

**TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ ĐỊA CHẤT
BỘ MÔN ĐỊA SINH THÁI VÀ CÔNG NGHỆ MÔI TRƯỜNG**

BÁO CÁO SEMINAR HỌC THUẬT

Đề tài:

**ĐÁNH GIÁ TÁC ĐỘNG CỦA BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU
TỚI CÁC ĐIỀU KIỆN KHÍ HẬU CỰC ĐOAN
VÀO CUỐI TK21**

TS. Trần Anh Quân

Hà Nội, tháng 5 năm 2021

MỤC LỤC

1. Giới thiệu chương	2
2. Biến đổi khí hậu trong quá khứ.....	3
2.1. Nhiệt độ trung bình và cực trị	4
2.2. Lượng mưa trung bình và cực trị.....	8
3. Dự tính BĐKH trong tương lai ở Việt Nam	10
3.1. Phương pháp dự tính khí hậu áp dụng trong báo cáo	10
3.1.1. Phương pháp chi tiết hoá động lực	11
3.1.2. Phương pháp hiệu chỉnh sai số và phân rã không gian BCSD	13
3.1.3. Phương pháp tính ứng với các ngưỡng nóng lên toàn cầu 1,5°C, 2°C, 3°C và 4°C	16
3.2. Kết quả dự tính khí hậu tương lai cho Việt Nam	18
3.2.1. Nhiệt độ.....	18
3.2.2. Lượng mưa	24
3.3. Biến đổi tương ứng với các mức tăng toàn cầu +1,5°C, 2°C, 3°C, 4°C.....	27
3.3.1. Nhiệt độ	27
3.3.2. Lượng mưa	28
4. Tổng hợp và kết luận	30
5. Tài liệu tham khảo.....	31

1. Giới thiệu chương

Việt Nam là một trong những quốc gia bị ảnh hưởng nặng nề của biến đổi khí hậu (BĐKH) (MONRE 2009). Trong những năm qua kịch bản biến đổi khí hậu và nước biển dâng cho Việt Nam đã liên tục được xây dựng, cập nhật và công bố nhằm cung cấp những thông tin mới nhất về những biểu hiện, xu thế biến đổi trong quá khứ và những dự tính biến đổi khí hậu, nước biển dâng trong thế kỷ 21 ở Việt Nam (MONRE 2009; 2012; 2016; 2021). Nguyên tắc xây dựng chung của các kịch bản BĐKH của Việt Nam là chi tiết hoá các kịch bản toàn cầu dựa trên các phương pháp chi tiết hoá thống kê (MONRE 2009; 2012) hoặc chi tiết hoá động lực (MONRE 2012; 2016; 2021) theo các kịch bản khí nhà kính khác nhau. Các kịch bản khí nhà kính được sử dụng trong các báo cáo trên gồm các họ kịch bản phát thải SRES (Special Report on Emission Scenarios; Nakicenovic et al. 2000) và các kịch bản đường nồng độ đại diện RCPs (Representative Concentration Pathways; van Vuuren 2011). 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 khí nhà kính) 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%.

Các thông tin nhận được từ các kịch bản BĐKH là đầu vào quan trọng để từ đó có thể đưa ra các đánh giá tác động của BĐKH đến các mặt của đời sống kinh tế xã hội. Một phần của các nghiên cứu đánh giá này đang được thực hiện trong khuôn khổ của dự án GEMMES Việt Nam, được tài trợ bởi cơ quan phát triển Pháp AFD. Nội dung của chương báo cáo này là kết quả nghiên cứu của Gói làm việc thứ nhất (Working Package I) của dự án. Chương này sẽ tập trung trình bày một số kết quả mới nhất cập nhật từ các kịch bản của Bộ Tài Nguyên và Môi trường (MONRE 2021). Bên cạnh đó chúng tôi cũng đưa ra các tính toán mới dựa trên phương pháp chi tiết hoá thống kê BCSD (Bias Correction Spatial Disaggregation) cho bộ 31 mô hình khí hậu toàn cầu thuộc dự án so sánh đa mô hình kết hợp CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5). Trong các tính toán mới này, cả 4 kịch bản đường nồng độ đại diện RCP2.6, 4.5, 6.0 và 8.5 đã được sử dụng. Lưu ý rằng báo cáo năm 2016 và 2021 của Bộ Tài nguyên và Môi trường chỉ sử dụng 02 kịch bản RCP4.5 và RCP8.5. Lý do là các báo cáo này sử dụng phương pháp chi tiết hoá động lực nên bị hạn chế với số mô hình và kịch bản khí nhà kính do thời gian tính toán quá lớn. Các kết quả tính toán mới sử dụng phương pháp BCSD cho Việt Nam

này có thể tải được miễn phí từ địa chỉ: https://remosat.usth.edu.vn/Download/dat_GEMMES_WP1/WP1_MODEL_OUTP_UT/.

Năm 2015, nhiều quốc gia trên thế giới đã bàn thảo, tham gia vào Thỏa thuận Paris, với mục tiêu là giữ cho mức tăng nhiệt độ trái đất vào cuối thế kỷ 21 dưới ngưỡng 2°C so với thời kỳ tiền công nghiệp, và nỗ lực để giới hạn sự gia tăng ở mức 1,5°C. Các nhà khoa học khuyến cáo rằng nếu mức tăng nhiệt độ toàn cầu vượt qua ngưỡng 2°C thì sẽ gây nên những tác động rất nghiêm trọng đối với con người và hệ sinh thái (IPCC 2018). Việc xác định mức độ BĐKH của mỗi khu vực với các mức nóng lên toàn cầu (GWLs: Global Warming Levels) khác nhau có ý nghĩa thực tiễn lớn trong việc đánh giá tác động cũng như trong việc ứng phó với BĐKH của mỗi quốc gia. Trong bối cảnh đó, một trong những nội dung cần được nhấn mạnh của Chương này là đưa ra được các tính toán về sự thay đổi của nhiệt độ, lượng mưa và một số các yếu tố cực đoan tại Việt Nam theo các mức nóng lên toàn cầu khác nhau, từ 1,5°C, 2°C, 3°C đến 4°C.

2. Biến đổi khí hậu trong quá khứ

Theo báo cáo của Cơ Quan Khí tượng Thế giới (WMO-No. 1248, 2020) cho thấy, trong những năm gần đây, nhiệt độ trung bình toàn cầu tăng rất nhanh. Thập kỷ 2010–2019 là thập kỷ nóng nhất từ thời kỳ tiền công nghiệp đến nay; trong đó 5 năm gần đây có nhiệt độ cao nhất trong 140 năm qua. Cụ thể nhiệt độ trung bình toàn cầu năm 2019 đã tăng 1,1°C so với giai đoạn tiền công nghiệp (~1850s).

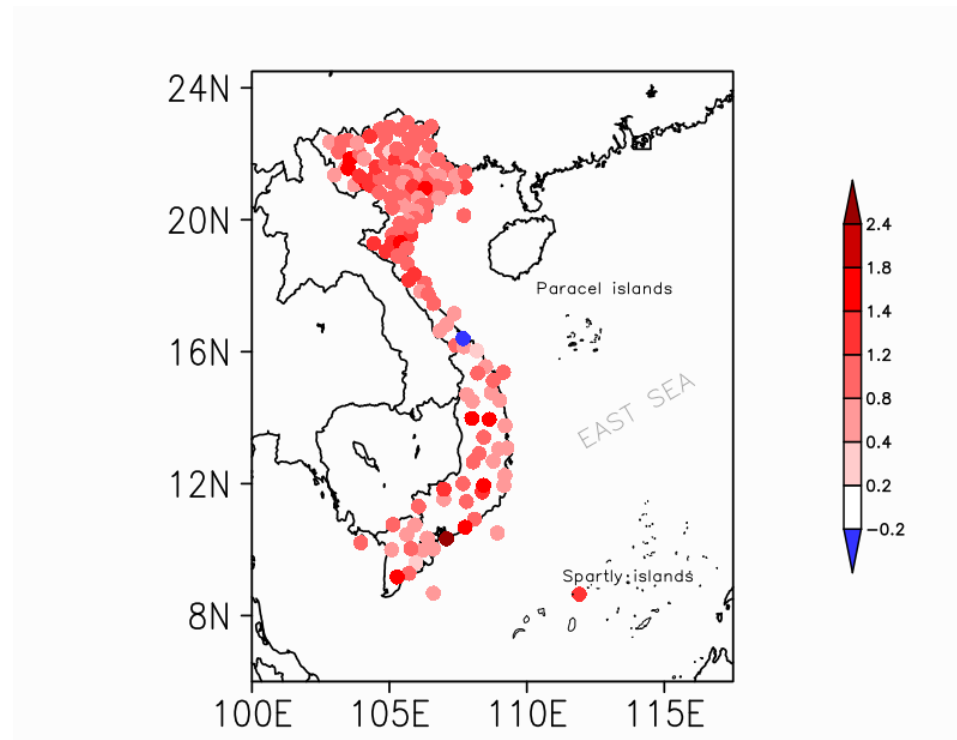
Mục 2 này sẽ cung cấp một số thông tin cập nhật về biểu hiện của BĐKH trong quá khứ của Việt Nam. Các tính toán dựa trên nguồn số liệu thu thập hàng ngày giai đoạn 1958–2018 từ 150 trạm quan trắc trên đất liền và hải đảo thuộc mạng lưới trạm khí tượng thủy văn của Tổng cục Khí tượng Thủy văn. Bộ số liệu này cũng được sử dụng trong Báo cáo mới nhất về Kịch bản Biến đổi Khí hậu và nước biển dâng của Bộ Tài nguyên và Môi trường (MONRE, 2021). Các kết quả tập trung vào các yếu tố nhiệt độ và mưa bao gồm: 1) nhiệt độ trung bình ngày T2m, 2) nhiệt độ cực tiểu Tn, 3) nhiệt độ cực đại ngày Tx, 4) lượng mưa ngày R, và 5) một số chỉ số cực đoan như số ngày nắng nóng, nắng nóng gay gắt, số ngày rét đậm, rét hại, lượng mưa ngày lớn nhất trong năm Rx1day, và số các ngày mưa lớn trong năm R50 có lượng mưa lớn hơn 50mm/ngày. Riêng số liệu nhiệt độ cực đại và cực tiểu trong ngày cũng như các chỉ số cực đoan chỉ thu thập và tính toán cho giai đoạn 1961–2018. Với nội dung mực nước biển dâng, người đọc có thể tham khảo các báo cáo kịch bản cập nhật của Bộ Tài Nguyên và Môi trường (MONRE 2016; MONRE

2021). Các báo cáo này cho thấy giai đoạn 1993–2014, mực nước tại các trạm có xu thế tăng khoảng 3,34mm/năm. Số liệu vệ tinh trong cùng giai đoạn này cũng đã cho thấy mực nước trung bình toàn Biển Đông có xu thế tăng (4,1mm/năm). Trong khi đó, giữa Biển Đông tăng lớn nhất (6–7,2 mm/năm) và mực nước ven biển từ Đồng bằng sông Cửu Long có mức tăng thấp nhất (2,2–2,5 mm/năm).

Để cập nhật, để đánh giá xu thế biến đổi khí hậu cho Việt Nam, biến đổi của các yếu tố khí hậu trung bình năm cho quy mô cả nước được xác định theo chuẩn sai nhiệt độ và lượng mưa của mỗi trạm. Giá trị thay đổi trên các vùng khí hậu/toàn quốc là giá trị trung bình của chuẩn sai của tất cả các trạm trong vùng/toàn quốc được phân tích bằng phương pháp hồi quy tuyến tính. Mức độ biến đổi của các yếu tố được thể hiện thông qua tốc độ xu thế tại các trạm quan trắc. đánh giá độ tin cậy của tốc độ xu thế của các yếu tố tại các trạm được thực hiện bằng phương pháp kiểm nghiệm thống kê T-test với độ tin cậy 95%.

2.1. Nhiệt độ trung bình và cực trị

Đánh giá mức độ biến đổi và xu thế đã chỉ ra nhiệt độ có xu thế tăng ở hầu hết các trạm quan trắc nhưng có mức độ tăng khác nhau giữa các vùng và các mùa trong năm (Hình 1.1, Bảng 1.1). Mức tăng nhanh dần theo các thập kỷ và mạnh nhất là các thập kỷ gần đây (2011–2018). Trung bình trên cả nước, nhiệt độ trung bình năm đã tăng khoảng 0,89°C cho thời kỳ 1958–2018. Mức độ tăng cao nhất vào mùa thu, khu vực Tây Nguyên tăng cao nhất lên đến 1,4°C, Bắc Trung Bộ và Tây Bắc tăng 1,3°C. Mức độ tăng nhỏ nhất vào mùa hè và mùa xuân tại khu vực Nam Trung Bộ với mức tăng tương ứng là 0,6°C và 0,4°C. Cực trị nhiệt độ cũng tăng ở hầu hết các vùng, ngoại trừ nhiệt độ cực đại ngày có xu thế giảm ở một số trạm phía Nam (Hình 1.2). Các kỷ lục về nhiệt độ trung bình cũng như nhiệt độ tối cao liên tục được ghi nhận từ năm này qua năm khác.



Hình 1.1. Mức độ tăng nhiệt độ T2m ở Việt Nam giai đoạn 1958–2018.

