



Reprint 573

多波長微波幅射計在降雨臨近預報的表現與應用

陳柏緯

第十九屆粵港澳氣象科技研討會，
中國，廣東陽江，2005年3月1-3日

多波長微波幅射計 在降雨臨近預報的表現與應用

陳柏緯
香港天文台

摘要

熱動力學參量普遍使用於雷暴及大雨的臨近預報，K 指數是其中一個例子。它們可以從高空探測氣球的數據推導出來，但這些數據一天只有兩次，不足以供臨近預報使用。本文討論 2004 年在香港的一次場地實驗，利用一部多波長、在地面操作的微波幅射計，頻密地提供大氣對流層(至 10 公里)的熱動力廓線，作降雨的臨近預報。

微波幅射計的數據首先與氣球探測的溫度、濕度廓線及由全球定位系統接收器推導的總水汽量比對，以確定它們的準確性。本文跟著研究微波幅射計提供的濕度廓線及 K 指數在暴雨個案中的表現，發現它們有助於顯示在暴雨發生前水汽的積聚及大氣不穩定性的增加。而且，在場地實驗的多次大雨過程中，發現從微波幅射計推導的 K 指數與位於幅射計約 20 公里範圍內的總閃電數及閃電頻率有良好的相關性。

Performance and Application of a Multi-wavelength Microwave Radiometer in Rain Nowcasting

P.W. Chan
Hong Kong Observatory

Abstract

Thermodynamic parameters, such as K-index, are commonly used in the nowcasting of thunderstorms and heavy rain. They are derived from upper-air ascent measurements, which are only available twice a day and not sufficient for nowcasting purpose. This paper discusses the use of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer to provide frequently updated thermodynamic profiles of the troposphere up to 10 km for rain nowcasting during a field experiment in Hong Kong in 2004.

The accuracy of the radiometer's measurements is first established by

comparing with the temperature and humidity profiles of upper-air ascents and the integrated water vapour derived from Global Positioning System (GPS) receivers. The humidity profile and K-index from the radiometer in a number of rainstorm cases are then studied. They are found to give useful indications of the accumulation of water vapour and the increasing degree of instability of the troposphere before the occurrence of the heavy rain. Moreover, the K-index derived from the radiometer measurements has good correlation with the total number and the rate of lightning flashes within about 20 km of the radiometer during the heavy rain episodes in the field experiment period.

1. 引言

在天氣預測業務上，普遍採用無線電探空儀所量度的溫度和濕度廓線以及由它們推導的大氣不穩定指數，作為大雨和雷暴的臨近預報。然而，探空儀的量度每日只有兩次，在下雨過程中，大氣對流層的熱動力性質在這些量度之間一般會急速地變化，在諸如香港等亞熱帶沿岸地區，這種情況尤其顯著。更頻密的熱動力資料，加上直至對流層高層的風數據(例如由風廓線儀提供，見文獻[1])，對惡劣天氣的臨近預報將大有幫助。

在地面使用的微波幅射計([7]及[8])量度微波頻譜中多個頻道的幅射強度，包括由大氣中的水汽、雲中液態水及氧分子的微波放射所支配的頻道，以反演直至 10 公里高空的溫度和濕度廓線。這些廓線每隔約 1 分鐘得到一次，一般在無雨的情況下使用，因為當有水薄膜覆蓋在幅射計的外殼(亦稱為「雷達罩」)時，量度會較為不準確。最近微波幅射計開始應用了一些方法減低雨的影響，例如用疏水物料覆蓋在雷達罩外，以及在罩上吹氣排水。經這些改進後，幅射計在降雨率低於每小時 15 毫米時得到較準確的熱動力廓線，但這降雨率仍遠低於亞熱帶地區每小時可達數十甚至超過一百毫米的大雨。

本文介紹一部多頻道、在地面使用的微波幅射計在 2004 年於香港進行

的場地實驗中，在大雨及雷暴的臨近預報方面的表現及應用。第 2 節描述該實驗所使用的儀器，第 3 至第 5 節討論幅射計的溫度和濕度廓線及可降水份數據的準確性，並與無線電探空儀，風廓線儀/聲雷達及全球定位系統接收器的資料比較，第 6 節描述一次降雨過程中幅射計數據的表現，顯示利用幅射計資料計算的大氣不穩定指數與閃電的出現有一定程度的相關性，這關係在第 7 節會進一步研究，第 8 節為本文的總結。

2. 實驗中所用的儀器

本研究使用的微波幅射計與文獻[8]中的一樣，透過量度 7 個氧氣頻道(51 – 59 千兆赫)和 5 個水汽頻道(22 – 30 千兆赫)的幅射強度，以獲取溫度和濕度廓線。它擁有疏水的雷達罩，並以加熱的氣流吹過雷達罩的表面，從而減低雨的影響。在場地實驗中，幅射計進行天頂掃瞄和固定仰角掃瞄，根據一般做法(例如文獻[3]及[8])，本文只使用天頂掃瞄的數據來反演大氣對流層直至 10 公里的熱動力廓線，每 5 分鐘取得一次。

利用神經網絡(neural network)方法，幅射強度量度可反演為大氣的溫度及濕度廓線。神經網絡是由無線電探空儀提供的高空大氣氣候資料所訓練，使用幅射傳輸模式(radiative transfer model)模擬幅射計在該氣候下的觀察情況[8]。本研究採用一年(2003 年)的高解像度探空儀數據來訓練神經網絡，氣球上升途中資料的獲取率為 0.5 赫，對一般上升速度來說，即空間分辨率約 10 米。

實驗在 2004 年 2 月至 6 月於香港進行，幅射計放置在三個地方，與無線電探空儀，風廓線儀/聲雷達及全球定位系統接收器的資料比較(圖 1)。當研究幅射計所提供的熱動力指數時，本文亦參考閃電定位網絡的數據[6]，該網絡探測離香港約 100 公里範圍內的雲對地閃電。

3. 與無線電探空儀的比較

幅射計的溫度及濕度廓線與京士柏的探空資料在整段實驗時間皆進行比對，它們的偏差與標準差如圖 2 所示。對幅射計的數據有以下的觀察：

(a) 幅射計的溫度從地面到 1.4 公里出現暖偏差，之上則為冷偏差，標準差隨高度上升而增加，但一般小於 2 度。

(b) 幅射計的相對濕度在 1.2 至 5.8 公里左右出現濕偏差，之上則為乾偏差，標準差隨高度上升而增加，但一般低於 20%。

以上的結果與其他同類型幅射計的研究大致吻合(如文獻[3]，該文章研究幅射計達 4 公里高的數據)。

由於相對濕度數據對幅射計應用於雨的臨近預報方面有較大影響，我們更仔細地研究幅射計的濕度廓線。首先，幅射計在對流層中層的濕偏差與它顯示在該區經常出現濕層有關，但無線電探空儀並未量度到有這濕層存在(例子見圖 3)。在實驗後期，該濕層在幅射計的濕度廓線中出現得更頻密，有時濕度更接近飽和，這情況顯示幅射計所使用的幅射傳輸模式可能並不完全適用於華南地區的夏季風天氣，而需要作進一步修正，但這方面的研究已超越本文範圍。另一方面，關於在對流層頂層出現的乾偏差(圖 3)，幅射計在這些高度的濕度值似乎很倚重氣候廓線資料，一般而言氣候上濕度大致會隨著高度而下降，但在夏季對流層頂層有時會因為有卷雲存在(例如與雨帶的高層外流相關)而較正常偏濕。若同時使用地球同步氣象衛星的亮度溫度，有機會改進在這些高度上的濕度廓線反演[5]。

幅射計的溫度及濕度數據以下列的公式計算 K 指數(KI)，應用於雨的臨近預報：

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700})$$

其中 T 為溫度，Td 為露點，下標為氣壓層(單位是 hPa)。幅射計的數據以高度表示，相對應的氣壓層利用流體靜力近似而求得。圖 4 比較無線電探空儀和幅射計的 K 指數，可見它們有良好相關性，相關系數達 0.856。幅射計的 K 指數傾向較大，這是由於它不時顯示上空出現濕層(見以上討論)，而 K 指數包含了對流層中層(700 hPa，在華南的高度約 3 公里)的露點差。然而，若考慮以上所有與無線電探空儀的比對，幅射計大致上提供了準確的溫度和濕度廓線，可應用於臨近預報上。

