

淺層地下水毛管上升對於大豆灌溉補助水量之分析

Analysis of Capillary Rise from Shallow Groundwater Table to Supplement on Soybean Irrigation

國立台灣大學農業工程學系副教授

張 文 亮

Wen-Lian Chang

摘 要

學甲試驗田區大豆(高雄10號)在不同灌溉處理下,雖然平均淺層地下水位在340cm深,但是在田間以張力計量測,在90cm深度下的土壤含水量幾近田間容水量,而且種植田區尚有灌溉、降雨、不同微氣候與蒸發散,淺層地下水藉著毛管上升作用,可達90cm高度,為中斷點。田間測定大豆延伸根系可達80cm深度以下,而且地表灌溉水量愈少,根系在深層吸收水分比率愈高。生育期間雖完全沒有灌溉,地下水毛管補助佔大豆耗水量的57.47%,其收穫量雖較其他灌溉處理的低,但是用水效率最高,達38.42kg/ha-mm,即達最省水灌溉的果效。當灌溉水費達30元/mm時,祇有整地期間灌溉,其他期間完全依賴雨水與地下水管水補助,可以獲得最高之淨效益。

關鍵詞:毛管水,灌溉。

ABSTRACT

Soybean (Kao-hsiung No.10) irrigation experiments were done by different amount of water in Chia-Nan area. Average depth of under groundwater table was 340cm in growing period. The capillary water rose from shallow water table in the depth of 90cm, near the root depth of soybean. The soil moisture was maintained on the field capacity. The weight of soybean root increased in deeper depth, and capillary water from shallow water table contributed about 57.47% of total water consumption in lowest amount of irrigation water. Ratio of water use efficiency was up 38.42kg/ha-mm, and make the maximum net benefit for farmer in highest protortion using capillary upward water from shallow watertable.

Keywords : Capillary water , Irrigation.

一、前言

本省大部分農田，地下水位均在地面下 150 至 200 公分的深度。這層地下水面承受一大氣壓的空氣壓力，稱為非受壓含水層 (Unconfined Aquifer)，又因為距離地面近，又稱為淺層地水 (Shallow Groundwater)。本省沿海鄰近地區，淺層地下水位可達 350 至 400 公分深。淺層地下水由於水量不多，受季節性降雨量與蒸發期共同影響，地下水面一年上下升降可達 200 公分，所以在田間抽水灌溉 (Pumping irrigation)，很少打井取用淺層地下水，大多取自水量較豐沛的受壓含水層 (Confined groundwater)。

淺層地下水雖然在抽水灌溉上使用很少，但是對於旱作物的灌溉補助量，具有重要的影響，長期以來都是國內外灌溉工程學家所關注的課題，尤其這數十年來，農業生產價格比起工業產物價格相差很多，以致農業水資源分配承受巨大的壓力，需要轉至工業或民生用途的呼聲日漸升高，在面臨未來日益缺乏地面灌溉水源以分供作物水分的影響下，淺層地下水毛管上升供應作物蒸散作用，可為大自然、為農業灌溉保留重要可用之水。而且地表土壤愈乾，淺層地下水毛管上升量愈大，因此在地表水缺水之時，這份地下水上升的補助水量愈不可忽視。

根據達西定律 (Darcy's Law)，土壤中水分的移動主要的潛能 (Energy potential) 來自土壤孔隙中水分的壓力潛能 (Pressure potential) 是與位置有關的重力潛能。壓力潛能與水分在土壤孔隙間毛管壓力 (Capillary force) 有關。而淺層地下水毛管上升方向是逆重力方向，故上升能量主要是受隙間壓力潛能或毛管力的影響，所以這種現象稱為淺層地下水毛管上升 (Capillary upward)。

二、前人研究

本省對於淺層地下水毛管上升的研究，約有三十年的歷史，主要的研究地方都是以嘉南平原的「學甲旱作灌溉試驗站」為主。最早的研究有徐玉標等⁽¹⁾ (民國 65 年) 以學甲田間土壤土柱，測定不同地下水位高，土柱內毛管水的上升高度，發現至少可以上升一公尺高。而後郭勝豐 (民

國 76 年)⁽²⁾ 以數學模式計算毛管水上升通量。游進裕 (民國 77 年)⁽³⁾ 以土柱水分擴散運動測得導水係數 (Hydraulic conductivity) 參數，進而該地區推估毛管水運動。何信賢 (民國 81 年)⁽⁴⁾ 進而該地區提出作物蒸發散作用對於淺層地下水毛管上升量的影響。張文亮與施嘉昌⁽⁵⁾ (民國 81 年) 計算在穩定狀態下 (Steady state) 學甲地區毛管水上升最大通量。張文亮⁽⁶⁾ (民國 82 年) 測定學甲地區地下水鹽分濃度，進而計算鹽類隨著毛管水上升在地表的累積量。施嘉昌等⁽⁸⁾ (民國 83 年) 在該地區以不同灌溉水量，考慮地下水影響下之土壤水分變化，更精密地計算田間大豆需水量。張文亮⁽⁷⁾ (民國 83 年) 數學推導在田間雜草根系影響下，地下水毛管上升的促進量。張文亮、黃耿亮⁽⁹⁾ (民國 84 年) 繼以毛管水分運動，計算污染影響下，需增加的灌溉淋洗 (Leaching) 量。

國外有關淺層地下水毛管上升對於旱作物的需水量影響很多，具有代表性的有早期 Gardner (1958)⁽¹⁵⁾ 以土壤非飽和一維運動描述淺層地下水的毛管上升運動，並提出毛管水上升通量受土壤導水特性、淺層地下水深、土壤溫度與土壤上面微氣候環境之影響。Raats (1974)⁽²⁵⁾ 提出作物根系的深度可以減少毛管水分上升移動的距離，可使深根性旱作獲得較深的地下水補助。Benz et al. (1978)⁽¹¹⁾ 以田間砂壤土的三年試驗結果提出，有淺層地下水區域減少地表灌溉量，作物有最高的用水效率 (Water use efficiency)，他們亦發現深層的地下水仍可以提供部分毛管水補助，惟作物產量較淺層地下水區域低。Tripathi and Mishra (1986)⁽³⁰⁾ 提出淺層地下水毛管上升與土壤質地有關，根據田間試驗淺層地下水可補助作物總蒸散 (Evapotranspiration)，在黏質壤土有 61.6-64.5%，在粉質黏土有 39.0-46.8%，在壤土有 4.0-8.1%，即土壤質地愈細，地下水毛管上升對於作物需水量之補助愈大，而且認為在細質土壤中，即使淺層地下水位深至 200 公分以下，作物根系仍可以吸到足夠的毛管上升水，甚至在地表完全沒有灌溉，作物產量並沒有顯著性的減少。

