

中央氣象局110年天氣分析與預報研討會

利用向日葵8號衛星及單層輻射傳送模式反演地面輻射量

張哲維¹ (Chang C.-W.) 王聖翔² (Wang S.-H.) 李育棋³ (Lee Y.-C.) 林昆緯⁴ (Lin K.-W.) 鄭光浩⁵
(Cheng K.-H.) 葉子嫻⁶ (Yeh T.-Y.)
國立中央大學^{1,2} 交通部中央氣象局^{3,4} 中央氣象局衛星中心^{5,6}

摘 要

在本研究中，我們使用向日葵8號衛星(Himawari-8, H8)十分鐘解析度的資料以及應用單層輻射傳送模式反演高時間解析度的全天空輻射量(global horizontal irradiance, GHI)資料。本研究的模式中考慮了氣膠、臭氧、水氣、氣體及雲對輻射量的吸收及散射效應，並利用了地面觀測GHI資料及衛星資料透過經驗公式來建立太陽輻射波段及衛星波段之間的關係。同時也利用晴空判斷法及晴空指數將天空條件分為晴空條件、部分晴空條件及多雲條件，並以此改進模式結果之精確度。本研究選擇中央氣象局嘉義氣象站2018年1月1日至2018年4月12日之資料作為研究站點及研究時間，利用1月1日至2月28日建立太陽輻射波段及衛星波段之間的線性關係，而後反演3月1日至4月12日之地面輻射量，最後與氣象局地面氣候自動觀測系統(Automatic Climate Observation System, ACOS)之地面輻射量觀測資料進行誤差分析並探討模式之反演表現。結果顯示，晴空下的rMBE(相對平均偏差)、rRMSE(相對均方根誤差)及 r^2 (判定係數)為-1.7%、6.8%及0.98，非晴空下的rMBE、rRMSE及 r^2 為-5.9%、22.7%及0.84，模式在晴空下有極佳的表現。在反演策略中，吾人採用將天空條件分為晴空、部分晴空及多雲分別進行模式反演，整體表現的rMBE、rRMSE及 r^2 為-5.1%、20.5%及0.86，相較於沒有使用天空條件判斷下的結果(rMBE、rRMSE及 r^2 為-7.9%、22.7%及0.84)有較佳的表現。為了能夠與氣象局衛星反演產品比對，進一步將ACOS地面觀測GHI與本研究反演之GHI的時間解析度(分別為一分鐘及十分鐘)皆平均至一小時，與平均後的ACOS地面觀測進行誤差分析後，結果顯示本研究反演之GHI平均後的rMBE、rRMSE及 r^2 為-6.2%、14.3%及0.92，而氣象局所衛星反演之GHI產品的rMBE、rRMSE及 r^2 為-1.5%、11.2%及0.94，可以發現本研究模式結果能與氣象局衛星產品相近。最後進一步評估本反演法的時空適用性，吾人發現反演輻射量的地點若距離模式中建立線性關係式的地點越遠，模式反演之輻射量的誤差也會隨之增加，因此若能定義出台灣各個氣象觀測站代表的影響範圍，便能針對不同區域建立不同的線性回歸式以完成更大範圍的地面輻射量反演。

關鍵字：向日葵8號衛星，全天空輻射量

一、前言

近年來全球氣候變遷越發明顯，極端氣候事件頻率增加，從觀測資料、理論依據及數值模式等科學證據皆指出，人類活動產生的氣膠及溫室氣體造成大氣及地表之太陽短波輻射及長波輻射通量的變化，改變地球輻射量的收支，進而對環境造成衝擊(IPCC, 2013)。在臺灣，中央氣象局的太陽輻射量觀測已持續超過30年，然而因為氣象站站點在地理上的不連續性，沒有架設氣象站之地區的輻射量難以較準確的估計，然而衛星觀測可以連續且大範圍的觀測，因此希望可以結合地面觀測的準確度以及衛星觀測在空間上的優勢來反演未架設氣象站之地區的太陽輻射量，進而提供太陽能業者驗證電廠發電量。太陽能板在發電的過程中很容易受到外在因素影響，例如：太陽位置、雲、落塵、野生動物...等，除了太陽以外最主要的影響便來自雲，雲的多寡、高度、類型甚至

