



Original Article

Assess Hydrological Regime Changes in the Upper Da River under the Impacts of Climate Change and Socio-economic Development

Dang Dinh Kha*, Nguyen Phuong Linh, Nguyen Y Nhu

*Faculty of Meteorology Hydrology and Oceanography,
VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam*

Received 25th August 2025

Revised 15th October 2025; Accepted 30th October 2025

Abstract: The Da River, the principal tributary of the Red River system, plays a strategic role in hydropower generation and water supply for northern Vietnam. The hydrological regime of its upper basin has been increasingly influenced by the combined impacts of climate change and transboundary reservoir regulation. This study presents the first integrated assessment of these two factors within a unified SWAT-SUFI-2 modelling framework to evaluate the streamflow alterations in the upper Da River basin. Results indicate that under natural flow conditions without reservoir regulation, climate change intensifies flow extremes, with mean flood-season discharge increasing by approximately 2.5 times, while the number of low-flow months ($Q < P_5$) during the dry season rises 17 - fold compared with the baseline period (1980 - 2003). In contrast, during the reservoir operation phase (post-2007), the flood peak magnitude decreased by 17.5%, whereas dry-season discharge increased by 11.7%, effectively flattening the seasonal hydrograph. When both factors are considered jointly, reservoirs dominate the redistribution of seasonal flows, and climate change amplifies hydrological variability and extremes. This study provides the first quantitative evidence of the combined impacts of climate change and reservoir regulation on the transboundary Da River basin, offering a scientific basis for adaptive reservoir operation, data sharing, and integrated downstream water-risk management.

Keywords: Climate change, reservoir, hydrological regimes, Da River Basin.

* Corresponding author.

E-mail address: dangdinhkha@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5387>

Đánh giá sự biến đổi chế độ thủy văn thượng nguồn sông Đà dưới tác động của Biến đổi khí hậu và phát triển kinh tế xã hội

Đặng Đình Khả*, Nguyễn Phương Linh, Nguyễn Ý Như

*Khoa Khí tượng Thủy văn và Hải dương học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên,
Đại học Quốc gia Hà Nội, 334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 25 tháng 8 năm 2025

Chỉnh sửa ngày 15 tháng 10 năm 2025; Chấp nhận đăng ngày 30 tháng 10 năm 2025

Tóm tắt: Sông Đà là chi lưu chính của hệ thống sông Hồng, có vai trò chiến lược trong phát điện và cấp nước cho miền Bắc Việt Nam. Tuy nhiên, chế độ thủy văn của lưu vực đang chịu tác động đồng thời của biến đổi khí hậu và điều tiết hồ chứa xuyên biên giới. Nghiên cứu này lần đầu tiên tích hợp hai yếu tố trên trong cùng một khung mô hình SWAT - SUFI-2, nhằm đánh giá sự biến đổi dòng chảy ở thượng nguồn sông Đà. Kết quả cho thấy trong điều kiện không có hồ chứa, biến đổi khí hậu làm gia tăng tính cực đoan dòng chảy, với lưu lượng mùa lũ tăng trung bình ~2,5 lần và số tháng có dòng chảy < P5 trong mùa kiệt tăng gấp 17 lần so với giai đoạn nền (1980 - 2003). Ngược lại, trong giai đoạn vận hành hồ chứa (sau 2007), đỉnh lũ cực đại giảm ~17,5% và dòng chảy mùa kiệt tăng ~11,7%, góp phần làm phẳng chu kỳ thủy văn. Khi xét đồng thời cả hai yếu tố, hồ chứa giữ vai trò chi phối trong phân phối lại dòng chảy theo mùa, trong khi biến đổi khí hậu làm tăng bất định và tính cực trị. Nghiên cứu cung cấp bằng chứng định lượng đầu tiên về tác động tổng hợp của hồ chứa và khí hậu trong lưu vực xuyên biên giới sông Đà, làm cơ sở cho vận hành hồ chứa linh hoạt, chia sẻ dữ liệu và quản lý rủi ro nguồn nước hạ du.

Từ khoá: Biến đổi khí hậu, kinh tế xã hội, hồ chứa, dòng chảy, lưu vực sông Đà.

1. Giới thiệu

Biến đổi khí hậu toàn cầu đang làm thay đổi sâu sắc các yếu tố khí tượng - thủy văn trên quy mô lưu vực, đặc biệt ở các vùng nhiệt đới ẩm và khu vực phụ thuộc nhiều vào tuyết tan và dòng chảy ngầm [1]. Nhiều nghiên cứu dự báo rằng vào giữa thế kỷ 21, các lưu vực Đông Nam Á có thể giảm 10 - 30% dòng chảy trung bình năm do lượng mưa giảm và bốc hơi gia tăng [2, 3]. Những thay đổi này làm gia tăng tính cực đoan của chu trình thủy văn, với đỉnh lũ cao hơn, dòng chảy kiệt kéo dài và khắc nghiệt hơn, đặt ra thách thức lớn cho an ninh nguồn nước và quản lý rủi ro thiên tai.

Bên cạnh tác động khí hậu, hoạt động của nhân sinh, đặc biệt là xây dựng và vận hành hồ

chứa, đã trở thành yếu tố quan trọng trong biến đổi thủy văn ở nhiều lưu vực liên quốc gia [4, 5]. Các nghiên cứu gần đây về lưu vực Mekong và Yangtze cho thấy vận hành hồ chứa có thể làm thay đổi mạnh cường độ và thời gian xuất hiện lũ, đồng thời làm tăng độ bất định trong mùa kiệt [6-8]. Ở những lưu vực thiếu cơ chế chia sẻ dữ liệu vận hành, các rủi ro hạ du càng gia tăng do sự không đồng bộ giữa điều tiết nhân tạo và biến đổi khí hậu.

Sông Đà là chi lưu lớn nhất của hệ thống sông Hồng, có ý nghĩa chiến lược về thủy điện, cấp nước và phát triển kinh tế - xã hội ở vùng Tây Bắc Việt Nam. Tuy nhiên, phần lớn diện tích thượng nguồn của sông Đà nằm trên lãnh thổ Trung Quốc (lưu vực sông Lý Tiên), nơi đã và

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: dangdinhkha@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5387>

đang triển khai hàng loạt công trình thủy điện bậc thang từ sau năm 2007. Các hồ chứa này thường ưu tiên tích nước sớm để phát điện, không có nhiệm vụ cắt lũ hạ du và không công bố thông tin vận hành, dẫn tới những thay đổi rõ rệt tại các rạm hạ lưu Việt Nam như Trung Ái Kiều và Thổ Khả Hà. Nhiều quan trắc đã ghi nhận sự xuất hiện của các “đỉnh nhọn bất thường” trong mùa mưa và sự suy giảm mạnh dòng chảy mùa kiệt, phản ánh sự chi phối của hoạt động điều tiết hồ chứa.

