

因應氣候變遷調整稻作停灌決策時間對水庫用水管理的影響

Implication of Postponing Decision on Irrigation Suspension in Dry Season

國立中央大學土木工程學系
博士

馬家齊

CHIA-CHI MA

國立中央大學土木工程學系
碩士

魏郁婷

YU-TING WEI

國立中央大學土木工程學系
教授

吳瑞賢*

RAY-SHYAN WU

摘要

石門水庫是北台灣的重要水庫，同時兼負桃園、板新地區約 494 萬人口的民生用水，桃園、石門農田水利會 3.5 萬公頃的農業灌溉用水，以及 22 處已開發、開發中的工業區的工業用水，但其庫容對使用者而言過小，致年使用率已達 4 次左右。若枯水期蓄水量及入流量不足，可能需停供農業灌溉用水以維持民生工業用水的穩定，但因調度成本龐大及對農業生產環境造成長遠的不良影響，故儘可能延後停灌決策時間，以待更明確掌握未來水文條件是否有好轉的跡象。停灌決策時間點受限於稻作生長期及水庫水文條件影響，本研究利用氣候模式及作物模式，模擬數種未來氣候變遷情境下，稻作產量及生育日數變化，作為耕期調整的依據。再依耕期調整方案及石門水庫水文情境模擬枯水期的水庫運轉情形，評估稻作停灌決策時間對用水管理影響，分析發現延後一句至二週明顯改善現況。

關鍵詞：氣候變遷，停灌，耕期。

ABSTRACT

Shihmen Reservoir is the major reservoir in northern Taiwan to supply the domestic water for 4 million people, irrigation water for 35,000ha farmland and industrial water for 22 industrial parks. Its effective capacity is 210 million m³ and the annual water demand was about 850 million m³, therefore the utilization ratio of Shihmen Reservoir exceed 4. If the active storage and inflow are both deteriorated, the agency could decide to suspend irrigation to maintain the stability of supply of domestic water and industrial water. But the cost of water allocation for different users is expensive and can exercise harmful impacts for agriculture environment in long-term. Therefore, to postpone the

*通訊作者，國立中央大學土木工程學系教授，32001 桃園市中壢區中大路 300 號，mowchi@pchome.com.tw

decision of irrigation suspension would strive for more time and chance to expect the weather improved. The factors of adjusting the decision schedule of irrigation suspension are rice growth phase, cropping systems, farming schedule, and the hydrological conditions of the reservoir. This study utilized climate models and crop models to simulate several scenarios of water management and rice cropping, to discuss the effects on water management due to adjusting the decision schedule of irrigation suspension for the hydrological condition of Shihmen Reservoir had deteriorated under climate change.

Keywords: Climate change, Suspending irrigation, Farming schedule.

一、前言

本研究以台灣北部的石門水庫供水區為研究區域(以下簡稱本區域)，本區域 5 月至 10 月為豐水季，11 月至次年 4 月為枯水季，豐枯水季的降雨量差異相當明顯，2005~2014 年枯水季之平均降雨量僅佔全年降雨量 24.7%，平均入流量為全年之 20.1%，約為石門水庫 2014 年枯水季各標的計畫用水量總額之 87%，尚有 5,322 萬立方公尺的用水缺額，需仰賴水庫蓄存水量來補足。若水庫蓄水量在豐水季結束前仍不理想，則民生、農業與工業用戶將面臨缺水的危機。因此，水庫管理機關為了在下一個豐水季來臨前穩定用水需求，常須視水情的嚴峻程度，對各用水標的採行不同強度的管制措施。

停灌措施係依據水利法第 19 條之精神，暫停農民的用水權益以保障民生與工業用水的穩定，並依農業用水調度使用協調作業要點支付補償金予停灌區耕地所有權人，不但調度成本龐大、易引發不同用水標的間的誤解，長期而言亦對農民生活及農業生產環境造成不良影響，若能延後停灌決策時間點，待更明確掌握未來水文條件是否有好轉的跡象，評估能否以加強灌溉管理來代替停灌決策，儘可能降低對農業的衝擊。

另一易與「停灌」混淆的農業管理措施為「休耕」，係自 1983 年起，陸續實施「第一階段稻米生產及稻田轉作六年計畫」、「稻米生產及稻田轉作後續計畫」、「水旱田利用調整計畫」、

「水旱田利用調整後續計畫」、「稻田多元化利用方案」、「調整耕作制度活化農地計畫」等農業管理措施，鼓勵稻田轉作其他作物或休耕種植綠肥。「停灌」為因應枯旱缺水之強制性措施，「休耕」則為調節稻米產量之獎勵措施。

二、研究區域

本研究選定位於台灣北部的石門水庫供水區為研究區域。石門水庫集水面積為 763.4 平方公里，2014 年有效庫容為 209×10^6 立方公尺，滿水位為 245 公尺。主要的降水時期與來源為 3~4 月的春雨鋒面，5~6 月的梅雨鋒面，以及 7~10 月的颱風。豐水季為 5~10 月，枯水季為 11 月至隔年 4 月，豐枯水季的入流量差異明顯，1958~2014 年之平均年入流量為 $1,471 \times 10^6$ 立方公尺，中位數年入流量為 913×10^6 立方公尺，其中枯水季的平均入流量僅佔全年 23.6%，中位數入流量亦僅佔 27.7%。

2005~2014 年之平均計畫年配水量為農業用水 493×10^6 立方公尺，民生及工業用水 403×10^6 立方公尺，而平均實際年供水量為農業用水 382×10^6 立方公尺，民生及工業用水 408×10^6 立方公尺，年入流量超越機率需低於 52% 才能滿足各標的計畫用水量總和，但石門水庫庫容太小，年運用次數達 4 次以上，且豐水季時颱風降雨足以使其水位常保持於 240 公尺以上，如圖 1 所示，故以年平均值無法表達其面臨的缺水壓力，本研究遂以枯水季加以討論。

