

Reprint 1168

香港地形降水的個案研究

李鳳瑩、胡宏俊 & 梁恩瑜

第二十九屆粵港澳氣象科技研討會

澳門，2015年1月20-22日

香港地形降水的個案研究

李鳳瑩 胡宏俊 梁恩瑜

香港天文台

摘要

雖然香港是一個面積小的地方，但卻地形複雜，在春夏季某些適當的氣象條件下，會出現地形降水。在這項研究中，我們利用了實際的觀測，包括雷達圖像、無線電探空儀和定量降水估計(QPE)去研究多個地形降水的個案。在排除了鋒面、高空擾動和颱風等大範圍系統的影響後，我們可以鑒別出兩大類型的地形降水情況，包括在低層西南風和低層東至東南風影響下的地形降水分佈。本文從眾多個案中總結了一些共同特徵和其相關的氣象因素，包括天氣形勢、風場、對流可用位能(CAPE)、K指數、自由對流高度(level of free convection)和濕弗勞德數(moist Froude number)，從而討論關於地形降水情況的診斷方法，為天氣預報員提供監測地形降水和臨近預報的指導。

1. 引言

香港位於華南沿岸，三面環海；雖然只是彈丸之地，但地勢較為多山而平地較少，主要山脈大致由東北向西南排列。位於新界中部的大帽山高海拔 960 米，是香港最高的山峰。位於香港西部大嶼山的鳳凰山(約海拔 900 米高)、香港東部的馬鞍山(約海拔 700 米高)及柏架山(約海拔 500 米高)亦是香港的主要山峰(圖 1)。

香港的雨季一般在四月至九月，水氣主要從東、南和西南方向的海洋輸送。雖然香港山勢並不算太高，在適當的氣象條件仍可會引發地形降水。根據全港雨量站的資料繪製成的香港平均年雨量分佈圖(圖 1)，各區的年平均降雨量差別很大，例如橫瀾島年雨量少於 1,800 毫米，但大帽山附近則超過 3,000 毫米，這與本港的山勢有密切關係。

本文將會介紹在相對穩定的大氣條件下，受低層西南風或低層東至東南風的影響、香港出現的兩種地形降水情況和降水分佈的特徵。從這些個案中，可以綜合到一些共同的氣象因素，包括天氣形勢分析、風場、對流可用位能(CAPE – convective available potential energy)、K 指數、自由對流高度(LFC – level of free convection)和濕弗勞德數(moist Froude number)，希望有助天氣預報員對地形降水的監測和臨近預報。

2. 數據與方法

本文利用了 2012 至 2014 年的觀測及分析資料，當中包括：

- (i) 地面及高空天氣圖分析
- (ii) 京士柏的探空資料
- (iii) 深水埗風廓線儀資料
- (iv) 利用定量降水估計(QPE - quantitative precipitation estimate)得出的全日雨量資料[1]
- (v) 3 公里高 CAPPI (constant altitude plan position indicator)多普勒徑向風速雷達圖像

在香港，雨季一般發生在四月至九月之間，在排除了鋒面、高空擾動和颱風等大範圍系統的影響後，我們鑒別出有關地形引致降水的案例，並分析了以下氣象資料：

2.1 自由對流高度(LFC)、對流可用位能(CAPE)及 K 指數

我們利用香港京士柏在每日的 00UTC 和 12UTC 收集的探空資料，計算出自由對流高度(LFC)、對流可用位能(CAPE)和 K 指數。具體方程如下：

LFC 是空氣塊經乾絕熱舉升過程達飽和，在隨後的飽和絕熱過程中，空氣塊溫度首度和環境溫度相等的高度。

$$CAPE = \int_{LFC}^{EL} g \frac{\theta_v - \theta_{ve}}{\theta_{ve}} dz$$

EL 代表平衡高度(equivalent level)， g 是重力加速度， θ_v 為空氣塊的虛位溫， θ_{ve} 為未飽和環境的虛位溫， z 為離地高度。

$$K \text{ 指數} = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700})$$

T_{850} 是 850 百帕層的溫度， T_{500} 是 500 百帕層的溫度， Td_{850} 是 850 百帕層的露點， T_{700} 是 700 百帕層的溫度， Td_{700} 是 700 百帕層的露點。

2.2 濕弗勞德數(moist Froude number)

在固定的地形與環境熱力條件下，可以通過濕弗勞德數(moist Froude number – F_w)來描述上游大氣的特性，來研究對流不穩定的氣流通過中尺度山脈時的降雨型態。濕弗勞德數定義為以下的方程式：

$$F_w = \frac{U}{N_w h}$$

當中

$$N_w^2 = \frac{g}{\theta_v} \frac{\partial \theta_v}{\partial z}$$
$$= g \frac{\partial \ln \theta_v}{\partial z}$$

U 代表上游風速， N_w 為濕浮力震盪頻率 (moist Brunt-Väisälä frequency)， h 代表山的高度， θ_v 為虛位溫， $\overline{\theta_v}$ 為虛位溫於垂直方向的平均。

本研究以京士柏的 00UTC 探空資料估算當日的 F_w 。鳳凰山至大帽山一帶的 F_w 估算如下：山峰高度約為 900 米，即 $h \sim 900$ 米， U 為地面至離地面 900 米 (約 0-900 米) 的平均風速， N_w 則以於約 900 米的虛位溫及地面虛位溫之斜率來計算。至於馬鞍山與附近的一帶山峰的 F_w 則以 h 為 700 米作計算。 U 及 N_w 亦相對以 0 至 700 米的風速及虛位溫計算。

Chu and Lin [2] 利用理想模型實驗，歸納出不穩定的氣流通過山脈時的三種降水類型：

- (a) Regime I: 較小的 F_w (< 0.28): 對流系統在上游擴展；
- (b) Regime II: 中等的 F_w (~ 0.5): 對流系統在山頂附近的迎風坡或背風坡長時間滯留；
- (c) Regime III: 較大的 F_w (> 0.83): 對流系統在山頂附近產生對流降水系統且會向下游擴展。

Chen and Lin[3] 及 Chen, Lin and Zhao[4] 進一步研究對流不穩定的氣流通過中尺度山脈時的降雨型態，探討在不同的熱力條件下，利用了對流可用位能(CAPE)及中尺度數值天氣預報模式類比結果，發現當風速較高，即 F_w 較大時，降雨系統在山脈逗留發展的時間短；另外，當 CAPE 較大的時候，降雨系統受到地形抬升，所釋放的 CAPE 亦相對大，有利降雨系統於山區或下游附近加強；相反，當 CAPE 較小的時候降雨系統僅能發展成層狀的降雨。此外，山的高度(h)與半寬度的比例(h/a)也影響降雨系統在山區停留的時間[4]。當半寬度(a)越小，降雨系統停留於山區發展的時間就越短，對形成層狀降雨系統較為有利，並有可能減少降雨的時間。文獻以流型圖 2 概括了不同降水類型(Regime I,II,III)跟 F_w 及 h/a 的關係。

3. 個案分析與討論

從鑒別出來的地形降水案例可見，香港的地形降水主要可分為兩類別：低層西南風，以及低層東至東南風的情況。

3.1 低層西南風案例

2012年5月1日，一道低壓槽徘徊在華南北部，華南沿岸受西南風影響(圖 3a)。中層 500 百帕、中低層 700 百帕至低層 850 百帕(圖 3b-d)的流場均顯示西風槽的槽軸位處廣西附近。低層 850 百帕的西南風把南海的暖濕空氣輸送至華南沿岸地區。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 4a)。

