

不同代表濃度途徑情境對水稻作物灌溉用水量 之影響評估

Evaluating the Effects of RCPs on the Irrigation Water Requirements of Paddy Rice

財團法人
農業工程研究中心
副研究員

姜世偉

Shih-Wei Chiang

摘 要

本研究基於政府間氣候變遷專門委員會(IPCC)第五次評估報告(AR5)中四組「代表濃度途徑」之未來變遷情境，利用由臺灣氣候變遷推估與資訊平台計畫(TCCIP)進行大氣環流模式(GCMs)統計降尺度所推估未來 2020 至 2100 年之月溫度、雨量資料，並以臺灣南部嘉南地區為研究案例，探討在不同氣候變遷情境下對水稻作物灌溉用水量之影響。研究中，將各情境模式所預測之降雨量以及溫度改變因素納入考量，再利用 CROPWAT 模式進行灌溉用水量之計算。計算結果顯示，在溫室氣體高度排放的情境下，用水量差異增加的趨勢較為明顯，且隨推估時段而上升。針對 RCP8.5 情境在 2081-2100 推估時段，由 41 個 GCMs 所計算之平均用水量，一期作與二期作分別增加 10.69%與 6.68%。由符合臺灣降雨特性的 5 個 GCMs 計算所得之用水量，一期作增加 11.40%-16.84%；二期作增加 2.36%-12.48%。

關鍵詞：氣候變遷，代表濃度途徑，CROPWAT，灌溉用水量。

ABSTRACT

This study applied the four Representative Concentration Pathways (RCPs) adopted by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in the fifth Assessment Report (AR5) to explore the impact of different climate change scenarios on the water irrigation requirements of paddy rice. For this, parameters related to climate were provided by the Taiwan Climate Change Projection and Information Platform (TCCIP). These included statistically downscaled estimates of precipitation and temperature generated by General

*通訊作者，財團法人農業工程研究中心工程組副研究員，32068 桃園市中壢區中園路 196-1 號，swchiang@aerc.org.tw

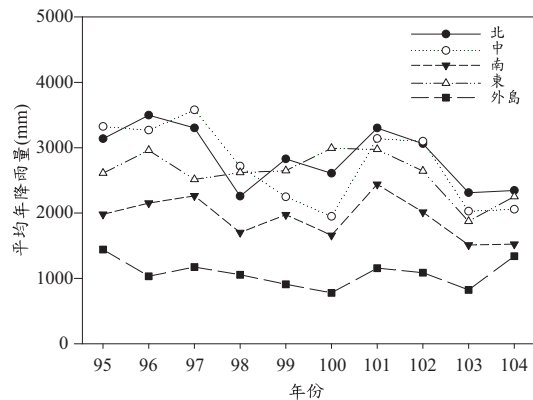
Circulation Models (GCMs) for the years between 2020 and 2100. The Chia-Nan area in southern Taiwan was selected as the study site, and changes in water requirements were predicted using CROPWAT modeling software, inputting GCM-based precipitation and temperature data as covariate predictors. Results of the study case indicate that the water requirements of paddy rice are likely to increase with time period and greenhouse gas emission under climate change. Specifically, under scenario RCP8.5 (2081-2100), the results showed that the average water requirements from the 41 GCMs data are likely to increase by 10.69% and 6.68% for the first and the second paddy crop, respectively. The water requirements from the top 5 GCMs data suggested for Taiwan are likely to increase from 11.40% to 16.84% for the first paddy crop and from 2.36% to 12.48% for the second paddy crop.

Keywords: Climate change, RCP, CROPWAT, Irrigation water requirements.

一、前言

臺灣位於亞熱帶地區，各地的年雨量相當豐沛，依據中央氣象局資料統計，臺灣地區近 10 年(2006~2015)平均雨量約 2,390 mm，但近年來全球氣候異常，旱澇極端情形發生的頻率逐漸增加，以 28 個氣象觀測站為基礎之歷年各區平均雨量折線圖(圖 1)可知，103 年平均降雨量(1,824mm)是近 10 年來最少的一年，僅為平均值的 76%。而臺灣地區也受地形與季風的影響，降雨空間與時間分布極為不均，顯見未來發生乾旱災害的頻率周期極可能逐漸縮短，勢必對水資源利用造成影響。政府間氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)於 2007 年公布氣候變遷第四次評估報告(the Fourth Assessment Report, AR4)，報告中指出全球平均溫度上升，非常可能是人為溫室氣體濃度增加所致，若以當前或更高的速率持續排放溫室氣體，可能導致進一步暖化，並可能引發全球氣候系統的變異，對環境所造成的衝擊亦直接或間接地影響人類生活。

氣候變遷已成為國際間極為關注的議題，其對各領域之衝擊評估及調適策略亦已成為各國政府刻不容緩不得不面對的問題。而農業生產受光照、水、溫度、土壤等自然環境條件的影響甚



資料來源：中央氣象局。

註：北、中、南、東、外島分區參照中央氣象局氣象預報分區。

圖 1 臺灣地區歷年各區平均雨量折線圖。

鉅，因氣候變遷帶來的溫度上升、降雨極端等氣候變異，可能造成農作物產量降低、品質變差、病蟲害增加等負面影響，進而增加生產成本並降低供應穩定性。除對作物生長造成影響外，未來水文條件的變異對作物需水量或灌溉用水量之影響亦為一值得探究之課題，近年來國內已有頗多的研究成果，如陳毓雯(2009)以台南地區為研究案例，當二氧化碳含量增加一倍至二倍的氣候情境下，推估一期作與二期作水稻將分別增加 3.00%-4.60%及 5.91%-10.96%的灌溉需水量。陳明石(2011)則分析彰化灌區農業灌溉用水受到氣候變遷之影響下，部分結果顯示一期作之二月