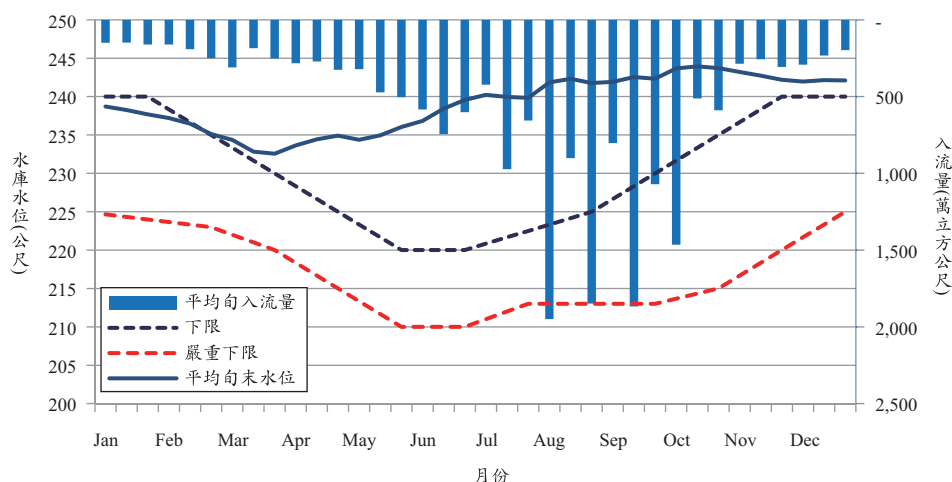


圖 1 石門水庫操作規線及平均水位與入流量(1958~2014)

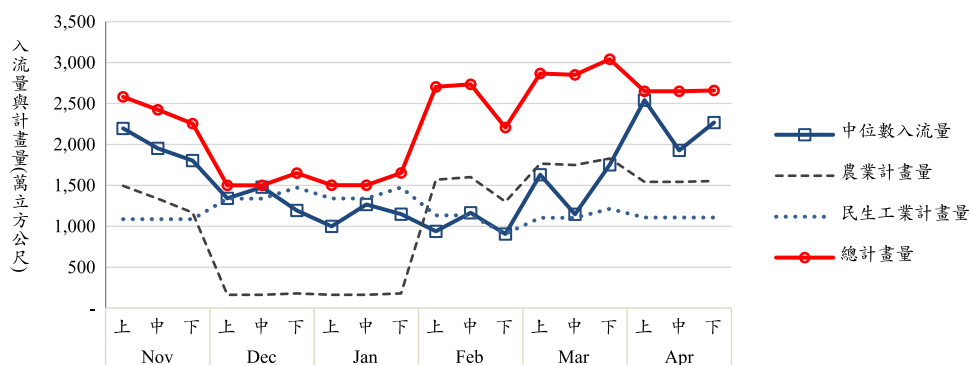


圖 2 石門水庫枯水季入流量與計畫量比較(2005-2014)

石門水庫之農業用水標的用戶為臺灣桃園農田水利會(以下簡稱桃園水利會)及臺灣石門農田水利會(以下簡稱石門水利會)，其灌區純為雙期作水稻田，依灌溉計畫並未供灌冬季裏作或其他短期旱作，故 12 月與 1 月為非灌期，幾乎無需用水，但 2 月開始進入整田用水尖峰期，此時降雨並不豐沛，因此需仰賴水庫蓄水補充之，若蓄水狀況不佳，便易遭逢缺水。以 2005~2014 年枯水季(前一年 11 月至當年 4 月)而言，總計畫需水量為 409×10^6 立方公尺，其中農業用水 195×10^6 立方公尺，民生及工業用水 214×10^6 立方公尺，如圖 2 所示，入流量超越機率需低於 24% 才能滿足計畫需求，亦即石門水庫在枯水季有 76% 的機率處於入不敷出的狀態，除了使用水庫蓄存

水量外，水庫管理單位並視入流狀況採行不同程度的用水管制措施。其中又以 2002、2003、2004、2006 年缺水情形較嚴重，遂分別對桃園或石門水利會灌區實施一期作停灌，以確保民生與工業用水的穩定，4 年共計停灌本區域之農田 9.4 萬公頃，政府支付的補償費達 43 億元。如表 1 所示。

三、文獻回顧

氣溫為調節作物生長速率及發育階段之主要氣象變數，同時也影響作物呼吸率及蒸發散量。太陽輻射提供葉片行光合作用所需之能量，左右植株碳水化合物分配和生質量的累積。降雨雖未直接影響作物生長，但水分為作物生長要素，降雨不足造成的乾旱或降雨過多而形成的水

表 1 歷年各農田水利會大規模停灌事件統計

年度	停灌範圍	灌區面積 (10 ⁴ ha)	停灌面積 (10 ⁴ ha)	補償經費 (10 ⁸ 元)	調用水量 (10 ⁸ m ³)
2002	石門、新竹頭前溪	1.8	1.5 (1.1)	11.3 (8.29)	2.3
2003	桃園、新竹頭前溪	3.1	2.8 (2.4)	10.6 (9.09)	2.4
2004	桃園、石門、新竹、苗栗、嘉南	11.8	6.5 (3.5)	27.9 (15.02)	4.0
2006	桃園、新竹、苗栗	4.1	3.1 (2.4)	14.0 (10.84)	4.3
2010	嘉南、苗栗	7.6	2.2	14.2	3.0
2011	嘉南	7.5	0.06	0.2	
2015	桃園、新竹、苗栗、臺中、嘉南	(2.3)	(1.7)	(13)	
合計(不含 2015)		35.9	16.16 (9.4)	78.2 (43.24)	16

資料來源：行政院農業委員會，2015。

括號內為桃園及石門水利會之值。

患亦將控制作物生長的表現。

Jansen (1990)利用 MACROS (Modules of an Annual Crop Simulator)作物模式，探討東亞地區氣候變遷下水稻之生產情形，結果指出在溫度略為增高的情況下，產量會增加，但溫度增加若超過 0.8°C，產量反而會減少。

姚銘輝與陳守泓(2009)以 DSSAT 模式模擬氣候變遷下的溫度與 CO₂ 變化對稻作生育的影響，結果顯示 CO₂ 濃度的增加有助於葉片光合作用之進行，使作物生質量累積增加，但所帶來增溫現象卻縮短作物生育期，若上升太高可能造成穀粒充實不足而減產。因此，氣候變遷對於未來農作物產量究竟係增加或減少，仍必須深入探討。

陳亭羽(2012)利用 DSSAT 模式模擬在氣候變遷下，不考慮未來二氧化碳濃度變化影響，且耕期不變，桃園地區一期作稻米產量均有增加的趨勢，近未來(2020-2039 年)之產量改變率介於 0.52%至 2.33%之間，遠未來(2080-2099 年)之產量改變率介於 2.84%至 7.86%之間。在大部分的情境下，桃園地區一期作灌溉需水量改變量不大，其原因是溫度上升雖會導致作物需水量增加但也導致生長天數減少，抵銷了灌溉需水量增加之效應。

