

# NGHIÊN CỨU DIỄN BIẾN HẠN HÁN TRÊN LƯU VỰC SÔNG HỒNG - THÁI BÌNH BẰNG BỘ DỮ LIỆU KHÍ TƯỢNG, THỦY VĂN KHÔI PHỤC TỪ MÔ HÌNH KẾT HỢP WEHY-WRF

Hồ Việt Cường, Nguyễn Thị Ngọc Nhân, Trần Văn Bách  
Phòng Thí nghiệm trọng điểm quốc gia về Động lực học sông biển  
Trịnh Quang Toàn  
Đại học tổng hợp California, Davis - Hoa Kỳ

**Tóm tắt:** Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu ứng dụng bộ mô hình khí tượng thủy văn kết hợp WEHY-WRF (Watershed Environmental Hydrology - Weather Research and Forecasting) để tính toán khôi phục các quá trình mưa và dòng chảy trên toàn bộ lưu vực sông Hồng - Thái Bình bao gồm cả phần lưu vực thuộc lãnh thổ Trung Quốc và Lào. Từ bộ dữ liệu khôi phục, tiến hành các nghiên cứu đánh giá về diễn biến hạn hán trên lưu vực thông qua việc tính toán, phân tích diễn biến của các chỉ số về hạn khí tượng (SPI) và hạn thủy văn (SDI) theo không gian và thời gian, từ năm 1960-2015.

**Từ khóa:** mô hình WEHY-WRF, khôi phục dữ liệu, dữ liệu toàn cầu, chỉ số SPI, SDI, lưu vực sông Hồng - Thái Bình.

**Summary:** This article presents the results of applied research of the Hydrological - meteorological combined model named WEHY-WRF to calculate recovery processes precipitation and flow across the Hong - Thaibinh River Basin, including part in territory of China and Laos. From the recovered data, conduct evaluation studies on the drought development across the basin through the calculations, analyses the evolution of the indicators of Standardized Precipitation Index (SPI) and Streamflow Drought Index (SDI) over space and time, from 1960 to 2015.

**Key words:** WEHY-WRF model, restore data, global data, indices SPI, SDI, Hong - Thaibinh River Basin.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hạn hán là loại hình thiên tai có điểm đặc trưng là tác động của nó thường tích lũy trong một khoảng thời gian dài và có thể kéo dài trong nhiều năm sau khi đợt hạn kết thúc, bởi vậy việc xác định thời gian bắt đầu và kết thúc đợt hạn rất khó khăn. Cũng do sự diễn biến tích lũy chậm nên tác động của hạn hán thường khó nhận biết hơn và khi nhận biết được thì sự thiệt hại đã xảy ra đáng kể. Hạn hán thường xảy ra trên một phạm vi rộng và ít khi là nguyên nhân trực tiếp gây tổn thất về nhân mạng nhưng lại

có những tác động rất lớn, gây ra nhiều thiệt hại và ảnh hưởng đến đời sống dân sinh, kinh tế xã hội và hủy hoại môi trường. Trong các nghiên cứu về hạn, thường sử dụng các công thức kinh nghiệm để tính toán các chỉ số hạn tương ứng, từ đó phân cấp mức độ hạn theo giá trị của các chỉ số tính toán. Các chỉ số hạn được tính dựa trên các thông số về điều kiện khí hậu, khí tượng, thủy văn, nguồn nước... trong khu vực. Trong đó phổ biến nhất là sử dụng các số liệu về mưa và dòng chảy, do đó các dữ liệu này luôn có vai trò rất quan trọng trong các nghiên

Ngày nhận bài: 19/9/2018  
Ngày thông qua phản biện: 26/10/2018

Ngày duyệt đăng: 28/11/2018

cứ đánh giá về hạn hán.

Lưu vực sông Hồng - Thái Bình là một lưu vực sông lớn liên quốc gia, chảy qua ba nước Trung Quốc, Lào và Việt Nam với tổng diện tích tự nhiên vào khoảng 169.000 km<sup>2</sup>, trong đó phần lưu vực phía thượng nguồn thuộc lãnh thổ Trung Quốc là 81.200 km<sup>2</sup> chiếm 48%, diện tích lưu vực trên lãnh thổ Lào là 1.100 km<sup>2</sup> chiếm 0,7% diện tích của toàn lưu vực. Phần hạ du lưu vực nằm trong lãnh thổ Việt Nam là 87.840 km<sup>2</sup>, bao gồm địa giới hành chính của 26 tỉnh/ thành phố thuộc vùng Bắc Bộ và cũng là khu vực trọng điểm về chính trị, văn hóa, kinh tế của nước ta, trong đó có Thủ đô Hà Nội. Trên lưu vực, hệ thống các trạm quan trắc khí tượng, thủy văn đã được xây dựng và thiết lập cả ở phần lưu vực thuộc lãnh thổ Việt Nam và Trung Quốc. Ở Việt Nam, việc đo đạc số liệu được bắt đầu rất sớm, từ năm 1890 tại trạm Hà Nội và thành lập Nha khí tượng vào năm 1902. Tuy nhiên theo thời gian, dưới tác động của nhiều yếu tố, mạng lưới các trạm quan trắc khí tượng, thủy văn trên lưu vực đến nay vẫn còn thưa thớt, chưa đầy đủ, việc quan trắc số liệu không được liên tục, có thời gian ngắt quãng, thậm chí một số trạm đã dừng đo. Ngoài ra các số liệu đo đạc khí tượng, thủy văn ở phần thượng nguồn lưu vực thuộc lãnh thổ Trung Quốc và Lào hiện nay vẫn rất ít được chia sẻ và gần như không có thông tin, tài liệu ở các khu vực này. Do sự không đồng bộ và đầy đủ của các dữ liệu thực đo, dẫn đến rất nhiều khó khăn trong tính toán, phân tích về các đặc trưng khí tượng thủy văn nói chung và chỉ số hạn hán nói riêng, nhất là các nghiên cứu trong thời kỳ dài. Vì vậy để khắc phục vấn đề thiếu số liệu thực đo và số liệu không đồng bộ, đề tài nghiên cứu cấp Quốc gia KC.08.05/16-20 đã ứng dụng và thiết lập bộ mô hình toán khí tượng thủy văn kết hợp WEHY-WRF để tính toán mô phỏng và khôi phục lại các dữ liệu mưa và dòng chảy từ 1960-2015 cho toàn bộ lưu vực sông Hồng - Thái Bình bao gồm cả phần lưu vực thuộc Trung Quốc và Lào. Từ bộ dữ liệu khôi phục,

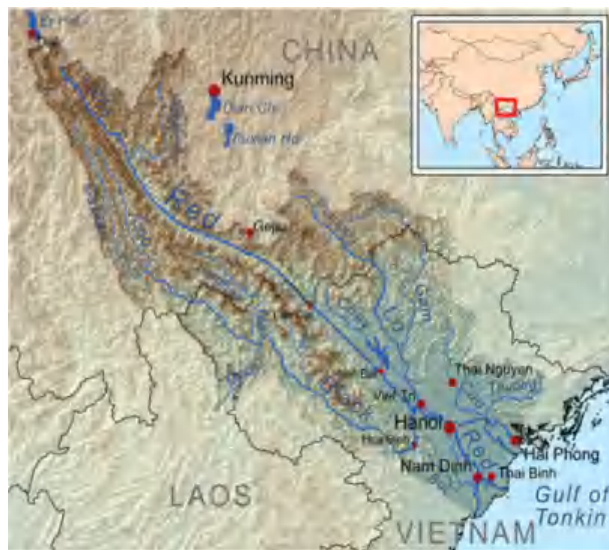
sẽ tiến hành các nghiên cứu, đánh giá về diễn biến hạn hán trên toàn lưu vực sông Hồng - Thái Bình thông qua việc tính toán, phân tích các chỉ số về hạn khí tượng (SPI) và hạn thủy văn (SDI) theo không gian và thời gian.

## 2. PHẠM VI VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Phạm vi nghiên cứu

Phạm vi khu vực nghiên cứu là toàn bộ lưu vực sông Hồng - Thái Bình bao gồm cả phần lưu vực thuộc Trung Quốc và Lào, được giới hạn từ 20<sup>o</sup>23' đến 25<sup>o</sup>30' vĩ độ Bắc và từ 100<sup>o</sup> đến 107<sup>o</sup>10' kinh độ Đông. Phía Bắc giáp lưu vực sông Trường Giang và sông Châu Giang của Trung Quốc, phía Tây giáp lưu vực sông Mê Kông, phía Nam giáp lưu vực sông Mã, phía Đông giáp vịnh Bắc Bộ.

Phần lưu vực sông Hồng - sông Thái Bình trên lãnh thổ Việt Nam có vị trí địa lý từ 20<sup>o</sup>23' đến 23<sup>o</sup>22' vĩ độ Bắc và từ 102<sup>o</sup>10' đến 107<sup>o</sup>10' kinh độ Tây.



Hình 1. Bản đồ toàn lưu vực sông Hồng - Thái Bình

### 2.2. Phương pháp nghiên cứu

- Ứng dụng bộ công cụ mô hình toán khí tượng thủy văn kết hợp WEHY-WRF để tính toán mô phỏng và khôi phục lại toàn bộ các chuỗi số liệu mưa, dòng chảy trên lưu vực sông Hồng - Thái Bình từ năm 1960-2015. Mô hình WEHY-WRF là một bộ phần mềm mô hình cặp đôi (Couple

Model) do Trung tâm thủy văn California (CHRL) - Đại học UC Davis, Hoa Kỳ phát triển [4], mô hình có khả năng tính toán mô phỏng đồng thời các điều kiện khí tượng và thủy văn trên lưu vực dựa trên các dữ liệu khí tượng toàn cầu (reanalysis data) đã được chi tiết hóa (downscaling) kết hợp với các dữ liệu về thông số bề mặt trên lưu vực. Thuật toán của mô hình được xây dựng dựa trên các phương trình tính toán bình quân theo diện tích của từng ô lưới, để có thể tính tới sự không đồng nhất về điều kiện khí tượng thủy văn và đặc điểm địa hình trong miền tính toán. Do đó có thể ứng dụng để tính toán mô phỏng các quá trình khí tượng thủy văn trên lưu vực trong cả điều kiện bị hạn chế về các dữ liệu thực đo, và đây chính là điểm ưu việt về công nghệ đã được chúng tôi lựa chọn để ứng dụng trong nghiên cứu này.

