

Reprint 945

2010 年 7 月 28 日持續強雷雨的個案分析

許建忠、柯銘強 & 何家亮

第二十五屆粵港澳氣象科技研討會

香港，2011 年 1 月 26-28 日

2010年7月28日持續強雷雨的個案分析

許建忠 柯銘強 何家亮
香港天文台

摘要

在2010年7月28日下午，香港廣泛地區受持續暴雨影響，香港天文台曾發出最高級別的黑色暴雨警告信號，而暴雨警告信號生效歷時約三個半小時。期間在香港境內共錄得約四千次雲對地閃電，接近半數影響香港國際機場及大嶼山一帶，航空交通受到嚴重影響，共有93班抵港及116班離港航機延誤。暴雨發展往往跟中小尺度渦漩或波動而引發的強烈上升和下沉氣流有關，因此，掌握氣流的三維變化對監測暴雨至為有用。本文主要利用本地中尺度觀測資料包括天氣雷達、自動氣象站、風廓綫儀及微波輻射計數據分析此次持續強雷雨的成因，當中應用了由多普勒天氣雷達數據經變分法反演的三維風場，以助分析高空風場的變化及中小尺度的波動。初步分析結果顯示是次雷暴發展的空間分佈與加強與雷暴外流邊界的切變線相遇及雷暴合併有關，而西風與西南風的匯聚及西風中的波動亦有助強雷雨的維持。另外，本文亦會對數值天氣預報模式預測這場暴雨的表現作出評估。

1. 引言

雷暴是春夏時節在香港常見的天氣。強雷暴通常伴隨暴雨，頻密的閃電、雷擊、甚至微下擊暴流等惡劣天氣。2010年7月28日下午，位於赤鱘角的香港國際機場受到強雷暴持續影響，機場雷暴和閃電警報系統(ATLAS)發出了約兩個半小時的紅色警報，是自2008年3月這系統業務運行以來最長的一次紅色警報。在紅色警報生效期間，機場1公里範圍內出現了約290次雲對地閃電，停機坪上的工作人員要暫停工作，並到安全地方暫避。機場風切變和湍流警報系統在暴雨期間也曾發出微下擊暴流和風切變警報，航空交通因而大受影響。受到強暴雨的影響，香港需要發出暴雨警告信號，歷時約三個半小時之久，這是天文台在2010年發出的第二次黑色暴雨警告信號(即表示在1小時內香港廣泛地區錄得超過70毫米雨量)。

廣東東部沿海地區在7月28日早上已出現有組織的雷暴單體，而本港局部地區亦受雷暴影響。當日中午過後，在廣東西部發展的雷雨區向東移動，逐漸靠近香港，另外在香港東北面的對流活動發展轉趨活躍及有向南擴展趨勢，而香港南面海域亦出現愈來愈有組織的對流發展，並向東北方向移動，趨向香港。在下午2時左右開始，強對流在香港發展迅速，強雷雨帶漸成東西走向，覆蓋香港南部，強雷雨帶在境內停留約兩至三小時。在暴雨警告信號生效期間，香港部份地區錄得超過150毫米雨量(圖1)，而全港共錄得差不多四千次雲對地閃電，接近半數影響香港國際機場及大嶼山一帶(圖2)。到下午5時過後，整道強雷雨帶開始緩慢向南移動，並逐漸遠離本港。從廣東沿岸地區的雨量分佈圖可以看到7月28日下午最大降雨區集中在珠江口附近(圖3)。這場暴雨具有持續及地區性的特徵。

本文集中分析中小尺度氣象觀測資料，包括利用探空、風廓線儀、自動氣象站、天氣雷達和微波輻射計數據等探討這次持續及地區性強雷雨的成因。當中亦應用由多普勒天氣雷達數據經變分法而反演出的三維風場(方法見附錄[A])，以助分析高空風場的變化及小尺度的波動。另

外，本文對天文台最近發展及試行的非靜力數值天氣預報模式(文獻[1])預測這場暴雨的表現，也作出初步的評估。

2. 天氣背景

2010年7月27日，一道低壓槽從華東沿岸伸延至華南沿岸及北部灣，為沿岸地區帶來零散驟雨和雷暴的天氣。翌日，低壓槽仍徘徊在廣東沿岸地區(圖4)。28日早上，華南沿岸區域受一道由低層伸展至高層深厚的西風槽影響，200百帕(圖5(a))的模式分析風場顯示廣東沿岸地區處於深西風槽前的南端和南海北部的副熱帶高壓的北端，廣東東部沿岸高空輻散強。中層500百帕(圖5(b))西風槽的槽軸位處華南沿岸地區，垂直風速分佈顯示該區有上升氣流活動，尤其是在珠江三角洲附近。700百帕風場(圖5(c))顯示華南沿岸處於槽脊之間的西至西南風急流當中，而低層850百帕(圖5(d))的西南風把南海的暖濕空氣輸送至華南沿岸地區。深槽移動緩慢，其中層槽軸徘徊在華東及華南沿岸。

7月28日早上8時的探空(圖6)顯示大氣非常不穩定，K指數達40，對流有效位能CAPE接近3000 J/kg，大氣的濕層由900百帕附近往上伸延至500百帕左右，非常深厚。加上高空風由接近地面到600百帕左右的暖濕西南風到中高層450至150百帕較乾涼的西北風，形成有利強對流天氣發展的條件。風廓線儀在當日日間大部份時間也顯示這樣的垂直風場分佈(圖7)。

3. 中尺度天氣分析

7月28日早上受中層西風深槽前輻合與高空輻散影響，香港以東至汕頭沿岸一帶的出現持續活躍的對流天氣發展。500百帕西風深槽在廣東沿岸加深。在早上8時左右，衛星圖像顯示珠江口以東(圖8，藍色虛線圈)及以西(圖8，紅色虛線圈)出現兩個中尺度對流系統(MCS)。這兩個對流系統在當日下午同時影響香港，為該區帶來持續雷雨。

3.1 雷暴和切變線的生成

早上 8 時，大驟雨和雷暴持續影響香港的東北部至大亞灣內陸一帶(圖 9(a)及(b)的 A 區)，其相關的下沉氣流在香港東北部形成一條外流邊界。自動氣象站的風場顯示一條準靜止切變線位於香港的東北部(圖 10(a))，切變線的北面是東北風而南面是較強的盛行西南風，東北風區較西南風區的氣溫低 3 度左右，形成冷池(cold pool)。暖濕的西南氣流爬升到較涼的東北風上，不斷激發強對流，較強的降雨區在 28 日早上及中午前後集中在香港東部。

下午 2 時，西風槽前短波移至香港，風廓線儀顯示 5 公里以上的風由原來的西北風轉為西南風，與槽前短波有關的中尺度對流系統相關的回波亦東移至香港西北面，並形成由東北向西南伸展有組織的回波(圖 9(b)的 B 區)。在近地面，由雷暴外流邊界的前沿所產生的西北風，跟大尺度背景的西南風形成一條新的切變線(圖 10(b))。在切變線以北的香港西北部於 30 分鐘內氣溫下跌 1-2 度，比大嶼山及香港南部平均低 3 度左右，形成另一冷池。在機場的微波輻射計顯示 K 指數由下午 2 時的 35 不斷上升至 3 時的 48 左右，而綜合水蒸氣和綜合液態水也在該時段急速上升(圖 11)。此時，雷暴外流邊界所造成的切變線橫過機場(圖 10(c))。機場北面的氣溫下跌 3 度左右。早前橫跨香港東北部的切變線也向南推進至九龍一帶(圖 10(c))，隨著冷池向南擴散，強降雨區亦逐漸南移至市區，較強的降雨區仍集中在切變線附近靠向較涼的氣團位置(文獻 [2])。

3.2 低空西南急流

在 700 百帕(圖 5(c))和 850 百帕(圖 5(d))的風場顯示 90°E 附近的中南半島有低壓槽，該槽前的西南氣流與南海北部的副熱帶高壓西側的偏南氣流形成一道急流，不斷輸送暖濕空氣到位於中國東面移動緩慢的渦旋，華南沿岸地區有風向和風速的輻合，風廓線儀數據顯示 28 日早上低層大西南風由地面垂直伸展至上空 4 公里左右(圖 7)，而低中層亦

見短波擾動。這種天氣形勢除有助維持珠江口附近的兩個對流系統的發展外，也形成在廣東沿海地區東北至西南走向的第三個線狀對流發展區（圖 8，綠色圈），其中一條線狀對流正位於香港南面（圖 9(b)及(c)的 C 區），隨着 700 百帕的西南氣流向東北移動，趨向香港。

3.3 雷暴外流邊界的切變線相遇和雷暴合併

跟短波槽相關的雷暴（圖 9(b)及(c)的 B 區）在 2 時 30 分左右向東移至香港西部，其外流邊界向東至東南移動。跟低空西南急流相關的雷暴（圖 9(b)及(c)的 C 區北端）向東北移動與香港東北面的雷暴（圖 9(b)及(c)的 A 區）合併並增強，圖 10(b)及(c)顯示東北部的冷池及雷暴外流邊界逐漸向南推進。另外，線狀對流在香港南面（圖 9(c)的 C 區）亦見增強，相信其外流邊界與香港西部的雷暴（圖 9(c)的 B 區）外流邊界在大嶼山以東水域相遇後，產生橋單體(bridging cells)（圖 9(c)的 D 區）並引發造成第三條切變線（圖 10(c)中最南的切變線）。最終三條切變線於下午 3 時左右合併為一條橫跨大嶼山至香港東面水域的切變線（圖 10(d)）。微波輻射計亦顯示 K 指數、綜合水蒸汽和綜合液態水都上升至頂峯（圖 11），再加上雷暴合併，雷雨在切變線附近迅速加強，促成了這場強雷雨地區性的特徵。而合併區所構成的 X 型雨區（圖 9(d)），是一種產生大暴雨的雷達回波特徵（文獻 [3]）。

雷暴合併區覆蓋香港南部及東部（圖 9(d)-(f)），東西走向的強雷雨帶呈準靜止狀態約 2-3 小時。與短波槽相關的東北至西南走向的強回波繼續向東移動（圖 9(e)及(f)）。

