

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

「 太 陽 能 預 測 模 式 與 分 析 技 術 研 究 」

**A Study of Solar Energy Prediction Models and Analysis
Technologies**

計畫編號：1032001INER023

受委託機關(構)：萬能科技大學

計畫主持人：王金印

聯絡電話：0953616429

E-mail address：jiwang@mail.vnu.edu.tw

核研所聯絡人員：許婉莉

報告日期：103 年 11 月 28 日

目 錄

中文摘要.....	1
ABSTRACT	2
壹、計畫緣起與目的.....	4
一、緣起.....	4
二、目的.....	5
貳、研究方法與過程.....	6
一、國際上對於太陽能預測模式之相關研究蒐集	6
二、NWP模擬系統(太陽能)及環境之溫度、濕度、風速、風向 等模擬預測分析.....	20
三、環境變動因素對於HCPV系統之品質管制分析.....	26
(一)相關之國內研究情況說明如下：	26
(二)相關之國外研究情況說明如下：	28
參、主要發現與結論.....	31
一、完成地區化NWP系統參數的模擬分析.....	31
(一) 地面太陽輻射觀測資料統計	31
(二) WRF模式模擬台灣地區上空雲量	32
(三) WRF模式模擬地面太陽全天空輻射量	34
二、環境變動因素對於HCPV系統之品質管制分析.....	39
(一) 不同地區與日期在環境因素上之變異分析.....	41
(二) 不同地區與時間在環境因素上之變異分析.....	41
(三) 不同日期與時間在環境因素上之變異分析.....	42
(四) 不同地區、日期與時間所呈現直接日照量之變異分析	43

三、結論.....	47
四、參考文獻.....	49

中文摘要

本計畫的重點為運用氣象研究與預測(Weather Research and Forecasting, WRF) 模式和利用已知大氣層頂太陽輻射強度及大氣狀態，以估算到達地面的太陽輻射強度。對於 WRF 模式輸出中的短波輻射、溫度、濕度、氣壓、風速、風向等資料進行探討。此 WRF 模式中的短波輻射輸出為全天空輻射(Global Horizontal Irradiance, GHI)，可藉由統計經驗模式自 GHI 求取直射日照(Direct Normal Irradiance, DNI)之值，以供高聚光太陽光發電(High Concentration Photovoltaic, HCPV)系統預測發電量使用。

在環境影響分析方面，本研究以關聯性分析和迴歸分析的統計模式，對於直流電、交流電、風速、最大風速、風向、大氣溫度、相對溼度、直射日照、全天空輻射、與紫外線等因素之間的相互關係與影響性，進行統計分析，以探討環境變動因素的相關性，提升太陽能預測之準確度。在多區域環境影響因素方面，則分析環境條件與地理位置等要素對太陽能發電的影響。

關鍵詞： 氣象研究與預測、太陽能預測、數值天氣預報模式

Abstract

This research focuses on solar energy prediction model that is WRF (Weather Research and Forecasting) model. With the given solar irradiance at the top of the atmosphere and atmospheric conditions, the solar irradiance over the ground can be estimated. In the issues of medium-term predicted solar technologies, the WRF output shortwave radiation, temperature, humidity, barometric pressure, wind speed, wind direction and other information are discussed. The WRF shortwave radiation output, GHI (Global Horizontal Irradiance), can derive into DNI (Direct Normal Irradiance), required for HCPV systems by using empirical models.

In order to enhance the accuracy of prediction of solar energy, correlation and regression analysis methods with other statistical processes are used to evaluate the environmental impact. The relationships among the factors of direct current, alternating current, wind speed, maximum wind speed, wind direction, air temperature, relative humidity, direct normal irradiance, global horizontal irradiance, and ultraviolet light are considered first. Secondly, a regression model is established to depict this relationship. Further, different areas, dates and times are discussed to understand the effects to those multi-regional environmental factors.

Keywords: WRF (Weather Research and Forecasting) model, Solar Energy Forecasting, Numerical Weather Prediction

作者及所屬單位

計畫主持人：王金印副教授萬能科技大學資訊管理系

共同主持人：林宏志副教授萬能科技大學電子工程系

共同主持人：李國路副教授萬能科技大學管理與資訊系

共同主持人：陳萬金教授大華科技大學電子工程系

壹、計畫緣起與目的

一、緣起

由於太陽能資源取之不盡和清潔無污染的特性，已成為開發新能源的首選。太陽能通常以光熱、光電、光化學方式轉換為熱能、電能和化學能。然而太陽能發電系統的實際輸出功率主要受太陽輻射照度的影響，這是因為太陽輻射單位面積能量密度低，時間上具有較大的不連續性和不穩定性。它不僅受季節和地理因素的影響，而且與當時的大氣透明度、水氣含量、氣懸膠(aerosol)、雲量、雲狀、雲與太陽的相對位置等有密切相關。這裡的氣懸膠，又稱氣溶膠或氣膠、煙霧質，是指固體或和液體微粒穩定地懸浮於氣體介質中形成的分散體系。一般大小在 0.01-10 微米之間，可分為自然和人類產生兩種。氣懸膠是一個對太陽輻射有重要且複雜影響的因素，它既可以直接反射、散射或吸收太陽輻射，又可以通過改變雲的微物理性質而產生間接效應，同時不同氣懸膠之間對太陽輻射的影響也有很大的差異。但總體而言，氣懸膠的增加通常還會使到達地面的太陽輻射減少。

太陽輻射也同時受天文因素的影響，其變化又具有週期性，包括日變化和年變化。其它環境因素如溫度等，對太陽輻射轉化效率也會產生影響。太陽光發電系統併網運行以後，由於發電量的變化是一個非平穩的隨機過程，輸出功率的不連續和不確定，會對電網產生較大影響。因此，要想大幅提高太陽光發電量比例，提高光電轉換效率，降低運營成本，保障電網安全，太陽能預報技術顯得尤為重要。

二、目的

本計畫即為配合核能研究所進行太陽光發電系統之技術發展相關研究之一。由於實際太陽能發電量取決於當時的大氣狀態，包括雲量、雲厚、臭氧及氣懸膠含量等。目前為止，欲知未來的大氣狀態，就必須有一套良好的數值天氣預測模式。本研究所採用的 WRF(Weather Research and Forecasting)數值天氣預報模式，由於具有預報準確度高且預報趨勢穩定的優勢，所以廣為眾多研究與作業單位所使用，包括我國中央氣象局、臺灣大學、中央大學、台灣師範大學等。本研究主要是分析 WRF 模式預測未來 6 至 48 小時各種天氣要素，包含溫度、濕度、氣壓、風速、風向以及短波輻射量等。計畫的目標是要完成 (一) 國際上對於太陽能預測模式之相關研究蒐集。(二)研究 NWP 模擬系統(太陽能)及環境之溫度、濕度、風速、風向等模擬預測分析。(三)地區化 NWP 系統參數的模擬分析。(四)環境變動因素對於 HCPV 系統之品質管制分析，提供系統維護參考

貳、研究方法與過程

一、國際上對於太陽能預測模式之相關研究蒐集

2013 年 Academic Press 出版太陽光發電預報的專書[1]，由美國加州大學聖地亞哥分校的 Jan Kleissl 教授主編，對太陽光發電預報提出廣泛及系統化的介紹，太陽光發電預測，關鍵性地降低技術及財務的風險，應用包含選擇地點、太陽光發電技術及併網供電考量，在可行性分析階段、設計階段及部署階段都極為重要，不同的發電技術，太陽光發電轉換效率自 6% 提昇至 44% (1976 年至 2014 年)，參考圖 1，

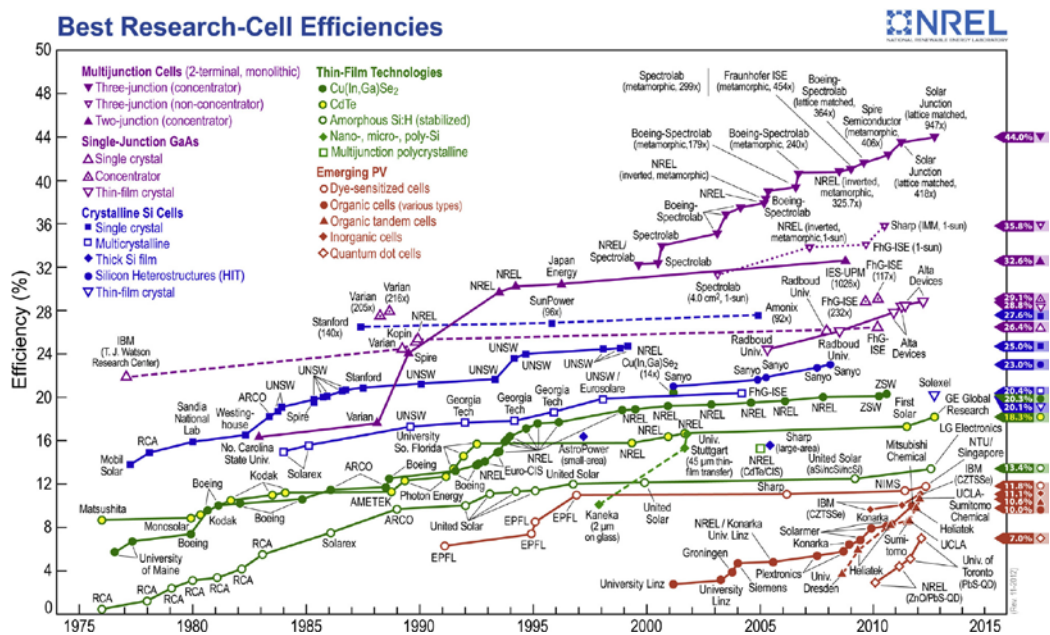


圖 1 太陽光發電轉換效率年譜

依規模可分成共用設施規模及分散式架設，不同的太陽光發電裝置，基本上是因為使用的材料對太陽光譜具有不同的反應，而產生不同的發電量，如圖 2，

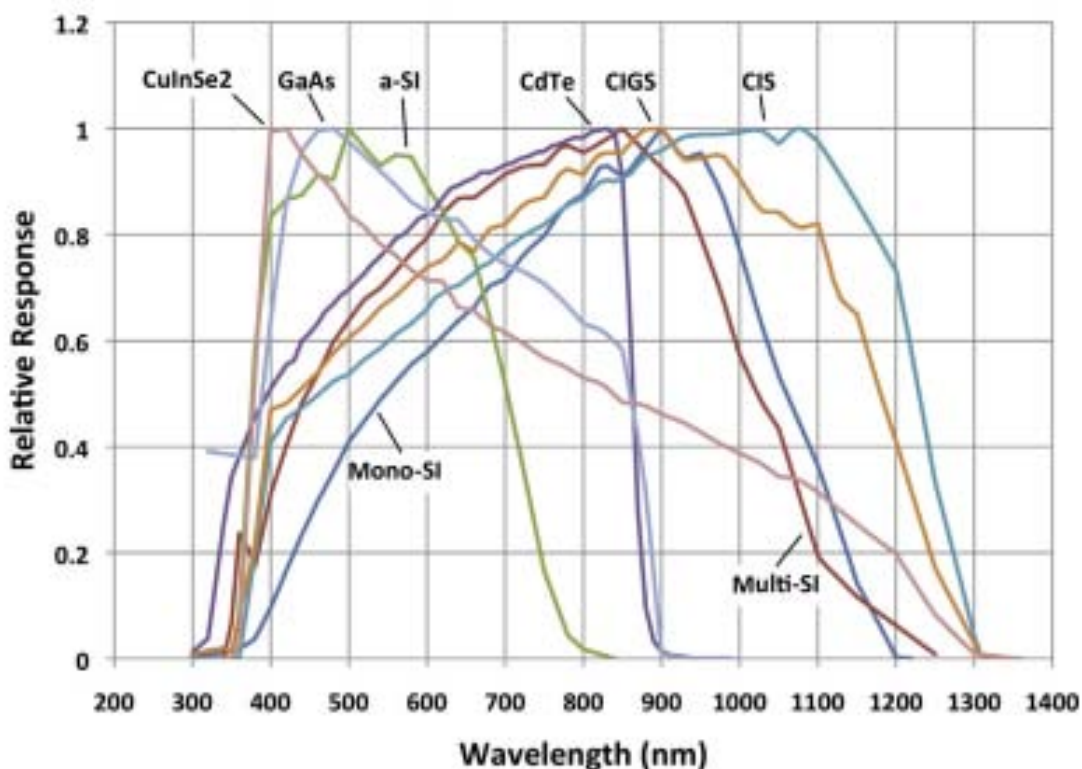


圖 2 各種太陽光發電材料對太陽光譜的反應

因此可推知，太陽光發電的性能與環境因素相關，而實務上，描述太陽光發電性能時，必須界定測試的條件，其中包含太陽光譜。預測日照量是預測太陽光發電的第一步，自從 19 世紀 Claude Pouillet 首先嚐試決定太陽輻射功率，而太陽輻射與大氣及地面的複雜互動一直是研究的主題，對預測太陽能而言，有三項主要元素，直接日照(Direct Normal Irradiance, DNI)，漫射水平輻射(Diffuse Horizontal Irradiance, DHI)，全天空輻射(Global Horizontal Irradiance, GHI)，關係如下：

$$GHI = DNI * \cos(SZA) + DHI$$

其中，SZA 為太陽天頂角 (Solar Zenith Angle)。

太陽輻射經由大氣散射、吸收或反射抵達地面，大氣的

特性之中，雲層是影響太陽光發電的主要因素，尤其雲層的量，以及對太陽光波長的反應，如圖 3，

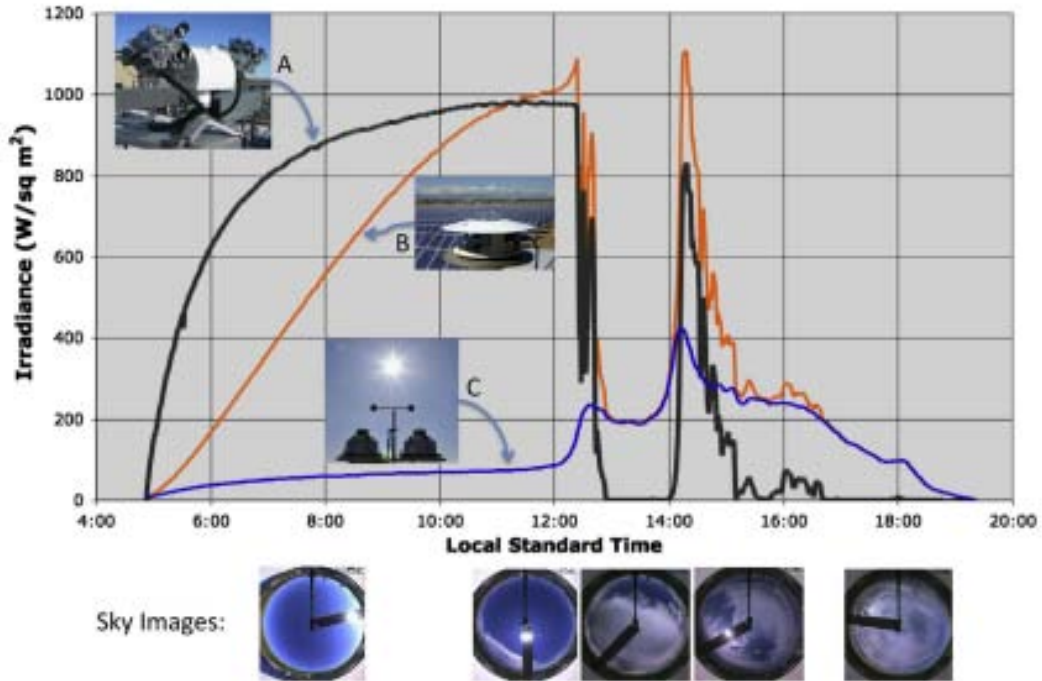


圖 3 雲層對太陽光發電的影響

大部分美國的太陽資源數據來自太空或地面的雲層觀察，以及模式的計算，太陽光幅射的預測高度依賴預測雲層的能力，雲層的型式、高度、相對移動及形成的覆蓋地區都是預測的輸入因子，用以描述幅射轉換模式的特性。在大氣層頂部的太陽光譜接近常數，大氣的動作類似光學濾波器產生不同的 DNI、DHI 及 GHI 分佈。首先建立無雲天空條件下，太陽在天頂，於海平面大氣光程(Air Mass, AM)為 1，如圖 4，AM1.5 相當太陽偏移天頂 48.2 度。