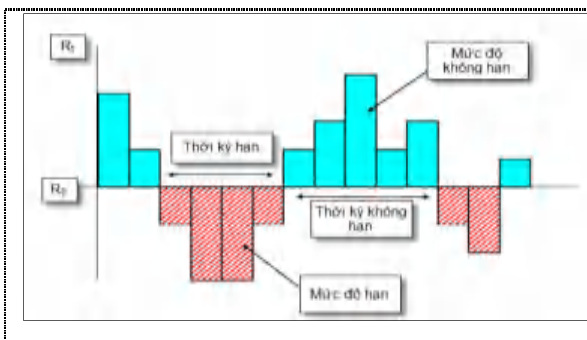
- Dựa trên bộ dữ liệu mưa và dòng chảy đã được tính toán khôi phục từ mô hình WEHY-WRF,

tiến hành các phân tích về diễn biến hạn hán trên toàn lưu vực sông Hồng - Thái Bình thông qua việc tính toán và đánh giá diễn biến của các chỉ số về hạn khí tượng (SPI) và hạn thủy văn (SDI) theo không gian và thời gian. Phương pháp tính toán cụ thể như sau:

+ Tính toán đánh giá diễn biến hạn khí tượng dựa trên chỉ số chuẩn hóa lượng mưa SPI (Standardized Precipitation Index) dựa trên các chuỗi số liệu lượng mưa trung bình tháng từ 1960-2015: Chỉ số SPI được tính toán đơn giản bằng sự chênh lệch của lượng giáng thủy thực tế R (tổng lượng tháng) so với trung bình nhiều năm và chia cho độ lệch chuẩn  $\sigma$  của lượng mưa trong thời kỳ tương ứng:

$$SPI = \frac{R - \bar{R}}{\sigma} \quad (1)$$

Chỉ số SPI là một chỉ số không thứ nguyên: khi các giá trị của SPI < 0 tình trạng khô, hạn hán, SPI > 0 tình trạng thừa ẩm.



| Mức độ hạn           | Chỉ số hạn SPI |
|----------------------|----------------|
| I. Hạn nhẹ           | 0 đến -0.99    |
| II. Hạn tương đối    | -1.0 đến -1.49 |
| III. Hạn nặng        | -1.5 đến -1.99 |
| IV. Hạn nghiêm trọng | < -2.0         |

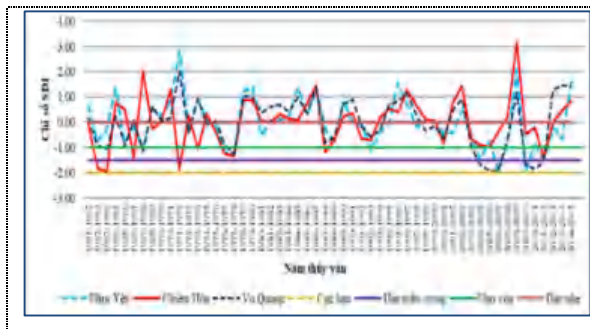
Hình 2. Đánh giá tình trạng hạn khí tượng bằng chỉ số SPI.

- Tính toán đánh giá hạn thủy văn trên lưu vực dựa vào chỉ số chuẩn hóa lượng dòng chảy SDI (Streamflow Drought Index): Chỉ số SDI<sub>i,k</sub> được xác định dựa trên các giá trị lưu lượng dòng chảy trung bình tháng Q<sub>i,j</sub>, trong đó i là biểu thị năm thủy văn, j là biểu thị tháng thủy văn trong năm thủy văn đó. V<sub>i,k</sub> là tổng lượng dòng chảy tích lũy cho năm thủy văn i và thời đoạn tham khảo k.

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{s_k}, \quad V_{i,k} = \sum_{j=1}^k Q_{i,j}$$

với  $\begin{cases} i = 1, 2, \dots \\ j = 1, 2, \dots, 12 \\ k = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (2)$

Trong đó: V<sub>k</sub> và S<sub>k</sub> lần lượt là trung bình và độ lệch chuẩn của dòng chảy tích lũy cho thời đoạn tham chiếu thứ k.



Hình 3. Đánh giá tình trạng hạn thủy văn bằng chỉ số SDI.

| Mức độ hạn         | Chỉ số hạn SDI       |
|--------------------|----------------------|
| I. Không hạn       | $SDI \geq 0$         |
| II. Hạn nhẹ        | $-1 \leq SDI < 0$    |
| III. Hạn vừa       | $-1.5 \leq SDI < -1$ |
| IV. Hạn trầm trọng | $-2 \leq SDI < -1.5$ |
| V. Cực hạn         | $SDI < -2.0$         |

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1. Toán khôi phục dữ liệu mưa và dòng chảy trên lưu vực bằng mô hình WEHY-WRF

a) Tài liệu, số liệu sử dụng:

- Dữ liệu địa hình: Sử dụng bộ dữ liệu ảnh ASTER với độ phân giải cao (30m) cho dữ liệu địa hình toàn lưu vực. Đây là bộ dữ liệu DEM đã được công nhận về chất lượng và được ứng dụng nhiều nơi trên thế giới cho các mục đích khác nhau.

- Dữ liệu khí tượng toàn cầu ERA-20C được cung cấp bởi Trung tâm dự báo khí tượng Châu Âu (ECMWF) bao gồm (mưa, gió, nhiệt độ, bức xạ, bốc hơi...) độ phân giải 125km với các bước thời gian khác nhau (6h, ngày, tháng) làm dữ liệu đầu vào cho mô hình.

- Dữ liệu mưa toàn cầu Aphrodite (APH) của Nhật Bản (với độ phân giải 25km).

- Dữ liệu thực đo tại 91 trạm khí tượng, thủy văn trên toàn lưu vực sông Hồng - Thái Bình thuộc phần lưu vực phía Việt Nam và một số trạm thuộc lãnh thổ Trung Quốc.

- Dữ liệu thảm phủ (sử dụng ảnh landsat có độ phân giải >60m), dữ liệu về độ che phủ lá cây (Dữ liệu LAI được thu thập từ ảnh vệ tinh của MODIS ứng với độ phân giải 500-1000 m), dữ liệu đất (dữ liệu soil grid 250m cho toàn cầu và phân loại đất toàn cầu của FAO).

b) Quy trình tính toán khôi phục dữ liệu:

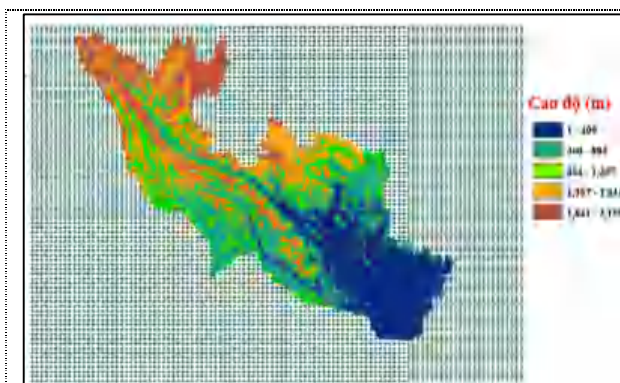
Việc tính toán và mô phỏng các điều kiện khí tượng - thủy văn của lưu vực được thực hiện

theo chu trình khép kín trên mô hình WEHY-WRF trong từng thời đoạn tính toán thông qua các module ghép nối song song giữa mô hình khí tượng WRF và mô hình thủy văn WEHY. Quy trình công nghệ tính toán khôi phục dữ liệu được mô tả trên Hình 4.

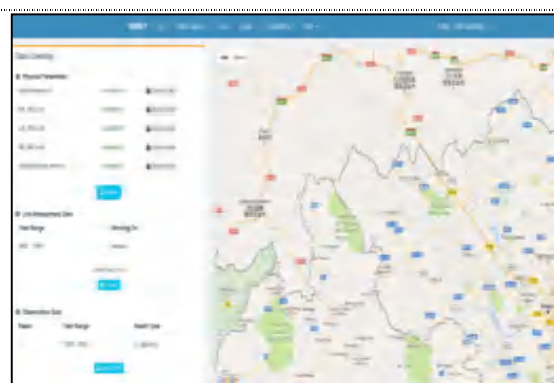


Hình 4. Quy trình tính toán khôi phục dữ liệu mưa và dòng chảy trên lưu vực bằng mô hình WEHY-WRF

Mô hình được thiết lập cho toàn bộ lưu vực sông Hồng - Thái Bình với phương pháp lưới lồng, các ô lưới được chi tiết hóa dần dần từ ô lưới có kích thước lớn thu hẹp xuống các ô lưới có kích thước nhỏ hơn và thông thường bằng 1/3 các ô lưới trước đó (ví dụ 81km→27km→9km) [5]. Trong nghiên cứu này, độ phân giải của ô lưới được sử dụng để tính toán khôi phục dữ liệu là 9km cho toàn bộ lưu vực. Miền tính toán của mô hình thiết lập tương ứng với độ phân giải này được thể hiện như trên Hình 5.



Hình 5. Miền tính toán với độ phân giải ô lưới (9km) của mô hình WRF.



Hình 6. Giao diện thiết lập của mô hình WEHY-WRF.

