

利用探空及自動氣象站資料預報與雷暴相關的強陣風

李淑明
香港天文台

摘要

與雷暴相關的下擊暴流經常引致地面出現高速的陣風。強烈的陣風可帶來不同程度的破壞，如大樹倒塌、貨櫃翻側等。

本文選用2001至2005年出現在香港國際機場上的雷暴個案，利用探空及自動氣象站資料來設計一個預報地面最高陣風的程式，並採用2006年的雷暴個案來測試預報程式的效果。本文同時探討如何應用最高陣風預報程式在業務陣風預測上，以助加強雷暴預警的服務。

Forecast of Strong Gusts associated with Thunderstorms based on Data from Radiosonde Ascents and Automatic Weather Stations

Olivia S.M. Lee
Hong Kong Observatory

Abstract

Downbursts associated with thunderstorms usually trigger high gusts on the ground. High gusts are known to cause various degrees of damages, such as falling of big trees and toppling of containers.

In this paper thunderstorm events occurred at the Hong Kong International Airport between 2001 and 2005 are selected. Data from radiosonde ascents and automatic weather stations are utilized to derive a formula to forecast the strength of maximum gusts on ground. The result of testing this formula in thunderstorm cases in 2006 is presented. The paper will also discuss the application of this formula in operational forecasting of wind gusts with a view to enhancing the alerting service on thunderstorms.

利用探空及自動氣象站資料預報與雷暴相關的強陣風

李淑明
香港天文台

1. 引言

1.1 雷暴不單帶來雷擊與閃電，與其相關的下擊暴流及颶鋒往往伴隨高速陣風，帶來不同程度的破壞，甚或影響飛行安全，所以機場預報員需要在機場天氣預報 (Terminal Area Forecast, TAF)裡提供與下擊暴流相關的陣風預報，用以提醒飛行員雷暴可能帶來的強陣風。

1.2 在機場天氣預報業務應用方面，機場預報員會利用簡單的氣候資料來估計與雷暴相關的陣風強度，再參考數值模式產品和多普勒雷達的徑向風速資料來對強陣風預報作修正。可是由於數值模式產品解像度有限，對預報高速陣風這類中尺度以下的現象存在一定困難。雷達的資料對臨近預報的幫助較大，但對較長期的TAF(未來24或9小時針對機場範圍的天氣預報)預報指導性較弱。

1.3 為了加強陣風的預報能力及進一步改進航空氣象服務，天文台開始了有關陣風預報的研究。從以往文獻記錄中(文獻[1])，McCann 利用探空資料來估計由下擊暴流引致的最高地面風速，並設計了WINDEX(WI)經驗程式來估計濕或乾的微下擊暴流附近地面的散度風最高風速。我們以WINDEX作藍本，選擇了2001至2005年期間在香港國際機場附近出現的雷暴個案，並利用探空及自動氣象站資料來設計香港適用的最高陣風預報程式。

2. 方法

2.1 WINDEX(WI)

2.1.1 McCann 設計的WINDEX(WI)程式如下：

$$WI = 5 [H_m R_q (L^2 - 30 + q_l - 2 q_m)]^{0.5} \quad \text{程式(1)}$$

當中

WI: WINDEX (kt)

H_m : 融化層離地面高度(km)

L : 由地面至凝固層的平均直減率(K/km)

q_l : 地面一公里以下的平均水汽混合比(g/kg)

q_m : 融化層的水汽混合比 (g/kg)

R_q : $q_l/12$ (g/kg)

2.1.2 McCann的設計是基於以下兩點：(甲) Proctor 從模式研究(文獻[2])推斷微下擊暴流是由融化層附近開始產生；(乙) Srivastava (文獻[3]) 及 Wolfson (文獻[4]) 的研究則顯示下沉動力跟下沉高度及由地面至凝固層的直減率的平方成正比。程式中 R_q 這因子是用來處理空氣乾燥的情況(即 $q_l < 12\text{g/kg}$)，目的是避免高估了WI (文獻[1]，[5]及[6])，因為空氣乾燥時，與下擊暴流相關的雨點未着地已蒸發，所以無論是下沉氣流或地面陣風也相對較弱。

