

Reprint 1100

探討熱帶氣旋監測的最新發展

蔡振榮 & 郝孟騫

第二十八屆粵港澳氣象科技研討會，
香港，2014年1月13-15日

探討熱帶氣旋監測的最新發展

蔡振榮 郝孟騫

香港天文台

摘要

西北太平洋及南中國海每年均受到熱帶氣旋的影響，準確地監測熱帶氣旋的位置、強度變化及風力分佈對預測其路徑及潛在影響非常重要。本文簡要介紹香港天文台在熱帶氣旋監測的最新發展，討論天文台在業務運作中如何應用氣象觀測衛星、氣象偵測飛行、地面觀測及垂直遙感探測等資料，並以近兩年影響香港的熱帶氣旋為例子說明。文章亦會討論如何綜合各類觀測資料，以評估南中國海的季風低壓增強成熱帶氣旋的情況。

關鍵字：熱帶氣旋監測, 季風低壓, 飛機偵測資料

1 引言

西北太平洋及南中國海每年均受到熱帶氣旋的影響。強風、暴雨及風暴潮往往對沿海地區造成重大的破壞及人命傷亡。準確地監測熱帶氣旋的位置、強度變化及風力分佈對預測其路徑及潛在影響尤其重要，能讓社會各界及早做好預防措施，減低熱帶氣旋可能所帶來的損失。

本文簡要介紹香港天文台在熱帶氣旋監測的最新發展，包括介紹天文台使用的遙感觀測平台，並以熱帶氣旋杜蘇芮、啟德、貝碧嘉、溫比亞、尤特及海燕為例，討論天文台在業務上如何應用遙感資料。文章亦會介紹天文台和香港政府飛行服務隊在 2011 年開始進行的熱帶氣旋偵測飛行，並以 2013 年 6 月中旬南中國海的季風低壓為例，分享天文台在業務中應用飛行偵測資料來決定是否將該系統升格為熱帶低氣壓的經驗。本文亦會以熱帶氣旋杜蘇芮及啟德影響香港期間的風廓線儀資料，探討地面持續風速和接近地面的低空風速之間的可能關係，並瞭解在熱帶氣旋影響下中低層大風區的發展對預報地面風力趨勢的啟示。此外，本文並會介紹天文台在業務中應用地面觀測資料的最新情況，以及展望日後利用飛機作高空探測的發展方向。

2 遙感觀測平台

2.1 氣象衛星觀測

香港天文台利用多個氣象衛星的觀測，包括日本氣象廳的 MTSAT 衛星圖像及中國氣象局的風雲衛星圖像，監測位於西北太平洋及南中國海的熱帶氣旋。由 2013 年開始，香港天文台開始接收中國氣象局的風雲-2F 衛星的區域加密觀測圖像(Rapid-Scan)。相對於傳統每 30 分鐘更新一次的衛星圖像，加密觀測圖像的更新頻率可達每 6 分鐘一次，而資料接收時間大約在觀測後 30 分鐘，較傳統衛星圖像縮短約 15 分鐘。較高的更新頻率及較快的資料傳遞對即時監測熱帶氣旋的短期移動趨勢及強度變化有相當大的幫助。以下討論應用區域加密觀測圖像的一個個案。

熱帶低氣壓溫比亞於 2013 年 6 月 28 日在菲律賓以東的西北太平洋上形成，並向西北移動，翌日增強為熱帶風暴，橫過菲律賓中部，其後於 6 月 30 日進入南中國海中部(圖 1)。香港天文台在當日開始接收更新頻率達每 6 分鐘一次的風雲-2F 衛星的區域加密觀測圖像。從 7 月 1 日上午 11 時至正午 12 時的可見光衛星圖像中(圖 2)，顯示接近溫比亞中心的組織在一小

時內有所改善，而德沃夏克衛星雲圖分析法亦支持溫比亞中心強度提升，天文台於正午左右將溫比亞升格為強烈熱帶風暴。相對傳統衛星圖像，更新頻率較高及資料傳遞較快的衛星圖像使天文台更有效掌握熱帶氣旋的強度的細緻變化，從而更快作出升格溫比亞的決定。

2.2 衛星觀測產品

除了傳統的可見光及紅外線衛星圖像外，香港天文台亦利用其他衛星觀測產品，例如微波衛星圖像及 ASCAT 海面風場分析等來監測熱帶氣旋的位置、強度及風場結構。以下分別討論應用微波衛星圖像及 ASCAT 海面風場分析的個案。

2.2.1 應用微波衛星圖像的個案

熱帶氣旋海燕在 2013 年 11 月 5 日下午至 11 月 6 日下午由強烈熱帶風暴迅速增強為超強颱風(圖 3)。在短短 24 小時之間，它的中心最高風速由每小時 60 海浬上升至每小時 105 海浬(表 1)。

文獻 1 及 2 介紹在熱帶氣旋風眼壁出現的「對流熱塔」現象。「對流熱塔」是指雲頂高度極高的對流，該處上升運動劇烈，並可能伴隨閃電。如熱帶氣旋風眼壁出現「對流熱塔」現象，熱帶氣旋或會迅速增強。由於「對流熱塔」的雲頂高度極高，直達對流層頂部，它們都含有數量顯著的冰晶。而這些冰晶可以利用 85-91 GHz 極化修正亮溫(polarization corrected brightness temperature (PCT))的微波衛星圖像來探測[3]。

天文台利用微波衛星圖像監測「對流熱塔」現象，從而得知熱帶氣旋會否迅速增強。在 11 月 6 日上午的 91 GHz 微波衛星圖像(圖 4)顯示了海燕中心附近的「對流熱塔」現象。圖中紅色的地方表示極化修正亮溫低於絕對溫度 192 度或以下，符合有關「對流熱塔」的條件[1, 2]，亦是熱帶氣旋迅速增強的先兆。在出現「對流熱塔」的現象後，天文台亦於當日上午八時將海燕升格為超強颱風。

2.2.2 利用 ASCAT 海面風場分析圖像

熱帶氣旋在發展的初期，組織一般會較為鬆散，使用衛星圖像(特別是紅外線衛星圖像)來估計熱帶氣旋的中心位置有時會較困難。ASCAT 海面風

場圖像提供高解析度的海面風場資料，可輔助預報員找出熱帶氣旋的中心位置。以下簡要討論其中一個應用 ASCAT 海面風場分析圖像的個案。

熱帶低氣壓貝碧嘉於 2013 年 6 月 20 日在南海中部形成(圖 5)。由當日晚上 9 時的紅外線衛星圖像顯示(圖 6)，貝碧嘉的結構仍不是很完整，單靠紅外線衛星圖像來估計貝碧嘉的中心位置存在較大的不確定性。而當時的 ASCAT 海面風場圖像(圖 7)卻能夠清楚顯示貝碧嘉的氣旋式流場，大大協助預報員分析貝碧嘉的中心位置。

但要注意的是，使用 ASCAT 海面風場圖像作分析有一定的限制，由於 ASCAT 載於極地軌道衛星上，覆蓋範圍有限，並不能持續觀測某一固定位置。而且因散射儀的限制，ASCAT 在風速較大的情況下會低估風力[4, 5]。在降雨率較大的情況下得出的風向風速資料亦會有較大的誤差[6]。

2.3 德沃夏克衛星雲圖分析法

在估算熱帶氣旋的強度方面，香港天文台主要應用德沃夏克(Dvorak)衛星雲圖分析法[7]，由目前強度值(CI 值)對照出接近海平面的最大風速。由於傳統德沃夏克衛星雲圖分析法對照表使用等效 1 分鐘的平均風速，香港天文台利用了 0.93 的轉換因數將 1 分鐘平均風速換轉為 10 分鐘平均風速[8]以作業務運作之用，表 2 為天文台使用的風速對照表。

應用德沃夏克衛星雲圖分析法有一定的限制，當熱帶氣旋開始減弱時，傳統德沃夏克衛星雲圖分析法要求 CI 值維持 12 小時不變。而在熱帶氣旋減弱超過 12 小時後，CI 值需要較最終 T 指數(Final T number)大 1.0。但當熱帶氣旋登陸後，減弱速度或會相當迅速。在這情況下，德沃夏克衛星雲圖分析法會高估熱帶氣旋的強度。再者，在熱帶氣旋減弱超過 12 小時之後，傳統德沃夏克衛星雲圖分析法並沒有詳細討論如何將 CI 值及最終 T 指數的差距收窄。

針對以上的限制，香港天文台於 2013 年試行改良的德沃夏克衛星雲圖分析法[9]：

1. 當熱帶氣旋登陸及開始減弱時，CI 值並不需要維持 12 小時不變，而只需較最終 T 指數高 0.5；
2. 如最終 T 指數已 12 小時維持不變，CI 值便等同於最終 T 指數；

3. 如熱帶氣旋在陸地再次發展，CI 值等同於最終 T 指數。

以下討論應用了試行改良的德沃夏克衛星雲圖分析法的個案：

2.3.1 熱帶氣旋溫比亞

溫比亞在 2013 年 7 月 2 日上午 6 時左右在湛江附近登陸(圖 1)。表 3 列出溫比亞 7 月 1 日下午 8 時至 7 月 2 日下午 8 時之間利用德沃夏克衛星雲圖分析法估算的強度資料。

由最終 T 指數顯示，溫比亞在 7 月 1 日下午 8 至 11 時開始減弱。因傳統 CI 值需維持 12 小時(即維持至 7 月 2 日上午 8 時)不變，而 12 小時之後需要較最終 T 指數大 1.0，所以由傳統 CI 值估算的強度較天文台綜合各方面資料，包括廣東省氣象局提供的自動氣象站及浮標資料所分析的強度為高。

而試行 CI 值在溫比亞登陸後只需較最終 T 指數高 0.5，表 3 顯示，利用試行 CI 值估算的強度較傳統 CI 值更貼近實況。

3 飛機偵測

由於海洋上的觀測資料相對陸地稀少，為增加分析熱帶氣旋內部結構的資料，美國國家海洋及大氣管理局(NOAA)使用飛機偵測儀器和下投式探空儀監測影響大西洋和東太平洋的熱帶氣旋。這些資料有助分析熱帶氣旋的位置和強度[10]。

