



臺灣地域性作物需水量之推估研究

Estimate of Region-Wide Crop Water Requirements in Taiwan Area

國立嘉義技術學院農業土木工程技術系講師

陳清田
Chen Ching-Tien

國立臺灣大學農業工程學系教授

甘俊二
Kan Chun-E.

摘要

在水資源捉襟見肘之現階段，作物需水量不但是水資源規劃利用之重要參數，更是灌溉計畫研擬與營運管理之依據，如何有效、即時、準確地測算作物需水量，冀以提昇水資源之有效利用，實為從事農業水資源規劃研究者之要務。

本研究係應用國際灌溉排水協會 (ICID) 於 1994 年所公佈之 Penman-Monteith 估算法，以台北、新竹、高雄等十地區自 1951 ~ 1990 之氣象資料，應用 40 年之平均資料，輔以頻率年之觀念，確立臺灣各地區全年之區域性旬別參考作物需水量 (ET_0)，俾為不同區域不同作物於不同期作下，即時估算不同作物需水量之應用，並以本省灌溉用水需求量最多之水稻加以試算，比較分析各期作水田於不同重現期距與長時距之年平均值下，不同區域各旬別作物需水量之差異，建立臺灣各地區水稻於不同期作下之旬別需水量與全生育期作物累積需水量，俾供水田灌溉用水管理與區域性水資源規劃利用之參考應用。

關鍵詞：作物需水量，參考作物需水量，水稻，期作，灌溉管理，水資源規劃。

ABSTRACT

Nowadays, under the condition of depleting water resources availability, crop water requirements become not only the important parameter of planning of water resources utilization, but also the basis of planning of the operation and management of irrigation projects. It is therefore the task of irrigation organizations to estimate crop water requirements in an efficient, fast and accurate way, for enhancement of the effectiveness of water resources utilization.

In this paper, the Penman-Monteith Evapotranspiration Estimate Model recommended by the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) in 1994 is applied. By using the meteorological data of Taipei, Hsinchu, Kaohsiung ... etc. of Taiwan in the period of 1951 to 1990 and applying the concept of frequency years, the values of reference evapotranspiration (ET_0) in every 10 days for different recurrent periods in different areas of Taiwan are computed for estimate of the water requirements of various crops in different periods. Further, the estimate is made to irrigation requirements of paddy rice, the most demanded in Taiwan, which is then used to analyze the differences of the 10-day irrigation absolute water consumptions in paddy fields in different areas under various recurrent periods. The results are then applied to establish the 10-day and the cumulative irrigation requirements in different cropping seasons in order to demarcate the reference zones based on the irrigation absolute water consumptions, for planning and management of regional water resources.

Keywords : Crop water requirements, Reference crop water requirements, Paddy rice, Cropping season, Irrigation water management, Water resources planning.

一、前言

作物需水量 (Evapotranspiration) 為作物葉面蒸散與地面及水面蒸發量之和；在水資源規劃利用上，實為一項不可或缺之重要基本資料。

作物需水量之測算法，可分為直接測定法及間接估算法，前者包括：滲漏計法 (Lysimeter)、土壤水分遞減法、累積法、水收支法及地下水水位變動法等。後者則有：蒸氣傳導法 (Vapor transfer method)、熱能平衡法 (Energy balance method) 等。直接法雖可求得實際觀測之作物需水量，然因受時空條件之影響，及資料之取得需龐大之經費與勞力，因而容易產生誤差；而間接法可應用各地之物理現象記錄作物生長期間之各種環境因素推求作物需水量，雖計算較為繁雜，但在電子計算機之協助下，亦不失為簡單而方便之方法，尤以時值水稻、旱作混植日趨頻繁之現階段。

長久以來，雖有許多之國內外專家學者致力於利用作物微氣象學 (Crop micro-metrology) 及氣候資料相關經驗式 (Empirical relationships from climate data) 來估算作物需水量 (Penman, 1948; Monteith, 1965, 1973, 1981; Jensen, 1974; 甘俊二, 1979; 施嘉昌, 1987; 陳清田, 1991 等)，先後亦發表了甚多

可靠之方法，然其應用因受於區域性與作物制度別等因素之影響，致易造成不同區域作物需水量估算上之不便，使其未能達成即時應用之目的，致影響機動配水之成效，故如何有效即時估算不同區域之作物需水量，實值深入加以探討，尤以作物類別與期作別多且繁雜之臺灣地區為甚。

因此，本研究擬應用 Penman-Monteith 估算法 (ICID, 1994)，並蒐集台北、高雄等十地區之 40 年平均氣象資料 (1951 ~ 1990)，輔以頻率年之觀念，予以比較分析，確立臺灣區域性全年旬別參考作物需水量 (ET_0)，俾供不同作物於不同期作別下其作物需水量估算之應用，進而以灌溉用水需求甚為殷切之水稻為研究對象，比較分析水稻在不同區域於不同重現期距及與年平均法下，各旬別作物需水量之差異，期能建立臺灣地區水稻於不同時期、不同期作之旬別作物需水量與全生育期累積作物需水量，以為區域性水資源規劃與灌溉營運管理之參考應用。

二、估算模式之建立

對於推求蒸發散勢或蒸發量，有兩種基本理論：一是考慮水汽受空氣推動而產生對流的空氣動力理論 (Aerodynamic theorem)；二是考慮水由液態變氣態的過程中熱傳導現象，即所謂能量平衡理論

(Energy balance theorem) :

(一)空氣動力理論

在地球表面邊界層(Boundary layer)中，因受到太陽輻射及地形地物的影響，使得空氣的流動呈紊流狀況(Turbulent flow)，今考慮一維座標，如下圖1所示：

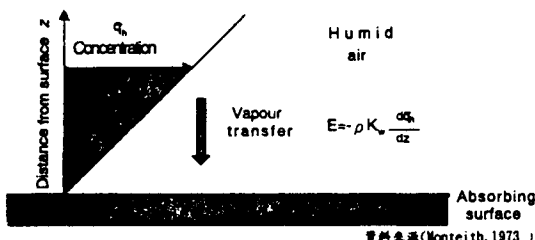


圖 1. 一維蒸發過程示意圖

假設蒸發潛熱 Q_E 僅沿著垂直高度變化(Penman, 1948 ; Monteith, 1973) , 則

$$Q_E = \lambda E = -\rho \lambda K_w \frac{dq_h}{dz} \dots\dots\dots (1)$$

今將等號兩邊水汽之潛化熱 λ 消掉，則其單位面積之蒸發率可以下式示之：

$$E = -\rho K_w \frac{dq_h}{dz} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- E ：隨著垂直高度變化之蒸發率， $g/cm^2/sec$ 。
- q_h ：瞬間單位質量濕潤空氣中水汽含量，即比濕(Specific humidity)，以質量比表示， q_h 為單位時間內 q_h 之平均值。
- K_w ：水汽擴散係數， cm^2/sec 。
- Z ：蒸發面上之垂直高度， cm 。
- ρ ：水汽密度， g/cm^3 。

(二)能量平衡理論

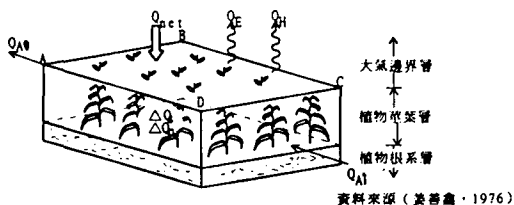


圖 2. 單位體積田區內熱量平衡示意圖

考慮如圖2 所示之田區示意圖，利用能量不滅原理，可將單位體積中能量變化用數學式表示如下(Penman, 1984)：

$$Q_{net} = Q_E + Q_H + \Delta Q_S + \Delta Q_P + Q_{Ai} - Q_{Ao} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- Q_{net} ：淨入射能量， w/m^2 。
- Q_E ：蒸發潛熱能， w/m^2 。
- Q_H ：空氣對流可感熱(Sensible heat)， w/m^2 。
- ΔQ_S ：田區之儲存能量， w/m^2 。
- ΔQ_P ：光合作用所消耗的能量， w/m^2 。
- Q_{Ai} ：空氣流入傳導熱(水平方向)， w/m^2 。
- Q_{Ao} ：空氣流出傳導熱(水平方向)， w/m^2 。

假設此田區於自然狀態下，將所有人為因素及其它偶發之地殼變動現象排除後，太陽光即為此田區唯一能量來源，且由於太陽光經過大氣層的阻隔，到達田區後又經入射角之傾斜，所以真正為田區所吸收的能量為淨輻射能 Q_{net} 。由於 Q_{Ai} 與 Q_{Ao} 可互為抵消掉且 ΔQ_S 與 ΔQ_P 相對於其他各項顯示得小，可忽略不計，故式(3)可簡單表示如下：

$$Q_{net} = Q_E + Q_H \dots\dots\dots (4)$$

Q_E 可從式(1)得知，至於 Q_H 可表示如下(Penman, 1948 ; Monteith, 1973)：

$$Q_H = -\rho C_p K_H \frac{\Delta T}{\Delta Z} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- Q_H ：空氣對流可感熱， w/m^2 。
- C_p ：空氣比熱， $cal/g/^\circ C$ 。
- K_H ：熱傳擴散係數， cm^2/sec 。
- ΔT ：蒸發面上不同垂直高度時之溫度差， $^\circ C$ 。
- ΔZ ：蒸發面上之垂直高度差， m 。

