

從氣象因子估算玉米需水量之研究

施 嘉 昌

國立台灣大學農業工程系教授

黃 振 昌

農業工程研究中心技師

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。

本研究以嘉南農田水利會學甲旱作灌溉試驗站74年，75年，76年秋作玉米試驗資料驗證 Blaney - Criddle 法、Thorntwaite 法、A-pan 法及混合法，應用於本省在估算作物需水量方面之適用性，結果顯示：

1. Thorntwaite 法，呈現最大之偏差值，適用性不佳。
2. Blaney - Criddle 法，適用性較 Thorntwaite 法為佳。
3. A-pan 法及混合法，適用性均較前二法為佳；惟作物係數上之估算，本研究分析之生長度日數較 A-pan 法之定值計算，實際及合理。

前 言

作物需水量 (Crop Water Requirements 或 Consumptive Use) 亦即作物蒸發散量 (Evapotranspiration) 之定義為：作物葉面蒸散與其附近地面及水面蒸發之和；在農業灌溉應用上，如灌溉計劃研擬、灌溉系統設計、灌溉營運管理等均為極重要之基本資料。

作物需水量與各氣象因子間相關性估算式之探討，已有長久之歷史，由於不少專家學者研究不遺餘力，先後發表甚多可靠之間接推估方法，漸漸取代投入可觀之時間、金錢、人力之直接觀測方式。利用氣象資料，作為作物需水量估算之依據，尤其可用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、農業工程師快速而且可靠之估算能力，為農業先進國家廣泛的應用與重視。

作物需水量之估算，可分為作物係數及作物本身之需水量兩項，國內以往僅注重作物需水量方面之研究⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁸⁾，對作物係數部份乃因作物試驗資料的短缺，資料甚少；而作物需水量方面由於缺乏有關諸氣象因子測定儀器之裝置，所以均引用國外地域色彩濃厚之 Blaney - Criddle 法或 Thorntwaite 法之經驗估算式來分析應用，雖便於國內使用，然而探究該二估算式，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⁽³⁾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，依國內氣候條件進一步予以校正。本研究之目的在嘗試考慮農業氣象、灌溉、作物觀點於一體，以理論觀點——應用 Penman 之混合法予以分析估算玉米作物需水量，同時並比較及探討 Blaney - Criddle 法、Thorntwaite 法與 A-pan 法各種推估法之間，在估算應用上之適用性，以作為將來台灣估算其它作物需水量之參考。

使用材料及研究方法

一、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系吸收，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，如是作物在整個成長過程中，葉面蒸散受作物生長因子之影響大而地面蒸發則受氣象因子之影響大，總而言之，當土壤水分供應適當，則作物需水量受氣象因子及作物生長階段——作物耗水特性兩大要素所支配。與各氣象因子相關之參考作物需水量估算式，本研究採用 Penman 于 1948 年所發表之混合法 (Combination Approach)，而以歷年 (1962 ~ 1971) 玉米試驗資料經迴歸分析得之作物係數⁽²⁾ 為作物之耗水指標。

(一)混合法 (Combination Approach) (14) (16) (17)

Penman 于 1948 年發表之方程式包含能量 (energy) 項 太陽輻射及空氣動力 (aerodynamic) 項……風速、濕度，並陸續於 1952 年，1956 年，1963 年修正方程式裡內含之地域性常數，在世界各地受到廣泛的應用與很好之評價，方程式如下：

$$ET_0 = \left[\frac{s}{s+r} (R_n - G_s) + \frac{r}{s+r} 15.36 W_f \Delta E \right] \lambda^{-1} \dots\dots\dots(1)$$

式中，ET₀：特種作物蒸發散量

S：飽和蒸汽壓力曲線斜率

r：濕度常數

R_n：淨輻射量

G_s：土壤熱通量

W_f：風速函數

ΔE：飽和蒸汽壓力曲線斜率

λ：蒸發潛熱

(二)作物係數 (Crop's Coefficient)

