

以氣象資料為基礎之旱作灌溉管理策略研討

Study on Irrigation Management Strategy Based on Climatic Data

國立台灣大學農業工程學系副教授

蘇 明 道

Ming-Daw Su

國立台灣大學農業工程學研究所碩士

鄭 國 誠

Kuo-Cheng Cheng

摘 要

以往台灣之灌溉以水稻為主，水稻灌溉管理之發展已趨於成熟，旱作之灌溉管理則尚在發展階段，為了達到灌溉自動化及有效使用有限水資源之目的，旱作灌溉需要一良好合理之控制策略做為灌溉管理之基礎。本研究嘗試以氣象資料為基礎建立旱作灌溉管理模式，研究中以嘉南水利會學甲旱作灌溉試驗站農作區之氣象資料為依據，經由蒸發散量經驗式估算出每天之最大可能蒸發散量，進而依作物因子與土壤水分因子等係數校正以推估實際蒸發散量，於考慮有效雨量後藉由根系土層之水收支平衡推估每日之土壤含水量，並利用學甲試驗站實測之土壤含水量校正推估之土壤含水量，建立以氣象資料為基礎之土壤含水量推估模式。在土壤水份推估模式建立後，本研究並評估以不同土壤水份消耗量作為灌溉基準之各種旱作灌溉策略，獲知不同之旱作灌溉基準與施灌水量、有效雨量利用之間的關係，做為日後旱作灌溉管理決策之參考。

關鍵詞：灌溉，灌溉管理，土壤水分，作物因子，自動化。

ABSTRACT

Rice was the major crop in Taiwan, and most of the irrigation is done mainly for rice. The development of irrigation management for rice has been mature, but that for dry crops is still under development. This research is to use climatic data to set up the irrigation management for dry crops. Daily potential evapor-transpiration was estimated from local climatic data through the use of empirical evapor-transpiration estimation equations with adequate crop coefficients. The actual evapor-transpiration was then estimated by the soil moisture factor to account the available soil moisture level. The soil moisture tracking model was set up by doing the water budget in the root zone through the use of actual evapotranspiration, irrigation, and effective rainfall. The soil moisture content was then estimated on daily basis. Data from the farming area of Hsue-Chia Irrigation Experiment Station of Chia-Nan Irrigation Association in Southern Taiwan were used for the calibration

and verification of the model.

The soil moisture tracking model was then used in this research to evaluate various kinds of irrigation management strategies. Different irrigation standards were used and their impacts were evaluated. It is found that low irrigation standard may cut down the irrigation frequency and may have a better use of the natural rainfall. But yield and production quality may also be lowered from the use of low irrigation standard. A closed look from economical analysis was suggested for better evaluation. The soil moisture tracking model built in this study can be used as a basis for irrigation automation.

Keywords : Irrigation, Irrigation management, Soil moisture, Crop coefficient, Automation.

前 言

由於近年來工商業迅速發展及生活水準提高，使得人力成本愈來愈高，各種產業為了追求較低的成本紛紛走向自動化的道路，農業自動化自然也成為發展之趨勢，灌溉自動化之研討乃成為農業生產的課題之一。臺灣之灌溉以往是以水稻為主，水稻灌溉管理之發展已趨成熟，但為因應消費習慣改變及單位面積水稻產量逐漸增加，政府政策性將水稻生產改為一年一期作並推動水田轉作，旱作面積因而逐漸增加，一般旱作灌溉以水果、蔬菜、五穀雜糧（如玉米、大豆、高粱等）等為主，在作物生長的過程中一般只灌溉一至二次。為了因應市場開放，達到降低生產成本、提高生產品質、追求更高經濟效益之目的，灌溉自動化已漸形重要，而良好、合理的旱作灌溉管理策略是達成灌溉自動化的基礎，因此建立旱作灌溉管理策略便成為一重要的課題。

一般灌溉自動化可依控制策略分兩大類型：第一種是以時間為控制依據以執行定時定量之灌溉，每隔一定的時間即自動定量施灌一次（圖1），雖然這種方式較簡單且易於管理，但卻缺乏彈性；由於作物在不同生長期所消耗的水量亦不相同，應依需水要求不同灌溉不同水量方才合理，而且這種管理方式也較不易有效利用天然之降雨量。第二種是以土壤水分感測器來監測土壤水分作為施灌之依據，這種方式又可分為兩種：一種是定時不定量的方式，另一種則是定量不定時（圖1）。前者是每隔一定時間，經由土壤水分感測器測得土壤含水量後再決定灌溉的水量，將土壤水份提高到田間容水

量；後者是當土壤水分降至某一預設之標準值時，即開啓灌溉系統以補充土壤水分至田間容水量。但由於土壤水份感測器所測得的值只是點的資料，無法充分代表大面積的灌區內之土壤水分現況，且其測得之土壤水分易受土壤之物理及化學性質、感測器埋設之周遭環境等因素影響，因此本文提出利用氣象資料作為建立灌溉管理策略的依據。

本研究之目的在建立以氣象資料為基礎之旱作灌溉管理模式，並以嘉南水利會學甲旱作灌溉試驗站農作區之氣象資料為驗證之參考資料。模式中首先經由蒸發散量經驗式估算出每天之蒸發散勢，進而依作物因子與土壤水分因子等係數做調整以推估實際之蒸發散量，於考慮有效雨量後，藉由根系土層之水收支平衡推估每日之土壤含水量。研究中並利用學甲試驗站實測之土壤含水量對推估之土壤水分進行比對校正，以期建立以氣象資料為基礎之土壤含水量推估模式作為研討旱作灌溉策略之參考依據。

雖然模式所估算之土壤含水量需加以校正調整，但由於做土壤水份校正必須採土以得到實測土壤水份資料，必需考慮人力及經濟層面，因此本研究嘗試探討合理之校正週期，做為利用氣象資料估算土壤水份之灌溉管理模式的參考。因土壤本身具有保水能力，是很好之水量儲存緩衝區，若估算之土壤含水量與實測土壤之含水量之偏差值在合理範圍內，不做校正亦不至因灌溉管理作業之誤差影響作物之正常生長，可等偏差值超過訂定之標準時再進行校正。本研究在完成以氣象資料推估土壤水份之模式後，即對以不同之

