



Original Article

# Future Rainfall Projections in Vietnam Based on a CMIP6 Dynamical Downscaling Experiment

Ngo Duc Thanh<sup>1,\*</sup>, Trinh Tuan Long<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*University of Science and Technology of Hanoi, Vietnam Academy of Science and Technology  
18 Hoang Quoc Viet, Cau Giay, Hanoi, Vietnam*

<sup>2</sup>*VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam*

Received 25 September 2023

Revised 24 October 2023; Accepted 21 November 2023

**Abstract:** This study presents, for the first time, the dynamical downscaled results at 25 km resolution for Vietnam from a global climate model participating in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6. The regional climate model (RegCM) version 4.7 was used with initial and boundary conditions from the global model CNRM-CM6-1 (referred to as CNRM) under the two Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) 2-4.5 and 5-8.5. Simulated rainfall from RegCM and CNRM for the baseline period 1995–2014 is compared with the observation-based Vietnam Gridded Precipitation Dataset. The results indicate that downscaling is particularly effective in complex terrain areas, notably in the Central region during the winter monsoon season. However, in an overall assessment, the downscaled RegCM rainfall has not demonstrated added value compared to the CNRM results, whether in terms of annual variation, rainfall amounts, or spatial distribution. Future projection results until the end of the 21<sup>st</sup> century show an increase in average rainfall, rainfall intensity, and annual maximum daily rainfall in Vietnam under both SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. The increase is projected to reach approximately 25% in the Northern coastal area in the RegCM experiment under SSP5-8.5. The increase in rainfall intensity is pronounced across most of Vietnam, particularly under SSP5-8.5. Regarding projected maximum daily rainfall, there are discrepancies between the regional climate model and the global model. While CNRM exhibits unclear trends in many areas, RegCM indicates an overall increase in maximum daily rainfall across most of Vietnam under both SSPs scenarios.

**Keywords:** Climate change, dynamical downscaling, rainfall, CMIP6, Vietnam.

\* Corresponding author.

*E-mail address:* ngo-duc.thanh@usth.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnu.ees.4933>

# Dự tính mưa tương lai trên Việt Nam dựa trên thí nghiệm chi tiết hoá động lực kết quả của CMIP6

Ngô Đức Thành<sup>1,\*</sup>, Trịnh Tuấn Long<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,  
18 Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,  
334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 25 tháng 9 năm 2023

Chỉnh sửa ngày 24 tháng 10 năm 2023; Chấp nhận đăng ngày 21 tháng 11 năm 2023

**Tóm tắt:** Nghiên cứu này lần đầu tiên trình bày kết quả chi tiết hoá động lực ở độ phân giải 25 km cho Việt Nam từ một mô hình toàn cầu tham gia vào Dự án Đối sánh Đa Mô hình Kết hợp Pha 6 (CMIP6). Mô hình khí hậu khu vực RegCM phiên bản 4.7 (gọi tắt là RegCM) đã được sử dụng với điều kiện biên và ban đầu từ mô hình toàn cầu CNRM-CM6-1 (gọi tắt là CNRM) theo hai kịch bản đường kinh tế xã hội chia sẻ SSP2-4.5 và SSP5-8.5. Lượng mưa mô phỏng từ RegCM và CNRM cho thời kỳ cơ sở 1995–2014 được so sánh với nguồn số liệu mưa quan trắc trên lưới VnGP. Kết quả cho thấy việc chi tiết hoá đạt hiệu quả rõ rệt trên các khu vực địa hình phức tạp, đặc biệt là khu vực Trung Bộ vào mùa gió mùa mùa đông. Tuy nhiên nhìn chung chi tiết hoá chưa cho thấy được sự vượt trội so với kết quả mô phỏng toàn cầu, cả về biến trình năm, giá trị lượng mưa, cũng như về phân bố không gian của mưa. Kết quả dự tính trong tương lai đến cuối thế kỷ 21 chỉ ra sự gia tăng phổ biến của mưa trung bình, cường độ mưa (SDII), và lượng mưa ngày lớn nhất trong năm (RX1day) trên Việt Nam theo cả 2 kịch bản SSP2-4.5 và SSP5-8.5. Mức tăng có thể đạt tới ~25% trên khu vực ven biển Bắc Bộ cho thí nghiệm RegCM với kịch bản SSP5-8.5. Mức độ tăng của cường độ mưa SDII là rõ rệt trên hầu khắp Việt Nam, đặc biệt là theo kịch bản SSP5-8.5. Đối với chỉ số RX1day, có sự khác biệt về xu hướng tăng giảm trên các khu vực cụ thể giữa mô hình toàn cầu CNRM và kết quả chi tiết hoá. Trong khi CNRM cho kết quả tăng giảm không rõ rệt trên nhiều khu vực, RegCM cho thấy RX1day tăng trên hầu khắp Việt Nam theo cả 2 kịch bản.

*Từ khóa:* Biến đổi khí hậu (BĐKH), chi tiết hoá động lực, mưa, CMIP6, Việt Nam.

## 1. Mở đầu

Việt Nam là một trong những quốc gia chịu tác động rõ rệt bởi BĐKH [1, 2]. Kể từ năm 2009 đến nay, Bộ Tài nguyên và Môi trường (TNMT) đã thường xuyên xây dựng, cập nhật xu thế BĐKH trong quá khứ cũng như kịch bản BĐKH và nước biển dâng tương lai cho Việt Nam [1-4]. Một số nghiên cứu đã chỉ ra lượng mưa năm trong thời kỳ quá khứ nhìn chung có xu thế tăng

lên ở phía Nam và giảm đi ở phía Bắc Việt Nam, mặc dù xu thế tăng giảm có thể thay đổi theo trạm và theo giai đoạn số liệu được phân tích [2-7].

Để có thể đưa ra các kế hoạch ứng phó phù hợp với BĐKH ở các cấp từ trung ương đến địa phương, việc có được thông tin dự tính sự biến đổi của các yếu tố khí hậu trong tương lai, trong đó có lượng mưa, là rất cần thiết. Cho đến nay, các thông tin dự tính BĐKH cho Việt Nam thường được thực hiện bằng cách chi tiết hoá đầu

\* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: ngo-duc.thanh@usth.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4933>

ra của các mô hình khí hậu toàn cầu (GCM, viết tắt của Global Climate Model) thông qua phương pháp chi tiết hoá thống kê hoặc động lực [8]. Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện cho Việt Nam để chi tiết đầu ra của các GCMs tham gia vào Dự án Đối sánh Đa mô hình Kết hợp Pha 3 (CMIP3, viết tắt của Coupled Model Intercomparison Project Phase 3) với các kịch bản phát thải khí nhà kính SRES (viết tắt của Special Report on Emission Scenarios) [3, 4, 9-12] hoặc các GCMs tham gia vào CMIP5 với các kịch bản đường nồng độ đặc trưng RCPs (viết tắt của: Representative Concentration Pathways) [1, 2, 13-15]. Nhìn chung, theo các kịch bản khác nhau đã được công bố bởi Bộ TNMT qua các năm, lượng mưa trên Việt Nam vào cuối thế kỷ 21 so với thời kỳ cơ sở tăng từ 10–40%, và lượng mưa cực trị cũng có xu thế tăng phổ biến từ 20–40%. Trong khi đó, Ngô Đức Thành và cs (2014) [12] tổ hợp kết quả từ 3 thí nghiệm chi tiết hoá động lực cho 03 GCMs tham gia CMIP3 đã chỉ ra rằng lượng mưa ngày lớn nhất trong năm (RX1day) được dự tính tăng trên khu vực Nam Trung Bộ giai đoạn 2000–2050 theo kịch bản phát thải trung bình. Q. T. Anh và cs (2022) [15] sử dụng kết quả chi tiết hoá thống kê của 31 GCMs tham gia CMIP5 và đã chỉ ra tính bất định cao trong kết quả dự tính mưa tương lai cho Việt Nam, với giá trị trung bình toàn quốc thay đổi từ  $1,16 \pm 7,1\%$  với kịch bản RCP2.6 đến  $4,41 \pm 9,2\%$  với kịch bản RCP8.5, khi so sánh giữa thời kỳ cuối thế kỷ 2080–2099 và thời kỳ 1986–2005.

