

財團法人國家實驗研究院國家太空中心

全球定位科學應用研究委託案(3/3)

101年度「全球定位科學應用研究中心」

期末報告

工作項目(2.3)：預報對觀測敏感度之四維資料變分同化系統測試報告

計畫名稱：以掩星資料進行颱風與豪雨個案分析與模擬：利用四維資

料變分同化系統，了解掩星資料對劇烈天氣預報之敏感度

及效益評估

執行期間： 2012/2/18~2013/2/17

分項工作管理人：黃清勇

分項工作共同管理人：洪景山

參與人員：劉豫臻、鄧雯心

中 華 民 國 1 0 2 年 1 月

## 一、 摘要

一般而言，同化觀測資料可以改善模式分析場及預報結果，但我們很難去了解每種不同類型觀測資料對預報改善之程度，故希望能找出可以評估觀測資料的影響程度的技術。利用 4DVAR 內建的伴隨模式(adjoint model)來計算預報預差對觀測增量之梯度(即敏感度)，可以評估每種觀測資料對預報誤差(價值函數增量)的影響。使用此種方法，不需要增加或減少同化系統之觀測資料即能了解預報誤差如何受到觀測資料同化的影響。觀測資料對於初始場的影響依觀測資料的正確性、數量、種類、及其他觀測資料的分布和背景觀測誤差的統計值而不同，當觀測資料影響到初始場中動力敏感區，對預報結果會有較大的影響。

同化掩星觀測時，我們首要想知道的事是使用此資料是否真能改善預報，過去除了 OSSE 實驗外，現在可使用另一種方式；4DVAR 伴隨模式來評估。使用此技術可以評估同化 FORMOSAT-3/COSMIC 掩星觀測對預報誤差的影響，及對各觀測點的敏感度，並且根據不同預報準確度的定義，可以求出不同觀測點對各變數的預報誤差改善程度。然而此方法仍有它的限制，例如在伴隨模式中，如積雲、邊界層等參數化方法並非線性，伴隨模式在邊界處理上也未完善，且根據不同真值的定義(true value)及預報準確度的定義而有不一樣的結果。

本年度之研究結果，已大致完成測試此工具，嘗試同化不同觀測並計算其對預報誤差的相對貢獻程度，並比較不同模擬時間，同化不同觀測資料(如探空資料 Sounding，地面觀測 Synop 及 GPS 掩星觀測)等之影響；另外，更嘗試增加擾動動能，相當於環境擾動風場向量值之總和對各種觀測之影響。在期末報告中，增加 2010 年凡那比颱風更長時間(24 h)預報結果以及對於不同個案(2010 年梅姬颱風)的測試，檢視上述各種觀測對改善預報誤差的相對貢獻程度。

## 二、 背景說明

福衛三號(FORMOSAT-3/COSMIC)及其後續計畫福衛七號衛星之氣象研究目標，主要在充分使用GPS掩星觀測資料於預報模式，藉以了解其對區域天氣預

報及全球分析或預報改善之程度，同時探討衛星資料同化理論與技術發展。一般研究對於觀測改善程度多使用 OSSE 實驗，經由增加或減少觀測點來測試各觀測之敏感度，除此方法之外，我們可以藉由變分資料同化系統之伴隨模式計算出觀測影響敏感度(Langland and Baker, 2004)。

利用四維變分同化的伴隨模式計算預報誤差對觀測同化的敏感度，圖 1 為其流程概略示意，上圖為同化預報系統流程，下圖為伴隨模式的運作方法，同化預報為一向前模式，而伴隨模式則是向前模式向後回推積分的過程。第一步在背景場( $x_b$ )經由資料同化(目前僅能使用三維資料同化)，得到分析場( $x_a$ )，經由預報模式預報得到預報值( $x_f$ )。為了得到預報誤差，我們定義價值函數(Cost function)

$$J_f = \frac{1}{2} \langle (x_f - x_t), C(x_f - x_t) \rangle$$

將  $J$  對  $x_f$  微分得到  $\frac{\partial J_f}{\partial x_f}$ ，經由預報模式的伴隨模式

可以得到  $\frac{\partial J_f}{\partial x_a}$ ，最後再經由同化系統的伴隨模式可得到預報對觀測的敏感度

(forecast sensitivity to observation, FSO)，目前預報對觀測的敏感度大多選擇為模擬區域乾淨能預報誤差，定義為：

$$\langle x, x \rangle = \frac{1}{2} \iint_{\Sigma} [u'^2 + v'^2 + \left(\frac{g}{N\theta}\right)^2 \theta'^2 + \left(\frac{1}{\rho c_s}\right)^2 p'^2] d\Sigma$$

### 三、 成果報告

長時間之伴隨模式積分需要大量的記憶體，故模擬之時間則主要受限於電腦能力之限制，目前已擴增記憶體容量，進行更長時間之伴隨積分，本次報告另有針對 2010 年凡那比(Fanapi)颱風進行 24 h 之預報誤差比較實驗，但另一 2010 年梅姬(Megi)颱風個案之結果測試目前仍以 06 h 和 12 h 模擬為主。

圖 2 為模擬實驗設計圖，由於 NCEP 場已經過一些初始同化過程，故若為 Cold Start Run 則必須先做一段時間之模擬再做同化，如 Run 06h 為例，將模擬之範圍擴大至 151x151 網格點，價值函數計算範圍為中間 21~130 個網格點以避開邊界，測試之個案時間為凡那比颱風 2010/0916/12Z 至 2010/0919/12Z 中每六

小時重新 cold start 一次，並且每一時間點同化做向後模擬六小時之模擬結果與不同化向後模擬六小時之模擬結果，相較於真值之預報誤差敏感度的平均。若比較時間為 2010/0917/12Z，初始場為 2010/0917/06Z 之 NCEP AVN 再分析場，cold start 進行預報六小時後得到 2010/0917/12Z 的預報場當作同化的背景場( $x_b$ )，分析場( $x_a$ )則為同化 GTS+GPS 資料後之分析場，預報六小時後得 2010/0917/18Z 預報場( $x_f$ )，而未同化前預報六小時結果則為( $x_g$ )，同化窗區為分析時間前後三小時，並且取真值( $x_t$ )為與預報場同一時間之 NCEP AVN 再分析場，作為誤差比較的基準。真值之選擇對實驗結果的解釋上影響很大，然而，在無其他較佳之選擇下，只能選用 NCEP AVN 做為真值。Run 12 h 則同前述，但預報時間為 12 小時；Run 24 h 則預報時間為 24 小時。

目前的 WRF FSO 在同化觀測資料時，除需要觀測誤差外，另須使用模式背景誤差，有 CV3 及 CV5 兩種主要選擇，前者由 NCEP 之季節內全球 24h 減 12 h 預報誤差之統計，後者常為個案預報時間之前一個月內 24h 減 12 h 預報誤差之統計，使用前者主要為方便、省時，使用後者則須實際模擬計算來統計一個月內預報誤差，費時許多。

圖 3 為凡那比颱風模擬路徑結果，因為模擬時間只有六小時，故無明顯差異，但有同化的初始場和 Run 06h 模擬結果，無論 CV3 或 CV5 之背景誤差，皆較未同化者好，但並不是很明顯，並且在 18/12Z、19/06Z 略有變差情況。圖四則為海平面氣壓增量圖，使用同化過後之結果減掉未同化結果所得出( $x_a - x_b$ )，期增量約介於 -1.0 至 3.0 之間，而紅色箭頭為風場的增量。

圖 5 則為模擬六小時後之結果(Run 06h)，為 2010/0916/12Z 至 2010/0919/12Z 之間每 6 小時一筆並且各模擬 6 小時之結果平均，故為 12 筆平均，此結果顯示，同化可以降低模擬一段時間之 NCEP 再分析場的預報誤差。圖 5a 也顯現出觀測對預報變數之影響，對於 U、V 有明顯之改善，T、Q 則次之，對 P 之敏感度則最小，圖 6 則選擇 2010/0917/12Z 其中的一種觀測種類 Synop 做對照，圖 6a 及 6b 可對照圖 5 預報對風場之模擬誤差是有較明顯改善的，故偏藍色的點較多，

而圖 6c 和 6d 顯示 T、Q 也有不錯的表現，而此圖中對 P 則是紅色的點明顯較多，與總和的結果圖 5b 是一致，但圖 6 是水平面上的圖，圖上有正值有負值，故無法單從水平面即判斷其總影響，也無法單從觀測敏感度總和判斷水平之分布之好壞。

圖 7 則為我們所關心同化 GP 衛星資料之結果，目前僅能得到同化折射率之觀測敏感度。圖 7a、b、c 為選擇之其中三層高度場分別代表低、中、高層，其中可以以紅藍色點數數量以及位置分布來分辨好壞，雖然分布點數少，但可以明顯發現在低層 5a 其紅點數較多，因此表現較差，中層則次之，高層則是藍點較多，表示該層可使預報變好，但如同前段所述這是任選之其中幾層，無法代表全部垂直之狀況，並且 GPS 觀測點數相較 Synop 是較少的，水平分布較稀疏，我們必須對照各層之分布。圖 8 則為探空 Sounding 和 GPSRO 同化對變數預報影響程度之垂直分布，已除上觀測點量而得到之平均值，此圖結果可以發現，同化 Sounding 結果之預報影響主要集中在低層(800~700 hPa)，但各變數間則仍有很大的不同，另外 GPSRO 同化結果，主要影響則集中在高層約 13 至 23 公里，此圖為單一筆時間 2010/0917/12Z 向後模擬六小時之結果，如對照其他時間點，則有些許差異，但結果大致同上，但此部分需再做比較分析。

圖 9 為 Run 12h 之結果，是將模擬時間增長為 12 小時之結果，相較圖 5，則大致上有變好的情況，預報誤差之影響貢獻值有增長的狀況，然而個別的時間點如分開來看，則是有正有負，並非每個時間點都是好的貢獻，但其總平均則是正的，個別時間之圖未示。

圖 10 同圖 5 為 Run 06 但使用該模擬時間前一個月之 CV5 背景誤差同化之結果，圖 5 則為 CV3，於模擬結果顯示其預報誤差之影響差異很大，實際上，使用不同參數設定之 CV3 背景誤差測試，其結果差異也相當大(圖未示)，而 CV5 之結果再同化 GPSRO 較好，而 CV3 則稍差，但其他觀測之同化則是 CV3 結果較好。

我們嘗試改變不同價值函數之定義，以期計算不同之預報誤差敏感度，並測

試選擇不同計算敏感度範圍，圖 11 為圈選之計算範圍，範圍選定在颱風移動經駛流場影響後常轉向的區域。圖 12 則為乾淨能之結果，並且選用 CV5 背景誤差，在此範圍內之觀測對乾淨能之皆有較好之影響，其中以 Sound、GEOAMV 以及同化折射率 GPSRO 之同化影響為最好，對照圖 10，在此範圍內 GPSRF 折射率有更好的表現，其中圖 10 及圖 12 為選定不同範圍觀測點之乾淨能總和，故其乾淨能量值則以圖 10 較大(因為範圍大點數多，故值較大)。此外我們嘗試使用範圍內風場擾動之總和計算價值函數，此價值函數恰為風向量差量值之總和

$$J = \iiint u'^2 + v'^2 d\Sigma, \text{ 故可代表觀測變數對平均擾動風場向量之預報敏感度 } \frac{\partial J}{\partial x},$$

得結果為圖 13，結果顯示對於圖 11 所選取之區塊來說，同化 GPSRO 有明顯之正面貢獻，可以明顯減少此區塊之擾動風場預報誤差。故同化之 GPSRO 資料，對此區之駛流風之影響以及颱風預報，可以有不錯的正面影響。

圖 14 則同圖 13，但為水平觀測點對選擇範圍圖 11 之價值函數對預報誤差影響分布圖，圖中顯示很遠的觀測點仍然對於此選擇範圍有影響力，此一結果有待更多分析及驗證。

本次報告測試凡那比颱風 Run 24h 結果如圖 15，同樣以圖 11 之範圍，分別檢視兩種價值函數(乾淨能、擾動動能)定義對預報誤差之影響。與前面結果比較可以發現，選擇特定範圍，或者，較長時間的預報，都能明顯看出同化 GPSRO 對預報誤差的改善，其中又以乾淨能的結果有較大正面影響；但個別時間的結果可能有正有負，因此，挑選其中幾種觀測檢視時間序列結果，在此範圍內表現最佳的 GeoAMV 及 GPSRO 在個別時間皆有正面影響；Sound、Synop 則僅在幾個時間點有明顯正面影響。

