

專論

玉米蒸發散係數之研究

Study on the Coefficient of Evapotranspiration of Corn

國立台灣大學農業工程學研究所教授 國立台灣大學農業工程學研究所碩士班研究生

施嘉昌
Charles C. C. Shih

黃成達
Cheng-Dar Hwang

摘要

作物蒸發散係數之定義為作物之實測蒸發散量 (Actual Evapotranspiration) 與潛勢蒸發散量 (Potential Evapotranspiration) 之比值，代表該作物因不同生長期距所需的蒸發散量之不同和氣候條件的差異，會與生長期距產生一該作物之生長曲線。其作用，可在預知潛勢蒸發散量後，乘上該時期之蒸發散係數即為該時期之預計作物蒸發散量或作物需水量。在農業之領域中，應用在未來灌溉計劃的研擬，灌溉系統之設計，營運管理等，是一方便、快速可靠的預測方法。

玉米蒸發散係數之求得，乃利用台南學甲試驗站自74年至77年間之玉米需水量試驗，做進一步之分析，以探求其合理性，作為學術理論之探討及提供農業上灌溉供水之應用。其結果如下：

- (1)經Penman式之分析，春作玉米全期之蒸發散係數為0.78；秋作玉米全期之蒸發散係數為0.75。
- (2)經Hargreave式之分析，春作玉米全期之蒸發散係數為0.87；秋作玉米全期之蒸發散係數為0.67。
- (3)玉米春作平均生長期距約為125天；平均生長度日數約為1865.3°C；平均總實測蒸發散量約為407.5mm；平均總潛勢蒸發散量約為459.8mm。
- (4)玉米秋作平均生長期距約為117天；平均生長度日數約為1626.7°C；平均總實測蒸發散量約為276.5mm；平均總潛勢蒸發散量約為360.8mm。

關鍵詞：蒸發散係數，潛勢蒸發散量，實測蒸發散量，生長度日數°C。

ABSTRACT

The definition of evapotranspiration coefficient of crop is the ratio of actual evapotranspiration and potential evapotranspiration. It represents the different evapotranspiration of crop from different growing stages and the climate condition. The curve of evapotranspiration coefficient against growing period will be plotted. The actual evapotranspiration can be computed from potential evapotranspiration times the coefficients during growing stages. It can be used on irrigation systems design, irrigation management etc. which are convenient to predict consumptive use of crop and

easy to manage agriculture in the field.

The basic data of this paper come from experiments in Hsueh-chia experimental Station, Chia-nan Irrigation Association from 1985 to 1988 for four years. It includes theory analysis and the meteorological models to calculate the potential evapotranspiration, the results are listed as below:

1. The evapotranspiration coefficients of corn are 0.78 and 0.75 with Penman equation in Spring and Autumn season respectively.
2. The evapotranspiration coefficients of corn are 0.87 and 0.67 with Hargreave equation in Spring and Autumn season respectively.
3. The average actual evapotranspiration of Spring corn is 407.5mm, but the value of potential evapotranspiration is 4589.8mm during growing 125 days, the average growing degree days temperature is 1865.3°C.
4. The average actual evapotranspiration of Autumn corn is 276.5mm, but the value of potential evapotranspiration is 360.8mm during growing 117 days, the average growing degree days temperature is 1626.7°C.

Keywords : Evapotranspiration coefficient, Potential evapotranspiration, Actual evapotranspiration, Growing degree days temperature °C

前 言

臺灣之農業用水，一向以水稻灌溉為主，因社會、經濟各方面之需求，生活用水及工業用水之需要程度日漸增加。對農業用水而言，受到甚大之壓力。表面上看來因轉作政策水稻種植面積減少，又工業及道路用地增加，農地亦日益減少，應可節省甚多水量供生活及工業用水之用，然農業用水增加了養殖用水及畜牧用水，且水稻轉作非在同一灌溉系統，欲節省農業灌溉用水甚有困難。水稻轉作後如何決定旱作需水量，如何節省水資源為本研究之課題。

臺灣之旱作灌溉用水量之研究在民國50年在臺南之學甲旱作試驗站就開始，其中以作物的需水量做得最多，包括玉米、高粱、大豆、甘藷、花生及旱作水稻等計16種^(1, 5)，其中以玉米的試驗資料最多，乃因玉米為目前之主要飼料。在民國60年前曾試驗春作三次，秋作七次。自民國74年開始再連續在此試驗站做四年的玉米試驗，以求得更精確的玉米需水量⁽³⁾。

民國74年後做精密之玉米需水量試驗，場地在台南嘉南灌區嘉南水利會學甲試驗站，包括試驗田、露天滲透計和自動遮雨棚滲透計，同時種植玉米作需水量試驗。除考慮水平衡的因子外，並在試驗場裝設自動氣象觀測儀，可觀測降雨、蒸發、溫度、風速、濕度、輻射量等項目。

由試驗所求得之需水量雖為同一作物，因時地及各影響需水量之因子不同可得不同數值，尤其是氣象因子之影響，故本文係探討玉米之作物蒸發散係數，亦即試驗所得之蒸發散量值與應用各模式氣象因子所求得之潛勢蒸發散量之比，可代表該作物生長期間之耗水特性之指標，亦為在特定生長期間作物的實測蒸發散量與潛勢蒸發散量之比值。

作物蒸發散係數對各種不同基本因子的關係已有許多前人研究及文獻。Denmead et al.(1959)⁽⁹⁾探討蒸發散係數與作物生長日數之關係、Doorenbos and Kassam,(1979)以作物生長階段與蒸發散係數之研究、Wright,(1982)⁽¹⁵⁾苜蓿收穫收割與收割間的百分比時間與蒸發散係數之關係、Wright and Jensen,(1978)⁽¹⁴⁾從播種到完全覆蓋之時間百分比和完全覆蓋後之日數與蒸發散係數之關係。