3.4 頻繁中尺度短波

除了局地性外，這場暴雨還有持續性的特徵。圖 12 是利用香港大老山雷達和深圳雷達數據反演的 2 公里高度風場，並疊加了 2 公里高度的反射率圖像。從圖中可見一道東西走向的強回波帶（反射率大於 40 dBZ）從下午 3 時到 5 時覆蓋著大嶼山及香港南部。強回波帶位處於西風和西

南風的交界，而當中出現多個中小尺度短波沿著強回波帶由西向東移動（圖 12 紅線）。從圖 13 的 5 公里高風場反演圖像可見，當日下午香港上空中層的西風帶中出現短波槽，頻繁的短波槽維持強雷暴的發展。直至下午 5 時，在短波槽後較為平直的西風到達香港西面海域。及後平直的西風向東移覆蓋香港上空中層，香港的雨勢亦隨之減弱。

從 2 公里高度的垂直風速雷達圖像顯示強回波帶伴隨上升和下沉氣流。上升的氣流主要位於強回波帶南邊的西南風範圍（圖 14 黃色區域），氣流上升速度最高約達 4 米/秒。而下沉氣流則位於強回波帶中央位置（圖 14 綠藍色區域），亦即西風帶與西南風帶交界的波動氣流中。最高下沉氣流速度約達 6 米/秒。

圖 15 顯示下午 4 時大嶼山西部的垂直剖面圖。從圖中可見位於低層西南氣流進入強回波帶的位置（接近圖中 A 點）出現上升的氣流。氣流一面向北走，一面上升到 6-7 公里左右。而在強回波帶的中心位置（A 與 B 點中間）的大氣中至下層主要是下沉氣流。下沉氣流的位置與最大反射率的位置是重疊的，表示降雨率高的回波隨著下沉氣流降至地面，帶來暴雨。

位於大嶼山北部的小蠔灣風廓線儀亦捕捉到高空的波動。圖 16 顯示風廓線儀的垂直風廓線與三維風場反演結果大致吻合。而比較大嶼山中部 N21 雨量計及該位置由雙雷達數據反演的 2 公里高度垂直風速，可見反演獲得的下沉氣流與地面錄得的雨量有比較好的關係。

3.5 境內暴雨結束

下午 5 時後，風廓線儀顯示離地面約 1 千米及以上的高空轉吹持續的西北風（圖 7，紅色虛線框），顯示 500 百帕西風深槽後的西北風已下傳至低層及向東伸展。槽前的暴雨發展逐漸向南至東南移動。地面的自動氣象站的風場顯示大嶼山高地及香港東南水域已轉吹西北風，切變線往南移，離開香港境內（圖 10(f)）。此時，香港普遍的氣溫變得平均。

微波輻射計也開始顯示 K 指數、綜合水蒸氣和綜合液態水明顯的下跌(圖 11)，大氣轉趨穩定。約下午 5 時 30 分，強雷雨逐漸移向香港南面海域，遠離香港。

4. 數值天氣模式預報表現

天文台在 2010 年 6 月開始業務運行以非靜力模式(NHM)為預報模式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)。AIR 預報模式系統包括兩個區域範圍的 NHM。外模式的 Meso-NHM 水平分辨率為 10 公里，垂直有 50 層，每 3 小時運行一次，利用日本氣象廳(JMA)全球模式 0.5 度網格點的預測作為邊界值，提供未來 72 小時預報。內模式的 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，每小時運行一次，提供未來 12 小時預報，目標是提升模擬中小尺度系統及對流天氣演變的能力。

2010 年 7 月 28 日下午 1 時至 5 時，RAPIDS-NHM 的地面風場及 1 小時雨量預測列於圖 17。模式起始時間為 03UTC，邊界值由 Meso-NHM 00UTC 的模式預測提供，而外模式的邊界值則由 JMA 模式 27 日 18 UTC 預測提供。下午 1 時至 2 時，RAPIDS-NHM 能預測在香港東部有強降雨情況，跟實況頗為吻合，但模式輸出的地面風和溫度未能明顯反映與強雨區相關的切變線和冷池。模式中在香港的地面風分析及預測均是南至西南風，這跟實況在香港東北部有切變線和冷池明顯有差異。因此，切變線跟盛行西南風所造成的地面輻合，以及暖濕的西南氣流爬升到較涼的冷池上而激發持續的對流亦未能模擬出來。下午 3 時至 5 時，RAPIDS-NHM 預測強降雨區域向東北移動，期間珠江口以西亦有強降雨發展。模式預測暴雨發展的區域較為內陸，它似乎能捕捉與低空西南急流相關的對流發展，但其預測位置仍有差異。模式未能預測香港受持續強雷雨影響，這相信可能與模式初始場及預測未能捕捉到香港附近地面輻合的情況有關，以及模式未能預測該區低層較小尺度的短波槽的出現。JMA 及 ECMWF 全球模式亦未能預測這場以中小尺度天氣系統為觸發機制的暴雨。

5. 總結

2010年7月28日香港的強雷雨過程發生在深厚西風槽的槽前末端，中小尺度短波在低空西南急流區活動頻繁，高空風場有明顯方向輻散，初始的中尺度天氣形勢為一準靜止對流發展區在香港東北面。雖然地面槽性弱，但雷暴外流邊界造成的切變線明顯。在境內三條分別從東北面、西面及南面推進的切變線相遇在香港南部，再加上雷暴合併，雷雨在合併的切變線附近迅速加強。這中小尺度的天氣形勢配上向東移動緩慢的高空西風槽，促成是次個案強雷雨的地區性和持續性的特徵。

在模式預報方面，天文台的非靜力模式、JMA及ECMWF全球模式未能準確地預測這場以中小尺度天氣系統為觸發機制的暴雨。對於預測短波槽有關的對流發展，模式的表現仍有待改進。多普勒天氣雷達三維風場反演有助分析中小尺度的天氣系統，尤其是強對流天氣。利用雷達數據的高時空解像度及多部位於不同地方的多普勒天氣雷達，可望捕捉大範圍的中小尺度天氣系統。

預報員應留意當附近有暴雨發展區及境內有切變線時，應利用臨近預報技巧，包括大雨概念模型，來評估對流、雷暴、切變線或輻合線的移動及合併的可能性。這些因素對預測暴雨有一定的指示作用。

鳴謝

感謝深圳市氣象局提供深圳天氣雷達原始數據作為業務運作及研究之用。

參考文獻

- [1] 黃偉健、周志堅，2010：天文台新一代數值天氣預報系統。第二十四屆粵港澳氣象科技研討會；深圳，中國，2010年1月20-22日。
- [2] Lam, C.Y., 1994: Rainstorm in Hong Kong on 16 June 1993: Part II – Nowcasting Aspects, *Hong Kong Meteorological Society Bulletin*, **vol. 4, no.1**, 13–19.
- [3] Li, P.W., and Lai, Edwin S.T., 2005: Typical Characteristics of Heavy Rain over the Coastal Areas of Southern China – A Radar Perspective. *Proceedings of Workshop on Meteorology and Climate over South China*, 5-8 December 2005, City University of Hong Kong.
- [4] Joe, P., and May, P. T., 2003: Correction of Dual PRF Velocity Errors for Operational Doppler Weather Radars. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **20**, 429–442.
- [5] Perreault, S., and Hébert, P., 2007: Median Filtering in Constant Time., *IEEE Trans. Image Processing*, **vol. 16, no. 9**, 2389-2394.
- [6] Gao, J., M. Xue, A. Shapiro, and K. K. Droegemeier, 1999: A variational method for the analysis of three-dimensional wind fields from two Doppler radars. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2128–2142.
- [7] Shimizu, S., H. Uyeda, Q. Moteki, T. Maesaka, Y. Takaya, K. Akaeda, T. Kato, and M. Yoshizaka, 2008: Structure and formation mechanism on the 24 May 2000 supercell-like storm developing in a moist environment over the Kanto Plain, Japan. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2389–2407.

