

氣候變遷對曾文-烏山頭供水地區水資源供需 之衝擊評估

Impact of Climate Change on Water Supply in Tsengweng-Wushantou Area

國立臺灣海洋大學
河海工程學系
教授

黃文政*

Wen-Cheng Huang

國立臺灣海洋大學
河海工程學系
碩士

張修明

Hsiu-Ming Chang

國立臺灣海洋大學
河海工程學系
碩士

賈佳芸

Chia-Yun Chia

國立臺灣海洋大學
河海工程學系
博士生

朱泰毅

Tai-Yi Chu

摘 要

本研究以曾文水庫上游集水區為研究區域，探討氣候變遷下曾文水庫集水區流量變化對曾文-烏山頭水庫供水地區水資源供需之影響。本研究採用 SRES A1B 情境中五種大氣環流模式輸出之未來日雨量與溫度資料(2046-2065)，透過水筒模式推求曾文水庫之未來入庫流量；並於已知未來下游需求量與水庫入流量之情況下，依照水庫操作規線對曾文-烏山頭水庫進行供水系統模擬，來評估氣候變遷下曾文-烏山頭供水地區各標的用水風險。

分析結果顯示未來氣候變遷將導致曾文水庫之入庫流量減少，降雨分佈較現況集中，造成缺水情況更為嚴重，其中未來若維持目前耕種面積情況，各模式公共缺水指數介於 0.4-1.62 之間，平均公共年缺水量為 11.63 MCM，平均農業年缺水量為 127.63 MCM；若減少耕種面積 10 %時，各模式公共缺水指數介於 0.23-1.2 之間，平均公共年缺水量為 8.95 MCM，平均農業年缺水量為 88.86 MCM，於該情況下之模擬結果，不論公共年缺水量或平均農業年缺水量皆與現況(1991-2010)分析結果較為接近。

關鍵詞：氣候變遷、曾文-烏山頭水庫、用水風險。

ABSTRACT

The purpose of this study is to estimate the watershed discharge, and assess the impact on water supply for Tsengweng reservoir in southern Taiwan under climate change.

*通訊作者，國立臺灣海洋大學河海工程學系教授，20224 基隆市北寧路 2 號，b0137@mail.ntou.edu.tw

This study selects five GCMs (General circulation models): with SRES A1B from CCCma_CGCM3, CNRM_Cm3, CSIRO_Mk3.0, GFDL_Cm2.0, and LASG_FGOAL-g1.0 for future (2046-2065) meteorological projection.

By applying the tank model, Tsengweng's inflow can be estimated. Based on the future inflow, water demand and reservoir operation rules, the risk of water supply of the Tsengweng-Wushantou joint operation can be assessed.

The results show that the inflow of Tsengweng reservoir would decrease in the future and the rainfall distribution is more concentrated than the present. That is, water shortage will be worse than the present. But if we cut off the irrigation area by 10% in the future, then water shortage situation will be similar to the present.

Keywords: Climate change, Tsengweng-Wushantou reservoir, Risk of water supply.

一、前言

近年來各國追求經濟及工業的快速發展，造成大量排出的二氧化碳、甲烷、氟氯碳化物等溫室氣體，對環境影響甚鉅，並造成溫室效應，使得地球溫度上升，而各地出現極端氣象(暴雨、旱災等)更加頻繁，因此氣候變遷成為近年來最重要的議題之一。根據聯合國政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次評估報告(The Fifth Assessment Report, AR5)指出因經濟快速發展之情形下導致全球溫室氣體增加的可能性由 90%的“非常可能(very likely)”增加至 95%的“極端可能(extremely likely)”。溫室氣體增加導致了地表溫度上升，這與全球水循環有密不可分的關係，因此造成極端氣候的發生頻率增加，降雨分布也會隨之改變，在未來我們需要更加關注以及訂定相關因應的對策。

由於台灣南部地區的降雨分布於豐水期與枯水期比例為 9:1，豐枯差異相當明顯，雨量主要集中於 5-10 月期間多為梅雨季節與颱風期間之暴雨，水庫無法有效存蓄所有降水，因此水資源調度及規劃對於台灣南部地區相當重要；曾文-烏山頭水庫每年計畫分配水量主要為供應農業需求，而近幾年颱風侵襲且暴雨事件發生頻率日益增加，造成水庫邊坡嚴重崩塌，使得大量泥沙

淤積於曾文水庫中，造成有效蓄水量大幅減少。對於氣候變遷造成氣候型態改變及有效蓄水量大幅減少之情況下，本研究將針對曾文-烏山頭水庫供水地區水資源調配進行研究與探討。

氣候變遷對集水區河川流量之影響，可藉由不同 GCMs 所推估之降雨量，配合降雨逕流模式來進行演算。有許多模式與方法可描述集水區降雨逕流關係，如單位歷線(Unit hydrograph; Sherman, 1932)、水筒模式(Sugawara, 1961)、地形指數模式(TOPMODEL; Beven and Kirkby, 1979)、HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning; Bergström, 1976)與 GWLF (General Watershed Loading Functions; Douglas *et al.*, 1992)等。其中水筒模式曾在亞洲地區廣泛推廣，並獲得普遍認同(李光敦，1993)。水筒模式之基本概念乃是將集水區系統之逕流機構，以數個貯留型之模型容器加以類比，考慮流域內複雜存在之水文因子，諸如入滲、滲漏、貯留、蒸發、地表逕流、中間流及基流等現象，藉以模擬流域內降雨—逕流之定率關係(王如意等，1980)。

氣候變遷亦會影響下游農業灌溉用水量之變化。Eheart and Tornil (1999)利用 Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC)模式估算不同情境下氣候變遷對灌溉用水之影響。Döll (2002)以 Global Irrigation Model (GIM)評估全球淨灌溉需求量，結果顯示於 2020-2029 年需求量

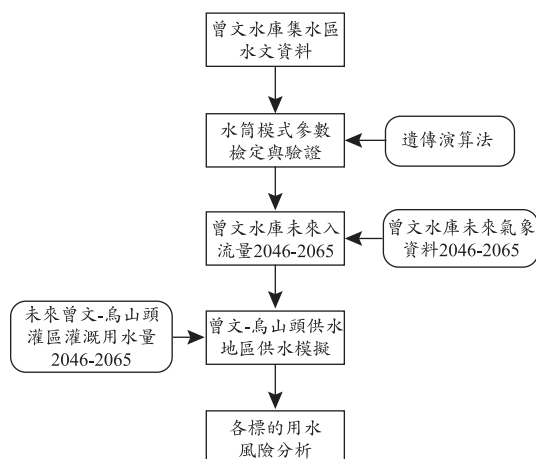


圖 1 研究流程圖

將較 1961-1990 年增加 3%至 5%。

而水資源系統分析方法主要分為模擬法(Simulation)與優選法(Optimization)兩大類。模擬法為根據系統設定之條件，如水庫不同操作策略或運轉規則，以數學或數值方法來模擬系統的反應(如放水量和蓄水量變化等)，以進行水資源供需分析之方法，常應用於水資源長期規劃模擬；優選法則應用於系統操作規則不易明訂下，透過各類優選演算法(如線性規劃、啟發式演算法等)求出系統的最佳供水規則，常應用於多目標水庫操作分析。黃文政(2009-2012)以模擬法探討霧社水庫淤積與湖山水庫完工後對彰雲地區供水之綜合影響，結果顯示霧社水庫淤積後，所增加之溢流量仍可為日月潭水庫與集集攔河堰攔蓄利用，對下游供水影響不大；湖山水庫完工後，依其原來目標民生用水將可完全滿足，但有利用效率低落之虞。

本研究主要為探討氣候變遷對曾文-烏山頭水庫供水地區水資源供需之影響，研究流程如圖 1 所示。本研究為減少不確定性，採用 A1B 情境下 5 種大氣環流模式(General circulation models, GCMs)所輸出之日氣象資料(雨量、溫度)，透過遺傳演算法(Genetic Algorithms)對水筒模式(Tank Model)進行最佳化參數之搜尋，並使用實際觀測流量驗證參數之準確性，再利用降雨逕流

模式進行未來 2046-2065 年之入庫流量模擬推估，以 GCMs 模式之日流量對曾文-烏山頭供水地區進行供水模擬分析，並與 1980-2010 年進行比較，此研究成果可提供相關單位於水資源決策規劃與分析之依據。

二、研究區域概述

2.1 研究區域

本研究以曾文水庫集水區為研究對象，流域面積 1,176 平方公里，年平均流量為 11.4 億立方公尺，並透過隧道取水至烏山頭水庫供應嘉南地區農田灌溉之用。曾文水庫之功能為灌溉、公共給水、發電、防洪與觀光等功能，並且與烏山頭水庫聯合操作，現今計畫用水量分配為農業 9 億立方公尺、民生 1.2 億立方公尺、工業 0.27 億立方公尺。