在南中國海北部方面，香港天文台自 2011 年開始與香港政府飛行服務隊合作，開展了熱帶氣旋的偵測飛行，利用定翼飛機上安裝的一套氣象測量系統，收集位於南中國海熱帶氣旋包括風、氣壓、溫度及相對濕度等資料。這些資料有助評定熱帶氣旋的位置及強度，以及用作數值預報模式的科研發展[11]。以下討論應用飛行資料的其中一個個案。

3.1 2013 年 6 月 14 及 15 日南中國海的季風低壓

季風低壓是在季風槽中的一個低壓系統。系統一般的覆蓋範圍較大，閉合等壓線的直徑可達 1000 公里。季風低壓和熱帶氣旋在結構上有明顯的差異，一般來說，季風低壓的中心的對流活動較弱，最大風速區域通常位

於其周邊。而受其他位於附近的天氣系統影響，大風區域更可能只集中在季風低壓的某個方向的周邊區域。相反，接近熱帶氣旋中心的對流活動則較強和持續，而最大風速區域亦靠近中心。

當季風低壓系統附近的大氣環境配合，如微弱的垂直風切變、良好的高空輻散、充足的水氣供應及較高的海面溫度，季風低壓中心對流活動便能夠增強及持續。當風速較大的區域逐漸由周邊移至中心附近，季風低壓便有機會發展為熱帶氣旋。如果以上提到的條件不配合，季風低壓轉化為熱帶氣旋的機會則較低。

在 2013 年 6 月 14 及 15 日，一個季風低壓影響南中國海北部(圖 8)。從 6 月 14 日的衛星圖像顯示(圖 9)，該低壓區的結構較為鬆散，對流主要集中在系統的東面，而中心附近並沒有持續的強對流，使用德沃夏克衛星雲圖分析法並未能準確評估其強度[12]。

受該季風低壓及中國東南沿岸高壓脊的共同影響下，季風低壓的東至東北面的氣壓梯度相對較密(圖 8)。而在 6 月 14 日下午 2 時的地面觀測資料顯示(圖 10)，該區曾錄得達強風程度的偏東風。但由於該季風低壓位處海洋範圍，其中心附近的觀測資料相對有限。

如前所述，把季風低壓評定為熱帶低氣壓取決於系統中心附近是否錄得持續的強風。為了更清楚知道低壓系統中心附近的風力情況，香港天文台在香港政府飛行服務隊的協助下，於當日下午進行了一次偵測飛行。圖 11 及圖 12 顯示在該低壓中心附近離地面 500 米的風向風速資料，全部均未達強風程度。由於該高度的風速一般較地面的風速為大，因此可推斷出低壓中心附近的地面風速並未達強風程度，不符合升格為熱帶低氣壓的標準。香港天文台最終並沒有將該季風低壓評定為熱帶低氣壓，飛機偵測在決定上起了非常關鍵的作用。

4 垂直遙感探測

風廓線儀可測量出儀器位置上空不同高度的風向、風速及垂直風速分佈狀況。在過去的研究當中[13-15]，風廓線儀有助監測熱帶氣旋相關的大風區由高空向下伸展至地面的情況。以下簡要討論應用風廓線儀估算大風區由高空向下伸展至地面的個案。

熱帶氣旋杜蘇芮於 2012 年 6 月 29 日向西北偏西移動橫過南中國海北部，移向珠江口附近的廣東沿岸，並於翌日凌晨在澳門以西的廣東沿岸登陸(圖 13)。而另一個熱帶氣旋啟德於 2012 年 8 月 16 日向西北偏西移動橫過南海北部，並於翌日下午在廣東西部湛江附近登陸(圖 14)。這兩個熱帶氣旋都在南中國海北部穩定地採取西北至西北偏西的路徑，並在香港的西南或西南偏南方掠過，移動路徑較為相似。

安裝在九龍深水埗(位置見圖 15)的風廓線儀探測了杜蘇芮及啟德為香港上空的風場帶來的變化(圖 16 及 17)，中層的風力比低層早數小時達到烈風程度，烈風區在大約 4 至 5 小時內由 3000 米上空向下伸展至約 500 米。

為了探討熱帶氣旋移近香港時地面平均風速和低層風速之間的可能關係，文獻 15 比較了長洲(位置見圖 15)風廓線儀在約 800-1900 米低層及長洲測風站(風速表距海平面約 99 米)錄得的風速。圖 18 顯示杜蘇芮和啟德移近香港時地面觀測與低空風速變化趨勢較為一致，並且地面風的變化稍為滯後於低空風的變化，這現象在風力增強的一段時段尤其明顯，可見以風廓線儀監測低空風速可以對預報員估算地面風力趨勢帶來一定的提示作用。

當風廓線儀資料顯示烈風由高空向下伸展時，它亦可以為評估香港個別離岸地區測風站出現烈風的時間發揮預警作用。杜蘇芮的個案顯示圖 16 中的烈風等風速線向地面外推所得的時間，與橫瀾島(位置見圖 15)測風站實際錄得烈風持續超過 15 分鐘的開始時間頗接近(見圖 16 及圖 19(a)的橙色箭咀)。至於啟德的個案，雖然橫瀾島只錄得短暫烈風，但最初達烈風時間亦與烈風等風速線外推的時間接近(見圖 17 及圖 19(b))。

由於目前分析個案的數目有限，我們還需要利用更多個案來確認風廓線儀資料出現大風區明顯向下伸展的條件。

5 地面觀測

地面觀測是評估熱帶氣旋位置及強度的一項重要基本資料。除了每三小時一次的地面觀測資料外，香港天文台與廣東省氣象局及國家海洋局合作，取得廣東地區的氣象資料，以及南中國海北部的石油平台和浮標的觀

測資料，更新頻率可達每五分鐘一次，而接收資料時間亦大約是觀測後的 20 分鐘。以下討論應用地面觀測資料的兩個個案。

5.1 利用石油平台及浮標的觀測資料估算熱帶氣旋的風圈半徑

熱帶氣旋尤特於 8 月 12 日上午進入南中國海後，採取西北偏西的途徑移動(圖 20)。由於南中國海傳統觀測資料相對有限，石油平台及浮標的觀測資料可說明預報員估算熱帶氣旋的風圈半徑。

圖 21 顯示香港天文台利用廣東省氣象局及國家海洋局提供的觀測資料在地理資訊系統平台展示的資料。圖中的紅圈是其中的一個石油平台自動觀測站。該站的風力在 8 月 12 日下午 5 時開始達到強風程度，當時尤特中心距離該觀測站大約 480 公里(即大約 260 海浬)，而天文台當時分析尤特的強風圈半徑達 270 海浬。此項資料支援天文台對尤特的強風圈半徑分析，亦吻合美國國家海洋及大氣管理局對尤特風力分佈的分析(圖 22)。

5.2 利用地面觀測資料厘定熱帶氣旋的中心位置

尤特於 8 月 14 日下午 2 時左右在廣東西部陽江附近登陸，並移入內陸(圖 20)。當日晚上約 7 時 30 分紅外線衛星圖像(圖 23)顯示尤特登陸後組織變得鬆散，利用衛星圖像分析尤特中心的位置存在較大的誤差。相對傳統地面觀測報告(圖 24)，廣東省氣象局提供的自動氣象站資料(圖 25)的密度明顯較高，並清楚顯示出尤特中心附近的氣旋式流場，從而協助預報員更準確分析尤特登陸後的中心位置。

6 總結及日後發展

本文介紹了香港天文台在熱帶氣旋監測的最新發展，包括在業務上應用遙感資料、飛機偵測、地面觀測資料及垂直遙感探測的經驗。這些寶貴的資料令香港天文台對監測區內熱帶氣旋的能力大大提升。

展望將來，香港天文台會繼續與區內的氣象組織緊密合作，交換更多氣象資料，同時亦會加強與香港政府飛行服務隊進行的熱帶氣旋飛行偵測。現計畫於 2014 年風季在香港政府飛行服務隊新的飛機上利用一套下投式探空儀(dropsonde)的裝置，在熱帶氣旋上空擲下探空儀，量度氣壓、氣溫、濕度、風向風速等氣象資料，提供風暴附近氣象資料的垂直廓線，加強對熱帶氣旋監測的手段。

參考文獻

- [1] Kelley, O.A., J. Stout & J.B. Halverson, 2004: Tall precipitation cells in tropical cyclone eyewalls are associated with tropical cyclone intensification. *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L24112
- [2] 楊漢賢·強颱風韋森特(1208)的「對流熱塔」分析·第二十七屆粵港澳氣象科技研討會, 廣東韶關, 2013年1月9-10日
- [3] Cecil, D. J., E. J. Zipser, and S. W. Nesbitt, 2002: Reflectivity, ice scattering, and lightning characteristics of hurricane eyewalls and rainbands, part I: Quantitative description, *Mon. Weather Rev.*, Vol. 130, 769 - 784
- [4] J. Figa-Saldaña, J.J.W. Wilson, E. Attema et al., 2002: The advanced scatterometer (ASCAT) on the meteorological operational (MetOp) platform: A follow on for European wind scatterometers. *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 28, No. 3, 404 - 412
- [5] 林書正、周昆炫·ASCAT衛星散射儀反演風場於熱帶氣旋環境下的誤差特徵·2011年地球科學系統學術論壇論文集, 2011:144 - 150
- [6] Macros Portabella, Ad Stoffelen, Wenming Lin et al., 2012: Rain Effects on ASCAT-Retrieved Winds: Toward an Improved Quality Control, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50, 2495 - 2506
- [7] Dvorak, V. F., 1984: Tropical cyclone intensity analysis using satellite data. NOAA Tech. Rep. 11, 45 pp

[8] Harper, B.A., J. D. Kepert, and J. D. Ginger, 2010: Guidelines for converting between various wind averaging periods in tropical cyclone conditions. World Meteor. Org., TCP Sub-Project Report, WMO/TD-No. 1555

[9] C. T. Shum and S. T. Chan, Application of Dvorak technique during the weakening stage of Tropical Cyclones, The 6th China-Korea Joint Workshop on Tropical Cyclones, Shanghai, China, 26-28 May 2013

[10] Chan, J.C.L, and K.P. Wong, 1989: The impact of the termination of aircraft reconnaissance on tropical cyclone warnings and forecasts in western North Pacific. International Conference on East Asia and Western Pacific Meteorology and Climate, 6-8 July 1989, Hong Kong.