當日早上 8 時的探空(圖 4b)顯示 K 指數達 34，CAPE 接近 3000 J/kg，大氣環境有條件產生降雨。較為飽和的氣層由 950 百帕附近往上伸延至 800 百帕左右，不算深厚。

當日早上七時許，雷達顯示(圖 5)有一些微弱回波開始在大帽山附近發展，並隨時間變得較有組織。於上午八、九時許雷達顯示不斷有回波在大帽山附近發展，而且呈西南至東北走向，回波於大帽山下游位置，即大埔一帶明顯有增強趨勢。整個過程持續至中午十二時許。降雨持續集中影響大帽山及其下游一帶。從當日的全日雨量圖(圖 5)中可見降雨集中在一道西南至東北走向並覆蓋著大帽山及新界東北部一帶的地方。降雨亦出現在大嶼山東北部，即鳳凰山的下游。

在本案例中，早上八時的自由對流高度(LFC)為 940 百帕左右 (約 600 米，低於大帽山及大嶼山的鳳凰山)。取山的高度(h)為 900 米(約為鳳凰山及大帽山山峰的高度)，地面至 900 米的平均風向及風速分別約為 222 度及 8.8 米/秒， N_w 為 0.0085/秒，則 F_w 約為 1.15；考慮山脈的半寬度(a) 約為 8000 米，高度與半寬度比例(h/a) 為 0.11，是第二節所介紹的 Regime III，因此山區及下游位置有機會產生比較明顯的雨勢。

另一個案例為 2013 年 6 月 25 日。當日天氣形勢跟上述西南風案例相若(圖 6)。當日早上八時的自由對流高度(LFC) 也為 940 百帕左右 (約

600 米)。地面至 900 米的平均風向及風速分別約為 232 度及 7.4 米/秒，經計算 F_w 約為 1.50；考慮山脈的半寬度(a) 約為 8000 米，高度與寬度比例(h/a) 為 0.11，當日早上八時的大氣形勢同樣可定為 Regime III。

實況所見當日九時許本港開始有驟雨發展，往後數小時至下午三時許雷達圖像顯示不斷有雨區影響大嶼山東北部至新界東北部一帶(圖 7)。(圖 8b) 為當日的全日雨量圖。可見 F_w 對低層西南風地形降水的預報有指導性。

本文研究了其他幾個於低層為西南風時地形降水的案例(表一)，其天氣形勢與上述兩個個案相似。從地面至 900 米高的平均風向為 204 度至 232 度。各案例中的 F_w 可歸納於 Regime III 或較接近 Regime II。從全日雨量分佈圖(圖 8)中可見雨帶主要從西南至東北走向的雨帶橫跨香港。

3.2 低層東至東南風案例

2013 年 4 月 29 日，中國東南沿岸地區受到一道高壓脊支配，廣東沿岸普遍吹東風(圖 9a)。4 月 29 日的高空流場分析顯示低層 850 百帕(圖 9b) 為東南風，700 百帕流場顯示西南風影響廣東沿岸(圖 9c)。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 10a)。低層東南風把南海的暖濕空氣輸送至華南沿岸地區。與上述西南風案例由中低層至地面均為西南風不同，這個案例地面風至中低層風向為東南風順轉西南風。

當日早上 8 時的探空(圖 10b)雖然顯示 CAPE 只有 157J/kg，但 K 指數達 32。大氣的濕層由近地面上延至 800 百帕左右。

在本案例中，早上八時由探空資料計算的自由對流高度(LFC) 為 795 百帕。考慮山高約為 700 米(約為馬鞍山與附近西貢的一帶山峰的高度)，低層 0-700 米的平均風速約為 7.21 米/秒， N_w 為 0.014/秒，則 F_w 約為 0.73，考慮山脈的半寬度(a) 約為 3000 米，高度與寬度比例(h/a) 為 0.23，則當日早上的天氣情況是本文 2.2 節所介紹的 Regime III 或較接近 Regime II。

當日下午二時許，雷達(圖 11)顯示有一些微弱回波開始在馬鞍山附近發展。往後一個多小時該區持續有對流活動產生，而且隨中低層的偏南氣流

往北走。回波於下游位置在新界東北部一帶稍有增強。整個過程持續至下午四時。

檢視當日天文台 RAPIDS-NHM 模式[5]對當日下午的預報。早於當天早上九時(01 UTC)的模式預報已顯示下午本港有雨區發展(圖 12)。配合上述 F_w 的計算，對預報員起一定提示作用。

表二總結了其他四個於低層東至東南風地形降水的案例。圖 13 顯示了各案例的全日雨量分佈。各案例跟上述個案的天氣形勢相似，由地面風至中低層為順轉風(0-1500 米平均風向較 0-700 米平均風向有較多偏南分量)。雖然 CAPE 較小但大部分個案的 K 指數均大於 30。各案例的 LFC 似乎沒有明顯規律，實況顯示東至東南風地形降水可以只出現於較低的高度，如 2014 年 4 月 23 日的 3 公里 CAPPI 雷達圖並不能顯示該降水相關回波(圖略)。

各案例中的 F_w 可歸納於 Regime III 或較接近 Regime II。其實香港東部地勢較為複雜，氣流除了過馬鞍山時能出現地形降水外，氣流流過香港島的柏架山也有機會引發地形降水。圖 13c 及 d 均可見柏架山附近有明顯雨量。但總括來說低層東至東南風地形降水的案例均顯示香港東面雨勢較明顯。

4. 總結與展望案

本文根據 2012 至 2014 年的觀測及分析資料，討論在排除了鋒面、高空擾動和颱風等大範圍系統的影響後，香港主要可出現兩種類型的地形降水情況，包括低層西南風和低層東至東南風影響下的地形效應降水。

從本文介紹的降水個案，歸納了一些共同特徵和其相關的氣象因素。結果顯示，在低層西南風與地形效應的影響下，大嶼山東北部至大帽山及新界東北部一帶較可能有顯著降水。而在低層東至東南風(由地面風至中低層風向均為順轉風)的情況下，香港東部雨勢則較為明顯。

此外，把各個案例的 F_w 繪劃在第二節所提及的流型圖可清楚見到，無論西南風或低層東至東南風個案， F_w 均在 Regime III 或較接近 Regime

II(圖 14)。這些案例均顯示底層需要一定的風速(約大於 6 米秒)才能出現明顯降水。若風速太細，即使計算出來的 F_w 界定為 Regime I，實況所見並不能產生明顯地形降水。

以上的分析對瞭解地形作用產生的降水有一定參考，特別是利用 00UTC 的實況評估往後幾個小時的發展條件，也對理解或評估數值預報模式，特別是高解析度中尺度模式掌握在香港附近的降雨趨勢有幫助。兩者相輔相成，對預報員有參考價值。展望將來，未來的研究可增加個案的數目以提高地形降水診斷條件的可靠性，並製作屬於香港地形降水的山高寬比例—濕弗勞德數流型圖，在與上述案例類似的情況下作區域性雨量預報。此外，可再深入探討本港地形在一些暴雨案例中對雨勢的影響。