今將式(5)、式(1)代入式(4)並利用 Bowen 率

$\beta = \frac{Q_H}{Q_E}$ 稍加推導(Penman, 1948 ; 陳清田, 1991) 即得

$$ET_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{(R_n - S)}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u)(e_a - e_s) \dots\dots (6)$$

式中：

- ET_0 ：參考作物蒸發散量， mm/day 。
- γ ：濕度常數(Psychrometric Constant)， $mb/^\circ C$ 。
- Δ ：飽和蒸汽壓力曲線斜率， $mb/^\circ C$ 。
- R_n ：淨輻射量， $cal/cm^2/day$ 。

- f(u)：風速函數。
- e_a：平均溫度時之飽和蒸汽壓，mb。
- e_d：露點溫度時之飽和蒸汽壓，mb。
- S：土壤熱通量，cal/cm²/day。
- λ：水汽潛化熱，cal/g。

此即為FAO於1984年所公佈之Modify Penman估算式，此式於應用上雖有不錯之評價，然因式中風速函數f(u)，易受區域性氣候環境之影響，進而降低估算上之準確性，故為避免不同氣候條件，造成作物需水量估算時之計算偏差，今擬從植物生理(亦即植物高度、植物群落等)之觀點加以探討分析，期能提升該估算式之精確度及穩定度。設若有一濕度修正常數γ*，取代原來濕度常數γ，此值與作物群落、作物高度、葉面積指數等有關，其與濕度常數γ之關係如下(Monteith, 1965)

$$\gamma^* = \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right) \quad (7)$$

式中：

- r_c：作物遮蔽阻抗(缺水狀態下，植物控制氣孔以防止水份蒸發之阻力，在飽和土壤時r_c=0)，s/m。
- r_a：空氣動力阻抗(受植物群落數之影響)，s/m。

上述之r_c因受作物高度(h_c)及葉面積指數(LAI)之影響(Allen et al., 1989)，其關係可如下式表示之

$$r_c = \frac{200}{LAI} \quad (8)$$

r_a則為植物群落中水汽或熱氣輸送容易度之表示，植物群落愈少，則r_a值會愈大，其為風速、能量傳導粗糙度及蒸汽傳導粗糙度之函數(Allen et al., 1989；Monteith, 1981；Brutsaert, 1975)，其式如下：

$$r_a = \frac{\ln \left\{ \frac{Z_m - d}{Z_{om}} \right\} \times \ln \left\{ \frac{Z_h - d}{Z_{oh}} \right\}}{K^2 U_z} \quad (9)$$

式中：

- r_a：空氣動力阻抗，s/m。
- Z_m：風速量測之高度，m。
- Z_h：溫(濕)度之量測高度，m。
- K：Von Karman Constant(=0.41)。
- U_z：離地面Z(m)高之風速，m/s。

d：零位移之風速剖面高度(在此高度下，無空氣流動，d= $\frac{2}{3}h_c$)，mm。

- Z_{om}：能量傳導粗糙度(=0.123h_c)，mm。
- Z_{oh}：蒸汽傳導粗糙度(=z_{oh}=0.1z_{om})，mm。

將式(7)代之式(6)整理得到

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta(R_n - S) + \rho C_p (e_a - e_d) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)} \quad (10)$$

式(10)即為以植物生理為觀點所推導出估算作物需水量之通式。今可將該式分離成下式：

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - S)}{\lambda [\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)]} + \frac{\rho C_p (e_a - e_d) / r_a}{\lambda [\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)]} = E_{rad} + E_{aero} \quad (11)$$

由式(11)得知蒸發量之多寡，即為能量項E_{rad}及空氣動力項E_{aero}之組合。其中r_c、r_a為LAI、d、Z_{oh}、Z_{om}等參數之函數，該參數皆受作物高度之影響，其中LAI經由Allen et al.等人(1989)之研究結果得知，當作物高度h_c在0.05~0.15m，則LAI=24h_c，又當作物高度在0.1~0.5m，則LAI=5.5+1.5ln(h_c)。至於d、Z_{oh}、Z_{om}亦可由相關之經驗式取得其值(Monteith, 1981；Brutsaert, 1975)，如式(9)之說明。

今若草類之高度為12cm，風速、溫(濕)度之量測高度距地面為2m時，將此值代入式(7)、式(8)、式(9)則得：

$$\gamma^* = \gamma \left(1 + \frac{200/2.88}{208/U_z}\right) = \gamma (1 + 0.34U_z) \quad (12)$$

且當T為20℃，水之潛能汽化熱λ=2.501-(2.361×10⁻³)T(Harrison, 1963)時，則得：

$$E_{rad} = \frac{0.408\Delta(R_n - S)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34U_z)} \quad (13)$$

又同理可得：

$$E_{aero} = \frac{8.64}{\lambda} \frac{1}{\Delta + \gamma} \frac{\rho C_p}{r_a} (e_a - e_d) \quad (14)$$

式(14)中，濕潤空氣比熱C_p因受濕度常數、水之潛能汽化熱λ及大氣壓力P之影響，其關係式如下：

$$C_p = \gamma \times \frac{0.622}{P} \times \lambda \times 1000 \quad (15)$$

而空氣質量密度ρ又與氣體常數R及垂直溫度成反比，其關係為：

$$\rho = \frac{1000P}{T_{kv} \times R} \dots\dots\dots (16)$$

式中：

P：在 Z 公尺高度之大氣壓力，KPa。

R：氣體常數 (= 287)，J/kg/°K。

T_{kv}：蒸發面之垂直溫度

$$(T_{kv} = T_k(1 - 0.378e_d/P)^{-1}), \text{°K。}$$

T_k：絕對溫度 (273 + T°C)，°K。

故當露點溫度之蒸氣壓 e_d 在 1 ~ 5KPa 間，而大氣壓力 P 在 80 ~ 100KPa 間，則垂直溫度 T_{kv} = 1.01(T + 273)，而空氣質量密度可改寫為：

$$\rho = 3.486 \frac{P}{1.01(T + 273)} \dots\dots\dots (17)$$

是以將 ρ 及 C_p 代入 (14) 式則可得：

$$E_{aero} = \frac{\gamma + 900U_2}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}(e_a - e_d) \dots\dots\dots (18)$$

將式 (13) 及 (18) 結合，即可得作物高度在 12cm 時，且溫、濕度量之高為 2m 時之參考作物蒸發散量。

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - S) + \frac{900}{T + 273}U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \dots\dots\dots (19)$$

式中：

ET_o：參考作物之蒸發散量，mm/day。

R_n：淨輻射量，MJ/m²/day。

Δ：飽和蒸汽壓力曲線斜率，KPa/°C。

γ：濕度常數，KPa/°C。

U₂：2 公尺高所量測之風速，m/s。

T：日均溫，°C。

e_a - e_d：飽和蒸汽壓力差，KPa。

S：土壤熱通量，MJ/m²/day。

式 (19) 即為 ICID 於 1994 年所推薦之作物需水量估算式，其與 1984 年 FAO 所推薦之 Modify Penman 式主要差別乃在於：(1) 為使計算更為方便、適切，特將該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)；(2) 為消弭風速函數因區域之特性造成估算上所產生之變異性，進而降低估算之準確度，故以作物遮蔽阻力 (Crop canopy resistance) 及空氣阻力 (Aerodynamic resistance) 等兩項關係式取代了原有之風速函數值 (Monteith, 1990)，使得該估算式更具合理性與適切性 (甘俊二，陳清田，陳焜

耀，1996)，本研究即以 Penman-Monteith 估算式推估臺灣地域性作物需水量。

三、模式參數之決定

1. 飽和蒸汽壓力曲線斜率 Δ

(Tetens, 1930；Murray, 1967)

$$\Delta = \frac{2504 \exp \left[\frac{17.27T}{(T + 237.3)} \right]}{(T + 237.3)^2} \dots\dots\dots (20)$$

式中：

Δ：飽和蒸汽壓力曲線斜率，KPa/°C。

T：日均溫，°C。

2. 濕度常數 γ (Brunt, 1952)

$$\gamma = 0.00163 \frac{P}{\lambda} \dots\dots\dots (21)$$

式中：

γ：濕度常數，KPa/°C。

λ：水之潛能汽化熱，MJ/kg。

P：在 Z 公尺高之大氣壓力，其估算方法為

$$\left[= 101.3 \left(\frac{273 + T - 0.0065EL}{273 + T} \right)^{0.526} \right], \text{KPa。}$$

