

# 專論

## 作物需水量與氣象因子相關 理論分析之研究

Study on Water Consumptive Use of Crops Related  
to Theoretical Analysis on the Factors of Meteorology

國立臺灣大學農業工程研究所教授

臺灣省農田水利會聯合會約聘技術員

施 嘉 昌

黃 振 昌

Charles C.C. Shih

Jenn-Chang Hwang

### 摘要

作物需水量是水資源規劃、利用之重要參數而且也是農業灌溉計劃研擬、營運管理的基本資料，利用氣象資料來估算作物需水量非但可靠且甚快速，可取代經年累月實地之直接試驗，現為農業先進國家廣泛之重視與採用。

過去國內對作物需水量之研究，均引用國外地域色彩濃厚之經驗公式估算、分析，不僅估算式之背景條件不符合、且對整個蒸發散過程描述因子過於簡單，亦失却基本之立足點，如能以物理觀點，合理估算作物需水量，實有加以探討之必要。

本文集農業氣象、灌溉、作物觀點於一體，以理論觀點及應用數理統計方法予以分析，確立國內之下列各參數及算式：

#### 一、風速函數地域性參數

$$E_a = (0.2 + 0.00146U_2)(E_s - E_d)$$

#### 二、日射——日照相關之地域性參數

$$R_a = R_s(0.2 + 0.43(\frac{N}{\bar{N}}))$$

#### 三、實用且客觀之生長度日數分析作物係數

#### 四、作物需水量之理論分析估算式

$$ET_0 = \frac{\Delta}{\Delta + r} \frac{R_N - S}{\lambda} + \frac{r}{\Delta + r} E_a$$

並以嘉南農田水利會學甲旱作試驗站1985年秋作玉米試驗成果相驗證。以上結論可供從事作物需水量估算上的參考。

### Abstract

Water consumptive use of crops is one of the important parameters not only in utilizing and planning water resources but also in management and operating agricultural irrigation project. Using climatological-

data methods may be rapid and reliable than the method of actual direct measuring in the field. The formulas of considering climatological factors are extensively applied in the advanced agriculture countries during recent 20-30 years.

Estimating of evapotranspiration in Taiwan has been adopted empirical formulas which from foreign local conditions for analizing. It is not only to ignore the full application of the actual local meteorological factors but also describing the evapotranspiration process simply. It may be lost the basic conceptions for analizing evapotranspirations. It is necessary for further discussions as far as the physical conceptions for analizing evapotranspiration is concerned.

This study is to consider agricultural meteorology, irrigation and crops physiology as a whole using mathematical statistics approach for analysis to establish the parameters and formulas as below:

1. local parameter of wind function

$$E_a = (0.2 + 0.00146U_2)(E_s - E_d)$$

2. local parameter of radiation--duration relationships

$$R_s = R_a [0.2 + 0.43(\frac{n}{N})]$$

3. crop's coefficient with growing-degree-days method

4. estimated formula of consumptive use

$$ET_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_N - S}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a$$

This study also prove the results with the autumn-corn data obtained from upland irrigation experiments at Hsueh-Chia Station in Chia-nan Area in 1985. The results can be used for estimating evapotranspiration in Taiwan.

## 一、緒 言

早期作物需水量之研究，乃在各種不同物理性，氣候性等變因情況下，經年累月於廣大面積下從事直接之田間試驗觀測，所投入之時間、金錢、人力相當可觀，而且，亦難於短期內獲得較具有適用性之資料為灌溉計劃及設計等所需。

因此，作物需水量與各氣象因子相關性之間接經驗估算式，二、三十年來，由於不少專家學者不遺餘力之研究與努力，先後發表甚多便捷，可靠之推估式，取代早期的直接量測方式。利用氣象資料，以為作需水量之估算依據，尤其於區域性之水資源規劃，或灌溉計劃之研擬，於某一信賴範圍內，更提供水文學家、農業工程師快速，可靠之估算能力，為農業先進國家廣泛的應用與重視。

影響作物需水量之氣象因子多而複雜，其關係

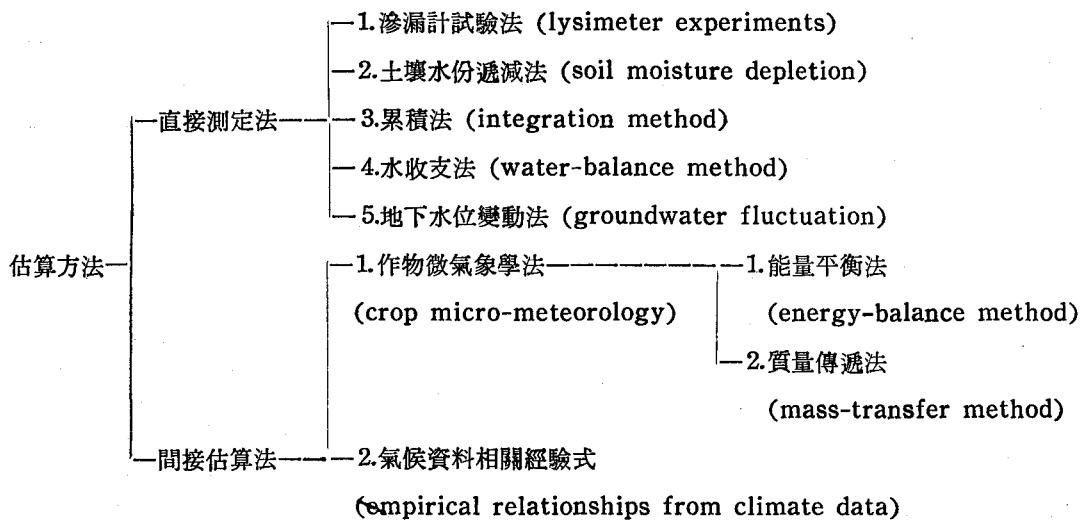
有單獨性，亦有綜合性。依據 Jensen (1974)<sup>(25)</sup>指出：『作物需水量估算之精確度，主要為，決定於推估計算式描述蒸發散過程其物理意義之能力暨氣候及作物之基本資料』；Wartena (1974)<sup>(35)</sup>亦曾建議推估模式須盡可能包含所影響之氣象因子及以合理的物理觀點表之，換言之，合理之作物需水量分析是基於物理意義之演繹而儘可能涵蓋其所影響之因子方能趨於對整個複雜之蒸發散過程描述之完善，進而提高推估計算式之精確度。

鑑於國內以往作物需水量之研究<sup>(1,4,10)</sup>，均援引國外地域色彩濃厚之 Blaney-Criddle 法或 Thornthwaite 法之經驗估算式分析，雖便於國內使用，然而探究該二式立地背景條件，一為美國西部乾燥地區所發展，另一為適合美國東部濕潤地區之條件，兩者皆不符合國內氣候因子，而且，在諸多影響因子中，掌握過於簡單，有失準確性，亦失

理論之立足點。陳氏等 (1967)<sup>(2)</sup> 雖曾應用 Penman 之混合法 (Combination Approach) 估算國內各作物之蒸發散量，但並未對該法中內函之地域性參數，視國內氣候條件予以校正，因此，以物理觀點合理之立論根據估算作物需水量，實有加以探討之必要。

本文集農業氣象、灌溉、作物觀點於一體，以理論觀點及應用數理統計予以分析，確立國內之下列各參數及算式：

- 一、風速函數地域性參數
- 二、日射——日照相關之地域性參數
- 三、客觀之生長度日數分析作物係數



### 1. 直接測定法

以上五種需水量直接測定法，滲漏計試驗法與土壤水分遞減法可測定某田區與某作物之需水量值，如二者同時並用可求得自地下水位毛管補給之水量。累積法與水收支法係觀測某地區綜合之需水量方法，如能與第一法或第二法並用，亦可求得個別作物之需水量。地下水位變動法為在上列二類之間求需水量之方法，如在觀測地下水位地區種植單一作物，亦可得該作物之需水量。

### 2. 間接估算法

- (1)作物微氣象學法  
(crop micro-meteorology)<sup>(6)</sup>

作物微氣象學為農業科技之一分枝，至今發展不過25~30年，是一門應用氣候學理論來探討、分析作物環境與天候關係之科學，利用能量平衡法 (energy-balance method) 與質量傳遞法 (

### 四、作物需水量之理論分析估算式

並以嘉南農田水利會學甲旱作試驗站1985年秋作玉米試驗成果與理論估算式及各估算式相驗證比較，期以探求理論分析之混合法在農業灌溉配水基準、水源規劃上之實用價值，並可藉本文之研究方式，成果充份發展，以提供諸多其它作物需水量，一種有理論依據、合理之物理觀點、可靠之估算方式，作為將來臺灣估算作物需水量之參考。

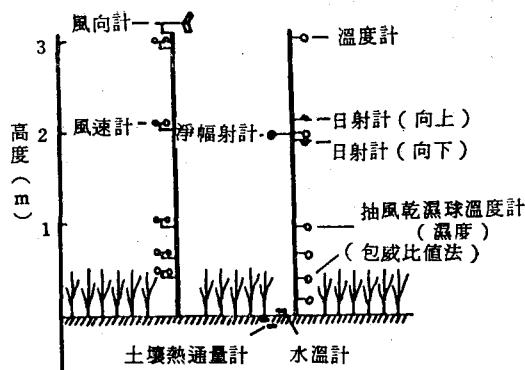
### 二、作物需水量之測算方法

作物需水量之測算，分直接測定及間接估算，至今發展而應用的方法，大致可概分如下：

- 1.滲漏計試驗法 (lysimeter experiments)
- 2.土壤水份遞減法 (soil moisture depletion)
- 3.累積法 (integration method)
- 4.水收支法 (water-balance method)
- 5.地下水位變動法 (groundwater fluctuation)
- 1.作物微氣象學法 (crop micro-meteorology)
  - 1.能量平衡法 (energy-balance method)
  - 2.質量傳遞法 (mass-transfer method)
- 2.氣候資料相關經驗式 (empirical relationships from climate data)

mass-transfer method) 的觀點，探討作物葉冠內部及上方各種氣象因素之剖面變化，可分析作物與大氣間各種實體 (entities) 的傳輸，而予以提供作物生育之最適物理條件，再以人為方式提供作物較為理想之生長環境。

微氣象觀測之主要項目包括輻射 (長波及短波)、溫度、濕度、風速等。由於偏重局部變化或特殊研究目的，根據需要，在田間做多點或密集的觀測，使用感應器 (sensor) 數目如多，則所得剖面資料亦多，分析探討其剖面變化亦較精確、完整。它是多採用遙測 (remote sensing) 方式，以資料蒐集器 (datalogger) 或微處理機來處理所觀測的資料。同時，配合特殊之研究需求 (如欲分析某種作物之光合作用時 CO<sub>2</sub> 之剖面變化，以進一步探討其生理過程)，觀測項目、感應器數目、架設位置就依應用之目的而異。如圖一，楊氏<sup>(6)</sup> 在



圖一 水稻田微氣象剖面觀測各感應器之架設

資料來源：參考文獻<sup>(6)</sup>

水稻田微氣象剖面觀測各感應器之架設情形，說明以能量平衡法及質量傳遞法來測定水稻葉冠與大氣之間各種實體垂直輸送的通量。

## (2) 氣候資料相關經驗式

### (empirical relationships from climate data)

作物之生長與低層大氣之各種氣象因子關係至為密切，由表一可知，影響作物需水量之氣象因子有日照、氣溫、濕度、飽和差、風速等，也因此常為專家學者依據此等因子來估算作物蒸發散量之取捨因子，或取一、或取二、或取三等等，累積多年試驗經驗，發展出間接估算之經驗公式，大致之分類如下：

甲、溫度法 (temperature method)：如 Blaney-Criddle (1945, 1950, 1970)<sup>(25)</sup>, Thornthwaite (1948)<sup>(25)</sup> 等。

