



氣候變遷資料偏差校正及 水文頻率分析之探討

蘇元風* / 國立臺灣海洋大學河海工程學系 助理教授

劉俊志 / 國家災害防救科技中心 博士

陳韻如 / 國家災害防救科技中心 博士

氣候變遷相關研究主要使用的動力降尺度資料與統計降尺度資料，都是基於數理與電腦工具模擬大氣與海洋的交互作用而產生降雨資料，然而這些大氣環流模式仍存在多種不確定性，例如：模式不確定性、資料不確定性、參數不確定性等等，因此氣候變遷資料是否能反映觀測資料的降雨特性，一直是水文學家在應用氣候變遷資料時非常想了解的問題。此時，氣候變遷資料的偏差校正（bias correction）便顯得相當重要，偏差校正的概念主要是透過統計方法，使氣候變遷資料與觀測資料具有相似的統計參數，例如：平均值、標準偏差、偏態係數等。過去已有許多研究使用經驗累積機率密度函數（Empirical Cumulative Density Function, ECDF）對應法，且得到不錯的成果。ECDF 對應法與水文頻率分析中的降雨量重現期的評估方式有其共通之處，本文將兩者一併探討其異同之處。

前言

近年來全球各地極端水文事件，例如：豪雨、乾旱等頻繁地發生，民眾普遍已認同氣候變遷正在發生當中，全球許多優秀的科學家，依循著聯合國政府間氣候變遷專業委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change，簡稱 IPCC）所定義的不同暖化情境，分析氣候變遷對於水文圈的影響。基於不同的全球暖化情境，各國科學家以大氣環流模式（General Circulation Model, GCM）分析在此氣候情境下，大氣與海洋交互作用的改變，其中降雨量即為主要的觀測量之一。然而，由於大氣環流模式仍存在多種不確定性，例如：物理與數學機制是否能完整描述大氣與海洋交互作用－模式不確定性、觀測資料本身的誤差－資料不確定性、模式中需要的參數誤差－參數不確定性。有鑑於此，可以想見 GCM 的產出勢必包含著一定程度的誤差。

為了使用氣候變遷資料於水文相關研究上，已有許多研究提出偏差校正（Bias Correction, BC）的方法，將前述的 GCM 誤差進行校正，使得 GCM 資料更接近地面觀測資料的特性^[1-4]。蘇等人^[5]與 Su *et al.*^[6] 使用經驗累積機率密度函數（Empirical Cumulative Density Function, ECDF）對應法，校正動力降尺度之颱風降雨量，且得到不錯的成果。當使用 ECDF 對應法時，事實上與水文上探討降雨量重現期的方式有其共通之處，本文將兩者一併探討其異同之處。

偏差校正－ECDF 對應法

以經驗累積機率密度函數（ECDF）對應法進行偏差校正時，其主要概念如下圖所示。圖 1 中可以看出氣象站觀測資料與統計降尺度之氣候變遷資料可以具有不同的樣本數，而兩者的 ECDF 也截然不同，而 ECDF 對應法的偏差校正做法，重點在於將氣候變遷資料（ X_p ）乘上一個比例（ratio, R ），使其接近觀測資料（ X_o ），而 R 的數值應隨著不同的 X_p 而異，換句話說，

* 通訊作者，yuanfongsu@mail.ntou.edu.tw

不同的 X_p 應找到其對應之 ECDF 值，再由 ECDF 值找到此 ECDF 所對應之觀測資料 X_o ，式 (1)。由圖 2 為偏差校正之示意圖，可發現經過 ECDF 對應法進行偏差校正後，兩組資料之 ECDF 將幾乎相同。

$$R = \frac{X_o}{X_p} \quad (1)$$

此方法已成功應用於動力降尺度資料，蘇等人 [5] 使用 ECDF 對應法校正日本氣象廳氣象研究所與國科會臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫 (TCCIP) 產製之 Weather Research and Forecasting modeling system - Meteorological Research Institute (WRF-MRI) 動力降尺度資料，更多詳細之動力降尺度資料產製過程與內容請見「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫 (1/3) 年度成果報告書」[7]。在 WRF-MRI 動力降尺度資料中，包含多場模擬之颱風降雨事件，資料之時間尺度為時雨量，而經由 WRF-MRI 產製的資料中，對照測站觀測資料發現有低估降雨量的情形，因此透過 ECDF 對應法，找出 WRF-MRI 之校正因子 (R)，由圖 3 可發現校正因子

