TÍCH HỢP MÔ HÌNH CÔNG CỤ ĐÁNH GIÁ ĐẤT VÀ NƯỚC (SWAT) VÀ HỆ THỐNG THÔNG TIN ĐỊA LÝ (GIS) MÔ PHỎNG XÓI MÒN ĐẤT VÀ VẬN CHUYỂN BÙN CÁT LƯU VỰC SÔNG CHỢ CHU

Nguyễn Ngọc Anh*, Hoàng Nhật Ánh, Nguyễn Lan Hương, Chu Văn Trung, Nguyễn Huy Trung, Nguyễn Đức Nhuận

Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Thái Nguyên

*Tác giả liên hệ: nguyenngocanh@tuaf.edu.vn

Nhận bài: 15/07/2025 *Hoàn thành phản biện:* 17/09/2025 *Chấp nhận bài*: 23/09/2025

TÓM TẮT

Nghiên cứu ứng dụng mô hình SWAT (Soil and Water Assessment Tool) tích hợp GIS (Geographic Information System) nhằm mô phỏng và đánh giá quá trình xói mòn đất và vận chuyển bùn cát tại lưu vực sông Chợ Chu (Thái Nguyên) trong giai đoạn 1990 - 2020. Dữ liệu đầu vào bao gồm DEM, bản đồ thổ nhưỡng, sử dụng đất và chuỗi khí tượng - thủy văn được chuẩn hóa và xử lý không gian. Mô hình chia lưu vực thành 26 tiểu lưu vực và 273 đơn vị HRU. Kết quả cho thấy lượng đất bị xói mòn trung bình toàn lưu vực là 76.710,97 tấn/năm tương đương 1,83 tấn/ha/năm. Xói mòn phân bố không đều giữa các tiểu lưu vực, trong đó tiểu lưu vực 25 có mức cao nhất là 9.716,64 tấn/năm (2,35 tấn/ha/năm), tiểu lưu vực 16 thấp nhất là 3,61 tấn/năm (0,20 tấn/ha/năm). Tổng lượng bùn cát vận chuyển tại đầu ra của lưu vực trung bình là 36.218 tấn/năm, tập trung chủ yếu vào mùa mưa, với đỉnh điểm tháng 7/2001 lên tới 30.390 tấn/tháng và thấp nhất vào mùa khô như tháng 2/1999 là 1,11 tấn/tháng. Kết quả khẳng định hiệu quả của mô hình SWAT trong định lượng quá trình xói mòn và vận chuyển trầm tích tại vùng trung du miền núi, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho quy hoạch sử dụng đất, bảo vệ đất – nước và xây dựng chiến lược giảm thiểu rủi ro môi trường bền vững.

Từ khóa: Dữ liệu, Hệ thống thông tin, Tiểu lưu vực, Xói mòn đất, Vận chuyển bùn cát

INTEGRATION OF THE SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL) MODEL AND GIS (GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM) FOR SIMULATING SOIL EROSION AND SEDIMENT TRANSPORT IN THE CHO CHU RIVER BASIN

Nguyen Ngoc Anh*, Hoang Nhat Anh, Nguyen Lan Huong, Chu Van Trung, Nguyen Huy Trung, Nguyen Duc Nhuan

University of Agriculture and Forestry, Thai Nguyen University

*Corresponding author: nguyenngocanh@tuaf.edu.vn

Received: 15/07/2025 *Revised:* 17/09/2025 *Accepted*: 23/09/2025

ABSTRACT

This study applied the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model integrated with GIS (Geographic Information Systems) to simulate and assess soil erosion and sediment transport processes in the Cho Chu River Basin (Thai Nguyen) for the period 1990 - 2020. Input data included a Digital Elevation Model (DEM), soil and land-use maps, and standardized meteorological–hydrological time series, all processed spatially. The model divided the basin into 26 sub-basins and 273 Hydrological Response Units (HRUs). Results indicated that the average soil erosion across the basin was 76,710.97 tons/year, equivalent to 1.83 tons/ha/year. Erosion was unevenly distributed among sub-basins, with Sub-basin 25 experiencing the highest rate at 9,716.64 tons/year (2.35 tons/ha/year), and Sub-basin 16 the lowest at 3.61 tons/year (0.20 tons/ha/year). The total sediment load transported at the basin outlet averaged 36,218 tons/year and was mainly concentrated in the rainy season, peaking at 30,390 tons in July 2001 and reaching its lowest level during the dry season, with only 1.11 tons/month in February 1999. These findings confirm the effectiveness of the SWAT model in quantifying erosion and sediment transport processes in midland and mountainous regions, providing a scientific basis for land use

planning, soil–water conservation, and the development of sustainable strategies to mitigate environmental risks.
Keywords: Data, Information system, Sub-basin, Sediment transport, Soil erosion

1. MỞ ĐẦU

Xói mòn đất và vận chuyển bùn cát là những quá trình tự nhiên phức tạp, chịu tác động mạnh mẽ từ điều kiện tự nhiên và hoạt động nhân sinh (Khoi và Suetsugi, 2014). Trong bối cảnh biến đổi khí hậu, sự gia tăng lượng mưa cực đoan, cùng với áp lực từ các hoạt động khai thác tài nguyên và sử dụng đất thiếu bền vững, đã làm gia tăng nguy cơ mất đất, suy thoái chất lượng đất, và bồi lắng lòng sông, hồ chứa ở nhiều lưu vực sông trên thế giới và tại Việt Nam (Borrelli và cs., 2020; Johnson và cs., 2022). Xói mòn đất không chỉ làm giảm năng suất nông nghiệp, mà còn dẫn đến suy giảm chất lượng nước và gây thiệt hại lớn cho các công trình thủy lợi (Kido và cs., 2023; Thai và cs., 2017). Tại lưu vực sông Chợ Chu – một phụ lưu quan trọng của sông Cầu, tình trạng xói mòn đất và vận chuyển bùn cát có xu hướng gia tăng, đặc biệt trong mùa mưa. Khu vực này có địa hình đồi núi dốc, tầng đất mỏng, cấu trúc đất yếu, trong khi độ che phủ rừng đang giảm sút do hoạt động khai thác và chuyển đổi mục đích sử dụng đất. Sự phát triển nông nghiệp trên đất dốc, đốt rừng làm rẫy, cùng với các tác động từ biến đổi khí hậu đang làm tăng tính nhạy cảm của lưu vực đối với hiện tượng xói mòn và rửa trôi đất.

Để mô phỏng và định lượng các quá trình xói mòn và vận chuyển bùn cát, mô hình SWAT đang được sử dụng rộng rãi trên thế giới. Nhiều nghiên cứu đã chứng minh tính hiệu quả và ứng dụng thực tiễn cao của mô hình này trong các điều kiện khí hậu và địa hình khác nhau. Chẳng hạn, Dutta và Sen (2018) đã áp dụng mô hình SWAT để dự báo xói mòn đất tại Ấn Độ, cho thấy khả năng phản ánh chính xác quy luật theo không gian, thời gian; Liu và Jiang (2019) áp dụng thành công mô hình này cho lưu vực sông Trường Giang, Trung Quốc; Setegn và cs. (2010) ứng dụng tại Ethiopia, đã chứng minh tính linh hoạt của mô hình. Các nghiên cứu gần đây cũng khai thác SWAT trong lập bản đồ khu vực nhạy cảm với xói mòn (Sime và Abebe, 2022), đánh giá phương án quản lý lưu vực (Tenaw và cs., 2024), và ứng dụng tại các lưu vực miền núi Việt Nam như Gia Lai (Lê Hoàng Tú và cs., 2021), hạ lưu sông Mekong (Lê Mạnh Hùng và cs., 2012), vùng thượng lưu sông Cầu (Thai và cs., 2017) và sông Nhật Lệ, Quảng Bình (Nguyễn Thị Thu Huyền và cs., 2018).