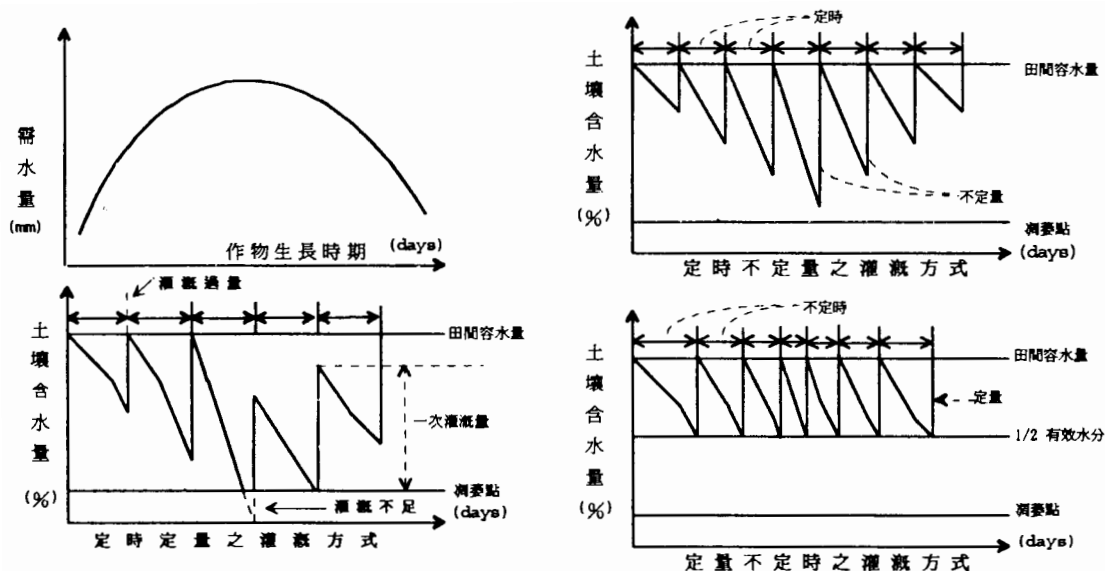


圖 1. 旱作灌溉管理方式示意圖

土壤水份消耗量作為灌溉基準之各種灌溉策略進行評估，以找出較佳之灌溉策略做為日後旱作灌溉管理之參考。

文獻回顧

作物需水量估算

作物生長時期之蒸發散量與低層大氣之各種氣象因子關係十分密切，影響作物需水量之氣象因子有日照、溫度、濕度、土壤水分飽和度、風速等，文獻中有許多依據此等因子來估算作物蒸發散量之研究結果，一般取其中一個或數個氣象因子，發展出估算蒸發散量之經驗式，有關推估作物蒸發散量之研究結果散見於前人的研究文獻中。Lowry-Johnson(1942)，Blaney-Criddle(1945, 1950, 1970)，Thornthwaite(1942)以溫度為影響作物需水量之主要因子，屬於溫度型之經驗式。Hargreaves(1956)，Jensen-Haise(1963)，Stephens(1965)以輻射氣象因子為主要考慮，屬於輻射型之經驗式。Penman(1948)發表較為完整且具理論基礎之混合法(combination approach method)，另外還有Munson之降雨－蒸發指標法(P. E. index method)(1960)以及Christiansen之複相關法(multiple correlation method)(1968)等。

作物需水量因具有地域之特性，國內學者之相關研究成果亦甚豐碩，黃振昌(1986)結合農業氣象、灌溉、作物之理論並應用數理統計分析確立國內各相關算式及參數。張本初(1990)收集一般通用的蒸發皿之蒸發量和蒸發散模式比較，並利用嘉南農田水利會學甲旱作灌溉試驗站1986年的氣象資料，利用直線迴歸分析各模式在當地之適用性、對所需氣象因子的依賴程度、及儀器精準對於模式之影響程度。陳清田(1991)藉由迴歸分析及敏感度分析，提供適用於嘉義地區作物需水量之推估模式，建立該區風速函數之地域性參數，並與嘉南農田水利會學甲試驗站之資料比較分析，建立嘉南地區作物需水量之推估模式，作為灌溉營運管理參考依據。以上之研究均以作物需水量之推估為主，但推估作物需水量之主要目的是為了做灌溉之管理，因此除了推估作物需水量外，需能瞭解土壤含水量之變化，以對灌溉系統作合理的控制與管理。

灌溉管理方式

Wiser(1965)提出以水平衡模式估算出土壤含水量作為灌溉計畫之參考依據，Jensen、Wright & Pratt(1969)考慮相關影響因子（包括作物生長之期

距、土壤表面之濕潤度與有效之土壤含水量等)根據作物之蒸散量與作物因子利用程式估算每日土壤水分消耗量。Jensen、Robb & Franey(1970)；Wu & Liang (1972) 提出依據環境因子求得最佳之灌溉量及效率，其使用之環境因子包括勞力及動力成本、水量、作物之產量、消耗能量等，主要均是以氣象資料作為灌溉管理系統之依據。

Jermar(1990) 使用最佳的灌溉策略方式來操作農業灌溉系統，以期得到最大之經濟效益，其主要考量的因子是氣候、作物的種類與產量、水的補充、勞力與機械成本等。Steiner & Keller (1992) 在“灌區管理模式”(Irrigation Land Management 簡稱 ILM) 中提出可以在複雜多變的環境中發展灌區管理模式當作各種區域作物灌溉系統之需求和依據，改進系統性能之策略以支援管理決策，文中首先考量灌區所有人之需要、作物種類、及水管理計畫，以獲得控制區域總灌溉水量，當作該區水需求的回應，由產量、氣候等資訊支援灌溉管理策略，並以大灌溉區域之現場資料去驗證、確認模式，分析管理所遇到的問題。Hill、Hanks & Wright(1982) 利用氣象資料及作物因子、土壤校正因子等相關因子估算每天之蒸發散量與土壤水份，並將推估值與實測值做分析比較，經由模式針對不同作物所推估之產量與實測之產量作評估，以作為灌溉用水管理之依據。

灌溉管理策略需考量之因素十分複雜，前人之研究文獻中灌溉策略可區分為兩種方式：一種是以水收支平衡方程式為依據，另一種是以經濟效益為考量，以達到最大之經濟效益為目標來訂定灌溉最佳之操作方式。後者之考量因子主要包括作物種類、作物產量、土壤水分補充頻率、勞力或機械成本等。本文研究之重點則屬於前者，即根據水數支平衡方程式作為灌溉管理之依據，因文獻中相關之研究多只著重於估算土壤含水量作為灌溉管理策略之參考依據，並未詳細研討推估土壤含水量之校正及評估，本文及提出利用實測之土壤含水量與估算土壤含水量值作比較分析，對估算之土壤含水量做校正工作，使其估算值更接近實測值，以避免造成太大之偏差影響整個灌溉系統的管理，以獲得更合理的灌溉策略供作灌溉系統操作之參考。

土壤水分估算模式

氣象資料

本研究分別在台大農場之試驗田區及台南學甲試驗站按裝一套自動氣象水文觀測系統，使用 CAMBELL SCIENTIFIC INC. 生產之 Model 21X 型 Micrologger 資料收集器收集相關的氣象資料，並以 CR10 Measurement and control module 儲存收集的數據，該系統可利用數據機與電腦連線以即時取得氣象資料，可供未來自動化灌溉控制系統使用。利用各種感測器收集的氣象資料包括風向(度)、風速(m/s)、溫度(°C)、相對濕度(%)、輻射量(ly/min)、淨輻射(空氣中之輻射量與地表反射熱輻射之差，ly/min)、雨量(mm)、及石膏塊土壤水分感測器讀數等等。

作物蒸發散勢

文獻中有關作物蒸發散量之估算模式相當多，較常被採用者有 Penman 法、Blaney-Criddle 法、Hargreaves 法、及 Thornthwaite 法。Penman 模式是 1948 年由英國人 Penman 所提出，結合能量平衡理論與空氣動力學來模擬水面之蒸發散，此法假定「土壤如果保持濕潤狀態而地表完全覆蓋時，其蒸發散作用由環境調節，並且可由氣象資料來估計」。其後並經 1952、1956、1963 年修正後使其估算之時間範圍可從一月、一天而縮小至以小時為準，使用 Penman 法時需要之氣象及區域參數資料相當繁雜，包括飽和蒸氣壓曲線之斜率、濕度、淨輻射量、風速函數、平均溫度時之飽和蒸氣壓、露點溫度之飽和蒸氣壓、土壤之傳熱係數、水汽蒸發潛化熱等等。Blaney-Criddle 法是由 Blaney-Criddle 於 1945 年提出並於 1950、1970 年相繼補充修正，該經驗式以日照時間與溫度為影響作物需水量之主要因素，由於溫度及日照氣象資料易於取得，故在世界各地使用已相當普遍。Hargreaves 於 1956 年依據種植在滲漏計上牧草之試驗資料，並與溫度輻射氣象因子之經驗公式相比較，得到估算作物需水量之經驗公式，此法為 Jensen-Haise 法之修正，即以草地為主要試驗作物而求得係數。Thornthwaite 得 1948 年假設區域內土壤水分供應不受限制時，以溫度、日照時