Mishra et al. (1990)⁽²³⁾ 提出淺層地下水毛管上升，對於乾旱時期的水稻生長，也可以增加用水

效率與維持部分產量。Kandil and Willardson (1992) (20)研究變動性的淺層地下水與玉米產量的關係，認為淺層地下水位接近地面到 10 公分時，將導致由排水不良抑制玉米產量，而地下水位深至 150 公分深時祇賴毛管上升補助，玉米產量不足維持最佳產量，Tripathi (1992) (31)認為在壤土土質，淺層地下水位在 160 至 250cm 深度時，對於灌溉需水量的補助可以忽略不計。不過 Tripathi 的研究成果應依不同作物而異，因為除土壤因子外，作物根毛深度是一項影響因子。以大豆研究為例，Raper and Barker (1970) (26)提出大豆根系大多集中在地下 15 公分深度，但是 Garay and Wilhelm (1983) (14)與 Hoogenbom et al. (1987) (19)皆認為愈在乾旱情況大豆根系可以伸延得更深。Kaspar et al. (1984) (21)提出地表缺水大豆根毛可以向下延伸至 200cm 以下，由此深度在 250cm 的淺層地下水位不需上升至地表才能供給大豆水分，祇需上升 50cm 就可以補助大豆蒸散量。不過即使淺層地下水位能對大豆需水量有補助，Sionit and Kramer (1977) (38)仍認為缺乏灌溉下的大豆產量比起足量灌溉產量仍然較低。這證明田間即使存在淺層地下水位，其供水量仍然無法滿足大豆水分全部蒸散量。Brown et al. (1985) (12)也支持類似的試驗結果。Runge and Odell (1960) (27)認為大豆產量損失主要是在生育旺盛期與子實充實期對缺水敏感所致。Sojka et al. (1977) (29)提出大豆開始開花後一個星期的幼莢形成期，即使在缺水期間後再行灌溉，植株內的導管壓力勢能(Xylem pressure potential)也不能正常恢復原狀，是大豆另一個缺水敏感期。

Doss and Thurlow (1974) (13)提出足量灌溉對於大豆產量的增加可能可以達到最佳產量，但是不一定具有經濟性。Mannocchi and Mecarelli (1994) (22)也認為缺水時期的灌溉，需要考慮作物的最大用水效率與最佳經濟效益，達到最高產量，不一定符合缺水時期灌溉水的經濟效益與管理。

綜合過去三十年國內外淺層地下水毛管上升對於作物灌溉需水量的補助，主要的研究有三个方面：1. 由土壤水分的觀點，研究毛管上升的運動；2. 由田間作物用水量的觀點，研究作物的用水效率；3. 由經濟的觀點，研究缺水期毛管上升

的補助經濟效益。因此本研究的目的，是綜合這三者，以在學甲旱作試驗站進行田間大豆試驗，以土壤水分觀點分析，試驗淺層地下水毛管上升的通量，並以田間灌溉處理，計算淺層地下水補助下的作物用水效率，並以經濟觀點評估其用水效益。以期對缺水時期淺層地下水毛管上升的價值，給予準確、合理之評估。

三、理論分析

首先假設淺層地下水毛管水分上升仍然符合達西公式，即達西通量是水分總勢能的函數，表示為

$$q = -K \nabla \phi \dots\dots\dots (1)$$

q 為達西通量 (Darcy's flux)，K 為導水係數 (Hydraulic conductivity)， ϕ 為總水分勢能 (Total water potential)。根據質量守衡，土壤水分在單位土壤距離的通量的變化為單位時間下土壤水分的變化量，故

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla q \dots\dots\dots (2)$$

θ 為土壤含水量，t 為時間。將(2)代入(1)式得

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \nabla K \nabla \phi \\ &= \frac{\partial K}{\partial X} \frac{\partial \phi}{\partial X} + \frac{\partial K}{\partial Y} \frac{\partial \phi}{\partial Y} + \frac{\partial K}{\partial Z} \frac{\partial \phi}{\partial Z} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

土壤水分總勢能包括土壤水分壓力勢能 (Pressure potential)、重力勢能 (Gravity potential)、滲透壓勢能 (Osmotic potential)、土壤表面靜電勢能 (Electrical potential) 等都會影響水分移動。不過主要的影響因子是水分壓力勢能與重力勢能。滲透壓勢能與靜電勢能祇有在極乾情況下的水分移動，才產生影響。故

$$\phi = \varphi + pgZ \dots\dots\dots (4)$$

φ 為水分壓力勢能，p 為水之密度，g 為重力，Z 為垂直方向之深度。(4)式左右兩端除以 pg，

$$\frac{\phi}{pg} = \frac{\varphi}{pg} + Z = -S + Z \dots\dots\dots (5)$$

S 為張力水頭 (Suction head)，土壤水分皆小於大氣壓力，故張力為正值。重新定義(3)式 ϕ 為水頭，則

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial K}{\partial X} \frac{\partial(-S+Z)}{\partial X} + \frac{\partial K}{\partial Y} \frac{\partial(-S+Z)}{\partial Y} + \frac{\partial K}{\partial Z} \frac{\partial(-S+Z)}{\partial Z} = - \left\{ \frac{\partial K}{\partial X} \frac{\partial S}{\partial X} + \frac{\partial K}{\partial Y} \frac{\partial S}{\partial Y} + \frac{\partial K}{\partial Z} \frac{\partial S}{\partial Z} \right\} + \frac{\partial K}{\partial Z} \dots\dots\dots (6)$$

因為淺層地下水毛管上升主要是一維的垂直方向運，故(6)式可表示為

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial K}{\partial Z} \frac{\partial S}{\partial Z} + \frac{\partial K}{\partial Z} \dots\dots\dots (7)$$

(2)式祇考慮在一維的Z方向時可表示為

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial Z} \dots\dots\dots (8)$$

(8)代入(7)式並積分

$$\int \frac{\partial q}{\partial Z} = \int \frac{\partial K}{\partial Z} \frac{\partial S}{\partial Z} - \int \frac{\partial K}{\partial Z} \dots\dots\dots (9)$$

得

$$q = K \frac{\partial S}{\partial y} - K \dots\dots\dots (10)$$

或改寫為

$$\frac{dS}{dZ} = \frac{q}{Z} + 1 \dots\dots\dots (11)$$

(11)式亦可示為積分式

$$\int ds = \int \frac{ds}{\frac{q}{K} + 1} \dots\dots\dots (12)$$

(12)式假設在淺層地下水毛管上升屬於穩定狀態，q為定值。(12)式等號的右端仍然無法積分，於是照 Gardner (1958) 傳統的假設，導水係數祇是土壤水分張力的函數，

$$K = \frac{a}{S^a + b} \dots\dots\dots (13)$$

n，a，b為定值，依土壤質地特性而異。(13)代入(12)式可得

$$\begin{aligned} \int_a^b dz &= \int \frac{ds}{\left[\frac{q}{\frac{a}{S^a + b}} \right] + 1} \\ &= \frac{a}{q} \int_a^\infty \frac{ds}{S^a + \left[b + \frac{a}{q} \right]} \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

a為毛管邊緣的毛細邊緣的張力水頭，d為毛管上升距離(14)式在數學上很容易解，但是在田間狀況下其邊界條件很難界定。主要的困難有三點：1. 毛管上升起始點不易界定。2. 根系分佈深度複雜。3. 根毛細胞壓力未知。各點分述如下：

