

NCDR 109-T04

模式調整外延(ExAMP)即時預報方法 之開發與應用

Development and Application of the Extrapolation Adjusted
by Model Prediction (ExAMP) Nowcasting Method



行政法人

國家災害防救科技中心

National Science and Technology Center
for Disaster Reduction

國家災害防救科技中心

中華民國 110 年 01 月

NCDR 109-T04

模式調整外延(ExAMP)即時預報方法 之開發與應用

Development and Application of the Extrapolation Adjusted
by Model Prediction (ExAMP) Nowcasting Method

蔡直謙、林欣弘、劉嘉騏、陳御群、林忠義、于宜強



國家災害防救科技中心
中華民國 110 年 01 月

中文摘要

為了最佳化利用全台都卜勒氣象雷達資料，研發有效的劇烈天氣即時預報方法，本研究結合雷達回波外延與雷達資料同化兩種技術，提出全新的模式調整外延(ExAMP)調合方案。此方案完全信任外延法所預測的回波形態，但允許強度被數值模式所預測的回波做有限的調整。為了系統性評估其即時預報能力，本研究針對台灣 2019 年不同類型的強降雨事件，進行外延法、數值模式和三種調合方案的回波即時預報實驗。實驗結果顯示只有 ExAMP 預報能同時掌握回波增強與減弱趨勢，方均根誤差也最低，為五種方法中的最佳。此外，五組預報的優劣順序不因事件種類不同而改變，意謂 ExAMP 方案對於各種天氣有一貫的優勢。此方案已發表於 Atmosphere 學術期刊，且用於開發「即時降雨預警技術」專頁與「落雨小幫手 App」兩項產品，以提供使用者最即時的降雨預警資訊。未來將進一步探討雷達變數與降雨率之間的關係，以期待 ExAMP 方案在降雨即時預報上也有助益。

關鍵字：都卜勒氣象雷達；即時預報；雷達回波外延；雷達資料同化；
模式調整外延

ABSTRACT

To optimally utilize all the Doppler weather radar data in Taiwan and develop an efficient nowcasting method for severe weather, this study incorporates the techniques of radar echo extrapolation and radar data assimilation by proposing a new blending scheme called extrapolation adjusted by model prediction (ExAMP). This scheme has full trust in the pattern of reflectivity predicted by extrapolation but allows the intensity to be adjusted by model prediction to a limited extent. For a systematic evaluation of its nowcasting skill, reflectivity nowcasting experiments for various heavy rainfall events in Taiwan in 2019 are carried out by comparing the methods of extrapolation, a numerical model, and three blending schemes. The results show that only the ExAMP nowcasts can predict both the strengthening and weakening trends of reflectivity with the lowest root-mean-square errors, the best among the five methods. Besides, the event type does not change the performance ranking of the five methods, which implies the consistent advantage of the ExAMP scheme for various severe weather systems. This scheme has been published in the journal of Atmosphere and utilized to develop two real-time nowcasting products (a web page and an app), which provide users with instant rainfall alert information. For future prospect, the relations between radar variables and the rainfall rate will be further explored for benefits to rainfall nowcasting via the ExAMP scheme as well.

Keywords: Doppler weather radar; nowcasting; radar echo extrapolation; radar data assimilation; extrapolation adjusted by model prediction

目錄

第一章	緒論	1
1.1	前言	1
1.2	文獻回顧	3
1.3	研究目的	7
第二章	研究方法	9
2.1	MAPLE 外延法	9
2.2	WRF 模式	10
2.3	Lin CD 與 Sal CD 調合方案	11
2.4	ExAMP 調合方案	12
第三章	實驗設計	14
3.1	強降雨事件樣本	14
3.2	MAPLE 模擬設定	15
3.3	WRF 模擬設定	16
第四章	實驗結果	19
4.1	兩豪雨事件的空間表現	19
4.2	所有豪雨事件的統計表現	23
4.3	不同事件種類的統計表現	28
第五章	應用產品	30

5.1	即時降雨預警技術.....	30
5.2	落雨小幫手 App.....	31
第六章	總結.....	35
6.1	結論.....	35
6.2	未來展望.....	36
	參考文獻.....	38



圖目錄

- 圖 1 MAPLE 模擬範圍，及其使用之九座都卜勒氣象雷達的回波掃描範圍(白色區域)。水平網格點有 921×881 個，間隔為 0.0125° 。……………16
- 圖 2 WRF 模式所使用的雙層、雙向互動巢狀網格模擬範圍。網格 1 有 280×280 個水平網格點，間隔為 15 公里。網格 2 有 331×331 個水平網格點，間隔為 3 公里。……………18
- 圖 3 7 月 2 日 10:00 UTC 低壓外圍對流系統事件中，(從左至右)觀測與 MAPLE、WRF、Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 預報於前置時間(從上至下)0、60、90、120 和 150 分鐘的回波與所對應的降雨率。矩形 A 與 B 強調所討論的區域。……………21
- 圖 4 8 月 2 日 10:30 UTC 局部雷雨事件中，(從左至右)觀測與 MAPLE、WRF、Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 預報於前置時間(從上至下)0、60、90、120 和 150 分鐘的回波與所對應的降雨率。矩形 C、D 和 E 強調所討論的區域。……………23
- 圖 5 MAPLE、WRF、Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 預報於前置時間 60、90、120 和 150 分鐘之回波的 RMSE，計算範圍為 43 個時段中觀測回波大於 0 dBZ 的網格點。……………24

圖 6	MAPLE、WRF、Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 預報於前置時間 60、90、120 和 150 分鐘、門檻值(a) 10 dBZ、(b) 20 dBZ 和(c) 30 dBZ 的 TS，計算範圍為 43 個時段中觀測回波大於 0 dBZ 的網格點。.....26
圖 7	MAPLE、WRF、Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 預報於前置時間 60、90、120 和 150 分鐘、門檻值(a) 10 dBZ、(b) 20 dBZ 和(c) 30 dBZ 的 BS，計算範圍為 43 個時段中觀測回波大於 0 dBZ 的網格點。.....27
圖 8	MAPLE、WRF、Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 預報針對 LT、MF、PL 和 TY 事件於前置時間(a) 60、(b) 90、(c) 120 和 (d) 150 分鐘、門檻值 20 dBZ 的 TS，計算範圍為觀測回波大於 0 dBZ 的網格點。.....29
圖 9	MAPLE、WRF、Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 預報針對 LT、MF、PL 和 TY 事件於前置時間(a) 60、(b) 90、(c) 120 和 (d) 150 分鐘、門檻值 20 dBZ 的 BS，計算範圍為觀測回波大於 0 dBZ 的網格點。.....29
圖 10	「即時降雨預警技術」專頁頁面，以台灣時間 2020 年 11 月 29 日 10 時 30 分為例。.....31

圖 11 「落雨小幫手 App」行動裝置頁面，以台灣時間 2020 年
11 月 29 日 10 時 40 分為例。……………33

圖 12 「落雨小幫手 App」主視覺海報，提供 Android 與 iOS 作
業系統的 QR 碼以利下載。……………34



表目錄

表 1	2019 年豪雨事件樣本分類表。……………	14
-----	-----------------------	----



第一章 緒論

1.1 前言

隨著全球人口持續成長與都市化的趨勢，天然災害可能造成的生命財產損失規模也愈來愈大。為了減低天然災害風險，建立情資研判與早期預警系統至關重要。在氣象災害方面，準確而快速的天氣分析與預報可謂此預警系統的核心技術。由於災害性天氣有各種時間與空間尺度，世界氣象組織將氣象預報依前置時間(lead time)長度分成七種(World Meteorological Organization 2019)：氣候預報(超過 2 年)、長期預報(30 天-2 年)、展期天氣預報(10-30 天)、中期天氣預報(3-10 天)、短期天氣預報(12 小時-3 天)、極短期天氣預報(2-12 小時)和即時預報(nowcasting；0-2 小時)。其中，極短期天氣預報與即時預報的對象往往是中、小尺度的劇烈天氣(如雷雨、暴洪和龍捲風)，內容除了描述其詳細現況外，還要預測未來數小時內強度與位置的變化(Browning 1982)。由於此類天氣的時間與空間尺度較小，要發布有效的警報或守視，除了準確度的需求外，還需要快速的計算、頻繁的更新和高空間解析度。在有限的觀測能量與計算資源條件下，研發出權衡此四項需求的即時預報方法與預警系統，是災防相關單位的一大挑戰。

觀測是即時預報的關鍵要素，傳統的地面與探空觀測很重要，但對於降水系統而言，都卜勒氣象雷達(Doppler weather radars)才能觀測到三維空間最完整的風場與水象(hydrometeor)資訊，時間與空間解析度也最高。因此，先進國家紛紛建置都卜勒氣象雷達網以涵蓋劇烈天氣高風險地區，甚至升級為能提供更多雲微物理資訊的偏極化雷達(polarimetric radars；Cunha et al. 2013；Huuskonen et al. 2014)，且尋求於即時預警系統中最佳化利用這些雷達觀測資料。本研究即利用台灣都卜勒氣象雷達網資料，以及雷達回波外延(radar echo extrapolation)與雷達資料同化(radar data assimilation)兩項技術，開發全新的調合方案(blending scheme)以結合兩技術優點，名為模式調整外延(extrapolation adjusted by model prediction；ExAMP)方案。針對 2019 年四種強降雨事件類型共 43 個時段的實驗結果顯示，ExAMP 方案的回波(reflectivity)即時預報表現優於其他四種方法。此成果已於今年發表在 Atmosphere 學術期刊(Lin et al. 2020)，且應用於國家災害防救科技中心(以下簡稱災防科技中心)「天氣與氣候監測網即時降雨預警技術」與「落雨小幫手 App」兩項產品，詳細內容分述於本技術報告。

本技術報告共分為六章：第一章除了前言外，也介紹相關文獻與研究目的；第二章詳述研究方法，包括所使用的雷達回波外延與雷達資料同化技術，以及三種不同的調合方案(含 ExAMP 方案)；第三章

為回波即時預報實驗設計，說明所有 2019 年強降雨事件樣本，以及外延與資料同化兩技術的模擬範圍與細部設定；第四章討論實驗結果，比較五組回波即時預報針對兩豪雨事件的空間表現，以及針對所有事件與不同事件種類的統計表現；第五章展示 ExAMP 方案的應用產品，包括「天氣與氣候監測網即時降雨預警技術」與「落雨小幫手 App」；第五章為總結，包括結論與未來展望。

1.2 文獻回顧

雷達回波為降水系統強度與位置的最佳指標，將最近的回波變化趨勢向未來時間外延，是最直觀的即時預報方法，早在 1953 年就已有研究提出(Ligda 1953)。後續研究針對回波變化趨勢的追蹤，發展出兩大主流技術：對流胞追蹤(cell tracking)與區域追蹤(area tracking)。在對流胞追蹤技術方面，Barclay and Wilk (1970)提出分離對流胞回波且計算其質心的方法，然後匹配前後兩筆回波資料(時間間隔須小於對流胞生命期)以算出移速，進而預測對流胞的未來位置。基於此回波質心追蹤法，Browning et al. (1982)提出客觀法同時追蹤多個對流胞，限制對流胞個別移速與平均移速的差距，以減少因對流胞分裂或合併所產生的識別誤差。在具備穩定的氣象雷達網與足夠的計算資源後，許多天氣研究與作業單位開發使用對流胞追蹤技術的即時預報系統，例如雷雨識別、追蹤、分析和即時預報(Thunderstorm Identification,