[11] W. K. Wong, S. M. Tse and P. W. Chan, 2013: Impacts of reconnaissance flight data on numerical simulation of tropical cyclones over South China Sea. Meteorological Application, published online
(<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/met.1412/abstract>)

[12] Velden, C., B. Harper, F. Wells et al., 2006: Supplement to: The D'vorak Tropical Cyclone Intensity Estimation Technique: A Satellite-Based Method that Has Endured for over 30 Years. BAMS, **87**, S6-S9

[13] Yeung, K.K., Use of wind profiler in severe weather monitoring, Meteorol. Zeitschrift, N.F. 7, 326-331, December 1998

[14] 李子祥、李中和、黃美成, 颱風尤特(0104)的天氣回顧, 第十六屆粵港澳氣象科技研討會報告, 中國, 廣州, 2002 年 1 月 30 - 31 日, 天文台報告及短文第 46 號. (www.hko.gov.hk/publica/reprint/r463.pdf)

[15] 郝孟騫、陳永鏗, 風廓線儀資料在熱帶氣旋烈風預報的分析及應用研究, 第三屆南海風雲論壇, 中國, 海南, 2013 年 11 月 29 日

表 1 海燕在 2013 年 11 月 5 日下午 2 時至 11 月 6 日下午 2 時的強度及中心估計最高風速。

香港時間	強度類別	海燕中心估計最高風速 (海浬每小時)
11 月 5 日 1400	強烈熱帶風暴	60
11 月 5 日 2000	颱風	70
11 月 6 日 0200	颱風	80
11 月 6 日 0800	超強颱風	100
11 月 6 日 1400	超強颱風	105

表 2 天文台使用的德沃夏克衛星雲圖分析法對照表

目前強度 值(CI 值)	1 分鐘平均風速 (海浬每小時)	10 分鐘平均風速 (海浬每小時) (由 1 分鐘平均風速*0.93 換算)
1.0	25	23
1.5	25	23
2.0	30	28
2.5	35	33
3.0	45	42
3.5	55	51
4.0	65	60
4.5	77	72
5.0	90	84
5.5	102	95
6.0	115	107
6.5	127	118
7.0	140	130
7.5	155	144
8.0	170	158

表 3 溫比亞在香港時間 7 月 1 日下午 8 時至 7 月 2 日下午 8 時利用德沃夏克衛星雲圖分析法估算的強度資料，表中的強度均為海裡每小時。

時間	最終 T 指數	傳統 CI 值 (對應強度)	試行 CI 值 (對應強度)	天文台 綜合分 析強度	以傳統 CI 值估 算與分 析強度 差距	以試行 CI 值估 算與分 析強度 差距
7 月 1 日						
下午 8 時	4.0	4.0 (60)	4.0 (60)	55	+5	+5
下午 11 時	3.5	4.0 (60)	4.0 (60)	55	+5	+5
7 月 2 日						
上午 2 時	3.5	4.0 (60)	4.0 (60)	55	+5	+5
上午 5 時	3.0	4.0 (60)	4.0 (60)	55	+5	+5
上午 8 時	3.0	4.0 (60)	3.5 (51)	50	+10	+1
上午 11 時	2.5	3.5 (51)	3.0 (42)	45	+6	-3
下午 2 時	2.5	3.5 (51)	3.0 (42)	40	+11	+2
下午 5 時	2.0	3.0 (42)	2.5 (33)	35	+7	-2
下午 8 時	2.0	3.0 (42)	2.5 (33)	30	+12	+3

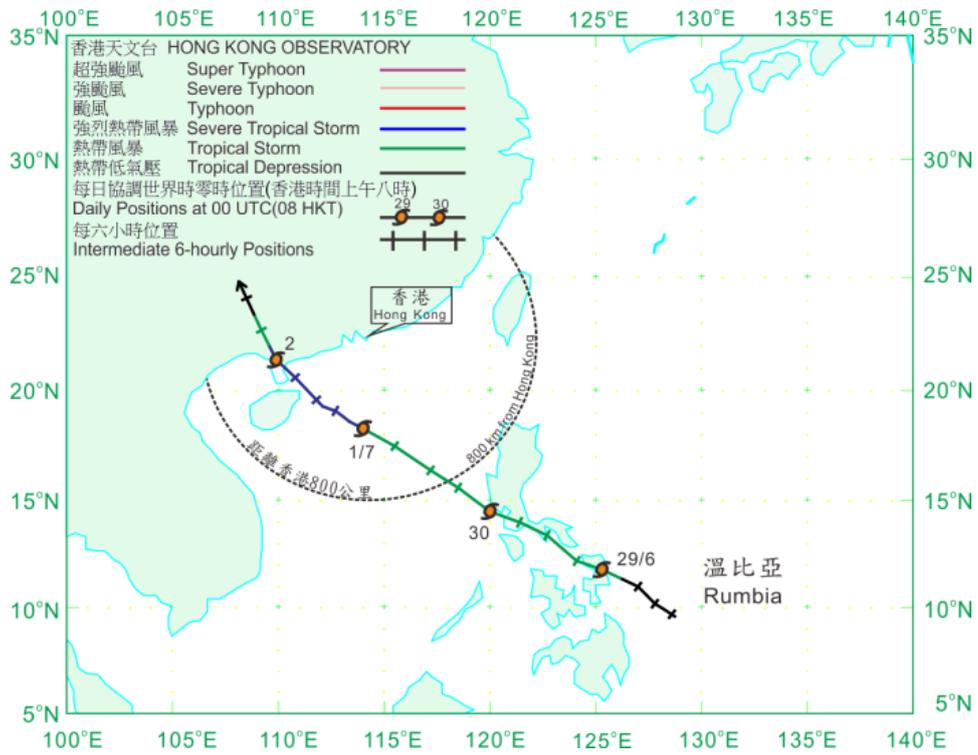


圖 1 溫比亞在 2013 年 6 月 28 日至 7 月 2 日的路徑圖

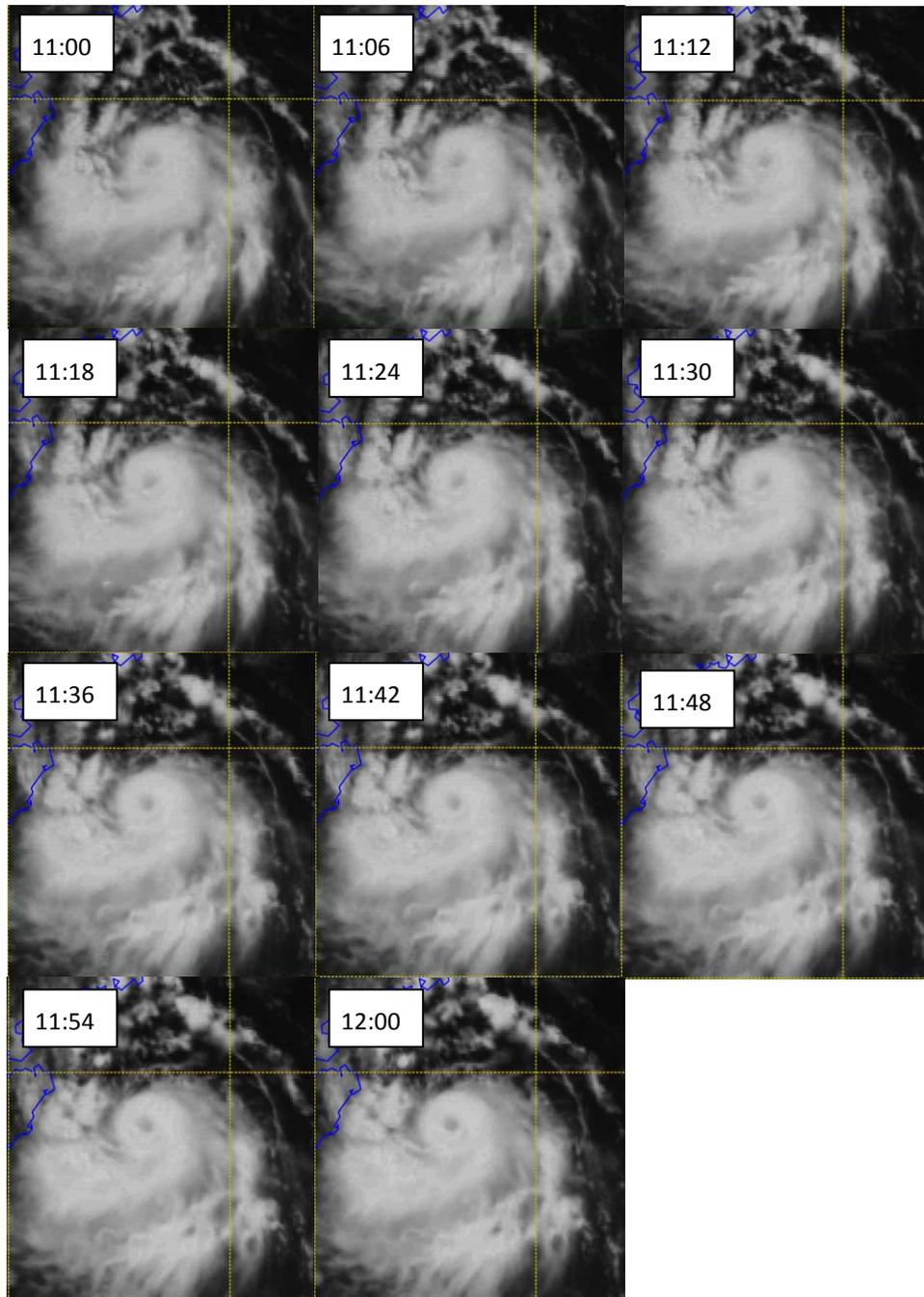


圖 2 2013 年 7 月 1 日上午 11 時至正午 12 時每 6 分鐘更新一次的風雲-2F 衛星區域加密觀測圖像，顯示接近溫比亞中心組織的改善。（來源：中國氣象局）

