

台灣地區作物需水量推估模式之合適性研究

Study on the Suitability of Consumptive Use Estimation Methods for Taiwan Area

國立台灣大學農業工程學研究所教授

甘 俊 二
Kan Chun-E.

國立嘉義農專講師

陳 清 田
Chen C.-T.

國立台灣大學農業工程學研究所研究生

陳 焜 耀
Chen Kune-yao

摘 要

在水資源捉襟見肘的現階段，適時適量的實施灌溉，除可確保作物之產量外，更有效地提升水資源之利用。為達此一目標，則如何有效快速準確地測算作物需水量，以提供農業灌溉計畫之研擬與營運管理之參考，實為從事灌溉事業者刻不容緩之要務。

本研究係應用國際糧農組織 (FAO) 於 1984 年所推荐之 Modify Penman、Modify Blaney-Criddle、Radiation 及蒸發皿蒸發量推求法等四種作物需水量間接推估法，與 1994 年國際灌溉排水協會 (ICID) 所公佈之 Penman-Monteith 法及以往國內外常用之估算作物需水量推估式，進行作物需水量之推估。並以嘉南學甲地區自民國 78 年至 81 年間所做之田間試驗資料加以驗證，期望藉由諸估算式之分析比較，建議一適用於本省之合理、適切之推估模式，以提供水資源規劃之參考。

由研究結果顯示，在諸估算式中以 Penman-Monteith 法為最佳，探究其原因，蓋其對於蒸發散量之推求是以植物生理為出發點，消弭了估算式中因地域性參數之影響所產生的誤差，故其穩定性佳，日後臺灣地區作物需水量之推估，在資料充足之情況下可以此估算式為之。

關鍵詞：作物需水量，空氣動力阻力，生長度日數，作物遮蔽阻力。

ABSTRACT

Nowadays, due to the seriously constrained availability of water resources in the Taiwan area, the practice of irrigation in adequate quantity at the right times will be able to ensure the production of irrigated crops as well as promote the efficiencies of water resource uses. For the preparation of irrigation plans and for the reference for irrigation system operation and management, it is a pressing task to establish a method for the prompt, efficient, and accurate estimation of the water requirements of crops.

The methods of consumptive use or crop water requirement estimation used in this study for irrigation in Taiwan include the Modified Penman, Modified Blaney-Criddle, Radiation, and Pan Evaporation method recommended by the Foods and Agriculture Organization, in 1984, as well as the Penman-Monteith Method recommended by the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) in 1994. Other methods often used in Taiwan and abroad were also tested. The results were further verified with the experiment data obtained from Hsieh-chia area in the period of 1989-1992. Comparisons between these methods were subsequently made in order to reach a consumptive use estimation method, which is rational and appropriate for Taiwan, to serve as a reference for the water resources planning of the island.

The results of this study showed that, among the various methods of consumptive use estimation, the Penman-Monteith was the most suitable for the Taiwan area. The better stability achieved may be due to that this method is based on the physiological conditions of plants, eliminating the errors caused by territorial parameters. It is recommended that the Penman-Monteith method be applicable in the Taiwan area as long as the required input data are sufficiently available.

Keywords : Consumptive use, Evapotranspiration, Aerodynamic resistance, Growing degree days, Crop canopy resistance.

一、前言

臺灣地區因受地形地勢之限制，使得河川之流向皆呈坡陡流短，又因降雨時空之分布不均及環境污染之日趨嚴重，致河川水質迭遭破壞。因此，縱使每年約有 2510mm 之年平均降雨量，然於水資源之利用上，仍處捉襟見肘，據經濟部水資會之研究報告指出（經濟部水資會，1991），臺灣地區各標的用水總量估計約 175.71 億立方公尺，其中農業用水約 135.5 億立方公尺為最多，佔用水總量之 77%，又在農業用水中，農田灌溉用水量約 103.3 億立方公尺，佔農業用水總量之 76%，由此可知，如何確切有效使用灌溉水量，除攸關作物產值，更與水資源利用率之提升，有著密不可分之關係，因此，如何有效、快速、準確的估算作物需水量，實為從事灌溉事業者之首務。

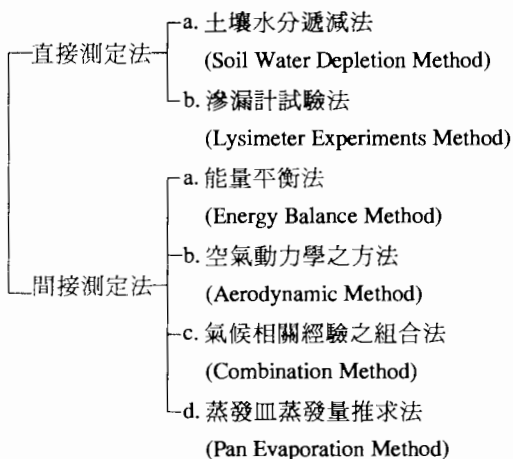
長久以來，雖有不少國內外之專家學者致力於利用作物微氣象學 (Crop micro-meteorology) 及氣候資料相關經驗式 (Empirical relationships from climate data) 來估算作物需水量，先後亦發表了甚多可靠之推估方法，然因受區域條件不同之影響，則估算式之精確性及適用性亦有待商榷。陳

氏 (1967) 等雖曾應用 Penman 之混合法 (Combination Approach, 1948) 估算國內各作物之蒸發散量，但並未對該法中內含之地域性參數，依國內氣候條件予以校正，黃氏 (1986) 雖進一步將地域性參數予以校正，然因所引用之氣象資料較為短缺，故校正後之參數，其代表性、穩定性稍嫌不足，張氏 (1990) 與張、甘氏 (1995) 更分別蒐集許多估算式予以比較分析，然因欠缺田間試驗資料之驗證，使其研究結果似有滄海遺珠之憾。本文為建議一適用於本省之完善估算式，蒐集了包括以植物生理為出發點在內之 Penman-Monteith (1994) 等諸估算式，並以嘉南學甲地區之田間試驗及氣象資料，予以比較分析各種推估方法間，在估算應用上之適用性、合理性，以確立臺灣地區作物需水量之最佳估算模式。