Tracking, Analysis, and Nowcasting ; TITAN ; Dixon and Wiener 1993) 、
風暴對流胞識別與追蹤(Storm Cell Identification and Tracking ; SCIT ;
Johnson et al. 1998) 、雷雨雷達追蹤(Thunderstorms Radar Tracking ; TRT ;
Hering et al. 2004) 和風暴追蹤模糊邏輯演算法(the Fuzzy Logic
Algorithm for Storm Tracking ; FAST ; Jung and Lee 2015) 。

相對於對流胞追蹤技術著重強回波位置，區域追蹤技術著重整體
回波的變化趨勢，在定量預報上佔有優勢。區域追蹤技術主要有兩種
計算移速的方法：雷達回波相關性追蹤(tracking radar echoes by
correlation ; TREC ; Austin and Bellon 1974 ; Rinehart and Garvey 1978)
與變分回波追蹤(variational echo tracking ; VET ; Laroche and Zawadzki
1994) 。前者將雷達掃描範圍切割成多個目標尺度的小方框，然後在前
後兩筆回波資料中匹配相關係數最大的兩方框，以算出各方框的移速。
後者則利用移動參考框與變分方法，尋找使價值函數(cost function)最
小化的參考框移速，價值函數可加入物理約束條件；所得的移速可當
作多個較小參考框的初估值，再各自重複變分過程，直到算出所有目
標尺度參考框的移速。此兩種方法的延伸研究也發展出許多即時預報
系統，例如 TREC 向量連續性(the Continuity of TREC Vectors ;
COTREC ; Li et al. 1995) 、麥基爾大學拉格朗日外延降水即時預報演
算法(the McGill Algorithm for Precipitation Nowcasting by Lagrangian

Extrapolation ; MAPLE ; Germann and Zawadzki 2002)、甘道夫系統光流方案(the Optical Flow Scheme for the Gandolf System ; Bowler et al. 2004)和大氣協同適應感測(the Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere ; CASA ; Ruzanski et al. 2011)。值得一提的是，絕大多數雷達回波外延方法皆進行合成回波(composite reflectivity)的單層水平外延，以盡量掌握雷達掃描範圍內的降水訊號，且兼顧快速計算的需求。外延積分大多採用拉格朗日或半拉格朗日方案，比常數向量方案更能掌握降水系統的運動性質。

雷達回波外延的優點為計算快速，且在對流胞內的水象粒子尚未轉變或沉降殆盡前非常準確。缺點為無法預測新對流胞的生成，由於單一對流胞的生命期通常只有 30–60 分鐘，超過之後此法的準確度會急速下降。新對流胞的預測需要數值模式的動力、熱動力和雲微物理過程，而數值模式初始條件的最佳化仰賴資料同化技術，所以雷達資料同化為中、小尺度劇烈天氣預報品質的關鍵要素(例如：Sun 2005 ; Xiao et al. 2005 ; Xiao and Sun 2007 ; Sun and Zhang 2008 ; Sugimoto et al. 2009 ; Tai et al. 2011 ; Tsai et al. 2014 ; Yang et al. 2020 ; Tsai and Chung 2020)。然而即使同化雷達資料的數值模式，也需要一段積分時間以起轉(spin up)上述模式過程。因此，在計算資源足夠的條件下，現代即時預報系統會調合雷達回波外延與雷達資料同化兩種技術。前

置時間愈短，前者的權重愈高。此觀念源自 Golding (1998)提出的區域觀測資料即時預報與模式初始化(Nowcasting and Initialization of Modeling Using Regional Observation Data ; NIMROD)系統，此系統調合外延法與英國氣象局統一模式(Met Office Unified Model ; MetUM ; Cullen 1993)預測的降雨，儘管 MetUM 當時尚未同化雷達資料。針對 1996 年 3 月至 1997 年 2 月一整年於英國的統計結果顯示，NIMROD 系統於前置時間六小時內的即時預報表現優於只使用外延法或 MetUM。Sun et al. (2014b)回顧了更多 Golding (1998)之後的調合方案研究，皆有類似的結論。

近年來持續有許多調合方案的延伸研究，嘗試不同的調合方式，也嘗試應用於水文預報。Wang et al. (2015)針對龍捲風個案，利用雙曲正切權重(hyperbolic tangent weight)調合外延法與同化雷達資料且修正偏差的先進區域預測系統(Advanced Regional Prediction System ; ARPS ; Hu et al. 2006)模式預測的回波，也優於只使用外延法或 ARPS 模式。Hwang et al. (2015)則利用常應用於影像變形(image morphing)技術的突顯交叉疊化(salient cross dissolve ; Sal CD ; Grundland et al. 2006)方案，調合外延法與高解析度快速更新(High-Resolution Rapid Refresh ; HRRR ; Benjamin et al. 2016)模式預測的 18-dBZ 回波頂端高度。針對 2013 年 5 月中至 6 月中 24 天於美國本土的統計結果顯示，

Sal CD 方案於前置時間 2-5 小時的即時預報表現優於線性交叉疊化 (linear cross dissolve ; Lin CD) 方案或只使用 HRRR 模式。此結果意謂即時預報系統在調合回波的過程中，適當保留強度資訊而不被過度平滑的重要性。Chung and Yao (2020) 使用 MAPLE 預測 16 個颱風個案的回波，發現將天氣研究與預報 (Weather Research and Forecasting ; WRF ; Skamarock et al. 2019) 模式預測的風場，透過變分方法融入 MAPLE 的運動場，有助於維持颱風螺旋雨帶的結構，延長即時預報能力至三小時。此結果指出調合方案的對象不一定是物理過程下游的回波或降雨，調合上游的風場同樣可能帶來改善。在水文預報的應用方面，Yoon (2019) 研發一套基於協調搜尋演算法 (harmony search algorithm) 的調合方案，同時結合三種外延法與兩種數值模式預測的降雨，再輸入水文模式以預測都市洪水。針對 2016 年 7 月於南韓首爾三場強降雨的實驗結果顯示，此新方案所模擬的下水道水深 (water depth in pipe) 與空間範圍最接近觀測到的洪氾區。Poletti et al. (2019) 則將同化雷達資料的數值模式預報趨勢融入外延法，再調合外延法與數值模式預測的降雨，輸入水文模式以預測河川流量。針對 2014 年秋季於義大利利古里亞大區三場強降雨的實驗結果顯示，調合方案仍優於只使用外延法。

1.3 研究目的

由於上述成功研究啟示，本研究針對 2019 年台灣四種強降雨天氣事件類型，利用 MAPLE 外延法、同化雷達資料的 WRF 模式以及 Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 三種調合 MAPLE 與 WRF 的方案，進行五組回波即時預報實驗且比較結果。目的為定性與定量評估此五種方法對於各種降水系統的整體即時預報能力，以及探討 ExAMP 新方案的優點，以做為設計本土情資研判與早期預警系統的重要參考。



第二章 研究方法

2.1 MAPLE 外延法

MAPLE 為加拿大麥基爾大學 J. S. Marshall 雷達觀測台所研發的雷達回波外延即時預報系統，其使用的 VET 與半拉格朗日積分完整步驟首見於 Germann and Zawadzki (2002)。如上文所述，VET 尋找使價值函數最小化的參考框移速，而 MAPLE 使用的價值函數可表示為：

$$J_{VET}(\mathbf{u}) = J_{\Psi} + J_2 \quad (1)$$

式中， \mathbf{u} 為待求的參考框最佳移速向量； J_{Ψ} 項為回波保守方程殘差值的平方和； J_2 項為運動場空間二階導數的平方和，亦即平滑補償函數。 J_{Ψ} 與 J_2 可分別表示為：

$$J_{\Psi} = \iint_{\Omega} \beta(\mathbf{x}) [\Psi(t_0, \mathbf{x}) - \Psi(t_0 - \Delta t, \mathbf{x} - \mathbf{u}\Delta t)]^2 dx dy \quad (2)$$

$$J_2 = \gamma \iint_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (3)$$

式中， Ψ 為回波； t_0 與 Δt 分別為現在觀測時間與連續觀測時間間隔； x 與 y 為位置向量 \mathbf{x} 的分量； u 與 v 為 \mathbf{u} 的分量； β 為雷達資料品質權重； γ 為平滑補償函數權重； Ω 代表參考框範圍。此外，MAPLE 使用 Laroche and Zawadzki (1994) 的尺度猜測程序，逐次縮小參考框的尺度重複變分過程，以減少價值函數只收斂至次級最小值的風險。外延積分則採用半拉格朗日後推平流法 (Robert 1981)，回溯回波移動的軌跡，位移

向量 α 可表示為：

$$\alpha = \Delta t \mathbf{u} \left(t_0, \mathbf{x} - \frac{\alpha}{2} \right) \quad (4)$$

此回溯過程拆分成許多微小時步，使軌跡能為曲線，更能預測降水系統中與旋轉相關的運動特性。本研究中 MAPLE 的設定包括：使用連續三筆、間隔 20 分鐘的回波觀測資料；回波門檻值為 5 dBZ；進行 3×3 網格點空間平滑；尺度猜測程序的次數為五次；最終向量密度為 72×72 ； β 與 γ 參考 Chung and Yao (2020) 裡的經驗值，分別為 0.5 與 1000。

2.2 WRF 模式

WRF 模式為美國國家大氣研究中心 (National Center for Atmospheric Research; NCAR) 所研發的數值模式，其組成包括先進研究 WRF (Advanced Research WRF; ARW) 與非靜力中尺度模式 (Nonhydrostatic Mesoscale Model; NMM) 兩套動力解答器、豐富的物理方案、WRF 前處理系統 (WRF Preprocessing System; WPS) 和 WRF 資料同化 (WRF Data Assimilation; WRFDA) 系統。主要的預報狀態變數包括三維風場分量、位溫擾動、重力位擾動、乾空氣地面氣壓擾動以及水氣和各種水象的混合比。本研究使用 WRF-ARW 第 3.3.1 版，採用的物理方案包括 Morrison 雲微物理參數化 (Morrison et al. 2009)、

快速輻射傳送模式(Rapid Radiative Transfer Model ; RRTM ; Mlawer et al. 1997)長波輻射、Goddard 短波輻射(Chou and Suarez 1994)、第五代賓州大學與 NCAR 中尺度模式(Fifth Generation Penn State University and NCAR Mesoscale Model ; MM5 ; Jiménez et al. 2012)地面層、Noah 地面模式(Chen and Dudhia 2001)、延世大學行星邊界層(Hong et al. 2006)和 Kain–Fritsch 積雲參數化(Kain 2004)。在資料同化方面，本研究使用 WRFDA 第 3.4.1 版的三維變分(three-dimensional variational ; 3DVar ; Sasaki 1958)方法，採用控制變數選項 7 (control variable option 7 ; CV7 ; Sun et al. 2014a)背景誤差協方差。所同化的觀測包括全球通信系統(Global Telecommunications System ; GTS)、全球定位系統(Global Positioning System ; GPS)掩星(Radio Occultation ; RO)和都卜勒氣象雷達資料。