2.2 GUSTEX(GU)

2.2.1 由於雷暴的大小強弱各有不同，它引致的下擊暴流的強度也有異，所以單靠WI 難以準確估計雷暴帶來的地面最高陣風。許多雷暴結構分析結果表明在雷暴中大氣中層的水平動量下傳是十分明顯的。基於這結果，Geerts (文獻[7])根據McCann的WI 程式加入從環境水平動量向下傳遞的信息，提出利用GUSTEX(GU)來估計雷暴最高陣風值。GUSTEX(GU)程式如下：

$$GU = \alpha WI + 0.5 U_{500} \quad \text{程式(2)}$$

當中

GU: GUSTEX (kt)

WI: WINDEX (kt)

α : 0 與 1 之間的常數

U_{500} : 500 百帕層的風速(kt)

2.2.2 WI 主要是從熱力學角度考慮下擊暴流的能量，而GU則補充了動力學的角度，引進水平動量傳遞至垂直動量的考慮。程式(2)中的0.5 是根據水平動量守恆由500百帕的水平動量傳至地面($\rho_{500} / \rho_{1000} \sim 0.5$ ， ρ 為空氣密度)的修訂因子。

2.3 WI及GU因子修訂

2.3.1 為了設計一項適用於香港的雷暴最高陣風預報程式，我們將程式(1)和(2)的其中一些因子修訂，使程式更切合本地情況。

2.3.2 在程式(1)中，為了避免因平均值而遺漏了低層大氣中某層的不穩定度，我們將L改成由地面至凝固層的最大直減率 L_{MAX} 。

2.3.3 程式(2)中以500 百帕層的風速 U_{500} 為因子，來表示水平動量由中層大氣下傳。但香港的一些雷暴個案分析中(文獻[8])顯示，下擊暴流有時在離地面大概3、4 公里左右(約700百帕層)開始下沉，因此我們將 U_{500} 改為 U_{MAX} - 即900至500百帕層之間的最大風速，這樣便可較全面代表水平動量下傳的情況。

2.3.4 程式(2)中0.5這常數是從 $\rho_{500} / \rho_{1000} \sim 0.5$ (ρ 為空氣密度) 得來。由於我們在2.3.3段已將 U_{500} 修訂為 U_{MAX} ，因此0.5這常數也應修訂為 ρ_{MAX} / ρ_{1000} ，當中 ρ_{MAX} 為900至500百帕之間最高風速層的空氣密度，而 ρ_{1000} 則代表接近地面的1000百帕層的空氣密度。因為香港地勢多山，近地面的探空資料常

受地形影響，計算出來的空氣密度並不代表接近地面的實際情況，所以我們將 $\rho_{\text{MAX}}/\rho_{1000}$ 進一步修訂為 $\rho_{\text{MAX}}/\rho_{990}$ ，當中以990百帕層的空氣密度代表接近地面情況，避免受地形影響。

2.3.5 經過以上的因子修訂後，得出新的WI程式(3)及最高陣風(GU)預報程式(4) 如下：

$$\text{WI} = 5 [H_m R_q (L_{\text{MAX}}^2 - 30 + q_l - 2 q_m)]^{0.5} \quad \text{程式(3)}$$

當中

WI: WINDEX (kt)

H_m : 融化層離地面高度(km)

L_{MAX} : 由地面至凝固層的最大直減率(K/km)

q_l : 最低層離地面一公里的平均水汽混合比(g/kg)

q_m : 融化層的水汽混合比 (g/kg)

R_q : $q_l/12$ (g/kg)

而

$$\text{GU} = \alpha_1 \text{WI} + \alpha_2 \rho U_{\text{MAX}} \quad \text{程式(4)}$$

當中

GU: GUSTEX (kt)

WI: WINDEX (kt)

α_1, α_2 : 常數

U_{MAX} : 900 至 500 百帕層之間的最大風速(kt)