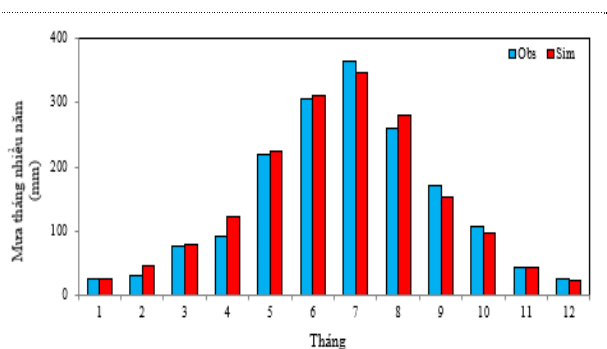
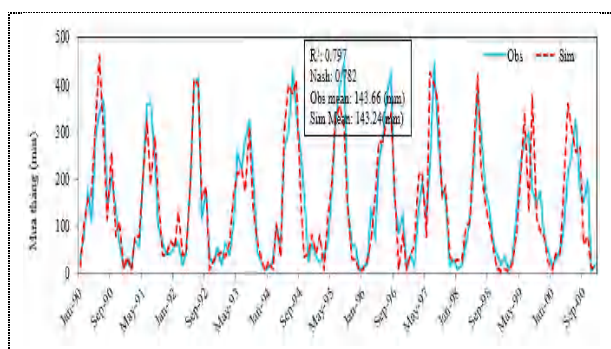
**c) Kết quả kiểm định mô hình WEHY-WRF:**

**\* Kiểm định mô hình khí tượng WRF:**

Sau khi mô hình đã được hiệu chỉnh và thiết lập bộ thông số tối ưu, lựa chọn chuỗi thời gian từ năm 1990 đến năm 1994 để kiểm định và đánh giá sự phù hợp của mô hình trước khi áp dụng tính toán khôi phục dữ liệu mưa trên lưu vực.

- Kết quả kiểm định mô hình tính toán mô

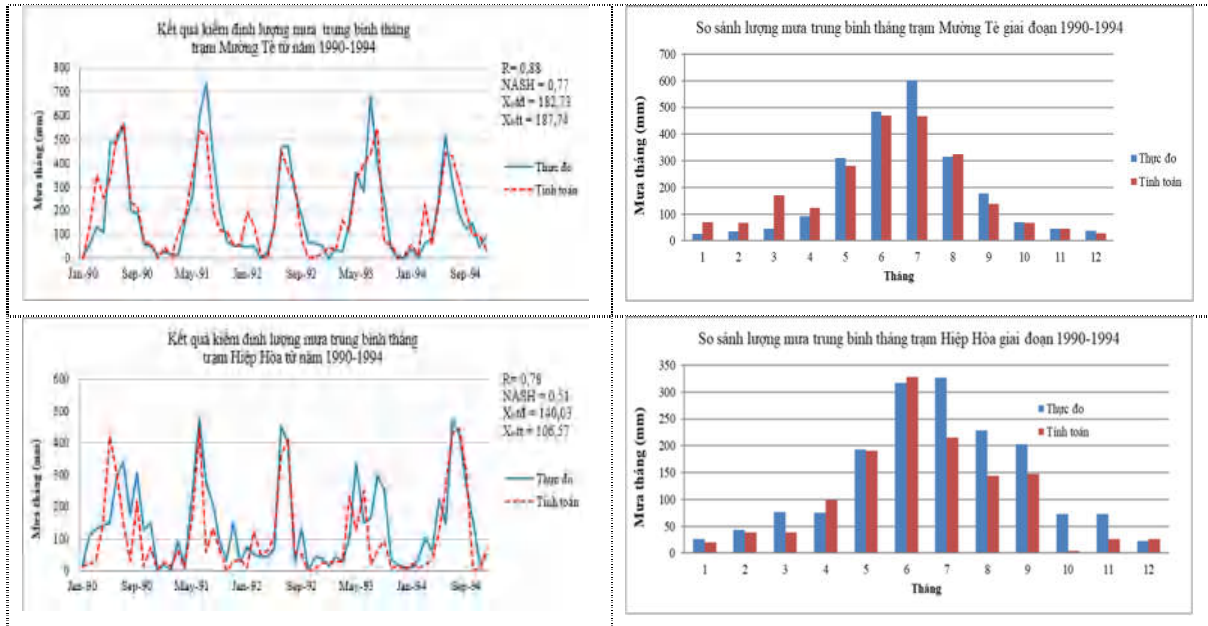
phỏng mưa cho toàn lưu vực sông Hồng - Thái Bình (bao gồm cả phần lưu vực thuộc Trung Quốc và Lào) cho thấy sự phù hợp giữa quá trình tính toán và thực đo, chỉ số lượng mưa trung bình tháng cho toàn giai đoạn từ 1990-1994 giữa tính toán và thực đo là khá sát nhau (~145 mm), hệ số tương quan  $R^2=0,797$  và hệ số NASH đạt 0,83. Kết quả đánh giá được thể hiện tại Hình 7.



Hình 7. Kết quả kiểm định lượng mưa trung bình lưu vực từ 1990-1994.

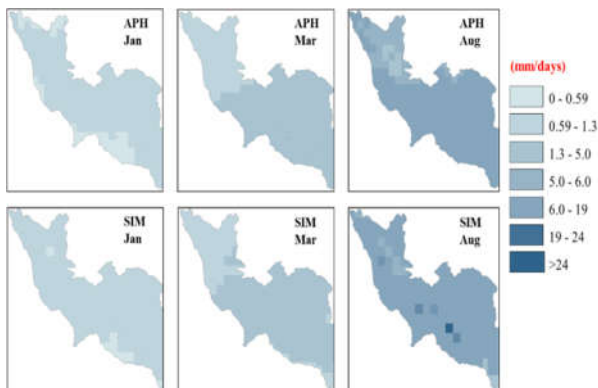
So sánh giữa kết quả tính của mô hình WRF với số liệu thực đo mưa tại một số trạm nằm phân bố ở các vị trí khác nhau trên lưu vực gồm Mường Tè, Lai Châu, Quỳnh Nhai, Hiệp Hòa, Hòa Bình cũng cho thấy mô hình không chỉ mô

phỏng tốt cho chuỗi số liệu dạng trung bình lưu vực, mà còn mô phỏng tốt phân bố mưa tại các điểm trên lưu vực. Kết quả kiểm định mưa cũng khá tương đồng ở hầu hết các trạm kiểm tra.



Hình 8. Kết quả kiểm định tính toán mưa trung bình tháng tại một số trạm.

Do không có dữ liệu khí tượng của phần thượng nguồn lưu vực thuộc phía lãnh thổ Trung Quốc và Lào nên các số liệu mưa toàn cầu Aphrodite (APH) [11] của Nhật Bản (với độ phân giải 25km) được sử dụng và coi như là các dữ liệu thực đo để kiểm định mô hình (bản chất của dữ liệu APH là được tính toán lại ở độ phân giải 25km với nguồn số liệu từ các trạm đo mặt đất thu thập được trên toàn cầu). Kết quả mô phỏng mưa ở phần thượng nguồn so sánh với dữ liệu APH cho toàn bộ lưu vực được thể hiện như trên Hình 9.



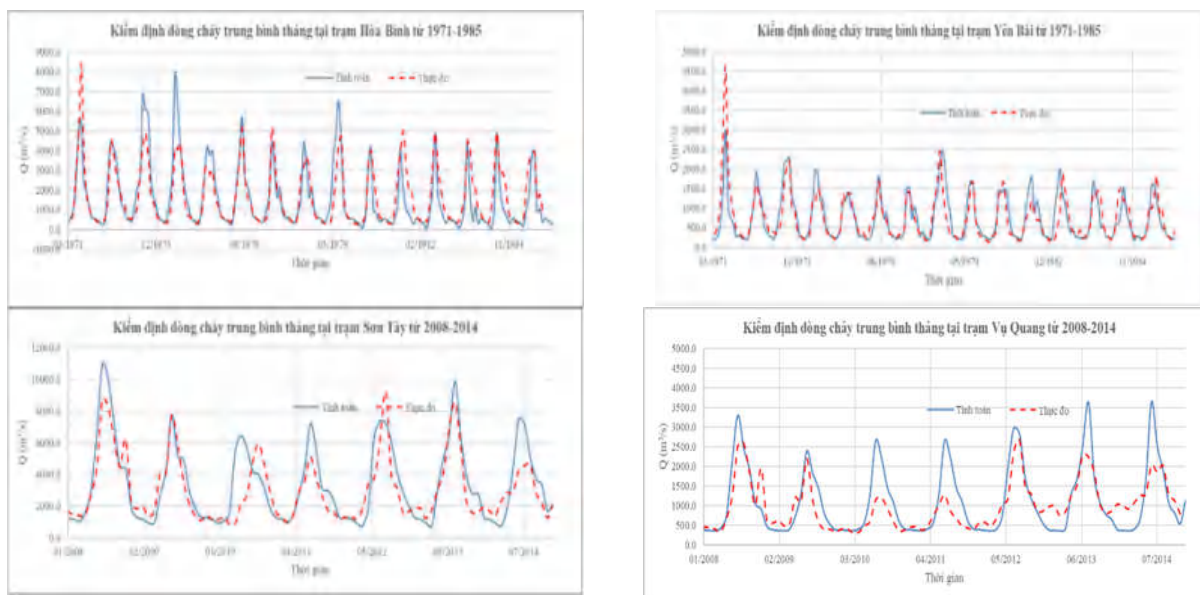
Hình 9. Kết quả kiểm định phân bố mưa trung bình tháng nhiều năm từ 1990-2000 cho toàn bộ lưu vực sông Hồng - Thái Bình.

Các số liệu phân bố mưa của APH và WRF có sự khác biệt về độ phân giải, nên kết quả tính toán mưa của mô hình sẽ được nội suy từ độ phân giải 9km sang độ phân giải 25km để so sánh đồng bộ trên toàn lưu vực. Bản đồ so sánh phân bố lượng mưa của một số tháng điển hình, đại diện cho đặc trưng mưa trong năm như: Tháng I (mùa khô), Tháng III (mùa trung gian) và Tháng VIII (mùa mưa) cho thấy kết quả mô phỏng của mô hình WRF khá tương đồng với số liệu mưa của APH. Có đến gần 87% diện tích trùng nhau theo các ô màu so sánh kiểm định.

