

雲中閃電資料應用於雷暴即時預警之研究

戴志輝¹ 王尹懋² 王安翔³ 林博雄¹

¹國立臺灣大學大氣資源與災害研究中心

²國立臺灣師範大學地球科學系

³國家災害防救科技中心

(中華民國一〇四年三月十九日收稿；中華民國一〇四年四月三十日定稿)

摘 要

全閃電(total lightning)次數的增加，代表對流系統正逐漸活躍中，因此全閃電次數的躍升，即全閃電次數時間變率的突增(jump)，可做為雷暴所伴隨劇烈天氣現象的預警參考指標。本文使用台電公司觀測之雲中(intra-cloud, IC)閃電資料，並採用較簡單的雲中閃電次數躍升(IC jump)定義方法，分析臺灣三種不同型態的雷暴系統，以檢視國內閃電資料應用於雷暴即時預警的適用性。結果顯示，在午後雷暴個案裡，IC jump 出現於數個對流胞合併成對流系統的過程中，並於 IC jump 達門檻後 40 分鐘出現最強的單站及區域 10 分鐘瞬時降雨；在移動性雷暴系統個案裡，當 IC 次數大量增加約 15 分鐘後，出現冰雹的目擊報告；在颱風雨帶環境下的移動性雷暴系統個案裡，當 IC jump 達到門檻後 40 分鐘，地面觀測到 10 分鐘強瞬時降雨。顯然，分析 IC jump 出現的時間，有助於極短時預警伴隨雷暴之劇烈天氣現象，甚至對雷暴於成熟階段的強瞬時降雨亦可適用。

關鍵字：IC jump、即時預警、劇烈天氣現象、強瞬時降雨

一、前言

深對流發展時，內部的靜電能及充電率，與冷雲的發展厚度成正比(Yoshida et al. 2009)。在混合固態與液態的水相環境中，大小不一的冰粒子在垂直運動影響下，歷經碰撞、帶電及分離過程後形成充電區，最後即可引起放電現象(Deierling et al. 2005)。通常在雷暴發展初期，閃電活動以雲中(intra cloud, 簡稱 IC) 型式最為活躍，隨著對流發展成熟，當對流胞核心(main core of the cell) 高度下降，雲對地(cloud to ground, 簡稱 CG) 閃電才逐漸出現，因此，IC 次數的峰值通常提前於 CG 出現(Lang and Rutledge 2002)。

儘管閃電次數在個案之間存在差異性，對發展中之雷暴系統，以 VHF (Very High Frequency) 原始資料(VHF source) 診斷全閃電率(total flash rate) 的變化，可了解雷暴強度演變並即時預警其伴隨地面強風、冰雹及龍捲風等劇烈天氣現象(severe weather) 之出現(Schultz et al. 2009; Gatlin and Goodman 2010)。例如，當多胞雷暴系統中各個對流胞發展階段一致，或是單一雷暴上升速度夠強，皆可能導致冰粒子垂直通量增大，引起全閃電數量突增(Deierling et al. 2005)；故全閃電密集分布之處，即為活躍對流(active convection) 的位置(Makowski et al. 2013)。閃電次數的躍升(lightning jump, 為閃電次數的時間變率達某一門檻)，表示雷暴正快速發展，此突增常領先於地面強風、冰雹及龍捲風等劇烈天氣現象的出現，平均領先時間可達 22 分鐘(Gatlin and Goodman 2010)。而全閃電率的迅速減少或 CG/IC 比值的增加，則多半代表雷暴正在衰減中(Makowski et al. 2013)。

此外，在中尺度對流系統裡，全閃電率峰值

較最大-52°C 衛星亮度溫度面積提早出現，且全閃電率越大，-52°C 亮度溫度面積增率越快(Makowski et al. 2013)。相較於中等強度回波(50~55 dBZ) 之雷暴系統，可能形成冰雹的強回波(60 dBZ 以上) 雷暴通常生命期較長、空間展延也較寬廣，除了伴隨較多的 IC 與 CG 之外，也傾向於有較大的 CG/IC 比值(Boussaton et al. 2007)。此外，在夏季陸地日間 CG 的發生頻率，與衛星反演之對流性降雨量呈現正相關(Petrova et al. 2014)。

臺灣一年四季都有機會出現 CG，表示全年皆有受雷暴影響的可能，但主要集中於暖季(林 1999)，尤以午後最為明顯(陳 1994)。由於雷暴的 IC 數量通常遠高於 CG，在台灣電力公司之全閃電偵測系統(Total Lightning Detection System, TLDS) 建立後，全閃電資料運用於雷暴的診斷分析也在臺灣逐漸受到重視。譚(2006)分析 2003~2005 年 TLDS 資料，亦認為全年皆有雷暴發生。Wang and Liao (2006) 認為，在 2004 年 Mindulle 颱風過後強西南風環境下，即使高閃電活躍度的範圍不易明確定義，但以每小時 IC 次數在每平方公里達 6 次的門檻，可追蹤海洋性風暴(oceanic storm) 的移動，並建議閃電資料可用來預測降雨區(rain field) 的動向。戴等(2008)認為隨著太平洋高壓軸線方向的逐月調整，臺灣附近中低層綜觀氣流風向由西南轉為東南，臺灣北部午後 IC 的主要分布位置也隨之由東轉西。吳等(2009)比對個案的雲模式模擬及全閃電時間序列，發現在中層軟雹與高層冰晶的質量百分比同時達最大的 12 分鐘之後，閃電的數量達到最大值。這些研究均說明，分析全閃電時間變率之演變，對雷暴之預警有應用價值。

在臺灣，地面強風、冰雹、龍捲風等劇烈天

氣現象，雖偶有聞之但少被正式記錄。然而為了各種防災需求，伴隨演變快速強對流系統出現之其他嚴重天氣現象，仍是短時、局部天氣預警的重要目標。雷達回波時間序列之診斷分析，對於對流強度及所伴隨天氣現象的判斷，雖能提供可信的參考，但格式簡單、更新頻率快且處理時間短的閃電觀測資料，可提供額外的預警時間，並增加預報決策的信心(Darden et al. 2010)，有助改善即時決策效率。因此，本文將對臺灣常發生之三種雷暴系統，探討應用 TLDS 資料判斷雷暴演變趨勢的可用性。第二章敘述所使用資料及分析方法，第三章敘述三種不同型態雷暴個案的分析結果，第四章為結論。

二、資料及方法

本文分析之閃電資料為台灣電力公司所設置的 TLDS 觀測資料；此系統由地面偵測到電磁脈衝現象後，再透過 TOA (Time of Arriving)法決定閃電發生位置。由於 TLDS 於 2012~2013 年進行部分測站遷移及觀測模組更新，本文所取得的 TLDS 資料，在 2013 年 6 月以前，區分為單一雲中、連續雲中（起點、中間點、終點）、雲地回擊以及子回擊等六種形式，並包含定位誤差資訊；但自 2013 年起，僅區分 IC 及 CG 兩種類型，且不包含定位誤差。在 2013 年 1 月 1 日~6 月 7 日 0500 UTC 期間，兩種資料格式均有記錄，此段重疊時間，比對新格式之 IC 類型與舊格式之單一雲中與三種連續雲中閃電形式，以及新格式之 CG 類型與舊格式之雲地回擊與子回擊形式，兩種格式記錄的閃電發生時間、經緯度及閃電次數完全相同。