1. 傳統的地下水毛管上升，飽和含水層的水面是設立在地下水水位面上。田間地下水位的判斷，經常是由地表穿透土層進入淺層地下水的觀測井水位測得。但是 Akindunni and Gillham (1992) (10) 提出淺層地下水由於受到水分遲滯現象(Hysteresis)的影響，在大氣壓力下水面會上升一段距離，使淺層地下水位以上一段距離土壤水分仍然接近飽和，這稱為毛管邊緣(Capillary fringe)由這裡視為毛管水上升之起始點，而非自由水。土壤質地愈細，毛管邊緣的距離就愈長。在粗砂的土壤層中，毛管上升起點勉強可由觀測井水面算起。但是在細質土中毛管邊緣使毛管上升處遠較淺層地下水位高。Hillel (1982) (17) 提出毛管邊緣的距離在田間很難準確的估計，不過其水分壓力為空氣一進入壓時即為毛管邊緣 air-entry value。即第一滴水分可以離開土壤孔隙之負壓。

2. 毛管上升高度在裸地可以上升到地表，但在有種植作物時 Raats (1974) (25) 則認為上升高度以作物根系深度為限，但是很難估計不同生育期的作物根系分佈，例如 Tripathi and Mishra (1986) (30) 則建議以毛管邊緣以上 20 公分為作物生育期間，毛管上升對於作物的補助距離。

3. 根毛細胞壓力不易測定，若設定根系是有最大的吸水速率，則張力可定為無窮大。這在作物吸收水量的計算上可算合理，因為 Hillel (1980) (17) 認為如果氣孔打開，週圍大氣是幾近於無窮大的水分張力來吸收植物水分。

(14)式中張文亮與施嘉昌(民國 81 年) (5) 根據土壤水分特性曲線的實驗結果，提出學甲土壤的 n 值等於 2，b = 486.48 cm²，a = 116.28 cm³/day

$$\begin{aligned} d &= \frac{a}{q_{max}} \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{a}{q} + b}} \tan^{-1} \frac{s}{\sqrt{\frac{a}{q} + b}} \right) \int_0^\infty \\ &= \frac{a}{q} \frac{1}{\sqrt{\frac{a}{q} + b}} \frac{\pi}{2} \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

(15)式可以改寫為

$$q_{max} = \frac{-a + a\sqrt{1 + \frac{b\pi^2}{d^2}}}{2b} \dots\dots\dots (16)$$

由(16)式知毛管上升距離 d 愈遠，毛管上升的通

量就愈低。

田間旱作物耗水量的計算採水平衡式：

$$A=R+I+C\pm\Delta S \dots\dots\dots (17)$$

(17)式中 A 為作物耗水量，R 為有效降雨量，I 為灌溉水量，C 為淺層地下水毛管上升補助總量， ΔS 為土壤水分變化量。

假設地下水毛管上升為穩定，

$$C=q \times d \times n \dots\dots\dots (18)$$

n 為作物生育期距。

作物用水效率(E)的計算為

$$E=\frac{A}{W} \dots\dots\dots (19)$$

W 為每公頃作物子實產量。

旱作用水經濟效益分析為

$$NB=P_1W_1+P_2(W-W_1)-[C_0+C_1W+C_2I] \dots\dots\dots (20)$$

NB 為淨效益， P_1 為政府保證作物收成價格， W_1 為每公頃保證收購產量， P_2 為進口作物價格， C_0 為固定成本（包括整地、施肥、種子、施藥、中耕等費用，但不包括工資）， C_1 為搬運工資， C_2 為灌溉水費。

四、試驗與方法

田間試驗係在本省西南部沿海的嘉南農田水利會「學甲旱作試驗站」進行。該區域土壤屬於八掌溪之河成沖積土。土壤剖面質地均勻，根據徐玉標等（民國 65 年）的試驗，土壤含砂粒 21.9 %、粉粒 62.8 %、粘粒 15.3 % 屬粉質壤土，土壤假比重 1.44，土壤飽和含水量 46.5 %、田間容水量 25.7 %，田間凋萎點 6.7 %。

試驗期間田間氣象觀測站每日記錄微氣候，最高溫度 35.2 °C，最低溫度 8.5 °C，平均相對濕度 84.6 %，年總降雨量 1594.5mm，平均地下水位在地面下 293.25cm，最高地下水位在 123cm（八月），最低地下水位在 394cm（五月）。

供試大豆品種為高雄選 10 號，種於民國 84 年 3 月 2 日。分為五種灌溉處理。 I_0 處理是祇有在整田時期灌溉 45mm 水量以外，大豆整個生育期間皆未灌溉。 I_1 處理與 I_0 相同，祇是在大豆生育旺盛期於 21 日，灌溉 40mm 水深。 I_2 處理是除了在生育旺盛期灌溉 40mm 水深外，也在開花後一週的幼莢形

成期，於 40 日灌溉 40mm 水深。 I_3 處理是與 I_2 處理相同外，另在子實充實期 58 日再灌溉 40mm 水深。 I_4 處理是在整個大豆生長期間，維持土壤水分在有 1/2 有效水分至田間容水量之間，灌溉日期與水量分別是 14 日 52.6mm，20 日 40mm，43 日 58.9 mm，56 日 60.6mm，63 日 56.6mm。每個試驗處理皆採四重覆，每個重覆田區面積有 150 m²（= 6m × 25m）。

大豆在田區種植的株距為 15cm，行距為 50 cm，每一個試驗田區植 2000 株大豆。試驗田區共有 20 塊，佈置採完全隨機排列。灌溉方式採取地面淹灌，灌溉水源來自試驗田區附近之深層地下水井。施肥與施藥皆照當地農民之耕種方法，並且進行二次中耕除草。大豆在生長 107 天後，用人工採收於每個試驗田區收割 15 株，量測株高、分枝數、節數、莢數、粒數、粒數。收割大豆乾燥至含水量 13 % 以下，測每株乾粒重並換算公頃子實重量。

土壤含水量的測定是在試驗區域，每一灌溉處理的四個重覆田區中擇一田區，在土壤 10、30、50、70cm 深度，置入一支張力計。試驗期中每星期讀一次張力計數，根據學甲土壤水分特性曲線（張文亮、施嘉昌，民國 81 年）⁽⁵⁾換算為土壤含水量。試驗期間當田間土壤含水量低至張力計能夠檢測的範圍，則在改用田間採土，用稱重烘乾法計算土壤含水量。為觀測地下水毛管上升高度方面，是在實驗田區之附近 10m 處，選一與 I_0 相同處理的試驗田，置入自置加長型張力計至 50、65、95、125 與 160cm 深，並且每星期記錄張力計值。

在大豆收割後於各試驗田區，將分節鐵管以木槌緩慢敲打置土中，整支鐵管再移出土中，將鐵管依 6、12、18、24、30、36、42、48、54、60cm 分開，而後將土壤置於水槽中，仔細洗出根毛，氣乾後測定每段土壤根毛重量。

