

閃電資料在降水估計之初步分析

林品芳¹ 張保亮² 丘台光² 陳嘉榮²
馬祖氣象站¹ 氣象衛星中心²

中央氣象局

摘要

隨著台電整合型閃電落雷偵測系統(Total Lightning Detection System, TLDS)的更新，該系統除了提供傳統的雲對地閃電(cloud-to-ground lightning)偵測外，同時對雲內(intracloud)及雲間(cloud-to-cloud)閃電提供偵測，中央氣象局自2005年1月起，開始即時接收此資料，並進行即時顯示及整合至劇烈天氣監測系統(QPESUMS)。

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。由2005年5月12日梅雨鋒面個案初步分析顯示，其閃電頻率平均每分鐘高達252次，而雲內閃電頻率約佔總閃電量的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較強降水區，但傾向於偏向降雨中心的前緣，兩者在空間及時間上的分佈相似，且當降雨量明顯增加時，閃電量也跟著明顯增加。除此之外，閃電量愈多，所對應之雷達合成回波(column vector, CV)、垂直液態水含量(vertical integrated liquid, VIL)與雷達估計降雨量等各雷達參數值也愈大，且相關性愈大，其中又與VIL的相關性較佳。

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，閃電頻率與降水間存在有相當程度的相關(Gremillion and Orville 1999; Knupp et al. 1998; Lang et al. 2000; Shafer et al. 2000; Toracinta et al. 1996; Watson et al. 1995)。

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 公里回波強度達30 ~ 43 dBZ時，其與閃電的位置、時間及頻率有密切相關。Dye et al. (1989)及Michimoto(1990)也發現位於溫度層-10 ~ -20 °C 間，當回波強度30 ~ 40 dBZ開始出現後，約5 ~ 30分鐘後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時，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區域。Carte and Kidder(1977)則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完全一致。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，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，但閃電中心時常與回波中心不一致，傾向發生於最大回波區的外緣。

Watson et al.(1995)和Shafer et al.(2000)則是探討由回波所推導之垂直液態水含量(vertical

integrated liquid, VIL) 和雲對地閃電(cloud-to-ground lightning,此後本文簡稱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CG頻率的峰值和VIL有良好的相關，VIL與閃電頻率隨時間變化的趨勢幾乎一致。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)亦發現此類似的特徵。

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(Total Lightning Detection System, TLDS)的更新，中央氣象局自2005年1月起，開始即時接收此資料，並進行即時顯示及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，亦包含有大量的雲內(intracloud)及雲間(cloud-to-cloud)閃電(此後本文統稱IC)，故IC與降雨間可能存在相關性。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雷達相關參數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。本研究使用相關雷達資料為QPESUMS系統整合中央氣象局五分山、花蓮、七股及墾丁等四座都卜勒氣象雷達的觀測回波所輸出之內插至 $0.0125^\circ \times 0.0125^\circ$ 網格經緯度每 10 分鐘更新之資料，降雨估計資料為不受地形阻擋與影響的最低仰角合成回波由 $Z=32.5R^{1.65}$ 關係式(Xin et al. 1997)而得；VIL 則是選取垂直高度 1.0 ~ 17.0 公里(共 21 層)等高面上的回波並利用

$$VIL = \sum_{i=1}^n 3.44 \times 10^{-6} Z^{\frac{4}{7}} \Delta H \quad (kg/m^2)$$

之關係式(其中 Z 為回波因子， ΔH 為兩層間的厚度)(Stewart 1991)所估算。

而閃電資料係中央氣象局接收來自台灣電力公司TLDS系統的閃電觀測資料，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(IC)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及IC發生時間、經緯度、極性、強度以及分辨是否同屬於一個閃電(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及CG。

三、分析結果

2005年5月12日為一梅雨鋒面個案，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)，為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，當日的總閃電量為362,724次/天(如圖1所示)，平均每分鐘閃電頻率高達252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所佔比例於此個案中相當小，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未到達台灣地區便進行觀測，閃電與雷達降雨估計之間若存在相關性，便可作為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(在此以具最大量小時閃電量之18 ~ 19 Z之降雨估計與閃電分佈圖為例，如圖2)，圖2a為18 ~ 19 Z的雷達回波降雨估計，圖2b則為圖2a疊加上此小時的所發生的閃電量，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較強降水區，兩者空間分佈相似。由降雨估計與閃電分佈的時間序列(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，整體來說相當接近，且當降雨量明顯增加時，閃電量也跟著明顯增加。另外，並非所有降雨中心都有較高的閃電密度。