黃文政(2012)以桃園農田水利會灌區為研究區域，利用 5 種 GCMs(CCCma_CGCM3、CNRM_Cm3、CSIRO_Mk3.0、GFDL_Cm2.0、

LASG_FGOALS-g1.0)所輸出之 2046~2065 年未來氣象資料配合田間水平衡模式模擬未來有效降雨量及灌溉用水量，結果顯示氣候變遷使稻作生育期間溫度上升與降雨量減少，導致一期作稻作需水量增加約 36%，有效雨量減少約 36%，使得灌溉用水量增加約 30%。

魏郁婷(2014)利用 DSSAT 模式模擬氣候變遷對桃園地區一期稻作產量與生長期的影響，結果顯示近未來(2020~2039)的稻作產量較現在增加 1%，生長期縮短 1.7%，若再延後耕期一週，則產量較現在增加 6.8%，生長期縮短 3.4%。

陳清田(2007)於嘉南農田水利會學甲試驗站進行現場實驗，探討一期作水稻插秧日期分別於 1 月 16 日、2 月 1 日、2 月 16 日、3 月 1 日、3 月 16 日開始時，其產量、農藝性狀、作物需水量、及灌溉用水量之差異，試驗結果顯示耕期延後可使灌溉用水量節約 74~324 mm，但產量亦有 7%~30%的減少趨勢。

盧孟明等(2007)分析雨量對稻作的影響，表現在一期稻作為插秧是否可以正常，二期稻作則為充實期灌溉水源是否豐沛。五至十月是臺灣的主要雨季，雨期在西南部較其他區域更加集中，以致於每年二月需決定一期稻作是否要落秧下種時往往正是全年水資源不確定性最高的時刻。若前一年的雨量不豐，休耕與否更需借助於氣象預報指引。另一方面，充實期若溫度太高，往往需要以灌溉調節根部的溫度，水

資源是否豐裕決定了可調節的程度。簡言之，每年二月和十一月的前三個月的累積雨量，是決定休耕和規劃灌溉的關鍵因素。臺灣北部地區的全年累積雨量有隨氣候暖化增加的趨勢，但其中十月至次年二月的枯水期累積雨量的變化趨勢卻是減少的。

Peng 等人(2004)以間接模擬的方式推估氣候變遷對稻作產量的影響，分析國際水稻研究所農場自 1979 年至 2003 年的溫度變化趨勢與稻作產量變化的關聯性；年平均最高和最低氣溫分別升高了 0.35°C 和 1.13°C，分析結果顯示最高氣溫變化對作物產量的影響不明顯，而枯水季 1 月至 4 月中的生長期，最低氣溫每增加 1°C 使產量下降 10%。這份報告提供了全球暖化使夜溫升高將降低水稻產量的論證。

周玫君(2004)利用 DSSAT 模式於耕種日期不變的前提下，於不同情境(A2 及 B2)，模擬未來氣候變遷下臺灣稻米產量。模擬結果發現，在不考慮未來二氧化碳濃度變化時，稻米一期作及二期作的產量均有減少的趨勢。

行政院經濟建設委員會(2002)探討農業用水量調撥使用時，如何訂定對農民的補償價格，透過經濟理論分析的角度，研擬農業用水調撥民生及工業用水的合理化補償機制。建議調撥農業用水的補償可以從對農田水利會及對農民之補償兩方面來看，對於農田水利會之補償可以增加誘因來促使提高節水效率，對農民而言，休耕補償藉由協調得到加碼值，可以促使廠商及農民得到共識，減少紛爭的機會。

經濟部水利署水利規劃試驗所(2005)分析桃園地區農業用水移用制度，規劃集團轉作地區、面積，進而推估可成功釋出農業用水及水資源利用方式，並研擬休耕轉作獎勵辦法，以為中長程水資源調度研究之參考。研究分析自來水供水缺口、農田水利會各支線系統灌溉水量與面積、農政機關計畫休耕面積間之關係，建議桃園農田水利會灌區分三組、石門農田水利會灌區分二組，以計畫性集團輪流停灌，即可同時滿足自來水供水缺口與計畫休耕面積。

表 2 石門水庫供水區第一期作用水日程表

用水項目	日 期	錯開日數
播種(秧田)	2 月 1 日~2 月 25 日	25
浸田	2 月 26 日~3 月 22 日	25
整田	2 月 28 日~3 月 24 日	25
插秧	3 月 1 日~3 月 25 日	25
本田期間	3 月 1 日~7 月 23 日	25
收穫	7 月 5 日~7 月 29 日	25
本田灌溉日數	120 天(含錯開日數 144 天)	

資料來源：臺灣桃園農田水利會，2014；臺灣石門農田水利會，2014

四、停灌決策

對農業用水而言，由於缺水容忍度較高，且水庫配水量較民生以外的其他標的用水大，節水效益較大。當石門水庫入流不理想時，經濟部水利署北區水資源局以延長水庫供水期程為整體考量，先協調桃園及石門農田水利會採取不同程度的加強灌溉管理措施、民生用水總量管制並增加翡翠水庫的支援量，減少石門水庫配水量；若水情更加惡化，只得考慮停供農業灌溉用水以維持民生工業用水的穩定。

停灌決策時間點受稻作生長期、耕作制度、灌溉管理、及水庫水文條件影響，為了避免農民投入栽培成本與人力後才宣布停灌而造成浪費，並考量農民不願放任已栽種作物死亡之心理因素，農政主管機關均主張若非緊急缺水狀況，停灌決策最好於作物栽培前宣布。本區域的耕作制度為雙期作水稻，雖然近年來休耕與轉作面積增加，但其灌溉計畫與實際灌溉操作仍以水稻為目標。水稻灌溉所配合主要的用水項目為播種、浸田、整田、插秧、本田、與收穫等 6 項，如表 2 所示，但目前農民為了配合農機插秧，係向育苗場購買成捆經過打包的秧苗，並未於田間播種，故本研究後續模擬以不含秧田為主；育苗場育苗的時間約 3 週，另加訂購與打包運送的時程，共約 25 日。目前停灌補償對象分為育苗業者與農民等 2 類，若能於 1/20 前宣布停灌，則可不補償育苗業者，否則兩者都應列入補償。另考量決策後的公文作業時程，目前一期作停灌決策

