

臺灣南部地區在未來氣候變遷下水旱田灌溉調適策略之研析

Analysis of Irrigation Adaptation Strategies for Paddy and Dry Fields in Southern Taiwan under Future Climate Change

國立中興大學
土木工程學系 教授
陳榮松
Rong-Song Chen

國立中興大學
土木工程學系 碩士
楊致嘉
ZHI-JIA YANG

摘要

本研究以 TaiWAP 及 CropWat 程式進行未來氣候模擬及農作物供需水量模擬，並提出農業用水調適方法。從臺南永康測站獲得相關氣象資料，將資料輸入至 TaiWAP 程式中獲得該地區未來氣候模擬，並模擬未來集水區流量。再把模擬出的資料帶進 CropWat 中進行作物在氣候變遷下的作物需水量及田間作物用水量，比較在水旱田的組合下，所需之灌溉水量。並評估在未來氣象中，是否有條件應付。最後擬定農作物用水調適策略以因應未來極端氣候下水資源短缺問題。

農作物用水調適方面上，針對南部地區進行檢討，經過多方檢討與篩選，最終選出三種可行性最高的方法進行討論，分別利用 SRI(水稻強化栽培系統)、水旱田轉作、增加蓄洪池方法，解決缺水方面的問題，因應氣候變遷下，針對作物種植方式進行改變，能在農業發展上永續發展與利用，結果顯示，這三種方法都能有效減少用水量，若能精通用法適時運用，將能創造最大利益。

關鍵詞：TaiWAP、CropWat、作物用水量、農業用水調適方法

Abstract

This study utilizes the TaiWAP and CropWat programs to conduct future climate simulations and crop water supply-demand simulations, proposing agricultural water

adaptation methods. Relevant meteorological data obtained from the Yongkang Station in Tainan are input into the TaiWAP program to obtain future climate simulations for the region and to simulate future watershed flows. The simulated data are then fed into CropWat to determine crop water requirements and field crop water use under climate change, comparing the irrigation water needed under combinations of paddy and upland fields. The study assesses whether the future meteorological conditions can meet these requirements. Finally, agricultural water adaptation strategies are proposed to address water resource shortages under future extreme climates.

Regarding agricultural water adaptation, the study focuses on the southern region, conducting a comprehensive review and selection process, ultimately identifying three highly feasible methods for discussion: System of Rice Intensification (SRI), conversion between paddy and upland fields, and the increase of flood storage ponds. These methods aim to solve water shortage problems and adapt to climate change by altering crop cultivation methods to achieve sustainable agricultural development and utilization. The results indicate that these three methods can effectively reduce water use, and mastering their application can maximize benefits.

Keywords: TaiWAP, CropWat, Crop Water Use, Agricultural Water Adaptation Methods

一、緒論

1.1 研究動機及目的

近年來氣候變遷日益嚴重，降雨呈現兩極化的現象，農業用水調配更加棘手；再者，因臺灣降雨時間較為集中，空間分布不均，造成豐枯水期相差甚大。面對水資源不足，工業開發，都市化等問題，若不好好正視，未來可能會帶來不可避免的災害。為了解決種種因素所帶來水資源不穩定的問題，尤其我國農業用水占全用水量的 62.4%，因此重新評估作物的合理用水量等農業用水調適策略是有必要的。

針對氣候變遷對水資源的影響，必須有效規畫與實行。針對水循環中，降雨與蒸發散最為重要，且都會受其環境影響，其中，蒸發散的估算更為困難，因此如何精確預估蒸發散量對水資源運用更加重要。在未來對於水資源短缺是必然的，因為臺灣降雨分布不均的問題；其次南部雨量通常集中在五月到十月間，但因降雨量過度極中，造成無法有效蓄水，冬季常有乾旱的危機，在氣候變遷的情況下，未來不只南部，甚至中北部都可能面臨這種危機。

本研究將利用 TaiWap 程式，預估未來臺灣南部地區氣候變遷下的氣溫與雨量，並模擬未來集水區流量，以利未來農業用水推估。並將模擬出的雨量氣溫等數據匯至 CropWat 程式中推測未來臺灣南部在氣候變遷下各種農作物之用水之策略分析，並針對水旱田之轉型之可行性做出討論，提出最佳的農業用水調適策略，以利於社會永續經營。

二、文獻回顧

2.1 CropWat 模式之相關研究

CropWat 是聯合國農糧組織(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)1990 年所研發出的軟體，目的在於模擬田間作物-土壤-大氣之間的關係，以利計算作物需水量與作物灌溉需水量。依照農作物的需求，輸入指定的資料，就能分別計算出日、旬、月的作物灌溉需水量，因此也能增加合理用水的可能。CropWat 計算主要是求得作物蒸發散量而去推估作物需水量及作物灌溉需水量。

甘俊二等(1996)以 Modify Penman、Modify Blaney-Criddle、Radiation、蒸發皿蒸發散量推求法、Penman-Monteith 法及以往國內常用之估算作物需水量之方法，進行作物需水量之推估，研究結果顯示在諸估算式中以 Penman-Monteith 法為最佳。

2.2 TaiWAP 模式之相關研究

2.2.1 TaiWAP 基本介紹

TaiWAP 模式是由臺灣大學生物環境系統工程學系永續發展研究室所開發的氣候變遷下水資源風險整合評估模式「Taiwan Water Resources Assessment Program to Climate Change」，簡稱 TaiWAP。主要功能在於評估資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力，包含了氣候變遷風險評估所需的氣候情境以及氣象合成模式，同時針對氣候變遷下水資源風險評估整合了 GWLF 水文模式、灌溉需水量評估模式、水資源模式等，並提供多準則排序評估法作為氣候變遷調適的支援決策工具。本研究主要是利用 TaiWAP 中的作物灌溉需水量模式以及集水區模擬結果推估所需之灌溉需水量，並加以擬定用水策略。