皆大於 1，故可減少前述低估降雨量的問題。經過偏差校正之後的 WRF-MRI 資料則更接近測站觀測資料，由圖 4 可看出校正後的數據較接近 1:1 等值線。校正結果從空間上看，可發現校正後的結果明顯大於校正前，整體數值分布較接近觀測的結果，而在空間分布特徵上 (圖 5)，可以發現偏差校正僅針對降雨量的數值進行校正，空間分布特性仍維持著 WRF-MRI 原始產製資料之空間分布特徵，由此可見，ECDF 對應法能保持原始資料產製之空間特性，調整數值使其統計特性與觀測值之統計特性相似，若要進一步改善空間分布特性，應從 WRF-MRI 的模式或是參數調整為出發點進行之。

水文頻率分析與 ECDF 對應法

水文頻率分析 (Frequency analysis, FA) 為常見的分析方式，是採用測站的時雨量資料，換算為連續 24 小時累積雨量，計算各年之最大連續 24 小時累積雨量，若有 N 年的紀錄，即有 N 筆年最大值序列，透過統計方法找出理論機率分布 (Theoretical

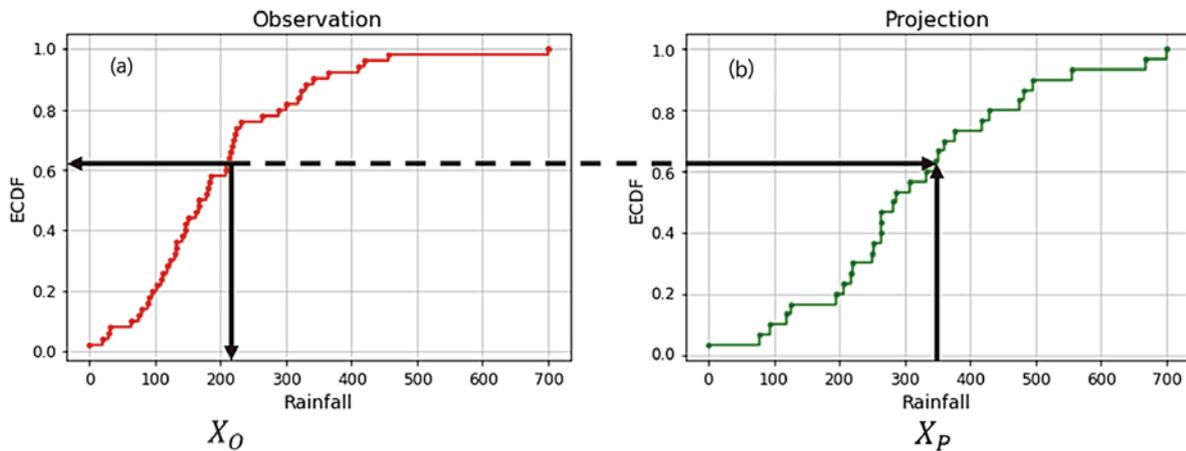


圖 1 ECDF 對應法於偏差校正之示意圖：(a) 氣象站觀測雨量；(b) 統計降尺度資料

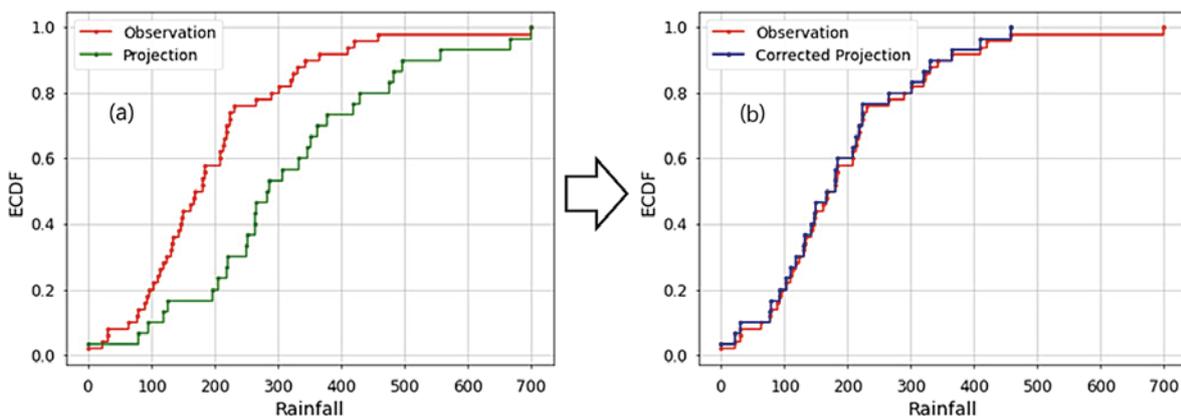


