

臺灣機場能見度定量預報評估

林宜菽¹ 陳例如² 陳正平² 朱韻雅² 林裕豐³

¹國立臺灣大學氣候變遷與永續發展研究中心

²國立臺灣大學大氣科學系

³空軍氣象聯隊氣象中心

摘要

本研究從飛航安全角度出發，探討應用區域氣象模式與空氣品質模式於機場能見度定量預報之可信度。目前應用於能見度預報的數值模式，多以純氣象模式為主，極少考慮氣膠粒子對能見度的影響，本研究的特色即是同時以氣象模式預報雲霧，以空氣品質模式預報霾，完整考慮霧與霾的影響來進行能見度定量預報。雲霧的預報使用WRF模式，其中雲微物理機制則採用臺大所研發的雙矩量參數法，能在氣膠與雲物理交互作用上有較細緻的處理；霾的預報使用CMAQ空氣品質模式。此外並發展出根據光學理論計算能見度障礙的參數法，取代傳統的經驗式，可結和霧與霾的能見度障礙。

以2019年1月至9月為預報期間，分別以1600公尺及5000公尺能見度作為判斷低能見度個案標準，針對全臺各地9個軍用機場的預報結果進行低能見度事件的診斷，將預報結果與實際觀測數據進行比對。結果顯示，低能見度的標準分別為1600公尺與5000公尺時，模式的預兆得分為0.18與0.49，顯示模式對於輕度低能見度事件的預報能力較佳，對於較嚴重的低能見度事件（多為濃霧事件）則掌握度較差。各機場的定量校驗結果則顯示，模式對清泉崗機場的能見度預報能力最佳，預兆得分可達0.6；在松山與馬公機場的表現則較不理想，預兆得分只有0.03。

關鍵字：能見度預報、霾霧預報、臺大參數法。

1. 前言

大氣環境狀況影響航運甚鉅；氣象條件如能見度、強風、雷電等因素，更是直接影響飛機起降的安全性。臺灣四面環海，大氣含水量充足，在適當天氣系統環境下，低能見度影響空軍任務操作情況時有所聞。在日常作業流程中，能見度的預報多仰賴預報員的作業經驗，少有客觀化流

程可供依循。在計算資源日漸多元豐富的趨勢下，本研究從預報應用角度出發，協助航管單位建立合理的能見度定量預報流程，並評估常態性能見度模擬預報的可信度。

能見度簡單的定義為觀測者對遠物的本體及形貌可辨識的最大距離；嚴格的定義則為觀測者可由地平線天空背景中分辨

出黑色目標物的最大距離。過往研究所提出可影響能見度的氣象因子眾多，如風向和風速[Croft et al., 1997; Solis, 1999]、溼度[Groblicki et al., 1981; Gultepe and Milbrandt, 2010]、氣膠的組成與物理特性[Malm and Johnson, 1984; Uhlig et al., 1994; Cheng and Tsai, 2000; Heo and Ha, 2009]、大氣穩定度[Solis, 1999]等。根據物理原理，造成能見度降低最主要原因為大氣粒子對光的吸收與散射。臺灣主要影響能見度的現象可略分為兩類：一者為霾，二者是霧。當環境中相對濕度未達飽和但氣膠濃度高、且遇上濕度偏高時，可形成霾，能使能見度偏低；空氣達到飽和時，部分氣膠可活化形成霧滴，更能大量散射光線而阻礙視線。由此可知，欲提升能見度定量預報，數值模式除了需要模擬一般氣象場，亦需具備模擬大氣中氣膠（霾）與水相粒子（雲、霧滴）散光特性的預報能力。

由於影響能見度之因子眾多，目前的科學知識與觀測技術尚未能完全掌握相關機制，以至於數值模式不論是在雲霧或是霾的預報皆仍有許多不夠成熟之處。例如一般的氣象模式中並未考慮氣膠的存在，因此除了無法直接考慮氣膠對能見度的影響外，亦無法處理氣膠與雲微物理之間的過程，遑論其對能見度的影響。這些重要過程的忽略，導致應用數值模式於能見度預報的高度不確定性。

為了降低氣膠在能見度預報上所造成的不確定性，本研究使用多尺度空氣品質模式系統(The Community Multiscale Air Quality Modeling System, CMAQ)進行氣膠濃度的預報，並考慮氣膠在環境中的吸水

性，預報霾所造成的能見度障礙；在霧的預報方面，則是使用搭配有臺大雲微物理參數法的天氣研究和預報模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF)。此微物理參數法考慮了氣膠對雲的影響，且在雲微物理過程的處理上較為細膩，可提供更符合物理程的雲霧模擬結果，以預報霧所造成的能見度障礙。此模式系統用於對臺灣各個機場2019年1月至9月的能見度進行預報，在事後對預報結果進行校驗，評估常態性能見度模擬預報的可信度，為航管有關單位未來進行例行性能見度預報提供參考。

2. 歷史資料分析

為瞭解各機場能見度之時空分布特性，本研究首先使用2018年全年各機場之能見度觀測資進行分析，針對低能見度事件的季節時空分布討論，主要分析松山、新竹、清泉崗、嘉義、臺南、岡山、屏東、花蓮及馬公等9個機場之能見度特性，各機場位置及代碼如表 1。因應空軍基地影響飛機起降的能見度標準分為1600公尺與5000公尺，進行低能見度個案分析時將採用這兩項標準，分別計算不同能見度門檻下，低能見度個案發生的情況。此外，為系統性分析各機場能見度的資訊，本研究中僅選擇整點之觀測資料進行分析。

以能見度低於1600公尺為判定低能見度事件標準，分析各季節低能見度個案發生的日數(圖1)發現，北部的松山、新竹與東部的花蓮機場低能見度發生日數皆在5日以下，發生比例相當低。而馬公機場僅在春夏兩季出現低能見度事件，分別為8日與11日。清泉崗機場各季低能見度日數皆

在10日以上，冬季更高達38次；除了夏季之外，清泉崗機場在其它三季皆為低能見度發生日數最高的機場。嘉義機場情況與清泉崗機場相似，但發生次數略低於清泉崗機場。臺南、岡山及屏東機場於夏季發生低能見度日數最高，約為20日左右，為夏季發生率最高的區域，冬季發生率次之，而春季發生率最低皆為3日。由2018年全年數據來看（表 1），能見度低於1600公尺的日數由高至低為清泉崗機場最高（日數比例為20%），嘉義以南4個機場次之（日數約10-15%之間），其它機場日數皆在6%以下。