* 生長度日數即 $TU=(T_{max}-T_{min})/2-10$ °C 即為作物最適生長最高與最低溫度之平均值。其中10°C為玉米之基本生長溫度，低於10°C，將影響玉米正常生長機能，所以生長度日數（直譯），表示作物生長累積熱量的指標。

另外基於累積的每日平均溫度之熱量單元 (Heat units) 或生長度日數 * (Growing Degree Days) 處理之方式, 可有效的預測不同作物的生長與成長, 如 Lana et al., (1952)⁽¹¹⁾ 發展一個玉米之累積熱量單元曲線。Sammis et al. (1985)⁽¹²⁾ 也應用於苜蓿、玉米、高粱和棉花。

本文為探討玉米之蒸發散係數, 對作物之實測蒸發散量和潛勢蒸發散量得法之研究, 做一相關性之探討, 並應用學甲試驗站自74年至77年間之玉米需水量試驗, 再做進一步之分析, 以探求其合理性, 作為提供農業上灌溉供水之應用及學術理論與應用之參考。

使用材料及研究方法

一、蒸發散之直接觀測法^(4、5):

作物在不同之生長環境、生長過程及生長階段中, 其蒸發散的現象會因大氣氣象之蒸發要求及作物生理上之需求, 隨時在進行與變化, 另外地表土壤之蒸發亦同時進行, 故影響實際作物的蒸發散量可包括: 氣候、土壤、作物品種、生長階段、灌溉及排水等人為措施。

本研究採用水分遞減法來計算田間試驗之水分變化情形, 再以平衡收支計算玉米之實測蒸發散量。

基於試驗田和滲漏計的試驗資料, 利用水平衡方程式的觀念, 可得一個蒸發散模式, 如下:

$$I + R + G - DI - DR - ET = \pm \Delta M \quad (1)$$

I: 灌溉水。

R: 降雨。

G: 地表水供應。此研究假設為零。

DI: 因超灌的深層滲漏。

DR: 因超降雨的深層滲漏。

ET: 蒸發散量。

+ΔM: 灌溉或降雨後的土壤水分增加量。

-ΔM: 因蒸發散的土壤水分之損失量。

±ΔM乃從試驗田和滲透計的土壤水分的變化來計算。DI和DR值可藉由滲透計試驗所測得。但在遮雨棚試驗因無降雨影響, 所以上式變為:

$$I - DI - ET = \pm \Delta M \quad (2)$$

所以蒸發散模式可寫為:

$$ET = I + R - DI - DR \pm \Delta M \quad (3)$$

上式可用於露天滲透計和田間試驗。

$$ET = I - DI \pm \Delta M \quad (4)$$

上式可用於自動遮雨棚試驗。

土壤水分變化 (±ΔM) 乃根據在田間及滲漏計之灌前與灌後、降雨前與降雨後和選定採土時間, 所測得土壤水分含量之增加量或減少量。土壤水分含量之測定乃由田間或滲漏計所採集之10、20、30、40及60cm等不同深度之土樣, 帶回試驗室做24小時之烘乾, 由所計算的土壤烘乾前與烘乾後之重量, 求當時之土壤水分含量。

$$\pm \Delta M = \frac{(W - W_a)}{100} * A_s * D \quad (5)$$

W: 灌後、降雨後或特定時期初期所測定之土壤水分含量。(重量百分比)

W_a: 灌前、降雨前或特定時期末期所測定之土壤水分含量。(重量百分比)

A_s: 假比重。由實測法求得。

D: 有效根層深度。此玉米採40公分之根深。

在75年間因缺乏逕流與深層滲漏的水量量測值, 故考慮以有效雨量來替代該時期之蒸發散量。

$$\pm \Delta M = \frac{(FC - W_a)}{100} * A_s * D \quad (6)$$

FC: 田間容水量(%)。由土壤機械分析所測得。

二、蒸發散之間接觀測法

本文應用學甲早作試驗站之自動氣象觀測儀所測的資料, 包括輻射、溫度、濕度及風速等之資料, 應用微氣象學法所推導之經驗公式來計算玉米之潛勢蒸發量 (Potential Evapotranspiration)。如下列四個經驗式及皿蒸發法。

1. Penman式^(6、7、13、14)

英國之Penman氏於1948年提出結合能量平衡原理及空氣動力論較為完整之混合法。此模式對於大範圍的氣候變化情形皆能適用, 其結果的適用範圍可大至一月, 小至一天。在經後人修正後, 其適用之範圍亦可小至每小時為基準。其修正之Penman式如下:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n + G) + r E_a}{\Delta + r} \quad (7)$$

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n + G) + 15.35 \gamma f(u)(E_a - E_d)}{\Delta + r} \quad (8)$$

- ET : 特種作物之蒸發散量。
 Δ : 飽和蒸氣壓與溫度曲線之斜率。
 γ : 乾濕球常數。
 R_n : 淨輻射量。(ly/day)
 G : 土壤熱傳導率。(一般忽略不計)
 $f(u)$: 風速函數。
 E_a : 平均溫度之飽和蒸氣壓。(mb)
 E_d : 露點溫度之飽和蒸氣壓。(mb)
 λ : 蒸發潛熱。

2. Montith法^(4,7):

Motith(1965)結合對數漩渦擴散函數的使用和遮蓬阻力的觀念應用於Penman-Montith混合方程式中:

$$\lambda ET = \frac{\Delta R_n + \rho C_p (\varepsilon_a - \varepsilon_d) / r_a}{\Delta + r(1 + r_s / r_a)} \quad (9)$$

