

不同氣候變遷情境下降雨衝擊評估

謝佳穎¹、陳韻如¹、朱容練¹、陳永明¹、陳正達²

¹國家災害防救科技中心、²國立臺灣師範大學海洋環境科技研究所

摘要

政府間氣候變化專門委員會(IPCC)第四次報告(AR4)中,提供各國模擬的大氣環流模式(GCM)以及模擬不同二氧化碳排放情境下(A1B、B1、A2...),未來氣候變遷的降雨與溫度變化結果。由於各個 GCM 模式的空間解析度不同且較大,無法直接應用台灣地區的衝擊面向評估的空間尺度,如流域、縣市等。故利用統計降尺度之方式,將所有情境與 GCM 模式的降雨與溫度的變化,降尺度至 25 公里的網格尺度。由於過去提供使用端多模式系集平均(Ensemble)的降雨改變率的變化較小,下游使用端應用該資料評估衝擊程度時,無法反應氣候變遷情境下極端特性其衝擊影響較小。故依據使用端(如水利署相關衝擊評估計畫)的需求,本研究以於豐水期間增加一倍標準差的降雨變化,而枯水期減少一倍標準差方式假設最劣情境(worse case)提供使用端評估衝擊之參考。為瞭解提供使用端的氣候變遷情境資料的特性,本研究以 1980~1999 年視為基期,評估近未來(2020-2039)與遠未來(2080-2099)的氣候變遷情境下降雨空間變化與衝擊。研究中除了分析三種排放情境下多個 GCM 模式的結果,並將日本高解析度氣候模式(MRI)的 20km*20km 的降雨資料亦納入分析比較。以瞭解未來氣候變遷情境下可能的降雨時序變異特性與不確定性,以提供下游使用者災害衝擊評估時之參考依據。最後,研究分析數據顯示,未來約有 60% 機率呈現豐水期降雨增加,而約有 80% 的機率枯水期呈現減少的趨勢。且以 A1B 排放情境降雨改變率變異性大,不確定性較高。而 MRI 資料顯示豐水期降雨改變率與統計降尺度多模式系集平均的變化較接近,但枯水期則是呈現相反改變率。

關鍵字：排放情境、統計降尺度、GCM 模式、MRI 模式、最劣情境

一、前言

聯合國「政府間氣候變遷委員會」(IPCC)藉由大尺度海氣耦合環流模式(Atmosphere-Ocean Coupled General Circulation Model, AOGCM)模擬未來的全球大氣環流特徵及氣候變化,針對多個大氣環流模式(GCM)模擬各種二氧化碳排放情境氣候變異情形。其中,IPCC AR4 模式的解析度通常在 150-300 公里,然而影響天氣的尺度通常小於此解析度,因此必須使用降尺度方式獲得降雨推估資訊。

全球環流模式(General Circulation Model, GCM)進行降尺度之研究起於九零年代, GCM 屬於全球尺度(>104km),相較於台灣集水區水文尺度而言,其空間解析度相對粗糙,再者,台灣地形各異,降雨型態也十分極端,若以 GCM 結果直接預估台灣地區未來氣候型態,則無法掌握較細緻的變異。故台灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫(簡稱 TCCIP)第一年度(99 年),該計畫由國家災害防救科技中心負責規劃執行,結合中央研究院環境變遷研究中心、中央氣象局、臺灣大學、臺灣師範大學及國內氣候變遷研究學者共同合作。

TCCIP 利用統計降尺度方法,配合 IPCC 的 GCM 模式之情境資料,製作臺灣地區 25 公里x25 公

里高解析度降雨降尺度推估資料。統計降尺度是以高解析度觀測資料與低解析度 GCM 模式資料兩者的累積分布函數(CDF, cumulative distribution function)關係,透過偏差量的校正(bias correction)降尺度後,獲得台灣地區 75 個網格點之高解析度之月平均氣候值之模式結果。

TCCIP 目前產出 A1B、B1 與 A2 三種氣候變遷情境之推估資料(月雨量、月溫度),以 1980~1999 年之月平均值為比較基準(即基期),提供近未來的 2020~2039,與世紀末的 2080~2099 年(即所謂目標期間)兩個時段未來推估年之月雨量改變率(%)以及月溫度改變量(單位°C)。為避免使用單一 GCM 模式的不確定性,故建議是使用端分析所有的 GCM 模式的產出,或以多重模式平均(Multi-Model Ensemble)的結果進行衝擊分析,故提供給水文應用端是 A1B、B1 與 A2 三種氣候變遷情境下,所有 GCM 模式以及 Ensemble 之降尺度後各月降雨改變率輸入值。

本研究針對提供給使用端的降尺度後的資料分析其未來氣候變遷下可能的降雨衝擊,且將日本高解析度氣候模式(MRI)的 20km*20km 的降雨資料亦納入分析比較。

二、研究方法

2.1 使用資料說明

IPCC AR4 目前提供的 GCM 模式共有 25 個，但其中中國大陸北京所提供 CN_BCC_CM1 模式資料，無法下載完整資料，故 TCCIP 分析的 GCM 模式共有 24 個。各 GCM 模式模擬歷史氣候時間範圍與推估未來時間範圍，可知大部分的 GCM 模式模擬歷史的時間範圍都是以 1999 年或 2000 以前為主，模擬約 40 年的時間，未來推估時間則是從 2000 以後開始到世紀末，模擬 100 年的資料。詳細模式介紹可參閱（http://www.ipcc-data.org/gcm/monthly/SRES_AR4/index.html）。