Tuy nhiên, tại lưu vực sông Chợ Chu hiện chưa có nghiên cứu nào áp dụng mô hình SWAT một cách hệ thống để mô phỏng và đánh giá xói mòn đất cũng như vận chuyển bùn cát. Đây là khoảng trống quan trọng trong bối cảnh khu vực đang phải đối mặt với nhiều rủi ro môi trường, ảnh hưởng trực tiếp đến sinh kế người dân và hiệu quả sử dụng tài nguyên. Vì vậy, việc tích hợp mô hình SWAT với hệ thống thông tin địa lý (GIS) nhằm mô phỏng quá trình xói mòn và vận chuyển bùn cát theo không gian – thời gian, đồng thời xác định các vùng nhạy cảm cần ưu tiên quản lý, là một hướng tiếp cận khoa học và có tính thực tiễn cao. Nghiên cứu này được thực hiện nhằm thiết lập mô hình SWAT cho lưu vực sông Chợ Chu, mô phỏng quá trình xói mòn và vận chuyển bùn cát trong giai đoạn 1990 - 2020. Kết quả không chỉ cung cấp thông tin định lượng về mức độ xói mòn - vận chuyển vật chất, mà còn góp phần hỗ trợ công tác quy hoạch sử dụng đất, quản lý tài nguyên

DOI:10.46826/huaf-jasat.v10n1y2026.1292

nước và xây dựng các giải pháp thích ứng với biến đổi khí hậu tại khu vực trung du miền núi phía Bắc Việt Nam.

2. NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

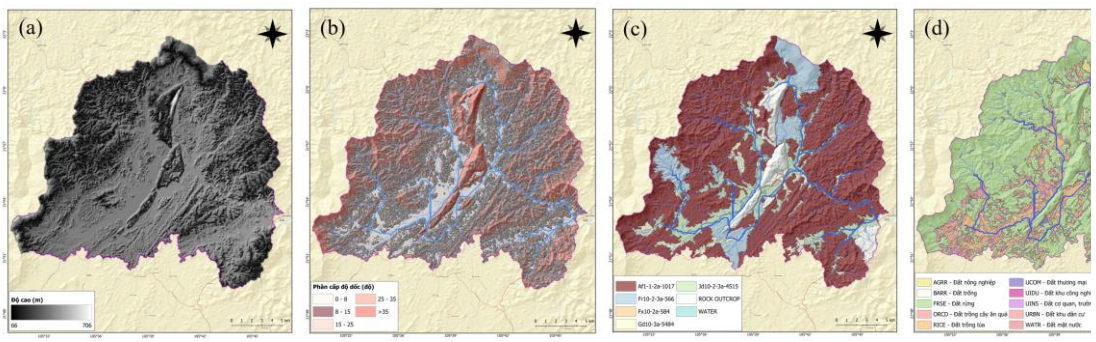
Nghiên cứu sử dụng bốn loại dữ liệu đầu vào chính để phục vụ xây dựng và mô phỏng mô hình SWAT:

- Dữ liệu khí tượng: Gồm chuỗi dữ liệu thời tiết thống kê theo ngày trong giai đoạn 1990 - 2020, bao gồm lượng mưa từ hai trạm Định Hóa và Chợ Mới; nhiệt độ không khí từ hai trạm Thái Nguyên và Bắc Kạn được cung cấp bởi Trung tâm Thông tin và Dữ liệu Khí tượng Thủy văn.

- Dữ liệu địa hình (DEM)*:* Mô hình số độ cao (DEM) với độ phân giải 30 m được thu thập từ nguồn SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) thông qua nền tảng EarthExplorer của USGS. DEM được sử dụng để xác định mạng lưới sông suối, ranh giới lưu vực và các chỉ số địa hình phục vụ mô hình SWAT. Toàn bộ dữ liệu không gian (bao gồm DEM) được chuẩn hóa và thống nhất về cùng hệ tọa độ WGS_1984_UTM_Zone_48N nhằm đảm bảo tính nhất quán và độ chính xác khi chồng ghép, phân tích trong mô hình.

- Dữ liệu thổ nhưỡng*:* Thu thập từ bản đồ đất tỷ lệ 1:50.000 xây dựng năm 2005 được cung cấp bởi Sở Nông nghiệp và Môi trường tỉnh Thái Nguyên. Bản đồ thể hiện thông tin về phân loại đất, cùng một số đặc điểm cơ bản như thành phần cơ giới và độ dày tầng đất trong phạm vi lưu vực nghiên cứu.

- Dữ liệu sử dụng đất*:* Bản đồ hiện trạng sử dụng đất năm 2020 do Sở Nông nghiệp và Môi trường tỉnh Thái Nguyên cung cấp được chuyển đổi từ định dạng *.dgn sang *.shp bằng ArcGIS. Dữ liệu này được chuẩn hóa và quy đổi thành bản đồ lớp phủ sử dụng đất (LULC) tương thích với mô hình SWAT thông qua bảng đối chiếu mã loại đất (ví dụ đất trồng lúa (LUC, LUK) được chuyển đổi sang mã RICE, đất rừng (RDD, RPH, RSX) sang mã FRSE, hay đất cây lâu năm (CLN) sang mã ORCD. Các nhóm đất khác cũng được chuyển đổi tương tự). Bản đồ LULC là đầu vào quan trọng, phản ánh đặc điểm lớp phủ bề mặt trong lưu vực và có ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình sinh dòng chảy mặt và xói mòn đất.



Hình 1. Mô hình số độ cao DEM (a); Bản đồ phân cấp độ dốc (b); Bản đồ thổ nhưỡng (c) và Bản đồ lớp phủ sử dụng đất (d)

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phương pháp thu thập tài liệu

Trong nghiên cứu này, các loại dữ liệu chính được thu thập và xử lý bao gồm dữ liệu mô hình số độ cao (DEM), Bản đồ hiện trạng sử dụng đất, bản đồ thổ nhưỡng và dữ liệu khí tượng. Tất cả dữ liệu trên sau khi được thu thập đều được xử lý và tổ chức trong môi trường GIS, nhằm đảm bảo tính nhất quán về không gian, thời gian và định dạng kỹ thuật cho quá trình mô hình hóa. Việc chuẩn hóa dữ liệu đầu vào là bước quan trọng để đảm bảo độ chính xác và độ tin cậy cho kết quả mô phỏng của mô hình SWAT.

