

臺灣西南海域總閃電頻率之診斷與模擬

吳依璇¹ 林博雄¹ 王寶貫²

1. 國立臺灣大學

2. University of Wisconsin-Madison

摘要

本研究結合臺灣電力公司 TLDS (Total Lightning Detection System) 系統的閃電資料與 WISCDYMM (Wisconsin Dynamic-Microphysical Model) 雲模式所輸出的水象粒子資訊，針對 5、6 月份臺灣西南海域位置，進行 2005 年至 2008 年的閃電及天氣特徵分析，結果顯示 2007 年為閃電相當活躍的一年，而 2008 年情況相仿，2005 年及 2006 年相對的微弱許多；由天氣特徵分析，可發現 5、6 月份造成閃電發生主要是鋒面系統，然而由高溫熱對流所造成的閃電現象仍不容小覷，2007 年甚至可達 34.4%。

探討閃電數量與水象粒子質量百分比的關係，可發現高層大氣 (7.2 至 11 公里) 相關性較佳，若分析這些參數的時間序列特徵，可發現中層大氣 (3.2 至 7 公里) 與高層大氣高度中，軟雹與冰晶分別與閃電發生有明顯的相關性存在，符合雲中粒子帶電之理論。

一、前言

2007 年西南氣流實驗觀測期間執行飛航任務時，漢翔 Astra 飛機於新竹上空遭受雷擊事件迄今仍筆者們記憶猶新，因此讓我們省思以下問題：閃電在雲中的微物理機制到底為何？是否有辦法對閃電進行診斷，進而改善飛航安全？現今帶電機制最主要是涉及軟雹及冰晶粒子，軟雹受到重力掉落的過程中，碰到過冷水滴會形冰化作用，使得這些過冷水滴在軟雹表面凝結，當這些冰化中的軟雹與冰晶碰撞時，便會造成電荷轉移，使得彼此帶電。Jayaratne et al. (1983) 透過實驗指出，粒子所帶的電量與電性符號與溫度有關，且與雲水含量、冰晶大小、碰撞的相對速度、雲中的化學污染物及過冷水大小等也有關係。並提出反轉溫度觀念。另一方面 Rakov and Uman (2007) 亦提出類似的觀念，他們指出電性反轉溫度發生於約 -15°C 處 ($\sim 6\text{km}$)，其中低於 -15°C 溫度處，軟雹向下帶負電、冰晶向上帶正電；高於 -15°C 溫度處，軟雹向下帶正電、冰晶向上帶負電 (如圖 1)。由以上的文獻回顧可知，影響雲中帶電情形的粒子主要為軟雹及冰晶兩種，並且粒子在不同溫度下會發生電性反轉現象。

曾等人 (2005) 年針對臺灣地區不同天氣型態下的閃電進行了分類研究，「鋒面」造成的閃電以雲內閃電為主，「午後熱對流」有較明顯的對地閃電發生；「海洋對流型」閃電數量及範圍均較「陸地對流型」零星，他們認為其中原因應是陸地高低層溫差與濕度差異都較海洋來得大，可用位能較高；「颱風」所造成的閃電相對於颱風結構而言較為分散；「高層冷心」的閃電密度為六種天氣類型之最，日夜變化最顯著。Fehr et al. (2005) 取 1998 年歐洲 EULINOX (The European

Lightning Nitrogen Oxides Project) 實驗的觀測資料，對雲中粒子及閃電做了時間序列及質量百分比的分析，並針對兩種不同尺度風暴進行比較，分別是 Multi-cell 與 Super-cell。其研究結果指出，高層粒子與閃電之間的相關性較佳，且較大的系統 (如：Super-cell) 相關性較差。因應後續研究所需，將參考 Fehr et al. (2005) 的 Multi-cell 研究結果，如圖 2 所示。

本文在第二節介紹我們所使用的閃電資料來源，以及輸出水象粒子的模式；第三節針對 2005 年至 2008 年 5、6 月份臺灣西南海域閃電特徵進行探討，進行閃電與天氣變化的概略討論；最後篩選兩個個案進行更深入研究，分別針對「水象粒子質量百分比與閃電數量的相關性」及「水象粒子與閃電數量時序列的相關性」進行討論。