\* Kiểm định mô hình thủy văn WEHY:

Mô hình được kiểm định với liệt số liệu dòng chảy tự nhiên từ 1971-1985 là giai đoạn trước khi có các hồ chứa lớn ở thượng nguồn và giai đoạn từ 2008-2014 sau khi xây dựng các hồ Thác Bà, Hòa Bình, Tuyên Quang, Sơn La, Lai Châu... Kết quả kiểm định dòng chảy tại một số trạm chính trên lưu vực cho thấy các chỉ số thống kê đều đạt trên 0,8 (hệ số tương quan  $R^2=0.884$  và chỉ số Nash=0.81), với đường màu xanh là biểu diễn các giá trị tính toán mô phỏng và đường màu đỏ biểu diễn các giá trị thực đo. Kết quả mô phỏng theo quan sát là khá sát với thực đo cả về phân mùa lũ và mùa kiệt, đồng

ngĩa với khả năng mô phỏng dòng chảy trên lưu vực khá tốt của mô hình WEHY.



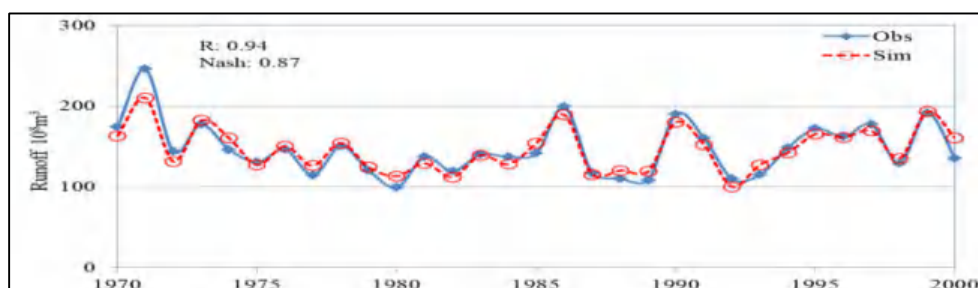
Hình 10. Kết quả kiểm định dòng chảy tại một số trạm thủy văn trên lưu vực thuộc lãnh thổ Việt Nam.

Việc kiểm định kết quả mô phỏng dòng chảy phía thượng nguồn Trung Quốc là rất khó khăn do hạn chế về thông tin và dữ liệu đo đạc. Dựa trên số liệu thu thập được từ một số bài báo Quốc tế nghiên cứu ở khu vực này, chúng tôi đã tiến hành khôi phục các chuỗi dữ liệu thực đo về tổng lượng dòng chảy trên sông Yuanjiang

(Nguyên Giang) phía thượng nguồn Trung Quốc [9] từ năm 1970-2000. So sánh giữa số liệu thực đo (Yuanjiang - Trung Quốc) và số liệu tính toán chiết xuất từ mô hình WEHY cho thấy kết quả mô phỏng khá tốt, kết quả kiểm định được thể hiện tại Bảng 1 và Hình 11.

**Bảng 1. So sánh thông số thống kê giữa kết quả tính toán và số liệu thực đo sông Yuanjiang - Trung Quốc, thời đoạn từ 1970-2000**

| Sông Yuanjiang       | Tổng lượng dòng chảy năm (1970-2000) | Độ lệch chuẩn | Chỉ số tương quan | Nash |
|----------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------|------|
| Thực đo $10^8 m^3$   | 146.9                                | 32.1          | 0.94              | 0.87 |
| Tính toán $10^8 m^3$ | 146.1                                | 28.1          |                   |      |



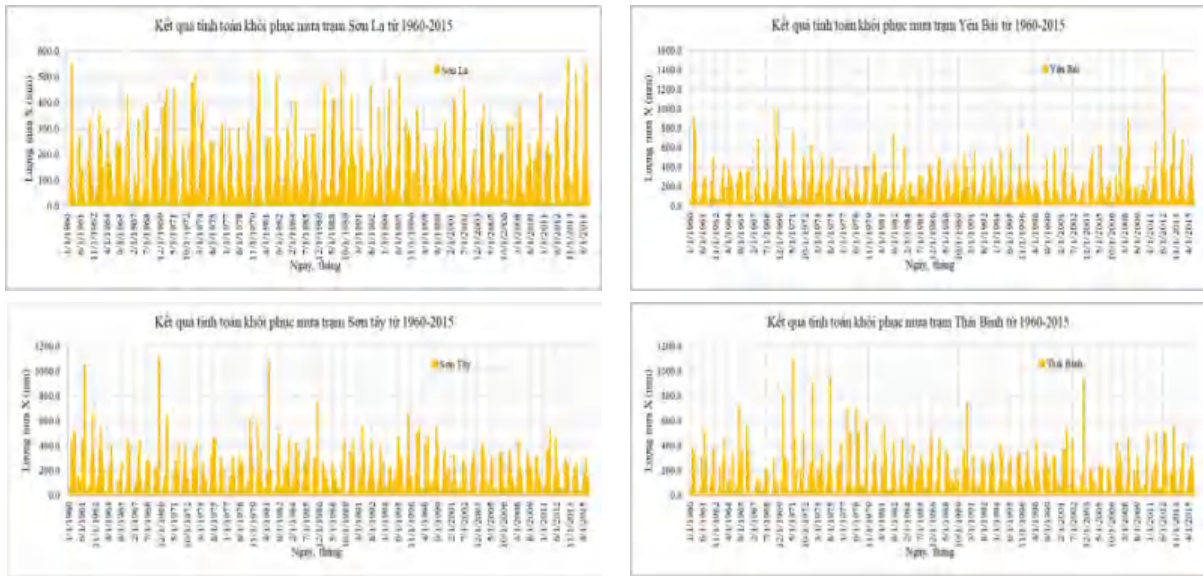
Hình 11. So sánh kiểm định tổng lượng dòng chảy năm mô phỏng và số liệu thực đo trên sông Yuanjiang – Trung Quốc từ 1970-2000.

Kết quả kiểm định mô hình WEHY-WRF cho toàn lưu vực (bao gồm cả Việt Nam và Trung Quốc) là khá tốt, các chỉ số thống kê đánh giá độ tin cậy trong tính toán mô phỏng khí tượng và thủy văn đều đạt giá trị từ 0,8 trở lên. Như vậy có thể khẳng định, mô hình được thiết lập là đảm bảo độ tin cậy và có thể sử dụng để tính toán khôi phục các chuỗi dữ liệu mưa và dòng chảy trên lưu vực để làm số liệu đầu vào cho các tính toán, phân tích về diễn biến hạn hán trên lưu vực sông Hồng - Thái Bình bằng các

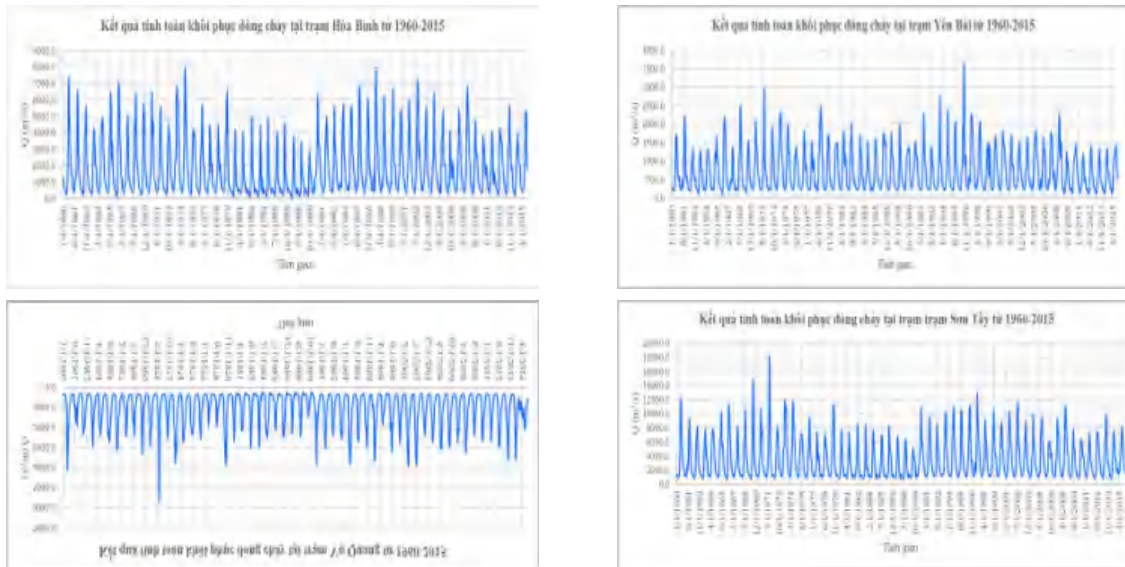
chỉ số đánh giá SPI, SDI.

**d) Kết quả tính toán khôi phục bộ dữ liệu mưa và dòng chảy:**

Sau khi kiểm định, mô hình WEHY-WRF được áp dụng để tính toán mô phỏng và khôi phục lại các chuỗi giá trị mưa và dòng chảy trên toàn bộ lưu vực sông Hồng - Thái Bình từ 1960-2015. Kết quả khôi phục dữ liệu tại một số vị trí trên lưu vực được thể hiện tại các Hình 12 và Hình 13.



Hình 12. Kết quả khôi phục lượng mưa trung bình ngày từ 1960-2015 tại một số vị trí trên lưu vực sông Hồng - Thái Bình.



Hình 13. Kết quả khôi phục dòng chảy trung bình ngày từ 1960-2015 tại một số vị trí trên lưu vực sông Hồng - Thái Bình.

