

氣候變遷對灌溉需水量之影響

The Influence of Climate Change on Irrigation Water Requirements

國立台灣大學農業工程學系助理教授

國立台灣大學農業工程學系碩士班研究生

童慶斌

連宛渝

Ching-pin Tung

Wan-yu Lien

摘 要

台灣農業用水量佔了百分之七十以上，尤其灌溉用水為所有標的用水量之最大宗，因此，評估合理之灌溉需水量是重要的課題。作物需水量與氣候條件息息相關，如果未來氣候條件發生改變時，灌溉用水量會受到影響，進而影響水資源調配。本研究建立一水田灌溉需水量評估模式，進行模擬在不同氣候條件下灌溉需水量之改變。模擬結果顯示，利用累積生育度數預測生長期下，全年灌溉需水量約減少 13%~20%，但部分生長階段之大幅增加值得注意；利用固定天數於生長期預測，則灌溉需水量約增加 4~14% 以反應溫度升高導致之蒸發散量增加。利用固定天數預測生長期無法反應氣候變遷對生長期之影響，因此可能導致錯誤之結論。

關鍵詞：氣候變遷，全球暖化，溫室效應，蒸發散，水資源。

ABSTRACT

Agriculture uses about 70% of total water uses in Taiwan, and irrigation is a major user. Therefore, estimate of rational irrigation water requirement is an important issue. Crop water requirement is closely related to climate. Climate change will directly impact agricultural water uses, and further influence water resources management. A simulation model was developed in this study to evaluate irrigation water for paddy field. The model was applied to evaluate the changes of irrigation water requirement under different future climate conditions. Simulated results indicate that water requirements decrease 13~20% with using fixed growing degree days to predict growth stages. However, the increase of water requirement for early growth stages is desired more attentions. On the other hand, using fixed days predicts increase of 4~14% of irrigation water requirement to reflect increased evapotranspiration due to higher temperature. Because using fixed days can not

project the climate change impacts on the length of growth stages, simulation results might lead to wrong conclusions.

Keywords: Climatic change, Global warming, Greenhouse effect, Evapotranspiration, Water resources.

一、前言

作物需水量為滿足作物蒸發散量，其值等於潛勢能蒸發散量乘以作物係數，而灌溉需水量必須再進一步考量田間滲漏損失及灌溉系統輸水損失等因素。由於農業用水量佔台灣總用水量的百分之七十左右，因此，正確的估計農業用水量很重要。目前已有許多學者估算台灣地區作物需水量(甘，1992；甘等，1996；陳、甘，1997)；這些研究都是利用作物固定的生育天數來劃分作物的生長階段，或是只考慮作物的潛能蒸發散量；但是，作物的生長將會受到氣候及環境的影響，而作物的潛能蒸發散量更是會因為氣候條件的不同而有極大的差異，因此，要進一步反映出不同地區、不同氣候條件下作物的生長的差異，必須有能反應環境影響機制之評估工具。

作物的生長過程是一個延續之過程，相同作物在不同的生長期作物係數並不相同，因此會有不同之水資源需求。根據不同的生長期來供應合理水分，將會是調配水資源較適當之方法。所以，判斷作物之生長期及作物係數就顯得相當重要了。

傳統估算作物生長期的方式是利用生育天數，但是作物受到環境的影響很大，同一種作物在不同的環境之下，其生長天數也會有顯著的差異；根據 Gilmore and Roger (1958) 指出在二百餘年前，Reamur (1735) 便發現各種作物在特定的生育期內，其每日平均氣溫的總和，不論在年期、種植地點等，會接近一個常數，因此提出“溫度單位累積”的觀念，並認為可應用於估計作物的生育狀況。此後經過學者的研究，提出了生育度數的基本定義：在特定的生育期中，每日的平均溫度減基礎生長溫度的總和；其超出基礎溫度以上的部分與作物的生長速率為線性關係

(Warriangton and Kamanasu, 1983; Colville and Frey, 1986)，因此作物對溫度的反應可視為一種單位累積的效應 (Menderski et al., 1973)。在台灣也有學者對這一方面做了研究，包括劉瑋婷(1980)利用實驗找出幾種不同品種稻米的生育度數，施嘉昌、黃成達(1994)彙整出玉米的生育度數，而甘俊二等(1996)也將 GDD 應用於台灣地區作物需水量推估模式之合理性的研究。

大氣是由許多的氣體組成的，這些氣體中，有一部分氣體會使得來自太陽短波輻射容易穿透，而地球反射長波輻射不易穿透，如同溫室保持溫度的情形，這些氣體稱為溫室氣體；比較重要的溫室氣體有：二氧化碳(CO₂)、臭氧(O₃)、水蒸氣(H₂O)、甲烷(CH₄)、氧化亞氮(N₂O)、氟氯碳化物(CFCs)等。大氣中本來就有溫室氣體的存在，所以溫室效應原本就存在於地球上，並不是因為人為因素而產生溫室效應，是因為人為增加溫室氣體而加強了溫室效應。加強溫室效應會導致全球性氣候變遷，而氣候變遷影響最大者為水文與農業環境。