Wang and Liao (2006)認為在 TLDS 偵測站 200 公里範圍內，閃電的定位誤差低於 1 公里。

但由 TLDS 觀測之 2010 年連續雲中起點(圖 1a)、2011 年單一雲中(圖 1b)及 2013 年 IC (圖 1c) 分布，顯示不同年份、不同形式及系統更新前後，皆會在偵測站(圖 1 各圖紅色空心框)附近或兩偵測站之間，出現圓形或圓弧帶的不連續分布，以及呈放射狀集中分布的情況，表示 TLDS 在某些特定位置(尤其臺灣西南部、東部最為顯著)會有較大的資料定位不確定性；另一種不確定性，是密集閃電出現在無回波區域的情況，如第三章個案二(後述)。統計 2008 年至 2013 年(2008 年缺 419 小時、2009 缺 335 小時、2010 缺 424 小時、2011 年缺 120 小時、2012 年缺 255 小時，以及 2013 年僅至 6 月 7 日 0500 UTC 且缺 2 小時)期間 TLDS 各種形式閃電的數量(圖 2)，顯示 2008~2011 年各形式比例相近但數量逐年降低，而 2012 與 2013 年的比例及數量則與前 4 年明顯不同。上述定位不確定性、資料形式比例與數量變動之原因，可能包括觀測干擾、觀測儀器及方法改變、雷暴型態差異及氣候變遷等因素，雖值得進一步分析探討，但已超出本文討論範圍。

本文於討論 2008 年 8 月 15 日午後雷暴個案時，以較可合理代表「一次閃電」的單一雲中及連續雲中起點等兩種形式來計算 IC 次數及其時間變率，CG 則僅選擇雲地回擊形式。戴等(2008)以此定義所分析的午後雷暴個案，其 CG/IC 比值多半低於 0.1，而 2008~2011 年期間，全年 CG/IC 比值介於 0.021~0.058，2012 年 6 月雖於部分觀測站有所更新(私下由台電提供之資料)，CG/IC 比值為 0.077 仍低於 0.1，但值得注意的是，2013 年的 CG/IC 比值則明顯增大至 0.503。各年統計結果，顯示偵測的敏感度與資料形式在硬體且/或軟體更動前後有所改變，特別是 CG(圖 2)。而在 2013 年 3 月 28 日雷暴個案與 2014 年 7

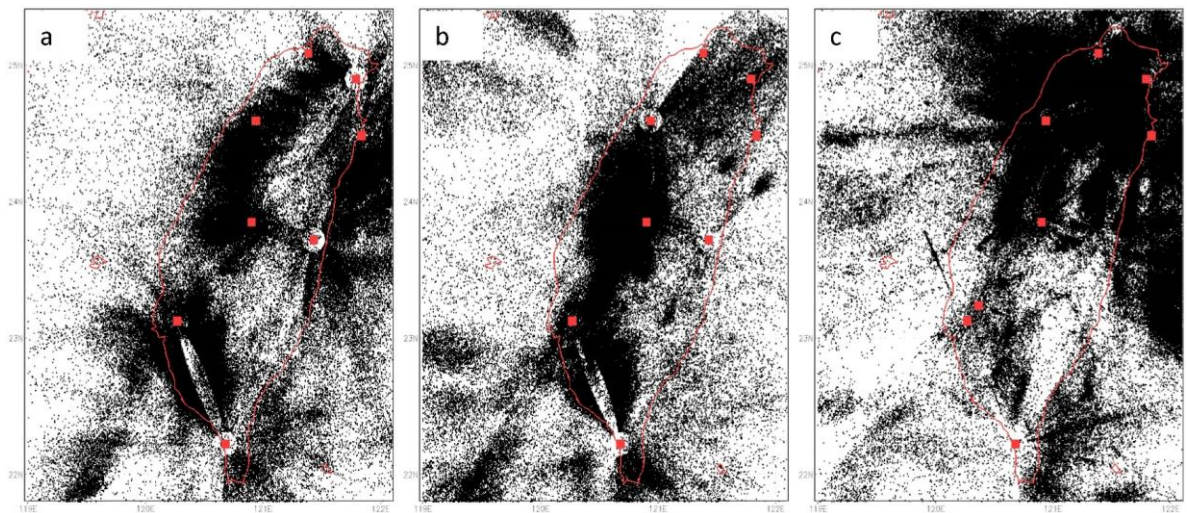


圖 1 由 TLDS 觀測之(a)2010 年全年連續雲中起點、(b)2011 年全年單一雲中及(c)2013 年全年 IC 之閃電分布圖。圖中紅色實心框為閃電偵測站位置。

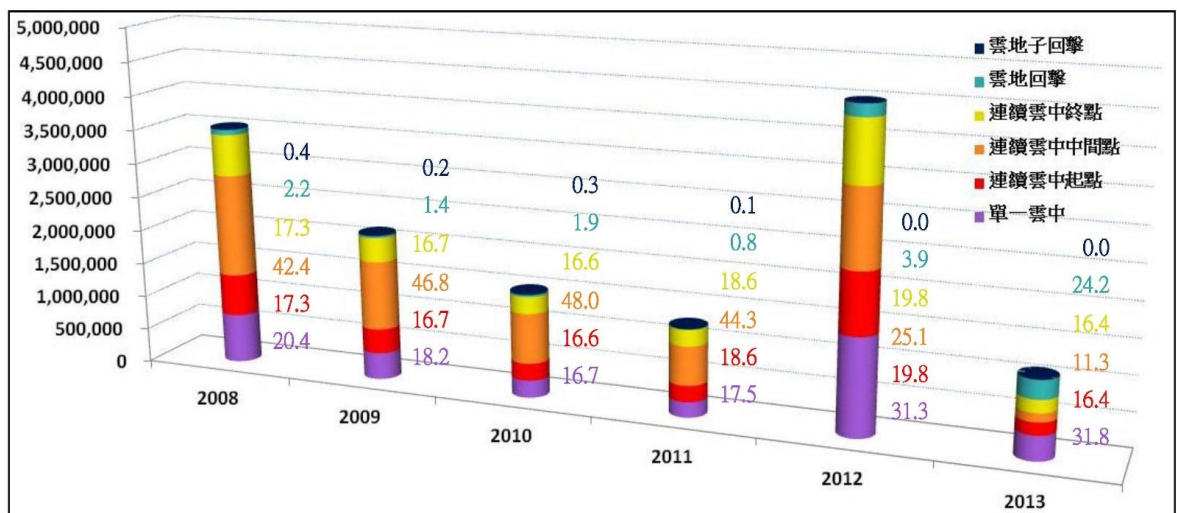


圖 2 於 2008~2013 間每年單一雲中、連續雲中（起點、中間點、終點）、雲地回擊以及子回擊等六種形式（以不同顏色區分）閃電之數量（圓柱，縱座標）及百分比（數值）。

