

台灣自動即時預報系統(TANC)之對流啟始預報評估

張惠玲 吳佳蓉 林允才 唐玉霜 黃葳凡 陳嘉榮

中央氣象局衛星中心

摘要

本研究主要針對 2014 年 5 個午後對流個案，評估台灣自動即時預報系統(Taiwan Auto-Nowcaster, TANC)未來 1 小時之對流啟始預報(nowcasts of convective storm initiation)的表現，結果顯示：TANC 呈現明顯的過度預報，但具有相當好的區辨能力；相較於氣象局之短時高解析模式 STMAS-WRF，TANC 可提供更正確、更具參考價值的午後對流預報資訊。

由於午後對流啟始預報有很大的不確定性，在應用上必須考量所預報之對流可能在時間或空間上有所偏移。因此，本研究除測試不同機率門檻對預報表現之敏感度外，同時測試 TANC 在不同空間及時間窗區(spatial and temporal window)下的預報表現差異。結果顯示：針對午後對流個案，TANC 可以 0.6 作為最佳機率門檻。當容許預報有 4 km 的空間不確定性時，預兆得分(TS)和前估得分(POD)可達 0.17 和 0.59；而容許預報有前後 18 分鐘的時間不確定性時，TS 和 POD 可達 0.19 和 0.65。

關鍵字：對流啟始預報(nowcasts of convective storm initiation)、不確定性(uncertainty)、機率門檻(probability threshold)、時間及空間窗區(temporal and spatial window)

一、前言

針對即時預報，最大的挑戰之一包括預報是否有對流發生以及對流將發生在何時與何地。有些時候，即便大氣環境存在很大的對流可用位能(convective available potential energy, CAPE)，也未必有對流風暴發生；這是因為同時有頗大的對流抑制(convective inhibition, CIN)阻攔了對流的產生。大尺度的抬升(ascent)、白天的地表加熱以及海陸風或山谷風前緣之中尺度邊界(mesoscale boundaries)都有助於克服對流抑制，而導致對流風暴之發展。Hsu(1970)分析美國德州南部沿岸長期的海陸風觀測資料，指出海風鋒(sea breeze front)通過時，積狀雲會在其前緣最大上升運動區形成，而對流性陣雨大多在海風發展最旺盛後 1~2 小時，發生於輻合最強之區域附近。這是因為中尺度邊界可提供對流發展足夠的舉升作用(lifting)，因此模式初始場中是否包含詳細的中尺度邊界資訊對於能否正確預報對流啟始的時間和地點是相當重要的。然而，目前的觀測網密度並不足以解析重要的中尺度邊界特性，因此，對流啟始預報仍舊是短時預報中極具挑戰的一個課題。

本研究主要是針對弱綜觀(weak synoptic forcing)環境下在台灣地區生成的午後對流系統，利用臺灣自動即時預報系

統(Taiwan Auto-Nowcaster, TANC)進行未來 1 小時之對流啟始預報(nowcasts of convective storm initiation)，並綜合評估 TANC 之預報表現，以做為後續 TANC 發展和改進之重要依據。午後對流雖不屬劇烈天氣，但急遽增強的午後對流同樣會造成傾盆大雨和淹水，讓無預警之民眾措手不及。

本文結構如下：第二部份將簡單介紹 TANC 系統和個案資料，第三部分介紹校驗方法，第四部分是校驗結果，包括機率預報偏差、區辨能力以及 TANC 與短時高解析熱啟動(hot-start)模式 STMAS(Space and Time Multiscale Analysis System)-WRF 之比較。第五部分是敏感度測試，包括預報表現對機率門檻、空間和時間緩衝窗區(spatial and temporal window)的敏感度，最後一部分是結論與展望。

二、TANC 系統及個案資料

TANC 是由美國大氣研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)引進中央氣象局，並針對台灣特殊之天氣和地理環境進行在地化(localization)，使之更適用於台灣對流系統之預報。目前 TANC 可提供每六分鐘一筆的即時預報產品，其模式範圍如圖 1 所示，空間解析度是 0.01 度。

