



香港天文台

HONG KONG OBSERVATORY

Reprint 867

天文台新一代數值天氣預報系統

黃偉健 & 周志堅

第二十四屆粵港澳氣象科技研討會

深圳，2010 年 1 月 20-22 日

天文台新一代數值天氣預報系統

黃偉健、周志堅

香港天文台

摘要

天文台計劃在2010年雨季前開始業務運行新一代數值天氣預報系統。預報系統包含水平分辨率為10公里及2公里的非流體靜力模式(NHM)，配合三維變分資料同化方案(3DVAR)及局地分析及預報系統(LAPS)處理雷達和衛星數據，提供高空間解象度及頻密更新(每1-3小時)的模式輸出，包括超短期(0-12小時)以至未來三日的天氣預測。本文將介紹新一代數值天氣預報模式系統的開發及應用，闡述預報系統於熱帶氣旋及暴雨個案的表現，以及討論模式試驗運行的初步驗證結果。

1. 引言

香港天文台在1999年開始業務運行中尺度區域譜模式系統(Operational Regional Spectral Model - ORSM)，該模式系統使用了流體靜力假設，提供高達每三小時更新、水平分辨率最高為20公里的數值預測，以支援短時天氣預報工作及未來三天的短期天氣預測。隨著數值模式技術的發展，天文台在數年前開展非流體靜力學模式的引進工作，加強中尺度和對流尺度的短期降雨預報能力。在2004年4月起，天文台開始試驗運行一套由日本氣象廳(Japan Meteorological Agency - JMA)引進的非流體靜力學模式系統(Non-hydrostatic Model - NHM)[1]，水平分辨率為5公里，每小時更新，預報時效為12小時，使用20公里水平分辨率ORSM預報作為初始及邊界條件，並透過局地分析及預報系統(Local Analysis and Prediction System - LAPS)[2]處理雷達和衛星數據，提供NHM所需的雲物理水凝物(cloud hydrometeors)比濕分佈初始場，減低模式的旋轉加強時間(spin-up time)，希望令模式定量降雨預測得以改進，並且能應用於與雷達降雨臨近預報的融合[3]。同時，NHM的模式預測提供高分辨率LAPS(水平分辨率由5公里至數百米)實時中尺度分析系統所需要的背景場數據，讓LAPS更有效地應用雷達、衛星以及自動氣象站等觀測資料。

綜合過去數年引進JMA-NHM的經驗，天文台計劃在2010年雨季前開始業務運行以NHM為主的新一代數值天氣預報系統，稱為『大氣綜合快速循環預報模式系統』(Atmospheric Integrated Rapid cycle (AIR) forecast model system)，主要特徵包括完全使用非流體靜力學模式，不作流體靜力假設，以及提高空間分辨率，當中模式水平分辨率最高達2公里，以全面提升中尺度至局部尺度、由未來數小時至三天的數值預報能力。本文將介紹新系統的設計和初步試驗運行的效果。下文第2及第3節將介紹AIR中的NHM與資料同化系統的架構；第4節會討論NHM預報暴雨和熱帶氣旋個案及初步驗證結果；第5節會作出總結，並展望將來NHM的發展。

2. 非流體靜力學模式(NHM)

NHM是由日本氣象廳的數值預報課(Numerical Prediction Division - NPD)及氣象研究所(Meteorological Research Institute - MRI)共同開發的統一模式[1]，並且是目前JMA業務中尺度數值天氣預報模式系統[4]。

天文台將會運行的AIR預報模式系統包括兩個區域範圍的NHM(圖1)。外範圍的Meso-NHM水平分辨率為10公里，垂直有50層，每3小時運行一次，提供未來72小時預報，針對暴雨、熱帶氣旋路徑與強度及其他影響香港及華南地區的中尺度天氣系統的短時期預測。Meso-NHM的邊界場由JMA全球譜模式(GSM)每6小時更新的預報數據產生，而海面溫度場則自美國國家環境預報中心(NCEP)高分辨率(約10公里)實時每日海溫分析數據獲得。內範圍的RAPIDS-NHM水平分辨率為2公里，垂直有60層，利用Meso-NHM預報作為邊界值，並每小時運行一次，提供未來12小時預報，覆蓋範圍與現時試驗運行的5公里水平分辨率NHM基本一致，目標是提升模擬中小尺度系統及對流天氣演變的效用，進一步改善與臨近預報的融合及拓展其他局地尺度預報應用，例如香港各區氣溫及風的預報。

NHM的動力學框架是使用完全壓縮型非流體靜力學控制方程式，採用有限差分法，時間積分採用水平顯式-垂直隱式(HEVI - Horizontal Explicit Vertical Implicit) 的時間分離(time-splitting)計算方案。NHM水平與垂直網格離散化分別使用Arakawa-C跳點網格及Lorenz方案。地形高度及地表特徵由USGS GTOPO30 及 GLCC2 資料集計算，並加入香港範圍的高分辨率地形(USGS SRTM - Shuttle Radar Topography Mission)及都市區域分佈資料。

