

臺灣地區對流胞預報誤差特性分析與路徑預報技術改善

¹李采蓉 ¹鍾高陞 ¹柯靜吟 ¹鄒益豪

²陳新淦 ²林秉煜 ²黃椿喜

¹國立中央大學大氣物理所

²中央氣象局 預報中心

摘要

本研究使用中央氣象局用於預報作業上之對流監測平台系統(System for Convection Analysis and Nowcasting, SCAN)當中以對流胞辨識與追蹤(Storm Cell Identification and Tracking, SCIT)方式所得出的對流胞資料，進行 2011 年~2018 年總共 8 年來 5 月到 8 月之預報誤差統計特性分析。為檢驗在不同環境條件下的統計特徵是否有所差異，因此北部採用五分山雷達之觀測資料、南部則以七股雷達資料將臺灣地區分為北部以及南部，並進一步將天氣系統區分為綜觀以及弱綜觀進行分析探討。

針對對流胞即時預報產品的建構，採用類似颱風路徑潛勢預報(Potential Track Area)的方式，取 4 種對流胞速度組別下前 70% 歷史預報誤差統計資訊，以界定 0-1 小時內強對流胞可能侵襲致災的預警範圍，定量提升劇烈天氣之預警能力。此外，嘗試將 SCIT 資料與 iTEEN、MAPLE 或 WISSDOM 系統所提供之中尺度環流場、環境駛流場等資訊進行結合，以改善 SCAN 系統缺乏對流胞初生時期移動資訊的問題。使用強降水事件驗證結合上述資訊後的 PTA 預報表現。另外，尚進一步參考颱風暴風圈侵襲機率預報(Wind Speed Probability)的方法，使用蒙地卡羅法進行前 95% 歷史預報誤差統計資訊的隨機抽樣，以建構對流胞暴風圈侵襲機率預報(Storm Threat Optimal Probability)。

關鍵字：0-1 小時即時預報、對流胞辨識追蹤、誤差特徵統計分析

一、前言

劇烈天氣系統當中，對流風暴所伴隨之強降雨、強風、冰雹以及閃電帶來的嚴重災害可能會造成農業以及工業上的重大損失。臺灣地區主要受鋒面系統、西南氣流、颱風以及午後熱對流等劇烈天氣影響，從防災預警的角度而言，對流胞的研判與追蹤及即時預報十分重要，但在學術研究與實際作業單位當中，此任務仍是極為困難與挑戰的課題(Jung and Lee 2015; Hou and Wang 2017; Kato et al. 2017; Capozzi et al. 2018)。

在觀測上，氣象雷達可提供高時空解析度之資訊(平均 6-7 分鐘一筆三維觀測資料；250 公尺解析度)，可以有效的監測對流胞的生成與行進方向。中央氣象局目前所採用之對流監測平台 SCAN 為美國 WDSS 系統之預警決策支援系統，主要由都卜勒雷達觀測及其他相關資訊(如探空、地面觀測、數值模擬)整合而成。其中，針對風暴的偵測辨識及追蹤，採用 SCIT (the Storm Cell Identification and Tracking algorithm, Johnson et al. 1998)系統，來預測對流胞在 0-1 小時之間的發展。

SCIT 系統過去的相關研究如下：1. 張等人(2006)藉由中央氣象局、經濟部水利署及美國劇烈風暴實驗室 NSSL 共同開發之 QPESUMS 系統(Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors, Zhang et al., 2011; Gourley et

al. 2002)，評估颱風與梅雨季事件對流胞在 0-1 小時的外延路徑預報，利用氣象雷達觀測進行 30 與 60 分鐘之路徑誤差分析；2. 張等人(2008)利用 QPESUMS 之最大回波資料，統整 2005-2007 年 5-10 月的所有午後雷陣雨個案，從統計的角度探討對流胞之氣候特徵；3. 蔡(2011)分析 2011 年之龍捲風及其所伴隨之強對流胞個案，其結果顯示利用 SCAN 系統大致能掌握風暴的演變，但仍建議藉由統計分析進行系統的評估及修改；4. 鍾等人(2019)利用 2017 年夏季 5 至 8 月的資料進行對流胞路徑誤差統計分析，初步了解對流胞於不同地區、月份下的行為以及誤報特性差異；5. 鍾等人(2020)則進一步以 2011-2018 年 5 至 8 月的多年對流胞特性統計分析結果，成功參考中央氣象局現行颱風預報產品(Potential Track Area, PTA)建構對流胞路徑潛勢預報(Potential Track Area for storm, PTAS)。

