

交通部中央氣象局
委託研究計畫期末成果報告

提升評估氣候變遷影響之能力

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-100-M-16

執行期間：100年6月27日至100年12月5日

計畫主持人：陳正達

執行機構：中華民國地球科學學會

本成果報告包括以下應繳交之附件(或附錄)：

赴國外出差或研習心得報告1份

赴大陸地區出差或研習心得報告1份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各1份

中華民國 100 年 11 月 15 日

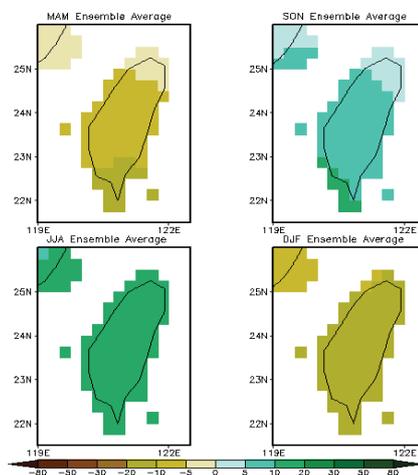
政府研究計畫期末報告摘要資料表

計畫中文名稱	提升評估氣候變遷影響之能力		
計畫編號	MOTC-CWB-100-M-16		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	中華民國地球科學學會		
年度	100	執行期間	自 6 月 27 日起至 12 月 5 日止
本期經費 (單位：千元)	1485 千元		
執行進度	預定 (%)	實際 (%)	比較 (%)
	100	100	0
經費支出	預定(千元)	實際(千元)	支用率 (%)
	1485	1485	100%
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	陳正達	翁叔平	曾騰平
		吳朝榮	
		鄒治華	
報告頁數	59	使用語言	繁體中文
中英文關鍵詞	氣候變遷、統計降尺度 Climate Change, Statistical downscaling		
研究目的	<p>全球氣候變遷是一個全球共同關切的問題，也是各國氣象機構極為重視的問題。全球氣候變遷對區域氣候的影響是氣候研究中相當困難的一部分，因為用以進行氣候變遷推估的氣候模式往往無法解析區域氣候細節，再加上不同氣候模式所推估的區域細節特性不一，同時也並不容易以過去資料驗證其模擬結果（大氣海洋耦合模式的自然變動是氣候系統的本質），因此亟需對氣候變遷的區域影響，以邏輯與科學的方式加以呈現問題的特性，同時可藉以宣導與推廣氣候知識，與加強政府橫向溝通與合作。本計畫以 IPCC 第四次報告所用的氣候模式為基礎，提出降尺度分析方法，利用多模式推估全球氣候變遷對台灣與東亞地區月、季溫度與降雨的影響，並提出將推估結果應用在社會與經濟層面的實例（未來水資源、乾旱變化評估）。另一方面，由於全球氣候變遷使得推估災害天氣事件之強度與發生機率更加困難，增加了船舶航行安全管理中的不確定性，為加強瞭解全球氣候變遷對台灣船舶航行安全之影響，本計畫也將協助氣象局辦理講習活動，提升科學知識。</p>		

研究成果

計畫將運用國際現有的氣候變遷模式模擬推估資料庫，以科學客觀的方法，將氣候模式對未來氣候變遷模擬推估的結果，進一步轉換為臺灣地區未來氣候變遷的區域細部特性與分布推估，使後續因應區域氣候變遷特徵所進行的影響評估、政策規劃制定有所依據，而且同時詳實地將推估過程中的相關問題、科學本質以及所伴隨的不確定性加以分析說明。以下為主要完成之工作：

- (一) 適合台灣的 IPCC AR4 模式統計降尺度方法之說明，包含降尺度之基本概念與原則，以及運用 IPCC AR4 模式與降尺度方法研究台灣氣候變遷的適用範圍與限制。
- (二) IPCC AR4 模式統計降尺度方法應用在台灣與東亞地區的結果，包含：(1) 運用 IPCC AR4 模式與降尺度方法於台灣氣候變遷研究的計算資料、方法、步驟；(2) 根據前項方法說明氣候變遷對台灣與東亞地區氣候的影響，包括：夏季溫度、冬季溫度、月雨量等；(3) 針對氣候變遷推估對水資源應用領域的影響，以石門水庫為實例，引用未來推估結果計算標準化降雨指標 (Standardized Precipitation Index, SPI) 未來變化的可能情境，並討論未來乾旱事件可能發生的頻率與嚴重程度。



2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 台灣降雨
氣候變化 24 個模式平均。單位%

- (三) 邀請日籍專家針對氣候變遷對台灣與東亞地區海域風浪與航行安全的影響進行說明、授課，並進行活動紀錄與教材收集。

	<p>(四) 參與 APEC Climate Center 相關活動，包含瞭解 APEC Climate Center 現況與未來規劃以及國內各單位的參與 APCC 的情形，參加其年度氣候會議以及 WCRP Open Science 會議，促進臺灣評估氣候變遷影響能力相關工作的國際參與。</p> <p>氣候變遷文宣材料將於期末口頭報告時一並提出，其中包含：</p> <p>(1) 以台灣與東亞地區氣候變遷推估為重點，撰寫大眾化之氣候變遷中文宣導材料；(2) 台灣氣候變遷研究成果或相關計畫英文簡介，並製做適合作為接待外賓(以政府中高階官員為假想對象)時的簡報檔案，簡報材料以圖片呈現並搭配英文文字說明。</p>
<p>具體落實應用情形</p>	<p>計畫收集區域高解析度的觀測資料，評估並建立適合台灣本地應用的 IPCC 模式推估結果的統計降尺度方法，運用多個 IPCC 氣候模式在 A1B 情境下的氣候模擬推估系集結果，並進一步將相關氣候模擬資料區域化，進行台灣與東亞地區未來逐月溫度與雨量變化推估的可能範圍與機率，並分析其伴隨的不確定性及來源。此區域氣候變遷推估資料庫將可提供其他政府部門評估氣候變遷對各個社會、經濟層面的影響，以及後續的調適策略。</p> <p>邀請其他國家之波浪氣候專家，來臺傳授氣候變遷對西北太平洋波浪影響推估之科學進展方面。七月初，已邀請京都大學防災研究中心的 Nobuhito Mori 教授訪臺進行系列演講。</p> <p>參與 APEC Climate Center 活動與促進臺灣評估氣候變遷影響能力相關工作的國際參與方面，已於 10 月 17-20 日參加 2011 APEC Climate Symposium，以及 10 月 24-28 日舉行的世界氣候研究計劃國際科學會議。</p> <p>氣候變遷文宣材料將可提供氣象局進行氣候知識的宣導與推廣。</p>
<p>計畫變更說明</p>	<p>(若有)</p>
<p>落後原因</p>	<p>(若有)</p>
<p>檢討與建議 (變更或落後之因應對策)</p>	

中文摘要

對於氣候變遷的影響、調適的評估，最重要的資料需求是局部地區氣溫與降水的未來變化，而非全球平均氣候的改變。不過目前全球氣候變遷推估還是以參與聯合國氣候變遷科學評估報告的氣候模式為主要工具，而這些模式模擬資料的空間解析度並無法提供詳細的區域氣候變遷訊息，因此，需要藉由必須透過動力模式或統計方法，進一步將資料區域細節化，不過即使如此，也還是不能免去氣候模式差異與自然變動對局部地區氣候模擬所造成的不確定性，而且降尺度方法本身也可能伴隨估計的誤差。

透過科學與客觀的方法，研究計畫將運用統計降尺度，以全球氣候模式模擬區域化的結果為基礎，分析未來台灣氣候變遷的可能性機率分布範圍。運用機率方式表示是客觀呈現上述氣候模式差異、自然氣候變動以及降尺度方法疊加後的不確定性估計與信心高低，更有利於政府與民間機構在瞭解區域氣候變遷資料推估特性後，採取適當的決策、規劃以及風險評估。在氣候變遷影響的實例方面，是與長期將與狀態比較相關的未來乾旱推估為例進行說明。計畫也邀請日籍專家針對區域氣候變遷對風浪與船舶航行安全影響的應用方向，傳授相關研究心得。同時參與 APEC 活動與國際會議，促進臺灣評估氣候變遷影響能力相關工作的國際參與方面。

Abstract

For the assessment of climate change impact and adaptation, the regional future projection of temperature and precipitation information is far more important than the global mean climate change. For the future climate change projection, the main tools are the climate model participated in the 4th assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. But the spatial resolutions of climate models are relatively low and can't provide the detailed local climate change information. Either dynamical or statistical downscaling method is needed to provide further regional details. Nevertheless, the local future climate projections still retain the uncertainty from the original model differences or regional natural variability. Further the potential error from downscaling methodology can also affect the estimate of possible range of future climate change.

The proposed work is based on the statistical downscaling of global climate model projection to estimate the likelihood of future climate change projection for Taiwan in probabilistic format. Due to the uncertainty of climate change projection from model differences, natural variability, and downscaling method, the probabilistic distribution is an objective way to reveal the current scientific understanding and limitation of simulation data. Both public and private sections should be aware of the nature of future climate change projection information and properly use them for planning, decision making with risk assessment in mind. The future projected changes in the drought condition are used as an example for further applications. The project invited expert to lecture and demonstrate the impact of climate change on regional surface wind, wave height, and safety of navigation near Taiwan as another example for linkage between the regional climate change information and impact assessment capacity building.

一、前言與研究背景

聯合國跨政府氣候變遷委員會在 2007 年發表的最新科學評估報告 (IPCC, 2007) 認為全球氣候正在變化已是毋庸置疑的 (unequivocal)，儘管其中可以歸咎於人類活動所造成的部份有多少還是氣候科學的研究議題，但是報告中認為「從 20 世紀中期以迄今所觀測到的全球平均溫度上升的絕大部份，非常可能 (超過 90% 機率) 是由於觀測到的人為排放所造成的溫室氣體增加所造成的」，而且可以預期人為排放所造成的溫室氣體增加在 21 世紀將會持續或甚至加劇，也因此，即使究竟未來氣候變遷會如何，還有許多不確定性，這些氣候模式所推估的未來氣候變遷將可能對台灣的自然環境與資源產生巨大的衝擊，公共衛生、基礎建設、災害防救、社會經濟發展、人民生活福祉也都會受到一定程度的影響。政府應該對於未來台灣可能的氣候變遷情況有完整的評估與瞭解，積極制定相關法律、政策與可行的因應調適減緩方案措施，以減輕未來氣候變遷對國家基本建設與人民生命財產安全所帶來的衝擊。

但是因應氣候變遷對各政府與民間機構而言都是新的課題，對於台灣未來可能必須面對的氣候變遷推估狀況與特性的了解，則是政策決定者與行動規劃人員能夠有效採取因應措施不可或缺的資訊，聯合國跨政府氣候變遷委員會的評估報告雖然提供部份的東亞區域氣候變遷推估資訊 (Christensen et al., 2007)，但是礙於目前推估所用氣候模式的空間解析度有限，並無法呈現台灣細部的各區域變化以及相關的不確定性，但台灣在氣候變遷的研究人力並不多，過去發表在國際期刊的台灣區域未來氣候變遷分析與推估的論文有限 (Hsu and Chen, 2002; Liu et al., 2011)，同時也往往無法及時反應聯合國跨政府氣候變遷委員會定期更新的科學評估報告現狀，以及報告所建基的氣候模式推估資料庫。

IPCC 第四次科學評估報告對於區域氣候未來變遷推估的討論，仍是以 Giorgi and Francesco (2000) 所劃分的 30 個次大陸區域為分析的基準，其中台灣是為於亞洲 6 個次大陸區之一的東亞區域 (East ASia; EAS; 20-50N, 100-145E) 中，以全球氣候模式而言，尺度在數千公里的次大陸區已經可以被合理地代表，儘管高解析度的細節只能透過降尺度方法進一步推估。東亞區域平均氣候變化固然是可以簡化為單一的數字指標，但是必須小心可能有正負變化抵消的狀況，因此往往必須輔以空間分布特性補充。在溫度變化方面，多數區域平均隨時間的暖化特徵與全球平均相似，以 IPCC 第四次科學評估報告所用的 A1B 未來發展情境為例，在二十一世紀末東亞區域，年平均多模式系集的近地面氣溫的中位數 (median) 為 3.3 °C，系集分布範圍是介於 2.3 °C 與 4.9 °C 之間。

而氣候模式模擬系集平均的未來增溫空間分布特徵 (參見圖 1)，東亞地區西北側陸地區域的增溫幅度比西南側海面大，冬季增溫一般來說也比夏季大，尤其是中高緯度。不過必須注意的是不同氣候模式間，增暖的幅度還是有相當幅度的差異，空間的分布也未必完全一致。在未來降水變化推估部分，東亞地區整體

平均季節（冬、夏季）降雨在多半的氣候模式均呈現上升的趨勢，二十一世紀末的年平均降水變化量大約在 9% 左右，冬季降水變化推估的模式間差異較大。進一步分析系集平均未來降水變化的空間分布（參見圖 1），雖然多數的局部地區降水變化的符號與整個東亞區域相同，但是在夏季中亞地區，多數氣候模式的未來降水推估是減少的；在冬季，雖然亞洲地區的高緯度降水量增加的幅度相當大，但是從西太平洋經過台灣到南海、中南半島、孟加拉灣以至阿拉伯半島等地區，在多數氣候模式模擬推估的未來降水量卻是降低的，且與區域平均海平面氣壓增加的分布有很好的對應。這也是先前強調即使東亞區域平均降雨增加，但空間結構中的確隱含不同變化間彼此的相互抵消，而且此空間結構在不同氣候模式間也有頗高的一致性。

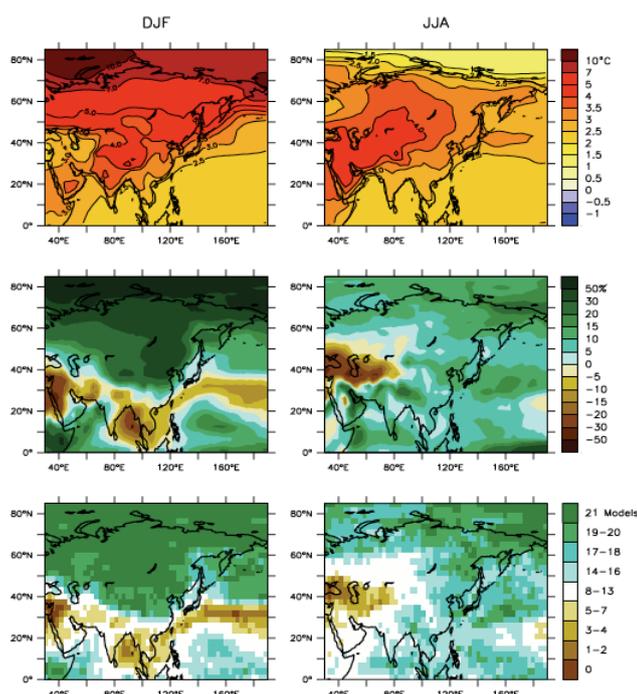


圖 1：在 A1B 的未來發展情境下，氣候模式系集平均的近地表氣溫與降水量的變化（2080 至 2099 年減去 1980 至 1999 年平均），左、右側分別代表北半球的冬季與夏季。由上而下分別是近地表氣溫改變（ $^{\circ}\text{C}$ ）、降水量變化百分比（%）、以及未來降水量增加的模式個數（分析所使用的模式總數為 21，只有在三分之二的模式改變符號相同才標注顏色）（摘自 IPCC WG1 Fourth Assessment Report, Chapter 11, Fig.11.8）

儘管有上述的空間變化特徵，全球氣候模式受限於計算資源的需求與現有模式架構，水平空間解析度大約是從五百多公里至一百多公里，其中大多數的模式網格大小約為三百公里（2.8125 經緯度）。台灣在這種典型氣候模式的解析度下只能以一個網格點，無法進一步區分更細部的氣候資訊，而且往往在這些氣候模式中，台灣地區被定義為海洋的網格點，並不是陸地，同時在低解析度下的台灣地形也比實際高度要低得多。這些限制都可能造成氣候模式的直接模擬結果與

台灣區域細部觀測資料的差距，特別是地形對氣溫與降雨都有明顯的作用。如果只計算氣候改變量，固定的系統性誤差也許對結果影響有限，但是還是無法評估氣候改變量是否會受到海陸分布與地形的影響。所以必須審慎運用全球氣候模式的模擬資料，特別是運用模式過去氣候模擬結果時，必須瞭解其在現有架構下，全球氣候模式在有局部複雜地形地貌的台灣區域，無可避免會產生的誤差。

對於台灣區域未來氣候變遷推估的實際需求，特別是高解析度局地細部的現在氣候模擬運用，主要是氣候變遷影響評估與調適研究方面的需要，不管是能源、水資源、公共衛生、農業、旱澇、經濟等影響評估研究，通常都是運用區域細部的相關部門觀測記錄，以及氣候資料與其相關性的分析為基準，也因此高解析度的氣候資料才能滿足應用端的需求，必須發展將全球氣候模式模擬結果誤差修正與提高解析度的方法。以科學方法進一步提高模式模擬結果解析度（即所謂降尺度方法）主要有兩種方式：動力降尺度與統計降尺度。由於動力降尺度所需的計算資源龐大，特別是考慮不同氣候模式的未來推估，以涵蓋不確性，因此計畫初步將著重在統計降尺度方法。

二、研究方法

2.1 降尺度方法之說明

統計降尺度是一種提高模式模擬結果解析度的方法，所使用的原理是以統計方法分析高解析度觀測資料與全球氣候模式低解析網格模擬資料結果間的關係，修正模式模擬推估的誤差並提高資料的解析度，由於與動力降尺度不同，並不需要完整的全球氣候模式資料，而只針對有興趣的氣候變數目標進行分析，所以可以涵蓋資料庫中所有不同全球氣候模式的推估結果，有效保留原有推估的可能性機率分布範圍。Wilby et al. (2004) 曾針對不同統計降尺度方法（如天氣分類法—Weather typing、天氣衍生器法—Weather generators 與回歸法—Regression Method 等）的特性加以比較，並列出其原理與優缺點於下表。

Method	Strengths	Weaknesses
Weather typing (e.g. analogue method, hybrid approaches, fuzzy classification, self organizing maps, Monte Carlo methods).	<ul style="list-style-type: none"> • Yields physically interpretable linkages to surface climate • Versatile (e.g., can be applied to surface climate, air quality, flooding, erosion, etc.) • Compositing for analysis of extreme events 	<ul style="list-style-type: none"> • Requires additional task of weather classification • Circulation-based schemes can be insensitive to future climate forcing • May not capture intra-type variations in surface climate
Weather generators (e.g. Markov chains, stochastic models, spell length methods, storm arrival times, mixture modelling).	<ul style="list-style-type: none"> • Production of large ensembles for uncertainty analysis or long simulations for extremes • Spatial interpolation of model parameters using landscape • Can generate sub-daily information 	<ul style="list-style-type: none"> • Arbitrary adjustment of parameters for future climate • Unanticipated effects to secondary variables of changing precipitation parameters
Regression methods (e.g. linear regression, neural networks, canonical correlation analysis, kriging).	<ul style="list-style-type: none"> • Relatively straightforward to apply • Employs full range of available predictor variables • ‘Off-the-shelf’ solutions and software available 	<ul style="list-style-type: none"> • Poor representation of observed variance • May assume linearity and/or normality of data • Poor representation of extreme events

此外，還有更為簡單的變化量法 (delta or anomalies method, Giorgi and Mearns, 1991) 與誤差校正空間分解法 (Bias correction and spatial disaggregation, Wood et al. 2002, 2004 與 Maurer 2007)，只是分析高解析度觀測資料與低解析度全球氣候模式模擬結果的統計關係，並用以修正模式誤差並提高模式在特定區域的資料解析度，也許更適用於先期的評估氣候變遷影響能力建立的研究規劃。同時，使用相同的統計降尺度方法在不同全球氣候模式氣候變遷推估結果，可以處理區域變化的不確定性，並以可能發生機率的方式表現。處理的氣候變數將以氣候變遷影響研究方面最長討論的逐月東亞與臺灣區域氣溫與降水為優先。

此先期的評估氣候變遷影響能力建立研究，著重於高解析度局地細部的未來氣候模擬推估，以氣候變遷影響評估與調適研究方面的需要為主，不管是能源、水資源、公共衛生、農業、旱澇、經濟等影響評估研究，都極需區域細部氣候變遷資料，同時也希望了解資料的不確定性與應用上的極限。

在統計降尺度方面，本計畫所採取的方法是由 Wood et al. (2002, 2004) 與 Maurer (2007) 所發展的誤差校正空間分解法 (Bias correction and spatial disaggregation)，是屬於比較簡單的統計降尺度方法，不過還是比 Giorgi and Mearns. (1991) 所提及的簡單變化量法 (delta or anomalies method) 要更細緻一些，可以處理部份變異量與空間內插。之所以未運用先前表中提及的各種複雜統計降尺度方法 (Wilby et al. 2004)，是因為東亞區域冬夏季風環流與局部地區的主要降雨系統的關係未必容易找到合適、準確的統計關係，勉強套用的結果往往並不理想，而且也未必能移除模式的系統性誤差。

