

建立環流模式推估能力評比之方法

Establish Methods to Evaluate the Projection Ability of General Circulation Models

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
教授

童慶斌*

Ching-Pin Tung

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
博士候選人

連宛渝

Wan-Yu Lien

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
碩士

何宜昕

Yi-Hsin Ho

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
碩士

戴嘉慧

Chia-Hui Tai

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
碩士

莊立昕

Li-Hsin Chuang

摘要

氣候變遷衝擊評估研究中用以推估未來氣候變化之工具為環流模式，目前 IPCC 網站上提供多個環流模式之未來氣候推估結果，然而，不同的環流模式其假設及考慮的邊界條件皆不相同，因此，應用大尺度氣候推估於小區域研究隱含著不確定性。本研究建立模式推估資料之評估方法，分析環流模式與研究區域歷史雨量資料統計特性，剔除對研究區域無法提供合理推估資料之環流模式，以強化簡易降尺度應用之合理性與衝擊評估之不確定性。本研究參考國內外相關文獻制定之排名法與缺點扣分法，以年相關係數、豐水期均方根誤差以及枯水期均方根誤差為評分項目，分析比較環流模式基期年(1961-1990年)之推估值與研究區域基期觀測之月平均降雨量資料。研究中將評分方法應用於新店溪、大漢溪與頭前河流域，研究結果顯示於 3 個不同流域間均具備良好的適用性之環流模式排序前 3 名依序為 MPEH5、NCCCSM、GFCM2.1、INCM3 及 MRCGCM。

關鍵詞：環流模式，氣候變遷，氣候推估，不確定性。

*通訊作者，國立臺灣大學生物環境系統工程學系教授，10617 台北市大安區羅斯福路四段 1 號，cptung@ntu.edu.tw

ABSTRACT

The general circulation models (GCMs) are often used to project future climate and further applied to assess the impact of climate change. On the IPCC website, it provides many GCMs' projections considering different greenhouse gases emission scenarios. However, different GCMs may simulate climate based on different assumptions and boundaries. Thus, it has significant uncertainty when large scale climate projections are applied to a local scale impact assessment study. The purpose of this study is to establish methods to evaluate the projection abilities of GCMs. According to the comparisons between GCMs' projections and statistics of historical rainfall data, those GCMs, which cannot provide reasonable projections, are not considered for further impact assessment. It is expected to strengthen reasonably application of simple downscale and to reduce uncertainty of impact assessments. The ranking method and score reduction method are used to evaluate the projection ability of GCMs. The results show the MPEH5, NCCCSM, GFCM2.1, INCM3 and MRCGCM models can provide the most reasonable projections for all the Xindian River Basin, Dahan River Basin and Touchien River Basin.

Keywords: GCMs, Climate change, Climate Projection, Uncertainty.

一、前言

目前有越來越多學者投入氣候變遷衝擊評估之相關研究，談到氣候變遷衝擊評估的方法，首先須分析歷史資料證明氣候確實有發生變異現象，接著依據推估之未來氣候，以模擬未來可能造成之水文、水資源、與生態環境之衝擊。然未來氣象事件尚未發生，因此未來氣候資料亦不存在，因此需透過氣候模式模擬合理的氣象資料。國際間諸多關於氣候變遷之研究皆透過利用環流模式(General Circulation Models, 以下簡稱 GCMs)之輸出資料推估未來氣候，再進行後續衝擊評估研究。然而 GCMs 模式雖已十分複雜，但仍無法包含所有可能影響的因子，因此一般來說，氣候模式模擬大空間尺度之氣候資訊的合理性較高，提供小空間尺度區域的氣候特性之不確定性較高；此外 IPCC 的氣候模擬百年氣溫變化趨勢與溫室氣體、懸浮微粒的變化趨勢相當一致，但模擬數十年內的氣候變化則變異仍大；總之，時間及空間尺度越小，則氣候模式的模擬能力就越差(徐嘉君及林淑華, 2008)。由此可知，GCMs 尚不能確保提供合理推估短時間及小區域

之氣候，然而，氣候變遷對水文、農業、生態環境與公衛等領域之衝擊評估研究中，往往需要日時間尺度及集水區空間尺度之氣象資料，因此必須進行尺度調整，將大尺度 GCMs 之輸出結果轉換為日時間尺度或集水區空間尺度之資料。

降尺度方法主要分為動力降尺度、統計降尺度以及簡易降尺度，動力降尺度係以 GCMs 的區域結果以及邊界條件，進行區域氣候模式(regional climate model, RCM)的模擬(徐嘉君及林淑華, 2008)；統計降尺度則利用流域歷史氣象資料與大區域氣候型態建立統計關係，再以 GCMs 模擬大區域之氣候型態來進行降尺度(童慶斌, 2007)；而簡易降尺度則直接將環流模式推估改變量加至觀測資料，或利用環流模式推估改變量修正氣象合成模式參數再合成資料(童慶斌, 2007)。由於在水文模擬時常常需要日或小時之氣象資料，因此國內外相關研究常採用簡易降尺度的方式設定氣候變遷情境，再結合氣象資料合成模式產生氣象資料，然而，簡易降尺度法是基於鄰近研究區域之網格點可以代表研究區域氣候平均特性之假設，因此藉由分析是否可提供研究區域合理歷史氣候推估以挑選適當的 GCMs，以降

低因環流模式本身推估資料之不合理性對後續評估結果之影響。

由於每個 GCM 模式對氣候系統各單元的交互作用均有不同的考量，且全球各地的氣候變化可能因經緯度、地形、海陸分布的不同而有所差異，因此不同的 GCM 模式模擬出來之結果亦可能有所差異。卓盈旻及盧孟明(2009)針對 GCMs 模式對亞洲季風的季節和年際變化之模擬情形進行分析，根據其研究顯示，模式對亞洲季風有一定的模擬能力，且基本上都能模擬出亞洲夏季季風環流和降雨空間分佈，但是模式之間的差異度甚大，此外，在針對南亞、東亞、西北太平洋三個次季風區環流和雨量的模擬能力分析上，研究結果顯示模式對於南亞季風有比較好的模擬能力，而大多數模式在三個季風區中對於風場空間特性的掌握比雨量更好。陳正達等(2011)之研究則指出，依照多個氣候模式系集分布情形推估，台灣的 4 個主要分區未來多季平均雨量多半都是減少的，在未來夏季平均雨量百分比變化上，除了北台灣之外，在其他地區有超過 3/4 的模式推估降水都是增加的，約有一半的模式認為未來夏季平均雨量百分比變化主要介於 2%~26% 之間；然而，在多數氣候模式推估未來降水會增加的 6 月到 10 月，仍有少數模式模擬的未來月平均會減少至-20%以上。