TANC共有12個預報因子，針對不同的對流系統可以選擇不同的預報因子組合。目前CWB採用其中8個預報因子來進行午後對流之啟始預報，此8個預報因子依影響尺度分為三類(分別為大、中和小尺度)，再依其特性細分為氣候統計、穩定度等等，各層之權重總和為1(圖2)。TANC採用模糊邏輯的概念，將各預報因子對午後對流之相關程度以隸屬函數(membership function)來描述，用以產生每個格點之隸屬度。將各預報因子的隸屬度乘上相對應的權重，再加總起來，即可得到午後對流發生的可能性(likelihood)，亦即是午後對流發生的機率。

本研究主要針對2014年暖季5個比較有組織且生命期較長的午後對流個案(共141報之1小時對流啟始預報)，詳細評估TANC之預報表現，個案列表如表1。

三、校驗方法

(一) 機率預報轉為決定性預報

如何將TANC的機率預報轉為決定性預報呢?首先需選定一個機率門檻(probability threshold, Pt; 比方說0.8)，當預報機率 ≥ 0.8 這個門檻時，就視為TANC預報有對流發生。本研究用以校驗的觀測場來自TANC對每個格點的對流狀態辨識，每個格點會被區分為4種不同的對流狀態，包括：無對流(no storm)、新生對流(new storm)、持續性對流(ongoing storm)以及消散性對流(decaying storm)。在本研究中，新生對流和持續性對流被歸類為觀測有對流產生，而無對流和消散性對流則是歸類為觀測無對流產生。透過這樣的轉換，每個格點將分屬於2x2列聯表(contingency table)中四種可能狀況的其中一種，因此我們就可計算threat score (TS)、Bias score (BIAS)、probability of detection (POD)、false alarm ratio (FAR)和Kuiper score (KS)等校驗得分。

(二) 鬆弛法(relaxation method)

由於午後對流啟始預報有很大的不確定性，在實際應用上必須考量所預報之對流可能在時間或空間上有所偏移。因此在本研究第五部分-敏感度測試，我們將透過鬆弛法(Lakshmanan et al. 2012)來評估TANC在不同時間與空間緩衝窗區下的預報表現，亦即由原先格點鄰域的校驗，放寬為格點鄰域周圍 $(2N+1) \times (2N+1)$ 個格點的校驗。

以 $N=1$ (亦即容許東西南北方向上有1個格點的空間緩衝區)為例來說明。假定TANC預報某格點有對流發生，如果是採用點對點(pixel-to-pixel)的校驗方法，必須在同一格點

觀測到有對流產生才算「命中(hit)」；但如果允許有1個格點的空間緩衝，那麼只要在以原格點為中心的3x3個格點中，有任一格點觀測到有對流產生就算「命中」。因此，允許空間上的緩衝會提高命中次數。同樣的，針對錯誤預警(false alarm)部分，原先只要在同一格點觀測到無對流產生就算「錯誤預警」；但允許1個格點的空間緩衝則須滿足3x3個格點均無對流產生才算「錯誤預警」，因此，錯誤預警的次數會降低。而在漏報(miss)部分，如果觀測場在某校驗格點上有對流產生，原先只要TANC在同一格點預報無對流產生就算「漏報」；但現在必須其周圍3x3個格點均預報無對流產生才算「漏報」，因此漏報的次數會降低。凡不屬於以上3種狀況者，就歸類在列聯表中的correct rejection。

(三) 信賴區間和拔靴法

信賴區間(confidence interval)是利用一組樣本對其母體(population)的某個測試統計量(例如平均數、中位數或標準差等)進行區間估計，以瞭解此測試統計量其量測值的可信程度，並用以描述樣本對母體參數估計的不確定性。如何建立信心區間呢?首先需選定一個信心程度(confidence level)，例如95%，此信心程度代表信賴區間涵蓋母體參數的機率。簡言之，信賴區間考慮了樣本變異以及樣本數目有限所造成的統計不確定性，因而可對預報表現提供更具參考價值的資訊。

