



Original Article

Analyze Rainfall Distribution During Tropical Cyclones in Vietnam Using TRMM 3B42 Satellite Data

Vu Thanh Hang^{1,*}, Nguyen Ngoc Nghia², Pham Thanh Ha¹, Pham Thi Thanh Nga³

¹VNU Hanoi University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

²935th Air Regiment, 370th Division, Air Defense – Air Force Service,
Bien Hoa Airport, Dong Nai, Vietnam

³Vietnam Institute of Meteorology, Hydrology and Climate Change,
23 Nguyen Chi Thanh, Lang, Hanoi, Vietnam

Received 25th August 2025

Revised 15th October 2025; Accepted 30th October 2025

Abstract: In this study, the information of 63 tropical cyclones (TCs) landfalling in Vietnam during 2000 and 2019 is collected to investigate the spatial and temporal distribution of TC-induced rainfall in relation to ENSO phases and landfall directions. The results indicate that ENSO exhibits distinct influences at different stages of the TC lifecycle: the La Niña phase is associated with increased rainfall over a broad area before landfall, whereas the El Niño phase is linked to the peak rainfall intensity occurring at the time of landfall, followed by a rapid decline. Asymmetric TC-induced rainfall structures are more evident during El Niño phase, while in La Niña phase, they typically exhibit more spatially uniform and widespread rainfall distribution. Landfall direction also indicates significant differences in TC-induced rainfall characteristics. TCs landfalling from the southwest tends to produce more intense and localizes peak rainfall near the TC center, which rapidly weakens after landfall. In contrast, TCs landfalling from the west and northwest generate broader rainfall areas with longer post-landfall persistence. Overall, landfall direction makes a greater influence on the structural variation of TC-induced rainfall than the ENSO phases.

Keywords: TC-induced rainfall; Tropical cyclones landfalling in Vietnam; TRMM 3B42; ENSO.

* Corresponding author.

E-mail address: hangvt@vnu.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5395>

Đặc điểm phân bố mưa phân tích từ số liệu vệ tinh TRMM 3B42 trong các trường hợp bão đổ bộ vào Việt Nam

Vũ Thanh Hằng^{1,*}, Nguyễn Ngọc Nghĩa², Phạm Thanh Hà¹, Phạm Thị Thanh Nga³

¹*Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,
334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam*

²*Trung đoàn Không quân 935, Sư đoàn 370, Quân chủng Phòng không – Không quân,
Sân bay Biên Hoà, Đồng Nai, Việt Nam*

³*Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu,
23 Nguyễn Chí Thanh, Láng, 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: Trong nghiên cứu này, thông tin của 63 cơn bão đổ bộ vào Việt Nam trong giai đoạn từ năm 2000 đến 2019 được thu thập để nghiên cứu phân bố không gian và thời gian của mưa bão trong mối liên hệ với pha ENSO và các hướng đổ bộ. Kết quả cho thấy ENSO tác động khác biệt theo từng giai đoạn tiến trình của bão: pha La Niña làm gia tăng lượng mưa trên phạm vi rộng trước khi bão đổ bộ, trong khi pha El Niño gắn liền với sự tập trung cực đại mưa ngay tại thời điểm bão đổ bộ nhưng nhanh chóng suy giảm sau đó. Bên cạnh đó, cấu trúc mưa bất đối xứng được thể hiện rõ rệt trong pha El Niño, trong khi pha La Niña thường có sự phân bố mưa đồng đều và rộng hơn. Ngoài ảnh hưởng của ENSO, hướng đổ bộ cũng tạo ra sự khác biệt đáng kể: bão hướng Tây Nam thường gây mưa cực đại lớn hơn và tập trung hơn trong phạm vi hẹp gần tâm bão, nhưng nhanh chóng suy yếu sau khi vào đất liền; ngược lại, các trường hợp bão đổ bộ theo hướng Tây và Tây Bắc có vùng mưa lớn phân bố rộng hơn, duy trì lâu hơn sau khi bão đổ. Hướng đổ bộ của bão ảnh hưởng nhiều hơn đến sự thay đổi cấu trúc trường mưa do bão so với pha ENSO.

Từ khóa: Mưa do bão; Bão đổ bộ Việt Nam; Số liệu mưa vệ tinh TRMM 3B42; ENSO

1. Mở đầu

Bão là một trong những loại hình thiên tai gây nên những đợt mưa lớn diện rộng kéo dài, cùng với đó là lũ lụt, lũ quét, sạt lở đất làm thiệt hại nặng nề về tài sản, phá hủy môi trường tự nhiên cũng như tính mạng con người. Năm 1997, Cơ quan Hàng không và Vũ trụ Quốc gia Hoa Kỳ (NASA) đã phóng một vệ tinh quỹ đạo thấp đặc biệt với mục đích thực hiện Nhiệm vụ đo mưa nhiệt đới (TRMM) sử dụng cảm biến vi

sóng chủ động và bị động. Số liệu TRMM đã mở ra một cuộc cách mạng trong nghiên cứu bão ở tất cả các giai đoạn phát triển, cho phép đo lường mưa tốt hơn ở khu vực nhiệt đới và cận nhiệt đới, nơi có hoạt động mạnh mẽ của các cơn bão và gần như không có số liệu đo đạc trực tiếp. Cho đến nay, hiểu biết về cấu trúc mưa bão ở các giai đoạn khác nhau cũng như nâng cao chất lượng dự báo mưa trong điều kiện có bão vẫn đang là thách thức đối với các nhà khoa học cũng như các dự báo viên.

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: hangvt@vnu.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5395>

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng cấu trúc mưa trong bão rất phức tạp và rất khác nhau trong từng trường hợp [1, 2]. Các phân tích từ ảnh radar cho thấy mưa bão thường được tổ chức thành những dải xoắn hướng vào tâm bão [3], vùng mưa lớn thường tập trung ở xung quanh khu vực mắt bão [4]. Phân bố theo không gian của mưa bão được xem như là một chuỗi các giá trị trung bình theo hình vành khuyên bao gồm một thành phần trung bình phương vị (phần đối xứng trục) và một thành phần nhiễu (phần bất đối xứng). Trong một nghiên cứu của [5] đã xây dựng profile theo hướng bán kính của mưa cho 21 cơn bão ở vùng đông và tây Thái Bình Dương sử dụng quan trắc ảnh vi sóng thụ động vệ tinh chỉ ra rằng bán kính mưa cực đại giảm khi cường độ bão tăng lên. [6] đã sử dụng sản phẩm mưa vệ tinh TRMM từ năm 1998 đến 2000 để nghiên cứu phân bố mưa bão ở các vùng đại dương nhiệt đới. Kết quả cho thấy cường độ mưa trung bình theo hướng phân vị thay đổi thay đổi theo cường độ bão cũng như các vùng đại dương khác nhau. Bán kính tính từ tâm bão của vùng mưa cực đại giảm khi cường độ bão tăng lên. Tương tự, thành phần bất đối xứng của mưa bão cũng biến đổi đáng kể theo cường độ bão và khu vực địa lý. Tính trung bình cho tất cả các trường hợp thì vùng mưa cực đại có vị trí ở góc phần tư phía trước, tuy nhiên lệch trái hoặc phải tùy thuộc vào cường độ bão. [7] đã sử dụng số liệu TRMM và chỉ ra rằng ảnh hưởng của độ đứt gió thẳng đứng và chuyển động của cơn bão sẽ ảnh hưởng đến sự bất đối xứng của trường mưa bão. Khi độ đứt gió lớn hơn 5 m/s thì nó sẽ đóng vai trò quyết định tính bất đối xứng của phân bố mưa bão, tuy nhiên trong môi trường có độ đứt gió yếu thì tốc độ chuyển động của bão sẽ là yếu tố quan trọng hơn. Các đặc tính địa hình như đường bờ biển và núi cũng là các nhân tố ảnh hưởng đến sự phân bố bất đối xứng của trường mưa đặc biệt vào thời điểm bão đổ bộ [8]. Bên cạnh đó, cường độ mưa trong bão không chỉ phụ thuộc vào cường độ của bão khi đổ bộ, mà còn phụ thuộc vào nhiều tương tác phức tạp khác. Phân bố mưa khi bão đổ bộ ngoài phụ thuộc vào chuyển động của chính cơn bão còn phụ thuộc đáng kể vào khu vực hoạt động, hình thái đối lưu và các yếu tố môi trường

khác. Ngoài ra, sự cung cấp ẩm và đặc tính của bề mặt bên dưới cũng có ảnh hưởng đáng kể đến sự phân bố mưa vì độ ẩm không những giúp duy trì cường độ bão mà còn là điều kiện quan trọng để gây ra mưa lớn [9]. Ngoài các nghiên cứu về đặc điểm phân bố mưa bão như trên, số liệu mưa vệ tinh còn được sử dụng để thiết lập mô hình quán tính và thống kê khí hậu cho lượng mưa như mô hình R-CLIPER [10]. Đây là một trong những công cụ hữu ích được sử dụng tại các trung tâm dự báo nghiệp vụ để dự báo mưa do bão. Mô hình R-CLIPER nghiệp vụ sử dụng phân bố theo hướng bán kính của lượng mưa bão trung bình theo hướng phương vị thu được từ số liệu vệ tinh để xây dựng các vùng mưa bão như là một hàm của cường độ bão [11]. Việc cải thiện kỹ thuật dự báo mưa theo phương pháp thống kê phụ thuộc nhiều vào ước lượng mưa từ vệ tinh và đặc điểm khí hậu khu vực của mưa do bão. Do vậy, việc đánh giá chất lượng mưa vệ tinh so với quan trắc mặt đất cũng là một vấn đề được quan tâm nhiều trước khi khai thác nguồn số liệu hữu ích này.

