

不同計量期距的 Penman-Monteith 方程式日射-日照 關係地域性參數之探討

The Different Calculating Time Period for the Local
Parameters of the Insolation-Sunshine Correlation in
the Penman-Monteith Equation

農業工程研究中心
副研究員

黃振昌

Huang, Cheng-Chang

農業工程研究中心
研究助理

宋易倫

Sung, Yi-Lun

摘 要

Penman-Monteith(P-M)方程式是國際上廣泛應用在蒸發散量課題研究之估算式，式中輻射項日射-日照關係地域性不同計量期距參數，廣受國內外許多學者、機構深入探討及研究，並推薦到適當地區應用在不同目的之領域。本文擬就 P-M 方程式日射-日照關係，國內外推薦地域性不同計量期距參數，以根均方差(RMSE)、相關係數(R^2)及效率係數(CE)三項客觀統計指標，檢測評估在日計、旬計及月計不同計量期距下，應用在國內本土環境之適用性。

以 2000 或 2001 年實測數據檢測評估結果顯示，無論是日計或旬計或月計計量期距下，均以黃振昌(2003)及黃振昌、宋易倫(2003)所建立旬計本土化參數，具最低 RMSE 值、0.95 以上 R^2 、最大 CE 值，闡明推估性能較優於其他國內外如 Angstrom (1924)，Penman(1948)，Black et al.(1954)，ICID(1994)，FAO(1998)，顏俊士(1974)，唐榮澤(1979)，黃國禎、徐森雄(1982)，徐森雄、宋義達(1987)，施嘉昌、黃振昌(1987)等所推薦模型參數，係以上推薦模型參數中，適用性最佳，建議可在適當之農業氣候分區或農田水利會灌區或水資源區域，採參及應用。

關鍵詞：蒸發散量，日射，日照，地域性參數。

ABSTRACT

The Penman-Monteith (P-M) equation is widely applied in evapotranspiration estimation in the world. The local parameters of the insolation-sunshine correlation in the P-M equation were thoroughly discussed by many researchers, and suggested to be

applied to appropriate locations with different calculating time period for different field's purposes. The applicability of various local parameters were examined and evaluated in this paper for Taiwan. Three objective statistical indexes, root mean square error (*RMSE*), coefficient of correlation (R^2), and coefficient of efficiency (*CE*) were used to compare the results for all suggested parameters.

Using data measured in 2000 or 2001, the evaluation results indicated that the parameters suggested by Angstrom(1924), Penman(1948), Black et al.(1954), ICID(1994), FAO(1998), Yen(1974), Tang(1979), Huang & Shu(1982), Shu & Sung(1987), Shih & Huang(1987) and have been applied in Taiwan in the past, had unsatisfactory results without regard of the time period of daily, 10days or monthly. The parameters established by Huang(2003) and Huang & Sung(2003) yielded the least *RMSE*, R^2 more than 0.95 and the highest *CE*. In other words, it performed better than all other parameters. It was concluded that the local parameters recommended by Huang(2003) and Huang & Sung(2003) should be applied 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 Commission on Irrigation and Drainage, ICID)頒布,及聯合國糧食與農業組織(Food and Agricultural Organization of the United Nations, FAO)經不斷應用與驗證,相繼從 1975 年建議、1977 年更新(Doorenbos & Pruitt, 1975、1977),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,唯一受國際性機構認可並推荐之蒸發散量(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} ,經稍加推演為

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

式中, ET_0 : 蒸發散量,亦稱參考作物需水量(reference crop water requirement)。 Δ : 飽和蒸汽壓力曲線斜率(slope of saturated vapor pressure curve)。 γ : 溼度常數(psychrometric constant)。

u_2 : 離地面 2 米高風速(wind speed)。 α : 反照率(albedo)。 R_{nl} : 淨長波輻射。 S : 土壤熱通量(soil heat flux)。 R_a : 外大氣層(extraterrestrial)之水平輻射量。 n : 實際日照時數(actual sunshine hours)。 N : 潛在或理論日照時數(potential or theoretical sunshine hours),即日長(day length)。 a 、 b : 輻射項日射-日照關係地域性參數。

日射係太陽以能量輻射方式,經過雲層覆蓋透射及反射,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、水資源經營領域而言,日射是植(作)物成長、光合作用(photosynthesis)及蒸發散量所需能量之供給來源,到達地面日輻射量化研究,長久以來一直是以雲量覆蓋(cloud cover)及日照時間,為主要指標予以推估(Iqbal, 1983),尤以後者指標之模型又優於前者(Iziomon & Mayer, 2001), (1)式中內含之輻射項,即是以日射與日照相關,在水資源或水文氣象領域,國際上廣泛應用之例。

(1)式中輻射項日射-日照關係地域性參數 a 、 b 之不同計量期距,廣受國內外許多專家學者、機構深入探討及研究,並推荐到適當地區應用在不同目的之領域,如表 1 所示,最早可溯及 Angstrom(1924)於 Sweden 之 Stockholm 地區,所

表 1 日射-日照關係 $R_s = R_a [a + b(\frac{n}{N})]$ 國內外推 a、b 參數背景相關資料

發表者 (發表年份)	參數		計量期距			推薦適用地區	緯度	資料	
	a	b	日	旬	月			長度	地點
Angstrom (1924)	0.25	0.75	-	-	√	Stockholm (Sweden)	59.4° N	1922~1923	Stockholm (Sweden)
Penman (1948)	0.18	0.55	-	-	√	Rothamsted (England)	51.8° N	1931~1940	Rothamsted (England)
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	1923~1951	-
FAO(1975) (1977)	0.25	0.50	-	√	√	世界各地	1°~36° S 1°~65° N	-	-
FAO(1998)	0.25	0.50	√	√	√	世界各地	1°~36° S 1°~65° N	-	-
ICID(1994)	0.25	0.50	√	√	√	世界各地	-	-	-
顏俊士 (1974)	0.37	0.37	-	-	√	台北地區(台灣)	25°02' N	1961~1970	台北(台灣)
	0.11	0.43	-	-	√	花蓮地區(台灣)	23°58' N		花蓮(台灣)
	0.34	0.39	-	-	√	宜蘭地區(台灣)	24°46' N		宜蘭(台灣)
唐榮澤 (1979)	0.2745	1.0665	-	-	√	台南地區(台灣)	23°00' N	1967~1977	台南(台灣)
黃國禎、 徐森雄 (1982)	0.1974	0.5625	-	-	√	台北地區(台灣)	25°02' N	1974~1980	台北(台灣)
	0.2028	0.5786	-	-	√	台中地區(台灣)	24°09' N		台中(台灣)
	0.2004	0.2018	-	-	√	嘉義地區(台灣)	23°30' N		嘉義(台灣)
	0.1853	0.6153	-	-	√	台南地區(台灣)	23°00' N		台南(台灣)
	0.2686	0.6550	-	-	√	台東地區(台灣)	22°45' N		台東(台灣)
	0.2866	0.5543	-	-	√	恆春地區(台灣)	22°00' N		恆春(台灣)
	0.1982	0.8146	-	-	√	花蓮地區(台灣)	23°58' N		花蓮(台灣)
	0.3222	0.5535	-	-	√	高雄地區(台灣)	22°34' N		高雄(台灣)
徐森雄、 宋義達 (1987)	0.1821	0.6418	-	-	√	台北地區(台灣)	25°02' N	1974~1985	台北(台灣)
	0.2038	0.6111	-	-	√	台中地區(台灣)	24°09' N	1979~1985	台中(台灣)
	0.2755	0.5233	-	-	√	台南地區(台灣)	23°00' N		台南(台灣)
	0.3079	0.5140	-	-	√	恆春地區(台灣)	22°00' N		恆春(台灣)
	0.2002	0.7856	-	-	√	花蓮地區(台灣)	23°58' N		花蓮(台灣)
施嘉昌、 黃振昌 (1987)	0.20	0.43	-	√	-	台南地區(台灣)	23°00' N	1979~1983	台南(台灣)
黃振昌、 宋易倫 (2003)	0.2003	0.4135	-	√	-	西南氣候分區(台灣)	23°00' N	1950~1999	台南(台灣)
黃振昌 (2003)	0.1322	0.4315	-	√	-	西北氣候分區(台灣)	25°02' N	1952~2000	台北(台灣)
	0.1654	0.4895	-	√	-	中彰氣候分區(台灣)	24°09' N	1979~2000	台中(台灣)
	0.1869	0.4265	-	√	-	雲嘉氣候分區(台灣)	23°30' N	1976~2000	嘉義(台灣)
	0.1820	0.3788	-	√	-	南部氣候分區(台灣)	22°00' N	1981~2000	恆春(台灣)
	0.1409	0.4582	-	√	-	東岸氣候分區(台灣)	23°58' N	1948~2000	花蓮(台灣)
	0.1155	0.6739	-	√	-	東北氣候分區(台灣)	24°46' N	1981~2000	宜蘭(台灣)