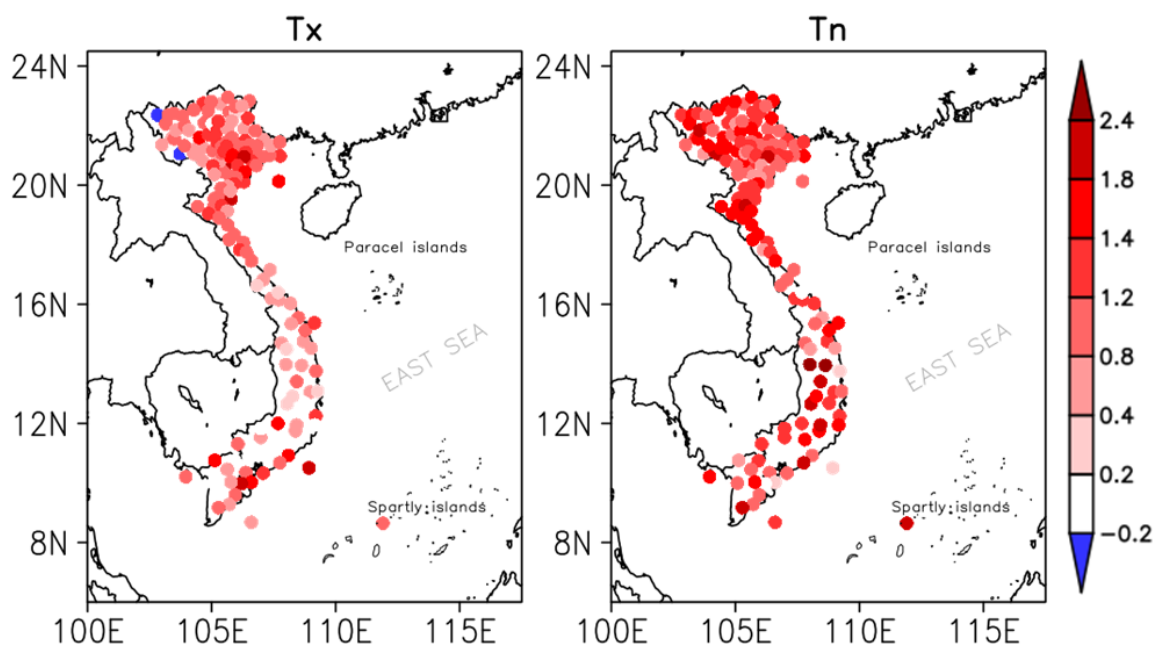
Bảng 1.1. Mức tăng của nhiệt độ trung bình (°C) trong 61 năm (1958–2018) trên 7 vùng khí hậu.

Vùng khí hậu	Mùa đông	Mùa xuân	Mùa hè	Mùa thu
Tây Bắc	1,1	0,8	0,9	1,3
Đông Bắc	1,0	0,8	0,8	1,1
Đồng bằng Bắc Bộ	0,9	0,9	0,7	1,2
Bắc Trung Bộ	0,8	0,9	0,8	1,3
Nam Trung Bộ	0,6	0,4	0,6	0,9
Tây Nguyên	1,3	0,7	1,0	1,4
Nam Bộ	1,1	0,8	0,9	1,1

Nhiệt độ tối cao ngày (Tx) tăng trên hầu hết phạm vi cả nước trong giai đoạn 1961–2018 (Hình 1.2). Các kỷ lục cao chủ yếu được ghi nhận vào những năm El Niño hoạt động (1987, 1997, 2010, 2017). Mức tăng phổ biến từ 0,2 đến 1,7°C trên

hầu hết các khu vực, trừ một số trạm khu vực Tây Bắc có ghi nhận sự giảm của nhiệt độ tối cao ngày với khoảng 0,2°C đến 0,6°C/58 năm. Nhiệt độ tối cao ngày tăng tương đối nhiều ở Đồng bằng Bắc Bộ, phía nam của vùng Đông Bắc, phía bắc của vùng Bắc Trung Bộ và phía đông của Nam Bộ, có nơi tăng trên 2,1°C. Trong khi đó nhiệt độ tăng tương đối ít ở khu vực Nam Trung Bộ và phía tây của Tây Nguyên.

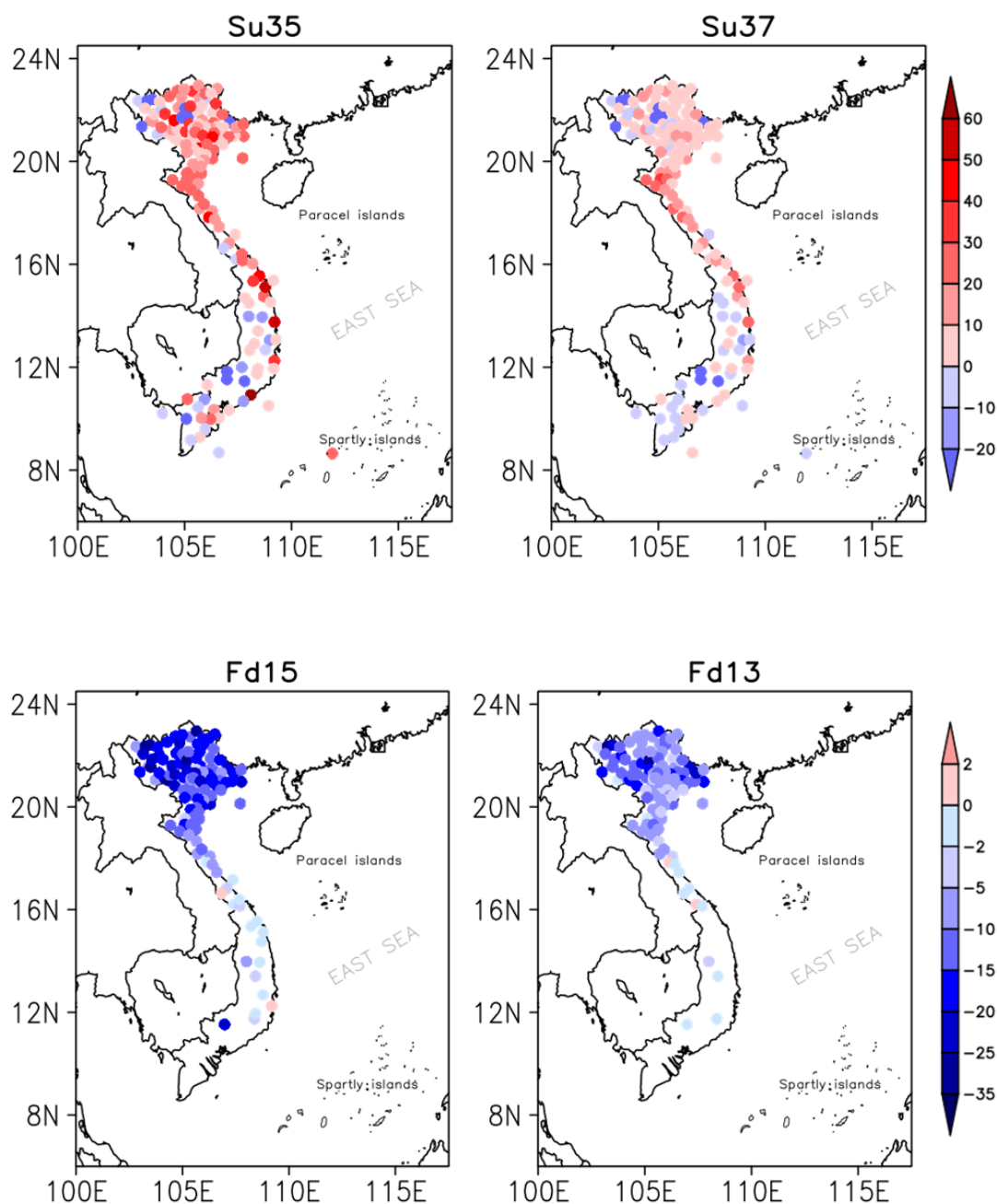
Bên cạnh đó, trong giai đoạn 1961–2018, nhiệt độ thấp nhất trung bình năm (Tn) cũng có xu thế tăng trên phạm vi cả nước với mức tăng nhiều nhất lên đến trên 1,8°C ở Tây Nguyên, 1,5°C ở Tây Bắc, 1,3°C ở Bắc Trung Bộ, 1,2°C ở Đông Bắc, Nam Bộ và ít nhất là 1,0°C ở Đồng bằng Bắc Bộ và Nam Trung Bộ. Nhìn chung mức tăng trung bình của Tn cao xu hướng cao hơn mức tăng của Tx trên Việt Nam (Hình 1.2).



Hình 1.2. Mức độ thay đổi của nhiệt độ cực đại ngày Tx và nhiệt độ cực tiểu ngày Tn giai đoạn 1961-2018.

Số ngày nắng nóng (ngày có $T_x \geq 35^\circ\text{C}$) và nắng nóng gay gắt (ngày có $T_x \geq 37^\circ\text{C}$) có xu thế tăng; ngược lại, số ngày rét đậm (ngày có $T_{2m} \leq 15^\circ\text{C}$), rét hại (ngày có $T_{2m} \leq 13^\circ\text{C}$) có xu thế giảm (Hình 1.3). Trong giai đoạn 1961–2018, số ngày nắng nóng có xu thế tăng trên hầu hết các vùng khí hậu với mức tăng thêm phổ biến từ 10 đến 40 ngày. Mức tăng nhiều hơn ở phía nam vùng Đông Bắc, Đồng bằng Bắc Bộ, Bắc Trung Bộ và Nam Trung Bộ. Trong khi đó, một số nơi thuộc khu vực Tây Bắc, Tây Nguyên và Đông Nam Bộ có số ngày nắng nóng giảm từ 10–15 ngày/58 năm. Số ngày nắng nóng gay gắt cũng có xu thế tăng, nhưng tăng nhẹ hơn

so với số ngày nắng nóng, với khoảng 5–15 ngày/50 năm. Khu vực Bắc Trung Bộ có số ngày nắng nóng gay gắt tăng nhiều nhất trên cả nước.



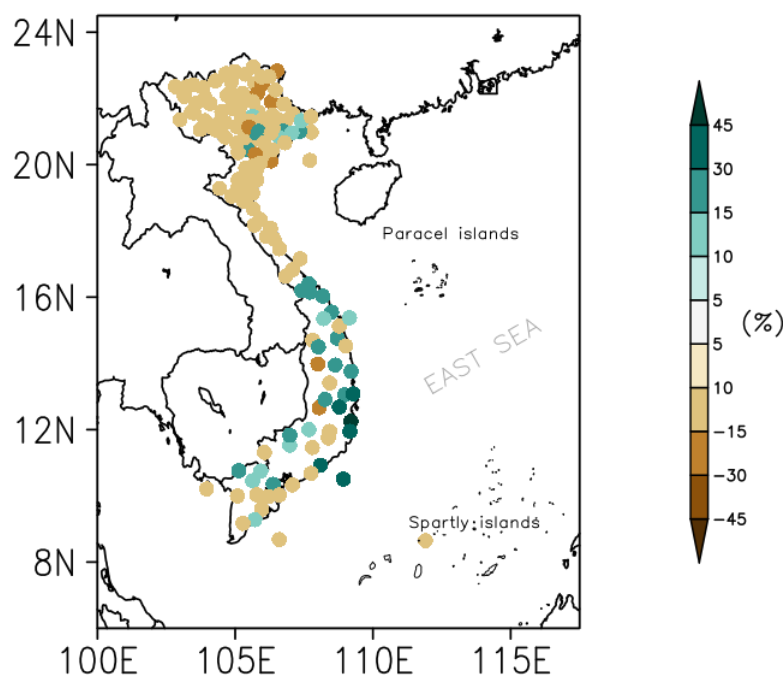
Hình 1.3. Mức độ biến đổi số ngày nắng nóng (Su35), nắng nóng gay gắt (Su37), số ngày rét đậm (Fd15), số ngày rét hại (Fd13) giai đoạn 1961-2018. Đơn vị: ngày/58 năm.

Số ngày rét đậm có xu thế giảm rõ rệt, phổ biến từ 5 đến 25 ngày cho cả giai đoạn 58 năm cho các khu vực phía Bắc. Mức giảm rõ rệt nhất xảy ra ở khu vực Tây Bắc, Đông Bắc, có nơi giảm đến trên 35 ngày. Khu vực Tây Nguyên và Nam Trung

Bộ có số ngày rét đậm giảm nhẹ khoảng 2–5 ngày. Số ngày rét hại có xu thế giảm trên miền khí hậu phía Bắc, phổ biến từ 5 đến 20 ngày/58 năm, chủ yếu tập trung ở khu vực Tây Bắc và Đông Bắc Bộ.

2.2. Lượng mưa trung bình và cực trị

Tính trung bình trên phạm vi cả nước, lượng mưa năm tăng nhẹ với mức tăng 2,1% trong giai đoạn 1958–2018. Xu thế mưa năm nhìn chung giảm trên đa số các trạm phía Bắc và tăng ở nhiều trạm ở Nam Trung Bộ và Tây Nguyên (Hình 1.4). Tính cho từng vùng khí hậu, lượng mưa các mùa có xu thế tăng nhiều nhất vào mùa đông, với mức tăng từ 16,8 tại khu vực Bắc Trung Bộ đến 97,4% ở Nam Bộ. Trong khi đó, vào mùa hè và mùa thu, lượng mưa có xu thế giảm ở các vùng khí hậu phía Bắc từ 0.7 đến 27.1% (Bảng 1.2).



