

溫度估算日射量之可行性評估¹

姚銘輝^{2,4} 陳述³ 漆匡時² 蔡金川²

摘要：作物模擬模式的開發或驗證常需要日射量此項氣象資料，但受限於感測器較昂貴及自動紀錄等因素，日射量的累積資料或各測站點的分布均不如溫度密集，因此，本研究探討利用日最高溫及最低溫的溫差推估日射量的可行性。以農業試驗所氣象站資料分析溫差及輻射量在不同年際及季節間的差異，發現降雨狀態會影響溫差估算日射量的準確度，尤其是每年 6 月至 10 月較多雨的季節，但若將降雨量納入迴歸式可降低誤差值。依據不同氣候狀態及海拔高度分別選取 6 個測站的資料作分析，利用迴歸式估算日射量，在均值平方根偏差的範圍為 1.02-6.08 MJ m⁻² day⁻¹，均值偏差為 2.33 MJ m⁻² day⁻¹。

關鍵詞：日射量、日射量比、均值平方根偏差、均值偏差。

前 言

太陽光照射在葉片上，輻射能在葉綠體膜轉為化學能，提供作物同化作用的能量來源，一般將太陽所釋放的光稱為日射量(solar radiation)。由於日射量對作物生長及分化具有直接作用，因此在農業研究上常需要利用此項氣象資料，尤其是作物模式的建立與驗證等相關研究，更需要以日射量為基本輸入值。不過，由於量測日射量的儀器過於昂貴，且非每一氣象測站皆有觀測，我國自 1980 年起在一級測站才有此項資料，因此在 1980 年以前或目前簡易型測站的日射量需以估算方式求得。

太陽輻射依據量測的位置可區分為大氣層外日射量(extraterrestrial solar radiation; R_a)及近地面之全天空日射量(global solar radiation; R_{sp})兩種。由於太陽所輻射的熱量一般可視為常數，地球外輻射量可依量測點和太陽的距離及地球運轉速度加以計算，但近地面量測之太陽輻射受雲層影響而降低，雲本身非常複雜，包括雲層厚度、高度、及雲中水汽量皆會影響太陽光的直射及散射，雲的量化觀測及數值分析處理是目前氣候模式仍無法克服的問題⁽¹⁴⁾，這也直接增加太陽輻射估算的難度。

基於日射量取得上的困難，是否可由其他氣象因素加以估算？目前利用氣象衛星觀測直接估算地面之日射量已有相當多報告^(16,23)，這方面研究可精確建立日射量的氣象網格(mesh)，不過除衛星資料取得及判讀仍不普及外，對於歷史資料也無法提供，在實用上仍有限制之處。而利用歷史資料中其他氣象因素估算日射量，包括日照時數⁽¹⁸⁾、雲覆蓋率⁽⁷⁾、最高及最低溫度差⁽¹⁹⁾及降雨日數⁽¹⁵⁾等皆有相關研究報告，同時有些研究利用兩種以上氣象因素作估算，例如 De Jong and Stewart⁽⁹⁾利用溫度及降雨量估算日射量值和實測值之決定係數可達 0.7 以上。

我國氣象站的設置除氣象局所屬 25 個氣象站及 17 個農業一級站(自動且觀測項目齊全之測站)

1. 行政院農業委員會農業試驗所研究報告第 2136 號。接受日期：91 年 11 月 20 日。
2. 木所農工組助理研究員、助理研究員、副研究員。臺灣省 臺中縣 霧峰鄉。
3. 本所種原組助理研究員。臺灣省 臺中縣 霧峰鄉。
4. 通訊作者，電子郵件：mhyao@wufeng.tari.gov.tw；傳真機：(04)23338162。

外，另有二級站(傳統自記式或自動紀錄之測站)及學校、水利局及糧食局所屬之專用站，就測站的數目及分佈是相當密集，但每一測站的觀測項目並不相同，以日射量為例，僅氣象站、農業一級站及少數觀測站有此項資料，而此項氣象因素又受地域條件影響極大，例如海拔高度及坡向等。陳等⁽¹⁾曾利用日照時數資料將我國不同地區估算日射量經驗式的參數求出，同時估算值和實測值相關係數在 0.8 以上。然而，日照時數紀錄時間雖較日射量長，但仍並不普遍，本研究擬利用溫度估算日射量，探討溫差日變化和當日日射量的關係，並試圖找出經驗式的參數，以供氣象資料短缺時參考之用。

材料與方法

本文利用農業試驗所農業一級測站過去十年氣象資料為來源，以建立分析的流程，同時依據地理及氣候特性選取四個測站(台北、台中、高雄及花蓮)的資料分析，高山氣候依不同海拔高度，分別以日月潭(1007m)及阿里山(2416m)為代表，各測站均為中央氣象局所屬氣象站，資料年份是由 1992 至 2001 年，共十年的資料。所使用資料包括平均最高溫、平均最低溫、日照時數、降雨量、降雨日數、雲量及日射量等七項。

不同氣象因素之迴歸參數的檢測是利用均值相關統計方法，包括均值偏差(mean bias error; MBE)及均值平均根偏差(root mean square error; RMSE)兩種方式。

$$MBE = [\sum (F_i \text{ comp} - F_i \text{ meas})] / n$$

$$RMSE = \{[\sum (F_i \text{ comp} - F_i \text{ meas})^2] / n\}^{1/2}$$

$F_i \text{ comp}$ 指第 i 筆估計值， $F_i \text{ meas}$ 指第 i 筆實測值， n 為所有測定值數目。RMSE 值低表示估算正確率高；MBE 值若為正則為高估，為負則為低估。分析軟體為 SPSS 套裝統計軟體⁽²²⁾。