2.2.2 TaiWAP 預設情境

對於未來氣象是由過去氣候變遷的相關研究來設定未來氣候情境，包括假設、空間或時間類比與大氣環流模式(General Circulation Models, GCMs) 模擬。近年大氣環流模式發展趨於成熟，因此在氣候變遷下多採用 GCMs 模擬為主。在 IPCC AR5 模擬應用上，大氣環流模式根據未來可能的溫室氣體排放來模擬未來的氣候，其溫室氣體排放模擬情境稱為 RCPs。必須將現有數據輸入至模式中，配合設定之氣候變遷情境，進而產生未來的氣象資料，才能往下進行集水區流量與作物需水量之模擬。

未來全球氣溫是驟升狀態，溫室氣體排放量的持續增加將導致進一步的暖化，進而影響全球水循環的變化呈現不平均的狀況，乾濕季之間的降雨量變化差異將持續擴大。在 IPCC 第六次評估報告中也顯示在極端事件上推估”幾乎確定”在降雨推估中顯示乾濕區以及乾濕季降雨量對比越來越強。

三、 研究理論與方法

3.1 試驗地基本資料

永康測站位於臺南，於民國 36 年設置，經緯度座標為東經：120°23 北緯：23°03，海拔高度為 8.1 公尺，如圖 3-1 所示



圖 3-1 永康測站示意圖

3.2 氣象資料

根據中央氣象局氣象臺南永康氣象站從西元 2008 年至 2023 年之氣象資料，月均溫約在 17°C 以上，且最高溫發生在六月至八月，接近 30 度高溫，如圖 3-3 所示。降雨方面年平均降雨量為 149.9mm，其中，六月至八月因颱風季降雨最多，而平均雨量最多於八月發生，甚至高過 500mm，如圖 3-2 所示。就目前之氣象資料，永康氣象站觀測之平均濕度為 74.75 %、年平均風速為 2.82 m/s、平均日照時數為 6.5 hr。

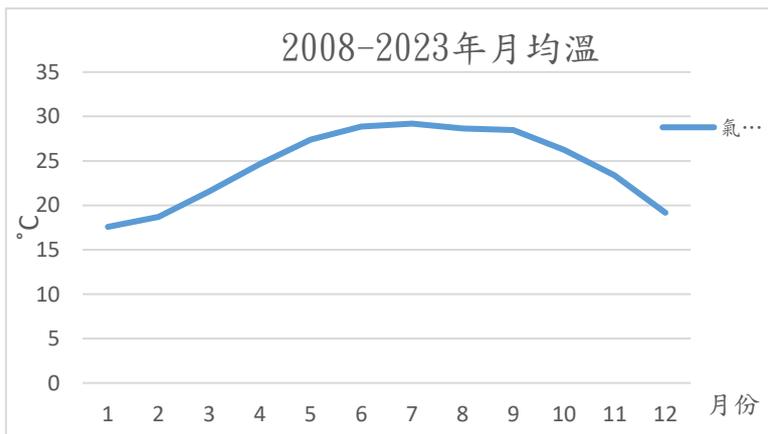


圖 3-3 永康氣象站 2008-2023 年月均溫

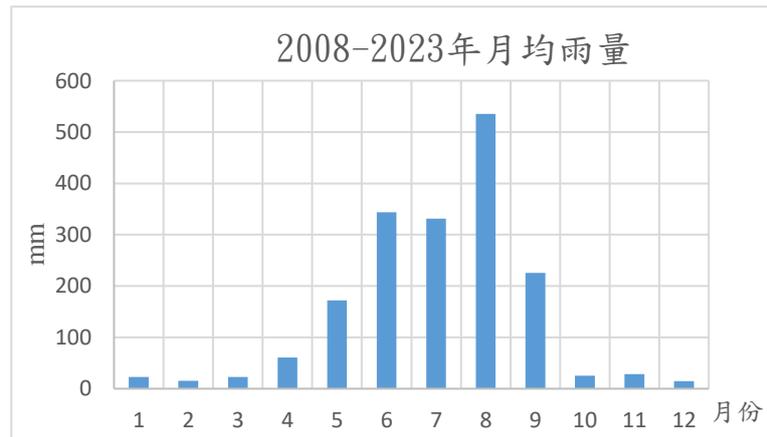


圖 3-2 永康氣象站 2008-2023 年月平均雨量

3.3 CropWat 模式應用

CropWat 計算模式需要輸入四大估算，包括(一)參考作物蒸發散量(二)有效降雨(三)作物資料(四)土壤資料，進行作物需水量之計算，如下圖 3-4 所示

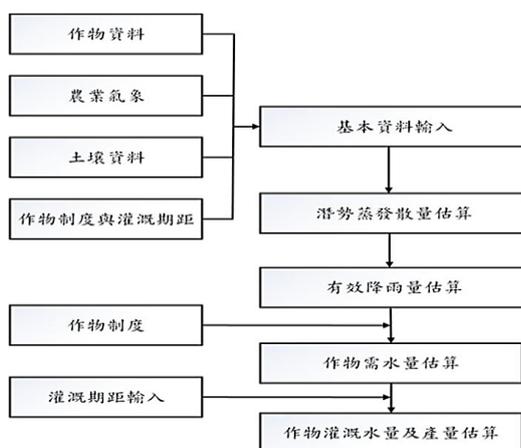


圖 3-4 CropWat 灌溉管理模式之示意圖

作物灌溉量計算公式如下式(1)

$$\text{作物灌溉水量} = (\text{作物需水量} - \text{有效降雨} + \text{滲漏量}) / \text{施灌效率} \quad (1)$$

1. 參考作物蒸發散量

以 Penman-Montieth 公式進行作物參考蒸發散量之計算，模式中所應輸入之氣象資料包含：(1)最高、最低溫度；(2)相對溼度(%)；(3)平均風速(m/sec)；(4)日照時數(hr/day)；(5)降雨量(mm)，以上參數需依據當地的氣象條件作設定。

