

閃電頻率與劇烈降雨關係之初步分析

林品芳¹ 丘台光² 陳嘉榮² 張保亮²

馬祖氣象站¹ 氣象衛星中心²

中央氣象局

摘要

劇烈天氣常伴隨閃電的發生，閃電頻率高的地區經常伴隨強烈對流及降水，就長時間統計而言，閃電頻率與降水間有相當程度的相關。隨著台電整合型閃電落雷偵測系統的更新，該系統除了提供傳統的雲對地閃電(cloud-to-ground lightning)觀測外，同時對雲內(intracloud)及雲間(cloud-to-cloud)閃電提供觀測，中央氣象局自2005年起，開始即時接收此資料，除進行即時顯示外，亦整合至劇烈天氣監測系統(QPESUMS)中。

由2005年5月12日梅雨鋒面個案初步分析顯示，其閃電頻率每分鐘平均高達251次，而雲內閃電頻率約佔總量的 98%，而雲對地閃電所佔比例則相對偏小，只佔 2%。分析中也發現，大部份的閃電發生在最強降水區，但傾向於偏向降雨中心的前緣，兩者在空間分佈上相當相似，且回波若大於40 dBZ，則兩者峰值出現的時間具一致性。另外，降雨估計值超過45mm，且閃電頻率超過8次/10分鐘，則閃電相對於降雨估計具10~30分的前導時間(leading time)的機會便會大幅增加。

一、前言

劇烈天氣常伴隨閃電的發生，閃電密度及頻率高的地區經常伴隨強烈對流及降水，就長時間統計而言，對流愈劇烈閃電的頻率愈高，閃電頻率與降水間有相當程度的相關(Shafer et al. 2000; Lang et al. 2000; Watson et al. 1995; Toracinta et al. 1996; Gremillion and Orville 1999; Knupp et al. 1998)。

Shackford(1960)首先指出閃電與0 °C 高度層以上的最大雷達回波及雷達回波的垂直分佈相關。而Larsen and Stansbury(1974)及Marshall and Radhakant(1978)進一步指出高度6~7公里回波強度30~43 dBZ與閃電的位置、時間及頻率有密切相關。Dye et al. (1989)及Michimoto(1990)也指出位於溫度層-10~-20 °C間，當回波強度30~40 dBZ開始出現後，約5~30分鐘即可能出現閃電現象。另外，位於-10°C溫度層之混合相態區，若雷達回波小於40 dBZ，且平均垂直速度低於6~7 m/s，則閃電不太可能發生(Dye et al. 1989; Zipser 1994; Zipser and Lutz 1994)。

在閃電頻率與降水的相關研究方面，Kuettner (1950)發現大部份的閃電發生在強降水的區域。Carte and Kidder (1977)觀測發現最高的閃電密度發生在最強降雨區附近，但與雷暴的回波中心不一致，相關研究(Dye et al. 1986; López et al. 1990; Watson et al. 1995)亦指出閃電似乎傾向去避開最大回波區，閃電中心時常與回波中心不一致，而在整個雷暴的生命期中，最大的閃電頻率區域的位置對應著最大回波中心在變化，且閃電傾向發生於最大回波區的外緣。

Shafer et al.(2000)和Watson et al.(1995)則是探討由回波所推導之垂直液態水含量(vertical integrated liquid, VIL)和CG頻率之相關，並指出兩者隨時間變化的趨勢相當一致。洪(2002)亦發現雲對地閃電(cloud-to-ground lightning,此後本文簡稱CG)頻率的峰值和VIL有良好的相關，VIL隨時間變化的趨勢和閃電頻率的趨勢幾乎一致。另一方面，Williams et al.(1999)分析佛羅里達州的雷暴，發現總閃電率常在劇烈天氣現象發生前的15~20分鐘前會快速的增加，Lang and Rutledge(2005)亦發現類似的特徵。

對於閃電資料在實際應用研究上，Kempf and Krider (2003)提出若CG量與經過區域平均的降水

量(mm)有相當好的一致性，閃電資料則有助於估計並預報中尺度對流系統降雨的位置與降雨量。而Tapia et al. (1998)則是指出由CG所反演出來的降雨分布可以掌握較大降水區域的位置，並能估計強烈降水事件在時間與空間上的分布。因此，如何利用閃電資料進行危險天氣監測，並進行降水的估計，乃至極短時間的降水預報，就成爲一個重要的研究課題，特別是對於雷達因山區或地形而無法觀測的區域。

