VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences

Journal homepage: https://js.vnu.edu.vn/EES

Original Article

Characteristics of Extreme Heat Events in Vietnam: Statistical Overview Through M_d Index and Lagrangian Analysis

Dao Nguyen Quynh Hoa*, Nguyen Duc Thang

VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

Received 8th August 2025
Revised 14th October 2025; Accepted 10th December 2025

Abstract: The study investigates the heat extreme events characteristics across seven subregions of Vietnam from March to September using ERA5 reanalysis data for the period 1981 – 2024. The characteristics of heatwaves are determined from the dimensionless heatwave index M_d, which standardizes the exceedance level of daily maximum temperature (Tx) relative to its percentile threshold. Results reveal an increase in frequency, duration, intensity, and spatial extent, with notable regional disparities, particularly in the Northwest, Central Vietnam, Central Highlands, and Southern regions during study period. A prolonged April 2024 extreme heat event, with record coverage over the entire subregions of Vietnam, was driven by joint influence of the Bay of Bengal anticyclone and the western North Pacific subtropical anticyclone. Backward trajectory analysis (in Lagrangian methodology) revealed two air parcel origins: continental (dry, foehn-enhanced) and oceanic (humid), whose interation amplified heat intensity and scale. These findings highlight multi-mechanism drivers of extreme heat condition in Vietnam and underscore the importance of integrating synoptic and Lagrangian analyses for improved forecasting and climate adaptation.

Keywords: Extreme heat event, heat analysis, ERA5.

* Corresponding author.
E-mail address: hoadao@vnu.edu.vn

https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5353

Đặc điểm nắng nóng trên khu vực Việt Nam: đặc trưng thống kê với chỉ số M_d và phân tích Lagrange của trường hợp điển hình

Đào Nguyễn Quỳnh Hoa*, Nguyễn Đức Thắng

Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,
334 Nguyễn Trãi, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 8 tháng 8 năm 2025
Chỉnh sửa ngày 14 tháng 10 năm 2025; Chấp nhận đăng ngày 10 tháng 12 năm 2025

Tóm tắt: Nghiên cứu này phân tích các đặc trưng hiện tượng nắng nóng cực đoan tại 7 tiểu vùng khí hậu của Việt Nam trong giai đoạn từ tháng 3 đến tháng 9, sử dụng bộ dữ liệu tái phân tích ERA5 cho giai đoạn 1981 – 2024. Các đặc trưng nắng nóng được xác định từ chỉ số nắng nóng M_d phi thứ nguyên, chuẩn hóa mức độ vượt ngưỡng của nhiệt độ cực đại ngày (Tx) so với ngưỡng phân vị. Kết quả cho thấy tần suất, thời gian kéo dài, cường độ và phạm vi không gian của các đợt nắng nóng đều gia tăng rõ rệt, với sự khác biệt đáng kể giữa các khu vực, đặc biệt tại vùng Tây Bắc, Trung Bộ, Tây Nguyên và Nam Bộ. Một đợt nắng nóng kéo dài vào tháng 4 năm 2024, bao phủ toàn bộ các tiểu vùng khí hậu của Việt Nam, chịu tác động đồng thời của áp cao trên Vịnh Bengal và áp cao cận nhiệt Tây Bắc Thái Bình Dương. Phân tích quỹ đạo lùi (phương pháp Lagrange) cho thấy có hai nguồn gốc chính: khối khí lục địa (khô, chịu ảnh hưởng của hiệu ứng foehn) và đại dương (ẩm), mà sự tương tác của chúng đã làm gia tăng cường độ và quy mô nắng nóng. Các kết quả này nhấn mạnh vai trò của nhiều cơ chế tác động đến nắng nóng cực đoan tại Việt Nam, đồng thời cho thấy tầm quan trọng của việc tích hợp phân tích quy mô synop và phân tích Lagrange trong dự báo và thích ứng với biến đổi khí hậu.

Từ khóa: Nắng nóng, phân tích Lagrange, ERA5.

1. Mở đầu

Nắng nóng (NN) thông thường được định nghĩa là những khoảng thời gian kéo dài có thời tiết nóng bất thường so với điều kiện khí hậu tại một thời điểm và địa điểm nhất định. Đây là một hiện tượng thời tiết cực đoan gây lo ngại vì chúng có thể gây ra những tác động có hại tới sức khỏe con người, hệ sinh thái, nông nghiệp và nền kinh tế [1]. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nóng lên toàn cầu, hoạt động nắng nóng diễn biến hết sức phức tạp. Trong báo cáo Biến đổi khí hậu lần thứ 6, Ủy ban Liên chính phủ về Biến đổi khí hậu (IPCC) nhấn mạnh rằng "những sự kiện nóng cực đoan (bao gồm nắng nóng) đã trở nên thường xuyên hơn và mạnh hơn về cường độ trên hầu hết các lục địa từ thập niên 1950" [2].

Hiện nay, những nghiên cứu về nguồn gốc và đặc trưng NN trên lãnh thổ Việt Nam là một chủ đề rất được quan tâm, trên cả quy mô thời tiết và khí hậu. Việc đưa ra một định nghĩa đầy đủ về NN là một bài toán khó đối với các nhà nghiên cứu và các chuyên gia dự báo nghiệp vụ. Thông thường, một đợt nắng nóng được xác định

* Tác giả liên hệ.
Địa chỉ email: hoadao@vnu.edu.vn

https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5353

là những ngày liên tiếp có trường nhiệt (nhiệt độ tối cao, tối thấp, trung bình, hoặc kết hợp với các chỉ số nắng nóng) vượt trên một ngưỡng cố định [3]. Theo định nghĩa được quy định tại khoản 21 điều 5 Quyết định 18/2021/QĐ-TTg năm 2021, nắng nóng là hiện tượng thời tiết khi nhiệt độ không khí tối cao (Tx) vượt quá 35ºC. Định nghĩa này cũng đã được sử dụng phổ biến để xác định các đặc trưng của nắng nóng trên lãnh thổ Việt Nam, bao gồm nhận xét về đặc điểm phân bố nắng nóng theo không gian, thời gian [4]; số ngày nắng nóng [5]; và từ đó phân tích xu thế biến đổi của nắng nóng trong hiện tại và dự tính tương lai. Những nghiên cứu mới nhất hiện nay sử dụng các ngưỡng phân vị tương đối và có thể thích ứng với các điều kiện khí hậu khác nhau [6-10]. Nhóm các tác giả Pham-Thi Ly và cộng sự (cs) Pham-Thanh Ha và cs (2023) đã sử dụng ngưỡng phân vị 90 nhiệt độ tối cao làm ngưỡng phân loại nắng nóng và đã phân tích các đặc trưng nắng nóng liên quan, điển hình như tổng số đợt nắng nóng, tổng số ngày nắng nóng, thời gian nắng nóng kéo dài, hoặc cường độ nắng nóng hàng năm [8, 9]. Tuy nhiên, nhóm các tác giả Russo và cs (2015) [10] những ngưỡng phân vị sử dụng trực tiếp trường nhiệt độ có thể đánh giá thấp cường độ của nắng nóng, hoặc sóng nhiệt, trong bối cảnh khí hậu toàn cầu đang nóng lên. Các tác giả đã thay thế cách xác định đợt nắng nóng bằng chỉ số cường độ sóng nhiệt hàng ngày (M_d), sử dụng một biến cường độ nắng nóng thay thế cho sản phẩm trực tiếp từ trường nhiệt làm công thức xác định nắng nóng cho từng ngày riêng lẻ của mỗi đợt nắng nóng. Phương pháp này đã được sử dụng phổ biến để phân tích một số đợt nắng nóng – sóng nhiệt ở khu vực châu Âu [10, 11], và có tiềm năng sử dụng được ở những khu vực khác ví dụ như Việt Nam. Nghiên cứu này sử dụng chỉ số M_d làm chỉ số phân tích nắng nóng trên khu vực Việt Nam vì ba lý do chính: i) M_d xác định ngưỡng dựa trên phân vị trong cửa sổ trượt (±15 ngày), nhờ đó tự động hiệu chỉnh theo hiệu ứng mùa và phản ánh chính xác đặc trưng nắng nóng ở vùng nhiệt đới gió mùa; ii) M_d là một chỉ số thầun thống kê, phi thứ nguyên, linh hoạt trong nhiều bối cảnh khí hậu khác nhau (đã có ứng dụng tương tự tại Trung Quốc [12], Châu Phi [13, 14], Đông Nam Á [15, 16],…); và iii) M_d khắc phục hạn chế của ngưỡng truyền thống (Tx > 35°C) vốn chịu ảnh hưởng mạnh bởi địa hình, nhờ vậy mô tả tốt hơn tính liên tục, cường độ và phạm vi của nắng nóng, rất phù hợp để kết hợp với phân tích Lagrange trong nghiên cứu này.