二、模式使用及資料來源

(一) WISCDYMM 模式

本文使用威斯康辛大學的 WISCDYMM (Wisconsin Dynamic-Microphysical Model) 雲模式來取得雲中水象粒子的時空分布，WISCDYMM 模式滿足隨時間演變、非流體靜力衡及準可壓縮的原始方程模式。解析度及網格大小可以針對不同研究需求做調整，在本研究中所使用的模式網格及解析度，沿用 Wang (2003) 經驗設定：「水平 55 公里、解析度 1 公里，

垂直 20 公里、解析度 0.2 公里，時間解析度 2 秒」。

WISCDYMM 模式的驅動(triggering)是經由一個低層熱胞(thermal bubble)來做為雲發展的初始擾動場，在該模式中可手動設定熱胞的初始大小與溫度，模式所需的初始值為每層(200 公尺)的位溫、比濕、風向及風速，其餘微物理各項變數初始場多半假設為零。水平邊界設定使用的是「輻射邊界條件」，可使波動能量往外傳遞，頂層邊界所使用的是「能量吸收層」，把向上傳送的能量吸收掉(Klemp and Wilhelmson, 1978)。WISCDYMM 包含三十八種微物理過程，輸出十二種變數如下：三維風速、擾動動能、位溫、氣壓、水汽混合比、雲滴混合比、雲冰混合比、雨滴混合比、軟雹/冰雹混合比及雪片混合比(王, 1997)。

(二)閃電資料來源

繼臺灣電力公司 1989 年設置的閃電觀測系統 (Lightning Location System) 之後，因應輸配電塔安全維護的需求，臺電於 2003 年建置了一套芬蘭 Vaisala 公司的整合型閃電落雷偵測系統 TLDS (Total Lightning Detection System)。TLDS 在臺灣各地共有七座偵測站，時間解析度 4~10 秒，儲存資料的時間間隔為 1 秒。單一座偵測站偵測範圍為 250 公里，偵測效率高達九成以上，精確度為 1000 公尺(廖, 2004)。

本文所取得的閃電資料型態可分為六種，分別為：單獨一次雲內閃電發生次數 (IC-0)、連續發生的雲內閃電起始點數量 (IC-1)、連續發生的雲內閃電連接點數量 (IC-2)、連續雲內閃電發生的終點數量 (IC-3)、對地閃電的回擊數量 (CG-0) 及對地閃電子回擊數量 (CG-1)，本文定義單位時間的總閃電頻率為 (IC-0) (IC-1) 及 (CG-0) 總和。

三、 2005~2008 年 5、6 月臺灣西南

區域閃電消長特徵

臺灣於 5、6 月梅雨季節時，大部份的劇烈降水天氣系統，發生在臺灣的西南方陸地與海上，中南部較北部易有熱對流的發生。為了方便 WISCDYMM 模式使用，且配合西南氣流實驗計畫，本文的個案空間位置鎖定在臺灣西南海域，理由是可不受地形起伏影

響，因為 WISCDYMM 模式初始值必須給予海平面至 20 公里高度，每兩百公尺解析度的垂直剖面資料，選擇海面可確保近海平面有初始值數據，毋須用外延法得之。在本節研究中，時間尺度以「每日」為單位，為了研究結果的顯著性，設定門檻值來定義「閃電發生機率」；另一方面如果單位時間內發生閃電數量偏高，則代表該時間的閃電活躍性較高，在本研究中我們也設定了門檻值，僅處理當日閃電數量 ≥ 100 筆的資料，來分析「閃電活躍性」。

「閃電發生機率」的數據分析結果顯示，2005 年為整體閃電活動微弱的一年；2006 年為較極端的一年，大部份時間都屬於很微弱幾乎沒有閃電訊號被偵測到，但在 6 月 9 日與 6 月 10 日兩日內，單位小時被偵測到 1000~2000 筆左右。2005 及 2006 年的閃電發生機率僅 32%左右。2007 年與 2008 年閃電發生頻率特徵類似，然而發生機率提高到 55%以上。

在閃電活躍性的表現上，透過每日大於 100 筆的門檻分析，發現 2007 年比 2008 年來得稍為活躍，2007 年活躍性可達 38.9%，2008 年則為 34.8%，在活躍性表現上 2005 及 2006 年僅有 10%左右，與 2007、2008 年相差了 20%左右，形成顯著的差異。另一方面，2008 年單位小時內所發生的閃電均未超過 500 筆。