統計降尺度需要高解析度的觀測資料作為統計分析的基準與校驗，由於氣候模式模擬資料原本就是網格平均資料，也因此我們傾向使用網格化的觀測資料為分析的基準，可以避免討論測站點與網格區域平均值轉換的問題，這不表示問題不存在，而是並不在此處理，亦即將高解析度的網格觀測資料視為接近真實網格區域平均值，不討論觀測空間尺度的採樣問題。由於氣候變遷推估應用還需要考慮觀測資料記錄的時間長度，而報告所使用的統計分析方法較需要長時間的觀測作為機率分布的基準，所以只選擇資料長度在 40 年以上的觀測分析。

2.2 本研究使用統計降尺度方法說明

Wood et al. (2002, 2004) 與 Maurer (2007) 所發展的誤差校正空間分解法，在誤差校正方面，是先將高解析度觀測月平均資料與氣候模式資料皆先內插轉換至 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 的網格解析度，再運用每個網格點的觀測時間累積機率分佈 (Cumulative Distribution Function, CDF) 修正模式的時間累積機率分佈，而且為了避免只是資料互換，我們是以交互驗證 (cross-validation) 的方式進行，即先

將要估計的年份排除後，再以其他 39 年的觀測與模式資料累積機率分佈進行估算該年模式資料的修正值，同時該年實際觀測值可以做為誤差估算的基準，完成所有年份的個別計算後，再進一步分析累計多年份資料後的誤差變化。可以預期的是，單一年份相對於多年累計平均值的誤差大，因為此方法的特性是使模式的機率密度函數分布可以被修正為與觀測的機率密度函數分布相似，但是不保證某個特定年份會與實際觀測值有所對應，只有在累計平均年數較多時，才能預期修正的作用。此外當該年模式模擬值大於其他 39 年時，必須運用累積機率分佈外插的方式處理，目前是以最大與最小 5 年分布進行線性外插，並以平均值加 3 個標準差與 0 做為外插值的上下限，由於 3 個標準差以常態分布而言已經是接近 400 年才發生一次的事件，即使是做為未來百年氣候變遷的推估基準，也應還不致於過度高估，但必須注意氣候變數統計模型偏向較肥大尾端分布形態時的適用性。此外是這種方法在資料有顯著的長期趨勢時，必須特別小心其在未來氣候的適用性(亦即多數結果都需要外插決定)，此時必須先計算模式資料的長期趨勢特性，在模式誤差修正前先將其扣除，修正後再將此長期趨勢特性加回，以保持累積機率分佈修正的有效性。藉由兩者累積機率分佈關係式進行誤差修正後可以得到 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 誤差修正後的模式平均降雨或溫度。誤差修正後的模式平均資料除以 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 觀測資料氣候值的比值即為修正係數，將此 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 的修正係數以空間內插至高解析度的原始觀測網格上，之後再乘上高解析度觀測資料氣候值，就可以得到某個特定年份的模式模擬資料統計降尺度結果。限於長期高解析度觀測資料不多，在近地面氣溫資料方面只提高解析度到經緯度 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ ，臺灣地區共有 24 個網格平均值，降雨的觀測資料解析度較高，為 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ，臺灣地區共有 75 個網格平均值，圖 2 為降尺度網格示意圖。

三、資料來源

3.1 觀測資料

本計畫中，主要針對降雨與平均溫度兩變數。降雨方面的觀測資料是使用日本的 APHRODITE (Asia Precipitation Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of the Water Resources, Yagatai et al. 2005) 計畫所分析的日平均降雨資料為基準，再進一步處理為月平均資料，單位為 mm/day，觀測資料範圍為亞洲季風區 ($60^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ ； $15^{\circ}\text{S}\sim 55^{\circ}\text{N}$)，資料時間為 1951-2007 年，網格解析度為 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。溫度的觀測資料則是使用英國東安吉利雅大學 (University of East Anglia) 的氣候研究中心 (Climate Research Unit, CRU) 3.10 版的月平均地表溫度。資料範圍為全球陸地，觀測資料時間長度為 1901-2009 年，單位： $^{\circ}\text{C}$ ，網格解析度為 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。

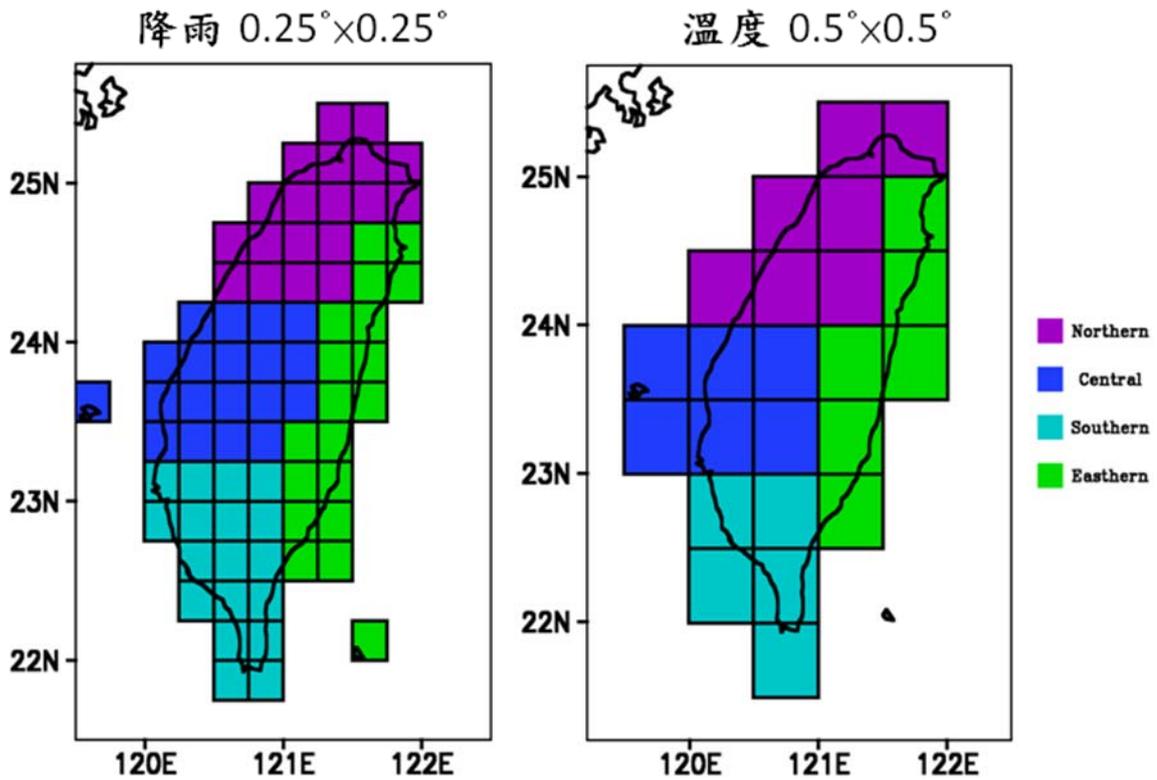


圖 2 台灣地區降尺度網格式示意圖

上述的觀測資料都是以陸上氣象測站的長期觀測所進一步處理的網格式資料分析，也因此只有陸地的部份有資料，海洋上除島嶼外並無資料（海上長期氣象監測無論是透過衛星反演或錨定觀測，資料時間長度皆有所不足），同時由於計畫的重點在東亞與台灣區域氣候變遷，因此所選取的觀測資料範圍為經度 60°E 至 150°E，緯度 0°N 至 55°N。

3.2 氣候模式資料

3.2.1 氣候模式來源

本計畫中氣候模式資料是選取參與 IPCC 第四次評估報告中，在模式資料庫中的 24 個 AOGCM 模式的月平均降雨資料(單位: mm day^{-1})與月平均地表溫度資料(單位: $^{\circ}\text{C}$)，24 個模式詳細介紹見表 1。選取模式中二十世紀(20th Century Climate in Coupled Models ; 20c3m)以及未來情境，依時間分兩部分做降尺度，一為歷史氣候降尺度，40 年；另一為未來推估降尺度，100 年。有相關未來情境模擬資料的所有氣候模式推估結果，並非所有的氣候中心都完成所有的未來情境模擬實驗，以 A1B 情境為例，共有 24 個氣候模式的模擬推估結果，主要處理的是與觀測資料相同的氣候變數：月平均降雨與地表溫度。

氣候中心	國家	模式名稱
Bjerknes Centre for Climate Research	Norway	bccr_bcm2_0
Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis	Canada	cccma_cgcm3_1_t47
Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis	Canada	cccma_cgcm3_1_t63
Météo-France / Centre National de Recherches Météorologiques	France	cnrm_cm3
CSIRO Atmospheric Research	Australia	csiro_mk3_0
CSIRO Atmospheric Research	Australia	csiro_mk3_5
NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	gfdl_cm2_0
NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	gfdl_cm2_1
NASA / Goddard Institute for Space Studies	USA	giss_aom
NASA / Goddard Institute for Space Studies	USA	giss_model_e_h
NASA / Goddard Institute for Space Studies	USA	giss_model_e_r
LASG / Institute of Atmospheric Physics	China	iap_fggoals1_0_g
Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia	Italy	ingv_echam4
Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)	Japan	miroc3_2_hires
Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)	Japan	miroc3_2_medres
Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of KMA, and Model and Data group.	Germany / Korea	miub_echo_g
Max Planck Institute for Meteorology	Germany	mpi_echam5
JMA / Meteorological Research Institute	Japan	mri_cgcm2_3_2a
Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office	UK	ukmo_hadcm3
Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office	UK	ukmo_hadgem1
Institut Pierre Simon Laplace	France	ipsl_cm4
Institute for Numerical Mathematics / Russian Academy of Science	Russia	inmcm3_0
National Center for Atmospheric Research	USA	ncar_ccsm3_0
National Center for Atmospheric Research	USA	ncar_pcm1

表 1、計畫將所使用的 24 個參與 IPCC 第四次科學評估報告的氣候模式以及所屬的國家與氣候中心。

3.2.2 未來情境比較

IPCC 在 2000 年發表一次評估未來發展與排放情境的特別報告 (Nakicenovic et al. 2000)，對於未來全球與區域的社會、經濟、科技、環境等變化設計一些不同的故事情境，分別以 A1T, A1FI, A1B, A2, B1, B2 等簡稱代表在未來情境選擇方面，全球氣候變遷模擬情境可分成下列數種：

A1 情境 - 全球經濟大幅成長，全球人口數在世紀中達到最高而後下降，嶄新和有效率的科技快速發展。全球化的市場經濟導向，人均所得差距消失，人類大幅投資教育與提高生活水準，科技成長與資訊流通順暢。A1 情境群組下，依據其科技發展的能源使用，可包含以下三個次情境：

A1B：再生能源與化石燃料並用，土地使用變遷速度適中

A1T：再生能源進展迅速，未來人類不使用化石燃料

A1F1：人類仍然大幅使用化石燃料

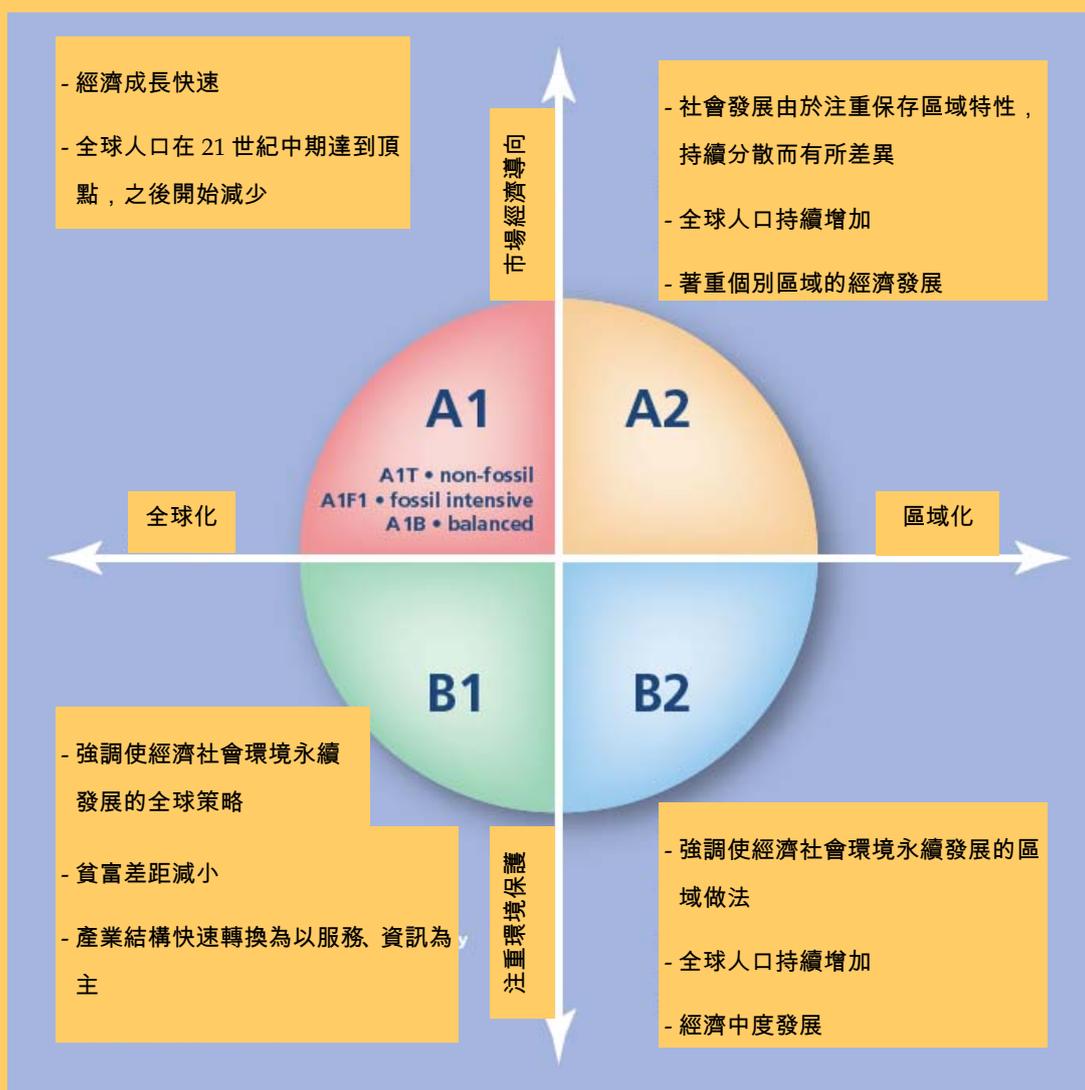
A2 情境－區域性經濟成長且幅度不等，導致未開發國家與開發國家的收入差異仍大，科技與人口流動較不暢通，強調家庭或族群生產力，A2 的人口成長率是四個情境中最高者，科技和經濟成長是四個情境中較緩慢者。

B1 情境－全球化的世界，人口成長和A1 情境一樣，但是經濟結構轉變為物料需求量減緩的服務業，和資訊業和清潔與高效率的科技。全球的環境與社會意識高漲，強調以結合全世界的力量來追求經濟、社會和環境的永續發展，當然也包括公平性。經濟發展程度適中，科技快速發展，而且扮演很重要的角色，世界各國的貧富差距縮小。

B2 情境－世界各國人類對於環境保護與社會公平性日趨重視，但以區域性和地方性思維為主。政府政策為有環境意識的公民所影響，全球化腳步減緩，而地域性決策機制顯的更受重視。全球人口仍持續增加但是低於A2 情境，經濟發展程適中，科技發展不如A1 和B1 情境快速，但是更多樣性。

未來發展與排放情境

聯合國跨政府氣候變遷委員會在 2000 年發表一份評估未來發展與排放情境的特別報告 (Nakicenovic et al., 2000)，對於未來全球與區域的社會、經濟、科技、環境等變化設計一些不同的故事情境，分別以 A1T, A1FI, A1B, A2, B1, B2 等簡稱代表，其中數字 1 與 2 分別表示未來的社會將更朝全球化發展 (1) 或開始著重區域特性 (2)，而第一個英文字母 A 與 B 則是區別未來的經濟是以市場導向發展為重 (A) 抑或以環境保護優先 (B)，其中 A1 的情境又進一步區分為三種次情境，A1T 主要是強調替代的再生能源進展迅速，大量減少石化燃料的運用，A1FI 則是假設石化燃料依舊是主要能源的生產源，A1B 則是同時運用再生能源與石化燃料，發展比較平衡。下圖為上述未來發展與排放情境的示意與進一步資訊說明。



對於世界未來發展情境究竟會如何，還是有很大的不確定性，很難判斷究竟那個情境比較可能發生。IPCC 第四次評估報告中，認為A1B 是未來最可能發生的情境，也是最主要被闡述的情境。A1B 情境被簡述為，未來是經濟成長非常快速的社會，人口成長趨緩，愈多愈新、有效率科技很快被使用。該情境下的世界經濟和文化會趨近相同，有能力建設均富社會，即大幅度減少區域間人均收入的差異。所以本計畫主要將以A1B 情境來討論台灣氣候變遷推估的可能性機率分布範圍。

A1B未來情境作為計劃報告的主要氣候變遷推估描述介於溫室氣體排放量更高的A2情境與排放量較少B1情境之間，也可以視為考慮對未來世界發展情境不確定時所採取的「平均」或「居中」的氣候變遷推估結果。不過，必須強調所有三個不同情境的降尺度結果都已在計劃中完成，只是限於篇幅，未完整加入報告中，報告中將包含主要的A2、A1B、B1情境的基本比較。

3.2.3 模式選取

計畫選取模式針對過去二十世紀歷史模擬實驗以及 A1B 未來發展情境進行分析討論，在模式有多成員系集模擬時只取單一成員進行分析，主要是希望在討論模式結構與敏感度所造成的差異與機率分布範圍時，各模式的權重相同。同一模式不同系集成員的差異可以做為自然變動幅度大小的評估，但不會在報告中深入討論。統計降尺度方法的應用與驗證所使用的是上述過去二十世紀歷史模擬實驗中的最後 40 年，之後便運用相同的方法進行 A1B 未來發展情境實驗模擬推估資料的降尺度，所含蓋的時間為接續二十世紀歷史模擬的後續 100 年氣候變遷模擬推估。雖然原始的氣候模式資料包含全球，但是受限於觀測資料，降尺度的結果主要是在東亞的陸地上，原始的氣候模式資料網格解析度約介於 100 多公里到 500 公里之間，降尺度後的資料解析度變成與觀測資料一致，地表溫度為經緯度 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ，降雨量為 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

3.3 歷史氣候降尺度之檢驗與氣候變化定義

將此統計降尺度方法用於 IPCC 24 模式溫度與降雨的歷史氣候。溫度與降雨量歷史統計降尺度可使模式與觀測結果相似，且提高模式的解析度。24 個模式 40 年的模式氣候值與觀測結果有幾乎相同的結果。但若從 40 年中取一段時間的氣候值與觀測結果有所差異。本計畫使用蒙地卡羅法 (Monte Carlo Method, Metropolis et al. 1949) 估計所得降雨誤差 90% 信賴水準，來探討誤差問題，如圖 3 所示是以模式 mpi_echam5 為例子。可看出當取的時間越短，其誤差越大。在陸地中間沒資料地區是因為降雨量小於 0.03 mm/day，則不計算之。若我們分析

的地區降雨量未來變化小於統計 90% 信賴水準的值，未來推估的可信度就較為不足。圖 4 為模式 mpi_echam5 使用 Monte Carlo 得方法所得平均溫度差異量 90% 信賴水準，與圖 3 結果一樣，可看出氣候平均時間越短，平均溫度差異量越大。同理，若分析的地區平均溫度未來變化小於 90% 信賴水準的值的話，未來推估的可信度就比較小。

將統計降尺度用於未來氣候的推估上，可得到未來模式平均溫度、降雨修正偏差量且較高解析度的結果。若將近未來氣候變化(change)定義對於降雨為 2020-2039 年平均降雨量減 1980-1999 年平均降雨量，除以 1980-1999 年平均降雨量。而近未來氣候變化對於平均溫度定義為 2020-2039 年平均溫度減去 1980-1999 年平均溫度的差異量。將 21 世紀末氣候變化(change)定義對於降雨為 2080-2099 年平均降雨量減 1980-1999 年平均降雨量，除以 1980-1999 年平均降雨量。而 21 世紀末氣候變化對於平均溫度定義為 2080-2099 年平均溫度減去 1980-1999 年平均溫度的差異量。故後續將提到的氣候變化就是用 1980-1999 年氣候值為基準，分別對未來 2020-2039 年、2080-2099 年氣候變遷做推估。本研究對 24 個 IPCC 全球模式做未來氣候的推估，每個模式有各自不同的氣候推估結果。將 24 個模式結果的平均後有客觀的近未來與世紀末氣候變遷推估。本研究的未來氣候推估會對於東亞、台灣 2020-2039 年、2080-2099 年降雨及平均溫度氣候值做分析。在降尺度後網格分佈如圖 2 所示，臺灣區域可區分為北、中、南、東四區，以利於表現臺灣各地氣候的細微差異。