Sự hình thành nắng nóng thường gây ra bởi điều kiện môi trường quy mô synop và tương tác giữa các quá trình quy mô lớn và quy mô nhỏ. Các nghiên cứu cho thấy các hình thế synop liên quan tới áp thấp Nam Á và hoạt động của áp cao Tây Bắc Thái Bình Dương ảnh hưởng trực tiếp tới nắng nóng trên khu vực Việt Nam [17]. Ngoài ra, hình thế rãnh thấp bị nén cũng là một trong những hình thế gây ra nắng nóng trong khu vực [18]. Theo nghiên cứu của Chu Thị Thu Hường và cs (2010) phân tích từ chuỗi số liệu 1961 - 2007, khu vực Trung Bộ, đặc biệt là Bắc Trung Bộ là tâm điểm của nắng nóng, kết hợp với các yếu tố địa hình (dãy nũi Trường Sơn chạy dọc bắc – nam) tạo ra hiệu ứng gió foehn làm nắng nóng khu vực này vô cùng khắc nghiệt [19]. Ngoài ra, ảnh hưởng của các dao động khí hậu như hiện tượng ENSO cũng có thể tác động tới tần suất, cường độ và thời lượng nắng nóng [20]. Để làm rõ cơ chế nắng nóng, các tác giả Sijia Wu và cs (2023) đã phân chia nắng nóng thành 3 loại: nắng nóng ban ngày, đêm ấm và nắng nóng dạng phức hợp [21]. Từ dữ liệu trong giai đoạn 1979 – 2020, cả 3 loại nắng nóng xảy ra ở hầu hết các khu vực trên thế giới, tần suất nắng nóng ban ngày khoảng 17,53%, ban đêm 23,43% và dạng phức hợp chiếm 58,04%. Xu hướng tăng lên lần lượt là 1,37%, 1,16%/thập kỷ đối với dạng nắng nóng ban đêm và phức hợp, ngược lại nắng nóng ban ngày có xu hướng giảm là 2,53%. Các tác giả Yang Chen và Yi Li (2017) cho thấy nắng nóng ban ngày thường đi kèm với sự gia tăng bức xạ mặt trời, giảm lượng mưa và độ che phủ mây [22]. Bên cạnh đó, Luo và ccs. (2022) đã phát hiện nắng nóng – sóng nhiệt có liên quan tới sự mở rộng của áp thấp Nam Á và áp cao cận nhiệt Tây Bắc Thái Bình Dương [23] – phù hợp với nghiên cứu của Xuebang Liu và ccs. [24]. Các tác giả Tian Yinglin và ccs. (2024) chia nắng nóng thành 4 loại: nóng - ẩm, nóng – khô, nắng

nóng bình lưu và nắng nóng do đoạn nhiệt [25]. Những ngày nóng - ẩm chiếm 38% tổng số ngày nắng nóng và chủ yếu quan sát thấy ở các vùng vĩ độ cao và nhiệt đới. Những ngày nóng – khô chiếm 26% tổng số ngày nắng nóng, thường xuyên được quan sát thấy ở các vùng nhiệt đới. Hiện tượng nắng nóng bình lưu và nắng nóng do đoạn nhiệt chiếm khoảng 18% tổng số ngày nắng nóng, chủ yếu do các quá trình bình lưu và giãn nở đoạn nhiệt gây ra, được quan sát thấy ở ở khu vực ngoại nhiệt đới.

Tuy nhiên, các nghiên cứu kể trên sử dụng cách tiếp cận synop và thống kê truyền thống với hệ quy chiếu Euler, chưa đi sâu vào phân tích động lực học và các quá trình vận chuyển năng lượng, tương tác của không khí liên quan tới nắng nóng. Trong khi đó, các phương pháp Lagrange – cho phép theo dõi quãng đường dịch chuyển của các phần tử không khí – đã được chứng minh là công cụ hữu hiệu trong việc xác định nguồn gốc, cơ chế và điều kiện hình thành các hiện tượng thời tiết cực đoan như nắng nóng – sóng nhiệt tại châu Âu [26-28]. Dị thường nhiệt độ của phần tử khí gây ra nắng nóng có thể được phân tích thành tổng của các tích phân thành phần tương ứng với đóng góp từ mỗi quá trình vật lý theo thời gian. Phương pháp này giúp phân tích biến thiên nhiệt độ dựa theo các quá trình giãn nở đoạn nhiệt (do dòng giáng), bình lưu nóng, hoặc điều kiện đốt nóng bề mặt [26, 27]. Những nghiên cứu sử dụng phương pháp Lagrange đã cho thấy các hiện tượng nắng nóng thường phát triển từ nhiều ngày và trên một quãng đường tương đối dài. Ví dụ, trong đợt nắng nóng – sóng nhiệt trên Tây Bắc Thái Bình Dương năm 2021, các phần tử khí đóng góp cho dị thường nhiệt đã hình thành từ hàng ngàn kilomet từ xa và gây ra sự tăng nhiệt từ tổ hợp các quá trình dịch chuyển theo phương ngang, dòng giáng, và sự đốt nóng bề mặt [27].

Đặc biệt, việc kết hợp giữa mô tả chỉ số nắng nóng được thiết lập từ phương pháp phân vị và phân tích Lagrange cho thấy góc nhìn toàn diện hơn về cả mặt thống kê và cả cơ chế vật lý của nắng nóng thông qua tính liên tục về không gian và thời gian. Tại Việt Nam, hiện nay những nghiên cứu ứng dụng phương pháp này còn rất hạn chế. Khoảng trống này đặt ra nhu cầu cấp thiết cho việc nghiên cứu nhằm nhận diện tốt hơn các đặc trưng và cơ chế vật lý của nắng nóng, phục vụ hiệu quả hơn cho công tác cảnh báo sớm và thích ứng điều kiện biến đổi khí hậu tại Việt Nam. Cụ thể hơn, nghiên cứu sẽ làm rõ các vấn đề sau:

- Đánh giá các đặc trưng nắng nóng tại Việt Nam trong những thập kỷ gần đây thông qua chỉ số nắng nóng M_d, nhận định những ưu điểm của việc sử dụng chỉ số này trong đánh giá các đặc trưng nắng nóng theo không gian và thời gian.
- Tìm hiểu nguồn gốc và phân tích các đặc trưng động lực và nhiệt - ẩm của các khối khí gây ra nắng nóng trên khu vực.

Để giải quyết những vấn đề trên, nghiên cứu của chúng tôi bao gồm các phần: số liệu và phương pháp nghiên cứu, phân tích xu thế và các đặc trưng nắng nóng trên khu vực Việt Nam, và tiến hành phân tích Lagrange một trường hợp nắng nóng điển hình trên khu vực Việt Nam.

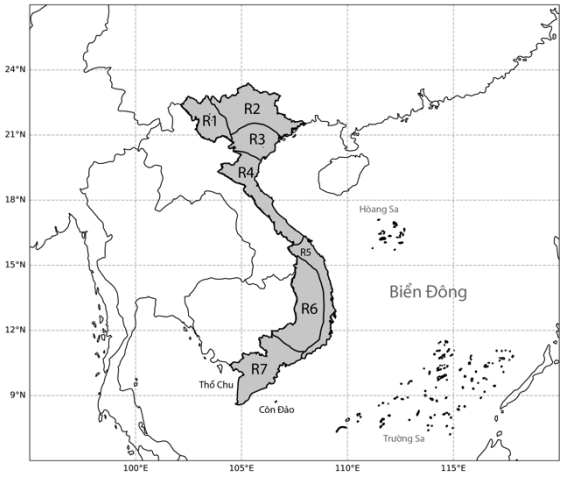
2. Số liệu và phương pháp

2.1. Số liệu và khu vực nghiên cứu

Bộ dữ liệu tái phân tích ERA5 thuộc Trung tâm Hạn vừa và Hạn dài Châu Âu (ECMWF) trong giai đoạn 1981 – 2024 được sử dụng trong nghiên cứu này [29]. Để xác định nắng nóng, nghiên cứu sử dụng biến nhiệt độ không khí mực 2m từ bộ dữ liệu ERA5-Land với độ phân giải 0,1° x 0,1° kinh vĩ. Ngoài ra, các biến mực đơn khác được sử dụng bao gồm: áp suất mực biển, năng lượng bức xạ thuần bề mặt, năng lượng sóng dài thuần bề mặt, ẩn nhiệt bề mặt, hiển nhiệt bề mặt. Các biến còn lại bao gồm nhiệt độ, độ ẩm, địa thế vị thuộc bộ số liệu ERA5 trên các mực khí áp có độ phân giải 0,25°x0,25° độ kinh vĩ.

Khu vực nghiên cứu trong nghiên cứu này bao gồm toàn bộ phần đất liền của Việt Nam (Hình 1). Khu vực này được chia thành 7 vùng khí hậu với các đặc điểm khác biệt về kiểu khí hậu và điều kiện địa hình [30]. Do vị trí địa lý đa dạng và chịu ảnh hưởng của gió mùa, các đặc trưng nắng nóng có sự khác biệt rõ rệt giữa các vùng: R1 (Tây Bắc), R2 (Đông Bắc), R3 (Đồng

bằng Bắc Bộ), R5 (Bắc Trung Bộ), R6 (Tây Nguyên), và R7 (Nam Bộ).



Hình 1. Khu vực nghiên cứu được sử dụng trong bài báo.

2.2. Định nghĩa nắng nóng và các đặc trưng nắng nóng

Một đợt nắng nóng được định nghĩa là giai đoạn ít nhất 3 ngày liên tiếp nhiệt độ tối cao (Tx) trên ngưỡng phân vị khí hậu. Cụ thể hơn, đối với một ngày thứ d bất kỳ trong một năm (*d* từ 1 đến 366), ngưỡng phân vị 90 của tổ hợp số liệu A_d được định nghĩa như sau:

$$A_d = \bigcup_{y=1981}^{2010} \bigcup_{i=d-15}^{d+15} T(y,i)$$

với T(y, i) là giá trị nhiệt độ cực đại Tx ngày thứ i trong năm y. Giá trị cường độ nắng nóng theo ngày, M_d, được định nghĩa như sau:

$$M_d(T_d) = \begin{cases} \dfrac{T_d - T_{25p}}{T_{75p} - T_{25p}}, nếu\ T_d > T_{25p} \\ 0, nếu\ T_d \le T_{25p} \end{cases}$$

với T_d là giá trị Tx vào ngày d trong đợt nắng nóng, T_{25p} và T_{75p} lần lượt là giá trị phân vị thứ 25 và 75 từ bộ số liệu Tx tháng 3 – tháng 9 trong 30 năm khí hậu (1981 – 2010). Một đợt nắng nóng được xác định nếu có ít nhất 3 ngày liên tiếp giá trị $M_d > 0$. Cường độ của đợt nắng nóng được xác định bởi chỉ số $ĐNN = \sum_{d=1}^{d=n} M_d$ với n là ngày cuối của đợt nắng nóng ($n \geq 3$). Giá trị M_d chỉ được giới hạn trong giai đoạn tháng 3 – tháng 9 của các năm để tính toán và phân tích các đặc trưng nắng nóng. Chỉ số nắng nóng Md là chỉ số thuần thống kê, phi thứ nguyên, thể hiện được đặc trưng tính liên tục, cường độ và phạm vi của nắng nóng, so với việc sử dụng một ngưỡng tuyệt đối hay một giá trị phân vị cố định trong toàn bộ giai đoạn khí hậu.