考慮熱和蒸汽之空氣動力阻力之移轉自葉表面至z高度的量測範圍內, 經推導得下式:

$$r_a = \frac{\left\{ \ln \left(\frac{z-d}{z_{om}} \right) \right\} * \left\{ \ln \left(\frac{z-d}{z_{ov}} \right) \right\}}{k^2 * u_s} \quad (10)$$

- C_p : 空氣比熱。(0.24cal/g⁻¹K)
 r_s : 即在缺水狀態下, 植物控制氣孔以防止水分蒸發之阻力(sec/cm)。在飽和土壤含水量下 $r_s = 0$ 。此設 $r_s = 0.5$ sec/cm。
 r_a : 非飽和狀態下, 土壤水分傳送至土表之阻力。(sec/cm)。
 d : 量測表面的零位移高度。(此設為0 mm)(Zero plane displacement height)即在此高度下無空氣流動。
 z_{om} : 動量傳導粗糙度(Roughness lenght)。(此設為1.37mm)*
 z_{ov} : 因植物水汽和熱移轉的粗糙長度。即蒸氣傳導粗糙度。(此設為1.37mm)*
 z_a : 量測風速的高度。(此為2000mm)

Hargreave經驗公式⁽⁷⁾:

Hargreave於1956年, 依據種植在滲漏計上牧草(Grass)試驗資料, 並以溫度、輻射等氣象因子之經驗公式相互比較, 得到如下之估算參考作物需水量之經驗式, 於拉丁美洲廣泛的使用。

$$ET = 0.0135 (T + 17.78) R_s \quad (11)$$

- T_g : 日均溫。(°C)
 R_s : 全日日射量, 由日射計測得。(ly/day)

4. Jensen & Haise 經驗公式⁽⁷⁾:

Jensen & Haise於1963年, 在美國西部地區, 提出一種線性關係式來估算參考作物(苜蓿)需水量, 頗適合半乾燥、乾燥地域氣候條件的應用。如下式:

$$ET = (0.014 T_a - 0.37) 0.000673 R_s \quad (12)$$

- T_a : 日均溫。(°F)
 R_s : 全日日射量, 由日射計測得。(ly/day)

5.A Pan蒸發皿法⁽²⁾:

利用直徑4呎、高10吋之蒸發皿、皿內水面保持7-8吋深。以此當作該日之參考蒸發散量。

三、玉米蒸發散係數之決定⁽¹⁵⁾

蒸發散係數乃是真實蒸發散量與潛勢蒸發散量之比值。

$$K_c = \frac{ET_a}{ET_r} = \frac{\text{實測蒸發散量}}{\text{參考蒸發散量}} \quad (13)$$

作物係數通常可表示為一種作物考慮的蒸發散量和一種參考作物之蒸發散量之比值。所謂參考作物之蒸散量常以苜蓿或牧草在良好生長之水分來代表, 即生長之葉旺盛, 覆蓋良好, 中間無空隙之謂。在發芽時會有一個最小值, 在依據氣象資料和完全覆蓋時, 苜蓿之比值會趨於1, 牧草會大於1, 然後隨成熟接近而減少。一般而言, 這些係數代表一個田間的平均狀況在一個濕土或乾土表面間, 且在作物根層沒有土壤水分的限制。

四、玉米蒸發散係數與不同尺度因子之關係

1. 玉米蒸發散係數與生長期距的關係: 生長期距乃以作物從播種日期開始為第零天至收成日為最末日之總生長日數, 探討此與蒸發散係數之曲線圖形。
2. 玉米蒸發散係數與生長期距分數的關係: 生長

* 在穩定中性大氣情況下 $Z_{om} = Z_{ov} = Z_{o1} = Z_{om} = Z_{ov} = 1.37$ mm, 係根據penman假設潛勢蒸發散的情況下, 短草之表面粗糙度。

期距分數乃以從播種至某生長期間，與總生長期距之比值為探討之對象。

3. 玉米蒸發散係數與生長度日數的關係：以基於累積的每日平均溫度之熱量單元(Heat Units)⁽⁸⁾處理方式而有效的預測不同作物的生長與成長，此熱量單元又可稱為生長度日數(Growing Degree Days)，可由下式計算求得：

$$TU = [(T_{max} + T_{min}) / 2 - 10] ^\circ C \quad \text{----- (13)}$$

T_{min} ， T_{max} 各為最小和最大的空氣溫度(°C)。每日的熱元值是負值則考慮在累積熱元值為零。

4. 玉米蒸發散係數與生長度日數分數的關係：基本蒸發散曲線已發展成藉由使用量測蒸發散對潛勢蒸發數值，作出合於標準的時間尺度的熱元分數(Fraction of thermal units FTU)⁽⁸⁾。FTU是定義為從發芽至某時期的熱元累積值，除以從發芽到生理成熟(75% Black Layer)的總熱元累積值。

結果與討論

一、玉米蒸發散係數之分析結果

1. 利用各氣象模式，將所需之氣象資料代入之即可得各年、各期作在生長階段之生長度日數及潛勢蒸發散量；在與實測蒸發散量除之，即可得蒸發散係數。如表1至表5所示。
2. 將各期作之作物係數分為春、秋作，其各氣象模式之蒸發散係數與各種尺度因子作迴歸分析及求其相關係數，所得之結果如表6至表10。

二、討論

1. 本研究所做之實測蒸發散量採用土壤水分變化之水收支平衡法，75年之春、秋作因滲透計無滲漏與逕流之資料，故採用試驗田之土壤水分含量變化法。處理別之選擇，以產量最高之處理為優先，故取C處理之二次灌溉。
2. 在求以收支平衡法之實測蒸發散量時，因考慮之土壤水分含量變化時，所求出之值可能為負值，如在大量降雨後，水分未能充分完成重力之排水，其土壤水分含量可能高於田間容水量，故在計算時，利用以一定之天數，如七天，為計算之依據，作為此定時期之實測蒸發散量值。
3. 由表1至表5知，75年春、秋作之平均實測蒸發