Ở Việt Nam, số liệu mưa vệ tinh TRMM cũng được đánh giá và khai thác với nhiều mục đích nghiên cứu khác nhau. [12] đã đánh giá 3 bộ sản phẩm mưa vệ tinh là CMORPH, TRMM và GSMaP so với số liệu mưa lưới ở Việt Nam (VnGP) cho khu vực Trung Bộ trong thời kỳ mùa mưa từ năm 2001 đến 2010. Kết quả nghiên cứu thể hiện TRMM có tương quan cao hơn, bias nhỏ hơn, và sai số bình phương trung bình quân phương RMSE cũng nhỏ hơn so với số liệu GSMaP và CMORPH ở khu vực Tây Nguyên với qui mô thời gian tháng. Thêm nữa, số liệu TRMM cũng cho kết quả tốt hơn 2 bộ số liệu vệ tinh còn lại ở các ngưỡng mưa từ 25 đến 80 mm/ngày. Nhóm tác giả [13] đã đánh giá ước lượng mưa vệ tinh TRMM và GSMaP trong các trường hợp có bão cho khu vực lục địa Việt Nam trong giai đoạn 2000–2019. Kết quả nghiên cứu cho thấy phân bố mưa bão theo hướng bán kính của cả 2 bộ số liệu mưa vệ tinh khá phù hợp với quan trắc, tập trung chủ yếu trong phạm vi bán kính 500 km tính từ tâm bão, trong đó cực đại mưa xuất hiện ở khoảng bán kính 100 km. Ước lượng mưa vệ tinh thường thiên thấp ở những

khoảng cách xảy ra mưa cực đại trong phạm vi bán kính 100 km nhưng lại thiên cao ở những khoảng cách lớn cách xa tâm bão so với giá trị mưa quan trắc. Khu vực ven biển miền Trung Việt Nam là nơi có sai số MAE lớn nhất. Với những đánh giá theo cường độ bão cho thấy sai số MAE với giá trị lớn nằm ở phía bên trái so với quỹ đạo bão, tuy nhiên lại thể hiện ngược lại khi đánh giá theo khu vực bão đổ bộ. Mặc dù dữ liệu mưa từ vệ tinh vẫn còn tồn tại sai lệch nhất định so với quan trắc mặt đất, đặc biệt trong điều kiện địa hình phức tạp, nhưng với ưu thế về độ phủ rộng và tính liên tục theo không gian–thời gian, chúng vẫn được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu về cấu trúc trường mưa. Tại Việt Nam, [14] đã sử dụng dữ liệu GSMaP để phân tích đặc điểm mưa do bão theo vùng đổ bộ và cường độ bão. Kết quả cho thấy cường độ mưa trung bình có xu hướng tỷ lệ thuận với cường độ bão, và vùng mưa cực đại có xu hướng dịch gần về phía tâm bão khi bão tiến vào đất liền. Ngoài ra, vị trí vùng mưa cực đại cũng thay đổi đáng kể tùy theo khu vực đổ bộ.

Việt Nam là quốc gia có đường bờ biển kéo dài và địa hình phức tạp, nên cấu trúc mưa do bão có thể khác biệt đáng kể theo vùng, phụ thuộc vào hướng đổ bộ, tốc độ di chuyển của bão, cũng như các yếu tố môi trường. Bên cạnh đó, biến động của lượng mưa ở các khu vực của Việt Nam cũng chịu tác động của ENSO [15-17]. Đặc biệt, mức độ ảnh hưởng của ENSO đối với lượng mưa có sự khác biệt đáng kể theo từng vùng và từng khoảng thời gian trong năm [18, 19]. Trong khi đó, số liệu mưa quan trắc trên mặt đất ở các khu vực ven biển và vùng biển còn hạn chế. Dữ liệu vệ tinh với độ phân giải không gian và thời gian cao, có thể bổ sung khoảng trống này bằng cách cung cấp thông tin liên tục và đồng đều trên phạm vi rộng, bao gồm cả trước và sau khi bão đổ bộ. Hầu hết các nghiên cứu hiện nay ở Việt Nam mới chỉ tập trung vào thống kê lượng mưa tổng thể hoặc phân tích tác động của bão ở quy mô vùng, trong khi các đặc trưng không gian – thời gian của mưa do bão theo từng hướng đổ bộ hoặc theo các pha ENSO vẫn chưa được khai thác đầy đủ. Xuất phát từ thực tế đó,

nghiên cứu này sử dụng bộ dữ liệu mưa vệ tinh TRMM 3B42 để phân tích đặc điểm phân bố mưa trong quá trình bão đổ bộ vào Việt Nam. Phân tích được thực hiện cho 63 cơn bão ảnh hưởng trực tiếp đến lãnh thổ Việt Nam trong giai đoạn 2000–2019, đồng thời xem xét theo các pha ENSO khác nhau và theo hướng đổ bộ. Nguồn số liệu và phương pháp nghiên cứu sẽ được trình bày ở Mục 2. Các kết quả và thảo luận sẽ được đề cập chi tiết ở mục tiếp theo.

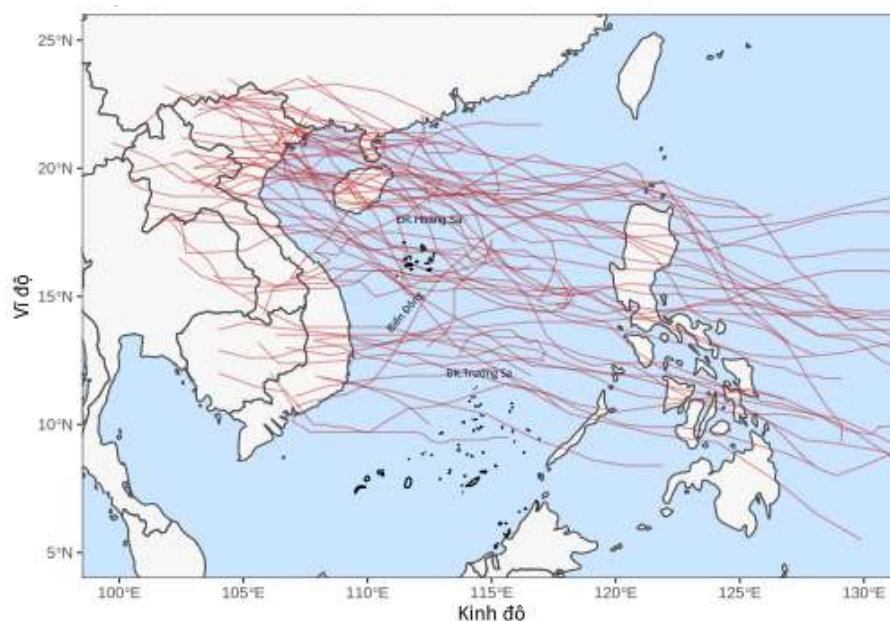
2. Số liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Số liệu TRMM 3B42

Sản phẩm mưa vệ tinh TRMM 3B42 là một sản phẩm vệ tinh quan trọng cung cấp số liệu mưa trong Nhiệm vụ Đo đạc Mưa Nhiệt Đới (TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission), được phát triển bởi Cơ quan Hàng không và Vũ trụ Hoa Kỳ (NASA) và Cơ quan Thám hiểm Hàng không Nhật Bản (JAXA). TRMM 3B42 bắt đầu hoạt động từ năm 1997, cung cấp số liệu mưa với độ phân giải cao cả theo không gian và thời gian. Miền bao phủ của sản phẩm từ 50 độ vĩ Bắc đến 50 độ vĩ Nam với độ phân giải không gian là 0,25 độ và độ phân giải thời gian là 3 giờ. Trong nghiên cứu này, số liệu được khai thác để phân tích đặc điểm và đánh giá giá ước lượng mưa 24 giờ trong những trường hợp bão đổ bộ vào khu vực Việt Nam giai đoạn từ năm 2000 đến 2019. Bộ số liệu này được tải về trực tiếp theo đường dẫn: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>.