Các đặc trưng nắng nóng được nghiên cứu bao gồm [31, 32]:

i) SNNN: tổng số ngày thỏa mãn điều kiện nắng nóng hàng năm (đơn vị: *số ngày*);

ii) SĐNN: số đợt nắng nóng hàng năm (đơn vị: *số đợt*);

iii) TLNNtb (TLNNcđ): thời lượng nắng nóng trung bình (hoặc cực đại) của các đợt nắng nóng – sóng nhiệt hàng năm (đơn vị: *số ngày*);

iv) CĐNN: cường độ nắng nóng, chỉ số ĐNN cực đại trung bình nhiều năm (đơn vị: *phi thứ nguyên*).

v) ĐLNN: độ lớn nắng nóng, giá trị trung bình ĐNN mỗi năm;

vi) Phần diện tích chịu ảnh hưởng của nắng nóng trong khu vực (đơn vị: %).

Ngoài ra, để xác định xu hướng biến đổi của nắng nóng (từ giai đoạn 1981 – 2010 tới giai đoạn 2011 - 2024), chúng tôi áp dụng kiểm định phi tham số Mann-Kendall với mức ý nghĩa 5% để xác định xu hướng biến đổi của các đặc trưng nắng nóng liệt kê bên trên [33, 34]. Độ lớn của xu hướng biến đổi được xác định bằng chỉ số xu thế Sen phi tham số.

2.3. Phương pháp tính quỹ đạo lùi của phần tử

Để tái hiện lại quãng đường dịch chuyển của những phần tử khí xuất hiện tại thời điểm nắng nóng, các quỹ đạo 3 chiều được tính toán bằng công cụ phân tích Lagrange có tên LAGRANTO, được phát triển bởi Sprenger và cs (2015) [35]. Mô hình LAGRANTO thực hiện xấp xỉ quỹ đạo của phần tử khí:

$$\frac{Dx}{Dt} = u(x)$$

trong đó, $x = (\lambda, \phi, \rho)$ là tọa độ kinh độ, vĩ độ, áp suất của phần tử khí, và $u = (u, v, \omega)$ là

vector gió 3 chiều tại vị trí của phần tử. Mô hình LAGRANTO truy vết quỹ đạo tiến hoặc lùi của phần tử bằng việc giải phương trình này theo thời gian. Hiện nay, mô hình LAGRANTO có thể áp dụng truy vết quỹ đạo phần tử từ nhiều mô hình đầu vào, bao gồm các sản phẩm tái phân tích, dự báo của Trung tâm Hạn vừa Hạn dài Châu Âu (ECMWF), hoặc một số mô hình COSMO, WRF,… Độ phân giải của LAGRANTO phụ thuộc vào độ phân giải và chất lượng trường dữ liệu của mô hình đầu vào. Với dữ liệu độ phân giải quá thô, quỹ đạo khối khí có thể bị sai lệch. Ngoài ra, do là mô hình thuần Lagrange nên LAGRANTO không thể tự mô tả các quá trình vi mô (ví dụ, ngưng kết hay bức xạ), mà chỉ phản ánh được chuyển động của phần tử khí theo trường gió.

Nghiên cứu tính toán các quỹ đạo lùi 5 ngày sử dụng trường gió ba chiều từ ERA5 với tần suất 1 giờ/lần, lưới có độ phân giải 0,25°x0,25° kinh vĩ và 40 mực thẳng đứng khí áp. Các quỹ đạo được khởi tạo vào ngày nắng nóng, với các phần tử khí được lựa chọn có vị trí giá trị M_d đạt ngưỡng nắng nóng, trong ngày xảy ra nắng nóng. Điểm kết thúc của quỹ đạo (5 ngày trước thời điểm nắng nóng) được gọi là nguồn gốc nắng nóng, hay điểm xuất phát nắng nóng. Thiết lập mô hình LAGRANTO được cài đặt như sau:

Bảng 1. Thiết lập mô hình dò quỹ đạo LAGRANTO

Thông số	Thiết lập mô hình
Thời gian bắt đầu	00 UTC ngày 30/4/2024
Thời gian kết thúc	00 UTC ngày 25/04/2024 (-120 giờ)
Độ phân giải thời gian	1 giờ
Độ phân giải không gian	0,25 độ kinh vĩ
Bước thời gian	-5 phút (quỹ đạo lùi)
Phương pháp sai phân thời gian	Runge-Kutta bậc 4
Phương pháp sai phân không gian	Tuyến tính

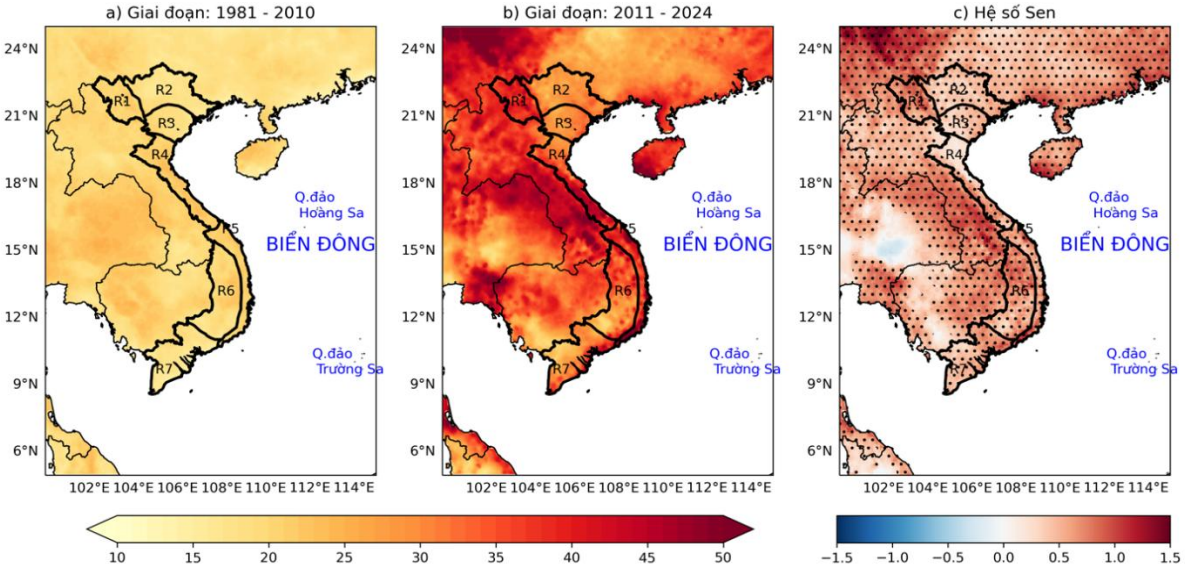
3. Xu thế và các đặc trưng nắng nóng trên khu vực Việt Nam

Các Hình 2 – 5 thể hiện phân bố không gian và xu thế theo thời gian của số ngày nắng nóng (SNNN), số đợt (SĐNN), thời lượng nắng nóng trung bình/cực đại (TLNNtb, TLNNcđ) và cường độ nắng nóng trung bình/cực đại (CĐNNtb, CĐNNcđ) trong 2 giai đoạn từ 1981 – 2010 và 2011 – 2024. Có thể nhận thấy rằng, nắng nóng đang gia tăng mạnh mẽ cả về tần suất và cường độ.

Đầu tiên, về mặt tần suất, cả SNNN và SĐNN (Hình 2-3) đều ghi nhận mức gia tăng đáng kể trong giai đoạn 2011-2024 so với giai đoạn trước. SNNN trung bình năm ở nhiều khu vực đã vượt ngưỡng 30-40 ngày/năm, trong khi SĐNN cũng tăng lên từ 7-10 đợt/năm, nhất là ở khu vực vùng núi và duyên hải miền Trung và Nam Bộ (R1, R4 – R7). Đây cũng là những nơi chịu ảnh hưởng nặng nề nhất của nắng nóng với hai chỉ số SNNN và SĐNN đạt giá trị cao nhất trong cả nước. Xu thế tăng ở khu vực này có ý nghĩa thống kê, với hệ số Sen có giá trị dương tương đối lớn đạt 1,0 – 1,5 ngày/năm và 0,2 – 0,4 đợt/năm.

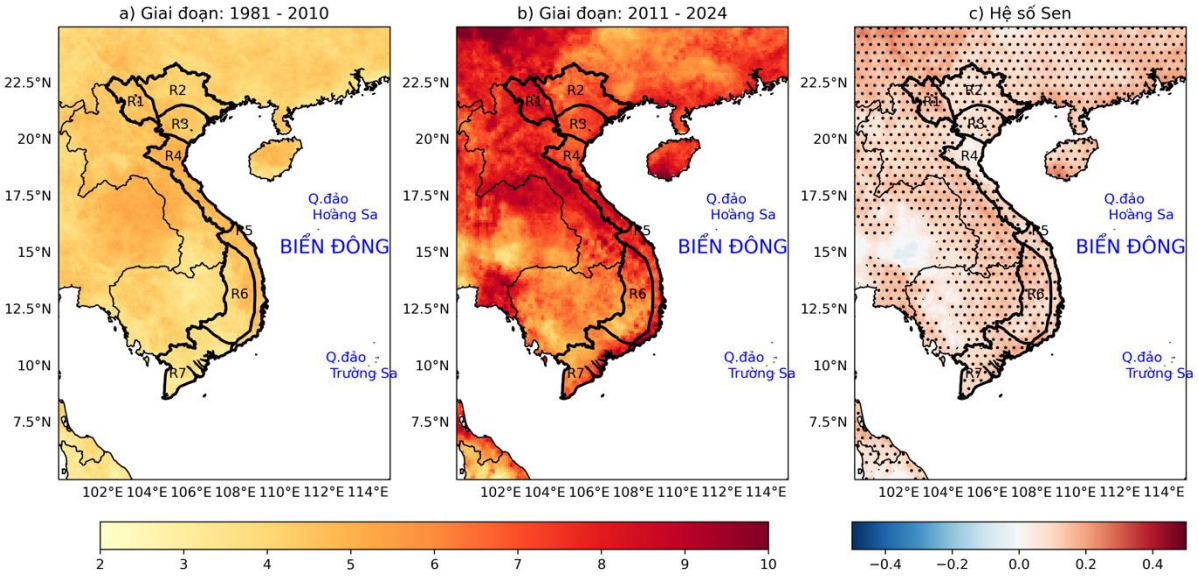
Bên cạnh đó, các chỉ số về thời lượng nắng nóng trung bình và cực đại mỗi năm như TLNNtb và TLNNcđ (Hình 4 – Hình 5) cho thấy rằng nắng nóng không chỉ xảy ra thường xuyên hơn mà còn kéo dài hơn. Thời lượng trung bình/cực đại mỗi đợt nắng nóng giữa hai giai đoạn khác biệt rất đáng kể thể hiện rõ qua giá trị. Trong giai đoạn 1981 – 2010, nhiều khu vực có TLNNtb khoảng 4,5 – 5,0 ngày và cực đại là 5 – 7 ngày, tăng lên từ 6.5 – 8,0 ngày trung bình và cực đại 8 – 10 ngày ở giai đoạn 2011 – 2024. Xu thế tăng phổ biến tại nhiều vùng, đặc biệt là từ R5 – R7. Dù mức tăng của TLNN có phần thấp hơn so với tần suất nắng nóng (SNNN và SĐNN), nhưng sự gia tăng diện rộng, đặc biệt ở các vùng R1 – R3 và R6, cho thấy đây là xu thế rõ rệt. Xét theo không gian, sự phân bố của các đặc trưng nắng nóng tương đối nhất quán giữa các khu vực. Các khu vực Các khu vực Tây Bắc, Tây Nguyên và Nam Bộ (R1, R6-R7) là những vùng có giá trị cao nhất và xu thế tăng mạnh nhất. Trong khi đó, miền Bắc (R2 – R3) dù có tần suất nắng nóng thấp hơn nhưng vẫn ghi nhận xu thế tăng rõ ràng. Điểm khác biệt duy nhất là mức độ gia tăng về TLNN ở khu vực duyên hải miền Trung (R4 – R5) không đáng kể như tần suất nắng nóng.