圖 2 偏差校正示意圖：(a) 校正前兩組資料之 ECDF；(b) 校正後之 ECDF 分布圖應接近一致

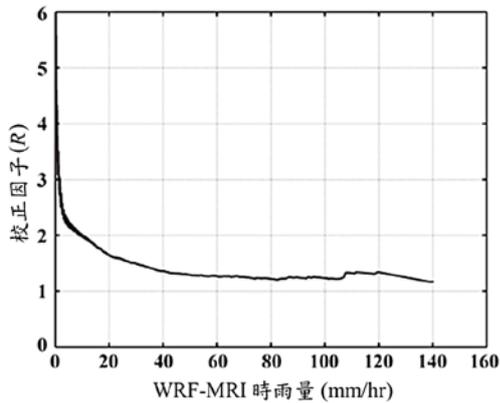


圖 3 WRF-MRI 之校正因子^[5]

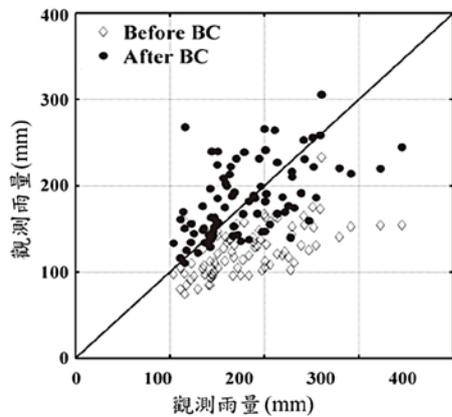


圖 4 颱風事件總雨量經偏差校正前後之比較^[5]

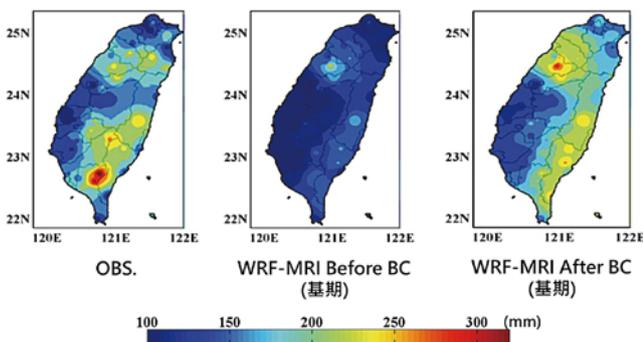


圖 5 觀測資料與偏差校正前後之總雨量分布圖^[5]

Distribution)。FA 與前述 ECDF 對應法都是以 ECDF 為分析的基礎，然而不同之處在於 FA 在 ECDF 上推估資料的理論機率分布，並以理論機率分布換算某水文量之超越機率 $P(x \geq x_T)$ 以及對應之重現期 (T)，如圖 6 及式 (2) 所示。

$$P(x \geq x_T) = \frac{1}{T} \quad (2)$$

當使用 TCCIP 的 AR6 統計降尺度氣候變遷資料於水文頻率分析時，同樣將需要面臨偏差校正的問題，然而使用 ECDF 對應法的概念，將可能同時完成偏差校正與頻率分析。舉例而言，若想分析氣候變遷下