日射量由氣溫資料估算之公式是依據 Richardson⁽¹⁹⁾所提出：

$$R_{sp} / R_a = a (T_{max} - T_{min})^b \dots \dots \dots (1)$$

R_a : 大氣層外的日射量(MJm^{-2})

R_{sp} : 近地面日射量(MJm^{-2})

T_{max} 及 T_{min} 分別為日最高及最低氣溫($^{\circ}C$)

R_a 依據 Seller⁽²¹⁾ 定義為大氣層上每一點的日射量，其計算公式為

$$R_a = (tn/\pi) * Sp_0 * (<D>/D)^2 * [H * \sin(\delta) * \sin(\lambda) + \cos(\delta) * \cos(\lambda) * \sin(H)] \dots \dots (2)$$

t 是輻射量計算時間(min)， n 為轉換常數($0.060 MJ kw^{-1} min^{-1}$)， Sp_0 為太陽常數($1378 kw m^{-2}$)， $<D>$ 地球至太陽平均距離(m)， D 為計算當天地球至太陽的距離， H 為半日長度(half-day length)(rad)， δ 太陽赤緯(declination)(rad)， λ 為緯度(rad)。其中 D 及 H 的計算為

$$D = 1.5 * 10^{13} - 0.0252 * 10^{13} * \cos[(DOY - 3.0) * 2\pi / 366] \dots \dots (3)$$

$$H = 2\lambda / 24 * DAYLEN / 2 \dots \dots \dots (4)$$

DOY 為積日(day of year)；DAYLEN 為理論日長

結果與討論

目前估算日射量的方式有許多種，包括以其他氣象因素利用迴歸方式發展出簡易經驗公式，或由複雜的傅利葉分析(Fourier analysis)計算太陽光的吸收及散射(scattering)⁽⁵⁾ 皆有。但過於複雜的演算程序往往需要較艱澀的數理背景，雖可提高預測能力，但限制普遍運用的機會。簡易的經驗公式雖預測能力稍差，但資料取得及計算方便，反而有較多的文獻探討，而本研究中即以溫度及降雨兩項氣象因素作為估算太陽輻射的資料來源。

利用最高溫及最低溫的差異估算日射量的理論基礎是地表邊界層的能量變化。就地面能量平衡的觀點，如果不考慮土壤熱流，則淨輻射量(net radiation)可分為潛熱(latent heat; L)及可感熱(sensible heat; S)，一般可將這兩種通量(flux)以 Bowen ratio(L/S)表示。潛熱來自於太陽光對作物植被(canopy)或土壤水分的加熱，可感熱則是白天氣溫的提高(對空氣加熱)。在典型夜間微氣象，因輻射冷卻現象氣溫會接近於露點溫度(dew point temperature)，最低溫往往是出現在太陽出現前，而當太陽輻射強烈時，對空氣的加熱在正午達到最高，也就是最高溫度的產生。因此就學理而言，最高溫及最低溫的差值可表示為太陽輻射對空氣的加熱幅度。由本所農業氣象站過去 10 年資料分析可知，月最高溫及最低溫差值在 8-12°C 之間(圖 1)，其中 3 月至 9 月差值較低，同時變異量也較低，可能此段時期為雨季，空氣中水汽量高有關，太陽輻射的能量釋放以潛熱居多，可感熱相對較少所致。至於日射量的變化，夏季雖受降雨天數較多影響，但由於受太陽直射影響，輻射量約為 11-13 MJ m⁻² day⁻¹，不過也因雲層及降雨緣故，變異量較大。

表 1 為日最高溫度及最低溫度的差值和日射量的相關性，兩者決定係數(coefficient of determination; R²)的月平均值在 0.5 以上，但七至十月的四個月中決定係數明顯偏低，其中以 1993 年 8 月、2000 年 9、10 月及 2001 年 8 月的決定係數最低，低於 0.1 以下，由氣象資料可發現，在這些月份平均日射量皆高，例如 2000 年 9 月的月平均日射量高達 13 MJ m⁻² day⁻¹，日最高值更達 17 MJ m⁻²，但在連續高日射量後出現低日射量，且這一日並無降雨(或少量降雨)資料，溫差也並未下降，此情形導致決定係數數值的下降。舉例而言，2001 年農業試驗所測站 1 月(圖 2)及 7 月(圖 3)溫差及日射量比值的關係圖，黑色條狀表降雨日，降雨時期溫差及日射量比皆會下降(如 1 月資料)，但有些情形並不一致，例如圖 3 中 7 月 25-27 日皆有降雨紀錄，溫差下降不明顯，但日射量比反而有增高趨勢，經查詢原始資料後發現，7 月 25 日降雨量 50 公厘，日射量由前一日 11.98 MJ m⁻² 降至 8.16 MJ m⁻²，但接下來二日雖為降雨日，但雨量僅為 0.5 公厘，日射量迅速上升，7 月 27 日更高達 17.05 MJ m⁻²。這說明降雨對溫差及日射量的影響程度不同，因此在估算日射量時，應對降雨量作一規範，否則容易造成估算上的錯誤。