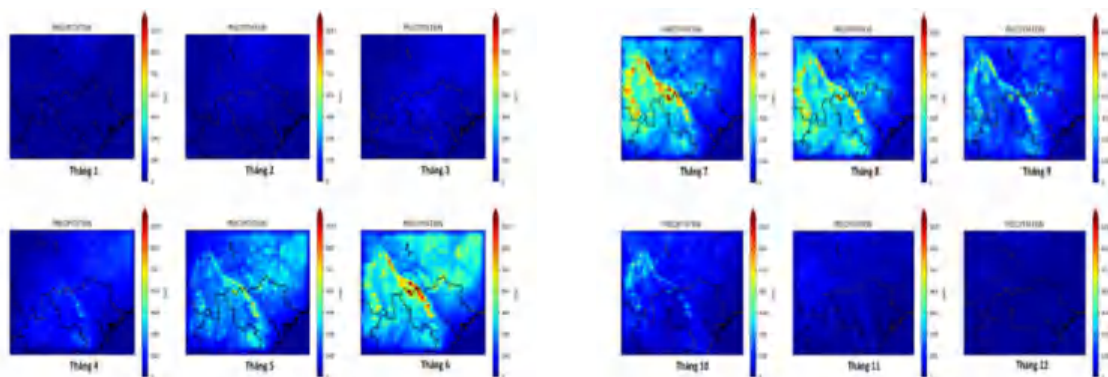


### 3.2. Đánh giá diễn biến hạn khí tượng và thủy văn trên lưu vực sông Hồng - Thái Bình

#### a) Diễn biến hạn khí tượng:

Sử dụng bộ dữ liệu lượng mưa khôi phục từ năm

1960-2015 để tính toán các chỉ số SPI, từ đó lập bản đồ phân bố mưa và hạn hán cho toàn lưu vực. Kết quả xây dựng bản đồ phân bố mưa trung bình tháng nhiều năm trên toàn lưu vực được thể hiện tại Hình 14.



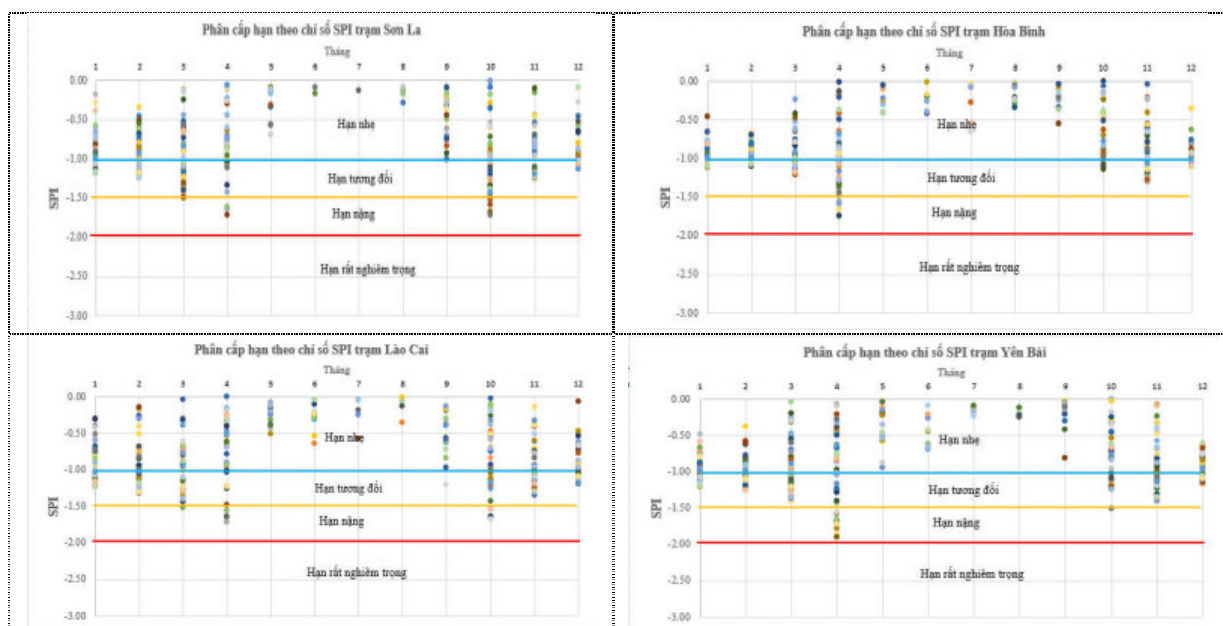
Hình 14. Phân bố lượng mưa trung bình tháng nhiều năm từ 1960-2015.

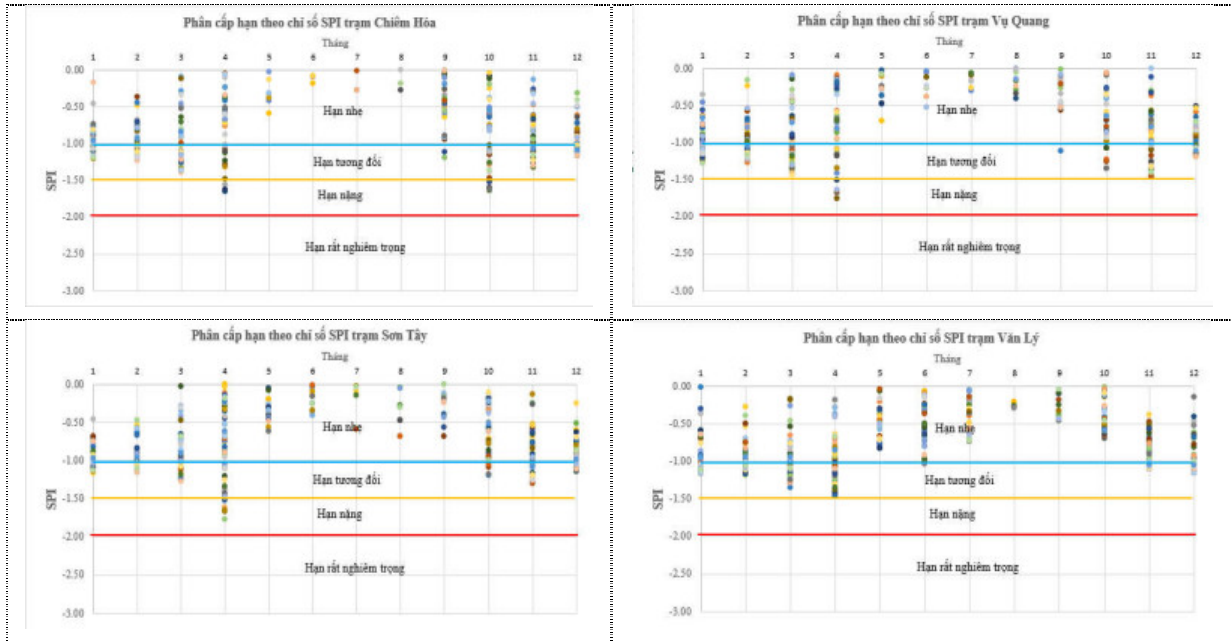
Lựa chọn số liệu tại một số trạm điển hình phản ánh đầy đủ đặc trưng mưa cho các khu vực trên cả vùng thượng lưu và hạ lưu, tiến hành tính toán chỉ số SPI để đánh giá diễn biến hạn theo từng tháng trên toàn lưu vực. Kết quả phân tích diễn biến hạn như sau:

#### \* Phân bố chỉ số hạn trên lưu vực:

Diễn biến hạn trên lưu vực chỉ xảy ra ở mức từ hạn nhẹ đến hạn nặng, không xảy ra hạn nghiêm

trọng. Mức độ hạn giảm dần từ thượng lưu về hạ lưu, vùng thượng lưu tại các trạm Sơn La, Lào Cai, Chiêm Hóa đều xảy ra hạn nặng vào tháng IV và tháng X nhưng xuống đến trạm Hòa Bình, Yên Bái, Vụ Quang hạn nặng chỉ xảy ra vào tháng IV. Các khu vực vùng đồng bằng (trạm Sơn Tây) chỉ xảy ra hạn nặng thường chỉ xảy ra trong tháng IV và vùng ven biển không có tình trạng xảy ra hạn nặng.





Hình 15. Kết quả phân cấp hạn theo chỉ số SPI tại các trạm trên lưu vực.

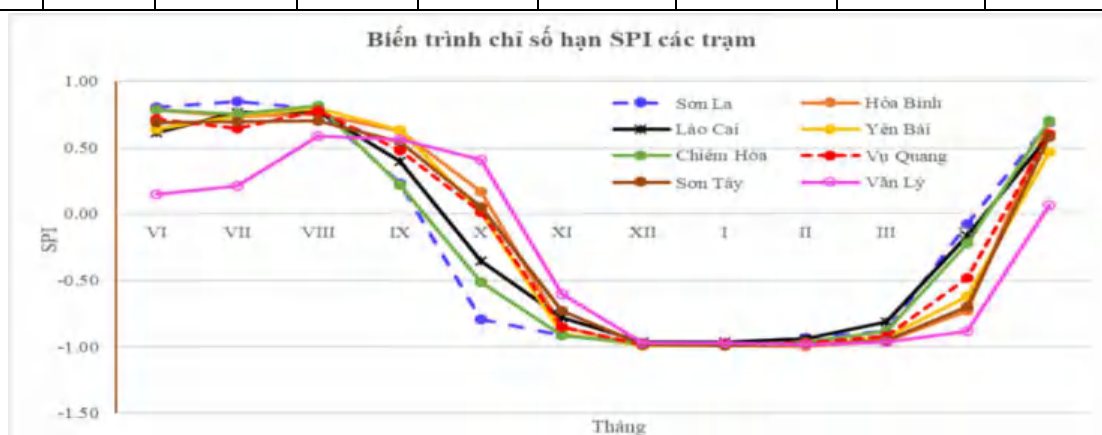
Nhìn chung trên toàn lưu vực biến trình chỉ số hạn biến đổi khá đồng đều từ thượng lưu xuống hạ lưu. Vùng thượng lưu tại các trạm Sơn La, Lào Cai, Chiêm Hóa hạn xảy ra từ tháng X đến tháng IV, càng về hạ lưu thời gian hạn giảm chỉ

từ tháng XI đến tháng IV (tại các trạm Hòa Bình, Yên Bái, Vụ Quang, Sơn Tây, Văn Lý). Hạn cao điểm thường xảy ra vào các tháng XII năm trước đến tháng II năm sau. Tháng hạn nhất rơi vào tháng I hàng năm.