對於對流天氣系統的模擬，NHM是採用顯式雲物理過程，雲物理過程會考慮水凝物 - 包括水氣、雲水、雲冰、雪和霰的比濕作為預報變量，而三種固態水氣的數濃度(number density)是經由診斷方程獲得。同時，NHM

包括多種對流參數化方案，Meso-NHM及 RAPIDS-NHM均採用經改進的 Kain-Fritsch對流參數化過程[1]，並因應水平分辨率的差異及個案研究作出參數的調整。至於湍流閉合方案，NHM應用了 Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino三階湍流閉合模型[5]，配合部分凝結方案及經由大渦模擬(large eddy simulation)結果訂正的湍流閉合參數，有助NHM模擬邊界層湍流渦旋效應，以及動量、熱量及水氣交換等過程[6]。

3. NHM資料同化系統

NHM採用三維變分資料同化系統，簡稱為JNoVA-3DVAR (JMA Non-hydrostatic model based Variational data Assimilation system)。JNoVA-3DVAR建基於其4DVAR系統的框架[7]，並應用於JMA的業務每小時大氣分析運算。正如其他的變分資料同化系統，JNoVA-3DVAR計算最優化的模式狀態變量(state variables)或控制變量(control variables)，以達致以下成本函數(cost function)的最小值：

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_B)\mathbf{B}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_B)^T + \frac{1}{2}(\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x})\mathbf{R}(\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x})^T$$

其中 \mathbf{x} , \mathbf{x}_B 為NHM的控制變量及背景值向量，包括水平風分量(u, v)，地面氣壓(p_s)，位溫(θ) 與及比濕及飽和比濕的比例(q_v/q_{vs})； \mathbf{y} 是觀測資料向量， \mathbf{H} 為觀測算子。 \mathbf{B} 和 \mathbf{R} 分別為背景及觀測誤差協方差矩陣(error covariance matrix)，背景誤差協方差矩陣經由NMC法[8]計算。

JNoVA-3DVAR可以處理和分析的觀測資料包括常規地面、海面、船舶和探空數據，與及地面自動氣象站、風廓線儀和飛機資料。氣象衛星方面，JNoVA-3DVAR亦能分析MTSAT-1R雲導風，NOAA極地軌道衛星的反演溫度垂直剖面(ATOVs retrieval profile)，與及從微波探測儀(microwave sounder)和全球定位系統(GPS)反演的大氣垂直總可降水量 (total precipitable water)。對於熱帶氣旋的初始結構，資料同化系統會根據預報員的熱帶氣旋

地面分析數據 - 即中心氣壓、最高風速和強風半徑資料，並且考慮風暴的非對稱結構，產生多個分佈於風暴中心附近的地面氣壓和風場(u,v)垂直剖面，作為類似探空資料的方式融入3DVAR分析中。不過，JNoVA-3DVAR現階段並未能直接處理雷達反射率以改善模式的水氣初始分佈；因此需要利用LAPS分析衛星可見光通道反射率以及紅外光通道亮溫，加上雷達資料揉合而成的垂直水氣分佈和總可降水量[2]，作為額外觀測數據加入JNoVA-3DVAR的分析運算。

4. NHM應用個案及討論

4.1 2009年5月24日個案 - 降雨位置

2009年5月24日一個廣闊低壓區影響南海北部，同時受到中國東南部的高壓脊所產生的輻合效應，與低壓區相關的外圍雨帶不斷在沿岸海域出現發展(圖2(a)-(c))。圖3(a)顯示Meso-NHM當日正午12時的海平面氣壓和1小時累積雨量預測，模式的起始時間為23日18UTC。3DVAR分析除包括常規觀測以外，還有香港和廣東省的自動氣象站、雲導風與ATOVS溫度垂直剖面資料。Meso-NHM能成功模擬珠江口附近雨帶的分佈，並一直延伸到沿岸海域。從850百帕及700百帕的風場和相對濕度場的預報圖(圖3(b)-(c))可見廣東沿岸出現一個廣闊的急流區(紅色等值線顯示風速大於20海浬以上的區域)，與雨帶的位置脗合，水氣主要集中在較低層，模式對流發展並不深厚，導致模式的雨量預測比實況強度較低。圖3(d)是RAPIDS-NHM的同一時間的預測，初始場由Meso-NHM的3小時預測產生，並包括所有的雲凝結物的比濕預報，整體上RAPIDS-NHM的預測雨帶分佈比Meso-NHM更為細緻，沿岸的雨帶發展亦比較集中於海岸線和相連的迎風面地形附近。其中RAPIDS-NHM預測有多條寬約5公里、由西北到東南走向的雨帶，與雷達觀測(圖2(c))基本一致。

