

氣候變遷下的農業用水科學管理

Scientific Assessment on Agricultural Water Management under Climate Change in Taiwan

國立中央大學
土木工程學系
博士候選人

馬家齊

Chia-Chi Ma

國立中央大學
土木工程學系
教授

吳瑞賢*

Ray-Shyan Wu

摘 要

台灣地區因地形特殊，降雨在時間與空間上的分布相當不平均，近年來又受到氣候變遷的影響，水資源供應具高度不確定性，導致各標的用水競爭激烈。台灣早期的社會經濟以農業為主，但隨著經濟發展、產業結構改變，水稻栽培面積自 1975 年最高峰 79 萬公頃降至 2011 年 25 萬公頃，灌溉用水量則僅自 136 億立方公尺降至 111 億立方公尺。如此呈現的數據顯示水田灌溉面積雖減少，但灌溉用水量並未隨灌溉面積等比例減少，因此引發各界的質疑。故本文自水資源用水結構、農田水利會的用水管理等面向切入，以科學數據探討氣候變遷及農業政策對農業用水管理的影響，並以桃園農田水利會 2009 及 2011 年一期作抗旱用水管理為例，說明抗旱措施確能有效節約平常因休耕眾多、灌區零散而增加的輸配水損失及滲漏量，節約水量約為平水年灌溉用水量之 26%。

關鍵詞：氣候變遷，灌溉用水量，抗旱。

ABSTRACT

Due to the special topography, the rainfall in Taiwan is quite uneven both in time and space distribution. Partially due to the impact of climate change in recent years, the water supply with a high degree of uncertainty leading to the subject of intense competition for water. Taiwan moves from agricultural economy to the development of industrial economy. The cultivation area of rice in 1975 was 790,000 hectares, and reduces to 250,000 hectares in 2011. As a result, the irrigation water reduced from 13.6 billion m³ to 11.1 billion m³. This study discussed the structure of water resources, irrigation water management, and the scientific data relating to agricultural policies

*通訊作者，國立中央大學土木工程學系教授，32001 桃園縣中壢市中大路 300 號，raywu@ncu.edu.tw

affecting the agricultural water management under climate change. Case study in Taoyuan Irrigation Association in 2009 and 2011 demonstrates the approach in the water management for severe drought to reduce the losses and leakage in fallows effectively, and save about 26% of irrigation water in a normal year.

Keywords: Climate change, Irrigation water requirement, Severe drought.

一、前言

台灣早期的社會經濟以農業為主，但隨著經濟發展、產業結構改變，農業生產占國內生產毛額比重，自 1951 年的 32% 降至 2011 年的 2%；水稻栽培面積在 1975 年達到最高峰，達 79 萬公頃，之後便隨著產業結構的改變而逐漸減少，至 2002 年僅 30 萬公頃，1998 年加入世界貿易組織後，開放稻米及其他糧食作物進口，並推動水旱田利用調整相關計畫，稻作面積更逐年減少，至 2011 年僅餘 25 萬公頃。然而比較歷年農業用水量，水田灌溉面積雖減少，但灌溉用水量並未隨灌溉面積等比例減少，引發社會各方的質疑；而生活與工業用水需求則逐年增加，但開發新水源在天然條件或社會條件上均顯困難，且成本日高，故社會要求農業用水量酌予調降之壓力也愈來愈大。

台灣的水資源利用早年以農業灌溉為主，隨著經濟蓬勃發展、產業結構改變，業已轉變為各標的用水兼籌並顧之現況。農業的年用水量自 1984 年至 2011 年間，從 159 億立方公尺減少至 127 億立方公尺，而生活及工業用水量，則從 32 億立方公尺增加至 52 億立方公尺。除因產業結構改變造成水資源利用與分配跟著改變外，台灣地區因地形特殊，降雨在時間與空間上的分布相當不平均，近年來又受到氣候變遷的影響，水資源在供應量上更具高度不確定性，各地區缺水的風險逐漸升高，導致各標的用水競爭激烈。

氣候變遷下的氣溫變化及降雨型態的改變，影響了作物的生育期程，衝擊作物的品質、數量。如農業生產所需的水、土、及遺傳物種等自然資源可能受氣候暖化、降雨改變及極端氣候

所造成的災害衝擊而減少或劣化，使作物產量及品質下降，以致危及糧食安全。作物生育與氣溫有相當的關係，在氣溫增加 1.12~2.37°C，作物生長期會往前移動(蘇宗振，2009)，進而改變了農業灌溉的用水期程。臺灣地區水稻生產之灌溉操作特性為湛水灌溉，用水量大，使農業用水(含畜牧及養殖)占整體水資源年用水量 70%，而灌溉用水量又占農業用水量 90%，為農業用水項目中比例最大者，當灌溉用水量產生變化，用水結構就可能產生改變，因此合理評估灌溉用水量便顯得相當重要。

台灣過去之氣候變遷特性，平均氣溫和海平面的上升速度，超過全球變化的速率，足見氣候變遷對台灣氣候的影響已經很顯著。全台的年平均降雨量變化趨勢雖不明顯，但不降雨日數及降雨強度均有逐年增加的趨勢，尤其春季降雨日數減少較明顯(陳雲蘭，2008)，對於第一期作的農業用水有相當的衝擊。