隨著台電整合型閃電落雷偵測系統的更新，中央氣象局自2005年起，開始即時接收此資料，除進行即時顯示外，亦整合至劇烈天氣監測系統(QPESUMS) (丘等 2004)。由於台灣地區劇烈對流伴隨閃電帶來強烈降雨之個案，在閃電部份，除了CG外，亦包含大量的雲內(intracloud)及雲間(cloud-to-cloud)閃電(此後本文統稱IC)，故IC與降雨間必存在相關性，先前許多研究多探討雷達回波參數、降水與CG間的相關，較少探討與IC間的關係，又由於CG量在多個個案中，其量明顯少於IC量(圖未示)，故本文分析2005年5月12日個案之總閃電頻率與回波及區域平均降水量在空間上及時間上的相關，希望能藉由閃電資料的整合，進而提升降水估計的品質，提高短時劇烈天氣系統的定量降水監測與預報能力。第二節說明相關資料來源，第三節描述初步分析結果，第四節則是討論與結論。

二、資料來源

本研究主要分析2005年5月12日鑲嵌於梅雨鋒面中對流胞伴隨閃電現象之個案。本研究所使用之雷達回波爲Qpesums系統中，組合中央氣象局五分山、花蓮、七股及墾丁等四座雷達最接近地面且不受地形阻擋與影響的仰角觀測，再內插至網格 $0.0125^{\circ} \times 0.0125^{\circ}$ 之經緯度最低仰角合成回波(Hybrid Reflectivity)資料，降雨估計資料則是經由此回波的 $Z=32.5R^{1.65}$ 關係式(Xin et al. 1997)而來。而閃電資料係中央氣象局接收來自台灣電力公司之整合型閃電落雷偵測系統，分別裝置於吉山、崙尾、明潭、小琉球、鶯子嶺、烏石鼻及鳳林等七座，該系統除了提供傳統的CG觀測外，同時對雲內及雲間閃電提供觀測，觀測次數可達每秒100次，因此可提供幾乎沒有空間及時間解析度限制的即時閃電資料，資料內容包括CG或IC之發生時間、經緯度、極性、強度以及分辨是否同屬於一個閃藉(lightning stroke)系統。本文中所謂之閃電，因CG量皆明顯少於IC量，因此均指總閃電，暫不區分IC或CG。

三、分析結果

2005年5月12日爲一梅雨鋒面個案，此鋒面包含許多中小尺度對流系統，這些對流系統自海面上向東移進台灣地區，呈現滯留現象後在台灣地區消散(圖未示)，爲台灣中部以北地區帶來超過300 mm的日雨量(圖未示)，並伴隨相當頻繁的閃電現象，當日的總閃電量爲362,574次/天(如圖1所示)，平均每分鐘閃電頻率高達251次/分鐘，其中IC(紫色星號)佔總閃電量的98%，而CG(桃色星號)則只佔了2%，CG所佔比例相當小，可見IC和對流發展的強度有密切的關係，因此此個案的後續研究暫不區分IC或是CG。由圖1發現，閃電幾乎分布於台灣地區，主要是劇烈對流所引起的閃電現象。

由於此個案包含大量的閃電量及降雨量，又雷達可在天氣系統到達台灣地區前先進行觀測，因此閃電與雷達降雨估計之間若存在相關性，便可作爲劇烈天氣發生的指標。因此分析此個案每小時降雨估計與閃電分佈(在此僅示出當日具最大量小時閃電量之18~19Z之降雨估計與閃電分佈圖，如圖2)，圖2a爲18~19Z的雷達回波降雨估計，圖2b則爲18~19Z雷達回波降雨估計與閃電的空間分佈，顯示閃電密度高的區域非常接近降雨中心，大部份的閃電發生在最強降水區，兩者空間分佈相似，即較強降雨中心有較高的閃電密度。由降雨估計與閃電分佈的時間序列圖(圖未示)來看，閃電中心與降雨中心雖並非完全一致，傾向於偏向降雨中心的前緣，但只有些微差異，大體來說相當一致。另外，並非所有降雨中心都有較高的閃電密度。