月 23 日 Matmo 颱風外圍雨帶個案中，則分析未分類之 IC 與 CG（如本節第一段所述）；此種未區分形式閃電資料雖有助解析閃電路徑(pathway; Hodapp et al. 2008)，但卻增加「一次閃電」分辨的難度。另外，因為 TLDS 在 2013 年 1~6 月同時記錄兩種格式閃電資料，因此透過電暴個案之

分析，將可比較兩種格式對於閃電次數時間變率計算方式，在即時預警應用上是否有差異。

閃電次數的躍升，也就是相對於平均閃電次數的異常突增現象，需被明確定義才能做為判斷指標；但從原始資料過濾出閃電次數的方法、閃

電次數及其時間變率的採樣時距、平均的方式、異常的定義等，皆會影響極大化預警機會以及極小化錯誤預警的結果(Gatlin and Goodman 2010)。即使 Gatlin and Goodman (2010)認為合理的演算法多達上萬種組合，而 Schultz et al. (2009)根據 6 種常用演算法的測試結果，建議短時段閃電次數時間變率的移動平均並滿足 2 倍標準差之門檻最合適，但受限於 TLDS 的各種定位不確定性(圖 1)以及系統更動前後不同閃電形式資料的改變(圖 2)，本文以「兩相鄰時段的 IC 次數時間變率均 > 0 且增加」這項簡單原則，定義為某固定區域達到 IC jump 的門檻標準。作為一個預警指標，只分析數量多且出現時間較早的 IC 亦屬合理。例如，當 T1~T6 等 6 個連續相鄰時段的 IC 次數分別為 0、3、0、0、3 及 15 次 時間¹，則 T2~T6 的「IC 次數時間變率」分別為 3、-3、0、3 及 12 次 時間²，其中 T3~T4 (-3~0) 及 T4~T5 (0~3) 皆不被視為 IC jump，僅 T5~T6 (3~12) 會被視為 IC jump 的出現。

雖然計算閃電次數躍升的目的之一為，在無須等待雷達回波去除雜訊、整合資料等前置作業所需之時間遲滯情況下，亦能預警劇烈天氣現象的發生(Gatlin and Goodman 2010; Makowski et al. 2013)，但為了比對閃電發生位置與雷暴發展之間的關係，並檢視國內現行閃電資料的可用性及定位誤差，本文亦分析氣象局 QPESUMS (quantitative precipitation estimation and segregation using multiple sensors) 水平解析度 $0.0125^\circ \times 0.0125^\circ$ 經緯度、時間間隔 10 分鐘之整合 (mosaic) 雷達最大回波 (vertical maximum intensity, 或稱 column vector, 簡稱 CV) 資料。配合 CV 的時間解析度，即使 TLDS 觀測資料的時間可精確至毫秒，本文計算閃電次數的累計間隔亦為 10 分鐘，例如：

0830 UTC 資料代表 0820 UTC 00 秒起累積至 0830 UTC 00 秒以前之閃電次數。本文藉由區域內 10 分鐘的 IC 次數與 CV 比對，並參考氣象局觀測之 10 分鐘累積雨量資料，來呈現雷暴演變過程中 IC jump 與天氣現象的先後關係，分析之時間均為國際標準時(Universal Time Coordinated, UTC)。

三、個案分析

(一) 個案 A：2008 年 8 月 15 日午後雷暴

該日於 0400~1000 UTC 之間的閃電遍布中央山脈左側(圖 3)，但此個案僅選取閃電資料定位不確定性較低的臺灣北部地區(24.6~25.1°N、120.9~121.9°E)為探討區域。IC 次數(圖 4 淺紫色線)在 0350~0540 UTC 之間介於 3~73，在 0540~0630 UTC 之間迅速增加，雖於 0620 UTC 時 IC 次數稍減，隨後於 0630 UTC 達個案最大值 988；之後於 0640~0710 UTC 時 IC 次數迅速減少，至 0720 UTC 達相對最低的 102，隨後在 0740 UTC 達另一相對極大值後震盪下降，最後在 1000 UTC 以後幾無 IC 出現。CG 次數(圖 4 藍色線)分別在 0610 及 0800 UTC 達到相對最大的 30 及 14。區域內 CV 的強度分別大於 30、40 及 50 dBZ 的面積(即格點數，圖 4 黃、棕及紅色線)，在 0340 UTC 以前皆為 0，自 0350 UTC 起 30~50 dBZ 的回波同時出現且面積逐漸擴大，50 dBZ 回波之最大面積出現在 0600 UTC(圖 4 紅色*)，至 0750 UTC 時 50 dBZ 第二次達到相對最大面積(圖 4 紅色×)，隨後回波面積減小並於 0930 UTC 之後無 50 dBZ 強回波出現。

圖 5 為個案 A 之 CV(色階)、IC 及 CG 分布圖。對流系統編號(i)及其其最大強度以 Ai-dBZ

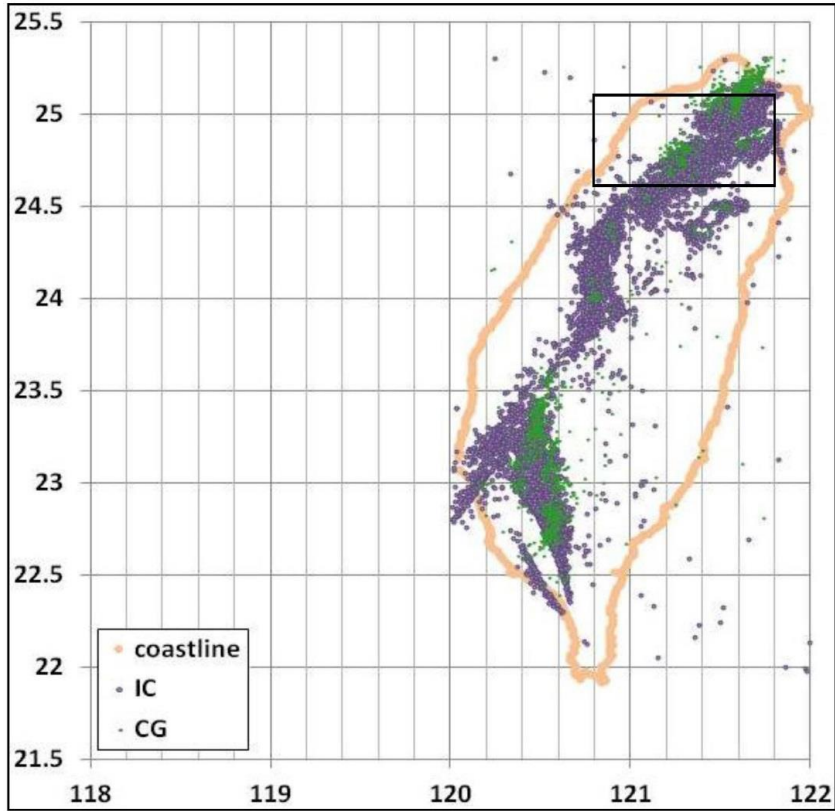


圖 3 2008 年 8 月 15 日午後雷暴 0400~1000 UTC 之間的 IC (紫色點) 與 CG (綠色點) 分布。黑色框標示閃電頻率與 CV 分析區域。