2. 有效降雨

依據 CropWat 模式提供的四種有效降雨估算方式，分別為固定比例法、FAO 公式法、經驗公式法、美國農業部土壤保持法，其中有效降雨估算方式參考行政院農委會所建議的固定比例法 60%，此方法以歷年月平均雨量之百分比計算有效雨量，此法計算簡便，可做為粗放灌溉用水規劃之參考，補足逕流和滲透造成的損失。

3. 作物資料

分為水田與旱田兩部分。

水田分為(1)育苗(2)整田(3)開始(4)發展(5)期中(6)收穫 6 個生長階段，每階段資料包括：(1)生長天數(day) (2)作物係數(3)作物高度(m) (4)整地用水量。

每個生長階段使用兩個作物係數。當在土壤表面上積水時使用第一個 Kc wet；當土壤上沒有水時使用 Kc dry，Kc dry、Kc wet 都依照模式中預設的建議值做設定。生長天數、插秧日、收穫日、整浸田水深等參考水利署灌溉用水計畫。一期作灌溉日數 130 天，整浸田水深 180mm；二期作灌溉日數 112 天，整浸田水深 180mm。旱作部分以黃豆、小麥、玉米、甘藷、花生為主要研究作物，其中黃豆、小麥、玉米、花生的生長天數大約為 120 天，但甘藷約為 150 天。

4. 土壤資料

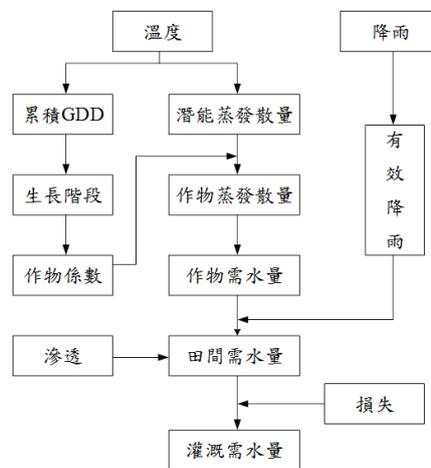
土壤資料包括土壤特性、土壤有效水分、入滲率、起始土壤水分等，大部分土壤性質為砂質壤土為主，是依據彰化水利會灌溉用水計畫中灌區土壤性質做設定。(最大降雨)入滲率設定 50 mm/day(陳世楷，1998)。初始土壤水分設定為 14%、孔隙率為 43%(施嘉昌等，1988)。田間最大滲透率考慮牛踏層數值為 3.7mm/day(陳世楷，1998)。

3.4 TaiWAP 模式應用

TaiWAP 情境說明

TaiWap 程式評估氣候變遷下之河川流量及水資源供水系統之整合工具程式。程式內容包括初始設定、氣象資料產生器、集水區流量模擬、農業灌溉需水量模擬、水資源模擬、決策支援分析以及結果分析。程式執行順序如圖 3-5

整合了 IPCC AR4、TCCIP AR4 以及 TCCIP AR5 情境，其中透過 RCP 溫室氣體排放濃度 4 大情況和 41 種 GCM 模式，可產生未來可能降雨氣溫情境。



1. 氣象資料產生：經過降尺度後，由氣候統計特性以 Monte Carlo 模擬的方式去產生符合的氣候條件之日降雨和日氣溫。
2. 集水區流量模擬：使用 GWLF 模式模擬集水區流量。
3. 農作物需水量模擬：推估水稻生長過程所需的潛勢能蒸發散量，借此推估出氣候變遷影響下之作物需水量，進而獲得未來情境下之作物需水改變量。
4. 水資源模擬：分析符合水資源永續發展下的環境承载力後，進行缺水風險空間分析。

四、臺灣南部地區未來氣象之預測

4.1 南部未來氣象模擬分析

將永康測站 2008 年至 2023 年資料輸入進 TaiWAP 程式中，於程式中選擇 IPCC AR5，配合 RCP8.5 之溫室氣體排放情境，以 20 年短期為走向，GCM 模式則採用 CCSM4、