由於Martin (1995)觀測CG發生位置與到達地面的位置，其水平距離差介於8 ~ 10 km之間；Kridler (1988)發現有3 ~ 4 km的距離差；Orville (1994)探測到的水平距離差則是5 ~ 10 km；Schuur et al. (1991)及Hunter et al. (1992)也觀測發現兩者會有顯著的水平距離差。考慮這些研究對CG閃電發生位置與到達地面位置兩者間水平誤差的觀測結果，因此選取5×5網格點內閃電量與降雨估計的區域平均值，並做兩者每小時隨時間的變化趨勢圖。先分別計算每個區域在5月12日間的總閃電量，選擇最高的前20名(在此僅示出前2名，如圖3)區域平均閃電頻率與降水估計隨時間的變化，可明顯看出當降雨明顯增加時，閃電頻率也跟著明顯增加，即兩者峰值出現的時間相當一致，具有明顯的正相關。

由於此時間解析度爲一小時，較無法看出兩者在時間上是何者具先導時間(leading time)，因此進一步將時間解析度提高爲10分鐘，探討10分鐘區域合成回波分別與區域閃電頻率在時間上的相

關，亦選擇區域閃電量最高的前20名(在此僅示出前2名，如圖4)。圖4中綠點為閃電頻率實際值，未打上綠點之閃電頻率為原閃電頻率之5倍值，主要是為了突顯閃電峰值的出現時間。圖4顯示在此個案中，若回波值大於40 dBZ，幾乎都會對應到閃電頻率的峰值，但不一定具有高的閃電頻率值，但若大回波(大於40 dBZ)的持續時間較長，此時間的回波峰值幾乎對應至高的閃電頻率峰值。由此個案10分鐘區域平均的回波與閃電頻率隨時間的變化來看，雖然趨勢上有相當程度上的一致，但無法明顯分辨何者具先導時間。由於較大回波表示有較多或是較大的雨滴粒子，故由10分鐘區域平均的最低仰角合成回波，利用 $Z=32.5R^{1.65}$ 關係式(Xin et al. 1997)，分析降雨估計與閃電頻率隨時間的相關，亦選擇區域閃電量最高的前20名，(在此僅示出第3名及第5名，如圖5)。由此前20名區域降雨估計與閃電頻率隨時間的變化看來，暫且不論峰值大小，其出現的時間相當一致，且在最大峰值處，閃電頻率相對於降雨估計約有10~30分鐘的前導時間。另外，若降雨估計值超過45mm，且閃電頻率超過8次/10分鐘，則閃電相對於降雨估計具前導時間的機會便會大幅增加；若兩者皆不超過此閾值，則閃電相對於降雨估計幾乎無前導時間。

四、討論與結論

由2005年5月12日具中尺度對流系統伴隨閃電現象之梅雨鋒面個案初步分析顯示，IC於此個案中佔98%，而CG則只佔2%，明顯可見IC和對流發展的強度有密切的關係。大部份的閃電發生在最強降水區，雖並非完全一致，傾向於偏向降雨中心的前緣，但兩者在空間分佈上相當相似，與Tapia et al.(1998)、Kuettner (1950)及Carte and Kidder (1977)研究結果類似。且當降雨明顯增加時，閃電量也跟著明顯增加，兩者峰值出現的時間具一致性，有明顯的正相關，此與Tapia et al.(1998)所得結果相當。

此外，針對本個案10分鐘區域平均回波與閃電頻率之時間序列圖所得結果發現，若回波大於40 dBZ，幾乎都會對應到閃電頻率的峰值，顯示兩者在時間分佈上具一致性，但無法明顯分辨何者具先導時間。雖然所分析的合成回波無法完全表現回波在垂直方向上的分佈，但仍可提供天氣系統劇烈程度的訊息，因此，若合成回波與閃電頻率在時間上具一致性，而較大合成回波暗示在垂直方向上具有較多或是較大的雨滴粒子，若初始觀測到較大回波，則與地面觀測到的降雨會有時間上的延遲，則閃電相對於降雨則可能具先

導時間。因此分析10分鐘區域平均最低仰角合成回波所估計之雨量與閃電頻率之時間序列圖發現，若降雨估計值超過45mm，且閃電頻率超過8次/10分鐘，則閃電相對於降雨估計具10~30分鐘的前導時間的機會便會大幅增加。此前導時間加上地面觀測降雨相對於初始觀測到大回波的延遲時間，以及閃電資料是否可應用閃電資料做對流降雨估計及劇烈天氣發生的指標，此為未來需要進一步分析的重要研究課題。