由此可知，GCMs 輸出資料提供的是大範圍的平均特性，但 GCMs 之輸出資料是否可以反映集水區尺度之氣候特性為進行水文模擬時所需考量的重點之一，因此本研究提供一簡單之評比環流模式推估資料應用於研究區域合理性之方法，排除與研究區域統計特性明顯不符之 GCMs，以強化簡易降尺度之合理性與降低後續應用之不確定性。

二、文獻回顧

各國發展之 GCMs 確實提供了未來氣候的推估，但模擬氣候過程中對地表能量平衡與水文系統簡化各自表述，模式對未來氣候模擬結果並不一致，為區域氣候模擬帶來估算偏差與不確定性。Mahlman(1997)提及環流模式仍有許多不完

善之處，許多影響氣候的物理機制仍未被人類掌握。許晃雄(1998)提到由於氣候模式之空間解析度甚差，因此當空間尺度越小、變化越劇烈的天氣現象，準確度越低，雖然近年來 GCMs 模式已有顯著改善，但仍存在相當之不確定性，因此挑選適當的 GCMs 是評估氣候變遷衝擊研究的重點，以下蒐集國外針對環流模式效能研究之相關文獻，作為本研究之基礎理論。

目前國外已有相關研究針對 GCMs 效能進行分析研究，如 Perkins *et al.* (2007)將澳大利亞分成 12 個矩形網格($10^{\circ} \times 10^{\circ}$)，以網格內氣象測站資料之平均值來代表該地區氣候特性，採觀測資料與模擬資料之機率密度函數重疊面積作為技術得分之依據，並分析 1961 年至 2000 年間，23 組 GCMs 模擬結果與歷史日降雨量、日最高溫和日最低溫的差異；而 Suppiah *et al.* (2007)計算 GCMs 和 1961-1990 年之溫度、雨量及海平面壓力之均方根誤差和相關係數，最後利用缺點扣分法(demerit point system, Whetton, 2005)作為技術得分依據。Koutsoyiannis *et al.* (2008)挑選距研究區域最接近的 4 個網格點，將各點 GCMs 資料作權重優選，取加權後溫度、雨量資料與觀測資料最接近者，研究中優選時考慮效率係數 $Eff = 1 - e^2/\sigma^2$ ，其中 e^2 為推估之平均平方差， σ^2 為歷史觀測資料之變異。Chiew *et al.* (2009)計算 1961-2000 年之間 GCMs 和觀測資料之均方根誤差、相關係數、變異係數(coefficient of variation, CV)與模式有效性係數(Nash-Sutcliffe efficiency)等統計特性差異，藉由諸項結果評估 GCMs 之準確性，最後藉由不同挑選方式探討氣候變遷影響下未來可能雨量的變化。Johnson and Sharma (2009) 以變異之收斂性為評估項目，探討溫度、雨量、風速、比濕度、長波輻射、短波輻射、海平面壓力及可降水量等 8 種氣象變數在模擬氣候變遷情況下之變動性，其研究中首先校正所有資料之偏差，再將每種氣象變數的 9 個 GCMs 依據網格位置與時間加總平均，並計算短、中、長期變異之收斂性。

國內大部分氣候變遷議題研究均採用 GCMs 之輸出資料作為分析評估之依據，然而在模式的挑選上並沒有特別的考量，僅以每個模式最鄰近

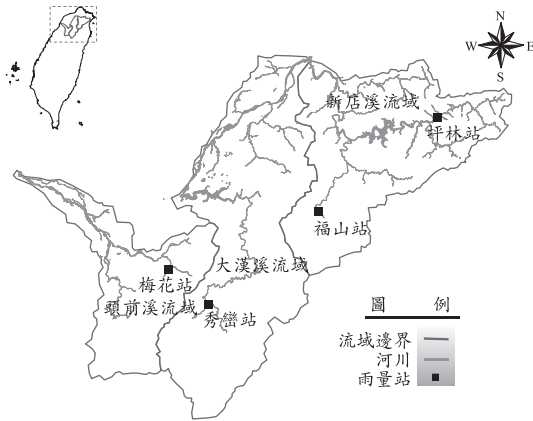


圖 1 研究區域

研究區域的格點之輸出資料代表該模式對研究區域未來的氣候的推估，經濟部水利署水利規劃試驗所(2008)利用淡水河流域氣象測站 1961-1990 年歷史氣溫、雨量資料與各 GCMs 之基期資料進行相關係數分析，遴選適合該研究區域的 GCMs，研究結果顯示不同 GCMs 在氣溫方面均有良好的表現，但在雨量的模擬能力變動大；劉正欽(2010)利用多模式系集平均(MME)分析 GCMs 在不同區域氣候場的結果，研究中使用不同 GCMs 輸出資料之平均的結果進行分析，發現隨著採用 GCMs 數目增加，均方根誤差會隨著明顯降低。

由國內外研究可知，挑選適當之 GCMs 及 GCMs 的個數，對後續研究結果可能造成一定之不確定性，然而目前國內尚未特別針對 GCMs 挑選進行分析討論，因此，本研究提出之建立評比環流模式推估能力之方法，可提供後續研究在進行氣候變遷之影響評估前先行挑選適當之 GCMs 模式。

三、研究方法

3.1 研究區域

本研究挑選新店溪流域、大漢溪流域以及頭前溪流域等位於台灣北部 3 個流域(圖 1)，並從 3 流域內擇一雨量站代表該流域之氣候特性進行分析，然而因位於新店溪之翡翠水庫其供水方式主要係以南勢溪為主，當南勢溪流量不足以提供

