

高解析度網格點氣象分析系統

顧欣怡¹、王信凱¹、鄭安孺²、高慧萱²、陳怡彤²、呂國臣¹

交通部中央氣象局預報中心¹
多采科技有限公司²

摘要

氣象局預報中心在作業時並無接近真實的即時氣象分析場可供參考，預報人員僅能藉由實際測站觀測、衛星、雷達等即時觀測資料，歸納出台灣附近的實際天氣概況，建置接近真實的網格點氣象分析場資料乃為預報上迫切需求的資訊。此外，氣象局將於 101 年 1 月發布鄉鎮預報，此分析場將可作為鄉鎮預報產品或模式預報準確度評估與改進之客觀依據。目前氣象局驗證天氣預報的技術得分還是以單點校驗為主，未來發佈鄉鎮天氣預報產品後勢必要有網格預報的校驗以評估預報的準確度，而真值(Ground truth)即可作為校驗的基準。

為此，預報中心引進資料同化客觀分析方法 (STMAS-2D) 和客觀分析方法(通用克利金法、普通克利金法)，利用有限的觀測資料網與模式輸出的背景場資料，進行分析以期能得到最接近真實的網格點資料，建立各重要天氣因子之歷史氣象分析場資料庫，並以達成即時提供每小時 2.5 公里網格解析度氣象場分析之作業化為目標。此外，亦利用氣象局每 15 分鐘一筆的高時間解析度觀測資料，通過簡單資料檢覈方法後，以克利金法得到 1 公里網格解析度的氣象分析場，利用 NCL 繪圖後將產品提供預報員參考使用。本產品亦於花博期間在網頁上提供溫度、濕度及雨量網格分析資料以供民眾參考，也因剔除錯誤的觀測資料可即時通報測站進行維修。

高解析度網格點氣象分析系統目前已有包括地面溫度、露點溫度、風場、降水量、雲量、波浪和日最高最低溫等 2.5 公里網格點之 2005~2010 年歷史真值(Ground truth)分析場，並已完成地表氣象資料場分析技術 (STMAS-2D、普通克利金法和通用克利金法)之測試與作業建置，可每小時產出 2.5 公里網格解析度之各重要天氣因子分析場並匯入於資料庫管理。氣象重分析場之歷史和即時資料庫不僅有助於格點預報指引產品之校驗和大氣環境場之現況即時分析，亦可以協助建立不同天氣系統和季節影響下之小區域的氣候或天氣特徵，以協助精細之鄉鎮天氣預報。

一、前言

目前中央氣象局提供有關天氣觀測資訊之服務，多以氣象局現有測站觀測資料為主，除了測站分布不均勻之外，空間解析度亦不到鄉鎮尺度的範圍。對於民眾的日常生活應用而言，除了提供常規性天氣觀測資訊之外，災害性天氣對生命財產的影響更劇。而天氣預報的基礎來自於氣象資訊的收集，例如針對引發豪(大)雨之對流系統的監測，如果有小區域範圍的即時氣象分析場可供預報人員參考將有助於小尺度劇烈天氣的預警能力。

中央氣象局自民國 72 年起執行 4 期公共建設計畫，除了配合全面汰換自動雨量站之觀測站網外，也完成了五分山、花蓮、墾丁和七股等 4 座新一代都卜勒氣象雷達網的設置，同時配合新式氣象衛星發射全面汰換了衛星接收系統，各項氣象基礎建設已陸續完成。隨著雷達與衛星等各類遙測資料的引入，以及大量地面自動觀測站的架設，高時空解析度的觀測資料提供了預報精緻化最有利的基礎；而如何將所有傳統與非傳統觀測資料同化，產生一最佳分析結果，提供下游模式最佳初始場以及作為統計預報與校驗之基礎，便成為重要的課題。此外，現今各國預報發展趨

勢亦由原本文字預報及點預報的方式改為圖形化的面預報，此一預報結果的校驗，亦需將不規則測站分布的觀測資料轉化為能代表大氣真實情況的網格化結果，方能進行比對；故選取一個快速而又不失真的客觀分析方法處理觀測資料，實為發展鄉鎮預報的關鍵。

