

雷達回波變分追蹤法應用於臺灣複雜地形環境下之可行性評估

潘俊瑋¹ 鍾高陞¹ 林欣弘² 陳台琦¹ 姚奕安¹

國立中央大學大氣科學學系¹
國家災害防救科技中心氣象組²

(中華民國 106 年 11 月 30 日收稿，中華民國 107 年 4 月 26 日定稿)

摘要

本研究使用加拿大麥基爾大學(McGill University)所發展之雷達回波外延預報系統(McGill Algorithm for Precipitation nowcasting using Lagrangian Extrapolation, MAPLE)，利用中央氣象局(Central Weather Bureau, CWB)雷達回波整合資料，檢視該系統在臺灣地區即時天氣預報(0~6 小時)的表現。MAPLE 系統包含兩個程序，依序為：1.雷達回波變分追蹤法(Variational Echo Tracking, VET)決定降水系統的移動場；2.由半拉格朗日後推平流法(semi-Lagrangian backward advection)決定降水系統的預報場。本研究選取颱風與梅雨鋒面兩種天氣型態共三個個案進行分析，並評估 MAPLE 的可行性。

研究首先針對 VET 過程所使用的兩種參數——移動向量密度及回波資料時間間隔進行敏感度測試。在獲得臺灣地區最佳化設定後，定性討論雷達回波外延在預報平移與旋轉天氣系統之特性。本篇分別選取兩個颱風及梅雨鋒面共三個個案進行測試，由測試結果顯示，MAPLE 回波預報結果與觀測回波之間的相似程度在分數表現上相當理想。進一步檢視移動向量，但當天氣系統接近臺灣陸地時，移動向量速度減緩，顯示外延法能夠反應出地形阻擋之影響。而 MAPLE 系統定量降水表現方面，綜合不同預報得分指標，此系統對於颱風和梅雨鋒面的降水預報能力可維持在 2~3 小時。與持續法相比較，其降水預報誤差隨時間明顯改進。然而，當預報時間(lead time)超過 3 小時後，外延預報能力迅速下降，主要與外延回波缺乏掌握天氣系統生成與消散的機制有關。整體而言，透過高時空間解析度之雷達觀測網的降水觀測，進行外延預報，能迅速提供即時定量降水預報資訊。此技術可在極短時間內提供 0-3 小時之預報，彌補複雜天氣數值模式初期起轉過程在降水資訊之不足。

關鍵字：即時天氣預報，雷達回波，外延方法

一、前言

臺灣地理位置特殊，不僅東臨太平洋，西隔臺灣海峽與歐亞大陸相望，再加上通過北迴歸線，使臺灣兼具熱帶及副熱帶季風氣候特徵。島內地形陡峭，河川大多短小急流，每年的兩個主要降水時期一五至六月的梅雨季及七至九月的颱風季，常為臺灣帶來豐沛的降水，但也時常因此引發水災與土石流等重大災害，因此如何準確預測降水在臺灣是重要的議題。

過去數十年來，透過觀測技術的演進和數值天氣預報模式(Numerical Weather Prediction, NWP)的改良，天氣預報準確度有明顯增加。然而受限於觀測資料時空解析度、降水物理過程了解與複雜地形的交互作用等因素，定量降水預報(Quantitative Precipitation Forecasts)依然具有一定程度的困難和挑戰，尤其是進入 0~6 小時左右的即時天氣預報(Nowcasting)，數值模式往往無法迅速有效的掌握降水情況，造成此期間的可預報度相當低。透過氣象雷達高時空解析度的觀測，6~8 分鐘內能提供大範圍降水資訊，有助於天氣系統的監測與診斷。除此之外，更可進一步將其視為最佳的降水初始場並搭配合適的即時預報系統進行預報，能在短時間內瞭解到天氣系統的未來

發展趨勢，提供相關單位執行災害預警措施，以減少災害帶來的損失。

目前主要使用的降水預報方式包含數值模式預報(NWP)和外延預報(亦即 Lagrangian 預報)，兩者在不同的預報期間(lead time)對於降水的掌握能力各有所長(Golding 1998; Wilson et al. 1998)，如圖 1(摘自 Germann et al. 2006)所示。模式預報因為透過內部完整且複雜的數學及物理方程式和各種參數化設定之間的調整平衡，能夠取得良好的大氣動力和熱力條件，使得 1~3 天之後有較佳的掌握能力，然而在極短期(very short-term)的預報能力由於受到積分初期的起轉過程 (spin-up process)影響而有所限制；外延預報法主要因為無法完整考慮到降水系統的生成與消散作用以及風暴移動場的變化(Tsonis and Austin 1981; Radhakrishna et al. 2012)，使得中期之後預報能力隨時間快速下降。不過外延預報法使用最接近大氣真實狀態(ground truth)的觀測資料進行外延預報，可以掌握最佳的初始降水場資訊，使得極短期的預報能力優於模式結果。

氣象雷達提供高覆蓋率及時空解析度的觀測降水資訊，過去有許多研究利用此資訊來發展定量降水即時預報(Quantitative Precipitation Nowcasting, QPN)。

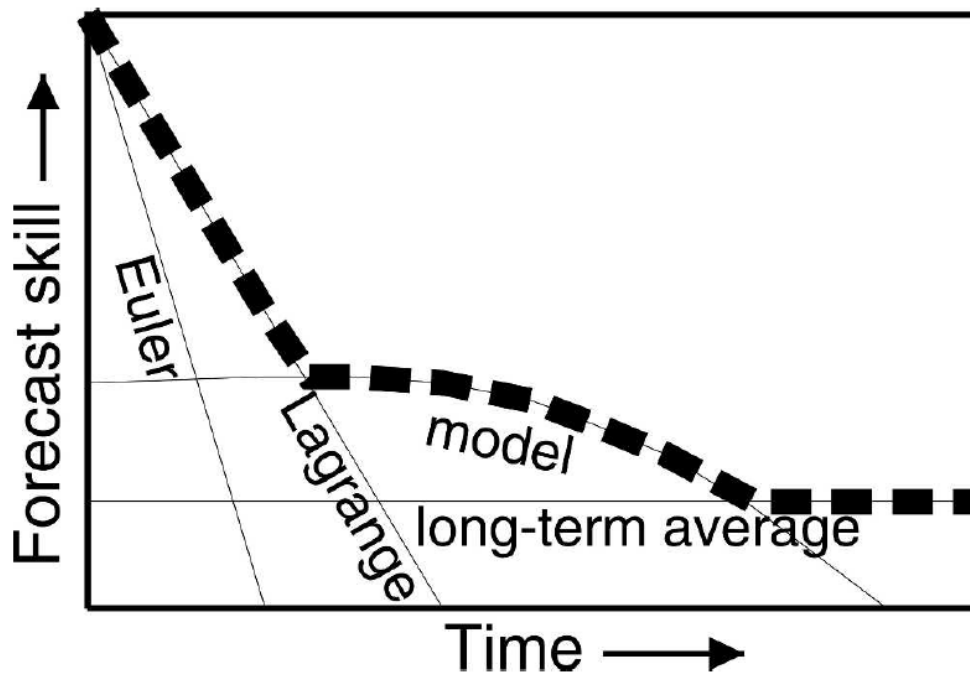


圖 1 不同預報方式的預報能力隨預報時間變化概念圖。(摘自 Germann et al. 2006)

英國氣象局(Met Office)與澳洲氣象局(Bureau of Meteorology)共同開發的 Short-Term Ensemble Prediction System(STEPS)，利用傅立葉轉換將降水系統(雷達回波)依照不同空間尺度進行分解後進行外延預報(Spectral Prognosis, S-PROG)，並和降尺度 NWP 預報結合進行降水機率預報，針對普通降水能達到 6 小時的預報能力(Seed 2003; Bowler et al. 2006)。香港天文臺(Hong Kong Observatory)發展的 SWIRLS(Short-range Warnings of Intense Rainstorms in Localized Systems)系統使用 TREC(Tracking Radar Echos by Correlations)技術(Rinehart and Garvey 1978; Tuttle and Foote 1990)進行雷達回波追蹤和外延預報，結果顯示前 3 小

時有不錯的降水掌握能力，並且加入數值模式(Operational Regional Spectral Model, ORSM)延伸至 24 小時的降水預報(Li and Lai 2004)。在臺灣中央氣象局則使用影像辨識與處理的技術進行外延預報，更將天氣系統區分不同尺度大小分別計算移動趨勢並合併(方等人 2017)。綜合外延預報概念和雷達觀測資料，「雷達回波外延法」便是一種較簡易且最廣泛使用的即時預報方式，參考公式如下：

$$\hat{\Psi}(t_0 + \tau, \mathbf{x}) = \Psi(t_0, \mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha}) \quad (1)$$

$\hat{\Psi}$ 為預報降水資訊， Ψ 為觀測降水資訊， t_0 為預報起始時間， τ 為預報期間， $\boldsymbol{\alpha}$ 為位移向量。上式代表在預報起始時間 t_0 ， $\mathbf{x} - \boldsymbol{\alpha}$ 位置上有觀測到降水資訊，

經過 τ 時間區間的預報之後，在 $t_0 + \tau$ 時間，降水資訊會經過 α 位移向量的外延，來到 \mathbf{x} 的位置上。整體而言，此概念就是使用最近時間的一組觀測資料，經由適當的外延而產生一組預報結果。

另一方面，針對風暴和對流系統的起始預報，由美國國家大氣研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) 所研發的 ANC(AutoNowCaster)系統，結合各種觀測資料(雷達、衛星、氣象站...等)與數值模式資訊，使用模糊邏輯法(fuzzy logic)以隸屬函數(membership function)轉換各種預報因子(predictors)產生未來 1 小時的對流起始可能性(likelihood)預報(Mueller et al. 2003)。中央氣象局引進此系統，針對臺灣特殊之天氣和地理環境進行在地化 (localization) 成為 TANC(Taiwan AutoNowCaster)系統，並評估弱綜觀(weak synoptic forcing)環境下，1 小時內的午後對流起始預報表現，結果顯示此系統應用在臺灣，多呈現過度預報，但仍然具有不錯的區辨能力(張等 2015)。

本篇研究所使用之即時預報系統——McGill Algorithm for Precipitation nowcasting using Lagrangian Extrapolation 簡稱 MAPLE，其基本架構由 Germann and Zawadzki (2002)首次提

出並使用美國氣象雷達網資訊進行降水回波預報。此研究指出，在廣大且平坦的北美地區，即時預報能力依照不同天氣系統約呈現 2.5~6 小時左右的可預報度的表現，之後也討論到生成與消散(growth and decay)作用和風暴移動場變化為主要影響外延預報能力的關鍵 (Germann and Zawadzki 2004; Turner et al. 2004; Germann et al. 2006; Radhakrishna et al. 2012)。Lin et al. (2005)進一步使用 MAPLE 系統與多種 NWP 預報針對美國中、東部地區進行比較，結果顯示 3~6 小時期間外延預報表現即使有逐漸下降的情況，依然略優於 NWP 預報結果。後續有學者將 MAPLE 系統引進南韓進行一系列之參數測試和即時預報校驗(Bellon et al. 2010; Lee et al. 2010)，結果顯示雖然有出現高估降雨強度的情況，但在 2.5 小時內有不錯的表現。另外 Mandapaka et al. (2012)使用此系統進行歐洲阿爾卑斯山脈地區的即時預報評估，並與 NWP 預報進行比較，結果發現在複雜地形的影響下，外延預報平均的預報能力仍可在 2.5~3 小時內優於 NWP 預報。

過去 MAPLE 系統多應用於中緯度地區的即時預報評估，而本研究首次針對鋒面系統(梅雨)和熱帶氣旋(颱風)這兩類強烈對流系統，在臺灣複雜地形作用下該系統在即時預報能力的表現。下一節介紹利用 MAPLE 進行回

波外延的方法與即時預報較驗方式。第三節簡介本研究三個個案以及臺灣雷達網聯之觀測資料。第四節為即時天氣預報結果分析與討論。最後一節為結論與展望。

二、外延方法與預報檢驗

(一) 雷達回波外延預報系統(MAPLE)

由加拿大麥基爾大學 (McGill University)雷達氣象團隊(J. S. Marshall Radar Observatory)所開發的即時預報系統 MAPLE，主要是使用變分演算法取得適當的天氣系統移動場並搭配外延技術，針對即時天氣狀況進行預報。以下就 MAPLE 系統當中的雷達回波變分追蹤法(Variational Echo Tracking, VET) 及半拉格朗日平流法(Semi-Lagrangian Advection)兩個部份做概略介紹。

1. 變分回波追蹤法(Variational Echo Tracking, VET)

