

# THỬ NGHIỆM DỰ BÁO DÔNG SỬ DỤNG CHỈ SỐ KHÍ QUYỂN TỪ MÔ HÌNH WRF TẠI KHU VỰC ĐÔNG NAM TỈNH VĨNH LONG

Phạm Thanh Long, Võ Thị Nguyên, Lê Xuân Hòa, Ngô Hồ Hà My, Trần Đình Quốc  
Phân Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn, Môi trường và Biển

Ngày nhận bài: 8/10/2025; ngày chuyển phản biện: 9/10/2025; ngày chấp nhận đăng: 22/12/2025

**Tóm tắt:** Nghiên cứu này nhằm đánh giá khả năng nhận diện và dự báo dông tại khu vực Đông Nam tỉnh Vĩnh Long dựa trên các chỉ số bất ổn định đối lưu được tính từ trường khí tượng của mô hình WRF (Weather Research and Forecasting). Các chỉ số bao gồm năng lượng tiềm năng đối lưu sẵn có (CAPE), ức chế đối lưu (CIN), chỉ số K (KI), chỉ số Boyden và chỉ số Total Totals (Totalx). Dữ liệu được xây dựng từ sáu đợt mưa trong giai đoạn 2021-2023, kết hợp với quan trắc sét từ mạng ENTLN, trong đó cả sét trong mây và sét đánh xuống đất đều được sử dụng để phân loại thời điểm có dông và không dông. Nghiên cứu tiến hành xác định ngưỡng phù hợp cho từng chỉ số thông qua phân tích thống kê và thử nghiệm 100 giá trị ngưỡng cho mỗi chỉ số. Các chỉ tiêu đánh giá bao gồm xác suất phát hiện (POD), tỷ lệ báo động giả (FAR), chỉ số CSI, điểm kỹ năng Heidke (HSS) và đặc biệt là chỉ số TSS được dùng làm tiêu chí lựa chọn ngưỡng tối ưu. Sau đó, các ngưỡng được kiểm chứng bằng tập dữ liệu độc lập để đánh giá tính ổn định và khả năng tổng quát hóa. Kết quả cho thấy CAPE là chỉ số hiệu quả và ổn định nhất, đặc biệt tại các vùng Đông Bắc và Tây Bắc. Chỉ số Boyden thể hiện vai trò hỗ trợ, trong khi KI và Totalx kém hiệu quả hơn do tỷ lệ báo động giả cao. Khi kiểm chứng với dữ liệu độc lập, hầu hết các chỉ số giảm kỹ năng dự báo, phản ánh hạn chế của phương pháp sử dụng ngưỡng cố định. Nghiên cứu khẳng định cần kết hợp đa chỉ số và bổ sung các phương pháp hiện đại như hồi quy logistic hoặc mô hình học máy nhằm nâng cao tính ổn định và hiệu quả của hệ thống cảnh báo dông phục vụ dự báo nghiệp vụ.

**Từ khóa:** Mô hình WRF, dự báo dông, chỉ số bất ổn định đối lưu, Đông Nam tỉnh Vĩnh Long.

## 1. Mở đầu

Dông đi kèm với sét, mưa đá và lượng mưa cực lớn gây thiệt hại nặng nề về người và tài sản [1]. Các đám mây vũ tích được tạo ra theo chiều thẳng đứng được coi là các ổ dông, cơ chế nâng và sự bất ổn định của khí quyển đóng vai trò là các điều kiện cơ bản để hình thành chúng.

Thời gian tồn tại điển hình của một cơn dông khoảng 1-12 giờ và phạm vi không gian của nó chỉ vài km, khiến việc dự báo trở nên khó khăn [2], [3]. Trong nhiều thập kỷ, các thông số nhiệt động lực học được thiết kế để định lượng sự hình thành dông; các đặc điểm đối lưu và chỉ số của khối khí cho thấy tiềm năng dự báo dông [4], [5].

Dự báo dông là một trong những nhiệm vụ thách thức nhất do đặc điểm vật lý vốn phi tuyến tính của chúng [6]. Mô hình số (NWP) là một trong những phương pháp đã được sử dụng rộng rãi trên toàn thế giới. Hiện nay, phần lớn các dự báo khí tượng được thực hiện bằng cách sử dụng dữ liệu từ mô hình NWP kết hợp với các quan trắc có thể tiếp cận được [7]. Chỉ số dông thường được sử dụng để dự báo đối lưu trong nhiều thập kỷ. Khả năng dự báo các sự kiện dông của một mô hình cần được đánh giá và cải thiện bằng cách sử dụng các chỉ số dông thu được từ các tập dữ liệu mô hình và quan trắc [8].

Trong năm qua, nhiều "chỉ số" đánh giá định lượng độ ổn định tĩnh của tầng đối lưu đã được đề xuất sử dụng trong dự báo thời tiết [9]. Một số chỉ số này như chỉ số KI [10], chỉ số Total Totals (TT) [11], Năng lượng tiềm năng đối lưu (CAPE)

Tác giả liên hệ: Phạm Thanh Long

Email: longpham.sihymete@gmail.com

[12]. Nhiều nghiên cứu đã dự báo dông bằng cách sử dụng các chỉ số ổn định và đánh giá hiệu quả của chúng bằng cách sử dụng điểm kỹ năng. Hiệu quả của các điểm kỹ năng khác nhau trong việc dự đoán các sự kiện hiếm, đặc biệt là lốc xoáy và lũ quét, đã được kiểm tra thông qua việc phân tích các bảng nhị phân [13], [14].

Hiệu suất của các chỉ số nhiệt động lực học thay đổi đáng kể tùy theo từng khu vực; một chỉ số cùng với ngưỡng hiệu quả tại một vùng có thể không áp dụng cho vùng khác. Do vậy, nghiên cứu này đánh giá khả năng dự báo dông dựa trên một số chỉ số khí quyển khác nhau. Qua đó, cung cấp thêm những hiểu biết về đặc trưng của môi trường đối lưu - yếu tố quan trọng đối với sự hình thành và phát triển của dông. Để làm rõ đặc điểm hiệu suất của từng chỉ số và khả năng ứng dụng thực tiễn trong điều kiện cụ thể tại vùng nghiên cứu, nghiên cứu thực hiện hai nội dung chính sau: (1) Trực quan hóa các chỉ số khí quyển trong cả hai trường hợp có và không có dông nhằm đánh giá sơ bộ khả năng phân biệt dông của mô hình WRF; (2) Xác định ngưỡng của từng chỉ số khí quyển để dự báo dông hiệu quả nhất, dựa trên các thang điểm đánh giá như POD, FAR, TSS,... từ kết quả mô phỏng của mô hình WRF, đối chiếu với dữ liệu quan trắc sét từ Mạng lưới Phát hiện Sét Toàn cầu của Earth Networks (ENTLN), thuộc tập đoàn AEM.

