

到達地面太陽輻射量之空間分布推估模擬

賴彥任¹

台灣大學實驗林管理處¹

林博雄²

台灣大學大氣科學系²

摘要

太陽輻射為生態系之主要能量來源，影響並控制著植群分佈，在生態系研究常將其視為主要變數之一。台灣山區因地形起伏變化劇烈，對於太陽輻射的遮蔽有著相當大的影響，然而許多研究人員經常將研究區域假定在平坦且無遮蔽的環境，卻忽略了周遭地形對太陽輻射量所可能造成的遮蔽減光效應；整合地理資訊系統，並利用數值地形模型進行相關演算模式已經發展且加以驗證(賴彥任,2003)。

本研究以台灣地區地理資訊系統為基礎，應用中央氣象局與空軍於板橋、馬公、屏東、綠島及花蓮之月平均汽球探空大氣剖面資料，以及 NASA/CLIRAD-SW 輻射傳遞模式所發展的地表太陽輻射傳遞模式，考慮地形遮蔽進行演算，來推估台灣島上到達地面逐月太陽輻射日累積量圖層。研究顯示海拔、坡度坡向、地形遮蔽、全天光空域等地形因子均為太陽輻射量之有效影響因子，於研究尺度之網格小於 5000m 時應被納入考慮。

關鍵字：氣球探空、太陽輻射量、地形效應

一、前言

在複雜的物理環境因子中，太陽輻射為生態系之主要能量來源，為生態環境研究上之有效變數，亦為整體生態系能量、養分循環及食物鏈關係之影響機制，因此如何掌握空間性太陽輻射能的變化為生態系能量等研究的重點(夏禹九等,1992；Rich et al.,1995；陳朝圳,1997)。事實上，地球表面的能量來源有 99.8% 來自太陽(Dickinson and Cheremisnoff,1980)，太陽輻射除了為一切生物能量來源外，且控制生育地之大氣候及局部氣候，舉凡水文循環的過程、土壤溫度、土壤熱收支等均受其影響與控制。水文循環的根源來自於太陽能量所促使的蒸發與蒸散現象，森林由於太陽照射，接收輻射能有蒸發和蒸散情形，隨之而有水文循環，因此當森林能廣泛的分佈時，陸地所接收的太陽輻射能將有許多能量以蒸發和蒸散方式轉換，此現象可緩和近地球表面的環境溫度，與海水面蒸發所造成的效果蠻相像的。此外，森林亦因光合作用而有質能互換現象，而成為良好的生產環境，經食物鏈而造就了無數生物生存之可能性。鑑於水文學中蒸發散機制之研究結果(賴彥任,1996)得知，要推估蒸發散量需不少氣象資料，而太陽輻射量在其中更扮演著絕對之影響因子。

若細究到達地面的太陽輻射量來源，可分為直射輻射量(direct irradiance)及漫射輻射量(diffuse irradiance)兩種，其中漫射輻射量若在地形起伏劇烈的山區，則必須再細分為天空光輻射量(sky light irradiance)和周遭地形反射量(terrestrial reflected

irradiance)。綜觀太陽輻射傳遞過程中的影響因子，有隨地球公轉與自轉的天文因素，還有大氣成分的吸收、散射與反射等的大氣效應，最後則有地形起伏所造成的地形效應與地被性質的反照率等。這些因子與太陽輻射量的各貢獻量間，更有其個別的影響特性需被考量。

蘇鴻傑(1987)指出理論輻射量若不考慮天候及地形之屏蔽，地球表面任一點之輻射量，實可由當地緯度、方位及坡度之值，加入一系列天文常數之計算而得。Kaempfert(1966)曾在溫帶地區分析太陽輻射量之變異，在台灣亦有學者進行理論太陽輻射量之計算(夏禹九、王文賢,1985)。以北半球而言，最大之勢能輻射量(potential radiation)發生在南向山坡，而最小者在北向坡，在同一緯度及方位，測點之坡度亦影響接收太陽輻射量之大小。

誠如上述，太陽輻射能為地球能量的主要來源，因此永久性的氣象測站皆有太陽輻射儀器的架設，做為各領域研究的參考數據。然而氣象測站的設置與維護費用昂貴，且僅能偵測單點的氣候狀況，無法顧及整個地面的變化狀況。在台灣地形起伏十分劇烈下，是否可將監測結果直接適用於集水區各處，確實值得商榷。本研究以台灣地區地理資訊系統為基礎，應用中央氣象局與空軍於板橋、馬公、屏東、綠島及花蓮之月平均汽球探空大氣剖面資料，以及 NASA/CLIRAD-SW 輻射傳遞模式所發展的地表太陽