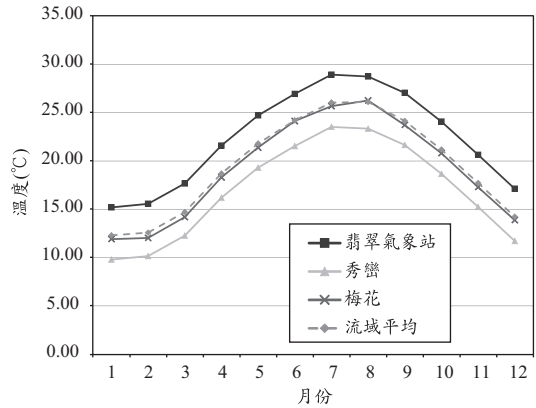


圖 2 研究區域溫度比較

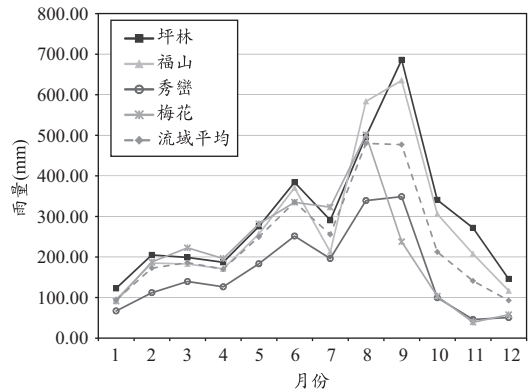


圖 3 研究區域雨量比較

下游需水時，則由水庫放水提供下游需水，因此在新店溪流域分別採用北勢溪之坪林雨量站及南勢溪之福山雨量站，在大漢溪流域採用秀巒雨量站，而頭前溪流域則採用梅花雨量站，此外，研究中亦以 4 站之平均特性代表 3 個流域平均特性進行分析。歷史資料長度的部分，由於坪林站與福山測站之紀錄年分皆自 1977 年起，扣除資料缺漏之故，本研究取 1979 年~1990 年之溫度及雨量資料進行分析，而秀巒站與梅花站溫度及雨量資料則均為 1961-1990 年。

在研究區域中，4 個測站的月平均溫度趨勢變化相近(圖 2)，各測站間相關係數皆高於 0.95，顯示北部地區溫度有極高之相關性，而在月平均雨量部分(圖 3)，坪林、福山及秀巒測站在全年月平均雨量上有較高之相似性，各測站之月平均雨

量相關係數均大於 0.86，另坪林及福山測站最大降雨月份發生於 9 月，梅花測站最大降雨月份則發生在 8 月，可知坪林及福山兩測站與梅花測站月平均雨量相關性較低，而秀巒與梅花測站月平均雨量相關性有較佳的相關性。由於 4 個雨量測站並非屬於同一個集水區，降雨量及降雨分布略有不同是可以預期的。在流域平均特性上可以發現，其平均溫度與各站之相關係數亦相當高，而在 4 個雨量站中，流域平均雨量與梅花站的相關性較低僅有 0.76，但與其他雨量站之相關性均有 0.9 以上。

3.2 GCMs 資料說明

目前 IPCC 網站提供多國研究單位研發的 GCMs 的推估資料，各 GCM 考量 SRES(Special Report on Emissions Scenarios)報告中溫室氣體排放漸變預設情境，模擬未來大氣因子，以推估未來可能的氣候情況。本研究選用 IPCC 網站上完整提供 A1B、A2 與 B1 三種情境的 10 個 GCMs 進行分析，所選取之模式分別為 CSIRO-MK3 (簡稱 CSMK3)、GFDL-CM2.0 (簡稱 GFCM20)、GFDL-CM2.1 (簡稱 GFCM21)、INM-CM3 (簡稱 INCM3)、IPSL-CM4 (簡稱 IPCM4)、NIES:MIROC3_2-MED (簡稱 MIMR)、MPIM-ECHAM5 (簡稱 MPEH5)、MRI-CGCM2_3_2 (簡稱 MRCGCM)、NCAR-CCSM3 (簡稱 NCCCSM)及 UKMO-HADCM3 (簡稱 HADCM3)，以上 10 個 GCMs 之推估值資料均可由 IPCC Data Distribution Center (IPCC DDC)獲得。

GCMs 模式考量氣候系統中大氣、海洋、陸地、海冰以及生物圈各單元之交互作用，並將全球網格化，以推估全球氣候的變化。在 GCMs 所設定的網格中，臺灣地區因面積狹小的緣故，往往僅落於單一網格中，因此本研究以距離測站最近的網格點資料代表研究區域內氣象因子變化情形，分析 GCMs 所模擬之氣候特性是否與研究區域相似。本研究則採用 10 個 GCMs 之氣候推估資料與 4 測站歷史觀測資料分析比較兩者的統計特性，並從中挑選適用於研究區域的 GCMs 模式。

3.3 評估流程與方法

根據經濟部水利署水利規劃試驗所(2008)研究顯示，不同 GCMs 在模擬基期(1961~1990 年)之氣溫方面有較佳的結果，其模擬值與實際值之間的相關性皆為 0.99 以上；而在雨量部分，不同 GCMs 結果差異性大，且與歷史實際降雨量之相關係數呈現極為不同之趨勢，可見得 GCMs 降雨模擬能力實為挑選 GCMs 模式與否之重要關鍵之一，因此本研究針對環流模式模擬基期雨量進行深入探討。

GCM 模擬結果與地面測站資料存在著誤差，在進行簡易降尺度之前，必須藉由誤差修正 (Bias Correction) (Li *et al.*, 2010; Takara *et al.*, 2009; Murphy, 1999)才能去除模式與地面測站之間的系統誤差。因此，本研究分別針對已進行 Bias Correction 及未進行 Bias Correction 兩組資料，探討兩組資料所挑選出之 GCMs。

由於 GCMs 之輸出資料與歷史資料在統計特性上略有差異，因此，假設 GCM 之輸出資料與地面測站資料有相同之統計特性，亦即具有相同之機率值的情況下，GCM 之逐月資料與歷史逐月資料之關係可由式(1)表示。

$$\frac{X_{OBS} - \mu_{OBS}}{\sigma_{OBS}} = \frac{X_{GCM} - \mu_{GCM}}{\sigma_{GCM}} \dots\dots\dots (1)$$

式中 X 為逐月資料， μ 為平均值， σ 則為標準偏差，而下標之 OBS 與 GCM 分別代表觀測值或 GCM 之輸出值，在降尺度至地面測站時，則以修正值 X_{BC} 取代上式之 X_{OBS} (式(2))。

$$X_{BC} = \frac{\sigma_{OBS}}{\sigma_{GCM}}(X_{GCM} - \mu_{GCM}) + \mu_{OBS} \dots\dots\dots (2)$$

因此，基期之修正值 $X_{BC,base}$ 則可透過式(3)表示，而修正後之基期平均值 $\mu_{BC,base}$ 則可以式(4)表示。

$$X_{BC,base} = \frac{\sigma_{OBS}}{\sigma_{base}}(X_{base} - \mu_{base}) + \mu_{OBS} \dots\dots\dots (3)$$

$$\mu_{BC,base} = \frac{\sigma_{OBS}}{\sigma_{base}}(\mu_{base} - \mu_{base}) + \mu_{OBS} = \mu_{OBS} \dots\dots\dots (4)$$

