

香港能見度與大氣懸浮粒子濃度關係初探

梁延剛 胡文志 楊敬基

摘要

利用 2005 年赤鱗角能見度及東涌懸浮粒子 (PM_{2.5}) 濃度的每小時數據,發現 PM_{2.5} 濃度與能見度 (撇除雨霧及相對濕度 $\geq 95\%$ 的個案) 呈倒數關係,相關係數約為 0.8。此外,出現低能見度 (能見度低於 8 公里,而雨霧及相對濕度 $\geq 95\%$ 的個案不計) 的每月總時數與月平均 PM_{2.5} 濃度都呈現相類似的季節趨勢,即冬季較高,夏季較低。利用 HYSPLIT 作反軌跡圖分析顯示這現象跟影響香港的空氣來源有關。來自內陸的軌跡中,出現低能見度的日平均時數是 10.9 小時,日平均 PM_{2.5} 的濃度則是 62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,分別高於來自海洋的 1.8 小時和 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。本文亦分析了一個有熱帶氣旋接近本港的個案,論證氣象條件對能見度及 PM_{2.5} 濃度的重要性。

A preliminary study on the relationship between visibility and atmospheric suspended particulate concentration in Hong Kong

Y.K. Leung, M.C. Wu and K.K. Yeung

Abstract

By making use of the 2005 hourly data of visibility at Chek Lap Kok and suspended particulate (PM_{2.5}) at Tung Chung, PM_{2.5} concentration and visibility (excluding cases with mist, fog, rain or relative humidity $\geq 95\%$) are found to have a reciprocal relationship with correlation coefficient about 0.8. Besides, similar seasonal trend are exhibited in both the number of hours of reduced visibility (visibility below 8 km and excluding cases with mist, fog, rain or relative humidity $\geq 95\%$) and PM_{2.5} concentration, i.e. with higher value attained in winter and lower value in summer. Back trajectory analysis using HYSPLIT indicates that this phenomenon is related to the source of air mass affecting Hong Kong. For continental trajectories, the average daily occurrence of reduced visibility was 10.9 hour and the daily mean PM_{2.5} concentration was 62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, which are higher than the corresponding 1.8 hours and 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for maritime trajectories. A case study on an event with a tropical cyclone approaching Hong Kong is included in this paper to demonstrate the significance of meteorological conditions in determining the visibility and PM_{2.5} concentration.

香港能見度與大氣懸浮粒子濃度關係初探

梁延剛 胡文志 楊敬基

1. 引言

隨着珠江三角洲這個「世界工廠」近年的迅速發展，香港能見度轉差的趨勢（文獻 [1, 2, 3, 4]）漸漸引起公眾關注。除了霧及降雨等帶水點的天氣現象外，能見度的下降多是由於大氣中的懸浮粒子吸收和散射可見光引起。懸浮粒子主要是由人類活動例如工程、交通、火力發電、燃燒植物等產生（文獻 [5, 6]）。文獻 [7] 比對氣象及懸浮粒子數據，顯示香港市區出現的低能見度主要是與空氣中由城市活動所產生的懸浮粒子，例如氮化合物（ NH_4^+ ）、硫酸鹽（ SO_4^{2-} ）及硝酸鹽（ NO_3^- ）等有關。懸浮在大氣中的固體或液體粒子的直徑一般介乎 10^{-3} 至 $10^2 \mu\text{m}$ （人髮直徑約為 $100 \mu\text{m}$ ），其質量僅佔整個大氣質量的十億份之一（文獻 [8]），其中又以直徑 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的懸浮粒子（PM2.5）影響人體的健康最大（文獻 [9]）。

以往的研究顯示很多地方例如中國的北京（文獻 [10]）、美國的洛杉磯（文獻 [11]）和丹佛（文獻 [12]）等的能見度與懸浮粒子濃度都有很好的關係。本研究利用 2005 年由香港境內赤鱗角機場觀測所得的能見度數據及鄰近赤鱗角的東涌空氣監測站錄得的 PM2.5 數據，探討兩者的關係。本文亦分析了能見度及 PM2.5 濃度的季節變化，以及這些變化跟影響香港的空氣來源之間的關係。

文獻 [3] 指出當有熱帶氣旋出現在台灣附近時，香港能見度下降的機會增加。本文進一步分析了一個 2005 年夏季颱風海棠（0505）途徑台灣及登陸福建省的個案，論證氣象條件對能見度和 PM2.5 濃度的重要性。

2. 數據及方法

香港天文台的赤鱗角機場氣象站自 1997 年起由受過氣象訓練的天文台觀測員每小時進行能見度觀測。2004 年 11 月開始加入自動儀器監測能見度，以補充肉眼的觀測。跟文獻 [1, 2, 3] 一樣，本文的低能見度定義是指能見度低於 8 公里，但因霧、薄霧、降水及高濕度 ($\geq 95\%$) 所引致的情況不算在內。東涌空氣監測站的每小時 PM2.5 濃度數據源自香港環境保護署，有關站址的特徵及量度方法可參考文獻 [13]。

利用消光系數 B_{ext} 與能見度 V 的 Koschmeider 方程（文獻 [14]）：

$$B_{ext} = \frac{k}{V} \quad k \text{ 為常數}$$

及 B_{ext} 與懸浮粒子濃度的正比關係，

$$\text{PM2.5} \propto B_{ext}$$

可知懸浮粒子濃度跟能見度有倒數關係。此外，文獻 [6, 10] 發現北京的懸浮粒子濃度與能見度多呈指數關係。因此，本研究將香港的懸浮粒子濃度與能見度分別作倒數及指數曲線擬合以便比較。

本文採用了非參數化的等級相關（rank correlation）統計方法（文獻 [15]）測試懸浮粒子濃度與能見度的季節變化相關是否達 5% 顯著水平。研究也利用了美國國家海洋及大氣局（NOAA）HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 模式，以美國

國家環境預報中心 (NCEP) 的全球資料同化系統 (GDAS) 數據來計算反軌跡 (backward trajectory)，分析在不同類別的軌跡下出現的低能見度時數及 PM_{2.5} 濃度。GDAS 數據的時間及水平解像度分別是 6 小時和 1 經緯度。HYSPLIT 反軌跡在很多過去的研究 (例如文獻 [16]) 都被採用來了解空氣的來源，有關 HYSPLIT 模式的詳情見文獻 [17]。

本文利用了日本氣象廳 (JMA) 模式 1.25 度的數據分析當颱風海棠途徑台灣及登陸福建省時，華南地區近地面的水平及垂直風場。天文台安裝了一套衛星接收系統，每天接收美國太空總署的地球觀測衛星的成像光譜儀 (MODIS) 圖像，再經處理後製成氣溶膠光學厚度 (AOD) 圖像。這些 AOD 數據對了解大氣的懸浮粒子濃度甚為有用。此外，天文台亦在赤蠟角附近的沙螺灣設有風廓線儀及聲波雷達探空組合 (RASS) 為本文提供了近地面的垂直風場及虛氣溫廓線。文獻 [18] 也曾利用 RASS 探討香港空氣污染的情況。

3. 結果

3.1 能見度與 PM_{2.5} 濃度的關係及季節變化

圖 1 顯示 2005 年 PM_{2.5} 濃度與能見度呈很好的倒數或指數關係，相關係數分別為 0.78 及 0.79，在統計學上達 5% 顯著水平。隨着能見度上升，PM_{2.5} 濃度的上限亦呈指數式下降。一般來說，能見度越低，PM_{2.5} 濃度的離散程度越大 (圖 1)。從表 1 可知，PM_{2.5} 濃度與低能見度 (< 8 公里) 的相關係數亦較低。

2005 年低能見度出現的時數與 PM_{2.5} 的濃度皆有明顯及類似的季節

變化（圖 2），兩者的等級相關很高（ $r = 0.95$ ，達 5%顯著水平）。冬季（1、2 及 12 月）出現低能見度的日平均時數及 PM2.5 濃度最高，分別為 11.0 小時和 $55.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而夏季（6、7 及 8 月）最低，分別是 1.3 小時及 $21.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