Ở Việt Nam, nhiều nghiên cứu đã đánh giá tác động riêng rẽ của biến đổi khí hậu và hồ chứa đến chế độ dòng chảy ở các lưu vực miền núi [9, -11]. Một số nghiên cứu khác đã ứng dụng mô hình SWAT trong mô phỏng dòng chảy xuyên biên giới [12]. Tuy nhiên, các công trình này vẫn còn hạn chế: i) Chưa tích hợp đồng thời tác động của biến đổi khí hậu và vận hành hồ chứa trong cùng một khung mô hình; ii) Thiếu phân tích định lượng chi tiết cho từng mùa (kiệt - lũ) và iii) Chưa tận dụng dữ liệu vệ tinh - tái phân tích để bù đắp thiếu hụt số liệu quan trắc.

Trong bối cảnh đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm lấp đầy khoảng trống trên bằng cách tích hợp mô hình SWAT - SUFI-2 với dữ liệu đa nguồn (vệ tinh, tái phân tích và quan trắc mặt đất) để đồng thời đánh giá tác động của khí hậu và hồ chứa đến chế độ dòng chảy thượng nguồn sông Đà. Đây là một trong những nghiên

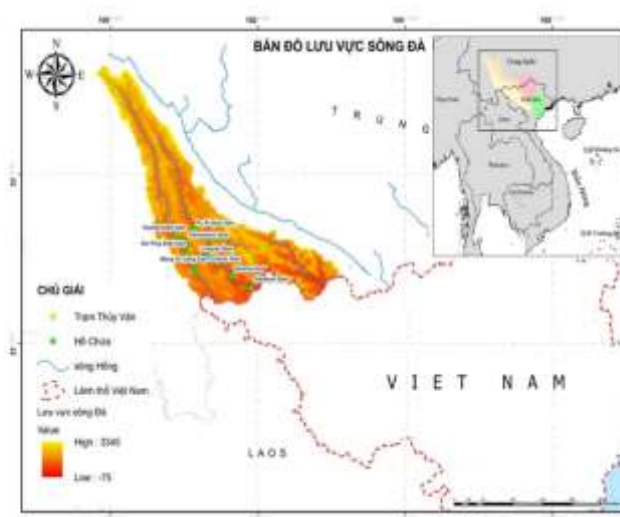
cứu đầu tiên áp dụng khung mô hình tích hợp xuyên biên giới cho lưu vực thượng nguồn sông Đà (Trung Quốc - Việt Nam).

Mục tiêu chính của nghiên cứu là đánh giá sự biến đổi chế độ thủy văn thượng nguồn sông Đà dưới tác động kép của biến đổi khí hậu và hoạt động nhân sinh, từ đó cung cấp cơ sở khoa học cho quản lý tài nguyên nước xuyên biên giới và vận hành hồ chứa tối ưu trong điều kiện bất định ngày càng gia tăng.

2. Dữ liệu và phương pháp

2.1. Khu vực nghiên cứu

Lưu vực sông Lý Tiên (Lixian Jiang - 李仙江) là một chi lưu lớn của sông Đà (Hình 1), bắt nguồn từ thành phố Đại Lý (tỉnh Vân Nam, Trung Quốc) và chảy theo hướng Tây Bắc - Đông Nam trước khi hợp lưu với sông Tiểu Hắc tại biên giới Việt - Trung, thuộc xã Mù Cả, huyện Mường Tè, tỉnh Lai Châu [13]. Tọa độ trung tâm của lưu vực khoảng $23^{\circ}10' - 24^{\circ}30' N$ và $101^{\circ}10' - 102^{\circ}15' E$. Lưu vực có diện tích khoảng 24.230 km^2 , độ cao trung bình ~ 1.090 m, với hơn 70% diện tích nằm trên cao trình 500 m. Địa hình chủ yếu là núi cao, chia cắt mạnh, nhiều thung lũng hẹp và ghềnh thác, tiềm ẩn nguy cơ sạt lở, lũ quét và xói mòn đất.



Hình 1. Bản đồ khu vực nghiên cứu - thượng lưu lưu vực sông Đà.

Khí hậu mang đặc trưng nhiệt đới gió mùa với hai mùa rõ rệt: mùa mưa từ tháng 5-10, chiếm 80–85% lượng mưa năm (1.500-2.500 mm), thường dưới dạng các trận mưa lớn, ngắn hạn; mùa khô từ tháng 11-4, lượng mưa dưới 350 mm, làm gia tăng tình trạng hạn hán. Nhiệt độ trung bình năm 22-26 °C, biên độ nhiệt ngày - đêm lớn, đặc biệt trong mùa khô.

Mạng lưới thủy văn gồm hai nhánh chính là A Mặc Giang và Bả Biên Giang, cùng các phụ lưu đáng kể như Tiêu Hắc Giang - dòng sông tạo ranh giới tự nhiên Việt - Trung. Từ sau năm 2007, Trung Quốc đã xây dựng ít nhất 15 hồ chứa thủy điện lớn (Yayangshan, Shimenkan, Longma, Gelantan, Takuhe,...), góp phần cắt giảm đỉnh lũ và bổ sung dòng chảy mùa kiệt. Các hồ này được bố trí theo chuỗi bậc thang dọc trục chính sông Lý Tiên, trong đó Yangyangshan - Shimenkan - Longma - Gelantan - Takuhe tạo thành hệ thống liên hoàn (xem Hình 2). Dung tích tích trữ toàn hệ thống ước đạt trên 10 tỷ m³. Tuy nhiên, sự điều tiết này cũng làm thay đổi rõ rệt chế độ dòng chảy tự nhiên, gia tăng rủi ro xả lũ bất thường và giảm lượng nước về hạ du trong giai đoạn tích nước, đặt ra thách thức lớn cho quản lý tài nguyên nước xuyên biên giới ở hạ lưu sông Đà.

2.2. Dữ liệu

Nghiên cứu sử dụng mô hình số độ cao (DEM) với độ phân giải 30 m do Viện Quy hoạch Thủy lợi miền Nam cung cấp để xác định tiểu lưu vực, hướng dòng chảy và độ dốc bề mặt. Bản đồ sử dụng đất được phân loại lại theo mã SWAT từ cơ sở dữ liệu ESA, trong đó bao gồm nhóm đất nông nghiệp, rừng và khu đô thị. Bộ dữ liệu ESA WorldCover v2.0 (2021, độ phân giải 10 m) [14, 15] được tái phân loại thành ba nhóm chính: rừng, nông nghiệp và khu dân cư theo cấu trúc mã SWAT. Các lớp dữ liệu được nội suy lại về độ phân giải 30 m để đồng nhất với DEM, kiểm tra thống nhất không gian bằng hệ tọa độ WGS 84/UTM Zone 47N. Bản đồ đất được xây dựng dựa trên cơ sở dữ liệu FAO - UNESCO kết hợp HWSO (30 arc-seconds), với phân nhóm thủy văn A - D theo tiêu chuẩn NRCS

để phản ánh đặc tính thấm hút. Bộ dữ liệu HWSO v1.21 [16, 17] được sử dụng và đồng bộ độ phân giải không gian 1 km. Các chỉ tiêu vật lý (texture, clay, silt, bulk density) được kiểm tra giới hạn hợp lý (0 - 100%) và chuẩn hóa đơn vị. Phân nhóm thủy văn (A-D) được gán theo hướng dẫn NRCS (2007) dựa trên độ thấm và độ sâu tầng đất mặt.

