



香港天文台  
HONG KONG OBSERVATORY

Reprint 491

非靜力數值模式在短期降雨預測方面的表現

楊漢賢，張冰，林靜芝

第十七屆粵港澳氣象科技研討會報告，

中國，澳門，2003年1月22-23日

# 非靜力數值模式在短期降雨預測方面的表現

楊漢賢 張冰 林靜芝

香港天文台

## 摘要

為進一步改善在中尺度甚至對流尺度的短期降雨預報，天文台於二零零一年引進及測試美國的 Advanced Regional Prediction System( 簡稱 ARPS ) 及 Weather Research and Forecasting( 簡稱 WRF ) Model 兩個非靜力模式。前者在二零零二年四月作業務試運行，後者則作為研究之用。

有鑒於以網格點為基礎的傳統驗證方法未能真實反映數值模式在中尺度或以下的降雨預報方面的技巧，天文台採用了一套以物件導向 ( object-oriented ) 為本的實時定量降雨預測驗證系統，有效地衡量各模式的表現，並藉此尋找其中的系統偏差。二零零二年四月至九月的驗證結果顯示，相對於天文台的『業務區域譜模式』(ORSM)，非靜力模式在大雨預報技巧上較有優勢，可是，ARPS 在降雨預測上有渦旋減弱 ( spin-down ) 的傾向。

## **Performance of Non-hydrostatic Models in Short-range Quantitative Precipitation Forecast**

H.Y. Yeung, P. Cheung and C.C. Lam

Hong Kong Observatory

### Abstract

For better short-range quantitative precipitation forecast (QPF) down to the convective scale, the Hong Kong Observatory (HKO) has been experimenting with two adapted non-hydrostatic models since 2001, namely, the Advanced Regional Prediction System (ARPS) and the Weather Research and Forecasting (WRF) Model from the United States. The former was put into operational trial in April 2002; the latter is mainly set up for research purpose.

As the conventional grid-point based QPF verification methods cannot truly reflect the forecast skill of a numerical weather prediction model, especially in the mesoscale regime, a real-time object-oriented QPF verification system is used to evaluate the performance of the models and to identify their systematic biases. The verification results for April to September 2002 show that compared to the HKO Operational Regional Spectral Model (ORSM), non-hydrostatic models are more skillful in the heavy rain regime. However, the results also reveal a spin-down tendency in the QPF of ARPS.

# 非靜力數值模式在短期降雨預測方面的表現

楊漢賢 張冰 林靜芝

香港天文台

## 1. 引言

天文台的「業務區域譜模式」(Operational Regional Spectral Model, 簡稱 ORSM) 在一九九九年年底投入業務運作以來, 主要提供香港附近地區的短期降雨預報指引, 在天氣尺度至中尺度的降雨預測方面尤見其效。為進一步改善更小尺度的短期降雨預報, 我們於二零零一年引進及測試美國的 Advanced Regional Prediction System( 簡稱 ARPS )及 Weather Research and Forecasting( 簡稱 WRF ) Model 兩個非靜力模式。前者在二零零二年四月作業務試運行, 後者則作為研究之用。為了能夠客觀地衡量上述模式在定量降雨預報方面的表現, 以及尋找其中的系統偏差, 我們建立了一套物件導向 (object-oriented) 形式的實時預測驗證系統。本文的目的是要介紹這系統的設計特色, 分析 2002 年 4 月至 9 月的驗證結果, 並從中探討非靜力模式定量降雨預測, 以及物件導向的驗證方法連帶的一些問題。

## 2. 驗證方法

傳統的模式預報驗證方法以網格點為基礎, 是一種點對點的比較, 對模式預報場的空間準確度要求極高, 對位置上的誤差特別敏感。礙於物理參數化和模式分辨率所限, 模式的定量降雨預報 (quantitative precipitation forecast, 簡稱 QPF) 無論在強度、時間性及位置三方面都普遍存在相當的誤差。更甚者, 在中尺度或以下的降雨中, 短時間累積雨量的分佈一般較為零散, 亦具隨機性。故此, 傳統的驗證方法對模式定量降雨預報並不適合, 極其量只可作為一種基線驗證 (baseline verification)。

以 ORSM 及 ARPS 在 2002 年的大雨預測為例, 傳統方法計算出的技巧評分, 如(a)所示的 T 評分(Threat Score), 兩者水平都顯得偏低, 而且在不同驗證時間上的變化不太大, 以致產生兩種不同模式在大雨預報技巧方面似乎相若的錯誤印象。但撇除位置上的偏差後, 剩餘的誤差便會反映模式在雨勢預測和其他造雨機制上的缺陷, 包括如次網格的上昇或下沉氣流, 以及其他與對流活動有關的參數化不盡完善等, 從而凸顯靜力與非靜力模式的分別。(b)虛線

所示的數據，是經過物件導向方法撇除位置誤差後的技巧評分，我們稱之為『最高可得技巧評分』（maximum attainable skill score，簡稱 MASS）。明顯可見，不同模式的 MASS 可以相差很大，技巧高低立現。要計算 MASS，我們採用了 Ebert 和 McBride [1] 提出的「連續雨區」(continuous rain area，簡稱 CRA) 的物件導向概念。附錄(甲) 詳細定義何謂 CRA、解釋 CRA 位移與 QPF 位置誤差的關係，以及 MASS 的計算方法。

我們把這個針對中尺度降雨而設的系統稱為「中尺度物件導向定量降雨預報驗證系統」(Mesoscale Object-oriented QPF Verification System，簡稱 MOQVS)。MOQVS 除了能求得 MASS 外，其中一個重要「副產品」是它在計算過程中會一併找出 QPF 在位置上的系統偏差（見附錄（甲）），從而讓我們有機會利用後處理方法去改善這方面的問題。MOQVS 在 2002 年初投入業務試行，對 ORSM 及 ARPS 的一小時累積雨量預報進行實時驗證。實況雨量分佈方面則以雷達回波與地面實測雨量的綜合分析為準[2]。由於 ORSM 產品的分辨率最低（約 25 公里），為公平比較起見，MOQVS 會先把所有實況及較高分辨率的預測雨量分佈圖，以平均法轉換至 25 公里的分辨率才進行驗證。而驗證的範圍以香港為中心，涵蓋東經 112.125 至 116.125 度，北緯 20.325 至 24.325 度，包含 256 個網格點（見圖(二)）。

### 3. 驗證結果

我們可從以下幾方面討論 2002 年 4 月至 9 月的驗證結果：

#### 3.1. 季節上的轉變

為方便分析背後造雨機制的變化，我們把 4 月至 9 月分為兩階段：（一）4 月至 6 月的初夏及（二）7 月至 9 月的盛夏，期間產生大雨的主要天氣系統分別為鋒或低壓槽，以及熱帶氣旋或西南季候風。

圖(三)顯示不同模式、不同季節的 MASS 在不同驗證時間上的變化。為方便比較，我們以三個最常見的技巧評分，即 Threat Score（簡稱 TS）、Equitable Threat Score（簡稱 ETS）及 Hanssen-Kuipers Score（簡稱 HKS）來計算 MASS，分別展示於圖(三)(a)至(c)。附錄（乙）詳列各技巧評分的定義及算式。圖中冷色和暖色調分別代表 ARPS 及 ORSM，而同一色調中的淺色和深色則