(a)30 年誤差 90% (b) 20 年的誤差 90% (c)10 年的誤差 90%

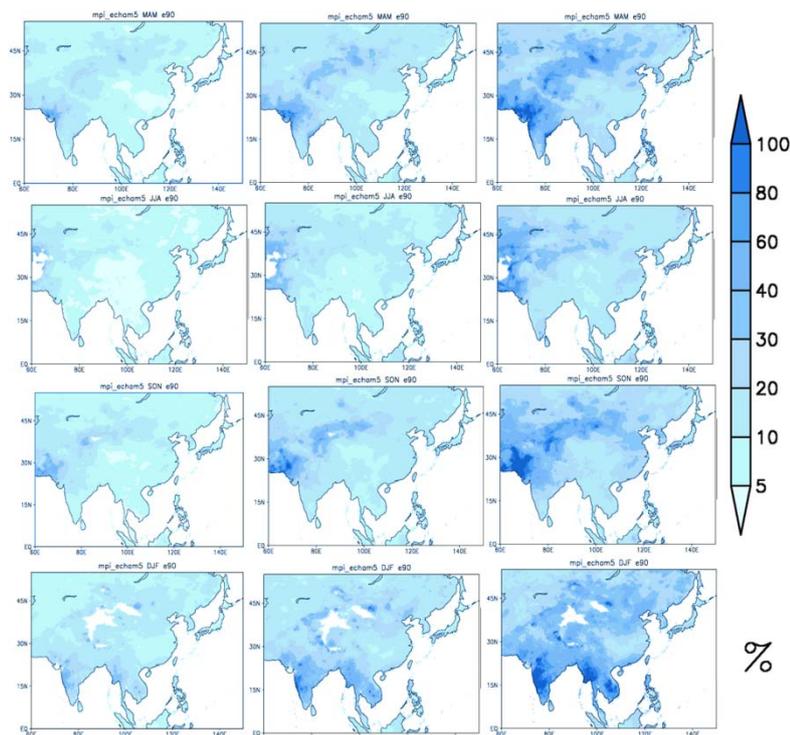


圖 3: 模式 mpi_echam5 使用 Monte Carlo 得方法所得降雨誤差的 90%信賴水準。

(a)40 年取 30 年(b) 40 年取 20 年(c)40 年取 10 年。

由上至下為 MAM、JJA、SON、DJF 降水誤差的圖。

(a) 30 年誤差 90% (b) 20 年誤差 90% (c)10 年誤差 90%

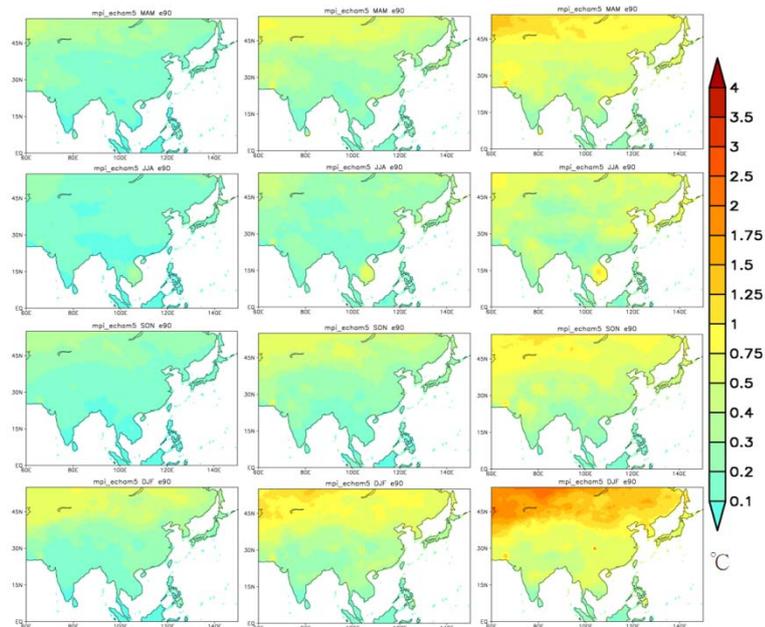


圖 4: 模式 mpi_echam5 使用 Monte Carlo 得方法所得平均溫度誤差的 90%信賴水準。

(a)40 年取 30 年(b) 40 年取 20 年(c)40 年取 10 年。

由上至下為 MAM、JJA、SON、DJF 平均溫度差異量的圖。

四、未來氣候推估

4.1 氣候變遷對東亞地區與臺灣氣候的影響

在過去氣候模式的研究中，由於空間尺度的侷限，往往在臺灣地區僅能提供一個氣象數值來代表所有地方，舉例來說，以平均降雨量而言，不論是臺北、臺中、高雄、澎湖，都是同樣的值來表示，溫度、風速等氣候指標也是相同情形，而這與實際地域性的現象上有落差，本計畫將 IPCC24 個氣候模式的資料以統計降尺度方式得到更小區域的氣象要素與氣候參考指標，在 IPCC 第四次評估報告中指出，若國際氣候公約順利推動，未來情境發生如 A1B 的機會較高，如此東亞區域推估，於 21 世紀末約增暖 3.3°C，但季節間仍有差異，以冬季的暖化最為顯著，尤其是北方內陸區域。日高溫與日低溫的變化相似，高溫出現機率增加和低溫出現機率減少(柳中明等 97)。

4.1.1 溫度

在 2020-2039 年東亞平均溫度與 1980-1999 年東亞平均溫度的差異量如圖 5，在 2020-2039 年四季都有溫度暖化的現象。高緯度會比低緯度明顯，且冬季暖化比其他季節明顯一些。東亞地區由於陸地增溫較海洋為高，且高緯度增溫較低緯度為高，影響包含冬季冷氣團減弱，寒流頻率減少，東北季風減弱。

臺灣地處中低緯度，所以推估上升溫度約 1.0~1.2°C 間（通過 90% 統計檢定）。與東亞地區的陸地暖化特性較無關聯，所以沒有冬季暖化較明顯的情形。如圖 6 所示，臺灣地區暖化的情形分布，在 IPCC 24 模式系集平均之下，在四季的平均溫度來看，並沒有季節上的明顯差異。表 2 為 2020-2039 年四季平均溫度氣候變化量，臺灣地區及臺灣四區的區域平均表格。由表清楚可知，以此統計降尺度的方法所得平均溫度，指出未來 2020-2039 年的推估都比 1980-1999 年的平均溫度氣候值高，而春季升高 1.02 度，夏季升高 1.08 度，東季升高 1.05 度，冬季升高 1.12 度。臺灣北、中、南、東四區沒有明顯的差異性。

	Average			
	MAM	JJA	SON	DJF
Taiwan	1.02	1.08	1.05	1.12
North Taiwan	1.04	1.06	1.06	1.16
Central Taiwan	1.02	1.09	1.05	1.13
South Taiwan	1.01	1.09	1.04	1.08
East Taiwan	1.02	1.07	1.05	1.12

表 2: 2020-2039MAM、JJA、SON、DJF 平均溫度氣候變化臺灣、臺灣北部、臺灣中部、臺灣南部、臺灣東部的平均值。

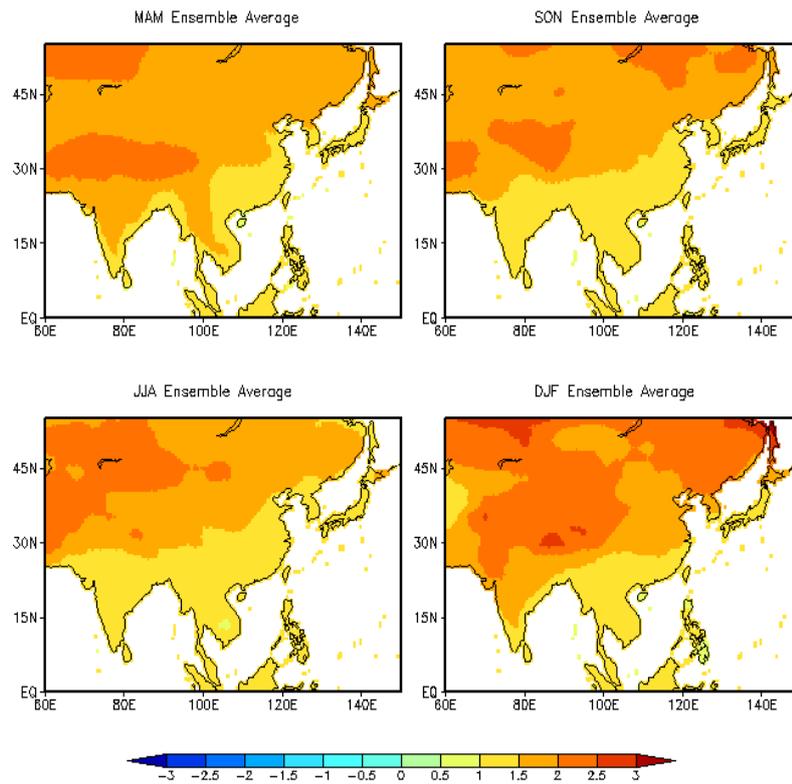


圖 5: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 東亞平均溫度氣候變化 24 個模式平均。單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

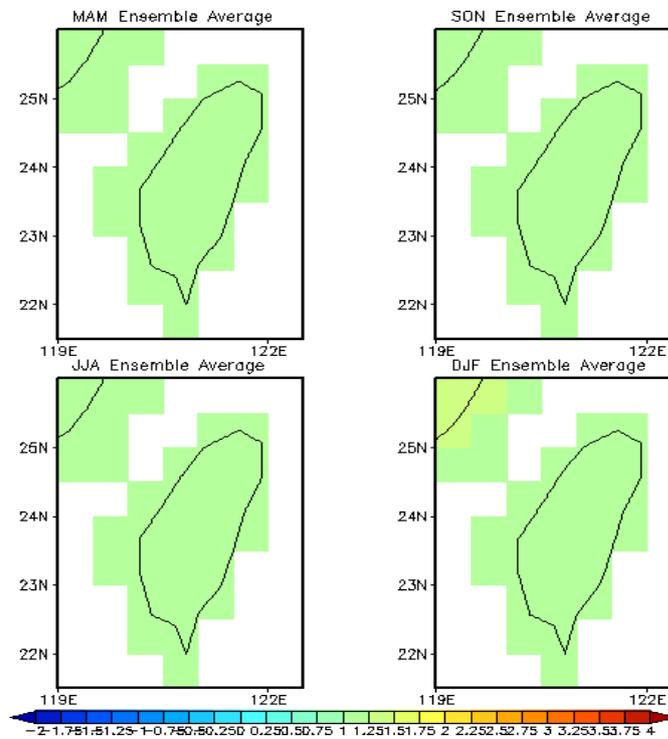


圖 6: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 臺灣平均溫度氣候變化 24 個模式平均。單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

在 2080-2099 年東亞平均溫度與 1980-1999 年東亞平均溫度的差異量如圖 7，在 2080-2099 年四季溫度暖化更盛，區域增溫較高的分布與近未來相同。高緯度仍比低緯度明顯，冬季暖化也比其他季節顯著。如此的增溫效應影響冬季冷氣團減弱的情形可能更加嚴重，東北季風也隨之更加弱化。

臺灣地區推估上升溫度約 2.5~2.6°C 間。台灣島嶼性氣候，與東亞地區陸地暖化特性仍無關聯。如圖 8 所示，台灣地區暖化的情形分布，在 IPCC24 模式系集平均之下，在四季的平均溫度方面，則出現夏、秋兩季台灣南部增溫情形較春冬季高 0.1°C 左右，並非特別明顯。表 3 為 2080-2099 年四季平均溫度氣候變化量，台灣地區及台灣四區的區域平均表格。由表可知，以此降尺度方法所得未來推估 2080-2099 年平均溫度比 2020-2039 年平均溫度氣候值更高，春季升高 2.54 度，夏季升高 2.61 度，秋季升高 2.58 度，冬季升高 2.55 度。台灣北、中、南、東四區仍沒有較大的差異性，但整體台灣 21 世紀末比近未來上升 1~1.5°C 左右。

Average				
	MAM	JJA	SON	DJF
Taiwan	2.54	2.61	2.58	2.55
North Taiwan	2.6	2.64	2.63	2.65
Central Taiwan	2.56	2.63	2.59	2.57
South Taiwan	2.46	2.56	2.51	2.41
East Taiwan	2.53	2.6	2.57	2.53

表 3: 2080-2099MAM、JJA、SON、DJF 平均溫度氣候變化台灣、台灣北部、台灣中部、台灣南部、台灣東部的平均值。

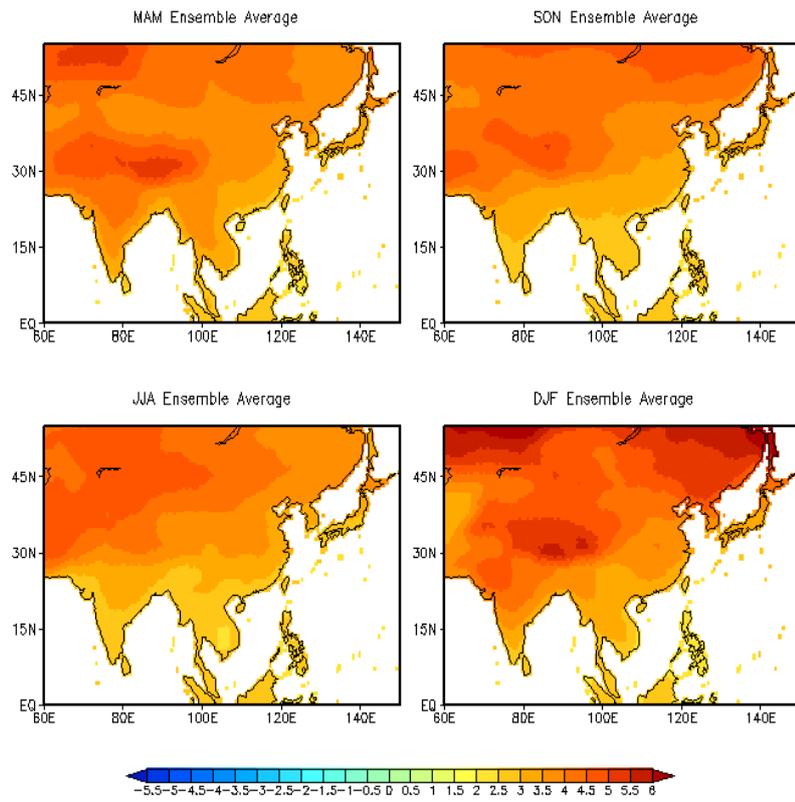


圖 7: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 東亞平均溫度氣候變化 24 個模式平均。單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

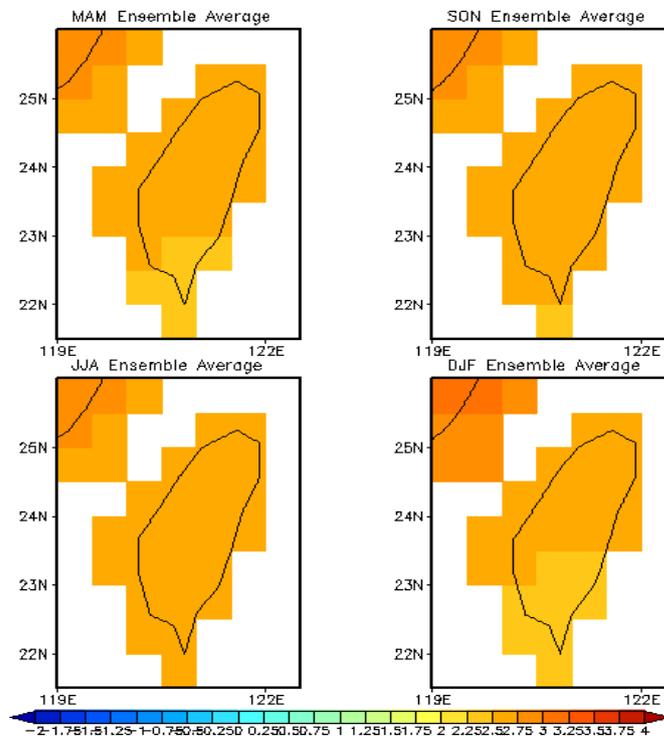


圖 8: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 台灣平均溫度氣候變化 24 個模式平均。單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

4.1.2 降雨

東亞地區由於海陸增溫程度不同，冷高壓變弱，大陸冷氣團出海所會造成的鋒面，其出現機率降低，導致冬季降雨減少，從海洋沿著海陸邊緣，擴散到東南亞區域 (柳中明等 97)。圖 9 為 2020-2039 年四季的東亞降雨的氣候變化 24 模式平均結果。2020-2039 年春季氣候中亞、中南半島、中國南端、台灣及菲律賓北部比 1980-1999 年春季氣候的降雨有減少趨勢，其他地方有增加的趨勢。而其近未來 2020-2039 年夏季氣候的降雨變化中國大陸較不明顯，中亞及菲律賓的變化較大。2020-2039 年秋季，在華中華南有明顯比 1980-1999 年變乾燥；在中國大陸北部、蒙古、印度半島、中亞有明顯降雨增加。2020-2039 年冬季氣候變遷較他季節為明顯，亞洲北緯 30 度以南未來較為乾燥，30 度以北降雨量會增加。IPCC 24 個氣候模式預估未來變遷有不錯一致性的趨勢，但數值大小上，仍有很大的不同，如降雨量的多寡、氣溫高低程度等，更有研究指出如各節氣之雨季出現的時間也會有區域性延後或提早的情形。

而 2020-2039 年台灣的四季變化如圖 10 所示，在春季與冬季降雨量比 1980-1999 年氣候值較為乾燥些，而夏季與秋季雨量有稍微增加。表 4 為圖 10 四季對應台灣及台灣北、中、南、東部四區的降雨量平均數值。2020-2039 年的台灣氣候降雨變化，春季-5.64%、夏季 5.79%、秋季 4.83%、冬季-3.21%。春冬兩季全台四區都是以減少約 3~7%，而在各區內的大小分布情形來說，雨量增加最多的百分比以夏季變化最大的東部 6.21%，以及秋季變化最大的南部 7.18%，雨量減少最多的百分比是春季變化量最大為南部 -7.62%，冬季變化量最大為中部。

Average				
	MAM	JJA	SON	DJF
Taiwan	-5.64	5.79	4.83	-3.21
North Taiwan	-4.03	5.39	2.59	-3.04
Central Taiwan	-5.37	5.6	4.91	-3.53
South Taiwan	-7.62	5.96	7.18	-3.17
East Taiwan	-5.65	6.21	4.77	-3.09

表 4: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 降雨氣候變化台灣、台灣北部、台灣中部、台灣南部、台灣東部的平均值。

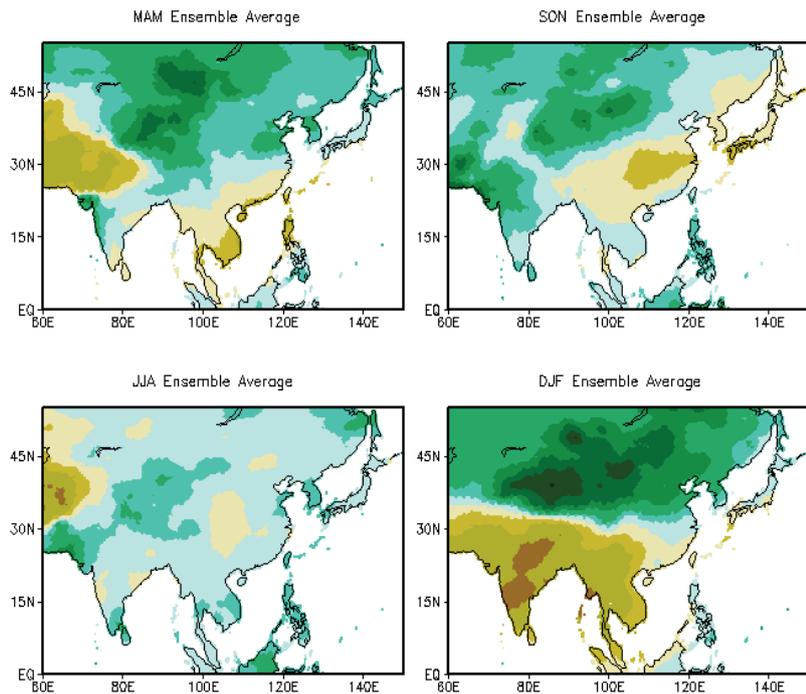


圖 9: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 東亞降雨氣候變化 24 個模式平均。單位%。

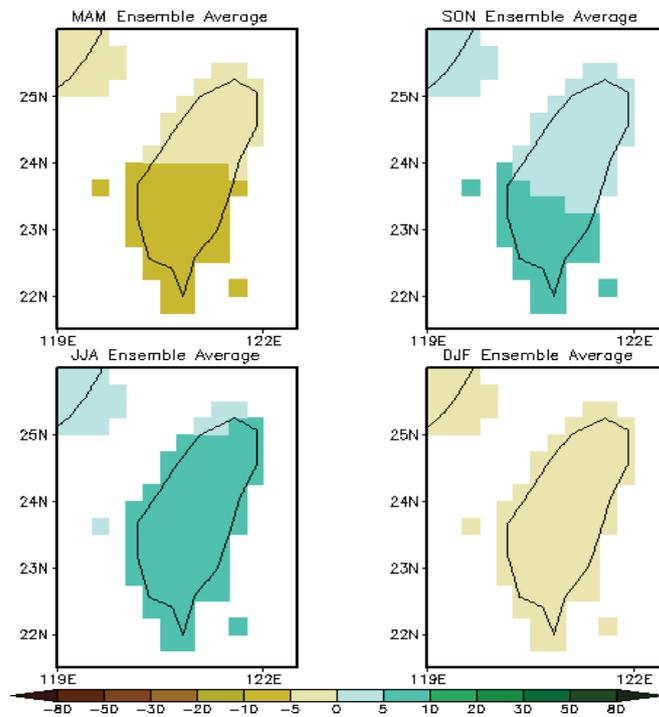


圖 10: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 台灣降雨氣候變化 24 個模式平均。單位%。