## 2. Số liệu và phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Số liệu và phạm vi nghiên cứu

#### 2.1.1. Số liệu

Số liệu ban đầu hóa và số liệu điều kiện biên phụ thuộc thời gian được lấy từ dự báo của mô hình toàn cầu GFS cung cấp bởi Trung tâm Quốc gia Dự báo Môi trường (NCEP)/Hoa Kỳ với độ phân giải  $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$  kinh vĩ trong 6 đợt mưa khu vực nghiên cứu, gồm: đợt mưa ngày 3-9/10/2021, 11-18/11/2021, 11-19/07/2022, 18-23/10/2022, 18-28/09/2023 và 7-11/11/2023. Số liệu đầu ra từ mô hình dự báo toàn cầu GFS được dùng làm số liệu đầu vào cho mô hình WRF. Sau khi đã có dữ liệu điều kiện biên và điều kiện ban đầu từ mô hình GFS, mô hình WRF sẽ chi tiết hóa động lực các yếu tố khí tượng từ độ phân giải thô đến độ phân giải cao.

Dữ liệu sét (số lần sét, flash) bao gồm cả

tia sét trong mây (IG) và tia sét từ mây hướng xuống mặt đất (CG) được sử dụng trong nghiên cứu. Dữ liệu này được thu thập từ Mạng lưới Phát hiện Sét Toàn cầu của Earth Networks (ENTLN), thuộc tập đoàn AEM. Tập dữ liệu bao gồm toàn bộ các sự kiện sét xảy ra trong khu vực nghiên cứu trong giai đoạn ba năm (2021-2023), với độ phân giải  $0,05^{\circ}$ , phạm vi không gian từ vĩ độ  $9,38^{\circ}N$  đến  $10,22^{\circ}N$  và kinh độ  $105,15^{\circ}E$  đến  $106,63^{\circ}E$ .

#### 2.1.2. Phạm vi nghiên cứu

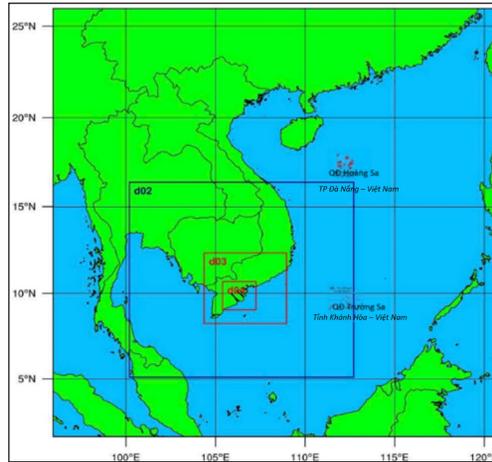
Phạm vi nghiên cứu là vùng phía Đông Nam tỉnh Vĩnh Long (tỉnh Trà Vinh cũ) với độ phân giải  $0,05^{\circ}$  tương ứng với 76 pixel (Màu vàng trong Hình 1). Việc chia khu vực này thành các vùng nhỏ và phân tích ngưỡng chỉ số khí quyển theo từng vùng không chỉ giúp tăng độ tin cậy thống kê mà còn mang lại khả năng nhận diện rõ ràng sự khác biệt trong mức độ nhạy cảm với dông giữa các khu vực. Qua phân tích, có thể thấy rõ vùng nào có ngưỡng chỉ số khí quyển thấp nhưng vẫn dễ xuất hiện dông, phản ánh tính nhạy cảm cao hơn của khu vực đó với các điều kiện bất ổn khí quyển. Đây cũng là cách tiếp cận phù hợp để xây dựng các bản đồ cảnh báo nguy cơ dông theo vùng, thể hiện trực quan mức độ rủi ro không gian. Phương pháp này giữ được đặc trưng địa lý, đồng thời khắc phục các hạn chế của dữ liệu phân tán theo pixel riêng lẻ, qua đó mang lại ngưỡng chỉ số khí quyển cảnh báo dông ổn định hơn so với chỉ sử dụng 1 trạm quan trắc Càng Long. Các vùng được định nghĩa tương đối đều nhau với 56 ô pixel; Vùng dự báo Tây Bắc được định nghĩa vĩ độ ( $9,80^{\circ}N$ ;  $10,10^{\circ}N$ ), kinh độ ( $105,94^{\circ}E$ ,  $106,28^{\circ}E$ ), Đông Bắc với vĩ độ ( $9,80^{\circ}N$ ,  $10,10^{\circ}N$ ), kinh độ ( $106,28^{\circ}E$ ,  $106,61^{\circ}E$ ), vùng Tây Nam với vĩ độ ( $9,52^{\circ}N$ ,  $9,80^{\circ}N$ ), kinh độ ( $105,94^{\circ}E$ ,  $106,28^{\circ}E$ ) và vùng Đông Nam, vĩ độ ( $9,52^{\circ}N$ ,  $9,80^{\circ}N$ ), kinh độ ( $106,28^{\circ}E$ ,  $106,61^{\circ}E$ ) (hình chữ nhật màu xanh trong Hình 2).

### 2.2. Thiết kế thí nghiệm

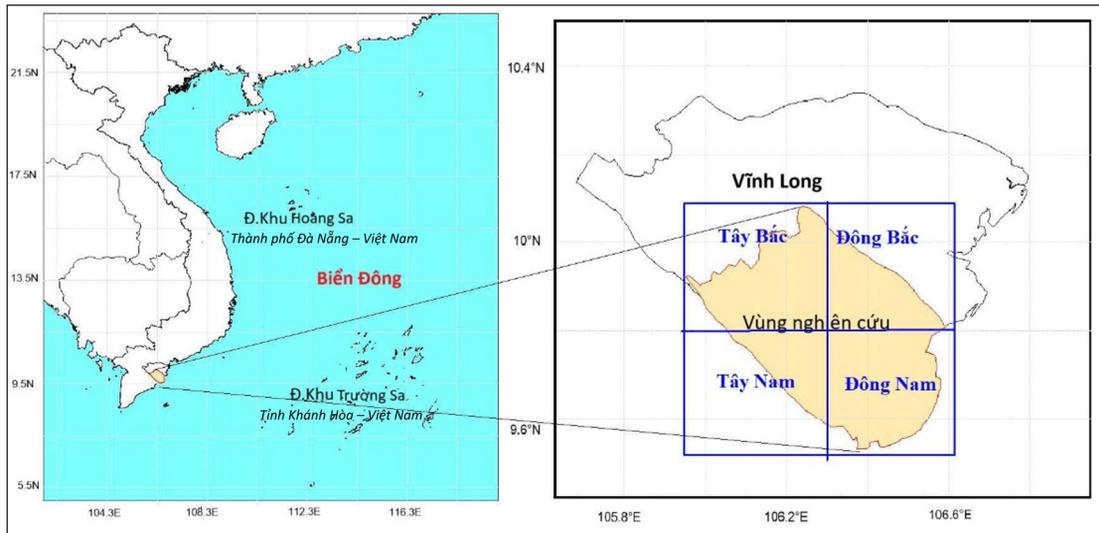
Mô hình WRF được thiết lập với bốn miền lưới lồng có độ phân giải lần lượt là 27 km, 9 km, 3 km và 1 km (từ d01 đến d04). Các sơ đồ vật lý được áp dụng thống nhất cho cả bốn miền bao gồm RRTMG cho bức xạ, YSU

cho lớp biên hành tinh, sơ đồ vi mô mây-giáng thủy New Thompson và sơ đồ bề mặt đất Noah; sơ đồ đối lưu Kain-Fritsch được sử dụng cho các miền có độ phân giải thô hơn. Ở hai miền ngoài d01 (27 km) và d02 (9 km), sơ đồ Kain-Fritsch được duy trì để mô phỏng các quá trình đối lưu quy mô vừa, phù hợp

với độ phân giải còn tương đối thô. Ngược lại, ở hai miền trong d03 (3 km) và d04 (1 km), sơ đồ đối lưu được tắt hoàn toàn, cho phép mô hình mô phỏng tương minh các hệ dông-mưa đối lưu thông qua động lực học lưới mịn và sơ đồ vi mô mây-giáng thủy (convection-permitting) [15], [16], [17].