目前已經有許多學者研究台灣地區氣候變遷的趨勢與影響，本研究希由農業用水結構與管理問題切入，在氣候變遷造成亢旱頻率增加的趨勢下，以 2009 與 2011 年桃園農田水利會針對石門水庫農業用水管理的實務經驗為案例，探討其因應枯旱的用水潛勢。

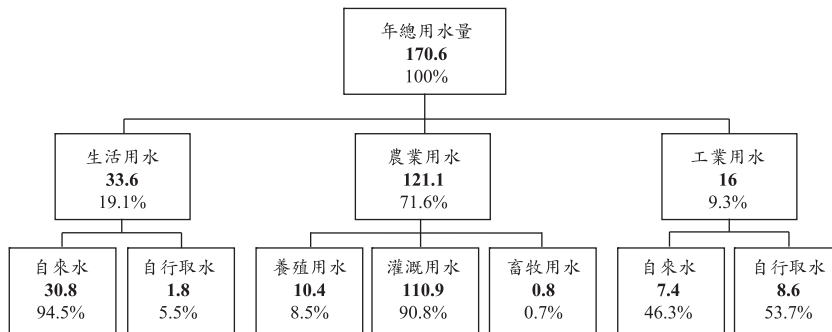
二、用水結構

台灣地區的水資源利用狀況與產業發達及社會變遷息息相關。水資源的分配成為影響台灣整體發展的因子中最重要的一環。近年來，在持續的都市化與工業化的發展下，用水結構隨產業結構之變遷而有所變化，因而引發水源缺乏與分配不均的問題，使得水資源成為影響區域發展最

表 1 台灣地區各農田水利會灌溉用水量

水利會	灌區面積 (ha)	計畫用水量 (10 ⁴ m ³ /yr)	實際用水量 (10 ⁴ m ³ /yr)	單位面積計畫水量 (10 ⁴ m ³ /ha/yr)	單位面積實際水量 (10 ⁴ m ³ /ha/yr)
宜蘭	18,549	92,628	86,289	4.99	4.65
北基	5,299	22,650	22,184	4.27	4.19
桃園	24,650	60,512	36,890	2.45	1.50
石門	12,085	23,902	20,057	1.98	1.66
新竹	7,464	36,458	36,725	4.88	4.92
苗栗	9,504	44,043	36,652	4.63	3.86
臺中	28,059	202,406	142,990	7.21	5.10
南投	12,412	56,343	59,721	4.54	4.81
彰化	46,631	255,276	143,070	5.47	3.07
雲林	64,864	238,323	138,388	3.67	2.13
嘉南	81,524	144,624	84,219	1.77	1.03
高雄	20,341	56,029	39,770	2.75	1.96
屏東	25,253	71,718	68,058	2.84	2.70
臺東	14,395	124,932	118,286	8.68	8.22
花蓮	12,498	84,645	115,968	6.77	9.28
七星	704	3,769	3,751	5.35	5.33
瑠公	268	1,120	1,153	4.18	4.30
小計/平均	384,500	1,519,378	1,154,171	3.95	3.00

資料來源：農田水利會聯合會，2010



水量單位：億立方公尺

資料來源：經濟部水利署，2010

圖 1 台灣地區 2010 年用水結構圖

重要的環境限制因子之一。台灣地區水資源年利用量大約 180 億立方公尺左右，隨著產業結構由早期之農業社會轉變成工商業社會，加上人口成長及都市化，用水結構亦產生很大變化，至 2010 年，生活用水達 33.6 億立方公尺，佔 19.1%，工業用水 16 億立方公尺，佔 9.3%，農業用水 121.1 億立方公尺，佔 71.6%，其中灌溉用水 110.9 億

立方公尺，佔年總用水量 65%，如圖 1 所示。

農業用水中以灌溉用水佔最大宗，約 90%，依據 2010 年農田水利會聯合會的統計資料，台灣地區 17 個農田水利會的灌區面積約 38.4 萬公頃，實際灌溉用水量約 115.4 億立方公尺，平均單位面積灌溉用水量約 3×10^4 m³/ha/yr，亦即每年 3 公尺深的水量，如表 1 所示。但因台灣地形

表 2 歷年各農田水利會大規模停灌事件統計

年度	農田水利會停灌範圍	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	11.3	2.3
2003	桃園、新竹頭前溪	3.1	2.8	10.6	2.4
2004	桃園、石門、新竹、苗栗、嘉南	11.8	6.5	27.9	4.0
2006	桃園、新竹頭前溪、苗栗明德	4.1	3.1	14.0	4.3
2010	嘉南曾文、烏山頭及白河；苗栗明德及中港溪	7.6	2.2	14.2	3.0
	小計	28.4	16.1	78	16