Nguồn số liệu chi tiết hoá các kịch bản BĐKH cho Việt Nam cũng được kế thừa từ một số hợp tác nghiên cứu mang tính khu vực. Trong đó đáng kể nhất là dự án dự án “Thí nghiệm Phối hợp Chi tiết hoá Khu vực - Đông Nam Á” (CORDEX-SEA, tiếng Anh: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment - Southeast Asia) [16-19]. Pha 1 của CORDEX-SEA đã được thực hiện với mục tiêu chi tiết hoá động lực các mô hình toàn cầu CMIP5 tới phân giải 25 km [19-21] sử dụng mô hình khí hậu khu vực (RCM, viết tắt của Regional Climate Model); trong khi Pha 2 của CORDEX-SEA thực hiện việc tiếp tục chi tiết hoá động lực từ phân giải 25 km về phân giải 5 km cho một số

khu vực nghiên cứu cụ thể, bao gồm khu vực hạ lưu sông Mê Kông [22]. Hiện nay, trong Pha 3, CORDEX-SEA đang tiến hành chi tiết hoá động lực về độ phân giải 25 km cho một số GCMs tham gia CMIP6 [23] theo một số kịch bản kinh tế xã hội chia sẻ SSP (viết tắt của: Shared Socioeconomic Pathways) khác nhau [24]. Mỗi nhóm nghiên cứu tham gia CORDEX-SEA được phân công chi tiết hoá ít nhất một GCM. Nhóm nghiên cứu của chúng tôi chịu trách nhiệm thực hiện chi tiết hoá động lực cho kết quả đầu ra của mô hình CNRM-CM6-1 của Trung tâm Nghiên cứu Khí tượng Quốc gia Pháp [25]. Lưu ý rằng T. N. Duy và cs (2023) [26] đã xếp hạng khả năng mô phỏng của 29 GCMs tham gia vào CMIP6 trên khu vực Việt Nam, kết quả chỉ ra CNRM-CM6-1 nằm trong số 5 mô hình tốt nhất. Bên cạnh đó, cho đến thời điểm hiện tại, theo hiểu biết của các tác giả, chưa có bất kỳ công bố nào sử dụng kết quả chi tiết hoá động lực các thí nghiệm toàn cầu CMIP6 để phân tích đánh giá BĐKH cho Việt Nam.

Trong nghiên cứu này chúng tôi sẽ tập trung vào đánh giá sự biến đổi của mưa trên khu vực Việt Nam mô phỏng bởi thí nghiệm chi tiết hoá CNRM-CM6-1 thông qua 03 chỉ số mưa, gồm: i) Tổng lượng mưa ngày; ii) Lượng mưa ngày lớn nhất trong năm; và iii) Chỉ số cường độ mưa đơn giản (xem định nghĩa tại mục 2). Đây sẽ là nghiên cứu đầu tiên ở Việt Nam phân tích kết quả chi tiết hoá động lực cho một mô hình GCM tham gia vào CMIP6. Nghiên cứu trước tiên sẽ đánh giá khả năng mô phỏng của thí nghiệm chi tiết hoá động lực cho mưa trong thời kỳ cơ sở 1995–2014, sau đó đánh giá xu thế biến đổi trong thời kỳ tương lai 2015–2099 theo hai kịch bản kinh tế xã hội chia sẻ SSP2-4.5 và SSP5-8.5.

## 2. Khu vực, nguồn số liệu và phương pháp nghiên cứu

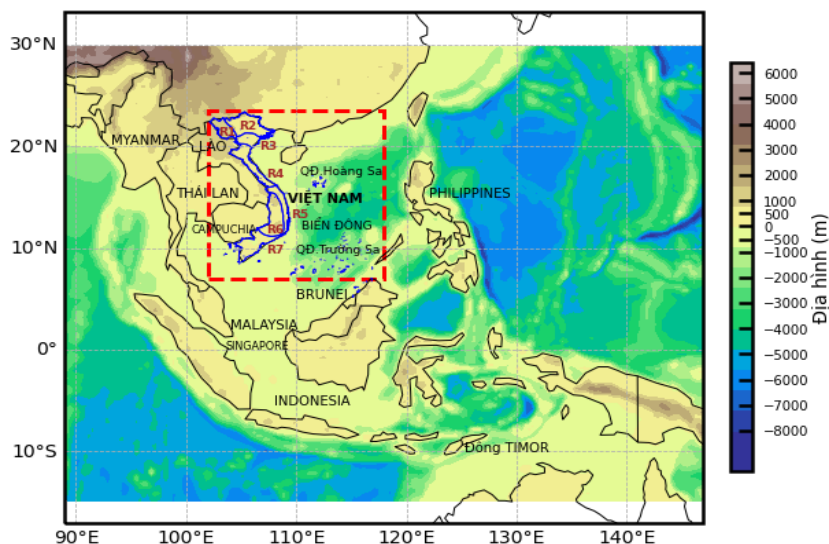
### 2.1. Thí nghiệm chi tiết hoá động lực và khu vực nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, mô hình khí hậu khu vực RegCM phiên bản 4.7 [27] đã được sử dụng

để chi tiết hoá kết quả đầu ra của mô hình CNRM-CM6-1 (thành phần r1i1p1f2, gọi tắt là CNRM) của Trung tâm Nghiên cứu Khí tượng Quốc gia Pháp [25]. CNRM là phiên bản mô hình tham gia vào CMIP6 và là một trong 5 GCMs có kết quả mô phỏng tốt nhất cho nhiệt độ 2m và lượng mưa trên 7 vùng khí hậu của Việt Nam [26].

Thí nghiệm chi tiết hoá, gọi tắt là RegCM\_CNRM, về độ phân giải 25 km được thực hiện trên miền tính [89°E–147°E, 15°S–30°N] cho khu vực Đông Nam Á (Hình 1). Trong nghiên cứu này, kết quả đánh giá và phân tích sẽ được tập trung cho khu vực đất liền Việt Nam với 7 vùng khí hậu gồm: Tây Bắc (R1), Đông Bắc (R2), đồng bằng Bắc Bộ (R3), Bắc Trung Bộ (R4), Nam Trung Bộ (R5), Tây Nguyên (R6), và Nam Bộ (R7) (Hình 1). Lưu ý rằng ranh giới của 7 vùng khí hậu được phân định theo tiêu chuẩn của Nguyễn Đức Ngữ và Nguyễn Trọng Hiệu (2004) [28].

Mô hình RegCM được sử dụng với các cấu hình sơ đồ tham số hoá vật lý như sau: sơ đồ tham số hoá đối lưu Kain-Fritsch [29], sơ đồ lớp biên hành tinh UW [30], sơ đồ mưa quy mô lớn SUBEX [31], sơ đồ thông lượng đại dương-khí quyển Zeng [32], sơ đồ bề mặt đất CLM4.5 [33]. Các cấu hình tham số hoá vật lý này đã được dự án CORDEX-SEA lựa chọn cho Pha 3 dựa trên các đánh giá độ nhạy của đầu ra mô hình đối với các lựa chọn sơ đồ vật lý khác nhau trên khu vực.



Hình 1. Miền tính của thí nghiệm chi tiết hoá động lực cho khu vực Đông Nam Á và khu vực nghiên cứu Việt Nam (trong khung màu đỏ nét đứt) với độ cao địa hình tương ứng (m). Vị trí của 7 vùng khí hậu của Việt Nam được phân định bởi các đường màu xanh.

Thí nghiệm RegCM\_CNRM được đánh giá cho thời kỳ cơ sở 1995–2014 và thời kỳ tương lai 2015–2099 theo hai kịch bản kinh tế xã hội chia sẻ SSP (viết tắt của: Shared Socioeconomic Pathways) gồm SSP2-4.5 và SSP5-8.5 [24]. SSP2-4.5 mô tả thế giới tương lai với sự phát triển đạt được mức độ cân bằng vừa phải giữa các khu vực và các lĩnh vực, trong đó cường bức xạ vào cuối thế kỷ so với thời kỳ tiền công

nghiệp đạt 4,5 W/m<sup>2</sup>. Giá trị cường bức xạ này tương ứng với kịch bản tương lai khi các nỗ lực được thực hiện để giảm nhẹ biến đổi khí hậu, bao gồm việc ban hành các chính sách giảm phát thải, việc thúc đẩy sử dụng các nguồn năng lượng tái tạo, và thay đổi sử dụng đất. Trong khi đó, SSP5-8.5 mô tả một thế giới tương lai trong đó sự phát triển thể hiện sự bất bình đẳng cao ở quy mô khu vực và toàn cầu, với cường bức xạ

vào cuối thế kỷ đạt  $8,5 \text{ W/m}^2$ . Giá trị cường bức bức xạ này tương ứng với kịch bản tương lai trong đó có rất hạn chế hoặc không có các hành động thiết thực nào được thực hiện để giảm nhẹ biến đổi khí hậu.