2.2 曾文-烏山頭灌溉區域

曾文-烏山頭水庫主要以灌溉為主要目標，故本研究以嘉南農田水利會嘉南大圳的曾文-烏山頭灌區為農業灌溉用水量依據，此灌區涵蓋嘉義、台南兩縣市，位於台灣西南部的嘉南平原，灌溉方式以分組輪灌作為灌溉方式，共分六組，其區域包括，新化、佳里、麻豆、新營、朴子、嘉義。灌溉面積一期為 58,694 公頃，二期灌溉面積為 87,695 公頃，灌溉渠道總長 10,131 公里，主要作物為以水稻為主，另有甘蔗等雜作。

而在灌溉方式上，以輪灌制度作為依據，先將灌區農地分為三大區，大區再分為小區，小區再各分三分，依次分組輪灌。

2.3 雨量資料蒐集

本研究雨量資料採用經濟部水利署於曾文水庫集水區所設立之雨量測站，測站分別為曾文新村、水山、里佳、馬頭山、樂野、表湖、龍美、三角南山、大棟山等 9 個測站，使用徐昇法(Thiessen method)進行測站集水區面積權重計算，求得曾文水庫集水區平均日降雨量，資料長度為 1991-2010 年(共 20 年)，年平均降雨量為

表 1 曾文水庫集水區雨量站權重(曾柏峰，2004)

站名	曾文新村	水山	里佳	馬頭山	樂野	表湖	龍美	三角南山	大棟山
權重	0.0039	0.0878	0.2126	0.1849	0.1394	0.1387	0.1192	0.0634	0.0501

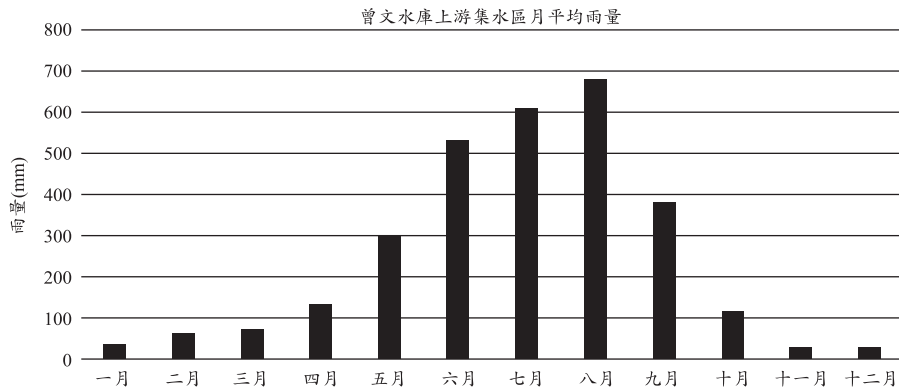


圖 2 曾文水庫 1991-2010 年之月平均降雨量

2,992 mm，而月平均降雨量如圖 2 所示，各測站權重如表 1 所示。

2.5 氣象資料

現況(1991-2010)資料採用行政院農業委員會-農業氣象諮詢系統中的曾文水庫管理中心曾文氣候站之溫度、溫差、風速、濕度日資料，並採 Penman-Monteith method 計算現況之潛勢蒸發散量。

本文受限於研究時程，所需資料乃先採用 AR4 所提供資料，暫不考慮 AR5 資料。氣候模式是一有效的模擬工具，但由於環境的不確定性大，不同的氣候模式之模擬的降水量結果也會不同。為了減少模擬過程的不確定性，IPCC 建議採用並參考多種氣候模式的平均值結果。故本文的未來(2046-2065)資料採用臺灣大學全球變遷研究中心提供之 SRES A1B 情境下統計降尺度日溫度與日雨量資料 (Lin *et al.* 2010)，包含加拿大 CCCma_CGCM3、法國 CNRM-CM3、澳洲 CSIRO-Mk3.0、美國 GFDL-CM2.0、中國 LASG-FGOALS-g1.0 五種 A1B 情境之 GCMs 模式；另外於降雨逕流模擬(水筒模式)、田間水平

衡模式與供水系統模擬時，則假設水文及地文條件基本參數，現況與未來一致。

三、研究方法

3.1 水筒模式

水筒模式為一描述集水區降雨與逕流關係之方法，其考慮到了集水區內不同地層間貯留與稽延之效應，並以數個貯留型水筒模擬水流於集水區內的活動行為，如地表逕流、中間流與基流等如圖 4 所示，可適切反應出集水區出流特性。水筒模式之概念類似線性水庫(Nash, 1957)，不過其有較多參數可供調整，如水筒數目、孔口數目、孔口係數與孔口高度等，並可針對不同時段賦予不同之退水常數，以增進模擬精度，使水筒模式較傳統線性水庫模式更為優異(王與李，1987)。使用多個開口與多個水筒串聯來描述降雨逕流系統，亦使模式有辦法描述不同降雨型態之逕流特性(Sugawara, 1985)。

水筒模式可合理描述水流於地表與土壤間的運動情形，但集水區之蒸發散量對逕流量亦有明顯影響，因此於實際應用時應將蒸發散量影響納入考量，方能使水筒模式正確反應出降雨及逕

流之關係。彭門-蒙地斯方程式(Penman-Monteith equation)常用來估算蒸發散量，其綜合質量與能量傳遞之概念且考慮因子較多，可適切反映出實際狀況。彭門-蒙地斯方程式之計算方法如下(Allen *et al.*, 2006)：

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

ET_0 ：日參考蒸發散量[mm/day]， R_n ：作物表面淨輻射量[MJ/m²day]， G ：土壤熱通量密度[MJ/m²day]， T ：每日離地 2 公尺高之溫度[°C]， u_2 ：離地 2 公尺高之風速[m/s]， e_s ：飽和蒸汽壓[kPa]， Δ ：蒸氣壓斜率[kPa/°C]， e_a ：實際蒸汽壓[kPa]， γ ：溼度計算常數[kPa/°C]。

由於以 Penman-Monteith 法(PM 法)計算時所需要的氣象參數較多，然而未來推估過程中有許多氣象因子是難以推估的，因此本研究在推估未來之潛勢能蒸發散量時，將採用 Hamon 法來進行推估，因其氣象因子僅需日均溫及日照時數兩項，較適合用於推估未來的潛勢能蒸發散量。而 Hamon 認為溫度與壓力為影響水分子在氣相與液相間之轉換為重要因素。參考 Shaw and Riha (2011)，其公式表示如下：

$$PE = 29.8D \frac{e_s}{T + 273.2} \dots\dots\dots(2)$$

式中 PE 為日潛勢蒸發散量[mm/day]； e_s 為飽和蒸汽壓[kPa]； D 為日照時數[hr]

因此本研究利用 PM 法與 Hamon 法所推估出之現況潛勢能蒸發散量及以 Hamon 法推估出之未來潛勢能蒸發散量，透過象限轉換法(張惠雯，2010)來校正出未來之潛勢能蒸發散量校正值，其示意圖如圖 3 所示。

本研究採用雙筒型水筒模式模擬曾文水庫上游集水區降雨逕流關係，其示意圖如圖 4 所示。於該模式中上筒代表著地表逕流之特性，雨水落入筒後會先儲存於上筒底部，直到水深達到 h_{a1} 高度時經由 a_1 孔口流出，對應到實際情形，如降雨落於地表而滲入土壤，待土壤吸收飽和後

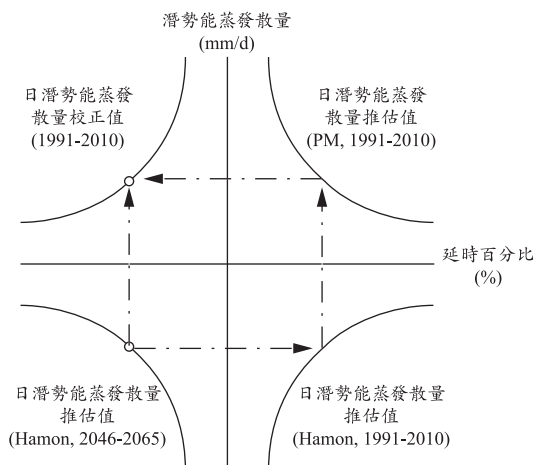


圖 3 象限轉換法-潛勢能蒸發散量校正示意圖

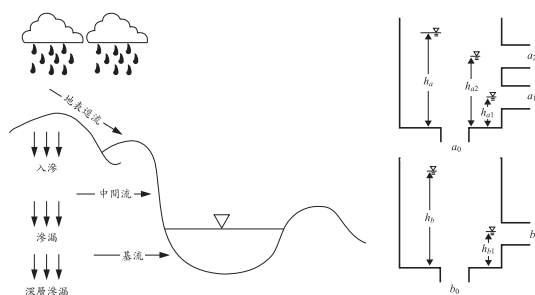


圖 4 水筒模式示意圖

產生地表逕流；而當暴雨發生時，降雨遠大於滯蓄、截留、入滲、與土壤可儲存之量時，降雨將直接反應於流量上，形成流速快且流量大之地表逕流，其性質可視為從 a_2 孔口流出，反應暴雨時期地表逕流之特性；而降雨入滲至土壤後會有部分經由 a_0 繼續滲漏至較深層之土壤，此時降雨由上層水筒進入下層水筒。直到深層土壤飽和時，下層水筒內水深到達 h_{b1} ，水流即從孔口 b_1 流出，反應中間流與基流之特性；最後，下筒之水流持續滲漏，經由孔口 b_0 進入地下水層。本研究所需最佳化之水筒模式參數共有 8 個，將採用遺傳演算法(Genetic algorithms)來檢定與驗證其最佳化參數值(張修明，2016)。