Blaney-Criddle<sup>(25)</sup> 於1945年提出而於1950, 1970年相繼補充修正，該經驗式基於一項假定，即溫度與日照時間為影響作物需水量最主要之因素，發源於美國西部地區，所以頗為適合乾燥氣候地區的應用，由於溫度及日照資料易於取得，故在美國及世界各地已有相當普遍之使用，估算經驗公式如下：

$$CU = k \times p \times \left( \frac{45.7 \times T + 813}{100} \right) \quad (1)$$

式中，CU：月作物需水量 (mm)

k：作物係數，可由試驗求出

p：日照百分率，數值依緯度而定，可查表而得

T：月平均溫度 (°C)

Thornthwaite<sup>(25)</sup> 於1948年，假定區域裏土壤含有充份之水分含量，水分供給不成爲限制因子，應用美國東部地區氣候條件，以氣溫、日照時數為估算作物需水量之取決因子而與作物種類、土壤種類無關，估算經驗公式如下：

$$CU = 16 \times \left( \frac{10 \times T}{I} \right)^a \quad (2)$$

式中：CU：月作物需水量 (mm)

I：年間熱量係數 =  $\sum I$

$$I : \text{月間熱量係數} = \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (3)$$

$$a = 6.57 \times 10^{-7} \times I^3 - 7.71 \times 10^{-5} \times I^2 + 1.79 \times 10^{-2} \times I + 0.49239 \quad (4)$$

由Thornthwaite法所得之作物需水量是一最高限度之數值，且係以每月30天，每天12小時之日長時數所得之基準值，對於各月之日數，每日之日長時數須予以校正之。

表一 各種氣象因子與作物蒸發散量之相關

氣象因子	相關係數	
	Briggs 與 Shantz	日本 Kota 氏
日 照	0.89	0.86
淨 輻 射 量	—	0.89
溫 度	0.86	0.83
濕 度	0.84	—
蒸汽飽和差	—	0.59
風 速	0.35	—
蒸 發	0.93	0.94

資料來源：參考文獻<sup>(2)</sup>

乙、濕度法 (humidity method)：

丙、蒸發量法 (evaporation method)：蒸發皿蒸發量係諸氣象因子之綜合指標，因此用蒸發皿蒸發量來推求作物需水量，較為實用、簡便，其估算公式如下：

$$ET_0 = C \times Epan \quad (5)$$

式中，ET<sub>0</sub>：參考作物需水量 (mm)

Epan：蒸發皿蒸發量 (mm)

C：皿係數，皿之使用型式、大小須加以修正

丁、輻射法 (radiation method)：

戊、其它：如英國之 Penman<sup>(25)</sup> 氏於1948年發

表較為完整而具理論基礎之估式——混合法 (Combination approach)。

前述各種方法，常以直接測定法較符實際，惟須長時間期從事直接之田間觀測，所投入之金錢、人力相當可觀，所以近年來，已為間接估算式所取代；應用微氣候學理論，藉以精密儀器設備之間接估算，是近代農業科技日趨重要亦漸為採用之應用科學，雖突破傳統之研究探討方式，不過昂貴之儀器設備，在實用上，仍是一道障礙，不若以氣候資料相關之經驗公式來得稱便。

上述諸經驗公式及其它相類似估算式經常見於各種研究報告，各種方法中有較為廣泛應用者，亦有特別適用於某一地域，但利用氣候資料以為估算作物需水量之依據，由於具有快速、可靠之估算能力，已不失為一世所公認之有效途徑，更為農業先進國家廣泛應用與重視。本研究嘗試以應用較為廣泛，且具有物理觀點，合理之立論根據之混合法來估算作物需水量，並建立混合法應用於國內其所內函之地域性參數，作為將來國內估算作物需水量之參考。

### 三、混合法及作物係數估算作物需水量

作物在生長過程中所吸收之水分，主要消耗於葉面蒸散，儲存在土壤中之水分被作物根係吸收，由根部而至枝幹，養分藉此過程輸送到作物體內各部份，而且水分本身亦由作物體內細胞所吸收，促成其生長，最後，由葉面氣孔蒸散而去；田間作物消耗水分，除葉面蒸散外，另一主要項目為地面蒸發，兩者具有密切關係，在作物整個成長過程中，甚難將其兩者分別討論，一般均予以併稱作物蒸發散量，亦稱作物需水量。

作物生長初期，葉面積小，地表面積大，至作物生長至某一程度即變成葉面積大而地表面積小，如是，葉面蒸散受作物生長因子之影響大而地面蒸發則較受氣象因子之影響大，總而言之，當土壤水分供應適當，則作物需水量受作物生長階段——作物耗水特性及氣象因子兩大要素所支配。

### (一) 氣象因子

氣象因子與作物需水量相關性之間接估算式，一如前述，本文取用諸多經驗估算式中之混合法，其推衍過程處理如下：

## 1. 物理條件

如前所述，作物蒸發散包含了蒸發 (evapor-

ation) 與蒸散 (transpiration) 兩個過程，蒸散於葉面氣孔進行，而蒸發可在甚多不同之表面進行，包括潮濕土壤、水面、作物等表面蒸發水汽，兩者自液相變成氣相之物理過程，完全一致，其必備之條件為：

- (1) 水分之供應 (moisture supply)
  - (2) 熱量之來源 (heat source)
  - (3) 汽壓梯度 (vapor pressure gradient)

2. 能量平衡法 (energy-balance method)

蒸發散之產生，必有足夠之能量來源。考慮田間作物集團整個葉冠體積 (canopy volume) 為控制體積 (control volume)，如圖二所示，則依據能量不減原理 (principle of conservation of energy)，可得如下之平衡方程式：

$$R_n = S + A + \lambda E + P + \int_0^z C_c \frac{dT_c}{dt} dz + \rho C_p \int_0^z \frac{dT}{dt} dz + \frac{\lambda \rho \varepsilon}{P_a} \\ \int_0^z \frac{dE}{dt} dz + \rho C_p \int_0^z \frac{d(VT)}{dx} dz + \frac{\lambda \rho \varepsilon}{P_a} \int_0^z \frac{d(VE)}{dx} dz .....(6)$$

式中， $R_n$ ：淨輻射量 (net radiation)

S : 土壤熱通量 (soil heat flux)

A : 顯熱通量 (sensible heat flux)

$\lambda E$ ：潛熱通量 (latent heat flux)，亦即是勢能 (potential) 或參考 (reference) 蒸發散量  $\dot{E}T_0$ 。

P : 淨光合作用能量(net photosynthesis energy)

$C_c$  : 葉冠體積之熱容量 (heat capacity of canopy)

$T_c$ ：葉冠體積之溫度

$\rho$  : 空氣密度 (density)

$C_p$ : 定壓比熱 (specific heat at constant pressure)

$\lambda$  : 蒸發潛熱 (latent heat of vaporization)

$\epsilon$  : 水蒸氣與空氣之分子重量比  
(ratio molecular weight)

$P_a$ : 大氣壓力

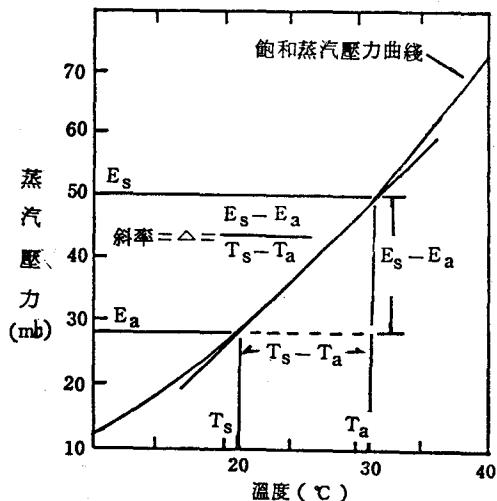
V：水平風速



於是，解(11)式及(16)兩式，得含有能量及空氣動力兩項的混合法估算作物需水量之方程式為：

$$ET_0 = \frac{\Delta}{\Delta + r} \frac{R_N - S}{\lambda} + \frac{r}{\Delta + r} E_a \dots\dots\dots(17)$$

(17)式，為 Penman<sup>(25)</sup>於 1948 年所發表，式中， $E_a$ 包含有風速及飽和蒸氣壓力差兩項，乃具有乾燥空氣水汽分子之能力； $\Delta/\Delta + r$  及  $r/\Delta + r$  兩項和為 1，是一無因次單位，也是能量及空氣動力兩項之權重因子。Penman 並陸續於 1952 年，1956 年<sup>(29)</sup>，1963 年<sup>(30)</sup>修正(17)式裏內含之地域經驗性常數。



圖四 蒸汽壓力與溫度關係圖

資料來源：參考文獻<sup>(34)</sup>

## (二) 作物耗水特性——作物係數 (crop coefficient $K_c$ )

每種作物有其耗水特性，亦即各有其作物係數，在定期距作物需水量  $ET_{crop}$ ，與參考蒸發散量  $ET_0$  之比值，即是代表該期距作物耗水特性指標之作物係數，亦即

藉試驗結果及以該期距之氣候資料估算參考蒸發散量，利用(18)式即得該期距之  $K_c$  值。

作物係數除依作物之類別、栽種季節、生長階段、氣象等條件而異外，也與所選擇參考蒸發散量估算式之不同亦有所不同，如 Blaney-Criddle 法或 Thornthwaite 法估算，由於未考慮風速及飽和差因素，故其所估算之  $K_r$  值，當較 Penman 氏之混合法所估算者，含較多之地域氣候因子的影響在內。

作物係數隨播種後時間之遞增，作物係數與時間之相對分佈，即可構成該作物之作物曲線圖（crop curve），一般作物曲線在生長期間之變化，目前的表示大致有：

1. 以葉面之有效覆蓋百分比為指標，隨作物種植後葉面覆蓋之有效面積百分比之增加作物係數亦隨之增加，至完全覆蓋 100 % 時，即趨於定值（Jensen, 1974<sup>(25)</sup>）。此法須以專業知識與技術於田間從事直接之判斷與量測作物莖葉之生長速率，應用上不甚理想。

2.以作物生長階段 (stage) 表示，每種作物依地區特性予以設定全生育日數，再細分成四個階段：前期 (initial) 階段，生長 (development) 階段，中期 (mid-season) 階段，後期 (late-season) 階段，在該階段之作物係數或為常數或為線性增加，生長日數亦予以設定 (Doorenbos and Pruitt, 1977<sup>(21)</sup>)；此法應用上，簡化作物全期生長之複雜過程，設定生育階段、日數及作物係數，有其實用上之優點，但並未慮及不同時間不同氣候下地域性氣候之影響因素在內，也有其不客觀的一面。

3.以氣溫資料，累積作生長所需之熱量，表示成生長度日數 (growing-degree-days)，並予以三次多項式之迴歸而建立作物曲線 (Sammis et al., 1985<sup>(32)</sup>)，此法以溫度為齊一基準，消弭地域性因季節、因氣候而異之影響，為一簡便而且客觀，實用之方法。

#### 四、相關氣象因子計算分析

### (一) 混合法中各項因子之計算

### 1. 飽和蒸汽壓力 E

飽和蒸汽壓力之計算，如依據複雜之 Goff-Gratch 公式或查表的方式進行，均頗感不便；Bosen<sup>(17)</sup>於 1960 年提出於數位計算機上稱便之計算式。

$$E = 33.8639[(0.00738T + 0.8072)^8 - 0.0000191(1.8T + 48) + 0.001316] \quad (19)$$

式中：E：飽和蒸氣壓力（mb）

T : 溫度 (°C), -51°C ≤ T ≤ 54°C

## 2. 飽和蒸氣壓力曲線斜率△

Bosen<sup>(17)</sup> 提出飽和蒸氣壓力計算之近似式，如<sup>(19)</sup>式，將其微分，得

$$\Delta E = \frac{dE}{dT} = 33.8639[0.05904(0.00738) \\ T + 0.8072] - 0.0000342 \quad (20)$$