是雲的移動速度(Lave and Kleissl, 2013)，因此若能對於雲有進一步的掌握便可以增進模式反演的精準度。Yao (2017)提出一種利用衛星觀測及地面資料反演地面輻射量之反演法，首先利用衛星波段與太陽波段間瑞利散射(Rayleigh scattering)及雲反射量建立地面觀測與衛星觀測之線性關係，後續便以此線性關係反演地面輻射量，本研究以此方法為基礎結合天空條件(晴空條件、部分晴空條件及多雲條件)判斷嘗試改進此方法之反演結果。

二、研究方法

地面觀測具有高時間解析度及準確的特性，且可以有效的呈現局部地區之氣象參數變化。本研究使用到之地面觀測資料有氣象局的地面氣候自動觀測系統(Automatic Climate Observation System, ACOS)以及全球氣膠監測網(Aerosol Robotic Network, AERONET)之長期資料，前者可提供氣溫、氣壓、風

速風向...等氣象要素之直接觀測，後者屬於地面遙測儀器之觀測，可得到大氣的氣膠光學特性資訊。ACOS系統為中央氣象局(Central Weather Bureau, CWB)新一代之氣候觀測系統，已於民國110年1月1日0時正式啟用，目前建置於氣象局 27 個有人駐守之氣象站，此系統所使用之輻射計為EPPLEY的SPP全天空輻射儀，屬於熱電堆型輻射計，觀測波段為0.295 μm 至2.8 μm 。AERONET為由美國太空總署(NASA)所主導的國際合作觀測實驗網(Holben et al., 1998)，目的是對全球空氣品質與大氣現象進行同步觀測，為全球空氣品質監測與衛星產品校驗的重點儀器，本研究選用嚴格篩選過後資料品質最高的Version 3 Level 2產品進行分析，使用的參數資料包括0.44 μm 和0.675 μm 波段的氣膠光學厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)以及單次散射反照率(Single Scattering Albedo, SSA)。另外還使用衛星資料及再分析資料，首先是向日葵8號衛星(Himawari-8, H8)，為日本的氣象衛星之一，屬於地球同步衛星，H8的時間解析度為10分鐘，空間解析度隨不同波段及地區有0.5至2公里的區別(Bessho et al., 2016)。而本研究中選用的資料為可見光3號頻道(band3, B3)的反射率(reflectivity)資料，空間解析度為1公里，資料由中央氣象局所提供。中級解析度成像分光輻射度計(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)是搭載於Aqua和Terra上的重要感測器，兩者均屬於NASA地球觀測系統(Earth Observation System, EOS)系列繞極軌道衛星，觀測波段涵蓋範圍包括可見光、近紅外光與紅外光波段，每1到2日便可提供全球地表的觀測數據，啟用至今已有超過15年的觀測資料，可以提供長期且大範圍的氣膠光學特性參數資訊，與地面觀測比對也有不錯的準確度表現(He et al., 2010)。本研究選用MODIS/Aqua以及MODIS/Terra Collection 6.1 Level-3產品，參數選用由深藍法(deep blue algorithm)所反演出的0.47 μm 和0.65 μm 之AOD及SSA日資料進行分析，空間解析度為1°×1°(Platnick et al., 2015)。地表反照率(surface albedo)則是選用MODIS/Aqua+Terra Collection 6 Level-3的黑天反照率(black-sky albedo, BSA)日資料(Schaaf and Wang, 2015)，波段為可見光波段及太陽短波輻射波段，波長分別介於0.3 μm 至0.7 μm 及0.3 μm 至5 μm ，空間解析度為0.05°×0.05°。臭氧部分使用OMI/Aura Version 003 Level-2整層臭氧(total column ozone)日資料，空間解析度為0.25°×0.25°(Bhartia, 2012)。水氣部分使用MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2) Version 5.12.4 Level 2 整層可降水水氣量(total precipitable water vapor)小時資料，水平空間解析度為0.5°×0.625°(Rienecker et al., 2011)。