4. 與風廓線儀/聲雷達的比較

在沙螺灣(圖 1)運作期間，幅射計的量度亦用作計算虛溫度，並與位於同一地方的風廓線儀/聲雷達的數據比對。該風廓線儀/聲雷達是一個 1299 兆赫系統，與文獻[1]討論的儀器相近。圖 5 顯示比對結果，可見在大氣邊界層內幅射計出現約 0.5 – 1 度的暖偏差，而標準差在 1 – 1.5 度之間，這些結果與無線電探空儀的比對基本一致(圖 2a)。幅射計在邊界層內的輕微暖偏差似乎並不與它跟參考儀器(無線電探空儀或風廓線儀/聲雷達)的位置不同有關，而好像是幅射計本身的特質。

5. 與全球定位系統接收器的比較

與幅射計最接近的全球定位系統(GPS)接收器的可降水份數據會用作比對。當幅射計放置在天文台總部及長洲時，選用了位於昂船洲的 GPS 接收器，而當它遷移至沙螺灣時，則選用了小冷水的 GPS 接收器(所有這些地方皆在圖 1 顯示)。圖 6 為比對結果，可見兩組數值相關性很高，系數超過 0.9。

兩組量度有時會出現較大偏差，例如在圖 6 中被圈起的數據點，幅射

計的可降水份較 GPS 接收器的數字大了 10 毫米或以上。圖 7 顯示其中一個例子，當時幅射計安裝在長洲，同一地方有一個刻度為 0.5 毫米的翻斗式雨量計。似乎當雨勢大(最大降雨率為 0.5 毫米/分鐘，即 30 毫米/小時，與天氣雷達的降雨估計[不在這裡顯示]相近)但不連續時，幅射計和 GPS 接收器的可降水份值大致吻合(例如在香港時間早上 6 時前和 7 時後)。然而，如果雨勢大而大致上連續時(例如在香港時間早上 6 時至 7 時之間)，幅射計的可降水份會顯示較大及頻密的波動，但在 GPS 接收器的數據中並不出現，兩種量度有時相差超過 10 毫米(例如上午 6 時 31 分，以紅箭頭表示)。為了確定這差別並非與降雨率的局部地區性變化有關，我們參考了香港境內的雨量計網絡的數據和天氣雷達圖像，發現在幅射計和兩個 GPS 接收器等位置的降雨率大致相同(不在這裡顯示)。幅射計在這些時刻的數據較為可疑，故此將不會於以下的討論中使用，例如第 7 節中 K 指數時間平均值的計算。

6. 個例分析

2004 年 4 月 17 日的大雨過程將作較深入的討論，以顯示幅射計在降雨臨近預報的應用。天文台當日下午需要發出「黃色暴雨警告」，即香港普遍受大雨影響，一小時的雨量超過 30 毫米。天氣尺度方面，一道低壓槽在該日徘徊於華南沿岸(圖 8)。天氣雷達圖像(例子見圖 9)顯示一條雨帶在下午 3 時 30 分至 8 時之間大致向東移動橫過香港，為多處地方帶來超過 60 毫米雨量。在本港量度到的閃電主要跟在離開海平面 3 公里高度上反射率最小為 44 dBz 的雷達回波相關聯(相對應的降雨率約為 20 毫米/小時)，這些回波的闊度(沿著雨帶的移動方向而言)一般約為 20 公里(圖 9)。

隨著雨帶逐漸迫近本港，幅射計顯示各高度的相對濕度皆逐漸增加(圖 10)，在離海平面 2 公里左右濕度最高，天氣尺度而言，一股清勁至強風程度的西南氣流在這高度上把較濕的空氣從南海帶往華南沿岸。幅射計亦顯示雲底高度逐漸下降，與天氣觀測員的報告一致。在大雨期間，低於 3 公

里左右的空氣接近飽和，液態水含量達到約 4.9 克/平方米的極大值。當雨帶移離香港，相對濕度逐步下降，雲底亦抬升。

幅射計測得的在 2 公里左右的水汽積聚，以及各高度相對濕度的逐漸上升，皆有效地顯示大雨即將來臨。這些現象亦可透過由幅射計的數據所計算的 K 指數來表達(圖 11)，隨著雨帶移近本港，K 指數穩步上升，當大雨剛開始而閃電變得活躍時，K 指數超過 35，在下午 6 時 30 分後，K 指數開始下跌，雨逐漸停止，幅射計附近亦不再有閃電發生。

7. K 指數與閃電的相關性

K 指數普遍用於評估雷暴出現的機會。由於無線電探空儀一般是一天量度兩次，從這些數據計算的 K 指數只可能用作評估未來約 12 小時的情況，例如是利用憑經驗所累積出來的評估方法，或者是與其他氣象因素一併考慮的流程圖[2]。幅射計頻密地提供對流層的溫度和濕度廓線以計算 K 指數，是一個獨特的機會可作研究 K 指數與對流層不穩定性之間是否存在量化的關係，而後者與雷暴的出現有關。

在場地實驗期間，我們觀察到在多次大雨過程中，當幅射計的數據所計算的 K 指數超過約 35 時，它附近的閃電亦較為頻密(例如圖 11 中 2004 年 4 月 17 日的個案)。在每一次大雨過程，當 K 指數達到或大於 35 期間的值會用作計算時間平均。對流層不穩定性則以如下方式透過閃電數字表達：

- (a) 當幅射計的數據所計算的 K 指數最小為 35 期間，與幅射計的距離小於 R 的閃電的總數；
- (b) 把(a)中定義的閃電總數，除以幅射計的數據計算的 K 指數最小為 35 的時間(以小時為單位)，所得到的閃電頻率。

與幅射計的距離 R 在 10 公里至 100 公里之間變動，以研究 K 指數的時間

平均跟以上(a)及(b)所定義的對流層不穩定性的關係。R 的最大值(100 公里)是跟據閃電定位網絡的最大探測範圍，而最小值(10 公里)的選取是因為在該距離時仍然有足夠多的大雨個例(最小 10 個)作統計分析，當 R 進一步減少時，在距離幅射計小於 R 的範圍內有閃電的降雨過程數目會大幅下降。

本文集中研究華南地區夏季季風期間與雨帶相關聯的閃電活動，一共有 11 個案例，由局部地區性雷暴引起的降雨過程(例如在華南內陸地區因長時間的日照所誘發的雷暴)不包括在內。

當對流層不穩定性以閃電總數來定義時，它跟 K 指數時間平均的相關性在 R = 10 公里和 20 公里時為最大，若果以閃電頻率來定義，相關性則於 R = 20 公里時為最大(圖 12)。R 取 20 公里的值，與雷達觀測到有活躍閃電的雨帶部份的空間尺度大致吻合(見圖 9)。不論是閃電總數或頻率，當 R 超過 20 公里時，與 K 指數時間平均的相關性會減少，直至 R = 60 公里時相關性開始基本上不變，這是由於每一次大雨過程的閃電數據已差不多全部使用。

圖 13 顯示當與幅射計的距離為 20 公里以內時，閃電總數和頻率跟 K 指數時間平均值的散佈圖，相關性達到約 0.8 的偏高數值。對於閃電總數來說，最小平方線性擬合的斜率為 1.183，亦即當 K 指數時間平均每增加 1，位於幅射計 20 公里內的閃電總數會平均上升 $10^{1/1.183} = 7$ 倍。同樣地，對於閃電頻率而言，相對應的上升為 $10^{1/1.276} = 6$ 倍。由此可見，閃電活動對 K 指數值頗為敏感。

從圖 13 中，可見在所有大雨過程之間，5 月 8 日的過程有最大的 K 指數時間平均和閃電總數，以及第二大的閃電頻率，它其實是天文台在 2004 年的雨季中唯一需要發出「黑色暴雨警告」的大雨，即香港普遍受大雨影響，一小時的雨量超過 70 毫米。文獻[4]分析了該場大雨，觀察到一個中尺度渦旋經過幅射計所在地方(長洲)。

