

Reprint 860

「多尺度光流變分法」在臨近降雨預報的應用和表現

楊漢賢、黃偉健 & 鄭子路

第二十四屆粵港澳氣象科技研討會

深圳，2010 年 1 月 20-22 日

「多尺度光流變分法」在臨近降雨預報的應用和表現

楊漢賢 黃偉健 鄭子路

香港天文台

摘要

臨近預報系統主要都是透過追蹤雷達回波的移動，再利用外推法推算降雨量。香港天文台研發的第一代『小渦旋』臨近預報系統（簡稱 SWIRLS），分別利用相關法及風暴單體質心法去追蹤雷達回波。由於雨區的移動受多重天氣尺度的影響，在發展第二代『小渦旋』（簡稱 SWIRLS-2）時，我們嘗試把雷達回波追蹤問題作統一處理，並開發一項名為「多尺度光流變分法」（Multi-scale Optical flow by Variational Analysis，簡稱 MOVA）的新技術。由於具備多尺度的特點，這種新的回波追蹤技術可同時應用到雷暴單體路徑預報和定量降雨預報之上，令 SWIRLS-2 具備更一致的回波追蹤運算。根據個案研究及初步驗證結果，新算法不但能達至過往的預報水平，在如颱風線等雨帶整體群速和個別單體相位速度不一致的情況下，更顯出其優勢。

本文會簡介 MOVA 的技術重點，包括如何應用「光流」圖像處理技巧、變分法求解、多層級回波運動分析等算法，以及在 SWIRLS-2 臨近降雨預報上的具體實施方案。此外，本文亦會簡報新方案在 2008 年暴雨案例上的表現評估、比較 2009 年的實時驗證結果、討論其應用限制，並總結現階段的整體成效。

1. 引言

香港天文台研發的『小渦旋』臨近預報系統（簡稱 SWIRLS），由 1999 年投入業務運作至今，經已有十年時間，主要功能之一，是定量降雨預報。其中最關鍵的運算之一，是透過追蹤雷達回波的移動，再利用外推法推算降雨量。第一代的『小渦旋』臨近預報系統[Li *et al.* 2000]，分別利用相關法（簡稱 TREC，即 Tracking of Radar Echoes by Correlation）及風暴單體質心法去追蹤雷達回波。由於原本的設計重點，在於預測香港境內小尺度暴雨系統在未來一至三小時所帶來的降雨，因此『小渦旋』的 TREC 追蹤算法，亦是針對小尺度運動而特別調較。近年，隨著天文台開發第二代的『小渦旋』臨近預報系統（簡稱 SWIRLS-2）[Yeung *et al.* 2009]，我們對定量降雨的要求有所提高，以滿足本地以及 2008 年北京奧運會期間的需要——預報時效長達 6 小時，範圍寬至 250 公里，分辨率維持在 1 公里左右。由於雨區的移動受多重尺度的天氣系統影響，按照提高後的要求，SWIRLS-2 在有效捕捉兩區小尺度運動的同時，無可避免要兼顧兩帶大尺度的運動。

為此，我們嘗試把雷達回波追蹤不同尺度運動的問題統一考慮，並開發一項名為「多尺度光流變分法」（Multi-scale Optical flow by Variational Analysis，簡稱 MOVA）的新技術。由於具備多尺度的特點，這種新的回波追蹤技術可同時應用到雷暴單體路徑預報和定量降雨預報之上，令 SWIRLS-2 具備更一致的回波追蹤運算。在 2008 年北京奧運會期間，北京版的 SWIRLS-2 實時將 MOVA 應用到雷暴單體路徑預報，效果理想，有關的結果已在世界氣象組織的 2009 年臨近預報專題討論會中發表[Yeung *et al.* 2009]。而應用 MOVA 作定量降雨預報的研發工作在 2009 年年初完成，並在同年春季在香港開始試行。

下文第 2 節簡介 MOVA 的技術重點，包括「光流」圖像處理技巧的詳細算法，以及在 SWIRLS-2 臨近降雨預報上的具體實施方案。第 3 節會簡報新方案在 2008 年暴雨案例上的表現。第 4 節會討論應用上的一些限制和值得注意的事項，並會展示 2009 年的實時預報驗證結果。第 5 節會作出總結，並展望未來的發展方向。

2. 多尺度光流變分法

光流(optical flow)的概念源自圖像處理技術中的物體運動檢測方法，在計算機視覺應用中非常有用。簡單來說，物體的運動可以用運動矢量場描述，而當投影在一個平面圖像上，運動往往是通過圖像序列中不同點的灰

度或光度分佈隨時間的變化而體現。這種灰度或光度的變化趨勢，定義為光流場，以矢量場 (u,v) 表示，受下列的光流方程控制：

$$\frac{\partial I}{\partial t} + u \frac{\partial I}{\partial x} + v \frac{\partial I}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

式(1)中， $I=I(x,y,t)$ 代表光度場，是時間 t 和二維空間 (x,y) 的函數。簡單來說，上列光流方程表示在二維空間上任意一個光點，在其運動軌跡上的光度會維持不變。由於光流場牽涉兩個獨立變數 u 及 v ，所以單單光流方程本身並不足以解題，而必須加入額外的條件或資料，才能獲得唯一的解。文獻上不難找到多種解決的方法，而 MOVA 採納以下基於變分法及光流場平滑化的算法[Aubert *et al.* 1999]。