未來本研究將增加個案分析並進一步探討閃電、雷達回波的垂直分佈及VIL三者間在空間及時間上的相關，希望有助於降水估計品質的提升，並提高本局對於短時劇烈天氣的定量降水監測與預報能力。

參考文獻

- 丘台光、陳嘉榮、張保亮與林品芳，2004：應用多重觀測工具之定量降雨估計之研究。第八屆大氣科學學術研討會，2004年5月17-20，桃園龍潭。
- 洪景山，2002：雲對地閃電和雷達回波參數之相關：個案研究。大氣科學，30，21-34。
- Carte, A. E., and R. E. Kidder, 1977: Lightning in relation to precipitation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **39**, 139-148.
- Dye, J. E., J. J. Jones, W. P. Winn, T. A. Cerni, B. Gardiner, D. Lamb, R. L. Pitter, J. Hallett, and C. P. R. Saunders, 1986: Early electrification and precipitation development in a small, isolated Montana cumulonimbus. *J. Geophys. Res.*, **91**, 1231-1247.
- Dye, J. E., W. P. Winn, J. J. Jones, and D. W. Breed, 1989: The electrification of New Mexico thunderstorms. 1. Relationship between precipitation development and the onset of electrification. *J. Geophys. Res.*, **94**, 8643-8656.
- Gremillion, M. S., and R. E. Orville, 1999: Thunderstorm characteristics of cloud-to-ground lightning at the Kennedy Space Center, Florida: a case study of lightning initiation signatures as indicated by the WSR-88D. *Wea. Forecasting*, **14**, 640-649.
- Hunter, S. M., T. J. Schuur, T. C. Marshall, and W. D. Rust, 1992: Electric and kinematic structure of the Oklahoma mesoscale convective system of 7 June 1989. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 2226-2239.
- Kempf, N. M., and E. P. Krider, 2003: Cloud-to-ground lightning and surface rainfall during the grate flood of 1993. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1140-1149.
- Knupp, K. R., B. Geerts, and S. J. Goodman, 1998: Analysis of a small, vigorous mesoscale convective a low-shear environment. Part I: Formation, radar echo structure, and lightning

- behavior. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1812-1836.
- Krider, E. P., 1988: Spatial distribution of lightning strikes to ground during small thunderstorms in Florida. *Proc. 1988 Int. Aerospace and Ground Conf. on Lightning and Static Electricity*, Oklahoma City, OK, Dept. of Commerce, NOAA/ERL, 318-323.
- Kuettner, J., 1950: The electrical and meteorological conditions inside thunderclouds. *J. Meteor.*, **7**, 322-332.
- Lang, T. J., and S. A. Rutledge, 2005: One severe storm with two distinct electrical regimes during its lifetime: Implications for nowcasting severe weather with lightning data. *The 85th AMS Annual Meeting*.
- Lang, T. J., S. A. Rutledge, J. E. Dye, M. Venticinque, P. Laroche, and E. Defer, 2000: Anomalous low negative cloud-to-ground lightning flash rates in intensive convective storms observed during STERAO-A. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 160-173.
- Larsen, H.R., and E. J. Stansbury, 1974: Association of lightning flashes with precipitation cores extending to height 7 km. *J. Atmos. Terr. Physics*, **36**, 1547-1553.
- López, R. E., W. D. Otto, R. Ortiz, and R. L. Holle, 1990: The lightning characteristics of convective cloud systems in northeastern Colorado. Preprints, *Conf. on Atmospheric Electricity*, Kananaskis Park, AB, Canada, Amer. Meteor. Soc., 727-731.
- Marshall, J. S., and S. Radhakant, 1978: Radar precipitation maps as lightning indicator. *J. Appl. Meteor.*, **17**, 206-212.
- Martin, F., 1995: Actividad tormentosa en la Peninsula y areas limitrofres durante el verano de 1994. Tech. Note 23, Instituto Naconal de Meteorologia, 27 pp.
- Michimoto, K., 1990: A study of radar echoes and their relation to lightning discharge of thunderclouds in the Hokuriku district. Part I: Observations and analysis of thunderclouds in summer and winter. *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 327-335.
- Orville, R. E., 1994: Cloud-to-ground lightning flash characteristics in the contiguous United States: 1989-1991. *J. Geophys. Res.*, **99**, 10833-10841.
- Schuur, T. J., B. F. Smull, W. D. Rust, and T. C. Marshall, 1991: Electrical and kinematic structure of the stratiform precipitation region trailing an Oklahoma squall line. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 825-842.
- Shackford, C. R., 1960: Radar indications of a precipitation-lightning relationship in New England thunderstorms. *J. Meteorology*, **17**, 15-19.
- Shafer, M. A., D. R. MacGorman, and F. H. Carr, 2000: Cloud-to-ground lightning throughout the lifetime of a severe storm system in Oklahoma. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1798-1816.
- Tapia, A., J. A. Smith, and M. Dixon, 1998: Estimation of convective rainfall from lightning observations. *J. Appl. Meteor.*, **37**, 1497-1509.
- Toracinta, E. R., K. I. Mohr, E. J. Zipser, and R. E. Orville, 1996: A comparison of WSR-88D reflectivities SSM/I brightness temperatures, and lightning for mesoscale convective system in Texas. Part I: Radar reflectivity and lightning. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 902-918.
- Watson, A. I., R. L. Holle, and R. E. López, 1995: Lightning from two national detection networks related to vertically integrated liquid and echo-top information from WSR-88D radar. *Wea. Forecasting*, **10**, 592-605.
- Williams, E. R., B. Boldi, A. Matlin, M. Weber, S. Hodanish, D. Sharp, S. Goodman, R. Raghavan, and D. Buechler, 1999: The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. *Atmos. Res.*, **51**, 245-265.
- Xin, L., G. Recuter, and B. Laroche, 1997: Reflectivity-rain rate relationship for convective rainshowers in Edmonton. *Atmos. Ocean*, **35**, 513-521.
- Zipser, E. J., 1994: Deep cumulonimbus cloud systems in the tropics with and without lightning. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1837-1851.
- Zipser, E. J., and K. Lutz, 1994: The vertical profile of radar reflectivity of convective cell: A strong indicator of storm intensity and lightning probability? *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1751-1759.