用以區分初夏和盛夏。

在所有的驗證時間上，ARPS 的 MASS 都明顯比 ORSM 高出數倍。這表明前者在預測華南沿岸地區夏季常見的強對流活動上，整體上較後者有技巧。此外，驗證結果亦顯示兩模式在不同造雨機制上的表現有頗大差異。仔細看圖(三)(c)的清晨時段 (16 至 00 UTC) 可發現，ARPS 盛夏的 MASS 明顯比初夏高，而相反地，ORSM 初夏的 MASS 則高於盛夏。這反映出 ORSM 作為一個靜力模式，在處理由鋒或低壓槽等大尺度天氣系統所導致的大雨方面，較由中尺度天氣系統所產生的為佳。而 ARPS 作為一個非靜力模式，情況則剛好相反。

### 3.2. 預報時效及雨勢上的變化

圖(四)(a)、(b)分別展示 ARPS 及 ORSM 在 4 月至 9 月以 HKS 計的平均 MASS 值，在不同預報時效和不同雨勢上的轉變。為方便討論，圖(四)(a)只展示預測雨勢為每小時 30 毫米或以上 MASS，而圖(四)(b)則只展示預報時效為 6 小時的 MASS。

由圖(四)(a)可見，在首 12 小時的預報中：

- (一) ARPS 的 MASS 在首 7 小時普遍比 ORSM 高出 3 至 5 倍，但在往後的預測中則與 ORSM 同樣偏低，在一定程度上反映 ARPS 的降雨預報迅速轉弱，即一般所謂「渦旋減弱」(spin-down) 現象。圖(五)的預報頻率偏差變化，清楚反映這種迅速轉弱傾向(預報時效愈長，ARPS 的大雨預報頻率偏差愈低)。這情況在 8 小時或以後的預測明顯較為嚴重。我們在下節第 4.2 段再詳細討論。
- (二) 不同初始時間的 QPF，其 MASS 值會有相當大的差異。以 ARPS 的 03 與 09-UTC 計算為例，前者的 MASS 在首 7 小時都能維持在較高水平，但後者下跌較快，第 6 小時預測的 MASS 已降至接近靜力模式的水平。

至於雨勢上的分別，由圖(四)(b)可歸納出：

- (三) ARPS 在每小時 30 至 70 毫米的大雨預測中，在技巧上明顯較 ORSM 有優勢。至於這種優勢是否等同有用的 QPF 的問題，下節第 4.3 段再加以討論。
- (四) 如上述第(二)項一樣，不同初始時間的 QPF，其 MASS 值在不同的大雨情況下有頗大的差異。事實上，對於每小時 50 毫米或以上的大雨預測，ARPS 的個別 QPF(包括 12、15 及 21-UTC

的計算)所達到的 MASS 水平,其實與靜力模式之間的分野不大。

### 3.3. 位置誤差

如上文第2節及附錄(甲)所介紹,QPF 在位置上的誤差(以下簡稱「位差」)是一個向量,記為 $\mathbf{R}$ 。為方便討論,可把 $\mathbf{R}$ 分拆為經向和緯向兩個分量,以 $R_y$ 及 $R_x$ 標示。經、緯向分量的正值分別代表偏北、偏東,而負值則代表偏南、偏西。我們定義總平均位差為所有位差向量長度的總平均,即 $|\overline{\mathbf{R}}| = \sqrt{\overline{R_y^2} + \overline{R_x^2}}$ ,而分量平均標示為 $\overline{R_y}$ 及 $\overline{R_x}$ 。在尋找 QPF 的系統位差時,我們取上述三個位差量的三個月平均值。圖(六)(a)至(d)中的綠色折線分別顯示 ARPS 及 ORSM 在初夏和盛夏的 $|\overline{\mathbf{R}}|$ 值,而黃、紅兩色的直方圖則代表 $\overline{R_y}$ 及 $\overline{R_x}$ 值在不同驗證時間上的變化。至於向量 $\mathbf{R}$ 的隨機性,則反映在以上三個純量值的差別上。

由圖(六)(a)、(b)的直方圖可見,ARPS 的 $\overline{R_y}$ 及 $\overline{R_x}$ 值在 4 至 6 月期間大致上可歸納為前者正者後者負,顯示其 QPF 有偏移西北二十多公里的傾向。而總平均位差 $|\overline{\mathbf{R}}|$ 則為 60 多公里,比起 $\overline{R_y}$ 及 $\overline{R_x}$ 高兩至三倍。由此看來,ARPS 的 QPF 位差存在相當的隨機性。在 7 至 9 月期間的最大轉變,是 $\overline{R_y}$ 變得沒有方向而且數值接近零,而 $\overline{R_x}$ 則變為偏東十多公里。由於總平均位差 $|\overline{\mathbf{R}}|$ 的水平沒有明顯轉變,代表這期間的隨機性相對擴大了。

至於 ORSM 方面,圖(六)(c)、(d)顯示它的總平均位差 $|\overline{\mathbf{R}}|$ 變化較大,數值亦較 ARPS 為高。 $\overline{R_y}$ 及 $\overline{R_x}$ 也較 ARPS 為大,但方向性不太顯著。隨機性方面則和 ARPS 相若。

## 4. 討論

### 4.1. 積雲參數化

ARPS 盛夏的表現明顯比初夏好(見圖(三)),除了因為非靜力模式本身是針對中尺度對流天氣而建立之外,相信亦是與我們在七月初對模式進行了一次重要的調校有關。在模式試行兩個多月後,發現很多降雨預報中都出現過多及過強的低層輻合線。經過一輪觀察後,我們認為這些有問題的輻合線源於過強的對流活動,因而把模式的積雲參數化模組關掉。但由於模式本身的分辨率為 6 公里,嚴格來說不能有效地模擬所有積雲中的上昇和下沉氣流,所以對於這個做法是否適當,目前還沒有定論。為此,我們短期內會安

裝 ARPS 的最新版本，以及試驗經改良過的積雲參數化模組。

## 4.2. 渦旋迅速減弱傾向

圖(四)(a)顯示 ARPS 的 MASS 在預報時效第七至第八小時之間有一個頗大的跌幅。原因有二：

### (1) 模式內在的渦旋減弱傾向 —

ARPS 的資料同化系統能有效地把雷達回波數據轉化為模式的水汽分析。但受雷達探測距離所局限，這水汽分析範圍的半徑只有 256 公里左右。假設高空流場為每小時 40 公里的西風，約 6 小時後，這些由雷達所導出的「額外」水汽資料便會逐漸「流出」分析範圍，而隨後的水汽以致降雨預測便要倚賴初估場以及邊界條件，其技巧水平因而有可能突然下降。

### (2) CRA 搜尋半徑的問題 —

如附錄(甲)所述，CRA 位移需要在一預設搜尋範圍內進行。否則，實況的 CRA 及預測的 CRA 之間的相關性會成疑問，位移不會進行。所以，當模式的技巧水平因渦旋減弱等問題而下降到令預測的 CRA 與實況的 CRA 之相隔距離超過搜尋範圍的半徑時，MASS 會等於原來基線驗證得到的技巧評分。搜尋半徑是一個可調校參數，在 MOQVS 業務試行中被設定為 100 公里。這個設定主要是考慮到香港本身的大小與 MOQVS 的運作效率而做的。