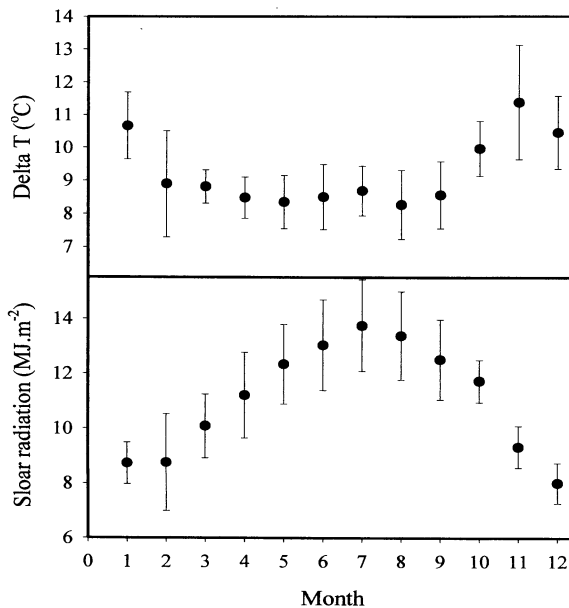


圖 1. 農業試驗所 1992-2001 年之日溫差及日射量之月平均值。

Fig.1. The monthly change in delta temperature (daily range of air temperature) and solar radiation at Taiwan Agriculture Research Institute from 1992 to 2001.

降雨量是否可作為估算日射量的資料來源？De Jong and Stewart⁽⁹⁾以溫差和降雨量的迴歸式『 $R_{sp}/R_a = a(\Delta T)^b(1+cP+dP^2)$ ，P 為降雨量』分析加拿大七個測站資料，發現冬季（降雨量少）決定係數低於 0.5；夏季（降雨量多）則決定係數高於 0.7 以上，同時經驗式中之參數值不受地域影響。台灣地區降雨特性，每一降雨事件的降雨量及持續時間差異極大，以台中地區過去 40 年雨量資料分析，降雨量年際之間變異係數(coefficient of variation；CV)高達 21.4%⁽⁴⁾，日累積雨量更有高達 300 公厘的記錄。因此，圖 4 是將 1999-2001 年農試所測站降雨資料和日射量比的相關圖，由資料分析中可知，

表 1. 農業試驗所 1992-2001 年之日溫差(最高溫-最低溫)和日射量之決定係數

Table 1. Relationship (coefficient of determination) between the difference of daily temperature (maximum-minimum) and the solar radiation in 1992-2001, TARI

Year	Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1992	0.71* ^z	0.85*	0.86*	0.71*	0.81*	0.68*	0.74*	0.82*	0.37	0.35	0.82*	0.74*
1993	0.85*	0.41*	0.68*	0.80*	0.77*	0.86*	0.23	0.10	0.43*	0.54*	0.82*	0.82*
1994	0.85*	0.89*	0.60*	0.69*	0.54*	0.76*	0.24	0.79*	0.47*	0.75*	0.55*	0.71*
1995	0.79*	0.81*	0.77*	0.90*	0.76*	0.78*	0.53*	0.85*	0.48*	0.33	0.50*	0.60*
1996	0.51*	0.81*	0.42*	0.68*	0.70*	0.39	0.69*	0.68*	0.34	0.68*	0.65*	0.51*
1997	0.71*	0.89*	0.69*	0.73*	0.70*	0.83*	0.83*	0.73*	0.69*	0.65*	0.45*	0.73*
1998	0.73*	0.75*	0.71*	0.73*	0.57*	0.75*	0.22	0.72*	0.80*	0.63*	0.38	0.83*
1999	0.67*	0.86*	0.79*	0.60*	0.74*	0.71*	0.66*	0.92*	0.68*	0.61*	0.37	0.72*
2000	0.78*	0.84*	0.83*	0.68*	0.83*	0.83*	0.60*	0.39	0.03	0.03	0.65*	0.77*
2001	0.80*	0.89*	0.86*	0.61*	0.62*	0.84*	0.63*	0.07	0.88*	0.49*	0.79*	0.79*

^z * indication of the coefficient of determination is significant at the 0.05 level under two-tailed test.

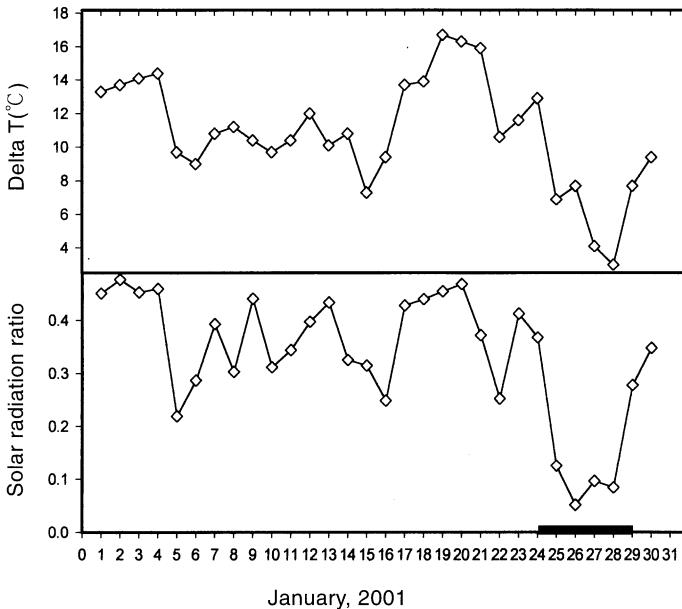


圖 2. 農業試驗所 2001 年 1 月之日溫差及日射比。

Fig.2. The delta temperature and solar radiation ratio at TARI in January, 2001. The black bars indicated the rain day.