2.2. Số liệu bão

Số liệu quan trắc 63 cơn bão đổ bộ vào Việt Nam từ năm 2000 đến 2019 được thu thập từ nguồn cơ sở dữ liệu của Cơ quan Khí tượng Nhật Bản JMA (Japan Meteorology Agency) có độ phân giải theo thời gian là 3 giờ. Dữ liệu này bao gồm thông tin chi tiết của từng cơn bão như tên quốc tế, thời gian hoạt động của cơn bão, vị trí tâm bão, tốc độ gió cực đại, khí áp mực biển cực tiểu. Quỹ đạo của các cơn bão được minh họa trên Hình 1.



Hình 1. Minh họa quỹ đạo các cơn bão đổ bộ vào Việt Nam trong giai đoạn 2000-2019.

Bên cạnh đó, tập số liệu bão được phân chia theo 2 nhóm là: i) Hướng đổ bộ gồm: Tây Bắc (TB, từ 292,5° đến 337,5°, 24 trường hợp), Tây (T, từ 247,5° đến 292,5°, 37 trường hợp), Tây Nam (TN, 202,5° đến 247,5°, 2 trường hợp); ii) Pha ENSO gồm: El Niño (E, 11 trường hợp), La Niña (L, 16 trường hợp), Trung tính (N, 36 trường hợp), được phân chia dựa trên dữ liệu ONI tại: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php, Cụ thể,

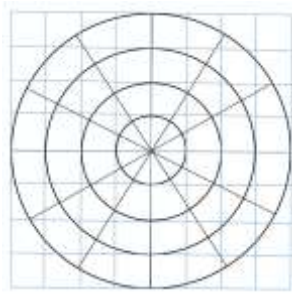
các giai đoạn được xác định là El Niño hoặc La Niña nếu giá trị ONI duy trì $\geq +0,5$ hoặc $\leq -0,5$ trong ít nhất 5 tháng liên tiếp; các giai đoạn còn lại được xem là pha trung tính. Chi tiết của cơn bão theo từng nhóm được thống kê ở Bảng 1. Việc phân chia này nhằm mục đích xem xét sự khác biệt về đặc điểm phân bố mưa bão trong các trường hợp riêng cũng như khả năng ước lượng mưa tương ứng của TRMM.

Bảng 1. Thống kê 63 cơn bão đổ bộ vào Việt Nam trong giai đoạn 2000–2019 và phân nhóm.

Năm	STT	Tên bão	Hướng đổ bộ	Pha ENSO	Năm	STT	Tên bão	Hướng đổ bộ	Pha ENSO
2000	1	KAEMI	TB	L	2012	32	PAKHAR	TB	L
	2	WUKONG	T	L		33	KAITAK	T	N
2001	3	DURIAN	TB	N		34	GAEMI	T	N
	4	USAGI	T	N		35	SONTINH	TB	N
	5	LINGLING	T	N	2013	36	BEBINCA	TB	N
2003	6	IMBUDO	TB	N		37	JEBI	TB	N
	7	GONI	T	N		38	MANGKHUT	TB	N
	8	KROVANH	T	N		39	WUTIP	T	N
2004	9	CHANTHU	T	N		40	NARI	T	N
2005	10	WASHI	T	N		41	HAIYAN	TB	N
	11	VICENTE	T	N	2014	42	RAMMASUN	TB	N
	12	DAMREY	TB	N		43	KALMAEGI	TB	N
2006	13	XANGSANE	T	E		44	SINLAKU	T	E
	14	DURIAN	TN	E	2015	45	KUJIRA	TB	E

2007	15	TORAJI	TB	L		46	VAMCO	T	E
	16	FRANCISCO	TB	L	2016	47	MIRINAE	TB	N
	17	LEKIMA	T	L		48	DIANMU	T	L
	18	PEIPAH	TN	L		49	RAI	TB	L
2008	19	KAMMURI	T	N	2017	50	TALAS	T	N
	20	HAGUPIT	T	N		51	SONCA	T	N
	21	MEKHALA	T	N		52	DOKSURI	T	N
	22	NOUL	T	L		53	DAMREY	T	L
2009	23	SOUDELOR	T	E		54	TINO	T	L
	24	MUJIGAE	T	E	2018	55	SONTINH	TB	N
	25	KETSANA	T	E		56	BEBINCA	T	N
	26	MIRINAE	T	E		57	USAGI	TB	E
2010	27	CONSON	TB	L		58	TORAJI	TB	E
	28	MINDULLE	TB	L	2019	59	MUN	TB	N
2011	29	HAIMA	T	N		60	WIPHA	T	N
	30	NOCK-TEN	T	L		61	PODUL	T	N
	31	NESAT	TB	L		62	MATMO	T	N
						63	NAKRI	T	N

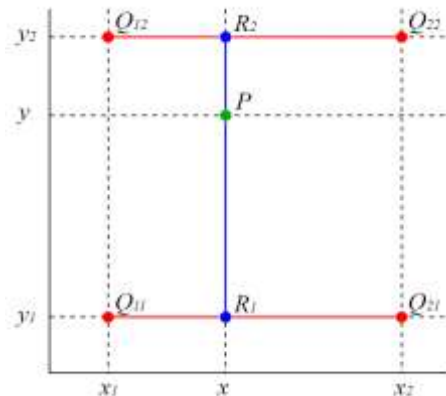
2.3. Phương pháp phân tách chuỗi Fourier



Hình 2. Minh họa lưới tròn giả định với tâm hình tròn ứng với tâm bão.

Phương pháp phân tách chuỗi Fourier FFT (Fast Fourier Transform) được sử dụng rộng rãi để xem xét sự bất đối xứng của trường mưa bão, trong đó tính toán thành phần mưa bão từ sóng số 0 (WN-0 ứng với thành phần mưa đối xứng) đến các số sóng cao hơn (WN1-4 ứng với thành phần mưa bất đối xứng) [6, 7]. Dữ liệu cường độ mưa được coi là tín hiệu đầu vào sau đó phân tích các phổ tần số khác nhau để đánh giá sự phân bố lượng mưa trong bão. Một lưới tròn giả định được thiết lập (Hình 2), khoảng cách giữa các vòng tròn là 10 km tính từ tâm bão đến khoảng cách bán kính 500 km. Việc lựa chọn bán kính này dựa trên nhiều nghiên cứu trước đây cho thấy phạm vi mưa chính của bão thường nằm

trong khoảng 400–500 km tính từ tâm bão, đặc biệt ở khu vực Tây Bắc Thái Bình Dương [13; 20-22]. Trên mỗi vòng tròn gồm 64 điểm cách đều nhau được nội suy từ lưới ô vuông ban đầu bằng phương pháp nội suy song tuyến tính (Hình 3).



Hình 3. Minh họa phương pháp nội suy song tuyến tính.