4.2 2009年6月4日個案 – 降雨強度

受到一道活躍低壓槽影響，華南沿岸地區在6月3日到4日凌晨出現了數次較大的降水過程。圖4(a)顯示Meso-NHM於6月4日凌晨1時的海平面氣壓和3小時累積雨量預測，模式的分析時間為6月3日09UTC，邊界條件由GSM 00 UTC的預報產生。除了上述4.1節提及的觀測資料以外，3DVAR也加入由5公里水平分辨率LAPS的總可降水量分析輸出。不過，由於雷達資料範圍所限，LAPS的總可降水量分析輸出資料主要集中在珠江口附近，只能改善位於該區的3DVAR低層水氣分析(圖略)。Meso-NHM預測降雨的位置主要集中在沿岸附近，與實況雷達的雨量分析比較(圖4(b))，香港附近的降水分佈頗為相近，但模式的雨量強度較弱。圖4(c)顯示RAPIDS-NHM於凌晨30分的1小時累積雨量與地面風的預報，初始場由Meso-NHM的3小時預測產生，可見提高分辨率後模式在雨帶的強度有所改善。與Meso-NHM比較，RAPIDS-NHM的降雨量較大，雨帶集中在新界地區，1小時的降水量超過30毫米，接近當天凌晨香港的降雨情況。在業務應用上，透過位相修正(phase correction)[9]調整預報雨區位置，RAPIDS-NHM能進一步改善與臨近預報的融合，應可更有效地預測較長時效的降雨量。

4.3 2008年熱帶氣旋個案 – 路徑預報

為了解Meso-NHM預測熱帶氣旋移動的情況，我們選擇了6個2008年的熱帶氣旋個案(表1)，利用GSM的分析和預報作為Meso-NHM的初始以及邊界條件，運算72小時的預測。與天文台最佳路徑分析資料比較，24及48小時的預測的平均路徑誤差為大概80和160公里，比GSM稍為優勝(分別為約100和200公里)，亦比現時的60公里分辨率ORSM(分別超過200和300公里)，有相當大的改善；72小時預測的可驗證案例只有4個，平均位置誤差約180公里。

4.4 人造熱帶氣旋資料 (TC bogus) 的同化試驗

圖5-(a1)顯示2009年9月13日12UTC熱帶氣旋巨爵(0915)的3DVAR分析海平面氣壓和風場，資料同化亦應用了人造熱帶氣旋資料方案所產生的風暴環流內多層風向與風速的數據；圖5-(b1)則是從GSM的預報資料產生的初估場。從圖中可見，3DVAR分析能有效地利用預報員的實況分析數據，產生的氣旋中心氣壓達到約991百帕，與實況相符；利用相同的模式物理過程設定，上述兩者的24及48小時的預測分別顯示在圖5-(a2)、(a3)及5-(b2)、(b3)。兩者的預報路徑相當接近(圖6(a))，兩套預測的24小時和48小時的預報位置與最佳路徑分析資料相差分別約100及150公里。圖6(b)顯示模式預測的中心附近最高風力與最佳路徑分析資料的比較。具有TC bogus的初始條件能有助模式預測風暴強度的改變，24小時的中心附近風力增加22海浬，與根據天文台最佳路徑分析資料計算的強度變化(30海浬)較接近，而後者的模擬，雖然起始的中心附近風力相近，但由於風暴整體結構較弱，故此24小時中心風力則只增強約5海浬。

5. 總結與展望

本文介紹了將於2010年雨季前運行的天文台以NHM為核心的『大氣綜合快速循環預報模式系統』(AIR forecast model system)，並討論了當中包含的Meso-NHM與RAPIDS-NHM的初步預測試驗結果。模式與資料同化系統均比現在的業務模式系統有所改進，並且能利用更多類型的觀測資料產生更好的模式初始條件，希望能更有效地模擬各種中小尺度的對流系統及拓展其他局地尺度預報的應用。現時正加緊進行測試NHM與JNoVA，希望累積更多個案進行模式與資料同化運算的調校。另一方面，將來亦會引進和研發直接同化衛星與雷達觀測資料的方法，以便更有效地將雷暴結構與中小尺度天氣資料納入NHM。