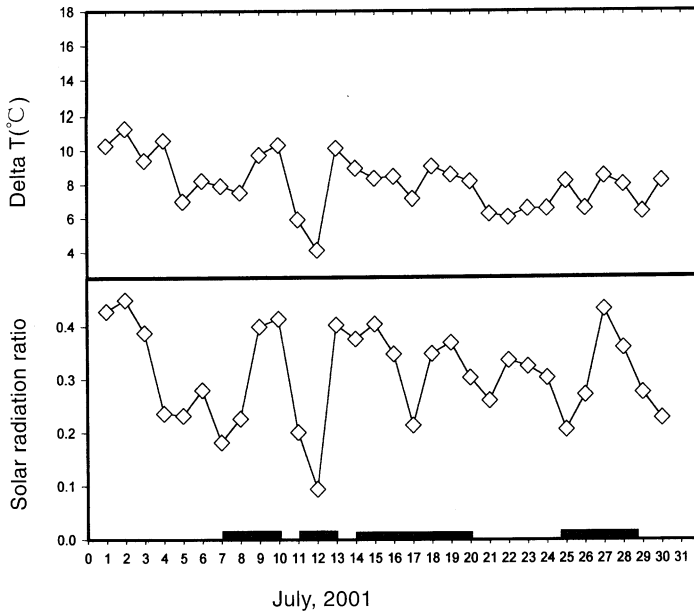


圖 3. 農業試驗所 2001 年 7 月之日溫差及日射比。

Fig.3. The delta temperature and solar radiation ratio at TARI in July, 2001. The black bars indicated the rainy day.

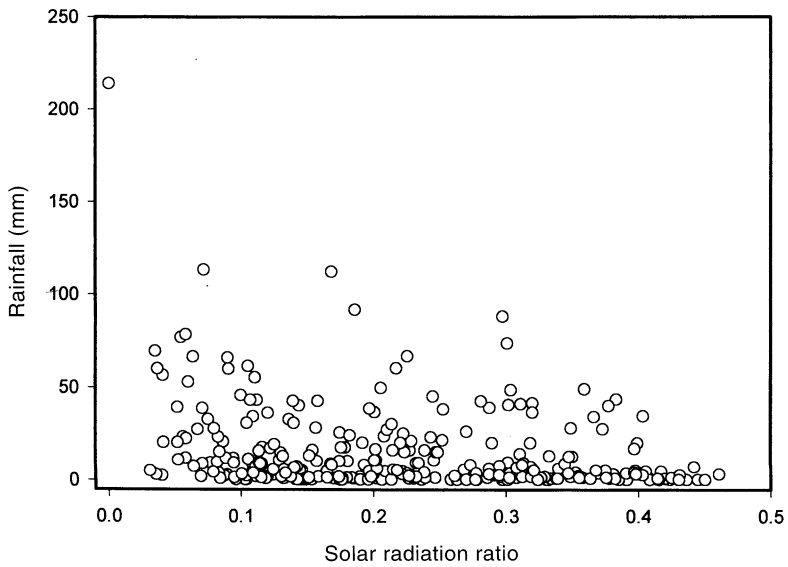


圖 4. 農業試驗所 1999-2001 年之日射比及降雨量之關係性。

Fig.4. Relationship between solar radiation ratio and rainfall at Taiwan Agriculture Research Institute in 1999-2001.

經驗式以指數性較二次式更能代表降雨量及日射量比(R_{sp}/R_a)的關係, 這個特性分別以台北、台中、高雄及花蓮等不同地域的降雨資料作驗證, 所得結果相一致。當降雨資料大於 0.5 公厘時, 降雨量和日射量比的相關係數為 0.46, 大於 10 公厘 0.51, 大於 20 公厘 0.59, 大於 30 公厘 0.70, 大於 50 公厘 0.73, 大於 75 公厘 0.89, 大於 100 公厘 0.99。日降雨量越多, 雲層越厚及雲中含水汽量高, 自然阻擋太陽輻射到達地面的量, 但降雨量低(<10 公厘)時容易造成估算的錯誤, 以夏季常發生之午後雷陣雨為例, 降雨影響日射量的累積, 但降雨前後可能是艷陽高照, 日溫差變化不大而日射比顯著下降, 如此容易造成估算上的錯誤。因此, 將表一所列決定係數偏低之月份, 依據『 $R_{sp}/R_a = a(\Delta T)^b (1+c \ln(P))$, P 為降雨量』迴歸式計算, 其中降雨量低於 10 公厘時, P 設為 0, 則決定係數將會明顯增高。例如 2001 年 8 月的決定係數為 0.07, 經調整後提高為 0.34, 而在本研究後續有關溫差估算日射量部分, 針對容易受雨量影響的時期(6 月至 10 月)也以上式處理。