CSIRO-Mk3-6-0、GISS-E2-R、HadGEM2-AO、MIROC5 等 5 種適合南部之模式，利用 TaiWap 初步模擬出未來氣候變遷。

表 1 南部未來降雨量各情境模擬

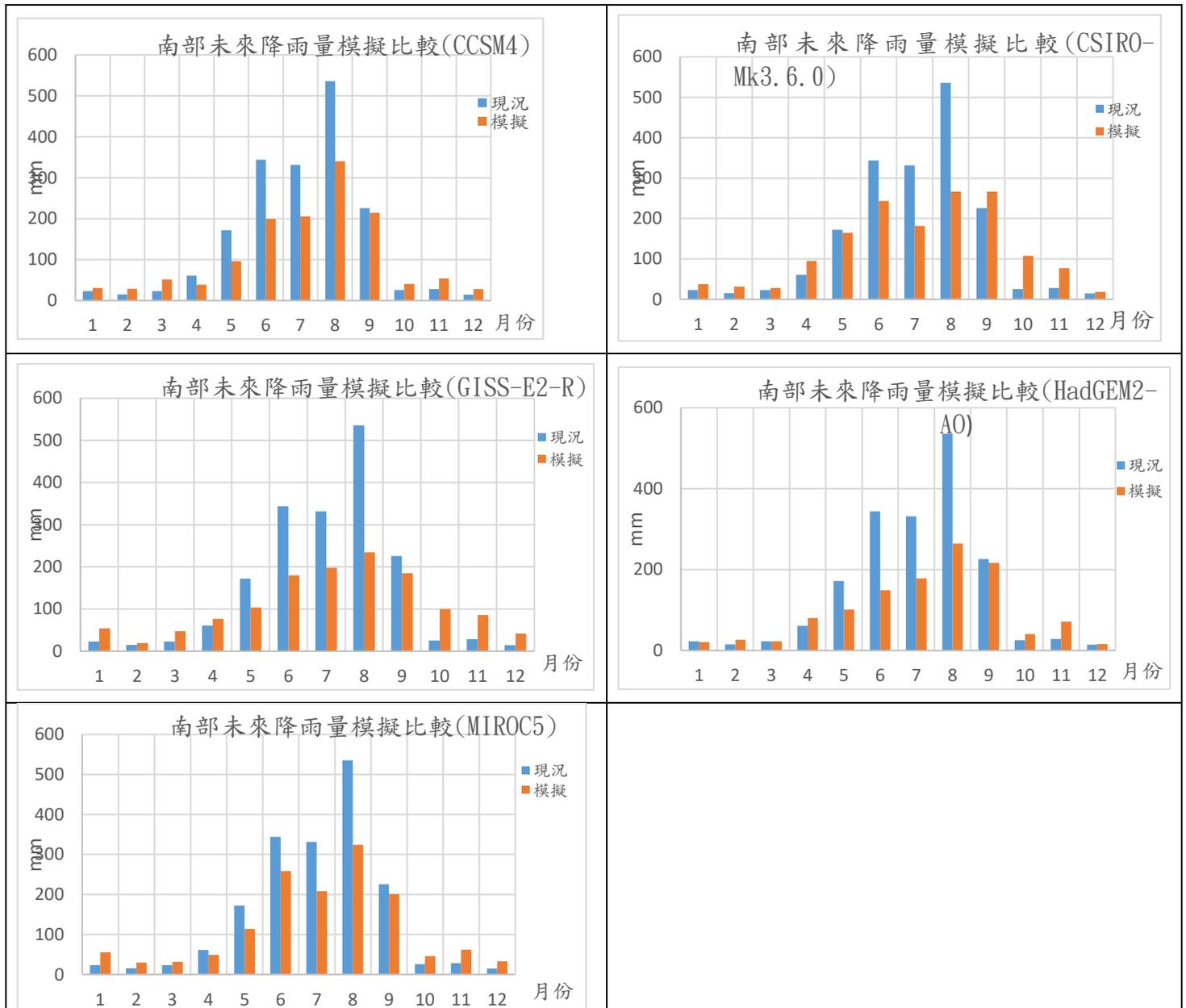
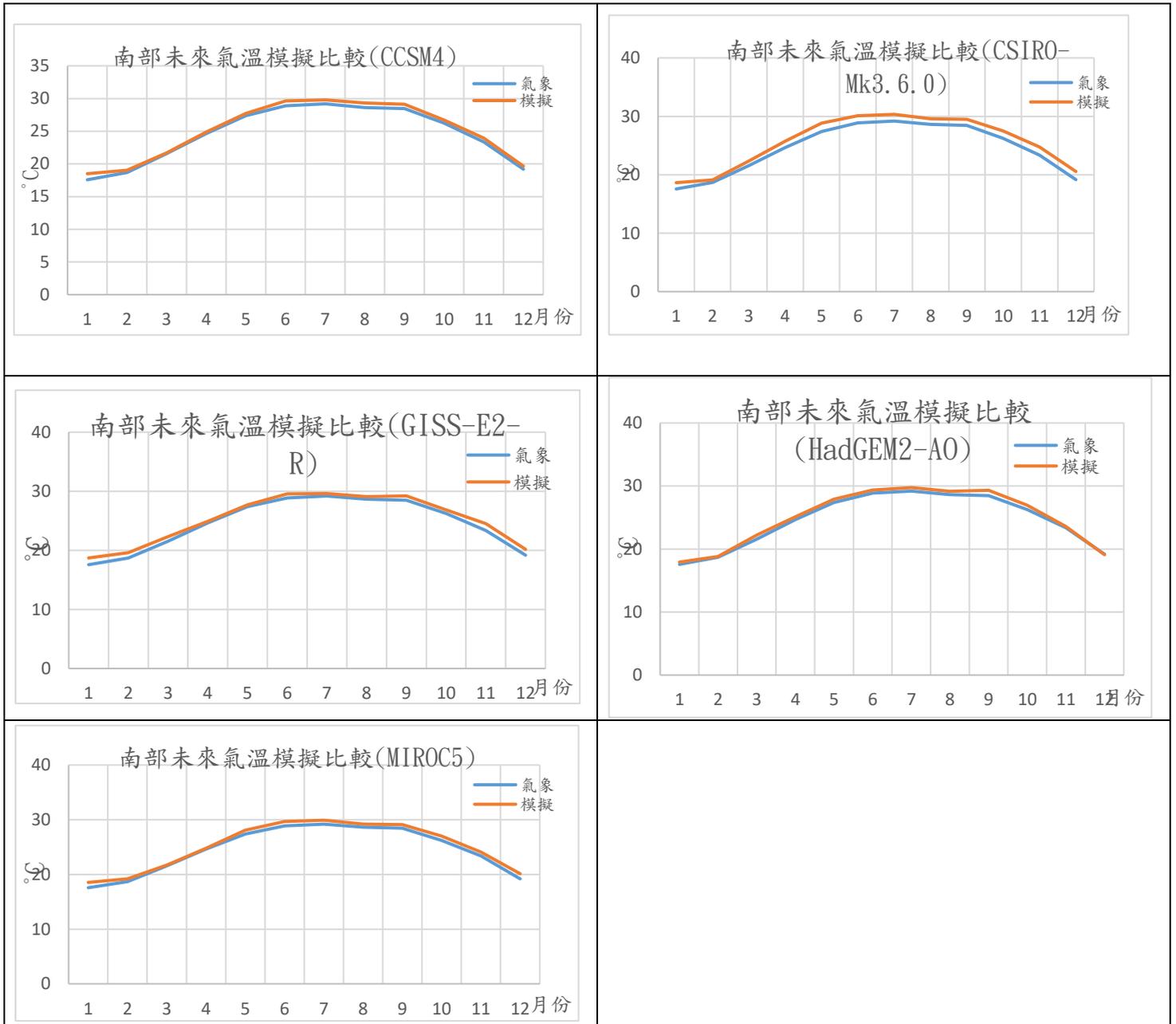