在本研究中，我們是採用拔靴法(bootstrap method; Wilks 2006)，透過重新取樣(resampling)來建立信賴區間。拔靴法的概念在於每個樣本是獨立的，因此每個樣本被抽到的機率是相等的。重新取樣的過程相當於將 N 個樣本值寫在 N 顆球上，然後將 N 顆球放到一個箱子中。若要產生一個拔靴樣本(bootstrap sample)，則必須從箱子中抽取 N 顆球，但每顆球在下顆球被抽取前，必須先放回箱子中。透過重新取樣過程，我們可以得到大量的拔靴樣本(本研究的拔靴樣本數是10,000)，並建立母體參數的樣本分佈(sampling distribution)，進而對母體參數進行統計推論。

四、校驗結果

由於TANC所提供的是未來1小時雷達回波 >35 dBZ(視為有對流發生)的機率，因此我們利用reliability diagram和Relative operating characteristic (ROC)互相配合來評估TANC的預報能力。Reliability diagram主要反應預報偏差，而ROC對於偏差並不敏感。一個有偏差的預報系統仍然可能有好的ROC曲線，因此ROC可做為模式潛在可用性的評估依據。此外，我們也利用預報員及使用者較為熟悉的非機率校驗方法

(TS、BIAS、POD、FAR和KS)來評估TANC的預報表現，亦即透過機率門檻的設定，將機率預報轉為決定性預報。

(一) 機率預報偏差

圖3右欄是TANC未來1小時對流啟始預報的Reliability diagram(Hsu and Murphy 1986)。圖中的實線是信賴曲線(reliability curve)，可用以瞭解預報機率和觀測頻率間的一致性；對角線代表完美預報。當信賴曲線與對角線愈靠近時，表示機率預報的偏差愈小，可信度愈高。當信賴曲線落在對角線下方時，代表模式過度預報或高估(overforecasting)；落在上方時，代表低估(underforecasting)。結果顯示TANC呈現明顯的過度預報。圖3左欄是相對應的直方圖(histogram)，顯示落在不同預報機率區間的樣本百分比，可以發現：預報機率为0.1和0.2的樣本占總樣本85%以上，這與TANC大尺度預報因子中的氣候綜合值(雷達氣候頻率以及雷達氣候趨勢)有關。這兩個預報因子係根據林等(2010)針對臺灣地區2005-2008年暖季(5-10月)在弱綜觀環境下之午後(12-20 LST)對流的雷達回波進行綜合而得到。由於台灣西南部山坡地好發午後對流，且對流持續時間頗長(亦即有很高的氣候頻率和趨勢)，因此TANC總是預報在臺灣西南部坡地有午後對流發生的可能性。

(二) 區辨能力

ROC曲線是利用一組遞增的預報機率做為機率門檻，所畫出x軸是錯誤預報率(false alarm rate)、y軸是命中率(hit rate)的曲線。ROC面積(ROC area)定義為ROC曲線下方的面積，可用以評估模式區辨事件和非事件的能力。ROC面積介於0和1之間，當ROC面積 >0.7 時，代表模式具有好的區辨能力(Buizza et al. 1999)。TANC的ROC面積高達0.96，顯示TANC具有極佳的區辨能力。

(三) TANC 與 STMAS-WRF 之比較

短時(0-12小時)高解析(水平解析度為3 km)熱力預報模式STMAS-WRF採用非絕熱資料同化，因此得以有效減輕傳統模式的spin-up問題，而在模式預報初期是供更正確的降水預報，目前是氣象局0-12小時降水預報之重要參考依據。

由於STMAS-WRF模式每3小時進行一次預報，而TANC是每6分鐘一報，因此我們只取TANC每小時正點上的對流啟始預報與相對應之STMAS-WRF最近一報的垂直最大回波(CV)預報進行校驗比較，共有24報可供校驗比較。TANC是以0.6做為機率門檻(請參見五(一)預報表現對機率門檻的