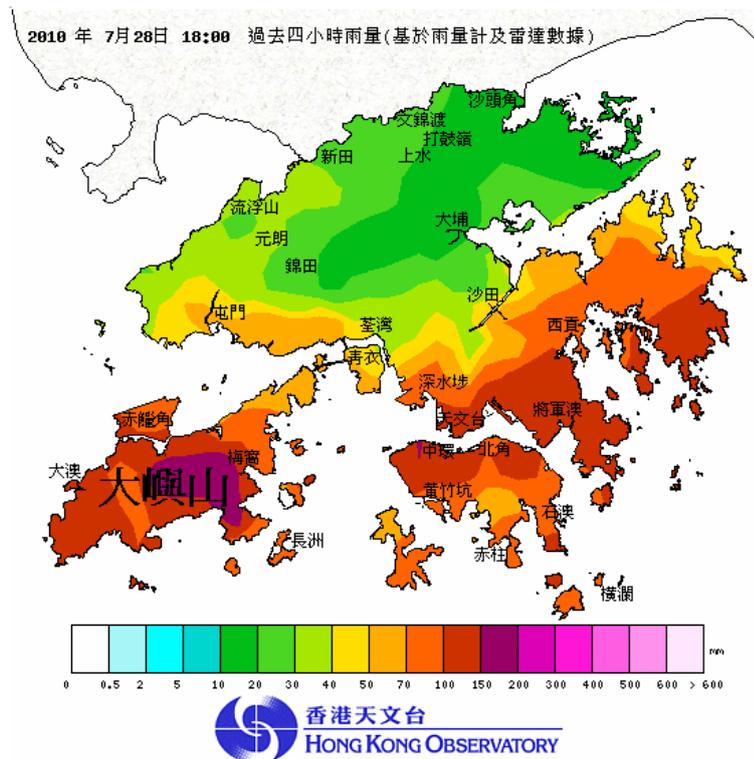


圖 1 香港在 2010 年 7 月 28 日下午暴雨警告信號生效期間的雨量分佈圖。

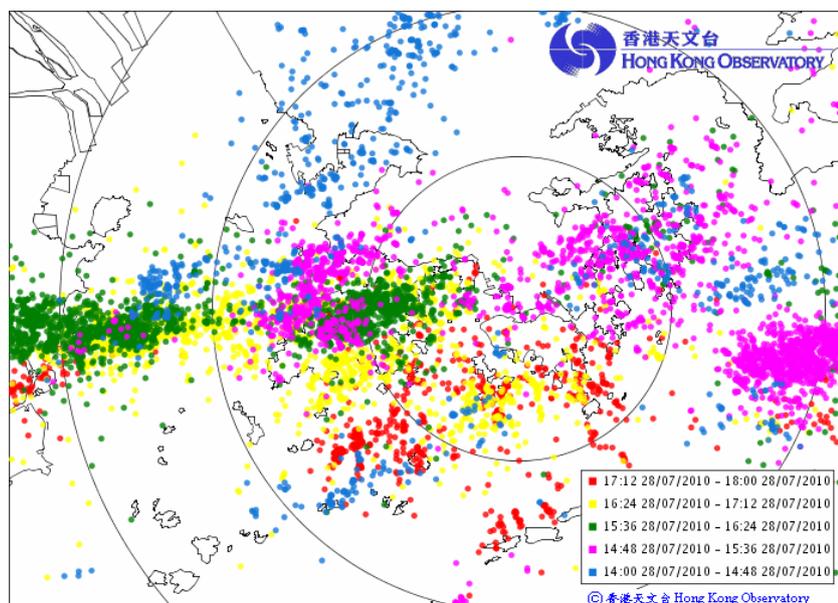


圖 2 2010 年 7 月 28 日下午香港境內及其鄰近地區在強雷雨帶影響期間所錄得的雲對地閃電。

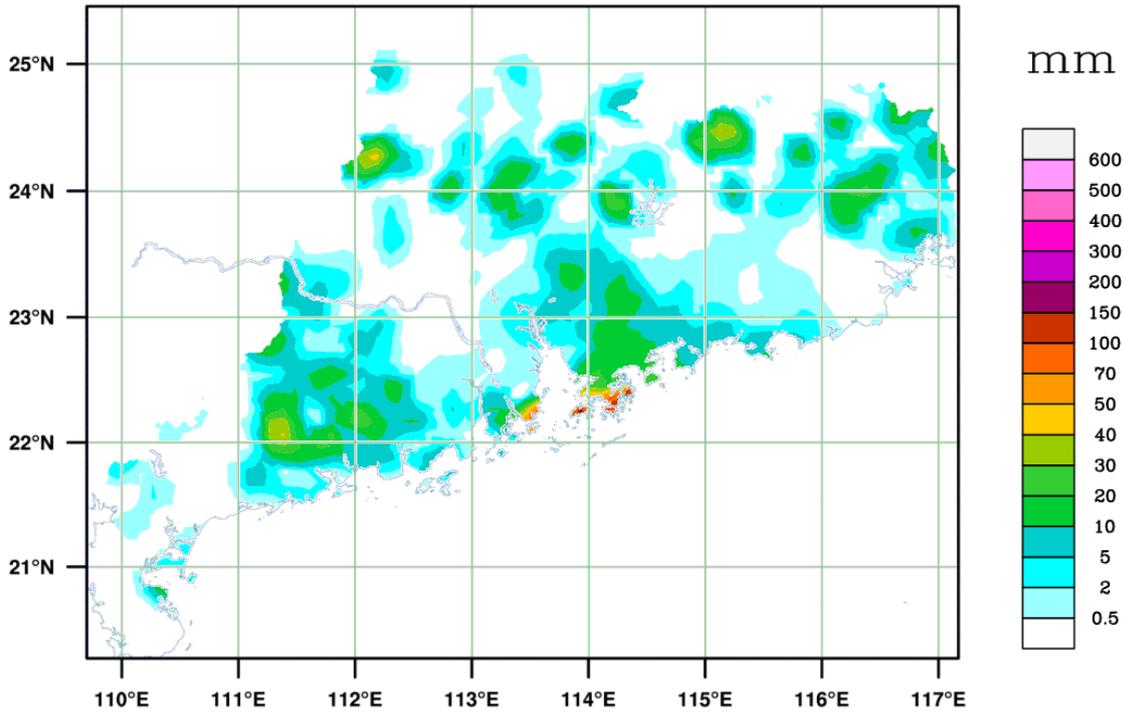


圖 3 2010 年 7 月 28 日下午在香港的暴雨警告信號生效期間廣東沿岸地區的雨量分佈圖。

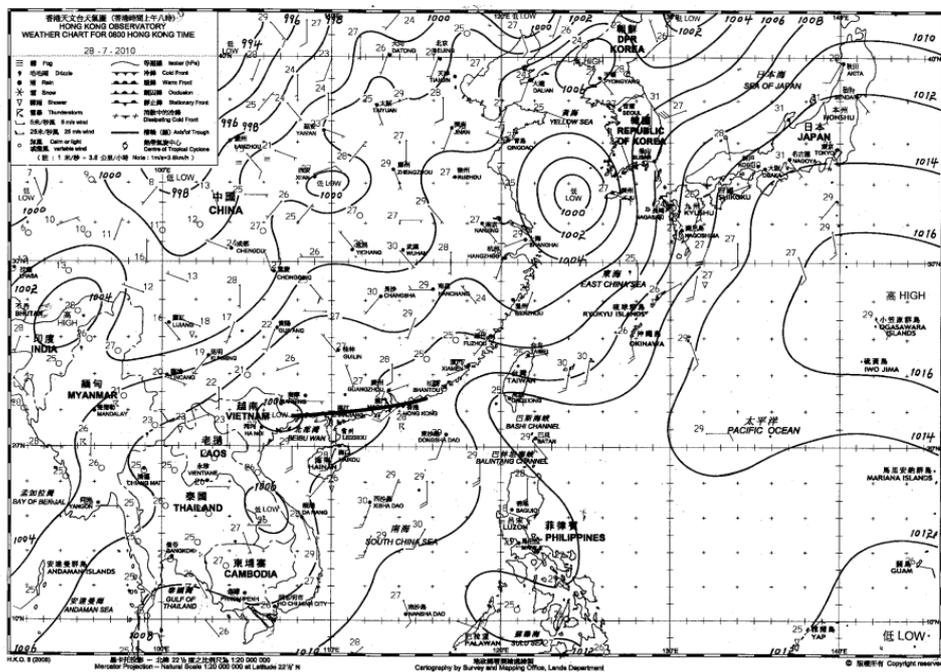


圖 4 2010 年 7 月 28 日早上 8 時的地面天氣圖。

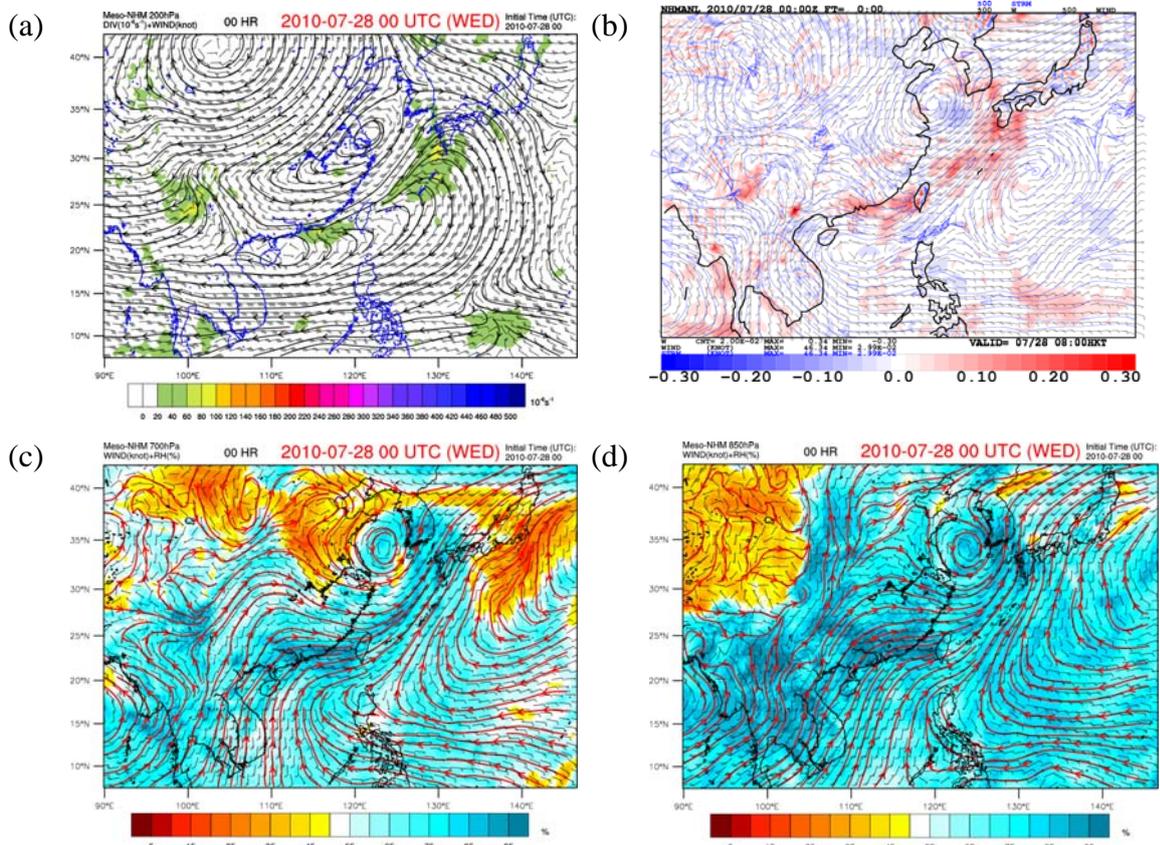


圖 5 2010 年 7 月 28 日早上 8 時天文台非靜力模式分析的(a)200 百帕流場及輻散圖;(b)500 百帕流場及垂直風速圖(紅色正數向上)、(c)700 百帕及(d)850 百帕流場及相對濕度圖。香港時間=UTC+8 小時(下同)。