為獲得較有統計意義之結果，本次報告加入比較 2010 年梅姬颱風個案，同時也模擬更多時間點，增加模擬筆數。圖 17 為模擬六小時後之結果(Run 06h)，為 2010/1016/06Z 至 2010/1020/12Z 之間每 6 小時一筆並且各模擬 6 小時之結果平均，故為 17 筆平均。對照凡那比颱風個案，兩者的觀測點變數之預報誤差貢

獻結果皆以 U、V 有最明顯之改善，對 P 的敏感度最小；另外，對照單一時間 (2010/1020/00Z) Synop 的敏感垂直總和(圖 17c,d,e)也一致，對 P 有較多紅色點。將敏感度計算範圍縮小至圖 18 所示，選擇包含部分梅姬颱風行進路線且後轉向 北之路徑範圍。圖 19b 結果顯示，與大範圍結果比較(圖 17)，乾淨能量值以圖 17 較大(範圍大點數多，值較大)，但在此範圍內 GPSRO 對預報誤差貢獻相較於 其他觀測明顯較高，其他各觀測的影響程度皆有下降趨勢。圖 18c,d,e 將各觀測 以個別時間分開來看(這裡以 Sound、Synop 以及 GPSRF 結果為例)，雖然 Sound 平均誤差貢獻敏感度為最多，但在 17 筆時間資料中卻也不是每個時間點都有良 好的表現；Synop 的正負值起伏也相當大，反而是 GPSRO 資料在較多的時間點 都有減少誤差的情形，顯示模擬時間筆數對資料貢獻的評斷也有相當大的影響。 另外，在梅姬颱風北轉期間(約為 101918Z~102006Z)，三種觀測表現差異不大， 但平均仍以 Sound 資料改善最為明顯。

圖 20 為水平觀測點對選擇範圍圖 18 之價值函數對預報誤差影響分布圖，選 擇 GPSRO 觀測資料有較大貢獻量之時間 2010/1020/00Z，比較三種垂直層差異。 同化折射率之觀測敏感度顯示中、低層差異不明顯，而高層對預報誤差之敏感度 較好(藍點較多)，可使預報變好。

另模擬 12 小時(Run 12h)，且嘗試使用圖 17 範圍內風場擾動之總和計算價值 函數後之結果為圖 21，為 2010/1016/06Z 至 2010/1020/06Z 之間每 6 小時一筆並 且各模擬 12 小時之結果平均。觀測變數對平均擾動風場向量之預報敏感度，結 果顯示同化各資料平均對預報皆有正面貢獻，但以 GeoAMV 及 Sound 表現最佳， GPSRF 的貢獻並不大。對照同樣使用 cost function 為擾動動能的凡那比颱風個案， 在 24 h 預報結果中，顯示 GPSRF 可明顯影響颱風預報。兩個案結果差異也與背 景場(CV3、CV5)的選擇有關，預期使用 CV5 背景場可能有更好結果。

#### 四、 結語

前述研究結果，已經測試對各種不同觀測種類以及觀測真值的定義比較出的

結果，其中結果顯示，同化資料可以改善初始預報場，其中最主要貢獻為 Sound、GeoAMV、GPSRF。在凡那比颱風個案我們測試不同背景誤差(CV3 與 CV5)之結果，不同背景誤差對預報結果影響很大，其中又以在背景誤差為 CV5 時，GPSRO 有較大正面影響；至於梅姬颱風，目前僅測試 CV3 背景誤差的結果。另外，各觀測平均的貢獻量可能在不同時間上有極大差異，因此，模擬筆數需到達一定數量才有意義；除了本次報告增加的梅姬颱風個案、平均模擬數量，持續增加統計的數量以及不同個案的比較分析是必要的。而預報時間的增長(6hr->12hr->24hr)，以及縮小計算敏感度的範圍結果，皆使 GPSRO 觀測的貢獻相較其他觀測更為突出，尤其凡那比颱風個案在 24 h 預報時，各個時間皆對預報呈現正面影響。此方法優勢在於可以同時使用多種觀測資料同化，不需為了解各種觀測資料對各變數各觀測點的詳細預報誤差敏感度而去除任何變數。

WRFV3.3.1 之 FSO 系統已經可以對觀測點做預報敏感度之詳細分析。利用不同的價值函數定義以及選定範圍之敏感度計算，可分析同化不同觀測所造成的影響。報告中兩個颱風個案的結果在選定之颱風路徑的範圍內，GPSRO 皆有不錯的影響；在凡那比個案中，對擾動動能來說，同化 GPSRO 更明顯有最大的影響。進行更多個案以及大量預報分析，探討如何應用 FSO 工具作更詳細之分析診斷，是本議題未來重要的工作。

# What is observation sensitivity?

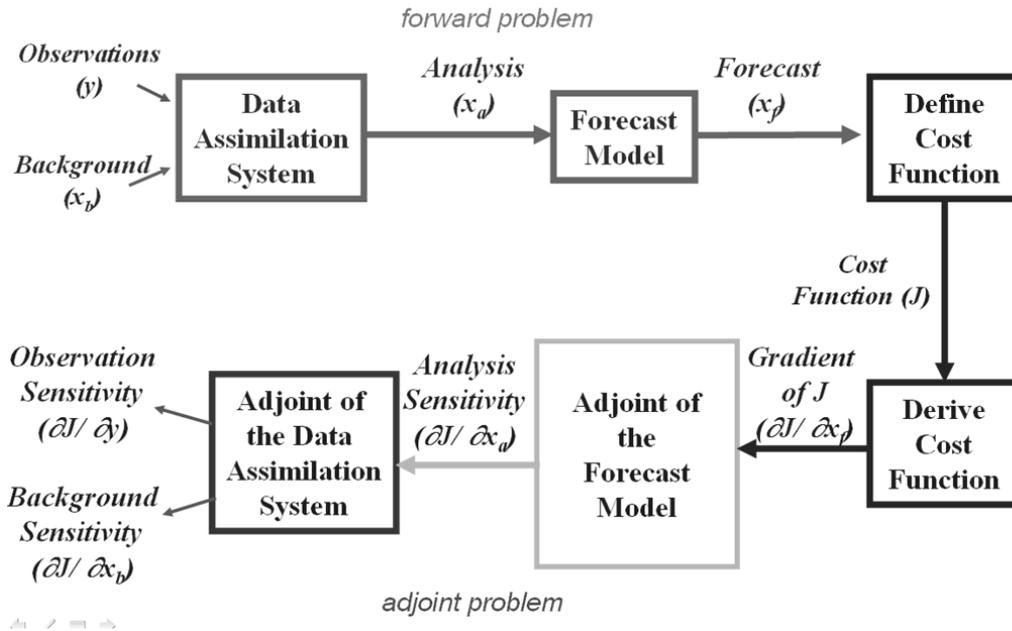


圖 1. WRF 4DVAR 及伴隨系統運作流程圖。

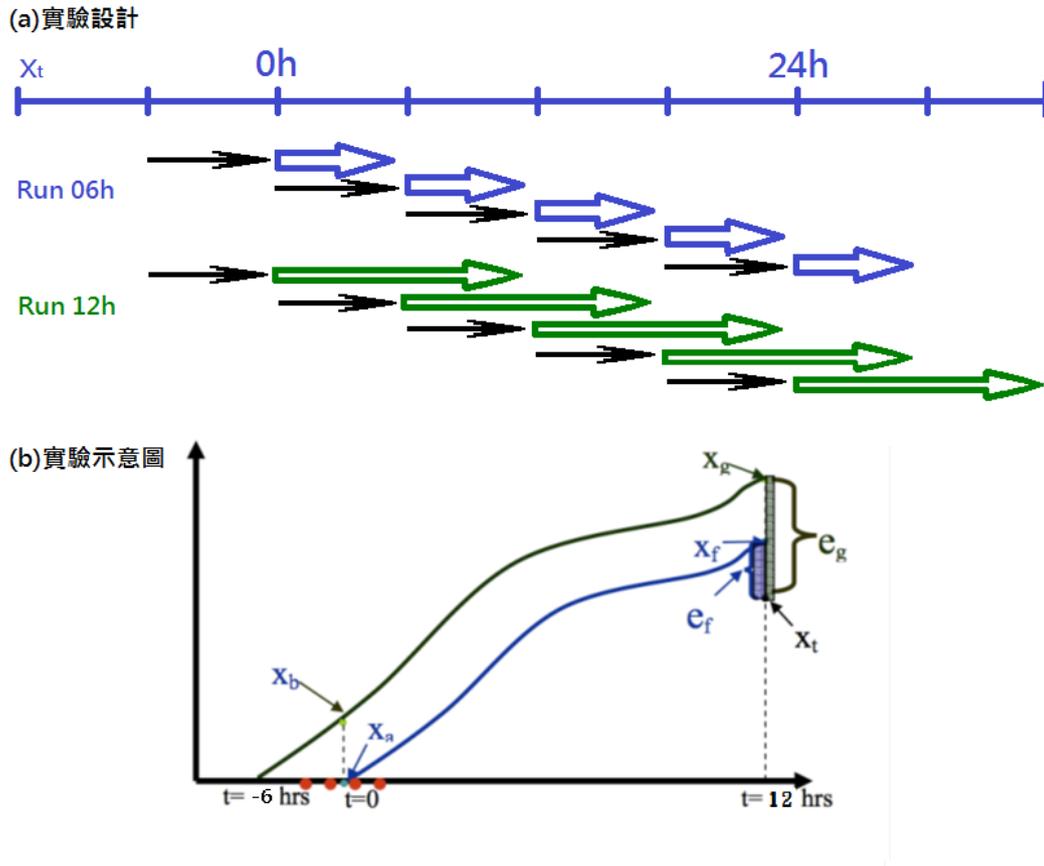


圖 2. (a)實驗設計圖之示意圖，Run 06h 為 cold start 預報 6 小時後同化之分析場再模擬 6 小時(藍線)，Run 12h 為 cold start 預報 6 小時後同化(綠線)再模擬 12 小時，黑線表示 NCEP 再分析場向前積分模擬 6 小時，最上方之時間軸代表對應之模擬時間，真值則使用 NCEP 再分析場，(b)則為 FSO 方法示意圖。

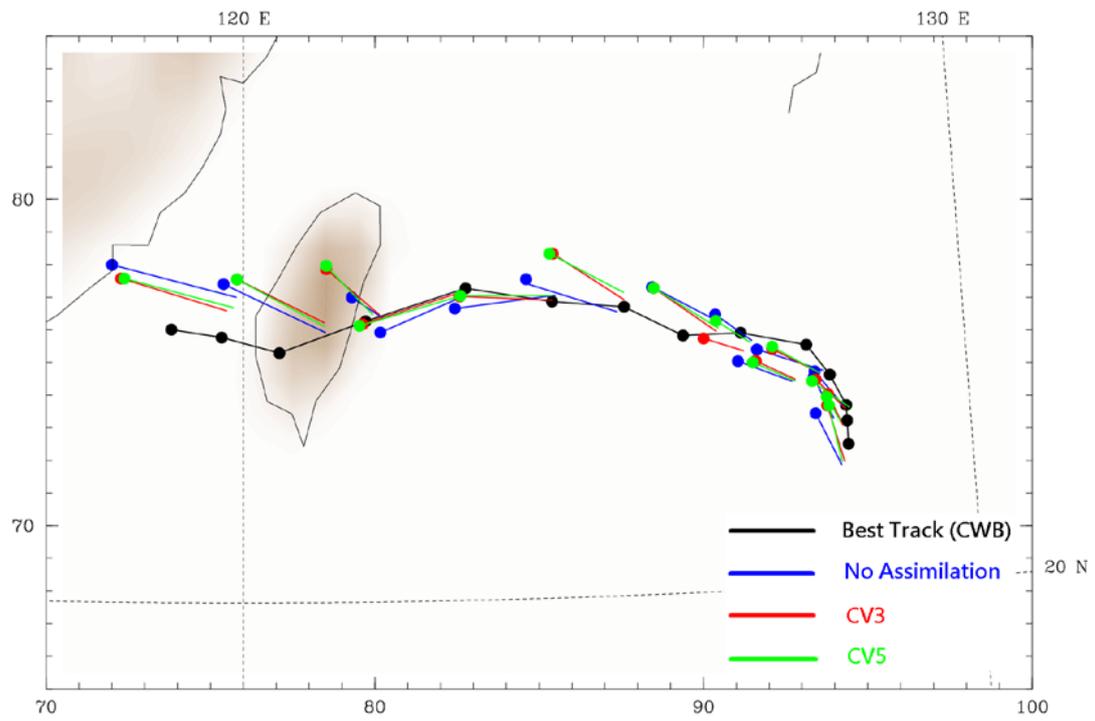


圖 3. 模擬 2010 年凡那比颱風之路徑圖，黑色為最佳路徑；藍色為模擬六小時後未同化再繼續模擬六小時；紅色為背景誤差選用 CV3；綠色為背景誤差選用 CV5。