遺傳演算法將變數視為染色體之基因，經由

表 2 水筒模式參數範圍

參數	a_0	a_1	a_2	h_{a1}	h_{a2}	b_0	b_1	h_{a1}
上下限	0-0.5	0-0.5	0-1	0-200	0-200	0-0.5	0-0.5	0-200
單位	1/day	1/day	1/day	mm	mm	1/day	1/day	mm

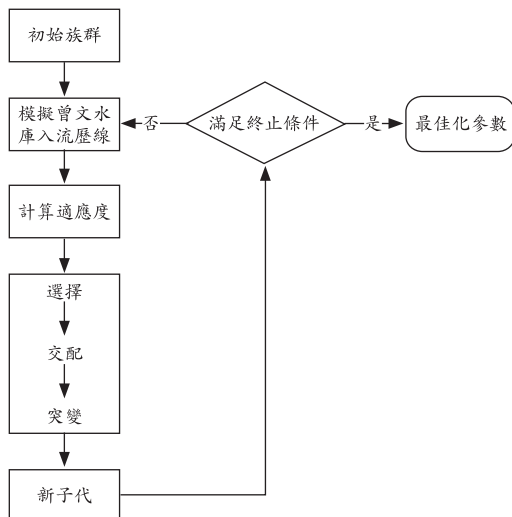


圖 5 遺傳演算法搜尋過程

選擇、交配、突變等過程，逐步繁衍出適應值較佳的新族群，以求得問題最佳解。其可以處理大量參數之優選問題，且多點同時搜尋最佳解的特性，亦使該方法較容易求得全域最佳解(Holland, 1975)。遺傳演算法搜尋過程則如圖 5 所示。

本研究將 a_0 、 a_1 、 a_2 、 h_{a1} 、 h_{a2} 、 b_0 、 b_1 與 h_{b1} 共 8 個參數視為一條染色體，以實數編碼方式建立，染色體內各基因(參數)皆按照其物理特性設定上下限，如表 2 所示。初始族群為隨機產生之 200 條染色體，各組參數所產生之石門水庫入流量歷線即可與實際觀測進行比較，並以適應度函數(Fitness function)評估各組參數之優劣：

$$\text{目標函數：} \frac{\sum_{t=1}^N \frac{|Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t)|}{Q_{obs}(t)}}{N} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(3)$$

上式中為 $Q_{obs}(t)$ 為 t 時刻之觀測流量、 $Q_{sim}(t)$ 為 t 時刻之模擬流量、 N 為模擬之總日數。

完成各參數之適應度函數計算後，依照遺傳演算法「適者生存，不適者淘汰」之基本精神，選擇合適之親代染色體，於交配時使用，以便產生子代，繼續進行優化。選擇染色體之方法有許多種，在此採用輪盤選擇法(Roulette selection method)，其特色為隨機選取，但被選中之機率係根據染色體適應度函數值決定，適應度函數值越高者越容易被選中。選出兩條親代染色體便可執行交配，為避免搜尋結果過早或太慢收斂，設定交配率為 90%，突變率則設定為 1%，而交配方法則採用全體算術交配法(Uniform all positions arithmetic crossover; Michalewicz, 1992)，以線性組合方式產生兩個子代。族群替代方式係採用 Syswerda (1989)所提出之漸進式替代(Steady-State replacement)，待產生與母代相同數目 200 條新的基因後，將母代與新產生的基因一起比較，選出其中適應度函數最佳的 200 條基因做為子代，繼續優化程序，直到最佳結果已無明顯改進且執行 10,000 代，則終止搜尋。

3.2 灌溉用水量之估算(賈佳芸，2015)

本研究利用田間水平衡模式與模擬法，估算 2046-2065 年曾文-烏山頭灌區灌溉用水量，灌溉面積選用 2006、2007、2008、2011、2012 年實際灌溉面積之平均，曾文-烏山頭灌區一期稻作耕種面積為 15,755 ha，二期稻作耕種面積為 32,202 ha，一期雜作耕種面積為 32,318 ha，二期雜作灌溉面積為 33,482 ha (扣除 2011 年休耕)。

文中田間水平衡模式是將水田視為一控制體積，根據質量守恆定律，以水文循環之系統中水平衡方程式描述流入、流出與儲蓄量的變化，

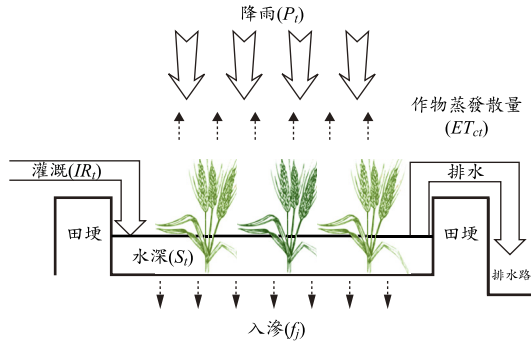


圖 6 水稻田間水平衡模式

田間水平衡之模式示意圖如圖 6 所示，其水文連續方程式為：

$$\Delta S = I - O \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中 ΔS 為田間儲蓄水量之變化(mm)； I 為入流量(mm)； O 為出流量(mm)。本研究於不考慮回歸水影響之情況下，將(4)式可改為

$$\Delta S = \frac{IR_i}{\sum_i A^i (1 + CL^i)} + P_t - ET_{ct} - \sum_j f^j A^j \quad \dots\dots\dots(5)$$

式(5)中 IR_i 為灌溉需水量(mm)； A^i 為支渠 i 之灌溉面積佔總面積之比例(%)； CL^i 為支渠 i 之平均輸水損失(%)； P_t 降雨量(mm)； f^j 為 j 土壤之滲漏量(mm)； A^j 為 j 土壤佔總面積之比例(%)。

田間水平衡模式中，降雨量為最重要之水份補助來源，其中未被排水設施排除而得以留於田間者成為有效雨量，因此若當有效雨量無法滿足田間需水量時，則必須灌溉。考慮作物於不同時期時，所適合之蓄水深度亦有所不同，則灌溉用水量依據式(5)可改表達如下：

$$IR_i = 0 \text{ if } P_t + S_t - S_t^{\min} - ET_{ct} - \sum_j f^j A^j \geq 0$$

or

$$IR_i = \sum_i (ET_{ct} + \sum_j f^j A^j + S_t^{\min} - S_t - P_t) A^i (1 + CL^i) \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中 $S_t^{\min}$ 為田間蓄水深度下限。

當降雨量既能夠補足作物生長時所需水量

又能使田間蓄水時，此時留在田間內之水量即稱為有效降雨，有效降雨能夠有效減少農業上之引灌水量，而多餘之水量便為無效降雨藉由排水設施排出，可以下式計算：

$$P_t^* = P_t \quad \text{if } S_t^{\max} \geq S_t + P_t - ET_{ct} - \sum_j f^j A^j$$

or

$$P_t^* = S_t^{\max} - S_t + ET_{ct} - \sum_j f^j A^j \quad \text{otherwise} \quad (7)$$

式中 $S_t^{\max}$ 為田間蓄水深度上限， P_t^* 指 t 時刻的有效降雨量(mm)。

本研究假設灌溉水源供應充足且不間斷之情況下，考慮稻作各生長時期特性不同，參考甘俊二(2000)與陳買(1997)所訂定田間合適之蓄水深度的上下限。高於上限者於排水系統排出，而低於下限者予以補足。然而，雜作方面本研究依據嘉南農田水利會所提供之灌溉時期及水量標準，依其蓄水深度，每次田間水深為 70 公厘(mm)，本研究僅計算甘蔗與雜作施灌期間所需之水量，每次施灌天數為 15 天。