日射量和降雨天數之間的關係為何? McCaskill⁽¹⁵⁾以 $R_{sp} = aR_a + bR^{t-1} + cR^t + dR^{t+1}$ 公式計算每日輻射量, 其中 a, b, c 及 d 為經驗係數, R^t 為轉換後之降雨資料, t-1, t 及 t+1 為估算前一天、當日及後一天。 R^t 的轉換是日降雨量大於 0.1 公厘視為 1, 不下雨視為 0。不過, 以本所氣象站過去十年降雨資料代入 McCaskill 之估算式中, 並不能準確的預估日射量, 可能原因除降雨外, 雲量多寡及量測時微氣象均需考慮, 若僅由降雨天數(或時數)估算我國此種對流旺盛及天氣型態變化快速的環境顯然不足。Liu and Scott⁽¹²⁾以澳洲 39 個氣象站的資料分析, 由溫差及降雨資料所發展出之 9 種估算日射量模式的結果顯示, 結合溫差及降雨天數兩氣象因子可提高估算日射量的準確度, 其中降雨天數的迴歸式是依循 McCaskill 之計算式, 本研究進一步將 Liu and Scott 所發展的程式以本所氣象資料帶入, 所得結果和單一利用溫差所作結果相近, 這說明降雨天數此項氣象資料並無法有效地提高溫差估算日射量的準確度, 事實上, 降雨是多項氣象因素改變的原因也是結果, 另包括大尺度天氣型態的作用, 這造成降雨預測的困難, 同時我國屬於海島性氣候, 所受影響因素甚多, 不若大陸性氣候(如澳洲)穩定, 因此, 降雨作為日射量估算並不合適。

表 2 依不同氣候型態分別選擇台北、台中、高雄及花蓮, 同時加上具高山特性之日月潭及阿里山等測站, 以 1997 年至 2001 年利用日最高溫及日最低溫之差值估算日射量的決定係數, 及估算係數的平均值。由五年的平均資料得知, 利用溫差估算的決定係數在 6 個測站皆在 0.5 以上, 在平地部份以高雄測站較低為 0.54, 花蓮測站較高為 0.70, 高地測站的決定係數較平地為高, 日月潭為 0.77, 阿里

表 2. 我國 6 個氣象站 1997-2001 年間估算日射量之公式係數及決定係數月平均值

Table 2. Monthly coefficient and statistics for estimates of solar radiation at 6 weather station in Taiwan, data derived from 1997-2001 years combined

Month	Location																	
	Taipei			Taichung			Kaohsiung			Hualien			Jihyuehtan			Alishan		
	a	b	R ^{2z}	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
Jan.	0.009	1.82	0.63	0.037	1.10	0.68	0.019	1.43	0.66	0.020	1.35	0.73	0.020	1.34	0.82	0.036	1.10	0.77
Feb.	0.010	1.80	0.364	0.014	1.50	0.77	0.037	1.32	0.55	0.020	1.30	0.68	0.007	1.80	0.75	0.024	1.42	0.82
Mar.	0.008	1.68	0.67	0.13	1.50	0.75	0.028	1.30	0.46	0.017	1.29	0.76	0.013	1.45	0.81	0.014	1.55	0.75
April	0.005	1.92	0.67	0.015	1.48	0.68	0.049	1.15	0.45	0.018	1.48	0.72	0.019	1.27	0.75	0.027	1.22	0.77
May	0.012	1.49	0.61	0.013	1.58	0.64	0.038	1.33	0.47	0.021	1.41	0.72	0.016	1.45	0.81	0.028	1.18	0.73
June	0.013	1.46	0.68	0.010	1.79	0.66	0.016	1.92	0.60	0.027	1.42	0.69	0.023	1.30	0.74	0.024	1.15	0.71
July	0.012	1.56	0.57	0.015	1.70	0.59	0.008	2.13	0.44	0.019	1.78	0.60	0.015	1.46	0.69	0.027	1.15	0.64
Aug.	0.013	1.53	0.56	0.015	1.50	0.62	0.003	2.65	0.60	0.012	1.93	0.73	0.020	1.30	0.76	0.025	1.30	0.73
Sept	0.013	1.75	0.60	0.020	1.43	0.72	0.035	1.42	0.51	0.011	1.99	0.61	0.024	1.26	0.83	0.026	1.24	0.70
Oct.	0.019	1.75	0.54	0.011	1.55	0.73	0.024	1.60	0.53	0.014	1.83	0.77	0.013	1.62	0.68	0.016	1.55	0.67
Nov.	0.017	1.73	0.60	0.020	1.34	0.62	0.014	1.27	0.53	0.030	1.29	0.71	0.018	1.42	0.78	0.047	1.21	0.74
Dec.	0.023	1.48	0.61	0.020	1.36	0.70	0.031	1.22	0.66	0.028	1.51	0.70	0.022	1.38	0.78	0.033	1.27	0.79

^zA, b : coefficient of solar radiation estimating formula (eq1); R²:coefficient of determination

山為 0.74，而 a, b 值受地域及季節性影響，a 值的範圍為 0.005-0.050 之間，b 值的範圍為 1.10-2.70 之間。利用溫差估算日射量是根據對空氣的加熱幅度，但空氣中的組成份也會影響兩者間的關係。Rizzi *et al.*,⁽²⁰⁾曾對影響晴空輻射下降的原因進行探討，認為分別受臭氧(0.5-3%)、上層懸浮微粒(1.9-11%)、乾空氣(11-13%)、水汽(3.5-14%)和低層懸浮微粒(0.1-26%)，其餘則為雲所阻擋。我國各地皆會因都市化或工業化所排出氣體而造成不同程度的空氣污染，增加空氣中懸浮微粒的濃度。Bakan⁽⁶⁾以氣候模式評估發現，灰塵沉降將使溫度下降，同時因空氣污染所形成雲層內組成分複雜，影響太陽光的入射及反射⁽⁸⁾外，也干擾空氣的加熱程度，不過，雖然空氣污染對於日射量或溫度皆會有直接或間接的影響，但污染源過於複雜，且常為偶發現象，除非有很長的完整紀錄，否則難以解釋對於氣象因子的影響。