註：資料來源，本研究整理。

建議之估算模型，

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

式中， R_s ：水平輻射量。 R_c ：完全碧空(perfectly clear day)入射量。地域性參數 a ，Angstrom(1924)以月計量方式，建議 $a=0.25$ 。由於「完全碧空」缺乏明確定義，應用上遭到判斷之困難與不便，於是 Prescott(1940)修正(2)式，得

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

Penman(1948)於英國東南方 Rothamsted 地區，應用混合法(combination approach)估算蒸發散量，(3)式中之 a 、 b 參數值，以月為計量期距，經不斷應用與驗證(Penman, 1956、1963)，分別是推薦 0.18、0.55。Black et al. (1954)檢視南緯 $6.3^\circ \sim 7.0^\circ$ ，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，可在適當緯度範圍內之國家或地區應用 a 、 b 值，範圍分別是在 0.19~0.40、0.280~0.613 之間，最終推薦之 a 、 b 值分別是 0.23~0.48。FAO(Doorenbos & Pruitt, 1975、1977)綜合回顧世界各地 1948~1971 年，日射-日照相關式 52 篇研究成果，檢驗北緯 $65^\circ \sim 1^\circ$ ，南緯 $36^\circ \sim 1^\circ$ ，包含日計、週計、旬計及月計量方式，所有 a 、 b 地域性參數，以實用的觀點，從 1975 年發表到 1977 年再版，在國際上著名且廣泛應用之作物需水量估算式中，對 a 、 b 地域性參數，除始終均推薦以旬計及月計量期距之 0.25、0.50 外，於 1998 年更新改版時，更進一步推荐可應用在日計量方式上(Allen et al., 1998)。ICID(Allen et al., 1994)以國際上灌溉排水領域尖端、權威的領導角色，推荐 a 、 b 值分別是 0.25、0.50，可應用在世界各地日計、旬計及月計量方式上。

國內在日射-日照相關性之探討，首推顏俊士(1974)以月計方式，分析獲得台北、花蓮及宜蘭地區之 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)在台南地區，特

意選擇晴空碧日之日射量，除去雲量之影響後，以月計方式，求得 a 、 b 值分別是 0.2745、1.0665。黃國禎、徐森雄(1982)依據中央氣象局氣候資料年報資料，確立台灣地區台北等八個測站月計方式之 a 、 b 值，分別是 0.1853~0.3222、0.2018~0.8146。徐森雄、宋義達(1987)應用 Penman (1948)方程式再予以簡化後，導出台灣地區台北等七個測站蒸發量估算值，在進一步與實測值比較下，亦獲得有相當適用性之實證結果，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。施嘉昌、黃振昌(1987)以理論分析方式，推衍理論日長與外大氣層水平輻射量，採旬計量方式，建立嘉南學甲地區 a 、 b 值為 0.2、0.43。黃振昌、宋易倫(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，經分析驗證得旬計量方式 a 、 b 值 0.2003、0.4135。黃振昌(2003)採理論方程式並經迴歸分析建立模型，藉根均方差、相關係數及效率係數統計指標，建立台灣地區西北農業氣候分區計六個分區，日射-日照關係本土化旬計參數， a 、 b 值範圍分別是 0.1155~0.1869、0.3788~0.6739。

本文擬就 Penman-Monteith 方程式(Allen et al., 1994、1998)輻射項日射-日照關係國內外推荐模型參數 a 、 b ，探討在日計、旬計及月計不同計量期距下，以中央氣象局台北、台南測站資料，分別代表台灣北部、南部地區氣候環境，藉根均方差(RMSE)、相關係數(R^2)及效率係數(CE)三項客觀統計指標，檢測評估應用在國內本土環境之適用性。

二、材料及方法

應用 Angstrom(1924)理念、Prescott(1940)修正式，(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。

2.1 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，(1)或(3)式中所示之外大氣層水平輻射量 R_a ，可以太陽常數(solar constant, I_{sc})、地球軌道離心校正因子(the eccentricity correction factor of the earth's orbit, E_o)、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)

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

2.2 日長 N 理論值

如同上述太陽-地球間之幾何位置關係，(1)或(3)式中所示之日長 N，可以太陽赤緯(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)

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

2.3 模型檢測統計指標

根均方差(root mean square error, $RMSE$)，代表國內外推薦模型參數推估值 P_i 與實測值 O_i (下標 i 表示統計指標分析樣本數, $i=1 \sim N$ ，以下表示亦同)之變異程度，以正值呈現，值愈大變異愈大，反之愈小。

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

相關係數(coefficient of correlation, R^2)，以檢測說明實測值 O_i 與國內外推薦模型參數推估值 P_i 間之相關程度， R^2 值界於 0~1 之間。(7)式中 \bar{P} 、 \bar{O} 分別是推估值與實測值之均值。

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

效率係數(coefficient of efficiency, CE)，評估國內外推薦模型參數之推估性能， CE 值範圍界於負無窮(minus infinity)- $\infty \sim 1$ 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 與模

型推估值 P_i 間之變異性，不易詮釋及說明的，可以有效地改善(Nash & Sutcliffe, 1970; Legates & McCabe, 1999)。

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

性能等級(rank of performance, rank)，為評估國內外推薦模型參數估算性能，運用性能等級 rank 予以評價，綜合 $RMSE$ 、 R^2 及 CE 值三項客觀統計指標檢測表現，主要以 CE 值愈大、 $RMSE$ 愈小，輔以 R^2 相關程度，給予該參數模型估算性能，在國內環境適用性最佳評價，記以 rank1，次佳記以 rank2，餘類推。

2.4 氣候測站資料

為分析及探討之週全、嚴謹起見，選擇北迴歸線北南各一處，即以台北(站號：46692，緯度 25°02' N)、台南(站號：46741，緯度 23°00' N)測站，分別代表台灣地區北部、南部氣候環境，並以日射及日照實測資料(中央氣象局，2001、2000；剔除儀器故障或資料異常等情況，樣本數分別是 351、348 日；日射儀器，台北、台南測站皆是 EPPLEY(美國)，Precision Spectral Pyranometer，日照儀器，是英弘 EKO(日本)，ms-091)，進行國內外推薦模型參數 a、b，不同計量期距下驗證之統計及分析。

