



Review Article

Climate Change Scenarios for Southeast Asia and Vietnam: Current Status and Future Research Directions

Ngo Duc Thanh*

*University of Science and Technology of Hanoi, Vietnam Academy of Science and Technology,
18 Hoang Quoc Viet, Cau Giay, Hanoi, Vietnam*

Received 07 January 2023

Revised 09 March 2023; Accepted 10 March 2023

Abstract: This paper presents a comprehensive review of the development of climate change scenarios (CC) in Southeast Asia and Vietnam over the past decades. In Southeast Asia, the dynamical downscaling approach using regional climate models has been mainly applied, especially by the Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment - Southeast Asia (CORDEX-SEA) community. In Vietnam, climate change scenarios were published and updated in 2009, 2012, 2016, and, most recently, in 2020 by the Ministry of Natural Resources and Environment. While recent CC scenarios in Vietnam have favored the dynamical approach, some studies have already applied the statistical method and performed the downscaling for multiple models and greenhouse gas (GHG) scenarios. So far, experiments in the region and Vietnam have only focused on downscaling results from global climate models participating in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (CMIP3) and Phase 5 (CMIP5). Published results show a consensus on the increase in projected temperature; however, the results of precipitation projections remain highly uncertain. This paper subsequently proposes several research directions that could be implemented in the coming years in the region, including: i) Building a high-resolution grid-based climate dataset; ii) Downscaling CMIP6 products with the latest GHG scenarios using dynamical, statistical, and probabilistic projections, with a focus on the role of urbanization in the context of global climate change; and iii) Developing a regional coupled atmosphere-ocean system to better understand the mechanism of future climate change in the region and Vietnam.

Keywords: Climate change, downscaling, future scenarios, Southeast Asia, Vietnam.

* Corresponding author.

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

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4932>

Kịch bản Biến đổi khí hậu cho khu vực Đông Nam Á và Việt Nam: hiện trạng và đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo

Ngô Đức Thành*

*Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,
18 Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 07 tháng 01 năm 2023

Chỉnh sửa ngày 09 tháng 3 năm 2023; Chấp nhận đăng ngày 10 tháng 3 năm 2023

Tóm tắt: Bài báo này tổng quan lại một số kết quả nghiên cứu về việc xây dựng kịch bản biến đổi khí hậu (BĐKH) trên khu vực Đông Nam Á và Việt Nam trong những thập kỷ vừa qua. Trên khu vực Đông Nam Á, phương pháp chi tiết hoá động lực sử dụng mô hình khí hậu khu vực được áp dụng chủ yếu, đặc biệt là các kết quả từ Thí nghiệm Phối hợp Chi tiết hoá - Đông Nam Á (CORDEX-SEA). Tại Việt Nam, các kịch bản BĐKH đã được công bố và cập nhật vào các năm 2009, 2012, 2016, và gần đây nhất là 2020 bởi Bộ Tài nguyên và Môi trường. Mặc dù các kịch bản gần đây thiên hơn về cách tiếp cận động lực, tuy nhiên một số nghiên cứu cũng đã áp dụng cách tiếp cận thống kê và thực hiện việc chi tiết hoá cho một tập hợp đa mô hình và đa kịch bản khí nhà kính (KNK) tại Việt Nam. Cho tới nay, các thí nghiệm trên khu vực và cho Việt Nam mới chỉ tập trung vào việc chi tiết hoá các kết quả từ các mô hình khí hậu toàn cầu tham gia Dự án Đối sánh Đa mô hình Pha 3 (CMIP3) và Pha 5 (CMIP5). Các kết quả công bố cho thấy sự thống nhất về mức tăng của nhiệt độ dự tính trong tương lai, tuy nhiên kết quả dự tính mưa lại mang nhiều tính bất định. Bài báo này cũng đề xuất một số hướng nghiên cứu cần được triển khai trong những năm tới, bao gồm: i) Xây dựng bộ số liệu khí hậu trên lưới có phân giải cao; ii) Chi tiết hoá các sản phẩm CMIP6 với các kịch bản KNK mới nhất bằng phương pháp động lực, thống kê, và dự tính xác suất, trong đó có chú trọng đến vai trò của đô thị hoá trong bối cảnh BĐKH toàn cầu; và iii) Phát triển hệ thống mô hình kết hợp biển - khí và ứng dụng hệ thống này trong việc làm rõ cơ chế của sự BĐKH trong tương lai trên khu vực và tại Việt Nam.

Từ khóa: BĐKH, chi tiết hoá, kịch bản tương lai, Đông Nam Á, Việt Nam.

1. Mở đầu

Khu vực Đông Nam Á bao gồm 11 quốc gia (Hình 1), chủ yếu nằm trong vùng nhiệt đới có khí hậu nóng ẩm, nhiều mưa, ngoại trừ một số khu vực như miền Bắc Việt Nam, bắc Lào, và phía bắc Myanmar có khí hậu cận nhiệt đới [1]. Các quốc gia trên khu vực Đông Nam Á thường

xuyên hứng chịu các thiên tai như bão, mưa lớn, nắng nóng, lũ lụt, và hạn hán [2].

Các kết quả nghiên cứu cho giai đoạn quá khứ đã chỉ ra sự gia tăng của nhiệt độ cũng như các cực trị nhiệt độ trên hầu khắp khu vực Đông Nam Á [3-9]. Sự biến đổi của lượng mưa trong quá khứ diễn ra theo xu thế không đồng nhất trên khu vực. Trên khu vực Việt Nam, lượng mưa có

* Tác giả liên hệ.

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

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4932>

xu thế tăng lên ở phía Nam và giảm đi ở phía Bắc giai đoạn 1961–2007 [7], tuy nhiên xu thế tăng giảm đối nghịch trên hai miền này lại không thực sự rõ rệt trong giai đoạn 1979–2019 [10]. Trên khu vực Thái Lan, cường độ mưa ngày trung bình tăng trong khi số lượng ngày mưa giảm trong giai đoạn 1955–2014 [11]. J. M. Gutiérrez và cộng sự (2021) [9] cho thấy mưa giai đoạn 1961–2015 trên khu vực hầu hết là không có xu thế rõ rệt ngoại trừ một số khu vực có xu thế tăng thuộc Malaysia, Việt Nam và phía nam Philippines.

Báo cáo Đánh giá lần thứ 6 của Ban Liên Chính phủ về BĐKH (IPCC, tiếng Anh: Intergovernmental Panel on Climate Change) [12] đã tập hợp được các kết quả dự tính tương lai từ các mô hình toàn cầu GCM (tiếng Anh: Global Climate Model) tham gia vào Dự án Đối sánh Đa mô hình pha 5 (CMIP5, tiếng Anh: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) [13] và pha 6 (CMIP6) [14], và các mô hình khí hậu khu vực RCM (tiếng Anh: Regional Climate Model) từ các Thí nghiệm Phối hợp Chi tiết hoá Khu vực (CORDEX, tiếng Anh: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment). Trên khu vực Đông Nam Á nói chung và Việt Nam nói riêng, việc nhận được các thông tin tin cậy và chi tiết về các dự tính khí hậu trong tương lai (hay còn gọi là kịch bản BĐKH) theo các kịch bản KNK khác nhau là rất quan trọng. Lý do là vì các thông tin này sẽ là đầu vào cho các mô hình đánh giá tác động, từ đó hỗ trợ các nhà hoạch định chính sách đưa ra các chiến lược và quyết sách để có thể ứng phó hiệu quả với BĐKH ở các cấp, từ địa phương (ví dụ như tỉnh, thành) đến quốc gia, khu vực. Tuy nhiên do hạn chế của năng lực tính toán và lưu trữ, các kết quả GCMs tham gia vào dự án CMIP5 và CMIP6 mới nhất cho đến hiện tại có độ phân giải còn tương đối thô, đa số từ khoảng 100 km trở lên, không đủ chi tiết cho việc phân tích, đánh giá BĐKH và tác động của nó ở qui mô khu vực [15]. Vì vậy, một trong những giải pháp hiệu quả hiện nay là áp dụng một số phương pháp chi tiết hoá, bao gồm chi tiết hoá động lực và chi tiết hoá thống kê, với đầu ra từ các GCMs để nhận được kịch bản BĐKH với phân giải cao hơn.

Việc xây dựng kịch bản BĐKH chi tiết cho một quốc gia, khu vực là một công việc đòi hỏi nguồn lực tính toán, năng lực của đội ngũ cán bộ, cũng như thời gian thực hiện. Từ 2009, các kịch bản BĐKH với mức độ chi tiết khác nhau cho Việt Nam liên tục được Bộ Tài nguyên và Môi trường xây dựng, cập nhật và công bố [16-19]. Kịch bản cập nhật tiếp theo cho Việt Nam được dự kiến sẽ công bố vào 2025.