表 3 石門水庫供水區第一期作田間用水量

		桃園水利會				石門水利會			加權平均/合計
土壤種類		輕粘土	粘質壤土	砂質粘壤土	砂質壤土	粘土	粘壤土/植 壤土/壤土	砂壤土	
灌區面積 (ha)		4,766	9,864	4,618	5,402	2,569	7,646	1,870	36,735
秧田		32	32	32	32				
浸田	第一次	100	100	100					
	第二次	50	50	50					
整田		30	30	30	180	180	180	180	180
本田	前 30 天	216	228	243	303	228	237	303	245
	30 天後	540	576	603	756	567	594	756	613
	小計	756	804	846	1,059	795	831	1,059	859
小計(不含秧田)		936	984	1,026	1,239	975	1,011	1,239	1,039

本田期生育日數：120 日；用水深單位：mm

資料來源：臺灣桃園農田水利會，2014；臺灣石門農田水利會，2014

時限為 1/10。(行政院農業委員會，2007)

五、灌溉情境模擬

目前行政院農業委員會建議之停灌決策時間點為 1 月 10 日前，而石門水庫上半年主要水源為 3~4 月的春雨與 5~6 月的梅雨，1 月上旬對於春梅雨的預測仍有不確定性，若能延後決策時間至更接近春梅雨季，對春梅雨預測的信心度增加，可使停灌決策或相關抗旱策略更周延。為評估儘可能延後停灌決策時間點，並以不影響二期作耕作期程為前提，需調整錯開日數以增加耕期調整的彈性，後續再加入氣候變遷對未來稻作生育期與產量的影響，作為耕期調整的參考依據。

灌溉計畫中的錯開日數係為了避免集中供灌產生過高的用水尖峰，而將灌區依錯開日數分為若干組，例如錯開 25 日即分為 25 組，每日依組別及該當用水項目水深輪流施灌，即可降低用水尖峰，惟整個供灌時程將拉長。

灌區依錯開日數分組後，灌區內同一日將同時有數種用水項目，如 Eq. 1 所示，因此第 t 日分別有多少組別面積進行不同用水項目，需利用步階函數加以區別，如 Eq. 2。各用水項目用水量可利用 Eq. 3~Eq. 9 求之。(經濟部水利署水利規劃試驗所，2009)

$$D_f(t) = D_{sp}(t) + D_{ss}(t) + D_{p1}(t) + D_{p2}(t) + D_{p3}(t) + D_s(t) \quad \dots (1)$$

式中 $D_f(t)$ 為灌區第 t 日田間用水量， $D_{sp}(t)$ 為秧田整田用水， $D_{ss}(t)$ 為秧田補給用水， $D_{p1}(t)$ 為第 1 次浸田用水， $D_{p2}(t)$ 為第 2 次浸田田間用水量， $D_{p3}(t)$ 為整田用水， $D_s(t)$ 為本田用水。各用水項目用水深如表 3 所示。

$$S(t, t_s, t_p) = U(t - t_s) - U[t - (t_s + t_p)] = \begin{cases} 0 & t < t_s \\ 1 & t_s \leq t < t_s + t_p \\ 0 & t_s + t_p \leq t \end{cases} \quad \dots (2)$$

式中 t_s 為該用水項目開始日， t_p 為錯開日數。

即 t 日尚未達該用水項目開始日時，或已超過[該用水項目開始日 + 錯開日數]時，其步階函數 $S(t, t_s, t_p)$ 為 0，即該用水項目不計入。

1. 秧田整田用水量：為秧田整田水深與秧田面積之積，並以步階函數判別第 t 日是否有此一用水項目。

$$D_{sp}(t) = d_{sp}(t) A_s(t) S(t, t_s, t_p) \quad \dots (3)$$

式中 $d_{sp}(t)$ 為 t 日秧田整田水深， $A_s(t)$ 為配合錯開日數分組後之 t 日秧田面積。

表 4 不同情境之灌溉起始、用水尖峰日期與尖峰水深

灌溉情境	期作 總水深 (mm)	開始 用水	浸田 開始	本田 開始	本田最 後灌溉	收割	第 1 次 尖峰日	第 1 次 尖峰水深 (mm)	第 2 次 尖峰日	第 2 次 尖峰水深 (mm)
S.1 現況，含秧田，錯開 25 日	1,016	2/1	2/26	3/1	7/17	7/23	3/10	13.09	3/19	11.58
S.2 不含秧田，錯開 25 日	984	2/26	2/26	3/1	7/17	7/23	3/10	12.85	3/19	11.58
S.3 不含秧田，7/29 完成收割， 錯開 25 日，延後 1 週	984	3/4	3/4	3/7	7/23	7/29	3/16	12.85	3/25	11.58
S.4 不含秧田，7/29 完成收割， 錯開 20 日，延後 1 旬	984	3/9	3/9	3/12	7/23	7/29	3/18	14.92	3/27	13.34
S.5 不含秧田，7/29 完成收割， 錯開 15 日，延後 2 週	984	3/14	3/14	3/17	7/23	7/29	3/20	18.37	3/26	14.75

2. 秧田補給用水量：為秧田生育期間(約 25 天)補充之水量，並依灌溉期距間歇灌溉，每次灌溉水深為灌溉期距與日水深之積，灌溉次數則為生育期間除以灌溉期距。

$$D_{ss}(t) = \sum_{i=1}^{N_s} \left\{ \left(\int_{t+(i-1)l_s}^{t+il_s} d_{ss}(\tau) d\tau \right) A_s S[t, t_s, t_p] \right\} \dots \quad (4)$$