首先，把光流方程寫為成本函數 J_0 ：

$$J_0 = \iint \left[\frac{\partial I}{\partial t} + u \frac{\partial I}{\partial x} + v \frac{\partial I}{\partial y} \right]^2 dx dy \quad (2)$$

式(2)經離散化後，光度場的時間偏微商會近似為 $[I(t)-I(t-\Delta t)]/\Delta t$ ，即兩張連續圖片的光度差異。在 MOVA 追蹤算法中， $I(t)$ 為最新的等高雷達反射率數據矩陣， Δt 為6分鐘。為加強光流場在每次更新分析時的連貫性，在具體的運算中，成本函數 J_0 其實亦包含上一個時段（即由 $t-2\Delta t$ 至 $t-\Delta t$ ）的差異。

然後，假設光流具有物理運動的連續性，而對其矢量場 (u,v) 加上平滑化的要求，並以成本函數 J_s 表示：

$$J_s = \iint \left[\nabla^2 u + \nabla^2 v \right] dx dy \quad (3)$$

最後，運用變分法把總成本函數 J 最小化，以求出最優的光流場解：

$$\begin{aligned} J &= J_0 + \gamma \cdot J_s \\ &= \iint \left[\frac{\partial I}{\partial t} + u \frac{\partial I}{\partial x} + v \frac{\partial I}{\partial y} \right]^2 dx dy + \gamma \cdot \iint \left[\nabla^2 u + \nabla^2 v \right] dx dy \end{aligned} \quad (4)$$

由於成本函數項 J_0 、 J_s 兩者的量級和單位不同，需加入參數 γ 以調較平滑化的約束比重。至於具體的最小化計算，我們採用了 L-BFGS (Limited-memory quasi-Newton code for unconstrained optimization)方法的數值優化程序[Liu & Nocedal 1989]。

為客觀地分析兩區運動的多重尺度，我們把相關的雷達反射率數據，以不同的分辨率，共分7層級進行光流分析，從低至高分辨率（即大至小尺度），逐一解出相應的光流場。具體來說，第一層級的分析尺度最大，取整

個計算域的寬度（即半徑256公里的雷達掃描範圍），第二層則定為計算域的五分一寬度，而從第三層級開始，每層的分辨率設為上一層級的雙倍，直至最終的第七層級。在不同層級的光流分析中，由於對應的設定尺度或分辨率不同，所需的平滑化約束比重 γ 都不盡相同。我們根據2008年的17個暴雨案例（見表(1)），利用每例的最初約十張雷達圖片，調教出一組較能反映多尺度運動的 γ 參數值。簡單來說， γ 的數值隨層級的上升而增大，顯示平滑化的作用在小尺度上的運動愈加重要。

由於MOVA是從大尺度開始，逐級完善較小尺度的光流分析，算法因而能夠減低一般變分法可能陷入局地極小值的機會。而由於每層級的光流分析，皆由上一層級的光流場提供初估值，所以在最終層級的分析之中，特別是在沒有雷達回波的區域上，自動承繼了所有較大尺度的運動矢量。透過這個多尺度的分析程序，雨帶在每個設定分辨率或尺度下的運動矢量得以成功捕捉得到，而其整體的群速和個別回波的相位速度亦因而能夠在最終的分析場中反映出來。

3. 應用例子

圖(1a)顯示在2008年4月19日下午6時36分，颱風浣熊(0801)的強烈雨帶正影響香港。圖中白色、深藍色箭頭分別顯示MOVA、TREC雷達回波運動矢量場。兩者最顯著的分別在於運動速度，留意白色箭頭的長度普遍較深藍色箭頭短，在受強烈回波影響的地方尤其突出，顯示MOVA的速度普遍較TREC的慢，反映前者主要反演雨帶的整體平移運動（相對較慢的群速）、而後者則重回波在小尺度上隨颱風環流飄移的路徑（相對較快的相位速度）。除速度外，運動的方向亦因尺度不同而有些微差別。比較香港（圖中央的方框範圍）及其以西地區的運動矢量場，可見TREC的渦度較大，較貼近颱風的氣旋性流場，在香港上空的部份是較為偏北的運動。然而，MOVA運動矢量場的渦度則相對較小，並反映了雨帶整體有向外擴散的傾向，在香港上空的矢量較為偏東。

綜合上述兩者的差異，可歸納出：（一）若根據TREC的運動矢量場外推，回波由於移動速度快，在香港境內能累積的雨量會較少；（二）若根據MOVA的運動矢量場外推，雨帶除移動速度較慢外，亦會擴散到較東的地區，因而能夠造成較多及較廣的累積雨量。圖(1b)的表格清楚顯示，當天下午5時至8時期間，以MOVA為基礎的暴雨預警信息（表的第三行），相比起TREC（表的第二行），較能掌握紅色暴雨的出現，而且亦能警告黑色暴雨會持續一段較長的時間，較