## 2.2. Nguồn số liệu quan trắc trên lưới VnGP

Nguồn số liệu lượng mưa ngày sử dụng trong nghiên cứu này là từ bộ số liệu trên lưới VnGP (viết tắt của cụm từ: Vietnam Gridded Precipitation dataset) [34, 35]. Bộ số liệu VnGP được xây dựng cho giai đoạn 1980–2014 bằng cách nội suy số liệu ngày từ 481 trạm đo mưa trên 7 vùng khí hậu của Việt Nam về lưới  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  hoặc lưới  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  sử dụng kỹ thuật Spheremap [36]. Trong nghiên cứu này, phiên bản của VnGP trên lưới  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  được sử dụng để phù hợp với độ phân giải của thí nghiệm chi tiết hoá động lực sử dụng mô hình khí hậu khu vực. Chất lượng của bộ dữ liệu VnGP đã được so sánh với các bộ số liệu mưa trên lưới phổ biến được dùng trên khu vực Đông Nam Á và ở nhiều nơi trên thế giới gồm bộ số liệu mưa tháng GPCC (viết tắt của: Global Precipitation Climatology Centre) [37], bộ số liệu mưa ngày APHRODITE (viết tắt của: Asean Precipitation – Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation) [38], bộ số liệu mưa tháng CRU (viết tắt của: Climate Research Unit) [39], và bộ số liệu mưa tái phân tích ERA5 trên lục địa (sản phẩm ERA5-Land) [40]. Kết quả cho thấy chất lượng của bộ dữ liệu VnGP vượt trội khi so với các bộ dữ liệu còn lại [35] cũng như khi so với một số phương pháp nội suy khác không sử dụng Spheremap [34].

## 2.3. Các chỉ số mưa được sử dụng để phân tích

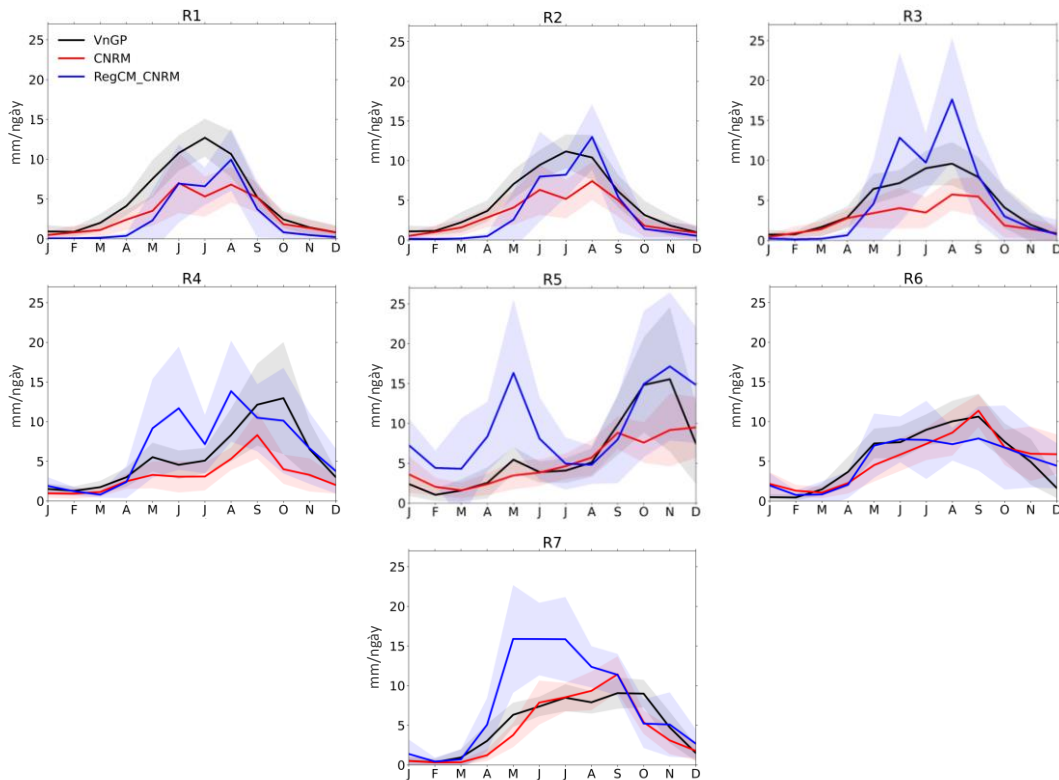
Từ chuỗi số liệu ngày của mưa, 03 chỉ số liên quan sẽ được tính toán và phân tích trong nghiên cứu này gồm: i) Tổng lượng mưa ngày R (mm/ngày); ii) Chỉ số cường độ mưa đơn giản (SDII, viết tắt của Simple precipitation Intensity Index, đơn vị mm/ngày) được tính bằng tổng lượng mưa của những ngày mưa trong năm chia cho số ngày mưa; và iii) Lượng mưa ngày lớn nhất trong năm (RX1day, đơn vị mm/ngày).

Phân tích các chỉ số này sẽ cho chúng ta có các thông tin tương ứng về sự biến đổi của giá trị trung bình, biên độ và cường độ của cực trị mưa trong tương lai.

## 3. Kết quả và thảo luận

### 3.1. Khả năng mô phỏng cho thời kỳ cơ sở

Lượng mưa từng tháng trung bình cho giai đoạn 1995–2014 của thí nghiệm chi tiết hoá RegCM\_CNRM được so sánh với kết quả của mô hình toàn cầu CNRM và nguồn số liệu VnGP trên Hình 2. Mặc dù có sự khác biệt đáng kể về mặt biên độ giữa kết quả mô phỏng và quan trắc, tuy nhiên nhìn chung RegCM\_CNRM đã nắm bắt được biến trình mùa của mưa trên đa số các khu vực. Đặc biệt trên khu vực Nam Trung Bộ (R5), RegCM\_CNRM đã nắm bắt được khá tốt 2 đỉnh mưa được chỉ ra bởi VnGP, một đỉnh nhỏ vào tháng 5 phản ánh hiện tượng mưa tiểu mãn do sự dịch chuyển của dải hội tụ nhiệt đới qua khu vực, và đỉnh lớn hơn vào mùa thu đông dưới ảnh hưởng của gió mùa mùa đông, trong khi mô hình toàn cầu CNRM không nắm bắt được. Tuy nhiên, cũng lưu ý rằng mặc dù nắm bắt được đỉnh mưa tiểu mãn trên khu vực miền Trung (R3–5), thí nghiệm RegCM\_CNRM có xu hướng cho giá trị mưa thiên cao rõ rệt. Kết quả này gợi ý rằng một nghiên cứu về khả năng cải tiến cấu hình thí nghiệm cũng như lựa chọn các sơ đồ tham số hoá phù hợp cho RegCM nhằm biểu diễn tốt giá trị mưa tiểu mãn trên khu vực miền Trung sẽ là một hướng nghiên cứu có ý nghĩa và cần được thực hiện trong tương lai. Mô hình CNRM mô phỏng thiên thấp lượng mưa so với VnGP trên hầu hết các vùng khí hậu. Trong khi đó RegCM\_CNRM thường có xu hướng làm giảm tính thiên âm của CNRM, nhưng lại mang giá trị mưa về hướng thiên cao so với giá trị của VnGP. Trên khu vực Nam Bộ (R7), kết quả RegCM\_CNRM thiên cao rõ rệt trong các tháng xuân và hè trong khi CNRM lại mô phỏng khá sát giá trị của VnGP. Điều này có thể là do khu vực Nam Bộ có địa hình khá bằng phẳng, vì vậy ưu thế phân giải cao để có thể biểu diễn địa hình tốt hơn của RegCM\_CNRM sẽ không có hiệu quả rõ rệt.



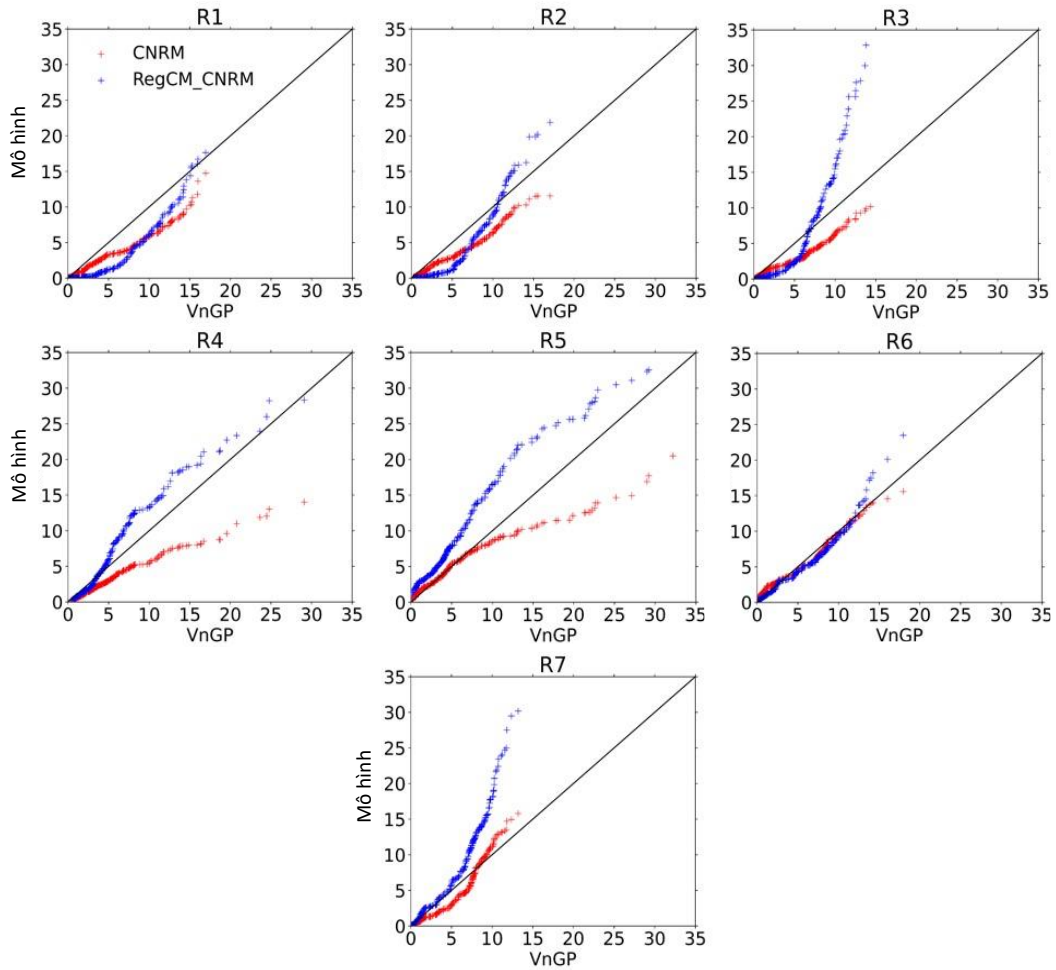
Hình 2. Biến trình năm của mưa trung bình trên từng vùng khí hậu của Việt Nam cho thời kỳ cơ sở 1995–2014. Đường màu biểu diễn giá trị trung bình khí hậu còn các khoảng tô màu biểu diễn khoảng  $\pm 1$  lần độ lệch chuẩn cho 20 giá trị tháng của thời kỳ cơ sở.