所使用之觀測資料方面，降雨是使用 Aphrodite (Asia Precipitation Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of the Water Resources) 的月平均降雨資料，單位為 mm/day，觀測資料範圍為亞洲季風區 (60°E~150°E; 15°S~55°N)，資料時間為 1951-2007 年，網格解析度為 0.25°×0.25°。而溫度的部分則是使用 CRU (Climate Research Unit) 的月平均地表溫度，資料範圍為全球陸地，觀測資料時間為 1901-2002 年，網格解析度為 0.5°×0.5°，單位：°C。本計畫選取觀測範圍為經度 60°E~150°E，緯度 0°N~55°N；觀測時間為 1961-2000 年。

本研究除利用 GCM 數值資料外，另以日本氣象廳 (Japan Meteorological Agency, JMA) 氣象研究所 (Meteorological Research Institute, MRI) 發展的高解析度大氣環流模式 (之後簡稱為 MRI-JMA 模式) 之資料進行溫度及降雨比較。此計畫中的 MRI-JMA 模式係根據日本氣象廳在天氣預報作業上使用的數值模式所發展而成，網格間距約 20km*20km，近遠未來之時間尺度與 GCM 相同，皆為 20 年。

2.2 統計降尺度方法

國內現行經常採用的統計降尺度方法約有六種，分別為簡易降尺度、Support Vector Machine (SVM) 統計降尺度、多變數回歸、Statistical Downscaling Model (SDSM)、Singular Value Decomposition (SVD) 統計降尺度以及參考 Climate-Wizard 所使用之 Bias Correction Statistical Downscaling (BCSD)。(魏綺瑪，2008;童慶斌，2009.)

統計降尺度方法眾多，TCCIP 採用 Bias Correction Statistical Downscaling，簡稱 BCSD 此一方法，主要考量氣候變遷研究議題著重在統計特性的呈現，氣候模式資料轉化的過程應力求保留模式原本存在的特性，過於複雜的後端處理過程 (Post-Process)，容易增加雜訊的產生。再者，BCSD 方法，於國外之水文領域多有使用，適合用來作為氣候與水文應用端資料串接的工具。詳細方法介紹，可參考 Wood et al. (2002), Wood et al. (2004), and Maurer (2007)。研究中採用的統計降尺度方法是利用低解析度 IPCC AR4 模式資料進行降尺度，得到東亞

地區高解析度(25 公里 x 25 公里)與觀測較相近的 IPCC AR4 月平均氣候值之模式結果，應用於台灣地區降尺度後，總計共得到 75 個點位。

2.3 假設降雨特性情境

TCCIP 提供三種氣候變遷情境降尺度後之降雨改變率，分別是 A1B、B1 與 A2 情境，B1 是描述高度全球化的世界，以資源與服務為主的經濟型態；A2 是描述世界各地發展不均，全球人口不斷增加，且經濟趨緩，未能採用新的能源技術之情境；A1B 的情境中，資源分配上屬非化石燃料與化石燃料並重 (Nakicenovic, 2000)。以 1980~1999 年之月平均值為比較基準(即基期)，提供近未來的 2020~2039，與世紀末的 2080~2099 年(即所謂目標期間)兩個時段未來推估年之月雨量改變率(%)以及月溫度改變量(單位°C)。

TCCIP 提供所有 IPCC AR4 的 24 個 GCM 模式降尺度後的月雨量改變率以及月溫度改變量產出，亦提供將重模式平均(Multi-Model Ensemble)給使用端，以降低使用單一 GCM 模式的不確定性。但使用端無法一一分析所有的 GCM 結果，Ensemble 的結果又因平均過後月降雨改變率過小，各月的降雨變化最多約只有±10%的變化，衝擊影響不顯著。由於情境資料的下游使用端—水利署針對現況的水工結構物與水資源管理規則在遭受氣候變遷衝擊影響，較擔心的降雨變化為豐水期越豐且枯水期越枯的情境，必須針對可能的衝擊提早提出相關調適策略因應氣候變遷衝擊。故依據下游使用端需求，兩次討論會議後，由水利署與 TCCIP 達成情境提供端與使用端之共識，假設最劣情境便是以豐水期降雨量是增加的比率，而枯水期降雨量是減少的情境為原則。

假設最劣情境是計算所有 GCM 模式下各月份的降雨變化之一倍標準差值(1SD)，以多重模式平均(Ensemble mean)的各月降雨變化的結果視為之平均值，豐水期(5~10 月)增加一倍標準差值；而枯水期(11~4 月)則是減少一倍標準差，以作為假設之最劣情境(如示意圖 1)。