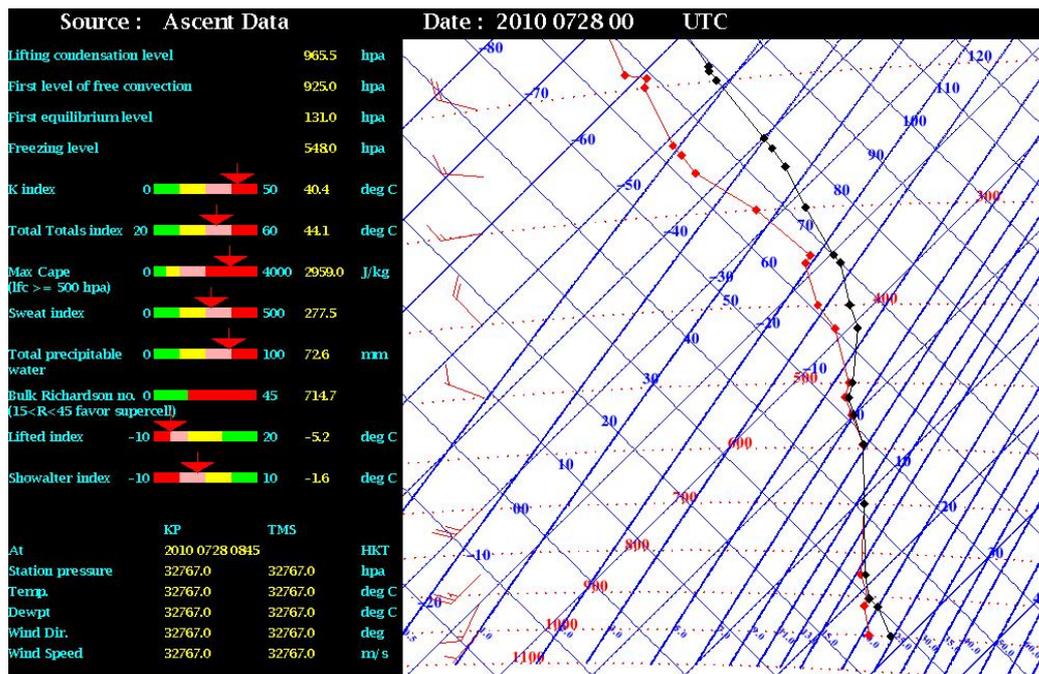


圖 6 2010 年 7 月 28 日早上 8 時的香港探空及大氣不穩定指數。

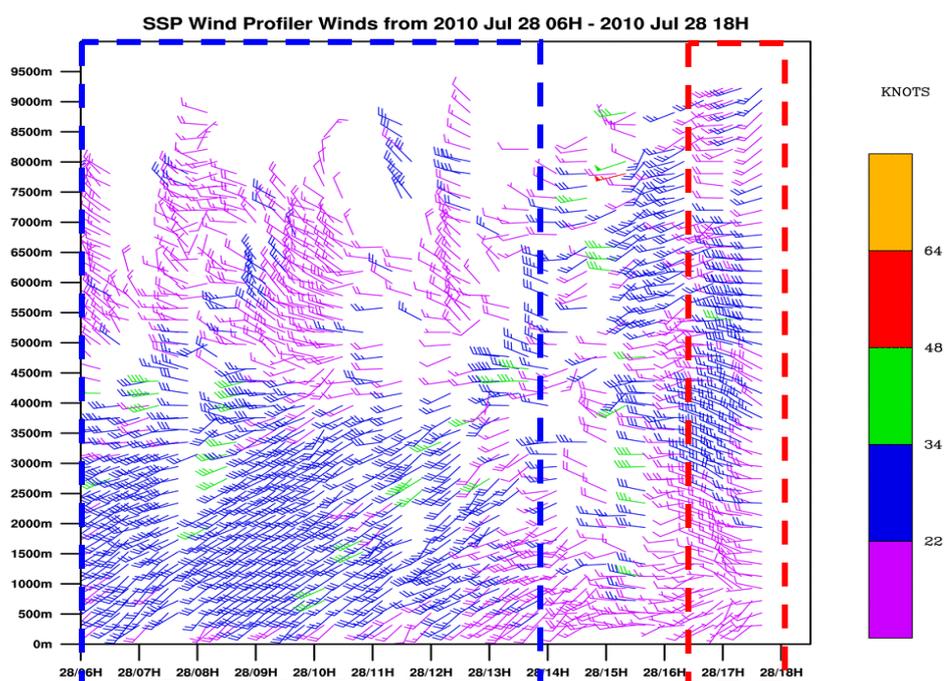


圖 7 2010 年 7 月 28 日早上 6 時至下午 6 時位於香港中部的深水風廓線儀所探測到的高空垂直風場。

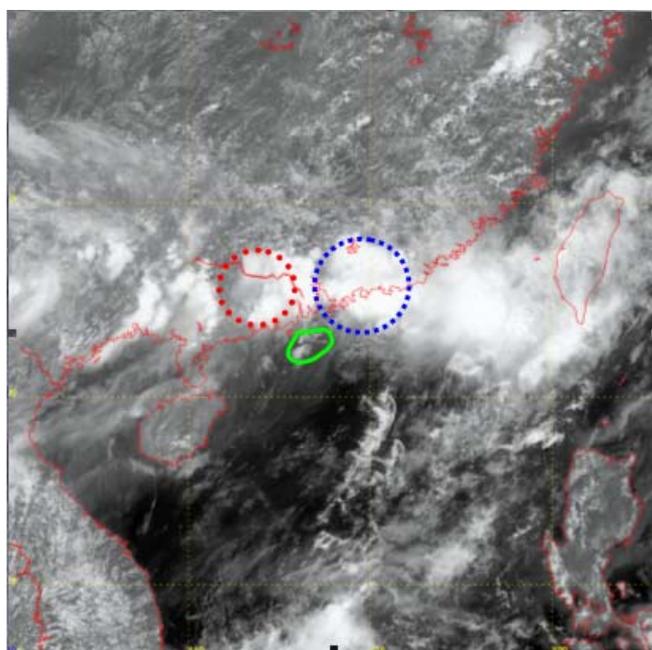


圖 8 2010 年 7 月 28 日下午 12 時 30 分的可見光衛星圖像。

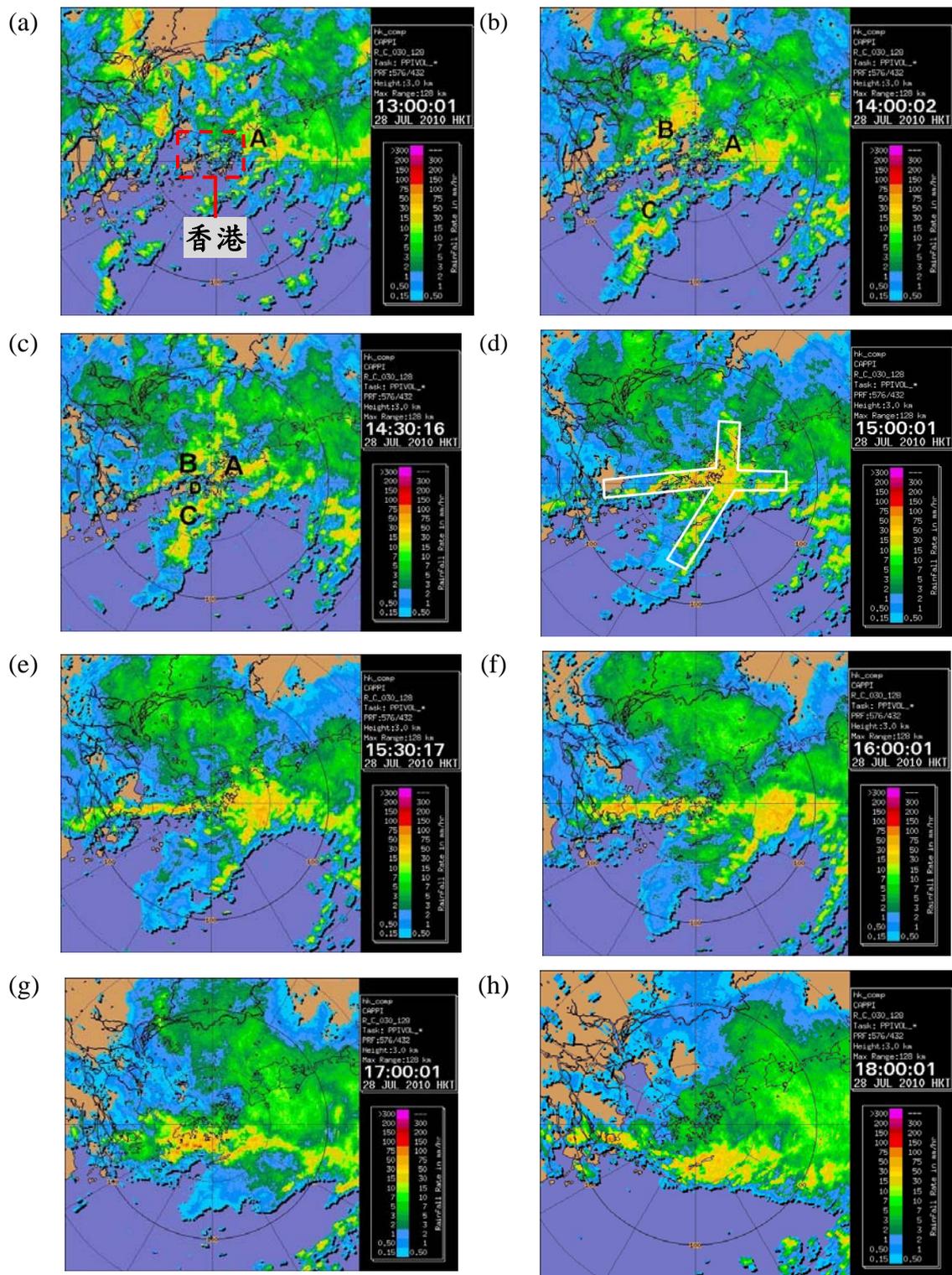


圖 9 2010 年 7 月 28 日下午 1 時至 6 時的 3 公里反射率雷達圖像。下午 3 時左右，雷達回波合併形成 'X' 圖案(圖(d)白色框)。

