

Penman-Monteith 方程式日射-日照關係地域性 參數之建立與評估

Establishment and Evaluation on the Local Parameters in the Relationship between Solar Radiation and Sunshine Duration in Penman-Monteith Equation

農業工程研究中心副研究員

黃 振 昌

Huang, Cheng-Chang

摘 要

國內以往蒸發散量相關課題之研究探討，涉及輻射項日射-日照關係式地域性參數應用，多是以不甚嚴謹地查表或內插方式取得，也少見視國內氣候環境條件予以校正。本文藉長期觀測記錄，以及根均方差 RMSE、相關係數 r 及效率係數 E 三項客觀統計指標，檢測與評估國內外推荐及本文分析所得模型，在國內應用時適用性之探討。

分析結果顯示，國內以往常使用的國外推荐參數，不建議繼續在國內應用。基於農業水資源或水文氣象領域之應用，本文所建立之日射-日照關係本土化參數，建議可在台灣地區各農業氣候分區或適當之農田水利會灌區，採參及應用。

關鍵詞：蒸發散量，日射，日照，地域性參數。

ABSTRACT

Owing to various estimations of evapotranspiration in the past years, parameters of these estimations were often not developed in their specific environment, and need to be calibrated with special climatic and agronomic conditions. Using long-term records, and three objective statistical indexes, root mean square error (RMSE), coefficient of correlation (r), and coefficient of efficiency (E) were used to test the results of the estimating model developed in this study, and compared with the other formulas.

The results indicated that the parameters suggested by the foreign literatures were

not recommended to be used in Taiwan. Based on the application for the field of agricultural water resources and hydrometeorology, the parameter developed in this study recommended to apply for each of the agro-climate divisions or irrigation association area in Taiwan.

Keywords: Evapotranspiration, Solar radiation, Sunshine duration, Local parameter.

一、前言

Penman-Monteith 方程式(Allen et al., 1994、1998)係 1994 年獲國際灌溉排水委員會(International Committee of Irrigation and Drainage, ICID)頒布，及聯合國糧食與農業組織(Food and Agriculture Organization, FAO)經不斷應用與驗證，相繼從 1977 年建議、1984 年更新(Doorenbos et al., 1977、1984)，以及再結合作物冠層阻力(crop canopy resistance)及空氣動力阻力(aerodynamic resistance)觀念(Monteith 1981、1990)，於 1998 年改版推荐，受國際性機構唯一認可推荐之蒸發散量(evapotranspiration)估算式，包含有：提供蒸發散熱量來源之輻射項 ET_{rad} 與驅動蒸發散力量來源之空氣動力項 ET_{aero} ，

$$ET_0 = ET_{rad} + ET_{aero} \\ = \frac{0.408\Delta}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \left(0.77 \frac{R_s}{R_a} \left(a + b \frac{n}{N} \right) - R_{nl} - S \right) + ET_{aero} \quad (1)$$

(1)式中， ET_0 ：蒸發散量，亦稱參考作物需水量(reference crop water requirement)，單位 mm/day， Δ ：飽和蒸汽壓力曲線斜率(slope of saturated vapor pressure curve)，單位 mb/°C， γ ：溼度常數(psychrometric constant)，單位 mb/°C， u_2 ：離地面 2 米高的風速，單位 m/sec， R_{nl} ：淨長波輻射，單位 $Mj/m^2/day$ ， S ：土壤熱通量(soil heat flux)，單位 $Mj/m^2/day$ ， R_s ：日射量(global solar radiation)，單位 $Mj/m^2/day$ ， R_a ：外大氣層(extraterrestrial)之水平輻射量，單位 $Mj/m^2/day$ ， n ：實際日照時數(actual sunshine hours)，單位 hr， N ：潛在或理論日照時數(potential or theoretical sunshine hours)，即日長(day length)，單位 hr， a 、 b 即為輻射項日射-日照關係式地域性參數。

國內以往蒸發散量相關課題之探討研究，其中涉及輻射項日射-日照關係式地域性參數 a 、 b 之應用，如：陳尙等(1967)引進 Penman(1948、1956、1963)混合法(combination approach)試算及檢討旱作物需水量；張本初(1990)應用包含 modified Penman 在內共八組蒸發或蒸發散方程式(或模型)，藉迴歸分析探討各模式之相關情形，以及分析各項氣象因子對模式之相對敏感度，進而探討作物需水量最佳模式；陳清田(1991)採用 modified Penman 等八模式，以嘉義觀測站 1985~1989 年氣象資料，經無因次敏感度分析及迴歸分析，建議以 modified Penman 為嘉義地區作物需水量最佳推估模式；梁仁有等(1995)引用 original Penman、Penman-Monteith、FAO Penman 計 10 個方程式，應用 Simmeteo 動力模式，進行氣候改變對台灣地區蒸發散量影響的模擬研究；甘俊二等(1996a)應用 Penman-Monteith 方程式，推估台灣地區玉米、高粱、大豆及落花生四種主要旱作物，不同區域不同期作下之需水量，並以所推估之模式進一步做合適性研究(甘俊二等，1996b)；童慶斌等(2000)採用 Penman-Monteith 方程式計算作物需水量，進而模擬在氣候變遷下對灌溉需水量之影響；郭振民等(2002)、陳姜琦(2002)利用衛星遙測輔以 Penman-Monteith 方程式估算區域蒸發散量...等等，不僅對 R_a 或 N 值數據，仍是以不甚嚴謹地查表或內插方式取得，而且對內含之地域性參數，未曾視國內氣候環境條件予以校正。在現階段「水土資源永續經營、深根台灣、邁向國際化」之同時，國際化公式本土化參數，實有加以建立及評估之必要。