Bài báo này tổng quan các thông tin kỹ thuật về hiện trạng của các kịch bản BĐKH hiện có cho khu vực Đông Nam Á và Việt Nam. Các thảo luận trong bài sẽ tập trung vào nội dung khí hậu và không đề cập đến lớp bài toán kịch bản “nước biển dâng” do các kỹ thuật tính toán, nguồn số liệu và phương pháp xây dựng kịch bản “nước biển dâng” là hoàn toàn khác. Bài báo này cũng đề xuất một số hướng nghiên cứu có thể thực hiện trong tương lai để tiếp tục phát triển và cập nhật các kịch bản BĐKH trên khu vực.

2. Hiện trạng Kịch bản biến đổi khí hậu trên khu vực Đông Nam Á

Trên khu vực Đông Nam Á, trong những năm qua các kịch bản BĐKH chi tiết đã được xây dựng cả trên quy mô riêng lẻ các quốc gia lẫn toàn khu vực. Do phương pháp chi tiết hoá thống kê thường đòi hỏi phải có nguồn số liệu quan trắc đủ tốt và cho giai đoạn đủ dài [20], việc sử dụng phương pháp chi tiết hoá động lực là phổ biến hơn trên khu vực Đông Nam Á trong những năm gần đây. Phương pháp chi tiết hoá động lực sử dụng các RCMs chạy tích phân cho giai đoạn quá khứ và tương lai với điều kiện ban đầu và điều kiện biên từ các GCMs trên một miền tính cụ thể với phân giải cao [15, 21]. Mặc dù là một phương pháp tốn kém về tài nguyên tính toán và lưu trữ, chi tiết hoá động lực có ưu điểm là có thể diễn giải được động lực, các đặc tính vật lý, và các quá trình hồi tiếp giữa các biến khí hậu, rất hữu ích cho những bài toán nghiên cứu cơ chế và đặc điểm của BĐKH.

Một số nỗ lực chi tiết hoá động lực đã được thực hiện riêng lẻ cho một số quốc gia trên khu vực như Thái Lan [22, 23], Indonesia [24],

Philippines [25], đặc biệt là từ Việt Nam [16-19, 26-29]. S. Kang và cộng sự (2019) [30] sử dụng mô hình khí hậu khu vực MIT để chi tiết hoá một số GCMs cho Lục địa Maritime. Trong khuôn khổ dự án SEACAM (tiếng Anh: Southeast Asia Climate Analyses and Modeling), tài trợ bởi Trung tâm Nghiên cứu Khí hậu Singapore của cơ quan Khí tượng Singapore và Trung tâm Hadley của Anh, Rahmat và cộng sự (2014) [31], đã đưa ra các dự tính BĐKH cho khu vực Đông Nam Á dựa trên kịch bản phát thải trung bình A1B từ Báo cáo đặc biệt về kịch bản phát thải SRES (tiếng Anh: Special Report on Emission Scenarios) [32]. Các dự tính này sử dụng kết quả từ 17 thành phần tổ hợp của mô hình khí hậu khu vực HadRM3P được chạy với độ phân giải $0,22^\circ$ (xấp xỉ 25 km).

Các nỗ lực hợp tác trong khu vực về chi tiết hoá động lực thực sự được thúc đẩy trong khuôn khổ các hoạt động của dự án CORDEX Đông Nam Á (CORDEX-SEA) được bắt đầu từ năm 2012 [33]. Dự án CORDEX-SEA với sự tham gia ban đầu của các nhà nghiên cứu đến từ 5 quốc gia gồm Indonesia, Malaysia, Philippines, Thái Lan, và Việt Nam, dần dần nhận được sự quan tâm và tham gia của các nhà nghiên cứu đến từ 14 quốc gia khác nhau trong và ngoài khu vực.

Trong Pha 1 của dự án CORDEX-SEA, các thí nghiệm về độ nhạy của kết quả mô hình với 18 tổ hợp tham số vật lý khác nhau của mô hình khí hậu khu vực RegCM đã được thực hiện [34-36]. Các thí nghiệm được tiến hành với độ phân giải 36 km cho miền tính [81,1E–143,9E, 15S–38,8N] (miền tính D1, Hình 1). Kết quả của việc phân tích độ nhạy đã cho phép chọn ra sơ đồ đối lưu MIT-Emmanuel [37] kết hợp với sơ đồ thông lượng đại dương BATS1e [38] để từ đó mô hình RegCM được cấu hình và chạy chi tiết hoá cho đầu ra của các mô hình CMIP5 thời kỳ tương lai. Việc chi tiết hoá CMIP5 về độ phân giải 25 km sau đó đã được thực hiện cho miền tính nhỏ hơn ([89,5E–146,5E, 14,8S–27N], miền tính D2, Hình 1). Pha 1 của CORDEX-SEA được hoàn thành năm 2018 trong đó 7 RCMs (cùng với RegCM) đã được sử dụng để chi tiết hoá 11 GCMs từ CMIP5. Trong Pha 2 của CORDEX-SEA, kết quả 25 km từ CMIP5 được

tiếp tục chi tiết hoá xuống 5 km cho một số miền tính cụ thể (các miền tính D2-1 đến D2-4, Hình 1) nhằm phục vụ nhu cầu của cộng đồng đánh giá tác động BĐKH. Trong Pha 3 đang được tiến hành của CORDEX-SEA, các thí nghiệm chi tiết hoá cho các mô hình CMIP6 sẽ được thực hiện cho độ phân giải 25 km trên miền tính mở rộng hơn một chút về phía Bắc so với miền tính D2 để có thể bao phủ trọn vẹn cả lãnh thổ Myanmar ([89,18E–146,61E, 14,72S–29,36N], miền tính D3, Hình 1).

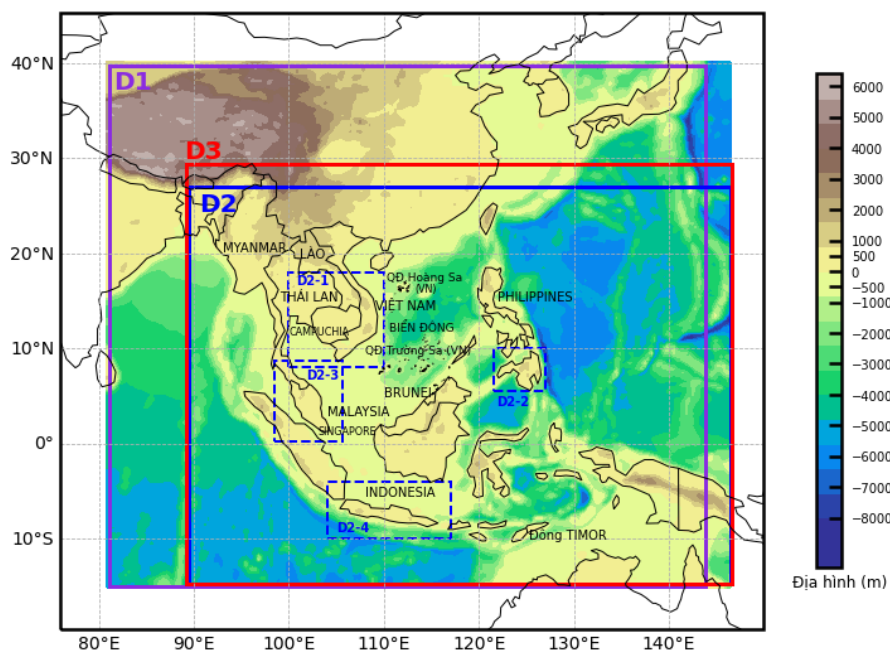
Nhiều kết quả nghiên cứu từ dự án CORDEX-SEA với các thí nghiệm chi tiết hoá đã được công bố. Nhìn chung, các thí nghiệm cho thấy khả năng nắm bắt được khá tốt biến trình mùa của các yếu tố nhiệt độ, lượng mưa và các hoàn lưu quy mô lớn trên các khu vực khác nhau của miền tính [34-36, 39]. T. N. Duc và cộng sự (2017) [36] chỉ ra rằng các mô phỏng cho kết quả tương đối thống nhất hơn trên khu vực lục địa bán đảo Đông Dương, trong khi các kết quả khá là phân tán trên Lục địa Maritime. Bên cạnh đó tính thiên thấp một cách có hệ thống của RegCM khi mô phỏng nhiệt độ trên khu vực cũng được chỉ rõ [35]. Kết quả của các yếu tố mô phỏng rất nhạy với việc lựa chọn các sơ đồ tham số hoá vật lý. Chẳng hạn như lượng mưa mô phỏng rất nhạy với sơ đồ tham số hoá đối lưu được lựa chọn [34, 36]. Việc hiệu chỉnh sản phẩm mô hình bằng phương pháp phân vị cũng đã được áp dụng và cho kết quả khả quan [40, 41].