數為估算作物需水量之因子，提出與作物、土壤種類無關之 Thornthwaite 估算式。

根據黃振昌(1986)將各種經驗式估算值與實測值做比較，發現以 Penman 之估算值最接近實測值，而 Blaney-Criddle 法次之。本文決定採用 Blaney-Criddle 法，因 Penman 法雖然可以得到更精確的估算值，但由於 Penman 法需使用多項之氣象因子，但有些區域性之農業氣象站無法提供足夠之氣象資料（如入輻射量），而 Blaney-Criddle 法只採用溫度為輸入之氣象因子取得較為容易，且在灌溉策略的建立和評估之方法論建立後，如區域性之資料能完整取得，則可以輕易的更換模式相關之蒸發散勢估算公式。Blaney-Criddle 之估算公式如下：

$$ET_p = K_c P (45.7T + 813) / 100 \dots\dots\dots (1)$$

- 式中：ET_p：作物之最大蒸發散量 (mm/day)
K_c：作物因子
P：日照時數百分比
T：日平均溫 (°C)

實際蒸發散量估算

前述各種經驗式所求出之ET_p值，乃是經由充分灌溉後之特定作物（一般指苜蓿 Alfafa）在特定之生長狀況（一般指40公分高）時之可能最大蒸發量，但因作物之生長狀況不同及土壤水份之變化，因此需依作物生長階段及土壤水份狀況進行校正才能得到作物實際之蒸發散量。校正工作分成作物生長校正及土壤水份校正兩部份，其校正方式如下：

$$ET_a = ET_p \times K_c \times K_s \dots\dots\dots (2)$$

- 式中：ET_a：實際蒸發散量 (mm/day)
ET_p：最大蒸發散量 (mm/day)
K_c：作物校正因子
K_s：土壤水份校正因子

作物需水量與作物的種類、生長狀況有關，需先進行田間試驗訂出各種作物在各種不同之生長階段之蒸發散量和前述參考作物之最大可能蒸發散量之比值，此類數據可從各種手冊或文獻中找到（表1），圖2中所示的為玉米之作物因子曲線，橫軸表示作物之生長時期，分為兩個階段：前段表示作物播種到完全覆蓋為止，以覆蓋百分比表示；後則以完全覆蓋後之天數表示。縱軸表

示作物係數，作物係數會隨作物生長時期不同而有所改變。

若根系土層內沒有足夠之水分可供蒸發散，則最大可能之蒸發散量ET_p將無法發生。例如在高溫、低濕度的炎熱沙漠，估算出來的最大可能蒸發散量很高，但由於土壤含水量很少，實際蒸發散量將遠遠低於最大可能之蒸發散量。根部土層之土壤含水狀況是影響實際作物蒸發散量之重要因子，需加以校正，根據 Hill、Hanks & Wright (1982) 之研究，其校正可以下式表示：

$$K_s = \log(1 + 100(1 - D_p/D_t)) / \log 101 \dots\dots\dots (3)$$

- 式中：K_s：土壤水份校正因子
D_p：土壤水分消耗量 (Soil moisture depletion)
D_t：在田間容水量時根系土層內之總有效水分量
D_p/D_t：根系土層有效水分量消耗之比例
(D_p及D_t之單位應取一致，使D_p/D_t成無因次)

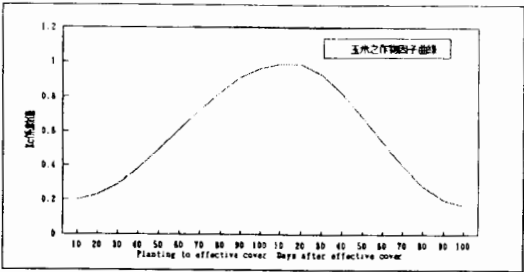


圖 2. 玉米生長期與作物因子之關係圖

表 1. 作物生長期與各種作物之作物因子係數

作物種類	播種至完全覆蓋 Planting to effective cover (%)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
橡類	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0
低莖	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1
豆類	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1
豌豆	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.9	0.9
馬鈴薯	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.9	0.9
甘蔗	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
苜蓿	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
牧草	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
	完全覆蓋後之天數 Days after effective cover									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
低莖	1.0	0.9	0.7	0.5	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
豆類	1.0	1.0	0.9	0.7	0.6	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1
豌豆	1.0	1.0	1.0	0.8	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
馬鈴薯	0.9	0.9	0.8	0.6	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
甘蔗	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
玉米	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2
苜蓿	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
牧草	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

土壤水份校正因子受土壤表層之土壤水份影響很大，當土壤處於田間含水量之狀態時之 $D_p=0$ 而 $K_s=1.0$ 。在凋萎點處時 $D_p=D_t$ ，而 $K_s=0$ ，因此當進行灌溉或剛下完一場雨後，土壤內之水份處於接近田間含水量之高水分狀態而使土壤之蒸發量升高，土壤水份校正因子值也相對較高，尤其是施灌或下雨後之三天內，土壤水份校正因子值之變化最明顯。

有效雨量

利用根系土層之水平衡計算以推估土壤含水量必須考慮有效雨量，有效雨量之估算相當複雜，其推估受到灌溉管理方式、降雨特性、地形等不同因素之影響，難有一確切之估算模式可供遵循，本研究乃暫採用水利局推行旱作灌溉所採用之方法：

1. 日雨量 5mm 以下則視為無效。
2. 灌溉 24hr 之內之降雨視為無效。
3. 超出作物根系土層田間含水量之降雨視為無效。
4. 有效雨量之估算方式如(4)、(5)式：
 - a. 若降雨後土壤含水量大於田間含水量：

$$ER = (FC - SM_t) \times D + CU \times (DAY + 1) \quad \dots (4)$$
 - b. 若降雨後土壤含水量小於田間含水量：

$$ER = (SM_{t+1} - SM_t) \times D + CU \times DAY \quad \dots (5)$$

式中 ER : 有效降雨 (mm)
 FC : 田間含水量 (%)
 SM_t : 降雨前之土壤含水量 (%)
 SM_{t+1} : 降雨後之土壤含水量 (%)
 CU : 該月作物之日用水量 (mm/day)
 DAY : 連續降雨日數 (days)
 D : 土層厚度 (mm)

土壤含水量估算

土壤水份之估算可利用對根層土壤之水收支平衡來達成，估算之土壤水分將可供作灌溉管理之參考 (圖 3)：

$$SM_t = SM_{t-1} + ER_{t-1} - ETa_{t-1} \quad \dots (6)$$

式中 SM_t : 某特定時間 t 之土壤含水量
 SM_{t-1} : 前一天 $t-1$ 時之土壤含水量
 ER_{t-1} : 前一天 $t-1$ 時之作物實際之蒸發散量

土壤水分估算模式之驗證

本研究採用學甲試驗站定期採土實測之土壤含水量試驗資料驗證土壤水份推估之準確性，以推估之土壤含水量與實測數據比較，若有誤差則加以修正以免估算之偏差影響作物生長及整個灌溉系統的管理。管理應用上可以在誤差達到某預設之門檻值時即進行修正，或每隔一段固定時距校正一次，本研究稍後即針對修正期距及頻率作一研討，作為日後利用此模式時之參考。研究中利用學甲試驗站之四組田間實驗資料來驗證，根據本文建立之旱作灌溉土壤水分管理模式比較土壤含水量之估算值與實測值。

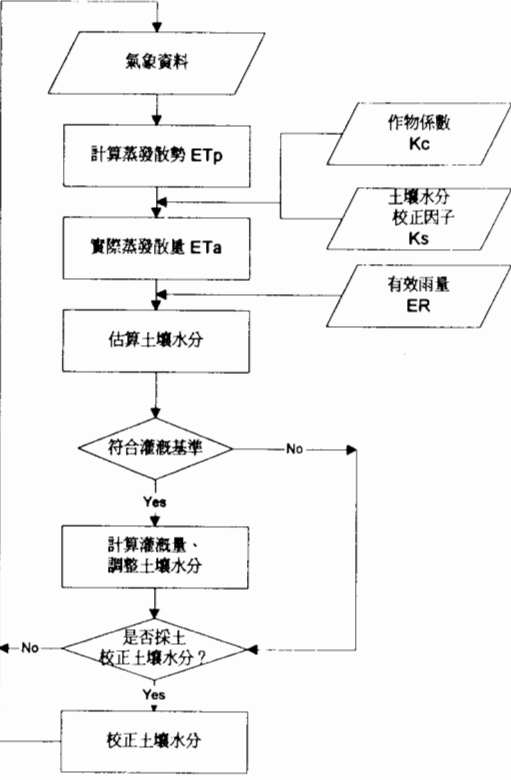


圖 3. 旱作灌溉土壤水分管理流程圖

土壤含水量校正

將推估之土壤含水量曲線與實測之土壤含水量做比較 (圖 4)，發現實測值與估算值與估算值之偏差量 (表 2) 會超過總有效水份之一半 (約 9%) 以上，有可能影響作物之正常生長，本研究