本文擬建立台灣地區各農業氣候分區，日射-日照關係式本土化參數 a 、 b 值，再藉根均方

表 1 歷年台灣地區農業氣候分區成果一覽表

學者專家	年份	應用分區方法	分區結果
蔣丙然	1954	依柯本氏(Koppen's system)分類法，以年平均和月平均氣溫、雨量、土生植物為標準。	分為六類：Cf _a 東北部、CW _a 西部、AW 西南部、Af 東南部、Gcf _a 中部山地及 GDW 中部高山。
陳正祥	1957	依桑士偉特(Thornthwaite's system)分類法，以潤濕指數(moisture index)及有效溫度(thermal efficiency)為分類指標。	分成二十類型，再藉主觀判定合併成八區：東北區、北部區、西南區、南區、東岸區、中部山區、西岸區及澎湖區。
郭文鏢等	1978	採相關係數法、濕溫圖法(hythergraphic analog method)，考量全年氣候差異方式。	分成八區：東北區、北部區、西南區、南部區、東岸區、中部山區、西岸區及澎湖區。
郭文鏢等	1981	採月平均氣溫、降水量相關係數比較法及濕溫圖比較法之結果，再藉多變值區分法予以評定。	分成九區：東北區、西北區、中彰區、雲嘉區、西南區、南部區、東岸區、東部山區及中部山區。
徐森雄	1983	依據天氣之熵(entropy)所導出之情報比(information ratio)觀念，分析台灣各地氣候之類似性。	去除中央山地外，氣候區域概分為：北部、西部、西南部、東北部、東南部及南部等六區。
洪煥琳等	1998	以溫度、濕度及蒸發量為多變量統計分析因子，再藉階層式集群分析(cluster analysis)、非階層集群分析，選出適當集群數，確定分群後求出各氣象分區。	分成六季相對應之不同四區，如：東部沿海、花東縱谷、南部及西南沿海、西北沿海等區域。

註：資料來源，本研究整理。

差 RMSE、相關係數 r 及效率係數 E 三項統計指標，檢測與評估國內外推薦參數及本文建立模型，在國內應用之適用性，以為蒸發散量估算相關課題應用 Penman-Monteith 方程式時，推薦輻射項日射-日照關係句計本土化參數 a、b 值，應用於適當之農田水利會灌區。

二、材料及方法

2.1 農業氣候分區選定

台灣地區之農業氣候分區，歷年相關研究成果豐碩，彙整如表 1 所示。

依發表時序之先後，最早首推蔣丙然(1954)依柯本氏(Koppen's system)分類法，以年平均和月平均氣溫、雨量、土生植物為標準，加以探討。陳正祥(1957)根據桑士偉特分類法(Thornthwaite's system)，以潤濕指數(moisture index)及有效溫度(thermal efficiency)為分類指標。郭文鏢等(1978)以 132 觀測站記錄，採相關係數法、濕溫圖法，考量全年氣候差異方式，予以分區。郭文鏢等(1981)以全省 143 測站月平均氣溫、月降水量資料，採：1.相關係數比較法、

2.濕溫圖比較法、3.多變值區分法、4.濕溫圖 θ 值比較法、5.最暖月與最冷月之雨量比值法等五種方法，予以分區。徐森雄(1983)依據天氣之熵(entropy)導出情報比(information ratio)觀念，分析台灣各地氣候之類似性。洪煥琳等(1998)以溫度、濕度及蒸發量為多變量統計分析因子，先後以階層式集群分析(cluster analysis)法、非階層集群分析法，選出適當集群數，確定分群後求出各氣象分區。

綜合上述各專家學者之分區方法及其結果，以農作物之栽培應適地適作，在適宜氣候環境中，發揮最高生產潛力、減低生產成本之原則，相較於其他學者專家，以郭氏等(1981)之分區結果，即東北區、西北區、中彰區、雲嘉區、西南區、南部區、東岸區、東部山區及中部山區計九區，如圖 1 所示，最為恰當，日後諸如農業生產專業區之設置，各區農作物安全栽培時序之擬訂及農業氣象預報分區等，充分應用台灣農業氣候資源(曾文柄等，1984)，均援引採參郭氏等(1981)之研究成果，爰此，也應該頗適作物需水量相關分析研究所需農業氣候分區之應用。

- I、東北區(Northeast Region)
- II、西北區(Northwest Region)
- III、中彰區(Chung-Chang Region)
- IV、雲嘉區(Yun-Chia Region)
- V、西南區(Southwest Region)
- VI、南部區(South Region)
- VII、東岸區(Eastcoast Region)
- VIII、東部山區(East-mountain Region)
- IX、中部山區(Central- mountain Region)

資料來源：郭文燦、楊之遠(1981)。

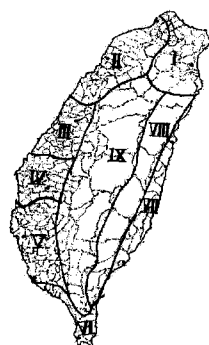


圖 1 台灣地區農業氣候分區

2.2 日射-日照關係式地域性參數

日射能量係太陽以輻射方式，經過雲層覆蓋之透射及反射，空氣分子與氣懸膠體等之散射及吸收，以及地面之吸收及反射等綜合效應，廣為無數學者專家探討並應用到各專業領域，以農業生產活動、水資源經營領域而言，日射是農作物成長行光合作用(photosynthesis)或蒸發散量所需能量之供給來源，到達地面日輻射量化之研究，長久以來一直是以前者以雲量覆蓋(cloud cover)及日照時間，為主要指標予以推估，尤以後者指標之模型又優於前者(Iziomon and Mayer, 2001)，所以，投入日輻射量化相關課題之研究，古今中外的探討，也是以日照為函數居多，Penman-Monteith 方程式中內含之輻射項，即是國際性廣為採參其中之一例，表 2 彙整所示，係本文引用國內外推荐之日射-日照關係 a、b 參數及其背景相關資料，將透過根均方差、相關係數及效率係數三項統計指標，參與本文之分析、比較及檢測。

2.2.1 國外推荐

日射-日照相關探討日射量，首推 Angstrom(1924)所建議之估算式：

$$R_s = R_c [a + (1-a)(\frac{n}{N})] \dots\dots\dots(2)$$

(2)式中， R_c ：完全碧空(perfectly clear day)之入射量。a：地域性參數，Angstrom 於 Sweden 之 Stockholm 地區，以月計計算方式，建議 $a=0.25$ ，因此，在 $\frac{n}{N}$ 前之係數即為 0.75。由於「完全碧空」缺乏明確定義，Angstrom 建議之估算式，應用上遭到判斷之困難與不便，於是 Prescott (1940)修

