



Original Article

Geographic Extent of Flash Droughts Across the Seven Climatic Sub-regions of Vietnam

Pham Thanh Ha*, Phan Van Tan

*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: This study analyzed the spatio-temporal characteristics of flash droughts across seven climatic sub-regions of Vietnam using ERA5 soil moisture data at three depths (7 cm, 28 cm, and 100 cm) over the period 1961 - 2020. The results reveal notable differences in flash drought occurrence between regions and across soil depths, with the shallowest layer (D7) showing the highest sensitivity to dry conditions. Although variations exist in absolute values, all results from three criteria consistently identify high flash drought frequency and duration in regions R1, R2, R4, and R7. Flash droughts primarily occur during the rainy season: JJA (June - August) in the northern regions (R1 - R3) and SON (September - November) in the southern regions (R4 - R7). Notably, flash droughts tend to occur on a broad spatial scale in sub-regions R1 - R3 and R7, where approximately 60% of the identified events affected more than 50% of the regional area, based on D7 and D28 criteria. These findings provide a scientific basis for selecting relevant variables and constructing appropriate input datasets for future flash drought forecasting and early warning models.

Keywords: Geographic extent, flash droughts, Vietnam.

* Corresponding author.

E-mail address: phamthanhha.k56@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5394>

Quy mô không gian của hạn chớp nhoáng tại 7 vùng khí hậu Việt Nam

Phạm Thanh Hà*, Phan Văn Tân

*Khoa Khí tượng Thủy văn và Hải dương học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên,
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: Nghiên cứu đã phân tích đặc điểm không gian–thời gian của hạn chớp nhoáng tại bảy vùng khí hậu Việt Nam, dựa trên dữ liệu độ ẩm đất ERA5 tại ba lớp sâu (7 cm, 28 cm và 100 cm) trong giai đoạn 1961 - 2020. Kết quả cho thấy hạn chớp nhoáng có sự khác biệt rõ rệt giữa các vùng và theo chiều sâu đất, với lớp đất nông (D7) phản ứng nhạy nhất với điều kiện khô hạn. Mặc dù có khác biệt về giá trị tuyệt đối, cả ba chỉ tiêu đều chỉ ra tần suất và số ngày xảy ra hạn cao tại các vùng R1, R2, R4 và R7. Về thời gian, hạn chớp nhoáng chủ yếu tập trung vào mùa mưa: JJA (tháng 6-8) ở các vùng phía Bắc (R1 - R3) và SON (tháng 9-11) ở phía Nam (R4 - R7). Đáng chú ý, hiện tượng này có xu hướng xảy ra trên diện rộng tại các vùng R1 - R3 và R7, với khoảng 60% số đợt hạn ảnh hưởng trên 50% diện tích vùng dựa trên chỉ tiêu D7 và D28. Kết quả là tiền đề cho việc lựa chọn các nhân tố và thiết lập các tập hợp biến đầu vào phù hợp cho các mô hình dự báo và cảnh báo hạn chớp nhoáng trong tương lai.

Từ khóa: Quy mô không gian, hạn chớp nhoáng, Việt Nam.

1. Mở đầu

Ở Việt Nam, cùng với bão và lũ lụt, hạn hán là loại hình thiên tai gây ra nhiều tổn thất, thiệt hại nhất. Vì vậy mà chủ đề này luôn thu hút được sự quan tâm của các nhà khoa học. Mặc dù vậy, cho đến nay trong số các công trình nghiên cứu và ứng dụng về hạn hán, phần lớn đề cập đến một hoặc một vài trong số bốn loại hạn đã được biết đến là: i) Hạn khí tượng (meteorological drought), ii) Hạn nông nghiệp (agricultural drought); iii) Hạn thủy văn (hydrological drought) và iv) Hạn kinh tế - xã hội (socio-economic drought) và chỉ có 02 có công trình nghiên cứu về hạn chớp nhoáng (flash drought-FD) cho khu vực Việt Nam [1, 2]. Thực tế, hạn

chớp nhoáng là chủ đề khá mới mẻ, chính thức xuất hiện lần đầu tiên trong bài báo của [3]. Mặc dù vậy, số lượng các công trình nghiên cứu về chủ đề này tăng khá nhanh theo thời gian, đặc biệt là từ sau năm 2013 [4].

Khác biệt với các dạng hạn hán thông thường vốn diễn tiến chậm và kéo dài, hạn chớp nhoáng được đặc trưng bởi sự suy giảm nhanh chóng và bất ngờ của lượng nước trong đất trong một khoảng thời gian ngắn và sự gia tăng của lượng bốc thoát hơi nước, chủ yếu do điều kiện thiếu nước gây ra bởi sự suy giảm nhanh chóng của lượng mưa [5-9]. Chính tốc độ thay đổi đột ngột này khiến hệ sinh thái và hoạt động sản xuất nông nghiệp không có đủ thời gian để thích nghi, từ đó làm gia tăng mức độ thiệt hại so với các

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: phamthanhha.k56@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5394>

hình thái hạn hán khác [10]. Thật vậy, ảnh hưởng nặng nề của hạn chớp nhoáng tại các khu vực khác nhau trên thế giới đã được ghi nhận trong lịch sử [11 - 12], như giảm tới 70% sản lượng lúa mì năm 2010 tại nhiều vùng chuyên canh của Nga [11]; gây thiệt hại hơn 30 tỷ USD do mất mùa tại Mỹ năm 2012 (báo cáo của NCDC năm 2019, <https://www.ncdc.noaa.gov/billions>),... Đáng chú ý, các nghiên cứu gần đây nhấn mạnh dưới tác động của biến đổi khí hậu, tần suất và mức độ nghiêm trọng của các hiện tượng thời tiết cực đoan, trong đó có hạn chớp nhoáng, đang có xu hướng gia tăng [13, 14]. Nhiều nghiên cứu ghi nhận tần suất xuất hiện của các đợt hạn chớp nhoáng sự tăng lên ở nhiều nơi trên thế giới, chẳng hạn như ở phía nam Trung Quốc [15], Mỹ [16] và ở Châu Phi [14], trong đó có khu vực phía Nam và Tây Bắc Việt Nam [1]. Bên cạnh đó, sự xuất hiện của các đợt hạn chớp nhoáng có tính biến động mạnh theo từng năm và chịu ảnh hưởng bởi các nhân tố mang tính địa phương (như lượng mưa, nhiệt độ, đặc điểm địa hình, lớp phủ bề mặt [17]) cũng như các nhân tố hoàn lưu quy mô lớn (như hoạt động của gió mùa [18], ENSO [2, 19], MJO [20] và IOD [21]). Các nhân tố chi phối này có thể khác nhau giữa các khu vực nghiên cứu, phản ánh đặc điểm khí hậu và điều kiện địa lý riêng của từng vùng. Điều này cho thấy tính cấp thiết của các nghiên cứu về hạn chớp nhoáng.