Các kết quả từ các thí nghiệm CORDEX-SEA đã được sử dụng rộng rãi để dự tính và phân tích khí hậu tương lai trên khu vực. Số ngày không mưa liên tiếp được dự tính tăng lên tới 30% theo RCP4.5 và 60% theo RCP8.5, đặc biệt là trên khu vực Lục địa Maritime [42, 43]. Các nghiên cứu này cũng chỉ ra lượng mưa cực đại ngày được dự tính sẽ tăng lên trên các khu vực như Indonesia và phía bắc Myanmar. S. T. Ngai và cộng sự (2022) [41] sử dụng các kết quả tổ hợp mô hình sau hiệu chỉnh phân vị cho thấy sự gia tăng lượng mưa dự tính vào mùa đông trên khu vực bán đảo Đông Dương và sự giảm mưa vào mùa hè trên khu vực Lục địa Maritime. H. Herrmann và cộng sự của gió bề mặt biển trên khu vực với các sản phẩm CORDEX-SEA, cho

thấy mức độ và xu thế biến đổi phụ thuộc vào mô hình toàn cầu đầu vào, mô hình khu vực được sử dụng cũng như đặc điểm gió theo mùa.

Các kết quả dự tính trong tương lai từ các thí nghiệm CORDEX-SEA chỉ ra rằng nhiệt độ trên khu vực sẽ tăng lên từ 3 °C-5 °C vào cuối thế kỷ 21 so với thời kỳ 1986–2005 theo kịch bản

RCP8.5 [42]. Theo kết quả Chương Atlas từ Báo cáo Đánh giá lần thứ 6 của IPCC [45], mức gia tăng nhiệt độ trên khu vực dự tính bởi các mô hình toàn cầu CMIP5 (CMIP6) là từ 0,9 °C ± 0,3 °C (1,2 °C ± 0,4 °C) theo kịch bản RCP2.6 (SSP1-2.6) đến 3,5 °C ± 0,7 °C (3,8 °C ± 0,9 °C) theo kịch bản RCP8.5 (SSP5-8.5).



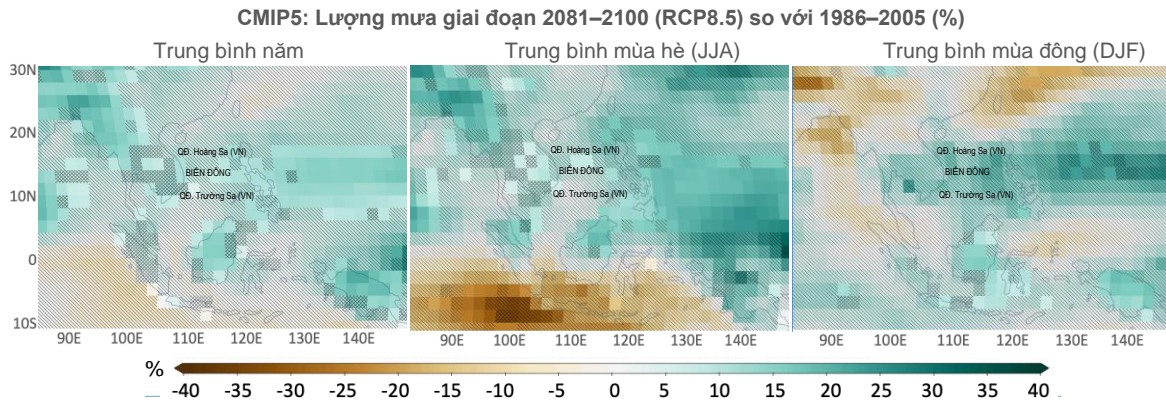
Hình 1. Các miền tính được lựa chọn qua các pha khác nhau của dự án CORDEX-SEA. D1 là miền tính để nghiên cứu độ nhạy với các sơ đồ vật lý với các thí nghiệm có phân giải 36 km. D2 là miền tính cho pha chi tiết hoá các mô hình toàn cầu CMIP5 về phân giải 25 km. D2-1, D2-2, D2-3, D2-4 là các miền tính để chi tiết hoá xuống 5 km. D3 là miền tính phân giải 25 km cho pha chi tiết hoá các mô hình toàn cầu CMIP6. Độ cao địa hình trên khu vực cũng được hiển thị.

Trong khi các kết quả dự tính sự gia tăng của nhiệt độ trên toàn khu vực là tương đối đồng nhất giữa các thí nghiệm toàn cầu và khu vực, kết quả dự tính mưa còn bao hàm nhiều tính không chắc chắn. F. Tangang và cộng sự (2020) [33] chỉ ra rằng mặc dù các thí nghiệm CORDEX-SEA cho giá trị mưa giảm trong các tháng mùa hè tương lai trên khu vực, kết quả tăng giảm vẫn phụ thuộc nhiều vào mô hình sử dụng. P. L. Nguyen và cộng sự (2022) [46] chỉ ra rằng các thí nghiệm chi tiết hoá với RCMs cho kết quả cường độ mưa ngày cao hơn so với các mô hình đầu vào GCMs. Hình 2 minh họa mức độ biến đổi của lượng mưa

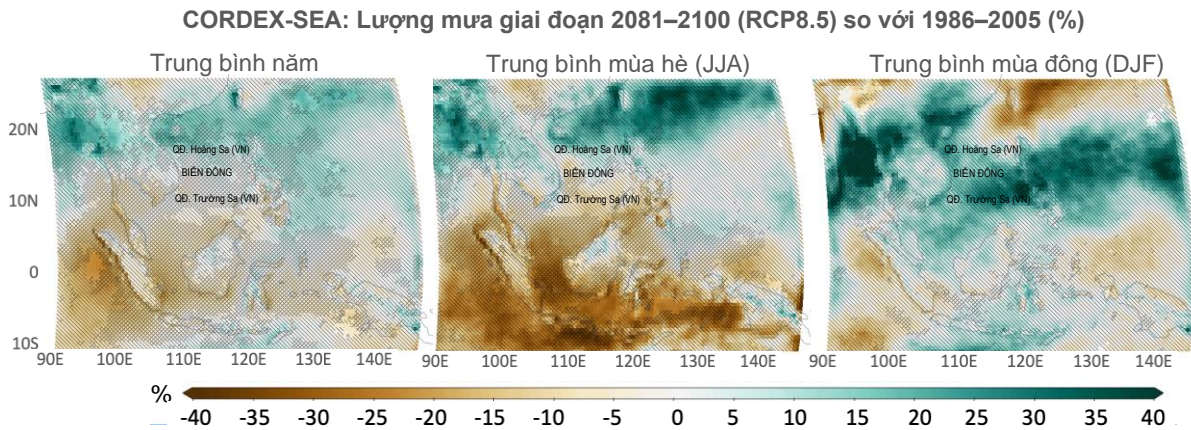
trung bình từ 29 mô hình toàn cầu CMIP5 so sánh giữa giai đoạn 2081–2100 theo kịch bản RCP8.5 và thời kỳ 1986–2005. Hình 3 cũng biểu diễn tương tự như Hình 2 nhưng là kết quả từ 11 thí nghiệm chi tiết hoá động lực của CORDEX-SEA. Kết quả cho thấy có sự khác biệt rõ rệt về xu thế biến đổi của mưa trong tương lai giữa sản phẩm chi tiết hoá động lực CORDEX-SEA và sản phẩm từ các GCMs. Nếu như các mô hình toàn cầu cho tín hiệu mưa nhìn chung tăng lên trong tương lai trên khu vực, thì các sản phẩm mô hình khu vực lại cho kết quả tăng giảm với biên độ lớn, đặc biệt là vào mùa hè. Tín hiệu tăng

giảm là ngược nhau trên nhiều vùng giữa kết quả từ mô hình toàn cầu và từ mô hình khu vực. Điều này cho thấy rằng vấn đề dự tính sự biến đổi của

mưa trong tương lai là rất phức tạp, và cần phải luôn rất thận trọng khi nhận định về xu thế mưa trong tương lai.



Hình 2. Mức độ biến đổi (%) của lượng mưa, tính từ 29 mô hình toàn cầu CMIP5, trên khu vực Đông Nam Á giai đoạn 2081–2100 theo kịch bản RCP8.5 so với thời kỳ 1986–2005 cho các giá trị (a) trung bình năm, (b) trung bình mùa hè, và (c) trung bình mùa đông. Các ô lưới không có gạch thể hiện khu vực mà các mô hình có tính thống nhất cao về xu thế biến đổi; các ô lưới có gạch chéo 1 hướng thể hiện khu vực không có sự biến đổi rõ rệt hoặc kết quả các mô hình không thống nhất; các ô lưới có gạch chéo 2 hướng thể hiện khu vực mà các mô hình cho tín hiệu trái ngược nhau. Hình vẽ nhận được với công cụ Atlas của IPCC (<https://interactive-atlas.ipcc.ch>).