目前已經有許多學者研究氣候變遷的影響 (Amien et al., 1996; Buan et al., 1992; Fredrick and Major, 1997; Major and Fredrick, 1997) 、Tung and Haith (1998, 1995)、童慶斌 (1997)、洪等 (1996, 1998a)、童等 (1997) 針對氣候變遷下河川流量的影響做了許多的研究，洪等 (1998b) 研究氣候變遷對灌溉渠道缺水率的影響，虞國興及許書平 (1998) 研究氣候變遷對雨量之分佈特性及長期趨勢之影響；McCabe and Wolock (1992) 研究在較潮濕的地區，灌溉需水量在假設的氣候改變下的敏感度，但是在台灣卻較少人討論氣候變遷對灌溉需水量的影響。氣候變遷將會影響溫度及雨量，因此對農業用水量的影響也是可預期的，此外農業用水量佔台灣總用

水量的百分之七十左右，當農業用水量產生變化，用水結構就可能產生改變。本文的研究目的就是希望能評估在不同氣候變遷情況下，灌溉需水量及在時間上分佈之改變。

二、研究方法

水田灌溉用水為農業用水之大宗，本研究針對水田灌溉特性建立一灌溉用水評估模式，模式利用 Penman 公式計算作物之潛能蒸發散量，即作物需水量，再透過田間水平衡關係估算田間需水量，最後考慮輸水損失下決定灌溉需水量，模式之相關說明敘述如下。

合理灌溉需水量應先決定作物需水量，再決定田間需水量，最後在考慮輸水損失下推估合理灌溉需水量，根據水資源局的研究報告（1997）灌溉需水量可由下式決定：

灌溉需水量=田間需水量×輸水損失係數(1)

灌溉主要是以人工的方式來補足降雨的不足，因此，灌溉水量主要是滿足有效雨量不足的部份。但是，在水田中通常會有滲漏及必須維持一定的湛水深，因此，灌溉水量也必須提供足夠的水量，以滿足兩者之需求，田間需水量的計算方式可以透過下式決定：

$$IR_t = \begin{cases} 0 & \text{if } W_t \geq ET_t + D_t + PC_t - Pe_t \\ ET_t + D_t + PC_t - Pe_t - W_t & \text{otherwise} \end{cases}$$
(2)

式中的 IR_t即為每日之田間需水量，ET_t為作物蒸發散量，D_t為湛水深，PC_t為滲漏量，Pe_t為當日有效雨量，W_t為田面水深。當不考慮湛水深時，上式中的 D_t即為 0。

滲漏（PC_t）

滲漏量（PC_t）可依照土壤質地，經由台灣省水利局（現為水利處）之經驗公式推算，如公式(3)。

$$PC = \frac{240}{Clay\% \times I}$$
(3)

其中 Clay%為土壤中黏土粒重量百分比，I 為係數，其值隨 Clay%大小而定。不同土壤之黏土百分比及係數 I 可由表 1 取得。田間的滲漏量（PC_t）與田間的土壤質地有關，例如根據台灣水利局的調查，高雄地區的土壤主要以坵土以及坵質壤土為主，因此高雄地區的滲漏量可採用 8.8mm/day。

有效雨量（Pe_t）

有效雨量（Pe_t）可以減少灌溉水量，所以在灌溉的同時，必須考慮有效雨量的影響。主要計算有效雨量的方式有 5 種，包括 1.逐日記帳法；2.五年年平均日雨量法；3.二十年間第四位枯水位法；4.百分比法；5.伽瑪分佈法。這幾種方法都有其優缺點，有些方法沒有考慮土壤入滲量，有些沒有考慮作物生長階段的變化，因此，在估計上可能會有誤差產生。為了避免這個問題，本研究中定義有效雨量為滿足作物需水量與田間滲漏量的最小值，因此，有效雨量可以利用下式估算：

$$Pe_t = \min\{R_t, ET_t + PC_t\}$$
(4)

式中的 Pe_t即為 t 日有效雨量，R_t為 t 日降雨量，ET_t為 t 日蒸發散量，PC_t則為 t 日滲漏量。也就是說，當降雨量小於蒸發散量及滲漏量之和時，

表 1 不同土壤之滲漏量（PC_t）

土壤種類	黏土質含量%	係數 (I)	滲漏量 (mm/day)
砂質礫土	1.6	1.0	150.00
粒質砂土	5.0	1.1	43.7
砂土	8.0	1.2	25.00
壤質砂土	11.6	1.3	15.90
砂質壤土	14.9	1.4	11.50
壤土	18.2	1.5	8.80
黏質壤土	21.9	1.6	6.85
壤質黏土	27.0	1.7	5.24
黏土	33.0	1.8	4.04
中黏土	40.0	1.9	3.16
重黏土	49.0	2.0	2.45

資料來源：蔡易良，1993

所有的降雨量都會是有效雨量；反之，若降雨量大於蒸發散量及滲漏量之和時，則只有滿足蒸發散量及滲漏量的部份為有效雨量，其餘在 t 日則視為無效雨量蓄積在田區中，供下一時期使用，此外本研究中有效雨量並不考慮當降雨量過小時，雨水被截留而無法降落至地面之情形，因此不論雨量是否低於 5mm，只要落於田區且符合有效雨量之公式，皆視為有效雨量。

湛水深 (D_t)