表 2 南部未來氣溫各情境模擬



本研究針對在極端氣候下，對農業灌溉下的研究與影響，而在 5 種情境模擬下，南部模擬雨量變化幅度依多至少依序為 HadGEM2-AO - GISS-E2-R - CCSM4 - MIROC5 - CSIRO-Mk3.6.0，故選用 HadGEM2-AO 情境作為集水區模擬之討論。

南部集水區模擬

在情境 HadGEM2-AO 模擬下，且土地利用設定值 CN 值設定參考 TaiWap 內的建議值，分別為 79 與 71，面積部分使用張俊誠(2021)在中北部使用的分析數據，分別為旱田 196 公頃與水田 608 公頃，以利做為比較，模擬結果如下圖 4-1。

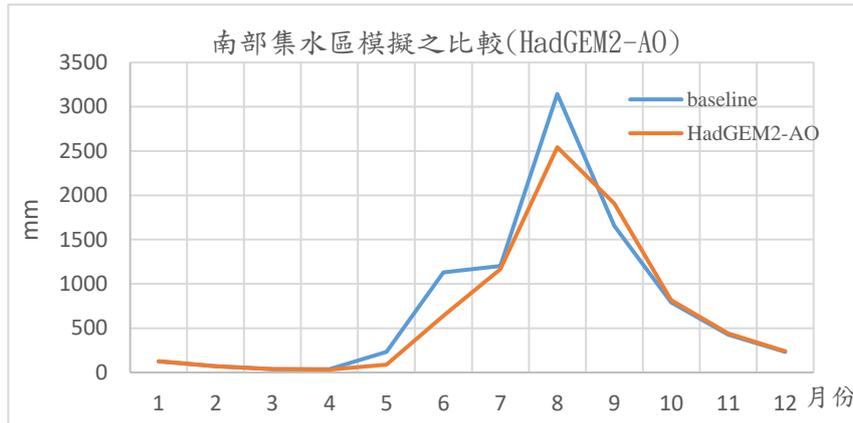


圖 4-1 南部集水區模擬之比較(HadGEM2-AO)

結果顯示，在一月至四月間，集水區水量非常低，平均不到 100mm，表示該段期間非常乾枯，可能面臨缺水的問題，到五、六月尚未好轉，甚至比基期來的低，增減率甚至達到-62.59%和-43.56%，減少了將近一半；而到九月有稍微改善，增減率為 15.26%，而其餘與基質落差不大；與中北部相比，南部在一到五月相對乾燥，平均低於 200mm，而七到九月雖到雨季，但也沒其他兩地區的雨量來的多，因此依整體來說，在南部地區，冬季可能面臨缺水問題。

五、臺灣南部地區農業用水調適之策略

5.1 南部未來農作物用水推估

本研究推估臺灣地區農民主要種植水稻，早作有黃豆、小麥、玉米、花生、甘藷之用水量，最後進行水旱田轉作之分析。透過 TaiWAP 程式獲得的南部模擬之雨量後，將氣象資料、未來雨量、各水旱作物生長時期以及土壤特性依序輸入至 CropWat 程式中，利用 CropWat 程式進行現況和氣候變遷下南部地區之各作物需水量、有效降雨量和田間灌溉用水量。其結果如表 5-1、表 5-2，依序為作物需水量、有效降雨量以及田間灌溉用水量。其中田間灌溉用水量需額外除以 70% 的灌溉效率才獲得最終的灌溉用水量。

表 0-1 南部地區現況之作物用水量推估

	作物種類	期別	作物需水量(mm)	有效降雨量(mm)	田間灌概用水量 (mm)
旱作	花生	春作	540.3	154.5	205.4
		秋作	477.0	190.6	214.0
	甘藷	春作	573.9	125.1	232.9
		秋作	504.8	99.2	219.4
	玉米	春作	514.0	312.4	221.4
		秋作	449.1	254.1	191.9
	黃豆	春作	373.2	142.0	239.9
		秋作	330.2	206.2	38.1
	小麥	春作	486.1	137.8	173.4
		秋作	425.3	153.9	146.0
水田	水稻	一期	665.6	461.0	890.2
		二期	594.1	759.6	0

表 0-2 南部地區氣候變遷下之作物用水量推估

	作物種類	期別	作物需水量(mm)	有效降雨量(mm)	田間灌概用水量 (mm)
旱作	花生	春作	540.7	176.3	250.9
		秋作	477.0	239.2	163.7
	甘藷	春作	573.9	139.3	279.4
		秋作	504.8	138.3	169.4
	玉米	春作	514.3	230.4	254.5
		秋作	449.1	316.4	155.6
	黃豆	春作	373.2	136.7	236.0
		秋作	330.2	206.2	38.5
	小麥	春作	486.3	137.2	210.8
		秋作	426.2	293.6	146.6
水田	水稻	一期	665.9	268.7	932.2
		二期	594.1	649.9	0

5.2 氣候變遷下南部農業用水調適策略結果與討論

農業是水資源的主要消耗者之一，因此有效的水資源管理至關重要。針對臺灣南部農業用水情形，以下能提出六種農業調適策略，在從中挑出最具有合理性及可行性的方法後，加以分析並提出適當的做法。