請留意以上分析只用了一年(2004 年)夏季季風期間的數據(共 11 次降雨過程)，個例數目頗為有限，所得結論的普遍性還須以較多的數據來驗證。

8. 結論

本文研究了一部多頻率並於地面運作的幅射計在降雨的臨近預報方面的表現和應用。該幅射計擁有疏水的雷達罩，並以加熱氣流來減低雨水覆蓋在雷達罩表面對量度準確性的影響。若以無線電探空儀、風廓線儀/聲雷達和 GPS 接收器的數據為基準，幅射計提供的溫度和濕度廓線，以至可降水份等皆頗為準確，但有時也觀察到這些數值之間會存在差異，包括：

- (a) 幅射計的溫度在大氣邊界層內呈現暖偏差；
- (b) 幅射計的濕度廓線傾向於 3 至 4 公里高度出現濕層，引致所計算的 K 指數較無線電探空儀的數字為大；
- (c) 當降雨大致連續及達到約 30 毫米/小時以上時，幅射計的可降水份顯示較頻密波動，但 GPS 接收器的量度並沒有此現象，幅射計的數據此時較為可疑。

除卻這些差異，幅射計大致上提供了有用的資料，供降雨的臨近預報使用，例如它顯示了各高度的相對濕度增加，和對流層低層的水汽積聚。幅射計頻密地更新大氣的溫度和濕度廓線，可用於計算 K 指數，應用於臨近預報。本文發現當 K 指數維持在 35 或以上時，大雨和活躍的閃電一般會出現。

對於華南沿岸的夏季風降雨而言，幅射計計算的 K 指數在 35 或以上期間的值若作時間平均，發現與位於幅射計 20 公里範圍內的閃電總數和頻率有良好的相關性，並與雷達觀察到有閃電活動的雨帶的空間尺度頗為吻合。此外，閃電活動對 K 指數亦相當敏感：當 K 指數增加 1，閃電總數和

頻率會分別上升 7 及 6 倍。幅射計基本上連續地提供對流層的溫度和濕度廓線，因而可以研究 K 指數跟大氣不穩定度(以閃電活動來表示)的關係，使用一天只有兩次的無線電探空儀數據並不能進行這樣的工作。

鳴謝

作者感謝香港特別行政區政府地政總署提供 GPS 接收器的數據，由 GPS 接收器推導的可降水份是天文台跟香港理工大學的一個共同研究項目所製作的，作者並感謝中華電力公司提供香港的閃電定位網絡所探測的閃電數據。

參考文獻

- [1] Chan, P.W., and K.K. Yeung, 2003: Experimental extension of the measurement range of a boundary layer wind profiler to about 9 km. Preprints, 12th Symposium on Meteorological Observation and Instrumentation, Amer. Meteor. Soc.
- [2] Collier, C. G., and R. B. E. Lilley, 1994: Forecasting thunderstorm initiation in north-west Europe using thermodynamic indices, satellite and radar data. Meteor. Appl., 1, p.75-84.
- [3] Hewison, T., and coauthors, 2004: Monitoring inversions from ground-based remote sensing instruments during Temperature, Humidity, and Cloud profiling campaign (TUC). Preprints, 8th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing Applications.
- [4] Li, L.O., C.C. Lam and W.K. Wong, 2004: The meso-cyclone over Hong Kong on 8 May 2004: Doppler radar observation and numerical simulation. Preprints, International Conference on Mesoscale Convective Systems and Heavy Rainfall in East Asia (ICMCS-IV), Chinese Academy of Meteorological Sciences and China Meteorological Administration.

- [5] Liljegren, J., 2004: Improved retrievals of temperature and water vapor profiles with a twelve-channel radiometer. Preprints, 8th Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), Amer. Meteor. Soc.
- [6] Murphy, M.J., and K.L. Cummins, 2000: Early detection and warning of cloud-to-ground lightning at a point of interest. Preprints, 2nd Symposium on Environmental Applications, Amer. Meteor. Soc.
- [7] Rose, T., and H. Czekala, 2003: Filter bank radiometers for atmospheric profiling. Preprints, Sixth International Symposium on Tropospheric Profiling: Needs and Technologies, p.261-263.
- [8] Ware, R., P. Herzegh, F. Vandenberghe, J. Vivekanandan, and E. Westwater, 2004: Ground-based radiometric profiling during dynamic weather conditions. Submitted to J. Appl. Meteor.