2.3 Lin CD 與 Sal CD 調合方案

本研究針對四種強降雨天氣事件類型，比較 MAPLE 外延法、WRF 模式以及 Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 三種調合 MAPLE 與 WRF 之方案的 150 分鐘預報結果。根據 Hwang et al. (2015)，兩個影像(I_1 與 I_2)的交叉疊化(C)可表示為：

$$C(x, y) = wI_1(x, y) + (1 - w)I_2(x, y) \quad (5)$$

式中， w 為介於 0 與 1 之間的權重。假設 I_1 與 I_2 分別代表 MAPLE 與 WRF 預測的回波，則 w 應隨著前置時間增加，從 1 遞減至 0。在本研究 Lin CD 方案實驗中，權重 $w(t)$ 於預報前 120 分鐘從 1 線性遞減至 0，然後於 120—150 分鐘維持 0。相較之下，Sal CD 方案增加考慮 I_1 與 I_2 回波強度差異的突顯性，以保留高回波的特徵。因此，權重 $w_S(x, y, t)$ 為 $w(t)$ 與突顯性 $r(x, y)$ 的函數，可表示為：

$$w_S = \frac{1}{2} \left[\frac{wr}{wr+(1-w)(1-r)} + \frac{\sqrt{w^2+r^2}}{\sqrt{w^2+r^2}+\sqrt{(1-w)^2+(1-r)^2}} \right] \quad (6)$$

式中， $r(x, y)$ 為正規化回波強度(N)差異的累積分布函數(Φ)，可表示為：

$$r(x, y) = \Phi[N_1(x, y) - N_2(x, y)] \quad (7)$$

2.4 ExAMP 調合方案

本研究開發的全新 ExAMP 調合方案，精神在於完全信任外延法所預測的回波形態，但允許強度被數值模式所預測的回波做有限的調整。此概念源自一作業經驗：數值模式在起轉期間所預測的新對流胞生成位置經常錯誤，但經過雷達資料同化後，對於既有對流胞的強度變化有較高的可預報度。在本研究中，ExAMP 方案所預測的回波(Ψ_E)可表示為：

$$\Psi_E = \begin{cases} \Psi_{MAPLE} + (\Psi_{WRF} - \Psi_{MAPLE})(1 - w) & \text{if } \Psi_{MAPLE} > 0 \text{ dBZ,} \\ 0 \text{ dBZ} & \text{if } \Psi_{MAPLE} \leq 0 \text{ dBZ,} \end{cases} \quad (8)$$

式中，WRF 相對於 MAPLE 的回波增量 $\Psi_{WRF} - \Psi_{MAPLE}$ 設有上、下限，分別為 $0.5\Psi_{MAPLE}$ 與 $-0.3\Psi_{MAPLE}$ 。超過上、下限的增量皆會被截斷至上、下限，以緩和 WRF 模擬出過度之對流胞成長或消散時的不利影響。這裡的 0.5 與 -0.3 為經驗係數，前者量值較大，以考量早期預警須顧及快速增強的可能性。要強調的是，此方法追求在外延法失效前，獲得比外延法更準確的預報，但仍然有其限制。假設數值模式在起轉期間所預測的新對流胞生成位置是正確的(儘管機率較小)，則 ExAMP 方案將不幸漏失。另一個限制為 ExAMP 即時預報與其他模式較長期預報之間的空間不連續問題，例如本研究於前置時間為 150 分鐘時。假設需要一個合併極短期天氣預報與即時預報兩種尺度的無縫預報，則可以考慮進一步調合 ExAMP 即時預報與模式較長期預報。

第三章 實驗設計

3.1 強降雨事件樣本

台灣位於暖溼的東亞季風區，地形複雜，所以全年有各種降水系統，尤其是 5 月至 11 月的汛期。造成長延時強降雨與大規模災害的天氣系統通常為梅雨鋒面(發生於 5 月中至 6 月中)與颱風(大多發生於 7 月至 9 月)，而尺度較小的局部雷雨與低壓外圍的對流系統也會造成較短延時的強降雨。本研究採樣 2019 年至少一個雨量計觀測到三小時 100 毫米以上的事件，即中央氣象局所定義的豪雨事件，總計 10 個強降雨事件、43 個三小時時段。這些事件樣本分成四個主要種類，包括局部雷雨(local thunderstorm；LT)、梅雨鋒面(Mei-yu front；MF)、低壓外圍(periphery of low pressure；PL)對流系統和颱風(typhoon；TY)，時段數與事件日期列於表 1。

表 1 2019 年豪雨事件樣本分類表。

事件種類	時段數	事件日期
局部雷雨(LT)	11	5/24 (1)、8/1 (5)、8/2 (5)
梅雨鋒面(MF)	4	5/28 (3)、5/29 (1)
低壓外圍(PL)	19	6/11 (3)、6/12 (1)、7/2 (10)、8/6 (5)
颱風(TY)	9	8/24 (9)
總計	43 個時段	10 個事件

3.2 MAPLE 模擬設定

承上文所述，所有 43 個時段皆利用 MAPLE、WRF、Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 進行五組 150 分鐘的回波即時預報實驗且比較結果。圖 1 為 MAPLE 模擬範圍，及其使用之台灣九座都卜勒氣象雷達的回波掃描範圍，包括四座 S 波段雷達(五分山 RCWF、花蓮 RCHL、七股 RCCG 和墾丁 RCKT)與五座 C 波段雷達(清泉崗 RCCK、馬公 RCMK、綠島 RCGI、南屯 RCNT 和林園 RCLY)。MAPLE 所使用的合成回波來自中央氣象局的多重感測器定量降水估計與分離 (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor; QPESUMS; Zhang et al. 2011) 系統，每 10 分鐘提供一次。水平網格點有 921×881 個，間隔為 0.0125° 。此外，QPESUMS 合成回波也做為五組回波即時預報的校驗標準。

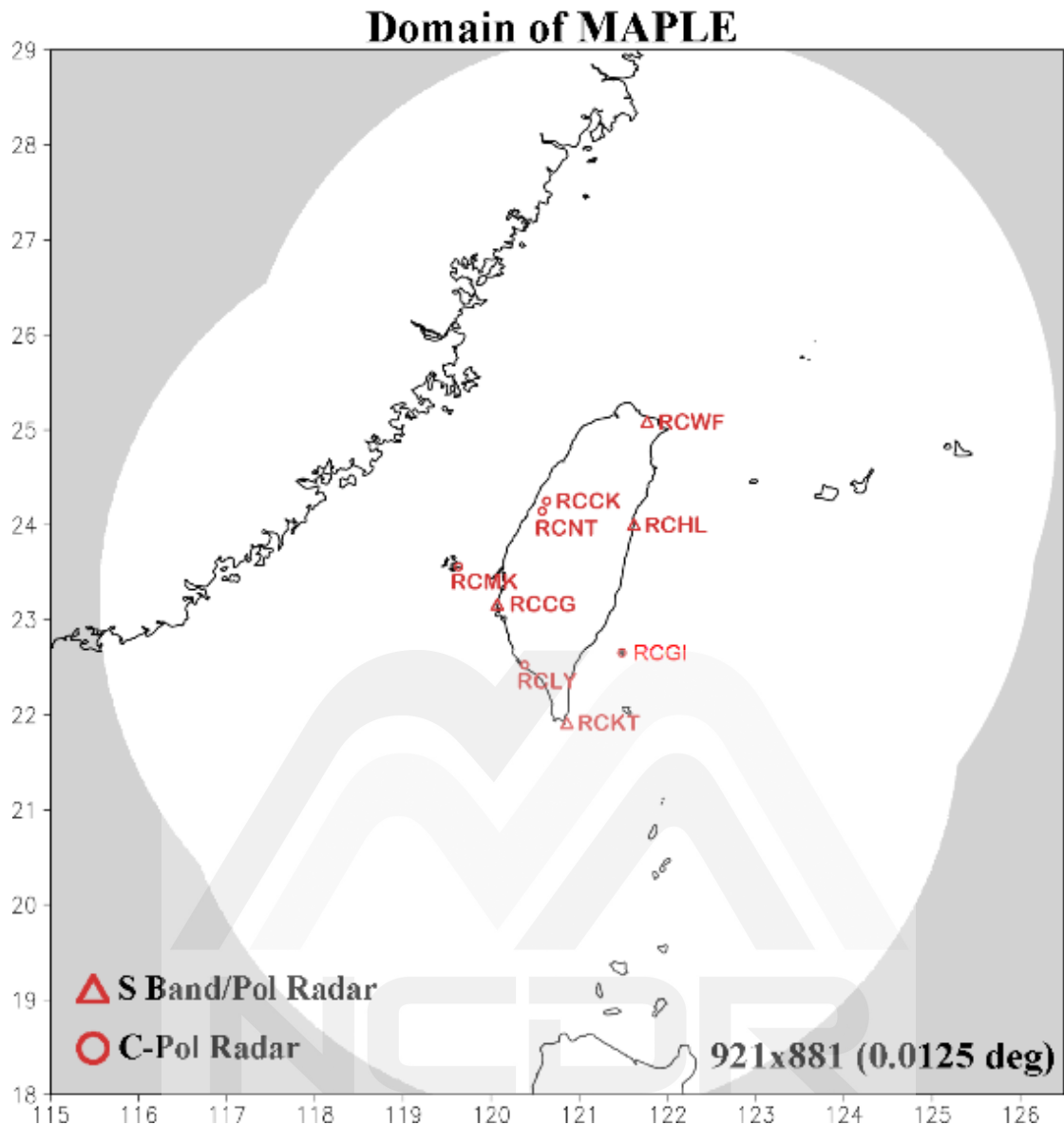


圖 1 MAPLE 模擬範圍，及其使用之九座都卜勒氣象雷達的回波掃描範圍(白色區域)。水平網格點有 921×881 個，間隔為 0.0125° 。

3.3 WRF 模擬設定

WRF 模式使用雙層、雙向互動巢狀網格，模擬範圍如圖 2 所示。

網格 1 有 280×280 個水平網格點，間隔為 15 公里；網格 2 有 331×331 個水平網格點，間隔為 3 公里；垂直有 45 層。初始與邊界條件源

自美國國家環境預報中心(National Centers for Environmental Prediction; NCEP)全球預報系統(Global Forecast System; GFS)的 0.5° 預報，然後使用 WRFDA 的 3DVar 方法同化 GTS 資料、GPS RO 的折射率資料和五座雷達(五分山 RCWF、花蓮 RCHL、七股 RCCG、墾丁 RCKT 和馬公 RCMK；如圖 1)的徑向速度與回波資料。雷達資料的前處理包括雜波濾除、偏差與衰減修正、徑向速度反折錯和空間內插等。GTS 與 GPS RO 資料於 GFS 預報初始時間同化至網格 1 與網格 2，雷達資料則於數小時後以三個循環(間隔 30 分鐘)同化至網格 2，分析增量能透過雙向互動回饋至網格 1。最後，將網格 2 所預測的三維回波轉換為合成回波，再內插至 QPESUMS 網格。值得一提的是，為了考量作業情況下電腦計算與資料傳輸的延遲問題，MAPLE 預報的前 10 分鐘與 WRF 預報的前 30 分鐘皆捨棄。舉例而言，假設欲比較之五組即時預報的時間為 10:00–12:30 UTC，則輸入 MAPLE 的最後一筆雷達資料時間為 09:50 UTC，同化至 WRF 的最後一筆雷達資料時間為 09:30 UTC。