為符合暴雨的實況發展（表的第四行）。

第二個應用例子，是 2009 年 3 月 5 日的一次颱風從西北向東南橫過廣東沿岸的過程。圖(2a、b)分別顯示下午 1 時 48 分的 MOVA、TREC 雷達回波運動矢量場。在這次過程中，MOVA 成功捕捉颱風整體快速向東南移動的趨勢。相反，TREC 則主要反映當時的西南氣流。雖然後者在香港附近的颱風前沿亦能分析出一些向東南的運動矢量，但總的來說，颱風整體移動的向南分量不太明顯，速度偏慢，導致因強烈回波逗留香港上空的時間太久，而過分累積雨量的後果。因此，根據 MOVA、TREC 兩者運動矢量場所製作的一小時預測雨量分布圖就出現很大差異。如圖(3a)所示，前者的雨量分布較為平均，雨勢最大的位置及峰值較吻合實況（見圖(3c)）。相反，圖(3b)表明後者的雨量分布過分集中於香港境內，較為偏離實況。

4. 客觀評估

由於雨區的運動矢量沒法直接測量，所以要衡量雷達回波追蹤方法的效果，其實並沒有客觀的準則。我們改為比較以 MOVA 及 TREC 為基礎的暴雨預報表現，作為評估這種新方法的依歸。數據方面，同樣是選取自 2008 年所有 17 次暴雨過程，但剔除每例最初約十張用作調較 γ 參數值的雷達圖片（共佔整個數據集約百分之十六）。這些暴雨案例涵蓋西南季風、低壓槽、颱風等多種不同尺度的暴雨系統，詳情可參閱表(1)。評分的指標，包括命中率（POD，即 probability of detection）、虛報率（FAR，即 false alarm ratio）、以及 C 評分（CSI，即 Critical Success Index）。具體的表現評估，分以下兩個區域進行：

香港境內 — 評估的對象為 MOVA 及 TREC 為基礎的一小時暴雨預報（每 6 分鐘更新），雨量閾值為 30 毫米和 50 毫米，以香港境內的量雨筒數據為客觀實況。如圖(4)所示，在 30 毫米預報方面，MOVA 的三項評分能夠比 TREC 明顯優勝。在 50 毫米預報方面，MOVA 的 POD 亦可以比 TREC 明顯高，但礙於 FAR 方面亦同樣較高，因此在 C 評分上沒有顯出優勢。

珠三角地區 — 評估的對象為不同降雨閾值的一小時定量降雨預報，範圍是以香港為中心，約 120 公里內的珠三角地區，網格點距離約為 2 公里，以範圍內經量雨筒資料修正的雷達定量降雨分析數據為實況的依歸。如圖(5a)所示，MOVA 在所有的降雨閾值上的 CSI，皆比 TREC 的優勝。這是由於 MOVA 的 POD 遠較 TREC 的高（見圖(5b)），而同時能於 FAR 方面保持頗為接近的評分（見圖(5c)）。

5. 討論

上述的客觀評估結果雖然間接引證了 MOVA 在定量降雨預報應用方面能夠取得的優勢，但由於缺乏實測的運動矢量數據作直接的比對，嚴格來說並不能完全保證現行的 MOVA 算法在所有情況下都有滿意的表現。特別在沒有回波的區域上，MOVA 給出的運動矢量主要來自第一層級的最大尺度分析，加上平滑化的要求。在較複雜或較弱的引導氣流下，例如移動緩慢的颱風，其最大尺度的運動，在相隔 6 分鐘的雷達圖像上可能不太明顯，因而影響有關的運動矢量分析。同時，在研究過程中，我們發現 MOVA 的運動矢量，特別是速度方面，對於平滑化約束比重較為敏感。因此，現時所採納的 γ 參數值雖然有一定程度的代表性，但待個案累積更多後，仍可再進行調較，以提升其概括性。

無論如何，以 MOVA 為基礎的新臨近降雨預報算法經已在 2009 年春季開始業務試行。正如上文第 3 節的第二個應用例子所展示，效果頗為理想。事實上，從 2009 年 6 月開始的實時預報驗證的數據來看，初步的結果亦符合預期，與上文第 4 節《珠三角地區》的客觀評估結果相似。如圖(6)所示，MOVA 在所有的降雨閾值上的 POD 或 CSI，皆比 TREC 的優勝。

6. 總結

從參與 2008 年北京奧運會的經驗出發，我們成功開發並應用 MOVA 這種多尺度的新雷達回波追蹤技術。根據 2008 年的個案研究及 2009 年的實時驗證結果，初步來說新算法不但能達至過往的預報水平，在如颱風環流及颱風線等天氣系統中，雨帶整體群速和個別單體相位速度不一致的情況下，更顯出其優勢。待累積更多實時經驗後，我們會按驗證結果，進一步改善 MOVA 算法在定量降雨上的表現。同時，我們亦會繼續開發及改進 MOVA 在雷暴路徑預報方面的應用。

此外，MOVA 算法亦適用於調整數值天氣預報模式的定量降雨輸出，可以將模式的降雨分布及融合預報的相位誤差 (phase error) 修正，以有效融合雷達外推雨量預測，提升臨近預報的整體預報技巧水平 [Wong *et al.* 2009]。