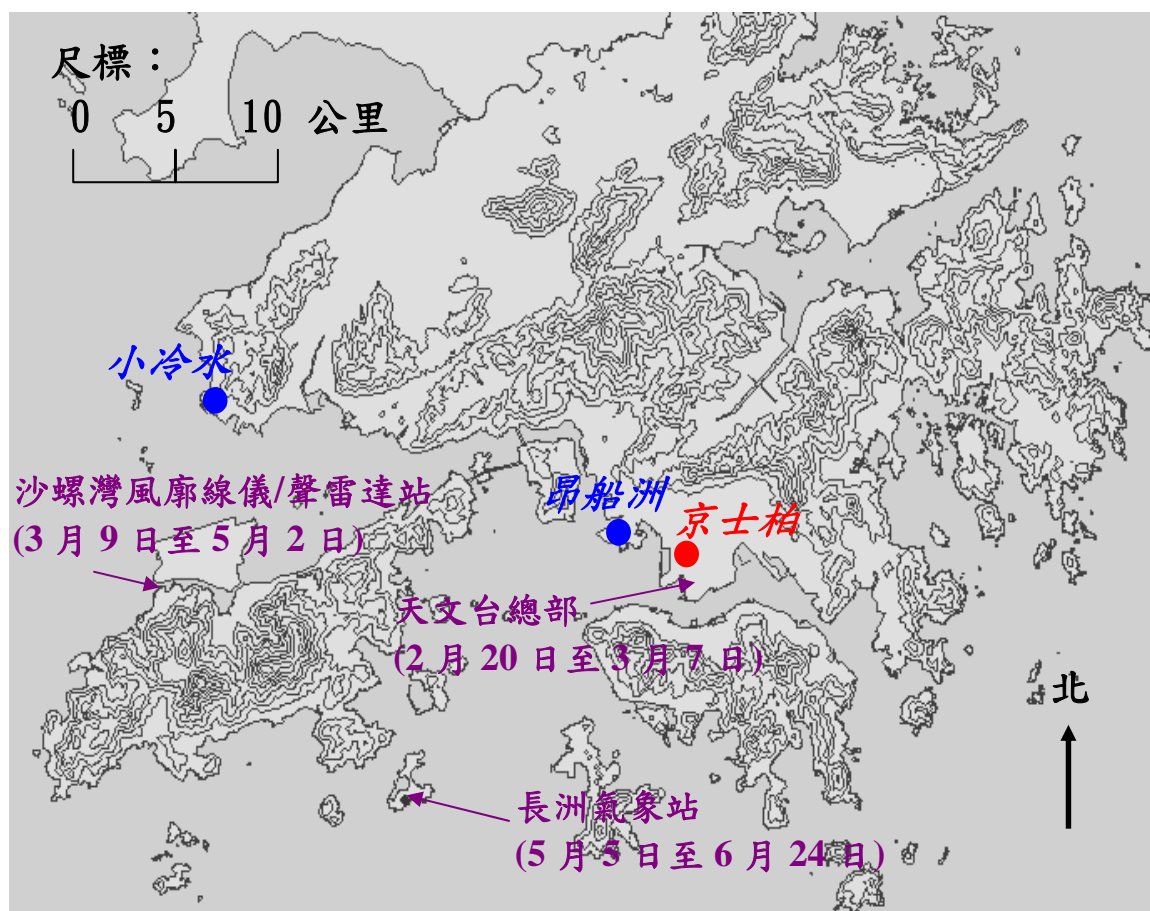
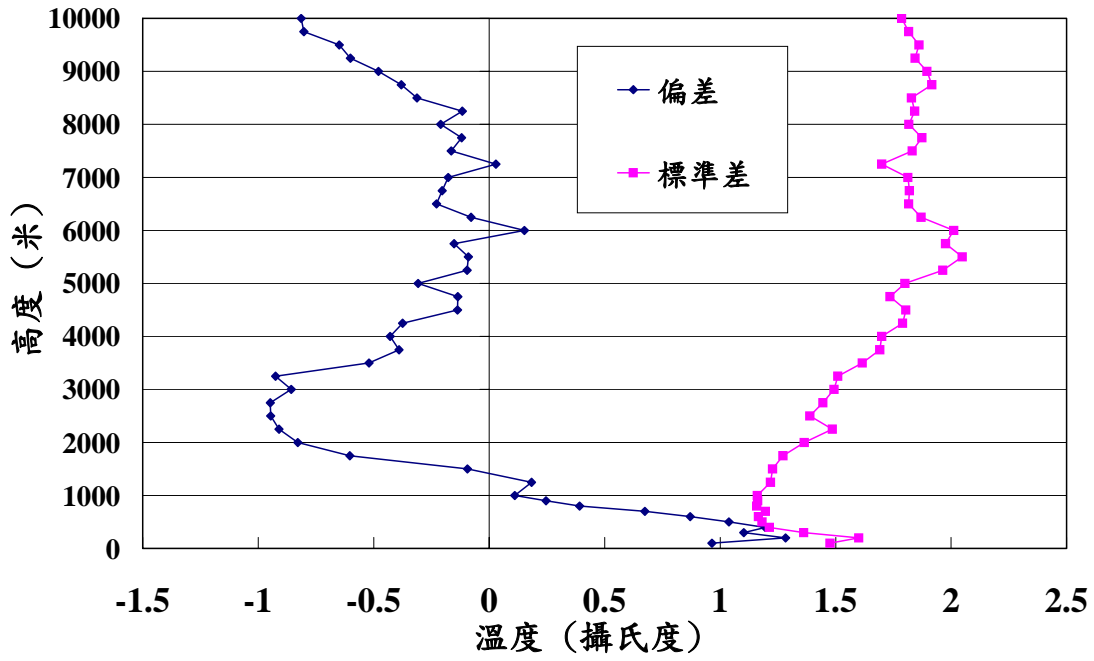
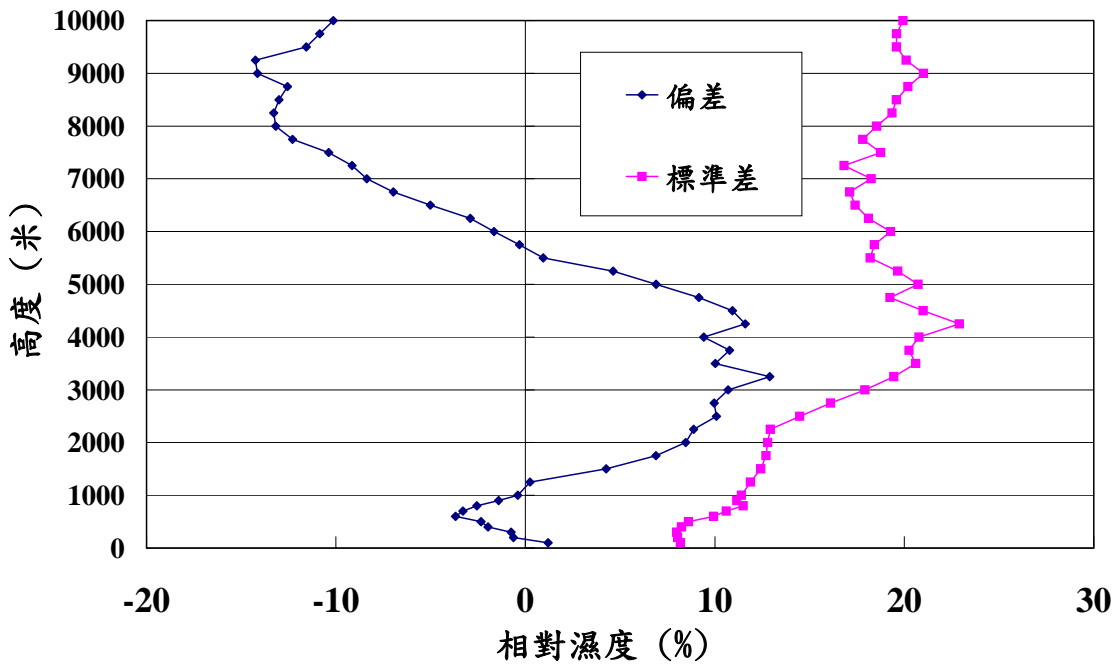


圖 1 香港地圖(等高線間距為 100 米)。幅射計在三個地方運作(地名以紫色顯示),時間包含在括號內。圖中亦顯示內文提到的無線電探空儀站(紅色)和 GPS 接收器(藍色)。



(a)



(b)