五、結果與討論

圖(一)~(五)顯示在 50、65、95、125 與 160cm 深處土壤水分張力的變化。整個試驗期在 160cm 深度張力的變動範圍在 0.28-0.32bar 平均為 0.30

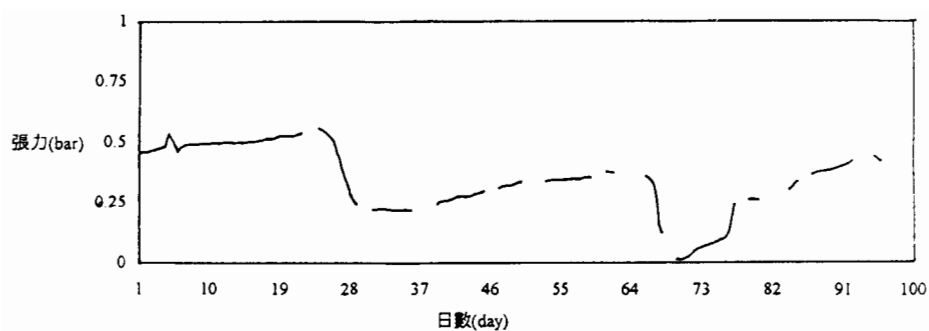


圖 1. 大豆根區 50cm 深土壤水份張力計讀數記錄圖

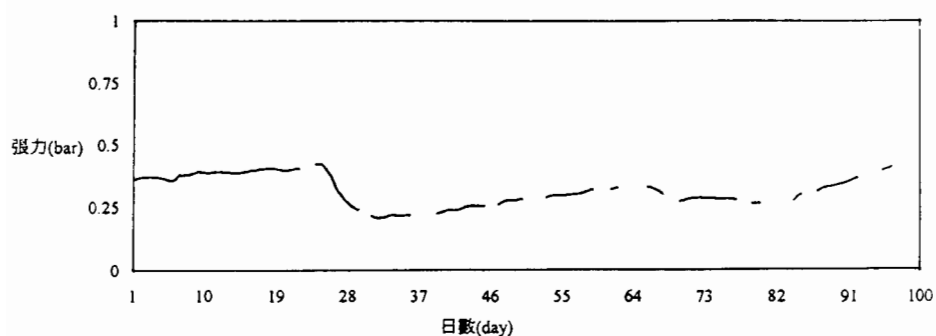


圖 2. 大豆根區 65cm 深土壤水份張力計讀數記錄圖

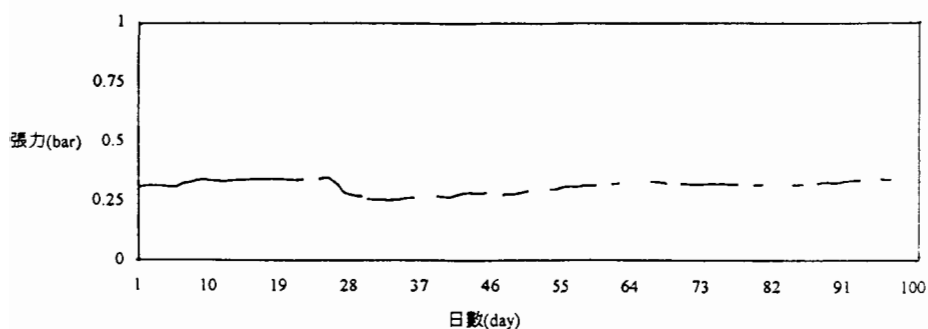


圖 3. 大豆根區 95cm 深土壤水份張力計讀數記錄圖

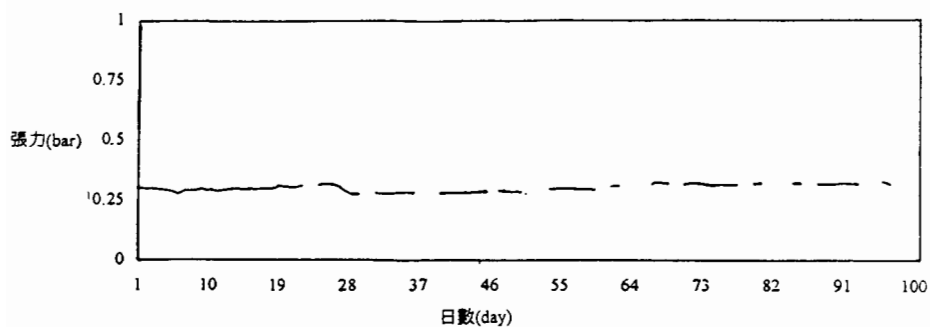


圖 4. 大豆根區 125cm 深土壤水份張力計讀數記錄圖

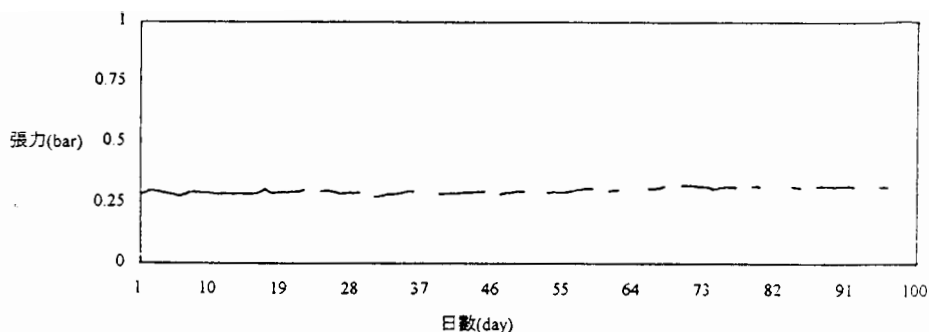


圖 5. 大豆根區 160cm 深土壤水份張力計讀數記錄圖

bar，125cm 深度的張力變動範圍在 0.28-0.33bar，平均為 0.30bar，95cm 深度的張力變動範圍在 0.26-0.36 bar 平均為 0.31bar，65cm 深度的張力變動範圍在 0.21-0.42bar 平均為 0.32bar，50cm 深度的張力變動範圍在 0.02-0.56bar 平均為 0.35bar。這顯示無論試驗時期的微氣候改變、降雨量、土壤表面的水分蒸發量，與大豆的蒸散量，土壤深度在 95 至 160cm 以下的土壤水分張力幾乎不改變，徐玉標等（民國 65 年）也提出類似的現象，地下水位在 2m 以下時地下水的毛管上升可至 80cm 深以致外界微氣候條件如何變動，皆對毛管上升區土壤水分沒有影響，這裡可視為毛管邊緣高度。本研究試驗期間平均地下水在 350cm 以下，但是土壤

90cm 深以下的水分幾乎不改變，顯然不斷大豆根毛吸水與微氣候條件影。70cm 以上的土壤水分則有較大的變動。因此在 90cm 與 70cm 之間，80cm ($= (90+70)/2$) 設為根毛延伸的極限，那毛細管尚需上升 10cm ($= 90-80$) 方能供為根毛吸收。

