

由 MTSAT 衛星影像和數位地形資料

估算臺灣地表太陽輻射量

蕭鋒¹ 林博雄¹ 賴彥任²

¹國立臺灣大學大氣科學系

²國立臺灣大學實驗林管理處

摘要

過去一些研究嘗試發展進行複雜地形的輻射模式，試圖精確掌握向下太陽輻射通量 (Downward Solar Irradiance, DSI)於地表之空間分佈。臺灣地區對於 DSI 研究止於利用零星地面觀測資料來分析懸浮微粒之效應，本研究沿用賴(2003)利用 GMS-5 衛星資料估算陳有蘭溪集水區內 DSI 時空分布方法，設計一套 Satellite-Based DSI Estimation Model (SDEM)，擴大探討臺灣全島 DSI 高時空解析推估之可行性。研究結果發現，由晴空個案所計算的 SDEM 估算值與中央研究院環境變遷中心地面觀測的分鐘平均觀測值加以比對，發現兩者相關係數可達 0.93 以上，有雲個案之相關係數也達 0.81 以上。SDEM 估算值與中央氣象局地面測站觀測之 DSI 小時累積量比對，在低海拔的測站之相關係數可超過 0.9，高海拔的測站雖然因為衛星影像辨識霧的能力不佳，但 SDEM 估算值與高海拔測站比對結果之相關係數仍有 0.8 以上。

一、前言

太陽輻射為驅動地球中大氣環流與水文循環的主要能量，監測穿越地球大氣層抵達地球表面的太陽輻射通量 (向下太陽輻射量, Downward Solar Irradiation, 以下簡稱 DSI)有助於我們了解地表與大氣之間的能量交換以及滿足生態應用研究之需求。然而，DSI 的時空分布並非恆常不變，首先到達大氣層頂的太陽輻射分別受到緯度、太陽時角、日地距離而改變(Liou, 2002)；穿越大氣的太陽輻射則是受到大氣分子、氣膠、雲的吸收與散射，抵達地表後，再受到地形效應反射、遮蔽等影響，造成地面上所量測到的 DSI 的分佈極不均勻。

臺灣地區 DSI 的量測研究主要在利用 DSI 觀測資料來分析氣膠效應(林, 2002; 陳, 2004), 賴(2003)

曾利用日本 GMS-5 地球同步衛星資料估算陳有蘭溪集水區內 DSI 之時空分佈，並考慮地形的遮蔽效應。本研究延續其研究架構並擴展樣本範圍，設計 Satellite-Based DSI Estimation Model (SDEM)擴大探討臺灣全島之 DSI 高時空解析之推估可行性。下一節將先說明 SDEM 架構與資料輸入輸出過程，第三節討論 SDEM 與地面觀測的驗證結果，最後討論臺灣全島的 DSI 月平均分布狀態。

二、SDEM 架構與運算

2-1 SDEM 架構

回溯到達地表的太陽輻射 DSI，可分為天文因素、大氣效應和地形效應等三大過程，分述如下：

(一)天文因素

本文選用太陽常數 (I_{sc}) 1367 Wm^{-2} ，此一數量是

Frohlich and Brusa(1981)研究 8 種衛星觀測資料後的建議值。其次我們引用 Duffie and Beckman(1980)提出的太陽常數因日地距離變動的修正公式。太陽入射線與赤道面夾角(太陽赤緯, δ)是隨著地球公轉而呈週期性變動, 本文採用 Cooper (1969) 提出的方程式進行計算。地球上任意地點任意時刻的太陽天頂角(θ)、太陽方位角(A), 則可由地理緯度(φ)、太陽赤緯及時角(ω)之關係式可由球面三角公式推導而得(曾, 1988)。經過以上計算而得到天文因素修正後的 DSI, 稱之為 I_c 。

(二)大氣效應

大氣輻射傳遞過程中衰減 DSI 的因子眾多, SDEM 模式採用大氣透射率(大氣層頂與通過大氣層後的太陽輻射量比值, T)做為整體大氣效應的代表參數。本研究利用 Chou et al.(2006)分析台南地區氣膠光學厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)對 DSI 的影響所推導的大氣透射率做為臺灣全島大氣透射率之估算, 臺灣本島 AOD 之參考數值(圖 1)是:

高度>1000m, AOD=0.1

高度<1000m 再細分為:

24.5N 以北, 120~122E, AOD=0.56

24.5N 以南, 120~120.7, AOD=0.69

其他陸地地區: AOD= 0.3

海上地區: AOD= 0.05

通過 AOD 修正後的 DSI 簡稱為 I_{atm} 。

(三)地形效應

複雜地形之上計算 DSI 可區分 3 個分量來討論(圖 2):

