

第一章

全球與東亞氣候變遷

許晃雄¹、王嘉琪²、李時雨¹、曹俊和³、梁禹喬⁴、郭怡君⁵、
陳昭安⁶、陳英婷¹、曾于恒⁵、曾琬鈴⁷、黃偌栩⁵、蔡宜君¹、
賴昭成⁸、駱世豪¹

¹中央研究院環境變遷研究中心

²中國文化大學大氣科學系

³國立臺灣海洋大學海洋環境資訊系

⁴國立臺灣大學大氣科學系

⁵國立臺灣大學海洋研究所

⁶國家災害防救科技中心

⁷國立臺灣大學氣候變遷與永續發展學位學程

⁸國立臺北教育大學自然科學教育學系



摘要

大氣、海洋與冰雪圈以及生物圈的觀測提供了暖化明確的證據。自1850年以來全球地表溫度持續增暖，且在近年暖化程度急遽增強加速，人為排放的溫室氣體對氣候變化的貢獻證據越來越充分。不同共享社會經濟路徑 (Shared Socioeconomic Pathway, SSP；參見文字框1) 下，全球地表溫度都至少持續增溫到世紀中葉，除非在未來幾十年內大幅減少溫室氣體排放，否則本世紀的暖化必然超過1.5°C與2°C。自1950年以來，全球大多數區域顯示，極端高溫事件 (包括熱浪) 的頻率和強度已增加，而極端寒冷事件則減少。人為活動造成的溫室氣體增加是這些極端溫度事件變化的主要驅動因素。極端高溫事件的頻率，很可能隨著全球暖化程度呈現非線性增加，罕見極端高溫事件的相對增加率將更大。

人類導致的暖化也驅動了全球氣候變化。整體而言，陸地降水量有些微增加的趨勢，熱帶地區、非洲北部、部分歐洲與中亞以及海洋大陸降水增加；南美洲中部、北美西部與北非以及中東則呈現降水減少的趨勢。模式推估全球平均降水量將逐漸增加，陸地降水增加比全球或海洋區域更為明顯。全球暖化下，每增加1°C，全球平均年降雨量可能增加2%至3%，極端降雨事件頻率與強度增加約7%，多數地區的暴雨事件極可能變得更加頻繁和強烈。極端濕潤與乾旱事件的嚴重程度將會加劇，受乾旱影響的土地總面積將增加且變得更加頻繁和乾燥。熱帶氣旋的降雨量、強度與強熱帶氣旋比例都會隨著暖化程度增強而增加。世紀末西北太平洋颱風生成數量減少且生命期縮短，並呈現西北太平洋的熱帶氣旋向極區遷移的趨勢。然而，颱風伴隨的最大風速與降雨都是增強的。

總結全球暖化對海洋、冰雪圈與海平面上升的衝擊，海洋溫度與熱含量的增加已成為全球性問題，其範圍從表面到底層分布極廣，溫度上升衍生出海洋熱浪的增加與海洋層化效應的增強。海洋酸化呈現全球性趨勢。大西洋經向翻轉環流的減弱，在觀測方面雖尚未定論，但未來推估皆明確指出減弱的趨勢。黑潮在過去觀測大致呈現加速趨勢且有離岸偏移，並且在夏季較為顯著。冰雪圈已經受到顯著的影響，特別是北極海冰，預計可能在2050年完全消失。另一方面，格陵蘭和南極的冰層在快速減少，加速全球海平面上升。觀測顯示冰川、春季積雪和永凍土的質量持續減少，然而在北美和西伯利亞等地，積雪覆蓋面積反而有所增加。海平面高度在過去80萬年中呈現顯著的波動，但自19世紀中葉以來，其升高速度已超過過去2000年的平均值，主要是由於海水熱膨脹和冰

川、陸冰的融化；未來推估至2300年，海平面將會持續升高。

過去數十年間，全球季風呈現明顯的年際與年代際變化，由於不同區域間有明顯差異，整體而言無顯著變化趨勢。在未來情境推估中，季風環流減弱，但因為暖化使得水氣增加，全球季風降水可能增強。全球平均氣溫每上升1°C，全球季風陸域降水量，在各SSP情境的平均降水量可能增加1.3%至2.4%。未來變遷推估顯示，季風降水增加量具明顯南北向不對稱性，北半球會高於南半球。

在季風活動未來變遷推估中，東亞地區由於季風肇始提前及夏季延長，季風降水增強。降水增強主要來自梅雨的增強，尤以東南亞和中國南部最為明顯。季風降水在所有未來情境推估中均為增加，且隨模擬時間增加與排放情境的嚴重程度依次提升。雖然模式推估對季風模擬仍具不確定性，然而對於東亞區域在21世紀之季風降水增加具高度信心，對於季風季節增長的信心度則為中等。

從1850年到1970年代，氣膠及其前驅物濃度呈現上升的趨勢，對氣候造成冷卻的效果，可部分抵銷溫室氣體造成的暖化。1970年代中期以後，各國開始關注及控制污染物排放，改善空氣品質，氣膠及其前驅物造成的淨輻射強迫減弱，讓地球降溫的效果也隨之減弱。全球暖化加速消耗臭氧，低污染地區地表臭氧減少，但在整體污染地區反而增加。在CMIP5高排放情境 (RCP8.5) 情境下，全球暖化造成2100年平均氣膠濃度約增加 0.21 mg m^{-3} ，熱浪頻率增加導致高污染臭氧或氣膠增加。

1.1 前言

本章主要依據聯合國政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第六次氣候變遷評估報告 (6th Assessment Report, AR6)，並參考第五次評估報告 (AR5)、全球升溫1.5°C特別報告 (Special Report on Global Warming of 1.5°C, SR15)，以及變遷氣候中的海洋與冰雪圈特別報告 (Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, SROCC)，綜整全球地表溫度、降水、海洋、冰雪圈、極端天氣與季風，在過去幾十年的變化，以及在各種不同溫室氣體排放情境中的未來變遷趨勢。



1.2 溫度、降水

1.2.1 地表溫度觀測

大氣、海洋與冰雪圈以及生物圈的觀測提供了暖化明確的證據。在過去的幾十年中，達到了幾個世紀甚至千年以來前所未見的高溫，變化速度在過去2000年、甚至更長的時間內絕無僅有。根據古氣候重建的溫度資料顯示，自1850年以來全球地表溫度持續增暖(圖1.2.1)。近年來全球暖化的程度急遽增強加速，21世紀的前20年(2001年至2020年)全球地表平均溫度相較1850年至1900年間高出 0.99°C (0.84°C 至 1.10°C)。過去百年來，全球平均溫度增暖的速度飆高，已超越過去10萬年中最暖的數個世紀的溫度紀錄。自2012年以來，全球地表溫度大幅上升，2016年至2020年更成為1850年至2020年之間最熱的5年。

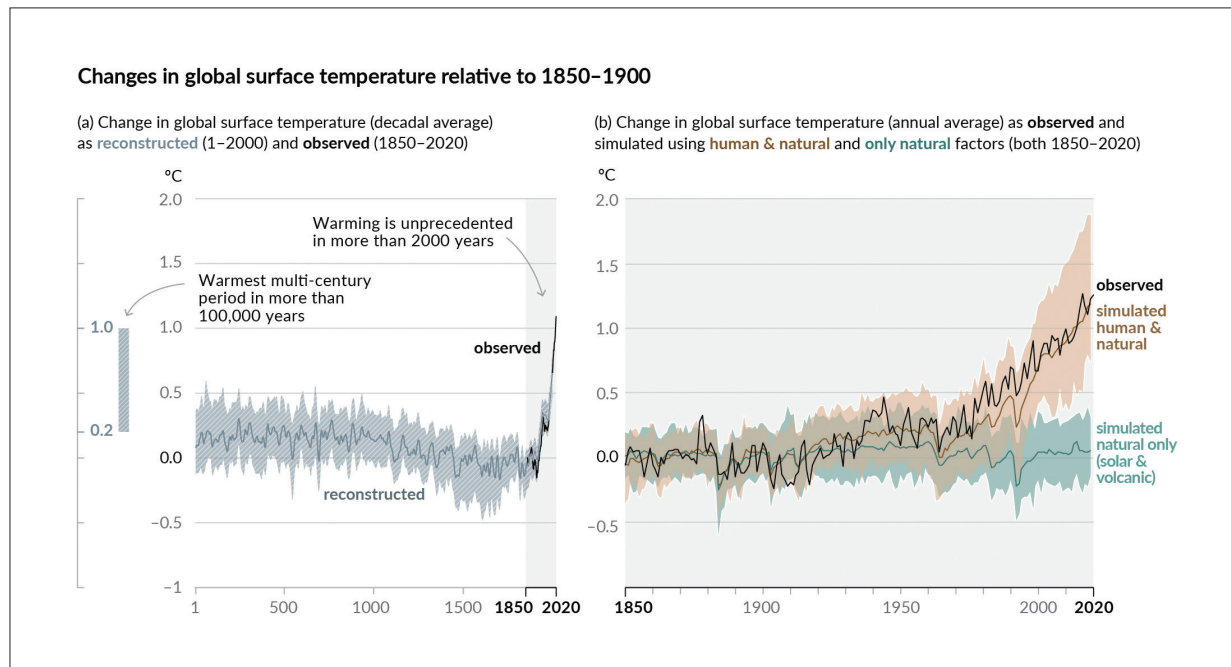


圖1.2.1 (a) 全球表面氣溫的變化，灰色實線為從古氣候檔案中重建的溫度距平，黑色實線為觀測的溫度距平，基期為1850年至1900年期間每10年的平均。左側垂直長條顯示過去10萬年中最暖的幾個世紀的估計溫度(間冰期)。灰色陰影區顯示溫度重建的非常可能範圍(參見文字框3)。(b) 過去170年全球表面氣溫變化(黑線)，基期為1850年至1900年平均。比較第六期耦合模式比對計畫(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)兩組氣候模擬，包括人為和自然驅動因素(棕色)以及僅自然驅動因素(太陽和火山活動，綠色)。實色線條為系集平均值，彩色陰影為模擬的非常可能範圍。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure SPM.1)

從IPCC AR2到AR5，人類對近期氣候變化的貢獻證據越來越充分與加強，在本次AR6評估中更加明確，包括在區域尺度和極端天氣方面的影響。人類影響指的是導致或促進氣候反應的人類活動，例如人為排放的溫室氣體，隨後改變大氣輻射特性，導致氣候系統中的大氣、海洋和陸地部分升溫。其他影響氣候的人類活動，包括排放氣膠和其他短暫氣候影響因子，以及土地利用變化，例如都市化。

以模式模擬探討全球暖化的原因以及人類活動所造成的影響 (圖1.2.1b)，模擬結果中僅靠自然驅動因素造成的增溫幅度並不顯著 (綠線)，而加入人為活動因素後 (棕線)，在1900年後的增溫影響越來越顯著且和觀測的溫度變化曲線相當重疊，人類活動對全球暖化的影響無庸置疑。1980年代後，全球地表溫度持續上升，但在各地仍有不同的暖化區域特性與海陸的差異 (圖1.2.2)：陸地的增溫高於海洋 (1.59°C [1.34°C至1.83°C] 與 0.88°C [0.68°C至1.01°C])，極區增溫又比中低緯度更為顯著，尤其是北半球高緯度區域。臺灣所在的亞洲的增溫也較全球平均多。

隨著全球暖化加劇，氣候系統中的許多變化也相應地變得更加明顯：極端高溫、海洋熱浪、暴雨等極端氣象事件的頻率和強度增加；在某些地區，農業和生態乾旱(參見1.4.3 乾旱事件) 的發生率增加；強度較大的熱帶氣旋的比例增加；北極海冰、雪覆蓋和永凍土減少。

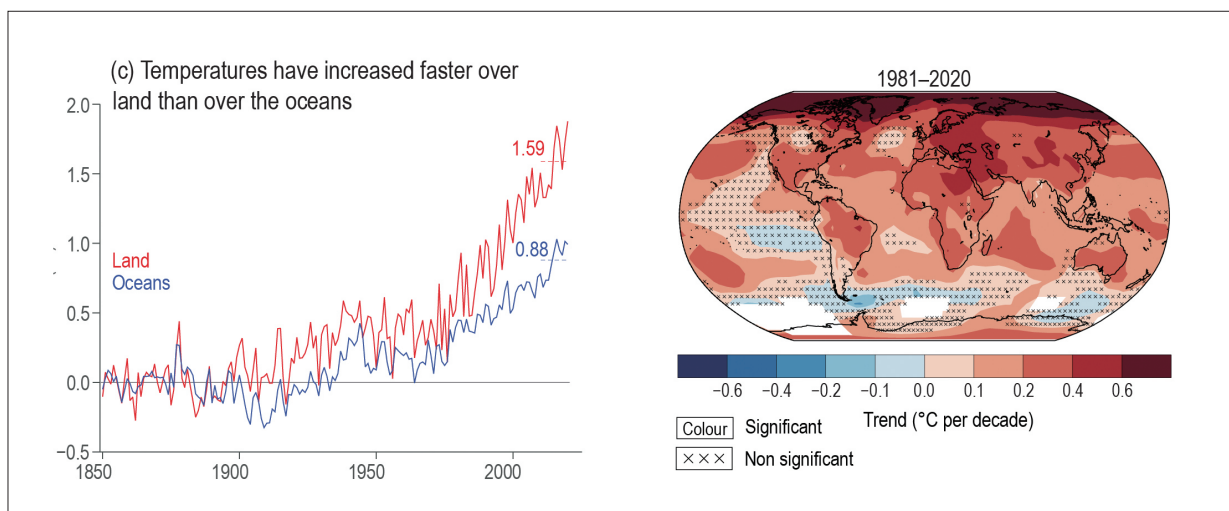


圖1.2.2 (左圖) 1850年至2020年的地表溫度距平，藍、紅線分別表示海洋與陸地溫度，並標示出最後10年的升溫數值 (摘自IPCC AR6, WGI, Figure 2.11)。(右圖) 1981年至2020年期間HadCRUTv5每10年的地表溫度趨勢 (°C decade⁻¹)，x區域表示不顯著。(摘自IPCC AR6, WGI, Cross-Section Box TS.1, Figure 1)

**文字框 1 | SSP 排放情境**

科學家依據全球各種經濟發展趨勢，擬訂各種不同的發展情境 (scenario)，將未來每年溫室氣體排放量的推估值導入地球系統模式 (Earth System Model, ESM) 進行長期氣候模擬，得到相對應的全球地表平均溫度變化。此模擬架構與評估方法最常被應用於全球氣候變遷研究，如IPCC AR4、AR5乃至AR6都是用類似的方法，差別是使用的溫室氣體排放濃度情境設定不同 (整理如表BOX 1.2.1)。例如：AR5中的五種代表濃度路徑 (Representative Concentration Pathway, RCP) 分別為溫室氣體排放情境嚴重度極低、低、中、高、極高 (由RCP1.9、RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0至RCP8.5)。隨著世代演進，暖化情境設定越來越複雜卻更加真實且合理，多樣化的暖化情境設定對於下游氣候變遷資料應用也有更多選擇。

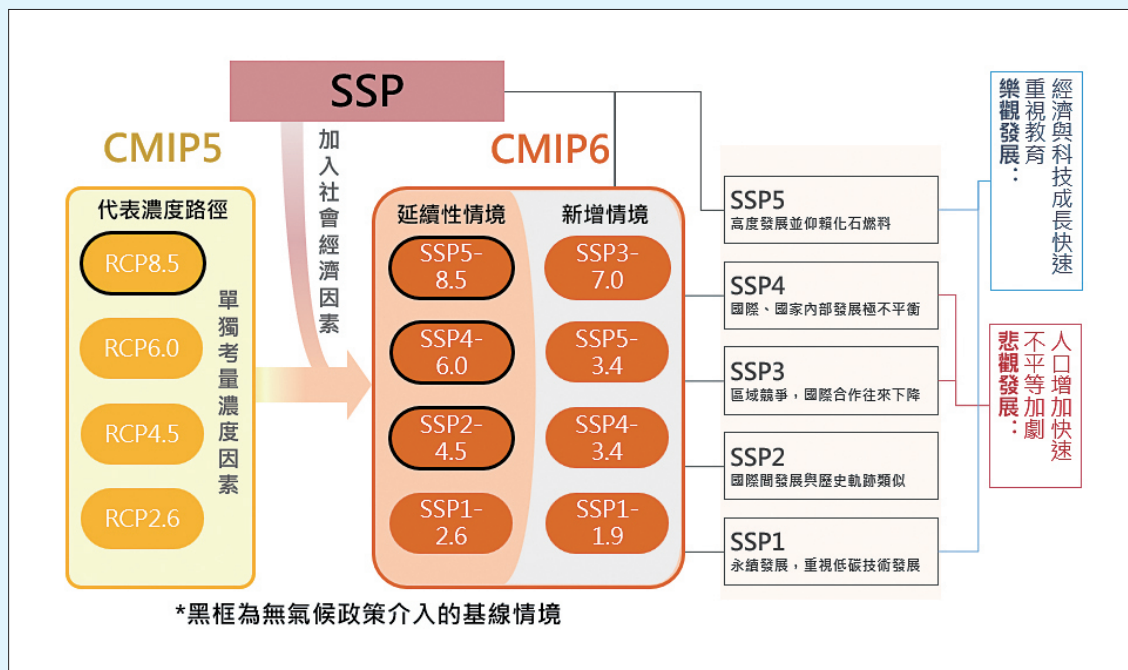
表BOX 1.2.1 IPCC各世代所使用相關氣候資料說明

世代	AR4	AR5	AR6
氣候資料組	CMIP3	CMIP5	CMIP6
推估起始年	2001	2006	2015
常用情境	B1, A1B, A2	RCP1.9, RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 (RCP：代表濃度路徑)	SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 (SSP：共享社會經濟路徑)
參考文獻	Meehl et al., 2007	Taylor et al., 2012	Eyring et al., 2016; O'Neill et al., 2016

最新公布的AR6報告中使用CMIP6新一代ESM的模擬結果，有別於AR5只使用代表濃度途徑 (Representative Concentration Pathway, RCP) 做為氣候變遷推估排放情境，而是使用共享社會經濟路徑 (Shared Socioeconomic Pathway, SSP) (Riahi et al., 2017) 為新一代氣候變遷情境的重要組成，結合氣候變遷研究界多個研究社群成果，為社會經濟情境與氣候情境共同交織成的新情境框架。SSP以全

全球或區域性的社會與經濟發展程度做為區分，不同SSP主要差異來自對全球人口增長、受教育機會、城市化、經濟增長、資源可用性、技術發展和需求驅動因素的不同假設，區分為SSP1至SSP5等5種不同社經發展情境。各種SSP設定均隱含著減緩氣候變遷衝擊，與調適行動的社會經濟挑戰。圖BOX 1.2.1說明SSP1為永續發展的理想情境；SSP2為與歷史發展相似的中間路線；SSP3與SSP4分別代表區域競爭及不平等發展，皆強調高挑戰性的調適；SSP5則為高度仰賴化石燃料的高發展、高排放情境。

CMIP6暖化情境最主要的特徵，即加入氣候政策之後，以落實不同減緩目標所導致的溫室氣體排放濃度和相對應的輻射強迫力 (圖BOX 1.2.1)，並以共享社會經濟路徑與代表濃度途徑的數字組合 (SSP-RCP) 表示CMIP6資料中的情境 (如：SSP1-2.6為SSP1與RCP2.6組合的情境)。另外，AR6中亦引用AR5 CMIP5 分析成果，故當情境名稱為RCP時，代表描述的資料為CMIP5。為銜接與比較CMIP5暖化情境，將SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0及SSP5-8.5做為4個主要模式模擬情境。



圖BOX 1.2.1 SSP情境設定說明與其對應的RCP情境 (資料來源：本報告產製)



以下為SSP暖化情境的相關說明：

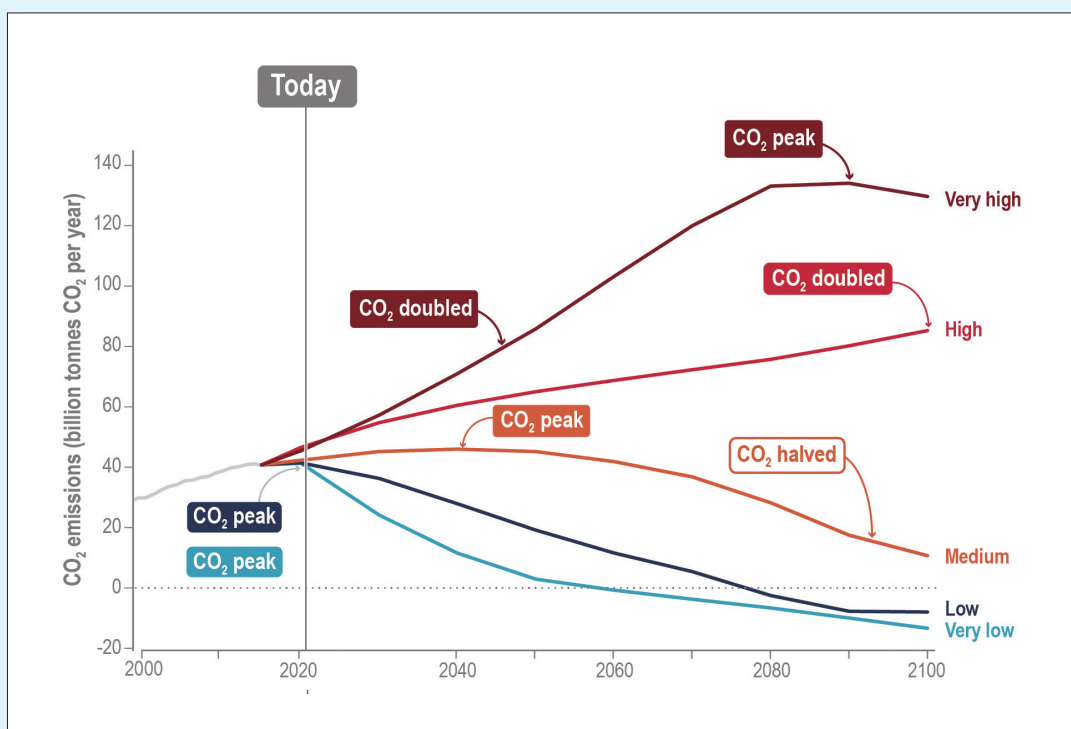
SSP1-1.9：強調快速、深度減排，預計在世紀中達成淨零排放，以達成巴黎協定期望限制升溫在1.5°C，但執行過程中仍可能暫時突破限制門檻，於世紀末控制在1.5°C以下。

SSP1-2.6：實現巴黎協定的限制目標。

SSP2-4.5：被視為接近現況，基於既有氣候政策的未來趨勢。

SSP3-7.0：以目前的排放量持續增加，無減緩目標下的基線情境。

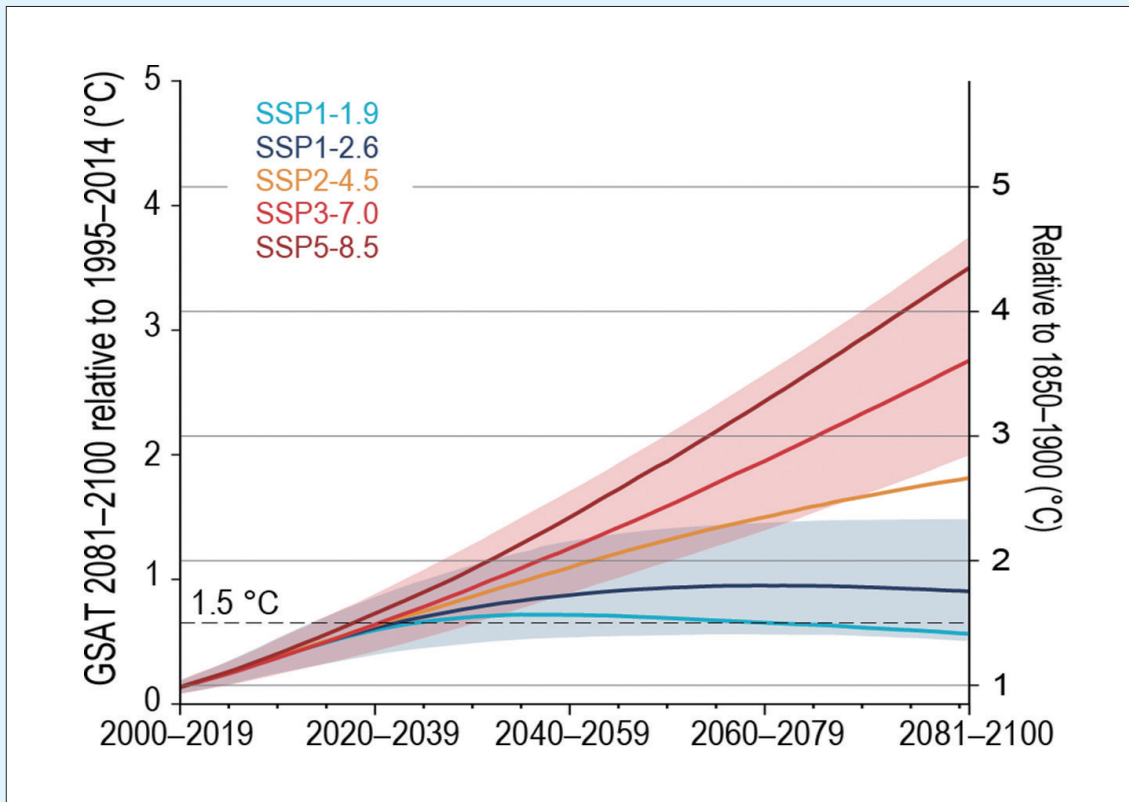
SSP5-8.5：非常高度溫室氣體排放情境，雖然較不可能發生，但可視為未來可能的最極端情況。



圖BOX 1.2.2 IPCC AR6排放路徑設定。不同的共享社會經濟路徑 (SSP) 可能導致未來不同溫室氣體 (以二氧化碳為大宗) 排放量SSP1-1.9 (very low)，SSP1-2.6 (low)，SSP2-4.5 (medium)，SSP3-7.0 (high)，SSP5-8.5 (very high)。(摘自IPCC AR6, WGI, Infographic TS.1)

圖BOX 1.2.2為CMIP6針對未來推估，設計了自2015年至2100年依照多種不同的共享社會經濟路徑 (SSPs)，計算並發展出相對應的溫室氣體排放濃度變化路

徑。將不同溫室氣體加入ESM模式模擬，可得到相對應的全球平均溫度變化 (圖BOX 1.2.3)。



圖BOX 1.2.3 CMIP6 SSP暖化情境下模擬全球平均溫度變化。不同顏色線代表不同SSP溫度變化，左側座標為相對1995年至2014年的變化，右側座標為相對工業革命前 (1850年至1900年) 的變化。陰影區為多模式5%至95%可信賴區間。(摘自IPCC AR6, WGI, Cross-Section Box TS.1, Figure 1)

1.2.2 地表溫度未來推估

全球暖化已成既定事實，針對未來可能發生的各種情況，AR6透過不同溫室氣體排放選擇的情境模擬 (SSP)，提供人類集體選擇做為參考。在所有的排放情境下，全球地表溫度將至少持續增加到本世紀中葉，除非在未來幾十年內大幅減少二氧化碳和其他溫室氣體排放，否則本世紀的暖化必然超過1.5°C與2°C。



圖1.2.3顯示1950年至本世紀末的全球地表溫度變化 (包括觀測與模式歷史模擬與未來推估) (IPCC, 2021: Technical Summary)。相對於1850年至1900年，極低溫室氣體排放情境SSP1-1.9下的2081年至2100年全球地表平均溫度很可能會上升1.0°C至1.8°C，而高溫室氣體排放情境SSP5-8.5下的升溫幅度很可能會高達 3.3°C至5.7°C。在所有情境評估中 (SSP5-8.5除外)，20年平均全球地表升溫超過1.5°C將在2030年代初期發生。在極高溫室氣體排放SSP5-8.5和高排放SSP3-7.0情境下，世紀末全球地表溫度將上升超過2°C (圖1.2.3)。根據SSP5-8.5情境的模擬，增溫超過2°C的情形甚至在2041年至2060年期間就極有可能提早發生。隨著情境由低至高排放，模式間推估的差異也逐漸擴大，但整體增溫趨勢一致。

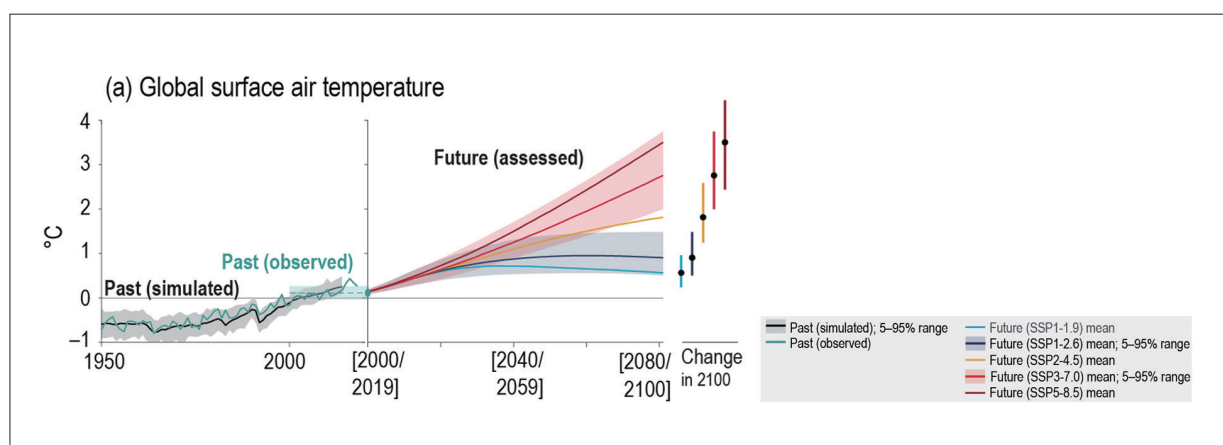


圖1.2.3 綠線與灰線分別為過去觀測與模擬的全球地表溫度變化，基期均為1995年至2014年平均。垂直黑直線右側為5個不同SSP情境下推估的未來溫度變化，展示不同的排放選擇如何影響關鍵的大尺度指標，強調人類集體選擇的重要性。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure TS.8)

根據巴黎氣候協定關注的全球暖化程度 (Global Warming Level, GWL；參見文字框2) 1.5°C、2°C以及3°C，相對於1850年至1900年，全球平均地表溫度的增溫變化總結如下：(1) SSP2-4.5、SSP3-7.0或SSP5-8.5，平均約在2030年左右超過1.5°C；(2) SSP3-7.0或SSP5-8.5，平均約在2043年左右超過2°C；(3) SSP5-8.5，平均約在2062年左右超過3°C。整體而言，隨著時間演進，增溫幅度加劇。

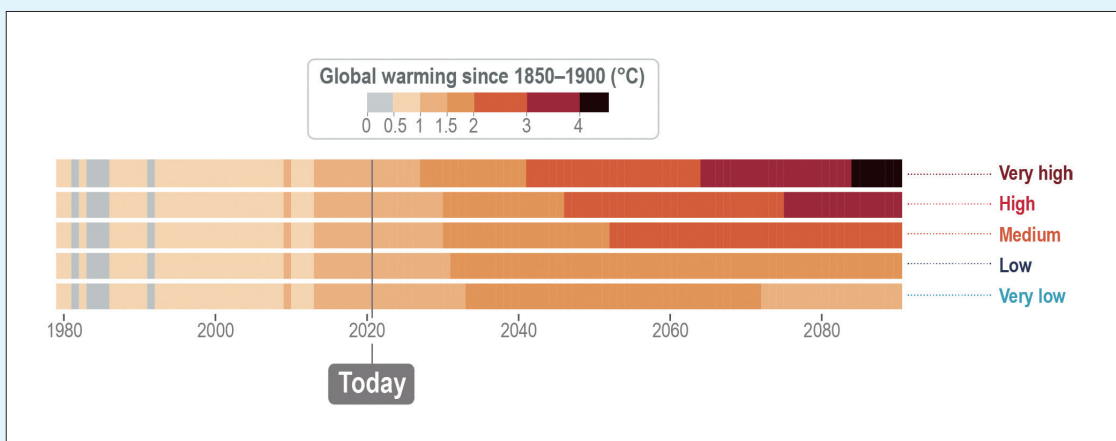
年代際或年際的變化中，全球溫度趨勢仍會有時下降有時上升，但在百年尺度的升溫趨勢方面仍是相當明確。若從2020年開始實行強有力的排放減緩措施，根據極低排放情境SSP1-1.9的模擬，全球暖化將有望趨緩，溫度得以在21世紀後半葉緩緩下降。

文字框 2 | 全球暖化程度 (GWL)

方法由來

2015年《巴黎協定》目標為將全球暖化限制在2°C或1.5°C，氣候科學研究社群從原先依據不同排放路徑推估未來短、中、長期暖化程度的氣候變化研究，開始朝向評估特定全球暖化程度下的氣候變遷與衝擊 (James et al., 2017)。之後IPCC於2018年提出《全球升溫1.5°C特別報告》(Special Report on Global Warming to 1.5°C, SR15) (IPCC, 2018)，提供全球升溫1.5°C的衝擊評估結果與氣候變遷相關資訊。而後，AR6 (IPCC, 2021) 大量導入此作法於相關衝擊評估。氣候衝擊驅動因子 (Climate Impact Drivers, CIDs) 即是以全球暖化不同程度來提供相關量化推估資訊。

將SSPs情境資料導入ESM氣候模式模擬，得到相對應全球暖化程度 (圖BOX 1.2.4)。從最新的美國國家海洋大氣總署 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 全球觀測資料顯示，1850年至2023年1月全球地表溫度已經增加0.87°C，也符合模擬結果，若依照現今全球溫室氣體排放程度分級，目前全球暖化程度已進到GWL 1°C。



圖BOX 1.2.4 全球地表溫度在不同排放路徑下不同暖化程度 (溫度變化相對於工業革命前1850年至1900年) 對應的發生時間點。CO₂排放濃度Very low (SSP1-1.9)，Low (SSP1-2.6)，Medium (SSP2-4.5)，High (SSP3-7.0)，Very high (SSP5-8.5)。(摘自IPCC AR6, WGI, Infographic TS.1)



在ESM氣候模式裡，溫室效應氣體的濃度變化主導了全球平均溫度變化。IPCC AR6為提供具有可信度且一致化的推估資訊，科學家評估CMIP6眾多模式GWL不同門檻值的發生時間，得到如表BOX 1.2.2的整合數據，再藉由統計方法評估各時段最有可能發生的全球暖化程度。不同的排放路徑於短期 (2021年至2040年)、中期 (2041年至2060年)、長期 (2081年至2100年) 的暖化情況 (註：本報告將持續使用此短、中、長期對應的年分)，無論是何種路徑，GWL 1.5°C最早都將在2021年至2040年期間發生；在中度排放程度以上，GWL 2°C最早可能發生的時期在2041年至2060年；若各國氣候政策與溫室效應氣體排放減量失敗，則GWL 4°C最早可能發生的時期在2081年至2100年。

表BOX 1.2.2 全球平均溫度相對於1850年至1900年的變化。(單位：°C，資料來源：IPCC AR6 TS Cross-Section Box TS.1, Table 1)

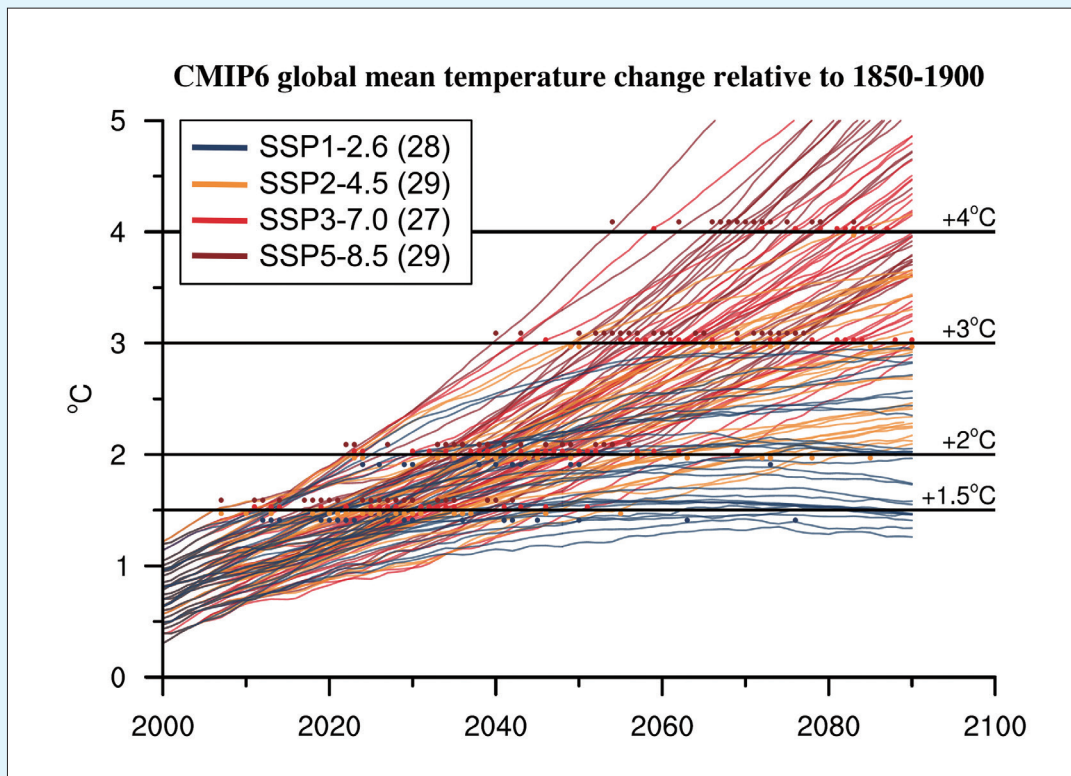
情境	短期 (2021年至2040年)		中期 (2041年至2060年)		長期 (2081年至2100年)	
	最佳推估	可能範圍	推估	範圍	推估	範圍
SSP5-8.5 (Very high)	1.6	1.3至1.9	2.4	1.9至3.0	4.4	3.3至5.7
SSP3-7.0 (High)	1.5	1.2至1.8	2.1	1.7至2.6	3.6	2.8至4.6
SSP2-4.5 (Medium)	1.5	1.2至1.8	2.0	1.6至2.5	2.7	2.1至3.5
SSP1-2.6 (Low)	1.5	1.2至1.8	1.7	1.3至2.2	1.8	1.3至2.4
SSP1-1.9 (Very low)	1.5	1.2至1.7	1.6	1.2至2.0	1.4	1.0至1.8

GWL 如何設定

AR6評估全球平均溫度變化的「發生時間」(如表BOX 1.2.2) 是根據多重證據的綜合結果，這類簡化的資訊對一般大眾或決策者尚可滿足。但落實應用氣候變遷衝擊評估與調適規劃應用研究需要的是，各別模式模擬達到不同全球暖化程度時，臺灣承受的變遷的詳細空間資訊。以下說明如何評估CMIP6各別模式原始推估的全球暖化程度。首先須蒐集全球氣候模式地表溫度資料 (自工業革命前1850

年即開始進行模擬)，相關資訊可參考CMIP6各成員模擬資料 (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>)。計算每個模式相對於工業革命時期前全球平均地表氣溫變化，達到不同升溫程度的時間，以銜接後續CMIP6統計降尺度日資料庫的建立，進一步進行後續不同領域衝擊評估。

假想各別氣候模式代表不同廠牌的汽車，其模擬計算核心如車子的引擎，對於溫室氣體所模擬的溫度變化反應也不同，有些敏感，有些遲鈍。每個模式GWL評估是參考AR6及多數相關文獻的做法，使用模式的全球平均氣溫，計算達到不同全球暖化程度的時間。根據歷史模擬自1850年推估到未來時期全球平均溫度的時序變化，以20年移動窗區 (第10年代表)，計算各別模式相對於工業革命前升溫首次到達1.5°C、2°C、3°C與4°C目標的發生時間 (如圖BOX 1.2.5)。



圖BOX 1.2.5 CMIP6全球平均溫度相對於1850年至1900年的20年滑動平均變化 (每條線代表單一模式溫度變化，線上的點為該模式升溫至不同門檻值的發生時間)。根據CMIP6模式未來推估相對於歷史模擬1850年至1900年升溫變化，計算全球暖化通過1.5°C、2°C、3°C、4°C目標時間 (溫度曲線以第10年代表20年平均值)。(資料來源：臺灣氣候變遷關鍵指標圖集：AR6統計降尺度版，2023)



統計結果整理如表BOX 1.2.3，GWL 1.5°C (110組模擬) 最早與最晚發生時間為2007年與2076年，中位數為2028年；GWL 2°C (99組模擬) 發生時間為2042年；GWL 3°C (66組模擬) 發生時間為2065年；GWL 4°C (31組模擬) 發生時間為2076年。各別模式發生的全球暖化程度對應年分參考「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台」計畫 (Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, TCCIP) 資料說明 (AR6統計降尺度日資料說明文件)。

表BOX 1.2.3 CMIP6模式推估全球暖化程度 (GWLs) 的年分統計表

GWL	1.5°C	2°C	3°C	4°C
系集數量	110	99	66	31
各別情境： 模式個數	SSP1-2.6 : 25 SSP2-4.5 : 29 SSP3-7.0 : 27 SSP5-8.5 : 29	SSP1-2.6 : 14 SSP2-4.5 : 29 SSP3-7.0 : 27 SSP5-8.5 : 29	SSP1-2.6 : 0 SSP2-4.5 : 12 SSP3-7.0 : 25 SSP5-8.5 : 29	SSP1-2.6 : 0 SSP2-4.5 : 1 SSP3-7.0 : 13 SSP5-8.5 : 17
時間中位數 (最早-最晚)	2028 ¹ (2007-2076)	2042 (2022-2085)	2065 (2040-2090)	2076 (2054-2087)

1 氣候變遷偵測與指標專家小組 (ETCCDI)：主要是為了協助大眾更容易地理解和應對氣候變遷問題而設立的。提供了許多有關氣候變遷指標的定義及計算方式，以及相關的軟體套件及應用指導，讓使用者可以更方便地進行氣候變遷研究及分析。更多資訊請參考 <https://www.wcrp-climate.org/etccdi>

隨著全球升溫幅度的增加，各地暖化的情形加劇。模擬不同升溫幅度對各地增溫的影響如圖1.2.4，升溫幅度由低至高分別類似SSP1-2.6、SSP2-4.5以及SSP5-8.5的情境。不同情境模擬均有北半球高於南半球、陸地升溫趨勢大於海洋 (約1.4倍至1.7倍)、高緯度趨勢大於中低緯度的特性。這些差異是由多種因素所影響，包括陸地與海洋的比熱差異、北半球陸地面積多於南半球、海洋環流的影響。北半球高緯度地區的溫度升高量預計是全球升溫量的2倍至4倍，這種現象被稱為北極放大現象，反射太陽輻射的海冰與