作物係數，作物耗水特性之指標，本研究玉米作物係數藉以下方程式估算⁽²⁾：

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

式中，K_c：作物係數

G : 累積生長度日數

二、Blaney-Criddle法⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾

Blaney-Criddle 于 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, 創始於美國西部地區, 頗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:

$$C U = K_c P \left(\frac{45.7 T_a + 813}{100} \right) \dots\dots\dots(3)$$

式中, C U : 月作物需水量 (mm)

K_c : 作物係數, 可由試驗求出。本研究應用此法時採用表 1 結果之平均值。

P : 日照百分率, 數值依緯度而定。

T_a : 月平均溫度 (°C)。

三、Thornthwaite法⁽¹⁴⁾

Thornthwaite 于 1948 年, 假設區域裡土壤含有充份之水分含量, 水分供應不成為限制因子, 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, 其估算經驗公式如下:

$$C U = 16 \left(\frac{10 T_a}{I} \right)^a \dots\dots\dots(4)$$

式中, C U : 月作物需水量 (mm)

T_a : 月平均溫度 (°C)

I : 年間熱量係數 = $\sum i$

$$i : \text{月間熱量係數, } i = \left(\frac{T_a}{5} \right)^{1.514} \dots\dots\dots(5)$$

a : 年間熱量係數

$$a = 6.751 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49239 \dots\dots\dots(6)$$

四、蒸發量法(Evaporation Method)

蒸發皿蒸發量為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:

$$E T_o = K_c E_{pan} \dots\dots\dots(7)$$

式中, E T_o : 特種作物需水量 (mm)

K_c : 作物係數, 本研究應用此法時, 採用表 2 結果之平均值。

E_{pan} ：蒸發皿蒸發量 (mm)，本研究採用A型蒸發皿之蒸發量。

五、各氣象因子之計算

(一)飽和蒸汽壓力曲線斜率S：

為便於數位計算機上之執行，取代查表的方式，本研究以(8)式計算飽和蒸汽壓力曲線斜率 $S^{(8)}$ ：

$$S = 33.8639 [0.05904 (0.00738T + 0.8072)^7 - 0.0000342] \dots\dots(8)$$

式中，T：溫度 (°C)

表1 依歷年田間玉米淨耗水量計算之Kc值⁽¹⁾(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

平均值：0.39

表2 依歷年田間玉米淨耗水量計算之Kc值⁽¹⁾(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
51.年春			0.22	0.57	0.81	0.50								0.53
51.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
52.年秋									0.31	0.46	0.54	0.33		0.41
52.年秋	0.28									0.32	0.63	0.51		0.44
52.年秋	0.77	0.57	0.51								0.24	0.63		0.54
52.年秋	0.18									0.30	0.69	0.45		0.41
59.年秋	0.49									0.46	0.58	0.52		0.51

平均值：0.48

(二)濕度常數 γ

$$\gamma = \frac{C_p P_a}{0.622 \lambda} \dots\dots\dots(9)$$

式中， C_p ：定壓比熱

$$C_p = 0.242$$

$$P_a : \text{大氣壓力 } P_a = 1013 - 0.1055EL \dots\dots\dots(10)$$

EL ：農業氣象站之高程 $E1 = 21.6$

$$\lambda : \text{蒸發潛熱 } \lambda = 595 - 0.51 T \dots\dots\dots(11)$$

(三)淨輻射量 R_n

太陽之輻射輸出，透過大氣層頂，經大氣吸收、散射及反射等等綜合效應而達地面，其淨輻射量 R_n ，即為所有入流量 R_{ns} ，與出流量 R_{nl} 之差值，應用上，除藉儀器觀測獲得外，尚可由一系列數學式子分析及許多專家學者研究分析成果計算而得。本研究分析方式是採用後者。