二、作物需水量測定方法

蒸發散 (Evapotranspiration) 為在自然環境下，水由液態轉變為氣態，而擴散至大氣中之現象。其中包括由土壤表面、水面、或其它之固體表面之蒸發 (Evaporation) 與水經由植物之氣孔而擴散至大氣中之蒸散 (Transpiration) 兩部份，在自然環境

下蒸發與蒸散兩者不易分離，因此一般將其合併而稱之為蒸發散。對於蒸發散量之測算方法甚多，發展至今依其採用之方法，可加以分類為由水平衡觀點之直接測定法，與應用微氣象原理之間接測定法二種，詳細之分類方式如下所示：



在上述之諸估算方法當中以直接測定方法，以水收支平衡觀點之直接測定法較為精確，而且符合實地之狀況，惟引用此法對於其測定與控制均需龐大之經費、人力及設備，且需長時期從事直接之田間觀測，加以干擾因素錯綜複雜不易控制，因此在短時間之內難以達到理想之效果。對於新開發地區而言，在無相關資料之情況下，務必預置完整之各種試驗場地與試驗設備後，再進行各項基礎試驗，依試驗之結果應用於田間，如此一來費時甚久且不切實際。因此，如擬建立一新開發地區之開發計畫，或在已灌溉區域因為種種原因無法採用直接測定方法時，則需根據現有之資料，以間接推估之方法進行估算，再判定選擇較實用者應用之。

作物之生長與低層大氣環境之各種氣象因子關係至為密切，研究作物需水量與各氣象因子相關性之間接估算方法甚多，若以氣象因子為基礎加以分類，大致可以歸納如下：

1. 溫度法 (Temperature Method) : Blaney-Criddle Method(1945)、Modify Blaney-Criddle Method(FAO, 1984)、Thornthwaite Method(1948)、Day-degree Method(1924)等。
2. 輻射法 (Radiation Method) : Hargreaves

Method(1956)、Jensen-Haise Method(1963)、Radiation Method(FAO, 1977)、Stephens Method(1965)、Makkink Method(1957)、Priestley-Taylor Method(1973)、Turc Method(1961)等。

3. 濕度法 (Humidity Method) : Ivanou Method(1954)、Papadakis Method(1966)等。

4. 蒸發量法 (Evaporation Method) : Pan evaporation Method(FAO, 1977, 1984)等。

5. 組合法 (Combination approach) : Penman Method (1948, 1952, 1956, 1963)、Modify Penman Method (FAO 1977, 1984, ICID 1994)、Van Bavel Method(1966)等。

三、研究方法

本文對於作物需水量之估算，在間接測定方面係採用國際糧農組織(FAO)於1984年所推荐之 Modify Penman 法、Modify Blaney-Criddle 法、Pan Evaporation Method 法、Radiation 法及 ICID 於1994年所推薦之 Penman-Monteith Method；除此之外尚包括 Hargreave 法、Jensen-Haise 法、Van Bavel 法、Priestley-Taylor 法等諸推估模式進行作物需水量之估算。在直接測定法方面是以嘉南學甲地區，自民國78年至81年間以 Lysimeter Experiments Method 所做之田間試驗資料加以驗證，期望藉由諸估算式之分析比較，建議一適用於本省之合理、適切之推估模式。

1. Modified Penman(FAO, 1984)

Penman 式是1948年由英國 Penman 所提出，結合了能量平衡理論與空氣動力學之方法來模擬表面之蒸發散量，此法係假定土壤如保持濕潤狀態而且地表有完全覆蓋時，其蒸發散作用係由環境條件所調節，可用氣象資料估計。其後並於1952年、1956年及1963年分別修正估算模式中之地域性參數，使其應用範圍可從一月、一天而縮短至以小時為基準，因此在世界各地受到廣泛的應用與很好的評價，FAO特推荐該模式以估算作物需水量，其估算式如下：

$$ET_0 = c [W \times R_n + (1 - W) \times f(u) \times (e_a - e_d)]$$

式中

ET_0 : 參考作物之蒸發散量 (mm/day)。

W : 加權因子依溫度及緯度而定。

R_n : 淨輻射之蒸發當量 (mm/day)。

$f(u)$: 風速函數。

e_a : 平均溫度時之飽和蒸汽壓 (mb)。

e_d : 露點溫度時之蒸汽壓 (mb)。

c : 校正因子, 調整因日夜間氣象條件所引起之差異。

2. Penman-Monteith(ICID, 1994)

此估算式於 1994 年為 ICID 所公佈, 該模式以草類及苜蓿做蒸發散試驗, 其與 1984 年 FAO 建議式之主要差別乃在於: a. 為使計算更方便、適切, 特將估算式中各參數之單位由原來之 CGS 制, 更正為國際之通用單位 SI 制 (International Standard Units); b. 為消弭風速函數因區域之特性在估算上所產生之差異性及降低估算之準確度, 故以作物遮蔽阻力 (Crop Canopy Resistance) 及空氣動力阻力 (Aerodynamic Resistance) 等兩項關係式取代了原有之風速函數值 (Monteith, 1981, 1980), 該估算式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - S) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)}$$

式中

ET_0 : 參考作物之蒸發散量 (mm/day)。

R_n : 淨輻射量 ($MJ/m^2/day$)。

Δ : 飽和蒸汽壓力線斜率 ($KPa/^\circ C$)。

γ : 濕度常數 ($KPa/^\circ C$)。

U_2 : 2 公尺高所量測之風速 (m/s)。

T : 溫度 ($^\circ C$)。

$e_a - e_d$: 飽和蒸汽壓力差 (KPa)。

S : 土壤熱通量 ($MJ/m^2/day$)。

3. Van Bavel 法

Van Bavel(1966) 於 1965 年在美國亞利桑那州鳳凰城做苜蓿 (alfalfa) 蒸發散試驗 (以下簡稱 Bavel 式), 亦以 Penman 模式為基本模式, 但加入了蒸發表面粗糙度為考慮因子, 所以風速函數 $f(u)$ 為:

$$f(u) = \frac{\rho \phi k^2}{P} \frac{U_z}{[\ln(Z_d/Z_0)]^2}$$

式中

$f(u)$: 風速函數。

ρ : 水的質量密度 (g/cm^3)。

P : 大氣壓力 (mb)。

k : Von Karman 常數 (= 0.41)。

U_z : 地面高度為 Z_d 時之日平均風速 (cm/min)。

Z_0 : 蒸發表面粗糙度 (cm)。

Z_d : 離地面之高度 (cm)。

ϕ : 水分子量與濕潤空氣平均分子量之比 (= 0.622)