鳴謝

作者感謝李位信先生與黃偉健先生對本文提出的寶貴意見。

參考文獻

- [1] Li, P.W., W.K. Wong, K.Y. Chan, and E.S.T. Lai, 2000: SWIRLS – An Evolving Nowcasting System, HKO Technical Notes 100.
- [2] Chu, C.-M., and Y.-L. Lin, 2000: Effects of orography on the generation and propagation of mesoscale convective systems in a two-dimensional conditionally unstable flow. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 3817-3837.
- [3] Chen, S.-H. and Y.-L. Lin, 2005: Effects of moist Froude number and CAPE on a conditionally unstable flow over a mesoscale mountain ridge. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 331-350.
- [4] Chen, S.-H., Y.-L. Lin, and Z. Zhao, 2008: Effects of unsaturated moist Froude number and orographic aspect ratio on a conditionally unstable flow over a mesoscale Mountain, *J. Meteor. Soc. Japan*, **86**, 353-367.
- [5] 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，2010 年 1 月 20-22 日。

表 1 低層西南風案例

案例	0-900 米 Froude number	0-900 米 平均風向 (度)	0-900 米 平均風速 (米/秒)	LFC (百帕)	CAPE (J/Kg)	K 指數
30/4/2012	0.998	222	6.95	925	2329	34
1/5/2012	1.153	222	8.84	939	2939	34
25/6/2013	1.494	232	7.41	944	2707	35
22/5/2014	1.749	204	9.29	925	2323	35
17/6/2014	0.734	225	6.49	925	3397	41

表 2 低層東至東南風案例

案例	0-700 米 Froude number	0-700 米 平均風 向(度)	0-700 米 平均風 速(米/ 秒)	0-1500 米 平均風 向(度)	LFC (百帕)	CAPE (J/Kg)	K 指數
22/4/2013	1.335	78	10.37	130	640	0	34
23/4/2013	0.745	112	10.29	161	--*	0	37
29/4/2013	0.733	113	7.21	124	795	157	32
23/4/2014	0.948	98	8.31	129	1000	0	35
24/4/2014	0.769	93	8.58	137	--*	0	25

*低層為逆溫層

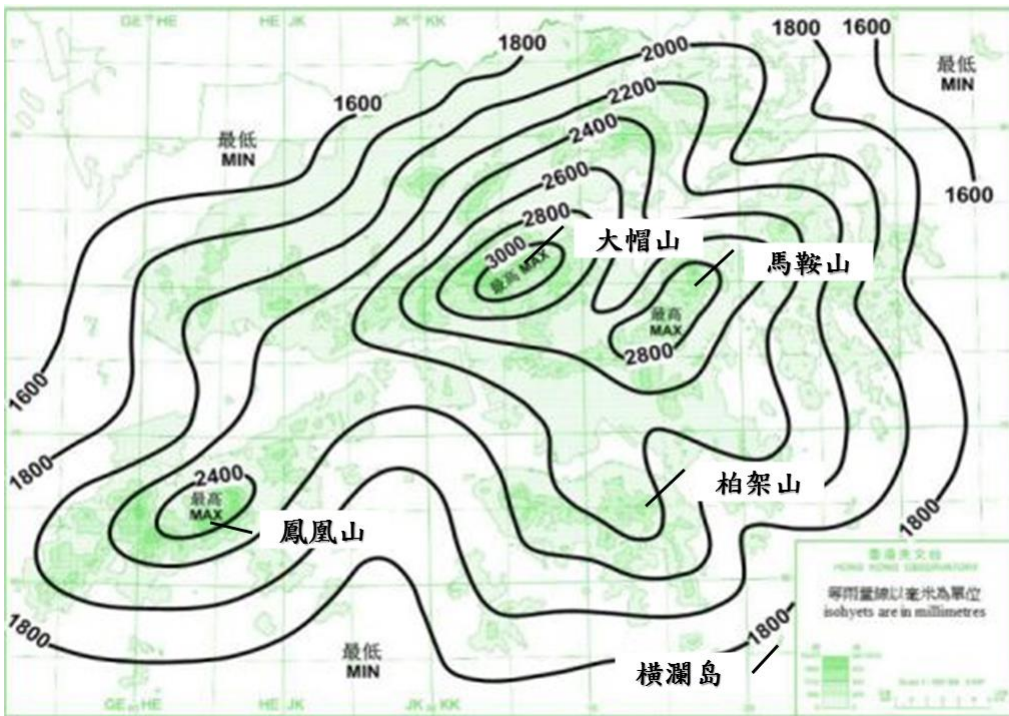


圖 1 香港的地形及平均年雨量分佈圖(1981-2010)。

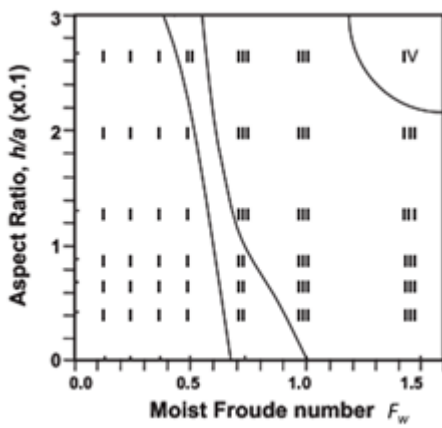
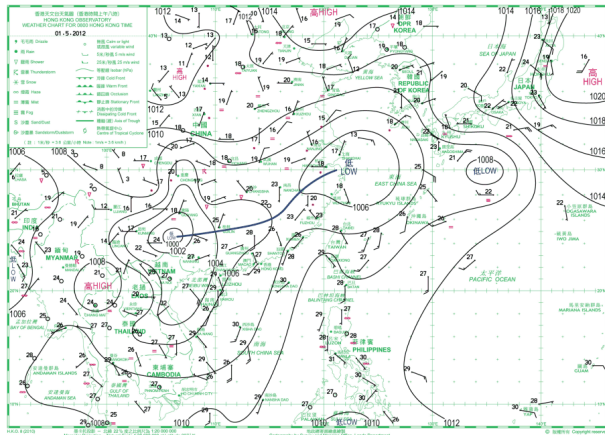
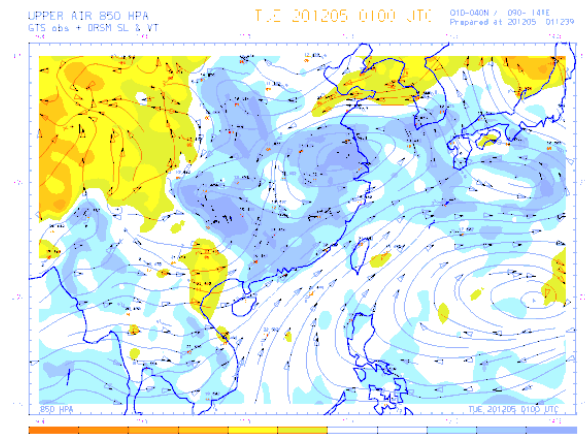


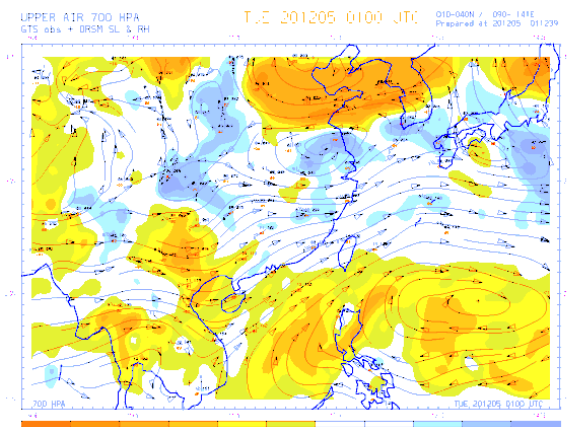
圖 2 流型圖顯示不同降水形態跟山的高度與寬度比例(h/a) 及濕弗勞德數 F_w 的關係。