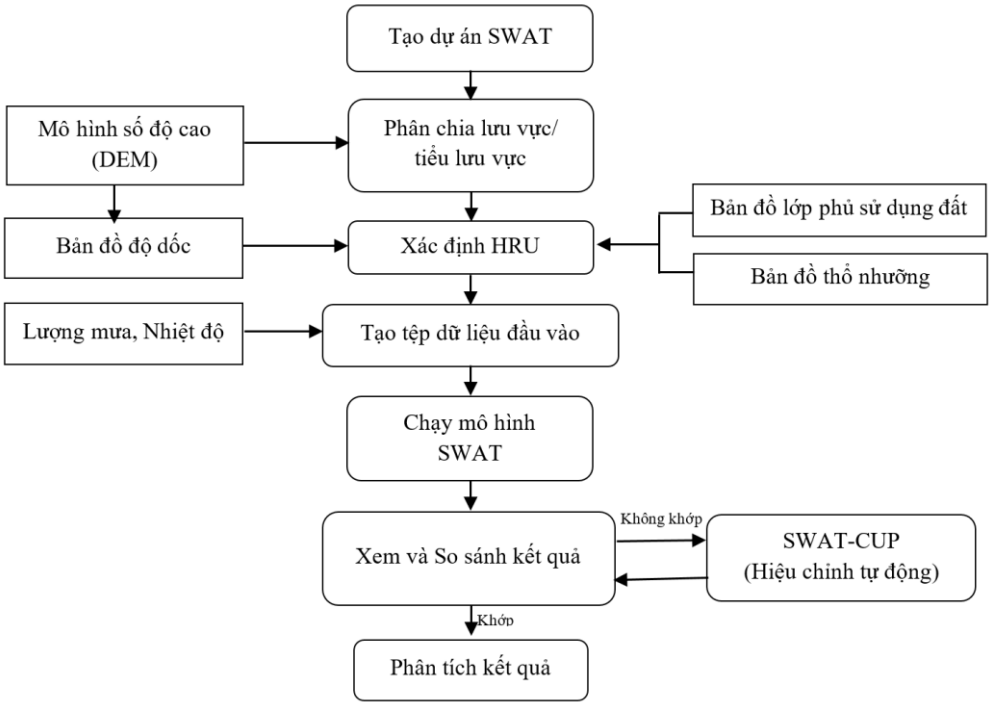
2.2.2. Phương pháp xử lý dữ liệu

Dữ liệu đầu vào cho mô hình SWAT được chuẩn hóa nhằm đảm bảo khả năng tích hợp và chồng xếp chính xác giữa các lớp thông tin. Mô hình số độ cao (DEM) độ phân giải 30m, thu từ SRTM (Hình 1a), được sử dụng để xác định mạng lưới dòng chảy, chia tiểu lưu vực và phân cấp độ dốc thành 5 cấp bao gồm: 0 - 8^0; 8 - 15^0; 15 - 25^0; 25 - 35^0 và lớn hơn 35^0 (Hình 1b), phục vụ phân tích địa hình. Dữ liệu bản đồ đất tỉnh Thái Nguyên, được mã hóa lại theo hệ thống FAO để phù hợp với cơ sở dữ liệu đầu vào của SWAT (Hình 1c). Bản đồ hiện trạng sử dụng đất năm 2020 được xử lý và chuyển mã sang hệ thống phân loại LULC của SWAT (Hình 1d). Ba lớp dữ liệu này được chồng xếp trong môi trường GIS để xác định các đơn vị thủy văn (HRUs), là cơ sở cho mô phỏng dòng chảy và xói mòn. Về chuỗi dữ liệu lượng mưa và nhiệt độ giai đoạn 1990 - 2020 được đồng bộ hóa theo thời gian và chuyển đổi định dạng theo yêu cầu mô hình. Toàn bộ quá trình xử lý, mã hóa và tích hợp dữ liệu được thực hiện trong môi trường phần mềm ArcSWAT, đảm bảo độ chính xác và đồng nhất của các lớp thông tin không gian và chuỗi số liệu đầu vào.

2.2.3. Phương pháp ứng dụng mô hình SWAT

Mô hình SWAT là mô hình thủy văn – sinh hóa bán phân bố, cho phép mô phỏng dài hạn các quá trình dòng chảy, xói mòn và vận chuyển bùn cát trên lưu vực. Quy trình ứng dụng trong nghiên cứu gồm ba bước chính (Hình 2): (i) Chuẩn bị dữ liệu - chuẩn hóa DEM, bản đồ lớp phủ sử dụng đất, thổ nhưỡng và dữ liệu khí tượng để tạo các đơn vị phản ứng thủy văn (HRU); (ii) Thiết lập mô hình – chồng xếp và mã hóa các lớp dữ liệu theo cấu trúc SWAT, mô phỏng xói mòn bằng phương trình MUSLE dựa trên đặc tính đất, độ dốc, lớp phủ và dòng chảy; (iii) Phân tích, đánh giá – Do không có số liệu thực đo về lượng bùn cát, việc hiệu chỉnh – kiểm định không thể thực hiện. Kết quả mô phỏng được đánh giá thông qua xu thế vật lý giữa lượng mưa và bùn cát theo tháng; tính phân hóa theo không – thời gian phù hợp với điều kiện tự nhiên và so sánh định tính với các nghiên cứu tương đồng trong khu vực.

DOI: 10.46826/huaf-jasat.v10n1y2026.1292



Hình 2. Tiến trình mô phỏng bùn cát bằng mô hình SWAT

2.2.4. Phương pháp tính xói mòn

Đối với mô phỏng xói mòn đất trong lưu vực, mô hình SWAT tính toán dựa theo phương trình mất đất phổ dụng điều chỉnh (MUSLE – *Modified Universal Soil Loss Equation*). Theo phương pháp này, lượng xói mòn được tính theo công thức được đề xuất và ứng dụng bởi Dutta và Sen (2018), Gull và Shah (2021), Sime và Abebe (2022), Zewde và cs. (2024), cũng như được mô tả chi tiết trong tài liệu kỹ thuật của Neitsch và cs. (2011).

$$Sed = 11.8 \times \left(Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{hru}\right)^{0.56} \times K \times C \times P \times LS \times CFRG$$

Trong đó: *Sed* là lượng bùn cát phát sinh trong một ngày (tấn); Q_{surf} là lượng dòng chảy mặt (mm/ha); q_{peak} là lưu lượng đỉnh dòng chảy (m^3/s); $area_{hru}$ là diện tích đơn vị HRU (ha); K là hệ số xói mòn đất; C là hệ số che phủ và quản lý đất; P là hệ số biện pháp bảo vệ đất; LS là hệ số chiều dài và độ dốc; CFRG: hệ số điều chỉnh kích thước hạt.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