Hình 1.4. Thay đổi lượng mưa ở Việt Nam giai đoạn 1958–2018 (%/61 năm)

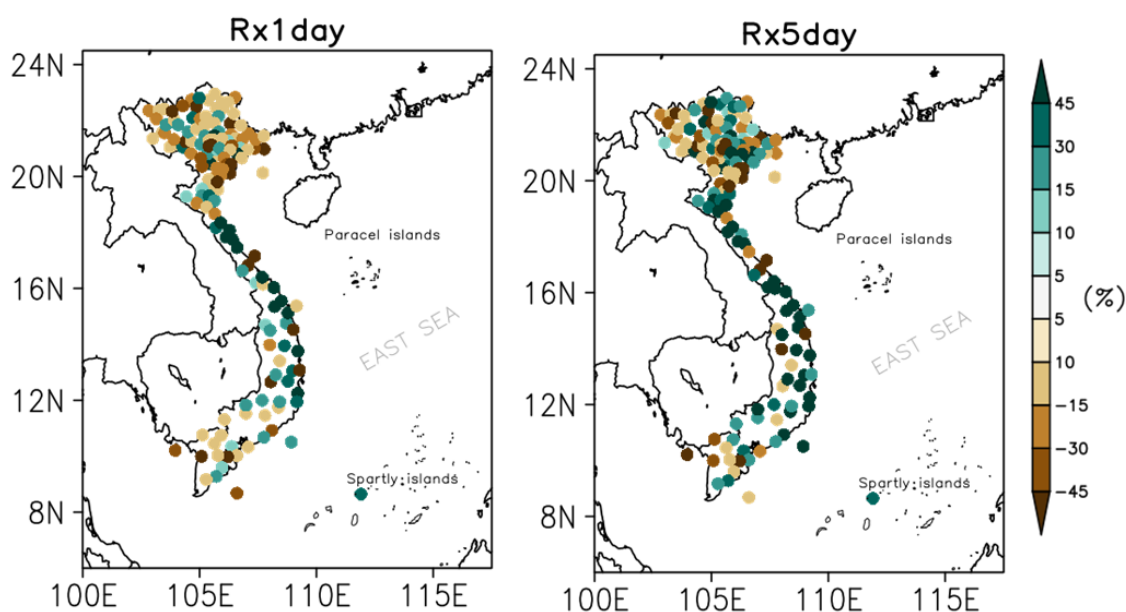
Bảng 1.2. Thay đổi lượng mưa trên các vùng khí hậu giai đoạn 1958–2018 (%/61 năm)

Vùng khí hậu	Đông	Xuân	Hè	Thu
Tây Bắc	41,4	9,9	-4,3	-17,3
Đông Bắc	34,3	-0,7	1,4	-16,0

Đồng bằng Bắc Bộ	13,8	2,7	-0,9	-27,1
Bắc Trung Bộ	16,8	13,0	8,6	-12,1
Nam Trung Bộ	82,2	23,0	8,9	11,3
Tây Nguyên	40,3	14,6	0,5	7,4
Nam Bộ	97,4	7,5	2,5	3,8

Các cực trị cũng như hiện tượng cực đoan về mưa có xu thế biến đổi khác nhau trên các vùng khí hậu của Việt Nam, giảm ở hầu hết các trạm thuộc Tây Bắc, Đông Bắc, Đồng bằng Bắc Bộ và tăng ở phần lớn trạm thuộc các vùng khí hậu Bắc Trung Bộ và Nam Trung Bộ (Hình 1.5). Trong những năm gần đây, mưa lớn xảy ra bất thường hơn về thời gian, địa điểm, tần suất và cường độ (MONRE 2021). Mưa lớn không chỉ xảy ra trong mùa mưa mà cả trong mùa khô.

Trong 58 năm qua, Rx1day có xu thế tăng ở trung tâm vùng Đông Bắc, một số khu vực thuộc Đồng Bằng Bắc Bộ, hầu hết tỉnh duyên hải Trung Bộ, Tây Nguyên với mức tăng phổ biến từ 20 đến 50%. Rx1day có xu thế giảm ở một số các tỉnh vùng đồng bằng Bắc Bộ và hầu khắp Tây Nam Bộ. Rx5day có xu thế tăng nhiều hơn so với Rx1day, phổ biến từ 5 đến 60%, nhiều nhất ở Trung Bộ, trong khi đó, khu vực Tây Bắc, một phần Đông Bắc, các tỉnh Thanh Hóa, Quảng Trị, các tỉnh phía Bắc Tây Nguyên và Tây Nam Bộ lại có sự giảm của Rx5day với mức giảm từ 2 đến 20%. Số ngày mưa lớn tăng nhiều nhất là 10,4 ngày tại trạm Ba Tơ (Quảng Ngãi) và giảm nhiều nhất là 12,8 ngày tại trạm Càng Long (Trà Vinh).



Hình 1.5. Thay đổi của Rx1day và Rx5day ở Việt Nam giai đoạn 1961–2018

Các tính toán chi tiết hơn và thực tế cho thấy hạn hán xuất hiện thường xuyên hơn trong mùa khô. Số tháng hạn có xu thế tăng ở khu vực phía Bắc, giảm ở Trung Bộ và phía Nam lãnh thổ, trong đó tăng nhiều nhất ở Đồng bằng Bắc Bộ, giảm nhiều nhất ở Nam Trung Bộ (MONRE 2021). Số bão mạnh có xu thế tăng cũng như khả năng tác động của ENSO đến thời tiết, khí hậu Việt Nam có sự gia tăng (MONRE 2021).

3. Dự tính BĐKH trong tương lai ở Việt Nam

3.1. Phương pháp dự tính khí hậu áp dụng trong báo cáo

Các kịch bản BĐKH toàn cầu cho tương lai thường dựa trên các sản phẩm dự tính từ các mô hình khí hậu toàn cầu (GCM: Global Climate Model) với các kịch bản nồng độ khí nhà kính khác nhau. Các kết quả trong các Báo cáo đánh giá của IPCC đa phần đều dựa trên kết quả đầu ra của các GCMs. Tuy nhiên do hạn chế của năng lực tính toán và lưu trữ, các GCMs cho đến hiện tại có độ phân giải tương đối thô, đa số từ khoảng 100km trở lên. Vì vậy, để có thể dự tính BĐKH cho một khu vực nhỏ, cụ thể là các tỉnh thành thuộc một quốc gia như Việt Nam, cần thiết phải áp dụng một số kỹ thuật chi tiết hoá. Trong mục này sẽ giới thiệu sơ lược 02 phương pháp chi tiết hoá thống kê và động lực. Phương pháp đầu tiên là hiệu chỉnh sai số và phân rã không gian BCSD (Wood et al. 2004) được thực hiện trong khuôn khổ của dự án GEMMES. Phương pháp thứ 2 là chi tiết hoá động lực, sử dụng mô hình khí hậu khu vực (RCM: Regional Climate Model) chạy tích phân cho giai đoạn quá khứ và tương lai với điều kiện ban đầu và điều kiện biên từ mô hình toàn cầu,

được thực hiện trong quá trình xây dựng các kịch bản quốc gia của Bộ Tài nguyên và Môi trường (MONRE 2021).

Với cả 02 phương pháp, nguồn số liệu toàn cầu đầu vào nhận được từ các GCMs tham gia vào dự án CMIP5 (Taylor et al. 2012). Lưu ý rằng các thí nghiệm của CMIP5 được thiết kế với các kịch bản đường nồng độ đại diện RCPs (van Vuuren et al. 2011; MONRE 2016). Các giá trị 2.6, 4.5, 6.0 và 8.5 của các RCPs ứng với giá trị cưỡng bức bức xạ (radiative forcing, đơn vị Wm^{-2}) vào thời kỳ cuối thế kỷ 2100 so với thời kỳ tiền công nghiệp 1750. Các thí nghiệm CMIP5 đã đóng góp rất lớn vào các kết quả dự tính BĐKH toàn cầu và khu vực, được tổng hợp trong Báo cáo đánh giá lần thứ 5 (IPCC, 2013) và Báo cáo đánh giá lần thứ 6 của IPCC dự kiến được công bố vào cuối năm 2021.

3.1.1. Phương pháp chi tiết hoá động lực

Chi tiết hóa động lực là phương pháp chính được sử dụng để tính toán xây dựng kịch bản biến đổi khí hậu gần đây của Việt Nam (MONRE 2016; MONRE 2021). Các mô hình được sử dụng trong các kết quả tính toán của báo cáo này, cũng như của kịch bản MONRE (2021) bao gồm sáu mô hình khí hậu khu vực (RCM): 1) mô hình PRECIS (Jones et al. 2004), 2) mô hình cIWRF (Fita and Fernández 2010), 3) mô hình CCAM (McGregor and Dix, 2008), 4) mô hình RegCM (Giorgi et al. 2012), 5) mô hình AGCM/MRI (Murakami et al. 2012), và 6) mô hình RCA3 (Samuelsson et al. 2011).

Mỗi thí nghiệm chi tiết hoá động lực có điều kiện biên và ban đầu từ đầu ra của một số mô hình toàn cầu của trong báo cáo CMIP5 (IPCC, 2013). Riêng với mô hình CCAM, số liệu nhiệt độ bề mặt biển từ các mô hình toàn cầu đã được hiệu chỉnh với nguồn số liệu quan trắc (Katzfey et al. 2016). Tổng cộng có tất cả 19 phương án tính toán được lựa chọn, trong đó có 14 phương án của nhiệt và 5 phương án mưa (Bảng 1.3). Lưu ý rằng đây cũng là các phương án được sử dụng trong kịch bản cập nhật mới nhất của Bộ Tài nguyên và Môi trường (MONRE, 2021), cung cấp bởi Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi Khí hậu (IMHEN).

Bảng 1.3. Danh sách 14 phương án mô hình khí hậu toàn cầu và khu vực cho nhiệt độ. 5 phương án có đánh dấu * bên cạnh các mô hình toàn cầu là các phương án được sử dụng cho dự tính lượng mưa trong kịch bản MONRE (2021).

TT	Mô hình	Mô hình toàn cầu	Thời kỳ	Độ
----	---------	------------------	---------	----

	khu vực		Quá khứ	RCP4.5	RCP8.5	phân giải
1	PRECIS	HadGEM2-ES*	1960-2005	2006-2009	2006-2009	25 km
2		GFDL-CM3*				
3		CNRM-CM5*				
4	CCAM	CCSM4	1970-2005	2006-2009	2006-2009	30 km
5		CNRM-CM5				
6		GFDL-CM3				
7		NorESM1-M				
8	RegCM4	CNRM-CM5	1980-2000	2046-2065 2080-2099	2046-2065 2080-2099	20 km
9		HadGEM2-AO				
10		MPI-ESM-MR*				
11		EC-Earth				
12		CSIRO MK3.6*				
13		GFDL-ESM2M				
14	clWRF	NorESM1-M	1970-2005	2006-2009	2006-2009	30 km

Phương pháp chi tiết hoá động lực có ưu điểm là nắm bắt được các quá trình vật lý và hóa học của khí quyển nên kết quả của mô hình có tính logic giữa các biến khí hậu. Tuy nhiên phương pháp này cũng có nhược điểm là có thể không mô phỏng tốt các yếu tố địa phương do các dữ liệu đầu vào không đủ mức độ chi tiết.

Hơn nữa, mỗi mô hình toàn cầu và khu vực đều có sai số hệ thống nhất định. Vì thế, trong báo cáo này cũng như trong báo cáo MONRE (2021), kết quả đầu ra của các phương án chi tiết hoá động lực được hiệu chỉnh dựa trên số liệu thực đo tại các trạm. Việc hiệu chỉnh sai số hệ thống cho các biến nhiệt độ trung bình ngày và lượng mưa ngày tại mỗi trạm cho thời kỳ chuẩn 1986-2005 và trong tương lai cuối thế kỷ 21 được thực hiện như sau: (1) đối với lượng mưa (ngày, Rx1day): phương pháp hiệu chỉnh phân vị CDFt (Cumulative Distribution Functions transform) được áp dụng (Vrac and Friederichs, 2015; Vrac 2018); (2) đối với nhiệt độ: áp dụng việc hiệu chỉnh dựa trên các ngưỡng phân vị theo Amengual et al. (2012).

Các giá trị nhiệt độ, lượng mưa mô phỏng trong quá khứ và tương lai sau khi hiệu chỉnh được sử dụng cho việc tính toán xây dựng kịch bản BĐKH trình bày trong Mục 3.2.