散量分別為2.24及1.73，76年春、秋之平均實測蒸發散量分別為4.05及2.87，77年春作則為3.81，75年較低的原因可能量因無滲漏資料而採用有效水分之計算。將其分成個別之春、秋作之實測蒸發散量，分別為3.26與2.36，可知春作之實測蒸發散量大於秋作之實測蒸發散量，由學甲之月平均氣象資料可得應證。

4. 由表1至表5知，Montieth式所得之潛勢蒸發散量有最小之值，故所求得之蒸發散係數均較高，探求其原因可能是Montieth式中所代入之係數均為文獻所推薦，其在此研究之適用性有待進一步研究。Jensen & Haise式之潛勢蒸發散量有較高之值，此為輻射法之一種，發展於美國西部之乾燥氣候，故求得之蒸發散係數為偏低。而Penman式與A型蒸發皿所求得之則大致接近。Hargreave式所求得之值亦稍高。
5. 由表6至表10可看出，各不同潛勢蒸發散量之蒸發散係數，對不同之尺度因子，結果顯示，以吸收熱量為依據之生長度日數和生長度日數分數之相關係數均大於以日期為依據的生長期距和生長期距分數，此與外國文獻之結論相同；故可知，在預測蒸發散係數時以熱量之吸收程度來估算之可靠性較高。
7. 由表6及10迴歸方程式及相關係數，可知秋作之相關係數比春作之相關係數為高，可能與所取的個數較少有關係。
8. 由表11知以Hargreave式及Penman式之相關值分別為0.65與0.61，為較高之相關值。
9. 表13是由各期作所計算出個別之生長日數、生長度日數、總實測蒸發散量與總潛勢蒸發散量與其蒸發散係數。其中玉米之生長度日數是依據生長期間所吸收之熱量之總和，以°C表示之。總實測蒸發散量(ΣET)是以總生長期距內，個別算出不同時間間距之真實蒸發散量之總和。故知春作玉米之平均生長期距約為125天；平均生長度日數約為1865.3°C；平均總實測蒸發散量約為407.5mm；平均總參考蒸發散量約為459.8mm。
10. 玉米秋作平均生長期距約為117天；平均生長度日數約為1626.7°C；平均總實測蒸發散量約為276.5mm；平均總潛勢蒸發散量約為360.8mm。

11. 玉米之生長期距，春作日數大於秋作日數，生長度日數、總實測蒸發散量及總潛勢蒸發散量亦是如此，此可由各期別之氣象資料看出其原因。

12. 經Penman式之分析，春作玉米全期之蒸發散係數為0.78；秋作玉米全期之蒸發散係數為0.75。如表12。

13. 經Hargreave式之分析，春作玉米全期之蒸發散係數為0.87；秋作玉米全期之蒸發散係數為0.67。如表14。

結 論

本研究利用學甲試驗站之玉米需水量資料，利用五種氣象模式，由前文分析結果可得以下結論：

(1) 由各氣象模式對不同尺度因子之相關分析得知，以生長度日數為考慮因子之相關係數值得較高的值，此法所代入之數據，雖非全部由氣象資料中觀測所得，但以吸收熱量為依據所得之蒸

發散係數仍甚有參考係值。又以Hargreave式及Penman式之平均相關係數較高。故可知之由理論推導而來之Penman，其發展背景與台灣之海島型氣候類似，其有較好之適用性。

(2) 以玉米之生長期距為120天計算，將玉米之生長階段分為生長期前、後段與成熟期前、後段，故春作分別為2、3、4及5月；秋作分別為10、11、12及1月。春作之蒸發散係數分別為0.54、0.95、1.11及0.84，全期之蒸發散係數為0.78；秋作之各生長階段之蒸發散係數分別為0.36、0.74、1.04及0.87，全期之蒸發散係數為0.75。其春、秋作之作物蒸發散曲線如圖1及圖2所示。