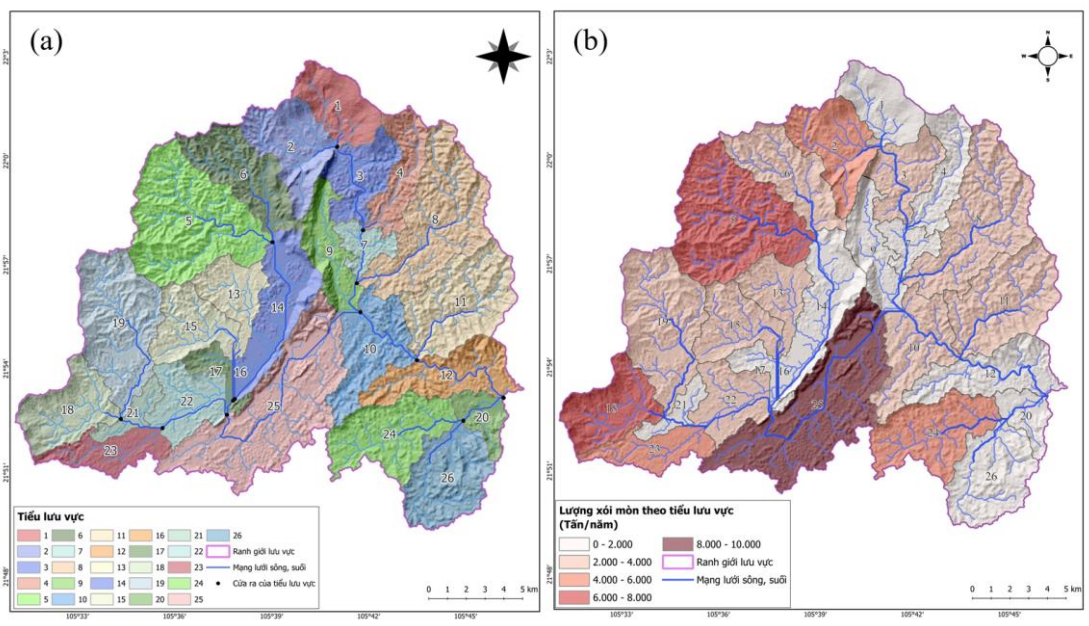
3.1. Khu vực nghiên cứu

Hệ thống sông Chợ Chu là mạng lưới thủy văn lớn nhất trên địa bàn huyện Định Hóa, tỉnh Thái Nguyên (theo đơn vị hành chính cũ). Dòng chính mang tên sông Chợ Chu hình thành từ nhiều khe suối nhỏ bắt nguồn trên các sườn núi thuộc các xã phía Tây và phía Bắc huyện, đặc biệt là các khu vực rừng đầu nguồn. Ba nhánh chính cấu thành hệ thống này gồm suối Chao, suối Múc và suối Tao; trong đó, đoạn chảy qua xã Tân Dương là rộng nhất. Sau khi đi qua địa phận xã Yên Ninh (huyện Phú Lương), sông Chợ Chu tiếp nhận thêm một chi lưu từ xã Yên Trạch và tiếp tục chảy theo hướng Bắc – Tây Bắc trước khi hợp lưu với sông Cầu tại thị trấn Chợ Mới, huyện Chợ Mới, tỉnh Bắc Kạn. Lưu vực có diện tích khoảng 420 km^2, địa hình khu vực chủ yếu là đồi

núi thấp, độ dốc trung bình từ 5 - 15^0, bị chia cắt bởi các dãy núi và thung lũng hẹp, khu vực có khí hậu nhiệt đới ẩm gió mùa với lượng mưa tập trung từ tháng 5 đến tháng 10. Cơ cấu sử dụng đất trong lưu vực hiện nay gồm khoảng 55% đất lâm nghiệp, 30% đất nông nghiệp và phần còn lại là đất ở, đất trống và mặt nước. Các hoạt động sản xuất nông - lâm nghiệp như trồng rừng kinh tế, trồng lúa, ngô và chè là nguồn sinh kế chính của người dân trong lưu vực. Tuy nhiên, tình trạng canh tác trên đất dốc, khai thác rừng chưa bền vững và gia tăng diện tích đất trống đang làm gia tăng nguy cơ xói mòn, rửa trôi dinh dưỡng và suy giảm chất lượng môi trường đất - nước.

3.2. Kết quả thiết lập mô hình SWAT

Kết quả cho thấy lưu vực sông Chợ Chu được phân chia thành 26 tiểu lưu vực với tổng diện tích 41.970,55 ha (tương đương 419,71 km²). Diện tích các tiểu lưu vực có sự chênh lệch đáng kể, dao động từ 18,29 ha (tiểu lưu vực 16) đến 4.134,8 ha (tiểu lưu vực 25). Các tiểu lưu vực có diện tích lớn (>3.000 ha) như tiểu lưu vực 5, 8 và 25 tập trung chủ yếu ở khu vực hạ lưu và các hợp lưu chính, đóng vai trò quan trọng trong cân bằng nước và vận chuyển bùn cát. Ngược lại, các tiểu lưu vực nhỏ (<500 ha) như tiểu lưu vực 7, 16, 17, 20 và 21 thường phân bố ở thượng lưu, đặc trưng bởi địa hình dốc, diện tích hẹp và tiềm ẩn nguy cơ xói mòn cục bộ. Sự khác biệt về quy mô và đặc điểm phân bố này là cơ sở quan trọng để mô hình SWAT mô phỏng chính xác sự biến động không gian của dòng chảy và xói mòn đất, đồng thời hỗ trợ việc xác định các khu vực ưu tiên trong quản lý tài nguyên đất và nước (Hình 3a).



Hình 3. Bản đồ phân chia các tiểu lưu vực (a) và phân bố không gian xói mòn (b)

DOI: 10.46826/huaf-jasat.v10n1y2026.1292

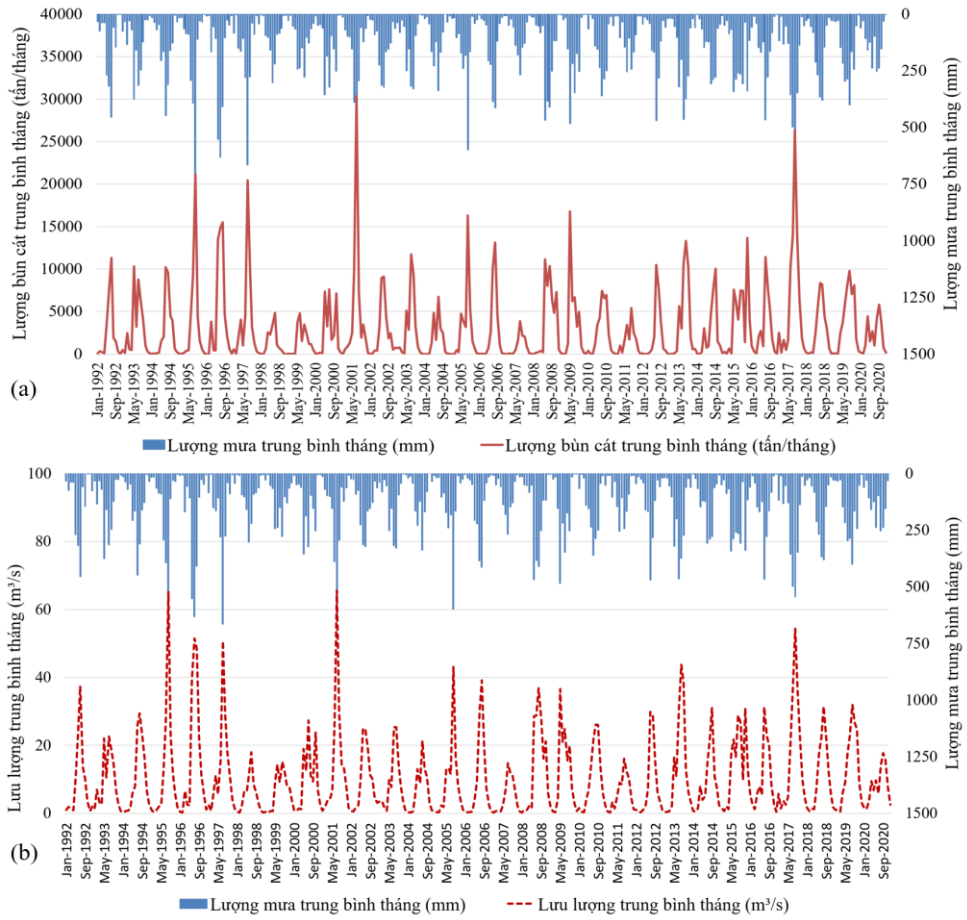
Trên cơ sở phân tích không gian, mô hình xác định 273 đơn vị thủy văn (HRUs) đại diện cho sự biến đổi không gian về điều kiện đất đai, lớp phủ sử dụng đất và địa hình. Bộ dữ liệu lượng mưa và nhiệt độ từ các trạm trong khu vực được tích hợp vào mô hình. Các thông tin đầu vào này cho phép SWAT mô phỏng dòng chảy, xói mòn và vận chuyển bùn cát, đảm bảo tính đồng bộ không gian - thời gian và tạo cơ sở cho phân tích kết quả mô phỏng.