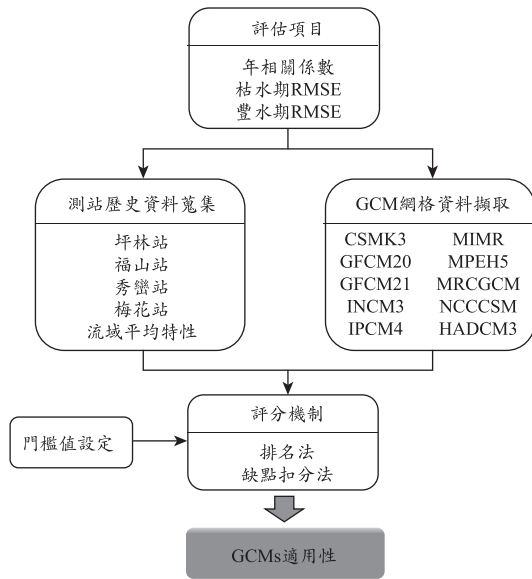


圖 4 評比環流模式流程

將資料分為已進行 Bias Correction 及未進行 Bias Correction 之兩組後，後續研究流程如圖 4 所示，研究中以年相關係數(R)為評估項目，分析 GCMs 基期模擬值之月平均雨量與歷史月平均雨量資料，若相關係數越高模式越能表現研究區域季節變化的特性，呈現豐水期與枯水期間明顯之趨勢。另一方面，由於相關係數僅代表模擬值與實際值有相似的趨勢，模擬值與實際值間不一定具有相近值。因此研究中以均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)探討 GCMs 模擬之基期雨量與實際雨量之間量值之差異性，RMSE 越小代表模擬值越接近真實的降雨情形，模式亦越具備模擬研究區域氣候的能力，並依照時間尺度分別計算豐水期及枯水期之 RMSE，RMSE 正規化(Normalize)公式如式(5)所示：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\frac{Q_{simi} - Q_{obsi}}{Q_{obsi}})^2}{N}} \dots\dots\dots(5)$$

其中 Q_{simi} 為第 i 筆模擬值， Q_{obsi} 為第 i 筆觀測值， N 為資料總數，若由式(1)所計算之 RMSE 為 0 時，代表模擬值與觀測值間並無誤差，而若 RMSE 計算結果為 3，則表示模擬值與觀測值間誤差為

3 倍。綜合上述，本研究用以評比 GCMs 模擬能力之評估項目為年相關係數、枯水期之 RMSE 以及豐水期之 RMSE。

在模式評比上，本研究參考國內外研究訂定兩種評分方式，第一種為排名法(式(6))，乃將分析結果直接排序，故若相關係數越高表示趨勢變化相近，模擬能力越佳，而若 RMSE 越低代表模擬誤差越少，則模擬能力越佳，最後將評估項目之排名累加並排序後平均得到最後的名次。

$$S_j = \sum_{i=1}^3 order_i \dots\dots\dots(6)$$

式中 S_j 為模式 j 之排名法得分， $order_i$ 表示該模式在第 i 項門檻值之排名，當 $i = 1$ 及 $i = 2$ 時，分別表示該模式枯水期與豐水期之 RMSE 在所有模式中的排名，而 $i = 3$ 時表示該模式之相關係數在所有模式中之排名。

第二種為應用 Whetton *et al.* (2005)提出之缺點扣分法(demerit point system)，並參考 Whetton *et al.* (2005)與 Suppiah *et al.* (2007)之研究訂定門檻值，當豐水期及枯水期之 RMSE 高於門檻值時(式(7))或相關係數低於門檻值(式(8))，模式將被扣分，最後加總三評估項目扣分並排名(式(9))。然門檻值因分析對象的不同，而不同的評比項目其門檻值設定對分析結果亦將造成影響，故本研究使用缺點扣分法時，先針對門檻值設定進行敏感度測試，最後分析所有評估項目後加總扣分數(D_j)即可分辨 GCMs 之模擬能力。

$$C_i(x) = \begin{cases} 1, & x > \text{threshold of RMSE} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots\dots(7)$$

$$C_3(x) = \begin{cases} 1, & x \leq \text{threshold of R} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots\dots(8)$$

$$D_j = \sum_{i=1}^3 C_i \dots\dots\dots(9)$$

式(7)中 C_i 為模式在第 i 項門檻值之扣分值，當 $i = 1$ 及 $i = 2$ 時分別表示模式在枯水期與豐水期之 RMSE 是否低於門檻值，式(8)中之 C_3 則說明模式之相關係數是否高於門檻值。 D_j 為模式 j 之總扣

分值，計算出各模式之扣分值後，則可據此挑選適當之評估模式。

四、結果討論

4.1 環流模式與測站降雨量統計特性分析

本研究以年相關係數(R)、豐水期 RMSE 以及枯水期 RMSE 為評分項目，首先針對 GCMs 模擬所得之基期雨量與測站歷史實際雨量進行分析。在相關性分析上(圖 5)可發現，IPCM4 與 MIMR 模式於 4 個雨量測站及流域平均之降雨趨勢結果分析出現負相關，在梅花測站 MIMR 模擬之歷史基期雨量與歷史實際雨量之相關係數更為-0.43，顯示該模式模擬降雨趨勢與梅花測站實際降雨情形並不一致，此外，在其餘 8 個模式中，

CSMK3 模式與梅花站之相關性不到 0.2，顯示該模式之月平均雨量與梅花站之月平均雨量屬於低度相關或無相關性，因此在模式挑選時應特別加以注意。

而在 RMSE 分析結果(圖 6 及圖 7)顯示，若針對個別流域討論，新店河流域之坪林及福山測站，其枯水期與豐水期之 RMSE 大致相近，但在大部分的 GCMs 中枯水期之 RMSE 大致上較豐水期為低；然而，在大漢河流域之秀巒站與頭前河流域之梅花站則僅 INCM3 及 MRCGCM 模式在枯水期模擬較佳。整體來說，在 3 個流域中，10 個 GCMs 所模擬之豐水期雨量較枯水期雨量來的合理，在豐水期之 RMSE 大致上均小於 1，但在枯水期之 RMSE 最高卻可能高達 3，表示 GCMs