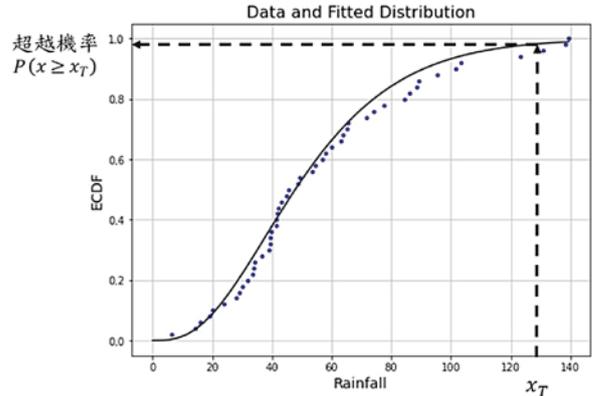


圖 6 水文頻率分析示意圖

之日降雨在基期、近未來與世紀末，其重現期是否有明顯的改變？欲回答此問題，根據前面偏差校正的概念，一般作法是先將氣候變遷下的日雨量資料進行偏差校正，使其具備觀測資料之統計特性，由觀測資料與氣候變遷基期的資料所得之校正因子，套用在近未來與世紀末的資料中，再各自進行水文頻率分析。然而，若是將問題的視角轉由超越機率的角度出發，則此問題將可表示如下圖。分析流程請見圖 7 中的橘色路徑，首先左上方傳統的水文頻率分析過程先設定某水文量 (x_T)，例如：最大連續 24 小時累積雨量大於 650 毫米，找到其超越機率，再由此超越機率向右對應至氣候變遷下基期的 CDF 上，向下方找到對應之氣候變遷基期的門檻值，此門檻值所對應的是 AR6 統計降尺度模式之年最大日雨量值，在 AR6 統計降尺度日降雨資料中，其出現之超越機率與測站最大連續 24 小時累積雨量大於 650 毫米之超越機率相同。此門檻值即可回答一個問題：在傳統以測站方式所得的水文頻率分析中，最大連續 24 小時累積雨量大於 650 毫米的重現期對應到 AR6 統計降尺度日降雨資料時應該是多少雨量值。

在氣候變遷的研究中，水文學家往往希望得知：相對於過去或是現在，未來的降雨會如何改變？欲回答此問題，可由前述之門檻值找到對應於氣候變遷未來時期的超越機率，即可比較氣候變遷情境下，對應於觀測資料超過某水文量 (x_T) 之未來時期的超越機率，相較於相同基準下的基期，超越機率的數值是否有顯著的改變，透過公式 (2) 即可換算為重現期的改變。