圖 2 幅射計的量度相對於同時無線電探空儀數據的偏差和標準差。

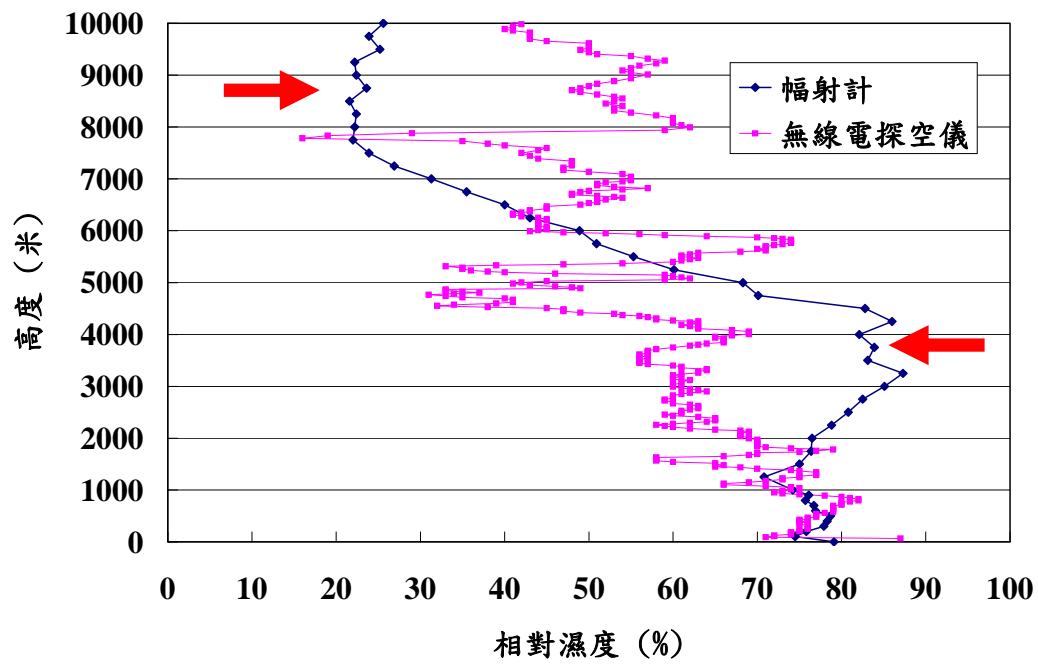


圖 3 2004 年 5 月 31 日 00 世界時輻射計和無線電探空儀的相對濕度廓線，顯示對流層中部的濕偏差及頂部的乾偏差(紅箭頭表示)。

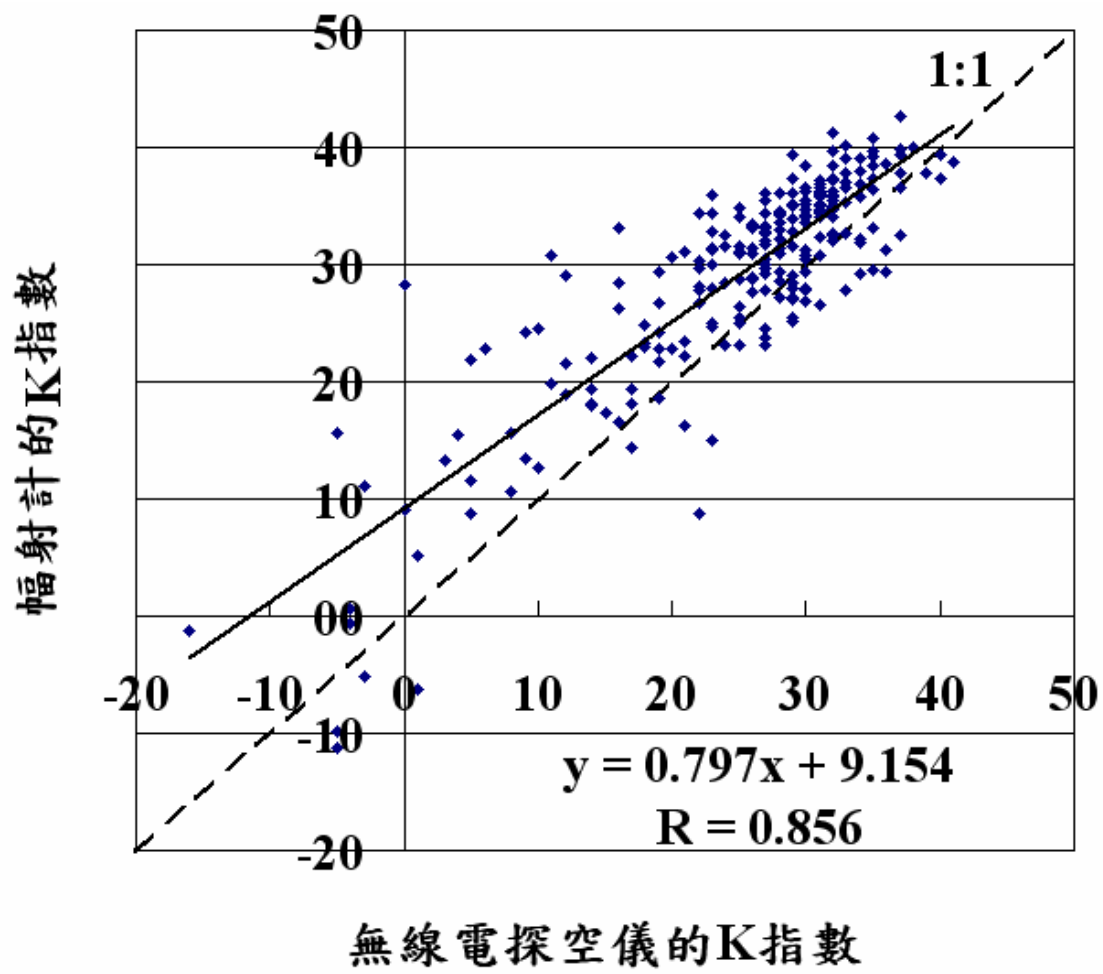


圖 4 輻射計與無線電探空儀的 K 指數的比較。

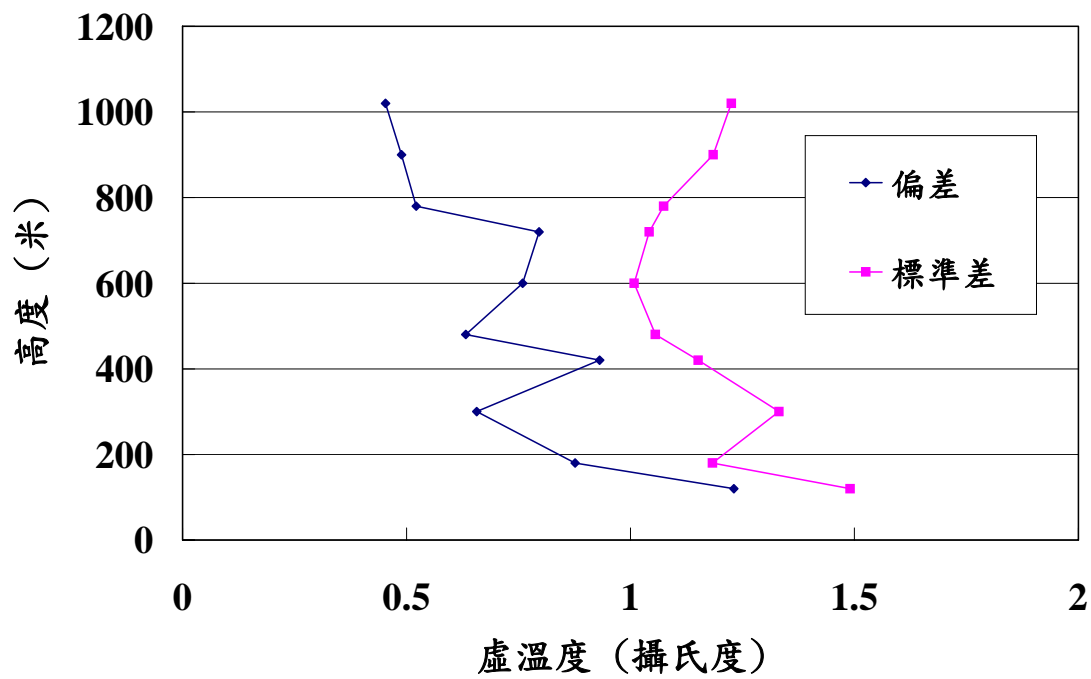