3.3. Kết quả mô phỏng xói mòn đất và vận chuyển bùn cát

3.3.1. Đánh giá kết quả mô phỏng từ mô hình SWAT

Phân tích được thực hiện trên kết quả mô phỏng của mô hình SWAT trong giai đoạn 1992 - 2020, sau khi loại trừ hai năm đầu (1990 - 1991) là giai đoạn khởi động mô hình nhằm ổn định các điều kiện ban đầu. Hình 4a và Hình 4b cho thấy sự biến động mạnh của cả lưu lượng dòng chảy và lượng bùn cát theo chu kỳ mùa vụ, phản ánh rõ đặc trưng khí hậu nhiệt đới gió mùa của lưu vực sông Chợ Chu. Trong mùa mưa, lưu lượng dòng chảy tăng mạnh, đặc biệt tập trung trong các tháng 6 - 8, đóng vai trò chủ đạo trong quá trình rửa trôi và vận chuyển bùn cát. Một số thời điểm ghi nhận giá trị dòng chảy trung bình tháng cao vượt trội so với trung bình nhiều năm, như tháng 8/1995 (65,19 m^3/s), tháng 7/2001 (65,54 m^3/s) và tháng 8/2017 (54,33 m^3/s). Sự gia tăng đột biến này tương ứng với các đỉnh xói mòn lớn, điển hình tháng 7/2001 và tháng 8/2017 lần lượt đạt 30.390 tấn/tháng và 26.310 tấn/tháng.

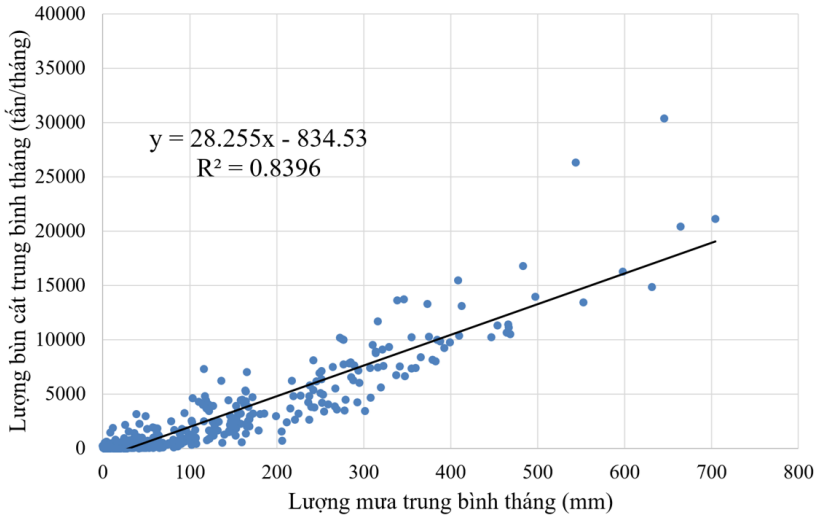
Ngược lại, trong mùa khô, lưu lượng duy trì ở mức rất thấp, nhiều tháng chỉ dưới 0,5 m^3/s (như tháng 2/1999: 0,096 m^3/s), dẫn đến lượng bùn cát gần như không đáng kể, phổ biến dưới 1.000 tấn/tháng, thậm chí có tháng chỉ 1,1 tấn/tháng. Trung bình toàn chuỗi, lưu lượng dòng chảy mùa mưa cao gấp 7 đến 12 lần mùa khô, đồng thời lượng bùn cát cũng cao hơn hàng chục lần, khẳng định vai trò chi phối của điều kiện thủy văn mùa mưa đối với động lực xói mòn và vận chuyển bùn cát trong lưu vực. Sự phân hóa này là phù hợp với các nghiên cứu khác trong khu vực và trên thế giới. Borrelli và cs. (2020) cũng cho thấy tác động của biến đổi khí hậu và sử dụng đất có thể làm tăng xói mòn đất toàn cầu. Sự gia tăng đột biến về dòng chảy và lượng bùn cát trong các tháng 7/2001 và 8/2017 mà nghiên cứu ghi nhận là minh chứng rõ nét cho mối quan hệ này. Zewde và cs. (2024) cũng quan sát thấy lượng bùn cát được vận chuyển lớn nhất vào mùa mưa, đặc biệt là vào tháng 7 và tháng 8, do cường độ mưa lớn và đất canh tác thiếu che phủ thực vật.



Hình 4. Lượng mưa và lượng bùn cát (a) và Lưu lượng dòng chảy trung bình tháng (b)

Mối tương quan giữa lượng mưa và lượng bùn cát (Hình 5) với hệ số xác định $R^2 = 0,8396$ đã khẳng định mức độ tin cậy của kết quả mô phỏng. Các nghiên cứu khác như Johnson và cs. (2022) nhận định rằng biến đổi khí hậu, với sự gia tăng cường độ và tần suất mưa lớn dẫn đến tăng dòng chảy và làm tăng tải lượng chất ô nhiễm. Dutta và Sen (2018) tìm thấy mối tương quan giữa lượng mưa và lượng bùn cát ($R^2 = 0,71$) tại lưu vực Hirakud, Ấn Độ. Liu và Jiang (2019) cũng cho thấy mối tương quan cao giữa lượng mưa, dòng chảy và bùn cát trong mùa lũ tại lưu vực sông Trường Giang, Trung Quốc.