此方法由 Laroche and Zawadzki (1994,1995)所發展，最原先的目的是利用單都卜勒雷達回波資料進行三維風場反演，在本系統中將其應用於多雷達整合回波的二維移動場計算。以下為其價值函數(cost function)呈現：

$$J_{\text{VET}}(\mathbf{u}) = J_{\Psi} + J_2 \quad (2)$$

上式中， \mathbf{u} 即為使用過去時間的觀測回波資料經過此價值函數的極小化計算而得到「二維回波移動場」資訊。式(2)包含兩個條件限制，第一部份 J_{Ψ} (式 3)代表觀測回波剩餘項平方的總和量，亦即回波保守條件項(the conservation of reflectivity constraint)，公式如下：

$$J_{\Psi} = \iint_{\Omega} \beta(\mathbf{x}) [\Psi(t_0, \mathbf{x}) - \Psi(t_0 - \Delta t, \mathbf{x} - \mathbf{u}\Delta t)]^2 dx dy \quad (3)$$

其中 $\beta(\mathbf{x})$ 為回波保守條件項的權重係數，假設在最大程度的滿足回波保守情況之下，亦即不考慮降水系統的生成及消散(growth and decay)作用，透過變分法找出過去時間(t_0 、 $t_0 - \Delta t$)的觀測回波值(Ψ)在空間上的移動關係(\mathbf{x} 、 $\mathbf{x} - \mathbf{u}\Delta t$)，統整後形成向量數目為 $m \times n$ ($m=n$)的二維回波移動場(\mathbf{u})。第二部份 J_2 (式 4)代表平滑懲罰項(the smoothness penalty constraint)，公式如下：

$$J_2 = \gamma \iint_{\Omega} \left[\begin{aligned} & \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 + \\ & \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right)^2 \end{aligned} \right] dx dy \quad (4)$$

其中 γ 為平滑懲罰項的權重係數， u 和 v 則是回波移動場(\mathbf{u})在 x 和 y 方向的分量，利用二次微分的作用來平滑回波移動場資訊。

在 VET 過程中參考由 Navon and Legler (1987)所描述的共軛梯度演算法

(conjugate-gradient algorithm)進行疊代計算以極小化式(2)。此外，為了避免疊代過程趨向次小值(secondary minimum)收斂，使用 Laroche and Zawadzki (1994)所發展的尺度猜測程序(scaling-guess process)，透過逐步增加移動場解析度的疊代計算找出最合適的回波移動場。相較於 TREC 藉由尋找不同時間回波的最大相關性(correlation)，在無回波區域無法估計移動場，MAPLE 透過變分法以及尺度猜測所獲得之 VET 能得到整個區域內的移動向量。

2. VET 參數介紹

進行 VET 運算之前有許多參數可提供使用者選擇，而不同的參數設定組合將會影響到後續預報表現。以下針對幾個 VET 參數進行概略介紹，預設值請參考表 1。

(1) 觀測資料筆數與時間間隔

在任何的時間間隔設定之下，最少只要選用 2 筆(t_0 、 $t_0 - \Delta t$)觀測資料即可推算出對應的回波移動場。然而為了增加資料之間的回波關聯性以推算出較完整的回波移動過程，本研究使用 3 筆(t_0 、 $t_0 - \Delta t$ 、 $t_0 - 2\Delta t$)觀測資料來進行 VET 運算。而觀測資料時間

間隔的選擇則是取決於雷達資料的時間解析度，選用太長的時間間隔會因為資料之間的回波相關性過低，無法滿足式(2)當中的回波保守條件，而產生較不合理的移動場；選用太短的時間間隔則會因為局部範圍回波的顯生成或消散作用，造成移動場具有加速現象而無法持續應用在預報區間。根據前人的研究(Germann and Zawadzki 2004; Bellon et al. 2010; Mandapaka et al. 2012)，使用間隔 30 分鐘的 3 筆觀測資料，亦即過去 60 分鐘的回波移動資訊，來進行 6 小時的外延預報，是合理的預設值。

(2) 空間平滑格點

即使經過資料品管流程的回波資料也有可能隱含部份小尺度(1~2 公里)的雜訊，使得計算移動場過程產生負面影響。因此先將空間經緯網格解析度為 0.0125° 的最大回波資料進行 3×3 格點的平均，再進行 VET 運算來解決此問題。

(3) 回波門檻

回波量值範圍可能小至 -30dBZ 大至 70dBZ，為了避免短生命期的弱回波影響移動場計算結果，可以設定此參數將低於門檻值的回波先行剔除。

表 1 VET 參數敏感度測試實驗組合列表。其中，A、B、C 為實驗組；D 為控制組(預設值)。

VET參數敏感度測試實驗組合列表					
No	VET參數	A實驗	B實驗	C實驗	D實驗
1	觀測資料筆數	3			
2	觀測資料時間間隔(分鐘)	20		30	
3	空間平滑格點數	3x3			
4	回波門檻(dBZ)	5			
5	尺度猜測程序之次數	3	4	3	4
6	尺度猜測程序之向量密度	4x4, 12x12, 24x24	4x4, 12x12, 24x24, 48x48	4x4, 12x12, 24x24	4x4, 12x12, 24x24, 48x48
7	$\beta(x)$ 與 γ 權重係數	0.5 與 1000			

(4) 尺度猜測程序之次數與向量密度

在計算移動場過程中，向量密度的設定將影響到能否追蹤到適當尺度的天氣系統移動趨勢，以應用在後續的預報區間。向量密度必須小到能反應出中/大型天氣系統的旋轉、形變現象和各個降水區域之間的移動場變化，但也要大至能避免追蹤到迅速消長的對流系統，如同前述產生不合理的加速或減速現象，而無法持續應用在預報區間。本篇研究參考 Germann and Zawadzki (2002)所使用的三階段尺度猜測程序並進行以下調整。將原始最大回波資料的 921×881 個格點擴張為 1000×1000 個格點，並且移除掉邊界的 140 個格點，最終形成 720×720($i \times j, i=j$) 個格點的正方形範圍以進行 VET 運算。而向量密度的設定依序為 4×4、12×12、24×24 和 48×48($m \times n, m=n$)個數目，

選定 48×48 為預設值，其中每個向量的解析度為 0.1875°，約 19 公里 ($720 \div 48 \times 0.0125^\circ = 0.1875^\circ$)。

(5) $\beta(x)$ 與 γ 權重係數

$\beta(x)$ 與 γ 係數在任何的尺度猜測程序中可由使用者自行調整，但是考慮到 VET 運算範圍的總格點數($i \times j, i=j$)和向量數($m \times n, m=n$)差距大約在 3 個數量級的差距，所以 $\beta(x)$ 與 γ 的比率也大致以此呈現。根據加拿大麥基爾大學雷達氣象研究中心(J.S. Marshall Radar Observatory)在魁北克地區進行 MAPLE 系統即時 (real-time)預報評估，發現使用 $\beta(x) = 0.5$ 與 $\gamma = 1000$ 的組合能有不錯的預報表現，在南韓的 VET 參數測試研究(Bellon et al. 2010)中以此為預設組合，本篇研究亦採用相同設定視為預設值。

3. 半拉格朗日後推平流法 (Semi-Lagrangian Backward Advection Scheme)

半拉格朗日法 (semi-Lagrangian scheme) 公式如下：

$$\tau = N\Delta t \quad (5)$$

$$\alpha = \Delta t \mathbf{u} \left(t_0, \mathbf{x} - \frac{\alpha}{2} \right) \quad (6)$$

其中，式(5)的 τ 代表整個預報期間，式(6)的 α 代表外延向量。結合上述兩式，先將預報期間(τ)切成 N 個時間等份(Δt)，每個時間等份找出對應到空間上個別格點的回波移動場資訊(\mathbf{u})，形成合適的外延向量(α)以進行預報，其主要優點能允許在預報過程中有不同的移動速度，並且掌握到降水系統的旋轉效應。

在選擇預報回波位置的方式，則使用後推法(backward)來決定。此方法概念為：「現在的空間資訊是由過去時間的上游空間資訊(backward in time and upstream in space)所決定」。舉例來說，在 $T+1$ 時間的 (I, J) 格點上的回波，利用內差後的移動場向上游找出在 T 時間上的 (I_0, J_0) 格點的回波應為其原始來源資訊。當 (I, J) 格點位在輻散的區域，則其附近格點的預報回波可能來自相同的 (I_0, J_0) 格點，亦即 (I_0, J_0) 格點的回波量值向外擴展或增加至多於一個 (I, J) 格點的臨近區域；反之，若是 (I, J)

格點位在輻合的區域，則會使其附近的預報回波產生壓縮或減少現象。以上兩者效應，將視移動場向量的輻合/輻散情況使預報結果產生不同程度的扭曲，使其形成不可避免的背離質量保守效應現象。

綜合以上說明，MAPLE 即時預報系統的運作流程即為：利用過去時間的觀測資料搭配 VET 運算求得移動場 (analysis window)，接著將預報起始時間(t_0)的雷達觀測資料放入移動場進行外延預報 (forecast period)。本研究之資料來源為中央氣象局 QPESUMS 系統 (Zhang et al., 2011 ; Gourley et al. 2002)，該系統自 2002 年起與經濟部水利署、農委會水土保持局及美國劇烈風暴實驗室 (National Severe Storm Laboratory, NSSL) 共同發展，其中「最大回波」產品涵蓋臺灣臨近區域之大範圍高時空解析度降水資訊，適合應用於即時降水預報評估，因此本研究選用此產品來進行預報，詳細介紹請見第三章。

(二) 校驗方法

為了檢視 MAPLE 系統的預報結果，本研究利用實際觀測資料進行比較並探討此系統在臺灣複雜地形下的可行性。而評估降水預報能力時，由於沒有單一校驗方式能完整評估預報表現能力，因此本研究使用兩種主要校驗

方式，分別為「連續校驗法(Continuous Verification)」與「絕對校驗法(Categorical Verification)」並參考其中不同的指標與得分進行比較。

1. 連續校驗法(Continuous Verification)

連續校驗法考慮整個空間中的所有降水資訊來評估預報能力。本研究使用的連續校驗法包含空間相關係數(Spatial Correlation Coefficient, SCC)以及均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)。其中空間相關係數(Spatial Correlation Coefficient, SCC)是一種衡量兩個個體間相似程度的方法。過去文獻中，為了檢視空間中預報與觀測降水分佈的狀況，常使用此係數進行驗證，公式如下：

$$SCC = \frac{\sum(F-\bar{F})(O-\bar{O})}{\sqrt{\sum(F-\bar{F})^2 \times \sum(O-\bar{O})^2}} \quad (7)$$

上式中， \mathbf{F} 為格點上預報時間內的累積降水， \mathbf{O} 為格點上觀測時間內的累積降水， $\bar{\mathbf{F}}$ 為預報累積降水的平均值， $\bar{\mathbf{O}}$ 為觀測累積降水的平均值。本研究使用此方式評估預報與觀測累積降水之間的相關性。而均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)則能表現空間上預報和觀測降水資訊的差異量，以了解整體預報的偏差程度，公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F-O)^2}{N}} \quad (7)$$

上式中， \mathbf{F} 為格點上預報時間內的降水資訊， \mathbf{O} 為格點上觀測時間的降水資訊， N 為所有納入計算的格點數。

2. 絕對校驗法(Categorical Verification)

絕對校驗法針對空間中不同程度的降水資訊來進行預報評估。首先給定一個降水門檻(Threshold)，當格點上的降水資訊超過此門檻值則視為降水事件發生(1)，未超過此門檻值則視為降水事件未發生(0)，因此又稱為二元校驗法(Binary Verification)。表 2 顯示觀測與預報降水事件的組合，總共分為以下四種情況：命中(\mathbf{a})、失誤(\mathbf{b})、假警報(\mathbf{c})及正確否定(\mathbf{d})。本研究使用的絕對校驗法包含偏離係數(Bias)以及公正預兆得分(Equitable Threat Score, ETS)。

偏離係數(Bias)代表預報降水事件和觀測降水事件之比值，公式如下：

$$Bias = \frac{a+c}{a+b} \quad (8)$$

當 Bias 大於 1 表示預報高估降水次數，小於 1 表示預報低估降水次數。

表 2 觀測與預報降水事件組合表。相同格點上，預報(F)與觀測(O)降水資訊分別對特定的門檻值(th)進行判斷後，得到以下四種事件：命中(a)、失誤(b)、假警報(c)及正確否定(d)的次數。

觀測/預報事件組合表		
預報(F) \ 觀測(O)	$O \geq th$	$O < th$
	$F \geq th$	命中 (a)
$F < th$	失誤 (b)	正確否定 (d)
th : 降水資訊門檻值		

公正預兆得分 (Equitable Threat Score, ETS) 又可稱為 Gilbert skill score(GSS)，公式如下：

$$ETS = \frac{a - a_r}{a + b + c - a_r} \quad (10)$$

$$a_r = \frac{(a+b) \times (a+c)}{(a+b+c+d)} \quad (11)$$

其中 a_r 代表隨機預報命中的次數。ETS除了保有臨界成功指數(Critical Success Index, CSI) 計算概念外，亦排除隨機預報命中的狀況，能更客觀的描述正確預報降水事件的機率。範圍在 $-1/3 \sim 1$ 之間，最佳值為 1 ，無預報能力時為 0 。