4. Modified Blaney-Criddle 法

Blaney-Criddle 於 1945 年提出, 而於 1950 年、1970 年相繼補充修正, 該經驗式基於一項假定, 即日照時間與溫度為影響作物需水量最主要之因素。該估算式創於美國西部地區, 頗適合乾燥氣候地區應用, 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的使用, FAO 於 1984 年所推薦之估算式如下:

$$ET_0 = c[p(0.46T + 8)]$$

式中

ET_0 : 參考作物之蒸發散量 (mm/day)。

p : 日照率, 可查緯度表得知。

T : 溫度 ($^\circ C$)。

c : 校正因子, 視最小相對濕度、日照時數、日間風速而定。

5. Radiation 法

Radiation Method 由 Makkink 氏在 1957 年所提之經驗公式修正而來, 基本上假設溫度、日照及太陽輻射為主要影響因子, FAO 於 1984 年所推薦之估算式如下:

$$ET_0 = c(W \times R_s)$$

$$R_s = R_a (0.25 + 0.50n/N)$$

式中

ET_0 : 參考作物之蒸發散量 (mm/day)。

R_s : 太陽輻射之蒸發當量 (mm/day)。

W : 加權因子, 依溫度及緯度而定。

c : 校正因子, 依平均濕度與日間風速而定。

R_n : 不同緯度所接受之淨輻射蒸發當量 (mm/day)。

n/N : 實際日照時間與最大可能日照時間之比。

本估算式中之太陽輻射(R_s)，是依照地球緯度及月份之不同而有所差異，其可由緯度表查出最大輻射量(R_o)值，再根據實際日照時數(n)，與最大可能日照日數(N)，計算出太陽輻射值。而加權因子 W 則由平均氣溫及氣象站之海拔高度加以修正得出。而校正因子 c 值則視平均相對濕度及日間風速而異，若以圖解法估算作物需水量，則在求得 $W \times R_s$ 後配合相對濕度及日間風速，可求得參考作物之需水量。

6. Priestley-Taylor 模式

台灣地區之年平均降雨量約為 2510mm，屬於濕潤地區，因此選用發展自濕潤地區之 Priestley-Taylor 模式(1973，以下簡稱 P-T)，以其估算之作物需水量進行比較分析。Priestley-Taylor 方法，其主要乃以能量平衡之觀念為基礎，蒸發散量之能量來源為太陽淨輻射，其估算方程式如下：

$$\lambda ET_0 = \eta \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n$$

式中

ET_0 ：參考作物之蒸發散量(mm/day)。

R_n ：太陽淨輻射($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day}$)。

η ：待定常數(≈ 1.26 , Allen, 1986)。

Δ ：飽和蒸汽壓力曲線斜率($\text{mb}/^\circ\text{C}$)。

γ ：濕度常數($\text{mb}/^\circ\text{C}$)。

λ ：水之潛能汽化熱(cal/g)。

7. Pan Evaporation 法

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，其估算式如下：

$$ET_0 = K_p \times E_{pan}$$

式中

ET_0 ：參考作物之蒸發散量(mm/day)。

E_{pan} ：蒸發皿蒸發量(mm/day)。

K_p ：蒸發皿係數。

8. Jensen & Haise(1990)

係在氣溫條件下，加入日射量為其取決因子(以下簡稱 J-H 式)，其估算式表示如下：

$$ET_0 = 0.000673(0.014T - 0.37)R_s$$

式中

ET_0 ：參考作物之蒸發散量(mm/day)。

T ：日均溫($^\circ\text{C}$)。

R_s ：全日日射量($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day}$)。

9. Hargreaves 法(1979、1986)

此法係為 J-H 法之修正式，即以草地為主要試驗而求得係數。其估算式表示如下：

$$ET_0 = 0.0135(T + 17.78)R_s$$

由以上各種估算作物需水量之模式可得知，前三種方法是以微作物氣象學為基礎，利用空氣動力學方法及能量平衡理論之組合方式，其在應用上較繁雜；而其他幾種方式是以能量平衡理論為基礎，再配合多年的氣象資料試驗而得之經驗公式，在應用上雖較為簡便，但卻有區域性之限制。在整體之應用上，無論以何種方法其所測得之結果均為參考作物需水量，因此務必再配合各種作物之作物係數，方能推測出各種作物之作物需水量，由此可見作物係數之決定，攸關作物需水量之多寡，其重要性質不容忽視之。

四、資料分析

本文為探討各估算式之適用性、合理性及準確性，對於作物需水量之估算，主要以國際糧農組織(FAO)於 1984 年所推荐之四種作物需水量之間接推估方式，及 ICID 於 1994 年所公佈之 Penman-Monteith 估算式，除此之外另選用 Hargreaves 法、Jensen-Haise 法、Van Bavel 法、Priestley-Taylor 法等諸推估模式進行作物需水量之估算，最後再以嘉南水利會之學甲旱作試驗站，自民國 78 年至 81 年間以滲漏計試驗法所做之田間試驗資料加以比較分析，由各模式間之差異性加以分析其應用於本省之合適性。

1. 間接推估法

應用上述之九種作物需水量間接推估式，配合嘉南學甲旱作試驗站之各氣象記錄資料，分別推算春作高粱及秋作高粱於試驗生育期之參考作物需水量，依照推算之結果配合以高粱之作物係數，進行各種推估方式之作物需水量估算比較。