本研究使用晴空判斷法及晴空指數對天空條件進行分類，本研究參考的方法由Reno and Hansen

(2016)提出，此方法的特色在於地面輻射觀測的部分只需要使用到全天空輻射量(global horizontal irradiance, GHI)分鐘值便可以判斷當下是否為晴空，且挑選出的晴空時間與Long and Ackerman (2000)所挑選出的晴空時間重疊率高達94%，由此可見Reno and Hansen (2016)的方法所篩選出的晴空時間有很高的可信度，藉由此方法可使我們辨別晴空條件與非晴空條件的時間，此方法概念在於使用經驗公式計算出理想晴空輻射量，並與地面觀測輻射量做比較，若符合此方法要求之五個數學上的條件則可以判斷當下為晴空條件，而非晴空條件則使用晴空指數(clearness index, K_t)， K_t 計算方式為地面觀測輻射量(F)除以大氣層頂輻射量(F_0)，如式(1)至式(3)。

$$K_t = \frac{F}{F_0} \quad (1)$$

$$F_0 = I_0 E_0 (\sin\phi \sin\delta - \cos\delta \cos\phi \tan\delta \tan\phi) \quad (2)$$

$$E_0 = 1 + 0.033 \times \cos\left(\frac{360 \times \text{doy}}{365}\right) \quad (3)$$

其中doy為指定日期的當年累積日數(day of the year)。當晴空指數(K_t)大於等於0.3則判斷天空條件為部分晴空條件，而晴空指數(K_t)小於0.3則判斷天空條件為多雲(Iqbal, 1983)。

本研究運用單層輻射模式(Janjai et al., 2013; Yao, 2017)來描述太陽輻射量進入大氣層後的能量變化，在單層輻射模式的假設下，太陽輻射從進入大氣向下到達地表後受到反射作用向上，然而因為大氣多種物質的散射作用使部分太陽輻射會再次向下到達地表，而這個過程會無限次的持續下去(圖 1)，因此造成太陽輻射在大氣及地表之間不停地被吸收、散射以及反射。

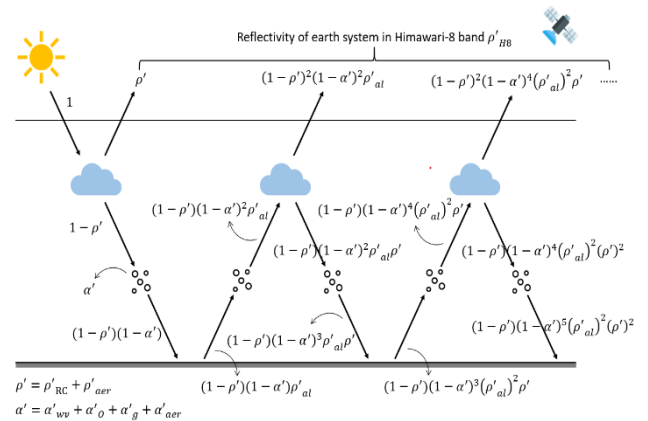


圖 1 單層輻射模式結構圖。

為了方便辨認，以下所有的參數中沒有撇號表示該參數代表太陽短波波段(solar band)的吸收或散射效應，而本研究以ACOS系統所使用之輻射計觀測波段(0.295 μm 至2.8 μm)作為太陽短波波段，若有撇號表示該參數代表衛星波段(satellite band)的吸收或散射效應，並以H8衛星B3波段(0.57 μm 至0.71 μm)作為