一般而言，每個時期水田中所需要的湛水深 (D_t) 都有不同，在灌溉時，灌溉水量除了必須滿足作物的需水量之外，必須提供額外的水量使水田的湛水深達到一定的高度，各個時期的湛水深可以由表 2 決定。

表 2 稻米不同生長時期所需湛水深 (D_t)

生長期	湛水深 (cm)
*成活至分蘗	6~8
*分蘗期至有效分蘗終期	4~6
有效分蘗終期至幼穗形成初期	排水(0)
幼穗形成初期至終期	5~10
*孕穗期	5~10
抽穗開花期	5~10
乳熟期至糊熟期	2~3
黃熟期製完熟期	0

資料來源：台灣農家要覽（民國 84 年）（其中，* 部份採用高雄水利會建議之湛水深，即（）內之值）

田面水平衡

根據調查顯示台灣地區田間排水高度 h_D 為 24 公分，因此，當田面的水深超過 24 公分時便會產生逕流，此外，在某些生長期，田區中不需要湛水深，因此需要特別排水，這時期的逕流量便是要將田中蓄積的水份排出。逕流量可以下式表示

$$Q_t = \text{Max}\{0, W_t + IR_t + R_t - h_D\} \dots\dots\dots(5)$$

田面水深則是根據田中期初之水量、灌溉水量、蒸發散量、入滲量、雨量以及逕流量 (Q_t) 來決定的；可以由下列方程式決定：

$$W_{t+1} = \begin{cases} 0 & \text{if } D_{t+1} = 0 \\ W_t + IR_t - ET_{0t} - PC_t + R_t - Q_t & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

作物需水量

決定灌溉需水量的主要因素為作物需水量，作物需水量也就是作物蒸發散量。作物蒸發散量 (ET_t) 可以利用潛能蒸發散量及作物係數 (K_c) 估算如下式

$$ET_t = ET_{0t} \times K_c \dots\dots\dots(7)$$

計算潛能蒸發散量的方法有很多種，本研究中採用 1994 年國際灌溉排水協會 (ICID) 所公佈之 Penman-Monteith Method 公式來估算。Penman-Monteith Method 公式可以下式表示：

$$ET_{0t} = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - S) + \gamma \times \frac{900}{T + 273} \times U_2 \times (e_a - e_d)}{\Delta + (1 + 0.34 \times U_2)} \dots\dots\dots(8)$$

式中的 ET_{0t} 即為每日潛能蒸發散量 (mm/day)， R_n 為每日淨輻射量 ($Mj/m^2/day$)， Δ 為飽和蒸汽壓力線斜率 ($KPa/^\circ C$)， γ 為濕度常數 ($KPa/^\circ C$)； U_2 為兩公尺高所量度之風速 (m/s)， T 為日均溫 ($^\circ C$)， $(e_a - e_d)$ 為飽和蒸汽壓力差 (Kpa)； S 為土壤熱通量 ($Mj/m^2/day$)。公式中參數的決定可參考經濟部水資源局(1997)之報告。

作物係數是依據不同的生長期來做區分，目前討論作物的生長期有兩種方式：一種則是考慮作物的生育度數來決定作物的生長階段，以累積的生育度數來決定作物的作物係數；另一種是利用固定天數，考慮生理發育期作為基準，來訂定作物的作物係數。本研究分別討論兩種不同的方式，利用不同的方式預測生長期決定作物係數。依據水資源局的研究報告(1997)可查出不同時期的作物係數，表 2 即各個生長期之作物係數。而不論是利用固定天數法或是利用生育度數法，都可以利用表 2 決定不同時期的作物係數。有關生長期之進一步探討請見模擬試驗設計一節。

近年來不管是農業模擬或水資源評估，均有許多採用如微軟公司發展之速算表軟體 Excel 進行分析，如美國 Country Study Program 所提供之 WatBal 之模式。本研究亦利用 Excel 建立上述公式，進而推估作物灌溉需水量。

三、模擬試驗設計

研究地區

本研究方法將應用於高雄地區，高雄農田水利會主要分為三大灌區，分別是曹公區、岡山區及旗山區，灌溉總面積約為 18195 公頃，灌溉水源包括高屏溪、二仁溪、阿公店水庫、荖濃溪及旗山溪。本區年平均溫度約為 24.4 度，最高溫出現在 7 月，月平均溫度為 28.7 度，最低溫為 1 月，月平均溫度為 18.4 度；年平均雨量為 1619 mm，其中豐水期(5 月至 10 月)雨量為 1472.2 mm，而枯水期(11 月至 4 月)雨量為 145.7mm。

生育度數(°C)

作物容易受到環境的影響，在不同的環境中，相同的作物也可能有不同的生育情況，由於作物從耕種至成熟所需之生長溫度累積溫度不容易受到環境的影響，因此，利用作物累積溫度的方式決定作物的生育情況變異較小。累積生育度數的基本定義為：在特定的生育期中，每日的平均溫度減基礎生長溫度的總和，如公式(8)所示：

$$AGDD = \sum (\bar{T} - T_b) \dots\dots\dots(9)$$

依據劉瑋婷（1990）所做的實驗認為，稻米 50%的發芽之基礎溫度為 12.5℃。但是由於台灣的資料並不足夠，本研究利用 8℃~12.5℃為基礎溫度，分別計算其 GDD 值。目前作物生長期的劃分是以作物的固定生育天數為主，當利用固定天數的方法來求作物係數時，每一個生育期的天數皆為 15 天，總生育天數為 120 天，因此，將每一個生理發育階段視為整個生育期的八分之一。根據台灣農家要覽可查出高雄 139 號一期作的生育天數為 130 天（台灣農家要覽，民國 84 年），二期作的生育天數為 100 天（台灣農家要覽，民國 84 年），分別累積其每八分之一時期