SỐ NGÀY NẮNG NÓNG TRUNG BÌNH NĂM (SNNN)



Hình 2. Số ngày nắng nóng trung bình năm (SNNN) trong giai đoạn 1981 – 2010 (a), giai đoạn 2011 – 2024 (b) và hệ số Sen giai đoạn 1981 – 2024 với vùng chấm đen thể hiện mức độ ý nghĩa 5% theo kiểm nghiệm Mann-Kendall (c).

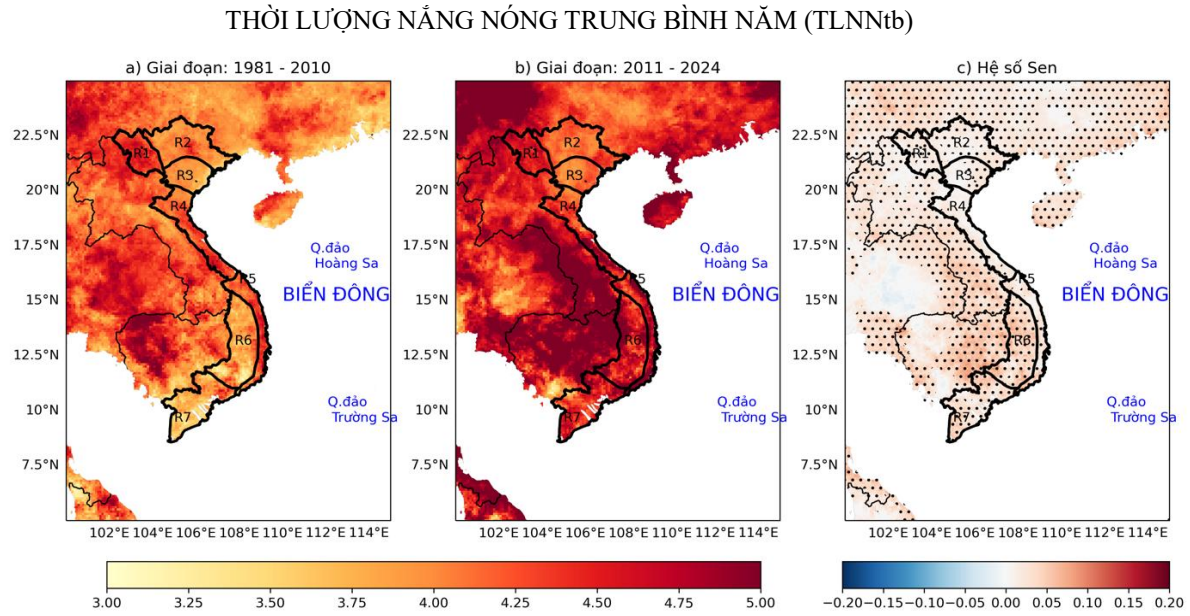
SỐ ĐỢT NẮNG NÓNG TRUNG BÌNH NĂM (SĐNN)



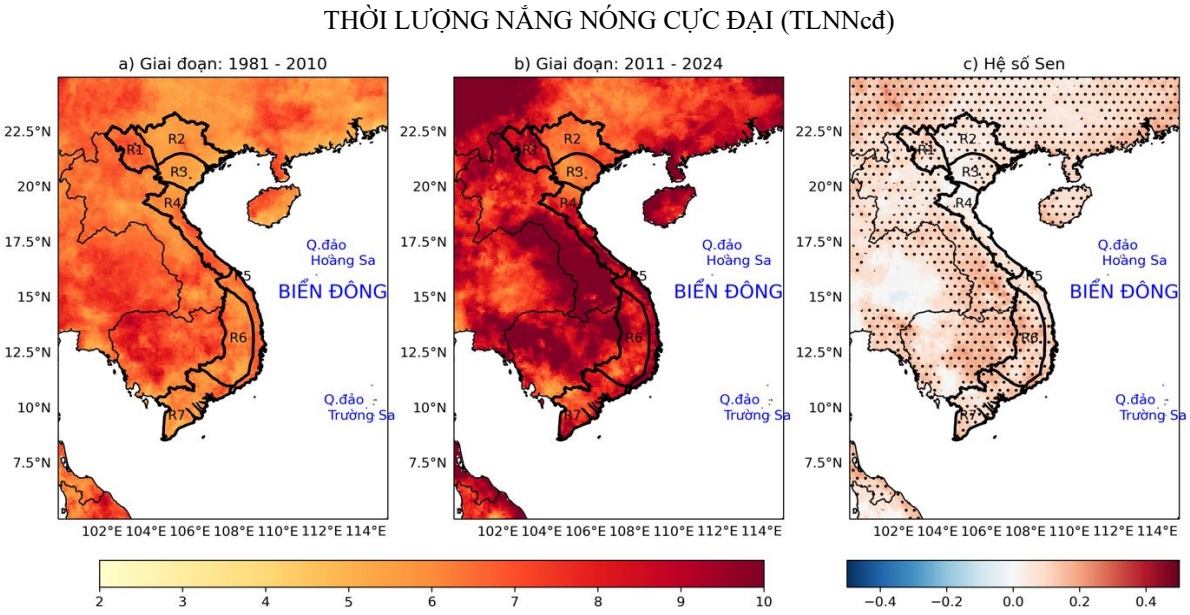
Hình 3. Tương tự như Hình 2 nhưng cho số đợt nắng nóng trung bình năm (SĐNN).

Về cường độ nắng nóng (tổng giá trị M_d thuộc mỗi đợt nắng nóng), Hình 6 và Hình 7 thể hiện giá trị CĐNNcđ/CĐNNtb trong 2 giai đoạn 1981 – 2010, 2011 – 2024 và xu thế biến đổi của

các giá trị này. So với các chỉ số về tần suất và thời lượng nắng nóng, xu thế Sen tăng của CĐNN không đáng kể với ý nghĩa thống kê ở một số khu vực. Khu vực tăng mạnh nhất là Bắc Bộ (R1, R2, R3) và Tây Nguyên. Về mặt không gian, cường độ nắng nóng ở khu vực Tây Bắc và Tây Nguyên đạt giá trị cao hơn các khu vực khác, khoảng 12 – 14 vào giai đoạn 2011 – 2024. Các khu vực Trung Bộ (R4, R5) có thời lượng nắng nóng kéo dài, tần suất nắng nóng cao, nhưng cường độ nắng nóng tương đối thấp so với các khu vực.

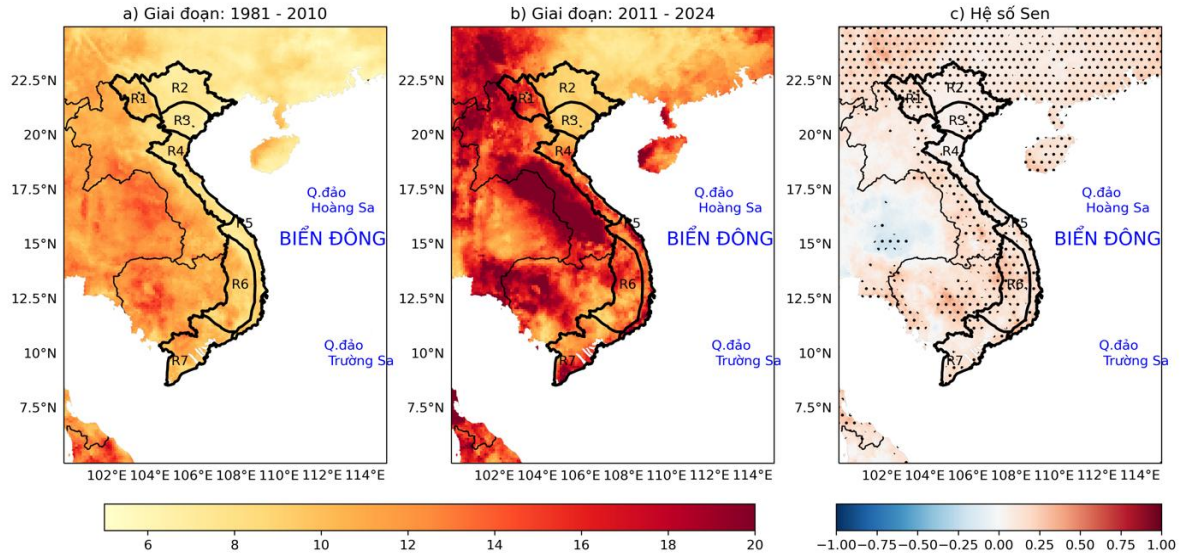


Hình 4. Tương tự như Hình 2 nhưng cho thời lượng nắng nóng trung bình năm (TLNNtb).