### 3. 饱和差 $\Delta E$

饱和差  $E_a - E_d$ ,  $E_a$  是日平均温度之饱和蒸汽压,  $E_d$  是露点温度之饱和蒸汽压, 实用上常以最低温度取代之<sup>(21, 25, 27)</sup>。饱和差  $\Delta E = E_a - E_d$  之计算有以日最高最低气温平均的温度平均 (temperature average) 法及蒸汽压力平均 (vapor pressure average) 法, 该二法之计算如下<sup>(20, 25)</sup>:

(1) 平均气温之饱和蒸汽压  $E_{\text{ave}}$  减去清晨 8 点露点温度, 即最低露点温度之饱和蒸汽压  $E_{dp\min}$ , 亦即是

$$\Delta E = E_{\text{ave}} - E_{dp\min} \quad (21)$$

(2) 平均气温之饱和蒸汽压  $E_{\text{ave}}$  减去露点温度之饱和蒸汽压  $E_{dp\text{ave}}$ , 亦即是

$$\Delta E = E_{\text{ave}} - E_{dp\text{ave}} \quad (22)$$

(3) 平均气温之饱和蒸汽压  $E_{\text{ave}}$  减去平均气温之饱和蒸汽压  $E_{\text{ave}}$  与平均相对湿度  $RH_{\text{ave}}$  之乘积, 亦即是

$$\Delta E = E_{\text{ave}} - RH_{\text{ave}} \times E_{\text{ave}} = E_{\text{ave}}(1 - RH_{\text{ave}}) \quad (23)$$

(4) 最高温度之饱和蒸汽压  $E_{\text{smax}}$  与最低温度之饱和蒸汽压  $E_{\text{smin}}$  之平均值减去清晨 8 点露点温度之饱和蒸汽压  $E_{dp8}$ , 亦即是

$$\Delta E = (E_{\text{smax}} + E_{\text{smin}})/2 - E_{dp8} \quad (24)$$

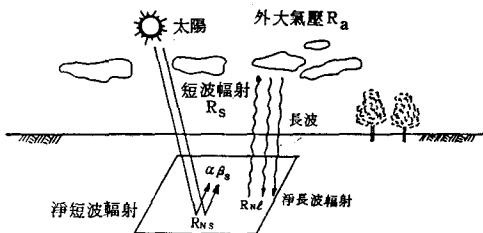
(5) 最高温度之饱和差  $E_{\text{smax}} - E_{\text{max}}$  与最低温度之饱和差  $E_{\text{smin}} - E_{\text{min}}$  之平均值, 亦即是

$$\Delta E = [(E_{\text{smax}} - E_{\text{max}}) + (E_{\text{smin}} - E_{\text{min}})]/2 \quad (25)$$

蒸汽压力饱和差  $\Delta E$  之计算, 由於所採用的计算式将影响风速函数中地域性参数之大小及风速函数之形式, 所以, 採用的计算式应与24小时饱和差 (hourly deficit) 和其均值相互比较, 选择误差小, 而具该日饱和差代表性之计算式, 俾能因此确定该地域风速函数之参数。

### 4. 测辐射 $R_n$

太阳之辐射输出, 透过大气层顶, 经大气吸收、散射及反射等综合效应而达地面, 其净辐射量  $R_n$ , 即为所有入流量  $R_{ns}$ , 与出流量  $R_{nl}$  之差值, 如图五所示。应用上除藉仪器观测获得外, 尚可由一系列数学式子理论分析推衍及许多专家学者研究分析成果计算而得。



圖五 輻射能量平衡示意圖

資料來源：參考文獻<sup>(21)</sup>

入流量  $R_{ns}$ , 即是净短波辐射量, 若考虑地表所覆盖之性质其特有的反照率 (albedo)  $\alpha$ , 则

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (26)$$

式中,  $\alpha$  为反照率, 在大多数绿色作物之覆盖, 其值范围大约是 0.20~0.25,  $\alpha$  取用 0.23 最为普遍<sup>(25)</sup>;  $R_s$  为日射量。

出流量  $R_{nl}$ , 净长波辐射, 为地面向上长波辐射  $R_{lu}$  与大气向下长波辐射  $R_{ld}$  之差值, 即

$$R_{nl} = R_{lu} - R_{ld} \quad (27)$$

依 Stefan-Boltzmann 定律, 若视地球表面为一黑体 (black-body), 则地面向上长波辐射可以黑体辐射处理为:

$$R_{lu} = \varepsilon \sigma T^4 = \sigma T_{\text{a}}^4 \quad (28)$$

式中,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $T_{\text{a}}$  为平均温度, 以绝对温度表示。而大气向下长波辐射主要由于水汽粒子, 二氧化碳, 臭氧等之吸收, 放射而达地面, 一般其估算式大体以温度、蒸汽压力为函数之形式表示, Penman (1951)<sup>(28)</sup> 建议采用较为简便, 易于处理的 Brunt (1932)<sup>(18)</sup> 方程式估算

$$R_{ld} = (C_1 + C_2 \sqrt{E_d}) \sigma T_{\text{a}}^4 \quad (29)$$

合併(28),(29)式, 得

$$R_{nl} = (1 - C_1 - C_2 \sqrt{E_d}) \sigma T_{\text{a}}^4 \quad (30)$$

另考虑云量之影响, 可以日照率因子来计算<sup>(28)</sup>, 所以

$$R_{nl} = (1 - C_1 - C_2 \sqrt{E_d}) \sigma T_{\text{a}}^4 (0.1 + 0.9(\frac{N}{N})) \quad (31)$$

式中,  $C_1$  及  $C_2$  为地域性参数, 由於国内目前尚无此方面资料, 所以, 本文依 Jensen (1974)<sup>(25)</sup> 推荐之值处理; 並整理(26)及(31)式, 得净辐射量  $R_n$



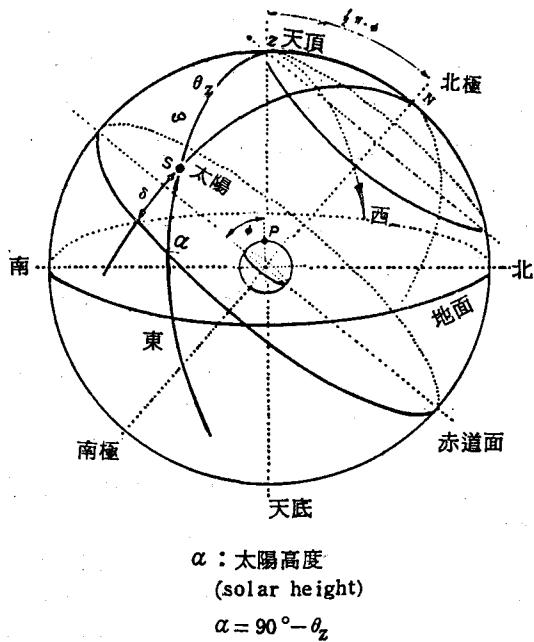
理論日長N值與理論外大氣層水平輻射量  $R_a$  值，建立旬計量日射——日照相關式之  $a, b$  值來應用於嘉南學甲地區日射量之估算。

### 3.本文之分析

#### (1) 日長 (day length) N理論值

圖六所示，假想在緯度  $\phi$  之觀測者 P，若考慮以地球為中心之天球 (celestial sphere)，由地球與太陽間兩者位置之三角關係，觀測者與太陽的位置間有如下之關係式：

$$\cos\theta_z = \sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega \dots\dots(43)$$



圖六 天球座標間之關係

資料依源：參考文獻<sup>(24)</sup>

式中， $\theta_z$ ：天頂角 (the zenith angle)

$\delta$ ：太陽赤緯 (declination)，太陽入射線與赤道面之夾角；由於自轉與公轉之規律運行，赤緯值之估算式有許多學者專家發表，於數位計算機應用上，Iqbal<sup>(24)</sup>建議下式可得滿意之精確度：

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right) * (0.006918 - 0.399912 * \cos\theta + 0.070257 * \sin\theta - 0.006758 * \cos 2\theta + 0.000907 * \sin 2\theta - 0.002697 * \cos 3\theta + 0.00148 * \sin 3\theta) \dots\dots(44)$$

$\theta$ ：日角 (day angle)

$$\theta = 2\pi(dn - 1)/365 \dots\dots(45)$$

dn：日數，從1月1日為1計起

$\phi$ ：緯度 (latitude)

$\omega$ ：時角 (hour angle)

從圖六知，當  $\theta_z = 90$  度，即是日出  $W_s$  或日落，所以 (43) 式可改寫成

$$\cos W_s = -\frac{\sin\delta \sin\phi}{\cos\delta \cos\phi} \dots\dots(46)$$

或

$$W_s = \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) \dots\dots(47)$$

所以，一天日長 (day length) N，以小時表示其結果如下：

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) \dots\dots(48)$$

#### (2) 外大氣層水平輻射量 $R_a$ 理論值

吾人知道，凡光或熱之強弱與光源或熱源之距離平方成反比例，亦知地球自轉外並以橢圓形軌道繞行太陽，地球與太陽間之距離並非一定，考慮這兩個原則，處理外大氣層水平輻射量  $R_a$  理論值之推衍如下：

太陽以一定能量之輻射率  $I_{sc}$  輸出，衡量太陽—地球間之距離因素，則在太陽輻射線方向上之垂直面之人射率  $I_{ON}$  是

$$I_{ON} = I_{sc} \left(\frac{R_0}{R}\right)^2 \dots\dots(49)$$

式中， $I_{ON}$ ：太陽輻射線上垂直面之入射率

$I_{sc}$ ：太陽常數，本文以 Iqbal 之建議，採用世界氣象組織 WMO 推薦值 1367  $W/m^2$

$\left(\frac{R_0}{R}\right)^2$ ：地球軌道之離心校正因子，在工程及專業性應用於數位計算機上，下式可得很好之精確結果：

$$E_0 = \left(\frac{R_0}{R}\right)^2 = 1.000110 + 0.034221 * \cos\theta + 0.00128 * \sin\theta + 0.000719 * \cos 2\theta + 0.000077 * \sin 2\theta \dots\dots(50)$$

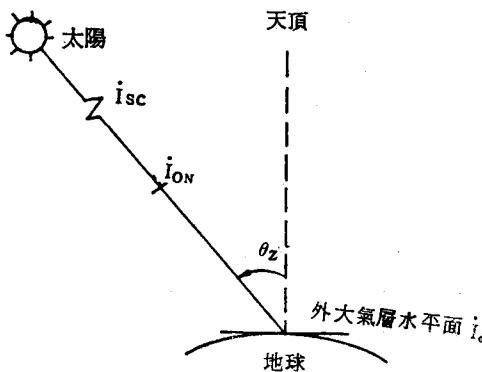
依圖七，在外大氣層水平面上之入射率  $I_0$

$$I_0 = I_{ON} * \cos\theta_z \dots\dots(51)$$

合併 (49), (51) 式

$$I_0 = I_{sc} * E_0 * \cos\theta_z \dots\dots(52)$$

所以，在一微小時段  $dt$ ，其入射量  $dI_0$  為



圖七 太陽—地球間諸輻射之關係概圖

資料來源：參考文獻<sup>(24)</sup>

式中， $I_{sc}$  為太陽常數，以能量單位表示  $I_{sc} = 1.96 \text{cal/cm}^2/\text{min}$

$$\therefore dI_0 = \frac{12}{\pi} * I_{sc} * E_0 * (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) d\omega \dots \dots \dots (55)$$