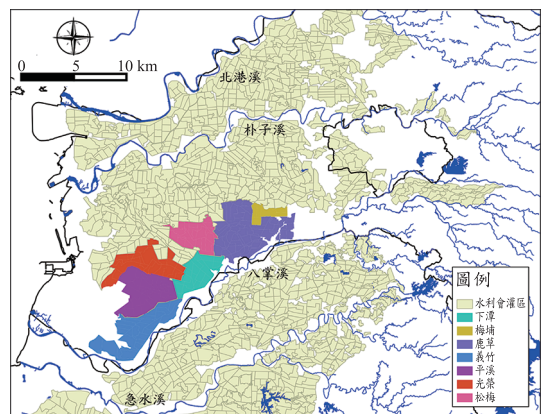
份、三月份及五月份，作物需水量呈現增加的趨勢。陳亭羽(2012)探討氣候變遷下桃園地區稻米一期作灌溉需水量之變化，模擬結果顯示在大部分的情境下，溫度上升導致生長天數減少，抵銷蒸發散增強以及降雨量減少的效應，造成未來的灌溉需水量改變量不大。楊瑄鴻(2013)以石門農田水利會灌區為研究區域，分析結果顯示未來一、二期稻作平均灌溉用水量有略微減少之趨勢，分別減少 77 mm 與 207 mm。毛承善(2013)以新竹農田水利會灌區為研究區域，在 A1B 情境下，分析結果顯示未來一期灌溉用水將增加 5.9%，而二期將減少 4.2%。趙碧蓮(2014)探討短中長期氣候變遷於 A1B 情境下水稻作物需水量之變化，研究結果顯示一期作水稻作物需水量增加幅度以花蓮地區最為顯著，其增加比率為 13.21%；二期作水稻作物需水量增加幅度以台北地區最為顯著，其增加比率為 10.75%。陳宏偉(2015)以台中區域水稻田地區為研究範圍，分析結果顯示大肚、清水、梧棲等海線地區是降雨量較少而需水較高地區。姜世偉等(2015)以臺灣北部桃園地區為研究案例，於 A1B 近未來(2020-2039)與遠未來(2080-2099)情境下，探討水稻作物需水量變化情形，結果顯示近未來一期作水量變化-11.5%-1.4%、二期作水量變化 7.3%-16.3%；遠未來一期作水量變化 2.0%-19.7%、二期作水量變化-1.5%-19.3%。馬家齊與吳瑞賢(2015)引用近未來(2020-2039)溫度及雨量變化率數據，模擬桃園及石門農田水利會一期作田間用水量與水門用水量，結果顯示田間用水量上升 1.8%，有效雨量減少 6.4%，加計田間損失後之水門用水量增加 9.8%。

前述相關研究均以 IPCC AR4 氣候變遷情境為基礎，而 IPCC 自 2013 年 9 月陸續公布氣候變遷第五次評估報告(the Fifth Assessment Report, AR5)，並在 2014 年 11 月公布綜合評估報告(Synthesis Report)，該報告為 AR5 過程中最後一份報告，其綜合了 AR5 三個工作小組報告之關鍵結論。相較於 AR4，AR5 所採用的觀測資料較多，氣候模式考慮因素更為完整，且所提出的四種情境所能涵蓋層面更廣。因此，本研究針對未

來氣候變遷情境，採用 AR5 的氣象條件變化量，並配合作物特性與耕作期程，以臺灣南部嘉南地區為案例進行稻作灌溉用水量之計算，透過與現況用水量比較，評估對於農業用水可能造成的衝擊。

二、研究區域概述

本研究選定臺灣南部的嘉南地區為研究对象，依照臺灣嘉南農田水利會官方網站(<http://www.chianan.gov.tw/>)資料所載，水利會灌溉區域位於臺灣西南部嘉南平原，東起中央山脈，西臨臺灣海峽，東西寬約 71 公里，北從北港溪，南至二仁溪，南北長約 86 公里，地勢平坦，跨嘉義、台南三縣市，屬亞熱帶性氣候，年平均溫度 21-24°C，年平均降雨量約 1,600 mm，百分之八十降雨於五月至九月間。水利會轄區主要包括曾文-烏山頭水庫灌區(併用區、三年輪灌區、新灌區)及一般區(白河水庫灌區、道將圳系統灌區)，各灌區之耕作方式依地質與水源分為雙期作田、單期作田、三年二作田、蔗作田、輪作田等。其中以曾文-烏山頭水庫灌區灌溉面積最大，民國 103 年度為 63,333 公頃，其灌溉水源全部由曾文-烏山頭水庫供應。本研究以曾文-烏山頭水庫灌區面積最大的八掌溪支線(圖 2)為計算案例，一期作灌溉灌溉面積約 2,765 公頃；二期作灌溉灌溉面積約 4,336 公頃。



資料來源：嘉南農田水利會

圖 2 八掌溪支線各工作站灌區範圍分布圖。

三、分析方法

3.1 CROPWAT 模式概述

有關灌溉用水量之演算，本研究採用聯合國糧農組織(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)所發展之 CROPWAT 模式(FAO, 1992)，近年來該模式在國內亦已被廣泛地應用(經濟部水利署南區水資源局，2014；經濟部水利署水利規劃試驗所，2014；溫家伶，2015；姜世偉等，2015；馬家齊與吳瑞賢，2015)，茲將該模式理論概述如下。作物生長期間所需求的水量是為了要滿足作物蒸發散量，而影響蒸發的環境因子很多，其中太陽輻射是主要的能量來源，土壤、氣候、作物種類和生長階段皆會影響蒸發的速率。作物蒸發散量為作物葉面蒸散、地面及水面蒸發之總和，可由下式求得：

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中， ET_c ：作物蒸發散量(mm/day)； K_c ：作物係數，由作物耕作型態、種植時間、作物生長階段及生長週期決定； ET_0 ：參考作物蒸發散量(mm/day)。

式(1)中，利用 Penman-Monteith 法估算參考作物蒸發散量，如下式：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

式中， ET_0 ：參考作物蒸發散量(mm/day)； R_n ：淨輻射量(MJ/m² day)； G ：土壤熱通量(MJ/m² day)； T ：溫度(°C)； u_2 ：2 公尺高所量測之風速(m/s)； e_s ：飽和蒸氣壓力(KPa)； e_a ：實際蒸氣壓力(KPa)； Δ ：飽和蒸氣壓力與溫度關係曲線斜率(KPa/°C)； γ ：乾濕度常數(KPa/°C)。前述各項參數可由當地的地理位置、高程、氣象、季節等資料計算而得(Allen *et al.*, 1998)。

降雨可供作物吸收利用而可減少灌溉用水量者稱為有效雨量，本研究採用之估算方法如下式(Dastane, 1978)：

$$P_{eff} = P_{tot} \times \frac{125 - 0.2P_{tot}}{125} \quad \text{for } P_{tot} \leq 250mm \quad \dots(3)$$

$$P_{eff} = 125 + 0.1 \times P_{tot} \quad \text{for } P_{tot} > 250mm$$

式中， P_{tot} ：月平均降雨量(mm)； P_{eff} ：月平均有效雨量(mm)。

田間滲漏量係因水田灌溉過程中持續澆水的特性，透過田區表層土壤入滲後產生垂向及橫向滲流，其值取決於田間土壤的特性，一般可根據粘土、粘壤土、壤土、砂壤土等不同的土壤質地，決定其相對應之滲漏率。