三、結果與討論

應用國內外各模型如 Angstrom(1924)，Penman(1948)，Black et al.(1954)，FAO (1998) & ICID (1994)，顏俊士(1974)，唐榮澤(1979)，黃國禎、徐森雄(1982)，徐森雄、宋義達(1987)，施嘉昌、黃振昌(1987)，黃振昌、宋易倫(2003)，黃振昌(2003)，所推薦不同計量期距參數 a、b，藉由(4)及(5)式在程式撰寫、電腦運算下，求得 N 及 R_a ，再擷取 R_s 、n 實測資料(中央氣象局，2001、2000)，不同計量期距下，諸模型參數日射推估值與實測值之比較分析，結果討論如下。

以台北測站、日計計量期距而言，分析結果整理如表 2 並繪製如圖 1 所示。分析結果顯示，

表 2 日射實測值與諸模型參數推估值比較分析結果一覽表(台北測站、日計)

日	實測值 (2001)	模型推估值							
		Angstrom (1924)	Penman (1948)	Black et al. (1954)	FAO(1998) ICID(1994)	顏俊士 (1974)	黃國禎、徐 森雄(1982)	徐森雄、宋 義達(1987)	黃振昌 (2003)
1	11.57	20.37	14.86	14.64	15.49	15.71	15.50	16.70	11.45
2	10.00	19.74	14.40	14.25	15.08	15.41	15.04	16.16	11.09
3	8.24	13.84	10.07	10.47	11.15	12.51	10.61	11.11	7.70
4	2.73	5.94	4.28	5.42	5.89	8.63	4.69	4.35	3.15
.
(略)	(略)	(略)	(略)	(略)	(略)	(略)	(略)	(略)	(略)
345	11.20	21.67	15.82	15.46	16.34	16.30	16.48	17.82	12.21
346	2.18	5.85	4.21	5.33	5.79	8.49	4.61	4.28	3.10
347	6.49	14.35	10.44	10.77	11.46	12.69	10.99	11.55	7.99
348	10.31	20.57	15.01	14.76	15.61	15.77	15.65	16.88	11.57
349	3.02	7.01	5.06	6.08	6.57	9.08	5.48	5.27	3.77
350	10.81	22.11	16.14	15.75	16.65	16.55	16.81	18.19	12.46
351	5.57	9.83	7.13	7.90	8.46	10.50	7.60	7.68	5.39
<i>RMSE</i>		9.1299	4.2476	4.9672	5.8464	8.3550	4.9433	5.5305	1.7699
<i>R</i> ²		0.9549	0.9548	0.9526	0.9519	0.9133	0.9549	0.9543	0.9547
<i>CE</i>		-2.2589	0.2946	0.0354	-0.3363	-1.7292	0.0446	-0.1958	0.8775

單位:Mj/m²/day。

RMSE 值以 Angstrom(1924)之 9.1299Mj/m²/day 為最高，代表與實測值之變異程度最大，其次由高到低依序分別是：顏俊士(1974)之 8.355，FAO(1998)&ICID(1994)之 5.8464，徐森雄、宋義達(1987)之 5.5305，Black et al.(1954)之 4.9672，黃國禎、徐森雄(1982)之 4.9433，Penman(1948)之 4.2476，及黃振昌(2003)之 1.7699Mj/m²/day 為最低。各模型推估值與實測值間之相關程度，*R*² 都在 0.91 以上，顯示相關程度佳，以顏俊士(1974)之 0.9133 最低，以 Angstrom(1924)及黃國禎、徐森雄(1982)之 0.9549 最佳。效率係數 *CE* 指標，由小到大順序如同上述，分別是 -2.2589、-1.7292、-0.3363、-0.1958、0.0354、0.0446、0.2946、0.8775，推估性能表現以 Angstrom(1924) 最不理想、黃振昌(2003)最佳。

進一步檢視推估值之分佈，除黃振昌(2003)所推荐模型約略落在 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)

態勢現象，偏離程度尤以顏俊士(1974)及 Angstrom (1924)為最。綜合 *RMSE*、*R*² 及 *CE* 三指標之檢測與評估，初步結果揭示：1.表 1 清單中，唯一推荐可應用在日計計量期距之 FAO (1998) & ICID (1994)模型參數，應用在國內本土氣候環境，檢測評估結果，分別是 5.8464Mj/m²/day、0.9519 及 -0.3363，與黃振昌(2003)所推荐旬計參數，分別是 1.7699Mj/m²/day、0.9547 及 0.8775，相較之下，並未求得理想；2.綜評在所有模型推荐參數中，推估能力以黃振昌(2003)最優，而以 Angstrom(1924)最不理想。

以旬計計量期距而言，分析結果整理如表 3 並繪製如圖 2 所示。分析結果顯示，*RMSE* 值以 Angstrom(1924)之 88.22Mj/m²/10days 為最高，是所有模型與實測值變異程度最大者，其次由高到低依序是顏俊士(1974)之 83.33，FAO(1998) & ICID(1994)之 57.83，徐森雄、宋義達(1987)之 52.41，Black et al.(1954)之 48.76，黃國禎、徐森

