



TUYỂN TẬP HỘI THẢO KHOA HỌC QUỐC GIA

QUẢN LÝ MÔI TRƯỜNG VÀ PHÁT TRIỂN TÀI NGUYÊN THIÊN NHIÊN

EMNR 2026





HỘI NGHỊ KHOA HỌC
Quản lý môi trường và phát triển tài nguyên thiên nhiên
Environmental Management and Natural Resources Development
(EMNR 2026)



BAN TỔ CHỨC

TT	Họ và tên	Đơn vị công tác	Chức danh
1.	GS.TS. Trần Thanh Hải	Trường Đại học Mở - Địa chất	Trưởng ban
2.	PGS.TS. Nguyễn Thế Vinh	Trường Đại học Mở - Địa chất	Phó trưởng ban
3.	PGS. TS. Đỗ Ngọc Anh	Trường Đại học Mở - Địa chất	Phó trưởng ban
4.	TS. Nguyễn Quốc Phi	Trường Đại học Mở - Địa chất	Phó trưởng ban
5.	TS. Đào Đình Thuần	Trường Đại học Mở - Địa chất	Ủy viên
6.	TS. Trần Thị Thanh Thủy	Trường Đại học Mở - Địa chất	Ủy viên

BAN KHOA HỌC

TT	Họ và tên	Đơn vị công tác	Chức danh
1.	PGS.TS. Nguyễn Thế Vinh	Trường Đại học Mở - Địa chất	Trưởng ban
2.	TS. Nguyễn Quốc Phi	Trường Đại học Mở - Địa chất	Phó trưởng ban
3.	PGS. TS. Đỗ Ngọc Anh	Trường Đại học Mở - Địa chất	Ủy viên
4.	TS. Đào Đình Thuần	Trường Đại học Mở - Địa chất	Ủy viên
5.	TS. Trần Thị Thanh Thủy	Trường Đại học Mở - Địa chất	Ủy viên

BAN BIÊN TẬP

TT	Họ và tên	Đơn vị công tác	Chức danh
1.	PGS. TS. Nguyễn Phương	Tổng hội Địa chất Việt Nam	Trưởng ban
2.	PGS. TS. Đỗ Văn Bình	Tổng hội Địa chất Việt Nam	Phó trưởng ban
3.	PGS. TS. Phan Quang Văn	Trường Đại học Mở - Địa chất	Phó trưởng ban
4.	TS. Nguyễn Quốc Phi	Trường Đại học Mở - Địa chất	Phó trưởng ban
5.	GS. Hwang Sang Gi	Trường ĐH Paichai, Hàn Quốc	Ủy viên
6.	GS. Avirut Puttiwongrak	Viện Công nghệ Châu Á (AIT), Thái Lan	Ủy viên
7.	PGS. TS. Bùi Thị Kim Anh	Viện Khoa học Công nghệ Năng lượng	Ủy viên



HỘI NGHỊ KHOA HỌC
Quản lý môi trường và phát triển tài nguyên thiên nhiên
Environmental Management and Natural Resources Development
(EMNR 2026)



và Môi trường, Viện Hàn lâm Khoa học
và Công nghệ Việt Nam

8.	TS. Bùi Du Dương	Trung tâm Quy hoạch và Điều tra tài nguyên nước Quốc Gia (NAWAPI)	Ủy viên
9.	TS. Chu Xuân Quang	Viện Ứng dụng Công nghệ (NACENTECH), Bộ KH và CN	Ủy viên
10.	TS. Đỗ Văn Nhuận	Tổng hội Địa chất Việt Nam	Ủy viên
11.	TS. Đào Đình Thuần	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
12.	TS. Nguyễn Hoàng Nam	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
13.	TS. Trần Thị Thanh Thủy	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
14.	PGS. TS. Trần Thị Thu Hương	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
15.	TS. Trần Anh Quân	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
16.	TS. Vũ Thị Phương Thảo	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
17.	TS. Nguyễn Thị Hòa	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
18.	TS. Nguyễn Phương Đông	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
19.	TS. Phạm Khánh Huy	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
20.	TS. Nguyễn Văn Dũng	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
21.	TS. Nguyễn Quang Minh	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
22.	TS. Đặng Thị Ngọc Thủy	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
23.	TS. Đỗ Thị Hải	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
24.	TS. Vũ Thị Lan Anh	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên

BAN THƯ KÝ

TT	Họ và tên	Đơn vị công tác	Chức danh
1.	TS. Trần Anh Quân	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Trưởng ban
2.	TS. Nguyễn Phương Đông	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
3.	ThS. Đào Trung Thành	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
4.	ThS. Phan Thị Mai Hoa	Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên



HỘI NGHỊ KHOA HỌC
Quản lý môi trường và phát triển tài nguyên thiên nhiên
Environmental Management and Natural Resources Development
(EMNR 2026)



LỜI NÓI ĐẦU

Hội nghị Khoa học Quốc gia về “Quản lý môi trường và phát triển tài nguyên thiên nhiên 2026” (Environmental Management and Natural Resources Development - EMNR 2026) được tổ chức vào ngày 16 tháng 01 năm 2026 tại Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội. Hội nghị do Trường Đại học Mỏ - Địa chất phối hợp cùng các đơn vị đối tác trong và ngoài nước đồng tổ chức.

Ban Tổ chức Hội nghị đã nhận được 50 báo cáo của các nhà khoa học trong cả nước gửi đến Hội nghị. Các bài báo khoa học đăng trong tuyển tập này trình bày những kết quả nghiên cứu về các lĩnh vực:

- ❖ Những vấn đề hiện nay trong quản lý môi trường và phát triển tài nguyên;
- ❖ Các công nghệ tiên tiến trong bảo vệ và quan trắc môi trường;
- ❖ Đánh giá tác động môi trường và quản lý bền vững tài nguyên địa chất;
- ❖ Công nghệ tái chế và xử lý chất thải;
- ❖ Đánh giá tai biến môi trường và rủi ro;
- ❖ Mô hình hóa môi trường và các công cụ quản lý;
- ❖ Giáo dục và truyền thông môi trường;
- ❖ An ninh môi trường và các vấn đề an toàn.

Ban Tổ chức hy vọng rằng, Hội nghị không chỉ là diễn đàn để các nhà khoa học chia sẻ, thảo luận những kết quả nghiên cứu mới về các lĩnh vực môi trường nói chung mà còn là dịp để các tổ chức, cá nhân gặp gỡ, trao đổi, hợp tác nhằm nâng cao hiệu quả hoạt động khoa học và công nghệ trong các lĩnh vực chuyên môn.

Trong quá trình chuẩn bị tổ chức Hội nghị, Ban Tổ chức đã nhận được sự hỗ trợ cả về tinh thần và vật chất của các tổ chức và cá nhân. Ban Tổ chức Hội nghị xin gửi tới các đơn vị và cá nhân lời cảm ơn sâu sắc về sự ủng hộ, giúp đỡ quý báu đó.