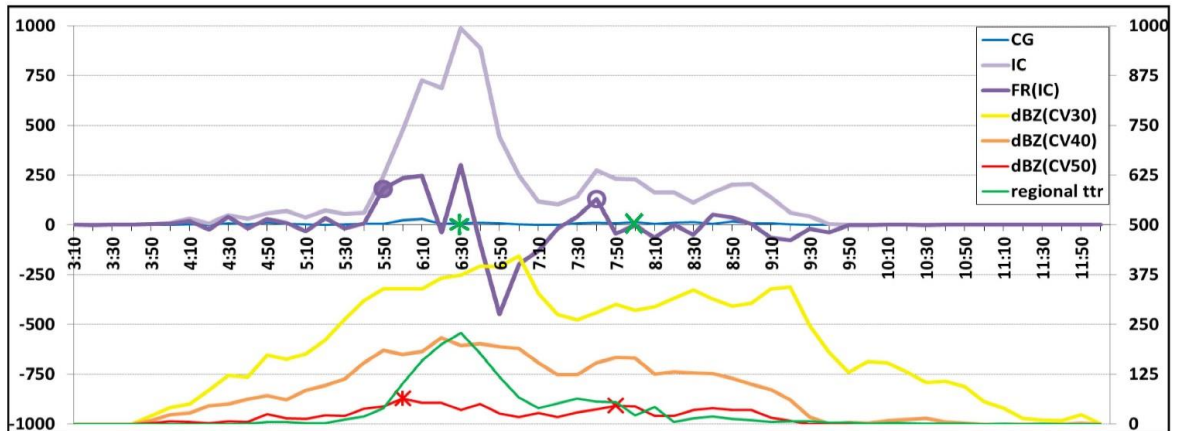


圖 4 個案 A 於 2008 年 8 月 15 日 0310~1200 UTC 之閃電及回波時間序列 (橫坐標, 0310~1150 UTC)。淺紫/藍/紫色線 (代號分別為 IC/CG/FR(IC)) 分別為 10 分鐘之 IC 次數/CG 次數/IC 次數之變率 (左縱座標), 紫色實心及空心圓為 IC jump (預警強瞬時降雨) 出現時間, 綠色*及 x 為強瞬時降雨出現時間, 綠色線為區域內所有雨量站的 10 分鐘總雨量 (右縱座標, mm); 黃/棕/紅色線分別為 CV 強度達到 30/40/50 dBZ 的格點總數 (右縱座標), 紅色*及 x 均為 50 dBZ 相對最大範圍出現時間。

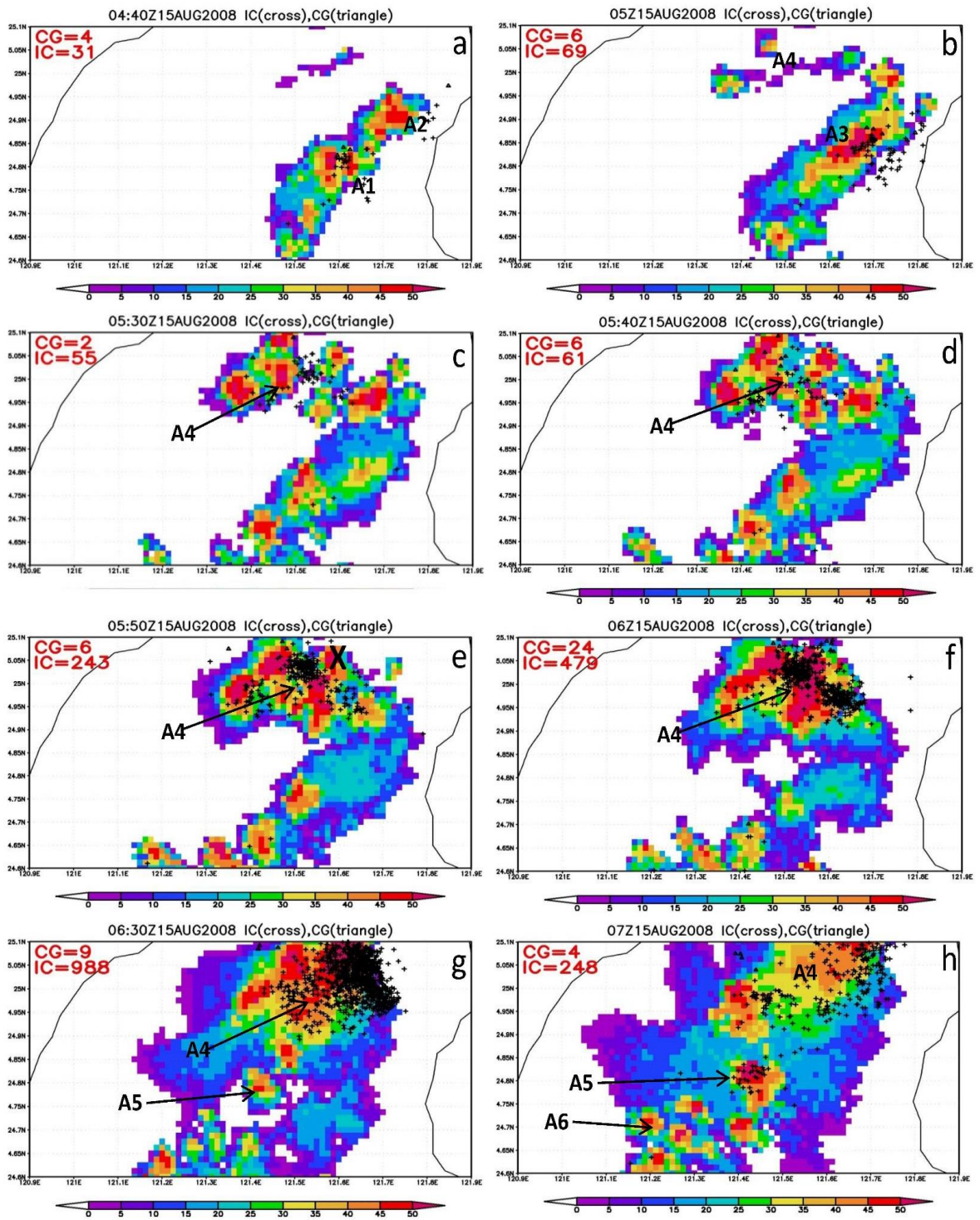


圖 5 個案 A 午後雷暴於 2008 年 8 月 15 日(a) 0440、(b) 0500、(c) 0530、(d) 0540、(e) 0550、(f) 0600、(g) 0630 及(h) 0700 UTC 之 CV (色階, 單位: dBZ) 與 10 分鐘 IC (+), CG (▲) 分布圖, 該時段 IC 與 CG 次數於左上角。圖(e)中符號 X 為 COA9G0 雨量站位置。