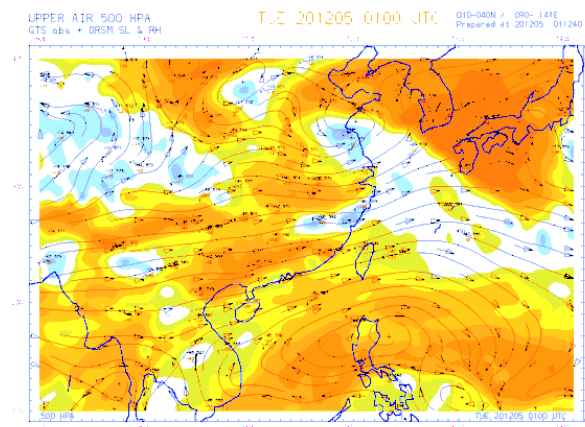
(a)



(b)

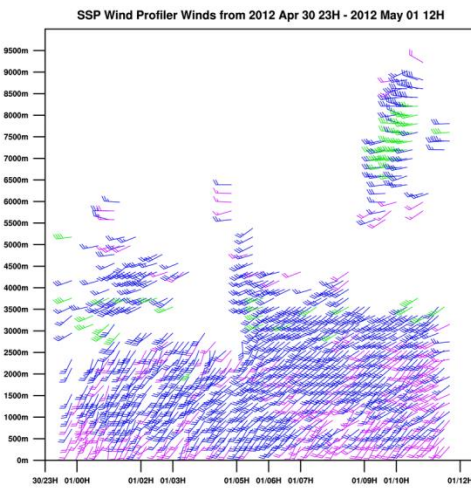


(c)

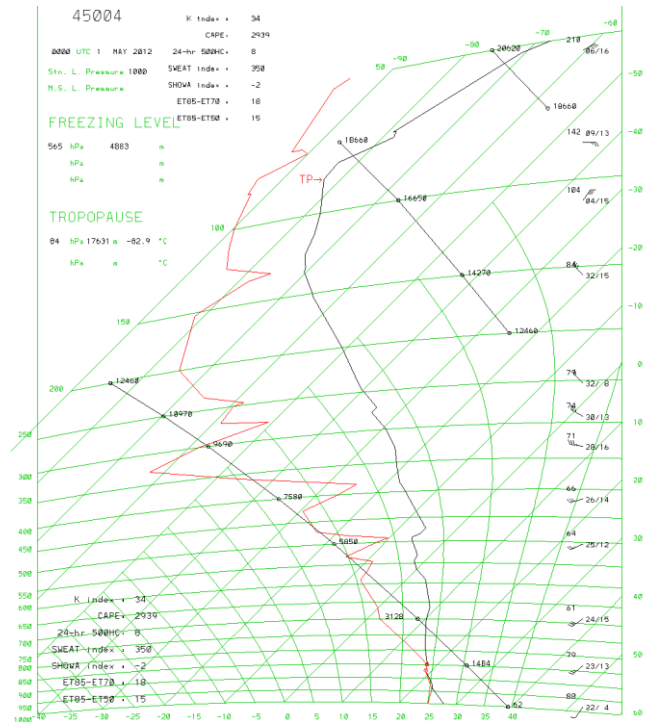


(d)

圖 3 2012 年 5 月 1 日 00 UTC (a)地面天氣圖;(b)850 百帕、(c)700 百帕 和 (d)500 百帕的流場分析。



(a)



(b)

圖 4 2012 年 5 月 1 日 a)深水埗風廓線儀記錄 b) 早上 8 時的香港探空及大氣不穩定指數。

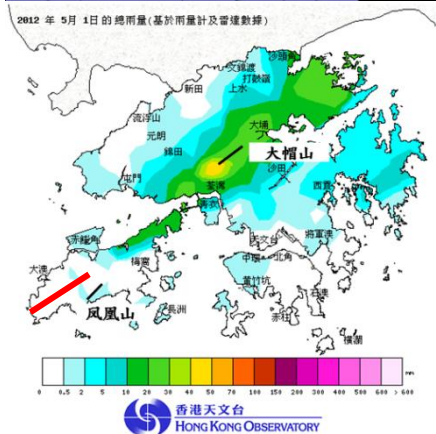
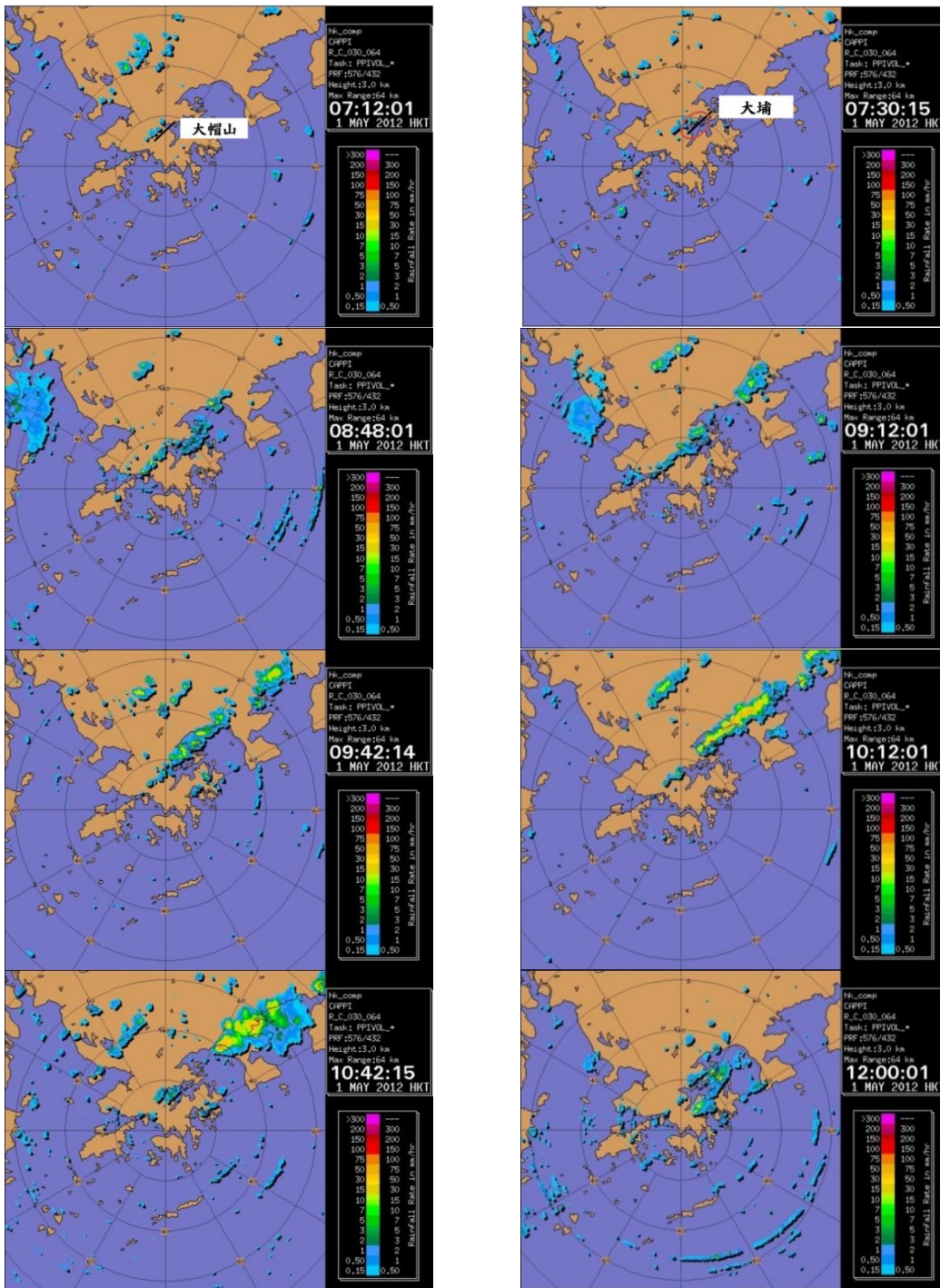