Dữ liệu khí tượng gồm lượng mưa ngày, nhiệt độ cực trị (Tmax, Tmin), cùng các biến hỗ trợ (bức xạ mặt trời, độ ẩm, gió), được khai thác từ vệ tinh ERA5 và trạm khí tượng Mường Tè (Trung tâm Mạng lưới khí tượng thủy văn quốc gia). Dữ liệu ERA5 Reanalysis (ECMWF, phiên bản 5, độ phân giải 0,25°, giai đoạn 1980 - 2021) được hiệu chỉnh sai lệch bằng Quantile Mapping so với chuỗi quan trắc trạm Mường Tè [18]. Các biến hỗ trợ (bức xạ, độ ẩm, gió) được kiểm tra logic vật lý ($T_{max} \geq T_{min}$, $RH \leq 100\%$) và loại bỏ giá trị âm hoặc thiếu. Chuỗi cuối cùng được tái mẫu theo bước thời gian ngày và đồng bộ múi giờ UTC+7. Các hồ chứa lớn trong lưu vực được mô hình hóa trong SWAT thông qua tệp .RES, với đầy đủ đặc tính vật lý (diện tích, dung tích, mực nước) và chế độ vận hành (xả tối đa - tối thiểu, ưu tiên tưới tiêu). Thông tin hồ chứa được tổng hợp từ báo cáo thủy điện Trung Quốc [19] và dữ liệu vệ tinh Landsat - MODIS về biến động diện tích mặt nước giai đoạn 2000 - 2020. Các tham số vận hành được hiệu chỉnh sơ bộ dựa trên tỷ lệ giữa dung tích hữu ích và tổng dung tích để đảm bảo tương thích với SWAT.RES.

Dữ liệu thủy văn bao gồm chuỗi lưu lượng ngày tại trạm Pô Lếch giai đoạn 1980 - 2015, trong đó dữ liệu quan trắc đầy đủ chỉ có từ 2003 - 2011. Để tái tạo các khoảng thiếu hụt, nghiên cứu áp dụng phương pháp kết hợp hồi quy đa biến và mô hình học máy (SVM, RF, ANN), với lựa chọn đặc trưng bằng CFS và tối ưu siêu tham số bằng Bayesian Optimization. Chuỗi quan trắc tại trạm Pô Lếch (2003 - 2011) không đủ dài để phản ánh đặc trưng thủy văn trung và dài hạn của lưu vực (1980 - 2021). Vì SWAT yêu cầu chuỗi đầu vào liên tục để đảm bảo ổn định về cân bằng nước và phân tích biến động theo mùa, việc khôi phục dữ liệu trở thành bước bắt buộc. Trong nghiên cứu này, mô hình ANN chỉ được sử dụng

như công cụ nội suy phi tuyến nhằm tái lập các khoảng trống ngắn hạn, không thay thế hay trùng lặp chức năng mô phỏng vật lý của SWAT. Độ tin cậy của chuỗi phục hồi được kiểm chứng qua so sánh với chuỗi quan trắc thực tế, cho $R^2 = 0,92$, $NSE = 0,89$ và $RMSE = 7,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Kiểm định Kolmogorov-Smirnov ($p > 0,1$) và Mann-Whitney ($p > 0,05$) xác nhận rằng phân bố thống kê của chuỗi phục hồi không khác biệt có ý nghĩa so với chuỗi đo, đảm bảo tính đại diện thống kê cho giai đoạn mở rộng. Các đoạn dữ liệu phục hồi được dùng duy nhất để đảm bảo tính liên tục đầu vào, trong khi hiệu chỉnh và kiểm định SWAT vẫn dựa trên chuỗi quan trắc thực tế. Cách tiếp cận này giúp tăng độ bao phủ thời gian, duy trì tính đại diện thống kê, đồng thời bảo đảm độc lập giữa dữ liệu mô hình hóa và quan trắc thực đo. Chuỗi tái tạo cho thấy ANN đạt độ chính xác cao và ổn định, nhờ đó dòng chảy ngày tại Pô Lếch được hoàn thiện cho toàn bộ giai đoạn, phục vụ hiệu chỉnh - kiểm định mô hình SWAT.

2.3. Mô hình SWAT

Trong nghiên cứu này, mô hình thủy văn phân bố SWAT (Soil and Water Assessment Tool) [20] được áp dụng để mô phỏng chế độ dòng chảy tại lưu vực thượng nguồn sông Đà. Mô hình được xây dựng trên nền tảng SWAT2012 thông qua giao diện ArcSWAT 2012, do SWAT+ chưa có ưu thế rõ rệt trong điều kiện dữ liệu hạn chế. SWAT được thiết kế để đánh giá tác động dài hạn của biến đổi khí hậu, sử dụng đất và các hoạt động nhân sinh đến chu trình nước và chất lượng nước trong điều kiện dữ liệu hạn chế. Lưu vực được chia thành 31 tiểu lưu vực và sau đó phân tách thành HRU theo ngưỡng phân chia 10% sử dụng đất, 10% thổ nhưỡng và 5% độ dốc.

Các mô-đun vật lý được kích hoạt gồm: Tuyết tan (snowmelt) sử dụng phương pháp temperature-index (degree-day) phù hợp với vùng cao $> 1500 \text{ m}$; Bốc hơi tiềm năng (PET) tính theo công thức Penman-Monteith; Dòng ngầm (baseflow) mô phỏng theo linear reservoir algorithm (ALPHA_BF). Thời gian spin-up được thiết lập 3 năm (1980 - 1982) để ổn định

trạng thái ẩm của lưu vực trước giai đoạn mô phỏng (1983 - 2021).

Quá trình hiệu chỉnh tham số được thực hiện bằng công cụ SWAT-CUP sử dụng thuật toán Sequential Uncertainty Fitting - Version 2 (SUFI-2) [22]. SUFI-2 cho phép tự động hóa việc hiệu chỉnh, phân tích độ nhạy và lượng hóa bất định, giúp cải thiện độ tin cậy của mô phỏng so với phương pháp thủ công. Trong SWAT-CUP, SUFI-2 được chạy với 2000 vòng lặp. Khoảng biến thiên ban đầu của các tham số được thiết lập dựa trên phạm vi khuyến nghị [21], sau đó thu hẹp dần theo kết quả vòng trước. Các tham số nhạy cảm chính gồm CN2, ALPHA_BF, GW_DELAY, ESCO, CH_N2, SOL_K, SOL_AWC. Giá trị p-factor đạt 0,78 (tức 78% quan trắc nằm trong khoảng bao phủ 95% - 95PPU) và r-factor đạt 0,84, nằm trong giới hạn khuyến nghị ($p > 0,7$; $r < 1,5$). Điều này cho thấy mô hình có độ tin cậy và mức bất định chấp nhận được.