(3) 玉米春作平均生長期距約為125天；平均生長度日數約為1865.3°C；平均總實蒸發散量約為407.5mm；平均總潛勢蒸發散量約為459.8mm。

(4) 玉米秋作平均生長期距約為117天；平均生長度日數約為1626.7°C；平均總實蒸發散量約為276.5mm；平均總潛勢蒸發散量約為360.8mm。

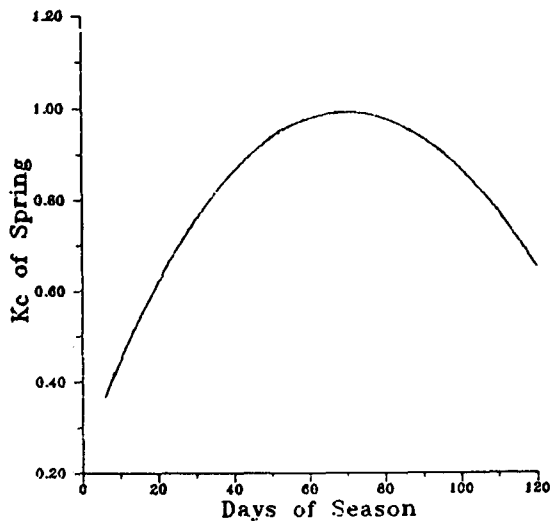


圖 1 玉米春作之作物蒸發散係數曲線

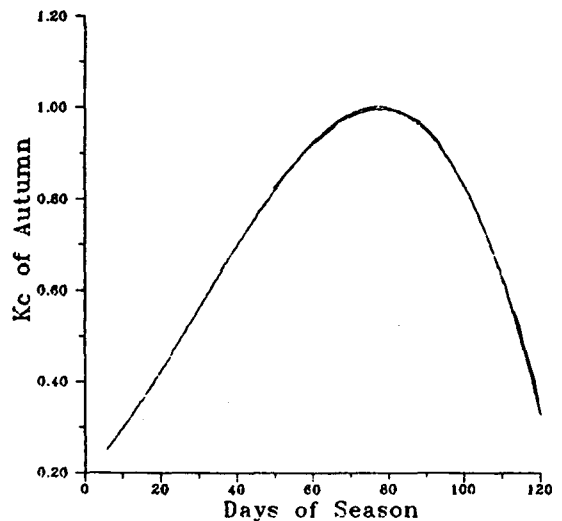


圖 2 玉米秋作之作物蒸發散係數曲線

表1 75年春作玉米之生長期距、生長度日數、實測蒸發量及各氣象模式之潛勢蒸發量、蒸發散係數

生長 期距	生長度 日數	實測蒸 發散量	Penman ET(mm)	Penman Kc	Mont. ET(mm)	Mont. Kc	Harg. ET(mm)	Harg. Kc	J&H ET(mm)	J&H Kc	A Pan ET(mm)	A Pan Kc
7	49.7	3.317	15.652	0.21	8.583	0.39	14.37	0.23	12.71	0.26	0
14	75.0	5.834	15.034	0.39	8.142	0.72	13.42	0.43	11.30	0.52	12.15
28	182.9	8.694	27.850	0.31	17.695	0.49	29.20	0.30	29.89	0.29	29.72	0.94
35	260.1	24.939	15.248	1.63	8.865	2.81	14.37	1.73	14.42	1.73	18.84	0.81
42	353.4	21.621	25.217	0.86	15.898	1.36	28.97	0.75	26.01	0.83	30.16	0.84
49	445.4	13.459	17.089	0.79	11.772	1.14	18.20	0.74	18.29	0.74	18.49	0.92
56	568.0	21.164	34.601	0.61	21.792	0.97	34.67	0.61	36.18	0.58	36.67	0.94
63	695.6	26.655	36.232	0.74	24.214	1.10	38.58	0.69	40.53	0.66	38.40	0.94
70	827.7	11.554	33.771	0.34	23.425	0.49	36.81	0.31	39.06	0.30	33.70	1.00
77	954.8	7.396	37.741	0.20	22.967	0.32	37.06	0.20	38.94	0.19	42.30	0.89
84	1082.5	23.680	29.165	0.81	19.202	1.23	29.12	0.81	31.76	0.75	25.47	1.15
91	1213.1	46.560	27.204	1.71	19.931	2.34	30.86	1.51	32.61	1.43	28.88	0.94
98	1329.9	8.351	17.277	0.48	12.716	0.66	19.26	0.43	20.00	0.42	10.11	1.71
105	1455.9	5.033	25.232	0.20	20.056	0.25	30.52	0.16	32.13	0.16	21.43	1.18
112	1574.9	15.558	17.227	0.90	13.776	1.13	20.70	0.75	21.64	0.72	16.51	1.04
121	1760.5	27.341	41.422	0.66	30.919	0.88	47.14	0.58	50.55	0.54	41.91	0.99

表2 75年春作玉米之生長期距、生長度日數、實測蒸發散量及各氣象模式之潛勢蒸發散量、蒸發散係數

生長 期距	生長度 日數	實測蒸 發散量	Penman ET(mm)	Penman Kc	Mont. ET(mm)	Mont. Kc	Harg. ET(mm)	Harg. Kc	J&H ET(mm)	J&H Kc	A Pan ET(mm)	A Pan Kc
7	137.5	4.576	34.144	0.13	23.933	0.19	39.693	0.12	41.331	0.11	36.690	0.88
14	258.9	2.860	25.550	0.11	17.373	0.16	28.708	0.10	29.908	0.10	29.160	0.88
21	383.8	5.720	22.699	0.25	16.957	0.34	27.433	0.21	28.766	0.20	26.180	0.87
28	510.8	9.782	24.651	0.40	18.595	0.53	30.832	0.32	29.364	0.33	27.940	0.88
35	618.9	24.596	24.203	1.02	16.257	1.51	27.428	0.90	28.060	0.88	30.840	0.78
42	723.6	18.304	23.994	0.76	14.113	1.30	25.154	0.73	25.626	0.71	26.820	0.89
49	819.9	18.020	13.727	1.31	10.427	1.73	18.090	1.00	18.394	0.98	11.400	1.20
56	917.7	2.984	17.292	0.75	11.087	1.17	19.353	0.67	19.451	0.67	11.350	1.52
63	998.1	12.584	23.331	0.54	13.220	0.95	24.467	0.51	23.794	0.53	17.700	1.32
70	1073.8	15.444	17.398	0.89	9.301	1.66	18.506	0.83	17.795	0.87	16.570	1.05
77	1148.7	18.304	18.380	1.00	11.211	1.63	33.779	0.80	21.899	0.84	15.960	1.15
83	1208.0	10.828	15.749	0.69	9.254	1.17	18.418	0.59	17.415	0.62	20.100	0.78
84	1215.8	7.436	2.572	2.89	1.381	5.38	2.838	2.62	2.597	2.86	2.560	1.00
89	1268.4	6.864	10.371	0.66	5.352	1.28	10.585	0.65	10.152	0.68	10.130	1.02
91	1283.2	7.436	5.583	1.33	3.022	2.46	6.387	1.16	5.802	1.28	5.720	0.98
98	1357.3	10.868	15.482	0.70	9.142	1.19	17.850	0.61	17.124	0.63	12.800	1.21
105	1424.6	9.724	21.193	0.46	12.359	0.79	23.941	0.41	22.606	0.43	20.120	1.25
119	1536.4	8.008	38.711	0.21	21.493	0.37	42.295	0.19	38.983	0.21	37.330	1.04
126	1593.3	12.584	22.645	0.56	13.325	0.94	25.142	0.50	23.153	0.54	20.720	1.09
129	1610.2	8.720	11.495	0.50	6.068	0.94	10.435	0.55	9.131	0.63	10.970	1.05