Hình 3 biểu diễn biểu đồ phân vị Q–Q cho phép so sánh hai phân phối của các giá trị mưa trung bình tháng thời kỳ 1995–2014 giữa kết quả mô hình và nguồn số liệu VnGP. Có thể thấy dạng phân phối của mưa CNRM thường có xu hướng lệch phải so với phân phối của VnGP trên hầu khắp các vùng khí hậu ngoại trừ R6 và R7, thể hiện bởi các điểm màu đỏ nằm dưới đường chéo. Điều này dẫn tới việc CNRM nắm bắt thiên thấp các cực trị mưa tháng trên các vùng từ R1–R5. Phân phối của VnGP được biểu diễn tốt nhất bởi CNRM trên khu vực R6 Tây Nguyên và sau đó là R7 Nam Bộ. Trên khu vực Nam Bộ, phân phối của CNRM có xu hướng tăng cường độ nhọn ở phía cực trị thấp và giảm độ nhọn ở phía cực trị cao, dẫn tới kết quả thiên thấp của CNRM ở những khoảng phân vị nhỏ và thiên cao của CNRM ở những khoảng phân vị cao. Lưu ý rằng Hình 2 cũng thể hiện một phần kết quả này khi

lượng mưa trung bình khí hậu trên R7 của CNRM nhỏ hơn VnGP vào một số tháng ít mưa nhất (tháng 2–4) và cao hơn VnGP trong các tháng mưa nhiều nhất (tháng 8–9).

Kết quả chi tiết hoá Reg\_CNRM làm thay đổi rõ rệt phân phối của giá trị mưa tháng so với CNRM. Phân phối của Reg\_CNRM có xu hướng lệch trái rõ rệt so với CNRM và so cả với VnGP trên các vùng khí hậu R4, R5 và R7, dẫn tới việc mô phỏng thiên cao các giá trị cực trị mưa lớn trên các khu vực này. Trong khi đó, phân phối của Reg\_CNRM cho xu thế lệch phải, nghĩa là thiên thấp, ở các giá trị mưa nhỏ trên các vùng khí hậu R1–3 và R6 và có xu thế lệch trái, nghĩa là thiên cao khi giá trị mưa quan trắc vượt qua một ngưỡng nhất định. Nhìn chung, Hình 3 cho thấy thí nghiệm chi tiết hoá Reg\_CNRM không cho sự cải thiện rõ rệt về phân phối của mưa tháng trên các vùng khí hậu của Việt Nam.





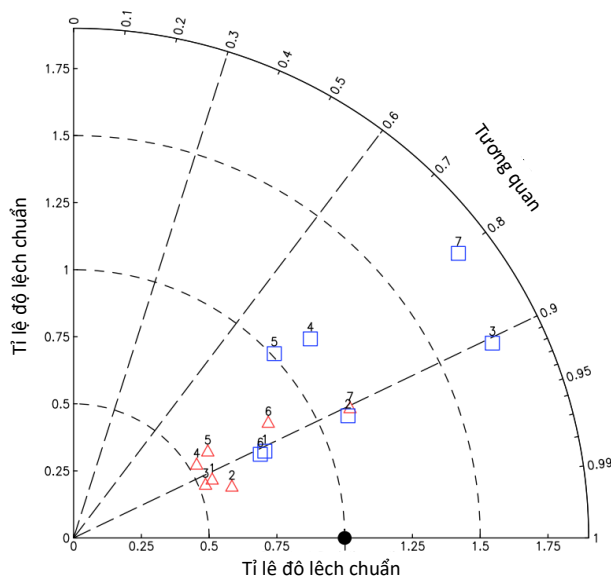
Hình 3. Biểu đồ phân vị Q-Q cho giá trị mưa trung bình tháng cho 240 tháng giai đoạn 1995–2014. Đơn vị mm/ngày.

Hình 4 là một so sánh khác về kết quả mô phỏng RegCM-CNRM và CNRM so với VnGP sử dụng giản đồ Taylor [41]. Trên giản đồ Taylor, tỉ lệ giữa độ lệch chuẩn của kết quả mô phỏng so với quan trắc được biểu thị bởi khoảng cách xuyên tâm, trong khi tương quan giữa kết quả mô phỏng và quan trắc được biểu thị bởi góc cực. Mỗi ký hiệu trên giản đồ tương ứng với kết quả tính toán cho mỗi vùng khí hậu, hoặc bởi mô hình toàn cầu CNRM (ký hiệu tam giác đỏ), hoặc bởi thí nghiệm chi tiết hoá RegCM\_CNRM (ký hiệu hình vuông xanh). Giá trị quan trắc được biểu diễn bởi một điểm trên trục ngang (có tương quan bằng 1) ở khoảng cách đơn vị so với điểm

gốc của giản đồ (nghĩa là không có sai số đối với độ lệch chuẩn). Theo Taylor (2001) [41], khoảng cách từ mỗi điểm mô hình đến điểm quan trắc tỉ lệ với giá trị chênh lệch RMSD (viết tắt của centred root mean square). RMSD càng nhỏ nghĩa là kết quả mô phỏng càng gần với kết quả quan trắc. Có thể thấy kết quả chi tiết hoá RegCM-CNRM nhìn chung cho biên độ thay đổi mưa các tháng trong năm thiên cao so với quan trắc, trong khi CNRM cho biên độ thiên thấp. Một số ngoại lệ là R1 và R6 – thiên thấp – đối với RegCM-CNRM, và R7 – thiên cao – đối với CNRM. Các kết quả mô phỏng nắm bắt khá tốt chu trình năm của mưa, biểu thị ở giá trị tương

quan tương đối cao, phổ biến trong khoảng từ 0,7–0,9. Thí nghiệm chi tiết hoá không giúp cải

thiện chênh lệch RMSD trên các vùng khí hậu, ngoại trừ R1 và R2.



Hình 4. Giản đồ Taylor cho các giá trị trung bình khí hậu của mưa (bao gồm 12 giá trị tương ứng với 12 tháng của năm) trên 7 vùng khí hậu của Việt Nam (các số trên các ký hiệu biểu diễn vùng khí hậu tương ứng). Các ký hiệu tam giác màu đỏ biểu diễn kết quả từ mô hình toàn cầu CNRM, các ký hiệu hình vuông màu xanh biểu diễn kết quả từ thí nghiệm chi tiết hoá RegCM-CNRM. Ký hiệu tròn màu đen biểu diễn vị trí của giá trị quan trắc VnGP.