敏感度測試：0.6為最佳機率門檻)，而STMAS是以35dBZ做為CV門檻，這是因為TANC是預報未來1小時生成35 dBZ以上之對流性回波的可能性。

整體而言(參見圖5之performance diagram; Roebber 2009)，TANC有較高的TS(亦即預報的正確性較高)，24個預報中有9報的TS介於0.05~0.2間，而STMAS-WRF僅有2報高於0.05；TANC雖然呈現過度預報，但不及STMAS-WRF嚴重，TANC有7報的Bias <1.0 ，10報的Bias介於1~3之間，而STMAS-WRF有18報的Bias >3 ；TANC的成功預報率(success ratio, SR; $SR=1-FAR$)相對較高(亦即FAR相對較小)。此外，STMAS-WRF在24報中，有10報是TS和POD均為0，且FAR為1；換言之，預報與觀測結果是完全沒有交集的。相較之下，TANC有較佳的預報表現。

表2列出兩模式KS的相關統計量摘要。STMAS-WRF的KS中位數是0.005，而其真實值有95%的信度落在-0.01和0.05之間；TANC的KS中位數明顯高於STMAS-WRF(0.11 vs 0.005)，此外，95%信心區間(0.025~0.21)也明顯較廣。TANC的預報技術(forecast skill)明顯優於STMAS-WRF。

五、敏感度測試

(一) 預報表現對機率門檻的敏感度

圖6是TANC在不同機率門檻下的預報表現，水平軸是不同的機率門檻，垂直軸分別是TS、BIAS、POD和FAR等校驗得分。盒圖(Box plot)中的盒子高度代表中間50%的樣本分布；盒子愈高代表TANC在不同報或不同個案間的預報表現(TS、BIAS、POD和FAR)變異愈大；盒子愈扁則是代表預報表現愈穩定。盒子腰部的橫線(中位數)用以代表TANC平均的預報表現。可以發現：機率門檻Pt介於0.3和0.6間的TS和FAR並沒有明顯的差異，但BIAS和POD均隨著Pt的提高而明顯降低。在此情況下，該如何選取最佳的機率門檻？考量點應該是BIAS，而非POD。因為只要選擇較低的機率門檻就會有較高的POD(命中率)，但這樣做會導致過度預報，而出現過多的錯誤預警。從BIAS來看：我們應該選擇0.6作為最佳機率門檻。因為Pt介於0.3和0.5間的BIAS都明顯過大；雖然選擇0.6做為Pt還是呈現過度預報(Bias~2-5)，但提高Pt至0.7時，TANC卻呈現明顯的低估(underforecasting; $BIAS < 1$)，且TS會明顯降低。

此外，盒圖中位數兩側的資料分布是不對稱的，因此我們採用校驗得分的中位數(score median)來代表TANC的平均預報表現，並以中位數做為測試統計量，利用拔靴法去建立

95%的信賴區間(圖7)。結果同樣顯示最佳Pt是0.6。此外, TS、POD和FAR的95%信賴區間是相當集中的(請注意圖7中, TS和FAR的刻度間距是很小的), 顯示校驗結果的可信度相當高。

(二) 校驗得分對空間緩衝窗區的敏感度($S=2N+1$)

圖8和9是TANC以0.6做為機率門檻, 在不同空間緩衝窗區下的預報表現, 水平軸是空間緩衝窗區的格點數, 垂直軸分別是TS、BIAS、POD和FAR等校驗得分。緩衝格點為0代表點對點的校驗結果, 緩衝格點為1($N=1$, $S=3$)代表緩衝區是 3×3 格點範圍之校驗結果。結果顯示: 隨著緩衝格點數的增加, TS和POD均提高(特別是POD), FAR明顯降低, 但BIAS的變動不大。當我們允許東西南北方向有4個格點的空間緩衝(~ 4 km的位置偏差)時, TS和POD平均可達0.17和0.59, 而FAR和BIAS約為0.79和2.2。