另外，在檢驗臺灣地區陸地降水分布的結果時，為了避免：1)天氣系統受到地形作用影響所產生之成長或消散；2) 觀測品質及站點分布不均的問題，進而影響校驗的結果，故先不使用地面雨量站進行校驗。在本研究當中，

先將QPESUMS系統的「最大回波」產品，參考Xin et al. 1997所提出適合臺灣之Z-R相關式：

$$Z = 32.5R^{1.65} \quad (12)$$

將回波(Z)轉為降雨率(R)，再進一步計算「累積降水量」，檢驗臺灣地區陸地上降水分布的結果(校驗範圍請參考圖2說明)。

三、觀測資料與個案簡介

本研究使用高時空解析度的臺灣雷達回波整合資料進行分析討論，提供雷達資料進入MAPLE系統，使用VET演算法得到二維的VET移動場(回波移動場)，基於此移動場訊息進行回波外延預報。

Domain Setting

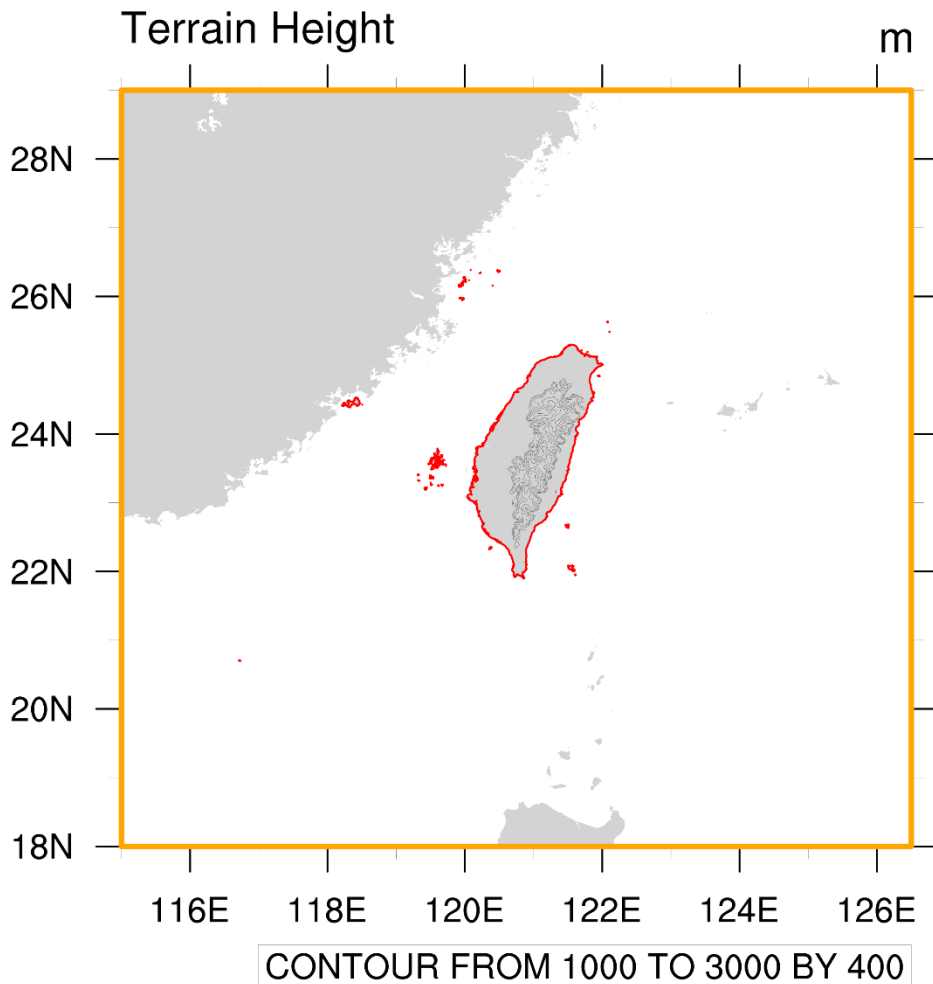


圖 2 各種資料校驗或比較之範圍設定。觀測與預報最大回波校驗範圍為東經 115°至 126.5°與北緯 18°至 29°(橘色方框)；觀測與預報最大回波經過 $Z=32.5R^{1.65}$ 式轉換後的累積降水量校驗，其範圍為臺灣陸地區域(紅色區域)。

(一) 臺灣雷達回波整合網

天氣監測系統 QPESUMS 提供包括即時雷達資料、雨量站資料、閃電資料、雷達資料衍生產品(例如：定量降水估計和定量降水預報)給各政府機關防災應用參考。此監測系統整合臺

灣多部氣象作業雷達資訊，掃描範圍涵蓋了臺灣本島及鄰近海域，除了可觀測來自太平洋、南海及巴士海峽等地的颱風外，也可觀測梅雨鋒面等天氣系統，構成完整的氣象雷達觀測網。包含氣象局的 4 座 S 波段(波長 10 公分)

雷達，其中 3 座為都卜勒氣象雷達，分別位於七股(RCCG)、墾丁(RCKT)及花蓮(RCHL)，和 1 座位於五分山(RCWF)的雙偏極化氣象雷達(2014 年 3 月完成升級)。另外也包含空軍氣象單位的 2 座 C 波段(波長 5 公分)雙偏極化氣象雷達，分別位在清泉崗(RCCK)和馬公(RCMK)機場。

整合雷達資訊中，「最大回波」(Composite Reflectivity 或 Column Vector, CV)產品提供最廣泛且完整的觀測回波資料，能夠在天氣系統尚未進入臺灣本島前，及早評估其發展趨勢和未來動向，適合應用於即時預報，故做為本研究所使用之雷達觀測資料。此產品空間解析度為 0.0125° ，時間解析度為 10 分鐘，資料範圍涵蓋東經 115° 至 126.5° 與北緯 18° 至 29° ，共有 921×881 個網格數。2012 年 06 月 30 日以前僅整合 4 座雷達(RCCG、RCKT、RCHL、RCWF)觀測資訊，同年 07 月 01 日之後再加入 RCCK 與 RCMK 資料，成為 6 座雷達整合結果。

由於臺灣地形峻峭複雜又四面環海，使得雷達波束在山區易產生地形雜波(terrain clutters)或地形遮蔽(beam blockages)，在海面上也常出現大範圍的海面回波(sea clutters)，因此 QPESUMs 產品資料品管參考 Chang et al. (2009)所使用的回波氣候統計法

(reflectivity climatology)，找出各個雷達未受上述非氣象回波資訊的最低可用仰角高度，再進行回波資料整合。

(二) 個案簡介

本篇研究針對臺灣常見的兩種天氣型態——颱風與梅雨鋒面，進行預報和校驗分析。總共使用三個個案，分別為南修(NAMTHEUN)颱風(2010 年 08 月 30 日~31 日)、梅雨鋒面(2012 年 06 月 11 日~12 日)與麥德姆(MATMO)颱風(2014 年 07 月 21 日~23 日)。颱風個案當中一個沒有直接影響(未登陸)臺灣陸地的輕度颱風—南修，與另一個結構相對完整，由臺灣東部登陸橫越中央山脈的中度颱風—麥德姆—進行測試與比較。以下為個案簡介。

1. 個案一：南修颱風(2010)

南修颱風於 2010 年 08 月 30 日在臺灣北部海面生成，向西南方緩慢移動，進入臺灣海峽之後減弱為熱帶性低氣壓。中央氣象局在 08 月 30 日 14 時 30 分(UTC)發布海上、陸上颱風警報，並於 08 月 31 日 12 時 30 分(UTC)解除海上、陸上颱風警報，期間由於颱風最大強度僅為輕度颱風，七級暴風半徑約 80 公里，近中心最大風速大約只有 18ms^{-1} ，加上颱風中心並未登陸，因此沒有重大災情發生。不過在這兩天受到颱風中心周圍雨帶影響，為臺灣北部地區帶來近 300mm 左右的

累積雨量，西半部也受部份外圍雨帶移入產生些許降水(圖 3a 和 3b)。

2. 個案二：鋒面系統(2012)

2012 年 6 月 11 日傍晚在華南地區有一道鋒面隨低壓移出，開始往南移動逐漸接近臺灣，使得臺灣附近綜觀環境處於不穩定狀態。其中，此鋒面系統從 11 日 12 時(UTC)開始，有線狀回波從臺灣海峽向南移動臺灣，大約在 14 時(UTC)系統登陸臺灣後，強回波區域在北部地區移動緩慢。在 11 日的累積雨量圖中，除了中午以前山區的對流發展之外，北部地區也因此有一降雨極值分佈區域(圖 3c)。2012 年 6 月 12 日開始，除了延續 11 日晚上北部的線狀回波移入之外，主要系統由中南部外海移入，降水區域逐漸轉向集中於中南部山區(圖 3d)。在兩天之內出現相當驚人的累積雨量，造成臺灣多處有淹水、土石流情況發生。

3. 個案三：麥德姆颱風(2014)

麥德姆颱風於 2014 年 07 月 18 日在關島西南方海面生成，向西北轉北

北西移動，07 月 19 日中央氣象局將其升格為中度颱風，07 月 22 日 16 時(UTC)左右於臺東長濱登陸，20 時(UTC)左右由彰化附近出海，23 日 07 時(UTC)左右從馬祖南方進入福建地區並逐漸轉弱為輕度颱風。中央氣象局在 07 月 21 日 09 時 30 分(UTC)發布海上颱風警報，21 日 18 時 30 分(UTC)發布陸上颱風警報，並於 07 月 23 日 15 時 30 分(UTC)解除海上、陸上颱風警報，期間七級暴風半徑約 200 公里，十級暴風半徑約 80 公里，近中心最大風速高達 38ms^{-1} 。受颱風影響，在 07 月 21 日至 23 日之間全臺各地都有顯著降雨產生，尤其集中於東部地區和中南部山區(圖 3e 和 3f)，造成部份地區鐵路交通中斷，農業損失逾新臺幣 6 億元。

四、結果分析與討論

表 3 為預報策略設定，每個天氣個案事件期間，每 1 小時進行一次 10~360 分鐘的預報。因此雖然僅三個個案分析，但是分別有 23、35 與 46 次的即時預報結果(總樣本數有 104 次的預報)。

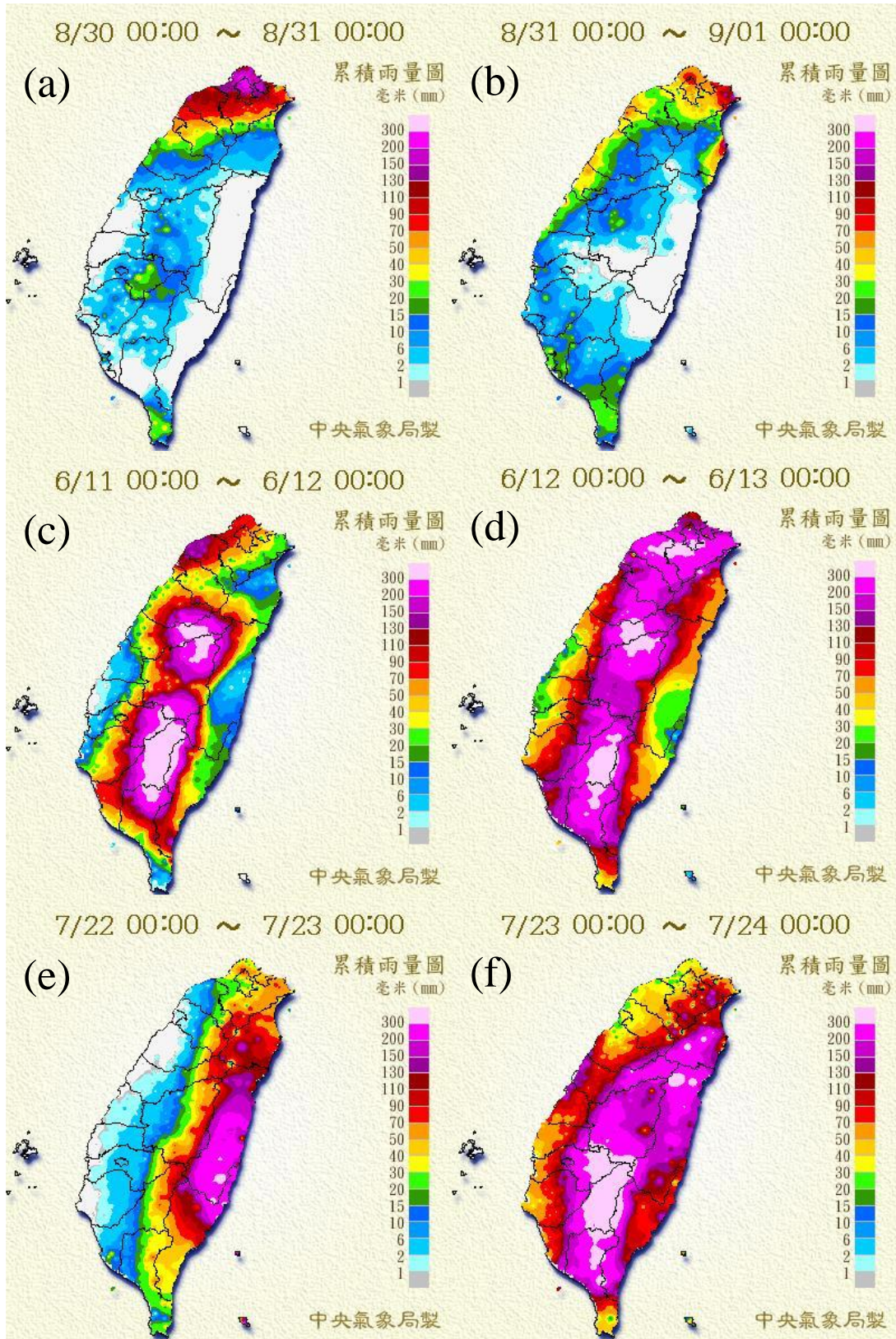


圖 3 中央氣象局提供之: (a) (b) 為 2010 年 08 月 30 日及 31 日(LST)的日累積雨量圖; (c) (d) 為 2012 年 06 月 11 日(LST)及 12 日的日累積雨量圖; (e) (f) 為 2014 年 07 月 22 日及 23 日(LST)的日累積雨量圖。