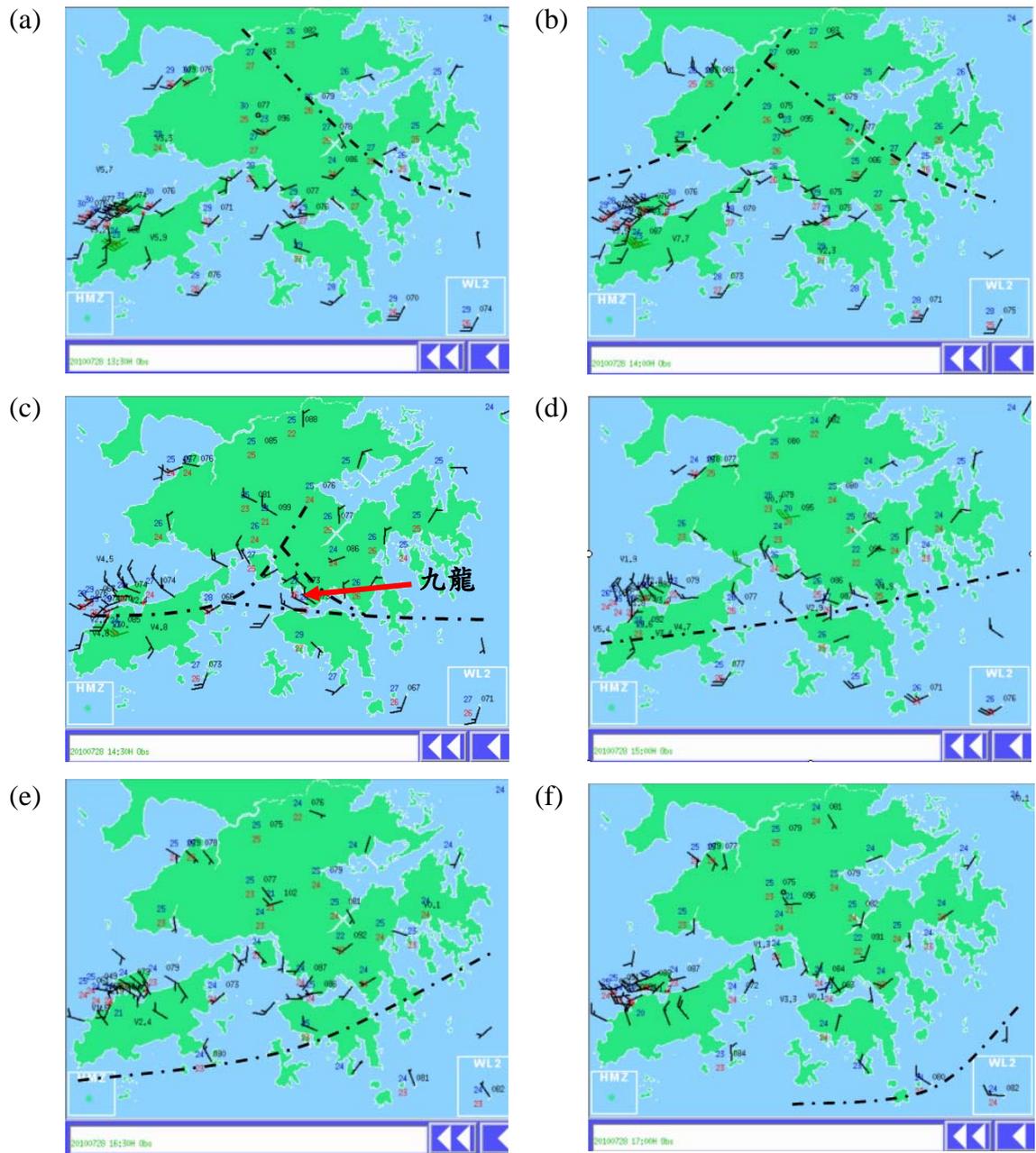


圖 10 自動氣象站在 2010 年 7 月 28 日下午 1 時 30 分至 5 時的觀測(黑色虛線為切變線)。

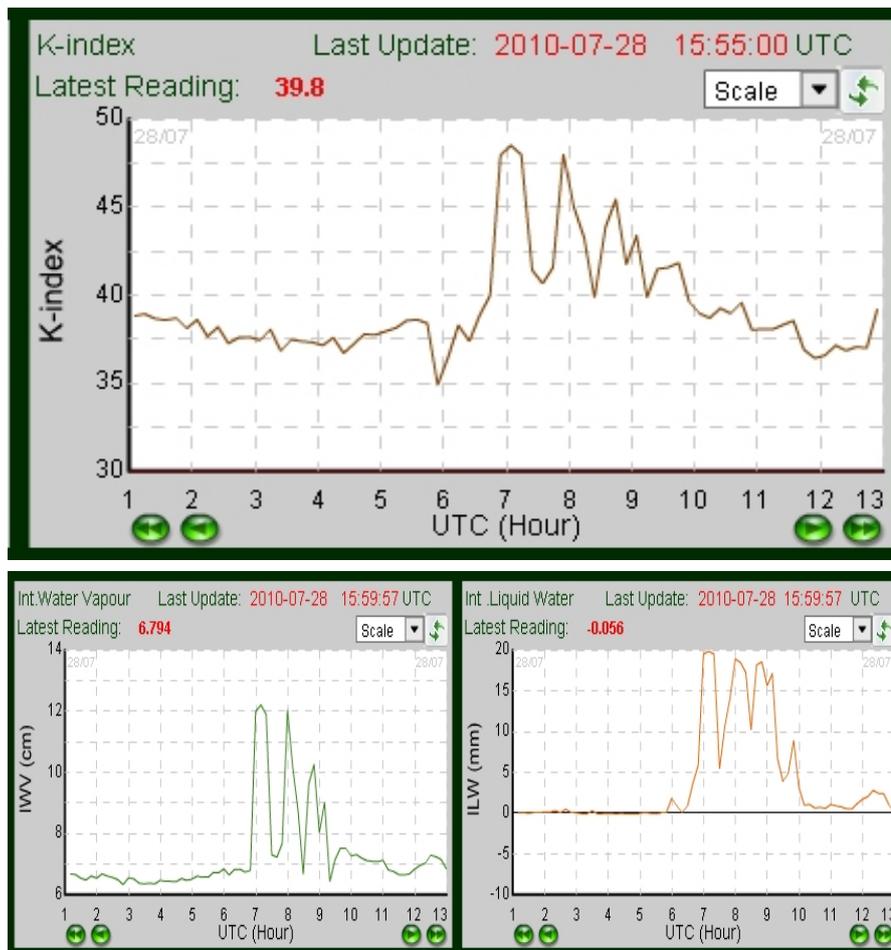


圖 11 香港國際機場的微波輻射計在 2010 年 7 月 28 日所推導的 K 指數(上圖)及綜合水蒸汽和綜合液態水(下圖)。

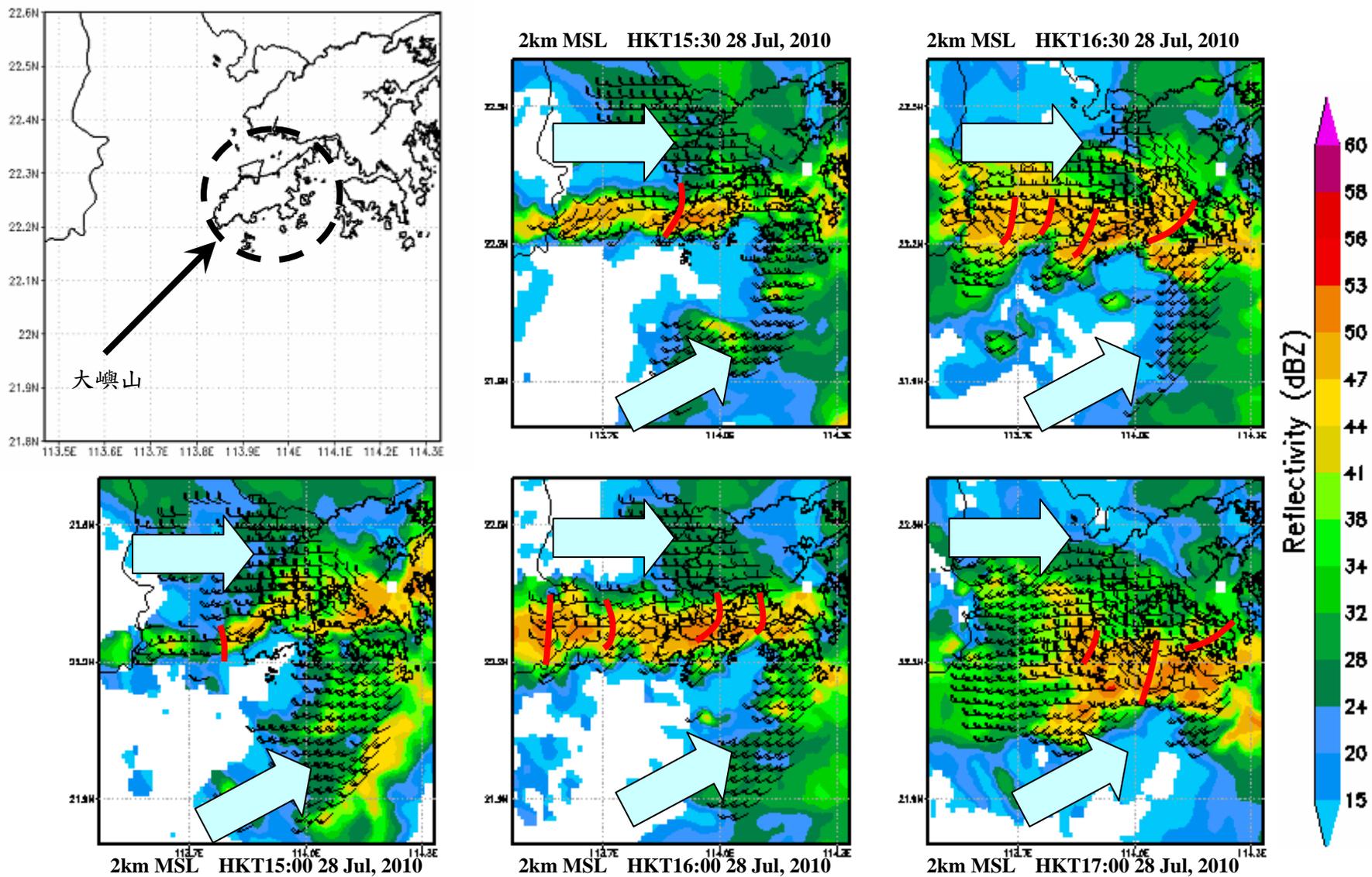


圖 12 2010 年 7 月 28 日下午 3 時至 5 時的 2 公里高雷達回波強度及風場圖像。一道東西走向的強回波帶位於西風和西南風會合的地方。強回波帶中出現多個波動(紅線)。