的生育度數，即為每一個生育階段的累積生育度數。由於同一種作物的累積度數是相同的，因此，取一期作與二期作的每個生育階段的累積溫度的平均值當成其生長所需的累積溫度。觀察不同的基礎溫度計算出來的累積生育度數發現，當基礎溫度為 10℃時，計算出來的一期作與二期作的 GDD 值在統計上可以視為沒有差異的，而所計算出的總 GDD 值平均為 1776℃。各個生長階段之累積生育度數可由表 3 查出。

表 3 稻米作物係數及累積生育度數

生育天數	生育階段	累積生育度數(°C)	一期作	二期作
1~15	插秧期	197	0.5	0.9
16~30	分蘖初期	390	0.8	1.2
31~45	分蘖末期	597	1.2	1.5
46~60	開花初期	807	1.3	1.6
61~75	開花末期	1038	1.3	1.5
76~90	成熟初期	1272	1.2	1.3
91~105	成熟中期	1525	1	1
106~120	成熟末期	1776	0.7	0.6

資料來源：研擬合理農業用水標準（III）（經濟部水資源局，1997）及自行整理。

作物係數 Kc

作物係數會隨著不同的作物而有不同，相同的作物在不同的生育期也會有不同的作物係數，但是相同作物的品種並不會影響其作物係數，稻米的作物係數可以由表 3 查出。在以天數為基準的情況下，作物不同時期的作物係數可以由下表查出，而在以累積溫度為基準的情形下，作物的作物係數則是由前一天累積的溫度來決定。

插秧日期

各地的插秧日期並不一定，而且台灣一年有二作，因此插秧的日期也有所不同，各地區的插秧日期可以由表 4 查出。高雄地區的耕種的日期在本研究中選擇 1 月 1 日及 6 月 25 日分別代表一、二期作的耕種日期。

表 4 各地區插秧日期

地區	一期作	二期作
宜蘭地區	2月中旬至3月上旬	7月下旬至8月上旬
台北地區	3月中旬至3月下旬	7月下旬至8月上旬
新竹地區	3月上旬至3月下旬	7月下旬至8月上旬
台中地區	2月中旬至3月下旬	7月下旬至8月上旬
嘉南地區	1月中旬至3月上旬	7月中旬至8月上旬
高屏地區	1月上旬至1月下旬	6月下旬至7月中旬
台東地區	1月中旬至2月中旬	7月下旬至8月上旬
花蓮地區	2月上旬至3月上旬	7月上旬至8月上旬

資料來源：台灣農家要覽（農委會，民國84年）

表 5 氣候變遷預設情境

	氣候變遷預設情境
Case1	溫度增加2度
Case2	溫度增加2度、雨量增加10%
Case3	溫度增加2度、雨量減少10%
Case4	在CCCM之氣候條件下
Case5	在GFDL之氣候條件下
Case6	在GISS之氣候條件下
Case7	在UKMO之氣候條件下

氣候變遷預設情境

氣候變遷之預測有許方式，本研究所討論之氣候變遷預設情境包括兩類，除了利用大氣環流模式(GCM)的輸出值來設定氣候變遷預設情境，另一方面則是將目前的溫度、雨量直接增減

一定的比例，來討論氣候變遷對農業灌溉需水量的影響。茲將氣候變遷預設情境考慮彙整表5。

不同之氣候變遷預設情境應用於修正目前的氣象資料，再進一步推求灌溉需水量。為比較需水量的改變，在氣候變遷的情況之下，作物的品種並不加以改變，因此，每個生育期之總生育度數、kc值等因子皆考慮為不變。

四、模擬結果

本研究將探討灌溉需水量受到氣候變遷及湛水深之影響，下列幾項為主要的考慮方案(1)目前的氣候條件下，湛水深對灌溉需水量之影響；(2)氣候變遷及湛水深對灌溉需水量之影響；(3)不考慮湛水深，氣候變遷對灌溉需水量之影響。

目前氣候下湛水深對灌溉需水量之影響

灌溉方式的不同將會導致不同的灌溉需水量，在此討論湛水深對灌溉需水量之影響。其影響如圖1所示，圖1(a)為利用累積溫度法估算不同灌溉方法所需之灌溉需水量，圖1(b)為利用固定天數法估算不同灌溉方法所需之灌溉需水量。