本研究將著重於現有對流胞路徑潛勢預報(PTAS)產品的優化以及延伸預報產品的開發，包含：1. 嘗試將 SCIT 與其他系統之中尺度環流場、環境駛流場等資訊進行結合，以進一步找尋更早掌握對流胞路徑的可能性；2. 參考現行颱風侵襲機率預報(Wind Speed Probability, WSP；蔡等人 2011)，開發適用於對流胞的侵襲機率潛勢預報產品(Storm Threat Optimal Probability, STOP)，以提供更好的防災預警資訊。

二、研究方法

SCIT 為一風暴偵測、辨識及追蹤系統，用於辨識、描繪特性、路徑追蹤、預測對流胞在三維空間短期的移動(Johnson et al. 1998)。對流胞的辨識會分為三個步驟進行：首先，從在雷達波束上辨識出 1D 對流區塊；接著，將符合 1D 辨識條件之對流區塊擴展至同一仰角之掃描面上搜尋 2D 對流區塊；最後，在 3D 空間完整的體積掃描定義出對流胞。經過以上過程後，給予對流胞編號以及中心位置。決定對流胞中心後，會將兩筆連續的體積掃描得到的對流胞進行比對，當對流胞在不超過掃描時間門檻(20 分鐘)的時間區間內，判定為同一個對流胞，產生移動向量。最後，根據對流胞的定位與移動資訊，進行 0 到 1 小時之對流胞即時路徑預報。

均方根誤差(RMSE)可用於檢視對流胞路徑預報於 0 到 1 小時內的誤差程度，公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F - O)^2}{N}}$$

上式中，F 為預報時間點的對流胞位置，O 為觀測的對流胞位置，N 為所有納入計算的格點數。參考中央氣象局自 2003 年起發布的颱風 PTA 路徑潛勢預報建構方式，將多年預報誤差統計資料依對流胞移動速度區分為： $V \leq 5 \text{ m s}^{-1}$ 、 $5 < V \leq 10 \text{ m s}^{-1}$ 、 $10 < V \leq 15 \text{ m s}^{-1}$ 、 $15 \text{ m s}^{-1} < V$ 四類，由小到大選取前 70% 資料當中的最大值作為最大可能誤差距離，並將統計結果整理成對照表(如表 1)。實際執行對流胞路徑預報時，根據不同移速取得所需預報時間的誤差值，將所得誤差半徑的圓形範圍繪製在預報路徑圖上，得到對流胞路徑 70% 的潛勢預報(PTAS;圖 1)。

表 1. 2011 至 2018 年 5~8 月南北雷達四組速度分組前 70% 最大誤差範圍(km)，橫軸為預報時長。

Site	min Spd	10	20	30	40	50	60
		RCWF	≤5	3.3	5.7	8.1	10.4
	5~10	3.7	6.4	9.2	11.8	14.5	17.2
	10~15	4.0	6.9	9.7	12.4	15.1	17.8
	>15	5.1	8.9	12.9	17.0	20.9	25.2
RCCG	≤5	3.8	6.6	9.2	11.5	13.9	16.3
	5~10	4.2	7.3	10.3	12.9	15.7	18.4
	10~15	4.7	8.2	11.5	14.4	17.6	20.5
	>15	6.7	12.0	17.1	22.4	27.7	33.2

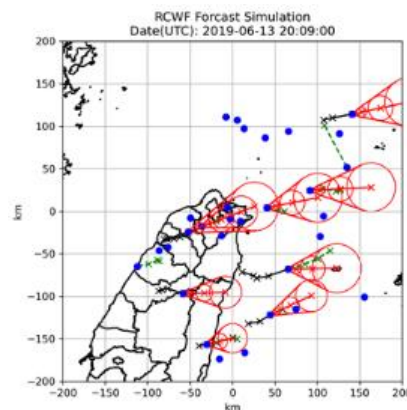


圖 1. PTAS 預報示意圖。藍點為當下對流胞位置，綠線為此時間後 1 小時內的移動路徑，黑線為過去 1 小時內的移動路徑，紅線為 0-1 小時誤差範圍，圓圈分別為 10、30、60 分鐘 70% 預報誤差範圍。

由於 SCIT 無法掌握對流胞首筆資料的移動方向及速度，為尋求更早預警的可能性，採用表 2 所示之系統提供的風場或環境流場資訊作為對流胞首筆移動資料，評估將其與 SCIT 結合前後 PTAS 產品的預報表現。可偵測機率(Probability of Detection, POD)可透過計算對流胞實際位置是否坐落在 PTAS 誤差範圍之內，以檢驗該產品的預報能力：