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

$$= (1 - \alpha) R_s - (1 - C_1 - C_2 \sqrt{Ed}) \sigma T_a^4 \left[0.1 + 0.9 \left(\frac{n}{N} \right) \right] \dots\dots\dots(12)$$

式中， α ：反照率 (albedo)，本研究取用 0.23⁽¹⁴⁾

R_s ：日射量，本研究之估算式如下⁽²⁾：

$$R_s = R_a \left[0.2 + 0.43 \left(\frac{n}{N} \right) \right] \dots\dots\dots(13)$$

C_1, C_2 ：地域性參數，由於國內目前尚無此方面資料，所以本研究依 Jensen 推薦之值處理⁽⁸⁾。

$$C_1 = 0.39, C_2 = -0.05$$

σ ：Stefan - Boltzmann 常數

Ed ：實際空氣中之汽壓

T_a ：平均溫度，以絕對溫度表式。

n/N ：日照率因子。

R_a ：外大氣層之水平輻射量

(四)土壤熱通量 G_s

土壤熱通量，由於白天吸收熱量，晚上放出熱量，計量上除藉由精密之儀器觀測外，也有以溫度之均值方式估計；由於在(1)式中與其他量 R_n ， $E T_o$ 比較，所佔比例甚微，應用上可略而不計^{(13) (14) (19)}。

(五)風速函數 W_f

在所有應用氣象資料來估算作物需水量之估算式裡，Penman 之混合法方程式，之所以能稱之為較合理、可靠、健全的估算式，其原因是混合法方程式，除考慮輻射能量

影響外，同時也考慮風速、濕度的影響；風速函數形式如下：

$$W_f = W_1 + W_2 U \dots\dots\dots(14)$$

式中， W_1 ， W_2 ：地域性參數，本研究取用⁽²⁾ $W_1 = 0.2$

$$W_2 = 0.00146$$

U ：離地一特定高度之平均風速。

(六)飽和差 ΔE

飽和差 $\Delta E = E_a - E_d$ ， E_a 是日平均溫度之飽和蒸汽壓， E_d 是露點溫度之飽和蒸汽壓，實用上常以最低溫度取代之⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

(七)生長度日數 G

$$G = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base} \dots\dots\dots(15)$$

式中， T_{max} ：最高氣溫

T_{min} ：最低氣溫

T_{base} ：作物成長之基準溫度 (base temperature)，本研究以玉米為例，其值取⁽¹⁸⁾ $T_{max} = 32$ ， $T_{min} = 10$

(八)外大氣層水平輻射量 R_a

日射量來自太陽輻射，為作物生長之主要能源，也是蒸發散產生之原因之一。本研究為求計量精確度之提高，取代查表的方式，以下列諸式於數位計算機執行算出輻射量 R_a 值。

$$R_a = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_o \sin \delta \sin \phi \left(\frac{\pi}{180} W_s - \tan W_s \right) \dots\dots\dots(16)$$

式中， I_{sc} ：太陽常數 = 1367 W/m^2 (1.96 Ly/min)¹²

ϕ ：緯度 (latitude)

δ ：太陽赤緯 (declination)

$$\delta = \frac{180}{\pi} (0.006918 - 0.399912 \cos \theta + 0.070257 \sin \theta - 0.006758 \cos 2\theta + 0.000907 \sin 2\theta - 0.002697 \cos 3\theta + 0.00148 \sin 3\theta) \dots\dots(17)$$

E_o ：地球軌道離心校正因子

$$E_o = 1.0011 + 0.034221 \cos \theta + 0.00128 \sin \theta + 0.000719 \cos 2\theta + 0.000077 \sin 2\theta \dots\dots\dots(18)$$

θ ：日角 (day angle)

$$\theta = 2 \pi (dn - 1) / 365 \dots\dots\dots(19)$$

dn ：日數，從1月1日為1計起

W_s ：日出時角 (sunrise hour angle)

$$W_s = \text{Arc cos} (- \tan \phi \tan \delta) \dots\dots\dots(20)$$

六、本研究採用資料

(一)玉米作物需水量試驗資料，取自嘉南農田水利會學甲旱作灌溉試驗站，74年、75年、76年秋作玉米試驗成果⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾以作為本研究諸估算式估算結果之驗證及比較。