乃利用實測之土壤含水量探討對推估土壤含水量做校正之次數、間隔與平均校正量、偏差量間之關係，研討如何有效校正模式之誤差。

一般當校正次數越多則平均校正量及誤差量應越低，但由表 2 中之資料分析發現，只有 77 年春作比較合乎上述之趨勢，探究其原因，可由校正前後推估土壤含水量與實測土壤含水量關係圖來說明。以 76 年春作為例，在作物生長之初期推估之土壤含水量值與實測值十分接近，但到了生長旺盛期時後其推估值與實測值之差距卻變大而

且呈現不規則的變化（偏差值有正值也有負值）。校正次數少時因校正點原本偏差值就較小，則平均校正量不一定較大；校正次數多反而可能因累加校正量而使其平均校正量偏高，因此以此方式評估最佳校正週期似不可行。

校正估算之土壤含水量主要是為了防止估算之偏差量過大影響灌溉管理系統，由於偏差值因作物、土壤、氣象資料等複雜環境因子之影響無法避免，可藉由使用之灌溉基準，及管理、經濟上之決定容許偏差量範圍，例如使用 1/2 有效水份

表 2. 土壤水分估算值與實測值之比較

75年 春作			76年 春作			76年 秋作			77年 春作		
估算	實測	偏差	估算	實測	偏差	估算	實測	偏差	估算	實測	偏差
17.3	17.3	0.0	17.0	17.2	-0.2	17.9	17.9	0.0	19.2	19.2	0.0
17.7	22.2	-4.5	16.6	16.3	0.3	17.4	16.5	0.9	18.7	18.0	0.7
17.3	17.9	-0.6	16.1	15.9	0.2	17.8	17.1	0.7	18.3	16.9	1.4
16.9	17.2	-0.3	15.5	15.7	-0.2	18.7	17.6	1.1	18.2	17.2	1.0
16.4	16.9	-0.5	16	16.1	-0.1	17.7	16	1.7	17.7	16.1	1.6
15.6	15.4	0.2	17.5	18.4	-0.9	16.5	15.9	0.6	16.9	15.3	1.6
15.8	17.5	-1.7	17.4	18.9	-1.5	20.8	23.1	-2.3	16	14.5	1.5
16.9	19.7	-2.8	18.2	19.6	-1.4	19.7	19.0	0.7	16.5	17.2	-0.7
15.7	16	-0.3	24.4	26.7	-2.3	21.6	20.4	1.2	16.8	16.2	0.6
15.2	14.5	0.7	23.6	20.7	2.9	19.9	18.1	1.8	17.0	14.0	3.0
19.5	21.5	-2.0	22.4	17.3	5.1	18.9	15.1	3.8	16.6	13.8	2.8
19.1	20.2	-1.1	24.3	23	1.3	23.1	24.4	-1.3	21.8	23.8	-2.0
17.7	16.9	0.8	24.5	19.5	5.0	21.1	18.8	2.3	21.6	22.6	-1.0
21.8	19	2.8	24.1	23.5	0.6	19.3	15.4	3.9	20.5	18.8	1.7
20.5	12.2	8.3	23	18.4	4.6	17.6	14.7	2.9	24.3	23.4	0.9
19.4	10.0	9.4	21.4	14.3	7.1	16.3	14.7	1.6	24.3	23.8	0.5
19.3	9.8	9.5	24.2	23	1.2	20.5	24	-3.5	23.8	21.2	2.6
23.4	19.3	4.1	24.2	24.5	-0.3	20.8	22.4	-1.6	23.7	19.5	4.2
22.1	15.9	6.2	22.3	16.4	5.9	20.1	20.8	-0.7	21.4	15.1	6.3
24.5	11.8	12.7	24.2	24.1	0.1	18.4	17.0	1.4	19.4	12.5	6.9
24.5	20.5	4.0	24.5	22.6	1.9	16.5	15.6	0.9	23.3	15.8	7.5
23.8	21.6	2.2	23.8	23.3	0.5				21.2	13.4	7.8
22.7	19.8	2.9	23.3	21.1	2.2				24.5	13.9	10.6
23.8	23.3	0.5	24.5	19.3	5.2				24.1	18.5	5.6
23.1	21.4	1.7	24.1	23.1	1.0				23.0	19.9	3.1
23.7	22.3	1.4	21.4	18.4	3.0				20.0	14.6	5.4
24.5	23.4	1.1	21.0	17.4	3.6				18.1	9.9	8.2
23.3	25.0	-1.7	23.1	22.9	0.2						
19.9	20.2	-0.3	20.7	18.4	2.3						
			22.0	18.4	3.6						
			21.4	22.2	-0.8						