$$POD = \frac{Hit}{Hit + Miss}$$

當所有路徑預報都能包含對流胞位置時，POD 最佳分數為 1，如預報誤差範圍無法掌握對流胞位置，則 POD 分數最差為 0。

表 2. 即時預報系統簡介。

iTEEN (陳 2016)	VET 變分回波追蹤法 (Chung and Yao, 2020)	WISSDOM (Liou et al., 2019)
Integration on Taiwan Extended Ensemble Nowcasting	McGill Algorithm for Precipitation nowcasting using Lagrangian Extrapolation	Wind Synthesis System used to Doppler Measurement
<ul style="list-style-type: none"> ✓ 使用中央氣象局區域預報模式決定性預報 WRFD、颱風數值預報 TWRP 及 WEPS 模式系集資料 ✓ 透過影像辨識技術篩選預報結果 ✓ 取用 3 km x 3 km 風場資訊 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 由加拿大 McGill 大學雷達氣象團隊所開發的即時預報系統 ✓ 假設回波保守的條件下以變分回波追蹤法 (Variational Echo Tracking, VET) 獲取二維回波移動場 ✓ VET 測試可依不同閾值時間或空間解析度進行調整。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 中央大學雷達氣象實驗室所發展之多雷達反演技術 ✓ 透過變分極小化的疊代計算，得到三維空間之風場結構 ✓ 約束條件有：徑向風與背景風場、連續方程、垂直渦度方程、Laplacian 平滑項、地面測站資料等 ✓ 取用水平解析度 1 km / 高度 3 km 的風場資訊

除了以 PTAS 產品界定出對流胞路徑預報的不確定性範圍外，為進一步定量呈現各地受對流胞暴風圈威脅的可能性之多寡，參考中央氣象局的颱風 WSP 機率侵襲預報產品建構方式、以及部分對流胞 PTAS 的做法建構對流胞 STOP 預報。首先同樣將對流胞依據移速分為四組，篩選出多年歷史資料中生命期達

60 分鐘以上之對流胞，經由 95%信賴區間濾除離群值後，存取剩餘對流胞於 10、20、30、40、50、60 分鐘預報時長下的「經向誤差(Meridional Track Error:MT)」與「緯向誤差(Zonal Track Error:ZT)」(即 x、y 方向誤差)。執行預報時，會至資料庫內抽取 1000 組歷史對流胞預報誤差統計資料(x、y 方向誤差一同進行抽樣)。抽樣方式分為以下二種(皆使用 PRNG 亂數產生器)：1. 蒙地卡羅法：於六個預報時段分別進行誤差隨機抽樣，且考慮前後預報時段誤差的相關性(每次進行抽樣時，會自資料庫中篩選出與前一預報時段之經緯方向誤差皆不大於 4 公里之對流胞作為抽樣母體)；2. 歷史路徑抽樣法：直接抽取整組樣本(即每次皆直接抽取單一歷史對流胞六個時段的預報誤差)。完成誤差抽樣後，會以直線外延預報為基準生成 1000 條模擬路徑，並以 4 公里網格點間距，在距離雷達位置 200 公里範圍內的區域找尋每個網格點方圓 4 公里內(所設定之對流胞侵襲半徑)的模擬路徑數量(m)，並以模擬路徑之數量比(m/1000*100%)計算侵襲機率，生成 STOP 預報產品。

三、使用資料說明

本期研究使用五分山雷達(RCWF)與七股雷達(RCCG) 2011 年至 2018 年夏季(5 至 8 月) 的 SCIT 歷史預報誤差進行預報產品的建構，並配合 MAPLE、iTEEN 以及 WISSDOM 等系統提供的流場資訊，選用表 3 所示之歷史強降水事件進行 PTAS 產品的校驗。此外，亦嘗試根據中央氣象局每日發布的天氣報告，將 8 年統計資料區分為受到颱風、鋒面等綜觀天氣影響的綜觀日(共 343 天)以及其餘的弱綜觀日(共 641 天)，討論經緯向誤差的分布情況。第一部分將著重探討結合其他系統流場資訊，進行對流胞初生移動情況掌握能力的改善情況；第二部分則根據經緯向誤差的統計分布特徵，由原先的路徑潛勢預報(PTAS)進一步延伸至機率侵襲預報(STOP)。

表 3. 選用校驗個案說明。(* 有 iTEEN 資料之個案； ** 有 WISSDOM 資料之個案)

編號	雷達	日期	天氣型態
(a)	RCCG	2017/07/08 06:00~13:00	弱綜觀天氣系統(高壓籠罩)
(b)		2017/07/24 06:00~12:00	弱綜觀天氣系統(高壓籠罩)
(c)		* 2018/08/23 00:00~08/24 09:00	熱帶性低氣壓
(d)		* 2019/07/19 11:00~17:40	綜觀天氣系統(颱風環流)
(e)	RCWF	2019/08/12 18:00~08/13 06:00	綜觀天氣系統(颱風環流)
(f)		2017/06/13 18:00~06/14 12:00	滯留鋒
(g)		2017/07/07 06:00~13:00	弱綜觀天氣系統(高壓籠罩)
(h)		* 2018/08/03 05:00~10:00	綜觀天氣系統(颱風環流)
(i)		* 2019/06/13 16:00~23:00	冷鋒
(j)		* 2019/07/02 05:00~12:00	綜觀天氣系統(低壓環流)
(k)		** 2020/10/12 05:00~10:59	東北風&颱風外圍環流
(l)		** 2020/10/16 05:00~10:59	東北風