圖 5 2012 年 5 月 1 日上午七時許至正午十二時雷達圖像顯示有雨帶持續於大嶼山東北部、大帽山至新界東北部一帶發展。下圖為當日的總雨量圖(紅線為大嶼山的半寬度(a)約為 8000 米)。

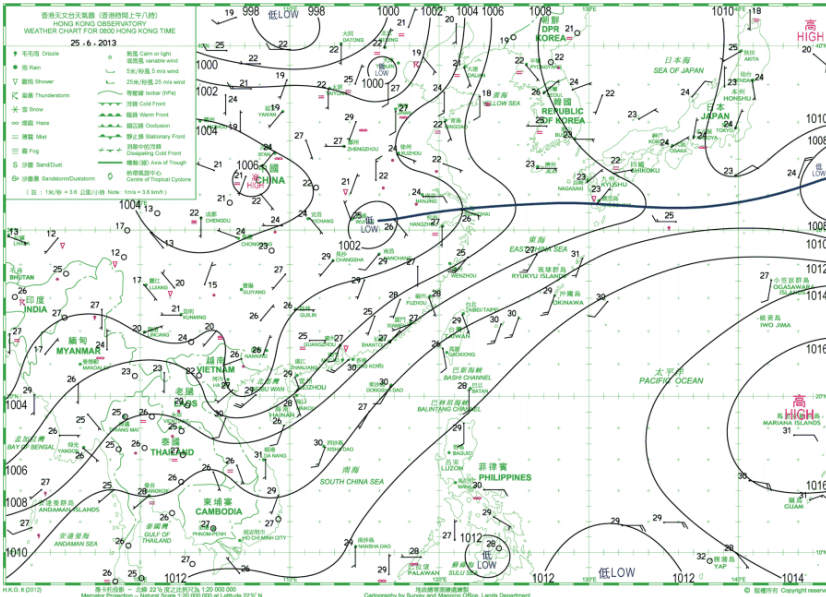


圖 6 2013 年 6 月 25 日 00UTC 地面天氣圖。

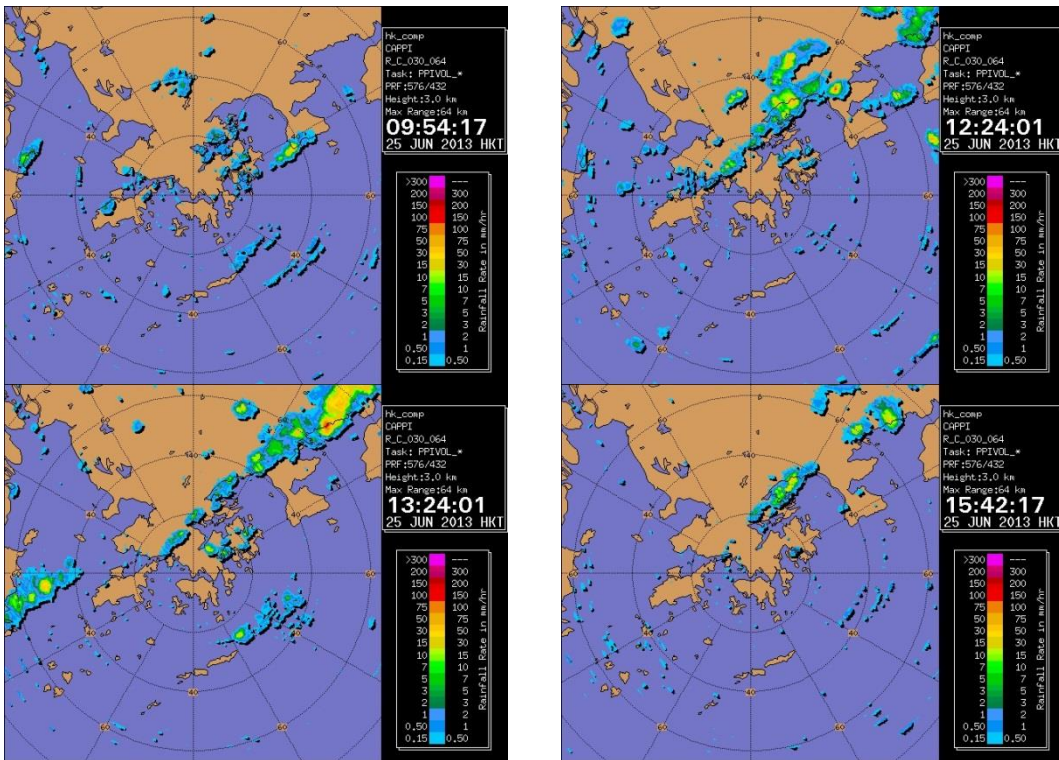
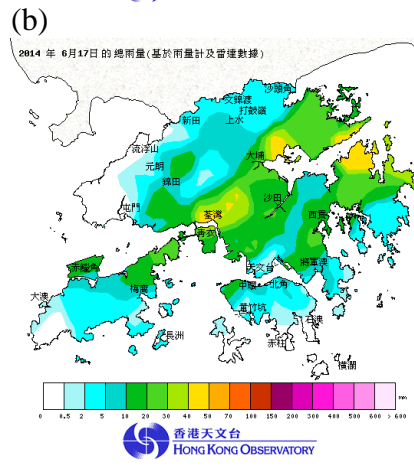
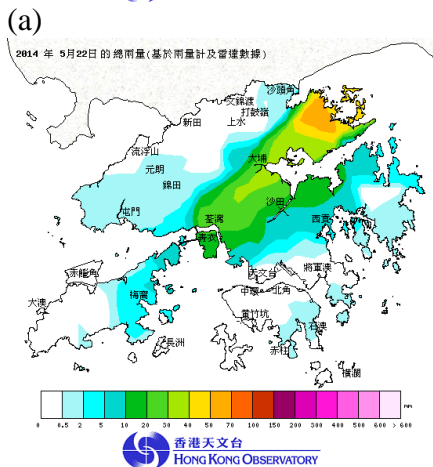
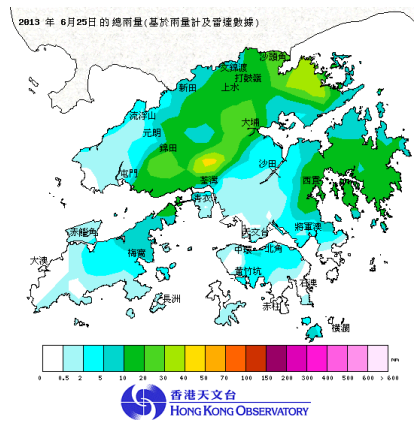
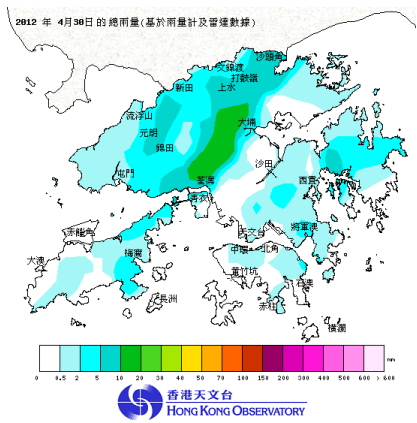
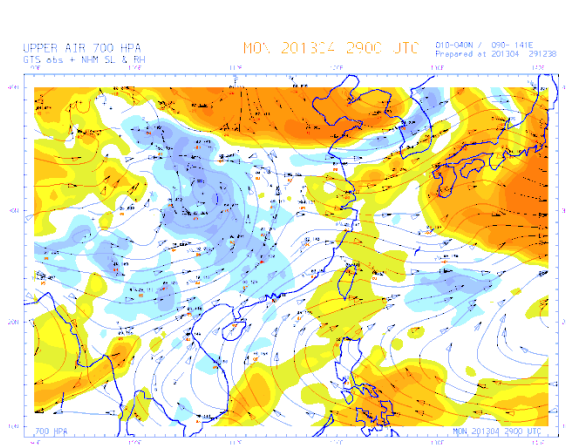
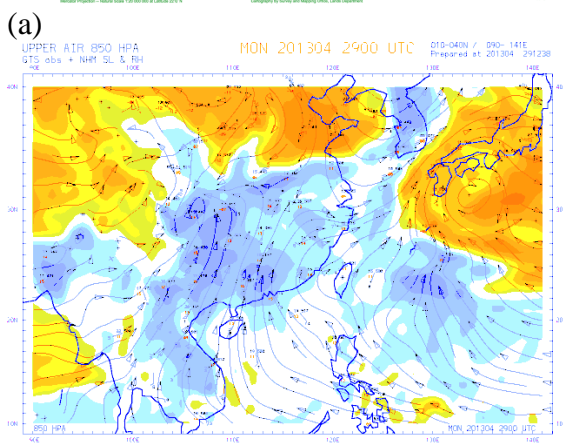
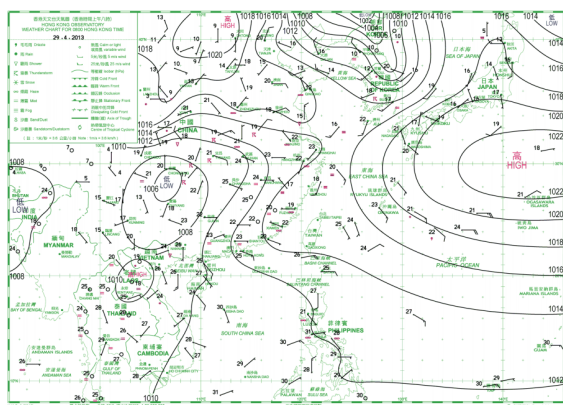


