

地球同步衛星向日葵 8 號影像推導大氣運動向量之高度指定實驗

周鑑本 章鶴群 董承錡 陳冠儒 張育承

第四組
中央氣象局

摘要

本文採取傳統的互相關法(Cross-Correlation Method)求取衛星大氣運動向量。在高度指定步驟中，測試為減輕在推導衛星大氣運動向量時，傳統上以目標窗區內 20~25%最冷像素平均高度為指定大氣運動向量高的方法，所產生的慢速偏差(slow-speed bias)問題，而提出的互相關貢獻(Cross-Correlation Contribution)法。然而實驗結果顯示，兩種指定高度方法所得的大氣運動向量，其速度偏差並無顯著差異。將實驗推導的大氣運動向量與觀測探空數據進行比較的結果顯示，衛星大氣運動向量在定量上是準確的，誤差略大於區域數值天氣預報模式 6 小時的預報風場，以誤差均方根度量，二者相差小於 1.0 公尺每秒。本次實驗亦顯示從向日葵 8 號衛星推導出的大氣運動向量可用於定性上瞭解大氣環流。

關鍵字：大氣運動向量

一、前言

以連續衛星觀測影像中的可追蹤物(雲塊或水汽特徵)位移量，估算大氣運動向量，可提供大氣環流資訊的量化數據，特別是在傳統探測數據稀少的廣闊海洋上。這些數據既可用於資料同化系統中改善數值天氣預報，也可助於天氣預報人員進行天氣分析以瞭解當前的天氣狀況。

推導衛星大氣運動向量的技術可以追溯到 1960 年代 (Fujita 1960)。傳統上是互相關法於兩張連續衛星影像中求取大氣運動向量。至於如何指定此一大氣運動向量的高度始終是一個具有挑戰性的議題，在指定高度過程中，主要分為兩個步驟：一為決定衛星觀測為有雲像素時的雲高，二為選取哪些目標窗區內的雲像素用來計算大氣運動向量的高度(被追蹤物高度)。在第一步驟中，若求卷雲(非黑體)高度可採二氧化碳切片法 (Menzel et al. 1983) 與水汽頻道截斷法 (Szejwash 1982)，若雲為黑體的情形下可採紅外窗區頻道法 (Fritz 和 Winston 1962)。在第二步驟中，沿用已久的傳統方法，以目標窗區最中冷的 20%~25% 像素的平均高度來代表衛星大氣運動向量高度，這造成以互相關方法求取衛星大氣運動向量時常具慢速偏差的情況發生。為解決此一偏差問題。Bresky 等人 (2012 年) 開發了一種新穎的嵌套追蹤

方法(nested tracking approach)，以減小慢速偏差的情形。在歐洲氣象衛星開發組織(EUMETSAT)，另發展出互相關貢獻法亦欲達到相同的目的，文中採取後者於此次的實驗中。

另一個有關高度指定的議題，是衛星大氣運動向量的高度所代表的意義。最近的研究指出，將衛星大氣運動向量的指定高度，解釋為代表整朵雲的某層的平均高度或雲頂以下某個高度可能更合理。例如，Lean 等人 (2015 年) 進行首次猜測偏離[觀測 - 背景]統計(first-guess departure [observation - background] statistics)和模擬研究實驗證明了這一概念；他們發現，通過簡單地將所有類型雲的指定高度降低大約 10-40 hPa，可以改進衛星大氣運動向量與模式風場之間的匹配。其他研究也顯示此一觀點，Folger (2014) 等人也描述了通過降低指定高度或與雲層平均風進行比較，幾乎消除了高層雲推導的衛星大氣運動向量慢速偏差情況。我們意採納此一方法於我們的實驗中。

二、方法

首先介紹推導大氣運動向量的互相關法，其公式 (1) 如下，此公式用於計算第 1 時間觀測影像的目標窗區(內含可辨識的被追蹤物)A 矩陣(元素 $a_{i,j}$) 與第 2 時間觀測搜索窗區 B 矩陣(元素 $b_{i+m,j+n}$)與 $a_{i,j}$ 距離 x 軸

方向 m 個像素 y 軸方向 n 個像素)的相關係數，當互相關係數 $CC(m, n)$ 最大值時，即認為目標窗區內被追蹤物平移至此，平移的距離除以兩觀測時間差可得到速度。

$$CC(m, n) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{b_{i+m, j+n} - b_{mean}}{\sigma_b} \frac{a_{ij} - a_{mean}}{\sigma_a} \quad (1)$$