圖 13 2010 年 7 月 28 日下午香港高空中層出現短波槽的擾動。在下午 5 時左右，位於短波槽後較為平直的西風到達香港西面海域。

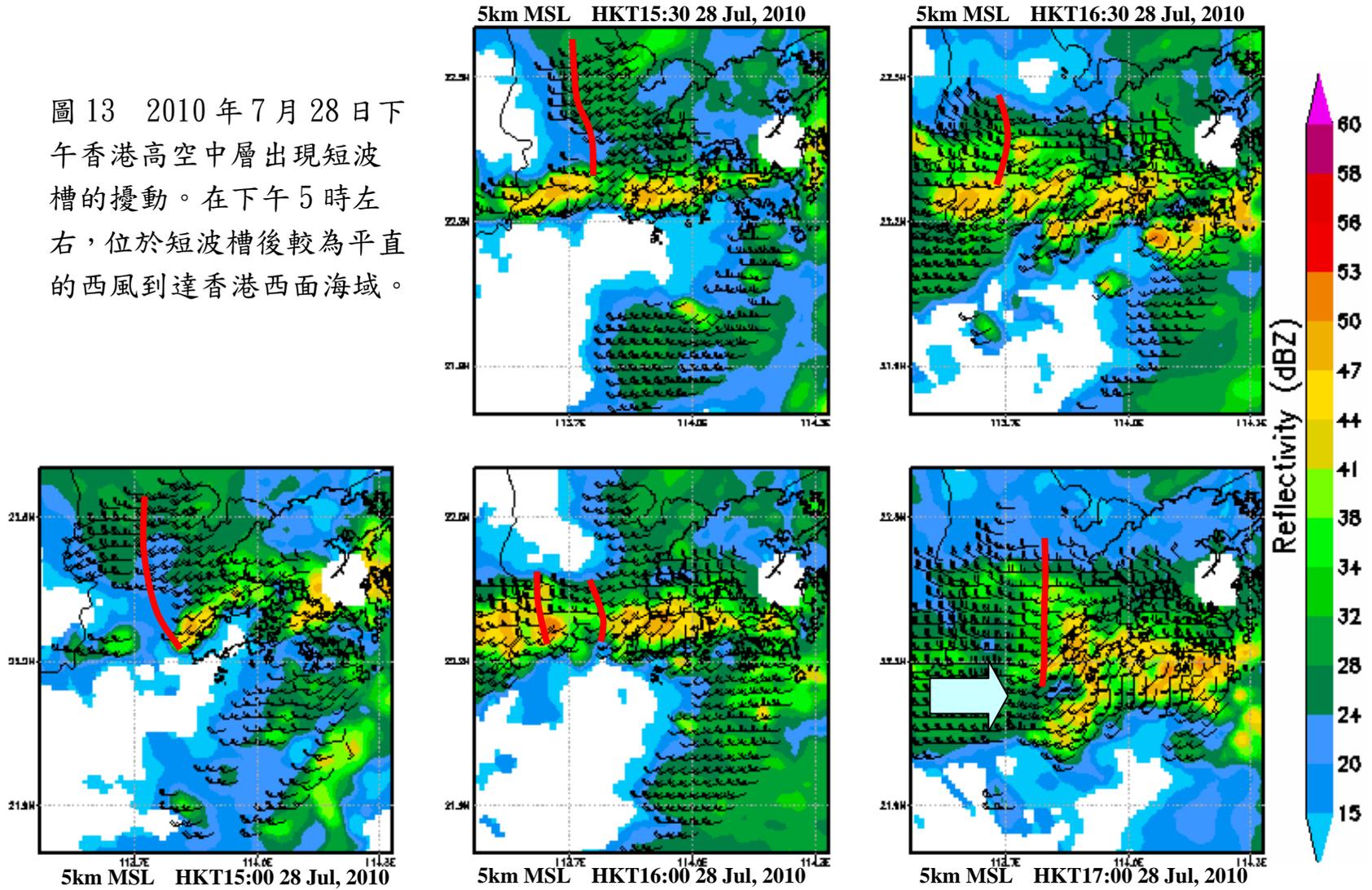
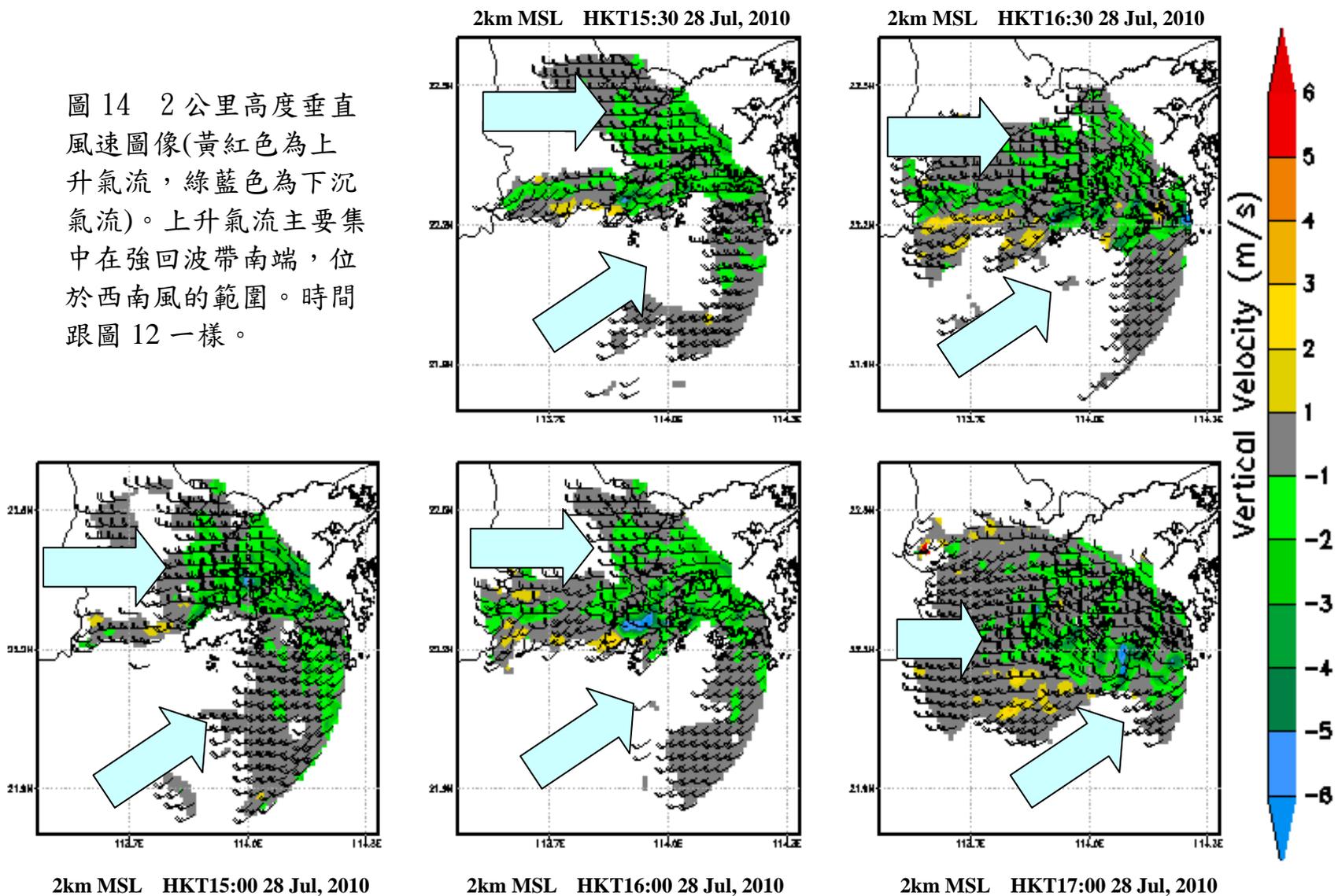


圖 14 2 公里高度垂直風速圖像(黃紅色為上升氣流，綠藍色為下沉氣流)。上升氣流主要集中在強回波帶南端，位於西南風的範圍。時間跟圖 12 一樣。



H=2 km 28JUL2010 16:00 HKT

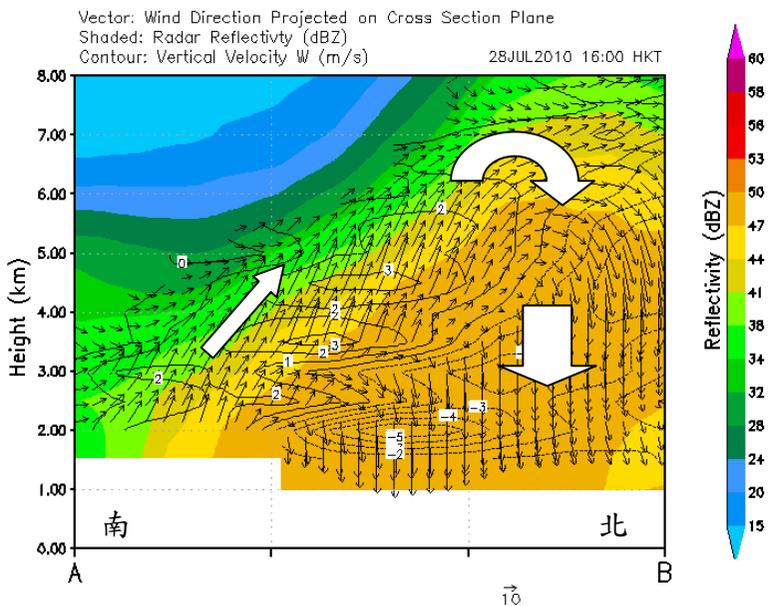
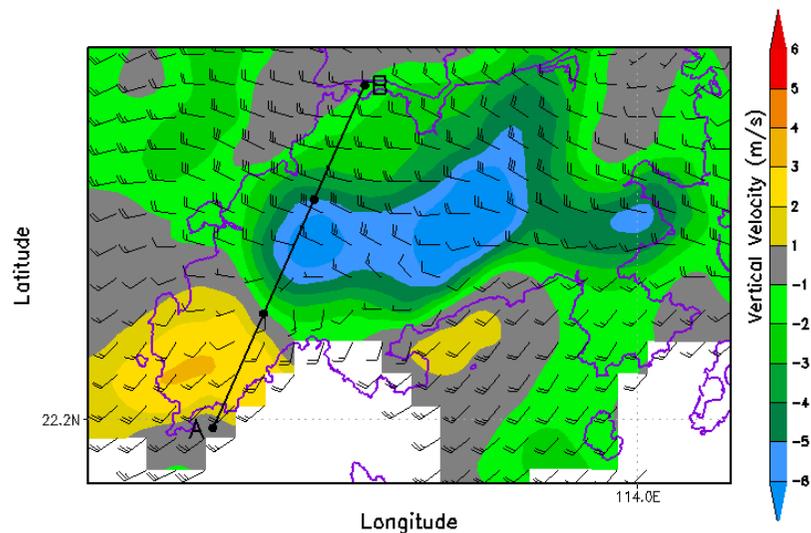