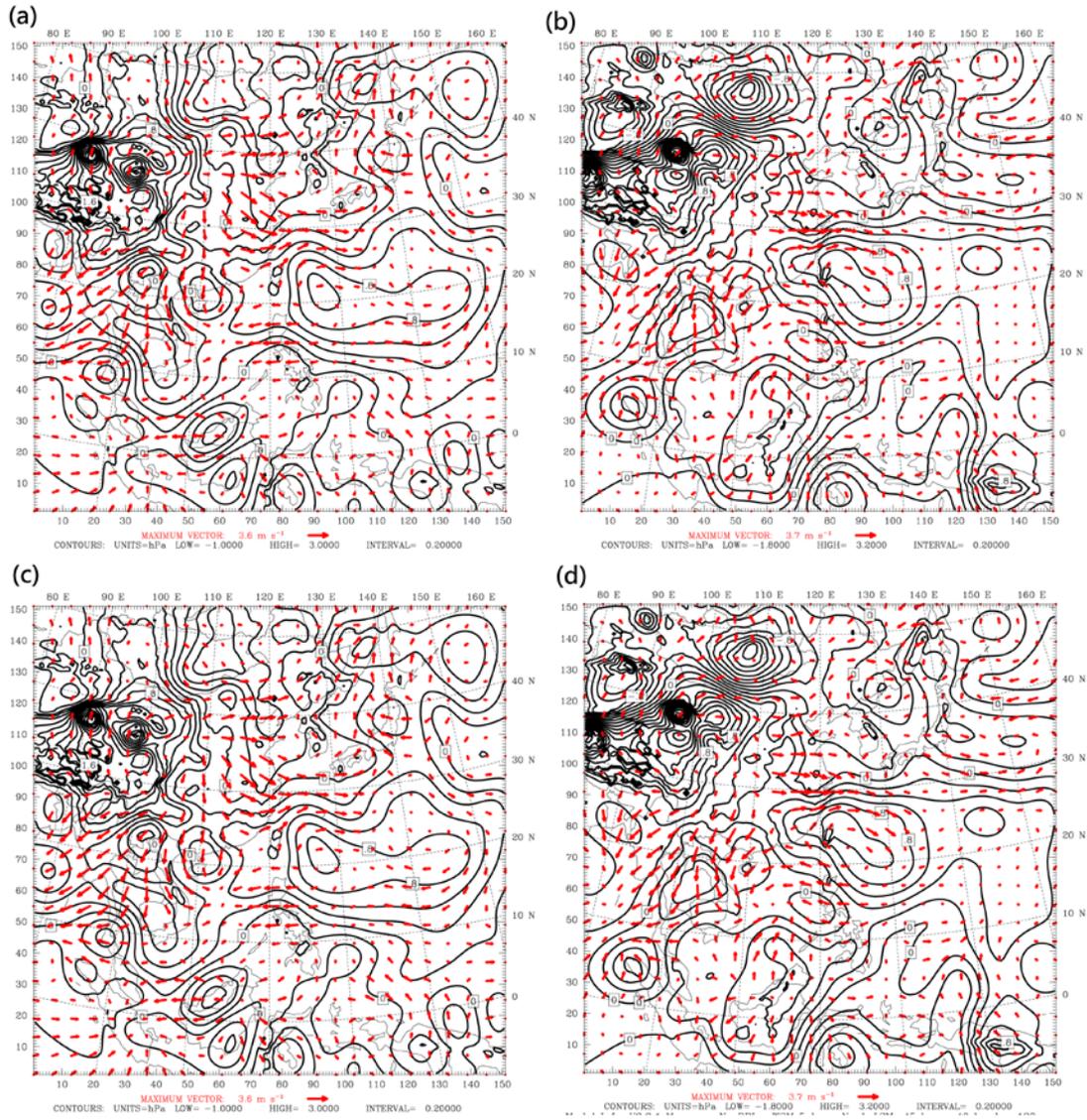
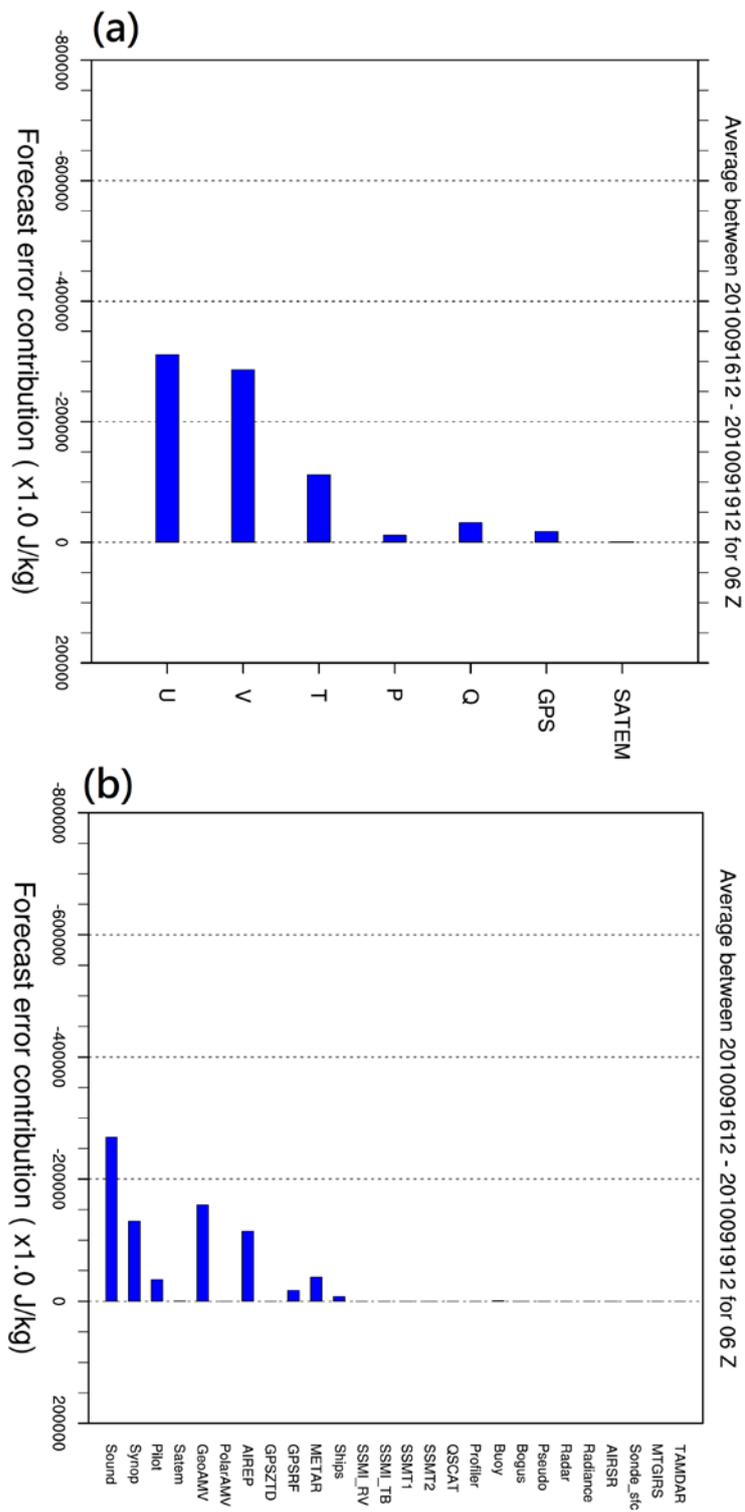


圖 4. 海平面氣壓增量以及水平風場(紅色箭頭)增量圖，等值線間距為 0.2 hpa，  
 (a) 1712 ( $x_a - x_b$ )背景誤差選用 CV3，(b) 1812 ( $x_a - x_b$ )背景誤差選用 CV3，(c) 1712  
 ( $x_a - x_b$ )背景誤差選用 CV5，(d) 1812 ( $x_a - x_b$ )背景誤差選用 CV5。



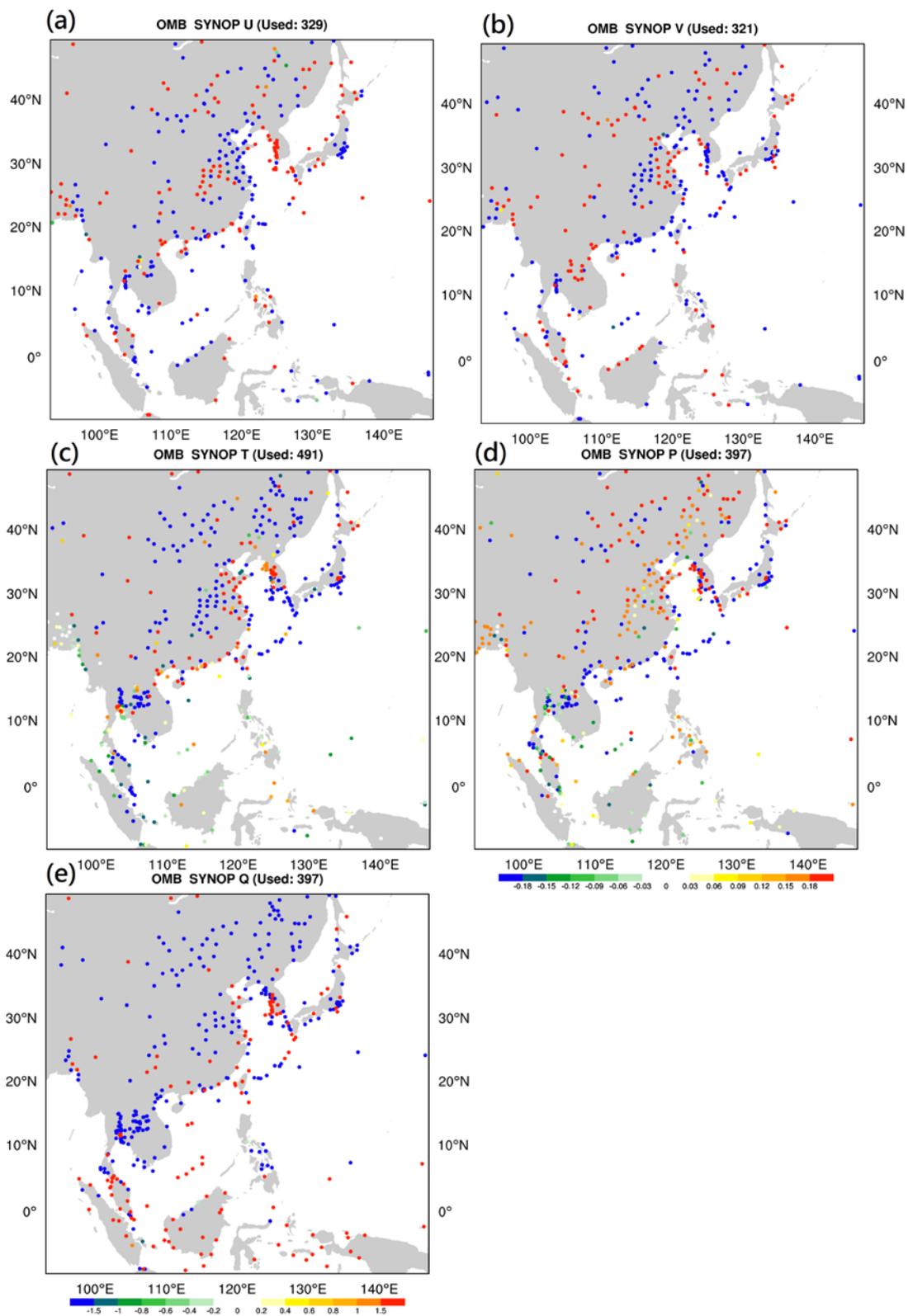


圖 6. Run 06h 結果, 1712Z 水平面上 Synop 各觀測點變數對預報誤差之敏感度垂直總和, 分別為(a) U, (b) V, (c) T, (d) P, (e) Q (價值函數為乾淨能, 單位 J/kg)。