Hình 1. Miền tính cho mô hình WRF



Hình 2. Phạm vi nghiên cứu (vùng màu vàng) và bốn hình chữ nhật màu xanh được định nghĩa vùng dự báo ở khu vực nghiên cứu

### 2.3. Phương pháp nghiên cứu

#### 2.3.1. Phương pháp về các chỉ số đối lưu

Chỉ số CAPE (J/kg)

CAPE (Convective Available Potential Energy) là năng lượng có sẵn cho sự phát triển của đối lưu trong khí quyển. CAPE lớn, đối lưu phát triển [12]. CAPE được tính:

$$CAPE = \int_{z_{LFC}}^{z_{EL}} g \frac{T_{vp}(z) - T_{ve}(z)}{T_{ve}(z)} dz \quad (1)$$

Trong đó:  $g$  là gia tốc trọng trường ( $9.81 \text{ m/s}^2$ );  $T_{vp}(z)$  là nhiệt độ ảo của khối khí tại độ cao  $z$ ;  $T_{ve}(z)$  là nhiệt độ ảo của môi trường tại độ cao  $z$ ;  $z_{LFC}$  là điểm tự do nâng lên;  $z_{EL}$  là điểm giới hạn.

Chỉ số CIN (J/kg)

CIN (Convective Inhibition) là năng lượng cản trở đối lưu. CIN âm hoặc bằng 0, hạn chế phát triển đối lưu [12]. CIN được tính:

$$CIN = \int_{z_{sfc}}^{z_{LFC}} g \frac{T_{vp}(z) - T_{ve}(z)}{T_{ve}(z)} dz \quad (2)$$

Trong đó  $z_{sfc}$  là độ cao mặt đất và các ký hiệu khác như CAPE.

Chỉ số KI (°C)

KI (K-Index) đánh giá khả năng hình thành mưa dông dựa trên nhiệt độ và độ ẩm ở các tầng thấp và trung bình của khí quyển [10]. Giá trị KI được tính:

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700}) \quad (3)$$

Trong đó:  $T$  và  $Td$  là nhiệt độ và điểm sương tại mực khí áp 850, 700 và 500 hPa.

Chỉ số TT (°C)

TT (Total Totals Index) đánh giá tổng hợp độ bất ổn trong khí quyển dựa trên nhiệt độ và độ ẩm, giúp dự báo sự phát triển dông [11].

$$TT = T_{850} + Td_{850} - 2 \times T_{500} \quad (4)$$

Trong đó:  $T$  và  $Td$  là nhiệt độ và điểm sương tại mực khí áp 850 và 500 hPa.

Chỉ số Boyden (m-°C)

Chỉ số Boyden (BI) không tính đến độ ẩm và mô tả cấu trúc nhiệt độ theo phương thẳng đứng trong lớp 1000-700 hPa. Chỉ số này được định nghĩa là hiệu giữa độ dày lớp 1000-700 hPa và nhiệt độ tại mực 700 hPa, sau đó trừ thêm 200 [18]:

$$BI = 0.1 \times (Z_{700} - Z_{1000}) - T_{700} - 200 \quad (5)$$

Trong đó:  $Z_{700}$  và  $Z_{1000}$  là độ cao địa thế vị tại mực 700 và 1000 hPa và  $T_{700}$  là nhiệt độ tại mực 700 hPa.

### 2.3.2. Phương pháp đánh giá

Trong nghiên cứu này, hiệu quả dự báo dông của các chỉ số khí tượng được đánh giá dựa trên ma trận dự báo nhị phân, phân chia các tình huống dự báo thành bốn loại:

Chỉ số POD (Probability of Detection): là xác suất phát hiện hiện tượng. POD có giá trị bằng 0 cho biết mô hình không dự báo được khi hiện tượng xảy ra. Nếu chỉ số POD mà bằng 1 có nghĩa là mô hình dự báo là hoàn hảo.

$$POD = \frac{A}{A + C} \quad (6)$$

Chỉ số FAR (False Alarm Ratio) là tỉ lệ dự báo khống của mô hình (dự báo có xảy ra trong khi quan trắc không xảy ra). FAR càng cao, độ tin cậy càng giảm; Nếu FAR bằng 0, nghĩa là tỷ lệ dự báo khống của mô hình là rất thấp, mô hình tốt.

$$FAR = \frac{C}{A + C} \quad (7)$$

Chỉ số TS/CSI (Threat Score/Critical Success Index) là chỉ số cho biết mức độ chính xác trong việc dự báo hiện tượng có xảy ra. TS có giá trị nằm trong khoảng từ 0 đến 1 với giá trị bằng 1 được coi là dự báo hoàn hảo.

$$CSI = \frac{A}{A + B + C} \quad (8)$$

Heidke Skill Score (HSS): HSS phản ánh mức độ cải thiện của dự báo so với dự đoán ngẫu nhiên. HSS=1,0, dự báo hoàn hảo; HSS=0,0, không tốt hơn ngẫu nhiên; HSS < 0, dự báo tệ hơn ngẫu nhiên.

$$HSS = \frac{2(AD - BC)}{(A + B)(B + D) + (A + C)(C + D)} \quad (9)$$

True Skill Statistic (TSS): TSS đo lường khả năng phân biệt đúng các trường hợp có và không có hiện tượng dông. Giá trị TSS dao động từ -1 đến 1. HSS=1,0, dự báo hoàn hảo; HSS=0,0, không có kỹ năng; HSS < 0, dự báo sai.

$$TSS = \frac{A}{(A + B)} - \frac{C}{(C + D)} \quad (10)$$

## 3. Kết quả nghiên cứu

Số liệu quan trắc dông (sét) tại Vĩnh Long hiện nay chủ yếu được ghi nhận từ trạm Càng Long, nằm ở khu vực Tây Bắc của tỉnh. Do dông là hiện tượng có tính cục bộ rất cao, phạm vi ảnh hưởng thường chỉ trong vài km<sup>2</sup>, nên số liệu từ một trạm chưa phản ánh đầy đủ hoặc đại diện

cho toàn bộ khu vực địa lý rộng toàn tỉnh. Do đó, việc sử dụng số liệu quan trắc đồng từ trạm Càng Long chỉ áp dụng cho khu vực Tây Bắc, các vùng còn lại sẽ sử dụng dữ liệu sét. Nghiên cứu sẽ sử dụng cả sét trong mây và sét tới đất, điều này có thể giải quyết được sai số khi có đồng có thể không có sét vì xuất hiện đồng thường có sét trong mây.