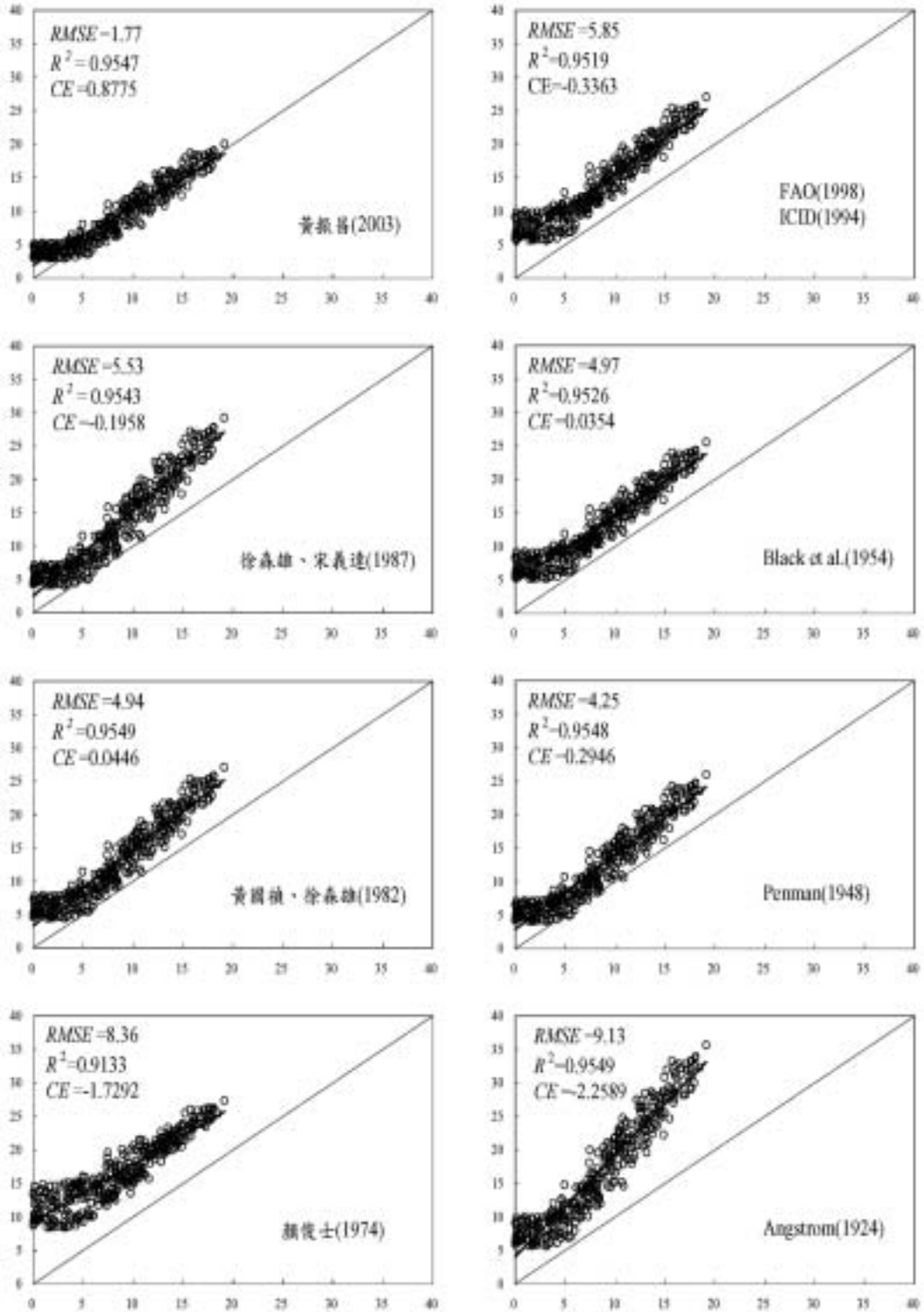


圖 1 台北測站日射實測值(x 軸)與諸模型推估值(y 軸)比較圖(圖示單位 $Mj/m^2/day$ ，對角斜線比例是 1 : 1)。粗體直線是最佳迴歸線。

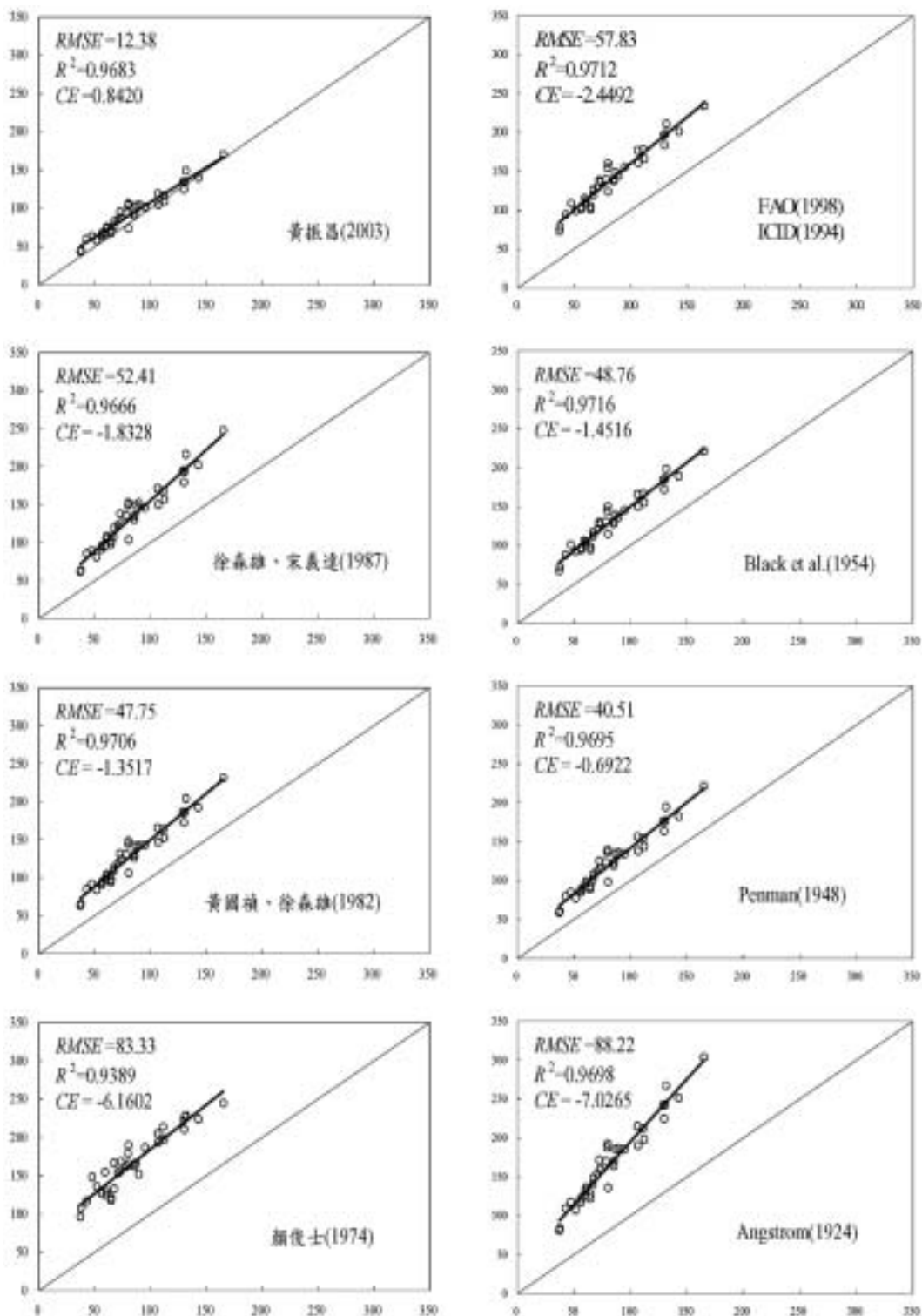


圖 2 台北測站日射實測值(x 軸)與諸模型推估值(y 軸)比較圖(圖示單位 $Mj/m^2/10days$, 對角斜線比例是 1 : 1)。粗體直線是最佳迴歸線。

表 3 日射實測值與諸模型參數推估值比較分析結果一覽表(台北測站、旬計)

旬	實測值 (2001)	模型推估值							
		Angstrom (1924)	Penman (1948)	Black et al. (1954)	FAO(1998) ICID(1994)	顏俊士 (1974)	黃國禎、徐 森雄(1982)	徐森雄、宋 義達(1987)	黃振昌 (2003)
1	64.44	122.52	89.08	94.67	101.03	117.71	94.19	97.46	67.79
2	67.15	148.42	108.04	111.83	119.00	132.57	113.70	119.35	82.59
3	56.35	117.46	85.21	94.68	101.53	126.69	90.86	91.65	64.34
4	37.63	83.99	60.70	72.59	78.41	107.80	65.66	63.31	45.19
5	72.46	171.83	125.05	129.98	138.37	155.27	131.70	137.94	95.53
.
(略)	(略)	(略)	(略)	(略)	(略)	(略)	(略)	(略)	(略)
32	42.62	109.61	79.53	87.92	94.22	116.68	84.72	85.71	60.11
33	89.49	186.80	136.18	136.48	144.68	151.79	142.50	152.16	104.66
34	64.74	127.62	92.81	97.99	104.50	120.43	98.02	101.80	70.72
35	37.04	81.08	58.70	67.86	73.07	96.28	63.07	62.12	44.00
36	60.66	136.03	98.92	104.60	111.57	128.91	104.50	108.43	75.35
<i>RMSE</i>		88.22	40.51	48.76	57.83	83.33	47.75	52.41	12.38
R^2		0.9698	0.9695	0.9716	0.9712	0.9389	0.9706	0.9666	0.9683
<i>CE</i>		-7.0265	-0.6922	-1.4516	-2.4492	-6.1602	-1.3517	-1.8328	0.8420