MỤC LỤC

PHẦN 1: QUẢN LÝ TÀI NGUYÊN VÀ MÔI TRƯỜNG

Mô phỏng các trận lũ đặc biệt lớn trên lưu vực sông Đà dựa trên mô hình tích hợp khí tượng-thủy văn WEHY-WRF

Trần Anh Quân..... 2

Nghiên cứu biến đổi không gian và xu thế dài hạn của lượng mưa trên lưu vực sông Nhuệ - Đáy giai đoạn 1961 – 2019

Trần Anh Quân, Nguyễn Thị Hồng Ngọc 15

Phân tích, đánh giá diễn biến nguồn nước sông Hữu Trạch trước và sau khi có công trình thủy điện Bình Điền

Đỗ Cao Cường, Trần Thành Lê, Phạm Khánh Huy, Nguyễn Văn Bình 27

Đánh giá tác động của việc khai thác sử dụng nước và vận hành công trình thủy điện Bình Điền đến nguồn nước, môi trường và các đối tượng khai thác, sử dụng nước khác có liên quan trong khu vực

Trần Thành Lê, Đỗ Cao Cường 35

Nghiên cứu ảnh hưởng của khí phóng xạ radon đến môi trường khu vực mỏ đồng Sin Quyền, Lào Cai

Nguyễn Văn Dũng, Nguyễn Thị Thu Trang..... 45

Phân tích sự biến động các chỉ số sinh thái - môi trường sử dụng ảnh viễn thám Sentinel-2 phục vụ đánh giá nguy cơ xảy ra tai biến

Đào Minh Nhật, Phan Thị Mai Hoa, Nguyễn Quốc Phi..... 53

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, Phan Thị Mai Hoa, Nguyễn Quốc Phi..... 64

Nghiên cứu về khả năng xảy ra và các tính chất của hạn hán chớp nhoáng (flash drought) tại Việt Nam trong hai thập kỷ qua

Nguyễn Thị Ngọc Mỹ 75

Ảnh hưởng của ENSO tới hạn hán chớp nhoáng (flash drought) ở Việt Nam

Nguyễn Thị Ngọc Mỹ 90

Đánh giá các nguồn thải tác động đến tài nguyên nước dưới đất khu vực Đăk Nông và đề xuất giải pháp quản lý

Trần Thị Thanh Thủy, Phạm Thị Thanh Hải, Tô Nguyễn Hồng Nhung..... 102

Hiện trạng môi trường phóng xạ khu vực mỏ Đông Pao, tỉnh Lai Châu

Nguyễn Quang Minh, Vũ Trường Sơn..... 111

Đánh giá xói lở lòng sông dự án khai thác cát sỏi tại 4 điểm khu vực Nghĩa Lộ, Văn Chấn, tỉnh Lào Cai

Nguyễn Quang Minh, Đào Trung Thành, Nguyễn Quốc Phi, Phạm Khánh Huy 125

Xác định lượng bổ cập từ nước mưa cho tầng chứa nước dưới đất Holocen đồng bằng sông Hồng

Lê Việt Hùng, Trần Thành Lê, Phùng Thị Linh 138

Quản lý và khai thác tài nguyên sinh vật biển đảo của triều Nguyễn giai đoạn 1802-1858

Đinh Thị Hải Đường 148

Cơ sở khoa học hoàn thiện chính sách đóng cửa mỏ nhằm đáp ứng yêu cầu khai thác khoáng sản bền vững và bảo vệ môi trường

Quách Đức Tín, Hoàng Nam, Nguyễn Thị Cúc 158

PHẦN 2: SINH THÁI MÔI TRƯỜNG VÀ PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG

Kinh tế tuần hoàn trong quản lý chất thải khai khoáng: xu hướng phát triển và tiềm năng áp dụng cho Việt Nam

Nguyễn Phương Đông, Vũ Thị Lan Anh, Phạm Minh Khôi, Nguyễn Thị Hòa 170

Ứng dụng mô hình DPSIR trong đánh giá thực trạng vận chuyển khoáng sản trên sông, hồ và ô nhiễm môi trường nước tại một số khu vực ở Việt Nam

Trần Thị Ngọc, Phan Thị Mai Hoa, Nguyễn Thị Hòa, Đặng Thị Ngọc Thủy, Nguyễn Thị Hồng..... 180

Đánh giá tác động đến môi trường không khí do hoạt động khai thác, chế biến đá vôi tại một số mỏ khu vực xã Tân Thành, tỉnh Ninh Bình

Vũ Thị Lan Anh, Trần Thị Ngọc, Nguyễn Thị Hòa, Nguyễn Phương Đông 189

Dự báo lượng chất thải rắn y tế nguy hại phát sinh của tỉnh Quảng Ninh năm 2030

Nguyễn Mai Hoa 201

Nghiên cứu đặc điểm phân bố trầm tích và sinh cảnh đáy biển phục vụ phát triển điện gió ngoài khơi vùng biển từ Vĩnh Hảo - La Gi

Đàm Việt Quốc, Nguyễn Tài Tuệ, Trần Thị Dung, Phạm Lan Anh 211

Phân tích SWOT và đề xuất chiến lược nâng cao hiệu quả công tác lập phương án cải tạo, phục hồi môi trường cho các dự án khai thác khoáng sản lộ thiên

Trần Thị Ngọc, Đặng Thị Ngọc Thủy, Vũ Thị Lan Anh	224
Ứng dụng phương pháp Electre trong lựa chọn phương án cải tạo phục hồi môi trường tại khu vực khai thác khoáng sản, xã Phước Dinh, tỉnh Khánh Hòa	
Nguyễn Thị Cúc, Phan Thị Mai Hoa, Nguyễn Quốc Phi, Vũ Thị Lan Anh	235
Giải pháp chiến lược thúc đẩy du lịch Net Zero tại Cụm du lịch sinh thái Võ Nhai – Thần Sa, thuộc phía Bắc Việt Nam	
Phan Thị Mai Hoa, Vũ Thị Lan Anh, Nguyễn Thị Cúc	245
Đóng cửa mỏ và cải tạo, phục hồi môi trường sau khai thác than tại Quảng Ninh: Nhìn từ quản trị vòng đời mỏ đến công tác hoàn nguyên và chuyển đổi không gian hậu khai thác	
Hoàng Nam, Nguyễn Quốc Phi	254
Đánh giá các tác động sinh thái của sinh vật phù du tại đảo Quan Lạn đến công trình điện gió ngoài khơi tỉnh Quảng Ninh	
Trần Thị Thu Hương, Phùng Thị Thu Trang	264
So sánh đặc điểm hoạt độ ^{210}Po , khả năng tích lũy và mức độ nguy hại phóng xạ khi tiêu thụ Vẹm Xanh (<i>Perna viridis</i>) và các nhóm loài cá khác nhau ở biển ven bờ, Lâm Đồng, Việt Nam	
Tạ Đức Thịnh, Dương Văn Hào, Hoàng Văn Hiệp, Phạm Thị Thanh Xuân	274
Nghiên cứu đề xuất giải pháp quản lý môi trường tại một số mỏ khoáng sản tại Việt Nam	
Nguyễn Phương, Vũ Thị Lan Anh, Nguyễn Thị Cúc	284
Xây dựng cơ sở dữ liệu các hệ sinh thái đất ngập nước khu vực ven biển Quảng Yên - Cát Bà	
Nguyễn Quốc Phi, Nguyễn Thị Thanh, Phan Thị Mai Hoa, Lê Hữu Hải, Bùi Ngọc Quý	296
Những vấn đề về chuyển đổi số ứng dụng trong các doanh nghiệp khai thác khoáng sản tại Việt Nam	
Nông Việt Hùng, Dương Phi Hùng, Nguyễn Ngọc Bảo, Lê Văn Công, Nông Việt Trung, Nguyễn Thị Thu Hương; Đỗ Mạnh Cường; Hà Minh Thọ, Nguyễn Văn Huệ, Vũ Cao Cường, Phạm Thế Anh, Ngô Thái Vinh	307
PHẦN 3: NHỮNG TIẾN BỘ MỚI TRONG CÔNG NGHỆ MÔI TRƯỜNG	
Phân tích biến động AQI theo mùa và cảnh báo ô nhiễm không khí tại khu vực Đông Bắc tỉnh Lạng Sơn	
Nguyễn Thị Hồng, Đào Trung Thành, Nguyễn Thị Thu Huyền	315

Đánh giá hiệu quả hệ thống USBF sử dụng giá thể phủ vật liệu nano TiO₂ biến tính Eu trong xử lý nước thải sinh hoạt