公式中 M 和 N 是目標窗區的維度，本次實驗設定 $M=N=15$ ， a_{mean} 是目標窗區像素的平均值； b_{mean} 是搜索窗區像素的平均值； σ_a 和 σ_b 是目標窗區和搜索窗區像素的標準差。

接著介紹為了改善慢速偏差的問題，Borde 等人 (2014 年) 提出的互相關貢獻法。為了清楚地說明此一方法，將等式 (1) 重寫為以下形式 (Büche 等人 2006 和 Borde 等人 2014)：

$$CC(m, n) = \sum_{i,j}^{M,N} CC_{ij}(m, n) \quad (2)$$

其中 CC_{ij} 是目標窗區 A 矩陣中的第 (i, j) 像素 a_{ij} 和搜索窗區 B 矩陣中的 $(i+m, j+n)$ 像素 $b_{i+m, j+n}$ 於互相關係數計算時所貢獻的值。圖 1 描述互相關貢獻法是如何選擇被追蹤物中用於指定高度的像素。圖 1(a) 是目標窗區的像素；圖 1(b) 是下一觀測影像中距目標窗區 x 方向距離 m 像素 y 方向距離 n 像素的搜索窗區像素，這個搜索窗區與目標窗區計算得到最大的互相關係數。圖 1(c) 為圖 1(a) 和 1(b) 中匹備像素於式 (2) 中的 CC_{ij} 值。從圖 1(a)、(b) 和 (c) 中，我們發現圖 1(a) 和 (b) 中亮度溫度較低像素和亮度溫度較高像素於圖 1(c) 中具較大的 CC_{ij} 值。但我們知道 CC_{ij} 值大且低亮度溫度的像素才是組成被追蹤物的像素，為清楚顯示追蹤物的像素，因此圖 1(d) 畫出圖 1(a) 目標窗區亮度溫度與圖 1(c) 中計算的 CC_{ij} 值的散布圖，很明顯圖中下部分支中的像素可以代表組成被追蹤物像素。使用這些像素高度的加權平均，指定出更合理的大氣運動向量高度。計算被追蹤物高度公式如下：

$$P = \frac{\sum_{CC_{i,j} > CC_{i,j,mean}}^{cold_branch} CC_{i,j} \times CLA_CTH_{i,j}}{\sum_{CC_{i,j} > CC_{i,j,mean}}^{cold_branch} CC_{i,j}} \quad (3)$$

公式中 $CLA_CTH_{i,j}$ 是單一像素的雲高 (氣壓) 值，這公式的意義是取圖 1(d) 中亮度溫度較低分支中 $CC_{i,j}$ 值大於 $CC_{i,j}$ 的平均值像素高度的加權平均值。若在亮度溫度較低分支中沒有像素的 $CC_{i,j}$ 值大於 $CC_{i,j}$ 的平均值，則使亮度溫度較低分支中 $CC_{i,j} > 0$ 像素來計算高度的平均值。在互相關貢獻法中，亦估算用於計算平均 (高度) 壓力像素高度的標準方差，得到計算高度的不確定性。該信息有助於將衛星大氣運動向量數據同化到數值預報系統中。

最後介紹利用代價函數極值微調大氣運動向量高度的方法，在此法中將以傳統方法或互相關貢獻法求得的大氣運動向量的高度，做垂直上下的調整，並計算每次調整時代價函數 (公式 (4)) 的值，選取所有調整高度中所計算的代價函數最小值者，定義為最終設定的大氣運動向量的高度。此代價函數定義如下 (Velden 等, 1997)：

$$B_{m,k} = \left(\frac{V_m - V_{i,j,k}}{F_V} \right)^2 + \left(\frac{T_m - T_{i,j,k}}{F_T} \right)^2 + \left(\frac{P_m - P_{i,j,k}}{F_P} \right)^2 + \left(\frac{dd_m - dd_{i,j,k}}{F_{dd}} \right)^2 + \left(\frac{S_m - S_{i,j,k}}{F_S} \right)^2 \quad (4)$$

其中下標 m 代表為大氣運動向量的 V (速度向量)， T (溫度)， P (壓力)， dd (方向) 和 S (速度大小)。下標為 i, j 與 k 代表用以數值預報內插至大氣運動向量位置的物理量。 F_V 、 F_T 、 F_P 、 F_{dd} 與 F_S 是控制等號右側各項對成本函數的貢獻的權重。如果垂直調整無法在原高度附近 ± 100 hPa 內找到最小的代價函數值，則刪除此一大氣運動向量， F_V 、 F_T 、 F_P 、 F_{dd} 與 F_S 的值之設定遵循 (Holmlund et al. 2001; Niemanet al. 1997)。