鳴謝

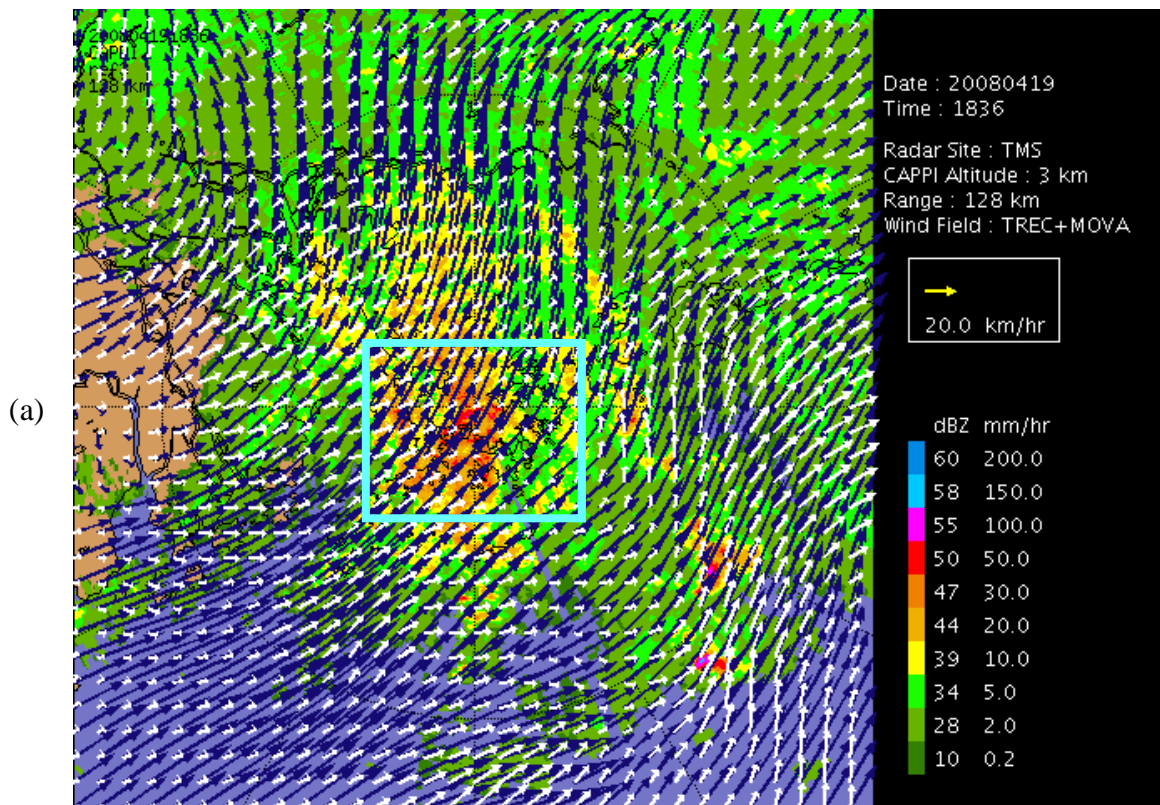
本文作者衷心多謝衛翰戈先生及劉心怡小姐的建議和指導。

參考文獻

- [1] Aubert, G., R. Deriche, and P. Kornprobst, 1999 : Computing optical flow via variational techniques, *SIAM J. Appl. Math.*, **60**, 156-182.
- [2] Li, P.W., W.K. Wong, K.Y. Chan & Edwin S.T. Lai, 2000 : SWIRLS — An Evolving Nowcasting System, *Hong Kong Observatory Technical Note*, No.100.
- [3] Liu, D. C. & J. Nocedal, 1989 : On the Limited Memory BFGS Method for Large Scale Optimization, *Mathematical Programming B*, **45**, pp. 503-528.
- [4] Wong, Wai-kin, Linus H.Y. Yeung, Ying-chun Wang & Min Chen, 2009 : Towards the Blending of NWP with Nowcast — Operation Experience in B08FDP, *WMO Symposium on Nowcasting*, 30 Aug-4 Sep 2009, Whistler, B.C., Canada.
- [5] Yeung, Linus HY, WK Wong, Philip KY Chan & Edwin ST Lai, 2009 : Applications of the Hong Kong Observatory nowcasting system SWIRLS-2 in support of the 2008 Beijing Olympic Games. *WMO Symposium on Nowcasting*, 30 Aug-4 Sep 2009, Whistler, B.C., Canada.