Nguyễn Hoàng Dũng, Nguyễn Hoàng Nam, Đào Trung Thành..... 323

Nghiên cứu thu hồi nguyên tố đất hiếm từ màn hình máy tính xách tay thải

Nguyễn Thị Hồng, Đào Trung Thành, Nguyễn Thị Anh Thư..... 331

Nghiên cứu đánh giá hàm lượng kim loại nặng trong trầm tích ven bờ khu vực đảo Cái Bầu, tỉnh Quảng Ninh

Đào Trung Thành, Nguyễn Thị Hồng, Trần Thị Ngọc..... 338

Ứng dụng mô hình Mike21 để đánh giá quá trình lan truyền bùn cát và vật chất đáy do hoạt động nạo vét tại khu vực Tân Hải qua cửa Ba Đặng trên Sông Phan, tỉnh Lâm Đồng

Nguyễn Thị Hoà, Vũ Thị Lan Anh, Nguyễn Thị Hồng..... 346

Đánh giá chất lượng môi trường đất và nước tại một số làng nghề tái chế phế liệu

Nguyễn Mai Hoa 355

Xác định điểm nóng ô nhiễm dầu do sự cố tàu vận chuyển khoáng sản tại hồ Thác Bà, tỉnh Yên Bái bằng mô hình MIKE 21

Phan Thị Mai Hoa, Trần Thị Ngọc, Nguyễn Thị Cúc 365

The application of hydrological approaches for the estimation and evaluation of minimum flow in the Huong River basin

Vu Thu Hien, Pham Khanh Huy 375

Physicochemical evolution and molecular dynamics analysis of torrefaction porous bio-char

Lê Phú Cường 384

Xác định các vị trí xảy ra trượt lở và các yếu tố ảnh hưởng tại đảo Cát Bà, thành phố Hải Phòng sử dụng ảnh viễn thám đa thời gian

Nguyễn Thị Ánh Nguyệt, Trần Thị Thu Hà, Nguyễn Quang Minh, Đào Minh

Nhật..... 396

Nghiên cứu một số thuật toán học máy đánh giá nguy cơ xảy ra tai biến địa môi trường khu vực Đồ Sơn, TP. Hải Phòng

Phan Thị Mai Hoa, Nguyễn Quốc Phi, Phương Thị Ngọc, Lê Thị Vân Anh, Nguyễn

Đức Thành, Hoàng Minh Thư, Đường Thị Thanh Huế, Gabin Germon, Amin

Adarzi, Đào Minh Nhật..... 406

Đánh giá mức độ ô nhiễm nước mặt sông Hà Thanh, tỉnh Bình Định sử dụng công nghệ

GIS và tư liệu viễn thám

Nguyễn Thị Ánh Nguyệt, Lê Chấn Trung, Trần Anh Tuấn, Phạm Việt Hồng 420

Đánh giá sự phân bố ô nhiễm bụi PM10 và PM2.5 tại khu vực nội đô thành phố Hà Nội

**Đỗ Thị Thanh Bình, Nguyễn Thị Ánh Nguyệt, Phùng Thị Thu Trang, Đỗ Mạnh
Dũng, Lê Mạnh An 431**



Mô phỏng các trận lũ đặc biệt lớn trên lưu vực sông Đà dựa trên mô hình tích hợp khí tượng-thủy văn WEHY-WRF

Trần Anh Quân^{1*}

¹Khoa Môi trường, Trường Đại học Mô-Địa chất, Việt Nam,

* Tác giả liên hệ

Họ và tên: Trần Anh Quân

Điện thoại: 0366888829

E-mail: quantrananh.hung@gmail.com

Tóm tắt

Lũ lớn và đặc biệt lớn trên lưu vực sông Đà (LVS Đà) là hiểm họa thiên tai gây thiệt hại nặng nề về người, tài sản và ảnh hưởng sâu rộng đến hệ thống hồ chứa bậc thang (Lai Châu, Sơn La, Hòa Bình (trước 1/7/2025)) cũng như an toàn hạ du sông Hồng. Nghiên cứu này mô phỏng lại các trận lũ điển hình giai đoạn 1995-2023 bằng mô hình thủy văn vật lý thực WEHY (Watershed Environmental Hydrology) tích hợp trực tiếp với mô hình khí tượng WRF (Weather Research and Forecasting). Kết quả cho thấy mô hình tái hiện tốt thời gian, quy mô và đỉnh lũ tại các vị trí hồ Lai Châu, Sơn La và Hòa Bình; sai số đỉnh lũ đa số nằm trong ngưỡng cho phép theo Thông tư 22/2019/TT-BTNMT. Phân tích phân bố không gian mưa 72 giờ và dòng chảy sườn đồi cho thấy vai trò nổi trội của yếu tố địa hình, đặc tính đất và thảm phủ trong điều tiết dòng chảy mặt, không phải nơi mưa lớn nhất luôn là nơi dòng chảy mạnh nhất. Các phát hiện khẳng định tiềm năng của hệ mô hình WEHY-WRF trong hỗ trợ dự báo, cảnh báo và vận hành liên hồ để giảm thiểu rủi ro lũ đối với vùng hạ du trọng yếu như Hà Nội.

Từ khóa: WEHY, sông Đà, lũ cực đoan, mô phỏng thủy văn, hồ chứa.

phổ biến và nguy hiểm nhất, vừa mang tính

1. Đặt vấn đề

chu kỳ theo mùa, vừa mang tính ngẫu

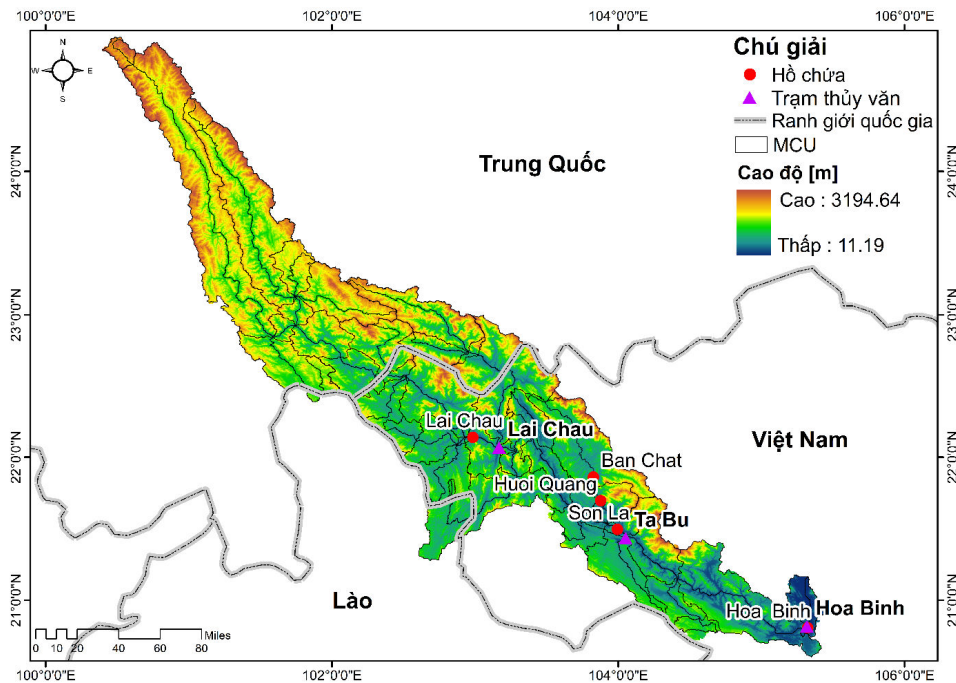
Lũ là một trong những hiểm họa thiên tai