正(2)式，得

$$R_s = R_a [a + b(\frac{n}{N})] \dots\dots\dots(3)$$

Penman(1948)於英國東南方 Rothamsted 地方，在混合法方程式中，以月為計量期距，推荐(3)式中之 a、b 參數值，分別是 0.18、0.55。Black et al. (1954)檢視包含南緯 $6.3^\circ \sim 7.0^\circ$ ，北緯 $18.5^\circ \sim 64.8^\circ$ ，範圍含蓋 Java、India、Hawaii、USA、Australia、Canada、France、Germany、England 等世界各地 32 地區，以月計方式，經統計分析，區分 7 大群落，可在適當緯度範圍內之國家、地區應用 a、b 值，其範圍 a 值在 0.19~0.40 之間，b 值在 0.280~0.613 之間，而最終推荐之 a、b 值分別是 0.23、0.48。FAO(Doorenbos et al., 1977、1984；Allen et al., 1998)綜合回顧世界各地有關日射-日照相關式方面之研究成果，檢驗自北緯 60° 至 1° ，南緯 36° 至 1° (Doorenbos et al., 1977)，所有 a、b 兩地域性參數值，以實用的觀點，從 1977 年發表到 1984 年的再版，以及 1998 年之推荐改版，與 ICID(Allen et al., 1994)的認可頒布，在國際上著名廣泛應用之作物需水量估算式中，a、b 兩地域性參數值，始終均推荐分別是 0.25、0.50。

2.2.2 國內推荐

國內在日射-日照相關性之探討，首推顏俊士(1974)以月計方式分析求得台北、花蓮、宜蘭地區之 a、b 值，依序分別是 0.37、0.37、0.11、0.43 及 0.34、0.39。唐榮澤(1979)特意選擇晴空碧日之日射量，除去雲量之影響後，以 1967~1977

表 2 本文引用國內外推薦之日射-日照關係 a、b 參數及其背景相關資料

發表者	發表年份	a	b	適用地區	緯度	計算基準	分析資料長度
Angstrom	1924	0.25	0.75	Stockholm(Sweden)	59.4° N	月計	1922~1923
Penman	1948	0.18	0.55	Rothamsted(England)	51.8° N	月計	-
Black et al.	1954	0.23	0.48	Java, India, Hawaii, USA, Australia, Canada, France, Germany, Alaska...etc, 32 locations	6.3°~7.0°S 18.5°~64.8°N	月計	1923~1951
FAO	1977、1984、1998	0.25	0.50	世界各地	-	月計	-
ICID	1994	0.25	0.50	世界各地	-	月計	-
顏俊士	1974	0.37	0.37	台北地區(台灣)	25°02' N	月計	1961~1970
	1974	0.11	0.43	花蓮地區(台灣)	23°58' N	月計	1961~1970
	1974	0.34	0.39	宜蘭地區(台灣)	24°36' N	月計	1961~1970
唐榮澤	1979	0.2745	1.0665	台南地區(台灣)	23°N	月計	1967~1977
黃國禎等	1982	0.1974	0.5625	台北地區(台灣)	25°02' N	月計	1974~1980
	1982	0.2028	0.5786	台中地區(台灣)	24°09' N	月計	1974~1980
	1982	0.2004	0.2018	嘉義地區(台灣)	23°30' N	月計	1974~1980
	1982	0.1853	0.6153	台南地區(台灣)	23°00' N	月計	1974~1980
	1982	0.2866	0.5543	恆春地區(台灣)	22°00' N	月計	1974~1980
	1982	0.1982	0.8146	花蓮地區(台灣)	23°58' N	月計	1974~1980
徐森雄等	1987	0.1821	0.6418	台北地區(台灣)	25°02' N	月計	1974~1985
	1987	0.2038	0.6111	台中地區(台灣)	24°09' N	月計	1979~1985
	1987	0.2755	0.5233	台南地區(台灣)	23°00' N	月計	1979~1985
	1987	0.3079	0.5140	恆春地區(台灣)	22°00' N	月計	1979~1985
	1987	0.2002	0.7856	花蓮地區(台灣)	23°58' N	月計	1979~1985
施嘉昌等	1987	0.20	0.43	台南地區(台灣)	23°N	旬計	1979~1983
黃振昌等	2003	0.2003	0.4135	台南地區(台灣)	23°N	旬計	1950~1999

註：資料來源，本研究整理。

年台灣糖業研究所所記錄之水平日射量及日照資料，以月計方式，求得 a、b 值分別是 0.2745、1.0665。黃氏等(1982)，依據中央氣象局氣候資料年報的資料，確立台灣地區八個測站月計方式之 a、b 值，其中適合本文選定之農業氣候分區，為台北、台中、嘉義、台南、恆春及花蓮測站，a、b 值分別是 0.1974、0.5625，0.2028、0.5786，0.2004、0.2018，0.1853、0.6153，0.2866、0.5543，0.1982、0.8146。徐氏等(1987)，應用 Penman 方程式再予以簡化後，導出台灣地區台北等七個測站之蒸發量估算值，在進一步與實測值比較下，亦獲得有相當適用性之實證結論，其中，日射-日照關係月計方式之 a、b 參數值，分別是 0.1821~0.3079、0.5140~0.7856。施氏等(1987)以理論分析方式，推衍理論日長 N 值與外大氣層水平輻射量 R_a 值，以旬計計量方式，建立嘉南學甲地區 a、b 值為 0.2、0.43。黃氏等(2003)，以

台灣地區農業生產活動最具代表性之嘉南平原-台南測站為例，應用 1950~1999 年日射及日照記錄，經分析驗證得旬計計量方式之 a、b 值 0.2003、0.4135。

2.3 本文模型

應用 Angstrom(1924)由日照資料推估日射量之理念，再以 Prescott(1940)之修正式，日射-日照間之關係式，從數學模型角度來看，是以一次線性方程式之型態呈現，(3)式中之 R_s 、n 可擷取氣象觀測站歷史記錄獲得，N、 R_a 可藉由理論計算式透過程式在電腦運算求得。本文擬應用迴歸分析(regression analysis)方式，經最小二乘法(least square method)建立標準方程式(normal equation)，求解迴歸係數即(3)式中之 a、b 值，並以相關係數及 F 檢定，進一步說明所得迴歸模型之相關程度及檢定存在性之顯著與否。