Hạn hán nói chung hay hạn chớp nhoáng nói riêng không phải là biến quan trắc trực tiếp, do đó không có chuỗi số liệu lịch sử. Việc xác định sự xuất hiện của hạn chớp nhoáng hiện nay chủ yếu được dựa trên các chỉ tiêu. Trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu đề xuất các phương pháp, cách tiếp cận khác nhau để xác định hạn chớp nhoáng, tuy nhiên đến nay vẫn chưa có một chỉ tiêu cụ thể nào được thống nhất và áp dụng rộng rãi [4]. Điều này cho thấy một khoảng trống rõ rệt trong việc nhận diện và theo dõi hiện tượng này một cách hệ thống. Trong bối cảnh đó, việc lựa chọn được một chỉ tiêu phù hợp, khả thi và sát với điều kiện thực tế của từng khu vực nghiên cứu trở nên đặc biệt quan trọng. Các chỉ số xác định hạn chớp nhoáng thường được xây dựng dựa trên các đặc trưng đặc thù như sự suy giảm

nh nhanh chóng của độ ẩm đất, sự gia tăng đột ngột của bốc thoát hơi. Tuy nhiên, một điều đáng chú ý là việc lựa chọn/xây dựng chỉ tiêu xác định hạn chớp nhoáng phụ thuộc nhiều vào nguồn dữ liệu có sẵn trên khu vực nghiên cứu. Cụ thể, việc thu thập dữ liệu cần thiết để tính toán các chỉ tiêu hạn chớp nhoáng có thể tốn kém và đầy thách thức, đặc biệt là ở các khu vực có dữ liệu hạn chế. Ví dụ, các chỉ tiêu sử dụng thông tin đầu vào là các biến thường không quan trắc trực tiếp mà phải ước tính thông qua các công thức thực nghiệm như các biến liên quan tới bốc hơi và độ ẩm đất. Việc thiếu dữ liệu có thể ảnh hưởng đến độ chính xác và tính đại diện của các chỉ tiêu, cũng như khả năng áp dụng chúng cho các trường hợp cụ thể. Đây cũng là một trong những nguyên nhân dẫn tới sự chưa thống nhất về chỉ tiêu xác định hạn chớp nhoáng trên thế giới và tầm quan trọng của việc khảo sát nguồn dữ liệu sẵn có để xây dựng/lựa chọn chỉ tiêu xác định hạn chớp nhoáng cho phù hợp với khu vực nghiên cứu. Các nghiên cứu trước đây đã thực hiện cho thấy sự đa dạng về các chỉ tiêu xác định hạn chớp nhoáng. Ví dụ, thông tin về sự thay đổi dị thường của chỉ số ứng suất bốc hơi (Evaporative Stress Index - ESI) có thể được coi là tín hiệu để xác định sự xuất hiện của các đợt hạn chớp nhoáng đã được chỉ ra trong một số nghiên cứu của [22] và [12]. Trong khi đó, [23] đã sử dụng chỉ số độ ẩm đất (Soil Moisture Index - SMI) để xác định các đợt hạn chớp nhoáng tại Cộng hòa Czech. Thông tin về độ ẩm đất cũng được sử dụng để xác định hạn chớp nhoáng tại Mỹ trong nghiên cứu của [24]. Gần đây, [25] đã đề xuất chỉ tiêu được xây dựng dựa trên thông tin về tỷ số ứng suất bốc hơi chuẩn hóa (Standardized Evaporative Stress Ratio-SESR). Tuy nhiên, các phương pháp xác định hạn chớp nhoáng đề cập ở trên khó được áp dụng rộng rãi do sự hạn chế về nguồn số liệu liên quan tới độ ẩm đất và bốc hơi tại nhiều khu vực. Để khắc phục được điều này, nghiên cứu của [26] đã xây dựng một phương pháp khách quan để xác định hạn chớp nhoáng dựa trên thông tin về các biến khí tượng phổ biến và dễ dàng áp dụng. Cụ thể, nhóm tác giả đã xây dựng chỉ tiêu xác định hạn chớp nhoáng bằng chỉ số SPEI (standardized evaporation precipitation index -

SPEI) ở quy mô thời gian 1 tháng và áp dụng nó cho Tây Ban Nha trong giai đoạn 1961-2018. Việc xác định hạn chớp nhoáng được tập trung vào giai đoạn phát triển, sự giảm đột ngột của chỉ số SPEI trong thời gian ngắn (4 tuần) và độ lớn của các sự kiện.

Đối với khu vực Việt Nam, hạn chớp nhoáng mới được đề cập trong hai nghiên cứu của [1] và [2]. Mặc dù cùng chung khu vực nghiên cứu là Việt Nam, nhưng các chỉ tiêu được áp dụng trong nghiên cứu này có sự khác biệt trong rõ rệt trong cách tiếp cận. Cụ thể, nghiên cứu của [1] đã xác định hạn chớp nhoáng dựa trên thông tin về độ ẩm đất (soil moisture) trung bình trong lớp đất tầng rễ (0-100cm), được lấy từ số liệu tái phân tích ERA5, độ phân giải 0.25° . Trong khi đó, hạn chớp nhoáng trong nghiên cứu [2] được xác định dựa trên thông tin về tỷ số ứng suất bốc hơi chuẩn hóa (Standardized Evaporative Stress Ratio-SESR) - tỷ số này được ước lượng dựa trên thông tin về chỉ số bốc thoát hơi tiềm năng PET (potential evapotranspiration) và chỉ số bốc thoát hơi thực tế AET (actual evapotranspiration) của GLEAM. Như vậy, các nghiên cứu trước đây cho khu vực Việt Nam sử dụng cách tiếp cận khác nhau để xác định hạn chớp nhoáng, dẫn đến sự bất định trong kết quả, đồng thời chưa phân tích đầy đủ quy mô không gian - yếu tố quan trọng cho đánh giá rủi ro và xây dựng hệ thống cảnh báo. Trong bối cảnh Việt Nam phụ thuộc nhiều vào nông nghiệp và chịu tác động mạnh từ biến đổi khí hậu, việc nhận diện sớm và chính xác hiện tượng cực đoan như hạn chớp nhoáng là rất cần thiết. Do đó, nghiên cứu này áp dụng tiêu chí xác định hạn chớp nhoáng dựa trên sự suy giảm nhanh của độ ẩm đất, một chỉ báo trực tiếp về tình trạng khô hạn và yếu tố then chốt chi phối quá trình sinh trưởng của cây trồng. Việc lựa chọn độ ẩm đất làm tiêu chí trung tâm đã được khẳng định trong nhiều nghiên cứu trước đây [27 - 30]. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chưa thống nhất về độ sâu đất được sử dụng, thường dao động trong khoảng 0-150 cm, do độ ẩm đất trong vùng rễ 50-150 cm thường quyết định sự phát triển của thảm thực vật [31-33]. Chỉ ra rằng việc xác định hạn chớp nhoáng chịu ảnh hưởng đáng kể bởi lựa chọn độ sâu của lớp đất và ngưỡng giá

trị được sử dụng để xác định hạn. Nghiên cứu cho thấy rằng sử dụng lớp đất mặt (khoảng 10 cm trên cùng) có thể phát hiện được nhiều sự kiện hạn chớp nhoáng hơn so với khi sử dụng vùng rễ, do lớp đất mặt là nơi đầu tiên chịu tác động của sự gia tăng bốc thoát hơi và giảm lượng mưa. Tuy nhiên, độ ẩm đất trong vùng rễ lại cung cấp đại diện chính xác hơn về mức độ ảnh hưởng mạnh của thảm thực vật. Điều này đặt ra thách thức trong việc xác định chính xác các sự kiện hạn chớp nhoáng, khi cần cân bằng giữa khả năng phát hiện nhanh sự kiện hạn và phản ánh đúng phản ứng của hệ sinh thái thực vật. Do đó, nhằm đánh giá độ nhạy của độ ẩm đất theo tầng sâu và xác định lớp đất dễ bị tổn thương nhất do hạn chớp nhoáng tại Việt Nam, nghiên cứu này lựa chọn phân tích độ ẩm đất tại ba tầng sâu: 7 cm, 28 cm và 100 cm. Đồng thời, nghiên cứu khảo sát quy mô không gian của các đợt hạn chớp nhoáng tại bảy vùng khí hậu để xác định mức độ cục bộ hay diện rộng, giúp phục vụ công tác xây dựng các mô hình cảnh báo sự xuất hiện của hạn chớp nhoáng trong tương lai.