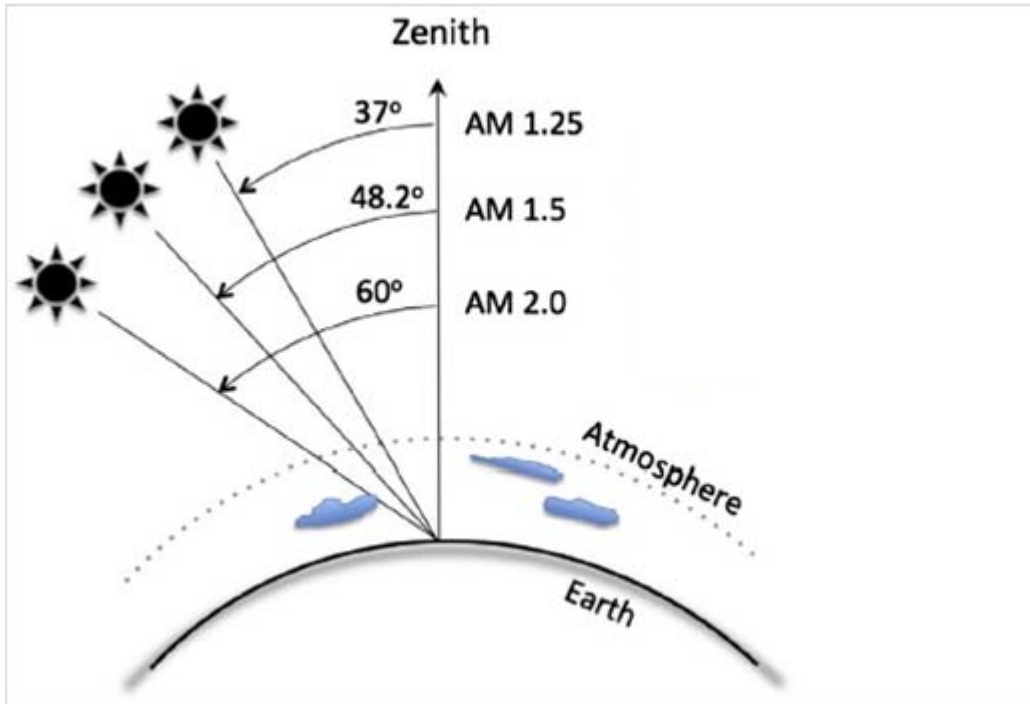


圖 4 大氣的路徑長度 (AM)

通常太陽光的模式建立在 AM1.5，美國 ASTM 建立的光譜標準如圖 5，

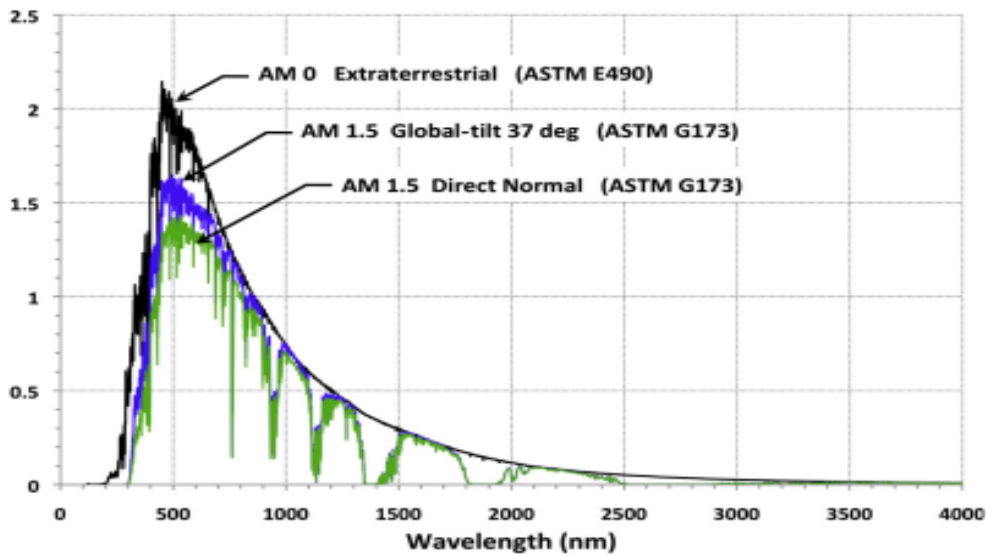


圖 5 光譜標準

太陽光預測方法的步驟如圖 6，依據所需預測的期間，步

驟可作調整。

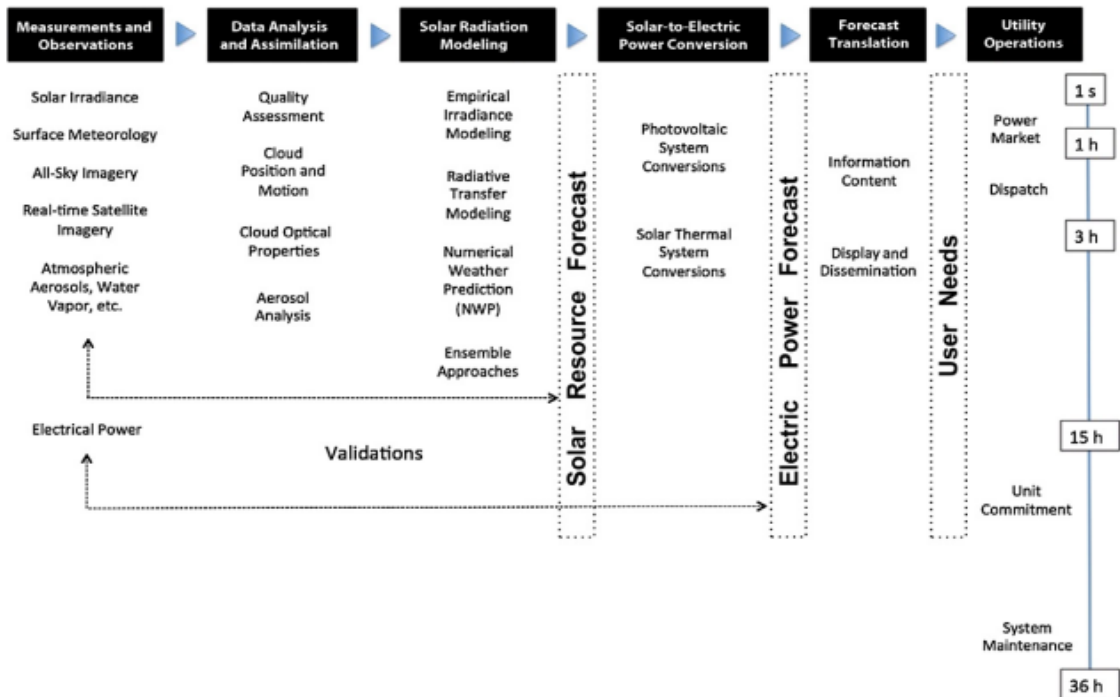


圖 6 預測的方法

基本上，首先基於氣象或遙測，估計晴空的幅射量，第二步驟，計入雲層的存在，建立雲層場景，其可以基於地面觀測、衛星觀測或數值天氣預測(Numerical Weather Predict, NWP)，依據所需求的預測期間，估計太陽幅射。

以衛星觀測為基礎的幅射模式，包含由物理推導模式到純實驗模式，物理推導模式必須求解幅射轉換方程式，以及大氣組成成分及精確的計算，實驗模式則包含較簡單的迴歸。至於，半經驗模式使用簡單的幅射轉換趨近及對觀測的凝合(fitting)，半經驗模式可使用探討衛星可見光頻道的記錄資料。基本原理是全天空幅射(GHI)為背景的晴空幅射(GHI_{clear})減去雲的衰減，雲的衰減由衛星資料推斷，晴空幅射背景由發電廠位置及時間計算，如圖 7。

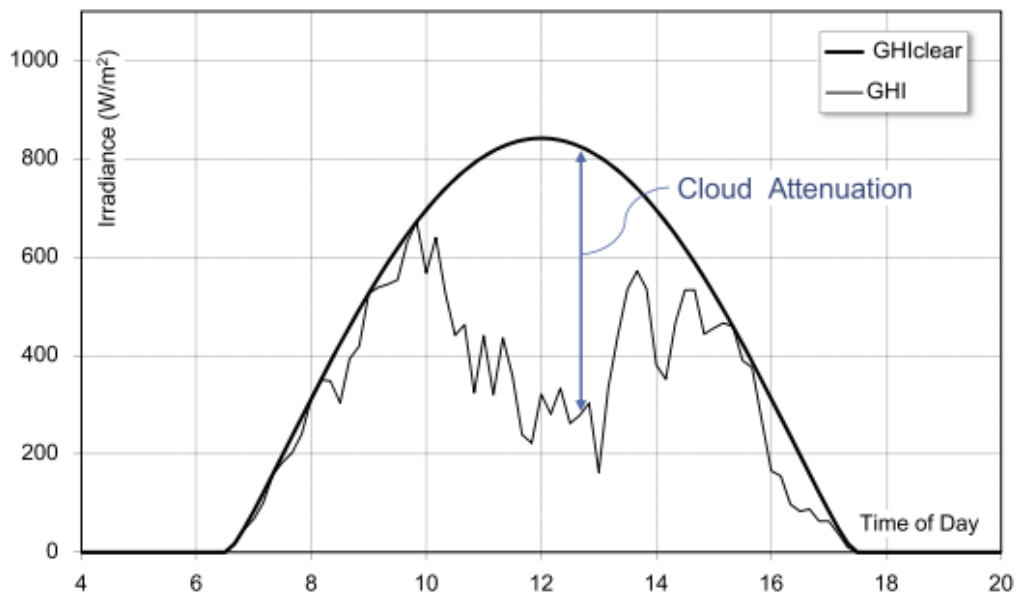


圖 7 雲層對太陽幅射的衰減

由衛星資訊推導的雲指數(Cloud Index, CI)被用以描述對太陽幅射的衰減，定義晴空指數 (clear-sky index) $kt^* = GHI / GHI_{clear}$ ，在美國及歐洲的八個地區，由實驗數據迴歸，得到

$$kt^* = 2.36CI^5 - 6.3CI^4 + 6.22CI^3 - 2.63CI^2 - 0.58CI + 1$$

基於衛星影像的預測太陽能方法，使用不同的預測方法得到不同的預測結果，太陽能預測的時距可為分鐘、小時或幾天，時距長的預測較依賴數學模式的運行；通常使用衛星影像可預測時距約為小時的太陽能，使用地面觀測所產生的太陽能預測一般為十分鐘等級，雲層是太陽能預測的主要影響，尤其對短期的預測影響更大，雖然偵測雲層的存在似乎很直接。事實上，雲層有各種獨特的特徵(signature)，其與晴空的比較結果，提供偵測雲層的量度，偵測使用兩大類演算法，門檻值偵測法與機率統計法，使用衛星影像偵測雲層的最大問題是地面的冰雪及空氣中的氣凝膠(aerosol)，地面冰雪

的反射影響衛星影像，近 30 年的研究，已逐步建立雲的光程及對光譜的相依關係；至於氣凝膠的顆粒大小及密度亦影響衛星影像，迄今未建立顆粒大小的光程及對光譜的相依關係。未來的短期預測的研究重點，包含三度空間效應，例如雲層高度及太陽位置的影響，如圖 8，延伸的遮蔽可達幾十公里。

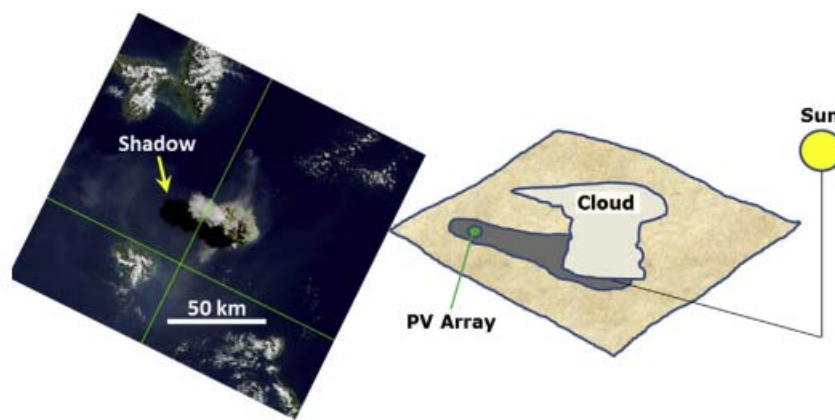


圖 8 雲層高度及太陽位置的影響

數值天氣預報(NWP)所萃取的雲參數，須進一步的探討，例如風場(風速及風向)，數值天氣預報模式與氣象學的結合是另一重要考量。

2012 年 M. Demirtas 發表使用氣象資料預測太陽幅射 [2]，氣象資料庫的收集地點是土耳其 Besevler，量測時間 2012 年 5 月，每 10 分鐘一組資料，計 1024 組，量測參數為室外溫度、室外濕度、氣壓、日照，量測參數如表 1。