1. 滴灌或微灌:首先，可以透過灌溉系統的改進，使用滴灌和微灌能夠將水直接送到植物根部，減少了水分的蒸發和滲漏，以減少水的浪費，且能更均勻的送達植物根部，提高作物的生產。
2. 遙感監測:遙感監測的利用使民更有效地管理水資源，遙感監測提供土壤濕度監測、作物生長預測等數據，幫助在灌溉時更精確了解是否需要灌溉，減少過度灌溉的發生。
3. 水旱田轉作技術:眾所皆知對水稻以農業灌溉來說，一直都是用水量最多的農作物，透過水旱田轉作之手段，不僅有效減緩水資源利用，還能有農作物的收益。
4. SRI 技術應用:透過農委會農田水利處得知，SRI 技術透過減少水田的灌溉，達到減少用水，且研究發現，SRI 灌溉方式不僅能節省水量，還能增加作物生產，有助於在這極端氣候下的發展。
5. 蓄水池之建設:在未來氣候變遷下，何時會面臨缺水危機不得而知，增建蓄水池能夠順應緊急的情況，適時補足缺失。
6. 政策支持與合作:通過制定相應的水資源管理政策和法規來支持農業的可持續發展，並鼓勵農民參與水資源節約和保護。

針對以上六種策略，其中滴灌或微灌中因外部不可控因素大，例如設備堵塞、又因看不到難以掌控，難以預測，因此暫不討論，遙感監控與政策輔助則牽涉到農民的積極度，也在不可控範圍，也先不再討論範圍，而水旱田轉作在臺灣已實施一段時間，且效果顯著，這次針對南部地區採取此手段，保有合理性及可行性，而 SRI 技術則參考農委會提出的計畫，並且 SRI 技術在世界各地已有確實實施，且達到不錯的效果，因此也能納入討論的方法，再者，蓄水池之建設適合在臺灣發展，因為面積不大，因此有需要時能夠及時送達，在有效的時間立即補注，解決水資源不足的問題，根據以上種種因素，因此選擇這三項出來做討論，並提出可行性之驗證，以利後續之利用。

策略 1-南部地區水田轉旱作之分析

經過 TaiWap 分析，能夠得知在未來雨量缺乏是不可避免的，尤其是南部地區，因為降雨分布不均導致乾季時常有缺水的情況發生，因此若把部分水田轉為旱田，理論上能達到節水效果，也能在有限的資源下達到有效的農業灌溉。以下將分析在南部水田轉旱作之結果。

本研究以水稻種植面積為 608 公頃，旱田則為 196 公頃作為分析，利用在前一章得知田間灌溉用水量並按照各比例不同進行分配，最後可得知調整後的總灌田間灌溉用水量及省水量後做討論。

表 0-3 極端氣候下南部一期作水稻轉黃豆之節水量

1. 面積比例(%)		2. 田間灌溉用水量(m ³)		3. 調整後總田間灌溉 用水量(m ³)	4. 節省之水量(m ³)
水稻	黃豆	水稻	黃豆		
0	100	0.0	462,560.0	462,560.0	5,205,702.4
20	80	1,133,652.4	333,043.2	1,466,695.6	4,201,566.7
40	60	2,267,304.9	249,782.4	2,517,087.3	3,151,175.0
60	40	3,400,957.4	129,516.0	3,530,474.2	2,137,788.1
80	20	4,534,609.9	33,304.3	4,567,914.2	1,100,348.1
100	0	5,668,262.4	0.0	5,668,262.4	0.0

表 0-4 極端氣候下南部二期作水稻轉黃豆之節水量

1. 面積比例(%)		2. 田間灌溉用水量(m ³)		3. 調整後總田間灌溉 用水量(m ³)	4. 節省之水量(m ³)
水稻	黃豆	水稻	黃豆		
0	100	0.0	75,460.0	75,460.0	3,975,644.0
20	80	810,220.8	54,331.2	864,552.0	3,186,552.0
40	60	1,620,441.6	40,748.4	1,661,190.0	2,389,914.0
60	40	2,430,662.4	21,128.8	2,451,791.2	1,599,312.8
80	20	3,240,883.2	5,433.1	3,246,316.3	804,787.7
100	0	4,051,104.0	0.0	4,051,104.0	0.0

表 0-5 極端氣候下南部一期作水稻轉小麥之節水量

1. 面積比例(%)		2. 田間灌溉用水量(m ³)		3. 調整後總田間灌溉 用水量(m ³)	4. 節省之水量(m ³)
水稻	小麥	水稻	小麥		
0	100	0.0	413,168.0	413,168.0	5,255,094.4
20	80	1,133,652.5	297,481.0	1,431,133.4	4,237,129.0
40	60	2,267,305.0	223,110.7	2,490,415.7	3,177,846.7
60	40	3,400,957.4	115,687.0	3,516,644.5	2,151,617.9
80	20	4,534,609.9	29,748.1	4,564,358.0	1,103,904.4
100	0	5,668,262.4	0.0	5,668,262.4	0.0

表 0-6 極端氣候下南部二期作水稻轉小麥之節水量

1. 面積比例(%)		2. 田間灌溉用水量(m ³)		3. 調整後總田間灌溉 用水量(m ³)	4. 節省之水量(m ³)
水稻	小麥	水稻	小麥		
0	100	0.0	287,336.0	287,336.0	3,763,768.0
20	80	810,220.8	206,881.9	1,017,102.7	3,034,001.3
40	60	1,620,441.6	155,161.4	1,775,603.0	2,275,501.0

60	40	2,430,662.4	80,454.1	2,511,116.5	1,539,987.5
80	20	3,240,883.2	20,688.2	3,261,571.4	789,532.6
100	0	4,051,104.0	0.0	4,051,104.0	0.0