Để làm rõ hơn vai trò của chi tiết hoá, giá trị gia tăng AV (viết tắt của: Added Values) của kết quả thí nghiệm RegCM\_CNRM so với kết quả mô phỏng bởi mô hình toàn cầu CNRM được tính toán sử dụng công thức đề xuất bởi Di Luca và cs (2013) [42]:

$$AV = (X_{GCM} - X_{OBS})^2 - (X_{RCM} - X_{OBS})^2 \quad (1)$$

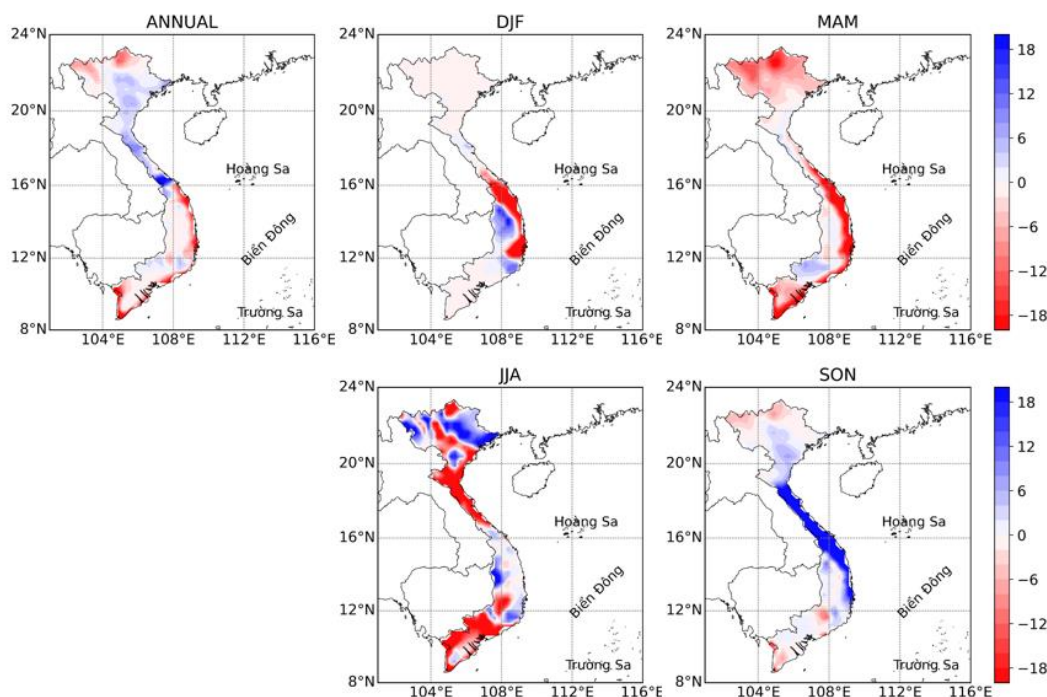
trong đó X biểu diễn giá trị trung bình khí hậu của nhiệt độ hoặc lượng mưa, trung bình cho cả giai đoạn 1995–2014. Các biến X với ký hiệu GCM, RCM, và OBS biểu diễn giá trị của đại lượng X tương ứng cho bởi mô hình toàn cầu CNRM, thí nghiệm chi tiết hoá RegCM-CNRM, và nguồn số liệu VnGP. Nếu  $AV > 0$ , kết quả chi tiết hoá cho thấy giá trị gia tăng khi so sánh với kết quả của mô hình toàn cầu, trong khi  $AV < 0$  chỉ ra rằng mô hình toàn cầu cho kết quả tốt hơn so với chi tiết hoá. Lưu ý rằng so sánh này được thực hiện trên lưới 0,25°; kết quả CNRM trước đó đã được nội suy song tuyến tính về lưới này.

Hình 5 biểu diễn AV cho giá trị mưa trung bình năm và các mùa trên Việt Nam. Có thể thấy giá trị AV thay đổi theo không gian và thời gian, tuy nhiên trong đa số trường hợp chi tiết hoá không cho kết quả mô phỏng tốt hơn so với mô hình toàn cầu CNRM có phân giải cao. Điều này một phần đến từ việc chỉ số AV chỉ so sánh mình giá trị mưa trung bình cho cả thời kỳ chứ không xem xét đến các yếu tố như tương quan, độ lệch chuẩn như giản đồ Taylor. Trong khi đó một số nghiên cứu trước đã chỉ ra rằng các kết quả mô phỏng với mô hình khí hậu khu vực trên khu vực Đông Nam Á, đặc biệt là mô phỏng mưa, rất nhạy với các cấu hình tham số hoá vật lý của mô hình và kết quả mô phỏng có thể rất khác biệt so với kết quả quan trắc [16, 18, 42]. Nguyen-Thuy và cs (2021) [43] cũng chỉ ra rằng nếu như không áp dụng phương pháp hiệu chỉnh sai số hậu mô hình, kết quả chi tiết hoá động lực mưa đối với sản phẩm CMIP5 thường kém hơn so với kết



quả của mô hình khí hậu toàn cầu ban đầu trên Việt Nam. Thí nghiệm chi tiết hoá động lực chỉ cho thấy hiệu quả rõ rệt sau khi áp dụng hiệu chỉnh sai số hoặc sử dụng phép nhân chênh lệch [43], hoặc sử dụng hiệu chỉnh phân vị [44]. Lưu ý rằng việc hiệu chỉnh số liệu mưa của thí nghiệm chi tiết hoá CMIP6 nằm ngoài mục tiêu của nghiên cứu này. Tuy nhiên, cần ghi nhận

rằng vào mùa mưa SON do tương tác giữa gió mùa mùa đông và địa hình gây mưa dọc duyên hải miền Trung, thí nghiệm chi tiết hoá cho kết quả tốt hơn đáng kể ( $AV > 0$ ) trên khu vực này. Điều này cho thấy vai trò của độ phân giải cao thể hiện trong RegCM\_CNRM trong việc nắm bắt các tương tác của các hình thái thời tiết với địa hình gây mưa.



Hình 5. Điểm số AV của thí nghiệm chi tiết hoá RegCM\_CNRM cho giá trị mưa trung bình năm (Annual) và các mùa trên Việt Nam, bao gồm mùa đông (DJF), mùa xuân (MAM), mùa hè (JJA) và mùa thu (SON). Màu xanh nghĩa là thí nghiệm RegCM\_CNRM tốt hơn so với kết quả CNRM nếu xét theo điểm AV. Đơn vị (mm/ngày)<sup>2</sup>.

### 3.2. Dự tính tương lai

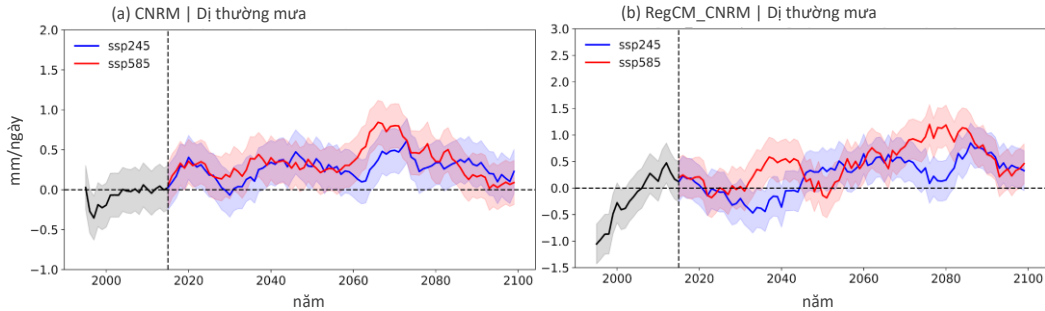
Hình 6 biểu diễn diễn biến của dị thường lượng mưa tương lai trung bình trên toàn Việt Nam, được dự tính bởi mô hình toàn cầu CNRM và thí nghiệm chi tiết hoá RegCM\_CNRM theo 2 kịch bản SSP2-4.5 và SSP5-8.5. Kết quả cho thấy mưa có xu thế tăng lên trên Việt Nam trong tương lai từ giữa đến cuối thế kỷ so với thời kỳ chuẩn, mặc dù sự khác nhau giữa 2 kịch bản SSP2-4.5 và SSP5-8.5 là không rõ rệt nếu xét riêng giai đoạn cuối thế kỷ 21. Xu thế biến đổi trung bình trên toàn Việt Nam của kết quả chi

tiết hoá khá tương đồng với xu thế biến đổi nhận được từ mô hình toàn cầu CNRM. Kết quả xu thế tăng mưa trên Việt Nam này cũng phù hợp với những kết quả dự tính trước đây đã được công bố của Bộ Tài nguyên và Môi trường sử dụng kết quả chi tiết hoá cho các mô hình tham gia CMIP5 trở về trước [1-4].