上述的季節變化跟影響香港的空氣來源有關。圖 3a 顯示 2005 年抵達香港的 96 小時反軌跡路線圖，軌跡大致可分為內陸、沿岸、經台灣和海洋四類。經分類後，我們發現途經人類活動較高的內陸軌跡類別，出現低能見度的日平均時數是 10.9 小時，日平均 PM2.5 的濃度則是 $62.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，分別遠高於途經人類活動較低的海洋軌跡類別的 1.8 小時和 $19.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ （表 2）。沿岸軌跡類別方面，低能見度的時數（8.3 小時）及 PM2.5 濃度（ $41.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）乃介乎內陸和海洋軌跡之間，但比較靠近內陸軌跡。至於經台灣軌跡的低能見度時數及 PM2.5 濃度，則與沿岸軌跡的相約。但要注意的是，經台灣的軌跡數量不多，只有 6 條，故低能見度時數及 PM2.5 濃度的代表性不如其餘三類軌跡高。

各季的內陸、沿岸、途經台灣及海洋軌跡的分佈見表 3。香港位於東亞季風區，冬季受東北季候風的影響，較多內陸及沿岸軌跡（圖 3e），而夏季受西南季候風的影響，大部份都是海洋軌跡（圖 3c）。因此，冬季出現低能見度的時數及 PM2.5 的濃度都較夏季為高。

3.2 個案分析 - 颱風海棠

香港夏季的能見度雖然較其他季節為佳，但當有熱帶氣旋途經台灣附近時，香港的能見度經常會下降（文獻 [2, 3, 20]）。

圖 4 顯示颱風海棠的移動路徑。海棠在 2005 年 7 月 14 日增強成為

一個颱風（文獻 [19]）。次日，海棠轉向西北偏西移動。7月18日它在台灣東岸登陸。7月19日，海棠橫越台灣海峽，當晚在福建沿岸登陸，並減弱成強烈熱帶風暴。翌日，海棠進一步移入內陸並且消散。

7月18日海棠在台灣登陸期間，赤蠟角的能見度明顯下降（圖 5a）。到7月21日海棠消散後，能見度才開始上升。在7月19及20日能見度最低的期間，東涌 PM_{2.5} 的濃度亦是最高，個別小時達 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （圖 5a）。除東涌外，7月19及20日香港平均的 AOD 也較其他日子高（圖 5b）。

能見度下降及 PM_{2.5} 濃度升高的因素分析如下：

(a) 空氣來源

從圖 4 可知，到達香港的軌跡很受海棠的移動途徑影響。7月14日，海棠離香港尚遠，香港的空氣來源主要來自海洋。但隨著海棠的移近，受其外圍環流影響，沙螺灣的風廓線記錄顯示近地面 1500 米的風向漸轉為西至西北（圖 6）。到7月19及20日，反軌跡路線分析顯示香港範圍內近地面的空氣主要源自內陸（圖 4）。

(b) 水平輻合、垂直下沉

香港附近近地面（925 hPa）的水平輻散度由7月14至17日的正值明顯地轉為7月18至21日的負值（圖 7），表示由水平輻散變為輻合，這與受海棠的環流影響下，香港附近受內陸的西至西北氣流與海洋的西至西南氣流匯聚有關。一般來說，在接近熱帶氣旋中心的氣流會上升，但離中心較遠的外圍氣流則會下沉。圖 8 顯示受颱風海棠影響，廣東沿

岸的氣流普遍下沉。水平及垂直氣流的匯聚不利懸浮粒子的三維擴散，令濃度增加，能見度下降。

(c) 逆溫層

氣流下沉亦會令近地面的氣溫上升。RASS 的資料顯示大氣底層自 7 月 18 日起急速升溫至 7 月 19 及 20 日的最高溫（升幅有攝氏 2 至 3 度），然後開始回落（圖 9 下）。因不同高度的氣層的升溫速度不一樣，在 7 月 19 至 21 日期間在最接近地面的地方形成逆溫層（圖 9 上），使大氣較穩定，阻礙懸浮粒子向高空擴散。

(d) 低風速

在海棠途經台灣期間，華南沿岸的地面等壓線都較疏鬆，普遍的風速均為輕微至和緩，有利懸浮粒子的積聚。

綜合上述 (a)、(b)、(c) 及 (d) 的分析，空氣來源的轉變、水平及垂直氣流的匯聚、逆溫層的形成及低風速都令香港在 7 月 19 及 20 日的能見度下降及 PM2.5 濃度增加。

除颱風海棠外，很多途經台灣附近的熱帶氣旋都會有類似上述的特性。對於這類熱帶氣旋，可以用一個概念模型（圖 10）來解釋香港能見度下降及 PM2.5 濃度增加的原因。

4. 結論

2005 年每小時東涌懸浮粒子 (PM_{2.5}) 濃度與赤蠟角能見度 (撇除雨霧及相對濕度 $\geq 95\%$) 呈倒數或指數關係，相關係數約為 0.8。出現低能見度的時數與 PM_{2.5} 濃度有相類似的季節變化，即冬季較高，夏季較低。這現象跟影響香港的空氣來源有關。來自內陸的軌跡中，出現低能見度的日平均時數是 10.9 小時，日平均 PM_{2.5} 的濃度則是 $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，分別高於來自海洋的 1.8 小時和 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

颱風海棠的個案分析顯示，空氣來源的轉變、水平及垂直氣流的匯聚、逆溫層的形成及低風速都能令香港的能見度下降及 PM_{2.5} 濃度增加的。除颱風海棠外，很多途經台灣附近的熱帶氣旋都會有類似的特性。對於這類熱帶氣旋，本文建立了一個概念模型來解釋香港能見度下降及 PM_{2.5} 濃度增加的原因。

參考文獻

1. Chang, W.L. and E. Koo, 1986, "A Study of Visibility Trends in Hong Kong", *Atmospheric Environment*, 20, 1847-1858.
2. Cheng, C.M., S.T. Chan and C.C. Chan, 1997, "Visibility Trends in Hong Kong", *Hong Kong Observatory Technical Note (Local) No. 69*.
3. 梁延剛, 鄭婉圓及胡文志, 2004, "香港大氣能見度的長期變化", *Hong Kong Observatory Reprint No. 565*.
4. Lam, C.Y., 2006, "On climate changes brought about by urban living", Proceedings of PGBC Symposium 2006 Urban Climate + Urban Greenery, 2 December 2006, Hong Kong.
5. 周淑貞及束炯編著, 1994, "城市氣候學", 氣象出版社, 北京, 618 頁.
6. 王淑英及徐曉峰, 2001, "北京地區大氣能見度的影響因素分析", *城市氣象服務科學討論會學術論文集*, 中國氣象學會, 349-352.
7. Sequeira, R. and K.H. Lai, 1998, "The Effect of Meteorological Parameters and Aerosol Constituents on Visibility in Urban Hong Kong", *Atmospheric Environment*, 16, 2865-2871.
8. 吳兌, 畢雪岩, 鄭雪嬌, 李菲, 譚浩波, 廖國蓮及黃健, "珠江三角洲大氣灰霾導致能見度下降問題研究", *氣象學報*, 64(4), 510-516.
9. 安俊嶺, 張仁健及韓志偉, 2000, "北方 15 個大型城市總懸浮顆粒物的季節變化", *氣候與環境研究*, 5(1), 25-29.
10. 王京麗及劉旭林, "北京市大氣細粒子質量濃度與能見度定量關係初探", *氣象學報*, 64(2), 221-227.
11. Adams, K.M., L.I. Davis and S.M. Japar, 1990, "Real-Time in situ measurements of atmospheric optical absorption in the visible via photoacoustic spectroscopy-IV, Visibility degradation and aerosol optical properties in Los Angeles", *Atmospheric Environment*, 24A, 605-610.