式中， N_s 為秧田補給灌溉次數， $d_{ss}(t)$ 為 t 日秧田補給水深， l_s 為秧田補給灌溉期距。

3. 第 1 次浸田用水量：本田整田前先浸田二次，使耕層土壤充分含水以利整田作業之進行。惟桃園水利會砂質土壤灌區將浸田水量併於整田時供給，以減少滲漏損失，石門水利會全區將浸田水量併於整田時供給，未區分浸田用水量。

$$D_{p1}(t) = d_{p1} A_p(t) S(t, t_s, t_p) \dots \quad (5)$$

式中， d_{p1} 為第 1 次浸田水深， $A_p(t)$ 為配合錯開日數分組後之 t 日本田面積。

4. 第 2 次浸田用水量：

$$D_{p2} = d_{p2} A_p(t) S(t, t_s, t_p) \dots \quad (6)$$

式中 d_{p2} 為第 2 次浸田水深。

5. 整田用水量：

$$D_{p3} = d_{p3} A_p(t) S(t, t_s, t_p) \dots \quad (7)$$

式中 d_{p3} 為整田水深。

6. 本田用水量：水田湛水時，以蒸發散所減少之

湛水深計算每日用水深，乾田時則依土壤種類計算每日用水深。

$$D_s(t) = \sum_{i=1}^{N_h} \left\{ \left(\int_{t+(i-1)l_p}^{t+il_p-l_g} d_h(\tau) d\tau + d_g l_g \right) A_p S[t, t_{s,i}, t_p] \right\} \dots \quad (8)$$

$$t_{s,i}^6 = t_s^5 + 1 + (i-1)l_p \dots \quad (9)$$

式中， N_h 為灌溉次數， l_p 為灌溉期距， l_g 為灌溉期距內之乾田日數， d_h 為每日減水深(水田湛水灌溉時，每日減少之水深)， d_g 為每日用水深； $t_{s,i}^6$ 為本田第 i 次灌溉的日期， t_s^5 為整田開始日。

本研究以不影響第二期作為原則，即依錯開日數分組之最後一組收割日期需在 7 月 29 日前，分別依現況、是否含秧田、不同錯開日數、延後插秧等條件設計 5 種用水情境，推求灌溉起始日、用水尖峰日與尖峰水深，如表 4 所示，情境 S.1 為現況灌溉計畫之操作方式，自 2 月 1 日開始秧田用水，錯開日數 25 日，2 月 26 日開始浸田用水，3 月 1 日開始本田用水；情境 S.2 與 S.1 之差異為不計秧田用水，而自 2 月 26 日開始用水；情境 S.3 與 S.2 之差異為延後自 3 月 4 日開始用水；情境 S.4 為不計秧田用水，自 3 月 9 日開始用水，錯開日數 20 日，最後收割日期 7 月 29 日；情境 S.5 為不計秧田用水，自 3 月 14 日開始用水，錯開日數 15 日，最後收割日期 7 月 29 日。其中情境 S.4 可較現況 2 月 1 日開始用水，推遲至 3 月 9 日開始用水，但尖峰水深增為

表 5 各情境旬用水量與現況之比較

	2 月	3 月			4 月			5 月			6 月			7 月	
	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中
S.2	73	95	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
S.3	0	56	105	120	101	104	106	100	100	100	100	100	105	140	225
S.4	0	17	122	131	99	109	109	98	101	101	101	98	106	160	281
S.5	0	0	108	147	100	109	114	98	99	101	102	95	108	167	375

單位：%

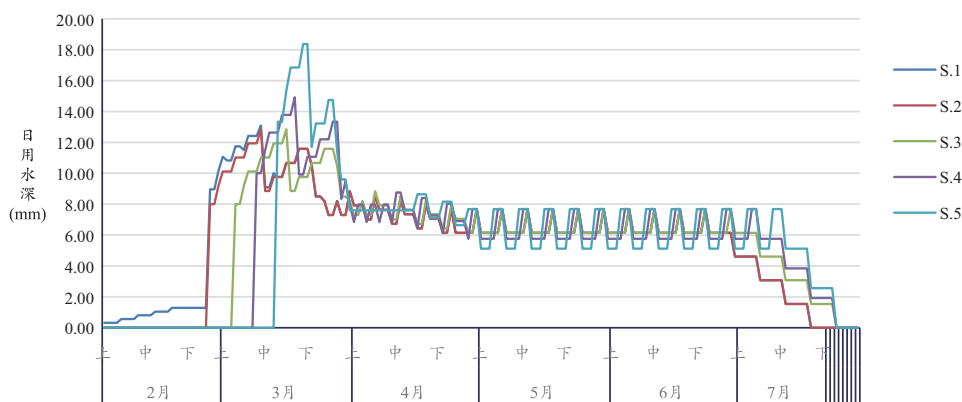


圖 3 各情境一期作田間用水深

表 6 各情境累積用水量與現況之比較

	2 月	3 月			4 月			5 月			6 月			7 月		
	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
S.2	50	81	88	91	93	94	94	95	95	96	96	96	97	97	97	97
S.3	0	39	64	79	82	86	88	89	90	91	92	92	93	95	96	97
S.4	0	12	54	73	78	82	85	86	88	89	90	90	91	94	96	97
S.5	0	0	41	68	74	78	83	84	85	87	88	88	90	93	96	97

單位：%

114%；情境 S.5 可推遲至 3 月 14 日開始用水，尖峰水深增為 140%，如表 5 所示。

由圖 3 及表 5 可看出，較長的錯開日數其尖峰用水量較低，但也拉長整個供灌時程，延長的灌溉時程相當於錯開日數減 1 日，如錯開日數 25 日係指將輪區分為 25 組逐日輪流灌溉，需以 25 日完成原本未分組以 1 日完成的用水項目，灌溉時程增加了 24 日。在渠道輸水容量與水源供給條件所能負擔的尖峰用水量下，縮短錯開日數即可縮短灌溉時程，在不影響第二期作耕作期程的前提下，可增加第一期作延後供灌的調整彈性。

至 4 月底止，情境 S.4 的累積用水量為現況 85%，情境 S.5 的累積用水量為現況 83%，如表 6 所示；情境 S.4 與情境 S.5 的最大旬用水量均發生在 3 月下旬，分別為現況的 131%與 147%，如表 5 所示。錯開日數的長短與用水尖峰呈現負相關，故縮短灌溉時程或降低尖峰用水量，是管理者須抉擇的課題。後續的分析將併同耕期的調整，探討對石門水庫配水量的影響。