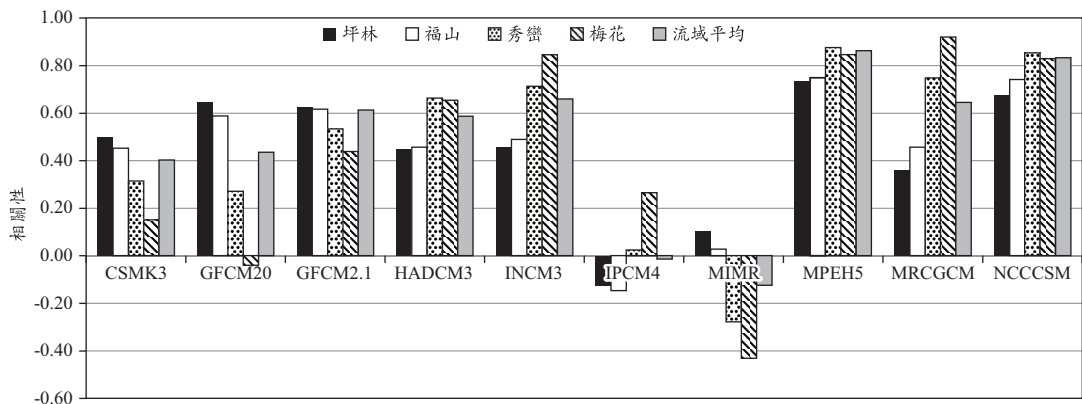


圖 5 環流模式與各雨量測站年相關係數分析結果

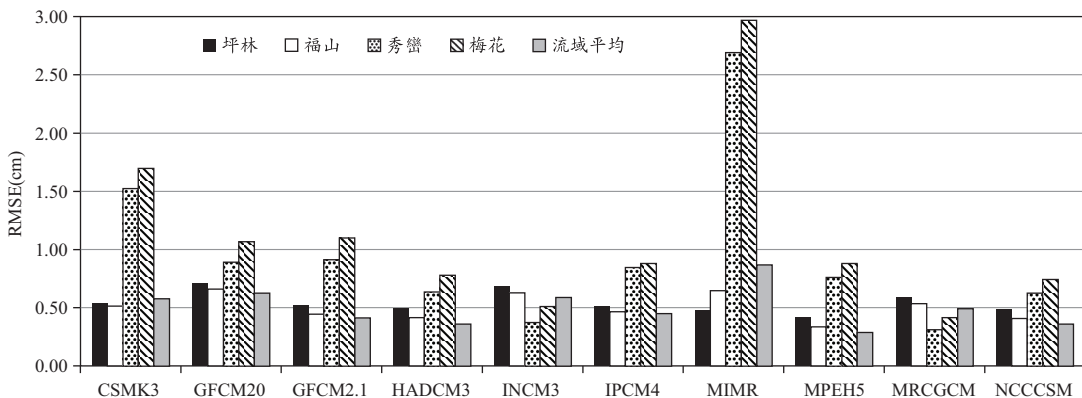


圖 6 環流模式與各雨量測站枯水期 RMSE 分析結果

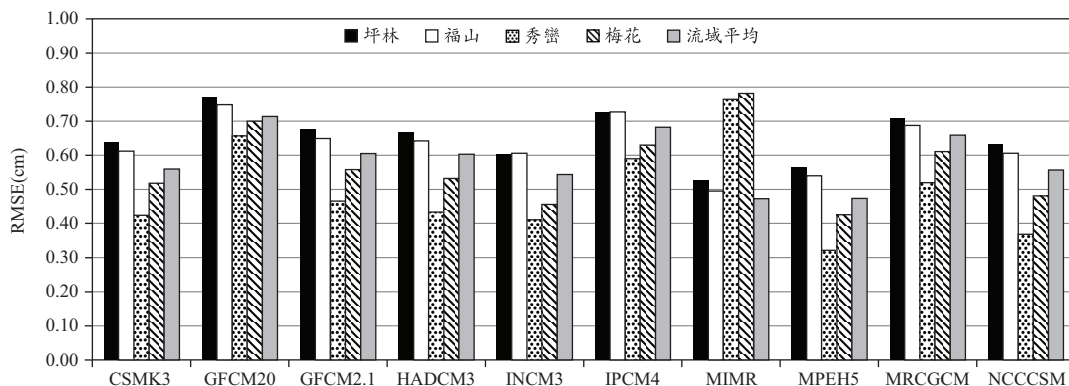


圖 7 環流模式與各雨量測站豐水期 RMSE 分析結果

在枯水期模擬之雨量之誤差是實際雨量之 3 倍。但值得注意的是枯水期雨量本來就較低，因此雖然 GCMs 在枯水期模擬之雨量之誤差是實際雨量之 3 倍，但若從誤差值來看的話，枯水期的誤差值較豐水期之誤差值為低。而針對流域平均雨量進行分析時則可發現，其與 GCMs 之 RMSE 不論是在枯水期或是豐水期均較單站之 RMSE 值為低，但誤差最高仍接近 0.9，此外，與單站降雨特性較為不同的是，豐水期的 RMSE 值在大部分的 GCMs 模式中均較枯水期之 RMSE 值為高。

據分析結果，GCMs 與雨量測站及流域平均之相關係數在 0.92 至 -0.43 之間，而豐水期與枯水期之 RMSE 則落在 2.97 至 0.29 之間。由相關係數的定義可知，當相關係數 > 0.7 時，表示測站之雨量統計特性與 GCMs 模式模擬之雨量統計特性為高度線性相關，而相關係數介於 0.7 與 0.4 時，則表示測站之雨量統計特性與 GCMs 模式模擬之雨量統計特性為顯著性相關，因此在研究中，挑選相關係數為 0.7、0.6、0.5 與 0.4 共 4 組情況，討論不同的相關係數對 GCMs 模式挑選之影響。在 RMSE 的部分，雖然 Whetton *et al.* (2005) 及 Suppiah *et al.* (2007) 將門檻值設定為 4 或 2，然而，根據本研究 RMSE 分析結果顯示，RMSE 最大值僅為 2.97，若設定 RMSE 為 2 或 4 則鑑別效果較差，扣除枯水期有 6 個情況 RMSE 大於 1 的情況之外，不論枯水期或豐水期 RMSE 皆落於 0.92 至 0.3 之間，因此本研究設定 RMSE 之門檻

表 1 排名法挑選 GCMs 之分析結果

流域別 測站	新店溪		大漢溪	頭前溪	流域 平均
	坪林	福山	秀巒	梅花	
CSMK3	4	6	6	8	7
GFCM20	8	9	9	9	10
GFCM2.1	4	3	6	6	5
HADCM3	4	4	5	5	4
INCM3	7	5	3	1	3
IPCM4	9	9	8	6	9
MIMR	3	6	10	10	8
MPEH5	1	1	1	2	1
MRCGCM	9	8	4	2	6
NCCCSM	2	2	1	4	2