綜合上述各項因子，田間水收支平衡則可以式(4)計算。

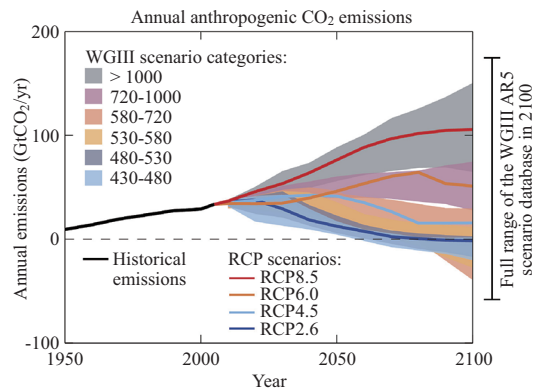
$$\text{土壤水分變化} = \text{田間用水量} - \text{作物蒸發散量} \dots\dots(4)$$

$$+ \text{有效雨量} - \text{田間滲漏量}$$

其中，作物蒸發散量加計田間滲漏量稱為田間需水量，若欲維持田間土壤水分而需要額外供灌的水量則為田間用水量，其為田間需水量減有效雨量。

3.2 氣候變遷情境

依據「氣候變遷 2013 物理科學基礎(給決策者摘要)」所載，IPCC AR5 是以「代表濃度途徑」(途徑所指的是濃度的變化歷程)來重新定義四組未來變遷的情境，並以輻射強迫(Radiative Forcing)作用在 2100 年與 1750 年之間的差異量當作指標性的數值來區分之，如圖 3 所示。被命名為 RCP2.6 的情境意味著每平方公尺的輻射強迫作用在 2100 年增加了 2.6 瓦，而 RCP4.5、RCP6.0 與 RCP8.5 則代表每平方公尺的輻射強迫作用分別增加了 4.5、6.0 與 8.5 瓦。在這四種



資料來源：IPCC, 2014。

圖 3 RCP 不同情境二氧化碳排年排放量分布圖。

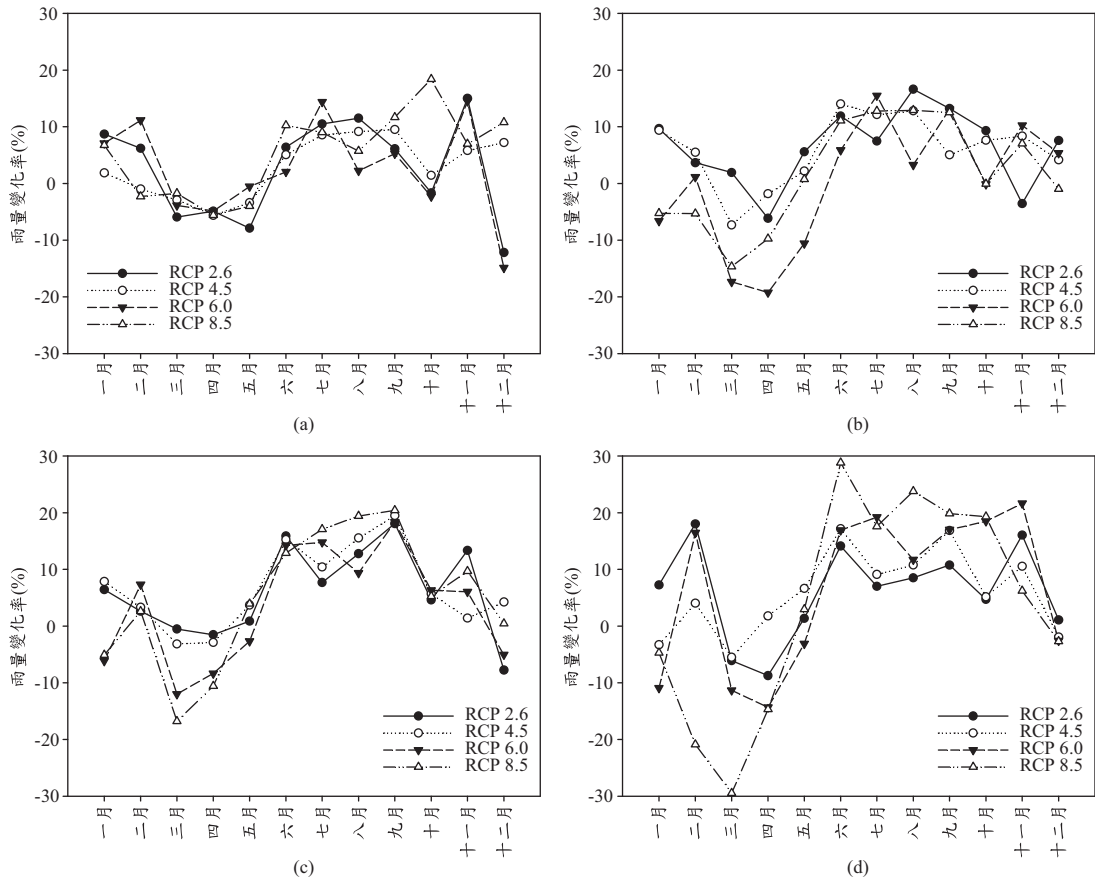


圖 4 不同推估時間之平均雨量變化率分布圖 (a)2021-2040；(b)2041-2060；(c)2061-2080；(d)2081-2100。

情境中，RCP2.6 是個暖化減緩的情境(輻射強迫作用在 2100 年呈減少趨勢)；RCP4.5 與 RCP6.0 是屬於穩定的情境(輻射強迫作用的變化在 2100 年呈較為穩定狀態)；RCP8.5 則是個溫室氣體高度排放的情境(輻射強迫作用在 2100 年呈持續增加趨勢)。

欲評估氣候變遷之衝擊，必須建立未來氣候可能之情境以及相對應之氣象條件變化，一般藉由全球大氣環流模式(General Circulation Models, GCMs)來進一步探討氣象條件改變後之影響，其係考量溫室氣體增加導致全球暖化特性下之大氣交互作用的數學模型。本研究有關氣候變遷未來預測之氣象資料，採用 IPCC AR5 並由臺灣氣候變遷推估與資訊平台計畫(Taiwan Climate Change Projection and Information Platform,

TCCIP)使用統計降尺度方式所產製未來 100 年的溫度與雨量資料之相關成果，所選用 GCMs 係源自世界 22 個研究中心，不同溫室氣體排放程度情境的 GCMs 個數分別為：RCP2.6 有 26 個、RCP4.5 有 38 個、RCP6.0 有 21 個、RCP8.5 有 41 個，溫度改變量與降雨變化率之基期為 1986-2005 共 20 年，未來推估時段為 2006-2100 共 95 年。茲將 4 段推估時段(2021-2040、2041-2060、2061-2180、2081-2100)，由各情境的 GCMs 在各月份的平均雨量以及溫度變化情況分別繪製於圖 4 以及圖 5。由圖 4 以及圖 5 大致可瞭解未來情境下，降雨豐枯時期將更為顯著，而溫度變化與季節關連性不大，二者皆隨推估時段以及溫室氣體排放程度，而有較大幅度的變化。