方式標記於圖 5。自 0440 UTC 起兩獨立對流胞 A1-50 及 A2-45 (圖 5a) 逐漸增強並合併為 0500 UTC 之 A3-50, 此時 A3-50 西北方開始有 A4-40 逐漸增強 (圖 5b), 0530-0540 UTC 之間 A4-40 增強至 A4-50 且對流胞數量增加 (圖 5c、d); A4-50 附近原本各自獨立的對流胞於 0550 UTC (圖 5e) 開始合併, 於 0600 UTC (圖 5f) A4-50 合併成範圍明顯增大的對流系統並維持至 0630 UTC (圖 5g); 0700 UTC 後 (圖 5h), 除了少數獨立對流胞之外, 對流系統 A4-50 減弱為 A4-40; 之前 0630 UTC (圖 5g) 另一對流胞 A5-50 與其西南方之對流胞群 A6-45 正發展中; A5 與 A6 後續演變歷程類似 A4 的合併過程, 在此不再敘述。

在 0530 UTC (圖 5c) A4-50 附近各獨立的對流胞, 面積各約為 $5 \times 5 \sim 10 \times 10 \text{ km}^2$, 隨後於 0600 UTC 合併成約 $30 \times 15 \text{ km}^2$ 的對流系統 (圖 5e); 0550 UTC 以後, 區域 ($24.6 \sim 25.1^\circ \text{N}$ 、 $120.9 \sim 121.9^\circ \text{E}$, 即圖 5 之範圍) 內降雨量快速累積, 且在 0630 UTC 出現最大的 10 分鐘區域累積雨量 (圖 4 綠色線), 其中最強的單站 10 (圖 4 綠色*) 與 30 分鐘降雨量 (31 與 62.5 mm) 則分別出現在 0630 UTC 與 0640 UTC 之 C0A9G0 (圖 5e 符號 X, 位於 25.0575°N 、 121.5947°E) 測站。

就極短時天氣預警而言, A4 是否如 A1~A3 減弱或持續增強為一範圍較大之對流系統, 即使在 0530 UTC 的 CV 完成後 (實務上 CV 約需 10~15 分鐘之資料處理過程) 仍難預測, 更不易預期其影響程度, 直到 0550 UTC 甚至 0600 UTC 的 CV 完成後, 才能確定 A4 已發展成對流系統, 並據此進行相關之防災預警; 不過從 0600 UTC 的 CV 完成至可開始採取預警決策, 應已接近 0615 UTC。但 IC 次數時間序列顯示, A4 的合併過程伴隨 IC 次數的迅速增加, 在 0530~0550 UTC 之

間, IC 次數由 55、61 躍升至 243 (圖 5 左上角數值), IC 次數的變率則由 -14 (55 減 69)、6 (61 減 55) 突增至 182 (243 減 61)。以本文所使用的定義 (如第二章所述), 0550 UTC (圖 4 紫色實心圓) IC jump 的出現, 代表 A4-50 的對流胞正在合併成為活躍的對流系統, 可能處於上傳冰晶通量與下傳可降冰 (precipitable ice) 通量增強的階段 (Deierling et al. 2005), 劇烈天氣現象很有可能即將出現。即使在此個案中, 並無劇烈天氣現象之觀測報告, 但對於 20 分鐘後於 0610 UTC 出現之高 CG 次數、40 分鐘後之區域及單站的瞬時強降雨等現象, 此 IC jump 可多爭取一些預警時間, 是極短時天氣預警的重要參考資訊。

至於 0740 UTC 的另一次 IC jump (圖 4 紫色空心圓圈), 是 A5 與 A6 附近之對流胞群合併過程中所出現的現象, 但區域 (圖 4) 及單站 (位於 24.8°N 、 121.35°E 的 21C140, 在 0800 UTC 觀測到 12 mm 的 10 分鐘雨量, 圖 4 綠色×) 瞬時降雨相對於 0630 UTC 皆較不顯著。可能因本文定義之 IC jump 門檻較寬鬆, 或最強降雨並未被雨量站觀測到, 以致於此次 IC jump 為錯誤警報。

(二) 個案 B: 2013 年 3 月 28 日電暴

此系統於 0800~1030 UTC 之間, 自西向東通過澎湖北方進入苗栗, 目擊報告顯示苗栗銅鑼 (約位於 24.5°N 、 120.78°E) 在 1010~1020 UTC 出現冰雹。0800~1030 UTC 期間, 閃電多分布於台灣海峽北部及苗栗以北海岸線兩側 (圖 6), 其中伴隨電暴的閃電主要集中於 B-60 (部分時間達 70 dBZ, 圖 8) 移動方向一側, 故在 24.5°N 附近呈現東西向帶狀分布特徵 (圖 6 紅色框); 為避免伴隨其他雷暴系統 (如在 $23.5 \sim 24.2^\circ \text{N}$ 、 $118 \sim 120^\circ \text{E}$ 之間, 或北部近海區域), 以及具不確定性

的 IC 分布 (0820~0920 UTC 之間在新竹、苗栗交界向西延伸的區域內, 出現未伴隨任何回波但密集的 IC, 圖 8), 影響 IC 次數的計算結果, 此個案以 24.2~24.58°N、119.0~121.0°E 為閃電次數及 CV 格點數的計算範圍 (圖 6、8 紅色框), 此範圍雖導致 B-60 之強 CV 格點數略為減少, 也使得可能與電暴無關的少量閃電被計算進來 (如圖 8c 於 119~119.5°E 之閃電), 但應不致於影響 IC 與 CV 的變動趨勢。圖 7 之淺紫色實線顯示, 在 0900 UTC 以前少有 IC 活動, 但 IC 次數在 0850~0920 UTC 由 19、26、107 增至 197, 並於 0930 UTC 達到相對高值 375 後稍降至 0940 UTC 的 359, 於 0950 略降至相對低值 240, 之後 IC 次數又再大量增加, 於 1000~1020 UTC 之間由 577、789 增至 840, 於 1030 UTC 達到個案最大值 874 後即迅速減少 (圖 7 淺紫色線)。值得注意的是, CG 次數在 0810~1030 UTC 介於 94 及 250 (圖 7 藍色線) 變動幅度較小, 使得 0900 UTC 以前的 CG/IC 比值皆遠高於 1, 此現象可能與 2013 年起 TLDS 觀測站、觀測儀器、資料處理方式改變有關 (如第二章所述)。