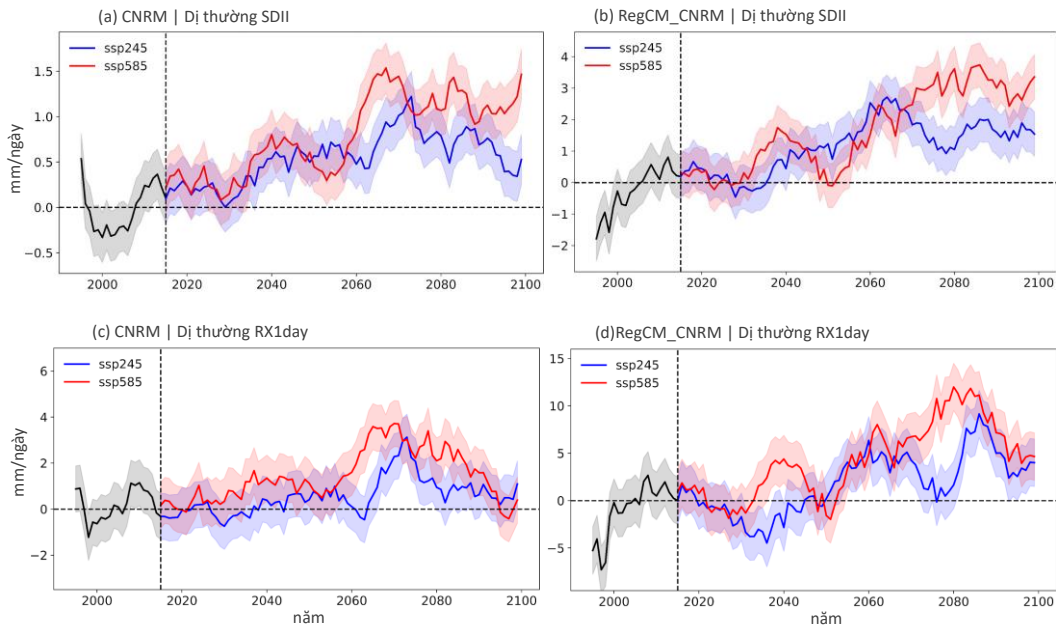
Hình 7 biểu diễn tương tự như Hình 6 nhưng cho chỉ số cường độ mưa đơn giản SDII và lượng mưa ngày lớn nhất trong năm RX1day. Kết quả cũng cho thấy sự tương đồng về xu thế biến đổi giữa thí nghiệm chi tiết hoá và mô hình toàn cầu.

SDII có xu hướng tăng rõ rệt trong tương lai theo cả 2 kịch bản. RX1day cũng có xu hướng tăng rõ rệt. Như vậy mưa được dự tính gia tăng cả về

cường độ và lượng mưa cực trị, dẫn đến các hiểm họa do mưa lớn có nhiều khả năng sẽ gia tăng trong tương lai.



Hình 6. Trung bình trượt 10 năm của dị thường mưa so với trung bình thời kỳ cơ sở cho (a) mô hình toàn cầu CNRM và (b) kết quả chi tiết hoá RegCM\_CNRM. Đường màu đen biểu diễn cho thời kỳ cơ sở, đường màu xanh và đỏ tương ứng cho thời kỳ tương lai theo kịch bản SSP2-4.5 và SSP5.8-5. Các khoảng bôi màu biểu diễn  $\pm 1$  lần độ lệch chuẩn. Đơn vị mm/ngày.



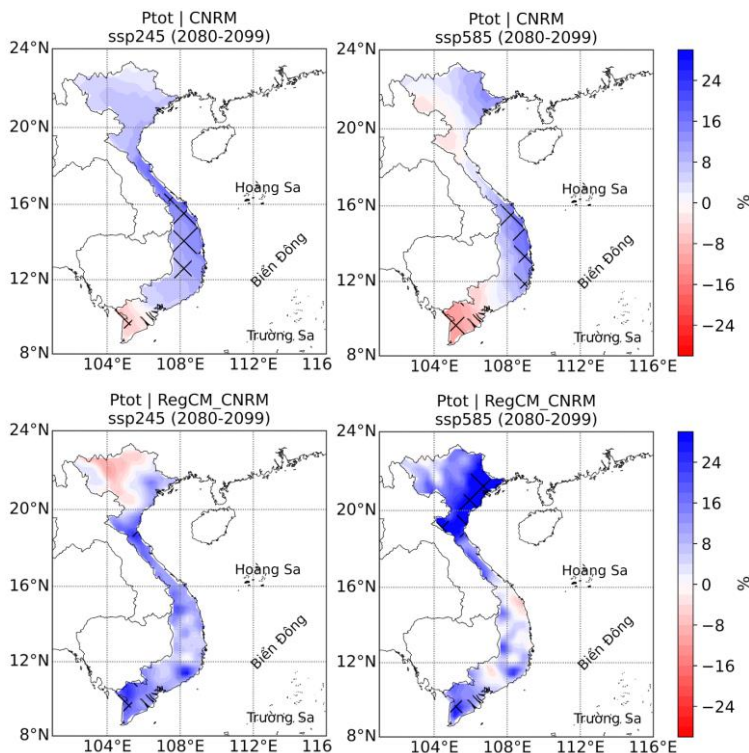
Hình 7. Tương tự như Hình 6 nhưng cho chỉ số SDII (trên) và chỉ số RX1day (dưới).

Hình 8 cho thấy sự biến đổi của lượng mưa theo không gian trên lãnh thổ Việt Nam giữa thời kỳ cuối thế kỷ và thời kỳ cơ sở theo 2 kịch bản. Nhìn chung lượng mưa có xu thế tăng lên theo cả 2 kịch bản trên hầu khắp Việt Nam, cho cả kết quả chi tiết hoá RegCM\_CNRM và mô hình toàn cầu CNRM, với mức tăng có thể đạt tới

~25% (khu vực ven biển Bắc Bộ, kết quả RegCM\_CNRM, kịch bản SSP5-8.5). Ở đây cần lưu ý là CNRM cho kết quả lượng mưa giảm trong tương lai trên đồng bằng sông Cửu Long, trong khi đó RegCM\_CNRM lại cho kết quả tăng trên khu vực. Nhiều nghiên cứu trước đây cũng đã chỉ ra tính bất định của kết quả mô

phỏng mưa từ các mô hình [8, 16, 18]. Như vậy cần lưu ý việc sử dụng kết quả dự tính mưa trong tương lai cho một khu vực cụ thể cần phải cân nhắc thêm cả tính bất định của mô hình. Trên khu vực Nam Trung Bộ và Tây Nguyên, mô hình CNRM cho kết quả mưa gia tăng rõ rệt trong tương lai theo cả 2 kịch bản SSP2-4.5 và SSP5-8.5, đạt mức ý nghĩa thống kê ở ngưỡng 95%.

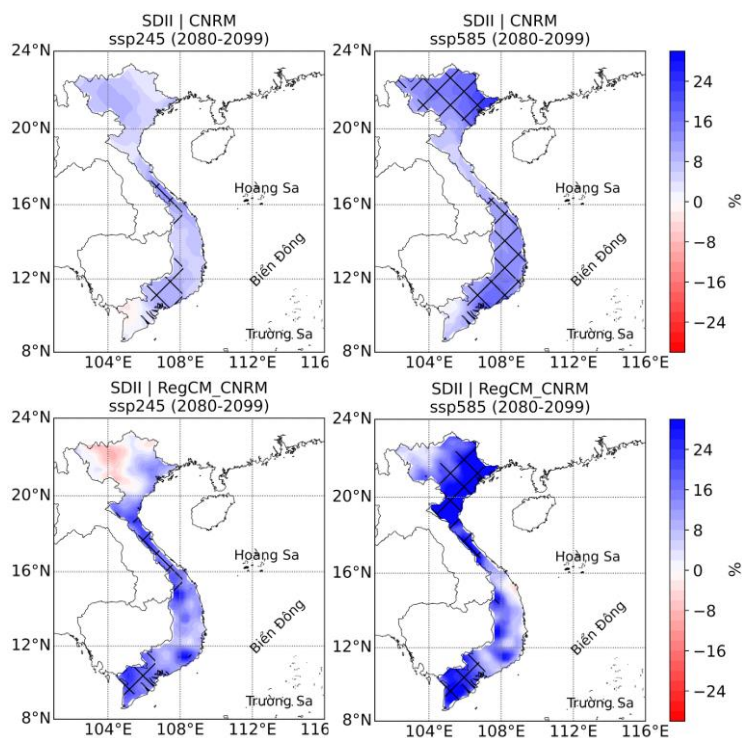
Tuy nhiên kết quả chi tiết hoá RegCM\_CNRM cũng cho kết quả nhìn chung tăng trên các khu vực này, ngoại trừ duyên hải Nam Trung Bộ theo kịch bản SSP5-8.5 có xu hướng giảm nhẹ. Tuy nhiên các mức tăng giảm của RegCM\_CNRM trên Nam Trung Bộ và Tây Nguyên đều không đạt mức ý nghĩa thống kê 95%.