## 4.3. MASS 較高等同 QPF 較好?

從圖(七)的預報頻率偏差 (Frequency Bias, 簡稱 FB)、虛報率 (False Alarm Ratio, 簡稱 FAR) 及命中率 (Probability of Detection, 簡稱 POD) 可見，ARPS 在雨勢愈大的情況下，大雨預報頻率愈偏高 (FB 大於 1 為偏高，小於 1 為偏低)。雖然這會提高命中率，但同時亦會導致虛報率升高。由此可見，模式直接輸出的 QPF 的技巧，與業務預報所需的還有一段頗大距離。要縮窄這距離的首要一環，就是要處理好大雨預報頻率偏高的問題，而這往往主要是模式內部的參數化不完善所致。模式後處理方法，在這方面的幫助不大。

## 4.4. 系統偏差

圖(六)(a)、(b)中，位差分量顯得較小的原因之一，是我們用了較長的三個月平均。礙於 MOQVS 的數據庫所限，若以月平均去計算，CRA 的數目太少，造成統計上的顯著性水平問題。故此，更加細緻的驗證分析，例如因流場而異的系統偏差分析，仍有待日

後收集更多的 QPF 數據才可進行。

#### 4.5. WRF 模式

由於 WRF 模式只用作個案研究，現階段沒有把它放進 MOQVS 作實時驗證。但從觀察所得，WRF 跟 ARPS 同樣有大雨預報頻率偏高的問題。由於 WRF 沒有加入如雷達等本地資料以修正模式水汽分析的初估場，其問題比起 ARPS 更嚴重。

#### 5. 總結

概括地說，2002 年 4 月至 9 月的驗證結果表明，ARPS 所代表的非靜力模式的大雨預測技巧，在幾個方面上都明顯比 ORSM 所代表的靜力模式表現優勝。在業務預報方面，應用模式 QPF 時要小心衡量不同初始時間的預測之間的差異。同時，亦要考慮雨區系統位差的問題。此外，更要留意 ARPS 在雨勢預測中的高估情況，而且技巧會隨預報時效增長而出現渦旋減弱的現象。

#### 6. 鳴謝

本文作者要多謝林超英先生及陳鋆先生的寶貴意見及指導。

#### 7. 參考文獻

- [1]. E.E. Ebert and J.L. McBride, 2000: “Verification of precipitation in weather systems: determination of systematic errors”, *Journal of Hydrology*, **239**, p.179-202.
- [2]. P.W. Li *et al*, 1999: “Short-range Forecast of Heavy Rain based on Radar Echo Analysis”, Third International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle (GEWEX), Beijing, 16-19 June 1999.
- [3]. D.S. Wilks, 1995: “Statistical Methods in the Atmospheric Sciences”, Academic Press.
- [4]. H.R. Stanski *et al*, 1989: “Survey of Common Verification Methods in Meteorology”, WMO/TD No. **358**.

## 附錄（甲）—『最高可得技巧評分』的計算

誤差一般可分拆為隨機誤差及系統偏差兩個分量。由於後者對預報有價值，『最高可得技巧評分』（maximum attainable skill score，簡稱 MASS）主要是針對大雨預測在位置上的系統偏差而設的。換句話說，我們計算 MASS 時假設了：

- (i) 預報雨區的位置誤差主要是源自預報天氣系統的偏差，如低層輻合線的位置錯誤，又或是高空擾動的移動速度太快等等；
- (ii) 隨機誤差為次要而不考慮。

有了這些概念後，MASS 的計算變成一種雨區對雨區的比較，從而需要物件導向形式的驗證策略。為此，我們採用了 Ebert-McBride 的做法[1]。簡單來說，有以下幾個步驟：

- (a) 針對我們有興趣的大雨情況，例如每小時 30 毫米（天文台發出暴雨警告的最低雨量指標），設定雨勢臨界值（rainfall intensity threshold），以  $\eta$  表示。
- (b) 從累積降雨分佈中，區分出所有雨勢大於或相若  $\eta$  的「連續雨區」（continuous rain area，簡稱 CRA）。舉例來說，圖(八)(a)、(b)的紅圈分別在實況和預測雨量分佈圖中標示  $\eta \geq 30$  mm/hr 的 CRA。
- (c) 把每一個預測的 CRA 獨立地在一預設的搜尋範圍內逐網格平移，並計算每次平移後相對於實況的總均方差（total mean square error，簡稱 TMSE）。
- (d) 找出能將 TMSE 極小化的位移矢量（relocation vector），記為  $\mathbf{L}$ 。圖(八)(c)的實線紅圈標示由圖(八)(b)對應圖(八)(a)作出 TMSE 極小化位移後的 CRA，而藍色箭頭則代表矢量  $\mathbf{L}$ 。
- (e) 標示 CRA 在位置上的誤差（以下簡稱「位差」）為矢量  $\mathbf{R}$ ，並定義為  $\mathbf{L}$  的相反矢量，即  $\mathbf{R} = -\mathbf{L}$ 。
- (f) 整個 QPF 的位差可定義為所有  $\mathbf{R}$  的向量平均。
- (g) 把經過 CRA 位移後的 QPF 再做一次點對點的基線驗證，所得的技巧評分便成為該次 QPF 的 MASS。

## 附錄（乙）— 各統計量的定義和計算

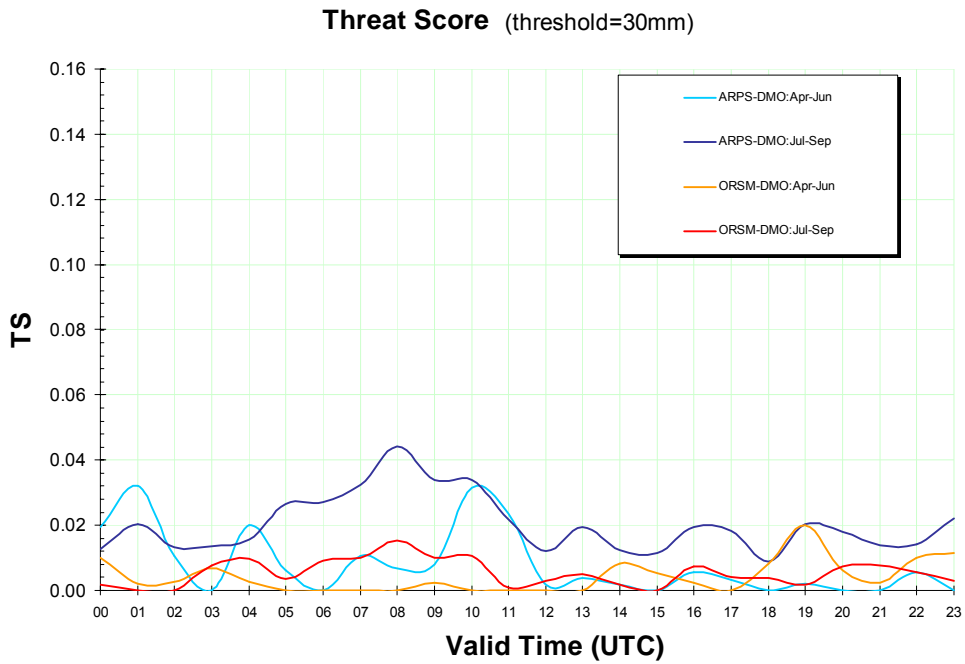
以下表格輯錄了本文所採用的統計度量。各統計量的詳細意義可在第[3]、[4]項參考文獻中找到。