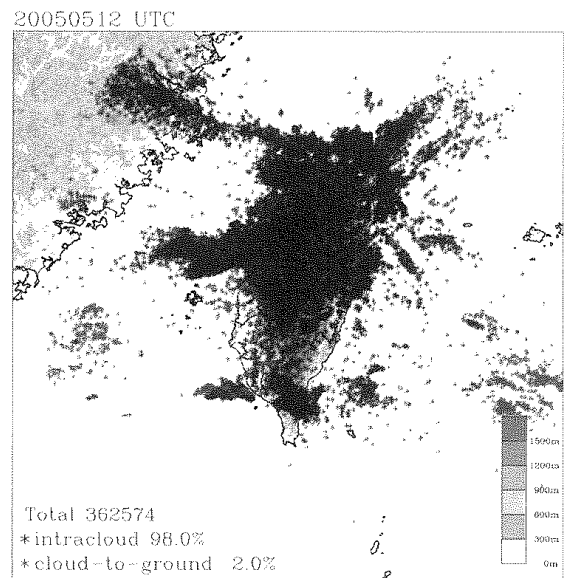


圖 1 2005 年 5 月 12 日閃電分佈圖。紫色星號為雲內閃電，桃紅色星號為雲對地閃電。

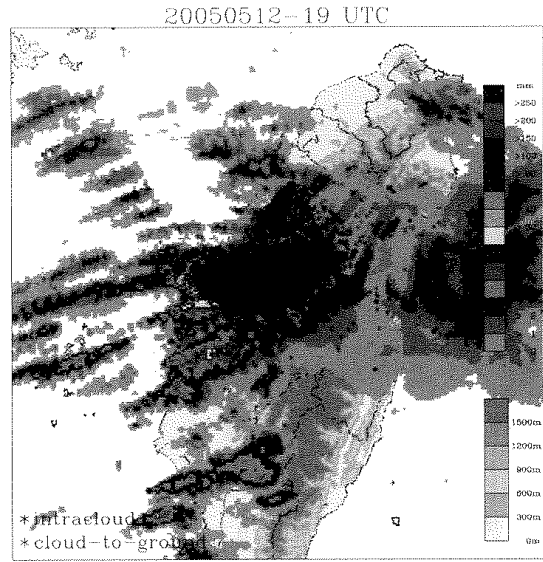
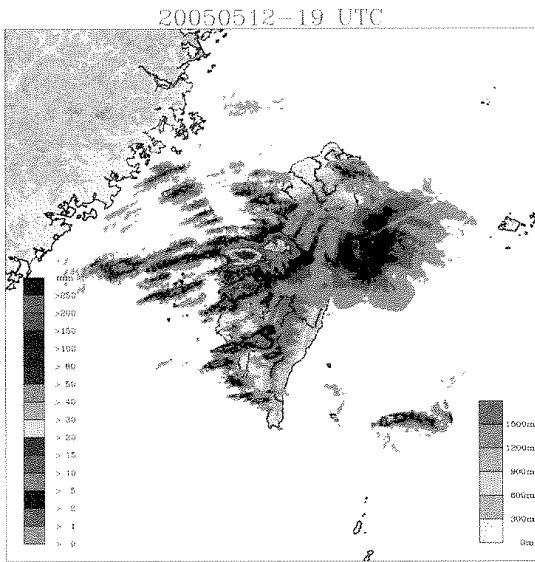