Hình 3. Tương tự như Hình 2 nhưng với kết quả từ 11 thí nghiệm chi tiết hoá động lực thuộc dự án CORDEX-SEA.

3. Hiện trạng Kịch bản biến đổi khí hậu cho Việt Nam

Việt Nam là một trong những quốc gia bị ảnh hưởng nặng nề của BĐKH [18]. Việt Nam có địa hình phức tạp nhiều đồi núi, với đường bờ biển

dài, và được chia thành 7 vùng khí hậu [47]. Trong những năm qua kịch bản BĐKH và nước biển dâng cho Việt Nam thường xuyên được Bộ Tài nguyên và Môi trường xây dựng, cập nhật và công bố nhằm cung cấp những thông tin cập nhật nhất về xu thế BĐKH trong quá khứ và những

kịch bản BĐKH và nước biển dâng dự tính trong thế kỷ 21 ở Việt Nam [16-19].

Kịch bản đầu tiên xây dựng cho năm 2009 [16], sau đây gọi là Kịch bản 2009, áp dụng phương pháp chi tiết hoá thống kê sử dụng phần mềm MAGICC/SCENGEN phiên bản 5.3. Các kịch bản KNK được sử dụng trong kịch bản đầu tiên này là các kịch bản SRES, bao gồm kịch bản phát thải thấp B1, kịch bản phát thải trung bình B2, và kịch bản phát thải cao A2. Mức độ chi tiết của Kịch bản 2009 chỉ được giới hạn cho 7 vùng khí hậu của Việt Nam.

Kịch bản cập nhật năm 2012 [17], sau đây gọi là Kịch bản 2012, đã cập nhật số liệu quan trắc từ toàn bộ gần 200 trạm khí tượng của Việt Nam để đánh giá xu thế BĐKH trong quá khứ trên Việt Nam. Với các dự tính tương lai, bên cạnh việc áp dụng phương pháp chi tiết hoá thống kê, Kịch bản 2012 cũng bổ sung cả kết quả chi tiết hoá động lực từ: i) Mô hình PRECIS của Trung tâm Hadley – Vương Quốc Anh; và ii) Mô hình AGCM/MRI của Nhật Bản. Các kịch bản KNK được tính đến gồm kịch bản phát thải thấp B1, kịch bản phát thải trung bình B2 và A1B, và kịch bản phát thải cao A2 và A1FI. Kịch bản 2012 đưa ra thông tin dự tính chi tiết cho 63 tỉnh/thành phố trên toàn quốc, đồng thời bên cạnh các yếu tố khí hậu là nhiệt độ và lượng mưa trung bình thì còn bổ sung các giá trị cực trị gồm: nhiệt độ tối cao, tối thấp, lượng mưa ngày lớn nhất, và số ngày có nhiệt độ lớn hơn 35 °C.

Kịch bản 2016 [18] được xây dựng trên cơ sở Báo cáo đánh giá lần thứ 5 của IPCC [48] với các kịch bản đường nồng độ đặc trưng RCPs (tiếng Anh: Representative Concentration Pathways) [49]. Số liệu quan trắc được thu thập từ 150 trạm quan trắc khí tượng thủy văn trên đất liền và hải đảo cập nhật đến năm 2014. Trong Kịch bản 2016, phương pháp chi tiết hoá động lực được sử dụng dựa trên 5 mô hình khí hậu khu vực gồm AGCM/MRI, PRECIS, CCAM, RegCM, và cIWRF với 16 phương án tính toán. Các kịch bản BĐKH cho các yếu tố trung bình và cực trị được tính toán chi tiết cho 63 tỉnh/thành phố và cho 150 trạm khí tượng của Việt Nam.

Kịch bản mới nhất công bố năm 2020 [19] đã có những cập nhật đáng kể so với Kịch bản 2016. Bộ số liệu quan trắc trên các trạm đã được cập nhật đến năm 2018. Tổng cộng có 19 phương án chi tiết hoá, trong đó có 14 phương án của nhiệt và 5 phương án của mưa từ 6 mô hình gồm AGCM/MRI, PRECIS, CCAM, RegCM, cIWRF, và RCA3 được sử dụng. Các thông tin BĐKH tương lai cũng được dự tính cho 63 tỉnh/thành phố, các quần đảo Hoàng Sa và Trường Sa của Việt Nam, và chi tiết cho 150 trạm khí tượng. Bên cạnh đó, Kịch bản 2020 còn bổ sung thông tin lượng mưa mùa mưa và mùa khô, kịch bản hạn hán cho các vùng khí hậu của Việt Nam, và định lượng hoá các đặc điểm của gió mùa mùa hè trong tương lai như sự biến đổi của thời điểm bắt đầu, kết thúc, thời gian tồn tại, cường độ.

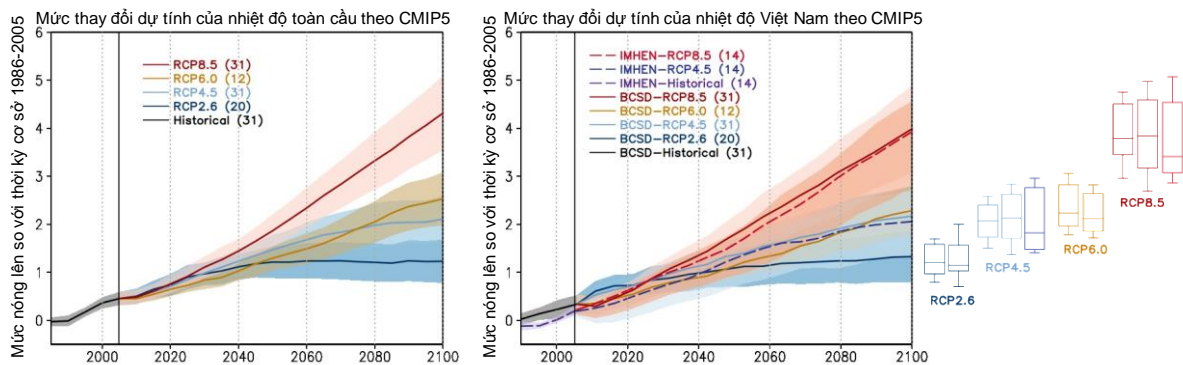
Theo các kịch bản khác nhau đã được công bố bởi Bộ Tài nguyên và Môi trường qua các năm, nhiệt độ trung bình năm trên Việt Nam vào cuối thế kỷ 21 so với thời kỳ cơ sở (1980–1999 hoặc 1986–2005 tùy thuộc vào kịch bản KNK) tăng từ 1,5-4,2 °C, lượng mưa tăng từ 10-40%, với lượng mưa cực trị cũng có xu thế tăng phổ biến từ 20-40%.

Bên cạnh các kịch bản đã được công bố của Bộ Tài nguyên và Môi trường và các kết quả của CORDEX-SEA, một số nghiên cứu khác về việc xây dựng kịch bản BĐKH cho Việt Nam cũng đã được công bố. Ho và cộng sự (2011) [50] sử dụng mô hình khí hậu khu vực RegCM3 để chi tiết hoá sản phẩm đầu ra từ mô hình toàn cầu CCSM3 cho giai đoạn quá khứ 1980–1999 và giai đoạn tương lai 2001–2050 theo 2 kịch bản A1B và A2. Kết quả cho thấy số ngày nóng mùa hè sẽ tăng và số đêm lạnh mùa đông sẽ giảm, đồng thời các sự kiện mưa lớn trong mùa mưa được dự tính giảm ngoại trừ khu vực Đông Bắc và Nam Trung Bộ. N. D. Thanh và cộng sự (2014) [28] sử dụng tổ hợp kết quả từ 3 thí nghiệm chi tiết hoá động lực với 3 mô hình khu vực là CCAM, RegCM3, và REMO để dự tính khí hậu cho Việt Nam giai đoạn 2000–2050 theo kịch bản phát thải A1B. Kết quả chỉ ra là sản phẩm tổ hợp của các mô hình cho các kết

quả tốt hơn từng mô hình riêng lẻ với các yếu tố khí hậu trung bình và một số yếu tố cực trị. Lượng mưa ngày lớn nhất trong năm (RX1day) cũng được dự tính tăng trên khu vực Nam Trung Bộ, hàm ý rằng các hiểm họa liên quan đến nước đường như sẽ tăng trong tương lai. J. Katzfey và cộng sự (2016) [27] sử dụng mô hình khu vực CCAM và RegCM4.2 lần lượt với phân giải 10 km và 20 km để chi tiết hoá kết quả mô phỏng và dự tính của mô hình CCAM toàn cầu. Điểm đặc biệt là các thí nghiệm CCAM toàn cầu được thực hiện sử dụng nhiệt độ bề mặt biển và mật độ băng biển từ 6 mô hình toàn cầu CMIP5 đã được hiệu chỉnh sai số trung bình và phương sai. Các tác giả đã chỉ ra rằng các thí nghiệm chi tiết hoá có khả năng biểu diễn tốt biến trình mùa của nhiệt độ, trong khi kết quả mô phỏng lượng mưa còn nhiều khác biệt. Chẳng hạn, RegCM4.2 quá khô (thiên thấp hơn 60%) tại các tháng 10-11, trong khi CCAM thì lại quá ướt (thiên cao lên tới 130%) từ tháng 12 đến tháng 3.