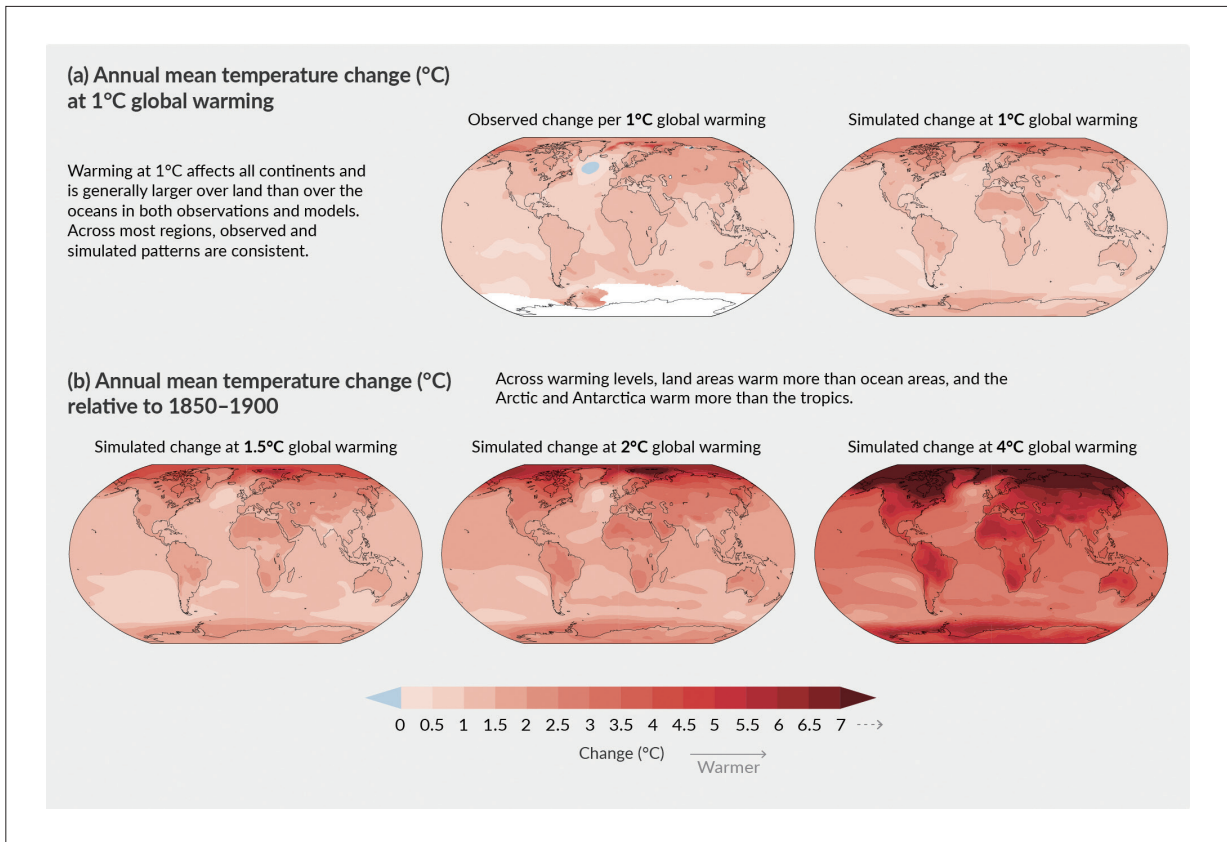


圖1.2.4 (a) 左圖顯示1850年至2020年全球平均氣溫 (Global Surface Air Temperature) 每升高1°C對應的觀測年平均地表溫度變化 (°C)，右圖則是模型模擬結果。(b) GWL 1.5°C、GWL 2°C以及GWL 4°C時，模式模擬的年平均溫度變化。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure SPM.5)

雪減少，地表吸收的太陽輻射增加。暖化程度的增加使各地極端事件變得更加嚴重，每增加0.5°C都會明顯提高高溫極端天氣的頻率和強度。

地球的氣候系統已經演變數百萬年，各種大自然留下的古氣候證據提供過去氣候變化的紀錄。過去氣候狀態的重建，顯示大氣中的CO₂濃度和全球地表溫度變化密切相關，兩者的變化曲線相當相似 (IPCC, 2021: Technical Summary)。若暖化持續加劇，根據SSP5-8.5情境模擬，到了2300年，將出現過去幾百萬年來未曾見過暖化程度，不只突破百萬年前上新世中期 (mid-Pliocene) 的地面溫度，甚至將會逼近千萬年前始新世早期 (early-Eocene) 的高溫紀錄，人類活動所造成的暖化效應將在全球各地發生，尤其是人類居住的陸地，地球將進入前所未有的高溫狀態。



1.2.3 降水量觀測

自20世紀中葉以來，人類導致的氣候變化已經驅動了全球水循環的變化，進而改變全球和區域尺度上水循環的變異。降水觀測缺乏完整的長期紀錄，每組資料時間長度也不同，尤其是1950年以前資料相當短缺，因此各資料的降水紀錄差異較大 (參見IPCC AR6, WGI, Table 2.6)，不同資料之間，早期的觀測趨勢並未顯示一致的長期變化 (摘自IPCC AR6, WGI, Figure 1.2.6)。不過仍有的部分年份資料呈現較可信的一致變化，如1950年、1970年與2000年至2019年皆有陸地降水較多的觀測紀錄，在每10年的平均也可以看到一致性的距平結果。整體而言，陸地降水量有些微增加的趨勢。不同地區有各自的區域降水趨勢特性，全球降水氣候計畫2.3版 (Global Precipitation Climatology Project, GPCP V2.3) 近40年 (1980年至2019年) 降水資料顯示，熱帶地區、非洲北部、部分歐洲與中亞、海洋大陸皆有降水增加的現象，南美洲中部、北美西部與北非、中東則呈現降水減少的趨勢。

依據數組再分析資料對1973年至2019年水氣變數的趨勢分析，全球地表平均比濕與氣柱水氣總量 (total column water vapour) 增加，對應了降水有些微增加的趨勢 (摘自IPCC AR6, WGI, Figure 2.13-2.15)。全球暖化下，高溫空氣中可容納較多的水氣量 (飽和水氣壓)，但空氣中的水氣壓增加速度小於飽和水氣壓增加的速度，相除之下，全球地表相對濕度仍為減少趨勢，尤其是2000年以後。

透過模擬探討人類活動對陸地降水量所造成的影響，無論是全球或是不同緯度帶的分析，如果僅考慮自然驅動力的模擬，降水都未出現明顯趨勢。如果加入人為活動因素影響的模擬，降水在1990年以後就有開始逐漸增加的現象，尤其以北半球高緯度地區增加幅度最為明顯。除了南半球中緯度地區以外，在其餘緯度帶，人類活動影響均造成降水增加趨勢。這些模擬證實人類活動的確對降水的長期變化造成影響 (參見IPCC AR6, WGI, Figure 3.15)。

1.2.4 降水量未來推估

模式推估在21世紀全球平均降水量將逐漸增加，全球水循環將繼續加劇。在SSP1-

2.6情境下，世紀末全球降水約增加2.9% (1.0%至5.2%)；在SSP3-7.0情境下，約增加4.7% (2.3%至8.2%)。相對於全球或海洋，陸地上的降水增加更為明顯。考量陸地降水與人類活動範圍較息息相關，全球陸地降水的增加將帶來更多的衝擊 (圖1.2.5)。本世紀末2081年至2100年 (長期) 各情境模擬的平均陸地降水均比1995年至2014年更豐沛。依各模式降水量排序的5%至95%區間，各排放情境下，全球陸地降水變化範圍如下：極低排放SSP1-1.9情境為-0.2%至4.7%，低排放SSP1-2.6為3.3% (0.0%至6.6%)，中排放SSP2-4.5為1.5%至8.3%，高排放SSP3-7.0為5.8% (0.5%至9.6%)，極高排放SSP5-8.5則為0.9%至12.9%。溫室氣體排放量越高，總累積量越高，全球陸地降水增加量越多且越迅速。

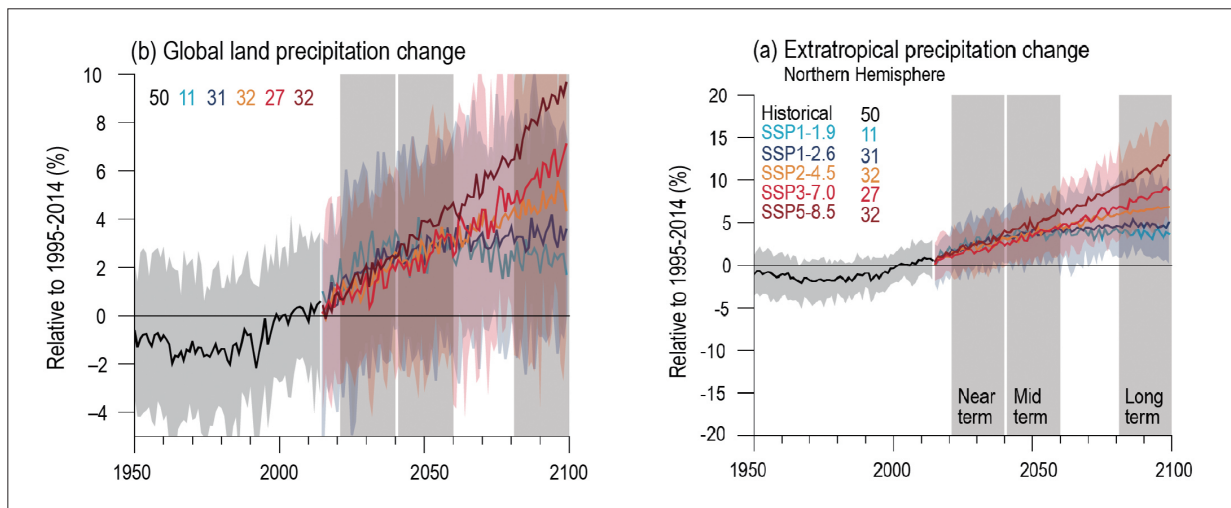


圖1.2.5 歷史與系集模式的未來各情境模擬平均降水變化率 (相較於1995年至2014年平均)。 (左圖) 全球陸地降水；(右圖) 北半球30°N至90°N中高緯度降水。陰影為SSP1-2.6與SSP3-7.0各模式結果排序5%至95%的範圍，情境標示右側數字為使用的模式數量。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 4.2b, 4.4a)

相對於21世紀末的明確降水推估變化結果，2021年至2040年間降水變化推估的不確定性較高 (圖1.2.5)，如不同SSP之間的降水變化差異不顯著，主要是由氣候內部的自然變異性、模型不確定性、自然與人為氣膠影響的不確定性所造成。亦即2021年至2040年的推估結果顯示，雖然人為溫室效應對溫度有明顯影響，但對變動較大的降水影響程度尚未明顯高於前述之自然與科學的不確定性。然而在更長久的未來，如果溫室氣體累積越多，影響就更明顯。以SSP5-8.5情境的北半球中高緯度陸地降水變化率為例，依各模式推估降水量排序5%至95%，在2041年至2060年、2041年至2060年以及2081年



至2100年，分別為0.6%至4.9%、1.5%至8.8%以及4.7%至17.2%。北半球溫帶區域的降水增加變化率比全球陸地降水更為顯著。

全球暖化下，每增加1°C，全球年平均降雨量可能增加2%至3%，但極端降雨事件頻率和強度預計會增加約7%，多數地區的暴雨事件極可能變得更加頻繁和強烈(參見1.4.2 極端降水)。模擬不同升溫幅度對各地全年降水量的影響如圖1.2.6，升溫幅度由低至高分別類似SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5的情境。GWL 1.5°C時，赤道太平洋與非洲北部年降水增加，高緯度地區、赤道太平洋和部分季風區的年降水增加，而副熱帶地區與熱帶部分地區年降水減少，尤以地中海附近與低緯度北大西洋最為明顯(圖1.2.6)。不同GWL的降水變遷特徵相似，惟暖化程度越高，變化量越大。

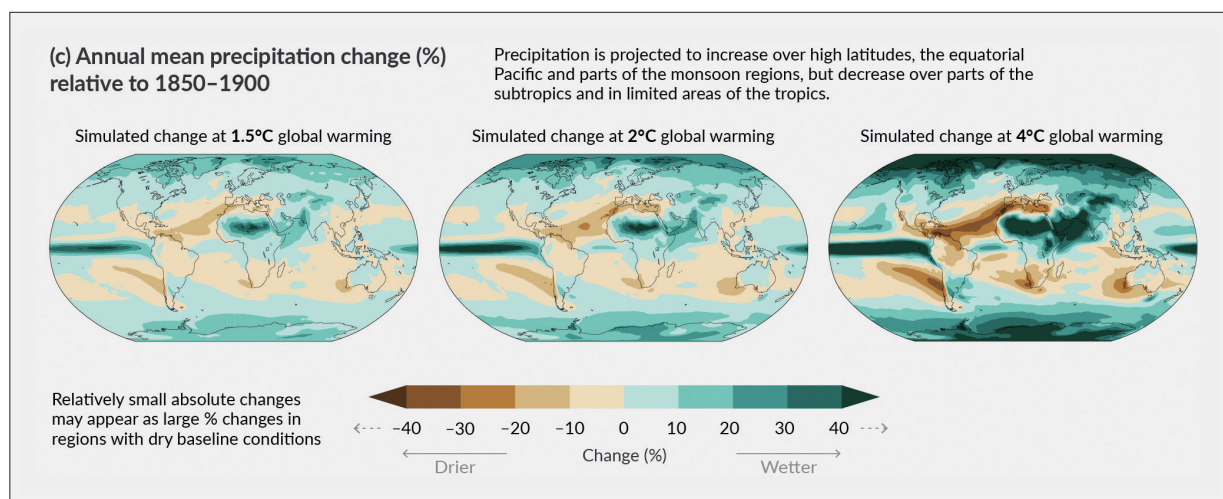


圖1.2.6 GWL 1.5°C、GWL 2°C以及GWL 4°C時，模擬的年平均降水變化率 (%)。基期皆為1850年至1900年。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure SPM.5)

1.2.5 降水與蒸發量

除了溫度與降水的改變，全球水循環與水資源運用也相當重要，1980年至2019年間降水減去蒸發量 (P-E) 的變化趨勢分布與降水相當類似(圖1.2.7)，熱帶與季風區P-E為增加趨勢，副熱帶則為減少。統計全球與陸地、海洋的P-E，多數觀測資料顯示全球P-E為正值，即降水大於蒸發量。陸地區域P-E在過去1980年至2019年為增加趨勢，且為正值(降水大於蒸發)，但75%的陸地趨勢並不顯著。在各組觀測資料中，多數觀測資料在

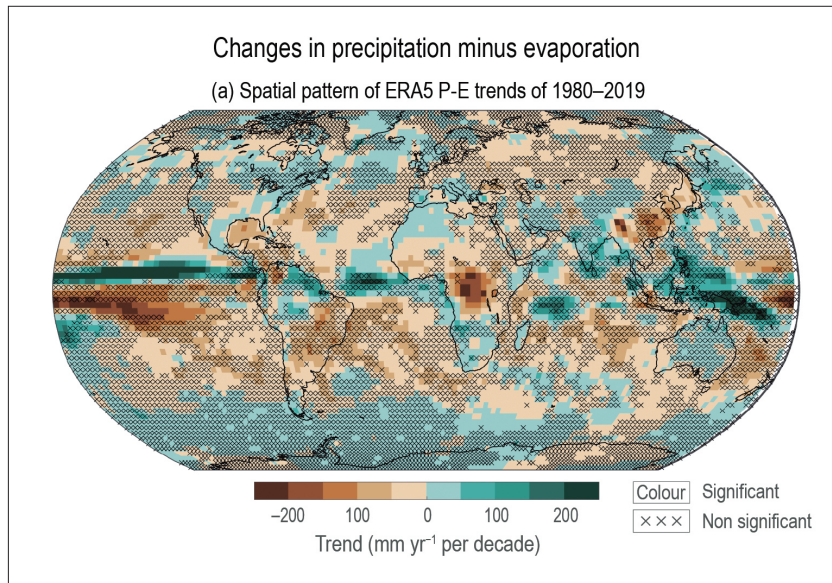


圖1.2.7 1980年至2019年降水減去蒸散量 (P-E) 趨勢。x區域表示不顯著。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 2.16)

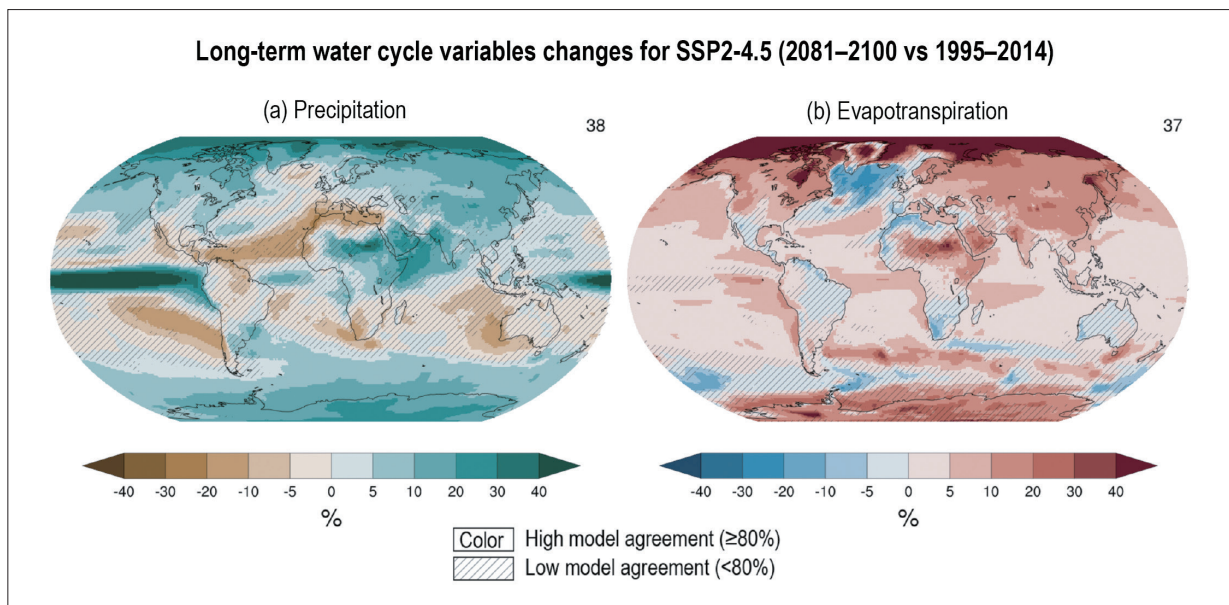


圖1.2.8 SSP2-4.5情境下，2081年至2100年降水變化率與蒸散量變化率 (%)。基期為1995年至2014年，右上數字為分析的模式數量。斜線覆蓋的區域表示呈現一致的變化訊號之模式數量少於80%。(摘自IPCC AR6, WGI, Box TS.6, Figure 1)

海洋區域P-E為減少趨勢，此趨勢主要受到蒸發量主導。但是如圖所示，大部分區域 (以x標示) 的變化未具統計顯著性。

SSP2-4.5情境下的降水與蒸散量變化如圖1.2.8。降水趨勢與圖1.2.6相似。蒸散量部



分，超過80%的模式推估一致顯示海洋蒸散量將增加，僅大西洋北部為減少趨勢；陸地蒸散量也多呈現正趨勢，其中南半球陸地各模式的結果較不一致。整體而言，高緯度增加的訊號較中低緯度強，尤其是北半球。

在暖化情況下，極端的濕潤與乾旱事件的嚴重程度將會增加，大氣環流的變化亦會影響這些極端事件發生的位置和頻率。在所有排放情境下，世界大多數地區的水循環變異性和相關極端事件將增加得更快。受乾旱影響的土地總面積將增加，且乾旱將變得更加頻繁和嚴重 (參見1.4.3 乾旱事件)。

1.3 海洋

1.3.1 海洋：海溫、海洋酸鹼度、海洋鹽度和海洋環流

地表溫度相對於1850年至1900年，全球平均上升 0.88°C ，其中有 0.6°C 的升溫是發生在1980年以後 (圖1.3.1a)。根據近年研究 (Bulgin et al., 2020)，全球海溫的增溫趨勢 (1981年至2018) 約為每10年上升 0.9°C (圖1.3.2a,b)，除了南極海域與東太平洋南半球副熱帶的部分區域以外，基本上全球海面均為增溫，尤其在北半球高緯度地區最為明顯。以過去40年來看 (圖1.3.2c至f)，大西洋洋盆以1990年至1999年增溫最為顯著，東太平洋區域於2010年至2018年增溫明顯，2000年至2009年期間則為全球海溫變化趨緩的區間。利用數十個全球模式模擬未來暖化情境的海溫變化趨勢有極高的可信度，在SSP1-2.6的情境下，1995年至2014年和2081年至2100年之間平均增加 0.86°C ，而在SSP5-8.5則會增加 2.89°C 。全球海洋熱含量自1970年持續增加 (圖1.3.3)，且在21世紀將繼續上升。由於深層海洋循環較緩慢，即使在低排放情境，至少仍將持續到2300年。

Human activities affect all the major climate system components, with some responding over decades and others over centuries

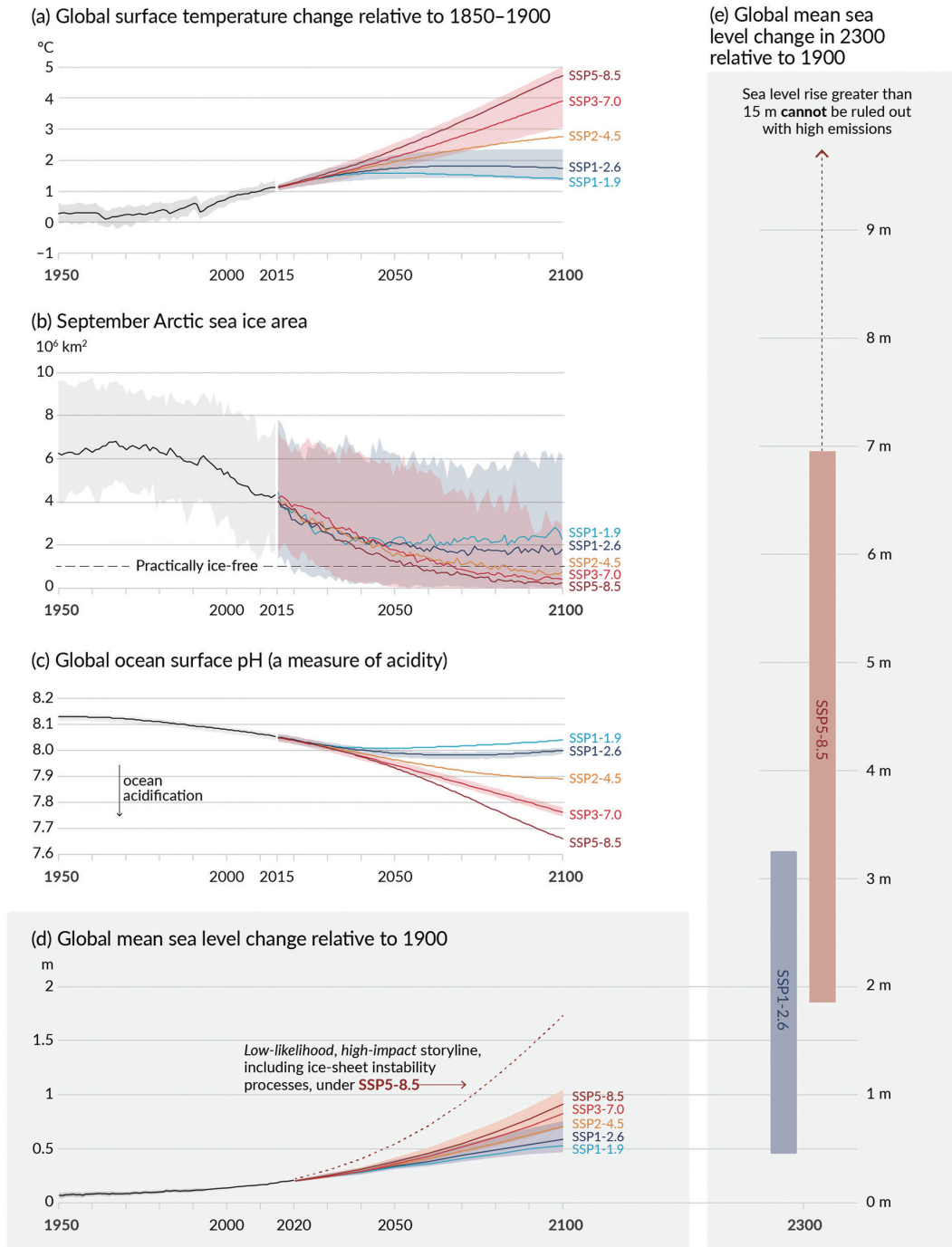


圖1.3.1 主要海洋變遷因子在過去觀測與不同人為排放溫室氣體暖化情境下之推估：(a) 全球地表溫度改變量 (基期1850年至1900年)，(b) 9月北極海冰，(c) 全球海洋酸鹼度，(d) 1950年至2100年的全球海平面高度改變量 (基期1900年)，(e) 2300年的全球海平面高度變化 (基期1900年)。(摘自IPCC AR6, 2021, Figure SPM.8)

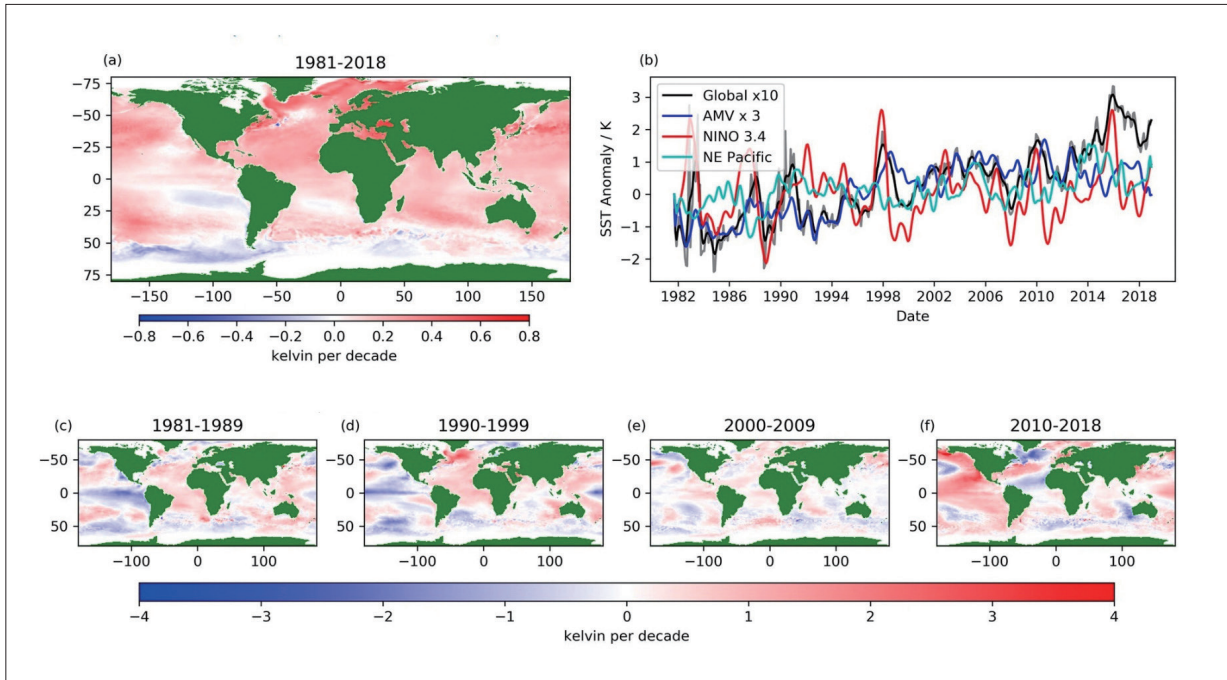


圖1.3.2 (a) 1981年至2018年全球海表溫度距平 (Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA) 趨勢 (單位： $K decade^{-1}$)。 (b) 1981年至2018年全球SSTA時間序列 (黑線)。 (c) 1981年至1989年、(d) 1990年至1999年、(e) 2000年至2009年和 (f) 2010年至2018年間的年代際趨勢。(摘自 Bulgin et al., 2020, Figure 1)

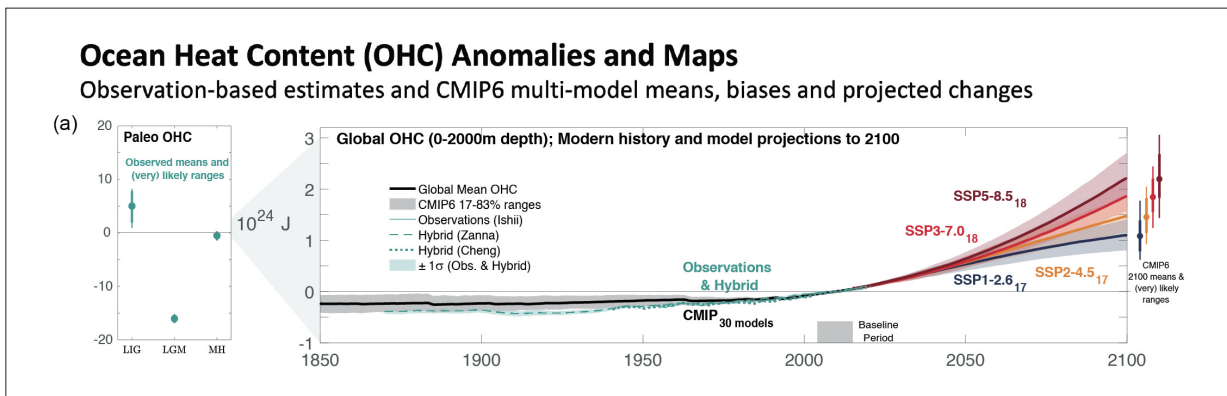


圖1.3.3 海洋熱含量在過去觀測及不同溫室氣體暖化情境下，其隨時間的變化。黑線為全球海洋上層2000公尺的海洋熱含量相對於2005年至2014年的氣候平均的異常值。(摘自 IPCC AR6, WGI, Figure 9.6)

在西北太平洋東亞地區，圖1.3.4為CMIP6中SSP5-8.5暖化情境下，28組低解析度及5組高解析度模式之海表溫度變化系集平均 (以解析度 1° 為界)。不論高低解析度模式之系集平均，海表溫度在中高緯度增溫得較為明顯，與大氣表面溫度變化的分布相似。臺灣東岸有自低緯度向北流經的黑潮，相對於全球或同緯度地區而言，溫度增加幅度較少

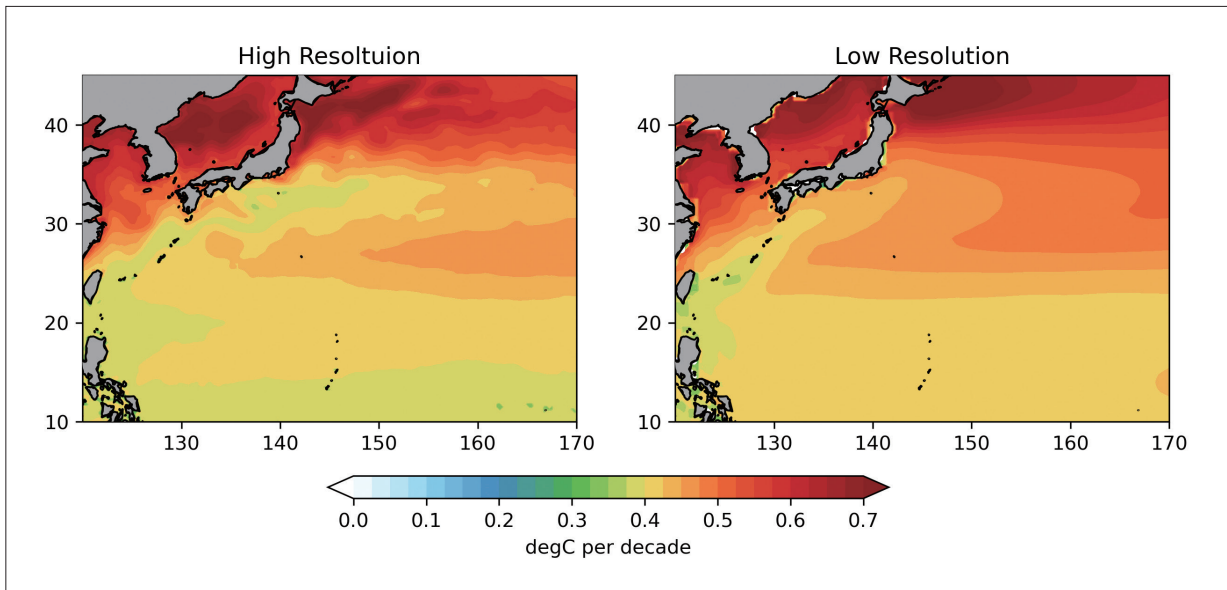


圖1.3.4 CMIP6的SSP5-8.5暖化情境下高低解析度模式系集平均之海表溫度變化趨勢 (單位： $^{\circ}\text{C decade}^{-1}$)。左、右分別為高解析度模式 (空間解析度小於100 km) 及低解析度模式 (空間解析度大於100 km)。(資料來源：本報告產製)

(每10年約增加 0.4°C)；且因為高解析度模式之黑潮較強，增溫的幅度又較低解析度來得少。臺灣海峽及東海西北側靠大陸沿岸區域則較不受黑潮的影響，越接近中國沿岸，海表溫度增加趨勢越顯著 (每100年約增加 5°C) (Sato et al., 2006; Sung et al., 2021)。

除了平均狀態的改變，另一個值得注意的是海洋極端事件的發生 (如海洋熱浪) 與海溫結構改變 (如海洋層化)：海洋熱浪是指近海表面溫度異常高且持續一段時間的現象，可能對海洋生態系統造成嚴重和持久的影響 (Smith et al., 2023; Wernberg et al., 2021)，甚至影響到社會經濟 (Smith et al., 2021)。1980年代以來，海洋熱浪發生頻率增加了大約1倍，且變得更加強烈和持久，特別是2014年至2016年東北太平洋發生了破紀錄的長期持續海洋熱浪，並從阿拉斯加灣向北美西海岸擴展，是引發2015年至2016年超強聖嬰的重要前驅訊號 (Tseng et al., 2017)。海洋層化 (圖1.3.5) 指的是由於海表面升溫，較下層高或高緯度表層海水因降雨的淡化效應 (Ke-xin & Fei, 2022; Li et al., 2020; Sallée et al., 2021; Yamaguchi & Suga, 2019)，海洋表面的海水密度降低，導致上下層海水不易交換的現象。研究指出1960年至2018年間全球海洋層化約增加了5%，平均每10年約增加0.9%。大約70%的海洋層化發生在海面下200 m內，此一現象在太平洋、大西洋與印度洋皆可觀察到。近表層海水溫度上升 (Li et al., 2020) 貢獻了90%的層化現象，鹽度上升的貢獻較小。在未來暖化情境，海水溫度將持續上升，海洋層化現象將會隨著溫室氣體累積量增加而加強。

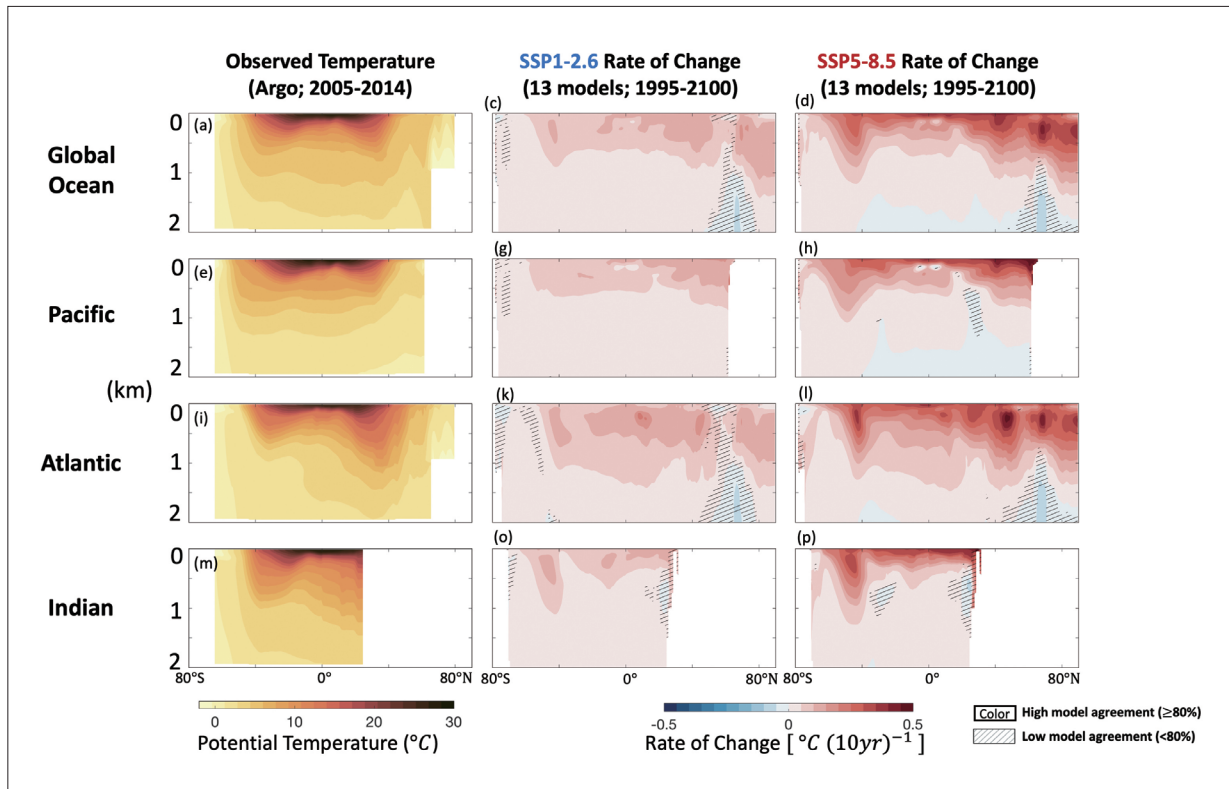


圖1.3.5 全球、太平洋、大西洋和印度洋，海表面以下2,000 m內東西向平均海水位溫的緯度-深度分布圖和其變化速率。從左到右列分別為觀測值 (2005年至2014年， $^{\circ}\text{C}$)，暖化情境SSP1-2.6與SSP5-8.5的變化速率 (1995年至2100年， $^{\circ}\text{C decade}^{-1}$)。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 9.7)

海洋酸化與海水中的pH值及碳酸鈣溶解度直接相關，過去全球海洋的平均pH值大致維持8至8.2左右 (Garcia-Soto et al., 2021)，觀測上可以看到全球海洋pH值從1950年起便逐漸降低，隨暖化情境加劇更是逐漸遞減 (圖1.3.1c)，可見在暖化下海洋逐漸酸化的趨勢相當明確。海水pH值與碳酸鈣的溶解度有直接相關，由於pH值變化會影響碳酸鹽類在海水中的酸鹼平衡，如pH值降低 (變酸)，碳酸鈣溶解度會提高。儘管部分生物面對pH值的變化並不敏感，但研究顯示，以碳酸鈣為外骨骼的生物，例如：造礁珊瑚 (Mollica et al., 2018)、翼足類 (Bednaršek et al., 2021; Mekkes et al., 2021)、鈣板藻等，在逐漸酸化的環境下會降低鈣化作用的效率，導致碳酸鈣的外骨骼或外殼破損。此外，酸化影響原來海水對於二氧化碳吸收的程度，儲存於海水中的溶解態無機碳 (Dissolved Inorganic Carbon, DIC；大部分為碳酸鹽離子) 在新的酸鹼平衡下，若因溶解度改變而從離子態轉為二氧化碳形式，釋放到水中後再擴散至大氣中，反而可能使得海洋這個最大的碳匯轉換為碳源。

觀測顯示全球海洋pH值從1950年起便逐漸降低，自1980年代以來，全球海洋表層pH值每10年下降約0.016至0.02 (Lauvset et al., 2015; Hurd et al., 2018; Gehlen et al.,

2020)。雖然由於時間與空間上的觀測數量不足，這項數據可信度較低，仍有研究認為在過去的20年中，全球表層海洋pH值變化趨勢已經強過自然變異 (Lauvset et al., 2015; Bindoff et al., 2019; Gehlen et al., 2020)。全球次表層 (1,000 m以上) 的pH值在過去20年到30年中也持續下降 (Lauvset et al., 2020)；在海洋深層 (2,000 m以下) 過去也觀察到局部海洋盆地pH值下降，如高緯度北大西洋與南冰洋。模擬推估顯示，在各種暖化情境下，pH值都將逐漸遞減，海洋酸化趨勢相當明確 (圖1.3.1c)。

海洋鹽度主要受到降水與蒸發影響，同時也因為淡水流入、洋流、海溫與海冰等複雜因子而變化，空間分布相當不平均。在1950年至2019年間，南大洋、熱帶太平洋地區、北太平洋北部與東印度洋地區的海表鹽度減少，大西洋、南太平洋與西印度洋鹽度則增加 (IPCC AR6, WGI, Ch2)。由於不同海域鹽度受到不同因子的影響，暖化情境下的鹽度變遷推估也較為困難。在全球暖化影響下，地中海降雨以及周遭河流注入淡水量減少，造成該海水鹽度增加 (Adloff et al., 2015; Parras-Berrocal et al., 2020; Soto-Navarro et al., 2020; Theodoropoulos & Karaouzas, 2021; Delworth et al., 2022)，進一步改變了地中海流出水 (Mediterranean Outflow Water, MOW) 甚至大西洋深海的鹽度特徵。由於地中海深受氣候變遷影響明顯 (Adloff et al., 2015; Parras-Berrocal et al., 2020; Soto-Navarro et al., 2020)，且可經由窄長的直布羅陀海峽 (寬10多公里，水深約300 m) 流出高鹽度海水而影響大西洋，因此地中海被視為對氣候變化反應最靈敏的熱區 (“Hot spot” ; Giorgi, 2006)。依據推估，在SSP5-8.5 (於2100年多了 8.5 W m^{-2} 的大氣輻射) 情境下，2040年至2100年間地中海平均降雨量可減少20%至40% (Delworth et al., 2022)，並且河水流入量減少15%至30% (Sante et al., 2021)。在這大環境變遷下，地中海經由直布羅陀海峽流入大西洋的海水鹽度勢必增加，影響大西洋經向翻轉環流 (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC; Rahmstorf, 1998; Ivanovic et al., 2014; Swingedouw et al., 2019; Aldama-Campino & DÖÖs, 2020)。Ivanovic et al. (2014) 表示若地中海鹽度增加2倍，直布羅陀海峽緯度 (約北緯 35°) 以北的AMOC將減弱，有趣的是，在該緯度以南的AMOC將增強，形成複雜的溫鹽環流重組的情況，證實面積不到大西洋1/40的地中海，在AMOC和全球尺度氣候變遷中扮演重要角色，不過實際的變動機制仍需科學家進一步探討。

觀測證據顯示，AMOC在20世紀末期到21世紀初期有減弱的趨勢 (圖1.3.6)，不過此一減弱趨勢是自然變異或是受人為排放溫室氣體影響尚未有定論 (Bryden et al., 2005;



Caesar et al., 2018; Fu et al., 2020; Latif et al., 2006; Latif et al., 2022; Rahmstorf et al., 2015)，如最近觀測發現AMOC自2010年又開始增強 (Moat et al., 2020)。

Desbruyères et al. (2019) 發現表面海水密度變化可能是AMOC變異性的主要驅動因子，而表面密度變化主要受表面熱通量變化主導，最近10年AMOC的增加，可能與近10年大氣變化造成的北大西洋極端低溫事件有關 (Josey et al., 2018)，因為北大西洋高緯度地區冷卻的影響，隨著海洋表面的冷卻，密度增加而強化海水下沉，加強AMOC (Tseng et al., 2022)。模式模擬結果也顯示目前AMOC 的變化趨勢仍在工業革命前的模擬變異範圍內 (Tsusijo et al., 2020)。但討論到未來暖化情境時，即使模式模擬分歧較大，所有SSP情境下的AMOC在21世紀末皆會減弱，但不會完全停止 (圖1.3.6)。