輻射傳遞模式，考慮地形遮蔽進行演算，來推估台灣島上到達地面太陽輻射量的逐月圖層，最後針對地形效應所造成的影響進行探討。

二、前人研究

太陽輻射從太陽釋出起，約 8 分 20 秒到達地球大氣層外，再經大氣層，然後到達地球表面，期間經歷多項因子影響，使太陽輻射量發生質與量兩方面的變化，傳遞概念如圖 1。

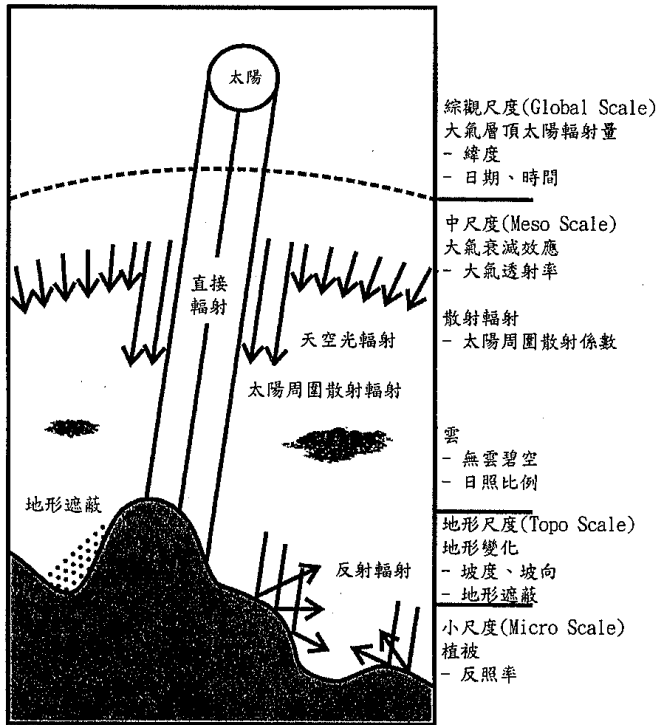


圖 1 太陽輻射傳遞至地球表面之影響因子概念圖 (修改自 McKenney, 1999; Mullen, 1996)

綜合來看，地球接收之太陽輻射量，受下列因素影響(黃文雄，1968):

1. 天文因素
 - A. 地球—太陽距離。
 - B. 太陽赤緯(declination)(太陽入射線與赤道面之夾角)。
 - C. 時角(hour angle)(地球自轉每小時 15°)。
2. 地理因素
 - A. 緯度及經度。
 - B. 海拔高度。
3. 幾何因素
 - A. 太陽高度角及赤緯。
 - B. 受輻射面之周遭地形遮蔽效應。
 - C. 受輻射面之傾斜度。
 - D. 受輻射面之方位。
4. 物理因素
 - A. 大氣之衰減(吸收、反射、散射等)。
 - B. 受輻射面之表面性質(表面之物理化學性質)。

就輻射自太陽傳輸到地球地面的路徑，其影響因子，可歸類於：

1. 太陽至地球大氣層外的天文因素。
2. 大氣層外至地球表面的大氣效應。
3. 地形起伏的地形效應。
4. 地表受輻射面的表面性質因素。

其中天文因素、大氣效應及地表受輻射面歷年來已有許多學者進行相關研究(Ineichen and Perez, 1990; Liu and Jordan, 1960; Osozawa and Tateishi, 2002; Dozier and Frew, 1990; Dubayah, 1994; Kimes *et al.*, 1980; Fouquart *et al.*, 1991); 相對而言，地形雖為影響地球表面上任一點接收日射量之主要因子(Rich *et al.*, 1995)，高程、坡度、坡向、陰影遮蔽等對太陽輻射的影響已被提出多年，但直到近幾年才有辦法具體模擬並量化。其受限原因為：(1)關係式相當複雜，(2)缺乏關係式中所需資料，(3)缺乏適當模式。由於 GIS 的發展，配合高速電腦的運算，為此方面的研究帶來突破的契機(Dubayah and Rich, 1995)。