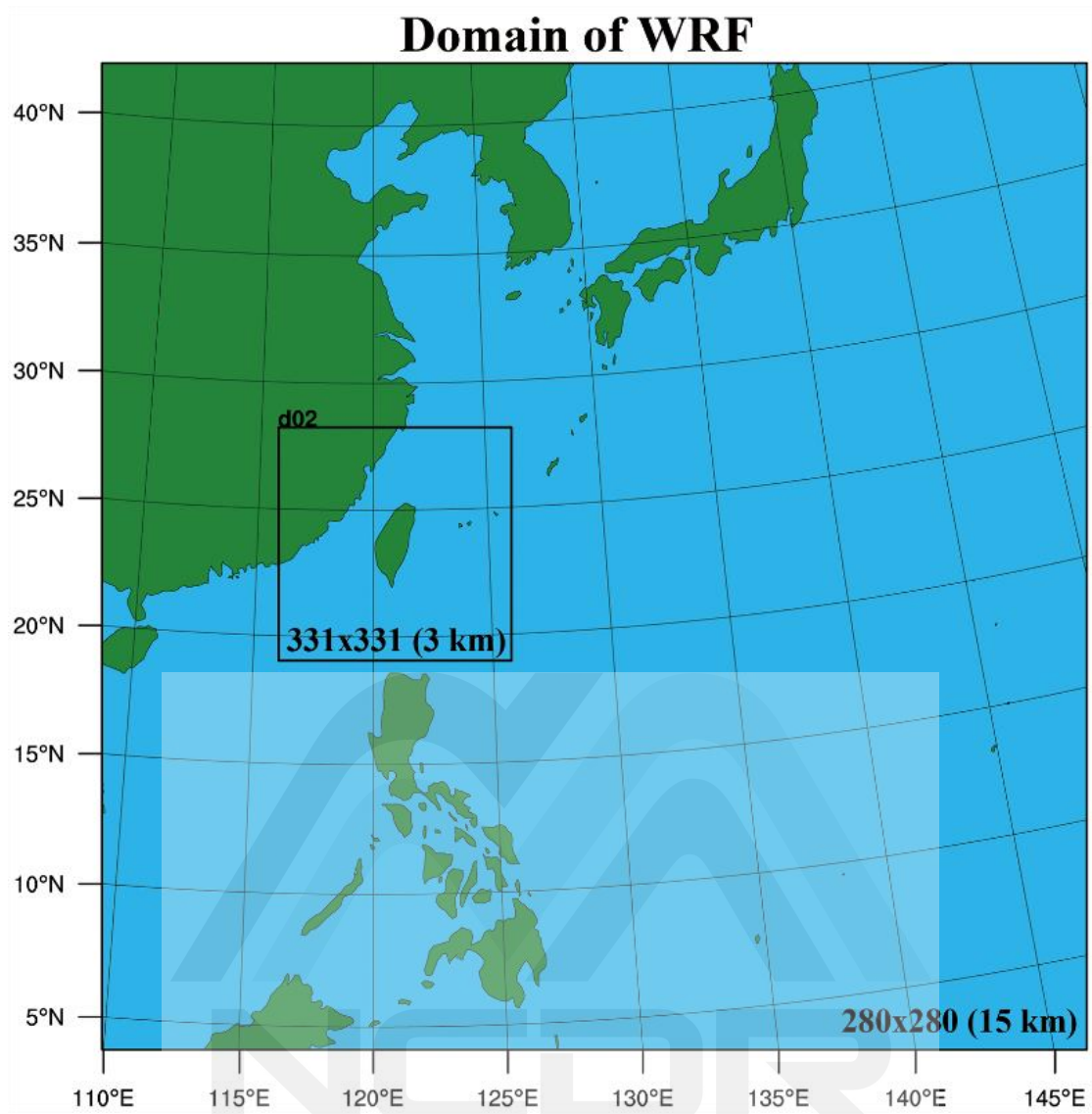


圖 2 WRF 模式所使用的雙層、雙向互動巢狀網格模擬範圍。網格 1 有 280 × 280 個水平網格點，間隔為 15 公里。網格 2 有 331 × 331 個水平網格點，間隔為 3 公里。

第四章 實驗結果

4.1 兩豪雨事件的空間表現

在評估五種方法針對所有事件的統計表現前，本研究首先檢視兩個豪雨事件的空間表現，分別代表對流系統發展與消散兩種情境。第一個事件為 7 月 2 日 10:00 UTC 的低壓外圍對流系統，圖 3 顯示其觀測與五組即時預報於不同前置時間的回波，以及所對應的降雨率。回波與降雨率(Z-R)關係式為 QPESUMS 系統所使用的關係式(Xin et al. 1997)，可表示為：

$$Z = 32.5R^{1.65} \quad (9)$$

在此對流發展事件中，南海一熱帶低壓的北方有多條線狀對流(A 區)正在增強，且於 150 分鐘期間因熱帶低壓北移而靠近台灣陸地。同時，台灣北部有一個對流系統(B 區)正在減弱。由於外延法本身難以預測強度變化，MAPLE 預報無法掌握 A 區的增強與 B 區的減弱。在 WRF 預報方面，A 區有廣布的嚴重高估情形，主要源自 NCEP GFS 水氣場的初始溼偏差，及其在模式起轉期間的誤差成長，但 B 區減弱趨勢的掌握較佳。在調合方案方面，Lin CD 與 ExAMP 於 0 分鐘的回波全等於 MAPLE，源自此兩方案的 MAPLE 初始權重(方程式 5 與方程式 8 的 w)為 1。而 $w = 1$ 時，Sal CD 方案的 MAPLE 初始權重(方程式 6 的

w_S)變成：

$$w_S = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sqrt{1+r^2}}{\sqrt{1+r^2+1-r}} \right] \quad (10)$$

此值略小於 1，所以 Sal CD 於 0 分鐘的回波依稀可見 WRF 的回波形態。隨著前置時間增加，Lin CD 與 Sal CD 預報逐漸趨近 WRF 預報，所以繼承 A 區的嚴重高估與 B 區預測到的減弱趨勢。ExAMP 預報則不會在最後趨近 WRF 預報，而是一路採用 MAPLE 預報的回波形態，但能參考 WRF 預報適度調整強度，因而成功同時掌握 A 區的增強與 B 區的減弱，表現為此事件五種即時預報方法中的最佳。



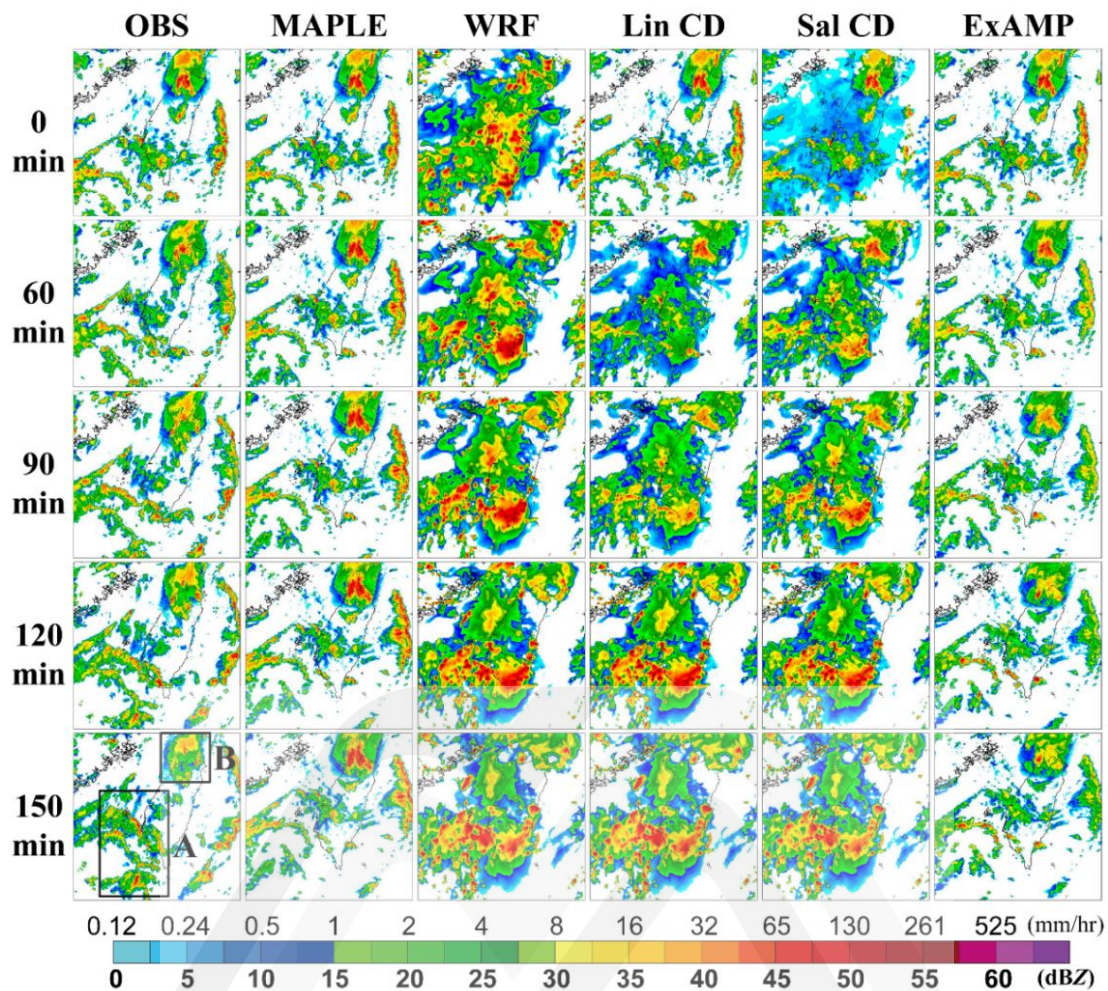
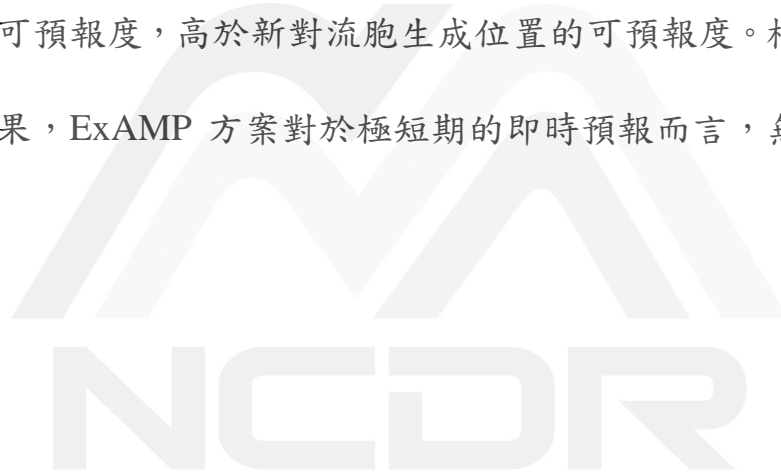