圖 11 為 2080-2099 年四季的東亞降雨的氣候變化 24 模式平均結果。2080-2099 年春季氣候中亞、中南半島、華南沿海、台灣及菲律賓北部春季氣候的降雨減少情形更劇，東亞地區春季整體平均變化較近未來分布相近，變化加大。夏季則海陸溫差加強，海陸環流增強，由南海吹往大陸的西南氣流旺盛，沿長江的梅雨降雨增加(柳 97)。夏季氣候的降雨變化在 21 世紀末有明顯變為全面性降雨增加，而中亞地區南邊變溼，北邊變乾的交界分布仍存在，變化差異更加明顯。2080-2099 年秋季，在華中華南比 1980-1999 年變乾燥的情形減小，在中國大陸北部、蒙古、印度半島降雨增加與近未來相似，但中亞南邊沿海有明顯降雨增加，且延伸至印度半島西北部。2080-2099 年冬季氣候變遷仍較他季節為明顯，亞洲北緯 30 度以南未來仍為較乾燥，中南半島西部出現較大範圍變乾區域，30 度以北降雨量仍增加更劇。就東亞地區未來世紀末降雨量的推估方面，對於東南亞沿海農業發展上，作物在季節調配有很大影響，以及冬季黃河、長江等流域下游是否會有嚴重洪水災害，值得探究。

而在 2080-2099 年台灣的四季降雨變化如圖 12 所示，在春季與冬季降雨量比 1980-1999 年氣候值更加乾燥，而夏季與秋季雨量有增加，以夏季較大。表 5 為圖 12 四季對應台灣及台灣北、中、南、東部四區的降雨量平均數值。2080-2099 年的台灣氣候降雨變化，春季-7.27%、夏季 15.88%、秋季 7.34%、冬季-13.02%。臺灣地區也受到東亞地區海陸增溫不同的影響，春冬季降雨減少，但冬季減少的情形更多，春季跟梅雨季主要降雨區域往北偏移有關，春冬兩季全台四區都是以減少約 4~14%，而在各區內的大小分布情形來說，雨量增加最多的百分比，為夏季變化最大的南部 16.96%，以及秋季變化最大的南部 9.78%，雨量減少最多的百分比是春季變化量最大為南部 -10.11%，冬季變化量最大為南部 -14.11%。

Average				
	MAM	JJA	SON	DJF
Taiwan	-7.27	15.88	7.34	-13.02
North Taiwan	-4.79	14.47	5.07	-11.5
Central Taiwan	-6.91	16.4	7.67	-13.95
South Taiwan	-10.11	16.96	9.78	-14.11
East Taiwan	-7.43	15.75	6.98	-12.59

表 5: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 降雨氣候變化台灣、台灣北部、台灣中部、台灣南部、台灣東部的平均值。

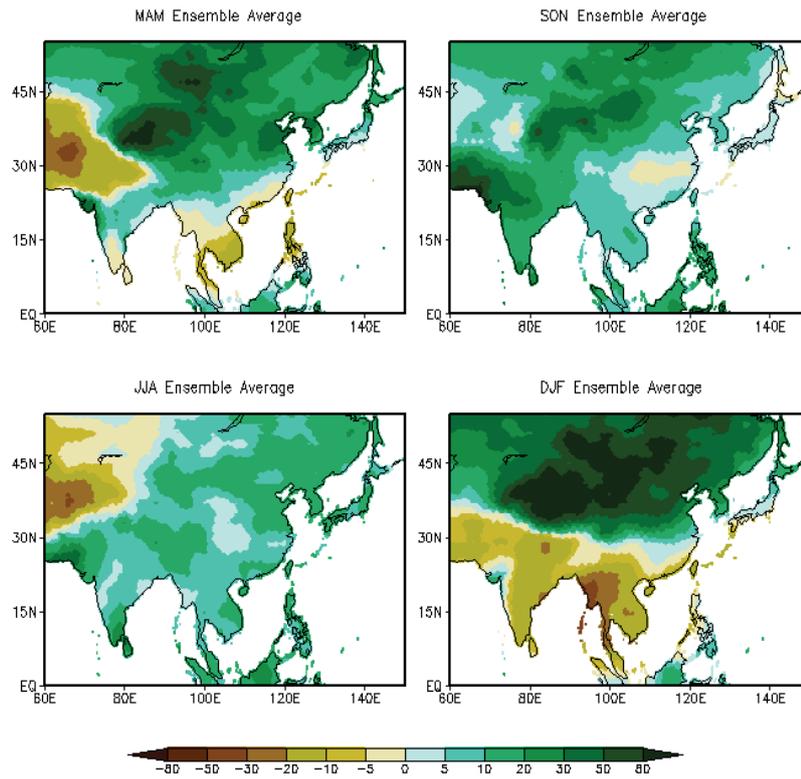


圖 11: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 東亞降雨氣候變化 24 個模式平均。單位%。

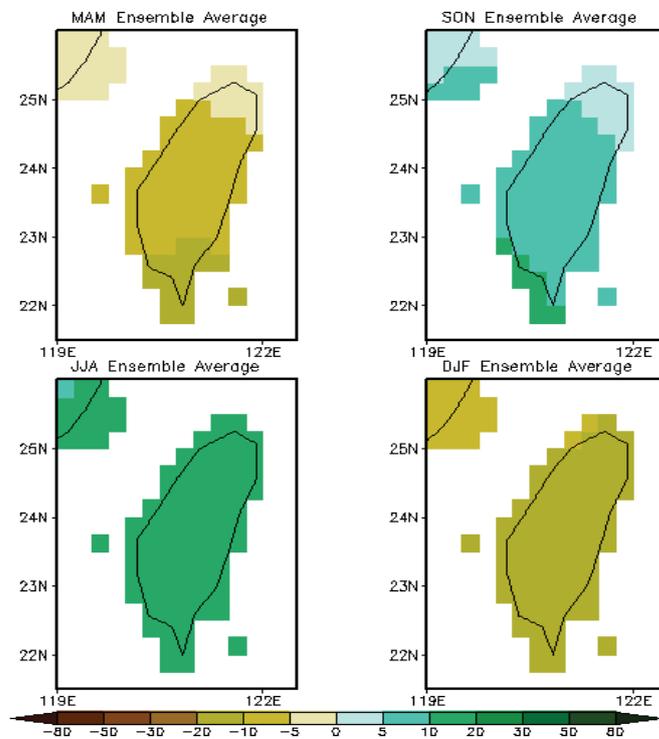


圖 12: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 台灣降雨氣候變化 24 個模式平均。單位%。

4.2 不確定性與極端天氣的評估

本計畫使用偏差量校正和空間分類 (bias-correction and spatial disaggregation BCSD)進行統計降尺度，對未來氣候做推估，推估出未來降雨、平均溫度的氣候值。但此方法用於 24 個模式有不同的結果，如何以一個客觀方式來探討未來推估結果是重要的課題。本章節將兩個方式討論此方法的未來推估的不確定性，以及極端天氣等問題。

4.2.1A 溫度最大值、中位數、最小值

首先將 24 個模式 2020-2039 年與 2080-2099 年對未來推估的結果，根據每個網格點上所有資料進行排序，求出 24 個模式的最大值、中位數、最小值，進行比較分析。東亞近未來 2020-2039 年 24 模式平均溫度推估下，四季平均溫度氣候值變遷差異量之最大值(圖 13)、中位數(圖 14)、最小值(圖 15)。圖 13 春季、冬季經度 60E~85E，緯度 45N~55N 之間，秋季、冬季新疆附近，夏季、冬季北海道附近，有較大的最大值。圖 14 所示，四季皆可看出低緯度暖化程度較慢，高緯度暖化較為明顯。從圖 15 中發現四季大部分地區都為正值，代表大多數的地方。2080-2099 年 24 模式平均溫度推估，四季平均溫度氣候值變遷差異量之最大值(圖 16)、中位數(圖 17)、最小值(圖 18)。圖 16 春、夏、秋、冬季已無明顯季節差異，緯度 30N 以北都屬於增溫大於 6 度以上的區域，緯度 30N 以南除了印度半島北部有較大的增溫區域外，其他區域增溫最大值約為 3~4 度左右，夏、秋兩季海陸交界的沿海，可能因為海陸風效應調節，所以增溫情形較春、冬兩季弱。圖 17 所示，四季皆有低緯度暖化程度弱，高緯度暖化強，夏、秋兩季東南亞海陸調節下，沿海地區增溫明顯較弱，春、冬兩季則在青康藏高原有顯著較強的增溫情形。從圖 18 中發現四季全區仍為正值，24 個模式預報結果的最小值，顯示 21 世紀末暖化情況都較近未來平均值或中位數更加增強，約升高 2 度左右。

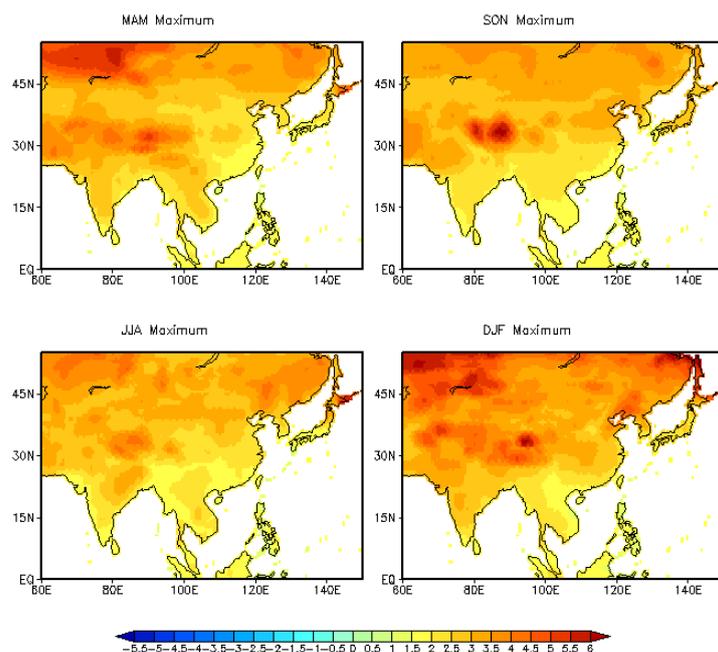


圖 13: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 東亞平均溫度氣候變化 24 個模式的最大值。單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

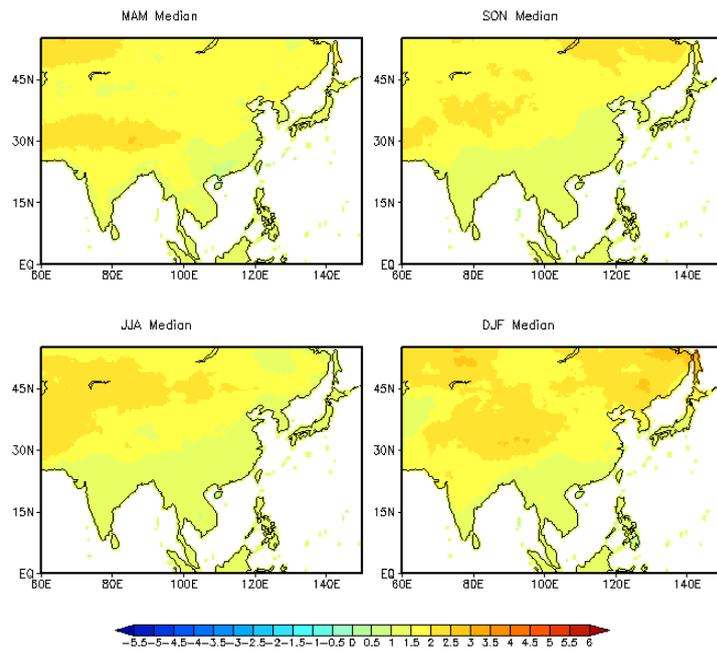


圖 14: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 東亞平均溫度氣候變化 24 個模式的中位數。單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

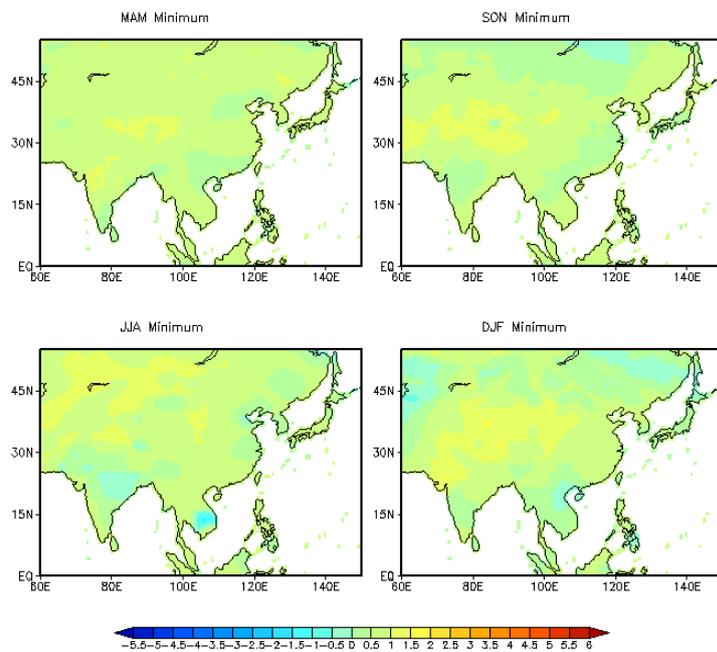


圖 15: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 東亞平均溫度氣候變化 24 個模式的最小值。單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

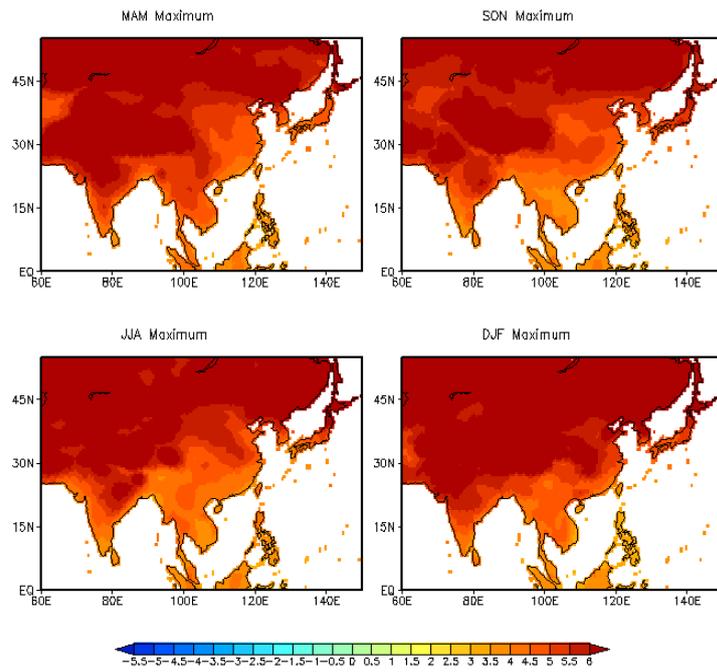


圖 16: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 東亞平均溫度氣候變化 24 個模式的最大值。單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

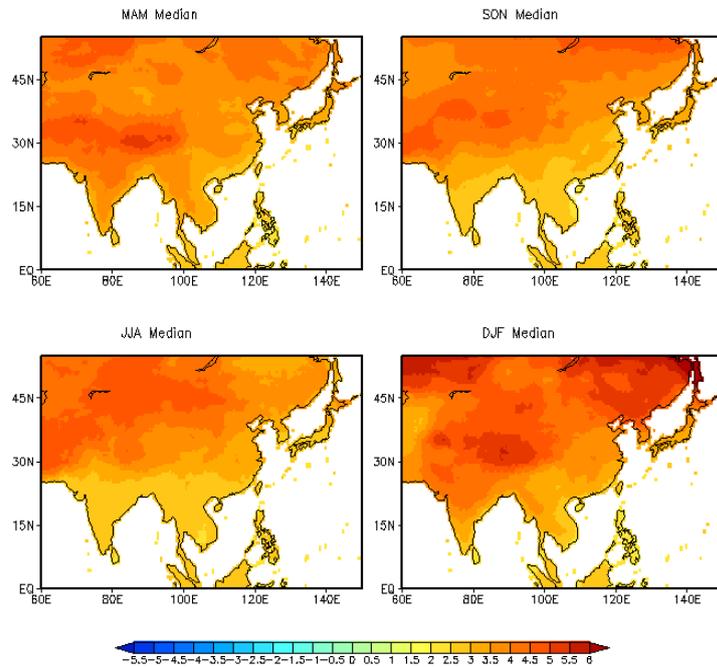


圖 17: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 東亞平均溫度氣候變化 24 個模式的中位數。單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

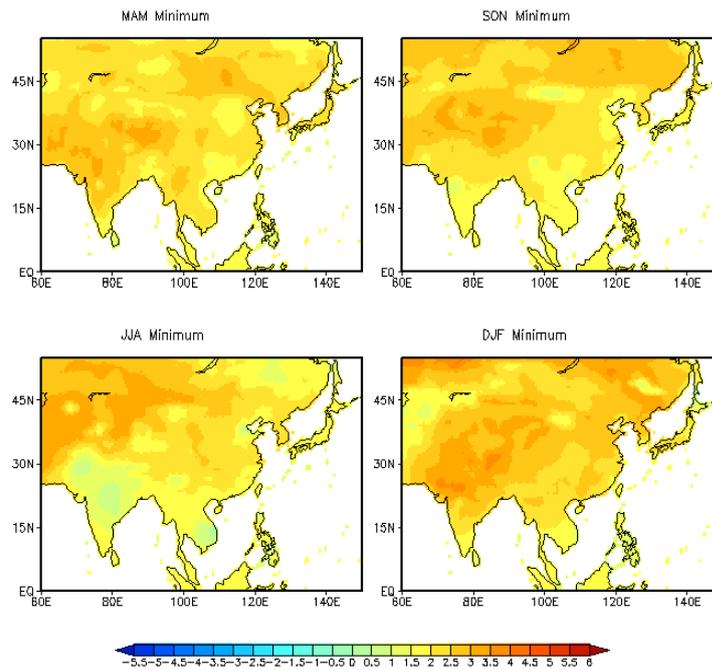


圖 18: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 東亞平均溫度氣候變化 24 個模式的最小值。單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

圖 19、圖 20、圖 21 分別為 2020-2039 年台灣四季平均溫度氣候變化的最大值、中位數、最小值。由圖 19 顯示出 24 個模式所預測 2020-2039 年平均溫度上升最大值範圍在 1.25 度~2.0 度之間。將其最大值對台灣、台灣北部、台灣中部、台灣南部、台灣東部的區域平均，而數值列於表 6。2020-2039 年平均溫度最大值台灣春季 1.52 度，夏季 1.56 度，秋季 1.55 度，冬季 1.73 度。以台灣四區比較，春季、秋季、冬季北部最大值最大，而夏季最大值在台灣南部。24 模式平均溫度差異量的中位數，在比較表 2 及表 7 的結果，顯示 24 個模式的中位數與 24 個模式平均的結果相近，與降雨推估同，表 7 中 2020-2039 年平均溫度差異量的中位數，春季 1 度，夏季 1.07 度，秋季 1.01 度，冬季 1.14 度。台灣北、中、南、東四區暖化程度相近。從圖 21 上所示的數值皆為大於零，由此可知 24 格模式所預測 2020-2039 年平均溫度的氣候變化皆是溫度上升的情形。表 8 表示 2020-2039 年平均溫度差異量的最小值，春季 0.52 度，夏季 0.53 度，秋季 0.57 度，冬季 0.47 度。其北、中、南、東四區的平均溫度差異小。圖 22、圖 23、圖 24 分別為 2080-2099 年台灣四季平均溫度氣候變化的最大值、中位數、最小值。由圖 22 顯示出 24 個模式所預測 2080-2099 年平均溫度上升最大值範圍在 3.5 度~4.0 度之間。將其最大值對台灣、台灣北部、台灣中部、台灣南部、台灣東部的區域平均，而數值列於表 9。2080-2099 年平均溫度最大值台灣春季 3.8 度，夏季 4.0 度，秋季 3.7 度，冬季 3.65 度。以台灣四區比較，春、秋、冬三季北部最大值最大，而夏季最大值四區差異不大。24 模式平均溫度差異量的中位數，在比較表 3 及表 10 的

結果，顯示 24 個模式的中位數與 24 個模式平均的結果也是相近，與上述各中位數及平均值的比較有同樣情形，表 10 中 2080-2099 年平均溫度差異量的中位數，春季 2.54 度，夏季 2.65 度，秋季 2.6 度，冬季 2.6 度。台灣北、中、南、東四區暖化程度相近。從圖 24 上所示的數值皆為大於 1.5 度，由此可知 24 格模式所推估 2080-2099 年平均溫度的氣候變化溫度較 2020-2039 年一定至少有上升 1 度的情形。表 11 表示 2080-2099 年平均溫度差異量的最小值，春季 1.58 度，夏季 1.72 度，秋季 1.57 度，冬季 1.8 度。其平均溫度差最小值北、中、南、東四區並無明顯不同。