3.1.2. Phương pháp hiệu chỉnh sai số và phân rã không gian BCSD

Phương pháp chi tiết hóa thống kê được sử dụng ở đây là phương pháp hiệu chỉnh sai số và phân rã không gian (Bias Correction Spatial Disaggregation - BCSD; Wood et al. 2004). Phương pháp BCSD bao gồm 2 bước riêng biệt là hiệu chỉnh sai số (BC) và phân rã không gian (SD) (Hình 1.6). Cụ thể các bước thực hiện như sau:

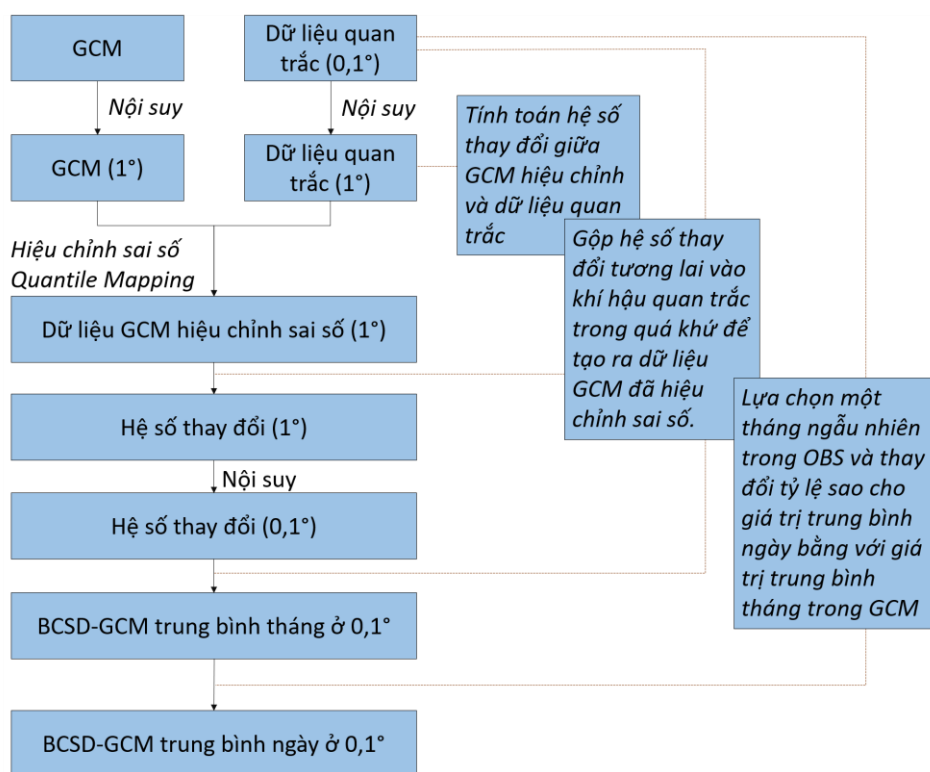
- **BC:** Đầu tiên, biến đầu ra nhiệt độ và mưa của các GCMs và dữ liệu quan trắc (OBS) được đưa về cùng độ phân giải ngang $1^\circ \times 1^\circ$ (xấp xỉ 100km) bằng phương pháp nội suy bảo toàn bậc nhất (First order conservative remapping) để đảm bảo các miền tại biên đất liền của Việt Nam đều được lấp đầy. Tiếp theo, phương pháp hiệu chỉnh sai số biến đổi phân vị (Quantile Mapping - QM) được sử dụng trên nguồn số liệu 1° này để hiệu chỉnh dữ liệu mô phỏng từ các GCMs bằng OBS. Các hàm phân phối tích lũy (CDF: Cumulative distribution function) cho mưa (P), nhiệt độ trung bình (T2m), nhiệt độ tối cao tuyệt đối (Tx), nhiệt độ tối thấp tuyệt đối (Tm) được xây dựng cho OBS và dữ liệu mô phỏng của từng GCM cho từng tháng và cho từng ô lưới. Sai số của kết quả GCM so với OBS ở độ phân giải $1^\circ \times 1^\circ$ được hiệu chỉnh bằng cách hoán đổi phân vị của GCM bằng phân vị cùng giá trị xác suất trong OBS. Mục tiêu chính của phương pháp biến đổi phân vị QM là tìm ra các trường khí hậu đã được hiệu chỉnh sai số với giả định:

$$X_{BC} = F_o^{-1} (F_{GCM} (X_{GCM}))$$

trong đó X_{BC} và X_{GCM} thể hiện giá trị GCM được hiệu chỉnh sai số và giá trị ban đầu trong giai đoạn kiểm nghiệm. $F_{GCM}()$ và $F_o^{-1}()$ lần lượt là hàm CDF

của GCM và hàm CDF nghịch đảo của OBS. Đối với nhiệt độ, xu thế tuyến tính của nhiệt độ trên mỗi ô lưới được tách khỏi chuỗi giá trị theo thời gian trước khi áp dụng QM, và được cộng lại sau khi phần giá trị còn lại (noise) đã được hiệu chỉnh sai số. Phương pháp này đảm bảo xu thế biến đổi của nhiệt độ được bảo toàn như trong GCM ban đầu (Wood et al. 2004; Maurer 2007; Sobie et al. 2012).

- **SD:** Hệ số thay đổi mưa và nhiệt độ giữa kịch bản tương lai GCM và OBS được tính toán bằng hiệu số (đối với nhiệt độ) hoặc tỷ lệ (với mưa) ở độ phân giải 1° . Trước khi được gộp vào miền trung bình của khí hậu quan trắc trong quá khứ để tạo ra dữ liệu hiệu chỉnh trong tương lai, hệ số thay đổi được nội suy độ phân giải ô lưới 0.1° . Dữ liệu đã chi tiết hóa tiếp tục được phân rã thời gian về độ phân giải ngày bằng cách lựa chọn ngẫu nhiên một tháng trong quá khứ và thay đổi những ngày trong tháng theo tỷ lệ hoặc hiệu số sao cho giá trị trung bình tháng trong GCM là không thay đổi.



Hình 1.6. Các bước thực hiện của phương pháp chi tiết hoá BCSD

Trong nghiên cứu này, bộ dữ liệu chi tiết hoá bằng phương pháp BCSD được xây dựng dựa trên tổng cộng 31 mô hình khí hậu toàn cầu GCMs thuộc CMIP5 (Bảng 1.4) cho giai đoạn quá khứ 1980-2005 và thời kỳ tương lai 2006–2100. Các

kịch bản nồng độ khí nhà kính RCPs được sử dụng bao gồm RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 và RCP8.5. Dữ liệu quan trắc được sử dụng là dữ liệu ô lưới từ 1980–2005 cho P, T2m, Tx, Tm có độ phân giải ngang 0.1° được xây dựng dựa trên 481 trạm quan trắc mưa và 157 trạm quan trắc nhiệt độ. Các kết quả chi tiết hoá thống kê sử dụng phương pháp BCSD cho Việt Nam này được lưu dưới định dạng netCDF (network Common Data Form) và có thể tải được miễn phí từ địa chỉ:

https://remosat.usth.edu.vn/Download/dat_GEMMES_WP1/WP1_MODEL_OUTP_UT/.

Bảng 1.4. 31 mô hình CMIP5 GCMs được sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho các tính toán BCSD.

T T	ID Mô hình	Độ phân giải (°)		Mô hình khả dụng (* là các mô hình đã được sử dụng)			
		Kinh độ	Vĩ độ	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
1	ACCESS1-0	1.25	1.875		*		*
2	ACCESS1-3	1.25	1.875		*		*
3	BCC-CSM1-1	2.7906	2.8125	*	*	*	*
4	BCC-CSM1-1-M	2.7906	2.8125	*	*		*
5	BNU-ESM	2.7906	2.8125	*	*		*
6	CanESM2	2.7906	2.8125	*	*		*
7	CCSM4	0.9424	1.25		*	*	*
8	CESM1-BGC	0.9424	1.25		*		*
9	CESM1-CAM5	0.9424	1.25	*	*	*	*
10	CMCC-CM	0.7484	0.75		*		*
11	CNRM-CM5	1.4008	1.40625	*	*		*
12	CSIRO-Mk3-6-0	1.8653	1.875	*	*	*	*
13	GFDL-CM3	2	2.5	*	*		*
14	GFDL-ESM2G	2.0225	2	*	*	*	*
15	GISS-E2-H	2	2.5	*	*	*	*
16	GISS-E2-H-CC	2	2.5		*		*
17	GISS-E2-R	2	2.5	*	*	*	*

18	GISS-E2-R-CC	2	2.5		*		*
19	HadGEM2-CC	1.25	1.875		*		*
20	HadGEM2-ES	1.25	1.875	*	*		*
21	IPSL-CM5A-LR	1.8974	3.75	*	*		*
22	IPSL-CM5A-MR	1.2676	2.5	*	*	*	*
23	IPSL-CM5B-LR	1.8947	3.75		*		*
24	MIROC-ESM	2.7906	2.8125	*	*	*	*
25	MIROC-ESM-CHEM	2.7906	2.8125		*	*	*
26	MIROC5	1.4008	1.40625	*	*	*	*
27	MPI-ESM-LR	1.8653	1.875	*	*		*
28	MPI-ESM-MR	1.8653	1.875	*	*		*
29	MRI-CGCM3	1.12148	1.125	*	*		*
30	NorESM1-M	1.8947	2.5	*	*	*	*
31	NorESM1-ME	1.8947	2.5		*		*
	Tổng số mô hình cho mỗi kịch bản			20	31	12	31

3.1.3. Phương pháp tính ứng với các ngưỡng nóng lên toàn cầu 1,5°C, 2°C, 3°C và 4°C

Các ngưỡng nóng lên toàn cầu GWLs (Global Warming Level) 1,5°C, 2°C, 3°C và 4°C được xác định khi so sánh nhiệt độ trung bình không khí bề mặt toàn cầu (GSAT: Global mean Surface Air Temperature) (giá trị trung bình 20 năm) so với giai đoạn 1850-1900. Giá trị GWL được tính toán cho mỗi mô hình GCM và mỗi kịch bản khí nhà kính. Trong báo cáo này, các ngưỡng thời gian cho các ngưỡng GWL cho mỗi mô hình trong số 31 GCMs của CMIP5 được kế thừa từ kết quả của [Hauser et al. \(2019\)](#).

[Bảng 1.5](#) dưới đây cho thông tin về thời điểm (trung vị, sớm nhất, muộn nhất) xảy ra các GWL 1,5°C, 2°C, 3°C và 4°C ứng với các kịch bản RCPs khác nhau tính từ tập hợp các CMIP5 GCMs ở [Bảng 1](#) được sử dụng trong nghiên cứu này.

Bảng 1.5. Thời điểm các ngưỡng nóng lên toàn cầu GWL 1,5°C, 2°C, 3°C và 4°C đạt được ứng với các kịch bản RCPs khác nhau. Ứng với mỗi kịch bản và

ngưỡng GWL, 3 giá trị được liệt kê gồm giá trị trung vị, giá trị năm sớm nhất và giá trị năm muộn nhất từ tập hợp các mô hình toàn cầu CMIP5 tại Bảng 1. NA (not available) nghĩa là không xác định được giá trị.

	GWL 1.5°			GWL 2°			GWL 3°			GWL 4°		
	Năm trung vị	Năm sớm nhất	Năm muộn nhất	Năm trung vị	Năm sớm nhất	Năm muộn nhất	Năm trung vị	Năm sớm nhất	Năm muộn nhất	Năm trung vị	Năm sớm nhất	Năm muộn nhất
RCP2.6	2023	2008	2047	2039	2025	2081	NA	NA	NA	NA	NA	NA
RCP4.5	2027	2008	2055	2047	2024	2085	2073	2064	2078	NA	NA	NA
RCP6.0	2030	2011	2060	2053	2033	2078	2078	2072	2087	NA	NA	NA
RCP8.5	2023	2009	2042	2039	2023	2053	2062	2046	2087	2081	2065	2088

Với các kết quả chi tiết hoá động lực và thống kê cho Việt Nam sử dụng trong nghiên cứu này, ta sẽ xem xét sự biến đổi của khí hậu khu vực ứng với mỗi thời điểm GWL đạt được từ mô hình toàn cầu tương ứng.

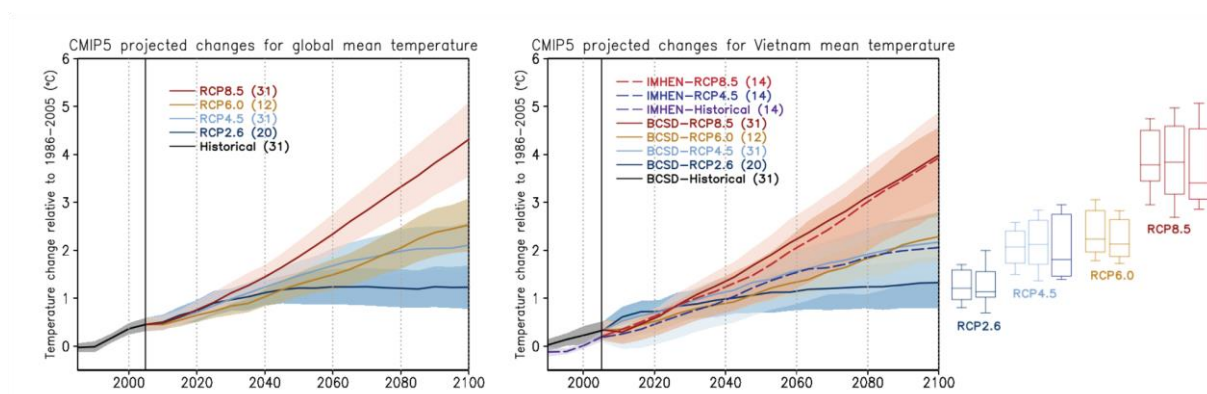
Chẳng hạn ta cần xét sự biến đổi của nhiệt độ Việt Nam ứng với ngưỡng GWL 1.5°C từ một số thí nghiệm chi tiết hoá. Giả thiết có 40 thí nghiệm chi tiết hoá ứng với 10 mô hình toàn cầu và 4 kịch bản khí nhà kính. Ta có được 40 thời điểm $\{t_1, t_2, \dots, t_{40}\}$ tra từ kết quả của [Hauser et al. \(2019; \[https://github.com/mathause/cmip_warming_levels\]\(https://github.com/mathause/cmip_warming_levels\)\)](https://github.com/mathause/cmip_warming_levels) mà lần lượt từng mô hình toàn cầu với từng kịch bản đạt ngưỡng GWL 1.5°. Sự biến đổi ứng với ngưỡng GWL 1.5° của thí nghiệm chi tiết hoá i được xác định là sự sai khác giữa giá trị trung bình 20 năm quanh thời gian t_i và thời kỳ chuẩn 1986-2005. Sau đó ta có thể tính kết quả trung bình từ 40 kết quả này cũng như các khoảng bất định tương ứng.