三、實驗設定與結果

首先敘述實驗的設定方式，本次實驗測試 6 種不同衛星大氣運動向量高度指定方式，分別為：實驗 1、

2、3、4、5 與實驗 6。實驗 1：以目標窗區中 20~25% 最低溫像素平均高度為指定大氣運動向量高度；實驗 2：以將實驗 1 的高度加以調整尋找公式(3)極小值的手段，重新微調高度；實驗 3：將實驗 1 的高度調低 30hPa 作為大氣運動向量高度；實驗 4：以互相關貢獻法為指定大氣運動向量高度；實驗 5：以將實驗 4 的高度加以調整尋找公式(3)極小值的手段，重新微調高度；實驗 6：將實驗 4 的高度調低 30hPa 作為大氣運動向量高度。

測試資料時間為 2016 年 12 月 1 日到 12 月 9 日 (缺 3 日資料)，衛星資料為每天在 0000、0010 和 0020 UTC 連續的 Himawari-8 影像，數值預報數據來自於中央氣象局的作業的區域天氣預報模式。

接下來敘述各實驗設定的執行結果，我們將實驗 1 至 6 的統計結果顯示於表 1 與圖 2 中，比較實驗 1 與 4 的偏差(bias)可以發現互相關貢獻法與傳統的高度指定法的速度偏差並無顯著差異。比較實驗 1 與 2 或比較實驗 4 與 5 顯示，以代價函數極小值微調有助於減輕慢速偏差問題，且有助於向量差(mdv)與均方根誤差(rmse)的減小。觀察實驗 3 與 6 可以發現降低 30hPa 的方法可減緩慢速偏差的問題，但無助於向量差(mdv)與均方根誤差(rmse)減小。就所有誤差分析(向量差、均方根誤差、標準方差與偏差)總體而言，實驗 2 與 5 的設定表現較佳。

由於向日葵 8 號衛星具有多個頻道，可產製空間分布較廣的大氣運動向量，提供較完整的大氣環流資訊，最後我們展示 3 個可見光、3 個近紅外光、3 個水汽頻道，與紅外窗區頻道的大氣運動向量於颱風的個案，如圖 3(a)所示，由圖中可以發現，大氣運動向量可以描述颱風的環流與颱風環境的環流，在颱風外圍較晴空的地區的低層環流亦可被推導出來，其主要貢獻來自於可見光與近紅外光，尤其近紅外光。圖 3(b)為 150hPa 的數值預報風場(黃色向量)與其上下 50hPa 內的大氣動向量(紅色向量)的比較，此圖可定性上的檢查大氣動向量與數值預報風場間的差異，有助於分析堆導大氣動向量系統直觀校驗。圖(c)與(d)如圖(d)但數值預報風場分別在 200hPa 與 850hPa 處。

四、 結論與未來工作

衛星大氣運動向量可提供大氣環流的重要的資訊，

然在指定高度方面依然存在討論空間，本次實驗以互相關法建立的系統討論高度指定的議題。實驗結果顯示互相關貢獻法與傳統方法對於慢速度偏差的問題並未顯示明顯差異，而微調高度尋找代價函數極小值的手段可減輕此一問題，並降低大氣運動向量的誤差，但須注意的是這會大氣運動向量偏向數值預報場，另外降低 30hPa 的方法可有效減緩慢速偏差的問題，但並不能降低大氣運動的誤差。向日葵 8 號上的多個頻道可提供使用更精細的方案來分析雲參數的機會，這也可能有助於找到更合理代表衛星大氣運動向量高度的機會，這方面的研究將在我們的未來工作中進行和測試。這次實驗只測試東亞地區，在未來的實驗中我們將範圍擴展至全景的衛星觀測範圍，並將採用質點影項測速儀(Particle Image Velocimetry, PIV)的方法取代互相關法推導大氣運動向量，PIV 的方法可將速度向量推至次像素解析，以目前 2 公里的影像解析度與 10 分鐘的掃描頻率，僅就解析度而言，此法對大氣運動向量誤差的降低定有助益。