因此，在一天裏，外大層氣之水平輻射量  $R_a$  理論值從日出積分到日落即是

$$\begin{aligned}
 R_a &= \int dI_0 = \int \left( \frac{12}{\pi} \right) * I_{SC} * E_0 * \\
 &\quad (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) d\omega \\
 &= \left( \frac{24}{\pi} \right) * I_{SC} * E_0 \int (\sin \delta \sin \phi + \\
 &\quad \cos \delta \cos \phi \cos \omega) d\omega \\
 &= \left( \frac{24}{\pi} \right) * I_{SC} * E_0 * \left[ \left( \frac{\pi}{180} \right) * W_s * \right. \\
 &\quad \left. (\sin \delta \sin \phi) + (\cos \delta \cos \phi \sin W_s) \right] \dots (56)
 \end{aligned}$$

合併(47)、(56)式

$$R_a = \frac{24}{\pi} * I_{SC} * E_0 * \sin\delta \sin\phi * \left( -\frac{\pi}{180} \right) * W_s - \tan W_s \quad \dots \dots \dots (57)$$

## 五、資料分析

作物需水量的估算分兩部份，一為參考作物需水量  $ET_0$  與氣象因子相關之理論分析估算式，其中應先確立、鑑定式中內函之地域性常數，另一為作物耗水特性——作物係數由作物曲線構成。

### (一) 風速函數地域性參數

由於風速函數之參數大小與所取用蒸汽壓力飽和差  $\Delta E$  之計算式有關，所以本文亦據以24小時飽和差平均值與各計算式相互比較後，選定較為適切之計算式為確立風速函數之依據，並由臺南學甲地區實測風速，蒸發量等資料<sup>(13)</sup>，則(14)式中之風速函數地域性參數，經由迴歸分析後，即可獲得

並以實測資料與(33)～(36)式及本文分析所得作一比較分析及討論。

## (二)日射——日照相關地域性參數

引用日照資料以估算日射量，首先需對(38)式 $a$ 、 $b$ 值予以建立。依據Iqbal之建議，作此等常數之分析，以月計或旬計日射量較為合理亦普遍，若以日計日射量分析，較不明確亦乏人使用；配合作物需水量之估算，本文擬採用旬計方式進行分析，利用前述推衍結果如(38)、(44)、(45)、(48)、(50)及(57)等式，以1979~1983年實測日射量，日照時數資料<sup>(11)</sup>，予以迴歸分析確立嘉南學甲地區日射——日照相關之地域性參數。

並以1984年實測資料<sup>(11)</sup> 與(39)~(42)諸估算式及本文分析所得估算式作一比較分析及討論。

### (三)作物係數分析

風速函數及日射——日照相關式之地域性參數既經確立，參考作物需水量  $ET_0$  之理論分析估算式以日照時間，最高溫度，最低溫度，風速等氣候資料<sup>(12,13)</sup> 即可獲得。 $ET_{crop}$  資料取自學甲旱作試驗站歷年試驗成果<sup>(1)</sup>，如是，以(18)式即可獲得作物係數  $K_c$  值。

作物係數，作物耗水特性之指標，可應用於不同時間，不同氣候下方具意義；以往國內作物係數之研究，均是取歷年試驗記錄之平均值，即應用於農業灌溉用水標準上，這種方法仍未消弭氣候因子之影響，也未具代表性，適用及客觀性。

Biscoe et al.<sup>(15)</sup>曾如下指出：「在農業領域裏，氣候是影響作物產量之主要變因，於整個成長階段，有許多氣候因素在不同時間，不同地域氣候下影響著作之生長與成長」；諸多之氣候因子中，影響作物不同階段之生長，至今為專家學者研究與應用多而廣泛，最重要者首推溫度，諸如光合、呼吸、吸收等生理作用均受溫度之影響殊為顯著。因此，本文為求作物係數之代表性、適用及客觀性，作物曲線之構成擬應用作物成熟所需之熱量單位

(19, 23, 26) ——生長度日數(growing-degree-days)之觀點，將歷年作物劃以溫度為基準指標，並以Sammis et al.<sup>(32)</sup>之建議，作三次多項式之迴歸分析，予以產生合理之作物物係數  $K_c$  值，並構成作物曲線圖，即

$$K_c = A_0 + A_1 \times G + A_2 \times G^2 + A_3 \times G^3 \dots \quad (58)$$

式中， $A_j$ ：迴歸係數

$G$ ：累積生長度日數，以下式表示之

$$G = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_{\text{base}} \dots \quad (59)$$

$T_{\max}$ ：最高氣溫 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\min}$ ：最低氣溫 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{base}}$ ：作物成長之基準溫度 (base temperature)。每種作物各有其基準溫度，最高或最低氣溫若超出此基準溫度，則作物成長即受到壓迫 (stress)，超出部份不予計之。

#### 四 分析方法<sup>(7, 22)</sup>

本文所用線性模型迴歸分析或多項式模型迴歸分析，均以最小二乘法 (least squares method)

) 建立標準方程式 (normal equation)，而求解各模型中之迴歸係數，並以

(1) 相關係數  $R$ ，說明變數間之相關程度

(2) F 分配，檢定該迴歸模型之存在性，顯著性，並詮釋迴歸係數之意義

(3) 實測值與各估算式其估算值的比較，採用平均方差 (root-mean-square-error) 值，即

$$\text{RMSE} = \left( \frac{\sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N_s} \right)^{1/2} \dots \quad (60)$$

式中， $Y_i$  為實測值， $\hat{Y}_i$  為估算式估算值， $N_s$  為樣本數。

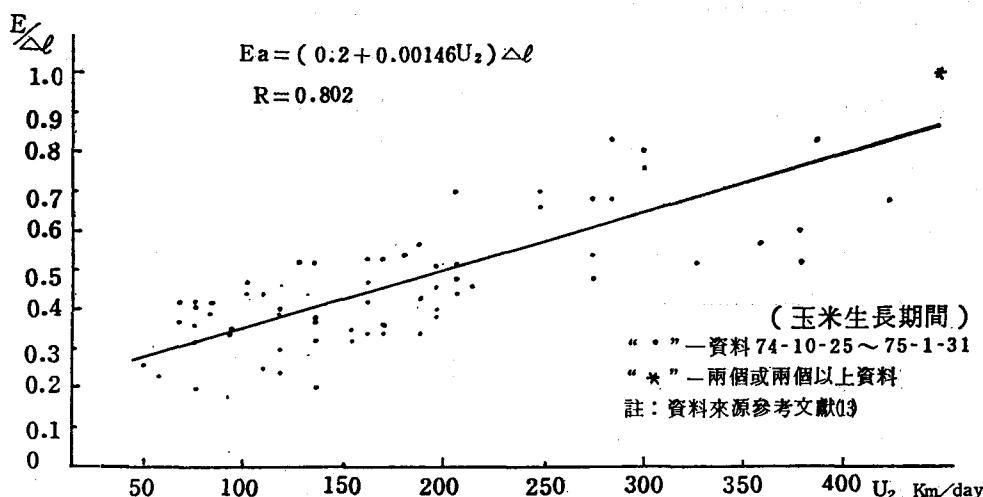
## 六、結果與討論

1. 表二～五，列出每月任取一天所計算實際飽和差與諸計算式之比較。資料取自學甲試驗站之自記溫濕度計之記錄<sup>(13)</sup>，以 (19) 式分別求出當時溫度與露點溫度之飽和蒸汽壓。累計24小時飽和差後取其平均值與 (21)～(25) 諸計算式計算結果比較，表二，表三，表五顯示 (22) 式所計算的最接近實際飽和差值；表四中 (22) 式是次接近；因此，得 (22) 式——由最高最低氣溫為平均溫度之飽和蒸汽壓  $E_{\text{sat}}$ ，減去露點溫度之飽和蒸汽壓  $E_{\text{dpave}}$  之結果，較能代表嘉南學甲地區 24 小時實際之飽和差。以表二～表五之計算分析結果，擇定 (22) 式之計算式為本文推導嘉南學甲地區風速函數其大小及形式中計算飽和差之依據。

2. 於 74 年秋作玉米種植期間，取自學甲試驗站之資料：直徑 120cm 蒸發皿之蒸發量、2m 高風速計風速、最高氣溫、最低氣溫等資料<sup>(13)</sup>，74 年 10 月 25 日～75 年 1 月 31 日計 67 天，經迴歸分析得嘉南學甲地區風速函數

$$E_a = (0.2 + 0.00146U_2)\Delta E \dots \quad (61)$$

式中， $U_2$  單位是  $\text{Km/day}$ ，乃取自 24 組瞬時風速



圖八 嘉南學甲地區風速函數迴歸分析圖

表二 74年11月14日實際飽和差與諸計算式之計算表

Time	Temp. (°C)	R. H. (%)	Sat. Vap (Temp.)	D. P. (°C)	Sat. Vap (D. P.)	Deficit (mb)
1	19.0	81.5	22.0	15.8	17.9	4.0
2	19.5	82.0	22.7	16.4	18.6	4.0
3	19.0	84.0	22.0	16.3	18.5	3.5
4	18.0	85.0	20.6	15.4	17.6	3.1
5	17.5	83.0	20.0	14.6	16.6	3.4
6	18.0	80.0	20.6	14.5	16.6	4.1
7	18.0	80.0	20.6	14.5	16.6	4.1
8	20.0	75.0	23.4	15.5	17.6	5.8
9	22.0	70.0	26.4	16.4	18.6	7.8
10	24.0	67.0	29.8	17.6	20.1	9.7
11	25.0	65.0	31.7	18.1	20.8	10.9
12	26.5	60.0	34.6	18.2	20.9	13.7
13	27.0	58.5	35.6	18.3	21.0	14.6
14	27.0	58.0	35.6	18.2	20.8	14.8
15	27.0	58.0	35.6	18.2	20.8	14.8
16	26.0	64.0	33.6	18.8	21.7	11.9
17	24.5	67.0	30.7	18.1	20.8	10.0
18	23.0	73.0	28.1	18.0	20.6	7.5
19	21.5	78.0	25.6	17.6	20.1	5.6
20	21.0	82.0	24.9	17.8	20.4	4.4
21	20.0	83.0	23.4	17.0	19.4	3.9
22	20.0	83.0	23.4	17.0	19.4	3.9
23	20.0	84.0	23.4	17.2	19.7	3.7
24	19.0	86.0	22.0	16.6	18.9	3.1
Average of 24 hourly deficit value =						7.2

1.  $T_{\max}=27 \quad T_{\min}=17.5 \quad \therefore T_{\text{ave}}=22.3 \quad \therefore E_{\text{save}}=26.9 \text{mb}$

$T_{dp\min}=15.5 \quad \therefore E_{dp\min}=17.6$

(21)式  $\Delta E=E_{\text{save}}-E_{dp\min}=9.3 \text{mb}$

2.  $T_d=T_{\min}=17.5 \quad \therefore E_{dpave}=20$

(22)式  $\Delta E=E_{\text{save}}-E_{dpave}=6.9 \text{mb}$  (最接近)