我們參考中央氣象局預報中心天氣概述單將 5、6 月份常見天氣系統型態區分出六種：(1)高溫熱對流，(2)滯留鋒（不在臺灣本島上空），(3)滯留鋒（位於臺灣本島上空），(4)鋒面接近中，(5)颱風外圍環流影響，(6)西南氣流影響，分析閃電發生期間之天氣特徵。若將天氣型態(2)、(3)與(4)相加，可發現由鋒面影響所造成的閃電現象佔 50~80%，其中 2005 年及 2006 年由滯留鋒面所影響的現象較弱。然而由高溫熱對流所影響的閃電比例仍不容小覷，以 2007 年最為顯著可達 34.4%。由鋒面所造成的閃電現象通常是連續且可維持 2 至 3 天間歇性的型態，但若由高溫熱對流所造成的閃電現象，往往是集中且生命期僅有數小時。

四、 個案分析

有鑑於 2007 及 2008 年 5、6 月份(西南氣流實驗期間)有較充足的天氣資料，並且閃電活躍性較高，因此本文對這兩年進行個案挑選，選取的空間範圍固定

在臺灣西南方海域，並將每小時總閃電量大於等於 20 筆/小時個案濾出，淘汰僅發生在陸地上的閃電個案。

2008 年選取了 5 月 22 日 22:31UTC 至 23 日 00:46UTC、發生在 22.8N、119.6E 位置的個案；2007 年選擇了 5 月 23 日 10:31UTC 至 11:59UTC 這個個案，閃電發生經緯度約在 21.98N、120.43E。這兩個個案均為當日鋒面北移的天氣型態，對臺灣並不造成直接影響，儘管當時為 5 月底，但南部天氣已屬於炎熱、甚至可達 33°C 的高溫天氣，符合我們所期望的熱力推動情況。2008 年個案生命期約三小時的個案，每小時閃電數量大約 14~61 筆左右；2007 年個案生命期約一小時，小時內所發生閃電數量為六十筆，兩個案整體特徵為一個弱綜觀情況。

使用 WRF model (the Weather Research/Forecast model) version 2.2 取得 WISCDYMM 模式所需的初始場資料，為配合臺電閃電資料每分鐘一筆資料格式，因此模式輸出也調整為一分鐘一筆，其參數包含：時間、qr (rain water)、qs (snow)、qh (hail/graupel)、qi (ice) 及 qc (cloud water) 的質量混合比。為方便與 Fehr et al.(2005)研究相互比照，本文將水象粒子的輸出於垂直方向分為四層，分別為：0 至 3 公里、3.2 至 7 公里、7.2 至 11 公里及 11.2 至 20 公里。

將個案的水象粒子質量百分比與閃電數量的相關性，搭配 Fehr et al.(2005)的結果進行比較(圖 3)，顯示我們的研究結果與 Fehr et al.(2005)是一致的。在 7.2 至 11 公里中，冰晶與閃電數量呈正相關，似乎隱含了雲中帶電機制情形，在稍後的時間序列分析中會更加明顯。圖 4 為 2008 年個案的粒子質量百分比與閃電數量的時序關係，在 0-3 公里空層無明顯關係存在，但在 3~7 公里與 7~11 公里，軟雹及冰晶的質量百分比極值與閃電數量極值存在時間延遲關係。

2007 年個案在水象粒子質量百分比與閃電數量相關性分析上，其結果與 2008 年個案相仿，且與 Fehr et al.(2005)結果一致。水象粒子質量百分比與閃電數量時序關係(圖未示)，如同圖 4 之特徵，也在 3~7 公里與 7~11 公里看出軟雹與冰晶粒子極值與閃電極值存在著時間上延遲現象。

綜合以上兩個個案，我們的研究結果與 Fehr et al.(2005) 研究結果相當一致。Rakov and Uman (2007)(圖 1)認為 6 公里之上高度，軟雹傾向向下並帶負電，當軟雹向下落愈多，會加強雲中帶電極化現象，使得雲中電位差更甚，迫使電場接近足夠引發閃電的門檻值，因此我們認為 7.2-11 公里軟雹與閃電數量呈負相關是符合帶電理論。

在 3.2-7 公里與 7.2-11 公里空層的軟雹與冰晶質量百分比的時間序列上，分別顯示當這兩種質量百分比達到極值後 12~14 分鐘，閃電數量也達到極值，可透過帶電機制理論去解釋，見 Rakov and Uman (2007) 所提出的示意圖(圖 1)，粒子電性反轉分界線約在 6 公里的高度，在 6 公里之下相對應於我們的 3.2-7 公