$\rho = \rho_{\text{MAX}}/\rho_{990}$

ρ_{MAX} : U_{MAX} 最高風速層的空氣密度

ρ_{990} : 990 百帕層的空氣密度

2.4 編製最高陣風(GU)預報程式

2.4.1 我們選用了2001至2005年間香港國際機場的一些高陣風個案來編製GU程式。個案的選擇條件為：

- a. 機場氣報告錄得雷暴及
- b. 機場及附近的氣象站在雷暴發生前後 1 小時內錄得蒲氏風級表 5 級或以上的陣風。

2.4.2 符合以上條件的個案共有 114 個，我們利用錄得雷暴前的最近一次 00 或 12 UTC 探空資料，來計算程式(3)的 WI 及程式(4)中的 p 和 U_{MAX} 。程式(3)的 H_m 及 U_{MAX} 是直接從探空資料取得。 L_{MAX} 是從探空的溫度 - 高度圖中的斜度計算出來。 q_l ， q_m 及 R_q 是從 Sargent 公式(文獻[9])得出：

$$q = \varepsilon f e / (P - f e) \quad \text{程式(5)}$$

當中

$$\begin{aligned} \ln(e) = & 1.809567918 + 0.07266296315 T_d - 0.2996403370 \cdot 10^{-3} T_d^2 \\ & + 0.1160464233 \cdot 10^{-5} T_d^3 - 0.4606513971 \cdot 10^{-8} T_d^4 \\ & + 0.23159066 \cdot 10^{-10} T_d^5 - 0.1103513356 \cdot 10^{-12} T_d^6 \end{aligned}$$

$$\varepsilon = 0.62198$$

$$f = 1 + 4.5 \cdot 10^{-6} p + 5.6 \cdot 10^{-7} (T - 12.5 + 7500/p)^2$$

e : 水汽壓(hPa)

T_d : 露點(°C)

T : 溫度(°C)

q : 水汽混合比(g/kg)

P : 氣壓(hPa)

2.4.3 程式(4)的某一層 H 的空氣密度 ρ_H 由以下公式得出：

$$\rho_H = (1/T) (P/R_d + e/R_v) \quad \text{程式(6)}$$

當中

ρ_H : H (hPa) 層的空氣密度(kg/m³)

T : H (hPa) 層的溫度(K)

P : H (hPa) 層的氣壓(Pa)

e: H (hPa) 層的水汽壓(Pa)

R_d : 乾空氣氣體常數($287.05 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

R_v : 水氣氣體常數($461.495 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

2.4.4 將實況的最高陣風 G_a 及從探空資料計算出來的 WI, ρ 和 U_{MAX} 值放進程式(4)中，然後作線性迴歸，即可得出常數 α_1 及 α_2 ：

$$\begin{aligned} G_a &= \alpha_1 WI + \alpha_2 \rho U_{MAX} \\ \text{或} \quad G_a/WI &= \alpha_2 (\rho U_{MAX}/WI) + \alpha_1 \end{aligned} \quad \text{程式(7)}$$

上式中 G_a 是在香港國際機場錄得雷暴的前後 1 小時內，機場及附近 10 個地面氣象站及 5 個浮標氣象站(位置見圖一紅點及藍點標記)錄得的最高陣風(kt)。地面氣象站和浮標氣象站的陣風風速採樣為 3 秒平均風速。

2.4.5 我們利用 114 個雷暴個案的數據，繪製圖二的 $G_a/WI - \rho U_{MAX}/WI$ 散佈圖。從圖二中剔除異常值(即圖二或圖三紅圈內的 5 點)，然後再以剩餘的 109 個藍點作線性迴歸，得出圖三的紅色趨勢線：

$$\begin{aligned} G_a/WI &= 0.93 (\rho U_{MAX}/WI) + 0.12 \\ R^2 &= 0.47 \end{aligned}$$