衛星波段。模式中(圖 1)假設太陽短波輻射進入地球前的輻射量為1，進入地球後會受到瑞利散射及雲反射效應(ρ'_{RC})和氣膠的散射效應(ρ'_{aer})，使部分輻射量(ρ')返回太空，剩餘部分之輻射量($1 - \rho'$)則繼續向地表傳送，向地表傳送的過程中將受到各大氣因子的吸收效應(α')，包括水氣(α'_{wv})、臭氧(α'_o)、氣體(α'_g)、氣膠(α'_{aer})，使輻射量衰減為 $(1 - \rho')(1 - \alpha')$ ，到達地表時被部分吸收後剩餘部分反射向上，輻射量因為地表反照率(ρ'_{al})而再次衰減為 $(1 - \rho')(1 - \alpha')\rho'_{al}$ ，接下來輻射量會持續地受到大氣的吸收效應及散射效應而不斷地衰減，最後所有離開地球的輻射量總和將視為H8衛星B3波段的反射率資料(ρ'_{H8})。在單層輻射模式中所假設的多個參數皆可透過衛星資料及再分析資料量化得到，僅剩下太陽波段及衛星波段下的瑞利散射及雲反射量(ρ_{RC} , ρ'_{RC})為未知數，需透過單層輻射模式中的各參數計算出。本研究中之模式反演地面輻射量主要分為兩部分，分別為建立模式和反演地面輻射量，在建立模式部分除了上述計算 ρ_{RC} 和 ρ'_{RC} 外還須根據不同的天空條件進行 ρ_{RC} 和 ρ'_{RC} 的線性回歸，流程圖如圖 2所示。

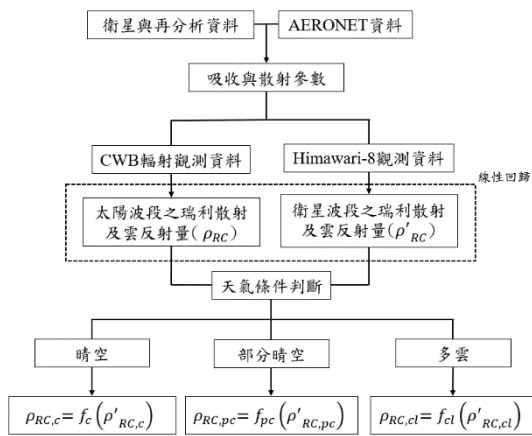


圖 2 建立模式之流程圖。

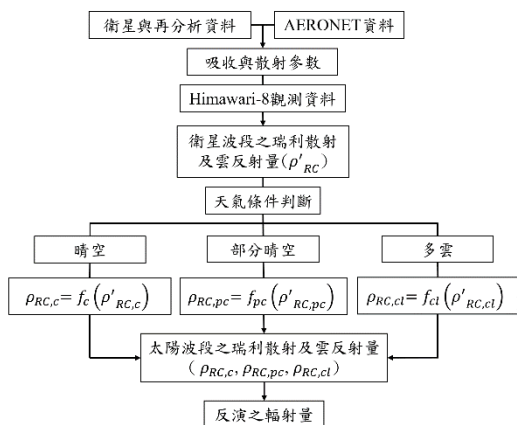


圖 3 模式反演輻射量之流程圖。

第二部分為反演地面輻射量，此部分一開始與建立模式部分相似，差別在於此部分僅計算 ρ'_{RC} ，接

下來便根據不同天空條件將 ρ'_{RC} 代入前述過程所建立的線性關係，流程圖可參考圖 3。

後續的結果與討論中將進行誤差分析，使用的統計參數為平均偏差(Mean Bias Error, MBE)、均方根差(Root mean square error, RMSE)及決定係數(r^2)，以及以百分比表示的上述前兩參數的rMBE及rRMSE，計算方式如式(4)至式(7)所示，下標o代表觀測值，下標d代表反演值。

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{1}^N (GHI_d - GHI_o) \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{1}^N (GHI_d - GHI_o)^2} \quad (5)$$