度量	統計量	簡稱及定義
準確度	命中率/探測概率 (Probability of Detection)	$POD = \frac{H_{\eta}}{H_{\eta} + M_{\eta}}$
	虛報率 (False Alarm Ratio)	$FAR = \frac{F_{\eta}}{F_{\eta} + H_{\eta}}$
偏差度	頻率偏差 (Frequency Bias)	$FB = \frac{H_{\eta} + F_{\eta}}{H_{\eta} + M_{\eta}}$
技巧評分	Threat Score (又稱 Critical Success Index)	$TS = \frac{H_{\eta}}{H_{\eta} + F_{\eta} + M_{\eta}}$
	Equitable Threat Score	$ETS = \frac{Z_{\eta} H_{\eta} - F_{\eta} M_{\eta}}{(F_{\eta} + M_{\eta})N + (Z_{\eta} H_{\eta} - F_{\eta} M_{\eta})}$
	Hanssen-Kuipers Score	$HKS = \frac{Z_{\eta} H_{\eta} - F_{\eta} M_{\eta}}{(Z_{\eta} + F_{\eta})(H_{\eta} + M_{\eta})}$

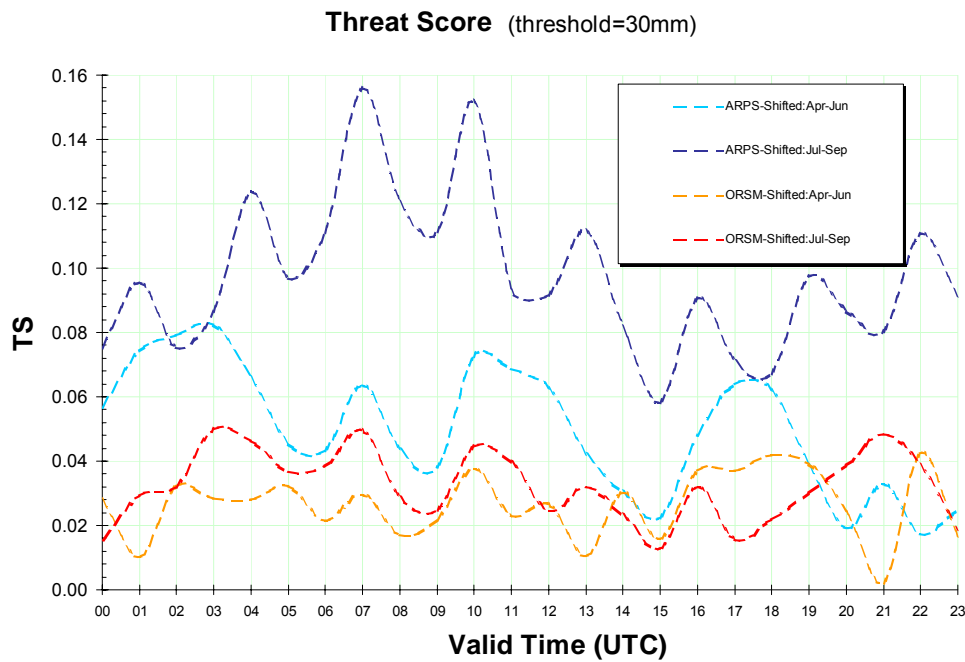
上表中，統計量  $H_{\eta}$ 、 $F_{\eta}$ 、 $M_{\eta}$  及  $Z_{\eta}$  分別是以下分類預測用的列聯表(contingency table)中的四項元素（以次數計）：

(次數)		預測	
		「有」 ( $y \geq \eta$ )	「無」 ( $y < \eta$ )
實測	「有」 ( $o \geq \eta$ )	$H_{\eta}$	$M_{\eta}$
	「無」 ( $o < \eta$ )	$F_{\eta}$	$Z_{\eta}$

其中  $y$  和  $o$  分別代表驗證網格上的預測和實測雨量，而  $\eta$  則代表雨量臨界值。  $N$  是所有事件次數的總和，即  $N = H_{\eta} + F_{\eta} + M_{\eta} + Z_{\eta}$ 。

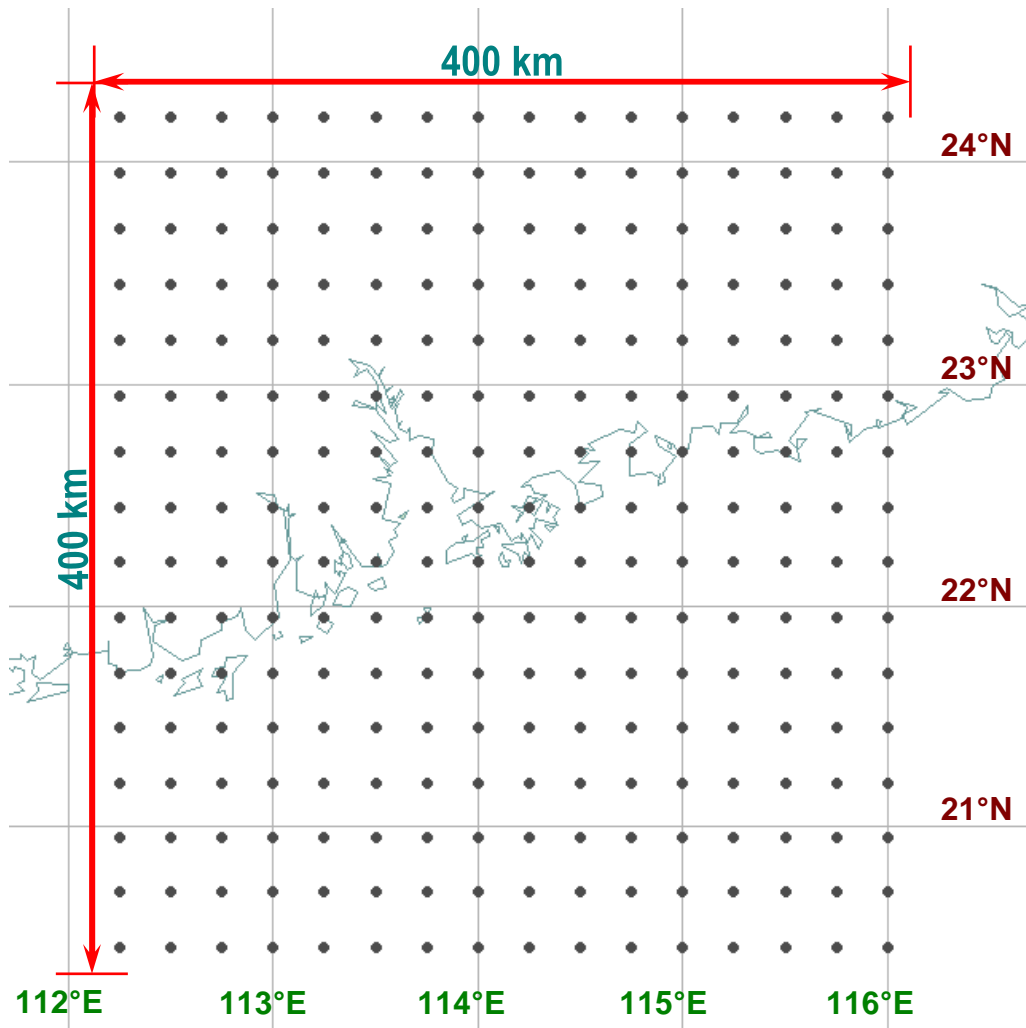


(a)