趨勢線的斜度 α_2 為 0.93，而 Y 軸截距 α_1 則為 0.12。圖三同時顯示兩條與趨勢線平行而 Y 軸截距分別為 α_{MIN} 和 α_{MAX} 的黑色線，兩條黑色線之間已包含所有用作迴歸的數據。 α_{MIN} , α_{MAX} 分別為：

$$\begin{aligned} \alpha_{MIN} &= -0.05 \\ \alpha_{MAX} &= 0.30 \end{aligned}$$

2.4.6 由此編製成的最高陣風 GU 預報程式為：

$$GU = 0.12 WI + 0.93 \rho U_{MAX} \quad \text{程式(8)}$$

我們利用 α_{MIN} 和 α_{MAX} 來估計 GU 預報的上下限 GU_{MAX} 和 GU_{MIN} ：

$$GU_{MIN} = -0.05 WI + 0.93 \rho U_{MAX}$$

$$GU_{MAX} = 0.30 WI + 0.93 \rho U_{MAX}$$

3. 驗證

3.1 2006年內共有38個雷暴個案符合2.4.1段的條件，我們以此來驗證最高陣風(GU)預報程式(8)。同時，我們也將GU程式的表現跟最接近雷暴發生的機場天氣預報 (TAF) 比較。

3.2 為了方便驗證，我們將陣風以蒲氏風級表分為和緩(4至5級；11至21 kt)、強風(6至7級；22至33 kt)、烈風(8至9級；34至47 kt)及暴風(10至11級；48至63 kt)四類。GU程式及TAF的驗證結果分別列於表一(a)和一(b)，而探測概率(Probability of Detection, POD)及虛報率(False Alarm Rate, FAR)則分別列於表二(a)和二(b)。

3.3 從表一(a)及一(b)得知，在38個驗證個案裡，GU程式跟TAF同樣準確估計了其中25個個案的陣風風力。GU程式分別高估及低估了11及2個，而TAF則高估了4個，低估了9個。這顯示GU程式較傾向高估數值，而TAF則傾向低估雷暴帶來的陣風級數。

3.4 上述38個個案中，有36個個案的陣風在 GU_{MIN} 和 GU_{MAX} 之間， GU_{MIN} 和 GU_{MAX} 平均相差43 kt (詳細數據省略)。 GU_{MIN} 和 GU_{MAX} 可視為陣風預報的上下限。

3.5 從表二(a)看到GU程式預測強風程度陣風的表現較好，POD達60.7%，而且沒有虛報。另一方面，從表二(b) 得知，雖然TAF強風程度陣風POD更高—達85.7%，但FAR也高(25.0%)，因為機場預報員在38個雷暴個案裡，大部分(32個，可參考表一(b))也作出強風程度陣風預報。