$$rMBE = \frac{MBE}{GHI_o} \times 100\% \quad (6)$$

$$rRMSE = \frac{RMSE}{GHI_o} \times 100\% \quad (7)$$

三、結果與討論

在本研究中，因AERONET嘉義站及CWB嘉義氣象站位於同地點，因此選擇此地點進行輻射量的反演，然而AERONET的觀測資料時間與CWB之ACOS系統的輻射計觀測資料時間僅在2018年1月1日至2018年4月12日重疊，因此選擇以2018年1月1日至2018年4月12日資料建立模式，而後反演2018年3月1日至2018年4月12日輻射量，反演之時間解析度為每10分鐘一筆。圖 4為未考慮天空條件的模式反演之輻射量與ACOS地面觀測輻射量比對散佈圖。圖 5為考慮天空條件的模式反演之輻射量與ACOS地面觀測輻射量比對散佈圖，反演的時間皆介於2018年3月1日至2018年4月12日，單位皆為 $W m^{-2}$ 。誤差分析部分，未考慮天空條件的模式反演輻射量的MBE、RMSE及 r^2 值分別為 $-41.6 W m^{-2}$ (-7.9%)、 $119.2 W m^{-2}$ (22.7%)及0.84，其中括號內分別為rMBE及rRMSE。考慮天空條件的模式反演輻射量的MBE、RMSE及 r^2 值分別為 $-27.0 W m^{-2}$ (-5.1%)、 $108.0 W m^{-2}$ (20.5%)及0.86，因此我們可以知道應用晴空判斷法及晴空指數可以使模式改進與提升。

模式表現在晴空條件與非晴空條件下如**錯誤！找不到參照來源。**及圖 6所示，晴空條件下反演之地面輻射量的MBE、RMSE及 r^2 值分別為 $-10.5 W m^{-2}$ (-1.7%)、 $41.5 W m^{-2}$ (6.8%)及0.98，非晴空條件下反演之地面輻射量的MBE、RMSE及 r^2 值分別為 $-30.1 W m^{-2}$ (-5.9%)、 $116.2 W m^{-2}$ (22.7%)及0.84，由誤差表現可知，模式在晴空條件下的表現是很好的，非晴空條件的表現相對較差，因此可知道影響模式的很大因素來自於雲。