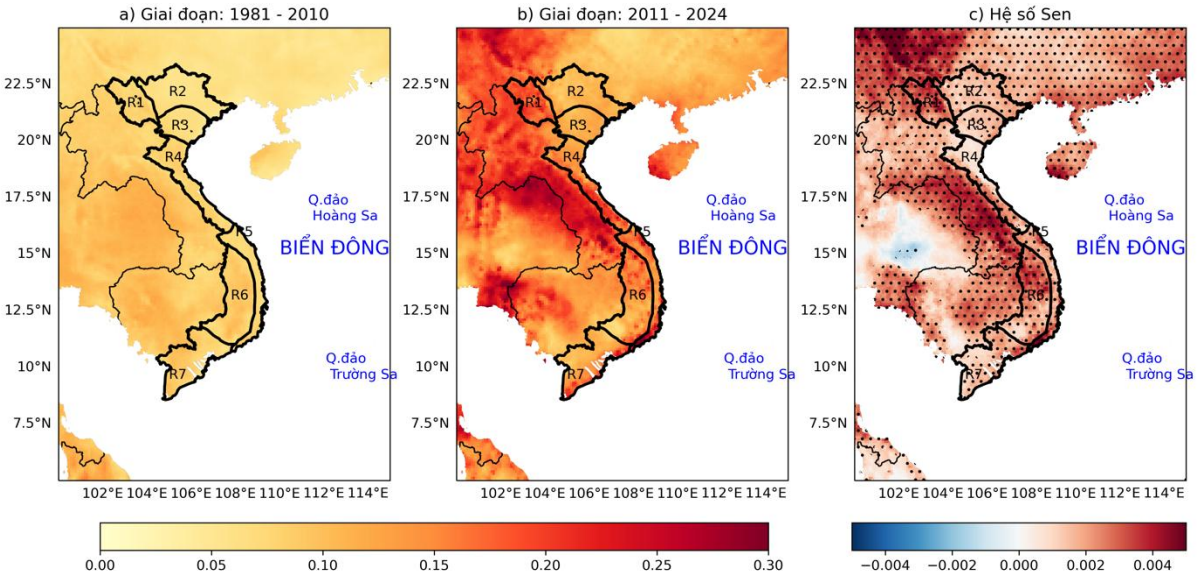
Hình 5. Tương tự như Hình 2 nhưng cho thời lượng dài nhất (cực đại) của nắng nóng (TLNNcđ).

CƯỜNG ĐỘ NẮNG NÓNG CỰC ĐẠI (CĐNNcđ)



Hình 6. Tương tự như Hình 2 nhưng cho cường độ nắng nóng cực đại (CĐNNcđ).

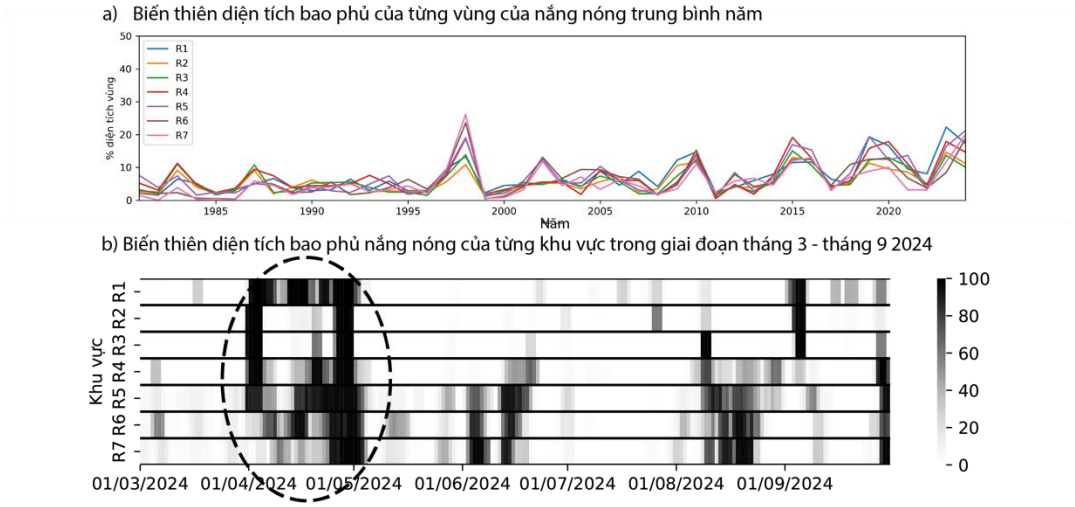
CƯỜNG ĐỘ NẮNG NÓNG TRUNG BÌNH (CĐNNtb)



Hình 7. Tương tự như Hình 2 cho cường độ nắng nóng trung bình (CĐNNtb).

Phần khoanh tròn nét đứt đánh dấu thời điểm đợt nắng nóng tháng 4 năm 2024.Về diện nắng nóng, theo Hình 8a, tỷ lệ diện tích các khu vực chịu nắng nóng ở cả 7 vùng dao động mạnh theo từng năm, phản ánh tính biến động cao. Các thời điểm đạt cực đại về diện nắng nóng thường xuất hiện đồng thời ở nhiều vùng, cho thấy tá động của các đợt nắng quy mô rộng trong năm. Trong

giai đoạn 1981 – 2010, một đỉnh cực đại xuất hiện vào năm 1998 với tỷ lệ diện tích vùng chịu nắng nóng tăng mạnh, nhiều vùng vượt ngưỡng trung bình 20% - 25% (vùng Nam Bộ đạt gần 28%). Từ năm 2010 đến 2024, số năm có diện tích nắng nóng cao xuất hiện thường xuyên hơn, xu hướng tăng về diện nắng nóng cũng trở nên rõ rệt trong toàn bộ giai đoạn này. Đặc biệt, trong năm 2024 (Hình 8b), giai đoạn tháng 4 (khoanh tròn trong hình) là đợt nắng nóng diện rộng nhất trong năm. Hầu hết các vùng R1 – R7 đều có diện tích chịu nắng nóng tương đối lớn, gần như 100% diện tích mỗi vùng đều trải qua nắng nóng trong nhiều ngày liên tiếp. Với lý do này, phần tiếp theo của nghiên cứu sẽ tập trung phân tích và đánh giá vai trò của các khu vực nguồn, đặc tính nhiệt ẩm và biến đổi của các phần tử khí xuất hiện trong đợt nắng nóng này.



Hình 8. a) Biểu đồ đường biến thiên diện tích nắng nóng bao phủ (%) của từng vùng R1–R7 nắng nóng trung bình năm; b) Biến thiên diện tích bao phủ nắng nóng của từng khu vực trong giai đoạn tháng 3 đến tháng 9 năm 2024.

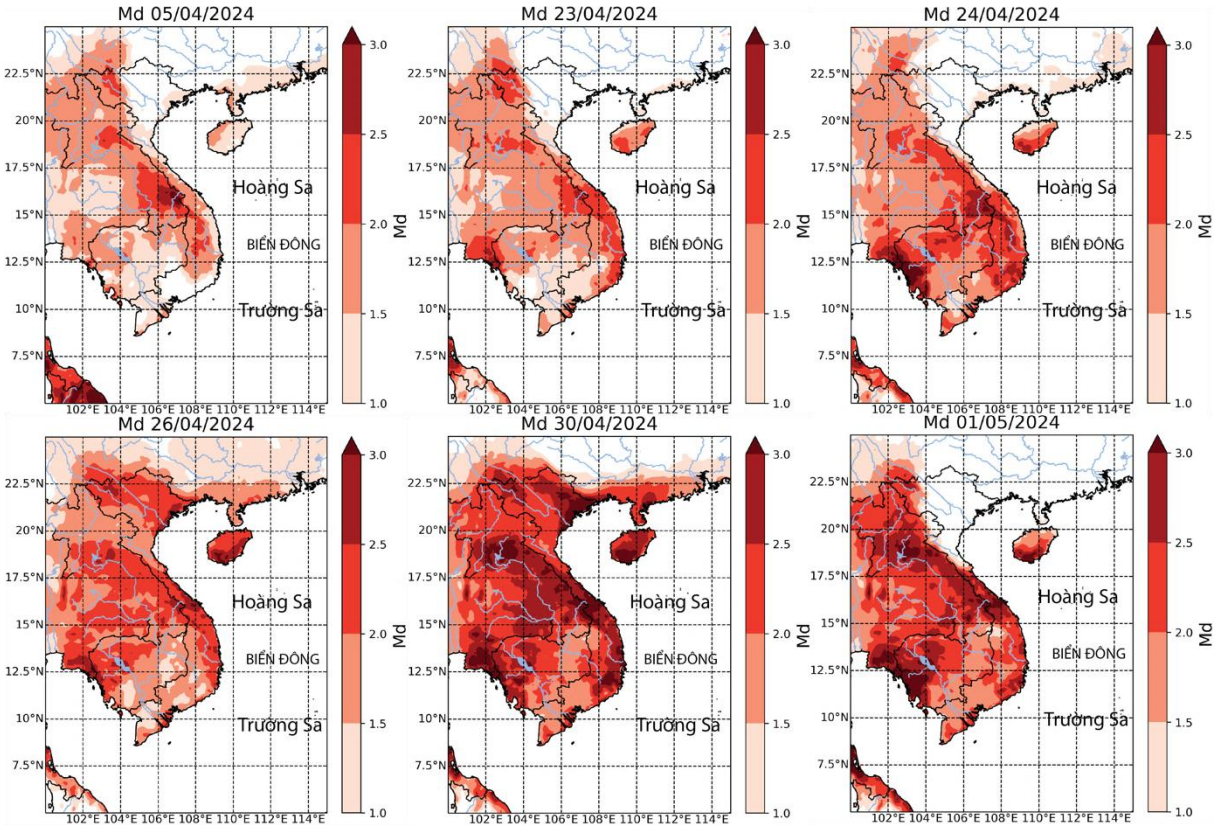
4. Phân tích quỹ đạo phần tử của trường hợp nắng nóng điển hình tháng 4 năm 2024

Đợt nắng nóng diễn ra trong tháng 4 năm 2024 là một đợt nắng nóng phức tạp, diện nắng nóng bao phủ toàn bộ báo đảo Đông Dương với cường độ lớn. Giá trị của chỉ số Md trong những ngày tháng 4 được thể hiện trên Hình 9 cho thấy sự mở rộng và diễn biến phức tạp của đợt nắng nóng này. Từ ngày 23 – 24/04/2024, giá trị Md gia tăng, cường độ từ 2,0 – 2,5 ở nhiều nơi thuộc Trung Bộ và Nam Bộ. Từ ngày 25/04, nắng nóng có sự mở rộng ra toàn bộ Việt Nam, từ Bắc Trung Bộ đến Tây Nguyên M_d > 2,5, thậm chí đạt ngưỡng 3,0. Ngày 30/04/2024 là thời điểm nắng nóng mở rộng và tăng cường rõ rệt nhất, nhiều khu vực đạt ngưỡng cực đại có M_d > 3,0. Phạm vi nắng nóng bao phủ toàn bộ lãnh thổ Việt Nam, và cũng chính là lý do trong nghiên cứu này lựa chọn ngày 30/04 là ngày bắt đầu của mô hình Lagrange (Bảng 1). Từ ngày 01/05, tuy Md vẫn giữ mức cao tại khu vực Trung Bộ và Nam Bộ, nhưng ở Bắc Bộ nắng nóng có xu hướng giảm nhẹ.