(二)諸估算式有關氣象因子資料，如：輻射量、氣溫、日照、風速、濕度、蒸發量等，除藉上述一系列方程式計算外，所需資料，均採自玉米栽培時期之氣象觀測資料。

結果與討論

(一)依上述所使用之材料及研究方法，作物需水量諸估算式估算值分析結果與74年、75年、76年秋作玉米試驗值比較，分別如表3、表4、表5所示。由表3可看出A-pan法與本研究分析，較接近實測值，其偏差分別是3.74mm、-2.29mm、Blaney-Criddle法居次，偏差值是8.23mm，而Thornthwaite法與實測值偏差則最大，偏差值達173.56mm。表4所示之偏差值，也是A-pan法與本研究分析的，較Blaney-Criddle法、Thornthwaite法為小。而表5所示稍微異於前二表，Blaney-Criddle法與本研究分析，較接近實測值，A-pan法居次。Thornthwaite法仍舊是與實測值偏差最大。

由連續三年秋作資料驗證諸估算式估算值，結果顯示：來自於美國中部與西部濕潤地區之Thornthwaite法，與其他諸式在估算作物需水量估算上之比較，其適用性不高，而來自於美國西部乾燥地區之Blaney-Criddle法，也不高，探究其原因，除立地背景條件異於國內氣候條件外，在眾多氣象因子中所掌握僅為氣溫與日照二項因素，過於簡單，而忽略風速與濕度對促進蒸發之作用。實際上，影響作物需水量之氣象因子是多種而複雜，其間有單獨性，亦有綜合性，依據Jensen⁽⁴⁾指出：「作物需水量之估算精確度，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⁽²⁰⁾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之觀點表示。

蒸發皿蒸發量為諸氣象因子之綜合指標，也是於各種氣象因子與作物蒸發散量相關性最高，如表6所示，相關係數達0.93~0.94，均較其他諸氣象因子為高。表3、4、5所示，A-pan法估算之結果與實測值甚為接近，適用性均較Blaney-Criddle法及Thornthwaite法為佳。

本研究分析所採用之Penmn混合法——混合能量及空氣動力學法，自有其物理意義及觀點，在(1)式中，包含有風速及飽和蒸汽壓力差，乃具有乾燥空氣水汽分子之能力； $s / s + r$ 及 $r / s + r$ 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；涵蓋的氣象因子較其他估算法多，等等皆是該法之特色。由表3、4、5分析結果顯示，本研究分析與實測值之偏差值，分別是-2.29mm，-8.96mm，-20.87mm，均比其他估算法較為接近實測值；然表5所示，與實測值尚有20.87mm之差距，雖比

表3 作物需水量諸估算式估算值之結果比較

Blaney-Criddle Method

M. No	Tave	f	Kc	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)

A - Pan Method

M. No	Evapo	Kc	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	28.30	0.48	13.82
12-3	30.40	0.48	14.59
1-1	28.40	0.48	13.63

Summation of Consumptive Use of Water 206.40(mm)

Thorntwaite Method

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)

本研究分析

M. No	ETO	E	Kc	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. Thorntwaite	376.22	185.64	173.56
5. 本研究分析	200.37	98.87	-2.29