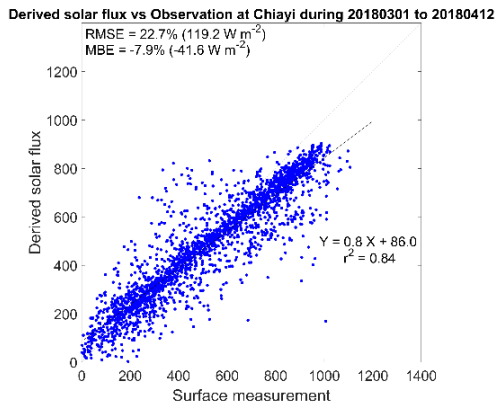


圖 4 未考慮不同天空條件下的模式反演之輻射量表現。

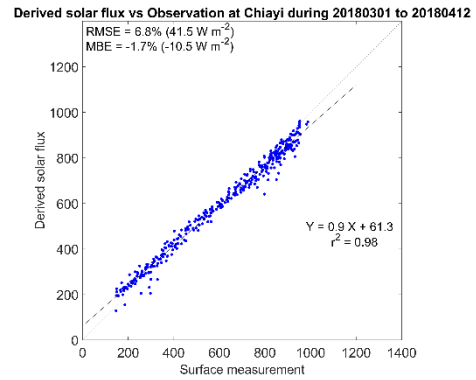


圖 6 模式反演之輻射量表現(晴空條件)。

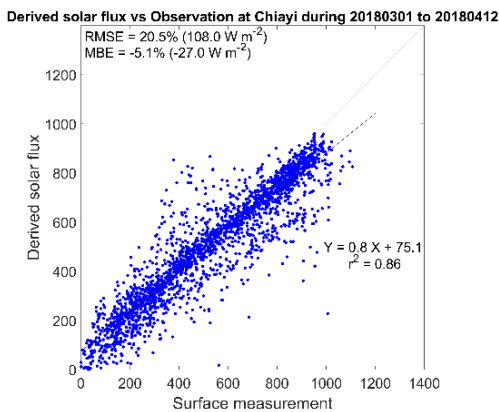


圖 5 考慮不同天空條件下的模式反演之輻射量表現。

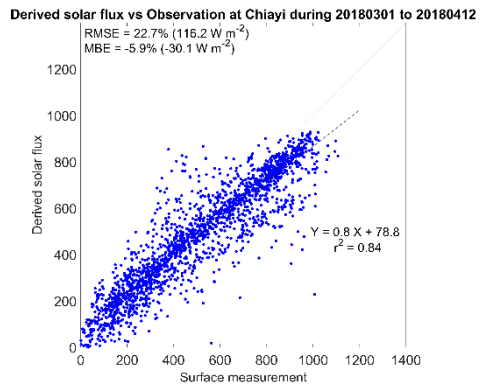


圖 6 模式反演之輻射量表現(非晴空條件)。

除上述之誤差分析外，本研究同時與氣象局之衛星反演產品做逐時輻射量個案比對，圖 7 為 2018 年 3 月 10 日嘉義氣象站之地面輻射量比對圖，此日為反演期間晴空條件時間最多的一天，然而並未慮除晴空條件時間以外之資料，因此部分時間為部分晴空條件，橫軸為時間，縱軸為地面輻射量，單位為 $W m^{-2}$ 。圖中之藍線為中央氣象局 ACOS 系統之輻射計觀測值，時間解析度為 1 分鐘，紅線為本研究模式所反演之地面輻射量，反演時間自上午 8 時 10 分至下午 5 時，時間解析度為 10 分鐘，黃線為中央氣象局的反演產品，主要利用 H8 B3、B13 及 B15 三個頻道之衛星觀測進行反演，反演時間自上午 6 時至下午 7 時，時間解析度為 1 小時，為了比對方便，畫圖時將每小時之資料點前移 0.5 小時。從圖中可以看出本研究反演之地面輻射量在其中幾個時間點的輻射量值明顯較前後低，同時也可以發現 ACOS 系統之輻射觀測在同個時間點有相對較大的值，原因為模式判斷當下為部分晴空條件，而其他時間點為晴空條件，導致反演時使用之線性關係式不同，因此造成反演出之地面輻射量較低。

圖 8 為 2018 年 3 月 4 日嘉義氣象站之地面輻射量比對圖，從圖中可以看出本研究反演之地面輻射量之整體變化趨勢及量值與 ACOS 系統之地面觀測值十分接近。氣象局反演產品因為時間解析度之關係無法呈現短時間的輻射量變化，然而變化趨勢也與 ACOS 系統之地面觀測值相似，然而多數時間有低估的情形發生。從圖 7 及圖 8 的逐時輻射量比對圖可以看出本模式之反演輻射量與氣象局衛星產品在不同天空條件下有不同的差異，同時也可以發現時間解析度更高的產品能夠更完整的呈現短時間的輻射量震盪變化。

為了解本研究之模式反演輻射量與氣象局之輻射量產品間的差異，遂將 ACOS 系統之地面觀測輻射量與本模式之反演輻射量計算為小時平均，例如：9 時的小時平均值由 8:01 至 9:00 (ACOS) 及 8:10 至 9:00 (本研究) 的資料計算得出，使用上述時間的平均方式原因為氣象局產品採用此方式進行計算。將本研究平均後的反演輻射量及氣象局反演產品輻射量分別與平均後的 ACOS 系統之地面觀測輻射量進行誤差分析，結果如圖 9 及圖 10，本研究平均後的反演輻射量之 MBE、RMSE 及 r^2 值分別為 $-34.9 W m^{-2}$ (-6.2%)、 $79.8 W m^{-2}$ (14.3%) 及 0.92，而氣象局反演產品輻射量之 MBE、RMSE 及 r^2 值分別為 $-8.3 W m^{-2}$ (-