**Bảng 2. Chỉ số hạn SPI trung bình tháng và năm tại các trạm.**

| Tháng | Sơn La | Hòa Bình | Lào Cai | Yên Bái | Hàm Yên | Chiêm Hóa | Vụ Quang | Sơn Tây | Văn Lý |
|-------|--------|----------|---------|---------|---------|-----------|----------|---------|--------|
| VI    | 0,80   | 0,79     | 0,61    | 0,64    | 0,68    | 0,79      | 0,72     | 0,69    | 0,15   |
| VII   | 0,85   | 0,73     | 0,77    | 0,74    | 0,91    | 0,76      | 0,64     | 0,69    | 0,21   |
| VIII  | 0,79   | 0,75     | 0,77    | 0,80    | 0,86    | 0,82      | 0,78     | 0,70    | 0,59   |
| IX    | 0,23   | 0,63     | 0,39    | 0,63    | 0,75    | 0,22      | 0,48     | 0,54    | 0,56   |
| X     | -0,80  | 0,17     | -0,36   | 0,02    | 0,09    | -0,51     | 0,01     | 0,06    | 0,41   |
| XI    | -0,91  | -0,85    | -0,78   | -0,90   | -0,75   | -0,92     | -0,85    | -0,73   | -      |
| XII   | -0,97  | -0,99    | -0,96   | -0,99   | -0,99   | -0,98     | -0,98    | -0,98   | -      |
| I     | -0,97  | -0,99    | -0,97   | -0,99   | -1,00   | -0,98     | -0,98    | -0,99   | 0,97   |
| II    | -0,93  | -1,00    | -0,94   | -0,98   | -1,00   | -0,96     | -0,97    | -0,99   | -      |

|     |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|     |       |       |       |       |       |       |       |       | 0,98 |
| III | -0,88 | -0,96 | -0,81 | -0,93 | -0,99 | -0,88 | -0,92 | -0,95 | -    |
| IV  | -0,07 | -0,73 | -0,16 | -0,62 | -0,98 | -0,22 | -0,48 | -0,70 | -    |
| V   | 0,69  | 0,69  | 0,59  | 0,46  | -0,61 | 0,71  | 0,60  | 0,58  | 0,07 |
| TB  | -0,18 | -0,15 | -0,15 | -0,18 | -0,25 | -0,18 | -0,16 | -0,17 | -    |



Hình 16. Biến trình chỉ số SPI trung bình nhiều năm (1961-2015) tại các trạm

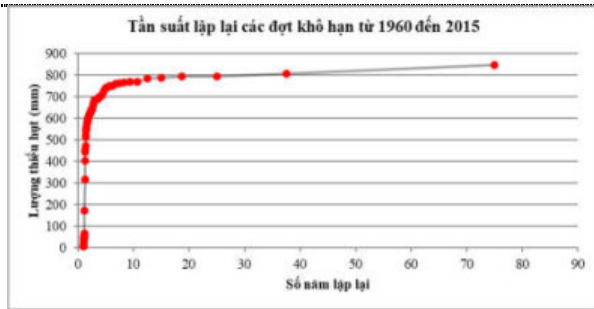
\* Diễn biến tần suất hạn:

Nhìn chung trên lưu vực sông Hồng - Thái Bình sự thiếu hụt lượng mưa xảy ra khá thường xuyên trong năm, ngay cả trong các tháng mùa mưa từ tháng V đến tháng X. Vào tháng XI ngay khi mùa mưa kết thúc, tần suất hạn và mức độ hạn

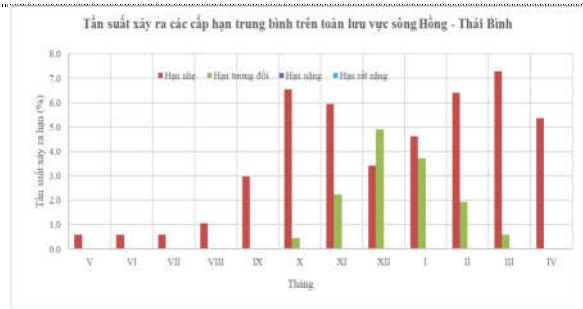
tăng nhanh, tháng XII đến tháng II là các tháng cao điểm mùa hạn, trong tất cả các năm tính toán đều xảy ra thiếu hụt mưa ở các tháng này. Sang tháng III và tháng IV số tháng hạn giảm dần và giảm rõ rệt khi chính thức vào mùa mưa từ tháng V đến tháng IX.

**Bảng 3. Tần suất xuất hiện hạn tháng tại các trạm (P%).**

| Tháng | Sơn La | Hòa Bình | Lào Cai | Yên Bái | Chiêm Hóa | Vụ Quang | Sơn Tây | Văn Lý |
|-------|--------|----------|---------|---------|-----------|----------|---------|--------|
| VI    | 2      | 7        | 13      | 9       | 4         | 9        | 11      | 31     |
| VII   | 1      | 6        | 5       | 6       | 3         | 7        | 5       | 28     |
| VIII  | 7      | 8        | 4       | 4       | 3         | 9        | 7       | 5      |
| IX    | 25     | 12       | 20      | 13      | 31        | 18       | 17      | 13     |
| X     | 49     | 27       | 40      | 30      | 40        | 30       | 34      | 25     |
| XI    | 52     | 52       | 50      | 52      | 52        | 51       | 49      | 47     |
| XII   | 55     | 55       | 54      | 55      | 55        | 55       | 55      | 55     |
| I     | 55     | 55       | 55      | 55      | 55        | 55       | 55      | 55     |
| II    | 54     | 55       | 54      | 55      | 54        | 55       | 55      | 55     |
| III   | 53     | 54       | 49      | 54      | 51        | 54       | 54      | 55     |
| IV    | 32     | 46       | 34      | 44      | 37        | 42       | 49      | 51     |
| V     | 9      | 7        | 14      | 16      | 7         | 12       | 17      | 34     |



Hình 17. Tần suất lặp lại đợt hạn trên lưu vực từ năm 1960-2015.



Hình 18. Tần suất trung bình xảy ra các cấp hạn trên lưu vực.

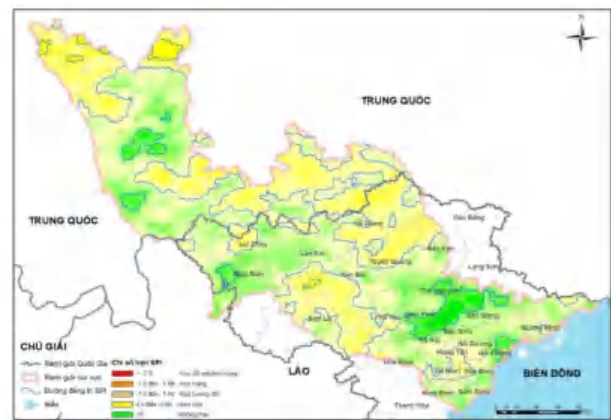
**\* Thời gian hạn và mùa hạn:**

Số tháng hạn trung bình trong một mùa hạn trên toàn lưu vực dao động trong khoảng từ 4-5 tháng, có năm hạn dài lên tới 8-9 tháng như mùa hạn 1968-1969, 1978-1980, 1998-1999, 2004-2005, 2010-2011,... Kết quả tính toán này cũng phù hợp với tình trạng hạn hán thực tế đã xảy ra trên lưu vực.

Mùa khô hạn trên lưu vực có thời gian bắt đầu đồng nhất trên toàn lưu vực và thường bắt đầu từ tháng X, cao điểm tháng XII đến tháng II và kết thúc vào tháng IV. Tuy nhiên cao điểm bắt đầu và kết thúc là khác nhau, càng ra ngoài biển thì thời gian kết thúc hạn muộn hơn so với vùng thượng lưu.

**\* Xây dựng bản đồ phân vùng hạn khí tượng:**

Từ các số liệu tính toán các chỉ số hạn SPI giai đoạn từ năm 1960-2015, tiến hành xây dựng bản đồ phân vùng hạn cho toàn lưu vực dựa trên các chỉ số hạn SPI trung bình mùa khô nhiều năm theo từng tháng và theo từng khu vực. Dưới đây là kết quả xây dựng bản đồ diễn biến hạn khí tượng cho toàn bộ lưu vực sông Hồng - Thái Bình (Hình 19).



Hình 19. Bản đồ phân vùng hạn khí tượng theo chỉ số SPI trung bình mùa khô nhiều năm giai đoạn từ 1960-2015

**b) Diễn biến hạn thủy văn:**

Sử dụng bộ dữ liệu lưu lượng dòng chảy được khôi phục từ 1960-2015, tiến hành tính toán các chỉ số hạn SDI trong mùa kiệt (theo năm thủy văn) tại các trạm đại diện cho các tuyến sông suối trên lưu vực gồm: Tạ Bú, Hòa Bình trên sông Đà; Yên Bái, Lào Cai trên sông Thao; Hàm Yên, Chiêm Hóa, Vụ Quang trên sông Lô - Gâm; Sơn Tây, Hà Nội trên sông Hồng; Thượng Cát trên sông Đuống; Gia Bảy, Chũ trên hệ thống sông Thái Bình,... Từ đó phân tích, đánh giá diễn biến hạn hán xảy ra trên toàn lưu vực sông. Kết quả tính toán cho thấy:

*Trên sông Đà:* Tại trạm Hòa Bình hạn trầm

trọng xảy ra vào các năm 1992-1993 và 2010-2011, cực hạn xảy ra năm 2011-2012. Tại trạm Tạ Bú có 3 năm xảy ra hạn trầm trọng xảy ra vào năm 1980-1981, 1989-1990 và 1992-1993. Nửa đầu thời đoạn từ năm 1961-1995 hạn xảy ra thường xuyên và nghiêm trọng hơn so với thời kì từ năm 1996-2015. Các đợt hạn kéo dài từ năm 1977-1982; 1986-1992 và 2009-2013. Tại trạm Hòa Bình có 24 năm không hạn (chiếm 44,4%), 21 năm hạn nhẹ (chiếm 38,9%), có 6 năm hạn vừa (chiếm 11,1%), 2 năm hạn trầm trọng (chiếm 3,7%) và 1 năm cực hạn chiếm 1,9%. Tại trạm Tạ Bú trong 54 năm tính toán (1961-2015) thì có 26 năm không hạn (chiếm 48,1%), 18 năm hạn nhẹ (chiếm 33,3%), 7 năm hạn vừa (chiếm 13%) và 3 năm xảy ra hạn trầm trọng (chiếm 5,6%), dòng chảy tại khu vực này không có năm nào cực hạn.