2.3.1 外大氣層水平輻射量 R_a 理論值

隨季節變換，地球與太陽間距離亦隨之變化，並非一定，也由於地球自轉軸呈傾斜並非垂直於水平面，所以，依太陽-地球間之幾何位置關係，外大氣層水平輻射量 R_a 以太陽常數 (solar constant, I_{sc})、地球軌道離心校正因子 (the eccentricity correction factor of the earth's orbit, E_0)、太陽赤緯 (declination, δ)、緯度 (latitude, ϕ) 及日出時角 (sunrise hour angle, W_s) 為函數計算之 (Iqbal, 1983)

$$R_a = \frac{24}{\pi} \times I_{sc} \times E_0 \times \sin \delta \sin \phi \times \left[\left(\frac{\pi}{180} \right) \times W_s - \tan W_s \right] \quad \dots\dots\dots(4)$$

2.3.2 日長 N 理論值

如同上述太陽-地球間之幾何位置關係，一天之日長 N ，以太陽赤緯 (declination, δ) 及緯度 ϕ 為函數計算之，以小時表示之關係式如下 (Iqbal, 1983)，

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad \dots\dots\dots(5)$$

2.4 模型檢測統計指標

1. 根均方差 (root mean square error, RMSE)，代表推估值 P_i 與實測值 O_i 之變異程度，以正值呈現，值愈大變異愈大，反之愈小。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

2. 相關係數 (coefficient of correlation, r)，以檢測說明實測值 O_i 與推估值 P_i 間之相關程度， r 界於 0 到 1 之間。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2][\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2]}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

3. 效率係數 (coefficient of efficiency, E)，評估模型之推估性能， E 值範圍界於負無窮 (minus infinity) 到 1 之間，值愈大適合度愈佳，反之愈差，對相關係數在實測值 O_i 與推估值 P_i 間之變異性，不易詮釋及說明的，可以有效地改善。

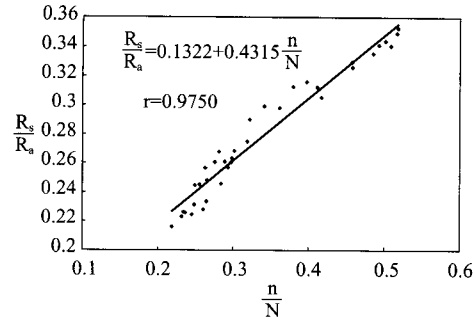


圖 2 農業氣候分區-西北區台北測站迴歸分析結果

$$E = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad \dots\dots\dots(8)$$

2.5 氣象測站資料

採用郭氏等(1981)農業氣候分區結果，並考量由於部份分區無氣候測站，且大多為非農田水利會灌區，所以捨棄中部山區及東部山區，其餘七個氣候分區依序並收集長度不一之日射及日照資料 (中央氣象局, 1948~2001)，以台北 (站號：46692，緯度 25°02' N)、台中 (站號：46749，緯度 24°09' N)、嘉義 (站號：46748，緯度 23°30' N)、台南 (站號：46741，緯度 23°00' N)、恆春 (站號：46759，緯度 22°00' N)、花蓮 (站號：46699，緯度 23°58' N) 及宜蘭 (站號：46708，緯度 23°46' N) 測站，為各分區之代表，進行統計及分析，最終並以該站最後一年且完整之記錄，為驗證時之實測資料。

三、結果與討論

3.1 各農業氣候分區日射-日照關係本土化參數之建立

以農業氣候分區-西北區之台北測站為例說明。藉方程式 (4)、(5) 式，透過程式撰寫，擷取日射及日照資料，1952~2000 年，長度共計 49 年，以農業水資源領域慣行計量基準--旬計方式，進行統計迴歸分析，結果如圖 2 所示，得迴歸模型

$$R_s = R_a [0.1322 + 0.4315 \left(\frac{n}{N} \right)] \quad \dots\dots\dots(9)$$

表 3 台灣地區各農業氣候分區日射-日照關係分析基本資料背景及結果

氣候分區	採用代表測站(站號)	緯度	分析期限(年)	分析長度(年)	驗證資料(年)	$R_s = R_a [a + b(\frac{n}{N})]$			
						係數 a	係數 b	相關係數 r	F 檢定, $\alpha=0.01$ F(1,34 ; 0.99)=7.46
西北區	台北(46692)	25°02'	1952~2000	49	2001	0.1322	0.4315	0.9750	655.18>7.46,OK
中彰區	台中(46749)	24°09'	1979~2000	22	2001	0.1654	0.4895	0.9674	496.51>7.46,OK
雲嘉區	嘉義(46748)	23°30'	1976~2000	25	2001	0.1869	0.4265	0.9311	221.58>7.46,OK
西南區	台南(46741)	23°00'	1950~1999	50	2000	0.2003	0.4135	0.8268	73.47>7.46,OK
南部區	恆春(46759)	22°00'	1981~2000	20	2001	0.1820	0.3788	0.8865	124.74>7.46,OK
東岸區	花蓮(46699)	23°58'	1948~2000	53	2001	0.1409	0.4582	0.9806	849.78>7.46,OK
東北區	宜蘭(46708)	24°36'	1981~2000	20	2001	0.1155	0.6739	0.9823	936.56>7.46,OK

註：資料來源：除台南測站係引用黃氏等(2003)之結果，餘為本研究分析所得。

相關係數 0.9750，F 檢定 = 655.18 > F(1,34; 0.99) = 7.46，顯示迴歸分析所得模型在 99% 顯著水準下，具有顯著性及存在性。同理，其他各農業氣候分區所得迴歸分析結果，整理如表 3 所示，其方程式分別如下：

