

水分收支法模擬土壤水分含量作為灌溉管理依據 Soil Water Management According to the Results of Simulation of Soil Moisture Using a Water Budget Approach

向為民^{1*} 林正鎊²
Weimin Hsiang Chenfang Lin

Summary

Efficient management of water could be attained through correct assessment of soil moisture, while irrigation was operated in upland. To attain this goal, a simple simulation model formulated by data of precipitation and pan evaporation was introduced to calculate the balance of water in field. The data required for analysis and validation of the model were adopted from irrigation experiment of spring crop of corn, 1988, located in Hsueh-Chia upland irrigation station in Chia-Nan area. Five surveyed data of soil moisture during initial growth stage (0-26 day after sowing, LAI \leq 1), which were included in treatment A, were fitted by Least Squares method to get the parameters essential for this model, i.e., Ka, Kb (moisture exchange parameter between surface and subsoil) and Kc (the crop coefficient), respectively. Then the simulation of soil moisture in mid as well as late-seasons was made by using ka, kb and the crop coefficient curve. Another set of soil data surveyed in treatment B were also simulated for the validation of this model.

The results indicated parameters for this model were readily available from surveyed data at initial growth stage of corn, i.e., $K_a = 0.131 \pm 0.019$, $K_b = 134.58 \pm 3.00$, $K_c = 0.153 \pm 0.097$. And with this set of parameters, the status of soil moisture in mid and late seasons could be easily predicted through simulation. The correlation equation between observed and simulated data is: Estimated = $0.9133 \times$ (Measured) - 17.298, $n=21$, $R^2=0.9354$ and for data set of treatment B: Estimated = $0.6756 \times$ (Measured) + 42.913, $n=25$, $R^2=0.8505$.

Accurate assessment of soil moisture of upland in Taiwan is easy and ready to be achieved, as long as simple climatology data and parameters from field experiment data were available. Hence, efficient management of irrigation is feasible and can be expected.

Key words: Soil water, Simulation model, Corn

摘要

旱作灌溉作業進行時倘能正確地估算土壤水份狀態，則有效率的進行水份管理工作是可以期待的。針對此一目的擬利用

¹ 台灣省農業試驗所農化系。Department of Agricultural Chemistry, Taiwan Agricultural Research Institute, Wufeng, Taiwan.

² 國立中興大學土壤環境科學系。Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan.

* Corresponding author.

簡單的水分收支方法來推估土壤水份含量，而所建立的模式僅需要降雨量及蒸發量兩項氣象調查資料，如此，便可以進行土壤水份收支的計算。本研究取嘉南水利會學甲旱灌中心，77年春作玉米灌溉試驗資料，為模式分析與驗證之材料。利用玉米生育初期(播種後0~26天， $LAI \leq 1$)，試驗之A處理，土壤水份含量5個時間點的調查資料，以最小平方估計法，求出模式所需的三個參數，分別是Ka、Kb(下層土壤水份交換項所屬的2個參數)及Kc(作物係數，crop coefficient)，其次利用Ka、Kb及全生育期之作物係數曲線再進行生育中期、盛期及末期土壤水份之模擬；以及另取B灌溉處理的一組土壤調查資料，進行模擬驗證。

結果顯示利用玉米生育初期之調查資料可以順利取得模式的參數值； $Ka = -0.131 \pm 0.019$ ， $Kb = 134.58 \pm 3.00$ ， $Kc = 0.153 \pm 0.097$ ，且利用此一參數值模擬玉米生育中、後期的土壤水份含量；得到調查值與推估值間的相關式為 $Estimated = 0.9133 \times (Measured) - 17.298$ ， $n=21$ ， $R^2=0.9354$ 取B灌溉處理的資料進行模擬，所得調查值與推估值的相關式為 $Estimated = 0.6756 \times (Measured) + 42.913$ ， $n=25$ ， $R^2=0.8505$ 。

根據本研究之結果可知，在本省旱作土壤水份之推估，僅需簡單的氣象資料及容易由田間試驗取得之參數值，就可以進行，可以有效率的進行灌溉管理之工作。

關鍵詞：土壤水分，模擬模式，玉米。

前言

作物生產量與土壤水份含量關係密切，土壤水份充足供應時，作物得以吸收，抵消自身蒸發散的損失，維持細胞的

膨潤狀態，進行光合作用。許多研究指出，限制作物用水直接影響產量。

Doorenbos和Kassam(1986)寫出作物產量減少和蒸發散量減少的相關式，訂出23種作物在不同生育階段，相關式中的參數值(yield response factor)。作物栽培之蒸發散量主要決定在引起蒸發散的氣象因子，如輻射能、風速、濕度等等；此外，作物本身性狀及土壤狀態亦參與其中。實際用水時，因而必須考慮與氣候、土壤、作物相關之眾多因子，從而訂定灌溉計畫(水利局，1980)，使能夠保持適宜的土壤水份狀態，滿足作物對水份的需求；同時能夠在作業時決定灌溉時間和灌溉量。