六、氣候變遷模擬

稻作的產量與生育期程會因氣候變化而有

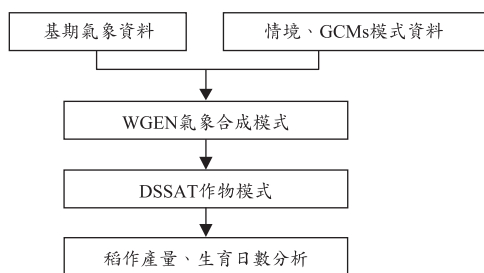


圖 4 氣候變遷模擬流程圖

所改變，耕期調整或氣候變遷可能會改變稻作生育期間的氣候條件，進而影響其產量與收穫期程，此為灌區內農民最關心的課題，故為評估耕期調整可行性的影響因子之一。本研究利用 DSSAT 模式模擬 2020-2039 年及 2050-2069 年間，氣候變遷及耕期調整對稻作產量與生育期程的影響，流程如圖 4 所示。

在氣象資料方面，採用行政院農業委員會桃園區農業改良場氣候候候站之 1985-1999 年日雨量及日平均溫度為基期資料，該測候站位於桃園市新屋區，東經 121°57'50.46"，北緯 24°57'09.54"，海拔 33.5 公尺。氣候變遷情境選用 A1B，A1B 是再生能源與石化燃料並用，發展比較平衡，在 IPCC 的第四次評估報告中，被認為是未來最可能發生的情境，也是最主要被闡述的情境。(行政院國家科學委員會，2011)。GCMs 則依據「強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力」(經濟部水利署水利規劃試驗所，2007)之相關係數分析選用 CGCM2_3_2、ECHAM5_OM、GFDL_CM2_1。藉由氣象合成模式，分別繁衍 2020-2039 年及 2050-2069 年各 120 組日雨量與日溫度資料，利用迴歸係數法推估日最高溫、日最低溫以及日輻射量(陳亨羽，2012)，再輸入 DSSAT 進行模擬，分析稻作耕期調整對產量及本田期生育日數的影響。

由於氣候變遷改變了溫度等影響稻作生育的因子，以第一期稻作本田期 3 月~7 月而言，2020-2039 年的溫度上升了 0.86-0.95°C，2050-2069 年的溫度則上升了 1.15-1.22°C，代入 DSSAT 作物模式後之模擬結果為：

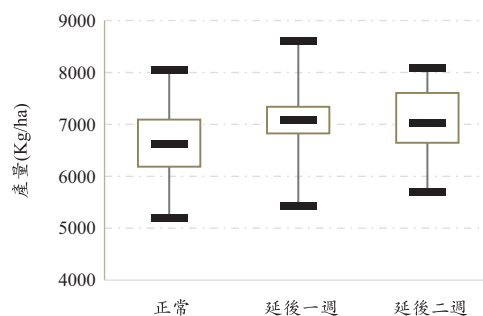


圖 5 2020-2039 年稻作產量變化

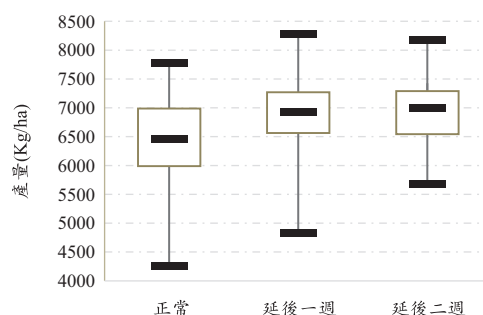


圖 6 2050-2069 年稻作產量變化

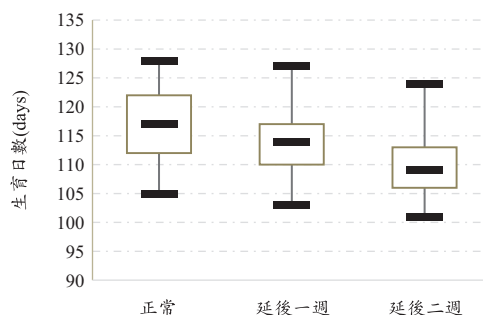


圖 7 2020-2039 年稻作生育日數變化

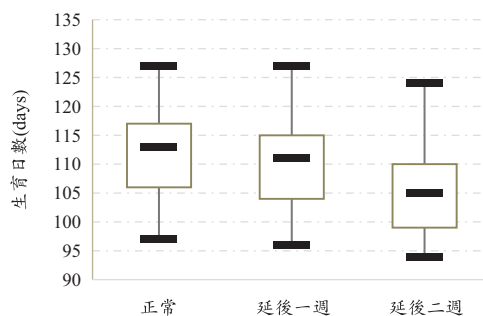


圖 8 2050-2069 年稻作生育日數變化

表 7 案例模擬之 4 種水文情境之旬入流量

		11 月			12 月			1 月			2 月			3 月			4 月		
		上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
1	超越機率 80%入流量	1,385	1,284	1,173	979	851	940	790	763	792	769	720	729	876	919	1,112	1,234	997	996
2	超越機率 95%入流量	1,035	996	926	783	702	780	653	614	706	659	591	615	682	674	837	833	836	747
3	2003 枯水期 入流量	814	996	972	783	818	1,483	1,180	851	774	720	635	494	619	626	1,112	2,515	1,801	1,001
4	2004 枯水期 入流量	1,035	1,127	1,722	1,218	833	800	653	618	949	2,971	1,797	918	1,654	1,039	1,938	2,945	1,498	1,364

水量單位：萬立方公尺

2003 枯水期：Nov. 2002 ~ Apr. 2003

2004 枯水期：Nov. 2003 ~ Apr. 2004

表 8 案例模擬之 3 種操作情境之差異條件

a	現況農作期	含秧田用水、3/1 本田開始、錯開日數 25 日
b	錯開日數 20 日	不含秧田用水、3/7 本田開始、錯開日數 20 日
c	錯開日數 15 日	不含秧田用水、3/14 本田開始、錯開日數 15 日

- 2020-2039 年與 2050-2069 年的稻作產量，在耕期延後一週時，平均產量較正常耕期增加約 7%~7.3%，但若延後為二週，平均產量與延後一週相較未有明顯變化。
- 由於稻作生育日數受溫度及日照時數影響，2050-2069 年的每一個耕期的生育日數均較 2020-2039 年的相同耕期為短；而同時期的生育日數也隨著耕期延後而縮短。

DSSAT 模擬正常耕期的稻作本田期日數，目前為 120 天，2020-2039 年約可縮短為 117 天，延後耕期一或二週時，由於生育期往高溫的夏季遞延，生育日數可再縮短為 114~109 天。為了不影響二期作耕作期程，一期作延後耕期一週時，錯開日數縮短為 20 日，延後耕期二週時，錯開日數縮短為 15 日。