Thực tế, các đợt được lựa chọn để phân tích ngưỡng chỉ số trong nghiên cứu này đều là những đợt mưa đồng đã được xác nhận, nghĩa là điều kiện khí quyển trong các giai đoạn đó đều đã có sự bất ổn định nhất định và tiềm năng đối lưu rõ rệt. Tuy nhiên, không phải toàn bộ các giờ trong đợt mưa đồng đều xảy ra đồng (có sét). Đồng thường chỉ xuất hiện trong những khoảng thời gian và không gian nhất định trong đợt, xen kẽ với những khoảng tương đối ổn định hơn, hoặc chỉ có mưa mà không có sét. Mặc dù vậy, việc phân tích ngưỡng chỉ số khí quyển trong các đợt mưa đồng vẫn có ý nghĩa, vì nó cho phép tách biệt giữa các thời điểm “có đồng” và “không đồng”. Điều này giúp xác định được ngưỡng chỉ số khí quyển có khả năng xảy ra đồng. Ngoài ra, việc giới hạn phân tích trong các đợt mưa đồng giúp tập trung vào các tình huống có nguy cơ, tránh làm nhiễu kết quả bởi các giai đoạn thời tiết hoàn toàn ổn định. Tuy nhiên, cũng cần lưu ý rằng ngưỡng chỉ số khí quyển nên được hiểu là ngưỡng áp dụng trong điều kiện đã có bất ổn khí quyển tiềm ẩn.

Bốn đợt mưa được sử dụng để xác định ngưỡng hiệu quả của chỉ số đồng/chỉ số khí quyển trong dự báo đồng bao gồm các khoảng thời gian: 03-09/10/2021, 11-18/11/2021, 11-19/07/2022, và 18-23/10/2022. Hai đợt mưa khác, xảy ra trong thời gian 18-28/09/2023 và 07-11/11/2023, được sử dụng như tập dữ liệu độc lập để kiểm chứng. Do số lần mưa đồng tương đối ít, nên trong phân tích này, mỗi ô lưới (pixel) trong không gian 4 vùng vùng dự báo (tổng cộng 76 ô) được đánh nhãn là "có đồng" nếu sét được ghi nhận ít nhất một lần trong thời điểm đó. Sự đánh nhãn này cho từng giờ trong thời hạn dự báo 24 giờ của mô hình WRF. Trong bốn đợt số liệu phụ thuộc, số lần ghi nhận có sét được thống kê như sau: vùng Đông Bắc có 278 bản ghi, Tây Bắc 269, Tây Nam 298, và Đông Nam

140. Với hai đợt độc lập dùng để kiểm chứng, số lần có sét cao hơn đáng kể: Đông Bắc 361, Tây Bắc 447, Tây Nam 470 và Đông Nam 374.

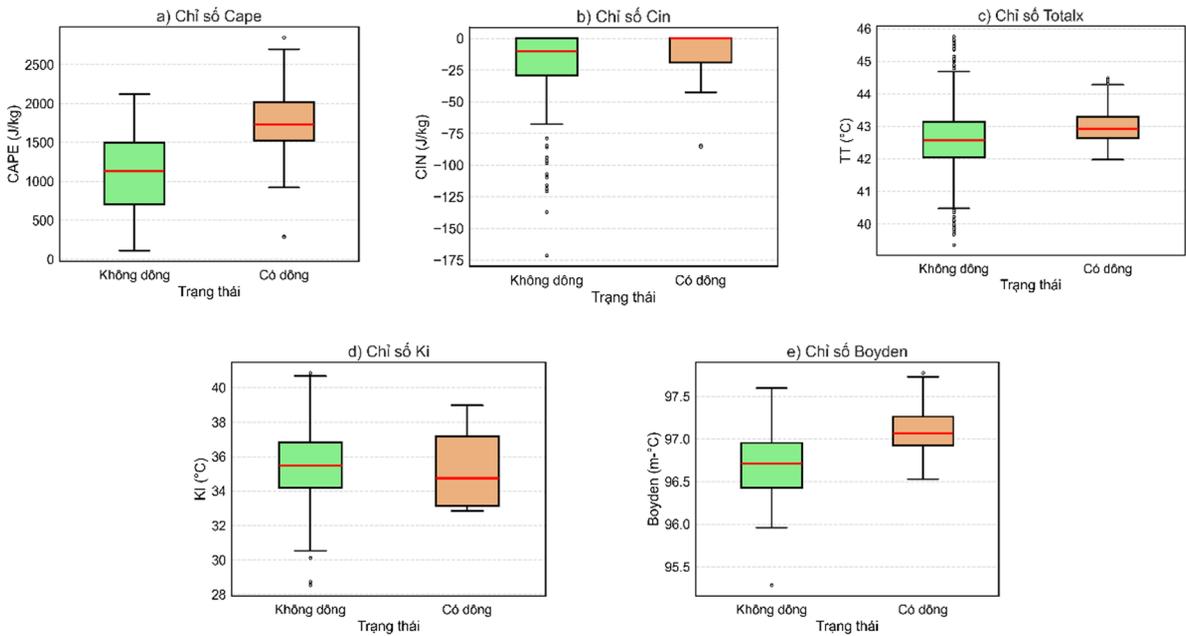
Do dữ liệu được ghi theo mức độ phân giải cao (theo giờ và theo ô lưới), nên khi tính tổng toàn bộ tập dữ liệu (gồm cả giờ không có sét), số lượng bản ghi không có đồng sẽ vượt trội so với bản ghi có đồng. Để giải quyết tình trạng mất cân bằng dữ liệu, nghiên cứu áp dụng phương pháp lọc ngẫu nhiên có kiểm soát (random undersampling), giữ lại toàn bộ bản ghi có đồng, đồng thời chọn ngẫu nhiên một tập con các bản ghi không đồng sao cho số lượng của chúng chỉ gấp đôi số bản ghi có đồng. Việc chọn mẫu ngẫu nhiên này giúp giảm sai lệch do mất cân bằng phân lớp và đảm bảo tính khách quan trong quá trình đánh giá. Sau khi cân bằng, tập dữ liệu được sử dụng để quét thử 100 giá trị ngưỡng khác nhau cho mỗi chỉ số khí quyển (CAPE, CIN, Totalx), với chỉ số kỹ năng TSS được dùng làm tiêu chí lựa chọn ngưỡng phù hợp cho từng chỉ số.

Để xác định ngưỡng chỉ số cho cảnh báo đồng dựa trên chỉ số, chúng tôi đã tính tần suất xuất hiện ngưỡng chỉ số liên quan đến sét, cụ thể: (1) Bước 1: Xác định ranh giới 4 vùng dự báo: Vùng Tây Bắc; Đông Bắc; Tây Nam và Đông Nam vùng nghiên cứu (đường màu xanh trong Hình 1); (2) Bước 2: Đồng nhất số liệu trên lưới ncdf về cùng độ phân giải là 0.05 độ như dữ liệu sét (Bao gồm cả IC và CG) (2) Bước 3: Gán các pixel vào mỗi vùng dự báo. Với mỗi pixel (lat, lon), xác định nó thuộc vùng nào và lưu thông tin vào vùng đó. (3) Bước 4: Gom chỉ số khí quyển và sét theo từng giờ cho mỗi vùng. Nếu ít nhất 1 pixel có sét, coi là có đồng trong vùng và giờ đó; (4) Bước 5: Vẽ các biểu đồ để xác định ngưỡng của chỉ số đối lưu; (5) Bước 6: Xác định các chỉ số POD, FAR,...TSS theo các ngưỡng khác nhau (100 ngưỡng khác nhau dựa trên min và max của chuỗi và tiêu chí TSS cao nhất) [19], [20]; Bước 6: Xây dựng phương trình hồi qui Logistic (Không dẫn ra trong bài báo này).