資料來源：黃振昌(2003),單位:Mj/m²/10days。

雄(1982)之 47.75，Penman(1948)之 40.51，及黃振昌(2003)之 12.38Mj/m²/10days 為最低。與實測值間之相關程度， R^2 都在 0.93 以上，顯示各模型推估值相關程度佳，以顏俊士(1974)之 0.9389 最低，以 Black et al.(1954)之 0.9716 最佳。效率係數 *CE* 指標，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，推估性能表現以 Angstrom(1924)最不理想、黃振昌(2003)最佳。進一步檢視推估值之分佈，除黃振昌(2003)所推薦模型約略落在 1:1 對角線上下，其餘模型均落在 1:1 對角線上方，呈高估現象，偏離程度尤以 Angstrom(1924)及顏俊士(1974)為最。綜合 *RMSE*、 R^2 及 *CE* 三指標之檢測與評估，初步結果闡明：在表 1 清單中，推荐旬計量基準模型參數，有 FAO (1998) & ICID (1994)及黃振昌(2003)，然應用在國內本土氣候環境、旬計量期距上，仍以黃振昌(2003)較其他模型所推薦參數之推估結果理想，而以 Angstrom(1924)最不理

想。

以月計量期距而言，分析結果整理如表 4 並繪製如圖 3 所示。分析結果顯示，各模型 *RMSE* 值以 Angstrom(1924)之 261.18Mj/m²/month 為最高，是所有模型與實測值變異程度最大者，其次由高到低依序是顏俊士(1974)之 249.03，FAO (1998) & ICID (1994)之 172.02，徐森雄、宋義達(1987)之 153.941，Black et al.(1954)之 144.76，黃國禎、徐森雄(1982)之 140.92，Penman (1948)之 119.03，及黃振昌(2003)之 33.07Mj/m² /month 為最低。與實測值間之相關程度，各模型推估值 R^2 都在 0.95 以上，顯示相關程度佳，以顏俊士(1974)之 0.9557 最低，以 Black et al.(1954)之 0.9859 最佳。效率係數 *CE* 指標，由小到大順序如同上述，分別是 -8.8240、-7.9318、-3.2616、-2.4130、-2.0179、-1.8601、-1.0404、0.8425，推估性能表現以 Angstrom(1924)最不理想、黃振昌(2003)最佳。進一步檢視推估值之分佈，除黃振昌(2003)所推薦模型約略落在 1:1 對角線上下，

表 4 日射實測值與諸模型參數推估值比較分析結果一覽表(台北測站、月計)

月	實測值 (2001)	模型推估值							
		Angstrom (1924)	Penman (1948)	Black et al. (1954)	FAO(1998) ICID(1994)	顏俊士 (1974)	黃國禎、徐 森雄(1982)	徐森雄、宋 義達(1987)	黃振昌 (2003)
1	187.94	389.43	283.07	301.83	322.24	377.48	299.51	309.32	215.31
2	170.33	385.50	280.05	302.45	323.34	386.55	297.01	304.54	212.53
3	243.79	526.93	382.96	409.70	437.56	515.31	405.45	417.96	291.12
4	201.51	427.78	309.95	352.64	379.07	488.92	331.99	330.20	233.01
5	258.48	488.70	354.27	399.05	428.52	545.14	378.73	378.96	266.83
6	361.90	639.66	465.04	494.31	527.55	614.85	491.75	508.75	353.90
7	366.97	682.88	496.64	523.81	558.55	642.66	524.43	544.90	378.46
8	425.69	813.07	592.29	603.39	640.89	693.69	621.54	658.01	453.99
9	204.36	453.74	329.25	363.77	389.85	482.41	350.69	354.92	248.86
10	242.86	508.58	369.84	391.04	417.08	481.87	390.71	405.40	281.71
11	188.29	421.38	306.47	323.16	344.58	396.32	323.60	336.27	233.55
12	162.44	344.54	250.29	270.32	289.00	345.51	265.45	272.18	189.94
RMSE		261.18	119.03	144.76	172.02	249.03	140.92	153.94	33.07
R ²		0.9851	0.9849	0.9859	0.9854	0.9557	0.9858	0.9823	0.9838
CE		-8.8240	-1.0404	-2.0179	-3.2616	-7.9318	-1.8601	-2.4130	0.8425

單位:Mj/m²/month。

表 5 不同計量期距諸模型統計檢測結果一覽表(台北測站)

計量 期距	檢測 指標	國內外學者、機構							
		Angstrom (1924)	Penman (1948)	Black et al. (1954)	顏俊士 (1974)	黃國禎、徐 森雄(1982)	徐森雄、宋 義達(1987)	FAO(1998) ICID(1994)	黃振昌 (2003)
日計	RMSE	9.13	4.25	4.97	8.35	4.94	5.53	5.85	1.77
	R ²	0.9549	0.9548	0.9526	0.9133	0.9549	0.9543	0.9519	0.9547
	CE	-2.2589	0.2946	0.0354	-1.7292	0.0446	-0.1958	-0.3363	0.8775
	sub-rank	8	2	4	7	3	5	6	1
	Rank	8	2	4	7	3	5	6	1
旬計	RMSE	88.22	40.51	48.76	83.33	47.75	52.41	57.83	12.38
	R ²	0.9698	0.9695	0.9716	0.9389	0.9706	0.9666	0.9712	0.9683
	CE	-7.0265	-0.6922	-1.4516	-6.1602	-1.3517	-1.8328	-2.4492	0.8420
	sub-rank	8	2	4	7	3	5	6	1
	Rank	8	2	4	7	3	5	6	1
月計	RMSE	261.18	119.03	144.76	249.03	140.92	153.94	172.02	33.07
	R ²	0.9851	0.9849	0.9859	0.9557	0.9858	0.9823	0.9854	0.9838
	CE	-8.8240	-1.0404	-2.0179	-7.9318	-1.8601	-2.4130	-3.2616	0.8425
	sub-rank	8	2	4	7	3	5	6	1
	Rank	8	2	4	7	3	5	6	1

註:1.RMSE 單位:日計Mj/m²/day,旬計Mj/m²/10days,月計Mj/m²/month。2.R²及CE為無因次單位。3.旬計結果係摘自黃振昌(2003),餘為本文分析。

其餘模型均落在 1:1 對角線上方,呈高估現象,偏離程度尤以 Angstrom(1924)及顏俊士(1974)為最。綜合 RMSE、R² 及 CE 三指標之檢測與評估,初步結果揭露:在表 1 清單中可發現,絕大多數模型都是以月計計量期距方式推荐,然應用在國