水份管理作業進行時，合理的分析判斷，正確的估算土壤水份狀態，方能有效率的進行管理工作。土壤水份受眾多因素之影響，惟可以使用系統方法建立管理模式。Wopereis氏等(1994)引用Bouma 1993年之說法，將水份管理的系統分析方法分為五個層階，自farmer's knowledge至最高階層之differential models及complex differential models for subprocesses；同時指出各階系統分析方法都可以用來掌握某一地點、時間下土壤水份含量，但愈高階分析方法所得之結果愈容易轉移至其他地區使用。目前已有可資利用之高階模式，如SWATR(Feddes et al., 1978)係利用微分模式模擬土壤水份含量的變化，經驗證有良好的模擬特性。此一模式以土壤性質為出發點，結合作物水份因子及氣象資料，形成完整架構。有關土壤水份運動之描述，是目前理論基礎最完備者。但是模式執行上需要土壤孔隙分佈及導水特性方程式，目前於本省旱作灌溉應用上，資料取得頗為不易。

本報告則以土壤水份平衡方程式，模擬土壤水份含量變化。模式所利用的氣候

資料以台灣目前各灌區所能提供者，土壤資料也是以灌區土壤調查所蒐集者為限，模式參數則以田間水份收支資料來求取。希望以最經濟的資料需求來建立模式，且可以利用來估算土壤含水量追跡乾旱，作為旱作土壤水份管理工具。報告中土壤水份平衡模式中之參數，扣除調查資料可以得到的，其餘則利用田間土壤水份變化資料反求，模式模擬效果之驗證則以同一地點不同生育時期及不同灌溉處理之水份變化資料進行。

土壤水份平衡方程式中，較不易掌握之二項因子，分別為作物實際蒸發散量及下層土壤毛管水供應量，本文中以玉米生育初期之田間資料求取毛細管水供應量之數學式中的參數值，以皿蒸發量及作物係數決定作物實際蒸發散量。接著玉米整個生育期的土壤水份含量則可以利用土壤水份收支法加以估測。

理論與方法

土壤水份平衡方程式為：

$$P + I = \Delta W + ET + R + D$$

P：降雨量

I：灌溉水

ΔW ：土壤、植體水份之變化

ET：蒸發散量

R：逕流

D：滲漏

本文中著眼於「控制上層」中土壤水份含量之變化，此一深度並不意指根域上層，且旱作根系隨地點不同而不一致，可能受構造及土壤水文因素之影響。所以本文將本省主要旱作灌溉施行之地區，計算土壤有效水份含量之土壤深度定為「控制上層」之深度，範圍是0～60公分。據

此，將土壤水份平衡方程式中之D更改定義為「與下層土壤水份之交換量」，所指為毛管水補充或滲漏。式中植體水份含量之變化較土壤為低所以將之忽略。

降雨量及蒸發散量受氣候影響，後者同時受土壤乾濕影響。本文之模式採用FAO灌排水資料中推定蒸發散量的方法 $ET = Kc \times ETm$ (ETm：蒸發散潛量)，ETm的推定則採用蒸發皿的方法 (Doorenbos and Pruitt, 1984)。較具理論基礎的Penmen公式，需要之氣象資料於本省非一般氣象站所能提供，而蒸發皿的資料則甚完全 (台灣省水利局，1976)。土壤逕流量，可由降雨量減入滲量計算，入滲量則以田間調查資料依Kostiakov方法計算。土壤水分平衡模式改寫為：

$$\Delta W = F + I - ET + G$$

$$F = P - R$$

ΔW ：土壤水份之變化

$$ET = Kc \times ETm$$

I：灌溉量

D → G

F：入滲量

G：與下層土壤水份交換量

Kc：作物係數

ETm：蒸發散潛量

而模式中不能由調查資料供給資料者僅餘G項及Kc參數。G項，與下層土壤水份交換量，理論上與土壤導水特性相關，本研究則假設與「控制上層」中水份含量的多寡W成直線相關： $G = Ka (W - Kb)$ ，Ka，Kb項為參數。最終數學式中僅存3個參數Ka，Kb，Kc需要決定。