圖 3 7 月 2 日 10:00 UTC 低壓外圍對流系統事件中，(從左至右)觀測與 MAPLE、WRF、Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 預報於前置時間(從上至下)0、60、90、120 和 150 分鐘的回波與所對應的降雨率。矩形 A 與 B 強調所討論的區域。

第二個事件為 8 月 2 日 10:30 UTC 消散中的局部雷雨，圖 4 顯示其觀測與五組即時預報於不同前置時間的回波，以及所對應的降雨率。從觀測可見，台灣中、南部陸地與近海的雷雨(C 區)於 150 分鐘期間持續消散。MAPLE 的預報能力類似上個事件，無法掌握 C 區的減弱趨勢，且由於微弱的運動場，回波的形態與強度看似停滯。在 WRF 預報方面，0 分鐘的對流胞位置偏離觀測。儘管這些初始對流胞隨著

模擬逐漸消散，在東海岸附近卻有兩個錯誤的對流胞(D 與 E 區)逐漸增強。在調合方案方面，Lin CD 與 Sal CD 預報的特性類似上個事件，在開始時與 MAPLE 預報相似，然後逐漸趨近 WRF 預報。相較之下，ExAMP 預報在程度上掌握 C 區的減弱趨勢，且成功避免 WRF 預報中的兩個錯誤對流胞，表現再次為五種方法中的最佳。總結來說，無論對流系統發展或消散情境，WRF 預報結果皆呼應上文所述的作業經驗，亦即經過雷達資料同化的數值模式在起轉期間，既有對流胞強度變化的可預報度，高於新對流胞生成位置的可預報度。根據此經驗與實驗結果，ExAMP 方案對於極短期的即時預報而言，無疑佔有優勢。



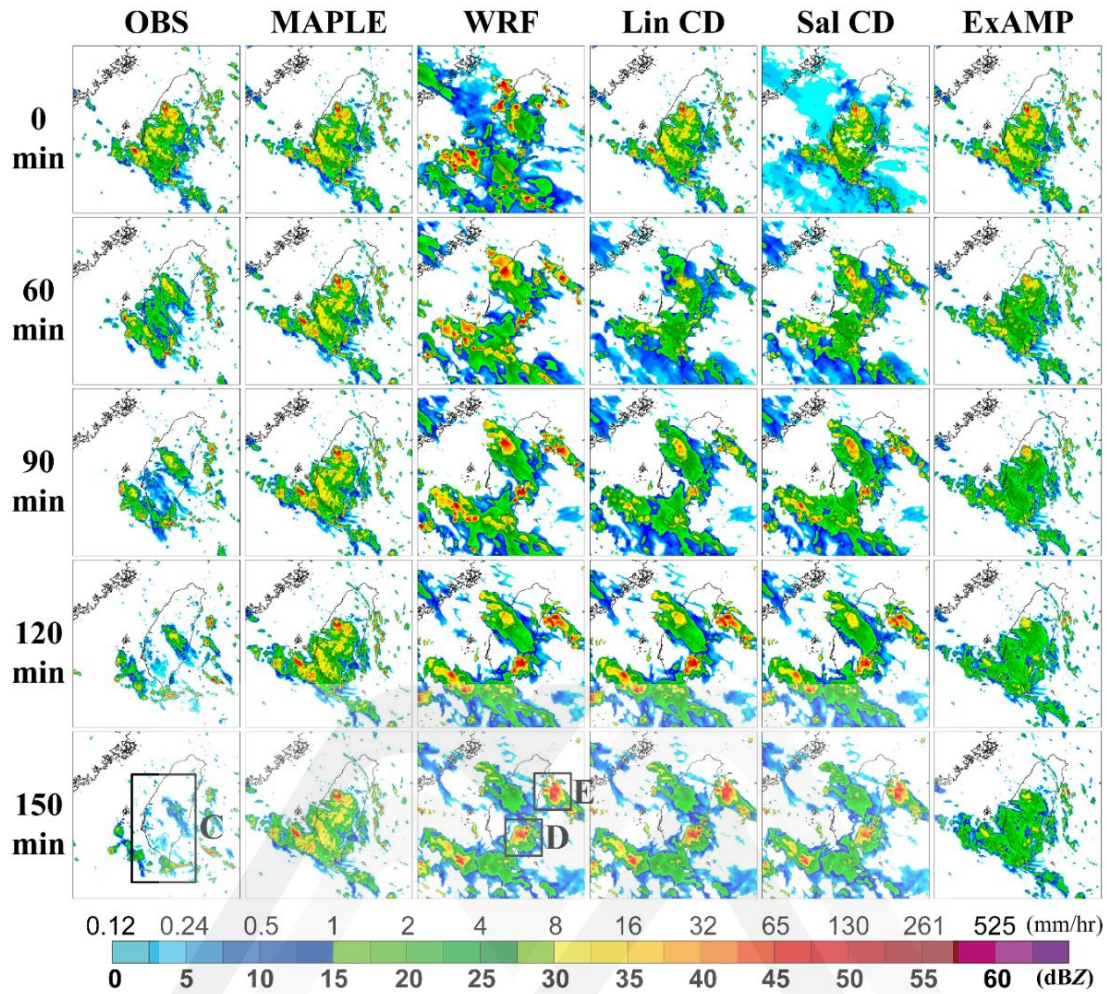


圖 4 8 月 2 日 10:30 UTC 局部雷雨事件中，(從左至右)觀測與 MAPLE、WRF、Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 預報於前置時間(從上至下)0、60、90、120 和 150 分鐘的回波與所對應的降雨率。矩形 C、D 和 E 強調所討論的區域。

4.2 所有豪雨事件的統計表現

為了更系統性地評估五種方法，本研究針對所有強降雨事件樣本計算技術得分。首先在整體表現方面，圖 5 比較五組即時預報於不同前置時間之回波的方均根誤差(root-mean-square error；RMSE)，計算範圍為 43 個時段中觀測回波大於 0 dBZ 的網格點。結果顯示所有前置時間的 RMSE 皆以 ExAMP 預報為最低，MAPLE 預報次之。前置

時間愈長，可預報度愈低，所以 RMSE 隨著前置時間增加而增加。

WRF 預報的 RMSE 似乎飽和於最差的 10 dBZ，而 Lin CD 與 Sal CD 預報的 RMSE 於 120 分鐘後也趨近此值。Lin CD 預報的 RMSE 於 60 與 90 分鐘比 Sal CD 預報低，但於 120 與 150 分鐘比 Sal CD 預報高，呼應 Hwang et al. (2015) 中 Sal CD 之表現於前置時間 2-5 小時勝過 Lin CD 的結果。

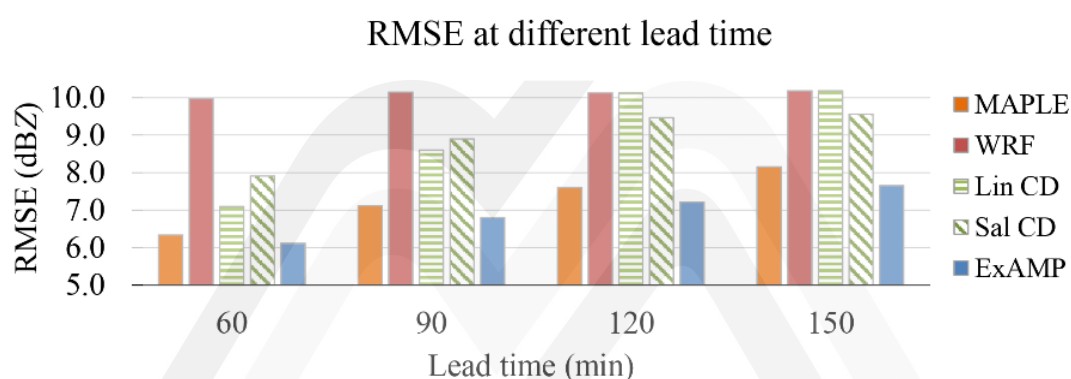


圖 5 MAPLE、WRF、Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 預報於前置時間 60、90、120 和 150 分鐘之回波的 RMSE，計算範圍為 43 個時段中觀測回波大於 0 dBZ 的網格點。

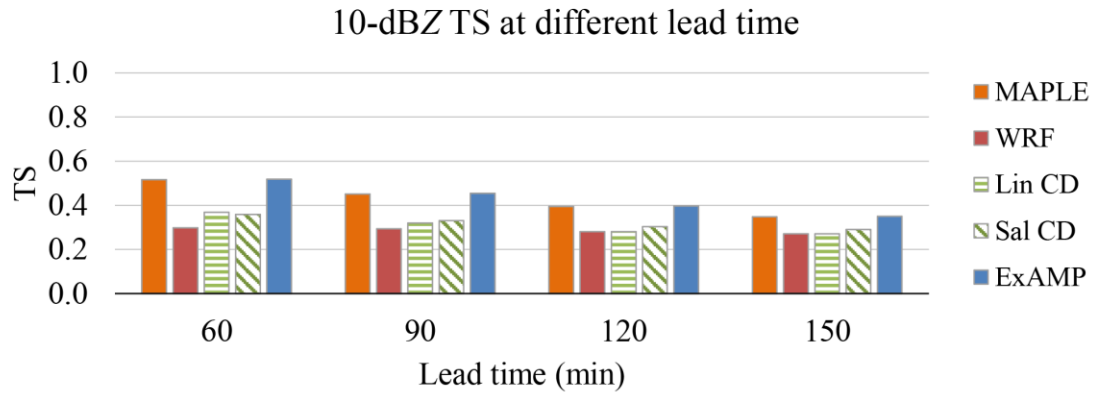
除了整體表現外，還比較某些回波門檻值的預兆得分(threat score；TS)與偏倚得分(bias score；BS)，代表針對該門檻值的即時預報技術。