Hiệu quả mô phỏng được đánh giá bằng ba chỉ số chuẩn: hệ số Nash-Sutcliffe (NSE), hệ số xác định (R^2) và độ lệch tương đối (PBIAS). Theo Moriasi và cộng sự (2007) [23], mô hình được coi là chấp nhận được khi $NSE > 0,5$, $R^2 > 0,6$ và $|PBIAS| \leq 25\%$. Trong nghiên cứu này, các giá trị đạt $NSE = 0,93$, $R^2 = 0,89$, $PBIAS = +8,3\%$, chứng tỏ mô hình mô phỏng tốt cả dòng chảy trung bình và cực trị.

Sau hiệu chỉnh, mô hình được kiểm định bằng bộ dữ liệu độc lập 2014-2015 cho thấy sai số trung bình thấp và ổn định. Kết quả hiệu chỉnh - kiểm định cung cấp cơ sở vững chắc để phân tích tác động riêng rẽ và tổng hợp của biến đổi khí hậu và vận hành hồ chứa đến chế độ dòng chảy thượng lưu sông Đà.

2.4. Kịch bản hồ chứa

2.4.1. Kịch bản dòng chảy tự nhiên (K0)

Giai đoạn 1980-2003 được lựa chọn làm thời kỳ cơ sở, đại diện cho điều kiện dòng chảy tự nhiên khi các hồ chứa lớn ở cả Trung Quốc và Việt Nam chưa vận hành hoặc có quy mô nhỏ, chưa đủ sức ảnh hưởng đến chế độ thủy văn. Đây là kịch bản nền để so sánh với các kịch bản có tác động của hồ chứa và khí hậu.

2.4.2. Kịch bản vận hành hồ chứa

Ba kịch bản vận hành được thiết lập nhằm phản ánh các chiến lược điều tiết phổ biến:

Kịch bản 1 (ưu tiên tích trữ): hồ chứa được vận hành để tích nước tối đa trong mùa mưa, duy trì mực nước cao, hạn chế xả trừ khi cần đảm bảo an toàn công trình hoặc ứng phó lũ lớn. Mục tiêu là ưu tiên tuyệt đối cho an ninh nguồn nước mùa kiệt, nhưng có thể hạn chế khả năng phát điện và gia tăng rủi ro nếu xuất hiện lũ bất thường.

Kịch bản 2 (ưu tiên khai thác): hồ chứa chủ động xả nước theo nhu cầu sử dụng, duy trì lưu lượng xả cao ngay cả trong mùa khô nhằm phục vụ phát điện, nông nghiệp và sinh hoạt. Đây là phương án điều tiết nhân tạo tích cực, kỳ vọng mang lại hiệu quả kinh tế cao, nhưng tiềm ẩn rủi ro thiếu hụt nguồn nước nếu xảy ra hạn hán kéo dài.

Kịch bản 3 (cân bằng theo mùa): hồ chứa được điều tiết theo quy luật mùa vụ trung bình nhiều năm. Trong mùa mưa, hồ tích nước ở mức vừa phải để dành dung tích phòng lũ; mùa khô, xả theo quy trình cố định. Đây là phương án trung hòa, đại diện cho chế độ vận hành phổ biến hiện nay.

Các thông số vận hành chi tiết cho từng hồ trong các kịch bản được trình bày tại Bảng 4.

2.4.3. Kịch bản khí hậu (khử xu thế)

Để tách biệt tác động của biến đổi khí hậu, nghiên cứu xây dựng hai kịch bản khí hậu độc lập:

Kịch bản cơ sở (K0): đại diện cho điều kiện dòng chảy tự nhiên, chưa có hồ chứa, sử dụng chuỗi khí tượng lịch sử 1980-2021 phản ánh xu thế khí hậu thực tế. Kịch bản này được chọn làm nền so sánh cho hai nhóm phân tích: i) Đánh giá tác động của vận hành hồ chứa (K1 - K3); và ii) Đánh giá ảnh hưởng của xu thế khí hậu thông qua kịch bản khí hậu khử xu thế (K4).

Kịch bản cơ sở (K0): sử dụng chuỗi khí tượng lịch sử 1980-2021, phản ánh đầy đủ xu thế khí hậu và các dao động tự nhiên. K0 được dùng làm cơ sở để so sánh với kịch bản khí hậu khử xu thế (K4).

Kịch bản khí hậu khử xu thế (K4): chuỗi yếu tố mưa được xử lý loại bỏ xu thế dài hạn nhằm tách biệt ảnh hưởng của biến đổi khí hậu. Phương pháp khử xu thế được thực hiện bằng hồi quy tuyến tính đơn theo thời gian.

Việc khử xu thế được thực hiện riêng cho từng tháng, nhằm giữ nguyên đặc trưng mùa và chỉ loại bỏ thành phần xu hướng dài hạn (long-term trend). Sau khi xử lý, các chuỗi được kiểm định bằng Mann-Kendall test để xác nhận không còn xu thế có ý nghĩa thống kê ($p > 0,1$) trong giai đoạn 1980 - 2021. Kết quả cho thấy độ dốc trung bình của chuỗi mưa giảm từ -2,1 mm/năm xuống -0,1 mm/năm.

Việc so sánh kết quả mô phỏng giữa K0 và K4 cho phép định lượng tác động thuần túy của biến đổi khí hậu đến dòng chảy (thay đổi lưu lượng trung bình năm, thời điểm lũ/kiệt, mức độ cực đoan hóa). Đây là cơ sở để phân biệt vai trò của khí hậu so với nhân sinh, qua đó đề xuất các giải pháp thích ứng như điều chỉnh quy trình vận hành hồ chứa hoặc xây dựng chiến lược cảnh báo sớm lũ - hạn.

Tổng quan hệ thống kịch bản: Toàn bộ kịch bản nghiên cứu bao gồm:

K0: dòng chảy tự nhiên (1980 - 2003), không có hồ chứa (kịch bản cơ sở).

K1, K2, K3: dòng chảy hiện tại (1980 - 2021) với ba phương án vận hành hồ chứa (ưu tiên tích trữ, ưu tiên khai thác, cân bằng theo mùa).

K4: kịch bản khí hậu khử xu thế (1980 - 2021), không có hồ chứa.

Cách tiếp cận này cho phép đánh giá độc lập và tổng hợp tác động của hồ chứa và biến đổi khí hậu đến chế độ dòng chảy thượng nguồn sông Đà.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Hiệu chỉnh kiểm định mô hình

Mô hình SWAT được hiệu chỉnh và kiểm định cho hai giai đoạn đặc trưng: dòng chảy tự nhiên (1980-2003) và dòng chảy có điều tiết hồ chứa (2012-2015). Trong giai đoạn tự nhiên, mô hình được hiệu chỉnh (1980-1990) và kiểm định (1991-1995) tại trạm Pô Lếch, cho thấy mức độ phù hợp cao giữa dòng chảy mô phỏng và quan trắc. Các chỉ số thống kê đạt mức rất tốt theo tiêu chí Moriasi và cộng sự (2007), với $R^2 > 0,89$, $NSE > 0,93$ và $PBIAS < 11\%$. Điều này khẳng định khả năng mô phỏng đáng tin cậy của SWAT trong điều kiện chưa có tác động nhân sinh.