本報告利用嘉南水利會學甲灌溉中心77年春作玉米田間試驗資料 (曹以松等，1988)，進行分析。試驗地點位於本省西南

Table 1. Soil texture and moisture constants of field soil surveyed. (after Tsaur et al., 1988)

Depth (cm)	Particle size analysis				Particle density	Field capacity (w.t. %)		Permanent wilting point	Bulk density	Porosity (%)
	Texture	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)		1/3atm	Field survey			
0 ~ 10	Silt loam	26.82	54.90	18.28	2.68	19.89	22.60	4.78	1.36	45.95
10 ~ 20	Silt loam	26.22	55.10	18.68	2.69	19.98	20.60	4.66	1.47	42.25
20 ~ 40	Silt loam	28.56	53.04	18.40	2.71	20.16	21.20	4.87	1.44	41.30
40 ~ 60	Loam	34.82	48.80	16.38	2.69	19.85	23.30	6.22	1.34	43.06
60 ~ 80	Loam	37.96	41.40	20.64	2.71	19.96	20.20	5.37	1.46	40.36
80 ~ 100	Sandy loam	55.22	28.60	16.18	2.65	13.75	15.68	2.12	1.51	35.10

部嘉南平原上，試驗地土壤質地與土壤水分常數列表 1 所示：

灌溉試驗的處理分別為 (A) 播種後 55 天灌溉一次水深為 40mm。(B) 播種後 45 天灌溉，水深為 40mm。各處理選一小區每週採取地面下 0 ~ 10cm, 10 ~ 20cm, 20 ~ 30cm, 30 ~ 40cm, 40 ~ 60cm 各層土壤樣品，使用烘乾法測定土壤水分，除定期測定外，灌溉實行前 24 小時，降雨後 24 小時，種植日及收穫日，均採樣測定土壤水分含量。試驗田另有氣象觀測場所，蒸發皿為 A 型陸皿 (直徑 120 公分，深 25 公分)。

利用 A 處理玉米初期生育之田間試驗資料求取模式參數，進而利用水份收支法模擬其餘生育時期之土壤含水量，並利用 B 處理之資料進行驗證。模式求取參數之步驟如下：

一、作物係數，Kc 值之建立：

1. 將玉米的生長階段分為 4 個階段：第一：生育初期 (葉面積指數 $LAI \leq 0.1$ ，自播種後 26 天內)。第二：生育中期 ($0.1 < LAI < 3.0$ ，播種後 26 天 ~ 69 天)。第三：生育盛期 (自 $LAI \geq 3.0$ 開始，至玉米乳熟

期終了，葉片轉色，開始黃熟，播種後 69 ~ 104 天)。第四：生育末期 (自生育盛期之終止至收穫為止)。各階段 Kc 值之變化，在此假設與時序成線性相關。

2. 分別建立 4 個階段之 Kc 值。生育初期階段蒸發散量大部份來自於裸地之蒸發；此一階段取變化狀態下的平均值。平均值之求取是利用 A 處理之田間土壤水份含量調查資料代入土壤水份平衡模式，以最小平方估計法，使用套裝軟體求取 (Scientist for Windows, version 2.0)。生育盛期第三階段之 Kc 值則定為 1.1。生育中期第二階段之 Kc 值則利用內插法於第一與第二階段中求取。收穫期之 Kc 值定為 0.6 (Doorenbos and Kassam, 1986)；生育末期第四階段之 Kc 值同樣利用內插法求取，界於 1.1 與 0.6 之間。

二、控制土層與下層土壤水份交換量，G 值之建立

控制上層水份向下滲漏或是下層土壤藉毛細管現象進入根域上層，假設與控制上層水份含量的多寡成直線相關。 $G = Ka(W - Kb)$ 。利用玉米生育初期之土壤水份含量調查資料進行迴歸分析，由迴歸分析之

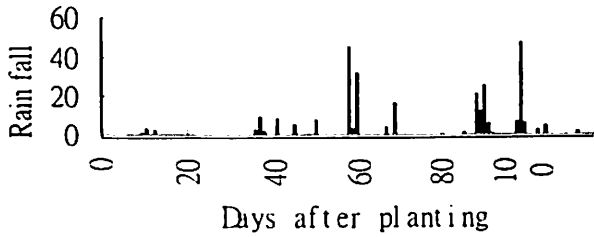


Fig. 1. Rainfall distribution during growth season.