根據第三次森林資源調查，森林佔台灣省面積的 58.53% (林務局，1995)，且多位於山區，地形起伏量十分大。因此，地形效應對地面接收之日射量有著相當大的影響。以往曾以周遭山脊所在處，利用人工或電腦演算其方位角及高度角，進而求取全天空空域(夏禹九、王文賢, 1985; 陳朝川, 1997)。謝漢欽(1997)認為直接輻射量的影響大於天空空輻射量，其對於生育地的乾、濕及植物生長亦是一具關鍵影響因子，故於研究中以周遭 12 個樣區計算 16 個方位的全天空空域，以瞭解太陽輻射在生態系所扮演的角色。地形遮蔽對於太陽輻射量的影響(圖 2)將因局部的地形遮蔽而不同。因此，雖然理論上太陽輻射可直接照射到集水區中的任一點，但周圍地形地物的遮蔽影響，都會造成地面實際接收之太陽輻射無法達到理論值。

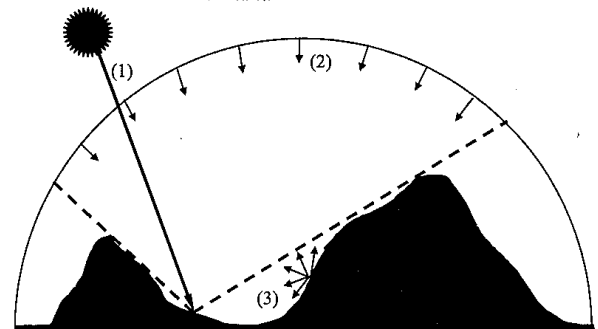


圖 2 太陽行徑軌跡與地形關係示意圖(在一坡地上有三種不同輻射光來源(1)太陽直接輻射，(2)大氣漫射輻射，(3)坡地附近區域物體之反射和漫射) (Dubayah and Rich, 1995)

三、研究方法

本研究利用已發展之方程式對天文因素進行修正，另以 NASA/CLIRAD-SW 輻射傳遞模式所發展的太陽輻射傳遞模式進行大氣效應修正，再利用全天空比例因子及數位地形模式推算之地形遮蔽角度進行地形效應修正，最後

估算到達地表或冠層的太陽輻射量。整個演算模式乃利用 Delphi 語言進行開發，主要估算方式分述如下：

(一) 天文因素

太陽常數(solar constant)採用 Frohlich and Brusa (1981) 經過仔細研究 8 種觀測資料後的建議值，屬於國際公認的太陽常數 1367 W/m^2 為基準，再以 Duffie and Beckman(1980) 提出的方程式進行太陽常數年間變動修正。

太陽入射線與赤道面夾角隨著地球公轉而呈年間週期性變動之太陽赤緯(declination)則採用 Cooper(1969) 提出的方程式進行演算。

地球上任意時刻任意地點任意時刻的太陽天頂角(solar zenith angle)、方位角(solar azimuth angle)，則可由地理緯度(Latitude)、太陽赤緯及時角(hour angle)之關係式由球面三角公式推導而得(曾忠一,1988)。

本研究首先計算每日日出及日落時刻，再以 6 分鐘為間隔演算太陽軌跡之天頂角及方位角，用以進行太陽輻射傳遞演算，最後輸出太陽輻射日累積量圖層。

(二) 大氣效應

研究中採用之 CLIRAD-SW 輻射傳遞模式係由美國航空暨太空總署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)所發展，模式考慮了水汽、臭氧、氧氣、二氧化碳、雲及氣溶膠等吸收效應；亦考慮雲、氣溶膠與分子等吸收與散射效應之影響，進而輸出 0.175 至 $10 \mu\text{m}$ 波長之直接輻射量及漫射輻射量(Chou and Suarea, 1999)。

本研究應用中央氣象局與空軍於板橋、馬公、屏東、綠島及花蓮之月平均氣球探空大氣剖面水氣資料(官與林, 2005)，並以現有縣市界合併為 5 大區域，分別採用鄰近探空資料做為模擬基礎(圖 3)。臭氧、氧氣、二氧化碳、雲及氣溶膠等參數則採用模式所附之標準值進行模擬，由於模式中並無考慮雲霧之影響，本研究模擬結果可視為晴空條件受地形效應影響下之勢能太陽輻射入射量(potential global radiation)。