參考資料：

- Borde, R., M. Doutriaux-Boucher, G. Dew, and M. Carranza., 2014: A Direct link between feature tracking and Height Assignment of Operational EUMETSAT Atmospheric Motion Vectors. *J Atm Oceanic Technol*, **31**,33-46.
- Bresky, W. C., J. M. Daninls, A.A Baliey, and S. T. Wanzong, 2012: New Methods toward Minimizing yhe Slow Speed Bias Associated with Atmospheric Motion Vectors. *J Appl Meteor Climatol*, **51**, 2137-2151
- Büche, G., H. Karbstein, A. Kummer, and H. Fischer, 2006: Water vapor structure displacements from cloud-free Meteosatscenes and their interpretation for the wind field, *J. Appl. Meteor.*, **45**, 556-575.
- Fritz, S., and J. S. Winston, 1962: Synoptic use of radiation measurements from satellite TIROS-II. *Mon Wea Rev*, **90**,1-9
- Folger, K., M. Weissmann, and Lange, 2014: Height correction of atmospheric motion vectors using satellite lidar observation from CALIPSO. *J Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 1809-1819.,
- Fujita, T. 1968: Present Status of Cloud Velocity Computations from ATS-1 and ATS-3. *Space Res*, **9**, 557-570.
- Holmlund, K., C. S. Velden, and M. Rohn, 2001: Enhanced Automated Quality Control Applied to High-Density Satellite-Derived Winds. *Monthly Weather Review*, **129**, 517-529.
- Lean, P., S. Migliorini., and G. Kelly., 2015: Understanding Atmospheric Motion Vector Vertical

Representativity Using a Simulation Study and First-Guess Departure Statics. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **54**,2479-2500

Nieman, S.J., W. P. Menzel, C.M. Hayden, D. Gray, S. Wanzong, C.S. Velden, and J. Daniels, 1997: Fully Automated Cloud-Drift Winds in NEDIS Operations. *Bulletin of AMS*, **78**, 1121-1134.

Szejwach, G., 1982: Determination of Semi-Transparent

Cirrus Cloud Temperature from Infrared Radiances: Application to Meteosat. *J Appl Meteor*, **21**, 384-393
 Velden, C.S., C.M. Hayden, S. J. Nleman, W.P Menzel, S. Wanzong, and J. S. Goerss., 1997: Upper-Tropospheric Winds Derived from Geostationary Satellite Water Vapor Observations. *Bulletin AM S*, **78**, 173-195

圖表：

表1. 實驗1至6數據：大氣運動向量(AMV)與數值預報模式(NWP)6小時的誤差(以探空為真值)，mdv為向量差、rmse為均方根誤差、stdv為標準方差、bias為偏差、spd為平均風速、num是資料個數。

		mdv	rmse	stdv	bias	spd	num
實驗 1	AMV	4.886	5.570	2.877	-0.666	17.87	348
	NWP	4.467	5.029	2.310	-0.910		
實驗 2	AMV	4.243	4.903	2.457	0.180	17.86	356
	NWP	3.873	4.405	2.098	-0.069		
實驗 3	AMV	4.698	5.547	2.950	0.401	16.62	331
	NWP	4.236	4.828	2.317	0.172		
實驗 4	AMV	4.844	5.725	3.053	-0.694	17.43	334
	NWP	4.236	4.798	2.254	-0.879		
實驗 5	AMV	4.054	4.825	2.617	0.358	17.60	337
	NWP	3.688	4.234	2.080	-0.073		
實驗 6	AMV	4.688	5.456	2.791	0.117	16.48	341
	NWP	4.078	4.670	2.275	0.016		