3.  $RH_{\text{ave}}=(83+58)/2=71\%$

(23)式  $\Delta E=E_{\text{save}}(1-RH_{\text{ave}})=7.8 \text{mb}$

4.  $E_{s\max}=35.6 \quad E_{s\min}=20$

(24)式  $\Delta E=(E_{s\max}+E_{s\min})/2-E_{dp8}=10.2 \text{mb}$

5.  $E_{\max}=35.6 \times 58=20.6 \quad E_{\min}=20 \times 0.83=16.6$

(25)式  $\Delta E=[(E_{s\max}-E_{\max})+(E_{s\min}-E_{\min})]/2=9.2 \text{mb}$

表三 74年12月20日實際飽和差與諸計算式之計算表

Time	Temp. (°C)	R. H. (%)	Sat. Vap. (Temp.)	D. P. (°C)	Sat. Vap. (D. P.)	Deficit (mb)
1	14.0	89.0	16.0	12.2	14.2	1.8
2	14.0	90.0	16.0	12.4	14.4	1.6
3	14.0	90.0	16.0	12.4	14.4	1.6
4	13.5	89.0	15.5	11.7	13.8	1.7
5	13.0	86.0	15.0	10.7	12.9	2.1
6	14.0	85.0	16.0	11.5	13.6	2.4
7	14.0	85.0	16.0	11.5	13.6	2.4
8	14.5	80.0	16.5	11.1	13.2	3.3
9	16.0	70.0	18.2	10.6	12.8	5.4
10	18.5	67.0	21.3	12.3	14.4	6.9
11	21.0	60.0	24.9	13.0	15.0	9.8
12	22.0	58.0	26.4	13.5	15.4	11.0
13	23.0	58.0	28.1	14.4	16.4	11.7
14	23.0	58.0	28.1	14.4	16.4	11.7
15	22.5	59.0	27.2	14.2	16.2	11.1
16	21.0	60.0	24.9	13.0	15.0	9.8
17	20.0	70.0	23.4	14.5	16.5	6.9
18	18.0	78.0	20.6	14.2	16.2	4.5
19	16.5	79.0	18.8	12.9	14.9	3.9
20	16.0	80.0	18.2	12.6	14.6	3.6
21	15.0	86.0	17.1	12.7	14.7	2.4
22	14.5	86.0	16.5	12.2	14.2	2.3
23	14.0	89.0	16.0	12.2	14.2	1.8
24	13.5	89.0	15.5	11.7	13.8	1.7
Average of 24 hourly deficit value=						5.1

1.  $T_{\max}=23 \quad T_{\min}=13 \quad \therefore T_{ave}=18 \quad \therefore E_{save}=20.6 \text{mb}$

$T_{dpmin}=11.1 \quad \therefore E_{dpmin}=13.2$

(21)式  $\Delta E=E_{save}-E_{dpmin}=7.4 \text{mb}$

2.  $T_d=T_{\min}=13 \quad \therefore E_{dpave}=15$

(22)式  $\Delta E=E_{save}-E_{dpave}=5.6 \text{mb}$  (最接近)

3.  $RH_{ave}=(86+58)/2=72\%$

(23)式  $\Delta E=E_{save}(1-RH_{ave})=5.8 \text{mb}$

4.  $E_{smax}=28.1 \quad E_{smin}=15$

(24)式  $\Delta E=(E_{smax}+E_{smin})/2-E_{dp8}=8.4 \text{mb}$

5.  $E_{\max}=28.1 \times 0.58=16.3 \quad E_{\min}=15 \times 0.86=12.9$

(25)式  $\Delta E=[(E_{smax}-E_{\max})+(E_{smin}-E_{\min})]/2=7.0 \text{mb}$

表四 75年1月11日實際飽和差與諸計算式之計算表

Time	Temp. (°C)	R. H. (%)	Sat. Vap. (Temp.)	D. P. (°C)	Sat. Vap. (D.P.)	Deficit (mb)
1	9.5	88.0	11.9	7.6	10.4	1.4
2	9.5	83.0	11.9	6.8	9.9	2.0
3	9.0	81.0	11.5	5.9	9.3	2.2
4	8.0	80.0	10.7	4.8	8.6	2.1
5	7.5	80.0	10.4	4.3	8.3	2.1
6	7.5	80.0	10.4	4.3	8.3	2.1
7	7.5	78.0	10.4	3.9	8.1	2.3
8	10.0	76.0	12.3	6.0	9.4	2.9
9	15.0	73.0	17.1	10.3	12.5	4.6
10	19.0	60.0	22.0	11.1	13.3	8.7
11	21.5	53.0	25.6	11.6	13.6	12.0
12	22.5	47.0	27.2	10.6	12.8	14.4
13	23.0	45.0	28.1	10.4	12.6	15.4
14	23.0	50.0	28.1	12.1	14.1	14.0
15	22.5	50.0	27.2	11.6	13.7	13.6
16	21.5	55.0	25.6	12.2	14.2	11.5
17	20.0	75.0	23.4	15.5	17.6	5.8
18	17.0	89.0	19.4	15.2	17.2	2.1
19	16.0	89.0	18.2	14.2	16.2	2.0
20	15.0	88.0	17.1	13.0	15.0	2.1
21	13.0	88.0	15.0	11.0	13.2	1.8
22	12.0	86.0	14.0	9.7	12.1	2.0
23	12.0	82.0	14.0	9.0	11.5	2.5
24	12.0	80.0	14.0	8.7	11.2	2.8
Average of 24 hourly deficit value=						5.5

1.  $T_{\max}=23 \quad T_{\min}=7.5 \quad \therefore T_{ave}=15.3 \quad \therefore E_{save}=17.4 \text{ mb}$

$T_{dpmin}=6 \quad \therefore E_{dpmin}=9.4$

(21)式  $\Delta E=E_{save}-E_{dpmin}=8.0 \text{ mb}$

2.  $T_d=T_{\min}=7.5 \quad \therefore E_{dpave}=10.4$

(22)式  $\Delta E=E_{save}-E_{dpave}=7.0 \text{ mb}$  (次接近)

3.  $RH_{ave}=(80+50)/2=65\%$

(23)式  $\Delta E=E_{save}(1-RH_{ave})=6.1 \text{ mb}$  (最接近)

4.  $E_{smax}=28.1 \quad E_{smin}=10.4$

(24)式  $\Delta E=(E_{smax}+E_{smin})/2-E_{dp8}=9.9 \text{ mb}$

5.  $E_{\max}=28.1 \times 0.50=14.1 \quad E_{\min}=10.4 \times 0.80=8.3$

(25)式  $\Delta E=[(E_{smax}-E_{\max})+(E_{smin}-E_{\min})]/2=8.1 \text{ mb}$

表五 75年2月22日實際飽和差與諸計算式之計算表

Time	Temp. (°C)	R. H. (%)	Sat. Vap. (Temp.)	D. P. (°C)	Sat. Vap. (D. P.)	Deficit (mb)
1	8.0	74.0	10.7	3.7	8.0	2.8
2	8.0	78.0	10.7	4.4	8.4	2.4
3	8.0	80.0	10.7	4.8	8.6	2.1
4	7.5	81.0	10.4	4.5	8.4	2.0
5	7.5	75.0	10.4	3.4	7.8	2.6
6	10.0	65.0	12.3	3.8	8.0	4.3
7	12.0	57.0	14.0	3.8	8.0	6.0
8	14.5	56.0	16.5	5.9	9.3	7.2
9	16.5	52.0	18.8	6.6	9.8	9.0
10	18.0	51.0	20.6	7.7	10.5	10.1
11	18.0	50.0	20.6	7.4	10.3	10.3
12	18.0	50.0	20.6	7.4	10.3	10.3
13	17.0	51.0	19.4	6.8	9.9	9.5
14	16.0	57.0	18.2	7.5	10.4	7.8
15	15.0	70.0	17.1	9.6	12.0	5.1
16	13.0	75.0	15.0	8.7	11.3	3.7
17	12.0	78.0	14.0	8.3	11.0	3.1
18	11.0	80.0	13.1	7.7	10.5	2.6
19	11.5	78.0	13.6	7.8	10.6	3.0
20	11.0	75.0	13.1	6.8	9.9	3.3
21	11.0	80.0	13.1	7.7	10.5	2.6
22	10.0	82.0	12.3	7.1	10.1	2.2
23	10.0	82.0	12.3	7.1	10.1	2.2
24	10.0	81.0	12.3	6.9	10.0	2.3
Average of 24 hourly deficit value=						4.8

1.  $T_{\max}=18 \quad T_{\min}=7.5 \quad \therefore T_{\text{ave}}=12.8 \quad \therefore E_{\text{save}}=14.8 \text{mb}$

$T_{dp\min}=5.9 \quad \therefore E_{dp\min}=9.3$

(21)式  $\Delta E=E_{\text{save}}-E_{dp\min}=5.5 \text{mb}$

2.  $T_d=T_{\min}=7.5 \quad \therefore E_{dp\text{ave}}=10.4$

(22)式  $\Delta E=E_{\text{save}}-E_{dp\text{ave}}=4.4 \text{mb}$  (最接近)

3.  $RH_{\text{ave}}=(75+50)/2=63\%$

(23)式  $\Delta E=E_{\text{save}}(1-RH_{\text{ave}})=5.5 \text{mb}$

4.  $E_{s\max}=20.6 \quad E_{s\min}=10.4$

(24)式  $\Delta E=(E_{s\max}+E_{s\min})/2-E_{dp8}=6.2 \text{mb}$

5.  $E_{\max}=20.6 \times 0.50=10.3 \quad E_{\min}=10.4 \times 0.75=7.8$

(25)式  $\Delta E=[(E_{s\max}-E_{\max})+(E_{s\min}-E_{\min})]/2=6.4 \text{mb}$

資料之平均值。(61)式相關係數  $R=0.802$ , F 分配檢定,  $F=116.9 > F(1, 66; 0.99)=7.08$ , 顯示迴歸分析具線性顯著性及存在性, 並具有 0.802 之相關程度, 如圖八所示。

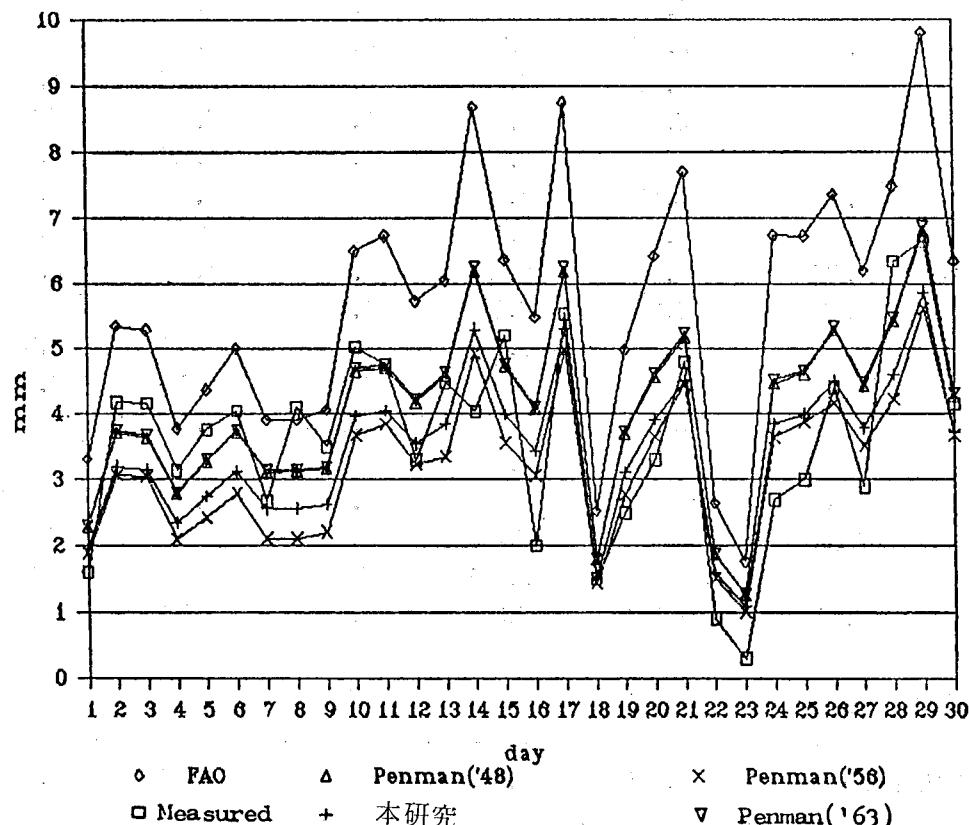
3.表六列出 Penman 混合法方程式中空氣動力項, Dalton 形式之風速函數經驗參數, 可看出