nhiên gần gũi với tổ hợp của các hình thái khí

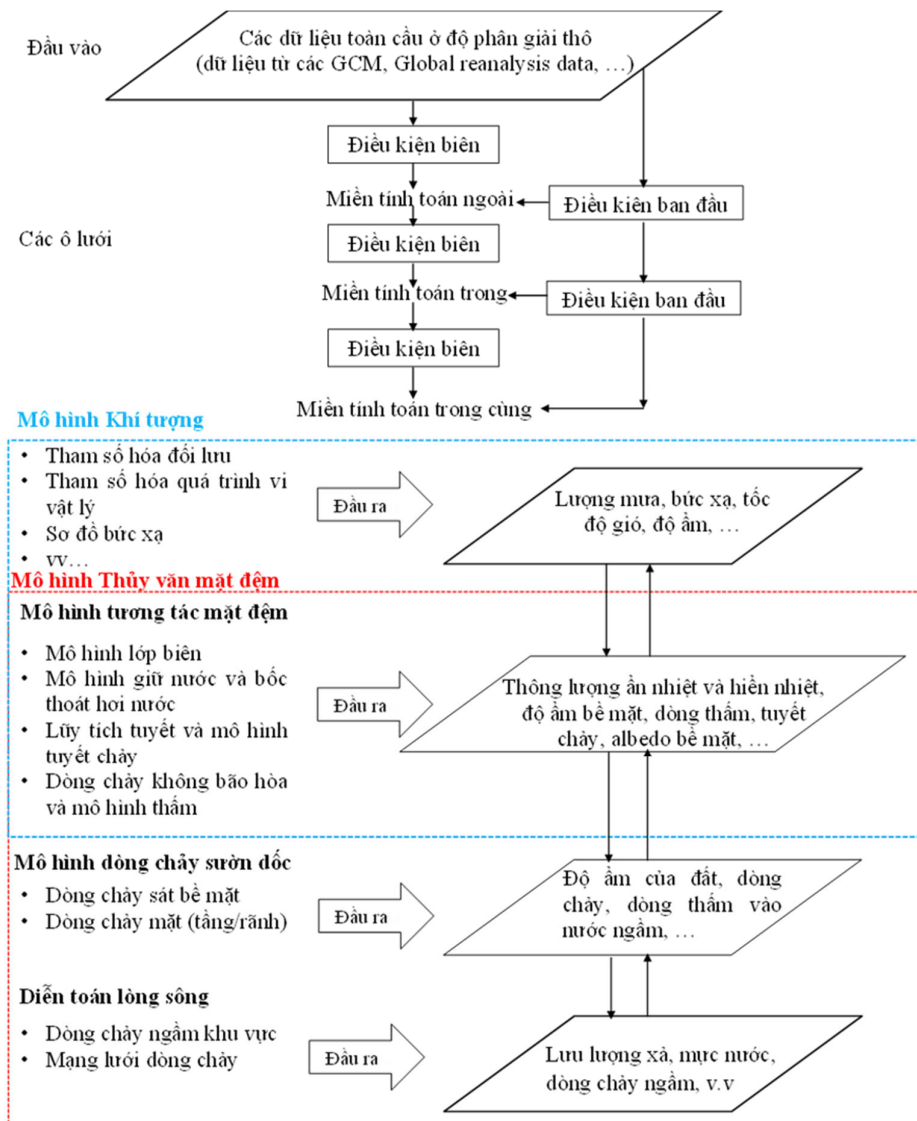
tượng cực đoan. Đối với Việt Nam, sự dễ tổn thương trước lũ xuất phát từ sự kết hợp giữa mật độ dân cư cao ở vùng đất thấp ven sông, tốc độ đô thị hóa nhanh, và tác động gia tăng của biến đổi khí hậu, khiến các hệ thống sông chính—trong đó có sông Đà—thường xuyên đứng trước áp lực mưa lũ lớn (Hồ Việt Cường và cs, 2019). Trên LVS Đà, ba hồ chứa lớn Lai Châu, Sơn La và Hòa Bình đồng thời là các công trình lợi dụng tổng hợp (chống lũ, cấp nước, phát điện), đóng vai trò sống còn trong cắt lũ và điều tiết dòng chảy cho hạ du. Tuy nhiên, bản chất bậc thang và dung tích rất lớn của các hồ cũng làm tăng tính phức hợp hệ thống, đòi hỏi hoạch định vận hành tỉ mỉ

và dự báo-cảnh báo chính xác để phòng ngừa rủi ro vượt lũ thiết kế.

Trong bối cảnh đó, mô phỏng lại các trận lũ đặc biệt lớn đã xảy ra trên LVS Đà không chỉ giúp tái hiện các điều kiện thời tiết-thủy văn dẫn đến đỉnh lũ cao mà còn cung cấp bằng chứng định lượng về hiệu quả cắt lũ của hệ thống hồ chứa và những hạn chế khi đối diện các tổ hợp thời tiết hiểm gặp (Bùi Huyền Linh và Trần Anh Phương, 2021). Bài báo lựa chọn cách tiếp cận bằng mô hình thủy văn vật lý thực WEHY tích hợp trực tiếp với mô hình khí tượng WRF, nhằm tận dụng tối đa cấu trúc trường khí tượng và phản ứng bề mặt lưu vực trong các quá trình bốc hơi, thấm và



Hình 1. Vị trí các trạm thủy văn và hồ chứa lớn trên lưu vực sông Đà



Hình 2. Các thành phần trong mô hình kết hợp khí tượng thủy văn

chuyển vị dòng chảy (Powers và cs, 2017). Phần tiếp theo mô tả tổng quan khu vực nghiên cứu cùng các sự kiện lũ tiêu biểu, rồi trình bày chi tiết khung dữ liệu và phương pháp, kết quả mô phỏng theo thời gian và không gian, trước khi thảo luận sâu về hiệu năng mô hình, cơ chế hình thành lũ

đặc biệt lớn và ý nghĩa quản lý đối với vận hành liên hồ, an toàn hạ du.

2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu

LVS Đà nằm ở vùng Tây Bắc Việt Nam, kéo dài tới lãnh thổ Trung Quốc ở thượng lưu (Hình 1). Địa hình điển hình là núi cao,



chia cắt mạnh, độ dốc lớn, với dãy Hoàng Liên Sơn đóng vai trò rào chắn địa hình quan trọng đối với dòng chảy và trường mưa. Điều kiện mặt đệm (đất, thảm phủ, độ sâu tầng rễ, LAI theo mùa) và mạng kênh-suối dày đặc khiến lưu vực có phản ứng thủy văn nhạy, đặc biệt trong các đợt mưa lớn thời đoạn ngắn. Hệ thống hồ chứa bậc thang gồm Lai Châu, Sơn La và Hòa Bình cung cấp khả năng điều tiết đáng kể; hồ Hòa Bình thường đóng góp khoảng một nửa dòng chảy hạ lưu sông Hồng thông qua điều tiết cắt lũ.

2.2. Phương pháp mô phỏng

Mô hình WEHY là mô hình thủy văn vật lý thực, mô phỏng các quá trình mưa-dòng chảy ở quy mô lưu vực với mô tả chi tiết các thành phần bốc hơi, cân bằng năng lượng, cân bằng khối lượng, thấm và truyền lũ trên kênh-suối, đặc biệt chú trọng

cơ chế tạo dòng chảy sườn đồi (Chen và cs, 2004). WEHY tiếp nhận trực tiếp đầu vào khí tượng từ WRF, một mô hình dự báo thời tiết phổ biến, cho phép xây dựng chuỗi mưa theo thời gian và trường khí tượng đi kèm (nhiệt độ, độ ẩm, gió, áp, bức xạ). Cấu hình tương tác có thể “one-way” (khí tượng → thủy văn) hoặc “fully coupled” (hai chiều), trong đó trường bề mặt từ thủy văn có thể phản hồi lên khí tượng. Trong nghiên cứu này, đầu vào khí tượng từ WRF được sử dụng để mô phỏng các trận lũ quá khứ, đảm bảo tính nhất quán về động lực và chuỗi thời gian (Hình 2).