2. 直接測定法

直接測定之作物需水量是以嘉南水利會之學甲旱作試驗站，自民國 78 年至 81 年間以滲漏計試

驗法所做之田間試驗資料，應用土壤水份追蹤法加以測定春作高粱及秋作高粱之作物需水量，在隔絕地下水補給之試驗處理中，對於有效雨量及作物需水量之計算方法為：

(1)有效雨量計算

- a. 一次降雨量未超過 5mm 時，以無效雨量計之。
- b. 降雨量超過 5mm 時，以下雨前之土壤水分至田間容水量之間之水深為有效雨量，超過田間容水量之部份則視為無效。
- c. 如遇連續降雨時，則以該旬之作物蒸發散乘以水面蒸發量之積數，為其有效雨量。
- d. 計算有效雨量之依據是以各期作之灌溉增產指數最高者為之。

(2)作物需水量之計算

在隔絕地下毛管水補給之情況下，以土壤水分追蹤法計算而得，其中包含有效雨量在內，其計算之方式以下列平衡式為之：

$$ET_{crop} = I + AR \pm (P_w \times As \times d / 100)$$

式中

ET_{crop} ：作物需水量 (mm)。

I ：灌溉水量 (mm)。

AR ：有效雨量 (mm)。

P_w ：土壤水分變化量 (%)。

As ：假比重。

d ：根系深度 (mm)，一般為 400mm。

3. 作物係數 (Kc)

每種作物有其耗水特性，各作物係數 (Kc) 之定義，即為在特定期距之作物需水量 (ET_{crop}) 與該期距之參考作物需水量 (ET_0) 之比值，亦即：

$$Kc = ET_{crop} / ET_0$$

藉由實測之試驗結果與該期距之氣候資料所估算之參考作物需水量，即可得該期距之作物係數。作物係數係依照作物之類別、栽種季節、生長階段、氣象等條件而有所差異，本文為求作物係數之代表性、適用性及客觀性，選定生長度日數 (Growing-degree-days) 之方法，將歷年作物劃以溫度為基準指標，並以 Sammis et al. (1985) 之建議，作三次多項式之迴歸分析，予以產生合理之作物係數 Kc 值，其迴歸模式如下：

$$Kc = A_0 + A_1G + A_2G^2 + A_3G^3$$

$$G = (T_{max} + T_{min}) / 2 - T_b$$

式中

Kc：作物係數

A_j ：迴歸係數 $j = 0, 1, 2, \dots$

G：累積生長度日數 (°C)

T_{max} ：最高氣溫 (°C)

T_{min} ：最低氣溫 (°C)

T_b ：作物成長之基準溫度 (Base temperature) (°C)。

本文所採用線性模型迴歸分析是以最小二乘法 (Least square method) 建立標準方程式 (Normal equation)，而求解各模型中之迴歸係數 (顏月珠，1982)，並以相關係數 r ，說明變數間之相關程度，以 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，對於實測值與各估算式之估算值的比較，則採用均方差 (Root mean square error) 值加以判定。

五、結果與討論

1. 依照 Penman-Monteith (ICID, 1994) 及 Modify Penman (FAO, 1984) 二法所得之高粱春、秋作物係數與累積生長度日數之三次多項式迴歸分析之結果分別為：

Penman-Monteith 春作

$$Kc = 0.3672 + 1.3457 \times 10^{-3}G - 9.2477 \times 10^{-7}G^2 + 1.228 \times 10^{-10}G^3$$

相關係數 $r = 0.863$ ，F 分配檢定，

$$F^* = 32.52 > F(0.95, 2, 30) = 3.32$$

具高度相關及 5% 顯著水準之存在性。

Penman-Monteith 秋作

$$Kc = 0.2976 + 1.4616 \times 10^{-3}G - 8.5519 \times 10^{-7}G^2 + 8.9473 \times 10^{-11}G^3$$

相關係數 $r = 0.909$ ，F 分配檢定，

$$F^* = 62.56 > F(0.95, 2, 30) = 3.32;$$

具高度相關及 5% 顯著水準之存在性。

Modify Penman 春作

$$Kc = 0.2310 + 1.9943 \times 10^{-3}G - 1.5822 \times 10^{-6}G^2 + 3.1546 \times 10^{-10}G^3$$

相關係數 $r = 0.736$ ，F 分配檢定，

$$F^* = 20.35 > F(0.95, 2, 27) = 3.35;$$

具中度相關及 5 % 顯著水準之存在性。

Modify Penman 秋作

$$Kc = 0.2879 + 1.544 \times 10^{-3}G - 7.2387 \times 10^{-7}G^2 + 1.2237 \times 10^{-11}G^3$$

相關係數 $r = 0.810$ ，F 分配檢定，

$$F^* = 14.33 > F(0.95, 2, 27) = 3.35;$$

具高度相關及 5 % 顯著水準之存在性。

2. 由圖 1 可以看出高粱之作物係數 (Kc) 值之趨勢，無論由 Penman-Monteith 或 Modify Penman 方式所計算之作物係數，於春、秋作之 Kc 值趨勢相當具有一致性，且由 Penman-Monteith 法所得之結果，無論於春作或秋作皆較 Modify Penman 為佳，其結果可作為今後推估春、秋作高粱需

水量時之 Kc 值。

3. 在表 1、表 2 中之作物需水量之推估，是將民國 78 年至 81 年之試驗資料，依照 Penman-Monteith (ICID, 1994) 法計算高粱之作物係數，再分別應用於各作物需水量推估模式之中；表 3、表 4 之作物係數之計算是以 Modify Penman (FAO, 1984) 之方法而得；表 5、表 6 之作物係數則是採用 FAO 所推薦之四階段式之作物係數。由實測值與各推估式之推估結果加以比較，應用 Penman-Monteith 法及 Modify Penman 法計算而得之 Kc 值較 FAO 之推薦值更為適合，究其因乃組合法是以生長度日數之觀點，劃以溫度為基準，可以知道每日、旬、月之 Kc 值，故較 FAO 所推薦四個生長階段之 Kc 值合理。