3.3 供水系統模擬

模擬法(Simulation method)為水資源系統分析時常用之方法，其將系統實際運作情況概念化，藉此探討水資源運用狀況。本研究將採用模擬法，探討氣候變遷對曾文-烏山頭供水區域各標的用水之影響。

曾文水庫與烏山頭水庫聯合操作，其主要負責嘉南農田水利會灌溉用水、台南與嘉義地區部分公共用水，曾文-烏山頭水庫供水系統圖如圖 7 所示，本研究利用 GCMs 未來 2046-2065 年氣象資料以水筒模式模擬未來曾文水庫入流量，再以未來入庫流量進行曾文-烏山頭水庫供水模擬，程式模擬如圖 8 所示。

曾文水庫操作必須符合曾文水庫運用要點(經濟部水利署，2014)相關規定，而曾文水庫與烏山頭水庫聯合營運故也需符合烏山頭水庫運用要點(經濟部，2011)，本研究之曾文-烏山頭水庫利用與發電運轉原則整理如下：

1. 蓄水量超過上限時，得視各標的需要，超量供應且須由發電廠發電後放出。

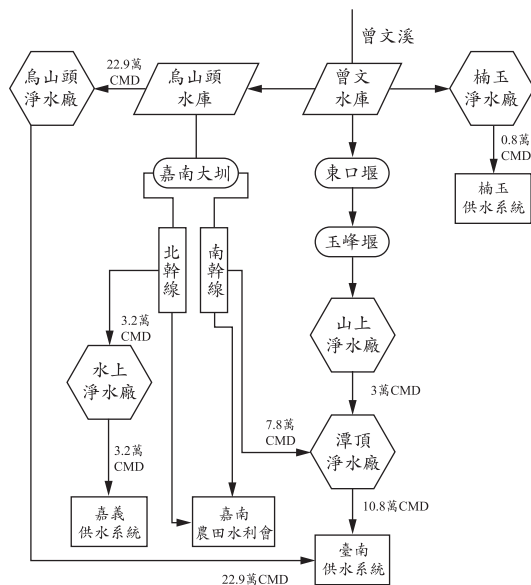


圖 7 曾文-烏山頭水庫供水系統圖

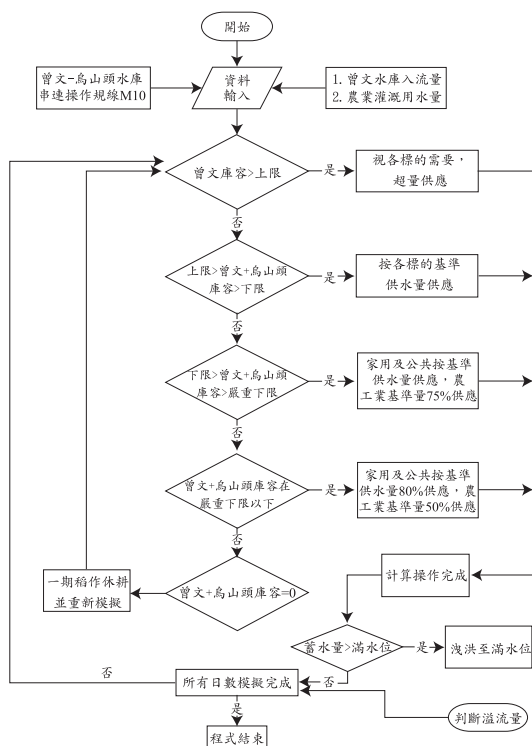


圖 8 程式模擬流程圖

2. 蓄水量在上限與下限之間時應按各標的基準供水供應且須由發電廠發電後放出。
3. 水量在下限與嚴重下限之間時，家用及公共給水按基準供水供應，農業用水與工業用水水量則按基準供水之百分之七十五供應且須由發電廠發電後放出。
4. 蓄水量在嚴重下限以下時，家用及公共給水按基準供水之百分之八十供應，農業用水與工業用水水量則按基準供水之百分之五十供應且須由發電廠發電後放出。
5. 依第三款至四款規定縮減各標的用水，水庫蓄水仍不敷分配使用時，應視當時情況，依各標的縮減方式再縮減分配供應，或由南水局、水利會、台灣自來水股份有限公司等協商辦理。

民生與工業用水部分採用經濟部水利署南區水資源局提供之數據，以每日民生用水 33 萬噸與工業用水 7.5 萬噸；灌溉用水量方面利用聯

合國糧農組織作物需水量估算法與前一小節之田間水平衡模式與模擬法，推估現況 2003-2012 年及 2046-2065 年曾文-烏山頭灌區之單位面積灌溉用水量，並採用五種 GCMs 之計算結果。

3.4 案例分析

待完成未來嘉南農田水利會灌溉用水量與曾文水庫入流量之推估工作，便可使用模擬法，搭配曾文-烏山頭水庫操作規則與各標的需水量，進行曾文-烏山頭水庫供水系統模擬，評估氣候變遷對曾文-烏山頭灌區農業需水供應之影響。過去發生缺水事件時往往透過各部會開會協商，公告減少耕作面積或當期休耕，於歷史紀錄上 1991 年與 1993 年底枯旱缺水時，經研擬使一期稻作一律休耕(行政院農委會，1995)。

本節將以兩種情境作為探討，情境一以一期稻作休耕為主要目標，當水庫發生空庫時，使一期稻作休耕並重新模擬。情境二，由於未來曾文

表 3 情境介紹

情境一	情境二
1. 維持現況耕作面積 2. 若水庫發生空庫時，一期稻作休耕並重新模擬當年供水情形	1. 一、二期作物(稻作、雜作)耕作面積減少 10% 2. 若水庫發生空庫時，一期稻作休耕並重新模擬當年供水情形

表 4 最佳化水筒模式參數值

參數	a_0	a_1	a_2	h_{a1}	h_{a2}	b_0	b_1	h_{b1}
數值	0.0808	0.1762	0.4568	59.1538	152.3873	0.0397	0.3224	63.2964
單位	l/day	l/day	l/day	mm	mm	l/day	l/day	mm

水庫入流量推估呈現減少趨勢，故可能需要調整耕作面積來作為氣候變遷因應之對策，本情境嘗試全面減少一、二期作物面積為主要目標，若水庫發生空庫時，則進一步考慮一期稻作休耕並重新模擬來進行供水模擬評估，表 3 為兩種情境之介紹。

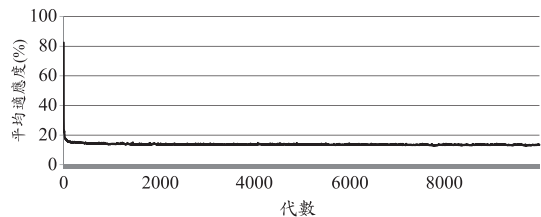


圖 9 遺傳演算法平均適應度變化

3.5 分析指標

本研究選用公共用水缺水指數(Shortage Index, SI)、供水滿足率與供水可靠度為本研究所使用之評估指標，用來評定曾文-烏山頭供水地區之供水狀況。

各指標定義如下：

1. 公共用水缺水指數

$$SI = \frac{100}{N} \sum \left(\frac{\text{年缺水水量}}{\text{年計畫供水水量}} \right)^2 \dots\dots\dots(8)$$

2. 供水滿足率

$$\text{供水滿足率} = \frac{\text{實際供水水量}}{\text{需水量}} \times 100\% \dots\dots\dots(9)$$

3. 供水可靠度

$$\text{供水可靠度} = \frac{\text{供水滿足天數}}{\text{供水總日數}} \times 100\% \dots\dots\dots(10)$$

四、結果與分析

4.1.1 水筒模式驗證

本研究使用雙筒型水筒模式進行降雨逕流模擬，雙筒型水筒模式中有 8 個參數 a_0 、 a_1 、 a_2 、 h_{a1} 、 h_{a2} 、 b_0 、 b_1 與 h_{b1} 需要檢定，並以最佳化後之參數進行曾文水庫降雨逕流模擬。在最佳化時透過遺傳演算法搜尋最佳化參數，利用表 4 所設定之水筒模式與遺傳演算法參數限制，對適應度函數進行評估，以求得雙筒型水筒模式最佳化參數。

本研究蒐集 1991-2010 年(共 20 年)曾文水庫集水區資料，並使用 1991-2005(共 15 年)資料進行水筒模式參數檢定，圖 9 顯示遺傳演算法平均適應度之變化，圖中可看出於 10,000 代時，適應度值已達收斂。