在西北太平洋海域裡最活躍的環流系統是流經臺灣東岸的黑潮，其具有高動能和熱能輸送的特性，在區域大氣與海洋的氣候調節扮演重要角色，黑潮流速與流軸的變化也會同時引起臺灣周遭海域的海溫與海面高度等變異。研究指出，黑潮水入侵東海以及南海的變化，對臺灣周遭海域溫度與海平面變化有同等重要的影響 (Kuo & Tseng, 2021; Wang & Wu, 2022; Wang & Oey, 2014)。

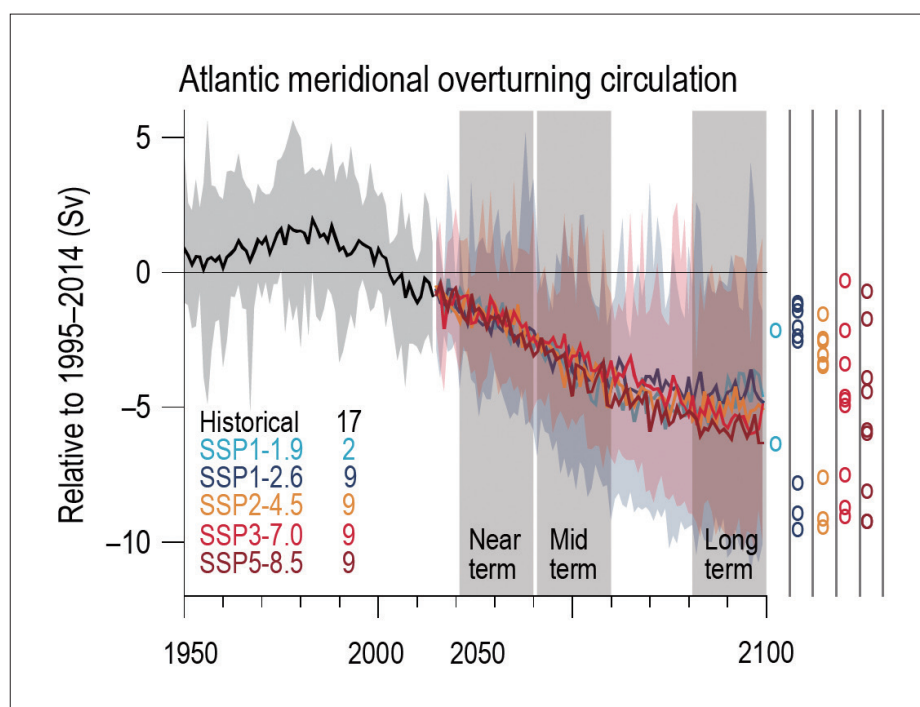


圖1.3.6 大西洋經向翻轉洋流的模擬強度變化在歷史與暖化情境之模擬。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 4.6)

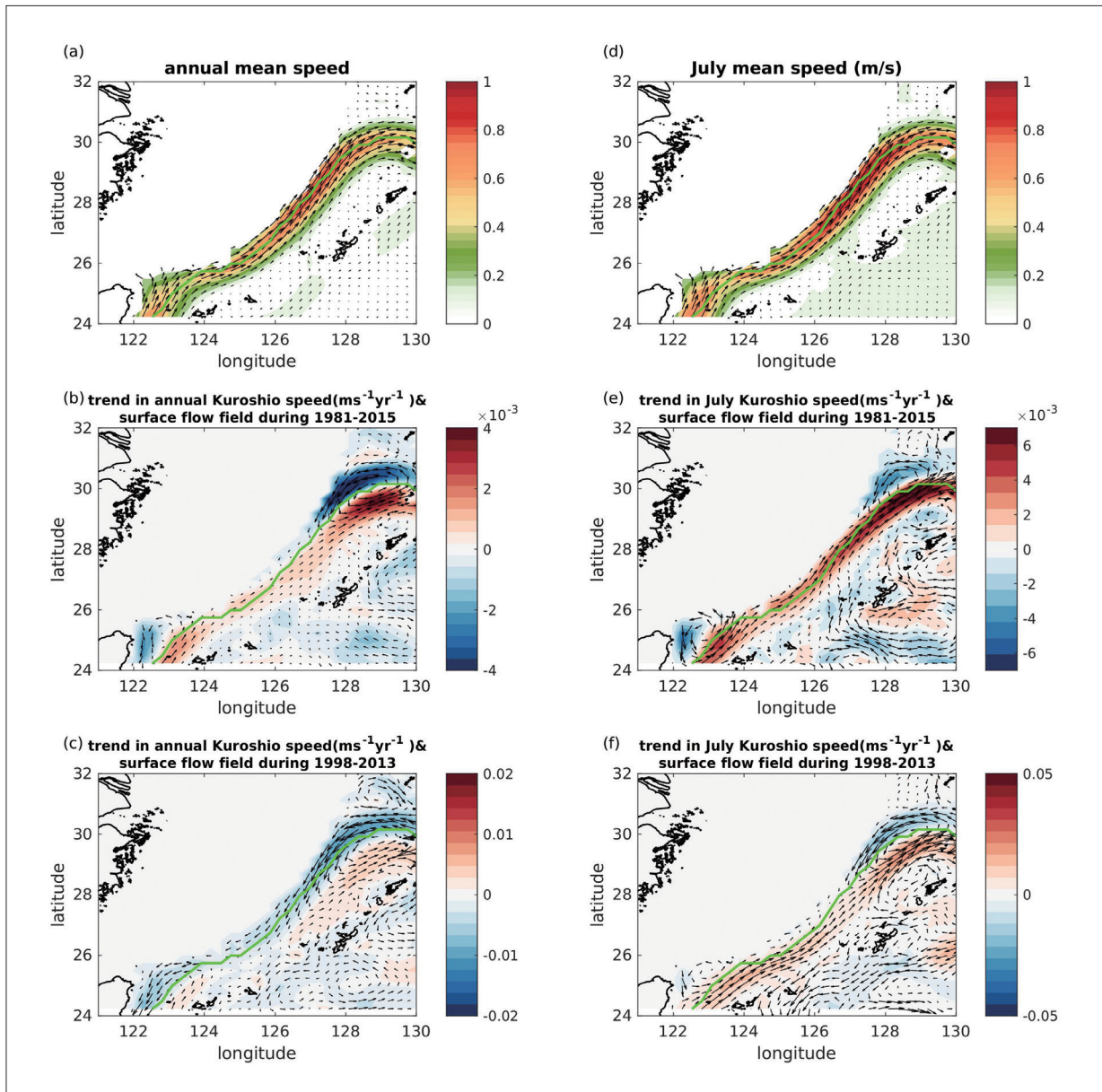


圖1.3.7 黑潮流速的 (a) 氣候平均；(b) 1981年至2015年變化趨勢；(c) 1998年至2013年變化趨勢。(d至f) 為夏季的結果。(摘自Kuo et al., 2023, Figure 7)

黑潮的變化主要受到大尺度風應力旋度以及上層海洋熱變化的影響 (Cheon et al., 2012; Sakamoto et al., 2005; Tseng et al., 2016)，從1955年至2010年期間的水文資料，可以發現東海海域的黑潮似乎有加速現象，在暖化停滯 (Warming Hiatus) 期間，黑潮則呈現減弱趨勢 (Liu et al., 2021)。圖1.3.7 a至c為Kuo et al. (2023) 使用區域海洋模式模擬1981年至2015年介於臺灣與日本間黑潮的變遷，此時間區段的黑潮在0 m至200 m的年平均流速約為0.06 m s⁻¹至1 m s⁻¹，顯示些微偏強但並不明顯的趨勢 (每年約0.001 m s⁻¹) 且有離岸偏移的現象，然而在暖化停滯期間卻有減弱的趨勢，黑潮流速減弱將導致其入



侵黑潮水通量的增加 (Guo et al., 2006; Wei et al., 2016; Liu et al., 2021)。此外，黑潮於暖化較強期間流速增強的趨勢在夏季較顯著，即使在暖化停滯期間的夏季仍維持較弱的增強趨勢 (圖1.3.7d至f)。

1.3.2 冰雪圈：海冰、陸冰、冰川、永凍土、冰雪

海冰的消失以北極海最為顯著 (圖1.3.8a)，尤其是在9月海冰開始形成的時節最明顯。相對的，南極的海冰消失較不顯著 (圖1.3.8b)，2015年之前甚至有增加的趨勢，然而這幾年的觀測 (最新紀錄詳見網站資訊<https://nsidc.org/arcticseaicenews/2023/02/antarctic-sea-ice-minimum-settles-on-record-low-extent-again>) 顯示南極海冰正快速減少。在所有SSP情境的推估，南北極海冰皆呈現顯著減少。在SSP5-8.5的最高排放情境下，北極海9月海冰在2050年左右可能完全消失，唯有在低排放情境SSP1-2.6與SSP1-1.9，世紀末北極海冰才不會完全消失 (圖1.3.1b)。

全球最重要的兩個陸冰冰層 (ice sheet) 地區為格陵蘭島與南極大陸 (圖1.3.8c)。格陵蘭冰層質量在1992年至2020年減少了4,890 Gt，相當於全球平均海平面上升13.5 mm (Box et al., 2022)：在1992年至1999年期間平均每年減少39 Gt，在2000年至2009年期間平均每年減少175 Gt，在2010年至2019年期間平均每年減少243 Gt。南極冰層質量在1992年至2020年減少了2,670 Gt，相當於全球海平面上升7.4 mm：在1992年至1999年期間平均每年減少49 Gt，在2000年至2009年期間平均每年減少70 Gt，在2010年至2019年期間平均每年減少148 Gt。兩個主要冰層質量的減少皆有加速的趨勢。在所有的SSP情境，格陵蘭冰層和南極冰層將在本世紀持續融化。暖化情境下的世紀末2100年，在SSP1-2.6情境，格陵蘭冰層對全球平均海平面上升的相關貢獻可能為0.01 m至0.10 m，在SSP2-4.5為0.04 m至0.13 m，在SSP5-8.5則為0.09 m至0.18 m。南極冰層融化在SSP1-2.6情境對全球平均海平面上升貢獻0.03 m至0.27 m，而在SSP2-4.5與SSP5-8.5情境下，則分別為0.03 m至0.29 m與 0.03 m至0.34 m。

在過去觀測紀錄裡，冰川、北半球春雪與永凍土等冰雪圈重要現象皆在逐漸減少中。冰川的質量在1993年至2019年減少了6,200 Gt，相當於全球平均海平面上升17.1 mm，在所有SSP情境下將繼續消失。自有觀測紀錄開始，冰川消失的質量在2010年

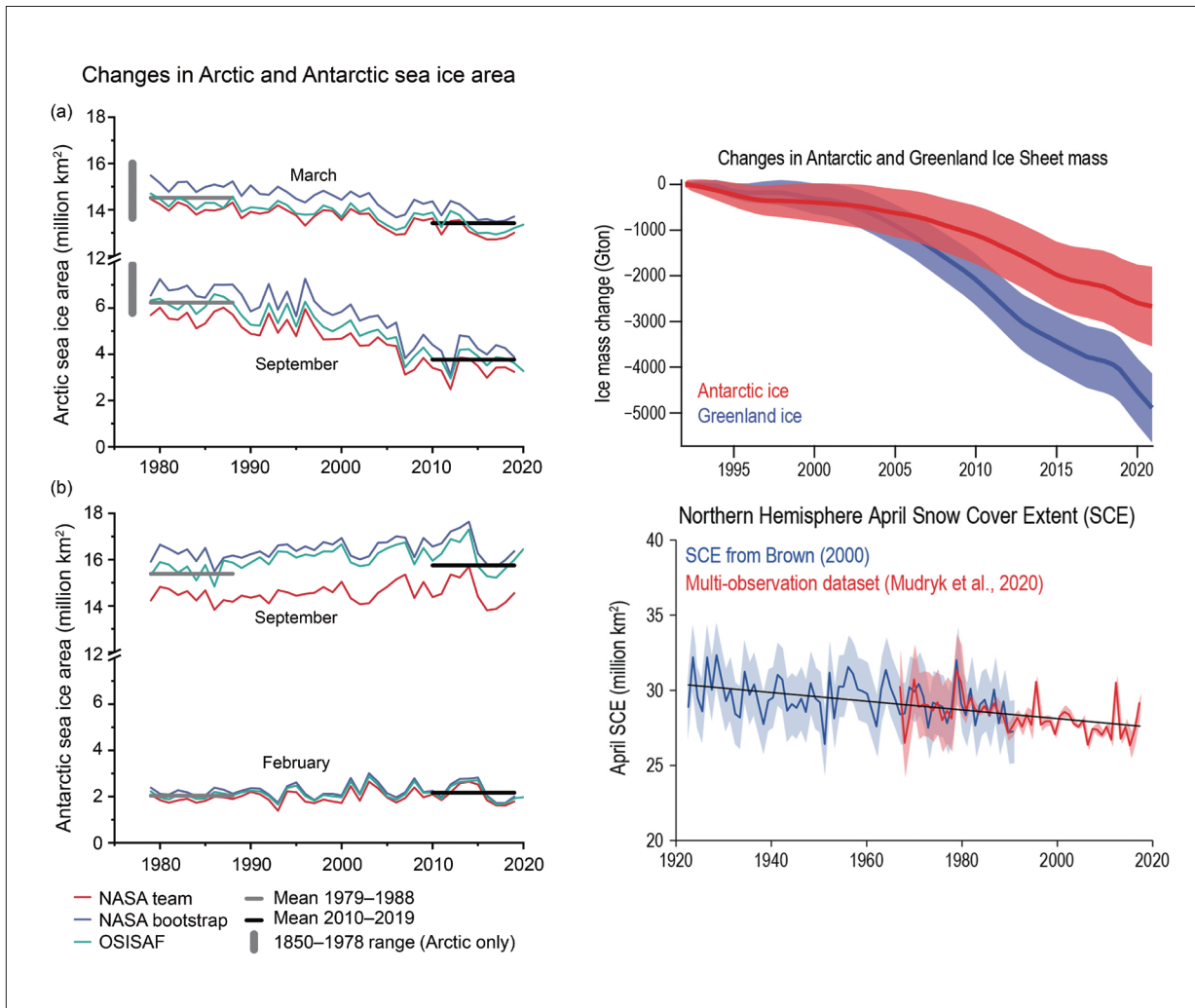


圖1.3.8 (a) 北極與 (b) 南極海冰之季節觀測值。(c) 南極與格陵蘭島的陸冰冰層總質量之歷史觀測值。(d) 北半球春天積雪延伸範圍之歷史觀測值。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 2.20, 2.24, 2.22)

至2019年比過往任何十年都要多。且自1978年以來，北半球春季的雪覆蓋面積一直在減少 (圖1.3.8d)，早在1950年代就已經開始了這種趨勢。在全球暖化的情況下，北半球季節性積雪覆蓋面積的進一步減少幾乎是確定的。值得注意的是，北半球有些地區過去幾十年雪覆蓋面積有增加的趨勢，例如北美、西伯利亞等地區 (Pulliainen et al., 2020)。未來推估全球平均氣溫每上升1°C，北半球春季積雪範圍減少約8% (摘自IPCC AR6, WGI)。關於永凍土的紀錄，在過去30年至40年中，也觀測到整個永久凍土區域的永凍土溫度增高。模擬推估皆指出，若全球持續變暖將導致近地表的永凍土體積減少。未來推估全球平均氣溫每上升1°C，地表3公尺內永凍土體積減少約25% (摘自IPCC AR6, WGI)。



1.3.3 海平面高度

從過去地質同位素資料分析與近代儀器觀測，可以看到全球海平面高度在過去80萬年呈現振盪起伏 (圖1.3.9a)，然而自19世紀中葉以來，全球平均海平面上升速率高於前2,000年的平均速率 (圖1.3.9b)，過去100年間 (圖1.3.9c) 各類觀測資料一致顯示海平面上

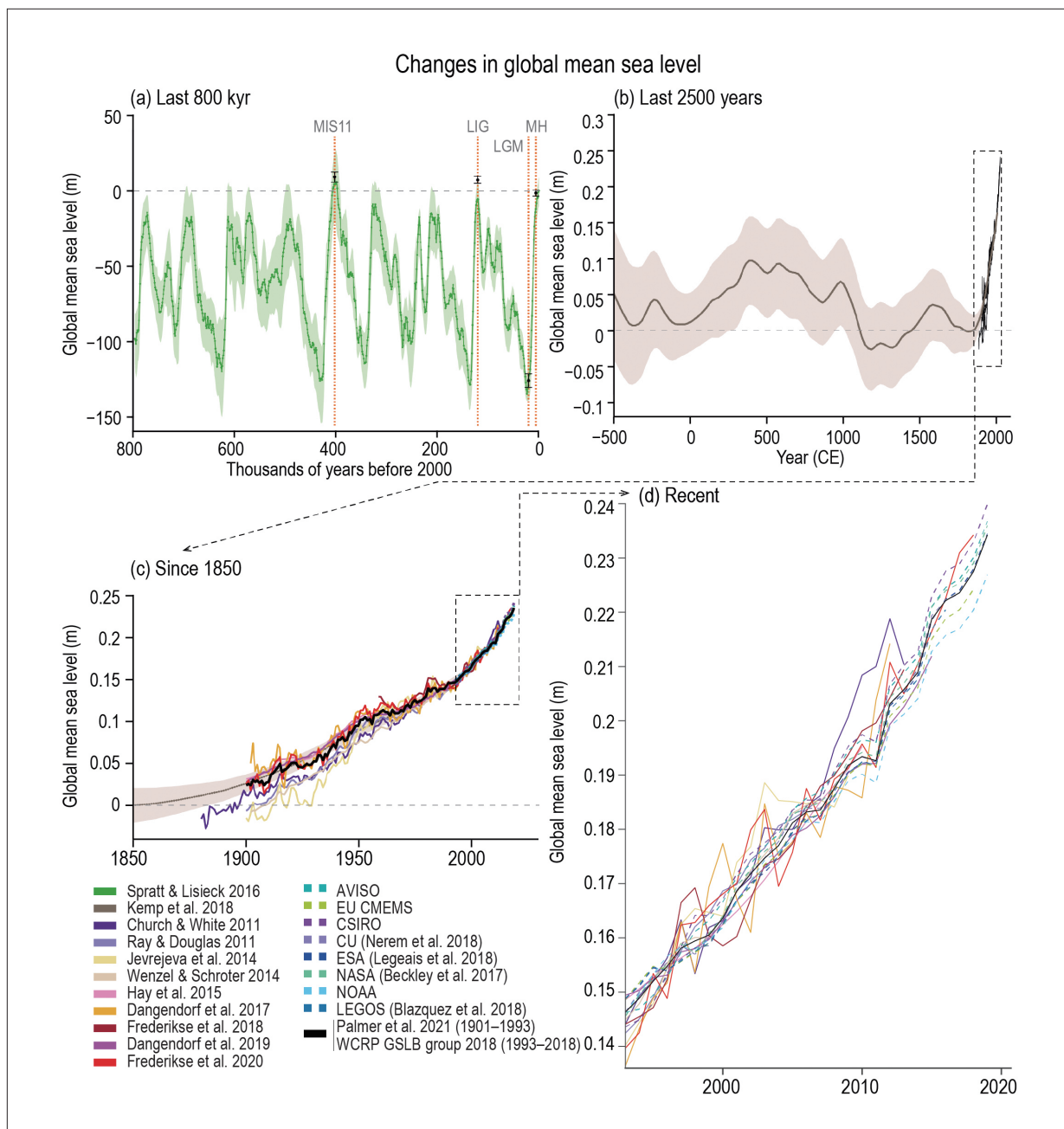


圖1.3.9 全球平均海平面之歷史變遷。(a)過去80萬年冰芯氧同位素分析重建的海平面。(b)過去2500年根據各種代理數據以及儀器測量的重建。(c)自1850年以來的潮位站和後來的衛星高度計估計值。(d)根據近年來潮位站以及測高儀的資料。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 2.28)

升速度明顯加快，比過去 3 千年中的任何一個世紀都上升得更快，且在最近 20 多年速率更是明顯加快 (圖 1.3.9 d)。分段來看，自 20 世紀 60 年代末以來，全球平均海平面上升加速，1971 年至 2018 年期間的平均速率為每年 2.3 mm，增加到 2006 年至 2018 年期間的每年 3.7 mm。在暖化的預測之下 (圖 1.3.1d)，海平面高度的上升隨著暖化情境而加劇。到 2100 年，海平面高度將上升 0.38 m (SSP1-1.9) 至 0.77 m (SSP5-8.5)。

海平面上升一般可分為幾個因素：冰川和陸冰融化、海水熱膨脹、陸地水量與地殼垂直運動等因素造成。由於沒有單一模式可以直接計算海平面變化的所有貢獻，因此不同因素貢獻到海平面的變化是分開計算，然後再加總。將不同的貢獻因子區分開來，並且比較過去觀測紀錄與模式模擬，可發現在人為暖化影響下，海水熱膨脹是海平面上升的主因。在未來暖化情境下，海水的熱膨脹仍是海平面上升最主要因素。2100 年之後，因深海繼續吸收熱量、格陵蘭和南極洲冰原持續融化，全球平均海平面將繼續上升數個世紀，並在未來數百年內保持高值 (圖 1.3.1e)。

21 世紀末，全球海平面上升在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 及 SSP5-8.5 暖化情境下，將分別上升約 0.47 m、0.56 m 及 0.76 m，四分位距分別約為 0.15 m、0.2 m 及 0.25 m，其中海洋增溫的熱膨脹效應佔約 3 成至 4 成，其他為極區冰川融化及河川逕流流入 (Hermans et al., 2021)。海平面高度上升量與海表溫度增加量為正相關但非線性關係，溫度增加越多時，海平面高度上升量更多 (Hermans et al., 2021)。由海平面高度上升的水平分布 (圖 1.3.10) 可知，在 21 世紀末時，臺灣周遭平均海平面上升相

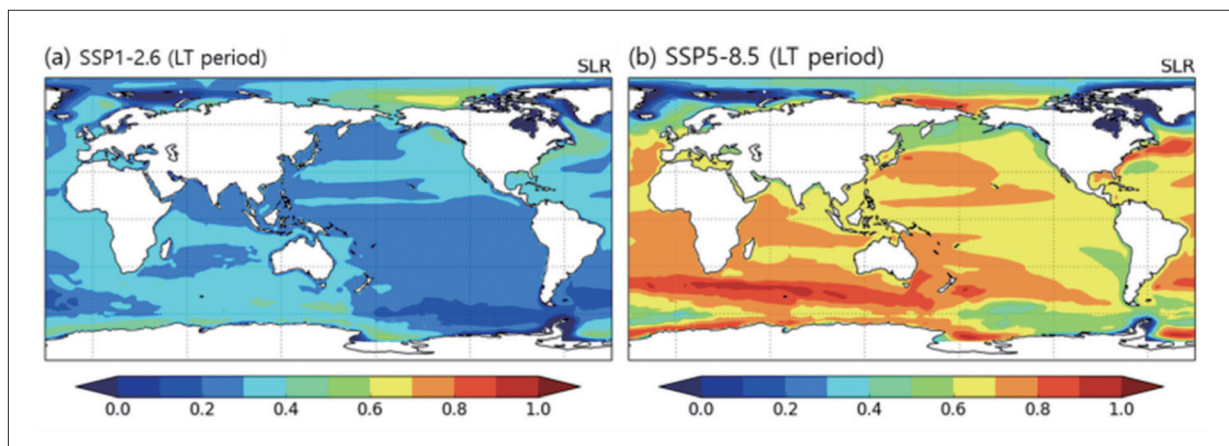


圖 1.3.10 CMIP6 的 (a) SSP1-2.6 與 (b) SSP5-8.5 暖化情境下模擬全球海平面高度上升分布 (2081 年至 2100 年平均與基期 1995 年至 2014 年平均之差異)。(摘自 Sung et al., 2021)



對於全球而言較高 (約0.6 m至0.7 m)，且臺灣東岸的變化較大 (Sung et al., 2021)，此空間上的分布可能與海水熱膨脹效應或受大氣風場驅動之海洋環流改變有關 (Yamanaka et al., 2021)。

Yamanaka et al. (2021) 利用第五期耦合模式比對計畫 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5) 中幾個解析度較粗的模式暖化結果當作高解析度海洋模式的邊界條件，降尺度驅動海洋 $1/10^\circ$ (約10 km) 空間解析度之海洋模式，模擬發現臺灣東西側海表溫度增加幅度不同 (圖1.3.11)，在代表濃度途徑 RCP8.5 (RCP2.6) 的情境下，東側約為 2.5°C (0.7°C)，西側約為 3°C (1°C)。降尺度海洋模式模擬的水平分布變化，與解析度較粗的全球模式結果類似，但整體而言增溫幅度較弱。海平面高度上升程度同樣在東西側有不同的變化幅度 (圖1.3.12)，在RCP8.5 (RCP2.6) 的情境下，東側約為70公分 (42公分)，西側約為64公分 (40公分)，其水平分布變化與幅度也與全球模式結果相似。然而，此篇研究較著重在日本附近海域的分析，圖1.3.11與圖1.3.12只呈現西北太平洋較大範圍的結果，臺灣周遭海域仍缺乏更細緻的分析成果。

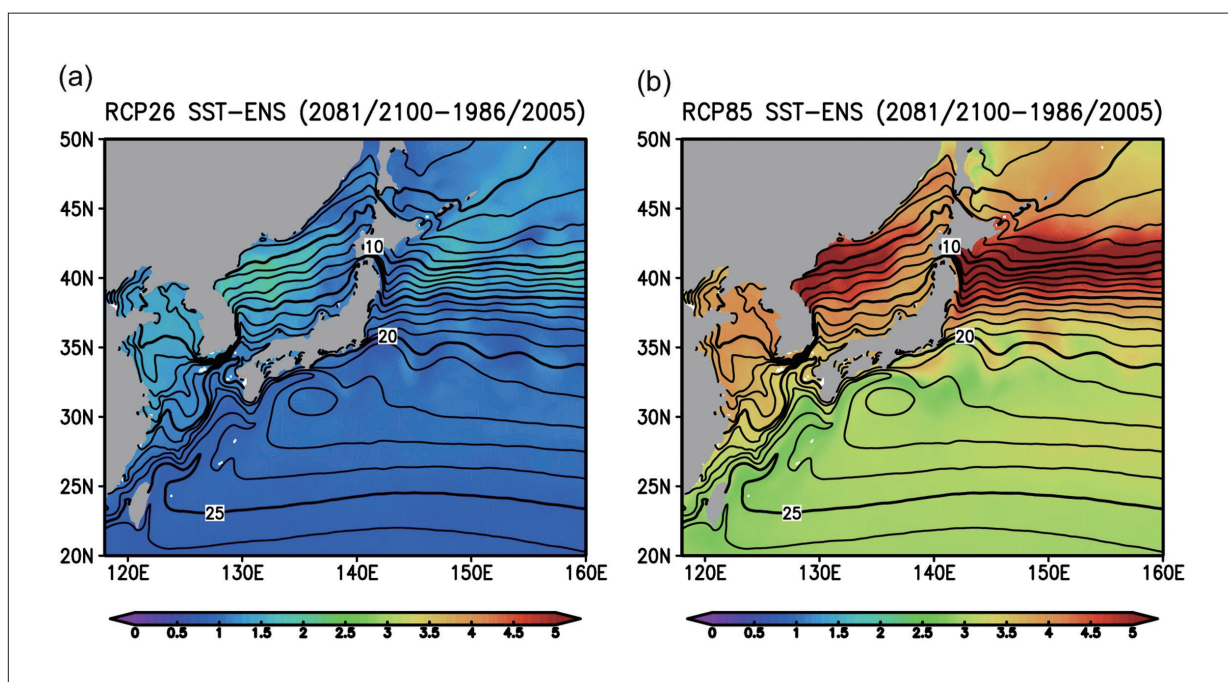


圖1.3.11 CMIP5 (a) RCP2.6與 (b) RCP8.5暖化情境下區域降尺度海洋模擬的海表溫度上升分布 (2081年至2100年平均與1986年至2005年歷史模擬平均之差異)。(摘自Yamanaka et al., 2020)

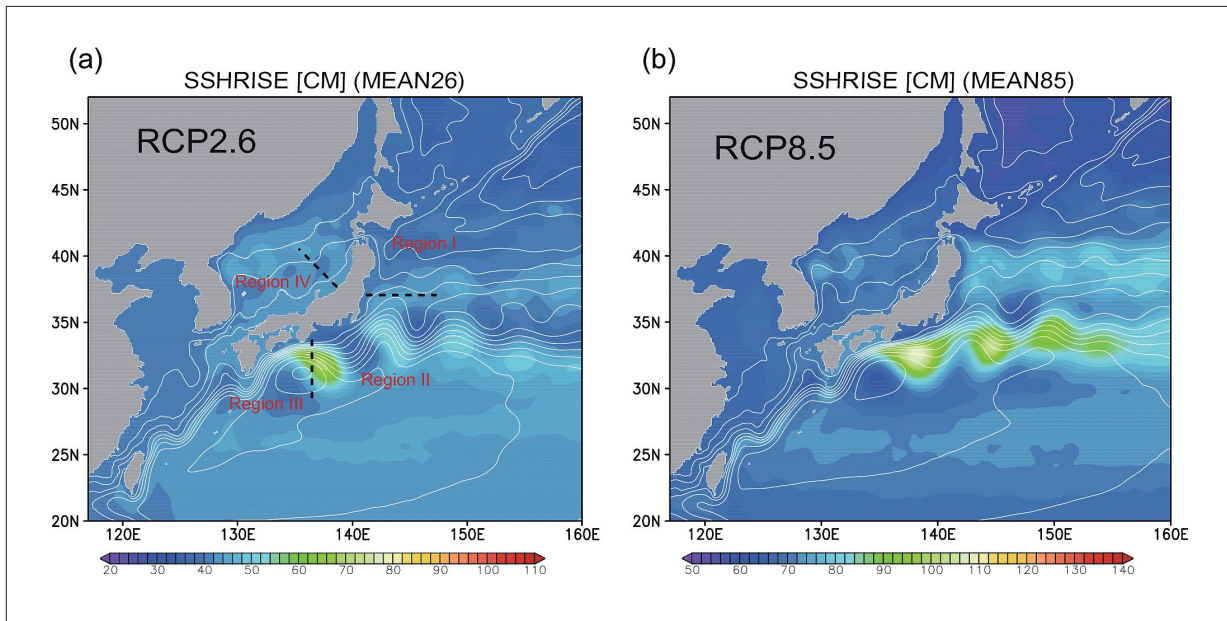


圖1.3.12 CMIP5 (a) RCP2.6與 (b) RCP8.5暖化情境下區域降尺度海洋模擬的海平面高度上升分布 (2081年至2100年平均與1986年至2005年歷史模擬平均之差異)。(摘自Yamanaka et al., 2020)

1.4 極端天氣與氣候

本節評估了極端氣候的過去觀測變化，主要針對極端溫度事件與極端降雨事件，以及未來在GWL 1.5°C、2°C和4°C的推估。極端降雨相關的部分，將統整關於極端降雨、乾旱、風暴導致的極端降雨，以及在AR6越來越重視的複合事件。

1.4.1 極端溫度事件

全球溫度近年的變化趨勢

從IPCC「促進氣候變遷調適之風險管理—針對極端事件及災害」特別報告 (IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, SREX) (IPCC, 2012) 和AR5 (IPCC, 2014) 到現在的AR6報告以來，已經使用許多基於每日溫度的指標來檢驗全球暖化的趨勢 (例如，The Commission for Climatology/World Climate Research Program/Commission



for Oceanography and Marine Meteorology joint Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI, 氣候變遷偵測與指標專家小組；Dunn et al., 2020)。大多數研究結果都表明，全球大多數地區的觀測紀錄都呈現明顯的暖化信號。自AR5 (IPCC, 2014) 報告以來，已經提出暖化趨勢不斷增強、極端高溫強度和發生頻率增加，同時，相對應的極端低溫強度和發生頻率則減弱的觀點，並在AR6中進一步確認了這一結果。儘管區域、空間和時間上的極端溫度增強趨勢可能有所不同，但全球暖化效應的證據是鐵證如山，無法被撼動 (IPCC AR6, WGI, Section 11.3.2)。

全球暖化的趨勢可以從幾個溫度指標進行分析(參見文字框5)，暖晝天數 (Frequency of warm days, TX90p)、暖夜天數 (Frequency of warm nights, TN90p)、冷晝天數 (Frequency of cold days, TX10p)、冷夜天數 (Frequency of cold nights, TN10p)、日最低溫極小值 (Annual Coldest daily minimum temperature, TNn) 和日最高溫極大值 (Annual hottest daily maximum temperature, TXx)。根據IPCC AR6的報告，全球暖晝天數和暖夜天數指標增加，而冷晝天數和冷夜天數指標減少。由全球陸地平均TXx和TNn距平 (基期為1961年至1990年) 時間序列顯示 (IPCC AR6, WGI, Figure 11.2)，TXx與全球陸地平均溫度變化一致，皆為隨時間增長變強，並且兩者增溫趨勢皆比全球平均溫度的增溫趨勢強45% (IPCC AR6, WGI, Section 2.3.1)。陸地變暖意味著TNn會上升得更為劇烈，自1960年以來，至今TNn已經上升約3°C左右 (IPCC AR6, WGI, Figure 11.2)。從不同的觀測數據中分析發現，本世紀以來全球平均溫度和大多數陸地地區極端氣溫有一致性增暖趨勢 (Fischer & Knutti, 2014; Donat et al., 2016a; Dunn et al., 2020)，而TNn和TXx指標也都有一致上升的結果，但是TNn增暖趨勢大於TXx指標 (Dunn et al., 2020; IPCC AR6, WGI, Figure 11.2)。

全球增暖趨勢會因區域不同而有不同的結果，在TXx、TNn指標的空間上顯示，大多數的地區趨勢一致變暖，歐洲、南美洲西北部地區TXx增暖得最為強烈，而TNn指標顯示在北極有很強烈的增暖訊號 (圖1.4.1)。另外，每年暖晝天數指標的增加趨勢與全球陸地平均溫度、TXx和TNn一致，在大多數地區都有增強的趨勢 (圖1.4.1c)，而每年冷夜天數指標則從1950年代開始發生頻率逐漸減少，幾乎所有陸地區域都有顯著性的減少 (Alexander et al., 2016; Dunn et al., 2020)。

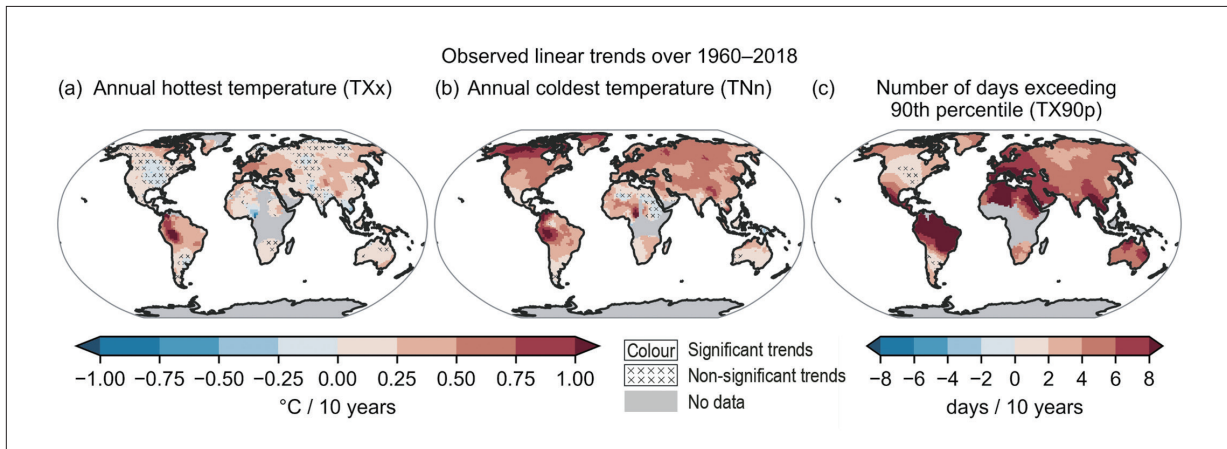


圖1.4.1 1960-2018年極端溫度指標之線性趨勢。(a) 日最高溫極大值 (TXx)、(b) 日最低溫極小值 (TNn) 距平、(c) 暖晝 (TX90p) 指標1960年至2018年線性趨勢之空間分布。TX90p的門檻值是選取1961年至1990時段的90百分位。沒有被標註灰色叉記號之區域，代表趨勢達到90%以上顯著之信心門檻。每格網格點需在1960年至2018年間至少有約39年 (66%) 以上的資料，並且資料年分至少能延伸至2009年，才會被計算線性趨勢。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 11.9)

東亞地區溫度變化趨勢

正如之前IPCC報告中的評估，東亞區域近年來面臨嚴重的極端高溫議題 (IPCC AR6, WGI, Section 12.4.2)，從歷史觀測資料結果顯示，極端高溫發生的頻率和強度顯著增加，極端低溫的頻率和強度顯著減少 (Donat et al., 2013b; Wang, H. et al., 2013; Lu et al., 2016; Zhou et al., 2016; Lin et al., 2017; Yin et al., 2017)。證據也顯示極端高溫 (低溫) 發生的頻率和強度的顯著增加 (減少)，對人類活動有一定程度的影響 (IPCC AR6, WG1, Table 11.7; Imada et al., 2014, 2019; Lu et al., 2016, 2018; Takahashi et al., 2016; Zhou et al., 2016; Wang et al., 2017a; Ye & Li, 2017; Kim et al., 2018; Seong et al., 2021)。

全球極端溫度未來的變化推估

根據IPCC全球升溫1.5°C特別報告 (Chapter 3, Hoegh-Guldberg et al., 2018; SR15)，GWL 1.5°C和GWL 2°C對極端溫度的預測評估與AR5的評估一致，且在未來暖化氣候下，全球大多數地區與陸地地區的極端高溫將更加頻繁，熱浪發生頻率和持續時間很可能增加，而極端低溫則將更少見，是幾乎可以確定的 (Chapter12, Collins et al., 2013)。GWL 2°C情境相比GWL 1.5°C情境，會造成全球多數陸地地區有更頻繁、更強和更長持續時間的高溫極端事件，並影響許多人口稠密地區。SR15報告中指出，最極端的高溫事件頻率「非常可能」(very likely) 增加，而極端低溫事件頻率和強度將減少，寒潮的持續時間也將縮短。



文字框 3 | 信心度與不確定性

AR6中的不確定性處理延續了AR5所採用的方法 (參考2017科學報告，圖文框1.1)。信心度用來定性描述，另加上使用可能性量表，以定量方式呈現不確定性，同時AR6更增加了評估過程的可追溯性。相關推估的結果多根據文獻的證據、一致性、信心度以及可能性進行評估。這兩個指標分別是：

1. 信心度 (Confidence)：基於證據的類型、數量、品質、一致 (例如數據、機制理解、理論、模式、專家判斷)，以及一致性程度，對發現的有效性進行定性評估。

2. 可能性 (Likelihood)：對發現的不確定性進行定量測量，以機率方式表示 (例如基於觀測的統計分析或模式結果，或兩者皆有，以及作者團隊的專家判斷或從專家觀點的正式定量調查，或兩者皆有)。

以下評估流程說明，參考IPCC AR6 Chapter1 Box1.1說明。當科學家們對於某氣候現象 (或趨勢) 可用的證據先進行評估，得出足夠的一致性結論，再將其結合為一個指標進行信心水準評估，並使用5個程度表示：非常低、低、中等、高和非常高¹信心度。如果判斷得出足夠的信心度和定量 (機率性) 證據，就會再以可能性陳述來表示。可能性的陳述通常是科學家對於該證據，已經具有高或非常高信心水準。可能性的表示方式包括：幾乎確定 (99%至100%的機率)、非常可能 (90%至100%)、可能 (66%至100%)、或許可能 (33%至66%)、不可能 (0%至33%)、非常不可能 (0%至10%)、幾乎不可能 (0%至1%)。

空間圖如何呈現

觀測和推估未來氣候變遷的空間資訊，通常以地圖形式呈現歷史趨勢 (基於觀測資料)，以及未來相對於基期的多模式推估變化。這些地圖通常包含關於結果

1 當對某一發現的信心度被評估為低時，不一定意味著對其相反情況的信心度為高，反之亦然。同樣地，低信心度並不意味著對該發現的不信任，反而意味著該陳述是基於目前可用知識的最佳結論。未來更多的研究證據可能會改變評估中的信心水準。

的穩健性或不確定性資訊，如趨勢的顯著性或模式之間的變化一致性。對於觀測到的趨勢，使用統計顯著性來測試確定穩健性。然而，對於多模式平均變化，模式之間的變化方向 (模式一致性)，使用簡單或更全面的方法來表示穩健性和不確定性。AR6在空間圖表示穩健性和不確定性的目的是：(1) 可以在不同空間度 (全球、區域) 一致的方法，同時滿足不同需求；(2) 在不同章節間保持視覺上的一致性；(3) 讓讀者盡可能容易理解地圖上不同資訊層次。

因此AR6在空間上呈現方式說明於表BOX 1.4.1。需要強調的是，與以前的報告一樣，這些方法適用在網格尺度上，從而增加了穩健性。AR6區域評估和方法 (例如趨勢檢測和歸因) 是針對氣候區域進行的，而不是在網格尺度上進行的。空間上小區域尺度和大區域尺度都是相關 (例如調適發生在較小尺度，但也在國家的大範圍空間尺度)。

表BOX 1.4.1 AR6在空間圖上所呈現不確定性相關資訊

方法	類別	定義	視覺化 Code
A. 觀測 (顯著性)	A.1. 顯著	顯著 (0.1 顯著水準) 趨勢	顏色 (無覆蓋)
	A.2. 非顯著	非顯著趨勢	交叉 
B. 模式推估，簡單方法 (一致性)	B.1. 模式一致性高	≥80%模式變化符號一致 第6章 (<5模式系集數)：超過 (n-1)/n模式變化符號一致	顏色 (無覆蓋)
	B.2. 模式一致性低	<80%模式變化符號一致 第6章：少於 (n-1)/n模式變化符號一致	對角線 
C. 模式推估，進階方法 (顯著變化與一致性)	C.1. 穩健訊號 (顯著變化且一致性高)	≥66%模式顯示變化大於變異門檻 γ 及≥80%模式變化符號一致	顏色 (無覆蓋)
	C.2. 無變化或無穩健變化	<66%模式顯示變化大於變異門檻 γ	反對角線 
	C.3. 衝突訊號 (顯著變化但一致性低)	≥66%模式顯示變化大於變異門檻 γ 但<80%模式變化符號一致	交叉線 



方法A適用於觀測，包括兩個類別，一個用於具有顯著趨勢的區域 (無覆蓋)，另一個用於無顯著趨勢的區域 (“×” 覆蓋)，通常使用顯著性水準為0.1的雙尾檢定。

方法B是模式未來推估的簡單方案。它包括兩個類別，一個用於模型一致性 (至少80%的模式在變化的方向上一致，以無覆蓋方式呈現)，另一個用於非一致性 (細線)。應注意，模式一致性使用「模式民主」進行計算 (即不捨棄或加權模式)。在CORDEX研究中，80%被廣泛使用，部分原因是在某些情況下可用的系集數量較小；這也有助於減少模式相依性對最終結果的影響。儘管大部分變數 (如溫度) 對於暖化驅動的變化具有高度的信心，但對於類似降水或區域評估來說，它被認為過於嚴格。