表(1) — 香港 2008 年暴雨個案

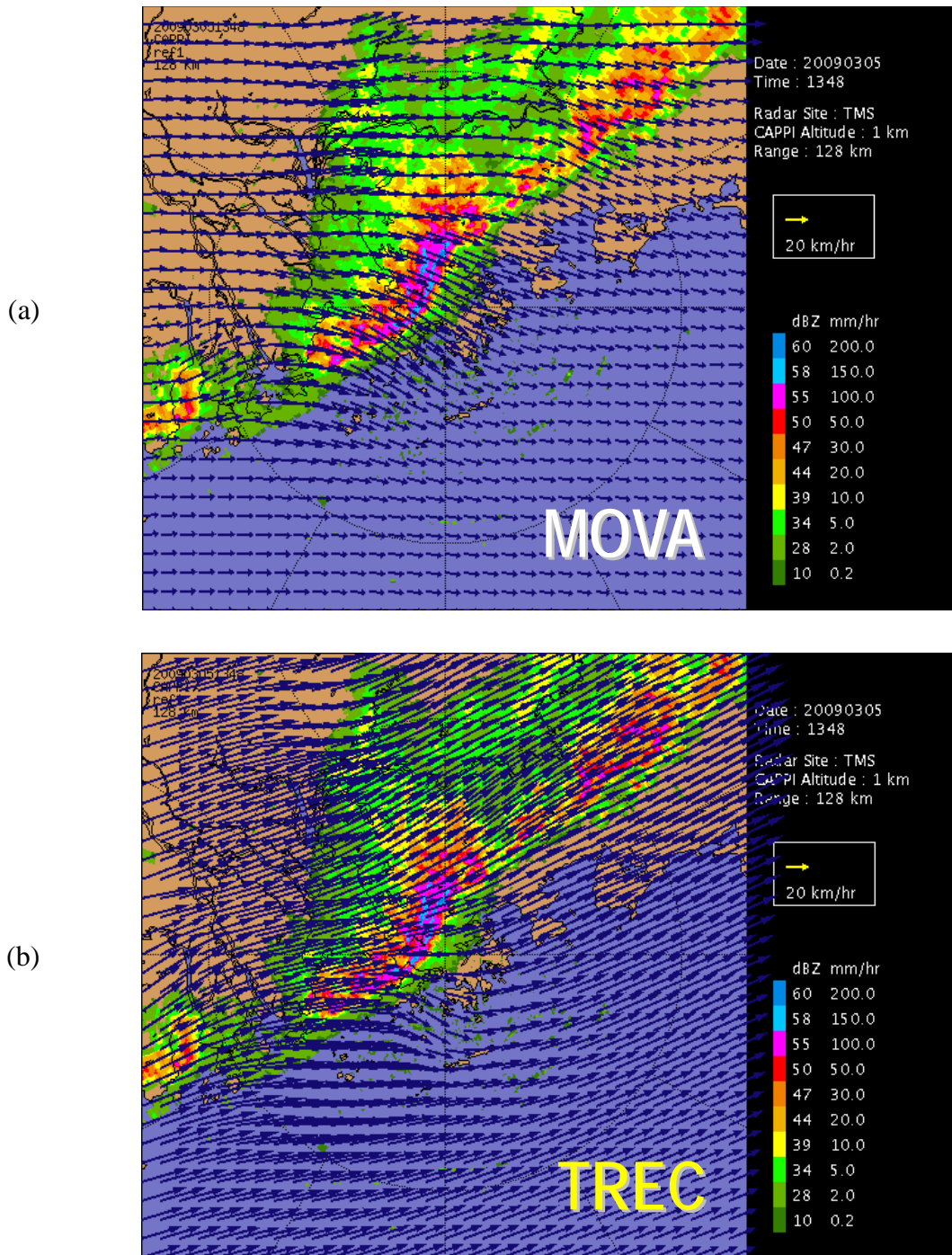
日期	主要天氣系統
4 月 19 日	颱風浣熊(0801)
5 月 29 日	低壓槽
6 月 3 日	低壓槽
6 月 6 日	低壓槽
6 月 7 日	低壓槽
6 月 13 日	低壓槽
6 月 25 日	颱風風神(0806)
6 月 26 日	活躍西南氣流
7 月 6 日	低壓區
7 月 8 日	低壓區
7 月 10 日	活躍西南氣流
7 月 12 日	低壓槽
7 月 14 日	低壓槽
8 月 8 日	強烈熱帶風暴北冕(0809) 殘餘
9 月 24 日	颱風黑格比(0814)
10 月 5 日早上	熱帶風暴海高斯(0817) 殘餘
10 月 5 日黃昏	+ 微弱東北季候風



(b)

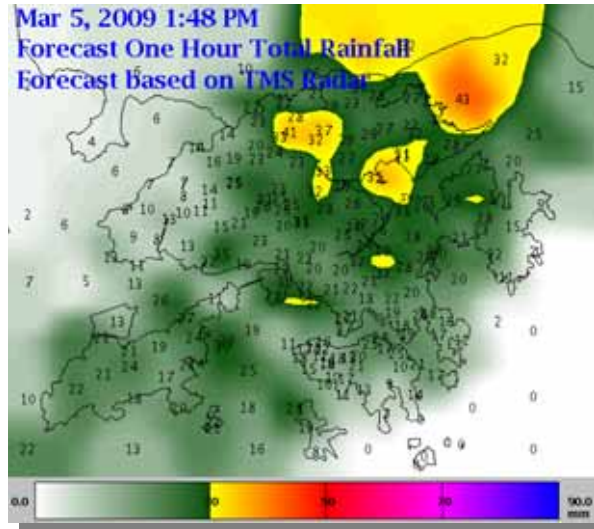
System	Time (HKT)	17	18	19	20
TREC	20080419	G A A A A A A A A A	R R B B R R R R R A	A A A A A A R A G G	N N N N N N N N N N
MOVA	20080419	A A A R R A R R R R	A R B B R R B B B B	B B B B B B B B B R	R R A A A A A G G G
Actual	20080419	G G A A A A A A R R	R R B B B B B B B B	B B B B R R R R A A A A	G G G G N N N N N N N N