兩種得分的定義分別為：

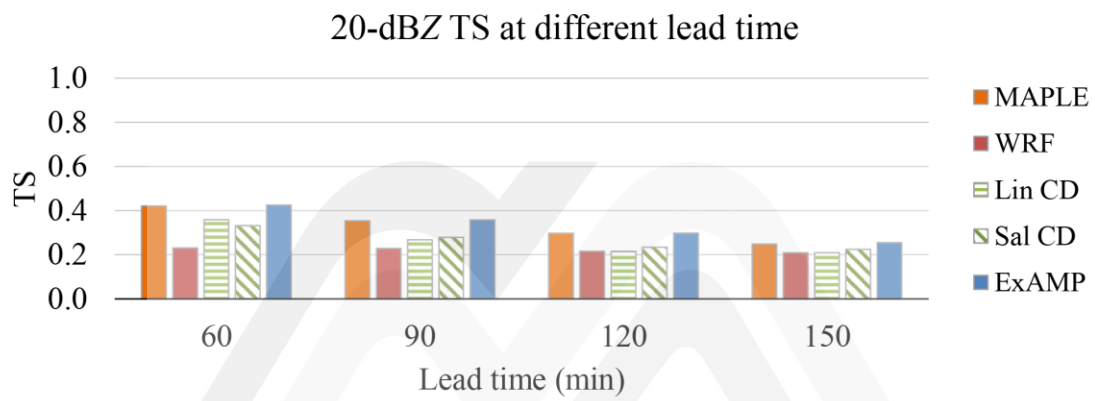
$$TS = \frac{H}{H+F+M} \quad (11)$$

$$BS = \frac{H+F}{H+M} \quad (12)$$

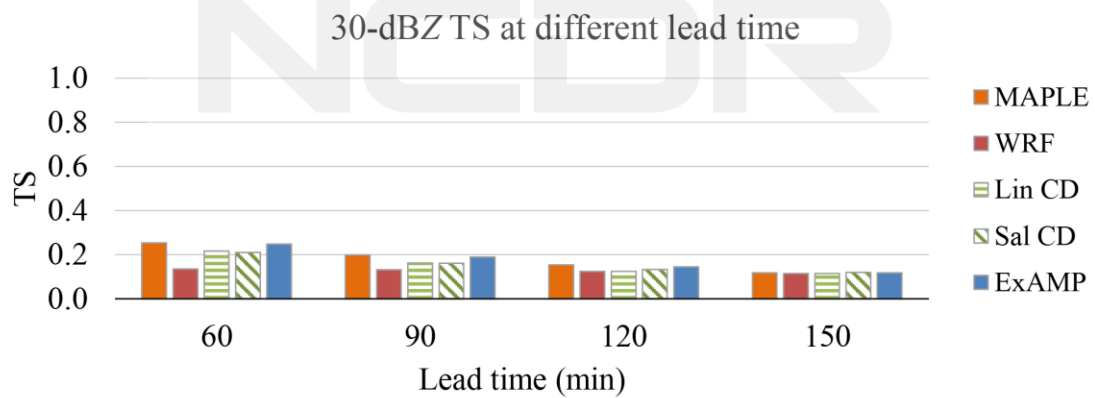
式中， H 、 F 和 M 分別為該門檻值命中(hit)、誤報(false alarm)和漏報(miss)的網格點數。圖 6 與圖 7 分別比較五組即時預報於不同前置時間、不同回波門檻值(10 dBZ、20 dBZ 和 30 dBZ)的 TS 與 BS。MAPLE 與 ExAMP 預報的 TS 於所有前置時間、所有門檻值皆不分軒輊，不像 RMSE 有分出高下，意謂兩種方法針對回波是否超過某些門檻值的預測能力相同。WRF、Lin CD 和 Sal CD 預報的 TS 則較低，符合預期。MAPLE 與 ExAMP 預報之門檻值 10 與 20 dBZ 的 BS 趨近最理想的 1，但 ExAMP 預報之門檻值 30 dBZ 的 BS 小於 1，意謂 ExAMP 預報比 MAPLE 預報有更多高回波門檻值的漏報網格點。儘管如此，從 ExAMP 預報的 RMSE 最低能斷言，ExAMP 在命中與誤報網格點最不易產生嚴重高估的問題。相反地，幾乎所有 WRF、Lin CD 和 Sal CD 預報的 BS 皆遠大於 1，代表嚴重高估，尤其前置時間較長時。



(a)

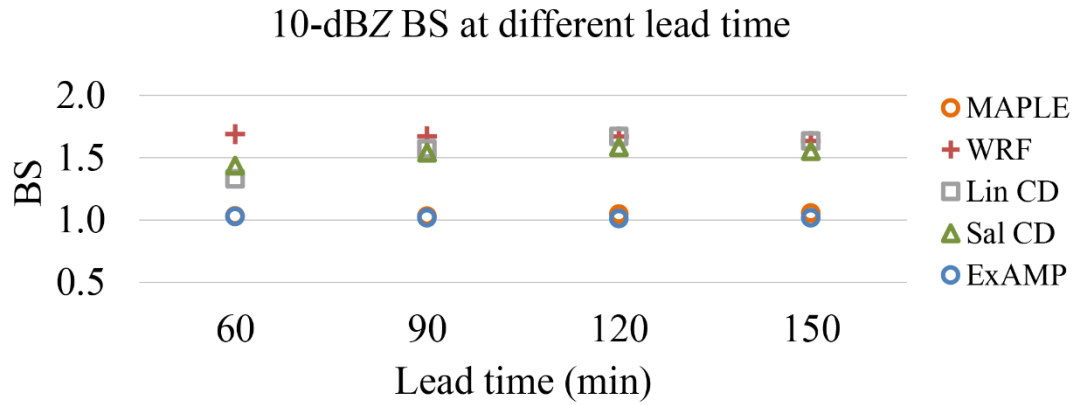


(b)

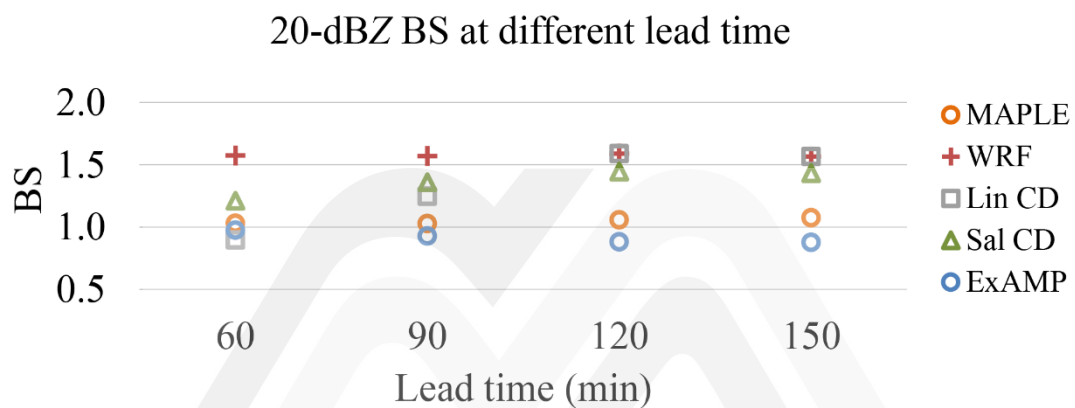


(c)

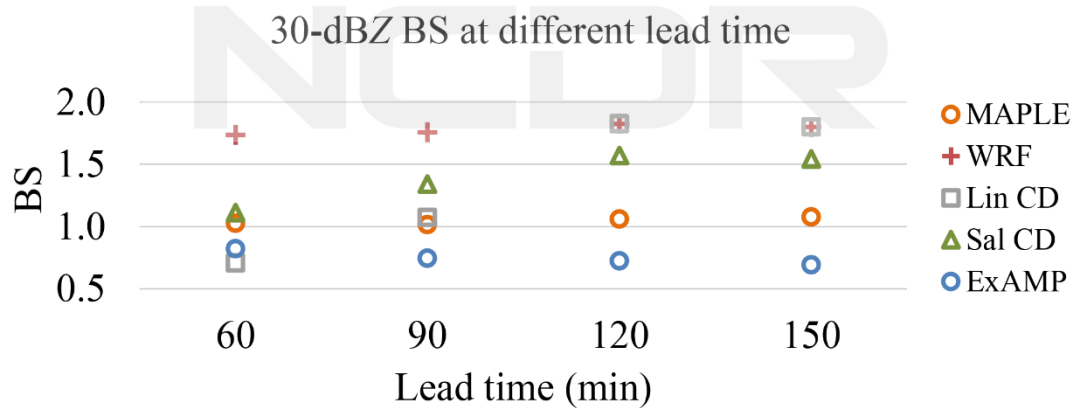
圖 6 MAPLE、WRF、Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 預報於前置時間 60、90、120 和 150 分鐘、門檻值(a) 10 dBZ、(b) 20 dBZ 和(c) 30 dBZ 的 TS，計算範圍為 43 個時段中觀測回波大於 0 dBZ 的網格點。



(a)



(b)



(c)

圖 7 MAPLE、WRF、Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 預報於前置時間 60、90、120 和 150 分鐘、門檻值(a) 10 dBZ、(b) 20 dBZ 和(c) 30 dBZ 的 BS，計算範圍為 43 個時段中觀測回波大於 0 dBZ 的網格點。

4.3 不同事件種類的統計表現

為了進一步評估不同強降雨事件種類的表現，圖 8 與圖 9 分別比較五組即時預報針對局部雷雨(LT)、梅雨鋒面(MF)、低壓外圍(PL)和颱風(TY)事件於不同前置時間、門檻值 20 dBZ 的 TS 與 BS。在 TS 結果方面，五組即時預報於上述所有事件統計表現的優劣順序，不會因事件種類不同而改變，意謂 ExAMP 方案對於各種劇烈天氣系統有一貫的優勢。此外，比較相同方法於不同事件種類的 TS 可發現，颱風事件 TS 最高，局部雷雨事件 TS 最低。主要原因是颱風有組織完整、水平平流的雨帶，而局部雷雨的演變較呈垂直且高非線性，可預報度較低。在 BS 結果方面，只有 MAPLE 與 ExAMP 預報免於嚴重高估的問題，與所有事件統計表現的結論一致。兩者的 BS 於颱風事件皆趨近最理想的 1，但前者於局部雷雨事件為高估，後者於梅雨鋒面與低壓外圍事件為低估。

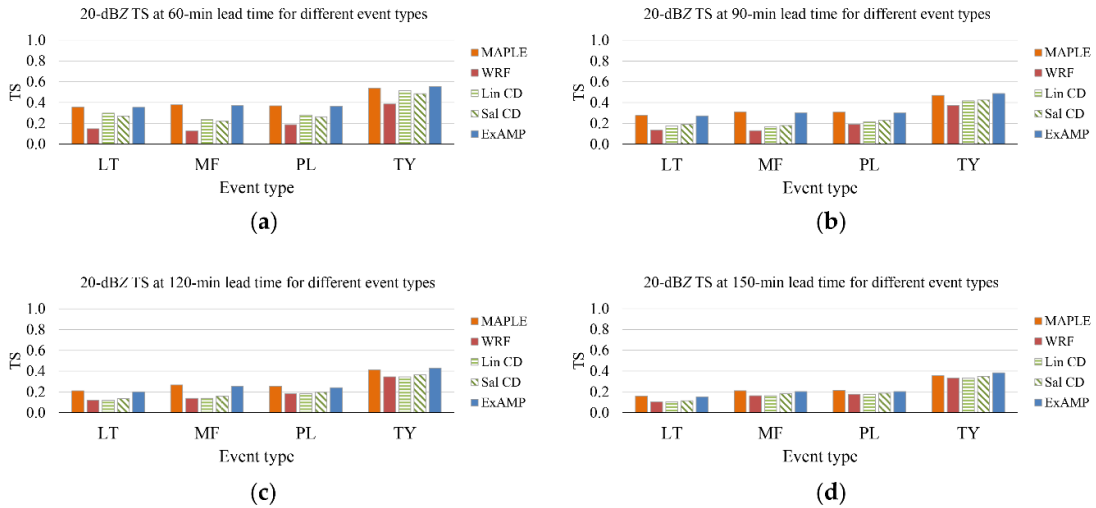


圖 8 MAPLE、WRF、Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 預報針對 LT、MF、PL 和 TY 事件於前置時間(a) 60、(b) 90、(c) 120 和(d) 150 分鐘、門檻值 20 dBZ 的 TS，計算範圍為觀測回波大於 0 dBZ 的網格點。