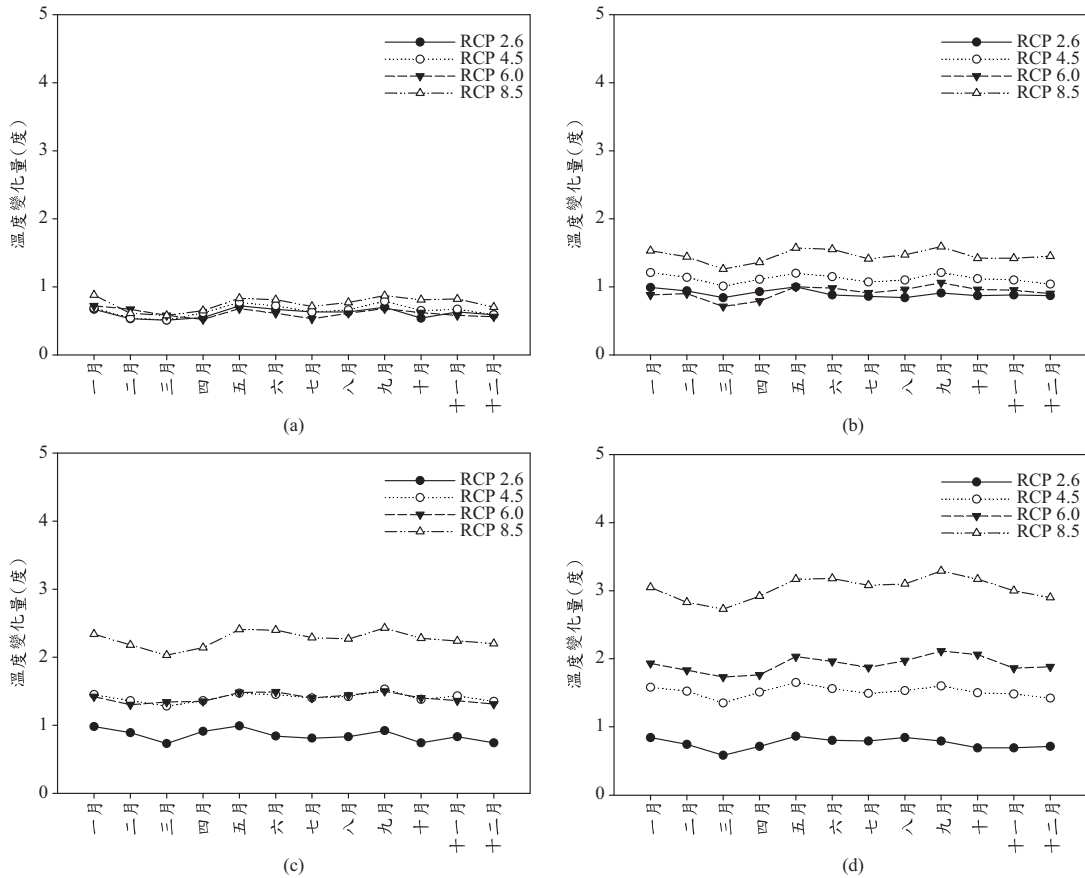


圖 5 不同推估時間之平均溫度改變量分布圖 (a)2021-2040；(b)2041-2060；(c)2061-2080；(d)2081-2100。

四、參數設定

CROPWAT 模式必須建立之相關參數，主要包括地理、氣象、作物、土壤、灌溉時期等 5 項資料類別，本研究所採之相關參數設定說明如下：

1. 地理：本研究係採用與研究案例鄰近之中央氣象局台南站的氣象資料，該站站號 467410，海拔高度 40.8 m，經度 120.2048，緯度 22.9932。
2. 氣象：包含月平均之最高溫度、最低溫度、相對溼度、風速、日照時數、降雨量等，本文以中央氣象局台南站統計觀測資料(表 1)為參數建立之基礎，表 1 各項參數為氣候變遷情境基期(1986-2005)共 20 年之平均值。其中，溫度以及降雨量則分別考慮各氣候變

表 1 中央氣象局台南站氣象資料彙整表 (1986-2005 平均)

| 月份 | 最低溫 (°C) | 最高溫 (°C) | 濕度 (%) | 風速 (km/day) | 日照時數 (hr) | 降雨量 (mm) |
|-----|----------|----------|--------|-------------|-----------|----------|
| 1月 | 9.1 | 28.1 | 77 | 335 | 5.8 | 17.9 |
| 2月 | 9.7 | 29.3 | 78 | 318 | 5.7 | 33.4 |
| 3月 | 11.4 | 31.3 | 77 | 295 | 5.8 | 37.8 |
| 4月 | 15.5 | 32.9 | 78 | 258 | 5.7 | 86.5 |
| 5月 | 19.7 | 34.0 | 77 | 245 | 6.0 | 154.3 |
| 6月 | 21.9 | 34.9 | 79 | 273 | 6.2 | 368.5 |
| 7月 | 23.0 | 35.2 | 78 | 275 | 6.6 | 370.8 |
| 8月 | 22.7 | 34.6 | 80 | 269 | 6.2 | 380.3 |
| 9月 | 21.7 | 34.3 | 78 | 258 | 5.9 | 174.6 |
| 10月 | 18.8 | 32.9 | 76 | 257 | 6.2 | 37.3 |
| 11月 | 14.7 | 31.1 | 76 | 276 | 5.7 | 13.8 |
| 12月 | 10.9 | 28.6 | 76 | 309 | 5.4 | 21.4 |

註：1998/05 至 2001/12 年台南站停止觀測，資料改採鄰近的永康站。

資料來源：中央氣象局。

遷情境在每個月份的變異量，TCCIP 係提供全台 5 公里解析度網格化資料，未來情境 GCMs 的推估資料，溫度為改變量(單位 °C)；雨量為改變率(單位%)。本研究遂擷取台南站鄰近網格資料作為輸入資料，用以設定研究案例地區在未來情境下的氣象資料。

3. 作物：主要有作物生長日數以及作物係數，其中作物生長日數依據水利會灌溉計畫中之灌溉日數進行設定。作物係數表示實際蒸發散量和可能蒸發散量的比值，代表各種作物生長期間之耗水特性指標，參數之設定參考臺灣水稻作物係數相關研究(甘俊二，1979)，如表 2 所示。
4. 土壤：土壤資料主要為設定田間滲漏量，依據水利會灌溉計畫中所載，研究案例之土壤質地屬壤土，依照表 3 進行設定田間滲漏量為 3.5 mm/day。

表 2 水稻作物係數表

| 生育天數 | 1-15 | 16-30 | 31-45 | 46-60 | 61-75 | 76-90 | 91-105 | 106-120 |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|
| 生育期 | 插秧期 | 分蘗初期 | 分蘗末期 | 開花初期 | 開花末期 | 成熟初期 | 成熟中期 | 成熟末期 |
| 一期作 | 0.5 | 0.8 | 1.2 | 1.3 | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 0.7 |
| 二期作 | 0.9 | 1.2 | 1.5 | 1.6 | 1.5 | 1.3 | 1.1 | 0.6 |

資料來源：甘俊二，1979。

表 3 考慮牛踏層之平均入滲量彙整表

| 土壤種類 | 考慮牛踏層之平均入滲量(mm/day) |
|-------|---------------------|
| 礫石 | 4.4 |
| 砂土 | 4.1 |
| 細砂土 | 3.9 |
| 壤質細砂 | 3.8 |
| 砂質壤土 | 3.7 |
| 坩質壤土 | 3.6 |
| 壤土 | 3.5 |
| 砂質粘壤土 | 3.7 |
| 坩質粘壤土 | 3.4 |
| 坩質粘土 | 3.4 |
| 粘土 | 3.2 |