2.3. Dữ liệu

Địa hình (DEM) lấy từ SRTM với độ phân giải 30 m và 90 m (Farr và cs, 2007); dữ liệu đất sử dụng SoilGrids ở độ phân giải ~1 km (Poggio và cs, 2021); thảm phủ bề mặt từ GLCC và độ che phủ lá (LAI) từ

Bảng 1. Thông tin nguồn dữ liệu sử dụng

STT	Tên trạm	Sông	Yếu tố thu thập	Năm thu thập
1. Trạm Thủy văn				
1.1	Lai Châu	Đà	H, Q	1994 - 2015
1.2	Tạ Bú	Đà	H, Q	1994 - 2015
1.3	Hòa Bình	Đà	H, Q	1994 - 2015
2. Hồ chứa lớn				
2.1	Lai Châu	Đà	Q _{đến}	1994 - 2023
2.2	Sơn La	Đà	Q _{đến}	2015 - 2023
2.3	Hòa Bình	Đà	Q _{đến}	2015 - 2023



MODIS MCD15A3H (500 m, chu kỳ 4 ngày) (Myneni và cs, 2015; Loveland và cs, 2017). Trường khí tượng (mưa, nhiệt, ẩm, gió, áp, bức xạ) lấy từ đầu ra của WRF và được nội suy, chiết ghép vào lưới tính của WEHY. Dữ liệu kiểm định lấy từ mực nước và lưu lượng thực đo tại các trạm Lai Châu, Tạ Bú, Hòa Bình, cùng lưu lượng đến các hồ lớn; chuỗi dữ liệu được cập nhật đến năm 2023 (Bảng 1).

2.4. Thiết kế mô phỏng và hiệu chỉnh-kiểm định

Khác với hiệu chỉnh theo mùa hoặc theo năm, nghiên cứu lựa chọn hiệu chỉnh “theo sự kiện” (event-based calibration) nhằm bám sát động lực riêng của mỗi trận lũ lớn trong giai đoạn 1995-2023. Bộ tham số được điều chỉnh tập trung vào các thành phần nhạy cảm: hệ số thấm, tham số trữ nước đất, nhám mặt sườn, nhám kênh-suối, tham số truyền lũ, và đại diện thảm phủ-LAI theo thời đoạn. Kiểm định mô phỏng dựa trên ba nhóm chỉ tiêu: (i) sai số đỉnh lũ (Qpeak) đối chiếu với ngưỡng cho phép theo Thông tư 22/2019/TT-BTNMT (Bộ TNMT, 2019) (hệ số chuẩn hóa $Scf = 0,6742$, chuỗi tối thiểu ≥ 5 năm có các trận lũ lớn); (ii) sai số tổng lượng lũ (W), tính bằng tích phân lưu lượng theo thời gian sự kiện; và (iii) đối chiếu đường biến trình (hình thái thời gian lên-đỉnh-xuống lũ).

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Mô phỏng theo thời gian: đỉnh lũ, tổng lượng và biến trình

Tại khu vực hồ Lai Châu, các trận lũ lớn và đặc biệt lớn được mô phỏng với sai số tổng lượng đa phần nhỏ ($94-6.356 \text{ m}^3/\text{s}$), ngoại lệ đáng chú ý là sự kiện cuối 7-đầu 8/2017 với sai số tổng lượng $\sim 12.883 \text{ m}^3/\text{s}$. Sai số đỉnh lũ đa số nằm dưới ngưỡng cho phép $412 \text{ m}^3/\text{s}$; tuy nhiên, tháng 7/2006 và cuối 7-đầu 8/2007 có sai số Qpeak vượt ngưỡng, phản ánh những thách thức trong mô tả mưa-dòng chảy thời đoạn ngắn khi trường mưa có cường độ biến thiên mạnh theo giờ. Đối với các sự kiện điển hình khác, mô hình tái hiện tốt thời điểm đạt đỉnh và trị số đỉnh; chẳng hạn sự kiện 1998 sai số Qpeak $\sim 61 \text{ m}^3/\text{s}$, năm 1996 $\sim 160 \text{ m}^3/\text{s}$ (Bảng 2, Hình 3).

Tại khu vực hồ Sơn La, sai số Qpeak của toàn bộ sự kiện nằm trong ngưỡng cho phép $2.473 \text{ m}^3/\text{s}$; sai số tổng lượng lũ chủ yếu trong khoảng $205-14.402 \text{ m}^3/\text{s}$, với ngoại lệ tháng 8/1996 đạt $\sim 29.227 \text{ m}^3/\text{s}$. Đường biến trình mô phỏng bám sát thời gian lên-đỉnh-xuống lũ, thể hiện khả năng mô tả tốt phản ứng lưu vực ở quy mô trung lưu khi trường mưa và điều kiện mặt đệm được đại diện đầy đủ.

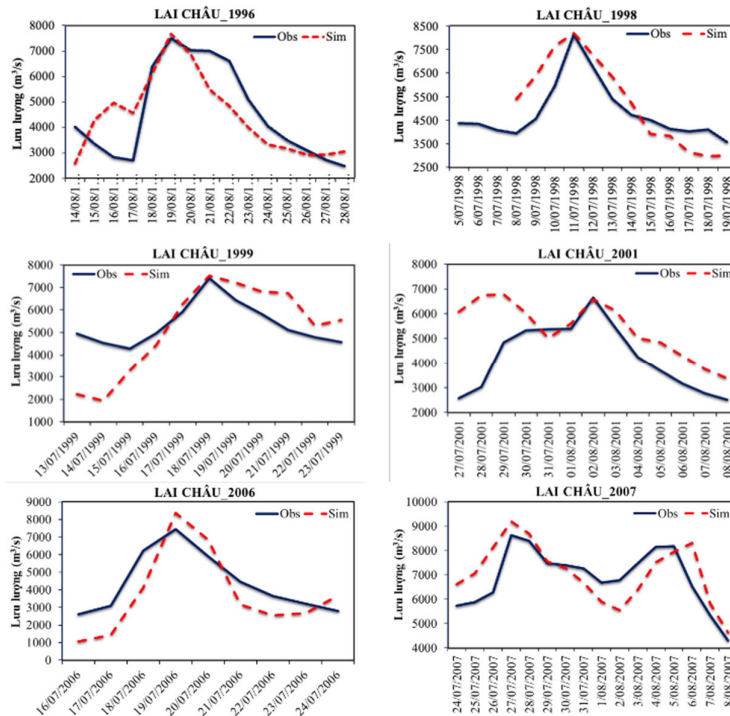
Tại hồ Hòa Bình, mô hình cho thấy độ ổn

Bảng 2. Sai số kết quả mô phỏng các trận lũ lớn tại khu vực hồ Lai Châu

Đơn vị: m^3/s

TT	Trận lũ	Tổng lượng lũ (W)		Sai số W	Đỉnh lũ (Q_{peak})		Sai số Q_{peak}
		Obs	Sim		Obs	Sim	
1	16-25/08/1996	52.710	51.047	1.663	7.510	7.670	160
2	08-17/07/1998	44.030	50.386	6.356	8.140	8.201	61
3	13-23/07/1999	58.750	57.320	1.430	7.410	7.520	110
4	01-04/08/2001	21.728	23.326	1.598	6.652	6.788	137
5	09-15/08/2002	42.090	49.649	7.559	8.030	8.083	53
6	17-23/07/2006	33.970	29.166	4.804	7.460	8.384	924
7	26/07-06/08/2007	89.250	89.156	94	8.630	9.192	562
8	31/07-04/08/2017	18.811	31.694	12.883	8.140	8.407	267