表 1 量測參數

Parameters	Minimum Value	Maximum Value	Mean Value
Outside temperature	12.70	27.30	20.38
Outside humidity	14.00	93.00	45.55
Barometric pressure	750.90	762.10	756.79
Solar radiation	400.00	1163.00	681.54

太陽幅射的量測值如圖 9。

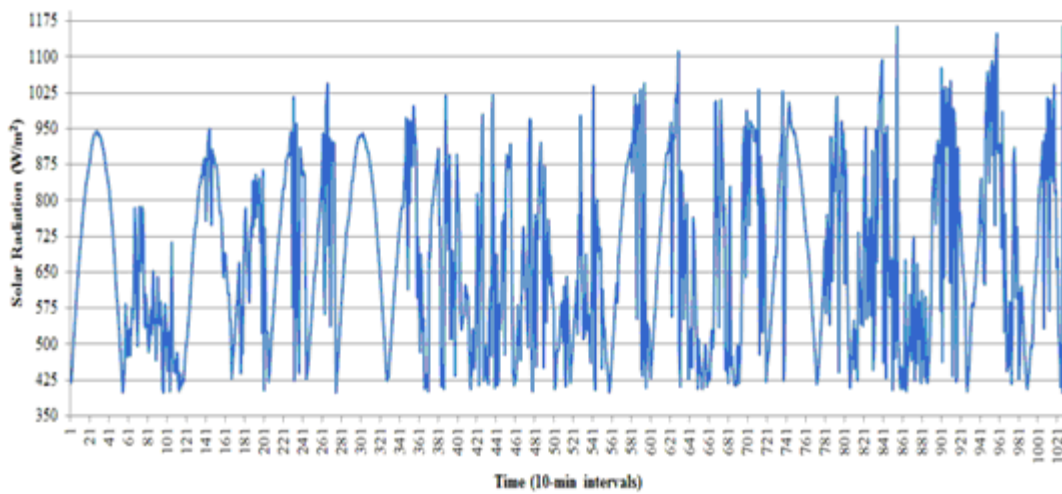


圖 9 太陽幅射量測值

使用迴歸方法及類神經網路方法，其中訓練資料 880 組，測試資料 144 組，以三項參數作為預測結果比較的基础，Mean Absolute Error (MAE) W/m^2 ，Mean Absolute Percentage Error (MAPE)%，Normalized Root Mean Square (NRMSE)%，使用上述資料及不同的預測方法，k-NN 分類法的實驗結果，MAE $47.227 W/m^2$ ，MAPE 7.910%，NRMSE 12.671%，本論文研究指出 k-NN 優於 Feed Forward Neural Network (FFNN)，Radial Basis Function (RBF)，Multilayer Perception (MLP)，Takagi Sugeno Fuzzy (TSF)，Auto regression Fuzzy Model (AFM)，Wavelet Neural Network (WNN)，Hidden Markov

Model(HMM) ， Autoregressive Integrated Moving Average(ARIMA)等方法。

2009 年 Lorenz, Elke 等人指出[3]，太陽能發電系統的性能是高度變化的，取決於當地的氣象條件，在過去的若干年，一些研究機構已經開發出不同的方法來預測太陽輻射，各種程序用於評估預測的準確性。作者提出一個基準程序以評估預測太陽輻射的準確性。在本文中，地面數據涵蓋歐洲的四個地區，該預測方法都是基於數值天氣預報模式，如 ECMWF（歐洲中心中期氣象預報）或 GFS（全球預報系統），使用三個評價參數，均方根誤差（RMSE），平均絕對誤差（MAE）和偏差(bias)，評估結果顯示了五種模式預測的準確性對氣候條件的依賴性很強，表 2 指出第一天的預測結果，四種模式皆優於持續模式，均方根誤差如圖 10。

表 2 第一天的預測結果

approach	<i>rmse</i> in W/m ²	<i>mae</i> in W/m ²	<i>bias</i> in W/m ²
ECWMF-OL	101 (45.6 %)	65 (29.2 %)	16 (7 %)
BLUE	99 (44.6 %)	61 (27.6 %)	1 (0.5 %)
CENER	129 (58.1 %)	87 (39.0 %)	30 (13.6 %)
WRF-MT	123 (55.4 %)	77 (34.7 %)	47 (21.0 %)
SYNOP	112 (50.4 %)	70 (31.5 %)	9 (0.4 %)
persistence	142 (64.3 %)	91 (41.2 %)	-14 (6.4 %)

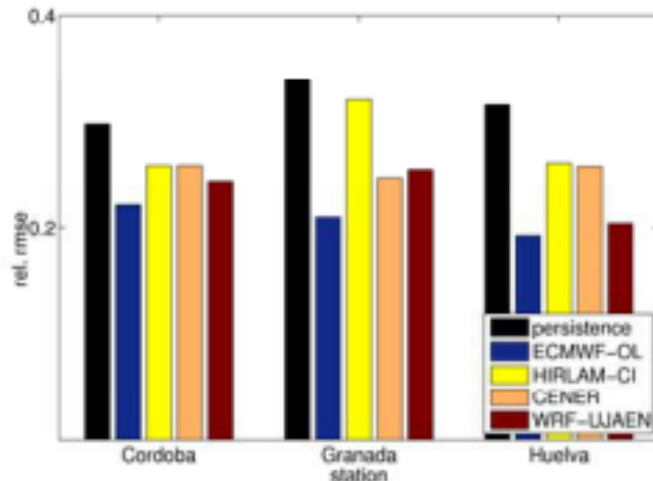


圖 10 各預測方法的均方根誤差

2012 年 Lara-Fanego 等人[4]評估了三天前的預測全天空輻射(GHI)和直接日照(DNI)的可靠性，該全天空輻射預測是在安達盧西亞地方以天氣研究及預測模式直接產生，而直接日照預測是利用 WRF 輸出和衛星影像為基礎，加以後製處理所產生，其簡要步驟如圖 11，

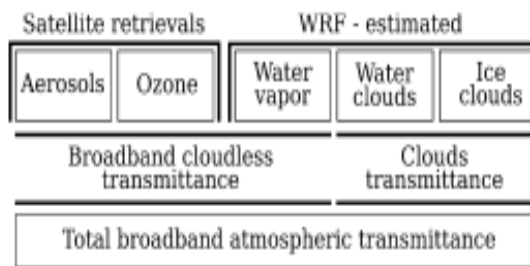


圖 11 後製處理的簡要步驟

預測結果以均方根誤差(RMSE)及平均偏移誤差(MBE)進行評比，結果如圖 12 為全天空輻射的預測，圖 13 為直接日照的預測，比較一年四季的預測，結論反映了與晴空相比，在陰天的條件下，WRF 模式的能力仍然有限，然而 WRF 模式比晴空持續模型(persistence model)有很大的性能改善。

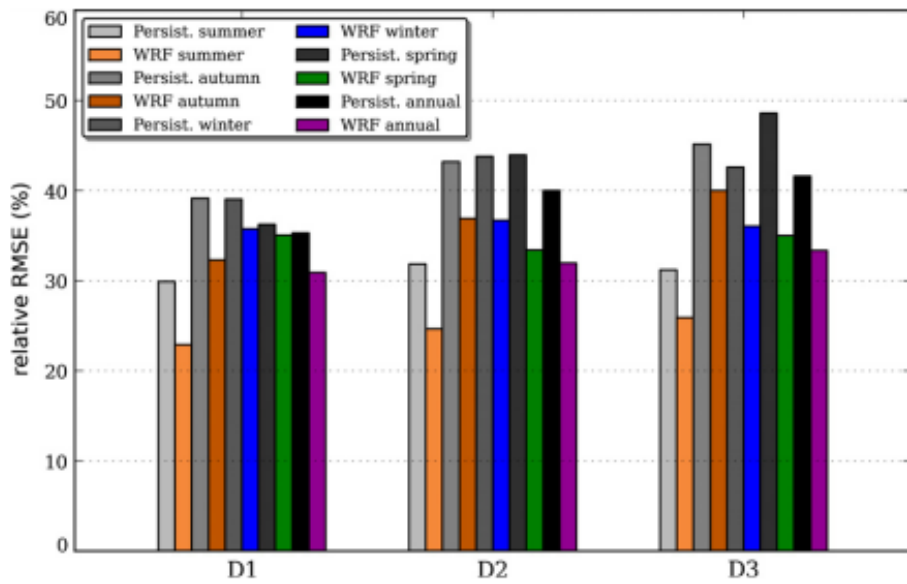


圖 12 全天空輻射的預測

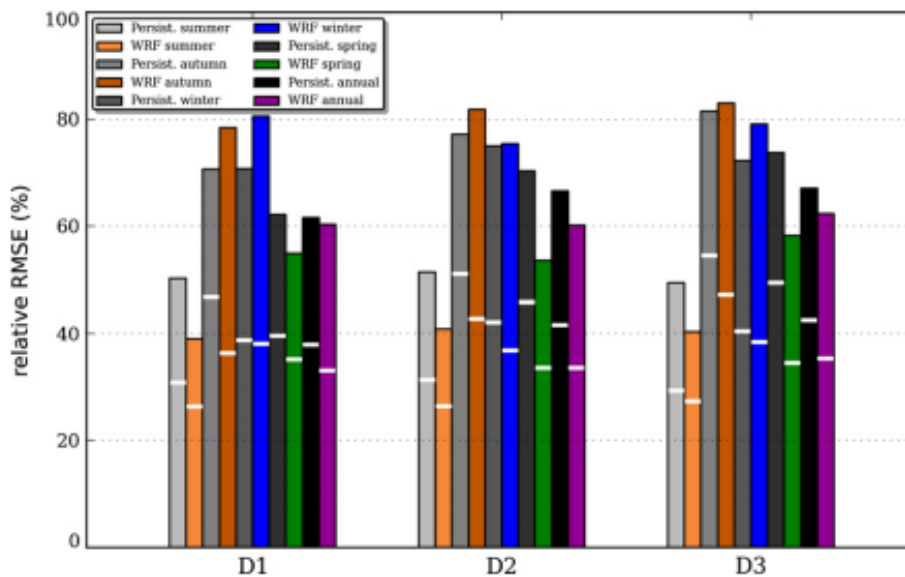


圖 13 直接日照的預測

在地面使用全天空成像儀(Total Sky Imager, TSI)，對太陽輻射進行短期預報是一項廣受肯定的實驗方法[5]，美國加州大學聖地亞哥分校在這一方面已累積很多經驗，全天空成像儀每 30 秒拍攝一張影像，然後處理，以確定雲層的光學厚度（厚或薄），及平均雲場的速度，雲的位置預測使用不變的雲平流方式，以 30 秒的間隔，作長達 15 分鐘的預測，平均而

言，不變的雲平流天氣預報，優於雲影像持續預測，同時也更能預測日照的快速變化，在 UCSD 校區分佈架設 11 個日照計，測量每秒的全天空輻射(GHI)，用以驗證預測的準確性，在不同氣象條件下，收集額外的資料，據以評估後續須改善之處。預測流程如圖 14，

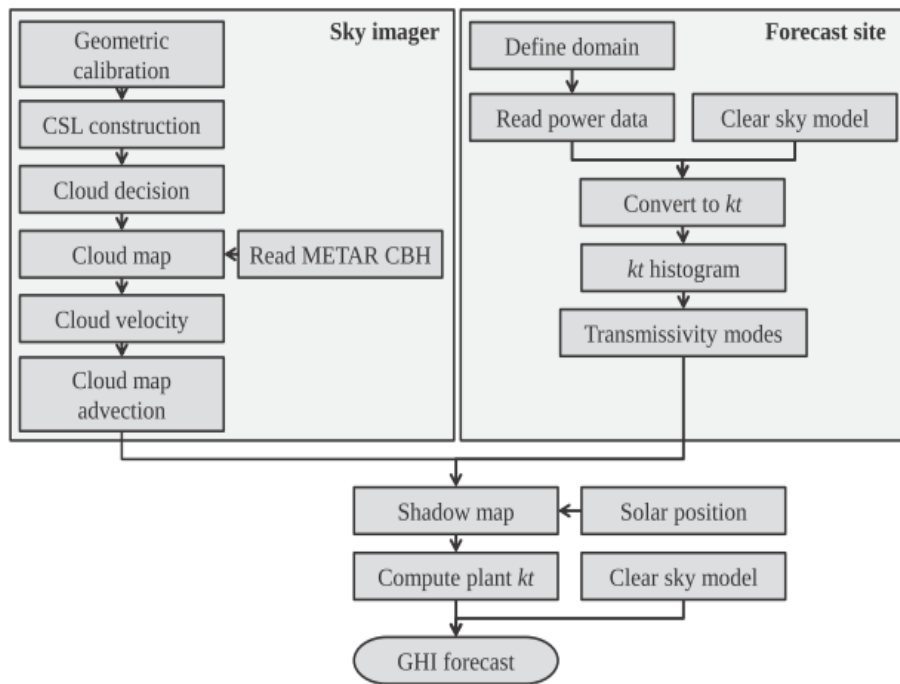


圖 14 預測流程

預測流程概分為三部份，天空成像儀部分包含：幾何校正和圖像預處理、建立晴空圖庫(Clear Sky Library, CSL)、雲的決定、建立雲圖(cloud map)、計算雲的速度向量、雲圖的流動；預測站台部分包含：定義預測的範圍、讀取發電功率資料、選擇晴空模式、轉換成晴空指數(clear sky index, kt)、計算 kt 的直方圖、建立透射模式；合併部分則包含：使用遮障圖，太陽位置，計算晴空指數，以晴空模式算出預測的全天空輻射。

2013年 R.H.Inman 等人[6]，提出一篇綜述性文章，提及在過去的幾年裡，隨著地區電網的增加，太陽能發電技術經歷強勁的能源市場的增長，更由於太陽光發電在電網參與程度增加，太陽光發電天生的高度變化本質造成電網的各種問題。因此，非常需要多個時段的高精度的太陽能預測系統。回顧一些基本概念和方法，包括太陽輻射成分，AM (Air mass)，濁度，晴空模型，晴天指數，持續預測和太陽能預報技術的評估，這些主題為太陽能預測技術奠定基礎。太陽輻射成分，太陽光由外太空到地面是複雜的多重反射、吸收及再發射等與大氣分子的互動結果，全天空輻射(GHI)是直接日照(DNI)與散射日照(DHI)的加總， $GHI = DHI + DNI \cdot \cos \theta$ ，其中， θ 為太陽天頂角，AM是指由大氣邊界層達到地面的大氣工程，濁度是產生在地面上可觀察照度的清潔及乾燥的大氣分子係數。晴空模型通常使用不同的輻射傳送模型(RTM)，以當地氣象為輸入諸如臭氧含量，水氣含量及與太陽的幾何位置，可選擇各種的晴空模型例如：Solis model、European Solar Radiation Atlas (ESRA) model、Bird and Hulstrom model、Molineaux model、Ineichen model、CPCR2 model、REST2 model、Kasten model、Polynomial fit、ASCE evapotranspiration model。晴空指數為量測日照與模型晴空的比率 $k_t = I_t / I_t^{clear}$ ，持續預測是最簡單的預測，基本假設下一預測時間晴空指數相同。