四、結果分析

首先針對結合 iTEEN、MAPLE 或 WISSDOM 系統流場資訊後的 PTAS 預報表現進行探討，如圖 2。

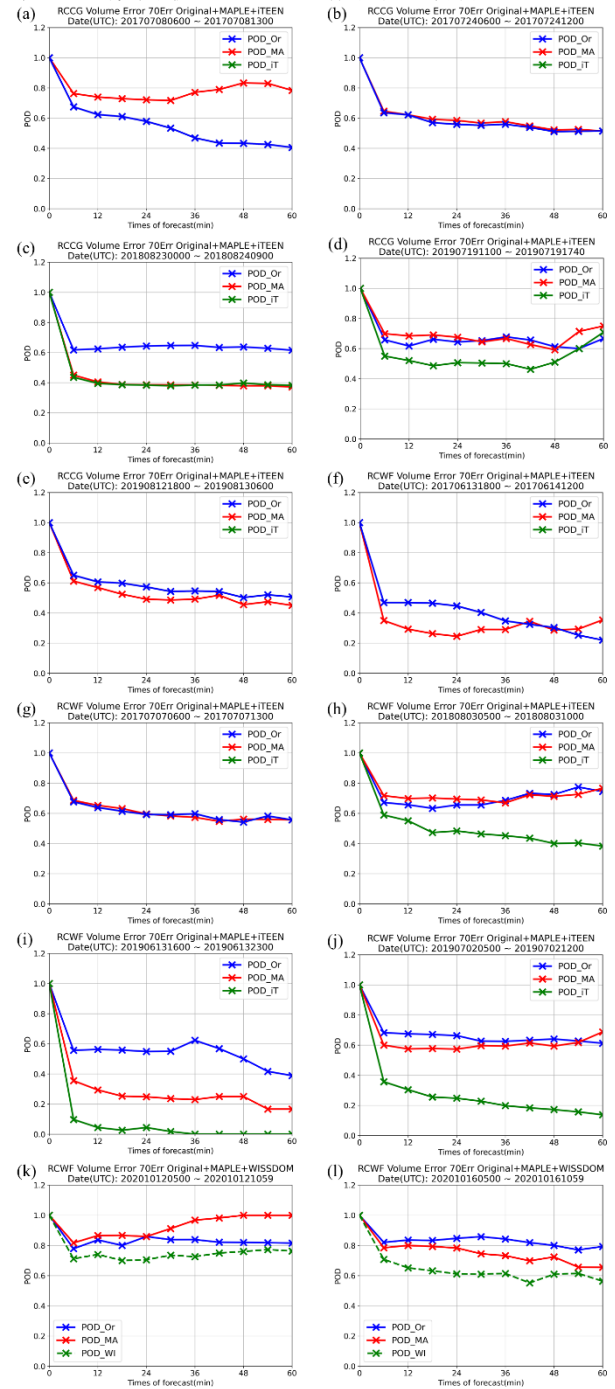


圖 2. 使用原始 SCIT 資訊(藍線)、加入 MAPLE(紅線)、iTEEN(綠實線)或 WISSDOM(綠虛線)之 POD 於一小時預報期間內的變化，各編號對應之事件見表 3。

比較個案之 POD 表現，首先可以觀察到原始 SCIT 直線外延(藍線)在個案(c)、(d)、(h)、(j)、(k)、(l)的表現較佳，在個案(b)、(e)、(g)的表現尚可，而在(a)、(f)、(i)的表現較差。分析這些個案的天氣型態，可以注意到鋒面系統個案的表現皆差，弱綜觀天氣系統個案的表現則尚可至差。當加入 MAPLE 時(紅線)，個案(a)、(d)、(h)、(k)的表現變好，(b)、(g)無太大差別，(f)、(j)時好時壞，(c)、(e)、(i)、(l)的表現則變差。

其中尤以個案(a)的表現變好、個案(c)的表現變差最為明顯，然而，並未觀察到有特定的天氣型態會於加入 MAPLE 後有明顯的改善。針對有 iTEEN 資料(綠實線)的個案進行討論(c、d、h、i、j)，然而，可以發現加入 iTEEN 後的表現大抵都比原始 SCIT 直線外延及 MAPLE 的表現不理想，僅個案(d)的表現較佳。而在加入 WISSDOM 後(綠虛線)，個案(k)、(l)的表現亦不如原始直線外延及 MAPLE，不過皆有維持在水準之上。