圖 6 表示不同灌溉處理大豆根毛在土壤不同深度剖面之變化。該圖顯示，灌溉水量愈多，大豆根毛主要生長在淺層處，反之根部在土壤深層生長的比例增加。 I_0 、 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 各灌溉處理根毛平均的生長深度是 8.496、9.726、7.830、7.236、5.538cm。不過各處理的大豆根系本皆可伸至 60cm 深度以下，這個結果與 Kaspar et al. (1984)⁽²¹⁾ 的田間觀察結果相似，大豆的在缺水灌溉時根部可

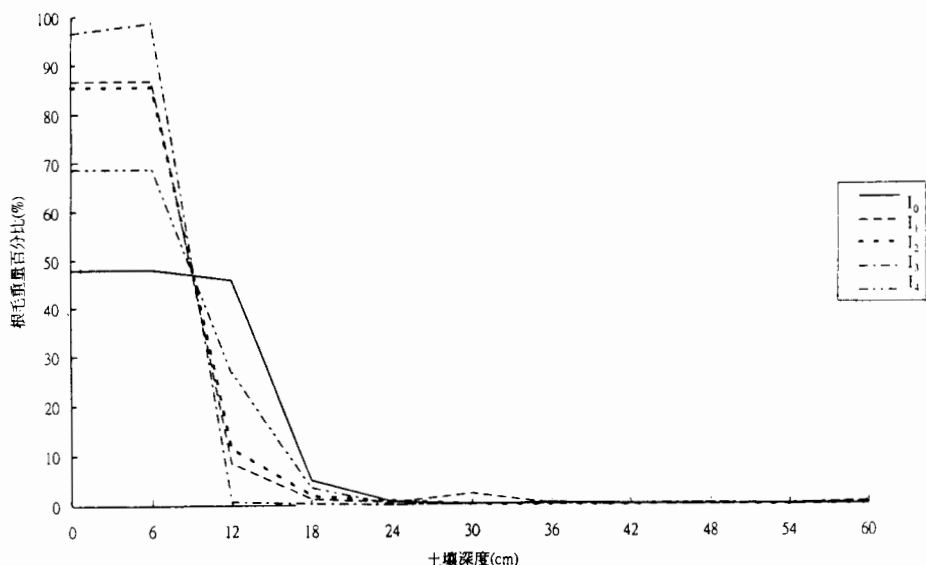


圖 6. 學甲大豆試驗田區不同灌溉處理根毛重量在土壤深度之分佈比

以向下沿伸至深層，而獲得淺層地下水補助。

由學甲土壤水分特性曲線，張文亮與施嘉昌（民國 81 年）提出④式中的 a 值為 $116.28\text{ cm}^3/\text{day}$ ，b 值為 486.48 cm^2 ，n 值為 2，代入④式可計算得 q 值為 0.038 cm/day ，與田間測得毛管上升高度、毛管邊緣張力數。以大豆生育 107 天計算，淺層地下水毛細上升的補助量為 4.066 cm （ $= 0.038\text{ cm/day} \times 107\text{ day}$ ）或 40.66 mm 的水深。

大豆試驗田區各灌溉處理之土壤含水量變化以表(一)至表(四)示之。試驗期間之降雨量，皆屬於有效降雨量，因為該地區之有效降雨量為 58mm（施嘉昌提供資料，民國 84 年）。在降雨時，依在現場觀測，雨滴至地面後皆迅速入滲進入地表土壤，田間沒有地表逕流流出試驗田區。表(一)至表(四)顯示 I_0 、 I_1 、 I_2 、 I_3 處理，土壤根區含水量的變化總量相差不多，祇有 I_4 處理的土壤含水量的變化總量較大，主要的原因是 I_4 提高的灌溉頻率與灌溉水量，增加了深層滲漏量，而且在 62 日後大豆進入成熟期後的灌溉，在土壤 70cm 深處水分的減少，大部分的水分成為滲漏。比較各處理 70cm 深處土壤含水量變化的比例， I_0 為 24 %、 I_1 為 17.9

%、 I_2 為 6.8 %、 I_3 為 1.8 %、 I_4 是 34 %。可知地表灌溉水量愈少，深層土壤的水分遞減比率愈多，大豆根部需獲更多水量來自深層以供蒸散所需。 I_4 的比值反而增加，可能是滲漏的影響。

表(五)表示不同灌溉處理大豆之生育與收穫差異，顯示 I_0 處理的大豆株高顯著性 ($P<0.05$) 的降低，顯示在大豆在生長旺盛期時灌溉充分，株高免受抑制。 I_0 處理的大豆植株雖然有矮化現象，但是分株數、節數、莢數與粒數並沒有顯著性的變化，不過每株乾粒重有顯著性的減少，證明子實充實期的缺乏灌溉，使得大豆乾粒重顯著減輕，這也影響每公頃子實收穫重量（表(六)）的減少。大豆生育維持 1/2 土壤有效水分至田間容水量之間，其大豆乾粒重與收穫每公頃子實重量最高。而大豆生育期間除靠降雨灌溉以外皆不灌溉，其子實產量最低。由此可知祇靠淺層地下水毛管上升補助灌溉是可以使大豆有生產，惟其產量為充分水量灌溉下產量之 81.3 %（ $= 2718.1/3343 \times 100\%$ ）。可見水分灌溉是能增加大豆產量。

表(七)顯示各灌溉處理之用水效率，各灌溉處理間用水效益依次為 $I_0 > I_1 > I_2 > I_3 > I_4$ 。這個結

表 1. 學甲大豆試驗田區無灌溉 I_0 土壤水分變化量

觀測日期	採土期距 (日)	有效 降雨量 P (mm)	灌溉量 I (mm)	各土深之土壤含水量變化 (mm)				土壤根區 70cm 含水量變化 $\Delta \theta$ (mm)
				10cm	30cm	50cm	70cm	
2/21-2/27	7	2.50	0.00	-10.41	-2.00	-1.98	-2.34	-16.73
2/28-3/06	7	21.50	0.00	4.91	0.00	-0.54	1.50	5.87
3/07-3/14	8	1.10	0.00	-3.18	-6.58	-5.48	0.00	-15.24
3/15-3/21	7	0.00	0.00	-3.63	-4.02	-2.86	-1.28	-11.79
3/22-3/28	7	0.00	0.00	-1.23	-4.48	-4.80	-1.12	-11.63
3/29-4/07	10	8.70	0.00	-2.30	-7.58	-5.54	-2.40	-17.82
4/08-4/14	7	0.00	0.00	-2.24	-7.60	-8.00	-5.10	-22.84
4/15-4/24	10	0.00	0.00	-2.80	-14.66	-3.70	-9.42	-30.58
4/25-5/04	10	0.00	0.00	-2.40	-3.00	-5.20	-15.10	-25.70
5/05-5/16	12	45.20	0.00	5.50	5.80	2.00	1.60	14.90
5/17-5/22	6	56.00	0.00	4.20	9.75	10.75	6.75	31.65
5/23-5/29	7	0.00	0.00	-3.40	-3.20	1.00	5.40	-0.20
5/30-6/05	7	0.00	0.00	-3.40	-10.00	-10.60	-11.00	-35.00
合計	105	120.50	0.00	-20.38	-47.57	-34.95	-32.51	-135.41