參考文獻

- [1] Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito, and Y. Yamazaki, 2006: The Operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266-1298.
- [2] Albers S., J. McGinley, D. Birkenheuer, and J. Smart 1996: The Local Analysis and Prediction System (LAPS): Analysis of clouds, precipitation, and temperature. *Weather and Forecasting*, **11**, 273-287.
- [3] 黃偉健、黎守德，2006：「激流」(RAPIDS)暴雨預報系統－「小渦旋」與數值天氣預報模式的融合。第二十屆粵港澳氣象科技研討會；澳門，中國，2006年1月18-20日。
- [4] JMA, 2007: Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency. *Appendix to WMO Technical Progress Report on the Global Data-processing and Forecasting System and Numerical Weather Prediction*, March 2007, 194 pp.
- [5] Nakanishi, M. and H. Niino, 2004: Improvement of the Mellor-Yamada level 3 model with condensation physics: its design and verification. *Bound. Layer Meteor.*, **112**, 1-31.
- [6] Wong, W.K. and E.S.T. Lai, 2008: Numerical Simulation of Fog Using Non-Hydrostatic NWP Model with Third-order Turbulence Closure. *2nd International Symposium on Shallow Flows*, 10-12 Dec 2008, HKUST, Hong Kong, China.
- [7] Honda, Y., M. Nishijima, K. Koizumi, Y. Ohta, K. Tamiya, T. Kawabata and T. Tsuyuki, 2005: A pre-operational variational data assimilation system for a non-hydrostatic model at the Japan Meteorological Agency: Formulation and preliminary results. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3465-3475.

[8] Parrish, D. and J.C Derber, 1992: The National Meteorological Center's spectral statistical interpolation analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1747-1763.

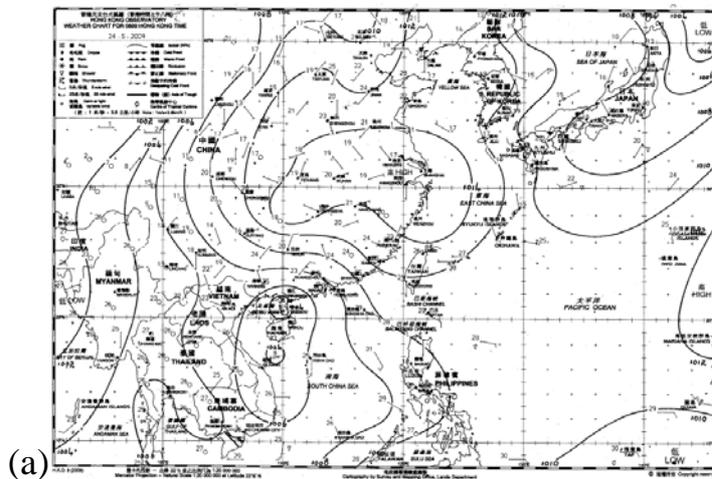
[9] Wong, W.K., L.H.Y. Yeung, Y.C. Wang and M. Chen, 2009 : Towards the Blending of NWP with Nowcast — Operation Experience in B08FDP, *WMO Symposium on Nowcasting*, 30 Aug-4 Sep 2009, Whistler, B.C., Canada.

表1 2008年熱帶氣旋的路徑預報個案

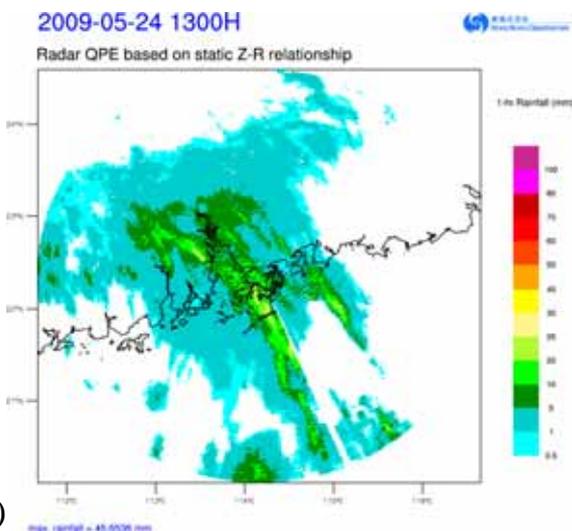
	Meso-NHM 預報 初始時間	中心氣壓及 最高風力
颱風浣熊 (0801)	2008-04-16 12 UTC	970百帕；65海浬
颱風風神 (0806)	2008-06-23 00 UTC	970百帕；65海浬
強烈熱帶風暴北冕 (0809)	2008-08-04 12 UTC	995百帕；30海浬
颱風鸚鵡 (0812)	2008-08-20 00 UTC	955百帕；80海浬
颱風黑格比 (0814)	2008-09-22 00 UTC	960百帕；75海浬
熱帶風暴海高斯 (0817)	2008-10-02 12 UTC	998百帕；30海浬



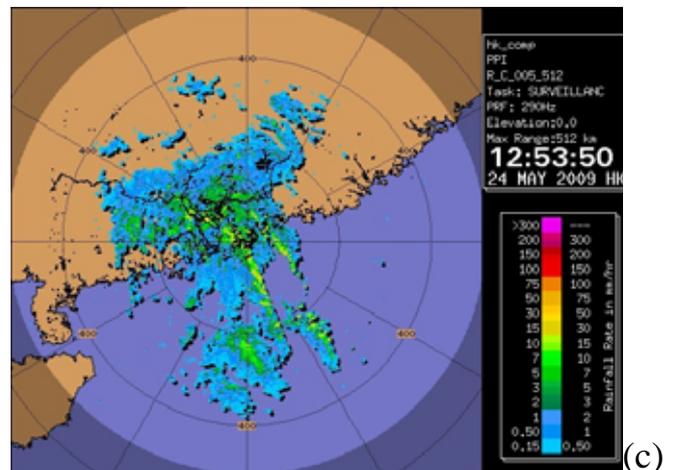
圖1 AIR預報模式系統中的Meso-NHM與RAPIDS-NHM(紅線)的範圍。