資料來源：行政院農業委員會，2011

多變，且跨熱帶與亞熱帶二個氣候區，加上農田水利會的主要水源尚有河川與水庫之別，故單位面積用水量差異極大，低者如嘉南水利會為 1.03 萬立方公尺/公頃，高者如花蓮水利會為 9.28 萬立方公尺/公頃，相差達 9 倍，蓋因其區域降水型態、蓄水設施、土壤質地、灌溉系統配置、灌溉制度、灌區耕地休耕轉作面積與分佈狀況等因素交錯影響，才会有如此的差異。

三、農業用水管理問題

近幾年常因亢旱而停灌的桃園、石門、嘉南農田水利會，其單位面積實際年用水量在平水年時即為各水利會最低者，均低於平均值 3 萬立方公尺/公頃甚多，甚至嘉南水利會僅 1.03 萬立方公尺/公頃，除因其灌區位於經濟高度開發地區，民生及工業用水標的需水量大且有逐年增加之趨勢，而其主要灌溉水源為水庫，利於配合農時供水，且有三年輪作區之劃設，亦即將灌區分為 6 組，每期作僅 1~2 組供應稻作水量，其餘各組則供應甘蔗或雜作水量，故在制訂灌溉計畫時即可規劃較高之用水效率，以相對少量的水灌溉較大的耕地面積；而水庫原本即兼負供應民生及工業用水之責，且亢旱時節餘之農業用水可直接蓄存於水庫中，更便於調度利用，因此水利主管機關基於水資源整體運用效益最佳化之考量，在缺水風險較高的一期作多採行較嚴苛的用水管制。因此位於亢旱區的石門水庫與曾文水庫灌區的農田水利會還有多少節水空間，是值得吾人深究的問題。

3.1 水利會的節水空間

由於社會發展，人口增加，且愈來愈集中於都會區，以致民生與工業用水需求大增，尤其北部地區，2002、2003、2004、2006、2010 年均有公告農田水利會灌區停灌紀錄，移用農業用水以支援民生工業用水，但須花費大量公帑，及大批人力物力辦理發放停灌補償費相關作業，5 個期作共計停灌面積 16.1 萬公頃，發放補償費 78 億元，調用水量 16 億立方公尺。如表 2 所示。在累積了數年的管理與調度經驗後，水利署與農田水利會、自來水公司、科學園區等主要用水單位漸漸磨合出水資源調度模式，雖然 2009、2010、2011 亦屬乾旱，但農田水利會停灌區已大幅縮減，大多以加強灌溉管理配合其他用水標的總量管制等方式度過缺水難關。

然而自 2002 年以來，農田水利會就辦理了 7 次的亢旱，頻率較以往增加不少，顯然除了氣候變遷造成極端水文事件頻率增加外，高度發展的都會區與工業園區，都增加了區域水資源調度的風險。亢旱區的水利會多以水庫為主要水源，因原本就採用較高之用水效率，相對的調度彈性就被壓縮了。

近年來，由於社會變遷，農村人口老化，農政當局配合加入 WTO 而推行休耕轉作，再加上亢旱頻仍，導致實際種植面積大幅下滑，看似農田水利會的用水調度彈性增加了，形成農業用水需求降低的假象，實則係農民迫於水源壓力與補償利誘而任其耕地休耕，長久以往，將嚴重衝擊城鄉的勞力結構、國土的合理利用、以及水土資

表 3 台灣各地區灌溉水深與稻作作物需水深之比較

地區	宜蘭	基隆	台北	新竹	台中	嘉義	台南	高雄	恆春	花蓮
一期作	406	404	464	484	512	319	441	430	500	438
二期作	721	629	686	820	787	721	854	786	841	660
合計	1,127	1,033	1,150	1,304	1,299	1,040	1,295	1,216	1,341	1,098
灌溉水深	4650	4,190	4,190	4,920	5,100	1,030	1,030	1,960	2,700	9,280
灌溉與需水比	412%	400%	370%	370%	400%	99%	79%	161%	200%	833%

註 1：資料來源：陳清田(1997)及本研究整理。

註 2：灌溉水深為表 1 單位面積實際水深，單位：mm。

源的永續發展。

3.2 合理農業用水量

農業用水與民生、工業等其他標的用水相較，有諸多特性使其估算較為困難，合理與否也不易論斷。例如：

1. 水源條件：以水庫或地下水為水源者，可以蓄豐濟枯，容易管控，也容易調度，便於提供適時適量的灌溉用水，具有較高的用水效率。若以河水或雨水為水源，則因其不易儲蓄，且豐枯水季差異大，豐水季多引水量高於需求量，而枯水季水量又不足所需，故用水效率較差。
2. 灌溉方式：以管路灌溉者，可以實施精密灌溉，以滿足作物需求為限，大大提高用水效率。若以明渠灌溉，除了輸水損失量大，田坵內的滲漏損失亦大，故其用水效率較差。但明渠灌溉除了灌溉效益，尚具有環境(如補充地下水、調節微氣候等)與生態效益(如提供水分給作物以外的動植物、提供棲地等)，此一部份之效益則不易估算。
3. 迴歸水的利用：河道與灌溉系統上下游的取水與排水、田區間的伏流水利用等，均有可能導致用水量重覆計算。
4. 作物需水量與環境維護：農業用水實際滿足作物需求的比例不高，由水田的水平衡方程式(如式 1，吳瑞賢，2011)可知，農業灌溉用水在滿足作物需求(ET)之後，大多仍於田間與渠道間以輸配水損失型態回饋於環境。如表 3 所示，以宜蘭地區為例，2 個期作的稻作需水深合計為 1127 mm，而灌溉用水深為 4650 mm，