內本土氣候環境上,檢測評估反映,仍並未如黃振昌(2003)所推荐旬計參數之推估結果為優。

綜合以上三種不同計量期距分析,諸模型統計檢測所得結果,彙整如表 5 所示,並繪製 RMSE、CE 比較分佈,如圖 4、圖 5 所示。由圖

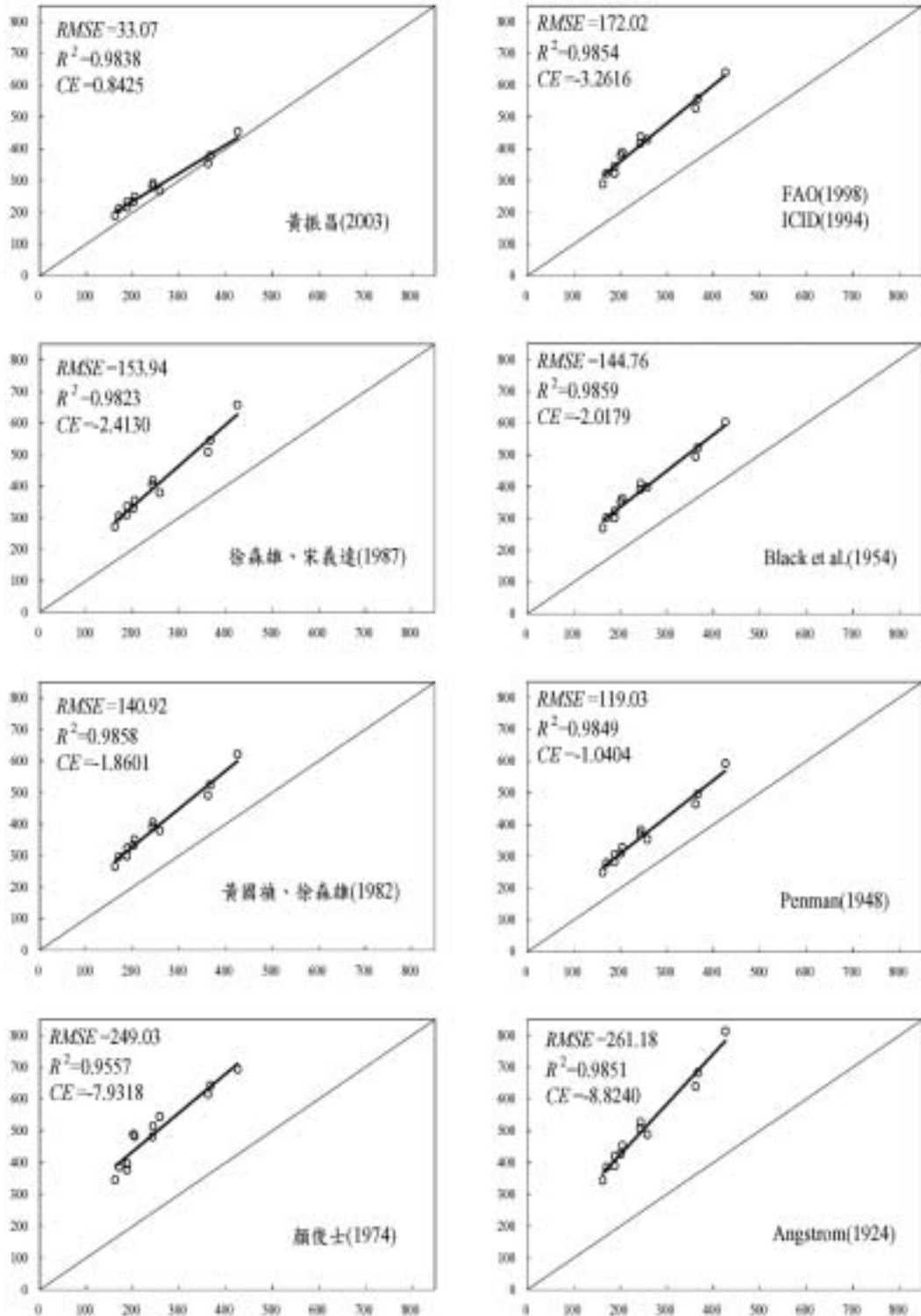


圖 3 台北測站日射實測值(x 軸)與諸模型推估值(y 軸)比較圖(圖示單位 $Mj/m^2/month$ ，對角斜線比例是 1 : 1)。粗體直線是最佳迴歸線。

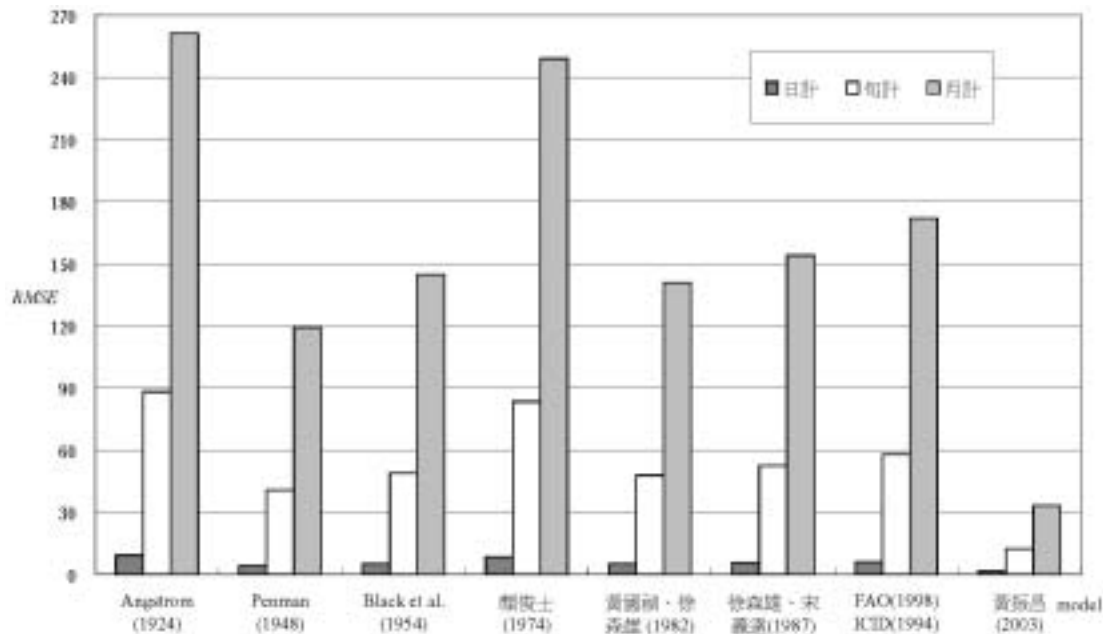


圖 4 不同計量期距諸模型根均方差(RMSE)比較分佈圖(台北測站)

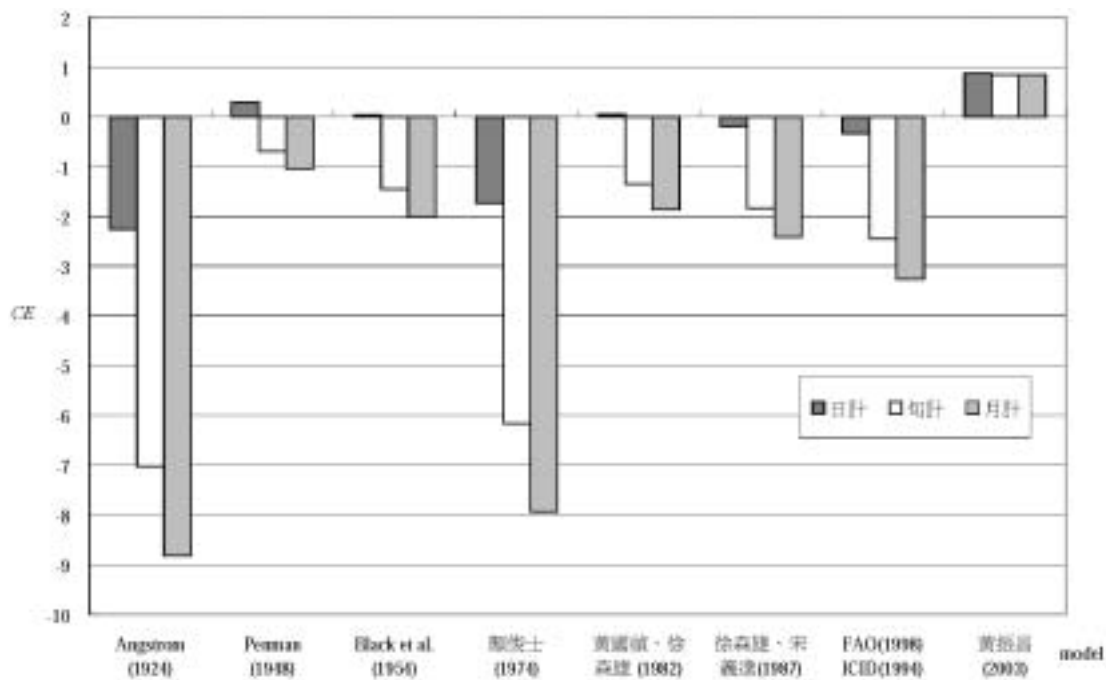


圖 5 不同計量期距諸模型效率係數(CE)比較分佈圖(台北測站)