(a)



(b)



(c)

圖2 (a)2009年5月24日00UTC(本地時間為上午8時)的地面分析；(b)24日下午1時的雷達1小時累積雨量分析以及(c)雷達回波分佈。

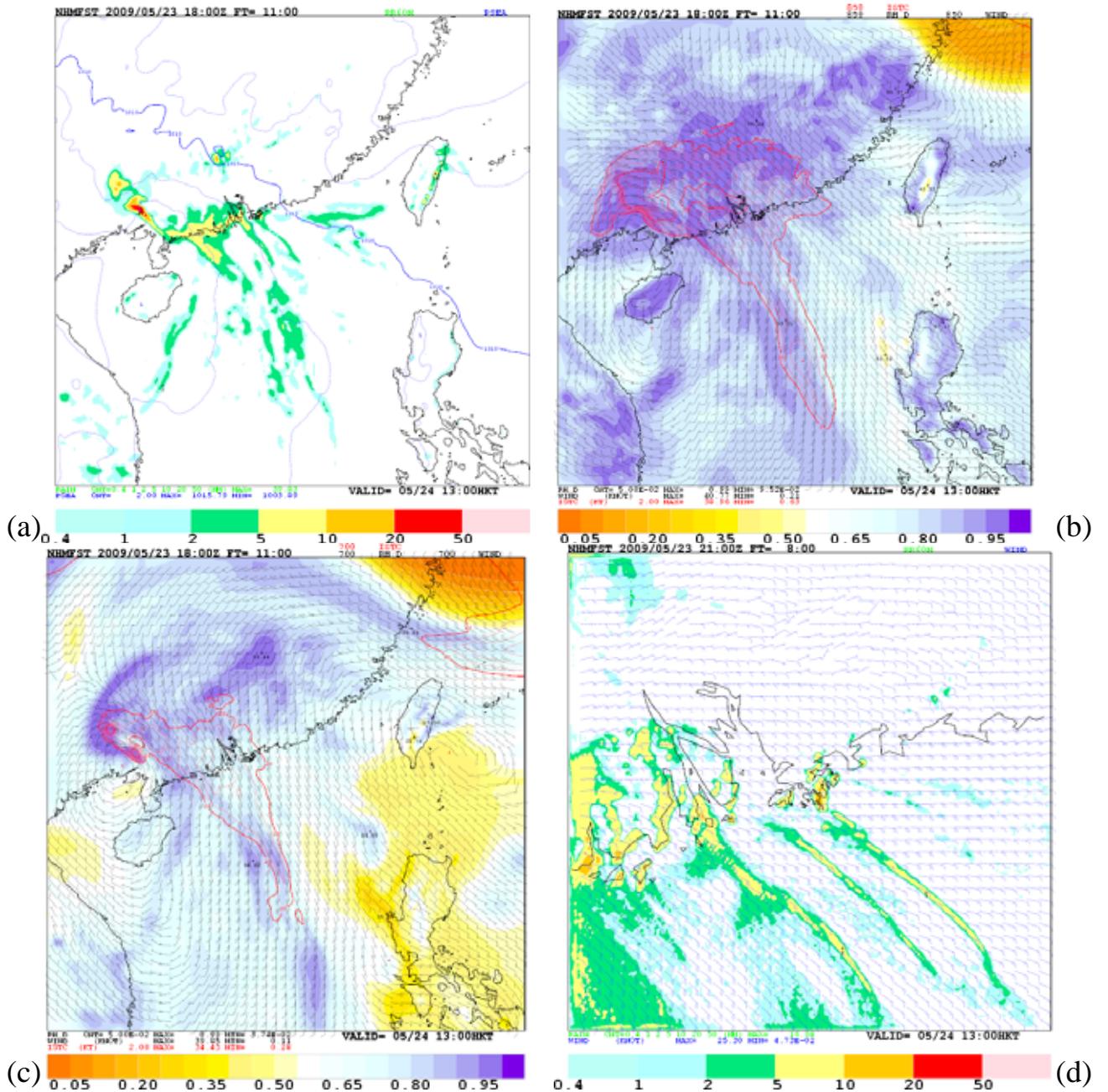


圖3 Meso-NHM於2009年5月24日正午12時的(a)地面1小時累積雨量與海平面氣壓、(b)850百帕及(c)700百帕的濕度與風的11小時預報，紅線區域代表風速達20海裡或以上的範圍；(d)同一時間的RAPIDS-NHM地面風及1小時累積雨量的預測。