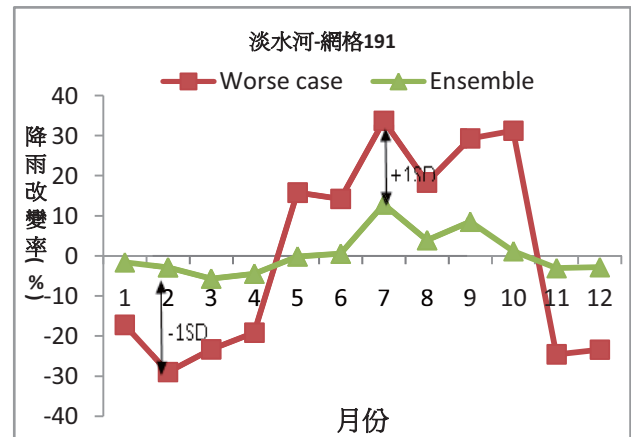


圖 1 假設最劣情境之各月份的降雨改變率之示意圖

2.4 氣候變遷下之降雨量變化

為進一步瞭解在不同氣候變遷情境下，台灣地區未來可能的降雨變化，本研究利用降尺度後的未來兩個時段（2020~2039 年與 2080~2099 年）的月降雨改變率之網格資料（25km x 25km），以及 Aphrodite 歷史的月平均降雨資料（1980~1999 年），分析的情境包含 A1B、B1、A2 三種排放情境多重模式平均

（Ensemble）與最劣情境（Worse case），評估未來氣候變遷情境下全台降雨的空間分布情形。

三、結果與討論

依 IPCC 第四次技術報告(IPCC, 2007)、日本環境省氣候變遷報告書（日本環境省，2009）以及水利署第一階段管理計畫（水利署，2010），本研究以 1980 至 1999 年視為基期，評估近未來（定義為 2020 至 2039 年）與遠未來（定義為 2080 至 2099 年）之三種氣候變遷情境(A1B、B1、A2)下，Ensemble 與假設最劣情境之降雨之空間變化與衝擊，以及 MRI 高解析度資料未降尺度的資料，相關未來降雨變化分析成果如下所示。

3.1 不同氣候變遷情境下降雨改變率

(1) 多重模式平均（Ensemble mean）

經過 BCSD 統計降尺度後，將 24 組 GCM 模式之降尺度推估的結果視為母群體，各月降雨改變率的算術平均值（Ensemble mean）下圖 2 為全台的 75 個網格點，A1B、B1、A2 三個情境下近未來與世紀末的所有模式各月平均降雨改變率的空間變化情形。由圖中可發現三種情境的全台的降雨改變率空間上具有一致性，差異不大，除了 B1 三月份份的降雨改變率增加較為明顯增加，網格點各月份的變化約介於±15%的變化。圖 3 為世紀末的 Ensemble mean 的空間變化，降雨改變率變化為±20%，變化更大，其空間分布特性與近未來相同具有一致性。圖 4 為 Ensemble 中所有網格點的平均值、最大與最小值的各月份變化，由圖中可發現 7~9 月颱風季節期間，以 A1B 情境的降雨改變量大，故 A1B 情境對於台灣地區降雨的增加量較為顯著，B1 情境中則是以三月份的改變率較其他兩個情境不同，是呈現增加的趨勢。

(2) 假設之最劣情境（Worse case）

計算 24GCM 模式的各月份降雨變化平均值以及一倍標準差，依據豐枯水期增減一倍標準差，組合成的最劣情境之全台降雨改變率空間變化，如圖 5 與圖 6 所示。圖中枯水期降雨改變率，三個情境在空間變化較一致性，豐水期的月份降雨改變率，較有不同程度的空間變化的差異且降雨改變率相較 Ensemble 的變化範圍更大，豐枯水其便有明顯的差異改變，世紀末的假設的 A1B 最劣情境降雨改變率更為顯著。圖 7 為 Worse case 中所有網格點的平均值、最大與最小值的各月份變化，由圖中可發現近未來豐水期的月降雨改變率最大到+40%，而枯水期的變化則是約為-30%，

世紀末的變化更大-40%~+60%左右，如此便可改善下游使用端採用 Ensemble 改變率過小的問題。

3.2 MRI 高解析度降雨改變率

日本氣象廳（JMA）氣象研究所發展的高解析度大氣環流模式（MRI），由於此資料為 20km 尺度資料，故未再進行降尺度，直接採用其分析的結果，圖 8 為近未來與世紀末的降雨改變率。由圖中可知近未來情境少數台灣沿海的網格降雨改變率差異較大，全台降雨改變空間變化較為一致。4、5、9、11、12 月降雨改變率呈現減少的趨勢，而 1 月及 10 月的東西半部降雨分布不均至為明顯。世紀末情境全台降雨改變空間變化一致較低，以 5、11 月降雨改變率呈現減少的趨勢。近遠未來之北部地區降水皆呈現短少的趨勢，豐水期仍有多處地區降水偏低。

3.3 不同氣候情境下之全台降雨量空間分布

(1) 多重模式平均（Ensemble mean）

多重模式平均之近未來月分布之空間降雨改變值如圖 9，世紀末月分布之空間降雨改變值如圖 10，為三種情境下，Ensemble mean 乘上 Aphrodite 值後的預估實際降雨值，其中 5、7、9、10 月降雨變化較為明顯，5 月的東部沿海、7 月與 8 月的東南部及南部沿海、以及 9 月份各地區除西部平原外，皆有極明顯的集中降雨趨勢，而月降雨量最高是發生在 7 月恆春半島地區，以世紀末 A1B 情境而言，單月降雨將達 1000mm，單月降雨達年總降雨 34.8%。