飽和差  $\Delta E$  計算式取捨之決定, 因地域氣候所呈現出的立地條件不同而有所不同, 且地域性參數大小亦隨之不同。

4.表七列出(33)~(36)風速函數諸估算式及本文推導所得(61)式之估算值與實測值的比較分析, 並以圖九表示之。

表六 Penman 方程式空氣動力項經驗式一覽表

單 ET <sub>0</sub>	位 U	風速計 E	高	推導者	參 數			$\Delta E$ 之 計算式	發 年 份
					m	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>		
mm/day	mile/day	mmHg	2m	Penman	0.35	1.0	0.0098	(21)	1948
mm/day	mile/day	mmHg	2m	Penman	0.35	0.5	0.01	(21)	1956
mm/day	mile/day	mmHg	2m	Penman	0.35	1.0	0.01	(21)	1963
mm/day	Km/day	mbar	2m	FAO	0.27	1.0	0.01	(23)	1977
mm/day	Km/day	mbar	2m	本 文	0.20	1.0	0.0073	(22)	1986



圖九 諸估算式估算值與實測值比較

表七，實測值與估算式估算值比較分析

實測值 *	估 算 值				
	本 文 (1986)	FAO (1977)	Penman (1948)	Penman (1956)	Penman (1963)
1	1.600	1.976	3.309	2.290	1.898
2	4.180	3.195	5.350	3.702	3.068
3	4.170	3.143	5.293	3.630	3.046
4	3.140	2.351	3.777	2.785	2.114
5	3.760	2.747	4.375	3.270	2.435
6	4.050	3.130	5.008	3.717	2.795
7	2.680	2.564	3.911	3.119	2.117
8	4.100	2.569	3.918	3.125	2.120
9	3.500	2.624	4.062	3.169	2.220
10	5.020	3.967	6.492	4.655	3.674
11	4.760	4.049	6.736	4.710	3.849
12	3.300	3.542	5.737	4.179	3.226
13	4.480	3.841	6.055	4.596	3.348
14	4.040	5.290	8.683	6.197	4.923
15	5.200	3.981	6.370	4.728	3.555
16	2.010	3.432	5.490	4.075	3.064
17	5.540	5.298	8.746	6.188	4.975
18	1.500	1.534	2.532	1.792	1.441
19	2.500	3.110	4.976	3.693	2.777
20	3.300	3.905	6.429	4.568	3.651
21	4.800	4.513	7.697	5.176	4.461
22	0.900	1.598	2.645	1.864	1.507
23	0.300	1.067	1.762	1.247	1.002
24	2.700	3.842	6.375	4.474	3.638
25	3.000	3.996	6.731	4.616	3.874
26	4.400	4.500	7.364	5.281	4.167
27	2.900	3.781	6.206	4.429	3.518
28	6.340	4.608	7.490	5.427	4.222
29	6.660	5.868	9.805	6.808	5.617
30	4.160	3.724	6.352	4.272	3.681
R.M.S.E (mm/day)	0.890	2.328	0.967	1.012	0.988
Correlation R...	0.804	0.791	0.809	0.781	0.808

\* 資料來源：參考文獻<sup>(13)</sup>

結果顯示FAO於1977年所推薦之風速函數其估算值與實測值相比較是諸估算式中有最大平均方差值，相關性亦不佳；Penman於1948年及1963年所發表之風速函數雖有最好之相關，但其平均方差值亦不甚理想；在諸多估算式中，綜合平均方差值，相關係數兩者指標，以本文之估算值與實測值比較擁有最小之平均方差值及0.802之相關性而言，本文所得之風速函數是較其它諸式適合應用於嘉南學甲地區，因此，本文即以(61)式，代表嘉南學甲地區之風速函數。

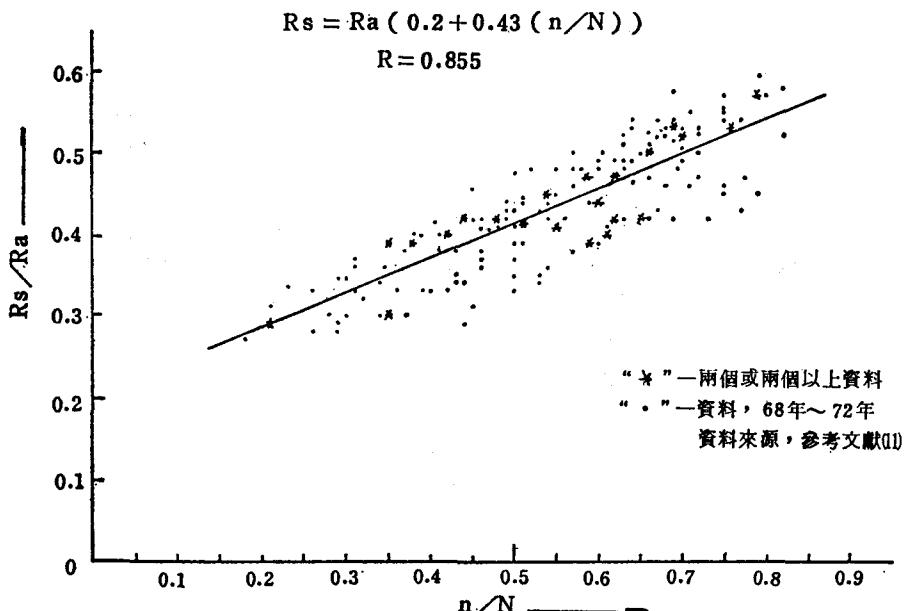
5.以日照資料可用來估算日射量，因日照觀測

儀器較為簡便，價格亦低廉，資料容易取得；  
 Ångström之研究，並經由 Prescott 之修正，應用日射——日照相關探討日射量，最主要者在確立(38)式中之 a，b 值，俾以利用日照資料估算日射量。

本文分析結果，代表嘉南學甲地區日射——日照相關式

$$R_s = R_a [0.2 + 0.43(n/N)] \quad \dots \dots \dots (62)$$

相關係數  $R = 0.855$ , F 分配檢定,  $F = 483 > F(1, 179; 0.99) = 6.71$ , 表示經迴歸分析之迴歸式均具有顯著性及存在性, 如圖十所示。



圖十、臺南學甲地區日射一日照相關迴歸分析圖

6.表八列出(39)~(42)式，國內外所研究成果的經驗式及本文分析所得(62)式其估算值與實測值之誤差、相關比較分析，並以圖十一示之。

從表八及圖十一得知，諸估算式之估算值與實測值間皆有良好之趨勢 (trend)，所以相關性皆在 0.95 左右；從圖十一看出唐氏所發表之估算式其估算值與實測值間的離差較其它諸式為大，表八亦顯示平均方差值最大，達  $318.3\text{Ly/旬}$ ，其它諸式約略羣聚在一處。表八列出本文分析所得(62)式之估算值與實測值間之平均方差值是  $25.3\text{Ly/旬}$ ，相關係數  $R=0.957$ ，說明本文所得之日射——日照相關式均較其它諸式適合在嘉南學甲地區日射量估算。

之應用。

7.表九列出日射——日照相關各經驗公式估算之背景資料。從表八之估算結果及表九之背景資料發現，國外發表的如FAO, Penman, 因氣候條件，地理位置等因素跟國內條件比，均相去甚遠，故不適合國內立地條件使用；然而表九發現在嘉南地區有唐氏，黃氏等及本文分析所得的三個估算式，從學理判斷，同一地區與實測值相比較，彼此間理應相差不多，然而從表八、圖十一却發現差距很大，探究其原因如下：

(1)理論日長 $N$ 與理論外大氣層輻射量 $R_a$ 的引用不同；以往研究經查，均以較為粗放的內插法內插

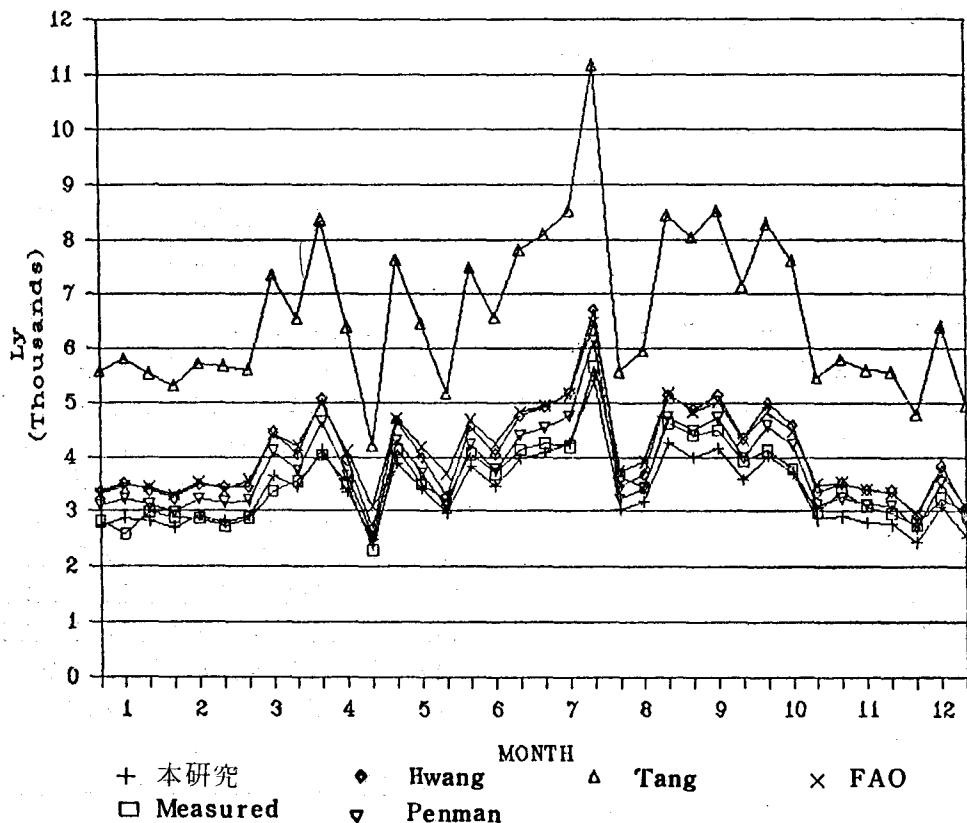
表八 諸估算式估算值與實測值之比較分析

實測值 * (1984)	估 算 值				
	本 文 (1986)	Hwang (1982)	Tang (1979)	FAO (1977)	Penman (1948)
1 2812.0	2749.6	3374.3	5576.5	3321.6	3100.0
2 2583.0	2861.7	3515.8	5812.7	3456.0	3229.2
3 2988.0	2825.2	3380.5	5535.1	3437.9	3121.6
4 2885.0	2710.1	3242.0	5307.8	3298.2	2993.9
5 2862.0	2909.4	3490.4	5720.5	3537.8	3221.3
6 2732.0	2801.6	3439.3	5684.5	3384.2	3159.4
7 2881.0	2921.4	3443.8	5606.9	3570.0	3189.8
8 3365.0	3658.1	4457.2	7347.0	4428.5	4100.7
9 3569.0	3441.2	4040.7	6568.8	4209.8	3745.7
10 4035.0	4130.8	5065.6	8369.4	4991.3	4654.4
11 3509.0	3350.8	3937.6	6403.2	4098.3	3649.6
12 2290.0	2476.3	2679.8	4214.2	3095.0	2528.0
13 4135.0	3880.3	4658.8	7637.7	4717.4	4299.0
14 3495.0	3414.9	3989.3	6472.5	4183.5	3702.0
15 3205.0	2967.3	3261.7	5163.6	3694.0	3066.3
16 4059.0	3837.2	4578.8	7489.2	4673.2	4230.5
17 3694.0	3467.8	4053.6	6578.4	4247.6	3761.2
18 4139.0	3969.0	4765.4	7812.6	4825.2	4397.3
19 4263.0	4084.6	4932.0	8102.6	4957.8	4545.8
20 4200.0	4257.0	5181.0	8536.5	5155.2	4767.7
21 5662.0	5398.1	6721.9	11167.0	6493.3	6157.5
22 3670.0	3034.8	3464.1	5569.4	3741.2	3230.3
23 3448.0	3182.5	3686.5	5961.5	3907.8	3427.0
24 4629.0	4252.9	5141.4	8450.4	5160.3	4737.7
25 4396.0	3997.2	4881.2	8052.4	4835.9	4488.8
26 4494.0	4169.0	5148.8	8528.6	5027.1	4724.2
27 3914.0	3579.1	4343.1	7148.3	4338.0	3999.1
28 4128.0	4019.8	4998.7	8300.2	4837.4	4580.2
29 3781.0	3715.0	4599.3	7625.0	4476.5	4218.0
30 2992.0	2860.5	3359.1	5460.9	3499.4	3113.8
31 3364.0	2908.1	3524.8	5798.9	3525.9	3246.3
32 3096.0	2796.5	3396.4	5591.8	3388.6	3126.8
33 2969.0	2764.3	3375.6	5568.6	3344.3	3104.2
34 2758.0	2432.3	2922.7	4793.1	2956.3	2696.5
35 3238.0	3078.5	3849.5	6404.6	3698.4	3523.4
36 3012.0	2533.2	3024.8	4948.8	3084.5	2794.3
R.M.S.E. (Ly/10 days)	25.3	59.5	318.3	60.7	32.0
Correlation R...	0.957	0.946	0.940	0.958	0.949