為瞭解高閃電量與雷達相關參數在空間與時間上的相關，固選取在此個案中，具有總閃電量 > 100次及 > 200次的網格點，統計分析這些網格點分別對於雷達參數之合成回波(column vector, CV)、VIL及最低仰角合成回波所估計降雨量(QPE)的相關(圖3及圖4)。由圖3可見，具有 > 100次閃電量的網格點與各雷達參數間隨時間的變化有相當程度上的對應關係，峰值出現時間相當，其中閃電與VIL有較CV及QPE為高的相關，達0.61(圖未示)。由具有 > 200次閃電量的網格點來看(圖4)，除了與各雷達參數間隨時間的變化也有良好的對應外，與各雷達參數的相關皆高於具 > 100次閃電量網格點的相關，與VIL的相關亦較高，達0.68(圖未示)。另外，> 200次閃電量的網格點較 > 100次閃電量的網格點有較大的雷達參數值。若只針對統計具最高閃電量前20者的網格點(圖5)，除了上述之特徵外，其相關也較 > 200次閃電量的網格點來得高，與VIL的相關可達0.76(圖未示)，而且不論是CV、VIL或是QPE，其值皆較 > 200次閃電量的網格點為大，間接證明閃電與劇烈天氣間的相關。

圖2~圖5顯示了大的閃電量與雷達參數間於空間及時間上有分布上的一致性，若進一步分析不同閃電量與雷達參數的相關，可發現閃電量愈高，與CV、VIL及QPE的相關也就愈高(圖6a)。由於Kridler (1988)觀測發現CG發生位置與到達地面的位置會有3 ~ 4 km的距離差；而Schuur et al.(1991)及Hunter et al.(1992)則發現兩者有顯著的水平距離差異；Orville(1994)探測到的水平距離差為5 ~ 10 km；Martin(1995)也觀測發現兩者水平距離差介於8 ~ 10 km之間，因此選取以 5×5 網格點為一單位區域，分析不同閃電量與雷達參數的相關，發現兩者除了有正相關外，區域閃電較單網格點對於各雷達參數的相關性也較高(圖6b)，尤以其與VIL的相關性最佳。

四、討論與結論

由2005年5月12日中尺度對流系統伴隨閃電現象之梅雨鋒面個案之初步分析顯示，IC於此個案中佔98%，而CG則只佔2%，暗示了IC和對流發展的強度有密切關係。大部份的閃電發生在較強降水區，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Carte and Kidder(1977)、Kuettner(1950)及Tapia et al.(1998)的研究結果類似。且當降雨量明顯增加時，閃電量也跟著明顯增加，有明顯的正相關，此與Tapia et al. (1998)所得結果相當。

一般而言，大回波通常先出現在較高層處，隨著天氣系統的發展，較大回波所在高度會漸漸

降低，由於 VIL 能反應出天氣系統較高層的較大回波值以及垂直發展上的含水量，且 Larsen and Stansbury(1974)及 Marshall and Radhakant(1978)指出高度 6~7 公里回波強度達 30~43 dBZ 時，與閃電的位置、時間及頻率有密切相關。另外，通常於系統降雨前以及較高層有較大回波時，已有大的 VIL 值，若此為劇烈對流系統，降雨前通常已有許多的閃電發生(Krehbiel 1986)。本文所使用之 CV 雖然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，且較大的 CV 暗示著在垂直方向上可能具有較多或是較大的雨滴粒子，若初始觀測到較大回波，會與地面觀測到的降雨有時間上的延遲，而閃電在降雨事件發生前多早已發生，因此不論所選取的閃電量多寡，均可見閃電與 VIL 有較好的相關(圖 3~圖 6)，而且閃電量愈多，所對應之各雷達參數值也愈大。如此，閃電資料是否可做為對流降雨估計及劇烈天氣發生的指標，為未來需要進一步分析的重要研究課題。

本研究未來將由不同的閃電表現行為，如閃電量於同一系統中突然的遞增或遞減，希望能提供系統發展或減弱的訊息，進一步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，希望能藉由閃電資料、雷達及雨量站的資訊整合，嘗試彌補雷達與雨量站在山區或地形而無法觀測的降水區域，以提昇短時劇烈天氣系統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.
- Krehbiel, P. R., 1986: The electrical structure of thunderstorms. *The Earth's Electrical Environment*. National Academy Press, Washington, D. C., pp. 90-113.
- 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: Anomalously 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.
- Stewart, S. R., 1991: The prediction of pulse-type thunderstorm gusts using vertically integrated liquid water content (VIL) and the cloud top penetrative downdraft mechanism. NOAA Tech. Memo. NWR SR-136, 20pp. [Available from National Technical Information Service, U.S. Dept. of Commerce 5285 Port Royal Rd., Springfield, VA 22161.]
- 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.