在過去發展的許多太陽能預測方法和應用之中，實驗顯示在不同空間及時間解析度得的情形下得到成功，也發展出穩健的預測方法，本文中提及預測方法包含迴歸方法、人工

類神經網路、遙測模式、數值天氣預報、地基成像及混合方法，摘要如表 3。

表 3 預測的方法

1. Regressive methods
1.1. Linear stationary models
1.1.1. Auto-Regressive (AR) models .
1.1.2. Moving Average (MA) models
1.1.3. Mixed Auto-Regressive Moving Average (ARMA) models
1.1.4. Mixed Auto-Regressive Moving Average models with exogenous variables (ARMAX)
1.2. Non-linear stationary models .
1.3. Linear non-stationary models
1.3.1. Auto-Regressive Integrated Moving Average (ARIMA) models
1.3.2. Auto-Regressive Integrated Moving Average models with exogenous variables (ARIMAX)
2. Artificial Intelligence (AI) techniques
2.1. Artificial Neural Networks (ANNs)
2.2. Early networks
2.2.1. Threshold Logic Unit (TLU)
2.2.2. Simple perceptron .
2.2.3. Adaptive Linear Neuron (ADALINE)
2.3. Multi-layer networks
2.3.1. MADALINE
2.3.2. Multi-layer perceptron
2.4. Applications of ANNs
2.5. k-nearest neighbors (k-NN)
3. Remote sensing models
3.1. Orbits
3.2. Satellites
3.3. Radiation budget
3.4. Physical satellite models
3.4.1. Gautier-Diak-Masse model
3.4.2. Marullo-Dalu-Viola model
3.4.3. Möser-Raschke model .
3.4.4. Dedieu-Deschamps-Kerr model
3.5. Statistical satellite models
3.5.1. Hay-Hanson model
3.5.2. Tarpley & Justus-Paris-Tarpley models
3.5.3. Cano-HELIOSAT model
3.5.4. Perez Operational model
4. Numerical Weather Prediction (NWP)
4.1. Global Forecast System (GFS)
4.2. Regional NWP models
4.2.1. Rapid Update Cycle (RUC)/RAPid refresh (RAP) models
4.2.2. North American Mesoscale (NAM) model
4.2.3. High Resolution Rapid Refresh (HRRR) model
4.2.4. Weather Research and Forecasting (WRF) model
5. Local sensing
5.1. Sky imagers
5.2. Wireless sensor networks
5.3. Pyranometer arrays
6. Hybrid systems

摘要描述各種方法如下：迴歸方法，具有觀測與數據相關聯的優勢，在數據不佳和數據豐富的環境，通常工作良好，在數據不佳的環境中，人們可能只能處理以往的感測資料或電輸出數據，可以使用諸如 AR、MA、ARMA 和 ARIMA。

另一方面，在數據豐富的環境，人們可以有機會獲得廣泛的附加數據，如觀測的時間演化的物理量。在這些環境中，外部輸入經過仔細的選擇，這些隨機學習方法已被應用到各種各樣的預測時間範圍，從小時以內至年度；人工類神經網路（ANN）的建模提供了改善的非線性近似性能，當輻射數據足夠時，提供一種替代物理建模的方法，人工神經網路是通用的非線性近似，能夠提供非線性多變數的解決方案，通常沒有時間範圍的限制，這些技術已成功用在小時以內至以年度的時間跨距預測；衛星成像提供一種替代昂貴的地面日照強度計網路的方案，允許預測太陽輻射時間跨度從小時以內到日以內，此方法受到衛星的取樣頻率和空間解析度的限制；數值天氣預報(NWP)允許在沒有密集地面網路可用的情形下，對雲層位置的時間進程建模，NWP 模式具可擴展性，能模擬區域或全球大氣的發展，大氣的大型模型的結果，數值預報模型提供了最有吸引力的長期時間的預測；對於短時間的預測，地基成像（以及無線網絡系統）是非常有前途的，使用天空成像儀可用於地區的 2 到 20 分鐘的預測；最近，各種混合方法結合兩個或兩個以上的技術已被提出，這些方法提供優於傳統方法的許多特點，包括結合隨機和確定性能力的預測，結合數值天氣預測模式及衛星模型與隨機學習方法，其結果是提昇預測的精確度及更增加時間範圍的選擇，同樣的道理，吸收當地從天空成像儀和無線傳感器得到的氣象信息，通過隨機學習方法，應導致更多時間解析度及空間解析度的選擇，也達成更正確的預測。

二、NWP模擬系統(太陽能)及環境之溫度、濕度、風速、風向等

模擬預測分析

1. WRF (Weather Research and Forecasting)模式介紹

本研究使用 WRF 模式輸出之溫度、濕度、風速、風向等氣象因子評估其對 HCPV 系統整體效益之影響。WRF 是由美國國家大氣研究中心 (National Center for Atmospheric Research) 主導研發，為一種中尺度數值天氣預報系統。WRF 的模擬流程可分為「外部資料取得」、「前處理」、「初始化與模擬」及「後處理視覺化輸出」等 4 部分。外部資料區分為地表資料及網格資料，地表資料為全球真實經緯網格 $30'' \times 30''$ (約 $0.87 \text{ km} \times 0.87 \text{ km}$) 的空間解析度，本研究的網格資料，也就是初始場及邊界值採用美國國家環境預報中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 的最終分析資料 (Final Analysis)，資料網格解析度為 $1^\circ \times 1^\circ$ ，垂直空間解析度為 27 層，時間間距為每 6 小時一筆。前置處理系統 WPS (WRF Preprocessing System) 區分為三個模組，分別為 Geogrid、Ungrib、Metgrid，並透過 Namelist.wps 來控制各模組執行的細節。Geogrid 負責定出各層巢狀網格的大小、範圍、水平解析度，並產生各層網格所需之地表資料 (如地形、植被、土壤類型等)；Ungrib 模組將輸入之網格資料轉換格式為供 WRF 使用，最後 Metgrid 模組將轉換格式後之網格資料與地形資料結合，進行水平內插，產生與各層巢狀網格相同範圍及解析度之資料，WPS 處理流程如圖 15 所示。

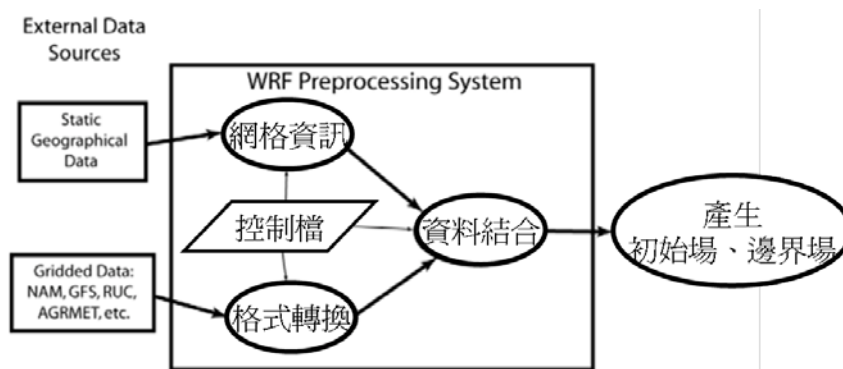


圖 15 WRF 前置處理系統(WPS)流程圖

「初始化與模擬」區分為 REAL 及 WRF 兩模組，REAL 負責將 Metgrid 產生之網格資料進行垂直內插，以產生模擬所需之初始場及邊界場，WRF 為模式主程式，依細部設定進行積分，WPS 及「初始化與模擬」之流程如圖 16 所示。最後「後處理視覺化輸出」即將模擬完成的檔案轉為分析判讀各量場所需的型態，本研究主要輸出為輻射傳送方程模擬所需之雨 (Rain)、雲水 (Cloud Liquid Water)、軟雹 (Graupel)、雲冰 (Cloud Ice Water)、雪 (Snow) 等垂直水象成份數值輸出。完整的模擬流程如圖 17 所示。

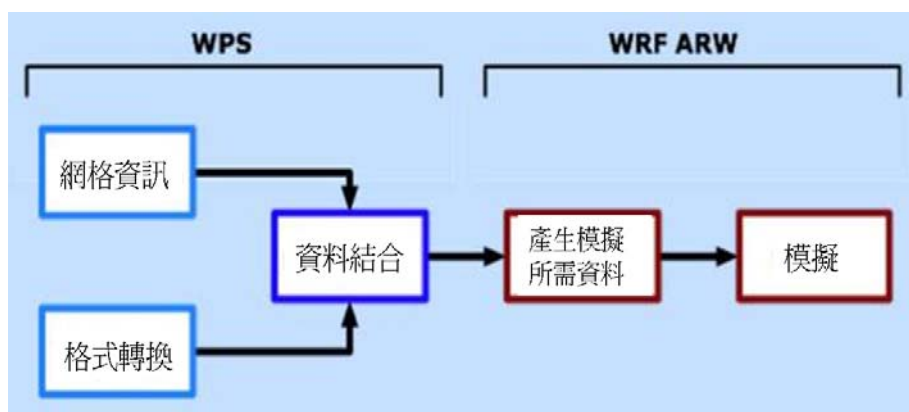


圖 16：前置處理系統(WPS)及「初始化與模擬」關係流程圖

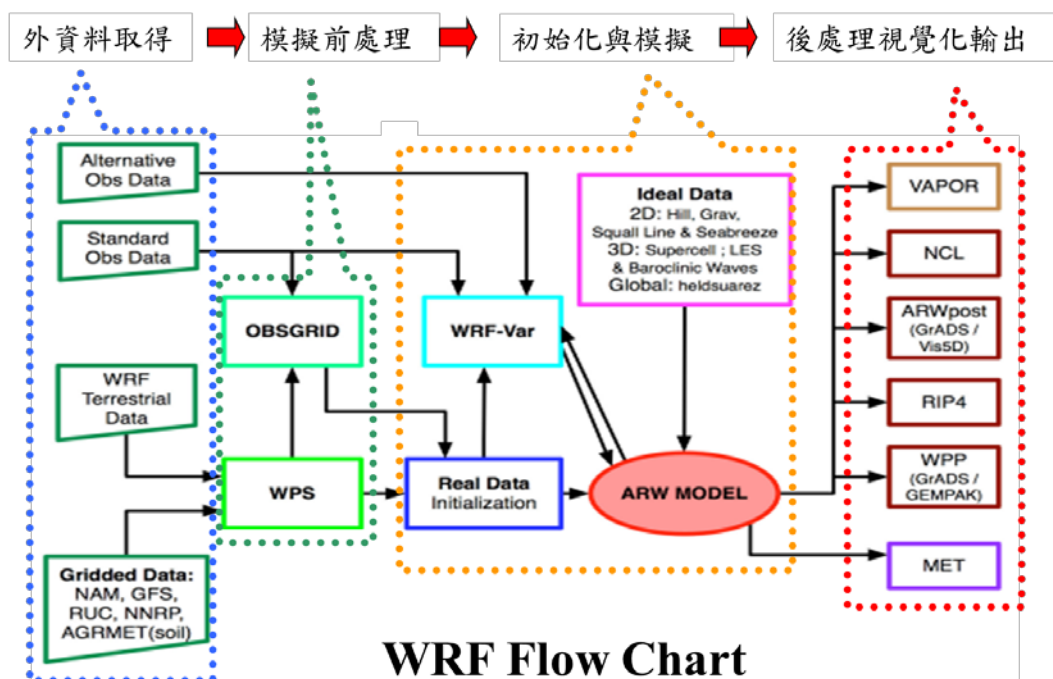


圖 17 WRF 模擬流程圖

WRF 模式中有數種微物理法、邊界層參數化法及積雲參數化法。本研究採用 Goddard GCE scheme 微物理參數法，該參數法適用於冰、雪、軟雹的高解析度模擬；YSU (Yonsei University) 邊界層參數化法；以及 KF (Kain-Fritsch) 積雲參數化法，此參數法為利用質量流量法(Mass Flux Approach)來求對流事件。本研究建立條件機率分布時，本研究所使用之 WRF 為第 3.1 版，模式三層巢狀網格設定，外層粗網格(D1)解析度為 90 公里，第二層網格(D2)解析度為 30 公里，內層細網格(D3)解析度為 10 公里，模擬預報時間 24 小時。

2. WRF 溫度、濕度、風場輸出產品

WRF 模式因應本研究需求可輸出每小時各個高度層的溫度、濕度、風場，以下為 11 月 12 日處理之個案，以 08:00 和 17:00 兩個時間點之台灣地區:北緯 21.5~25.5 度、東經 120~122 度分別舉例說明如下，圖 18 為地表面溫度(°C)，圖

19 為 2 公尺高度氣溫($^{\circ}\text{C}$)，圖 20 為 2 公尺高度混合比濕度(g/kg)，圖 21 為風場(m/s)的分布圖。

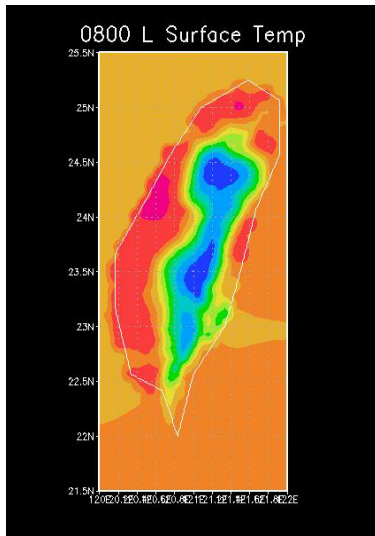


圖 18(a) 08:00
地表面溫度($^{\circ}\text{C}$)

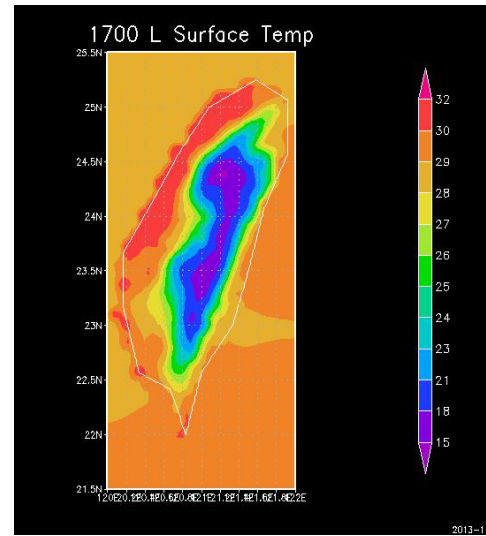


圖 18 (b) 17:00
地表面溫度($^{\circ}\text{C}$)