CV 大於 60 dBZ 的面積在 0900 UTC 達最大範圍 (圖 7 紅色線), 70 dBZ 則出現於 0850~0920 UTC 與 0950~1000 UTC (圖 7 粉紅色線)。與本個案相關之 B-60 的範圍自 0820 UTC (圖 8a) 起逐漸擴大, 並在 0840~0850 UTC 之間增加了約 50%, 70 dBZ 回波則稍遲 10 分鐘出現 (圖 7 與 8b), 這段期間 IC 次數變動並不顯著, 伴隨 B 的閃電多為 CG (圖 7、8a 及 8b)。隨後當 IC 次數自 0900 UTC 起開始增加, B-60 的範圍已達到相對最大 (圖 8c、d), IC 次數於 0950 UTC 達相對低值 (圖 7 淺紫色實線)、B-60 範圍也縮小 (圖 8e), 隨後的 40 分鐘裡 IC 次數由 240 快速增加至

874, 但 CV 顯示 B-60 為一獨立的移動性對流系統, 並沒有和其他對流系統合併的現象, 甚至 B-60 之 CV 範圍正在所縮小, 與 IC 次數呈相反之變化趨勢 (圖 8f~h)。

在此系統進入臺灣陸地之前, 中央氣象局就已發佈冰雹警報, 但除現有各種主、客觀方法外, IC 次數的變化提供另一項資訊: 由 0920~0950 UTC 的 CV 演變趨勢, 固然可以外延出 B-60 的登陸時間與地點, 但同一期間強回波範圍逐漸縮小 (圖 7 紅色線), 很可能導致取消警報的判斷, 尤其 0950 UTC 的 CV 顯示 B 已接近苗栗, 但作業上約於 1005 UTC 始有 CV 圖可參考, 此時幾乎已無決策取捨的空間。但若參考 0940~1000 UTC 之間 IC 次數 (圖 7 淺紫色實線) 的大量增加 (由 359、240 增至 577), 可確認 B 仍持續活躍, 對於延續警報的決策是一項重要參考資訊。雖然在 0950~1000 UTC 之間, IC 次數的時間變率分別為 -119 及 337, 並不符合本文定義之「兩相鄰時段的 IC 次數時間變率均 > 0 且增加」門檻, 因此沒有 IC jump 在這段時間出現, 但 IC 次數於 1000 UTC 大量增加仍為 **15 分鐘** 之後冰雹出現 (圖 7 紅色*) 的重要訊號。至於稍早於 0910 UTC 出現的 IC jump (圖 7 紫色空心圓圈), 因 IC jump 出現後 B 位於海上而無地面觀測資料佐證, 故無法確定是否為錯誤預警。

分析 2013 年上半年 TLDS 所保留之舊格式閃電資料, 結果顯示以單一雲中及連續雲中起點代表「一次閃電」的方式來計算 IC 次數 (圖 7 淺紫色點線) 及其時間變率 (圖 7 紫色點線), 與以新格式資料所計算的結果在變化趨勢上並無差異, 因此並不影響對此個案於 0950~1010 UTC 期間 IC jump 的判斷。

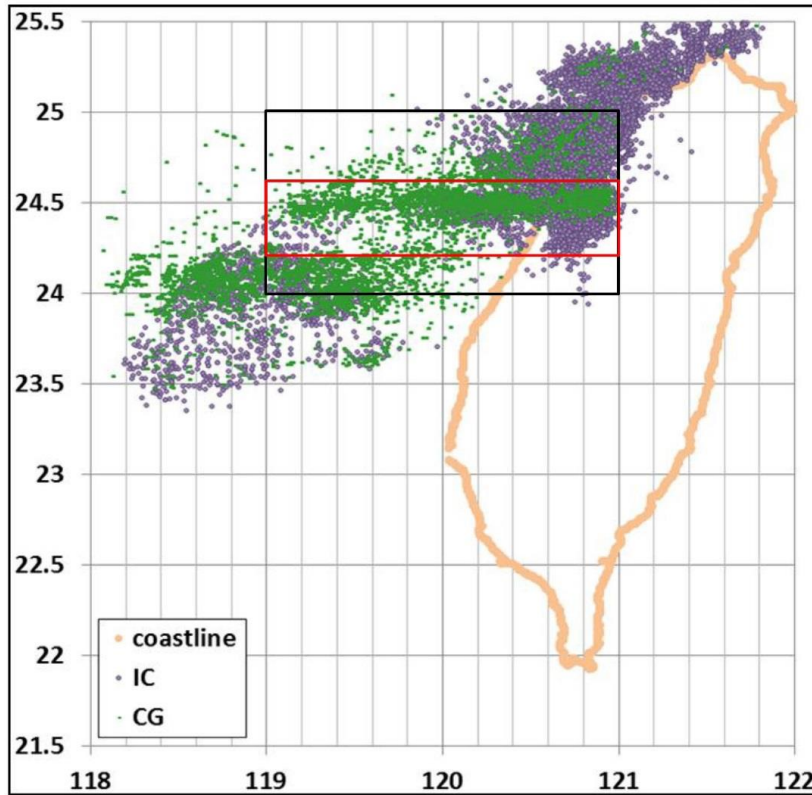


圖 6 2008 年 8 月 15 日午後雷暴 0400~1000 UTC 之間的 IC (紫色點) 與 CG (綠色點) 分布。紅色框標示閃電頻率與 CV 分析區域，黑色框則為圖 8 繪製閃電及 CV 的區域。

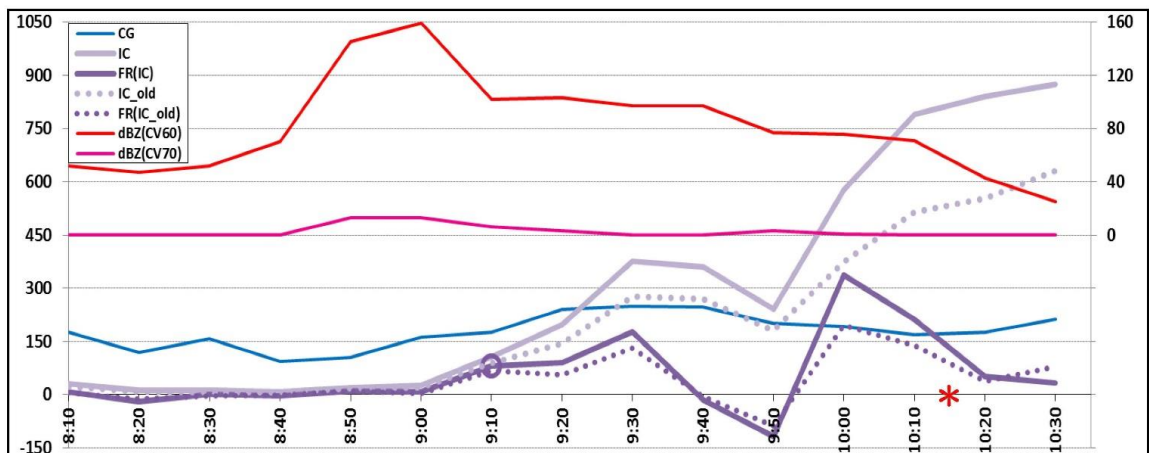


圖 7 個案 B 於 2013 年 3 月 28 日 0810~1030 UTC 之閃電及回波時間序列 (橫坐標, 0810~1030 UTC)。淺紫/藍/紫色線 (代號分別為 IC/CG/FR(IC)) 分別為 10 分鐘之 IC 次數/CG 次數/IC 次數之變率 (左縱座標), 紫色空心圓為 IC jump 出現時間, 紅色* 為冰雹目擊報告出現之時間; 紅/粉紅色線分別為 CV 強度達到 60/70 dBZ 的格點數 (右縱座標); 淺紫/紫色點線為舊版 TLDS 之 10 分鐘 IC 次數/變率 (左縱座標)。