表3 75年春作玉米之生長期距、生長度日數、實測蒸發散量及各氣象模式之潛勢蒸發散量、蒸發散係數

生長 期距	生長度 日 數	實測蒸 發散量	Penman ET(mm)	Penman Kc	Mont. ET(mm)	Mont. Kc	Harg. ET(mm)	Harg. Kc	J&H ET(mm)	J&H Kc	A Pan ET(mm)	A Pan Kc
5	67.3	4.013	22.342	0.18	13.861	0.29	23.267	0.17	22.538	0.18	23.000	0.97
12	126.1	6.634	22.040	0.30	13.373	0.50	22.568	0.29	21.107	0.31	27.700	0.89
20	245.5	17.632	33.814	0.52	21.232	0.83	35.262	0.50	35.786	0.49	28.200	1.20
28	357.0	5.586	24.973	0.23	17.328	0.34	28.293	0.21	28.732	0.20	28.027	0.89
36	464.5	90.662	25.831	0.64	18.760	0.88	30.312	0.55	30.604	0.54	30.620	0.84
41	532.2	15.930	17.912	0.89	13.411	1.19	21.669	0.73	21.671	0.73	17.400	1.03
48	630.7	12.646	24.722	0.51	18.187	0.70	28.408	0.44	28.598	0.44	22.340	1.11
56	735.2	11.552	27.118	0.43	19.060	0.61	29.931	0.39	30.436	0.38	30.350	0.89
61	804.4	32.589	22.173	1.47	16.746	1.95	26.594	1.23	26.669	1.22	21.180	1.05
65	879.9	19.142	14.862	1.29	11.161	1.71	17.371	1.10	18.368	1.04	14.180	1.05
68	936.9	9.972	13.938	0.72	9.425	1.06	15.004	0.66	15.848	0.63	17.940	0.78
75	1052.9	17.070	28.638	0.60	22.281	0.77	35.023	0.49	36.429	0.47	29.820	0.96
82	1174.2	30.643	31.747	0.97	25.358	1.21	39.398	0.78	41.108	0.75	31.870	1.00
86	1248.9	31.130	21.361	1.46	17.265	1.80	26.937	1.16	28.416	1.10	18.800	1.14
97	1451.8	37.542	30.637	1.23	0.000	40.601	0.92	43.222	0.87	15.780	1.94
104	1590.4	21.523	31.309	0.69	14.993	1.44	40.915	0.53	43.608	0.49	39.300	0.80
111	1728.7	21.947	25.632	0.86	20.971	1.05	31.395	0.70	33.483	0.66	33.210	0.77
117	1849.1	19.942	29.874	0.67	26.104	0.76	39.110	0.51	41.722	0.48	37.130	0.80
124	1995.4	17.938	30.286	0.59	24.412	0.73	36.589	0.49	39.382	0.46	36.200	0.84

表4 76年春作玉米之生長期距、生長度日數、實測蒸發散量及各氣象模式之潛勢蒸發散量、蒸發散係數

生長 期距	生長度 日數	實測蒸 發散量	Penman ET(mm)	Penman Kc	Mont. ET(mm)	Mont. Kc	Harg. ET(mm)	Harg. Kc	J&H ET(mm)	J&H Kc	A Pan ET(mm)	A Pan Kc
3	72.9	5.107	15.946	0.32	11.537	0.44	18.625	0.27	19.603	0.26	16.0	0.99
9	173.5	12.525	17.194	0.73	13.453	0.93	22.331	0.56	22.245	0.56	22.4	0.77
17	320.3	21.158	31.435	0.67	23.141	0.91	38.247	0.55	40.241	0.53	33.8	0.93
24	458.7	6.201	27.520	0.23	20.885	0.30	34.582	0.18	36.848	0.17	33.6	0.82
31	593.5	29.220	25.065	1.17	19.273	1.52	32.073	0.91	34.023	0.86	26.6	0.94
38	705.2	24.877	20.866	1.19	14.081	1.77	23.248	1.07	24.065	1.03	25.2	0.83
45	827.9	17.753	21.641	0.82	16.913	1.05	27.968	0.63	29.216	0.61	22.2	0.97
52	936.0	32.220	23.901	1.35	14.739	2.19	26.378	1.22	26.937	1.20	25.7	0.93
59	1044.2	23.277	19.272	1.21	13.614	1.71	23.798	0.98	24.343	0.96	15.1	1.27
66	1151.3	19.212	17.874	1.07	11.576	1.66	20.244	0.95	20.680	0.93	17.7	1.01
73	1237.8	17.290	15.757	1.10	9.297	1.86	16.437	1.05	16.361	1.06	15.0	1.05
80	1291.7	35.433	20.463	1.73	9.370	3.78	19.404	1.83	17.706	2.00	27.6	0.74
91	1393.4	36.781	26.432	0.95	14.853	1.68	30.103	0.83	28.421	0.88	28.2	0.94
94	1418.5	11.101	6.727	1.65	2.788	3.98	5.594	1.98	5.171	2.15	7.8	0.86
101	1495.2	19.091	15.156	1.26	9.015	2.12	18.868	1.01	18.189	1.05	10.4	1.46
107	1568.1	7.743	15.411	0.50	6.665	1.16	14.071	0.55	13.837	0.56	12.1	7.24
115	1643.0	11.355	19.824	0.57	11.263	1.01	21.079	0.54	19.857	0.57	19.5	1.02