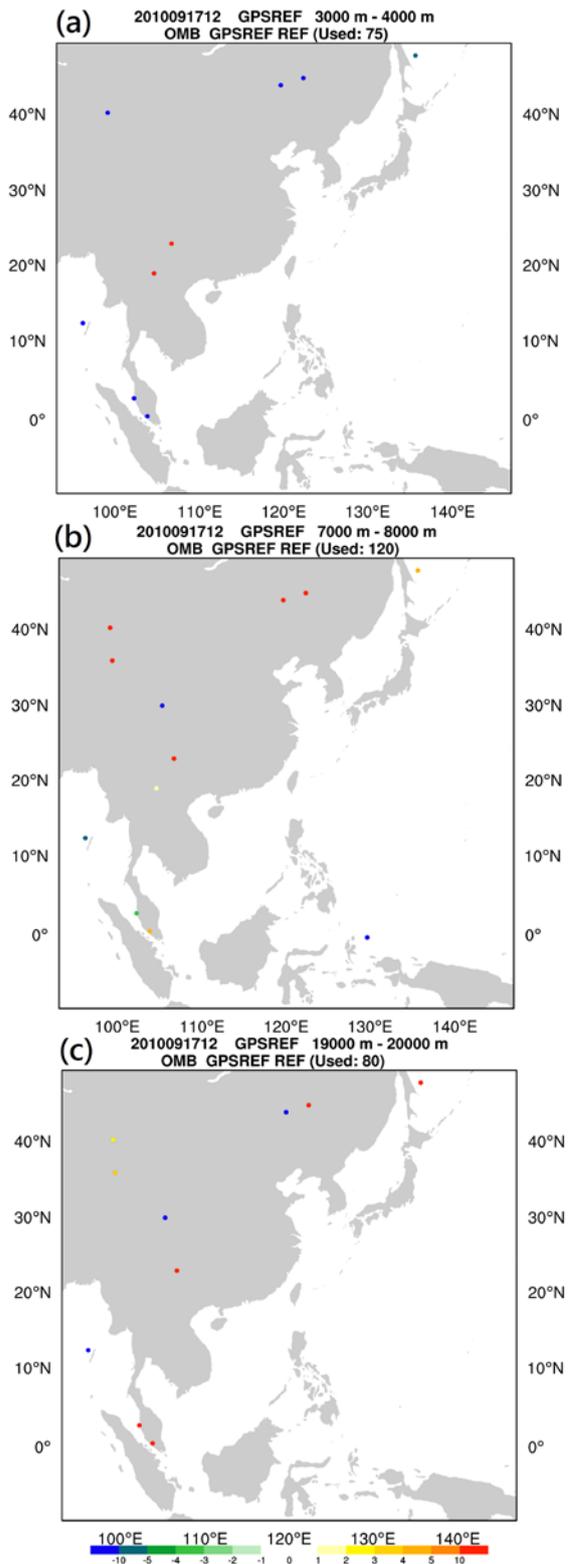


圖 7. Run 06h 結果，1612Z 同化 GPSRO 之折射率造成預報誤差的敏感度，分別為 (a)低層 3000 m 至 4000 m，(b)中層 7000 m 至 8000 m，以及(c)高層 19000 m 至 20000 m 總和 (價值函數為乾淨能，單位 J/kg)。

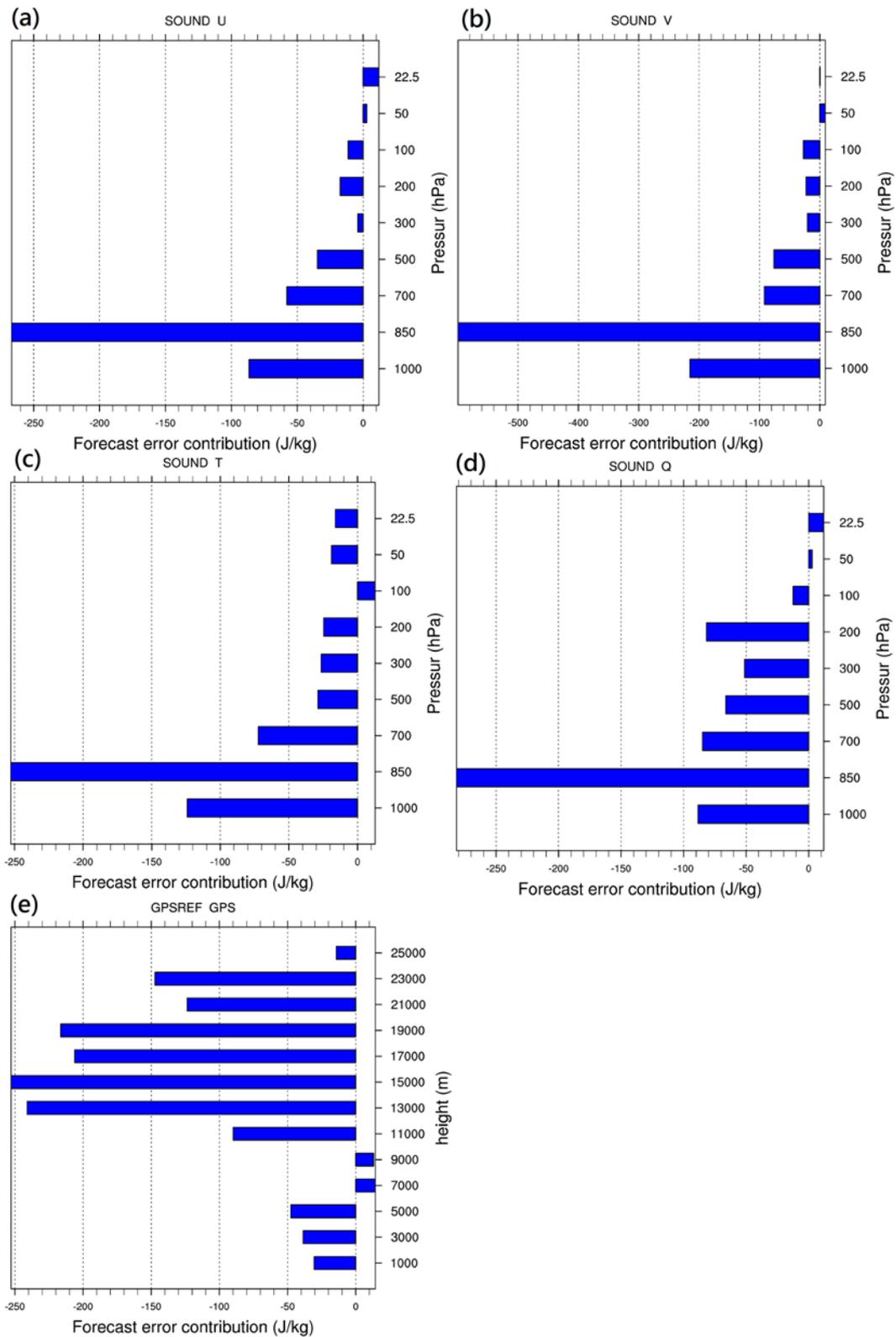


圖 8. Run 06h 結果，1712Z 同化 Sounding 所造成各變數誤差的貢獻程度之垂直分布，分別為變數 (a) U，(b) V，(c) T，(d) Q，此外(e)為同化 GPSRO 之折射率造成預報誤差的敏感度，各層之總和為除於該層點數之平均值(價值函數乾淨能，單位 J/kg)。

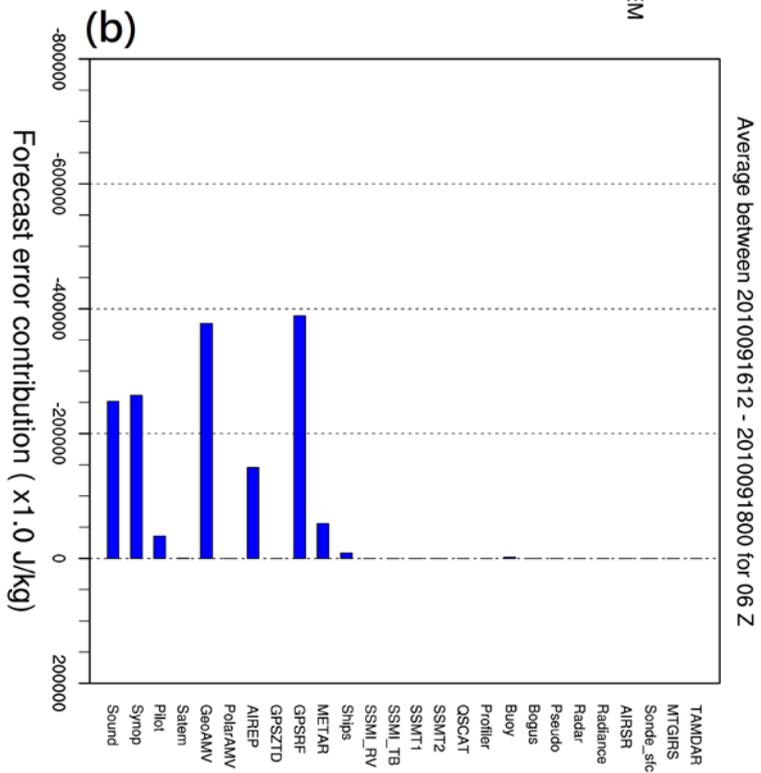
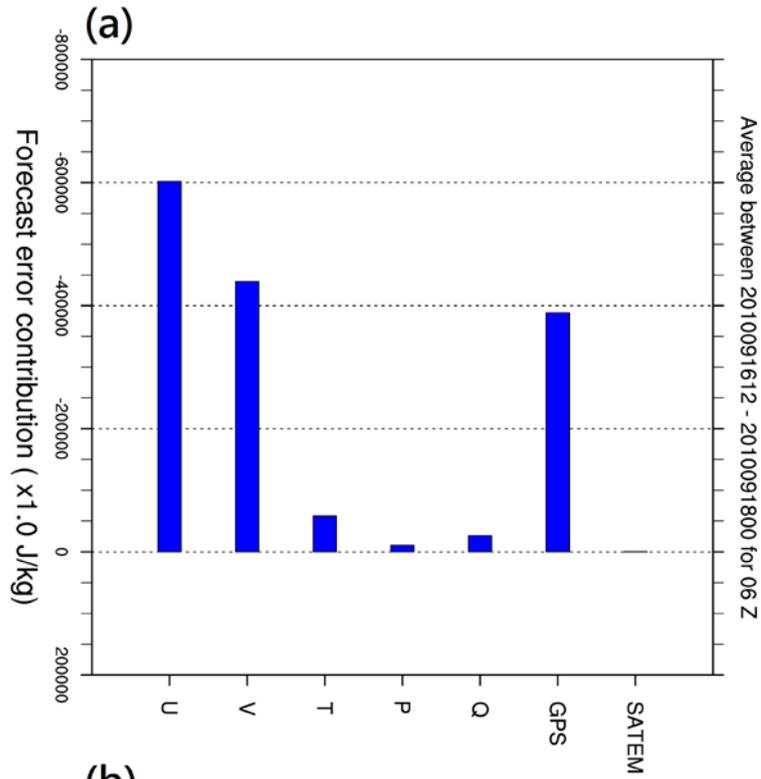


圖 9. Run 12h 結果，(a)各種觀測對預報誤差之貢獻，(b)觀測點變數對預報誤差之貢獻敏感度總和，負值表示同化影響可減少誤差(價值函數乾淨能，單位 J/kg)。