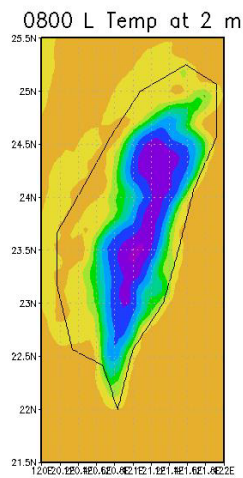


圖 19 (a) 08:00
2 公尺高度氣溫($^{\circ}\text{C}$)

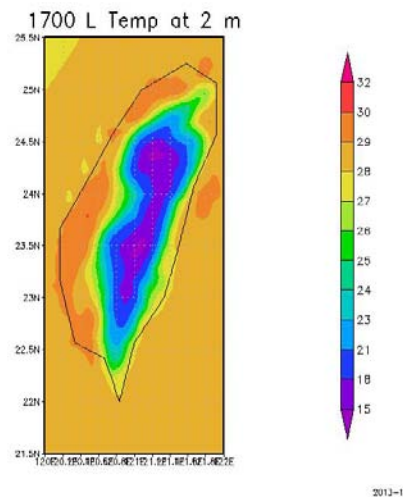


圖 19 (b) 17:00
2 公尺高氣溫($^{\circ}\text{C}$)

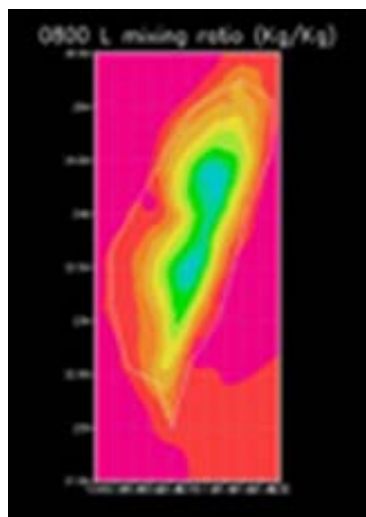


圖 20 (a) 08:00

2 公尺高度濕度混合比(g/kg)

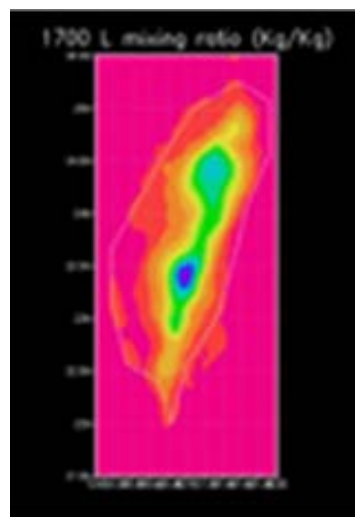


圖 20 (b) 17:00

2 公尺高度濕度混合比(g/kg)

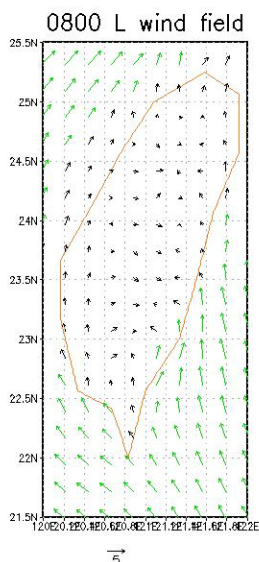


圖 21 (a) 08:00

2 公尺高度風場(m/s)

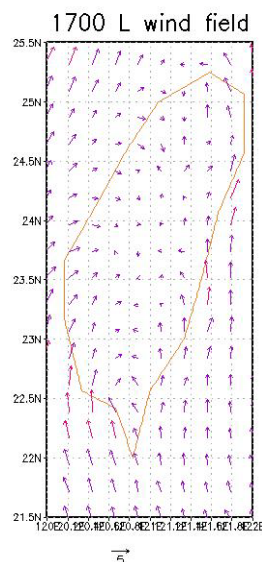


圖 21 (b) 17:00

2 公尺高度風場(m/s)

影響 HCPV 發電系統性能的因素相當多，大致可區分為氣象因素，例如：輻射通量、輻射頻譜、大氣溫度、濕度、風速、風向；以及操作因素，例如：自我遮蔽、污斑、追蹤誤差等。但輻射通量、輻射頻譜、太陽電池模組溫度等的影響已經相當明確，所以以下針對大氣溫度、濕度、風速、風向等因素對 HCPV 整體性能之影響進行探討。

三、環境變動因素對於HCPV系統之品質管制分析

HCPV 發電系統具有高度的複雜性，除系統本身的可靠性與精確性需求外，其實際輸出功率主要還受太陽輻射照度的影響，這是因為太陽輻射單位面積能量密度低，時間上具有較大的不連續性和不穩定性。它不僅受季節和地理因素的影響，而且與當時的大氣透明度、水氣含量、氣懸膠(aerosol)、雲量、雲狀、雲與太陽的相對位置等有密切相關[7]。因此，本分計畫工作的重點在於分析環境條件與地理位置等要素對太陽能發電的影響，希望進而了解發電穩定性的掌握，或提供用作太陽能預測模式建立的參考。基於影響 HCPV 系統發電的因素分析，本身是預報模式能夠準確的要件，兩者也具互相輔佐的關係；而預報方式又分對於太陽輻射或太陽能發電量兩種，因此，在國內外有關本計畫之執行情況上將一併說明。

(一)相關之國內研究情況說明如下：

影響 HCPV 系統發電的因素相當複雜，綜合國內研究情況，大致可區分為設備本身因素，例如：設備品質、排熱性、模組轉換效率、電池特性；操作因素，例如：追蹤誤差、模組溫度、元件劣化、故障等；氣象因素，例如：直接日照(Direct Normal Irradiance, DNI)、大氣溫度、濕度、風速、風向；環境因素，例如：灰塵、髒汙、雨量、自我遮蔽；以及地理因素，例如：方位角、傾斜角、日照強度、年日照時數[7-9]等。另在前述研究[7]中顯示，太陽能發電系統的實際輸出功率主要受太陽輻射照度的影響，而即使單就太陽輻射的影響因子觀之，依據徐翠華[10]進行的研究，則大致亦可分為天文因

子：太陽常數、日地距離、太陽赤緯、時角；地理因子：測站緯度、經度、海拔高度；幾何因子：太陽高度角、太陽方位角、接收器平面對地平面的傾斜度及傾斜面的方位角；物理因子：純大氣的消光、大氣中的含水量、大氣中的臭氧含量；以及氣象因子：日照百分率、天空雲量、地面反射率等五類。值得注意的是，台灣本島的地理與環境，跟歐美或大陸又有區域上之差異性，而且本身在高山、平原、海邊，或工業區與非工業區間，也有差異性存在。譬如台灣東部鄰海區域，特殊的環境有空氣中的鹽霧，或夏天風大吹起河床底部沙子所造成之沙塵暴；特殊的氣候則是高低溫差大、而時有焚風、甚至是颱風。這些因素都可能造成 HCPV 模組之鏽蝕、損壞，或者發電功率降低。

以上初步說明對太陽能發電的影響因素種類之研究，對於其間如何影響的探討則有：陳斐文[8]利用迴歸分析灰塵及髒汙對太陽能發電系統影響，並解析聚光型太陽電池模組於下雨或清洗前後的變化，及解釋因安裝位置不同，太陽電池模組受環境因素影響的程度也不同。高翊倫[9]主要是以太陽能發電系統之發電量預測模型為主，分別應用遺傳規劃法 (Genetic Programming, GP) 與時間序列分析 (Time Series Analysis)，探討系統轉換效率與台灣地區的地表日照亮之影響。李昌晏[12]利用 PSpice 模擬軟體分析不同太陽能電池陣列遮蔽情況下之功率-電壓輸出特性曲線之變化情形。蕭德仁[13]對高雄地區之日照量、太陽能板陣列仰角角度、模組溫度、及清洗等因素與太陽能系統發電量之關係進行研究。陳雅鈴[14]以 TRNSYS 軟體模擬，搭配四種追日控制方式（開

迴路追日控制、閉迴路追日控制、混合式追日控制及指向誤差修正追日控制)，分析所產生的不同追日偏差，對中壢地區的聚光型太陽光電系統之電力性能影響。鄧劭殷[15]利用逐步迴歸(Stepwise Regression)分析法與自組性演算法(Group Method of Data Handling, GMDH)建構發電量預測模式，針對過去台灣地區之太陽光電發電系統之實際發電量資料進行分析，以找出影響系統發電量之重要因素。Tsai[16]以建置在屏東科技大學的 HCPV 模組為例，考量環境溫度與直接日照等因素，驗證三個不同型態的模組溫度預測方程式，以及與太陽能發電之關係。

(二)相關之國外研究情況說明如下：

直接日照是高聚光太陽光發電 (High Concentrated Photovoltaic, HCPV) 系統中最主要的能量來源。但是 DNI 主要易受到雲、氣懸膠(aerosol)、水氣(water vapor)三個氣候因素的影響[7]。在聚光光伏領域，光能放大倍數越高，要求系統精度就越高。大陸學者馬金玉等[17]提及精確的太陽能預報是基於輻射傳送理論，即太陽輻射穿過大氣層傳輸到達地面的物理過程，包括雲、氣溶膠、水氣等對輻射的吸收、散射和反射的機理，通過地面氣象觀測、高空大氣探測、衛星遙感、數值模擬等手段獲得相關要素的資訊，包括大氣透明度、水氣含量、氣溶膠、雲量、雲狀、溫度、濕度等要素，根據這些參數建立太陽輻射預報模型。大陸學者孫川永等[18]則論及太陽光發電功率主要受接收太陽輻射強度之影響，而太陽輻射又受地形、太陽角度、氣象因素等所決定，由於地球自轉及氣象條件的影響，太陽光發電功率會呈現間歇式、隨機

波動的特點。大陸學者李芬等[19]歸納目前太陽光發電預報技術主要可分為三類：一是基於太陽總輻射預報和光伏 I/V 特性曲線仿真模型法，二是基於太陽總輻射預報和光電轉換效率模型法，三是基於歷史氣象資料(天氣情況、太陽總輻射資料)和同期太陽光發電量資料，採用統計方法(如多元迴歸、神經網絡等相關算法)進行分析建模的統計預報法。國外對太陽能發電的影響因素種類之研究，大致與國內研究者所提相同[20-25]，主要包含總輻照度、固定光譜輻照度，風速、空氣溫度、大氣光程(Air Mass)，水氣，氣溶膠，緯度，土壤、灰塵、雨、雪等，以及影響氣象變量的季節性和地理性。在太陽能預測方法上，Kleissl [26]認為與時間尺度的長短關係密切，可根據需要分為幾秒或幾分鐘、幾小時、或幾天，而對聚光太陽光發電系統而言，直接日照(DNI)的預測是最必要的。國外太陽輻射預報的方法主要可分成：基於傳統統計方法和人工神經網路的預測方法、基於衛星雲圖資料的外推方法、及利用數值天氣預報結果進行統計訂正的方法等三類。另外，對太陽光發電量預測方法主要是根據太陽光發電的原理和光電轉換效率，建立影響光電轉換效率的經驗公式和合理的經驗係數，輸入輻射預報，進行太陽光發電量預報。該方法的效果主要決定於光電效率模型和輻射預報的準確性[17，19，26~29]。

綜觀以上文獻，預測太陽輻射是對預測的太陽能能量轉換系統的性能，並確保電網的穩定運行的重要的第一步。而對於太陽輻射或太陽能發電預測精確的先決條件是先要瞭解影響的環境條件與地理位置要素有哪些？如何影響？

與影響程度為何？因此，本研究單元以分析環境條件與地理位置等要素對太陽能發電的影響為題，希望藉由核研所在全台之太陽能及環境資料收集站資料，對 HCPV 系統的發電品質，發揮管控的效果，以強化太陽能電力調度的效能。

對於太陽輻射或太陽能發電預測精確的先決條件是先要瞭解影響的環境條件與地理位置要素有哪些？如何影響？與影響程度為何？本研究單元先對一般的環境因素對太陽能發電的影響進行分析，並考慮台灣地理位置與環境條件的自有獨特性，以目前核能所建置太陽能發電場域的資料收集站之資料為基礎，進行影響因素之數值化分析。另一方面，本研究單元也嘗試將 WRF 模式輸出之地區化的溫度、濕度、風速、風向等氣象因子評估其對 HCPV 系統整體效益之分析作一整合，當成後續進行比較與分析時之工作，希望未來對這兩種不同來源資料的品質提升都能有所助益。整體研究步驟與執行重點簡述如圖 22 所示。

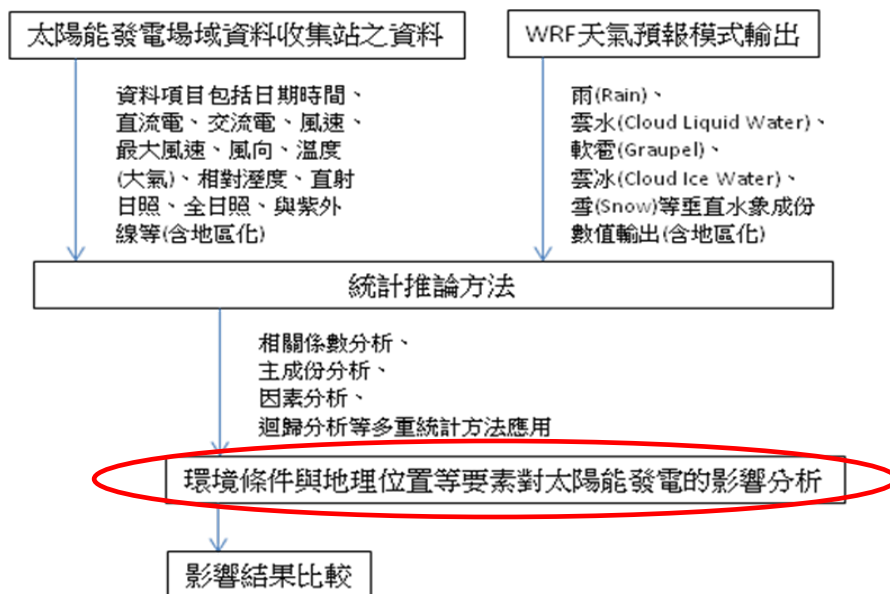


圖 22 本研究單元執行步驟與重點

參、主要發現與結論

一、完成地區化NWP系統參數的模擬分析

(一) 地面太陽輻射觀測資料統計

為了解台灣地區到達地表的太陽輻射統計特性，以及未來作為模式模擬地面太陽輻射量的驗證。本研究利用中央氣象局永康地面太陽觀測站提供為期一年(2011年2月~2012年1月)的逐日地面觀測資料求得月平均全天空輻射量(GHI)。圖中顯示各月份大致上從6時日出後，太陽輻射量逐漸增加，到13時左右達到峰值，然後隨著太陽西斜後，太陽輻射量逐漸減少，到19時左右降到最小值。但是到達地面太陽輻射量 and 在大氣層頂的太陽日射量並不一致，這主要受到地面上空雲量、氣懸膠體、臭氧含量等散射和吸收削弱影響。因此永康地區地面太陽全天空輻射量月平均大小依序為6月、8月、9月、7月、5月、10月、4月、2月、3月、1月、11月、12月，但是約13時，最大值卻不是6月而是9月，可能原因是6月和8月時雲量較9月為多，如圖23所示。