表 3 預報策略設定列表

預報策略			
個案	南修颱風(2010)	梅雨鋒面(2012)	麥德姆颱風(2014)
預報時間	2010-08-30 14:00 ~ 2010-08-31 12:00(UTC)	2012-06-11 08:00~ 2012-06-12 18:00(UTC)	2014-07-21 18:00~ 2014-07-23 15:00 (UTC)
預報更新時間 (分鐘)	60		
預報期間時間 解析度(分鐘)	10		
預報期間(分 鐘)	10~360		
預報次數	23	35	46

接下來結果之分析與討論將分為(一) VET 參數敏感度測試；(二)外延預報特性；(三) VET 移動場與地形作用與(四)定量降水即時預報評估，四個部分進行。

(一) VET 參數敏感度測試

為了檢視 MAPLE 系統當中的 VET 參數組合對於臺灣地區主要的兩種天氣型態(梅雨鋒面和颱風系統)預報結果變化，本研究針對「時間間隔」與「向量密度」的調整進行四組敏感度實驗，分別為 A 組: 20 分鐘/24x24 個向量、B 組: 20 分鐘/48x48 個向量、C 組: 30 分鐘/24x24 個向量以及 D 組 30 分鐘/48x48 個向量(預設值)，詳細設定請參考 VET 參數設定列表(表 1)。本章節使用的預報和校驗資料皆為最大回波，詳細校驗範圍請參考圖 2 說明。

首先參考 Germann and Zawadzki (2002) 研究中之餘弦相似性 (Cosine Similarity) 進行分析。餘弦相似度的公式與式 (7) 類似，唯一的不同在不扣除資料樣本的平均數，此法適合於檢驗像雷達回波在空間上有強弱且不規則分布之變數。圖 4 為三個個案，有雷達回波時(門檻為 10dBZ 以上)，使用四種 VET 參數設定的預報平均結果。當此係數降至 1/e 時，則視為預報和觀測回波的空間分佈已無相似性的參考價值，由此三個個案預報 6 小時的平均結果來看，都還可維持在 1/e 的量值之上。以此係數高於 0.6 視為預報和觀測回波的空間分佈有高度相似為依據，整體而言，個案一(圖 4a)大約在預報 2.5 小時，個案二(圖 4b)大約在預報 3 小時，而個案三(圖 4c)到預報 3.5 小時

以內，三者都有不錯的表現。而在四組敏感度實驗比較中，前兩個個案都有相似的結果。預報 1.5 小時(90 分鐘)內，四組實驗結果均相當一致，1.5 小時之後才開始略有差異，其中 C 和 D 實驗結果略優於 A 和 B 實驗，而 C 與 D 實驗之間幾乎沒有差異。而個案三的情況，在預報 1.5 小時(90 分鐘)內，A 和 B 實驗結果略優於 C 和 D 實驗，之後預報期間的表現能力則以 C 實驗的結果稍為優於其他實驗。

接著是絕對校驗法的分析，使用 10dBZ 和 35dBZ 視為所有降水和強降水的門檻值。三個個案的 ETS 在所有降水的預報表現(圖 5a、5c、5e)，1 小時約為 0.4~0.5 左右，3 小時下降至 0.2~0.3 左右；強降水的結果(圖 5b、5d、5f)，1 小時只來到 0.2 左右的分數呈現。而在四組敏感度實驗比較中，ETS 結果與餘弦相似性十分雷同，前兩個個案預報 1.5 小時內，四組實驗結果幾乎無差異，1.5 小時後 C 和 D 實驗結果相似且略優於 A 和 B 實驗；個案三則是在預報 1.5 小時後，以 C 實驗的結果略優於其他實驗。最後在強降水的測試中，除了個案一的表現與前述結果相似之外，另外兩個個案在整個預報期間的四組敏感度實驗幾乎可視為沒有差別。

綜合上述分析後可發現，針對兩種 VET 參數——觀測資料時間間隔及尺度猜測程序之向量密度，所搭配的四組敏感度測試結果，並沒有顯著差別，與 Bellon et al.(2010)的研究中，使用韓國半島四個月(2006 年 7 月和 11 月以及 2007 年 2 月和 5 月)的降水事件，進行多種 VET 參數調整的預報及校驗分析結果十分相似。而根據目前三個個案在臺灣地區之整體表現，採用 D 實驗為最佳設定進行接下來的分析討論。

(二) 外延預報特性

此節分別選取鋒面(個案 2)與麥德姆颱風(個案 3)，在不同天氣型態其主要降雨帶影響臺灣陸地時間的預報結果，定性分析 MAPLE 系統在外延預報時的特點與表現。

在 2012 年 6 月的梅雨鋒面事件(個案二)中，選取 11 日 16 時(UTC)的最大回波觀測(圖 6 a)與利用回波所得之 VET 移動向量與速度(圖 6 b)進行分析討論。移動場在臺灣地區的特徵，呈現出鋒面系統由西向東移動的平移特性。除此之外，移動場本身並不是一個常數，在空間上呈現出不同的平移方向與速度，以此時段為例，當回波主要分布在北臺灣的區域時，臺灣東北區有較快的移動速度(約 $18-20 \text{ ms}^{-1}$)，而在臺灣西半部的移速則較為緩慢(約

10-12 ms^{-1})。此結果表示 MAPLE 系統在利用回波資訊獲得移動速度時，可以掌握天氣系統不同區域(如層狀或對流區)當中其發展與移動速度之不同。比較雷達網聯觀測與一小時即時預報的結果(圖 6c 與 6d)可以發現，觀測與預報無論在位置或者強度上，有不錯的一致性。圖 7 為 11 日 16 時(UTC)開始的 1~3 小時之觀測和預報累積降水分佈圖。第 1 個小時的降水預報，無論在位置與強度上，與觀測的結果皆相當一致。而第 2 個小時的結果，降水位置的分布，整體而言仍與觀測一致，而強度雖然有掌握到，但是北部的預報累積降水極值區域向東偏移；然而因受臺灣複雜地形的因素，在中南部山區的持續對流降水的表現並不理想。第 3 個小時的預報結果，降水的型態定性掌握類似於觀測的分布，但是無論北部或南部，其降水強度皆低於實際觀測的結果。

2014 年 7 月麥德姆颱風(個案三)中選取颱風中心即將登陸臺東的 22 日 15 時(UTC)所得之預報結果進行討論。由觀測回波(圖 8a)與 VET 移動場(圖 8b)的搭配可以看出，VET 在颱風中心與

其形成的雨帶附近，呈現出逆時針旋轉的移動場特性，與颱風的環流結構相似。此外，在不同區域其移動速度有強弱的分別。以這個時段當中，移動場在臺灣東北部的速度較強，而在臺灣中、南部的地區，移動速度明顯較小。此結果同樣說明 VET 此天氣系統當中，在不同區域的發展(如颱風當中不同雨帶)，可以反應在移動向量的分布上。比較雷達網聯觀測與一小時即時預報的結果(圖 8c 與 8d)可以發現，觀測與預報在颱風雨帶位置與強度上，亦有相當好的吻合。檢驗陸上觀測和 1-3 小時即時預報結果在累積降水分佈之部份(圖 9)，定性上全臺降水分布的位置與強度，與觀測比對有相當好的結果。而隨著預報時間的增加，第 2、第 3 小時之後，預報降水向西越過中央山脈，降水極值區域有較大偏差，使得降水空間分佈與觀測相差較大。

綜合上述定性的比對觀測和預報降水情況，顯示雷達外延的技術，對於綜觀尺度至中尺度天氣系統的預報在一至兩小時內有不錯的表現。

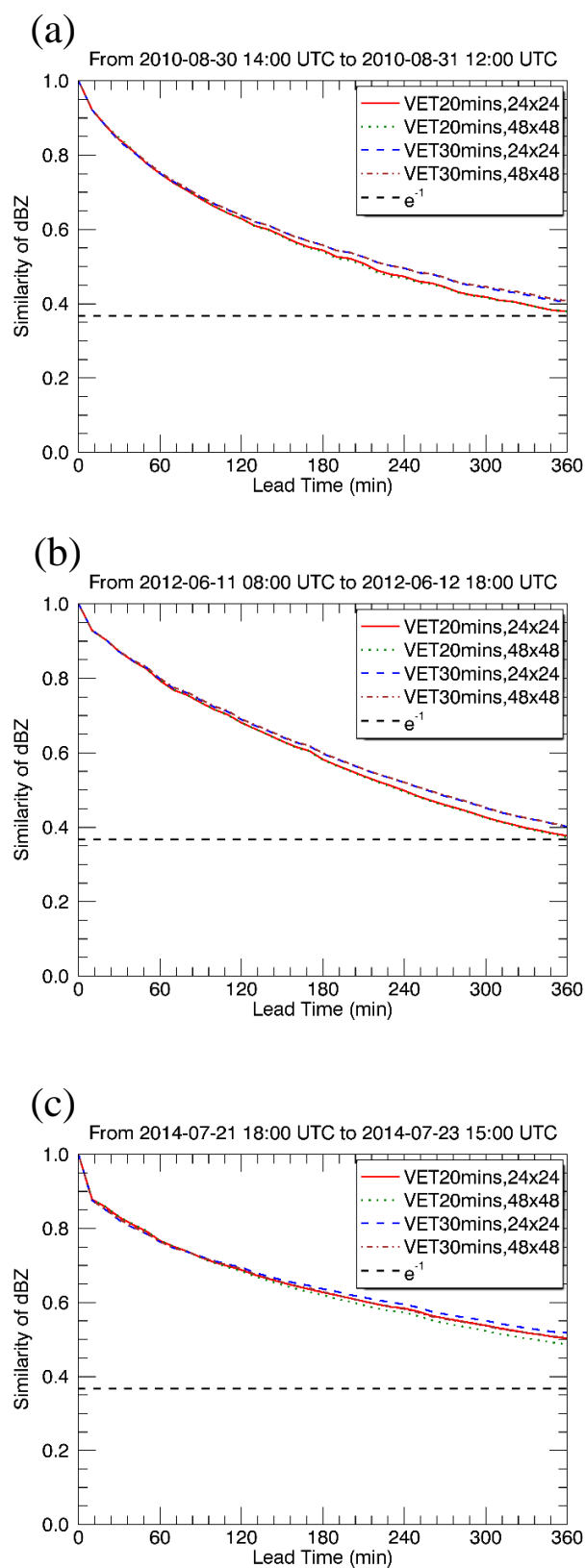


圖 4 使用四種 VET 參數設定的預報平均結果進行餘弦相似性之校驗，紅、綠、藍及棕線段表示 A、B、C 及 D 實驗設定，黑色虛線代表 $1/e$ 量值。(a)個案一；(b)個案二；(c)個案三。