高解析度網格點氣象分析系統的發展是交通部中央氣象局「發展鄉鎮逐時天氣預報系統」中程計畫裡一個工作項目，此中程計畫是以朝向提高精密度的天氣預報指引及監測技術為目標，預期可以有效改善鄉鎮尺度的天氣預報，增加常規天氣預報的精度以及改善災害性天氣的監測及預警能力。而高解析度網格點氣象分析系統即是負責提供接近真實之 2.5 公里解析度網格點的氣象分析場資料，包括：降水量、地表氣溫、日間最高氣溫、夜間最低氣溫、雲量、地表風、地表溼度、海面相關氣象場及海面波浪，以做為實施精緻化預報之參考，並建立歷史氣象分析場資料庫，提供精緻化發展統計預報指引與預報結果校驗之所需。此計畫特別針對本土化作業需求，建立作業化的鄉鎮尺度天氣分析技術，不但可以反映各地小區域的氣候特徵，此分析場亦將可作為鄉鎮預報產品或模式預報準確度評估與改進之客觀依據。

二、方法簡介

在發展高解析度網格點之氣象分析場方面，客觀分析方法如 STMAS(Space-Time Mesoscale Analysis System)、克利金法(Universal Kriging technique)等分析技術皆須開發。

2-1、克利金法

克利金法(Kriging technique)又名地質統計法(Geo-statistics technique)，其根據資料在空間中分佈的統計特性，決定線性內插係數(Bras and Rodriguez-Iturbe, 1985)。克利金法估計的步驟可分為二部份：1、結構分析(structural analysis)－由歷史資料，迴歸統計協變異數(covariance)隨距離變化的情形，決定「變異圖」或「半變異圖」(variogram or semi-variogram)的函數。2、最佳線性不偏估計(Best Linear Unbiased Estimation-BLUE)－假設估計值為已知值的線性權重平均，根據不偏估計和最小估計誤差變異數兩項原則，以變異圖或半變異圖導出權重係數值。

「變異圖」或「半變異圖」是觀測樣本資料的協變異數隨距離變化情形。等距離的原始半變異數在不同的時空點可能會有很大的差異。因此在進行迴歸之前，通常會將距離軸分為幾個區間，然後將同區間內距離相近半變異數取平均求得實驗半變異數，由實驗半變異數就可以看到在排除了局部干擾的因素下，兩測站的相關性隨距離變化的情形，並且可以用一簡單的函數來描述這種關係。

過去的研究結果顯示，台灣地表溫度是緯度和海拔高度的線性趨勢函數，去除此二趨勢後的溫度殘差值的二階統計函數（即協變異圖）具有定常性。於是李天浩與林忠義(2010)融合 Bras 和 Rodriguez-Iturbe (1985)的通用協變異函數，和 Kitanidis (1993)建議的通用克利金法，再導出第四種通用克利金法設計。作法是將空間趨勢函數代入半變異圖表示式中，迭代嘗試不同的空間趨勢函數係數，將溫度變數值減去趨勢的殘差值，代入估計半變異圖或協變函數，收斂目標是溫度殘差值的協變異圖最符合定常性假設。獲得最佳化的趨勢係數和協變異圖後，配合使用 Kitanidis (1993)要求權重係數使各個趨勢函數係數乘的座標值權重組合都等於 0 的不偏估計條件，設計地表溫度空間內插估計。使用這種方法的主要理念是台灣山區地表溫度隨海拔高度變化的趨勢為主控因子，必須去除半變異圖中的趨勢函數，才能突顯真實的地表溫度協變異圖。

另外，在雨量場分析方面，假設空間隨機變數具有定常性，平均值為常數但其數值未知，則可以使用普通克利金法(Ordinary Kriging technique)估計空間真實雨量場。但因為雨量測站網密度稀疏，雷達遙測降雨強度則有空間完整觀測的優勢，若能有效結合兩種觀測工具的特性，對於空間降雨的估計將有很大的助益，常見的整合雷達及雨量測站觀測降雨的方法有「比值調整」和「聯合克利金法」兩種策略。(李天浩與林

忠義，2010)

