

翻 譯

合理設計灌溉計劃之方法

李 源 泉* 譯

註：值此灌溉管理的實務機構——水利會醞釀改制聲中。我們認為欲使今日農村走向企業化或專業區型態，除組織系統的改制外，更重要的應該是改革傳統的灌溉管理方法，代之以更科學化，更合理化，更經濟化的企業管理途徑，以配合今後各項農業發展，達成經濟用水之目的。

近年來本省雖有若干單位利用電腦及現地作物別面積等資料來設計灌溉供水計劃，唯該方式僅在利用電腦代替目前水利會的手算方式。而對於如何合理取得現地資料作合理的估計灌溉時間及水量，仍未作詳細論述，今謹擇譯美國近年來有關此種研究之文獻，以為今後本省灌溉作業之參考。

本文譯自 Journal of the Irrigation and Drainage Division Proceedings of the A. S. C. E. (March, 1970), Marvin E. Jensen, David C. N. Robb, 及 C. Eugene Franzoy 氏發表之 "Scheduling Irrigation Using Climate-Crop-Data" 一文。譯成後承糖研所農藝系土壤物理及灌溉研究室主持人楊尙仁博士斧正，謹此誌謝。

一、緒 論

近年來有關地表灌溉系統之研究，顯示灌溉計劃實務、施灌時間及水量等與 25 年前 Israelson 氏的研究並無任何顯著差異。由於每次灌溉的供水時間與供水量因地而異，致使各次灌溉效率亦隨之而不同。因此過去企圖研究田間、土壤、作物及管理因子對灌溉效率的關係，一直沒有成功。然而，因為有了較佳的供水控制系統和量水設備，加上系統設計準則的改進，更可靠的蒸發散量估計方法，有關土壤水分基準之商用儀器之發展，過去 15 年來較佳灌溉用水管理的潛勢已有顯著的增加。

灌溉實務沒有大幅改變的主要原因，是由於農民對灌溉的程序並未作重大的改變；如不管氣象變化所行的定期灌溉，固定輪灌順序，或因鄰區灌溉而灌溉的方式等。同時供給的水量則依灌溉方法，如溝灌、漫灌、12 或 24 小時繼續灌溉等而定，而非依照當時土壤水分缺乏量。經多年的經驗而言，好的灌溉是一種藝術而非科學。

許多學者主張利用氣象資料設計灌溉計劃，例如 Penman 氏在 1952 年曾首先分析此種方法，隨後許多學者亦延用此法。然而這種方法仍然沒有實際應用發展，亦未曾作大規模試驗研究。由於時間、技術背景，或有關資料的缺乏以致無從發展和應用包括氣象、水力、土壤及作物等資料在內的管理措施，因此

灌溉人員始終無法立即地採用最新的科學原則。同時除非在能證明確可獲得更多的利益前，不管這種灌溉計劃設計方法有多明顯的優點，農民決不願捨棄傳統的方法。

施灌時間及水量雖能影響灌溉效率，但由於作物某一生長階段對土壤水分張力特別敏感，所以灌溉時機大大地影響作物的產品及品質。當作物缺水現象已明顯發生時，雖即刻灌溉，仍難免發生損害。過量的灌溉也將減低作物的產量，除非供給大量的氮肥，以補償被淋洗的氮素。

二、灌溉計劃設計方法之選擇

目前已有許多不同方法可用以設計灌溉計劃；如以輪灌方式進行，灌溉期距一定，水量或一定或不定，而對全年氣象之變化則多不予考慮，此種系統必將造成較低灌溉效率和較低產量。同理連續灌溉之效率亦甚低，因蒸發散量與降雨在作物生育季節中，並非均勻。

機動灌溉為另一種系統的灌溉計劃，其應用範圍可能比定期灌溉為普遍。這種灌溉計劃通常是依據經驗或以月測土壤或作物等特性而設計。

更直接的灌溉計劃設計，常需使用儀器來測定並標示土壤水分值。常用的儀器有水分張力計(Tensiometer)和石膏吸濕體(Gypsum Block)。水分張力計特別適合於那些對土壤水分張力特別敏感的作物