圖(1) 颱風浣熊(0801)，2008年4月19日的案例：(a)下午6時36分的雷達反射率圖片，不同顏色的像素表示不同強度的回波（詳見右方的色標）。地圖的半徑為128公里，香港位於中心（中央淺藍方框範圍之內）。圖片顯示，浣熊在廣東西部沿岸登陸後，其強烈雨帶正影響珠江口及香港大部分地區。圖中白色、深藍色箭頭分別顯示MOVA、TREC的雷達回波運動矢量場。(b)表格記載當天下午5時至8時期間的暴雨狀況——第一行表示本地時間，第二、第三行分別顯示以TREC、MOVA為基礎的未來一小時暴雨預警信息（每6分鐘更新），第四行為基於量雨筒資料的暴雨實況分析（每5分鐘更新），所有狀況皆以相應的顏色和符號表示（黃底“A”、紅底“R”、黑底“B”分別代表60分鐘累積雨量普遍超過30、50、70毫米的暴雨；綠底“G”代表60分鐘累積雨量超過20毫米的大雨）。



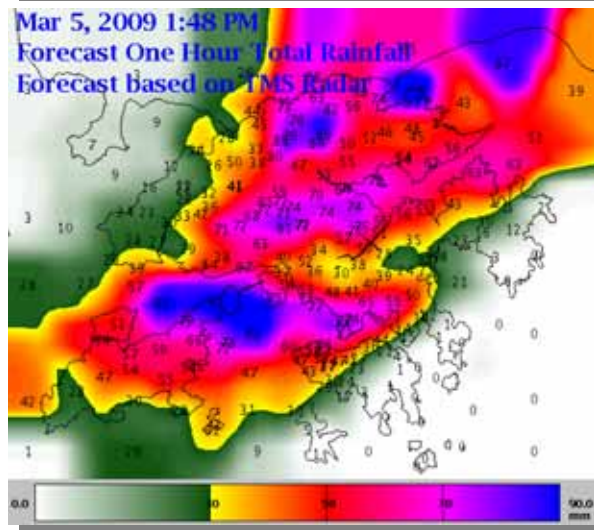
圖(2) 2009年3月5日的颱風案例:(a)下午1時48分的MOVA雷達回波運動矢量場;(b)對應的TREC雷達回波運動矢量場。

(a)



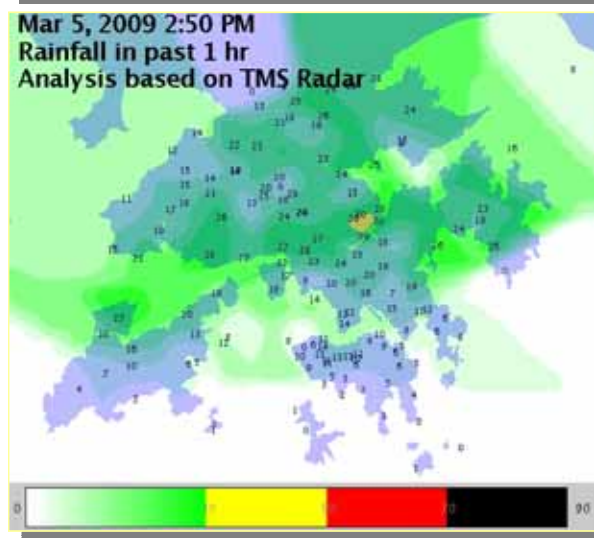
MOVA

(b)