Giả sử rằng muốn tìm giá trị của hàm f chưa biết tại điểm (x, y) (điểm P màu xanh lá cây trên Hình 3) và đã biết giá trị của f tại 4 điểm $Q_{11} = (x_1, y_1)$, $Q_{12} = (x_1, y_2)$, $Q_{21} = (x_2, y_1)$, $Q_{22} = (x_2, y_2)$, trước tiên thực hiện phép nội suy tuyến tính theo hướng x (lấy giá trị điểm R_1, R_2 trên Hình 3) nhận được:

$$f(x, y_1) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{11}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{21}) \quad (1)$$

$$f(x, y_2) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{12}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{22}) \quad (2)$$

Tiếp theo thực hiện nội suy theo hướng y ta có:

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} f(x, y_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} f(x, y_2) \\ &= \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} \left(\frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{11}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{21}) \right) \\ &\quad + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \left(\frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{12}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{22}) \right) \\ &= \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} (f(Q_{11})(x_2 - x)(y_2 - y) + f(Q_{21})(x - x_1)(y_2 - y) \\ &\quad + f(Q_{12})(x_2 - x)(y - y_1) + f(Q_{22})(x - x_1)(y - y_1)) \end{aligned} \quad (3)$$

Sau khi nội suy số liệu từ lưới vuông sang lưới tròn giả định, tại mỗi vòng tròn hệ số Fourier bậc nhất được tính toán bằng cách sử dụng tất cả các ước lượng mưa như sau [23]:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \cos(q_i) \\ b_1 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \sin(q_i) \end{aligned} \quad (4)$$

trong đó R_i là ước lượng mưa riêng lẻ thứ i , q_i là góc pha tương ứng với ước lượng mưa so với chuyển động của cơn bão. Thành phần mưa bất đối xứng của sóng số 1 (WN-1) có thể được biểu diễn như sau:

$$M_1 = a_1 \cos(q) + b_1 \sin(q) \quad (5)$$

trong đó R là cường độ mưa trung bình tính trên toàn bộ vòng tròn. Tương tự, áp dụng công thức (5) để tính các thành phần mưa bất đối xứng của sóng số 2 đến 4.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Phân bố không gian-thời gian của mưa bão theo các pha ENSO

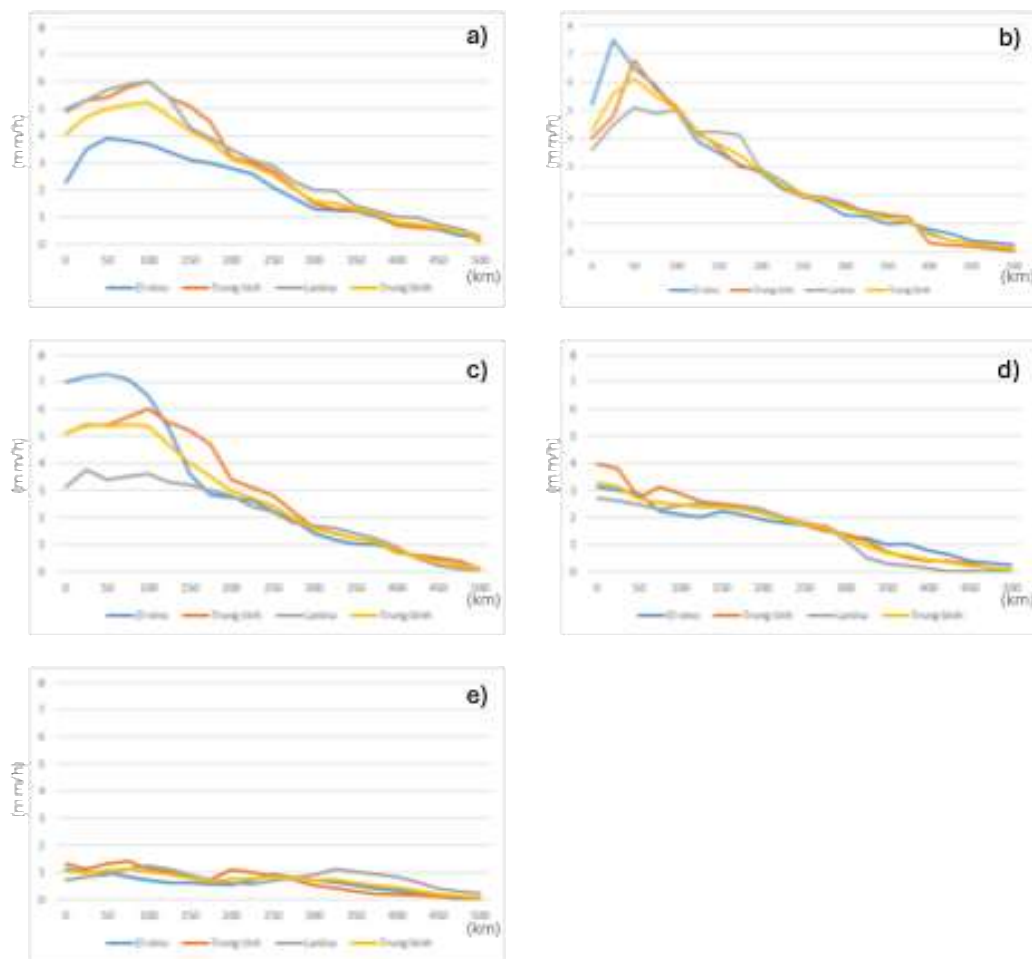
Hình 4 thể hiện phân bố cường độ mưa trung bình theo hướng bán kính đến khoảng cách 500

km tính từ tâm bão ở các lát cắt thời gian so với thời điểm bão đổ bộ theo pha ENSO. Nhìn chung, tác động của ENSO đối với phân bố cường độ mưa có sự khác biệt giữa thời gian trước và sau khi bão đổ bộ. Trước thời gian đổ bộ khoảng 12 giờ, cường độ mưa cực đại trong khoảng bán kính 50–100 km, với cường độ cao hơn ở pha La Niña so với El Niño, phản ánh môi trường ẩm thuận lợi hơn cho đối lưu trong La Niña. Tại thời điểm từ 6 giờ đến khi đổ bộ, cực đại mưa lại xuất hiện rõ ở pha El Niño với cường độ >7 mm/h sát tâm bão, trong khi La Niña và trung tính thấp hơn. Tuy nhiên, vùng mưa cực đại này chỉ tập trung ở phạm vi hẹp. Sau thời gian đổ bộ từ 6–12 giờ, cường độ mưa suy giảm nhanh (<2–4 mm/h), sự khác biệt giữa các pha ENSO không còn rõ rệt, cho thấy tác động của hoàn lưu lớn bị chi phối bởi ma sát và địa hình đất liền. Như vậy, ENSO có ảnh hưởng đến phân bố cường độ mưa bão khác nhau theo giai đoạn: La Niña làm gia tăng mưa trước khi bão đổ bộ trên phạm vi rộng, trong khi El Niño lại tập trung mưa cực đại tại thời điểm bão đổ bộ nhưng suy yếu nhanh sau đó.

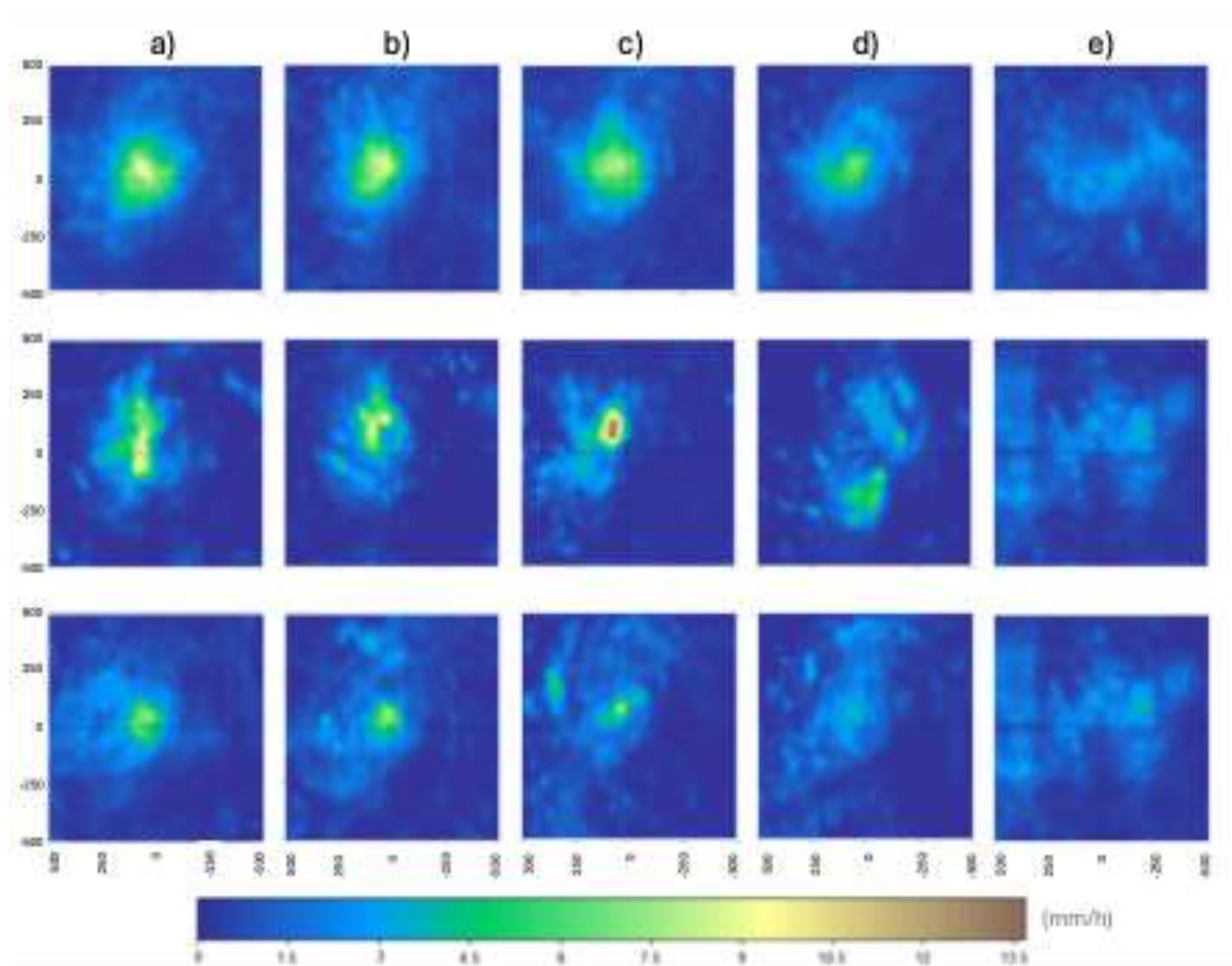
Hình 5 cho thấy sự khác biệt rõ rệt về phân bố không gian và thời gian của mưa bão theo các pha ENSO. Để phân tích được vị trí tập trung của mưa bão, tất cả các cơn bão đã được xoay sao cho hướng di chuyển của cơn bão trùng với