* 臺灣糖業研究所農藝系聘用研究人員。

，因為它可以表示介於田間容水量約0.15巴至0.7巴範圍之水分張力，在砂壤土中這範圍的張力是代表土壤有效水分。石膏吸濕體是多年前在奧立岡(Oregon)和尼布拉斯哥(Nebraska)等地被提倡的，但仍未被廣泛採用。石膏塊通常較適宜於那些可以在高土壤水分張力下生存的作物，但土壤之含鹽量則應較低。重量測定法(Gravimetric Method)則是決定土壤含水量最直接的一種方法，許多商業性灌溉服務公司經常利用此法，將作物需水量與重量測定法並用，為預測灌溉的一種最佳依據。

有效的灌溉，表示可完全控制土壤中有效水分含量，這種控制需充分瞭解全植期土壤含水量和供給恰當的水量，以補充土壤水分之儲存。而在必要時另需增加淋洗需要量(Leaching Requirement)。此種較精密的灌溉計劃，可分別以直接測定土壤含水量和預估土壤水分消耗量兩種不同步驟設計。直接測定土壤水分的方法有水分重量測定法、中子水分測定法(Neutron Moderation Measurement)或測定與土壤水分有關之其他參數。基於上述任何一種步驟進行，均可使灌溉水管理計劃獲得成功。

在加州的Southern San Joaquin Valley有若干商業性灌溉管理服務站，彼等幾乎全以柑橘園為對象，所設計之灌溉計劃是根據水分張力計而定，每年每英畝收費約8美元。在同州Santa Paula的地區也有相同性質的服務站，專門為柑橘生產合作社的會員提供服務。在華盛頓州哥倫比亞河流域也有包括測定土壤含水量的技術服務社。

1965年7月阿里桑納州鹽河流域計劃(The Salt River Project)曾對該區農戶提供一項頗有意思的服務。其目的在增進農民認識水在作物管理上之重要性，此項計劃已獲得廣泛的支持。其基本觀念係根據作物需水量與土壤保水能力來訂定施灌時期。這項計劃之受歡迎程度可在登記參加服務的英畝之增加數而獲得證明；1965年開始時之面積為14,000英畝至1968年已增至65,700英畝，幾乎佔有該特區可耕地面積之半數。這種服務對於擁有20英畝以上的會員不至增加其直接成本，而且對任何作物均可提供服務。在鹽河流域計劃中提供此項服務所需費用每年每英畝尚低於1.5美元。灌溉計劃之設計是依據農民自己每週在田區內所見之實際情況和一次技術人員在每塊田區固定點量測所得資料而訂定。土壤含水量每週量測一次，蒸發散速率則自過去所測定之本地區內各種作物之速率加以估計，獲有上述兩種資料後即可

預測下次灌溉的時間。灌溉後視察現場可確定土壤水分消耗情況，同時對最初的估計亦可作必要的調整。

某些地區使用蒸發量來估計土壤水分的消耗。蒸發量資料通常刊載於當地日報上，而農民可以依作物別使用不同的常數換算，並加以記錄。某些地區將自蒸發量推算出之作物耗水量公佈於展示牌上。根據預期氣象的變化來估計用水量的方法在法國也被使用過。

江森氏(Jensen)曾發展一種共時的電腦程式來估計土壤水分的消耗量、距下次灌溉的日數及施灌水量。利用氣象、作物和土壤資料的程式，曾在1966年在試區內試驗，1967年應用於6戶農家的13塊田區，1968年則在南愛達荷州植有11種不同作物的22戶農家之48塊田區使用。美國氣象局提供估計蒸發量所需氣象資料，而農家則提供一般農藝和灌溉資料。參加合作的農家均持有若干圖表作為灌溉時之依摺。春秋兩季電腦每週計算一次，而在仲夏時每週計算兩次。電腦放置於阿里桑納州之鳳凰城，利用一種遙控路線與愛達荷州的(Kimberly)連繫。在美國其他各地有同型電腦服務站可利用電話連絡。每塊田區則由技術人員定期至現場視察以修正灌溉計劃之準確度。鹽河計劃曾將上述電腦加以修改，並在鹽河河谷的19家農戶之2,162英畝田區加以試驗。