當以能見度5000公尺為標準時（圖2），北部的松山及新竹機場，春至秋季低能見度發生的比例並不高，發生的天數約13-23日；至冬季時新竹低能見度的天數則是增加至54日。東部花蓮一年四季發生低能見度的日數都差不多，大約在21-29日之間，季節差異不大。本島內，中部清泉崗機場以南的5個機場，低能見度發生頻率明顯高於北部與東部，且冬季發生日數更高達60日左右，發生率超過50%。離島馬公則是秋天發生低能見度的頻率最低，只有6日，其它季節均為30日左右，與本島其他機場的季節特性相當不同。整體而言，以5000公尺為低能見度門檻時，中南部發生低能見度的比例較高，約占全年50%的日數（表 1），且季節變化相似；北部、東部及馬公發生頻率較低，約占全年30%左右的日數，但各地點季節分布特性不同。

上述結果顯示，採不同能見度值為判定低能見度事件標準時，部分機場低能見度發生率的季節特性會有所差異。例如馬

公機場在5000公尺的標準時，冬季與春夏兩季發生率接近，且明顯高於夏季；但以1600公尺為標準時，則降至與夏季相同為0日，低於春夏兩季的發生率。此外，臺南以南的三個機場，在5000公尺標準時低能見度發生率最高的季節是冬季，而以1600公尺為標準時則為夏季。這些情況乃因不同機場、不同季節發生低能見度的原因不同所致，顯示了低能見度事件成因的複雜度。

3. 定量能見度預報方法

能見度預報的作業流程如圖3所示，主要模式作業可分為氣象模擬與氣膠模擬兩個部份。作業流程首先需先取得NCE GFS之全球預報資料，經WRF的前處理程序產出邊界及初始氣象資訊，再提供給WRF模式進行氣象場模擬。氣膠模擬的部份，進行CMAQ運算之前，需事先處理好污染物排放資料，待WRF模式模擬完成後，將其氣象場與污染物排放資訊提供給CMAQ進行前處理，接著才能進行氣膠的模擬。模擬完成後，由WRF模式輸出雲滴特性參數，由CMAQ模式輸出氣膠特性參數，進行能見度之運算，最後再依預報目標機場所在位置，估算各機場在預報期間內之能見度，以機場能見度的時間序列圖為輸出產品。

3.1 模式介紹

能見度的定量預報作業，必需同時考慮大氣中霧及霾的影響，因此在本計畫中將採用WRF天氣數值模式，模擬大氣中的水相粒子，藉由雲滴粒子進行霧的預報；使用CMAQ空氣品質模式，模擬大氣中的氣膠，以進行霾的預報；最後整合霧及霾

的預報結果，得到能見度定量預報。

WRF模式是由美國國家大氣研究中心與美國海洋大氣署共同研發的中尺度數值天氣預報模式，其適用尺度從數公尺至數千公里，可應用於各種天氣現象之模擬，其在天氣預報方面的能力已受到許多預報作業單位認可。目前使用的版本為3.8.1版。此外，由於霧的模擬主要受模式中的雲微物理過程主導，為增進模式對雲微物理過程的掌握能力，本計畫選擇使用雲微物理過程較詳盡的CLR參數法[Cheng et al., 2007; Cheng et al., 2010]進行模擬。此參數法為完整的雙矩量參數法，其特點包括：可預報氣膠轉化為雲滴、雨滴及冰晶的過程；以及暖雲參數式保留了細節模式中完整的暖雲物理過程，比傳統的總體水物法更能表現出暖雲的物理過程；而冷雲過程方面則是以Reisner et al. [1998]參數法為基礎，發展出以雙矩量參數完整描述冷雲過程之參數法，可提高模式模擬冷雲過程之準確度。

在模式設定方面，為使模式對不同的天氣系統都有良好的掌握度，以及考量其它東亞地區氣膠來源對能見度之影響，本研究設計之WRF模式模擬範圍如圖4，由外巢至內巢水平網格解析度（格點數）分別為30公里（190格*148格）、6公里（396格*366格）及3公里（103格*145格），垂直層數為38層。WRF天氣數值模式使用美國國家環境預報中心之全球預報系統（Global Forecast System, GFS）預報資料作為邊界場及初始場，解析度為0.5x0.5度；模式設定物理參數法除了雲微物理過程法選擇CLR參數法之外，其於物理過程則分別使用

:Dudhia短波輻射參數法、RRTM長波輻射參數法、Kain-Fritsch積雲參數法、YSU邊界層參數法、Monin-Obukhov地表參數法以及NOAH地表模式。在模式輸出方面，本研究使用WRF預報的雲水、雨水資訊進行能見度估算。

CMAQ是由美國環保署所發展的第三代空氣品質模式，主要被應用於空氣品質預報相關的議題之中。CMAQ模式本身為化學傳輸模式，由氣象模式提供氣象場進行驅動，以及排放資料處理模組提供污染物排放量；其特點是模式內建有複雜的化學過程，包括固相、液相、及氣相化學反應、不同相態間的轉換機制等等，且模式內考慮了水平擴散、垂直擴散、對流以及粒子沉降等過程，相較於早期的化學傳輸模式，更有能力模擬出貼近實際空氣污染情況。目前用於例行預報的版本為4.6版。模式架構依模擬作業主要分為氣象模組、排放資料處理模組、化學傳輸模組及輸出介面四大部分。

CMAQ的模式網格設計配合WRF模式，各巢狀網格解析度相同，各巢網格數由外巢至內巢分別內縮為30公里（185格*143格）、6公里（291格*261格）、及3公里（98格*140格），垂直層數同樣為38層。其中第二槽因計算資源考量，網格在東邊及南邊相對WRF各額外向內縮減100格。其每日銜接氣象場模擬作業（WRF）結束後開始進行模擬，提供72小時氣膠的預報模擬結果。模擬方式採單向巢狀內插方式計算，接續執行。而原始臺灣空氣品質模式中的初始條件模組在連續模擬的方式進行下，初始條件係以前次執行該時間的同巢模擬

結果；邊界條件方面，第一巢以背景值代入，第二至三巢則是以前一巢的模擬結果內插得到。本研究主要使用第三巢模擬的核模、累積模、粗模等三個氣膠粒徑模組的平均粒徑以及標準差資訊，進行能見度估算。

3.2 能見度計算

能見度的計算主要以消光係數 (extinction coefficient) 主導的 Koschmieder 方程 [Kunkel, 1984] 為基礎：

$$V = \frac{\ln 50}{b_E} = \frac{3.912}{b_E} \quad (1)$$

其中能見度 V 的單位為公里，消光係數 b_E 的單位為 1/公里；消光係數主要受大氣中的粒子影響，可表示為 [Seinfeld and Pandis, 1998, p1123-1125]:

$$b_E = \int \pi r^2 Q_E \left(m, \frac{r}{\lambda} \right) n(r) dr \quad (2)$$

其中 Q_E 為消光效率 (extinction efficiency)， m 為折射率 (refractive index)， r 為粒子半徑， λ 為波長， $n(r)$ 為粒徑分布也稱粒徑譜。計算能見度最大的挑戰即是估算(2)式中的消光效率，其數值隨粒徑的變化並不規律因而計算不易，故在實用上大多以參數法或是經驗法來進行能見度的估算。