hướng bắc. Trước thời điểm bão đổ bộ 12–6 giờ (Hình 5a, b), mưa thường tập trung lệch về phía trước và bên trái tâm bão, trong đó năm El Niño xuất hiện vùng mưa mạnh hơn và tập trung hơn, còn năm La Niña mưa trải rộng trên phạm vi lớn, trong khi năm trung tính có cấu trúc cân bằng, không thể hiện cực đại rõ rệt. Tại thời điểm bão đổ bộ (Hình 5c), mưa cực đại thể hiện rõ nhất trong pha El Niño xung quanh khu vực tâm bão. Ngược lại, năm La Niña và trung tính mưa phân

bố đồng đều hơn. Sau đổ bộ 6–12 giờ (Hình 5d, e), mưa suy giảm nhanh ở cả ba pha ENSO và sự khác biệt giữa các pha không còn rõ rệt. Điều này có thể do vai trò chi phối của ma sát bề mặt và địa hình sau khi bão vào đất liền. Như vậy, có thể thấy trong pha El Niño mưa cực đại tập trung tại thời điểm đổ bộ, trong khi pha La Niña thì vùng mưa trải rộng hơn ở những thời điểm trước khi bão đổ bộ.



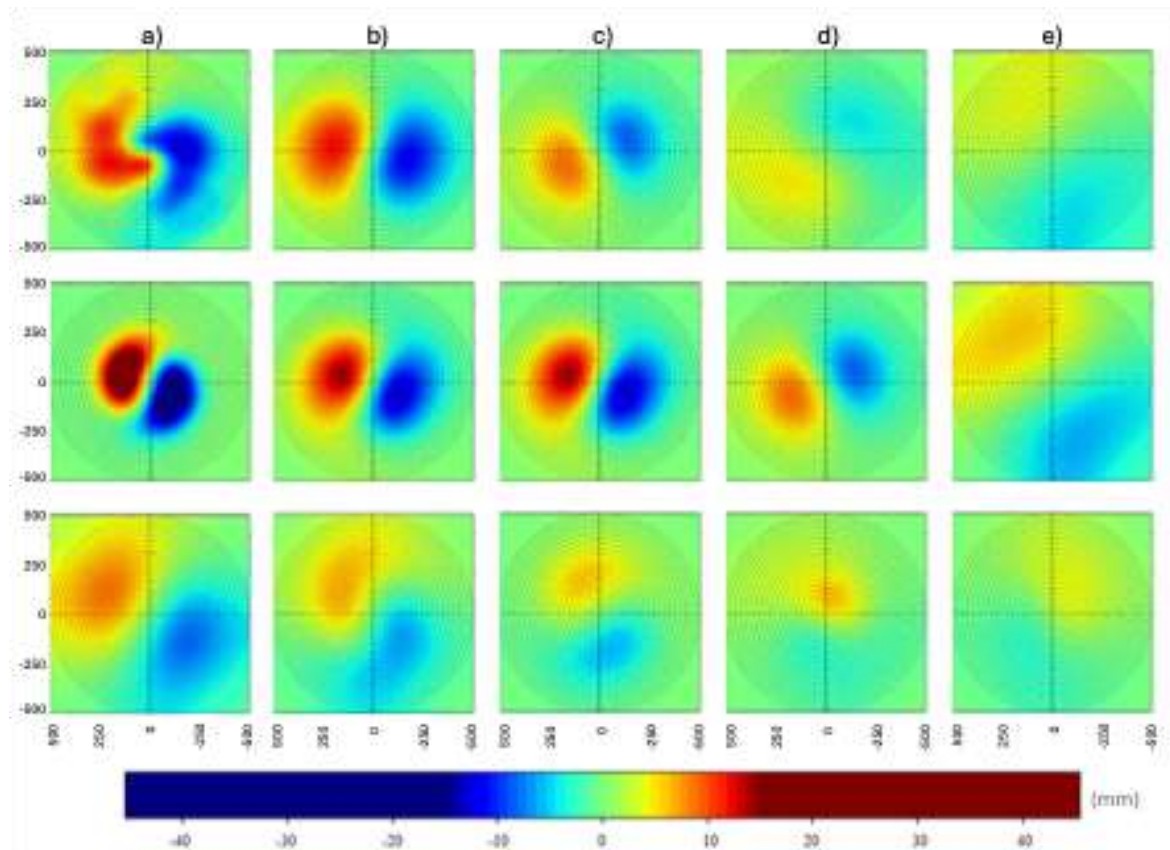
Hình 4. Phân bố cường độ mưa trung bình (mm/h) theo hướng bán kính (km) tính từ tâm bão theo pha ENSO (đường xanh: pha El Niño; đường xám: pha La Niña; đường cam: pha trung tính) và trung bình các trường hợp (đường vàng) ở các lát cắt thời gian so với thời điểm bão đổ bộ: a) trước 12 giờ; b) trước 6 giờ; c) thời điểm đổ bộ; d) sau 6 giờ; e) sau 12 giờ.



Hình 5. Phân bố cường độ mưa trung bình (mm/h, tô màu) theo pha ENSO: năm trung tính (trên); năm El Niño (giữa); năm La Niña (dưới) ở các lát cắt thời gian so với thời điểm bão đổ bộ: a) trước 12 giờ; b) trước 6 giờ; c) thời điểm đổ bộ; d) sau 6 giờ; e) sau 12 giờ;.

Hình 6 cho thấy cấu trúc mưa bất đối xứng (thành phần WN-1) trong phạm vi bán kính 500 km quanh tâm bão theo các pha ENSO và ở các thời điểm khác nhau trước và sau khi bão đổ bộ. Kết quả chỉ ra rằng trước khi bão đổ bộ (Hình 6a, b), phân bố bất đối xứng của vùng mưa lớn đã xuất hiện rõ rệt với xu thế tập trung về phía trước-bên trái (màu cam đỏ) trong các năm trung tính và El Niño, trong khi ở pha La Niña, mưa có cường độ yếu hơn nhưng phân bố rộng hơn, lan sang cả phía trước-bên phải. Đặc biệt, trong pha El Niño với sự phân cực rõ rệt giữa phía trước-bên phải (mưa tăng) và phía sau-bên trái (mưa

giảm). Tại thời điểm bão đổ bộ, phân bố mưa bất đối xứng vẫn duy trì rõ rệt ở pha El Niño và trung tính, trong khi ở pha La Niña cường độ yếu hơn và phân bố đều hơn quanh tâm bão. Sau khi bão đổ bộ, cấu trúc bất đối xứng nhanh chóng suy yếu: sau 6 giờ chỉ còn thấy rõ ở pha El Niño; đến sau 12 giờ, sự bất đối xứng gần như biến mất, trường mưa trở nên đối xứng và đồng nhất hơn quanh tâm bão. Kết quả này phản ánh quá trình suy yếu và tan rã của hệ thống bão sau khi đổ bộ, đồng thời nhấn mạnh sự khác biệt về cường độ và đặc trưng phân bố mưa bất đối xứng giữa các pha ENSO.