4. 圖 1 顯示，春作及宿根高粱各有不同之耗水特

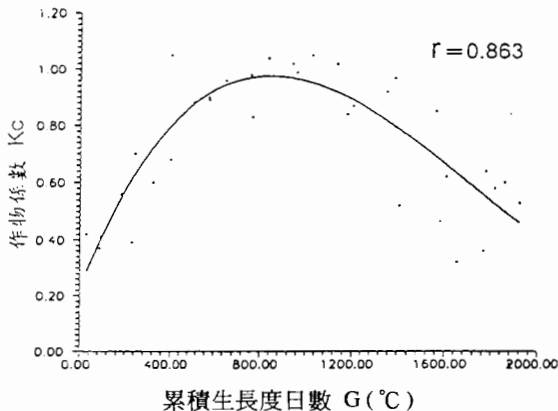


圖 a 春作高粱作物係數圖 (Penman-Monteith)

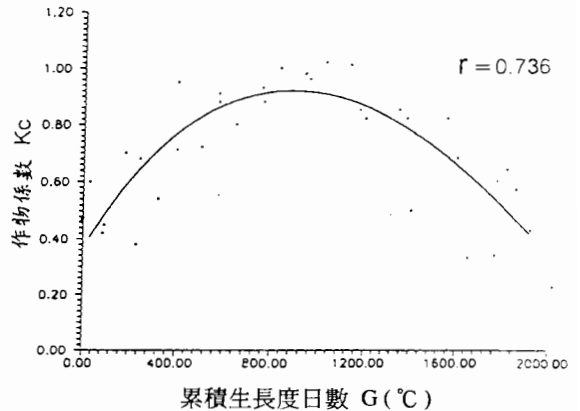


圖 c 春作高粱作物係數圖 (Modify Penman)

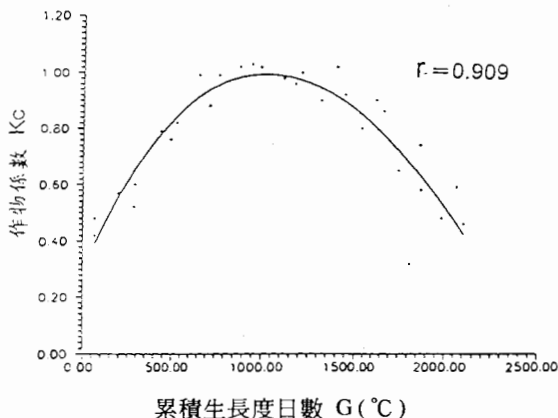


圖 b 秋作高粱作物係數圖 (Penman-Monteith)

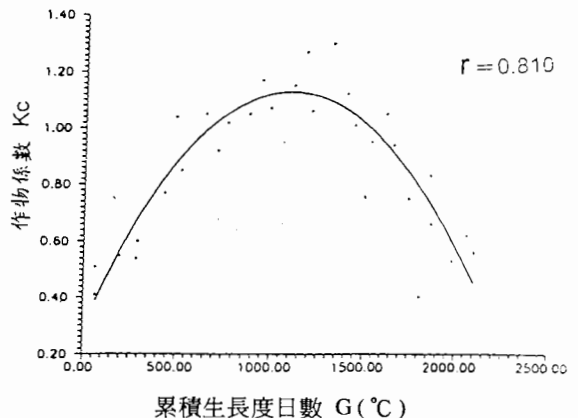


圖 d 秋作高粱作物係數圖 (Modify Penman)

圖 1. 高粱作物係數與累積生長度日數之相關圖

性，此乃由於春作高粱栽培初期，不但氣溫低而且日照較弱，至中後期則溫度漸升高、莖葉增多、增大、且日照強，因此蒸發散量較大，故其作物耗水曲線顯示，在後期有略微偏高之趨勢。至於宿根高粱在栽培初期則因氣溫較

高、日照強，作物之莖葉較小、較少，故作物需水量以土壤表面蒸發為主，至中期以後則氣溫逐漸降低，日照亦漸短弱，但作物漸成長，故需水量之增減，有相互抵消之趨勢，以致作物耗水曲線呈現較為緩和圓滑之趨勢。

表 1. 1992 年春作物需水量與與推估結果之比較 (Penman-Monteith) 單位：mm

月	旬	實測值	Penman (1994)	Penman (1984)	Van	B-C	Pan	Rad	Harg	J-H	P-T
2	下	5.25	4.60	2.98	3.91	3.72	3.87	1.86	2.28	2.18	1.61
3	上	15.35	9.38	8.73	11.62	27.15	15.11	5.72	7.22	6.76	5.57
3	中	30.12	30.13	24.82	33.91	37.20	35.56	16.56	19.95	19.60	15.06
3	下	30.08	29.76	29.21	41.53	50.75	43.70	16.75	20.38	19.93	15.38
4	上	16.32	15.07	14.18	17.48	47.53	27.30	9.40	12.73	12.48	10.42
4	中	18.38	19.21	18.24	22.69	49.68	22.71	12.61	15.11	14.64	12.19
4	下	29.68	28.99	25.21	31.19	52.45	41.78	18.24	22.68	23.16	18.42
5	上	29.45	30.71	28.53	36.46	53.76	44.74	19.08	23.87	19.12	19.36
5	中	26.36	26.45	24.36	31.10	49.10	39.49	15.55	20.07	20.49	16.25
5	下	20.31	22.09	22.15	27.95	45.66	33.52	13.46	17.57	17.82	14.13
6	上	12.90	20.53	16.47	19.83	34.65	30.00	11.72	15.05	15.66	12.33
合 計		234.20	236.92	214.87	277.66	451.64	337.78	140.50	176.91	171.84	140.72
與實測值之差			2.72	-19.33	43.46	217.44	103.58	-93.70	-57.29	-62.36	-93.48
相關係數 r			0.934	0.874	0.943	0.764	0.902	0.930	0.914	0.883	0.887
均方差RMSE			2.56	3.80	5.73	22.53	16.89	4.28	2.90	2.76	4.35