Trong giai đoạn có điều tiết (2012-2015), các hồ chứa lớn được tích hợp vào mô hình theo thông số kỹ thuật và quy trình vận hành thực tế. Ngoài các chỉ số tổng hợp ($R^2 = 0,86$; $NSE = 0,92$; $PBIAS = \pm 10\%$), mô hình được kiểm tra riêng đối với dòng chảy trung bình (Q_{tb}), cực đại (Q_{max}) và cực tiểu (Q_{min}). Kết quả cho thấy sai lệch trung bình lần lượt nhỏ hơn 8%, 12% và 15%, chứng tỏ mô hình tái hiện tốt cả chế độ lũ - kiệt và cân bằng nước năm. Như vậy, mô hình SWAT sau hiệu chỉnh bằng SUFI-2 đáp ứng yêu cầu độ tin cậy để đánh giá biến động chế độ thủy văn dưới tác động của khí hậu và điều tiết hồ chứa.

3.2. Biến động dòng chảy theo các kịch bản

3.2.1. Kịch bản cơ sở K0 (tự nhiên, không hồ)

Chuỗi lưu lượng ngày 42 năm (>15.000 giá trị) cho thấy biến động lớn theo thời gian. Trung bình năm: $210,35 \text{ m}^3/\text{s}$; cực đại: $1.122,33 \text{ m}^3/\text{s}$; cực tiểu: $0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Sự xuất hiện của các đỉnh lớn rời rạc bên cạnh nhiều giai đoạn dòng chảy thấp phản ánh tính bất định cao của lưu vực miền núi gió mùa.

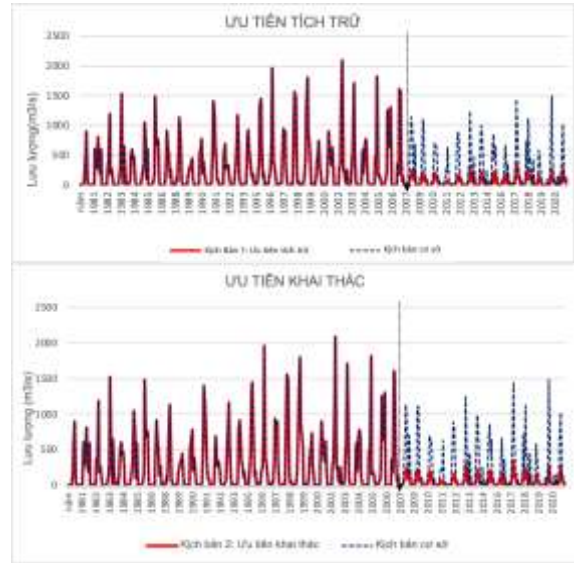
Hệ quả: cần một chế độ vận hành hồ linh hoạt - thích ứng để giảm rủi ro lũ và kiệt.

3.2.2. Kịch bản có hồ

So với tự nhiên, điều tiết hồ làm thay đổi đáng kể chế độ dòng chảy. Trung bình năm: $237,70 \text{ m}^3/\text{s}$ (cao hơn nền tự nhiên). Cực đại: $2.094,0 \text{ m}^3/\text{s}$ (cho phép xả lớn khi vượt ngưỡng an toàn). Cực tiểu: $0,0 \text{ m}^3/\text{s}$ (ngắt dòng cục bộ khi tích nước/hạn kéo dài).

Bảng 1. Chỉ số đặc trưng theo kịch bản

Chỉ tiêu	K0	K1	K2	K3
Lưu lượng trung bình năm, $\bar{Q}$ (m^3/s)	210,3	93,64	83,64	91,54
Lưu lượng cực đại, Q_{max} (m^3/s)	1821	523,0	894,3	683,0
Lưu lượng cực tiểu, Q_{min} (m^3/s)	0	0	0	0



Hình 2. Quá trình lưu lượng lưu vực thượng lưu sông Đà kịch bản điều tiết K2, K3 so với K0.

Hồ phát huy vai trò kép: giảm đỉnh mùa lũ, nâng dòng chảy mùa kiệt; nhưng đặt ra yêu cầu về dòng chảy môi trường và quy trình vận hành mềm dẻo.

K1 tối đa hóa tích nước: $\bar{Q}$ cao nhất, Q_{max} thấp nhất, K1 cắt đỉnh lũ mạnh nhưng dễ xuất hiện ngắt dòng cuối mùa khô.

K2 thiên về xả/khai thác: $\bar{Q}$ thấp nhất, Q_{max} cao nhất, dẫn đến gia tăng tính phân mảnh dòng chảy; khoảng ~25% thời đoạn có lưu lượng cao hơn K1, còn lại tập trung ở mức thấp/0.

K3 giữ thể trung hòa: $\bar{Q}$ nằm giữa K1–K2; Q_{max} trung gian; dao động ổn định hơn trong mùa mưa (tháng 5-10) (Hình 2).

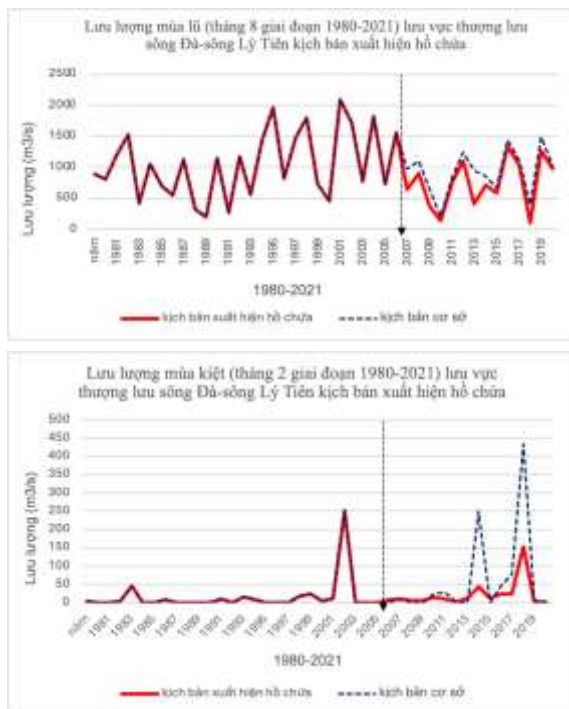
K1 cho Q_{tb} cao nhất ($93,64 \text{ m}^3/\text{s}$) nhờ ưu tiên trữ; K2 thấp nhất ($83,64 \text{ m}^3/\text{s}$) do thiên về xả/khai thác; K3 dung hòa ($91,54 \text{ m}^3/\text{s}$). Dù chênh lệch ~10 m^3/s , tác động có thể đáng kể trong các đợt khô hạn kéo dài.

3.3. Tác động hồ chứa theo mùa và đặc tính lũ

3.3.1. Biến đổi mùa (kiệt - lũ).

Sau khi liên hồ vận hành, chu kỳ mùa bị làm phẳng: đỉnh lũ giảm biên độ và kéo dài (Hình 3a), dòng kiệt được nâng (Hình 3b). Điều này hỗ trợ

phát điện/cấp nước, song cần phối hợp liên hồ để hạn chế rủi ro xả đột ngột.