Để phân tích nguồn gốc của đợt nắng nóng tháng 4 năm 2024, chúng tôi sử dụng phương pháp phân tích Lagrange xác định quỹ đạo lùi của các phần tử khí mực thấp (1000 hPa – 600 hPa) xuất phát từ vị trí có M_d > 0 tại 00 UTC ngày 30/04/2024 trên khu vực Việt Nam.

Hình 10 trình bày sự biến đổi không gian – thời gian của các phần tử gây ra nắng nóng đã được lựa chọn kết hợp với trường địa thế vị mực 850 hPa trong giai đoạn 23 – 30/04/2025. Nguồn gốc của các phần tử khí trong giai đoạn 23 – 24/04 (Hình 10a-b) tập trung ở hai vị trí: khu vực Ấn Độ và trên Biển Đông. Trong giai đoạn này,

trường hoàn lưu cho thấy sự thịnh hành của áp cao Tây Thái Bình Dương, các phần tử khí hội tụ ở khu vực phía Nam Việt Nam theo hoàn lưu của áp cao cận nhiệt. Ngược lại, những phần tử xuất phát từ lục địa Ấn Độ dịch chuyển theo sự mở rộng về phía bắc của áp cao trên Vịnh Bengal, theo dòng gió tây và tiến vào phía bắc và Bắc Trung Bộ.



Hình 9. Giá trị của chỉ số M_d (phi thứ nguyên) vào một số ngày trong tháng 4 và đầu tháng 5, năm 2024.

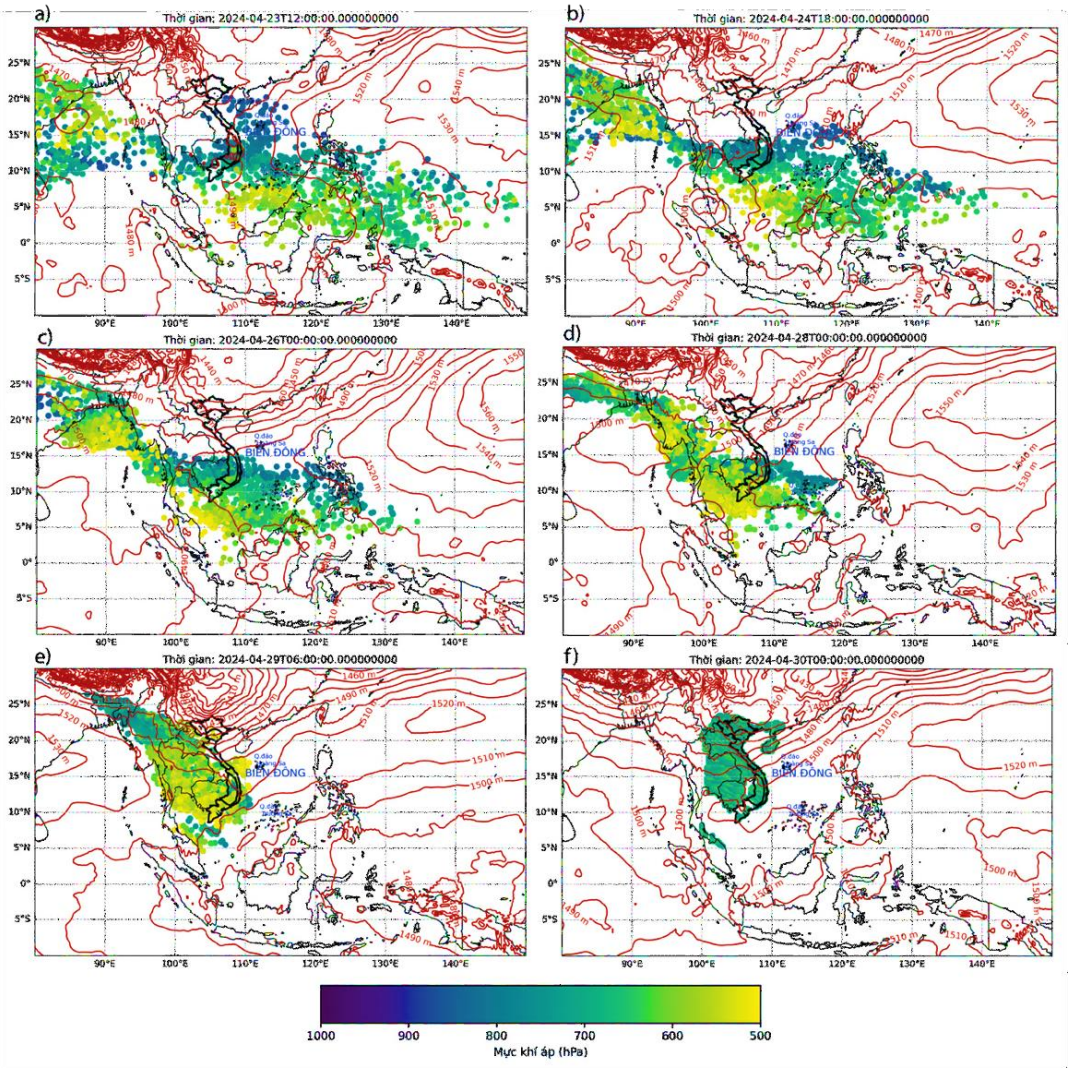
Kết hợp với Hình 11, ta có thể nhận thấy rõ quỹ đạo các phần tử có thể chia thành 2 cụm chính: cụm quỹ đạo đến từ phía tây (màu đỏ) và cụm quỹ đạo đến từ phía đông (màu xanh). Việc phân loại màu dựa trên nguồn gốc của của 2 nhóm phần tử khí. Đối với cụm quỹ đạo phía tây, các phần tử khí xuất phát từ Ấn Độ, dịch chuyển theo dòng gió tây phía bắc của áp cao trên Vịnh Bengal. Chúng là nguyên nhân chính gây ra nắng nóng trên khu vực Bắc Bộ và Bắc Trung Bộ, đặc biệt là khu vực R2 (41,98% phần tử xuất hiện tại khu vực này, Bảng 2). Ngược lại, cụm quỹ đạo phía đông chịu ảnh hưởng của hoàn lưu áp cao cận nhiệt Tây Thái Bình Dương và gây ra nắng nóng chủ yếu ở khu vực phía Nam (100% phần tử xuất hiện từ R4–R7, Bảng 2).

Bảng 2. Phân bố các cụm quỹ đạo phần tử gây ra nắng nóng trong khu vực Việt Nam vào ngày 30/04/2024

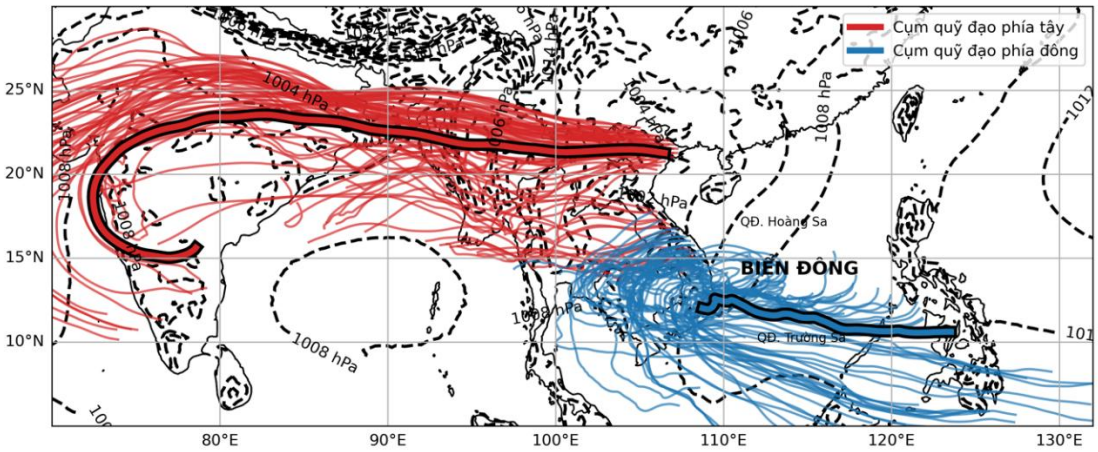
Tổng số: 2430 phần tử		Cụm quỹ đạo phía tây	Cụm quỹ đạo phía đông
Số lượng phần tử		1465	965
Tỷ lệ % xuất hiện từng khu vực	R1	19,45%	0
	R2	41,98%	0
	R3	16,38%	0
	R4	12,08%	9,63%
	R5	6 %	43,73%
	R6	1.23 %	41,66%
	R7	0	3,1%

Áp cao trên Vịnh Bengal có tác động rất lớn tới quỹ đạo di chuyển của các phần tử khí trên