1.5%)、 60.5 W m^{-2} (11.2%)及0.94，可以看見本研究之反演輻射量與氣象局產品表現接近。

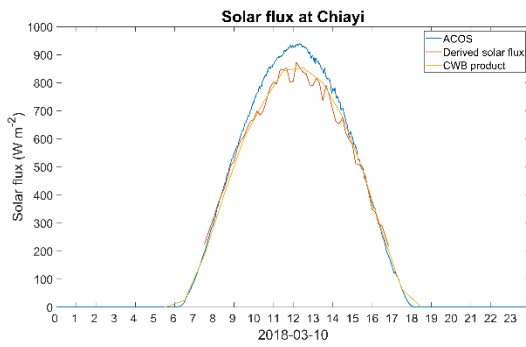


圖 7 嘉義氣象站地面輻射量比對(晴空條件)。

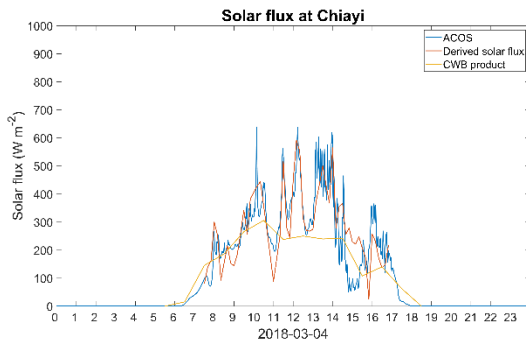


圖 8 嘉義氣象站地面輻射量比對(非晴空條件)。

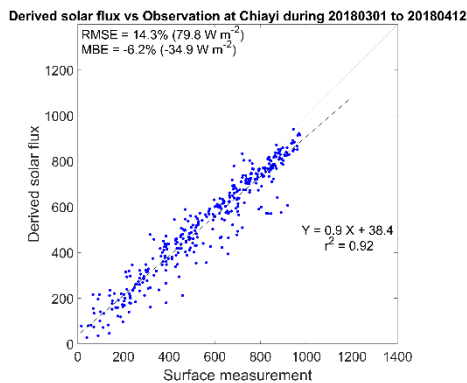


圖 9 本模式反演之輻射量表現(平均至小時)。

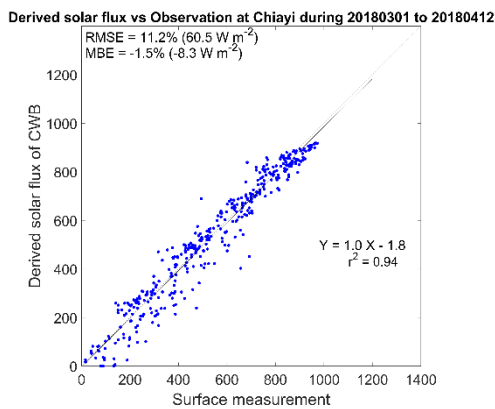


圖 10 氣象局衛星產品之輻射量表現。

為了解模式在不同地點的表現，本研究反演出台南氣象站及高雄氣象站的地面輻射量並與ACOS系統之輻射量觀測資料比對，結果如表 1。

表 1 模式於同時間(2018.3.1 - 2018.4.12)不同地點之表現。

統計\地點	嘉義站	台南站	高雄站
rMBE	-5.1%	-11.8%	-4.0%
rRMSE	20.5%	22.6%	24.1%
r ²	0.86	0.87	0.81
晴空比例	16.9%	23.4%	22.0%

為了更進一步了解模式在不同時間的表現，本研究反演嘉義氣象站2018至2020年每年1月至2月的輻射量，結果如表 2。由這些結果可以得知，隨著距離建立關係式的地點越遠，模式所反演之輻射量的誤差也會隨之增加，而模式在地點相同且時間相同(1月至2月)但年份不同的情況下，反演結果的表現還是非常相近的。表中之晴空比例為晴空條件時間佔所有反演時間的比例。

表 2 模式於不同時間同地點(嘉義站)之表現。

統計時間	2018.1.1 - 2018.2.28	2019.1.1 - 2019.2.28	2020.1.1 - 2020.2.29
rMBE	-1.6%	-1.8%	-1.6%
rRMSE	20.3%	16.8%	16.4%
r ²	0.89	0.89	0.88
晴空比例	13.9%	13.3%	20.8%

四、總結

本研究在資料選用上，吾人針對嘉義氣象站2018年1月1日至2018年4月12日的地面觀測資料及衛星觀測資料進行分析，作為此反演法測試之基準。結果顯示本研究結合單層輻射模式、晴空判斷法及晴空指數後確實提升了模式的表現，模式考慮天空條件前，反演之輻射量與ACOS地面觀測比對之MBE、RMSE及r²值分別為-41.6Wm⁻² (-7.9%)、119.2Wm⁻² (22.7%)及0.84，而考慮天空條件後，MBE、RMSE及r²值分別為-27.0Wm⁻² (-5.1%)、108.0Wm⁻² (20.5%)及0.86。考慮天空條件的模式在晴空條件下的MBE、RMSE及r²值分別為-10.5Wm⁻² (-1.7%)、41.5Wm⁻² (6.8%)及0.98，而非晴空條件下的MBE、RMSE及r²值分別為-30.1Wm⁻² (-5.9%)、116.2 Wm⁻² (22.7%)及0.84，可以發現晴空下的表現非常好，可見雲對模式有著顯著的不確定性。在與氣象局產品之逐時輻射量比對的部分，模式針對晴空條件代表日2018年3月10日的反演，地面輻射量呈現鋸齒狀之處的ACOS系統之觀測輻射量有稍微大一點的震盪，此震盪使本模式將當下判斷為非晴空條件，因為本模式所篩選出之