Hình 3, có thể thấy sự khác biệt giữa các chỉ số khí quyển tại các thời điểm có đồng và không đồng. Chỉ số CAPE (Hình 3a) trong các trường hợp có đồng cao hơn rõ rệt so với không đồng, với giá trị trung vị khoảng 1.700-2.000 J/kg so

với khoảng 1.000-1.200 J/kg khi không có dông. Điều này cho thấy CAPE là chỉ số quan trọng phản ánh mức năng lượng tiềm tàng cho đối lưu, có thể xem xét ngưỡng dự báo ban đầu khoảng 1.500 J/kg để nhận biết khả năng xảy ra dông. Chỉ số CIN (Hình 3b) thể hiện khả năng ức chế đối lưu, thường có giá trị âm. Trong các trường hợp có dông, CIN ít âm hơn (gần 0 hơn), trong khi không có dông, CIN âm sâu hơn, phản ánh ổn định hơn. Do đó, ngưỡng -15 J/kg có thể được sử dụng để phân biệt môi trường thuận

lợi cho đối lưu. Chỉ số Boyden (Hình 3e) cũng cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa hai nhóm, với trung vị cao hơn đáng kể trong các trường hợp có dông, gợi ý rằng Boyden > 97 (m-°C) có thể được xem là điều kiện thuận lợi cho dông. Các chỉ số Totalx (Hình 3c) và KI (Hình 3d) có xu hướng cao hơn khi có dông, nhưng sự khác biệt ít rõ ràng hơn và tồn tại nhiều giá trị ngoại lai, do đó cần cân nhắc kết hợp với các chỉ số mạnh hơn như CAPE và Boyden khi lựa chọn ngưỡng dự báo.



Hình 3. Các chỉ số khí quyển của vùng Đông Bắc cho trường hợp có và không có dông. Hộp màu từ phân vị 25th (Q1) đến 75th (Q3), và đường màu đỏ là trung vị. Đường kéo dài đến giá trị nhỏ và lớn nhất bằng với  $1,5 \times (Q3 - Q1)$ . Dấu cộng màu đen là giá trị ngoại lai

Hình 4, có thể thấy sự khác biệt của các chỉ số khí quyển giữa các thời điểm có dông và không có dông tại khu vực Tây Bắc. Chỉ số CAPE (Hình 4a) khi có dông cao hơn đáng kể so với khi không có dông, với giá trị trung vị khoảng 2.000 J/kg so với 1.000 J/kg. Điều này cho thấy CAPE là chỉ số năng lượng đối lưu quan trọng, và có thể xem xét ngưỡng 1.500 J/kg như một giá trị cảnh báo ban đầu cho môi trường tiềm năng dông. Chỉ số CIN là không rõ ràng giữa trường hợp có dông và không dông (Hình 4b). Chỉ số Boyden (Hình 4e) cũng cho thấy sự khác biệt giữa hai nhóm, với giá trị trung vị cao hơn khi có dông, gợi ý rằng

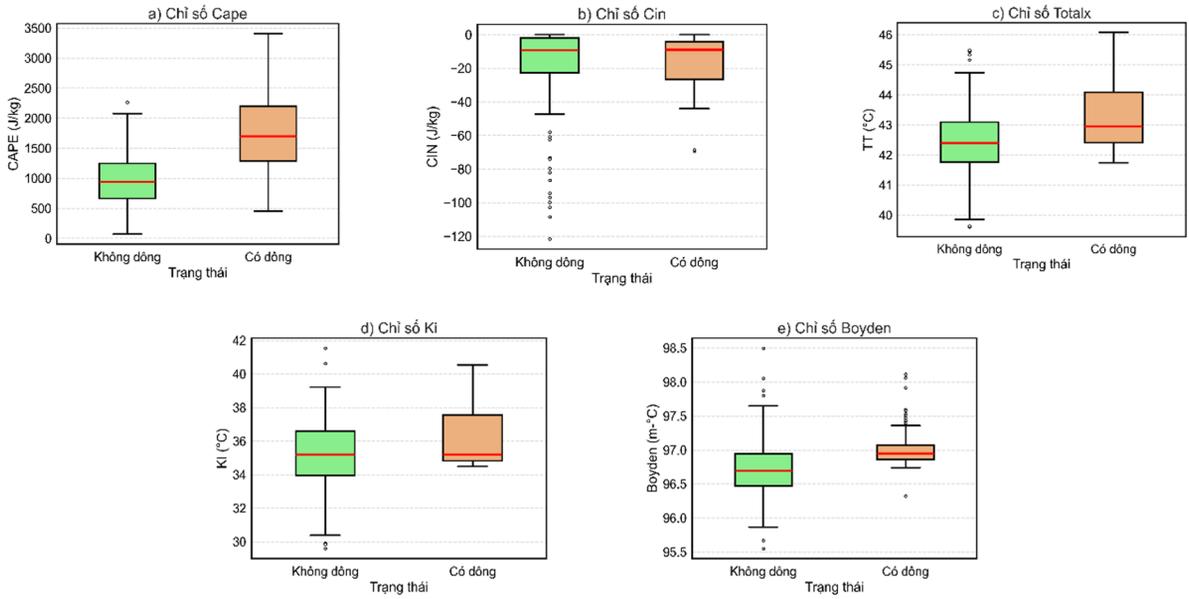
Boyden  $\geq 97$  (m-°C) có thể xem như một ngưỡng tiềm năng hỗ trợ nhận diện môi trường dễ phát sinh dông. Các chỉ số Totalx (Hình 4c) và KI (Hình 4d) cũng cao hơn khi có dông nhưng độ chênh lệch không lớn.

Hình 5, có thể thấy rõ sự khác biệt của các chỉ số khí quyển giữa các thời điểm có dông và không có dông tại khu vực Tây Nam. Chỉ số CAPE (Hình 5a) khi có dông có giá trị trung vị cao hơn đáng kể so với khi không có dông. Điều này gợi ý rằng ngưỡng CAPE khoảng 1.500-2.000 J/kg có thể được sử dụng như một giá trị cảnh báo ban đầu cho điều kiện thuận lợi phát triển đối lưu