表 2. 學甲大豆試驗田區一次灌溉 I₁土壤水分變化量

觀測日期	採土期距 (日)	有效 降雨量 P (mm)	灌溉量 I (mm)	各土深之土壤含水量變化 (mm)				土壤根區 70cm 含水量變化 $\Delta \theta$ (mm)
				10cm	30cm	50cm	70cm	
2/21-2/27	7	2.50	0.00	-4.58	1.92	-0.94	-1.02	-4.62
2/28-3/06	7	21.50	0.00	3.95	1.92	1.12	0.18	7.17
3/07-3/14	8	1.10	0.00	-10.88	-4.34	2.96	-0.84	-13.10
3/15-3/21	7	0.00	0.00	-5.50	-4.11	-4.53	-0.16	-14.30
3/22-3/28	7	0.00	40.00	-9.55	5.60	7.74	0.76	4.55
3/29-4/07	10	8.70	0.00	-4.25	-11.98	-7.08	-1.02	-24.33
4/08-4/14	7	0.00	0.00	-18.67	-18.26	21.58	-2.78	-61.29
4/15-4/24	10	0.00	0.00	-3.10	-17.82	-19.44	-38.60	-78.96
4/25-5/01	7	0.00	0.00	-0.40	-0.40	-1.40	-0.60	-2.80
5/02-5/08	7	5.50	0.00	0.00	-1.40	0.80	0.20	-0.40
5/09-5/19	11	79.70	0.00	15.30	25.20	21.60	14.00	44.20
5/20-5/29	10	1.50	0.00	-7.70	-10.40	-7.20	4.80	-30.10
5/30-6/05	7	0.00	0.00	-2.20	-12.00	-5.40	6.80	-26.40
合 計	105	120.50	40.00	-47.58	-46.07	9.81	-18.28	-102.12

表 3. 學甲大豆試驗田區二次灌溉 I₂土壤水分變化量

觀測日期	採土期距 (日)	有效 降雨量 P (mm)	灌溉量 I (mm)	各土深之土壤含水量變化 (mm)				土壤根區 70cm 含水量變化 $\Delta \theta$ (mm)
				10cm	30cm	50cm	70cm	
2/21-2/27	7	2.50	0.00	-7.14	3.70	-3.56	0.18	-6.82
2/28-3/06	7	21.50	0.00	4.83	3.68	-0.36	1.76	9.91
3/07-3/14	8	1.10	0.00	-13.41	-8.24	-1.02	-2.52	-25.19
3/15-3/21	7	0.00	0.00	-2.73	-4.88	-2.59	-8.33	-18.53
3/22-3/28	7	0.00	40.00	1.63	0.28	2.08	-2.74	1.25
3/29-4/07	10	8.70	0.00	-1.84	-17.49	-10.29	0.00	-29.62
4/08-4/14	7	0.00	40.00	-2.17	-9.03	-8.66	3.50	-16.36
4/15-4/24	10	0.00	0.00	-10.00	-8.75	-6.50	-4.75	-30.00
4/25-5/01	7	0.00	0.00	1.10	-1.60	-3.20	-3.80	-7.50
5/02-5/08	7	5.50	0.00	-1.20	0.20	0.00	1.00	0.00
5/09-5/15	7	25.20	0.00	4.73	0.70	-0.35	1.23	6.31
5/16-5/22	7	56.00	0.00	-1.10	0.80	4.20	14.80	18.70
5/23-5/29	7	1.50	0.00	-5.04	-8.00	-5.80	-2.00	-20.84
5/30-6/05	7	0.00	0.00	-3.80	-5.60	-0.80	-7.60	-17.80
合 計	105	120.50	80.00	-36.14	-54.23	-36.85	-9.27	-136.49

表 4. 學甲大豆試驗田區三次灌溉 I₃土壤水分變化量

觀測日期	採土期距(日)	有效降雨量 P (mm)	灌溉量 I (mm)	各土深之土壤含水量變化 (mm)				土壤根區 70cm 含水量變化 $\Delta \theta$ (mm)
				10cm	30cm	50cm	70cm	
2/21-2/27	7	2.50	0.00	-7.03	-4.76	-0.16	-1.30	-13.25
2/28-3/06	7	21.50	0.00	7.22	5.94	0.78	0.00	10.94
3/07-3/14	8	1.10	0.00	-14.39	-18.28	-7.76	-0.16	-40.59
3/15-3/21	7	0.00	0.00	-0.89	-10.40	0.00	0.66	-10.63
3/22-3/28	7	0.00	40.00	-24.61	9.16	2.58	1.66	-11.21
3/29-4/07	10	8.70	0.00	-2.58	-11.30	-4.38	-2.32	-20.58
4/08-4/14	7	0.00	40.00	-5.53	-4.18	-5.92	2.98	-12.65
4/15-4/24	10	0.00	0.00	-4.38	-5.25	-12.50	-20.25	-42.38
4/25-5/01	7	0.00	40.00	5.33	-1.23	0.35	6.83	11.28
5/02-5/08	7	5.50	0.00	-1.50	-8.20	-0.80	-2.60	-9.10
5/09-5/15	7	25.20	0.00	2.80	5.80	2.00	-3.20	4.56
5/16-5/22	7	56.00	0.00	-2.00	-1.60	0.80	19.60	16.80
5/23-5/29	7	1.50	0.00	-2.90	-4.40	-3.80	-5.20	-16.30
5/30-6/05	7	0.00	0.00	-2.10	-3.60	-3.40	0.80	-8.30
合 計	105	120.50	120.00	-52.56	-52.30	-32.21	-2.50	-139.57

表 5. 學中大豆試驗田區維持 1/2 有效水分 I₄土壤水分變化量

觀測日期	採土期距(日)	有效降雨量 P (mm)	灌溉量 I (mm)	各土深之土壤含水量變化 (mm)				土壤根區 70cm 含水量變化 $\Delta \theta$ (mm)
				10cm	30cm	50cm	70cm	
2/21-2/27	7	2.50	0.00	-7.68	-2.02	0.38	-3.70	-13.02
2/28-3/06	7	21.50	0.00	4.16	0.00	2.18	-0.10	6.24
3/07-3/14	8	1.10	0.00	-18.86	-6.14	2.62	-0.20	-22.58
3/15-3/21	7	0.00	53.00	11.44	2.90	2.74	-2.98	20.06
3/22-3/28	7	0.00	0.00	-8.82	-12.16	-1.98	-1.48	-24.44
3/29-4/07	10	8.70	0.00	-5.29	-6.72	-4.12	-1.98	-18.11
4/08-4/14	7	0.00	59.00	-4.58	14.54	0.84	6.74	17.54
4/15-4/24	10	0.00	0.00	-7.10	-14.80	-11.60	-13.00	-46.50
4/25-5/01	7	0.00	61.00	3.80	0.40	-2.80	-1.40	0.00
5/02-5/08	7	5.50	0.00	-2.80	-11.60	-13.80	-17.00	-45.20
5/09-5/15	7	25.20	57.00	1.50	4.40	6.00	5.60	17.50
5/16-5/22	7	56.00	0.00	-1.70	-1.60	-6.40	-5.80	-15.50
5/23-5/29	7	1.50	0.00	-3.80	-3.20	-4.20	-16.20	-27.40
5/30-6/05	7	0.00	0.00	-1.60	-4.80	-3.60	-8.20	-18.20
合 計	105	120.50	230.00	-41.33	-40.80	-33.74	-59.70	-175.57