透過遺傳演算法搜尋之最佳化參數值如表 4 所示，上筒上方出流孔 a_2 係數為所有孔口中最大者，其代表地表逕流之特性；當降雨落於地表滲入土壤後，待土壤吸收飽和後(高於 h_{a1})產生之中間流將由 a_1 孔口流出； h_{a2} 為上方出流孔口之高度其代表集水區地表逕流特性改變之臨界點。下

表 5 雙筒型水筒模式流量驗證

	觀測流量 2006-2010 (億噸)	模擬流量 2006-2010 (億噸)	誤差(%)
年平均流量	15.94	14.22	-10.79
枯水期	0.63	0.72	14.29
豐水期	15.31	13.5	-11.82
豐枯比	9.6:0.4	9.1:0.9	-

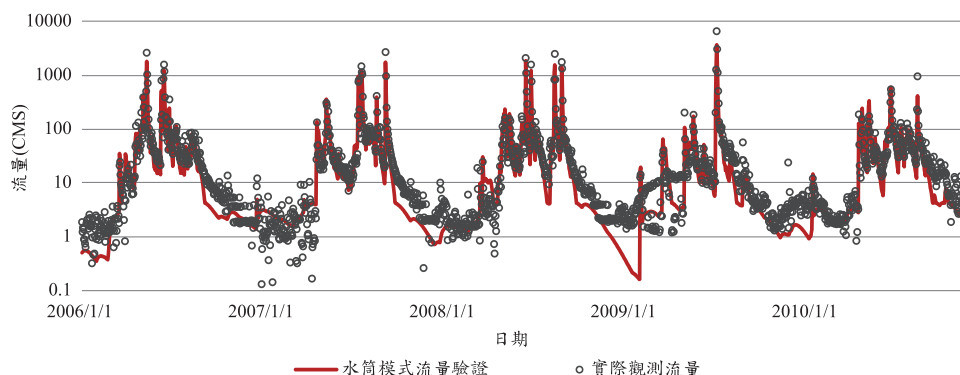


圖 10 雙筒型水筒模式流量驗證

筒滲漏孔口係數 b_0 較上筒滲漏孔口 a_0 小，合理表現出水流滲漏速率越深層越緩慢。而 b_1 為下筒第一流出孔口係數較上筒第一出流孔 a_1 小，代表水流在土壤中緩慢移動的特性。 h_{b1} 為下筒第一出流孔之高度，表示集水區下層土壤吸收水分之能力，而較深層土壤水分子移動不易保有較多水分。

利用曾文水庫 2006-2010 年(共 5 年)資料來進行最佳化參數之驗證，將所推估之入流量與實際觀測資料進行比較，結果如圖 10 所示。驗證流量可反應出集水區降雨及逕流關係，表 5 則為雙筒型水筒模式驗證之誤差計算結果，於總流量部分模式推估流量較觀測值低，全年誤差為 10.79%。而枯水期模式推估流量為 0.72 億噸相較於實際觀測值多出了 0.09 億噸，誤差為 14.29%。豐水期模式推估流量較觀測值低，誤差為 11.82%，此誤差應與近年來極端降雨事件頻繁發生有關，近年颱風事件頻繁，如 2009 年莫拉克颱風，嘉義縣阿里山鄉於颱風期間便測得降雨

量了 3,060 mm，為近年侵台颱風之最，故模式推估產生較大偏差；而豐枯比的部分，模式模擬之流量豐枯比為 9.1:0.9，觀測流量豐枯比為 9.6:0.4，其差距亦與近年氣候變遷而導致極端降雨事件發生頻率頻繁有關。

驗證結果顯示豐水期時模式模擬流量結果較好，而枯水期模擬結果較差，主要是因為枯水期期間總流量較少，故些許之流量差異變造成較大誤差百分比。且本研究主要考慮長時間下水資源系統供需關係，此模擬結果可做為之後曾文-烏山頭水庫供水系統分析之用。

4.1.2 田間水平衡模式比較

為了瞭解田間水平衡模式在計算上之準確性，本研究將田間水平衡模式所模擬出之現況灌溉用水量與嘉南農田水利會實際灌溉用水量進行比較，如表 6 與 7 所示，並以單位面積灌溉用水量來進行比較，由於灌區實際觀測資料較少，因此農田水利會提供之資料僅有 5 年可供模式參

表 6 稻作灌溉用水量之統計

水稻	面積(公頃)		一期灌溉用水量 (mm)		二期灌溉用水量 (mm)	
	計畫		模式	實際	模式	實際
	一期	二期				
年度						
2012	16,701	40,862	1,272	1,285	1,360	1,101
2011	16,604	40,557	1,383	1,529	1,407	917
2008	16,758	41,275	1,332	1,635	1,161	1,044
2007	16,749	41,594	1,329	1,443	1,126	1,097
2006	16,784	41,678	1,205	1,339	1,287	1,222
平均	16,719	41,193	1,304	1,446	1,268	1,076

表 7 雜作灌溉用水量之統計

雜作	面積(公頃)		一期灌溉用水量 (mm)		二期灌溉用水量 (mm)	
	計畫		模式	實際	模式	實際
	一期	二期				
年度						
2012	41,993	46,833	304	135	196	126
2011	42,034	46,611	317	147	177	0
2008	42,800	47,486	318	173	196	161
2007	43,180	47,738	303	162	207	156
2006	43,399	47,711	300	171	189	152
平均	42,681	47,276	308	158	193	149

考，其中在水稻模擬中，模式所計算出之一期稻作單位面積灌溉用水量平均為 1,304 mm，實際之單位面積灌溉水量約為 1,446 mm，約低估 142 mm (9.8%)；二期模式所計算之單位面積灌溉用水量平均為 1,268 mm，而實際之單位面積灌溉用水量平均為 1,076 mm，模式計算高於實際統計 192 mm (17.8%)。於雜作比較中，由表 7 所示，模式所計算之一期單位面積灌溉用水量平均為 308 mm，實際之單位面積灌溉水量約為 158 mm，明顯高估 150 mm (27.6%)；二期模式所計算之單位面積灌溉用水量約為 193 mm，而實際之單位面積灌溉水量約為 149 mm，高估了 44 mm (29.5%)。將模式之計算灌溉用水量與嘉南農田水利會所提供之實際灌溉用水量比較，不論稻作或雜作於一期之灌溉用水量皆呈現出較大之差異，整體都有高估的現象發生，但仍在可接受範圍內；

於一期耕作期間可能所降雨水就整體而言較為豐沛，因此在水利會之操作下，盡可能的供應水稻所需之灌溉用水量，然而也因雨水較豐沛之關係，雜作所需之灌溉用水量即大幅下降，進而導致了模式所推估之灌溉用水量明顯多於實際之灌溉用水量。二期之灌溉用水量不論稻作或雜作與實際灌溉之用水量皆有些微的差距，可能是因為二期耕作期間之有效降雨量少於預期，未來接下來之枯水期著想，因此水利會可以調度較為保守；然而就整體而言此模式所計算出之結果多與實際之灌溉水量有些差距，主要可能是因於模式計算時之前提假設為灌溉水源可充足供應且不間斷之情況下來進行模擬，因此與水利會之實際灌溉用水量有差距，但就比較結果來看此模式應可推估未來水稻與雜作之灌溉用水量。

表 8 曾文-烏山頭灌區稻作灌溉用水量

單位：mm

水稻	現況	模式平均	CCCma	CNRM	CSIRO	GFDL	LASG
一期	1,304	1,299	1,304	1,346	1,318	1,296	1,229
二期 06/11	1,228	931	978	1,068	831	857	919
二期 06/26	1,310	1,100	1,090	1,201	1,099	1,020	1,087
二期 07/06	1,320	1,182	1,170	1,262	1,195	1,108	1,176
二期 07/11	1,317	1,230	1,207	1,302	1,244	1,181	1,218
二期 07/16	1,344	1,252	1,226	1,318	1,246	1,220	1,251

表 9 曾文-烏山頭灌區雜作灌溉用水量

單位：mm

雜作	現況	模式平均	CCCma	CNRM	CSIRO	GFDL	LASG
一期	308	303	305	307	297	309	296
二期	199	204	209	197	202	206	206

4.2 氣候變遷對曾文水庫灌區灌溉用水量之影響

氣候變遷的發生造成整體溫度和雨量的改變，進而導致未來曾文水庫灌區之灌溉用水量改變，於小節本研究將現況 2003-2012 年與未來 2046-2065 年稻作與雜作平均灌溉用水量相互比較，如表 8 與表 9 所示。其中一期稻作 CCCma 模式推估未來灌溉用水量與現況較為貼近，而 LASG 下降許多，現況二期灌溉採五組陸續供灌，分灌日期為 6 月 11 日、26 日、7 月 6 日、11 日和 16 日，現況二期平均用水量為 1,304 mm 而未來二期推估中(假設供灌日期與現況相同)，五個模式平均為 1,139 mm，整體灌溉用水量有下降的現象。雜作方面，現況一期平均灌溉用水量為 308 mm，未來平均一期灌溉用水量為 303 mm，平均些微下降 5 mm，於未來模式的推估中，僅有 GFDL 模式推估灌溉用水量有些微上升，而 LASG 模式推估下降最多，二期雜作現況平均灌溉用水量為 199 mm，未來二期平均灌溉用水量為 204 mm，整體有上升趨勢。