第二部份針對 STOP 預報產品的開發。為此，首先須獲取對流胞於不同預報時長下的經緯向誤差分布。圖 3 為四組對流胞組別於 8 年統計下的 30、60 分鐘預報誤差散佈情況，在此可明顯觀察到誤差隨預報時長的增長而趨於分散，且當對流胞移動速度越大時此現象越明顯。

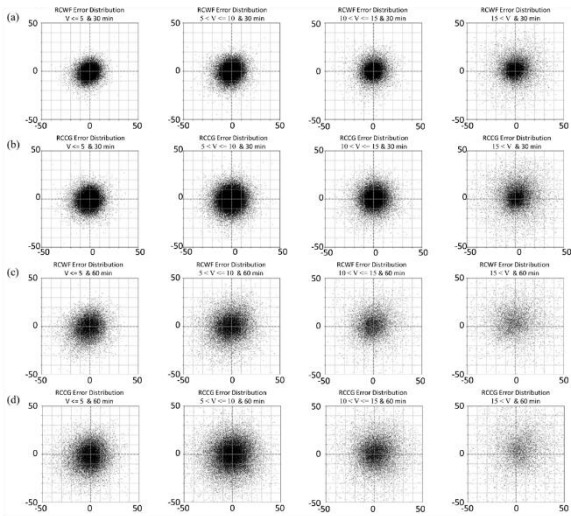


圖 3. 2011 至 2018 年 5~8 月不同速度組別經緯向預報誤差(km)散布圖，由左至右分別為 $V \leq 5$ 、 $5 < V \leq 10$ 、 $10 < V \leq 15$ 、 $15 < V$ 。(a) RCWF 預報 30 分鐘；(b) RCCG 預報 30 分鐘；(c) RCWF 預報 60 分鐘；(d) RCCG 預報 60 分鐘。

參考顧 2006 的誤差分析方法，將一小時預報誤差散佈圖取前 95%繪製機率橢圓，以紅($V \leq 5$)、綠($5 < V \leq 10$)、藍($10 < V \leq 15$)、紫($V > 15$)圓圈代表不同速度組別，探討誤差資料的分布是否有傾向特定的象限(圖 4)。結果顯示機率橢圓多呈現正圓，此代表經緯向誤差大小大致相同，並無特定傾向。比較所有日期下 RCWF 及 RCCG 的誤差分布(圖 4 a, b)，可發現 RCCG 整體誤差橢圓大小皆大於 RCWF，此誤差分布應為 RCCG 掃描時間間隔較 RCWF 長所致。進一步區分不同天氣系統，可發現整體誤差分布主要受綜觀天氣所主導。而在弱綜觀條件下(圖 4 c, f)速度較大的組別中($V > 10$)，機率橢圓中心偏向東北側(即預報落後於觀測)。檢視此組別下的統計資料量(表 4)，可發現此分布結果為少數極端個案所導致。因此，在一般情況下無需特別以區分天氣系統之統計資料庫進行對流胞預報產品的建構。

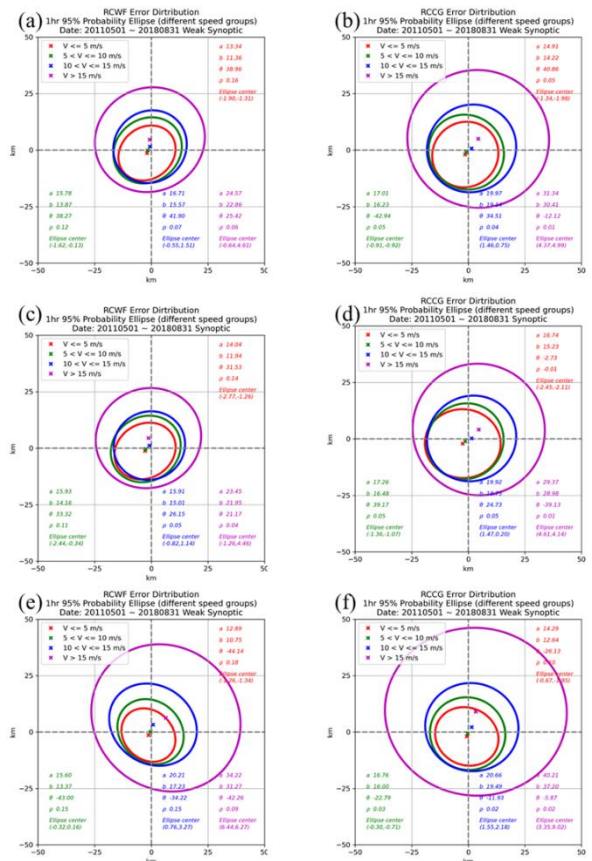


圖 4. 2011 至 2018 年 5~8 月一小時預報誤差之 95% 機率橢圓，上至下依序為所有日期、綜觀日與弱綜觀日之結果，RCWF(左: a, c, e)，RCCG(右: b, d, f)。