農業氣候分區-中彰區(台中測站)，

$$R_s = R_a [0.1654 + 0.4895(\frac{n}{N})] \dots\dots\dots(10)$$

農業氣候分區-雲嘉區(嘉義測站)，

$$R_s = R_a [0.1869 + 0.4265(\frac{n}{N})] \dots\dots\dots(11)$$

農業氣候分區-南部區(恆春測站)，

$$R_s = R_a [0.1820 + 0.3788(\frac{n}{N})] \dots\dots\dots(12)$$

農業氣候分區-東岸區(花蓮測站)，

$$R_s = R_a [0.1409 + 0.4582(\frac{n}{N})] \dots\dots\dots(13)$$

農業氣候分區-東北區(宜蘭測站)，

$$R_s = R_a [0.1155 + 0.6739(\frac{n}{N})] \dots\dots\dots(14)$$

農業氣候分區中彰區、雲嘉區、南部區、東岸區及東北區，代表測站依序是台中、嘉義、恆

春、花蓮及宜蘭測站，資料分析長度分別為 22 年、25 年、20 年、53 年及 20 年，驗證資料皆為 2001 年，相關係數分別為 0.9674、0.9311、0.8865、0.9806 及 0.9823，顯示迴歸模型至少都具 0.88 以上之高度相關，在 99% 顯著水準下，即 $\alpha=0.01$ ，各測站迴歸模型 F 檢定分別 496.51、221.58、124.74、849.78 及 936.56，均大於 F(1,34; 0.99) = 7.46，顯示各測站迴歸模型均具有顯著性及存在性。

3.2 國內適用性之檢測與評估

將本文所得分析結果(9)式~(14)式，與 Angstrom(1924)、Penman(1948)、Black et al. (1954)、FAO & ICID (1998)、顏俊士(1974)、唐榮澤(1979)、黃氏等(1982)、徐氏等(1987)、施氏等(1987)等國內外推荐之日射-日照關係 a、b 參數，進行實測值與諸模型推估值之比較與分析，以檢測與評估各模型，在農業氣候分區之適用性及可信賴度。以農業氣候分區-西北區之台北測站為例說明，採台北測站 2001 年實測值為檢測資料，分析結果整理如表 4 所示，實測值與諸模型推估值之比較，如圖 3 所示。

表 4 實測值與諸模型推估值分析結果一覽表(台北測站)

旬	實測值 (Mj/m ² / 10days) (2001)	推估值(Mj/m ² /10days)							
		本文 (2003)	徐氏等 (1987)	黃氏等 (1982)	顏俊士 (1974)	FAO&ICID (1998)	Black et al. (1954)	Penman (1948)	Angstrom (1924)
1	64.44	67.79	97.46	94.19	117.71	101.03	94.67	89.08	122.52
2	67.15	82.59	119.35	113.70	132.57	119.00	111.83	108.04	148.42
3	56.35	64.34	91.65	90.86	126.69	101.53	94.68	85.21	117.46
4	37.63	45.19	63.31	65.66	107.80	78.41	72.59	60.70	83.99
5	72.46	95.53	137.94	131.70	155.27	138.37	129.98	125.05	171.83
6	60.24	73.22	105.40	101.50	124.70	108.20	101.46	96.10	132.15
7	78.29	94.04	135.26	130.54	162.06	139.68	130.92	123.51	169.87
8	85.40	90.64	129.97	126.52	163.28	137.30	128.48	119.37	164.29
9	80.10	106.25	152.44	148.14	189.81	160.35	150.09	139.85	192.45
10	47.41	63.51	89.16	91.94	148.10	108.92	100.91	85.15	117.77
11	59.23	67.63	95.13	97.59	154.54	114.79	106.44	90.53	125.16
12	94.87	102.16	146.35	142.84	186.52	155.70	145.61	134.65	185.36
13	66.84	76.22	107.66	109.20	166.13	126.33	117.35	101.66	140.41
14	80.33	73.66	103.78	106.00	165.31	123.89	114.96	98.47	136.09
15	111.31	116.89	167.44	163.46	213.66	178.24	166.69	154.08	212.11
16	106.79	104.73	149.90	146.65	193.48	160.46	150.01	138.13	190.20
17	112.29	109.36	156.77	152.70	197.66	165.91	155.22	144.04	198.26
18	142.82	139.76	202.00	192.33	223.65	201.11	189.02	182.79	251.10
19	129.92	124.74	179.68	172.71	210.41	183.57	172.19	163.63	224.97
20	106.31	119.15	171.40	165.36	204.95	176.84	165.76	156.48	215.20
21	130.74	134.57	193.82	186.35	227.30	198.15	185.86	176.54	242.71
22	131.57	149.24	216.30	204.34	228.25	210.76	198.42	194.71	267.30
23	165.17	170.19	247.57	231.48	244.40	234.35	221.14	221.34	303.58
24	128.95	134.71	194.39	185.93	221.18	195.96	184.00	176.44	242.47
25	73.18	87.53	124.92	123.20	168.20	136.57	127.47	115.74	159.48
26	79.62	104.00	149.59	144.35	179.12	154.44	144.76	136.59	187.85
27	51.56	57.92	81.28	83.89	135.58	99.52	92.19	77.67	107.43
28	85.52	94.02	135.21	130.58	162.61	139.88	131.09	123.52	169.88
29	86.80	102.96	148.74	141.81	166.05	148.64	139.66	134.72	185.08
30	70.54	85.03	121.91	118.71	153.47	128.92	120.62	111.99	154.14
31	56.18	67.17	96.00	94.29	126.47	103.81	96.98	88.70	122.17
32	42.62	60.11	85.71	84.72	116.68	94.22	87.92	79.53	109.61
33	89.49	104.66	152.16	142.50	151.79	144.68	136.48	136.18	186.80
34	64.74	70.72	101.80	98.02	120.43	104.50	97.99	92.81	127.62
35	37.04	44.00	62.12	63.07	96.28	73.07	67.86	58.70	81.08
36	60.66	75.35	108.43	104.50	128.91	111.57	104.60	98.92	136.03
RMSE		12.38	52.41	47.75	83.33	57.83	48.76	40.51	88.22
r		0.9683	0.9666	0.9706	0.9389	0.9712	0.9716	0.9695	0.9698
E		0.8420	-1.8328	-1.3517	-6.1602	-2.4492	-1.4516	-0.6922	-7.0265