圖 15 左圖為 2010 年 7 月 28 日下午 4 時於香港西部大嶼山的 2 公里高度的風場和垂直風速，而右圖為同一時間的垂直剖面圖(A 及 B 點位置見左圖)。

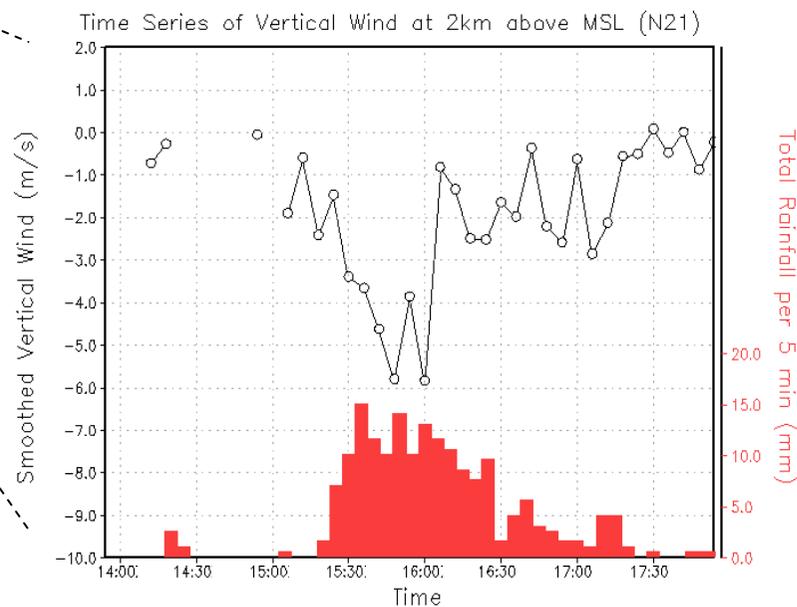
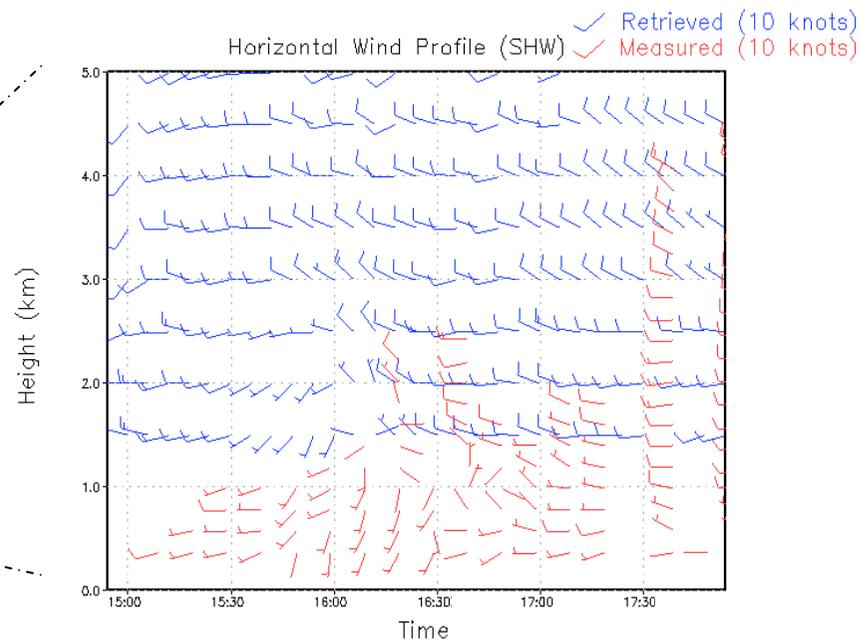
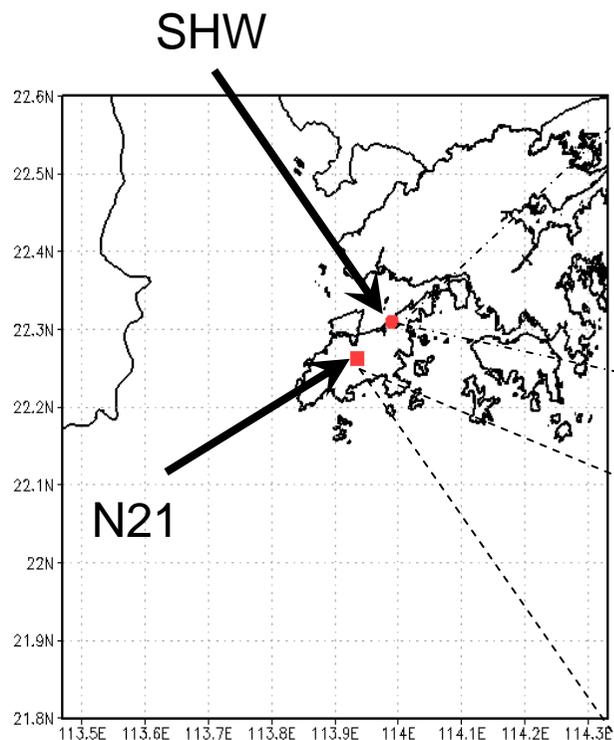


圖 16 SHW 為大嶼山北部的風廓線儀。右上圖藍色風向杆為 2010 年 7 月 28 日下午雙雷達數據反演風場的水平風向杆，而紅色風向杆為風廓線儀量度的水平風向杆。右下圖為大嶼山中部 N21 雨量計每 5 分鐘的總雨量，以及該位置 2 公里高上空由雙雷達反演的下沉氣流速度(負數為下沉速度)。

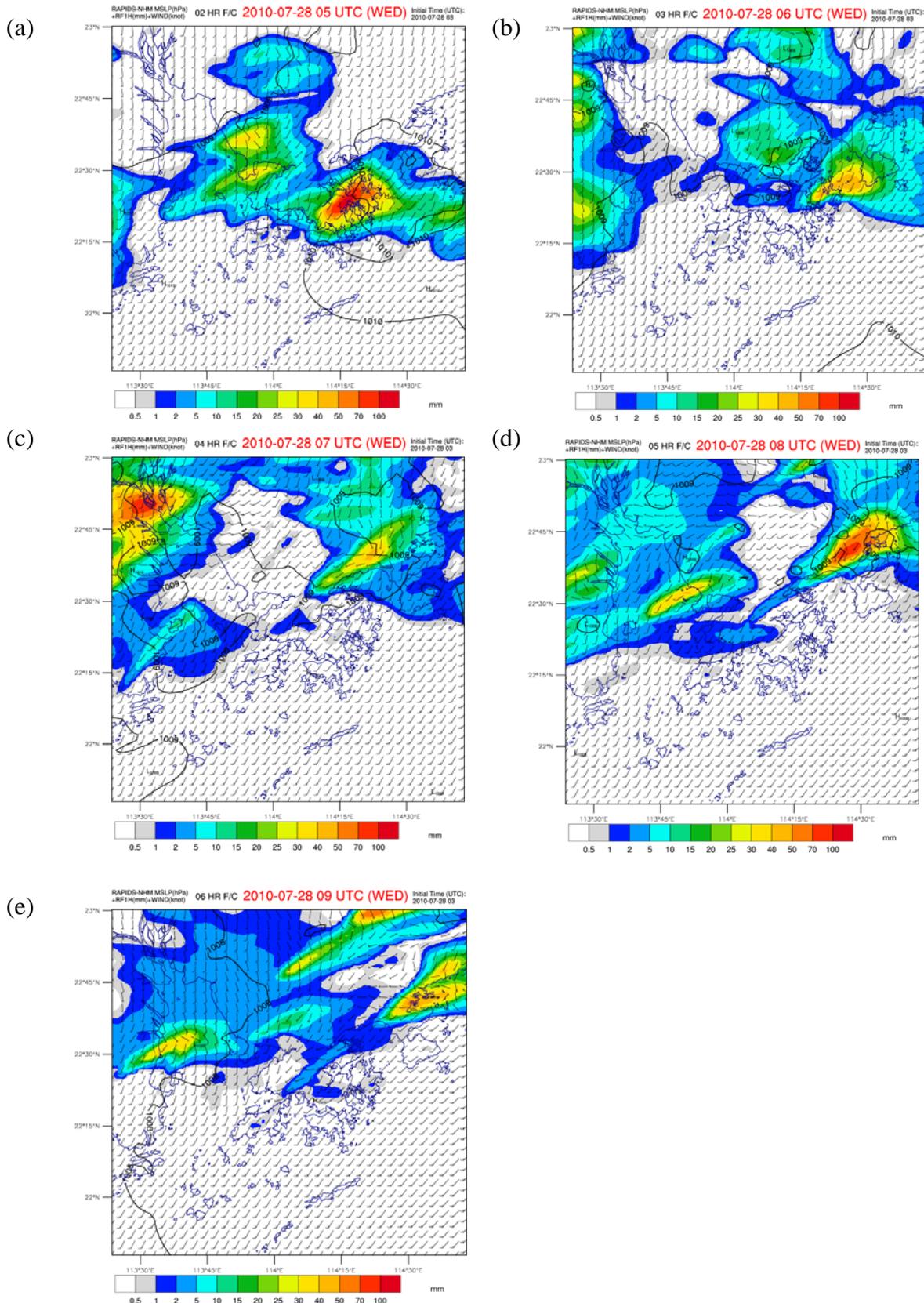


圖 17 RAPIDS-NHM 預測 2010 年 7 月 28 日下午 1 時至 5 時的地面風場和 1 小時雨量。

雷達數據處理和三維風場反演原理

1. 多普勒天氣雷達

文中利用的雷達數據分別來自深圳氣象局的天氣雷達和香港天文台的大老山天氣雷達(圖 A.1)。香港和深圳的雷達均是 S 波段多普勒天氣雷達，每六分鐘完成一個體積掃描(volume scan)。