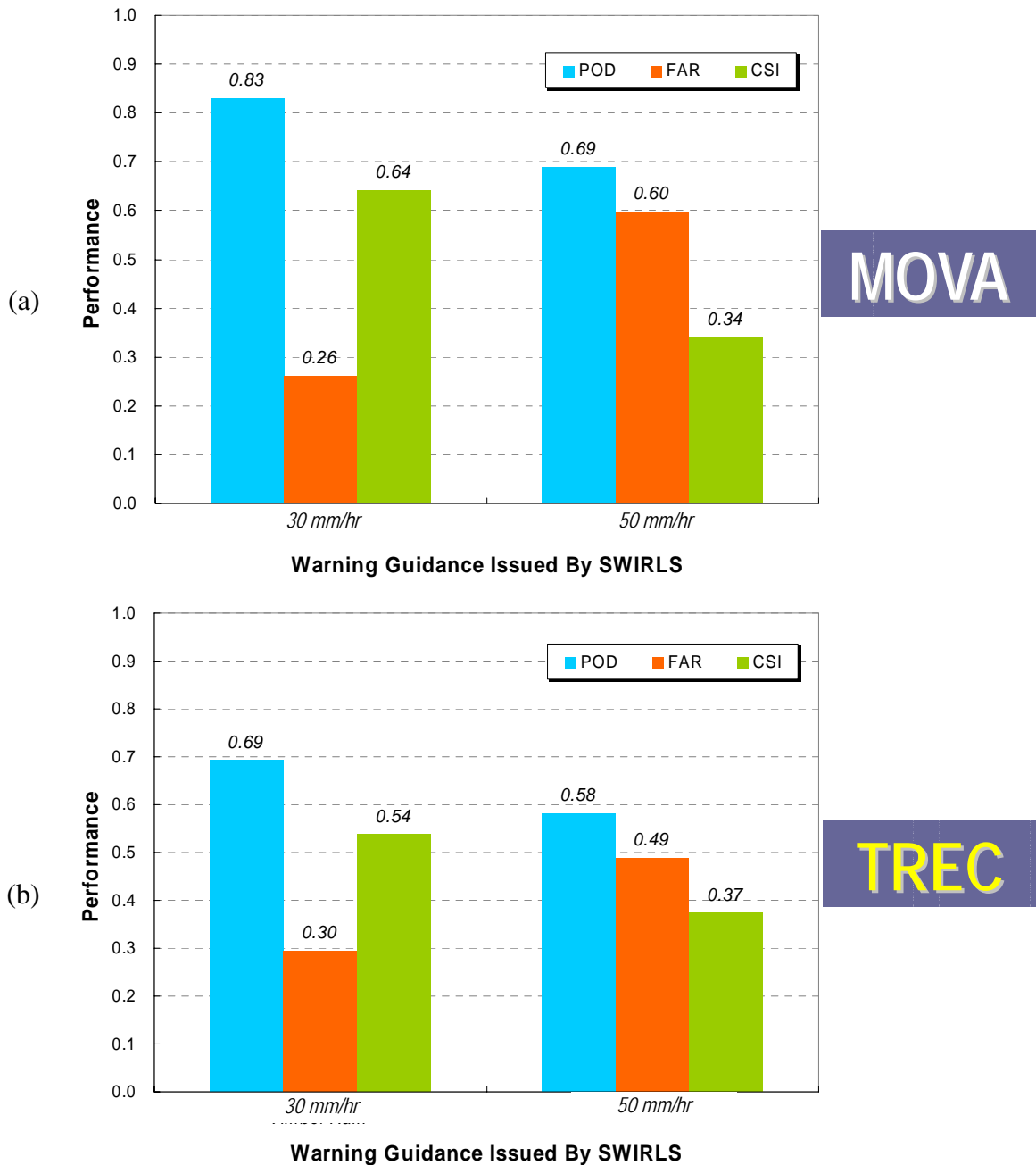
TREC

(c)