(2) 假設之最劣情境（Worse case）

假設之最劣情境近未來月分布之空間降雨改變值如圖 11，世紀末月分布之空間降雨改變值如圖 12，為三種情境下，Worse case 乘上 Aphrodite 值後的預估實際降雨值，其中 5、7、9、10 月為集中降雨月份，5 月的東部沿海、7 月與 8 月的東南部沿海及中部山區、以及 9 月份各地區除西部平原外，皆有極明顯的集中降雨趨勢，而月降雨量最高是發生在 7 月恆春半島地區，以世紀末 A1B 及 B1 兩種情境而言，單月降雨超過 1000mm，單月降雨達年總降雨 35.1%。

四、結論與建議

研究中比較三種排放情境下 GCM 模式與日本高解析度 MRI 資料輸出結果，分析數據顯示三個情境中以 A1B 情境則是降雨變異量最大，B1 情境中則是以三月份的改變率較其他兩個情境不同，是呈現增加的趨勢。而 MRI 資料顯示南北地區降水變異量大，相較之下，GCM 模式預測降水呈現較好的空間一致性，而 MRI 模式則是呈現南北地區降水分配不均的情況，且枯水期(1~3 月)降雨呈現增加的趨勢，而豐水期(6~8 月)增加的降雨量相對較少。

假設最劣情境雖降雨改變較 Ensemble mean 為明顯，近未來豐水期的月降雨改變率最大到+40%，而枯水期的變化則是約為-30%，世紀末的變化更大-40%~+60%左右，但由於該情境針對水文使用端需求設計之情境，並未能適用其他領域需求，如農業或生態等。建議下游使用端，針對所有 GCM 模式的結果進行分析，最後利用百分率的方式呈現衝擊程度，將較以單一模式分析結果佳，可降低氣候變遷分析的不確定性。

將降雨改變率乘上觀測降雨量(Aphrodite)，可發現多重模式平均月降雨量最高是發生在 7 月恆春半島地區，以世紀末 A1B 情境而言，單月降雨將達 1000mm，單月降雨達年總降雨 34.8%。

目前 TCCIP 提供多情境多模式且多點未來氣候變遷情境資料，建議下游水文應用端以大尺度的角度做為判斷的依據，不宜用單點的資料進行模式驗證，因為數值模擬中，必須要數個網格點以上的資料特性才較具意義。

參考文獻

- IPCC, 2007: Climate change 2007: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change, http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Print_FrontMatter.pdf
- Maurer, E. P. 2007. Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios. Climatic Change

82(3): 309-325.

- Nakicenovic, N., J. Alcamo, et al., 2000. Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (US), Environmental Molecular Sciences Laboratory (US).
- Wood, A. W., E. P. Maurer, A. Kumar, and D.P. Lettenmaier, 2002. Long range experimental hydrologic forecasting for the eastern US. J. Geophys. Res 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. Climatic Change 62(1): 189-216.
- 日本環境省 (2009). "日本の氣候變動とその影響". 文部科学省, 気象庁, 環境省.
- 水利署 (2010). "氣候變遷對水環境之衝擊與調適研究第 1 階段管理計畫", 第一版, 臺北市：經濟部水利署.
- 童慶斌 (2009). "永續環境政策之規劃與設計-永續環境管理機制與支援決策工具之發展-流域尺度, 水資源面向 (II)"., 行政院國家科學委員會.
- 魏綺瑪 (2008), "利用統計降尺度法推估石門水庫集水區未來情境降水研究", 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。