12. Groblicki, P.J., G.T. Wolff and R.J. Countess, 1981, "Visibility-reducing species in the Denver brown cloud – I. Relationship between extinction and chemical composition" , *Atmospheric Environment*, 15, 2473-2484.
13. Louie, P.K.K., J.G. Watson, J.C. Chow, A. Chen, D.W.M. Sin and A.K.H. Lau, 2005, "Seasonal characteristics and regional transport of PM_{2.5} in Hong Kong" , *Atmospheric Environment*, 39, 1695-1710.
14. Appel, B.R., Y. Tokiwa, J. Hsu, E.L. Kothny and E. Hahn, 1985, "Visibility as related to atmospheric aerosol constituents" , *Atmospheric Environment*, 19, 1525-1534.
15. Siegel, S. and N.J. Castellan, 1988, *Nonparametric statistics for the behavioral sciences*. International Edition, McGraw-Hill Book Co, 399pp.
16. Chan, C.Y., Y.S. Li, L.Y. Chan, Y.K. Leung, M.C. Wu, C.C. Chang and S.C. Liu, 2006, "An analysis on abnormally low ozone in the upper troposphere over subtropical East Asia in spring 2004" , *Atmospheric Environment*. In press.
17. Draxier, R.R. and G.D. Rolph, 2003, "HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
18. Jay, C.C., S.C. Kot and J.M. Tepper, 1996, "Detecting inversions and stable lapse rates with RASS" , *HKMetS Bulletin*, Vol. 6, No.1.
19. 香港天文台, 2005, *二零零五熱帶氣旋*. 101 頁.
20. Lee, Y.C., A. Savtchenko, 2006, "Relationship between air pollution in Hong Kong and in the Pearl River Delta region of South China in 2003 and 2004: An analysis" , *J. App. Meteor. Climatol.*, 45, 269-282.

表 1. 每小時東涌 PM2.5 濃度與赤蠟角能見度（撇除霧、薄霧、雨及相對濕度 $\geq 95\%$ ）的相關方程及係數。所有相關係數均達 5% 顯著水平。

	擬合方程式*		
	倒數曲線	指數曲線	直線
能見度	$y = 344790x^{-1}$ ($r = +0.781$)	$y = 116.396e^{-0.000128x}$ ($r = +0.789$)	$y = -0.0047x + 89.695$ ($r = +0.692$)
低能見度 (< 8 km)	$y = 354180x^{-1}$ ($r = +0.558$)	$y = 200.939e^{-0.000211x}$ ($r = +0.520$)	$y = -0.0160x + 159.281$ ($r = +0.592$)

* x 為能見度(m)， y 為 PM2.5 濃度(μgm^{-3})

表 2. 不同軌跡類別下，赤蠟角出現低能見度的日平均時數及東涌的日平均 PM2.5 濃度。

軌跡類別	數目	低能見度 時數(小時)	低能見度日平 均時數(小時)	日平均 PM2.5 濃度(μgm^{-3})
內陸	107	1167	10.9	62.3
沿岸	118	973	8.3	41.4
經台灣	6	52	8.7	36.5
海洋	134	246	1.8	19.5

表 3. 四季的軌跡數目分佈，括弧內代表百分率(%)。

軌跡類別	春季	夏季	秋季	冬季
內陸	15 (16.3)	4 (4.3)	36 (39.5)	52 (57.8)
沿岸	37 (40.2)	7 (7.6)	43 (47.3)	31 (34.4)
經台灣	4 (4.4)	1 (1.1)	1 (1.1)	0 (0.0)
海洋	36 (39.1)	80 (87.0)	11 (12.1)	7 (7.8)
總數	92 (100)	92 (100)	91 (100)	90 (100)