雲量是決定太陽輻射到達近地面的重要因素，但雲量本身難以量化及自動連續記錄，雲量的觀測資料是以目測方式取得，同時僅在一級測站才有專業觀測員提供此項資料。過去也有學者利用雲覆蓋度估算日射量⁽¹⁰⁾，基本估算方程式為 $R_{sp}/R_a = p + qC + rC^2 + sC^m$ ，其中 p, q, r, s, m 為經驗參數，C 為雲量。不過，這種較適合於長期資料分析(月或年)，日或時的分析誤差較大⁽¹⁷⁾，在本研究中也嘗試利用雲量估算日射量，但由於迴歸模式的決定係數偏低($R^2 \approx 0.05-0.35$)，並未再深入探討。姚等人⁽³⁾曾以氣候變遷角度分析過去 40 年台北、台中、台南及恆春之雲層變化，台北除 12 月份雲量有下降外，其餘月份皆呈增加；台中則相反，除 2 月份些微增加外，其餘皆明顯下降，同時全年疏雲日數(scattered days)明顯增加，裂雲日數(broken day)下降，密雲日數(overcast day)些微下降，晴空日數(clear day)維持不變。雲層厚薄的變化可能會影響日最高溫及最低溫的出現，但如何估算及影響程度為何則需更進一步的探討。

圖 5、圖 6 及圖 7 是利用表二中溫差估算日射量迴歸式的參數估算 1995 年的日射量，圖中資料以旬為單位繪製，同時將估算值及實測值的均值偏差(MBE)及均值平方根偏差(RMSE)標示。6 個測站旬

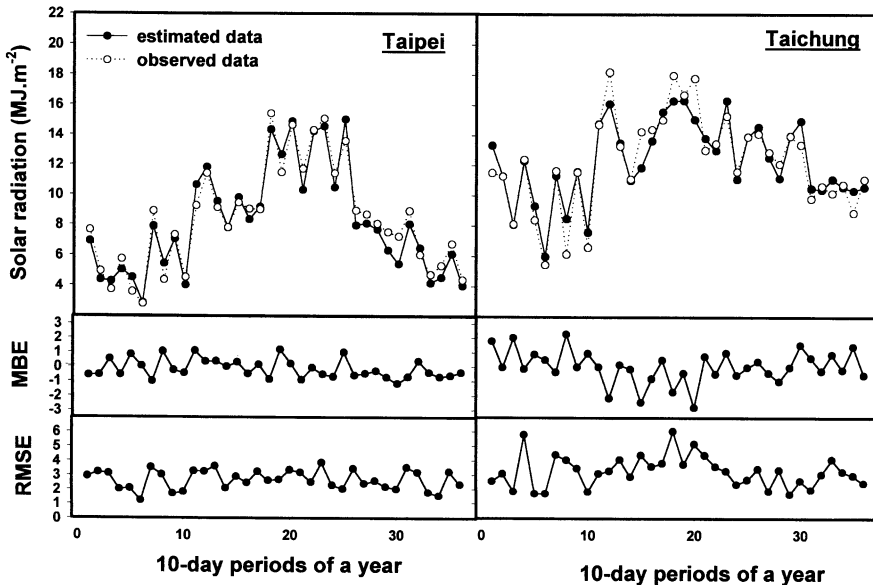


圖 5. 台北及台中測站 1995 年旬之日射量估算值及實測值和其均值偏差及均值平方根偏差。
 Fig.5. Measured vs. modeled solar radiation and its mean bias error (MBE) and root mean square errors (RMSE) for 10-day period of 1995 at Taipei and Taichung.

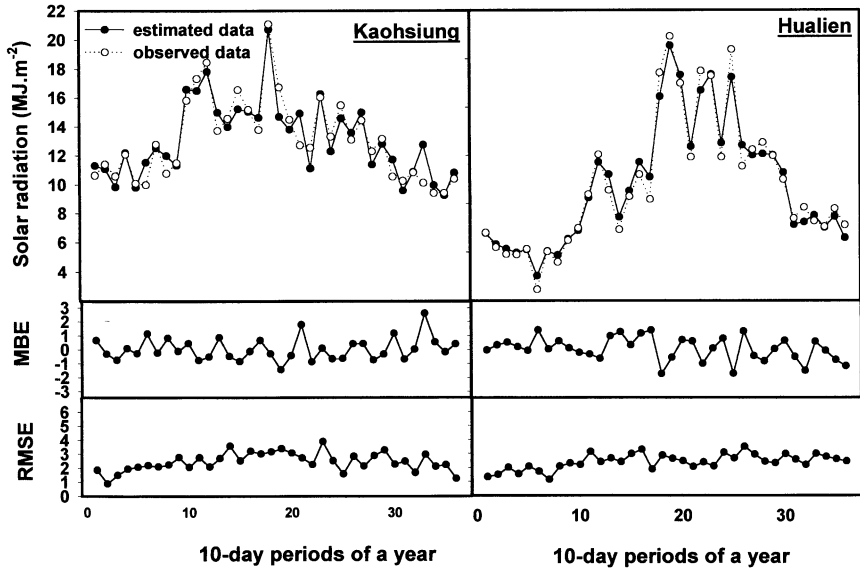


圖 6. 高雄及花蓮測站 1995 年旬之日射量估算值及實測值和其均值偏差及均值平方根偏差。
Fig.6. Measured vs. modeled solar radiation and its mean bias error (MBE) and root mean square errors (RMSE) for 10-day period of 1995 at Kaohsiung and Hualien.