DOI: 10.46826/huaf-jasat.v10n1y2026.1292



Hình 5. Mối tương quan giữa lượng mưa và lượng bùn cát từ mô hình

3.3.2. Kết quả mô phỏng xói mòn đất

Hình 3b cho thấy, lượng xói mòn đất trung bình tại các tiểu lưu vực trong lưu vực sông Chợ Chu phân bố không đồng đều. Giá trị xói mòn trung bình toàn lưu vực là 1,83 tấn/ha/năm, nằm trong mức xói mòn nhẹ theo Dechasa và cs. (2022) và TCVN 5299:2009, tương đương với tổng lượng đất mất đi ước tính khoảng 76.710,97 tấn/năm trên toàn diện tích lưu vực là 41.970,55 ha. Trong đó, tiểu lưu vực 25 ghi nhận tổng lượng xói mòn lớn nhất với 9.716,64 tấn/năm (2,35 tấn/ha/năm), tiếp theo là các tiểu lưu vực 18, 5, 23 và 24 với tổng lượng xói mòn lần lượt là 7.713,46 tấn/năm; 6.375,71 tấn/năm; 4.705,91 tấn/năm và 4.472,82 tấn/năm, tương ứng với 4,91 tấn/ha/năm, 1,76 tấn/ha/năm, 4,66 tấn/ha/năm và 2,23 tấn/ha/năm. Đây là những khu vực vừa có diện tích lớn vừa có tốc độ xói mòn cao, thể hiện đặc trưng của vùng có địa hình dốc, sử dụng đất nông nghiệp và thảm phủ kém ổn định, các yếu tố đã được khẳng định là làm gia tăng rủi ro mất đất trong nhiều nghiên cứu trước đây. Trong khi đó, các tiểu lưu vực như 16 (3,61 tấn/năm), 20 (94,83 tấn/năm) và 17 (750,21 tấn/năm) tương ứng với 0,20 tấn/ha/năm, 0,15 tấn/ha/năm và 1,74 tấn/ha/năm, thể hiện mức xói mòn thấp. Phần lớn các tiểu lưu vực còn lại có tổng lượng xói mòn dao động trong khoảng 1.000 - 4.000 tấn/năm (0,8 - 1,5 tấn/ha/năm).

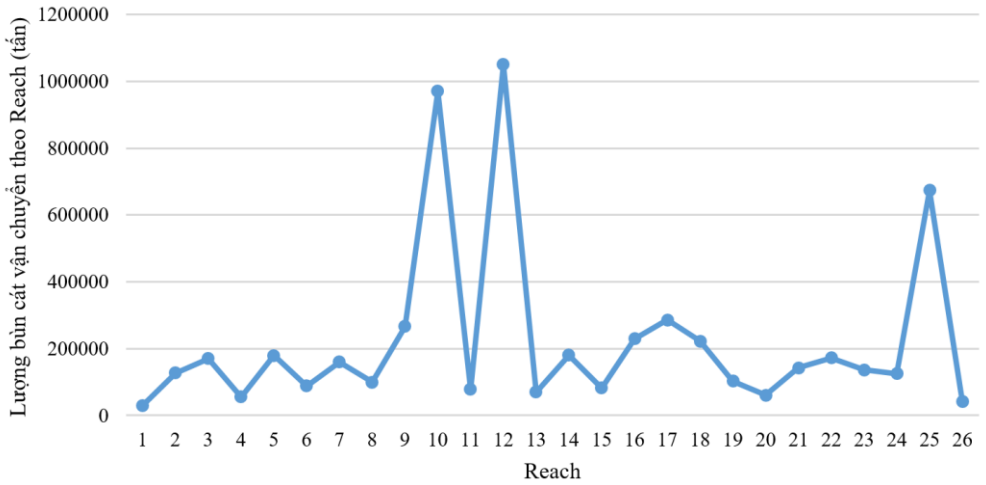
Đánh giá một cách tổng thể, kết quả mô phỏng cho thấy xói mòn tại lưu vực sông Chợ Chu thuộc nhóm xói mòn nhẹ, nhưng vẫn cao hơn so với nhiều khu vực khác như nghiên cứu tại tỉnh Gia Lai (Lê Hoàng Tú và cs., 2021), nơi xói mòn được đánh giá là không đáng kể (0 - 0,75 tấn/ha/năm). Tổng lượng đất mất ước tính thấp hơn rõ rệt so với lưu vực sông Cầu (khoảng 940.000 tấn/năm; Trần Việt Bách, 2017) và các lưu vực thuộc hệ thống sông Nhật Lệ, nơi biến động thảm phủ đã làm gia tăng đáng kể lượng bùn cát (Nguyễn Thị Thu Huyền và cs., 2018). Phân bố không gian của xói mòn tại lưu vực sông Chợ Chu cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa các tiểu lưu vực, hoàn toàn phù hợp với xu thế đã được ghi nhận trên lưu vực sông Cầu và sông Nhật Lệ. Tại lưu vực sông Bé (Khoi và Suetsugi, 2014), mất rừng và gia tăng đất nông nghiệp làm tăng bùn cát đáng kể do giảm khả năng giữ nước và tăng dòng chảy mặt. Trên quy mô lớn hơn, lưu vực hạ lưu sông Mekong (Lê Mạnh Hùng và cs., 2012) ghi nhận tải lượng bùn cát trung bình tại Kratie đạt tới 162 triệu tấn/năm, tập trung tại các vùng địa hình dốc và lượng mưa cao. Những so sánh này không chỉ củng cố tính hợp lý của kết quả mô phỏng mà còn gợi mở nhu cầu tích hợp

các yếu tố biến động sử dụng đất, khí hậu cực đoan và chính sách quản lý tài nguyên vào mô hình SWAT nhằm nâng cao năng lực dự báo và hỗ trợ ra quyết định ở quy mô lưu vực.

3.3.3. Biến động không - thời gian của vận chuyển bùn cát

* Biến động lượng bùn cát vận chuyển theo không gian

Kết quả mô phỏng tổng lượng bùn cát vận chuyển trên các đoạn sông chính (Reach) trong giai đoạn 1992 - 2020 tại lưu vực sông Chợ Chu cho thấy sự phân hóa rõ rệt theo không gian, phản ánh vai trò điều tiết của cấu trúc mạng lưới thủy văn. Theo kết quả mô phỏng thể hiện ở hình 6, dòng chính có tổng lượng bùn cát vận chuyển cao nhất là Reach 12, đạt tới 1.050.333 tấn, tiếp theo là Reach 10 (970.429 tấn) và Reach 25 (674.212 tấn). Ngược lại, các dòng chính như Reach 1, 4 và 26 có giá trị vận chuyển thấp, dao động dưới 60.000 tấn, với Reach 1 thấp nhất (30.407 tấn). Phân bố không đồng đều giữa các đoạn sông nêu bật vai trò quan trọng của cấu trúc mạng lưới thủy văn trong điều tiết bùn cát. Đặc biệt, việc xác định các đoạn sông có lượng vận chuyển lớn như Reach 12 và Reach 10 là cơ sở khoa học để ưu tiên bố trí các công trình giảm thiểu bồi lắng và kiểm soát xói mòn tại hạ lưu.