(三) 地形效應

在地形效應之直接輻射遮蔽與全天空空域(Whole light sky space)部分，乃利用 40m 網格大小之台灣數值地形模型(Digital Terrain Model)進行網格高程比對，求算出每一網格於各方位角之遮蔽天頂角(H_ϕ)，此部分之演算為耗時最久，以目前桌上型電腦仍無法進行完全比對，因此本研究利用標準大氣剖面進行太陽輻射量模擬，再評估海拔為 0m 受 1000 個網格遠(水平距離 40000m)之玉山網格(3941m)遮蔽天頂角為 85.6 度下，直接輻射量 12.56W/m^2 為地形遮蔽演算下之最大理論誤差，此值仍在本研究可接受之範圍之內，因此權衡電腦演算時間後，將以 1000 個網格為地形遮蔽演算半徑範圍。以 3.2GHz 桌上型電腦演算時間共約 17 天，演算程式可依方位角由多台電腦同時演算以節省時間，對同一區域而言僅需演算一次即可。另利用各方位角的遮蔽天頂角可另求得網格之全天空空域比例因子(Skyview factor, SVF)，全天空空域計算方式如下(賴彥任,2003)：

$$SVF = \sin^2 \left(\sum_{i=1}^{360} \frac{H_{\phi i}}{360} \right)$$

到達地表或冠層的太陽輻射量(I_g)應包含直接輻射量(Dir)、天空光輻射量(Dif)以及周遭地形反射輻射量(Ref)。由於周遭地形反射輻射量相對量較小(Iqbal, 1983; Dingman, 1994; Fu and Rich, 2000)，本研究先予以忽略。若受輻射面為水平向上，則太陽輻射量為：

$$I_g = Dir + Dif$$

若受輻射面為斜坡，由於數值地形模型之網格為投影面積，應依網格之坡度(S)轉換為坡面面積以為受輻射面演算基準，則太陽輻射量為：

$$I_g = (Dir + Dif) \cdot \frac{1}{\cos S}$$

地形效應對直接輻射量主要為遮蔽之影響，因此估算時，需先計算出瞬時的太陽天頂角(θ)和方位角，再與地形遮蔽之天頂角進行比對，當太陽未被地形所遮蔽時，才有直接輻射量。若不考慮坡度與坡向影響則直接輻射量計算條件式：

$$\text{if } \theta < H_\phi \text{ then } Dir = Dir_{CLIRAD} \text{ else } Dir = 0$$

於實際集水區內，受輻射面因有坡度(S)與坡向(ϕ_n)之差異。直接輻射量計算條件式：

$$\text{if } \theta < H_\phi \text{ then } Dir = Dir_{CLIRAD} \cdot \frac{\cos \theta_T}{\cos \theta} \text{ else}$$

$$Dir = 0$$

其中相對受輻射面之太陽天頂角(θ_T)為：

$$\cos \theta_T = \sin S \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) + \cos S \cos \theta$$

若 $\theta_T < 0$ ，代表相對於受輻射面之太陽天頂角大於 90 度，將產生網格自我遮蔽情形(Self-Shading)，亦即直接輻射無法到達受輻射面，因此：

$$\text{if } \cos \theta_T < 0 \text{ then } Dir = 0$$

在天空光輻射部分，假設天空光為均向性且不受輻射面表面特性而有差異，則天空光輻射量因受地形效應所產生形成的全天空空域大小而異，此部分以全天空比例因子(SVF)為權重進行修正(Dozier and Frew,1990; 賴彥任,2003)。則到達地面之天空光輻射量：

$$Dif = SVF \cdot Dif_{CLIRAD}$$

四、結果與討論

(一) 地形參數敏感度分析

對於海拔、坡度坡向、地形遮蔽、全天空空域等地形因子在整個模式中所佔影響比例應首先被瞭解，因此針對各因子進行逐一演算分析，結果如表 1。

結果顯示，考慮海拔因子後，隨著海拔升高，大氣效應影響路徑隨之縮短，6 月太陽日輻射量全島平均值將增加 5.82% ，12 月將增加 6.57% 。坡度坡向相對於太陽運行軌跡，會有自我遮蔽效應，因此 6 月及 12 月太陽輻射日累積量分別減少 7.29% 及 5.35% ，然