在經驗法方面，計算公式主要由觀測的能見度及相關參數資料反推得到，例如美國大氣海洋總署的預報系統實驗室 (NOAA/FSL) 發展的經驗式，將能見度簡化為相對濕度以及露點溫度的式子 [Doran et al., 1999]; 有些經驗式則是以大氣水相粒子的質量推算消光係數後得到霧的能見度 [Kunkel, 1984; Stoelinga and Warner, 1999; Gulpepe et al., 2006]; 也有同時考慮相對濕度以及氣膠粒子濃度的經驗法用以推算霾的能見度 [Binkowski, 1999]。受限於觀測料

能提供的大氣粒子粒徑資訊相當有限，這些經驗法並無法考慮粒徑的影響，但消光效率對粒徑譜的變化相當敏感，不考慮粒徑譜影響的經驗式在使用上勢必有其侷限。因此其它能考慮粒徑譜變化的參數法也陸續被發展出來，例如 Chylek [1978] 初步以粒子半徑為依據，在不同的粒徑範圍使用不同的參數式計算消光效率；而 Mitchell [2000] 則是更詳細地利用變異繞射近似來近似米氏理論中水的吸收及散射。這些計算也牽涉到預報模式能否提供霧滴與霾粒子的粒徑分布函數。

考慮到粒子大小顯著影響消光效率與能見度估算，本研究針對雲雨滴與氣膠粒徑的差異，分別使用不同的消光效率計算公式來估算兩種粒子對能見度之影響。霧的對能見度的影響主要以 WRF 模式預報的雲水及雨水為依據，使用 Cheng et al. [2010] 的 CLR 雲微物理模組進行模擬時，模式可提供雲雨水的混合比以及總數量等兩種矩量的預報值，提供粒徑分布資訊，再根據 Chen and Liu [2004] 的參數式將兩個矩量整合提供有效半徑如下：

$$r_{e,C} = \exp(-3.5884 - 0.3051 \cdot \ln N_C - 0.28698 \cdot \ln Q_C) \quad (3)$$

$$r_{e,R} = \exp(-0.099216 + 0.02949 \cdot \ln N_R + 0.99238 \cdot \ln r_R) \quad (4)$$

其中 $r_{e,C}$ 與 $r_{e,R}$ 分別為雲滴及雨滴之有效半徑， N_C 與 N_R 為雲滴與雨滴數量， Q_C 為雲滴混合比， r_R 為雨滴質量平均半徑。算能見度時，先以有效半徑及總數量的資訊，算出雲滴及雨滴的總截面積，再連同雲、雨水粒徑消光效率 (可設為 2) 代入(2)式來計算消光係數，可得霧的能見度障礙。

霾的粒徑範圍內消光效率變動很大，無法以定值論，需以參數式描述。考慮到 CMAQ 模式中是以對數常態分布描述氣膠粒徑分布，但過去的文獻中發展的參數式，大多都是以伽瑪分布(gamma distribution)描述氣膠粒子的粒徑分布[例如 Mitchell, 2000]，無法直接應用於本研究中，因此另外使用[Mätzler, 2002]理論計算數據後，重新發展適用於對數常態分布的消光效率 (Q_e) 參數式如下：

$$Q_e = \frac{a_6 + a_5 \sigma + 2x}{a_2 \exp[(a_3 + a_4 \sigma)(m^{a_0}) + x]}, \quad x = a_6 \exp[(a_7 + a_8 \sigma)(m^{a_0})] \quad (5)$$

其中 σ 為對數座標下的標準差， m 是峰值半徑(modal radius) μ 的函數 ($m = \frac{1}{\log_{10} \mu}$)，

a_0 至 a_9 為常數，如表 2。使用 CMAQ 模式模擬的核模、累積模、粗模等三個氣膠粒徑模組的平均粒徑以及標準差，即可由(5)式算出氣膠消光效率，再由(2)式算出氣膠的消光係數，也就是霾所造成的能見度障礙。同時考慮霧與霾的能見度障礙的影響，則可推估出該情況下的能見度，得到定量能見度預報數據。

4. 能見度預報結果

能見度預報作業為每日進行72小時預報，本研究中僅對前24小時之預報結果進行評估與討論。2019年1到9月各機場的能見度預報結果(圖5)顯示，清泉崗機場的能見度最差，出現能見度低於1600公尺以下的頻率最高，嘉義機場次之，臺南、岡山相似，僅略優於嘉義；能見度最佳的則是花蓮。對比過去的資料分析，這樣的表現大致上符合各機場間相對的能見度空間特徵。

直接比對預報期間各機場的能見度觀測資料(圖6)則可發現，模式模擬的低能見度發生時間大多與觀測資料相符，各機場機能見度的相對差異也合理，表示模式已有掌握低能見度事件時空特性的基本能力。然而若仔細比對模式預報的定量能見度與觀測值，則可發現模式經常低估了能見度，致使誤報頻率較高。低估能見度情況最為顯著的是馬公機場；從觀測上可發現馬公機場低於1600公尺能見度的不多，且少有低於750公尺的情況出現，但模式預報的能見度在1至5月及8月期間都出現過能見度極低(低於750公尺)的預報結果。

為評估模式預報能見度事件的能力，本研究以影響飛機起降之能見度標準做為診斷是否為低能見度個案依據，分別採用能見度1600公尺以及5000公尺做為標準值，只要24小時內有能見度低於標準值的情況出現，便判定為低能見度事件，來校驗模式對於低能見度個案之預報能力。在低能見度標準為低於1600公尺的定義下，觀測到低能見度發生的頻率多在20%以內(圖7)，僅清泉崗機場發生的頻率略高於20%，總共出現71次。模式預報結果大致上與觀測結果相近，但在低能見度發生次數較高的清泉崗、嘉義、岡山及屏東等機場，模式預報的次數皆低於觀測；在低能見度發生頻率較低的機場，模式預報次數則是高於觀測次數。當低能見度標準提高至低於5000公尺的定義時，嘉義以南四個機場的低能見度發生率與清泉崗機場相當，皆為60%左右，而花蓮的發生頻率也提升到了30%；預報的低能見度事件在各機場皆高於觀測值，說明在此標準下，模式