註：土壤含水量與偏差值皆以重量百分比%表示

為灌溉基準時可假設容許偏差範圍為 $1/2$ 有效水份之 50% ，圖 5 為四組作物生長期與偏差量之關係圖，可發現作物生長階段之初期其偏差量均在容

許偏差範圍內，但過了生長期之 $1/2$ 左右（約 70 天）後，其偏差量可能超過容許範圍即需做校正。

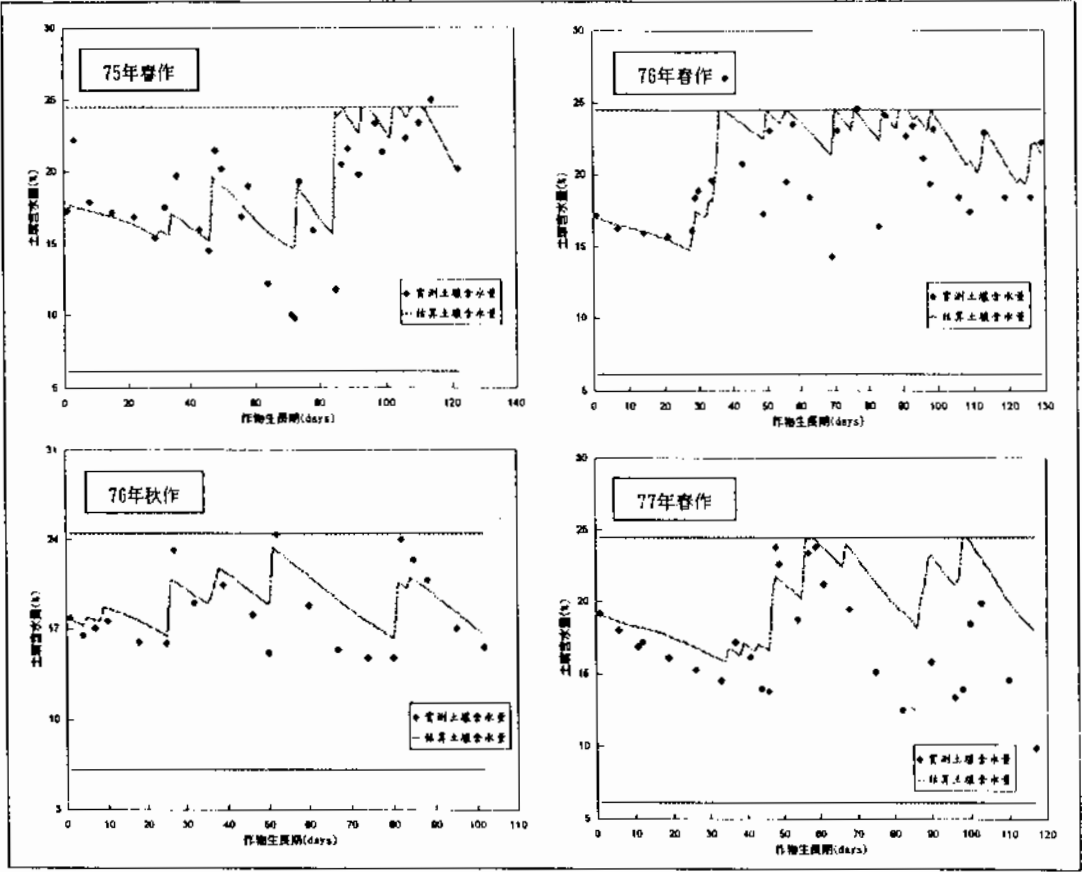


圖 4. 推估與實測土壤含水量變化圖

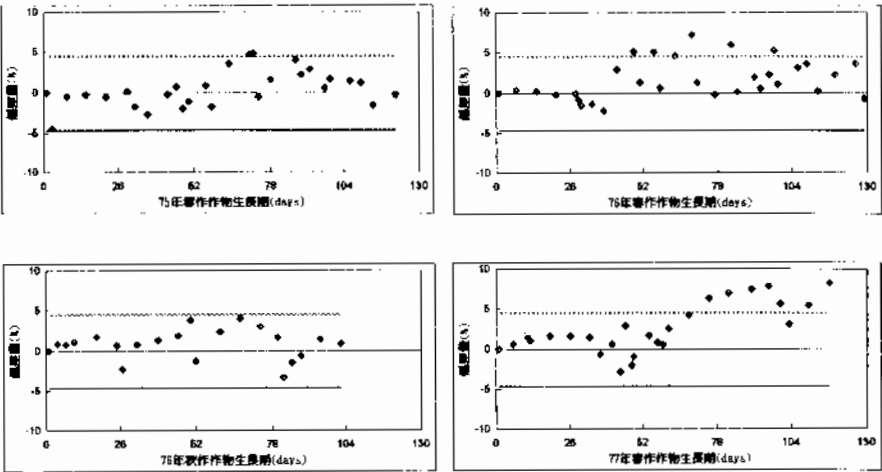


圖 5. 推估偏差分佈圖 ($1/2$ 有效水分灌溉基準、容許偏差)

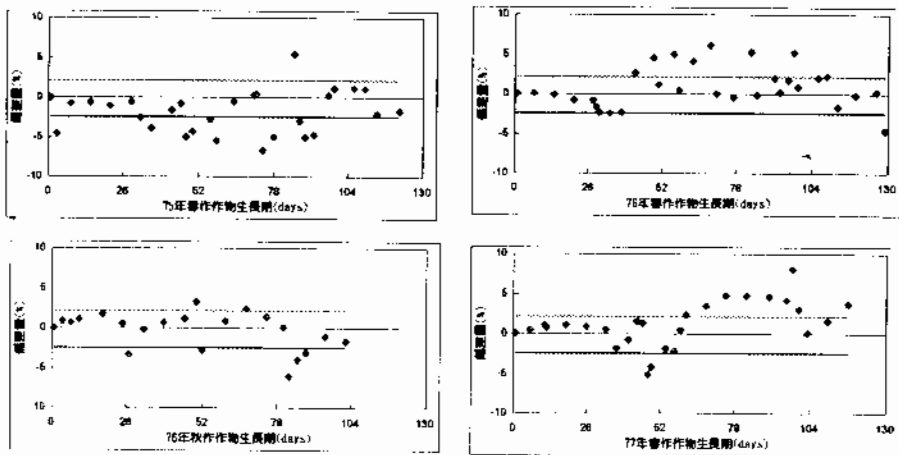


圖 6. 推估偏差分佈圖(3/4有效水分作灌溉基準、1/4有效水分作容許偏差)

不同之灌溉基準可能產生不同之校正需求，假設選定 3/4 有效水份為灌溉基準時，即當有效水分消耗掉 1/4 時即開始灌溉，使用此種較高之灌溉基準可能因該作物對缺水較敏感，或因該作物之市場價格較佳而希望有較好之產量與品質，故亦應訂定較嚴格之可容許偏差，建議以 1/2 有效水份的 25 % 為容許偏差。從圖 6 發現四組資料超過偏差範圍之次數及發生時間均比訂定 1/2 有效水份的 50 % 時增多且提前，因此亦需將開始校正之時間提前，以防止估算值與實際值之偏差過大影響整個灌溉管理系統及經濟效益之減低，由圖 6 中可以看出，約由第 50 天起即需開始進行採土校正之工作。

灌溉策略評估

灌溉基準

灌溉之目的在於保持土壤水分在合理範圍內，供作物根部吸收以維持作物之生長，進而增加作物產量並提高品質，以獲得最大之經濟效益。土壤具有儲存水分的功能，根系土層本身即可視為一個調節供水之蓄水池，因此不必做連續性之水份補充也可以維持作物生長。但為了決定何時需要進行灌溉，可以土壤水分之消耗量 (Depletion) 訂定一個合理的灌溉基準以供決策者使用。所謂灌溉基準是指有效水份與消耗量之差，當土壤水份低於某一訂定之灌溉基準時就必須灌溉。對旱作灌溉而言，有效水份是指田間容水量與凋萎點間之間的土壤水分。灌溉基準之訂定首先需考慮以下重要因子：

1. 作物之耐旱性：作物之種類不同其耐旱性也不一樣，同一作物在不同生長時期對缺水之敏感程度亦不同。
2. 作物之產量：維持較高之灌溉基準（即保持土壤在較高含水量的狀態）有助於提高作物之產量與品質。
3. 經濟效益：維持土壤於接近田間容水量之高水分狀態可以提昇產量及品質，但亦會因增加灌溉頻率而增加勞力及生產成本，因此若以達到最大經濟效益為目標，則需同時考量各方面之本及收益，包括農作物之價格、勞力成本、作物價格、操作管理費用等。

訂定一合理之灌溉基準需考量之因素非常複雜，一般本省旱作灌溉所採用之灌溉基準主要是以 1/2 或 1/4 有效水份為主，所謂以 1/4 有效水分為灌溉基準是當土壤含水量由田間容水量消耗達有效水份之 3/4 時（即有效水分尚餘 25 % 時）便進行灌溉，學甲試驗站即採 1/2 有效水份為灌溉基準。一般常用之灌溉基準有 1/2、1/4、及 3/4 幾種，本研究為了評估研討灌溉策略，因此加入 7/8、5/8、3/8 及 1/8 有效水份做為灌溉基準加以評估研討。

灌溉管理策略評估研討

一般田間旱作灌溉之管理方式可以依控制策略及依灌溉頻率來分類。

依控制策略可分：

1. 定時定量：每隔一定時間灌溉相同之水量，此種控制方式操作較簡單方便但較不合理，因灌溉水量無法隨作物生長階段變化所需水量不同而有所改變。
2. 定時不定量：每隔一定時間灌溉不同水量，主要原因是為會隨作物生長所需水量不同而改變，是屬於較合理之灌溉方式。
3. 定量不定時：每隔不同之時間灌溉相同的量，因其會隨作物生長之需水量不同而有不同之間隔時間。此種方式較適合單一農場之運作，但在台灣地區田區坵塊多，作物及土壤之變異性大之情況下，較不易管理。

依灌溉頻率可分：

1. 少量多次：此種灌溉方式是訂定較高之灌溉基準，即每次灌溉量較少而灌溉次數較多，此種灌溉方式因經常使根層土壤維持於較接近田間容水量之高水分狀態，因此可獲得較高產量及品質之作物，但相對的由於施灌頻率增加，其操作之成本也相對增加，且對自然降雨之有效利用率也會降低。
2. 多量少次：此種灌溉的方式訂定較低之灌溉基準，就是每次灌溉量較高但灌溉次數較少，此種方式會因訂定較低之灌溉基準使產量降低，但由於灌溉次數較少，其操作成本也相對降低，且由於根系土層處於較低含水量之機率增加，對自然降雨之利用率亦加大。