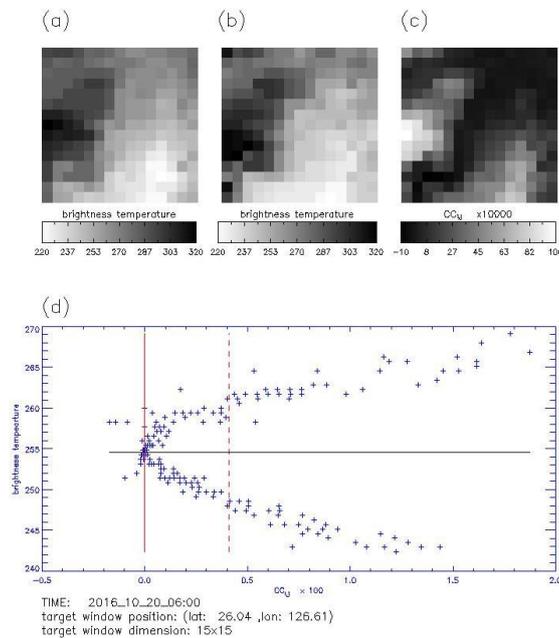


圖1. (a) Himawari-8頻道13影像的目標窗區(target window)。(b)在下一時間Himawari-8頻道13影像中與最目標窗區大相關的尋找窗區 (search window)。(c) 影像(a)第*i,j*像元與影像(b)第*i+m,j+n*像元貢獻給相關係數值 CC_{ij} 。(d) 目標窗區的各像元亮度溫度圖與 CC_{ij} 的散布圖，圖中黑色水平線為亮溫平均值，紅色垂直實線為 CC_{ij} 平均值，紅色垂直虛線為 CC_{ij} 值為零處。