方法C是模式推估的進階替代方案，包括三個類別：「穩健變化」、「衝突變化」和「無變化或無穩健變化」(請參閱表BOX 1.4.1中的詳細資訊)。前兩個類別可以解釋為氣候變遷訊號在內部變異中可能出現的區域 (即在 $\geq 66\%$ 的模式中超過變異門檻值)。

上述討論的B、C兩種方法允許在推估變化一起呈現，並且適用於不同的傳達目的。方法B僅傳達變化方向的一致性，獨立於其相對於內部變異的顯著性，而方法C將推估變化置於內部變異的背景中，並允許突顯出衝突信號的區域。需要注意的是，在不同章節之間，對於相同變量可以應用不同的方法，以呈現不同的目的。對於從多模式系集中的未來氣候推估中表示穩健性或不確定性，並沒有一種適合所有情況的方法。主要原因是顯著性取決於感興趣的空間尺度：雖然不會在每個位置檢測到顯著的趨勢，但呈現顯著趨勢的位置足以表示該區域的變化是顯著的，特別是對於極端情況 (例如全球陸地區域的年最大一日降水量可能已經加劇，即使只有約10%的氣象站顯示出顯著的趨勢；圖1.4.7)。

整體而言，根據圖1.4.2陸地上極端溫度變化的幅度大於全球平均溫度的變化，尤其是在中緯度陸地區域 (Fischer et al., 2014; Seneviratne et al., 2016; Sanderson et al., 2017; Wehner et al., 2018b; Di Luca et al., 2020)。圖1.4.2為不同暖化程度下TXx和TNn的溫度變化強度，即使在GWL 1.5°C，TXx和TNn的強度上就有不小的增強趨勢；TNn增強趨勢大

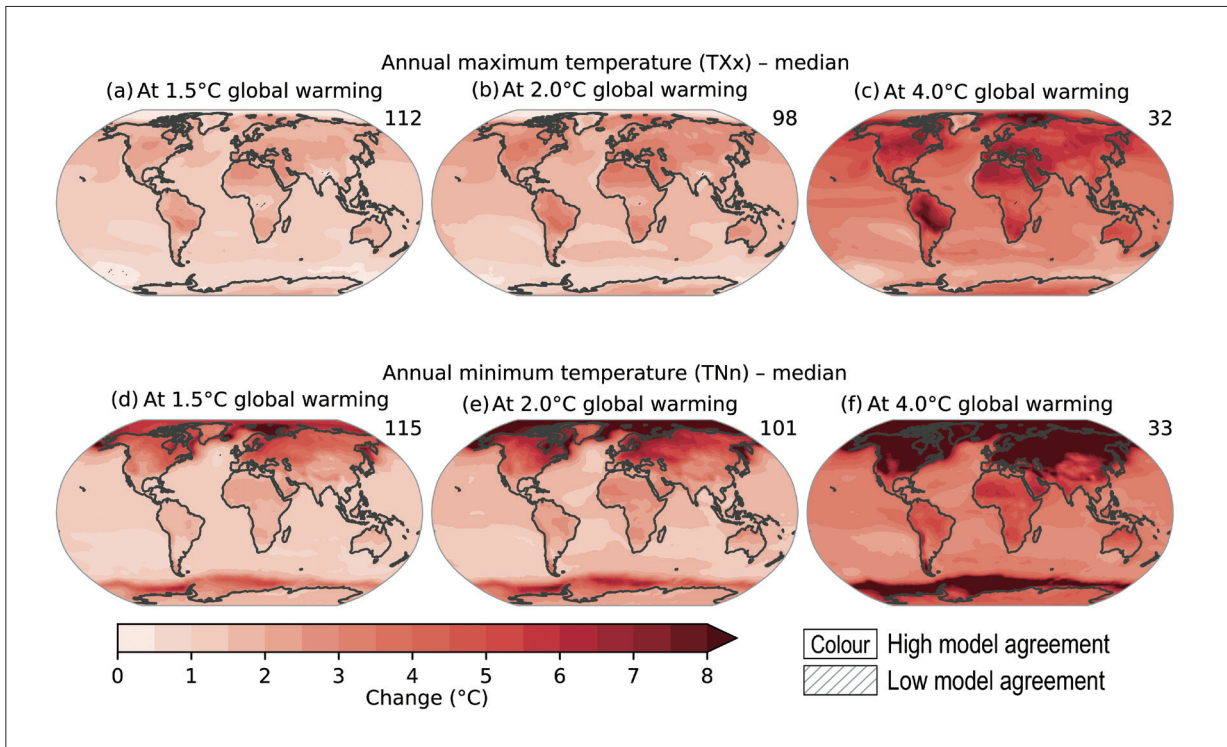


圖1.4.2 極端溫度指標之未來推估結果。(a至c) 分別為GWL 1.5°C、GWL 2°C和GWL 4°C的日最高溫極大值 (TXx) 和 (d至f) 分別為GWL 1.5°C、GWL 2°C和GWL 4°C的日最低溫極小值 (TNn) 距平。基期為1850年至1900年。(摘自IPCC AR6, Figure 11.11)，右上角的數字表示包含的模式數量。當某區域上 $\geq 80\%$ 模式顯示變化趨勢一致時，表示該區域之趨勢有高可信度；反之，則為低可信度，並用斜線覆蓋該區域。

於TXx，在中高緯度TXx的增強趨勢更急遽。

CMIP6的模擬顯示，全球每升溫0.5°C就可顯著增加極端高溫的強度和頻率，減少極端低溫的強度和頻率 (IPCC AR6, WGI, Figure 11.6, Figure 11.8, Figure 11.12)。升溫不到0.5°C，TXx的變化就可以高於自然變異的水準，並且CMIP6多模式結果指出，陸地上TXx的10年重現期事件和50年重現期事件的中位數66%範圍，在GWL 1°C和GWL 1.5°C之間不重疊 (IPCC AR6, WGI, Figure 11.6)，再次證明升溫0.5°C就會造成極端事件有顯著性的增加。

總結來說，在所有陸地區域上 (整合IPCC AR6, WGI, Table 11.4, 11.7, 11.10, 11.13, 11.16, 11.19)，即使在GWL 1.5°C下 (基期為1995年至2014年)，極端高溫事件的強度和頻率「很可能」增加，而極端低溫事件的強度和頻率則「很可能」減少。另外，在GWL 4°C時，以上現象的發生機率變成「幾乎可以確定發生」。雖然以上發生機率可信度適



用於AR6大多數區域，但仍有少數地區的可信度較低，例如，在GWL 1.5°C (4°C) 時，中美洲北部、北美中部和北美西部地區溫度變遷仍無法達到「中等 (很可能)」信心程度，所以在引用此類極端溫度資料於區域時，仍須注意推估結果的信心度。

東亞地區極端溫度未來變化推估

AR6報告根據CMIP5模擬未來推估顯示，21世紀末，東亞地區極端高溫事件「非常可能」變得更加強烈或頻繁，特別是在RCP6.0和RCP8.5的情境下 (Dosio et al., 2018; Lin et al., 2018; Nasim et al., 2018; Shin et al., 2018; Hong et al., 2019; Su & Dong, 2019; Khan et al., 2020; Kumar et al., 2020)。熱指標 (Heat Index, HI) 被用來研判極端高溫的衝擊。這項指標同時考量溫度與濕度，能更進一步呈現人、動物、植物對高溫的耐受度。當熱指標大於41°C時，定義為「危險熱負荷 (Dangerous heat stress)」門檻。本世紀末，在SSP5-8.5情境下，東亞區域在HI高於41°C門檻的天數，每年將增加50天至150天 (圖1.4.3)。而同樣的門檻在SSP1-2.6的情境下，東亞區域每年將增加約30

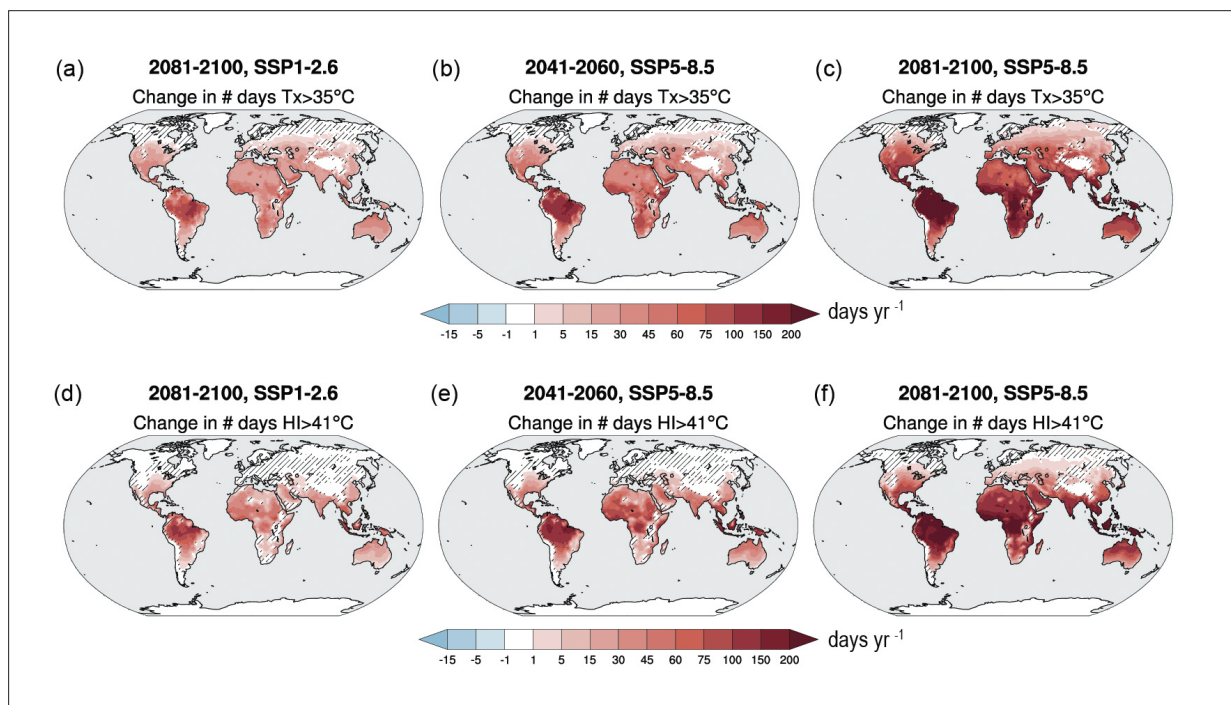


圖1.4.3 極端高溫發生天數在不同門檻、不同情境和不同時段的空間分布。(a至c)分別為21世紀末 (SSP1-2.6)、21世紀中 (SSP5-8.5) 和21世紀末 (SSP5-8.5) 超過「高熱負荷 (High heat stress)」門檻的天數；(d至f)為相對應的時段，但使用「危險的熱負荷 (Dangerous heat stress)」門檻。「高熱負荷 (High heat stress)」門檻定義為當最高溫度大於35°C，「危險的熱負荷 (Dangerous heat stress)」門檻則定義為當熱指標 (Heat index) 大於41°C的天數。(摘自 IPCC AR6, WGI, Figure 12.4; Schwingshackl et al., 2021)

天左右。另一方面，使用「高熱負荷 (High heat stress)」門檻定義 (最高溫度 $T_x > 35^\circ\text{C}$) 也可見東亞地區在SSP5-8.5的情境下，到世紀中超過高熱負荷門檻以上的天數預計每年將增加約1天至30天，而到世紀末則會到達每年增加約60天。上述SSP5-8.5和SSP1-2.6情境間的差異 具高信心度，表示全球增溫越劇烈，極端高溫事件的增幅也會更加劇烈 (圖1.4.3)。

1.4.2 極端降水

不同尺度極端事件的熱力與動力變化

天氣與氣候變化 (包括極端變化) 同時受到熱力 (如水氣增減) 與動力 (如環流變動) 因素影響。研究顯示 (Fischer & Knutti, 2016; Sun et al., 2021)，全球極端降水增加比例與 Clausius-Clapeyron 關係的理論值 (亦即氣溫每上升 1°C ，飽和水氣量便會增加7%) 呈現類似趨勢，但是變化量較低。人為溫室氣體濃度增加，造成溫度與飽和水氣量上升，間接導致極端降水增加，如地表每升溫 1°C ，降水可增加4%至8%，此為熱力貢獻。熱力貢獻的空間分布均勻，區域性差異小，各模式推估的變遷趨勢一致性高 (參見IPCC AR6, WGI, Box 11.1, Figure 11.15)。熱力變化間接影響大氣環流形成動力貢獻，但受區域氣候特性影響，所引起的降雨變化具明顯的區域性 (參見IPCC AR6, WGI, Box 11.1, Figure 11.15)，而且僅在少數區域 (如赤道東太平洋雨量增多，副熱帶南北大西洋、印度洋與東南太平洋雨量減少)，模式推估呈現一致的變遷趨勢。整體而言，動力貢獻在模式間的差異相當大，比熱力貢獻有更高的不確定性 (Shepherd, 2014; Trenberth et al., 2015; Pfahl et al., 2017)。雨量變遷增加趨勢與熱力貢獻增加趨勢較為類似，顯示暖化導致的水氣增加是雨量增加的主要原因 (摘自IPCC AR6 WGI, Box 11.1, Figure 11.15)。

觀測趨勢與人為活動影響

SREX (Seneviratne et al., 2012) 分析觀測資料，指出陸地強降雨事件可能增加地區比減少的地區更多，然而在許多地區，趨勢仍不具有統計學上的顯著性，且存在相當的區域與季節性變異。更新的觀測研究則發現更明確一致的變化趨勢，指出自20世紀中期以來，大多數陸地區域的日平均降水強度都有所增加 (高信心程度)，且在全球和陸地區域尺度上極端降雨強度增強。其中，超過50 mm的日降水機率增加 (Benestad et al., 2019)，陸地上的年最大一日降雨量 (Rx1day) 在潮濕和乾燥的地區都顯著增加 (Du et



al., 2019; Dunn et al., 2020)，例如：北美洲、歐洲、亞洲 (圖1.4.4；Sun et al., 2021)，以及全球季風區域 (Zhang & Zhou, 2019)。就統計顯著性而言，Rx1day增加的地區 (測站) 比減少的還要多 (圖1.4.4)。Rx1day強度增加比例與全球平均溫度上升之間，呈現與 Clausius-Clapeyron關係一致的比例變化 (Fischer & Knutti, 2016; Sun et al., 2021)。在全球至區域尺度上，最大連續5日累積降雨量 (Rx5day; 參見第二章文字框6 | 極端指標定義) 的長期變化在許多方面與Rx1day相似 (Zhang & Zhou, 2019; Sun et al., 2021)。此外，日雨量排名前5%降雨日之總降水量 (R95pTOT)，其佔年平均降雨之比例也顯著增加 (Dunn et al., 2020)。由1950年至2016年間的日降水資料，輕度、中等和強日降水強度都顯示增強 (Contractor et al., 2021)。

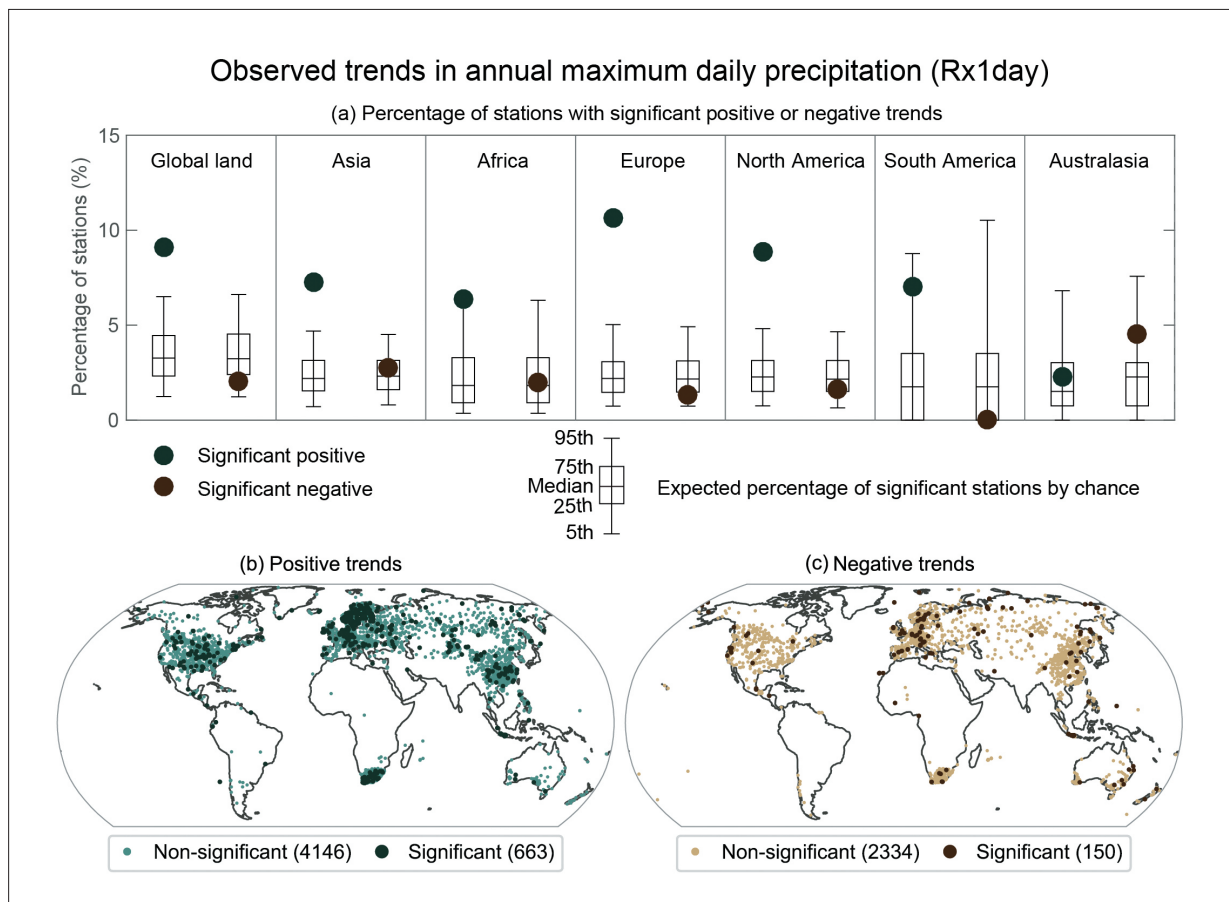


圖1.4.4 1950年至2018年間8345個測站年最大日降雨量 (Rx1day) 觀測趨勢與統計顯著性 (通過5%標準的雙尾檢定)。(a) 具有統計顯著趨勢的測站百分比；綠色顯示增加趨勢，棕色為減少趨勢。盒鬚圖方框標記中位數，第25個百分位數和第75個百分位數。上下橫線分別為第97.5個百分位數和第2.5個百分位數。(b) 增加趨勢測站與 (c) 減少趨勢測站的空間分布。深色 (淺色) 表示趨勢顯著 (不顯著) 的測站。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 11.13)

以全球而言，在大部分有良好觀測紀錄的陸地地區（例如亞洲、歐洲、北美洲），強降雨事件頻率、強度和/或降雨量都增加。強降雨強度增強，很可能是由人為因素引起（Dong et al., 2021; Fischer et al., 2014; Shiogama et al., 2016），其中溫室氣體排放增加是主要貢獻者。在非洲、澳洲、中南美洲，變化信心程度較低。在區域尺度上，可以支持人類活動對極端降雨影響的證據比較有限且不太穩健。

東亞趨勢

自1950年代以來，亞洲極端降水變化整體呈現顯著的增加趨勢（高信心程度）。在1950年至2018年，超過2/3的測站中觀察到Rx1day和Rx5day增加，其增加趨勢具有統計顯著性（圖1.4.4；Sun et al., 2021）。在東亞地區，Nayak et al. (2018) 的研究顯示日本過去的極端降雨變化隨著暖化升溫加劇而增強；Baek et al. (2017) 由夏季降雨的長期觀測紀錄，顯示韓國極端降雨增加與20年日降雨重現值增加，但是連續乾日天數增加，夏季降雨分布變得更加極端。在中國，極端降水沒有整體一致的趨勢（Liu et al., 2019b; Chen et al., 2021），有區域增加，有些地區減少。然而這樣的增加趨勢是否歸因於人為活動影響，目前研究尚未得到一致結論。

全球未來推估

暖化的未來，在大多數中緯度地區與熱帶地區，強降雨事件將更加頻繁和劇烈（Collins et al., 2013）。IPCC AR5之後的研究，提供更多明確的證據支持先前的評估結果，包括極端降雨的觀測趨勢增加、人為因素對過去變化影響與未來推估。在IPCC AR5報告尚無法證實極端降雨強度Rx1day增強與暖化作用情境的關係（Pendergrass et al., 2015; Sillmann et al., 2017），IPCC AR6報告的推估則顯示，在所有暖化情境，每增溫1°C都會呈現相似的極端降雨變化率（Sillmann et al., 2019; Li et al., 2021）。

隨著GWL升高，極端降水的發生通常會變得更強且更頻繁。極端降水幾乎在所有陸地區域都會增加（高信心程度），以亞洲與北美最明顯，只有很少數地區例外，例如在輕微暖化程度的地中海盆地周圍的南歐區域。極端降水的減少，主要發生於副熱帶海洋區域，並且與因風暴路徑變化而引起平均降水減少高度相關。

極端降雨機率增加的推估，會隨著事件罕見程度，其增加幅度更大（圖1.4.5；Fischer & Knutti, 2015; Kharin et al., 2018; Li et al., 2021）。使用SSP情境的CMIP6模擬



顯示，在GWL 4°C每10年一遇和每50年一遇事件的頻率，將分別增加約2倍和3倍 (Li et al., 2021)。此處使用的極端降雨指標定義請參考第二章文字框 6 | 極端指標定義。圖 1.4.5顯示在每升溫1°C的情境，Rx1day增加約7% (如4°C相對於增加30%)。至於Rx5day的10年和50年重現值，增幅略微小一些 (Li et al., 2021)。對於Rx1day和Rx5day的50年重現值，在GWL 1.5°C和GWL 2°C之間，多模式系集變化90%範圍沒有重疊 (圖1.4.5)，這顯示即使增溫幅度不大也可能導致極端降雨的顯著增加 (Li et al., 2021)。

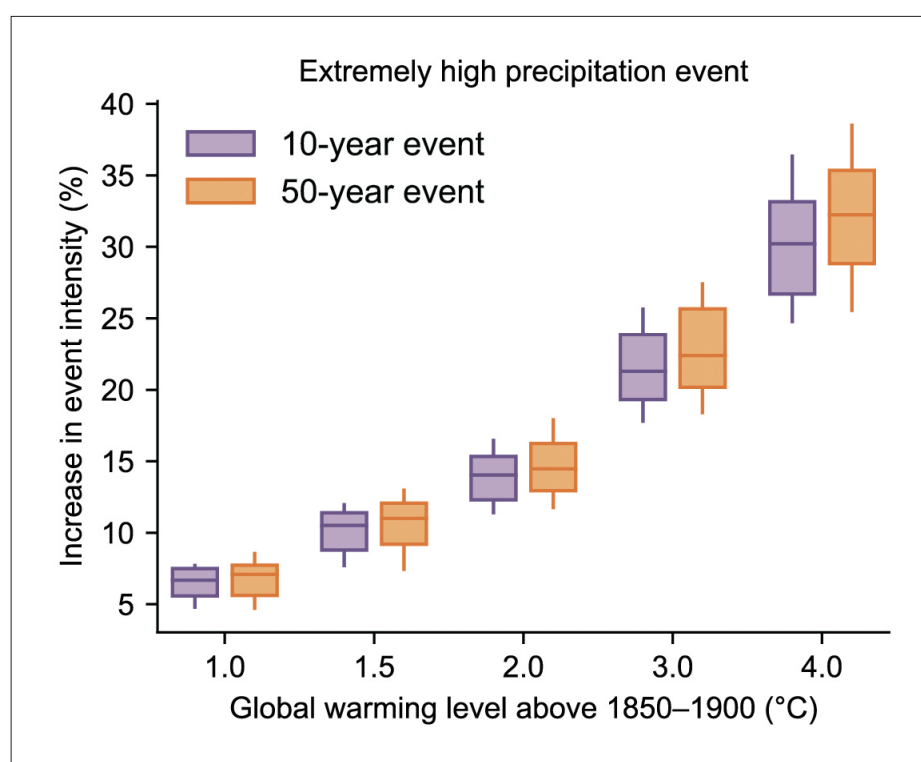


圖1.4.5 CMIP6模式在全球陸地區域。相對於1850年至1900年的GWL 1°C、GWL 1.5°C、GWL 2°C、GWL 3°C和GWL 4°C (橫軸)，年最大日降雨量 (代表極端降水事件強度)，在10年 (紫色) 和50年 (橙色) 事件重現值的推估變化率 (縱軸)。方框中水平線與上下框線分別代表所有模式模擬的變化率的中位數與66%的不確定性範圍，而盒鬚圖上下界間距代表90%的不確定性範圍。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 11.15)

以上結果顯示較罕見的極端降雨事件強度在暖化情境下增加的幅度比平均值的增加幅度大，亦即極端的變得更極端 (Pendergrass, 2018; Mizuta & Endo, 2020; Wehner, 2020)。不同暖化程度下，Rx1day變遷的空間分布非常相似 (圖1.4.6)，如赤道與極區附近增加最多，在目前的乾旱地區也都有顯著增加，並且在區域尺度上，極端降雨與全球暖化程度之間具有近線性的關係，與Seneviratne & Hauser (2020) 的結果一致。值得注

意的是，在低暖化情境 (GWL 1.5°C)，副熱帶的雨量變遷不顯著 (斜線區)，但到了GWL 4°C，雨量增加就很明顯。這項對比反映出暖化程度越高，變遷程度越大。

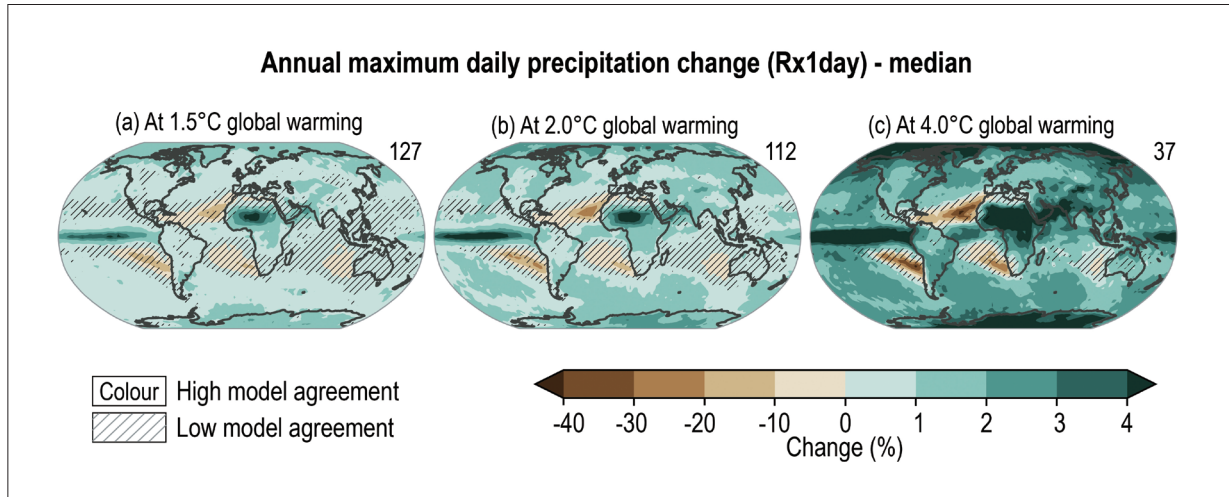


圖1.4.6 GWL 1.5°C、GWL 2°C和GWL 4°C時，年最大日降雨量Rx1day變化的分布。右上角數字為模擬組數。沒有斜線陰影處表示有高於80%模式推估呈現一致的變化方向，斜線陰影處表示模式一致性低的區域。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 11.16)

東亞未來推估

圖1.4.6顯示GWL 1.5°C至GWL 2°C之間的微幅差異，便可能導致極端降雨的增加，且模式之間在空間分布的一致性也提升。同樣的，亞洲極端降雨增強趨勢隨著全球暖化程度上升，且可能性更為明確。CMIP6多模式的中位數推估顯示，在95%以上的區域，Rx1day和Rx5day的10年和50年重現值將增加，即使在2°C暖化程度也是如此。在各排放情境皆顯示，隨著暖化程度升高，增加幅度會更大 (Li et al., 2021)，在東亞地區的極端降雨重現值增強，有更高比例的變化。

儘管存在地區差異，推估結果顯示多數東亞地區極端降雨增加。Nayak et al. (2018) 的研究顯示，在全球暖化推估的日本未來極端降雨變化，隨著升溫加劇而增強；Sui et al. (2018) 顯示GWL 2°C程度，在中國東北部與青藏高原有顯著的極端降雨增強；Li et al. (2018) 發現不同全球暖化程度之間，在極端降雨重現值增強並非等比例，GWL 2°C相對於GWL 1.5°C暖化程度，極端降雨百年重現值變化可由1.6倍上升至2.4倍。Chen et al. (2022) 利用高解析度大氣模式，推估暖化情境下的東亞春雨與梅雨季極端降雨變化顯示，春雨季盛行降雨雨帶往北擴張，雖然盛行降雨區平均降雨變化不大，但連續不降雨



天數增加、降雨天數減少，強降雨事件發生頻率增加；相對的，在梅雨季盛行降雨區，強降雨事件強度增加且發生更為頻繁，因此平均降雨增加。

1.4.3 乾旱事件

降水缺乏通常是引發乾旱的主要因素，大氣蒸發需求過剩、土壤含水量不足以及水文條件缺乏也會造成不同類型的乾旱。乾旱事件依據物理條件與使用指標可分類為：氣象乾旱、農業生態乾旱與水文乾旱。降水缺乏與蒸散作用直接對可用水量造成影響；土壤含水量不足有時會因大氣蒸發增加而加劇，進而導致農業生態乾旱；河川流量與地表水的不足則會造成水文乾旱。

觀測趨勢與人為活動影響

過去近幾十年來，亞馬遜地區 (2005年、2010年)、中國西南部 (2009年至2010年)、北美西南部 (2011年至2014年)、澳洲 (1997年至2009年)、加州 (2014年)、中東 (2012年至2016年)、智利 (2010年至2015年) 等地區均記錄到嚴重的降雨不足事件 (van Dijk et al., 2013; Mann & Gleick, 2015; Rowell et al., 2015; Marengo & Espinoza, 2016; Dai & Zhao, 2017; Garreaud et al., 2017, 2020; Marengo et al., 2017; Brito et al., 2018; Cook et al., 2018)。然而，在標準化降水指數 (Standardized Precipitation Index, SPI)、乾旱頻率和乾旱嚴重程度，全球並沒有長期顯著變化趨勢 (Orlowsky & Seneviratne, 2013; Spinoni et al., 2014; Spinoni et al., 2019)。若從區域角度看，非洲 (中部非洲和東南非洲) 和南美的幾個地區 (南美東北部、南美季風、南美西南部和南美南部)，則反映出這些地區由於長期降雨量不足導致的氣象乾旱 (圖1.4.7)。在人為因素對乾旱趨勢的歸因研究方面，由於事件中人為與非人為氣候因素間複雜的相互作用，以及不同的方法論、模式和數據來源，因此存在相當的不確定性 (Angélil et al., 2017)。

全球而言，同是基於Penman-Monteith蒸散模型的標準化降水蒸發散指數 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) 和帕默爾乾旱嚴重指數 (Palmer Drought Severity Index, PDSI) 的趨勢顯示，在過去幾十年受乾旱影響的地區 (如西非、南非、地中海和東亞地區)，其乾旱頻率和嚴重程度較SPI略微增加 (Dai & Zhao, 2017; Spinoni et al., 2019; Song et al., 2020) (圖1.4.7)，與土壤含水量觀測趨勢結

果一致。對比圖1.4.7的三種指標，考量大氣蒸發散過程的乾旱指數，相較於利用降水指數的評估，呈現更嚴重的乾燥趨勢。大氣蒸發需求 (Atmospheric Evaporative Demand, AED) 使得農業生態乾旱比氣象乾旱更為嚴重 (García-Herrera et al., 2019; Williams et al., 2020)，乾季土壤含水量減少 (Padrón et al., 2020)，會增加植物水分壓力 (Allen et al., 2015; Grossiord et al., 2020; Solander et al., 2020)，容易引發更嚴重的森林火災 (Abatzoglou & Williams, 2016; Turco et al., 2019; Nolan et al., 2020)。

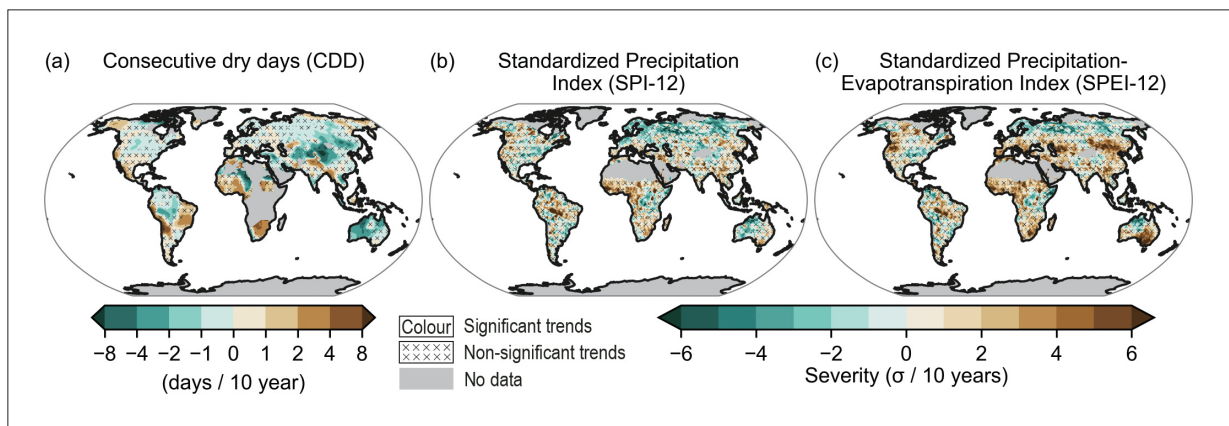


圖1.4.7 (a) 1960年至2018年之(年)最長連續不降雨日 (Maximum number of consecutive dry days, CDD) 的線性趨勢；(b) 1951年至2016年之12個月SPI和(c) 12個月SPEI的觀察線性趨勢。灰色代表缺乏足夠數據的區域，x區域表示統計趨勢不顯著。因此，無重疊的顏色區域表示趨勢具有統計顯著性。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 11.17)

在大多數地區，人類活動對於氣象乾旱的趨勢影響仍不明確，但對於特定事件嚴重程度的影響貢獻具有中等信心程度。農業生態乾旱的增長趨勢，以及人類活動對此趨勢的貢獻已被證實，在某些區域已具有中等可信度：人類活動使得受影響土地區域的溫度上升、相對濕度下降和淨輻射增加 (高信心程度)，大氣蒸發散需求增加，並進一步導致受影響土地面積增加。

東亞乾旱趨勢

東亞氣象乾旱的觀測趨勢目前僅有低信心程度，並無顯著趨勢 (Spinoni et al., 2019; Li et al., 2020)。農業生態乾旱方面則顯示乾燥趨勢增加，特別是約自1990年以來，在東亞的北部 (中國北部、部分俄羅斯、日本) 與中國西南部都可以偵測到，但研究間仍有不一致的趨勢 (Greve et al., 2014; Chen & Sun, 2015b; Cheng et al., 2015; Qiu et al., 2016; Dai & Zhao, 2017; Jia et al., 2018; Spinoni et al., 2019; Li et al., 2020; Padrón et



al., 2020)。在人為作用對農業生態乾旱趨勢的貢獻程度方面，目前研究進展有限。

水文乾旱在東亞地區有所增加，尤其是中國北部 (Zhao & Dai, 2017)。然而數據研究有限且信號混雜，現有證據顯示東亞水文乾旱的變化可能同時受到氣候驅動因素和人為因素的影響。長江流域的水文乾旱增加，主要由降水缺乏引起，但潛在蒸發增強和人類活動也有增強乾旱的趨勢 (Zhang et al., 2018)。由土壤含水量和河川流量變化顯示，農業活動已加劇中國北部的乾旱情況 (Liu et al., 2015)。

未來推估

隨著未來全球暖化加劇，區域的乾旱頻率、強度與造成災害的機率都將成比例增加 (高信心程度, Wartenburger et al., 2017; Greve et al., 2018; Xu et al., 2019)。CMIP6推估的連續不降雨日天數 (圖1.4.8) 呈現與降雨減少類似的空間分布，明顯可見隨著暖化由GWL 1.5°C增加到GWL 4°C，氣象乾旱將更嚴重與頻繁、範圍擴大，尤其是非洲、南美

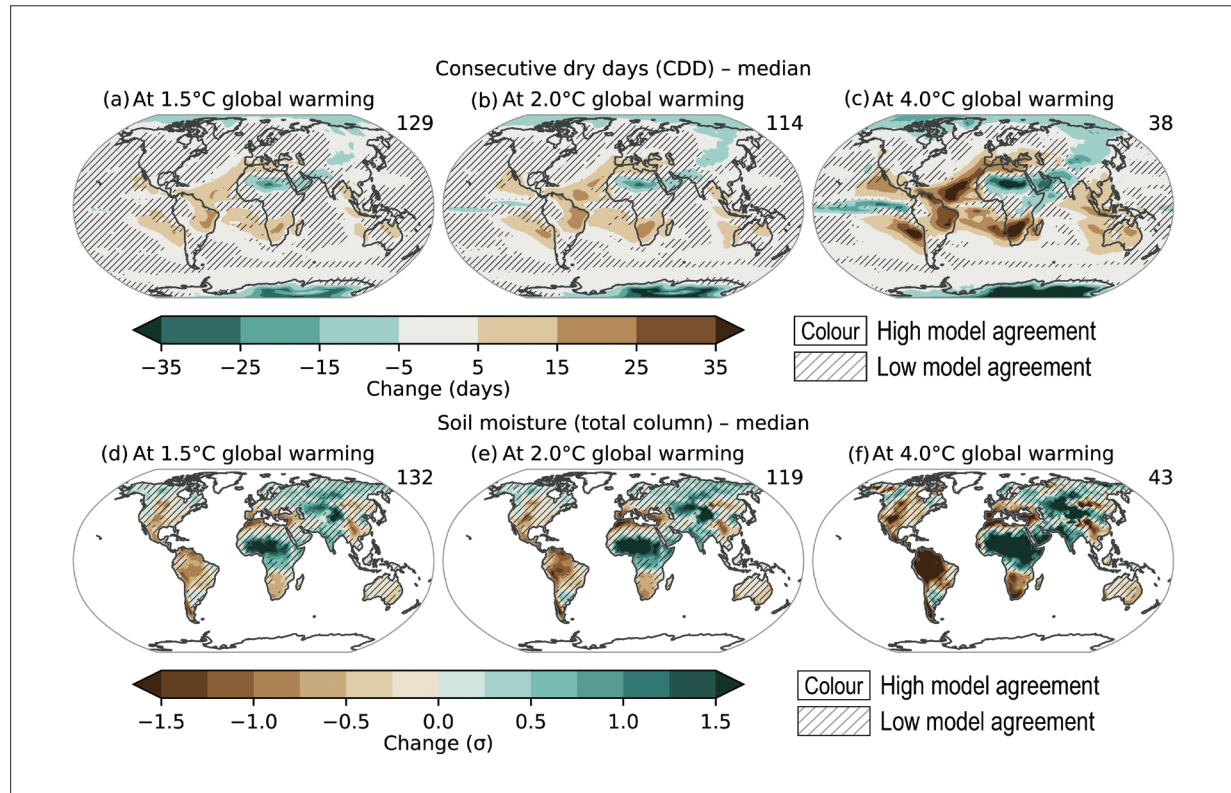


圖1.4.8 CMIP6模式推估全球升溫1.5°C、2°C和4°C時。(a至c) CDD的變化與 (d至f) 年平均土壤含水量變化。右上角數字表示使用的模擬組數。沒有斜線陰影處表示有高於80%模式推估呈現一致的變化方向，斜線陰影處表示模式一致性低的區域。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 11.19)

洲以及地中海附近區域。模式推估的降雨變化與乾旱期間長短的改變一致，但無法反應乾旱強度的變化 (Ukkola et al., 2020)。

■土壤含水量缺乏

暖化氣候推估中土壤含水量下降的區域，並不完全與降雨減少的區域重疊，而且由於大氣蒸發需求增加與相關的蒸發散增加導致土壤含水量缺乏的區域比受降雨不足影響的區域更多 (圖1.4.8；Orlowsky & Seneviratne, 2013; Dai et al., 2018)。在所有暖化程度，頂層土壤中的濕度的減少將會比降雨量減少更多 (Lu et al., 2019)，使得嚴重土壤含水量不足的區域擴大到大部分的南歐和中歐、北美洲南部、南美洲和東亞 (圖1.4.8)。土壤含水量衰退可進一步衝擊全球水循環，甚至導致極端氣候災害的多變性，間接加劇農業乾旱問題。量化此一趨勢需要掌握不同深度土壤含水量的全球趨勢，惟目前這方面資訊仍相當缺乏，且土壤內各層含水量模擬仍是模式的一大挑戰，亟待突破。

■農業生態乾旱與水文乾旱

推估未來農業生態乾旱變化時，PDSI和SPEI乾旱指標常被用來輔助說明土壤含水量的推估結果。利用PDSI或SPEI乾旱指標，未來推估顯示全球更嚴重和更頻繁發生的農業生態乾旱趨勢，影響範圍比氣象乾旱更大，包含了北美洲、歐洲、非洲、中亞與東亞、澳洲南部等地區 (Cook et al., 2014; Chen & Sun, 2017a, b; Gao et al., 2017b; Lehner et al., 2017; Zhao & Dai, 2017; Naumann et al., 2018; Potopová et al., 2018; Dai, 2021)。

隨著暖化程度增加，農業生態乾旱的區域會增加 (高信心程度)。降雨減少加劇區域乾旱，大氣蒸發需求增加，導致農業生態乾旱更為嚴重，強度增強或持續時間增長，而且隨著暖化程度加劇而加劇。隨著全球變暖，土壤含水量減少和相關乾旱的變化，許多地區植被的環境應力將會增加，影響植被的生長，可能降低全球陸地的碳匯效率。在高排放情境與GWL 4°C時，這樣的影響具高信心程度。

■東亞推估

Zhou et al. (2014) 利用連續不降雨日指標，推估東亞北部將趨於潮濕，南部則趨於乾燥。Kusunoki (2018) 推估日本連續乾日天數將會增加 (乾燥趨勢)。隨著全球增暖，亞洲地區氣象乾旱推估的變化信心程度較低，當全球暖化至GWL 4°C時，僅東南亞地區顯示氣象乾旱增加 (中等信心程度)。



氣象乾旱隨著暖化升溫程度增加而變化的趨勢，因模式、區域或指標而異，在區域空間分布顯示低信心程度 (Zhou et al., 2014; Dunn et al., 2020; Li et al., 2020; Spinoni et al., 2020)。東亞水文乾旱趨勢則仍具不確定性，現有證據有限且趨勢不一致。

1.4.4 風暴系統：熱帶氣旋、溫帶氣旋、劇烈對流風暴與大氣河

風暴，如熱帶氣旋 (颱風)、溫帶氣旋、劇烈對流風暴以及大氣河事件，通常在陸地帶來極端降雨與洪水，造成重大災情。劇烈天氣不是經常發生的事件，大多發生於局部地區且持續時間短暫，因此量化氣候變化對這些極端事件的影響與推估具有相當程度的挑戰性。自從AR5以來，模式在物理過程與水平解析度的進展，提升了這方面研究的評估與了解。本節將討論熱帶氣旋 (颱風)、溫帶氣旋、劇烈對流風暴與大氣河的過去趨勢與未來推估，以及對極端降雨的影響。