表 3. 採用不同灌溉基準之比較表

75 年 春作	灌溉基準	7/8	3/4	5/8	1/2	3/8	1/4	1/8
	灌溉次數	6	4	2	1	1	1	1
	總灌溉量	166	182	121	80	98	119	138
	有效雨量	136	139	160	201	183	162	143
	殘存水量	138	156	117	117	117	117	117
76 年 春作	灌溉基準	7/8	3/4	5/8	1/2	3/8	1/4	1/8
	灌溉次數	8	3	1	1	0	0	0
	總灌溉量	212	143	63	79	0	0	0
	有效雨量	122	191	252	235	314	314	314
	殘存水量	149	149	129	129	129	129	129
76 年 秋作	灌溉基準	7/8	3/4	5/8	1/2	3/8	1/4	1/8
	灌溉次數	8	4	3	2	1	1	1
	總灌溉量	201	176	179	159	100	120	139
	有效雨量	40	48	44	39	55	55	55
	殘存水量	154	136	136	112	67	87	106
77 年 春作	灌溉基準	7/8	3/4	5/8	1/2	3/8	1/4	1/8
	灌溉次數	6	3	1	0	0	0	0
	總灌溉量	149	127	60	0	0	0	0
	有效雨量	145	137	162	222	222	212	212
	殘存水量	134	143	101	101	101	101	101

註：總灌溉量、有效雨量及每次灌溉量之單位皆為mm

本研究使用學甲試驗站之 75、76、77 年春作玉米及 76 年秋作玉米四組田間試驗資料，利用前述建立之土壤水分管理模式，針對不同之灌溉基準進行研討評估，並採用不同之灌溉基準所產生總灌溉量、有效雨量與灌溉次數之關係來評估灌溉策略之優劣。圖 7 及表 3 中所列為四組資料使用不同灌溉基準所得之灌溉次數、總灌溉量及有效雨量之利用等結果。

由表 3 及圖 7 中得知總灌溉量與灌溉次數會隨灌溉基準降低而減少，而有效雨量則隨灌溉基準降低之低反而增加。灌溉基準降低灌溉次數即減少，作物消耗水量則增加空出儲水之空間，可提高有效雨量之利用及減少灌溉量。但 75 年春作及 76 年秋作之 3/8、1/4 與 1/8 灌溉基準之總灌溉量卻隨灌溉基準降低而提高，原因是作物生長期中只灌一次，施灌時間因灌溉基準降低而延後，總灌溉量因而增加，增加的部份事實上於收穫後仍殘存於土層中，故表中 76 年秋作期末土壤殘存含水量會隨總灌溉量之增加而提高。但 75 年春作期末之土壤殘存含水量並未隨總灌溉量之增加而提高，其原因可由不同灌溉基準之土壤含水量變化說明（圖 8）。由圖 8 中看出 75 年春作在進行唯一的一次灌溉後，因春作期間之有效雨量較大，使同一時期之土壤含水量提昇至田間容水量附近，導致各灌溉基準之期末土壤殘存水量相同而不會因灌溉基準、總灌溉量不同而改變，而 76 年秋作則於灌溉後無足夠之有效雨量提昇至土壤之田間容水量，因此最後土壤殘存含水量會隨灌溉基準降低導致灌溉時間延後而提高。

訂定一合理之灌溉策略需考量經濟效益，針對各個灌溉基準作經濟效益之分析，本文藉由農工研究中心研究報告「玉米不同灌溉處理效果及需水量試驗研究」中灌溉水量與作物產量之資料作一迴歸曲線，得知灌溉水量與作物產量之關係，由灌溉水量之多寡推估出作物產量（圖 9），進而做經濟效益之評估。施灌水量與產量之迴歸關係式為：

$$Y=0.001473X^3-0.18237X^2+24.13328X+3886.638 \dots (7)$$

式中 X：灌溉水量(mm)

Y：產量(kg/ha)

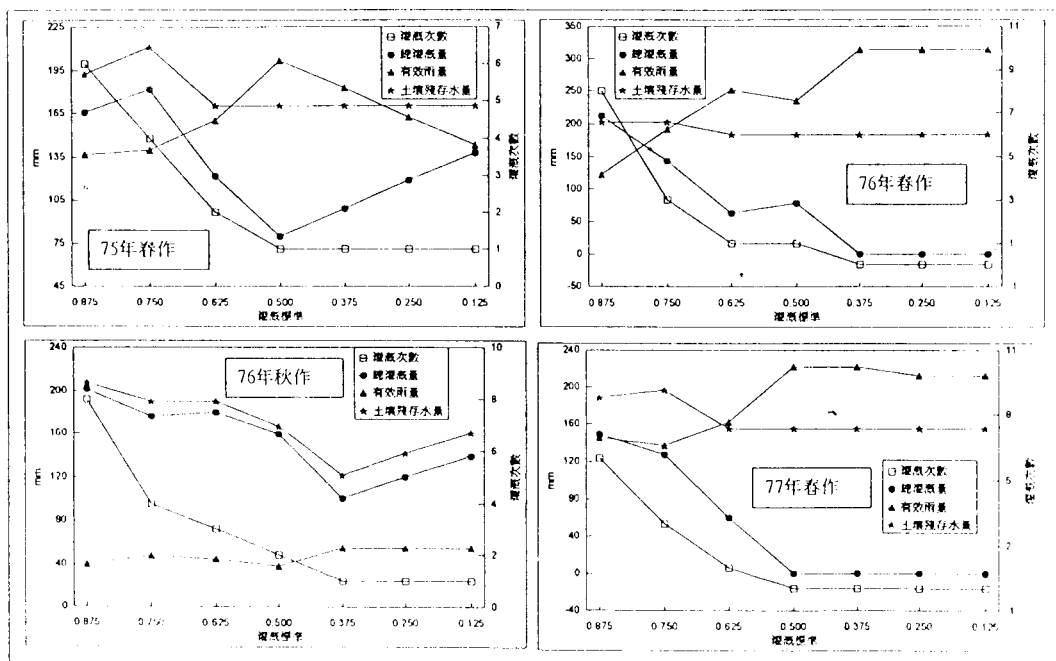


圖 7. 灌溉基準比較評估圖

假設玉米每公頃灌溉 10 公釐之成本為 200 元、一公斤之收購價格為 15 元（已考量種植所需之成本，包括種子、勞力、肥料等成本），由不同灌溉基準可獲得灌溉成本與產量價格，進而估算出淨利潤。表 4 所列為四組資料在不同灌溉基準之經濟分析，圖 10 中顯示春作獲得較高利潤之灌溉基準均分佈在 5/8 及 1/2 有效水份之灌溉基準間；秋作則發生於較低之 3/8 灌溉基準處。

由於經濟分析並非本研究之重點，以上分析是以學甲灌溉試驗站之相關經濟資料作為經濟分析之例證，但因資料來自試驗田區，人工、管理等成本計算與一般生產田區不完全相同，且土地利用、設備折舊、灌溉管理等成本亦未計入，因此所佔得之利潤相對偏高，作物之市場價格變異亦大，故以經濟因子考量決定灌溉基準為一動態之過程，必須進一步詳細研討。