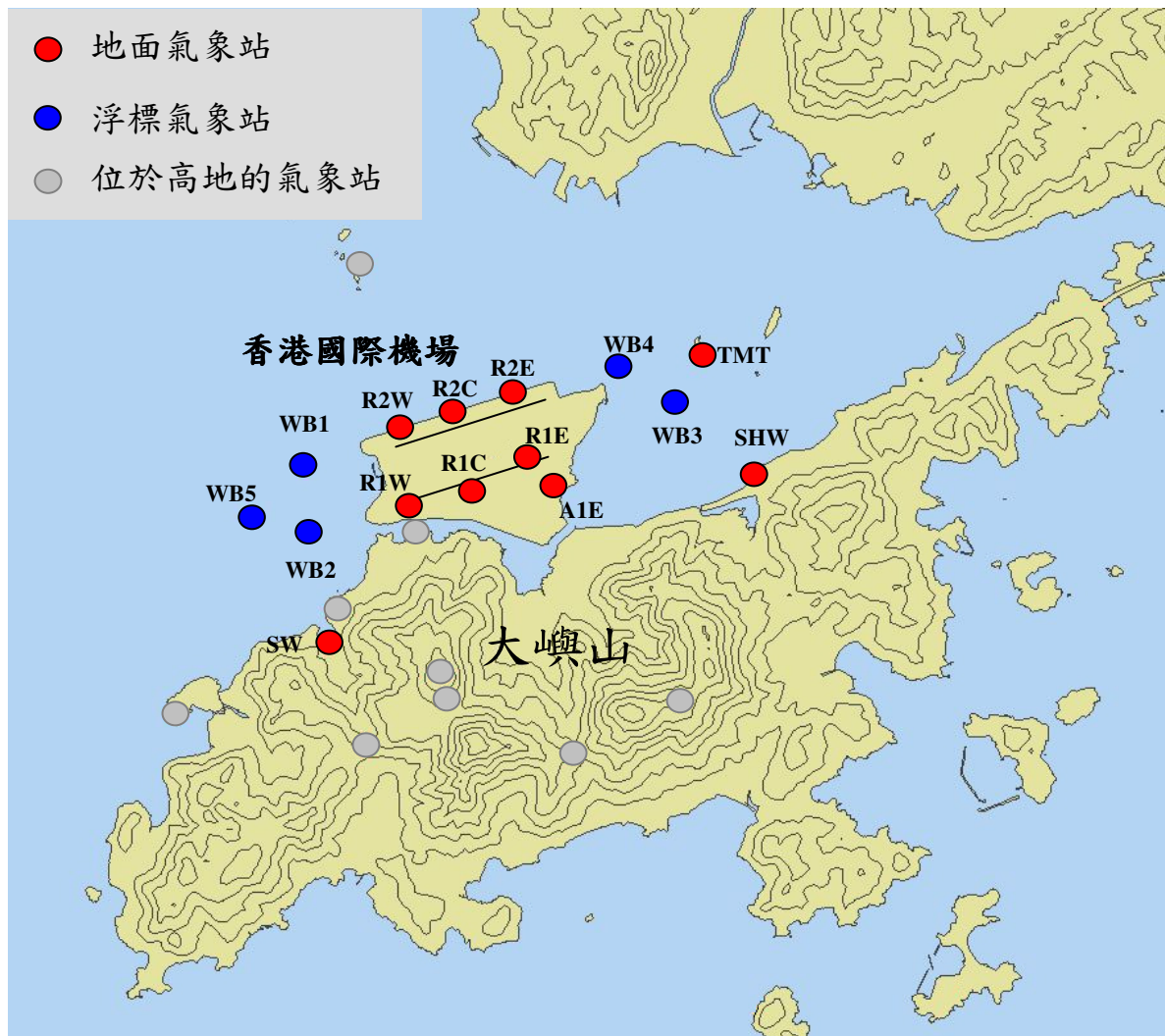
3.6 雖然GU程式對烈風(8至9級)和暴風(10至11級)這兩類極端陣風的FAR分別高達53.8%和66.7%，但POD表現也不錯—分別為 75.0% 和100%。而機場預報員在38個雷暴個案裡並沒有預報過10至11級的陣風，而8至9級陣風預報的表現也未如GU程式預報的好(POD較低，只有12.5%，而FAR則較高，達83.3%)。因此GU程式對預報8級以上的極端陣風也有一定指導作用。

4. 總結

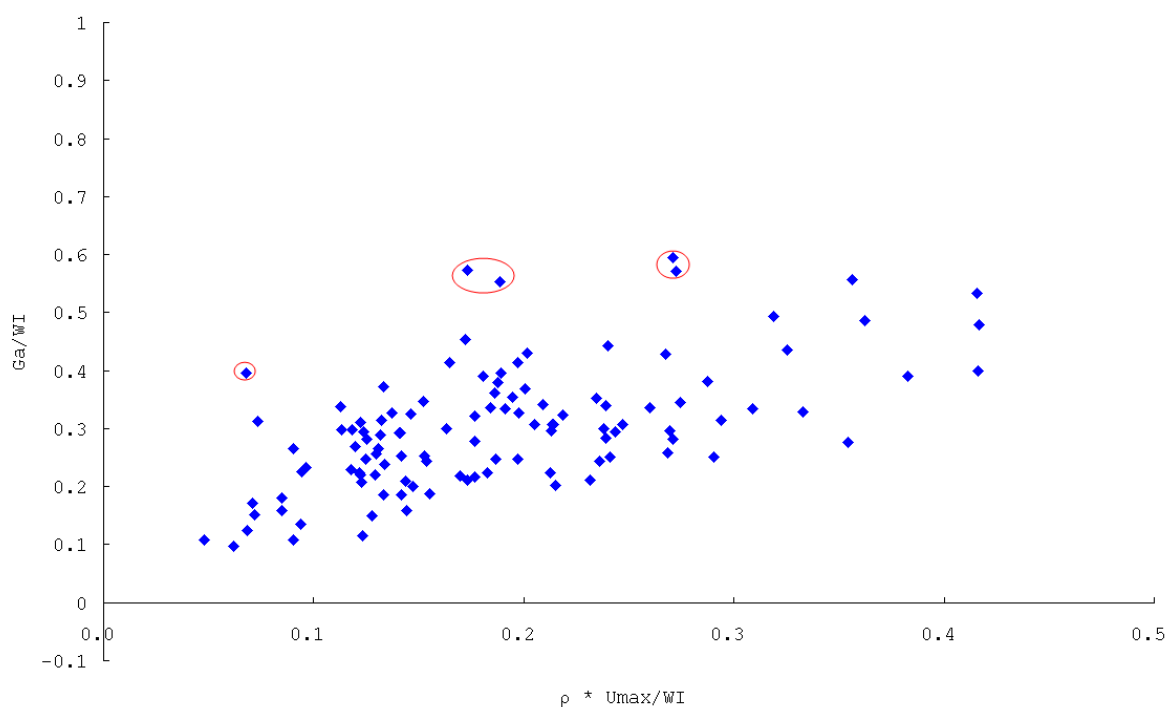
本文編制了一個適用於香港的最高陣風(GU)預報程式。從以上分析顯示，該最高陣風(GU)預報程式對於估計雷暴為香港國際機場帶來的最高陣風有一定的效用，對預測達 10 級以上的高速陣風尤為有效，可作為機場預報員業務預測陣風時的一項參考。