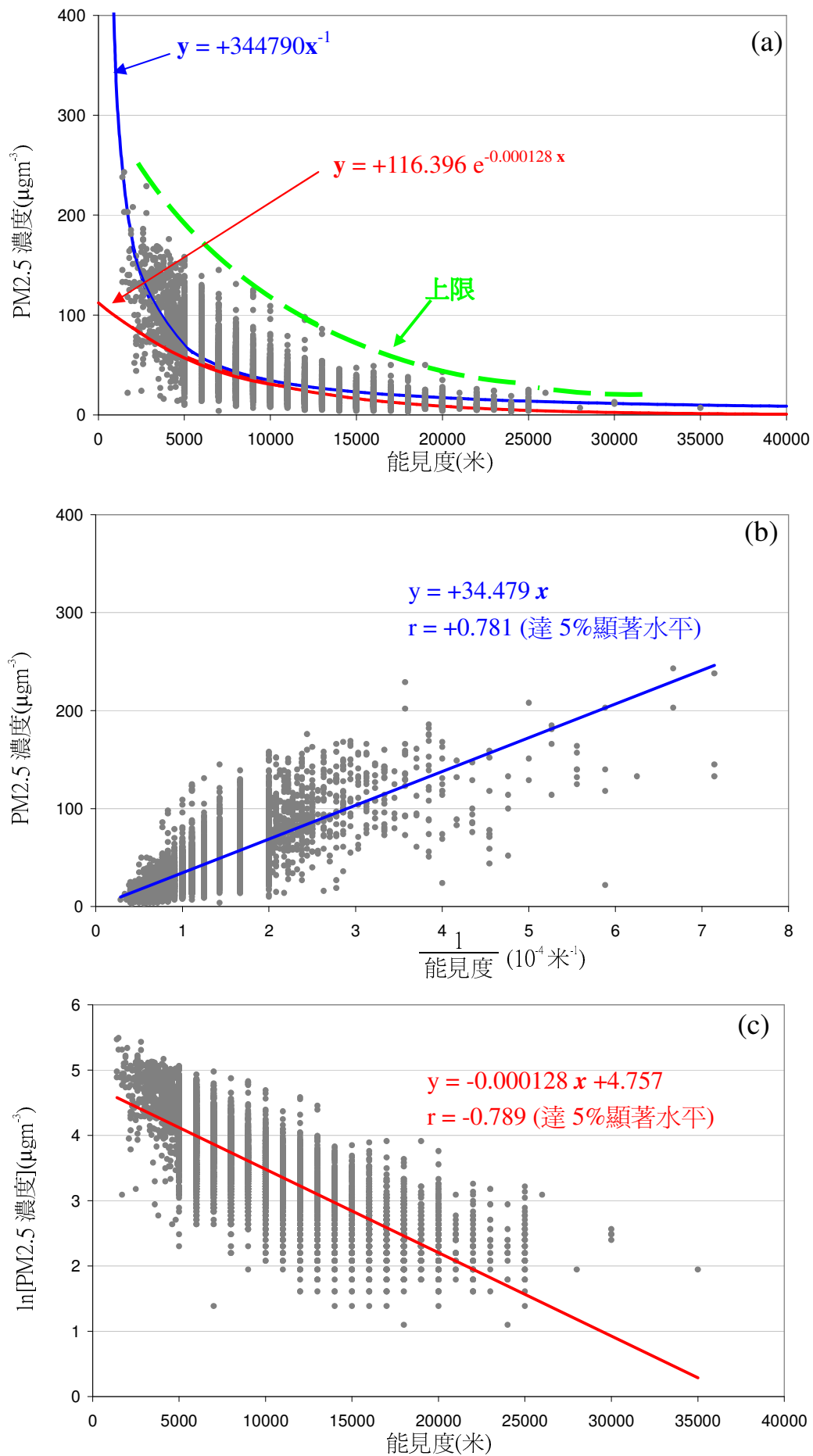


圖 1. 每小時 PM2.5 濃度與能見度（撇除霧、薄霧、雨及相對濕度 $\geq 95\%$ ）的關係分佈圖。

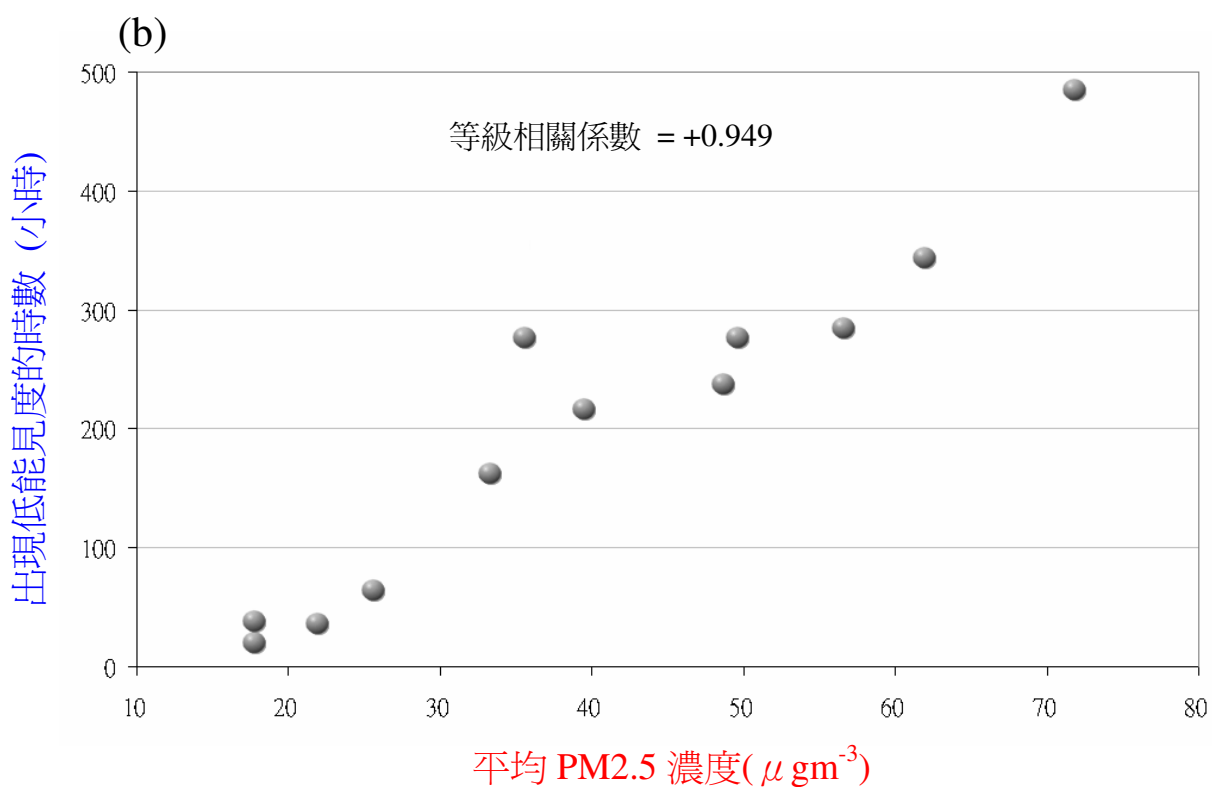
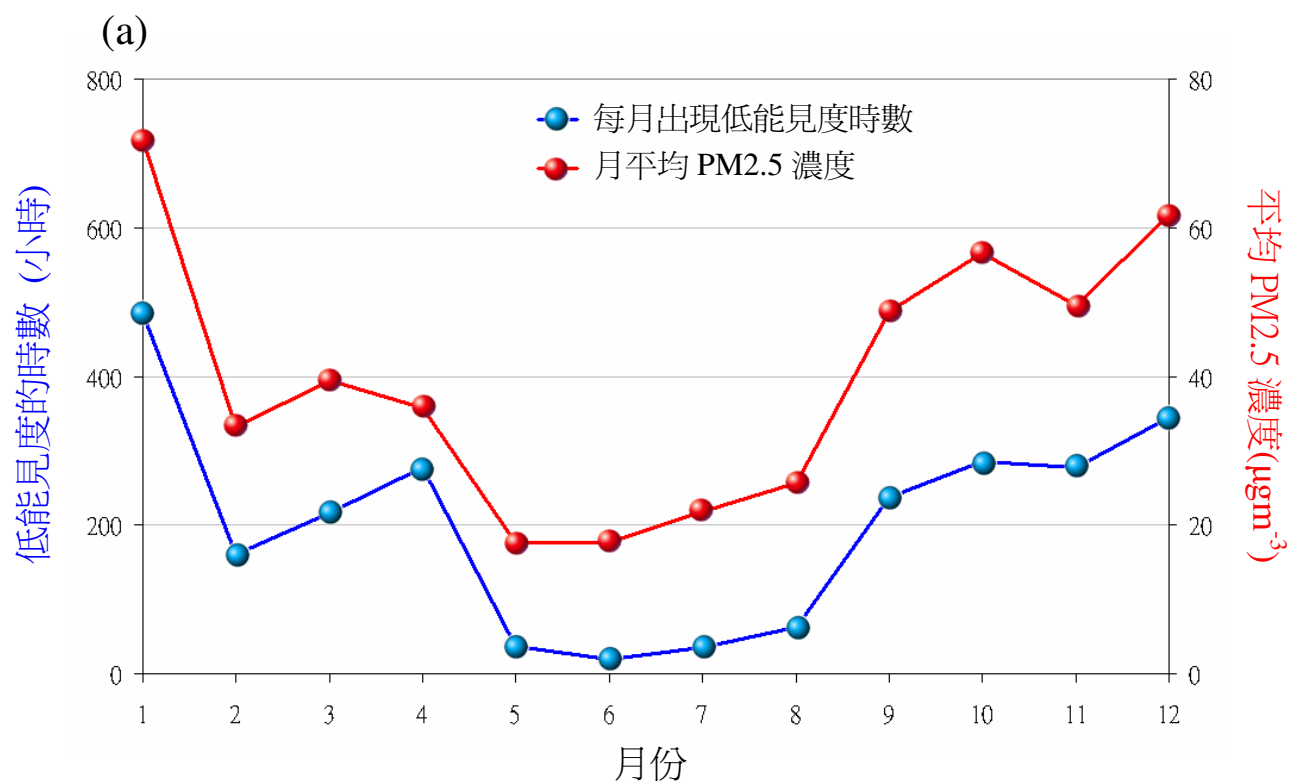