T：平均溫度，°C。

EL：海拔高度，m。

3. 飽和蒸汽壓力 e_a 及實測水蒸汽氣壓力 e_d

(Tetens, 1930)

$$e_a = \frac{e^{\circ}(T_{max}) + e^{\circ}(T_{min})}{2} = \frac{1}{2} \left[0.611 \exp \left(\frac{17.27T_{max}}{T_{max} + 237.3} \right) + 0.611 \exp \left(\frac{17.27T_{min}}{T_{min} + 237.3} \right) \right] \dots\dots\dots (22)$$

$$e_d = e^{\circ}(T_{dew}) = 0.611 \exp \left(\frac{17.27T_{min}}{T_{min} + 237.3} \right) \dots\dots\dots (23)$$

式中：

e_a：平均溫度時之飽和蒸汽壓力，Kpa。

e[°](T)：飽和蒸汽壓力函數，KPa。

e_d：露點溫度時之蒸汽壓力，KPa。

T_{max}：日最高溫度，°C。

T_{min}：日最低溫度，°C。

4. 蒸汽壓力飽和差 Δe

蒸汽壓力飽和差 Δe 之計算，關係著作物需水

量估算結果之良窳，所以慎選計算公式是必要的，一般 Δe 之求法有數種方式，本文主要計算式擬採用下式，因與 24hr 飽和差 (Hourly deficit) 之值相互比較，其誤差最小 (施嘉昌，黃振昌，1987、陳清田，1991)。

$$\Delta e = e_{save} - e_{dewmin} \dots\dots\dots (24)$$

式中：

e_{save} ：日平均溫度之飽和蒸氣壓，KPa。

e_{dewmin} ：日最低露點溫度之飽和蒸氣壓，KPa。

5. 淨輻射量 R_n (Gommes, 1983 ; Jensen, 1990)

太陽之輻射輸出，透過大氣層頂，經大氣吸收，散射及反射等綜合效應到達地面，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，應用上除可藉助儀器觀測外，尚可由一系列數學式子及許多專家學者研究分析成果計算而得。

$$\begin{aligned} R_n &= R_{ns} - R_{nl} = (1 - \alpha)R_s - R_{nl} = 0.77R_s - R_{nl} \\ &= 0.77R_s - (a_c \frac{R_s}{R_{so}} + bc) [a_1 + b_1 \sqrt{e_d} \sigma \frac{(T_{kx}^4 + T_{kn}^4)}{2}] \end{aligned} \dots\dots\dots (25)$$

式中：

R_n ：淨輻射量，MJ/m²/day。

R_s ：日射量，此值可直接由儀器量測得知，MJ/m²/day。

α ：反照率，在大多數綠色植物覆蓋下，其值範圍在 0.20 ~ 0.25，計算時大都採用 0.23

T_{kx} ：日最高絕對溫度(= (273 + T_{max}))，°k。

T_{kn} ：日最低絕對溫度(= (273 + T_{min}))，°k。

σ ：Stefan-Boltzmann 常數(= 4.9×10^{-9})，MJ/m²/k⁻⁴/d。

a_c, b_c ：地域性常數($a_c = 1.35, b_c = -0.35$)。

a_1, b_1 ：地域性常數($a_1 = 0.34, b_1 = -0.14$)，(Doorenbos and Pruitt, 1984)。

R_{so} ：晴天全日射率(= $(0.75 + 2 \times 10^{-5}EL)R_s$)，MJ/m²/day。

EL：測站高度，m。

R_a ：外大氣層之水平輻射量(= $3.76dr(W_s \sin\phi$

$\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\sin W_s)$)，MJ/m²/day。

W_s ：時角(hour angel, $W_s = \arccos(\tan\phi\tan\delta)$)，徑度(rad)。

d ：地球與太陽之相對距離(= $1 + 0.033\cos(0.0172J)$)

ϕ ：緯度(latitude)，rad。

δ ：太陽赤緯(declination)，太陽入射線與赤道面之夾角(= $0.40\psi\sin(0.0172J - 1.39)$)，徑度(rad)。

J ：一年中估算期間所需天數之順序，無因次。

6. 風速函數 U_2

在估算式中使用之風速皆以離地面 2m 高所量測之風速為主，若量測高度不在 2m 時，則可以下式修正之(Allen et al., 1989)

$$U_2 = U_z \frac{\ln(\frac{Z_2 - d}{Z_{om}})}{\ln(\frac{Z_m - d}{Z_{om}})} \dots\dots\dots (26)$$

式中：

U_z ：在 Z m 高度所量測之平均風速，m/s。

U_2 ：在 2m 高所量測之平均風速，m/s。

Z_m ：風速量測之高度，m。

d ：在零平面時風移動之風速剖面，m。

Z_{om} ：能量傳導粗糙度，m。

7. 土壤熱通量 S

土壤熱通量之量測，在以往除了藉助精密儀器之量測外，尚無任何經驗式或計算式以茲參考，然在 1994 年在 ICID 所推薦之 Penman-Monteith 估算式中，即提供了下式(Wright and Jensen, 1972)

$$S = 0.38(T_{day_i} - T_{day_{i-1}}) \dots\dots\dots (27)$$

式中：

S ：日土壤熱通量，MJ/m²/day。

T_{day_i} ：在 i 天之平均溫度，°C。

$T_{day_{i-1}}$ ：在 $i-1$ 天之平均溫度，°C。

以上土壤溫度之量測皆在地表下 0.18m 為之，由上式之估算結果，得知 1994 年 ICID 所推薦之估算式，雖較 1984 年 FAO 所推薦之估算可計算出該

日或月之土壤熱通量，然因所計算之 S 值仍甚低，故本文於 Penman-Monteith 估算式之建立時，仍不予考慮之。

四、作物需水量之推估

任何灌溉計畫之擬定，均以供應並滿足作物正常生長之所需之蒸發散量為目的，故無論在農業生產的立場上或水資源的規劃利用上，蒸發散量實為一基本且重要之資料，因此，有效、即時地測算作物需水量，不但有助於水資源之規劃管理，更可為乾旱時期輪灌期距訂定之參考，有效提昇水資源之利用。根據國際糧農組織 (FAO, 1984) 所推薦有效、即時估算作物需水量 (ET_{crop}) 之方法，可藉由氣象條件及環境條件決定之參考作物需水量 (ET_0)，配合以各種作物在不同生長期之作物係數 (K_c)，即可推求之。至於作物係數 (K_c) 之決定，乃由作物耕作型態、種植 (或播種) 時間、作物生長階段及生長週期決定，故今若在作物係數已知之情況下，則依各方法即時推估之各作物需水量為：

$$ET_{crop}(i,j) = K_c(j) \times ET_0(i) \dots\dots\dots (8)$$

式中：

i：時間引數 (index of time)

j：作物生長階段 (index of growing stage)

(一) 參考作物需水量

灌溉常受於時效性與地域性之影響，為達適時適量之目標，實需即時準確估算各作物需水量，故為有效即時準確測算各作物需水量，則參考作物需水量 (ET_0) 之推求為其必要條件，因此，吾人若能依區域之立地條件，建立各區域全年性 (36 旬) 之參考作物需水量，並配合各作物之作物係數，即可有效即時推估出各作物於不同區域不同之栽種期距下其各旬別作物需水量及全生育期累積作物需水量，這對作物種類既多，期作別且雜之臺灣地區而言，除可有效提昇農業灌溉用水之管理，更有助於水資源之規劃利用。

近年來由於科技之急速發展，使得周遭之氣候環境已有一定程度之變化，據陳鎮東 (1994)、姜善鑫 (1992) 與 IPCC (1990, 1995) 之研究指出，全球各地區之年平均溫度，由於受溫室效應加強之影

響，已有逐漸上升之趨勢，如此，將使區域性參考作物需水量 (ET_0) 隨之遞增，而作物生長之用水需求亦相對增加。因此，以往之灌溉用水規劃是否能滿足日後作物生長之用水需求，實需探討。是故，本文擬就參考作物需水量之需求趨勢加以分析，首先蒐集台北、高雄等十地區自 1951 年至 1990 年之日平均溫度、日最高溫度、風速、日射量等諸氣象資料，並應用頻率分析方法中經 χ^2 檢定適合度較佳之對數皮爾遜第三類分佈法 (Log-Pearson type III distribution) (陳清田, 1996、吳麗臣, 1991)，分析在重現期距 T 為 2 年、5 年、8 年、10 年、15 年、20 年等不同情況下之參考作物需水量 (陳清田, 1996)，進而再與 40 年之氣象資料平均值，及現行 4 至 5 年頻率年之設計基準下，所推估之參考作物需水量推估值加以分析比較，以確立臺灣區域性參考作物需水量，俾供區域性農業水資源規劃利用與管理之參考，推估之結果詳如圖 3 至圖 12 所示。