表4 作物需水量諸估算式估算值之結果比較

Blaney-Criddle Method						Thornthwaite Method						
Month	No	Tave	f	Kc	ET	Month	Tave	cu	C.F.	ET		
10	—	1	27.3	54.59	0.39	21.29	10	27.3	149.16	0.96	142.50	
10	—	2	27.7	55.07	0.39	21.48	11	23.9	93.96	0.90	84.72	
10	—	3	26.9	54.10	0.39	21.10	12	22.1	71.58	0.87	62.51	
11	—	1	25.4	49.35	0.39	19.25	1	18.7	38.85	0.89	34.43	
11	—	2	23.5	47.18	0.39	18.40	2	20.3	52.01	0.17	8.65	
11	—	3	22.7	46.26	0.39	18.04	Sum of Consumptive Use of Water.					
12	—	1	20.7	42.60	0.39	16.61	332.81 (mm)					
12	—	2	20.7	42.60	0.39	16.61						
12	—	3	19.5	41.27	0.39	16.09						
1	—	1	20.0	42.44	0.39	16.55						
1	—	2	18.7	40.98	0.39	15.98						
1	—	3	17.6	39.75	0.39	15.50						
2	—	1	23.8	24.54	0.39	9.57						
Sum of Consumptive Use of Water...												
...226.48 (mm)												
A-Pan Method						本研究分析						
Month	No	Evapo	Kc	ET	Month	No	ET _o	G	Kc	ET		
10	—	1	43.56	0.48	20.91	10	—	1	32.18	124.00	0.38	12.11
10	—	2	41.09	0.48	19.72	10	—	2	31.65	258.80	0.53	16.89
10	—	3	47.18	0.48	22.65	10	—	3	29.80	392.25	0.65	19.37
11	—	1	37.44	0.48	17.97	11	—	1	27.63	496.70	0.71	19.72
11	—	2	30.84	0.48	14.80	11	—	2	24.74	591.65	0.75	18.57
11	—	3	27.74	0.48	13.32	11	—	3	24.27	677.40	0.77	18.61
12	—	1	24.28	0.48	11.65	12	—	1	22.57	763.30	0.77	17.30
12	—	2	26.75	0.48	12.84	12	—	2	16.93	841.10	0.75	12.73
12	—	3	24.75	0.48	11.88	12	—	3	20.55	921.35	0.72	14.85
1	—	1	20.03	0.48	9.61	1	—	1	18.84	1004.65	0.68	12.75
1	—	2	30.59	0.48	14.68	1	—	2	20.38	1076.05	0.62	12.73
1	—	3	30.58	0.48	14.68	1	—	3	24.34	1150.20	0.56	13.60
2	—	1	17.63	0.48	8.46	2	—	1	13.54	1182.55	0.53	7.12
Sum of Consumptive Use of Water ...						Sum of Consumptive Use of Water ...						
... 193.18 (mm)						... 196.34 (mm)						

估 算 方 法	作 物 需 水 量	與 75. 年 秋 作 玉米實測值比較	與75.年秋作玉米 實測值之偏差值
1. 75 年實測值	205.30 mm	100.00 %	0.00 mm
2. Blaney-Criddle	226.48	110.32	21.18
3. A- pan	193.18	94.10	- 12.12
4. Thornthwaite	332.81	162.11	127.51
5. 本研究分析	196.34	95.64	- 8.96

表5 作物需水量諸估算式估算值之結果比較

Blaney-Criddle Method

Month	No.	Tave	f	Kc	ET	
9	—	3	27.2	28.97	0.39	11.30
10	—	1	29.2	56.89	0.39	22.19
10	—	2	29.2	56.89	0.39	22.19
10	—	3	26.3	53.38	0.39	20.82
11	—	1	25.9	49.92	0.39	19.47
11	—	2	25.6	49.57	0.39	19.33
11	—	3	23.2	46.83	0.39	18.26
12	—	1	18.4	40.05	0.39	15.62
12	—	2	19.0	40.71	0.39	15.88
12	—	3	21.2	43.15	0.39	16.83
1	—	1	20.0	21.22	0.39	8.28
Sum of Consumptive Use of Water ...						
... 190.15 (mm)						