Đối với cách tiếp cận thống kê, trong khuôn khổ dự án GEMMES tài trợ bởi cơ quan phát triển Pháp [51], phương pháp hiệu chỉnh sai số

và phân rã không gian BCSD (tiếng Anh: Bias Correction and Spatial Disaggregation) [52] đã được sử dụng để chi tiết hoá kết quả từ các mô hình toàn cầu CMIP5 [53]. Với ưu điểm là tính toán nhanh và không quá phức tạp, phương pháp BCSD được áp dụng trên tập hợp 31 mô hình toàn cầu CMIP5 theo 4 kịch bản RCPs, bao gồm RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 và RCP8.5. Các kết quả đầu ra bao gồm bộ số liệu ngày phân giải 10 km cho 4 biến gồm lượng mưa, nhiệt độ trung bình ngày, nhiệt độ tối cao và tối thấp ngày. Hình 4 nhận được từ E. Espagne và cộng sự (2021) [51] mô tả mức tăng nhiệt độ trung bình trên toàn cầu theo các mô hình CMIP5 và tại Việt Nam theo các kịch bản chi tiết hoá BCSD có đối sánh với kết quả dự tính mới nhất từ 14 thí nghiệm chi tiết hoá động lực sử dụng cho nhiệt độ của Kịch bản 2020 [19]. Có thể thấy kết quả từ phương pháp chi tiết hoá thống kê BCSD khá tương đồng với kết quả từ phương pháp chi tiết hoá động lực của Kịch bản 2020. Đến cuối thế kỷ 21, nhiệt độ trung bình tại Việt Nam được dự tính tăng lên đến $1,34 \pm 1,14$ °C theo RCP2.6 và $4,18 \pm 1,57$ °C theo RCP8.5 [51].



Hình 4. Mức tăng nhiệt độ toàn cầu (trái) và Việt Nam (phải). Nhiệt độ toàn cầu được trích xuất từ dữ liệu GCMs trong khi kết quả cho Việt Nam nhận được từ sản phẩm chi tiết hoá động lực của Kịch bản 2020 của Bộ Tài nguyên và Môi trường và từ phương pháp chi tiết hoá thống kê BCSD. Kết quả tổ hợp trung bình của các phương án được thể hiện bởi đường màu, trong khi khoảng bất định (± 1 lần độ lệch chuẩn) của các phương án cho mỗi kịch bản RCP được biểu diễn bằng vùng mờ cùng màu. Số lượng mô hình sử dụng cho mỗi RCP được thể hiện trong dấu ngoặc đơn phía sau tên từng kịch bản. Biểu đồ hộp bên phải biểu diễn các khoảng tứ phân vị, trung vị, khoảng phân vị thứ 10 và 90 của mức nóng lên giai đoạn cuối thế kỷ 2080–2099 so với thời kỳ cơ sở 1986–2005 trên phạm vi toàn cầu (hộp trái) và Việt Nam (1 hoặc 2 hộp bên phải; 2 hộp trong trường hợp RCP4.5 và RCP8.5 khi có kết quả chi tiết hoá động lực từ Kịch bản 2020) (nguồn: [51]).

4. Một số hướng nghiên cứu tiếp theo trong tương lai

Các mục trên đã cho thấy những nỗ lực và bước tiến đáng ghi nhận trong thập kỷ qua đối với bài toán xây dựng kịch bản BĐKH cho khu vực Đông Nam Á và Việt Nam. Để có thể tiếp tục xây dựng được những kịch bản BĐKH cập nhật và phù hợp với xu hướng phát triển khoa học trên thế giới, dưới đây là một số bài toán có thể cần được chú trọng bởi cộng đồng nghiên cứu khu vực và Việt Nam trong những năm tới.

4.1. Xây dựng bộ số liệu khí hậu phân giải cao trên lưới

Các quốc gia trên khu vực Đông Nam Á, bao gồm Việt Nam, hiện có hệ thống mạng trạm quan trắc khí tượng thủy văn còn tương đối thưa thớt, và nhiều trạm dữ liệu vẫn được thu thập một cách thủ công [9, 54, 55]. Ở quy mô toàn cầu, một số bộ dữ liệu trên lưới đã được phát triển và sử dụng, với phân giải không gian và thời gian khác nhau. Ví dụ có thể kể đến: i) Bộ số liệu tháng CRU TS phiên bản 4 gồm lượng mưa, nhiệt độ và một số biến khác [56] có phân giải không gian $0,5^\circ$ cho giai đoạn 1901–2018; ii) Bộ số liệu tháng GPCP phiên bản 2.3 [57] cho giai đoạn từ 1979 đến nay với phân giải $2,5^\circ$; và iii) Bộ số liệu mưa và nhiệt độ ngày APHRODITE trên khu vực gió mùa châu Á có độ phân giải không gian $0,25^\circ$ cho giai đoạn 1951–2007 hoặc đến 2015 tùy vào phiên bản sử dụng [58]. Trên khu vực Việt Nam, T. N. Xuan et al., (2016) [55] đã tập hợp số liệu ngày từ 481 trạm đo mưa và dùng phương pháp nội suy Spheremap [59] để xây dựng bộ số liệu mưa trên lưới VnGP phân giải $0,1^\circ$ và $0,25^\circ$ cho giai đoạn 1980–2010.

Trong những năm gần đây, do nguồn số liệu quan trắc hoặc trạm quan trắc trên khu vực được cập nhật hơn, bao gồm nguồn số liệu tại trạm mặt đất, nguồn số liệu tái phân tích phân giải cao, và nguồn số liệu vệ tinh, việc xây dựng mới một bộ số liệu trên lưới chất lượng cao, có phân giải không gian và thời gian phù hợp cho Đông Nam Á nói chung và Việt Nam nói riêng là cần thiết. Một thách thức là việc thu thập và chia sẻ số liệu quan trắc tại trạm giữa các quốc gia hiện không

đễ dàng. Bộ số liệu trên lưới, nếu được xây dựng thành công, sẽ góp phần kiểm nghiệm kết quả mô hình được chi tiết hoá (đối với cả bài toán động lực và thống kê) hoặc sẽ rất hữu ích trong việc xây dựng các hàm chuyển phù hợp nhằm hiệu chỉnh mô hình (đối với bài toán thống kê).

4.2. Chi tiết hoá sản phẩm CMIP6

Các thí nghiệm chi tiết hoá động lực trên khu vực Đông Nam Á và Việt Nam hiện mới chỉ thực hiện với các mô hình toàn cầu CMIP3 và CMIP5. Các kết quả mới nhất từ Báo cáo Đánh giá lần thứ 6 của IPCC [12] đã dựa trên các sản phẩm từ các mô hình toàn cầu CMIP6 với các kịch bản kinh tế xã hội chia sẻ SSP (tiếng Anh: Shared Socioeconomic Pathways) [60]. Tuy nhiên, độ phân giải của các mô hình toàn cầu tham gia CMIP6 vẫn còn thô, phổ biến xung quanh 100-150 km theo phương ngang, do đó vẫn chưa phù hợp để áp dụng cho quy mô khu vực và địa phương. Việc chi tiết hoá CMIP6 do vậy là cần thiết. Các nghiên cứu chi tiết hoá CMIP6 cho khu vực Đông Nam Á và Việt Nam hầu như chưa được công bố, nhất là với phương pháp chi tiết hoá động lực do yêu cầu về năng lực và thời gian tính toán. Hiện nay, cộng đồng CORDEX-SEA đã bắt đầu tiến hành việc thiết lập miền tính mới và lựa chọn cấu hình mô hình khu vực phù hợp để có thể chi tiết hoá kết quả CMIP6. Desmet & Ngo Duc (2022) [61] đã phát triển một phương pháp xếp hạng mới để có thể cho điểm hiệu suất của các mô hình CMIP6 trên khu vực Đông Nam Á, từ đó có thể khuyến nghị việc dùng mô hình toàn cầu nào để chi tiết hoá cho khu vực.