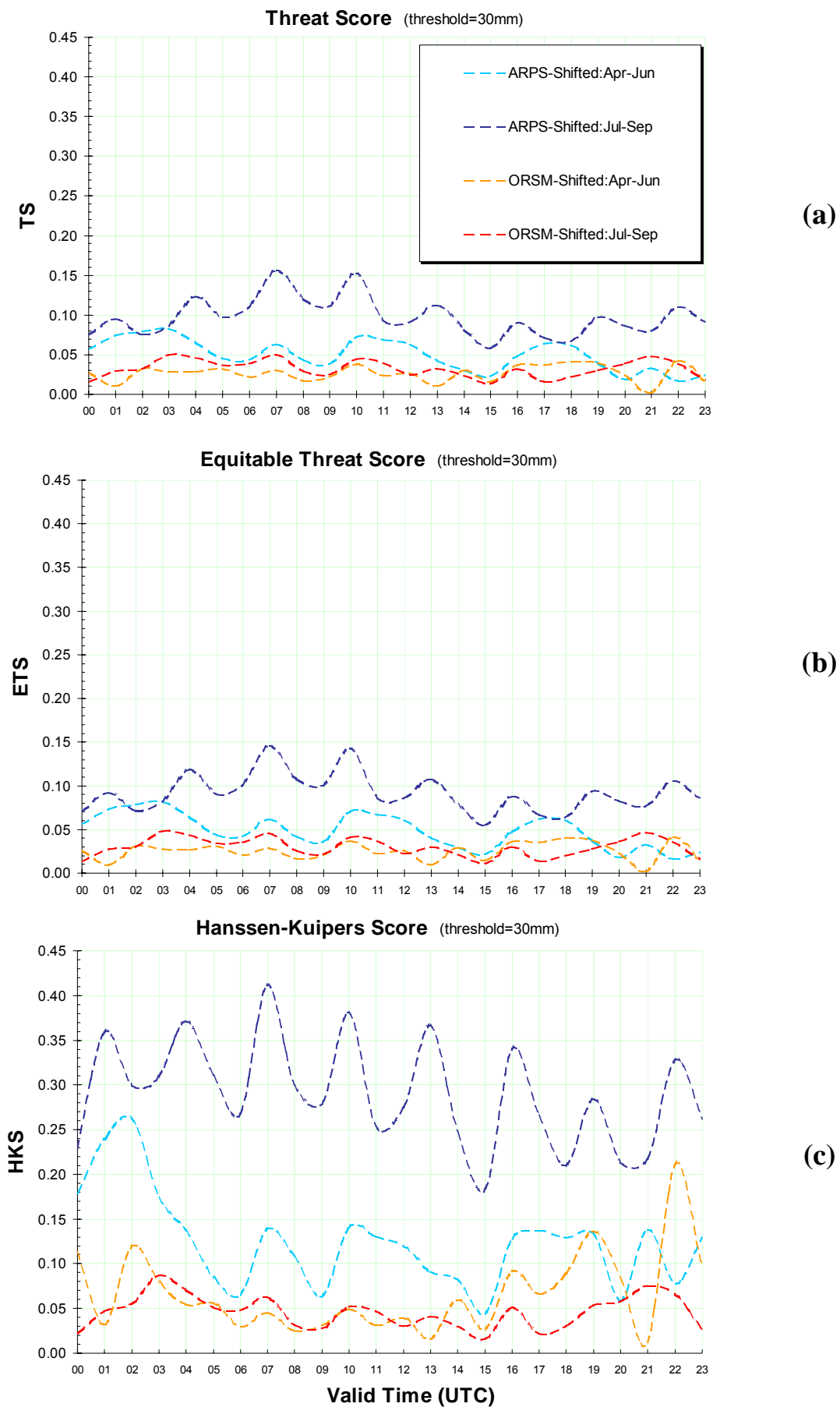


(b)

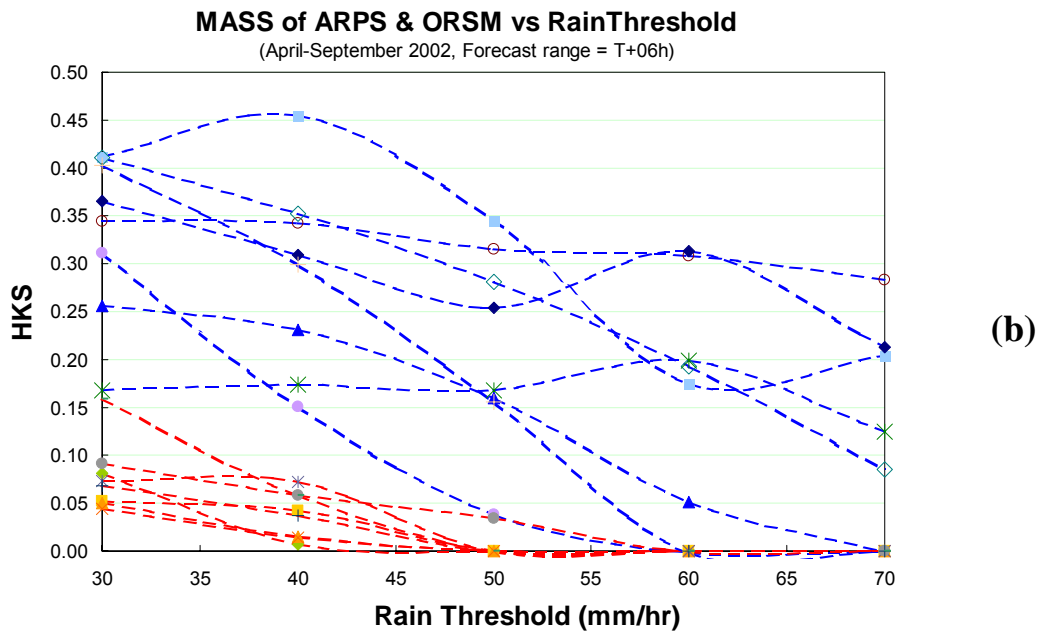
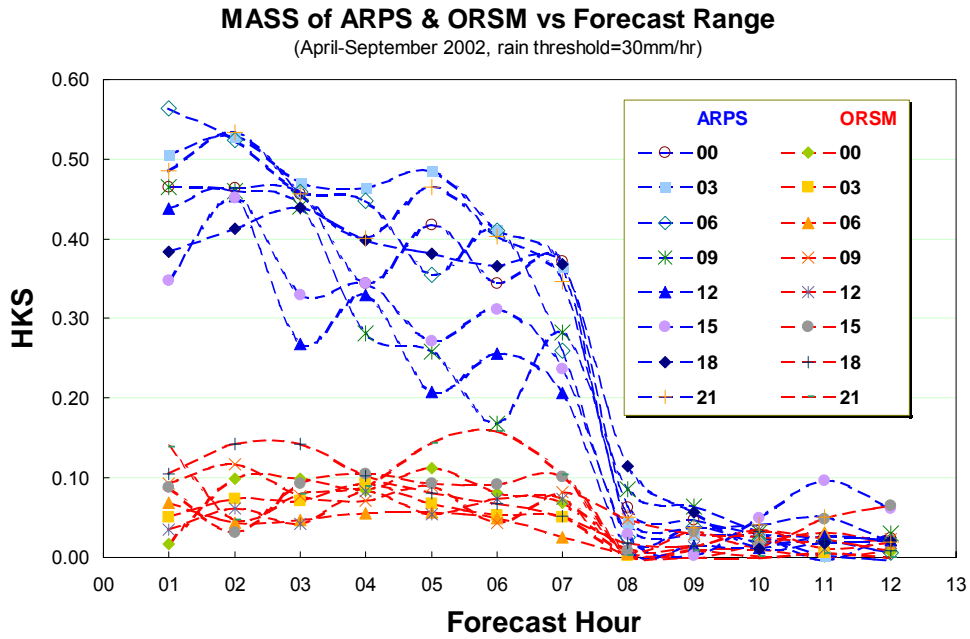
圖(一) 傳統技巧評分與 MASS 的比較：(a)傳統 T 評分(Threat Score)；(b)經過物件導向方法撇除位置誤差後的 T 評分 (MASS)。數據來源：ORSM (偏紅色虛/實線)及 ARPS (偏藍色虛/實線)在 2002 年 4 月至 9 月的大雨預測。