註：作物係數以 Penman-Monteith(1994) 法計算而得。

表 2. 1992 年秋作物需水量與與推估結果之比較 (Penman-Monteith) 單位：mm

月	旬	實測值	Penman (1994)	Penman (1984)	Van	B-C	Pan	Rad	Harg	J-H	P-T
6	中	13.42	15.01	15.32	17.65	34.77	25.63	11.12	14.75	15.43	12.27
6	下	28.95	30.07	35.79	50.73	53.91	46.67	26.88	25.81	27.28	21.30
7	上	24.77	24.64	22.85	28.40	56.21	48.35	16.38	21.68	22.60	18.13
7	中	40.85	42.38	51.97	77.59	64.88	60.78	26.66	34.61	36.59	28.32
7	下	46.86	48.66	51.29	75.35	69.67	64.10	28.31	35.48	37.49	29.23
8	上	43.96	45.08	50.63	77.22	60.64	56.12	24.82	32.13	34.10	26.04
8	中	31.05	31.33	28.05	38.52	51.56	39.37	15.96	21.28	22.41	17.36
8	下	17.32	18.61	15.06	17.98	45.83	29.13	13.81	14.56	15.25	12.07
9	上	4.85	4.32	3.59	3.67	17.34	11.43	4.15	4.33	4.53	3.59
合 計		252.03	260.07	274.56	387.12	454.80	381.38	168.09	204.63	215.68	168.30
與實測值之差			8.04	22.53	135.09	202.77	129.35	-83.94	-47.40	-36.35	-83.73
相關係數 r			0.998	0.976	0.969	0.936	0.959	0.910	0.976	0.977	0.973
均方差RMSE			1.12	5.07	19.39	22.06	14.53	10.96	6.49	5.34	9.09

註：作物係數以 Penman-Monteith(1994) 法計算而得。

表 3. 1992 年春作物需水量與與推估結果之比較 (Modify Penman) 單位：mm

月	旬	實測值	Penman (1994)	Penman (1984)	Van	B-C	Pan	Rad	Harg	J-H	P-T
2	下	5.25	6.29	4.08	5.34	5.08	5.29	2.52	3.11	2.97	2.20
3	上	15.35	10.15	9.45	12.57	29.38	16.35	6.16	7.81	7.31	6.03
3	中	30.12	29.78	24.53	33.52	36.77	35.14	16.33	19.72	19.38	14.88
3	下	30.08	28.19	27.67	39.34	48.08	41.40	15.79	19.30	18.88	14.57
4	上	16.32	14.04	13.21	16.28	44.27	25.43	8.80	11.86	11.62	9.71
4	中	18.38	17.94	17.03	21.18	46.38	21.20	11.83	14.11	13.67	11.38
4	下	29.68	27.40	23.82	29.48	49.58	39.49	17.29	21.44	21.89	17.41
5	上	29.45	29.62	27.52	35.17	51.85	43.15	18.44	23.02	18.44	18.68
5	中	26.36	25.82	23.78	30.36	47.93	38.55	15.17	19.59	20.00	15.86
5	下	20.31	21.88	21.94	27.68	45.22	33.19	13.28	17.40	17.64	13.99
6	上	12.90	19.63	15.74	18.95	33.12	28.67	11.29	14.39	14.97	11.78
合 計		234.20	230.73	208.77	269.88	437.66	327.89	136.89	171.75	166.79	136.49
與實測值之差			-3.47	-25.43	35.68	203.46	93.69	-97.31	-62.45	-67.41	-97.71
相關係數 r			0.934	0.941	0.943	0.784	0.902	0.930	0.914	0.883	0.887
均方差RMSE			2.49	3.21	4.82	20.60	15.56	4.61	2.72	2.71	4.68

註：作物係數以 Modify Penman (1984) 法計算而得。

表 4. 1992 年秋作物需水量與與推估結果之比較 (Modidy-Penman) 單位：mm

月	旬	實測值	Penman (1994)	Penman (1984)	Van	B-C	Pan	Rad	Harg	J-H	P-T
6	中	13.42	15.35	15.67	18.05	35.55	26.21	11.38	15.08	15.78	12.54
6	下	28.95	31.78	37.83	53.62	56.99	49.12	21.41	27.28	28.84	22.51
7	上	24.77	26.71	24.78	30.80	60.95	52.43	17.67	23.51	24.50	19.65
7	中	40.85	47.10	57.76	86.23	72.11	67.55	29.71	38.46	40.67	31.48
7	下	46.86	55.41	58.41	85.81	79.34	73.00	32.14	40.40	42.69	33.28
8	上	43.96	52.29	58.74	89.59	70.35	65.10	28.83	37.27	39.55	30.21
8	中	31.05	36.76	32.91	45.20	60.50	46.20	18.72	24.98	26.30	20.38
8	下	17.32	21.74	17.59	21.01	53.55	34.04	16.18	17.01	17.82	14.11
9	上	4.85	4.98	4.15	4.23	19.99	13.18	4.74	5.00	5.22	4.14
合 計		252.03	292.12	307.83	434.53	509.32	426.82	180.78	228.99	241.38	188.30
與實測值之差			40.09	55.80	182.50	257.29	174.79	-71.25	-23.04	-10.65	-63.73
相關係數 r			0.997	0.983	0.975	0.948	0.976	0.980	0.990	0.990	0.987
均方差RMSE			4.91	8.45	25.63	27.49	19.34	11.28	3.64	2.53	6.97

註：作物係數以 Modify-Penman (1984) 法計算而得。

5. 從表 1 至表 6 中，無論是以何種作物係數所推估之結果，Penman 式所估算之結果，均較其它估算式之估算值更接近實測值，此乃由於此兩法在計算過程中，考慮較多之氣象因子及作物生

理需要之故。而 B-C 法及 Pan 法、Hargreaves 法、J-H 法等卻只考慮部份因子，忽略風速與濕度對促進蒸發之作用，同時更忽略作物本身所具有之生理特徵，亦即作物需水盛期有單高峰