*Trên sông Thao:* Năm xảy ra hạn trầm trọng là năm 2009-2010 và 2011-2012. Tại trạm Lào Cai có 23 năm không hạn (chiếm 42,6%), 24 năm hạn nhẹ (chiếm 44,4%), 6 năm hạn vừa (chiếm 11,1%) và 1 năm hạn trầm trọng chiếm 1,9%. Tại trạm Yên Bái có 24 năm không hạn (chiếm 44,4%), 21 năm hạn nhẹ (chiếm 38,9%), 7 năm hạn vừa (chiếm 13%) và 2 năm hạn trầm trọng năm 2009-2010, 2011-2012 (chiếm 3,7%), không có năm nào

trầm trọng. Tại các trạm Yên Bái và Hòa Bình hạn xảy ra năm 2009-2010, 2011-2012. Hạn xảy ra ở các trạm này vẫn tại từng trạm có sự khác nhau, trong đó trạm Yên Bái xảy ra tình trạng hạn nặng hơn so với trạm Lào Cai.

*Trên sông Lô-Gâm:* Số năm xảy ra hạn trên sông Lô-Gâm ít hơn so với sông Đà và sông Thao nhưng mức độ hạn lại lớn hơn. Trong khi ở sông Đà và sông Thao chỉ có 1-2 năm xảy ra hạn trầm trọng thì trên sông Lô-Gâm xảy ra 2-6 năm, tình trạng hạn nghiêm trọng nhất xảy ra trên sông Lô tại Vụ Quang với 6 đợt xảy ra hạn trầm trọng là các năm 2004-

2007 và 2009-2012. Các thời kỳ xảy ra hạn liên tục trên lưu vực sông như từ năm 1975-1979, từ 2003-2008 và từ 2009-2012. Tại trạm Hàm Yên, trong 54 năm tính toán có 26 năm không hạn (chiếm 48,1%), 21 năm hạn nhẹ (chiếm 38,9%), 5 năm hạn vừa (chiếm 9,3%) và 2 năm nào hạn trầm trọng (chiếm 3,7%); Tại trạm Chiêm Hóa có 32 năm không hạn (chiếm 59,3%), 12 năm hạn nhẹ (chiếm 22,2%), có 7 năm hạn vừa (chiếm 13%), 3 năm hạn trầm trọng (chiếm 5,6%) và không có năm nào cực hạn. Tại trạm Vụ Quang có 30 năm không hạn (chiếm 55,6%), 15 năm hạn nhẹ (chiếm 27,8%), 3 năm hạn vừa (chiếm 5,6%), 6 năm hạn trầm trọng (chiếm 11,1%) và không có năm nào cực hạn. Qua đó cho thấy, diễn biến hạn hán trên sông Lô-Gâm cũng có sự biến động theo không gian, ở khu vực hạ du sông Lô-Gâm tại trạm Vụ Quang hạn hán xảy ra thường xuyên hơn so với trạm Chiêm Hóa, Hàm Yên ở vùng thượng nguồn.

*Hạ du sông Hồng:* Ở vùng hạ du, hạn thủy văn diễn ra thường xuyên và mức độ lớn hơn so với các khu vực thượng nguồn. Từ năm 1960-2015 đã có những năm xảy ra cực hạn trên sông hồng như năm 2011-2012 và hạn trầm trọng là các năm 2006-2007, năm 2009-2010, năm 2010-2011, năm 2014-2015. Hạn trên sông Hồng chia làm 2 thời kì: thời kì thứ nhất từ năm 1961-1986 chỉ số SDI lớn, hạn không xảy ra thường xuyên, không xuất hiện tình trạng hạn trầm trọng đến cực hạn, chỉ xảy ra một thời kỳ hạn kéo dài từ 1976-1979; thời kì thứ hai từ năm 1987-2015 chỉ số SDI giảm, xuất hiện các thời kỳ xảy ra hạn liên tục như thời kỳ từ 1991-1995, 2002-2008, 2009-2015.

Diễn biến hạn tại từng trạm: Tại trạm Sơn Tây có 24 năm không hạn (chiếm 44,4%), 19 năm hạn nhẹ (chiếm 44,4%), 10 năm hạn vừa (chiếm 18,5%), 1 năm cực hạn là năm 2011-2012 (chiếm 1,9%). Tại trạm Hà Nội, có 29

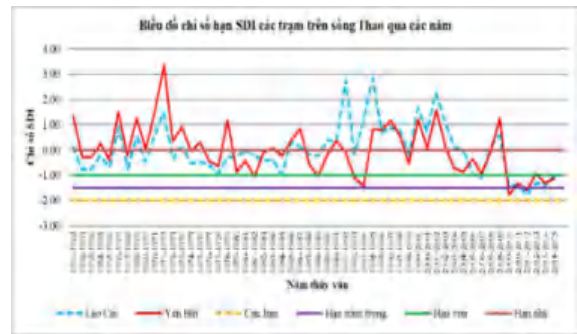
năm không hạn (chiếm 53,7%), 14 năm hạn nhẹ (chiếm 25,9%), có 6 năm hạn vừa (chiếm 11,1%), 4 năm hạn vừa (chiếm 7,4%) và 1 năm cực hạn (chiếm 1,9%). Như vậy theo không gian dọc theo sông Hồng, càng về hạ du mức độ hạn do thiếu hụt nước tăng hơn so với vùng thượng lưu, sang sông Đuống thì mức độ hạn giảm, hạn xảy ra ít hơn so với sông Hồng.

*Trên sông Thái Bình:* mức độ xảy ra hạn trên vùng thượng nguồn sông Thái Bình thấp hơn so với trên sông Hồng. Đánh giá chỉ số SDI tại các trạm trong khu vực cho thấy từ năm 1960-2015 không có năm nào xảy ra cực hạn

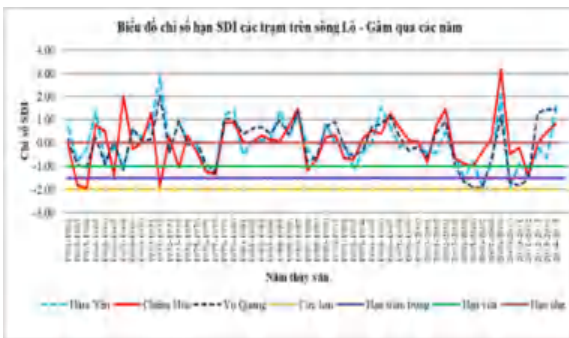
và chỉ có 2 năm xảy ra hạn trầm trọng. Tình trạng hạn xảy ra cũng biến động theo không gian, càng gần xuống dưới hạ du tần suất hạn tăng lên nhưng mức độ hạn giảm so với thượng nguồn. Phía thượng nguồn sông Thái Bình, trên sông Thương có 30 năm xảy ra hạn nhẹ và 2 năm xảy ra hạn vừa nhưng trạm Gia Bảy có 10 năm hạn nhẹ, 14 năm xảy ra hạn vừa. Đặc biệt trên sông Đuống từ năm 1999 trở lại đây không xảy ra hạn thủy văn, điều này cũng phù hợp với thực tế do tỷ lệ phân lưu dòng chảy từ sông Hồng chuyển sang sông Đuống có xu thế tăng lên do ảnh hưởng của việc mở rộng cửa vào và hạ thấp lòng dẫn sông Đuống.



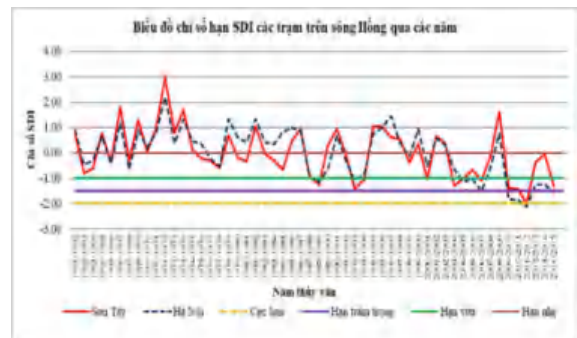
Hình 20. Biểu đồ diễn biến chỉ số hạn SDI trên sông Đà, thời kỳ từ 1960-2015.



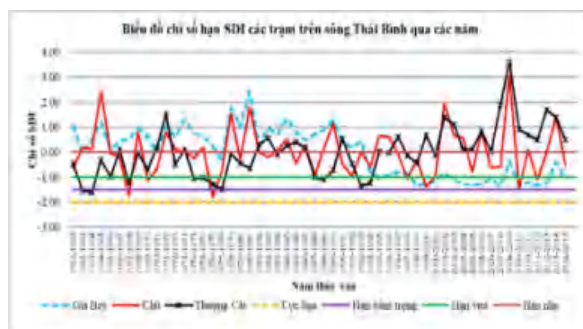
Hình 21. Biểu đồ diễn biến chỉ số hạn SDI trên sông Thao, thời kỳ từ 1960-2015.



Hình 22. Biểu đồ diễn biến chỉ số hạn SDI trên sông Lô-Gâm, thời kỳ từ 1960-2015.



Hình 23. Biểu đồ diễn biến chỉ số hạn SDI trên sông Hồng, thời kỳ từ 1960-2015.



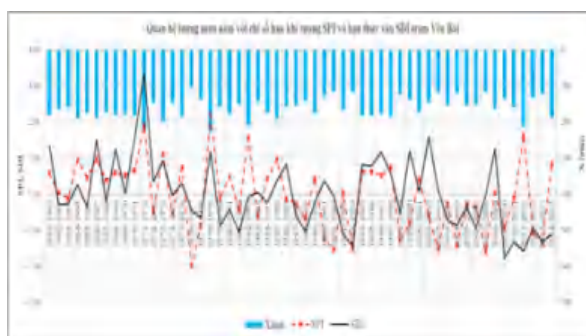
Hình 24. Biểu đồ diễn biến chỉ số hạn SDI trên sông Thái Bình, thời kỳ từ 1960-2015.