雷達遙測估計降雨受到特殊氣象條件，非雷達電波，地形，觀測距離、體積和高度等因素的影響，使得雷達觀測存在多種不確定性。地面雨量測站觀測值雖然也會受到風速、大雨珠噴濺等問題影響，但相對而言準確很多，因此對於位置相同的雨量測站和雷達觀測值，多傾向於相信前者。「比值調整」法使用共網格的雨量測站觀測/雷達觀測比值，配合客觀分析法建立點比值的空間函數，調整沒有雨量測站共網格的雷達降雨強度估計值，然而因為統計理論不如聯合克利金法，也未證實能否避免特定雷達觀測誤差型態，近年較少應用。

「聯合克利金法」是線性權重鄰近估計網格的雨量測站和雷達兩種觀測值，利用最小均方差和不偏估計原理，導出最佳權重係數，計算整合估計值的方法。按照資料整合方法的特性，聯合克利金法又可以分為：處理變數為對稱（例如常態）分佈，不含空間趨勢的普通聯合克利金法 (Ordinary Co-Kriging, OCK)；處理變數對稱分佈，含空間趨勢的通用聯合克利金法 (Universal Co-Kriging, UCK)；和利用赫米特(Hermite) 等正交函數將非常態變數轉換為常態分佈變數組合的析取聯合克利金法 (Disjunctive Co-Kriging, DCK)。

使用通用聯合克利金法(UCK 法)可以整合雷達及地面雨量測站觀測降雨，聯合克利金法的另一個優點為可輕易加入其它限制條件，例如若能取得各筆雷達觀測點與雷達之間的距離或是觀測點的高度等資料，可將其視為空間趨勢加入 UCK 法中成為新的不偏估計條件式，對於具有高度空間變化特性的雷達觀測資料而言，可更有效的降低雷達觀測誤差對降雨估計的影響，得到較正確的降雨空間分佈估計結果。

2-2、STMAS-2D 方法

STMAS 是由美國海洋暨大氣總署 (NOAA) 的地球系統實驗室全球系統組 (Earth System Research Laboratory/Global Systems Division) 發展出來的一套客觀分析技術。而 STMAS-2D 則是包含在其實驗室的 LAPS 下的地面分析模組。此為一套透過連續變分法對觀測資料進行同化的客觀分析系統。原本 LAPS 中亦有 LAPS-SFC 模組可進行地面分析，但其使用的分析方法是傳統的 Barnes 逐次訂正法，此法有著計算次數頻繁的問題，若是要具體的解析出多個波長的天氣系統特徵，需耗費大量的計算時間，因而無法滿足鄉鎮預報所需要的細網格需求；現行同化技術則多為單次的三維或四維變分分析，分析結果的好壞取決於對於模式誤差與觀測誤差共變異的精確估計；此法不但需要更大量的計算，而且往往無法取得準確的變異數估計，造成分析結果反而遺失觀測資料所捕捉的天氣特徵。(謝旻耕，1999)

STMAS 分析方法的特點在於透過多重網格 (Multigrig) 的概念進行最佳變分分析,此一分析方法與其他變分方式不同之處在於不需估計模式輸出的共變異項,先就觀測網絡可以解析的天氣特徵,直接透過觀測由長波到短波依序求解出來,而後在觀測無法解析的尺度,再透過統計權重的方式配合模式輸出求解,如此一來,大大減低了求得共變異數權重係數所需的計算量,具有計算時間短的優點。並且在於針對觀測資料可以解析的範圍內,因其針對不同的波長逐次的變分分析,亦可以保有天氣系統多重尺度的特性。而保留變分法的特性使的 STMAS 可以同化雷達徑向風等非傳統觀測資料,或是在分析過程加入物理條件的限制,這些都是傳統連續訂正法所無法做到的。

2-3、1 公里網格分析之觀測資料檢覈方法

利用氣象局每 15 分鐘一筆的高時間解析度觀測資料,通過簡單資料檢覈方法後,以克利金法得到 1 公里網格解析度的氣象分析場,利用 NCL 繪圖後將產品提供預報員參考使用。本產品亦於花博期間在網頁上提供溫度、濕度及雨量網格分析資料供民眾參考,也因剔除錯誤的觀測資料可即時通報測站進行維修。