表 5. 1992 年春作物需水量與與推估結果之比較 (FAO Suggest) 單位：mm

月	旬	實測值	Penman (1994)	Penman (1984)	Van	B-C	Pan	Rad	Harg	J-H	P-T
2	下	5.25	5.24	3.40	4.45	4.23	4.41	2.10	2.59	2.48	1.83
3	上	15.35	8.34	7.76	10.33	24.14	13.43	5.06	6.42	6.01	4.95
3	中	30.12	32.72	26.95	36.82	40.40	38.61	17.94	21.67	21.29	16.35
3	下	30.08	30.94	30.38	43.18	52.77	45.44	17.33	21.19	20.72	15.99
4	上	16.32	18.18	17.11	21.09	57.35	32.95	11.40	15.37	15.06	12.57
4	中	18.38	22.47	21.33	26.54	58.11	26.56	14.82	17.67	17.12	14.26
4	下	29.68	34.33	29.85	36.94	62.11	49.48	21.66	26.86	27.43	21.81
5	上	29.45	35.07	32.58	41.63	61.39	51.09	21.84	27.25	21.84	22.11
5	中	26.36	30.39	27.99	35.74	56.42	45.38	17.86	23.06	23.55	18.67
5	下	20.31	24.03	24.10	30.40	49.68	36.47	14.59	19.11	19.38	15.37
6	上	12.90	25.55	20.49	24.67	43.12	37.33	14.70	18.73	19.49	15.34
合計		234.20	267.27	241.94	311.80	509.70	381.14	159.28	199.92	194.36	159.27
與實測值之差			33.07	7.74	77.60	275.50	146.94	-74.92	-34.28	-39.84	-74.93
相關係數 r			0.888	0.905	0.930	0.696	0.850	0.870	0.858	0.954	0.825
均方差RMSE			5.19	3.20	9.01	29.17	21.52	3.21	4.19	3.76	3.33

註：作物係數採用國際糧農組織之推薦值。

表 6. 1992 年秋作物需水量與與推估結果之比較 (FAO Suggest) 單位：mm

月	旬	實測值	Penman (1994)	Penman (1984)	Van	B-C	Pan	Rad	Harg	J-H	P-T
6	中	13.42	9.24	9.44	10.87	21.41	15.79	6.83	9.08	9.50	7.55
6	下	28.95	17.80	21.19	30.03	31.91	27.51	12.01	15.28	16.15	12.61
7	上	24.77	22.31	20.70	25.72	50.91	43.79	14.76	19.64	20.47	16.42
7	中	40.85	44.60	54.69	81.66	68.28	63.96	28.01	36.42	38.51	29.81
7	下	46.86	56.07	59.10	86.32	80.28	73.86	32.60	40.88	43.19	33.68
8	上	43.96	54.66	61.40	93.65	73.54	68.06	30.10	28.97	41.35	31.58
8	中	31.05	37.98	34.01	46.71	62.52	47.74	19.38	25.81	27.17	21.05
8	下	17.32	25.16	20.36	24.31	61.96	39.39	18.62	19.68	20.62	16.32
9	上	4.85	4.91	4.09	4.17	19.73	13.01	4.69	4.93	5.15	4.08
合計		252.03	272.34	284.97	403.94	470.54	393.10	167.00	210.68	222.12	173.10
與實測值之差			20.31	32.94	151.91	218.51	141.07	-85.03	-41.35	-29.91	-78.93
相關係數 r			0.940	0.959	0.954	0.838	0.931	0.990	0.952	0.954	0.953
均方差RMSE			6.76	8.62	24.54	25.33	45.42	18.33	24.76	26.08	17.86

註：作物係數採用國際糧農組織之推薦值。

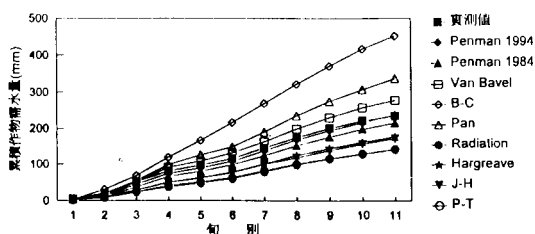
乃至雙高峰等之種種需水特性，因此所得之偏差值較大。雖然 Van Bavel 法與修正之 Penman 法雖同時考慮四種氣象因子，且 Van Bavel 又將 Penman 式中之風速函數加以修正，但所得之結

果顯示其偏差值確較修正之組合法為大。

6.圖 2 至圖 3 為諸估算式所得之累積作物需水量與實測值之比較，由圖中可以明顯看出，在諸估算式之中以 Penman 法所得之結果較其他方法為

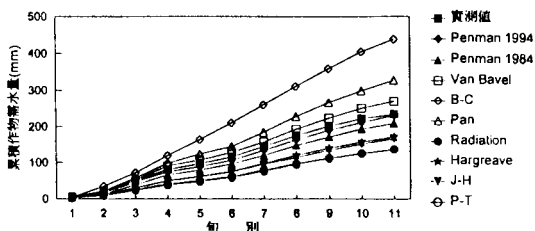
春作高粱累積作物需水量之比較

(Kc以Penman-Monteith法計算)



春作高粱累積作物需水量之比較

(Kc以Modify Penman法計算)



春作高粱累積作物需水量之比較

(Kc採用FAO所提供)

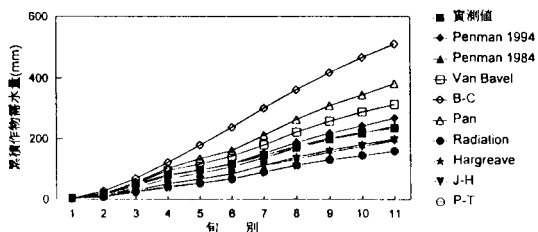
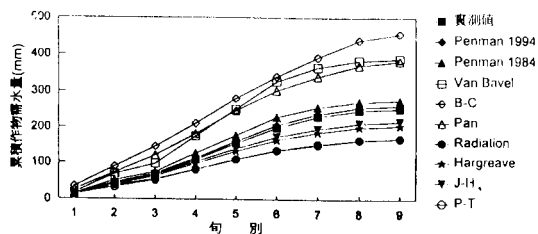