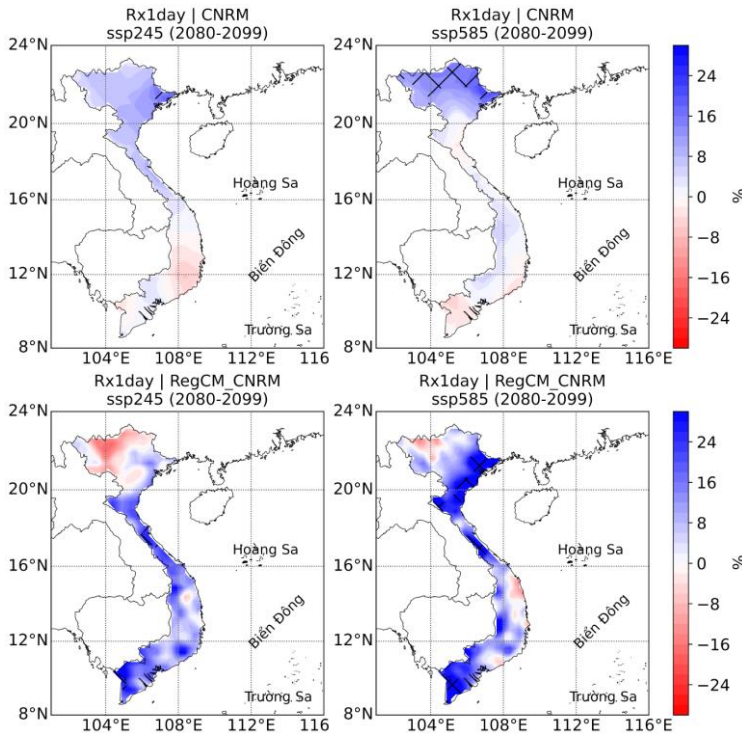
Hình 8. Sự biến đổi (%) lượng mưa trung bình thời kỳ cuối thế kỷ 2080–2099 theo kịch bản SSP2.4-5 (trái) và SSP5.-8.5 (phải) so với thời kỳ cơ sở, nhận được từ mô hình toàn cầu CNRM (trên) và kết quả chi tiết hoá RegCM\_CNRM (dưới). Các khu vực có gạch chéo thể hiện sự biến đổi đạt ý nghĩa thống kê ở ngưỡng 95% với kiểm nghiệm t-test.

Mức độ tăng của cường độ mưa SDII rõ rệt hơn so với lượng mưa trung bình (Hình 9), đạt mức ý nghĩa thống kê 95% trên hầu khắp Việt Nam theo kịch bản SSP5-8.5 cho cả kết quả chi tiết hoá RegCM\_CNRM và mô hình toàn cầu CNRM. Mức tăng nhỏ hơn cho kịch bản SSP2-4.5, trong đó xu hướng tăng giảm trái ngược giữa RegCM\_CNRM và CNRM trên vùng Tây Bắc, tuy nhiên các mức tăng giảm này đều chưa đạt mức ý nghĩa thống kê. Đối với chỉ số RX1day (Hình 10), CNRM cho xu thế tăng ở khu vực

phía Bắc Việt Nam theo cả 2 kịch bản, và xu thế tăng giảm không rõ nét trên các khu vực khác. Trong khi đó RegCM\_CNRM cho kết quả RX1day tăng trên hầu khắp Việt Nam theo cả 2 kịch bản, ngoại trừ một phần khu vực Tây Bắc và Nam Trung Bộ. Điều này gợi ý rằng với độ phân giải cao hơn, tương tác giữa địa hình và các hình thể gây mưa có thể được tăng cường, dẫn tới sự gia tăng lượng mưa cực trị RX1day trong tương lai.



Hình 9. Tương tự như Hình 8 nhưng cho chỉ số SDII.



Hình 10. Tương tự như Hình 8 nhưng cho chỉ số Rx1d.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu này đã lần đầu tiên trình bày kết quả chi tiết hoá động lực từ một mô hình toàn cầu tham gia vào CMIP6 cho Việt Nam. Mô hình khí hậu khu vực RegCM phiên bản 4.7 đã được sử dụng để chi tiết hoá đầu ra của mô hình toàn cầu CNRM-CM6-1 theo 2 kịch bản SSP2-4.5 và SSP5-8.5.

Các kết quả nhận được cho thấy việc chi tiết hoá đạt hiệu quả rõ rệt trong mô phỏng mưa trên các khu vực địa hình phức tạp, đặc biệt là khu vực Trung Bộ vào các tháng gió mùa mùa đông. Tuy nhiên nhìn chung kết quả chi tiết hoá chưa cho thấy được sự vượt trội so với kết quả mô phỏng toàn cầu, cả về biên trình năm của mưa, giá trị lượng mưa, cũng như về phân bố không gian của mưa. Điều này gợi ý rằng trong tương lai, để có thể tận dụng ưu điểm độ phân giải cao của kết quả chi tiết hoá, một số phương pháp hiệu chỉnh mưa nên được áp dụng trước khi đưa vào sử dụng cho các bài toán cụ thể [21, 43, 44].

Kết quả dự tính trong tương lai cho thấy mưa, bao gồm cả mưa trung bình, cường độ mưa SDII, và lượng mưa ngày lớn nhất trong năm RX1day, nhìn chung có xu hướng tăng trên nhiều khu vực của Việt Nam theo cả 2 kịch bản SSP2-4.5 và SSP5-8.5. Mức tăng có thể đạt tới ~25% trên khu vực ven biển Bắc Bộ cho thí nghiệm RegCM\_CNRM với kịch bản SSP5-8.5. Mức độ tăng của cường độ mưa SDII là rõ rệt trên hầu khắp Việt Nam (ngoại trừ khu vực Tây Bắc theo thí nghiệm RegCM\_CNRM và kịch bản SSP2-4.5), đặc biệt là theo kịch bản SSP5-8.5. Đối với chỉ số RX1day, có sự khác biệt về xu hướng tăng giảm trên các khu vực cụ thể giữa mô hình toàn cầu CNRM và kết quả chi tiết hoá. Trong khi CNRM cho kết quả tăng giảm không rõ rệt trên nhiều khu vực, RegCM\_CNRM cho thấy RX1day tăng trên hầu khắp Việt Nam theo cả 2 kịch bản, ngoại trừ một phần khu vực Tây Bắc và Nam Trung Bộ.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, chúng tôi dự kiến sẽ hiệu chỉnh lượng mưa từ mô hình để có thể có được bộ số liệu phân giải cao và có kết quả phù hợp với nguồn số liệu quan trắc trong thời kỳ chuẩn, nhằm phục vụ các nghiên cứu