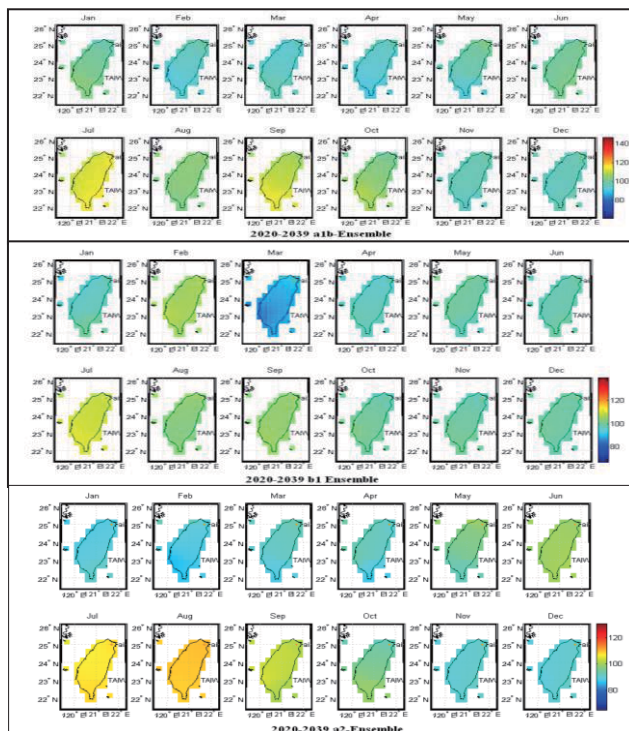


圖 2.近未來不同情境下 Ensemble 的降雨改變率

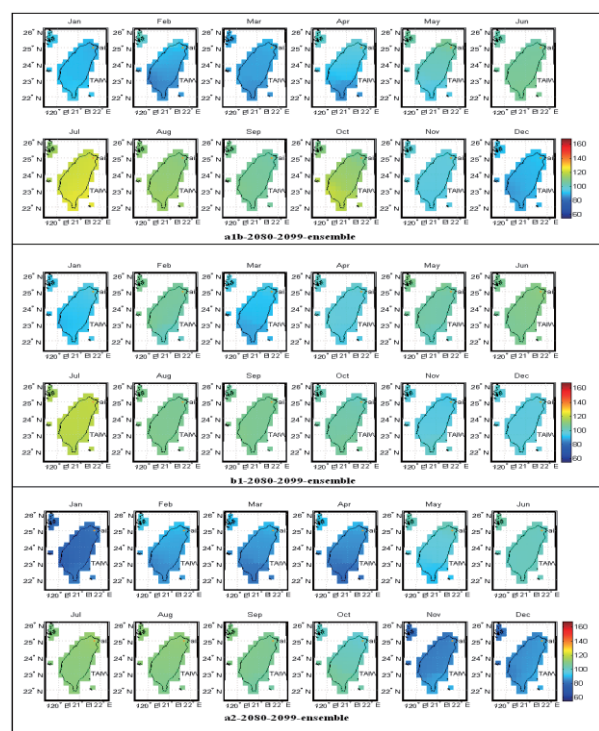


圖 3 世紀末不同情境下 Ensemble 的降雨改變率

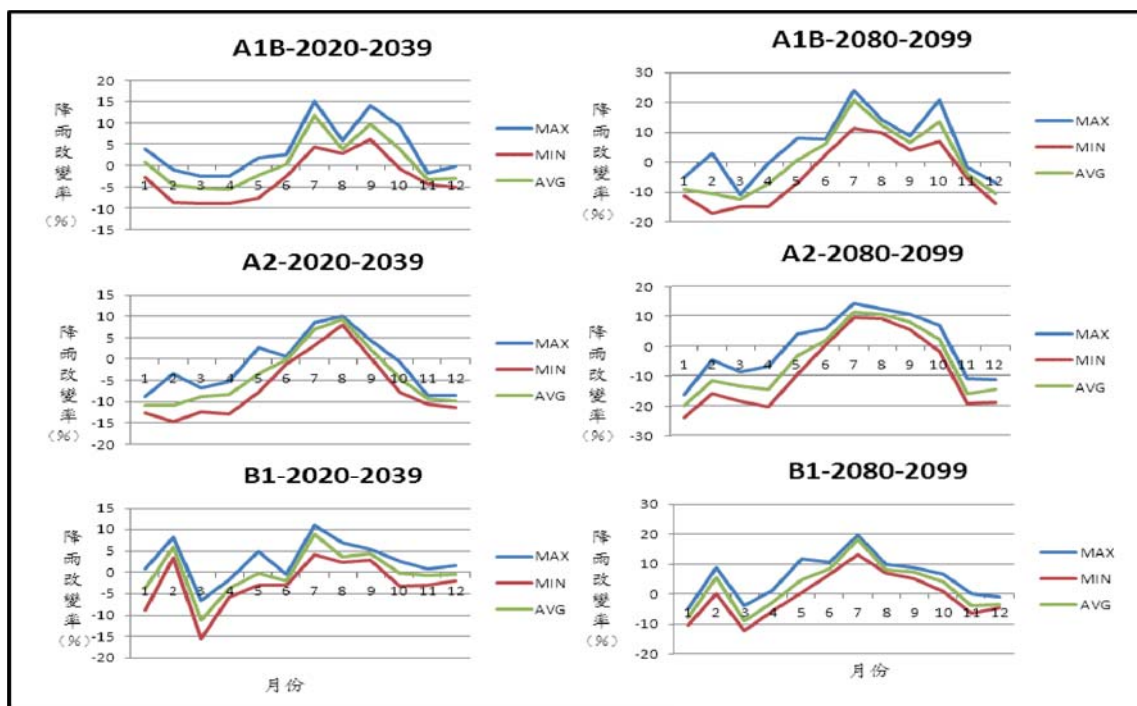