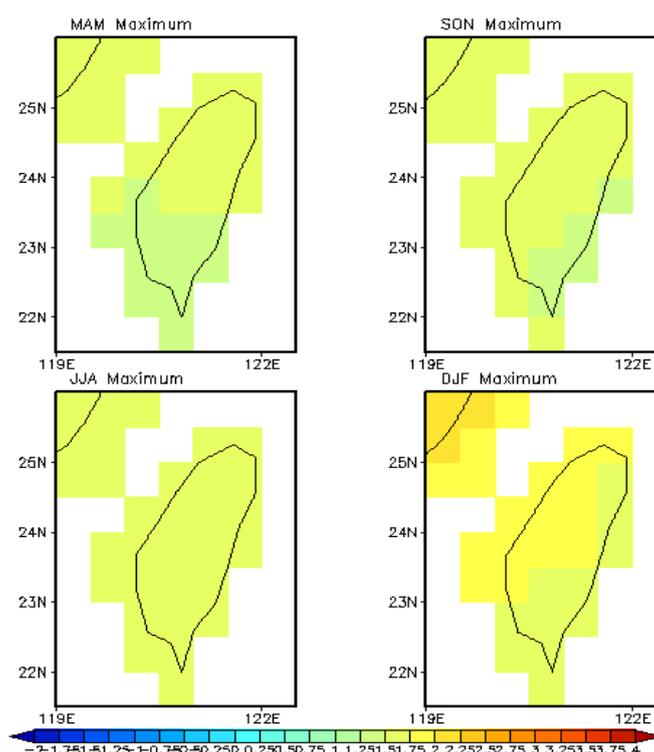


圖 19: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 台灣平均溫度氣候變化 24 個模式的最大值。單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

	Maximum			
	MAM	JJA	SON	DJF
Taiwan	1.51	1.56	1.55	1.73
North Taiwan	1.55	1.54	1.61	1.8
Central Taiwan	1.5	1.57	1.53	1.79
South Taiwan	1.48	1.59	1.51	1.58
East Taiwan	1.51	1.55	1.51	1.7

表 6: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 平均溫度氣候變化台灣、台灣北部、台灣中部、台灣南部、台灣東部的最大值。

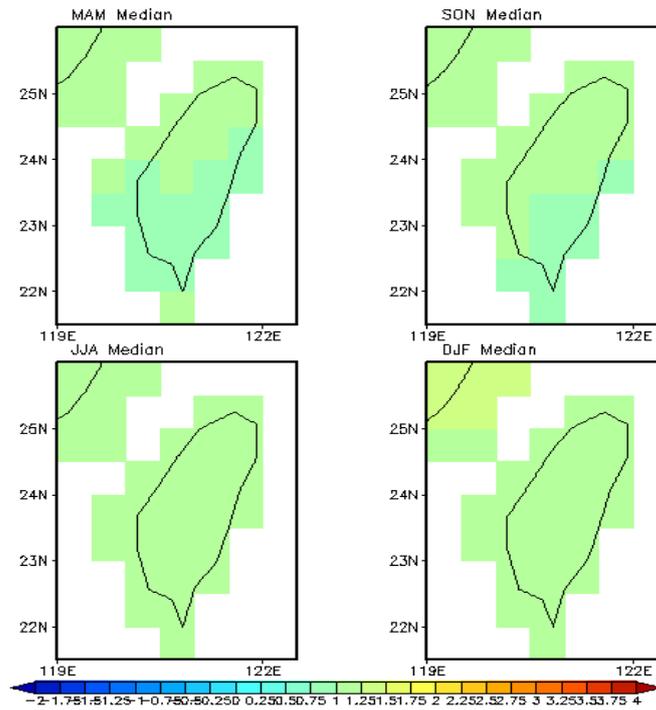


圖 20: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 台灣平均溫度氣候變化 24 個模式的中位數。單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

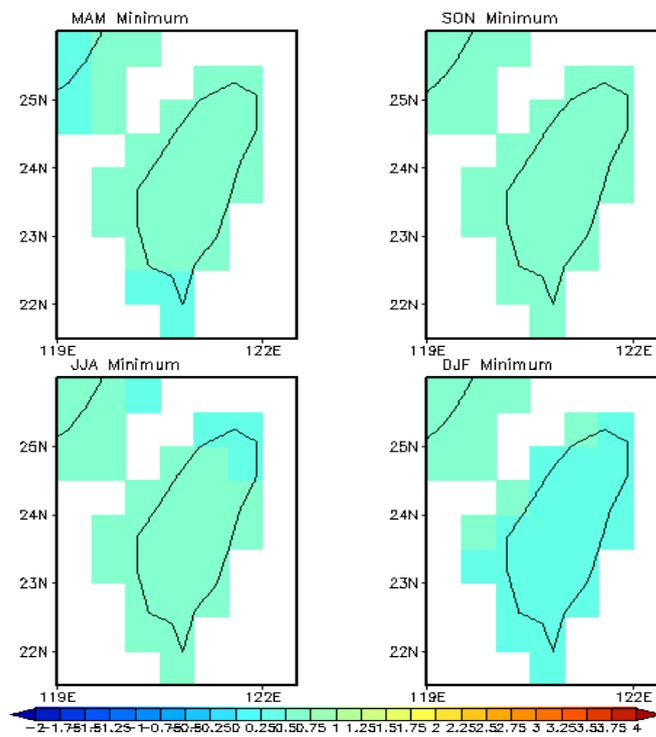


圖 21: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 台灣平均溫度氣候變化 24 個模式的最小值。單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

Median				
	MAM	JJA	SON	DJF
Taiwan	1.0	1.07	1.01	1.13
North Taiwan	1.02	1.06	1.03	1.17
Central Taiwan	1.0	1.08	1.02	1.12
South Taiwan	0.99	1.07	0.99	1.08
East Taiwan	1.0	1.06	1.0	1.14

表 7: 2020-2039MAM、JJA、SON、DJF 平均溫度氣候變化台灣、台灣北部、台灣中部、台灣南部、台灣東部的中位數。

Minimum				
	MAM	JJA	SON	DJF
Taiwan	0.52	0.53	0.57	0.47
North Taiwan	0.52	0.5	0.58	0.48
Central Taiwan	0.52	0.54	0.57	0.49
South Taiwan	0.5	0.59	0.56	0.44
East Taiwan	0.52	0.53	0.6	0.44

表 8: 2020-2039MAM、JJA、SON、DJF 平均溫度氣候變化台灣、台灣北部、台灣中部、台灣南部、台灣東部的最小值。

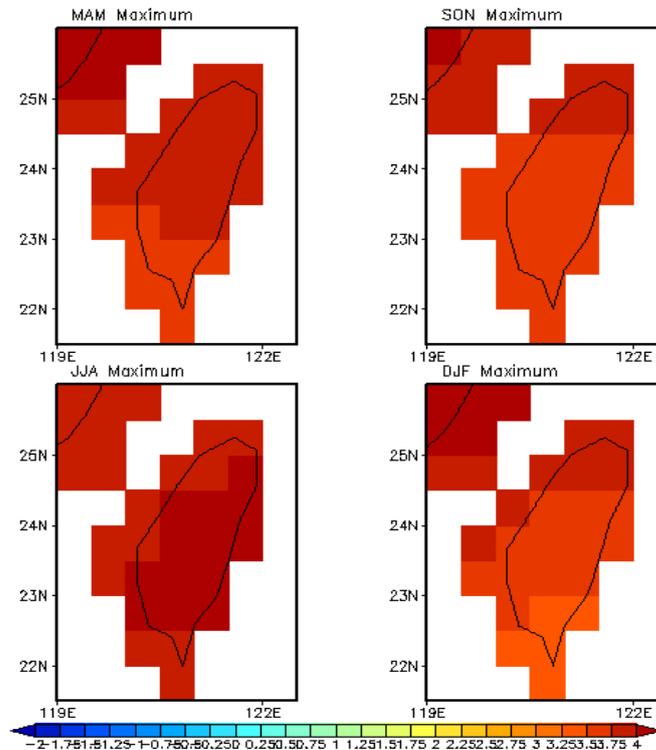


圖 22: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 台灣平均溫度氣候變化 24 個模式的最大值。單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

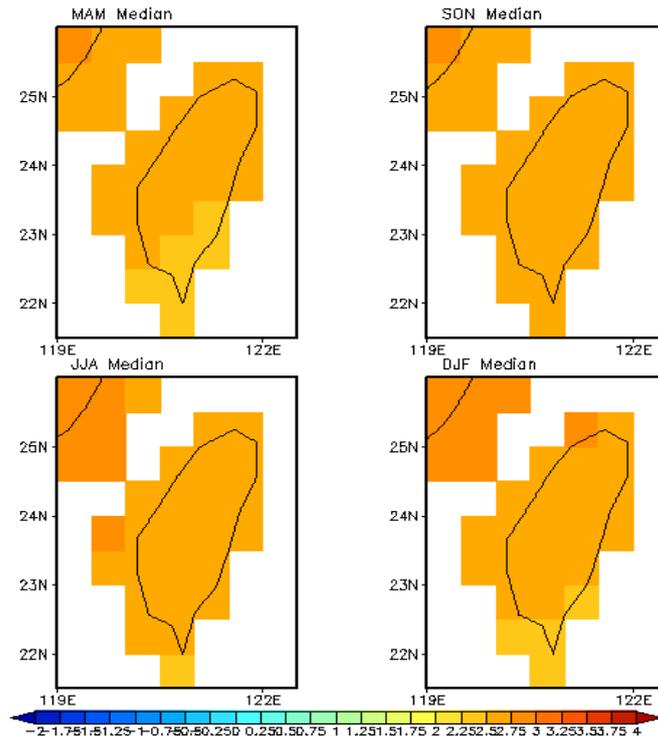


圖 23: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 台灣平均溫度氣候變化 24 個模式的中位數。單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

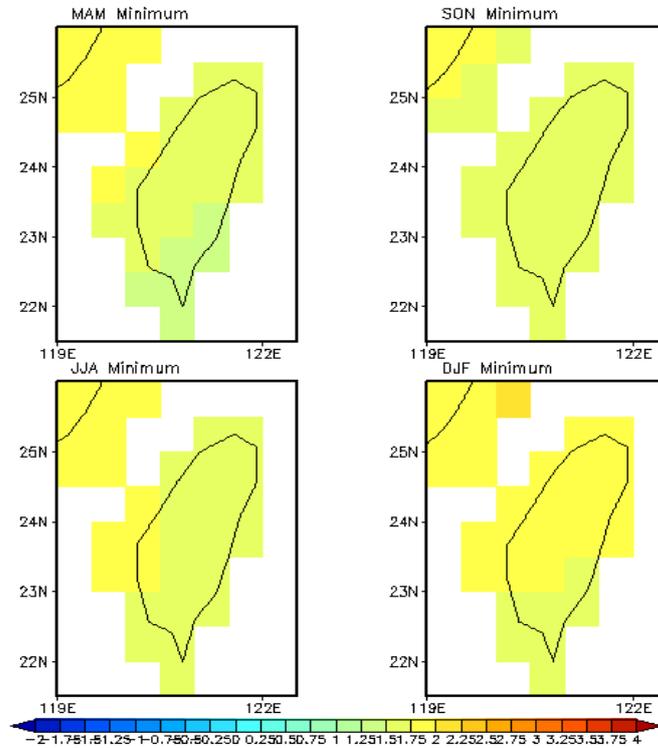


圖 24: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 台灣平均溫度氣候變化 24 個模式的最小值。單位 $^{\circ}\text{C}$ 。

Maximum				
	MAM	JJA	SON	DJF
Taiwan	3.8	4.0	3.7	3.65
North Taiwan	3.92	3.99	3.76	3.8
Central Taiwan	3.77	4.0	3.68	3.67
South Taiwan	3.63	3.98	3.61	3.44
East Taiwan	3.83	4.04	3.71	3.65

表 9: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 平均溫度氣候變化台灣、台灣北部、台灣中部、台灣南部、台灣東部的最大值。

Median				
	MAM	JJA	SON	DJF
Taiwan	2.54	2.65	2.6	2.6
North Taiwan	2.6	2.71	2.6	2.69
Central Taiwan	2.55	2.7	2.61	2.61
South Taiwan	2.45	2.52	2.57	2.48
East Taiwan	2.54	2.64	2.6	2.6

表 10: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 平均溫度氣候變化台灣、台灣北部、台灣中部、台灣南部、台灣東部的中位數。

Minimum				
	MAM	JJA	SON	DJF
Taiwan	1.58	1.72	1.57	1.8
North Taiwan	1.67	1.74	1.6	1.88
Central Taiwan	1.64	1.8	1.57	1.84
South Taiwan	1.46	1.71	1.54	1.67
East Taiwan	1.51	1.68	1.56	1.76

表 11: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 平均溫度氣候變化台灣、台灣北部、台灣中部、台灣南部、台灣東部的最小值。

4.2.1B 降雨最大值、中位數、最小值

東亞降雨氣候變化 2020-2039 年推估的 24 個模式中最大值、中位數、最小值分別如圖 25、圖 26、圖 27。結果可知最大值為 24 個模式最大的預測結果，春季印度半島、新疆、蒙古有較大降雨變化；夏季只有阿富汗附近與東北亞地區降雨變化為夏季最顯著的(圖 25)。

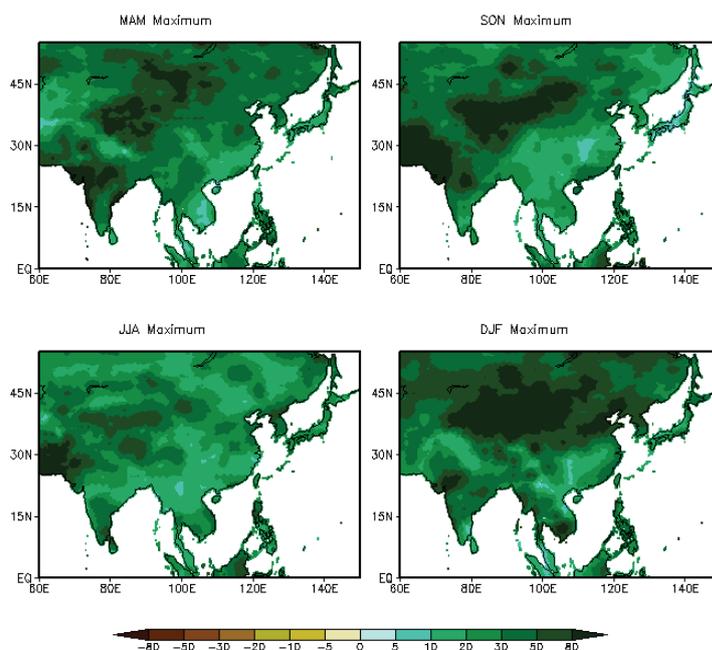


圖 25: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 東亞降雨氣候變化 24 個模式的最大值。單位%。

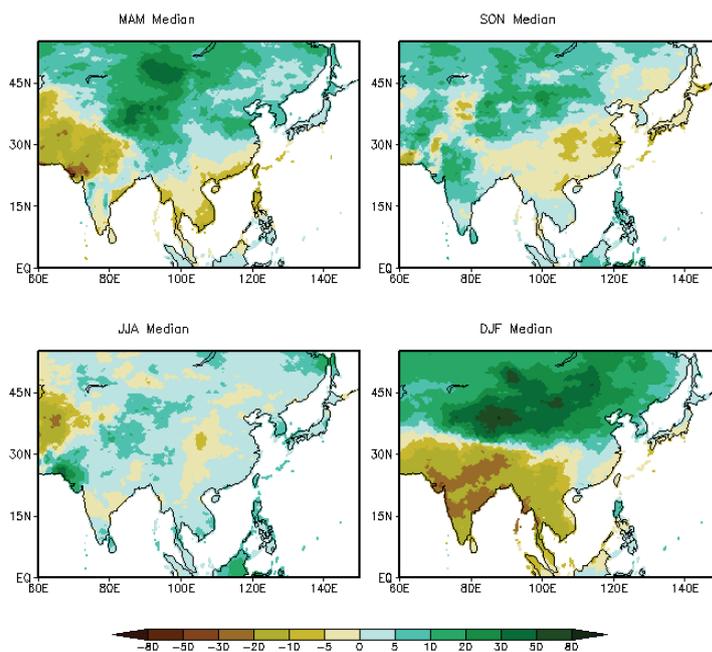


圖 26: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 東亞降雨氣候變化 24 個模式的中位數。單位%。

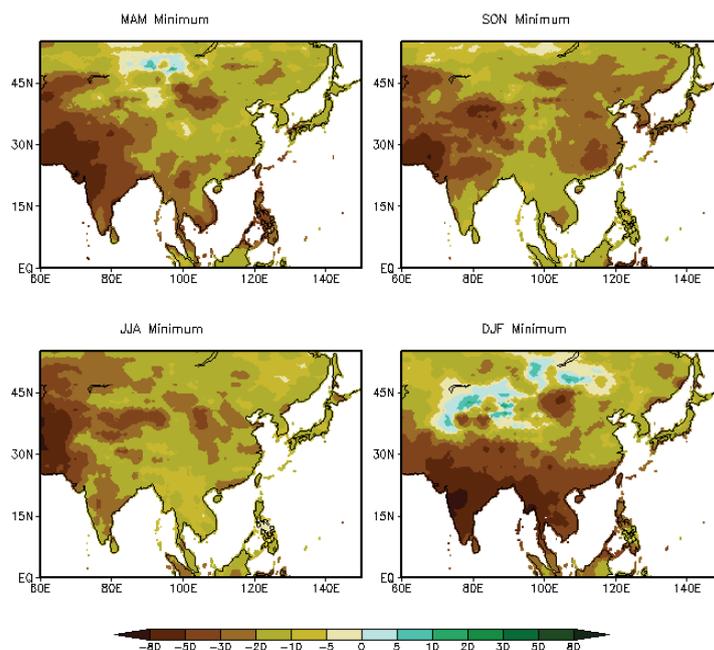


圖 27: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 東亞降雨氣候變化 24 個模式的最小值。單位%。

東亞降雨氣候變化 2080-2099 年推估的 24 個模式中的最大值、中位數、最小值分別如圖 28、圖 29、圖 30。冬季在世紀末仍是變化最大的季節，但其他季節都是增加的情形，除了春季中亞地區屬於變乾。中位數的意義與 24 個模式之平均的意義相近，中位數比對平均的結果，分布上都是相似的，而 21 世紀未來推估，冬季變化量還是四季中最大的。圖 27 是東亞降雨氣候變化 2020-2039 年推估得 24 個模式的最小值，是 24 模式中預測氣候最乾燥的結果。但在春季的蒙古、冬季的蒙古跟中國西北，圖上呈現綠色，為降雨量為增加，代表此地區 24 個模式都預測 2020-2039 年降雨量會增加，圖 30 為 2080-2099 年的變化，春季蒙古、冬季蒙古延伸至中國大陸東北降雨都是推估增加，此兩時期推估所得最小降雨量增加的分布，其可信度則較高。

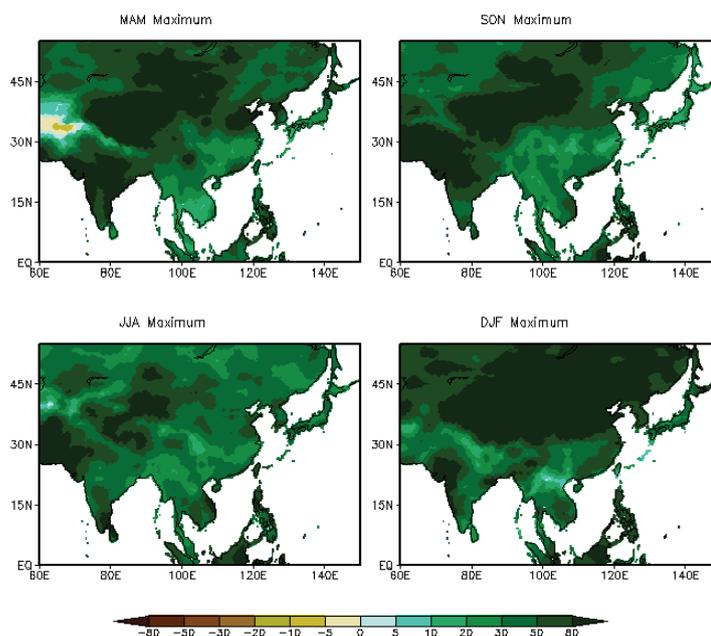


圖 28: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 東亞降雨氣候變化 24 個模式的最大值。單位%。

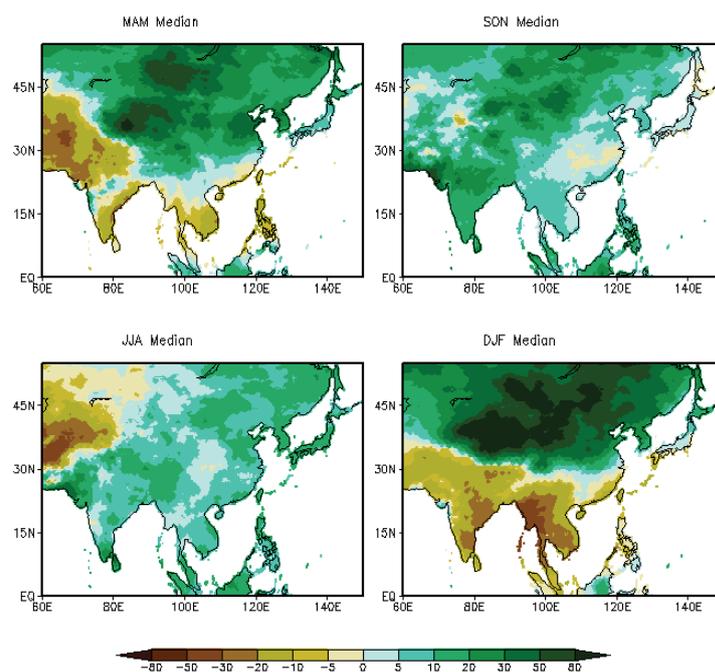


圖 29: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 東亞降雨氣候變化 24 個模式的中位數。單位%。