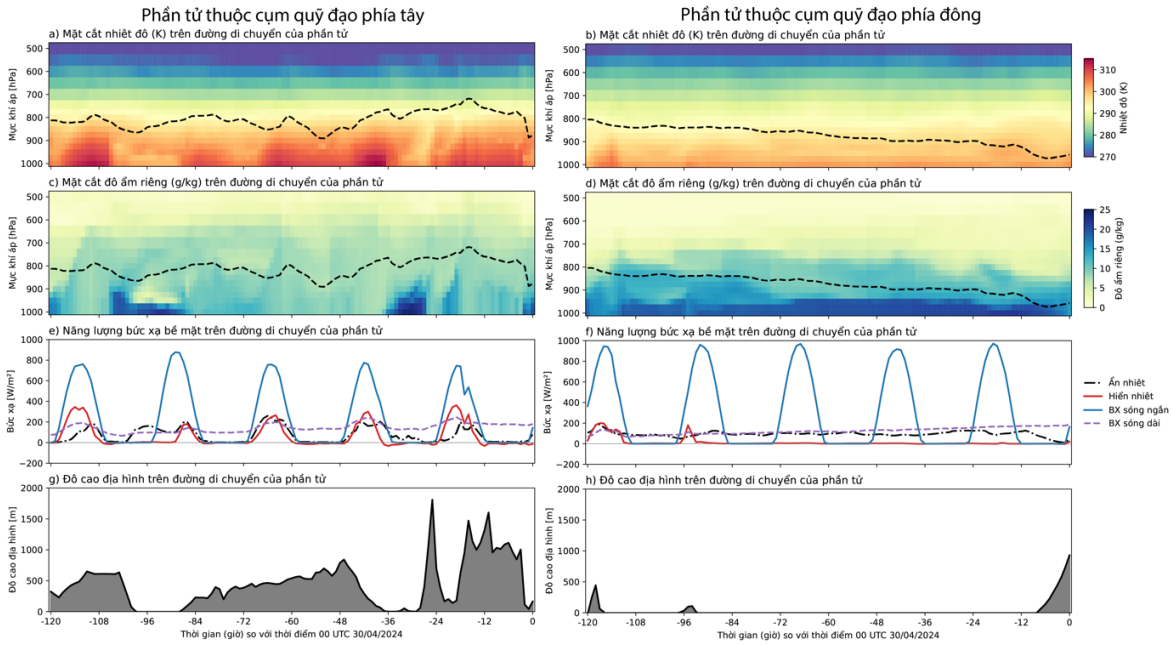
cụm quỹ đạo phía tây (Hình 10, 11). Hoàn lưu đưa các phần tử khí xoáy theo chiều kim đồng hồ ở Ấn Độ và di chuyển tới Việt Nam khi đi qua đất liền với bề mặt địa hình phức tạp. Ngược lại, cụm quỹ đạo phía đông chịu ảnh hưởng của hoàn lưu thuộc áp cao cận nhiệt Tây Thái Bình Dương, các phần tử khí chủ yếu đi qua biển. Do đó, để làm rõ những đặc tính khác biệt này, chúng tôi lựa chọn từ giữa 2 cụm quỹ đạo mỗi phần tử đặc trưng (Hình 11) và phân tích được thể hiện trên Hình 12. Các quỹ đạo đặc trưng trong mỗi cụm được xác định theo phương pháp median: sau khi phân nhóm các quỹ đạo theo đặc trưng không gian – thời gian, ta tính toán độ dài của từng quỹ đạo trong cụm. Quỹ đạo có độ dài gần nhất với giá trị trung vị (median) của phân bố độ dài trong cụm được chọn làm quỹ đạo đặc trưng. Hình 12 cho thấy địa hình có tác động lớn tới sự biến thiên về nhiệt độ của các phần tử xuất phát từ 2 cụm quỹ đạo. Trục hoành thể hiện thời gian di chuyển của phần tử, bắt đầu từ 120 giờ trước (~5 ngày) tới thời điểm 00 UTC ngày 30/04 (mốc 0 giờ).



Hình 10. Vị trí các phần tử gây ra nắng nóng ngày 30 tháng 4 năm 2024 (chấm màu theo giá trị mực khí áp, đơn vị: hPa) và trường độ cao địa thế vị (đường, đơn vị: mđtv) trong các thời điểm khác nhau: (a) 12 UTC 23/04/2024; (b) 18 UTC 24/04/2024; (c) 00 UTC 26/04/2024; (d) 00 UTC 28/04/2024; (e) 06 UTC 29/04/2024; và (f) 00 UTC 30/04/2024.



Hình 11. Bản đồ phân bố quỹ đạo phân tử của cụm quỹ đạo phía tây (màu đỏ) và cụm quỹ đạo phía đông (màu xanh) trên nền áp suất mực biển cực tiểu trung bình (đường nét đứt màu đen, đơn vị: hPa) giai đoạn 00 UTC 25/04/2024 đến 00 UTC 30/04/2024. Đường in đậm tương ứng với các quỹ đạo đặc trưng thể hiện trên Hình 12.



Hình 12. Đặc trưng nhiệt độ (a, b), độ ẩm (c, d), phân bố năng lượng nhiệt bề mặt (e, f) và độ cao địa hình (g, h) trên đường di chuyển của các phần tử thuộc cụm quỹ đạo phía tây (nhóm hình bên trái) và thuộc cụm quỹ đạo phía đông (nhóm hình bên phải). Vị trí không gian các phần tử này được in đậm trên Hình 9, quỹ đạo thăng đứng của phần tử được thể hiện nét đứt màu đen trên các Hình (a) – (d).

Quá trình biến tính của phần tử khí thuộc cụm phía tây phụ thuộc nhiều vào các tương tác bề mặt. Phần lớn thời gian phần tử nằm trên khu vực đất liền, địa hình biến đổi tương đối phức tạp (Hình 10d). Phân bố nhiệt độ gần bề mặt (850 hPa) của phần tử ở cụm phía tây có nhiệt độ cao hơn rõ rệt so với cụm phía đông, cho thấy phần tử này di chuyển qua khu vực nóng hơn (Hình 10a, e). Bức xạ sóng ngắn có chu kỳ dao động rõ ràng theo chu trình ngày – đêm (Hình 10c),

tương ứng với những thời điểm tăng nhiệt của phần tử. Ẩn nhiệt và hiển nhiệt cũng tương đối lớn, đặc biệt vào ban ngày. Phần tử thuộc cụm phía tây có sự tăng nhiệt dọc đường đi do những tương tác với địa hình và hiệu ứng foehn.

Ngược lại, cụm phía đông có biến thiên nhiệt không đáng kể, độ ẩm tương đối cao và tập trung chủ yếu dưới mực 700 hPa tương ứng với quãng đường dịch chuyển trên biển. Các phần tử này dịch chuyển theo rìa áp cao cận nhiệt Tây Bắc Thái Bình Dương, với khu vực dòng giáng có thể góp phần duy trì trường phân kỳ và đốt nóng phi đoạn nhiệt. Phần tử thuộc cụm phía đông có biên độ dao động các thành phần năng lượng nhỏ hơn, đặc biệt là ẩn nhiệt khá ổn định (khoảng 180 W/m^2 trong suốt quãng đường di chuyển). Điều này cho thấy quá trình trao đổi ẩm cũng có vai trò quan trọng đối với phần tử thuộc cụm. Dao động bức xạ sóng ngắn của quỹ đạo phía đông có xu thế mạnh hơn so với quỹ đạo phía tây. Sự khác biệt này chủ yếu do ảnh hưởng của điều kiện bề mặt: quỹ đạo phía đông di chuyển qua biển và quỹ đạo phía tây di chuyển qua lục địa (Hình 12g-h). Bức xạ sóng ngắn trên mặt biển được hấp thụ tốt hơn trên đất liền, do đặc tính truyền qua của nước và khả năng lưu trữ nhiệt bức xạ tốt hơn.

5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã khảo sát một số đặc trưng nắng nóng trên 7 vùng khí hậu của Việt Nam từ tháng 3 đến tháng 9 từ số liệu tái phân tích ERA5-Land trong giai đoạn 1981 – 2024. Các đặc trưng nắng nóng được xây dựng và phân tích dựa trên giá trị M_d, tính toán từ giá trị nhiệt độ tối cao Tx. Các kết quả cho thấy nắng nóng tại Việt Nam có xu thế gia tăng rõ rệt cả về tần suất, thời lượng, cường độ nắng nóng và mức độ bao phủ không gian, với sự khác biệt đáng kể giữa các vùng. Giai đoạn 2011 – 2024 ghi nhận số ngày và số đợt nắng nóng trung bình năm tăng mạnh so với giai đoạn 1981 - 2010, đặc biệt tại các khu vực tây Bắc, miền Trung, Tây Nguyên và Nam Bộ. Cường độ nắng nóng có xu thế tăng yếu hơn nhưng vẫn đạt giá trị cao ở một số khu vực như Tây Bắc và Tây Nguyên. Diện bao phủ nắng nóng biến động mạnh theo năm, song xu hướng tăng trở nên rõ rệt sau năm 2010, với các đợt nắng nóng diện rộng xuất hiện thường xuyên hơn. Các kết quả này có thể phần nào phản ánh tác động của biến đổi khí hậu đến các hiện tượng cực đoan ở Việt Nam. Đồng thời, nghiên cứu nhấn mạnh tầm quan trọng của việc nghiên cứu nguồn gốc và đặc tính khí quyển trong các đợt nắng nóng, nhằm phục vụ công tác dự báo và xây dựng chiến lược thích ứng.

Kết quả phân tích đợt nắng nóng tháng 4 năm 2024 cho thấy sự hình thành và phát triển của đợt nắng nóng kéo dài này là kết quả tương tác đồng thời của các hệ thống hoàn lưu quy mô lớn: áp cao trên Vịnh Bengal và áp cao cận nhiệt Tây Thái Bình Dương. Hai hệ thống này tạo ra hai cụm quỹ đạo phần tử có đặc điểm động lực và nhiệt - ẩm khác biệt. Cụm phía tây, có nguồn gốc từ Ấn Độ, di chuyển qua địa hình lục địa phức tạp và khô nóng, chịu tác động mạnh mẽ của hiệu ứng foehn, dẫn tới quá trình tăng nhiệt rõ rệt, góp phần gây nắng nóng ở Bắc Bộ và Bắc Trung Bộ. Ngược lại, cụm phía đông di chuyển chủ yếu trên biển dưới tác động của hoàn lưu áp cao cận nhiệt với dòng giáng góp phần duy trì trường phân kỳ và làm tăng quá trình đốt nóng phi đoạn nhiệt, duy trì độ ẩm cao và biến thiên nhiệt độ thấp hơn, đóng vai trò chính trong đợt nắng nóng ở Trung và Nam Bộ. Sự kết hợp đồng thời của hai cụm quỹ đạo này đã tạo ra một đợt nắng nóng có phạm vi và cường độ tương đối lớn, phản ánh tính chất phức tạp và đa cơ chế của các hiện tượng nắng nóng cực đoan trong bối cảnh biến đổi khí hậu. Phân tích này góp phần làm rõ cơ chế động lực – nhiệt - ẩm điều khiển quá trình di chuyển và biến tính của không khí gây nên hiện tượng nắng nóng trên khu vực Việt Nam. Các kết quả ban đầu này là nền tảng để chúng tôi thực hiện những nghiên cứu toàn diện hơn nhằm tổng quát hóa các cơ chế chung.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài mã số TN.24.11, của Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội.