3.2. Kết quả dự tính khí hậu tương lai cho Việt Nam

3.2.1. Nhiệt độ

a) Nhiệt độ trung bình

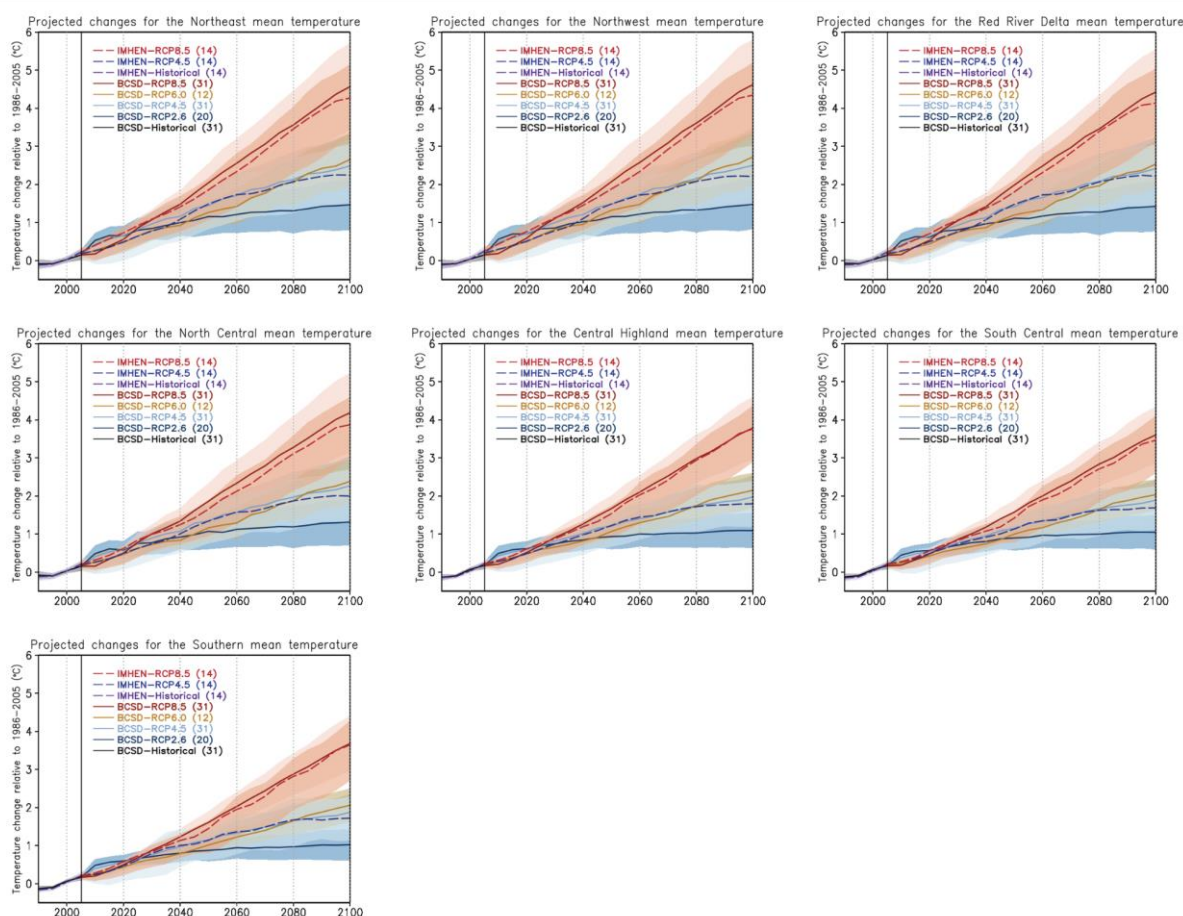
Mức độ gia tăng nhiệt độ toàn cầu và Việt Nam theo Hình 1.7 được tính toán dựa trên sự chênh lệch nhiệt độ giữa thời kỳ tương lai và thời kỳ cơ sở 1986-2005, theo đường trung bình động mỗi 5 năm. Nhìn chung, nhiệt độ trung bình trên Việt Nam tăng lên cùng với xu thế nóng lên toàn cầu. Có thể thấy kết quả của phương pháp chi tiết hoá động lực từ IMHEN khá tương đồng với kết quả từ phương pháp chi tiết hóa thống kê BCSD. Giữa thế kỷ 21, nhiệt độ trung bình tại Việt Nam có thể lên đến $1,13 \pm 0,87^\circ\text{C}$ theo RCP2.6 và $1,9 \pm 0,81^\circ\text{C}$ theo RCP8.5; và đến cuối thế kỷ có thể lên đến $1,34 \pm 1,14^\circ\text{C}$ theo RCP2.6 và $4,18 \pm 1,57^\circ\text{C}$ theo RCP8.5. Mức độ phân tán của các tính toán theo các kịch bản cho quy mô toàn cầu và cho khu vực Việt Nam đều tương đối thấp trong những thập kỷ đầu và tăng dần theo thời gian về cuối thế kỷ 21.



Hình 1.7. Mức tăng nhiệt độ toàn cầu (trái) và Việt Nam (phải). Tiến trình của 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 IMHEN và từ phương pháp chi tiết hóa 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 RCP được biểu diễn bằng vùng mờ cùng màu. Số lượng GCM được 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 xác suất xảy ra (khoảng tứ phân vị, trung vị, khoảng phân vị thứ 10 và 90) của mức nóng lên trong phạm vi toàn cầu và Việt Nam giai đoạn cuối thế kỷ 2080–2099 so với thời kỳ cơ sở 1986–2005. Với mỗi RCPs, sẽ có 2 hoặc 3 hộp lần lượt biểu

điển giá trị toàn cầu từ các GCMs, giá trị cho Việt Nam từ BCSD và giá trị cho Việt Nam từ IMHEN (đối với RCP4.5 và RCP8.5).

Xét trên 7 vùng khí hậu của Việt Nam (Nguyễn Đức Ngữ và Nguyễn Trọng Hiệu 2004), nhiệt độ trên các vùng đều gia tăng đáng kể trong thế kỷ 21 so với thời kỳ cơ sở 1986–2005 (Hình 1.8). Có thể thấy miền khí hậu phía Bắc từ Đông Bắc xuống Bắc Trung Bộ có mức gia tăng nhiệt độ cao hơn so với miền khí hậu phía Nam từ Tây Nguyên đến Nam Bộ.



Hình 1.8. Mức tăng nhiệt độ cho 7 vùng khí hậu ở Việt Nam tới cuối thế kỷ 21 theo các kịch bản IMHEN và BCSD. Phương thức biểu diễn tương tự như Hình 1.7.

Bảng 1.6 thể hiện định lượng về mức gia tăng nhiệt độ tại các vùng khí hậu Việt Nam vào các giai đoạn giữa và cuối thế kỷ 21 theo hai kịch bản RCP4.5 và RCP8.5. Theo kết quả dự tính từ IMHEN, vào cuối thế kỷ 21, mức gia tăng nhiệt độ ở khu vực phía Bắc sẽ dao động trong khoảng $2,00 \pm 1,2^\circ\text{C}$ (tại vùng Bắc Trung Bộ) theo RCP4.5 và $4,34 \pm 1,68^\circ\text{C}$ (tại vùng Tây Bắc) theo RCP8.5. Trong khi đó ở khu

vực phía Nam có mức tăng nhiệt trong khoảng $1,67\pm 0,96^{\circ}\text{C}$ (Nam Trung Bộ) theo RCP4.5 và $3,76\pm 1,16^{\circ}\text{C}$ (Tây Nguyên) theo RCP8.5. Với kết quả chi tiết hoá thống kê BCSD, mức gia tăng nhiệt độ ở các vùng Đông Bắc, Tây Bắc, Đồng bằng Bắc Bộ sẽ cao hơn $\sim 0,2-0,3^{\circ}\text{C}$ so với kết quả của IMHEN theo cả 2 kịch bản RCP4.5 và RCP8.5, trong khi mức tăng lại thấp hơn $\sim 0,15-0,2^{\circ}\text{C}$ trên vùng Bắc Trung Bộ. Ở khu vực phía Nam, mức tăng nhiệt của BCSD cao hơn so với kết quả của IMHEN, thay đổi trong khoảng $1,88\pm 1,21^{\circ}\text{C}$ (Nam Trung Bộ) theo RCP4.5 và $3,78\pm 1,31^{\circ}\text{C}$ (Tây Nguyên) theo RCP8.5.

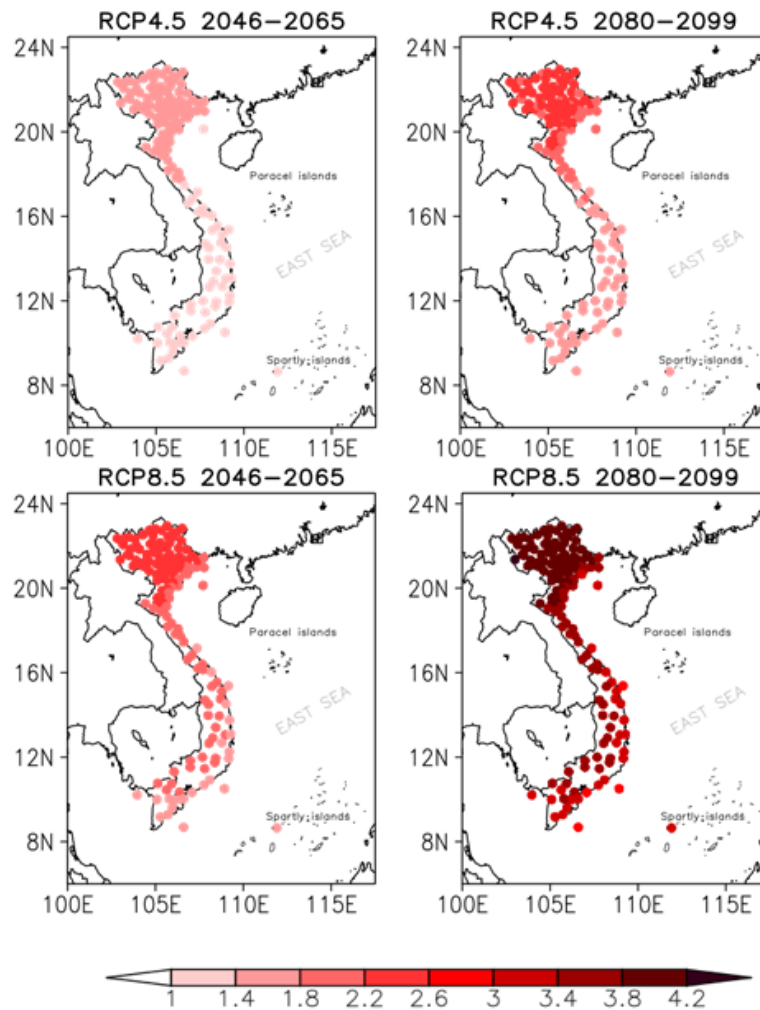
Bảng 1.6. Mức tăng nhiệt độ cho 7 vùng khí hậu Việt Nam tổ hợp từ các phương án chi tiết hoá động lực của IMHEN và từ các phương án chi tiết hoá thống kê của phương pháp BCSD.

Vùng		RCP4.5		RCP8.5	
		2046–2065	2080–2099	2046–2065	2080–2099
Đông Bắc	BCSD	$1,44\pm 0,80$	$2,49\pm 1,78$	$2,04\pm 1,00$	$4,57\pm 2,34$
	IMHEN	$1,48\pm 1,02$	$2,24\pm 1,36$	$1,86\pm 1,02$	$4,27\pm 1,89$
Tây Bắc	BCSD	$1,48\pm 1,10$	$2,50\pm 1,97$	$2,07\pm 1,13$	$4,62\pm 2,57$
	IMHEN	$1,49\pm 1,13$	$2,21\pm 1,29$	$1,88\pm 1,14$	$4,34\pm 1,68$
Đồng Bằng Bắc Bộ	BCSD	$1,41\pm 0,83$	$2,41\pm 1,78$	$1,98\pm 1,12$	$4,42\pm 2,41$
	IMHEN	$1,48\pm 1,10$	$2,20\pm 1,38$	$1,80\pm 1,10$	$4,10\pm 1,77$
Bắc Trung Bộ	BCSD	$1,34\pm 0,84$	$1,86\pm 1,01$	$2,26\pm 1,68$	$3,68\pm 1,06$
	IMHEN	$1,34\pm 0,96$	$2,00\pm 1,20$	$1,65\pm 0,93$	$3,87\pm 1,30$
Tây Nguyên	BCSD	$1,21\pm 0,66$	$2,50\pm 1,97$	$1,67\pm 0,62$	$3,78\pm 1,31$

	IMHE N	1,2±0,98	1,79±0,98	1,54±0,96	3,76±1,16
Nam Trung Bộ	BCSD	1,14±0,68	1,88±1,21	1,57±0,58	3,60±1,21
	IMHE N	1,13±0,77	1,67±0,96	1,42±0,86	3,47±1,06
Nam Bộ	BCSD	1,15±0,72	1,89±1,21	1,61±0,57	3,68±1,06
	IMHE N	1,14±0,88	1,72±0,96	1,45±0,93	3,64±1,28

Hình 1.9 hiển thị mức thay đổi của nhiệt độ trung bình năm tại 150 trạm khí tượng trong giai đoạn giữa và cuối thế kỷ 21 theo hai kịch bản RCP4.5 và RCP8.5. Ở đây, các kết quả chi tiết hoá động lực được trình bày để thống nhất với các kết quả từ báo cáo về kịch bản mới nhất của Bộ Tài nguyên và Môi trường (MONRE 2021). Có thể nhận thấy càng về cuối thế kỷ mức tăng nhiệt độ càng cao. Kịch bản RCP8.5 có mức tăng cao hơn rõ rệt so với kịch bản RCP4.5 vào cuối thế kỷ. Khu vực phía Bắc luôn có mức tăng cao nhất, giảm dần về phía Nam, thấp nhất ở Nam Trung Bộ, Nam Bộ và các trạm đảo.