為 0.7、0.6、0.5 與 0.4 共 4 種情況，討論不同的 RMSE 對 GCMs 模式挑選之結果之影響。

4.2 環流模式挑選結果分析

在模式挑選的部分，本研究分別針對 GCMs 模式之輸出結果是否先經過 Bias Correction，再利用本研究所提出之挑選分析方法進行模式挑選，模式挑選分析結果說明如後。

4.2.1 未進行 Bias Correction，直接進行 GCMs 模式挑選

以排名法篩選 GCMs 之結果(表 1)顯示，在 3 個流域內 MPEH5 與 NCCCSM 模式表現較佳，尤其是 MPEH5 除了在梅花站之外，在其他 3 個測站均為最佳之模式，此外，由表 1 中亦可發現

表 2 不同 RMSE 且相關係數門檻值為 0.7 之 GCMs 挑選結果

RMSE	0.7					0.6				
測站	坪林	福山	秀巒	梅花	流域平均	坪林	福山	秀巒	梅花	流域平均
CSMK3	1	1	2	2	1	2	2	2	2	1
GFCM20	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3
GFCM2.1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2
HADCM3	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2
INCM3	1	1	0	0	1	3	3	0	0	1
IPCM4	2	2	2	2	1	2	2	2	3	2
MIMR	1	1	3	3	2	1	2	3	3	2
MPEH5	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
MRCGCM	2	1	0	0	1	2	2	0	1	2
NCCCSM	1	0	0	1	0	2	1	1	1	0
RMSE	0.5					0.4				
測站	坪林	福山	秀巒	梅花	流域平均	坪林	福山	秀巒	梅花	流域平均
CSMK3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3
GFCM20	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
GFCM2.1	3	2	2	3	2	3	3	3	3	3
HADCM3	2	2	2	3	2	3	3	3	3	2
INCM3	3	3	0	1	3	3	3	1	2	3
IPCM4	3	2	3	3	2	3	3	3	3	3
MIMR	2	2	3	3	2	3	3	3	3	3
MPEH5	1	1	1	1	0	2	1	1	2	1
MRCGCM	3	3	1	1	2	3	3	1	2	3
NCCCSM	2	1	1	1	1	3	2	1	2	1

秀巒與梅花測站前 5 名模式是相同的，僅排名順序有些許之差異，而坪林及福山測站則有較相近之結果。而在相關性及 RMSE 分析中在梅花站表現較差之 MIMR 及 CSMK3 模式，在模式的挑選順序上皆為第 10 名，但是值得注意的是 MIMR 模式在坪林及福山之相關性分別僅有 0.1 及 0.03，顯示 MIMR 模式模擬雨量與坪林及福山站之實際雨量並無相關性，然而，最後卻因為其 RMSE 值較低，使得挑選名次卻分別為第 3 名及第 6 名，這說明了排名法雖然可以初步的篩選出適合的模式，但雨量趨勢模擬的準確與否對於後續的相關研究可能造成影響，因此仍須參考其他方法所挑選出來之模式進行綜合評比。而針對流域整體特性來看，MPEH5 與 NCCCSM 模式表現較佳，此結果與單站分析結果相似，顯示若單以排名法來看 MPEH5 與 NCCCSM 模式可同時適

用於 3 個流域區中。

以缺點扣分法篩選時，將依據設定之門檻值挑選適合之 GCMs，因此不同的門檻值設定對模式挑選結果將造成影響。表 2 為相關係數門檻值為 0.7，但考量不同 RMSE 門檻值 GCMs 模式之扣分結果，在表中若數值為 0 表示所有項目均高於門檻值，無扣分的情況，而數值為 1 則表示 3 個評比項目中有 1 項是不符合門檻標準，以下依此類推。比較 RMSE 之門檻為 0.7 及 0.4 時之情況可發現，當 RMSE 之門檻值為 0.4 時，不同的 GCMs 在所有測站皆有扣分的情況發生，而當 RMSE 之門檻為 0.7 時，則 4 個測站及流域平均情況皆有 1 至 2 個 GCMs 是沒有被扣分的，這顯示當 RMSE 的門檻值過高或過低時，將會導致所有的模式之 RMSE 都高於或低於門檻時，使得鑑別情況不佳，因此無法挑選出適合之模式，故本

表 3 不同相關係數且 RMSE 門檻值為 0.7 之 GCMs 挑選結果

R	0.7					0.6				
測站	坪林	福山	秀巒	梅花	流域平均	坪林	福山	秀巒	梅花	流域平均
CSMK3	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1
GFCM20	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
GFCM2.1	1	1	2	2	1	0	0	2	2	0
HADCM3	1	1	1	2	1	1	1	0	1	1
INCM3	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
IPCM4	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1
MIMR	1	1	3	3	2	1	1	3	3	2
MPEH5	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
MRCGCM	2	1	0	0	1	2	1	0	0	0
NCCCSM	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
R	0.5					0.4				
測站	坪林	福山	秀巒	梅花	流域平均	坪林	福山	秀巒	梅花	流域平均
CSMK3	1	1	2	2	1	0	0	2	2	0
GFCM20	2	1	2	2	2	2	1	2	2	1
GFCM2.1	0	0	1	2	0	0	0	1	1	0
HADCM3	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
INCM3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
IPCM4	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1
MIMR	1	1	3	3	2	1	1	3	3	2
MPEH5	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
MRCGCM	2	1	0	0	0	2	0	0	0	0
NCCCSM	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0

研究中，設定 RMSE 為 0.6 或 0.5 為較佳之門檻值。表 3 為考慮 RMSE 門檻值為 0.7 但不同相關係數門檻值之 GCMs 挑選結果，由於在坪林與福山兩站，GCMs 與測站之雨量相關係數介於 0.7-0.4 之間，因此，當相關係數為 0.7 及 0.4 時，會因為門檻值過高或過低較缺乏鑑別度，較無法挑出適當之模式，類似的情形在秀巒及梅花兩站及流域平均情況亦可發現，因此在本研究中相關係數為 0.6 或 0.5 為較佳之門檻值。

表 4 為依據上述分析，設定 RMSE 與相關係數門檻值分別為 0.5 及 0.6 之情況下 GCMs 模式挑選結果，由表中可以發現，以流域平均特性來看，能同時提供 3 個流域合理現況推估之環流模式排序前 3 名 MPEH5、NCCCSM、GFCM2.1、INCM3 及 MRCGCM 模式，此外，分別針對各雨量站進行分析時，則可發現坪林與福山的結果較