2. Số liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu

Nghiên cứu này sẽ phân tích quy mô không gian của hạn chớp nhoáng tại 7 vùng khí hậu đặc trưng của Việt Nam, bao gồm: Tây Bắc (R1), Đông Bắc (R2), Đồng Bằng Bắc Bộ (R3), Bắc Trung Bộ (R4), Nam Trung Bộ (R5), Tây Nguyên (R6), Nam Bộ (R7). Cách phân vùng này đã được áp dụng phổ biến trong nhiều nghiên cứu khí hậu tại Việt Nam ([34 - 36]). Hình 1 minh họa địa hình và ranh giới của từng vùng khí hậu trong nghiên cứu này.

2.2. Nguồn dữ liệu và quy trình chuẩn hoá phân vị độ ẩm đất

Dữ liệu độ ẩm đất trong giai đoạn 1961-2020 (60 năm) cho khu vực Việt Nam được sử dụng trong nghiên cứu này được lấy từ bộ số liệu tái phân tích ERA5 của Trung tâm dự báo hạn vừa Châu Âu (ECMWF), có thể truy cập miễn phí tại

<https://cds.climate.copernicus.eu>. Độ ẩm đất được cho trên lưới với độ phân giải ngang 0.25 độ kinh vĩ. Dữ liệu ERA5 đã được sử dụng rộng rãi để nghiên cứu các sự kiện hạn chóp nhoáng trên cả quy mô khu vực và quy mô toàn cầu trong các nghiên cứu trước đây [21, 37-40]. Đối với nghiên cứu này, dữ liệu độ ẩm đất theo ngày được tính trung bình từ bốn thời điểm quan trắc (00, 06, 12 và 18 UTC) và được tính trung bình cho ba lớp đất có độ sâu khác nhau, bao gồm: lớp 1 (0-7 cm), lớp 2 (0-28 cm) và lớp 3 (0-100 cm).

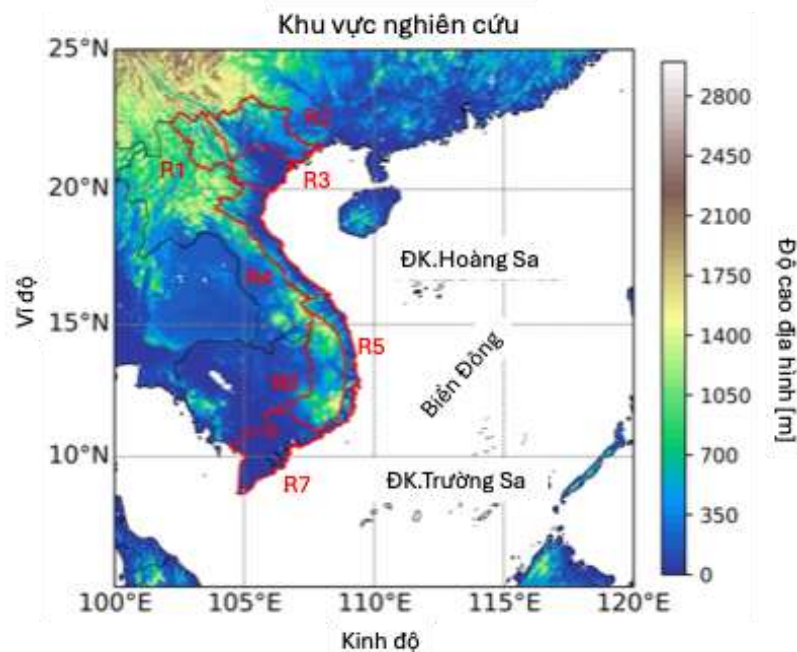
Các giá trị độ ẩm đất thu thập được sẽ được tính trung bình trượt 5 ngày, sau đó được chuyển sang thành các giá trị phân vị, theo các bước sau:

- Bước 1. Thiết lập tập mẫu theo ngày: với mỗi ngày cụ thể trong năm, chuỗi số liệu độ ẩm đất được lấy trung bình trong cửa sổ trượt gồm 5 ngày liên tiếp (bao gồm ngày đang xét, hai ngày

trước và hai ngày sau). Với chuỗi số liệu kéo dài 60 năm (1961 - 2020), mỗi ngày trong năm sẽ có tối đa 300 giá trị trung bình để tạo thành một tập mẫu đại diện cho ngày đó. Do giới hạn mốc thời gian, các ngày cận rìa như 1/1 và 31/12 chỉ có 298 mẫu, còn 2/1 và 30/12 có 299 mẫu.

- Bước 2. Xác định phân vị độ ẩm đất: từ tập mẫu được xây dựng ở bước 1, hàm phân bố thực nghiệm $F(x)$ của độ ẩm đất cho từng ngày trong năm được thiết lập. Sau đó, với mỗi giá trị độ ẩm đất x_i ứng với ngày thứ i của một năm bất kỳ, phân vị tương ứng sẽ được tính bằng $F(x_i)$ nhân với 100 (%).

Kết quả sau cùng là một tập dữ liệu độ ẩm đất đã được chuẩn hóa dưới dạng phân vị, phản ánh rõ ràng vị trí tương đối của từng giá trị độ ẩm trong phân bố theo ngày trong năm.



Hình 1. Khu vực nghiên cứu (đường màu đỏ thể hiện ranh giới giữa các vùng khí hậu).

2.3. Chỉ tiêu xác định hạn chóp nhoáng

Tiêu chí xác định hạn chóp nhoáng được dựa trên tiêu chí đã được áp dụng trong nghiên cứu trước đây của [14] bằng việc xem xét đồng thời cả tốc độ suy giảm nhanh của độ ẩm đất và tính kéo dài của điều kiện khô hạn. Theo đó, 1 đợt

hạn chóp nhoáng sẽ được xác định khi thỏa mãn đồng thời các điều kiện sau:

Độ ẩm đất giảm từ trên ngưỡng phân vị thứ 40 xuống dưới phân vị thứ 20, với tốc độ giảm trung bình không nhỏ hơn 5 phân vị trên mỗi chu kỳ 5 ngày (1 pentad);

- Nếu độ ẩm đất sau khi giảm tăng trở lại đến phân vị thứ 20, thì đợt hạn được coi là kết thúc;

- Đợt hạn chớp nhoáng phải kéo dài ít nhất 3 pentad (15 ngày).

- Hai điều kiện đầu mô tả giai đoạn bắt đầu và phục hồi của một đợt hạn chớp nhoáng. Như vậy, hai tiêu chí đầu mô tả các giai đoạn khởi phát và kết thúc của một đợt hạn chớp nhoáng. Tiêu chí thứ ba là thời gian tối thiểu để một đợt hạn chớp nhoáng được xác định. Trong nghiên cứu này, độ ẩm đất trung bình theo ngày được tính toán tại ba lớp sâu khác nhau trong tầng đất rề: lớp 1 (0-7 cm), lớp 2 (0-28 cm) và lớp 3 (0-100 cm). Hạn chớp nhoáng xác định tại mỗi lớp độ sâu tương ứng sẽ được ký hiệu lần lượt là D7, D28 và D100. Cách tiếp cận này cho phép đánh giá độ nhạy của từng tầng đất trong việc phát hiện hạn chớp nhoáng.