而若再依坡度修正坡面面積，則 6 月及 12 月太陽輻射日累積量將反而增加 2.52% 及 5.06%；由於隨著坡度的增加，網格內的坡面面積隨之增大，意味著受輻射面的增加，因此全島最大值(表 1 之 Para_D)於 6 月及 12 月相較於僅考慮海拔(表 1 之 Para_B)之值分別增大 2.5 倍($93.87/37.59=2.5$)及 9 倍($197.36/21.9=9$)。若僅考慮地形遮蔽直接輻射效應，則 6 月及 12 月將分別減少 3.69% 及 10.17%，12 月由於太陽天頂角較大，因此地形遮蔽直接輻射效應特別明顯。全天光空域比例因子為地形遮蔽對於天空光輻射影響之修正因子，雖然在表 1 中顯現 6 月及 12 月僅減少 0.57% 及 0.70%，相較於其他因子並不算高，但這乃是因為本次模擬情況為晴空條件，若以全天光空域比例因子全島平均值為 0.93 看，對於天空光輻射量將有減少 7% 之影響，異言之，在無直接輻射之陰天時，全天光空域比例因子將成為主要影響因子。

就太陽輻射傳遞理論而言，若視全島為單一網格進行演算，則於任何時刻之太陽輻射量應與考量地形因子影響後全島平均值極接近，此一理論值可做為地形因子考慮是否完全以及模式演算有無錯誤之驗證。表 1 之 Para_G 為考慮上述所有地形因子之模擬結果，對於全島而言，相較於 Para_A 呈現增加情形，然與 Para_B 幾乎一致，亦即增加的部分來自海拔的升高導致大氣效應影響路徑縮短；其他地形因子之正負效應確實互相抵銷，然而標準偏差、最大值與最小值卻因地形而有空間上戲劇性變異。

以全島大型集水區來分析，由於雪山山脈與中央山脈的遮蔽，集水區屬偏北向坡者，於 12 月多呈現太陽輻射量減少的情形，另於東海岸之部分集水區則呈現增加情形(如圖 4)。

(二) 網格大小敏感度分析

數值地形模型之網格大小攸關研究區域地形起伏擬真情形，可預期網格愈小則愈接近真實情況，對太陽輻射之遮蔽效應將愈能真實反映出來。對於大氣環流模式(GCMs)而言，網格大小動則數百公里，台灣島甚至無任何模擬資料點存在；另就區域大氣模式看，台灣區域目前發展至 15Km 之網格大小。若想研究更小尺度之影響時，通常就需要利用尺度縮小(Downscaling)技術進行內差至研究網格大小，再行分析。

表 2 為本研究利用 40m 數值地形模型均化地形起伏情形，放大網格大小直至 15000m，重複演算全島太陽輻射量之統計表。結果顯示 12 月之全島太陽輻射量標準偏差值相對於平均值在網格小於 5000m 時，隨網格縮小而上升，顯現網格愈小愈能表現出地形遮蔽效應；反之，網格大於 5000m 時，標準偏差值幾無改變，顯示網格大小已逐漸無法反應地形效應。此結果亦說明研究網格小於 5000m 時，模擬太陽輻射量應考量地形影響；反之，則可考慮忽略。以此結果推演考量氣溫空間分佈，除了緯度與海拔為目前可掌握之因子外，坡度、坡向等

其他地形因子是否也為有效因子仍值得未來探討。

(三) 逐月太陽輻射入射量分佈探討

若以逐月平均值來看年間全島太陽輻射量的變動情形(圖 5)，確實如預期般隨著地球公轉所造成之太陽赤緯變化而呈現三角函數變動曲線，然而若將資料依坡向切割來看，由於太陽運行軌跡與地形坡度坡向間的交互關係，使南向坡(方位角 $135^\circ \sim 215^\circ$)與北向坡(方位角 $0^\circ \sim 45^\circ$; $315^\circ \sim 359^\circ$)之逐月變化量有明顯空間變異，尤以夏季 5~7 月之北向坡甚至高於南向坡，此結果異於一般人於微氣候上普遍的認知，此現象若細究理論式應不足為奇，然似乎很少被提起。由於坡向不同，坡面之太陽輻射入射量不同，可能形成強烈的土壤溫度對比，進而影響山區氣溫和氣流的分布，對於植物之蒸發散量更有舉足輕重的影響。