參考文獻

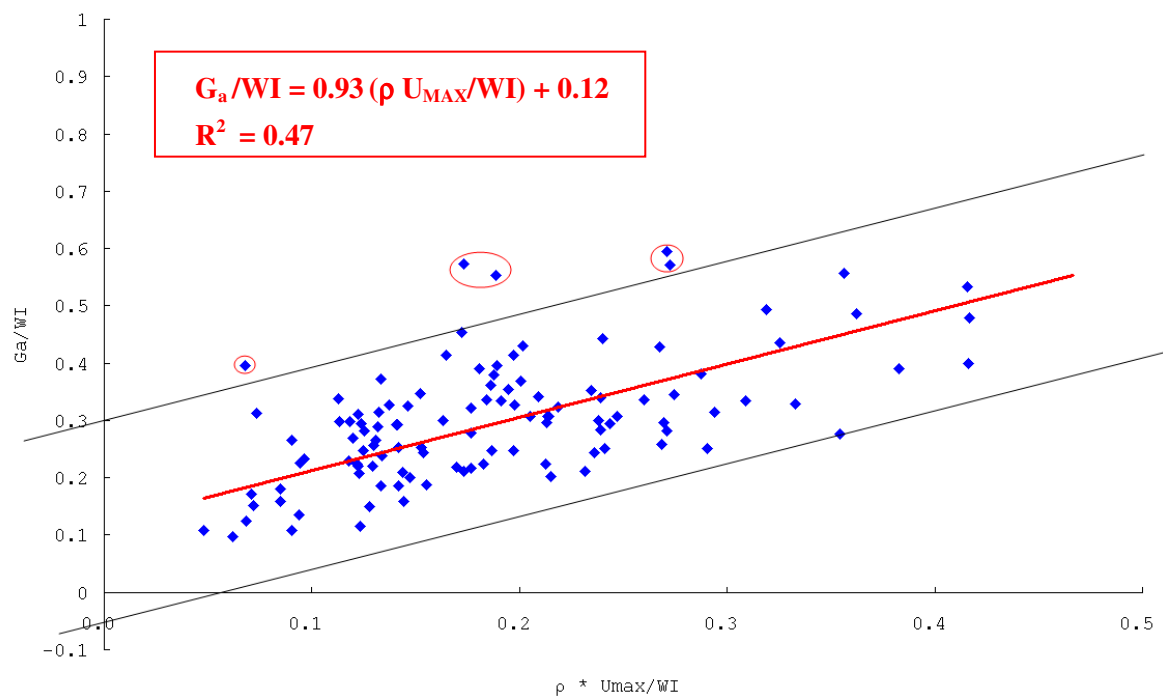
- [1] McCann, D. W., 1994 : WINDEX – A new index for forecasting microburst Potential. *Wea. Forecasting*, **9**, pp.532-541.
- [2] Proctor, F.H., 1989: Numerical simulations of an isolated microburst, Part II: Sensitivity experiments. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 2143-2165.
- [3] Srivastava, R.C., 1985: A simple model of evaporatively driven downdraft: Application to a microburst downdraft. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 11 1004-1023.
- [4] Wolfson, M.M., 1990 : Understanding and predicting microbursts. *16th conference on severe local storms*, American Meteorological Society, 340-351.
- [5] Waikimoto, R.M., 1985: Forecasting dry microburst activity over the High Plains. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 1131-1143.
- [6] Atkins, N., and R.M. Wakimoto, 1991: Wet microburst activity over the southeastern United States: Implications for forecasting. *Wea. Forecasting*, **6**, 470-482.
- [7] Geerts, B., 2001: Estimating Downburst-Related Maximum Surface Wind Speeds by Means of Proximity Soundings in New South Wales. *Wea. Forecasting*, **16**, 261-269.
- [8] 林靜芝、林鄺泗蓮, 2006: 與雷暴、熱帶氣旋及季候風相關的強陣風分析, 第二十屆粵港澳氣象科技研討會, 中國, 澳門, 2006 年 1 月 18-20 日
- [9] Sargent, G.P., 1980 : Computation of vapour pressure, dew-point and Relative humidity from dry and wet-bulb temperatures. *Met. Mag.*, **109**, 238.