Kết quả trung bình từ các phương án chi tiết hoá động lực cho thấy vào giữa thế kỷ từ 2046–2065, theo kịch bản RCP4.5, nhiệt độ trung bình năm có xu thế tăng trên phạm vi toàn quốc với mức tăng phổ biến từ 1,2–1,7°C, trong đó khu vực phía Bắc tăng khoảng 1,6–1,7°C, phía Nam tăng phổ biến 1,2–1,3°C. Trong khi đó, kịch bản RCP8.5 cũng đưa ra xu thế tăng nhiệt độ ở tất cả các khu vực với mức tăng từ 1,7–2,3°C, trong đó, tăng 2,0–2,3°C ở khu vực phía Bắc và 1,7–1,9°C ở phía Nam. Cuối thế kỷ, giai đoạn 2080-2099, cả hai kịch bản đều đưa mức độ biến đổi của nhiệt độ tăng nhanh hơn giai đoạn giữa thế kỷ. Mức tăng từ 2,0–2,4°C ở phía Bắc và 1,8–1,9°C ở phía Nam theo RCP4.5 và nhiệt độ cao nhất và thấp nhất có thể tới 4,7°C và 4,1°C theo kịch bản RCP8.5.



Hình 1.9. Mức độ biến đổi nhiệt độ trung bình năm theo hai kịch bản RCP4.5 (trái) và RCP8.5 (phải) trung bình từ các kết quả chi tiết hoá động lực cho giai đoạn giữa thế kỷ 2046–2065 (trên) và cuối thế kỉ 2080–2099 (dưới) so với thời kỳ cơ sở 1986–2005.

Mức độ biến đổi nhiệt độ theo mùa đều tăng từ giữa thế kỷ đến cuối thế kỷ theo cả hai kịch bản RCP4.5 và RCP8.5 (Bảng 1.6). Sự biến đổi nhiệt độ trong mùa hè xảy ra cao nhất, với mức tăng đến 4,6°C vào cuối thế kỷ theo kịch bản RCP8.5. Trong khi đó, nhiệt độ biến đổi ít nhất xảy ra vào mùa đông, với mức tăng cao nhất vào cuối thế kỷ theo hai kịch bản RCP4.5 và RCP8.5 tương ứng là 2,2°C và 3,8°C.

Bảng 1.6. Mức độ biến đổi nhiệt độ trung bình năm (°C) theo kịch bản RCP4.5 và RCP8.5 của các mùa trong năm, kết quả trung bình từ các phương án chi tiết hoá động lực.

Thời gian	Kịch bản RCP4.5	Kịch bản RCP8.5
-----------	-----------------	-----------------

	Giữa thế kỷ	Cuối thế kỷ	Giữa thế kỷ	Cuối thế kỷ
Mùa xuân	1,3 – 1,7°C	1,7 – 2,3°C	1,8 – 2,4°C	3,1 – 4,2°C
Mùa hè	1,3 – 1,8°C	1,7 – 2,5°C	1,7 – 2,5°C	3,3 – 4,6°C
Mùa thu	1,2 – 1,7°C	1,6 – 2,3°C	1,7 – 2,4°C	3,2 – 4,4°C
Mùa đông	1,2 – 1,6°C	1,5 – 2,2°C	1,7 – 2,2°C	2,9 – 3,8°C

b) Nhiệt độ cực trị

Nhiệt độ cực đại ngày Tx trung bình năm và nhiệt độ cực tiểu trung bình năm đều có xu thế tăng lên theo cả hai kịch bản RCP4.5 và RCP8.5 (Bảng 1.7). Vào giữa thế kỷ 21, nhiệt độ cực đại ngày trung bình năm trên cả nước tăng phổ biến từ 1,3–1,9°C trong đó khu vực phía Bắc tăng phổ biến từ 1,5–1,9°C; phía Nam phổ biến từ 1,3–1,4°C theo kịch bản RCP4.5. Theo kịch bản RCP8.5, nhiệt độ cực đại ngày trung bình năm trên cả nước tăng phổ biến từ 1,8–2,6°C; trong đó khu vực Bắc Bộ tăng từ 2,3–2,6°C; phía Nam tăng từ 1,8–1,9°C. Đến giai đoạn 2080–2099 cuối thế kỷ, nhiệt độ tăng phổ biến từ 1,7–2,6°C với mức tăng phổ biến phía Bắc là từ 2,0–2,6°C, phía Nam từ 1,7–2,9°C theo kịch bản RCP4.5 và tăng từ 3,2–4,7°C trong đó phía Bắc tăng từ 4,0–4,7°C theo RCP8.5.

Bảng 1.7 Mức độ biến đổi nhiệt độ tối cao và nhiệt độ tối thấp (°C) theo kịch bản RCP4.5 và RCP8.5, kết quả trung bình từ các phương án chi tiết hoá động lực.

Thời gian	Kịch bản RCP4.5		Kịch bản RCP8.5	
	Giữa thế kỷ	Cuối thế kỷ	Giữa thế kỷ	Cuối thế kỷ
Tx	1,3 – 1,9°C	1,7 – 2,6°C	1,8 – 2,6°C	3,2 – 4,7°C
Tn	1,3 – 1,6°C	1,7 – 2,1°C	1,8 – 2,3°C	3,3 – 4,1°C

Nhiệt độ cực tiểu ngày Tn trung bình năm trên cả nước tăng từ 1,3–1,6°C vào giữa thế kỷ, giai đoạn 2046-2065 theo kịch bản RCP4.5. Đến cuối thế kỷ, nhiệt độ cực tiểu ngày trung bình năm tăng phổ biến từ 1,7–2,1°C, trong đó, khu vực phía Bắc có mức tăng phổ biến trên 2,0°C. Trong khi đó, nhiệt độ cực tiểu ngày trung bình năm tăng từ 1,8–2,3°C với mức tăng ở phía Bắc trên 2,0°C vào giữa thế kỷ theo kịch bản RCP4.5. Tn trung bình năm tăng phổ biến từ 3,3–4,1°C, trong đó,

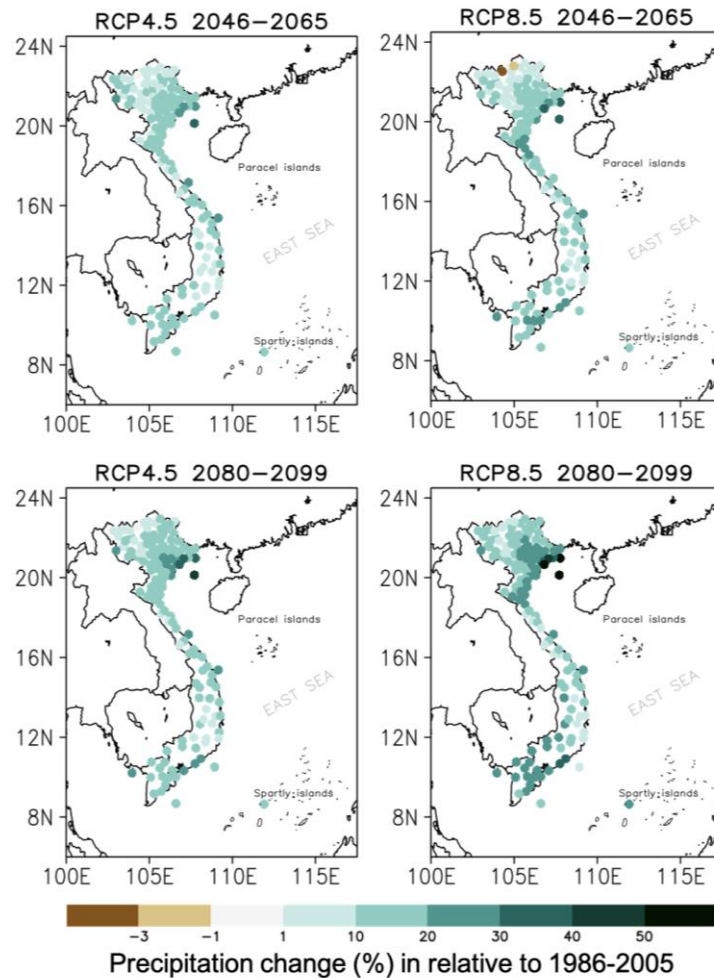
phía Bắc tăng phổ biến từ 3,6–4,1°C, phía Nam tăng phổ biến từ 3,6–4,1°C trong giai đoạn cuối thế kỷ.

3.2.2. Lượng mưa

Các kết quả mô phỏng và dự tính lượng mưa luôn mang tính bất định nhiều hơn so với các kết quả về nhiệt độ (Knutti and Sedláček 2013; Ngo-Duc et al. 2017). Nếu như các mô hình toàn cầu cũng như các kết quả chi tiết hoá khu vực đều dự tính nhiệt độ tăng trên hầu khắp các khu vực của Trái đất trong tương lai thì kết quả dự tính lại rất khác biệt so với mưa. Một mô hình có thể dự tính lượng mưa tăng ở một địa điểm trong khi một mô hình khác lại dự tính lượng mưa giảm. Ngay trên Việt Nam, các kết quả dự tính về mưa sẽ rất khác nhau nếu ta lựa chọn các mô hình khác nhau, các khu vực khác nhau, các kịch bản khác nhau. Vì vậy nhằm thống nhất với các kết quả liên quan đến sự biến đổi của lượng mưa từ các Báo cáo mới cập nhật của Bộ Tài nguyên và Môi trường (MONRE 2016; MONRE 2021), mục này chỉ thảo luận về các kết quả dự tính mưa nhận được từ 5 phương án chi tiết hoá động lực của IMHEN.

a) Lượng mưa trung bình

Lượng mưa năm được dự tính tăng trên đa phần lãnh thổ Việt Nam theo cả 2 kịch bản RCP4.5 và RCP8.5 (Hình 1.10). Theo kịch bản RCP4.5, lượng mưa năm được dự tính tăng trên phạm vi cả nước với mức tăng phổ biến 10–15% vào giữa thế kỷ và 10–20% vào cuối thế kỷ. Theo kịch bản RCP8.5, lượng mưa năm cũng được dự tính tăng phổ biến từ 10–15% trên hầu hết cả nước vào giữa thế kỷ 21. Ở các trạm đảo, ven biển Đông Bắc lượng mưa có thể tăng từ 20–30%. Lượng mưa được dự tính giảm ở một phần diện tích các tỉnh Lào Cai, Hà Giang với mức giảm không đáng kể, phổ biến dưới 5%. Đến cuối thế kỷ, lượng mưa được dự tính tăng trên phạm vi cả nước theo kịch bản RCP8.5, mức tăng phổ biến từ 10–25%, trong khi một phần diện tích thuộc Đông Bắc lượng mưa có thể tăng trên 40%.



Hình 1.10 Mức độ biến đổi lượng mưa trung bình năm dự tính theo hai kịch bản RCP4.5 và RCP8.5 cho giai đoạn giữa và cuối thế kỉ 21.

Sự biến đổi của lượng mưa theo mùa mưa và mùa khô cũng được xem xét theo hai kịch bản và đều được dự tính tăng trên đa phần diện tích cả nước trong các giai đoạn của thế kỷ 21. Lượng mưa mùa mưa tăng phổ biến 5–30% vào giữa thế kỷ và 10–40% vào cuối thế kỷ theo kịch bản RCP4.5; tăng tương ứng từ 5–25% và 15–30% vào giữa và cuối thế kỷ theo kịch bản RCP8.5. Trong khi đó, lượng mưa mùa khô được dự tính theo kịch bản RCP4.5, tăng phổ biến 8–20% vào giữa thế kỷ và 10–25% vào cuối thế kỷ; trong đó tăng cao nhất ở ven biển Đông Bắc, tăng thấp nhất ở Tây Nguyên và Bắc Trung Bộ. Theo kịch bản RCP8.5, lượng mưa mùa khô được dự tính tăng trên đa phần diện tích cả nước với mức tăng khoảng 5–25% vào cuối thế kỷ, ngoại trừ xu thế giảm ở một phần diện tích Bắc Bộ, Nam Tây Nguyên, và Đông Nam Bộ với mức giảm dưới 5%.

Mức độ biến đổi của lượng mưa có sự thay đổi qua 4 mùa trong năm theo cả hai kịch bản (Bảng 1.8). Mùa thu được dự tính có sự tăng lượng mưa lớn nhất trong năm, với mức tăng có nơi lên đến 40% vào cuối thế kỷ theo RCP8.5. Mùa xuân có

mức tăng lượng mưa từ 2–15% cho giai đoạn giữa và cuối thế kỷ theo RCP4.5. Trong khi theo kịch bản RCP8.5, lượng mưa mùa xuân có nơi có xu thế giảm. Lượng mưa mùa hè và mùa đông có sự biến đổi từ 5–25% theo cả hai kịch bản.

Bảng 1.8 Mức độ biến đổi lượng mưa năm phổ biến trên Việt Nam theo kịch bản RCP4.5 và RCP8.5 của các mùa trong năm.