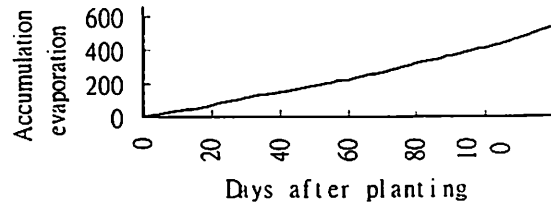


Fig. 2. Distribution of accumulation evaporation during growth season.

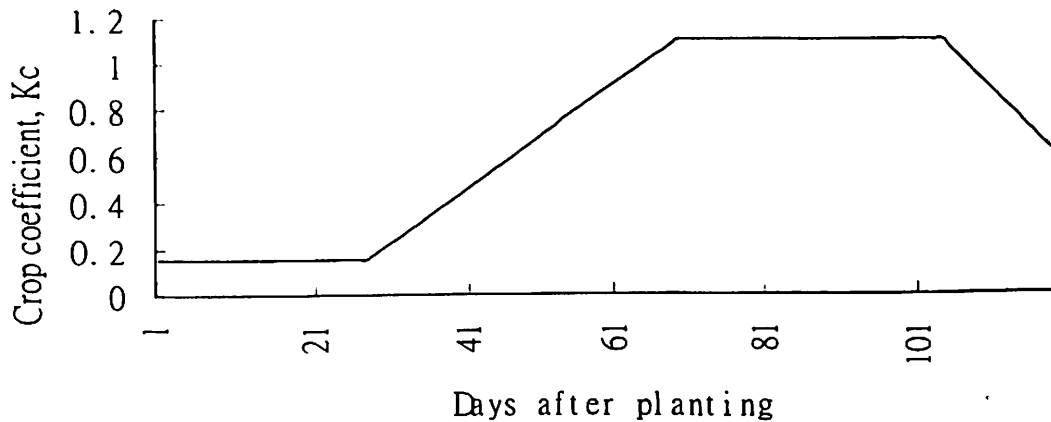


Fig. 3. Crop coefficient curve.

結果確立 K_a 及 K_b 值。

結果與討論

77 年春作玉米生長期間降雨量如圖一所示, 生育初期 (播種後 26 天內) 幾無降雨, 雨量集中在生育中、後期, 累計雨量 228.2 公厘。生育期間累積蒸發量 (A 型皿) 如圖二所示, 累計 532.58 公厘, 平均每日蒸發量 4.48 公厘。

玉米田土壤水份平衡方程式之參數值的求取, 係取 A 處理, 玉米生育第一階段的雨量、蒸發量資料及 5 個土壤水份含量的調查資料, 使用最小平方估測法推估, 求得 $K_c=0.153 \pm 0.097$, $K_a=-0.131 \pm 0.019$, $K_b=134.58 \pm 3.00$; 土壤水份觀測

值與推估值彼此間相關情形良好, 決定係數 (COD) 之值為 0.992。除生育初期以外的作物係數, 本研究依據 FAO 灌溉排水資料 (Doorenbos and Kassam, 1986) 決定第三階段之 K_c 值為 1.1, 收穫期之 K_c 值為 0.6, 得到玉米完整生育期之作物係數曲線圖如圖 3 所示。

FAO 灌溉排水資料中第一階段之 K_c 值為 0.4, 其取得之條件為每隔 7 天灌溉一次, 而本研究生育初期無灌溉, 彼此之間玉米田間水份狀況不一致, 且初期蒸發散量以裸地蒸發為主, 是以採取田間推估之 K_c 值作為計算實際蒸發散量使用。生育第三階段時 $LAI \geq 3$ 依據 Ritchie (1972) 之數學模式, 可以算出 $K_c=1$, 另 FAO 資料中之 $K_c=1.1$; 此時玉米根系已然發展完成, 可

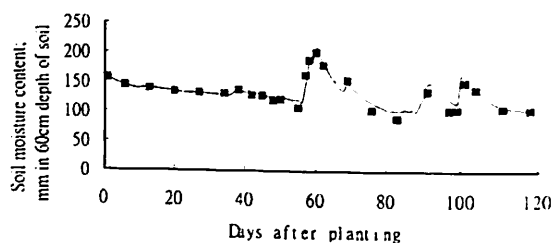


Fig. 4. Comparison between measured and estimated soil moisture content (treatment A)