資料來源：陳世楷等，1998。

5. 灌溉時期：本研究以曾文-烏山頭水庫灌區面積最大的八掌溪支線為計算案例，依據水利會灌溉計畫所載：一期作整田 1 月 21 日至 2 月 4 日，本田 1 月 22 日至 5 月 20 日，整田水深為 140 mm；二期作整田 6 月 16 日至 7 月 5 日，本田 6 月 17 日至 10 月 5 日，整田水深為 135 mm。

五、結果與討論

5.1 模式參數驗證

依據前述分析方法分別計算 103 年一期作與二期作各旬別之田間用水量，與水利會灌溉計畫用水量進行比對分別如圖 6 與圖 7 所示。由圖中可見，本研究所推估之各旬用水量與計畫用水量

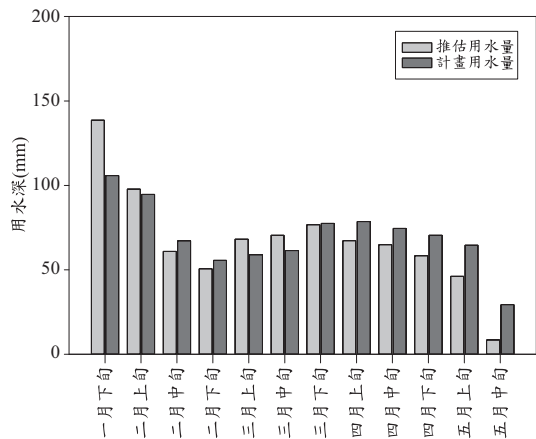


圖 6 一期作各旬別用水量比較圖。

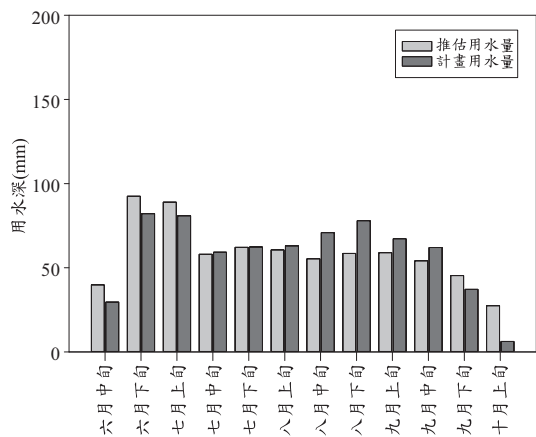


圖 7 二期作各旬別用水量比較圖。

差異不大，以總用水量而言，一期作與二期作所推估用水量分別為 808 mm 與 702 mm，而計畫用水量則為 838 mm 與 698 mm，相對誤差分別為 4.5%與 0.6%。整體而言，所採用之模式係考量作物生長所需之生理特性，其參數能反映用水量趨勢，足可做為後續分析之工具。

5.2 一期作整體用水量分析

茲將現況(基期 1986-2005)以及 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 及 RCP8.5 不同未來情境之氣象條件為基礎進行用水量之模擬，並以用水量差異進行分析與比較，其定義如下：

$$\text{用水量差異 (\%)} = \frac{\text{未來情境用水量} - \text{現況用水量}}{\text{現況用水量}} \times 100\% \quad \dots\dots (5)$$

表 4 一期作用水量差異彙整表

| 情境 | 推估時段 | 最小值(%) | 最大值(%) | 平均值(%) |
|--------|-----------|--------|--------|--------|
| RCP2.6 | 2021-2040 | -5.95 | 11.40 | 2.28 |
| | 2041-2060 | -9.87 | 9.10 | 2.54 |
| | 2061-2080 | -5.72 | 11.69 | 2.29 |
| | 2081-2100 | -8.25 | 11.48 | 2.27 |
| RCP4.5 | 2021-2040 | -6.36 | 10.52 | 2.45 |
| | 2041-2060 | -3.79 | 9.59 | 3.04 |
| | 2061-2080 | -8.44 | 11.85 | 3.63 |
| | 2081-2100 | -7.83 | 13.49 | 3.49 |
| RCP6.0 | 2021-2040 | -6.20 | 8.56 | 1.97 |
| | 2041-2060 | -9.77 | 11.28 | 5.22 |
| | 2061-2080 | -6.33 | 12.61 | 4.63 |
| | 2081-2100 | -3.96 | 15.51 | 5.95 |
| RCP8.5 | 2021-2040 | -6.73 | 9.34 | 2.66 |
| | 2041-2060 | -3.68 | 16.62 | 5.43 |
| | 2061-2080 | -7.67 | 19.80 | 7.09 |
| | 2081-2100 | -4.09 | 20.34 | 10.69 |