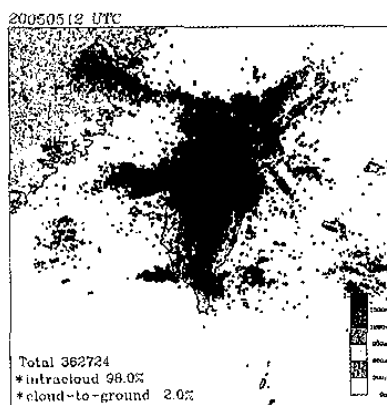


圖 1 2005 年 5 月 12 日閃電分佈圖。紫色星號為雲內閃電，桃紅色星號為雲對地閃電。

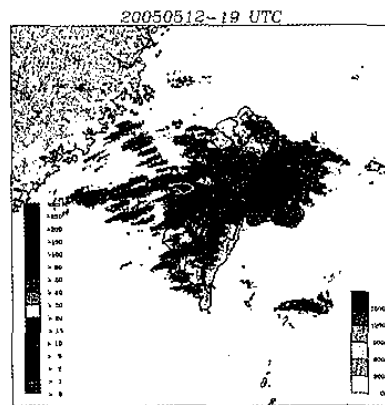
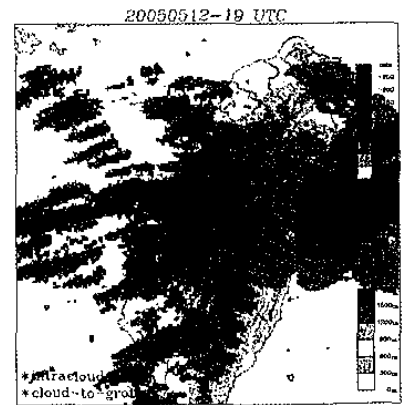


圖 2 2005 年 5 月 12 日 18~19Z(a)雷達降雨估計分佈圖；(b)雷達降雨估計與閃電分佈圖。紫色星號為雲內閃電，桃紅色星號為雲對地閃電。



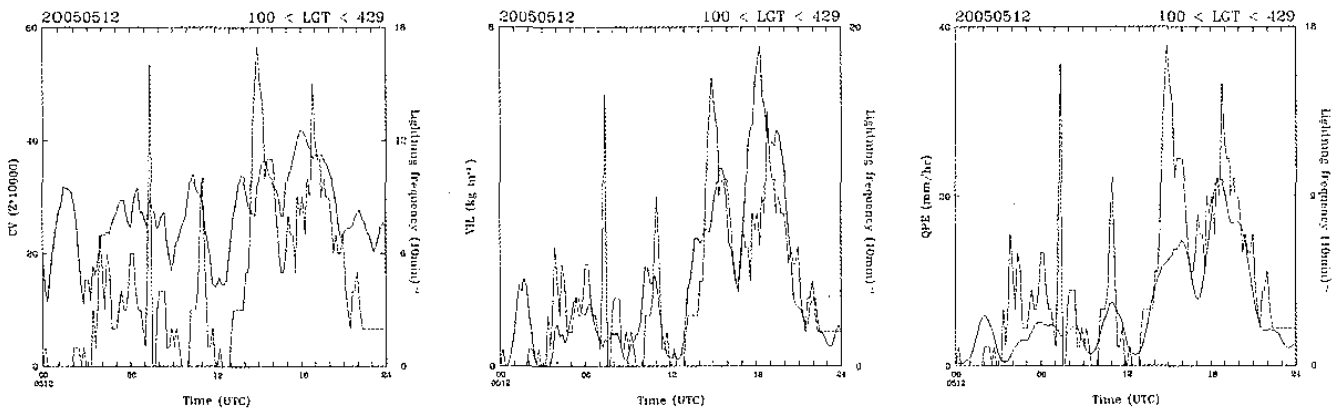


圖 3 2005 年 5 月 12 日總閃電量 > 100 次之網格點每 10 分鐘閃電量(紅線)與分別與(a) CV ; (b) VIL 及 (c) QPE(藍線)隨時間的變化。