Đối với phương pháp chi tiết hoá thống kê, trong báo cáo gần nhất cho dự án GEMMES về đánh giá tác động của BĐKH tại Việt Nam [62], các tác giả đã bước đầu chi tiết hoá sử dụng BCSD cho 35 mô hình CMIP6 với các kịch bản SSPs khác nhau cho Việt Nam xuống độ phân giải 10 km. Cho đến nay, chưa có nghiên cứu chi tiết hoá thống kê nào được thực hiện cho toàn khu vực Đông Nam Á, một phần là do chưa có bộ số liệu quan trắc nào thực sự phù hợp để làm cơ sở tham chiếu. Gần đây, bộ số liệu tái phân tích ERA5 phân giải 10 km trên đất liền của Trung tâm Dự báo Thời tiết hạn vừa Châu Âu đã

được xây dựng [63], có thể đóng vai trò là một bộ số liệu tựa quan trắc tốt phục vụ bài toán chi tiết hoá thống kê trên khu vực. Bên cạnh các yếu tố quen thuộc như lượng mưa và nhiệt độ, một số yếu tố khác như tốc độ và hướng gió, bức xạ, bốc thoát hơi, độ ẩm, ... cũng thường xuyên được yêu cầu bởi cộng đồng nghiên cứu đánh giá tác động của BĐKH. Vì thế, việc chi tiết hoá trong các nghiên cứu tương lai trên khu vực cũng cần xem xét đến cả các biến khí hậu khác bên cạnh lượng mưa và nhiệt độ.

Một trong những điểm quan trọng cần được nhấn mạnh trong các kịch bản BĐKH là việc dự tính được sự biến đổi của các hiện tượng, yếu tố cực đoan trong tương lai. Các yếu tố, hiện tượng cực đoan này thường nằm ở phần đuôi của hàm phân phối xác suất. Có một thực tế là các kết quả dự tính BĐKH từ các GCMs, hoặc từ các thí nghiệm chi tiết hoá vẫn dựa trên một số lượng hạn chế các mô hình; vì thế nên chúng không phủ hết được toàn bộ không gian xác suất. Bên cạnh đó các GCMs cũng thường đánh giá thiên thấp các sự kiện cực đoan [64]. Do đó, bên cạnh việc đưa ra các kịch bản BĐKH từ một số lượng hạn chế các kết quả mô hình, phương án dự tính xác suất cũng cần được tính đến. Một trong những nghiên cứu tiên phong theo hướng này đã sử dụng phương pháp thay thế/tổ hợp hỗn hợp các mô hình SMME (tiếng Anh: Surrogate/Model Mixed Ensemble) [65]. Phương pháp SMME có khả năng đánh giá tích hợp, vừa đưa ra trọng số xác suất cho các GCM vừa thể hiện được các rủi ro đuôi, là các rủi ro tuy có xác suất xảy ra thấp nhưng hậu quả lại nghiêm trọng. Việc áp dụng phương pháp SMME hoặc tương tự vào các Kịch bản trong tương lai trên khu vực Đông Nam Á và Việt Nam sẽ là rất hữu ích.

Bên cạnh các yếu tố và hiện tượng cực đoan, vai trò của quá trình đô thị hoá cũng cần được lượng hoá rõ ràng trong các thí nghiệm chi tiết hoá trong tương lai. Quá trình đô thị hoá đang và sẽ diễn ra mạnh mẽ trên thế giới, bao gồm cả khu vực Đông Nam Á và Việt Nam [66]. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng đô thị hoá làm gia tăng cường độ của các đợt sóng nhiệt [67, 68], cũng như có tác động đến sự xuất hiện của các sự kiện mưa cực đoan [69]. Đô thị hoá làm gia tăng mức

độ nóng lên toàn cầu [12]. Lưu ý rằng cho đến nay, đa số các mô hình GCMs thường bỏ qua vai trò của quá trình đô thị hoá do độ phân giải thô của chúng [70]. Trên khu vực thành phố Hồ Chí Minh, Doan & Kusaka (2018) [71] đã tính toán vai trò của đô thị hoá trong bối cảnh BĐKH, sử dụng mô hình WRF để chi tiết hoá kết quả CMIP5 theo 2 kịch bản RCP4.5 và RCP8.5. Kết quả cho thấy quá trình đô thị hoá làm gia tăng thêm 0,5 °C trong cả 2 kịch bản, tương ứng với 20-30% mức nóng lên do BĐKH. Với độ phân giải cao hơn, việc tích hợp các quá trình đô thị hoá vào các mô hình khu vực cần được thực hiện cho các thí nghiệm chi tiết hoá trên một số thành phố lớn trên khu vực Đông Nam Á trong tương lai.

4.3. Phát triển hệ thống mô hình kết hợp biển-khí

Khí hậu trên khu vực đất liền Đông Nam Á điển hình là nóng ẩm, chịu ảnh hưởng của gió mùa và các yếu tố đại dương. Một số nghiên cứu trước đây đã chỉ ra tầm quan trọng của tương tác khí quyển-đại dương ở quy mô toàn cầu và khu vực [72-74]. Nhiệt độ bề mặt biển được chỉ ra là có liên quan đến hoạt động của gió mùa [75, 76], và do đó có sự liên kết từ xa với các yếu tố khí hậu trên đất liền [77-79]. Vì vậy, việc có thể biểu diễn chính xác các tương tác hai chiều giữa bề mặt đất, khí quyển và đại dương là rất quan trọng để có thể hiểu sâu và hiểu đúng về các quá trình vật lý và BĐKH ở Đông Nam Á.

Các GCMs tham gia vào các pha CMIP khác nhau thường là các mô hình kết hợp bao gồm các thành phần khí quyển, đại dương và bề mặt đất liền cũng như các tương tác giữa chúng [14]. Như đã đề cập ở trên, các phương pháp chi tiết hoá thống kê và động lực đã bước đầu được áp dụng trên khu vực Đông Nam Á và Việt Nam trong những năm qua. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp chi tiết hoá thống kê là việc không bảo toàn được quan hệ vật lý giữa các biến khí hậu. Trong khi đó, các thí nghiệm chi tiết hoá động lực ở Đông Nam Á hiện sử dụng các RCMs với tương tác đại dương – khí quyển một chiều, tức là thông tin từ điều kiện biên đại dương được đưa vào khí quyển nhưng các quá trình hồi tiếp từ khí quyển vào đại dương không được xét đến. F. Juneng và cộng sự (2016) [34] chỉ ra rằng các

thí nghiệm RCM một chiều trên khu vực làm gia tăng lượng mưa trên khu vực bán đảo Đông Dương vào mùa hè. Việc không tính đến tương tác biên-khí hai chiều cũng có thể là nguyên nhân gây ra sự khác biệt giữa kết quả dự tính sự biến đổi của lượng mưa tương lai từ các thí nghiệm chi tiết hoá động lực (Hình 3) so với các kết quả từ các GCMs (Hình 2). Trong khi nhiều khu vực trên thế giới cho đến nay đã nghiên cứu phát triển các hệ thống mô hình kết hợp đại dương-khí quyển khu vực [80-82], các nghiên cứu tương tự hiện vẫn chưa được thực hiện trên khu vực Đông Nam Á và Việt Nam. Do đó, việc tập trung phát triển một hệ thống kết hợp giữa một RCM và mô hình đại dương trên khu vực sẽ là một hướng đi cần được chú trọng thực hiện và hứa hẹn sẽ giúp làm rõ hơn vấn đề BĐKH chi tiết trên khu vực và nhất là cơ chế của các biến đổi này trong tương lai.

5. Kết luận

Các kết quả về việc xây dựng kịch bản BĐKH cho khu vực Đông Nam Á và Việt Nam trong hơn một thập kỷ qua là rất đáng ghi nhận. Bài toán chi tiết hoá động lực đã đặc biệt được chú trọng và những nỗ lực hợp tác sâu rộng và hiệu quả trong khu vực Đông Nam Á đã được thực hiện, nhất là trong khuôn khổ các dự án CORDEX-SEA. Đối với Việt Nam, thông qua các Kịch bản BĐKH qua các năm được công bố bởi Bộ Tài nguyên và Môi trường, cùng với một số kết quả công bố trong một số nghiên cứu khác, có thể thấy việc xây dựng các Kịch bản BĐKH ngày càng chi tiết, cập nhật, với cách tiếp cận khoa học và phương pháp hiện đại. Trong thời gian tới, một số hướng nghiên cứu sau có thể cần được chú trọng trên khu vực Đông Nam Á và Việt Nam, bao gồm: i) Xây dựng bộ số liệu khí hậu trên lưới có phân giải cao dựa trên nguồn số liệu quan trắc hoặc các nguồn số liệu tái phân tích cập nhật; ii) Chi tiết hoá các sản phẩm CMIP6 với các kịch bản SSPs mới nhất bằng cả phương pháp động lực, thống kê, và dự tính xác suất; trong đó có chú trọng đến vai trò của đô thị hoá trong bối cảnh BĐKH toàn cầu; và iii) Phát triển hệ thống mô hình kết hợp biển-khí cho khu

vực Đông Nam Á, từ đó ứng dụng hệ thống kết hợp này cho các thí nghiệm chi tiết hoá để làm rõ cơ chế của sự BĐKH trong tương lai trên khu vực và tại Việt Nam.