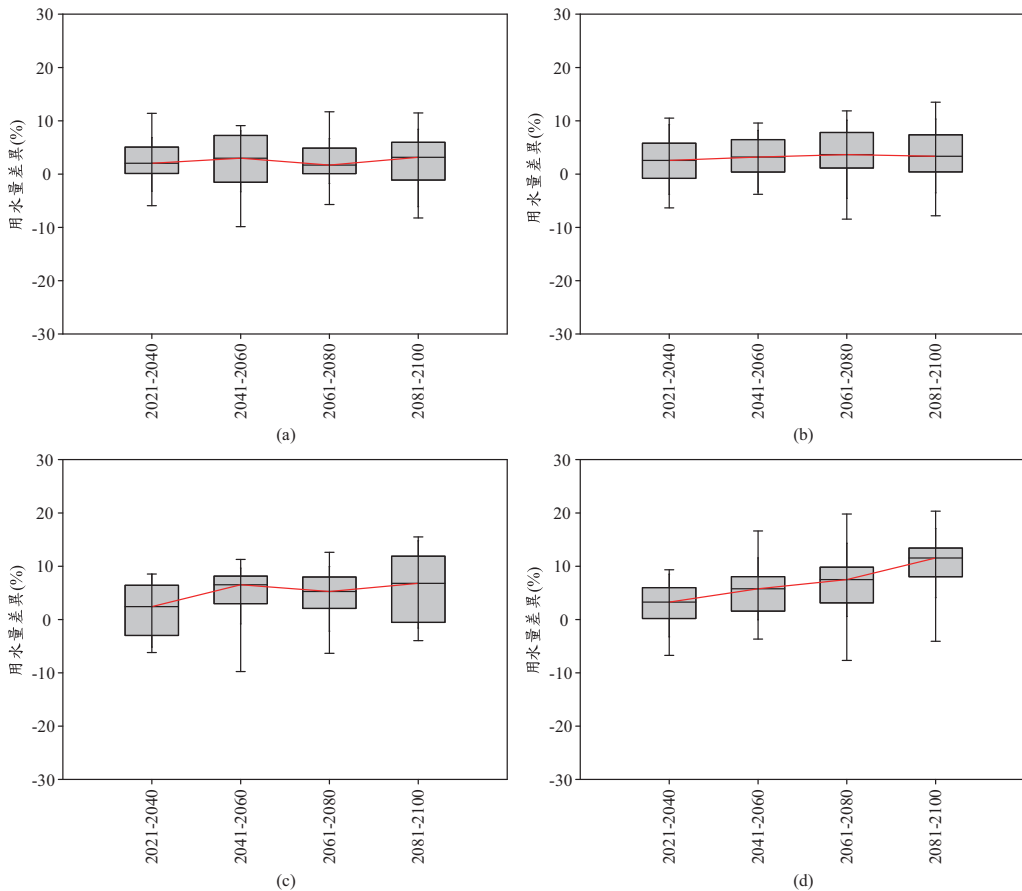


圖 8 一期作用水量差異統計趨勢圖 (a)RCP2.6 (b)RCP4.5 (c)RCP6.0 (d)RCP8.5。

依據式(5)，若用水量差異為正值，表示未來情境下用水量增加，反之，若用水量差異為負值，表示未來情境下用水量減少。茲將 4 段推估時段(2021-2040、2041-2060、2061-2180、2081-2100)之一期稻作灌溉用水量差異進行彙整，變化趨勢如圖 8 所示，圖中各箱形圖代表不同情境下，由各 GCMs 所得用水量差異之統計特性(上至下分別代表最大值、上四分位數、中位數、下四分位數、最小值)。另將一期稻作灌溉用水量差異變化(最小值、最大值、平均值)彙整如表 4，圖 8 及表 4 顯示，基於氣候變遷對氣象條件之影響，整體上，相較於現況，用水量均呈現增加之趨勢，且大致上隨溫室氣體排放程度而增加，亦隨著推估時段而增加。惟在 RCP2.6 情境，各推估時段之用水量差異平均值介於 2.28%至 2.54%

間，較無明顯差異。而 RCP8.5 情境，用水量差異平均值則由 2.66%(推估時段 2021-2040)大幅增加至 10.69%(推估時段 2081-2100)，意謂未來在溫室氣體高度排放的情境下，用水量明顯地隨著推估時段而有增加的趨勢。

5.3 二期作整體用水量分析

現況以及不同未來情境之二期稻作灌溉用水量差異趨勢如圖 9 所示，另彙整用水量差異變化於表 5。綜合前述模擬結果顯示，就整體用水量差異平均值而言，相較於現況，呈現微幅增加之趨勢。由於一期作期間，不同情境下整體雨量呈現減少的趨勢(見圖 4)，雨量無法有效利用，因此相較於一期作，二期作用水量整體增加幅度較為緩和。另外，在 RCP2.6 情境，各推估時段

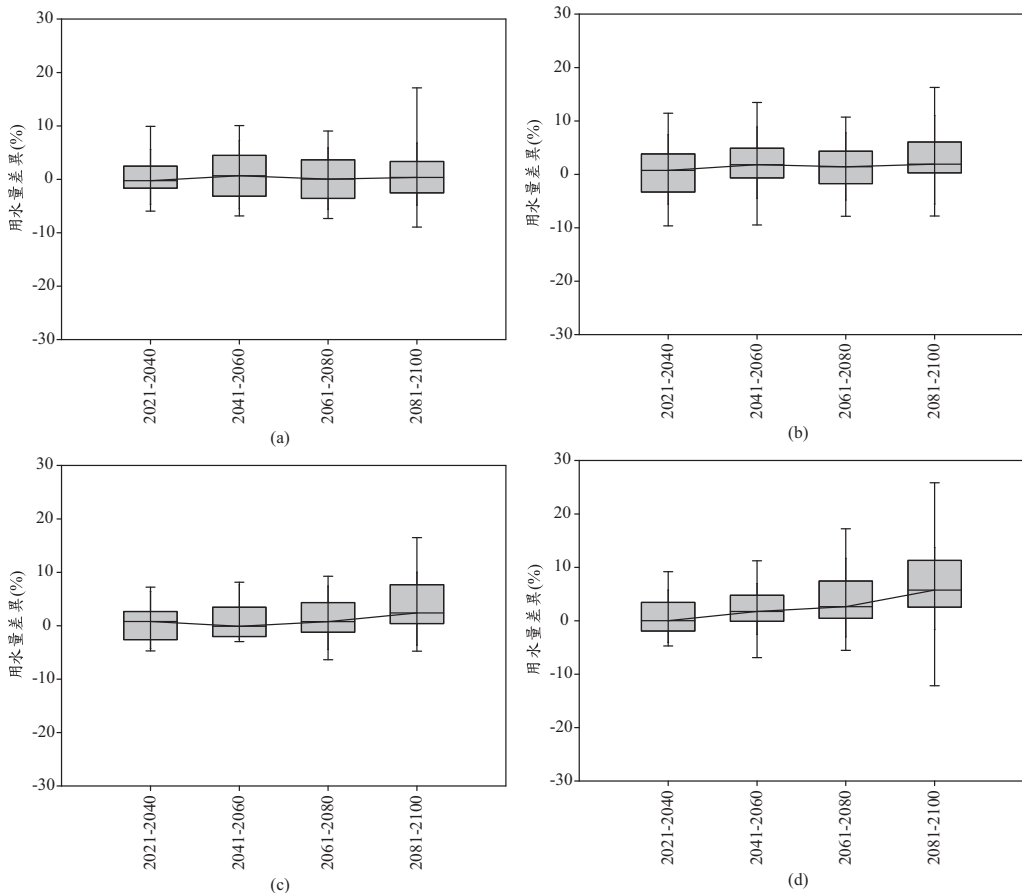


圖 9 二期作用水量差異統計趨勢圖 (a)RCP2.6 (b)RCP4.5 (c)RCP6.0 (d)RCP8.5。

之用水量差異平均值介於 0.05%至 0.86%間，而 RCP8.5 情境，其用水量差異平均值由 0.68%(推估時段 2021-2040)增加至 6.68%(推估時段 2081-2100)，且在 2081-2100 推估時段，其最小值(-12.18%)與最大值(25.84%)所涵蓋區間甚大，顯示未來氣候條件之變異對於灌溉用水量之影響具不確定性。

表 5 二期作用水量差異彙整表

| 情境 | 推估時段 | 最小值(%) | 最大值(%) | 平均值(%) |
|--------|-----------|--------|--------|--------|
| RCP2.6 | 2021-2040 | -5.97 | 9.92 | 0.27 |
| | 2041-2060 | -6.86 | 10.05 | 0.65 |
| | 2061-2080 | -7.33 | 9.06 | 0.05 |
| | 2081-2100 | -8.94 | 17.12 | 0.86 |
| RCP4.5 | 2021-2040 | -9.63 | 11.46 | 0.77 |
| | 2041-2060 | -9.46 | 13.46 | 1.93 |
| | 2061-2080 | -7.85 | 10.73 | 1.45 |
| | 2081-2100 | -7.80 | 16.28 | 2.77 |
| RCP6.0 | 2021-2040 | -4.71 | 7.23 | 0.74 |
| | 2041-2060 | -2.95 | 8.15 | 0.99 |
| | 2061-2080 | -6.37 | 9.27 | 1.41 |
| | 2081-2100 | -4.76 | 16.51 | 3.39 |
| RCP8.5 | 2021-2040 | -4.71 | 9.20 | 0.68 |
| | 2041-2060 | -6.91 | 11.25 | 2.41 |
| | 2061-2080 | -5.55 | 17.23 | 3.91 |
| | 2081-2100 | -12.18 | 25.84 | 6.68 |