為相似，而秀巒與梅花的結果亦較相同。根據分析結果顯示，較適合使用在坪林及福山兩個雨量測站之 GCMs 分別為 NCCCSM、MPEH5 及 GFCM2.1；而在秀巒與梅花雨量站則可挑選 INCM3、MRCGCM、MPEH5 與 NCCCSM 等 4 個模式。

4.2.2 先進行 Bias Correction 後，再進行 GCMs 模式挑選

根據式(4)之結果可知，進行 Bias Correction 後，GCMs 之輸出歷史資料統計特性皆修正至與測站之歷史統計特性相同，亦即其各月份之月平均雨量皆已與歷史雨量相同，因此 GCMs 與測站之雨量相關性及 RMSE 是相同的，並無法依據本研究提出之方法進行挑選。由此可知，利用 Bias Correction 將會調整 GCMs 之模擬結果，因此並

表 4 缺點扣分法 GCMs 挑選結果

R	0.6									
RMSE	0.6					0.5				
測站	坪林	福山	秀巒	梅花	流域平均	坪林	福山	秀巒	梅花	流域平均
CSMK3	2	2	2	2	1	3	3	2	3	3
GFCM20	2	3	3	3	3	2	3	3	3	3
GFCM2.1	1	1	2	2	1	2	1	2	3	1
HADCM3	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2
INCM3	3	3	0	0	0	3	3	0	1	2
IPCM4	2	2	2	3	2	3	2	3	3	2
MIMR	1	2	3	3	2	2	2	3	3	2
MPEH5	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0
MRCGCM	2	2	0	1	1	3	3	1	1	1
NCCCSM	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
R	0.5									
RMSE	0.6					0.5				
測站	坪林	福山	秀巒	梅花	流域平均	坪林	福山	秀巒	梅花	流域平均
CSMK3	2	2	2	2	1	3	3	2	3	3
GFCM20	2	2	3	3	3	2	2	3	3	3
GFCM2.1	1	1	1	2	1	2	1	1	3	1
HADCM3	2	2	1	1	1	2	2	1	2	1
INCM3	3	3	0	0	0	3	3	0	1	2
IPCM4	2	2	2	3	2	3	2	3	3	2
MIMR	1	2	3	3	2	2	2	3	3	2
MPEH5	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0
MRCGCM	2	2	0	1	1	3	3	1	1	1
NCCCSM	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1

無法判斷在所有的 GCMs 中何者較適合研究區域，故在進行模式挑選之前並不適合進行 Bias Correction，Bias Correction 實施的時間點應該在完成模式挑選後，將挑選出來適合模式之統計特性調整至測站之統計特性為佳。

4.3 不同流域間雨量資料分析

經由上述結果發現，雖然使用同樣評估項目與挑選準則且雨量站也使用相同的 GCMs 網格資料，但大漢溪流域與頭前溪流域結果相當相近，而與新店溪流域結果則存在極大的差異，舉例來說，INCM3 模式於大漢溪與頭前溪流域均有不錯的適用性，但在新店溪流域卻表現不佳，而位於同一流域之福山站與坪林站所挑選之 GCMs 模式

亦有所不同。有鑒於此結果，本研究進一步將雨量站分為同一流域之坪林與福山站、不同流域但降雨特性相似之秀巒與梅花站以及不同流域且降雨特性差異較大之坪林與秀巒站等 3 個組合進行分析(圖 8)，由分析結果可發現，坪林站及福山站屬同一流域之兩個不同的集水區，但因不同 GCMs 在不同雨量測站之 RMSE 略有差異，且實際降雨趨勢及降雨量上仍有不同，因此雖然兩雨量分屬同一流域，但在模式挑選上仍有些許的不同，但在大部分的情況中，所挑選的 GCMs 模式仍是相同的。秀巒及梅花站雖然分屬於兩個不同的流域，但其在全年、豐水期及枯水期之相關性均大於 0.6，顯示此量站之歷史雨量特性相近，因此容易挑選到相同的模式。而比較坪林站與秀

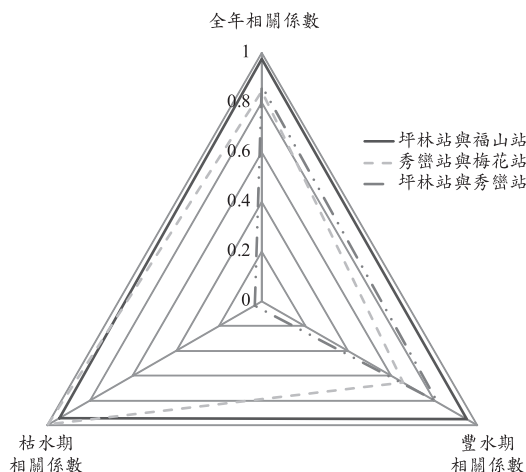


圖 8 不同測站雨量相關性

巒站之結果可知(圖 8),坪林站與秀巒站雖然在全年及豐水期降雨之相關性達到 0.8,但在枯水期兩個雨量站之相關性僅有 0.03,顯示此兩站在枯水期的相關性並不明顯,因此在挑選 GCMs 時會造成較大的差異。

由於 GCMs 將全球分為網格式,但環流模式模擬網格式度較大,雖然研究中所選用之 3 個流域其最接近的網格式皆為同一點,然而由於降雨量受地形之影響大,例如山脈走向特性、迎風面與背風面的差異等,相同流域區內的雨量站(坪林站及福山站)可能已經略有差異,不同流域的地形條件差異更大,因此亦可能選出不同環流模式。

五、結論與建議

GCMs 輸出資料為進行氣候變遷衝擊評估之重要依據,但 GCMs 提供之輸出資料為大範圍平均特性,因此在進行研究時,往往需要將大尺度之 GCMs 輸出資料結果透過降尺度的方式轉換為日時間尺度或流域尺度之資料。在水文相關研究中常以簡易降尺度做為空間降尺度分析的方式,但簡易降尺度是基於鄰近點可以代表研究區域氣候平均特性的假設進行分析,因此在進行簡易降尺度前,需先挑選適當之 GCMs 模式,確保 GCMs 模式之輸出資料與研究區域有相似的統計特性,以強化簡易降尺度之合理性,因此本研究

以環流模式所模擬之基期氣候資料能否反映研究區域歷史特性為考量,建立挑選環流模式的方法,研究中將不同 GCMs 於鄰近點推估雨量資料及歷史雨量資料,利用相關係數及 RMSE 值以排名法與缺點扣分法進行分析,討論 10 個 GCMs 在不同流域適用性。