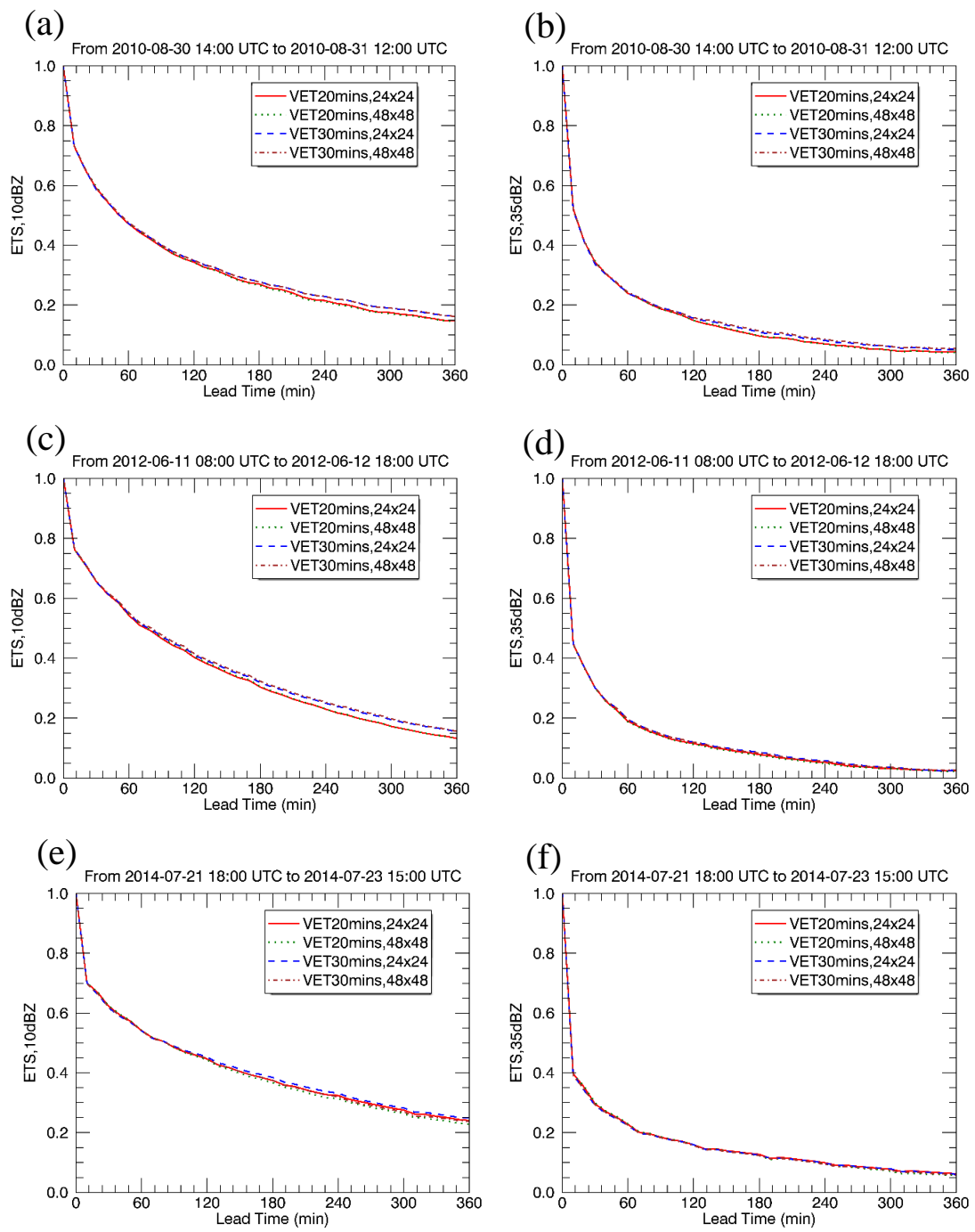


圖 5 使用四種 VET 參數設定的預報平均結果進行 ETS 之校驗，降水門檻值分別為 10dBZ 和 35dBZ，紅、綠、藍及棕線段表示 A、B、C 及 D 實驗設定。(a)和(b)個案一；(c)和(d)個案二；(e)和(f)個案三。

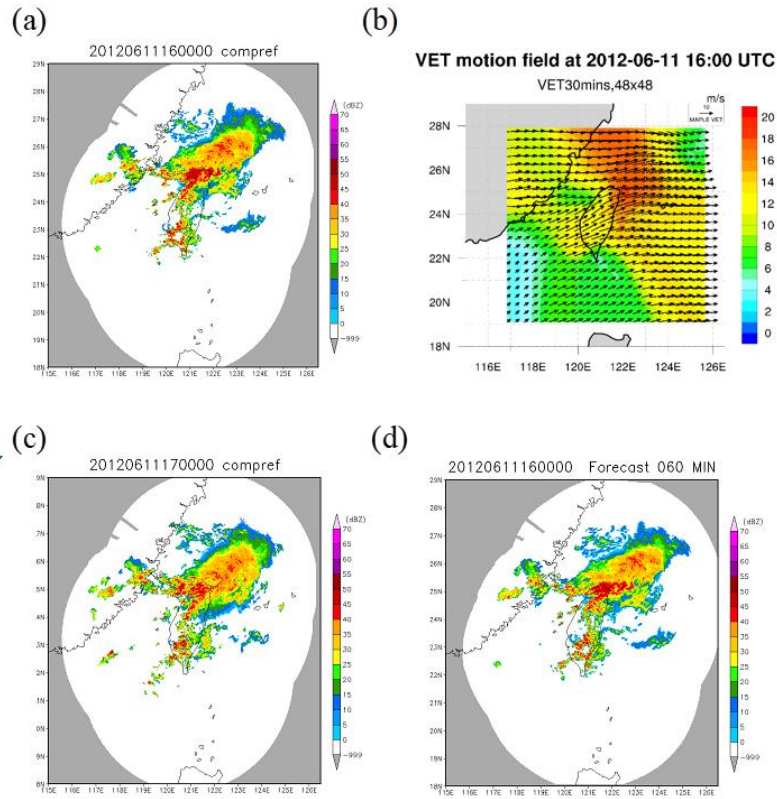


圖 6 2012 年 06 月 11 日 (a) 1600 UTC 觀測回波; (b) 1600 UTC VET 移動場 (移動向量以間隔呈現 24x24); (c) 1700 UTC 觀測回波; (d) VET 參數使用預設值 D 實驗，進行預報一小時後，在 1700 UTC 的最大回波圖。

