong hóa và mức độ can thiệp của con người, còn TRI phản ánh độ phức tạp địa hình và mức độ phân cắt là những điều kiện làm tăng khả năng tồn tại các mặt trượt tiềm năng. Nhóm ảnh hưởng mức thấp gồm MBI, STI, các thông số độ cong và hướng dốc. Những yếu tố này vẫn có giá trị trong nhận diện vị trí cụ thể và giải thích cơ chế tại điểm, nhưng tầm ảnh hưởng tổng thể thấp hơn so với các nhóm trên. Một phần tác động của chúng có thể đã được phản ánh gián tiếp thông qua các chỉ số tích hợp như SPI và TWI.

Xét về ý nghĩa thực tiễn, kết quả xếp hạng cho thấy cần ưu tiên nhóm biến độ dốc, SPI, TWI khi xây dựng bản đồ nhạy cảm trượt lở cho Quảng Ninh-Lệ Thủy. Điều này cho phép tập trung nguồn lực vào thu thập dữ liệu chất lượng cao cho các biến quan trọng nhất, giảm nhiều và tăng hiệu quả mô hình. Đồng thời, các giải pháp quy hoạch và công trình cần tránh hoặc có xử lý kỹ thuật đặc biệt tại các sườn dốc lớn, nơi hội tụ dòng chảy mạnh (SPI cao) và có xu

thế tích ẩm/bão hòa lớn (TWI cao).

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đánh giá được vai trò và mức độ ảnh hưởng khác nhau của tám yếu tố địa hình đối với hiện tượng trượt lở tại khu vực Quảng Ninh-Lệ Thủy (Quảng Trị). Độ dốc được khẳng định là yếu tố kiểm soát chính và có ảnh hưởng mạnh nhất đến sự phát sinh trượt lở. Nhóm chỉ số phản ánh động lực dòng chảy mặt (SPI) và khả năng tích ẩm (TWI) cũng đóng vai trò rất quan trọng với tư cách là các nhân tố thúc đẩy và kích hoạt trong điều kiện mưa lớn tập trung. Độ cao và TRI có ảnh hưởng ở mức trung bình, trong khi hướng dốc, MBI, STI và nhóm thông số hình thái chi tiết khác có ảnh hưởng thứ yếu trong quy mô đánh giá toàn vùng.

Từ các phát hiện này, nghiên cứu đề xuất rằng công tác phòng chống và giảm thiểu rủi ro trượt lở tại địa phương cần ưu tiên: khoanh vùng chi tiết các khu vực có độ dốc lớn ($>25^\circ$), đặc biệt tại nơi có SPI và TWI cao; tăng cường giải pháp thoát nước bề mặt và gia cố chân taluy ở các vị trí xung yếu; hạn chế xây dựng công trình hoặc hoạt động làm tăng tải trọng và phá vỡ cấu trúc sườn dốc trong các vùng nhạy cảm; đồng thời tiếp tục nghiên cứu tích hợp tương tác giữa các yếu tố địa hình với các nhân tố



khác như mưa thực đo, lớp phủ thực vật và cấu trúc đứt gãy để hoàn thiện bức tranh đánh giá nguy cơ toàn diện hơn.

Tài liệu tham khảo

1. Crawford M. M., Dortch J. M., Koch H. J., Killen A. A., Zhu J., Zhu Y., Bryson L. S. and Haneberg W. C., 2021. Using landslide-inventory mapping for a combined bagged-trees and logistic-regression approach to determining landslide susceptibility in eastern Kentucky, USA. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 54(4), qjeh2020-177.
2. Ghasemian B., Shahabi H., Shirzadi A. et al., 2022. A robust deep-learning model for landslide susceptibility mapping: a case study of Kurdistan Province, Iran. *Sensors* 22(4), 1573.
3. Lee S. and Pradhan B., 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides* 4(1), 33-41.
4. Luu C., Tran H. X., Pham B. T. et al., 2020. Framework of spatial flood risk assessment for a case study in Quang Binh Province, Vietnam. *Sustainability* 12(7), 3058.
5. Ohlmacher G. C., 2003. The relationship between topography and landslide hazards in the vicinity of Manhattan, Kansas. *Geological Society of America Abstracts with Programs* 35(6), 587.
6. Petley D. N., 2012. Global patterns of loss of life from landslides. *Geology* 40(10), 927-930.
7. Pradhan B. and Youssef A. M., 2010. Manifestation of remote sensing data and GIS on landslide hazard analysis using spatial-based statistical models. *Arabian Journal of Geosciences* 3(3), 319-326.
8. Rahmati O., Kornejady A., Samadi M. et al., 2019. PMT: New analytical framework for automated evaluation of geo-environmental modelling approaches. *Science of the Total Environment* 664, 296-311.
9. Reichenbach P., Rossi M., Malamud B. D., Mihir M. and Guzzetti F., 2018. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews* 180, 60-91.
10. Saito H., Nakayama D. and Matsuyama H., 2009. Comparison of landslide susceptibility based on a decision-tree model and actual landslide occurrence: the Akaishi Mountains, Japan. *Geomorphology* 109(3-4),



108-121.

11. Tran Manh Cuong, Tran Anh Phuong, Nguyen Anh Duc, Tran Van Tu, Tran Bao Chung, 2025. Application of the random forest machine learning model in developing landslide susceptibility maps in Lao Cai province. *Journal of Environment*, Special Issue III/2025, 38–47.
12. Tran Van Tu, Dao Minh Duc, Nguyen Manh Tung and Van Duy Cong, 2016. Preliminary assessments of debris flow hazard in relation to geological environment changes in mountainous regions, North Vietnam. Vietnam Journal of Earth Sciences 38(3), 277-286.
13. Wang X., Wang Y., Lin Q. and Yang X., 2023. Assessing global landslide casualty risk under moderate climate change based on multiple GCM projections. *International Journal of Disaster Risk Science* 14(5), 751-767.

Ngày nộp: 13/7/2025

Ngày chấp nhận đăng: 22/12/2025