作物需求僅占灌溉水深 24%，其餘回饋於環境中。

$$S_t = S_{t-1} + IR_t + IO_t + P_t - ET_t - DF_t - DR_t - Rh_t \dots (1)$$

式中，S 為田間保水量、IR 為灌溉水量、IO 為上游田區地表入流量、P 為降雨量、ET 為作物蒸發散量、DR 為田區地表出流量、DF 與 Rh 為垂直與水平滲漏量。

3.3 水的價值

自古以來，人類社會便將水視為重要的資源，除了生理上不可或缺，更將其廣泛運用於生活與生產。回顧古今中外水資源利用的歷史，水資源都與農業、工業與城鄉發展都有密切的「水源」關係。而其「價值」，亦隨著社會的變遷而有所改變：在農業型社會，大部分的水土資源使用於農業行為，為使大部分的人民獲得溫飽；轉型為工業型社會後，積極追求經濟發展與提高人民所得，以工業產值高於農業的觀念，逐漸轉移水土資源的使用；而到了經濟型社會時，成熟的經濟發展與高所得，人民開始追求更多的軟性建設，觀光業與服務業掘起；當社會發展趨於成熟穩定，多元價值受到肯定與重視，農業行為除了生產效益，逐漸注入了休閒與教育的元素，加上原有的生活與生態效益，水對於農業的價值大幅提昇。

現代社會重視週休二日，表示生活中有七分之一的時間進行休閒活動，水土資源的使用不應再侷限於生產行為，加上氣候變遷一再提醒人們對於自然的尊重，水土資源的使用應更著重多元價值的平衡。

四、氣候變遷對灌溉用水管理的影響

全球暖化的效應已日漸明顯，政府間氣候變遷委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) 於 2007 年第四次評估報告中分析不同地區之地表溫度資料，顯示全球平均溫度持續增溫中，從一萬年前到五千年前的自然增溫率為每千年 1°C ，近百年(1906-2005 年)的線性趨勢為 $0.74^{\circ}\text{C}\pm 0.18^{\circ}\text{C}$ ，近五十年(1956-2005 年)的增溫幅度更是近百年的兩倍。台灣年均溫在 1911 至 2009 年已上升 1.4°C ，增溫速率相當於每 10 年上升 0.14°C ，近全球平均值之 2 倍，而近 30 年來增溫速率更顯加快，每 10 年的上升幅度達 0.29°C 。

在降雨推估部分，由於雨量變化有很明顯的區域性差異，以總量而言，台灣地區在 100 年的線性變化趨勢並不明顯，但台灣地形複雜，不同季節有不同的天氣系統，冬季降雨有減少的趨勢，約在 -3% 至 -22% 之間；而夏季平均降雨則有增加的趨勢，約在 2% 至 26% 之間。且各個季節的降雨日數有減少的趨勢，尤以夏季的減少幅度最大。其中，對作物生長助益較大的小雨日數也大幅減少，百年趨勢為每 10 年減少 2 天，而近 30 年增加為每 10 年減少 4 天。這種原本多雨期間的雨量增加，而少雨季節雨量減少的趨勢，對台灣的水資源調配將是一大挑戰。(行政院國家科學委員會，2011)

台灣地區農業灌溉用水主要的供灌對象為水稻，一年可種兩期，一期作耕作時期約為 2 月至 6 月，二期作約為 7 月至 11 月。2002~2011 年的稻穀平均收穫量，一期作為 $6,588\text{ kg/ha}$ ，二期作為 $4,935\text{ kg/ha}$ ，因此政府為因應加入 WTO 後限量開放稻米進口而推行「水旱田利用調整計畫」以獎勵水稻田轉作或休耕後，農民多選擇以二期作辦理轉作或休耕，故一期作的稻作面積 $153,656$ 公頃遠大於二期作的稻作面積 $107,675$ 公頃(2002~2011 年平均)。但一期作適逢枯水期，加上氣候變遷效應下，冬季與春季降雨有減少的趨勢，而對作物生長助益較大的小雨日數也有大幅減少的趨勢，農業用水管理因此面臨嚴峻的挑戰。

由於春雨減少為氣候變遷下的趨勢，茲以石

門水庫供水區的桃園農田水利會在 2009 與 2011 年一期作，因春雨減少而配合水利署北區水資源局採行抗旱用水管理為例，探討農業用水管理所面臨的挑戰。

桃園農田水利會位於台灣北部，屬海島型亞熱帶氣候，一年四季均為作物生長季節，年平均溫度為攝氏 21° ，夏季長而溫度高，平均在攝氏 27.6° ，冬季短而溫度略低，平均在攝氏 15° 。平均年雨量為 $1,900$ 公厘，雨量之季節分配，夏季雖較冬季為多，但冬季並不過分乾旱，降雨之有效利用率約為 30%。桃園大圳灌區屬於水庫及埤塘灌溉營運系統，轄有埤塘 284 口，有效貯水量達 $4,580$ 萬立方公尺，如同一小型水庫，其水源係配合水庫之營運，由水庫放水，經幹支分線灌注，亦可由河水堰取入或由各貯水池上游集水區匯集雨水，先蓄存於埤塘中，再依田間實際需求，依時依序穩定供灌。