熱帶氣旋 (颱風)

熱帶氣旋的形成、發展和軌跡時常受到大氣和海洋的大尺度環流條件 (Christensen et al., 2013) 影響，例如哈德里環流、沃克環流和季風環流。大氣環境內部存在季節內至年代際的各種時間尺度變異，例如馬登—朱利安振盪 (Madden–Julian Oscillation, MJO)、北半球夏季季內振盪、聖嬰現象、大西洋多年代際振盪 (Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)，與太平洋海表面溫度年代際振盪 (Pacific Decadal Oscillation, PDO)，這些自然變異的作用提高了偵測人為因素影響熱帶氣旋活動改變的困難度。這些氣候變異未來變化的不確定性，也增加了推估熱帶氣旋活動變化的不確定性。例如在暖化氣候中，哈德里環流的擴張趨勢 (中等信心程度)，可能導致熱帶氣旋軌跡的緯度變化 (Altman et al., 2018; Sharmila & Walsh, 2018; Studholme & Gulev, 2018)。另一方面，模式推估之未來海溫變化分布，也會強烈影響區域熱帶氣旋活動的變化 (Yoshida et al., 2017)，然而目前這些變化仍存在相當程度的不確定性。

探討氣候變遷對熱帶氣旋活動之影響，高水平解析度的模式通常能夠更真實地呈現熱帶氣旋的特性。一般而言，熱帶氣旋等級依據風速由小至大可分類為1級至5級 (各級風速門檻參見<https://www.noaa.gov/jetstream/tropical/tropical-cyclone-introduction/tropical-cyclone-classification>)，而水平解析度介於10 km至60 km的模

式，比較能夠模擬出4級至5級熱帶氣旋，水平解析度為1 km至10 km的模式甚至能夠解析氣旋眼牆結構。在模式架構上，具有大氣海洋交互作用的模式，通常比僅考慮大氣的模式更能真實反應熱帶氣旋的發展。然而受限於運算資源，大多數具有海氣交互作用的氣候模式，水平解析度仍不足以解析呈現熱帶氣旋相關的特性，模擬能力仍有待提升。

■ 觀測趨勢與人為活動影響

過去40年的觀測紀錄與研究顯示：全球3級至5級熱帶氣旋所佔比例與快速加強事件的頻率，普遍呈現增加趨勢 (Kossin et al., 2020; Kishtawal et al., 2012; Balaguru et al., 2018; Bhatia et al., 2019)；熱帶氣旋達到最大風速的平均位置已開始往較高緯度偏移 (Kossin et al., 2014; Knapp et al., 2018)，西北太平洋熱帶氣旋活動也有往較高緯度遷移的跡象 (Oey & Chou, 2016; Liang et al., 2017; Nakamura et al., 2017; Altman et al., 2018; Daloz & Camargo, 2018; Lee et al., 2020; Yamaguchi & Maeda, 2020a; Kubota et al., 2021)，這些趨勢具有中等信心程度；Yamaguchi & Maeda (2020b) 則發現西北太平洋颱風移動速度減慢。在人為作用對颱風活動影響方面：Zhang et al. (2020) 顯示人為活動對熱帶以外地區颱風移動速度減慢有影響；Bindoff et al. (2013) 與 Knutson et al. (2019) 認為人為因素已經影響過去北大西洋颱風活動改變；Bhatia et al. (2019) 與 Murakami et al. (2020) 則認為目前熱帶氣旋活動的變化，不能完全為自然變異所解釋；Reed et al. (2020) 則呈現了人為作用對颱風強降雨增加之貢獻。

■ 全球未來推估

就全球來看，Knutson et al. (2020) 對於21世紀後期的颱風推估研究有相當完整的說明，在此之後的研究，整體而言結果是一致的，對相關變化的信心評估也有一致結論，顯示隨著全球變暖，熱帶氣旋平均最大風速和4級至5級熱帶氣旋的比例很可能會增加 (Murakami et al., 2012; Tsuboki et al., 2015; Wehner et al., 2018a; Knutson et al., 2020)，但對4級至5級熱帶氣旋未來頻率增加的推估則一致性較低 (Wehner et al., 2018a; Knutson et al., 2020)。

依據GWL 1.5°C至GWL 4°C的評估，隨著全球變暖，熱帶氣旋的降雨量、強度與強熱帶氣旋比例都會隨著暖化程度增強而增加 (Knutson et al., 2020)，全球熱帶氣旋平均降雨 (中位數) 增加11%至28% (高信心程度)。各海洋區域的熱帶氣旋降雨量也將增加 (中等信心程度)。熱帶氣旋平均最大風速 (氣旋強度) 也會隨著暖化程度增強而增加 (中



度至高度信心程度)，熱帶氣旋達到最大強度 (類別4至5) 的機率平均 (中位數) 增加10%至20% (高度信心)。由於熱帶氣旋低層水氣輻合 (Convergence) 增強，助長了降雨量增加 (Knutson et al., 2015; Phibbs & Toumi, 2016; Patricola & Wehner, 2018; Liu et al., 2019a)，使得降雨增加比例可能會高於Clausius-Clapeyron 的理論值 (即氣溫每上溫1°C，飽和水氣量增加7%)。

■東亞未來推估

隨著熱帶地區在暖化氣候下往高緯擴張，促使熱帶氣旋往高緯度移動 (Yamada et al., 2017; Yoshida et al., 2017; Roberts et al., 2020b)，在西北太平洋某些區域4級至5級強熱帶氣旋的頻率可能會因此增加，熱帶氣旋達到最大風強度的平均位置也可能會向西北太平洋較高緯度區域遷移。在高解析度大氣模式的推估顯示暖化情境下，世紀末西北太平洋颱風生成數量減少 (Tsou et al., 2016; Endo et al., 2022)，且生命期縮短 (Hong et al., 2021)。雖然颱風生成數量減少，颱風伴隨的最大風速與降雨卻是增強的 (Tsou et al., 2016; Hsu et al., 2021)，這些颱風活動的變化，深受暖化情境下此區域副熱帶高壓增強的影響。

溫帶氣旋

■觀測趨勢與人為活動影響

過去研究顯示溫帶氣旋與極端降雨事件的高相關性 (Pfahl & Wernli, 2012; Catto & Pfahl, 2013; Utsumi et al., 2017)。Reboita et al. (2015) 與 Wang, X. et al. (2016) 利用多筆再分析資料，顯示南半球溫帶氣旋數量有增加趨勢 (高信心程度)，然而在北半球則是相反 (Tilinina et al., 2013; Chang et al., 2016)。過去觀測紀錄在強烈溫帶氣旋的數量與強度方面 (例如最大風速)，顯示明顯的年際與年代際變化 (Feser et al., 2015; Reboita et al., 2015; Wang, X. et al., 2016; Varino et al., 2019)。人類活動對溫帶氣旋長期趨勢影響程度的評估，仍只有低信心程度。

■未來推估

溫帶氣旋造成的平均降雨與最大降雨率會隨著全球變暖而增加，增加的幅度與大氣水氣增加有關 (高信心程度) (Zappa et al., 2013b; Marciano et al., 2015; Pepler et al., 2016; Michaelis et al., 2017; Yettella & Kay, 2017; Zhang & Colle, 2017; Barcikowska et al., 2018; Hawcroft et al., 2018; Zarzycki, 2018; Kodama et al., 2019; Bevacqua et

al., 2020a; Reboita et al., 2021)。未來推估顯示溫帶氣旋強度變化不大 (Yettella & Kay, 2017)；在風暴路徑軌跡變化可能會導致局地極端風速增強 (中等信心程度)。暖化情境下，大西洋與歐洲溫帶氣旋數量減少 (Zappa et al., 2013b)；北太平洋方面，溫帶氣旋數量未來將會減少 (Chang, 2014; Kar-Man Chang, 2018)，移動路徑則會往極區偏移 (Seiler & Zwiers, 2016)。

劇烈對流風暴

■ 觀測趨勢與人為活動影響

劇烈對流風暴的定義因文獻和地區而異，且觀測資料在長期時空分布的缺乏，不易對劇烈對流風暴的觀測趨勢進行綜合評估。對於劇烈對流風暴或中尺度對流系統，目前僅有特定區域的研究，並未有全球完整的觀測趨勢評估。例如美國的對流風暴與劇烈雷雨風暴沒有顯著增加 (Kunkel et al., 2013; Kossin et al., 2017)，然而在相關的極端降雨顯示更多更強的降雨趨勢 (Kunkel et al., 2013; Easterling et al., 2016)。由於劇烈對流風暴的特性，使得探討這類事件時空變化與人為活動影響深具困難 (Kunkel et al., 2013)。部分研究顯示與劇烈對流風暴相關的極端降雨增加，例如Kawase et al. (2020) 透過故事線方法呈現日本在2018年7月極端降雨事件與近期日本暖化的關聯。劇烈對流風暴 (例如龍捲風、冰雹、降雨、風和閃電) 由於詳盡數據紀錄的時間較短，對過去冰雹、風和龍捲風活動的趨勢，以及是否受到人為活動影響，都缺乏信心。

■ 未來推估

在未來推估的部分，對於劇烈對流風暴的推估也僅限於區域或個案研究，難以有全球或全面的評估。透過氣候模式模擬全球暖化的推估結果顯示，由於來自低層水氣增加，熱帶與副熱帶地區對流可用位能在暖化氣候中增加，因此推測對於劇烈對流風暴是更有利發展的環境 (Sobel & Camargo, 2011; Singh et al., 2017; Chen J. et al., 2020)，但模式之間仍有相當的不確定性 (Allen, 2018)。

大氣河

大氣河是一個空間分布狹長 (數百公里寬) 而垂直發展淺 (數公里深) 的強水平水氣輸送廊道，由熱帶傳送暖濕空氣至中高緯度地區 (Zhu & Newell, 1998; Bozkurt et al., 2018; Mattingly et al., 2018; Little et al., 2019; Viale et al., 2018) 造成大量降雨。大氣河事件登陸後在局地受地形舉升影響造成極端降雨、洪水，甚至暖濕空氣造成冰河與積雪消融，



改變陸地蓄水量 (Froidevaux & Martius, 2016; Paltan et al., 2018; Waliser & Guan, 2017; Adusumilli et al., 2019; Ionita et al., 2020; Payne et al., 2020)。其登陸後受複雜地形的影響不易詳細估計，提升了估計大氣河相關降雨量的困難度 (Behrangi et al., 2016)。

■觀測趨勢與人為活動影響

大氣河研究大多著重在北美西岸、溫帶與極區 (Guan & Waliser, 2015; Waliser & Guan, 2017) 之影響，也會在春末夏初期間影響東亞，帶來極端降雨 (Kamae et al., 2017)。針對大氣河事件的長期觀測趨勢，相關的研究分析有限。北美西海岸登陸的大氣河活動有增加趨勢 (Gershunov et al., 2017; Sharma & Déry, 2020)；Gonzales et al. (2019) 探討大氣河在北美西岸的變化對水文領域應用於區域流量的時間與幅度之影響。整體而言，自從20世紀中期，在東北太平洋有增加的趨勢 (低信心程度)。

■未來推估

在全球暖化情境下，全球暖化的熱力作用讓大氣水氣增加，有助於大氣河變得更富有水氣，進而增強與持久 (高信心程度) (Payne et al., 2020)。可以預期在持續的暖化環境，大氣河事件更強的水氣傳送將會增加強降雨事件的強度於美國西岸 (Ralph & Dettinger, 2011; Lavers et al., 2015; Warner & Mass, 2017)、北美東北岸 (Hsu & Chen, 2020)、西歐 (Lavers et al., 2015; Ralph et al., 2016; Ramos et al., 2016) 與東亞 (Kamae et al., 2019)。大氣河在北美西岸登陸的頻率強度與持續時間，推估是增加的 (Gershunov et al., 2019)，然而Espinoza et al. (2018) 推測全球大氣河事件數量是些微減少。

綜合目前了解，隨著全球暖化，熱帶氣旋、溫帶氣旋、區域性的劇烈對流風暴，以及大氣河，這些系統導致相關的平均降雨和最大降雨量將會增加 (高信心程度)。圖1.4.9 總結本節提到的劇烈天氣在過去與未來的變遷分布：

在全球方面：(1) 熱帶氣旋、溫帶氣旋和大氣河的平均雨量與最大雨量增加—過去觀測由於可靠數據不足，僅有低信心程度，然而在未來推估則是高信心程度；(2) 更強烈熱帶氣旋比例增加—過去觀測僅有中等信心程度，未來推估具有高信心程度；(3) 全球熱帶氣旋生成頻率減少或沒有變化—過去觀測由於可靠數據不足，僅有低信心程度，在未來推估則是中等信心程度；(4) 溫帶氣旋的風速變化，會受各區域氣旋數量改變以及風暴路徑變化影響—過去觀測由於可靠數據不足，僅有低信心程度，在未來推估則是中等信心程度。

區域變化方面：(1) 西北太平洋的熱帶氣旋向極區遷移—過去觀測與未來推估皆為中等信心程度；(2) 影響美國的熱帶氣旋移動速度減慢，導致降雨增加—過去觀測為中等信心程度，未來推估則缺乏相關研究；(3) 影響美國的劇烈風暴平均降雨和最大降雨增加，春季劇烈風暴頻率和季節長度增加—過去觀測可靠數據不足，僅有低信心程度，未來推估則是中等信心程度。

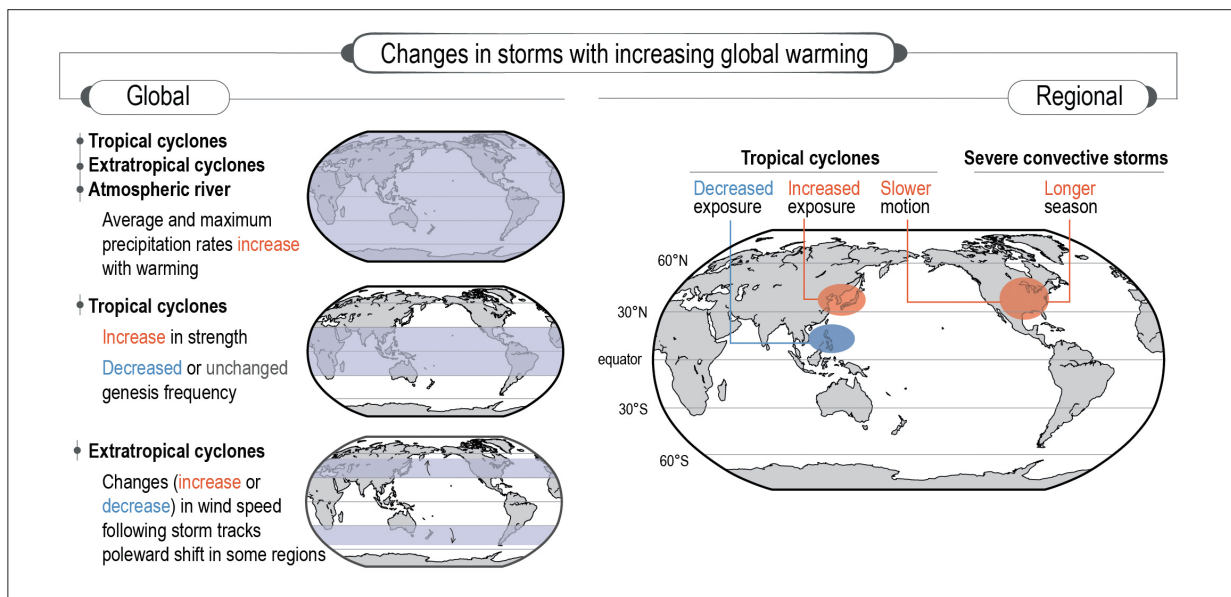


圖1.4.9 熱帶氣旋、溫帶氣旋、大氣河與劇烈對流風暴活動在過去觀測與未來推估變化的示意圖。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 11.20)

1.4.5 複合事件

複合事件定義與目前趨勢

SREX將複合事件定義為：(1) 同時或連續發生2個或多個極端事件；(2) 極端事件的背景條件相結合，強化了事件影響與衝擊；(3) 多種事件本身並非極端事件，但加乘在一起時會導致極端事件或影響。

因此，極端事件發生的型態可不限於單一類型，複合事件類型的極端事件綜合多種不同的極端現象，例如熱浪、乾旱與野火事件，可能會同時發生，進而加倍提高人類社會與環境衝擊和風險。Zscheischler et al. (2018) 則將複合事件定義為：多種驅動因素或危害的組合導致社會或環境風險。



依據定義，複合事件可分為四類：(1) 前置事件 (preconditioned events)：天氣驅動或氣候驅動的前置事件，加劇了造成衝擊的氣候影響因素；(2) 多變量事件 (multivariate events)：多個驅動因素或氣候影響因素導致某種衝擊；(3) 時間複合事件 (temporally compounding events)：接續發生的現象事件造成影響；(4) 空間複合事件 (spatially compounding events)：多個災害分布在鄰近地區導致的聚集影響。(Zscheischler et al., 2020)

2 個或多個氣象或氣候事件的結合，不一定是極端事件，它們可以同時發生、相隔不久或同時發生在不同地區，但事件彼此加乘，導致極端影響遠大於個別極端事件加總的影響。例如，同時發生的極端降水和極端強風可以導致基礎設施損壞 (Martius et al., 2016)；風暴潮和極端降雨事件的結合會造成沿海洪水 (Wahl et al., 2015)；乾旱與高溫的結合可能導致樹木死亡 (Allen et al., 2015)；野火增加冰雹和閃電的發生次數 (Zhang et al., 2019a)。氣旋、鋒面和雷雨風暴系統組成的複合暴雨類型，比單一風暴類型更容易引起極端降雨和極端強風 (Dowdy & Catto, 2017)。沿海與河口地區，洪水事件可能受到風暴潮、極端降雨和河川流量之間的相互影響，同時還有海平面上升、波浪、潮汐以及河口地區的地下水等因素，這類具有多個驅動因素的洪水通常被稱為「複合洪水」(Wahl et al., 2015; Moftakhari et al., 2017; Bevacqua et al., 2020b)，在過去觀測已經偵測到這類事件的增加趨勢 (Wahl et al., 2015; Bevacqua et al., 2019)。

在熱浪乾旱複合事件方面，自SREX和AR5以來的觀測研究顯示，許多地區出現乾旱和熱浪複合的情況。在大多數陸地區域，通常夏季溫度和降水呈現相反關係，有利於極端高溫的天氣系統也不利於降雨，因此，乾旱和熱浪之間具有高相關性 (Zscheischler & Seneviratne, 2017)。降水偏低和極端高溫特徵的乾旱事件已經在美國加州 (AghaKouchak, 2014)、澳洲東部內陸 (King et al., 2014) 和歐洲大部分地區 (Orth et al., 2016) 發生。而熱乾條件同時發生，則會促使野火事件的發生 (Schubert et al., 2014; Littell et al., 2016; Dowdy, 2018; Hope et al., 2019)，例如美國西部 (Abatzoglou & Williams, 2016)，特別是加州 (Williams et al., 2019)。觀測趨勢顯示，在澳洲天氣條件的長期趨勢有助於野火發生，這個趨勢可歸因於人類活動 (Dowdy, 2018)。

未來推估

隨著暖化程度增強，複合氣候事件的強度與頻率可能會增加。在全球暖化程度高的

情況下，同時發生熱浪和乾旱事件的頻率與強度將繼續增加，而全球每升溫 0.5°C ，此類事件的頻率與強度會更高 (高信心程度)。在某些地區，複合式的高溫、乾燥和多風天氣事件，將在全球暖化程度更高的情況下，更加頻繁發生 (高信心程度)。此外，全球暖化程度變得更高，沿海地區的複合洪水事件也將會增加 (高信心程度)。

鑒於全球暖化下，有高度信心推估未來熱乾複合事件增加，野火事件天氣類型會更為頻繁發生與嚴重，特別是在熱帶雨林區 (SRCCL; IPCC, 2019a)。在容易發生野火的地區，例如地中海與中國大興安嶺，研究推估未來乾旱與熱浪嚴重度增加，可能會導致野火頻率增加 (Tian et al., 2017; Ruffault et al., 2018)。隨著全球變暖，即使在GWL 1.5°C 至GWL 2°C 之間的情況下，糧作地區同時受到氣候極端事件影響的可能性也越來越高 (Gaupp et al., 2019)。由於氣候極端事件在許多地區變得更加頻繁，因此不同地點同時發生極端事件，也就是複合事件的狀況可能增加。

複合事件在暖化的未來可能更加頻繁或嚴重。這些複合事件通常對生態系統和社會造成比單獨發生時更嚴重的影響。隨著氣候變化，使單一極端事件變得更加嚴重，原本可能性低、影響程度高的極端事件 (Low-likelihood, High-impact Events Associated With Climate Extremes, LLHI)，由於這些事件的組合發生，可能創造前所未有的複合事件，加劇極端事件的強度和相關影響。

1.5 全球與東亞季風活動特徵之變遷

1.5.1 全球季風活動氣候特徵與未來變遷

全球季風區域依據環流場與降水型態有諸多定義方式。本報告依循AR6定義，將全球季風定義為全年降水變化 (夏季降水減去冬季降水) 大於 2.5 mm day^{-1} 的區域 (Kitoh et al., 2013)，並以此訂出區域季風區 (圖1.5.1)。下文所描述季風變化趨勢在此定義下，除特別提及環流外，以降水量變化為主。

全球季風活躍區域可大致區分如圖1.5.1。全球季風活動的氣候變遷特徵在AR5中



可發現，20世紀下半葉全球季風與陸地之季風降水均減弱，受限於資料特性間的可比較性與再分析資料的不確定性，此一季風活動與季風降水相關推論屬於低信心度 (Low Confidence)。從古氣候觀測的角度，近年來基於高解析度代用指標的應用，使科學家取得較可信之季風活動的歷史重建成果：以全新世中期 (Holocene) 為例，在較暖氣候情境下，季風系統及降水相對較強，然而對照上述北半球1950年代至1980年代的季風降水下降趨勢 (如圖1.5.2)，由觀測與模擬結果推測是肇因於人為氣膠 (anthropogenic aerosol) 排放的抵銷效應。

由近年的全球季風陸域降水觀測發現，季風降水量自1900年代至1950年代微幅上升 (北半球尤甚)，1950年代至1980年代下降，其後則轉變為逐漸上升的趨勢 (Kitoh et al., 2013; Wang et al., 2018, Wang, B. et al., 2021; Huang et al., 2019)，而其變化歷程反映北半球季風環流與降水量之多年代際變化 (Wang et al., 2014, 2017; Monerie et al., 2019)。分析1980年至2010年間GPCP及氣候預報中心合併分析降水 (Climate Prediction Center merged analysis of precipitation, CMAP) 資料可發現，自1980年起，北半球季風呈現降水量增加及夏季延長的特徵 (Deng et al., 2018; Han et al., 2019)。南半球季風活動則主要受較強烈的年際變化及區域差異影響，在GPCP及CMAP資料中並無顯著長期變化趨勢 (Deng et al., 2018)。

總結前述，AR5報告中發現上個世紀的全球季風降水下降趨勢在1980年代已逐漸反轉，目前北半球夏季季風降水可能 (Likely) 具上升趨勢，而南半球的季風活動主要受較強的年際變化影響，因此在百年尺度上並無顯著趨勢變化。古氣候資料則顯示：北半球季風活動自全新世中期以來漸趨弱，並且南北半球之間的季風活動呈現負相關。

在SSP情境推估中，全球季風降水在21世紀可能 (Likely) 增強，季風環流卻會相對減弱。全球季風陸域降水量在全球平均氣溫每上升1°C的條件下，在各SSP情境平均的降水量可能增加1.3%至2.4%，此增強是由於濕度上升的熱力回饋，同時也受到因環流減弱所導致抵銷作用 (Chen Z. et al., 2020)，在中長期未來變遷推估中，季風降水增加量具南北不對稱性，北半球會大於南半球，而東西向亦存在降水增加的不對稱性，是由於亞洲及非洲季風的增強，以及北美季風的減弱所導致 (Lee & Wang, 2014; Mohtadi et al., 2016; Pascale et al., 2017; Wang, B. et al., 2021)。

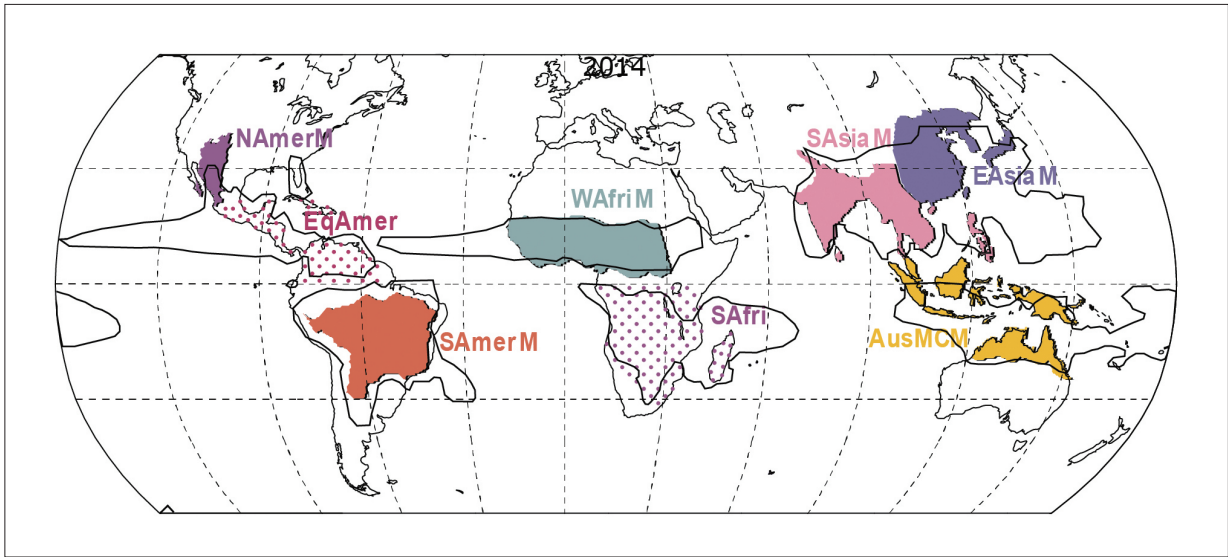


圖1.5.1 全球季風活躍區域 (粗黑線為全球季風範圍，其餘顏色則為區域性季風影響範圍：NAmerM代表受北美季風影響區域；EqAmer代表南美赤道季風區；SAmerM代表南美季風區；WAfriM代表西非季風區；SAfri代表南非季風區；SAsiaM代表東南亞及南亞季風區；EAsiaM代表東亞季風區；AusMCM代表澳洲與海洋大陸季風區)。(摘自IPCC, AR6, WGI, Box TS.13, Figure 1a)

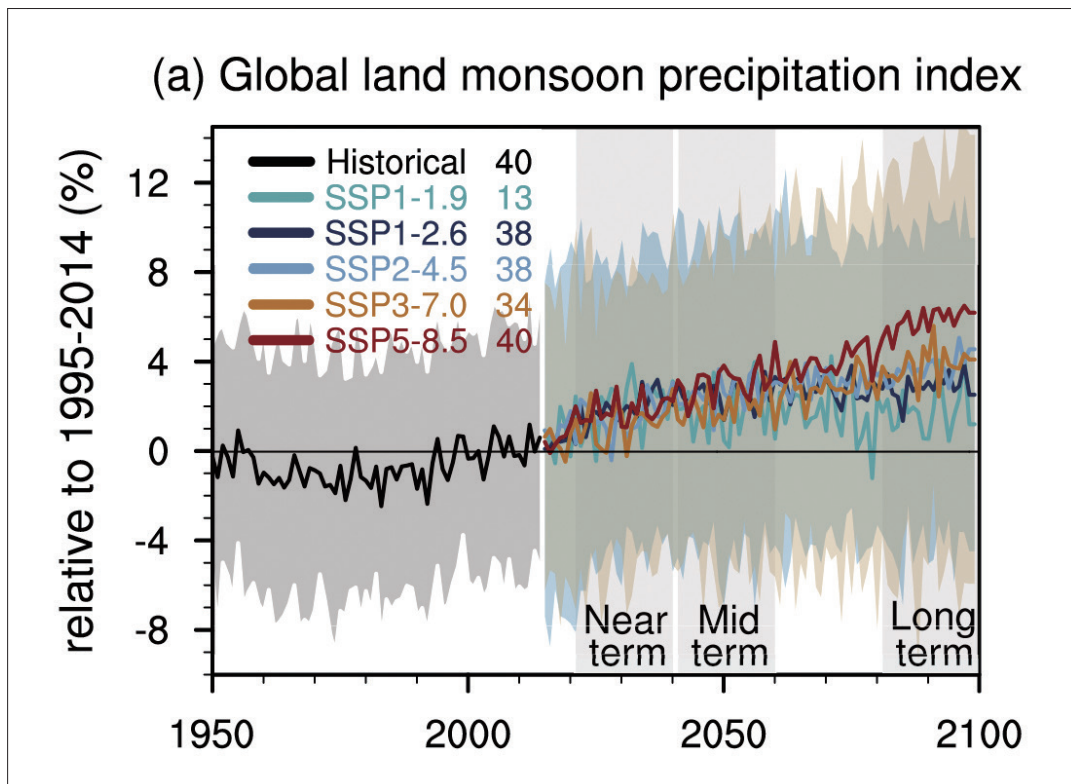


圖1.5.2 全球陸地之季風降水指數距平值。(季風降水指數定義為在全球季風範圍內進行區域權重的平均降水量。)圖中黑線為基期(1950年至2014年)，其餘5條線分別為CMIP6之5個SSP情境，Near term為2021年至2040年；Mid term為2041年至2060年；Long term為2081年至2100年之未來推估。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 4.14)



1.5.2 各季風區域季風降水特徵及未來變遷

AR6報告針對各季風區域應用9個CMIP6模式進行系集平均，以探討人為活動可能之效應，各季風區域在基期 (1950年至2014年) 的季風降水變化趨勢及未來情境降水量推估，分別如圖1.5.3及圖1.5.4所示，模擬組別分為NAT (自然效應)、ALL (包含人為與自然)、GHG (僅考慮溫室氣體) 及AER (僅考慮人為排放氣膠) 等組，由圖1.5.3中可發現位於北半球的SAsiaM及EAsiaM區域，人為排放氣膠減少季風降水的抵銷作用顯著，而未來推估則受溫室氣體主導 (圖1.5.4)，各區域的季風降水量均具上升特徵。

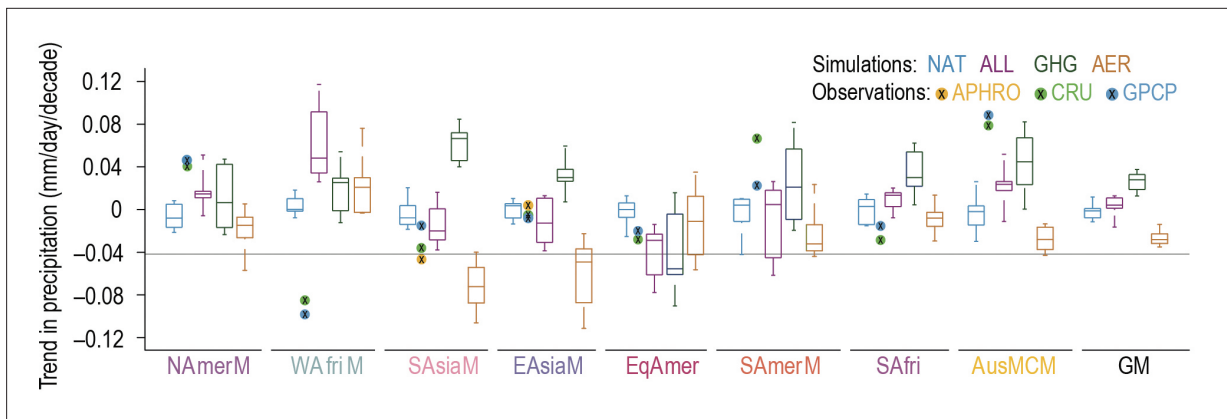


圖1.5.3 各區域季風區在DAMIP (The Detection and Attribution Model Intercomparison Project) 各輻射強迫力實驗下之季風降水 (定義為區域夏季降水量與冬季降水量之差值超過 2.5 mm day^{-1}) 變化趨勢 (NAT:自然強迫力/ALL:自然及人為強迫力/GHG:溫室氣體強迫力/AER:氣膠強迫力)。趨勢之基準為DAMIP九個模式依系集數目之加權系集平均。圖中圓圈代表三組不同觀測資料。(摘自IPCC AR6, WGI, Box TS.13, Figure 1b)

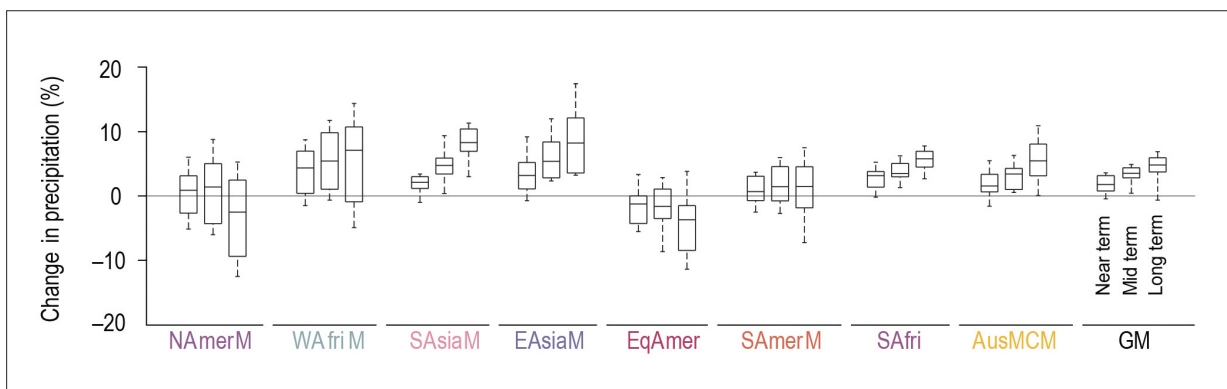


圖1.5.4 各區域季風區在SSP2-4.5情境下，在短期 (Near term, 2021年至2040年)、中期 (Mid term, 2041年至2060年) 及長期 (Long term, 2081年至2100年) 的季風降水量距平之模式系集未來推估 (合計24個CMIP6模式)。(摘自IPCC AR6, WGI, Box TS.13, Figure 1c)

在21世紀的區域季風推估中，可發現區域間的對比及降水與環流的變化，氣溫每上升1°C，可能 (Likely) 將使各區域一年中最乾與最濕月份的降水量差值增加3%至5%。由圖1.5.4可發現北美區域季風降水在長期的未來推估中將會減少，而南亞、東南亞及東亞區域的季風降水則隨近、中、長期之未來逐漸增加。

由古氣候重建資料及現今觀測資料均可發現，季風降水在不同時間的自然變異 (natural variability) 相當大，使得定量區域及更小空間尺度的季風降水未來變遷推估充滿挑戰。在短期 (near term, 2021年至2040年)，未來推估的不確定性主要來自於氣候內部變異 (internal variability)，而AMOC可能弱化非洲及亞洲的季風、加強南半球的季風環流，而在長期未來推估的結果中可發現南亞及東南亞季風的未來變遷將越趨一致。

1.5.3 東亞季風降水未來氣候變遷

東亞季風降水主要來自於夏季季風，在AR5的未來情境推估中，東亞季風區域的夏季季風降水增強，伴隨季風肇始 (onset) 的提前及夏季的延長。由CMIP5未來模擬推估中可發現，21世紀的東亞季風環流增強，同時伴隨降水量的增加，其主要來自梅雨雨帶南端的貢獻，該變化伴隨西北太平洋副熱帶高壓及東亞副熱帶噴流的南移，主要降水變化在東南亞與中國南部，在中國中部和東部的梅雨降水則無顯著變化 (Horinouchi et al., 2019)。以高解析度MRI-AGCM全球模式進行的未來暖化推估，發現在現今梅雨帶的南側降水增加，北側減少，但是不確定性較大 (Ose, 2019)。至於北太平洋副熱帶高壓的變遷，各模式的推估並未呈現一致的變遷趨勢 (Kitoh, 2017)。

未來情境模擬實驗 (Wang, Z. et al., 2016; Tian et al., 2019) 發現，由於歐亞大陸增溫 (Endo et al., 2018) 及海陸溫差增大等，21世紀的東亞季風環流將會增強。然而，由於氣膠排放情境 (Wilcox et al., 2020)、人為驅動力 (anthropogenic external forcing) 和內部變化 (internal variability) 間交互作用 (Wang, B. et al., 2021) 的不確定性，各區域水循環針對世紀末 (2080年至2099年) 的推估也具有較大的不確定性 (Endo et al., 2018)。

南北半球間之質量交換可做為南半球環流與東亞季風降水的連結，然而此連結在使用CMIP5氣候模式於RCP8.5未來情境模擬推估中顯示將會減弱 (Yu et al., 2018)。比較



GWL 1.5°C及GWL 2°C情境，可發現僅增溫0.5°C的差異，也會造成東亞區域大範圍降水的增強 (Lee et al., 2018; Liu et al., 2018; Chen et al., 2019) 及極端事件頻率與強度的提升 (Chevuturi et al., 2018; Li, D. et al., 2019)。

在CMIP6的季風活動未來變遷推估中，所有未來情境的季風降水均增加 (Chen et al., 2020)，然而伴隨模擬時間增加與在排放情境下，模式間的差異會提升。除SSP1-1.9情境在東亞區域未來推估的降水及逕流量為持平或減少外，其餘情境均顯示東亞區域未來季風降水將增加，且其將隨模擬時間增長與排放情境的嚴重程度提升。此外，自CMIP6未來模擬中發現，由於東亞區域夏季肇始的提前及消退的延後，將使夏季長度增加 (Ha et al., 2020)。

總結前述，雖然CMIP5與CMIP6在季風模擬仍具不確定性，然而對於東亞區域在21世紀之季風降水增加為具高度信心 (High Confidence)，對於季風季增長的信心度則為中等 (Medium Confidence)。

1.5.4 全球鋒面頻率之氣候狀態及模擬

鋒面在天氣及氣候尺度上皆有重要貢獻，為局部地區帶來明顯的天氣狀態改變，在中、高緯度可能貢獻超過75%的極端雨量，在主要風暴路徑上則可能達到約90% (Catto & Pfah, 2013)。在氣候分析上，對鋒面的偵測一般採用 Hewson (1998) 發展之方法，尋找空間中熱力參數快速變化的區域，例如濕球位溫梯度變化最大處。過去研究多針對全球尺度的鋒面頻率變化分析，Berry et al. (2011a, b) 根據數種再分析資料指出，由1989年至2009年間，鋒面頻率在北半球已明顯減少，但是由於太平洋副熱帶高壓擴張的關係，中太平洋到東太平洋的副熱帶鋒面頻率明顯增加。Catto et al. (2014, 2015) 及 Blazquez & Solman (2018) 評估CMIP5 模擬之鋒面及相關降水，發現鋒面頻率能被妥善的模擬出來，但頻率高值區位置略有偏差，且鋒面降水可能有高估的情況。根據CMIP5 模式在RCP8.5的情境推估，則發現鋒面頻率高值區有往高緯移動的趨勢。類似的移動趨勢也曾出現在CMIP3模擬中 (Chang et al., 2013; Grieger et al., 2014)。

1.5.5 東亞鋒面

鋒面降雨是華南地區及臺灣重要的水資源，近年發生在臺灣的氣象乾旱，多與春雨及梅雨較少有關 (Hsu and Chen, 2002; Chen et al., 2009)。因降雨過程受到天氣系統的環流型態影響，具有明顯的季節及區域特徵 (Lu & May, 2003)，局部地區的降雨變化不見得與全球趨勢同步。

東亞地區的季節可依降雨及環流型態區分為5個自然季節 (Natural Season)：冬季 (12/2至2/14)、春季 (2/15至5/15)、梅雨季 (5/16至7/24)、颱風季 (7/25至9/27) 及秋季 (9/28至12/1) (Chou et al., 2009)。在5個季節中，除了颱風季外，皆受到鋒面影響。由秋季開始，伴隨亞洲冬季季風出現在中、高緯度地區的極鋒系統，隨著冬季季風增強，鋒面可影響的區域逐漸向低緯地區延伸。除了位在北緯40°左右的極鋒區外，北緯20°至北緯30°之間的副熱帶也有活躍的鋒面活動 (如圖1.5.5)。隨著季節進入春季，冬季季風減弱，南方水氣增加，可看到極鋒頻率下降，副熱帶鋒面頻率略增。梅雨季則因客觀偵測方法未達完善，暫時無法討論。

Wang C. et al. (2021) 使用29個CMIP5模式分析東亞地區鋒面模擬，與RCP8.5於21世紀末的推估 (2071年至2100年)，由於鋒面的模擬在模式間差異較大，研究中針對鋒面

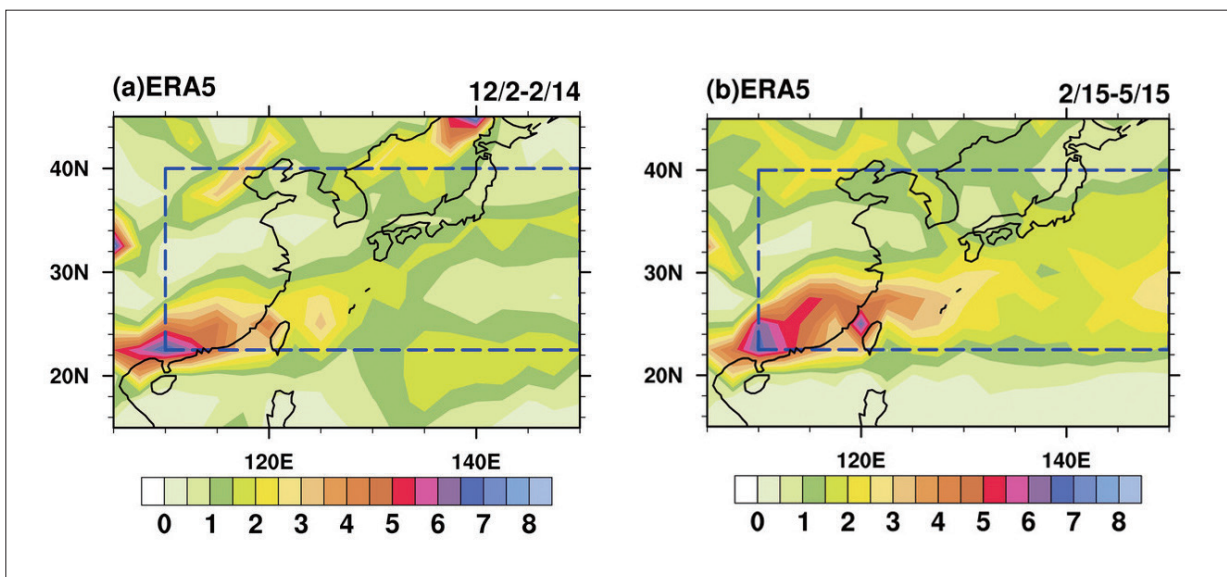


圖1.5.5 東亞地區以自然季節區分之鋒面天數。(a) 冬季 (12/2至2/14)；(b) 春季 (2/15至5/15)，單位： day season^{-1} ，資料：ERA5，1979年至2005年平均， $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。(摘自 Wang et al., 2021)