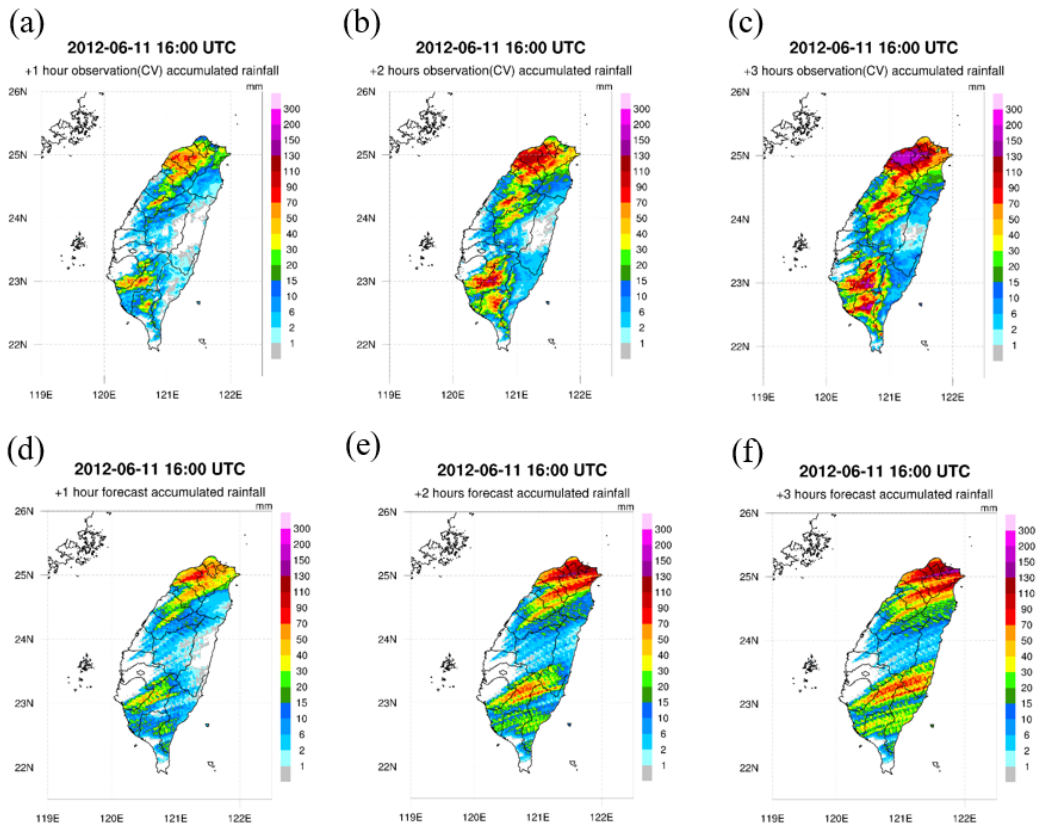


圖 7 2012 年 06 月 11 日 16 時(UTC) (a)-(c)觀測 1 至 3 小時的累積降雨量；(d)-(e)預報一至三小時的累積降雨量。

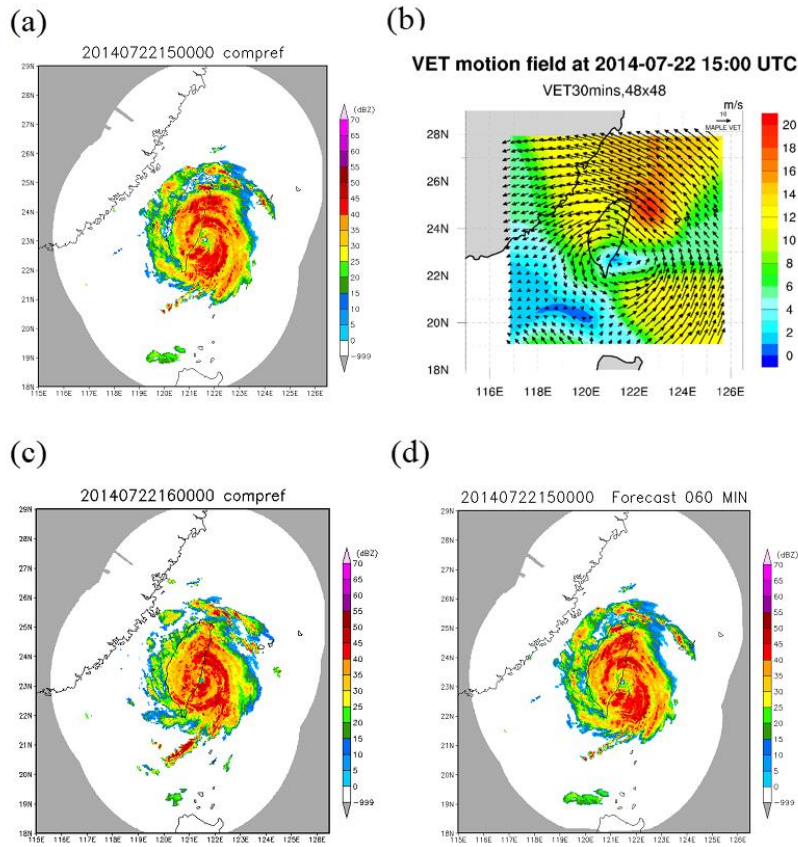


圖 8 同圖 6，但時間為 2014 年 07 月 22 日。

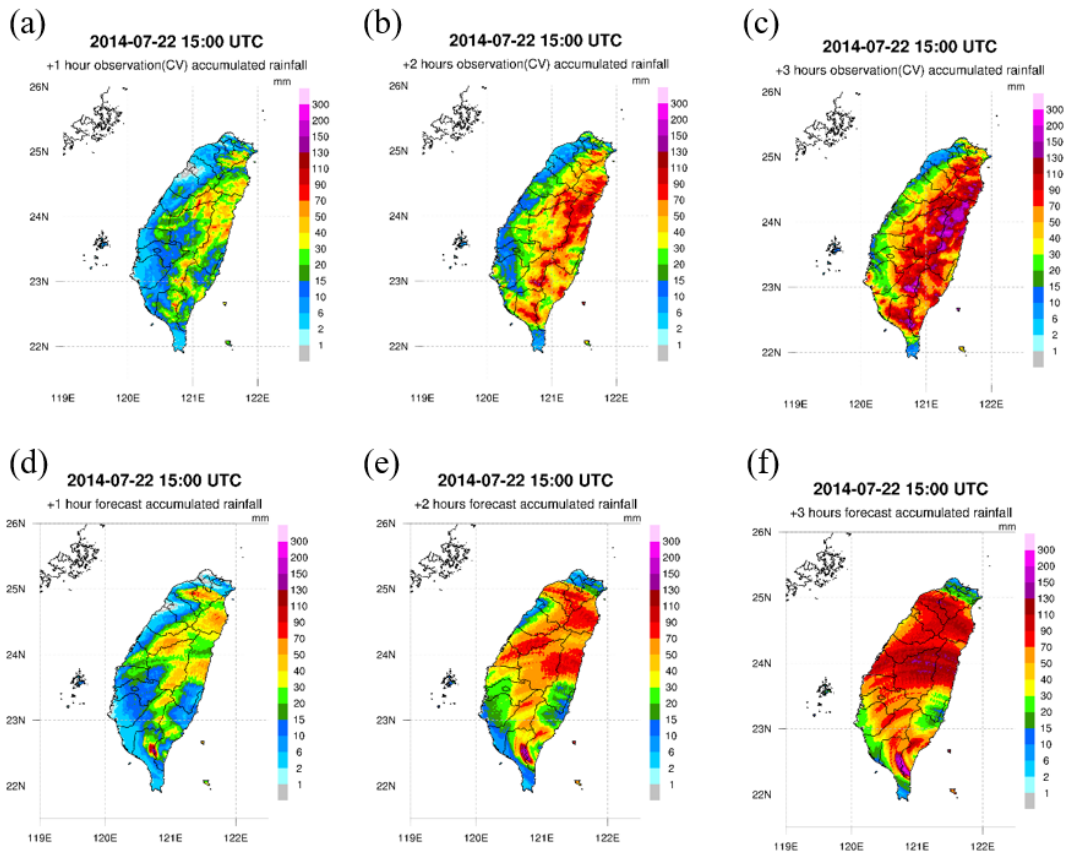


圖 9 同圖 7，但時間為 2014 年 07 月 22 日 15 時(UTC)。

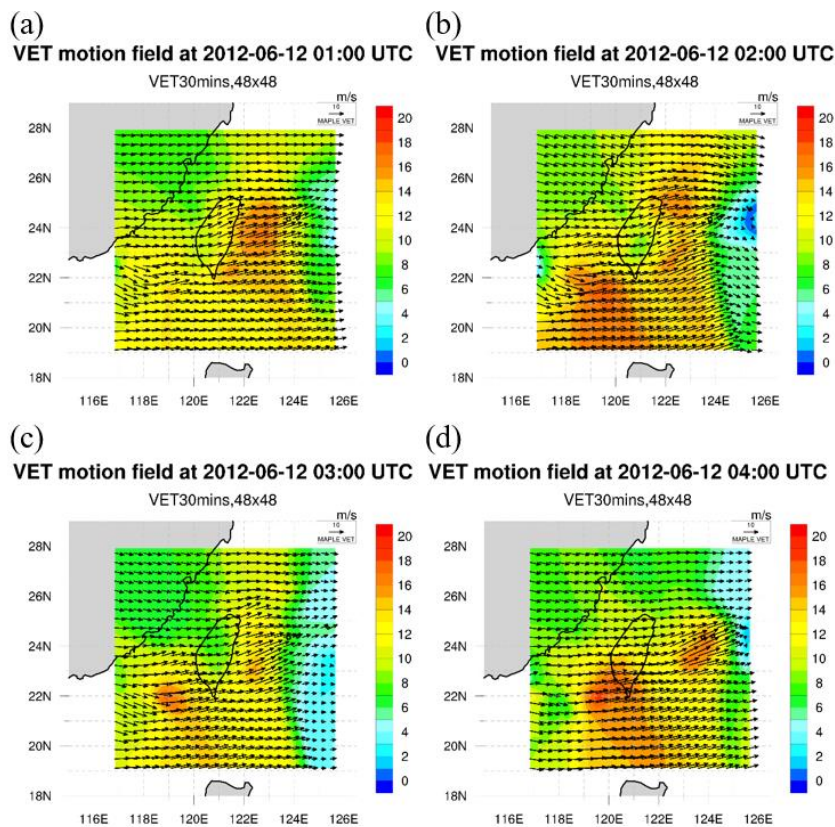


圖 10 2012 年 06 月 12 日(a)01 時、(b)02 時、(c)03 時及(d)04 時(UTC)的 VET 移動場。採用 VET 參數預設值(D 實驗)進行計算，移動向量僅以間隔呈現(12x12)。

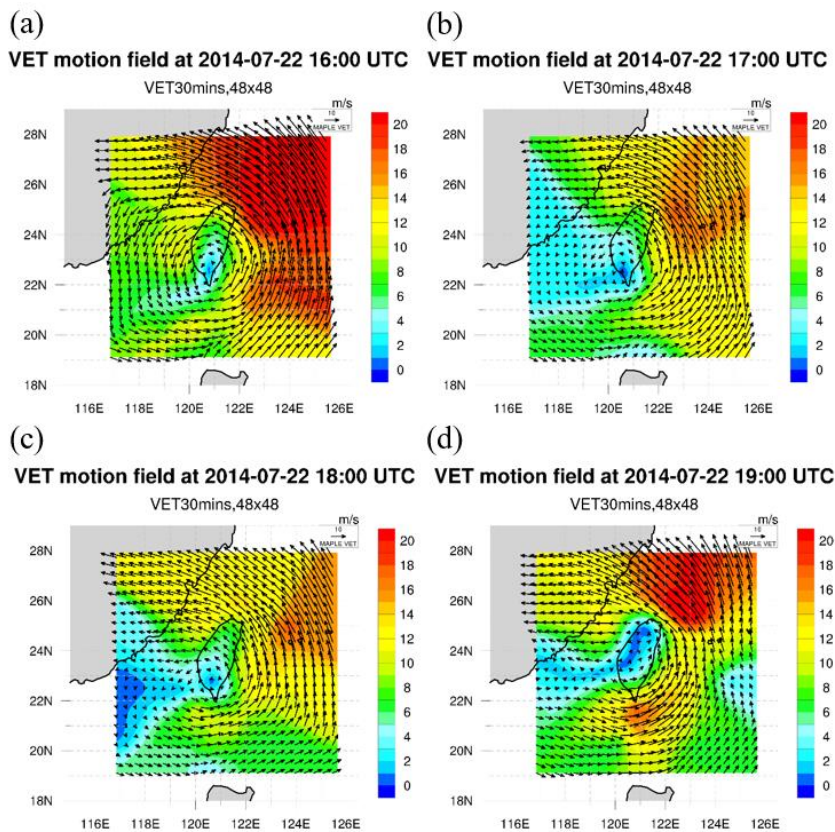


圖 11 同圖 10，但時間為 2014 年 07 月 22 日。

(三) VET 移動場與地形作用

當天氣系統通過臺灣陡峭複雜的地形環境時，往往使其移動或發展受山脈阻擋，而有減緩或停滯的現象產生。本節進一步檢驗 VET 移動場是否可以呈現此特性。

在以平移為主的鋒面事件(個案二)前期，當線狀回波進入臺灣西北部陸地期間，出現近似停滯的狀況(12日01時至04時)，在 VET 移動場(圖10)之中，臺灣西北部區域的移動速度有明顯減弱的現象，顯示 VET 確實有反應天氣系統停留的情形。而探討以旋轉為主的颱風個案時，圖11為麥德姆颱風(個案三)中心由東向西穿越臺灣期間，VET 移動場的演變圖。除了颱風中心附近回波移動的幅度較不明顯造成移速偏小之外，可觀察到移速分佈情況沿著臺灣北、東、南部海陸交界，產生明顯的梯度差異，在臺灣上空以及西部地區的移動速度，大多較周圍呈現偏低的現象。

雖然 MAPLE 即時預報系統並未包含如同數值模式能夠解析地形能力的特點，但透過回波在時空上的移動變化，所獲得的移動向量(VET)，確實能反應出天氣系統進入陸地後受到地形影響而減速的特徵，使 MAPLE 系統短時間內在地形上的降水預報維持一定

水準。然而，值得注意的是，圖7與圖9的結果亦顯示，利用 MAPLE 系統進行降水預報時，由於 MAPLE 所掌握到的移動場，主要以中尺度環流為主。因此，儘管移動場能反應受地形阻擋之影響，但無法適當掌握對流胞之滯留情形，進而產生不合理的對流過山現象。此項缺失在2小時的降水預報以及天氣系統受中央山脈地形阻擋時，更為顯著。

(四) 定量降水即時預報(QPN)評估

透過前兩節定性的分析外延預報的特性後，本章節將分別統整各個個案期間的平均預報結果，並使用第二章描述之檢驗方法，定量評估 MAPLE 系統的預報能力。而此章節在評估臺灣區域陸地上之定量降水即時預報(QPN)的表現時，採用式(12)將回波轉為降雨率，再計算預報和觀測的累積降水量進行比較，詳細校驗範圍請參考圖2說明。

圖12為計算 SCC 的結果，以0.5~0.6以上，視為有不錯的空間降水預報掌握。在個案一(圖12a)，降水預報2小時 SCC 仍有0.6的相關性；而個案二(圖12b)與個案三(圖12c)在2小時預報 SCC 可維持在0.5。圖13為計算 RMSE 的結果，在此參考方等人(2017)研究中，使用持續法(persistence)當作參考標準。

持續法是假設天氣系統在短時間內不隨時間變化，將過去觀測當作未來預報。藉此方法作為基準來檢視 MAPLE 系統在即時預報的能力。圖 13 的結果顯示：三個個案在第一個小時內的 RMSE 差異不大，MAPLE 僅些微優於持續法。然而，在 2 - 4 小時之預報時間當中，MAPLE 系統逐漸展現其優勢，降水預報誤差明顯小於持續法。即時預報 2 - 4 小時的結果，MAPLE 對於累積降水的表現比持續法至少提升 20 - 25%，清楚呈現 MAPLE 系統在即時預報上的能力。從 Bias 結果來看，個案一(圖 14a)的 30~50mm 降水門檻以上普遍為低估預報，個案二(圖 14b)前 2 小時沒有明顯偏差，之後主要為低估預報，個案三(圖 14c)第 1 小時預報略有高估，之後皆為嚴重的預報高估現象。

從 Bias 的結果隨個案以及預報時間來看，三個個案並沒有規律性，是由於預報期間無法完整考慮降水系統的生成與消散作用有關。在 ETS 分數表現上，個案一(圖 15a)前 3 小時的結果，無論累積雨量大或小，其平均分數都有 0.3 左右，一直到第四小時分數才顯著的降低。而個案二(圖 15b)，ETS 隨著預報時間增加而降低；此外，在同一預報時間當中，隨著累積雨量增加，ETS 略有下降的趨勢。個案三(圖 15c)整體分數分佈情況則與個案二的結果類似。