Hình 6. Tổng lượng bùn cát vận chuyển theo dòng chính (Reach)

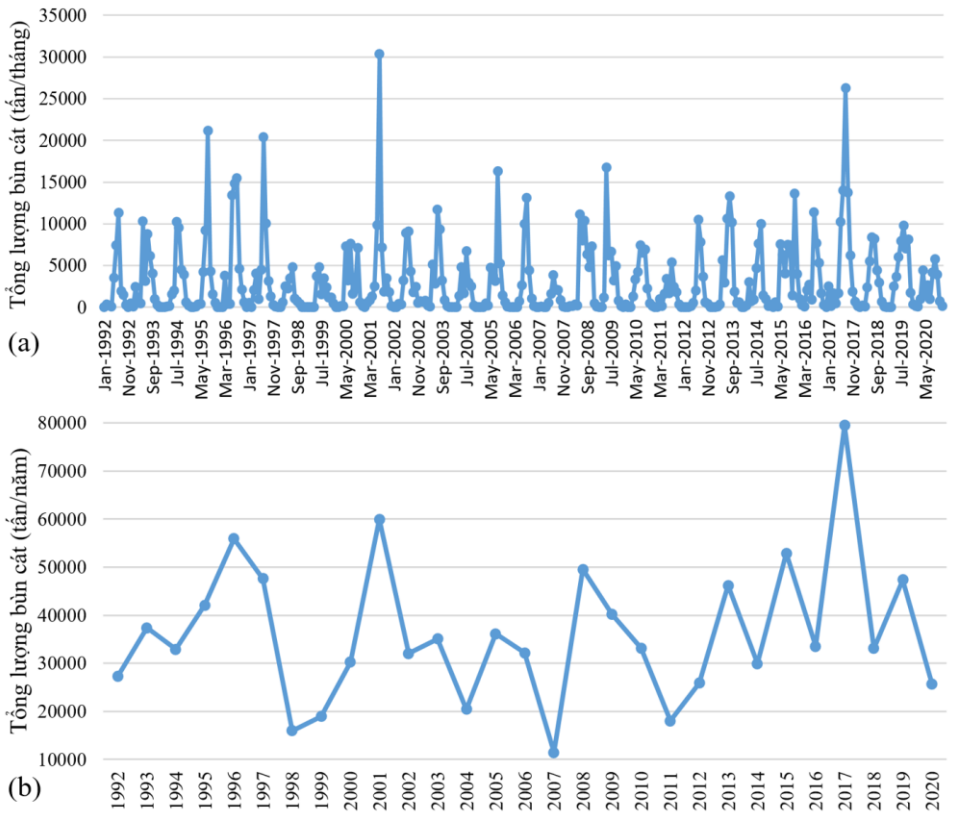
Điều này phù hợp với nghiên cứu tại lưu vực sông Cầu của Trần Việt Bách (2017) ghi nhận sự biến động lớn về không gian của tải lượng bùn cát, với mức độ xói mòn cao hơn ở hữu ngạn. Các nghiên cứu tại Gia Lai (Lê Hoàng Tú và cs., 2021) và sông Nhật Lệ (Nguyễn Thị Thu Huyền và cs., 2018) tiếp tục khẳng định vai trò của yếu tố địa hình, thảm phủ và phân bố rừng đầu nguồn trong điều tiết bùn cát. Trong đó, hiện tượng giữ lại bùn cát trong quá trình vận chuyển trên lưu vực sông Nhật Lệ cung cấp cơ sở để giải thích cơ chế điều tiết nội tại trong hệ thống sông Chợ Chu. Ở quy mô lớn hơn, lưu vực sông Mekong (Lê Mạnh Hùng và cs., 2012) và thượng lưu sông Cầu (Thai và cs., 2017) đều cho thấy tải lượng bùn cát có xu hướng phân bố không đồng đều, bị chi phối mạnh bởi điều kiện địa hình, khí hậu và cấu trúc lưu vực.

* Biến động lượng bùn cát vận chuyển theo thời gian

Phân tích đặc trưng vận chuyển bùn cát theo tháng tại lưu vực sông Chợ Chu như biểu đồ Hình 7a cho thấy sự biến động rõ rệt theo chu kỳ mùa vụ. Trong mùa khô (từ tháng 1 đến tháng 4), tổng lượng bùn cát vận chuyển trung bình dao động từ 180 đến 950 tấn/tháng. Một số tháng có giá trị thấp, điển hình như tháng 2/1999 là 1,11 tấn/tháng, cho thấy quá trình rửa trôi và xói mòn hầu như không xảy ra trong điều kiện mưa nhỏ. Tuy nhiên, bước sang mùa mưa

DOI: 10.46826/huaf-jasat.v10n1y2026.1292

(từ tháng 5 đến tháng 9), lượng bùn cát gia tăng đột biến, phản ánh ảnh hưởng mạnh mẽ của lượng mưa đến quá trình rửa trôi và vận chuyển bùn cát bề mặt. Trung bình tháng 7 và tháng 8 ghi nhận lượng bùn cát lần lượt là 8.975 tấn/tháng và 8.410 tấn/tháng, cao gấp chục lần mùa khô. Đặc biệt, tháng 7/2001 và tháng 8/2017 ghi nhận đỉnh điểm lần lượt với giá trị 30.390 tấn/tháng và 26.310 tấn/tháng, là giá trị lớn nhất trong toàn chuỗi thời gian nghiên cứu, cho thấy mức độ xói mòn nghiêm trọng khi xảy ra các đợt mưa cực đoan. Giai đoạn từ tháng 10 đến tháng 12 cho thấy xu hướng suy giảm dần nhưng vẫn giữ ở mức cao hơn mùa khô, tháng 10 (trung bình gần 2.500 tấn/tháng), do ảnh hưởng kéo dài của các đợt mưa lớn cuối vụ. Các tháng 11 và 12 có xu hướng giảm nhanh (giá trị trung bình lần lượt là 1.276 tấn/tháng và 324 tấn/tháng), đưa lưu vực quay trở lại trạng thái tích lũy vật chất trước mùa khô. Phân tích này phù hợp với kết quả của Zewde và cs. (2024) tại tiểu lưu vực Jemma thuộc thượng lưu sông Nile Xanh, miền Trung Ethiopia, nơi sản lượng bùn cát cao nhất cũng được ước tính vào các tháng 7 và tháng 8.



Hình 7. Tổng lượng bùn cát vận chuyển theo tháng (a) và theo năm (b)

Phân tích tổng lượng bùn cát vận chuyển theo năm tại lưu vực sông Chợ Chu cho thấy xu hướng biến động lớn giữa các năm (Hình 7b). Tổng lượng bùn cát vận chuyển trung bình năm tại đầu ra của lưu vực khoảng 36.218 tấn/năm (tương ứng 1,05 triệu tấn trong toàn giai đoạn). Năm có giá trị cao vượt trội là các năm 1996 (55.946 tấn/năm), năm 2001 (59.982 tấn/năm) và đặc biệt là năm 2017 đạt đỉnh với 79.500 tấn/năm, cao hơn gấp hơn 2 lần so với trung bình chuỗi. Điều này cho thấy đây là những năm xuất hiện hiện tượng mưa lớn bất thường hoặc kéo dài, gây ra xói mòn nghiêm trọng trên quy mô toàn lưu vực. Ngược lại, một số năm có lượng bùn cát vận

chuyển thấp, như năm 1998 (15.948 tấn/năm) và năm 2007 (11.450 tấn/năm), cho thấy lượng mưa ít và phân bố đồng đều hơn trong năm, từ đó làm giảm quá trình rửa trôi. Xu hướng này hoàn toàn phù hợp với đặc điểm khí hậu gió mùa của khu vực và được khẳng định bởi nhiều nghiên cứu khác. Ví dụ, tại vùng thượng lưu sông Cầu, Thai và cs. (2017) cũng chỉ ra rằng tổng lượng đất mất hàng năm có xu hướng tăng đều trong tương lai do biến đổi khí hậu, đặc biệt tăng mạnh vào mùa lũ. Tương tự, Setegn và cs. (2010) cũng đã chứng minh sự nhạy cảm của sản lượng bùn cát với biến động lượng mưa.