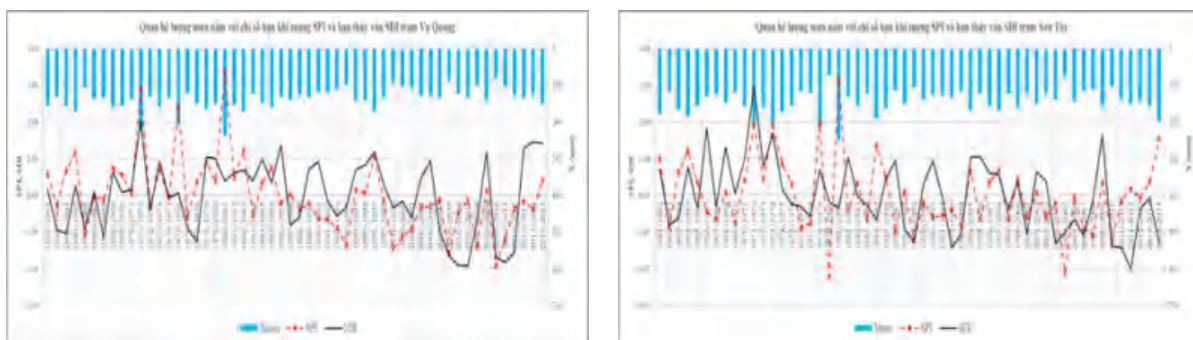
Như vậy có thể thấy, kết quả phân tích chỉ số hạn SDI đã phản ánh sát với thực trạng hạn thủy văn xảy ra trên các sông thuộc lưu vực sông Hồng - Thái Bình trong giai đoạn từ năm 1960-2015. Đối với những năm tình trạng hạn hán xảy ra nghiêm trọng trên lưu vực như mùa khô năm 1962-1963, 1963-1964, 1997-1998, 1998-1999, 2009-2010... các kết quả tính toán chỉ số SDI từ bộ dữ liệu khôi phục đã phản ánh được đúng thực trạng hạn.

**c) Phân tích mối liên hệ giữa phân phối lượng mưa với diễn biến hạn khí tượng và hạn thủy văn trên lưu vực:**

Chồng chập diễn biến về lượng mưa và phân phối mưa với các chỉ số tính toán hạn khí tượng SPI và hạn thủy văn SDI tại một số vị trí trạm

đại diện trên lưu vực sông Hồng - Thái Bình cho thấy: Với hạn khí tượng chỉ số SPI phù hợp với diễn biến mưa trên lưu vực, nhưng chỉ số hạn thủy văn SDI không hoàn toàn phù hợp với diễn biến mưa và tình hình hạn khí tượng. Sự khác nhau này có thể được giải thích là do dòng chảy trên các sông được hình thành không chỉ phụ thuộc vào lượng mưa trên lưu vực mà còn phụ thuộc vào cả lượng dòng chảy đến từ bên ngoài lưu vực. Đặc biệt là nếu trên lưu vực có các công trình hồ chứa lớn điều tiết dòng chảy như lưu vực sông Hồng - Thái Bình thì các hoạt động tích nước và xả nước sẽ làm thay đổi cơ bản chế độ thủy văn dòng chảy ở vùng hạ du các hồ chứa, do đó chỉ số đánh giá hạn thủy văn sẽ không phản ánh đúng thực tế diễn biến của các điều kiện khí tượng, khí hậu trên lưu vực.





Hình 25. Quan hệ giữa lượng mưa năm với diễn biến về chỉ số hạn khí tượng SPI và hạn thủy văn SDI tại một số trạm trên lưu vực

#### 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã ứng dụng bộ mô hình khí tượng thủy văn kết hợp WEHY-WRF với độ phân giải ô lưới 9km để tính toán mô phỏng các điều kiện khí tượng và thủy văn trên toàn lưu vực sông Hồng - Thái Bình. Mô hình đã được hiệu chỉnh và kiểm định với các số liệu thực đo tại nhiều vị trí trong khu vực, bao gồm cả phần lưu vực lãnh thổ Trung Quốc, Lào và Việt Nam với các chỉ tiêu thống kê đánh giá độ tin cậy từ 0,8 trở lên. Mô hình sau khi kiểm định, đã được áp dụng để tính toán mô phỏng và khôi phục lại các chuỗi số liệu mưa và dòng chảy trên toàn lưu vực cho giai đoạn từ năm 1960 đến 2015.

Từ bộ dữ liệu khôi phục, tiến hành các nghiên cứu đánh giá về diễn biến hạn hán trên toàn lưu vực sông Hồng - Thái Bình thông qua việc tính toán, phân tích diễn biến của các chỉ số về hạn khí tượng (SPI) và hạn thủy văn (SDI) theo không gian và thời gian. Kết quả nghiên cứu cho thấy tình hình diễn biến hạn trên lưu vực có sự khác nhau về thời gian và thời kỳ xảy ra hạn hán, kể cả đối với hạn khí tượng cũng như hạn thủy văn. Tình trạng và mức độ hạn diễn biến

không đồng nhất giữa vùng thượng nguồn và vùng hạ du, và giữa các tiểu lưu vực trong vùng. Trên lưu vực, thời kỳ xảy ra hạn khí tượng trùng với thời kỳ mùa khô từ tháng XI đến tháng IV, ở khu vực thượng lưu hạn xuất hiện sớm hơn, thường bắt đầu từ tháng X đến tháng IV. Các tháng cao điểm hạn xảy ra trong thời gian tháng XII đến tháng II năm sau. Dựa trên kết quả tính toán các chỉ số chuẩn hóa giá trị thủy SPI, nghiên cứu cũng đã xây dựng bản đồ phân vùng hạn khí tượng cho toàn bộ lưu vực sông Hồng - Thái Bình.

Kết quả nghiên cứu mối liên hệ giữa lượng mưa với các chỉ số hạn khí tượng SPI và hạn thủy văn SDI cho thấy, chỉ số SPI có sự đồng nhất và phản ánh đúng diễn biến về lượng mưa và phân bố mưa trên lưu vực. Đối với chỉ số SDI thì diễn biến hạn thủy văn trên lưu vực không hoàn toàn phụ thuộc vào lượng mưa, mà còn phụ thuộc vào đặc điểm, quá trình hình thành dòng chảy trên các sông, suối và lượng dòng chảy đến từ bên ngoài lưu vực, đặc biệt là sự ảnh hưởng của các công trình điều tiết trên dòng chính trong các thời đoạn tích nước, xả nước.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Amin, M. Z. M., et al “Future climate change impact assessment of watershed scale hydrologic processes in Peninsular Malaysia by a regional climate model coupled with a physically-based hydrology model”. Science of The Total Environment 575 (2017): 12-22.



- [2] Chen, Z. Q., et al. “Geomorphologic and soil hydraulic parameters for Watershed Environmental Hydrology (WEHY) model”. Journal of Hydrologic Engineering 9.6 (2004): 465-479.
- [3] Chen, Z. R., Kavvas, M., Ohara, N., Anderson, M., and Yoon, J. (2011) “Coupled regional hydroclimate model and its application to the Tigris-Euphrates basin”. J.Hydrol. Eng., 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000207, 1059–1070.
- [4] Hồ Việt Cường và Nnk, đề tài cấp Quốc gia KC.08.05/16-20 “Nghiên cứu đánh giá xu thế diễn biến, tác động của hạn hán, xâm nhập mặn đối với phát triển kinh tế - xã hội vùng đồng bằng sông Hồng - Thái Bình và đề xuất các giải pháp ứng phó”. Phòng TNTĐ Quốc gia về ĐLH Sông biển, Năm 2016-2019.
- [5] Hồ Việt Cường, Trịnh Quang Toàn và Nnk “Nghiên cứu ứng dụng phương pháp tính toán khôi phục chuỗi số liệu dòng chảy cho lưu vực sông”. Đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn, Năm 2017.
- [6] Kavvas, M., Kure, S., Chen, Z., Ohara, N., and Jang, S. (2013). “WEHY-HCM for modeling interactive atmospheric-hydrologic processes at watershed scale. I: Model description”. J. Hydrol. Eng., 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000724, 1262-1271
- [7] Kavvas, M. L., et al. “Watershed environmental hydrology (WEHY) model based on upscaled conservation equations: hydrologic module”. Journal of Hydrologic Engineering 9.6 (2004): 450-464.
- [8] Lo, Jeff Chun-Fung, Zong-Liang Yang, and Roger A. Pielke. “Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model”. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 113.D9 (2008).
- [9] LI Yungang, \*HE Daming, YE Changqing: “Spatial and temporal variation of runoff of Red River Basin in Yunnan”. Asian International Rivers Center, Yunnan University, Kunming 650091, China.
- [10] Trinh, T., et al. (2016). “New methodology to develop future flood frequency under changing climate by means of physically based numerical atmospheric-hydrologic modeling”. J. Hydrol. Eng., 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001331, 04016001.
- [11] T. Trinh, et al. Reconstruction of historical inflows into and water supply from Shasta Dam by coupling physically based hydroclimate model with reservoir operation model J. Hydrol. Eng. (2016), p. 04016029
- [12] Yatagai, Akiyo, et al. “APHRODITE: Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges”. Bulletin of the American Meteorological Society 93.9 (2012): 1401-1415.

**Ghi chú:** Nội dung bài báo là kết quả nghiên cứu của đề tài cấp Quốc gia KC.08.05/16-20: “Nghiên cứu đánh giá xu thế diễn biến, tác động của hạn hán, xâm nhập mặn đối với phát triển kinh tế - xã hội vùng đồng bằng sông Hồng - Thái Bình và đề xuất các giải pháp ứng phó” do Phòng TNTĐ Quốc gia về ĐLH Sông biển thực hiện năm 2016-2019.