明顯有過度預報的特性，且同樣是在馬公機場高估低能見度事件的情況最嚴重。

馬公低能見度過預報的情況，主要是由於目前模式在馬公機場預報出的海鹽濃度偏高（細節略）。海鹽粒徑大且吸水性強的特性導致其對能見度的影響顯著，容易造成偏低的能見度，這是未來模式需要特別改善的部分，也是使用這套模式進行預報時需要特別注意的。

進一步使用統計方法計算校驗指數，校驗方式是比對預報結果和實際觀測資料，將比對結果分為命中(Hits)、誤報(False Alarms)、漏報(Misses)、正確無事件(Correct Negatives)，計算出偏倚得分、可偵測率、正確率、誤報率以及預兆得分五項校驗指數，用以評估及校驗模式模擬低能見度個案之表現。各項校驗指數數值範圍及意義如下[Schaefer, 1990; Wilks, 1995]：

- 偏倚得分(Bias Score, BS)：
預報低能見度個案數和觀測低能見度個案數之比例，用以評估模式預報錯誤的程度。數值範圍介於 $0 \sim \infty$ ，等於 1 時表現最佳，大於 1 表示過度預報，小於 1 則表示預報不足。
- 可偵測率(Probability of Detection, POD):
用以評估低能見度事件被正確預報的個案比例。數值範圍介於 $0 \sim 1$ ，等於 1 時預報表現能力最佳。
- 正確率(Accuracy Rate, AR):
用以評估模式正確預報有無事件發生的能力。數值範圍介於 $0 \sim 1$ ，數值越高表示模式正確率越好。

- 誤報率(False Alarm Ratio, FAR):
用以評估低能見度事件假警報的誤報比例。數值範圍介於 $0 \sim 1$ ，等於 0 時預報表現最佳。為求與 POD 指數比較之直觀與清晰，本研究改呈現 $1-FAR$ 的數值，使其在數值為 1 時同樣為最佳值。
- 預兆得分(Threat Score, TS):
計算時排除正確無事件的情況，可視為描述模式預報正確率的指標。數值範圍介於 $0 \sim 1$ ，等於 1 時表現最佳，數值等於 0 代表模式無預報能力。

在以 1600 公尺為能見度標準時，模式在各機場的正確率 AR 表現都不錯，在個案數佔比不高的情況下，這說明模式大多能正確的判斷出非低能見度事件的情況。若以能夠準確預報到事件發生的技術得分來看（圖 8），松山機場的預報能力最不理想，其 TS 只有 0.03，BS 偏高， $1-FAR$ 也只有 0.05，表示模式在松山機場除了有過度預報能見度事件的特性之外，誤報率也高；主要原因可能是此機場實際發生低能見度的頻率很低，容易造成誤報。類似的情況同樣出現在馬公機場，除了海鹽預報高估造成誤報，也有低頻率事件不易預報的問題。新竹跟花蓮的表現略優於上述兩機場，TS 可提升至 0.11；嘉義以南的四個機場則誤報率更小，TS 表現更好，BS 除了在屏東略低之外，大多與 1 接近。模式在清泉崗的預報能力最好， $1-FAR$ 達 0.6、POD 為 0.44、TS 為 0.34 也都是所有機場中最高的。

當低能見度的標準提高至 5000 公尺時，各機場的低能見度事件都明顯增加（圖 7），模式出現漏報的機率也隨之提高，因而

各機場預報的正確率AR略微下降，僅維持在0.55以上。於此低能見度標準下，馬公機場因受模式高估海鹽濃度影響，正確率最低、誤報率最高，TS僅有0.3。除此之外，模式在其它機場的預報得分表現大致上與低能見度的個案數呈現正相關（參考圖7與圖8）。個案數較低的花蓮、松山以及新竹機場，誤報率較中部以南的五個機場高，TS得分也較低；屏東機場雖然誤報率較新竹機場低，但因其正確率亦偏低，表示漏報的情況比較多，因此TS得分略低於新竹，為0.46；其它清泉崗、嘉義、臺南及崗山等機場，表現接近，TS在0.56-0.6之間，以清泉崗機場的0.6表現最佳。

整體而言，將低能見度的個案標準由1600公尺提升至5000公尺時，模式的TS得分從0.18提升至0.49，顯示模式對於輕度低能見度事件的預報能力較佳，對於較嚴重的低能見度事件則掌握度較差。這主要與TS得分與事件發生機率有正向關係[Hilliker, 2004]。此外也跟霧與霾的物理特性差異有關；霧的粒徑較大，對能見度的影響極為顯著，霧的出現會使能見度急遽下降，只要有霧的存在，往往瞬間使得能見度降至1600公尺以下，直接影響是否有低能見度事件的判斷，而霧的濃度在此低能見度的情況下，僅用於輔助判斷其嚴重程度。反觀能見度介於1600公尺與5000公尺間的低能見度事件，較多的比例是受霾影響；霾的變化是環境濕度、氣膠吸濕度等影響的疊加，較為漸近，不似霧的事件那麼突發性。因此當模式有些微的誤差時，霾的誤差較少大幅影響低能見度事件之判定。

5. 結論

本研究以1600公尺與5000公尺兩種能見度標準，針對2018年臺灣地區各機場的低能見度事件發生頻率進行分析，再以WRF與CMAQ兩種數值模式為工具，針對2019年1月至9月各空軍機場能見度進行定量預報，並評估這段期間的預報結果。

觀測資料顯示，最常發生低能見度事件的機場為清泉崗機場，且以冬季發生頻率較高；嘉義以南的四個機場次之；花蓮與馬公發生低能見度事件的情況則較少。採取不同能見度值為判定低能見度事件標準時，部分機場低能見度發生率的季節特性會有所差異。例如臺灣南部的機場，在5000公尺標準時低能見度發生率最高的季節是冬季，而以1600公尺為標準時則為夏季。這些情況乃因不同機場、不同季節發生低能見度的原因不同所致，包括霧、霾的生成機制與氣象條件，顯示了低能見度事件成因的複雜度。

在預報表現評估方面，模式已有一定能力模擬出各機場低能見度事件的時間、空間分佈。校驗結果顯示，將低能見度標準由1600公尺提升至5000公尺時，模式的TS得分從0.18提升至0.49，顯示模式對於輕度低能見度事件的預報能力較佳，對於較嚴重的低能見度事件則掌握度較差。此差異主要由於嚴重低能見度事件主要由霧所造成，而霧的事件性較強，對環境參數較為敏感，模式比較不易掌握。此外，預兆得分與發生頻率有正向關係，而由霧所造成低見度的事件頻率也低。從各機場的校驗結果則可發現，模式在清泉崗機場的預報能力最佳，不同低能見度標準下的TS為