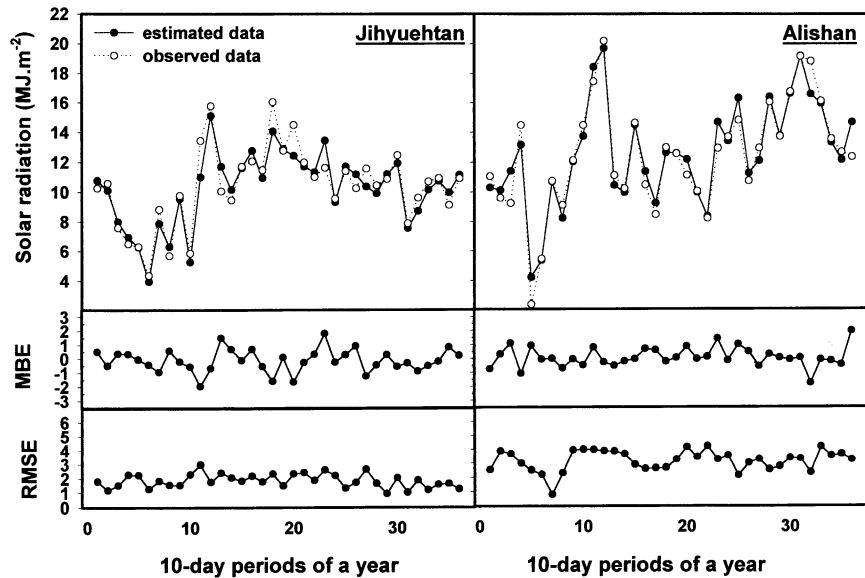


圖 7. 日月潭及阿里山測站 1995 年旬之日射量估算值及實測值和其均值偏差及均值平方根偏差。
Fig.7. Measured vs. modeled solar radiation and its mean bias error (MBE) and root mean square errors (RMSE) for 10-day period of 1995 at Jihyuehtan and Alishan.

之 RMSE 的範圍為 1.02-6.08 MJ m⁻²，年平均值 2.65 MJ m⁻²，為而每旬平均之估算誤差範圍在高估 2.33 MJ m⁻² 至低估 2.73 MJ m⁻² 之間，其中誤差範圍在 1MJ m⁻² 的旬數佔 70 % 以上。Weiss *et al.*,⁽²⁴⁾ 利用包括最高及最低溫度差等氣象因子在內之 14 種迴歸式估算美國中部 10 個測站之日射量，所得結果之 RMSE 的範圍為 3.6-4.7 MJ m⁻² 之間。Hunt⁽¹¹⁾ 由加拿大 8 個測站使用溫差及降雨量之五種日射量估算式，RMSE 的範圍為 4.0 至 7.2 MJ m⁻²，本研究利用溫差並對降雨量作一限制的迴歸方式，在 6 個測站預估 1995 年的準確度尚可接受。

結 論

本研究中除日最高溫及日最低溫之溫差外，同時也利用包括降雨量、降雨天數及雲量等氣象因子估算日射量的可行性。但 Lund⁽¹³⁾ 利用月氣象資料探討溫度、雪覆蓋度、風速、日照時數、大氣壓力、雲覆蓋度及降雨等因子，發現日射量和日照時數的決定係數最高。由陳等人⁽¹⁾ 利用我國各地氣象站日照時數資料估算日射量的結果，以台中測站為例，中央氣象局測站 1979-1991 年資料兩者相關係數 0.93，而本研究溫差的估算的相關係數為 0.82（決定係數的平方根），顯然利用溫差估算的準確度仍低於日照時數。日照時數的量測是將具有聚光的透明球體，利用太陽光經聚光後對球體下方紀錄紙燃燒的痕跡加以計算而得（Campbell-Stokes 式），徐及唐⁽²⁾ 探討四種常見日照計對日照時間紀錄所需的最低日射量為 2.86-5.72 MJ m⁻²day⁻¹。因此，日照時數雖然對於光度過高或過低無法解釋外，是一種直接對於太陽輻射的量測，而溫差則以氣象因子能量平衡的觀點，較會受到量測當時之環境影響，例如水汽量、懸浮微粒、風速、土壤或植被含水量等影響，但溫度此項氣象資料具有普遍性（至少對日照時數資料的取得而言），包括二級站或專屬氣象站皆有此項資料，而由本研究的結果顯示，利用日最高溫及日最低溫溫差所作估算日射量的迴歸式中，6 個氣象站的決定係數也達到 0.5 以上，是可資利用的估算方式。