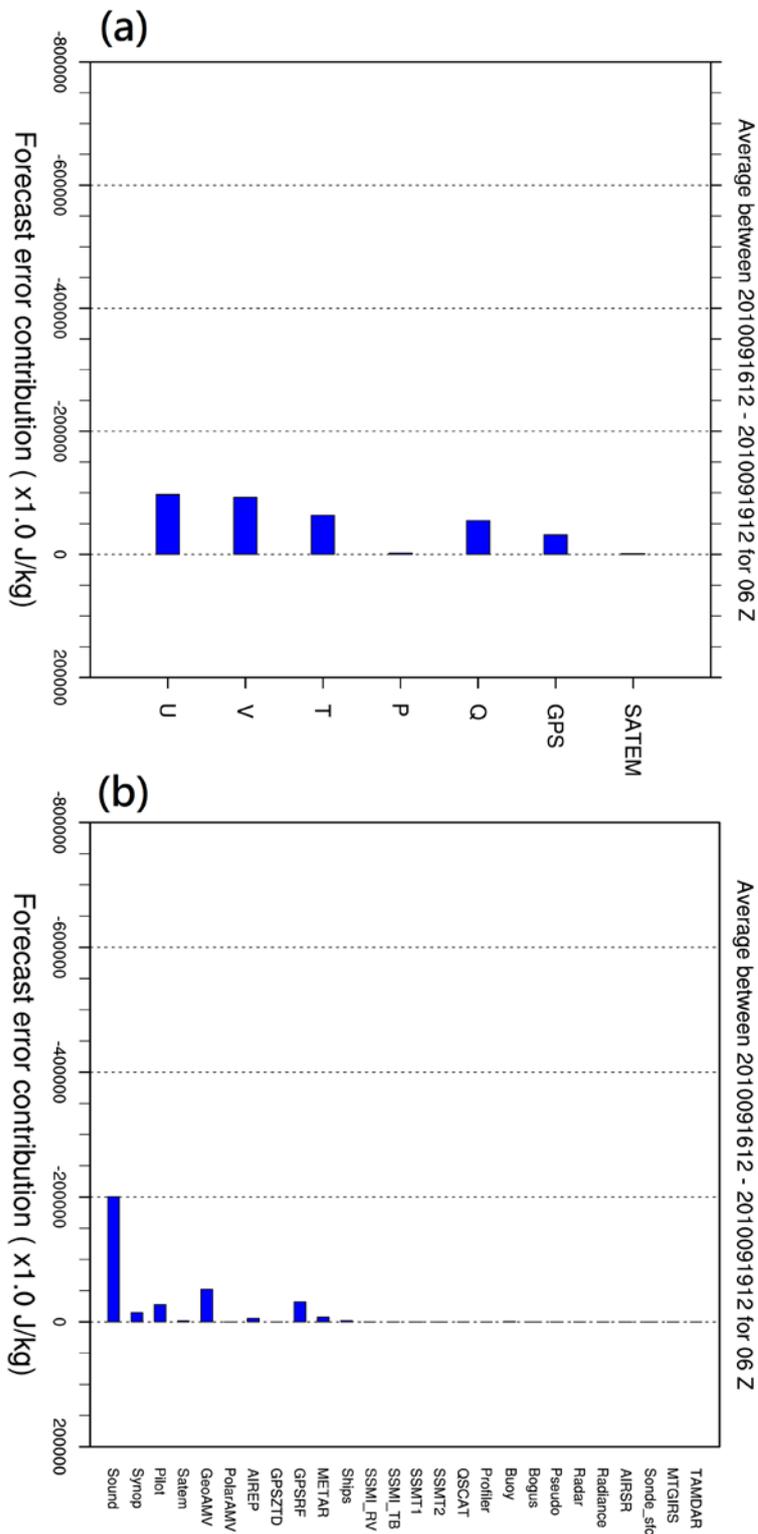


圖 10. Run 06h 但背景誤差為 CV5 結果(a)各種觀測對預報誤差貢獻，(b)觀測變數之預報誤差之貢獻敏感度總和，負值表示同化影響可減少誤差(價值函數為乾淨能，單位 J/kg)。

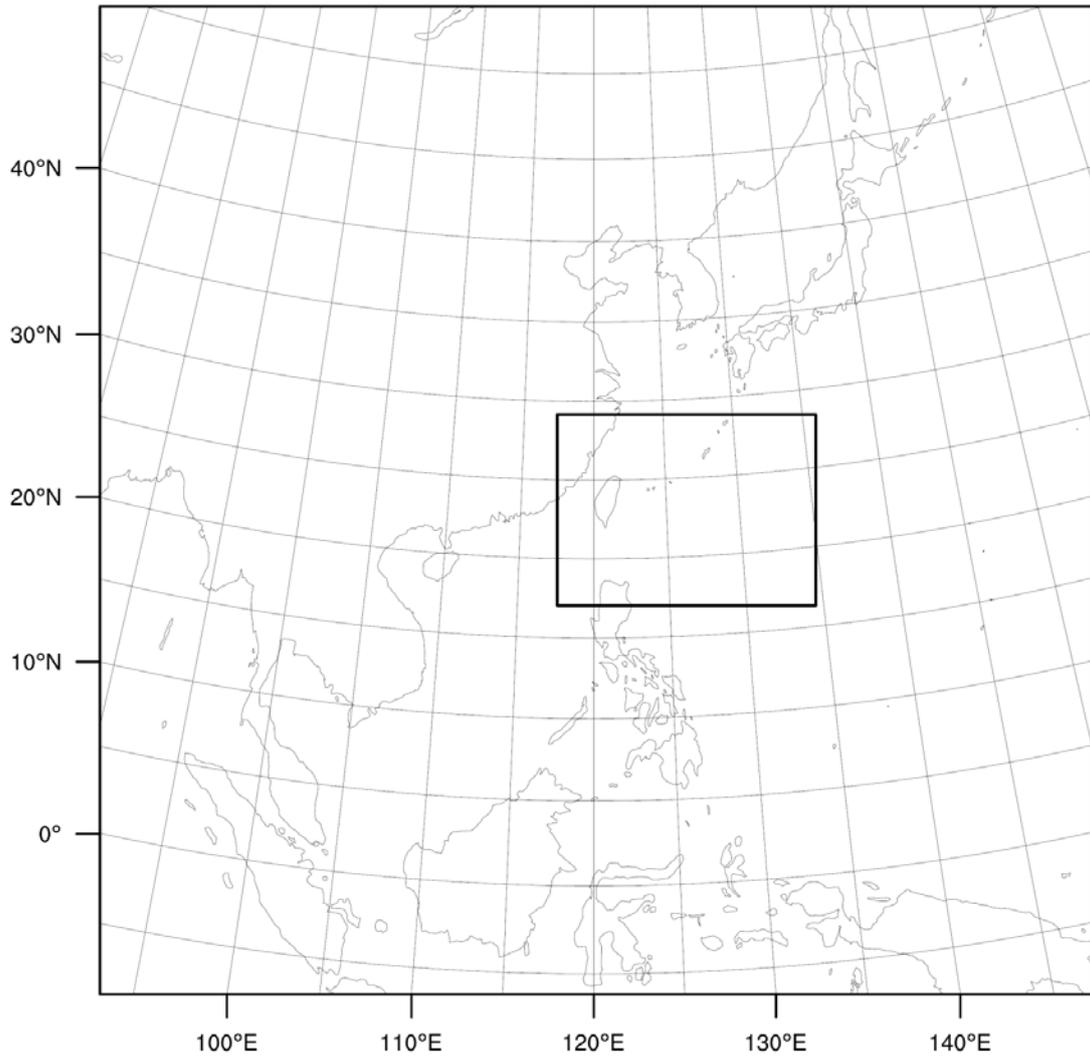


圖 11. 內框為價值函數計算的區域示意圖，Domain 為 45km，151x151。

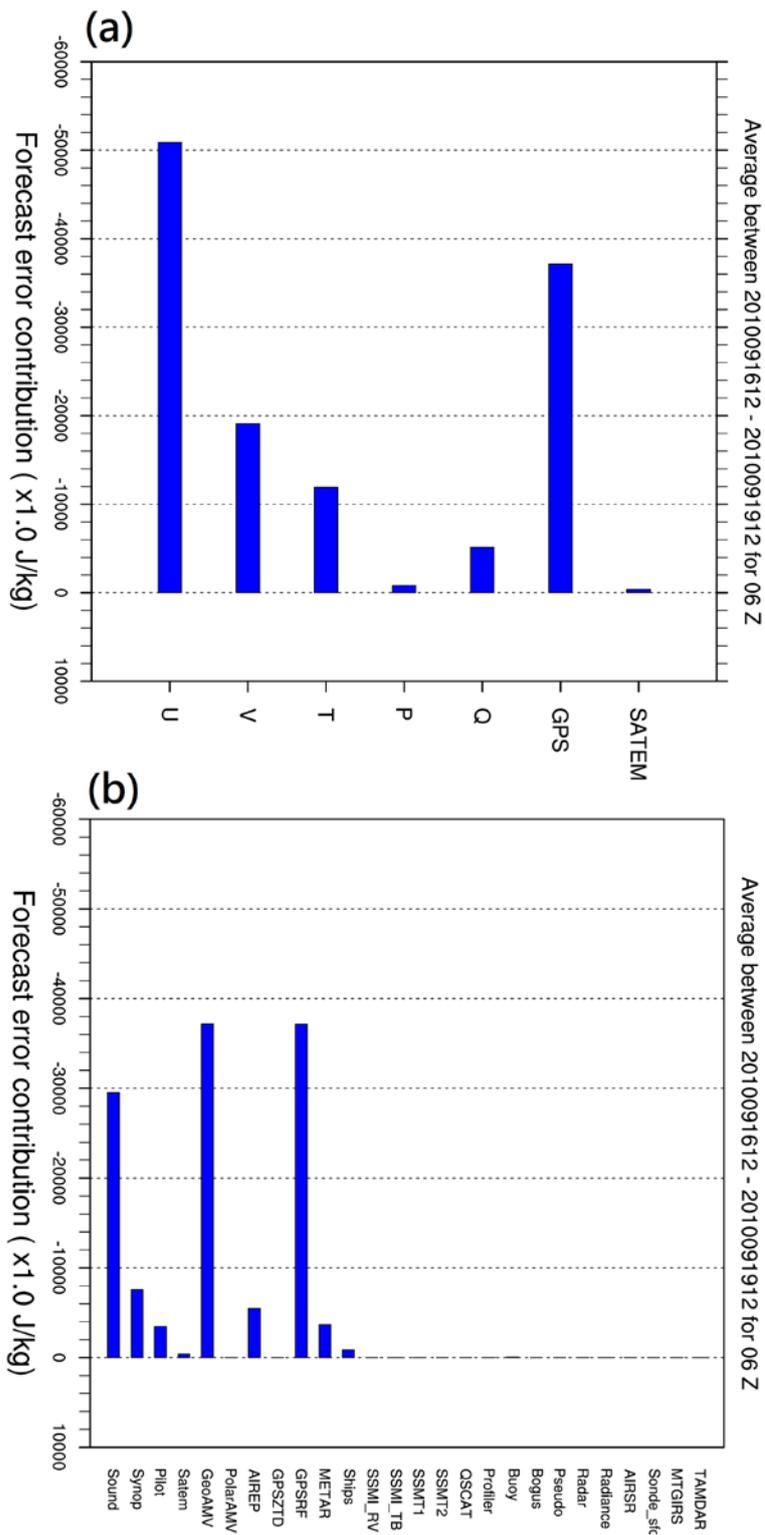


圖 12. Run 06h 但背景誤差為 CV5 結果，並且計算價值函數的範圍如圖 11 (a) 各種觀測對預報誤差之貢獻，(b) 觀測點變數對預報誤差之貢獻敏感度總和，負值表示同化影響可減少誤差(價值函數乾淨能，單位 J/kg)。