Hình 3. (a) Quá trình lưu lượng tháng 8 (đại diện mùa lũ); và (b) tháng 2 (đại diện mùa kiệt) giai đoạn 1980 - 2021 thượng lưu sông Đà kịch bản có hồ.

3.3.2. Đặc tính lũ: cường độ - thời gian - tần suất

Kết quả mô phỏng cho thấy các hồ chứa lớn ở thượng nguồn sông Lý Tiên - đặc biệt là Yayangshan, Longma và Gelantan - đã làm thay đổi đáng kể đặc tính lũ tự nhiên của khu vực.

i) Cường độ lũ (Q_{max}):

Sau khi các hồ chứa đi vào vận hành (sau năm 2007), đỉnh lũ trung bình năm tại trạm Pô Lếch giảm từ 465 m³/s xuống 298 m³/s, tương ứng mức giảm ~36%. Các đợt lũ lớn (vượt ngưỡng P95) giảm một nửa, từ 17 xuống còn 8 sự kiện trong chuỗi 1980-2021 (Bảng 2). Hiệu quả cắt đỉnh cao nhất thể hiện trong các năm mưa trung bình, trong khi ở các năm cực đoan (2010, 2015) khi hồ đạt dung tích giới hạn, dòng xả khẩn cấp khiến Q_{max} hạ lưu tăng trở lại ~20% so với mức trung bình nhiều năm. Điều này phản ánh tính “hai mặt” của điều tiết hồ: hiệu quả giảm

đỉnh trong điều kiện bình thường nhưng dễ phản ứng mạnh khi dung tích gần đầy;

ii) Thời gian xuất hiện đỉnh lũ:

Trước khi có hồ, đỉnh lũ thường xuất hiện trong khoảng 5-10 ngày sau các trận mưa lớn tháng 8. Sau khi điều tiết, mô hình cho thấy thời gian trễ đỉnh (Δt) trung bình tăng thêm 2-3 ngày, nhờ hiệu ứng tích nước và xả chậm hơn. Độ trễ lớn nhất (5 ngày) ghi nhận năm 2014 khi hồ Longma đạt mức nước phòng lũ cao. Tuy nhiên, một số sự kiện xả khẩn cấp (năm 2010) cho thấy Δt gần như bằng 0, khiến vùng hạ du vẫn chịu lũ dồn nhanh;

iii) Tần suất xuất hiện:

Phân tích tần suất cực trị cho thấy xác suất xuất hiện dòng chảy vượt P95 giảm từ 4,0% xuống 1,9%, tương ứng tần suất lũ lớn giảm hơn 50%. Ngược lại, các sự kiện dòng chảy trung bình tăng nhẹ do quá trình điều tiết làm “phẳng” chu kỳ dòng chảy;

Nhìn chung, điều tiết hồ chứa tại thượng lưu sông Đà có tác dụng giảm cường độ và làm chậm thời điểm lũ khi vận hành hợp lý, song trong các điều kiện mưa cực đoan, khi dung tích trữ đạt giới hạn, việc xả nhanh có thể đảo ngược xu thế này và gây rủi ro cho hạ du. Do đó, cần tích hợp dự báo khí tượng - thủy văn ngắn hạn vào quy trình vận hành liên hồ để tối ưu hóa khả năng cắt lũ mà vẫn duy trì an toàn công trình.

3.3.3. Bổ sung dòng chảy mùa kiệt.

Trong mùa kiệt (tháng 11 đến tháng 4 năm sau), hồ chứa cho thấy vai trò tích cực trong duy trì dòng chảy. So với kịch bản không có hồ chứa, dòng chảy trung bình tháng trong mùa kiệt tăng đáng kể, đặc biệt trong các tháng 1 tới tháng 3. Số tháng có dòng chảy dưới ngưỡng 5% giảm rõ rệt, thể hiện hiệu quả trong việc giảm thiểu rủi ro hạn hán cục bộ và duy trì dòng chảy sinh thái. Cơ chế tích nước trong mùa mưa và xả ổn định trong mùa kiệt giúp đảm bảo nguồn nước cho sinh hoạt, sản xuất và dòng chảy môi trường.

Kết quả cho thấy Q_{max} mùa lũ giảm 35,8% (465,2 → 298,7 m³/s); số lũ >P95 giảm ~53% (17 → 8). Qtb mùa kiệt tăng 56,8% (24,3 → 38,1 m³/s); số tháng <P5 giảm 63,6% (22 → 8) (Bảng 3).

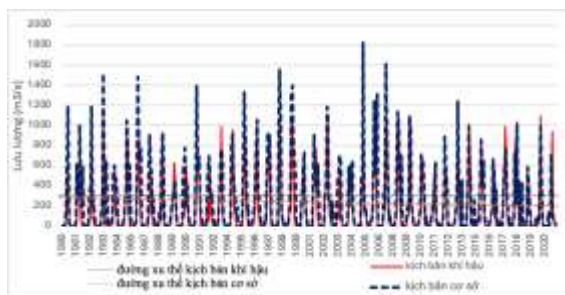
Hồ chứa là công cụ điều tiết dòng chảy hiệu quả, giúp giảm đỉnh lũ, duy trì dòng chảy kiệt, tối ưu hóa phát điện và cấp nước ổn định.

Bảng 2. Các đại lượng thủy văn mùa lũ và mùa kiệt (giai đoạn 1980 - 2021)

Đại lượng	Trước hồ chứa (cơ sở)	Sau hồ chứa	Mức thay đổi
Q trung bình mùa lũ (m^3/s)	465,2	298,7	-35,8%
Số lần lũ > P95	17	8	-52,9%
Q trung bình mùa kiệt (m^3/s)	24,3	38,1	56,8%
Số tháng dòng chảy < P5	22	8	-63,6%

3.4. Tác động của biến đổi khí hậu (khử xu thế)

3.4.1. Kịch bản khí hậu và cơ sở



Hình 4. Quá trình lưu lượng (giai đoạn 1980 - 2021) lưu vực thượng lưu sông Đà kịch bản K0 và K4.

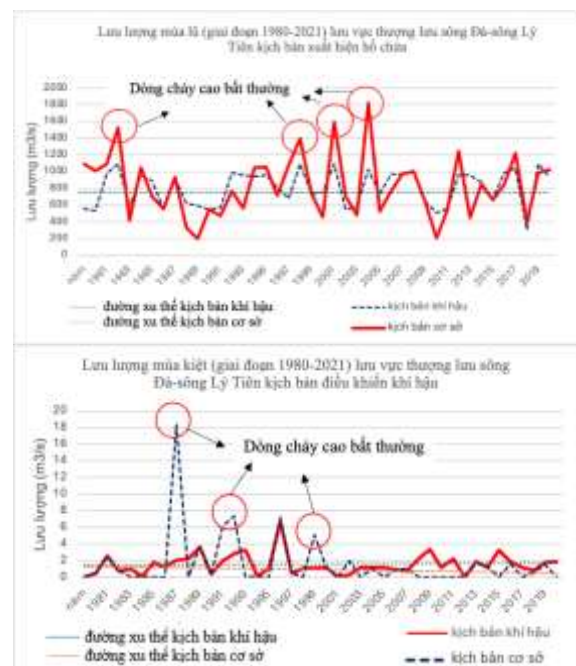
So với kịch bản khí hậu đã khử xu thế, kịch bản cơ sở hiện tại cho Qtb năm chỉ 175,01 m^3/s (giảm 26%); Qmax 1.097,0 m^3/s (giảm 48%) (Hình 4). Sự suy giảm đáng kể của dòng chảy trung bình và cực đại cho thấy tác động tiêu cực của biến đổi khí hậu làm giảm lượng mưa và giảm khả năng tạo dòng chảy.