圖 7 2013 年 6 月 25 日上午九時許至下午三時許雷達圖像。

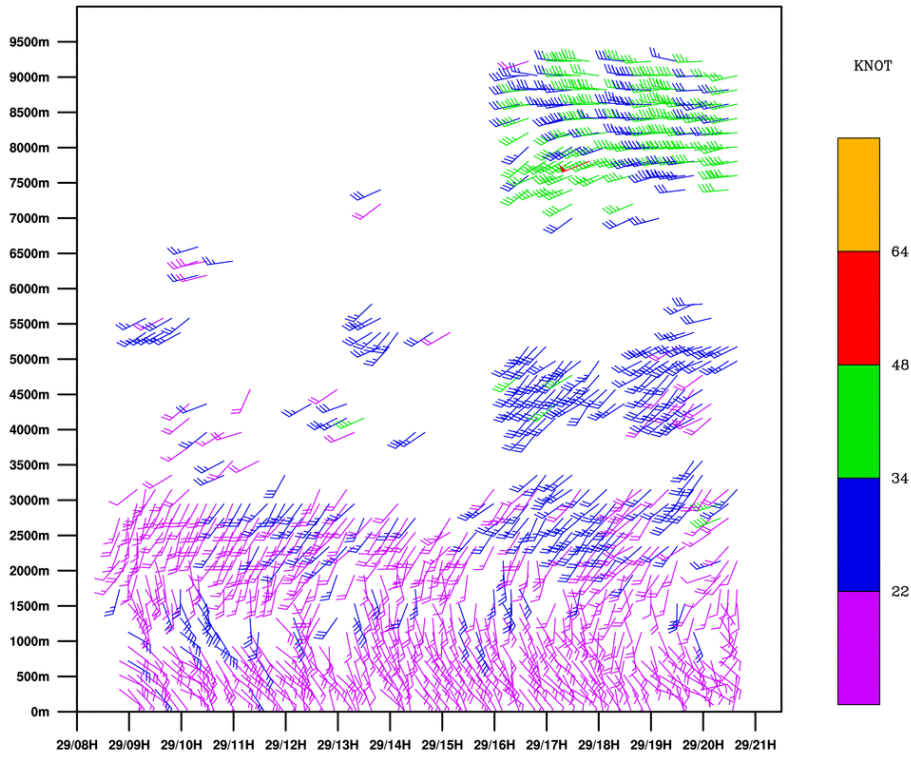


(a) (b) (c) (d)
圖 8 2012年4月30日(a)、2013年6月25日(b)、2014年5月22日(c)、2014年6月17日(d)的總雨量圖。