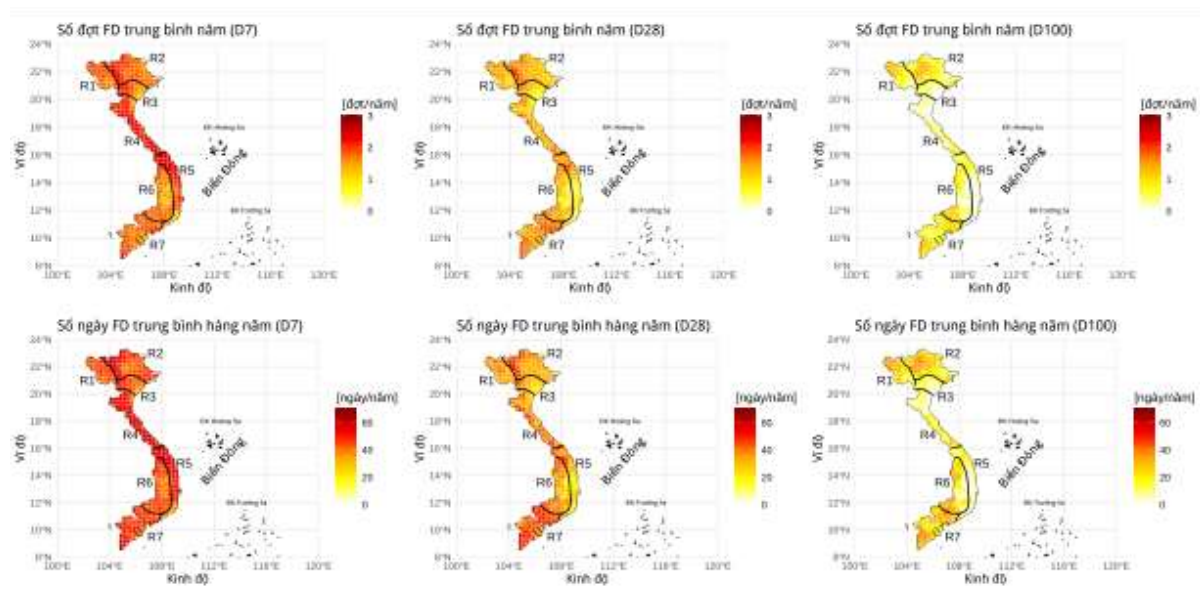
Bên cạnh đó, nghiên cứu tiến hành phân tích quy mô không gian của các đợt hạn chớp nhoáng tại bảy vùng khí hậu trên lãnh thổ Việt Nam,

nhằm xác định liệu hiện tượng này có xu hướng xảy ra cục bộ hay lan rộng trên toàn vùng. Trong nghiên cứu này, một đợt hạn chớp nhoáng được coi là xảy ra trên quy mô vùng (diện rộng) khi có ít nhất 50% số điểm (trạm) trong cùng một vùng đồng thời ghi nhận sự xuất hiện của hạn chớp nhoáng. Cách tiếp cận này tương tự phương pháp xác định sóng nhiệt quy mô vùng được đề xuất bởi [36].

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Phân bố không gian và thời gian hạn chớp nhoáng tại 7 vùng khí hậu Việt Nam

Phân bố không gian của tần suất và số ngày trung bình hàng năm xảy ra hạn chớp tại Việt Nam, được xác định theo ba lớp độ sâu đất khác nhau: D7 (0-7 cm), D28 (0-28 cm) và D100 (0-100 cm) được thể hiện ở Hình 2 và Bảng 1.



Hình 2. Phân bố không gian tần suất (hàng trên) và số ngày trung bình năm (hàng dưới) xảy ra hạn chớp nhoáng tại Việt Nam, xác định theo độ ẩm đất ở ba lớp sâu khác nhau: D7 (0 - 7 cm), D28 (0 - 28 cm) và D100 (0 - 100 cm). Đường màu đen thể hiện ranh giới của các vùng khí hậu R1-7.

Kết quả cho thấy lớp đất nông D7 phản ứng mạnh nhất với điều kiện khô hạn ngắn hạn, thể hiện qua tần suất và số ngày hạn chớp nhoáng cao vượt trội trên toàn bộ lãnh thổ, đặc biệt tập

trung tại các vùng R1, R2, R7 và nổi bật nhất là R4-5, nơi ghi nhận khoảng 2 - 3 sự kiện mỗi năm và trên 50 ngày hạn. Với lớp đất trung bình D28, tần suất và số ngày xảy ra hạn có xu hướng giảm

nhưng vẫn ở mức cao tại R4 và R7, phản ánh sự kéo dài của tình trạng khô hạn ở độ sâu khoảng 28 cm. Trong khi đó, tại lớp sâu D100, hạn chớp nhoáng xuất hiện ít và phân bố cục bộ, tần suất hiếm khi vượt quá 1 sự kiện/năm và số ngày xảy ra thường dưới 20 ngày, chủ yếu tại các vùng R1, R2 và R7. Nhìn chung, mức độ nhạy cảm với hạn chớp nhoáng có xu hướng giảm theo chiều sâu đất, phản ánh sự khác biệt trong phản ứng của các tầng đất đối với các điều kiện thời tiết cực đoan ngắn hạn. Mặc dù có sự chênh lệch về giá trị tuyệt đối giữa các lớp đất, các vùng R1, R2 và

R7 đều cho thấy dấu hiệu rõ rệt và nhất quán về sự hiện diện của hiện tượng hạn chớp nhoáng. Bên cạnh đó, sự sụt giảm của độ ẩm đất nhanh của xuất hiện ở các lớp đất sâu nhấn mạnh tính dễ bị tổn thương đối với nông nghiệp ở các khu vực như R1, R2 và R7. Mặc dù áp dụng chỉ tiêu khác để xác định hạn chớp nhoáng so với nghiên cứu của [2] cho khu vực Việt Nam, nhưng kết quả thu được có sự tương đồng khi nhấn mạnh sự xuất hiện của tần suất hạn chớp nhoáng cao tại khu vực R7.

Bảng 1. Thống kê số sự kiện, số ngày xuất hiện hạn chớp nhoáng trung bình nhiều năm tại 7 vùng khí hậu theo 3 chỉ tiêu D7, D28, D100

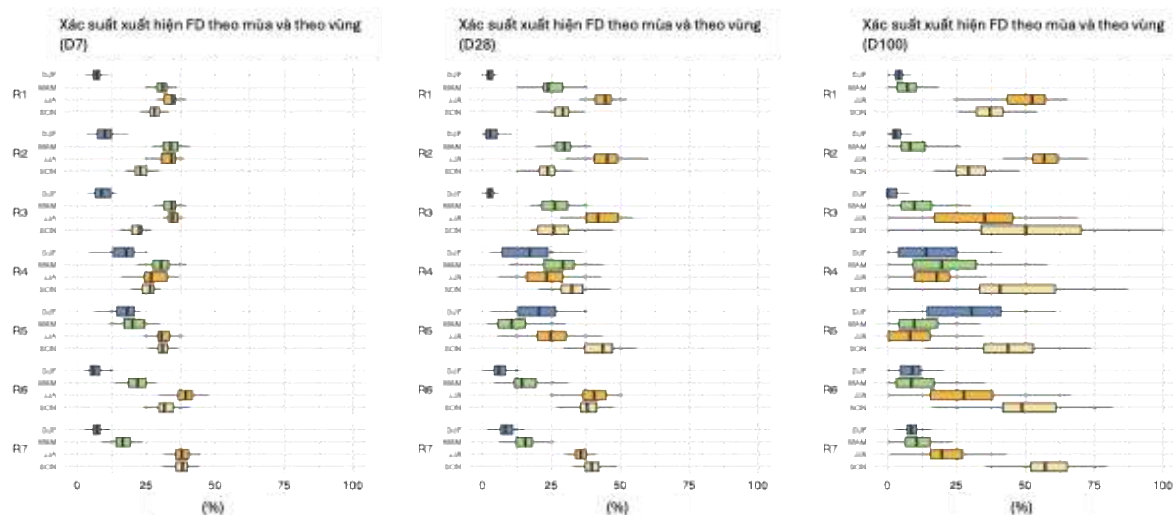
Vùng	Số sự kiện		Số ngày		Chỉ tiêu
	Trung vị	Độ lệch chuẩn	Trung vị	Độ lệch chuẩn	
R1	1,8	0,1	44,9	3,0	D7
R2	1,8	0,2	46,2	6,2	
R3	1,8	0,3	44,5	4,7	
R4	2,1	0,3	54,3	5,5	
R5	2,1	0,4	51,3	7,5	
R6	1,6	0,3	44,3	5,1	
R7	1,8	0,2	46,8	4,1	
R1	1,4	0,2	33,7	3,7	D28
R2	1,4	0,3	35,3	6,6	
R3	1,1	0,3	29,9	6,1	
R4	1,3	0,3	36,6	7,0	
R5	1,1	0,5	30,1	9,1	
R6	1,2	0,4	35,9	8,2	
R7	1,6	0,2	44,9	5,2	
R1	0,8	0,3	25,1	7,9	D100
R2	0,7	0,3	23,2	8,0	
R3	0,3	0,2	15,3	5,8	
R4	0,3	0,2	15,3	6,7	
R5	0,2	0,3	15,0	5,9	
R6	0,5	0,4	19,4	11,7	
R7	0,8	0,2	27,7	6,7	