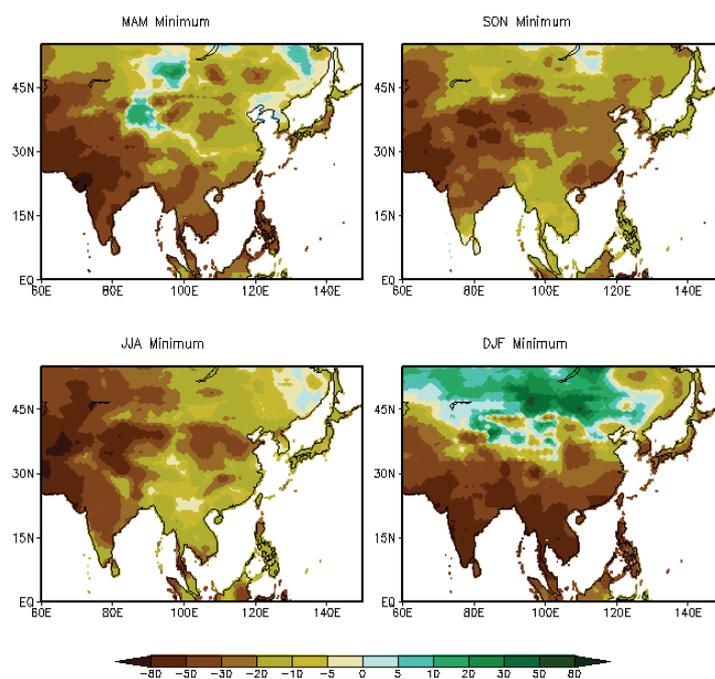


圖 30: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 東亞平均溫度氣候變化 24 個模式的最小值。單位%。

進一步看台灣地區最大值、中位數、最小值的分析情形，及台灣全部及四區最大值、中位數、最小值的平均結果。2020-2039 年台灣四季降雨變化氣候的最大值如圖 31 所示。表 12 為圖 31 四季對應台灣及台灣北、中、南、東部四區的降雨量增加最大百分比，依四季各為春季 25.82%，夏季為 24.75%，秋季為 35.75%，冬季為 26.38%。秋季的最大值變化為四季中最大。台灣四區的四季的最大值，春季中台灣中部變化最大 28.61%，夏季四區變化相近，秋季南部變化較大 39.04%，冬季中部、南部變化比較大。

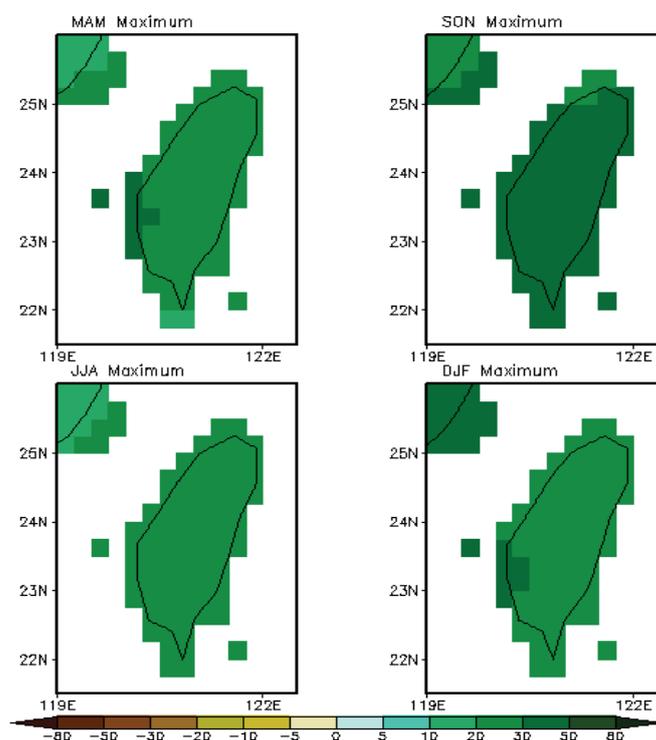


圖 31: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 台灣降雨氣候變化 24 個模式的最大值。單位%。

Maximum				
	MAM	JJA	SON	DJF
Taiwan	25.82	24.75	35.75	26.38
North Taiwan	24.41	24.96	32.66	24.11
Central Taiwan	28.61	24.78	37.87	28.34
South Taiwan	24.74	25.25	39.04	27.88
East Taiwan	25.48	24.04	33.6	25.27

表 12: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 降雨氣候變化台灣、台灣北部、台灣中部、台灣南部、台灣東部的最大值。

2080-2099 年台灣四季降雨變化氣候的最大值如圖 32 所示。表 13 為圖 32 四季對應台灣及台灣北、中、南、東部四區的降雨量增加最大百分比，依四季各為春季 36.92%，夏季為 68.2%，秋季為 43.89%，冬季為 20.05%。夏季的最大值變化為四季中最大，這與 2020-2039 年不同。台灣四區的四季的最大值，春季台灣中部變化較大 41.45%，夏季南部 76.15% 變化最大，秋季南部變化較大 54.65%，冬季北部 33.1% 變化比較大。

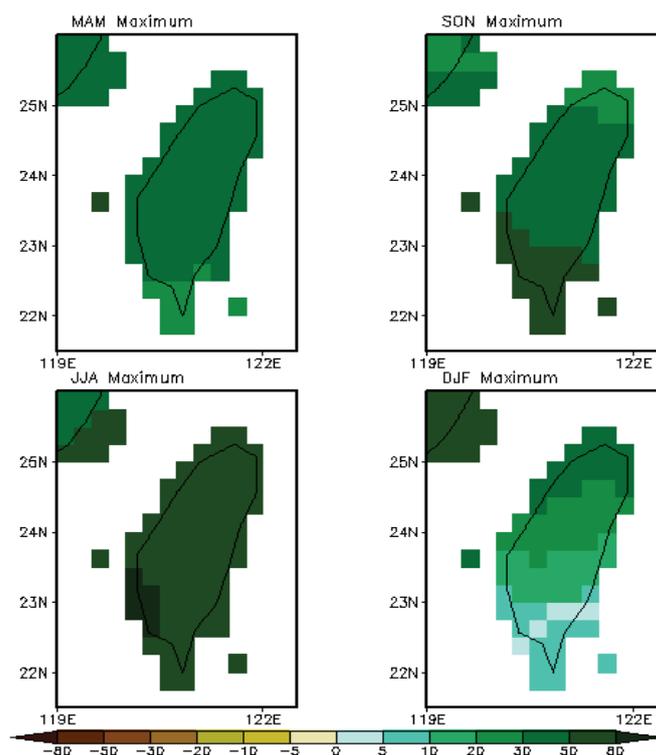


圖 32: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 台灣降雨氣候變化 24 個模式的最大值。單位%。

Maximum				
	MAM	JJA	SON	DJF
Taiwan	36.92	68.2	43.89	20.05
North Taiwan	35.94	64.44	33.73	33.1
Central Taiwan	41.45	68.91	44.55	22.19
South Taiwan	34.09	76.15	54.65	7.59
East Taiwan	36.06	63.7	43.21	16.65

表 13: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 降雨氣候變化台灣、台灣北部、台灣中部、台灣南部、台灣東部的最大值。

2020-2039 年台灣四季降雨變化氣候的中位數 (圖 33)。春、秋季的中位數分布與 24 個模式的平均結果 (圖 10) 差異較大。四季台灣降雨中位數春季為 -8.8%，夏季為 5.2%，秋季為 2.58%，冬季為 -2.98%。這個結果與 24 個模式平均結果相似，只是中位數的春、秋兩季雨量變化較 24 模式平均的雨量變化減少 2~3%。以台灣四區來看，春季中位數以台灣南部最小 -10.78%，夏季四區之間的差異小，秋季南部最大 5.05%，冬季中部最小 -4.33%。

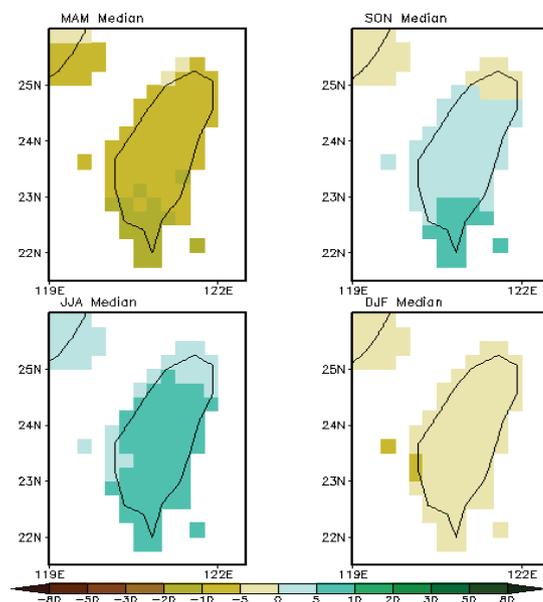


圖 33: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 台灣降雨氣候變化 24 個模式的中位數。單位%。

2080-2099 年台灣四季降雨變化氣候的中位數 (圖 34)。春、秋季的中位數分布與 24 個模式的平均結果 (圖 12) 差異明顯。四季台灣降雨中位數春季為 -10.71%，夏季為 14.94%，秋季為 10.4%，冬季為 -13.37%。台灣四區來看，春季中位數以台灣南部最小 -13.99%，夏季四區之間的差異小，秋季南部最大 12.83%，冬季中部最小 -15.25%。

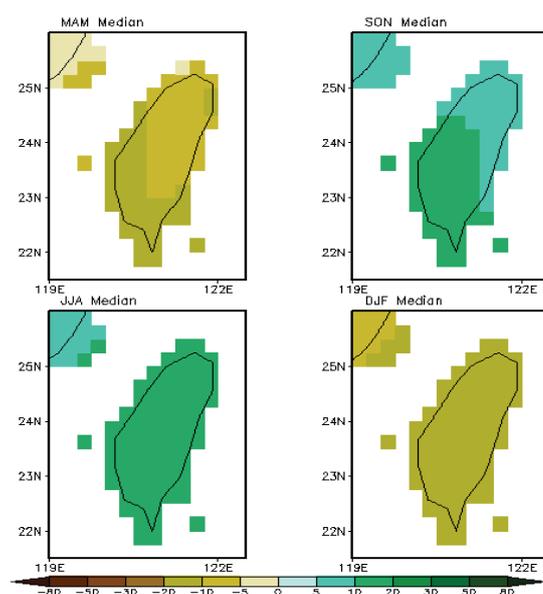


圖 34: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 台灣降雨氣候變化 24 個模式的中位數。單位%。

2020-2039 (圖 35)及 2080-2099 (圖 36)年，台灣四季降雨變化氣候的最小值都是降雨趨勢偏乾燥的情形，而 2020-2039 年春季跟冬季較為明顯，2080-2099 年除了夏季都全島減少 20% 以上的降雨。

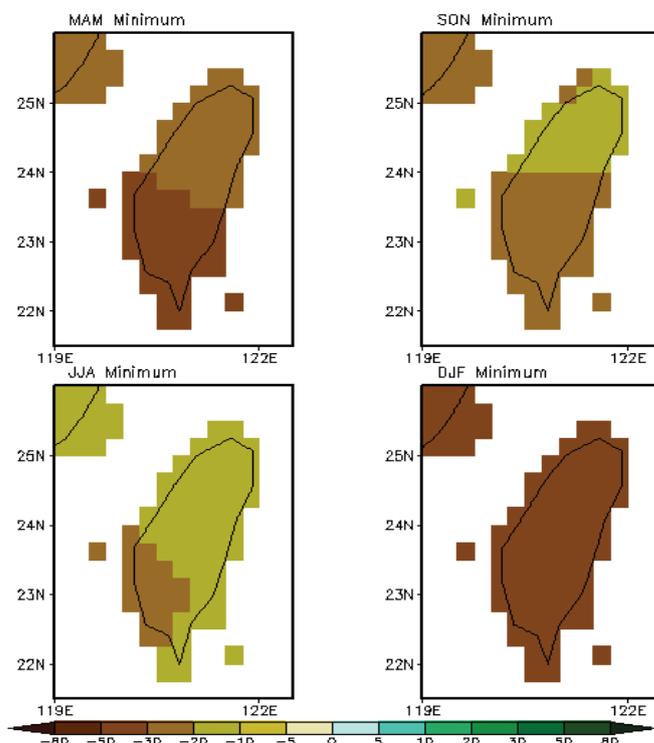


圖 35: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 台灣降雨氣候變化 24 個模式的最小值。單位%。

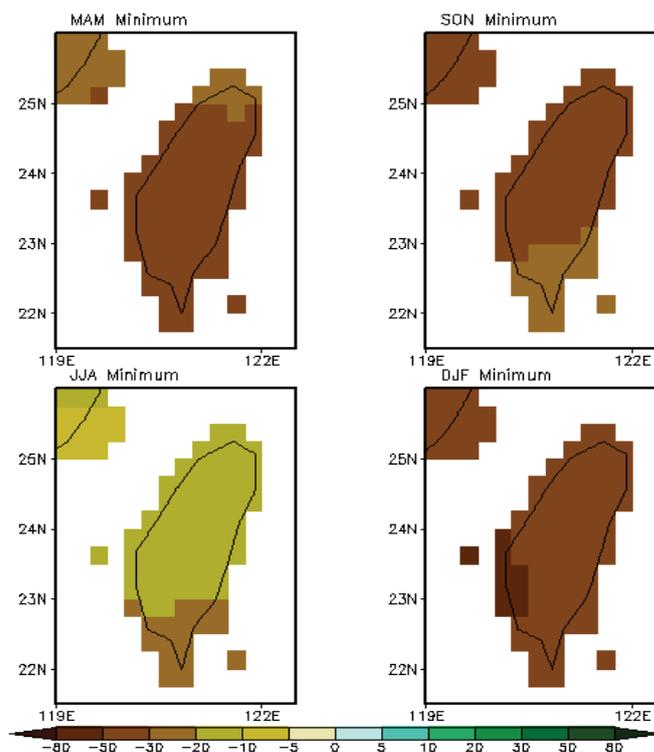


圖 36: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 台灣降雨氣候變化 24 個模式的最小值。單位%。

表 14 為 2020-2039 年四季對應台灣及台灣北、中、南、東部四區的降雨量變化最小的百分比，四季台灣降雨最小值春季為 -30.85%，夏季為-18.83%，秋季為-21.18%，冬季為-34.99%。2080-2099 年以表 15 所示，四季台灣降雨最小值春季為 -35.98%，夏季為-16.69%，秋季為-31.43%，冬季為-45.81%。

Minimum				
	MAM	JJA	SON	DJF
Taiwan	-30.85	-18.83	-21.18	-34.99
North Taiwan	-26.36	-16.22	-17.57	-34.28
Central Taiwan	-30.42	-19.79	-20.95	-36.74
South Taiwan	-35.87	-21.57	-25.14	-34.25
East Taiwan	-31.02	-17.9	-21.28	-34.64

表 14: 2020-2039 MAM、JJA、SON、DJF 降雨氣候變化台灣、台灣北部、台灣中部、台灣南部、台灣東部的最小值。

Minimum				
	MAM	JJA	SON	DJF
Taiwan	-35.98	-16.69	-31.43	-45.81
North Taiwan	-30.85	-14.75	-33.42	-44.27
Central Taiwan	-35.76	-14.62	-33.89	-48.69
South Taiwan	-40.88	-20.43	-28.37	-46.54
East Taiwan	-36.68	-17.14	-29.87	-43.77

表 15: 2080-2099 MAM、JJA、SON、DJF 降雨氣候變化台灣、台灣北部、台灣中部、台灣南部、台灣東部的最小值。

表 16 是在 A1B 未來發展情境下，台灣的四個主要分區在不同季節所對應的可能未來氣候變遷範圍，在此所謂未來氣候變化是指 2080 至 2099 年的平均值減去 1980 至 1999 年的平均值，亦即每百年的變化幅度，如果轉換為線性變化趨勢，另外表中還標出氣候變化可能性累積機率分布的主要分布點（從最小到最大，以及中間的 10、25、50、75、90 百分位所對應的變化值）。在近地表氣溫變化部份，所有氣候模式所推估的區域季節平均變化中位數大約是介於 2.5 至 2.7 °C 之間，北台灣較南台灣的增溫幅度略高，而春季較其他季節略低。約有一半的模式認為未來台灣各區域季節平均變化主要是介於 2.0 至 3.0 °C 之間。90% 以上的模式推估區域季節平均變化將在 1.7 °C 以上或小於 3.4 °C，同樣是北

台灣較南台灣的增溫幅度略高。在降水量平均百分比變化方面，依多氣候模式系集分布情形推估，台灣的四個主要分區未來冬季平均雨量多半都是減少的，約有一半的模式推估是介於 -3 到 -22%之間，南台灣春季未來的平均雨量百分比變化四分差 (Interquartile Range, IQR) 與冬季非常類似。而未來夏季平均雨量百分比變化，除了北台灣以外，則有超過四分之三的模式推估降水都是增加，約有一半的模式認為未來夏季平均變化主要是介於 +2% 至 +26% 之間，這些推估結果對原本就是夏季多雨、冬季少雨的中南部地區而言，未來如何調配水資源的豐枯期，在未來將會是更大的議題。

區域	季節	近地表氣溫平均變化 (°C)							降水量平均百分比變化 (%)						
		最小	10	25	50	75	90	最大	最小	10	25	50	75	90	最大
北台灣	冬(DJF)	1.9	1.9	2.1	2.7	3.1	3.4	3.8	-44	-29	-20	-13	-3	7	33
	春(MAM)	1.7	1.8	2.2	2.6	2.9	3.4	3.9	-31	-24	-14	-8	6	17	36
	夏(JJA)	1.7	1.8	2.2	2.7	3.0	3.3	4.0	-15	-12	-1	14	29	46	64
	秋(SON)	1.6	1.8	2.2	2.6	3.1	3.3	3.8	-33	-25	-10	8	21	28	34
中台灣	冬(DJF)	1.8	1.9	2.0	2.6	3.0	3.3	3.7	-49	-33	-22	-15	-4	6	22
	春(MAM)	1.6	1.8	2.1	2.6	2.9	3.3	3.8	-36	-25	-16	-10	3	17	41
	夏(JJA)	1.8	1.8	2.2	2.7	3.0	3.2	4.0	-15	13	2	14	26	64	69
	秋(SON)	1.6	1.8	2.2	2.6	3.0	3.3	3.7	-34	-23	-7	11	25	31	45
南台灣	冬(DJF)	1.7	1.7	2.0	2.5	2.9	3.2	3.4	-47	-34	-22	-13	-5	5	8
	春(MAM)	1.5	1.8	2.0	2.5	2.8	3.0	3.6	-41	-26	-21	-14	-5	22	34
	夏(JJA)	1.7	1.7	2.2	2.5	2.9	3.2	4	-20	-19	7	16	26	69	76
	秋(SON)	1.5	1.7	2.1	2.6	2.9	3.1	3.6	-28	21	-8	13	25	36	55
東台灣	冬(DJF)	1.8	1.8	2.0	2.6	3.0	3.3	3.7	-44	-31	-20	-12	-3	5	17
	春(MAM)	1.5	1.8	2.1	2.5	2.8	3.3	3.8	-37	-25	-18	-11	1	20	36
	夏(JJA)	1.7	1.7	2.2	2.6	2.9	3.2	4.0	-17	-15	3	15	26	57	64
	秋(SON)	1.6	1.8	2.1	2.6	3.0	3.2	3.7	-30	-23	-10	10	23	33	43

表 16: A1B 未來發展情境所對應的可能未來氣候變遷範圍在台灣四個分區的季節氣候平均變化 (2080 至 2099 年減去 1980 至 1999 年平均)，表中標題列中的 10、25、50、75、90 分別代表該區該季節平均值統計機率密度分布的不同百分位值。降水量變化部分有標記顏色的表示其至少有四分之三以上的模式都有相同的符號，藍色為降水量增加，橘色為減少。

4.2.2 台灣時間序列分析

台灣時間序列分析是將觀測資料與 24 個模式在台灣地區做區域平均的每年平均溫度及降雨量的結果，X 軸為時間序列 1960-2100 年，Y 軸為觀測與各模式變數數值分佈範圍。因為本研究是用觀測與 IPCC 24 模式資料做累積機率分佈

(CDFs)做誤差的修正(bias correction)，所以觀測資料的變動性越大，則模式做完統計降尺度的結果亦變動性較大。

圖 37 為四季台灣降雨的平均之時間序列圖，圖上的紅粗線為 24 模式系集平均降雨結果，黑粗線是 APHRODITE 降雨量觀測資料，細線為 24 個模式個別模式的降雨量，陰影區為 24 模式降雨平均上下一個標準差的範圍。在此必須避免直接比較觀測資料與模式系集平均，因為系集平均透過彼此的相互抵消，無法表現出觀測資料中的年際自然變動。在四季的台灣時間序列圖中，可知夏季降雨量較高，而夏、秋兩季其降雨量的變動性也較大；冬季降雨量較小，在春、冬兩季其降雨量的變動性較小。模式的降雨推估結果夏季有些微增加，春季則有些微減少，其他兩季未有明顯降雨增減情形。