圖 5 幅射計量度的虛溫度相對於同時風廓線儀/聲雷達數據的偏差和標準差。

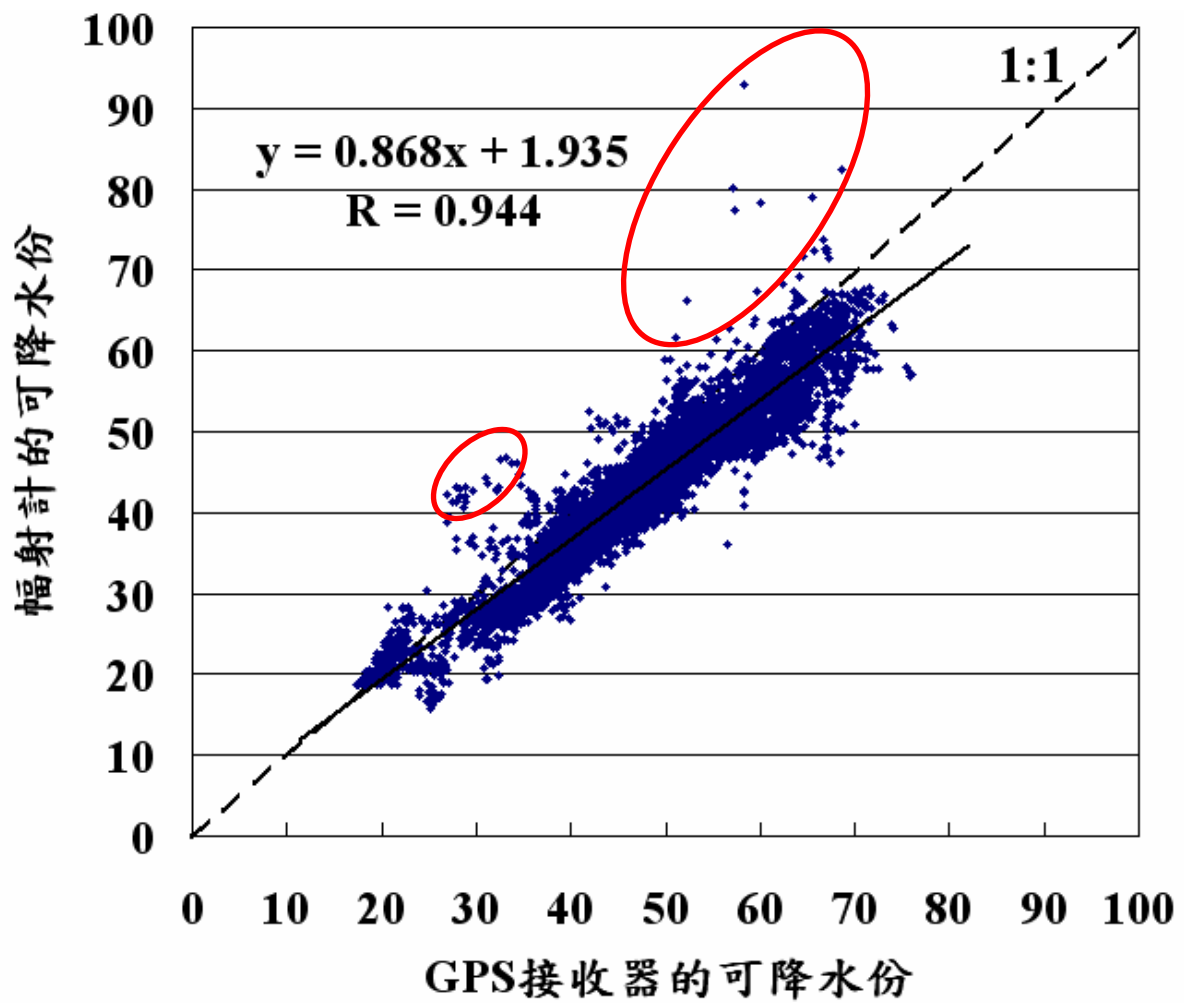


圖 6 輻射計與 GPS 接收器的可降水份(單位為毫米)的比較，雖然兩組數字有時相差達 10 毫米或以上(例如紅圈中的數據點)，但相關係數相當高，超過 0.9。

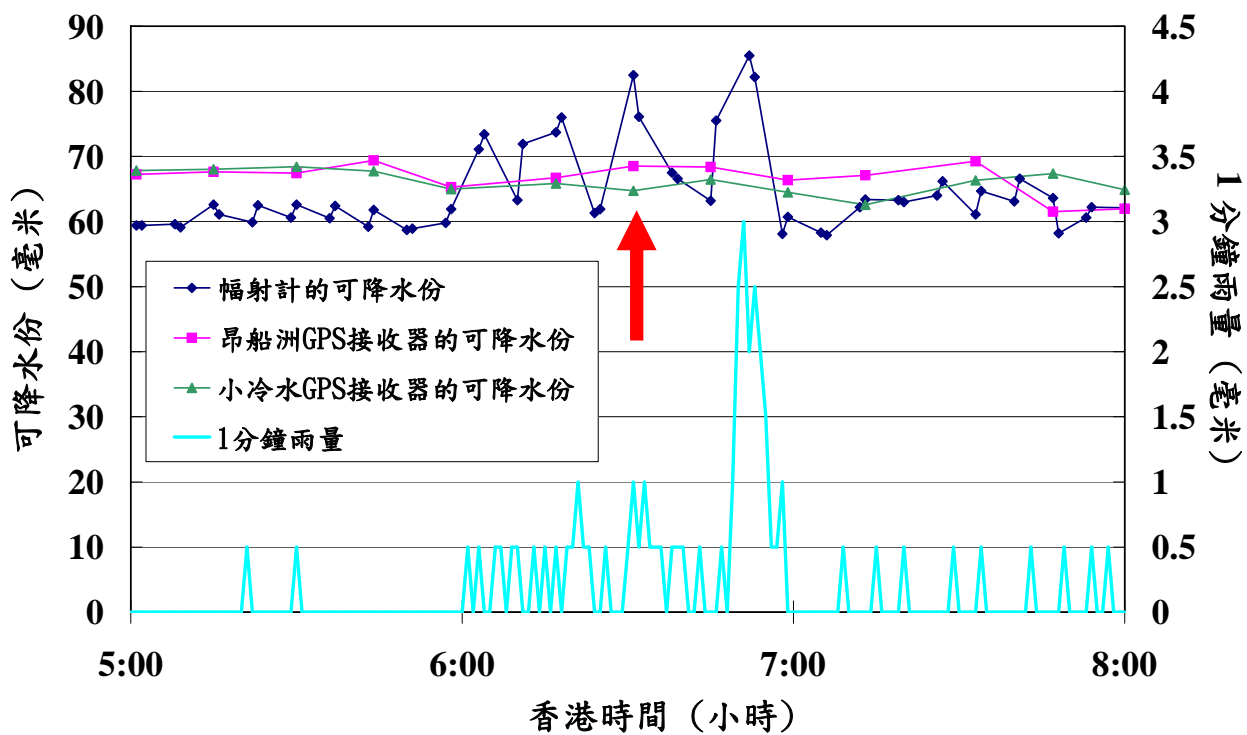


圖 7 2004 年 5 月 8 日上午輻射計與 GPS 接收器的可降水份，以及輻射計所在地(長洲)所量度的 1 分鐘雨量，輻射計其中一個有疑問的數據以紅箭頭表示。