利用深層土壤水份，表土水份含量的高低將不致影響過大，所以取 $K_c=1.1$ ，收穫期玉米葉片變色，根系衰退 K_c 值以 0.6 代入。

利用作物係數 K_c 及 K_a 、 K_b 三個參數以水份收支法進行模擬 A 處理玉米田之土壤水份含量，氣象資料僅需使用降雨量及蒸發量。在降雨部份考慮玉米截留之雨量，在玉米生育中期以後每連續一次雨量扣除 5mm (曹以松, 1973) 視為無效雨量。模擬自播種開始至全生育期，結果如圖 4 所示。土壤調查所得之土壤水份含量與模擬之數值，彼此間成直線相關， $\text{Estimated}=0.9133 \times (\text{Measured}) - 17.298$ ， $n=21$ ， $R^2=0.9354$ 。

以 A 處理所得之參數值模擬 B 處理之土壤水份含量之變，所得結果如圖 5 所示。調查與模擬數值彼此間之相關式， $\text{Estimated}=0.6756 \times (\text{Measured}) + 42.913$ ， $n=25$ ， $R^2=0.8505$ 模擬值與調查值相差最大之部份來自於灌溉後 (48 天) 之連續 3 個調查時間點，可能與田間灌溉之均勻度有關。

本省旱作主要栽培地區位於西南部及南部之沖積平原，氣候高溫多雨為其特徵，年平均雨量可以有 1500 公厘；惟雨量及雨期受季風影響而有乾濕季之分別，每年自十月至翌年四月為東北季風期，雨量

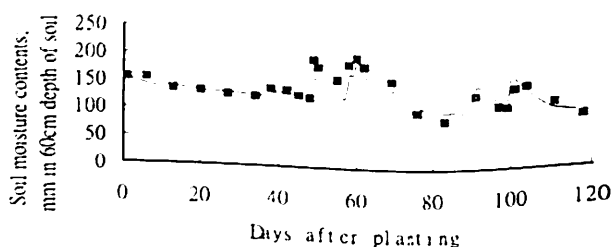


Fig. 5. Comparison between measured and estimated soil moisture contents (treatment B)

稀少，連續不降雨日數發生機率高，為旱季。五月至九月，西南季風盛行，受海洋氣團影響，降雨量驟增，其中尤以六、七、八月之雷雨及颱風挾帶豪雨；此期間為本區之雨季，雨量佔全年 85% 以上。避開六、七、八月之豪雨，旱作栽培有兩個主要期作，秋作：九月至元月，春作二月至六月。土壤水文變化最烈的夏作，旱作栽培面積則少。施嘉昌氏 (1991) 指出，不論春作或秋作玉米，生育期間灌溉兩次已經足夠，灌溉時間以配合玉米之水分生理，播種後 30 天及 50 天最適。秋作播種時正值夏季終了，土壤儲蓄了大量水份，地下水位高，而春作播種前必定有一次整地前之灌溉，地下水位，因處全年最乾時期，所以極低下，無論春作、秋作，生育初期少雨，玉米第一次灌溉對產量極為重要，同時因為降雨量少，土壤水份之變化，年與年之間極為穩定，便利於簡單模式的推估工作，可以有好的預測結果作為灌溉管理之依據。

由以上結果顯示，利用田間調查資料可以推估土壤水份平衡方程式中的參數值，即可利用氣象資料，以水份收支法推估即時之土壤水份含量，可以追跡乾旱，決定灌溉時間與灌溉量，且所需之氣象資料及土壤水份參數容易取得，所需成本亦不高，值得進一步進行驗證的工作。

引用文獻

- 台灣省水利局 1976 台灣旱作灌溉立地區分計畫報告。台灣，台中。
- 台灣省水利局 1980 雜作灌溉手冊。台灣，台中。
- 曹以松 1973 有效雨量模擬與估算之研究。農復會。台灣，台北。
- 曹以松、施嘉昌、李源泉、王錦鈺 1988 玉米不同灌溉處理需水量試驗研究。農業工程研究中心。台灣，台中。
- 施嘉昌 1991 玉米實際灌溉之檢定研究。台灣水利季刊，39(1), 1-9。
- Doorenbos, J. and W. O. Pruitt. 1984. Guidelines for predicting crop water requirements, FAO Irrig. and Drain. Paper no. 24, FAO, Rome.

- Doorenbos, J. and A. H. Kassam. 1986. Yield response to water, FAO Irrig. and Drain. paper no. 33, FAO, Rome.
- Feddes, R. A., P. J. Kowalik and H. Zaradny. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Wiley and Sons, New York.
- Ritchie, J. J. 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resour. Res. 18:204-1213.
- Wopereis, M. C. S., M. J. Kropff and J. Bouma. 1994. Soil data needs for regional studies of yield constraints in water-limited environments using modeling and GIS. In: Soil physical properties: Measurement and use in rice-based cropping systems. IRRI. Philippines.