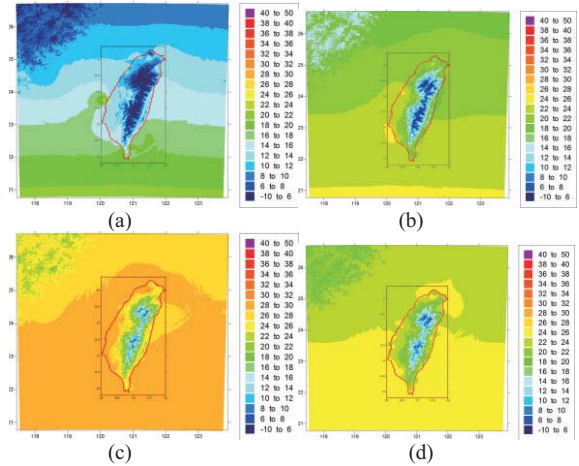
溫度的檢覈方法是以上一個時間的溫度當做基準,比較與最新觀測之間的變化量,由於兩筆資料時間間隔只有 15 分鐘,若資料變動太大即有錯誤的可能。檢覈流程分兩階段,第一階段是將測站溫度與網格點上的溫度做比較,由於測站高度與克利金網格高度並不相同,比較之前先將網格溫度依大氣平均降溫率校正,接著以溫差 4 度當做門檻進行資料篩選;第二階段為測站本身連續性的比較,將第一階段通過之測站資料與上一個時間之測站資料進行篩選,門檻值為 1.5 度,需同時符合第一與第二個條件才算是通過檢覈。露點溫度的資料檢覈法溫度檢覈相同,僅改變門檻值為第一階段 3 度,第二階段 1 度而已。通過兩階段檢覈的測站資料才會進入克利金分析,如此將可以避免錯誤資料進入內差影響網格資料的準確性。

三、分析範例

以下就溫度場、雨量場、風場和雲量等 2.5 公里網格分析結果舉出幾個範例,使用通用克利金法 (Universal Kriging technique) 來估計空間真實溫度場,使用普通克利金法 (Ordinary Kriging technique) 和通用聯合克利金法 (UCK 法, 整合雷達及地面雨量測站觀測降雨) 分別估計空間真實雨量場。風場分析則以 STMAS-2D 客觀分析方法為主。雲量則由衛星紅外線多頻道數據資料推估而得。

3-1、溫度分析場

圖一.分別是 2009 年 01 月 01 日 01 時、05 月 01 日 01 時、08 月 01 日 01 時及 11 月 01 日 01 時應用通用克利金法所估計得之地面網格溫度場。克利金法是一種內插技術,不能用來外延估計海上網格點的溫度。雖然為繪圖的需要輸出海上網格點的估計溫度,但是其可信度不佳。

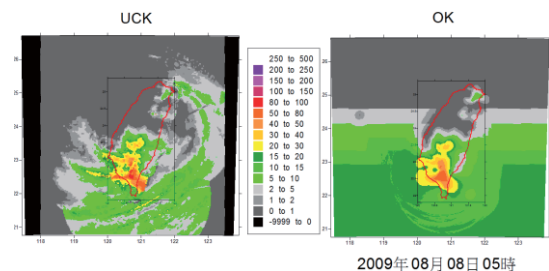


圖一：(a) 01 月 01 日 01 時 (b) 05 月 01 日 01 時 (c) 08 月 01 日 01 時 (d) 11 月 01 日 01 時之溫度分析場

3-2、雨量分析場

理論上, UCK 法的估計效果應優於 OK 法,但雷達雨量受地形干擾、雨滴粒徑分布大小、颱風結構等因素的影響,因此品質不佳。目前 QPESUMS 系統不分雨型,只使用一組 Z-R 關係式來將回波轉換成降雨,但經驗顯示,雷達在颱風期間普遍低估雨量,以莫拉克颱風為例, QPE 低估誤差可超過 50%。因此在颱風期間, UCK 法的估計效果不若預期。未來應重新評估各種雨量估計方法,對於梅雨、雷陣雨等不同雨型的估計成效。OK 法只能應用在估計陸上網格點雨量資訊,不可用在估計海面上的網格,海上的網格點因為距離各站均遠,與雨量站不相關,以克利金法演算,會得到所有測站的觀測降雨平均值,但 UCK 法可估計海面上的雨量。