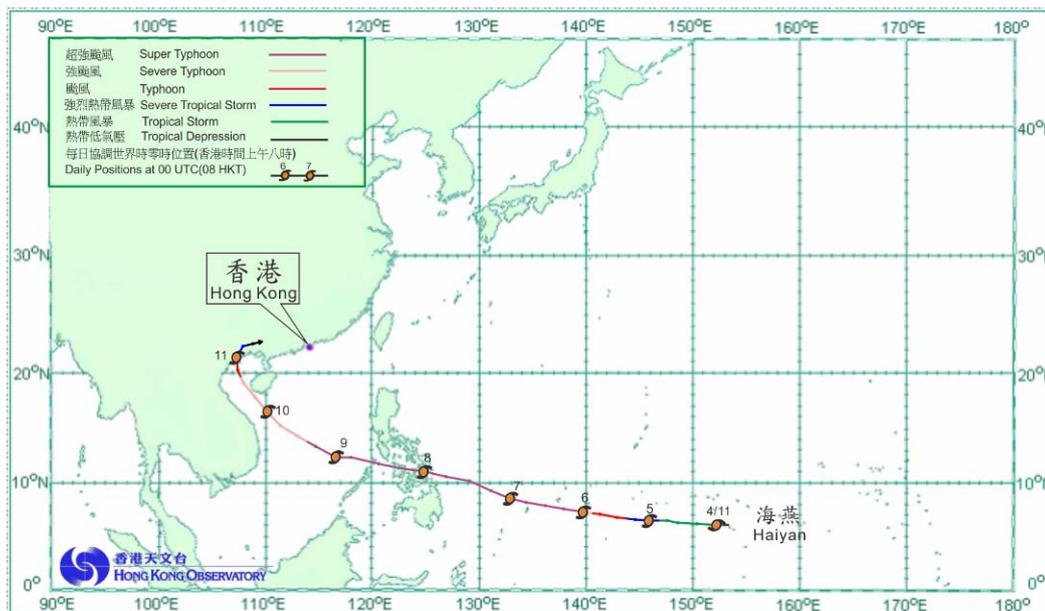


圖 3 海燕在 2013 年 11 月 4 日至 11 月 12 日的路徑圖

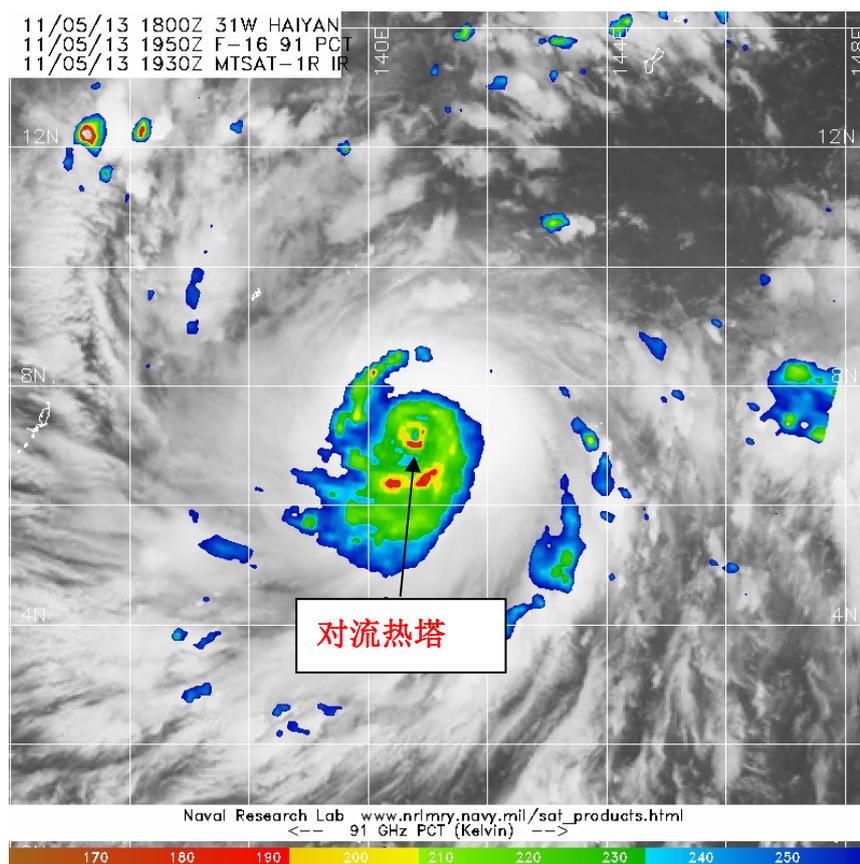


圖 4 香港時間 2013 年 11 月 6 日 03 時 50 分(即協調世界時 2013 年 11 月 5 日 19 時 50 分)的 91 GHz 極化修正亮溫的微波衛星圖像。(來源：[NRL Tropical Cyclone Page](http://www.nrlmry.navy.mil/sat_products.html))

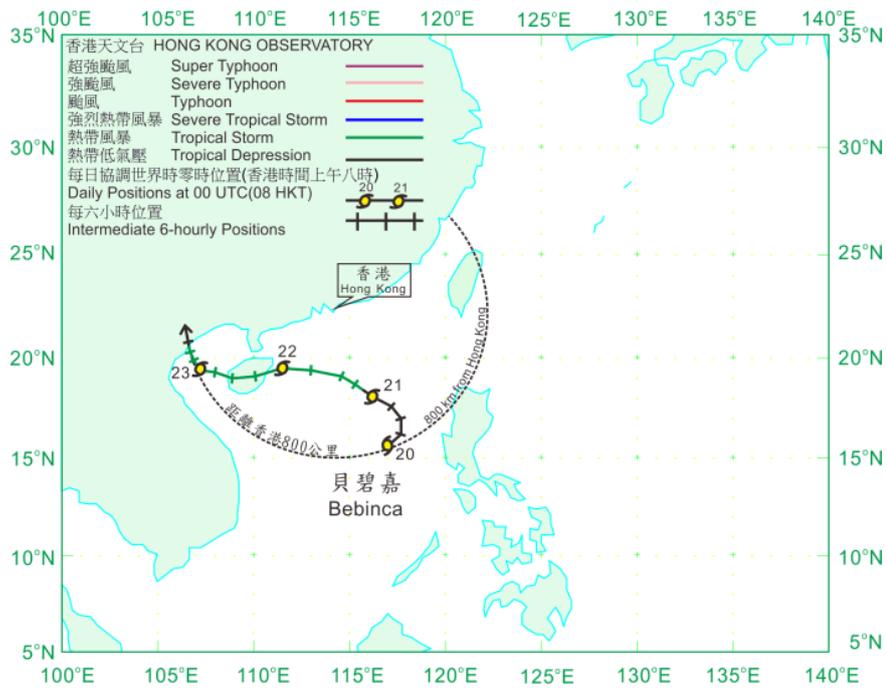


圖 5 貝碧嘉在 2013 年 6 月 20 日至 24 日的路徑圖

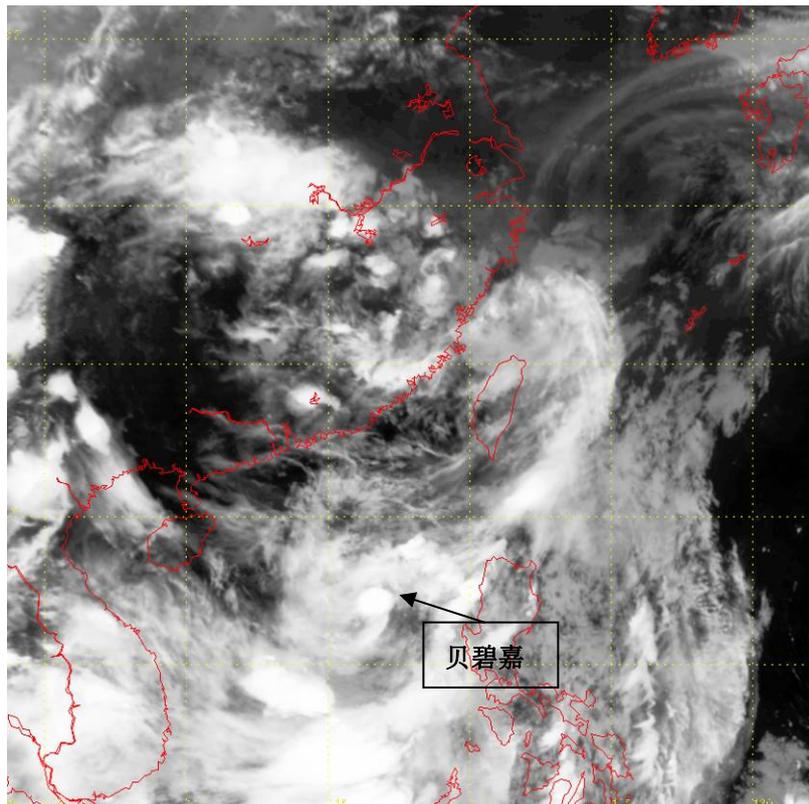


圖 6 2013 年 6 月 20 日香港時間晚上約 9 時的紅外線衛星圖像 (來源:日本氣象廳)