Hình 3 thể hiện phân bố tần suất xuất hiện hạn chớp nhoáng theo mùa tại bảy vùng khí hậu đặc trưng của Việt Nam, dựa trên ba độ sâu của độ ẩm đất: D7 (0-7 cm), D28 (0-28 cm) và D100 (0-100 cm). Kết quả cho thấy sự khác biệt đáng kể về thời điểm xuất hiện hạn chớp nhoáng giữa các vùng và theo từng lớp đất, phản ánh vai trò của yếu tố địa hình, khí hậu khu vực và độ sâu tầng đất trong cơ chế hình thành hạn chớp

nhoáng. Đối với chỉ tiêu D7, xác suất xuất hiện hạn chớp nhoáng theo các mùa không có sự khác biệt rõ rệt, tuy nhiên hạn chớp nhoáng có xu hướng xuất hiện nhiều hơn (trên 30%) vào các tháng 3-4-5 (ký hiệu, MAM) và 6-7-8 (ký hiệu, JJA) tại các vùng khí hậu phía Bắc (R1-4) và tại các vùng khí hậu phía Nam (R5-7), tần suất xuất hiện cao hơn tập trung vào JJA và 9-10-11 (ký hiệu, SON). Tần suất xuất hiện hạn

chớp nhoáng giữa các tháng có sự khác biệt rõ rệt hơn, với tần suất các tháng lớn nhất đạt tới trên 40% và 50% đối với lần lượt chỉ tiêu D28 và D100. Theo đó, đối với cả 2 chỉ tiêu D28 và D100, với hạn chớp nhoáng xảy ra phổ biến vào JJA tại các vùng R1 - 3 và có xu hướng lùi sang SON tại các vùng R4 - 7. Các kết quả này cho thấy, hạn chớp nhoáng có khuynh hướng xuất hiện vào các tháng mùa mưa, với thời gian xuất hiện hạn chớp nhoáng tập trung chủ yếu vào tháng JJA đối với khu vực R1 - 3 và SON đối với khu vực R4 - 7, tương đồng với nghiên cứu của [1]. Kết quả này lại trái ngược với nghiên cứu của [2] trong đó hạn chớp nhoáng được xác định chủ yếu trong các tháng mùa khô. Sự khác biệt đáng kể này phản ánh ảnh hưởng của cách tiếp

cận và biến đầu vào được sử dụng. Cụ thể, nghiên cứu của [2] sử dụng các chỉ số dựa trên sự gia tăng bốc thoát hơi - một yếu tố dễ đạt ngưỡng trong điều kiện khô nóng, trong khi nghiên cứu này và [1] sử dụng độ ẩm đất làm chỉ báo chính, phản ánh trực tiếp tình trạng sụt giảm độ ẩm sẵn có trong đất. Việc lựa chọn độ ẩm đất làm biến đầu vào có thể giúp phát hiện các đợt hạn xảy ra ngay cả trong mùa mưa trong trường hợp bốc thoát hơi tăng nhanh nhưng lượng mưa không đủ để bù đắp lượng nước mất đi. Như vậy, có thể thấy cách tiếp cận xác định hạn chớp nhoáng dựa trên thông tin về độ ẩm đất có khả năng nhận diện được sự xuất hiện của hạn chớp nhoáng tốt hơn vào mùa so với cách tiếp cận sử dụng thông tin về lượng bốc thoát hơi.



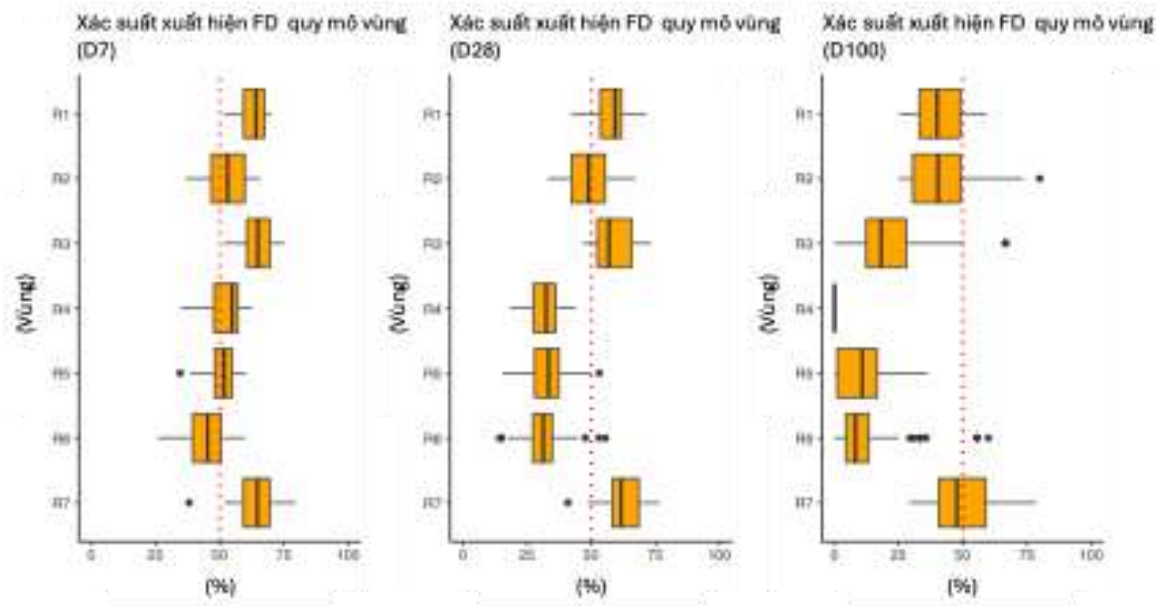
Hình 3. Boxplot thể hiện xác suất xuất hiện hạn chớp nhoáng theo các mùa và các vùng khí hậu tại Việt Nam, được xác định từ độ ẩm đất tại ba lớp sâu khác nhau: D7 (0-7 cm), D28 (0-28 cm) và D100 (0-100 cm).

Các mùa bao gồm: DJF (tháng 12-1-2, mùa Đông), MAM (tháng 3-4-5, mùa Xuân), JJA (tháng 6-7-8, mùa Hè) và SON (tháng 9-10-11, mùa Thu).