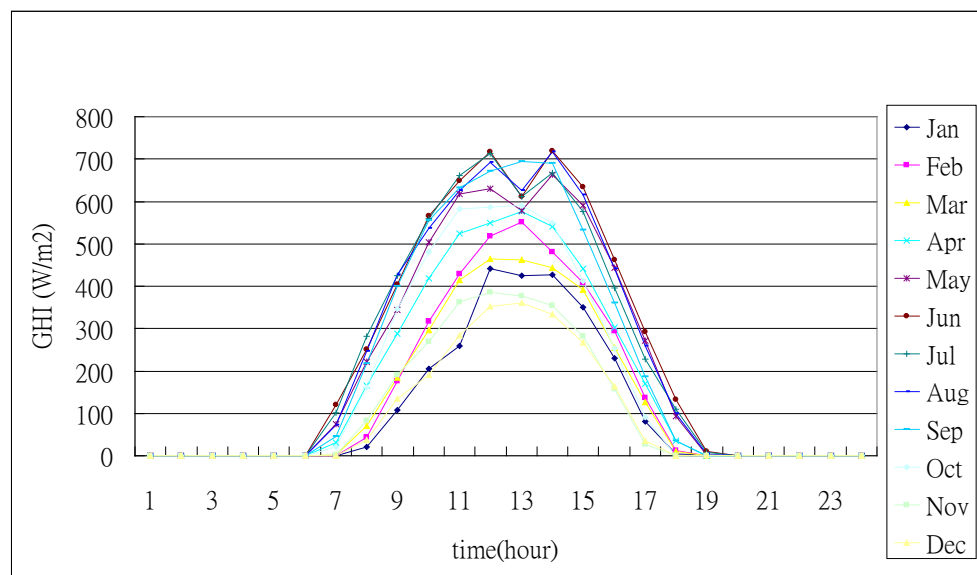


圖 23 台南永康太陽觀測站 GHI 的月平均

(二) WRF模式模擬台灣地區上空雲量

WRF 模式可模擬液態雲水，當混合比大於 0.0001 kg/kg 時，可視為有雲存在，以下三張圖為 WRF 模式模擬一個對流系統發展的個案。圖 24 為 900 mb(約 1 km)高度處雲量的分布(液態雲水混合比 $> 0.0001 \text{ kg/kg}$)，除東部海面外，大都沿中央山脈兩側山麓發展。圖 25 為 700 mb(約 3 km)高度處雲量的分布，大都在中央山脈上發展。圖 26 為 500 mb(約 5 km)高度處雲量的分布，在中央山脈較少地方上發展。

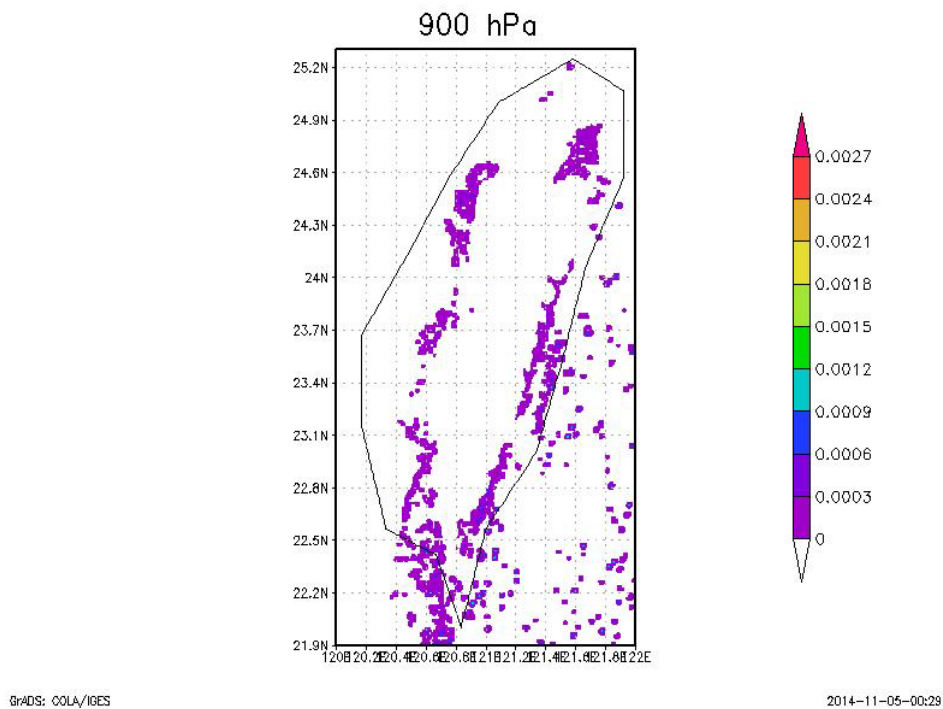
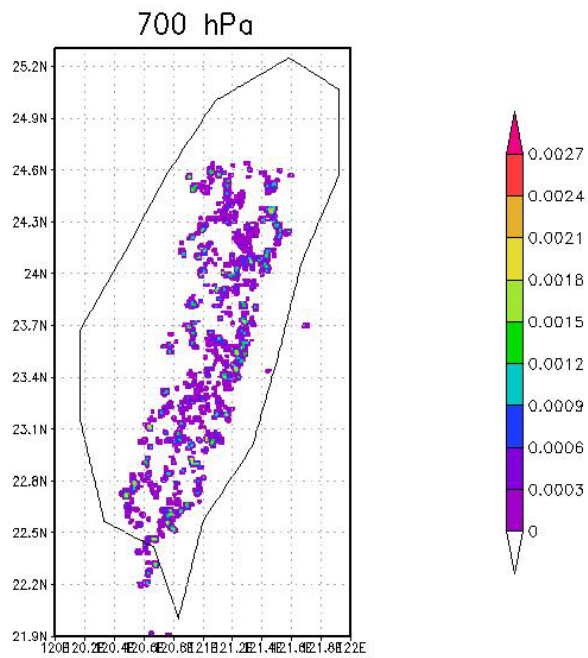


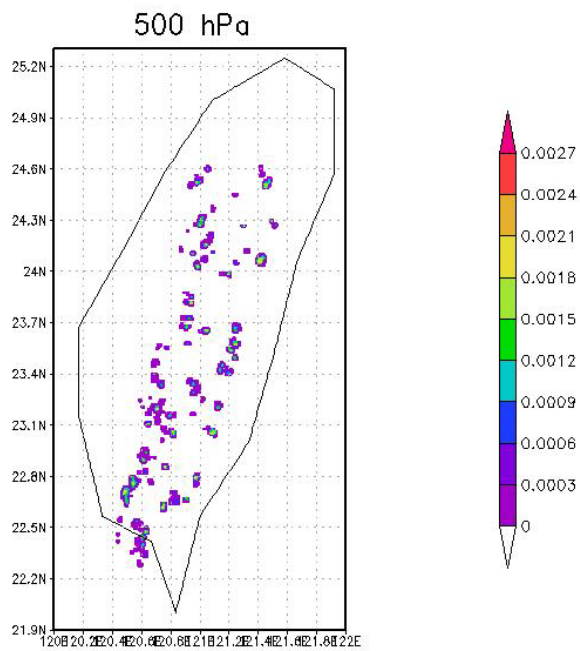
圖 24 WRF 模式-900mb(約 1km)高度處雲量分布



GrADS: COLA/IGES

2014-11-05-00:29

圖 25 WRF 模式-700mb(約 3km)高度處雲量分布



GrADS: COLA/IGES

2014-11-05-00:29

圖 26 WRF 模式-500mb(約 5km)高度處雲量分布

(三) WRF模式模擬地面太陽全天空輻射量

此部分分別模擬在晴空、多雲及降雨情況下，地面太陽全天空輻射量在台灣地區的分布概況。

1. 晴空時台灣地區地面太陽全天空輻射量分布概況

圖 27 為 2011 年 9 月 30 日 12 時的可見光衛星雲圖，圖中顯示台灣大部分是晴空，只有中央山脈上空有些裂雲存在。圖 28 即為 WRF 模式模擬之地面太陽全天空輻射量，由圖中顯示除中央山脈上方部分有雲地區在 $300\sim600\text{ w/m}^2$ 外，其他地區約在 $700\sim900\text{ w/m}^2$ 之間。

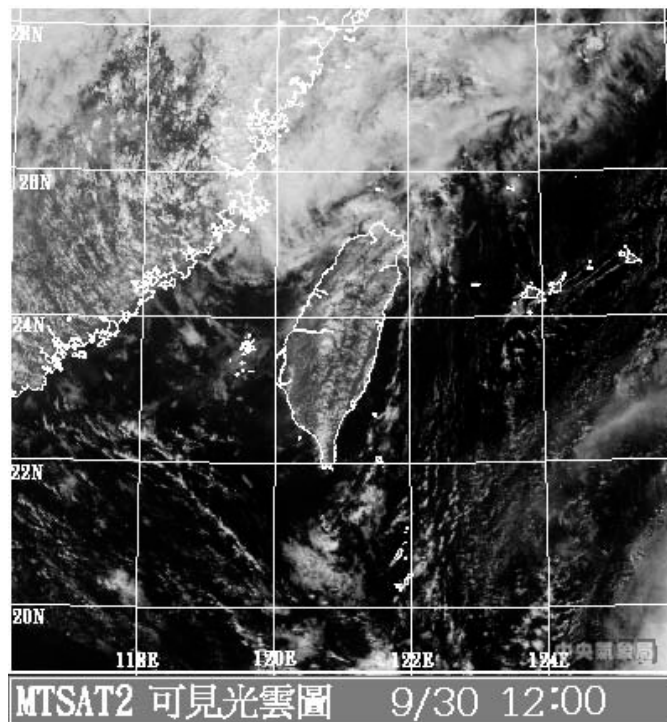
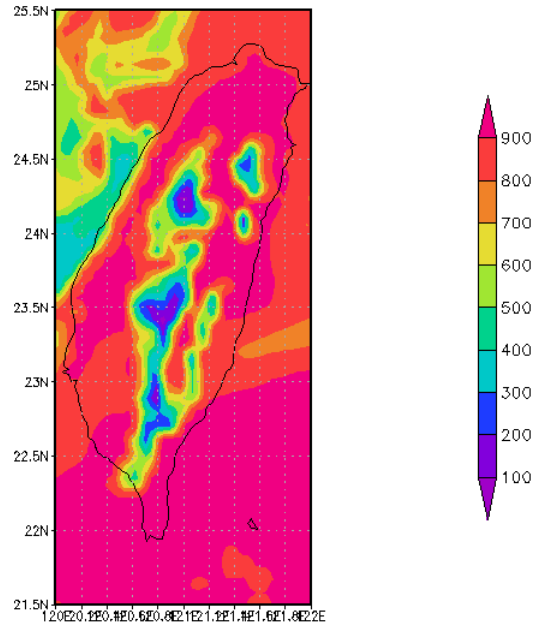


圖 27 為 2011 年 9 月 30 日 12 時的可見光衛星雲圖

horizontal-irradiance20110930-1200L



GrADS: COLA/IGES

2013-03-22-00:46

圖 28 WRF 模式模擬 2011 年 9 月 30 日 12 時地面太陽全天空輻射量

2. 多雲時台灣地區地面太陽全天空輻射量分布概況

圖 29 為 2011 年 5 月 27 日 12 時的可見光衛星雲圖，圖中顯示台灣位於颱風外圍環流，大部分為雲壟罩，只有西部地區有些薄雲存在。圖 30 為同一時間之紅外線衛星雲圖，圖中顯示西部地區的薄雲顏色灰黑，代表溫度高，所以屬於低層薄雲。圖 31 即為 WRF 模式模擬之地面太陽全天空輻射量，由圖中顯示除中央山脈東北部及上方部分雲區在 $100\sim 500\text{ w/m}^2$ 外，其他西部地區約在 $800\sim 900\text{ w/m}^2$ 之間。