由圖1(a)及圖1(b)可以很明顯的看出，在目前的氣候條件之下，不考慮湛水深時，所需要的灌溉水量將會顯著之減少，而且每一旬所需要的



圖 1(a) 利用累積生長溫度法預測生長期估計之灌溉需水量

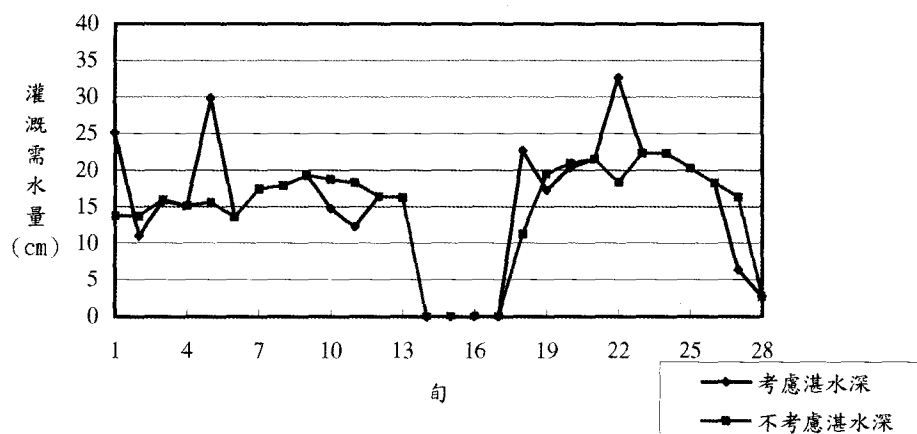


圖 1(b) 利用固定天數法預測生長期下估計之灌溉需水量

表 6 考慮湛水深每月所需增加之灌溉需水量百分比

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
GDD	8.8	3.8	10.3	-5.0	-5.0	11.4	11.4	-0.5	-9.5	0.0
Days	8.6	14.3	0.0	-10.0	0.0	11.4	-2.9	14.3	-10.0	0.0

灌溉水量比較平均，不會有某些時期需要特別多的灌溉水量的情形。但是在某些情形下，不考慮湛水深所需要的灌溉水量反而更多，這是因為當考慮湛水深時，在不同的生長期所需要的湛水深並不相同，因此，多餘的湛水深將可提供下一期之灌溉需水量，減少灌溉水量。湛水深對灌溉需水量之影響如表 6。由表中可以發現，考慮湛水深時，在生長期的前期（一期作的 1~3 月，二期作的 6~8 月）的灌溉需水量大致都是增加的情形，每單位面積所增加的總灌溉需水量約 21~23 公分左右，而在生長期的後期（一期作的 4~5 月，二期作的 9~10 月）的灌溉需水量是減少（或是增加幅度較小的情形）的情形，每單位面積所減少的灌溉需水量約 10 公分左右；而以整個生長期來看，因為考慮湛水深所需增加的灌溉需水量不論是利用累積生長溫度或是利用固定天數來討論生長期，灌溉需水量都是增加的，每單位面積約需增加 2.6 公分左右。

氣候變遷及湛水深對灌溉需水量之影響

在氣候條件發生改變及考慮湛水深時，灌溉需水量的增加情形如圖 2，其中，圖 2(a)為利用累積溫度法所估算出的灌溉需水量增加百分比，而圖 2(b)為利用固定天數法所估算出的灌溉需水量增加百分比。

在圖 2(a)中，大致的趨勢是相同的，但是，在 Case1、Case2 及 Case3 中，在第 13 旬時，其灌溉需水量較其他方式估算出來的為高。由於溫度的增加，作物的生長日數會縮短，因此，灌溉需水量的分佈將會有所改變；在一期作中（第 1 旬至第 16 旬）灌溉需水量在第 5 旬（二月中旬）灌溉需水量的增加量從 50%到 86%，但是，在 11 到 4 月為高雄地區的枯水期，雨量較少，因此，灌溉需水量的增加將會使水資源的調配出現問題，雖然在第二期作灌溉需水量也會有增加的情況，但是由於高雄地區在 5 到 10 月的雨量比較豐富，因此增加灌溉需水量對水資源調配的衝