桃園農田水利會自 2002 年起，於 2003、2004、2006 一期作開始前即因水利主管機關預估當時水源未能完成灌溉任務而公告停灌；而 2002、2009、2011 亦因春雨及梅雨降雨量嚴重不足而採行減量供灌之亢旱措施。其中 2009 年一期作的累積雨量僅為近十年平均值的 56.7%，2011 年一期作累積雨量則為近十年平均值的 79.3%，如表 4 所示。

2009 年一月份的石門水庫水位約維持在 EL.239m 附近，接近水庫操作規線下限，推估春雨亦較往年來得遲且少，但北區水資源局鑑於前幾次的公告停灌耗費大量公帑，而當時水情尚稱不上嚴峻，故以每旬召開用水調度會議的方式，與農田水利會及自來水公司協商，採行積極的減供措施以減少水庫蓄水的支出，等候春雨或梅雨的來臨，農田水利會及自來水公司則以減少損失水量為目標，各自採行加強管理的措施，至 5 月底梅雨來臨而使旱象趨緩時，水庫蓄水量尚有 $7,826$ 萬立方公尺，抗旱成效甚為顯著。顯見在農田水利會及自來水公司的配合下，加強用水管理足以應付春雨不足的狀況，而無需公告停灌耗費大量公帑，因此 2011 與 2013 年亦發生類似春雨不足的狀況時，便比照 2009 年的加強用水管

表 4 桃園農田水利會灌區 2009、2011 年一期作旬雨量及旬累積雨量

	二月			三月			四月			五月			六月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
2009	3	24	2.3	103.4	10.3	35.4	18	43.3	23.9	2.6	0.4	20.3	141.9	22.3	11.8
2011	2	51.2	0.4	38.2	8.5	49.4	7.1	9.3	7.1	8.6	187.9	29.9	20.4	18.6	208.8
近十年平均	36.4	39.4	25.9	53.7	27.1	75.1	51.7	31.3	38.8	54.1	67.9	64.5	152.2	52.4	46.0
2009 累積雨量	3	27.0	29.3	132.7	143.0	178.4	196.4	239.7	263.6	266.2	266.6	286.9	428.8	451.1	462.9
2011 累積雨量	2	53.2	53.6	91.8	100.3	149.7	156.8	166.1	173.2	181.8	369.7	399.6	420.0	438.6	647.4
近十年 平均累積雨量	36.4	75.8	101.7	155.3	182.4	257.5	309.2	340.5	379.3	433.4	501.4	565.9	718.0	770.4	816.4

註 1：近十年係指 2003~2012 年

註 2：各旬雨量係桃園農田水利會 15 個雨量測站值以加權法求之。

註 3：雨量單位為 mm。

理方式順利渡過。由於 2013 年一期作的加強用水管理措施施行尚未及一個月即因持續降雨而提前中止，故本文未列入討論。

在水利主管機關開始減供灌溉用水後，桃園農田水利會便以(1)每旬視水情狀況減少供水若干日數；(2)優先使用埤塘蓄水及河川水源，並加強埤塘調控；(3)增聘掌水工加強水門管理等措施因應。

為便於桃園大圳之灌溉管理，並儘量提高水頭、集中水量，以減少輸水損失，對於計畫量打折之總量管制，係以減少每旬供水日數的方式進行操作，各工作站需增加水門之操作頻率，尤其幹支線直接灌區，面積約 3,296 公頃，因無埤塘可供調蓄，完全仰賴桃園大圳供水，因此大圳的斷水日數便受限於直接灌區之耐旱程度。此外，由於社會經濟環境的改變，桃園市、蘆竹鄉、中壢市等區域已高度都市化，除了灌溉面積減少，休耕及轉作比例也大幅增加，稻作區域主要集中在桃園縣大園鄉、觀音鄉、新屋鄉及新竹縣新豐鄉、湖口鄉，然因位於桃園大圳下游地區，若幹線斷水頻率太高則易造成供水不穩定及輸水損失增加，因此，為了下游地區的穩定供水，除了增聘掌水工加強水門調控管理外，如遇連續多日未雨，乾燥高溫時，便需商請北區水資源局增供水量，以滿足用水需求；若灌區有效雨量達 10 mm 以上時，便停供隔日之灌溉用水，或延長該旬停

水日數，儘量將珍貴水資源蓄存在水庫中。表 5 為桃園農田水利會於 2009、2011 年一期作之用水管理成果，其中計畫用水量為正常水情條件下之計畫供灌水量、水庫配水量為水庫管理機關(經濟部水利署北區水資源局)依據水情條件且經協商後實際核配之水量、支援自來水公司水量則為會議協商後，北區水資源局實際核配給自來水公司之水量仍不足支應民生所需，而由自來水公司另行向水利會付費調撥之水量，故農業實際用水量為水庫配水量減去支援自來水公司水量。