圖 4 不同情境下近未來與世紀末各月全台 Ensemble 情境全台各月極大、平均與最小降雨改變率

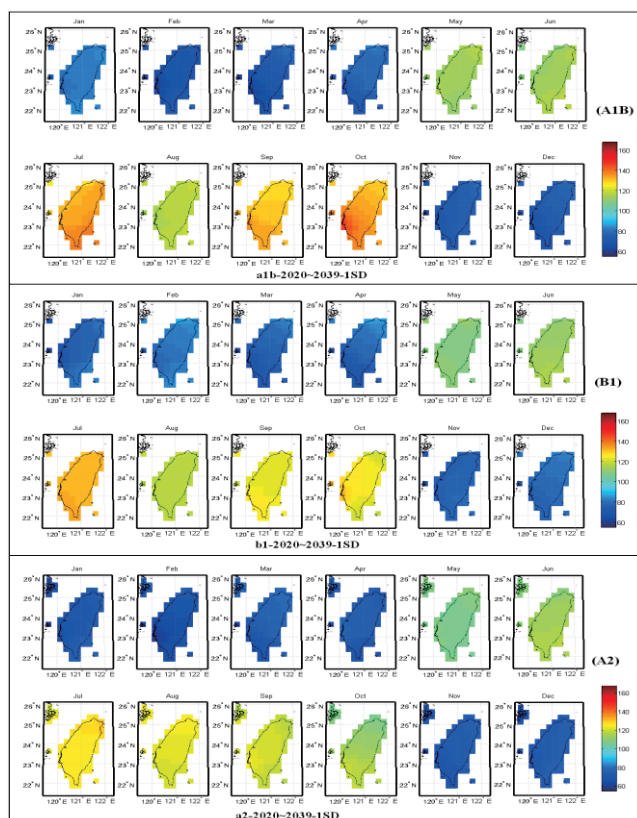


圖 5 三種情境下近未來假設最劣情境之降雨改變率

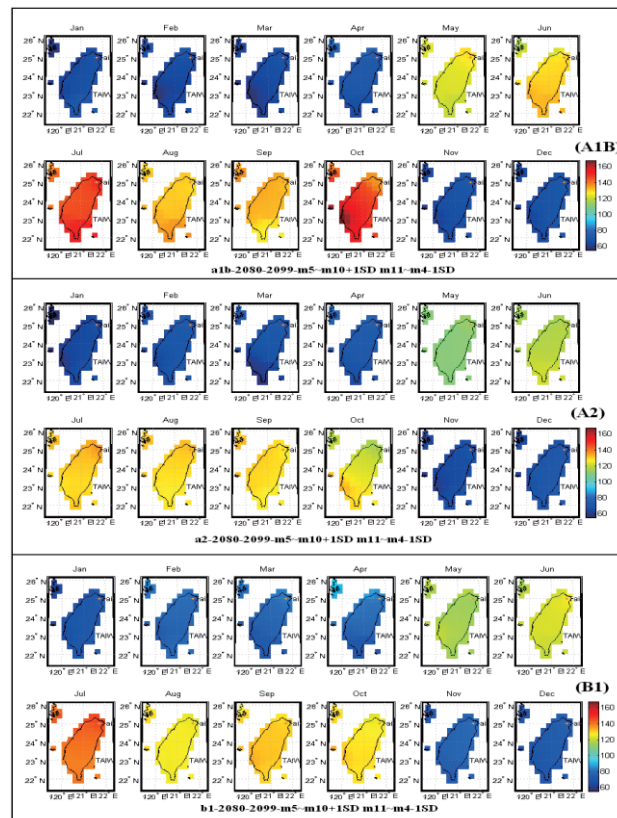


圖 6 三種情境下世紀末假設最劣情境之降雨改變率

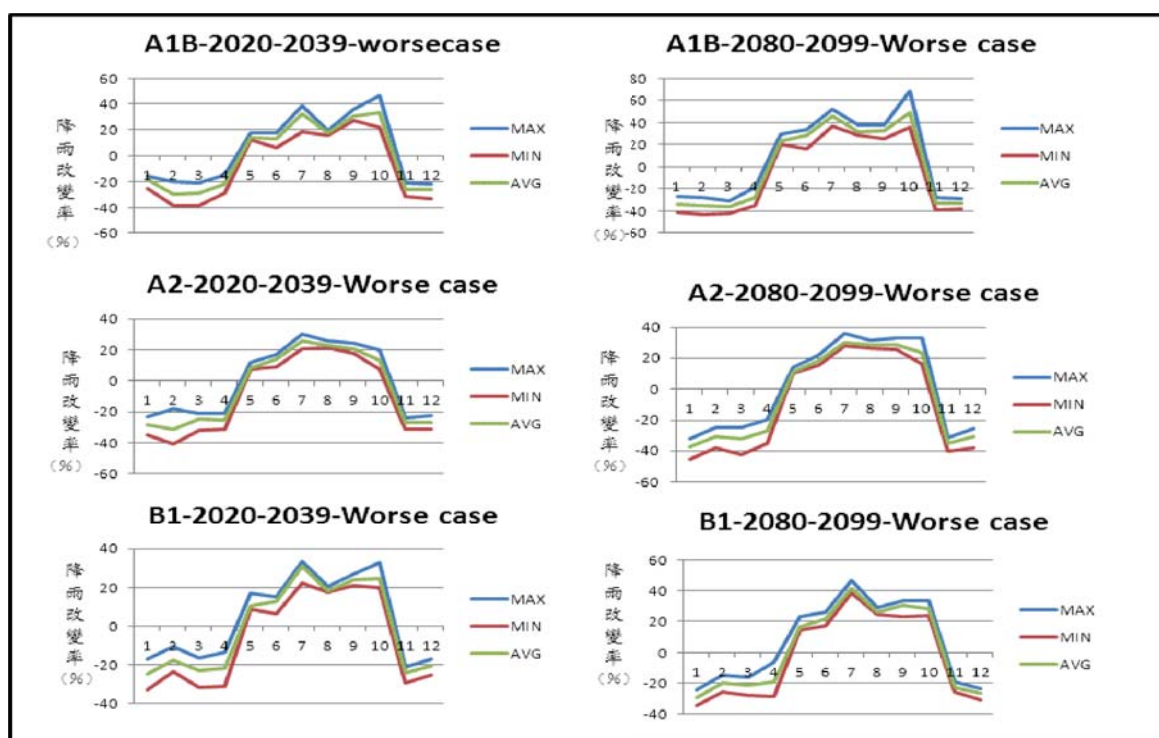