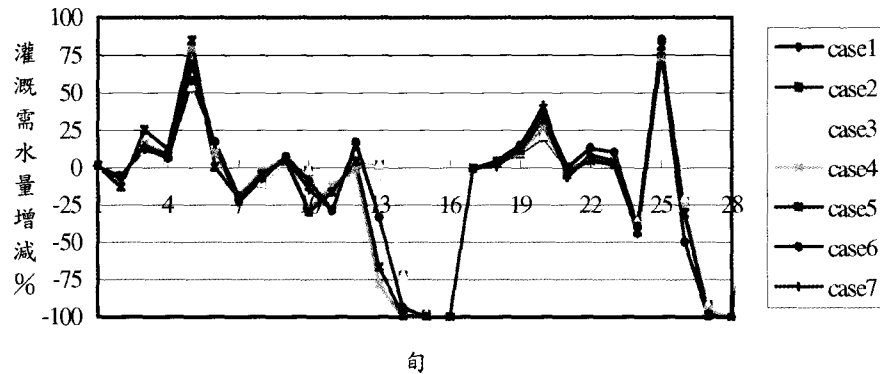


圖 2(a) 考慮湛水深及氣候變遷下，利用累積生長溫度法預測生長期所估算出的灌溉需水量增加百分比

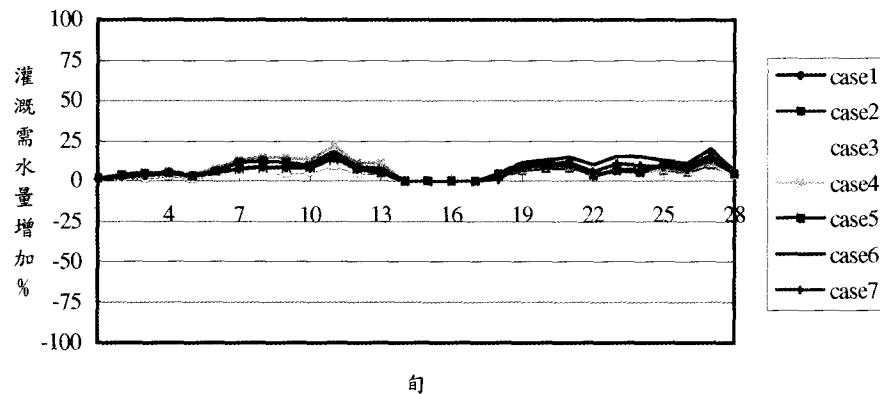


圖 2(b) 考慮湛水深及氣候變遷下，利用固定天數法預測生長期所估算出的灌溉需水量增加百分比

擊較少。

利用固定天數方法所估計出來的灌溉需水量的增加百分比並不是太大，主要是因為利用固定天數法並沒有考慮到作物因為溫度增加而有可能縮短其生長期，因此，需要灌溉的時間並不會移動，而增加的灌溉水量主要是滿足因為溫度增加而增加的蒸發散量。在圖 2(b)中，利用 GISS 的輸出值預測溫度及雨量改變值之情況，所模擬出來的值有較高的情形，可能的原因在於 GISS 所模擬出來的雨量減少的比例較大，因此，便需要較多的灌溉水量以滿足降雨的不足。

在圖 2(a)中有些時期的灌溉需水量減少的比例為 100%，這是因為溫度升高以後，作物的生長期會縮短，可以提早收成的時間，所以灌溉需水量才會因此而減少 100%，而在圖 2(b)中就沒

有這一個情況，這是因為固定天數法不會反應作物的生長會受到溫度的增加而縮短的現象。

在兩種不同的模擬情況中，一、二期作灌溉需水量平均增減百分比可由表 7 看出。由表中可以發現，利用累積生長溫度 (GDD) 計算作物的生理期所求出之灌溉需水量一期作平均約減少 17%；二期作平均減少 14%，而利用固定天數所求出之灌溉需水量一期作平均約增加 6%；二期作平均增加 9%，這是因為利用累積生長溫度可以因為溫度上昇而縮短生長期，因此需要灌溉的時期將會減少，而利用固定天數法則不會產生此現象所致。不過，雖然利用累積生育度數法灌溉需水量整年最多可以減少 20%，但是，在某些生長階段，灌溉需水量增加超過 50%也是必須特別加以注意的。

表 7 考慮不同氣候預設情境及湛水深下灌溉需水量平均增減百分比

	氣候預設情境	GDD		Days	
		一期作	二期作	一期作	二期作
Case1	溫度增加 2 度	-15	-13	4	8
Case2	溫度增加 2 度、雨量增加 10%	-15	-14	4	7
Case3	溫度增加 2 度、雨量減少 10%	-15	-12	4	8
Case4	在 CCCM 預測之氣候條件下	-20	-15	10	8
Case5	在 GFDL 預測之氣候條件下	-20	-14	8	9
Case6	在 GISS 預測之氣候條件下	-17	-13	7	14
Case7	在 UKMO 預測之氣候條件下	-17	-15	6	10

表 8 不考慮湛水深，不同氣候條件下平均灌溉需水量增減百分比

		GDD		Days	
		一期作	二期作	一期作	二期作
Case1	溫度增加 2 度	-16	-17	4	8
Case2	溫度增加 2 度，雨量增加 10%時	-16	-17	4	7
Case3	溫度增加 2 度，雨量減少 10%時	-16	-16	4	9
Case4	在 CCCM 預測之氣候條件下	-20	-18	9	7
Case5	在 GFDL 預測之氣候條件下	-20	-19	7	9
Case6	在 GISS 預測之氣候條件下	-18	-17	6	14
Case7	在 UKMO 預測之氣候條件下	-18	-20	6	9

不考慮湛水深，氣候變遷對灌溉需水量之影響

在氣候條件發生改變時，灌溉需水量的增情形如圖 3，其中，圖 3(a)為利用累積溫度法所估算出的灌溉需水量增加百分比，而圖 3(b)為利用固定天數法所估算出的灌溉需水量增加百分比。

在兩種不同的模擬情況中，不同時期灌溉需水量的增減彙整於表 8。由表 8 中可以發現，利用累積生長溫度（GDD）計算作物的生理期所求出之灌溉需水量一、二期作平均約減少 18%，而利用固定天數所求出之灌溉需水量一期作平均約增加 6%；二期作平均增加 9%。不過，雖然利用累積生長溫度計算灌溉需水量不論在一、二期作都是減少的情形，但是在某些生長階段中，灌溉需水量增加的情形。