里；在 6 公里之上相對應於 7.2-11 公里。粒子受到重力導致位於不同高度，軟雹傾向於位在較低處，冰晶則在較高處，當兩者數量足夠時，表示雲中帶電極化現象足夠強。雲中放電如同充電過程一般，當電場累積達到門檻值後才會放電，因此閃電極值時間會略晚於粒子質量百分比極值時間，兩個案時間延遲現象相當一致，均 12-14 分鐘左右，這個研究方法，似乎為現今閃電模式不足的窘境開創了另一個途徑。

五、 結論

藉由分析四年的年際變化，同是 5、6 月，閃電發生頻率的年際變化甚大；數量上，2005 年閃電整體較微弱；2006 年在 6 月 9 日及 10 日分別有多起大量的閃電被偵測到，不只遠高出四年平均、數量甚可位居四年來之首，但其他時間卻與 2005 年差不多微弱，顯然閃電的物理機制了解以及觀測可能誤差的判定都有待探索；2007 年及 2008 年閃電數量不分軒輊。5、6 月份以「鋒面系統」及「高溫熱對流」為影響閃電主要因素，鋒面系統所造成的閃電往往可間歇性維持 2~3 天左右，高溫熱對流往往僅持續數小時即停止，但短時間對流胞所造成的閃電數量並不亞於同樣時間長度下鋒面所造成的閃電。由本研究可知即使在 5、6 月份，高溫熱對流影響力仍不容忽視。

在本研究中我們發現垂直分層空間上，「水象粒子質量百分比與閃電數量的相關性」在高層與閃電的相關性甚佳，與 Fehr et al.(2005)研究結果雷同，但此分析方法無法了解整個生命中粒子消長與閃電變化的關係，於是我們再分析「水象粒子質量百分比與閃電數量時序的相關性」，發現在中層與高層大氣分別有些端倪，於中層軟雹質量百分比達到極值後，約 10~12 分鐘，閃電數量會達到整個生命期極大值的特徵，同一時間在高層冰晶質量百分比達到極值後約 10 分鐘左右，閃電數量亦達到極大值。由閃電帶電機制理論得知此種現象應為合理，透過此次研究所發現的水象粒子與閃電數量在時序上相關性，提供閃電研究與數值模式參數化參考。

六、 展望

閃電的相關研究迄今肇因於基礎理論尚不健全，實驗觀測費用高昂且危險性甚高，期望未來能藉由不同的研究方式多方著墨，期望彌補現今閃電模式不足的窘境，對閃電能有更深的認識。WWLLN(World Wide Lightning Location Network) 的觀測網資料值得注意，WWLLN 是由西雅圖華盛頓大學所運作的，在全球各地架設閃電定位網狀系統，透過對電磁脈衝的偵測，來對閃電做定位。其地面接收站彼此之間間距約 1000 Km，若要涵蓋全世界則必須要 500 個儀器，現階段發展僅有約 40~50 個左右。

我們對 WWLLN 的資料感到相當有興趣，因為 WWLLN 的資料遍及全球，令筆者不免疑惑是否與台電 TLDS 所偵測到的訊號吻合，於是我們選取與 2008 年個案相同時間的資料做分析。跟據資料顯示，WWLLN 所記錄到的閃電現象與我們個案一發生時間與位置均一樣，同時也可同步驗證臺電的 TLDS 系統所偵測到是正確的。WWLLN 範圍涵蓋幾乎全球的閃電現象，且偵測方式又與掛載在 TRMM 衛星上的 LIS 系統不同，在多種閃電偵測的方式下，可對全球性及海陸的閃電發生情形、甚至是熱帶與溫帶氣旋的對流活躍程度之差異等進行研究，我們相信這種橫跨空間不同尺度（國家）的閃電資訊，將能提供天氣與氣候的多重研究題材。

文獻參考

- Fehr T, Dotzek N, Holler H. 2005. Comparison of lightning activity and radar-retrieved microphysical properties in EULINOX storms. *Atmospheric research* 76(1-4):167-189.
- Jayarathne E, Saunders C, Hallett J. 1983. Laboratory studies of the charging of soft-hail during ice crystal interactions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 109(461).
- Johnson D, Wang P, Straka J. 1994. A study of microphysical processes in the 2 August 1981 CCOPE supercell storm. *Atmospheric research* 33(1-4):93-123.
- Klemp JB, Wilhelmson RB. 1978. The Simulation of Three-Dimensional Convective Storm Dynamics. *Journal of the Atmospheric Sciences* 35(6):1070-1096.
- Rakov V, Uman M. 2007. Lightning: physics and effects: Cambridge Univ Pr. 687pp.
- Wang PK. 2003. Moisture plumes above thunderstorm anvils and their contributions to cross-tropopause transport of water vapor in midlatitudes. *J Geophys Res* 108.
- 王寶貴. 1997. 雲物理學: 渤海堂 臺北市. 382 pp.
- 廖順安. 2004. 臺灣地區落雷偵測系統應用與校正方法研究完成報告. 臺灣電力股份有限公司九十三年度研究專題. Taipei.
- 曾以真, 洪景山, 陳家琦. 2005. 臺灣地區閃電氣候特徵之研究. 中央氣象局研究發展專題. 臺灣南區氣象中心.