3.4.2. Biến đổi chế độ dòng chảy theo mùa

So sánh giữa hai kịch bản cho thấy dòng chảy mùa lũ trong điều kiện khí hậu thực tế (có xu thế biến đổi) thấp hơn rõ rệt so với điều kiện không có xu thế khí hậu. Giá trị trung bình mùa lũ giảm từ 3922,7 m^3/s (khử xu thế) xuống 2561,6 m^3/s (thực tế), tương ứng mức giảm khoảng 35% (Hình 5). Sự suy giảm này phản ánh ảnh hưởng tiêu cực của xu thế khí hậu dài hạn - lượng mưa

giảm và bốc hơi tăng - làm giảm khả năng sinh dòng chảy và cường độ lũ ở thượng lưu sông Đà. Như vậy, biến đổi khí hậu hiện nay đang góp phần làm “giảm” đỉnh lũ, song cũng đồng thời thể hiện xu hướng khô hạn hóa hệ thống trong mùa mưa.

Những thay đổi này nhấn mạnh sự cần thiết của việc điều chỉnh chiến lược quản lý lũ và vận hành hồ chứa theo hướng linh hoạt và thích ứng tốt hơn với xu thế khí hậu ngày càng bất định và khắc nghiệt.



Hình 5. Quá trình lưu lượng mùa lũ (tháng 8), mùa kiệt (tháng 2) giai đoạn 1980 - 2021 lưu vực thượng lưu sông Đà kịch bản K0 và K4.

Dòng chảy vào mùa kiệt trên lưu vực, dưới tác động của biến đổi khí hậu, thể hiện xu thế suy giảm rõ rệt (Hình 5). Cụ thể, giá trị trung bình dòng chảy mùa kiệt trong kịch bản cơ sở (có xu thế khí hậu - mưa giảm) chỉ đạt 1.025 m^3/s , thấp hơn đáng kể so với 1.848 m^3/s trong kịch bản khí hậu. Không chỉ giảm về trung bình, dòng chảy mùa kiệt trong kịch bản cơ sở còn thể hiện tính cực đoan rõ rệt hơn: hiện tượng dòng chảy bằng 0 xuất hiện tới 17 năm trong tổng số 42 năm, trong khi ở kịch bản không chịu tác động của biến đổi khí hậu, tình trạng khô cạn hoàn toàn

chỉ xảy ra một lần duy nhất. Những kết quả này phản ánh xu hướng gia tăng tần suất và cường độ hạn hán, cùng với sự suy giảm nghiêm trọng của lượng mưa mùa khô, dưới ảnh hưởng ngày càng rõ nét của biến đổi khí hậu.

Ngoài ra, mặc dù trong một số thời điểm, dòng chảy cực đại mùa kiệt ở kịch bản cơ sở có thể cao hơn so với kịch bản khí hậu, nhưng điều này không đồng nghĩa với điều kiện thủy văn thuận lợi hơn. Ngược lại, nó cho thấy tính dao động thất thường, biểu hiện của sự biến động khó kiểm soát và vượt ngoài khả năng dự báo trong điều kiện khí hậu biến đổi.

3.5. Tác động kết hợp hồ chứa + khí hậu



Hình 6. Đường quá trình lưu lượng theo 3 kịch bản vận hành.

Sự điều tiết của hồ chứa có tác dụng làm phẳng chu kỳ dòng chảy, giảm biên độ dao động giữa mùa lũ và mùa kiệt. Cắt giảm đỉnh lũ mùa mưa tới ~17,5% và tăng dòng chảy mùa kiệt khoảng 11,7%, góp phần duy trì dòng chảy môi trường và cấp nước mùa khô (Hình 6).

Biến đổi khí hậu (kịch bản khí hậu với kịch bản nền) làm gia tăng bất định và cực trị, nhất là kiệt kéo dài và đỉnh lũ cực bộ.

Khi cả hai yếu tố cùng tồn tại, hồ chứa đóng vai trò điều tiết chủ đạo.

Các kết quả trên chỉ ra nhu cầu cấp thiết: i) Phối hợp liên hồ xuyên biên giới và chia sẻ dữ liệu vận hành; ii) Tích hợp dự báo khí hậu - thủy văn vào điều hành theo thời gian thực; iii) Thiết lập dòng chảy môi trường tối thiểu theo mùa; và iv) Xây dựng chiến lược thích ứng cho hạ du trong các tháng kiệt và giai đoạn mưa cực đoạn.

4. Kết luận

Nghiên cứu này nghiên cứu đầu tiên tích hợp mô hình SWAT, dữ liệu vệ tinh - tái phân tích (ERA5, ESA, HWSD) và kịch bản vận hành hồ chứa xuyên biên giới Trung Quốc - Việt Nam để đánh giá tác động kết hợp của biến đổi khí hậu và điều tiết nhân sinh đến chế độ thủy văn của lưu vực thượng lưu sông Đà. Kết quả cho thấy lưu lượng mùa lũ có thể tăng tới ~2,5 lần trong khi tần suất dòng chảy bằng 0 trong mùa kiệt tăng gấp 17 lần dưới tác động khí hậu thuần túy.

Sau năm 2007, hồ chứa lớn làm phẳng chu kỳ thủy văn, giảm đỉnh lũ 17,5%, tăng dòng chảy mùa kiệt ~11,7%. Tuy nhiên, các đợt xả khẩn cấp trong năm mưa lớn gây nên các dị thường đỉnh lũ, tương tự xu hướng đã ghi nhận tại các lưu vực có chuỗi hồ bậc thang như Mekong [24-26].

Phân tách tác động cho thấy hồ chứa chiếm 62% biến thiên dòng chảy mùa, trong khi khí hậu đóng góp 28% và phần tương tác chiếm khoảng 10%. Sự cộng hưởng giữa biến đổi khí hậu (gia tăng cực trị) và điều tiết nhân sinh (dịch pha dòng chảy) tạo nên chế độ thủy văn mới - với tính bất định cao và thay đổi đáng kể về thời điểm đỉnh lũ - dòng kiệt.