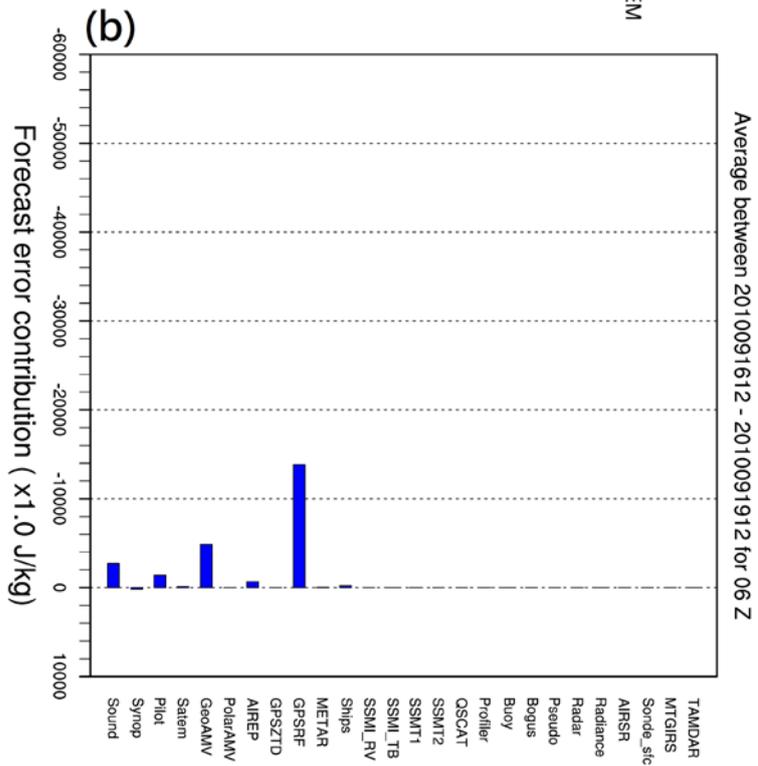
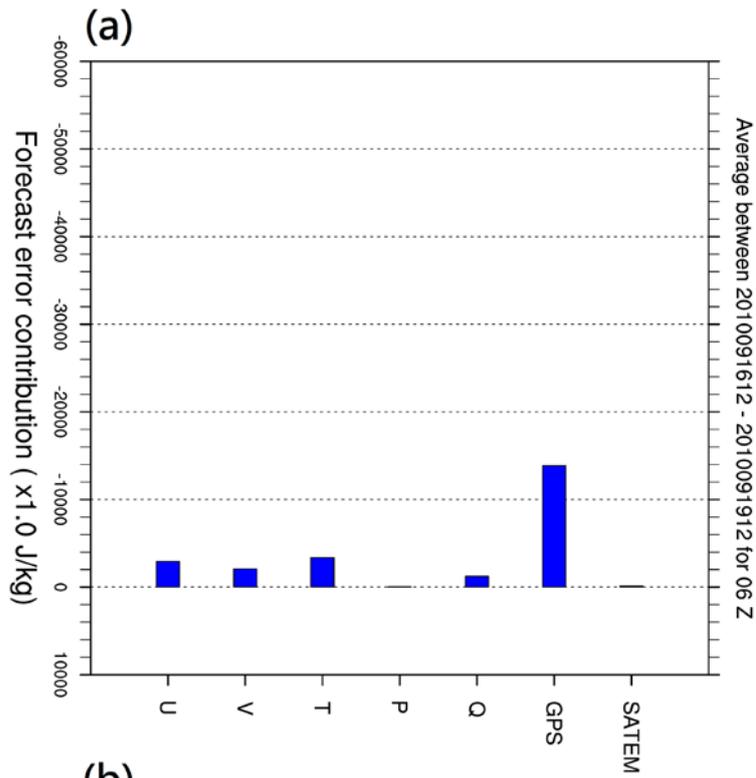


圖 13. Run 06h 但背景誤差為 cv5 結果，並且計算價值函數的範圍如圖 11，但價值函數為擾動動能 (a)各種觀測對預報誤差之貢獻，(b)觀測變數對預報誤差之貢獻敏感度，負值表示同化影響可減少誤差(價值函數擾動動能，單位 J/kg)。

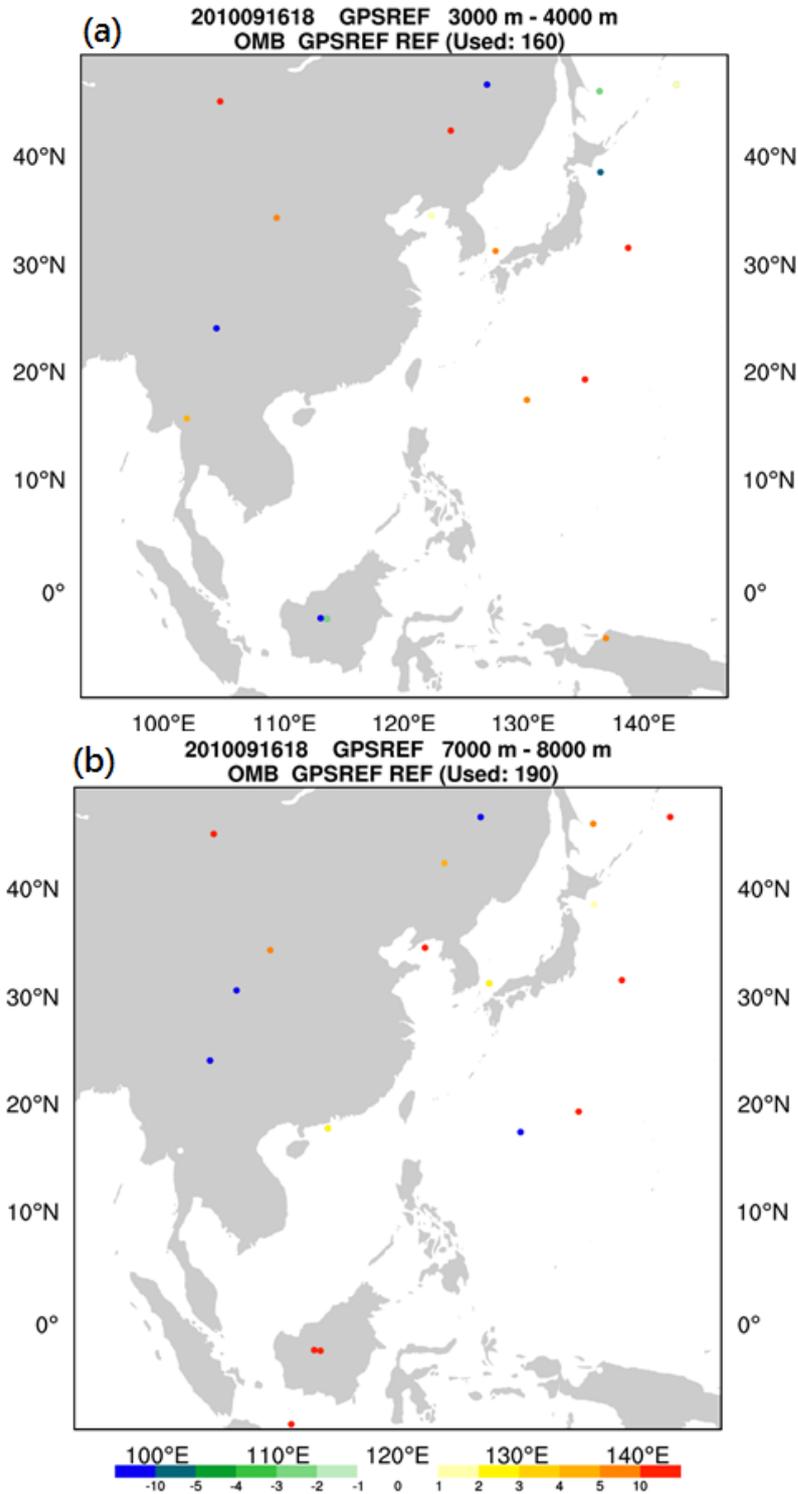


圖 14. Run 06h 但背景誤差為 CV5 結果，並且計算價值函數的範圍如圖 11，1612Z 同化 GPSRO 之折射率造成預報誤差的敏感度，分別為 (a) 低層 3000 m 至 4000 m，(b) 中層 7000 m 至 8000 m 總和 (價值函數擾動動能，單位 J/kg)。

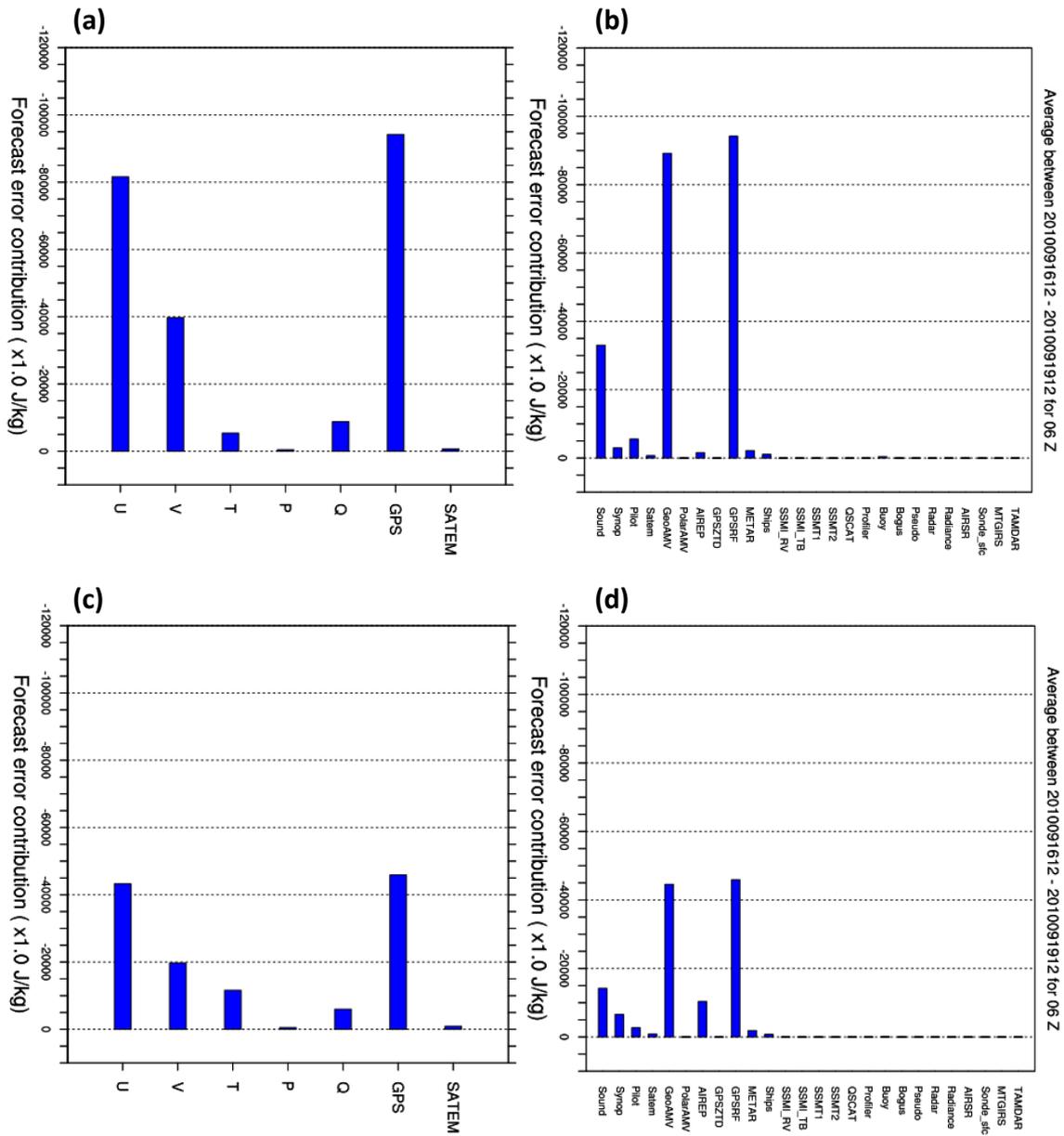


圖 15. Run 24h 且背景誤差為 CV5 結果，並且計算價值函數的範圍如圖 11，價值函數為乾淨能，單位 J/kg。(a) 觀測變數對預報誤差之貢獻敏感度總和，(b) 各種觀測對預報誤差之貢獻，負值表示同化影響可減少誤差；(c)、(d)同(a)、(b)，但價值函數為擾動動能，單位 J/kg。