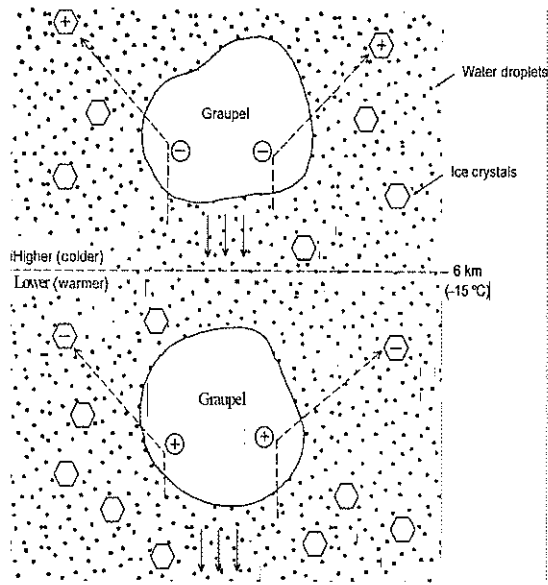


圖 1 Rakov and Uman (2007)所提出的雲中粒子帶電示意圖，並指出反轉溫度約在-15°C處 (~6Km)。

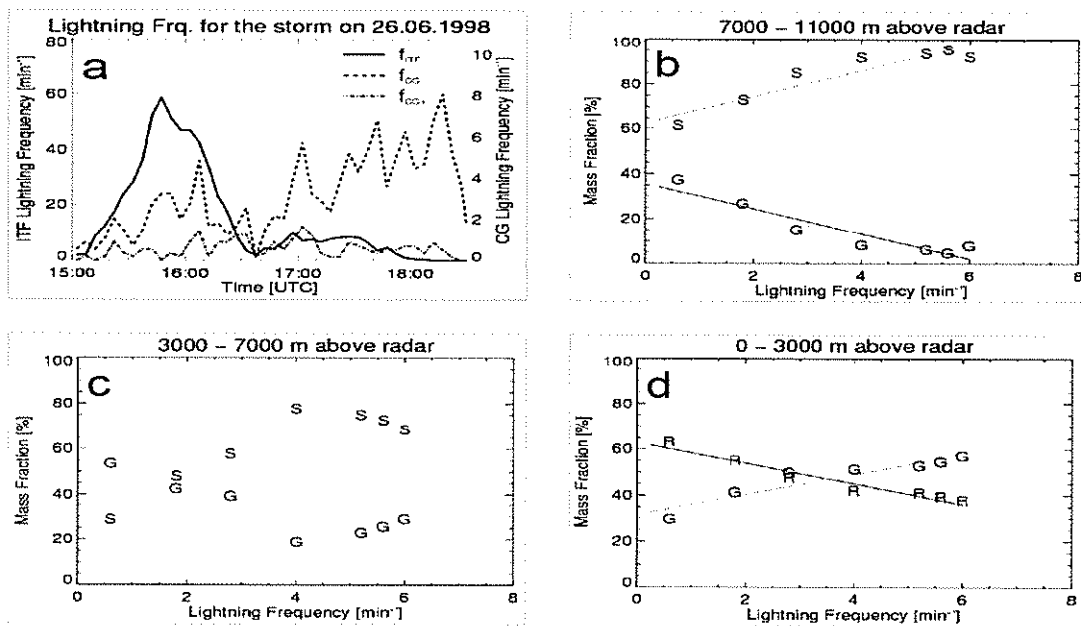


圖 2 Fehr et al. (2005)對閃電時序列及閃電頻率與粒子百分比相關性所做的研究，此為 Multi-cell 個案的分析結果。圖 a 為閃電時序列變化，圖 b 為高度 7-11 公里，閃電頻率與粒子質量百分比之相關性，軟雹與閃電呈負相關、冰晶與閃電數量呈正相關；圖 c 為高度 3-7 公里，軟雹與冰晶的表現與 7-11 公里相仿；圖 d 為高度 0-3 公里，閃電數量與雨水呈負相關、與軟雹呈正相關。