1. 直射輻射量 (Dir)/ 此一分量與觀測點鄰近地形有關, 若是太陽高度角小於地形坡度(S)時, 將發生地形遮蔽效應而造成 $Dir = 0$ 。若是太陽高度角大於地形高度角時, 直射輻射量未受到地形遮蔽, 地表的直射輻射量即為通過散射比例因子(R_d)運算而得的大氣直射輻射量($Dir = Dir_{atm}$)。
2. 散射輻射量 (Dif)/ 此一分量的估算相當困難, 主要是因為天空光散射量有很高的異向性, 並且隨著時空有相當大的變異。我們假設天空光散射方向為均向性, 假設天空光散射量與全天空域比例因子 (SVF)成比例關係, SVF 的定義是:

$$SVF = \sum_{i=0}^{359} \sin^2 \left(\frac{H_i \varphi}{160} \right)$$

其中, H_i 是測點當地的各方位角之遮蔽天頂角度 因此測點有顯著地形起伏時, Dif 因應修正為 $SVF \cdot Dif$

3. 地形反射輻射量 (Ref)/ 地面反照率(ρ_g)採用植被資料對照而得, 但地形坡向與坡度起伏與太陽位置造成受輻射面 Ref 具有相當大的時空異向性, 造成模式計算耗時; 由於它對於 DSI 總量的貢獻比例較低, 因此本研究採用 Dozier(1990)概念, 假設反射量為均向性以及僅考慮坡度修正, 得到 $Ref = 2.19 \left(\frac{1+\cos\delta}{2} - SVF \right) \cdot I_{atm} \rho_g$ 。

因此複雜地形上的 DSI 可以下式表示:

$$I_{ground} = Dir + Dif + Ref$$

I_{ground} 為地表總輻射量, Dir 為地表直接輻射量, Dif 為散射輻射量, Ref 為反射輻射量。

2-2 SDEM 資料來源與散射輻射量估算

Haar and Ellis(1987)試著利用繞極衛星資料推算 DSI, 由於資料於時間解析度上的不足, 未能探討 DSI 於一天時間尺度內的變化, 因此本文採用 MTSAT 地球同步衛星資料做為 SDEM 的輸入變數。MTSAT 位於東經 140 度的赤道上空 35,800 公里處, 約每半個小時掃描東亞地區一次。MTSAT 酬載了 4 紅外光波段和 1 個可見光波段的輻射計。紅外光波段星下點的資料解析度為 4 公里; 可見光波段星下點的解析度則為 1 公里, MTSAT 衛星提供本研究穩定且高解析度的資料。

為了估算臺灣地區崎嶇地形對 DSI 分佈的影響, 本研究採用了數位地形模型(DTM)與臺灣土地使用分類資料。DTM 由行政院農業委員會委託林務局 農林航空測量所測量製作, 以 40x40 公尺等間距的網格取樣, 產生之 DTM 資料能提供臺灣地區高度、坡向及坡度。

臺灣土地使用分類資料由國立臺灣大學大氣科學系「雲與氣膠研究室」所提供, 該資料來源為 90 年代臺灣土地利用調查的結果, 由於早期調查資料的結果較不完整, 如遇缺漏的部分, 則由 MODIS 反演資料來補充。得到臺灣地區土地利用的資料後, 再配

合國地理測量(U.S. Geological Survey)土地利用系統(Land use/Land Cover System)所提供之 24 類分類，並利用對照表對應到該網格的地面反照率(ρ_g)。

本研究以 MTSAT 衛星可見光影像 PIXEL 數值做為行星反照率(ρ_{sat})，其代表進入與離開地球的太陽輻射量比例。由於植被資料對照每一格點的地面反照率(ρ_g)為定值，而衛星所提供每一格點行星反照率將隨著太陽天頂角而變動，因此本研究以太陽天頂角餘弦值進行行星反照率的修正，若是修正後的行星反照率大於地面反照率，則模式將網格視為有雲的環境，

$$I_{atm} = I_c \cdot \cos\theta \cdot (1 - \rho_{sat} / \cos\theta) \cdot T$$

反之則是為晴空個案：

$$I_{atm} = T \cdot I_c \cdot \cos\theta$$

通過大氣到達地表上空的 I_{atm} 將由 R_d 區分成散射輻射量(Dif)與直射輻射量(Dir)，以便於進行地形效應的修正。由於散射輻射量的觀測並不普遍，Liu and Jordan (1960)首先提供了散射量與DSI的關係。Renidl et al. (1990)也利用 K_t 與太陽天頂角 θ 兩項變因建立散射輻射量統計模式。本研究根據賴(2003)實地量測的觀測結果，將衛星觀測反照率 ρ_{sat} 、 K_t 以及太陽天頂角 θ 三種參數建立臺灣地區 R_d 的估算式：