Ghi chú: Sai số đỉnh lũ cho phép là $412 m^3/s$



Hình 3. Kết quả mô phỏng các trận lũ lớn và đặc biệt lớn xảy ra tại khu vực hồ Lai Châu

định cao: sai số Q_{peak} tương đối nhỏ (74-1.614 m^3/s), ví dụ tháng 7/2009 chỉ ~74 m^3/s , tháng 7/2018 ~86 m^3/s ; sai số tổng lượng lũ dao động 699-15.758 m^3/s , ngoại

lệ tháng 8/1996 lệch lớn ~25.027 m^3/s . Chuỗi biến trình cho thấy mô hình tái hiện tốt hình thái sóng lũ tổng hợp khi các nhánh sông con cùng góp dòng về hồ, minh

**Bảng 3. Sai số kết quả mô phỏng các trận lũ lớn tại khu vực hồ Hòa Bình**Đơn vị: m^3/s

TT	Trận lũ	Tổng lượng lũ (W)		Sai số W	Đỉnh lũ (Q_{peak})		Sai số Q_{peak}
		Obs	Sim		Obs	Sim	
1	14-23/08/1995	9.7741	9.6757	984	12.129	12.375	246
2	16-25/08/1996	127.088	152.115	25.027	21.500	21.861	361
3	07-17/07/1998	87.997	95.378	7.381	11.776	12.045	269
4	13-24/07/1999	95.102	105.975	10.873	10.500	11.727	1.227
5	01-12/08/2000	65.049	78.539	13.490	8.710	8.884	174
6	31/07-06/08/2001	51.600	55.507	3.907	9.940	10.082	142
7	09-16/08/2002	74.483	90.241	15.758	15.200	15.427	227
8	08-14/08/2005	53.575	59.174	5.599	8.120	9.734	1.614
9	17-23/07/2006	56.686	70.651	13.965	14.700	14.927	227
10	26/07-07/08/2007	109.471	114.261	4.790	10.050	10.164	114
11	07-14/08/2008	55.775	49.898	5.877	10.350	10.866	516
12	03-11/07/2009	61.648	60.949	699	11.600	11.674	74
13	18-25/07/2018	50.568	58.902	8.334	11.800	11.886	86

Ghi chú: Sai số đỉnh lũ cho phép là: $2.358 m^3/s$

chứng cho khả năng tái hiện hiệu ứng cộng hưởng theo thời gian (Bảng 3, Hình 4).

4.2. Mô phỏng theo không gian với tổng mưa 72 giờ và dòng chảy sườn đồi

Phân tích các bản đồ không gian cho thấy mối quan hệ phức hợp giữa mưa lớn và dòng chảy sườn đồi. Sự kiện tháng 8/1995 ghi nhận mưa lớn ở giữa lưu vực nhưng cực đại dòng chảy sườn đồi lại tập trung thượng lưu; tháng 8/1996 và 8/2002 cho thấy sự trùng khớp tương đối giữa cực đại mưa 72 giờ với dòng chảy sườn đồi ở khu vực thượng lưu nằm trong lãnh thổ Trung Quốc; tháng 7/1998 có cực đại gần dãy Hoàng Liên Sơn; tháng 7/2009 mưa tập trung ở giữa lưu vực (Lào Cai và vùng tiếp

giáp Trung Quốc) trong khi dòng chảy sườn đồi mạnh nhất xuất hiện quanh Lào Cai và các sườn gần Hoàng Liên Sơn; năm 2018, đỉnh lũ hình thành trực tiếp từ mưa tại vùng hồ Hòa Bình, trong khi khu vực hồ Sơn La không có lũ đáng kể. Những mô hình phân bố này nhấn mạnh rằng địa hình (độ dốc, hướng sườn), tính thấm, trữ nước đất và thảm phủ đóng vai trò quyết định trong biến đổi mưa thành dòng chảy; nơi có mưa lớn nhất không nhất thiết là nơi có dòng chảy sườn đồi mạnh nhất (Hình 3.6 - Hình 3.8).

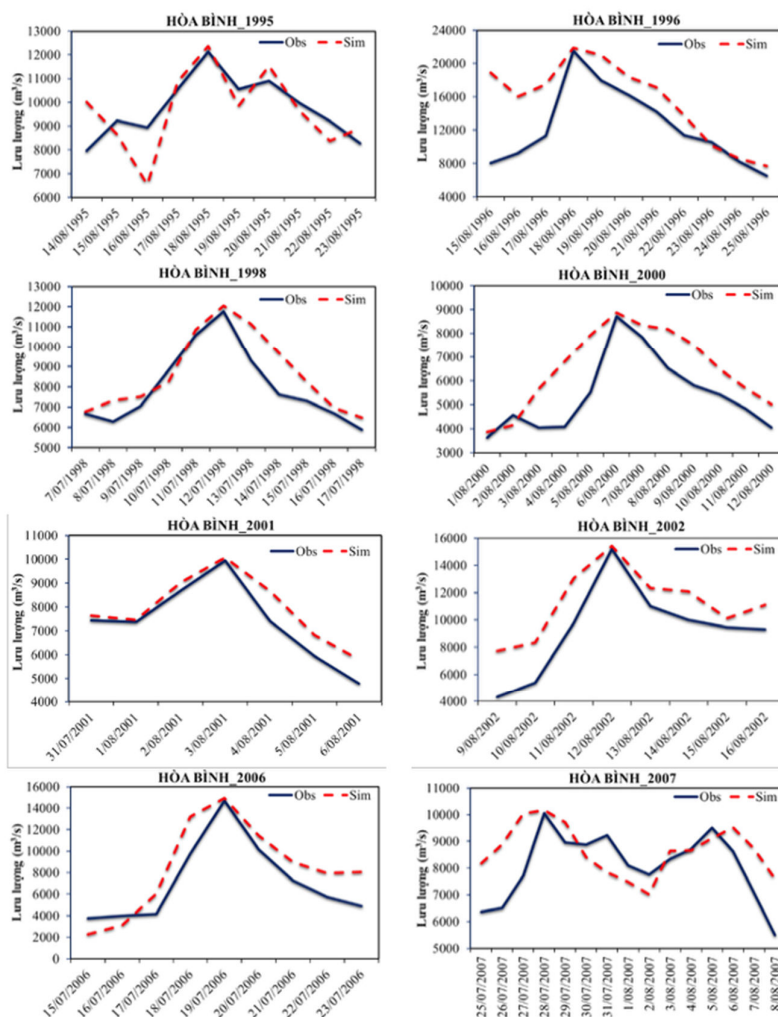
4. Thảo luận

4.1. Hiệu năng mô hình và sai số

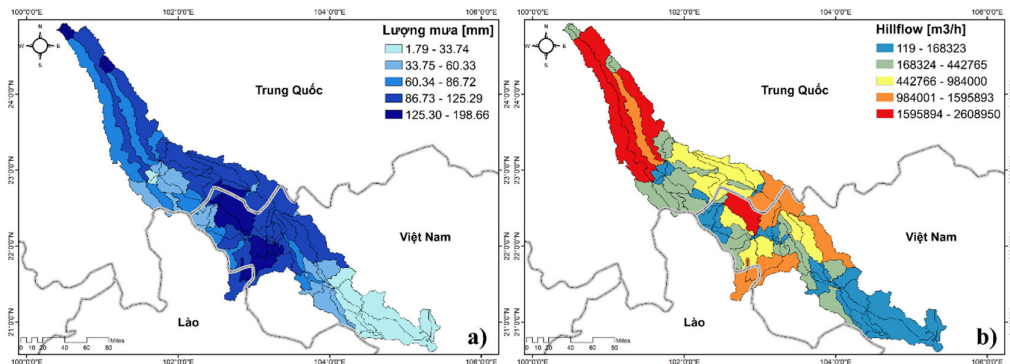
Hiệu năng của hệ mô hình WEHY-WRF đối với các sự kiện lũ lớn trên LVS Đà nhìn chung rất khả quan. Phần lớn các trận, sai số đỉnh lũ và tổng lượng lũ nằm trong ngưỡng chấp nhận theo khung pháp lý Việt Nam, từ đó xác nhận tính phù hợp của cách tiếp cận tích hợp khí tượng-thủy văn cho

bài toán tái hiện quá khứ. Mặc dù vậy, một số sự kiện có sai số tổng lượng lớn (đặc biệt tháng 8/1996 tại Sơn La và Hòa Bình; tháng 8/2017 tại Lai Châu) phản ánh những thách thức còn tồn tại.