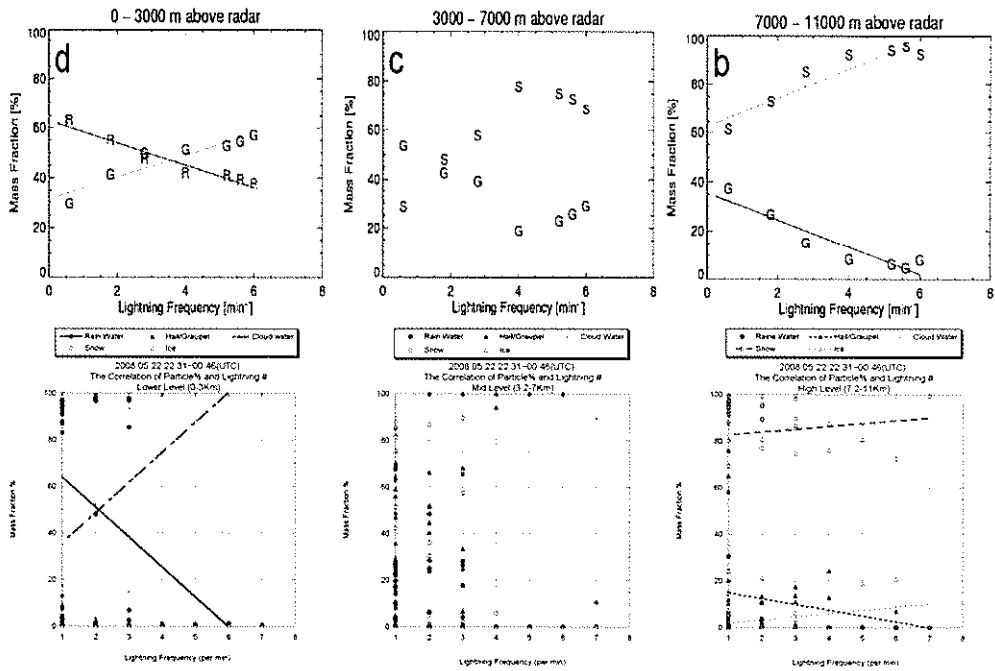


圖 3 上方三張為 Fehr et al.(2005)的研究結果，下方為本研究 2008 年個案研究結果，由左至右分別為 0~3 公里、3~7 公里及 7~11 公里空層。本研究與 Fehr et al.(2005)的結果一致。

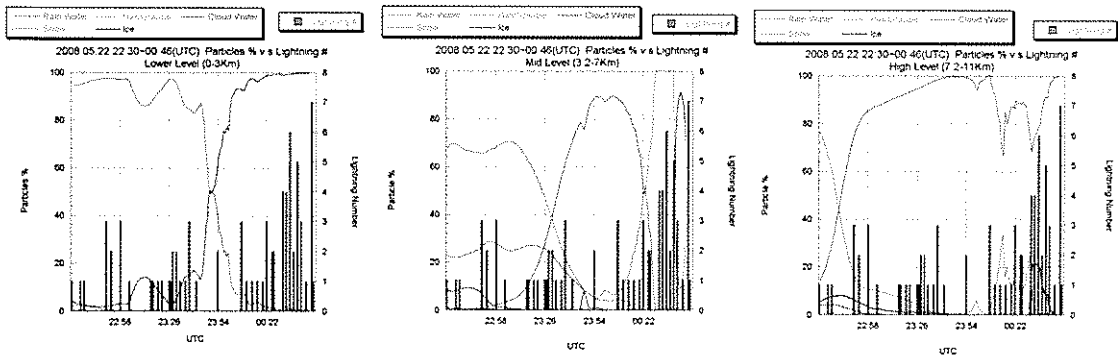


圖 4 此為 2008 年個案的時序列研究結果，由左至右分別為 0-3 公里的空層、3.2-7 公里及 7.2-11 公里，橫坐標為時間，縱座標為粒子當層質量百分比。3.2-7 公里，Hail/Graupel 極值為 00:30UTC，閃電極值為 00:44UTC；在 7.2-11 公里，ice 極值為 00:32UTC，閃電極值為 00:44UTC。