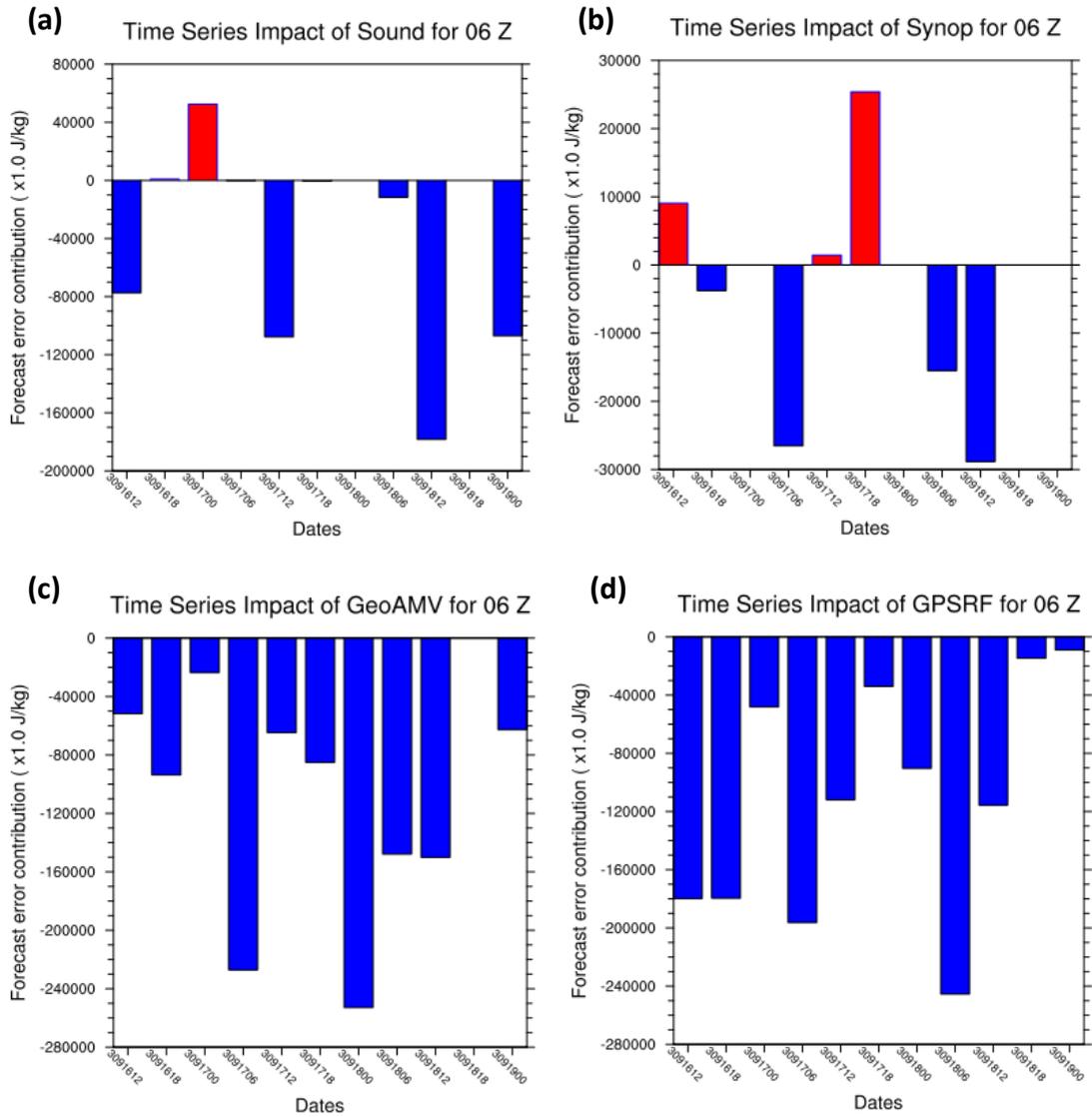


圖 16. 不同觀測對 24-h 預報誤差之貢獻的時間序列(每 6 小時)(2010/09/16/12Z~2010/09/19/00Z)結果，分別為(a) Sound，(b) Synop，(c) GeoAMV，(d)GPSRF 的結果(背景誤差為 CV3；價值函數乾淨能，單位 J/kg)。

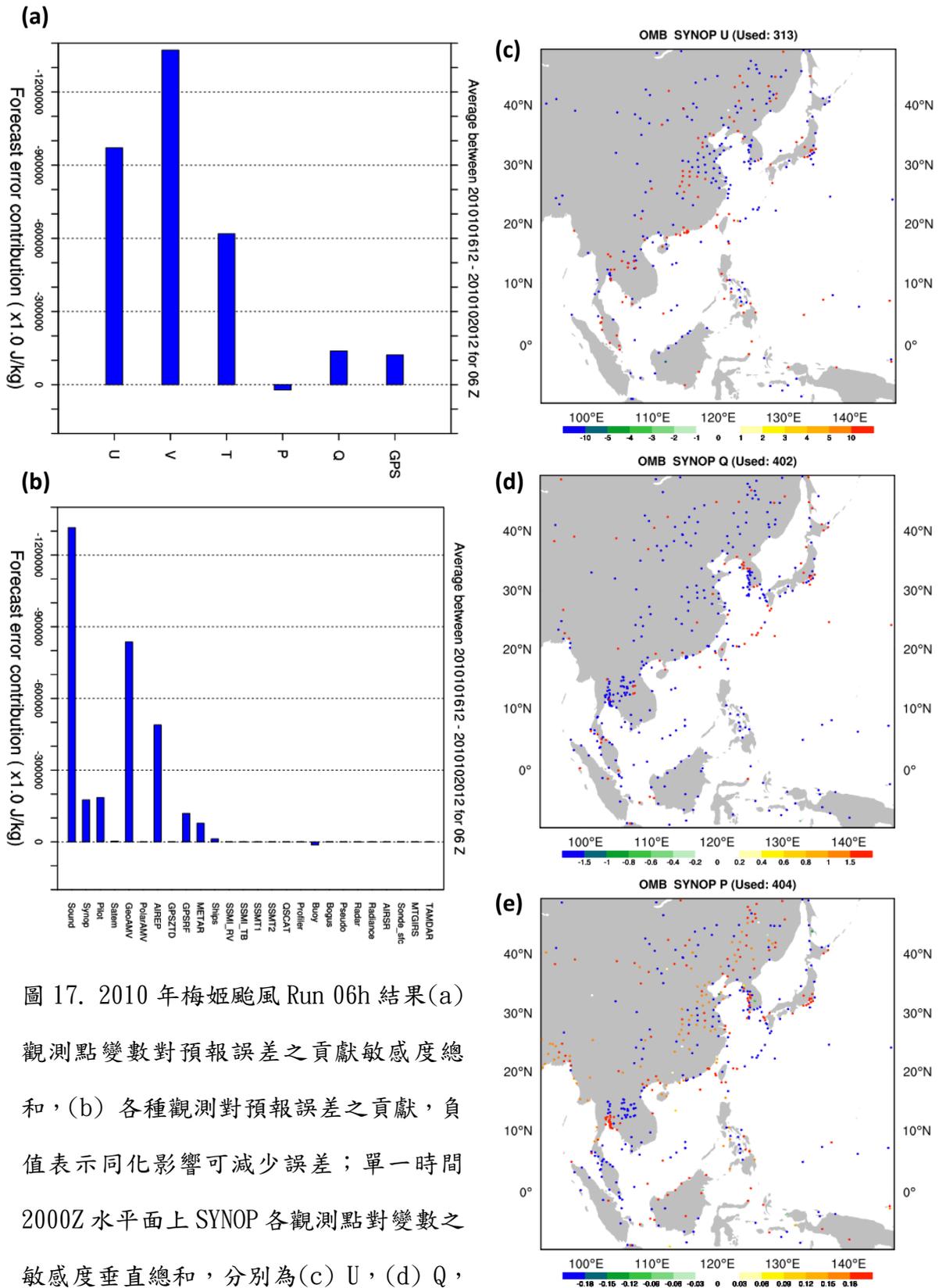


圖 17. 2010 年梅姬颱風 Run 06h 結果(a) 觀測點變數對預報誤差之貢獻敏感度總和，(b) 各種觀測對預報誤差之貢獻，負值表示同化影響可減少誤差；單一時間 2000Z 水平面上 SYNOP 各觀測點對變數之敏感度垂直總和，分別為(c) U，(d) Q，(e) P (背景誤差為 CV3；價值函數為乾淨能，單位 J/kg)。