Những kết quả này nhấn mạnh rằng hồ chứa là yếu tố chi phối chính, trong khi biến đổi khí hậu làm gia tăng tính cực đoan và bất định thủy văn. Xu hướng này phù hợp với các quan sát tại Himalaya và Brahmaputra [27] - nơi điều tiết nhân tạo và ấm lên khí hậu cùng làm biến đổi sâu sắc chu trình dòng chảy vùng núi. Nghiên cứu vẫn hạn chế bởi thiếu dữ liệu vận hành chi tiết và mô-đun tuyết. Trong tương lai, cần tích hợp mô hình lai vật lý - AI, mở rộng đánh giá ảnh hưởng ENSO/PDO/MJO và yếu tố kinh tế-xã hội để hỗ trợ quy hoạch và quản lý tài nguyên nước trong bối cảnh bất định ngày càng tăng.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi nhiệm vụ khoa học QG.25.161 của Đại học Quốc gia Hà Nội.

Tài liệu tham khảo

- [1] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Sixth Assessment Report, Working Group I, Cambridge University Press, Cambridge, 2021.
- [2] M. Van Camp, K. Walraevens, O. Batelaan et al., Groundwater Resources in Transboundary Basins - Review of Assessments under the 1992 UNECE Water Convention in Central, Eastern and South-Eastern Europe, United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, 2014.
- [3] Y. Satoh, Y. Pokhrel, H. Kim et al., The Timing of Unprecedented Hydrological Drought under Climate Change, *Nature Geoscience*, Vol. 10, 2017, pp. 191-197, <https://doi.org/10.1038/ngeo2903>.
- [4] Z. Li, S. Liu, T. Nakayama et al., Large-Scale Hydrological Alterations in the Mekong and Yangtze River Basins, *Nature Geoscience*, Vol. 9, 2016, pp. 38-45, <https://doi.org/10.1038/ngeo2586>.
- [5] X. Wang, Y. Ding, J. Xu et al., Transboundary Water Resources Management: Challenges and Opportunities, Springer Nature, Singapore, 2020.
- [6] A. K. Gain, M. M. Hoque, S. Akter et al., Assessing the Flood Hazard Impacts of Dams and Climate Change in the Lower Mekong Basin, *Natural Hazards*, Vol. 114, No. 2, 2022, pp. 1557-1579, <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05444-y>.
- [7] Y. Pokhrel, F. Felfelani, Y. Satoh et al., Global Terrestrial Water Storage and Drought Severity under Climate Change, *Nature Climate Change*, Vol. 11, 2021, pp. 226-233, <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00972-w>.
- [8] T. D. Dang, T. A. Cochrane, M. E. Arias, P. D. T. Van, Future Hydrological Alterations in the Mekong Delta Under the Impact of Water Resources Development, Land Subsidence and Sea Level Rise, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 15, 2018, pp. 119-133, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.01.002>.
- [9] A. Truong, M. T. Trinh, Study on the Impact of Climate Change on Surface Runoff Variation in the Nam Muc River Basin, *Journal of Natural Resources and Environment*, No. 20, 2018, pp. 3-10, <https://tapchi.hunre.edu.vn/index.php/tapchikhtnm/article/view/82> (accessed on: August 14th, 2025) (in Vietnamese).
- [10] T. M. H. Vu, Study on the Operation Regime of Water Storage for Son La and Hoa Binh Reservoirs, Vietnam National University, Hanoi, 2016 (in Vietnamese).
- [11] T. T. A. Nguyen, Application of the SWAT Model and GIS Technology to Evaluate Streamflow in the Dak Bla River Basin, *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, Vol. 29, No. 3, 2013, pp. 1-13 (in Vietnamese).
- [12] A. D. Nguyen, Study on the Application of the SWAT Model and SUFI-2 Algorithm for Parameter Identification and Simulation of Transboundary Inflows into Vietnam in the Da River Basin Using Global Datasets, Vietnam National University, Hanoi, 2021 (in Vietnamese).
- [13] National Geographic Atlas of China, National Geographic Society, Washington, DC, ISBN 978-1-4262-0136-3, 2007, pp. 119.
- [14] ESA (European Space Agency), WorldCover 2020 Product User Manual (Version 1.1), https://worldcover2020.esa.int/data/docs/WorldCover_PUM_V1.1.pdf (accessed on: August 2nd, 2025).
- [15] ESA Climate Change Initiative, Land Cover (v2.1.1): European Space Agency Climate Change Initiative Data Portal, European Space Agency, 2021.
- [16] Fao/Iiasa/Isric/Iscas/Jrc, Harmonized World Soil Database (Version 1.2), FAO, Rome, Italy, and IIASA, Laxenburg, Austria, 2012.
- [17] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), Harmonized World Soil Database (Version 2.0), <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v20/en/> (accessed on: 2nd, 2025).
- [18] DKRZ (German Climate Computing Center), ERA Data Access and Documentation Portal, https://docs.dkrz.de/doc/dataservices/finding_and_accessing_data/era_data/index.html (accessed on: August 14th, 2025).
- [19] C. Song, C. Fan, J. Zhu, J. Wang, Y. Sheng, K. Liu, T. Chen, P. Zhan, S. Luo, C. Yuan, L. Ke, A Comprehensive Geospatial Database of Nearly 100,000 Reservoirs in China, *Earth System Science Data*, Vol. 14, 2022, pp. 4017-4034, <https://doi.org/10.5194/essd-14-4017-2022>.
- [20] J. G. Arnold, R. Srinivasan, R. S. Muttiah, J. R. Williams, Large Area Hydrologic Modeling and Assessment: Part I - Model Development, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 1, 1998, pp. 73-89, <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.
- [21] K. C. Abbaspour, C. A. Johnson, M. T. Van Genuchten, Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure (SUFI-2), *Vadose*

- Zone Journal, Vol. 3, No. 4, 2004, pp. 1340-1352, <https://doi.org/10.2136/vzj2004.1340>.
- [22] K. C. Abbaspour, SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Dübendorf, Switzerland, 2015.
- [23] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, T. L. Veith, Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, Transactions of the Asabe, Vol. 50, No. 3, 2007, pp. 885-900, <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.
- [24] T. D. Dang, T. A. Cochrane, M. E. Arias, V. H. Dang, T. T. De Vries, Combined Impacts of Climate Change and Upstream Hydropower Development on Floodplain Inundation Dynamics in the Mekong Delta, Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 27, No. 1, 2023, pp. 51-71, <https://doi.org/10.5194/hess-27-51-2023>.
- [25] J. Wang, Y. Chen, Z. Li, Attribution of Streamflow Changes in the Brahmaputra River Basin: Climate Change or Human Activities?, Journal of Hydrology, Vol. 570, 2019, pp. 403-415, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.052>.
- [26] L. Li, Q. Zhang, V. P. Singh, Changes in Streamflow Regime in the Yangtze River Basin under Human and Climate Influences, Journal of Hydrology, Vol. 585, 2020, pp. 124829, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124829>.
- [27] W. W. Immerzeel, A. F. Lutz, M. Andrade, A. Bahl, H. Biemans, T. Bolch, P. Wester, Importance and Vulnerability of the World's Water Towers, Nature, Vol. 577, No. 7790, 2019, pp. 364-369, <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>.