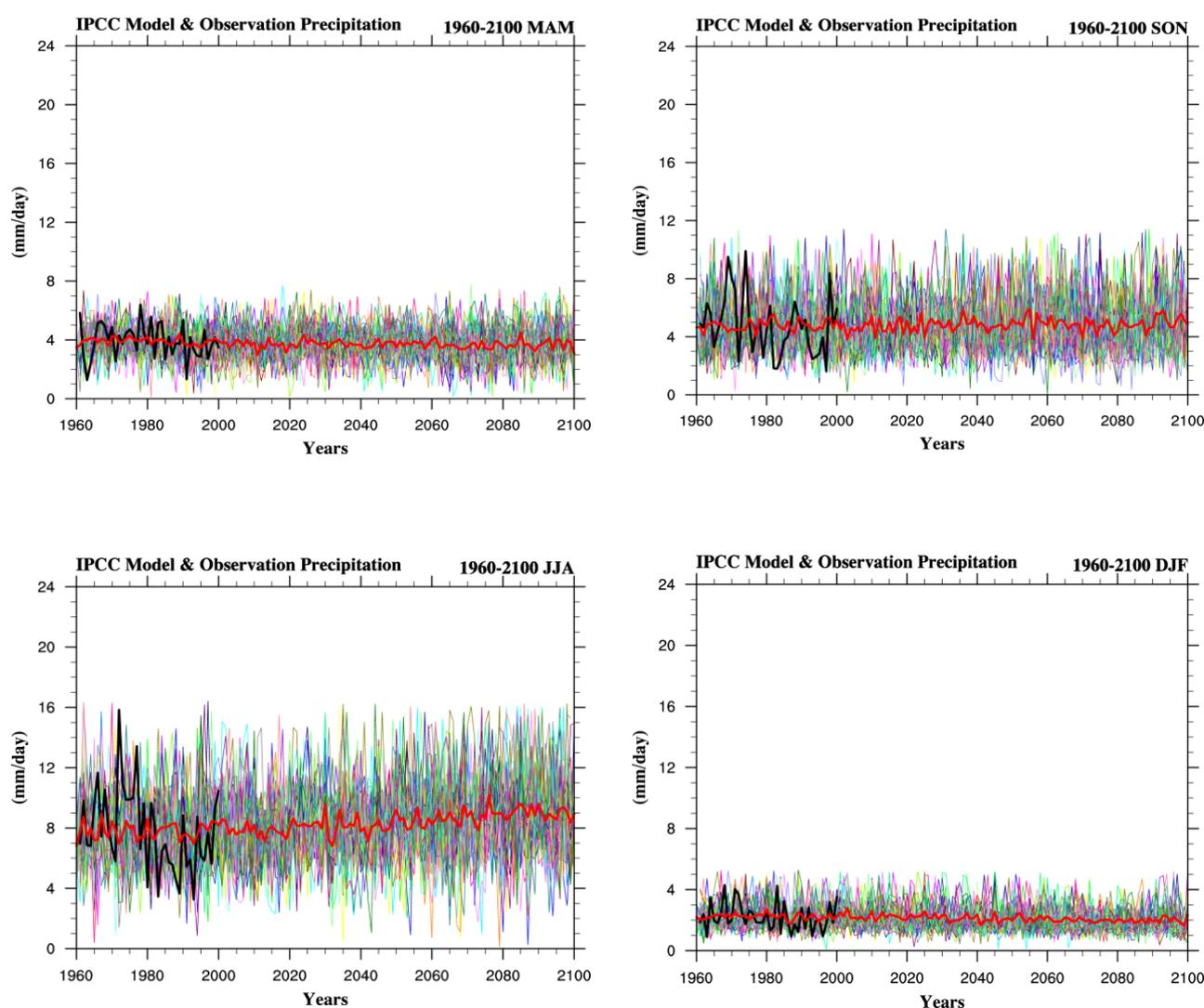


圖 37: MAM、JJA、SON、DJF 台灣降雨的平均之時間序列圖。紅粗線為 24 模式降雨系集平均結果。黑粗線是 APHRODITE 降雨量觀測資料，細線為 24 個模式個別模式的結果。陰影區為 24 模式降雨平均上下一個標準差的範圍。必須避免直接比較觀測資料與模式系集平均，因為系集平均透過彼此的相互抵消，無法表現出觀測資料中的年際自然變動。

圖 38 為四季台灣平均溫度的平均之時間序列圖，圖中的黑粗線是 CRU 平均溫度觀測資料，紅粗線為 24 個模式系集平均溫度平均結果，細線為 24 個模式個別溫度模擬的結果，陰影區為 24 模式降雨平均值上下一個標準差的範圍。平均溫度的結果春、夏、秋三季變動性較小，而四季中冬季的變動性最高。24 個模式的未來推估結果較為一致都是暖化，四季平均溫度皆有緩緩上升的趨勢。

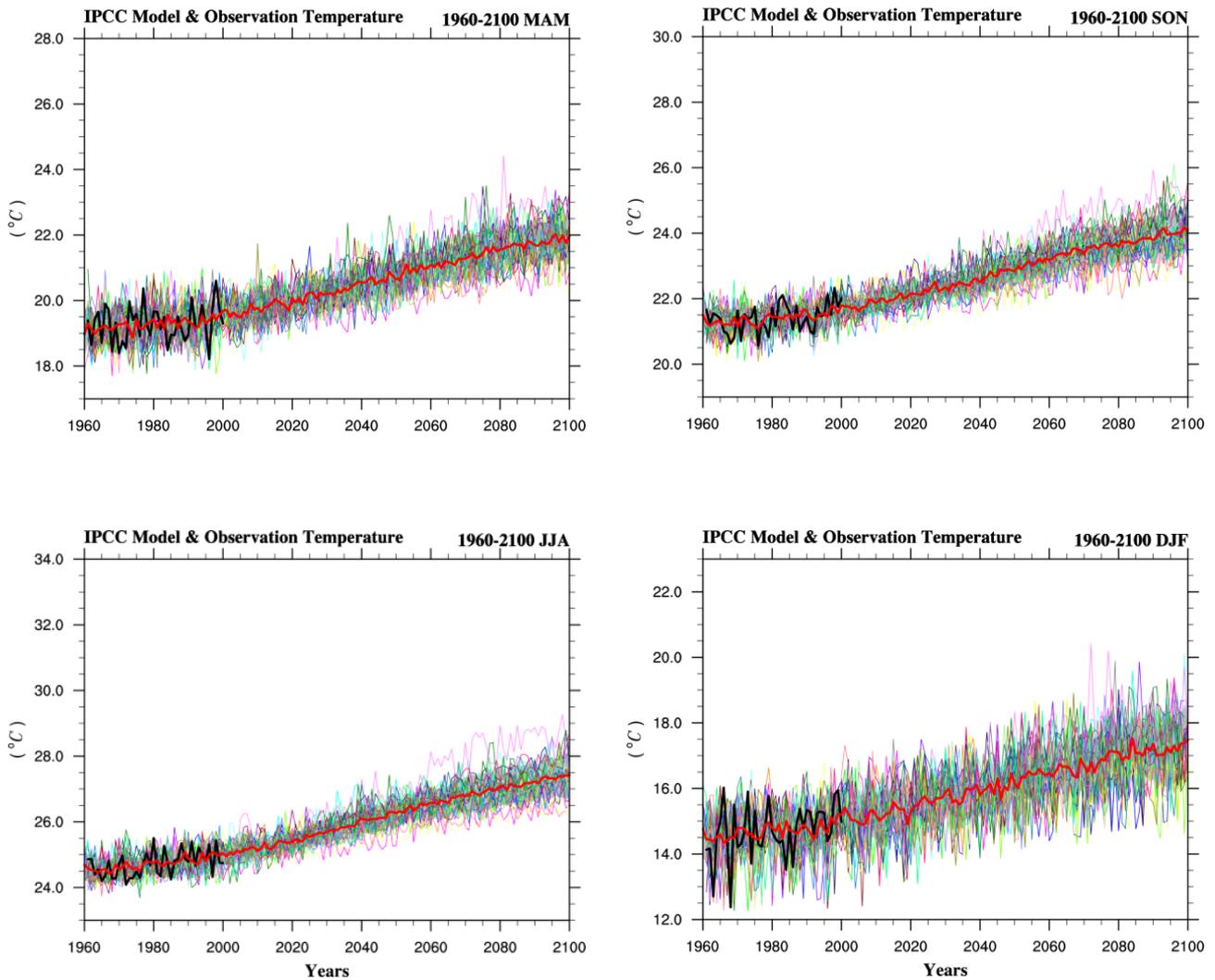


圖 38: MAM、JJA、SON、DJF 台灣平均溫度的平均之時間序列圖。紅粗線為 24 模式降雨平均結果。黑粗線是 CRU 平均溫度觀測資料。細線為 24 個模式的結果。陰影區為 24 模式降雨平均上下一個標準差的範圍。必須避免直接比較觀測資料與模式系集平均，因為系集平均透過彼此的相互抵消，無法表現出觀測資料中的年際自然變動。

五、推估結果的應用

就本計劃主要探討的推估氣候要素，溫度與降雨而言，一者關聯健康管理與民生經濟，一者則是關係著水資源、農漁業經濟等。

5.1 溫度推估之應用

過去台灣很少因為氣溫過高造成死亡的情形，但20世紀末至今，漸漸出現有關於中暑或熱衰竭死亡的例子，國外更是用熱浪一詞來形容高溫天氣災害，且出現民眾死亡人數的統計，確實隨著全球暖化，這樣的問題在台灣也需要開始重視，尤其都市化的熱島效應更是危及民眾健康與生命的殺手，因為高溫對於人體的健康會出現幾種症狀，如中暑(熱中風)、熱腫脹、汗疹濕疹、熱痙攣與熱耗損等，2008在美國報導指出美國每年夏天就有將近6200人因為天氣過熱而就醫，在歐美過去也發生過數起嚴重的熱浪災害，且有越來越頻繁的趨勢。根據本計劃所得到未來平均氣溫的推估，2020-2039年台灣平均溫度上升1~1.5°C，而在2080-2099年則上升約2.5~2.6°C，近年來夏季高溫常常出現36~38度的高溫報導，若在疊加上推估的溫度，我們國人未來在戶外可能常常要處於無法自然排熱，反倒是不斷吸熱的環境(高於體溫37°C)，這樣對於體溫的調整或是體內水分的平衡補充都將造成生活上很多不便與困擾，況且在IPCC 24個氣候模式推估當中，對於都市化的熱島效應可能有低估的情形，所以未來台灣氣溫的實際觀測值只會比推估的氣溫來得更高。因此在未來可能需制定相關法規來保障民眾，例如高溫天氣勞動保護條例或高溫假等等保障民眾安全。

5.2 降雨推估之應用

過去以來，台灣有78%的降雨量是集中在每年的夏、秋兩季(豐水期)，其餘的22%則在每年春、冬兩季(枯水期)，從前述關於未來推估的情形而言，豐水期在2020-2039年推估將增加5%左右，2080-2099年則增加7~15%，枯水期2020-2039年推估減少4%左右，到2080-2099年則減少7~13%，這對於原本地理環境就不利於儲水的台灣本島，顯然是一個需重視的問題，就水資源的使用方面，依照水利法規定，用水優先順序為家用、公共給水，接著依序為農業用水、水力用水、工業用水，但依照目前國內經濟產業與就業人口結構而言，工業用水已經不是只影響到科技產業業主而已，而是連動關係到產業的人力資源，2010年曾發生科學園區廠區無水可用，需自行透過民間運水車來補足用水的缺口，這樣的情形就未來氣候推估來看，恐會更加頻繁，不僅對業主造成額外的花費，更使得員工將面臨無薪假，嚴重更會造成產業鏈的供需問題，這可能導致未來台灣對於海水淡化或水資源的開發、民眾對水資源的教育等有很大的發展需要。

另外，水資源的管理方面，由於台灣降雨分布不均以及不利於集水的地形分布，導致能自然集水的水庫不多，且就目前而言水庫常面臨底部淤泥沉積，造成

最大儲水量減少的问题，然而政府已持續在進行河川水庫疏濬等工程，但對於未來氣候變遷所造成的變動，若能配合每年定期利用季節氣候特性進行整治，以提高整治效率，相信能改善水資源的管理。本計畫對未來氣候變遷推估所得的訊息應該可以提供非常好的參考與預防的思考方向。

5.3 推估結果應用實例

經濟部水利署「旱災潛勢定義及其分析方法之建立」計畫中，乾旱指標有一標準化降雨指標(Standardized Precipitation Index, SPI)，將此指標對石門水庫集水區進行氣候變遷情境下之乾旱變化情形推估來實例說明，McKee et al. (1993)提出 SPI 時，定義 SPI 值小於零為乾旱的起點，而當在 SPI 值小於-1.0 後出現正的 SPI 值時，為一場乾旱事件的終點。McKee 同時依 SPI 值的範圍定義乾旱強度(drought intensity)如表 17。

表 17. SPI 值對應之乾旱等級

SPI	乾旱等級	對應機率(%)
0 to -0.99	輕微乾旱	34.1
-1.00 to -1.49	中度乾旱	9.2
-1.50 to -1.99	嚴重乾旱	4.4
-2 or less	極嚴重乾旱	2.3

資料來源：McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J., 1993,

圖 39 為利用 APHRODITE 所計算之石門水庫集水區 SPI 歷史分布。由圖可知，1980~1999 年間，該地區發生乾旱的事件約有 7 起嚴重乾旱 SPI(6month)。其中 1991 年發生的乾旱事件，影響範圍涵蓋十縣市，北部二期稻作面臨休耕危機，農業損失高達 13 億，居歷年之冠。(北部旱災潛勢資料繪製示範計畫，經濟部水利署，2000) 在發生頻率部分，比較 1980~1989 與 1990~1999 二時期發現，後十年該區之乾旱發生頻率呈現增加的趨勢 (SPI-3month、SPI-6month)。

本計畫比較了 24 組氣候模式於該區枯水期之平均降雨改變率，列出枯水期表現最乾與最濕之模式，用以分析最極端情境下之水文變化，整理如表 18 所示。表中顯示，近未來推估中，以 gfdl_cm2_1 模式於 A1B 情境時之統計降尺度於該區枯水期有最少之降雨，較歷史基期平均降雨少了約 27%，同一時期呈現偏濕訊號的模式則是以 miub_echo_g 在 A1B 情境的 50% 為最。在世紀末的變化上，則是以 csiro_mk3_5 的 -25% 以及 ukmo_hadcm3 於 A1B 情境的偏多 66%。在豐水期的變化部分，只有少數模式(如 MRI_CGCM2_3_2a)呈現近未來偏少情形外，絕

大多數模式降尺度後均於該區呈現偏多的狀況，對於乾旱事件的影響相對較小。

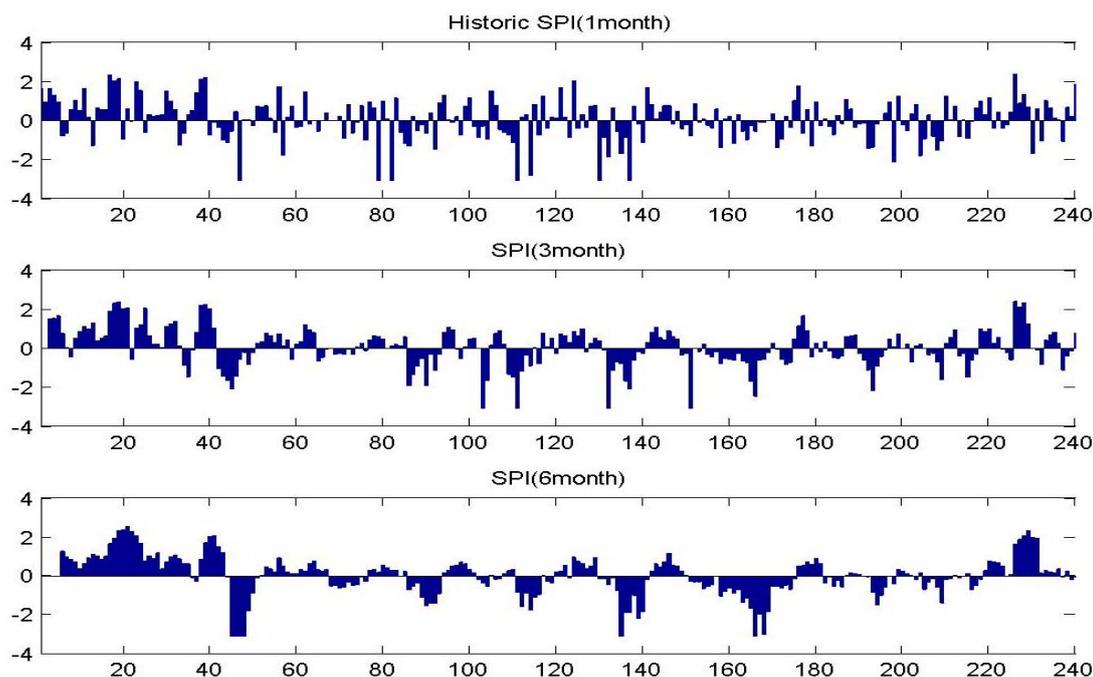


圖 39：石門水庫集水區 SPI 歷史(1980~1999)變化。橫軸為月份，240 為 1999 年 12 月，縱軸為 SPI 指數數值。上圖、中圖以及下圖分別為 SPI-1month、SPI-3month 與 SPI-6month。SPI(6month)橫軸 140 處即為 1991 年之乾旱事件時間點。

最乾	2020-2039(近未來)	2080-2099(世紀末)
A1B	gfdl_cm2_1(-27%)	csiro_mk3_5(-25%)
A2	cnrm_cm3(-26%)	cnrm_cm3(-13%)
B1	cnrm_cm3(0.2%)	mpi_echam5(20%)
最濕	2020-2039	2080-2099
A1B	miub_echo_g(50%)	ukmo_hadcm3(66%)
A2	miroc3_2_medres(48%)	ukmo_hadcm3(81%)
B1	gfdl_cm2_0(39%)	ukmo_hadcm3(53%)

表 18. A1B 情境下之枯水期模式極端變化列表

表 19 為歷史觀測枯水期之乾旱事件列表，由表可知，過去 1980~1999 年間，石門水庫集水區乾旱事件(超過 3 個月者)約有 11 起，平均持續時間約為 2.9 個月左右，平均強度(即平均 SPI 值)為-0.58。相較於歷史觀測結果，以 GFDL_CM2_1 枯水期 A1B 情境為例(表 20)，該區域之平均乾旱持續時間有延長的趨勢(3.23 個月)，此外，在平均強度部分，也有增強的情形。

start time	end time	duration	total severity	intensity
47	51	4	-1.85977	-0.46494
71	74	3	-0.71711	-0.23904
86	89	3	-4.20466	-1.40155
109	113	4	-7.10468	-1.77617
131	137	6	-7.56344	-1.26057
155	161	6	-2.92609	-0.48768
167	170	3	-1.45527	-0.48509
191	197	6	-5.39126	-0.89854
205	209	4	-1.34027	-0.33507
215	218	3	-2.43761	-0.81254
230	233	3	-0.97243	-0.32414
		2.947368	-2.07819	-0.58134

表 19. 歷史觀測枯水期乾旱事件列表

start time	end time	duration	total severity	intensity
47	51	4	-3.0512	-0.7628
71	75	4	-1.45084	-0.36271
86	89	3	-4.07793	-1.35931
108	113	5	-7.03597	-1.40719
131	137	6	-7.25014	-1.20836
155	161	6	-2.49318	-0.41553
167	170	3	-1.21495	-0.40498
179	182	3	-1.41191	-0.47064
191	197	6	-4.836	-0.806
206	209	3	-2.0472	-0.6824
215	218	3	-2.80886	-0.93629
		3.235294	-2.37144	-0.60848

表 20. GFDL_CM2_1 枯水期乾旱事件列表(A1B 近未來)

本研究嘗試將降尺度推估資料與水文應用端結合，進行氣候變遷下石門水庫集水區之乾旱衝擊評估，結果顯示，多重模式對於石門水庫集水區之降尺度降雨推估，於近未來與世紀末均呈現平均降雨增多的訊號，然而由於多重模式降雨改變率的變化幅度較小，因此反映出來之 SPI 變化趨勢與歷史 SPI 走勢極為類似。若從最劣情境的角度分析，則可發現乾旱發生的頻率有略為增加的情形，枯水期之降雨變化則有較為明顯之乾濕變化。可知若是在多重模式平均的降雨變化情境下演進，石門水庫集水區的降雨特性與目前類似。未來假以朝著最劣情境的方向發展，則該區域枯水期之降雨變化較為明顯，較不利於當地水資源之管理與調配。

從對未來氣候推估的時間序列來看，台灣四季的區域平均降雨及平均溫度，也提供了幾點訊息作為民眾及政府方面參考，例如 1.未來21世紀末春季的氣溫會如同現今的秋季氣溫，而在降雨情形未有明顯改變狀況下，水資源的利用與農漁業的季節性活動應如何調配，都是值得提早思考與規劃。 2.夏季的高溫以及降雨變動性高的氣候，極端氣候的預防，如豪大雨、熱浪等警告系統，或在衣著科技方面是否應朝向透氣通風佳且涼爽的材料改進，健康管理方面，預防中暑的宣導，以及集水區的規劃與整頓。 3.冬季氣溫變動大，降雨變動性小且降雨量低，水庫淤泥清除的施工計畫，全國性大規模的體育活動競技等，對於民眾旅遊方面，未來春季的氣候會是最佳的季節等等，以上這些推估的資訊也都能客觀提供政府及民眾參考。