表 6. 學甲試驗田區不同灌溉處理大豆之生育狀況

灌 溉 處理別	株 高 (cm/株)	分 枝 數 (枝/株)	節 數 (節/株)	莢 數 (莢/株)	粒 數 (粒/株)	乾粒重 (g/株)
I ₀	66.4	2.8	19.1	35.5	81.2	11.2
I ₁	78.7	2.6	16.5	35.6	78.0	11.5
I ₂	76.5	2.5	16.0	35.8	81.0	11.5
I ₃	78.2	2.4	16.3	34.0	77.9	11.6
I ₄	86.1	2.6	16.8	33.5	73.4	12.1

註：每區15株之平均數

表 7. 學甲試驗田區不同灌溉處理大豆的用水量與用水效率

灌 溉 處理別	灌溉水量 (mm)	總用水量 (mm)	地下水毛管上升 補助比例 (%)	子實產量 kg/ha	用水效率 kg/ha.mm
I ₀	0	70.75	57.47	2718.1	38.42
I ₁	40	144.04	28.23	2759.0	19.15
I ₂	80	149.67	27.17	2749.7	18.37
I ₃	120	186.69	21.78	3078.0	16.49
I ₄	230	260.59	15.60	3343.0	12.83

註：整地灌溉量45mm

地下水毛管上升補助量51.15mm

總用水量=灌溉量+整地灌溉量+淺層地下水上升補助量+有效降雨量-土壤水分耗損量

地下水毛管上升補助比例=地下水毛管上升補助量/總用水量

用水效率=子實產量/總用水量

果對缺水灌溉的土壤水分管理很重要，在有豐富與穩定的淺層地下水補注區，缺水灌溉雖然不能到達最高產量，但是可達最高的用水效率，即每單位用水量可以生產最高的子實產量，這個實驗結果與 Benz et al. (1978)⁽¹¹⁾的結果相同。尤其地面灌溉愈少，淺層地下水毛管上升補助百分率就愈高，在I₀處理可達 57.47%，略高於 Tripathi and

Mishra (1986)⁽³⁰⁾在粉質壤土的實驗結果。

表(Ⅶ)顯示不同灌溉水費的大豆收穫淨效益。目前本省大豆的保證價格為 25 元/公斤，進口價格為 9.2 元/公斤，保證價格的收購數量為 2500 公斤/公頃。大豆耕種的固定成本與價格為整地費 21267 元/公頃、機械播種費 9267 元/公頃、肥料費 2917 元/公頃、農藥費 2783 元/公頃、大豆種

子費 1867 元／公頃。非固定成本為產量搬運費，0.4 元／公噸乘以收穫公斤數，與灌溉水費為灌溉水價乘以灌溉水量。

表 6 列出不同灌溉水價，各灌溉處理的淨效益，顯示如果灌溉水單價等於零，即完全免費，則灌溉水愈多，淨效益愈高 $I_4 > I_3 > I_1 > I_2 > I_0$ 。如

果灌溉水單價漲至 2 元／公噸，則各處理之淨效益為 $I_4 > I_3 > I_0 > I_1 > I_2$ 。如果灌溉水單價漲至 3 元／公噸，則淨效益之次序 $I_0 > I_3 > I_1 > I_4 > I_2$ ，目前嘉南水利會主要水源來自曾文水庫，缺水時期灌溉水以 4.248 元／公噸的單價售與民生用水，若以此水費來估算，則淨效益依序為 $I_0 > I_1 > I_3 > I_2 > I_4$ 。

表 8. 學甲試驗田區不同灌溉處理大豆產量經濟分析表

灌溉處理別	大豆產量 (kg/ha)	大豆收購價 值(元/ha)	搬運費 (元/公噸)	灌溉水費 (元/公噸)	大豆產量淨效益					
					0 元/公噸	1 元/公噸	2 元/公噸	3 元/公噸	4 元/公噸	5 元/公噸
I_0	2718.1	64506.5	1087.2	1350	25318.3	24868.3	24418.3	23968.3	23518.3	23068.3
I_1	2759.0	64882.8	1103.6	2550	25678.2	24828.2	23978.2	23128.2	22278.2	21428.3
I_2	2749.7	64797.2	1099.9	3750	25596.3	24346.3	23096.3	21846.3	20596.3	19346.3
I_3	3078.0	67817.6	1231.2	4950	28485.4	26835.4	25185.4	23535.4	21885.4	21885.4
I_4	3343.0	70255.6	1337.2	8250	30817.4	28067.5	25317.4	22567.4	19817.4	19817.4

註：保證價格收購數量 2500kg/ha

保證價格 25 元/公斤，進口價格 9.2 元/公斤

固定成本 = 整地費 + 機械播種 + 肥料 + 農藥 + 種子

$38101 = 21267 + 9267 + 2917 + 2783 + 1867$

搬運費 0.4 元/公斤

七、結論與建議

根據研究的結果顯示，大豆田不灌溉祇靠淺層地下水毛管上升補助有最高之淨效益，淺層地下水毛管上升對於大豆在缺水灌溉下能夠具有很大的補助比例。淺層地下水供給作物的蒸發散所需，雖然不能使作物達到最高產量，但是可達最高用水效率，當灌溉水費提高至每噸 3 元時，田間除了整田灌溉以外，其他在整個大豆生育期間，完全停止灌溉，對於耕種者可達最高之淨效益。本省嘉南平原在乾旱時期，第一期稻作經常採大面積的休耕。依此實驗結果發現其實對於乾旱時期的配水計劃，政府可以鼓勵農民種植耐旱性作物；如大豆，供給整地用水，而後全期不用灌溉，完全依賴淺層地下水毛管上升補助，可達最

佳省水灌溉。在本省嘉南平原皆有天然蘊藏的供水水庫——淺層地下水，而且大部分的地區皆在 2 m 之內，應該是缺水時期不可忽視的灌溉水源。

本研究皆在田間進行試驗，有若干重要的因子因為不易控制，以致沒有深入探討，這包括 1. 土壤空間的變異性 (Spatial variability) 可能影響試驗的誤差；2. 大豆根毛的伸延長度，對於深層土壤水的吸收量影響很大，可惜土壤根毛的觀測困難，試驗的誤差性高；3. 假設根毛細胞的負壓達到無窮大，過去的學者如 Raats (1974) (25) 固然有如此的看法，這與實際作物生理狀況不符假設，不過其真正的負壓值在測定上非常困難；4. 在田間有深層滲漏時，淺層地下水毛管上升運動與深層滲漏的相互消長，在實際上應為非穩態 (Unsteady state)，但是本研究假設為穩態，進而容易計算求