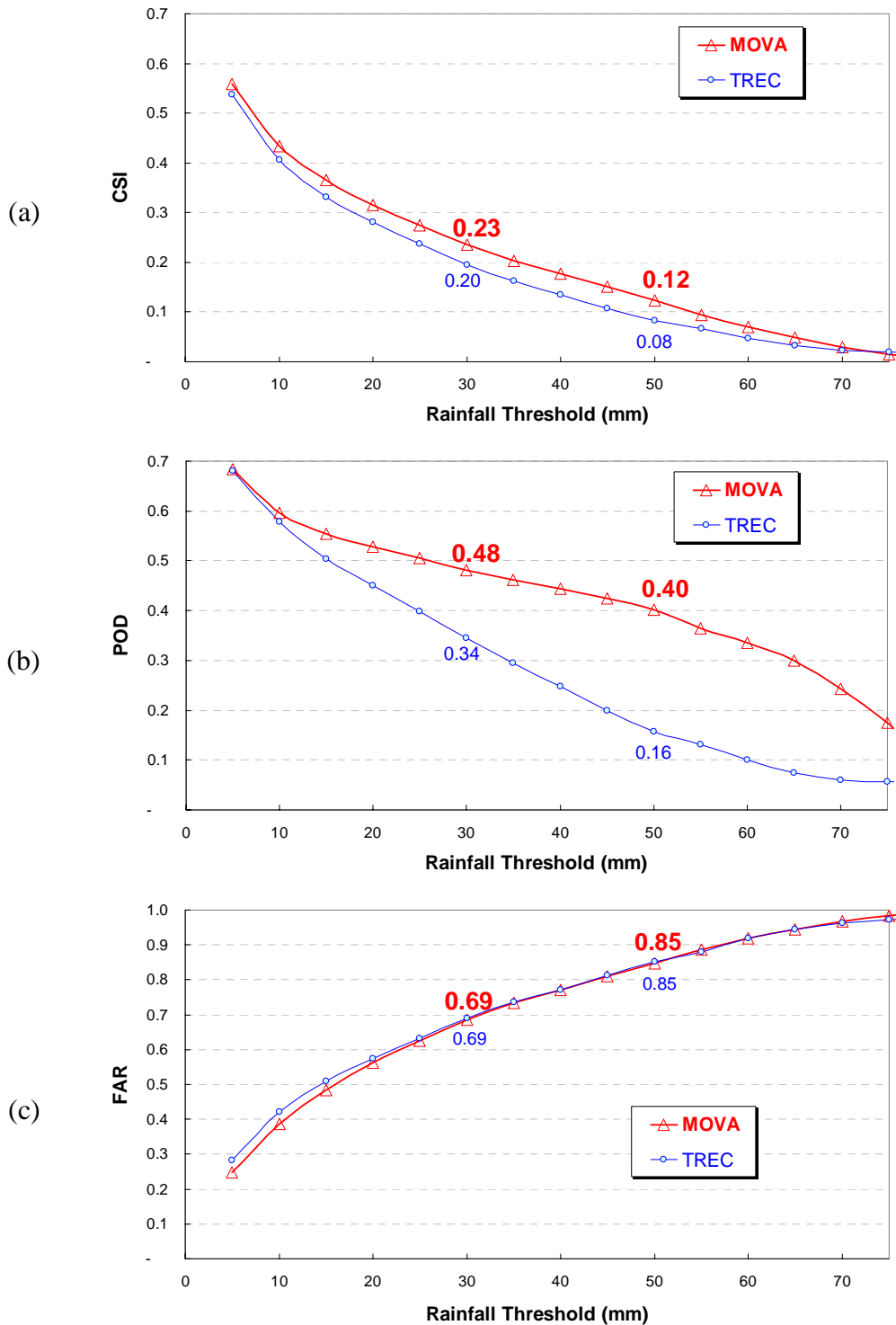


實況

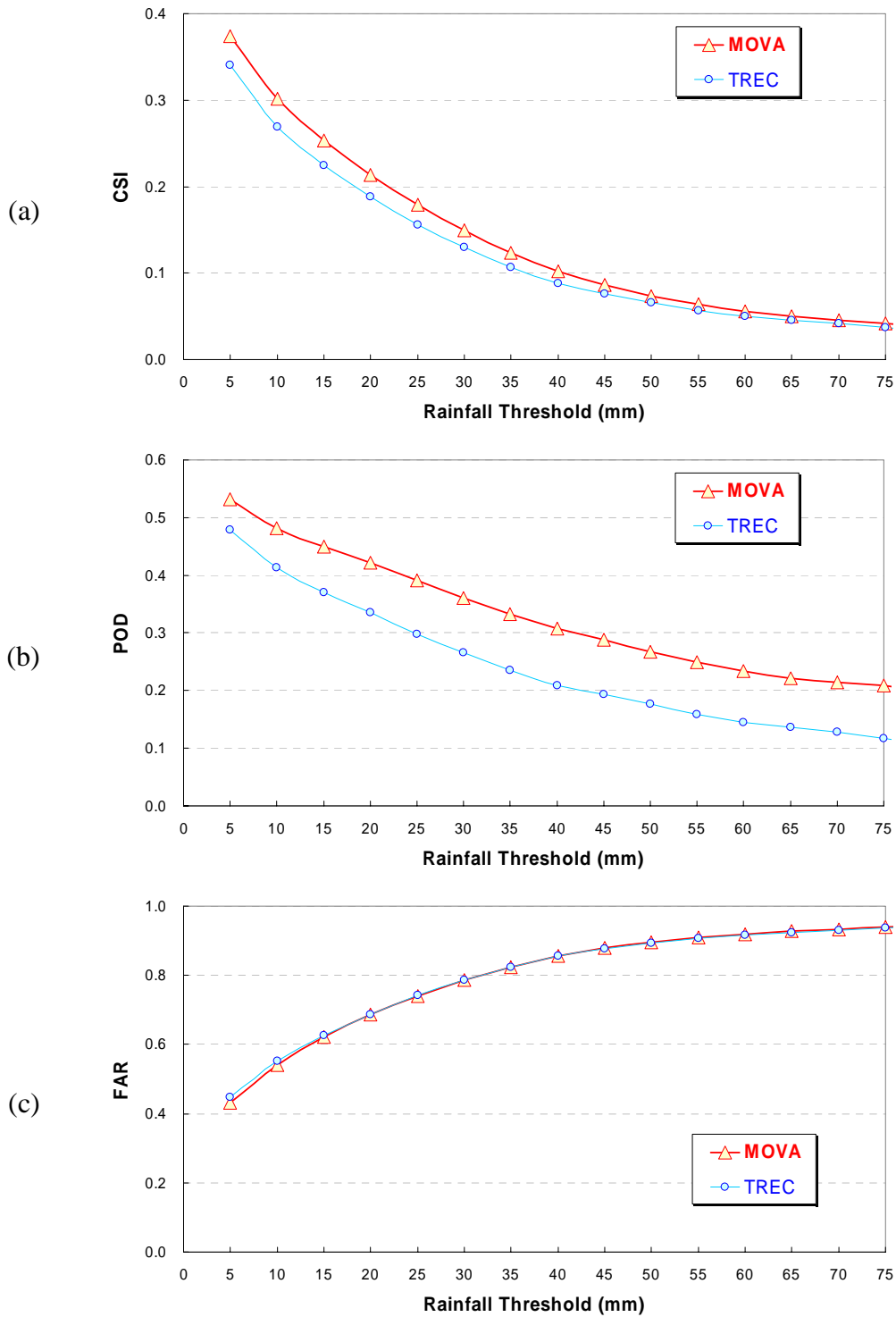
圖(3) 2009年3月5日的飆線案例：(a)根據下午1時48分的MOVA雷達回波運動矢量場（見圖(2a)）所製作的一小時預測雨量分布圖；(b)同圖(a)，但根據TREC（見圖(2b)）製作；(c)下午2時50分的實況一小時雨量分布圖。



圖(4) MOVA 及 TREC 在 2008 年 30、50 毫米暴雨預報的表現：(a) MOVA；(b) TREC。評分的指標，包括暴雨預警的命中率 (POD，即 probability of detection，以藍色直方圖表示)、虛報率 (FAR，即 false alarm ratio，以橙色直方圖表示)、以及 C 評分 (CSI，即 Critical Success Index，以綠色直方圖表示)。



圖(5) 『小渦旋』一小時定量降雨預報表現與降雨閾值的關係：(a) CSI；(b) POD；(c) FAR。圖中，紅綫、藍綫分別代表建基於 MOVA、TREC 的定量降雨預報評分。評估用的數據包括 2008 的 17 個暴雨案例（見表(1)）。範圍是以香港為中心，約 120 公里內的珠三角地區，網格點距離約為 2 公里。



圖(6) 『小渦旋』一小時定量降雨預報，2009年6至10月實時驗證結果：
 (a) CSI；(b) POD；(c) FAR。具體驗證方法及統計圖的繪製，請參閱圖(5)及內文第4節。