整體而言，未來曾文-烏山頭灌區灌溉用水量與 2003-2012 年之灌溉用水量相互比較差異不大，未來一、二期稻作平均灌溉用水量有略微減少之趨勢，分別僅減少了 5.4 mm 與 165 mm；而

雜作期間一期灌溉用水量將減少 5 mm，而二期則增加 5 mm；然而反觀以重現期五年作為基準，未來稻作一期灌溉用水量將增加 3 mm，二期則減少 172 mm；而未來雜作期間則恰好相反，一期平均減少 2 mm，二期平均增加 3 mm。

4.3 氣候變遷對曾文水庫雨量與入流量之影響

4.3.1 雨量影響

氣候變遷對曾文水庫集水區雨量改變，使未來曾文水庫入流量有所變化，本研究選用 A1B 情境下五種 GCMs 模式，依各模式輸出未來 2046-2065 年阿里山測站雨量，透過象限轉換法校正成曾文測站之雨量，將校正值代入雙筒型水筒模式即可推估出未來 2046-2065 年曾文水庫入流量，便可與現況來進行比較，並探討氣候變遷之衝擊與影響。

曾文水庫現況 1991-2010 年(共 20 年)與 GCMs 推估 2046-2065(共 20 年)雨量之統計結果，其結果顯示五種模式年平均雨量皆有減少的現象，而減少最多的為 CNRM 模式，其年平均雨量為 2,242 mm，較現況減少了 25.05%，次多的為 CCCma 模式，其平均雨量為 2,615 mm，較現況減少了 12.60%，五種模式年平均降雨量為

表 10 曾文水庫雨量統計資料與 GCMs 雨量

	觀測雨量	模式平均	CCCma	CNRM	CSIRO	GFDL	LASG
年平均 (mm)	2,992	2,702	2,615	2,242	2,886	2,845	2,920
相對百分比 (%)		-9.69	-12.60	-25.05	-3.55	-4.91	-2.41

表 11 曾文水庫入流量

單位：億噸

曾文水庫 入流量	觀測流量 (1991-2010)	CCCma	CNRM	CSIRO	GFDL	LASG	模式 平均
年平均	11.40	8.98	7.63	10.08	9.75	10.29	9.35
相對百分比	-	-21.23	-33.07	-11.58	-14.47	-9.74	-18.02
年平均枯水期	0.75	0.66	0.50	0.57	0.60	0.81	0.63
相對百分比	-	-12.00	-33.33	-24.00	-20.00	8.00	-16.27
年平均豐水期	10.65	8.32	7.14	9.51	9.14	9.49	8.72
相對百分比	-	-21.88	-32.96	-10.70	-14.18	-10.89	-18.12
豐枯比	9.3 : 0.7	9.3 : 0.7	9.4 : 0.6	9.4 : 0.6	9.4 : 0.6	9.2 : 0.8	9.3 : 0.7

2,702 mm，較現況少了 9.69%，由此平均可知未來年降雨量有減少之趨勢，如表 10 所示。

4.3.2 流量影響

氣候變遷將影響曾文水庫集水區與下游供水區域之降雨型態。本研究使用 GCMs 推估之阿里山氣象站雨量配合象限轉換法計算出曾文水庫上游雨量校正值，再利用雙筒型水筒模式模擬 2046-2065 年曾文水庫入流量，並比較 1991-2010 年觀測流量與 2046-2065 年模擬之差異。表 11 為 1991-2010 年與 2046-2065 年曾文水庫入流量統計結果，並以全年日流量統計值進行比較。

實際觀測流量統計結果，水庫年平均入流量為 11.4 億噸，將豐水期與枯水期分別比較，枯水期間之年平均入流量為 0.75 億噸，而豐水期為 10.65 億噸，豐枯比為 9.3 : 0.7，由此結果顯示出南部地區的豐枯比非常懸殊；未來各 GCMs 模式平均曾文水庫入流量為 9.35 億噸與觀測流量相比減少 18.02%，未來枯水期之年平均入流量為 0.63 億噸與觀測入流量相比為減少 16.27%，豐水期部分為 8.72 億噸與觀測流量相比減少了

18.12%，豐枯比為 9.3 : 0.7 與觀測流量豐枯比例相近。由此可以推論出未來 2046-2065 年曾文水庫年平均入流量整體皆呈現出減少之趨勢，且豐枯比比例仍非常懸殊。

4.4 氣候變遷對農業與公共用水供應風險之影響

完成曾文水庫入流量之推估工作後加入未來嘉南農田水利會灌溉用水量，便可使用模擬法，搭配曾文-烏山頭水庫操作規則與各標的需水量，進行水庫供水系統模擬，評估氣候變遷對曾文-烏山頭灌區農業需水供應之影響，本研究將分為兩種不同情境於下節分別說明。

首先，本文於此小節先大略說明現況 (2003-2010 年)與未來(2046-2065 年)之公共年缺水率與農業年缺水量，如圖 11 與 12 所示。由於現況模擬期間遇到了 2003、2004 年乾旱的發生，結果發現於 2003-2004 年間，不論公共年缺水率或農業年缺水量皆明顯多於其他年份，然而其他年份之公共年缺水率與農業年缺水量皆呈現出較平穩的趨勢，亦較無明顯的乾旱年份出現。

將未來(2046-2065 年)各模式之模擬結果平

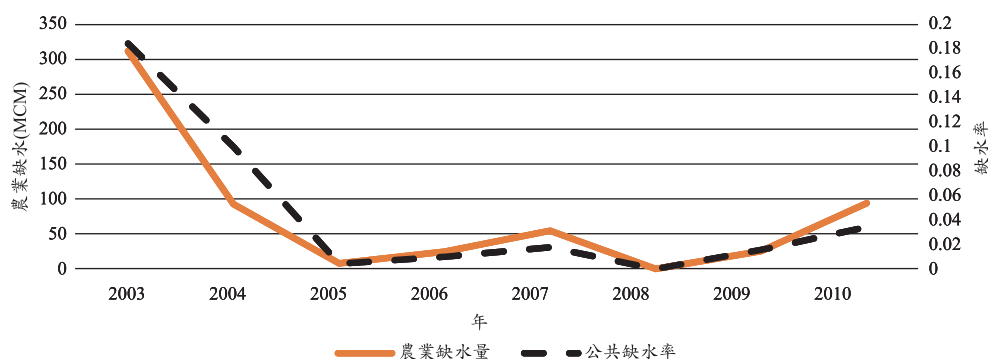


圖 11 現況各年公共缺水率與農業缺水量

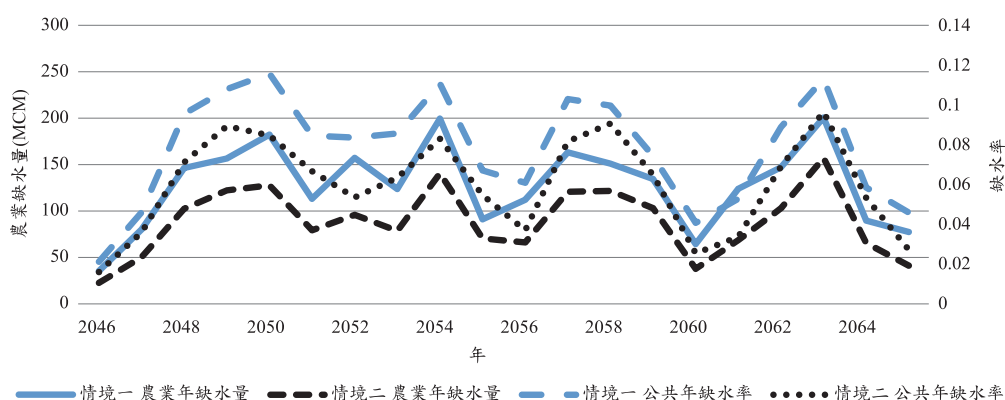


圖 12 未來 2046-2065 年模式平均公共年缺水率與農業年缺水量

均，可以發現未來的 20 年間不論公共年缺水率與農業年缺水量皆有類似週期的現象發生，而波動的幅度明顯大於現況的模擬結果，這也表示了在氣候變遷的影響下，臺灣豐枯水年的變化將比現況更為劇烈與頻繁。