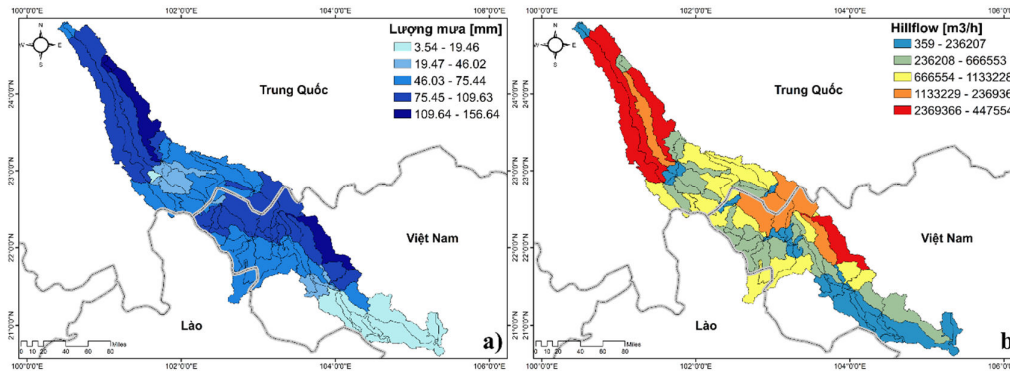
Thứ nhất, đại diện trường mưa là nguồn gốc sai số quan trọng. Mưa cực hạn trong ITCZ và các tổ hợp đối lưu có cấu trúc không gian-thời gian rất phức tạp, biến



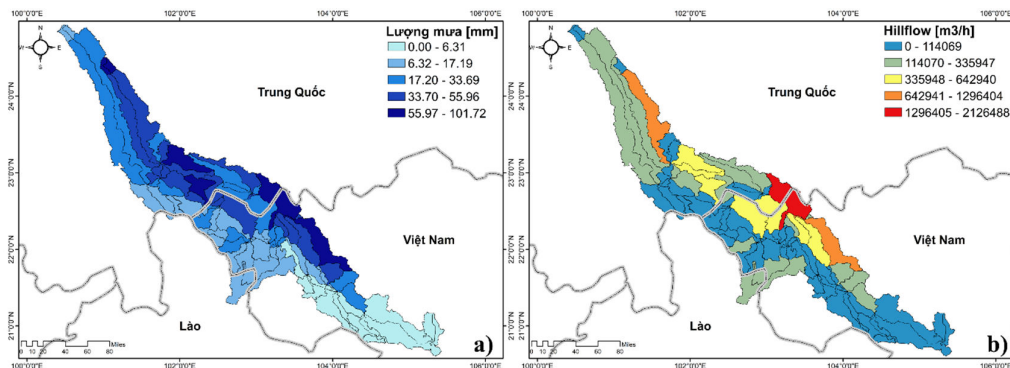
Hình 4. Kết quả mô phỏng các trận lũ lớn và đặc biệt lớn xảy ra tại vị trí hồ Hòa



Hình 5. Bản đồ phân bố a) tổng lượng mưa 72h b) dòng chảy sườn đồi của các MCU trong trận lũ tháng 8 năm 1995



Hình 6. Bản đồ phân bố a) tổng lượng mưa 72h b) dòng chảy sườn đồi của các MCU trong trận lũ tháng 8 năm 1996



Hình 7. Bản đồ phân bố a) tổng lượng mưa 72h b) dòng chảy sườn đồi của các MCU trong trận lũ tháng 7 năm 1998

thiên mạnh theo giờ, đôi khi “điểm hóa” chuyển nhanh. Nếu đầu vào WRF chưa theo dõi hội tụ hoặc tuyến đối lưu đi nắm bắt đầy đủ cấu trúc này tại quy mô km,



hoặc nếu lưới nội suy từ WRF sang WEHY làm “mềm hóa” cực trị mưa, mô hình thủy văn sẽ thiếu năng lượng đầu vào để tạo dòng chảy tương xứng, kéo theo sai số tổng lượng. Thứ hai, mặt đệm lưu vực dù đã dùng SoilGrids và GLCC, song độ phân giải 1 km-500 m khó phản ánh hết tính không đồng nhất nhỏ (sub-grid heterogeneity) của đất, đá phong hóa, lớp phủ thảm thực vật và hệ rễ; các tham số thấm-trữ nước, khi đại diện theo trung bình ô lưới, có thể làm sai khác đáng kể phản ứng dòng chảy ở các sườn dốc rất lớn. Thứ ba, chiến lược hiệu chỉnh theo sự kiện ưu tiên tái hiện động lực riêng của mỗi trận, giúp mô phỏng tốt trong phạm vi trận đó, nhưng tính tổng quát (transferability) sang sự kiện khác, đặc biệt với trường mưa-mặt đệm khác biệt, sẽ giảm.

4.2. Cơ chế hình thành lũ đặc biệt lớn trên LVS Đà

Các trận lũ đặc biệt lớn thường gắn với tổ hợp hình thế: ITCZ phối hợp ATNĐ/bão, hoặc rãnh áp thấp bị nén kết hợp hội tụ gió tầng thấp-trung, tạo các dải mưa diện rộng nhưng có “hạt nhân” cường độ cao, duy trì trong thời đoạn ngắn đến trung bình (48-120 giờ). Trên LVS Đà, một đặc điểm thường gặp là dịch chuyển trường mưa theo trục lưu vực: ban đầu mưa mạnh ở vùng hạ lưu và giữa lưu vực, sau đó dịch

lên thượng lưu, khiến sóng lũ từ các tiểu lưu vực đến hồ cộng hưởng theo thời gian. Sự kiện tháng 8/1996 là ví dụ điển hình: lũ hạ lưu có ba đỉnh, trong khi thượng lưu chỉ có một, cho thấy sự chồng ghép động lực do khác pha dòng đến từ các nhánh.

Bên cạnh đó, hình thái địa hình tạo chế độ tập trung dòng chảy rất nhanh và mạnh trên các sườn đồi dốc, với mạng suối dày dẫn truyền nước về kênh chính trong thời gian ngắn. Tính thấm và trữ nước của đất quyết định tỷ lệ mưa chuyển thành dòng chảy mặt; nơi có đất nén chặt, tầng đất mỏng hoặc đá gốc nông sẽ bão hòa nhanh, tạo ra dòng chảy tràn sớm và mạnh. Thảm phủ (LAI, kiểu che phủ) góp phần lớn vào điều tiết: tán lá và vật rơi giữ nước làm chậm thời gian trễ, trong khi suy giảm thảm phủ (do khai thác, lâm nghiệp) có thể tăng hệ số dòng chảy mặt và biên độ lũ. Tương tác của những yếu tố này giải thích tại sao mưa lớn không luôn đồng nghĩa với cực đại dòng chảy sườn đồi ở cùng vị trí.