A-pan Method

Month	No.	Evapo.	Kc	ET	
9	—	3	39.56	0.48	18.99
10	—	1	43.28	0.48	20.77
10	—	2	38.94	0.48	18.69
10	—	3	36.38	0.48	17.46
11	—	1	33.68	0.48	16.17
11	—	2	29.66	0.48	14.24
11	—	3	21.64	0.48	10.39
12	—	1	30.84	0.48	14.80
12	—	2	26.90	0.48	12.91
12	—	3	25.78	0.48	12.37
1	—	1	25.48	0.48	12.23
Sum of Consumptive Use of Water ...					
... 169.03 (mm)					

Thornthwaite Method

Month	Tave	cu	C.F.	ET
9	28.7	178.12	0.34	60.33
10	28.2	167.33	0.96	159.86
11	24.9	107.50	0.90	96.93
12	19.6	45.91	0.87	40.10
1	20.0	51.48	0.30	15.21
Sum of Consumptive Use of Water ...				
... 372.43 (mm)				

本研究分析

Month	No.	ETo	G	Kc	ET	
9	—	3	38.11	152.15	0.41	15.72
10	—	1	36.33	316.75	0.59	21.40
10	—	2	30.15	483.25	0.71	21.31
10	—	3	37.78	648.10	0.76	28.88
11	—	1	31.39	784.50	0.76	23.97
11	—	2	26.63	919.50	0.72	19.26
11	—	3	27.13	1039.20	0.65	17.71
12	—	1	26.78	1119.05	0.59	15.75
12	—	2	26.56	1205.10	0.50	13.33
12	—	3	23.71	1313.45	0.37	8.75
1	—	1	24.12	1408.30	0.23	5.58
Sum of Consumptive Use of Water ...						
... 191.61 (mm)						

估 算 方 法	作 物 需 水 量	與 76 年 秋 作 玉米 實測值比較	與 76 年 秋 作 玉米 實測值之偏差值
1. 76 年實測值	212.48 mm	100.00 %	0.00 mm
2. Blaney-Criddle	190.15	89.48	- 22.32
3. A-pan	169.03	79.54	- 43.45
4. Thornthwaite	372.43	175.26	159.95
5. 本研究分析	191.61	90.17	- 20.87

其他估算法較為接近，不過，其推估能力之穩定度，仍有待進一步長期資料之測試，以健全該法在台灣之適用性。

(二)作物需水量之估算分兩部份：一為參考作物需水量 E_{To} 與氣象因子相關之估算式，另一為作物耗水特性——作物係數。本研究在各種估算式中，Blaney-Criddle 法及 A-pan 法，從種植到收穫，均取用定值的 K_c 計算，分別是 0.39 及 0.48，在作物生理需求觀點上，較不盡實際及合理。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，在同一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，所以在表 3、4、5 均呈現最大之偏差值。本研究分析所採用者，乃以作物成熟所需之熱量單位——生長度日數 (growing-degree-days) 之觀點估算作物係數， K_c 值從種植到收穫，由表 3、4、5 可看出，大約從 0.38 漸增至 0.77 最高峰後再下降至 0.23，耗水特性走勢較為接近作物生理需水特性。

表 6 各種氣象因子與作物蒸發散量之相關⁽²⁾

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	—
蒸氣飽和差	—	0.59
風速	0.35	—
蒸發	0.93	0.94

結 論

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，在農業先進的國家受到廣泛的重視與應用。本文利用 74、75、76 年玉米秋作資料，驗證 Blaney-Criddle 法、Thornthwaite 法、A-pan 法及混合法，在估算作物需水量方面之適用性。結果發現，Thornthwaite 法由於估算上與作物種類無關，所以呈現最大之偏差值，適用性最低，Blaney-Criddle 法較 Thornthwaite 法為佳，惟作物係數上取定值估算稍欠實際、合理；A-pan 法與本研究分析之適用性，均較前二法為佳，與實測值較為接近；惟作物係數上之估算，本研究以生長度日數之方式估計較 A-pan 法之定值計