0.34與0.60，皆高於其它機場；表現較不理想的則是松山與馬公機場，其中馬公機場更因為模式容易高估海鹽濃度而造成誤報。這些因素都是使用這組模式預報結果時須特別留意的。對低能見度預報的改善，未來在氣象模式中可從影響濕度的機制（包括邊界層與地、氣交互作用等過程、地形作用）與初始條件進行分析，在空氣品質模式中則可針對不同氣膠的來源以及邊界層混合過程著手。

6. 參考文獻

- Binkowski, F. S. (1999), Aerosols in models-3 CMAQ, Science algorithms of the EPA Models-3 Community multiscale air quality (CMAQ) modeling system, 10-11.
- Chen, J.-P., and S.-T. Liu (2004), Physically based two-moment bulkwater parameterization for warm-cloud microphysics, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 130(596), 51-78.
- Cheng, C.-T., W.-C. Wang, and J.-P. Chen (2007), A modelling study of aerosol impacts on cloud microphysics and radiative properties, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133, 283-297.
- Cheng, C.-T., W.-C. Wang, and J.-P. Chen (2010), Simulation of the effects of increasing cloud condensation nuclei on mixed-phase clouds and precipitation of a front system, *Atmos. Res.*, 96(2-3), 461-476.
- Cheng, M. T., and Y. I. Tsai (2000), Characterization of visibility and atmospheric aerosols in urban, suburban, and remote areas, *Science of The Total Environment*, 263(1), 101-114.
- Chylek, P. (1978), Extinction and Liquid Water Content of Fogs and Clouds, *J. Atmos. Sci.*, 35(2), 296-300.
- Croft, P. J., R. L. Pfof, J. M. Medlin, and G. A. Johnson (1997), Fog Forecasting for the Southern Region: A Conceptual Model Approach, *Weather and Forecasting*, 12(3), 545-556.
- Doran, J. A., et al. (1999), The MM5 at the Air Force Weather Agency-New products to support military operations, in *The 8th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, edited, Dallas.
- Groblicki, P. J., G. T. Wolff, and R. J. Countess (1981), Visibility-reducing species in the denver "brown cloud"—I. Relationships between extinction and chemical composition, *Atmospheric Environment* (1967), 15(12), 2473-2484.
- Gultepe, I., M. D. Müller, and Z. Boybeyi (2006), A New Visibility Parameterization for Warm-Fog Applications in Numerical Weather Prediction Models, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(11), 1469-1480.
- Gultepe, I., and J. A. Milbrandt (2010), Probabilistic Parameterizations of Visibility Using Observations of Rain Pre-

- precipitation Rate, Relative Humidity, and Visibility, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(1), 36-46.
- Heo, K.-Y., and K.-J. Ha (2009), A Coupled Model Study on the Formation and Dissipation of Sea Fogs, *Monthly Weather Review*, 138(4), 1186-1205.
- Hilliker, J. L. (2004), The Sensitivity of the Number of Correctly Forecasted Events to the Threat Score: A Practical Application, *Weather and Forecasting*, 19(3), 646-650.
- Kunkel, B. A. (1984), Parameterization of Droplet Terminal Velocity and Extinction Coefficient in Fog Models, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(1), 34-41.
- Mätzler, C. (2002), MATLAB functions for Mie scattering and absorption, version 2, IAP Res. Rep, 8(1), 9.
- Malm, W. C., and C. E. Johnson (1984), Optical characteristics of fine and coarse particulates at Grand Canyon, Arizona, *Atmospheric Environment* (1967), 18(6), 1231-1237.
- Mitchell, D. L. (2000), Parameterization of the Mie Extinction and Absorption Coefficients for Water Clouds, *J. Atmos. Sci.*, 57(9), 1311-1326.
- Reisner, J., R. M. Rasmussen, and R. T. Bruntjes (1998), Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124(548), 1071-1107.
- Schaefer, J. T. (1990), The Critical Success Index as an Indicator of Warning Skill, *Weather and Forecasting*, 5(4), 570-575.
- Seinfeld, J. H., and S. N. Pandis (1998), *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, Wiley
- Solis, J. (1999), Correlation of aerosol optical depth with weather variables, Institute of Climate and Planets, NASA Goddard Institute of Space Studies.
- Stoelinga, M. T., and T. T. Warner (1999), Nonhydrostatic, Mesobeta-Scale Model Simulations of Cloud Ceiling and Visibility for an East Coast Winter Precipitation Event, *J. Appl. Meteor.*, 38(4), 385-404.
- Uhlig, E.-M., M. Stettler, and W. Von Hoyningen-Huene (1994), Experimental studies on the variability of the extinction coefficient by different air masses, *Atmos. Environ.*, 28(5), 811-814.
- Wilks, D. S. (1995), *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction*, Academic Press

7. 圖表彙整

表1 各機場之代碼、經緯度、及低能見度事件於2018年發生的頻率，低能見度事件發生之標準分別為5000公尺與1600公尺，表內數據單位為百分比。

機場名稱	代碼	緯度	經度	低於5000 m	低於1600 m
松山	RCSS	25.070	121.553	27	6
新竹	RCPO	24.817	120.933	31	1
清泉崗	RCMQ	24.265	120.621	55	20
花蓮	RCYU	24.023	121.610	26	2
馬公	RCQC	23.569	119.628	26	5
嘉義	RCKU	23.454	120.403	51	14
台南	RCNN	22.949	120.211	45	15
岡山	RCAY	22.782	120.262	49	14

表2 方程式(5)中各項常數之數值，因程式採雙精確度計算，故科學記號以 D 表示。

代號	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
數值	8.06703D7	-7.22679D7	2.97933D6	1.49612D-8	-1.43122D-8
代號	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
數值	1.00880D1	1.82523D9	-8.76924D-6	3.14276D-6	7.17069D0