5.4 RCP8.5 情境用水量分析

由前述分析成果可知，在溫室氣體高度排放的情境下，用水量差異增加的趨勢較為明顯，且隨推估時段而增加。因此，以下針對溫室氣體排放最嚴重的情境(RCP8.5)在 2081-2100 推估時段進一步探討，相關分析結果可做為未來擬具相關因應措施與調適策略之參考。茲將其在一期作與二期作期間，繪製各旬別之用水量差異於圖 10，另將用水量差異彙整於表 6 與表 7。上述資料顯示在一期作期間，以平均值而言，用水量差異增加最大的時期在四月下旬(平均值為 12.91%)，而相對其他時期，四月份用水量差異之最小值與最大值區間頗大，亦顯示此段時期不確定性較高。二期作期間用水量差異增加幅度最大者為七月份中旬(平均值為 7.85%)，而相較於其他旬別，九月份上中下旬之四分位數間距較大，顯示用水量差異分布較為分散，亦代表用水

量受未來氣候變遷影響具高度不確定性。

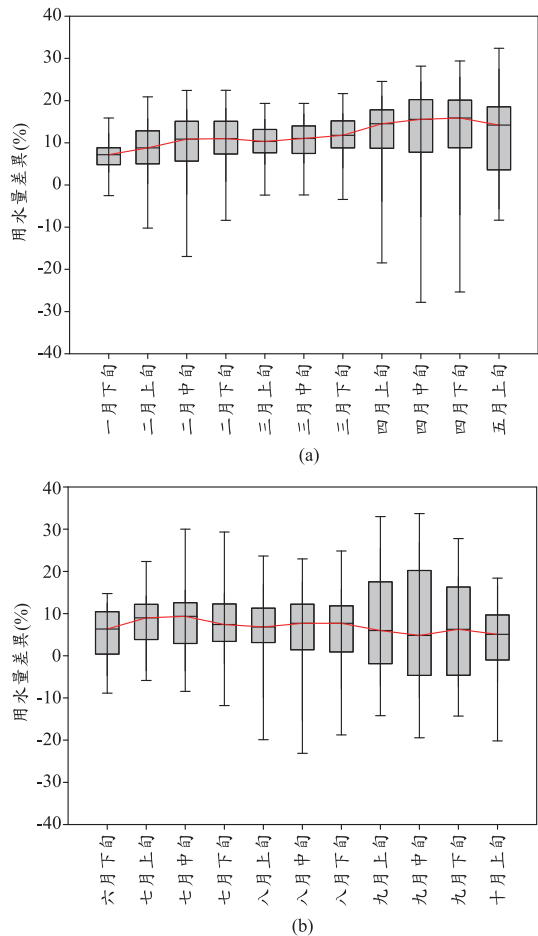


圖 10 RCP8.5 情境(2081-2100)各旬別用水量差異統計趨勢圖 (a)一期作 (b)二期作。

表 6 RCP8.5 情境(2081-2100)一期作各旬別用水量差異彙整表

| 旬別 | 最小值(%) | 最大值(%) | 平均值(%) |
|------|--------|--------|--------|
| 一月下旬 | -2.50 | 15.90 | 6.92 |
| 二月上旬 | -10.22 | 20.89 | 8.51 |
| 二月中旬 | -16.96 | 22.41 | 9.28 |
| 二月下旬 | -8.39 | 22.46 | 10.27 |
| 三月上旬 | -2.37 | 19.35 | 10.21 |
| 三月中旬 | -2.34 | 19.36 | 10.70 |
| 三月下旬 | -3.43 | 21.69 | 11.53 |
| 四月上旬 | -18.49 | 24.58 | 11.83 |
| 四月中旬 | -27.84 | 28.18 | 12.21 |
| 四月下旬 | -25.36 | 29.42 | 12.91 |
| 五月上旬 | -8.36 | 32.40 | 11.99 |

表 7 RCP8.5 情境(2081-2100)二期作各旬別用水量差異彙整表

| 旬別 | 最小值(%) | 最大值(%) | 平均值(%) |
|------|--------|--------|--------|
| 六月下旬 | -8.87 | 14.74 | 5.17 |
| 七月上旬 | -5.88 | 22.36 | 7.38 |
| 七月中旬 | -8.46 | 30.01 | 7.85 |
| 七月下旬 | -11.82 | 29.34 | 7.46 |
| 八月上旬 | -19.92 | 23.67 | 6.15 |
| 八月中旬 | -23.13 | 22.97 | 5.68 |
| 八月下旬 | -18.76 | 24.83 | 6.19 |
| 九月上旬 | -14.24 | 33.00 | 7.58 |
| 九月中旬 | -19.45 | 33.70 | 7.51 |
| 九月下旬 | -14.30 | 27.79 | 5.97 |
| 十月上旬 | -20.21 | 18.39 | 4.23 |

表 8 RCP8.5 情境(2081-2100)適合臺灣 GCMs 用水量差異彙整表

| GCMs | 一期作(%) | 二期作(%) |
|--------------|--------|--------|
| bcc-csm1-1-m | 13.67 | 2.70 |
| CCSM4 | 12.04 | 5.20 |
| CESM1-CAM5 | 16.84 | 7.94 |
| HadGEM2-AO | 14.15 | 2.36 |
| MIROC5 | 11.40 | 12.48 |

5.5 符合臺灣降雨特性之 GCMs 用水量分析

針對 RCP8.5 情境，IPCC AR5 提供了 41 個 GCMs，透過前述的分析結果，可整體瞭解未來氣象條件變異對灌溉用水量之影響。以下再進一步採用與臺灣降雨之相關性與模擬表現度符合臺灣南部的 5 個 GCMs(童慶斌等，2015)，分別為 bcc-csm1-1-m、CCSM4、CESM1-CAM5、HadGEM2-AO、MIROC5 進行探討。圖 11 展示了上述 5 個 GCMs 在 RCP8.5 情境 2081-2100 推估時段各旬別用水量差異，由圖 11(a)可清楚瞭解 5 個 GCMs 在一期作各旬均呈現用水量增加之趨勢，單一句別用水量增加幅度最大為四月份中旬 24.35%(CESM1-CAM5)。圖 11(b)則顯示二期作大致上用水量仍呈增加之趨勢，惟在六月份下旬以及八月份中旬至九月份下旬，有 2 個 GCMs 呈現用水量減少的現象，而單一句別用水量變化幅度最大為八月份中旬-20.67%(CCSM4)