\* 資料來源：參考文獻<sup>(11)</sup>

表九 日射——日照相關各經驗公式及其背景資料

發表者	地點	緯度	年份	計量基準	a	b
Penman	Rothamsted	52°N	1948	月計	0.18	0.55
FAO	世界各地	—	1977	月計	0.25	0.50
唐 氏	嘉南地區	23°N	1979	月計	0.2745	1.0665
黃 氏 等	嘉南地區	23°N	1982	月計	0.1853	0.6153
本 文	嘉南地區	23°N	1986	旬計	0.20	0.43



圖十一 諸估算式估算值與實測值比較

氣象手冊之圖表而得，本文是依地球——太陽間之幾何關係分析推衍，繼之以數位計算機計算而得。

(2)所採用之太陽常數，赤緯計算式及考慮距離因素——地球軌道之離心校正因子等的不同；如以往均視太陽常數是  $1.94 \text{ Ly/min}$ ，然而累積數年來所測結果，亦為世界氣象組織 WMO 所承認採行者為  $1.96 \text{ Ly/min}$ 。

(3)所採用儀器型式、計量基準、計量方式等不同；如唐氏、黃氏等採用者為月計估算；另如唐氏的計量方式為採用碧空無雲的情況下估算。

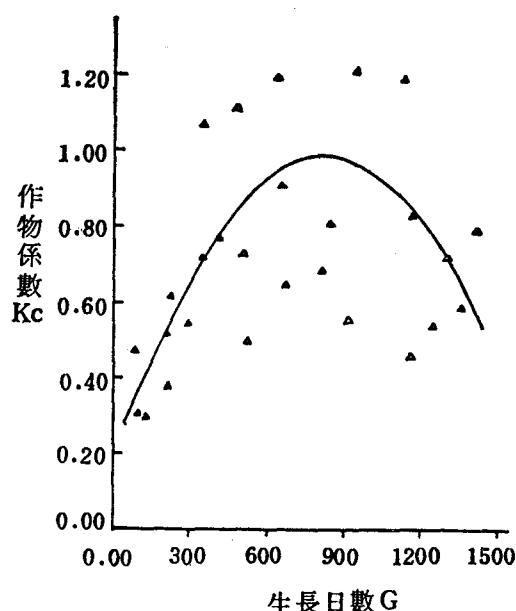
8.作物係數，代表作物的耗水特性，為能應用於不同季節，不同氣候下顯示其適用性，客觀性及實用性方具意義。Sammis et al.，以生長度日數之觀點，將不同時間下之氣候影響因子劃以溫度

爲齊一的指標而予以消弭之，於 1985 年在 New Mexico 集數個地方的作物試驗資料，如苜蓿、玉米、高粱、棉花等，以作物係數  $K_c$  與累積生長度日數  $G$  作三次多項式之迴歸分析，得到向下傾向圓滑之作物曲線圖。

本文以玉米試驗資料爲例，選定產量較高，田間資料完整部份，對於受颱風、霜害不正常部份之記錄，均不加以取用與分析；配合經上述地域參數的建立與確立後之參考作物需水量  $ET_0$  之理論分析估算式，即利用(18)，(58)及(59)式進行分析，經分析得春作玉米之作物係數  $K_c$  與累積生長度日數  $G$  之三次多項式關係式如下：

$$K_c = 0.1817 + 1.9192 \times 10^{-3} \times G - 1.1232 \times 10^{-6} \times G^2 - 1.7102 \times 10^{-11} \times G^3 \dots\dots (63)$$

相關係數  $R = 0.601$ ，F 分配檢定， $F = 4.72 > F(3, 26; 0.95) = 2.98$ ，說明該三次多項式迴歸模型具有中度相關性及 5 % 顯著水準之存在性，作曲線如圖十二所示。

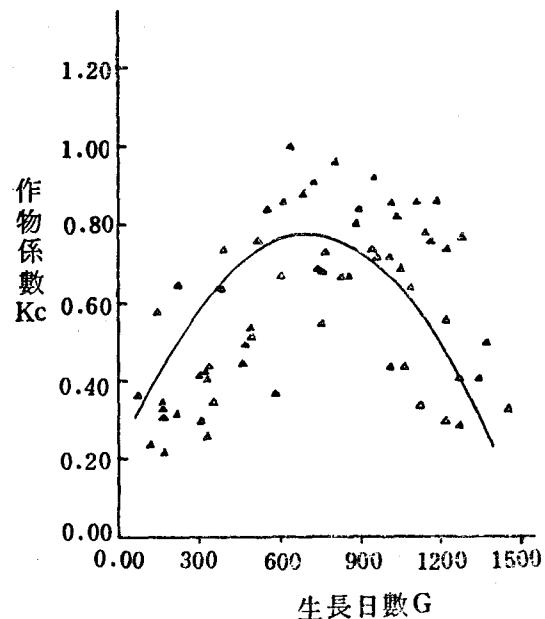


圖十二 春作玉米作物係數與生長度日數相關圖

秋作玉米之作物係數  $K_c$  與累積生長度日數  $G$  之三次多項式關係式如下：

$$K_c = 0.1963 + 1.5858 \times 10^{-3} \times G - 1.088 \times 10^{-6} \times G^2 - 1.4548 \times 10^{-11} \times G^3 \dots\dots (64)$$

相關係數  $R = 0.653$ ，F 分配檢定， $F = 15.37 > F$



圖十三 秋作玉米作物係數與生長度日數相關圖

$(3, 65; 0.95) = 2.76$ ，具中度相關性及 5 % 顯著水準之存在性，作物曲線如圖十三示。

從圖十二，圖十三看出春作、秋作玉米各顯示其不同之耗水特性，此是由於春作玉米栽培初期時，不但氣溫低，日照弱，而且地下水位低，毛管水補給較緩，至中後期則溫度逐漸升高，莖葉增多、增大，日照強，致蒸發散量大，而呈現如圖十二之作物曲線圖，後期略微偏高傾向之用水特性。秋作玉米栽培初期時，地下水位高，氣溫亦高，日照強，但作物莖葉小、少，作物需水量以土面蒸發居多，至中期以後，氣溫逐漸降低，日照亦變短、弱，但作物漸成長，故需水量之增減有相互抵消之趨勢，以致作物曲線呈現如圖十三較為緩和圓滑之曲線。

前述作物係數亦隨所取用之參考作物需水量估算式而異，所以，任兩種估算式所得之作係數自不能任意相比較；然就客觀、應用之觀點而言，歷年田間玉米試驗資料，如表十，以 Blaney-Criddle 法求得之  $K_c$  值及表十一，以 A-pan 法求得之  $K_c$  值，每年都不一樣，用爲配水計劃及工程設計，則取捨無憑；反觀，本文以生長度日數的觀點，所得 (63), (64) 式，乃劃以溫度爲基準，消弭氣候因子之影響，使之用爲灌溉規劃、設計得之憑藉，較前

表十 依歷年田間玉米淨耗水量計算之  $K_c$  值 (Blaney-Criddle法)

栽培時期	月 份												全期
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
51年春		0.36	0.49	0.61									0.49
58年春			0.47	0.58	0.40								0.48
60年春		0.35	0.74	0.84									0.64
52年秋						0.20	0.46	0.57					0.41
56年秋						0.23	0.42	0.40					0.35
57年秋							0.26	0.48	0.33	0.36			
58年秋	0.6	0.58							0.19	0.54	0.48		
59年秋							0.32	0.49	0.39	0.36			
59年秋	0.41							0.30	0.41	0.30	0.36		

資料來源：參考文獻<sup>(1)</sup>表十一 依歷年田間玉米淨耗水量計算之  $K_c$  值 (A-pan法)

栽培時期	月 份												全期
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
51年春		0.35	0.67	0.46	0.46								0.50
58年春		0.22	0.57	0.81	0.50								0.53
60年春		0.33	0.74	0.83	0.45								0.59
52年秋						0.28	0.65	0.76	0.46	0.54			
56年秋						0.31	0.46	0.54	0.33	0.41			
57年秋	0.28						0.32	0.63	0.51	0.44			
58年秋	0.77	0.57	0.51					0.24	0.63	0.54			
58年秋	0.18						0.30	0.69	0.45	0.40			
59年秋	0.49						0.46	0.58	0.52	0.51			

資料來源：參考文獻<sup>(1)</sup>

二者具客觀及適用性。

10.依作物生理觀點而言，作物生育期間之耗水型態應有向下傾向圓滑曲線之趨勢，從圖十三歷年秋作玉米資料看來，尚能顯示一般耗水特性之走向，然就圖十二歷年春作玉米資料看來，分佈就較分散紛亂，前後兩者資料之特性其不同之處，在滿足定性上——作物依生理需求之耗水型態是如前述曲線之趨勢的前提下，本文探究其在定量上的原因

是：

非人為所能控制之降雨干擾

蓋學甲試驗站於灌漑試驗其估算作物需水量是以土壤水分收支平衡計算而得，在田間試驗過程中，除灌溉水量可以準確地計量實施外，降雨時期、強度以及降雨量均無法控制，所以其有效雨量亦不易加以確定；從歷年氣候資料得知，春作期間之降雨多於秋作，因此可知，春、秋作兩者之資料有相當大

表十二 作物需水量諸估算式估算值之結果比較

Blaney-Criddle 法：

M. No.	Tave	f	K <sub>c</sub>	ET
9...3	29.30	59.54	0.39	23.22
10...1	27.30	55.77	0.39	21.75
10...2	28.90	57.75	0.39	22.52
10...3	27.90	56.52	0.39	22.04
11...1	25.50	49.19	0.39	19.19
11...2	23.70	47.15	0.39	18.39
11...3	23.50	46.92	0.39	18.30
12...1	22.40	45.98	0.39	17.93
12...2	17.40	40.26	0.39	15.70
12...3	19.80	43.00	0.39	16.77
1...1	15.30	38.66	0.39	15.08

summation of consumptive use of  
water.....210.89(mm)

Thorntwaite 法：

Month	Tave	E	C. F.	ET
9	29.90	200.48	0.34	68.83
10	28.00	161.65	0.97	156.80
11	24.20	100.19	0.92	92.18
12	19.90	52.75	0.90	47.47
1	17.90	37.27	0.29	10.94

summation of consumptive use of  
water.....376.22(mm)