自 2 月一期作整田期開始至 6 月底本田期結束，桃園農田水利會所節約之灌溉水量在 2009 年為 5,456 萬立方公尺，2011 年為 5,370 萬立方公尺；而石門水庫集水區之水文狀況，在因降雨而使旱象趨緩前，其蓄水量分別為 7,826 萬立方公尺(2009.5.31)及 5,101 萬立方公尺(2011.5.10)，可見若未能及早實施各項水管制措施，則石門水庫將可能見底。

桃園灌區 2009 年一期稻作面積為 6,893 公頃，其他作物面積 3,384 公頃，若以抗旱時僅灌溉水田之原則下，實際用水深為 1.26 公尺；2011 年一期稻作面積為 6,801 公頃，其他作物面積 3,628 公頃，實際用水深為 1.36 公尺，均約與本灌區之計畫用水深 1.23 公尺相當，亦即抗旱措施有效節約了平常因休耕眾多、灌區零散而增加的輸配水損失及滲漏量。

表 5 桃園農田水利會 2009、2011 年一期作用水管理情形

月份	旬別	計畫用水量	水庫配水量		支援自來水公司水量		農業實際用水量		農業實際用水比	
			2009	2011	2009	2011	2009	2011	2009	2011
2	上	1,086	0	349	0	10	0	339	0%	31%
	中	1,086	1,094	989	173	50	921	939	85%	86%
	下	869	851	843	135	40	716	803	82%	92%
3	上	1,144	653	1076	161	197	492	879	43%	77%
	中	1,144	829	818	173	199	656	619	57%	54%
	下	1,258	619	743	190	169	429	574	34%	46%
4	上	1,122	715	737	173	195	542	542	48%	48%
	中	1,122	721	716	173	199	548	517	49%	46%
	下	1,134	620	649	173	164	447	485	39%	43%
5	上	1,065	835	612	193	199	642	413	60%	39%
	中	1,065	928	430	216	106	712	324	67%	30%
	下	1,169	951	588	138	55	813	533	70%	46%
6	上	1,023	581	812	86	54	495	758	48%	74%
	中	1,023	823	807	86	50	737	757	72%	74%
	下	1,023	657	794	86	50	571	744	56%	73%
小計		16,333	10,877	10,963	2,156	1,737	8,721	9,226	53%	56%

註 1：水量單位為萬立方公尺。

在農業灌溉用水管理上，灌溉用水除了滿足作物生育所需外，尚包含了田區蒸發量、滲漏量、配水損失、幹支線輸水損失、甚至迴歸水的利用等諸多不易計量之因素，加上近年來因獎勵休耕轉作政策而使得實際稻作面積大幅減少且分布零散，使得管理所需的消耗水量相對增大。桃園灌區自 2002 至 2013 年的 12 個一期作中，2003、2004、2006 於期作開始之前即因評估石門水庫蓄水量不足以完成灌溉而公告停灌，2002 則先採行抗旱措施後仍於 5 月份公告停灌，2009、2011、2013 則因春雨不足而自本田地期開始採行抗旱措施，僅 2005、2007、2008、2010 與 2012 等五個平水年依計畫量供灌。

由於近幾年來的農地利用狀況因農業政策的更迭與社會的發展而有很大的變化，尤其桃園位處大台北地區週邊，變化更是迅速，因此本研究選擇近 5 年內的 3 個平水年：2008、2010 與 2012 年一期作的平均資料來與前述 2009、2011 年一期作的亢旱條件做比較，三個平水年一期作的平均稻作面積 8,680 公頃，其他作物面積平均 3,417 公頃，水庫實際配水量平均 15,366 萬立方

公尺，平均實際用水深為 1.77 公尺。且因北區水資源局在枯旱期亦對自來水公司的供水實施管制，因此自來水公司的民生及工業用水缺口仍需向農田水利會調用，桃園水利會 2009、2011 年一期作的調用量平均 1,946 萬立方公尺，若將支援自來水公司的水量扣除，則平均灌溉水深約 1.31 公尺，約為平水年時之 74%。

近三個平水年一期作的平均灌溉水深與稻作需水深比值約為 365%，採行抗旱措施後可降為 271%，灌溉用水用於滿足稻作生育所需的比例，由 27%提昇為 37%，亦即透過抗旱措施的管理手段，可減少灌溉用水在田區蒸發、滲漏、輸配水損失、迴歸水利用等方面的消耗，節約之用水深 0.46 公尺即為抗旱措施之成效。亦可反推為 1.31 公尺為類似管理強度下的灌溉水深。

桃園農田水利會在這兩次亢旱所採行的抗旱措施主要為間歇供水、加強埤塘調控與加強水門管理等三項，即可使灌溉水深降至平水年之 74%，亦即 1.31 公尺/期作。本文雖非以水平衡方程式或相關之水文模式或作物模式來模擬灌溉用水的管理方法，但係以實際執行的案例討論，