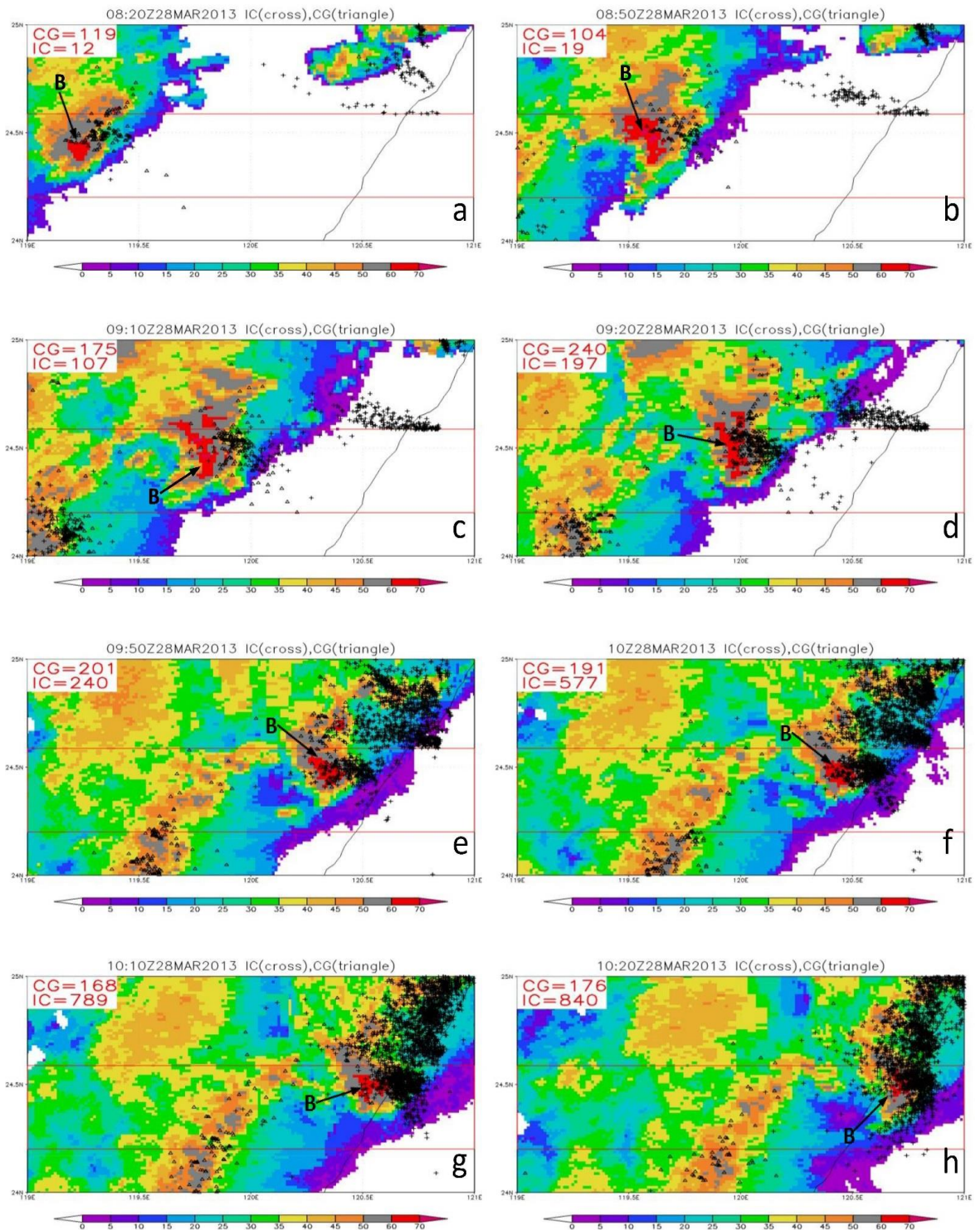


圖 8 2013 年 3 月 28 日雹暴(a) 0820、(b) 0850、(c) 0910、(d) 0920、(e) 0950、(f) 1000、(g) 1010、(h) 1020 UTC 之整合 CV (色階) 與 10 分鐘閃電頻率 (各圖左上角); 各圖紅色框為閃電頻率及 CV 格點數的計算範圍。

(三) 個案 C：2014 年 7 月 23 日 Matmo 颱風雨帶

Matmo 颱風於 7 月 23 日登陸福建前的 0700~1300 UTC 期間，於 23°~24°N、118°~120°E 區域內（圖 9、11 黑色框）閃電集中在颱風雨帶上（圖 9）。在颱風外圍雨帶環境下，IC 次數（圖 10 淺紫色線）在 0820~0830 UTC 起明顯增加，並於 0840~0850 UTC 增加最快，0920 UTC 達到個案討論期間最大的 269。隨後 0930~1010 UTC 之間 IC 次數下降，並於 1010 UTC 出現相對較低的 99。之後 IC 次數再增加，至 1050 UTC 達相對較高的 208 後，雖有起伏但呈現減少之趨勢。CG 次數（圖 10 藍色線）在高 IC 次數時段內之變動皆相對較小，50 dBZ 相對最大面積（圖 10 紅色線）出現在 0910 及 1100 UTC（圖 10 紅色×及*）。

圖 11 之 CV 顯示，0740 UTC 的 C1 與 C2（圖 11a）及 0810 UTC 的 C1~C3（圖 11b）均僅伴隨少量 IC 與 CG；0840 UTC 起在 C2 附近的 IC 與 CG 增加（圖 11c）；0850~0900 UTC 期間 C2 與 C3 合併為 C4（圖 11d、e）；0920 UTC 時 C4 的 IC 次數達到最大值，同時 C5 出現少量 CG（圖 11f）；1000 UTC 起，隨著 C4 面積縮小與 C5 面積增加，IC 與 CG 次數在 C4 附近減少但在 C5 附近增加（圖 9g），此 C4 減弱 C5 增強的演變趨勢持續至 1030 UTC（圖 11h）；1050 UTC 時相對大值的 IC 與 CG 次數主要由 C5 所造成（圖 11i）；1100~1120 UTC（圖 11j、k）期間 C5 的閃電密集區通過澎湖（約位於 23.57°N、119.55°E）；1140 UTC 之後 C5 的閃電次數及強回波範圍皆減少（圖 11l）。