表 0-7 極端氣候下南部一期作水稻轉玉米之節水量

1. 面積比例(%)		2. 田間灌溉用水量(m ³)		3. 調整後總田間灌溉用水量(m ³)	4. 節省之水量(m ³)
水稻	玉米	水稻	玉米		
0	100	0.0	498,820.0	498,820.0	5,169,442.4
20	80	1,133,652.5	359,150.4	1,492,802.9	4,175,459.5
40	60	2,267,305.0	269,362.8	2,536,667.8	3,131,594.6
60	40	3,400,957.4	139,669.6	3,540,627.0	2,127,635.4
80	20	4,534,609.9	35,915.0	4,570,525.0	1,097,737.4
100	0	5,668,262.4	0.0	5,668,262.4	0.0

表 0-8 極端氣候下南部二期作水稻轉玉米之節水量

1. 面積比例(%)		2. 田間灌溉用水量(m ³)		3. 調整後總田間灌溉用水量(m ³)	4. 節省之水量(m ³)
水稻	玉米	水稻	玉米		
0	100	0.0	304,976.0	304,976.0	3,746,128.0
20	80	810,220.8	219,582.7	1,029,803.5	3,021,300.5
40	60	1,620,441.6	164,687.0	1,785,128.6	2,265,975.4
60	40	2,430,662.4	85,393.3	2,516,055.7	1,535,048.3
80	20	3,240,883.2	21,958.3	3,262,841.5	788,262.5
100	0	4,051,104.0	0.0	4,051,104.0	0.0

表 0-9 極端氣候下南部一期作水稻轉甘藷之節水量

1. 面積比例(%)		2. 田間灌溉用水量(m ³)		3. 調整後總田間灌溉用水量(m ³)	4. 節省之水量(m ³)
水稻	甘藷	水稻	甘藷		
0	100	0.0	547,624.0	547,624.0	5,120,638.4
20	80	1,133,652.5	394,289.3	1,527,941.8	4,140,320.6
40	60	2,267,305.0	295,717.0	2,563,021.9	3,105,240.5
60	40	3,400,957.4	153,334.7	3,554,292.2	2,113,970.2
80	20	4,534,609.9	39,428.9	4,574,038.8	1,094,223.6
100	0	5,668,262.4	0.0	5,668,262.4	0.0

表 0-10 極端氣候下南部二期作水稻轉甘藷之節水量

1.面積比例(%)		2.田間灌溉用水量(m ³)		3.調整後總田間灌溉 用水量(m ³)	4.節省之水量(m ³)
水稻	甘藷	水稻	甘藷		
0	100	0.0	332,024.0	332,024.0	3,719,080.0
20	80	810,220.8	239,057.3	1,049,278.1	3,001,825.9
40	60	1,620,441.6	179,293.0	1,799,734.6	2,251,369.4
60	40	2,430,662.4	92,966.7	2,523,629.1	1,527,474.9
80	20	3,240,883.2	23,905.7	3,264,788.9	786,315.1
100	0	4,051,104.0	0.0	4,051,104.0	0.0

表 0-10 極端氣候下南部一期作水稻轉花生水量

1.面積比例(%)		2.田間灌溉用水量(m ³)		3.調整後總田間灌溉 用水量(m ³)	4.節省之水量(m ³)
水稻	甘藷	水稻	甘藷		
0	100	0.0	332,024.0	332,024.0	3,719,080.0
20	80	810,220.8	239,057.3	1,049,278.1	3,001,825.9
40	60	1,620,441.6	179,293.0	1,799,734.6	2,251,369.4
60	40	2,430,662.4	92,966.7	2,523,629.1	1,527,474.9
80	20	3,240,883.2	23,905.7	3,264,788.9	786,315.1
100	0	4,051,104.0	0.0	4,051,104.0	0.0

表 0-11 極端氣候下南部二期作水稻轉花生水量

1.面積比例(%)		2.田間灌溉用水量(m ³)		3.調整後總田間灌 溉用水量(m ³)	4.節省之水量(m ³)
水稻	花生	水稻	花生		
0	100	0.0	491,764.0	491,764.0	5,176,498.4
20	80	1,133,652.5	354,070.1	1,487,722.6	4,180,539.8
40	60	2,267,305.0	265,552.6	2,532,857.5	3,135,404.9
60	40	3,400,957.4	137,693.9	3,538,651.4	2,129,611.0
80	20	4,534,609.9	35,407.0	4,570,016.9	1,098,245.5
100	0	5,668,262.4	0.0	5,668,262.4	0.0

策略 2-利用 SRI 灌溉方式下之用水評估。

SRI 為水稻強化栽培系統，目的是減少種植水田資源的浪費，例如水資源、農藥，並可增加作物收益，這種灌溉方法也很適合缺水地區實施，SRI 秉持著三多四少的原則，多曬田，多中耕，多有機質，少苗，少水，少藥，少化肥等七項，以節水為目的制定的規則，SRI 與常規作法種植水稻的方式略有不同，以下表 0-為兩者之間的比較。

表 0-12 SRI 與常規作法之比較

項目		SRI	常規做法
移植株齡		人工插秧後8至15天	機械插秧，10-21 天移植
每穴株數		1株	2-3株
穴距		間隔25cm	間隔20cm
除草		中耕除草	除草劑或機械除草
肥料		堆肥	有機肥
田間用水管理	抽穗前	間斷灌溉，約2cm	續灌，約5-6cm
	孕穗前週		
	孕穗期	續灌，約5cm	續灌約5-10cm
	孕穗後		

根據上述比較，本節針對田間灌溉需水量做出估算，進而得知在未來缺水的情況下如何做出有效的解決方式，因此在 SRI 技術上，與常規做法最大不同為湛水深度的差異，SRI 基本上以 2cm 為基準，並實施間斷灌溉，而常規作法為 5-10cm，用水量差異甚大，且視地區的情況不同而有不同做法，本研究以 TaiWat 程式做模擬，計算出水稻的灌溉需水量，針對湛水深的不同進行調整，SRI 以 2cm 為基準，且採用間段灌溉，而常規做法以 6cm 做設定，且無實施間段性灌溉，以一到六月為第一期，七到十二月為第二期作，以未來氣象做為模擬，模擬結果如下表 0-。