表5 77年春作玉米之生長期距、生長度日數、實測蒸發散量及各氣象模式之潛勢蒸發散量、蒸發散係數

生長 期距	生長度 日數	實測蒸 發散量	Penman ET(mm)	Penman Kc	Mont. ET(mm)	Mont. Kc	Harg. ET(mm)	Harg. Kc	J&H ET(mm)	J&H Kc	A Pan ET(mm)	A Pan Kc
6	75.5	10.822	20.413	0.53	14.203	0.77	23.613	0.46	22.725	0.48	24.29	0.84
13	116.3	5.443	14.797	0.37	8.221	0.66	13.324	0.41	11.937	0.46	22.30	0.66
20	205.7	1.337	26.443	0.05	17.348	0.08	28.727	0.05	28.835	0.05	28.94	0.91
27	294.2	7.900	23.729	0.33	16.916	0.47	27.385	0.29	27.117	0.29	31.42	0.76
34	384.6	30.300	29.122	1.04	18.696	1.62	30.747	0.99	30.471	1.00	32.54	0.89
42	462.0	19.819	18.311	1.08	12.400	1.60	19.741	1.00	19.095	1.04	21.20	0.86
48	533.1	26.866	19.317	1.39	13.652	1.97	21.775	1.23	21.574	1.25	26.60	0.73
55	627.9	17.560	22.177	0.79	15.150	1.16	24.000	0.73	24.129	0.73	27.12	0.82
62	732.0	27.833	21.146	1.32	14.774	1.88	23.456	1.19	24.017	1.16	25.34	0.83
69	855.8	31.550	25.591	1.23	19.481	1.62	30.799	1.02	32.240	0.98	28.08	0.91
76	1000.7	34.777	34.045	1.02	25.244	1.38	39.530	0.88	42.374	0.82	35.63	0.96
83	1132.6	27.254	33.867	0.80	25.340	1.08	39.274	0.69	41.539	0.66	35.29	0.96
91	1278.9	40.595	24.485	1.67	17.492	2.34	26.864	1.52	28.525	1.43	35.20	0.70
97	1401.8	34.992	30.833	1.13	23.218	1.51	35.719	0.98	38.258	0.91	32.43	0.95
104	1528.3	40.759	27.365	1.27	20.360	1.71	33.069	1.05	30.674	1.14	38.60	0.71
111	1680.4	32.303	40.099	0.81	27.952	1.16	39.285	0.82	46.838	0.69	44.94	0.89
118	1840.1	57.320	45.462	0.66	31.188	0.96	50.476	0.59	52.870	0.56	49.64	0.92

表6 玉米之Penman式Kc之相關值

			Kc 迴歸方程式	個數	相關係數
生長期 距	春秋		$0.138+0.0201D-0.000133356D^2$	36	0.7136
			$0.163+0.0240D-0.0001777D^2$	32	0.6423
生長期 距分數	春秋		$0.201+2.1055FD-1.66055FD^2$	33	0.6732
			$-0.0.1+3.6661FD-3.23905FD^2$	32	0.7043
生長度 日數	春秋		$0.269+0.00106G-2.56E-7G^2 -1.01E-10G^3$	30	0.7428
			$0.130+0.00100G+5.51E-7G^2 -6.45E-10G^3$	33	0.6625
生長度 日數分數	春秋		$0.239+2.6746FD-2.54360FG^2 +0.27948FG^3$	30	0.7291
			$0.193+1.0741FG+2.46600FG^2 -3.40662FG^3$	29	0.6825

表7 玉米之Montieth式Kc之相關值

			迴歸方程式	個數	相關係數
生長期 距	春秋		$0.291+0.0208D-0.000134D^2$	29	0.7691
			$0.221+0.0231D-0.0001467D^2$	21	0.6941
生長期 距分數	春秋		$0.346+2.3296FD-1.79126FD^2$	27	0.6676
			$0.0935+2.9966FD-2.27079FD^2$	18	0.6831
生長度 日數	春秋		$0.293+0.00132G-6.94E-7G^2 -8.29E-11G^3$	29	0.6597
			$0.195+0.00062G+9.74E-7G^2 -6.83E-10G^3$	20	0.7527
生長度 日數分數	春秋		$0.263+3.1650FG-4.09070FG^2 +1.48742FG^3$	20	0.6769
			$0.259+0.2485FG+4.59250FG^2 -4.40884FG^3$	17	0.7510

表8 玉米之Hargreave式Kc之相關值

			迴歸方程式	個數	相關係數
生長期 距	春秋		$0.135+0.0208D-0.0001459D^2$	35	0.7565
			$0.1123+0.0241D-0.0001552D^2$	33	0.6707
生長期 距分數	春秋		$0.120+2.5466FD-2.11359FD^2$	34	0.6585
			$0.0508+2.7839FD-2.42175FD^2$	30	0.6784
生長度 日數	春秋		$0.167+0.00137G-4.74E-7G^2 -8.01E-10G^3$	44	0.7044
			$0.102+0.00089G+3.38E-7G^2 -4.63E-10G^3$	34	0.6620
生長度 日數分數	春秋		$0.209+2.0713FG-0.53040FG^2 +2.42452FG^3$	32	0.7644
			$0.162+0.8053FG+2.31081FG^2 -2.87545FG^3$	30	0.6740

表9 玉米之Jensen & Haise 式Kc之相關值

		迴歸方程式	個數	相關係數
生 長 期 距	春	$0.224+0.0185D-0.000136D^2$	35	0.7113
	秋	$0.067+0.0230D-0.0001612D^2$	33	0.6893
生 長 期 距 分 數	春	$0.183+2.6118FD-2.39900FD^2$	30	0.7427
	秋	$0.0281+2.8283FD-2.39840FD^2$	31	0.6974
生 長 度 日 數	春	$0.222+0.00147G-8.18E-7G^2 +7.19E-11G^3$	38	0.7182
	秋	$0.140+0.00055G+8.23E-7G^2 -6.39E-10G^3$	34	0.6842
生 長 度 日 數 分 數	春	$0.214+2.7748FG-1.98300FG^2 +0.60820FG^3$	29	0.7182
	秋	$0.141+0.8632FG+2.39678FG^2 -2.98449FG^3$	30	0.6857