Hình 6. Thành phần mưa bất đối xứng của WN-1 (mm) tính từ tâm bão đến bán kính 500 km theo pha ENSO: năm trung tính (trên); năm El Niño (giữa); năm La Niña (dưới) ở các lát cắt thời gian so với thời điểm bão đổ bộ: a) trước 12 giờ; b) trước 6 giờ; c) thời điểm đổ bộ; d) sau 6 giờ; e) sau 12 giờ.

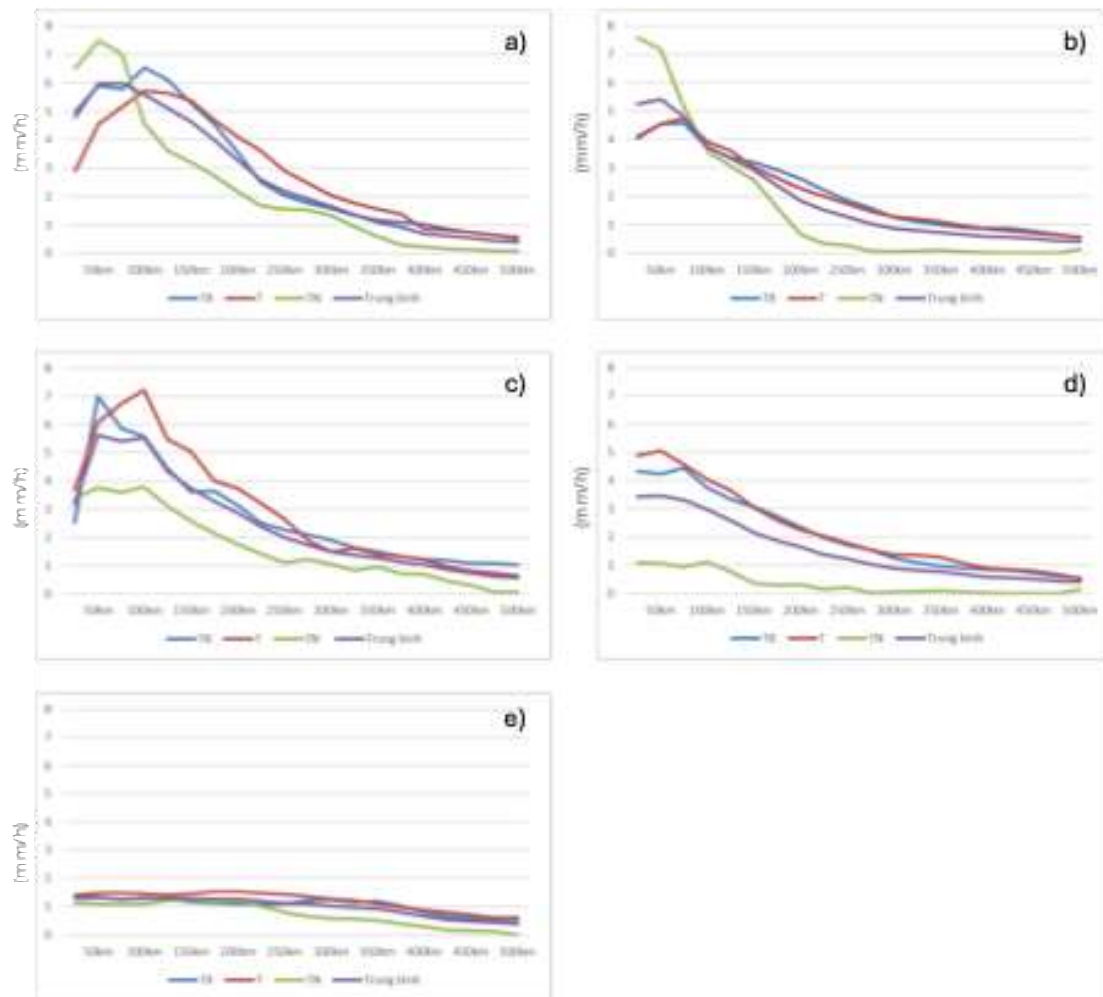
3.2. Phân bố không gian-thời gian của mưa bão theo hướng đổ bộ của bão

Hình 7 mô tả chi tiết sự phân bố cường độ mưa trung bình theo bán kính từ tâm bão trong các hướng đổ bộ khác nhau (Tây Bắc, Tây và Tây Nam) tại các thời điểm trước, trong và sau khi bão đổ bộ. Trước khi bão đổ bộ 12 giờ, lượng mưa mạnh nhất tập trung rõ rệt ở các cơn bão di chuyển theo hướng Tây Nam, với giá trị cực đại đạt khoảng 7–8 mm/h trong phạm vi bán kính hẹp 50–100 km tính từ tâm bão. Trong khi đó, các cơn bão hướng Tây và Tây Bắc có cường độ mưa thấp hơn, khoảng 5–6 mm/h và phân bố rộng hơn, với đỉnh mưa thường xuất hiện ở khoảng cách xa hơn (100–120 km). Đến 6 giờ trước khi đổ bộ, xu thế này vẫn tiếp tục duy trì, khi các cơn bão hướng Tây Nam vẫn ghi nhận

mưa cực đại xuất hiện ở khu vực lân cận tâm bão so với hai hướng còn lại. Tuy nhiên, cường độ mưa ở hướng này lại suy giảm nhanh hơn khi ra xa, thể hiện sự tập trung mưa mạnh chủ yếu trong phạm vi gần tâm bão. Tại thời điểm bão đổ bộ, các cơn bão hướng Tây Bắc và Tây Nam có khu vực với cường độ mưa lớn đều tập trung trong phạm vi 50–100 km tính từ tâm bão. Ngược lại, các cơn bão hướng Tây cho thấy phạm vi mưa lớn ở khoảng cách xa hơn tính từ tâm bão nhưng vẫn tập trung trong khoảng bán kính 100 km. Sau khi bão đổ bộ 6 giờ, cường độ mưa ở tất cả các hướng đều suy giảm rõ rệt, mặc dù các cơn bão hướng Tây Bắc và Tây vẫn thể hiện cực đại mưa với giá trị khoảng 4–5 mm/h ở gần tâm bão. Các cơn bão hướng Tây Nam có cường độ mưa suy giảm nhanh hơn, chỉ còn khoảng 1 mm/h tại bán kính 100 km. Tại thời điểm 12 giờ sau khi bão

đổ bộ, cường độ mưa ở tất cả các hướng giảm đáng kể xuống dưới 2 mm/h và sự khác biệt giữa các hướng đổ bộ hầu như không còn rõ rệt. Điều

này cho thấy quá trình suy yếu nhanh chóng của các hệ thống gây mưa do bão sau khi đổ bộ vào đất liền.



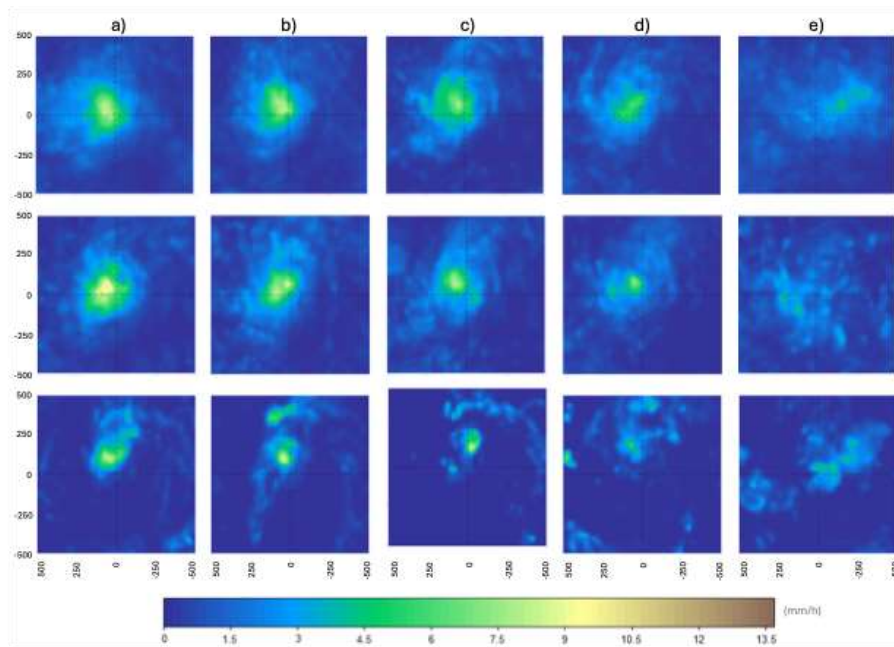
Hình 7. Tương tự như Hình 4 nhưng theo hướng đổ bộ của bão.