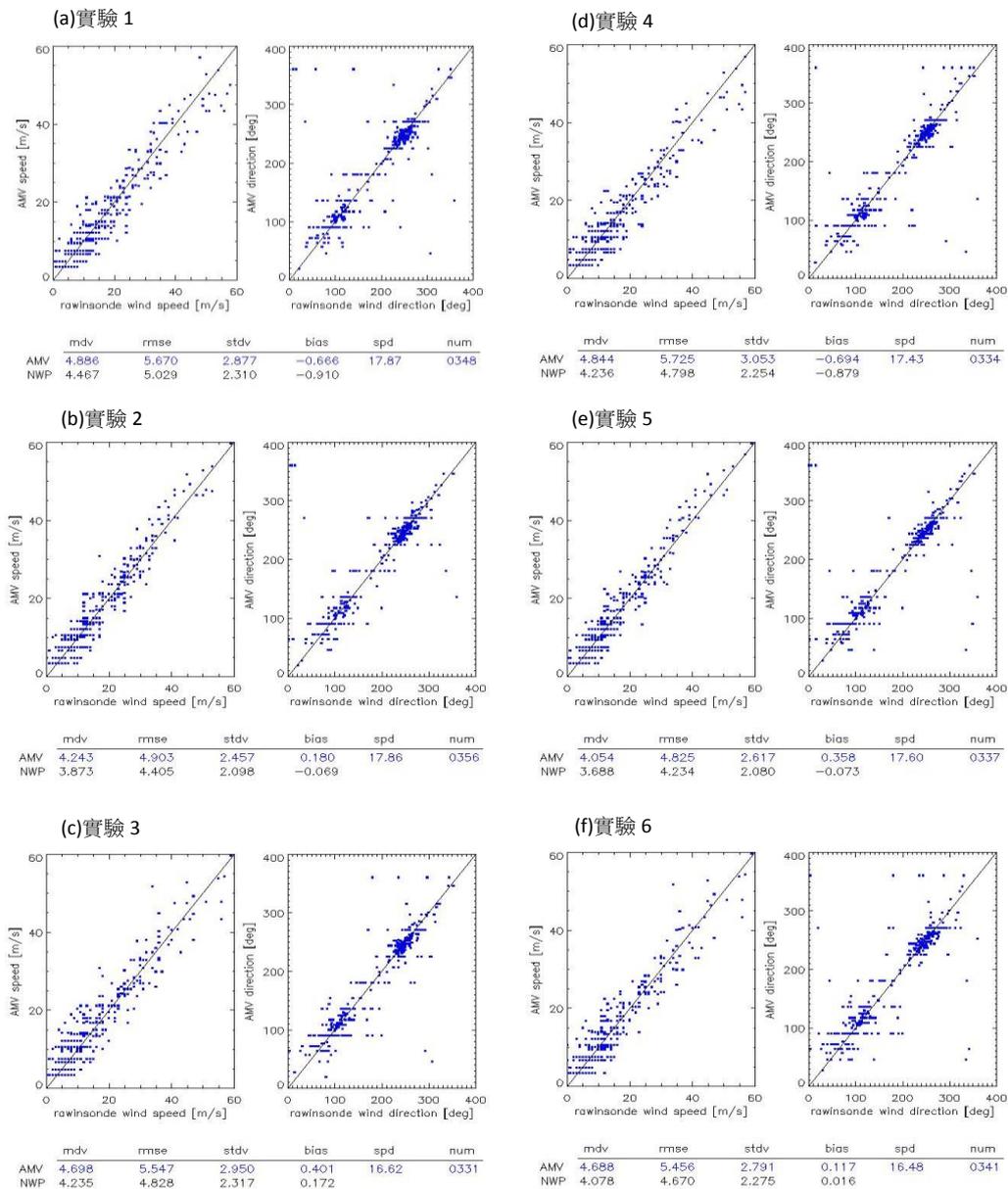


圖2. 圖(a)至(f)是實驗1至6的統計結果。每個實驗右邊方框是大氣運動向量風速對相對應得探空資料風速的散布圖，左邊是大氣運動向量風向對相對應得探空資料風向的散布圖。底下數據分別為大氣運動向量(AMV)與數值預報模式(NWP)6小時的誤差(以探空為真值)，mdv為向量差、rmse為均方根誤差、stdv為標準方差、bias為偏差、spd為平均風速、num是資料個數。

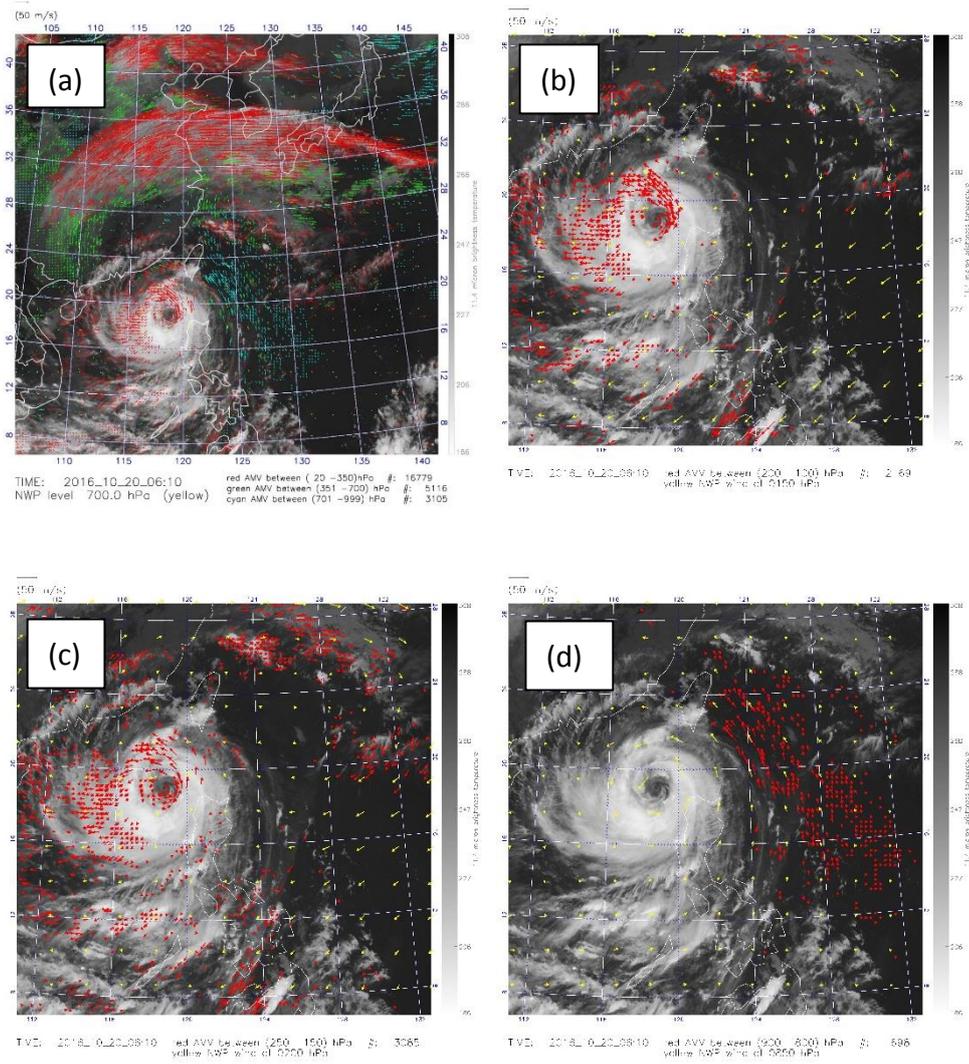


圖3、(a) 合成可見光、近紅外光、紅外窗區及水汽頻道推導的大氣運動向量，高度在20至350hPa 設為紅色，高度在351至700hPa為綠色，高度在701至999hPa為青色。(b) 黃色向量為150hPa 的數值預報風場，紅色向量為在150hPa上下50hPa內的大氣運動向量，(c)和(d)與(b)相同，但 與報風場高度分別為200與850hPa。