表 6 不同計量期距諸模型統計檢測結果一覽表(台南測站)

計量期距	檢測指標	國內外學者、機構								
		Angstrom (1924)	Penman (1948)	Black et al. (1954)	唐榮澤 (1979)	黃國禎、徐森雄 (1982)	徐森雄、宋義達(1987)	施嘉昌、黃振昌(1987)	FAO(1998) ICID(1994)	黃振昌、宋易倫(2003)
日計	RMSE	11.97	6.09	6.42	18.60	7.45	8.68	4.57	7.43	4.22
	R ²	0.9552	0.9551	0.9561	0.9528	0.9544	0.9554	0.9562	0.9558	0.9560
	CE	-9.9782	-1.8423	-2.1588	-25.5052	-3.2564	-4.7679	-0.5997	-3.2269	-0.3656
	sub-rank	8	3	4	9	6	7	2	5	1
旬計	RMSE	114.64	58.26	63.85	174.83	70.72	86.40	45.56	73.91	42.35
	R ²	0.9761	0.9760	0.9745	0.9737	0.9754	0.9727	0.9749	0.9737	0.9742
	CE	-21.9181	-4.9185	-6.1101	-52.3035	-7.7227	-12.0176	-2.6199	-8.5276	-2.1277
	sub-rank	8	3	4	9	5	7	2	6	1
月計	RMSE	339.57	172.21	190.21	515.99	208.83	257.68	135.55	220.33	126.05
	R ²	0.9873	0.9871	0.9878	0.9841	0.9863	0.9869	0.9879	0.9874	0.9876
	CE	-37.3715	-8.8684	-11.0398	-87.5985	-13.5123	-21.0962	-5.1145	-15.1538	-4.2872
	sub-rank	8	3	4	9	5	7	2	6	1
Rank		8	3	4	9	5	7	2	6	1

註:1.RMSE 單位:日計Mj/m²/day,旬計Mj/m²/10days,月計Mj/m²/month。2.R²及CE為無因次單位。3.旬計結果係摘自黃振昌、宋易倫(2003),餘為本文分析。

表顯示：1. 在國內地區北部氣候環境應用上，無論是日計或旬計或月計計算期距基準，RMSE 值都是黃振昌(2003)最低，以 Angstrom (1924)為最高，CE 值亦是以黃振昌(2003)為最大值，以 Angstrom(1924)為最小值；2. 以日計計量期距而言，以黃振昌(2003)具最低 RMSE 值、0.95 以上 R²、最大 CE 值，推估能力較優於其他國內外所有推薦模型，是為 rank1，其次依序 rank2 為 Penman (1948)，rank3 為黃國禎、徐森雄(1982)、rank4 為 Black et al.(1954)、rank5 為徐森雄、宋義達(1987)、rank6 為 FAO (1998) & ICID(1994)、rank 7 為顏俊士(1974)，而以 Angstrom(1924)最不理想，為 rank8。如此推估性能表現順序，在旬計或月計計量基準上，亦是獲致同樣結果；3. 爰此，綜評在台北測站資料不同計算期距之分析結果，以黃振昌(2003)為 Rank1，即評價為最理想，而以 Angstrom(1924)為 Rank8，即評價為最不理想。同理，應用台南測站資料，諸模型統計檢測分析所得結果，彙整如表 6 所示，並繪製 RMSE、CE 比較分佈，如圖 6、圖 7 所示。由圖表揭露：1.

在國內地區南部氣候環境應用上，無論是日計或旬計或月計計算期距基準，RMSE 值都是黃振昌、宋易倫(2003)最低，以唐榮澤(1979)為最高，CE 值亦是以黃振昌、宋易倫(2003)為最大值，以唐榮澤(1979)為最小值；2. 以日計計量期距而言，以黃振昌、宋易倫(2003)具最低 RMSE 值、0.95 以上 R²、最大 CE 值，推估能力較優於其他國內外所有推薦模型，是為 rank1，其次依序 rank2 為施嘉昌等(1987)，rank3 為 Penman (1948)，rank4 為 Black et al.(1954)、rank5 為 FAO (1998) & ICID (1994)，rank6 為黃國禎、徐森雄(1982)，rank7 為徐森雄、宋義達 (1987)、rank8 為 Angstrom(1924)，而以唐榮澤(1979)最不理想，為 rank9。如此推估性能表現順序，在旬計或月計計量基準上，亦是獲致同樣結果(僅黃國禎、徐森雄(1982)及 FAO(1998) & ICID(1994)略有變動)；3. 爰此，綜評在台南測站資料不同計算期距之分析結果，以黃振昌、宋易倫(2003)之 Rank1，評價最理想，而以唐榮澤(1979)之 Rank9，評價為最不理想。

綜合台北及台南測站資料檢測評估結果顯

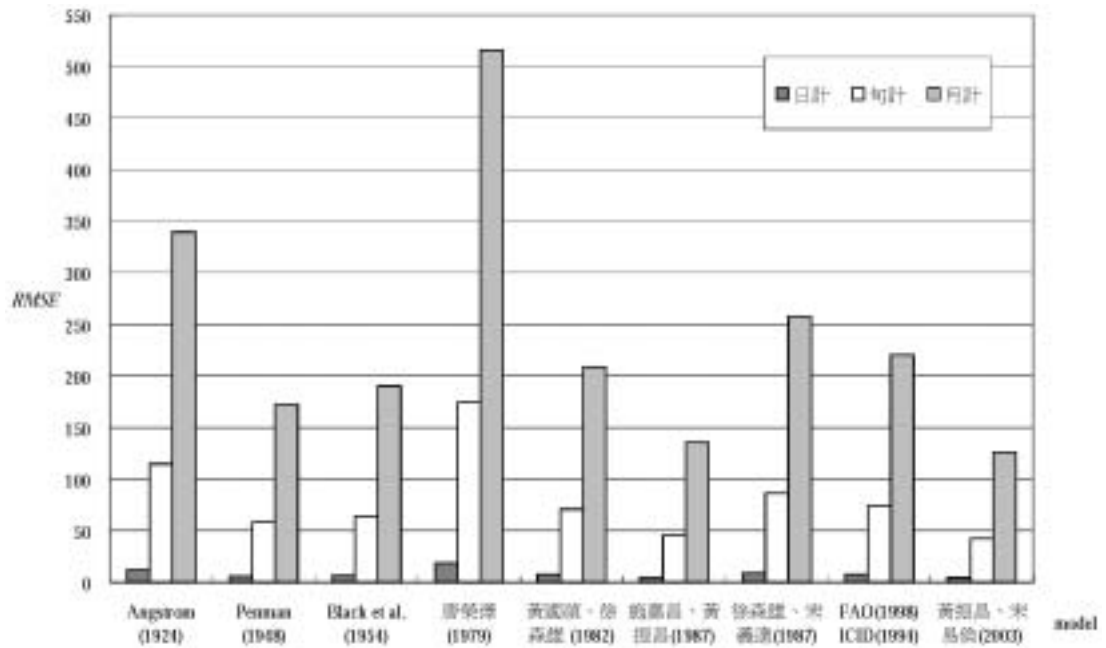


圖 6 不同計量期距諸模型根均方差(RMSE)比較分佈圖(台南測站)