晴空條件下的天空為無雲狀態，若恰好有碎雲經過輻射計附近便會判斷為非晴空條件，導致反演之線性關係不同，進而低估地面輻射量，也因此使模式結果的誤差增加，從這個現象可以發現目前所採用的天空條件分類策略仍存在盲點，未來需進行調整或更換方法。最後在時空適用性上，吾人發現反演輻射量之地點距離建立線性關係之地點越遠，反演之地面輻射量誤差越大，而同一地點在時間相同(1月至2月)但年份不同的情況下，反演結果的表現還是非常相近的，因此吾人認為本研究提出之方法目前較適合小範圍使用，若能定義出台灣各個氣象觀測站代表的影響範圍，便能針對不同區域建立不同的線性回歸式以完成更大範圍的地面輻射量反演。由於目前使用之天空條件判斷法仍依賴地面觀測，未來勢必要改用其他不依賴地面觀測之晴空判斷法才能反演無地面觀測地區之地面輻射量，例如使用衛星紅外線波段判斷雲特性，也可同時改用更高時間解析度之衛星產品，以期能提升模式之表現。

五、致謝

此研究在台灣地區標準地面輻射觀測網絡系統發展案的支持下順利完成，非常感謝中央氣象局衛星中心提供向日葵8號衛星資料以及衛星反演產品，使本研究能完成模式的建立並順利反演成功，同時也非常感謝中央氣象局提供地面輻射觀測資料使本研究之模式能順利進行計算並對反演結果進行客觀的比對及探討，在此致上最深的感謝。

六、參考文獻

- Bessho, K., et al., 2016. "An introduction to Himawari-8/9—Japan's new-generation geostationary meteorological satellites." *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II 94(2): 151-183.
- Bhartia, P. K., 2012. OMI/Aura Ozone (O3) Total Column Daily L2 Global Gridded 0.25 degree x 0.25 degree V3, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC).
- He, Q., et al., 2010. "Validation of MODIS derived aerosol optical depth over the Yangtze River Delta in China." *Remote Sensing of Environment* 114(8): 1649-1661.
- Holben, B. N., et al., 1998. "AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization." *Remote Sensing of Environment* 66(1): 1-16.
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press.
- Iqbal, M., 1983. "An Introduction to Solar Radiation Academic." New York 1983.
- Janjai, S., et al. 2013. "Mapping global solar radiation from long-term satellite data in the tropics using an improved model." *International Journal of Photoenergy*
- Lave, M. and J. Kleissl, 2013. "Cloud speed impact on solar variability scaling—Application to the wavelet variability model." *Solar energy* 91: 11-21.
- Long, C. N. and T. P. Ackerman, 2000. "Identification of clear skies from broadband pyranometer measurements and calculation of downwelling shortwave cloud effects." *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 105(D12): 15609-15626.
- Platnick, S., et al., 2015. MODIS Atmosphere L3 Daily Product. NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, USA
- Reno, M. J. and C. W. Hansen, 2016. "Identification of periods of clear sky irradiance in time series of GHI measurements." *Renewable Energy* 90: 520-531.
- Rienecker, M. M., et al., 2011. "MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications." *Journal of climate* 24(14): 3624-3648.
- Schaaf, C. and Z. Wang, 2015. "MCD43C3 MODIS/Terra+ Aqua BRDF/Albedo Albedo Daily L3 Global 0.05 Deg CMG V006." NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi 10.
- Yao, C.-M., 2017. Mapping Surface Solar Radiation with Satellite Data over Taiwan, National Central University.