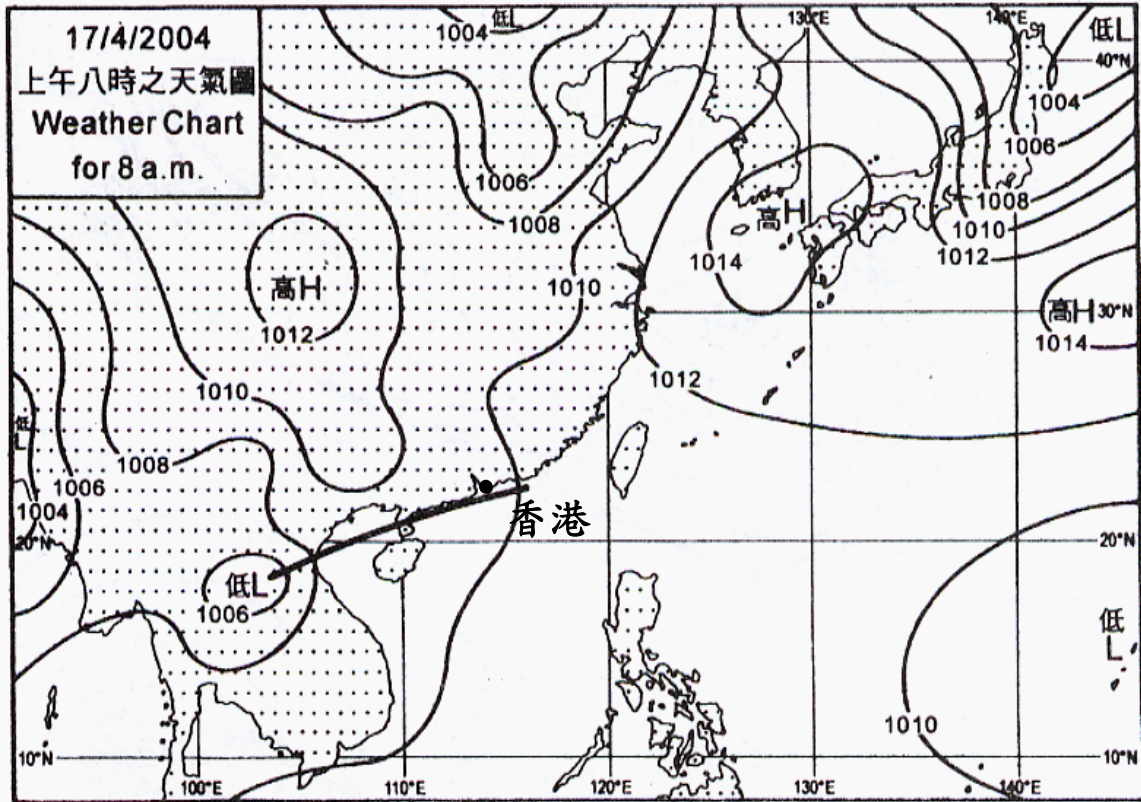


圖 8 2004 年 4 月 17 日上午 8 時的地面等壓線圖。

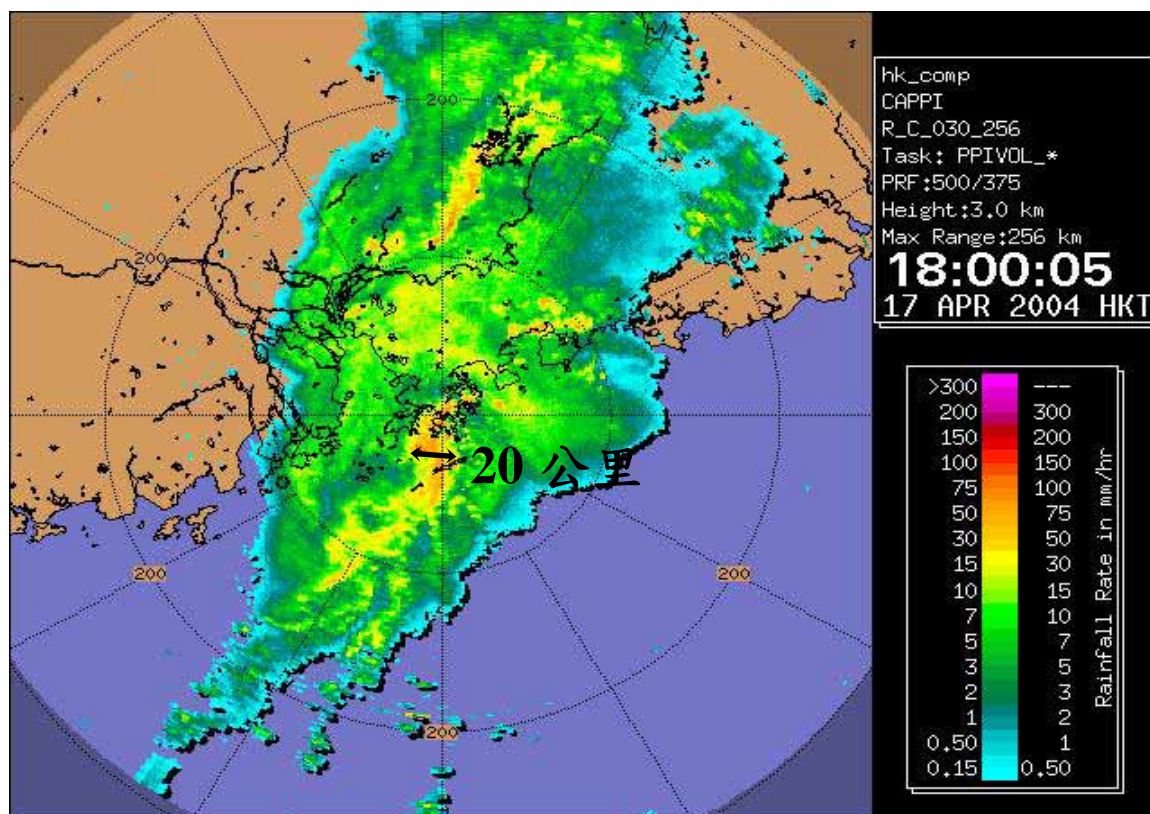


圖 9 2004 年 4 月 17 日下午 6 時離海平面 3 公里高度的天氣雷達影像。

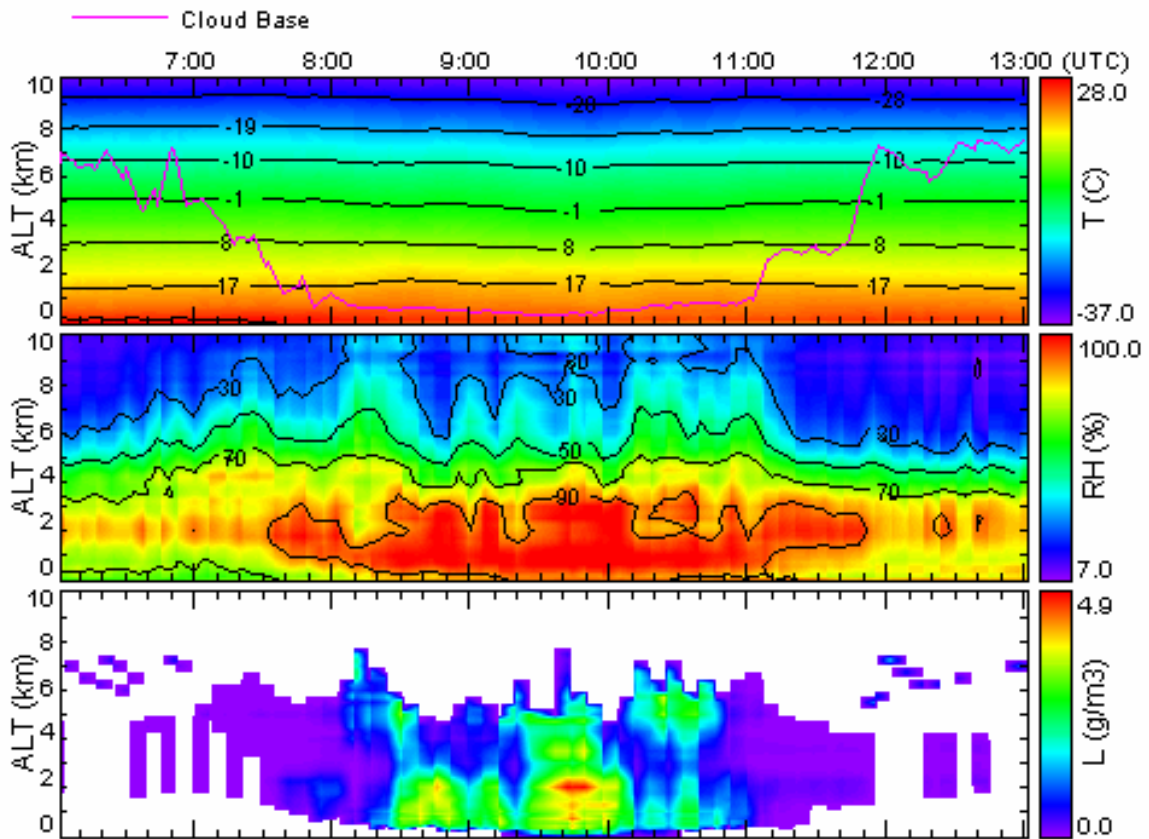


圖 10 2004 年 4 月 17 日下午 2 時(06 世界時)至 9 時(13 世界時)之間幅射計數據的時間-高度剖面，最上圖顯示溫度和雲底高度，中間為相對濕度，下圖為液態水含量。(本剖面利用幅射計的 Vizmet 軟件製作)