Hình 8 thể hiện phân bố không gian và thời gian của mưa bão theo các hướng bão đổ bộ. Cụ thể, tại 12 giờ trước khi đổ bộ, lượng mưa tập trung mạnh nhất ở vùng trung tâm nhưng có xu hướng lệch nhẹ sang trái tâm bão, vùng mưa cực đại chủ yếu nằm ở phía trước so với hướng dịch chuyển của cơn bão. Vùng mưa lớn trải rộng ra xung quanh tâm bão với khoảng bán kính 100km, với cường độ giảm dần khi xa tâm. Ở hướng Tây Bắc, mưa cũng tập trung ở giữa, lệch nhẹ sang trái. Cường độ mưa bão đổ bộ theo hướng này lớn hơn so với hai hướng Tây và Tây

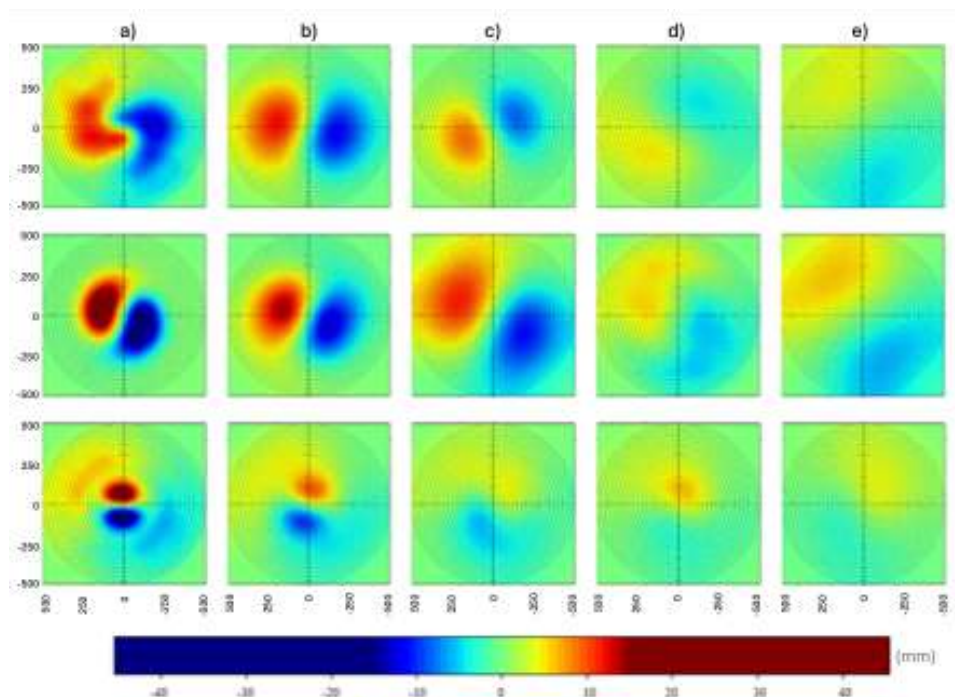
Nam, vùng mưa cực đại xuất hiện ở vùng sát trung tâm và lan rộng ra xung quanh. Những cơn bão có hướng đổ bộ Tây Nam cho thấy mưa lớn tập trung ở trung tâm và nằm ở phía trước cơn bão rõ rệt hơn so với hai hướng còn lại. Trước khi bão đổ bộ 6 giờ, phân bố mưa không khác biệt nhiều so với 12 giờ trước khi bão đổ bộ. Mưa vẫn tập trung ở các khu vực tương tự nhưng cường độ mưa có xu hướng giảm. Đến thời điểm bão tiến vào đất liền, vùng mưa lớn trong trường hợp bão đổ bộ theo hướng Tây Nam có xu hướng ở phía trước nhưng lệch sang cả phần bên phải

nhiều hơn so với các trường hợp bão đổ bộ theo hướng Tây và Tây Bắc. Thời điểm sau khi bão đổ bộ 6 giờ và 12 giờ, cường độ mưa bão suy

giảm rõ rệt và phân bố vùng mưa lớn cũng không còn thể hiện rõ như các thời điểm trước đó.



Hình 8. Tương tự như Hình 5 nhưng theo hướng bão đổ bộ: tây (trên); tây bắc (giữa); tây nam (dưới).



Hình 9. Tương tự như Hình 6 nhưng theo hướng bão đổ bộ: tây (trên); tây bắc (giữa); tây nam (dưới).

Hình 9 là kết quả phân tích thành phần mưa bất đối xứng theo phương pháp Fourier cho 3 hướng đổ bộ. Từ hình ta có thể thấy, tại thời điểm 12 giờ trước khi bão đổ bộ, vùng mưa cực đại của các cơn bão đổ bộ theo hướng Tây và Tây Bắc tập trung chủ yếu vào phía bên trái cơn bão trong đó vùng mưa cực đại của các cơn bão đổ bộ theo hướng Tây thể hiện phân bố đều hơn cả về phía trước và phía sau theo hướng bão di chuyển. Vùng mưa cực đại của các cơn bão đổ bộ theo hướng Tây Bắc có xu hướng nằm ở phía trước và bên trái so với tâm bão. Tuy nhiên, vùng mưa cực đại của các cơn bão đổ bộ theo hướng Tây Nam tập trung ở phía trước cơn bão và phân bố đều sang hai phía so với hướng di chuyển của bão. Qua các thời điểm, vùng mưa cực đại có xu hướng di chuyển theo chiều kim đồng hồ đối với các cơn bão có hướng đổ bộ Tây Bắc và Tây Nam, trong khi đó vùng mưa cực đại của các cơn bão đổ bộ theo hướng Tây có xu hướng xoay theo chiều ngược lại. Giá trị biên độ mưa bất đối xứng giảm dần qua các thời điểm đổ bộ trong tất cả các trường hợp.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã tập trung phân tích đặc điểm phân bố không gian và thời gian của mưa bão ở khu vực Việt Nam trong các pha ENSO và theo các hướng đổ bộ của bão. Thông qua các lát cắt thời gian trước, trong và sau khi bão đổ bộ, kết quả cho thấy có sự tương đồng về sự suy giảm nhanh cường độ mưa theo khoảng cách từ tâm bão, đặc biệt ở khoảng cách trên 150 km. Nhận định này phù hợp với các nghiên cứu trước đây về phân bố cường độ mưa bão [2, 13 20-22]. Bên cạnh đó, các kết quả cũng cho thấy có sự khác biệt rõ rệt trong các pha ENSO đối với cường độ và cấu trúc mưa bão. Cụ thể, trong pha La Niña, mưa thường có phạm vi phân bố rộng hơn và cường độ mạnh hơn trong giai đoạn trước đổ bộ (12–6 giờ), phản ánh điều kiện hoàn lưu ẩm thuận lợi cho đối lưu phát triển. Ngược lại, trong pha El Niño, cường độ mưa cực đại xuất hiện tại thời điểm bão đổ nhưng phạm vi hẹp hơn và suy giảm nhanh sau khi bão tiến vào đất liền. Sự khác biệt này cũng được phản ánh trong cấu

trúc bất đối xứng khi phân tích WN-1 với pha El Niño thể hiện sự phân cực mạnh giữa phía trước-bên trái (tăng mưa) và phía sau-bên phải (giảm mưa) so với hướng di chuyển của bão, trong khi ở pha La Niña có cấu trúc mưa đồng đều hơn. Sau khi bão đổ bộ từ 6–12 giờ, sự khác biệt giữa các pha ENSO dần mất đi do tác động chi phối của ma sát bề mặt và địa hình đất liền.