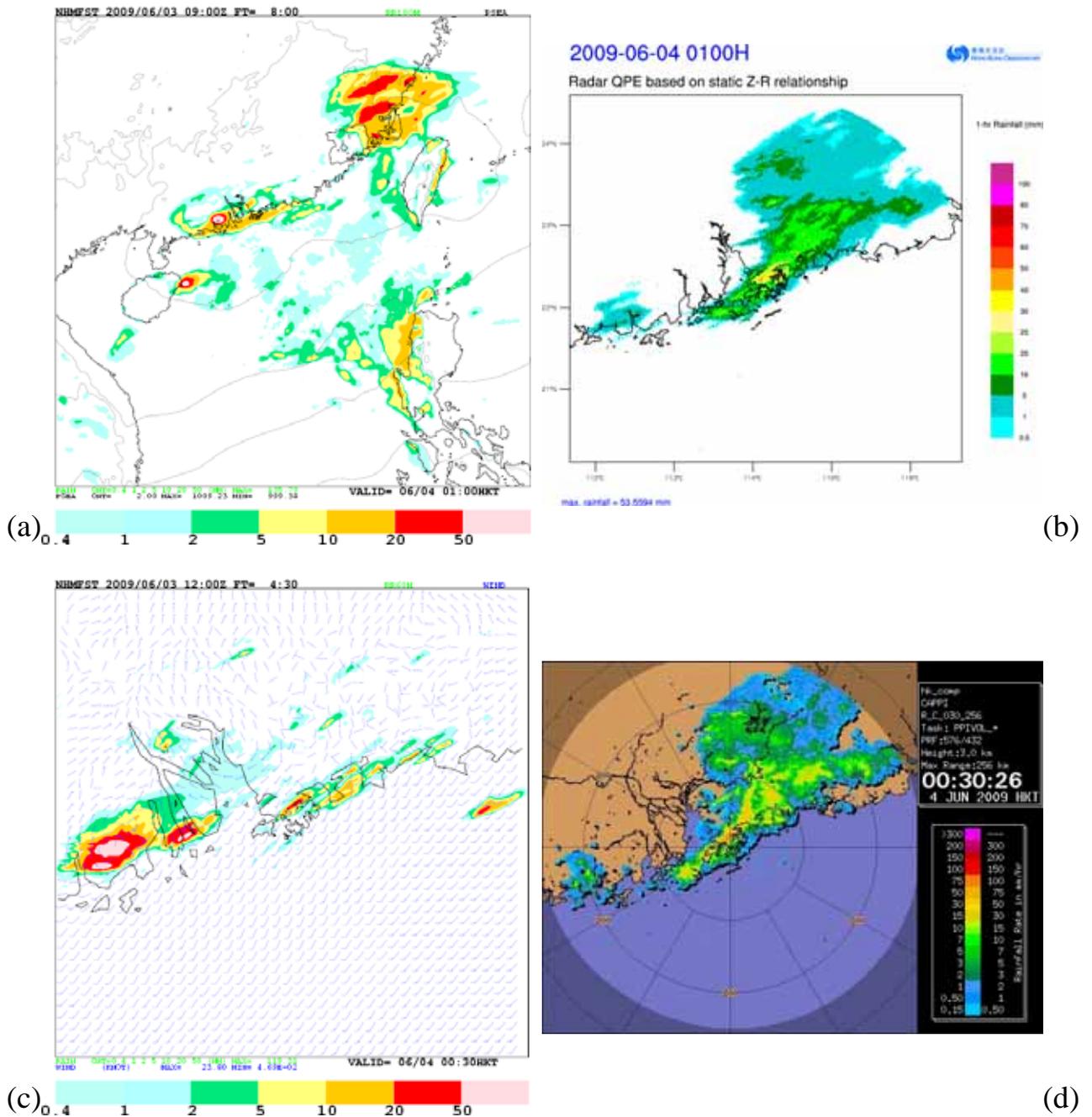


圖4 (a) Meso-NHM於2009年6月4日凌晨1時的地面3小時累積雨量與海平面氣壓的8小時預測；(b)凌晨1時雷達1小時累積雨量分析；(c) RAPIDS-NHM於凌晨30分的地面風與1小時累積雨量預測；(d)凌晨30分的3km CAPPI雷達回波反射率。