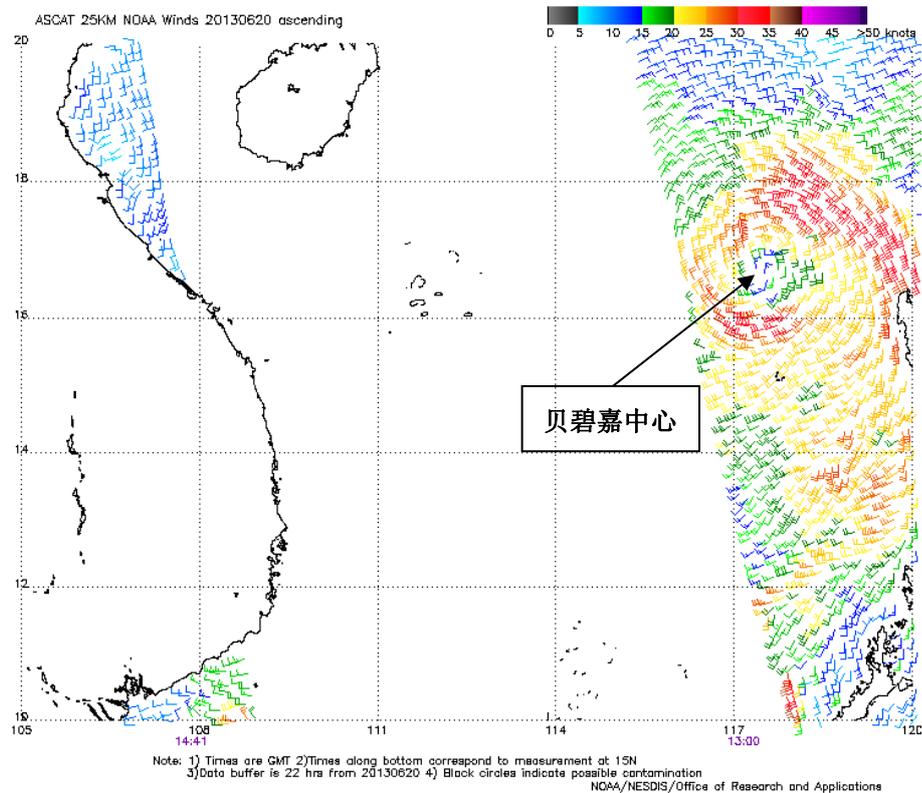


圖 7 2013 年 6 月 20 日香港時間晚上約 9 時的 ASCAT 海面風場分析，清楚顯示貝碧嘉的氣旋式流場。（來源: [Center for Satellite Application and Research](http://www.casr.gov.hk/))

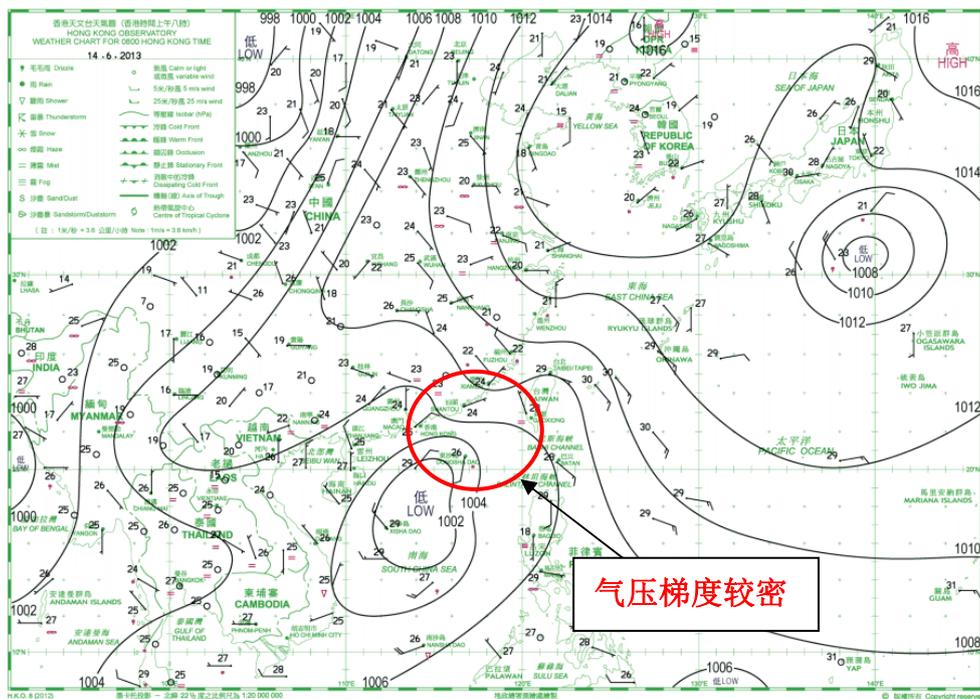


圖 8 2013 年 6 月 14 日上午 8 時的地面天氣圖

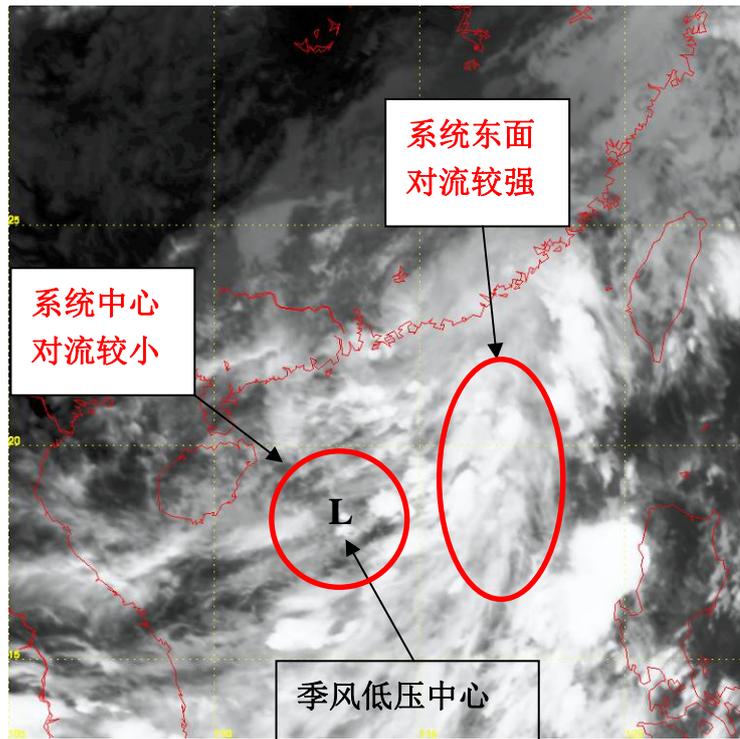


圖 9 2013 年 6 月 14 日晚上約 7 時 30 分的紅外線衛星圖像(來源:日本氣象廳)

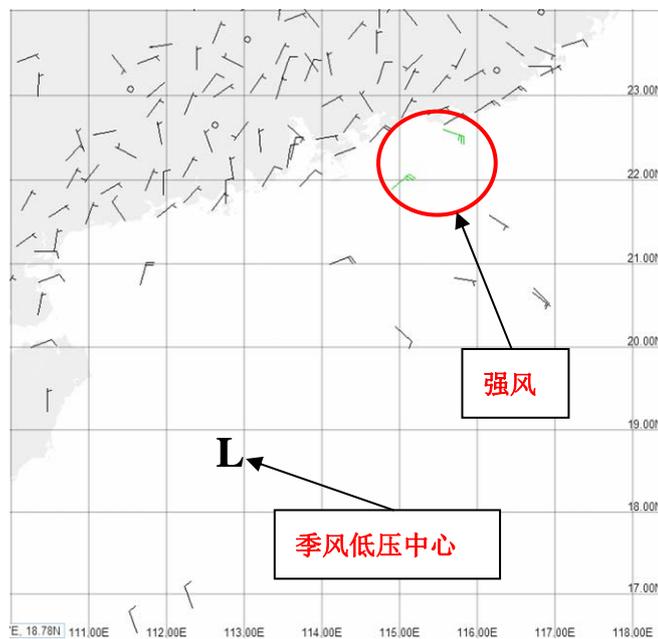


圖 10 2013 年 8 月 14 日下午 2 時的地面觀測資料，綠色的風矢表示風力達強風程度，但季風低壓中心附近的觀測資料相對有限。

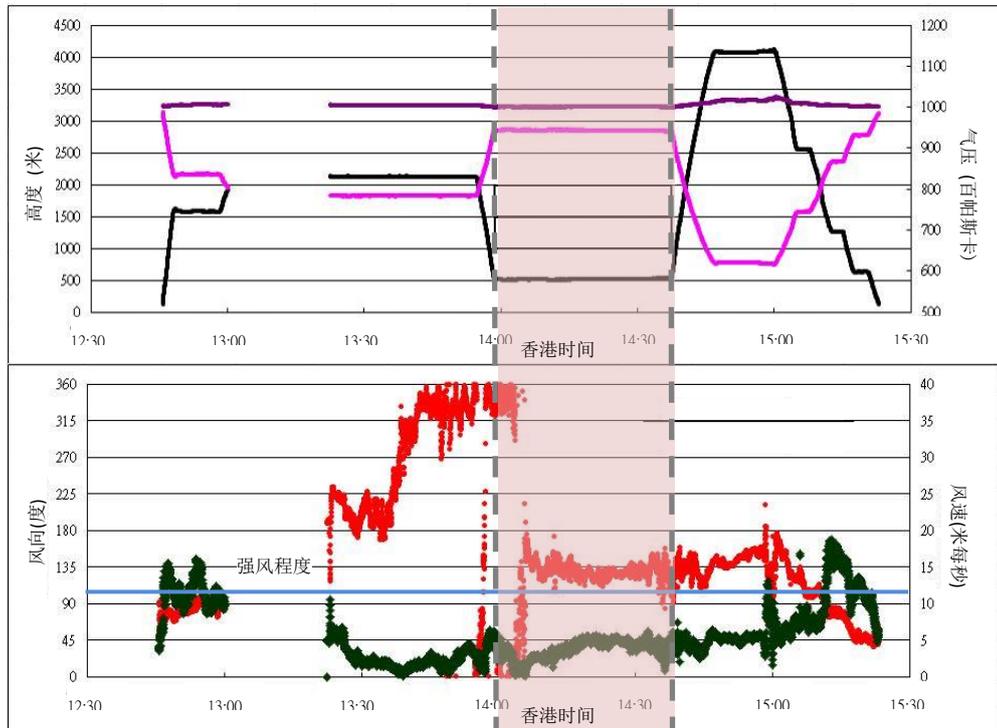


圖 11 2013 年 6 月 14 日香港時間下午 12 時 30 分至 5 時 30 分所收集的氣象資料。飛機在香港時間大約下午 2 時至 2 時 30 分(圖中紅色陰影區)接近低壓中心，並在離地面 500 米附近(950hPa)飛行，而在這段時間錄得的風速均未達強風程度。上圖：飛行高度(黑線)、氣壓(紫線)和海平面氣壓(啡線)；下圖：風速(綠線)、風向(紅線)。