圖 2. (a) 2005 年赤蠟角出現低能見度的時數與東涌 PM2.5 濃度的月際變化。(b) 赤蠟角出現低能見度的時數與東涌 PM2.5 濃度的散佈圖。

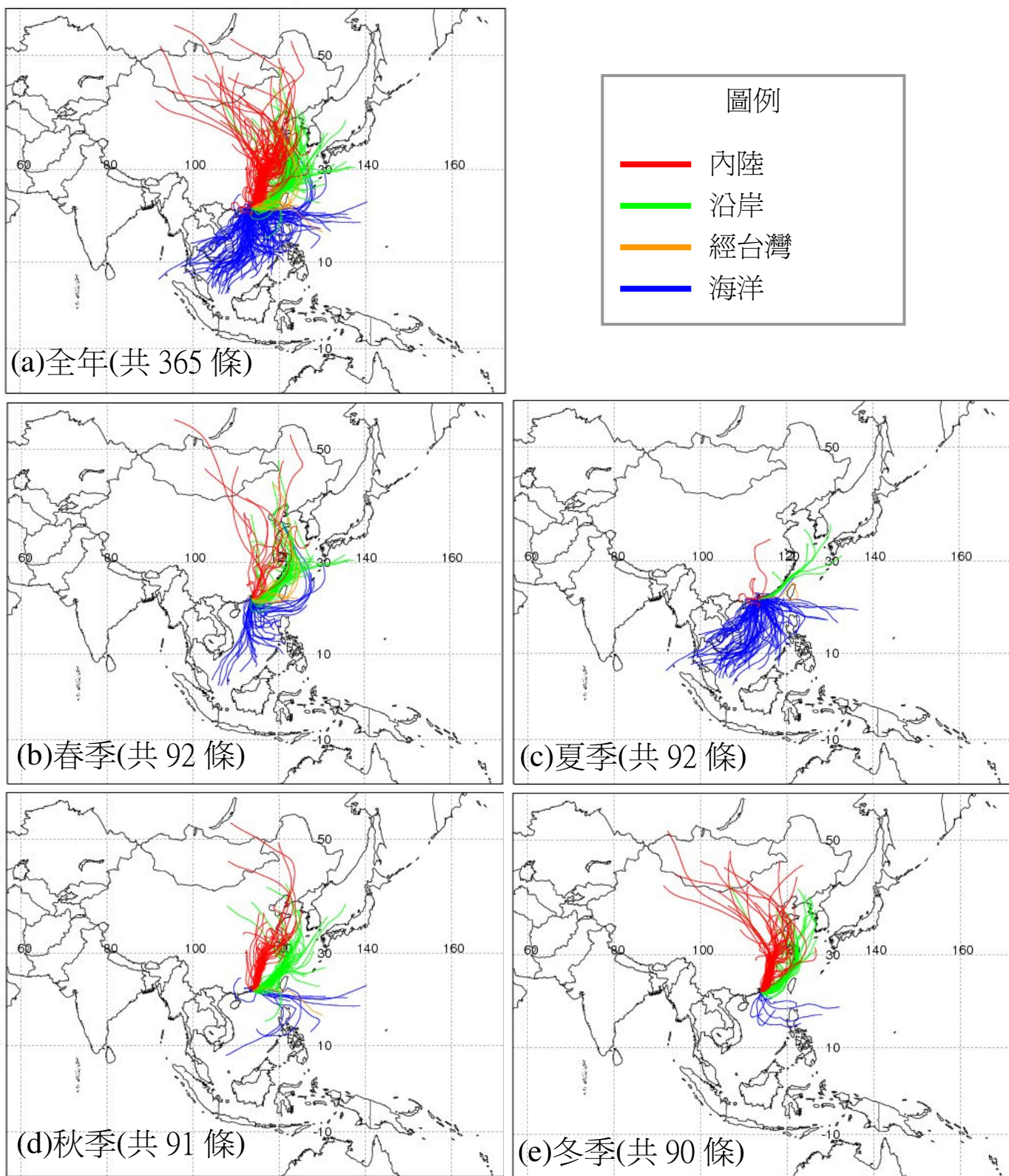


圖 3. 2005 年 (a)全年 (b)春季 (c)夏季 (d)秋季及 (e)冬季的每日 HYSPLIT 96 小時反軌跡路線圖 (每條線代表每日的反軌跡路線，反軌跡路線以香港下午 8 時離地面 10 米高為終點，另一端為 96 小時前的位置)。

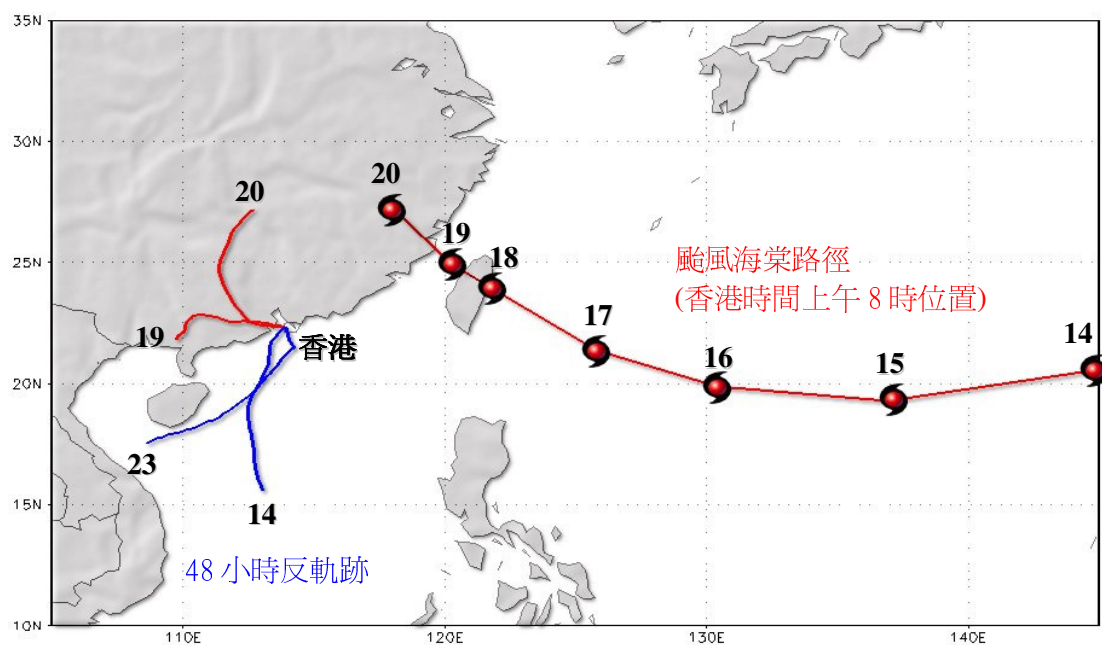


圖 4. 颱風海棠移動路徑圖。圖中亦顯示香港在 7 月 14 日、19 日、20 日及 23 日的 48 小時反軌跡圖（反軌跡路線以香港下午 8 時離地面 10 米高為終點，另一端為 48 小時前的位置）。與圖 3 一樣，紅(藍)色軌跡代表內陸(海洋)路線。