值得一提的是觀測資料若採用時雨量資料換算之最大連續 24 小時累積雨量，與統計降尺度之日降雨量資料找出年最大日雨量，在此視為相同基準的變數，

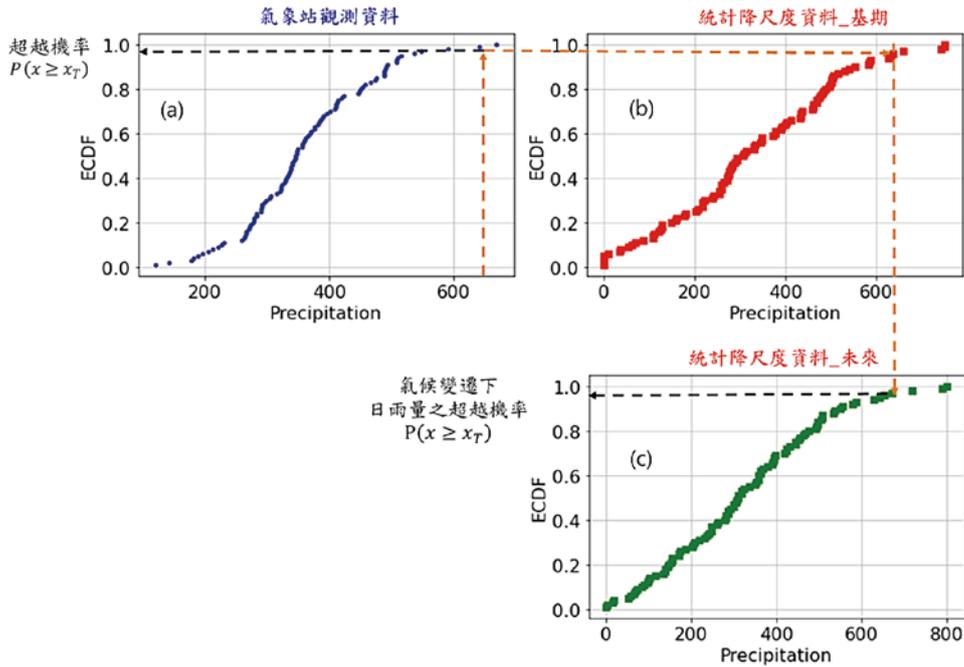


圖 7 氣候變遷下日雨量之超越機率評估示意圖

進行累積機率分布 (CDF) 的對應。目前此方法已應用於 AR5 的統計降尺度日雨量的頻率分析，詳細內容請參閱童裕翔等人 [8]。

以前述之分析流程，選用 1995 年至 2014 年共 289 個雨量站資料，建立測站最大連續 24 小時雨量與 AR6 統計降尺度歷史期間之日雨量資料年最大值序列。雨量站分布與 AR6 統計降尺度網格位置如圖 8 所示。將某網格位置上兩者的年最大值序列繪製 ECDF 圖 (圖 9)，可以發現由於 AR6 統計降尺度共有 31 個模式產出歷史期間之日雨量資料，可以發現這些 AR6 統計降尺度日雨量之年最大值，均小於測站之最大連續 24 小時雨量年最大值，此現象符合我們對於最大連續 24 小時雨量與日雨量之關係。一般而言，最大連續 24 小時雨量會發生在暴雨尖峰的中心時段，而此時段絕大多數的情形不會發生在單一日曆天當中，非常有可能是跨越 2 個日曆天，如圖 10 所示。

將前述偏差校正方法應用於分析 AR6 統計降尺度日雨量資料，評估未來的四種氣候變遷情境下，超越機率的改變情形。AR6 的四種情境分別是 SSP126、SSP245、SSP370 與 SSP585，四種情境分別考量不同的碳排放情境與社會經濟發展情況，依序分為樂觀至悲觀的情境，以 SSP126 為最樂觀，反之 SSP585 為最悲觀，也就是碳排放量不減反增的情況，詳細之情境描述請見臺灣氣候變遷關鍵指標圖集-AR6 統計降尺度版 [9]。其

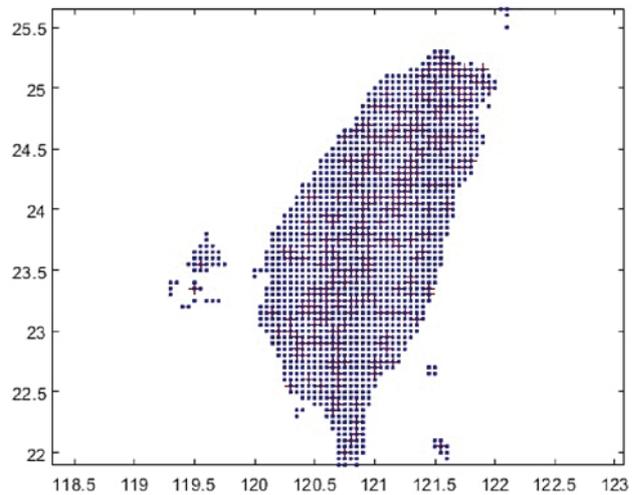


圖 8 測站所在網格 (紅色十字) 與 AR6 統計降尺度資料網格 (藍點) 之空間分布

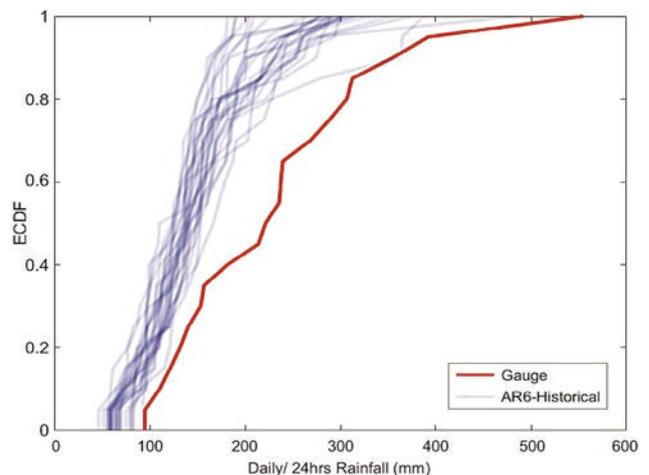


圖 9 測站與 AR6 統計降尺度歷史期間年最大值 ECDF 圖



圖 10 最大連續 24 小時雨量與日雨量關係示意圖

分析結果以 ACCESS-CM2 模式為例 (圖 11)，可以看出近未來 (2021 年 ~ 2040 年) 之超越機率在四種情境下差異不大，但可以明顯看出若比較近未來與世紀末，SSP585 情境下的超越機率由近未來時期普遍小於 0.1，到了世紀末，則明顯增加至 0.3 ~ 0.5 之間，特別是在山區。換句話說，在近未來時期約每 10 年發生一次的事件，在世紀末約 2 ~ 3 年便會發生一次，由此可見其危害度增加的幅度相當顯著。