七、案例模擬

由於本區域於 2003、2004 年一期作遭逢嚴重的乾旱而公告停灌，為瞭解不同灌溉操作對水庫用水調度的影響，本研究遂以超越機率 80%入流量、超越機率 95%入流量、2003 一期作枯水期

入流量、2004 年一期作枯水期入流量等 4 種水文情境，如表 7 所示；以及現況農作期、錯開日數 20 日並延後 1 週、錯開日數 15 日並延後 2 週等 3 種操作情境，如表 8 所示，交互 12 個案例情境進行用水模擬，並配合石門水庫運用要點所規定之水位條件操作，水庫水位在下限與嚴重下限之間時，農業用水 75%供應、民生用水 90%供應；水庫水位在嚴重下限以下時，農業用水 50%供應、民生用水 80%供應，模擬結果如表 9 所示。

枯水期用水量為前一年 11 月至當年 4 月，因應不同水位條件之管制措施後石門水庫供給農業、民生與工業用水之和，延後一週與現況相比僅略為減少，在 4 種水文情境下分別為 95%、94%、96%、97%；延後二週與現況相比，在 4 種水文情境下分別為 95%、93%、98%、96%，如圖 9 所示。

以 4 月底蓄水量而言，延後一週在入流量超越機率 95%的水文情境下有最明顯的改善，可由 1,031 萬立方公尺增至 2,966 萬立方公尺。其他 3 種水文情境亦可增加 982~1,479 萬立方公尺的蓄水量，如圖 10 所示。

表 9 模擬不同水文條件與操作規則下之用水管理結果

		4 月底 蓄水量 (10^4 m^3)	枯水期 用水量 (10^4 m^3)	農業 缺水率	民生 缺水率	水位低於 下限旬數	水位低於 嚴重下限旬數
Case 1a	現況農作期，80%入流量， 起始水位 240，水量 17,352	3,572	31,089	34%	11%	14	4
Case 1b	錯開日數 20 日，80%入流量， 起始水位 240，水量 17,352	5,050	29,611	20%	9%	18	0
Case 1c	錯開日數 15 日，80%入流量， 起始水位 240，水量 17,352	5,168	29,493	20%	9%	18	0
Case 2a	現況農作期，95%入流量， 起始水位 240，水量 17,352	1,031	29,991	38%	12%	12	6
Case 2b	錯開日數 20 日，95%入流量， 起始水位 240，水量 17,352	2,966	28,055	29%	11%	15	3
Case 2c	錯開日數 15 日，95%入流量， 起始水位 240，水量 17,352	3,107	27,914	29%	11%	15	3
Case 3a	現況農作期，2003 枯水期， 起始水位 236.5，水量 14,790	3,409	29,575	40%	13%	11	7
Case 3b	錯開日數 20 日，2003 枯水期， 起始水位 236.5，水量 14,790	4,585	28,399	27%	10%	16	2
Case 3c	錯開日數 15 日，2003 枯水期， 起始水位 236.5，水量 14,790	3,987	28,997	23%	10%	17	1
Case 4a	現況農作期，2004 枯水期， 起始水位 226.7，水量 8,990	5,745	28,324	38%	16%	4	14
Case 4b	錯開日數 20 日，2004 枯水期， 起始水位 226.7，水量 8,990	6,727	27,342	22%	14%	8	10
Case 4c	錯開日數 15 日，2004 枯水期， 起始水位 226.7，水量 8,990	6,845	27,224	22%	14%	8	10

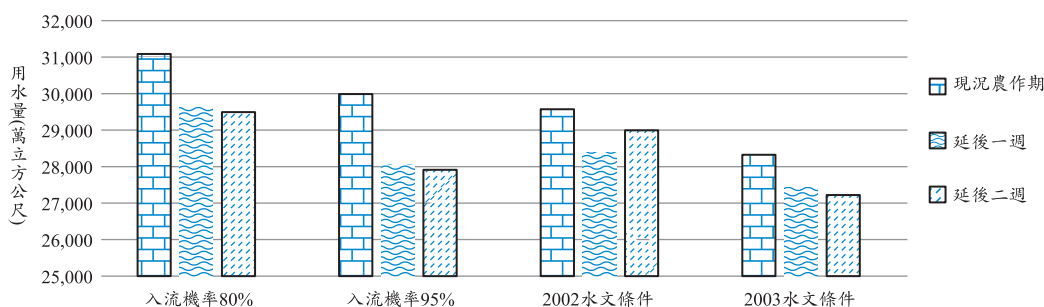


圖 9 各案例之枯水期用水量

以農業缺水率、民生缺水率而言，延後一週和延後二週幾乎相同。但操作情境 b 和現況相比則有相當明顯的改善，農業缺水率由 34%~40% 約可獲得 9%~17% 的改善、民生缺水率由 11%~16% 約可獲得 1%~3% 的改善，如圖 11、圖 12 所示。

八、結論與建議

由氣候變遷與作物模式的模擬得知，由於日照與溫度的增加，稻作若延後 1~2 週插秧，其產量在 2020-2039 年有增加的趨勢，而作物生長期則有縮短的趨勢，因此延後插秧對農民是利