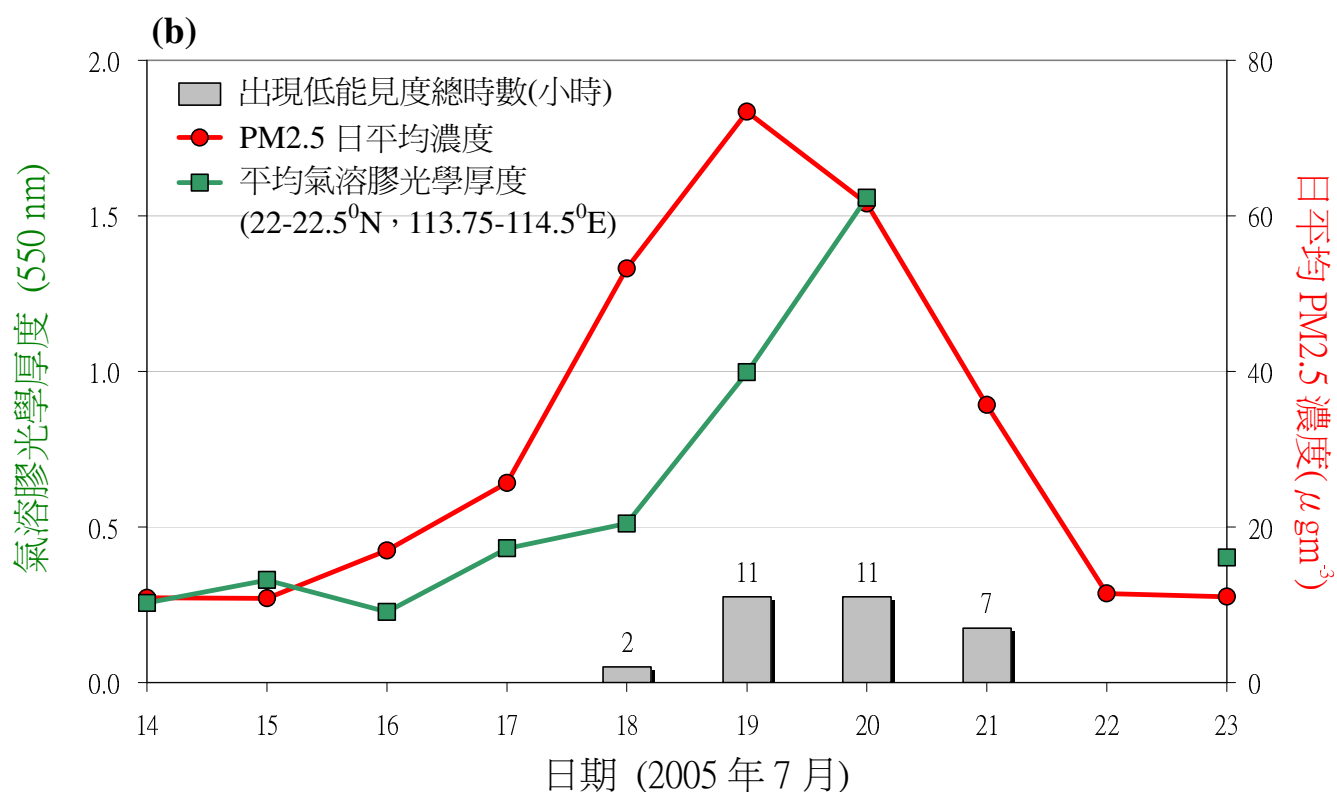
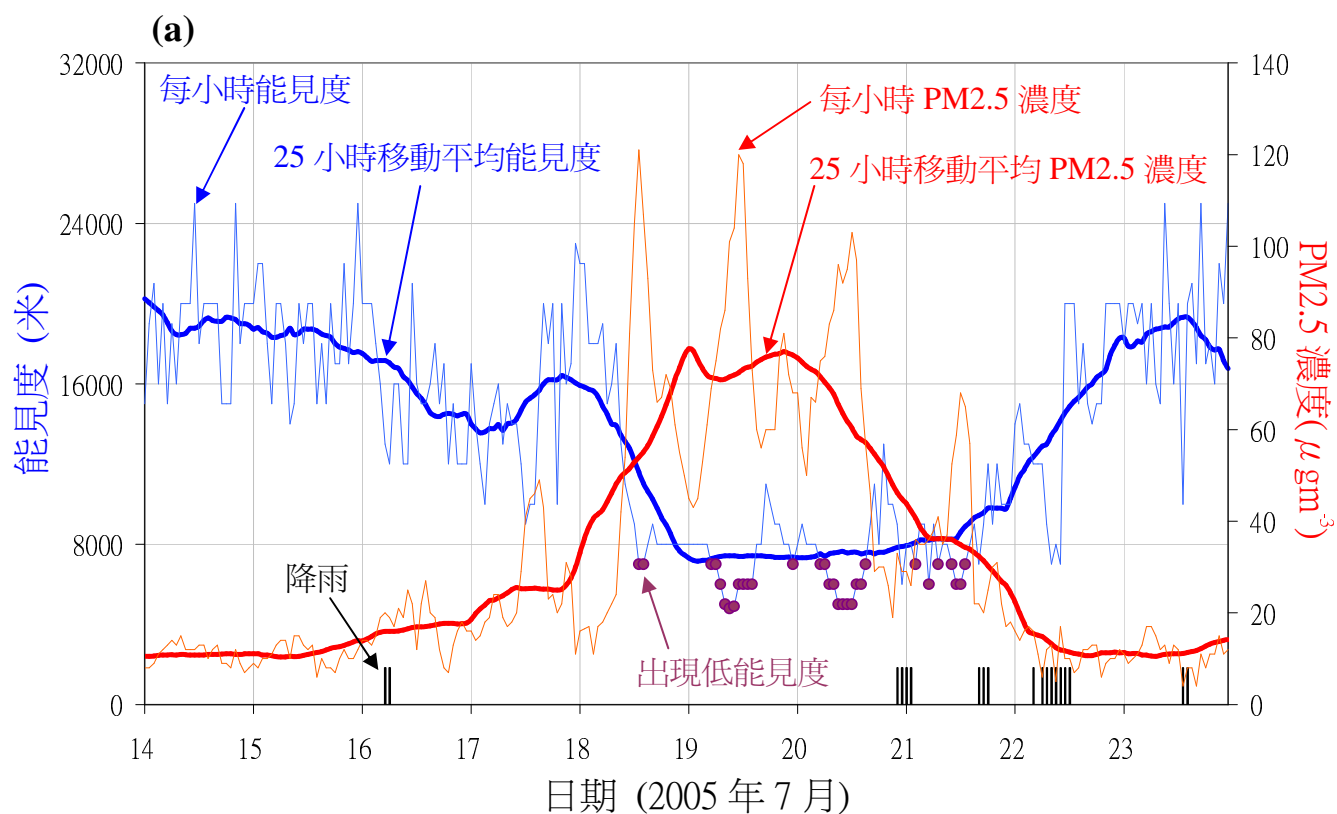


圖 5. (a) 能見度及 PM2.5 濃度每小時變化曲線，平滑線為用 25 小時移動平均法濾去日際變化後所得到的曲線。圖中亦顯示降雨及出現低能見度的時間。(b) 氣溶膠光學厚度及 PM2.5 濃度變化曲線。7 月 21 日及 22 日網格內沒有氣溶膠光學厚度數據。