表 4. STOP 預報誤差抽樣資料庫之各組別統計資料量。

雷達	天氣系統	$V \leq 5$ m/s	$5 < V \leq 10$ m/s	$10 < V \leq 15$ m/s	$15 < V$
RCWF	All	13,083	16,039	7,817	5,554
	綜觀日	5,686	9,825	6,189	5,085
	弱綜觀日	7,272	6,014	1,447	410
RCCG	All	19,077	28,527	13,317	6,125
	綜觀日	7,842	16,945	9,730	5,023
	弱綜觀日	10,783	11,041	3,507	988

以上述誤差統計資料初步建構之 STOP 預報示意如圖 5，在此事件中，PTAS 預報於預報前期並未成功預警(實際路徑座落於預警範圍之外)，而以 1000 次抽樣、4 公里對流胞侵襲半徑設定生成之 STOP 預報則以低侵襲機率捕捉到此對流胞，且由二種抽樣方式生成的預報結果並無顯著差異。

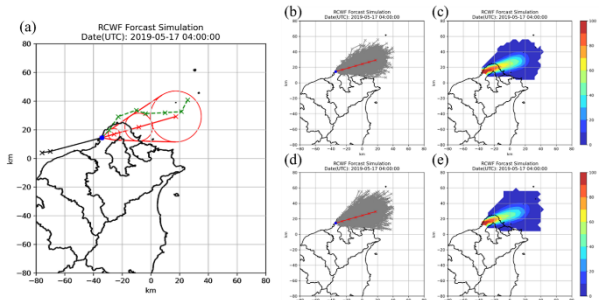


圖 5. 單一對流胞一小時預報，(a) PTAS 模擬預報；(b), (c) 蒙地卡羅抽樣模擬路徑及相應 STOP 預報；(d), (e) 歷史路徑抽樣模擬路徑及相應 STOP 預報。

進一步以敏感度測試檢視二種抽樣方法獲取的 STOP 預報: 圖 6 為是否使用信賴區間濾除離群值的預報結果差異, 若完全未進行離群值濾除(a, d), 會導致二者於 20% 機率以下預報結果呈現發散的情況; 而當以 95% 信賴區間濾除誤差過大之第一筆誤差資料時(b, e), 整體的預報結果相較未濾除(a, d)會有明顯的收斂, 但蒙地卡羅抽樣法仍有機率不連續(於 10% 機率範圍內夾雜 0% 機率的範圍)的情況發生; 若為確保二者預報結果收斂, 以 95% 信賴區間過濾所有誤差資料離群值(c, f)的作法較為理想。

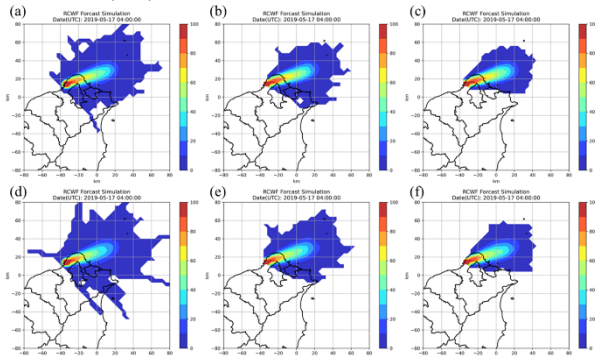


圖 6. STOP 預報離群值濾除敏感度測試。上為蒙地卡羅抽樣、下為歷史路徑抽樣, 由左至右依序為未進行離群值濾除(a, d)、以 95% 信賴區間進行第一筆誤差資料離群值濾除(b, e)、以 95% 信賴區間過濾所有誤差資料離群值(c, f)設定下的 STOP 預報結果。

圖 7 為不同對流胞侵襲半徑設定下的預報結果, 隨著侵襲半徑的增大, 高侵襲機率區塊所涵蓋的範圍會逐漸增加, 而二種抽樣方式於相同侵襲半徑設定下之預報結果並無顯著差異。

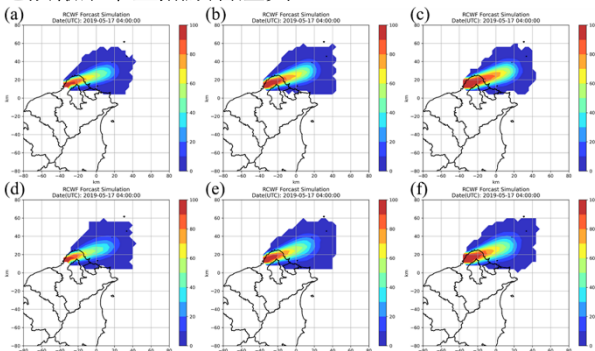


圖 7. STOP 預報侵襲半徑敏感度測試。上為蒙地卡羅抽樣、下為歷史路徑抽樣, 由左自右依序為 4 公里(a, d)、5 公里(b, e)、6 公里(c, f)對流胞侵襲半徑設定下的預報結果。