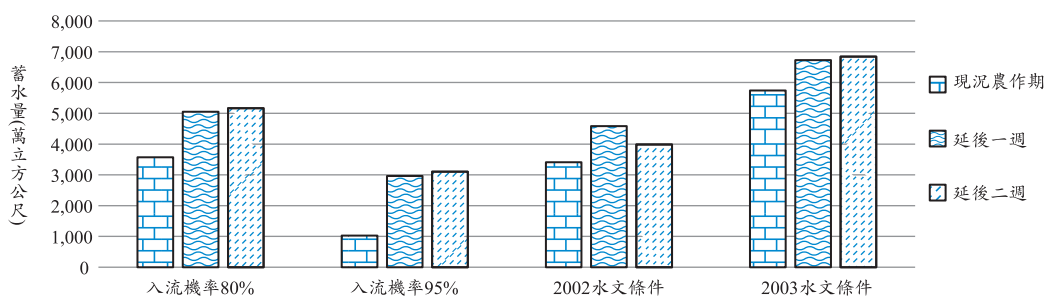


圖 10 各案例之期末蓄水量

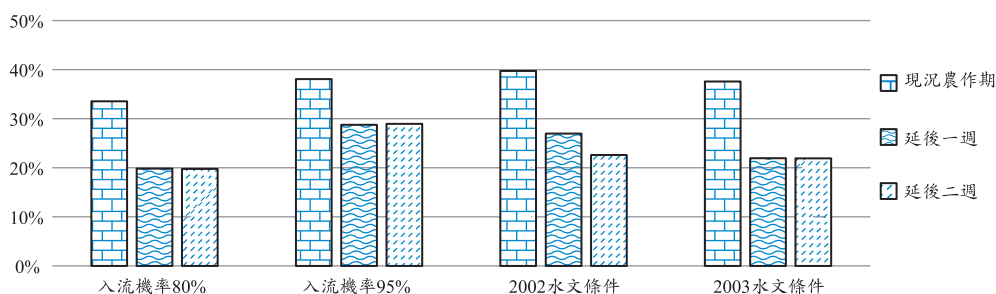


圖 11 各案例之農業缺水率

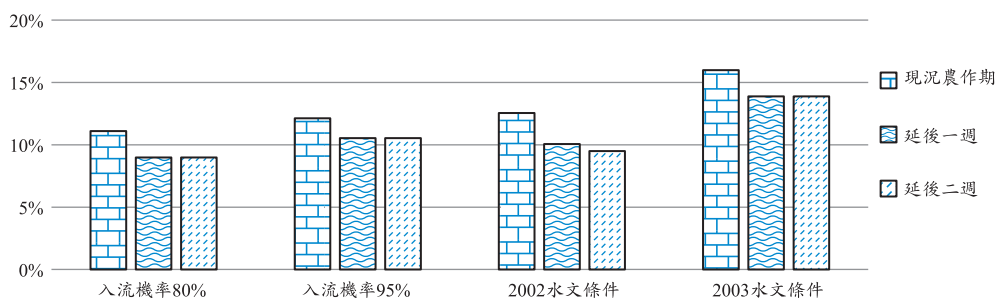


圖 12 各案例之民生缺水率

的，且不會影響二期作的耕期。

以農業缺水率、民生缺水率、水位低於嚴重下限句數而言，延後一週和延後二週幾乎相同。但操作情境 b 和現況相比則有相當明顯的改善，農業缺水率由 34%~40%約可獲得 9%~17%的改善、民生缺水率由 11%~16%約可獲得 1%~3%的改善、水位低於嚴重下限句數則可減少 3~5 句。

以 4 月底蓄水量而言，延後一週在入流量超越機率 95%的水文情境下有最明顯的改善，可由 1,031 萬立方公尺增至 2,966 萬立方公尺。其他 3 種水文情境亦可增加 982~1,479 萬立方公尺的蓄

水量。

枯水期用水量為前一年 11 月至當年 4 月，因應不同水位條件之管制措施後石門水庫供給農業、民生與工業用水之和，延後一週與現況相比略為減少，在 4 種水文情境下分別為 95%、94%、96%、97%；延後二週與現況相比，在 4 種水文情境下分別為 95%、93%、98%、96%。

由於延後 1 句與延後 2 週對農業缺水率、民生缺水率、水位低於嚴重下限句數、4 月底蓄水量而言差異不大，但與現況相較則有明顯的改善，且枯水期總供水量僅略為減少，對農業用水

管理單位衝擊不大，建議可再深入評估配套措施後試辦。

目前若要在育秧前公告停灌，並考量公文作業時間，農政機關建議於 1/10 前完成決策、於 1/20 前公告；在延後 1 旬插秧、縮短錯開日數為 20 日後，可延後至 2/10 公告。由於近 10 年石門水庫旬入流量中位數自 3 月起即有上升趨勢，若能配合中央氣象局對 3 月份的降雨預估，建議可延至 2 月上旬進行評估，並於決策後即透過媒體公告。

參考文獻

1. Jansen, D. M., "Potential rice yields in future weather conditions in different parts of Asia.", Netherlands Journal of Agricultural Science, Vol. 38 No. 4: 661-680, 1990.
2. Shaobing Peng, Jianliang Huang, John E. Sheehy, Rebecca C. Laza, Romeo M. Visperas, Xuhua Zhong, Grace S. Centeno, Gurdev S. Khush, and Kenneth G. Cassman, Rice yields decline with higher night temperature from global warming", PNAS, Vol. 101, 2004.
3. 行政院農業委員會，2007，「北部地區乾旱時期農業用水調用機制之建立」。
4. 行政院農業委員會，2015，「農田水利天然災害標準作業手冊」。
5. 行政院國家科學委員會，2011，「台灣氣候變遷科學報告 2011」。
6. 行政院經濟建設委員會，2002，「調撥農業用水之合理價格研究」。
7. 周玫君，2004，「氣候變遷及乾旱灌溉用水移用對水稻潛能產量影響」，台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。
8. 姚銘輝、陳守泓，2009，「氣候變遷下水稻生長及產量之衝擊評估」，作物、環境與生物資訊，6: 141-156。
9. 桃園農田水利研究發展基金會，2012，「台灣省桃園農田水利會水權維護及用水需求之調查評估」。
10. 陳亭羽，2012，「氣候變遷對桃園地區水稻產量及灌溉需水量之影響」，中央大學土木工程學系碩士論文。
11. 陳清田，2007，「水稻種植期距調整對灌溉用水量及生育產量影響之研究」，行政院農業委員會。
12. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2005，「桃園地區農地耕作調整促進水資源利用研究」。
13. 黃文政，2012，「氣候變遷對作物需水量與灌溉用水量之衝擊評估」，行政院農業委員會。
14. 臺灣石門農田水利會，2014，灌溉計畫書。
15. 臺灣桃園農田水利會，2014，灌溉計畫書。
16. 盧孟明、陳雲蘭、陳圭宏，2007，「全球暖化趨勢對臺灣水稻栽培環境之影響」，『全球暖化對臺灣農業氣象環境及作物生產之影響研討會』，中央氣象局。
17. 魏郁婷，2014，「氣候變遷下稻作生長期之變化與產量模擬及主成分分析」，中央大學土木工程學系碩士論文。
18. 魏綺瑪，2009，「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」，成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
19. 蘇宗振，2009，「氣候變遷下台灣糧食生產因應對策」，農政與農情，200: 37-40。

收稿日期：民國 104 年 6 月 4 日

修正日期：民國 105 年 1 月 6 日

接受日期：民國 105 年 1 月 7 日