(二) 水稻需水量

臺灣農業一向以種植水稻為主，所有的灌溉基準及設施均依此而定，灌溉水源計畫基於經濟之考量，一般係採用四至五年一次乾旱之頻率為基準年，並非以充分確保農業灌溉用水之安全做設計，亦即每四至五年即有可能出現一次用水不足之情況，或平均每年可能有 20 ~ 25 % 之缺水機率。然近年來因受溫室效應加強之影響，使作物生長之用水需水已略有逐漸增加之趨勢，故以往之設計基準是否能確保各作物之正常生長，實值商榷。因此，為因應氣候變遷的影響，以長時距之平均氣象資料及頻率年之觀念建立各作物灌溉需水量之基準，以確保作物之正常生長，實為刻不容緩之要務，尤以用水量最多之水稻更甚。

有關區域性水稻需水量之推估，可應用前述所確立之區域性參考作物需水量 (ET_0)，配合甘俊二 (1979) 過去在本省試驗所得之水稻作物係數 K_c 值 (如表 1)，並參考選定本省各區域之水稻栽培之適種時期 (施嘉昌等, 1976)，推估本省之區域性水稻需水量。表 2、表 3 與圖 13-1 至圖 22-2 所示，即為本省各地區之水稻在不同生育時期之旬別作物需水量，及全生育期累積作物需水量。

表1 水稻各生育階段別之作物係數K_c值

生育天數	生育階段	印尼 Jatiluhur 之 K _c 值	臺灣實驗例所推出之 K _c 值	
			一期作	二期作
1 ~ 30	整地期	1.01	—	—
31 ~ 45	插秧期	1.02	0.5	0.9
46 ~ 60	分蘖初期	1.21	0.8	1.2
61 ~ 75	分蘖末期	1.32	1.2	1.5
76 ~ 90	開花初期	1.41	1.3	1.6
91 ~ 105	開花末期	1.35	1.3	1.5
106 ~ 120	成熟初期	1.24	1.2	1.3
121 ~ 135	成熟中期	1.12	1.1	1.1
136 ~ 150	成熟末期	0.95	0.7	0.6

資料來源：灌溉系統配水技術之分析與研究(甘俊二，1979)

表2 臺灣各地區於不同重現期距下水稻全生育期累積作物需水量 單位：mm

期作	重現期距	宜 蘭	基 隆	台 北	新 竹	台 中	嘉 義	台 南	高 雄	恆 春	花 蓮
第 一 期 作	平均	406	404	464	484	512	319	441	430	500	438
	2年	403	460	460	482	518	305	446	430	494	430
	5年	450	486	523	545	580	350	505	481	540	486
	8年	470	498	549	569	605	368	525	500	557	509
	10年	479	517	559	581	614	377	533	508	564	519
	15年	494	518	578	598	630	391	545	520	577	537
	20年	502	531	593	607	635	404	553	526	585	548
第 二 期 作	平均	721	629	686	820	787	721	854	786	841	660
	2年	730	634	700	838	810	726	859	791	840	669
	5年	793	700	770	907	877	789	941	881	927	732
	8年	816	723	792	929	900	812	972	914	953	755
	10年	825	732	801	938	907	822	985	927	971	764
	15年	843	749	816	951	919	837	1006	946	992	779
	20年	848	762	822	954	928	845	1020	957	1000	785