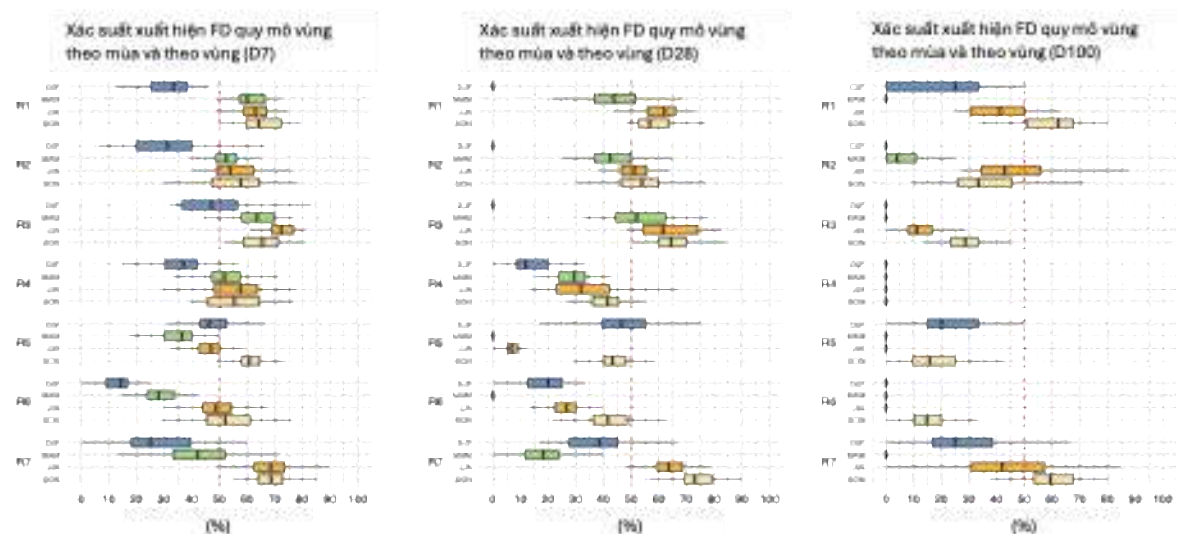
3.2. Quy mô không gian của hạn chớp nhoáng tại 7 vùng khí hậu Việt Nam

Hình 4 thể hiện xác suất xuất hiện hạn chớp nhoáng ở quy mô vùng, được xác định khi ít nhất 50% số điểm trong từng vùng khí hậu đồng thời ghi nhận hiện tượng này, dựa trên ba lớp độ ẩm đất: D7 (0 - 7 cm), D28 (0 - 28 cm) và D100 (0 - 100 cm). Kết quả cho thấy các vùng R1 - R3 và R7 có xu hướng xuất hiện hạn chớp nhoáng ở

quy mô diện rộng cao hơn so với các vùng khí hậu còn lại, áp dụng cho cả ba chỉ tiêu độ sâu. Đặc biệt, đối với D7 và D28, khoảng 60% số đợt hạn chớp nhoáng ghi nhận tại các vùng này (R1 - R3 và R7) xảy ra trên quy mô diện rộng. Đây cũng chính là những khu vực có xác suất xảy ra hạn chớp nhoáng cao nói chung (Hình 2), nhấn mạnh sự cần thiết của việc tập trung nghiên cứu chuyên sâu và triển khai các công cụ cảnh báo sớm nhằm giảm thiểu rủi ro tại các khu vực này.



Hình 4. Xác suất xuất hiện hạn chóp nhoáng quy mô vùng khi ít nhất 50% số điểm trong vùng đồng thời chịu ảnh hưởng.



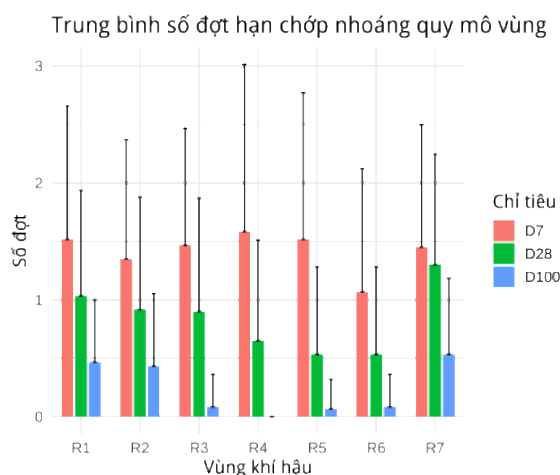
Hình 5. Boxplot thể hiện xác suất xuất hiện hạn chóp nhoáng quy mô vùng khi ít nhất 50% số điểm trong vùng đồng thời chịu ảnh hưởng theo các mùa và các vùng khí hậu tại Việt Nam, được xác định từ độ ẩm đất tại ba lớp sâu khác nhau: D7 (0-7 cm), D28 (0-28 cm) và D100 (0-100 cm). Các mùa bao gồm: DJF (mùa Đông), MAM (mùa Xuân), JJA (mùa Hè) và SON (mùa Thu).

Hình 5 thể hiện xác suất xuất hiện hạn chóp nhoáng ở quy mô vùng, được xác định khi ít nhất 50% số điểm trong mỗi vùng khí hậu đồng thời ghi nhận hạn chóp nhoáng, theo từng mùa dựa trên ba lớp độ ẩm đất: D7 (0 - 7 cm), D28 (0 -

28 cm) và D100 (0 - 100 cm). Kết quả cho thấy sự khác biệt rõ rệt về xác suất giữa các vùng khí hậu, các mùa trong năm và theo từng chỉ tiêu. Nhìn chung, có thể thấy các tháng có xác suất xảy ra hạn chóp nhoáng cao tại từng vùng cũng

là những tháng có xác suất xảy ra hạn chộp nhoáng trên quy mô diện rộng cao, trên cả 3 chỉ tiêu xác định. Cụ thể, đối với D7 và D28, hạn chộp nhoáng có xác suất xảy ra hạn chộp nhoáng trên diện rộng đạt trên 50% tại hầu hết các tháng trừ DJF đối với khu vực R1 - 4, xác suất xảy ra cao đặc biệt trong các tháng JJA và SON. Trong khi đó, R5 - 7, xác suất xuất hiện hạn chộp nhoáng trên diện rộng đạt trên 50% đối với tháng

JJA. Riêng với chỉ tiêu D100, do số lần ghi nhận hạn chộp nhoáng ở độ sâu này khá thấp (trung bình chưa đến 1 sự kiện/năm - Hình 2), nên biểu đồ phân bố chứa nhiều giá trị bằng 0. Tuy vậy, xu hướng xảy ra hạn chộp nhoáng trên diện rộng vẫn được ghi nhận rõ rệt trong mùa mưa (JJA và SON), phản ánh khả năng lan rộng của điều kiện khô hạn kéo dài tới cả lớp đất sâu trong một số thời điểm cực đoan.



Hình 6. Biểu đồ cột thể hiện số đợt hạn chộp nhoáng quy mô vùng trung bình giai đoạn 1961-2020 tại 7 vùng khí hậu Việt Nam theo các chỉ tiêu D7, D28, D100. Thanh màu đen biểu thị độ lệch chuẩn giữa các năm.

Hình 6 thể hiện số đợt hạn chộp nhoáng quy mô vùng trung bình giai đoạn 1961-2020 tại 7 vùng khí hậu Việt Nam theo các chỉ tiêu D7, D28 và D100. Kết quả cho thấy, chỉ tiêu D7 luôn ghi nhận số đợt hạn chộp nhoáng quy mô vùng cao nhất tại tất cả các vùng, dao động từ khoảng 1,5 đợt/năm, phản ánh độ nhạy cao của lớp đất mặt với các biến động ngắn hạn về độ ẩm. Trong khi đó, chỉ tiêu D28 cho kết quả thấp hơn khoảng dưới 1 đợt/năm và chỉ tiêu D100 cho số đợt hạn thấp nhất, thậm chí gần như bằng 0 ở một số vùng như R3 - 6, cho thấy hiện tượng hạn chộp nhoáng quy mô vùng hiếm khi ảnh hưởng sâu đến các lớp đất sâu hơn. Xét về không gian, các vùng R1, R4, R5 và R7 ghi nhận số đợt hạn xảy ra trên quy mô vùng cao hơn so với các vùng còn lại, đặc biệt theo chỉ tiêu D7. Bên cạnh đó, các cột sai số lớn ở tất cả các vùng và chỉ tiêu phản ánh sự biến động lớn giữa các năm về tần suất hạn chộp nhoáng. Nhìn chung, kết quả nhấn