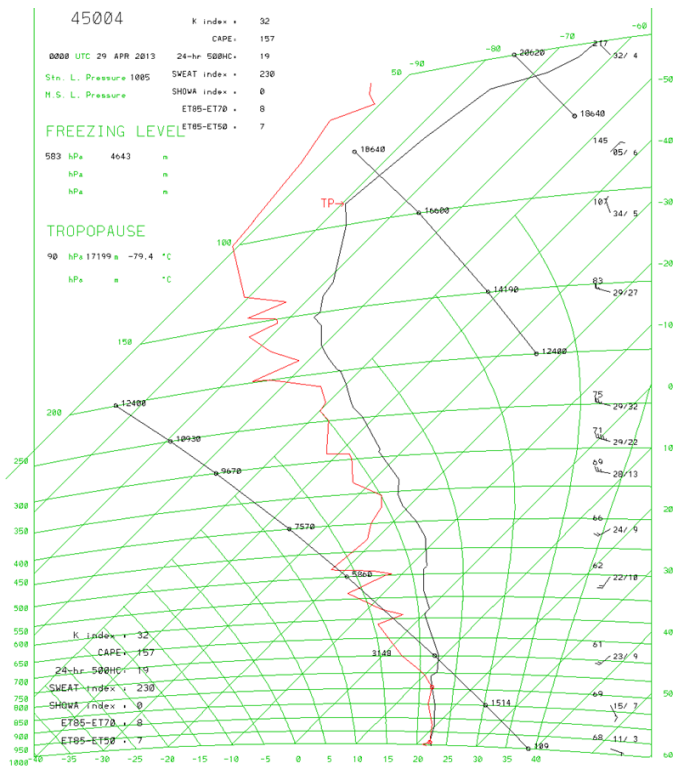


(b) (c)
圖 9 2013年4月29日00 UTC(a)地面天氣圖; (b)850百帕和(c)700百帕流場分析。

SSP Wind Profiler Winds from 2013 Apr 29 08H - 2013 Apr 29 21H

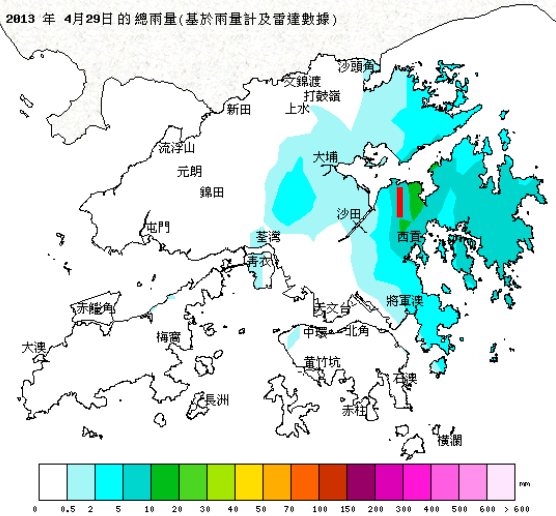
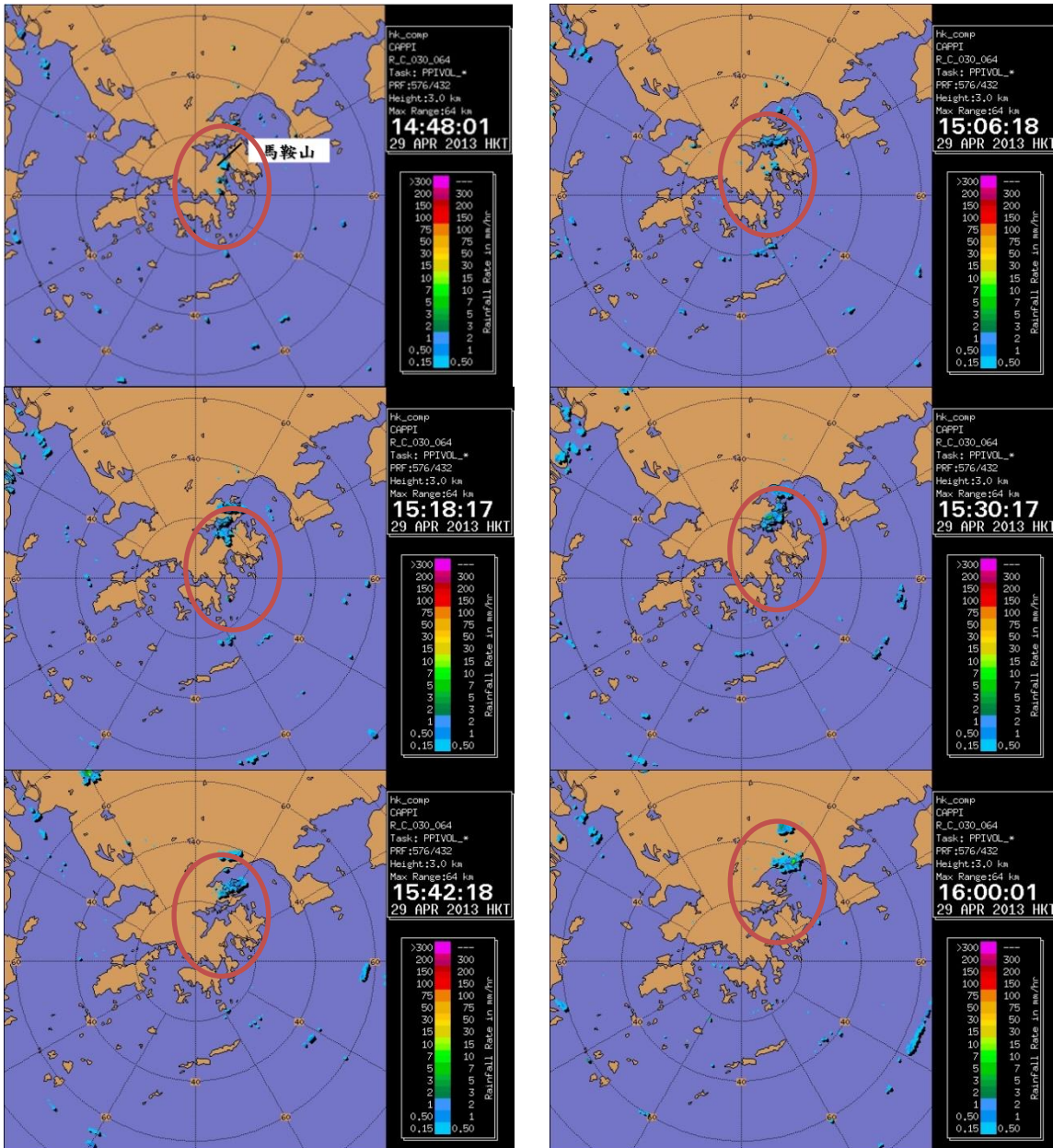


(a)



(b)

圖 10 2013 年 4 月 29 日深水埗風廓線儀記錄及早上 8 時的香港探空及大氣不穩定指數。



香港天文台
HONG KONG OBSERVATORY

圖 11 2013 年 4 月 29 日下午二時許至下午四時雷達圖像顯示有雨帶持續於馬鞍山及其下游發展。下圖為當日總雨量圖(紅線為馬鞍山的半寬度(a)約為 3000 米)。