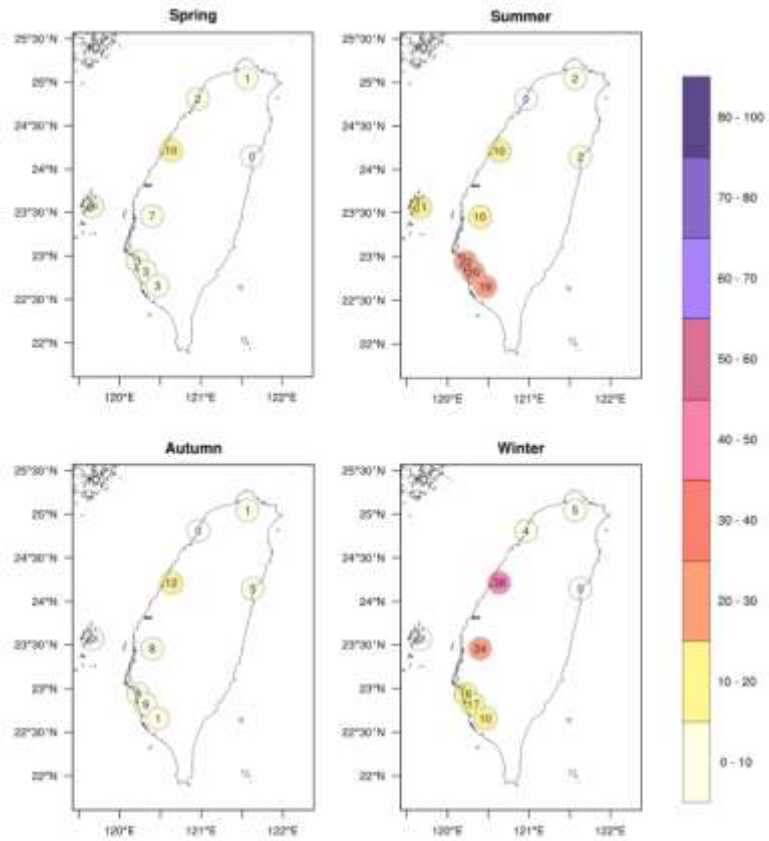


圖1 各季機場能見度低於1600公尺的個案數，表格內數字為日數，底色為百分比。

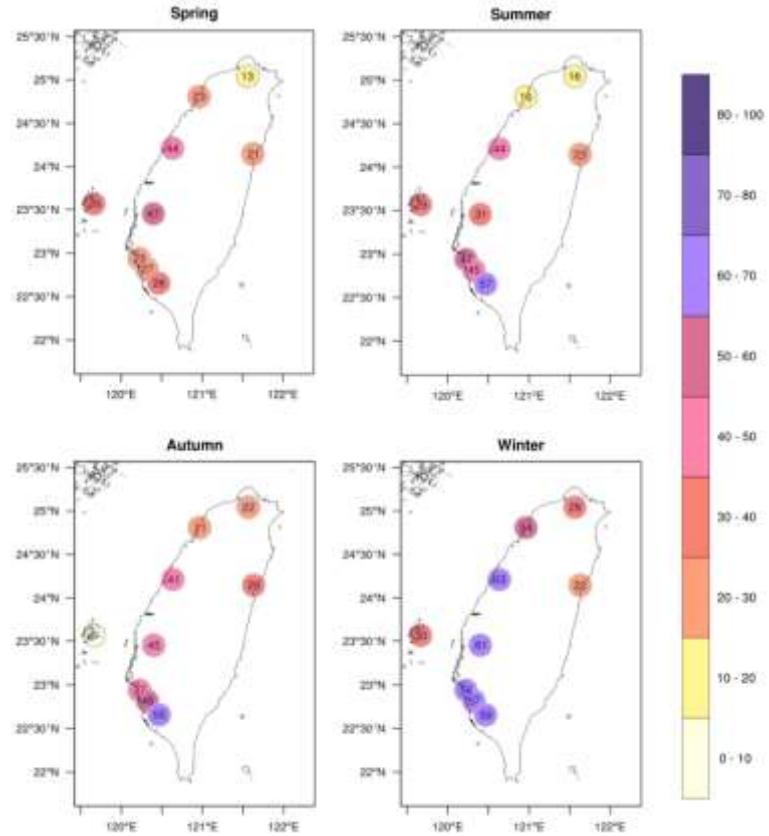


圖2 各季機場能見度低於5000公尺的個案數，表格內數字為日數，底色為百分比。

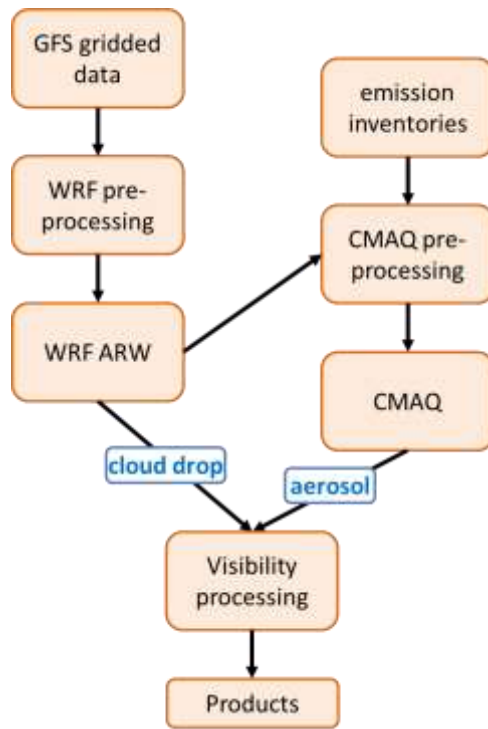


圖3 預報作業流程示意圖。



圖4 預報作業流程示意圖。

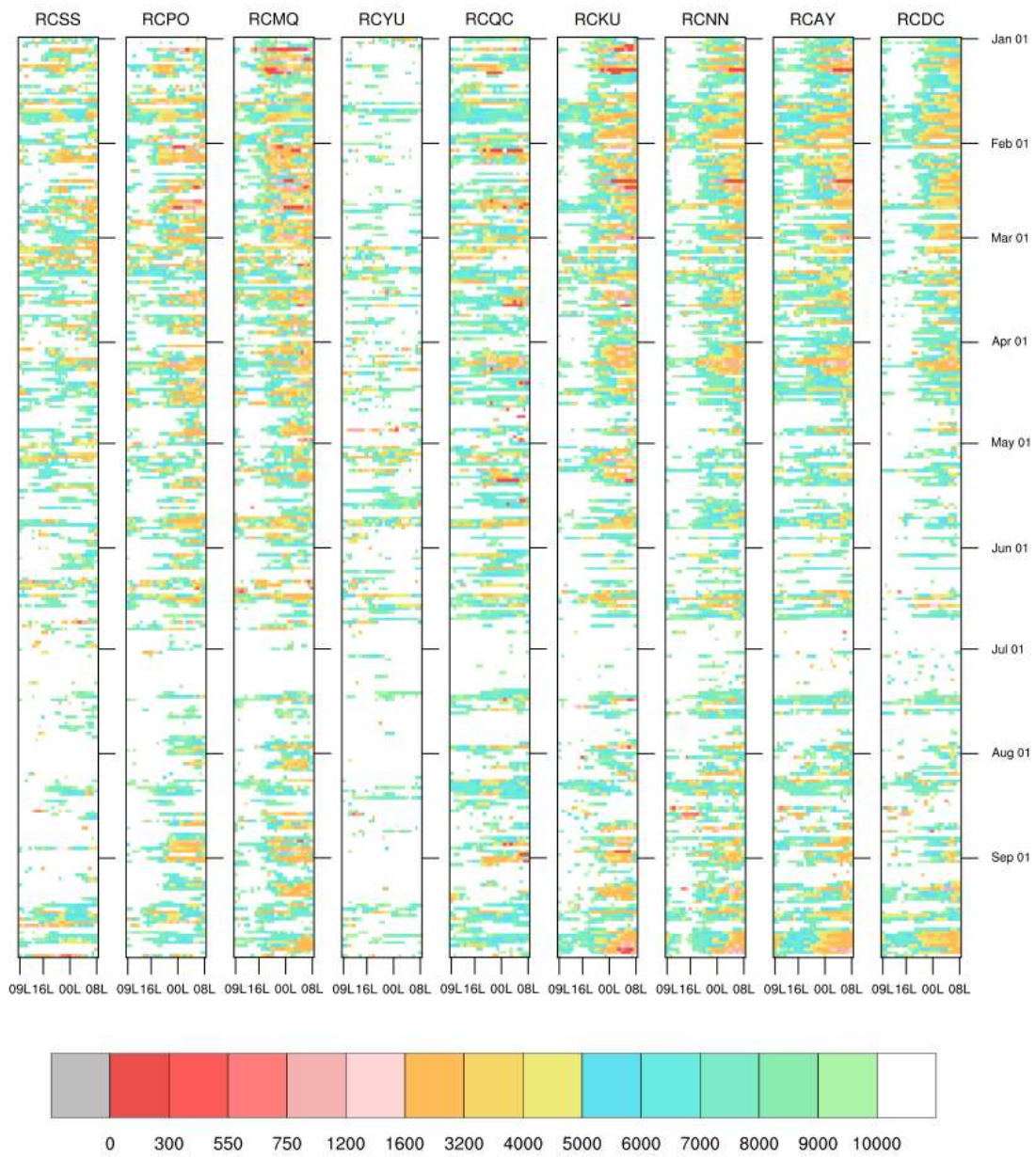


圖5 2019年1至9月各機場能見度預報結果。橫軸表示當日早上9點至隔日早上8點，縱軸表示1至9月份。底色為能見度（公尺），灰色代表資料缺漏。

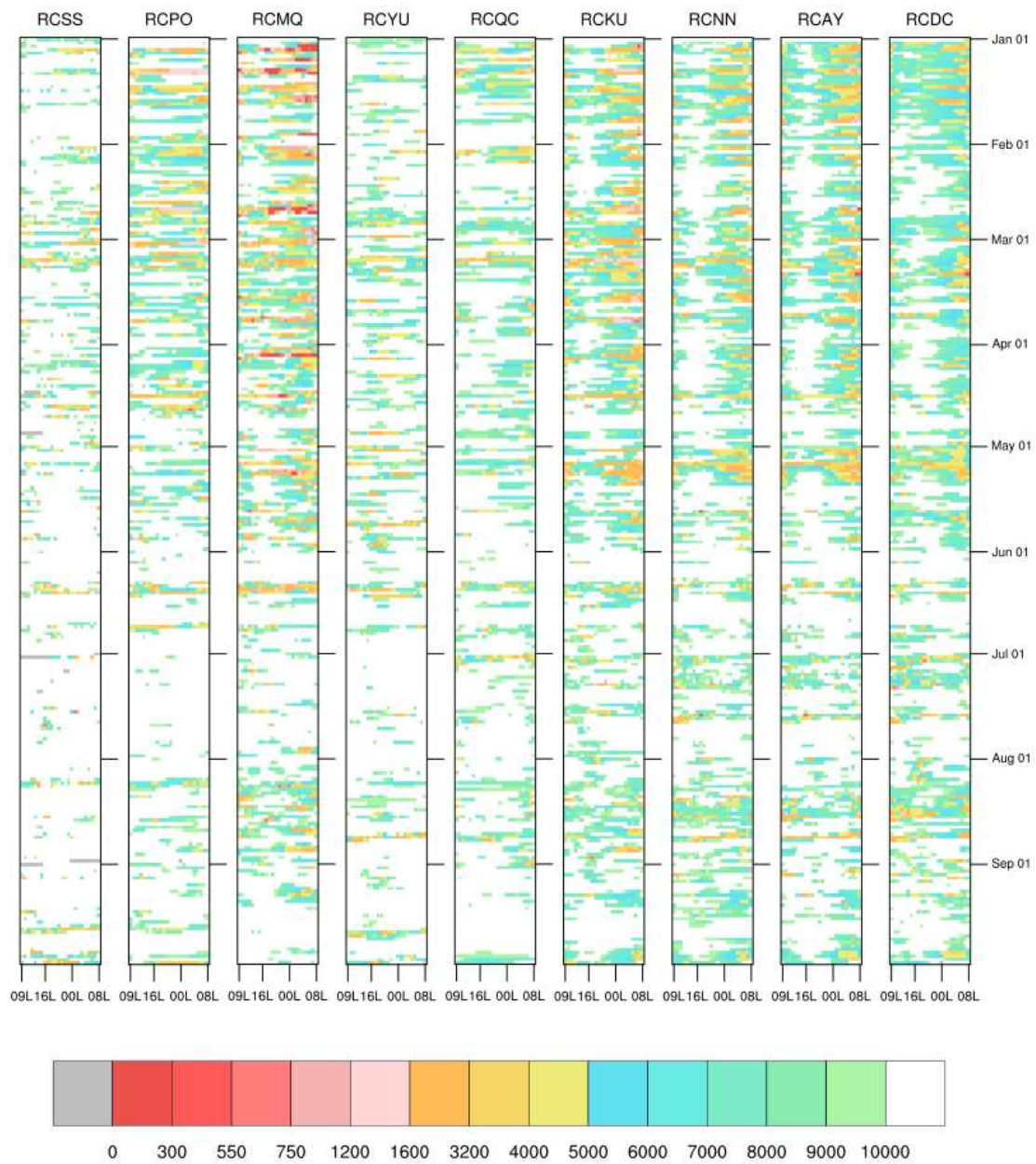


圖6 2019年1至9月各機場能見度觀測結果。圖表示方式如圖5。

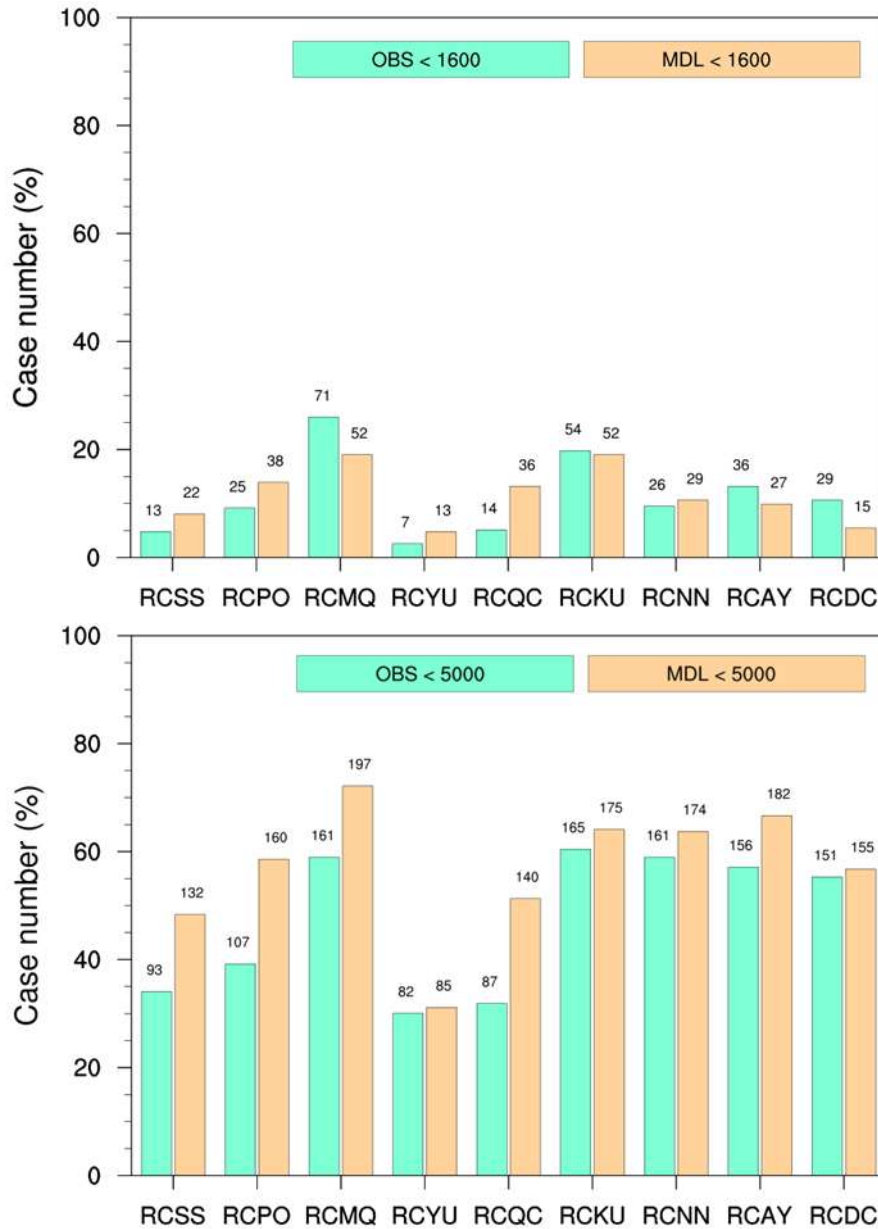


圖7 2019年1月至9月低能見度事件發生率（Y軸）與次數（圖中數字），上圖與下圖分別以能見度低於1600公尺與低於5000公尺為低能見度事件標準，綠色與橘色長條分別為觀測與模式預報之結果。

Low VIS Threshold (m)		BS		POD		AR		1-FAR		TS	
RCSS	1600	1.69		0.08		0.88		0.05		0.03	
	5000	1.42		0.71		0.66		0.50		0.42	
RCPO	1600	1.52		0.24		0.81		0.16		0.11	
	5000	1.50		0.87		0.70		0.58		0.53	
RCMQ	1600	0.73		0.44		0.78		0.60		0.34	
	5000	1.22		0.83		0.67		0.68		0.60	
RCYU	1600	1.86		0.29		0.94		0.15		0.11	
	5000	1.04		0.50		0.69		0.48		0.33	
RCQC	1600	2.57		0.21		0.84		0.08		0.06	
	5000	1.61		0.60		0.55		0.37		0.30	
RCJU	1600	0.96		0.41		0.77		0.42		0.26	
	5000	1.06		0.75		0.66		0.70		0.57	
RCNN	1600	1.12		0.27		0.85		0.24		0.15	
	5000	1.08		0.75		0.65		0.69		0.56	
RCAY	1600	0.75		0.25		0.84		0.33		0.17	
	5000	1.17		0.79		0.66		0.68		0.57	