manh vai trò của độ sâu đất trong khả năng phát hiện hạn chộp nhoáng, đồng thời cho thấy sự khác biệt về mức độ dễ tổn thương giữa các vùng khí hậu, từ đó làm cơ sở để xây dựng các hệ thống cảnh báo phù hợp với điều kiện cụ thể của từng khu vực. Xét về không gian, các vùng R1-3 và R7 ghi nhận số đợt hạn chộp nhoáng quy mô vùng cao hơn so với các vùng còn lại, đặc biệt quy luật này vẫn đúng với chỉ tiêu xác định hạn chộp nhoáng dựa vào độ ẩm đất tại các lớp đất sâu hơn. Bên cạnh đó, Hình 6 cũng cho thấy giá trị độ lệch chuẩn lớn ở tất cả các vùng và chỉ tiêu phản ánh sự biến động lớn giữa các năm về tần suất hạn chộp nhoáng quy mô vùng. Nhìn chung, kết quả nhấn mạnh vai trò của độ sâu đất trong khả năng phát hiện hạn chộp nhoáng, đồng thời cho thấy sự khác biệt về mức độ dễ tổn thương giữa các vùng khí hậu, từ đó làm cơ sở để xây dựng các hệ thống cảnh báo phù hợp với điều kiện cụ thể của từng khu vực.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã phân tích đặc điểm không gian và thời gian của hạn chớp nhoáng tại 7 vùng khí hậu trên cả nước, dựa trên dữ liệu độ ẩm đất của ERA5 ở ba lớp sâu khác nhau (7 cm, 28 cm và 100 cm) trong giai đoạn 1961 - 2020. Kết quả nhận được cho phép rút ra một số nhận xét sau:

i) Phân tích đặc điểm không gian - thời gian của hạn chớp nhoáng tại Việt Nam dựa trên độ ẩm đất ở ba lớp sâu (D7, D28 và D100) cho thấy sự khác biệt rõ rệt về tần suất, số ngày xảy ra và thời điểm xuất hiện của hiện tượng này giữa các vùng khí hậu và theo độ sâu tầng đất. Lớp đất nông (D7) phản ứng mạnh mẽ nhất với các điều kiện khô hạn ngắn hạn, với số lượng sự kiện và số ngày hạn chớp nhoáng vượt trội trên toàn lãnh thổ, đặc biệt tập trung ở các vùng R1, R2, R7 và nổi bật nhất là R4. Đối với chỉ tiêu D28 và D100, cường độ và mức độ lan rộng của hạn chớp nhoáng giảm dần, phản ánh mức độ ảnh hưởng khác nhau của các điều kiện khí tượng cực đoan đến các tầng đất;

ii) Về thời gian xuất hiện, hạn chớp nhoáng có xu hướng tập trung vào các tháng mùa mưa, với sự khác biệt giữa các vùng: các vùng phía Bắc (R1 - 3) có xác suất cao vào tháng JJA, trong khi các vùng phía Nam (R4 - 7) tập trung nhiều hơn vào tháng SON. Đáng chú ý, các vùng R1, R2 và R7 là những khu vực thể hiện tín hiệu hạn chớp nhoáng rõ rệt và ổn định nhất trên cả ba chỉ tiêu, cho thấy đây là các khu vực dễ bị tổn thương;

iii) Hạn chớp nhoáng có xu hướng xảy ra trên quy mô diện rộng tại các vùng R1 - 3 và R7, đặc biệt với độ sâu đất D7 và D28, nơi khoảng 60% số đợt hạn vượt ngưỡng ảnh hưởng trên 50% số điểm trong vùng. Về thời gian, các đợt hạn lan rộng chủ yếu xuất hiện vào mùa mưa (JJA và SON), phản ánh khả năng lan rộng của điều kiện khô hạn kéo dài tới cả lớp đất sâu trong một số thời điểm cực đoan. Kết quả này nhấn mạnh tầm quan trọng của cảnh báo sớm hạn chớp khi quy mô ảnh hưởng mang tính diện rộng và làm cơ sở khoa học cho việc xây dựng các hệ thống cảnh báo sớm nâng cao năng lực dự báo hạn chớp nhoáng trong tương lai.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi nhiệm vụ khoa học QG.25.48 của ĐHQGHN. Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Ban biên tập và ba phản biện đã có những ý kiến góp ý quý báu, giúp nhóm tác giả cải thiện, nâng cao chất lượng bài báo.

Tài liệu tham khảo

- [1] H. T. Minh, Nguyen. V. Toan, P. V. Tan, Flash Drought in Vietnam and Some of Its Characteristics During the Period of 1961 - 2020, *Journal of Hydro-Meteorology*, Vol. 752, 2023, pp. 75-86, [https://doi.org/10.36335/VNJHM.2023\(752\).75-86](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2023(752).75-86).
- [2] N. M. Nguyen, M. Choi, Delving into Flash Droughts in Vietnam During the Last Two Decades Using the Standardized Evaporative Stress Ratio, *J. Hydrol.*, Vol. 630, 2024, pp. 130669, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130669>.
- [3] M. Svoboda et al., The Drought Monitor, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, Vol. 83, 2002, pp. 1181-1190.
- [4] J. Lisonbee, M. Woloszyn, M. Skumanich, Making Sense of Flash Drought: Definitions, Indicators, and Where We Go from Here, *J. Appl. Serv. Climatol.*, Vol. 2021, No. 1, 2021, pp. 1-19.
- [5] R. D. Koster, S. D. Schubert, H. Wang, S. P. Mahanama, A. M. DeAngelis, Flash Drought as Captured by Reanalysis Data: Disentangling the Contributions of Precipitation Deficit and Excess Evapotranspiration, *J. Hydrometeorol.*, Vol. 20, 2019, pp. 124-1258, <https://doi.org/10.1175/jhm-d-18-0242.1>.
- [6] K. Lesinger, D. Tian, Trends, Variability, and Drivers of Flash Droughts in the Contiguous United States, *Water Resour. Res.*, Vol. 58, 2022, pp. e2022WR032186, <https://doi.org/10.1029/2022wr032186>.
- [7] M. Osman, B. F. Zaitchik, H. S. Badr, J. Otkin, Y. Zhong, D. Lorenz et al., Diagnostic Classification of Flash Drought Events Reveals Distinct Classes of Forcings and Impacts, *J. Hydrometeorol.*, Vol. 23, 2022, pp. 275-289, <https://doi.org/10.1175/jhm-d-21-0134.1>.
- [8] J. A. Otkin, M. C. Anderson, C. Hain, I. E. Mladenova, J. B. Basara, M. Svoboda, Examining Rapid Onset Drought Development Using the Thermal Infrared-Based Evaporative Stress Index,