三、預測方法

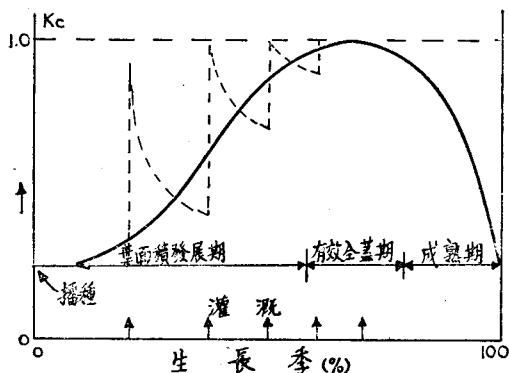
此項方法之基本原理，首先係估計每日潛蒸發散量(Potential Evapotranspiration)，然後依作物生長階段及地表土壤水分而應用作物係數(Crop Coefficient)。作物係數可自試驗資料中求得，該值自動反映出因灌溉或降雨而導致之土壤水分改變和土壤有效水分減少情況。土壤水分之耗減值是根據試驗所得資料、土壤水分特性、作物對土壤水分張力之耐性及根系深度而定。對某些灌溉系統，此種土壤水分耗減值等於該灌溉系統所補充之水量，而不考慮土壤與根深。在缺水地區此值可依最經濟之單位用水量而加以修正。

一般估計步驟可舉例如後： E_{tp} 為某種供試作物如苜蓿之估計日潛蒸發散量。此值可自能量平衡公式或自能量平衡與空氣動力學兩者所導演出之公式而加以估計，其方法可見於其他文獻。在某些地區，若週圍環境一致，則可利用蒸發盆測求 E_{tp} 。

作物係數係依據作物生長時期，降雨或灌溉後時間以及土壤所儲存之有效含水量而決定。若試驗資料中無此等數據，則可利用能量平衡公式推算；

$$K_c = \frac{1 + B_o (R_n + G)}{1 + B(R_{n0} + G_o)} \dots\dots\dots (1)$$

此處， $B = A/E_t$ ； R_n 為淨日射量。A 空氣之感熱流量。G 為土壤感熱流量。而 B 是感熱流量對潛熱流量之比，通稱為 Bowen 比。註脚○表示在鄰近同一作物的同時發生值。凡流入作物——空氣帶之能量取為正值，反之則為負值。作物係數亦可用 $K_c = K_{c0} \cdot K_a + K_e$ 估計近似值。 K_{c0} 表在土壤水分不受限制下試驗所得之平均作物係數。 K_a 表示在有效土壤水分受限制下之相對係數。（作電腦程式中， K_a 假定與 1.0 加留存有效水分之對數值成比例。） K_e 為各生長階段表土因降雨或灌溉而濕潤後作物係數之變化。正常情況下大部份作物之 $K_{c0} \cdot K_a + K_e$ 值不超過 1.0。雨後日蒸發散量之增加值，不能超過該次降雨後，土壤水分增加量之總和。



圖(一) 生長時期及因灌溉或降雨所造成之土壤水分變化對作物係數之影響。

經計算預估後，當日之日蒸發散量可利用觀測所得之氣象資料測求，而後三日之蒸發散量則依據氣象預測資料預測：

$$E_t = K_c \cdot E_{tp} \dots\dots\dots (2)$$

(2) 當天以前的累積土壤水分消耗量之估計則為：

$$W_d = \sum E_t - \sum R_o \dots\dots\dots (3)$$

此處， W_d 為估計之累積土壤水分消耗值。 R_o 為有效雨量，在一次定量的灌溉後， W_d 可以為 0。

距下次灌溉之日數可利用前三天實測值及後三天預測值之 E_t 平均值估計之。在半濕潤地區較長期間預測可用下式計算：

$$\left. \begin{aligned} N &= \frac{W_o - W_d}{E_t} \\ N &= 0 \text{ 當 } W_d < W_o \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

此處，N 為距下次灌溉之日數， W_o 為該生長

階段最適或最大土壤水分消耗量。

輸送至田區所需之單位面積水深則為

$$W_r = \frac{W_o}{E} \text{ , 當 } W_o < W_d \dots\dots\dots (5a)$$

$$W_r = \frac{W_d}{E} \text{ , 當 } W_d < W_o \dots\dots\dots (5b)$$

此處 W_r 為輸至田區單位面積之總水深。E 為全系統之灌溉效率。若在必要時， W_r 尚可以加入必要的淋洗需要量。

在每次電腦計算後，服務區內每戶農家，可以獲得下列資料：(1)作物及田區編號。(2)前次灌溉日期。(3)前次灌溉後所得之降雨量。(4)土壤水分消耗之估計。(5)各生長階段之最適消耗量。(6)距下次灌溉之日數（主要項目）。(7)灌溉水量概值（主要項目）。(8)一般之氣象預測。