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.

Tài liệu tham khảo

- [1] H. E. Beck, N. E. Zimmermann, T. R. McVicar, N. Vergopolan, A. Berg, E. F. Wood, Present and Future Köppen-Geiger Climate Classification Maps at 1 km Resolution, *Sci Data*, Vol. 5, No. 1, 2018, pp. 180214, <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>.
- [2] Y. Hijioka et al., Asia, Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Part B: Regional Aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, pp. 1327-1370.
- [3] W. K. Cheong et al., Observed and Modelled Temperature and Precipitation Extremes Over Southeast Asia from 1972 to 2010, *International Journal of Climatology*, Vol. 38, No. 7, 2018, pp. 3013-3027, <https://doi.org/10.1002/joc.5479>.
- [4] M. Q. Villafuerte, J. Matsumoto, Significant Influences of Global Mean Temperature and ENSO on Extreme Rainfall in Southeast Asia, *J Clim*, Vol. 28, No. 5, 2015, pp. 1905-1919, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00531.1>.
- [5] M. L. Tan, L. Juneng, F. T. Tangang, J. X. Chung, R. B. Radin Firdaus, Changes in Temperature Extremes and Their Relationship with ENSO in Malaysia from 1985 to 2018, *International Journal of Climatology*, Vol. 41, No. S1, 2021, pp. E2564-E2580, <https://doi.org/10.1002/joc.6864>.
- [6] Supari, F. Tangang, L. Juneng, E. Aldrian, Observed Changes in Extreme Temperature and Precipitation Over Indonesia, *International Journal of Climatology*, Vol. 37, No. 4, 2017, pp. 1979-1997, <https://doi.org/10.1002/joc.4829>.
- [7] 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).
- [8] S. Limjikanan, A. Limsakul, Observed Trends in Surface Air Temperatures and Their Extremes in Thailand from 1970 to 2009, *Journal of the Meteorological Society of Japan, Series II*, Vol. 90, No. 5, 2012, pp. 647-662, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2012-505>.
- [9] J. M. Gutiérrez et al., Atlas, in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [V. M. Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.)], Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021, pp. 1927-2058, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.021>.
- [10] H. P. Thanh, N. D. Thanh, J. Matsumoto, P. V. Tan, 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>.
- [11] A. Limsakul, P. Singhruck, Long-term Trends and Variability of Total And Extreme Precipitation in Thailand, *Atmos Res*, Vol. 169, 2016, pp. 301-317, <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2015.10.015>.
- [12] IPCC, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [V. M. Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.)], Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021, <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- [13] K. E. Taylor, R. J. Stouffer, G. A. Meehl, An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, *Bull Am Meteorol Soc*, Vol. 93, No. 4, 2011, pp. 485-498, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.
- [14] 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>.
- [15] F. Giorgi, Thirty Years of Regional Climate Modeling: Where Are We and Where Are We Going Next?, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 124, No. 11, 2019, pp. 5696-5723, <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>.
- [16] MONRE, *Climate Change and Sea Level Rise Scenarios for Vietnam*, 2009, pp. 1-34 (in Vietnamese).
- [17] MONRE, *Climate Change and Sea Level Rise Scenarios for Vietnam*, Vietnam Natural Resources, Environment and Mapping Publishing House, 2012, pp. 1-112 (in Vietnamese).
- [18] MONRE, *Climate Change and Sea Level Rise Scenarios for Vietnam*, Vietnam Natural Resources, Environment and Mapping Publishing House, 2016, pp. 1-188 (in Vietnamese).
- [19] MONRE, *Climate Change Scenarios*, Vietnam Natural Resources, Environment and Mapping Publishing House, 2020, 286 pp (in Vietnamese).
- [20] J. Murphy, An Evaluation of Statistical and Dynamical Techniques for Downscaling Local Climate, *J Clim*, Vol. 12, No. 8, 1999, pp. 2256-2284, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2256:AEOSAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2256:AEOSAD>2.0.CO;2).
- [21] F. Giorgi, L. O. Mearns, Introduction to Special Section: Regional Climate Modeling Revisited, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 104, No. D6, 1999, pp. 6335-6352, <https://doi.org/10.1029/98JD02072>.
- [22] M. Octaviani, K. Manomaiphiboon, Performance of Regional Climate Model RegCM3 Over Thailand, *Clim Res*, Vol. 47, No. 3, 2011, pp. 171-186, <https://doi.org/10.3354/cr00990>.
- [23] K. Manomaiphiboon, M. Octaviani, K. Torsri, S. Towprayoon, Projected Changes in Means and Extremes of Temperature and Precipitation Over Thailand Under Three Future Emissions Scenarios, *Clim Res*, Vol. 58, No. 2, 2013, pp. 97-115, <https://doi.org/10.3354/cr01188>.
- [24] J. L. McGregor, K. C. Nguyen, D. G. C. Kirono, J. J. Katzfey, High-resolution Climate Projections for the Islands of Lombok and Sumbawa, Nusa Tenggara Barat Province, Indonesia: Challenges and implications, *Clim Risk Manag*, Vol. 12, 2016, pp. 32-44, <https://doi.org/10.1016/j.crm.2015.10.001>.
- [25] M. Q. Villafuerte et al., Projected Changes in Rainfall and Temperature Over the Philippines from Multiple Dynamical Downscaling Models, *International Journal of Climatology*, Vol. 40, 2020, pp. 1784-1804, <https://doi.org/10.1002/joc.6301>.
- [26] V. T. Phan, T. N. Duc, T. M. H. Ho, Seasonal and Interannual Variations of Surface Climate

- Elements Over Vietnam, *Clim Res*, Vol. 40, No. 1, 2009, pp. 49-60, <https://doi.org/10.3354/cr00824>.
- [27] 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>.
- [28] N. D. Thanh, C. Kieu, M. Thatcher, D. N. Le, P. V. Tan, 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>.
- [29] M. V. Khiem, G. Redmond, C. McSweeney, T. Thuc, Evaluation of Dynamically Downscaled Ensemble Climate Simulations for Vietnam, *International Journal of Climatology*, Vol. 34, No. 7, 2014, pp. 2450-2463, <https://doi.org/10.1002/joc.3851>.
- [30] S. Kang, E. S. Im, E. A. B. Eltahir, Future Climate Change Enhances Rainfall Seasonality in A Regional Model of Western Maritime Continent, *Clim Dyn*, Vol. 52, No. 1, 2019, pp. 747-764, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4164-9>.
- [31] R. Rahmat et al., A Regional Climate Modelling Experiment for Southeast Asia, SEACAM (Southeast Asia Climate Analysis and Modelling) Project's Final Report, Centre for Climate Research in Singapore & Hadley Centre, 2014, pp. 1-128.
- [32] N. Nakicenovic et al., Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000, pp. 1-608.
- [33] 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>.
- [34] 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>.
- [35] 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>.
- [36] 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>.
- [37] K. A. Emanuel, M. Ž. Rothman, Development and Evaluation of A Convection Scheme for Use in Climate Models, *J Atmos Sci*, Vol. 56, No. 11, 1999, pp. 1766-1782, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<1766:DAEOAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<1766:DAEOAC>2.0.CO;2).
- [38] R. E. Dickinson, A. H. Sellers, P. J. Kennedy, Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1E as Coupled to the NCAR Community Climate Model, *Natl Cent for Atmos Res, Boulder, Colorado*, 1993, pp. 1-72.
- [39] M. Herrmann, N. D. Thanh, L. T. Tuan, Impact of Climate Change on Sea Surface Wind in Southeast Asia, from Climatological Average to Extreme Events: Results from A Dynamical Downscaling, *Clim Dyn*, Vol. 54, No. 3-4, 2020, pp. 2101-2134, <https://doi.org/10.1007/S00382-019-05103-6>.
- [40] L. T. Tuan et al., Application of Quantile Mapping Bias Correction for Mid-future Precipitation Projections Over Vietnam, *SOLA*, Vol. 15, 2019, pp. 1-6, <https://doi.org/10.2151/Sola.2019-001>.
- [41] 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>.
- [42] F. Tangang et al., Future Changes in Annual Precipitation Extremes Over Southeast Asia Under Global Warming of 2 °C, *APN Science Bulletin*, Vol. 8, No. 1, 2018, pp. 3-8, <https://doi.org/10.30852/Sb.2018.436>.
- [43] S. 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>.
- [44] M. Herrmann, T. N. Duc, T. N. Duc, F. Tangang, Climate Change Impact on Sea Surface Winds in Southeast Asia, *International Journal of Climatology*, Vol. 42, No. 7, 2022, pp. 3571-3595, <https://doi.org/10.1002/joc.7433>.
- [45] P. A. Arias et al., Technical Summary, in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [V. M. Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.)], Cambridge,