Bên cạnh đó, các kết quả thu được cũng chỉ ra hướng đổ bộ đóng vai trò quan trọng trong phân bố không gian của cường độ và cấu trúc mưa bão. Các cơn bão di chuyển theo hướng Tây Nam thường gây mưa cực đại mạnh nhất và tập trung trong phạm vi hẹp gần tâm bão (50–100 km), song sự suy giảm diễn ra nhanh chóng sau khi đổ bộ. Ngược lại, bão hướng Tây và Tây Bắc có phạm vi mưa lớn rộng hơn và duy trì lâu hơn, đặc biệt là trong giai đoạn 6 giờ sau đổ bộ. Cấu trúc bất đối xứng cho thấy vùng mưa cực đại ở các trường hợp bão đổ bộ theo hướng Tây Bắc và Tây Nam có xu hướng dịch chuyển theo chiều kim đồng hồ qua các thời điểm, trong khi đó các cơn bão đổ bộ theo hướng Tây lại có sự dịch chuyển theo chiều ngược lại. Các kết quả trên cũng cho thấy hướng bão đổ bộ ảnh hưởng tới cấu trúc trường mưa bão rõ rệt hơn so với các pha ENSO, điều này cho thấy một số nhân tố như đặc điểm đường bờ, địa hình đáy,... cũng tác động đến cấu trúc mưa do bão [8]. Nhiều nghiên cứu cũng đã chỉ ra rằng phân bố mưa khi bão đổ bộ còn phụ thuộc đáng kể vào khu vực hoạt động, hình thái đối lưu, tốc độ dịch chuyển, cũng như yếu tố môi trường khác [24-26]. Do đó, để hiểu rõ hơn về vai trò và mức độ tác động của các yếu tố này, cần thiết có những nghiên cứu chuyên sâu hơn trong tương lai.

Các kết quả trong nghiên cứu này không chỉ cung cấp bức tranh khái quát về đặc điểm phân bố của trường mưa bão theo không gian và thời gian trong các trường hợp bão đổ bộ vào Việt Nam dưới ảnh hưởng của ENSO và theo hướng đổ bộ mà còn cung cấp cơ sở khoa học cho việc nâng cao chất lượng dự báo mưa do bão. Việc xác định được cấu trúc trường mưa do bão trong từng pha ENSO và theo từng hướng đổ bộ sẽ giúp đưa ra các dự báo chi tiết và chính xác hơn, từ đó hỗ trợ công tác phòng tránh thiên tai, giảm

thiếu thiệt hại và nâng cao khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu trong tương lai.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này cảm ơn sự hỗ trợ về số liệu và ý tưởng nghiên cứu từ đề tài mã số ĐTDL.CN-59/21.

Tài liệu tham khảo

- [1] W. M. Frank, The Structure and Energetics of the Tropical Cyclone. Part I: Storm Structure, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 105, 1977, pp. 1119-1135, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1977\)105<1119:TSAEOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1977)105<1119:TSAEOT>2.0.CO;2).
- [2] R. W. Burpee, M. L. Back, Temporal and Spatial Variations of Rainfall Near the Centers of Two Tropical Cyclones, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 117, 1989, pp. 2204-2218, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<2204:TASVOR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<2204:TASVOR>2.0.CO;2).
- [3] H. Wexler, Structure of Hurricanes as Determined by Radar, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, Vol. 48, 1947, pp. 821-844.
- [4] C. L. Jordan, D. A. Hurt, C. A. Lowrey, On the Structure of Hurricane Daisy on 27th August 1958, *J. Meteor.*, Vol. 17, 1960, pp. 337-348.
- [5] E. Rodgers, R. Adler, Tropical Cyclone Rainfall Characteristics as Determined from a Satellite Passive Microwave Radiometer, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 109, 1981, pp. 506-521, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0506:TCRCAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0506:TCRCAD>2.0.CO;2).
- [6] M. Lonfat, F. D. Marks Jr., S. S. Chen, Precipitation Distribution in Tropical Cyclones Using the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Microwave Imager: A Global Perspective, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 132, 2004, pp. 1645-1660, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1645:PDITCU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1645:PDITCU>2.0.CO;2).
- [7] S. S. Chen, J. A. Knaff, F. D. Marks Jr., Effects of Vertical Wind Shear and Storm Motion on Tropical Cyclone Rainfall Asymmetries Deduced from TRMM, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 134, 2006, pp. 3190-3208, <https://doi.org/10.1175/MWR3245.1>.
- [8] Y. Wang, C. C. Wu, Current Understanding of Tropical Cyclone Structure and Intensity Changes: A Review, *Meteorol. Atmos. Phys.*, Vol. 87, 2004, pp. 257-278, <https://doi.org/10.1007/s00703-003-0055-6>.
- [9] Z. Yu, Y. Wang, H. Xu, Observed Rainfall Asymmetry in Tropical Cyclones Making Landfall over China, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, Vol. 54, 2015, pp. 117-136, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0359.1>.
- [10] R. E. Tuleya, M. DeMaria, J. R. Kuligowski, Evaluation of GFDL and Simple Statistical Model Rainfall Forecasts for U.S. Landfalling Tropical Storms, *Wea. Forecast.*, Vol. 22, 2007, pp. 56-70, <https://doi.org/10.1175/WAF972.1>.
- [11] M. Lonfat, R. Rogers, T. Marchok, F. D. Marks Jr., A Parametric Model for Predicting Hurricane Rainfall, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 135, 2007, pp. 3086-3097, <https://doi.org/10.1175/MWR3433.1>.
- [12] L. T. Tuan, J. Matsumoto, T. N. Duc, M. I. Nodzu, T. Inoue, Evaluation of Satellite Precipitation Products over Central Vietnam, *Prog. Earth Planet. Sci.*, Vol. 6, 2019, pp. 54, <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0297-7>.
- [13] P. T. Ha, V. T. Hang, P. T. T. Nga, D. T. The, T. D. Thuc, N. T. P. Hao, Assessing Tropical Cyclone-Induced Rainfall Distributions Derived from the TRMM and GSMaP Satellite Datasets over Vietnam's Mainland, *Vietnam J. Earth Sci.*, Vol. 46, 2024, pp. 449-467, <https://doi.org/10.15625/2615-9783/21040>.
- [14] T. M. Hieu, V. T. Hang, P. T. T. Nga, P. T. Ha, Characteristics of Rainfall Distribution Induced by Tropical Cyclones Making Landfall over Vietnam Using GSMaP Satellite Rainfall Data, *J. Meteorol. Hydrol.*, Vol. 748, 2023, pp. 64-76, [https://doi.org/10.36335/VNJHM.2023\(748\).64-76](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2023(748).64-76) (in Vietnamese).
- [15] N. D. Quang, 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>.
- [16] N. V. Thang, M. V. Khiem, N. D. Mau, T. D. Tri, Determining Drought Criteria for the South Central Region, *Vietnam J. Hydrometeorol.*, Vol. 639, 2014, pp. 49-55 (in Vietnamese).
- [17] V. V. Thang, N. T. Hieu, N. V. Thang, N. V. Hiep, P. T. T. Huong, N. T. Lan, Effects of ENSO on Autumn Rainfall in Central Vietnam, *Adv. Meteorol.*, Vol. 2015, 2015, pp. 1-12, <https://doi.org/10.1155/2015/264373>.
- [18] C. F. Ropelewski, M. S. Halpert, Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation, *Mon. Wea.*

- Rev., Vol. 115, 1987, pp. 1606-1626,
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2).
- [19] C. F. Ropelewski, M. S. Halpert, Quantifying Southern Oscillation Precipitation Relationships, *J. Climate*, Vol. 9, 1996, pp. 1043-1059,
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<1043:QSOPR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<1043:QSOPR>2.0.CO;2).
- [20] E. B. Rodgers, R. F. Adler, H. F. Pierce, Contribution of Tropical Cyclones to the North Pacific Climatological Rainfall as Observed from Satellites, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, Vol. 39, 2000, pp. 1658-1678.
- [21] H. A. N. Thi, J. Matsumoto, T. N. Duc, N. Endo, Long-Term Trends in Tropical Cyclone Rainfall Over Vietnam, *J. Agrofor. Environ.*, Vol. 6, 2012, pp. 89-92.
- [22] H. P. Thanh, T. N. Duc, J. Matsumoto, T. P. Van, H. V. Van, Rainfall Trends in Vietnam and Their Associations with Tropical Cyclones During 1979–2019, *SOLA*, Vol. 16, 2020, pp. 169-174,
<https://doi.org/10.2151/sola.2020-029>.
- [23] J. P. Boyd, Chebyshev and Fourier Spectral Methods, 2nd ed., Dover, New York, 2001, 44 pp.
- [24] L. J. Shapiro, The Asymmetric Boundary Layer Flow Under a Translating Hurricane, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 40, 1983, pp. 1984-1998,
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1983\)040<1984:TABLFU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1983)040<1984:TABLFU>2.0.CO;2).
- [25] F. Zhang, D. Tao, Effects of Vertical Wind Shear on the Predictability of Tropical Cyclones, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 70, 2013, pp. 975-983,
<https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0133.1>.
- [26] R. F. Rogers, P. Reasor, S. Lorsolo, Airborne Doppler Observations of the Inner-Core Structural Differences Between Intensifying and Steady-State Tropical Cyclones, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 141, 2013, pp. 2970-2991,
<https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00357.1>.