4. KẾT LUẬN

Kết quả phân tích hiện trạng xói mòn và vận chuyển bùn cát cho thấy lưu vực đang duy trì mức độ xói mòn chung thấp, tuy nhiên vẫn tồn tại những khu vực điểm nóng về xói mòn cần được ưu tiên quản lý. Kết quả mô phỏng cho thấy, lượng đất bị xói mòn trung bình toàn lưu vực đạt 1,83 tấn/ha/năm, tương đương khoảng 76.710,97 tấn/năm trên tổng diện tích 41.970 ha. Sự phân bố xói mòn không đều giữa các tiểu lưu vực, trong đó tiểu lưu vực 25 có tổng lượng xói mòn cao nhất 9.716,64 tấn/năm, tương ứng 2,35 tấn/ha/năm, ngược lại, các tiểu lưu vực 16 và 20 ghi nhận giá trị rất thấp, chỉ từ 3,61 đến 94,83 tấn/năm (tương ứng với 0,20 tấn/ha/năm và 0,15 tấn/ha/năm). Tổng lượng bùn cát vận chuyển tại đầu ra lưu vực trung bình là 36.218 tấn/năm, cao nhất vào mùa mưa, đặc biệt tháng 7/2001 và tháng 8/2017 lên tới 30.390 tấn/tháng và 26.310 tấn/tháng. Mùa khô ghi nhận lượng vận chuyển bùn cát rất thấp, như tháng 2/1999 chỉ 1,11 tấn/tháng. Biến động giữa các năm rõ rệt, cao nhất năm 2017 với 79.500 tấn/năm, thấp nhất năm 2007 với 11.450 tấn/năm. Việc nhận diện rõ các tiểu lưu vực có mức xói mòn cao, kết hợp phân tích khả năng vận chuyển bùn cát sẽ là tiền đề quan trọng cho xây dựng các kịch bản quản lý lưu vực bền vững, phòng chống suy thoái đất và bảo vệ tài nguyên đất, nước. Tuy nhiên, nghiên cứu cũng đối mặt với thách thức do thiếu số liệu thực đo về bùn cát để hiệu chỉnh mô hình, cần được bổ sung trong các nghiên cứu tiếp theo.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ kinh phí bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo Việt Nam theo đề tài mang mã số: B2024-TNA-15. Chúng tôi xin chân thành cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Tài liệu tiếng Việt

Lê Hoàng Tú, Nguyễn Thị Huyền, Phan Thị Hà, Đặng Nguyễn Đông Phương, Nguyễn Thành Nghĩa, Lê Minh Hải, Nguyễn Duy Liêm, Hoàng Hà Anh, Phạm Gia Điệp và Nguyễn Kim Lợi. (2021). Ứng dụng mô hình SWAT phục vụ phân vùng tài nguyên nước mặt và xói mòn đất tại tỉnh Gia Lai. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, *(732)*, 13–27.

Lê Mạnh Hùng, Trần Bá Hoằng, Nguyễn Duy Khang và Trần Tuấn Anh. (2012). Kết quả ứng dụng mô hình SWAT trong tính toán xói mòn bề mặt lưu vực hạ lưu sông MeKong. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, *(12/2012)*, 25–32.

Nguyễn Thị Thu Huyền, Nguyễn Văn Hùng, Nguyễn Thanh Hùng, Vũ Đình Cường và Hoàng Mạnh Hùng. (2018). Nghiên cứu ứng dụng mô hình SWAT đánh giá biến động dòng chảy, bùn cát trên lưu vực sông Nhật Lệ, tỉnh Quảng Bình. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, *(48/2018)*, 1–10.

Trần Việt Bách. (2017). Ứng dụng mô hình SWAT để tính toán lưu lượng dòng chảy và bùn cát trên lưu vực sông Cầu. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, (56/2017)*, 136–142.

2. Tài liệu tiếng nước ngoài

Borrelli, P., Robinson, D. A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J. E., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., & Ballabio, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences, 117*(36), 21994–22001.

Dechasa, A., Aga, A.O., & Dufera, T. (2022). Erosion Risk Assessment for Prioritization of Conservation Measures in the Watershed

DOI: 10.46826/huaf-jasat.v10n1y2026.1292

of Genale Dawa-3 Hydropower Dam, Ethiopia. *Quaternary, 5*(39), 19 pages.

Dutta, S., & Sen, D. (2018). Application of SWAT model for predicting soil erosion and sediment yield. *Sustainable Water Resources Management, 4*, 447–468.

Gull, S., & Shah, S. R. (2021). Modelling streamflow and sediment yield using Soil and Water Assessment Tool: A case study of Lidder watershed in Kashmir Himalayas, India. *Water Practice and Technology, 16*(4), 1370–1385.

Johnson, T., Butcher, J., Santell, S., Schwartz, S., Julius, S., & LeDuc, S. (2022). A review of climate change effects on practices for mitigating water quality impacts. *Journal of Water and Climate Change, 13*(5), 1684–1705.

Khoi, D. N., & Suetsugi, T. (2014). Impact of climate and land-use changes on hydrological processes and sediment yield—a case study of the Be River catchment, Vietnam. *Hydrological Sciences Journal, 59*(5), 1095–1108.

Kido, R., Inoue, T., Hatono, M., & Yamanoi, K. (2023). Assessing the impact of climate change on sediment discharge using a large ensemble rainfall dataset in Pekerebetsu River basin, Hokkaido. *Progress in Earth and Planetary Science, 10*(54), 1–14.

Liu, Y., & Jiang, H. (2019). Sediment yield modeling using SWAT model: Case of Changjiang River Basin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 234*(2019), 1–10.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2009*. Texas Water Resources Institute. TR–406, 647 pages.

Setegn, S. G., Dargahi, B., Srinivasan, R., & Melesse, A. M. (2010). Modeling of sediment yield from an ungauged watershed, Ethiopia using SWAT model. *Journal of the American Water Resources Association, 46*(3), 515–526.

Sime, C. H., & Abebe, W. T. (2022). Sediment yield modeling and mapping of the spatial distribution of soil erosion–prone areas. *Applied and Environmental Soil Science, 2022*, 1–12.

Tenaw, W. G., Tadesse, K. B., & Kerebih, M. S. (2024). Estimation of sediment yield and evaluation of management options in the watershed using SWAT model. *Air, Soil and Water Research, 17*, 1–15.

Thai, T. H., Thao, N. P., & Dieu, B. T. (2017). Assessment and simulation of impacts of climate change on erosion and water flow by using the Soil and Water Assessment Tool and GIS: Case study in Upper Cau River basin in Vietnam. *Vietnam Journal of Earth Sciences, 39*(4), 376–392.

Zewde, N. T., Denboba, M. A., Tadesse, S. A., & Getahun, Y. S. (2024). Predicting runoff and sediment yields using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model in the Jemma Subbasin of Upper Blue Nile, Central Ethiopia. *Environmental Challenges, 14*(2024), 13 pages.