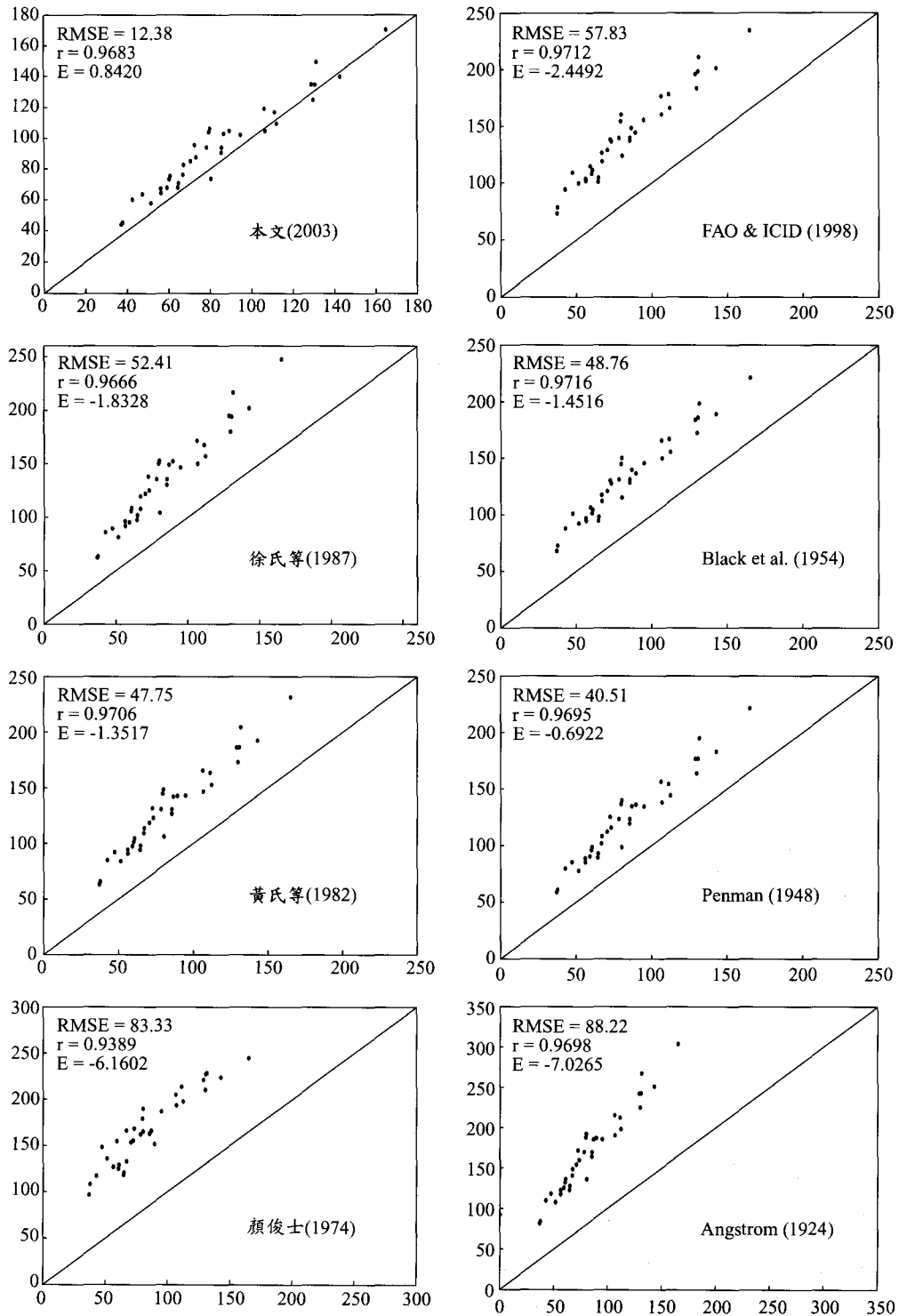


圖3 農業氣候分區-西北區台北測站 2001年實測值(x軸)與諸模型推估值(y軸)比較圖(圖示單位 $Mj/m^2/10days$ ，對角斜線比例是 1:1)。

由於計算期距基準不同，或分析資料時由圖表內插獲得，或考量晴空碧日與否，或雲量影響之考慮與否，或太陽赤緯、或太陽常數(世界氣象組織已從 1956 年 NASA 設計基準及國際日射尺規(International Pyrheliometric Scale, IPS)所訂之 $1,353\text{Wm}^{-2}$ ，於 1981 年建議使用世界放射基準(World Radiometric Reference, WRR)所訂之 $1,367\text{Wm}^{-2}$ (Iqbal, 1983)、或地球軌道離心校正因子等數據計算式採用之不同...等，所以各模型之推估性能表現，反映在 RMSE 值、r 及 E 值，將有所差異。由圖 3 顯示，無論是國外推薦或國內專家學者發表，所有模型推估值與實測值間之相關程度，r 以顏俊士(1974)之 0.9389 最低，以 Black et al.(1954)之 0.9716 最佳，顯示相關程度佳，都在九成以上，惟進一步檢視推估值之分佈，除本文模型($r=0.9683$)約略落在 1:1 對角線上下，其餘模型均落在 1:1 對角線上方，呈高估(overestimation)態勢，初步說明本文分析所得模型，在農業氣候分區-西北區適用性及可信賴度，較優於其他國內外所推薦模型。

再配合表 4 所揭示之根均方差 RMSE 及效率係數 E 二指標，以突顯各模型推估之優劣表現。分析結果顯示，RMSE 值以 Angstrom(1924)之 $88.22\text{Mj/m}^2/10\text{days}$ 為最高，代表與實測值之變異程度最大，其次由高到低依序是顏俊士(1974)之 83.33、FAO & ICID(1998)之 57.83、徐氏等(1987)之 52.41、Black et al. (1954)之 48.76、黃氏等(1982)之 47.75、Penman(1948)之 40.51 及本文之 12.38 為最低。效率係數 E，由小到大順序如同上述，分別是 -7.0265、-6.1602、-2.4492、-1.8328、-1.4516、-1.3517、-0.6922、0.8420，顯示本文分析所得模型，具最低 RMSE 值、最大 E 值，推估能力較優於其他國內外所推薦模型。綜合 r、RMSE 及 E 三指標之檢測與評估及印證，即使國際間廣泛應用獲國際性機構 FAO & ICID 所推薦認可的推估式，若在國內應用，應視國內實際地條件予以校正之事實，亦闡明本文分析所得結果，在農業氣候分區-西北區之適用性及可信賴度。