表 4. 各灌溉基準之經濟分析

灌溉標準	7/8	3/4	5/8	1/2	3/8	1/4	1/8
75年春作玉米							
總灌水量(mm/ha)	165.7	181.5	121.3	79.8	98.4	118.7	137.9
灌溉成本(元/ha)	33,142	36,298	24,256	15,952	19,688	23,735	27,587
估計產量(kg/ha)	4,613	4,539	4,811	4,845	4,859	4,820	4,746
產量價格(元/ha)	69,192	68,082	72,169	72,673	72,882	72,292	71,194
淨利益(元/ha)	36,050	31,784	47,913	56,721	53,194	48,557	43,608
76年春作玉米							
總灌水量(mm/ha)	211.8	143.3	62.6	79	0	0	0
灌溉成本(元/ha)	42,353	28,660	12,527	15,802	0	0	0
估計產量(kg/ha)	4,440	4,722	4,777	4,843	3,887	3,887	3,887
產量價格(元/ha)	66,594	70,829	71,647	72,646	58,300	58,300	58,300
淨利益(元/ha)	24,241	42,170	59,121	56,844	58,300	58,300	58,300
76年秋作玉米							
總灌水量(mm/ha)	201.4	175.8	179.2	159.1	100.1	120	139.1
灌溉成本(元/ha)	40,288	35,154	35,838	31,810	20,018	24,004	27,826
估計產量(kg/ha)	4,464	4,565	4,549	4,646	4,858	4,815	4,741
產量價格(元/ha)	66,964	68,470	68,235	69,685	72,862	72,230	71,115
淨利益(元/ha)	26,676	33,316	32,397	37,875	52,844	48,226	43,289
77年春作玉米							
總灌水量(mm/ha)	148.6	126.6	59.7	0	0	0	0
灌溉成本(元/ha)	29,714	25,326	11,944	0	0	0	0
估計產量(kg/ha)	4,697	4,793	4,759	3,887	3,887	3,887	3,886.7
產量價格(元/ha)	70,455	71,888	71,381	58,300	58,300	58,300	58,300
淨利益(元/ha)	40,741	46,562	59,437	58,300	58,300	58,300	58,300

結 論

本文以嘉南水利會學甲旱作灌溉試驗站農作區之氣象資料為依據，經由蒸發散量經驗式，估算出每天之最大蒸發散量，再以作物因子與土壤水分因子等係數做校正，以推估實際蒸發散量，並考慮有效雨量，藉由根系土層之水收支平衡推估每日之土壤含水量，建立以氣象資料為基礎之

土壤含水量推估模式。一般之農作區面積均大，以氣象資料為基礎建立大面積之旱作灌溉管理模式可彌補利用觀測點資料缺乏代表性之缺點，為合理可行的管理方式，並可為未來旱作灌溉自動化提供一有效之管理策略。

由實際田間試驗資料之驗證，得知在作物生長過程中，初期土壤水量推估值與實測值的偏差不大，但到了作物生長旺盛之後期，偏差會增大

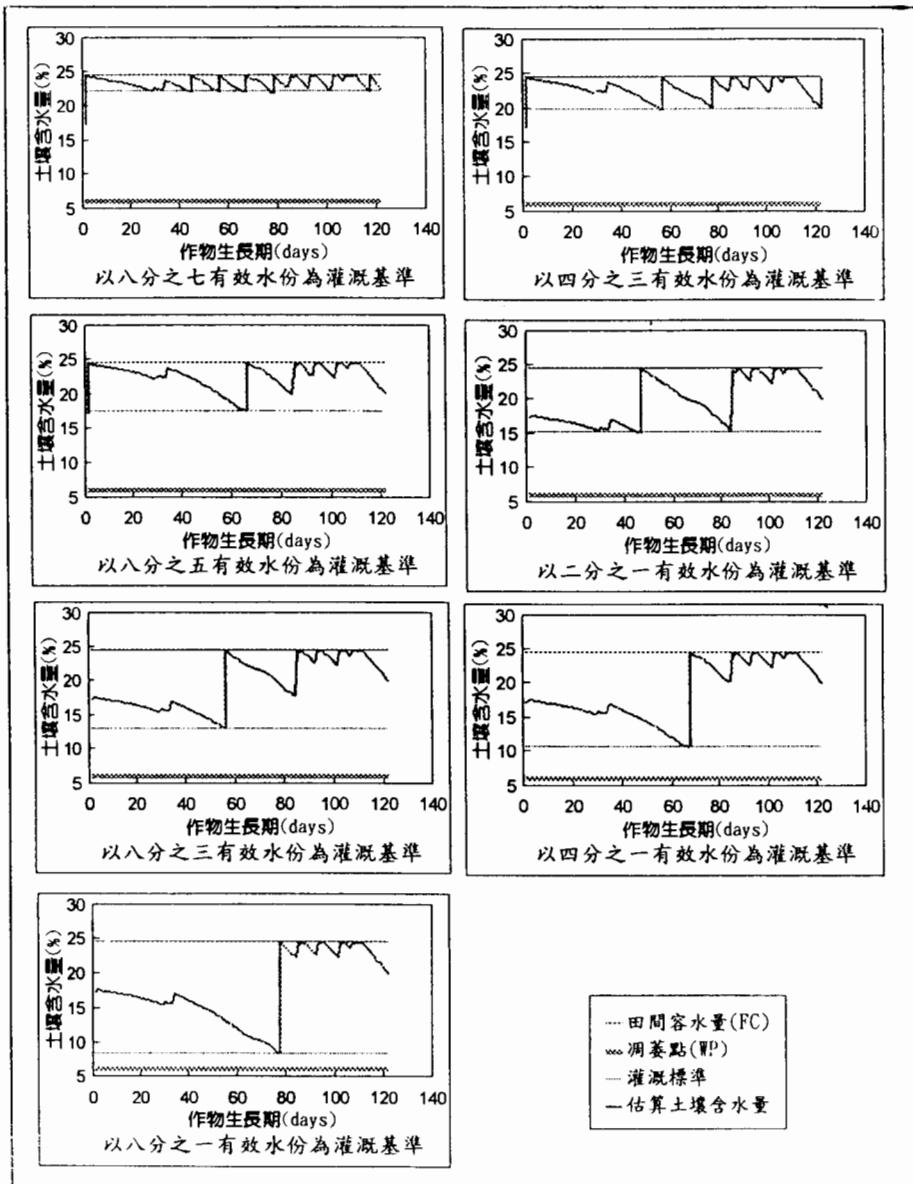


圖 8. 75 年春作不同灌溉基準之土壤含水量變化圖

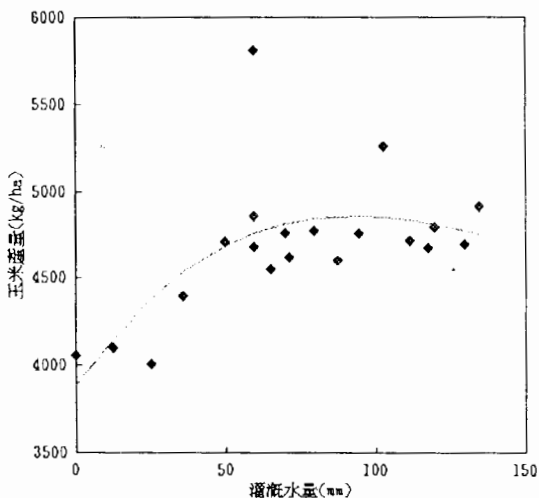


圖 9. 灌溉水量與玉米產量之關係圖

而有影響灌溉管理有效性之可能，因此建議於作物生長期的後 1/2 至 1/3 即進行採土以校正模式可能之推估偏差，可同時減少管理之成本並降低推估偏差之影響，以維持整個灌溉管理系統之有效性。

本文由各種不同之灌溉基準得出灌溉次數、總灌溉量及有效雨量之關係，結果發現較高之灌溉基準不一定會獲得較高之利潤，以學甲試驗站之初步經濟資料分析結果得知 5/8 與 3/8 有效水分之灌溉基準其經濟效益較高。因所用之經濟資料並不完全，有關經濟因子與灌溉策略間之關係宜作進一步之研討，但由於灌溉管理之模式已建立完成，只要收集完整正確的相關經濟資料即可有效的進行系統模擬與評估，而且經濟性資料（如利率、作物市場價格、人力成本等）常有動態變化之情況，利用本模式即可正確快速的掌握變動之影響，做出較佳之決策。