根據研究結果顯示,以流域平均特性來看,能同時提供 3 個流域合理現況推估之環流模式排序前 3 名 MPEH5、NCCCSM、GFCM2.1、INCM3 及 MRCGCM 模式,而分別針對各雨量站進行討論時則顯示,能提供新店溪流域合理現況推估之環流模式排序前 3 名為 NCCCSM、MPEH5 及 GFCM2.1 模式;而能提供大漢溪與頭前溪流域合理現況推估之環流模式排序前 3 名則為 INCM3、MRCGCM、MPEH5 與 NCCCSM 模式。由於 3 個流域皆位於台灣北部,其所選取之 GCMs 網格式皆相同,然而模式挑選結果卻有所不同,因此研究中進一步分析 3 個流域之歷史雨量資料,推測因地形等因素使得降雨型態不同,而導致此結果。

綜合而言,排名法與缺點扣分法均能挑選出適合研究區域之大氣氣環流模式,但在研究結果卻也發現,若僅使用排名法評析 GCMs 的良劣,結果將有可能出現盲點,如 MIMR 模式在全年相關性表現不佳,卻因枯豐水期 RMSE 表現良好,進而成為具有反映研究區域特性之模擬能力的模式;而缺點扣分法之門檻值的設定為一重要關鍵,結果顯示,若門檻值設定過高或過低將可能因所有的相關係數或 RMSE 都高於或低於門檻值,使得鑑別力不佳導致無法挑選出適合之 GCMs,因此未來亦應透過分析其他流域結果,設立統一且具有鑑別力之門檻值。此外,未來進行環流模式之挑選時,可多面向納入評估項目考量模式之效能,例如風場、海平面壓力等,以平衡評估項目因排名名次所造成之差距,因此,若能與氣象領域學者合作,先以大尺度觀點進行模式評估,篩選出可評估在台灣地區附近之大尺度氣候特性的 GCMs,再利用本研究提出之方法進行模式篩選,則可挑選出既符合台灣地區氣候特性亦符合研究區域之歷史氣象統計特性之

GCMs，此外，由於 Bias Correction 後不同的 GCMs 輸出之歷史資料統計特性皆與與測站之歷史統計特性相同，故在進行模式挑選之前並不適合進行 Bias Correction，應在完成模式挑選後，再利用 Bias Correction 調整挑選出來之 GCMs 之統計特性為宜。

目前國家災害防救科技中心利用 Aphrodite (Asia Precipitation Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of the Water Resources) 觀測月平均降雨資料與 CRU (Climate Research Unit) 的月平均地表溫度，藉由先將歷史資料降尺度後，再與低解析度 GCMs 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(25 公里×25 公里)之月平均氣候值之模式結果(陳韻如等，2012)。雖然網格點之歷史氣象資料與 GCMs 之輸出資料已經過偏差量之校正，然而網格點之歷史氣象資料與測站之歷史氣象資料間是否亦具有相同之統計特性仍須加以考量，因此建議在未來研究中，可透過本研究提出之方法，篩選出適合之 GCMs，以獲得未來氣象資料的改變情境。

參考文獻

1. Chiew, F. H. S., J. Teng, J. Vaze, D.G.C. Kirono, "Influence of Global Climate Model Selection on Runoff Impact Assessment", *Journal of Hydrology*. Vol. 379, pp. 172-180, 2009.
2. Johnson, F. and A. Sharma., "Measurement of GCM Skill in Predicting Variables Relevant for Hydroclimatological Assessments", *Journal of Climate*. Vol. 22(16), pp. 4373-4382, 2009.
3. Koutsoyiannis, D., A. Efstratiadis, N. Mamassis, A. Christofides, "On the Credibility of Climate Predictions", *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 53(4), pp. 671-684, 2008.
4. Li, H., J. Sheffield, and E. F. Wood, "Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, D10101, doi: 10.1029/2009JD012882.2010.
5. Mahlman, J. D., "Uncertainties in Projections of Human-caused Climate Warming", *Science*, Vol. 278, pp. 1416-1417, 1997.
6. Murphy, J., "An Evaluation of Statistical and Dynamical Techniques for Downscaling Local Climate", *Journal of Climate*, Vol. 12(8), pp. 2256-2284, 1999.
7. Perkins, S. E., A. J. Pitman, N. J. Holbrook, J. McAneney, "Evaluation of the AR4 Climate Models' Simulated Daily Maximum Temperature, Minimum Temperature and Precipitation over Australia Using Probability Density Functions", *Journal of Climate*, Vol. 20(17), pp. 4356-4376, 2007.
8. Suppiah, R., K. J. Hennessy, P. H. Whetton, K. McInnes, I. Macadam, J. Bathols, J. Ricketts, C. M. Page, "Australian Climate Change Projections Derived From simulations Performed for the IPCC 4th Assessment Report", *Australian Meteorological Magazine*, Vol. 56, pp. 131-152, 2007.
9. Takara, K., S. Kim, Y. Tachikawa, and E. Nakakita, "Assessing Climate Change Impact on Water Resources in the Tone River Basin, Japan, Using Super-High-Resolution Atmospheric Model Output". *Journal of Disaster Research*, Vol. 4(1), pp. 12-23, 2009.
10. 卓盈旻及盧孟明，「IPCC 第四期評估報告氣候模式對亞洲夏季季風模擬之分析」，*大氣科學*，第三十七期第二號，pp.13-33，2009。
11. 徐嘉君及林淑華，「全球氣候變遷模式推估與情境模擬簡介」，*林業研究專訊*，第 15 卷第 2 期，pp.5-7，2008。
12. 陳正達、許晃雄、盧孟明、隨中興、周佳、翁叔平、陳昭銘、林傳堯、鄭兆尊、朱容練、吳宜昭、卓盈旻、陳重功、張雅茹、林士堯、林修立、童裕翔與楊承道，「未來氣候變遷

- 推估」，收錄於許晃雄、陳正達、盧孟明、陳永明、周佳、吳宜昭等，「2011：臺灣氣候變遷科學報告 2011」，行政院國家科學委員會，2011。
13. 陳韻如、朱容練、劉俊志、謝佳穎「TCCIP 統計降尺度資料應用手冊說明」，國家災害防救科技中心，2012。
14. 許晃雄，「人為的全球暖化與氣候變遷」，The 4th International Conference of Atmospheric Action Network East Asia，台北，1998。
15. 童慶斌，「氣候變遷與環境生態講義」，國立台灣大學生物環境系統工程學系，2007。
16. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力 (2/2)」，2008。
17. 劉正欽，「區域氣候場對雨量降尺度之影響」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文，2010。

收稿日期：民國 100 年 12 月 26 日

修正日期：民國 101 年 4 月 10 日

接受日期：民國 101 年 4 月 12 日