圖 2 2005 年 5 月 12 日 18~19Z(a)雷達降雨估計分佈圖；(b)雷達降雨估計與閃電分佈圖。紫色星號為雲內閃電，桃紅色星號為雲對地閃電。

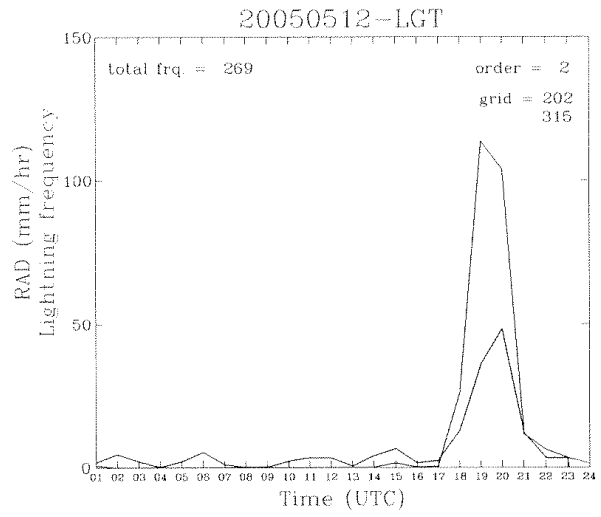
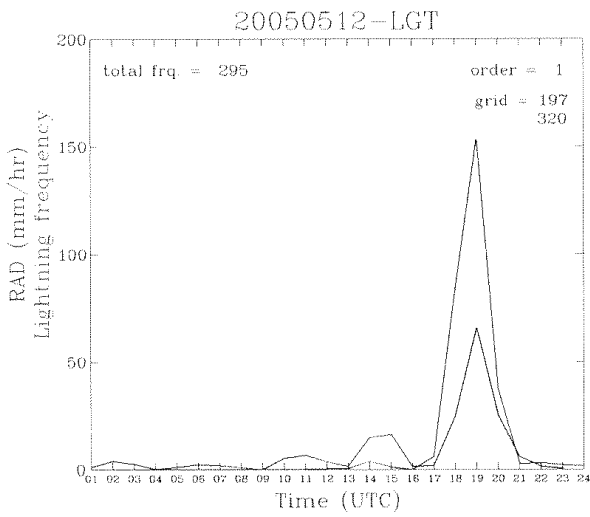