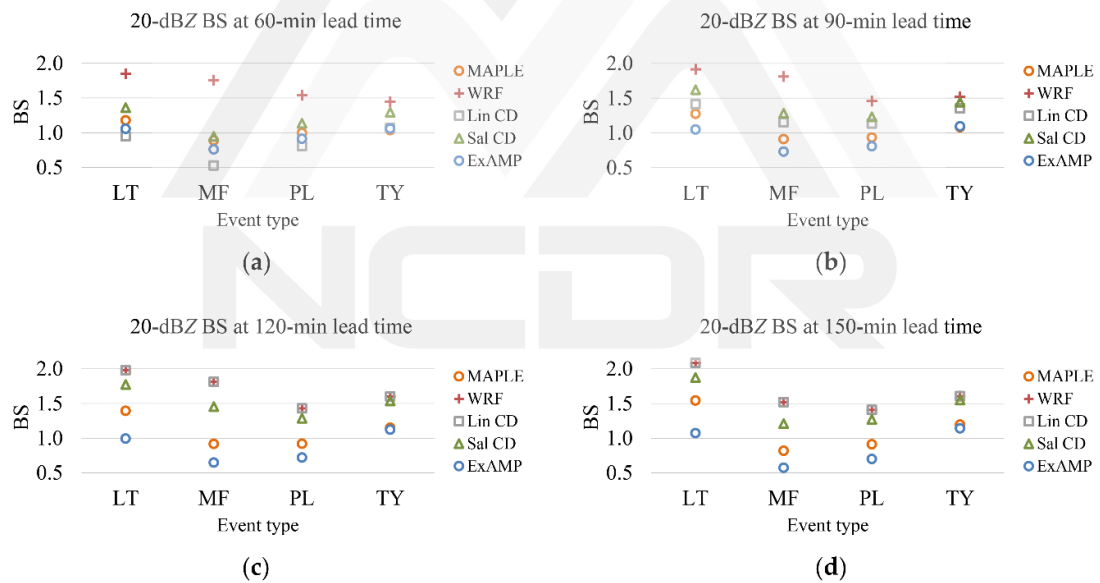


圖 9 MAPLE、WRF、Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 預報針對 LT、MF、PL 和 TY 事件於前置時間(a) 60、(b) 90、(c) 120 和(d) 150 分鐘、門檻值 20 dBZ 的 BS，計算範圍為觀測回波大於 0 dBZ 的網格點。

第五章 應用產品

5.1 即時降雨預警技術

在證明 ExAMP 方案於回波即時預報的優勢後，災防科技中心於天氣與氣候監測網(Weather Analysis and Taiwan Climate Hybrid Monitor ; WATCH)系統上，開發以此方案為核心的「即時降雨預警技術」專頁產品(https://watch.ncdr.nat.gov.tw/watch_nowcast)。目的除了落實此項自主先進技術的應用外，更能提供各行各業使用者最即時的降雨預警資訊。圖 10 為此專頁頁面，內容每 10 分鐘更新一次，整合過去 30 分鐘之觀測與未來 90 分鐘之 ExAMP 預報的全台合成回波。右上角顯示最新「預報初始時間」，且有「個案」按鈕能回顧強降雨歷史事件。左上角有「播放」與「停止」按鈕能控制回波動態，也能直接點擊時間軸至特定時間。回波圖預設為全台畫面，點擊圖中任何一點，能放大回波圖且以該點為中心。回波圖右側的「+」與「-」按鈕也分別用於放大與縮小，色標為回波強度(dBZ)。此外，本產品同時以回波推估降雨率(方程式 9)，若推估某鄉鎮區未來 1 小時內將發生 10 分鐘 10 毫米或 1 小時 40 毫米的降雨量，則將該鄉鎮區所屬之縣市界線以紅色標註，並於專頁下方列出該鄉鎮區。



圖 10 「即時降雨預警技術」專頁頁面，以台灣時間 2020 年 11 月 29 日 10 時 30 分為例。

5.2 落雨小幫手 App

為了進一步提供使用者隨身的服務，諸如在出門前、下班前或戶外旅遊時，獲得最新的即時降雨預警資訊，災防科技中心也針對行動裝置開發方便的「落雨小幫手 App」。圖 11 為此 App 頁面，整合過去

20 分鐘之觀測與未來 60 分鐘之 ExAMP 預報的全台合成回波，時間長度短於 WATCH 專頁。時間軸同樣能控制回波動態，也能直接點擊特定時間。由於此 App 使用 GPS 定位技術，點擊回波圖右下角的按鈕能放大回波圖且以使用者位置為中心，時間軸上方也能額外提供當地氣溫、濕度、風速與風向等資訊。點擊左下角的「展開」按鈕，能轉換為回波圖與雨量圖上下並列。再點擊「雨量」按鈕，能轉換為全螢幕雨量圖。此外，此 App 也提供即時訊息推播，能自由設定顯示通知與否，以及關閉通知的時段。在開發完成後，災防科技中心積極推廣此 App，包括 2020 年 9 月 24–26 日於台北世貿一館的「未來科技館」展覽，以及 10 月 13 日於災防科技中心的「善用創新科技強化情資整合」記者會。主視覺海報如圖 12，提供 Android 與 iOS 作業系統的 QR 碼以利下載。截至 11 月 14 日為止，Android 已有 17,128 人次下載，iOS 已有 28,149 人次下載。單日的行動定位服務(location-based service; LBS)請求數最高達 16.3 萬，使用者廣布台灣本島與各離島。



圖 11 「落雨小幫手 App」行動裝置頁面，以台灣時間 2020 年 11 月 29 日 10 時 40 分為例。

最幫忙你的APP 落雨小幫手



早安裝，早乾爽
隨手一滑 **下雨** 不怕!!



將專業氣象資訊，設計成方便的行動裝置APP軟體，應用GPS定位技術，進行即時**手機推播**與提醒



落雨小幫手提供使用者在出門前、下班前或是外出旅遊時，皆可獲得最新的即時降雨預警資訊



行政法人 **國家災害防救科技中心**
National Science and Technology Center
for Disaster Reduction



Android



iOS

圖 12 「落雨小幫手 App」主視覺海報，提供 Android 與 iOS 作業系統的 QR 碼以利下載。

第六章 總結

6.1 結論

為了開發有效的劇烈天氣即時預報方法與預警系統，最佳化利用都卜勒氣象雷達資訊至關重要，所以本研究首先回顧雷達回波外延、雷達資料同化和兩者調合方案的前人文獻。在雷達回波外延方面，對流胞追蹤與區域追蹤為兩大主流技術，後者在定量預報上佔有優勢。而區域追蹤技術又有 TREC 與 VET 兩種方法，災防科技中心測試中的 MAPLE 外延法即採用 VET 方法。在雷達資料同化方面，災防科技中心採用 WRF-ARW 第 3.3.1 版與 WRFDA 第 3.4.1 版的三維變分方法，同化 GTS、GPS RO 和全台雷達資料。為了結合 MAPLE 外延法與 WRF 模式的優點，本研究研發全新的模式調整外延(ExAMP)調合方案。此方案完全信任 MAPLE 所預測的回波形態，但允許強度被 WRF 所預測的回波做有限的調整。原因是 WRF 在起轉期間所預測的新對流胞生成位置經常錯誤，但經過雷達資料同化後，對於既有對流胞的強度變化有較高的可預報度。

本研究針對台灣 2019 年 10 個強降雨事件、43 個三小時時段，進行 MAPLE、WRF、Lin CD、Sal CD 和 ExAMP 五組回波即時預報實驗，包括局部雷雨、梅雨鋒面、低壓外圍對流系統和颱風四種事件。

在分別代表對流系統發展與消散之兩事件的空間表現方面，只有 ExAMP 預報成功同時掌握增強與減弱趨勢，為五種方法中的最佳。在所有事件的統計表現方面，ExAMP 預報的 RMSE 為最低，MAPLE 預報次之，而 WRF、Lin CD 和 Sal CD 預報皆有嚴重高估(BS 遠大於 1)的問題。在不同事件種類的統計表現方面，發現五組預報的優劣順序，不會因事件種類不同而改變，意謂 ExAMP 方案對於各種天氣有一貫的優勢。而颱風事件 TS 最高，局部雷雨事件 TS 最低。原因是颱風有組織完整、水平平流的雨帶，而局部雷雨的演變較呈垂直且高非線性。

由於 ExAMP 方案的回波即時預報表現明顯優於其他四種方法，此成果已成功於今年發表在 Atmosphere 學術期刊(Lin et al. 2020)，且以此方案為核心開發 WATCH「即時降雨預警技術」專頁與「落雨小幫手 App」兩項產品，以提供各行各業使用者最即時的降雨預警資訊。經過「未來科技館」展覽與「善用創新科技強化情資整合」記者會的積極推廣，落雨小幫手 App 於 Android 與 iOS 兩大作業系統皆有上萬人次下載，單日的 LBS 請求數最高達 16.3 萬，使用者廣布全台。

6.2 未來展望

本研究首先聚焦於回波即時預報，但對於早期預警系統而言，降

雨即時預報的實用性更高，也更有利於下游的水文災防應用。因此展望未來，將嘗試將 ExAMP 方案用於調合外延法與數值模式所預測的降雨，再以雨量計觀測資料校驗其預報能力。較簡單的方式是將 MAPLE 所預測的回波，透過 Z-R 關係式轉換為降雨率，再與 WRF 雨量調合。更精緻的方式是利用先進的偏極化雷達做更準確的定量降水估計，再進行雨量的外延，以及與 WRF 雨量的調合。無論採用哪種方式，皆必須事先探討雷達變數與降雨率之間經驗關係式的不確定性，才能期待 ExAMP 方案在降雨即時預報上也有明顯助益。



參考文獻

- Austin, G. L., and A. Bellon, 1974: The use of digital weather radar records for short-term precipitation forecasting. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **100**, 658–664. DOI: 10.1002/qj.49710042612
- Barclay, P. A., and K. E. Wilk, 1970: *Severe thunderstorm radar echo motion and related weather events hazardous to aviation operations*. ESSA Tech. Memo. ERLTM-NSSL 46, Norman, OK, USA, 63 pp. Available online: http://library.nwc.ou.edu/library/reports/OCRD_reports/NSSLtechnicalReport46.pdf
- Benjamin, S. G., S. S. Weygandt, J. M. Brown, M. Hu, C. R. Alexander, T. G. Smirnova, J. B. Olson, E. P. James, D. C. Dowell, G. A. Grell, H. Lin, S. E. Peckham, T. L. Smith, W. R. Moninger, and J. S. Kenyon, 2016: A North American hourly assimilation and model forecast cycle: The Rapid Refresh. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 1669–1694. DOI: 10.1175/MWR-D-15-0242.1
- Bowler, N. E. H., C. E. Pierce, and A. Seed, 2004: Development of a precipitation nowcasting algorithm based upon optical flow techniques. *Journal of Hydrology*, **288**, 74–91. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2003.11.011
- Browning, K. A., 1982: *Nowcasting*. Academic Press, Cambridge, MA, USA, 256 pp.
- Browning, K. A., C. G. Collier, P. R. Larke, P. Menmuir, G. A. Monk, and R. G. Owens, 1982: On the forecasting of frontal rain using a weather radar network. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 534–552. DOI: 10.1175/1520-0493(1982)110<0534:OTFOFR>2.0.CO;2
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 569–585. DOI: 10.1175/1520-

0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2

Chou, M.-D., and M. J. Suarez, 1994: *An Efficient Thermal Infrared Radiation Parameterization for Use in General Circulation Models*. NASA, Tech. Memo, Washington, DC, USA, p. 85.