圖 8 為不同抽樣次數的預報結果, 於 10、100、1000 抽樣次數條件下分別進行 3 次獨立預報測試, 結果顯示以 10 次抽樣進行機率十分不穩定; 而 100 次抽樣時則在高機率範圍較穩定, 低機率區域則仍有所落差; 執行 1000 次抽樣後的預報結果除了 10% 機率以下的區塊外緣不平滑而有些許落差外, 其餘機率範圍的多次預報結果皆十分相似。使用歷史路徑抽樣

法時, 預報結果隨抽樣次數增加而收斂的情況會比使用蒙地卡羅法抽樣來的明顯。綜上所述, 由二種抽樣方式生成之 STOP 預報於當前濾除 95% 離群值、1000 次誤差抽樣條件下的預報結果差異不明顯, 在考慮運算效率的情況下, 可優先採用抽樣方式相較簡單且預報結果較易收斂的歷史路徑抽樣法執行 STOP 預報。

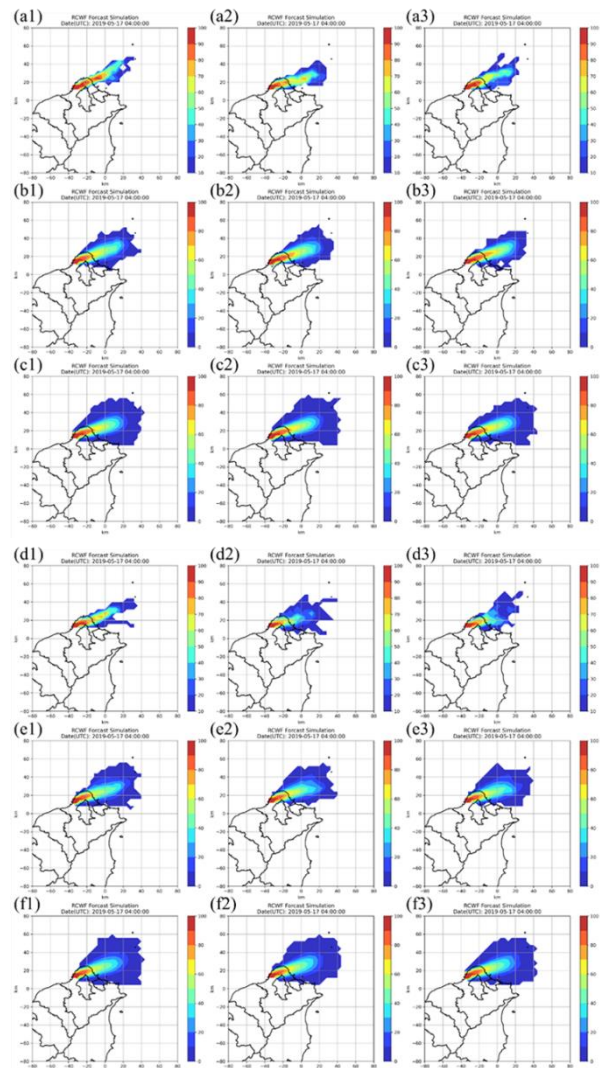


圖 8. STOP 預報抽樣次數敏感度測試, 1~3 代表相同抽樣次數條件下的三次獨立隨機抽樣預報結果。(a), (b), (c) 蒙地卡羅 10 次、100 次、1000 次抽樣; (d), (e), (f) 歷史路徑 10 次、100 次、1000 次抽樣。

五、結論

本研究主要延續鍾等人(2020)以 8 年 SCIT 誤差統計資料建構的 PTAS 預報產品, (1) 嘗試結合 iTEEN、MAPLE 或 WISSDOM 系統所提供的流場資訊, 以改善現有系統缺乏對流胞初生時期移動資訊的問題。(2) 此外, 亦初步嘗試開發適用於對流胞的侵襲機率潛勢預報產品(STOP)。

第一部分結果顯示, iTEEN 及 WISSDOM 資料對於提升本研究所選用之個案的預報能力尚無顯著

差異，而 MAPLE 資料的表現則與原始直線外延相近，且在部分情況下可以提升預報能力。然而，由 POD 校驗的結果顯示，MAPLE 資料對於個案預報能力的提升與個案的天氣系統並沒有直接關聯。儘管目前無法在實際預報應用上，以目標對流胞的天氣系統事先推估使用 MAPLE 資料的預報表現是否相較使用原始直線外延有所提升，但仍可考量將其用於補足 SCAN 系統缺乏對流胞初生移動資訊的問題，以達到提前掌握對流胞移動資訊的目的。