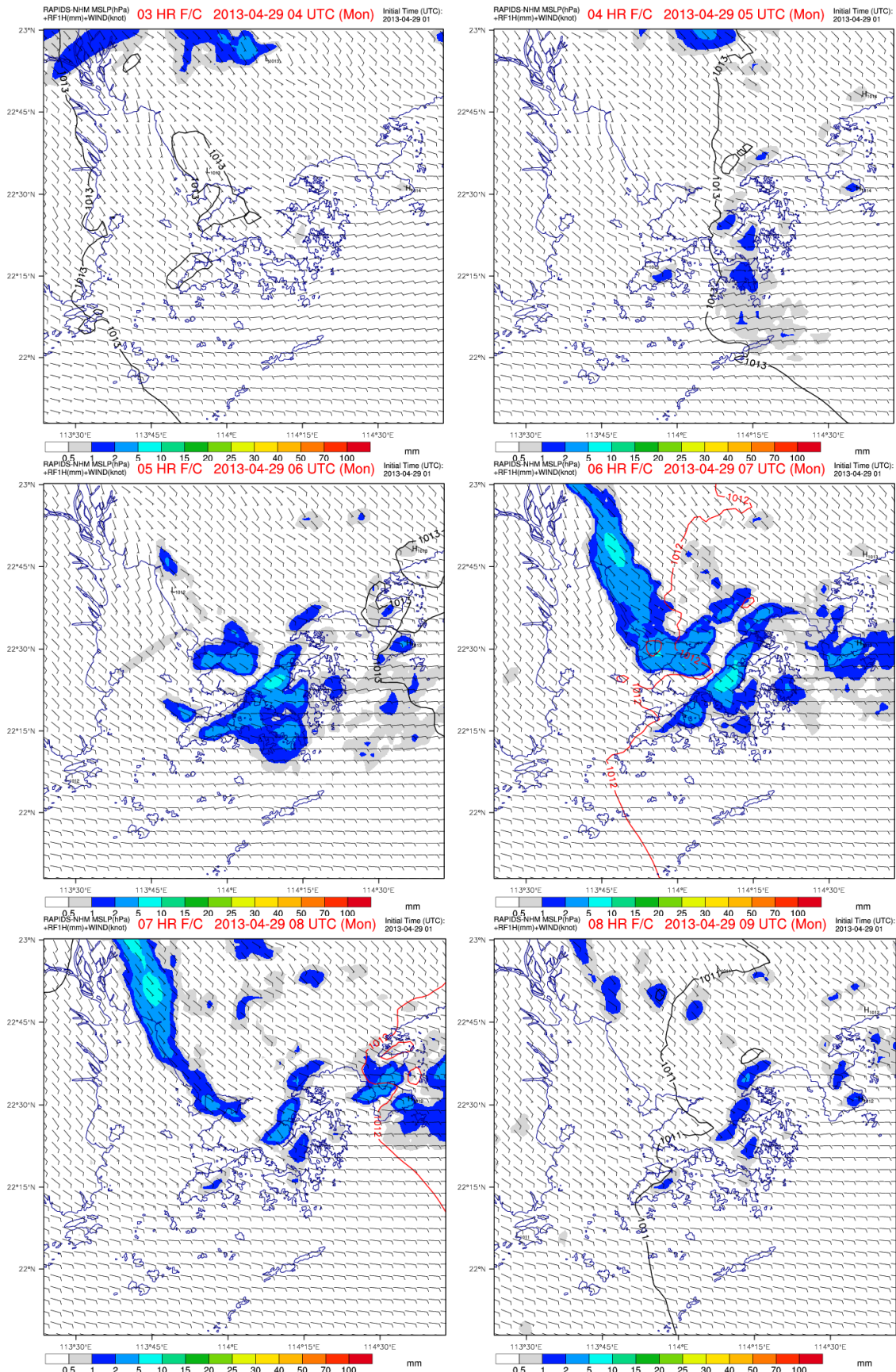


圖 12 RAPIDS-NHM 對 2013 年 4 月 29 日正午十二時至下午五時的每小時降雨，地面風和海平面氣壓的預報。

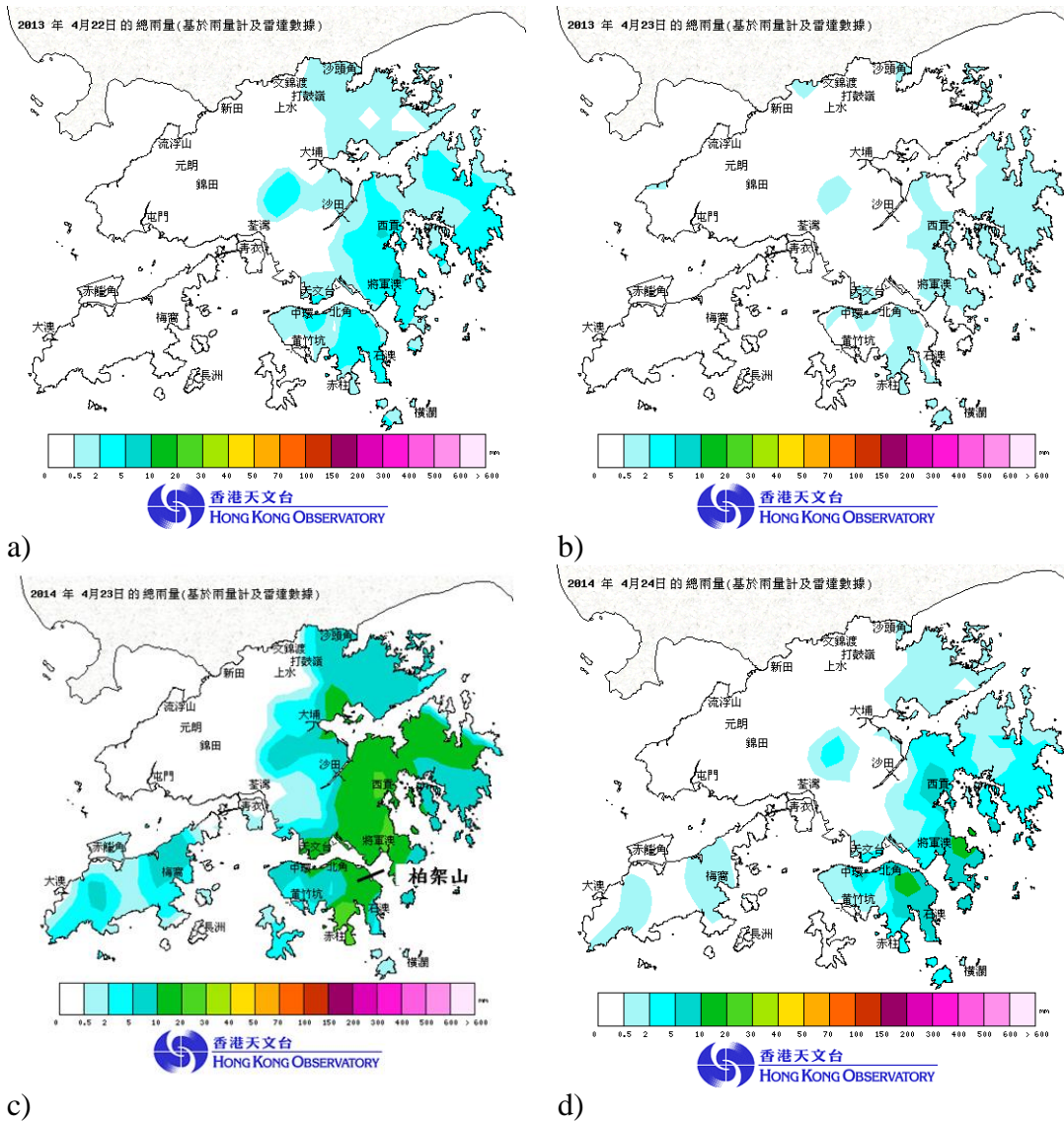


圖 13 2013年4月22日(a)、2013年4月23日(b)、2014年4月23日(c)、2014年4月24日(d)的總雨量圖。

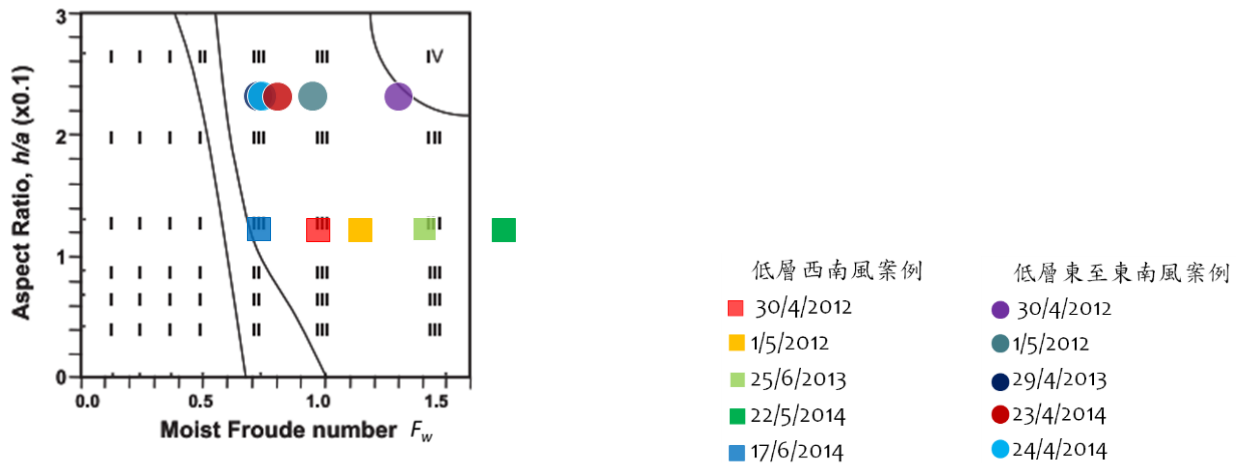


圖 14 香港地形降水案例於 F_w 及 h/a 的降水類型流型圖。