若以植物物候觀點，影響植物生理的太陽輻射相關因子包含太陽輻射光譜分佈、太陽輻射量以及日照時數等三項，本研究僅針對太陽輻射量受地形效應之影響進行修正與探討，CLIRAD-SW 輻射傳遞模式可分別輸出紫外光($0.175\sim 0.4\mu\text{m}$)、可見光($0.4\sim 0.7\mu\text{m}$)及紅外光($0.7\sim 10\mu\text{m}$)等波段之直接輻射量與天空光輻射量，而直接輻射量的輸出另可換算日照時數，因此未來仍可進一步分析太陽輻射光譜分佈、太陽輻射量以及日照時數等三項於台灣島內分佈情形，並與台灣植群分佈情形進行探討。

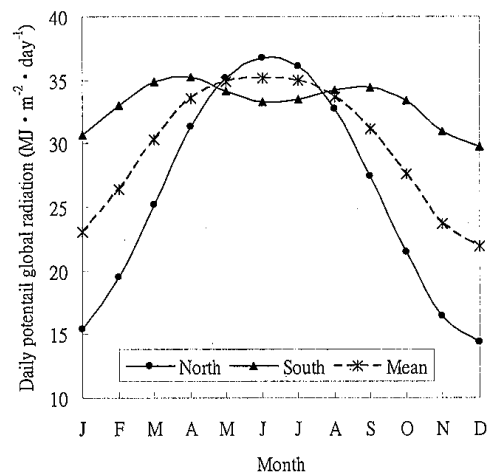


圖 5 全島南向坡及北向坡逐月太陽輻射日累積量平均值

五、結論

研究顯示海拔、坡度坡向、地形遮蔽、全天光空域等地形因子均為太陽輻射量之有效影響因子，於研究尺度之網格小於 5000m 時應被納入考慮。於 5~7 月北向坡太陽輻射量大於南向坡的現象，此段時間正好是植物生長季節，是否對植群分佈有所影響，未來應進一步探討；本研究輸出之全島逐月勢能太陽輻射日累積量分佈圖(圖 6)仍可提供氣象、水文及物候相關

研究參考使用。由於日本 MTSAT-1R 氣象衛星已正式運作，未來將運用以往利用 GMS-5 氣象衛星獲取大氣參數之模式 (賴彥任, 2003)，希能演算出全島逐時實際太陽輻射量圖層，以供相關研究使用。

六、參考文獻

1. 林務局 1995: 第三次臺灣森林資源及土地利用調查。
2. 官代緯、林博雄, 2005 台灣地區低層大氣探空剖面分析 94 天氣分析與預報研討會, 中央氣象局, 台北。
3. 夏禹九、王文賢, 1985: 坡地日輻射潛能的計算 林業試驗所試驗簡報第 1 號
4. 夏禹九、黃良鑫、王立志、黃正良, 1992: 不同森林植被之淨輻射能與日輻射能關係 林業試驗所研究報告季刊 7(4):371~374.
5. 陳朝圳, 1997: 數值高程模型應用於日輻射潛能之推估—以大武山自然保留區為例 中華林學季刊 30(1):93~104 36.
6. 曾忠一, 1988: 大氣輻射 聯經出版社 pp.63~77
7. 黃文雄, 1968: 太陽能之應用及理論 協志工業叢書 pp.22~58
8. 賴彥任, 1996: 高爾夫球場草生地水文收支之研究 碩士論文
9. 賴彥任, 2003: 集水區內太陽輻射量時空分佈估算之研究 國立台灣大學森林所博士論文
10. 謝漢欽, 1997: 應用數值地形資料推導福山地區森林生育地因子 台灣林業科學 12(1):1-14
11. 蘇鴻傑, 1987: 森林生育因子及其定量評估 中華林學季刊 20(1):1~14
12. Chou, M. D., and M. J. Suarez, 1999: A shortwave radiation parameterization for atmospheric studies. Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, 15, NASA/TM-1999-104606. pp1-42.
13. Cooper P.I., 1969: The absorption of solar radiation in solar stills. Solar Energy 12:333-346.
14. Dickinson W. C., and P. N. Cheremisinoff, 1980: Solar Energy Technology Handbook (London: Butterworths)
15. Dingman, S.L., 1994: Physical hydrology. Macmillan Publishing Co., New York.
16. Dozier J. and J. Frew, 1990: Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 28(5):963~969.
17. Dubayah R.C., 1994: Modeling a solar radiation topoclimatology for the Rio Grande River Basin. Journal of Vegetation Science 5:627-640.
18. Dubayah R.C. and P.M. Rich, 1995: Topographic solar radiation models for GIS. Int. J. Geographical Information Systems, 9(4):405-419.
19. Duffie J. A. and W. A. Beckman, 1980: Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley, New York, pp.762.
20. Foucart, Y., B. Bonnel and V. Ramaswamy, 1991: Intercomparing shortwave radiation codes for climate studies.