同理，應用本文於台灣地區各農業氣候分區

日射-日照相關所建立之迴歸模型，與國內外推薦參數，進行在國內適用性之比較、檢測及評估，在不同氣候分區下，實測值與諸模型推估值之統計分析，結果整理如表 5 所示。以台中測站分析所得結果而言，本文分析所得模型 RMSE 值、r 及 E 值三指標分別為 $38.85\text{Mj/m}^2/10\text{days}$ 、0.9596 及 -3.0573，相較 Angstrom(1924)之 110.73 (RMSE 值最高)、0.9587 及 -31.9634(最小 E 值)，具最低 RMSE 值、最大 E 值，推估能力都較優於其他國內外所推薦模型，其他諸如在西南區之台南、南部區之恆春及東北區之宜蘭測站，亦是如此。

儘管代表雲嘉區及東岸區之嘉義與花蓮測站，分別計有本文等六個、八個國內外推薦模型，參與檢測及比較，所有模型相關係數 r 都在 0.96 以上，而 RMSE 值及 E 值指標之表現，分別是以黃氏等(1982)之 7.36、0.8880，顏俊士(1974)之 6.88、0.9659 為最佳，本文以 30.14、-0.8765，19.00、0.7398 次佳，然進一步考量黃氏等(1982)及顏俊士(1974)所建議參數之背景，如月計基準、資料長度短(僅 7~10 年)且久遠(在 1980 以前)、內插圖表方式、使用過時相關常數等條件，相較本文以旬計計量貼切於農業水資源或水文氣象領域之應用，資料長度少則 20 年，甚至達 50 年以上，含蓋長期天候狀況，採理論方程式並經電腦運算分析，引用國際上最新認可相關常數等，實有若干不甚嚴謹、科學或客觀之處，因此仍建議以本文分析所得模型可為上述兩地區之代表及應用。

3.3 台灣地區日射-日照 a、b 參數建議值

綜合上述之結果與討論，應用 Penman-Monteith 方程式估算蒸發散量相關課題之研究，涉及能量項日射-日照關係地域性參數，本文推薦適用如表 6 所示。

四、結 論

Penman-Monteith 方程式，內含輻射項地域性參數 a、b 值，在台灣地區蒸發散量相關課題應用研究，是有必要予以審慎建立及評估。散見

表 5 台灣地區各農業氣候分區日射-日照相關實測值與諸模型推估值檢測結果

農業氣候分區	代表測站(站號)	檢測指標	本文(2003)	施氏等(1987)	徐氏等(1987)	黃氏等(1982)	唐榮澤(1979)	顏俊士(1974)	FAO&ICID(1998)	Black et al.(1954)	Penman(1948)	Angstrom(1924)
西北區	台北(46692)	RMSE	12.38	-	52.41	47.75	-	83.33	57.83	48.76	40.51	88.22
		r	0.9683	-	0.9666	0.9706	-	0.9389	0.9712	0.9716	0.9695	0.9698
		E	0.8420	-	-1.8328	-1.3517	-	-6.1602	-2.4492	-1.4516	-0.6922	-7.0265
中彰區	台中(46749)	RMSE	38.85	-	71.98	66.19	-	-	68.92	58.84	53.81	110.73
		r	0.9596	-	0.9587	0.9621	-	-	0.9765	0.9759	0.9573	0.9587
		E	-3.0573	-	-12.9280	-10.7785	-	-	-11.7686	-8.3069	-6.7846	-31.9634
雲嘉區	嘉義(46748)	RMSE	30.14	-	-	7.36	-	-	63.60	53.50	48.36	105.27
		r	0.9754	-	-	0.9614	-	-	0.9787	0.9778	0.9626	0.9635
		E	-0.8765	-	-	0.8880	-	-	-7.3561	-4.9134	-3.8303	-21.8893
西南區	台南(46741)	RMSE	42.35	45.56	86.40	70.72	174.83	-	73.91	63.85	58.26	114.64
		r	0.9742	0.9749	0.9727	0.9754	0.9737	-	0.9737	0.9745	0.9760	0.9761
		E	-2.1277	-2.6199	-12.0176	-7.7227	-52.3035	-	-8.5276	-6.1101	-4.9185	-21.9181
南部區	恆春(46759)	RMSE	55.80	-	123.44	123.36	-	-	100.99	90.51	86.05	146.23
		r	0.9655	-	0.9570	0.9632	-	-	0.9643	0.9656	0.9696	0.9696
		E	-10.9933	-	-57.6903	-57.6201	-	-	-38.2864	-30.5568	-27.5232	-81.3662
東岸區	花蓮(46699)	RMSE	19.00	-	84.22	87.70	-	6.88	61.27	51.81	44.38	95.67
		r	0.9868	-	0.9878	0.9880	-	0.9878	0.9782	0.9794	0.9862	0.9860
		E	0.7398	-	-4.1112	-4.5420	-	0.9659	-1.7051	-0.9341	-0.4192	-5.5952
東北區	宜蘭(46708)	RMSE	29.14	-	-	-	-	69.90	52.03	42.92	34.41	83.14
		r	0.9871	-	-	-	-	0.9702	0.9892	0.9898	0.9920	0.9920
		E	0.5200	-	-	-	-	-1.7526	-0.5253	-0.0379	0.3328	-2.8944

註：“-”，表示該推薦者於該地區無建議模型參數。單位，RMSE 是 $Mj/m^2/10days$ ，r 及 E 無因次。

表 6 Penman-Monteith 方程式日射-日照 a、b 參數推薦適用一覽表

$R_s = R_a [a + b(\frac{n}{N})]$		作物需水量或蒸發散量估算應用時之推薦適用	
係數 a	係數 b	氣候分區	農田水利會灌區
0.1322	0.4315	西北區	北基、桃園、石門、新竹、苗栗
0.1654	0.4895	中彰區	苗栗、台中、彰化、南投
0.1869	0.4265	雲嘉區	雲林
0.2003	0.4135	西南區	嘉南、高雄
0.1820	0.3788	南部區	屏東
0.1409	0.4582	東岸區	花蓮、台東
0.1155	0.6739	東北區	宜蘭、北基