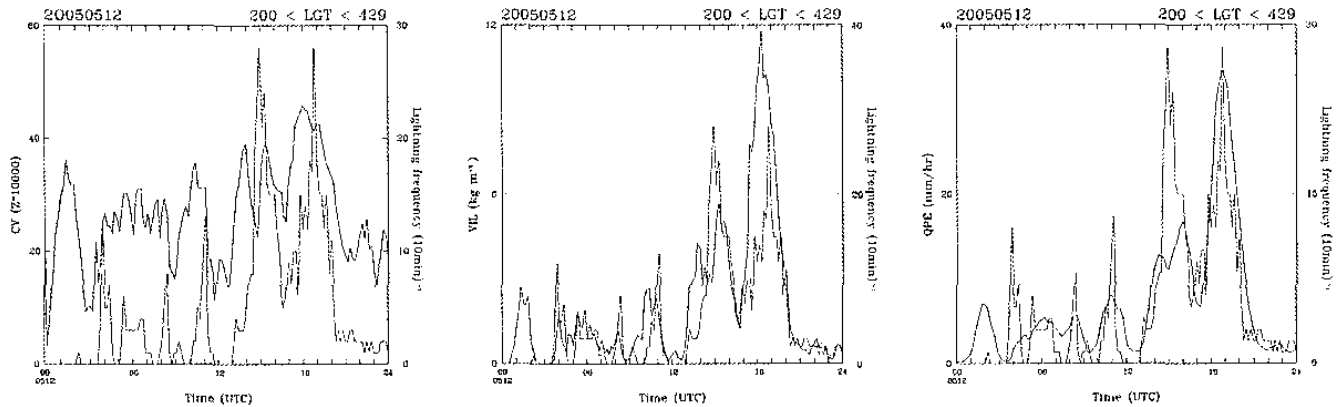


圖 4 同圖 3，但為總閃電量 > 200 次之網格點。

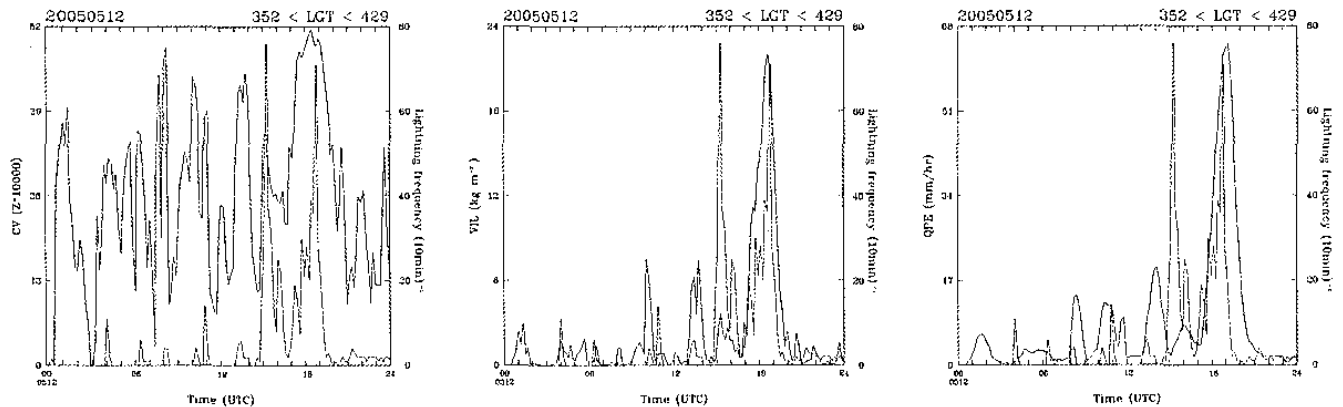


圖 5 同圖 3，但為總閃電量最大量前 20 者之網格點。

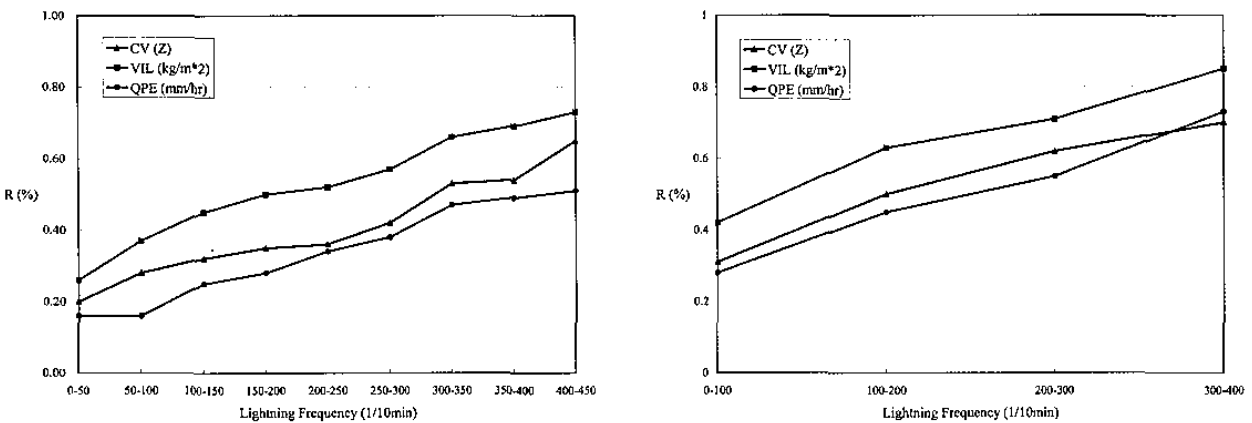


圖 6 2005 年 5 月 12 日 (a) 單點與 (b) 區域 (5x5 網格點) 之不同閃電量與合成回波 CV、VIL 及 QPE 之相關。