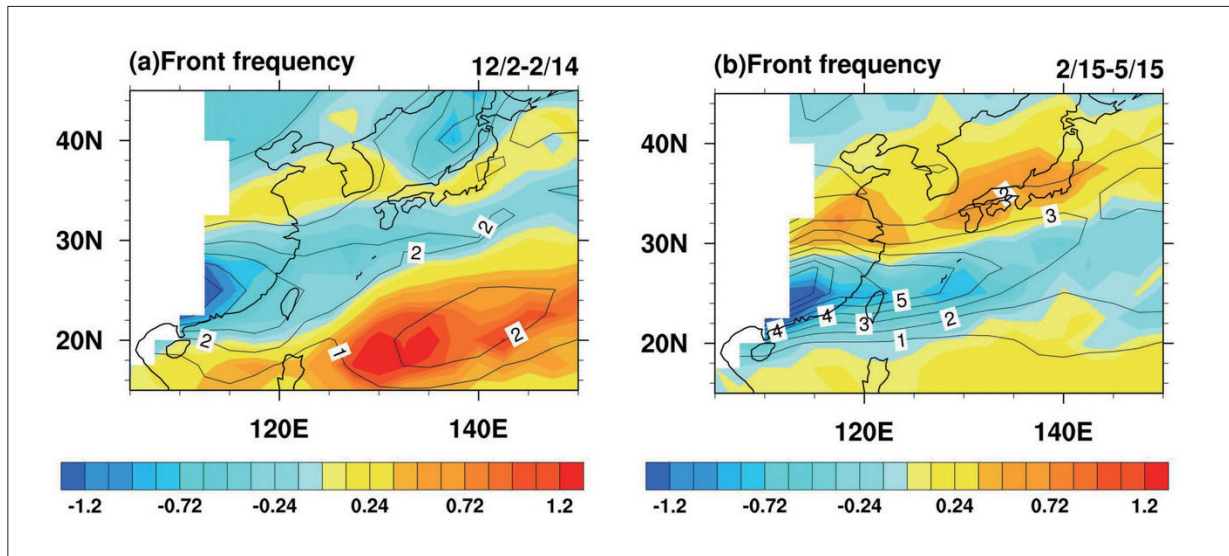


圖1.5.6 CMIP5模擬東亞地區之鋒面天數及未來變化，等值線為歷史模擬 (1976年至2005年平均；單位：day season⁻¹)，色階為RCP8.5情境於世紀末之變化量 (2071年至2100年；單位：day season⁻¹)。 (a) 冬季 (12/2至2/14)；(b) 春季 (2/15至5/15)，僅選用表現較佳的模式。(摘自 Wang et al., 2021)

頻率的空間分布計算其表現指數 (performance index, Reichler & Kim, 2008) 及空間相關性 (pattern correlation)，選出在東亞地區 (圖1.5.5藍色虛線方框區域) 表現較佳的6個至7個模式做系集平均 (如圖1.5.6)。

與歐洲中期天氣預報中心第五版再分析資料 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF Reanalysis v5, ERA5) 比較 (圖1.5.5)，CMIP5較佳模式的系集平均 (圖1.5.6等值線) 能良好掌握冬季及春季鋒面頻率的位置及強度。未來推估 (RCP8.5, 2071年至2100年；圖1.5.6色階) 則顯示冬季在極鋒區和副熱帶鋒面的氣候極大值區域，鋒面頻率略微下降，在北緯30°至北緯40°之間，黃河到長江之間的地區，延伸至朝鮮半島、日本及日本東部海面上，則鋒面頻率略微增加。北緯20°以南及菲律賓、臺灣東方外海上的訊號雖有明顯增加，但屬於熱帶天氣系統，並非中緯度具有斜壓特徵的鋒面。春季則於北緯30°至北緯40°之間有明顯鋒面頻率增加，尤其是長江以北的中國沿海及日本。北緯20°至北緯30°之間鋒面頻率減少，尤其是華南地區到臺灣一帶。整體而言，鋒面極值區有往北移動的趨勢。

統計26個CMIP5模式的鋒面頻率變化趨勢 (如圖1.5.7)，也有相同的區域變化特徵：在北緯30°至40°之間，有較多模式推估鋒面頻率增加；在北緯20°至北緯30°之間及北緯

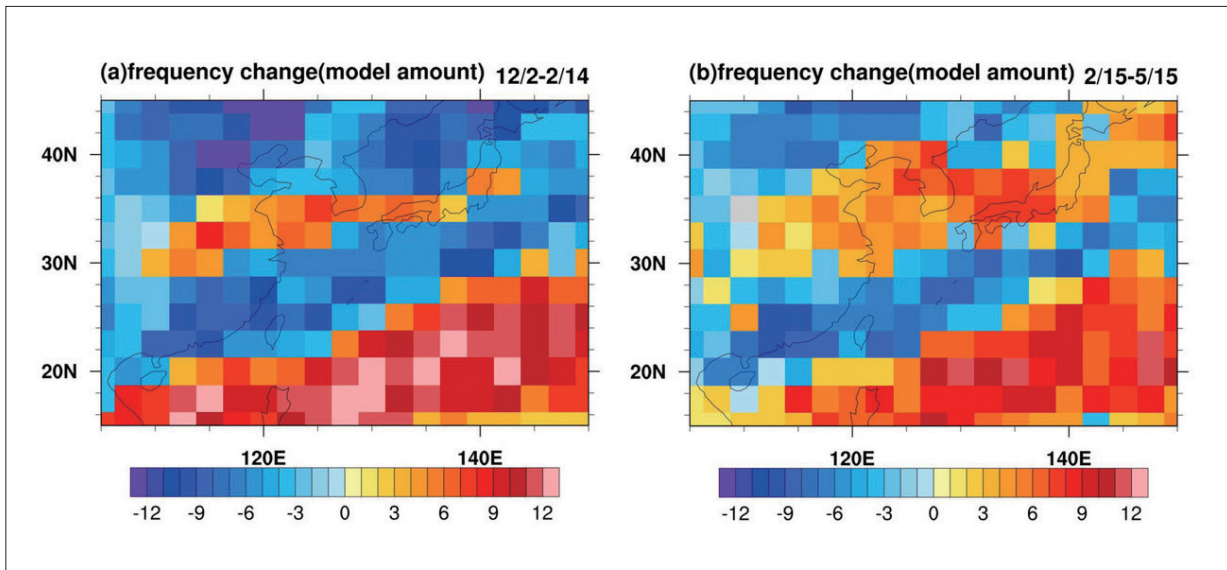


圖1.5.7 CMIP5模式鋒面頻率變化趨勢統計結果。(a) 冬季、(b) 春季，共使用26個模式，僅考慮RCP8.5情境於世紀末(2071年至2100年)相較於歷史模擬(1976年至2005年)變化量通過90%信心度的模式，紅色(藍色)網格代表有較多模式模擬出鋒面頻率增加(減少)趨勢，紅藍色階數字代表該趨勢的模式個數。(摘自 Wang et al., 2021)

40°以北的地區，則有較多模式推估鋒面頻率減少。模式個數已扣除變化趨勢沒有通過統計檢定的模式。

選用CMIP5模式中對鋒面頻率模擬較佳的模式，分析其大尺度環流的變化(如圖1.5.8)，發現未來(RCP8.5, 2071年至2100年)冬季時，中、高緯度地區陸地上海平面氣壓降低，顯示大陸冷高壓在暖化的情境下減弱。日本及其東部海面往西南延伸到臺灣、華南、中南半島和南海一帶則海平面氣壓升高，將加強臺灣、華南及南海一帶的低層(850百帕)東北風(圖1.5.8a)。

類似情況也出現在春季，只是變化量較小，同時春季於華南地區出現一個反氣旋式的環流距平(圖1.5.8b)。用來偵測鋒面的850hPa濕球位溫梯度(圖1.5.8c)，可看到在北緯20°以北普遍減少，主要減少的區域落在極鋒區和副熱帶鋒面區。水氣通量的變化，冬季在中國南部出現一個反氣旋式環流距平，此環流在春季變得更強，具有明顯往北傳送的通量(圖1.5.8d)，造成北緯30°附近濕球位溫梯度降低，在北緯30°以北則有水氣輻合，且濕球位溫梯度的增加，可能是春季鋒面頻率高值區略微往高緯移動的原因。

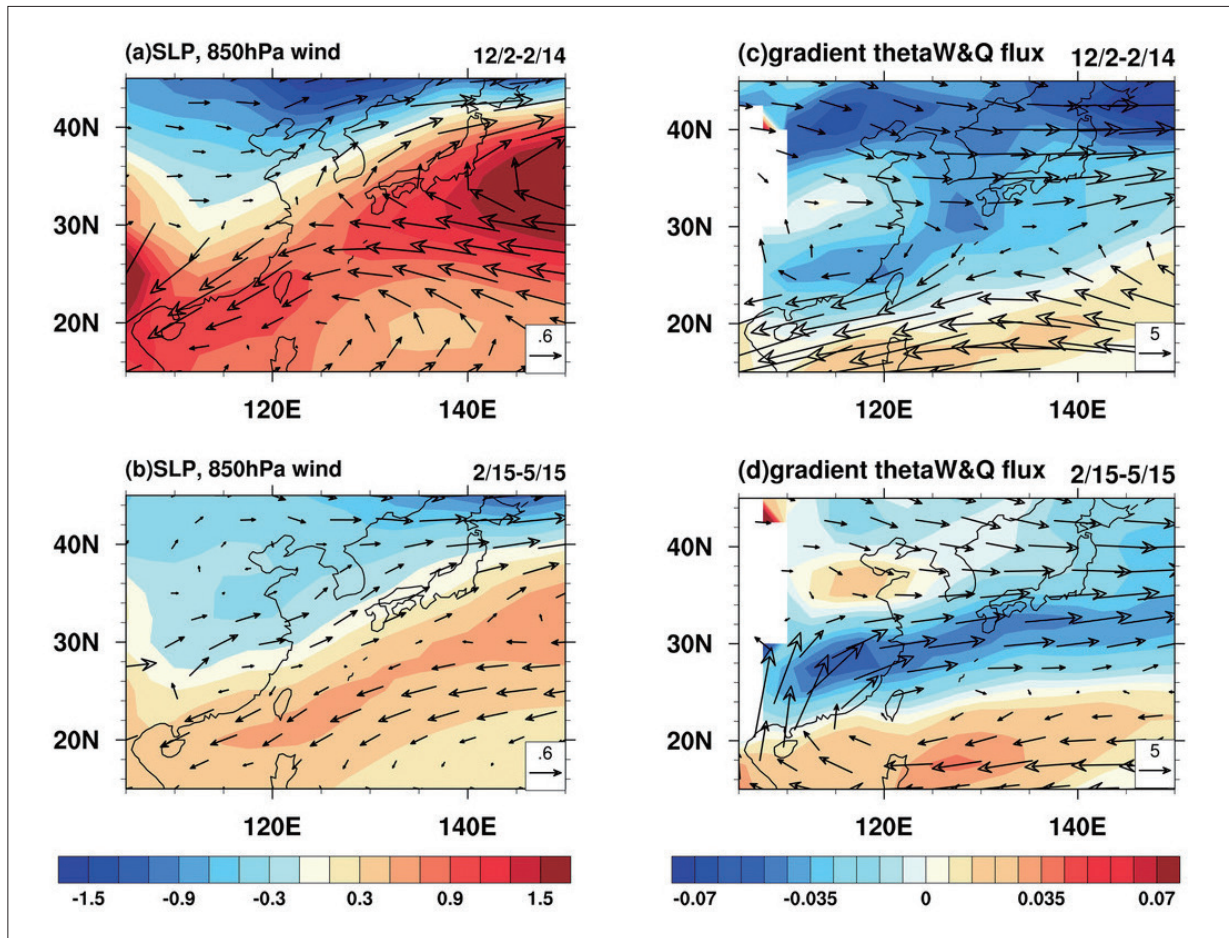


圖1.5.8 CMIP5表現較佳模式之大尺度環流變化 (未來推估減歷史模擬)。 (a) 和 (b) 分別為冬季及春季海平面氣壓變化 (色階, 單位: hPa) 及850 hPa風場變化 (箭頭, 單位: m s^{-1})。 (c) 和 (d) 為冬季及春季850 hPa濕球位溫梯度變化 (色階, 單位: $\text{K } 100 \text{ km}^{-1}$) 及水氣通量 (箭頭, 單位: $\text{g m kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$)。 (摘自Wang et al., 2021)

1.6 空氣品質

1.6.1 全球空氣品質的歷史變遷

大氣中有些短生命期的物質會影響氣候；這些物質對環境和健康也造成影響而被認為是空氣污染物。大氣中常見的污染物以氣膠 (aerosol, 或稱懸浮微粒 Particulate Matter, PM) 及反應性氣體為主, PM成分複雜, 常見的有硫酸、硝酸、氨、含碳物質、沙塵、海鹽等, 反應性氣體則有臭氧 (O_3)、氮氧化物 (NO_x)、二氧化硫 (SO_2) 和一氧化碳

(CO) 等。由於這些污染物的生命期約幾天到幾個月之間，與溫室氣體相比屬短生命期物種，因此分布的時空變化相當大，主要集中排放源區附近且受大氣條件影響。

在2010年至2019年期間，從衛星資料和地面測站資料顯示，全球污染物的空間分布有明顯變化。AR6統整過去研究顯示：全球CO濃度持續下降；SO₂及二氧化氮 (NO₂) 在北美、歐洲呈現持續下降趨勢，在南亞反而呈上升趨勢，東亞地區則是增加後下降的情況；值得注意的是O₃，除了美西及歐洲有下降趨勢，其他地區都是上升趨勢 (IPCC AR6, WGI)。氣膠對氣候的影響主要可以分成直接及間接效應。直接效應意指氣膠可吸收或反射太陽輻射，直接造成大氣冷卻或增溫；間接效應則指氣膠可影響雲的微物理性質，進而改變雲的反照率及生命期，進一步影響天氣系統及氣候 (Haywood and Boucher, 2000; Lohmann and Feichter, 2005; Twomey, 1977)。氣膠對氣候的影響，會受到氣膠種類、地理位置、垂直高度等影響，相當複雜，至今仍是模式裡極大的不確定性因素。從1850年到1970年代，PM及其前驅物濃度呈現上升的趨勢，污染物排放、濃度及生命期等變化對氣候造成冷卻的效果，可部分抵銷溫室氣體造成的暖化。而1970年代中期以後，各國開始關注及控制污染物排放，改善空氣品質，使得PM與其前驅物造成的淨輻射強迫減弱 (圖1.6.1)，讓地球降溫的效果也隨之減弱。從AR5到AR6，地球

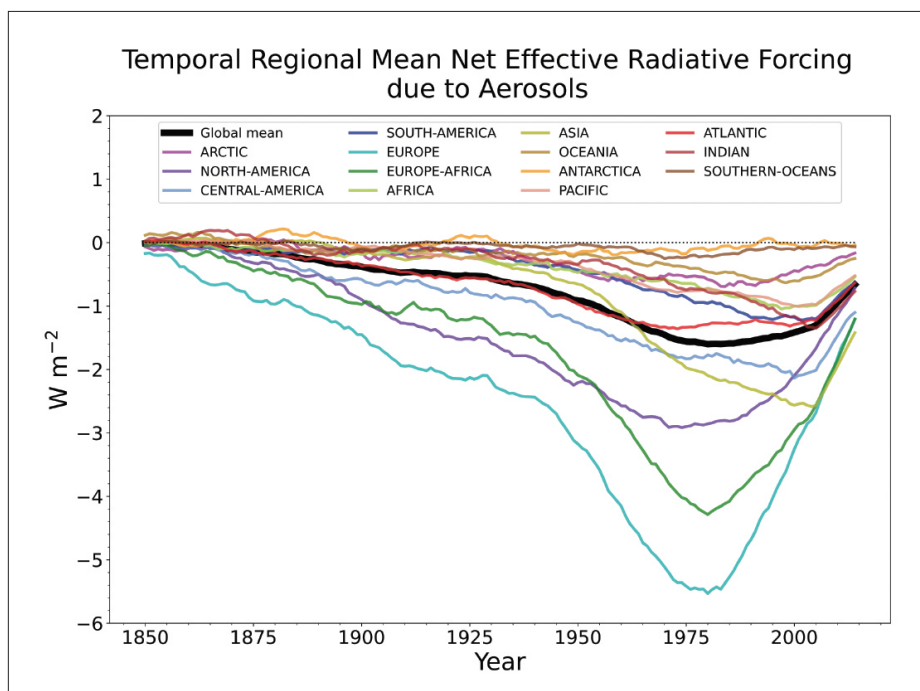


圖1.6.1 地球系統模式所模擬1850年至2014年PM造成的區域平均輻射強迫 ($W m^{-2}$)。(摘自IPCC AR6, WGI, Figure 6.11)



系統模式所涵蓋的面向更完整，包括大氣化學、生地化循環等都陸續納入地球系統模式裡，但從其中複雜的過程，例如自然源氣膠的排放與沉降等，仍有相當大的不確定性，亟須進行相關研究。

1.6.2 氣候變遷對全球空氣品質的影響

氣候變遷可影響大氣條件 (例如逆溫、通風狀況、平流層一對流層交換)、化學反應及生物源排放量等，進而影響污染物濃度 (Kirtman et al., 2013; von Schneidemesser et al., 2015)，AR6統整過去觀測及模式結果提出：(1) 全球暖化加速消耗 O_3 ，使低污染地區的地表 O_3 減少；但在污染地區，反而使地表 O_3 增加；(2) PM成分複雜，目前的研究大多局限於全球尺度或歐洲、美洲、南亞和東亞這三區，其他地區的研究十分缺乏。根據Westervelt et al. (2016) 與Xu & Lamarque (2018)，在PM及其前驅物排放固定，溫室氣體排放採用RCP8.5的情境下，全球暖化造成2100年平均PM濃度約增加 0.21 mg m^{-3} 。

另一方面，氣候變遷造成極端天氣的頻率增加，也會影響到空氣品質。最常被提到的是在全球暖化情況下，熱浪頻率增加，導致高污染 O_3 或PM事件增加。亞洲地區的冬季是高污染好發季節，Zou et al. (2017) 利用再分析資料研究2013年1月中國冬季高污染情況，認為全球暖化造成該年秋季時北極海冰減少以及該年冬季初大雪，溫度的變化造成大氣環流改變，中國北方處於弱風，不利污染物擴散。他們亦分析CMIP5對未來推估，認為未來全球暖化造成北極冰圈的變化，將使亞洲冬季更容易發生高污染事件。Cai et al. (2017) 分析CMIP5資料亦顯示在RCP8.5的情境下，類似2013年1月高污染時的天氣特徵 (大氣穩定度增加、近地面北風及中層西北風均減弱) 將更頻繁出現，且此環流特徵與北極振盪指數增加、和亞洲冬季季風減弱有關。研究亦指出全球暖化導致亞洲地區大尺度環流改變，包括北極振盪指數增加、冬季季風減弱等，都顯示未來亞洲冬季更容易發生高污染事件。

整體而言，目前科學研究顯示，全球暖化造成全球或區域尺度空氣品質有變差的趨勢，但由於污染物的時空尺度變化相當大，若要評估國家或都市尺度的影響，則需要高解析度數值模擬及資料分析，方能有更進一步的了解。

1.6.3 COVID-19 對全球空氣品質的衝擊

2019年12月，中國武漢市爆發COVID-19疫情，並蔓延到全世界，造成大流行，各國政府為控制疫情傳播，在2020年至2021年期間進行交通運輸或人類活動的管控，連帶也減少工業與經濟活動。

根據觀測資料估計，COVID-19造成NO₂濃度減少13%至48%，PM_{2.5}濃度減少10%至33%，而O₃濃度約增加0%至4% (Gkatzelis et al., 2021)，在區域或都市尺度減少情況更為明顯。Chauhan & Singh (2020) 分析世界主要城市，包括紐約 (New York)、洛杉磯 (Los Angeles)、薩拉哥薩 (Zaragoza)、羅馬 (Roma)、杜拜 (Dubai)、德里 (Delhi)、孟買 (Mumbai)、北京 (Beijing) 以及上海 (Shanghai) 等，在2019年12月到2020年3月的PM_{2.5}濃度，並與2017年至2019年的濃度做比較，發現可能由於世界各國為了遏止COVID-19疫情，倡導保持社交距離，2020年3月各大城市的PM_{2.5}濃度有下降的情況 (圖1.6.2)。

區域尺度的研究也有類似結果。Sharma et al. (2020) 分析印度22個城市的標準污染物濃度發現，包括PM₁₀、PM_{2.5}、CO及NO₂等污染物在2020年春季的濃度比2017年至2019年春季濃度減少10%至43%不等，但O₃濃度反而約增加17%；印度各地區的空氣品質指標 (Air Quality Index, AQI) 降低15%至44%不等，顯示在2020年疫情封鎖期間，由於人為活動降低，印度的空氣品質有明顯改進。至於中南半島一帶，2020年馬來西亞因為COVID-19發布了行動管制令Malaysia Movement Control Order (MCO)，Abdullah et al. (2020) 發現由於交通工具和工業活動減少，68個測站的PM_{2.5}濃度減少程度可達58%。泰國曼谷在2020年3月至4月期間，因疫情造成交通活動變少，CO及NO₂濃度降低，反而使O₃濃度明顯比2019年同期濃度增加 (Dejchanchaiwong & Tekasakul, 2021)。Bai et al. (2022) 分析中國地區1388個測站在2020年2月至3月PM_{2.5}濃度資料，發現中國主要城市的PM_{2.5}濃度相比於前5年的同時期，減少可達30%至60% (圖1.6.3)。

不僅地面觀測資料顯示空氣品質受COVID-19疫情影響，衛星遙測也有相似的結果。Filonchik et al. (2020) 分析臭氧監測儀 (Ozone Monitoring Instrument, OMI) 所估計的東亞污染物排放資料，顯示人為活動減少，導致東亞地區CO和NO₂排放量減少20%至30%。不僅東亞地區空氣品質有改善的情況，2020年初印度及阿拉伯聯合大公國的NO₂相較於疫情前降低約17%至23%，氣膠光學厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD) 降低約



3%至20% (Alqasemi et al., 2021; Hu et al., 2022)。東歐波蘭地區的中級解析度成像分光輻射度計 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 資料則顯示，2020年4月至5月AOD比2018年至2019年同期少了約20% (Filonchyk et al., 2021)。除了短生命期的污染物濃度明顯因疫情而降低，根據研究，COVID-19疫情也對2020年CO₂排放量造成短時間的影響，大約減少7%排放量 (Forster et al., 2020; Friedlingstein et al.,

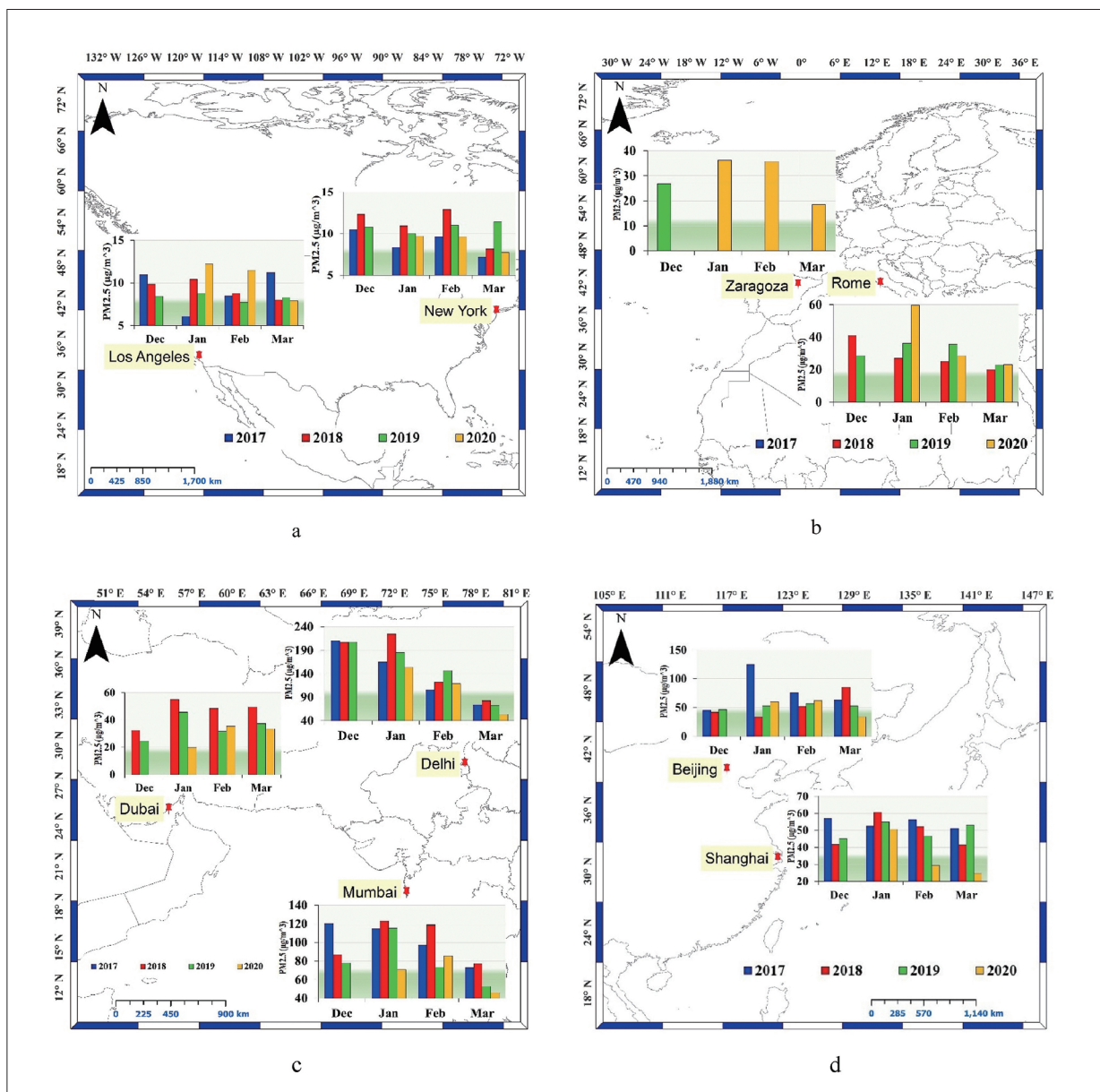


圖1.6.2 世界各主要城市在2017年 (藍色直條)、2018年 (紅色直條)、2019年 (綠色直條) 以及2020年 (黃色直條) 12月到隔年3月的平均PM_{2.5}濃度。(a) 美洲的紐約及洛杉磯，(b) 歐洲西班牙的薩拉哥薩及義大利羅馬，(c) 阿拉伯半島的杜拜以及印度的德里、孟買，(d) 中國的北京與上海。(摘自Chauhan & Singh, 2020)

2020; Le Quéré et al., 2020)，但2020年整年的CO₂濃度仍持續上升，顯示疫情並未造成CO₂長期的影響。

以上研究顯示COVID-19的疫情顯著減少人類活動，連帶改善空氣品質；從另一方面來說，COVID-19的疫情是一次真實的地球實驗室，人類若要改善目前各地空氣品質不良的情況，必須從控制及改進各種交通工具及工業活動著手。

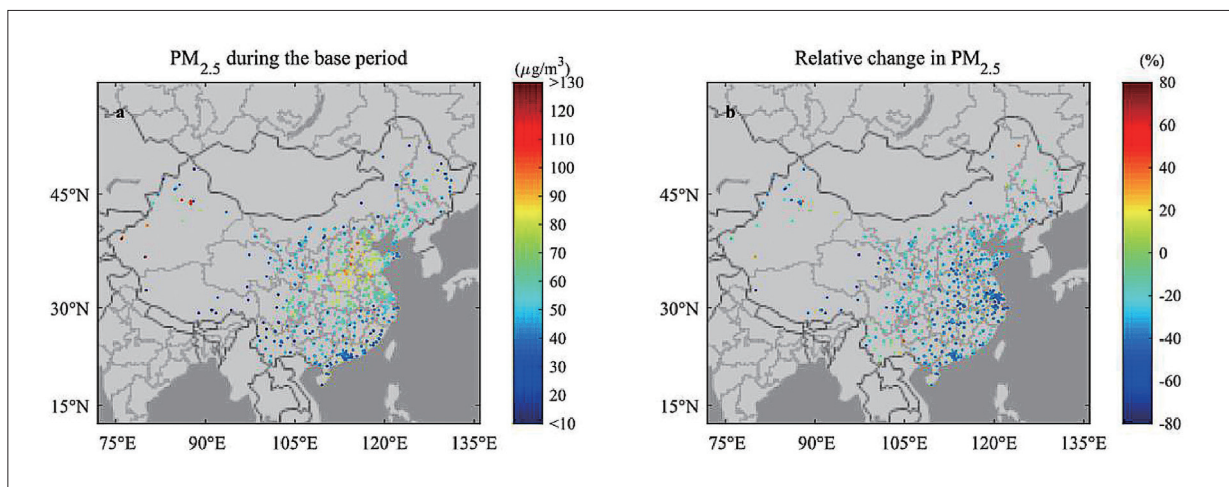


圖1.6.3 中國地區2015年至2019年平均PM_{2.5}濃度 (左圖) 以及2020年2月至3月平均PM_{2.5}濃度降低的比例 (%)。(摘自 Bai et al., 2022)

1.6.4 COVID-19 對全球輻射強迫以及氣候的衝擊

根據IPCC AR6，COVID-19疫情減少空氣污染，導致2020年總輻射強迫短暫出現小幅上升的情況，主要來自人為活動產生的氣膠減少。由於COVID-19造成全球人類活動受限制的時間不長，地球系統模式模擬的結果顯示輻射強迫變化量不大，2020年春天因為疫情造成總輻射強迫增加0.025 W m⁻²至0.2 W m⁻²，其中氣膠與雲交互作用貢獻+0.1 W m⁻²至+0.3 W m⁻²、CO₂減少使輻射強迫降低0.01 W m⁻²，以及NO_x減少 (對流層臭氧也減少) 造成輻射強迫減少0.04 W m⁻²。另一方面空中交通減少造成凝結尾卷雲減少，也降低輻射強迫約0.04 W m⁻²，到2020年底增加的趨勢則減緩至2020年春天的一半 (Forster et al., 2020; Gettelman et al., 2021; Weber et al., 2020; Yang et al., 2020)。COVID-19疫情造成污染物排放減少及AOD降低 (Gkatzelis et al., 2021; Ming et al., 2021; van Heerwaarden et al., 2021)，但2020年全球平均溫度或降水並未觀測到有明顯變化。



參考文獻

- 王俊寓、童裕翔，陳永明 (2023)。AR6臺灣氣候變遷圖資產製成果。國家災害防救科技中心，NCDR 111-A28。
- 童裕翔、陳正達、劉俊志、陳永明 (2019)。統計降尺度 (日) 資料評估與應用。國家災害防救科技中心，NCDR 107-T19。
- TCCIP技術報告 (2021)。統計與動力降尺度方法。臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台。https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_publish_data_document_one.aspx?dd_id=20210609212941
- TCCIP資料說明 (2023)。AR6統計降尺度日資料-資料說明文件。臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台。https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/km_publish_data_document_one.aspx?dd_id=20220708151649
- 國科會「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」(2023)。臺灣氣候變遷關鍵指標圖集：AR6統計降尺度版。國家災害防救科技中心。https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/ds_05_03.aspx
- Abatzoglou, J. T., & Williams, A. P. (2016). Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(42), 11770-11775. https://doi.org/10.1073/pnas.1607171113
- Abdullah, S., Mansor, A. A., Napi, N. N. L. M., Mansor, W. N. W., Ahmed, A. N., Ismail, M., & Ramly, Z. T. A. (2020). Air quality status during 2020 Malaysia Movement Control Order (MCO) due to 2019 novel coronavirus (2019-nCoV) pandemic. *Science of the Total Environment*, 729, 139022. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139022
- Adloff, F., Somot, S., Sevault, F., Jordà, G., Aznar, R., Déqué, M., Herrmann, M., Marcos, M., Dubois, C., Padorno, E., Alvarez-Fanjul, E., & Gomis, D. (2015). Mediterranean Sea response to climate change in an ensemble of twenty first century scenarios. *Climate Dynamics*, 45, 2775-2802. https://doi.org/10.1007/s00382-015-2507-3
- Adusumilli, S., Borsa, A. A., Fish, M. A., McMillan, H. K., & Silverii, F. (2019). A decade of water storage changes across the contiguous United States from GPS and satellite gravity. *Geophysical Research Letters*, 46(22), 13006-13015. https://doi.org/10.1029/2019gl085370
- AghaKouchak, A. (2014). A baseline probabilistic drought forecasting framework using standardized soil moisture index: application to the 2012 United States drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(7), 2485-2492. https://doi.org/10.5194/hess-18-2485-2014
- Aitor Aldama-Campino & Kristofer DÖÖs (2020). Mediterranean overflow water in the North Atlantic and its multidecadal variability, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 72(1), 1-10. https://doi.org/10.1080/16000870.2018.1565027
- Alexander, L.V. (2016). Global observed long-term Changes in temperature and precipitation

- extremes: A review of progress and limitations in IPCC assessments and beyond. *Weather and Climate Extremes*, *11*, 4–16. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.10.007>
- Allen, C. D., D. D. Breshears, & N. G. McDowell, (2015). On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the *Anthropocene*. *Ecosphere*, *6*(8), 1–55. <https://doi.org/10.1890/es15-00203.1>
- Allen, J.T. (2018). *Climate Change and Severe Thunderstorms*. In: *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. Oxford University Press, Oxford, UK (pp. 1–65). <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.62>
- Alqasemi, A. S., M. E. Hereher, G. Kaplan, A. M. F. Al-Quraishi, & H. Saibi (2021). Impact of COVID-19 lockdown upon the air quality and surface urban heat island intensity over the United Arab Emirates. *Science of The Total Environment*, *767*, 144330. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144330>
- Altman, J., Ukhvatkina, O. N., Omelko, A. M., Macek, M., Plener, T., Pejcha, V., Cerny, T., Petrik, P., Srutek, M., Song, J., Zhmerenetsky, A. A., Vozmishcheva, A. S., Krestov, P. V., Petrenko, T. Y., Treydte, K., & Dolezal, J. (2018). Poleward migration of the destructive effects of tropical cyclones during the 20th century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *115*(45), 11543-11548. <https://doi.org/10.1073/pnas.1808979115>
- Angéilil, O., Stone, D., Wehner, M., Paciorek, C. J., Krishnan, H., & Collins, W. (2017). An independent assessment of anthropogenic attribution statements for recent extreme temperature and rainfall events. *Journal of Climate*, *30*(1), 5-16. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-16-0077.1>
- Armstrong McKay, D. I., Staal, A., Abrams, J. F., Winkelmann, R., Sakschewski, B., Loriani, S., Fetzer, I., Cornell, S. E., Rockström, J., & Lenton, T. M. (2022). Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, *377*(6611). <https://doi.org/10.1126/science.abn7950>
- Baek, H. J., Kim, M. K., & Kwon, W. T. (2017). Observed short - and long - term changes in summer precipitation over South Korea and their links to large - scale circulation anomalies. *International Journal of Climatology*, *37*(2), 972-986. <https://doi.org/10.1002/joc.4753>
- Bai, H., W. Gao, Y. Zhang, & L. Wang (2022), Assessment of health benefit of PM2.5 reduction during COVID-19 lockdown in China and separating Contributions from anthropogenic emissions and meteorology. *Journal of Environmental Sciences*, *115*, 422-431. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.01.022>
- Balaguru, K., Foltz, G. R., & Leung, L. R. (2018). Increasing magnitude of hurricane rapid intensification in the central and eastern tropical Atlantic. *Geophysical Research Letters*, *45*(9), 4238-4247. <https://doi.org/10.1029/2018gl077597>
- Barcikowska, M. J., Weaver, S. J., Feser, F., Russo, S., Schenk, F., Stone, D. A., Wehner, M. F., & Zahn, M.



- (2018). Euro-Atlantic winter storminess and precipitation extremes under 1.5 C vs. 2 C warming scenarios. *Earth System Dynamics*, 9(2), 679-699. <https://doi.org/10.5194/esd-9-679-2018>
- Bednaršek, N., Naish, K.-A., Feely, R. A., Hauri, C., Kimoto, K., Hermann, A. J., Michel, C., Niemi, A., & Pilcher, D. (2021). Integrated Assessment of Ocean Acidification Risks to Pteropods in the Northern High Latitudes: Regional Comparison of Exposure, Sensitivity and Adaptive Capacity. *Front. Mar. Sci.* 8, 671497. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.671497>
- Behrangi, A., Guan, B., Neiman, P. J., Schreier, M., & Lambriksen, B. (2016). On the quantification of atmospheric rivers precipitation from space: Composite assessments and case studies over the eastern North Pacific Ocean and the western United States. *Journal of Hydrometeorology*, 17(1), 369-382. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-15-0061.1>
- Benestad, R. E., Parding, K. M., Erlandsen, H. B., & Mezghani, A. (2019). A simple equation to study changes in rainfall statistics. *Environmental Research Letters*, 14(8), 084017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2bb2>
- Berry, G., Jakob, C., & Reeder, M. (2011a). Recent global trends in atmospheric fronts. *Geophysical Research Letters*, 38(21). <https://doi.org/10.1029/2011GL049481>
- Berry, G., Reeder, M. J., & Jakob, C. (2011b). A global climatology of atmospheric fronts. *Geophysical Research Letters*, 38(4). <https://doi.org/10.1029/2010GL046451>
- Bevacqua, E., Maraun, D., Vousdoukas, M. I., Voukouvalas, E., Vrac, M., Mentaschi, L., & Widmann, M. (2019). Higher probability of compound flooding from precipitation and storm surge in Europe under anthropogenic climate change. *Science advances*, 5(9), eaaw5531. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw5531>
- Bevacqua, E., Vousdoukas, M. I., Zappa, G., Hodges, K., Shepherd, T. G., Maraun, D., Mentaschi, L., & Feyen, L. (2020b). More meteorological events that drive compound coastal flooding are projected under climate change. *Communications Earth & Environment*, 1(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00044-z>
- Bevacqua, E., Zappa, G., & Shepherd, T. G. (2020a). Shorter cyclone clusters modulate changes in European wintertime precipitation extremes. *Environmental Research Letters*, 15(12), 124005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbde7>
- Bhatia, K. T., Vecchi, G. A., Knutson, T. R., Murakami, H., Kossin, J., Dixon, K. W., & Whitlock, C. E. (2019). Recent increases in tropical cyclone intensification rates. *Nature Communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08471-z>
- Bindoff, N. L. et al., (2013) Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K.Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley

- (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (pp. 867–952). <https://doi.org/10.1017/cbo9781107415324.022>
- Bindoff, N.L., W.W.L. Cheung, J.G. Kairo, J. Arístegui, V.A. Guinder, R. Hallberg, N. Hilmi, N. Jiao, M.S. Karim, L. Levin, S. O’ Donoghue, S.R. Purca Cuicapusa, B. Rinkevich, T. Suga, A. Tagliabue, & P. Williamson, (2019). Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 447-587. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.007>. (pp. 447–587). <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-5/>
- Blázquez, J., Solman, S.A. (2019). Relationship between projected changes in precipitation and fronts in the austral winter of the Southern Hemisphere from a suite of CMIP5 models. *Clim Dyn* 52, 5849–5860. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4482-y>
- Box, J. E., Hubbard, A., Bahr, D. B., Colgan, W. T., Fettweis, X., Mankoff, K. D., Wehrlé, A., Noël, B., van den Broeke, M. R., Wouters, B., Bjørk, A. A., & Fausto, R. S. (2022). Greenland ice sheet Climate disequilibrium and Committed sea-level rise. *Nature Climate Change*, 12(9), 808-813. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01441-2>
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P., & Valdivieso, J. (2018). Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Climatic Change*, 150, 131-147. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2246-7>
- Brito, S. S. B., Cunha, A. P. M., Cunningham, C. C., Alvalá, R. C., Marengo, J. A., & Carvalho, M. A. (2018). Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, 38(2), 517-529. <https://doi.org/10.1002/joc.5225>
- Bryden, H. L., Longworth, H. R., & Cunningham, S. A. (2005). Slowing of the Atlantic meridional overturning Circulation at 25°N. *Nature*, 438(7068), 655-657. <https://doi.org/10.1038/nature04385>
- Bulgin, C. E., Merchant, C. J., & Ferreira, D. (2020). Tendencies, variability and persistence of sea surface temperature anomalies. *Scientific Reports*, 10, 7986. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64785-9>
- Caesar, L., Rahmstorf, S., Robinson, A., Feulner, G., & Saba, V. (2018). Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning Circulation. *Nature*, 556(7700), 191-196. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0006-5>
- Cai, W., K. Li, H. Liao, H. Wang, & L. Wu (2017), Weather Conditions Conducive to Beijing severe haze more frequent under Climate Change. *Nature Climate Change*, 7(4), 257-262. <https://doi.org/10.1038/nclimate3249>



- Catto, J. L., & Pfahl, S. (2013). The importance of fronts for extreme precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *118*(19), 10-791. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50852>
- Catto, J. L., Jakob, C., & Nicholls, N. (2015). Can the CMIP5 models represent winter frontal precipitation?. *Geophysical Research Letters*, *42*(20), 8596-8604. <https://doi.org/10.1002/2015GL066015>
- Catto, J. L., Nicholls, N., Jakob, C., & Shelton, K. L. (2014). Atmospheric fronts in current and future climates. *Geophysical Research Letters*, *41*(21), 7642-7650. <https://doi.org/10.1002/2014GL061943>
- Chang, E. K. (2014). Impacts of background field removal on CMIP5 projected changes in Pacific winter cyclone activity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *119*(8), 4626-4639. <https://doi.org/10.1002/2013jd020746>
- Chang, E. K., Guo, Y., Xia, X., & Zheng, M. (2013). Storm-track activity in IPCC AR4/CMIP3 model simulations. *Journal of climate*, *26*(1), 246-260. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00707.1>
- Chang, E. K., Ma, C. G., Zheng, C., & Yau, A. M. (2016). Observed and projected decrease in Northern Hemisphere extratropical cyclone activity in summer and its impacts on maximum temperature. *Geophysical Research Letters*, *43*(5), 2200-2208. <https://doi.org/10.1002/2016gl068172>
- Chauhan, A., & Singh R. P. (2020). Decline in PM2.5 Concentrations over major Cities around the world associated with COVID-19. *Environmental Research*, *187*, 109634. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109634>
- Chen, H., & Sun, J. (2015). Changes in drought characteristics over China using the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, *28*(13), 5430-5447. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00707.1>
- Chen, H., & Sun, J. (2017a). Anthropogenic warming has caused hot droughts more frequently in China. *Journal of Hydrology*, *544*, 306-318. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.044>
- Chen, H., & Sun, J. (2017b). Characterizing present and future drought changes over eastern China. *International Journal of Climatology*, *37*, 138-156. <https://doi.org/10.1002/joc.4987>
- Chen, S. T., Kuo, C. C., & Yu, P. S. (2009). Historical trends and variability of meteorological droughts in Taiwan. *Hydrological sciences journal*, *54*(3), 430-441. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.3.430>
- Chen, J., Dai, A., Zhang, Y., & Rasmussen, K. L. (2020). Changes in convective available potential energy and convective inhibition under global warming. *Journal of Climate*, *33*(6), 2025-2050. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0461.1>
- Chen, L., Qu, X., Huang, G., & Gong, Y. (2019). Projections of East Asian summer monsoon under 1.5°C and 2°C warming goals. *Theoretical and Applied Climatology*, *137*, 2187-2201. <https://doi.org/10.1007/s00137-019-0461-1>

org/10.1007/s00704-018-2720-1

- Chen, C. A., Hsu, H. H., Liang, H. C., Chiu, P. G., & Tu, C. Y. (2022). Future Change in extreme precipitation in East Asian spring and Mei-yu seasons in two high-resolution AGCMs. *Weather and Climate Extremes*, *35*, 100408. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100408>
- Chen, Y., Li, W., Jiang, X., Zhai, P., & Luo, Y. (2021). Detectable intensification of hourly and daily scale precipitation extremes across eastern China. *Journal of Climate*, *34*(3), 1185-1201. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0462.1>
- Chen, Z., Zhou, T., Zhang, L., Chen, X., Zhang, W., & Jiang, J. (2020). Global land monsoon precipitation changes in CMIP6 projections. *Geophysical Research Letters*, *47*(14), e2019GL086902. <https://doi.org/10.1029/2019GL086902>
- Cheng, S., Guan, X., Huang, J., Ji, F., & Guo, R. (2015). Long - term trend and variability of soil moisture over East Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *120*(17), 8658-8670. <https://doi.org/10.1002/2015jd023206>
- Cheon, W. G., Park, Y. G., Yeh, S. W., & Kim, B. M. (2012). Atmospheric impact on the northwestern Pacific under a global warming scenario. *Geophysical research letters*, *39*(16). <https://doi.org/10.1029/2012GL052364>
- Chevuturi, A., Klingaman, N. P., Turner, A. G., & Hannah, S. (2018). Projected changes in the Asian - Australian monsoon region in 1.5°C and 2.0°C global - warming scenarios. *Earth's Future*, *6*(3), 339-358. <https://doi.org/10.1002/2017ef000734>
- Chou, C., Huang, L. F., Tseng, L., Tu, J. Y., & Tan, P. H. (2009). Annual cycle of rainfall in the western North Pacific and East Asian sector. *Journal of Climate*, *22*(8), 2073-2094. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2538.1>
- Christensen, J.H. et al., (2013). Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K.Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp. 1217–1308). <https://doi.org/10.1017/Cbo9781107415324.028>
- Collins, M. et al., (2013). Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K.Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp. 1029–1136). <https://doi.org/10.1017/Cbo9781107415324.024>



- Contractor, S., M.G. Donat, & L. Alexander, (2021). Changes in Observed Daily Precipitation Over Global Land Areas Since 1950. *Journal of Climate*, *34*(1), 3–19. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0965.1>
- Cook, B.I., J.E. Smerdon, R. Seager, & S. Coats, (2014). Global warming and 21st Century drying. *Climate Dynamics*, *43*(9–10), 2607–2627. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2075-y>
- Cook, B.I., J.S. Mankin, & K.J. Anchukaitis, (2018). Climate Change and Drought: From Past to Future. *Current Climate Change Reports*, *4*(2), 164–179. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0093-2>
- Dai, A. (2021). Hydroclimatic trends during 1950–2018 over global land. *Climate Dynamics*, *56*(11–12), 4027–4049. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05684-1>
- Dai, A. & T. Zhao, (2017). Uncertainties in historical Changes and future projections of drought. Part I: estimates of historical drought Changes. *Climatic Change*, *144*(3), 519–533. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1705-2>
- Dai, A., T. Zhao, & J. Chen, (2018). Climate Change and Drought: a Precipitation and Evaporation Perspective. *Current Climate Change Reports*, *4*(3), 301–312. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0101-6>
- Daloz, A.S. & S.J. Camargo, (2018). Is the poleward migration of tropical Cyclone maximum intensity associated with a poleward migration of tropical Cyclone genesis? *Climate Dynamics*, *50*(1), 705–715. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3636-7>
- Dejchanchaiwong, R., & P. Tekasakul, (2021). Effects of Coronavirus Induced City Lockdown on PM_{2.5} and Gaseous Pollutant Concentrations in Bangkok. *Aerosol and Air Quality Research*, *21*(4), 200418. <https://doi.org/10.4209/aaqr.200418>
- Delworth, T. L., Cooke, W. F., Naik, V., Paynter, D., & Zhang, L. (2022). A weakened AMOC may prolong greenhouse gas-induced Mediterranean drying even with significant and rapid Climate Change mitigation. *PNAS*, *119*(35). <https://doi.org/10.1073/pnas.2116655119>
- Deng, K., S. Yang, M. Ting, Y. Tan, & S. He, (2018). Global Monsoon Precipitation: Trends, Leading Modes, and Associated Drought and Heat Wave in the Northern Hemisphere. *Journal of Climate*, *31*(17), 6947–6966. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0569.1>
- Desbruyères, D. G., Mercier, H., Maze, G., & Daniault, N. (2019). Surface predictor of overturning Circulation and heat Content Change in the subpolar North Atlantic. *Ocean Science*, *15*(3), 809–817. <https://doi.org/10.5194/os-15-809-2019>
- Di Luca, A., R. de Elía, M. Bador, & D. Argüeso, (2020). Contribution of mean Climate to hot temperature extremes for present and future Climates. *Weather and Climate Extremes*, *28*, 100255. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100255>
- Donat, M.G., L. Alexander, N. Herold, & A.J. Dittus, (2016). Temperature and precipitation extremes in Century-long gridded observations, reanalyses, and atmospheric model simulations.

- Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(19), 11174–11189. <https://doi.org/10.1002/2016jd025480>
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J., Willett, K. M., Aguilar, E., Brunet, M., Caesar, J., Hewitson, B., Jack, C., Klein Tank, A. M., Kruger, A. C., Marengo, J., Peterson, T. C., Renom, M., Oria Rojas, C., Rusticucci, M., ... Kitching, S. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(5), 2098–2118. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50150>
- Dong, S., Sun, Y., Li, C., Zhang, X., Min, S., & Kim, Y. (2021). Attribution of extreme precipitation with updated observations and CMIP6 simulations. *Journal of Climate*, 34(3), 871–881. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-1017.1>
- Dosio, A., L. Mentaschi, E.M. Fischer, & K. Wyser, (2018). Extreme heat waves under 1.5°C and 2°C global warming. *Environmental Research Letters*, 13(5), 054006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab827>
- Dowdy, A.J. (2018). Climatological Variability of Fire Weather in Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(2), 221–234. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-17-0167.1>
- Dowdy, A.J. & J.L. Catto, (2017). Extreme weather Caused by Concurrent Cyclone, front and thunderstorm occurrences. *Scientific Reports*, 7, 1–8. <https://doi.org/10.1038/srep40359>
- Du, H., Alexander, L. V., Donat, M. G., Lippmann, T., Srivastava, A., Salinger, J., Kruger, A., Choi, G., He, H. S., Fujibe, F., Rusticucci, M., Nandintsetseg, B., Manzanos, R., Rehman, S., Abbas, F., Zhai, P., Yabi, I., Stambaugh, M. C., Wang, S., ... Wu, Z. (2019). Precipitation from persistent extremes is increasing in most regions and globally. *Geophysical Research Letters*, 46(11), 6041–6049. <https://doi.org/10.1029/2019gl081898>
- Dunn, R. J., Alexander, L. V., Donat, M. G., Zhang, X., Bador, M., Herold, N., Lippmann, T., Allan, R., Aguilar, E., Barry, A. A., Brunet, M., Caesar, J., Chagnaud, G., Cheng, V., Cinco, T., Durre, I., De Guzman, R., Htay, T. M., Wan Ibadullah, W. M., ... Bin Hj Yussof, M. N. (2020). Development of an updated global land in situ - based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(16). <https://doi.org/10.1029/2019jd032263>
- Easterling, D.R., K.E. Kunkel, M.F. Wehner, & L. Sun, (2016). Detection and attribution of Climate extremes in the observed record. *Weather and Climate Extremes*, 11, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.01.001>
- Endo, H., Kitoh, A., & H. Ueda, (2018). A Unique Feature of the Asian Summer Monsoon Response to Global Warming: The Role of Different Land–Sea Thermal Contrast Change between the Lower and Upper Troposphere. *SOLA*, 14, 57–63. <https://doi.org/10.2151/sola.2018-010>



- Endo, H., Kitoh, A., & Mizuta, R. (2022). Future Changes in extreme precipitation and their association with tropical Cyclone activity over the western North Pacific and East Asia in 20 km AGCM simulations. *SOLA*, *18*, 58-64. <https://doi.org/10.2151/sola.2022-010>
- Espinoza, V., D.E. Waliser, B. Guan, D.A. Lavers, & F.M. Ralph, (2018). Global Analysis of Climate Change Projection Effects on Atmospheric Rivers. *Geophysical Research Letters*, *45*(9), 4299–4308. <https://doi.org/10.1029/2017gl076968>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, *9*, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Feser, F., Barcikowska, M., Krueger, O., Schenk, F., Weisse, R., & Xia, L. (2015). Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe—A review. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *141*(687), 350-382. <https://doi.org/10.1002/qj.2364>
- Filonchyk, M., V. Hurynovich, & H. Yan, (2021). Impact of Covid-19 lockdown on air quality in the Poland, Eastern Europe. *Environmental Research*, *198*, 110454. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110454>
- Filonchyk, M., V. Hurynovich, H. Yan, A. Gusev, & N. Shpilevskaya, (2020). Impact Assessment of COVID-19 on Variations of SO₂, NO₂, CO and AOD over East China. *Aerosol and Air Quality Research*, *20*(7), 1530-1540. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.05.0226>
- Fischer, E.M. & R. Knutti, (2014). Detection of spatially aggregated Changes in temperature and precipitation extremes. *Geophysical Research Letters*, *41*(2), 547–554. <https://doi.org/10.1002/2013gl058499>
- Fischer, E.M. & R. Knutti, (2015). Anthropogenic Contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change*, *5*(6), 560–564. <https://doi.org/10.1038/nclimate2617>
- Fischer, E.M., J. Sedláček, E. Hawkins, & R. Knutti, (2014). Models agree on forced response pattern of precipitation and temperature extremes. *Geophysical Research Letters*, *41*(23), 8554–8562. <https://doi.org/10.1002/2014gl062018>
- Fischer, E.M. & R. Knutti, (2016). Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models. *Nature Climate Change*, *6*(11), 986–991, <https://doi.org/10.1038/nclimate3110>
- Forster, P. M., Forster, H. I., Evans, M. J., Gidden, M. J., Jones, C. D., Keller, C. A., Lamboll, R. D., Quéré, C. L., Rogelj, J., Rosen, D., Schleussner, C., Richardson, T. B., Smith, C. J., & Turnock, S. T. (2020). Current and future global climate impacts resulting from COVID-19. *Nature Climate Change*, *10*(10), 913-919. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0883-0>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão,

- L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., ···& Zaehle, S. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth Syst. Sci. Data*, *12*(4), 3269-3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Froidevaux, P. & O. Martius, (2016). Exceptional integrated vapour transport toward orography: an important precursor to severe floods in Switzerland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *142*(698), 1997–2012. <https://doi.org/10.1002/qj.2793>
- Fu, Y., Li, F., Karstensen, J., & Wang, C. (2020). A stable Atlantic meridional overturning Circulation in a Changing North Atlantic Ocean since the 1990s. *Science Advances*, *6*(48), eabc7836. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc7836>
- Gao, X., Zhao, Q., Zhao, X., Wu, P., Pan, W., Gao, X., & Sun, M. (2017). Temporal and spatial evolution of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in the Loess Plateau under climate change from 2001 to 2050. *Science of The Total Environment*, *595*, 191-200. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.226>
- García-Herrera, R., Garrido-Perez, J. M., Barriopedro, D., Ordóñez, C., Vicente-Serrano, S. M., Nieto, R., Gimeno, L., Sorí, R., & Yiou, P. (2019). The European 2016/17 drought. *Journal of Climate*, *32*(11), 3169-3187. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-18-0331.1>
- Garcia-Soto, C., Cheng, L., Caesar, L., Schmidtko, S., Jewett, E. B., Cheripka, A., Rigor, I., Caballero, A., Chiba, S., Báez, J. C., Zielinski, T., & Abraham, J. P. (2021). An overview of ocean climate change indicators: Sea surface temperature, ocean heat content, ocean pH, dissolved oxygen concentration, Arctic Sea ice extent, thickness and volume, sea level and strength of the AMOC (Atlantic meridional overturning circulation). *Frontiers in Marine Science*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.642372>
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, *21*(12), 6307-6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso - Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, *40*(1), 421-439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Gaupp, F., J. Hall, D. Mitchell, & S. Dadson, (2019). Increasing risks of multiple breadbasket failure under 1.5 and 2 C global warming. *Agricultural Systems*, *175*, 34–45. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.05.010>
- Gehlen, M., Chau, T.T.T., Conchon, A., Denvil-Sommer, A., Chevallier, F., Vrac, M., & Mejia, C., (2020). Ocean acidification [in “Copernicus Marine Service Ocean State Report, Issue 4”]. *Journal of Operational Oceanography*, *13*(sup1), S64–S67. <https://doi.org/10.1080/1755876x.2020.1785097>



- Gershunov, A., T. Shulgina, F.M. Ralph, D.A. Lavers, & J.J. Rutz, (2017). Assessing the Climate-scale variability of atmospheric rivers affecting western North America. *Geophysical Research Letters*, *44*(15), 7900–7908. <https://doi.org/10.1002/2017gl074175>
- Gershunov, A., Shulgina, T., Clemesha, R. E., Guirguis, K., Pierce, D. W., Dettinger, M. D., Lavers, D. A., Cayan, D. R., Polade, S. D., Kalansky, J., & Ralph, F. M. (2019). Precipitation regime change in western North America: The role of atmospheric rivers. *Scientific Reports*, *9*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46169-w>
- Gettelman, A., R. Lamboll, C. G. Bardeen, P. M. Forster, & D. Watson-Parris, (2021). Climate Impacts of COVID-19 Induced Emission Changes. *Geophysical Research Letters*, *48*(3), e2020GL091805. <https://doi.org/10.1029/2020GL091805>
- Giorgi, F. (2006). Climate Change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.*, *33*(8), L08707. <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Gkatzelis, G. I., Gilman, J. B., Brown, S. S., Eskes, H., Gomes, A. R., Lange, A. C., McDonald, B. C., Peischl, J., Petzold, A., Thompson, C. R., & Kiendler-Scharr, A. (2021). The global impacts of COVID-19 lockdowns on urban air pollution. *Elementa: Science of the Anthropocene*, *9*(1). <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00176>
- Gonzales, K. R., D. L. Swain, K. M. Nardi, E. A. Barnes, & N. S. Diffenbaugh, (2019). Recent warming of landfalling atmospheric rivers along the west coast of the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *124*(13), 2018JD029860, <https://doi.org/10.1029/2018jd029860>
- Greve, P., Orlowsky, B., Mueller, B., Sheffield, J., Reichstein, M., & Seneviratne, S. I. (2014). Global assessment of trends in wetting and drying over land. *Nature Geoscience*, *7*(10), 716–721. <https://doi.org/10.1038/ngeo2247>
- Greve, P., L. Gudmundsson, & S.I. Seneviratne, (2018). Regional scaling of annual mean precipitation and water availability with global temperature Change. *Earth System Dynamics*, *9*(1), 227–240. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000251688>
- Grieger, J., G. C. Leckebusch, M. G. Donat, M. Schuster, & U. Ulbrich, (2014). Southern Hemisphere winter Cyclone activity under recent and future Climate Conditions in multi-model AOGCM simulations. *Int. J. Climatol.*, *34*, 3400–3416. <https://doi.org/10.1002/joc.3917>
- Grossiord, C., Buckley, T. N., Cernusak, L. A., Novick, K. A., Poulter, B., Siegwolf, R. T., Sperry, J. S., & McDowell, N. G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, *226*(6), 1550–1566. <https://doi.org/10.1111/nph.16485>
- Guan, B. & D.E. Waliser, (2015). Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *120*(24), 12514–12535. <https://doi.org/10.1002/2015jd024257>

- Guo, X., Miyazawa, Y., & Yamagata, T. (2006). The Kuroshio Onshore Intrusion along the Shelf Break of the East China Sea: The Origin of the Tsushima Warm Current. *Journal of Physical Oceanography*, *36*(12), 2205-2231. <https://doi.org/10.1175/JPO2976.1>
- Ha, K.-J., S. Moon, A. Timmermann, & D. Kim, (2020). Future Changes of Summer Monsoon Characteristics and Evaporative Demand Over Asia in CMIP6 Simulations. *Geophysical Research Letters*, *47*(8), 1–10. <https://doi.org/10.1029/2020gl087492>
- Han, Z., Su, T., Huang, B., Feng, T., Qu, S., & Feng, G. (2019). Changes in global monsoon precipitation and the related dynamic and thermodynamic mechanisms in recent decades. *International Journal of Climatology*, *39*(3), 1490–1503. <https://doi.org/10.1002/joc.5896>
- Hawcroft, M., E. Walsh, K. Hodges, & G. Zappa, (2018). Significantly increased extreme precipitation expected in Europe and North America from extratropical Cyclones. *Environmental Research Letters*, *13*(12), 124006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaed59>.
- Haywood, J. M. & Boucher, O. (2000). Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Rev. Geophys.*, *38*, 513–543.
- Hermans, T. H., Gregory, J. M., Palmer, M. D., Ringer, M. A., Katsman, C. A., & Slangen, A. B. (2021). Projecting global mean sea - level change using CMIP6 models. *Geophysical Research Letters*, *48*(5). <https://doi.org/10.1029/2020gl092064>
- Hewson, T. D., (1998). Objective fronts. *Met. Apps*, *5*, 37-65. <https://doi.org/10.1017/S1350482798000553>
- Hoegh-Guldberg, O., D. Jacob, M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K.L. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hijikata, S. Mehrotra, A. Payne, S.I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren, & G. Zhou, (2018). Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In: 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, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 175-312. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.005>
- Hong, C., Tsou, C., Hsu, P., Chen, K., Liang, H., Hsu, H., Tu, C., & Kitoh, A. (2021). Future changes in tropical cyclone intensity and frequency over the western North Pacific based on 20-km Hiram and MRI models. *Journal of Climate*, *34*(6), 2235-2251. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0417.1>
- Hong, J.-W., J. Hong, E.E. Kwon, & D.K. Yoon, (2019). Temporal dynamics of urban heat island Correlated with the socio-economic development over the past half-century in Seoul, Korea. *Environmental Pollution*, *254*, 112934. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.102>



- Hope, P., Black, M. T., Lim, E., Dowdy, A., Wang, G., Fawcett, R. J., & Pepler, A. S. (2019). On determining the impact of increasing atmospheric CO₂ on the record fire weather in eastern Australia in February 2017. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(1), S111-S117. <https://doi.org/10.1175/bams-d-18-0135.1>
- Horinouchi, T., S. Matsumura, T. Ose, & Y.N. Takayabu, (2019). Jet–Precipitation Relation and Future Change of the Mei-Yu–Baiu Rainband and Subtropical Jet in CMIP5 Coupled GCM Simulations. *Journal of Climate*, 32(8), 2247–2259. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-18-0426.1>
- Hsu, H.-H. & C.-T. Chen, (2002). Observed and Projected Climate Change in Taiwan. *Meteorol Atmos Phys* 79, 87-104. <https://doi.org/10.1007/s703-002-8230-x>
- Hsu, H.-H., & Y.-T. Chen, (2020). Simulation and Projection of Circulations Associated with Atmospheric Rivers along the North American Northeast Coast. *J. Climate*, 33, 5673–5695. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0104.1>
- Hsu, P., Chen, K., Tsou, C., Hsu, H., Hong, C., Liang, H., Tu, C., & Kitoh, A. (2021). Future changes in the frequency and destructiveness of Landfalling tropical cyclones over East Asia projected by high - resolution AGCMs. *Earth's Future*, 9(3). <https://doi.org/10.1029/2020ef001888>
- Hu, Z., Q. Jin, Y. Ma, Z. Ji, X. Zhu, & W. Dong, (2022). How Does COVID-19 Lockdown Impact Air Quality in India? *Remote Sensing*, 14(8), 1869. <https://doi.org/10.3390/rs14081869>
- Huang, X., Zhou, T., Zhang, W., Jiang, J., Li, P., & Zhao, Y. (2019). Northern hemisphere land monsoon precipitation changes in the twentieth century revealed by multiple reanalysis datasets. *Climate Dynamics*, 53(11), 7131-7149. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04982-z>
- Hurd, C. L., Lenton, A., Tilbrook, B., & Boyd, P. W. (2018). Current understanding and Challenges for oceans in a higher-CO₂ world. *Nature Climate Change*, 8(8), 686–694. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0211-0>
- Imada, Y. et al., (2014). The Contribution of anthropogenic forcing to the Japanese heat waves of 2013 [in “Explaining Extreme Events of 2013 from a Climate Perspective”]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(9), S52–S54. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-95.9.s1.1>
- Imada, Y., M. Watanabe, H. Kawase, H. Shiogama, & M. Arai, (2019). The July 2018 High Temperature Event in Japan Could Not Have Happened without Human-Induced Global Warming. *SOLA*, 15A, 8–12. <https://doi.org/10.2151/sola.15a-002>
- Ionita, M., V. Nagavciuc, & B. Guan, (2020). Rivers in the sky, flooding on the ground: the role of atmospheric rivers in inland flooding in Central Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(11), 5125–5147. <https://doi.org/10.5194/hess-24-5125-2020>
- IPCC, 2012: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B. et al., (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United

Kingdom and New York, NY, USA, 582 pp.. <https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation>

IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B. et al., (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.1132), www.ipcc.ch/report/ar5/wg2

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, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *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, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press, (pp.32). <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm>

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *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, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, (pp.3-24). <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>

IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., 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, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. 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 [Masson-Delmotte, V., 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, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.3-32). <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>

IPCC, 2021: 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* [Masson-Delmotte, V., 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, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.33-144). <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>.

IPCC, 2021: 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* [Chen, D., M. Rojas, B.H. Samset, K. Cobb, A. Diongue Niang, P. Edwards, S. Emori, S.H. Faria, E. Hawkins, P. Hope, P. Huybrechts, M. Meinshausen, S.K. Mustafa, G.-K. Plattner, and A.-M. Tréguier, 2021: Framing, Context, and Methods. 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* [Masson-Delmotte, V., 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, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.147–286). <https://doi.org/10.1017/9781009157896.003>

IPCC, 2021: Chapter 2. 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* [Gulev, S.K., P.W. Thorne, J. Ahn, F.J. Dentener, C.M. Domingues, S. Gerland, D. Gong, D.S. Kaufman, H.C. Nnamchi, J. Quaas, J.A. Rivera, S. Sathyendranath, S.L. Smith, B. Trewin, K. von Schuckmann, and R.S. Vose, 2021: Changing State of the Climate System. 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* [Masson-Delmotte, V., 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, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp. 287–422). <https://doi.org/10.1017/9781009157896.004>

IPCC, 2021: Chapter 4. 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 [Lee, J.-Y., J. Marotzke, G. Bala, L. Cao, S. Corti, J.P. Dunne, F. Engelbrecht, E. Fischer, J.C. Fyfe, C. Jones, A. Maycock, J. Mutemi, O. Ndiaye, S. Panickal, and T. Zhou, 2021: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. 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* [Masson-Delmotte, V., 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, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.553–672). <https://doi.org/10.1017/9781009157896.006>

IPCC, 2021: Chapter 6. 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* [Szopa, S., V. Naik, B. Adhikary, P. Artaxo, T. Berntsen, W.D. Collins, S. Fuzzi, L. Gallardo, A. Kiendler-Scharr, Z. Klimont, H. Liao, N. Unger, and P. Zanis, 2021: Short-Lived Climate Forcers. 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* [Masson-Delmotte, V., 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, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp. 817–922). <https://doi.org/10.1017/9781009157896.008>

IPCC, 2021: Chapter 9. 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* [Fox-Kemper, B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, and Y. Yu, 2021: Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. 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* [Masson-Delmotte, V., 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, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.1211–1362). <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>

IPCC, 2021: Chapter 11. 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* [Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou, 2021: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate . 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* [Masson-Delmotte, V., 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, and B. Zhou (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.1513–1766). <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>

IPCC, 2021: Chapter 12. 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* [Ranasinghe, R., A.C. Ruane, R. Vautard, N. Arnell, E. Coppola, F.A. Cruz, S. Dessai, A.S. Islam, M. Rahimi, D. Ruiz Carrascal, J. Sillmann, M.B. Sylla, C. Tebaldi, W. Wang, and R. Zaaboul, 2021: Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. 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* [Masson-Delmotte, V., 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, and B. Zhou (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.1767–1926). <https://doi.org/10.1017/9781009157896.014>

Ivanovic, R. F., Valdes, P. J., Gregoire, L., Flecker, R., & Gutzjahr, M. (2014). Sensitivity of modern climate to the presence, strength and salinity of Mediterranean-Atlantic exchange in a global general circulation model. *Climate Dynamics*, 42(3-4), 859-877. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1680-5>

James, R., Washington, R., Schleussner, C. - F., Rogelj, J. & Conway, D. (2017), Characterizing half - a - degree difference: a review of methods for identifying regional climate responses to global warming targets. *WIREs Clim Change*, 8, e457. <https://doi.org/10.1002/wcc.457>

Jia, B., J. Liu, Z. Xie, & C. Shi, (2018). Interannual Variations and Trends in Remotely Sensed and Modeled Soil Moisture in China. *Journal of Hydrometeorology*, 19(5), 831–847. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-18-0003.1>

Josey, S. A., Hirschi, J. J.-M., Sinha, B., Duchez, A., Grist, J. P., & Marsh, R. (2018). The recent Atlantic Cold anomaly: Causes, Consequences, and related phenomena. *Annual Review of Marine Science*, 10, 475-501.

Kamae, Y., W. Mei, S.P. Xie, M. Naoi, & H. Ueda, (2017). Atmospheric rivers over the Northwestern Pacific: Climatology and interannual variability. *Journal of Climate*, 30(15), 5605–5619. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-16-0875.1>

Kamae, Y., W. Mei, & S.-P. Xie, (2019). Ocean warming pattern effects on future Changes in East Asian atmospheric rivers. *Environmental Research Letters*, 14(5), 54019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab128a>

Kar-Man Chang, E. (2018). CMIP5 Projected Change in Northern Hemisphere Winter Cyclones with Associated Extreme Winds. *Journal of Climate*, 31(16), 6527–6542. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0899.1>

- Kawase, H., Imada, Y., Tsuguti, H., Nakaegawa, T., Seino, N., Murata, A., & Takayabu, I. (2020). The heavy rain event of July 2018 in Japan enhanced by historical warming. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *101*(1), S109-S114. <https://doi.org/10.1175/bams-d-19-0173.1>
- Ke-xin, L., & Fei, Z. (2022). Effects of a freshening trend on upper-ocean stratification over the Central tropical Pacific and their representation by CMIP6 models. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, *195*, 104999. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2021.104999>
- Khan, N., Shahid, S., Ahmed, K., Wang, X., Ali, R., Ismail, T., & Nawaz, N. (2020). Selection of GCMs for the projection of spatial distribution of heat waves in Pakistan. *Atmospheric Research*, *233*, 104688. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104688>
- Kharin, V. V., Flato, G. M., Zhang, X., Gillett, N. P., Zwiers, F., & Anderson, K. J. (2018). Risks from climate extremes change differently from 1.5°C to 2.0°C depending on rarity. *Earth's Future*, *6*(5), 704-715. <https://doi.org/10.1002/2018ef000813>
- Kim, Y.-H., S.-K. Min, D.A. Stone, H. Shiogama, & P. Wolski, (2018) Multimodel event attribution of the summer 2013 heat wave in Korea. *Weather and Climate Extremes*, *20*, 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.03.004>
- King, A.D., D.J. Karoly, M.G. Donat, & L.V. Alexander, (2014). Climate Change turns Australia's 2013 big dry into a year of record-breaking heat [in "Explaining Extreme Events of 2013 from a Climate Perspective"]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *95*(9), S41–S45. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-95.9.s41>
- Kirtman, B., S.B. Power, J.A. Adedoyin, G.J. Boer, R. Bojariu, I. Camilloni, F.J. Doblas-Reyes, A.M. Fiore, M. Kimoto, G.A. Meehl, M. Prather, A. Sarr, C. Schär, R. Sutton, G.J. van Oldenborgh, G. Vecchi & H.J. Wang, (2013). Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kishtawal, C.M., N. Jaiswal, R. Singh, & D. Niyogi, (2012). Tropical Cyclone intensification trends during satellite era (1986–2010). *Geophysical Research Letters*, *39*(10), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2012gl051700>
- Kitoh, A., Endo, H., Krishna Kumar, K., Cavalcanti, I. F., Goswami, P., & Zhou, T. (2013). Monsoons in a changing world: A regional perspective in a global context. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *118*(8), 3053-3065. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50258>
- Kitoh, A., (2017). The Asian Monsoon and its Future Change in Climate Models: A Review. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Series II*, *95*(1), 7–33. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2017-002>



- Knapp, K. R., Velden, C. S., & Wimmers, A. J. (2018). A global climatology of tropical cyclone eyes. *Monthly Weather Review*, *146*(7), 2089–2101. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-17-0343.1>
- Knutson, T. R., Sirutis, J. J., Zhao, M., Tuleya, R. E., Bender, M., Vecchi, G. A., Villarini, G., & Chavas, D. (2015). Global projections of intense tropical cyclone activity for the late twenty-first century from dynamical Downscaling of CMIP5/RCP4.5 scenarios. *Journal of Climate*, *28*(18), 7203–7224. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0129.1>
- Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J. C., Emanuel, K., Ho, C., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., & Wu, L. (2019). Tropical cyclones and climate change assessment: Part I: Detection and attribution. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *100*(10), 1987–2007. <https://doi.org/10.1175/bams-d-18-0189.1>
- Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J. C., Emanuel, K., Ho, C., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., & Wu, L. (2020). Tropical cyclones and climate change assessment: Part II: Projected response to anthropogenic warming. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *101*(3), E303–E322. <https://doi.org/10.1175/bams-d-18-0194.1>
- Kodama, C., B. Stevens, T. Mauritsen, T. Seiki, & M. Satoh, (2019). A New Perspective for Future Precipitation Change from Intense Extratropical Cyclones. *Geophysical Research Letters*, *46*(21), 12435–12444. <https://doi.org/10.1029/2019gl084001>
- Kossin, J.P., K.A. Emanuel, & G.A. Vecchi, (2014). The poleward migration of the location of tropical Cyclone maximum intensity. *Nature*, *509*(7500), 349–352. <https://doi.org/10.1038/nature13278>
- Kossin, J.P., T. Hall, T. Knutson, K.E. Kunkel, R.J. Trapp, D.E. Waliser, and M.F. Wehner, (2017). Extreme storms. In: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I [Wuebbles, D.J., D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T.K. Maycock (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, pp. 257–276. <https://doi.org/10.7930/J07S7KXX>
- Kossin, J.P., K.R. Knapp, T.L. Olander, & C.S. Velden, (2020). Global increase in major tropical Cyclone exceedance probability over the past four decades. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(22), 11975–11980. <https://doi.org/10.1073/pnas.1920849117>
- Kubota, H., Matsumoto, J., Zaiki, M., Tsukahara, T., Mikami, T., Allan, R., Wilkinson, C., Wilkinson, S., Wood, K., & Mollan, M. (2021). Tropical cyclones over the western North Pacific since the mid-nineteenth century. *Climatic Change*, *164*(3–4). <https://doi.org/10.1007/s10584-021-02984-7>
- Kumar, S., K. Chanda, & S. Pasupuleti, (2020). Spatiotemporal analysis of extreme indices derived from daily precipitation and temperature for Climate Change detection over India. *Theoretical and Applied Climatology*, *140*(1), 343–357. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03088-5>
- Kunkel, K. E., Karl, T. R., Brooks, H., Kossin, J., Lawrimore, J. H., Arndt, D., Bosart, L., Changnon, D., Cutter, S. L., Doesken, N., Emanuel, K., Groisman, P. Y., Katz, R. W., Knutson, T., O'Brien, J.,

- Paciorek, C. J., Peterson, T. C., Redmond, K., Robinson, D., ... Wuebbles, D. (2013). Monitoring and understanding trends in extreme storms: State of knowledge. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *94*(4), 499-514. <https://doi.org/10.1175/bams-d-11-00262.1>
- Kuo, Y.-C., & Tseng, Y.H. (2021). Influence of anomalous low-level Circulation on the Kuroshio in the Luzon Strait during ENSO. *Ocean Modell.*, *159*, 101759. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2021.101759>
- Kuo, Y.-C., Yu, Y., & Tseng, Y.-H. (2023). Interannual Changes of the summer Circulation and hydrology in the East China Sea: A modeling study from 1981 to 2015. *Ocean Modell.*, *181*, 102156.
- Kusunoki, S. (2018). Future Changes in precipitation over East Asia projected by the global atmospheric model MRI-AGCM3.2. *Climate Dynamics*, *51*(11-12), 4601-4617. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3499-3>
- Latif, M., Böning, C., Willebrand, J., Biastoch, A., Dengg, J., Keenlyside, N., Schweckendiek, U., & Madec, G. (2006). Is the thermohaline Circulation Changing? *Journal of Climate*, *19*(18), 4631-4637.
- Latif, M., Sun, J., Visbeck, M., & Hadi Bordbar, M. (2022). Natural variability has dominated Atlantic meridional overturning Circulation since 1900. *Nature Climate Change*, *12*(5), 455-460.
- Lauvset, S. K., Carter, B. R., Pèrez, F. F., Jiang, L. - Q., Feely, R. A., Velo, A., & Olsen, A. (2020). Processes Driving Global Interior Ocean pH Distribution. *Global Biogeochemical Cycles*, *34*(1), e2019GB006229. <https://doi.org/10.1029/2019gb006229>
- Lauvset, S. K., Gruber, N., Landschützer, P., Olsen, A., & Tjiputra, J. (2015). Trends and drivers in global surface ocean pH over the past 3 decades. *Biogeosciences*, *12*(5), 1285-1298. <https://doi.org/10.5194/bg-12-1285-2015>
- Lavers, D. A., F. M. Ralph, D. E. Waliser, A. Gershunov, & M. D. Dettinger, (2015). Climate Change intensification of horizontal water vapor transport in CMIP5. *Geophysical Research Letters*, *42*(13), 5617-5625. <https://doi.org/10.1002/2015gl064672>
- Le Quéré, C., Jackson, R. B., Jones, M. W., Smith, A. J., Abernethy, S., Andrew, R. M., De-Gol, A. J., Willis, D. R., Shan, Y., Canadell, J. G., Friedlingstein, P., Creutzig, F., & Peters, G. P. (2020). Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature Climate Change*, *10*(7), 647-653. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>
- Lee, D., Min, S., Fischer, E., Shiogama, H., Bethke, I., Lierhammer, L., & Scinocca, J. F. (2018). Impacts of half a degree additional warming on the Asian summer monsoon rainfall characteristics. *Environmental Research Letters*, *13*(4), 044033. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab55d>
- Lee, J.Y. & B. Wang, (2014). Future Change of global monsoon in the CMIP5. *Climate Dynamics*, *42*(1-2), 101-119. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1564-0>



- Lee, T. C., Knutson, T. R., Nakaegawa, T., Ying, M., & Cha, E. J. (2020). Third assessment on impacts of climate change on tropical cyclones in the Typhoon Committee Region–Part I: Observed changes, detection and attribution. *Tropical Cyclone Research and Review*, *9*(1), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.tccr.2020.03.001>
- Lehner, F., Coats, S., Stocker, T. F., Pendergrass, A. G., Sanderson, B. M., Raible, C. C., & Smerdon, J. E. (2017). Projected drought risk in 1.5°C and 2°C warmer climates. *Geophysical Research Letters*, *44*(14), 7419-7428. <https://doi.org/10.1002/2017gl074117>
- Li, C., Zwiers, F., Zhang, X., Li, G., Sun, Y., & Wehner, M. (2021). Changes in annual extremes of daily temperature and precipitation in CMIP6 models. *Journal of Climate*, *34*(9), 3441-3460. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-1013.1>
- Li, D., T. Zhou, & W. Zhang, (2019). Extreme precipitation over East Asia under 1.5°C and 2°C global warming targets: a Comparison of stabilized and overshoot projections. *Environmental Research Communications*, *1*(8), 085002. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab3971>
- Li, G., Cheng, L., Zhu, J., Trenberth, K. E., Mann, M. E., & Abraham, J. P. (2020). Increasing ocean stratification over the past half-century. *Nature Climate Change*, *10*(12), 1116-1123. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00918-2>
- Li, L., She, D., Zheng, H., Lin, P., & Yang, Z.-L. (2020). Elucidating diverse drought Characteristics from two meteorological drought indices (SPI and SPEI) in China. *J. Hydrol.*, *21*(7), 1513–1530. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-19-0290.s1>
- Li, W., Z. Jiang, X. Zhang, L. Li, & Y. Sun, (2018). Additional risk in extreme precipitation in China from 1.5°C to 2.0°C global warming levels. *Science Bulletin*, *63*(4), 228–234, <https://doi.org/10.1016/j.scib.2017.12.021>
- Liang, J., C. Wang, & K.I. Hodges, (2017) Evaluation of tropical Cyclones over the South China Sea simulated by the 12 km MetUM regional Climate model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *143*(704), 1641–1656. <https://doi.org/10.1002/qj.3035>
- Lin, L., Wang, Z., Xu, Y., Zhang, X., Zhang, H., & Dong, W. (2018). Additional intensification of seasonal heat and flooding extreme over China in a 2°C warmer world compared to 1.5°C. *Earth's Future*, *6*(7), 968-978. <https://doi.org/10.1029/2018ef000862>
- Lin, P., He, Z., Du, J., Chen, L., Zhu, X., & Li, J. (2017). Recent changes in daily climate extremes in an arid mountain region, a case study in northwestern China's Qilian mountains. *Scientific Reports*, *7*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02345-4>
- Little, K., D.G. Kingston, N.J. Cullen, & P.B. Gibson, (2019). The Role of Atmospheric Rivers for Extreme Ablation and Snowfall Events in the Southern Alps of New Zealand. *Geophysical Research Letters*, *46*(5), 2761–2771. <https://doi.org/10.1029/2018gl081669>
- Littell, J.S., D.L. Peterson, K.L. Riley, Y. Liu, & C.H. Luce, (2016). A review of the relationships between

- drought and forest fire in the United States. *Global Change Biology*, 22(7), 2353–2369. <https://doi.org/10.1111/gcb.13275>
- Liu, Y., Pan, Z., Zhuang, Q., Miralles, D. G., Teuling, A. J., Zhang, T., An, P., Dong, Z., Zhang, J., He, D., Wang, L., Pan, X., Bai, W., & Niyogi, D. (2015). Agriculture intensifies soil moisture decline in Northern China. *Scientific Reports*, 5(1), 11261. <https://doi.org/10.1038/srep11261>
- Liu, J., H. Xu, & J. Deng, (2018). Projections of East Asian summer monsoon Change at global warming of 1.5 and 2°C. *Earth System Dynamics*, 9(2), 427–439. <https://doi.org/10.5194/esd-9-427-2018>
- Liu, M., G.A.Vecchi, J.A. Smith, & T.R. Knutson, (2019a). Causes of large projected increases in hurricane precipitation rates with global warming. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2(1), 1–5. <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0095-3>
- Liu, M., Y. Shen, Y. Qi, Y.Wang, & X. Geng, (2019b). Changes in Precipitation and Drought Extremes over the Past Half Century in China. *Atmosphere*, 10(4), 203. <https://doi.org/10.3390/atmos10040203>
- Liu, Z. J., Zhu, X. H., Nakamura, H., Nishina, A., Wang, M., Zheng, H. (2021). Comprehensive observational features for the Kuroshio transport decreasing trend during a recent global warming hiatus. *Geophysical Research Letters*, 48(18), e2021GL094169.
- Lohmann, U. & Feichter, J. (2005). Global indirect aerosol effects: a review. *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 715–737. <https://doi.org/10.5194/acp-5-715-2005>
- Lu, C., Y. Sun, H. Wan, X. Zhang, & H. Yin, (2016). Anthropogenic influence on the frequency of extreme temperatures in China. *Geophysical Research Letters*, 43(12), 6511–6518. <https://doi.org/10.1002/2016gl069296>
- Lu, C., Y. Sun, & X. Zhang, (2018). Multimodel detection and attribution of Changes in warm and Cold spell durations. *Environmental Research Letters*, 13(7), 074013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacb3e>
- Lu, J., G. J. Carbone, & J. M. Grego, (2019). Uncertainty and hotspots in 21st Century projections of agricultural drought from CMIP5 models. *Scientific Reports*, 9(1), 4922. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41196-z>
- Lu, M.-M. & R.-J. May, (2003). A study on the long-term variations of Taiwan and global precipitation. *Atmos. Sci.*, 31, 199-220 (in traditional Chinese with English abstract).
- Mann, M. E. & P. H. Gleick, (2015). Climate Change and California drought in the 21st Century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(13), 3858–3859. <https://doi.org/10.1073/pnas.1503667112>
- Marciano, C. G., G. M. Lackmann, & W. A. Robinson, (2015). Changes in U.S. East Coast Cyclone dynamics with Climate Change. *Journal of Climate*, 28(2), 468–484. <https://doi.org/10.1175/>



jcli-d-14-00418.1

- Marengo, J.A. & J.C. Espinoza, (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1033–1050. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>
- Marengo, J.A., R.R. Torres, & L.M. Alves, (2017). Drought in Northeast Brazil– past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3–4), 1189–1200. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>
- Martius, O., S. Pfahl, & C. Chevalier, (2016). A global quantification of Compound precipitation and wind extremes. *Geophysical Research Letters*, 43(14), 7709–7717. <https://doi.org/10.1002/2016gl070017>
- Mattingly, K.S., T.L. Mote, & X. Fettweis, (2018). Atmospheric River Impacts on Greenland Ice Sheet Surface Mass Balance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(16), 8538–8560. <https://doi.org/10.1029/2018jd028714>
- Meehl, G. A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J. F. B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E., (2007). THE WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(9), 1383–1394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-9-1383>
- Mekkes, L., Sepúlveda-Rodríguez, G., Bielkinaitė, G., Wall-Palmer, D., Brummer, G.-J. A., Dämmer, L. K., Huisman, J., van Loon, E., Renema, W. & Peijnenburg, K. T. C. A. (2021). Effects of Ocean Acidification on Calcification of the Sub-Antarctic Pteropod *Limacina retroversa*. *Front. Mar. Sci.* 8, 581432. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.581432>
- Michaelis, A.C., J. Willison, G.M. Lackmann, & W.A. Robinson, (2017). Changes in winter North Atlantic extratropical Cyclones in high-resolution regional pseudo–global warming simulations. *Journal of Climate*, 30(17), 6905–6925. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-16-0697.1>
- Ming, Y., Loeb, N. G., Lin, P., Shen, Z., Naik, V., Singer, C. E., Ward, R. X., Paulot, F., Zhang, Z., Bellouin, N., Horowitz, L. W., Ginoux, P. A., & Ramaswamy, V. (2021). Assessing the influence of COVID - 19 on the Shortwave radiative fluxes over the east Asian marginal seas. *Geophysical Research Letters*, 48(3). <https://doi.org/10.1029/2020gl091699>
- Mizuta, R. & H. Endo, (2020). Projected Changes in Extreme Precipitation in a 60-km AGCM Large Ensemble and Their Dependence on Return Periods. *Geophysical Research Letters*, 47(13), 1–8. <https://doi.org/10.1029/2019gl086855>
- Moat, B. I., Smeed, D. A., Frajka-Williams, E., Desbruyères, D. G., Beaulieu, C., Johns, W. E., Rayner, D., Sanchez-Franks, A., Baringer, M. O., & Volkov, D. (2020). Pending recovery in the strength of the meridional overturning Circulation at 26°N. *Ocean Science*, 16(4), 863–874.
- Moftakhari, H.R., G. Salvadori, A. AghaKouchak, B.F. Sanders, & R.A. Matthew, (2017). Compounding