4.3. Vai trò vận hành liên hồ và dự báo tác động

Các kết quả định lượng về lượng tích nước, biên độ mực nước hồ, và giảm đỉnh lũ ở hạ du cho thấy vai trò sống còn của vận hành liên hồ. Nhiều sự kiện, hồ Hòa Bình đã giảm đỉnh lũ tại Hà Nội từ ~0,3 đến ~0,8 m, qua đó hạ thấp đáng kể nguy cơ vượt lũ



thiết kế đối với hệ thống đê và hạ tầng đô thị. Vận hành liên hồ thời gian thực cần dự báo tác động (impact-based forecasting) dựa trên hệ mô hình WEHY-WRF: chuyển nhanh trường mưa dự báo thành biến trình dòng đến, rồi tính toán phương án mở-đóng cửa, phối hợp phát điện để bảo đảm cả an toàn công trình lẫn giảm rủi ro hạ du. Sự kiện 2018 cho thấy tính bản địa hóa của lũ: lũ hình thành trực tiếp tại vùng hồ Hòa Bình trong khi Sơn La không có lũ tương ứng; vì vậy, dự báo-vận hành phải theo tiêu lưu vực thay vì chỉ dựa trên chỉ số vùng rộng.

4.4. Ứng dụng cho kế hoạch an toàn hạ du và quản trị rủi ro

Từ góc độ quản trị rủi ro, các mô phỏng tái hiện sự kiện cực hạn cung cấp nền tảng để xây dựng kịch bản lũ vượt thiết kế (thiên tai kép: mưa kéo dài + mưa cực đoạn + sự cố công trình), cập nhật kế hoạch ứng phó khẩn cấp và quy trình liên hồ. Bên cạnh việc cải thiện lưới dự báo và tham số mô hình, cần liên kết với mô phỏng ngập lụt 1D-2D hạ du, bao gồm bản đồ nguy cơ, tuyến sơ tán, điểm tránh trú, và phương án bảo đảm dịch vụ thiết yếu. Ở cấp chiến lược, các kết quả có thể tích hợp vào đánh giá rủi ro đa hiểm họa cho vùng đô thị lớn, nơi tổn thất tiềm năng rất cao, nhằm tối ưu hóa phân bổ nguồn lực phòng chống thiên

tai.

5.5. Hướng nghiên cứu tiếp theo

Dù WEHY-WRF cho thấy hiệu năng tốt, vẫn tồn tại hạn chế. Độ phân giải dữ liệu mặt đệm và khí tượng còn cần nâng cấp: WRF quy mô km (convection-permitting) sẽ mô tả tốt hơn cấu trúc đối lưu; DEM độ phân giải cao (LiDAR), SoilGrids 250 m, LAI theo mùa thời gian thực sẽ giảm sai số đại diện. Hiệu chỉnh đa mục tiêu (NSGA-II hoặc tương tự) với các tiêu chí đỉnh lũ, tổng lượng, thời gian đến đỉnh và sai số biến trình có thể tạo bộ tham số cân bằng hơn—giảm rủi ro quá khớp theo sự kiện. Đồng mô phỏng vận hành hồ (mở cửa xả, phát điện) và tác động nhân sinh (chuyển đổi sử dụng đất, suy giảm thảm phủ) cần được đưa vào khung mô hình để đánh giá toàn diện hơn. Cuối cùng, kết hợp với mô-đun ngập lụt sẽ tạo chuỗi dự báo tác động xuyên suốt từ mưa đến mực nước sông và độ sâu ngập tại ô đô thị, phục vụ chỉ huy ứng phó.

Kết luận

Nghiên cứu đã mô phỏng lại các trận lũ lớn và đặc biệt lớn trên lưu vực sông Đà giai đoạn 1995-2023 bằng hệ mô hình WEHY-WRF, sử dụng dữ liệu địa hình, đất, thảm phủ và chuỗi quan trắc thủy văn. Kết quả cho thấy mô hình tái hiện tốt đặc trưng lũ



cả về thời gian và quy mô. Tại hồ Lai Châu, sai số đỉnh lũ của các trận điển hình như tháng 8/1996 và tháng 7/1998 lần lượt chỉ khoảng 160 m³/s và 61 m³/s; tại hồ Sơn La, sai số Qpeak lớn nhất là 693 m³/s (tháng 7/2006), còn tại hồ Hòa Bình, sai số nhỏ nhất chỉ 74 m³/s (tháng 7/2009). Sai số tổng lượng lũ chủ yếu nằm trong khoảng cho phép, ngoại lệ một số sự kiện cực đoan như tháng 8/1996.

Phân tích không gian cho thấy mưa lớn không luôn đồng nghĩa với dòng chảy mạnh nhất; yếu tố địa hình, tính thấm và thảm phủ đóng vai trò quan trọng trong điều tiết dòng chảy. Hiệu quả cắt lũ của hồ Hòa Bình được khẳng định qua việc giảm đỉnh lũ tại Hà Nội từ 0,29 m đến 0,8 m, với tổng lượng nước tích đạt từ 3,2 đến 6,7 tỷ m³. Những kết quả này chứng minh tính khả thi của hệ mô hình WEHY-WRF trong dự báo tác động và vận hành liên hồ, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho việc xây dựng kịch bản ứng phó lũ cực hạn và giảm thiểu rủi ro cho vùng hạ du trọng yếu như Hà Nội.

Tài liệu tham khảo

1. Bộ Tài nguyên và Môi trường Việt Nam. (2019). Thông tư 22/2019/TT-BTNMT Ban hành Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về dự báo, cảnh báo lũ. Chính phủ Việt Nam.
2. Chen, Z. Q. R., Kavvas, M. L., Ohara, N., Anderson, M. L., & Chen, W. (2004). Watershed Environmental Hydrology (WEHY) Model: Model Application. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(6), 480-490.
3. Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004.
4. Hồ Việt Cường, Trịnh Quang Toàn, Đỗ Hoài Nam, Nguyễn Thị Ngọc Nhân, (2019). Nghiên cứu diễn biến mưa lớn trên lưu vực sông Đà - Thao trong tương lai dưới tác động của biến đổi khí hậu. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam - A*, Số. 11B.
5. Linh, Bùi Huyền, and Trần Anh Phương. "Đánh giá ảnh hưởng của các hồ chứa đến dòng chảy trên sông Đà." *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* 731 (2021): 97-107.
6. Loveland, T. R., Reed, B. C., Brown, J. F., Ohlen, D. O., Zhu, Z., Yang, L.,



- & Merchant, J. W. (2000). Development of a Global Land Cover Characteristics Database and IGBP Discover from 1 km AVHRR Data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6-7), 1303-1330.
7. Myneni, R., Knyazikhin, Y., & Park, T. (2015). MCD15A3H MODIS/Terra+Aqua Leaf Area Index/FPAR 4-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center.
8. Poggio, L., de Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D. (2021). SoilGrids 2.0: Producing Soil Information for the Globe with Quantified Spatial Uncertainty. *SOIL*, 7(1), 217-240. <https://soil.copernicus.org/articles/7/217/2021/>
9. Powers, J. G., Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Davis, C. A., Dudhia, J., Gill, D. O., Coen, J. L., Gochis, D. J., Ahmadov, R., Peckham, S. E., Grell, G. A., Michalakes, J., Trahan, S., Benjamin, S. G., Alexander, C. R., Dimego, G. J., Wang, W., Schwartz, C. S., Romine, G. S., Liu, Z., Snyder, C., Chen, F., Barlage, M. J., Yu, W., & Duda, M. G. (2017). The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1717-1737.
- Ngày nộp: 15/7/2025*
Ngày chấp nhận đăng: 22/12/2025