圖 3 2005 年 5 月 12 日每小時閃電頻率(紅線)與雷達回波降雨估計(藍線)隨時間的變化。

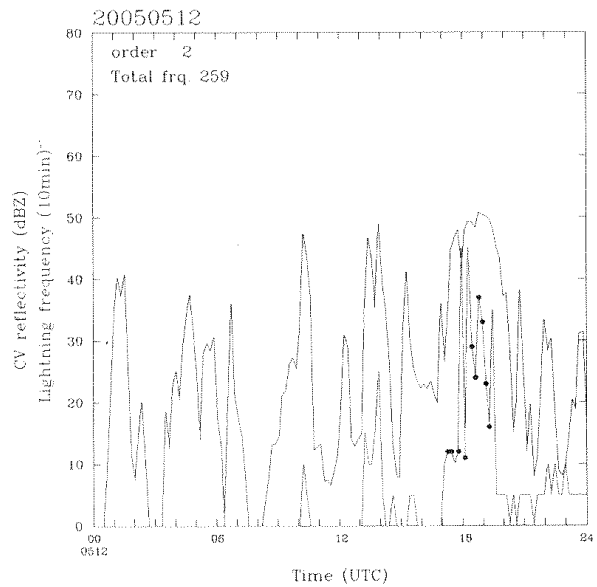
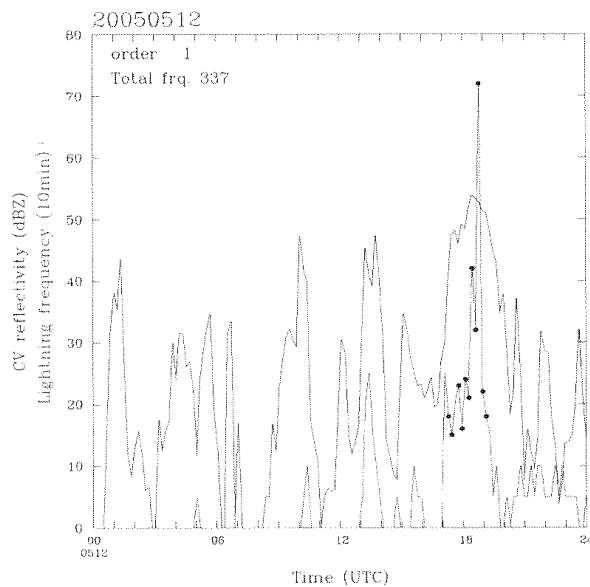


圖 4 2005 年 5 月 12 日每 10 分鐘閃電頻率(紅線)與雷達最大合成回波(藍線)隨時間的變化。閃電頻率曲線上之綠點為閃電頻率實際值，未有綠點之閃電頻率值為原值放大 5 倍之值。

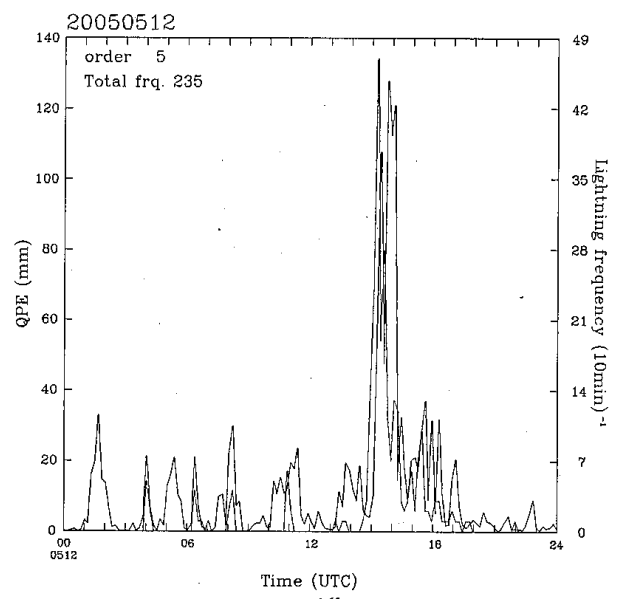
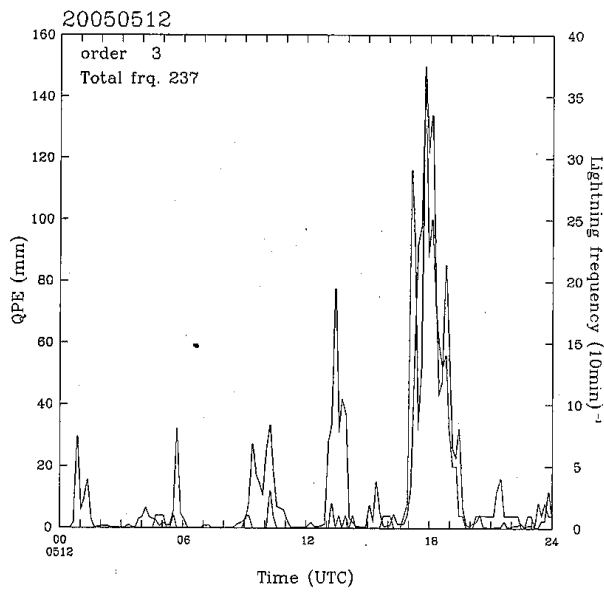


圖 5 2005 年 5 月 12 日每 10 分鐘閃電頻率(紅線)與雷達最低仰角合成回波經 $Z=32.5R^{1.65}$ 關係式所估計之降雨量(藍線)隨時間的變化。