註：臺灣各地區第一期作水稻種植時間

宜蘭地區：2月21日~6月20日

台北地區：3月1日~6月30日

台中地區：2月21日~6月20日

台南地區：1月1日~4月30日

恆春地區：1月1日~4月30日

基隆地區：3月1日~6月30日

新竹地區：3月1日~6月30日

嘉義地區：1月1日~4月30日

高雄地區：1月1日~4月30日

花蓮地區：2月21日~6月20日

臺灣各地區第二期作水稻種植時間

宜蘭地區：7月1日~10月31日

台北地區：7月21日~11月20日

台中地區：7月1日~10月31日

台南地區：6月21日~10月20日

恆春地區：6月1日~9月30日

基隆地區：7月21日~11月20日

新竹地區：7月1日~10月31日

嘉義地區：6月21日~10月20日

高雄地區：6月1日~9月30日

花蓮地區：7月21日~11月20日

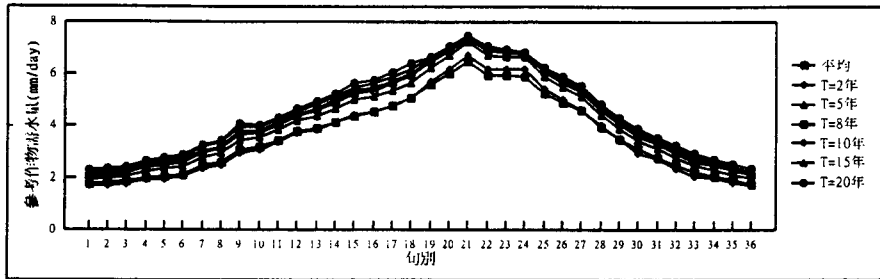


圖 3 台北地區旬別平均參考作物需水量變化圖

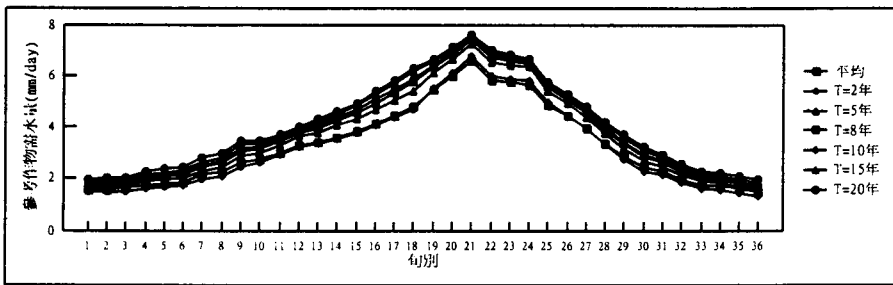


圖 4 基隆地區旬別平均參考作物需水量變化圖

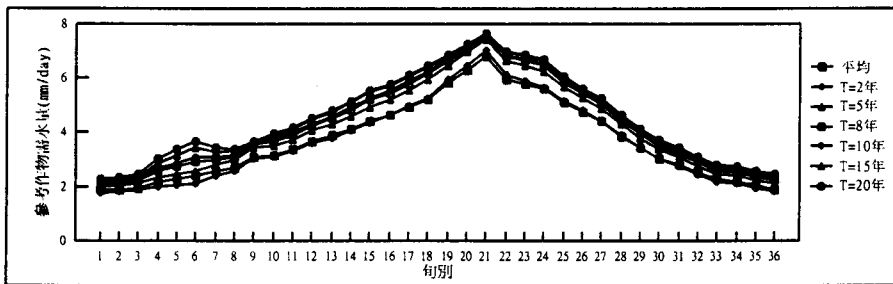


圖 5 花蓮地區旬別平均參考作物需水量變化圖

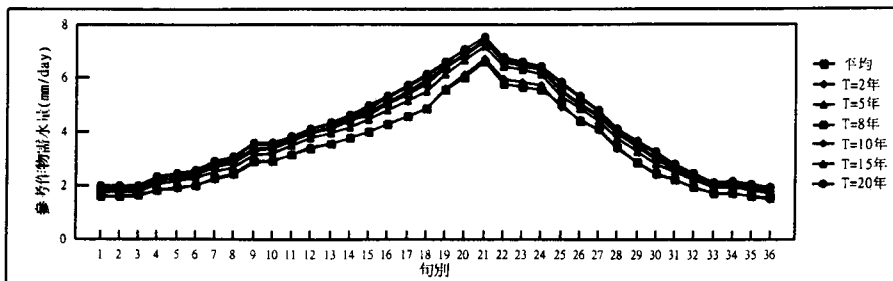


圖 6 宜蘭地區旬別平均參考作物需水量變化圖

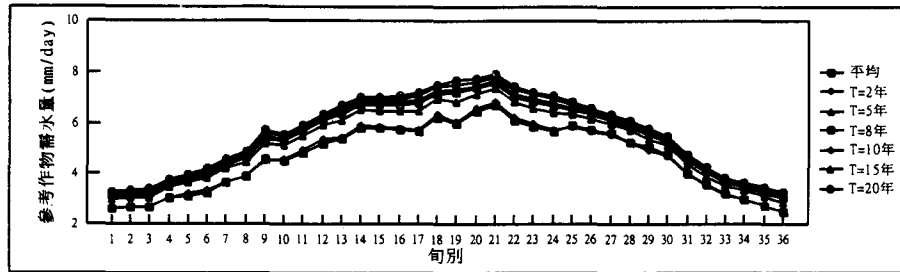


圖 7 台南地區旬別平均參考作物需水量變化圖

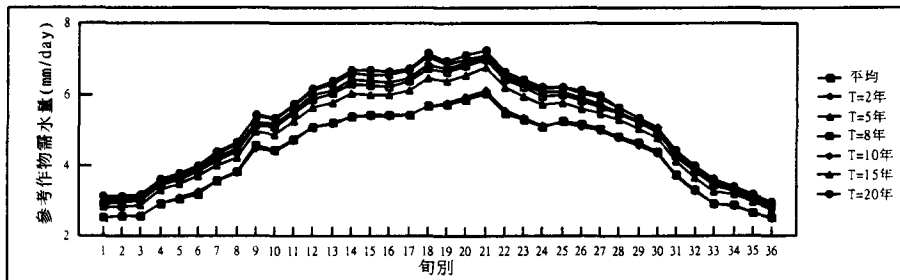


圖 8 高雄地區旬別平均參考作物需水量變化圖

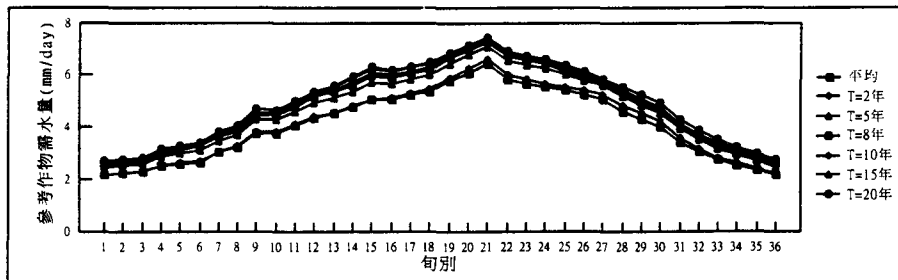


圖 9 台中地區旬別平均參考作物需水量變化圖

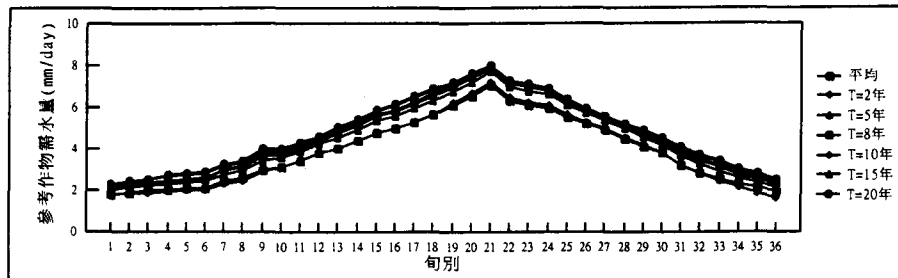


圖 10 新竹地區旬別平均參考作物需水量變化圖

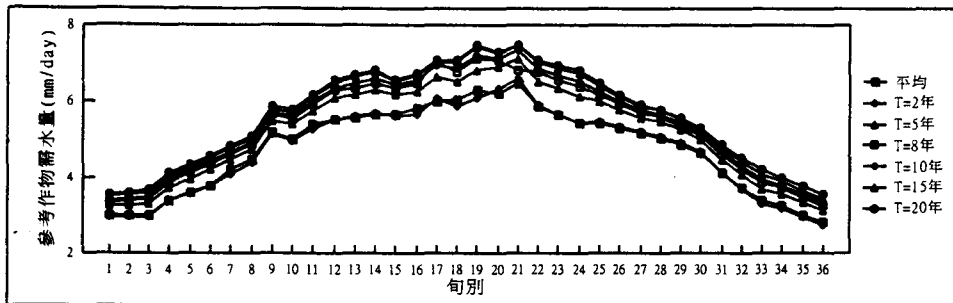


圖 11 恆春地區旬別平均參考作物需水量變化圖

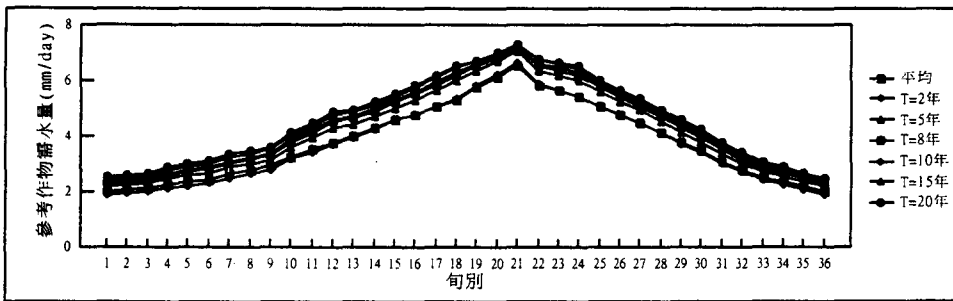


圖 12 嘉義地區旬別平均參考作物需水量變化圖

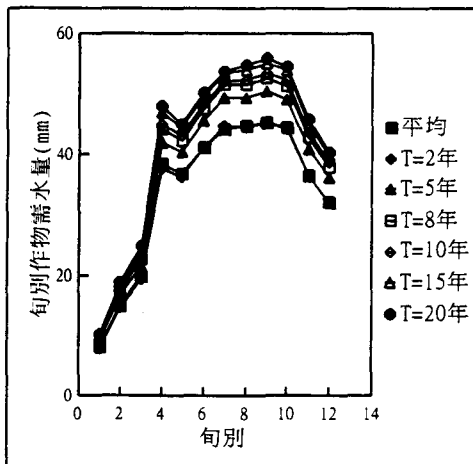


圖 13-1 宜蘭地區一期作水稻旬別作物需水量

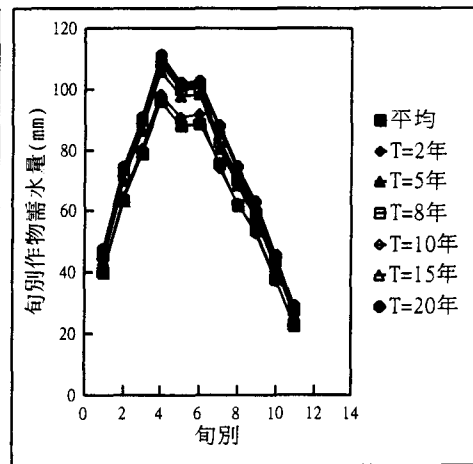


圖 13-2 宜蘭地區二期作水稻旬別作物需水量

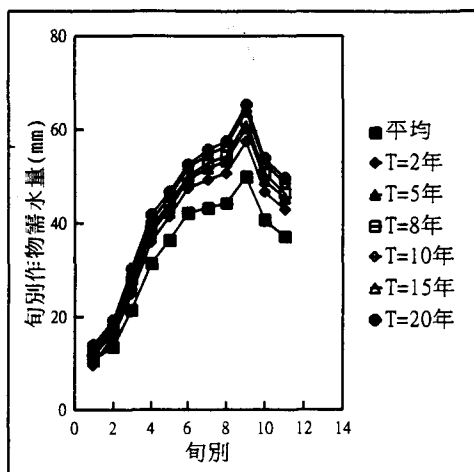


圖 14-1 基隆地區一期作水稻旬別作物需水量

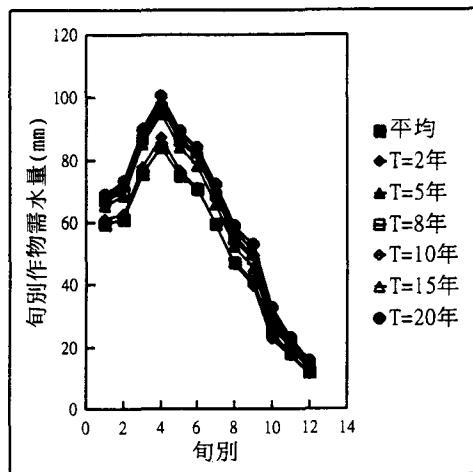


圖 14-2 基隆地區二期作水稻旬別作物需水量

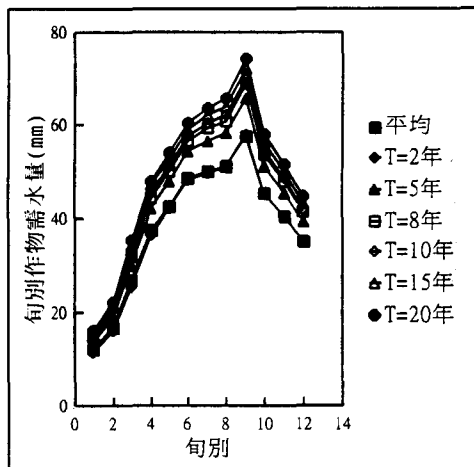


圖 15-1 台北地區一期作水稻旬別作物需水量

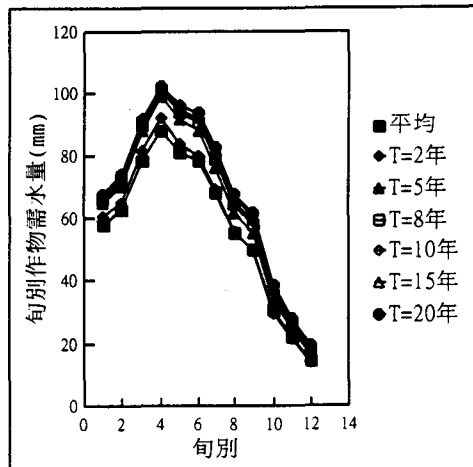


圖 15-2 台北地區二期作水稻旬別作物需水量

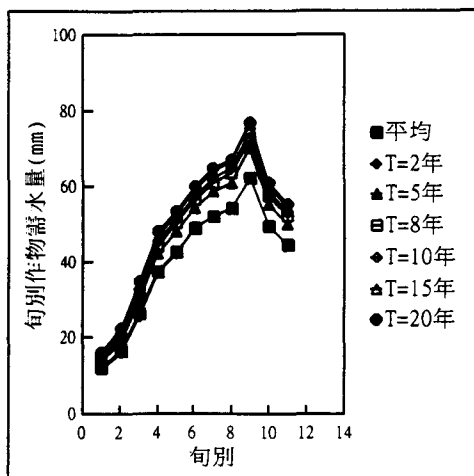


圖 16-1 新竹地區一期作水稻旬別作物需水量

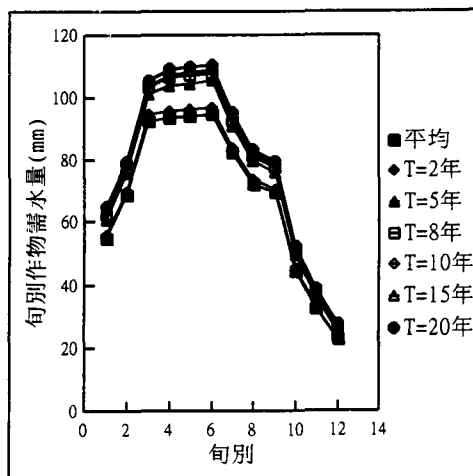


圖 16-2 新竹地區二期作水稻旬別作物需水量

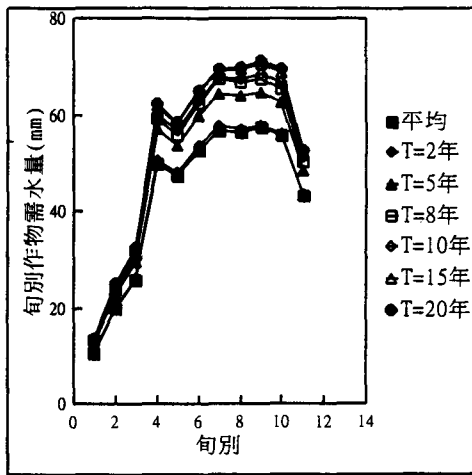


圖 17-1 台中地區一期作水稻旬別作物需水量

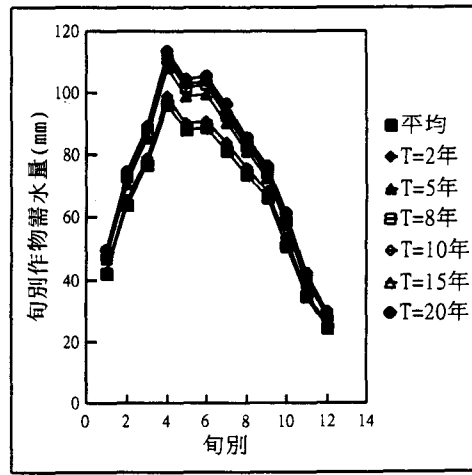


圖 17-2 台中地區二期作水稻旬別作物需水量

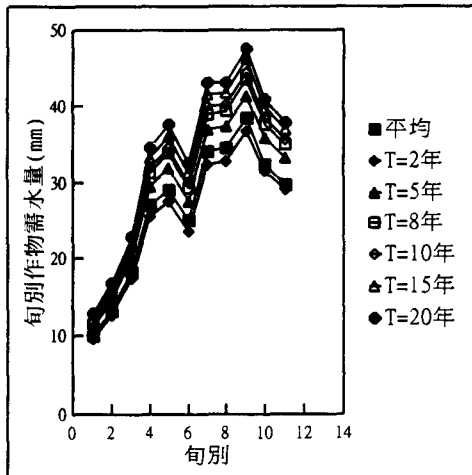


圖 18-1 嘉義地區一期作水稻旬別作物需水量

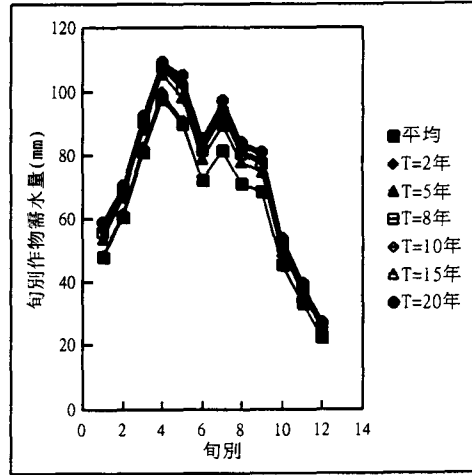