J. Geophys. Res., 96, 8955-8968.

21. Frohlich C., and R.W. Brusa, 1981: Solar radiation and its variation in time. Sol. Phys. 74:209-215.
22. Fu, P., and Rich, P.M., 2000: The Solar Analyst user manual. Helios Environment Modeling Institute, Los Alamos, N.M.
23. Ineichen P., O. Guisan and R. Perez, 1990: Ground-reflected radiation and albedo. Solar Energy 44(4):207-214.
24. Iqbal, M., 1983: An introduction to solar radiation. Academic Press, Toronto Ont.
25. Kasten F. 1966: A new table and approximate formula for relative optical air mass. Arch.
25. Kimes D. S., J. A. Smith and K. J. Ranson, 1980: Vegetation reflectance measurements as a function of solar zenith angle. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 46(12):1563~1573.
26. Liu B.Y.H. and R.C. Jordan, 1960: The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation. Solar Energy 4:1-19.
27. Osozawa J., H. Kano and R. Tateishi, 2002: Estimation of solar radiation using GMS and DEM data for determination of suitable agricultural land. Asian Conference on Remote Sensing 2002.
28. Rich P.M., W.A. Hetrick and S.C. Saving, 1995: Modeling topographic influences on solar radiation: a manual for the Solar flux model. Los Alamos National Laboratory Report LA-12989-M.

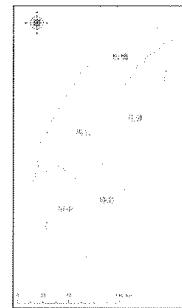


圖 3 大氣剖面水氣資料採用分區圖

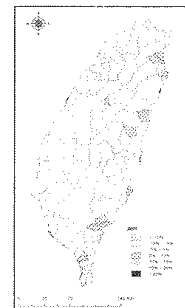
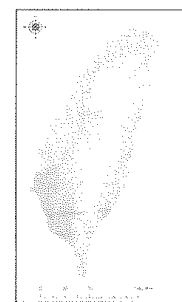
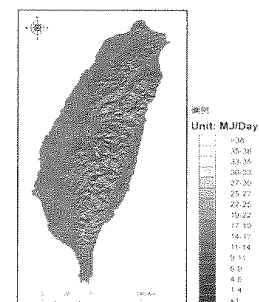


圖 4 12 月全島太陽輻射因地形效應差異分佈圖(相較於僅考慮海拔因子)