圖 7 不同情境下近未來與世紀末各月全台假設最劣情境全台各月極大、平均與最小降雨改變率

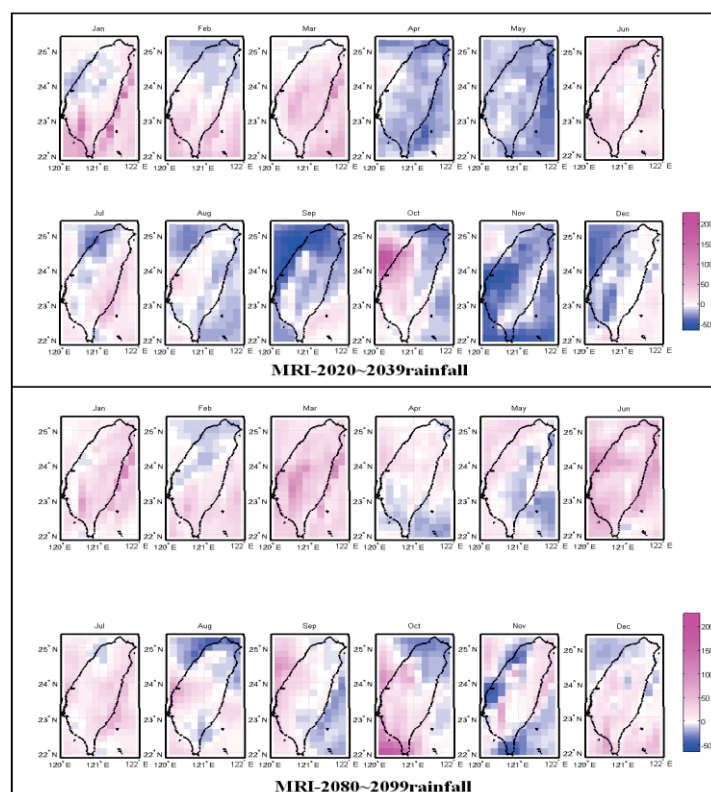


圖 8MRI 模式模擬近遠未來之全台降雨改變率

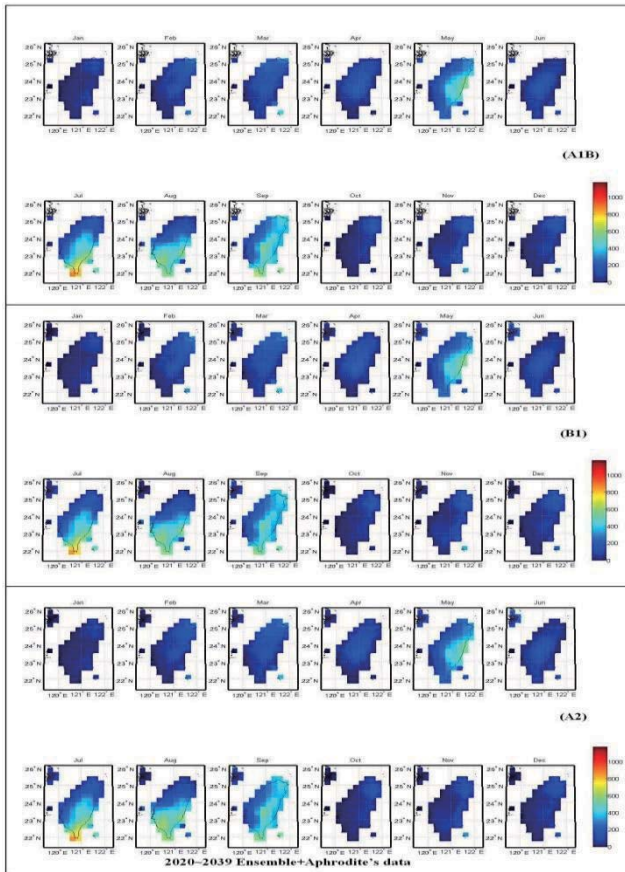


圖 9 近未來 ensemble 乘上 Aphrodite 值後降雨改變量

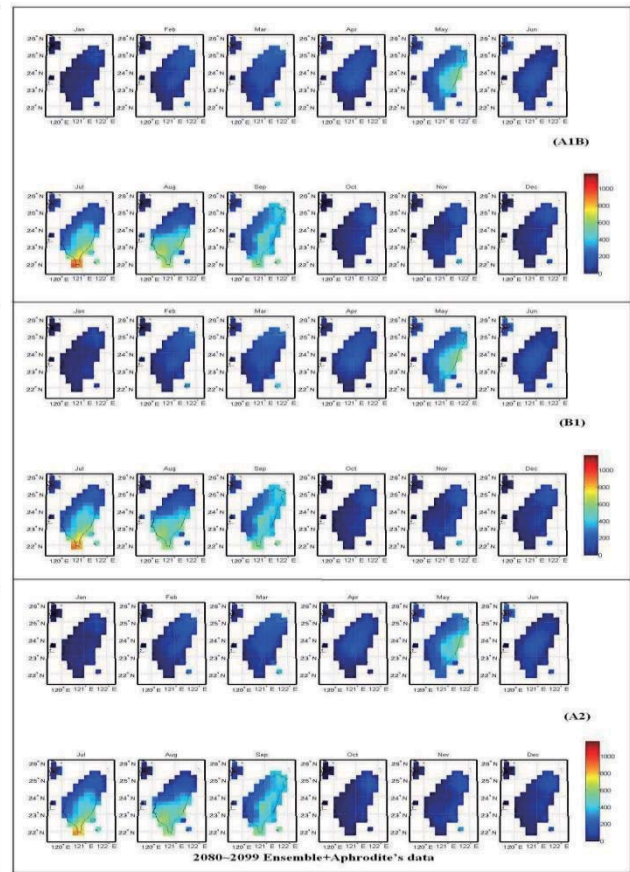