圖(二) MOQVS 的驗證範圍：以香港為中心，涵蓋東經 112.125 至 116.125 度，北緯 20.325 至 24.325 度，分辨率約 25 公里，包含 256 個網格點。

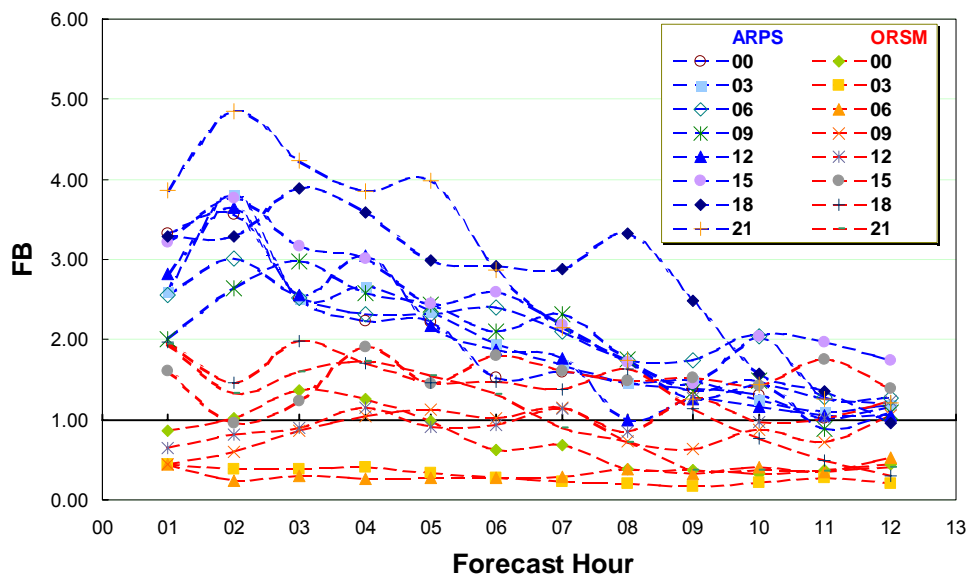


圖(三) MASS (虛線)在不同驗證時間上的變化：(a) Threat Score (TS)、(b) Equitable Threat Score (ETS)及(c) Hanssen-Kuipers Score (HKS)。冷色和暖色調分別代表 ARPS 及 ORSM，而同一色調中的淺色和深色則用以區分初夏和盛夏。

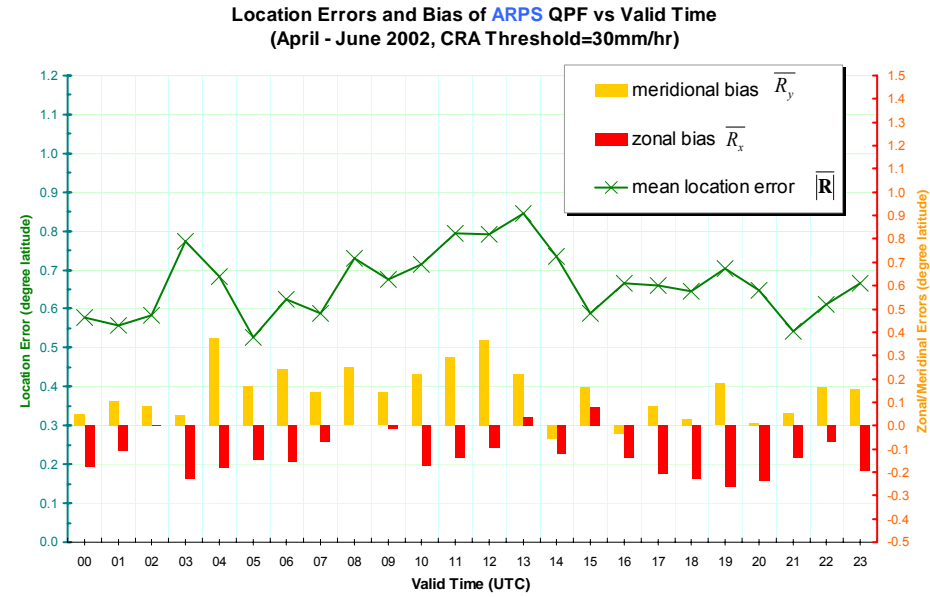


圖(四) ARPS (藍色虛線)及 ORSM (紅色虛線)在 2002 年 4 至 9 月的平均 MASS (以 HKS 計) : (a)不同預報時效 (預測雨勢為每小時 30 毫米或以上)和(b)不同雨勢 (預報時效為 6 小時)上的轉變。

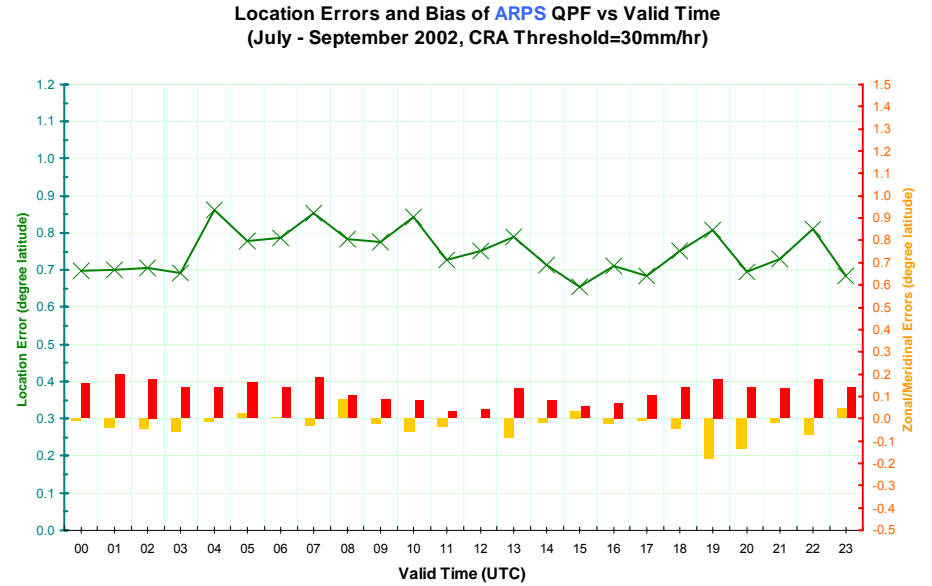
**Frequency Bias of ARPS & ORSM vs Forecast Range**  
 (April-September 2002, rain threshold=30mm/hr)