A-pan 法：

M. No.	Evapo.	K <sub>c</sub>	ET
9...3	50.44	0.48	24.21
10...1	52.86	0.48	25.37
10...2	50.34	0.48	24.16
10...3	54.50	0.48	26.16
11...1	38.70	0.48	18.58
11...2	31.15	0.48	14.95
11...3	34.90	0.48	16.75
12...1	29.50	0.48	14.16
12...2	28.80	0.48	13.82
12...3	30.40	0.48	12.59
1...1	28.40	0.48	13.63

summation of consumptive use of  
water.....206.40(mm)

本文分析：

M. No.	ET <sub>0</sub>	G	K <sub>c</sub>	ET
9...3	37.43	174.90	0.44	16.48
10...1	38.11	331.35	0.60	22.94
10...2	36.29	497.30	0.71	25.91
10...3	36.84	669.20	0.77	28.22
11...1	29.76	799.70	0.76	22.66
11...2	24.92	907.95	0.73	18.15
11...3	27.64	1023.65	0.66	18.35
12...1	26.71	1130.85	0.58	15.42
12...2	24.78	1197.70	0.51	12.64
12...3	28.52	1290.10	0.40	11.41
1...1	24.58	1339.80	0.33	8.18

summation of consumptive use of  
water.....200.37(mm)

估 算 方 法	作物需水量	與74年秋作玉米實測值比較	與74年秋作玉米實測值之偏差值
1.74年實測值	202.66mm	100.00%	0.00mm
2.Blaney-Criddle	210.89	104.06	8.23
3.A-pan	206.40	101.85	3.74
4.Thornthwaite	376.22	185.64	173.56
5.本文分析	200.37	98.87	-2.29

之特性差異。

11.本文引用 74 年秋作玉米試驗實測結果<sup>(9)</sup>與其它估算式及本文研究結果之估算式相比較、驗證、結果如表十二所示。

Blaney-Criddle 法，以溫度、日長資料<sup>(13)</sup>代以(1)式積算作物需水量，其中  $K_c$  值引用表十全期  $K_c$  值之平均值。

A-pan 法，以(5)式配合表十一全期  $K_c$  值之平均值為作物係數估算作物需水量。

Thornthwaite 法，以(2)～(4)式，代以氣溫、日照資料<sup>(13)</sup>求得作物需水量之估算。

本文分析以上述所得之結果：(61)式，(62)式，(64)式，並以氣溫、日照、風速等資料<sup>(13)</sup>累積各旬而得作物需水量之估算。

從表十二的結果比較，A-pan 法及本文分析所估算的較接近實測值，Blaney-Criddle 法居次，Thornthwaite 法與實測值之偏差最大。在諸估算式中 Blaney-Criddle 法及 A-pan 法，從種植到收獲，均取用定值的  $K_c$  估算，在作物生理需求觀點，較不盡實際，不盡合理及不具客觀。Thornthwaite 法，基本上即未曾考慮作物之耗水條件，所估算之蒸發散量與作物種類無關，在同時間下每種作物均呈同一數值之蒸發散量，而且是最高限度之蒸發散量，所以呈現最大之偏差值。

## 七、結論與建議

作物需水量是水資源規劃利用之重要參數，也是農業灌溉計劃研擬，工程設計之基本資料；利用氣象因子之相關性予以估算之經驗公式，由於具有快速、可靠之估算能力，受到廣泛應用與重視，在農業先進國家尤甚；在諸多經驗公式中，則以 Penman 所發表的混合法方程式，混合著能量與空

氣動力兩項，合理地描述作物蒸發散量的複雜過程，為較具物理意義及理論依據，因此特色，為應用較廣泛者之一。本文嘗試建立國內作物需水量之合理估算式，集農業氣象、灌溉、作物觀點於一體，應用數理統計予以分析，藉以提昇以往在此領域研究之探討層次，本文研究重點為：

1. 應用 Dalton 空氣動力形式，依實際 24 小時之飽和差之平均值，擇定飽和差之計算式，進而建立嘉南學甲地區風速函數中之地域性參數；以相關係數  $R = 0.802$ ，通過 1% 顯著水準之 F 分配檢定，並與目前廣泛採用的 FAO, Penman 所推薦之風速函數相比較，有最小之平均方差值，0.802 之相關性而論，應用本文所分析結果，目前，在國內之可行性頗高。

2. 衍用 Ångström 之觀點，依 Prescott 之修正意見，本文循地球——太陽間位置之相對幾何關係，理論推演分析予以確立應用在農業領域裏，旬計計量之日射——日照相關式，俾以簡易之日照資料推估輻射量。於相關式中之地域性常數，由相關係數  $R = 0.855$ ，1% 顯著水準之 F 分配檢定，及與目前國內外著名研究成果之經驗估算式比較，有最小之平均方差值，0.957 之相關性而言，本文分析所得，在農業領域裏，可稱在目前較適合國內之應用。

3. 以 Sammis et al. 觀點，從作物生理需求著眼，累積作物生長所需熱量單位之生長度日數，進行統計分析，建立春、秋作玉米作物係數及作物曲線圖，其特點為：劃以溫度為齊一之基準，消弭因不同時間，不同地點之氣候因素干擾，使作物係數具客觀、實用。

4. 本文以 74 年秋作玉米為例，配合上述之參數，理論估算式與其它經驗公式相比較，亦得良好之

結果。

以上結論，可供從事作物需水量研究、估算之參考，如將本文之分析方式，充份發展，可得其它作物有理論根據，合理之物理觀點及可靠之推估方式，惟：

1. 風速函數之建立，有賴長期記錄資料之校正與分析，予以確保參數之穩定性及可靠性，由於國內現地風速資料普遍缺少，而風速之空氣動力行為影響作物成長甚鉅且重要，所以，若以後逐漸增加有關數據，當予以校正、分析，期使更趨理想、穩定。

2. 風速之空氣動力行為，本文探討之角度是 Dalton 形式之經驗式，然而就風速對作物成長之影響，流體力學邊界層之效應而言，研究風速在作物葉冠與大氣間輸送過程中扮演之角色，諸如：株高、粗糙長度 (roughness length)、地面修正量 (zero plane displacement) 等，均是值得深入探討之方向，以輔風速之空氣動力行為影響作物成長之解釋趨於合理之理論根據。

3. 本文所指作物需水量，乃包含降雨干擾之有效性及地下水位毛管補給的情況下，由土壤水分追跡法計算而得之作物需水量。降雨之干擾，在作物需水量分析上，具有相當之影響，其有效性至今於旱作物灌溉研究上，仍不見好的方法分析，當在進行作物係數與生長度日數之多項式迴歸分析之前，應予以注意降雨情況，以降雨情況愈少愈佳，如圖十三，除能便於分析外，且能獲得較為明顯之作物耗水趨勢。為求隔離降雨干擾旱作物有效雨量之分析，自動遮雨棚之設置實有必要，在研究上、分析上均有提升層面之價值。另地下水毛細管補給之量，可藉滲漏計及田間試驗結果兩者之差數，即可分離得之，亦是值得今後之探討。

4. 從表一知蒸發皿蒸發量為諸氣象因子之綜合指標，且與作物蒸發散量之相關性最高，而表十二之估算結果也甚接近於實測值，且蒸發量資料亦易於取得，這些說明應用上的準確、簡便，因此，若以實用方便為由，以蒸發量法為參考作物需水量配合生長度日數，找出作物係數以為規劃設計之憑藉，也是值得今後努力的方向。

## 參考文獻

- 臺灣大學農工系、嘉南農田水利會、農工中心「學甲旱作灌溉試驗總報告」1976

- 陳尚、蔡奇成「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 Vol. 13 No. 4 p.26-49 1967
- 唐榮澤「臺南地區日射量之分析」氣象學報 25 (2): 15-20 1979
- 張建助「作物灌溉需水量之研究」國家長期科學委員會研究彙報第二期 p.353-371 1968
- 黃國禎、徐森雄「臺灣地區日射與日照關係之初步探討」氣象學報 Vol. 28 No. 1 p. 22-29 1982
- 楊之遠「作物微氣象——作物葉冠與大氣間動量、熱量及質量之垂直輸送」科學農業 33(1-2)2-8 1985
- 顏月珠「應用數理統計學」三民書局 1982
- 顏俊士「臺灣各地之日射量估計問題」大氣科學 vol.1 p72-80 1974
- 農工中心、嘉南農田水利會「玉米不同灌溉處理效果及需水量試驗研究」期中報告 1986
- 農復會、臺灣大學農工系「旱地作物需水量試驗報告」1965
- 中央氣象局「氣候資料年報」1979-1984
- 臺灣糖業研究所「氣象月報表」
- 嘉南農田水利會學甲旱作灌溉試驗站「氣象月報表」
- Ångström, A. "Solar and terrestrial radiation" Q. J. R. Meteorol. Soc. Vol. 50 p121-126 1924
- Biscoe, P.V. and Gallagher, J. N. "Weather, dry matter production and yield" In: "Environmental effects on crop physiology" Edited by Landsberg, J.J. and Cutting, C. V. p. 75-100 Academic Press 1977
- Black, J. N. Bonython, C.N. and Prescott, J. A. "Solar radiation and the duration of sunshine" Q. J. R. Meteorol. Soc. Vol. 80 p231-235 1954
- Bosen, J. R. "A formula for approximation of saturation vapor pressure over water" Monthly Weather Rev. 88(8): 275-276 1960
- Brunt, D. "Notes on radiation in the atmosphere" Q. J. R. Meteorol. Soc. Vol. 58 p. 389-420 1932
- Cross, H. Z. and Zuber, M. S. "Prediction of flowering dates in maize based on different methods of estimating thermal units" Agron. J. 64:351-357 1972
- Cuenca, R.H. and Nicholson, M. T. "Application of Penman equation wind function" ASCE Vol. 108 IR1:13-23 1982
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. "Guidelines for predicting crop water requirements" FAO Irrig. and Drain. Paper No. 24 FAO,

- Rome 1977
22. Draper, N. R. and Smith, H. "Applied regression analysis" 2nd. Ed. 1981
23. Gilmore, E. C., Jr. and Roger, J. S. "Heat units as a measure of measuring maturity in corn" Agron. J. 50:611-615 1958
24. Iqbal, M. "A Introduction to solar radiation" Academic Press 1983
25. Jensen, M. E. Ed. "Consumptive use of water and irrigation water requirements" ASCE 1974.
26. Medershi, H. J. Miller, M. E. and Weaver, C. R. "Accumulated heat units for classifying corn hybrid maturity" Agron. J. 65:743-747 1973
27. Merva, G. and Fernandez, A. "Simplified application of Penman's equation for humid regions" ASAE 28(3):819-825 1985
28. Penman, H. L. "The role of vegetation in meteorology, soil mechanics and hydrology" Brit. J. Physics, Vol.2 p.145-151 1951
29. Penman, H. L. "Estimating evaporation" Trans. Am. Geoph. U. Vol. 37 No. 1 p43-50
- 1956
30. Penman, H. L. "Vegetation and hydrology" Tech. Communication No. 53 Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, Eng. 1963
31. Prescott, J. A. "Evaporation from a water surface in relation to solar radiation" Trans. R. Soc. Aust. 64:114-118 1940
32. Sammis, T. W. Mapel, C. L. Lugg, D. G. Lansford, R. R. and McGuckin, J. T. "Evapotranspiration crop coefficients predicted using growing-degree-days" ASAE 28(3): 773-780 1985
33. Tanner, C. B. "Energy balance approach to evapotranspiration from crops" Soil Sci. Soc. Am. Proc. 24:1-9 1960
34. Tanner, C. B. "Evaporation of water from plants and soils" In: "Water deficits and plant growth" Edited by T.T. Kozlowski Vol. I p73-106 1968
35. Wartena, L. "Basic difficulties in predicting evaporation" J. Hydrol. 23:159-177 1974
36. Weisner, C. J. "Hydrometeorology" 1970

專營土木、水利、建築等工程

松群營造有限公司

負責人：林 燦 祥

地 址：鳳山市中正路二二七號

電 話：(07)三八四一四九九  
三八四八二六六