(三) 校驗得分對時間緩衝窗區的敏感度($T=2N+1$)

圖10和11同圖8和9, 但為不同時間緩衝窗區下的預報表現。緩衝時間為0代表預報和觀測在同一時間點上的校驗結果; 緩衝時間為6分鐘($N=1$, $T=3$)代表允許對流啟始預報有前後6分鐘的不確定性, 亦即TANC未來1小時預報顯示有對流發生時, 代表未來54~66分鐘內可能有對流產生。可以發現: 當我們允許有前後18分鐘的預報不確定性時, 平均而言, TS和POD可達0.19和0.65, 而FAR和BIAS約為0.78和2.5。

六、結論與展望

午後對流是時間和空間尺度很小的對流系統, 其生成、發展與消散受到綜觀環境、地形、熱力條件和中尺度環流等多重因素之影響。以目前的觀測資料密度而言, 即便是高解析的熱啟動模式也無法正確預報其發生的時間和地點, 因此對流啟始預報仍是短時預報中極具挑戰性的課題。

本研究主要針對2014年5個月綜觀環境下的午後對流個案, 評估台灣自動即時預報系統(TANC)之對流啟始預報表現。TANC呈現明顯的過度預報, 但具有相當好的區辨能力。相較於動力為主的中尺度對流系統, TANC午後對流啟始預報之校驗結果似乎不盡人意, 但我們想了解的是: 以臺灣目前作業的模式預報技術而言, TANC是否有其發展價值? 校驗結果顯示: 相較於氣象局之短時高解析熱啟動模式STMAS-WRF, TANC確實可提供更正確且更具參考價值的午後對流預報資訊。

由於午後對流啟始預報有很大的不確定性, 在應用上

必須考量所預報之對流可能在時間或空間上有所偏移。因此, 本研究除測試不同機率門檻對預報表現之敏感度外, 同時也測試TANC在不同空間及時間緩衝窗區下的預報表現差異。結果顯示: 針對午後對流個案, TANC可以0.6做為最佳機率門檻。當容許預報有4個格點之空間緩衝(~ 4 km的位置偏差)時, TS和POD可達0.17和0.59; 而容許預報有前後18分鐘的時間不確定性時, TS和POD可達0.19和0.65。

目前採用的預報因子中, CAPE、CIN以及850-500 hPa平均的相對濕度是來自WRF模式分析場(空間解析度約15 km, 而時間解析度是1小時), 而地面輻合(surface convergence)來自地面測站的風場觀測(空間解析度約9-10 km)。此4個預報因子的時間和空間解析度都難以解析午後對流之大氣環境特性。未來考慮嘗試由STMAS或Variational Doppler radar analysis system (VDRAS)分析場提供高時間和空間解析度的風場、熱力場和濕度場等相關資訊。

另一個重點是: TANC目前所採用的預報因子之隸屬函數和權重大多是主觀的人為給定, 未來考慮透過可信的過濾程序(screening or filtering procedure), 例如forward selection procedure進行預報因子之挑選, 剔除彼此高度相關的預報因子, 或多餘的預報因子, 使TANC有更適當的線性迴歸式以進行對流啟始預報。此外, 或許午後對流發生的可能性與預報因子間的關係是非線性的, 未來也可用非線性的迴歸關係式(例如 logistic regression)進行測試, 並與線性迴歸比較, 以找出較佳的統計迴歸預報。