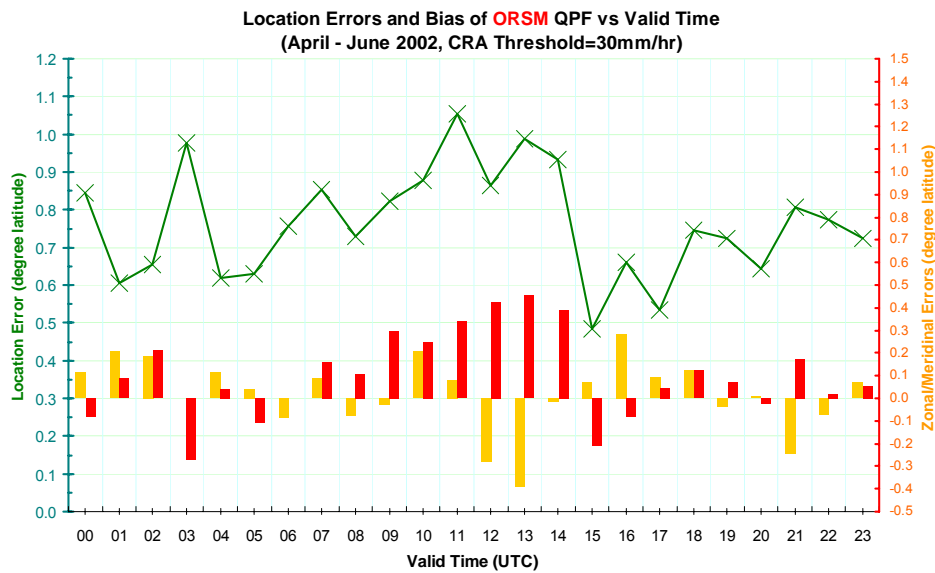
圖(五) ARPS (藍色虛線) 及 ORSM (紅色虛線) 在 2002 年 4 至 9 月的平均預報頻率偏差(FB)。



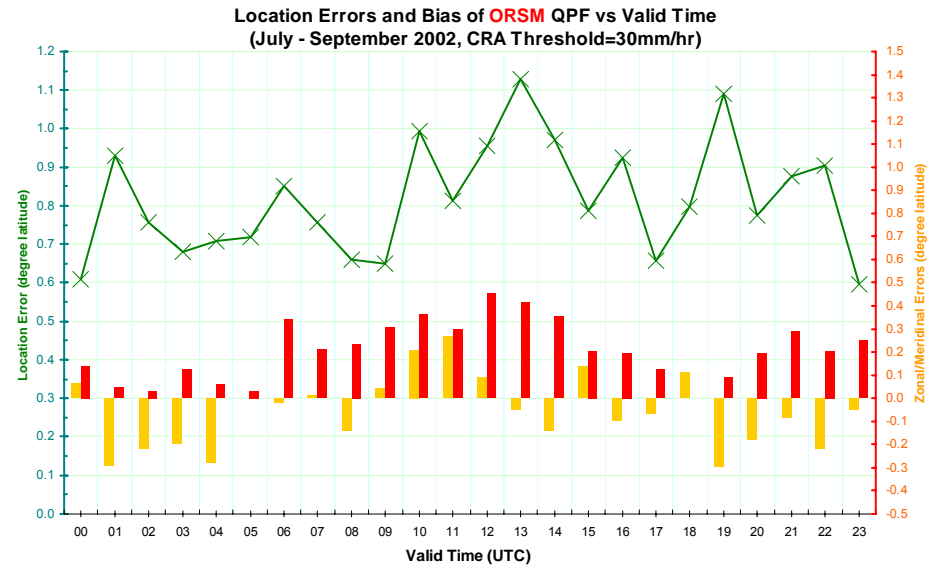
(a)



(b)

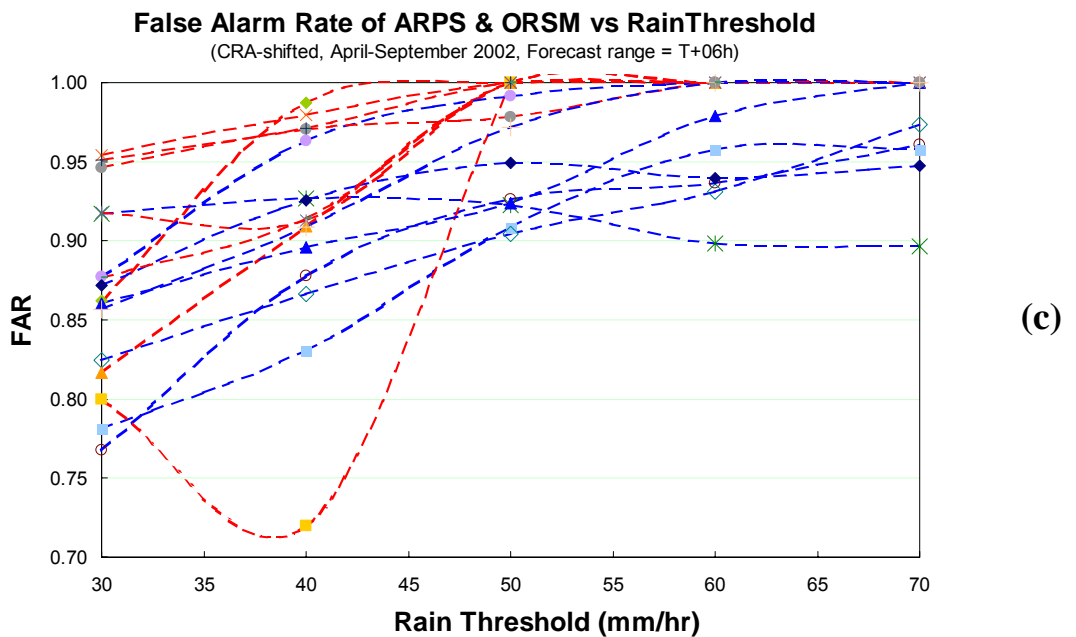
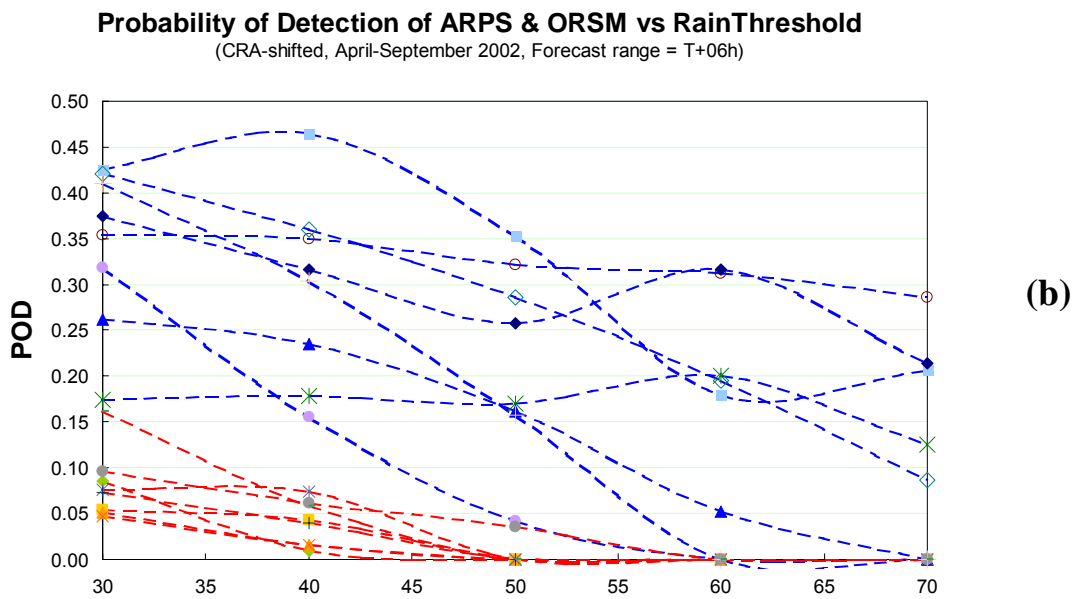
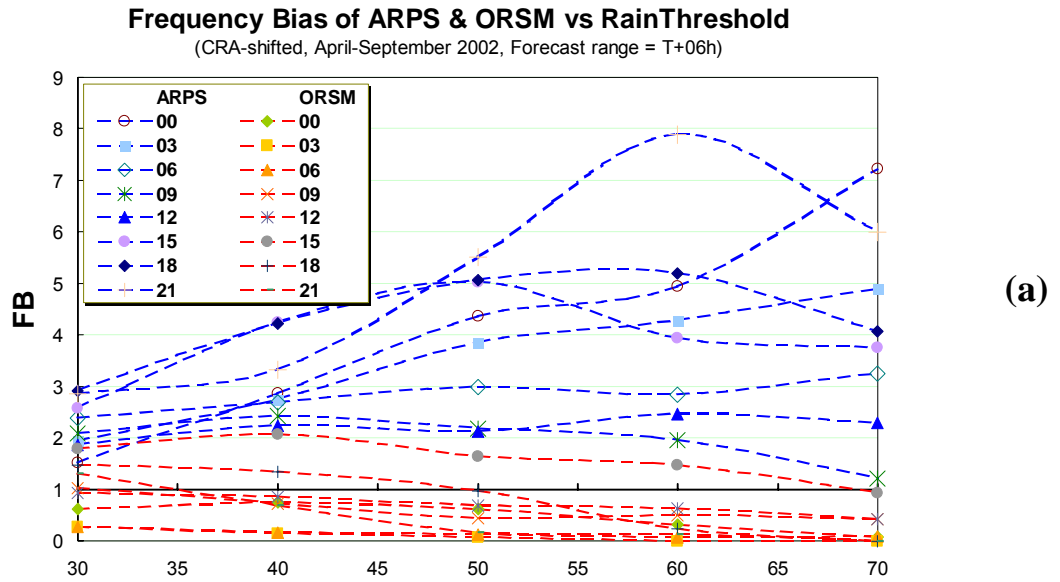