6 月



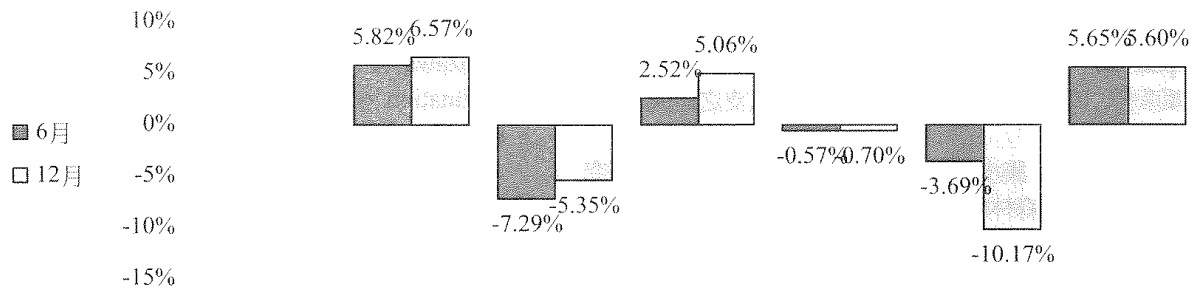
12 月

圖 6 全島太陽輻射分佈圖

表1 地形效應對全島太陽輻射入射量影響之敏感度分析

| Name | Para_A | Para_B | Para_C | Para_D | Para_E | Para_F | Para_G |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 地球公自轉 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 海拔 | | ● | | | | | ● |
| 坡度、坡向 | | | ● | ● | | | ● |
| 全天光空域比例因子 | | | | | ● | | ● |
| 地形遮蔽直接輻射 | | | | | | ● | ● |
| 坡面坡長修正 | | | | ● | | | ● |
| 6月全島平均值 | 30.06 | 31.81 | 27.87 | 30.82 | 29.89 | 28.95 | 31.76 |
| 12月全島平均值 | 17.21 | 18.34 | 16.29 | 18.08 | 17.09 | 15.46 | 18.17 |
| 6月全島標準偏差 | 0.16 | 1.84 | 2.66 | 1.95 | 0.23 | 1.36 | 2.93 |
| 12月全島標準偏差 | 0.31 | 1.21 | 5.44 | 6.93 | 0.33 | 2.94 | 7.94 |
| 6月全島最小值 | 29.7 | 29.7 | 4.01 | 24.76 | 27.61 | 8.27 | 7.18 |
| 12月全島最小值 | 16.55 | 16.56 | 1.7 | 2.28 | 15.31 | 1.7 | 0.06 |
| 6月全島最大值 | 30 | 37.59 | 30.65 | 93.87 | 30.32 | 30.32 | 101.3 |
| 12月全島最大值 | 18.08 | 21.9 | 27.76 | 197.36 | 18.08 | 18.08 | 186.16 |

全島平均值相較於 Para_A

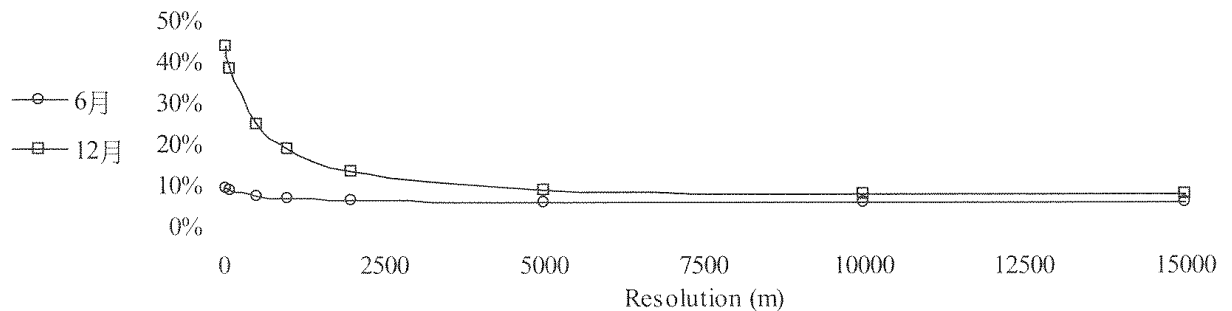


* 單位：MJ · m⁻² · day⁻¹

表2 網格大小對全島太陽輻射入射量影響之敏感度分析

| 網格大小(m) | 40 | 100 | 500 | 1000 | 2000 | 5000 | 10000 | 15000 |
|-----------|----------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 全島網格數 | 22457549 | 3593218 | 143705 | 35921 | 8987 | 1440 | 360 | 158 |
| 6月全島平均值 | 31.76 | 31.80 | 31.78 | 31.79 | 31.81 | 31.81 | 31.78 | 31.76 |
| 12月全島平均值 | 18.17 | 18.26 | 18.27 | 18.28 | 18.30 | 18.30 | 18.28 | 18.25 |
| 6月全島標準偏差 | 2.93 | 2.67 | 2.17 | 2.01 | 1.90 | 1.81 | 1.77 | 1.75 |
| 12月全島標準偏差 | 7.94 | 6.95 | 4.48 | 3.34 | 2.38 | 1.60 | 1.40 | 1.35 |
| 6月全島最小值 | 7.18 | 19.40 | 25.84 | 28.27 | 29.60 | 29.69 | 29.72 | 29.81 |
| 12月全島最小值 | 0.06 | 0.63 | 1.46 | 5.85 | 11.27 | 15.43 | 16.26 | 16.42 |
| 6月全島最大值 | 101.3 | 59.49 | 41.96 | 39.89 | 38.58 | 36.95 | 36.40 | 35.89 |
| 12月全島最大值 | 186.16 | 84.13 | 44.83 | 36.85 | 30.38 | 25.14 | 21.95 | 21.50 |

全島標準偏差相較於平均值



* 單位：MJ · m⁻² · day⁻¹