5.4 專家邀請（氣候變遷對船舶航行安全影響講習）

本計畫於7月中邀請日本京都大學災害預防研究中心的 Nobuhito Mori 教授，來台傳授其在氣候變遷對西北太平洋波浪影響推估的研究工作，辦理氣候變遷對台灣船舶航行安全之影響講習活動，提升國內在海岸氣候變遷與船舶航行安全領域的科學知識。其相關講習資料如附件。

氣候變遷對海岸環境的影響，包含海平面、海浪高度、暴潮未來的可能變化，在暖化氣候下，透過海水受熱膨脹以及陸冰、積雪冰川融化，IPCC 氣候變遷第四次評估報告估計在 A1B 情境下世紀末的全球平均海平升高可能的範圍將介於 0.21 至 0.48 公尺之間（參見圖 40），而且超過一半以上是來自海水受熱膨的貢獻，雖然有些科學家認為目前的氣候模式對於陸冰變動的動力過程處理並不够詳實，可能會低估未來的海平面上升程度，但是目前還是有相當大的爭議。此外，各海域的海平面上升程度也不盡相同，西北太平洋在日本東側的海平面上升幅度較熱帶海面大。上述海平面上升對現有海岸與港口環境都有影響，船舶航行路線必須加以調適。

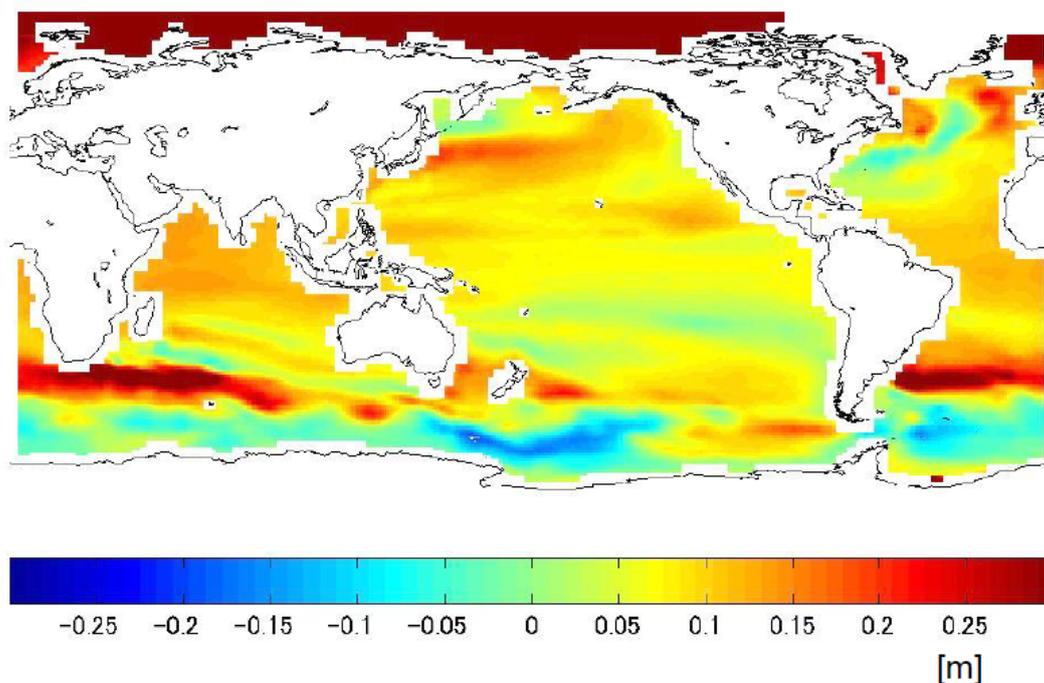
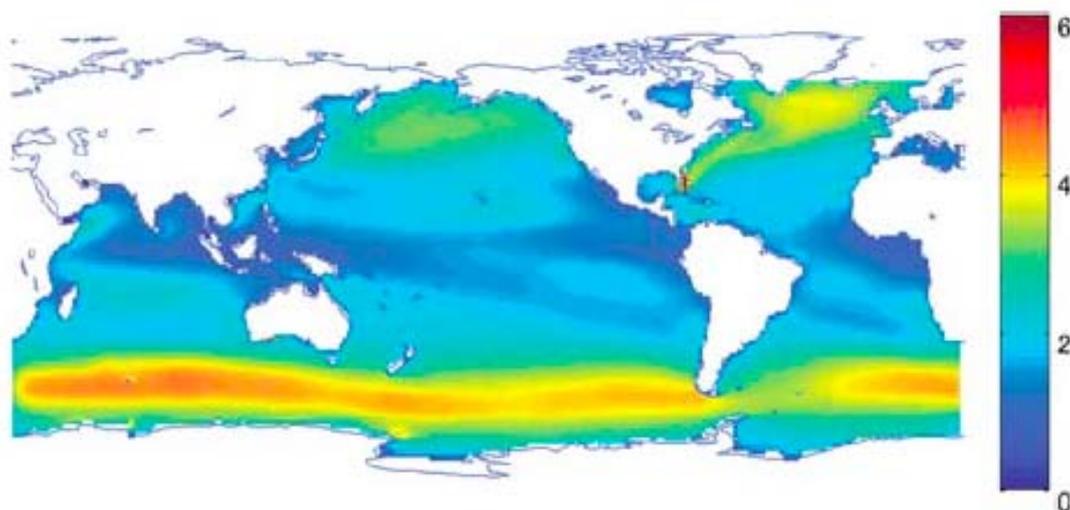


圖 40: A1B 未來發展情境下，氣候模式在世紀末海平面變化推估的分佈 (Courtesy of Npбуhito Mori)。

在平均海浪高度的變化部分，主要是受到在未來氣候變遷下海平面氣壓分佈、大氣環流型態變動以及近地表的風速改變的影響，而在極端海浪高度與暴潮的未來變化則是受到近地面風速極值的影響甚劇，亦即與夏秋季西北太平洋颱風生成、路徑與強度變化息息相關，冬季的變化則是會受到亞洲冬季季風強度變化所影響。

在海平面氣壓分佈、大氣環流型態與近地表風速改變方面，台灣鄰近的氣壓上升與近地表風速的減弱，使得氣候模式所推估的台灣附近未來平均顯著海浪高度 (significant wave height) 的變化，與整個西北太平洋的平均浪高變化的符號相同，都是在世紀末會略微下降 (參見圖 41)。



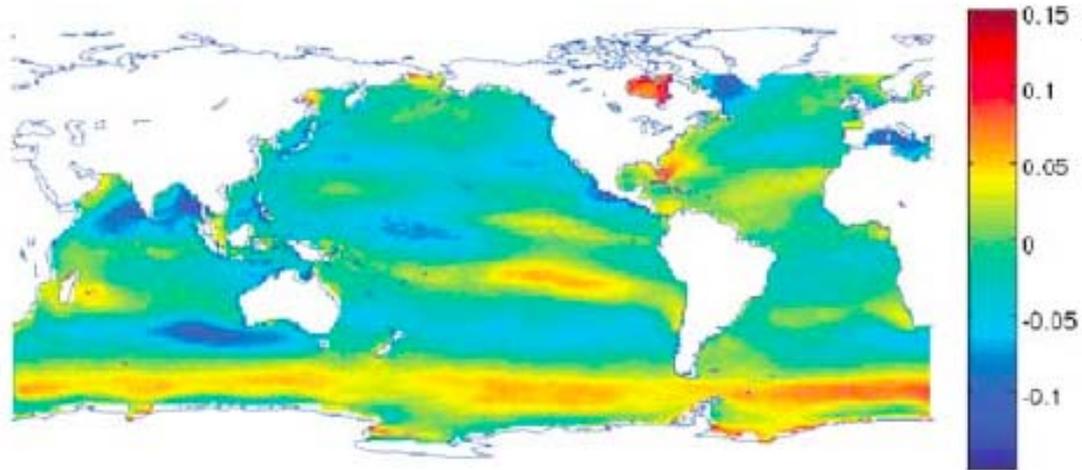


圖 41: (a) 現今氣候的平均顯著浪高的分佈，單位為公尺，以及 (b) 在 A1B 未來發展情境下，氣候模式在世紀末氣候平均顯著浪高變化推估的百分比分佈 (Mori et al., 2010)。

在極端海浪高度與暴潮的未來變化方面，主要是受到近地面風速極端狀態的影響，台灣與西北太平洋區域於夏秋季期間主要是受到颱風生成、路徑與強度變化所影響，對於整個西北太平洋的颱風生成個數改變，目前大多數氣候模式的推估都是生成個數會由於大氣穩定度增加而減少，但是最大風速較強 (>64knot) 的中度颱風個數則是將有增加的趨勢，也因此並不易評估極端海浪高度在世紀末暖化氣候中的改變，Mori et al. (2010) 以高解析度氣候模式模擬結果分析，認為即使先前提及的平均顯著浪高，未來在西北太平洋將會減小，但是極端海浪高度相關指標則是增加的(參見圖 42)。也就是颱風強度增加對極端浪高的影響比颱風生成個數減少更為重要。未來行經西北太平洋的船舶必須詳細考慮極端浪高與暴潮增加對航行安全的影響。必須注意的是，上述的結果是以整個西北太平洋狀態的變化為基準，如果是侵台颱風與台灣鄰近海域為焦點，不確定性會由於颱風生成位置與路徑的隨機性而大幅增加。在亞洲冬季季風的未來變化方面，由於在未來世紀末時陸地暖化較海洋明顯，將使冬季季風減弱的可能性較高，進而減小冬季近地面極端風速與浪高發生的機率。

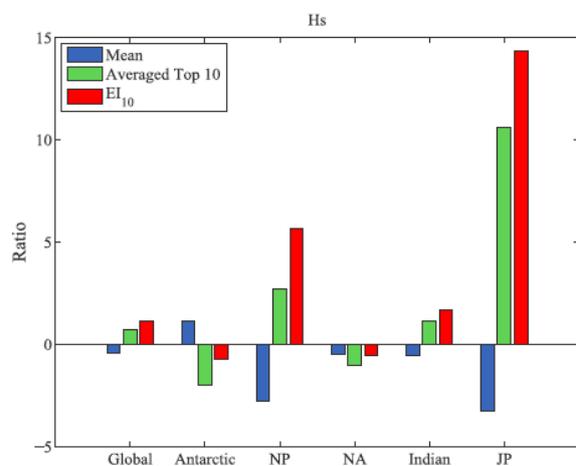


圖 42: 不同區域平均的顯著浪高平均值(藍色)、前十名平均(綠色)與極端指標(紅色)的分佈 (Mori et al., 2010)。

六、結論

對於未來長期氣候變遷的推估，唯一的科學工具是運用全球氣候模式模擬未來氣候隨時空的變化，而前提是必須依據世界未來的人口、經濟、社會、環境的可能發展情境，決定影響氣候系統輻射平衡的溫室氣體、氣溶膠等，未來在大氣中的濃度變化。但是由於各個氣候模式的結構與使用參數的不同，同時伴隨著氣候系統的自然變動，各種氣候反饋效應的差異造成氣候模式所估計的氣候敏感度也不同。而此氣候敏感度的差異，使科學家即使是對於全球平均近地表氣溫在未來百年後的變化究竟是攝氏幾度也無法精準地估計。

關於未來世界發展，可以用不同的情境假設，也就可以分開處理未來世界發展狀態的不確定性，但即便是以多數科學家認為可能最接近未來發展的情境 (IPCC SRES A1B)，氣候模式所估計的全球氣溫變化的氣候平均值最佳估計為增暖 2.8 °C，而可能範圍是從增暖 1.7 °C 到 4.4 °C 之間，意味著上述的氣候模式差異與氣候系統自然變動可能造成相當程度的不確定性。

不過對於氣候變遷的影響、調適的評估，最重要的指標是每個局部地區氣溫與降水的未來變化，而非全球平均氣溫的改變。是否這些氣候的改變需要各地政府單位、民間機構採取適當的決策與規劃，以因應未來的氣候與環境改變，需要詳實科學報告的指引。與先前討論同樣，全球氣候模式所模擬的未來區域氣候的時空變化是科學家主要用以評估的工具，但是氣候模式差異與自然變動對局部地區氣候模擬所造成的不確定性，甚至往往比上述的全球平均狀態更高。而且模式的空間解析度也不足，因此必須透過動力模式或統計方法，進一步將資料區域細節化，但都會再一次引進更多未來氣候變遷推估上的不確定性。

透過科學與客觀的方法，本研究使用為偏差量校正和空間細部區分內差 (bias-correction and spatial disaggregation, BCSD) 的方法，將 24 個 AOGCM 模式的月平均降雨資料 (單位: mm day⁻¹) 與月平均地表溫度資料 (單位: °C) 進行統計降尺度。將全球氣候模式模擬區域化的結果為基準，分析未來台灣氣候變遷的可能性機率分布範圍。運用機率方式表示是科學與客觀地呈現上述氣候模式差異、自然氣候變動以及降尺度方法所疊加的不確定性估計，同時區域的自然氣候變動特性也可以用以評估我們對未來台灣氣候變遷推估的信心高低。

以單一未來發展情境為例 (A1B)，下列是未來台灣氣候變遷推估的主要發現：(1) 在近地表氣溫變化部份，所有氣候模式所推估的區域季節平均變化中位數大約是介於 2.5 至 2.7 °C 之間，北台灣較南台灣的增溫幅度略高，而春季較其他季節略低。約有一半的模式認為未來台灣各區域季節平均變化主要是介於 2.0 至 3.0 °C 之間。90% 以上的模式推估區域季節平均變化將在 1.7 °C 以上或小於 3.4 °C，同樣是北台灣較南台灣的增溫幅度略高。(2) 在降水量平均百分比變化方面，依多氣候模式系集分布情形推估，台灣的四個主要分區未來冬季平均雨量

多半都是減少的，約有一半的模式的推估是介於 -3 到 -22%之間，南台灣春季未來的平均雨量百分比變化四分差 (Interquartile Range, IQR) 與冬季非常類似。而未來夏季平均雨量百分比變化，除了北台灣以外，則有超過四分之三的模式推估降水都是增加，約有一半的模式認為未來夏季平均變化主要是介於 +2% 至 +26% 之間，這些推估結果對原本就是夏季多雨、冬季少雨的中南部地區而言，未來如何調配水資源的豐枯期，在未來將會是更大的議題。

上述的主要發現與全球氣候模式所模擬的區域特徵相似，但提供更多的細節，這些額外的空間訊息，是透過高解析度觀測資料與低解析度氣候模式模擬結果的統計關係獲得，主要是利用累積機率分布進行誤差修正與空間解析。使用不同的統計降尺度方法，有可能得到不同的未來氣候變遷推估結果。

對於未來台灣近地面氣溫變遷推估而言，從區域平均到個別網格點，無論是月、季或是年平均的氣候平均氣溫變化，在本世紀末的變化幅度都遠超過模式所估算的氣候自然變動與統計降尺度方法的誤差，必須嚴正以對，雖然仍須留意其可能性機率分布範圍。不過，對於未來台灣降雨變遷推估的應用，必須注意其變化幅度往往未必具有統計上的顯著性，模式推估分布的可能性機率分布範圍或甚至符號都改變，科學上對相關結果可靠性的信心較為不足。

七、參考資料

- 柳中明、吳明進、林淑華、陳盈蓁、楊胤庭、林瑋翔、曾于恆、陳正達，2008：
臺灣地區未來氣候變遷預估。台大全球變遷研究中心，31 頁
- 旱災潛勢定義及其方法之建立，經濟部水利署，1999 年 6 月
- 北部旱災潛勢資料繪製示範計畫，經濟部水利署，2000 年 5 月
- Beniston, M., D. B. Stephenson, O. B. Christensen, C. A. T. Ferro, C. Frei, K. Haleness, T. Holt, B. Koffi, J. Palutikof, T. Semmler, and K. Woth, 2007: Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81, 71-95.
- Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton, 2007: Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007a: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Christensen, J. H., T. R. Carter, M. Rummukainen, and G. Amanatidis, 2007b: Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project, *Climatic Change*, 81,1-6
- Doblas-Reyes, F. J. and Goodess, C. M., 2005: Working paper on the need for downscaling of seasonal-to-decadal integrations within the EU-funded ENSEMBLES project. *Ensembles Technical Report 2*. ISSN 1752-2854. http://ensembles-eu.metoffice.com/tech_reports.html. 10 pp.
- Giorgi, F., and L. O. Mearns, 1991: Approaches to regional climate change simulation: A review. *Rev. Geophys.*, **29**, 191-216.
- Giorgi, F., and R. Francesco, 2000: Evaluating uncertainties in the prediction of regional climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1295-1298

- Giorgi, F., et al., 2001: Regional climate information – Evaluation and projections. In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 583–638.
- Giorgi, F., C. Jones and G. R. Asrar, 2009: Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bulletin* 58, 175-183.
- Hsu, H.-H. and C-T Chen, 2002: Observed and projected climate change in Taiwan, *Meteor. Atmos. Physics*, 79, 87-104.
- Hu, Z.Z., S. Yang, and R. Wu, 2003: Long-term climate variations in China and global warming signals. *J. Geophys. Res.*, 108(D19), 4614, doi:10.1029/2003JD003651.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Liu, C.-M., M.-C. Wu, S. Paul, Y.-C. Chen, S.-H. Lin, W.-S. Lin, Y.-C. Lee, H.-H. Hsu, R.-Y. Tseng, C.-T. Chen 2011: Super-ensemble of three RCMs for climate projection over East Asia and Taiwan, *Theoretical and Applied Climatology*, Volume 103, Issue 1-2, pp. 265-278.
- Maurer, E.P., 2007: Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California under two emissions scenarios, *Climatic Change*, 82, 10.1007/s10584-006-9180-9
- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993: The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan17-23, 1993, Anaheim CA, pp.179-186
- Mearns, L. O., W. J. Gutowski, R. Jones, L.-Y. Leung, S. McGinnis, A. M. B. Nunes, and Y. Qian: A regional climate change assessment program for North America.

- Metropolis, N., and S. Ulam, 1949: The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association* (American Statistical Association) 44 (247): 335–341
- Min, S.K., E.H. Park, and W.T. Kwon, 2004: Future projections of East Asian climate change from Multi-AOGCM ensembles of IPCC SRES scenario simulations. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 82(4), 1187–1211.
- Mori, N., T. Yasuda, H. Mase, T. Tom, and Y. Oku, 2010: Projection of Extreme Wave Climate Change under Global Warming. *Hydrological Research Letters*, 4, 15-19.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A. et al.: 2000, Special Report on Emissions Scenarios, Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 595 pp.
- Wilby, R. L., S. P. Charles, E. Zorita, B. Timbal, P. Whetton, and L. O. Mearns, 2004, Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods, technical report, Data Distrib. Cent., Intergovt. Panel on Clim. Change, Norwich, U. K.
- Wood, A.W., E.P. Maurer, A. Kumar, and D.P. Lettenmaier, 2002: Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *J. Geophysical Research-Atmospheres* 107(D20), 4429
- Wood, A.W., L.R. Leung, V. Sridhar, and D.P. Lettenmaier, 2004: Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Clim. Change*, 62, 189–216.
- Yatagai A, Xie P, Kitoh A (2005) Utilization of a new gauge-based daily precipitation dataset over monsoon Asia for validation of the daily precipitation climatology simulated by the MRI/JMA 20-km-mesh AGCM. *SOLA* 1:193-196

Projection of Future Coastal/Ocean Climate Change

Nobuhito Mori
Disaster Prevention Research Institute (DPRI)
Kyoto University
www.oceanwave.jp



Collaborators
H.Mase, T. Yasuda, S. Nakajo, T. Shimura (Kyoto U)
A. Kitoh (MRI) and H. Murakami (JAMSTEC)

Funded by
KAKUSHIN program and Grand-and the Grant-in Aid for Scientific Research of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology



科学研究費補助金
Grants-in-Aid for Scientific Research

Central Weather Bureau and National Taiwan Normal University
11-14 July, 2011, Taipei

Ensemble projection of sea level rise, SLP, wind and wave based on KAKUSHIN and CMIP3 models

Nobuhito Mori
Disaster Prevention Research Institute
Kyoto University
www.oceanwave.jp



July 11-14, 氣象局・臺灣師範大學

Tomohiro YASUDA, Sota NAKAJO, Soo Youl KIM, Nobuhito MORI, Hajime MASE and Kevin HORSBURGH (2011) Evaluation of Storm Surge Risk directly based on Climate Change Projection, Journal of JSCE in press (in Japanese)

Dynamic Projection Future Change of Storm Surge

Nobuhito Mori
Tomohiro Yasuda, Sota Nakajo
and Hajime Mase
DPRI, Kyoto University

Dynamic Projection of Future Global Wave Climate Change

Nobuhito Mori
Kyoto University
www.oceanwave.jp

Hajime Mase
Tomohiro Yasuda
Sota Nakajo
Tomoya Shimura

Mori (2010) Projection of Extreme Wave Climate Change under Global Warming, Hydrological Research Letters
Shimura, Mori et al. (2011) Extreme wave climate change projection at the end of 21st century, Proc. Asia Pacific Coasts (APAC2011)