引用文獻

1. 陳琦玲、林正鈞、劉滄琴。1994。台灣地區平地日射量之估算分析。中華農業研究 43:77-92。
2. 徐森雄、唐琦。1994。不同日照計觀測結果之比較。中華農業氣象 1:75-79。
3. 姚銘輝、盧虎生、朱鈞。1999。台灣地區日溫差之分析。中華農學會報 188:32-46。
4. 姚銘輝。2001。人工降雨對水稻生理反應及生育之影響。國立台灣大學農藝學研究所博士論文。台灣台北。170 頁。
5. Amato, V., A. Andretta, B. Bartoli, B. Coluzzi, V. Cuomo, F. Fontana, and C. Serio. 1986. Markov processes and fourier analysis as a tool to describe and simulate daily solar irradiance. Solar Energy 37:179-194.
6. Bakan, S., A. Chlond, V. Vubasch, J. Feichter, H. Graf, H. Grassl, K. Hasselmann, I. Kirchner, M. Latif, E. Roeckner, R. Sausen, V. Schlese, D. Schriever, I. Schult, V. Schumann, F. Sielman, and W. Welke. 1991. Climate response to smoke from the burning oil wells in Kuwait. Nature 351:367-371.
7. Brinsfield, R., M. Yaramanoglu, and F. Wheaton. 1984. Ground level solar radiation prediction model including cloud cover effects. Solar Energy 33:493-499.
8. Charlson, R.J., S.E. Schwartz, J.M. Hales, R.D. Cess, J.A. Coakley, J.E. Hansen, and D.J. Hoffman. 1992. Climate forcing by anthropogenic aerosols. Science 255:423-430.
9. De Jong, R., and D. W. Stewart. 1993. Estimating global solar radiation from common meteorological observation in western Canada. Can. J. Plant Sci. 73:509-518.

10. Harrison, A. W., and C. A. Coombes. 1986. Empirical relationship of cloud shade to point cloudiness. *Solar Energy* 37:417-721.
11. Hunt, L. A., L. Kuchar, and C. J. Swanton. 1998. Estimation of solar radiation for use in crop modeling. *Agric. For. Meteorol.* 91:293-300.
12. Liu, D. L., and B. J. Scott. 2001. Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observation. *Agric. For. Meteorol.* 106:41-59.
13. Lund, I. A. 1968. Relationship between insolation and other surface weather observations at Blue Hill, Massachusetts. *Solar Energy* 12:95-106.
14. Mahlman, J. D. 1997. Uncertainties in projections of human-caused climate warming. *Science* 278:1416-1417.
15. McCaskill, M. R. 1990. Prediction of solar radiation from rain-day information using regionally stable coefficients. *Agric. For. Meteorol.* 51:247-255.
16. Pereira, E. B., S. L. Abreu, R. Stuhlmann, M. Rieland, and S. Colle. 1996. Survey of the incident solar radiation in Brazil by use of meteosat satellite data. *Solar Energy* 57:125-132.
17. Rao, C. R., W. A. Bradley, and T. Y. Lee. 1984. Some comments on angstrom type regression models for the estimation of the daily global solar irradiation. *Solar Energy* 34:117-119.
18. Revfeim, K. J. A. 1997. On the relationship between radiation and mean daily sunshine. *Agric. For. Meteorol.* 86:183-191.
19. Richardson, C. W. 1985. Weather simulation for crop management models. *Trans. ASAE* 28:1602-1606.
20. Rizzi, R., C. Serio, R. Guzzi, and M. Francesca. 1980. Solar direct irradiance at the ground : a parameter approach. *Solar Energy* 25:15-20.
21. Sellers, W. D. 1965. *Physical Climatology*. Univ. Chicago Press. Chicago, IL. pp.272.
22. SPSS Institute. 1998. *SPSS user's guide*. Version Base 8.0. Chicago. USA
23. Stewart, J. B., C. J. Watts, J. C. Rodriguez, H. A. R. Bruin, A. R. Berg, and J. Garatuza-Payan. 1999. Use of satellite data to estimate radiation and evaporation for northwest Mexico. *Agric. Water Mag.* 38:181-193.
24. Weiss, A., C. J. Hays, Q. Hu, and W. E. Easterling. 2001. Incorporating bias error in calculating solar irradiance : for crop yield simulations. *Agron. J.* 93:1321-1326.

Estimating Solar Radiation from Daily Temperature Data¹

Ming-Hwi Yao^{2,4}, Shun Chen³, Kuang-Shih Chi² and Jin-Chuan Tsai²

Summary

Solar radiation is an important input parameter for crop simulation model. Because the sensor of solar radiation is expensive, to measure solar radiation are not popular as air temperature. Therefore, the objective for this study is to develop the algorithms for calculating solar radiation from daily maximum and minimum temperature. With a 10-year data set from weather station of Taiwan Agricultural Research Institute, we found the rainfall condition highly effect the estimation of solar radiation based on daily temperature, especially during the high rain-month period (June to October). A newly combined formula that included the temperature and rainfall could provide the estimation with less error than single factor. This study evaluated the accuracy for using daily temperature to estimate daily solar radiation at 6 weather stations in Taiwan area, the root mean square error (RMSE) range between calculated values from developed model and measured data in 1995 was 1.02-6.08 MJ m⁻² day⁻¹ with a standard deviation of 2.33 MJ m⁻² day⁻¹.

Key words : Solar radiation, Solar radiation ratio, Root mean square error (RMSE), Mean bias error (MBE).

1. Contribution No. 2136 from Taiwan Agriculture Research Institute, Council of Agriculture. Accepted : November 20, 2002.

2. Assistant Researcher and Associate Researches, Respectively, Department of Agricultural Engineering, TARI, Wufeng, Taichung, Taiwan, ROC.

3. Assistant Researcher, Department of Plant Resource, TARI, Wufeng, Taichung, Taiwan, ROC.

4. Corresponding author, e-mail: mhyao@wufeng.tari.gov.tw ; Fax: (04)23338162.