由圖 3(a)中可以看到，當不考慮湛水深時，一期作有些時期之灌溉需水量會增加 5%到 15%，在二期作時亦然，且灌溉需水量增加的更

多，尤其是 Case6 利用 GISS 模擬出來的溫度、雨量的改變值所估算出的灌溉需水量增加的比例比起其他情況來看，增加得非常多，相同的情形也出現在圖 3(b)中，約增加 20%的灌溉需水量，這是因為在不考慮湛水深的情況下，雨量的多寡便決定了灌溉水量的多少，而利用 GISS 模擬出來的雨量減少的比例較大，因此，所需要的灌溉水量也會比其他情況來的多。比較類似的情況也出現在 Case3 考慮溫度增加 2 度、雨量減少 10%的情況，利用此種氣候條件估算出來的灌溉需水量在二期作的增加量也比 Case1 及 Case2 的情況來得高。

比較所有情況可知，考慮累積溫度將可以有效的反映出作物有可能因為溫度的上昇而縮短生長期的情形，在這種情況下，作物的需水量不但可能減少，而且需要灌溉的月份也會減少，而固定生長天數的情況下，作物的生長情形並不會因為溫度的增加而縮短，因此，作物需要灌溉的

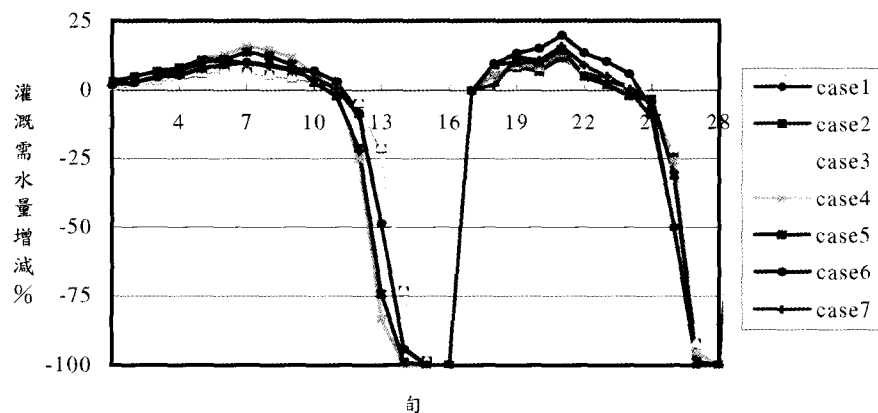


圖 3(a) 不考慮湛水深及氣候變遷下，利用累積溫度法預測生長期所估算出的灌溉需水量增加百分比

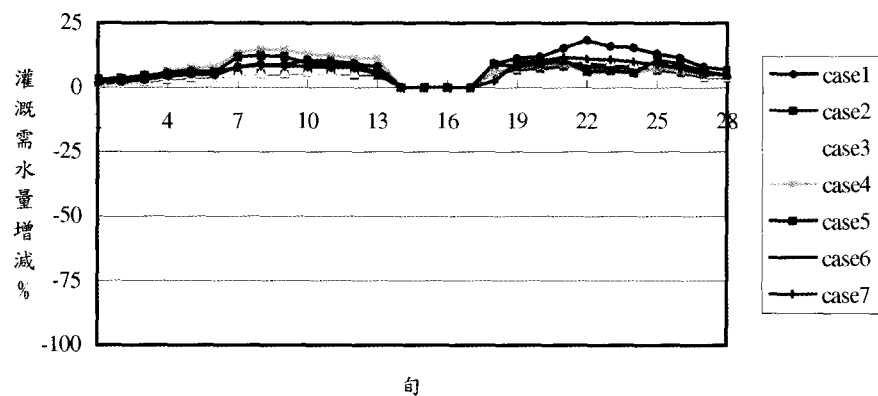


圖 3(b) 不考慮湛水深及氣候變遷下，利用固定天數法預測生長期所估算出的灌溉需水量增加百分比

月份並不會改變。湛水深亦是影響灌溉的主要因素，若是不考慮湛水深，則不論是考慮累積溫度的情況或是考慮固定天數的情況，作物所需要的灌溉水量都有明顯減少的情形。

五、結論與討論

由前節的模擬結果可知，稻米灌溉需水量的最大值大多出現在 3~5 月，但是 3~4 月適逢台灣的枯水期，雨量本來就比較少，尤其在高雄地區，枯水期的雨量只佔全年的 10%左右，因此，在這個時期的水資源之調配便相當的重要。

在考慮累積溫度預測作物生長期下所估算之灌溉需水量可以發現，由於溫度的上升，使得作物生長的時間縮短了，因此，所需要灌溉的月份也較少，特別是在二期作物的情形更是明顯，由於二期作種植的時間正好是在豐水期，因此，水量本來就比較足夠，再加上多出來的水量，便可以轉做其他用途，增加水資源調配的彈性；然而在一期作時，雖然某些生長階段之灌溉需水量會因為生長期縮短而減少，但是在某些階段灌溉需水量在考慮湛水深及氣候變遷下可能大幅增加 50~86%。由於一期作生長期主要在 1 月到 5