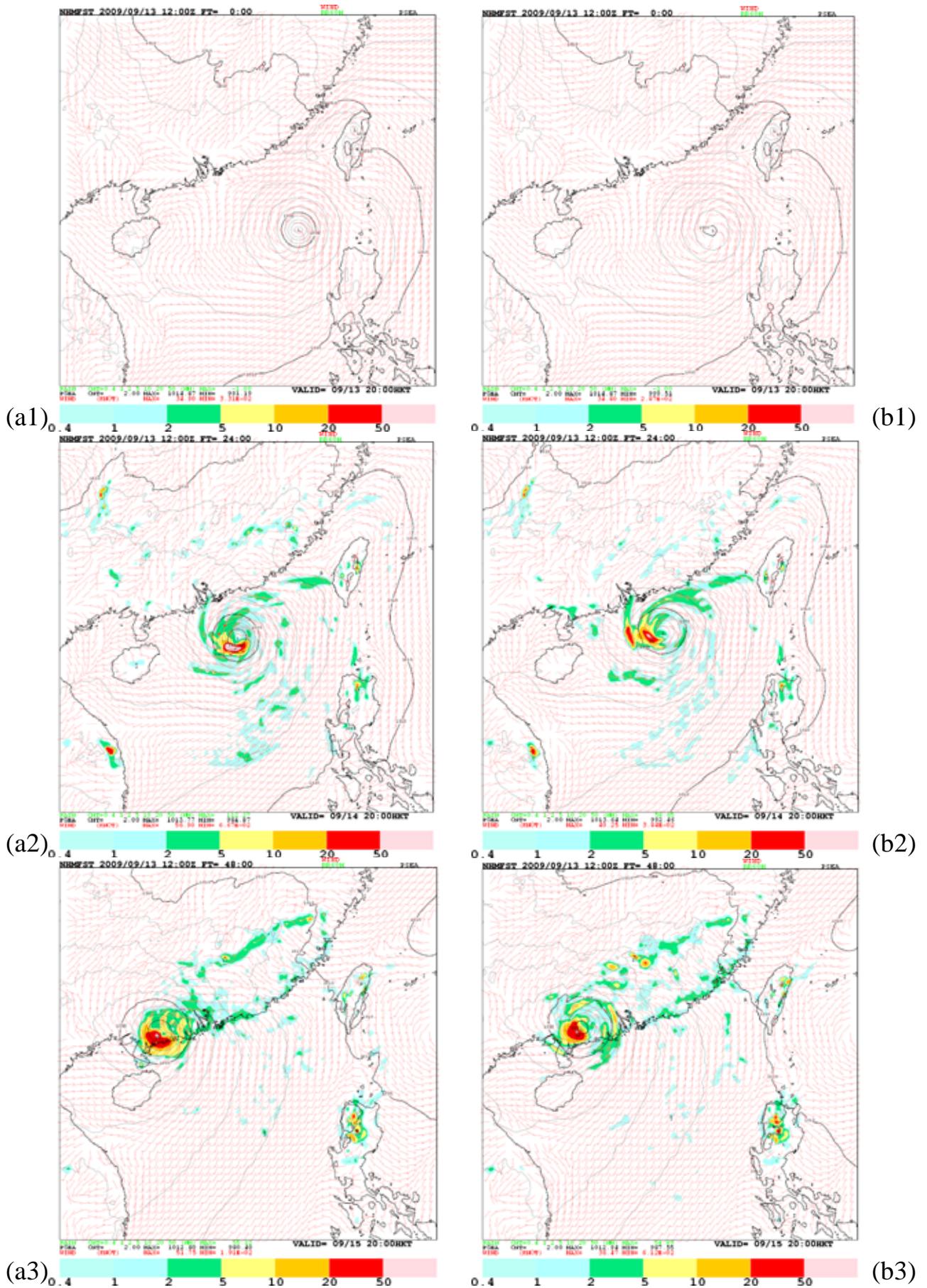
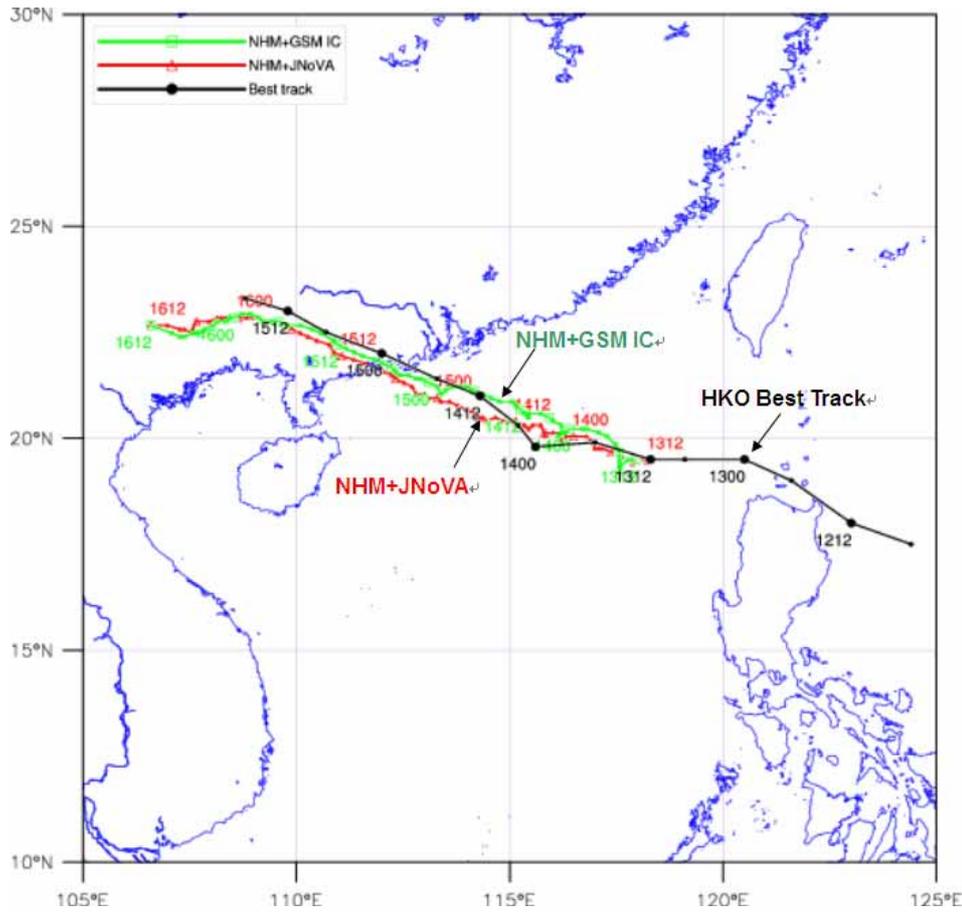
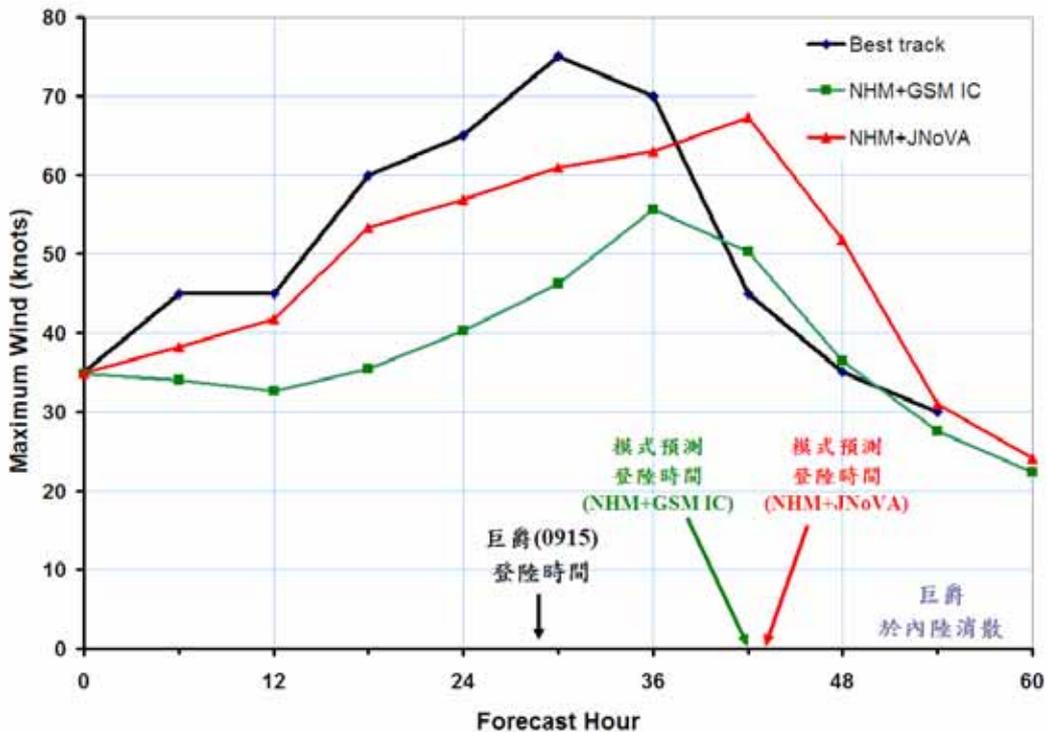


圖5 (a1)-(a3)：Meso-NHM於2009年9月13日12UTC巨爵(0915)的3DVAR分析、24小時及48小時的預測，包括地面風，海平面氣壓及1小時累積雨量；(b1)-(b3)：沒有應用3DVAR的Meso-NHM初始場及預測。



(a)



(b)

圖6 Meso-NHM以2009年9月13日12UTC為起始時間，巨爵(0915)的(a)72小時預報路徑及(b)中心附近最高風力的預測。紅線(三角標記)代表應用3DVAR加上TC bogus資料的預測；綠線(正方標記)代表沒有使用3DVAR的情況；黑線為天文台最佳路徑分析資料。