解，這種假設對於灌溉處理 I_4 可能會有影響；5. 本研究的毛管邊緣是田間由張力計觀測而得，雖然後來在田間實際開挖土壤剖面，也發現95cm處土壤水分直接近田間容水量，但是在理論預測毛管邊緣層仍有相當之困難；6. 在計算淨效益時，未估計人工花費，因為試驗場的人工管理花費遠較一般農家管理高，故未估入，如為估入則試驗場大豆淨效益為負值，與外面農家不符。這些問題都有待未來更精密試驗與田間調查的改進，由淺層地下水毛管上升模式，亦可估算其他旱作對於淺層地下水的利用。依根毛深度，高粱、玉米、甘藷、花生分別為50、75、60、45cm，其每日蒸散量可由淺層地下水位補助，由 ϕ 式計算分別得0.259、0.445、0.259、0.099 mm/day。

八、誌謝

本研究的執行感謝國科會 NSC84-2321-B002-100 計畫經費的補助。台灣大學農業工程系施嘉昌教授、徐玉標教授提供寶貴的意見。研究生何信賢、黃耿亮的協助根毛試驗與學甲試驗站同仁的協助田間試驗與氣象資料提供，嘉南水利會許勝雄先生、郭淑姿小姐提供灌溉水費的估算與管理方式，幫助很大，在此特致感謝。

九、參考文獻

1. 徐玉標、吳銘塘·民國65年·學甲旱作試驗總報告－嘉南水利會之地理環境與灌溉管理·國科會、農復會75(NSC)-C21-E-673計畫報告。
2. 郭勝豐·民國76年·裸地表土蒸發對土壤水分變化與毛管補給相關之研究·國立台灣大學農業工程研究所碩士論文。
3. 游進裕·民國77年·旱田土壤水分移動之研究·國立台灣大學農業工程學系研究所碩士論文。
4. 何信賢·民國81年·不飽和土壤水分在根區移動之模擬·國立台灣大學農業工程研究所碩士論文。
5. 張文亮、施嘉昌·民國81年·學甲地區地下水毛細上升至地表面最大量之模擬·地下水調查分析與保育管理研討會283-287頁。
6. 張文亮·民國82年·學甲地區乾旱時期地下水毛細上升對土壤鹽化之影響·大氣品質與農業經營之關係研討會，167-174頁。
7. 張文亮·民國83年·雜草蒸散作用促進地下毛管水上升導致休耕土壤鹽化之探討·台灣水利季刊，第四十二卷，第二期56-62頁。
8. 王如意、施嘉昌、徐金錫、王銀和、王錦鈺·民國83年·大豆不同灌溉處理效果及需水量試驗研究·農業工程研究中心AERC-92-RR-15研究報告。
9. 張文亮、黃耿亮，民國84年，從水污染觀點重估灌溉需水量之數學理論與應用·農業工程學報，第四十一卷，第二期21-28頁。
10. Akindunni, F. F., and R. W. Gillham. 1992. Unsaturated and saturated flow in response to pumping of an unconfined aquifer: numerical investigation of delayed drainage. Ground Water. Vol. P. 873-884.
11. Benz, L. C., R. A. Reichman, E. J. Doering, and, R. F. Follett. 1987. Water table depth and irrigation effects on applied-water-use efficiency of three crops. TRANS of the ASCE. Vol. 21. p723-728.
12. Brown, E. A., C. E. Caviness, and D. A. Brown. 1985. Response of selected soybean cultivars to soil moisture deficit. Agron. J. Vol. 77. p.274-278.
13. Doss, B. D., and D. L. Thurlow. 1974. Irrigation, row, width, and plant population in relation to growth characteristics of two soybean varieties. Agron. J. Vol. 66. p.620-623.
14. Garay, A. F., and W. W. Wilhelm. 1983. Root system characteristics of two soybean isolines undergoing water stress conditions. Agro. J. Vol. 75. p.973-977.
15. Gardner, W. R. 1958. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Sci. Vol. 58. p.282-232
16. Gerrit, H., M. G. Huck, and Curt M. Peterson. 1987. Root growth rate of soybean as affected by drought stress. Agron. J. Vol. 79. p.607-614
17. Hillel, D. 1980. Fundamentals of Soil Physics. Academic Press.
18. Hillel, D. 1982. Introduction to Soil physics.

Academic Press.

19. Hoogenboom, G., M. G. Huck, and Curt M. Peterson. 1987. Root growth rate of soybean as affected by draught stress. *Agron. J.* Vol. 79. p.607-614.
20. Kandil, H. M., AND L. S. Willardson. 1992. Relating crop-yield response to water-table fluctuations. *J. Irrig. and Drain. Engrg. ASCE.* Vol. 118.p.113-121.
21. Kaspar, T. C., H. M. Taylor, and R. M. Shibles. 1984. Taproot-elongation rates of soybean cultivars in the glasshouse and their relation to field rooting depth. *Crop Sci.* Vol. 24. p.916-920
22. Mannocchi, F., and P. Mecarelli. 1994. Optimization analysis of deficit irrigation systems. *J. Irrig. and Drain. Engrg. ASCE.* Vol. 120. NO. 3. P.484
23. Mishra, H. S., T. R. Rathore, and R. C. Pant. 1990. Effedt of intermihent irrigation on groundwater table contribution, irrigation requirement and yied of rice in Mollisols of the Tarai Region. *Agricultural Water Management.* Vol. 18. p. 231-241.
24. Prathapar, S. A., C. W. Robbins, W. S. Meyer, and N. S. Jayawardane. 1992. Models for estimating capillary rise in a heavy clay soil with a saline shallow water table. *Irrig. Sci.* Vol. 13. p.1-7.
25. Raats, P. A. C. 1974. Steady flows of water and soil in uniform soil profiles with plant roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* Vol. 38. p.717-722.
26. Raper, C. D., and S. A. Barber. 1970. Rooting systems of soybean. I. Differences in root morphology among varieties. *Agron. J.* Vol. 62. p.581-584.
27. Runge, E. C. A. and R. T. Odell. 1960. The relation between precipitation, temperature, and the yield of soybeans on the agronomy south farm, Urbana, Illinois. *Agron. J.* Vol. 52. p.245-247.
28. Sionit, N., and P.J. Kramer. 1977. Effect of Water Stress during different stages of growth of soybean. *Agron. J.* Vol. 69. p.274-277.
29. Sojka, R. E., H. D. Scott, J. A. Ferguson, and E. M. Rutledge. 1977. Relation of plant water status to soybean growth. *Soil Science.* Vol. 123. NO. 3. p.182-187.
30. Tripathi, R. P., and R. K. Mishra. 1986. Wheat root growth and seasonal water use as affected by irrigation under shallow water table conditions. *Plant and Soil.* Vol. 92. p.181-188.
31. Tripathi, R. P. 1992. Irrigation timing for wheat based on climate, crop, and soil data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* Vol. 118. p.370-381

收稿日期：民國 85 年 3 月 25 日

修正日期：民國 85 年 5 月 1 日

接受日期：民國 85 年 5 月 20 日