月，而 11 月到隔年 4 月為高雄地區的枯水期，因此，灌溉需水量的增加將是值得注意的問題。

此外，湛水深對灌溉需水量的影響也是相當大的，由表五中可以看到，考慮湛水深時，不論是利用累積溫度或是利用固定天數法來計算灌溉需水量，在生育期的前期湛水深每單位面積每個月的灌溉需水量約增加 21~23 公分左右，而生育期後期所需增加的湛水深每單位面積每個月減少 10 公分左右，而目前台灣的水資源並不足夠，若是湛水深可以減少，或是不考慮湛水深時，所能節省的水量將可以提供給其他用水標的使用，減輕水資源不足的情況。

由於固定天數法只能反映出作物因為溫度增加所增加的蒸發散量，不能反映出因為溫度增加使得作物的生長期因而縮短的現象，因此，利用固定天數法來估計在氣候變遷時的灌溉需水量可能會有較大的誤差。

目前台灣的作物生育度數的資料尚不完整，因此在研究上難以更精確預測生長期，希望未來能夠加強這一方面的研究。此外，本研究只針對氣候變遷對灌溉需水量的影響做討論，因為氣候變遷使得生長期縮短可能導致產量減少的情況，亦值得進一步探討。如能了解農業合理用水之量及需求時程，則可進一步探討水資源管理之影響與調適策略。

六、文獻回顧

甘俊二，”臺灣之稻作灌溉用水量推估方法之研究”，農田水利，38(6): 26-36，1991。

甘俊二、陳清田、陳焜耀，”台灣地區作物需水量推估模式之合適性研究”，農工學報，第 42 卷第 2 期，8-19 頁，1996。

行政院農業委員會，台灣農家要覽，行政院農業委員會台灣農家要覽增修訂，豐年社民國 84 年出版。

施嘉昌、黃成達，”玉米蒸發散係數之研究”，中國農業工程學報，第 43 卷第 3 期，頁 1-15，1994

洪念民、童慶斌、譚義績、李智新，”全省水文概況受氣候變遷的影響”，八十五年農業工程

研討會。

洪念民、童慶斌、譚義績，”后里圳小型水力發電受氣候變遷之影響”，台電工程月刊，第 601 期，1-11 頁，1998a。

洪念民、童慶斌、譚義績，”氣候變遷對台中水利會大安溪灌渠缺水率之影響”，台灣水利第 46 卷，第 2 期，1998b。

陳清田、甘俊二，”台灣地域性作物須水量之推估研究”，中國農業工程學報，第 43 卷，第 3 期，1997。

童慶斌，1997，氣候變遷對大甲溪上游河川流量之衝擊，台灣水利季刊第四十五卷第二期，64-69 頁，1996。

童慶斌、洪念民、譚義績，”氣候變遷對大安溪水資源營運之衝擊”，台灣水利季刊，第 46 卷，第二期，48-59 頁，1998。

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，八十六年六月。

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，第 44 卷，第 1 期，9-23 頁，1998。

劉瑋婷，”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。

蔡易良，”高雄獅子頭圳慣區乾旱缺水期救旱經歷之分析研究”，台灣大學農業工程學研究所碩士論文，1993。

Amien, I., Rejekiningrum, P., Pramudia, A. and Susanti, E. Effect of Interannual Climate Variability and Climate Change on Rice Yield in Java, Indonesia. Water, Air, and Soil Pollution. 92:29-39,1996.

Buan, R. D., Maglinao, A. R., Evangelista, P. P. and Pajuelas B. G. Vulnerability of Rice and Corn to Climate Change in the Philippines. Water, Air, and Soil Pollution. 92:41-51,1992.

Colville, D. C. and Frey, K. J. Development Rate and Growth Duration of Oats in Response to Delayed Sowing. Agron. J. 78:417-421,1986

Fredrick, K. D. and Major, D. C. Climate Change

- and Water Resources. Climatic Change. 37:7-23,1997.
- Gilmore, E. C., Jr., and Roger, J. S. Heat Unit as a Method of Measuring Maturity in Corn. Agron. J. 50:611-615,1958.
- ✓ Major, D. C. and Fredrick, K. D. Water Resources Planning and Climate Change Assessment Methods. Climatic Change. 37: 25-40,1997.
- Matthews, R. B., Kropff, M. J., Horie T. and Bachelet, D. Simulating the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia and Evaluating for Adaptation. Auricular System. 54 (3): 399-425,1997.
- McCabe, G. J. and Wolock, D. M. Sensitivity of Irrigation Demand in A Humid-temperate Region to Hypothetical Climatic change. Water Resources Association. 28 (3): 535-543,1992.
- Menderski, H. J., Miller, M. E. and Weaver, C. R. Accumulated Heat Units for Classifying Corn Hybrid Maturity. Agron. J. 65:743-747,1973.
- Tung, C. P. and Haith, D. A. Global Warming Effects on New York Streamflows Journal of Water Resources Planning and Management. 121(2): 216-225,1995.
- ✓ Tung, C. P. and Haith, D. A. Climate Change, Irrigation, And Crop Response. Journal of American Water Resources Association. 34(4): 1071-1085,1998.
- Warrington, I. J. and Kanemasu, E. T. Corn Growth Response to Temperature and Photoperiod I. Seeding Emergence, Tassel Initiation, and Anthesis. Agron. J. 75:749-754,1983.

收稿日期：民國 88 年 11 月 4 日

修正日期：民國 88 年 12 月 8 日

接受日期：民國 88 年 12 月 20 日