第二部分結果顯示，當雷達掃描時間間隔越長或是對流胞移動速度越快的情況下，預報誤差隨時間增長的情況越明顯。除了極少數 $V > 10$ 的弱綜觀對流胞有預報落後於觀測的情況外，大多數對流胞的誤差分布並未傾向特定的象限，以實際作業單位的角度而言，針對一般速度條件的對流胞預報判斷不須特別細分綜觀與弱綜觀。透過上述誤差資料建構的 STOP 預報可提供相較 PTAS 產品更多的預警資訊，而由蒙地卡羅及歷史路徑抽樣法生成之 STOP 預報結果差異不大，可採用相對易於收斂的歷史路徑抽樣法以降低運算所需資源。未來應進一步嘗試於預報中考量對流胞的生命期以及強度變化，以發展更符合實際情況的預報產品。

六、文獻參考

- 顧欣怡，2006: 颱風侵襲機率預報系統開發。中央氣象局研究發展專題第 CWB95-1A-07 號，76 頁。
- 張保亮，丘台光，陳嘉榮，張惠玲，王碧霞，2006: QPESUMS 系統對流胞偵測與預報路徑校驗，中央氣象局 2006 年天氣分析與預報研討會。
- 張保亮，林品芳，陳嘉榮，2008: 台灣地區午後對流雷達觀測特徵分析，中央氣象局 2008 年天氣分析與預報研討會。
- 蔡甫甸，2011: 中央氣象局即時預報發展之探討-只用 SCAN 追蹤分析 2011 年新店龍捲風所伴隨之風暴個案，中央氣象局 2011 年天氣分析與預報研討會。
- 蔡孝忠、呂國臣、許乃寧、賈愛玫，2011: 蒙地卡羅法在颱風侵襲機率估計的應用。大氣科學期刊，39(3)，269-288。
- 陳新淦，黃椿喜，呂國臣，洪景山，張博雄，2016: 利用雷達回波影像辨識及篩選技術發展極短期系集定量降水預報，大氣科學，44 期，1 號，1-32。
- 鍾高陞、柯靜吟、鄒益豪、林秉煜、陳新淦、劉宇其、賈愛玫，2019: 台灣地區 SCAN 即時預報系統之對流胞路徑誤差統計分析，中央氣象局 2019 年天氣分析與預報研討會。
- 鍾高陞、柯靜吟、鄒益豪、李采蓉、林秉煜、黃椿喜、陳新淦、劉宇其、賈愛玫，2020: 臺灣地區對流胞特性分析與路徑預報技術開發，中央氣象局 2020 年天氣分析與預報研討會。
- Capozzi, V., E. Picciotti, V. Mazarella, F. S. Marzano, and G. Budillon, 2018: Fuzzy-logic detection and probability of hail exploiting short-range X-band weather radar. *Atmos Res*, **201**, 17-33.
- Chung, K.-S., and I.-A. Yao, 2020: Improving Radar Echo Lagrangian Extrapolation Nowcasting by Blending Numerical Model Wind Information: Statistical Performance of 16 Typhoon Cases, *Mon. Wea. Rev.*, **148**, 1099-1120.
- Gourley, J. J., R. A. Maddox, D. W. Burgess, and K. W. Howard, 2002: An exploratory multi-sensor technique for quantitative estimation of stratiform rainfall. *Journal of Hydrometeorology*, **3**, 166-180.
- Hou, J. Y., and P. Wang, 2017: Storm Tracking via Tree Structure Representation of Radar Data. *J Atmos Ocean Tech*, **34**, 729-747.
- Johnson, J. T., P. L. MacKeen, A. Witt, E. D. Mitchell, G. J. Stumpf, M. D. Eilts, and K. W. Thomas, 1998: The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm. *Weather and Forecasting*, **13**, 263-276.
- Jung, S. H., and G. Lee, 2015: Radar-based cell tracking with fuzzy logic approach. *Meteorol Appl*, **22**, 716-730.
- Kato, R., S. Shimizu, K. Shimose, T. Maesaka, K. Iwanami, and H. Nakagaki, 2017: Predictability of meso-gamma-scale, localized, extreme heavy rainfall during the warm season in Japan using high-resolution precipitation nowcasts. *Q J Roy Meteor Soc*, **143**, 1406-1420.
- Liou, Y.-C., P.-C. Yang, and W.-Y. Wang, 2019: Thermodynamic recovery of the pressure and temperature fields over complex terrain using wind fields derived by multiple-Doppler radar synthesis. *Mon. Wea. Rev.*, **147**, 3844-3846.
- Zhang, J., K. Howard, C. Langston, S. Vasiloff, B. Kaney, A. Arthur, S. V. Cooten, K. Kelleher, D. Kitzmiller, F. Ding, D.-J. Seo, E. Wells and C. Dempsey, 2011: National mosaic and multi-sensor QPE (NMQ) system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **92**, 1321-1338.