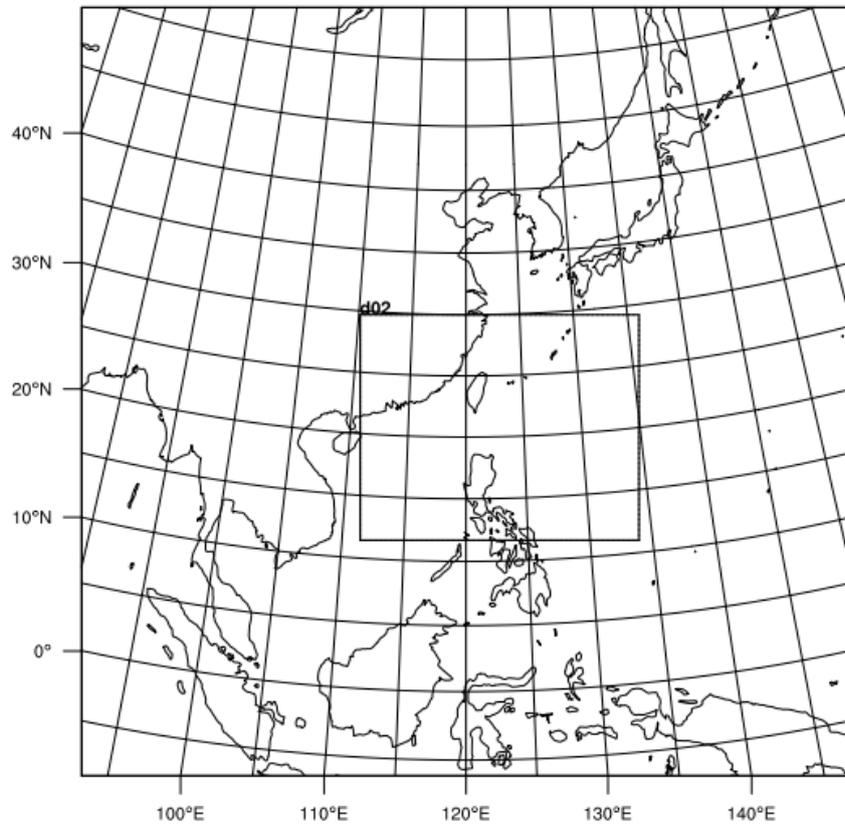


圖 18. 內框為梅姬颱風個案價值函數，計算的區域示意圖，Domain 為 45km，151x151。

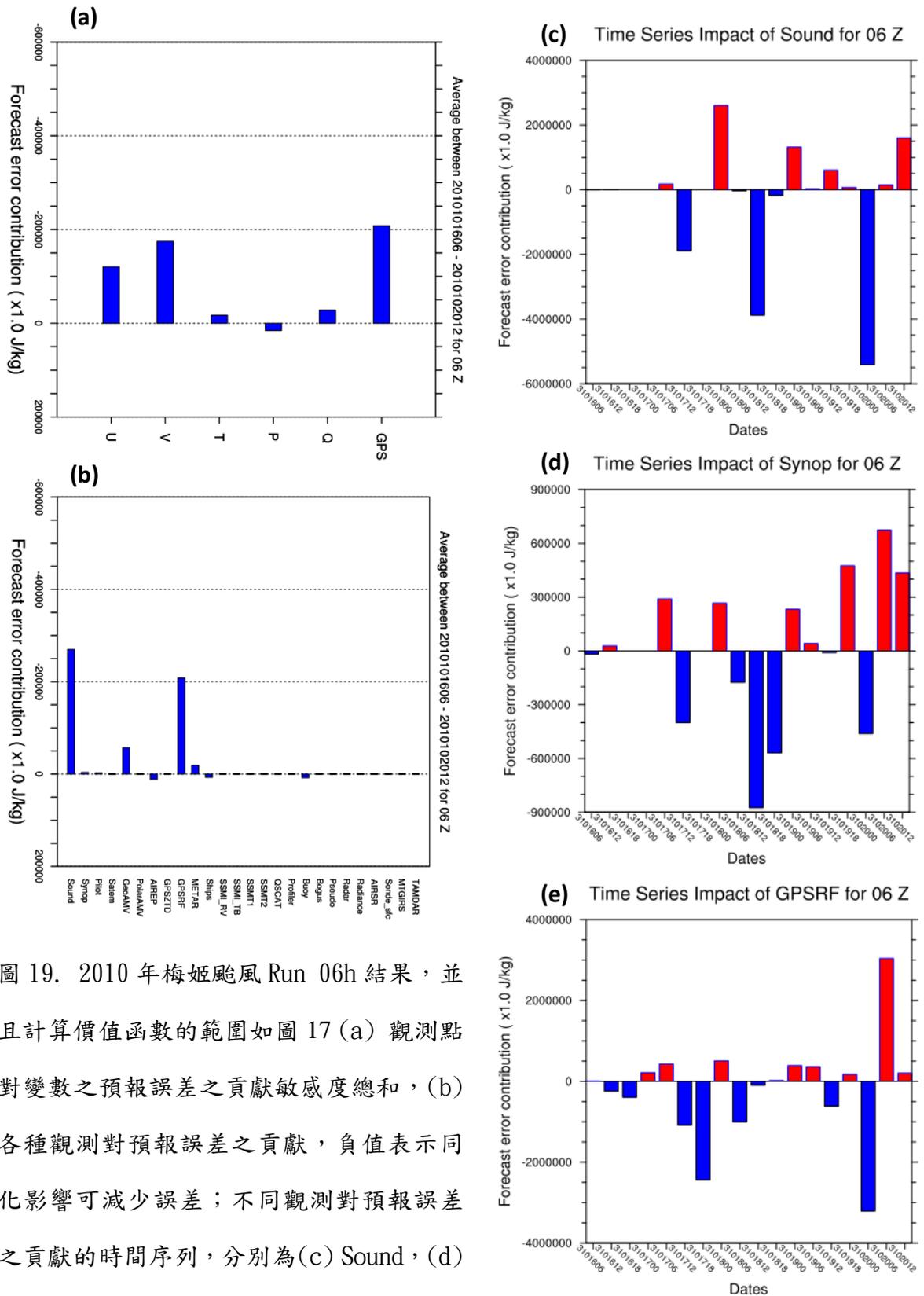


圖 19. 2010 年梅姬颱風 Run 06h 結果，並且計算價值函數的範圍如圖 17 (a) 觀測點對變數之預報誤差之貢獻敏感度總和，(b) 各種觀測對預報誤差之貢獻，負值表示同化影響可減少誤差；不同觀測對預報誤差之貢獻的時間序列，分別為(c) Sound，(d) Synop，(e) GPSRF 的結果(背景誤差為 CV3；價值函數為乾淨能，單位 J/kg)。

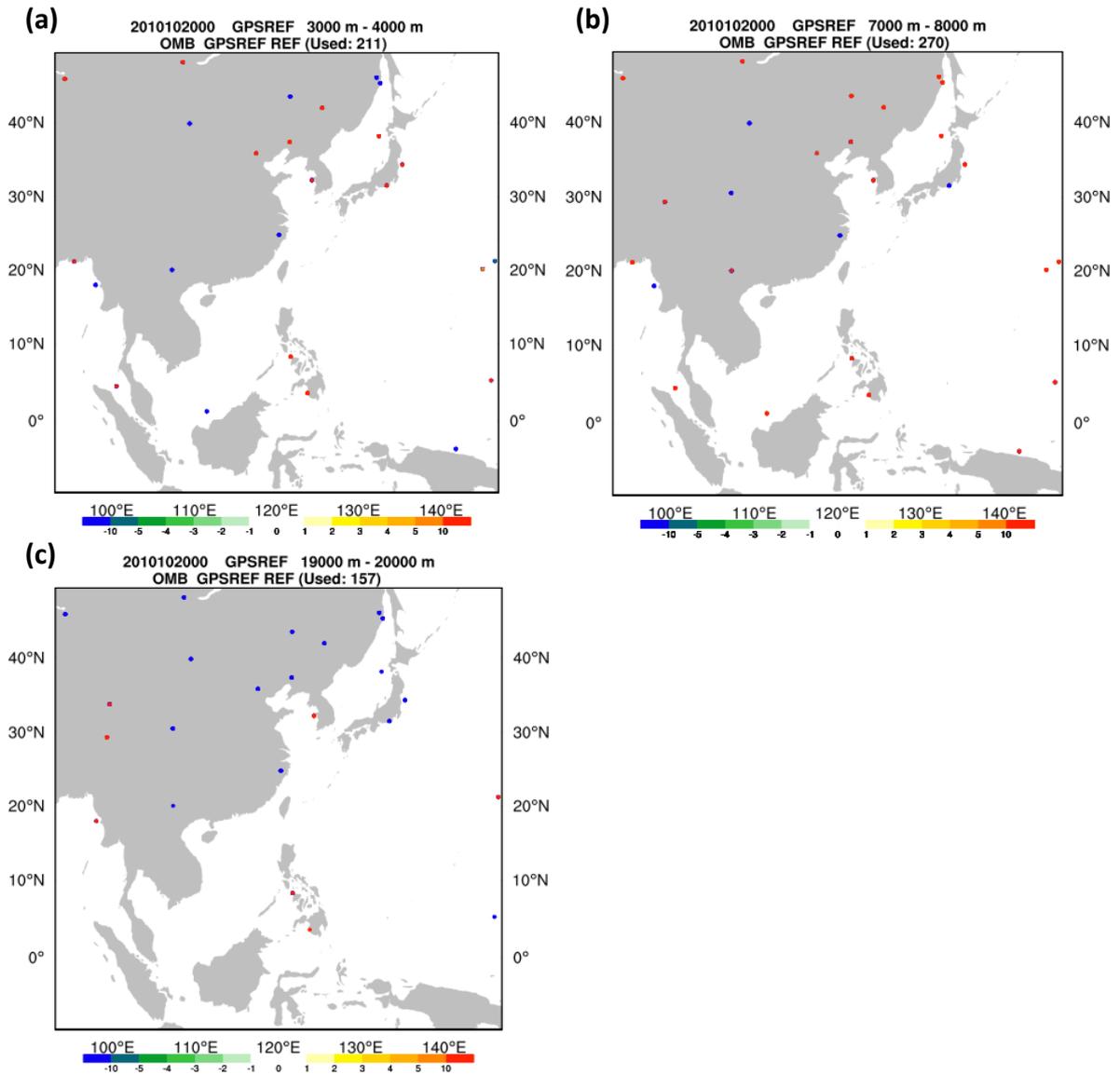


圖 20. 2010 年梅姬颱風 Run 06h 結果，並且計算價值函數的範圍如圖 17，2000Z 同化 GPSRO 之折射率造成預報誤差的敏感度，分別為 (a)低層 3000 m 至 4000 m，(b)中層 7000 m 至 8000 m，以及(c)高層 19000 m 至 20000 m 總和（背景誤差為 CV3；價值函數為乾淨能，單位 J/kg）。

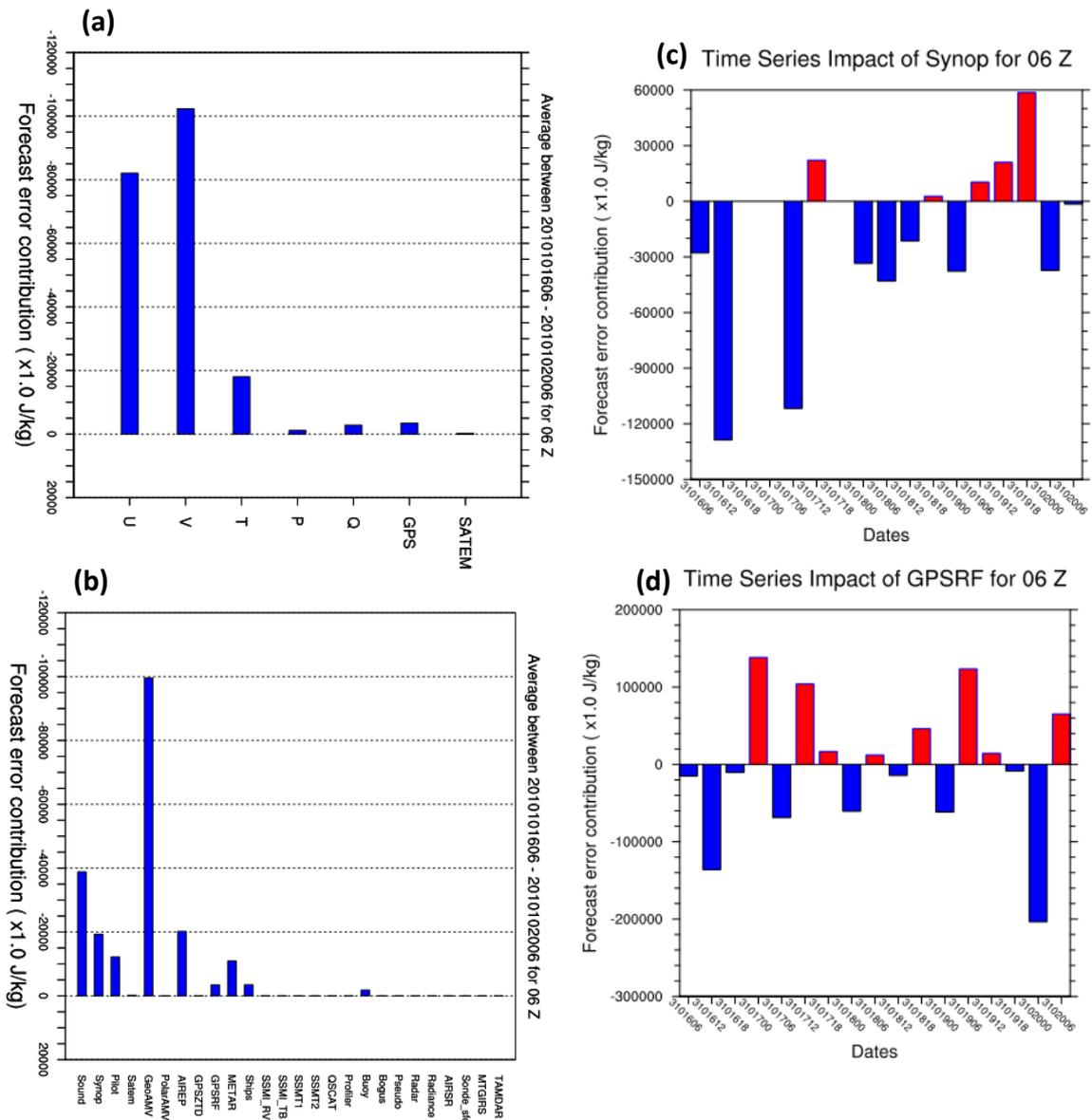


圖 21. 2010 年梅姬颱風 Run 12h 結果，並且計算價值函數的範圍如圖 17 (a) 觀測變數對預報誤差貢獻敏感度總和，(b) 各種觀測對預報誤差之貢獻，負值表示同化影響可減少誤差；不同觀測對預報誤差之貢獻的時間序列，分別為(c) Synop，(d) GPSRF 的結果(背景誤差為 CV3；價值函數為擾動動能，單位 J/kg)。

五、 自評表

原規劃目標	完成與否	說明
利用觀測資料同化系統，測試各種觀測影響之敏感度實驗	100%	已測試數種觀測資料同化所造成之誤差貢獻量，並持續增加模擬量並分析，並且已測試各種不同背景誤差之影響。影
比較不同預報準確度設計對觀測點敏感度的差異	100%	已使用選定範圍之擾動風場總和作為價值函數，計算其敏感度，並研究其結果。
出國學習並嘗試將觀測影響敏感度計算建置於四維變分同化系統	-	已取消。
評估同化偏折角對於預報模擬之影響(FSO)	100%	已嘗試評估，規劃建置中。
分析整理	100%	已完成。
撰寫報告	100%	已完成。