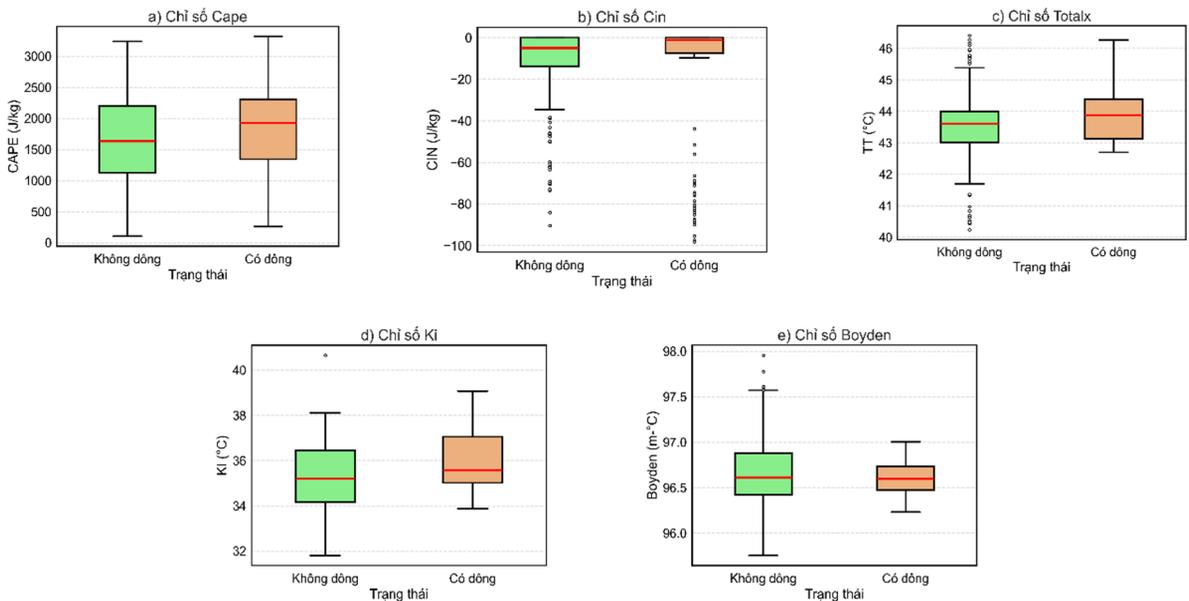
mạnh. Khi có dông, CIN ít âm hơn (gần 0 hơn) so với các thời điểm không dông, cho thấy sự ức chế yếu hơn. Ngưỡng CIN  $\geq -20$  J/kg tiếp tục là giá trị hợp lý để nhận diện môi trường dễ xảy ra đối lưu. Chỉ số KI (Hình 5d) và Totalx (Hình 5c) có xu hướng cao hơn trong trường hợp có dông, tuy nhiên sự chênh lệch giữa hai nhóm không lớn. Chỉ số Boyden (Hình 5e) có giá trị trung vị thấp hơn khi có dông so với khi không dông,

khác với các khu vực khác (Đông Bắc, Tây Bắc).

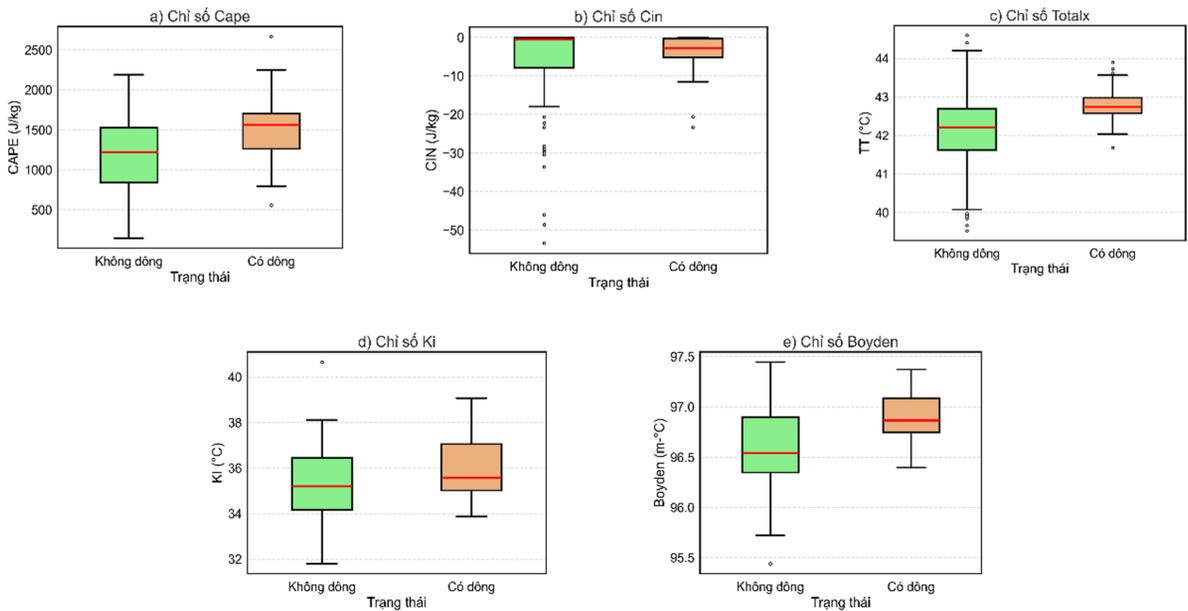
Tương tự, chỉ số CAPE (Hình 6a) gợi ý rằng ngưỡng CAPE  $\geq 1.500$  J/kg có thể là giá trị cảnh báo ban đầu cho khu vực này. Ngưỡng CIN  $\geq -15$  J/kg phù hợp để phân biệt môi trường thuận lợi cho dông. Chỉ số Boyden (Hình 6e)  $\geq 97$  (m $^{\circ}$ C) có thể xem như một giá trị ngưỡng hỗ trợ nhận diện môi trường thuận lợi cho dông tại khu vực Đông Nam.



Hình 4. Tương tự như hình 3 nhưng cho vùng dự báo Tây Bắc khu vực nghiên cứu



Hình 5. Tương tự như hình 3 nhưng cho vùng dự báo Tây Nam khu vực nghiên cứu



Hình 6. Tương tự như hình 3 nhưng cho vùng dự báo Đông Nam khu vực nghiên cứu

Bảng 1. Kiểm chứng ngưỡng phù hợp của chỉ số khí quyển cho dự báo dông trên 4 vùng định nghĩa dự báo trong khu vực nghiên cứu từ số liệu phụ thuộc

Vùng dự báo	Chỉ số	Ngưỡng hiệu quả	POD	FAR	CSI	TSS	HSS
Đông Bắc	CAPE	1.466,05	0,82	0,39	0,54	0,56	0,52
	CIN	-15,73	0,53	0,55	0,32	0,21	0,20
	Totalx	42,40	0,95	0,55	0,44	0,37	0,29
	KI	37,50	0,22	0,52	0,18	0,10	0,12
	Boyden	96,84	0,91	0,44	0,53	0,55	0,48
Tây Bắc	CAPE	1.182,33	0,84	0,38	0,55	0,58	0,53
	CIN	-18,46	1,00	0,65	0,35	0,05	0,03
	Totalx	42,22	0,94	0,55	0,44	0,37	0,29
	KI	34,42	1,00	0,56	0,44	0,36	0,27
	Boyden	96,77	0,98	0,46	0,53	0,56	0,46
Đông Nam	CAPE	1.444,45	0,63	0,49	0,39	0,33	0,31
	CIN	-11,32	0,93	0,63	0,36	0,15	0,11
	Totalx	42,60	0,75	0,45	0,46	0,44	0,40
	KI	34,93	0,80	0,59	0,37	0,21	0,17
	Boyden	96,66	0,83	0,48	0,46	0,44	0,38
Tây Nam	CAPE	1.528,73	0,70	0,59	0,35	0,19	0,16
	CIN	-14,96	0,70	0,58	0,36	0,22	0,19
	Totalx	44,10	0,43	0,48	0,30	0,23	0,24
	KI	34,90	0,89	0,58	0,40	0,27	0,21
	Boyden	96,53	0,70	0,63	0,32	0,12	0,10