2. 數據前處理

雷達數據在進行三維風場反演前先經過數據處理。首先是將徑向速度退模糊(dealiasing)，利用的是簡單的一維方法，即是對每一條波速數據由近至遠比較，當相鄰而較遠的徑向速度數據比較近的數據出現突然和較大的差異，即表示出現速度模糊現象，然後將相鄰而較遠的徑向速度數據改正過來。這方法雖然簡單，但在大多情況下，包括文中的個案，能有效將徑向速度退模糊。

在徑向速度退模糊後，我們利用中值濾波(median filtering) (文獻[4 和 5])，來去除徑向速度數據的“噪音”。圖 A.2 是用中值濾波前後的比較，可見中值濾波有助提高數據的質素。文中雷達數據在進行中值濾波時，所用的模板大小為 3×3 ，而過濾的次數為 3 次。這是經過試驗得出的方法。

3. 三維風場反演原理

我們把經過前處理的雷達數據插分到 90(長) \times 90(闊) \times 21(高)的三維網格，其解析度為 $1\text{km} \times 1\text{km} \times 0.5\text{km}$ 。三維風場反演是利用變分法(variational method)完成的，具體方法可參考文獻[6 和 7]，現簡單介紹如下：變分法是將費用函數(cost function) J 最小化，其中 J 的定義如下：

$$J = J_O + J_B + J_D + J_S$$

等號右邊每一項的解釋如下：

J_O 為量度反演風場徑向風和雷達觀察徑向風的誤差：

$$J_O = \frac{1}{2} \sum_{i,j,k} \lambda_m (PV_{rm} - V_{rm}^{\text{rob}})^2$$

其中 $PV_{rm} = \frac{(x-x_m)u + (y-y_m)v + (z-z_m)(w+w_T)}{\sqrt{(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2 + (z-z_m)^2}}$ 為投射反演三維風場的徑向

風場，當中 w_T 為雨水終端速度，其值可由經驗方程算出(文獻[7])。 V_{rm}^{rob} 為雷達觀察徑向風的插值， m 為雷達數目，而 i, j, k 表示三維網格點的數目。

J_B 為量度反演風場 (u, v, w) 和背景三維風場 (u_b, v_b, w_b) 的誤差，其方程如下

$$J_B = \frac{1}{2} \left[\sum_{i,j,k} \lambda_{ub} (u - u_b)^2 + \sum_{i,j,k} \lambda_{vb} (v - v_b)^2 + \sum_{i,j,k} \lambda_{wb} (w - w_b)^2 \right]$$

J_D 為調控反演風場以符合近似質量連續條件(weak anelastic mass constraint)：

$$J_D = \frac{1}{2} \sum_{i,j,k} \lambda_D \left(\frac{\partial \bar{\rho} u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\rho} v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\rho} w}{\partial z} \right)^2$$

其中 $\bar{\rho}$ 為平均大氣密度。

最後， J_S 為控制反演風場的平滑度，其方程如下

$$J_S = \frac{1}{2} \left[\sum_{i,j,k} \lambda_{us} (\nabla^2 u)^2 + \sum_{i,j,k} \lambda_{vs} (\nabla^2 v)^2 + \sum_{i,j,k} \lambda_{ws} (\nabla^2 w)^2 \right]$$

其中 ∇^2 為拉普拉斯算子。

各項方程中的權數取值如下(文獻[6 和 7])

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 1, \lambda_{ub} = \lambda_{vb} = \lambda_{wb} = 1 \times 10^{-4}, \lambda_D = 1 \times 10^5, \lambda_{us} = \lambda_{vs} = \lambda_{ws} = 100$$

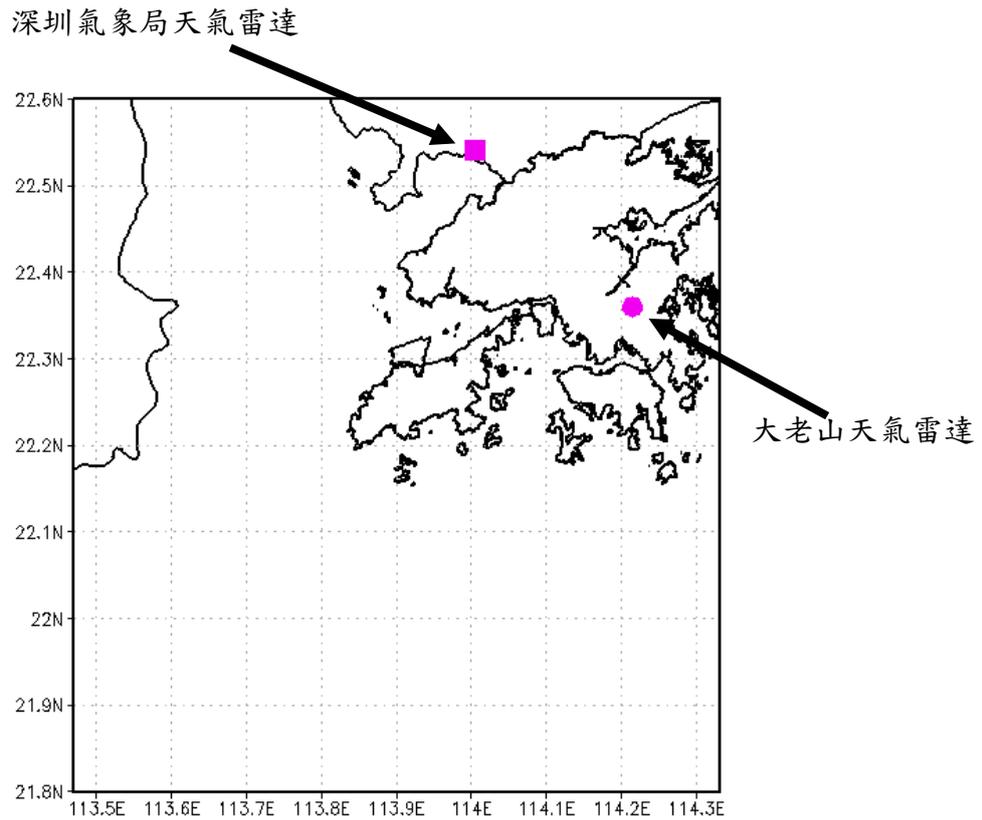


圖 A.1 深圳氣象局的天氣雷達(紅方)和香港天文台的大老山天氣雷達(紅圓)的位置。

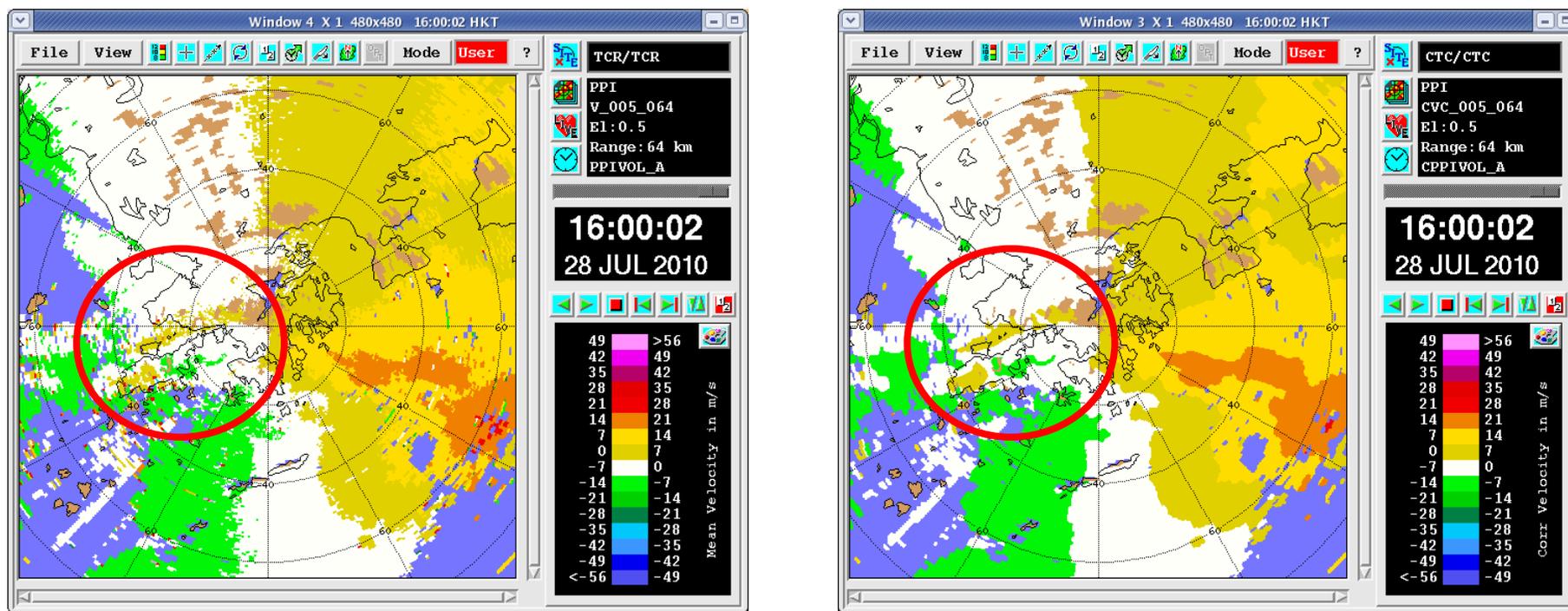


圖 A.2 左圖為未經過中值濾波的雷達徑向速度 PPI，而右圖則為經過中值濾波後的雷達徑向速度 PPI。從圖中可見數據變得平滑，但仍保持圖形的結構(紅圈所示)。