RCDC	1600	0.52		0.17		0.88		0.33		0.13	
	5000	1.03		0.64		0.58		0.62		0.46	
Total	1600	1.03		0.31		0.84		0.30		0.18	
	5000	1.20		0.73		0.65		0.61		0.49	

圖8 2019年1月至9月期間，各機場能見度小於1600公尺與5000公尺之預報校驗指數結果。其中BS欄位之虛線表示值為1；其他校驗指數最大值為1，最小值為0。

Evaluation of Qualitative Forecast for Airport Visibility in Taiwan

Yi-Chiu Lin¹ Li-Ju Chen² Jen-Ping Chen² Yun-Ya Chu² Yu-Feng Lin³

¹Research Center of Climate Change and Sustainable Development, National Taiwan University

²Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University

³Weather Center, Weather Wing, R.O.C. Air Force

Abstract

Aimed to improve flight safety, this study investigated the potential of using meteorological and air quality models for a quantitative forecast of airport visibility in routine operation. Current operational visibility forecasts tend to focus on meteorological conditions for fog formation and ignore the importance of fog and haze's microphysical effects. Therefore, a comprehensive treatment of fog and haze formation mechanisms in the meteorological and air-quality models are crucial to quantitative visibility forecasts. We apply the advanced air quality model called CMAQ for haze forecasting and the WRF meteorological model for fog forecasting. The WRF model is coupled with the NTU double-moment cloud microphysical scheme, which is highly detailed in treating the aerosol-cloud interactions and provides a more accurate description of fog-drop's optical properties. The visibility retardation is evaluated according to the microphysical properties of haze and fog using physics-based parameterizations compared to the conventional empirical methods.

The forecast results from January to September in 2019 show that the model can reasonably simulate the seasonal and spatial distribution of low visibility events at various airports in Taiwan. Evaluation of forecast performance was done for Taiwan's nine airports under the low visibility thresholds of 1600 and 5000 m, respectively. The overall Threat Score (TS) is higher (0.49) for forecasting the mild low-visibility (<5000m) events but lower (0.18) when forecasting more severe low-visibility (<1600m). The best performance was obtained for the Taichung Ching-Chuan-Kang Airport, with a TS of 0.6; the poorest performance with a TS of 0.03 was obtained for the Song-Shan Airport.

Keywords: visibility forecast, haze and fog forecast, NTU parameterization schemes