將田區蒸發量、滲漏量、輸配水損失、甚至迴歸水的利用等諸多不易計量或量測之因子加以包裹，推求具可行性之抗旱措施潛在效益，以及灌溉用水管理之可能最低需求。

五、農業政策對灌溉用水管理的影響

2011 年行政院農業委員會「全國糧食安全會議」之重要結論包括：訂定 2020 年糧食自給率達 40% 為政策目標，用以調整國內生產結構，以及將農地與水資源作最有效利用；掌握糧食進口來源，加強國際農業投資與合作，打造無國界之糧食安全防護網；建構糧食安全分級管理體系，掌握糧食安全存量，建立儲備機制；提升農業用水及農地之利用效率，維護優質糧食生產所需水土資源，確保糧食安全等。

為了因應氣候變遷造成的國際糧食供應風險，維護國家的糧食安全，政府自 2013 年起針對連續休耕地 5 萬公頃，請地主自行復耕一個期作或出租給別人種植轉(契)作作物，將原休耕給付經費轉為轉(契)作補貼，鼓勵種植進口替代作物如飼料玉米、大豆、短期經濟林等、或毛豆、結球萵苣、胡蘿蔔等具外銷潛力作物，或有機作物與地區特產等，以提高國內糧食自給率及維護農業生產環境。預期效益可提高糧食自給率於 2016 年達 34.9%；增加總產值及效益達 88 億元；並減少 61,772 噸二氧化碳排放量。

「調整耕作制度活化農地中程計畫」以目前二期作皆休耕之優良農地為率先辦理的目標，雖然計畫推廣之復耕作物均為需水量較水稻少的旱作，推估復耕所需之年需水量亦達 6.46 億立方公尺，如表 6 所示，與近 10 年實際用水量相較，南部地區用水量增率達 16.8%，北部地區亦達 6%。實際用水量加上復耕增需水量仍在原核定之水權量範圍內，但相對減少枯旱因應彈性，尤其重點推廣期程落在枯水的第一期作，對水資源調度造成較大的負擔，特別是石門水庫與曾文水庫灌區，若能延後其需水尖峰至春雨或梅雨期之後，例如延後插秧一至二旬或延長插秧期的錯開期距，應可大幅降低缺水之風險。

2013 年為「調整耕作制度活化農地中程計

表 6 配合活化休耕地之需水量(以釀酒高粱推估)

	2002~2011 平均用水量	活化農地 需水量	合計 水量	用水量 增率
北部	20.27	1.22	21.49	6.0%
中部	53.72	1.72	55.44	3.2%
南部	18.29	3.07	21.36	16.8%
東部	22.28	0.45	22.73	2.0%
小計	114.56	6.46	121.02	5.6%

資料來源：淡江大學水資源政策研究中心，2012

畫」之第一年，依據農糧署 2013 年 3 月上旬之統計推估，全國之復耕面積約為 1.1 萬公頃，水利會灌區中增加最多的則為石門水庫供水區的桃園灌區，約增加 1,700 公頃，且絕大多數種植水稻，實因水稻耕作流程較為簡便，且代耕制度盛行之故。

但 2013 年的春雨未來，石門水庫集水區 1~3 月份的降雨量僅為歷年平均值的 18%，水庫水位由 1 月 1 日接近滿水位的 244.6 公尺，已在 3 月 12 日降至下限 233 公尺，而中央氣象局亦預測台灣地區在 5 月以前偏乾的機率較大，因此經濟部水利署北區水資源局邀集農田水利會與自來水公司協商，農業用水自 3 月中旬起以計畫量 75% 供應，而自來水則以管制量每旬 1200 萬立方公尺 90% 供應，其缺口由自來水公司逕向農田水利會協商以加強灌溉管理節餘水來補足。

然而本期作恰逢「調整耕作制度活化農地中程計畫」而增加約 1,700 公頃之稻作面積，為確保稻作之正常生長，桃園農田水利會之加強灌溉管理節餘水量勢必減少，本研究建議以滿足計畫用水深為確保稻作生長之必要水量，其與石門水庫實配水量之差值即為可支援自來水公司之加強灌溉管理節餘水量。

3 月中旬水庫以計畫量 75% 配水，為 $858 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，確保稻作生長之必要水量每旬平均 $697 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，即初步有 $161 \times 10^4 \text{ m}^3$ 之節餘水可支援其他標的。如需增加支援量，應可由增加掌水工、巡守人員、夜間管理人員、改善幹支線、埤塘、水門之輸水損失與漏水等措施，投入適當的人力與物力。

六、結 論

台灣的水文條件、地理環境與耕作習慣，均具有區域性，應據以發展適性的農業環境。例如豐枯水季明顯，產量好的一期作適逢枯水季，則獎勵開發多重水源，如地下水，於管制條件下充分運用，並配套於豐水季時加以補充，鼓勵於二期作休耕種水。此外，部分用水吃緊地區，則廣設農塘，於枯水季增加有效雨量利用率，並合理使用地下水，豐水季則大量補充地下水；將主要水源供民生與工業使用，並調換角色成為農業之備用水源。