綜合上述三個個案在不同較驗分數上的結果顯示，MAPLE 系統在臺灣陸地區域對於颱風和梅雨鋒面的降水預報能力大約能維持在 2~3 小時。

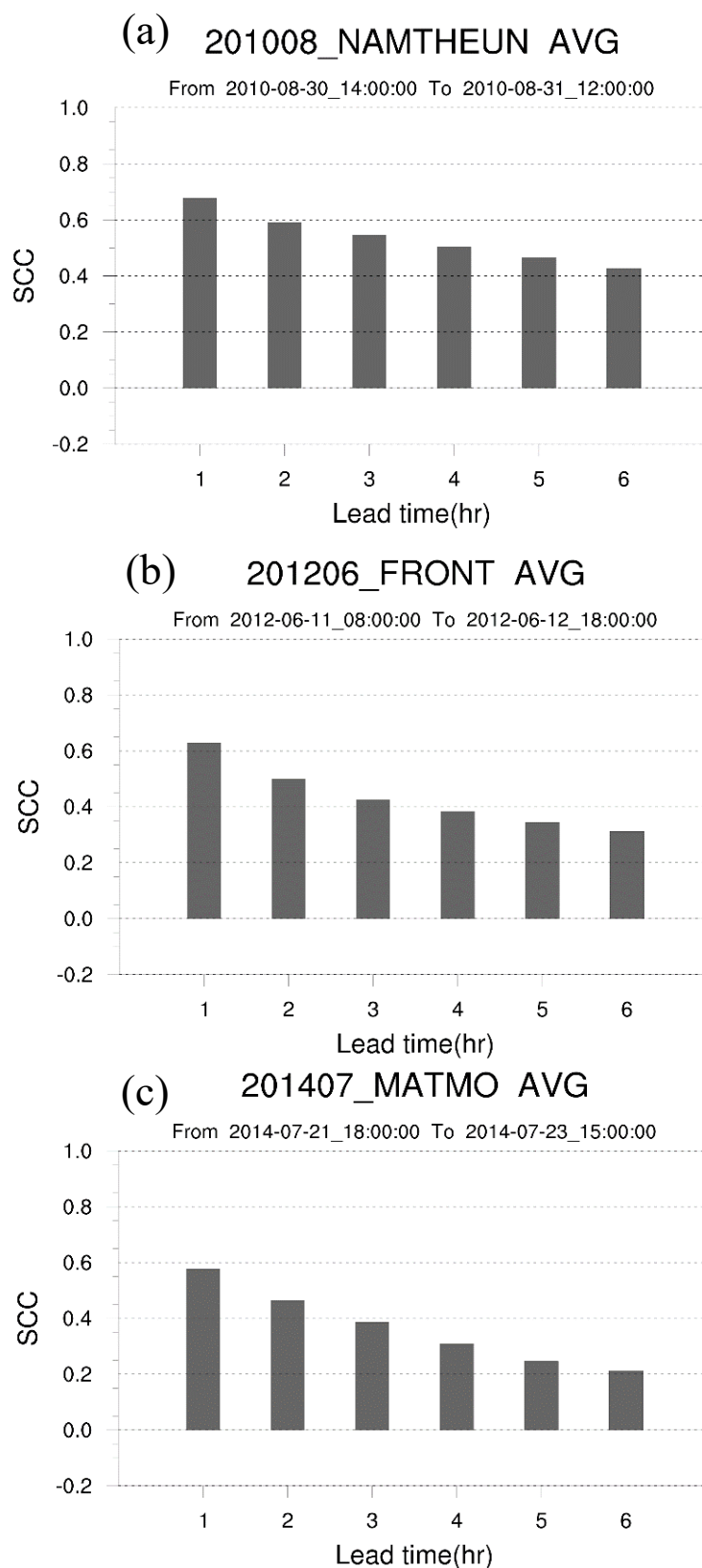


圖 12 三個個案預報 1~6 小時的累積降水之平均 SCC。(a)個案一，共 23 次預報；(b)個案二，共 35 次預報；(c)個案三，共 46 次預報。

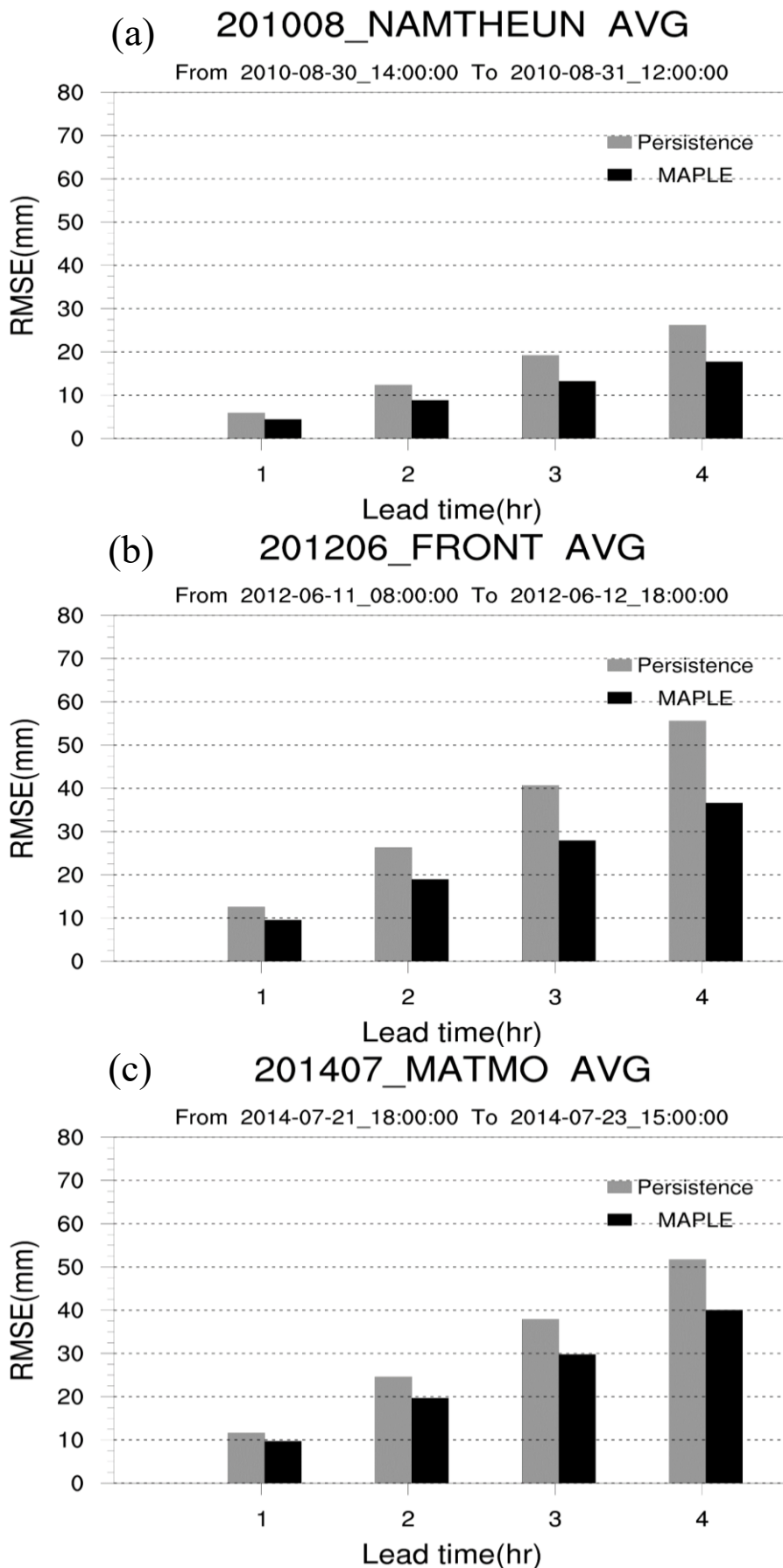


圖 13 同圖 12，但為 MAPLE 與持續法預報 1~4 小時的累積降水之平均 RMSE。

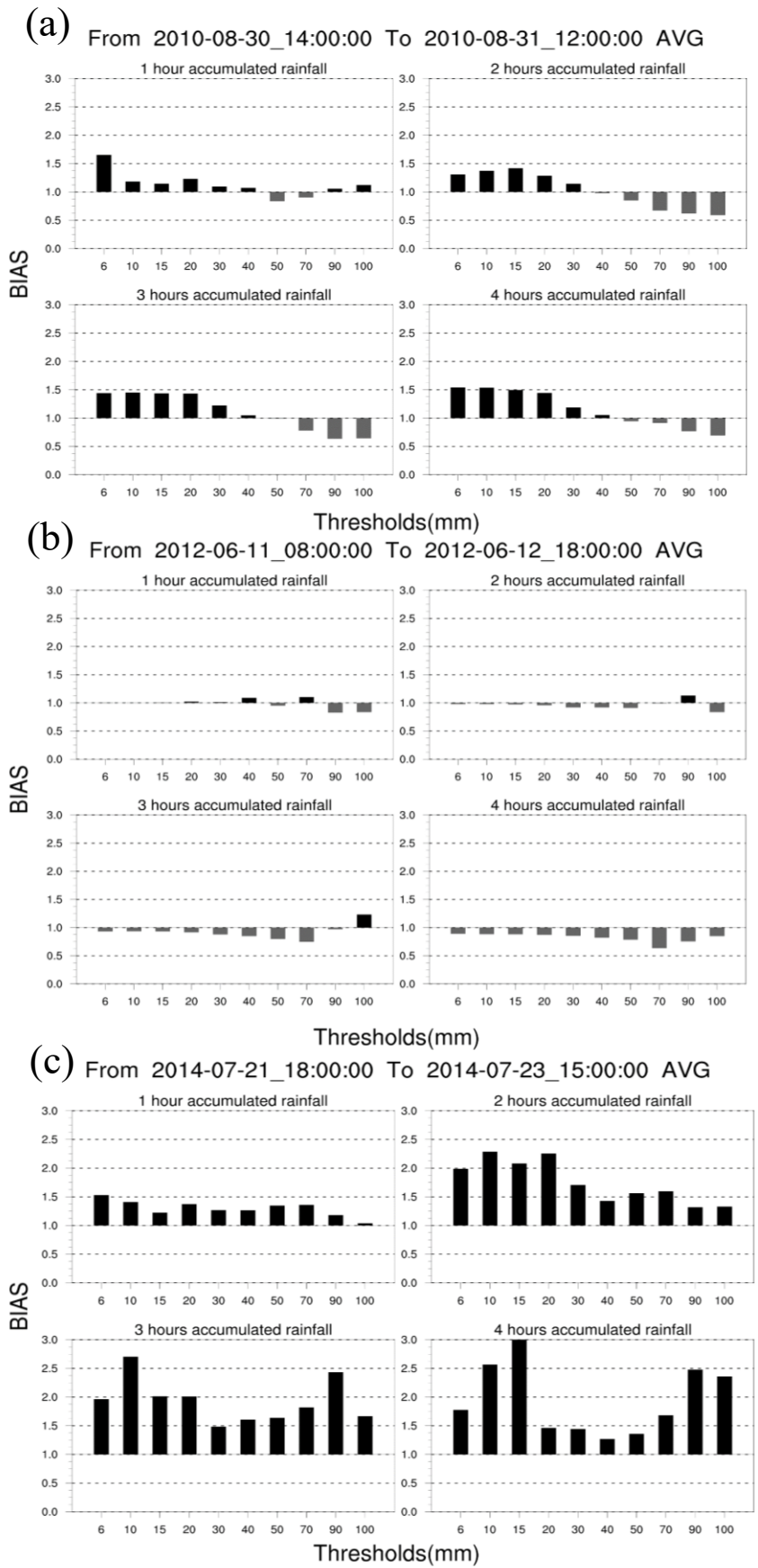


圖 14 同圖 12，但縱座標為累積降水隨門檻值變化之平均 Bias。

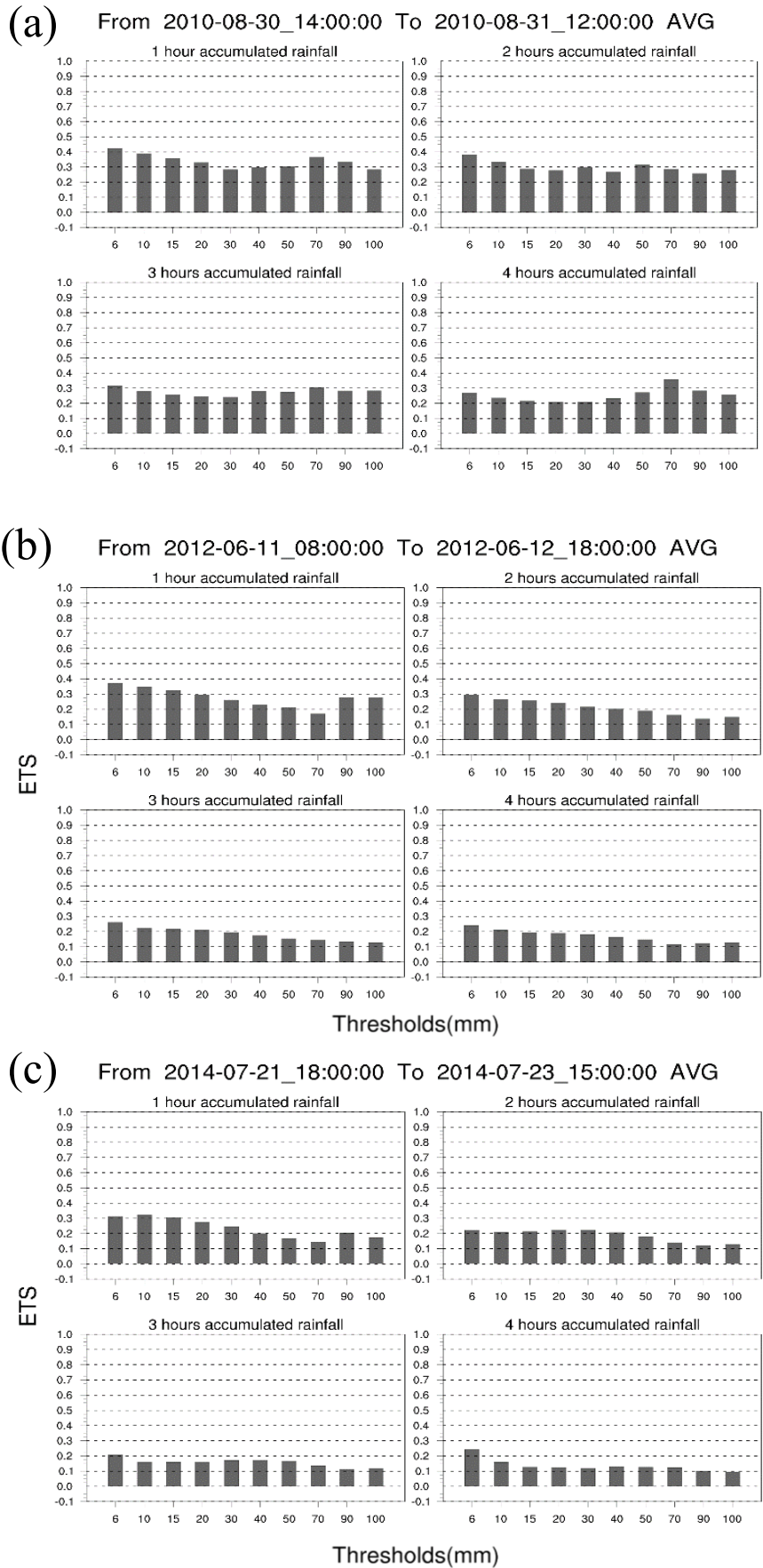


圖 15 同圖 12，但縱座標為累積降水隨門檻值變化之平均 ETS。

五、結論與未來展望

(一) 結論

本研究首次應用加拿大麥基爾大學雷達氣象團隊所開發的 MAPLE 即時預報系統，針對臺灣地區常見的兩類天氣系統——梅雨鋒面和颱風，進行即時預報能力之評估。個案選擇包含一個結合中尺度對流系統(MCS)的典型梅雨鋒面，一個沒有直接通過臺灣的輕度颱風以及一個橫越臺灣中央山脈的中度颱風。透過 VET 參數敏感度測試、外延預報特性、VET 移動場與地形作用與定量降水即時預報(QPN) 評估四個部分討論分析後，歸納出以下幾點結論：