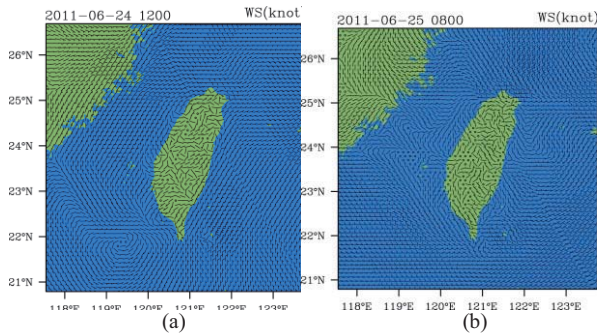
圖二為 2009 年 8 月 8 日 05 時之雨量分析場,應用普通克利金法 (OK) 估計得之地面網格雨量場與應用聯合通用克利金法 (UCK) 整合雷達與地面雨量測站所估計得之地面網格雨量場比較。



圖二：2009 年 08 月 08 日 05 時之雨量分析場

3-3、風場分析場

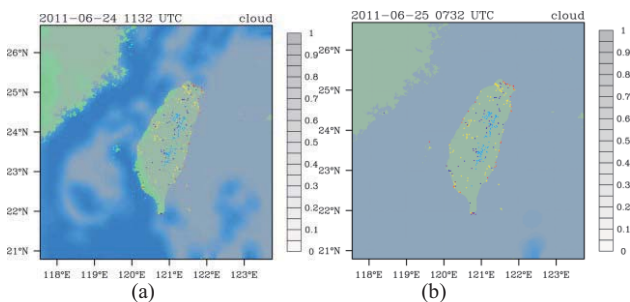
圖三為 2011 年米雷颱風期間以 STMAS-2D 方法分析的風場，由颱風路徑來看，6 月 24 日颱風中心在東經 132 度、北緯 22 度附近；6 月 25 日颱風中心已到東經 126 度、北緯 34 度附近。海面上的風場分析十分符合颱風的中心位置。



圖三：(a)06 月 24 日 12 時 (b)06 月 25 日 08 時之風場分析場

3-4、雲量分析場

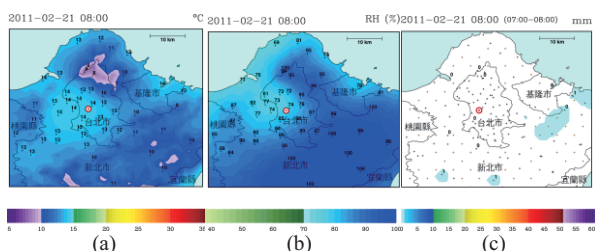
圖四為與 3-3 節同一時間之雲量分析場，颱風接近時雲量明顯增加。



圖四：(a)06 月 24 日 12 時 (b)06 月 25 日 08 時之雲量分析場

3-5、花博網頁提供之分析圖

氣象局於 2010 台北國際花卉博覽會期間和台北市政府共同合作，整合氣象監測、預報、服務及宣導等資訊，充分發揮氣象在生活與經濟活動的運用效能。其中，花博網頁上之即時天氣的部分，除了在東側大佳公園碼頭旁與西側圓山展區的氣象觀測站之外，並提供如圖五之花博展區附近 1 公里網格解析度之溫度、溼度和雨量分析圖，圖中紅色圈圈處即為花博展區。



圖五：2011 年 02 月 21 日 08 時(a)溫度(b)溼度(c)雨量之 1 公里網格分析場

四、系統建置

接近真實的網格點氣象分析場資料是預報上迫切需要的資訊，更可作為格點預報或模式準確度評估與改進之客觀依據。「高解析度網格點氣象分析系統」已經在 99 年開始研發地面真實場(Ground Truth)分析技術，建置相關模組和程式庫，並已完成 2005 至 2010 年包含地表溫度、日最高溫、日最低溫、雨量、地表風、地表溼度、雲量等的歷史重分析真值(Ground truth)資料場。其中，風場由 STMAS-2D 客觀分析方法產出；雲量由本局衛星中心提供；地表溫度、溼度與雨量場則應用通用克利金法與聯合克利金法等統計客觀分析技術產出。已開發模組化程式與作業化自動執行環境，預計 101 年即時自動化真值(Ground truth)分析系統將正式上線以提供最接近真實的大氣環境場狀態描述。本系統的主要目標有以下兩項：