最後，於情境一之模擬結果發現，公共年缺水率與農業年缺水量之模擬結果皆不盡理想，因此本研究進一步增加情境二，將一、二期作物(稻作、雜作)耕作面積減少 10%後重新模擬，結果發現在減少一、二期作物耕作面積可以有效減低公共年缺水率與農業年缺水量。其於供水模擬分析結果於下面小節詳細說明。

4.4.1. 情境一

本研究於該情境下僅考慮一期稻作休耕的

情形，若一期稻作期間水庫發生空庫時，程式模擬將該年度嘉南農田水利會曾文-烏山頭灌區一期灌溉面積歸零，並重新模擬；嘉南農田水利會曾文-烏山頭灌區一期稻作面積 15,755 公頃、二期稻作灌溉面積為 32,203 公頃，而雜作一期灌溉面積為 32,318 公頃、二期雜作耕作面積為 33,482 公頃。考慮休耕之供水系統模擬結果如表 12 所示，現況 2003-2010 年(因受限於實際灌溉用水量之時間長度)、未來 2046-2065 年五種模式平均之供水滿足率與可靠度則如圖 13 與 14 所示。

現況 2003-2010 年之公共與曾文-烏山頭灌區之平均公共與農業年缺水量分別為 7.57 百萬噸(MCM)與 87.23 MCM，而平均年供水量與溢流量分別為 864.22 MCM 與 250.54 MCM。公共缺水指數為 0.47，連續缺水日數為 81 天，模擬期

表 12 情境一 曾文-烏山頭水庫供水模擬結果

	現況供水 (2003-2010)	模式平均	CCCma	CNRM	CSIRO	GFDL	LASG
公共年缺水量(MCM)	7.57	11.63	11.50	16.54	7.14	11.04	11.95
農業年缺水量(MCM)	87.23	127.63	124.28	173.23	84.06	124.34	132.24
年供水量(MCM)	864.22	729.42	752.36	688.11	782.75	712.15	711.75
年溢流量(MCM)	250.54	219.22	152.78	101.64	238.01	276.55	327.13
公共 SI	0.47	0.96	0.78	1.62	0.40	0.90	1.09
公共連續缺水日數(day/yr)	81	104	116	114	79	124	85
農業連續缺水日數(day/yr)	44	51	54	59	34	65	42
總休耕次數	2	3	0	6	1	3	5

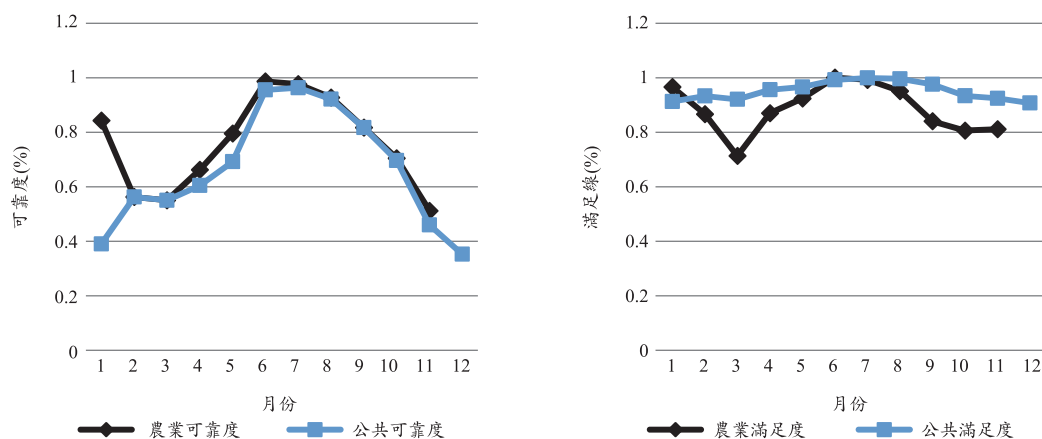


圖 13 現況 2003-2010 曾文-烏山頭供水之各月可靠度(左)與滿足率(右)

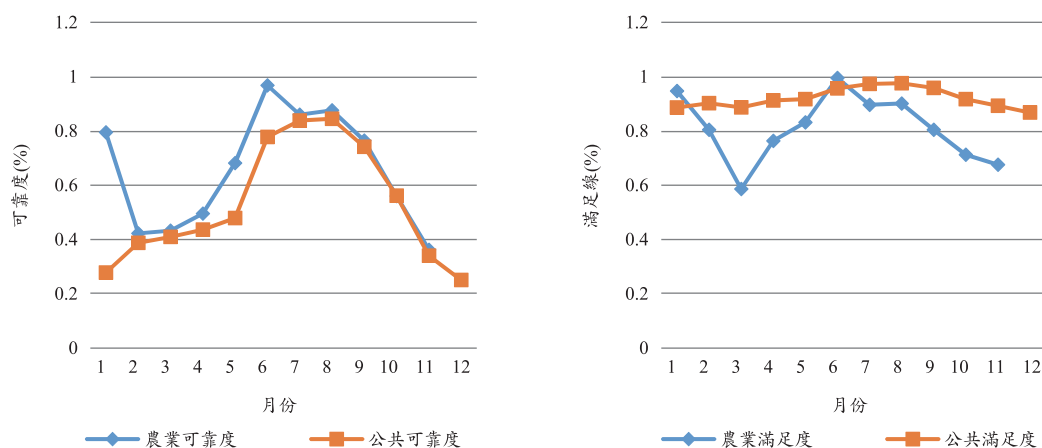


圖 14 情境一之 GCMs 曾文-烏山頭水庫供水之各月可靠度(左)與滿足率(右)

表 13 情境二 曾文-烏山頭水庫供水模擬結果

	現況供水 (2003-2010)	模式平均	CCCma	CNRM	CSIRO	GFDL	LASG
公共年缺水量(MCM)	7.57	8.95	7.45	14.17	4.71	8.29	10.15
農業年缺水量(MCM)	87.23	88.86	77.49	135.88	50.97	83.32	96.66
年供水量(MCM)	864.22	705.13	729.32	667.73	750.12	691.18	687.31
年溢流量(MCM)	250.54	240.23	174.87	116.09	267.83	294.07	348.30
公共 SI	0.47	0.67	0.37	1.20	0.23	0.68	0.89
公共連續缺水日數(day/yr)	81	90	103	105	62	85	91
農業連續缺水日數(day/yr)	44	40	48	55	27	32	38
總休耕次數	2	3	0	6	1	3	1

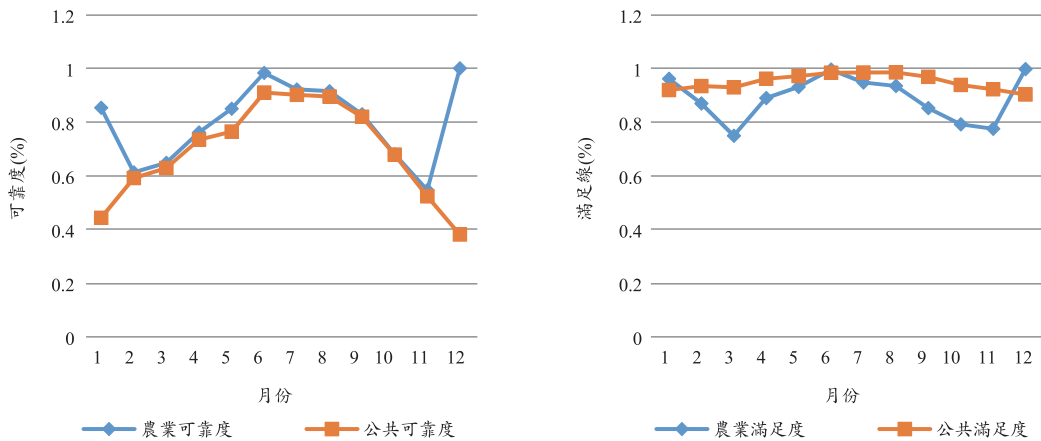


圖 15 情境二之 GCMs 曾文-烏山頭水庫供水之各月可靠度(左)與滿足率(右)

間之一期稻作總休耕次數為 2 次，各月滿足率與可靠度皆顯示出 3 月有較低情況發生，主要是因為一期作物灌溉時間多集中於二月下旬至三月下旬導致灌溉用水量偏大，而農業滿足率下降。

由於五種 GCMs 模式所模擬出來之供水模擬結果大不相同，因此整理出五種模式之平均值，在考慮一期稻作休耕的策略下，各模式之缺水量大多呈現增加的情況，平均公共年缺水量較現況增加 3.93 MCM，公共缺水指數從 0.47 提升至 0.96。