- effects of sea level rise and fluvial flooding. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *114*(37), 9785–9790. <https://doi.org/10.1073/pnas.1620325114>
- Mohtadi, M., M. Prange, & S. Steinke, (2016). Palaeoclimatic insights into forcing and response of monsoon rainfall. *Nature*, *533*(7602), 191–199. <https://doi.org/10.1038/nature17450>
- Mollica, Nathaniel R., Guo, Weifu, Cohen, Anne L., Huang, Kuo-Fang, Foster, Gavin L., Donald, Hannah K., & Solow Andrew R. (2018). Ocean acidification affects Coral growth by reducing skeletal density. *PNAS*. *115* (8) 1754-1759.
- Monerie, P.A., J. Robson, B. Dong, D.L.R. Hodson, & N.P. Klingaman, (2019). Effect of the Atlantic Multidecadal Variability on the Global Monsoon. *Geophysical Research Letters*, *46*(3), 1765–1775. <https://doi.org/10.1029/2018gl080903>
- Murakami, H., Wang, Y., Yoshimura, H., Mizuta, R., Sugi, M., Shindo, E., Adachi, Y., Yukimoto, S., Hosaka, M., Kusunoki, S., Ose, T., & Kitoh, A. (2012). Future changes in tropical cyclone activity projected by the new high-resolution MRI-AGCM. *Journal of Climate*, *25*(9), 3237-3260. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-11-00415.1>
- Murakami, H., Delworth, T. L., Cooke, W. F., Zhao, M., Xiang, B., & Hsu, P. (2020). Detected climatic change in global distribution of tropical cyclones. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(20), 10706-10714. <https://doi.org/10.1073/pnas.1922500117>
- Nakamura, J., Camargo, S. J., Sobel, A. H., Henderson, N., Emanuel, K. A., Kumar, A., LaRow, T. E., Murakami, H., Roberts, M. J., Scoccimarro, E., Vidale, P. L., Wang, H., Wehner, M. F., & Zhao, M. (2017). Western North Pacific tropical cyclone model tracks in present and future climates. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *122*(18), 9721-9744. <https://doi.org/10.1002/2017jd027007>
- Nasim, W., Amin, A., Fahad, S., Awais, M., Khan, N., Mubeen, M., Wahid, A., Rehman, M. H., Ihsan, M. Z., Ahmad, S., Hussain, S., Mian, I. A., Khan, B., & Jamal, Y. (2018). Future risk assessment by estimating historical heat wave trends with projected heat accumulation using SimCLIM climate model in Pakistan. *Atmospheric Research*, *205*, 118-133. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.01.009>
- Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R. A., Carrao, H., Spinoni, J., Vogt, J., & Feyen, L. (2018). Global changes in drought conditions under different levels of warming. *Geophysical Research Letters*, *45*(7), 3285-3296. <https://doi.org/10.1002/2017gl076521>
- Nayak, S., K. Dairaku, I. Takayabu, A. Suzuki-Parker, & N.N. Ishizaki, (2018). Extreme precipitation linked to temperature over Japan: Current evaluation and projected Changes with multi-model ensemble downscaling. *Climate Dynamics*, *51*, 4385–4401 <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3866-8>
- Nolan, R. H., Boer, M. M., Collins, L., Resco de Dios, V., Clarke, H., Jenkins, M., Kenny, B., & Bradstock,



- R. A. (2020). Causes and consequences of eastern Australia's 2019–20 season of mega - fires. *Global Change Biology*, 26(3), 1039-1041. <https://doi.org/10.1111/gcb.14987>
- Oey, L.-Y. & S. C. Chou, (2016). Evidence of rising and poleward shift of storm surge in western North Pacific in recent decades. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 5181–5192. <https://doi.org/10.1002/2015jc011516>
- O' Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M., (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 9, 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Orlowsky, B. & S.I. Seneviratne, (2013). Elusive drought: Uncertainty in observed trends and short- and long-term CMIP5 projections. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(5), 1765–1781. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1765-2013>
- Orth, R., J. Zscheischler, & S.I. Seneviratne, (2016). Record dry summer in 2015 Challenges precipitation projections in Central Europe. *Scientific Reports*, 6, 28334. <https://doi.org/10.1038/srep28334>
- Ose, T., (2019). Characteristics of Future Changes in Summertime East Asian Monthly Precipitation in MRI-AGCM Global Warming Experiments. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Series II*, 97(2), 317–335. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-018>
- Padrón, R. S., Gudmundsson, L., Decharme, B., Ducharne, A., Lawrence, D. M., Mao, J., Peano, D., Krinner, G., Kim, H., & Seneviratne, S. I. (2020). Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change. *Nature Geoscience*, 13(7), 477-481. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0594-1>
- Paltan, H., M.Allen, K. Haustein, L. Fuldauer, & S. Dadson, (2018). Global implications of 1.5 C and 2 C warmer worlds on extreme river flows. *Environmental Research Letters*, 13(9), 94003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad985>
- Parras-Berrocal, I. M., Vazquez, R., Cabos, W., Sein, D., Mañanes, R., Perez-Sanz, J., & Izquierdo, A. (2020). The Climate Change signal in the Mediterranean Sea in a regionally Coupled atmosphere–ocean model. *Ocean Science*, 16, 743–765. <https://doi.org/10.5194/os-16-743-2020>
- Pascale, S., Boos, W. R., Bordoni, S., Delworth, T. L., Kapnick, S. B., Murakami, H., Vecchi, G. A., & Zhang, W. (2017). Weakening of the North American monsoon with global warming. *Nature Climate Change*, 7(11), 806-812. <https://doi.org/10.1038/nclimate3412>
- Patricola, C.M. & M.F.Wehner, (2018). Anthropogenic influences on major tropical Cyclone events. *Nature*, 563(7731), 339–346. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0673-2>
- Payne, A. E., Demory, M., Leung, L. R., Ramos, A. M., Shields, C. A., Rutz, J. J., Siler, N., Villarini, G., Hall, A., & Ralph, F. M. (2020). Responses and impacts of atmospheric rivers to climate change. *Nature*

- Reviews Earth & Environment*, 1(3), 143-157. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0030-5>
- Pendergrass, A.G. (2018). What precipitation is extreme? *Science*, 360(6393), 1072–1073. <https://doi.org/10.1126/science.aat1871>
- Pendergrass, A.G., F. Lehner, B.M. Sanderson, & Y. Xu, (2015). Does extreme precipitation intensity depend on the emissions scenario? *Geophysical Research Letters*, 42(20), 8767–8774. <https://doi.org/10.1002/2015gl065854>
- Pepler, A. S., Di Luca, A., Ji, F., Alexander, L. V., Evans, J. P., & Sherwood, S. C. (2016). Projected changes in east Australian midlatitude cyclones during the 21st century. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 334-340. <https://doi.org/10.1002/2015gl067267>
- Pfahl, S. & H.Wernli, (2012). Quantifying the relevance of Cyclones for precipitation extremes. *Journal of Climate*, 25(19), 6770–6780. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-11-00705.1>
- Pfahl, S., P.A. O’Gorman, & E.M. Fischer, (2017). Understanding the regional pattern of projected future Changes in extreme precipitation. *Nature Climate Change*, 7, 423. <https://doi.org/10.1038/nclimate3287>
- Phibbs, S. & R. Toumi, (2016). The dependence of precipitation and its footprint on atmospheric temperature in idealized extratropical Cyclones. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(15), 8743–8754. <https://doi.org/10.1002/2015jd024286>
- Potopová, V., Štěpánek, P., Zahradníček, P., Farda, A., Türkott, L., & Soukup, J. (2018). Projected changes in the evolution of drought on various timescales over the Czech Republic according to Euro - CORDEX models. *International Journal of Climatology*, 38(S1). <https://doi.org/10.1002/joc.5421>
- Preuschmann, Swantje, Haensler Andreas, Kotova Lola, Dürk Nikolaus, Eibner Wolfgang, Waidhofer Carina, Haselberger Christoph & Jacob Daniela, (2017). The IMPACT2C web-atlas – Conception, organization and aim of a web-based climate service product. *Climate Services*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2017.03.005>
- Pulliainen, J., Luojus, K., Derksen, C., Mudryk, L., Lemmetyinen, J., Salminen, M., Ikonen, J., Takala, M., Cohen, J., Smolander, T., & Norberg, J. (2020). Patterns and trends of Northern Hemisphere snow mass from 1980 to 2018. *Nature*, 581(7808), 294-298. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2258-0>
- Qiu, J., Q. Gao, S.Wang, & Z. Su, (2016). Comparison of temporal trends from multiple soil moisture data sets and precipitation: The implication of irrigation on regional soil moisture trend. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 48, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.11.012>
- Rahmstorf, S. (1998). Influence of mediterranean outflow on Climate. *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 79, 281.



- Rahmstorf, S., Box, J. E., Feulner, G., Mann, M. E., Robinson, A., Rutherford, S., & Schaffernicht, E. J. (2015). Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning Circulation. *Nature Climate Change*, 5(5), 475-480.
- Ralph, F.M. & M.D. Dettinger, (2011). Storms, floods, and the science of atmospheric rivers. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92(32), 265–266. <https://doi.org/10.1029/2011eo320001>
- Ralph, F. M., Prather, K. A., Cayan, D., Spackman, J. R., DeMott, P., Dettinger, M., Fairall, C., Leung, R., Rosenfeld, D., Rutledge, S., Waliser, D., White, A. B., Cordeira, J., Martin, A., Helly, J., & Intrieri, J. (2016). CalWater Field studies designed to quantify the roles of atmospheric rivers and aerosols in modulating U.S. West Coast precipitation in a changing climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(7), 1209-1228. <https://doi.org/10.1175/bams-d-14-00043.1>
- Ramos, A.M., R. Tomé, R.M. Trigo, M.L.R. Liberato, & J.G. Pinto, (2016). Projected Changes in atmospheric rivers affecting Europe in CMIP5 models. *Geophysical Research Letters*, 43(17), 9315–9323. <https://doi.org/10.1002/2016gl070634>
- Reboita, M. S., Reale, M., Da Rocha, R. P., Giorgi, F., Giuliani, G., Coppola, E., Nino, R. B., Llopart, M., Torres, J. A., & Cavazos, T. (2021). Future changes in the wintertime cyclonic activity over the CORDEX-CORE southern hemisphere domains in a multi-model approach. *Climate Dynamics*, 57, 1533–1549. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05317-z>
- Reboita, M. S., R. P. da Rocha, T. Ambrizzi, & C. D. Gouveia, (2015). Trend and teleconnection patterns in the Climatology of extratropical Cyclones over the Southern Hemisphere. *Climate Dynamics*, 45(7–8), 1929–1944. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2447-3>
- Reed, K. A., A. M. Stansfield, M. F. Wehner, & C. M. Zarzycki, (2020). Forecasted attribution of the human influence on Hurricane Florence. *Science Advances*, 6(1), eaaw9253. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw9253>
- Reichler, T. & J. Kim, (2008). How well do Coupled models simulate today's Climate? *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 89, 303–311.
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Roberts, M. J., Camp, J., Seddon, J., Vidale, P. L., Hodges, K., Vanni re, B., Mecking, J., Haarsma, R., Bellucci, A., Scoccimarro, E., Caron, L., Chauvin, F., Terray, L., Valcke, S., Moine, M., Putrasahan, D., Roberts, C. D., Senan, R., Zarzycki, C., ... Wu, L. (2020). Projected future changes in tropical cyclones using the CMIP6 HighResMIP Multimodel ensemble. *Geophysical Research Letters*,

- 47(14). <https://doi.org/10.1029/2020gl088662>
- Rowell, D.P., B.B.B. Booth, S.E. Nicholson, & P. Good, (2015). Reconciling Past and Future Rainfall Trends over East Africa. *Journal of Climate*, 28(24), 9768–9788. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0140.1>
- Ruffault, J., T. Curt, N.K. Martin-StPaul, V. Moron, & R.M. Trigo, (2018). Extreme wildfire events are linked to global-change-type droughts in the northern Mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(3), 847–856. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-847-2018>
- Sakamoto, T. T., Hasumi, H., Ishii, M., Emori, S., Suzuki, T., Nishimura, T., & Sumi, A. (2005). Responses of the Kuroshio and the Kuroshio Extension to global warming in a high - resolution Climate model. *Geophysical Research Letters*, 32(14).
- Sallée, J.-B., Pellichero, V., Akhoudas, C., Pauthenet, E., Vignes, L., Schmidtko, S., Garabato, A. N., Sutherland, P., & Kuusela, M. (2021). Summertime increases in upper-ocean stratification and mixed-layer depth. *Nature*, 591(7851), 592-598.
- Sanderson, B. M., Xu, Y., Tebaldi, C., Wehner, M., O'Neill, B., Jahn, A., Pendergrass, A. G., Lehner, F., Strand, W. G., Lin, L., Knutti, R., & Lamarque, J. F. (2017). Community climate simulations to assess avoided impacts in 1.5 and 2°C futures. *Earth System Dynamics*, 8(3), 827-847. <https://doi.org/10.5194/esd-8-827-2017>
- Sante, D. F., Coppola, E., & Giorgi, F. (2021). Projections of river floods in Europe using EURO-CORDEX, CMIP5 and CMIP6 simulations. *Int. J. Climatol*, 43. <https://doi.org/10.1002/joc.7014>
- Sato, Y., Yukimoto, S., Tsujino, H., Ishizaki, H., & Noda, A. (2006). Response of North Pacific ocean circulation in a Kuroshio-resolving ocean model to an Arctic Oscillation (AO)-like change in Northern Hemisphere atmospheric circulation due to greenhouse-gas forcing. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 84(2), 295-309.
- Schubert, S.D., H.Wang, R.D. Koster, M.J. Suarez, & P.Y. Groisman, (2014). Northern Eurasian heat waves and droughts. *Journal of Climate*, 27(9), 3169–3207. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-13-00360.1>
- Schwingshackl, C., J. Sillmann, A.M. Vicedo-Cabrera, M. Sandstad, & K. Aunan, (2021). Heat Stress Indicators in CMIP6: Estimating Future Trends and Exceedances of Impact-Relevant Thresholds. *Earth's Future*, 9, e2020EF001885. <https://doi.org/10.1029/2020ef001885>
- Seiler, C. & F.W. Zwiers, (2016). How will Climate Change affect explosive Cyclones in the extratropics of the Northern Hemisphere? *Climate Dynamics*, 46, 3633–3644. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2791-y>
- Seneviratne, S.I., M.G. Donat, A.J. Pitman, R. Knutti, & R.L.Wilby, (2016). Allowable CO2 emissions based on regional and impact-related Climate targets. *Nature*, 529(7587), 477–483. <https://doi.org/10.1038/nature16542>



- Seneviratne, S.I. & M. Hauser, (2020). Regional Climate Sensitivity of Climate Extremes in CMIP6 Versus CMIP5 Multimodel Ensembles. *Earth's Future*, 8(9), e2019EF001474. <https://doi.org/10.1029/2019ef001474>
- Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., Rusticucci, M., Semenov, V., Alexander, L., Allen, S., Benito, G., ... Zwiers, F. (2012). *Changes in Climate Extremes and their Impacts on the Natural Physical Environment*. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, and Q. Dahe (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, (pp.109–230). <https://doi.org/10.1017/cbo9781139177245.006>
- Seong, M.-G., S.-K. Min, Y.-H. Kim, X. Zhang, & Y. Sun, (2021). Anthropogenic Greenhouse Gas and Aerosol Contributions to Extreme Temperature Changes during 1951–2015. *Journal of Climate*, 34(3), 857–870. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-1023.1>
- Sharma, A. R. & S. J. Déry, (2020). Variability and trends of landfalling atmospheric rivers along the Pacific Coast of northwestern North America. *International Journal of Climatology*, 40(1), 544–558. <https://doi.org/10.1002/joc.6227>
- Sharma, S., M. Zhang, Anshika, J. Gao, H. Zhang, & S. H. Kota, (2020). Effect of restricted emissions during COVID-19 on air quality in India. *Science of The Total Environment*, 728, 138878. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138878>.
- Sharmila, S. & K.J.E.Walsh, (2018). Recent poleward shift of tropical Cyclone formation linked to Hadley Cell expansion. *Nature Climate Change*, 8(8), 730–736. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0227-5>
- Shepherd, T.G. (2014). Atmospheric Circulation as a source of uncertainty in Climate Change projections. *Nature Geoscience*, 7(10), 703–708. <https://doi.org/10.1038/ngeo2253>
- Shin, J., R. Olson, & S.-I. An, (2018). Projected Heat Wave Characteristics over the Korean Peninsula During the Twenty-First Century. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 54(1), 53–61. <https://doi.org/10.1007/s13143-017-0059-7>
- Shiogama, H., Imada, Y., Mori, M., Mizuta, R., Stone, D., Yoshida, K., Arakawa, O., Ikeda, M., Takahashi, C., Arai, M., Ishii, M., Watanabe, M., & Kimoto, M. (2016). Attributing historical changes in probabilities of record-breaking daily temperature and precipitation extreme events. *SOLA*, 12(0), 225–231. <https://doi.org/10.2151/sola.2016-045>
- Sillmann, J., Stjern, C. W., Myhre, G., Samset, B. H., Hodnebrog, Ø., Andrews, T., Boucher, O., Faluvegi, G., Forster, P., Kasoar, M. R., Kharin, V. V., Kirkevåg, A., Lamarque, J., Olivié, D. J.,

- Richardson, T. B., Shindell, D., Takemura, T., Voulgarakis, A., & Zwiers, F. W. (2019). Extreme wet and dry conditions affected differently by greenhouse gases and aerosols. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2, 24.. <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0079-3>
- Sillmann, J., C.W. Stjern, G. Myhre, & P.M. Forster, (2017). Slow and fast responses of mean and extreme precipitation to different forcing in CMIP5 simulations. *Geophysical Research Letters*, 44(12), 6383–6390. <https://doi.org/10.1002/2017gl073229>
- Singh, M.S., Z. Kuang, E.D. Maloney, W.M. Hannah, & B.O.Wolding, (2017). Increasing potential for intense tropical and subtropical thunderstorms under global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), 1657–11662. <https://doi.org/10.1073/pnas.1707603114>
- Smith, K. E., Burrows, M. T., Hobday, A. J., King, N. G., Moore, P. J., Gupta, A. S., Thomsen, M. S., Wernberg, T., & Smale, D. A. (2023). Biological Impacts of Marine Heatwaves. *Annual Review of Marine Science*, 15(1), 119-145. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032122-121437>
- Smith, K. E., Burrows, M. T., Hobday, A. J., Sen Gupta, A., Moore, P. J., Thomsen, M., Wernberg, T., & Smale, D. A. (2021). Socioeconomic impacts of marine heatwaves: Global issues and opportunities. *Science*, 374(6566), eabj3593.
- Sobel, A.H. & S.J. Camargo, (2011). Projected Future Seasonal Changes in Tropical Summer Climate. *Journal of Climate*, 24(2), 473–487. <https://doi.org/10.1175/2010jcli3748.1>
- Solander, K. C., Newman, B. D., Carioca de Araujo, A., Barnard, H. R., Berry, Z. C., Bonal, D., Bretfeld, M., Burban, B., Antonio Candido, L., Céleri, R., Chambers, J. Q., Christoffersen, B. O., Detto, M., Dorigo, W. A., Ewers, B. E., José Filgueiras Ferreira, S., Knohl, A., Leung, L. R., McDowell, N. G., ... Xu, C. (2020). The pantropical response of soil moisture to El Nino. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5), 2303-2322. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2303-2020>
- Song, X., Y. Song, & Y. Chen, (2020). Secular trend of global drought since 1950. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094073. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba20d>
- Soto-Navarro, J., Jordá, G., Amores, A., Cabos, W., Somot, S., Sevault, F., Macías, D., Djurdjevic, V., Sannino, G., Li, L., & Sein, D. (2020). Evolution of Mediterranean Sea water properties under climate change scenarios in the Med-CORDEX ensemble. *Climate Dynamics*, 54(3-4), 2135-2165. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05105-4>
- Spinoni, J., Barbosa, P., De Jager, A., McCormick, N., Naumann, G., Vogt, J. V., Magni, D., Masante, D., & Mazzeschi, M. (2019). A new global database of meteorological drought events from 1951 to 2016. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 22, 100593. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100593>
- Spinoni, J., Barbosa, P., Bucchignani, E., Cassano, J., Cavazos, T., Christensen, J. H., Christensen, O. B., Coppola, E., Evans, J., Geyer, B., Giorgi, F., Hadjinicolaou, P., Jacob, D., Katzfey, J., Koenigk, T.,



- Laprise, R., Lennard, C. J., Kurnaz, M. L., Li, D., ... Dosio, A. (2020). Future global meteorological drought hot spots: A study based on CORDEX data. *Journal of Climate*, *33*(9), 3635–3661. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0084.1>
- Spinoni, J., G. Naumann, H. Carrao, P. Barbosa, & J. Vogt, (2014). World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. *International Journal of Climatology*, *34*(8), 2792–2804. <https://doi.org/10.1002/joc.3875>
- Studholme, J. & S. Gulev, (2018). Concurrent Changes to Hadley Circulation and the Meridional Distribution of Tropical Cyclones. *Journal of Climate*, *31*(11), 4367–4389. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0852.1>
- Su, Q. & B. Dong, (2019). Projected near-term Changes in three types of heat waves over China under RCP4.5. *Climate Dynamics*, *53*(7), 3751–3769. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04743-y>
- Sui, Y., X. Lang, & D. Jiang, (2018). Projected signals in Climate extremes over China associated with a 2°C global warming under two RCP scenarios. *International Journal of Climatology*, *38*, e678–e697. <https://doi.org/10.1002/joc.5399>
- Sun, C., Z. Jiang, W. Li, Q. Hou, & L. Li, (2019). Changes in extreme temperature over China when global warming stabilized at 1.5°C and 2.0°C. *Scientific Reports*, *9*(1), 14982. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50036-z>
- Sun, Y., Hu, T., Zhang, X., Li, C., Lu, C., Ren, G., & Jiang, Z. (2019). Contribution of global warming and urbanization to changes in temperature extremes in eastern China. *Geophysical Research Letters*, *46*(20), 11426–11434. <https://doi.org/10.1029/2019gl084281>
- Sun, Q., X. Zhang, F. Zwiers, S. Westra, & L. Alexander, (2021). A Global, Continental, and Regional Analysis of Changes in Extreme Precipitation. *Journal of Climate*, *34*(1), 243–258. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0892.1>
- Sung, H. M., Kim, J., Lee, J. H., Shim, S., Boo, K. O., Ha, J. C., & Kim, Y. H. (2021). Future changes in the global and regional sea level rise and sea surface temperature based on CMIP6 models. *Atmosphere*, *12*(1), 90.
- Swingedouw, D., Colin, C., Eynaud, F., Ayache, M., & Zaragosi, S. (2019). Impact of freshwater release in the Mediterranean Sea on the North Atlantic climate. *Climate Dynamics*, *53*(7–8), 3893–3915. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04758-5>
- Takahashi, C. & M. Watanabe, (2016). Pacific trade winds accelerated by aerosol forcing over the past two decades. *Nature Climate Change*, *6*(8), 768–772. <https://doi.org/10.1038/nclimate2996>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *93*(4), 485–498. <https://doi.org/10.1175/>

bams-d-11-00094.1

- Theodoropoulos, C., & Karaouzas, I. (2021). Climate Change and the future of Mediterranean freshwater macroinvertebrates: a model-based assessment. *Hydrobiologia*, *848*, 5033–5050. <https://doi.org/10.1007/s10750-021-04691-x>
- Tian, X., L. Shu, M. Wang, & F. Zhao, (2017). The impact of Climate Change on fire risk in Daxing’ anling, China. *Journal of Forestry Research*, *28*(5), 997–1006. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0383-x>
- Tian, F., B. Dong, J. Robson, R. Sutton, & S.F.B. Tett, (2019). Projected near term Changes in the East Asian summer monsoon and its uncertainty. *Environmental Research Letters*, *14*(8), 084038. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab28a6>
- Tilinina, N., S. K. Gulev, I. Rudeva, & P. Koltermann, (2013). Comparing Cyclone Life Cycle Characteristics and Their Interannual Variability in Different Reanalyses. *Journal of Climate*, *26*(17), 6419–6438. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00777.1>
- Trenberth, K. E., J. T. Fasullo, & T. G. Shepherd, (2015). Attribution of Climate extreme events. *Nature Climate Change*, *5*(8), 725–730. <https://doi.org/10.1038/nclimate2657>
- Tseng*, Y. H. & Co-authors (2016). North and equatorial Pacific ocean Circulation in the CORE-II hindcast simulation. *Ocean Modell.*, *104*, 143-170.
- Tseng, Y.-H., Ding, R., & Huang, X.-m. (2017). The warm Blob in the northeast Pacific—the bridge leading to the 2015/16 El Niño. *Environmental Research Letters*, *12*(5), 054019.
- Tseng, Y.-H., Tsao, S.-E., Kuo, Y.-C., & Tsai, J.-Y. (2022). TIMCOM model datasets for the CMIP6 Ocean Model Intercomparison Project. *Ocean Modelling*, *179*, 102109.
- Tsou, C. H., Pei-Yu, H., Tu, C. Y., Cheng-Ta, C., Tzeng, T. P., & Cheng, C. T. (2016). Present simulation and future typhoon activity projection over western North Pacific and Taiwan/east Coast of China in 20-km HIRAM Climate model. *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, *27*(5), 6.
- Tsuboki, K., Yoshioka, M. K., Shinoda, T., Kato, M., Kanada, S., & Kitoh, A. (2015). Future increase of supertyphoon intensity associated with climate change. *Geophysical Research Letters*, *42*(2), 646-652. <https://doi.org/10.1002/2014gl061793>
- Tsujino, H., Urakawa, L. S., Griffies, S. M., Danabasoglu, G., Adcroft, A. J., Amaral, A. E., Arsouze, T., Bentsen, M., Bernardello, R., Böning, C. W., Bozec, A., Chassignet, E. P., Danilov, S., Dussin, R., Exarchou, E., Fogli, P. G., Fox-Kemper, B., Guo, C., Ilicak, M., ··· Yu, Z. (2020). Evaluation of global ocean–sea-ice model simulations based on the experimental protocols of the ocean model Intercomparison project phase 2 (OMIP-2). *Geoscientific Model Development*, *13*(8), 3643-3708. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3643-2020>
- Turco, M., Jerez, S., Augusto, S., Tarín-Carrasco, P., Ratola, N., Jiménez-Guerrero, P., & Trigo, R. M.



- (2019). Climate drivers of the 2017 devastating fires in Portugal. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50281-2>
- Twomey, S. A. (1977). The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds, *J. Atmos. Sci.*, 34, 1149–1152.
- Ukkola, A.M., M.G. De Kauwe, M.L. Roderick, G. Abramowitz, & A.J. Pitman, (2020). Robust Future Changes in Meteorological Drought in CMIP6 Projections Despite Uncertainty in Precipitation. *Geophysical Research Letters*, 47(11), e2020GL087820. <https://doi.org/10.1029/2020gl087820>
- Utsumi, N., H. Kim, S. Kanae, & T. Oki, (2017). Relative Contributions of weather systems to mean and extreme global precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(1), 152–167. <https://doi.org/10.1002/2016jd025222>
- Van Dijk, A. I., Beck, H. E., Crosbie, R. S., De Jeu, R. A., Liu, Y. Y., Podger, G. M., Timbal, B., & Viney, N. R. (2013). The millennium drought in southeast Australia (2001–2009): Natural and human causes and implications for water resources, ecosystems, economy, and society. *Water Resources Research*, 49(2), 1040–1057. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20123>
- Van Heerwaarden, C. C., Mol, W. B., Veerman, M. A., Benedict, I., Heusinkveld, B. G., Knap, W. H., Kazadzis, S., Kouremeti, N., & Fiedler, S. (2021). Record high solar irradiance in Western Europe during first COVID-19 lockdown largely due to unusual weather. *Communications Earth & Environment*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00110-0>
- Varino, F., Arbogast, P., Joly, B., Riviere, G., Fandeur, M., Bovy, H., & Granier, J. (2019). Northern hemisphere extratropical winter cyclones variability over the 20th century derived from ERA-20C reanalysis. *Climate Dynamics*, 52(1-2), 1027–1048. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4176-5>
- Viale, M., R. Valenzuela, R.D. Garreaud, & F.M. Ralph, (2018). Impacts of Atmospheric Rivers on Precipitation in Southern South America. *Journal of Hydrometeorology*, 19(10), 1671–1687. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-18-0006.1>
- Von Schneidmesser, E., Monks, P. S., Allan, J. D., Bruhwiler, L., Forster, P., Fowler, D., Lauer, A., Morgan, W. T., Paasonen, P., Righi, M., Sindelarova, K., & Sutton, M. A. (2015). Chemistry and the linkages between air quality and climate change. *Chemical Reviews*, 115(10), 3856–3897. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00089>
- Wahl, T., S. Jain, J. Bender, S.D. Meyers, & M.E. Luther, (2015). Increasing risk of Compound flooding from storm surge and rainfall for major US Cities. *Nature Climate Change*, 5, 1093. <https://doi.org/10.1038/nclimate2736>
- Waliser, D. & B. Guan, (2017). Extreme winds and precipitation during landfall of atmospheric rivers. *Nature Geoscience*, 10, 179. <https://doi.org/10.1038/ngeo2894>
- Wang, B., Biasutti, M., Byrne, M. P., Castro, C., Chang, C., Cook, K., Fu, R., Grimm, A. M., Ha, K.,

- Hendon, H., Kitoh, A., Krishnan, R., Lee, J., Li, J., Liu, J., Moise, A., Pascale, S., Roxy, M. K., Seth, A., ... Zhou, T. (2021). Monsoons climate change assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *102*(1), E1-E19. <https://doi.org/10.1175/bams-d-19-0335.1>
- Wang, B., Li, J., Cane, M. A., Liu, J., Webster, P. J., Xiang, B., Kim, H., Cao, J., & Ha, K. (2018). Toward predicting changes in the land monsoon rainfall a decade in advance. *Journal of Climate*, *31*(7), 2699-2714. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0521.1>
- Wang, B., Liu, J., Kim, H., Webster, P. J., Yim, S., & Xiang, B. (2013). Northern hemisphere summer monsoon intensified by mega-el nino/Southern Oscillation and Atlantic multidecadal oscillation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(14), 5347-5352. <https://doi.org/10.1073/pnas.1219405110>
- Wang, C., Hsu, H., & Chen, Y. (2021). Observed and projected frontal activities in East Asia. *Journal of Climate*, *34*, 3067-3085. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0959.1>
- Wang, H., Chen, Y., Xun, S., Lai, D., Fan, Y., & Li, Z. (2012). Changes in daily climate extremes in the arid area of northwestern China. *Theoretical and Applied Climatology*, *112*(1-2), 15-28. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0698-7>
- Wang, J., & Oey, L.-Y. (2014). Inter-annual and decadal fluctuations of the Kuroshio in East China Sea and Connection with surface fluxes of momentum and heat. *Geophysical Research Letters*, *41*(23), 8538-8546.
- Wang, P. X., Wang, B., Cheng, H., Fasullo, J., Guo, Z. T., Kiefer, T., & Liu, Z. Y. (2014). The global monsoon across timescales: Coherent variability of regional monsoons. *Climate of the Past*, *10*(6), 2007-2052. <https://doi.org/10.5194/cp-10-2007-2014>
- Wang, P. X., Wang, B., Cheng, H., Fasullo, J., Guo, Z., Kiefer, T., & Liu, Z. (2017). The global monsoon across time scales: Mechanisms and outstanding issues. *Earth-Science Reviews*, *174*, 84-121. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.006>
- Wang, X.L., Y. Feng, R. Chan, & V. Isaac, (2016). Inter-comparison of extratropical Cyclone activity in nine reanalysis datasets. *Atmospheric Research*, *181*, 133-153. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.06.010>
- Wang, Z., H. Zhang, & X. Zhang, (2016). Projected response of East Asian summer monsoon system to future reductions in emissions of anthropogenic aerosols and their precursors. *Climate Dynamics*, *47*(5-6), 1455-1468. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2912-7>
- Wang, Y. L., & Wu, C. R. (2022). Rapid surface warming of the Pacific Asian marginal seas since the late 1990s. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *e2022JC018744.101*(C7), 16273-16289
- Wang, Z., Y. Jiang, H. Wan, J. Yan, & X. Zhang, (2017). Detection and Attribution of Changes in Extreme Temperatures at Regional Scale. *Journal of Climate*, *30*(17), 7035-7047. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0835.1>



- Warner, M.D. & C.F. Mass, (2017). Changes in the Climatology, Structure, and Seasonality of Northeast Pacific Atmospheric Rivers in CMIP5 Climate Simulations. *Journal of Hydrometeorology*, 18(8), 2131–2141. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-16-0200.1>
- Wartenburger, R., Hirschi, M., Donat, M. G., Greve, P., Pitman, A. J., & Seneviratne, S. I. (2017). Changes in regional climate extremes as a function of global mean temperature: An interactive plotting framework. *Geoscientific Model Development*, 10(9), 3609-3634. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3609-2017>
- Weber, J., Y. M. Shin, J. Staunton Sykes, S. Archer-Nicholls, N. L. Abraham, & A. T. Archibald (2020), Minimal Climate Impacts From Short-Lived Climate Forcers Following Emission Reductions Related to the COVID-19 Pandemic. *Geophysical Research Letters*, 47(20), e2020GL090326. <https://doi.org/10.1029/2020GL090326>
- Wehner, M.F. (2020). Characterization of long period return values of extreme daily temperature and precipitation in the CMIP6 models: Part 2, projections of future Change. *Weather and Climate Extremes*, 30, 100284. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100284>
- Wehner, M. F., K. A. Reed, B. Loring, D. Stone, & H. Krishnan, (2018). Changes in tropical Cyclones under stabilized 1.5°C and 2.0°C global warming scenarios as simulated by the Community Atmospheric Model under the HAPPI protocols. *Earth System Dynamics*, 9(1), 187–195. <https://doi.org/10.5194/esd-9-187-2018>
- Wehner, M., Stone, D., Mitchell, D., Shiogama, H., Fischer, E., Graff, L. S., Kharin, V. V., Lierhammer, L., Sanderson, B., & Krishnan, H. (2018). Changes in extremely hot days under stabilized 1.5 and 2.0°C global warming scenarios as simulated by the HAPPI multi-model ensemble. *Earth System Dynamics*, 9(1), 299-311. <https://doi.org/10.5194/esd-9-299-2018>
- Wernberg, T., Smale, D. A., Frölicher, T. L. & Smith, A. J. P. (2021). *ScienceBrief Review: Climate change increases marine heatwaves harming marine ecosystems*. In: Critical Issues in Climate Change Science, edited by: P. Liss, C. Le Quéré, & P. Forster. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5596820>
- Westervelt, D., L. Horowitz, V. Naik, A. Tai, A. Fiore, & D. L. Mauzerall, (2016). Quantifying PM_{2.5}-meteorology sensitivities in a global Climate model, *Atmospheric Environment*, 142, 43-56.
- Wilcox, L. J., Liu, Z., Samset, B. H., Hawkins, E., Lund, M. T., Nordling, K., Undorf, S., Bollasina, M., Ekman, A. M., Krishnan, S., Merikanto, J., & Turner, A. G. (2020). Accelerated increases in global and Asian summer monsoon precipitation from future aerosol reductions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(20), 11955-11977. <https://doi.org/10.5194/acp-20-11955-2020>
- Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Gershunov, A., Guzman - Morales, J., Bishop, D. A., Balch, J. K., & Lettenmaier, D. P. (2019). Observed impacts of anthropogenic climate change on wildfire in California. *Earth's Future*, 7(8), 892-910. <https://doi.org/10.1029/2019ef001210>

- Williams, A. P., Cook, E. R., Smerdon, J. E., Cook, B. I., Abatzoglou, J. T., Bolles, K., Baek, S. H., Badger, A. M., & Livneh, B. (2020). Large contribution from anthropogenic warming to an emerging North American megadrought. *Science*, *368*(6488), 314-318. <https://doi.org/10.1126/science.aaz9600>
- Xu, Y., & J. F. Lamarque, (2018). Isolating the meteorological impact of 21st Century GHG warming on the removal and atmospheric loading of anthropogenic fine particulate matter pollution at global scale. *Earth's Future*, *6*(3), 428-440.
- Xu, Y., Zhang, X., Wang, X., Hao, Z., Singh, V. P., & Hao, F. (2019). Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: A case study in northern China. *Journal of Hydrology*, *579*, 124147. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124147>
- Yamada, Y., Satoh, M., Sugi, M., Kodama, C., Noda, A. T., Nakano, M., & Nasuno, T. (2017). Response of tropical cyclone activity and structure to global warming in a high-resolution global Nonhydrostatic model. *Journal of Climate*, *30*(23), 9703-9724. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-17-0068.1>
- Yamaguchi, M. & S. Maeda, (2020a). Increase in the Number of Tropical Cyclones Approaching Tokyo since 1980. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Series II*, *98*(4), 775-786. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-039>
- Yamaguchi, M. & S. Maeda, (2020b). Slowdown of Typhoon Translation Speeds in Mid-latitudes in September Influenced by the Pacific Decadal Oscillation and Global Warming. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Series II*, *98*(6), 1321-1334. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-068>
- Yamaguchi, R., & Suga, T. (2019). Trend and variability in global upper - ocean stratification since the 1960s. *J. Geophys. Res., C*, *124*(12), 8933-8948.
- Yamanaka, G., Nakano, H., Sakamoto, K., Toyoda, T., Urakawa, L. S., Nishikawa, S., Wakamatsu, T., Tsujino, H., & Ishikawa, Y. (2021). Projected climate change in the western North Pacific at the end of the 21st century from ensemble simulations with a high-resolution regional ocean model. *Journal of Oceanography*, *77*(3), 539-560. <https://doi.org/10.1007/s10872-021-00593-7>
- Yang, Y., L. Ren, H. Li, H. Wang, P. Wang, L. Chen, X. Yue, & H. Liao, (2020). Fast Climate Responses to Aerosol Emission Reductions During the COVID-19 Pandemic. *Geophysical Research Letters*, *47*(19), e2020GL089788. <https://doi.org/10.1029/2020GL089788>
- Ye, Z. & Z. Li, (2017). Spatiotemporal Variability and Trends of Extreme Precipitation in the Huaihe River Basin, a Climatic Transitional Zone in East China. *Advances in Meteorology*, *2017*, 3197435. <https://doi.org/10.1155/2017/3197435>
- Yettella, V. & J.E. Kay, (2017). How will precipitation Change in extratropical Cyclones as the planet



- warms? Insights from a large initial Condition Climate model ensemble. *Climate Dynamics*, 49(5), 1765–1781. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3410-2>
- Yin, H., Y. Sun, H. Wan, X. Zhang, & C. Lu, (2017). Detection of anthropogenic influence on the intensity of extreme temperatures in China. *International Journal of Climatology*, 37(3), 1229–1237. <https://doi.org/10.1002/joc.4771>
- Yoshida, K., M. Sugi, R. Mizuta, H. Murakami, & M. Ishii, (2017). Future Changes in Tropical Cyclone Activity in High-Resolution Large-Ensemble Simulations. *Geophysical Research Letters*, 44(19), 9910–9917. <https://doi.org/10.1002/2017gl075058>
- Yu, T., Guo, P., Cheng, J., Hu, A., Lin, P., & Yu, Y. (2018). Reduced connection between the east Asian summer monsoon and southern hemisphere circulation on interannual timescales under intense global warming. *Climate Dynamics*, 51(9-10), 3943-3955. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4121-7>
- Zappa, G., L.C. Shaffrey, K.I. Hodges, P.G. Sansom, & D.B. Stephenson, (2013). A Multimodel Assessment of Future Projections of North Atlantic and European Extratropical Cyclones in the CMIP5 Climate Models. *Journal of Climate*, 26(16), 5846–5862. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00573.1>
- Zarzycki, C. M., (2018). Projecting Changes in Societally Impactful Northeastern U.S. Snowstorms. *Geophysical Research Letters*, 45(21), 12067–12075. <https://doi.org/10.1029/2018gl079820>
- Zhang, D., Zhang, Q., Qiu, J., Bai, P., Liang, K., & Li, X. (2018). Intensification of hydrological drought due to human activity in the middle reaches of the Yangtze River, China. *Science of The Total Environment*, 637-638, 1432-1442. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.121>
- Zhang, G., H. Murakami, T.R. Knutson, R. Mizuta, & K. Yoshida, (2020). Tropical Cyclone motion in a Changing Climate. *Science Advances*, 6(17), eaaz7610. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz7610>
- Zhang, W. & T. Zhou, (2019). Significant Increases in Extreme Precipitation and the Associations with Global Warming over the Global Land Monsoon Regions. *Journal of Climate*, 32(24), 8465–8488. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-18-0662.1>
- Zhang, Y., J. Fan, T. Logan, Z. Li, & C.R. Homeyer, (2019). Wildfire Impact on Environmental Thermodynamics and Severe Convective Storms. *Geophysical Research Letters*, 46(16), 10082–10093. <https://doi.org/10.1029/2019gl084534>
- Zhang, Z. & B.A. Colle, (2017). Changes in Extratropical Cyclone Precipitation and Associated Processes during the Twenty-First Century over Eastern North America and the Western Atlantic Using a Cyclone-Relative Approach. *Journal of Climate*, 30(21), 8633–8656. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-16-0906.1>
- Zhao, T. & A. Dai, (2017). Uncertainties in historical Changes and future projections of drought. Part II: model-simulated historical and future drought Changes. *Climatic Change*, 144(3), 535–548.

<https://doi.org/10.1007/s10584-016-1742-x>

- Zhou, B., Q.H. Wen, Y. Xu, L. Song, & X. Zhang, (2014). Projected Changes in temperature and precipitation extremes in China by the CMIP5 multimodel ensembles. *Journal of Climate*, 27(17), 6591–6611. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-13-00761.1>
- Zhou, B., Y. Xu, J. Wu, S. Dong, & Y. Shi, (2016). Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: Analysis of a high-resolution grid dataset. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1051–1066. <https://doi.org/10.1002/joc.4400>
- Zhu, Y. & R.E. Newell, (1998). A Proposed Algorithm for Moisture Fluxes from Atmospheric Rivers. *Monthly Weather Review*, 126(3), 725–735. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<0725:apafmf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<0725:apafmf>2.0.co;2)
- Zou, Y., Y. Wang, Y. Zhang, & J.-H. Koo (2017), Arctic sea ice, Eurasia snow, and extreme winter haze in China. *Science Advances*, 3(3), e1602751.
- Zscheischler, J. & S.I. Seneviratne, (2017). Dependence of drivers affects risks associated with Compound events. *Science Advances*, 3(6), e1700263. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700263>
- Zscheischler, J., Westra, S., Van den Hurk, B. J., Seneviratne, S. I., Ward, P. J., Pitman, A., AghaKouchak, A., Bresch, D. N., Leonard, M., Wahl, T., & Zhang, X. (2018). Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, 8(6), 469-477. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>
- Zscheischler, J., Martius, O., Westra, S., Bevacqua, E., Raymond, C., Horton, R. M., Van den Hurk, B., AghaKouchak, A., Jézéquel, A., Mahecha, M. D., Maraun, D., Ramos, A. M., Ridder, N. N., Thiery, W., & Vignotto, E. (2020). A typology of compound weather and climate events. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(7), 333-347. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0060-z>