算，實際、合理及客觀。以三年秋作玉米資料驗證，Penman 之混合法及生長度日數分析作物係數兩者合併估算玉米作物需水量，較接近實測值，可提供其他作物需水量估算上之參考。

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、黃振昌，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。
3. 陳尚、蔡奇成，1967，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13(4)：26—49。
4. 張建勳，1968，作物需水量之研究 國家長期科學委員會研究彙報2：353-371。
5. 農工中心、嘉南農田水利會，1986，玉米不同灌溉處理效果及需水量試驗研究第一年報告。
6. 農工中心、嘉南農田水利會，1987，玉米不同灌溉處理效果及需水量試驗研究第二年報告。
7. 農工中心、嘉南農田水利會，1988，玉米不同灌溉處理效果及需水量試驗研究第三年報告。
8. 農復會、台灣大學農工系，1965，旱地作物需水量試驗報告。
9. 嘉南農田水利會學甲旱作灌溉試驗站：氣象月報表。
10. Bosen, J. R. 1960 A formula for approximation of saturation vapor pressure over water. *Monthly Weather Rev.* 88(8): 275—276.
11. Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. 1977 Guidelines for predicting crop water requirements FAO Irrig. and Drain. Paper No. 24 FAO, Rome.
12. Iqbal, M. 1983 A Introduction to solar radiation Academic Press.
13. Jensen, M. E., Robb, D. C. N. and Franzoy, C. E. 1970 Scheduling irrigation using climate-crop-soil data ASCE Vol. 108 IR1: 25—38.
14. Jensen, M. E. Ed. 1974 Consumptive use of water and irrigation water requirements ASCE.
15. Merva, G. and Fernandez, A. 1985 Simplified application of Penman's equation for humid regions ASAE 28(3): 819—825.
16. Penman, H. L. 1956 Estimating evaporation *Trans. Am. Geoph. U.* 37(1): 43—50.
17. Penman, H. L. 1963 Vegetation and hydrology Tech. Communication No. 53 Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, Eng.
18. Shaw, R. H. 1977 Climate requirement In: "Corn and corn improvement" Sprague, G. F. Ed. American Society of Agronomy, Agronomy No. 18 pp. 591—623.
19. Tanner, C. B. 1960 Energy balance approach to evapotranspiration from crops. *Soil Sci. Soc Am. Proc.* 24: 1—9.
20. Wartena, L. 1974 Basic difficulties in predicting evaporation *J. Hydrol.* 23: 159—177.

APPLYING CLIMATOLOGICAL-FACTORS FOR ESTIMATING CONSUMPTIVE USE OF CORN

Charles C. C. Shih

Professor

Dept. of Agricultural Engineering
National Taiwan University

Jenn-Chang, Hwang

Engineer

Agricultural Engineering Research Center

ABSTRACT

Water consumptive use of crops is one of the important parameters not only in the utilization and planning of water resources but also in the management and operation of agricultural irrigation projects. Using climatological factors methods may be rapid and reliable than the methods of actual direct measuring in the field. The formulas of considering climatological factors are extensively applied and adopted in most advanced agricultural countries.

This study estimates the consumptive use of corn by the following 4 methods: Blaney-Criddle method, Thornthwaite method, A-pan and Combination method. The consumptive use of corn were calculated from the above methods and compared with the autumn-crop data of '85, '86, '87 which obtained from the Upland Crop Irrigation Experiments at Hsueh-Chia Station in Chia-nan Area. According to the results, the suitability of these methods for estimating consumptive use in Taiwan is listed as below:

1. The result from Thornthwaite method compared other methods, the suitability is not recommended.
2. The Blaney-Criddle method's suitability is better than which from Thornthwaite method.
3. The A-pan and the Combination method's suitability is better than the two methods above. However, the growing-degree-days approach used in the Combination method to estimate crop's coefficient was found more practical and reasonable than which the average approach in the A-pan method.

5