$$K_t = \frac{I_g}{I_o \cdot \cos\theta}$$

$$R_d = \frac{Dif}{I_g}$$

$$R_d = \frac{0.9079K_t^{-2.2922}}{0.4649^{-2.2922} + K_t^{-2.2922}}$$

$$\text{when } 0 \leq \rho_{sat} \leq 0.1$$

$$R_d = \frac{0.9280K_t^{-4.9750}}{0.5881^{-4.9750} + K_t^{-4.9750}}$$

$$\text{when } 0.1 < \rho_{sat} \leq 0.2$$

$$R_d = \frac{0.9691K_t^{-3.3004}}{0.6910^{-3.3004} + K_t^{-3.3004}}$$

$$\text{when } 0.2 < \rho_{sat} \leq 1.0$$

三、SDEM 估算地表 DSI 之驗證

本研究採用「衛星之可見光波段反照率是否大於

地面反照率」來決定該格點是否為晴空狀態。臺灣土地使用分類所對照得到中央研究院環境變遷中心(RCEC)台南站和台北站之地面反照率均為 0.15。台南站(圖 3)共有 3619 筆晴空樣本進行比對，比對結果之相關係數為 0.96，RMSE 為 133.6 Wm^{-2} 。台北站(圖 4)晴空樣本數量則有 3699 筆，相關係數為 0.93，RMSE 為 176.6 Wm^{-2} 。有雲個案的驗證方面，台南測站(圖 5)3083 筆樣本數比對結果的相關係數為 0.88，RMSE 為 150.7 Wm^{-2} 。台北測站(圖 6) 4972 筆樣本數量，比對結果之相關係數為 0.81，RMSE 為 167.4 Wm^{-2} 。顯示有雲個案時，SDEM 估算誤差將會增大，我們也發現當量測值小(大)於 600 Wm^{-2} 時，SDEM 會高(低)估。

我們再利用中央氣象局 2006~2007 年 10 個測站地面測站所觀測 DSI 小時累積量資料，探討 SDEM 修正大氣效應和地形效應後的 DSI 估算結果。表 1 整理本研究 SDEM 估算值與氣象局測站比對結果之相關係數，由該表可以發現 SDEM 估算臺灣各地地表 DSI 為可行的方法，北部區域的鞍部與蘇澳測站，以及人為污染較少的阿里山和蘭嶼測站，SDEM 模擬結果也與觀測值稍有出入。

三、 結論

本研究之目標為找出估計臺灣地區 DSI 時空分佈情況的模式(SDEM)。在前人的文獻回顧中發現目前估算方法將太陽輻射傳遞過程中的主要影響因子區分為天文因素、大氣效應和地形效應，並且探討經驗式來進行估算。SDEM 模式中的天文因素，由於變化較具規律性，本研究直接採用前人所建立之方程式。大氣效應部分，因雲霧分佈之不確定性，所以衛星影像做為雲層分佈之參考資料。大氣效應之修正模式上，考量太陽輻射傳遞中的簡單物理過程，將影響因子區分為 AOD 與雲之作用，但由於要描述此兩因子的影響和兩者之間的交互作用有相當大的難度，因此本研究採用了經驗式來簡化問題。地形效應則參考賴彥任(2003)探討地形對直接輻射的遮蔽與全光空域對於天空光散射輻射的影響之研究成果作為地形效應修正之主要架構。整體而言，本研究 SDEM 模式引用 AOD 加入大氣透射率的估算，造成晴空 DSI 的估算有相當

高的可信度；有雲的 DSI 估算仍有改善空間，僅靠 MTSAT 衛星可見光波段影像資料仍不足以描述大氣中「雲」的輻射衰減效應。SDEM 估算值與中央氣象局地面測站觀測之 DSI 小時累積量比對，在低海拔的測站之相關係數可超過 0.9，高海拔的測站雖然因為衛星影像辨識霧的能力不佳，但 SDEM 估算值與高海拔測站比對結果之相關係數仍有 0.8 以上。