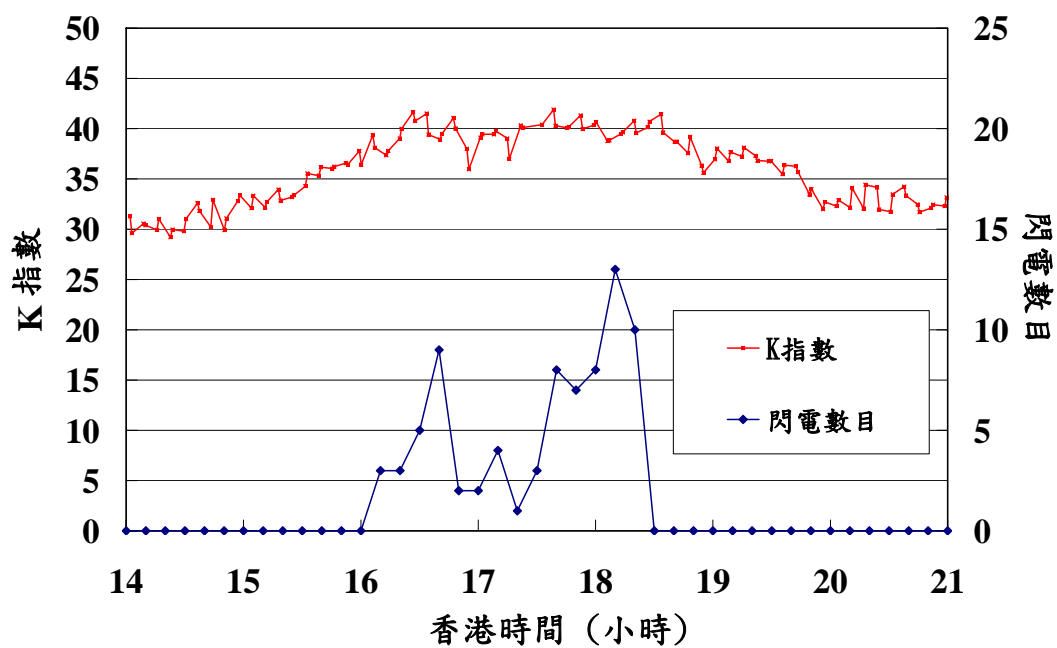


圖 11 2004 年 4 月 17 日下午由幅射計計算的 K 指數及幅射計 20 公里範圍內的閃電數目。

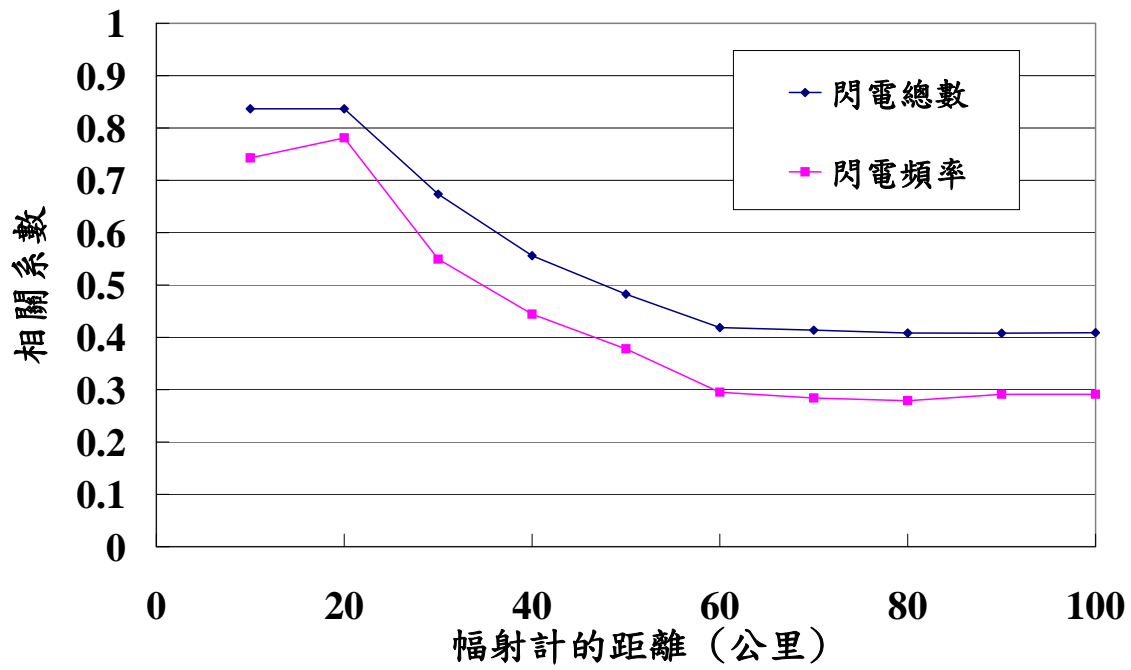
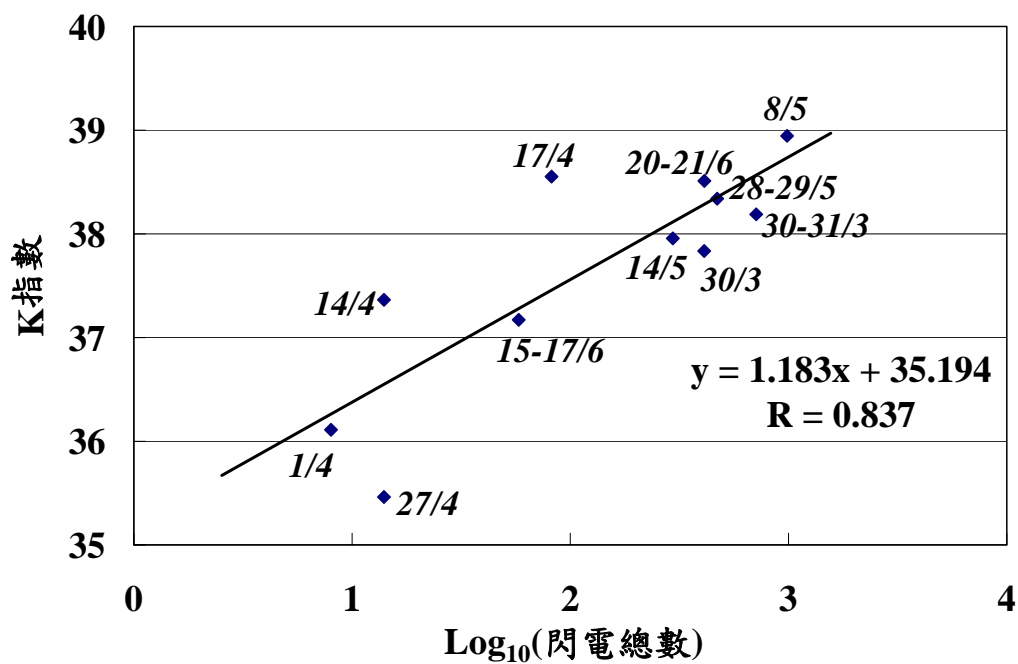
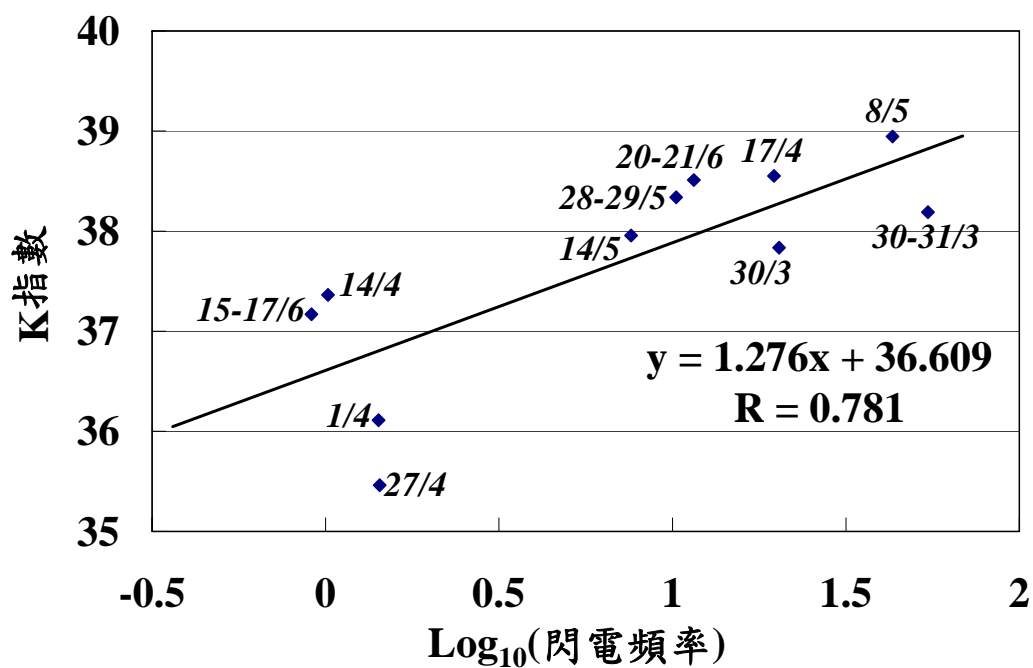


圖 12 K 指數時間平均與閃電活動(閃電總數或頻率)的相關係數，隨著輻射計的距離的改變。



(a)



(b)

圖 13 K 指數時間平均與輻射計 20 公里範圍內的(a)閃電總數和(b)閃電頻率的散佈圖，降雨過程的日期在數據點旁表示(格式為日/月份)。