圖 18-2 嘉義地區二期作水稻旬別作物需水量

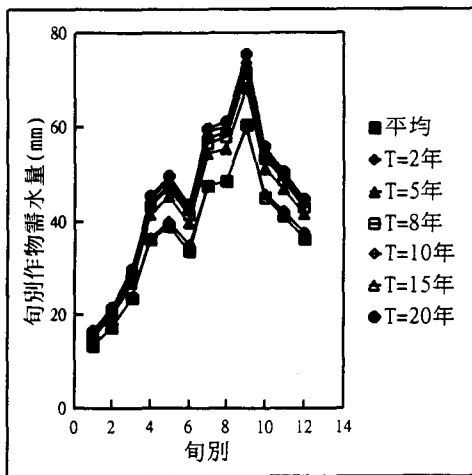


圖 19-1 台南地區一期作水稻旬別作物需水量

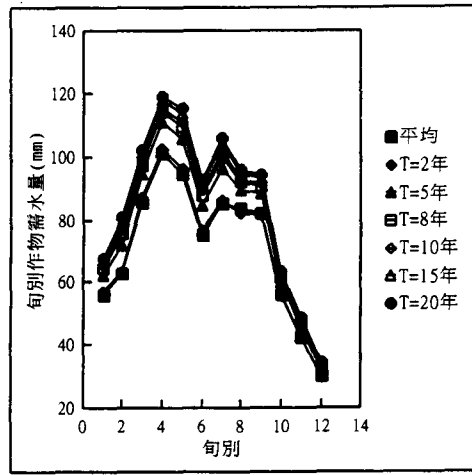


圖 19-2 台南地區二期作水稻旬別作物需水量

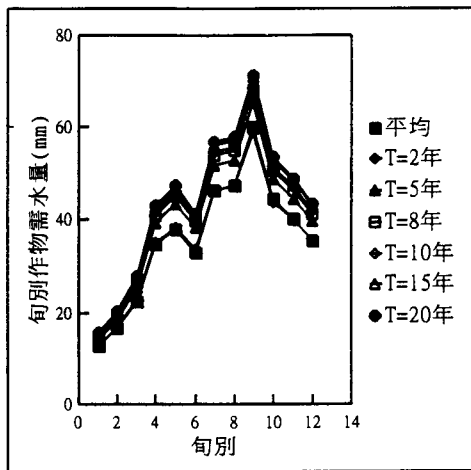


圖 20-1 高雄地區一期作水稻旬別作物需水量

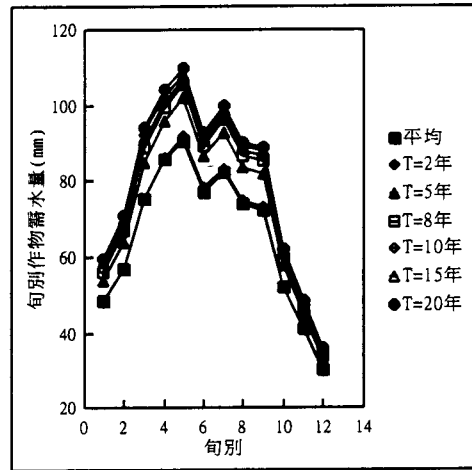


圖 20-2 高雄地區二期作水稻旬別作物需水量

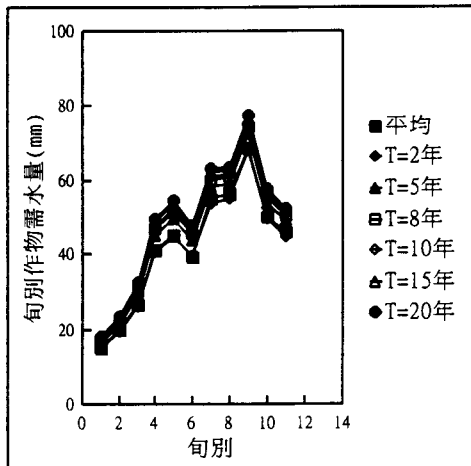


圖 21-1 屏東地區一期作水稻旬別作物需水量

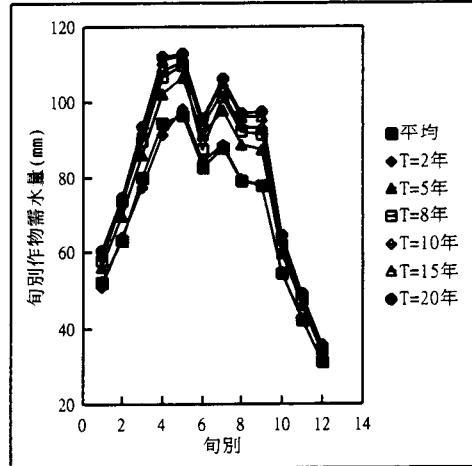


圖 21-2 屏東地區二期作水稻旬別作物需水量

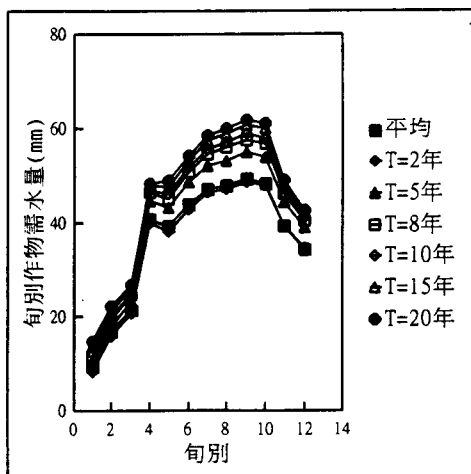


圖 22-1 花蓮地區一期作水稻旬別作物需水量

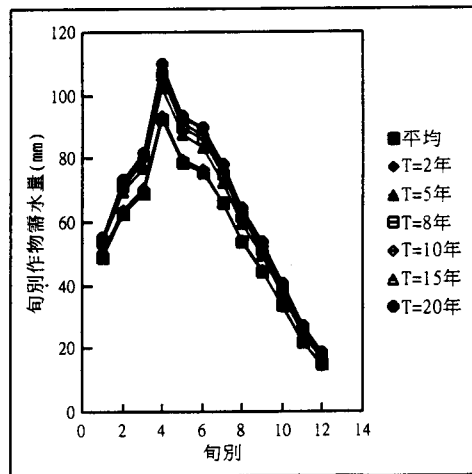


圖 22-2 花蓮地區二期作水稻旬別作物需水量

表3 臺灣各地區水稻全生育期累積作物需水量之建議值

單位：mm

區	域	台 北 地 區			新竹地區	台中地區	台 南 地 區		高 雄 地 區		東部地區
		宜 蘭	基 隆	台 北	新 竹	台 中	嘉 義	台 南	高 雄	恆 春	花 蓮
第 一 期 作 作	作物 需水量										
	最小值	403	404	460	482	510	305	440	430	494	430
	平均值	427	445	491	514	545	327	473	455	517	458
	最大值	450	486	523	545	581	350	505	481	540	486
	範圍	403 ~ 523					305 ~ 505		430 ~ 540		
第 二 期 作 作	作物 需水量										
	最小值	721	629	686	820	787	721	854	786	840	660
	平均值	757	664	728	863	832	755	897	833	883	696
	最大值	793	700	770	907	877	789	941	881	927	733
	範圍	629 ~ 793					721 ~ 941		786 ~ 927		

註：臺灣各地區第一期作水稻種植時間

宜蘭地區：2月21日～6月20日

台北地區：3月1日～6月30日

台中地區：2月21日～6月20日

台南地區：1月1日～4月30日

恆春地區：1月1日～4月30日

基隆地區：3月1日～6月30日

新竹地區：3月1日～6月30日

嘉義地區：1月1日～4月30日

高雄地區：1月1日～4月30日

花蓮地區：2月21日～6月20日

臺灣各地區第二期作水稻種植時間

宜蘭地區：7月1日～10月31日

台北地區：7月21日～11月20日

台中地區：7月1日～10月31日

台南地區：6月21日～10月20日

恆春地區：6月1日～9月30日

基隆地區：7月21日～11月20日

新竹地區：7月1日～10月31日

嘉義地區：6月21日～10月20日

高雄地區：6月1日～9月30日

花蓮地區：7月21日～11月20日

五、結果與討論

- 圖3至圖12分別為台北、新竹、高雄等十地區之參考作物需水量(ET_0)推估結果，從圖中可窺出臺灣各地區全年之參考作物需水量變化趨勢，依據此圖只要配合擬求作物之作物係數值(K_c)與種植時期，即可有效、即時、準確推求出該作物於不同區域不同期作別下之旬別作物需水量與全生育期累積作物需水量，如此將有助於農業灌溉用水之營運管理與水資源之規劃利用，尤以時值水稻、旱作混植情形日趨頻繁之現階段，更形重要。
- 由圖3至圖12之比較分析得知，各區域之全年旬別參考作物需水量，因區域性地環境之不