曾文-烏山頭灌區年缺水量較現況增加 40.4 MCM，年供水量減少 134.8 MCM；未來五種 GCMs 模式平均之結果，於一期稻作休耕條件下

未來各標的平均供水情況仍不樂觀，因此本研究將尋找其他可減輕缺水情況之策略，如調整未來灌溉面積來進行供水模擬。

4.4.2. 情境二

為有效地改善未來供水模擬結果，本研究嘗試對未來一、二期作物面積進行調整。主要考慮一期稻作休耕與一、二期作物面積皆減少 10%之條件下，將嘉南農田水利會曾文-烏山頭灌區未來一期稻作面積減為 14,180 公頃、二期稻作灌溉面積減為 28,983 公頃，而雜作一期灌溉面積減為 29,086 公頃、二期雜作耕作面積減為 30,133 公頃。考慮一期稻作休耕的情形，於模擬時一期稻作期

間水庫發生空庫，則程式將該年度灌區之一期灌溉面積歸零，並重新模擬。該情境下供水系統模擬結果如表 13 所示，未來 2046-2065 年五種模式平均供水滿足率與可靠度則如圖 15 所示。

五種模式之平均值，在考慮一期稻作休耕並減少 10 %灌溉面積之策略下，各模式缺水情況與前一小節相比都獲得明顯改善，平均公共年缺水量減少 2.68 MCM，公共缺水指數從 0.96 下降至 0.67，平均農業年缺水量減少 38.77 MCM。未來五種 GCMs 模式平均之結果，在本小節之條件下，與現況相比因灌溉面積減少，年供水量下降，但農業年缺水量與現況相近仍小幅度增加了 1.63 MCM，公共年缺水量也有增加 1.38 MCM，公共缺水指數由 0.47 稍為提升至 0.67。未來在公共需水量不變之情況下，減少農業耕作面積可以有效地舒緩各標的之缺水情形。

五、結論與建議

5.1 結論

1. 氣候變遷將導致未來 2046-2065 年曾文水庫集水區之年平均降雨量有所變化，未來年平均降雨量皆少於現況(1991-2010)，GCM 模式平均降雨量比與現況減少 9.69%，顯示未來受氣候變遷影響降雨量將有減少之趨勢；而利用水筒模式所模擬出之水庫入流量亦呈減少趨勢。
2. 未來曾文-烏山頭灌區灌溉用水量受氣候變遷之影響下，灌溉用水量的改變不顯著，未來一、二期稻作平均灌溉用水量僅分別僅減少了 5.4 mm 與 165 mm。
3. 依曾文-烏山頭水庫操作規線模擬，未來該供水區之平均年供水量減少 134.8 MCM，導致未來公共年缺水量約增加 4.06 MCM，而農業年缺水量則約增加 40.4 MCM；未來若在不增加現況之公共與農業缺水量條件下，則或可考量減少耕作面積約 10%。

5.2 建議

1. 曾文水庫雖為一多目標水庫但仍以提供農業灌溉用水為大宗，未來氣候變遷將造成水

資源缺乏，勢必對臺灣農業造成衝擊，然而目前停工之曾文水庫越域引水計畫，未來是否有其復工之需求性，將值得進一步深入探討。

2. 於未來推估中 2046-2065 年 CCCma、CNRM、CSIRO、GFDL 與 LASG 模式之分析結果不同，說明未來氣候變遷分析上充滿不確定性，無法對未來做出準確預測，且本研究採用 AR4 所提供之資料與最新 AR5 資料間略有差異，未來可考慮嘗試用 IPCC 最新報告中所提供之資料重新模擬，並相互進行比較與評估。

參考文獻

1. 中央氣象局全球資訊網，<http://www.cwb.gov.tw/>。
2. 王如意、劉佳明、虞國興，「水筒模式與最佳農業用水之研究」，行政院農委會研究報告，第 1-212 頁，1980。
3. 甘俊二，2000，「輸水損失與灌溉效率」，中國農村復興聯合委員會。
4. 朱泰毅，「氣候變遷對桃園地區水資源供需之衝擊評估」，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文，2014。
5. 吳瑞賢、王其美，「氣候變遷下之農業水資源挑戰與因應」，水資源管理會刊，2-10 頁，2013。
6. 李光敦，「水筒模式與降雨-逕流模擬」，農業工程學報，20-28 頁，1993。
7. 周家慶，「水庫供水操作及枯旱管理之研究-以曾文-烏山頭供水系統為例」，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文，2004。
8. 林柏勳、冀樹勇、張玉焄、何幸娟、蕭震洋、陳俊愷、許振崑、梁惠儀、柯傑夫，「曾文水庫集水區多元尺度環境調查與保育治理成效評估」，行政院農委會研究報告，2012。
9. 國立臺灣大學，「強化南部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究(1/2)」，經濟部水利署水利規劃試驗所研究報告，2010。

10. 張修明，「氣候變遷對曾文-烏山頭供水地區水資源供需之衝擊評估」，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文，2016。
11. 張惠雯，「台灣地區 21 世紀末之降雨頻率分析」，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文，2010。
12. 許勝雄、李建志，「氣候變遷對嘉南灌區灌溉用水調配之影響」，水資源管理會刊，33-39 頁，2013。
13. 陳買，1997，「水稻栽培灌溉排水管理」，台灣省農田水利協進會。
14. 陳榮松、楊國賢、王國樑、張清傑，「水筒模式應用於水稻梯田降雨-逕流之研究」，農業工程學報，88-100 頁，2009。
15. 陳憲宗、曾宏偉、林錦源、楊道昌、游保杉，「氣候變遷情境下曾文水庫集水區水文乾旱特性推估」，農業工程學報，44-60 頁，2011。
16. 曾柏峰，「曾文溪流域之降雨乾旱分析研究」，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文，2004。
17. 黃文政、李俊韜、蔡安源，「氣候變遷下潛勢蒸發散對農業水資源之衝擊研究」，100 年度行政院農業委員會主管科技計畫，100 農科-7.4.1-利-b1(2)，2011。
18. 經濟部水利署，「烏山頭水庫運用要點」，2011。
19. 經濟部水利署，「曾文水庫運用要點」，2014。
20. 經濟部水利署南區水資源局，<http://www.wrasb.gov.tw/>。
21. 經濟部水資源局，台灣地區合理之蒸發散折算係數與區域蒸發散量估算方法之建立(1/2)，2000。
22. 經濟部水資源局，台灣地區合理之蒸發散折算係數與區域蒸發散量估算方法之建立(2/2)，2001。
23. 虞國興、許書平，「氣候變遷對水資源之衝擊-雨量分析」，農業工程學報，9-24 頁，1998。
24. 賈佳芸，「氣候變遷對曾文-烏山頭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，2015。
25. 嘉南農田水利會，<http://www.chianan.gov.tw/>。
26. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., "FAO irrigation and drainage paper No.56 - Crop evapotranspiration", Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.
27. Bergström, S., "Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments", SMHI Report RHO 7, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, pp. 134, 1976.
28. Döll, P., "Impact of climate change and variability on irrigation requirements: A global perspective", Climate Change, Vol. 54, pp. 269-293, 2002.
29. Douglas, A., Halith, R.M. and Wu, R.S., "Generalized watershed loading functions - User's manual version 2.0", Department of Agricultural and Biological Engineering, Cornell University, New York, U.S.A, 1992.
30. Eheart, J.W. and Tornil, D.W., "Low-flow frequency exacerbation by irrigation withdrawals in the agricultural midwest under various climate change scenario", Water Resources Research, Vol. 35, pp. 2237-2246, 1999.
31. IPCC, "The Fourth Assessment Report", <http://www.ipcc.ch/>, 2007.
32. IPCC, "The Fifth Assessment Report", <http://www.ipcc.ch/>, 2014.
33. Lin, S.H., Liu, C.M. and Huang, W.C., "Developing a yearly warning index to assess the climatic impact on the water resources of Taiwan, a complex-terrain island", Journal of Hydrology, Vol. 309, pp. 13-22, 2010.
34. Nash, J.E., "The form of the instantaneous unit hydrograph", IASH publication no. 45, Vol. 3-4, pp. 114-121, 1957.
35. Sherman, L.K., "Streamflow from rainfall by the unit-graph method", Engineering News-Record, Vol. 108, pp. 501-505, 1932.

36. Sugawara, M., “Lecture note of hydrologic modeling by tank model”, Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 1985.
37. Sugawara, M., “On the analysis of runoff structure about several Japanese rivers”,

Japanese Journal of Geophysics, Vol. 2, No. 4, pp. 1-76, 1961.

收稿日期：民國 106 年 2 月 10 日

修正日期：民國 106 年 5 月 11 日

接受日期：民國 106 年 5 月 15 日