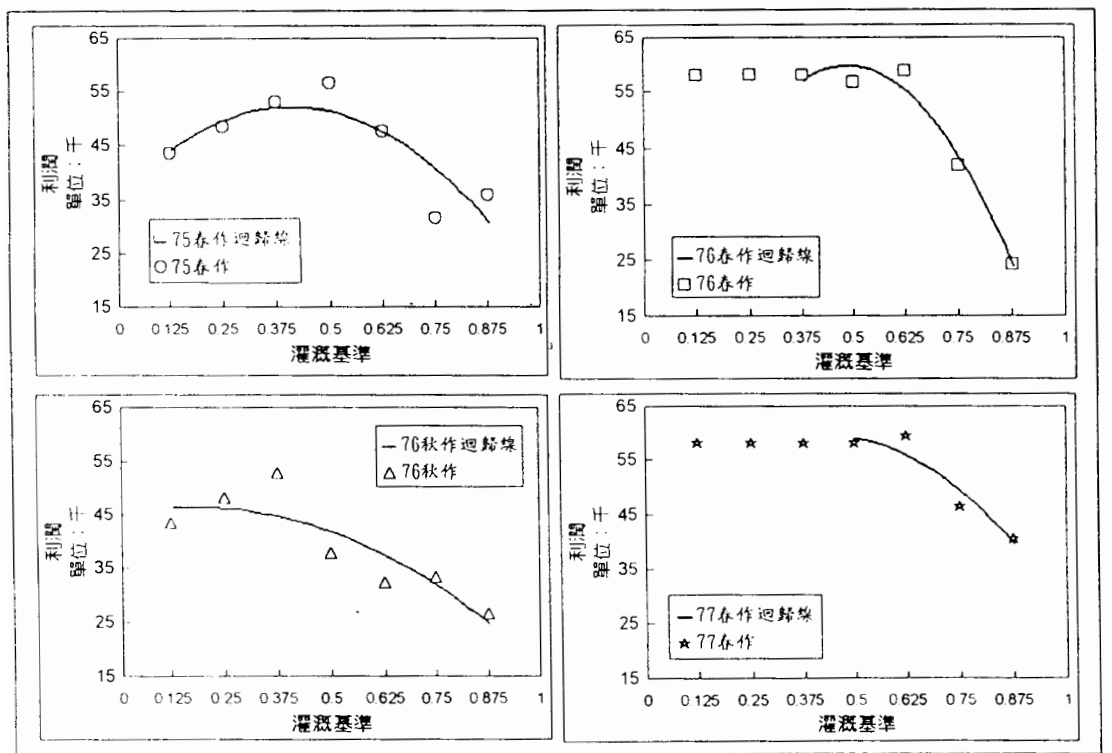


圖 10. 灌溉基準與利潤之關係圖

謝 誌

本研究進行中承行政院農業委員會水利科蔡科長明華，及台灣大學農業工程系甘俊二教授，湯松義先生之多方指正及建議，嘉南水利會學甲旱作灌溉試驗站提供試驗資料，使本研究得以完成，謹此一併致謝。

參考文獻

1. 台灣省水利局 (1980)，「雜作灌溉手冊」，395pp。
2. 施嘉昌、徐玉標、曹以松、甘俊二，(1976)，「灌溉排水原理」修訂版，中央圖書供應社，531 pp。
3. 曹以松，(1973)，「有效雨量模擬與估算之研究」，農工灌溉第十七號研究報告。
4. 曹以松、施嘉昌、李源泉、王錦鈺，(1988)，「玉米不同灌溉處理效果及需水量試驗之研究」，農業工程研究中心。
5. 陳尚、蔡奇成，(1967)，「旱作需水量之測算方法與試算結果之檢討」中國農業工程學報，13(4):26-49。
6. 陳清田，(1991)，「嘉義地區作物需水量推估研究」，中國農業工程學報 37(1):82-109。
7. 黃成達，(1990)，「玉米蒸發散量係數之研究」，台灣大學農業工程學研究所碩士論文。
8. 黃振昌，(1986)，「作物需水量與氣象因子相關理論之分析」，台灣大學農業工程學研究所碩士論文。
9. 張本初，(1990)，「作物需水量最佳模式之探討」，台灣大學農業工程學研究所碩士論文。
10. 蘇明道、陳盛福、黃石龍，(1992)，「以氣象水文為基礎之旱作灌溉自動化之研討」，七星農田水利研究發展基金會。
11. Allen, R. G., (1986), "A Penman For All Seasons", J. of Irrig. And Drain. Div., ASCE. 112(4):348-368.
12. Christiansen, J. E., (1968), "Pan Evaporation And Evapotranspiration From Climate Data", J. of Irrig. And Drain. Div., ASCE., 94(Ir2):243-265.
13. Cuenca, R. H. & Icholson, M. T., (1982), "Application Of Penman Equation Wind Function", J. of Irrig. And Drain. Div., ASCE. 108(Ir1):13-23.
14. Hansen, V. E., O. W. Israelsen, & G. E. Stringham, (1984), "Irrigation Principles And Practices", 3rd Ed. 447pp.
15. Hill, R. W., R. J. Hanks, & J. L. Wright, (1982), "Crop Yield Models Adapted To Irrigation Scheduling Programs", Research Report 99, Utah Agricultural Experiment Station, Utah State University.
16. Jensen, M. E. & H. R. Haise., (1963), "Estimating Evapotranspiration From Solar Radiation", J. of Irrig. and Drain. Div., ASCE. 89(1):14-41.
17. Jensen, M. E., (1964), "Consumptive Use Of Water And Irrigation Water Requirments", American Society of Civil Engineers.
18. Jensen, M. E., J. Lo. Wright, & B. J. Pratt, (1968), "Estimating Soil Moisture Depletion", ASAE Paper No. 69-941.
19. Jensen, M. E., Robb, David C. N. & Franzoy C. E., (1970), "Scheduling Irrigation Using Climate-Crop-Soil Data", J. of Irrig. and Drain. Div., ASCE. 96(1):25-38.
20. Jermar, Milan K. (1990), "On The Rationalization Of Water Management For Food Production", Water Resources and Management p205-217.
21. Lowery, R. L. & A. F. Johnson, (1942), "Consumptive Use Of Water For Agriculture", ASAE Transaction.
22. Mukherjee D. & N. T. Kottegoda, (1992), "Stochastic Model For Moistures Deficit In Irrigation Lands" J. of Irrig. And Drain. Division, ASCE, 118(4):527-542.
23. Munson, W. C., (1960), "Method For Estimating Consumptive Use Of Water For Agriculture", J. of Irrig. and Drain. Div., ASCE. 86(4):45-57.
24. Penman H. L., (1965), "Estimating Evaporation" Trans. Am. Geoph. U. Vol. 37No. P43-50.
25. Pierce, L. T. (1960), "A Practical Method Of Determining Evapotranspiration From Temperature And Rainfall" ASAE Trans. 3(1):77-81.
26. Steiner R. A. & Andrew A. Keller, (1992), "Irrigation Land Management Model", J. of Irrig. and Drain. Div., ASCE. 118(6):928-942.
27. Stephens, J. C., (1965), "Discuss Of Estimating Evaporation From Insolation", J. of Irrig. and Drain. Div., ASCE. 89(4):15-41.
28. Thom. A. S., & H. R. Oliver, (1977), "On Penman's Equation For Estimating Regional Evaporation", Quart J. R. Met. Soc. 103:345-357.
29. Wieser, Edwar H. (1965), "Irrigation Planning Using Climatological Data" J. of Irrig. and Drain. Div., ASCE. 91(Ir4):1-11.
30. Wu, I-Poi & Liang Tung, (1972), "Optimal Irrigation Quantity & Frequency", J. of Irrig. And Drain. Div., ASCE. 98(1)117-136.

收稿日期：民國 85 年 1 月 9 日

修正日期：民國 85 年 2 月 24 日

接受日期：民國 85 年 3 月 6 日