(c)

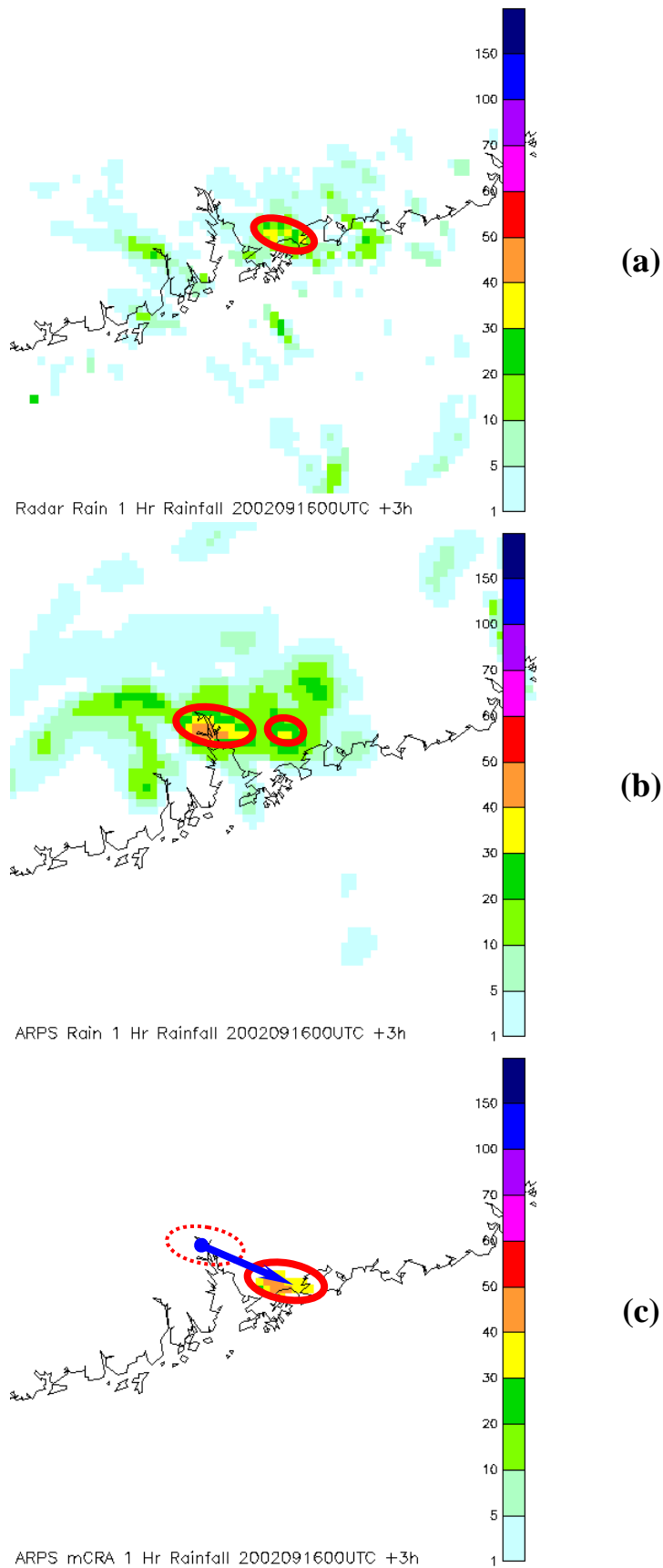


(d)

圖(六) ARPS 及 ORSM 的 QPF 位差：(a) ARPS，2002 年 4 至 6 月；(b) ARPS，2002 年 7 至 9 月；(c) ORSM，2002 年 4 至 6 月；(d) ORSM，2002 年 7 至 9 月。綠色折線值及黃、紅兩色的直方圖分別代表  $|\bar{R}|$ 、 $\bar{R}_y$  及  $\bar{R}_x$  值在不同驗證時間上的變化。



圖(七) ARPS (藍色虛線) 及 ORSM (紅色虛線) 其中三個統計量 (2002年4至9月平均) 在不同雨勢 (預報時效為6小時) 上的變化: (a) 預報頻率偏差(FB)、(b) 命中率(POD) 及 (c) 虛報率(FAR)。



圖(八) 大雨 CRA (紅圈) 及 TMSE 極小化位移矢量 (藍色箭頭):(a)實況 (b)ARPS 預測雨量分佈圖及(c) TMSE 極小化位移後的 CRA。