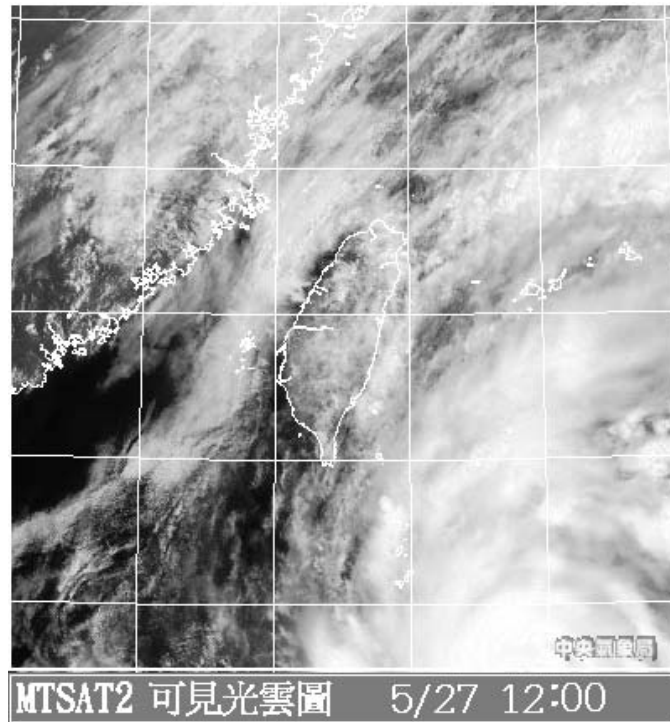


圖 29 為 2011 年 5 月 27 日 12 時的可見光衛星雲圖

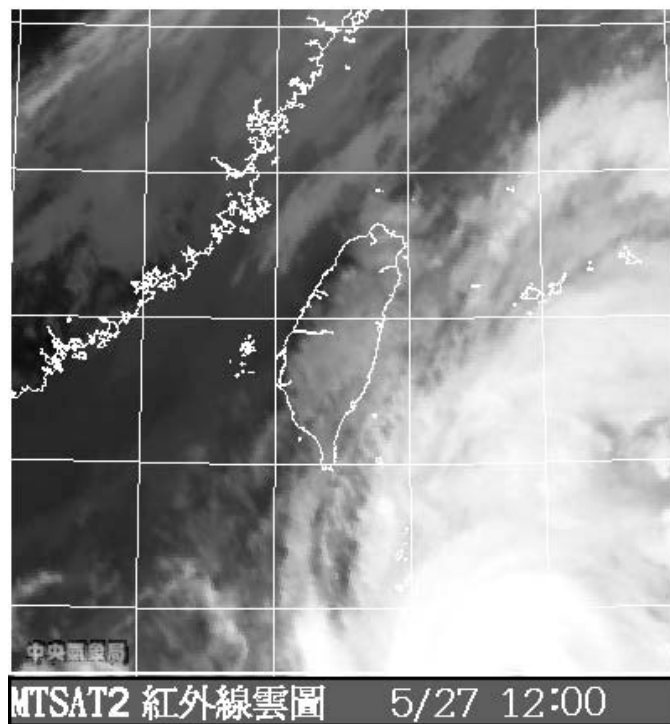
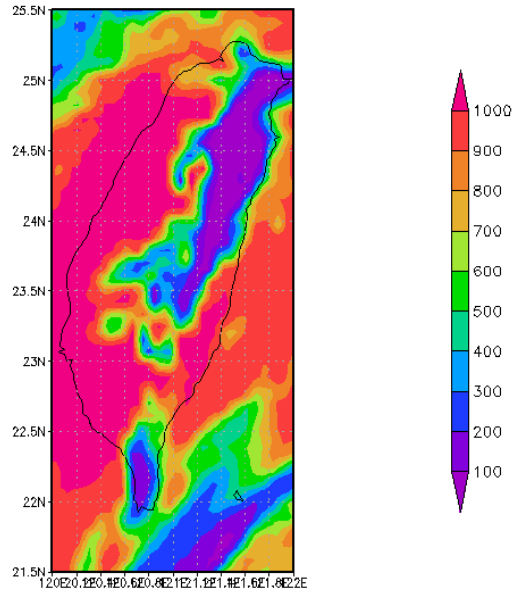


圖 30 為 2011 年 5 月 27 日 12 時的紅外線衛星雲圖

horizontal-irradiance20110527-1200L



GRADS: COLA/IGES

2013-03-22-00:52

圖 31 WRF 模式模擬 2011 年 5 月 27 日 12 時地面太陽全天空輻射量

3. 降雨時台灣地區地面太陽全天空輻射量分布概況

圖 32 為 2011 年 5 月 27 日 12 時的可見光衛星雲圖，圖中顯示台灣位於颱風外圍雨帶，大部分為雲雨壟罩。圖 33 即為 WRF 模式模擬之地面太陽全天空輻射量，由圖中顯示全台在 $0\sim 500\text{ w/m}^2$ 之間，只有極小裂雲地區約在 $700\sim 800\text{ w/m}^2$ 之間。

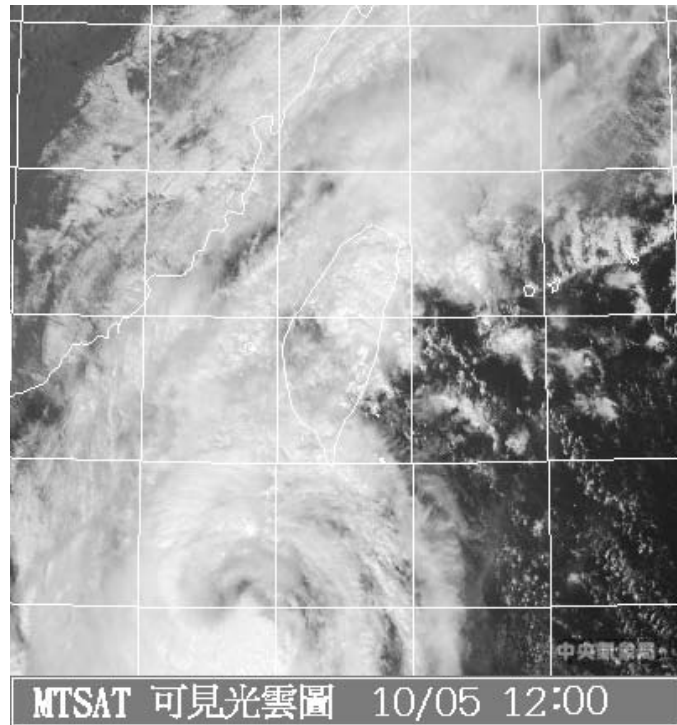
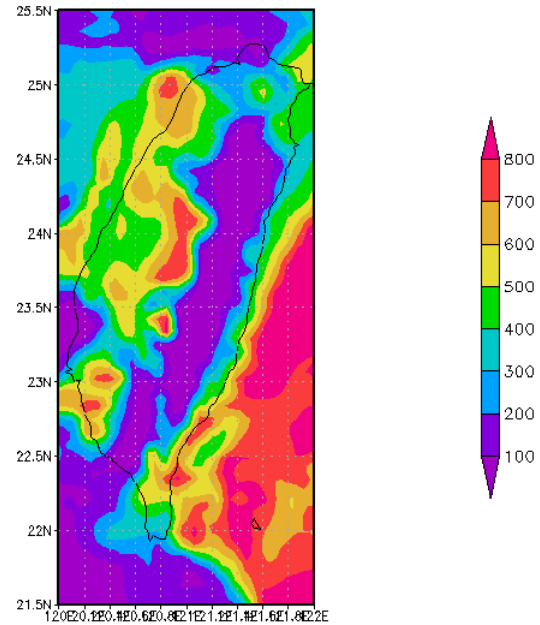


圖 32 為 2011 年 10 月 5 日 12 時的可見光衛星雲圖

horizontal-irradiance20091005-1200L



GrADS: COLA/IGES

2013-03-22-00:56

圖 33 WRF 模式模擬 2011 年 10 月 5 日 12 時地面太陽全天空輻射

二、環境變動因素對於HCPV系統之品質管制分析

在「多區域 HCPV 系統資料整合與分析暨環境因素之影響評估」[7]的研究中，已將計畫委託單位所提供，隨機抽取的四座 HCPV 系統基座之發電與環境資料(共包括日期時間、直流電、交流電、風速、最大風速、風向、溫度(大氣)、相對溼度、直射日照、全天空輻射、與紫外線等 11 個項目)，經由相關係數分析、主成份分析、因素分析、迴歸分析、與自我相關排除等統計方法，得出其中直流電與各種環境因素間的關係，以及受這些因素影響的程度。本研究的目的則在分析環境條件與地理位置等要素對太陽能發電的影響，希望研究結果可以作為對 HCPV 系統進行品質管制之依據，並成為系統維護之參考。

本研究部分所使用資料，係由計畫委託單位所提供之北部、中南部與南部等建置有 HCPV 系統之三個基地的發電與環境資料為對象，進行不同地區、日期、時間之環境因素差異性分析。資料先經系統抽樣自七月、八月、九月、與十月各一日，在 DNI 超過 0.3 的條件下，取九時至十五時六個小時的每小時平均值為準，完成之實地資料彙整如表 4。分析軟體則以 SPSS (Statistical Package for the Social Science)統計分析套裝軟體為主，分別探討在不同地區、不同日期、及不同時間下之不同環境因素變動狀況。

表 4 實地資料彙整

地區	日期	時間	環境因素				
			最大風速	...	大氣溫度	直射日照	紫外線
甲地	日期一	10 時	0.147	...	30.235	0.661	32.691
		11 時	1.524	...	31.809	0.692	39.680
		12 時	2.207	...	32.422	0.691	42.385
		13 時	2.625	...	32.562	0.620	41.436
		14 時	4.427	...	31.625	0.557	38.681
		15 時	4.586	...	31.287	0.398	29.914
	日期二	10 時	4.003	...	30.784	0.832	33.587
		11 時	3.891	...	31.801	0.847	40.843
		12 時	3.825	...	32.871	0.843	43.702
		13 時	4.217	...	33.563	0.843	44.339
		14 時	4.446	...	33.970	0.810	39.740
		15 時	4.306	...	33.449	0.638	29.899
...	
丙地	日期三	10 時	6.145	...	30.719	0.815	40.758
		11 時	6.666	...	32.185	0.884	49.215
		12 時	6.882	...	33.775	0.881	52.206
		13 時	6.834	...	36.562	0.886	52.701
		14 時	6.857	...	37.788	0.867	48.194
		15 時	6.856	...	38.276	0.766	39.051
	日期四	10 時	3.579	...	29.575	0.584	34.812
		11 時	3.701	...	30.867	0.682	42.376
		12 時	3.712	...	31.966	0.686	45.532

	13 時	3.375	...	35.725	0.649	43.738
	14 時	2.942	...	38.126	0.587	39.102
	15 時	3.052	...	36.263	0.357	31.587

(一) 不同地區與日期在環境因素上之變異分析

將表 4 之資料以 SPSS 對不同地區與日期在環境因素上之影響進行二因子多變量變異數分析，可得多變量檢定表如表 5 所示。檢視其中的 Wilks' Lambda 值可知，不同的地區、日期、或地區與日期的交互影響上，其環境因素上均有顯著的不同。

表 5 地區與日期之環境多變量檢定表

多變量檢定^c

效應項		數值	F 檢定	假設自由度	誤差自由度	顯著性
截距	Pillai's Trace	.997	6582.855 ^a	3.000	58.000	.000
	Wilks' Lambda 變數選擇法	.003	6582.855 ^a	3.000	58.000	.000
	多變量顯著性檢定	340.492	6582.855 ^a	3.000	58.000	.000
	Roy 的最大平方根	340.492	6582.855 ^a	3.000	58.000	.000
地區	Pillai's Trace	.925	16.915	6.000	118.000	.000
	Wilks' Lambda 變數選擇法	.246	19.634 ^a	6.000	116.000	.000
	多變量顯著性檢定	2.368	22.495	6.000	114.000	.000
	Roy 的最大平方根	2.025	39.824 ^b	3.000	59.000	.000
日期	Pillai's Trace	.604	5.040	9.000	180.000	.000
	Wilks' Lambda 變數選擇法	.444	6.211	9.000	141.307	.000
	多變量顯著性檢定	1.143	7.198	9.000	170.000	.000
	Roy 的最大平方根	1.042	20.843 ^b	3.000	60.000	.000
地區 * 日期	Pillai's Trace	.654	2.786	18.000	180.000	.000
	Wilks' Lambda 變數選擇法	.377	3.762	18.000	164.534	.000
	多變量顯著性檢定	1.570	4.941	18.000	170.000	.000
	Roy 的最大平方根	1.516	15.160 ^b	6.000	60.000	.000

a. 精確的統計量

b. 統計量為在顯著水準上產生下限之 F 的上限。

c. 設計: Intercept+地區+日期+地區 * 日期

(二) 不同地區與時間在環境因素上之變異分析

將表 4 之資料以 SPSS 對不同地區與時間在環境因素上之影響進行二因子多變量變異數分析，可得多變量檢定表如表 6。檢視其中的 Wilks' Lambda 值可知，不同的地區、時間、

或地區與時間的交互影響上，其環境因素上均有顯著的不同。

表 6 地區與時間之環境多變量檢定表

多變量檢定^c

效應項		數值	F 檢定	假設自由度	誤差自由度	顯著性
截距	Pillai's Trace	.999	14199.774 ^a	3.000	52.000	.000
	Wilks' Lambda 變數選擇法	.001	14199.774 ^a	3.000	52.000	.000
	多變量顯著性檢定	819.218	14199.774 ^a	3.000	52.000	.000
	Roy 的最大平方根	819.218	14199.774 ^a	3.000	52.000	.000
地區	Pillai's Trace	1.299	32.755	6.000	106.000	.000
	Wilks' Lambda 變數選擇法	.097	38.421 ^a	6.000	104.000	.000
	多變量顯著性檢定	5.250	44.628	6.000	102.000	.000
	Roy 的最大平方根	4.297	75.915 ^b	3.000	53.000	.000
時間	Pillai's Trace	1.344	8.765	15.000	162.000	.000
	Wilks' Lambda 變數選擇法	.078	14.533	15.000	143.951	.000
	多變量顯著性檢定	6.393	21.593	15.000	152.000	.000
	Roy 的最大平方根	5.409	58.418 ^b	5.000	54.000	.000
地區 * 時間	Pillai's Trace	.847	2.125	30.000	162.000	.002
	Wilks' Lambda 變數選擇法	.215	3.522	30.000	153.306	.000
	多變量顯著性檢定	3.372	5.695	30.000	152.000	.000
	Roy 的最大平方根	3.285	17.740 ^b	10.000	54.000	.000

a. 精確的統計量

b. 統計量為在顯著水準上產生下限之 F 的上限。

c. 設計: Intercept+地區+時間+地區 * 時間

(三) 不同日期與時間在環境因素上之變異分析

將表 4 之資料以 SPSS 對不同日期與時間在環境因素上之影響進行二因子多變量變異數分析，可得多變量檢定表如表 7。檢視其中的 Wilks' Lambda 值可知，不同的日期與不同的時間，其環境因素上均有顯著的不同，但日期與時間的交互影響則沒有顯著不同。

表 7 日期與時間之環境多變量檢定表

多變量檢定 ^c						
效應項		數值	F 檢定	假設自由度	誤差自由度	顯著性
截距	Pillai's Trace	.993	2132.032 ^a	3.000	46.000	.000
	Wilks' Lambda 變數選擇法	.007	2132.032 ^a	3.000	46.000	.000
	多變量顯著性檢定	139.046	2132.032 ^a	3.000	46.000	.000
	Roy 的最大平方根	139.046	2132.032 ^a	3.000	46.000	.000
日期	Pillai's Trace	.475	3.008	9.000	144.000	.003
	Wilks' Lambda 變數選擇法	.554	3.419	9.000	112.103	.001
	多變量顯著性檢定	.753	3.736	9.000	134.000	.000
	Roy 的最大平方根	.679	10.857 ^b	3.000	48.000	.000
時間	Pillai's Trace	.888	4.039	15.000	144.000	.000
	Wilks' Lambda 變數選擇法	.239	5.771	15.000	127.387	.000
	多變量顯著性檢定	2.654	7.904	15.000	134.000	.000
	Roy 的最大平方根	2.439	23.411 ^b	5.000	48.000	.000
日期 * 時間	Pillai's Trace	.178	.202	45.000	144.000	1.000
	Wilks' Lambda 變數選擇法	.830	.197	45.000	137.435	1.000
	多變量顯著性檢定	.194	.193	45.000	134.000	1.000
	Roy 的最大平方根	.099	.318 ^b	15.000	48.000	.991

a. 精確的統計量

b. 統計量為在顯著水準上產生下限之 F 的上限。

c. 設計: Intercept+ 日期+時間+ 日期 * 時間

(四) 不同地區、日期與時間所呈現直接日照量之變異分析

若進一步將表 4 之資料以 SPSS 分別對不同地區、日期與時間在直接日照量上之影響進行細部變異數分析與多重比較，可得檢定表如表 8~10。結果顯示：(1) 不同的地區對所呈現直接日照量有顯著影響(p-value=0.003)，其中北部與中南部地區呈現的直接日照量差異性較小，但均與南部地區出現較大差異，顯示南部的日照確實較強。(2)不同的日期對所呈現直接日照量有顯著影響(p-value=0.001)，其中，直接日照量 8 月最強，10 月最弱，7、8、9 月呈現的直接日照量差異性較小，但均與 10 月出現較大差異，顯示 10 月後的日照確實下降很多。(3) 不同的時間對所呈現直接日照量並無顯著影響(p-value=0.385)，原因應是選擇的實地資料都在近午前，日照上以變化不大，但仍可看出直接日照量由大到小的時間排序是：(12:00~13:00) > (11:00~12:00) > (13:00~14:00) >