圖 10 世紀末 ensemble 乘上 Aphrodite 值後降雨改變量

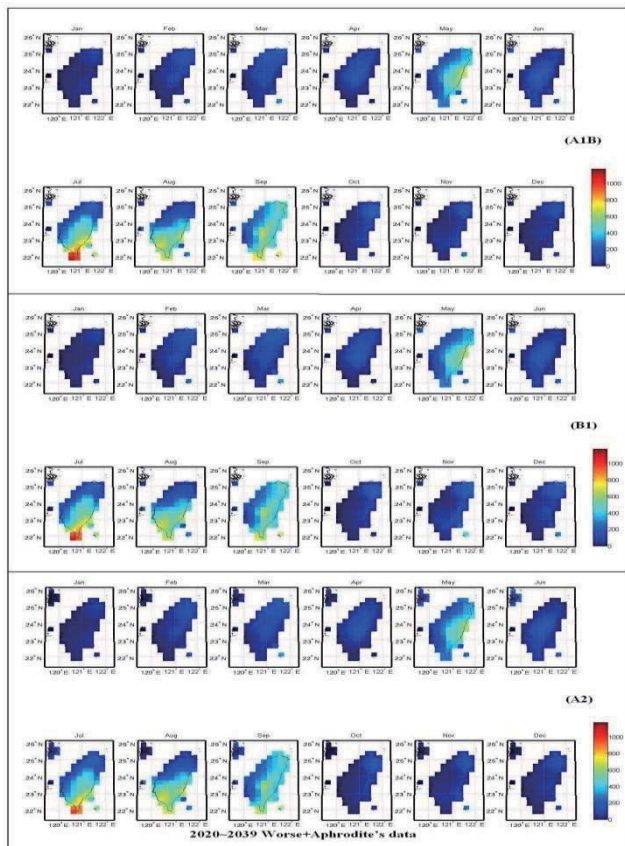


圖 11 近未來最劣情境乘上 Aphrodite 值後降雨改變量

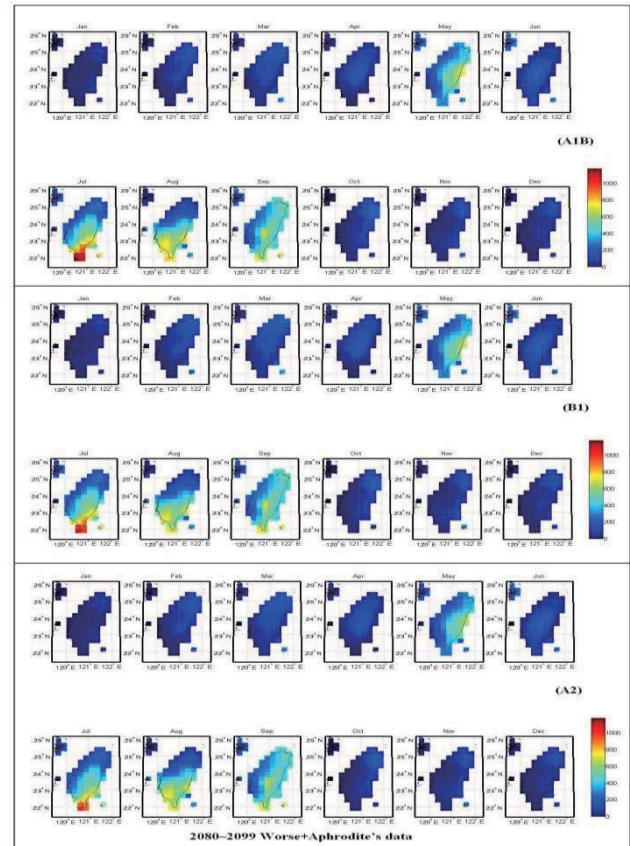


圖 12 世紀末最劣情境乘上 Aphrodite 值後降雨改變量