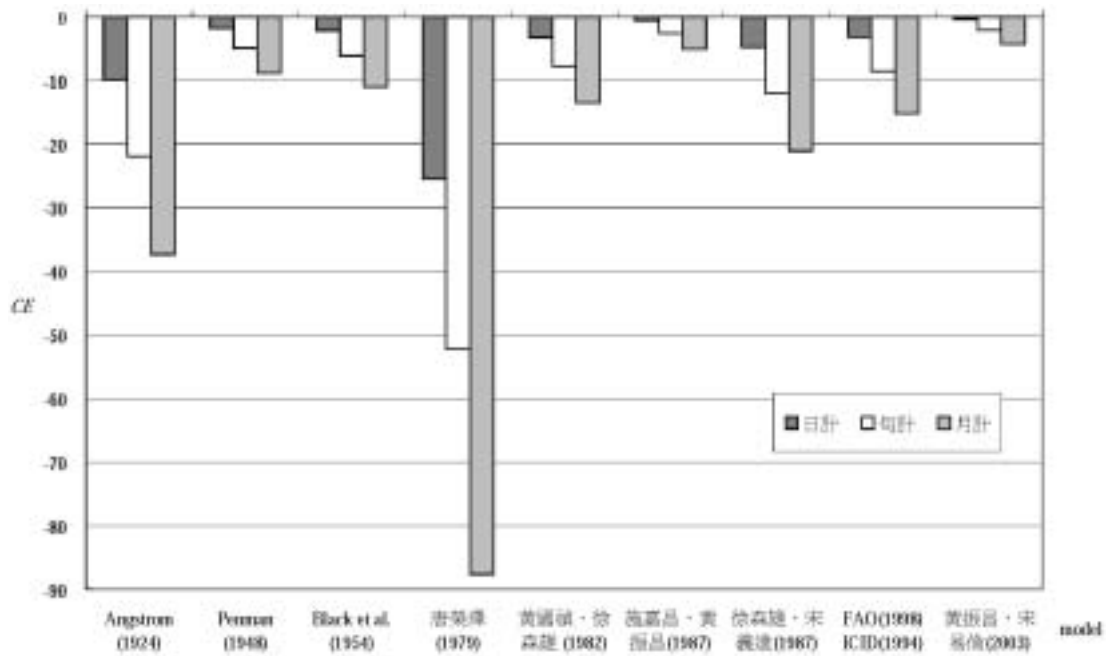


圖 7 不同計量期距諸模型效率係數(CE)比較分佈圖(台南測站)

示，以黃振昌(2003)及黃振昌、宋易倫(2003)所建立本土化旬計參數，不論是日計或旬計或月計，均具最低 *RMSE* 值、0.95 以上 R^2 、最大 *CE* 值，推估性能較優於其他國內外所有推薦模型參數，堪稱在國內本土環境之適用性最佳，至於國外推薦模型參數，如 Angstrom(1924)、Penman (1948)、Black et al.(1954)、FAO (1998) & ICID (1994)等，不建議繼續在國內應用。

四、結論與建議

4.1 結論

國際上廣泛應用之 Penman-Monteith 方程式 (Allen et al., 1994、1998)，內含輻射項日射-日照關係地域性國內外推薦參數，在日計或旬計或月計不同計量期距下，應用於農業生產、水文氣象及水資源經營相關領域，在台灣地區本土環境之適用性，是有必要予以審慎評估及探討。本文應用 2000 年(台南測站，南部地區氣候環境代表)及 2001 年(台北測站，北部地區氣候環境代表)實測資料，並採根均方差(*RMSE*)、相關係數(R^2)及效率係數(*CE*)三項統計指標，進行檢測及評估，分析結果顯示，無論是日計或旬計或月計計量基準下，均以黃振昌(2003)及黃振昌、宋易倫(2003)所建立本土化旬計參數，具最低 *RMSE* 值、0.95 以上 R^2 、最大 *CE* 值，闡釋推估能力及適用性較優於上述國內外所推薦模型參數，建議可在各農業氣候分區、適當之農田水利會灌區、水資源區域分區，採參及應用。而國內以往常使用國際上廣泛應用的，如 FAO(1998)、ICID (1994)、Black et al. (1954)、Penman (1948)、Angstrom (1924)等所推薦模型參數，在台灣地區本土環境之適用性都不甚理想，因此不建議繼續在國內應用。

4.2 建議

就如同所有水文氣象、農業水資源等相關課題研究一再強調，模型參數經愈長期資料之檢測，其適用性或應用性即相對愈佳，本文僅以 2000、2001 年實測資料，進行檢測及評估，所得結論，未來更長期距資料之進一步驗證，

實有必要。

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，「氣候資料年報」，2000-2001。
2. 施嘉昌、黃振昌，「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, 1987。
3. 徐森雄、宋義達，「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, 1987。
4. 唐榮澤，「臺南地區日射量之分析」，氣象學報 Vol. 25, No. 2, p. 15-20, 1979。
5. 黃振昌，「Penman-Monteith 方程式日射-日照關係地域性參數之建立與評估」，中國農業工程學報 Vol. 49, No. 3, p. 79-91, 2003。
6. 黃振昌、宋易倫，「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, 2003。
7. 黃國禎、徐森雄，「臺灣地區日射與日照關係之初步探討」，氣象學報 Vol. 28, No. 1, p. 22-29, 1982。
8. 顏俊士，「臺灣各地之日射量估計問題」，大氣科學 Vol. 1, p. 72-80, 1974。
9. Allen, R. G., Pereira, L. S., Rase, D., and Smith, M., "Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements" FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, 1998.
10. Allen, R. G., Smith, M., Perrier, A., and Pereira, L. S., "An update for the definition of reference evapotranspiration" ICID Bulletin. Vol. 43, No. 2, p. 1-34, 1994.

11. Angstrom, A., "Solar and terrestrial radiation" Q. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 50, p. 121-126, 1924.
12. Black, J. N. Bonython, C.N. and Prescott, J. A., "Solar radiation and the duration of sunshine" Q. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 80, p. 231-235, 1954.
13. Doorenbos, J. and Pruitt, W. O., "Guidelines for predicting crop water requirements" FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome, 179pp, 1975.
14. Doorenbos, J. and Pruitt, W. O., "Guidelines for predicting crop water requirements" FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd/ed, FAO, Rome, 156pp, 1977.
15. Iqbal, M., "An introduction to solar radiation" Academic Press, 1983.
16. Iziomon, M.G., Mayer, H., "Performance of solar radiation models-a case study" Agric. For. Meteorol., Vol. 110, p.1-11, 2001.
17. Legates, D. R. and McCabe, Jr. G. J., "Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation" Water Resources Research, Vol. 35, No. 1, p. 233-241, 1999.
18. Monteith, J. L. and Unsworth, M. H., "Principles of Environmental Physics" Edward Arnold, London, 1990.
19. Monteith, J. L., "Evaporation and surface temperature" Quarterly J. Royal Meteorol. Soc., Vol. 107, p. 1-27, 1981.
20. Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe., "River flow forecasting through conceptual models-A discussion of principles" J. Hydrol., Vol. 10, p. 282-290, 1970.
21. Penman, H. L., "Natural evaporation from open water, bare soil and grass" Proc. Roy. Soc. London, A193, p. 120-146, 1948.
22. Penman, H. L., "Estimating evaporation" Trans. Am. Geoph. U. Vol. 37, No. 1, p. 43-50, 1956.
23. Penman, H. L., "Vegetation and hydrology" Tech. Comm. No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England. 125pp, 1963.
24. Prescott, J. A., "Evaporation from a water surface in relation to solar radiation" Trans. R. Soc. Aust. Vol. 64, p. 114-118, 1940.

收稿日期：民國 93 年 8 月 3 日
 修正日期：民國 93 年 10 月 18 日
 接受日期：民國 93 年 10 月 26 日