Thời gian	Kịch bản RCP4.5		Kịch bản RCP8.5	
	Giữa thế kỷ	Cuối thế kỷ	Giữa thế kỷ	Cuối thế kỷ
Mùa xuân	2 – 15%	2 – 15%	-5 – 10%	-2 – 10%
Mùa hè	5 – 20%	3 – 25%	2 – 25%	10 – 25%
Mùa thu	5 – 25%	10 – 25%	5 – 25%	15 – 40%
Mùa đông	5 – 15%	5 – 20%	5 – 25%	5 – 15%

b) Lượng mưa cực trị

Lượng mưa ngày lớn nhất năm (RX1day) và lượng mưa 5 ngày liên tiếp lớn nhất trong năm (RX5day) được dự tính có xu thế tăng trên phạm vi cả nước trong các giai đoạn của thế kỷ 21 theo cả hai kịch bản RCP4.5 và RCP8.5 (Bảng 1.9).

RX1day tăng phổ biến từ 15–25% theo 2 kịch bản, và tăng mạnh hơn lên tới 24–30% và 25–40% tương ứng cho RCP4.5 và RCP8.5 vào cuối thế kỷ. RX5day được dự tính tăng phổ biến từ 10–20% và 15–20% vào giữa thế kỷ theo RCP4.5 và RCP8.5, và cũng tăng mạnh hơn lên tới 20–30% và 25–40% tương ứng vào cuối thế kỷ. Với cả RX1day và RX5day, khu vực Bắc Bộ được dự tính có mức tăng lớn nhất vào cuối thế kỷ.

Bảng 1.9. Mức độ biến đổi lượng mưa một ngày lớn nhất (RX1day) và lượng mưa năm ngày lớn nhất (RX5day) (%) theo kịch bản RCP4.5 và RCP8.5.

Thời gian	Kịch bản RCP4.5		Kịch bản RCP8.5	
	Giữa thế kỷ	Cuối thế kỷ	Giữa thế kỷ	Cuối thế kỷ
RX1day	15 – 25%	20 – 35%	15 – 25%	25 – 40%
RX5day	10–20%	20–30%	15–25%	25–40%

3.3. Biến đổi tương ứng với các mức tăng toàn cầu +1,5°C, 2°C, 3°C, 4°C

Dựa trên phương pháp tính toán đã được đề cập tại mục 3.1.3, mục này sẽ trình bày một số kết quả tính toán mức thay đổi của nhiệt độ và lượng mưa trên Việt Nam ứng với các mức tăng toàn cầu GWL +1,5°C, 2°C, 3°C, 4°C. Các tính toán sẽ được thực hiện cho tổ hợp từ các phương án chi tiết hoá động lực của IMHEN và chi tiết hoá thống kê BCSD. Với phương pháp chi tiết hoá BCSD, số thí nghiệm tham gia vào tính toán sự biến đổi ứng với các ngưỡng GWL 1.5°, 2°, 3° và 4° tương ứng là 76, 65, 33 và 18 thí nghiệm.

3.3.1. Nhiệt độ

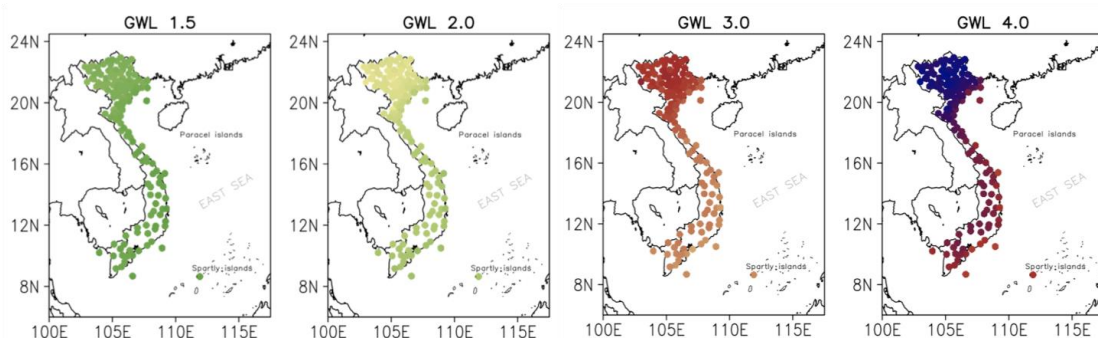
Kết quả tính toán mức thay đổi của nhiệt độ trên Việt Nam giữa các thời điểm tương ứng với các mức nóng lên toàn cầu khác nhau so với thời kỳ cơ sở 1986–2005 được biểu diễn trên Hình 1.11. Kết quả tổ hợp từ các phương án chi tiết hoá thống kê BCSD và chi tiết hoá động lực IMHEN khá tương đồng.

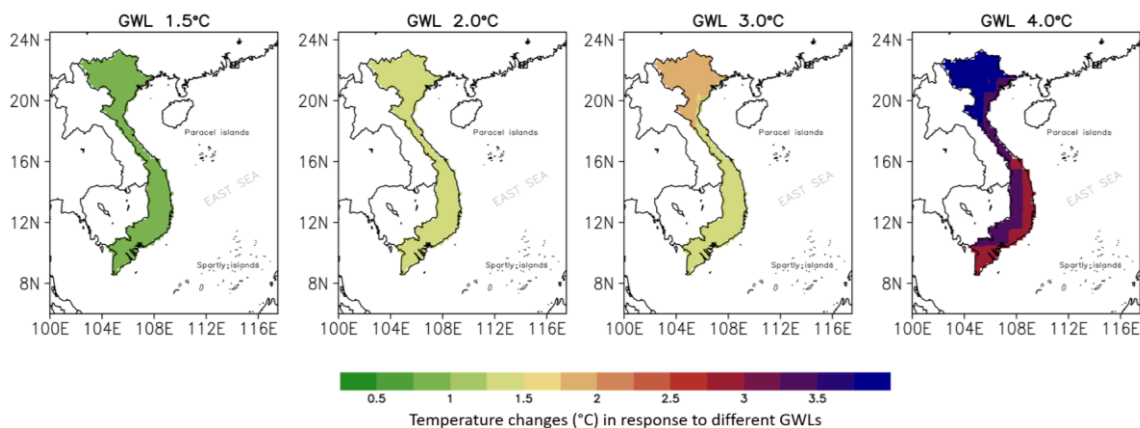
Có thể thấy, nếu GWL là 1,5°C, nhiệt độ trung bình năm trên toàn quốc có mức tăng phổ biến từ 0,7–0,9°C so với thời kỳ cơ sở 1986–2005 trong đó tăng cao nhất ở Bắc Bộ, thấp nhất ở Trung Bộ.

Nếu GWL là 2°C, nhiệt độ trung bình năm trên toàn quốc có mức tăng phổ biến từ 1,1–1,5°C so với thời kỳ cơ sở 1986–2005; trong đó tăng cao nhất ở khu vực Bắc Bộ, phổ biến từ 1,4–1,5°C; tăng thấp nhất ở Nam Bộ, phổ biến từ 1,1–1,2°C.

Nếu GWL là 3°C, nhiệt độ trung bình năm trên toàn quốc có mức tăng phổ biến từ 2,2–2,8°C so với thời kỳ cơ sở 1986–2005; trong đó tăng cao nhất ở khu vực Bắc Bộ, phổ biến từ 2,6–2,8°C; tăng thấp nhất ở Nam Bộ và ven biển Nam Trung Bộ, phổ biến từ 2,0–2,1°C.

Với mức tăng toàn cầu là 4°C so với thời kỳ tiền công nghiệp, mức tăng phổ biến trên toàn Việt Nam được dự tính đều từ 3°C trở lên so với thời kỳ cơ sở 1986–2005; trong đó tăng cao nhất ở khu vực Bắc Bộ, phổ biến trên 3,7°C; tăng thấp nhất ở Nam Bộ và ven biển Nam Trung Bộ, phổ biến từ 2,8–3°C. Trung Bộ và Tây Nguyên có mức tăng từ 3.2–3.5°C.





Hình 1.11. Biến đổi nhiệt độ (°C) trên Việt Nam tại các thời điểm đạt mức GWL khác nhau so với thời kỳ cơ sở 1986–2005 đối với kết quả tổ hợp từ phương pháp chi tiết hoá động lực (trên) và từ phương pháp chi tiết hoá thống kê BCSD (dưới).

3.3.2. Lượng mưa

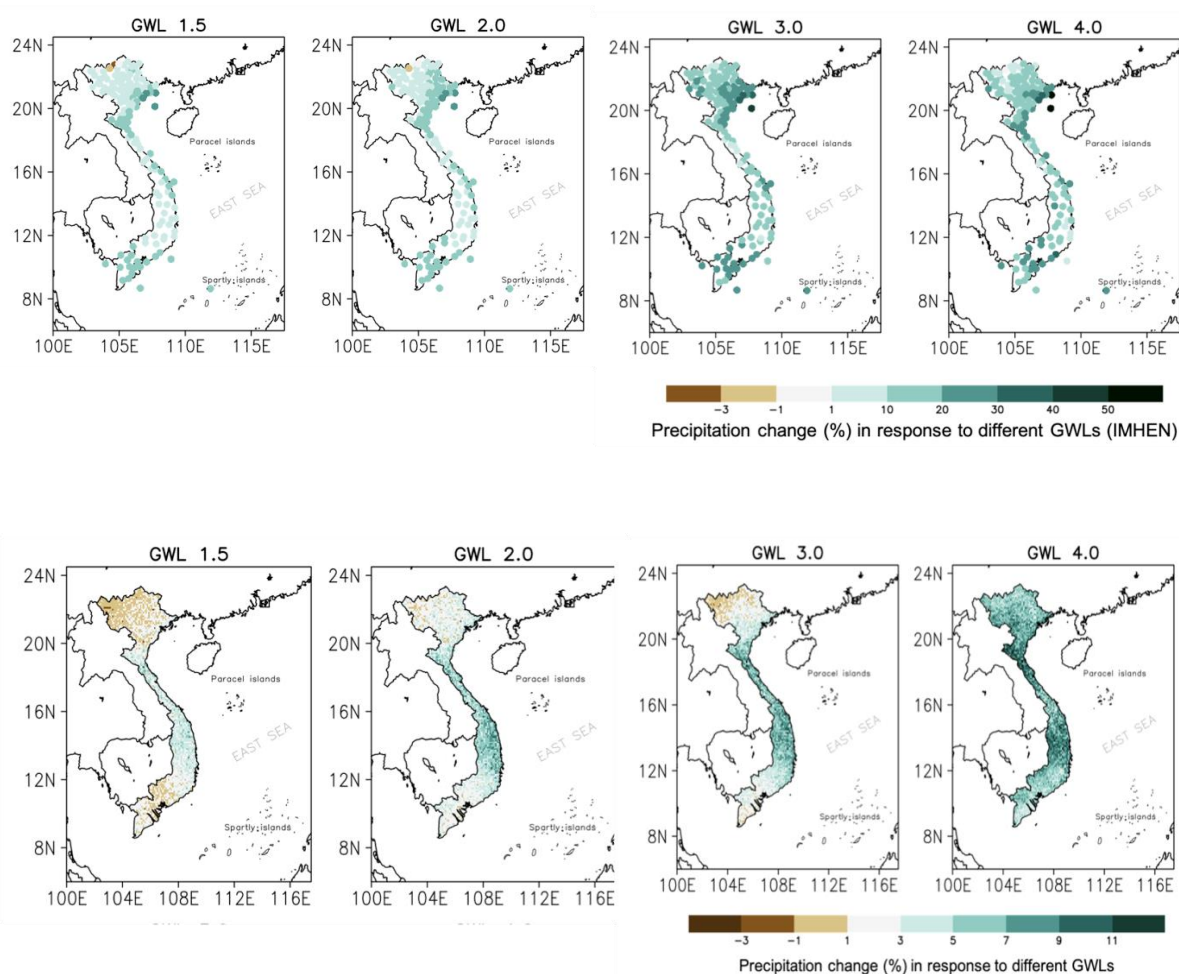
Kết quả tính toán mức thay đổi của lượng mưa trên Việt Nam giữa các thời điểm tương ứng với các mức nóng lên toàn cầu khác nhau so với thời kỳ cơ sở 1986–2005 được biểu diễn trên Hình 1.12. Kết quả tổ hợp từ các phương án chi tiết hoá thống kê BCSD có một số khác biệt so với kết quả từ phương pháp chi tiết hoá động lực IMHEN.

Kết quả chi tiết hoá động lực cho thấy, nếu GWL là 1,5°C, lượng mưa năm có xu thế tăng trên hầu hết cả nước với mức tăng phổ biến từ 0–20% so với thời kỳ cơ sở 1986-2005, trong đó tăng cao nhất 10–20% ở một số trạm thuộc Đông Bắc Bộ, Bắc Trung Bộ, và Nam Bộ. Khu vực ven biển và một số trạm đảo thuộc khu vực Đông Bắc Bộ, mức tăng lượng mưa có thể trên 20%. Lượng mưa tăng nhẹ ở Tây Nguyên và Nam Trung Bộ. Trong khi đó với kết quả từ BCSD, Bắc Bộ và Nam Bộ lại có xu thế giảm mưa nhẹ ứng với GWL là 1,5°C. Lượng mưa trên khu vực Trung Bộ và Tây Nguyên cũng được dự tính tăng với BCSD, tuy nhiên với mức tăng phổ biến nhỏ hơn 5%.

Với GWL là 2°C và 3°C, kết quả thay đổi lượng mưa năm khá tương đồng với kết quả nhận được từ GWL 1,5°C, tuy nhiên mức độ tăng lượng mưa năm là cao hơn, và diện tích có lượng mưa giảm theo BCSD cũng thu hẹp lại. Với kết quả chi tiết hoá động lực, một số trạm đảo và Đông Bắc Bộ có mức tăng mưa lên tới 40%

ứng với GWL 3°C. Trong khi đó mức tăng mưa có thể đạt tới 11% từ kết quả của BCSD trên khu vực Bắc Trung Bộ, Nam Trung Bộ, và Tây Nguyên.