參考文獻

- 林品芳、張保亮與周仲島, 2010: 弱綜觀環境下台灣午後對流特徵及其客觀預報。大氣科學, 77-108。
- Buizza, R., A. Hollingsworth, F. Lalaurette, and A. Ghelli, 1999: A Probabilistic predictions of precipitation using the ECMWF Ensemble Prediction System. *Wea. Forecasting*, **14**, 168-189.
- Hsu, S. A., 1970: Coast air circulation system: Observation and empirical model. *Mon. Wea. Rev.*, **98**, 487-509.
- Hsu, W.-R., and A. H. Murphy, 1986: The attributes diagram: A geometrical framework for assessing the quality of probability forecasts. *Int. J. Forecasting*, **2**, 285-293.
- Lakshmanan, V., J. Crockett, K. Sperow, M. Ba, and L. Xin, 2012: Tuning AutoNowcaster Automatically. *Wea. Forecasting*, **27**, 1568-1579.
- Roebber, P. J., 2009: Visualizing Multiple Measures of Forecast Quality. *Wea. Forecasting*, **24**, 601-608.
- Wilks, D. S., 2006: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2nd ed. Academic Press, 627 pp.

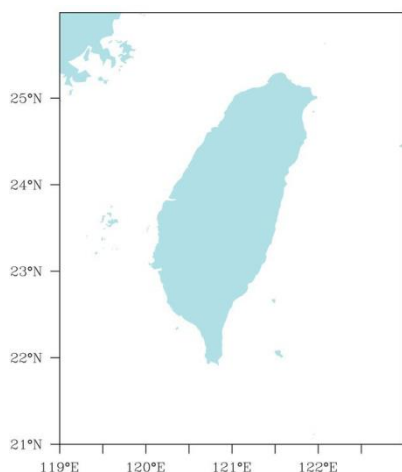


圖 1、TANC 模式範圍。

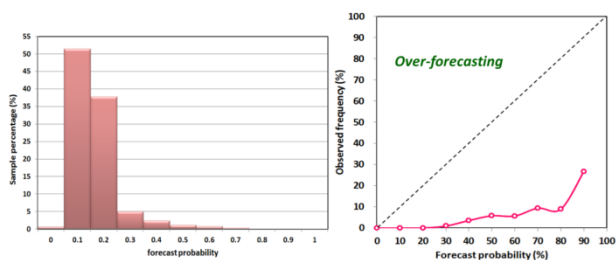


圖 3、右欄顯示 TANC 1 小時午後對流啟始預報之 reliability diagram，而左欄是相對應的直方圖(histograms)，顯示落在不同預報機率區間的樣本百分比。

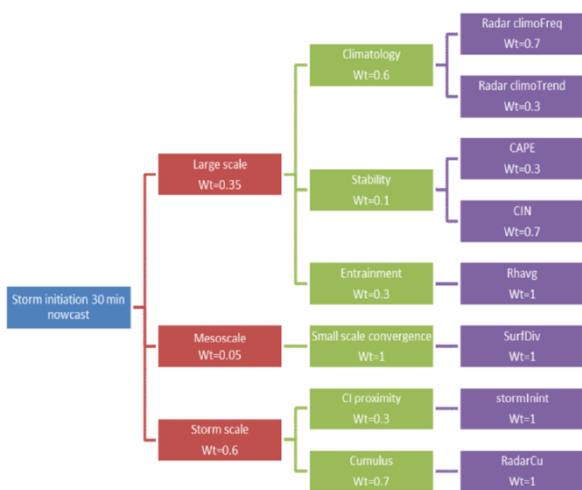


圖 2、未來 1 小時午後對流啟始預報之預報因子及其相對應權重。

表 1、本研究之午後對流個案。

個案日期：校驗的報數	開始和結束時間
30 Jun (34)	0606 - 0930 UTC
01 Jul (24)	0730 - 0948 UTC
27 Aug (33)	0618 - 0930 UTC
29 Aug (30)	0718 - 0906 UTC
	0930 - 1030 UTC
09 Sep (20)	0730 - 0930 UTC
Total: 141 1-h nowcasts	