此種試驗性的管理服務，一般甚受歡迎，根據報告：參加合作者之產量業已增加，農民下田檢視田區時間却相對的減少。作物的品質更趨一致。全田區之用水管理亦日漸改善。

四、聯合法（或稱直接擇預測法）

將鹽河流域計劃的執行法和詹遜（Jensen）氏的預測法聯合使用可使成本降至最低而服務却更令人滿意。其基本觀念在於應用科學原理執行灌溉管理，另以具有經驗及技術之人員的觀測作為修正依據。技術人員每週固定至田間視察以證實所估計之土壤水分和預測灌溉計劃的準確性，同時另對前次灌水之日期及水量亦加以證實，並收集降雨資料。這種求證措施是使這種方法成功的主要因素。此外定期訪問尚可增加預測法之信心，也可鼓勵灌溉人員改善其管理實務。這種方法設計出的灌溉計劃不僅使經濟用水具有準確性，同時亦具彈性。

此種方法（或簡稱 Jensen-SRP）之利益很多，最主要的當然是增加產量和降低生產成本使收益增加。其次則為增加用水效率，減少灌溉工和減少因灌溉不善所引起之損害。增加利潤可以從減少生產成本和增加產量兩項計算。在 SRP 中已證實有好的灌溉產量可增加十分之一至三分之一。另有一項不能由金錢估計的額外利益，是由於好的灌溉計劃所造成田間作業規劃的改善。同時祇要有預定的計劃，一個訓練有素的技術人員，可以管理更大面積。

上述管理方式，也可以對灌溉工程提供甚大之潛在利益。好的用水管理，可以減少每英畝的儲存需要量，以致每英畝水儲藏量成本減少，單位用水利用率

之增加。而且適當的管理可以使排水問題不致存在。凡此均可以增加農場經營的償還能力。若能增加潛需水量 (Potential Water Requirement) 之知識，則可以使計劃輸水量和水庫之操作相互配合。

此法所遭遇的最大難題是：在冬天月份如何安排田間操作人員的工作，因為冬天很少有作物生長。在氣候比較溫和而作物終年可生長的地區，或計劃較小，技術人員在此一時期另有工作，此一困擾則不致過於嚴重。其實，在冬季時期，田間作業人員可利用此時修正灌溉手冊，重新釐訂農場之灌溉作業方法或接受講習和訓練。

Jensen-SRP 法所遭遇的另一困擾是如何增加有關資料使能更精確預測灌溉日期及施灌水量，建立一個有效檢核系統和不太複雜的文書程序，則可克服此項難題。利用共時電腦 (Time-Share Computer) 可將大多數資料自動存入磁碟中 (Magnetic Disk)。

使用電子設備處理資料的方式，使資料的儲存及分析方法更進一步。對於將來有益於推求灌溉計劃的大量資料，可以儲存於卡片或磁碟中。

此外，在設計其他計劃或改進現有計劃時所需之資料，如在不同地區或種植不同作物時，土壤與產量間之關係，或其他參數間之相關資料，均可自儲存之資料中尋求。

五、總 論

影響灌溉效率及作物產量最重要因素繫之於有關灌溉時間和施灌水量之籌劃。當水量不足，成本過高，或當土壤條件限制水分移動和根系發展時，灌溉計劃更形重要。過量的灌溉會造成田區積水，致產量減低，而且也使用水、肥料和排水成本增高。經濟用水應為供水量恰等於作物需水量加淋洗需水量。為求得較高的灌溉效率，目前的灌溉設計實務，必須加以改善。

使用氣象、作物和土壤資料，利用電腦替代繁雜的計算及以有經驗技術人員至田間觀測而得到的灌溉設計，是一種很受田間灌溉管理員歡迎的方法。這種方式可增加農戶管理技巧和在合理成本下增加其淨收益。由於灌溉科學的進步，使灌溉技藝與田間判斷能力更向前跨大一步。

營業項目：砂石採取供應

志強建材工業有限公司

經理 曾 進 成

高雄縣大寮鄉溪寮村溪寮路六八號

專營土木、水利、建築承攬工程

自備推土機 經營土地開發及出租

天工營造廠

經理 林 文 堅

廠址：桃園鎮復興路一六五號
電話：桃園局 二四七四八