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. DOI: 10.1175/MWR-D-19-0193.1

Cullen, M. J. P., 1993: The unified forecast/climate model. *Meteor. Mag.*, **122**, 81–94. Available online: <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/8836-unified-forecast-climate-model>

Cunha, L. K., J. A. Smith, M. L. Baeck, and W. F. Krajewski, 2013: An early performance evaluation of the NEXRAD dual-polarization radar rainfall estimates for urban flood applications. *Wea. Forecasting*, **28**, 1478–1497. DOI: 10.1175/WAF-D-13-00046.1

Dixon, M., and G. Wiener, 1993: TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting—A Radar-based Methodology. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **10**, 785–797. DOI: 10.1175/1520-0426(1993)010<0785:TTITAA>2.0.CO;2

Germann, U., and I. Zawadzki, 2002: Scale-dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part I: Description of the methodology. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2859–2873. DOI: 10.1175/1520-0493(2002)130<2859:SDOTPO>2.0.CO;2

Golding, B. W., 1998: Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts. *Meteorol. Appl.*, **5**, 1–16. DOI: 10.1017/S1350482798000577

Grundland, M., R. Vohra, G. P. Williams, and N. A. Dodgson, 2006: Cross dissolve

- without cross fade: Preserving contrast, color and salience in image compositing. *Comput. Graphics Forum*, **25**, 577–586. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2006.00977.x
- Hering, A. M., C. Morel, G. Galli, S. Senesi, P. Ambrosetti and M. Boscacci, 2004: Nowcasting thunderstorms in the Alpine region using a radar based adaptive thresholding scheme. *Proceedings of the Third European Conference on Radar Meteorology*, Visby, Sweden, 6–10 September.
- Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318–2341. DOI: 10.1175/MWR3199.1
- Hu, M., M. Xue, and K. Brewster, 2006: 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms. Part I: Cloud analysis and its impact. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 675–698. DOI: 10.1175/MWR3092.1
- Huuskonen, A., E. Saltikoff, and I. Holleman, 2014: The operational weather radar network in Europe. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 897–907. DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00216.1
- Hwang, Y., A. J. Clark, V. Lakshmanan, and S. E. Koch, 2015: Improved nowcasts by blending extrapolation and model forecasts. *Wea. Forecasting*, **30**, 1201–1217. DOI: 10.1175/WAF-D-15-0057.1
- Jiménez, P. A., J. Dudhia, J. F. González-Rouco, J. Navarro, J. P. Montávez, and E. García-Bustamante, 2012: A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 898–918. DOI: 10.1175/MWR-D-11-00056.1
- 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. *Wea. Forecasting*, **13**, 263–276. DOI: 10.1175/1520-0434(1998)013<0263:TSCIAT>2.0.CO;2

- Jung, S.-H., and G. Lee, 2015: Radar-based cell tracking with fuzzy logic approach. *Meteor. Appl.*, **22**, 716–730. DOI: 10.1002/met.1509
- Kain, J. S., 2004; The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 170–181. DOI: 10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2
- Laroche, S., and I. Zawadzki, 1994: A variational analysis method for retrieval of three-dimensional wind field from single-Doppler radar data. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 2664–2682. DOI: 10.1175/1520-0469(1994)051<2664:AVAMFR>2.0.CO;2
- Li, L., W. Schmid, and J. Joss, 1995: Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography. *J. Appl. Meteor.*, **34**, 1286–1300. DOI: 10.1175/1520-0450(1995)034<1286:NOMAGO>2.0.CO;2
- Ligda, M. G. H., 1953: *The horizontal motion of small precipitation areas as observed by radar*. Mass. Inst. Tech., Tech. Rep. No. 21, Contract No. DA-36-039-SC-124, Cambridge, MA, USA, 60 pp.
- Lin, H.-H., C.-C. Tsai, J.-C. Liou, Y.-C. Chen, C.-Y. Lin, L.-Y. Lin, and K.-S. Chung, 2020: Multi-weather evaluation of nowcasting methods including a new empirical blending scheme. *Atmosphere*, **11**, 1166. DOI: 10.3390/atmos11111166
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102**, 16663–16682. DOI: 10.1029/97JD00237
- Morrison, H., G. Thompson, and V. Tatarskii, 2009: Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-Moment schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 991–1007. DOI: 10.1175/2008MWR2556.1
- Poletti, M. L., F. Silvestro, S. Davolio, F. Pignone, and N. Rebola, 2019: Using

- nowcasting technique and data assimilation in a meteorological model to improve very short range hydrological forecasts. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **23**, 3823–3841. DOI: 10.5194/hess-23-3823-2019
- Rinehart, R. E., and E. T. Garvey, 1978: Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. *Nature*, **273**, 287–289. DOI: 10.1038/273287a0
- Robert, A., 1981: A stable numerical integration scheme for the primitive meteorological equations, *Atmos.-Ocean*, **19**, 35–46. DOI: 10.1080/07055900.1981.9649098
- Ruzanski, E., V. Chandrasekar, and Y. Wang, 2011: The CASA Nowcasting System. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **28**, 640–655. DOI: 10.1175/2011JTECHA1496.1
- Sasaki, Y., 1958: An objective analysis based on the variational method. *J. Meteor. Soc. Japan*, **36**, 77–88.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, Z. Liu, J. Berner, W. Wang, J. G. Powers, M. G. Duda, D. M. Barker, and X.-Y. Huang, 2019: *A description of the Advanced Research WRF Model Version 4*. NCAR Technical Note NCAR/TN-556+STR, Boulder, CO, USA, 145 pp. DOI: 10.5065/1dfh-6p97
- Sugimoto, S., N. A. Crook, J. Sun, Q. Xiao, and D. M. Barker, 2009: An examination of WRF 3DVAR radar data assimilation on its capability in retrieving unobserved variables and forecasting precipitation through Observing System Simulation Experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 4011–4029. DOI: 10.1175/2009MWR2839.1
- Sun, J., 2005: Initialization and numerical forecasting of a supercell storm observed during STEPS. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 793–813. DOI: 10.1175/MWR2887.1
- Sun, J., H. Wang, W. Tong, Y. Zhang, C.-Y. Lin, and D. Xu, 2014a: Comparison of the impacts of momentum control variables on high-resolution variational data assimilation and precipitation forecasting. *Mon. Wea. Rev.* **2014**, *144*, 149–169. DOI: 10.1175/MWR-D-14-00205.1

- Sun, J., M. Xue, J. W. Wilson, I. Zawadzki, S. P. Ballard, J. Onvlee-Hooimeyer, P. Joe, D. Barker, P.-W. Li, B. Golding, M. Xu, and J. Pinto, 2014b: Use of NWP for nowcasting convective precipitation: Recent progress and challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 409–426. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00263.1
- Sun, J., and Y. Zhang, 2008: Analysis and prediction of a squall line observed during IHOP using multiple WSR-88D observations. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2364–2388. DOI: 10.1175/2007MWR2205.1
- Tai, S.-L., Y.-C. Liou, J. Sun, S.-F. Chang, and M.-C. Kuo, 2011: Precipitation forecasting using Doppler radar data, a cloud model with adjoint, and the Weather Research and Forecasting model: Real case studies during SoWMEX in Taiwan. *Wea. Forecasting*, **26**, 975–992. DOI: 10.1175/WAF-D-11-00019.1
- Tsai, C.-C., and K.-S. Chung, 2020: Sensitivities of quantitative precipitation forecasts for Typhoon Soudelor (2015) near landfall to polarimetric radar data assimilation. *Remote Sens.*, **12**, 3711. DOI: 10.3390/rs12223711
- Tsai, C.-C., S.-C. Yang, and Y.-C. Liou, 2014: Improving quantitative precipitation nowcasting with a local ensemble transform Kalman filter radar data assimilation system: Observing system simulation experiments. *Tellus A*, **66**, 21804. DOI: 10.3402/tellusa.v66.21804
- Wang, G., W.-K. Wong, Y. Hong, L. Liu, J. Dong, and M. Xue, 2015: Improvement of forecast skill for severe weather by merging radar-based extrapolation and storm-scale NWP corrected forecast. *Atmos. Res.*, **154**, 14–24. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.10.021
- World Meteorological Organization, 2019: *Manual on the global data-processing and forecasting system: Annex IV to the WMO Technical Regulations*. WMO No.485, Geneva, Switzerland, 148 pp. Available online: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10164

- Xiao, Q., Y.-H. Kuo, J. Sun, W.-C. Lee, E. Lim, Y.-R. Guo, and D. M. Barker, 2005: Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 768–788. DOI: 10.1175/JAM2248.1
- Xiao, Q., and J. Sun, 2007: Multiple-radar data assimilation and short-range quantitative precipitation forecasting of a squall line observed during IHOP_2002. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3381–3404. DOI: 10.1175/MWR3471.1
- Xin, L., G. Reuter, and B. Larochelle, 1997: Reflectivity-rain rate relationships for convective rainshowers in Edmonton: Research note. *Atmos. Ocean*, **35**, 513–521. DOI: 10.1080/07055900.1997.9649602
- Yang, S.-C., Z.-M. Huang, C.-Y. Huang, C.-C. Tsai, and T.-K. Yeh, 2020: Convective-scale assimilation with the GNSS-ZTD and radar data and its impact on heavy rainfall prediction in Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **148**, 1075–1098. DOI: 10.1175/MWR-D-18-0418.1
- Yoon, S.-S., 2019: Adaptive blending method of radar-based and numerical weather prediction QPFs for urban flood forecasting. *Remote Sens.*, **11**, 642. DOI: 10.3390/rs11060642
- Zhang, J., K. Howard, C. Langston, S. Vasiloff, B. Kaney, A. Arthur, S. Van Cooten, K. Kelleher, D. Kitzmiller, and F. Ding, 2011: National Mosaic and Multi-Sensor QPE (NMQ) system: Description, results, and future plans. *B. Am. Meteor. Soc.*, **92**, 1321–1338. DOI: 10.1175/2011BAMS-D-11-00047.1

模式調整外延(ExAMP)即時預報方法之開發與應用

發行人：陳宏宇

出版機關：國家災害防救科技中心

地址：新北市新店區北新路三段 200 號 9 樓

電話：02-8195-8600

報告完成日期：中華民國 109 年 12 月

出版年月：中華民國 110 年 01 月

版 次：第一版

非賣品

地址：23143新北市新店區北新路三段200號9樓

電話：++886-2-8195-8600

傳真：++886-2-8912-7766

網址：<http://www.ncdr.nat.gov.tw>