結果顯示，以未來氣象做模擬，SRI 技術與現行常規技術之比較，一期作總省水量 18.4%，二期作總省水量為 16.2%，確實有達到節水之效果。

表 0-13 SRI 與常規作法節省水量之比較

水稻	常規(m ³)	SRI (m ³)	節省之水量(%)
一期總需水量	362,242.2	295,498.9	18.4
二期總需水量	235,906.0	197,660.7	16.2

策略 3-蓄水池應用於農業灌溉

將一月至六月視為第一期，而七月至十二月視為第二期，可獲得一期作時期的南部集水區供水體積為 5,861,059.2m³，二期作為 39,016,819.2m³。

作物方面，面積使用水稻種植面積為 608 公頃，旱作種植面積為 196 公頃為計算面積標準，則水稻一期作和旱作物之最多用水量南部為 621,818.8 m³，而二期作為 4,383,128.0 m³，如表 0-所示。

表 0-14 作物總用水量和南部集水區供水體積之比較

作物總用水量和南部集水區供水體積			
期數	南部集水區供水體積 (m ³)	作物總用水量(m ³)	缺損水量
一期	5,149,760.0	6,215,526.4	-1,065,766.4
二期	39,016,819.2	4,383,128.0	0

結論

1. 農作物調適策略 1 中，利用水田轉作旱田，研究結果可知，在一期水稻中田間灌溉用水量為 5,668,262.4 m³，二期水稻中田間灌溉用水量為 4,051,104.0m³，而一期模擬水量中為 5,149,760.0 m³，二期作中，模擬水量為 39,016,819.2 m³，因此在一期作中水資源略有不足，可實施 10%水田轉作旱田，以因應缺水情況發生，適時的比例轉作時，能夠帶來不錯的節水效果。
2. 農作物調適策略 2，SRI 技術中，因為水田用水量較大，因此利用 SRI(水稻強化栽培系統)，一期作常規總水量為 362,242.2 m³，SRI 法為 295,498.9 m³，總省水量 18.4%，二期作常規為 235,906.0m³，SRI 法為 197,660.7 m³，總省水量為 16.2%，能有效解決 水量本質上的問題。
3. 農作物調適策略 3 中，討論為了因應農作物水資源缺乏而增設蓄水池的必要性，而結果顯示，在一期作時作物用水量與集水區模擬結果相差 1,065,766.4m³，若不採取其他手段，則可能造成作物缺水的危機，因此增設蓄水池是有必要的。

參考文獻

1. 童慶彬、洪念民、陳主惠。1999。「氣候變遷對水資源影響評估與適應策略研擬」，中國農業工程學報，第 45 卷，第 4 期。
2. 童慶彬、連宛瑜。2000。「氣候變遷對灌溉需水量之影響」，中國農業工程學報，第 46 卷，第 1 期。
3. 虞國興、許書平。1998。「氣候變遷對水資源衝擊-雨量分析」，中國農業工程

- 學報，第 44 卷，第 1 期。
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，pp. 1-14。
 5. 謝明昌、王如意、童慶斌。2007。氣候變遷對台灣地區水資源之衝擊與調適。土木水利。34(1): 65-72。
 6. 陳明石。2017。TaiWAP 模式對彰化地區農業用水推估之應用研究，中興大學土木工程學系所碩士論文。
 7. 連宛淪。2000。「氣候變遷對水稻灌溉需水量及產量之影響」，國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文。
 8. TCCIP 計畫辦公室。2015。臺灣氣候變遷推估與資訊電子報 002期。
 9. 環境資訊中心。2014。解讀聯合國最新氣候變遷報告(9)「無人倖免」IPCC: 氣候變遷正衝擊糧食與人類安全。
 10. 交通部中央氣象局。2008-2023。台南永康氣象站觀測資料。
 11. 臺灣大學生物環境系統工程學系永續發展研究室。TaiWAP2.0 手冊。
 12. 臺灣大學生物環境系統工程學系永續發展研究室。劉子明。TaiWAP 模式簡介。
 13. 甘俊二。1979。灌溉系統配水技術之分析與研究，台灣大學農業工程系。
 14. 甘俊二、陳清田、陳焜耀。1996。「台灣地區作物需水量推估模式之合適性研究」，農業工程學報第 42 卷，第 2 期，pp. 8-19。
 15. 陳榮松、楊宗祐、施文傑、蘇致仁、張峻誠、趙翌辰。2020。竹桃北地區穩定供水與減災總合策略研究與成效評估。
 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. 行政院農委會。<https://www.coa.gov.tw/>
 18. 國際農糧組織網站http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_cabbage.html。
 19. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. CropEvapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, Rome.
 20. Doorenbos, J. and A. H. Kassam. 1979. Yield Response to Water. FAO33, Rome.
 21. The Representative Concentration Pathways.2011. An Overview. Climatic Change.
 22. Tung,C.P. and Haith,D.A.1995. Global Warming Effects on New YorkStreamflows.
 23. 張峻誠。2021。氣候變遷下臺灣中北部農業用水調適研析。中興大學土木工程學

研究所碩士論文

24. SRI水稻強化栽培系統

<https://www.greenpeace.org/taiwan/update/13217/%E6%B0%B4%E7%A8%BB%E5%BC%B7%E5%8C%96%E6%A0%BD%E5%9F%B9%E7%B3%BB%E7%B5%B1sri%E4%BB%8B%E7%B4%B9/>

25. 蔡明華、蔡逸文、許素禎、張煜權、甘俊二。2015。臺灣推展節水與友善環境稻作強化栽培體系之策略研究。

26. 林慧娟。2017。氣候變遷下臺灣中北部農業用水調適研析。中興大學土木工程學研究所碩士論文