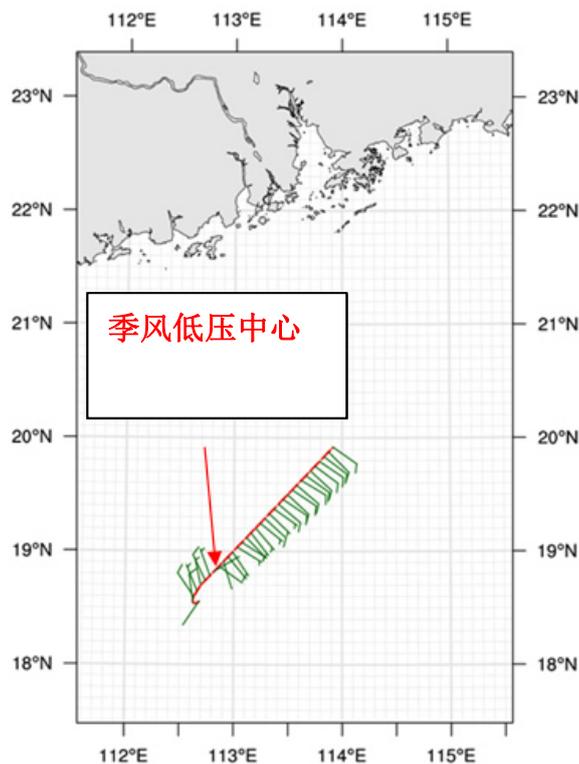


圖 12 2013 年 6 月 14 日香港時間下午 2 時至 2 時 30 分政府飛行服務隊定翼機所錄得在離地面 500 米附近(950hPa)的風向風速數據。紅線為定翼機接近低壓中心時的軌跡，綠色符號顯示風向風速(全部均未達強風程度)。

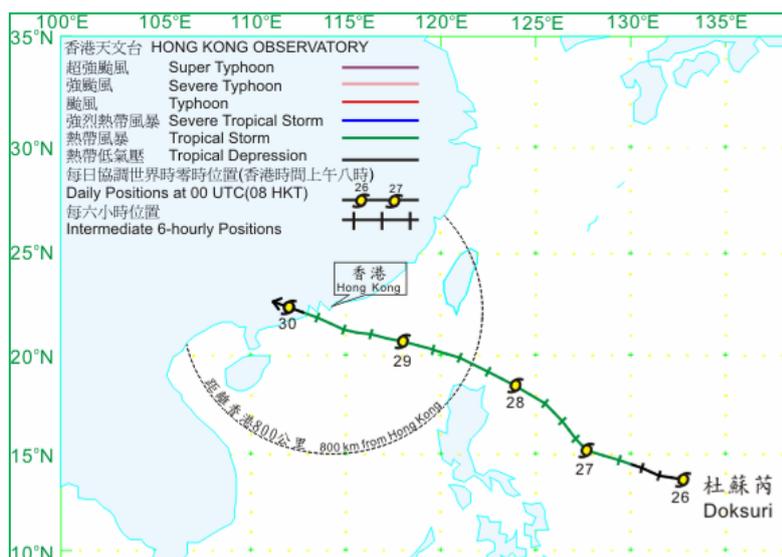


圖 13 杜蘇芮在 2012 年 6 月 26 日至 6 月 30 日的路徑圖

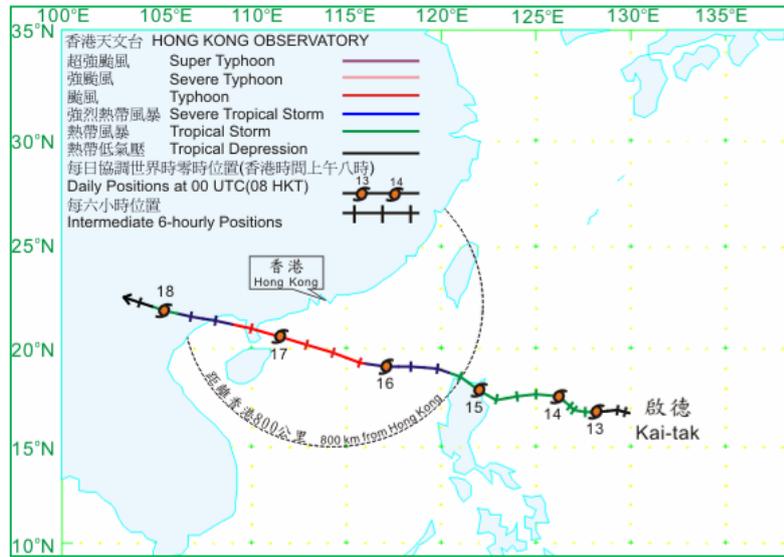


圖 14 啟德在 2012 年 8 月 12 日至 8 月 18 日的路徑圖

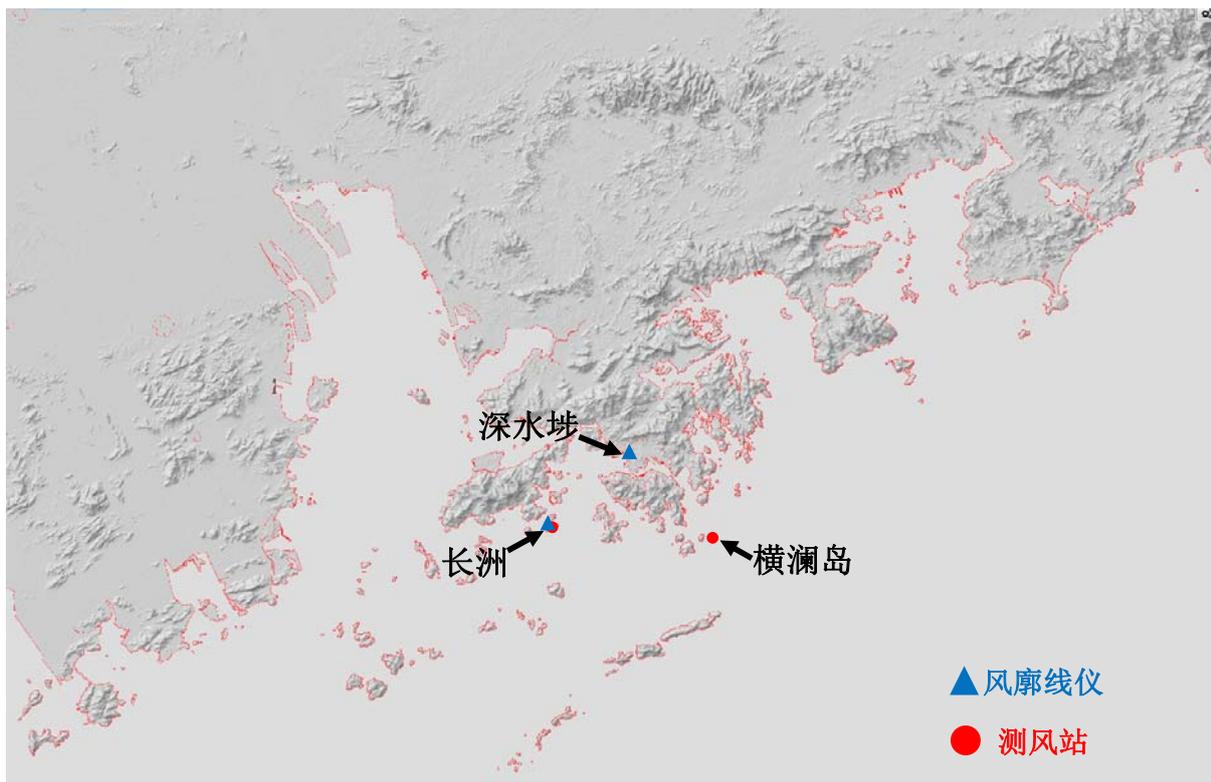


圖 15 在杜蘇芮及啟德個案中提及的測風站及風廓線儀位置(橫瀾島由於地勢較高，對應海面烈風的風速指標為 20 米/秒 [文獻 15])

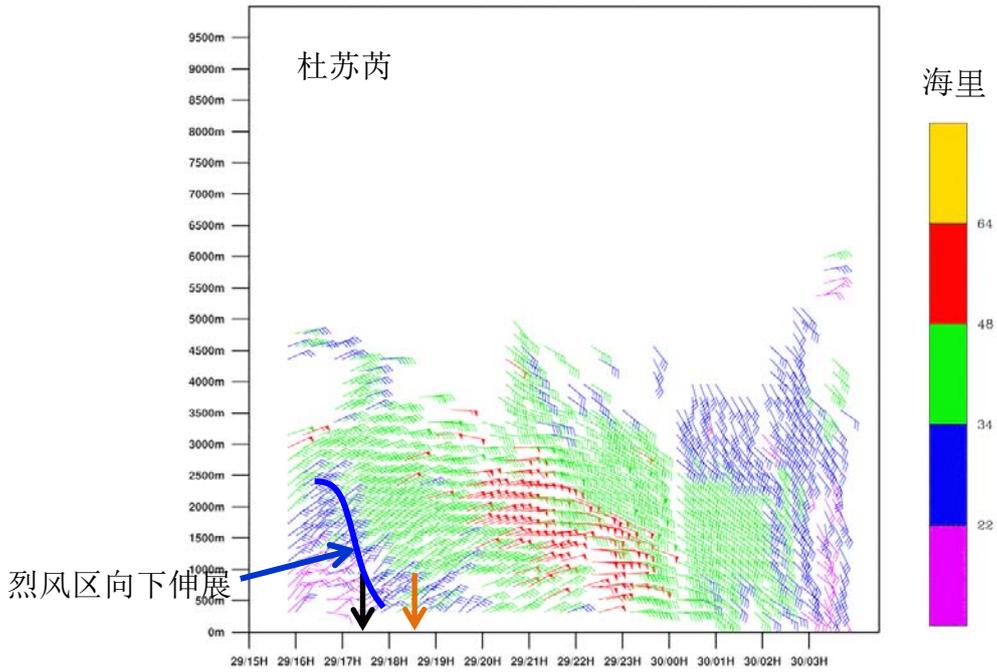


圖 16 杜蘇芮移近香港時風廓線儀觀測資料(綠色的風矢表示風力達烈風程度，黑色及橙色箭咀分別為橫瀾島最初達到烈風時間及烈風持續超過 15 分鐘的開始時間)