四、 參考文獻

- 林和駿,2002:春季臺灣地區懸浮微粒之短波輻射效應, 臺灣大學大氣所碩士論文.
- 陳詠昌,2004:臺灣地區衛星觀測及地面觀測之懸浮微粒光學特性,臺灣大學大氣所碩士論文.
- 曾忠一,1988,大氣衛星遙測學,渤海堂出版社,pp630。
- 賴彥任,2003:集水區內太陽輻射量時空分佈估算之研究,臺灣大學森林所博士論文.
- Jou, M. D., P. H. Lin, P. L. Ma and H. J. Lin, 2006: Effects of aerosols on the surface solar radiation in a tropical urban area, *J. Geophys. Res.* **111**, D15207, doi: 10.1029/2005JD006910.
- Haar, V. T. H., and J. S. Ellis, 1987: Determination of the solar energy microclimate of the United States using satellite data, Final Report, NASA Grant NAS5-22372, Colorado State University.
- Cooper, P. I., 1969: The absorption of solar radiation in solar stills, *Solar Energy*, **12**, 333-346.
- Dozier, J., and J. Frew., 1990: Rapid calculations of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data , *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **28**, 963-969.
- Duffie, J. A. and W. A. Beckman, 1980: Solar engineering of thermal processes, Wiley, New York, pp762.
- Frohlich C., and R.W. Brusa, 1981: Solar radiation and its variation in time ,*Sol. Phys.* **74**, 209-215.
- Liou, K. N., 2002: An Introduction to Atmospheric Radiation, 2nd ed., Academic, San Diego, Calif., pp583.
- Liu B.Y.H. and Jordan R.C., 1960: The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, *Solar Energy*, **4**, 1-19.
- Riendl, D. T., Beckman, W. A. and Duffie, J. A., 1990: Diffuse fraction correlations, *Solar Energy*, **45**, 1-7.

表 1：2006 年至 2007 年估算值與中央氣象局屬測站比對結果

站名	線性迴歸式	相關係數
宜蘭	Y=1.02X	0.94
台東	Y=0.90X	0.94
大武	Y=0.99X	0.93
台北	Y=1.01X	0.92
恆春	Y=1.01X	0.92
基隆	Y=0.98X	0.91
蘭嶼	Y=1.07X	0.87
鞍部	Y=0.80X	0.86
蘇澳	Y=0.96X	0.84
阿里山	Y=0.80X	0.81

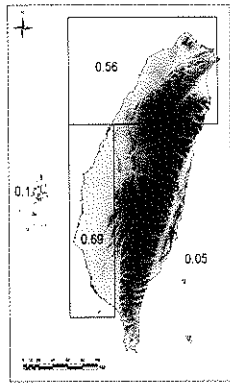


圖 1：臺灣地區氣膠光學厚度空間分布

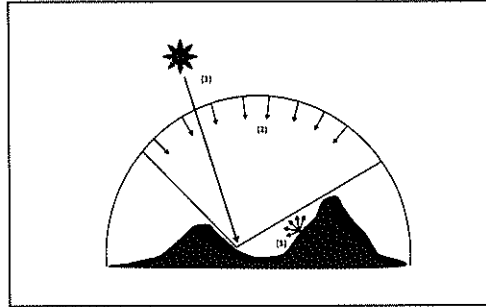


圖 2：坡地上三種不同輻射光來源：1.直射輻射量；2.天空光散射量；3.坡地附近區近物體之反射和散射

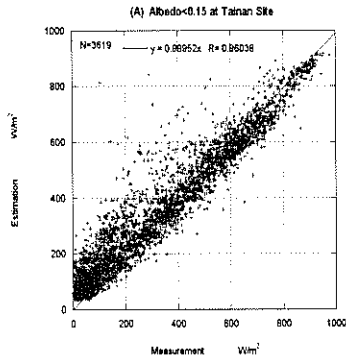


圖 3：RCEC 台南測站利用衛星資料定義之晴空個案得比對散佈圖，相關係數為 0.96。

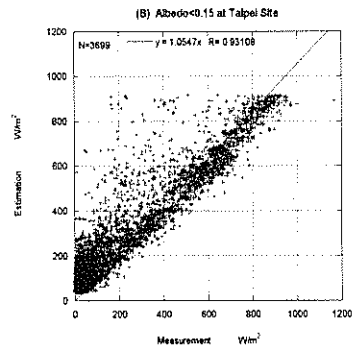


圖 4：RCEC 台北測站利用衛星資料定義之晴空個案得比對散佈圖，相關係數為 0.93。

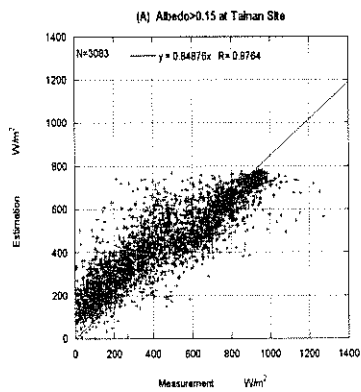


圖 5：RCEC 台南測站利用衛星資料定義之有雲個案得比對散佈圖，相關係數為 0.88。

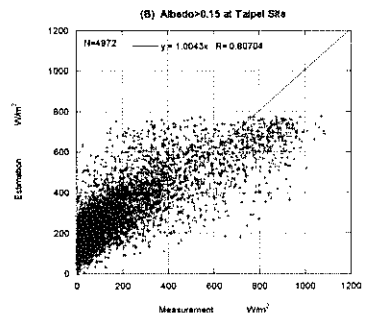


圖 6：RCEC 台北測站利用衛星資料定義之有雲個案得比對散佈圖，相關係數為 0.81。