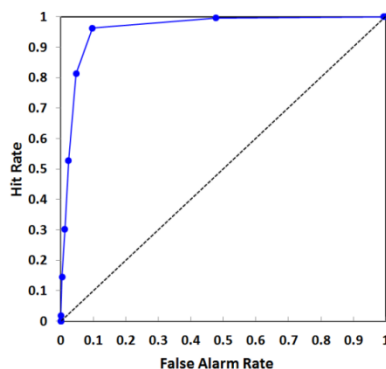


圖 4、TANC 未來 1 小時午後對流啟始預報之 ROC 曲線。

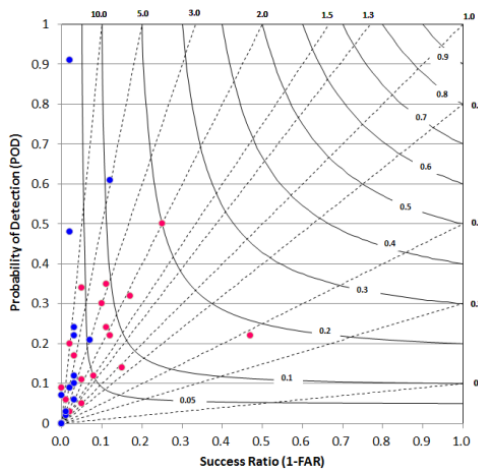


圖 5、午後對流個案校驗結果之 performance diagram。紅點和藍點分別是 TANC 和 STMAS-WRF 的結果。

表 2、利用個案樣本求得的中位數及利用 bootstrap 方法求取之 95% 信心區間。

預報系統	個案樣本之 KS 中位數	bootstrap 方法求得之 KS 中位數的 95% 信心區間
TANC	0.110	(0.025, 0.210)
STMAS-WRF	0.005	(-0.010, 0.050)