同，故其旬別參考作物需水量值亦不一致，於相同重現期距比較下窺出其趨勢由北往南逐漸升高，然於嘉義地區因受北回歸線之影響而降低，過了北回歸線之後於台南、高雄地區又升高。且又由於東北部一直呈現濕度較高、日照時間較短之狀況，西南部則呈較乾燥、日照時間較長之情況，故西南部之參考作物需水量，遠高於東北部。此亦即說明了西、南地區農業灌溉用水之需求較東、北地區來得殷切，故此區域之灌溉用水管理尤需加強。

- 由全年旬別參考作物需水量(ET_0)之變化趨勢圖得知，無論於任何地區其參考作物需水量之尖峰皆出現於七月下旬至八月上旬，究其因於此時期各區域之溫度皆為全年之最高值，此結果

亦驗證了溫度對作物需水量之敏感度最高(陳清田, 1991、張本初, 1990), 故於此資料之蒐集與處理宜加審慎。

4.表2為台北、新竹、高雄等地區一、二期作水稻於不同重現期距(T)下之作物需水量, 從表中可看出當T值越大作物需水量則愈高, 尤以T為20年時為甚, 於此所推估之結果雖較能保障作物生長之用水需求(缺水機率僅為5%), 然在有限水資源之限制下, 勢必不可行, 故宜依照各區域之用水特性予以決定, 亦即以區域性水資源之豐枯與用水成本之高低考量決定之。又從表2中得知以40年氣象資料平均值所推得之作物需水量, 與重現期距T為2年時, 所推得之結果, 無論於任何地區, 其值皆很接近, 質言之, 以往以氣象資料年平均值所規劃之作物需水量, 亦可以T為2年之頻率年為之, 如此, 雖兼具方便性與實用性。然若想以此平均作為灌溉用水之規劃設計, 則較不適宜, 因其缺水機率高達50%, 較不能保證作物之正常生長, 故於日後應盡量避免以此作為作物需水量之規劃設計, 尤以正值氣候溫度已略上升之現階段, 以此為灌溉水源計畫基準似值商榷, 宜應依據各區域之用水特性予以彈性調整方具實用。

5.比較國際糧農組織(FAO)所建議水稻全生育期累積作物需水量之最大限值950mm與日本灌溉水源規劃設計基準T為10年(高橋裕, 1965), 並考慮農業氣候區分之區域特性(郭文鏢、楊之遠, 1980), 則由表3得知, 於台北、高雄等不同區域, 其一、二期作水稻全生育期累積作物需水量之建議值如下表所示:

表4 水稻全生育期累積作物需水量之建議值
(單位: mm)

期作	台北區	新竹區	台中區	台南區	高雄區	東部區
一期作	403	482	510	305	430	430
	523	545	581	505	540	486
二期作	629	820	787	721	786	660
	793	907	877	941	927	733

由上表得知臺灣地區水稻需水量之範圍為403mm~927mm, 相較於國際糧農組織之450mm~950mm為低, 此乃受到地域性之環境影響所致, 臺灣地區屬濕潤地帶, 高濕度抑制了蒸發散之發生, 造成作物需水量亦會偏低, 此點可由推估結果偏低之基隆、宜蘭等多雨之地區加以驗證, 未來應可以此作為區域性灌溉用水規劃之依據。

6.表3與圖13-1至圖22-2分別為臺灣地區一、二期作水稻於不同重現期距下, 各期旬別作物需水量與累積作物需水量之變化, 從表3得知水稻全生育期之累積作物需水量, 無論於任何區域其第一期作水稻需水量皆遠較於第二期作水稻需水量來得低, 蓋因第二期作水稻之生長環境與第一期作水稻截然不同, 第二期作水稻之生長季節適逢氣溫較高, 故其需水量較高。又從圖13-1至圖22-2旬別作物需水量之變化圖中, 可窺出各作物於各生育階段之消耗水量呈多峰之趨勢, 此即說明作物雖於開花等最需水之生長階段, 然因氣候環境之影響, 抑制作物生長時期所需水量之蒸發散, 故其需水量反有遞減之趨勢, 此乃降雨所致, 故由旬別作物需水量圖正可說明臺灣地區水稻作物需水量特有之需求趨勢, 可供灌溉用水管理與水資源規劃利用之參考。

六、結論與建議

- 1.以長期平均氣象資料與頻率年觀念所建立之區域性參考作物需水量(ET₀), 配合擬求作物之作物係數與其適種時間, 並考量區域水源之豐枯情形, 即可有效、即時、準確的估算不同區域不同作物於不同期作別下之作物需水量, 俾供灌溉營運管理之參考應用。
- 2.依國土綜合開發計劃之區域劃分, 可將水資源區域劃分為北、中、南、東等四區, 則一、二期作水稻全生育期累積作物需水量於各區域之範圍分別為北部地區403mm~545mm、629mm~907mm, 中部地區510mm~581mm、787mm~877mm, 南部地區305mm~540mm、721mm~927mm, 東部地區430mm~486mm、660mm~733mm, 此結果有助於農業水