結論

本文由 ECDF 對應法進行氣候變遷資料的偏差校正談起，並探討 ECDF 對應法與水文頻率分析之異同之處。ECDF 對應法與水文頻率分析都是基於 ECDF 開始的分析，然而水文頻率分析在評估超越機率與重現期時，是基於理論機率分布計算之，與 ECDF 對應採用樣本計算有所不同。當使用氣候變遷資料於水文頻率分析時，可由超越機率的角出發，找出對應於觀測資料超過某水雨量 (x_T) 之超越機率，由此超越機率以 ECDF 對應法的概念，找出氣候變遷下基期的日雨量門檻值，再換算氣候變遷近未來的超越機率，即可比較氣候變遷情境下，對應於觀測資料超過某水雨量 (x_T) 之未來時期的超越機率，相較於相同基準下的基期，超越機率的數值是否有顯著的改變。由結果顯示，以 ACCESS-CM2 模式為例，比較近未來與世紀末，SSP585 情境下的超越機率由近未來時期普遍小於 0.1，到了世紀末，則明顯增加至 0.3 ~ 0.5 之間，特別是在山區。換句話說，在近未來時期約每 10 年發生一次的事件，在世紀末約 2 ~ 3 年便會發生一次，由此可見其危害度增加的幅度相當顯著。使用頻率分析以及重現期的概念，提供的未來變化情況描述，可更直接讓一般民眾體會到未來改變率的感受，如同面對乾旱事件，民眾可明顯感受到過去平均每十年發生一次的乾旱，在最近十年中卻幾乎年年有在抗旱。

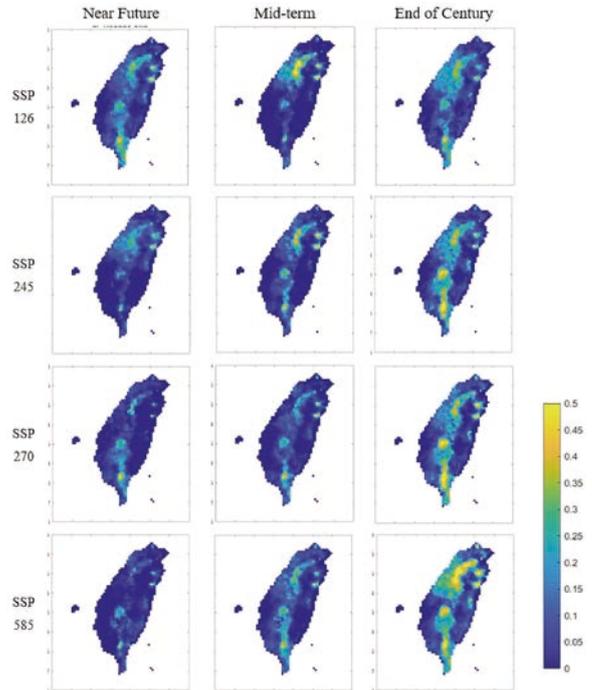


圖 11 氣候變遷下不同情境於不同時期之超越機率圖，以 ACCESS-CM2 模式為例

參考文獻

- Piani, C., Haerter, J.O., and Coppola, E. (2010a). "Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe." *Theor. Appl. Climatol.*, **99**, 187-192.
- Piani, C., Weedon, G.P., Best, M., Gomes, S.M., Viterbo, P., Hagemann, S., and Haerter, J.O., (2010b). "Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models." *Journal of Hydrology*, **395**, 199-215.
- Haerter, J.O., Hagemann, S., Moseley, C., and Piani, C., (2011). "Climate model bias correction and the role of timescales." *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **15**, 1065-1079.
- Teutschbein, C. and Seibert, J., (2012). "Bias correction of region climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods." *Journal of Hydrology*, Vol. 456-457, pp. 12-29.
- 蘇元風、劉俊志、鄭兆尊、鬼頭昭雄 (2014)，以動力降尺度資料評估氣候變遷下颱風降雨事件特性變異，農業工程學報，第 60 卷第 4 期。
- Yuan-Fong Su, Chao-Tzuen Cheng, Jun-Jih Liou, Yung-Ming Chen, and Akio Kitoh (2016). Bias correction of MRI-WRF dynamic downscaling datasets, *TIAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **27**(5), 649-657.
- 國科會 (2010)，「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫 (1/3) 年度成果報告書」。
- 童裕翔、劉俊志、鄭兆尊、陳正達、連琮勛 (2020)，氣候變遷之日雨量以及時雨量頻率分析，國家災害防救科技中心技術報告。
- 國科會 (2023)，「臺灣氣候變遷關鍵指標圖集 -AR6 統計降尺度版」。