近年來，由於亢旱頻繁、農糧政策的誘導、以及都市發展，農田水利會的灌區面積逐年減少，作物需水量降低，但灌溉系統並未跟著調整，導致操作水量節約有限，未相對增加節水空間；應積極輔導農田水利會改善灌溉系統，提高水資源運用效率；或加速推動水利會的水權多元化經營，有效利用現成之灌溉輸水設施，增加農田水利會節約用水之誘因。

對於農業用水量的合理性，宜有更整體的考量。由於農業灌溉的特性，河道與灌溉系統同時有取水也有排水，故下游地區使用上游地區的迴歸水情形相當普遍，使得農業用水量重覆計算。且農業用水不等於作物需水，其實作物實際耗水量不高，多引入之水量若能分配得宜，亦有助於水土資源的涵養。因此，應依據水源水文條件的時空差異，鼓勵農業於豐水期多引水，以涵養水土資源。

農業政策需考量時空環境差異，配合國土合理利用與區域性水文條件，制訂適地性的政策，以求取國土資源最佳利用。例如行政院農業委員會於 2013 年推行活化休耕農地政策，政府宜以跨部會的角度，切實檢討休耕政策及未來的活化休耕農地政策的良窳，對於農村勞力結構、糧食安全、國土的合理利用、區域水資源調度運用、氣候變遷的應變能力等各個面向，做一整體的考量，再依據區域環境特性與差異，制訂適地性的政策。

水的價值隨社會變遷而演進，而農業行為除

了生產效益，逐漸注入了休閒與教育的元素，加上原有的生活與生態效益，農業的價值大幅提昇。現代社會愈來愈重視週休二日，表示有七分之一的時間進行休閒活動，水土資源的使用應更著重多元價值的平衡。為了因應氣候變遷，水資源的合理利用，重要性不亞於國土的合理利用，更應該加以整合，謀求平衡。

由於氣候變遷的影響，台灣地區大豪雨日數增多，使得洪災風險升高，而小雨日數大幅減少，有效降雨率降低，昇高了旱災的風險，同時，乾濕季的極端化愈趨明顯，用水管理需增加彈性，農地的保水力與排水能力均需加強。台灣北部地區枯水期之供水情勢將更嚴峻，南部地區由於高度依賴豐水期之降雨，均需加強梅雨季與颱風季之水庫操作與水資源管理。

以桃園農田水利會 2009 與 2011 年之抗旱經驗觀之，稻作面積減少卻分布零散，平水年時仍依計畫量核配水量，實際用水深便高於計畫用水深，為粗放之管理方式；枯水年採行抗旱措施後，以計畫用水深乘上實際稻作面積，換算為確保稻作生長之必要水量，與實配水量之差值即為可供支援調度之彈性空間。建議未來可再依不同的稻作生育期估算各生育期之確保稻作生育必要水深，以作為抗旱措施投入成本與效益評估之基準。

誌 謝

本研究承蒙桃園農田水利會資料協助，部分成果發表於 2011 年農業工程研討會專題演講「農業用水管理的科學觀點」，內容並獲溫理仁先生及郭慶和先生指導，特此致謝。

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. Liu, S. C., C. Fu, C.-J. Shiu, J.-P. Chen, and F. Wu. Temperature dependence of global precipitation extremes, *Geophysical Research Letters*,

- 2009。
3. 甘俊二，「台灣稻作灌溉用水量推估方法之研究」，農田水利，38(6)，1991。
 4. 行政院國家科學委員會，「台灣氣候變遷科學報告 2011」，2011。
 5. 行政院農業委員會，「100 年度提升農業水資源利用效率政策規劃與灌溉管理資料庫維護計畫」成果報告，2011。
 6. 行政院農業委員會，「100 年農業統計年報」，2011。
 7. 吳瑞賢、李明旭、陳亭羽，「氣候變遷對桃園地區水稻產量及灌溉需水量之影響」，台灣水利，2012。
 8. 吳瑞賢、李明旭、陳世偉，「農業區地表水系統之模擬與推估」，農業工程學報，57(1)，2011。
 9. 姚銘輝、陳守泓，「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，6：141-156，2009。
 10. 姚銘輝、盧虎生、朱鈞、蔡金川，「DSSAT 模式在預測水稻產量及氣候變遷衝擊評估之適用性探討」，中華農業研究，49(4)：16-28，2000。
 11. 陳清田、甘俊二，「台灣地域性作物需水量之推估研究」，農業工程學報，43(3)，1997。
 12. 陳雲蘭，「百年來台灣氣候的變化」，科學發展 424 期，2008。
 13. 經濟部水資源局，「研擬合理農業灌溉用水標準(III)及農業用水調配之可行性方案研究」，經濟部水資源局，1997。
 14. 虞國興、許書平，「氣候變遷對水資源衝擊－雨量分析」，農業工程學報，44(1)，1998。
 15. 劉瑋亭，「溫度單位對水稻植株生育及產量之影響」，中興大學農藝研究所碩士論文，1990。
 16. 蘇宗振，「氣候變遷下台灣糧食生產因應對策」，農政與農情，200：37-40，2009。

收稿日期：民國 102 年 8 月 27 日

修正日期：民國 102 年 12 月 3 日

接受日期：民國 102 年 12 月 5 日