- J. Hydrometeorol., Vol. 14, 2013, pp. 1057-1074, <https://doi.org/10.1175/jhm-d-12-0144.1>.
- [9] J. A. Otkin, M. C. Anderson, C. Hain, M. Svoboda, Examining the Relationship Between Drought Development and Rapid Changes in the Evaporative Stress Index, J. Hydrometeorol., Vol. 15, 2014, pp. 938-956, <https://doi.org/10.1175/jhm-d-13-0110.1>.
- [10] J. A. Otkin et al., Facilitating the Use of Drought Early Warning Information Through Interactions with Agricultural Stakeholders, Bull. Am. Meteorol. Soc., Vol. 96, 2015, pp. 1073-1078.
- [11] E. Hunt et al., Agricultural and Food Security Impacts from the 2010 Russia Flash Drought, Wea. Climate Extremes, Vol. 34, 2021, pp. 100383, <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100383>.
- [12] H. Nguyen, M. C. Wheeler, J. A. Otkin, T. Cowan, A. Frost, R. Stone, Using the Evaporative Stress Index to Monitor Flash Drought in Australia, Environ. Res. Lett., Vol. 14, 2019, pp. 064016, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2103>.
- [13] V. Sreeparvathy, V. V. Srinivas, A Bayesian Fuzzy Clustering Approach for Design of Precipitation Gauge Network Using Merged Remote Sensing and Ground-Based Precipitation Products, Water Resour. Res., Vol. 58, 2022, pp. e2021WR030612, <https://doi.org/10.1029/2021wr030612>.
- [14] X. Yuan, L. Wang, E. F. Wood, Anthropogenic Intensification of Southern African Flash Droughts as Exemplified by the 2015/16 Season, Bull. Am. Meteorol. Soc., Vol. 99, 2018, pp. 86-90.
- [15] Y. Wang, X. Yuan, Anthropogenic Speeding up of South China Flash Droughts as Exemplified by the 2019 Summer-Autumn Transition Season, Geophys. Res. Lett., Vol. 48, 2021, pp. e2020GL091901, <https://doi.org/10.1029/2020GL091901>.
- [16] T. Gerken, G. T. Bromley, B. L. Ruddell, S. Williams, P. C. Stoy, Convective Suppression Before and During the United States Northern Great Plains Flash Drought of 2017, Hydrol. Earth Syst. Sci., Vol. 22, 2018, pp. 4155-4163.
- [17] R. Singh, V. Mishra, Atmospheric and Land Drivers of Streamflow Flash Droughts in India, J. Geophys. Res. Atmos., Vol. 129, 2024, pp. e2023JD040257, <https://doi.org/10.1029/2023JD040257>.
- [18] Y. Wang, X. Yuan, Land-Atmosphere Coupling Speeds up Flash Drought Onset, Sci. Total Environ., Vol. 851, 2022, pp. 158109, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158109>.
- [19] C. Wang, C. Deser, J. Y. Yu, P. DiNezio, A. Clement, El Niño and Southern Oscillation (ENSO): A Review, in: Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific: Persistence and Loss in a Dynamic Environment, Springer, 2017, pp. 85-106.
- [20] X. Jiang, Á. F. Adames, D. Kim, E. D. Maloney, H. Lin, H. Kim, et al., Fifty Years of Research on the Madden - Julian Oscillation: Recent Progress, Challenges, and Perspectives, J. Geophys. Res. Atmos., Vol. 125, 2020, pp. e2019JD030911, <https://doi.org/10.1029/2019jd030911>.
- [21] A. Pachore, R. Remesan, J. Kuttippurath, Flash Drought Teleconnection with the Large-Scale Climate Drivers in the Homogeneous Rainfall Regions of India, Int. J. Climatol., Vol. 45, 2025, pp. e8711, <https://doi.org/10.1002/joc.8711>.
- [22] M. C. Anderson et al., An Intercomparison of Drought Indicators Based on Thermal Remote Sensing and NLDAS-2 Simulations with U. S. Drought Monitor Classifications, J. Hydrometeorol., Vol. 14, 2013, pp. 1035 - 1056.
- [23] M. Mozny et al., Use of a Soil Moisture Network for Drought Monitoring in the Czech Republic, Theor. Appl. Climatol., Vol. 107, 2012, pp. 99-111.
- [24] T. W. Ford, C. F. Labosier, Meteorological Conditions Associated with the Onset of Flash Drought in the Eastern United States, Agric. For. Meteorol., Vol. 247, 2017, pp. 414-423.
- [25] J. I. Christian et al., A Methodology for Flash Drought Identification: Application of Flash Drought Frequency Across the United States, J. Hydrometeorol., Vol. 20, 2019, pp. 833-846.
- [26] F. D. Noguera, S. M. V. Serrano, Characteristics and Trends of Flash Droughts in Spain, 1961 - 2018, Ann. N. Y. Acad. Sci., Vol. 1472, 2020, pp. 155 - 172.
- [27] K. C. Mo, D. P. Lettenmaier, Precipitation Deficit Flash Droughts over the United States, J. Hydrometeorol., Vol. 17, 2016, pp. 1169 - 1184, <https://doi.org/10.1175/jhm-d-15-0158.1>.
- [28] X. Yuan, L. Wang, P. Wu, P. Ji, J. Sheffield, M. Zhang, Anthropogenic Shift Towards Higher Risk of Flash Drought over China, Nat. Commun., Vol. 10, 2019, pp. 12692, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12692-7>.
- [29] Y. Zhang, Q. You, G. Mao, C. Chen, X. Li, J. Yu, Flash Drought Characteristics by Different Severities in Humid Subtropical Basins: A Case Study in the Gan River Basin, China, J. Climate, Vol. 34, 2021, pp. 7337-7357, <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0596.1>.
- [30] L. Chen, T. W. Ford, P. Yadav, The Role of Vegetation in Flash Drought Occurrence: A Sensitivity Study Using Community Earth System Model Version 2, J. Hydrometeorol., Vol. 22,

- 2021, pp. 845-857, <https://doi.org/10.1175/jhm-d-20-0214.1>.
- [31] L. Cheng, M. Hoerling, A. AghaKouchak, B. Livneh, X. W. Quan, J. Eischeid, How Has Human-Induced Climate Change Affected California Drought Risk?, *J. Climate*, Vol. 29, 2016, pp. 111-120, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0260.1>.
- [32] J. Sheffield, G. Goteti, F. Wen, E. F. Wood, A Simulated Soil Moisture-Based Drought Analysis for the United States, *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, 2004, pp. D24108, <https://doi.org/10.1029/2004JD005182>.
- [33] Y. Qing, S. Wang, B. C. Ancell, Z. L. Yang, More Rapid Intensification of Flash Droughts with Shorter Onset Timescales, Preprint, 2021, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-267288/v1>.
- [34] D. Q. Nguyen, J. Renwick, J. McGregor, Variations of Surface Temperature and Rainfall in Vietnam from 1971 to 2010, *Int. J. Climatol.*, Vol. 34, 2014, pp. 249-264, <https://doi.org/10.1002/joc.3684>.
- [35] P. T. T. Nga, P. T. Ha, V. T. Hang, Satellite-Based Regionalization of Solar Irradiation in Vietnam by K-Means Clustering, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, Vol. 60, 2021, pp. 391-402, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-20-0070.1>.
- [36] H. P. Thanh, L. Thi, H. Phan, A. H. Fink, R. V. D. Linden, T. P. Van, Heatwaves in Vietnam: Characteristics and Relationship with Large-Scale Climate Drivers, *Int. J. Climatol.*, Vol. 44, 2024, pp. 4725-4740, <https://doi.org/10.1002/joc.8606>.
- [37] J. I. Christian, J. B. Basara, E. D. Hunt, J. A. Otkin, J. C. Furtado, V. Mishra, X. Xiao, R. M. Randall, Global Distribution, Trends, and Drivers of Flash Drought Occurrence, *Nat. Commun.*, Vol. 12, 2021, pp. 1-11, <https://www.nature.com/articles/s41467-021-26692-z> (accessed on: August 15th, 2025).
- [38] T. Parker, A. Gallant, M. Hobbins, D. Hoffmann, Flash Drought in Australia and Its Relationship to Evaporative Demand, *Environ. Res. Lett.*, Vol. 16, 2021, pp. 064033.
- [39] J. Shah, V. Hari, O. Rakovec, Y. Markonis, L. Samaniego, V. Mishra, M. Hanel, C. Hinz, R. Kumar, Increasing Footprint of Climate Warming on Flash Drought Occurrence in Europe, *Environ. Res. Lett.*, Vol. 17, 2022, pp. 064017.
- [40] M. S. Saharwardi, W. U. Hassan, H. P. Dasari, Y. Abualnaja, I. Hoteit, Enhanced Flash Droughts in Recent Decades over the Arabian Peninsula, *J. Hydrol. Reg. Stud.*, Vol. 61, 2025, pp. 102696, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102696>.