1. 考慮到不同的 VET 參數設定會影響移動場分佈並產生不同的預報結果，因此藉由敏感度測試以瞭解其中的差異，但是由比較結果顯示，四種 VET 參數設定實驗之預報結果並沒有顯著差異。同時檢視臺灣附近區域的回波校驗推估 MAPLE 系統在 0-3 小時內具有不錯的掌握能力。
2. 在 0-3 小時內，使用最接近大氣真實狀態的觀測降水資訊，搭配 VET 移動場進行外延預報，MAPLE 系統能提供良好的預報結果做為判

斷降水的重要參考資訊。當隨著預報時間的拉長，外延預報技術逐漸下滑。此外，由於複雜地形之影響，在臺灣南北不同區域之預報時間與預報能力之表現可能不盡相同。

3. 檢驗系統移入臺灣陸地時 VET 的變化，其結果呈現出移動速度下降的情況。顯示雖然僅用雷達回波外延的技術，仍可以反應出地形阻擋的效應。故利用 MAPLE 系統進行在地形上的降水預報時，其外延速率能夠調整，使得天氣系統在登陸後仍維持一定預報能力。
4. 針對臺灣陸地上進行定量降水極時預報(QPN)的校驗時，綜合三個個案的平均預報表現，MAPLE 系統在臺灣陸地區域對於颱風和梅雨鋒面的降水預報能力大約可達 2~3 小時。然而 3 小時後的降水預報表現顯著下滑，其主要原因在於此技術尚未考量天氣系統的生成和消散機制。

(二) 未來展望

以 MAPLE 即時預報系統在臺灣的初步測試顯示，降水預報依照不同天氣型態，推估雷達外延預報約有 2-3 小時的可信度。為了更加了解此系統的特性和能力，將延續以下研究工作：

1. 將回波外延的結果客觀地和地面雨量站進行測試比較。
2. 蒐集更多天氣個案進行雷達外延技術，統計上評估即時預報的表現。更進一步針對小範圍或區域性的天氣系統(如午後對流)進行測試與了解。
3. 與複雜的天氣數值預報模式進行比較，驗證在臺灣複雜地形下，兩者預報能力隨時間的變化趨勢。進一步評估雷達外延預報技術在臺灣可以彌補數值模式預報前期因起轉過程(spin-up process)的時間有多長。
4. 將雷達外延技術與複雜的天氣數值預報系統結合，以期加強外延預報系統對於天氣系統受到地形效應影響，以及無法推估天氣系統生長與消滅而造成預報能力後期急速下降的缺失。
5. 目前針對即時預報(Nowcasting)如何掌握天氣系統之發展，許多學者加入系集(ensemble)的概念，此方法日後也會進行評估與校驗其可行性之結果。

致謝

感謝兩位審查委員提供寶貴的意見，使本文能夠更加完善。感謝中央氣象局提供劇烈天氣監測系統

(QPESUMS)之雷達回波資料，使研究能順利進行。本研究由行政院科技部研究計畫 MOST 106-2625-M-008-014 經費資助。

參考文獻

張惠玲、吳佳蓉、林允才、唐玉霜、黃葳芃、陳嘉榮，2015：臺灣自動即時預報系統(TANC)之對流啟始預報評估。中央氣象局 104 年天氣分析與預報研討會。

方偉庭、王忠斌、張保亮，2017：雷達定量降水預報外延技術之評估與改進。中央氣象局 106 年天氣分析與預報研討會。

Atencia, A. and I. Zawadzki, 2014: A comparison of two techniques for generating nowcasting ensembles. part i: lagrangian ensemble technique. *Mon. Wea. Rev.*, **142**(11), 4036-4052.

Bellon, A., I. Zawadzki, A. Kilambi, H. C. Lee, Y. H. Lee and G. Lee, 2010: McGill algorithm for precipitation nowcasting by lagrangian extrapolation (MAPLE) applied to the South Korean radar network. Part I: Sensitivity studies of the Variational Echo Tracking (VET) technique. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**(3), 369-381.

- Bowler, N. E., C. E. Pierce and A. W. Seed, 2006: STEPS: A probabilistic precipitation forecasting scheme which merges an extrapolation nowcast with downscaled NWP. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**(620), 2127-2155.
- Chan, J. C. L., and W. M. Gray, 1982: Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 1354 - 1374.
- Chang, P. L., P. F. Lin, B. J. D. Jou and J. Zhang, 2009: An application of reflectivity climatology in constructing radar hybrid scans over complex terrain. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **26**(7), 1315-1327.
- Dong, K., and C. J. Neumann, 1986: The relationship between tropical cyclone motion and environmental geostrophic flows. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 115 - 122.
- Golding, B.W., 1998. NIMROD: A system for generating automated very short range forecasts. *Meteor. Applic.*, **5**, 1 - 16.
- Gourley, J. J., R. A. Maddox, D. W. Burgess, and K. W. Howard, 2002: An exploratory multisensory technique for quantitative estimation of stratiform rainfall. *J. Hydrometeor.*, **3**, 166-180.
- 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**(12), 2859-2873.
- Germann, U. and I. Zawadzki, 2004: Scale dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part II: Probability forecasts. *J. Appl. Meteorol.*, **43**(1), 74-89.
- Germann, U., I. Zawadzki and B. Turner, 2006: Predictability of precipitation from continental radar images. Part IV: Limits to prediction. *J. Atmos. Sci.*, **63**(8), 2092-2108.
- Laroche, S. and I. Zawadzki, 1994: A variational analysis method for retrieval of 3-Dimensional wind-field from single Doppler radar data. *J. Atmos. Sci.*, **51**(18), 2664-2682.
- Laroche, S. and I. Zawadzki, 1995: Retrievals of horizontal winds from single-Doppler clear-air data by methods of cross-correlation and

- variational analysis. *J Atmos. Ocean. Tech.*, **12**(4), 721-738.
- Lee, H. C., Y. H. Lee, J. C. Ha, D. E. Chang, A. Bellon, I. Zawadzki and G. Lee, 2010: McGill algorithm for precipitation nowcasting by lagrangian extrapolation (MAPLE) applied to the South Korean radar network. Part II: Real-time verification for the summer season. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**(3), 383-391.
- Li, P. W. and E. S. T. Lai, 2004: Short-range quantitative precipitation forecasting in Hong Kong. *J. Hydrolmeteor.*, **288**(1-2), 189-209.
- Lin, C., S. Vasic, A. Kilambi, B. Turner and I. Zawadzki, 2005: Precipitation forecast skill of numerical weather prediction models and radar nowcasts. *Geophys. Res. Lett.*, **32**(14).
- Mandapaka, P. V., U. Germann, L. Panziera and A. Hering, 2012: Can lagrangian extrapolation of radar fields be used for precipitation nowcasting over complex Alpine orography? *Wea. Forecasting.*, **27**(1), 28-49.
- Mueller, C., T. Saxen, R. Roberts, J. Wilson, T. Betancourt, S. Dettling, N. Oien and J. Yee, 2003: NCAR Auto-Nowcast System. *Wea. Forecasting.*, **18**(4), 545-561.
- Navon, I. M., and D. M. Leger, 1987: Conjugate-gradient method for large-scale minimization in meteorology. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1479 - 1502.
- Radhakrishna, B., I. Zawadzki and F. Fabry, 2012: Predictability of Precipitation from Continental Radar Images. Part V: Growth and Decay. *J. Atmos. Sci.*, **69**(11), 3336-3349.
- Rinehart, R., and E. Garvey, 1978: Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. *Nature*, **273**, 287 - 289.
- Roy, C. and R. Kovordanyi, 2012: Tropical cyclone track forecasting techniques - A review. *Atmos. Res.*, **104**, 40-69.
- Seed, A. W., 2003: A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting. *J. Appl. Meteorol.*, **42**(3), 381-388.
- Tsonis, A., and G. Austin, 1981: An evaluation of extrapolation techniques for the short-term prediction of rain amounts. *Atmos. Ocean*, **19**, 54 - 65.

- Turner, B. J., I. Zawadzki and U. Germann, 2004: Predictability of precipitation from continental radar images. Part III: Operational nowcasting implementation (MAPLE). *J. Appl. Meteorol.*, **43**(2), 231-248.
- Tuttle, J. D. and G. B. Foote, 1990: Determination of the boundary-layer. *J. Appl. Meteorol.*, **6**(2), 244-253.
- Wang, C. C., B. K. Chiou, G. T. J. Chen, H. C. Kuo and C. H. Liu, 2016: A numerical study of back-building process in a quasistationary rainband with extreme rainfall over northern Taiwan during 11-12 June 2012. *Atmos. Chem. Phys.*, **16**(18), 12359-12382.
- Wilson, J. W., N. A. Crook, C. K. Mueller, J. Z. Sun and M. Dixon, 1998: Nowcasting thunderstorms: A status report. *B. Am. Meteorol. Soc.*, **79**(10), 2079-2099.
- air-flow from a single Doppler radar. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **7**(2), 218-232.
- Velden, C. S. and L. M. Leslie, 1991: The Basic Relationship between Tropical Cyclone Intensity and the Depth of the Environmental Steering Layer in the Australian Region. *Wea. Forecasting.*,
- Xin, L. Y., G. Reuter and B. Larochelle, 1997: Reflectivity-rain rate relationships for convective rainshowers in Edmonton - Research note. *Atmos. Ocean*, **35**(4), 513-521.
- Zhang, J., K. Howard, P.-L. Chang, P. T.-K. Chiu, C.-R. Chen, C. Langston, W.-W. Xia, B. Kaney, and P.-F. Lin, 2008: High-resolution QPE system for Taiwan, data assimilation for atmospheric, oceanic, and hydrologic applications. S. K. Park, L. Xu, Ed(s), Springer-Verlag, 147 - 162.

Feasibility Assessment of Applying Variational Radar Echo Tracking Method over Complex Terrain in Taiwan

Jun-Wei Pan¹, Kao-Shen Chung¹, Hsin-Hung Lin², Tai-Chi Chen Wang¹, I-An Yao¹

¹ Department of Atmospheric Sciences, National Central University, Taiwan

² Meteorology Division, National Science and Technology Center for Disaster Reduction

(manuscript received 30 November 2017 ; in final form 26 April 2018)

Abstract

The nowcasting system, McGill Algorithm for Precipitation nowcasting using Lagrangian Extrapolation (MAPLE), is used to examine very short-term forecast of precipitation over Taiwan area in this study. There are two components in the MAPLE system: First, the motion field of precipitation is determined by Variational Echo Tracking (VET) technique. Second, a radar map is advected by means of a semi-Lagrangian backward advection scheme to be a precipitation forecast. By using composite radar data from the Central Weather Bureau (CWB), the cases from typhoon and Mei-Yu front are investigated in this study.

At first, sensitivity tests determine the best setting of VET parameters for nowcast over Taiwan area. Then the features of Quantitative Precipitation Nowcasting after running the MAPLE are investigated. The similarity of observed and predicted reflectivity can last for couple hours. While examining the motion vector of VET, it shows that the speed decreases if the weather system approaches to Taiwan. This indicates that the extrapolation skill can reflect the terrain effect. By examining of different forecast skill, the MAPLE system is able to perform well around 2 - 3 hour forecast lead time in general. Compared with the persistence method, the error of precipitation forecasting has obviously improved. However, after 3 hour, the scores of forecast skill decrease significantly due to lack of growth and decay mechanism from movement of radar echoes. Over all, the nowcasting system can provide 0-3 hours precipitation information when the complex numerical model is under 'spin-up' process.

Keywords: Nowcasting, radar reflectivity, extrapolation algorithm.

doi: 10.3966/025400022018034601001