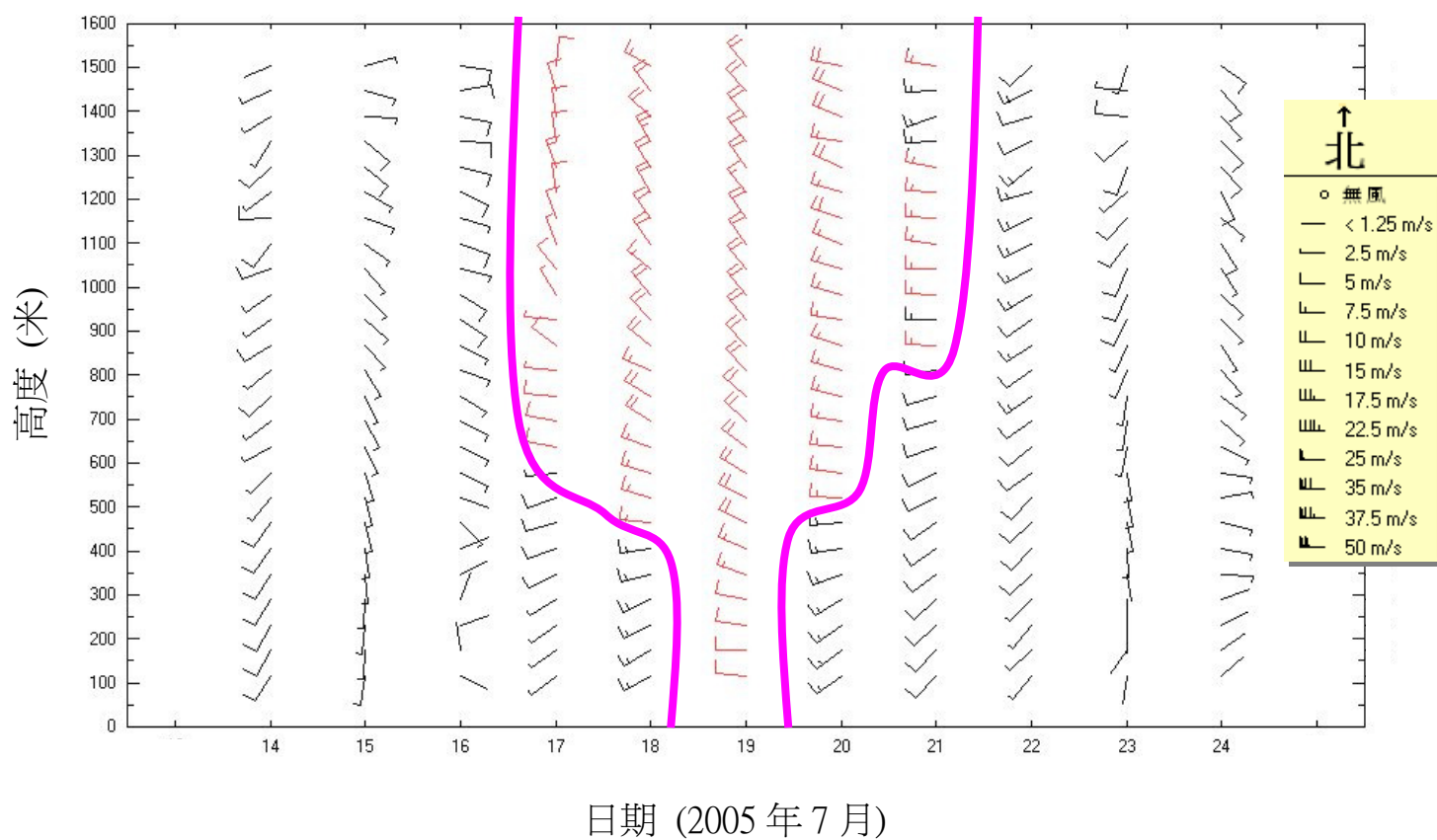


圖 6. 位於沙螺灣的風廓線儀錄得的日平均垂直風廓線時間序列。粗線範圍內的風來自西北象限。

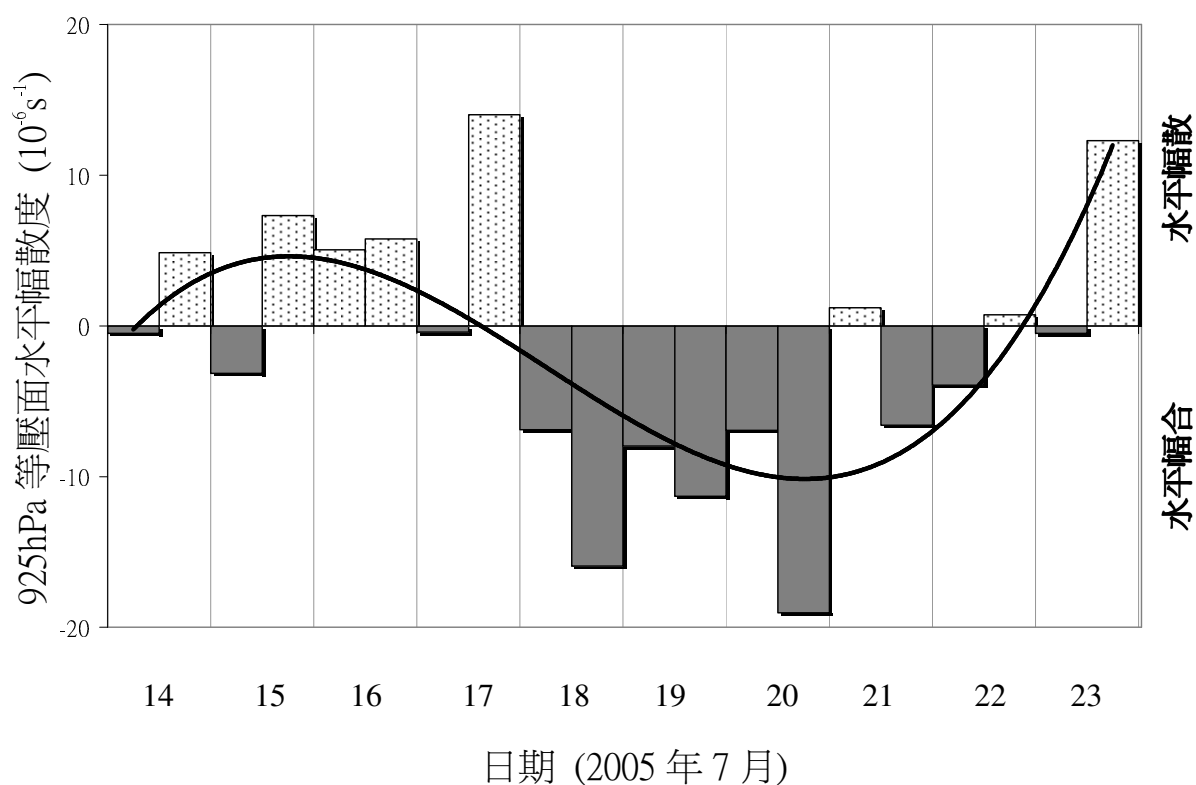


圖 7. 2005 年 7 月 14 日香港時間上午 8 時至 7 月 23 日香港時間下午 8 時日本氣象廳 (JMA) 數值模式在 925 hPa 等壓面分析最近香港的網格點的水平幅散度變化。圖中平滑曲線為最小 2 乘法估計的回歸 3 次元多項式曲線。

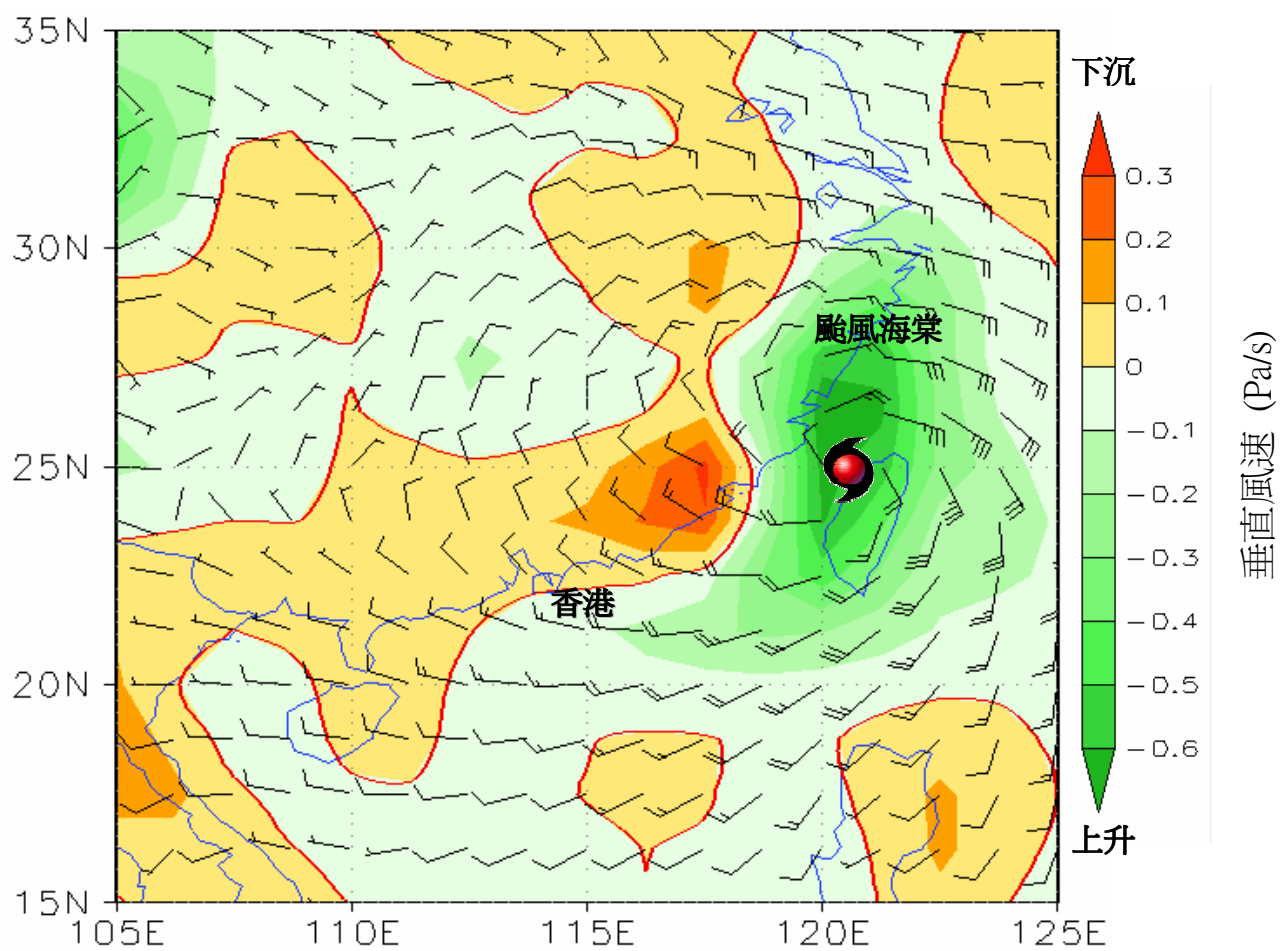


圖 8. 2005 年 7 月 19 日香港時間上午 8 時日本氣象廳 (JMA) 數值模式在 925 hPa 等壓面 (離地面約 750 米) 分析的水平風場及垂直風速。