Với GWL là 4°C, cả 2 phương pháp chi tiết hoá đều cho kết quả là lượng mưa tăng trên Việt Nam trong tương lai. Với phương pháp động lực, lượng mưa tăng nhiều nhất trên khu vực Đông Bắc, Đồng Bằng Bắc Bộ, và Nam Bộ với mức tăng phổ biến 10–30%, có trạm lên tới hơn 40%. Trên các khu vực khác, lượng mưa tăng phổ biến từ 0–10%. Trong khi đó, phương pháp BCSD cho lượng mưa tăng phổ biến 0–10% trên hầu khắp Việt Nam. Tại một số khu vực thuộc Trung Bộ và Tây Nguyên, lượng mưa có thể tăng cao hơn 10%.



Hình 1.12. Biến đổi lượng mưa (%) trên Việt Nam tại các thời điểm đạt mức GWL khác nhau so với thời kỳ cơ sở 1986–2005 đối với kết quả tổ hợp từ phương pháp chi tiết hoá động lực (trên) và từ phương pháp chi tiết hoá thống kê BCSD (dưới). Với lượng mưa của BCSD, những khu vực có trên 2/3 số thí nghiệm cho cùng dấu thay đổi được hiển thị với các gạch chéo.

4. Tổng hợp và kết luận

Chương báo cáo này đã trình bày được một số kết quả đánh giá BĐKH cập nhật cho Việt Nam. Nguồn số liệu quan trắc thời kỳ 1958–2018 đã được sử dụng để đánh giá BĐKH thời kỳ quá khứ. Phương pháp chi tiết hoá động lực và chi tiết hoá thống kê BCSD đã được sử dụng để dự tính BĐKH trong thế kỷ 21.

Một số kết quả chính nhận được từ Chương này như sau:

- Tính trung bình trên toàn Việt Nam, nhiệt độ đã tăng khoảng $0,89^{\circ}\text{C}$ cho thời kỳ 1958–2018 với mức tăng khác nhau giữa các vùng và các mùa trong năm. Mức tăng nhanh dần theo các thập kỷ và mạnh nhất là các thập kỷ gần đây. Số ngày nắng nóng và nắng nóng gay gắt có xu thế tăng; ngược lại, số ngày rét đậm, rét hại có xu thế giảm;
- Xu thế mưa năm thời kỳ 1958–2018 nhìn chung giảm trên đa số các trạm phía Bắc và tăng ở nhiều trạm ở Nam Trung Bộ và Tây Nguyên. Các cực trị cũng như hiện tượng cực đoan về mưa có xu thế giảm ở hầu hết các trạm thuộc Tây Bắc, Đông Bắc, Đồng bằng Bắc Bộ và tăng ở phần lớn trạm thuộc các vùng khí hậu Bắc Trung Bộ và Nam Trung Bộ;
- Các kết quả dự tính chỉ ra rằng nhiệt độ trung bình tại Việt Nam vào giữa thế kỷ 21 có thể tăng lên đến $1,13 \pm 0,87^{\circ}\text{C}$ theo RCP2.6 và $1,9 \pm 0,81^{\circ}\text{C}$ theo RCP8.5 so với thời kỳ cơ sở 1986–2005; và đến cuối thế kỷ có thể lên đến $1,34 \pm 1,14^{\circ}\text{C}$ theo RCP2.6 và $4,18 \pm 1,57^{\circ}\text{C}$ theo RCP8.5. Miền khí hậu phía Bắc có mức gia tăng nhiệt độ cao hơn so với miền khí hậu phía Nam;
- Theo các kết quả từ phương pháp chi tiết hoá động lực của IMHEN, lượng mưa năm được dự tính tăng trên đa phần lãnh thổ Việt Nam trong tương lai. Theo kịch bản RCP4.5, lượng mưa năm được dự tính tăng trên phạm vi cả nước với mức tăng phổ biến 10–15% vào giữa thế kỷ và 10–20% vào cuối thế kỷ. Theo kịch bản RCP8.5, lượng mưa năm cũng được dự tính tăng phổ biến từ 10–15% trên hầu hết cả nước vào giữa thế kỷ 21;
- Các tính toán về mức độ biến đổi của nhiệt độ và mưa trên Việt Nam ứng với các thời điểm đạt được mức nóng lên toàn cầu GWL $1,5^{\circ}\text{C}$, 2°C , 3°C , 4°C đã được thực hiện với cả 2 phương pháp chi tiết hoá động lực và chi tiết hoá thống kê BCSD. Ứng với các mức GWL, nhiệt độ trên Việt Nam đều tăng với mức tăng cao nhất ở khu vực Bắc Bộ, và thấp nhất ở duyên hải Nam Trung Bộ và Nam Bộ. Lượng mưa năm nhìn chung có xu hướng tăng, đặc biệt trên khu vực Trung Bộ và Tây Nguyên theo các mức nóng lên toàn cầu.

Các kết quả tính toán cho thấy sự nhất trí cao trong kết quả dự tính nhiệt độ từ phương pháp chi tiết hoá động lực và chi tiết hoá thống kê BCSD. Tuy nhiên do tính bất định cao của bài toán mô phỏng và dự tính mưa, kết quả từ phương pháp BCSD có sự khác biệt so với phương pháp chi tiết hoá động lực về mức độ và xu thế biến đổi của mưa trên các khu vực khác nhau của Việt Nam. Đây sẽ là một vấn đề cần nghiên cứu sâu hơn trong tương lai, khi thực hiện bài toán chi tiết hoá cho các kết quả mới hơn từ các mô hình toàn cầu thuộc dự án CMIP6.

Một trong những điểm nhấn trong các kết quả của Chương này là việc áp dụng thành công phương pháp chi tiết hoá thống kê BCSD, từ đó có thể xây dựng được bộ kịch bản chi tiết phân giải cao (~10km) cho Việt Nam với đầu vào là 31 mô hình toàn cầu từ dự án CMIP5. Với phương pháp BCSD, các kịch bản tương lai không bị giới hạn bởi RCP4.5 và RCP8.5 mà còn được tính toán cho các RCP2.6 và RCP6.0, là các kịch bản chưa được đề cập đến nhiều trong các nghiên cứu ở Việt Nam trước đây. Đặc biệt, bộ kịch bản phân giải cao cho Việt Nam này có thể được tái và sử dụng miễn phí từ địa chỉ:

[https://remosat.usth.edu.vn/Download/dat_GEMMES_WP1/WP1_MODEL_OUTP
UT/](https://remosat.usth.edu.vn/Download/dat_GEMMES_WP1/WP1_MODEL_OUTP
UT/)

Bộ kịch bản này được lưu dưới định dạng netCDF (network Common Data Form), và thích hợp cho việc sử dụng để nghiên cứu đánh giá BĐKH cũng như các tác động của BĐKH đến các hoạt động kinh tế xã hội của Việt Nam.

Ngoài ra, với bài toán chi tiết hoá kịch bản BĐKH cho tương lai tại Việt Nam cho tới hiện tại, các tính toán nhìn chung vẫn bị giới hạn bởi các kết quả từ các mô hình toàn cầu. Trong khi đó kết quả từ các mô hình toàn cầu trong CMIP5 có thể vẫn chưa phủ hết không gian xác suất của các khả năng có thể diễn ra trong tương lai. Trong khuôn khổ của WP1 của dự án GEMMES, chúng tôi đang đồng thời nghiên cứu việc áp dụng phương pháp xác suất đề xuất bởi (Rasmussen et al. 2016; Hsiang et al. 2017) để tiếp tục xây dựng bộ kịch bản BĐKH phân giải cao cho Việt Nam, trong đó có thể tính đến tốt hơn các rủi ro cực trị có thể xảy ra trong tương lai.

5. Tài liệu tham khảo

Amengual, A., V. Homar, R. Romero, S. Alonso and C. Ramis, 2012: A statistical adjustment of regional climate model outputs to local scales: application to Platja de Palma, Spain. *Journal of Climate*, 25(3), 939-957.

- Fita, L., and J. Fernández, 2010: CLWRF: WRF modifications for regional climate simulation under future scenarios, paper presented at 11th WRF Users' Workshop, Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo.
- Giorgi, F., E. Coppola, F. Solmon, L. Mariotti, M. B. Sylla, X., Bi, N. Elguindi, G. T. Diro, V. Nair, G. Giuliani, U. U. Turuncoglu, S. Cozzini, I. Güttler, T. A. O'Brien, A. B. Tawfik, A. Shalaby, A. S. Zakey, A. L. Steiner, F. Stordal, L. C. Sloan, and C. Brankovic, 2012: RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52, 7–29.
- Hauser, M., F. Engelbrecht, and E. M. Fischer, 2021: Transient global warming levels for CMIP5 and CMIP6 (Version v0.2.0) [Data set]. *Zenodo*. <http://doi.org/10.5281/zenodo.3591807>
- Hsiang, S., R. Kopp, A. Jina, J. Rising, et al., 2017: Estimating Economic Damage from Climate Change in the United States. *Science*, 356(6345), 1362-69.
- IPCC, 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Eds. T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC, 2018: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, Eds. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, et al., <http://www.ipcc.ch/report/sr15>.
- Katzfey, J, K. Nguyen, J. McGregor, P. Hoffmann, S. Ramasamy, H.V. Nguyen, V.K. Mai, V.T. Nguyen, B.K. Truong, V.T. Vu, H.T. Nguyen, V.T. Phan, Q.T. Nguyen, T. Ngo-Duc, T.L. Trinh, 2016: High-resolution projections for Vietnam – Methodology and evaluation of current climate simulations. *APJAS*, 52(2), 91-106.
- Jones, R.G., M. Noguer, D. C. Hassell, D. Hudson, S. S. Wilson, G. J. Jenkins, and J. F. B. Mitchell, 2004: Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. *Met Office Hadley Centre*, Exeter, UK, 40pp.

- Knutti, R., and J. Sedláček, 2013: Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3, 369–373.
- Maurer, E. P., 2007: Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios. *Climatic Change*, 82: 309-25.
- McGregor, J. L., and M. R. Dix, 2008: An updated description of the conformal-cubic atmospheric model. in K. Hamilton, W. Ohfuchi (Eds.), *High Resolution Simulation of the Atmosphere and Ocean*. Springer, pp. 51–76.
- MONRE, 2009: Climate change, sea level rise scenarios for Vietnam. *Ministry of Natural Resources and Environment*, Hanoi, pp. 34.
- MONRE, 2012: Climate change, sea level rise scenarios for Vietnam. *Ministry of Natural Resources and Environment*, Hanoi, pp. 27.
- MONRE, 2016: Climate change, sea level rise scenarios for Vietnam, Summary for Policy Makers. *Ministry of Natural Resources and Environment*, Hanoi, pp. 39.
- MONRE, 2021: Climate change, sea level rise scenarios for Vietnam. *Ministry of Natural Resources and Environment*, Hanoi, pp. 141 (*in press*).
- Murakami, H., R. Mizuta, and E. Shindo, 2012: Future changes in tropical cyclone activity projected by multi-physics and multi-SST ensemble experiments using the 60-km-mesh MRI-AGCM. *Climate Dyn.*, 39, 2569-2584.
- Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries B *et al.*, 2000: IPCC special report on emissions scenarios. *Cambridge University Press*, Cambridge.
- Ngo-Duc, T., F.T. Tangang, J. Santisirisomboon, F. Cruz, L. Trinh-Tuan, T. Nguyen-Xuan, T. Phan-Van, L. Juneng, G. Narisma, P. Singhruck, D. Gunawan, E. Aldrian, 2017: Performance evaluation of RegCM4 in simulating Extreme Rainfall and Temperature Indices over the CORDEX-Southeast Asia Region. *International Journal of Climatology*, 37, 1634-1647
- Nguyễn Đức Ngữ và Nguyễn Trọng Hiệu, 2004: Khí hậu và Tài nguyên Khí hậu Việt Nam. *Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật*, 230 pp.
- Peter, C., S. Hung-Neng, Chin, C. David C, Bader, Govindasamy Bala, 2009: Evaluation of a WRF dynamical downscaling simulation over California. *Climatic Change*, 95:499-521.

- Rasmussen, D., M. Meinshausen, R. E. Kopp, 2016: Probability-weighted ensembles of U.S. county-level climate projections for climate risk analysis. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 55, 2301–2322.
- Samuelsson, P., C. G. Jones, U. Willen, A. Ullerstig, S. Gollvik, U. Hansson, E. Jansson, C. Kjellström, G. Nikulin, and K. Wyser, 2011: The Rossby Centre Regional Climate model RCA3: model description and performance. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 63(1), 4–23.
- Sobie, S. R., A. T. Werner, T. Q. Murdock, G. Bürger, and A. J. Cannon, 2012: Downscaling Extremes—An Intercomparison of Multiple Statistical Methods for Present Climate. *Journal of Climate*, 25, 4366-88.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2012: An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485-98.
- van Vuuren, D. P., J. Edmonds, M. Kainuma, *et al.*, 2011: The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5-31.
- Vrac, M., and P. Friederichs, 2015: Multivariate—Intervariable, Spatial, and Temporal—Bias Correction. *Journal of Climate*, 28(1), 218-237.
- Vrac, M. 2018: Multivariate bias adjustment of high-dimensional climate simulations: the Rank Resampling for Distributions and Dependencies (R2D2) bias correction. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 3175–3196.
- WMO-No. 1248, 2020: WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019. 40 pp.
- Wood, A. W., L. R. Leung, V. Sridhar, and D. P. Lettenmaier, 2004: Hydrologic Implications of Dynamical and Statistical Approaches to Downscaling Climate Model Outputs. *Climatic Change*, 62, 189-216.