在國內外文獻或手冊或指南，所推荐地域性參數，包括採計基期、資料長度、分析方式、相關

常數引用、甚或適用環境背景等，除加以整理及回顧外，並參與本文採句計、理論方程式、迴歸分析所得模型，進行台灣地區適用性之評估及探討。藉由長期觀測記錄，以及根均方差 RMSE、相關係數 r 與效率係數 E 三項客觀統計指標，分析結果顯示，國內以往常使用國際上廣泛應用的，如 FAO&ICID(1998)、Penman(1948)、Angstrom(1924)等所推荐參數，在台灣地區之適用性都不甚理想，因此不建議繼續在國內應用；而國內部分學者所建議參數，由於計量與分析方式、資料長度、相關常數使用等因素，尙有若干改善空間，也基於農業水資源或水文氣象領域之應用，本文在台灣地區各農業氣候分區所建立之日射-日照關係本土化參數，建議可在各農業氣候分區或適當之農田水利會灌區，採參及應用。

謝 誌

本文係摘自行政院農業委員會「農業水利科技研究發展」科技計畫下，「作物需水量與農業氣象因子相關研究」細部計畫(計畫編號：(91農科-1.3.3-林-R1(30)))部份內容，及中央氣象局提供氣候資料，承蒙經費資助、資料提供，謹致謝意。

參考文獻

1. 中央氣象局，1948-2001，「氣候資料年報」。
2. 甘俊二、陳清田、陳鈞華，1996a，「台灣區域性旱作物需水量之推估」，85年度農業工程研討會論文集，p. 99-105。
3. 甘俊二、陳清田、陳焜耀，1996b，「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 Vol.42，No.2，p.8-19。
4. 洪煥琳、蘇明道、葉一隆，1998，「以作物需水量為基礎之氣象分區研究」，台灣水利 Vol. 46，No. 3，p. 35-49。
5. 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 Vol. 33，No. 2，p. 1-27。
6. 郭文鑠，1978，「臺灣農業氣候區域研究」，中央氣象局。
7. 郭文鑠、楊之遠，1981，「台灣地區農業氣候區域之劃分」，氣象學報 Vol.27 No.1，p.16-28。
8. 郭振民、陳姜琦、游保杉，2002，「應用 NOAA 衛星遙測估算蒸發散之氣象因子」，中國農業工程學報 Vol.48，No.3，p.19-30。
9. 徐森雄，1983，「台灣各地氣候類似性之分析」，科學發展月刊 Vol. 11，No. 2，p. 85-95。
10. 徐森雄、宋義達，1987，「從氣象資料估算蒸發量」，中華水土保持學報 Vol. 18，No. 2，p. 83-89。
11. 張本初，1990，「作物需水量最佳模式之探討」，國立台大農工所碩士論文。
12. 童慶斌、連宛渝，2000，「氣候變遷對灌溉需水量之影響」，中國農業工程學報 Vol. 46，No. 1，p. 57-68。
13. 唐榮澤，1979，「臺南地區日射量之分析」，氣象學報 Vol. 25，No. 2，p. 15-20。
14. 梁仁有、劉復誠、耿旭、林深林，1995，「氣候改變對臺灣地區蒸發散量影響的模擬研究」，氣象學報 Vol. 41，No. 4，p. 246-271。
15. 陳正祥，1957，「氣候之分類與分區」，臺大農學院實驗林林業叢刊第七號。
16. 陳尙、蔡奇成，1967，「旱作需水量之測算法與試算結果之檢討」，中國農業工程學報 Vol. 13，No. 4，p. 26-49。
17. 陳姜琦，2002，「應用衛星遙測於區域蒸發散量之估算」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
18. 陳清田，1991，「嘉義地區作物需水量推估之研究」，中國農業工程學報 Vol.37，No.1，p.82-109。
19. 曾文柄、朱鈞、郭文鑠、楊之遠，1984，「台灣地區農業氣候資源應用之研究」，中央氣象局。
20. 黃振昌、宋易倫，2003，「Penman-Monteith 蒸發散量估算方程式輻射項之應用」，氣象學報 Vol. 45，No. 1，p. 23-35。
21. 黃國禎、徐森雄，1982，「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。
22. 蔣丙然，1954，「臺灣氣候誌」，臺灣研究叢刊第二十六種，臺灣銀行經濟研究室。
23. 顏俊士，1974，「臺灣各地之日射量估計問題」，大氣科學 Vol. 1，p. 72-80。
24. Allen, R.G., Pereira, L.S., Rase, D., and Smith, M., 1998., "Crop evapotranspiration- Guidelines for computing crop water requirements" FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome.
25. Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., and Pereira, L.S., 1994., "An update for the definition of reference evapotranspiration" ICID Bulletin. Vol.43, No.2, p.1-34.
26. Angstrom, A., 1924., "Solar and terrestrial radiation" Q. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 50, p.

- 121-126.
27. Black, J. N. Bonython, C.N. and Prescott, J. A., 1954., "Solar radiation and the duration of sunshine" Q. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 80, p. 231-235.
28. Doorenbos, J. and Pruitt, W.O., 1977., "Guidelines for predicting crop water requirements" FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome.
29. Doorenbos, J. and Pruitt, W.O., 1984., "Guidelines for predicting crop water requirements" FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd/ed, FAO, Rome.
30. Iqbal, M., 1983., "An introduction to solar radiation" Academic Press.
31. Iziomon, M.G., Mayer, H., 2001., "Performance of solar radiation models-a case study" Agric. For. Meteorol., Vol.110, p.1-11.
32. Monteith, J.L. and Unsworth, M.H., 1990., "Principles of Environmental Physics" Edward Arnold, London.
33. Monteith, J.L., 1981., "Evaporation and surface temperature" Quarterly J. Royal Meteorol. Soc., Vol. 107, p. 1-27.
34. Penman, H. L., 1948., "Natural evaporation from open water, bare soil and grass" Proc. Roy. Soc. London, A193, p. 120-146.
35. Penman, H. L., 1956., "Estimating evaporation" Trans. Am. Geoph. U. Vol. 37, No. 1, p. 43-50.
36. Penman, H. L., 1963., "Vegetation and hydrology" Tech. Comm. No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England. 125pp..
37. Prescott, J. A., 1940., "Evaporation from a water surface in relation to solar radiation" Trans. R. Soc. Aust. Vol. 64, p. 114-118.

收稿日期：民國 92 年 5 月 7 日

修正日期：民國 92 年 5 月 17 日

接受日期：民國 92 年 6 月 23 日