資源之規劃利用

- 3.本研究依據水稻於各區域之適種期距，推得宜蘭、高雄、台東等地區之旬別作物需水量與全生育期累積作物需水量，可供區域性水稻灌溉用水管理規劃之參考應用。然為期使更有效、即時估算其餘作物需水量，宜應建立更具實用性可靠性之區域性主要旱作物之作物係數值，以為區域性水資源規劃之參考應用。
- 4.若以水資源之豐枯與用水經濟成本之高低為考量，本研究建議於水資源豐富或用水成本低地區(如東部)，可比照日本以重現期距T等於10年作為作物需水量之設計基準，然於水資源用水成本較高之地區(如北部)或灌溉水源較為缺乏之南部地區，則可以T為5年之重現期距設計之。
- 5.本研究雖以台北、高雄等十個氣象站之40個氣象資料，推得本省各地區之參考作物需水量(ET₀)與水稻需水量，然為使資料更具代表性，宜應採用更多之氣象站與較長期之氣象資料分析比較之，以免有掛一漏萬之憾。
- 6.本文以頻率年之觀念，藉由各單一氣象站之氣象資料，分析各地區各作物於不同重現期距下之灌溉絕對消耗水量，此為一探討區域作物需水量之方法論，然對於各地區交界處之作物需水量，其值應如何界定，實值有待更進一步之探討，故日後應可考慮先將區域性之氣象資料予以整合分析，再以前述之方法加以比較，以建立更具合理性之區域灌溉絕對消耗水量。
- 7.本研究雖依農業氣候區分建議一、二期作物需水量之用水範圍與區域性之參考作物需水量(ET₀)，然因受於人力、物力及時間之限制，於台東地區尚未予以分析，冀以日後探討之，期以建立更周全之區域性作物需水量資料，以為農業用水規劃管理之參考。

謝 誌

本研究承行政院農委會86科技-1.10-林-5
(4)計畫經費補助，方始有成，於此敬表謝忱。

參考文獻

- 1.王如意、易任，「應用水文學(下冊)」，國立編譯館，p99～241，1992。
- 2.甘俊二，「灌溉系統配水技術之分析與研究」，台大農工系，1979。
- 3.甘俊二、陳清田、陳焜耀，「臺灣地區作物需水量推估模式之合適性研究」，中國農業工程學報，第四十二卷第二期：p8～19，1996。
- 4.吳麗臣，「臺灣區域性參數與極值水量推估之研究」，臺灣大學農業工程學研究所碩士論文，1991。
- 5.施嘉昌、黃振昌，「作物需水量與氣象因子相關理論分析研究」，中國農業工程學報，第卅三卷第二期：p1～27，1987。
- 6.施嘉昌、徐玉標、曹以松、甘俊二，「灌溉排水原理」修訂版，中央圖書供應社，1976。
- 7.郭文鑠、楊之遠，「臺灣農業氣候區域規劃」，行政院國科會補助計畫(NSC-698-0409-24(01))，p55～107，1980。
- 8.姜善鑫，「大氣與陸地界面間的能量平衡」，中國地理學會會刊，第四期，p41～44，1976。
- 9.姜善鑫，「全球增溫與海平面上升」，科學月刊，第23卷第1期，1992。
- 10.張本初，「作物需水量最佳模式之探討」，臺灣大學農業工程學研究所碩士論文，1990。
- 11.陳清田，「嘉義地區作物需水量之推估研究」，中國農業工程學報，第卅七卷第一期：p82～109，1991。
- 12.陳清田，「臺灣各地區旱作物需水量之推估研究」，臺灣大學農業工程研究所碩士論文，1996。
- 13.陳鎮東，「全球變遷—地球過去的氣候和環境變遷及其成因」，中華民國海洋科技學會，1994。
- 14.環保署，「全球氣候變遷對臺灣之影響與因應之道」，1995。
15. Allen R.G., Jensen M.E., Wright J.L., and Burman R.D. "Operational Estimates of Evapotranspiration" Agron. J. 81: p650～662, 1989.
16. Brunt D., "Physical and Dynamical Meteorology", 2nd ed. University Press, Cambridge., p428, 1952.
17. Brutsaert W., "The Roughness Length for Water

- Vapor, Sensible Heat and other Scalars", J. Atm. Sci. 32: p2028 ~ 2031, 1975.
18. Doorenbos J. and Pruitt W. O., "Guidlines for Predicting Crop Water Requirments" FAO Irrigation Drainage Paper No. 24, 1976.
 19. Dugas W. A., Ainsworth C. G., "Effect of Potential Evapotranspiration Estimates on Crop Model Simulation" Transactions of the ASAE Vol.28 No.2, p471 ~ 476, 1985.
 20. Duffie J. A. and Beckmen W. A., "Solar Engineering of Thermal Process", John Wiley and Sons, New York. p1 ~ 109, 1980.
 21. Gommès R. A., "Pocket Computers in Agrometeorology", FAO Plant Production and Protection Paper 45, Rome, 1983.
 22. George Merva, M. ASAE. Andres Fernandez " Simplified Application of Penman's Equation for Humid Regions" Transactions of the ASAE Vol. 28 No. 3 , p. 819 ~ 825, 1985.
 23. Harrison L. P., "Fundamental Concepts and Definitions Relating to Humidity", In: Humidity and Moisture. Vol.3. Wexler A. (ed). Reinhold Publishing Company, New York, 1963.
 24. ICID, "Proposed Calculation Procedures for ET₀ Combination Formula", ICID Bulletin Vol. 43 No. 2, p. 39 ~ 82, 1994.
 25. IPCC/UNEP, "Climate Change" Cambridge University Press. 1990 ~ 1995.
 26. Jensen M.E., Burman R.D. and Allen R.G., " Evapotranspiration and Irrigation Water Requirement" ASCE Manual No.70, 1990.
 27. Linacre. E. T., "Climate and the Evaporation from Crop" Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE Vol. 93 IR4 : p. 61 ~ 79, 1967.
 28. Marvin E. Jense M., ASCE, David C. N. Robb M. ASCE, and C. Eugene Franzoy " Scheduling Irrigations Using Climate-Crop-Soil Data " Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE Vol. 96 IR 1 : p. 28 ~ 38, 1970.
 29. Monteith J. L., "Evaporation and the Environment", In: The Sate Movement of Water in Living Organisms. XIXth Symposium. Soc. for xp. Biol., Swansea. Cambridge University Press. p205 ~ 234, 1965.
 30. Monteith J. L., " Principles of Environmental Physics " Edward Arnold, London, 1973.
 31. Monteith J. L., "Evaporation and Surface Temperature, " Quarterly J. Royal Meteor. Soc. 107: p1 ~ 27, 1981.
 32. Murray F. W., "On the Computation of Saturation Vapor Pressure", J. Appl. Meteor. 6 : p203 ~ 204, 1967.
 33. Penman H. L., "Natural evaporation from open water, bare, soil and grass" Proc. R. Soc. A 193: p120 ~ 145, 1948.
 34. Penman H. L., "Estimating evaporation", Trans. Geoph. U. Vol. 37 No. 1, p43 ~ 50, 1956.
 35. Penman, H. L., "Vegetation and Hydrology", Tech. communication No. 3 Commen wealth Bureau of soil, Harpender, Eng., 1963.
 36. Persaud N., Chang A.C., "Time Series Analysis of Daily Solar Radiation and Air Temperature Measurements for Use in Computing Potential Evapotranspiration" Transactions of the ASAE Vol.28 No. 2, p462 ~ 470, 1985.
 37. Tetens O., "Uber Einige Meteorolorische Begriffe", Z. Geophys. 6 : p297 ~ 309, 1930.
 38. Wright J. L. and Jensen M.E., "Peak Water Requirements of Crop in Sourthern Idaho" J. Irring. and Drain. Div., ASCE 96 (IR1) : p193 ~ 201, 1972.
 39. 高橋裕, 「日本の水資源」, 東大新書, 1965。
 40. 櫻谷哲夫・堀江武, 「作物の蒸發散に関する研究—(1)水田蒸發散の季節・品種別特性と簡易推定法」, 農業氣象, 第41卷第1號: p45 ~ 55, 1985。
 41. 井上君夫, 「蒸發散の測定法(Ⅷ)—空氣動力學的方法による蒸發・蒸發量の測定」, 農業氣象, 第42卷第1號: p61 ~ 63, 1986。
 42. 及川武久, 「蒸發散(その3)—蒸散と植物體のストレス」, 農業土木學會誌, 第57卷第6號: p517 ~ 523, 1989。

收稿日期: 民國 86 年 10 月 6 日

修正日期: 民國 86 年 11 月 19 日

接受日期: 民國 86 年 12 月 3 日