Tài liệu tham khảo

[1] R. M. Horton, J. S. Mankin, C. Lesk, E. Coffel, C. Raymond, A Review of Recent Advances in Research on Extreme Heat Events, Current Climate Change Reports, Vol. 2, No.4, 2016, pp. 242-259, 10.1007/s40641-016-0042-x.

[2] IPCC, Annex I: Observational Products [Trewin, B. (ed.)], in Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, V. M. Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou, Editors, Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021, pp. 2061-2086.

[3] G. Meehl, C. Tebaldi, More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century, Science (New York, N.Y .), Vol. 305, No., 2004, pp. 994-997, https://doi.org/10.1126/science.1098704.

[4] T. T. Kiem, Characteristics and Main Synoptic Patterns Causing Heatwave Weather in Vietnam, Presented in Proceedings of the 5th Scientific Conference, 2000, National Center for Hydrometeorology (in Vietnamese).

[5] N. D. Ngu, Climate Change – Challenges to Development (Part 1), Environmental Economics, No. 1, 2009 (in Vietnames).

[6] L. V. Alexander, X. Zhang, T. C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A. M. G. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. Rupa Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D. B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci, J. L. V. Aguirre, Global Observed Changes in Daily Climate Extremes of Temperature and Precipitation, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Vol. 111, No. D5, 2006, https://doi.org/10.1029/2005JD006290.

[7] W. Lass, A. Haas, J. Hinkel, C. Jaeger, Avoiding the Avoidable: Towards a European Heat Waves Risk Governance, International Journal of Disaster Risk Science, Vol. 2, 2011, pp. 1-14.

[8] L. P. Thi, H. P. Thanh, T. P. Van, Y. V. Thuan, Variability of Heatwaves Across Vietnam in Recent Decades, Vietnam Journal of Earth Sciences, Vol. 45, No. 4, 2023, pp. 517-530, https://doi.org/10.15625/2615-9783/19057.

[9] H. P. Thanh, L. P. Thi, H. Phan, A. Fink, R. V. D. Linden, T. P. Van, Heatwaves in Vietnam: Characteristics and Relationship with Large-scale Climate Drivers, International Journal of Climatology, 2024, https://doi.org/10.1002/joc.8606.

[10] S. Russo, J. Sillmann, E. M. Fischer, Top Ten European Heatwaves Since 1950 and Their Occurrence in the Coming Decades, Environmental Research Letters, Vol. 10, No. 12, 2015, pp. 124003, https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124003.

[11] L. Schielicke, S. Pfahl, European Heatwaves in Present and Future Climate Simulations: A Lagrangian Analysis, Weather Clim. Dynam., Vol. 3, No. 4, 2022, pp. 1439-1459, https://doi.org/10.5194/wcd-3-1439-2022.

[12] J. Wang, Z. Yan, Rapid Rises in the Magnitude and Risk of Extreme Regional Heat Wave Events in China, Weather and Climate Extremes, Vol. 34, 2021, pp. 100379, https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100379.

[13] M. Amou, A. Gyilbag, T. Demelash, Y. Xu, Heatwaves in Kenya 1987-2016: Facts from CHIRTS High Resolution Satellite Remotely Sensed and Station Blended Temperature Dataset, Atmosphere, Vol. 12, No., 2020, pp. 37, https://doi.org/10.3390/atmos12010037.

[14] G. Zittis, P. Hadjinicolaou, M. Almazroui, E. Bucchignani, F. Driouech, K. Elrhaz, L. Kurnaz, G. Nikulin, A. Ntoumos, T. Ozturk, Y. Proestos, G. Stenchikov, Z. Rashyd, J. Lelieveld, Business-as-Usual will Lead to Super and Ultra-extreme Heatwaves in the Middle East and North Africa, NPJ Climate and Atmospheric Science, Vol. 4, 2021, https://doi.org/10.1038/s41612-021-00178-7.

[15] Z. Dong, L. Wang, Y. Sun, T. Hu, A. Limsakul, P. Singhruck, S. Pimonsree, Heatwaves in Southeast Asia and Their Changes in a Warmer World, Earth's Future, Vol. 9, No. 7, 2021, pp. e2021EF001992, https://doi.org/10.1029/2021EF001992.

[16] X. X. Li, C. Yuan, J. Hang, Heat Wave Trends in Southeast Asia: Comparison of Results From Observation and Reanalysis Data, Geophysical Research Letters, Vol. 49, No.4, 2022, pp. e2021GL097151, https://doi.org/10.1029/2021GL097151.

[17] P. M. Hang, T, T. Dung, N. Đ. Quang, Influence of the South Asian Low and the Western North Pacific Subtropical High on the Evolution of Heatwaves in the North Central Region During

2010–2015, Journal of Meteorology and Hydrology, Vol. 674, No. 2, 2017 (in Vietnamese).

[18] N. V. Lanh, Heatwaves and their Causes in Vietnam, Journal of Meteorology and Hydrology, No. 597, 2010, pp. 8-13 (in Vietnamese).

[19] C. T. T. Huong, P. T. L. Huong, V. T. Hang, P. V. Tan, Magnitude and trend of heatwave variation in Vietnam during 1961–2007, VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology, Vol. 26, No. 3S, 2010, pp. 423-430 (in Vietnamese),

[20] L. A. Hai, M. V. Khiem, V. N. Linh, C. T. T. Huong, Assessment of Heatwave Characteristics in Southern Vietnam During 1991–2020 and Their Variations Under Different ENSO Phases, Journal of Climate Change Science, No. 21, 2022, https://doi.org/10.55659/2525-2496/21.65991 (in Vietnamese).

[21] S. Wu, M. Luo, R. Zhao, J. Li, P. Sun, Z. Liu, X. Wang, P. Wang, H. Zhang, Local Mechanisms for Global Daytime, Nighttime, and Compound Heatwaves, NPJ Climate and Atmospheric Science, Vol. 6, No. 1, 2023, pp. 36, https://doi.org/10.1038/s41612-023-00365-8.

[22] Y. Chen, Y. Li, An Inter-comparison of Three Heat Wave Types in China during 1961–2010: Observed Basic Features and Linear Trends, Scientific Reports, Vol. 7, No. 1, 2017, pp. 45619, https://doi.org/10.1038/srep45619.

[23] M. Luo, N. C. Lau, Z. Liu, Different Mechanisms for Daytime, Nighttime, and Compound Heatwaves in Southern China, Weather and Climate Extremes, Vol. 36, 2022, pp. 100449, https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100449.

[24] X. Liu, B. He, L. Guo, L. Huang, D. Chen, Similarities and Differences in the Mechanisms Causing the European Summer Heatwaves in 2003, 2010, and 2018, Earth's Future, Vol. 8, 2020, https://doi.org/10.1029/2019EF001386.

[25] Y. Tian, A. Kleidon, C. Lesk, S. Zhou, X. Luo, S. A. Ghausi, G. Wang, D. Zhong, J. Zscheischler, Characterizing Heatwaves Based on Land Surface Energy Budget, Communications Earth & Environment, Vol. 5, No. 1, 2024, pp. 617, https://doi.org/0.1038/s43247-024-01784-y.

[26] A. Mayer, V. Wirth, Two Different Perspectives on Heatwaves Within the Lagrangian Framework, Weather and Climate Dynamics, Vol. 6, No. 1, 2024, pp. 131-150, https://doi.org/10.5194/wcd-6-131-2025.

[27] M. Rothlisberger, L. Papritz, Quantifying the Physical Processes Leading to Atmospheric Hot Extremes at a Global Scale, Nature Geoscience, Vol. 16, No. 3, 2023, pp. 210-216, https://doi.org/10.1038/s41561-023-01126-1.

[28] P. Zschenderlein, A. Fink, S. Pfahl, H. Wernli, Processes Determining Heat Waves Across Different European Climates, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 145, 2019, pp. 2973-2989, https://doi.org/10.1002/qj.3599.

[29] H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. M. Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, S. Abdalla, X. Abellan, G. Balsamo, P. Bechtold, G. Biavati, J. Bidlot, M. Bonavita, G. D. Chiara, P. Dahlgren, D. Dee, M. Diamantakis, R. Dragani, J. Flemming, R. Forbes, M. Fuentes, A. Geer, L. Haimberger, S. Healy, R. J. Hogan, E. Hólm, M. Janisková, S. Keeley, P. Laloyaux, P. Lopez, C. Lupu, G. Radnoti, P. D. Rosnay, I. Rozum, F. Vamborg, S. Villaume, J. N. Thépaut, The ERA5 global reanalysis, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 146, No. 730, 2020, pp. 1999-2049, https://doi.org/10.1002/qj.3803.

[30] V. T. Phan, T. N. Duc, Seasonal and Interannual Variations of Surface Climate Elements over Vietnam, Climate Research, Vol. 40, No. 1, 2009, pp. 49-60, https://doi.org/10.3354/cr00824.

[31] E. M. Fischer, C. Schär, Consistent Geographical Patterns of Changes in High-impact European Heatwaves, Nature geoscience, Vol. 3, No. 6, 2010, pp. 398-403, https://doi.org/10.1038/ngeo866.

[32] S. E. Perkins, L. V. Alexander, On the Measurement of Heat Waves, Journal of Cliamte, Vol. 26, No. 13, 2013, pp. 4500-4517, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1.

[33] M. G. Kendall, Rank Correlation Methods, American Journal of Operations Research, Vol. 3, No. 1A, 1948.

[34] H. B. Mann, Nonparametric Tests Against Trend, Econometrica, Vol. 13, No. 3, 1945, pp. 245-259, https://doi.org/10.2307/1907187.

[35] M. Sprenger, H. Wernli, The LAGRANTO Lagrangian Analysis Tool – Version 2.0, Geoscience Model Development, Vol. 8, No. 8, 2015, pp. 2569-2586, https://doi.org/10.5194/gmd-8-2569-2015.