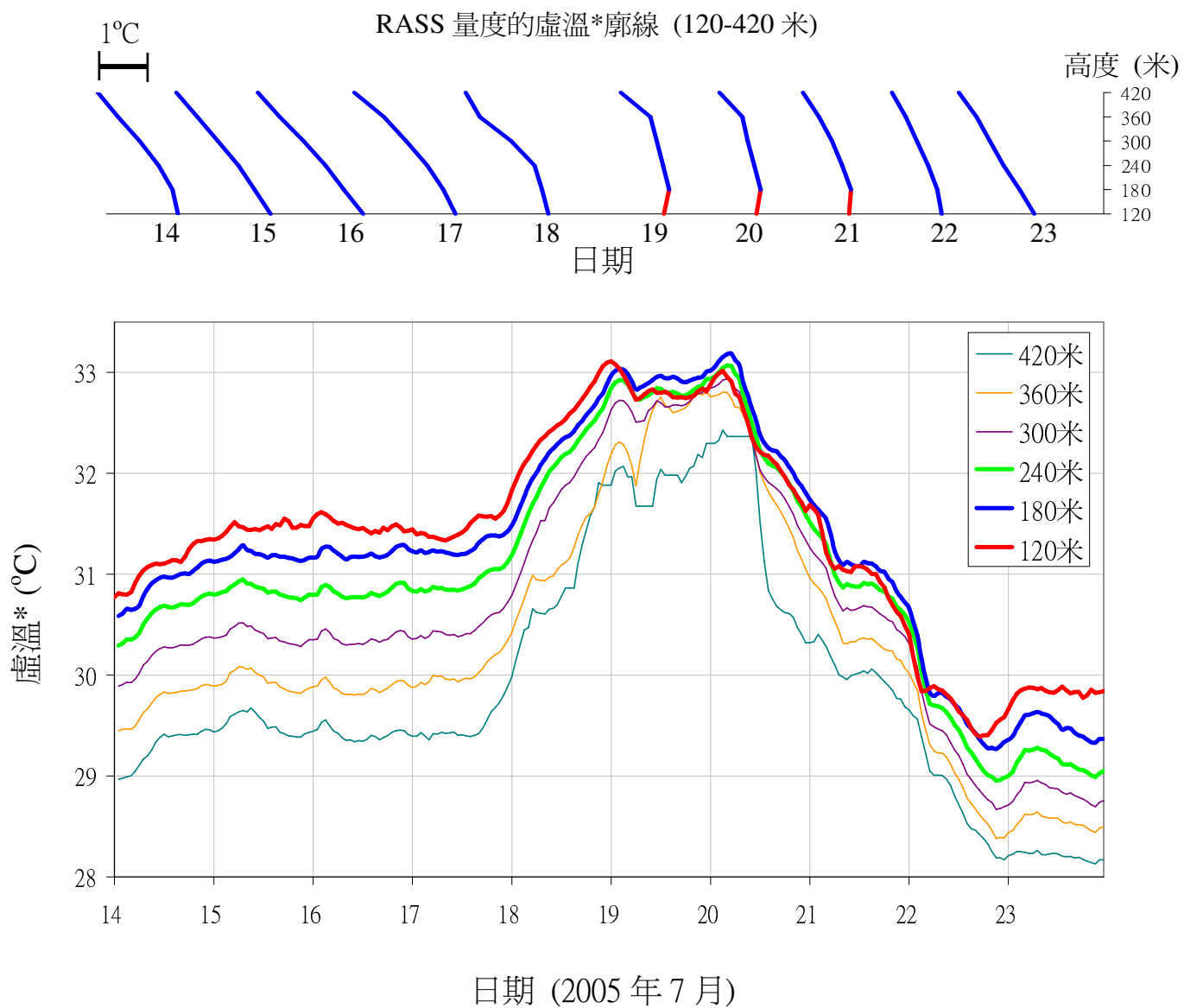


圖 9. 利用 RASS 量度近地不同高度的虛溫*逐日時間變化曲線。數據用 25 小時移動平均濾去日際變化。上圖為每天平均的垂直氣溫廓線，紅色表示低層出現逆溫層。

*由於在 120 至 420 米間的水汽含量差別不大，虛溫的變化可視作氣溫的變化。

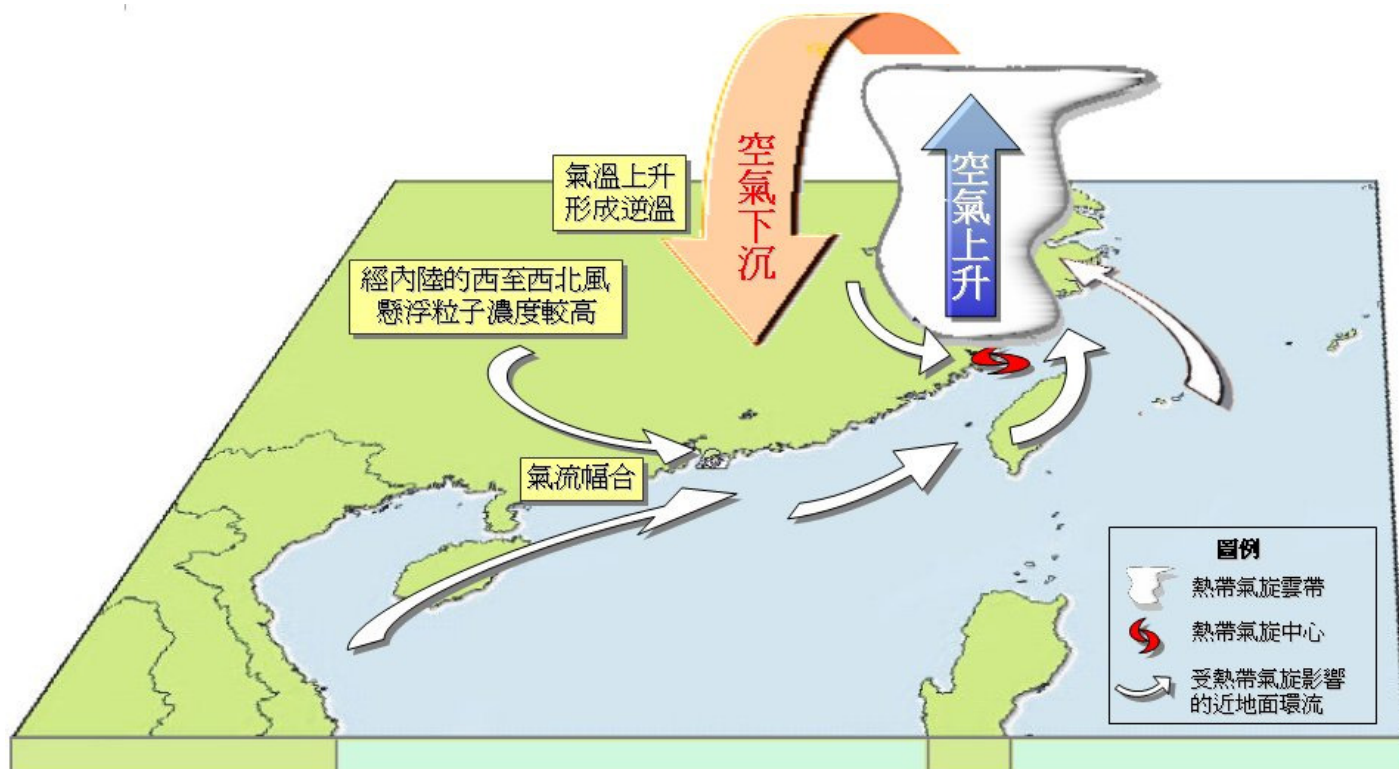


圖 10. 夏季受熱帶氣旋影響引致香港出現低能見度及高懸浮粒子濃度的概念模型。