Mỗi chỉ số được gán một ngưỡng phù hợp sao cho TSS đạt giá trị cao nhất, đây là tiêu chí chính để lựa chọn ngưỡng do đặc tính ổn định và ít mất cân bằng của chỉ số này [19], [20]. Quá trình xác định ngưỡng phù hợp cho từng chỉ số được thực hiện tự động thông qua quét 100 giá trị ngưỡng khác nhau (từ nhỏ nhất đến lớn nhất trong tập dữ liệu) của các chỉ số đối lưu để xác định các chỉ số đánh giá. Với mỗi ngưỡng, nhãn dự báo (dông hoặc không dông) được tạo ra bằng cách so sánh giá trị chỉ số với ngưỡng đó, riêng chỉ số CIN, do bản chất là đại lượng âm, nên ngưỡng được áp dụng theo điều kiện ngược lại. Dự báo tại từng ngưỡng được đánh giá bằng các điểm kỹ năng như POD, FAR, CSI,

TSS và HSS. Ngưỡng của chỉ số đối lưu cho TSS lớn nhất sẽ được chọn làm ngưỡng phù hợp cho chỉ số đó. Kết quả đưa ra ở Bảng 1 cho thấy CAPE là chỉ số ổn định và hiệu quả, với TSS dao động từ 0,33 đến 0,58, nổi trội tại khu vực Đông Bắc và Tây Bắc. Chỉ số Boyden cũng cho kết quả đáng tin cậy tại phần lớn khu vực, ngoại trừ Tây Nam, nơi mà mối quan hệ giữa Boyden và dông có xu hướng ngược chiều. Các chỉ số như KI và Totalx cho kết quả không ổn định và hiệu suất thấp hơn (TSS từ 0,10-0,44), trong khi CIN có tỷ lệ phát hiện cao (POD = 1,0) nhưng đồng thời cho TSS rất thấp, phản ánh khả năng báo động giả cao và giá trị phân biệt tương đối thấp.

Bảng 2. Kiểm chứng ngưỡng phù hợp của chỉ số khí quyển cho dự báo dông trên 4 vùng định nghĩa dự báo trong khu vực nghiên cứu từ số liệu độc lập

Vùng dự báo	Chỉ số	Ngưỡng hiệu quả	POD	FAR	CSI	TSS	HSS
Đông Bắc	CAPE	1.466,05	0,62	0,49	0,39	0,32	0,31
	CIN	-15,73	0,55	0,60	0,33	0,27	0,29
	Totalx	42,40	0,83	0,59	0,38	0,24	0,19
	KI	37,50	0,12	0,48	0,11	0,07	0,08
	Boyden	96,84	0,60	0,55	0,35	0,29	0,48
Tây Bắc	CAPE	1.182,33	0,50	0,52	0,33	0,23	0,23
	CIN	-18,46	0,46	0,60	0,27	0,11	0,10
	Totalx	42,22	0,86	0,59	0,38	0,23	0,18
	KI	34,42	0,10	0,65	0,08	0,01	0,01
	Boyden	96,77	0,53	0,47	0,34	0,25	0,24
Đông Nam	CAPE	1.444,45	0,65	0,40	0,45	0,43	0,43
	CIN	-11,32	0,56	0,56	0,38	0,35	0,34
	Totalx	42,60	0,50	0,71	0,22	-0,13	-0,11
	KI	34,93	0,03	0,86	0,03	-0,07	-0,09
	Boyden	96,66	0,63	0,48	0,47	0,42	0,35
Tây Nam	CAPE	1.528,73	0,62	0,36	0,46	0,44	0,44
	CIN	-14,96	0,53	0,49	0,35	0,26	0,26
	Totalx	44,10	0,73	0,61	0,34	0,11	0,09
	KI	34,90	0,02	0,94	0,01	-0,11	-0,14
	Boyden	96,53	0,50	0,55	0,40	0,21	0,15

Khi áp dụng các ngưỡng phù hợp trên dữ liệu độc lập (Bảng 2), TSS của hầu hết các chỉ số đều giảm rõ rệt, nhiều trường hợp chỉ còn 0,2-0,3, thậm chí một số chỉ số như KI có TSS < 0 hoặc

gần bằng 0. Điều này cho thấy tính ổn định và khả năng tổng quát hóa của một số chỉ số riêng lẻ còn hạn chế. CAPE vẫn giữ được vai trò chỉ số chính với TSS cao nhất ở hầu hết các vùng

(0,32-0,46), trong khi Boyden đóng vai trò hỗ trợ nhưng giá trị TSS giảm xuống khoảng 0,21-0,42. Các chỉ số CIN và Totalx mặc dù có POD cao nhưng FAR lớn, dẫn đến TSS và CSI không cao, làm giảm hiệu quả khi áp dụng độc lập. So sánh hai bảng cũng cho thấy sự khác biệt vùng miền: ngưỡng CAPE và Boyden tại Đông Nam và Tây Nam ổn định hơn so với Đông Bắc và Tây Bắc, thể hiện qua việc TSS trên dữ liệu độc lập giảm ít hơn. Điều này gợi ý rằng việc hiệu quả ngưỡng dự báo cần thực hiện riêng cho từng khu vực và cần được đánh giá lại thường xuyên trên tập dữ liệu độc lập để tránh hiện tượng quá khớp (overfitting).

#### 4. Kết luận

Trên cơ sở 6 đợt mưa lớn từ năm 2021-2023, kết quả nghiên cứu cho thấy các chỉ số bất ổn định đối lưu như CAPE, CIN, Boyden, KI và Totalx đều có giá trị nhất định trong nhận diện môi trường thuận lợi cho dông. Trong đó, CAPE thể hiện tính ổn định và khả năng phân biệt cao

nhất, còn Boyden đóng vai trò hỗ trợ. Tuy nhiên, khi áp dụng các ngưỡng xác định từ tập dữ liệu phụ thuộc sang tập dữ liệu độc lập, các chỉ số kỹ năng như TSS và CSI đều giảm đáng kể, phản ánh hạn chế của việc sử dụng ngưỡng cố định theo thời gian và không gian, cũng như khó khăn khi dự báo dựa trên một chỉ số đơn lẻ.

Do đó, nghiên cứu khẳng định sự cần thiết phải kết hợp nhiều chỉ số để mô tả đầy đủ hơn đặc trưng bất ổn khí quyển và nâng cao hiệu quả dự báo. Các ngưỡng cần được đánh giá và hiệu chỉnh định kỳ, có xét đến biến thiên theo mùa và theo khu vực.

Trong thời gian tới, hướng phát triển sẽ tập trung vào:

(1) xây dựng và thử nghiệm các mô hình thống kê hoặc mô hình học máy đa biến nhằm tích hợp thông tin từ nhiều chỉ số bất ổn định;

(2) tăng cường kiểm chứng ngưỡng và mô hình trên các tập dữ liệu độc lập có thời gian dài hơn để cải thiện độ tin cậy và khả năng tổng quát hóa.

**Đóng góp của từng tác giả trong bài báo:** Tác giả Phạm Thanh Long đã đề xuất ý tưởng nghiên cứu, định hướng nội dung, chuyên môn và tham gia phân tích kết quả. Tác giả Võ Thị Nguyên, tác giả Trần Đình Quốc chịu trách nhiệm thu thập, xử lý số liệu dông. Tác giả Võ Thị Nguyên, tác giả Lê Xuân Hòa và tác giả Ngô Hồ Hà My viết bản thảo bài báo. Tất cả các tác giả đã cùng trao đổi, thảo luận và thống nhất phê duyệt bản thảo cuối cùng.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ nhiệm vụ “Nghiên cứu thiết lập hệ thống cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn trên nền tảng công nghệ số cho tỉnh Trà Vinh”. Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn đơn vị chủ trì, các cộng tác viên và các tổ chức liên quan đã hỗ trợ cung cấp số liệu, đóng góp ý kiến chuyên môn và tạo điều kiện thuận lợi trong suốt quá trình thực hiện nghiên cứu.