圖 2. 春作高粱累積作物需水量之比較

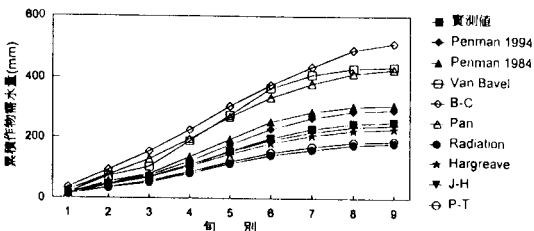
秋作高粱累積作物需水量之比較

(Kc以Penman-Monteith法計算)



秋作高粱累積作物需水量之比較

(Kc以Modify Penman法計算)



秋作高粱累積作物需水量之比較

(Kc採用FAO所提供)

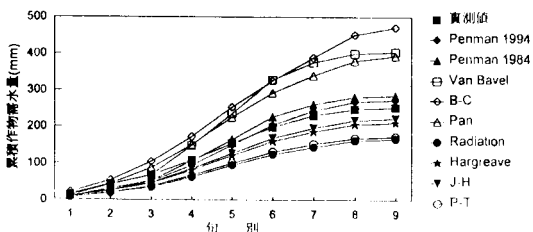


圖 3. 秋作高粱累積作物需水量之比較

優；在 Penman 估算式中又以 Penman-Monteith (ICID, 1994) 所推估之結果，其期作累積作物需水量之推估值與實測值之差，無論在春、秋作皆較 Modify Penman(FAO,1984) 為低，均方差亦較低，究其因乃該推估式是以植物生理為基礎，消弭了估算式中之參數易受區域氣候條件影響之因素，因而可以適用於各地區。由其推估之結果顯示，在氣象資料充足之情況下，可作為臺灣地區作物需水量之最佳推估模式。

六、結論與建議

1. 在估算高粱作物需水量之諸估算式中，Penman-Monteith 之所以為最佳，究其原因除了其對於描述作物蒸發過程及其物理意義較為詳盡外，

更由於該估算式是以植物生理為出發點。對作物係數計算是以生長度日數之觀點，劃以基準溫度，消弭氣候因子及地域性參數之影響，因此更為合理、客觀，具有相當之適合性。

2. 本文所推求之高粱春、秋作物係數 Kc，可作為台南學甲地區高粱作物需水量估算之參考依據，以為灌溉營運規劃設計之憑藉。

3. Penman-Monteith 法對於作物需水量之推估，由其推估之結果顯示，具有相當之完整性，然因計算時需有作物高度及葉面積指數等資料，因此，如何有效建立更齊全之各作物之田間試驗資料乃今後應努力之方向。

4. 就估算之實用性而言，雖然 Penman 估算式具有最好之相關性，但應用上較為繁雜，而

Hargreaves 法、J-H 法、蒸發皿蒸發量推求法等經驗式之偏差值雖稍不理想，但在完整資料欠缺時，亦可考慮選用之。

5. 在估算作物需水量時對於作物係數之選用不可忽視，本省在作物係數方面之試驗上有待進一步之研究，以建立更完整之田間試驗資料。

參考文獻

1. 陳尙、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: pp.26 ~ 49，1967。
2. 黃振昌，「作物需水量與氣象因子相關理論分析之研究」，國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文，1986。
3. 農業工程研究中心、嘉南農田水利會，「雜糧作物不同灌溉處理效果及需水量試驗研究」，1989 ~ 1992。
4. 張本初，「作物需水量最佳模式之探討」，國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文，1990。
5. 顏月珠，「應用數理統計學」，三民書局，1982。
6. 陳清田，「嘉義地區作物需水量推估之研究」，中國農業工程學報 Vol.13, No.1, pp.82 ~ 109，1991。
7. 經濟部水資會，「台灣地區民國八十年農業用水量估算報告」，1993。
8. 甘俊二、張煜權等，「研擬合理農業用水標準 (I)」，經濟部水利司研究報告，1995。
9. Allen R. G. and Pruitt W. O. "Rational use of the Blaney-Criddle formula" J. Irrig. and Drain. Engrg. ASCE Vol. 112(IR2): pp.139 ~ 155, 1986.
10. Cuenca R. H. and Nicholson M. T. "Application of Penman equation on wind function" ASCE Vol. 108 (IR1): pp.13 ~ 23, 1982.
11. Doorenbos J. and Pruitt W. O. "Guidelines for predicting crop water requirements" FAO Irrig. and Drain. Paper 24, 2nd ed. Rome. 156pp., 1984.
12. Eagleson P. S. "Dynamic Hydrology" McGraw-Hill, New York, 1970.
13. Jensen M. E., Burman R. D. and Allen R. G. "Evapotranspiration and irrigation water requirements" ASCE Manual No. 70, 1990.
14. Merva G. and Fernandez A. "Simplified application of Penman's equation for humid regions" ASAE 28(3): pp.819 ~ 825, 1985.
15. Monteith J. L. "Evaporation and surface temperature" Quarterly J. Royal Meteor. Soc. 107: pp.1 ~ 27, 1981.
16. Monteith J. L. and Unsworth M. H. "Principles of Environmental Physics" Edward Arnold, London, 1990.
17. N Kemdirim L. C. "Radiative flux relations over crops" Agri. Meteorol. 11: pp.229 ~ 24, 1973.
18. Penman H. L. "Natural evaporation from open water, bare, soil and grass" Proc. R. Soc. A 193: pp.120 ~ 145, 1948.
19. Penman H. L. "Estimating evaporation" Trans. Am. Geoph. U. Vol.37 No.1 pp.43 ~ 50, 1956.
20. Penman H. L. "Vegetation and Hydrology" Tech. communication No.3 Commonwealth Bureau of soil, Harpenden, Eng., 1963.
21. Sammis T. W., Mapel C. L., Lugg D. G. Lansford, R. R. and McGuchin, J. T. "Evapotranspiration crop coefficients predicted using growing-degree-days" ASAE 28(3): pp.773 ~ 780, 1985.
22. Van Bavel C. H. "Potential evaporation the combination concept and its experimental verification" water resource Res.2(3): pp.455 ~ 467, 1966.

收稿日期：民國 85 年 1 月 30 日

接受日期：民國 85 年 3 月 18 日