(一)、提供最穩定、即時且品質良好的高解析度網格點真值(Ground truth)氣象分析場，除了將有助於預報員分析即時天氣現況外，並可以協助網格預報產品之校驗以改善小區域天氣預報。更可以協助預報員建立由原先的點預報轉換成面預報的觀念。

(二)、長時間的歷史真值(Ground truth)氣象分析資料將可以作為小區域氣候特徵或天氣系統影響下之小區域溫度、降雨和風場等特徵的研究之用。尤其是在地形複雜的台灣，這樣的小尺度研究更是需要，尤其是對將來發布鄉鎮預報作業有實質的幫助。

各氣象因子的觀測資料是否正確、品質是否穩定乃為影響真值(Ground truth)分析結果成敗非常重要的因子。因此，我們對於各項測站氣象觀測資料包括溫度、露點溫度、雨量、以及相對溼度等，發展出可靠的資料品質檢覈(QA/QC, Quality Control and Quality Assurance)技術，建置資料品質檢覈模組，並且據以重新分析歷史真實氣象場。各觀測資料源本身有不同的 QA 方法，加上適當的時間和空間條件限制可以去除有疑慮的觀測資料，開發 QA 模組並以歷史真值(Ground truth)分析資料做測試，並建置相關自動化作業流程將此研發完成之 QA 模組納入即時真值(Ground truth)氣象分析場產製流程中。

本系統將各重要天氣因子之歷史與即時真值(Ground truth)氣象分析場之資料轉換格式後放入資料庫，並以建置觀測資料 QA 模組與真值(Ground truth)

分析診斷模組以達成最佳化之歷史與即時作業化之網格點氣象分析場資料為目標，分析之氣象因子有降水量、地表氣溫、地表風、地表溼度、雲量及日間最高溫與夜間最低溫之網格分析。將此網格資料做格式轉換之後匯入天氣預報輔助系統「天氣整合預報系統(Weather Integration and Nowcasting System, WINS)」以及「預報資訊編輯系統(Forecast Information Editing System, FIES)」，預報人員可以透過以上預報輔助系統看到所有氣象因子網格分析資訊，以協助精緻化預報作業。

五、結論

氣象局將於 101 年 1 月發布鄉鎮預報，高解析度網格點氣象分析系統的建立將可作為鄉鎮預報產品或模式預報準確度評估與改進之客觀依據。我們對於各項測站氣象觀測資料包括溫度、露點溫度、雨量、以及相對濕度等建置資料品質檢覈模組，並引進資料同化客觀分析方法 (STMAS-2D) 和客觀分析方法(通用克利金法、普通克利金法)據以重新分析歷史真實氣象場，並建置相關即時真值(Ground truth)氣象分析場自動化作業流程將產品提供至預報輔助系統以供預報人員分析即時天氣現況。

氣象重分析場之歷史和即時資料不僅有助於格點預報指引產品之校驗和大氣環境場之現況即時分析，亦可以協助建立不同天氣系統和季節影響下之小區域的氣候或天氣特徵，以協助精細之鄉鎮天氣預報。

六、參考文獻

Bras, R. L. and Rodriguez-Iturbe, I.: Random functions and hydrology, Addison Wesley, Reading, Mass., 1985.

Kitanidis, P. K, Generalized covariance functions in estimation, *Mathematical Geology*, 25(5), 525-540, 1993.

謝旻耕，1999：中美合作—氣象資料分析及顯示技術轉移，交通部中央氣象局氣象預報中心出國報告。

李天浩、林忠義，2010：評估四種聯合克利金法整合雷達和雨量站觀測估計降雨空間分佈的誤差特性，*中國土木工程學刊*，22：1，頁 23-41，2010.03[民 99.03]。