**Lời cam đoan:** Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] Y. Yair, B. Lynn, Z. Ben-Zion, and M. Yaffe, “Lightning super-bolts in Eastern Mediterranean winter thunderstorms,” in *Proceedings of the EGU General Assembly*, Vienna, Austria, 2020.
- [2] M. Kunz, “The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 7, no. 2, pp. 327-342, 2007, doi: 10.5194/nhess-7-327-2007.
- [3] Y. Das, “Some aspects of thunderstorm over India during pre-monsoon season: A preliminary report-I,” *Journal of Geosciences and Geomatics*, vol. 3, no. 3, pp. 68-78, 2015.
- [4] S. Bandyopadhyay and M. Mohapatra, “Determination of suitable thermodynamic indices and prediction of thunderstorm events for Eastern India,” *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 135, no. 1, pp. 1-13, 2023, doi: 10.1007/s00703-022-00942-1.

- [5] S. Bandyopadhyay, M. Mohapatra, and S. Sen Roy, "Determination of suitable thermodynamic indices and prediction of thunderstorm events for Kolkata, India," *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 133, no. 4, pp. 1367-1377, 2021, doi: 10.1007/s00703-021-00813-1.
- [6] A. J. Litta and U. C. Mohanty, "Simulation of a severe thunderstorm event during the field experiment of STORM programme 2006, using WRF-NMM model," *Current Science*, vol. 95, no. 2, pp. 204-215, 2008.
- [7] B. A. Choudhury et al., "A diagnostic study of cloud physics and lightning flash rates in a severe pre-monsoon thunderstorm over northeast India," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, no. 729, pp. 1901-1922, 2020, doi: 10.1002/qj.3773.
- [8] S. Tajbakhsh, P. Ghafarian, and F. Sahraian, "Instability indices and forecasting thunderstorms: The case of 30 April 2009," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 12, no. 2, pp. 403-413, 2012, doi: 10.5194/nhess-12-403-2012.
- [9] J. G. Powers et al., "The Weather Research and Forecasting Model: Overview, system efforts, and future directions," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98, no. 8, pp. 1717-1737, 2017, doi: 10.1175/BAMS-D-15-00308.1.
- [10] J. J. George, *Weather Forecasting for Aeronautics*. New York, NY, USA: Academic Press, 1960.
- [11] R. C. Miller, *Notes on Analysis and Severe-Storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Weather Central*. Scott Air Force Base, IL, USA: Air Weather Service, 1972.
- [12] M. W. Moncrieff and M. J. Miller, "The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 102, no. 432, pp. 373-394, 1976, doi: 10.1002/qj.49710243208.
- [13] R. K. Sahu, J. Dadich, B. Tyagi, N. K. Vissa, and J. Singh, "Evaluating the impact of climate change in threshold values of thermodynamic indices during pre-monsoon thunderstorm season over Eastern India," *Natural Hazards*, vol. 102, no. 3, pp. 1541-1569, 2020, doi: 10.1007/s11069-020-03978-x.
- [14] M. Y. Kulikov et al., "Skills of thunderstorm prediction by convective indices over a metropolitan area: Comparison of microwave and radiosonde data," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 4, Art. no. 604, 2020, doi: 10.3390/rs12040604.
- [15] A. F. Prein et al., "A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges," *Reviews of Geophysics*, vol. 53, no. 2, pp. 323-361, 2015, doi: 10.1002/2014RG000475.
- [16] Y. Miao and Y. Yang, "A modeling study of the severe afternoon thunderstorm event at Taipei on 14 June 2015: The roles of sea breeze, microphysics, and terrain," *Journal of the Meteorological Society of Japan*, vol. 98, no. 2, pp. 267-287, 2020, doi: 10.2151/jmsj.2020-008.
- [17] S. Vani, B. H. Lynn, A. Khain, and S. B. Goldenberg, "Evaluation and usefulness of lightning forecasts made with lightning parameterization schemes coupled with the WRF model," *Weather and Forecasting*, vol. 37, no. 5, pp. 795-815, 2022, doi: 10.1175/WAF-D-21-0080.1.
- [18] C. J. Boyden, "A simple instability index for use as a synoptic parameter," *Meteorological Magazine*, vol. 92, pp. 198-210, 1963.
- [19] R. J. Gottlieb and M. W. Wysocki, "Analysis of stability indices for severe thunderstorms in the Northeastern United States," Honors Thesis, College of Agriculture and Life Sciences, Cornell University, 2009. [Online]. Available: <https://ecommons.cornell.edu/bitstreams/db11ee57-3750-4739-98be-faafc6b3d2de/download>.
- [20] W. You, Z. Zang, X. Pan, L. Zhang, and Y. Li, "Statistical analysis of thunderstorms on the eastern Tibetan Plateau based on modified thunderstorm indices," *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 32, pp. 515-527, 2015, doi: 10.1007/s00376-014-4039-x.

# THUNDERSTORM FORECASTING USING WRF-DERIVED ATMOSPHERIC STABILITY INDICES IN SOUTHEASTERN VINH LONG PROVINCE

Pham Thanh Long, Vo Thi Nguyen, Le Xuan Hoa, Ngo Ho Ha My, Tran Dinh Quoc  
*Sub-Institute of Meteorology, Hydrology, Environment and Marine Sciences*

*Received: 8/10/2025; Accepted: 22/12/2025*

**Abstract:** *This study aims to evaluate the capability of identifying and forecasting thunderstorms in the Southeastern region of Vinh Long Province based on atmospheric stability indices derived from the Weather Research and Forecasting (WRF) model outputs. The analyzed indices include Convective Available Potential Energy (CAPE), Convective Inhibition (CIN), the K Index (KI), the Boyden Index, and the Total Totals Index (TT). The dataset comprises six rainfall events during the period 2021-2023, integrated with lightning observations from the ENTLN network, in which both intracloud (IC) and cloud-to-ground (CG) lightning flashes were utilized to distinguish between thunderstorm and non-thunderstorm conditions. The study determines suitable thresholds for each index through statistical analysis and testing of 100 candidate thresholds per index. Evaluation metrics include the Probability of Detection (POD), False Alarm Ratio (FAR), Critical Success Index (CSI), Heidke Skill Score (HSS), and particularly the True Skill Statistic (TSS), which is employed as the primary criterion for selecting optimal thresholds. These thresholds were subsequently cross-validated using an independent dataset to assess their stability and generalization capability. The results indicate that CAPE is the most effective and stable index, especially in the Northeastern and Northwestern sub-regions. The Boyden Index provides additional predictive skill, whereas the KI and TT perform less effectively due to high false-alarm rates. When evaluated with independent data, most indices exhibit reduced forecast skill, highlighting the limitations of using fixed thresholds approaches for convective forecasting.*

*The study emphasizes the need to combine multiple indices and incorporate modern approaches such as logistic regression or machine-learning models to enhance the stability and effectiveness of thunderstorm warning systems for operational forecasting.*

**Keywords:** *WRF model, thunderstorm forecasting, convective instability indices, Southeastern Vinh Long Province.*