以及九月份中旬 25.64%(CCSM4)，足見相較於一期作，二期作用水量之不確定性較高。若以一期作總用水量變化而言，表 8 顯示一期作用水量增加 11.40%- 16.84%；二期作用水量增加 2.36%-12.48%。

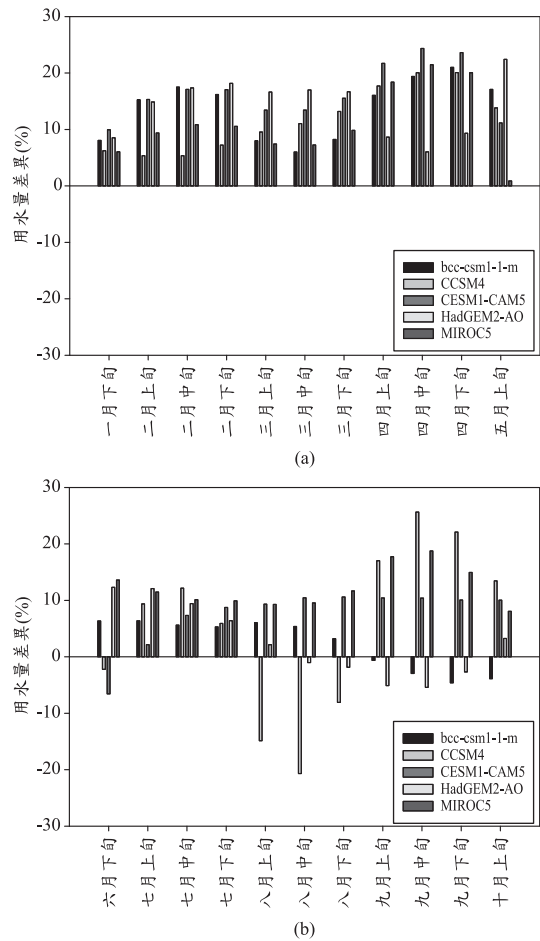


圖 11 RCP8.5 情境(2081-2100)適合臺灣 GCMs 用水量差異趨勢圖 (a)一期作 (b)二期作。

六、結論

臺灣近年來發生多次極端異常氣候，如 91 年、92 年、93 年、95 年、99 年、100 年、104 年均因水文條件欠佳發生缺水現象，政府採公告停灌休耕方式調用農業用水，以支援民生及工業用水。臺灣未來面對異常極端氣候所帶來之可能衝擊，影響水資源之穩定供給甚大。本研究選擇

嘉南農田水利會八掌溪支線灌區為研究案例，經由不同的 GCMs 所預測的氣象資料配合灌溉用水量模式，在不同未來氣候變遷情境下，分別於一期作與二期作探討用水量之增減情形，本研究之分析成果，期能做為未來因應對策研擬之參考。針對研究結果提出幾點結論如下：

1. 用水量差異隨著溫室氣體排放程度增加而增加，亦隨推估時段而增加，RCP8.5 情境在 2081-2100 推估時段，一期作與二期作平均用水量分別增加 10.69%與 6.68%。
2. 就 RCP8.5 情境在 2081-2100 推估時段而言，一期作與二期作平均用水量增加最大的時期，分別在四月下旬(12.91%)與七月份中旬(7.85%)。
3. 針對符合臺灣降雨特性的 5 個 GCMs(bcc-csm1-1-m、CCSM4、CESM1-CAM5、HadGEM2-AO、MIROC5)而言，一期作用水量均呈現增加之趨勢，增加幅度為 11.40%-16.84%。二期作部分 GCMs 在某些旬別有用水量減少的現象，惟整體用水量仍增加 2.36%-12.48%。

謝 誌

本文為經濟部水利署計畫(MOEAWRA1050295)延伸之研究成果，對於經濟部水利署之經費補助以及 TCCIP 計畫(MOST103-2621-M492-001)之資料提供，謹此致謝。

參考文獻

1. 甘俊二，1979，「灌溉系統配水技術之分析與研究」，台灣大學農工系。
2. 毛承善，2013，「氣候變遷對新竹灌區灌溉用水量之影響」，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文。
3. 姜世偉、林思孝、程運達、蔡展銘，2015，「氣候變遷對桃園地區水稻作物需水量影響之探討」，臺灣水利，第 63 卷，第 4 期，12-22 頁。
4. 馬家齊、吳瑞賢，2015，「氣候變遷與耕期

調整對農業用水管理的影響」，臺灣水利，第 63 卷，第 3 期，1-14 頁。

5. 陳世楷、劉振宇、黃偉哲，1998，「水田入滲水力特性之試驗研究」，臺灣水利，第 46 卷，第 4 期，52-64 頁。
6. 陳宏偉，2015，「氣候變遷對於水稻灌溉需水脆弱度評估之研究」，逢甲大學都市計畫與空間資訊學系碩士論文。
7. 陳明石，2011，「TaiWAP 模式對彰化地區農業用水推估之應用研究」，國立中興大學土木工程學系碩士論文。
8. 陳亨羽，2012，「氣候變遷對桃園地區水稻產量及灌溉需水量之影響」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
9. 陳毓雯，2009，「氣候因子影響水稻田灌溉需水量變化之研究」，國立成功大學地球科學系碩士論文。
10. 國家災害防救科技中心等，2015，「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置 (2/3)」，科技部補助專題研究計畫。
11. 童慶斌、劉子明、林嘉佑、曹榮軒、李明旭，2015，「氣候變遷水資源風險評估與調適決策之探討」，中國土木水利工程學會會刊，第 42 卷，第 4 期，30-45 頁。
12. 溫家伶，2015，「各尺度氣候資訊應用於農業用水管理的經濟價值」，國立中央大學水文與海洋科學研究所碩士論文。
13. 楊瑄鴻，2013，「氣候變遷對石門灌區灌溉用水量之影響」，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文。
14. 趙碧蓮，2014，「氣候變遷對區域性水稻作物需水量影響之研究」，國立嘉義大學土木與水資源工程學系研究所碩士論文。
15. 經濟部水利署，2014，「氣候變遷對水環境之衝擊與調適研究水資源管理成果報告」。
16. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2014，「氣候對水文環境影響下作物調整與田間水源管理之建議」。
17. 經濟部水利署南區水資源局，2014，「水文環境變遷情境下嘉南地區水源調度運用方案

- 研究」。
18. 臺灣氣候變遷科學報告工作小組，2011，「臺灣氣候變遷科學報告 2011」。
 19. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith, 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, Rome.
 20. Dastane, N. G., 1978. Effective rainfall in irrigated agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper.
 21. FAO, 1992. CROPWAT, A computer program for irrigation planning and management, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 26. Rome.
 22. IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report.
 23. IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis.
 24. IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report.

收稿日期：民國 105 年 8 月 17 日

修正日期：民國 105 年 9 月 11 日

接受日期：民國 105 年 9 月 16 日