đánh giá tác động. Bên cạnh đó, chúng tôi cũng sẽ tiến hành phân tích sự biến đổi của mưa trong tương lai dựa trên đầu ra của tổ hợp một số thí nghiệm chi tiết hoá động lực và thống kê, từ đó có thể đánh giá được tính không chắc chắn của các kết quả mô hình. Các kết quả dự tính chi tiết hoá từ các mô hình toàn cầu CMIP6 sẽ là nguồn thông tin, dữ liệu quan trọng để cập nhật các kịch bản biến đổi khí hậu cho Việt Nam trong tương lai.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ quốc gia (NAFOSTED) mã số 105.06-2021.14. Các tác giả chân thành cảm ơn các đồng nghiệp thuộc cộng đồng CORDEX-SEA về các trao đổi, thảo luận, cũng như về các thí nghiệm độ nhạy với điều kiện biên tái phân tích ERA5 đã được thực hiện, từ đó có thể xác định được cấu hình vật lý phù hợp sử dụng cho RegCM phiên bản 4.7 trên khu vực.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] MONRE, Climate Change Scenarios, Vietnam Natural Resources, Environment and Mapping Publishing House, 2020, pp. 1-286 (in Vietnamese).
- [2] MONRE, Climate Change and Sea Level Rise Scenarios for Vietnam, Vietnam Natural Resources, Environment and Mapping Publishing House, 2016, pp. 1-188 (in Vietnamese).
- [3] MONRE, Climate Change and Sea Level Rise Scenarios for Vietnam, Ministry of Natural Resources and Environment, 2009, pp. 1-34 (in Vietnamese).
- [4] MONRE, Climate Change and Sea Level Rise Scenarios for Vietnam, Vietnam Natural Resources, Environment and Mapping Publishing House, 2012, pp. 1-112 (in Vietnamese).
- [5] N. D. Thanh, P. V. Tan, Non-parametric Test for Trend Detection of Some Meteorological Elements for the Period 1961-2007, VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology, Vol. 28, No. 3S, 2012, pp. 129-135 (in Vietnamese).
- [6] 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, Scientific Online Letters on the Atmosphere, Vol. 16, 2020, pp. 169-174, <https://doi.org/10.2151/SOLA.2020-029>.
- [7] T. N. Duc, Rainfall Extremes in Northern Vietnam: A Comprehensive Analysis of Patterns and Trends, Vietnam Journal of Earth Sciences, Vol. 45, No. 2, 2023, pp. 183-198, <https://doi.org/10.15625/2615-9783/18284>.
- [8] T. N. Duc, Climate Change Scenarios for Southeast Asia and Vietnam: Current Status and Future Research Directions, VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences, Vol. 39, No. 1, 2023, pp. 1-15, <https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4932>.
- [9] N. Nakicenovic, R. Swart, C. Cambridge, University Press U. K, Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000, [Online] Available: <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm> (accessed on: September 1<sup>st</sup>, 2023).
- [10] T. Ho, V. Phan, N. Le, Q. Nguyen, Extreme Climatic Events Over Vietnam from Observational Data and Regcm3 Projections, Clim Res, Vol. 49, No. 2, 2011, pp. 87-100, <https://doi.org/10.3354/cr01021>.
- [11] J. Katzfey et al., High-resolution Simulations for Vietnam - Methodology and Evaluation of Current Climate, Asia Pac J Atmos Sci, Vol. 52, No. 2, 2016, pp. 91-106, <https://doi.org/10.1007/s13143-016-0011-2>.
- [12] T. N. Duc, C. Kieu, M. Thatcher, D. N. Le, T. P. Van, Climate Projections for Vietnam Based on Regional Climate Models, Clim Res, Vol. 60, No. 3, 2014, pp. 199-213, <https://doi.org/10.3354/cr01234>.
- [13] D. V. Vuuren et al., The Representative Concentration Pathways: An Overview, Clim Change, Vol. 109, No. 1-2, 2011, pp. 5-31, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
- [14] 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, No. 1, 2019, pp. 54, <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0297-7>.
- [15] Q. T. Anh, T. N. Duc, E. Espagne, L. T. Tuan, A High-Resolution Projected Climate Dataset for Vietnam: Construction and Preliminary Application in Assessing Future Change, Journal of Water and Climate Change, Vol. 13, No. 9, 2022, pp. 3379-3399, <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.144>.
- [16] L. Juneng et al., Sensitivity of Southeast Asia Rainfall Simulations to Cumulus and Air-Sea Flux Parameterizations in RegCM4, Clim Res, Vol. 69, No. 1, 2016, pp. 59-77, <https://doi.org/10.3354/cr01386>.
- [17] F. T. Cruz et al., Sensitivity of Temperature to Physical Parameterization Schemes of Regcm4 Over the CORDEX-Southeast Asia Region, International Journal of Climatology, Vol. 37, No. 15, 2017, pp. 5139-5153, <https://doi.org/10.1002/joc.5151>.
- [18] T. N. Duc et al., Performance Evaluation of RegCM4 in Simulating Extreme Rainfall and Temperature Indices Over the CORDEX-Southeast Asia Region, International Journal of Climatology, Vol. 37, No. 3, 2017, pp. 1634-1647, <https://doi.org/10.1002/joc.4803>.
- [19] F. Tangang et al., Projected Future Changes in Rainfall in Southeast Asia Based on CORDEX-SEA Multi-Model Simulations, Clim Dyn, Vol. 55, No. 5-6, 2020, pp. 1247-1267, <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05322-2>.
- [20] Supari et al., Multi-model Projections of Precipitation Extremes in Southeast Asia based on CORDEX-Southeast Asia Simulations, Environ Res, Vol. 184, 2020, pp. 109350, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109350>.
- [21] S. T. Ngai et al., Projected Mean and Extreme Precipitation Based on Bias-Corrected Simulation Outputs of CORDEX Southeast Asia, Weather Clim Extrem, Vol. 37, 2022, pp. 100484, <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100484>.
- [22] H. H. Cong et al., A High-resolution Climate Experiment Over Part of Vietnam and the Lower Mekong Basin: Performance Evaluation and Projection for Rainfall, Vietnam Journal of Earth Sciences, Vol. 44, No. 1, 2022, pp. 92-108, <https://doi.org/10.15625/2615-9783/16942>.
- [23] V. Eyring et al., Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) Experimental Design And Organization, Geosci Model Dev, Vol. 9, No. 5, 2016, pp. 1937-1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.
- [24] B. C. O' Neill et al., The Roads Ahead: Narratives for Shared Socioeconomic Pathways Describing World Futures in the 21<sup>st</sup> Century, Global Environmental Change, Vol. 42, 2017, pp. 169-180, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>.
- [25] A. Voltaire et al., Evaluation of CMIP6 DECK Experiments with CNRM-CM6-1, J Adv Model Earth Syst, Vol. 11, No. 7, 2019, pp. 2177-2213, <https://doi.org/10.1029/2019MS001683>.



- [26] T. N. Duy, T. N. Duc, Q. Desmet, Performance Evaluation and Ranking of CMIP6 Global Climate Models Over Vietnam, *Journal of Water and Climate Change*, Vol. 14, No. 6, 2023, pp. 1831-1846, <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.454>.
- [27] F. Giorgi et al., RegCM4: Model Description and Preliminary Tests Over Multiple CORDEX Domains, *Clim Res*, Vol. 52, 2012, pp. 7-29, <https://doi.org/10.3354/cr01018>.
- [28] N. D. Ngu, N. T. Hieu, *Climate and Climate Resources of Vietnam*, Agriculture Publishing House, 2004, pp. 1-230 (in Vietnamese).
- [29] J. S. Kain, The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update, *J. Appl. Meteor. Climatol*, Vol. 43, 2004, pp. 170-181, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2).
- [30] C. S. Bretherton, J. R. McCaa, H. Grenier, A New Parameterization for Shallow Cumulus Convection and Its Application to Marine Subtropical Cloud-Topped Boundary Layers, Part I: Description and 1D Results, *Mon Weather Rev*, Vol. 132, No. 4, 2004, pp. 864-882, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0864:ANPFSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0864:ANPFSC>2.0.CO;2).
- [31] J. S. Pal et al., Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNET, *Bull Am Meteorol Soc*, Vol. 88, 2007, pp. 1395-1409, <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-9-1395>.
- [32] X. Zeng, M. Zhao, R. E. Dickinson, Intercomparison of Bulk Aerodynamic Algorithms for the Computation of Sea Surface Fluxes Using TOGA COARE and TAO Data, *J Clim*, Vol. 11, No. 10, 1998, pp. 2628-2644, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<2628:IOBAAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<2628:IOBAAF>2.0.CO;2).
- [33] K. W. Oleson et al., Technical Description of Version 4.5 of the Community Land Model (CLM), NCAR Earth System Laboratory–Climate and Global Dynamics Division, Boulder, Colorado, 2013, pp. 1-434.
- [34] T. N. Xuan et al., The Vietnam Gridded Precipitation (VnGP) Dataset: Construction and Validation, *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 12, 2016, pp. 291-296, <https://doi.org/10.2151/sola.2016-057>.
- [35] Q. T. Anh, T. N. Duc, E. Espagne, L. T. Tuan, A 10-km CMIP6 Downscaled Dataset of Temperature and Precipitation for Historical and Future Vietnam Climate, *Scientific Data*, Vol. 10, 2023, pp. 257, <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02159-2>.
- [36] C. J. Willmott, C. M. Rowe, W. D. Philpot, Small-Scale Climate Maps: A Sensitivity Analysis of Some Common Assumptions Associated with Grid-Point Interpolation and Contouring, *the American Cartographer*, Vol. 12, No. 1, 1985, pp. 5-16, <https://doi.org/10.1559/152304085783914686>.
- [37] U. Schneider, A. Becker, P. Finger, A. M. Christoffer, M. Ziese, B. Rudolf, GPCC's New Land Surface Precipitation Climatology Based on Quality-Controlled in Situ Data and Its Role in Quantifying the Global Water Cycle, *Theor Appl Climatol*, Vol. 115, No. 1, 2013, pp. 15-40, <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0860-x>.
- [38] A. Yatagai, K. Kamiguchi, O. Arakawa, A. Hamada, N. Yasutomi, A. Kitoh, APHRODITE: Constructing a Long-Term Daily Gridded Precipitation Dataset for Asia Based on a Dense Network of Rain Gauges, *Bull Am Meteorol Soc*, Vol. 93, No. 9, 2012, pp. 1401-1415, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00122.1>.
- [39] I. Harris, P. D. Jones, T. J. Osborn, D. H. Lister, Updated High-resolution Grids of Monthly Climatic Observations - the CRU TS3.10 Dataset, *International Journal of Climatology*, Vol. 34, No. 3, 2014, pp. 623-642, <https://doi.org/10.1002/joc.3711>.
- [40] H. Hersbach et al., The ERA5 Global Reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 146, No. 730, 2020, pp. 1999-2049, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- [41] K. E. Taylor, Summarizing Multiple Aspects of Model Performance in A Single Diagram, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 106, No. D7, 2001, pp. 7183-7192, <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>.
- [42] A. D. Luca, R. D. Elía, R. Laprise, Potential for Small Scale Added Value of RCM's Downscaled Climate Change Signal, *Clim Dyn*, Vol. 40, No. 3-4, 2013, pp. 601-618, <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1415-z>.
- [43] H. N. Thuy et al., Time of Emergence of Climate Signals Over Vietnam Detected from the CORDEX-SEA Experiments, *International Journal of Climatology*, Vol. 41, No. 3, 2021, pp. 1599-1618, <https://doi.org/10.1002/joc.6897>.
- [44] L. T. Tuan et al., Application of Quantile Mapping Bias Correction for Mid-Future Precipitation Projections over Vietnam, *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 15, 2019, pp. 1-6, <https://doi.org/10.2151/SOLA.2019-001>.