- United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021, pp. 33-144. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>.
- [46] P. L. Nguyen, M. Bador, L. V. Alexander, T. P. Lane, T. N. Duc, More Intense Daily Precipitation in CORDEX-SEA Regional Climate Models Than Their Forcing Global Climate Models Over Southeast Asia, *International Journal of Climatology*, Vol. 42, No. 12, 2022, pp. 6537-6561, <https://doi.org/10.1002/joc.7619>.
- [47] N. D. Ngu, N. T. Hieu, *Climate and Climate Resources of Vietnam*, Agriculture Publishing House, 2004, pp. 1-230 (in Vietnamese).
- [48] IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I, Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.
- [49] 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>.
- [50] T. M. H. Ho, V. T. Phan, N. Q. Le, S. Nguyen, Extreme Climatic Events Over Vietnam from - Observational Data and RegCM3 Projections, *Clim Res*, Vol. 49, 2011, pp. 87-100.
- [51] E. Espagne et al., *Climate Change in Vietnam; Impacts and Adaptation*. A COP26 Assessment Report of the GEMMES Vietnam Project, 2021, [Online]. Available: <https://www.afd.fr/en/ressources/gemmes-vietnam-climate-change-impacts-and-adaptation> (accessed on: December 1st, 2022).
- [52] A. W. Wood, L. R. Leung, V. Sridhar, D. P. Lettenmaier, Hydrologic Implications of Dynamical and Statistical Approaches to Downscaling Climate Model Outputs, *Clim Change*, Vol. 62, No. 1, 2004, pp. 189-216, <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013685.99609.9e>.
- [53] 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>.
- [54] T. N. Duc, J. Matsumoto, H. Kamimera, H. H. Bui, Monthly Adjustment of Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) data over the Vu Gia-Thu Bon River Basin in Central Vietnam using an Artificial Neural Network, *Hydrological Research Letters*, Vol. 7, No. 4, 2013, pp. 85-90, <https://doi.org/10.3178/hrl.7.85>.
- [55] T. N. Xuan et al., The Vietnam Gridded Precipitation (VnGP) Dataset: Construction and Validation, *SOLA*, Vol. 12, 2016, pp. 291-296, <https://doi.org/10.2151/sola.2016-057>.
- [56] I. Harris, T. J. Osborn, P. Jones, D. Lister, Version 4 of the CRU TS Monthly High-resolution Gridded Multivariate Climate Dataset, *Sci Data*, Vol. 7, No. 1, 2020, pp. 109, <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>.
- [57] R. F. Adler et al., The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Analysis (New Version 2.3) and a Review of 2017 Global Precipitation, *Atmosphere (Basel)*, Vol. 9, No. 4, 2018, pp. 9040138, <https://doi.org/10.3390/atmos9040138>.
- [58] 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>.
- [59] 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>.
- [60] B. C. O'Neill et al., The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geosci Model Dev*, Vol. 9, No. 9, 2016, pp. 3461-3482, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.
- [61] Q. Desmet, T. N. Duc, A Novel Method for Ranking CMIP6 Global Climate Models Over the Southeast Asian Region, *International Journal of Climatology*, Vol. 42, No. 1, 2022, pp. 97-117, <https://doi.org/10.1002/joc.7234>.
- [62] Q. T. Anh, T. N. Duc, E. Espagne, Statistical Downscaling and Probabilistic Projections for Climate Risk Analysis in Vietnam, in *National Climate Change Impacts and Adaptation, Final Report* [E. Espagne, G. Magacho (eds.)], Hanoi, World Publishing House, 2022, pp. 13-62.
- [63] 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>.
- [64] IPCC, *Evaluation of Climate Models*, in *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, 2014, pp. 741-866, <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.020>.

- [65] D. J. Rasmussen, M. Meinshausen, R. E. Kopp, Probability-Weighted Ensembles of U. S. County-Level Climate Projections for Climate Risk Analysis, *J Appl Meteorol Climatol*, Vol. 55, No. 10, 2016, pp. 2301-2322, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0302.1>.
- [66] J. Gao, B. C. O'Neill, Mapping Global Urban Land for the 21st Century with Data-Driven Simulations and Shared Socioeconomic Pathways, *Nat Commun*, Vol. 11, No. 1, 2020, pp. 2302, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15788-7>.
- [67] E. S. Im, N. X. Thanh, Y. H. Kim, J. B. Ahn, 2018 Summer Extreme Temperatures in South Korea and their Intensification under 3 °C Global Warming, *Environmental Research Letters*, Vol. 14, No. 9, 2019, pp. 094020, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3b8f>.
- [68] J. Wang, J. Feng, Z. Yan, Potential Sensitivity of Warm Season Precipitation to Urbanization Extents: Modeling Study in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in China, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 120, No. 18, 2015, pp. 9408-9425, <https://doi.org/10.1002/2015JD023572>.
- [69] Z. W. Yan, J. Wang, J. J. Xia, J. M. Feng, Review of Recent Studies of the Climatic Effects of Urbanization in China, *Advances in Climate Change Research*, Vol. 7, No. 3, 2016, pp. 154-168, <https://doi.org/10.1016/j.accre.2016.09.003>.
- [70] R. Hamdi et al., The State-of-the-Art of Urban Climate Change Modeling and Observations, *Earth Systems and Environment*, Vol. 4, No. 4, 2020, pp. 631-646, <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00193-3>.
- [71] V. Q. Doan, H. Kusaka, Projections of Urban Climate in the 2050s In A Fast-Growing City in Southeast Asia: The Greater Ho Chi Minh City Metropolitan Area, Vietnam, *International Journal of Climatology*, Vol. 38, No. 11, 2018, pp. 4155-4171, <https://doi.org/10.1002/joc.5559>.
- [72] A. Timmermann et al., El Niño–southern Oscillation Complexity, *Nature*, Vol. 559, No. 7715, 2018, pp. 535-545, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0252-6>.
- [73] K. Thirumalai, P. N. DiNezio, Y. Okumura, C. Deser, Extreme Temperatures in Southeast Asia Caused by El Niño and Worsened by Global Warming, *Nat Commun*, Vol. 8, No. 1, 2017, pp. 15531, <https://doi.org/10.1038/ncomms15531>.
- [74] K. Ashok, S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, T. Yamagata, El Niño Modoki and its Possible Teleconnection, *J Geophys Res Oceans*, Vol. 112, 2007, pp. C11007, <https://doi.org/10.1029/2006JC003798>.
- [75] G. A. Meehl, Influence of the Land Surface in the Asian Summer Monsoon: External Conditions versus Internal Feedbacks, *J Clim*, Vol. 7, No. 7, 1994, pp. 1033-1049, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1994\)007<1033:IOTLSI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1994)007<1033:IOTLSI>2.0.CO;2).
- [76] S. Yang, K. M. Lau, Influences of Sea Surface Temperature and Ground Wetness on Asian Summer Monsoon, *J Clim*, Vol. 11, No. 12, 1998, pp. 3230-3246, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<3230:IOSSTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<3230:IOSSTA>2.0.CO;2).
- [77] D. N. Le, J. Matsumoto, T. N. Duc, Onset of the Rainy Seasons in the Eastern Indochina Peninsula, *J Clim*, Vol. 28, No. 14, 2015, pp. 5645–5666, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00373.1>.
- [78] H. N. Thanh, T. N. Duc, H. N. Hong, P. Baker, T. P. Van, A Distinction Between Summer Rainy Season and Summer Monsoon Season Over the Central Highlands of Vietnam, *Theor Appl Climatol*, Vol. 132, No. 3-4, 2018, pp. 1237-1246, <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2178-6>.
- [79] H. G. Takahashi, J. M. B. Dado, Relationship between Sea Surface Temperature and Rainfall in the Philippines During the Asian Summer Monsoon, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, Vol. 96, No. 3, 2018, pp. 283-290, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2018-031>.
- [80] Y. Fang, Y. Zhang, J. Tang, X. Ren, A Regional Air-sea Coupled Model and Its Application Over East Asia in the Summer of 2000, *Adv Atmos Sci*, Vol. 27, No. 3, 2010, pp. 583-593, <https://doi.org/10.1007/s00376-009-8203-7>.
- [81] C. Schrum, *Regional Climate Modeling and Air-sea Coupling*, Oxford University Press, 2017, <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.3>.
- [82] H. W. Lewis et al., The UKC3 Regional Coupled Environmental Prediction System, *Geosci Model Dev*, Vol. 12, No. 6, 2019, pp. 2357-2400, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2357-2019>.