圖一 位於香港國際機場附近，用以計算 GU 程式的地面氣象站及浮標氣象站位置圖



圖二 利用 2001 至 2005 年間香港國際機場錄得的 114 個雷暴個案的實況數據繪製而成的 $G_a/WI - \rho U_{MAX}/WI$ 散佈圖，圖中紅圈內的點為異常值



圖三 從圖二剔除異常值(紅圈)，然後作線性迴歸，得紅色趨勢線及紅格內的公式和 R 平方值

表一(a) 最高陣風(GU)預報程式驗證結果，表中風力為蒲氏風級

預報最高陣風 風力 實況 最高陣風風力	4 至 5 級 (11 至 21kt)	6 至 7 級 (22 至 33kt)	8 至 9 級 (34 至 47kt)	10 至 11 級 (48 至 63kt)
4 至 5 級 (11 至 21 kt)				
6 至 7 級 (22 至 33 kt)	1	17	7	3
8 至 9 級 (34 至 47 kt)	1		6	1
10 至 11 級 (48 至 63 kt)				2

表一(b) 機場天氣預報 (TAF) 驗證結果，表中風力為蒲氏風級

預報最高陣風 風力 實況 最高陣風風力	4 至 5 級 (11 至 21kt)	6 至 7 級 (22 至 33kt)	8 至 9 級 (34 至 47kt)	10 至 11 級 (48 至 63kt)
4 至 5 級 (11 至 21 kt)				
6 至 7 級 (22 至 33 kt)		24	4	
8 至 9 級 (34 至 47 kt)		7	1	
10 至 11 級 (48 至 63 kt)		1	1	

表二(a) 最高陣風(GU)預報程式的探測機率(Probability of Detection, POD)及虛報率(False Alarm Rate, FAR)，表中風力為蒲氏風級

預報最高陣風風力	探測概率 POD(%)	虛報率 FAR(%)
4 至 5 級 (11 至 21 kt)	不適用	100.0
6 至 7 級 (22 至 33 kt)	60.7	0.0
8 至 9 級 (34 至 47 kt)	75.0	53.8
10 至 11 級 (48 至 63 kt)	100.00	66.7

表二(b) 機場天氣預報 (TAF)的探測機率(Probability of Detection, POD)及虛報率(False Alarm Rate, FAR)，表中風力為蒲氏風級

預報最高陣風風力	探測概率 POD(%)	虛報率 FAR(%)
4 至 5 級 (11 至 21 kt)	不適用	不適用
6 至 7 級 (22 至 33 kt)	85.7	25.0
8 至 9 級 (34 至 47 kt)	12.50	83.3
10 至 11 級 (48 至 63 kt)	0.00	0.00