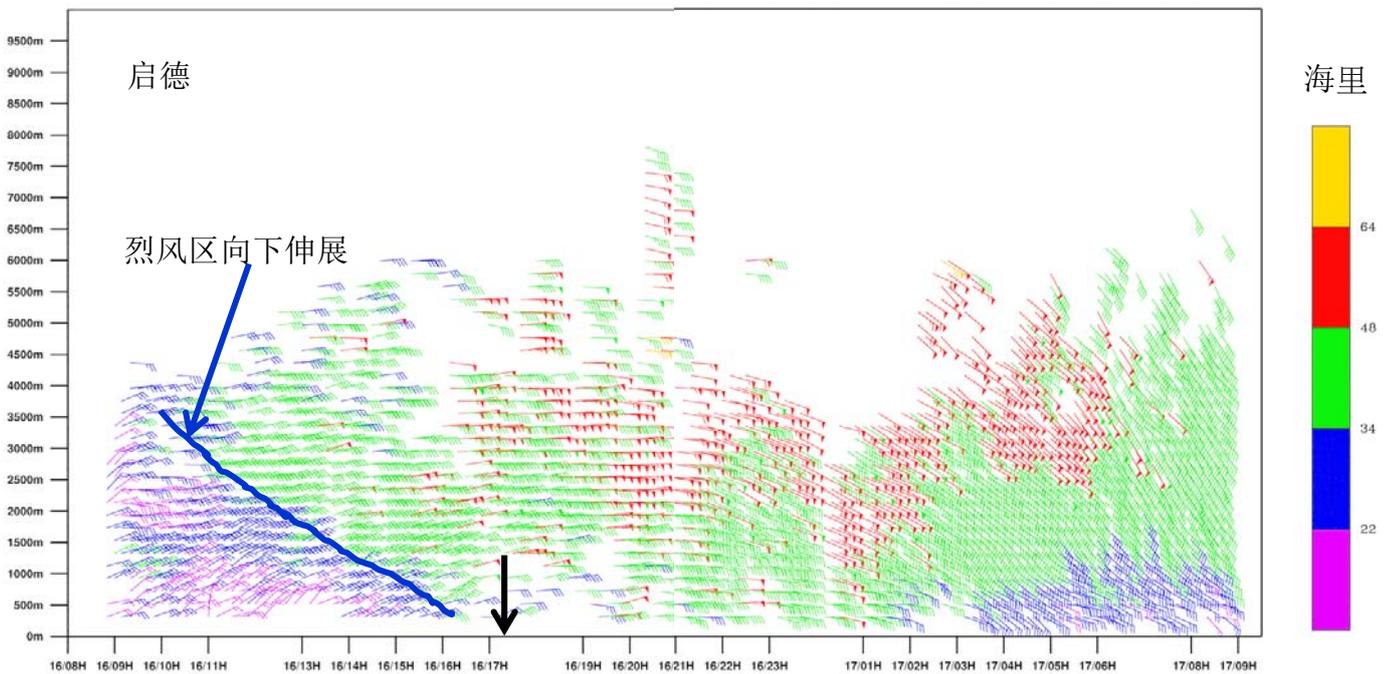


圖 17 啟德移近香港時風廓線儀觀測資料(綠色的風矢表示風力達烈風程度綠色的風矢表示風力達烈風程度，黑色箭咀為橫瀾島最初達到烈風時間)

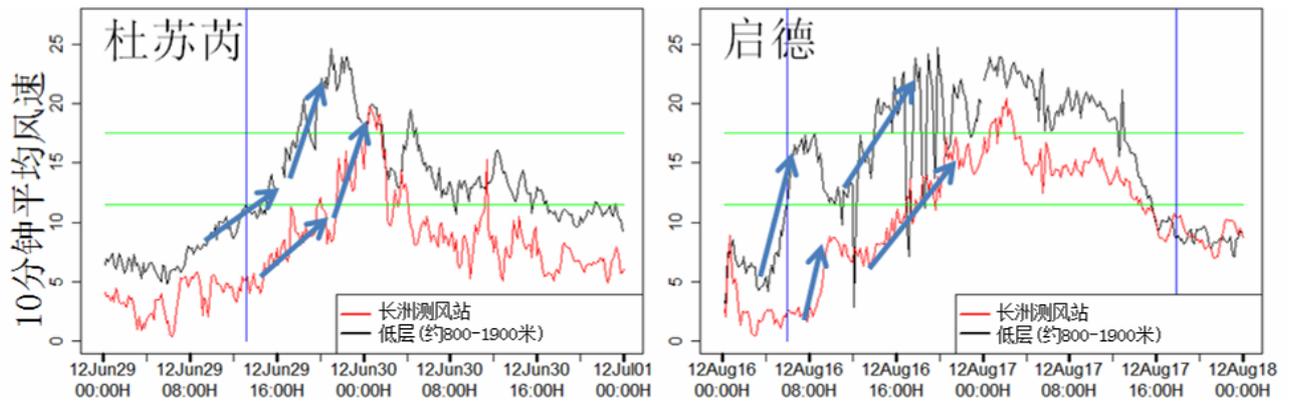


圖 18 長洲測風站(紅線)和長洲風廓線儀在約 800-1900 米(約 925 及 800 百帕之間受地形影響較少的一層)的低層(黑線)10 分鐘平均風速(米/秒)時間序列(香港時間)，顯示地面風的變化稍為滯後於低空風的變化，這現象在風力增強的一段時段尤其明顯。

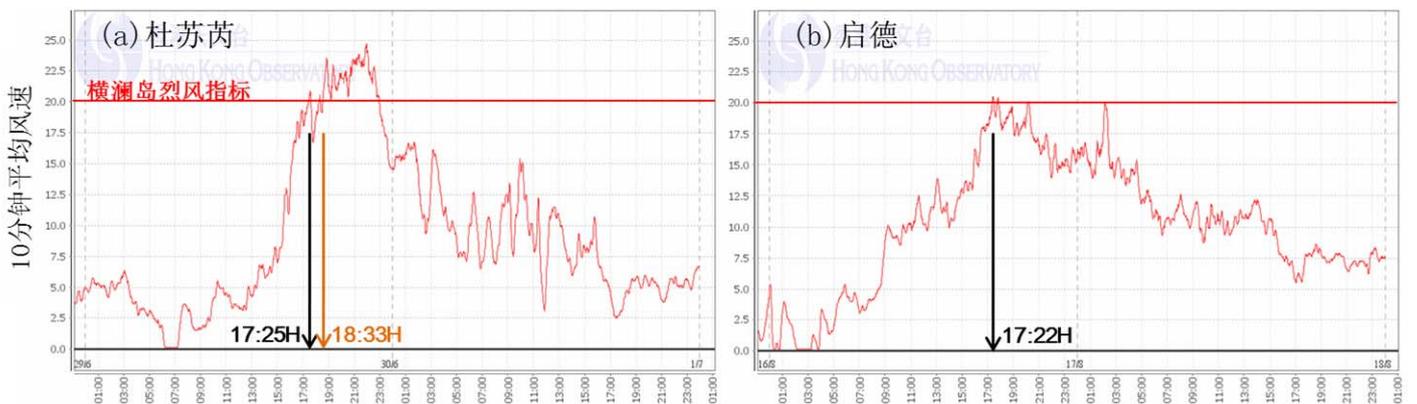


圖 19 橫瀾島測風站 10 分鐘平均風速時間序列(香港時間)(黑色及橙色箭咀分別為最初達到烈風時間及烈風持續超過 15 分鐘的開始時間)