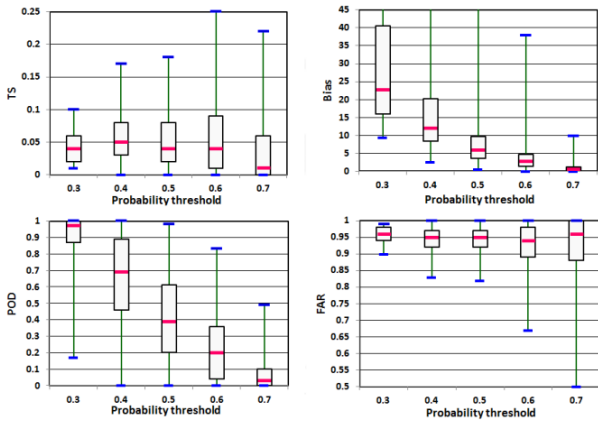


圖 6、TANC 在不同機率門檻下之校驗成績盒圖，包括 TS(左上)、Bias (右上)、POD (左下) 和 FAR(右下)。

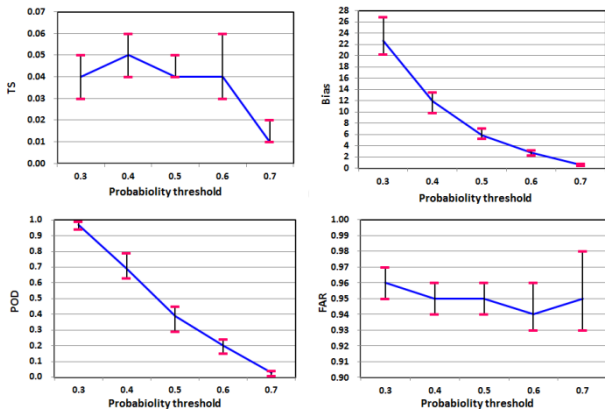


圖 7、TANC 在不同機率門檻下之平均校驗成績(中位數)及其 95%信心區間，包括 TS(左上)、Bias(右上)、POD(左下)和 FAR(右下)。

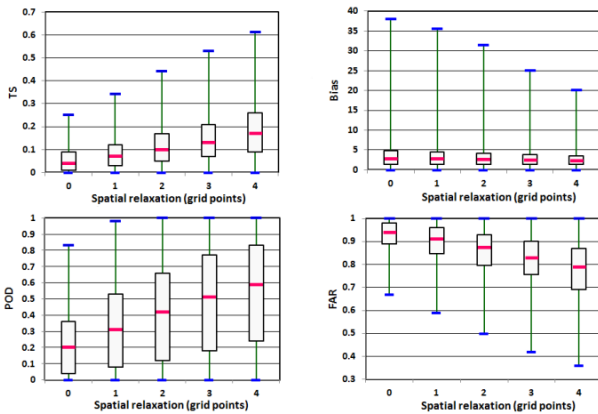


圖 8、TANC 採用 0.6 做為機率門檻，在不同空間窗區下之校驗成績盒圖，包括 TS(左上)、Bias (右上)、POD (左下) 和 FAR(右下)。

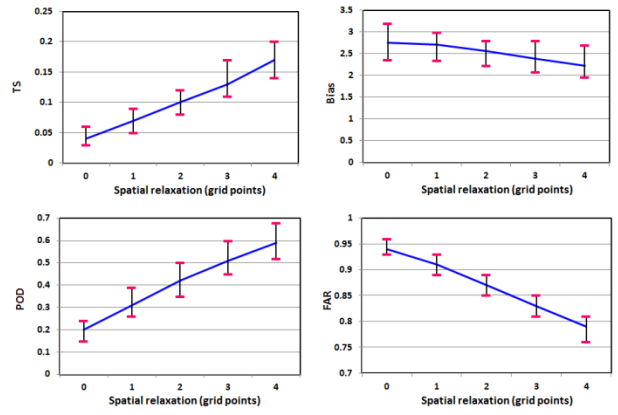


圖 9、TANC 採用 0.6 做為機率門檻，在不同空間窗區下之平均校驗成績(中位數)及其 95%信心區間，包括 TS(左上)、Bias(右上)、POD(左下)和 FAR(右下)。

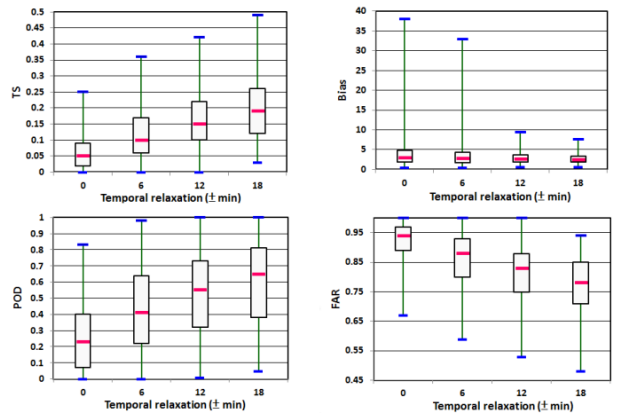


圖 10、TANC 採用 0.6 做為機率門檻，在不同時間窗區下之校驗成績盒圖，包括 TS(左上)、Bias (右上)、POD (左下) 和 FAR(右下)。

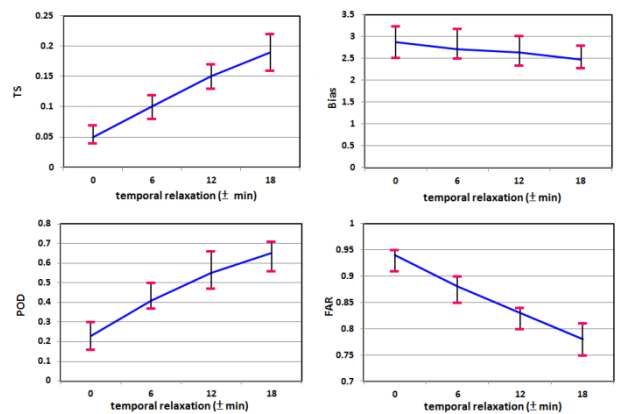


圖 11、TANC 採用 0.6 做為機率門檻，在不同時間窗區下之平均校驗成績(中位數)及其 95%信心區間，包括 TS(左上)、Bias(右上)、POD(左下)和 FAR(右下)。