(10:00~11:00) > (14:00~15:00) > (9:00~10:00)。

表 8 不同地區在直接日照量上之變異分析

ANOVA

DNI					
	平方和	自由度	平均平方和	F 檢定	顯著性
組間	.273	2	.137	6.247	.003
組內	1.509	69	.022		
總和	1.783	71			

多重比較

依變數: DNI
LSD

(I) 地區	(J) 地區	平均差異 (I-J)	標準誤	顯著性	95% 信賴區間	
					下界	上界
1	2	.034536	.042695	.421	-.05064	.11971
	3	-.109961*	.042695	.012	-.19514	-.02479
2	1	-.034536	.042695	.421	-.11971	.05064
	3	-.144497*	.042695	.001	-.22967	-.05932
3	1	.109961*	.042695	.012	.02479	.19514
	2	.144497*	.042695	.001	.05932	.22967

*. 在 .05 水準上的平均差異很顯著。

表 9 不同日期在直接日照量上之變異分析

ANOVA

DNI					
	平方和	自由度	平均平方和	F 檢定	顯著性
組間	.377	3	.126	6.085	.001
組內	1.405	68	.021		
總和	1.783	71			

多重比較

依變數: DNI
LSD

(I) 日期	(J) 日期	平均差異 (I-J)	標準誤	顯著性	95% 信賴區間	
					下界	上界
1	2	-.074304	.047920	.126	-.16993	.02132
	3	-.000267	.047920	.996	-.09589	.09536
	4	.126988*	.047920	.010	.03137	.22261
2	1	.074304	.047920	.126	-.02132	.16993
	3	.074036	.047920	.127	-.02159	.16966
	4	.201292*	.047920	.000	.10567	.29691
3	1	.000267	.047920	.996	-.09536	.09589
	2	-.074036	.047920	.127	-.16966	.02159
	4	.127256*	.047920	.010	.03163	.22288
4	1	-.126988*	.047920	.010	-.22261	-.03137
	2	-.201292*	.047920	.000	-.29691	-.10567
	3	-.127256*	.047920	.010	-.22288	-.03163

*. 在 .05 水準上的平均差異很顯著。

表 10 不同時間在直接日照量上之變異分析

ANOVA

DNI					
	平方和	自由度	平均平方和	F 檢定	顯著性
組間	.134	5	.027	1.070	.385
組內	1.649	66	.025		
總和	1.783	71			

多重比較

依變數: DNI

LSD

(I) 時間	(J) 時間	平均差異 (I-J)	標準誤	顯著性	95% 信賴區間	
					下界	上界
1	2	-.058197	.064529	.370	-.18703	.07064
	3	-.093407	.064529	.152	-.22224	.03543
	4	-.112589	.064529	.086	-.24143	.01625
	5	-.088257	.064529	.176	-.21709	.04058
	6	-.006541	.064529	.920	-.13538	.12230
2	1	.058197	.064529	.370	-.07064	.18703
	3	-.035210	.064529	.587	-.16405	.09363
	4	-.054392	.064529	.402	-.18323	.07444
	5	-.030060	.064529	.643	-.15890	.09878
	6	.051656	.064529	.426	-.07718	.18049
3	1	.093407	.064529	.152	-.03543	.22224
	2	.035210	.064529	.587	-.09363	.16405
	4	-.019182	.064529	.767	-.14802	.10965
	5	.005150	.064529	.937	-.12369	.13399
	6	.086866	.064529	.183	-.04197	.21570
4	1	.112589	.064529	.086	-.01625	.24143
	2	.054392	.064529	.402	-.07444	.18323
	3	.019182	.064529	.767	-.10965	.14802
	5	.024332	.064529	.707	-.10450	.15317
	6	.106048	.064529	.105	-.02279	.23488
5	1	.088257	.064529	.176	-.04058	.21709
	2	.030060	.064529	.643	-.09878	.15890
	3	-.005150	.064529	.937	-.13399	.12369
	4	-.024332	.064529	.707	-.15317	.10450
	6	.081716	.064529	.210	-.04712	.21055
6	1	.006541	.064529	.920	-.12230	.13538
	2	-.051656	.064529	.426	-.18049	.07718
	3	-.086866	.064529	.183	-.21570	.04197
	4	-.106048	.064529	.105	-.23488	.02279
	5	-.081716	.064529	.210	-.21055	.04712

HCPV 發電系統具有高度的複雜性，除系統本身的可靠性與精確性需求外，其實際輸出功率主要還受太陽輻射照度的影響，這是因為太陽輻射單位面積能量密度低，時間上具有較大的不連續性和不穩定性。本分計畫的研究重點是分析不同時間與地理位置對環境條件(尤其是直接日照)影響的闡述，可結合「多區域 HCPV 系統資料整合與分析暨環境因素之影響評估」[7]的研究，一方面更發了解不同時間與地理位置影響對太陽能發電穩定性的掌握，提供用作太陽能預測模式修訂之參考；一方面可再透過品質監測管理機制，精進多區域 HCPV 系統之品質管制分析，提供系統維護參考。

另外，氣象研究與預報 (Weather Research and Forecasting, WRF) 模型是一個數值天氣預報 (Numerical Weather Prediction, NWP) 和大氣模擬系統，為一種中尺度數值天氣預報系統[30]。它可以提供多種大氣物理參數法選擇，可適用於不同天氣型態和不同地理區域，輸出不同條件下之溫度、濕度、風速、風向等氣象因子，因此適用與本研究單元結合來評估其對 HCPV 系統發電效益之影響。有關 NWP 模擬系統(太陽能)之相關規劃與研究分析已在本研究的其他單元詳述。未來一旦 WRF 模式建置完成，就可將輸出結果與實地資料分析結果進行比較與相互驗證，必然對這兩種不同來源資料的品質特性都能有所提升。

三、結論

本計畫已完成彙集與分析國際太陽能預測模式等技術，研究顯示短時間以天空成像儀為最佳，而數值預報模型(NWP)則提供了最有吸引力的長期時間的預測。最近的趨勢為結合兩個或兩個以上的技術，能夠提供優於傳統方法，包括結合數值氣象預測模式及衛星模型與隨機學習方法、結合天空成像儀和無線傳感器得到的氣象資料等，提昇時間解析度及空間解析度，增進預測的精確度。

對於地區化 NWP 系統參數的模擬分析方面，本研究也利用中央氣象局永康地面太陽觀測站提供為期一年的逐日地面觀測資料求得月平均全天空輻射量(GHI)，研究結果發現到達地面太陽輻射量 and 在大氣層頂的太陽日射量並不一致，這主要受到地面上空雲量、氣懸膠體、臭氧含量等散射和吸收削弱影響。此外，應用 WRF 模式模擬台灣地區上空雲量分布圖、台灣地區地面溫度、氣溫、濕度、風場的分布圖和台灣地區地面太陽全天空輻射量等。

對於環境影響分析方面，本研究以關聯性分析和迴歸分析的統計模式，對於直流電、交流電、風速、最大風速、風向、大氣溫度、相對溼度、直射日照、全天空輻射、與紫外線等因素之間的相互關係與影響性，進行統計分析，以探討環境變動因素的相關性，提升太陽能預測之準確度。對於多區域環境影響因素，分析環境條件與地理位置等要素對太陽能發電的影響。經過多變量變異數分析和檢測 Wilks' Lambda 值的結果，其研究成果歸納如下：(1)不同地區與日期有顯著的不同；(2)不同地區與時間有顯著的不同；(3)不同日期與時間有顯著的不

同。另外，在直接日照的數據分析分面，以南部地區在八月份的中午時刻最強。

未來研究方向將以日本同步衛星(MTSAT)可見光資料計算地面晴空全天空太陽輻射、直射日照量、雲指數(cloud index)及地面全天空太陽輻射，進一步探討在不同臭氧、水氣及氣懸膠體含量下，晴空全天空太陽輻射及直射日照量的變化情形，以及對太陽能發電量的影響。

四、參考文獻

- [1] Jan Kleissl, "Solar Energy Forecasting and Resource Assessment" , Chap. 1-3, 2013, Academic Press
- [2] M. Demirtas,, "Prediction of Solar Radiation Using Meteorological Data" , IEEE (ICRERA), 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications
- [3] Lorenz, Elke, et al. "Benchmarking of different approaches to forecast solar irradiance." Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference. 2009.
- [4] Lara-Fanego, V., et al. "Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (southern Spain)." Solar energy 86.8 (2012): 2200-2217.
- [5] H.Yang,"Solar irradiance forecastin using a ground-based sky imager developed at UC San Diego", Solar Energy 103, 2014
- [6] R.H.Inman, "Solar forecasting methods for renewable energy integration", Progress in Energy and Combustion Science 39",2013,
- [7] 王金印、林宏志、李國路、陳萬金，「多區域HCPV系統資料整合與分析暨環境因素之影響評估」，行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告，102年，(計畫編號：1022001INER022)。
- [8] 陳斐文，聚光型太陽光發電系統之清洗決策分析，碩士論文，國立中央大學資訊工程學系，2012。
- [9] 高翊倫，建構台灣地區太陽能發電系統之發電量預測模型，碩士論文，國立交通大學工業工程與管理學系，2009。
- [10] 徐翠華，台灣地區太陽輻射及太陽能發電潛力之研究，碩士論文，國立臺灣師範大學地理研究所，2002。

- [11] 陳孟炬，「台灣東部區域戶外 HCPV 太陽能發電模組效能實測分析研究」，行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告，101年，(計畫編號：1012001INER029)。
- [12] 李昌晏，太陽能電池陣列遮蔽效應之研究，碩士論文，國立高雄應用科技大學電機工程系，2009。
- [13] 蕭德仁，提升太陽能電池發電效率參數與機構之研究，碩士論文，正修科技大學機電工程研究所，2004。
- [14] 陳雅鈴，使用 TRNSYS 模擬與驗證聚光型太陽光電系統電力性能，碩士論文，國立中央大學能源工程研究所，2011。
- [15] 鄞劭殷，太陽光電發電系統發電量預測模式之建構 - 以臺灣地區為例，碩士論文，國立交通大學工業工程與管理系所，2008。
- [16] B.-D. Tsai, Y.T. Hsu, T.T. Lin, L.-M. Fu, C.-H. Tsai, J.C. Leong, Performance of an INER HCPV Module in NPUST, Energy Procedia, ICAEE 2011: 26-28 December 2011, Bangkok, Thailand.
- [17] 馬金玉，羅勇，申彥波，李世奎，太陽能預報方法及其應用和問題，資源科學，33(5)，pp. 829-837，2011。
- [18] 孫川永，彭友兵，高媛媛，于廣亮，姜寧，魏磊，數值模式在太陽能出力分析中的應用研究，電網與清潔能源，28(8)，pp. 73-76，2012。
- [19] 李芬，陳正洪，成馳，段善旭，太陽能光伏發電量預報方法的發展，氣候變化研究進展，氣候變化研究進展，7(2)，pp. 136-142，2011。
- [20] [C. Gueymard, “Daily Spectral Effects on Concentrating PV Solar Cells as Affected by Realistic Aerosol Optical Depth and Other

- Atmospheric Conditions” , SPIE Conf, San Diego, CA (2009).
- [21] E-2527-06, “Standard Test Method for Rating Electrical Performance of Concentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Systems Under Natural Sunlight” , ASTM Int., West Conshohocken, PA (2006).
- [22] B. Marion, J. Adelstein, K. Boyle, H. Hayden, B. Hammond, T. Fletcher, B. Canada, D. Narang, A. Kimber, L. Mitchell, G. Rich, T. Townsend, “Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems” , the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition Lake Buena Vista, Florida (2005).
- [23] M. Muller, B. Marion, S. Kurtz, J. Rodriguez, “An Investigation into Spectral Parameters as they Impact CPV Module Performance” , the 6th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems (CPV-6), Freiburg, Germany (2010).
- [24] C. A. Gueymard, “Latitude and Climate Dependent Optimal Siting and Spectral Effects of Concentrating PV Technologies: Preliminary Analysis” , CPV Workshop, Marburg, 2007.
- [25] T. Stoffel, D. Renné, D. Myers, S. Wilcox, M. Sengupta, R. George, C. Turchi, “Concentrating Solar Power - Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data” , Technical Report, NREL/TP-550-47465, 2010.
- [26] Jan Kleissl, Solar Energy Forecasting and Resource Assessment, Elsevier Inc., 2013.
- [27] R. Perez, E. Lorenz, S. Pelland, M. Beauharnois, G. V. Knowe, K. Hemker Jr., Detlev. Heinemann, J. Remund, S. C. Muller, W.

- Traunmuller, G. Steinmauer, D. Pozo, J. A. Ruiz-Arias, V. Lara-Fanego, L. Ramirez-Santigosa, M. Gaston-Romero, L. M. Pomares, “Comparison of numerical weather prediction solar irradiance forecasts in the US, Canada and Europe” , *Solar Energy* 94 (2013) 305 – 326.
- [28] F. Wang, Z. Mi, S. Su, H. Zhao,” Short-Term Solar Irradiance Forecasting Model Based on Artificial Neural Network Using Statistical Feature Parameters” , *Energies* 2012, 5, 1355-1370.
- [29] L. Martin, L. F. Zarzalejo, J. Polo, A. Navarro, R. Marchante, M. Cony, “Prediction of global solar irradiance based on time series analysis: Application to solar thermal power plants energy production planning” , *Solar Energy* 84 (2010) 1772 – 1781.
- [30] Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, 2005 : A description of the advanced research WRF version 2. NCAR/TN-468+STR., National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.