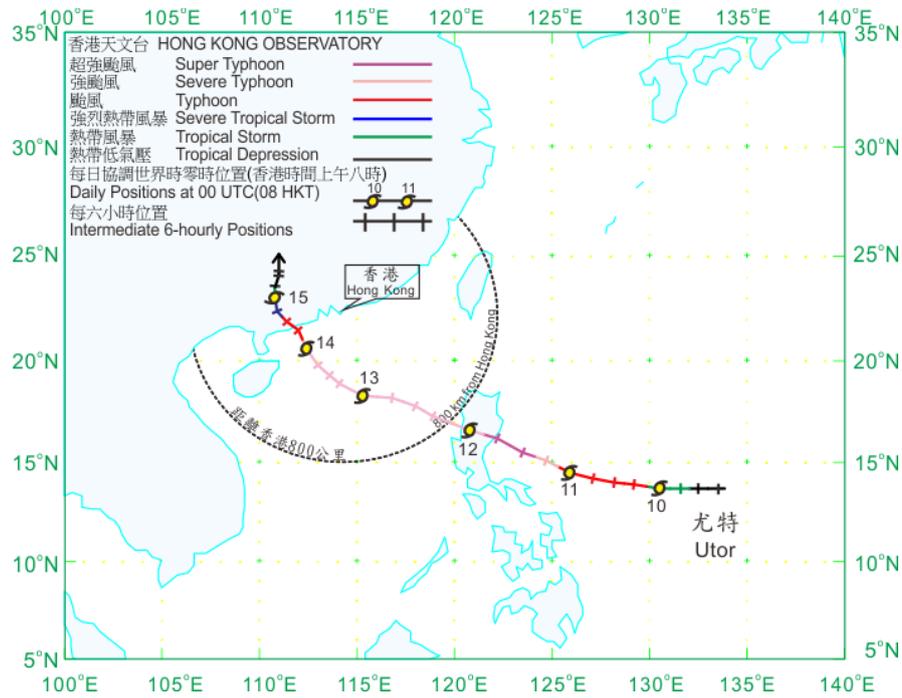


圖 20 尤特在 2013 年 8 月 9 日至 8 月 16 日的路徑圖

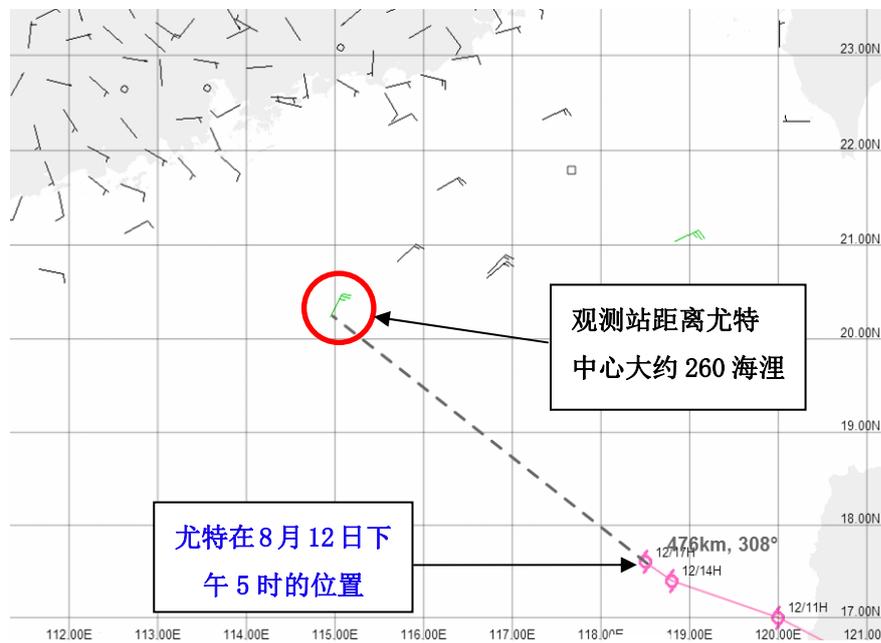


圖 21 香港天文台利用廣東省氣象局及國家海洋局提供的觀測資料在地理資訊系統平台展示的資料(2013 年 8 月 12 日下午 5 時)

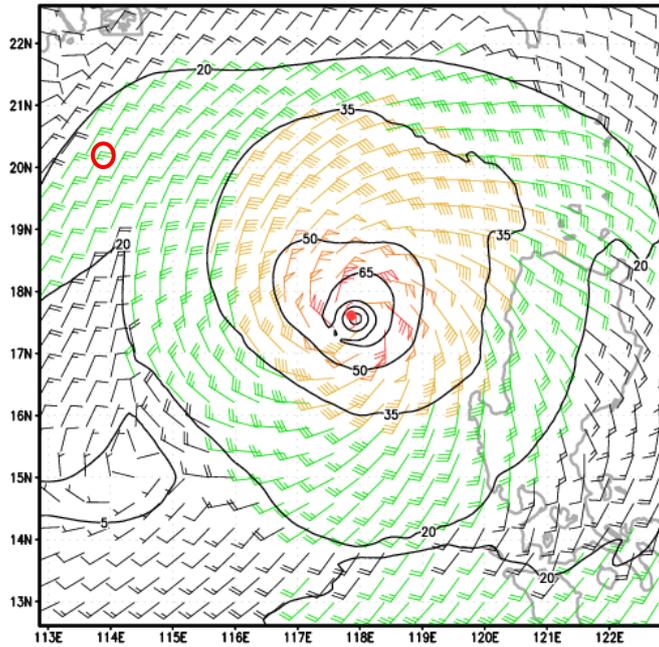


圖 22 尤特在 8 月 12 日下午 8 時的風力分佈分析(圖片源自美國國家海洋及大氣管理局)，圖中的綠色區域表示風力達強風程度，而紅圈是圖 21 中石油平台的位置。

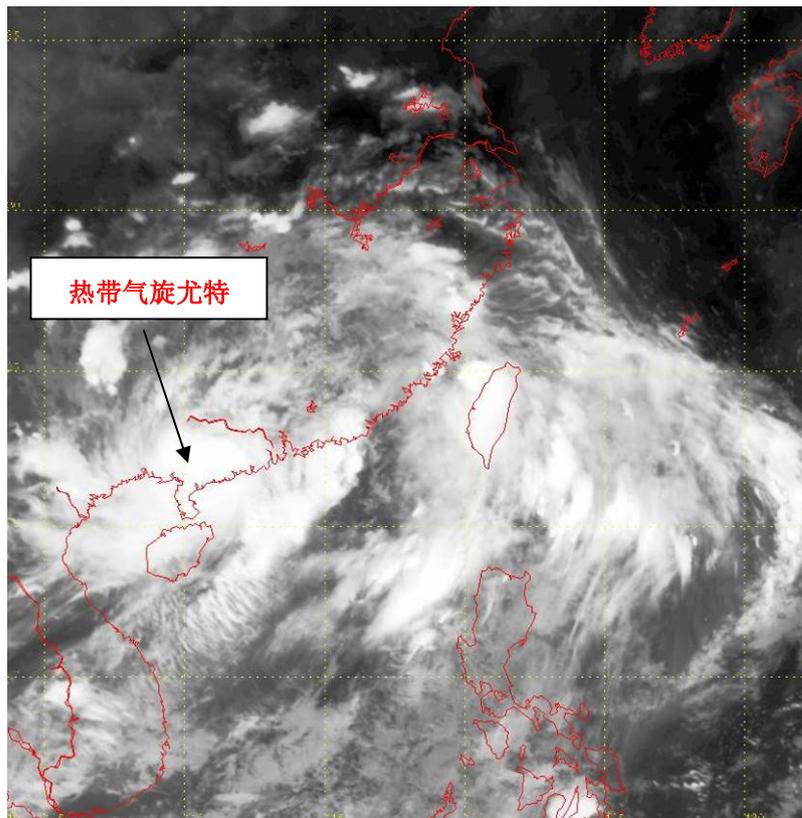


圖 23 2013 年 8 月 14 日香港時間晚上約 7 時 30 分紅外線衛星圖像，顯示尤特登陸後組織變得鬆散，分析中心位置存在困難。(來源：日本氣象廳)

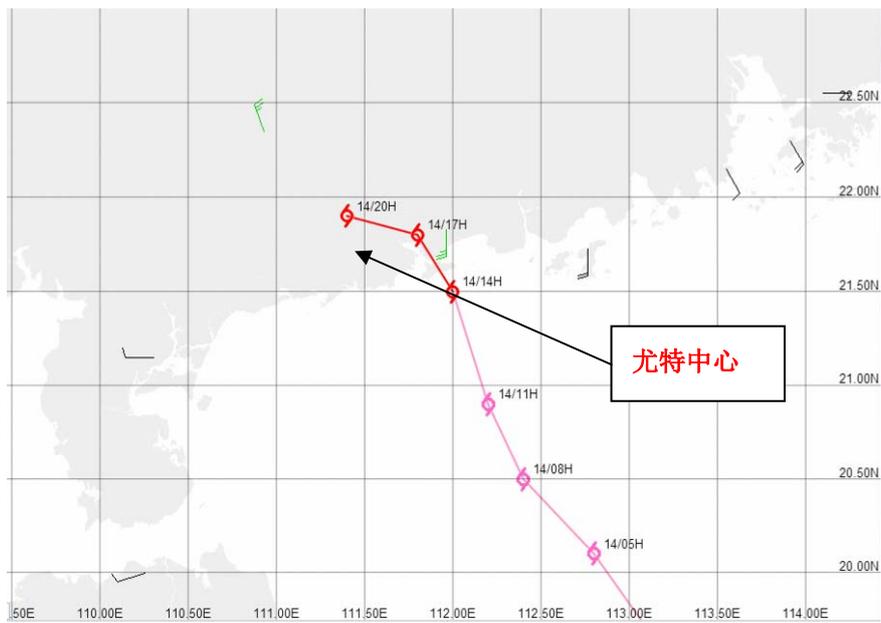


圖 24 香港天文台利用傳統地面觀測報告在地理資訊系統平台展示的資料 (2013 年 8 月 14 日晚上 8 時)

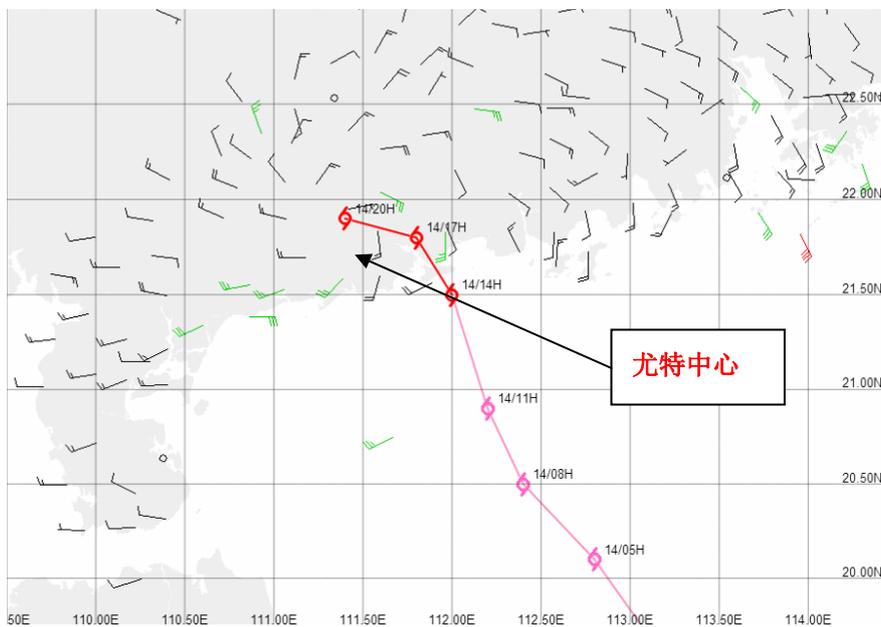


圖 25 香港天文台利用廣東省氣象局提供的自動氣象站資料在地理資訊系統平台展示的資料(2013 年 8 月 14 日晚上 8 時)