表10 玉米之A Pan Evapotranspiration 式Kc之相關值

		迴歸方程式	個數	相關係數
生 長 期 距	春	$0.842+0.00237D-0.0000116D^2$	42	0.1850
	秋	$0.016+0.0047D-0.000021D^2$	34	0.4229
生 長 期 距 分 數	春	$0.922+0.5269FD-0.00053FD^2$	37	0.0230
	秋	$0.0331+0.6173FD-0.27646FD^2$	33	0.3791
生 長 度 日 數	春	$0.944+0.00024G-4.04E-7G^2 -1.64E-10G^3$	49	0.2376
	秋	$0.868+0.000038G+3.32E-7G^2 -1.43E-10G^3$	35	0.4149
生 長 度 日 數 分 數	春	$0.322+1.3301FG-1.44969FG^2 +2.45953FG^3$	39	0.5539
	秋	$0.899+0.4710FG+2.08520FG^2 -1.49198FG^3$	31	0.4930

表11 各氣象模式對不同尺度因子之相關係數

	Penman	Mont.	Harg.	J&H	A Pan
生 長 期 距	0.6110	0.6352	0.5888	0.5754	0.3342
生 長 期 距	0.6105	0.6345	0.5888	0.5845	0.4060
生 長 度 日 數	0.6133	0.6972	0.6082	0.5952	0.4627
生 長 度 日 數 分 數	0.5964	0.6465	0.5596	0.5668	0.4627
平 均	0.6078	0.5863	0.6534	0.5845	0.4164

表12 本文研究之Penman式之Kc值

栽培時期	月 別								
	1	3	4	5	6	10	11	12	全期
75年春作		0.49	0.72	0.78	0.69				0.68
76年春作		0.38	0.77	0.86	0.45				0.75
77年春作		0.57	1.07	1.26	1.04				0.92
春 作		0.54	0.95	1.11	0.84				0.78
75年秋作	0.27					0.20	0.67	0.75	0.68
76年秋作	1.23					0.49	0.85	1.31	0.88
秋 作	0.87					0.36	0.74	1.04	0.75

表13 玉米各期別之相關值

	生長 期 距 (日)	生長 期 距 (°C)	總 ETa (mm)	總 ETd (mm) Penman	總 ETd (mm) Mont.	總 ETd (mm) Harg.
75年春作	121	1760.5	271.1	442.9	299.2	475.8
76年春作	129	1995.4	501.9	479.2	323.9	568.6
77年春作	124	1840.1	449.5	457.2	321.6	507.8
春 作	125	1865.3	407.5	459.8	314.9	517.4
75年秋作	115	1610.2	222.6	381.1	237.3	429.7
76年秋作	118	1643.2	330.4	340.5	222.5	393.1
秋 作	117	1627.7	276.5	360.8	229.9	411.4

表14 本文研究之Hargreave式之Kc值

栽培時期	月 別								
	1	3	4	5	6	10	11	12	全期
春 作		0.47	0.92	1.12	0.80				0.87
秋 作	0.71					0.29	0.64	0.87	0.67

八、參考文獻

1. 台灣大學農工系、嘉南農田水利會、農工中心 1976, "學甲旱作灌溉試驗總報告"。
2. 施嘉昌、徐玉標、曹以松、甘俊二 1984, "灌溉排水原理" 修定版中央圖書。
3. 農業工程研究中心 "玉米不同灌溉處理效果及需水量試驗研究" 1986-1988三年報告, 共三期。
4. 黃振昌、施嘉昌 1987, "作物需水量與氣象因子相關理論分析之研究" 中國農業工程學報, 33(2): 1-27。
5. 施嘉昌 1989, "玉米灌溉用水量之研究" 台灣水利 37卷4期。
6. 黃振昌 1986, "作物需水量與氣象因子相關理論分析之研究" 碩士論文。
7. 張本初 1990, "作物需水量最佳模式之探討" 碩士論文。
8. Cross, H. Z. and M. S. Zuber, 1972 "Prediction of Flowering Dates in Maize Based on Different Methods of Estimation Thermal Units" Agron. J. 351-355.
9. Denmead, O. T. and R. H. Shaw, 1959. "Evapotranspiration in Relation to the Development of the Corn Crop" Agron. J. 51:725-726.
10. Doorenbos, J. and A. H. Kassam. 1979 "Field Response to Water" FAO Irrigation and Drainage Paper 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
11. Lana, E.P., and E.J. Haber. 1952 "Seasonal Variability as Indicated by Cumulative Degree Hours with Sweet Corn" Proc. Amer. Soc. Hot. Sci. 59:389-392.
12. Sammis, T. W. C. L. Mapel, D. G. Lugg, R. R. Lansford, and Mcguckin, J. T. 1985 "Evapotranspiration Crop Coefficients Predicted using Growing-Degree-Days" TRANS, of the ASAE 28(3):773-780.
13. Shih, Charles C. C. 1990 "A One Dimension Evapotranspiration for Corn in Taiwan" Asia-Pacific Regional Conference on Engineering of Agriculture.
14. Wright, J. L. M. E. Jensen, 1978 "Development and Evaluation of Evapotranspiration Models for Irrigation Scheduling" Transactions of the ASAE, 21(1):88-96.
15. Wright, J. L. 1982 "New Evapotranspiration Crop Coefficient" J. Irrig. and Drain. ASCE 108(1):57-74.

收稿日期：民國82年10月19日

修正日期：民國82年11月3日

接受日期：民國82年11月6日