此個案雨帶雖於 0700~1300 UTC 期間近似滯留，但該雨帶中之雷暴則具移動性且對流強度

與活躍度皆有顯著變化。對澎湖地區而言，由 CV 的演變已足以判斷對流系統即將接近且天氣將更不穩定的時間點，然而閃電次數的分析，對於雷暴發展及其所伴隨天氣現象的判斷，也可提供其他重要資訊：當 IC 次數於 0820 UTC 開始增加之後，IC 次數雖有起伏但一直維持高值，CG 次數也很穩定，顯示雲帶中應包含多個處於生命期不同階段之雷暴系統，而個案期間共出現兩次 IC jump（IC 次數時間變率，在 0820~0830 UTC 由 17 增至 23，在 1020~1030 UTC 由 2 增至 12；圖 10 紫色空心及實心圓），其中當 C5 在移近澎湖前的 1030 UTC 出現 IC jump，而密集 IC 所在的活躍對流又即將直接通過，除劇烈天氣外，此時也有機會出現強瞬時降雨、CG 及低能見度等現象，從飛航安全預警的角度而言，有特別提高警覺的必要；隨後於 1050~1110 UTC 之間，相對較高 CG 次數與最大 50 dBZ 回波面積，以及 40 分鐘後澎湖站於 1110 UTC 出現的 $18 \text{ mm (10min)}^{-1}$ 強降雨（圖 10 綠色*），皆與 C5 直接相關。另外，雖然兩次 IC jump 分別出現於 0830 與 1030 UTC，若採用 Gatlin and Goodman (2010) 之 IC jump 演算方式，應會被更明顯出現於 0850 與 1050 UTC 之 IC jump 所取代（0840~0850 UTC 期間 IC 次數時間變率由 -12 增至 107；1040~1050 UTC 者由 11 增至 84），既使此更明顯之 IC jump 分別稍晚出現，但仍提前於 50 dBZ 之 CV 最大範圍與強瞬時降雨出現（0850 UTC 左右與 IC jump 較相關之對流系統遲至 0940 UTC 始移入澎湖測站且造成 14 mm 之 10 分鐘強降雨，圖 10 綠色×）。

四、結 論

本文使用台灣電力公司設置之 TLDS 閃電資料，透過簡單的 IC jump 定義，即「兩相鄰時段

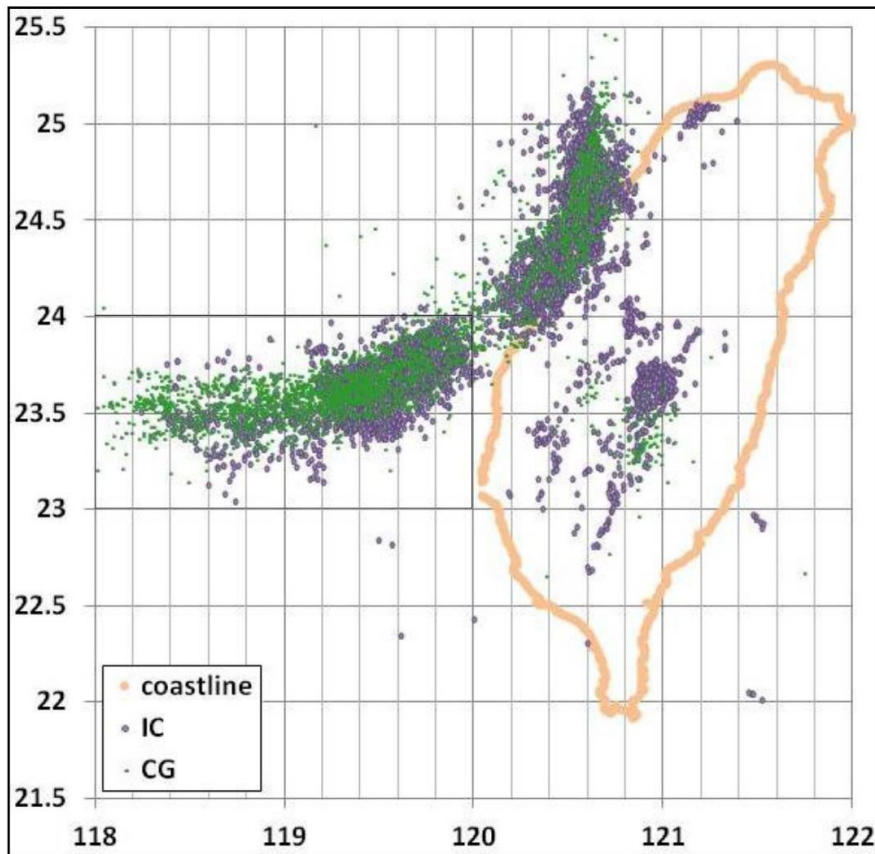


圖 9 如圖 3，但為 2014 年 7 月 23 日 Matmo 颱風外圍雨帶個案，時間為 0700~1300 UTC。

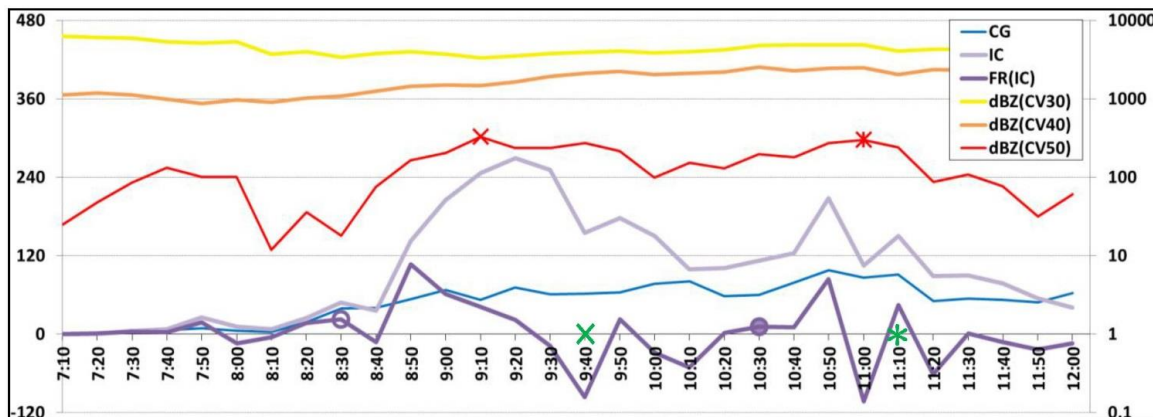


圖 10 2014 年 7 月 23 日 0710~1200 UTC 期間 Matmo 颱風雨帶閃電及回波時間序列（橫坐標）。淺紫／藍／紫色線（代號分別為 IC/CG/FR(IC)）分別為 10 分鐘之 IC 次數/CG 次數/IC 次數之變率（左縱座標），紫色實心及空心圓為 IC jump（預警強瞬時降雨）出現時間，綠色 x 及 * 為澎湖站 10 分鐘相對強降雨出現時間；黃／棕／紅色線分別為 CV 強度達到 30/40/50 dBZ 的格點總數（右對數縱座標），紅色 x 及 * 均為 50 dBZ 相對最大格點數出現時間。

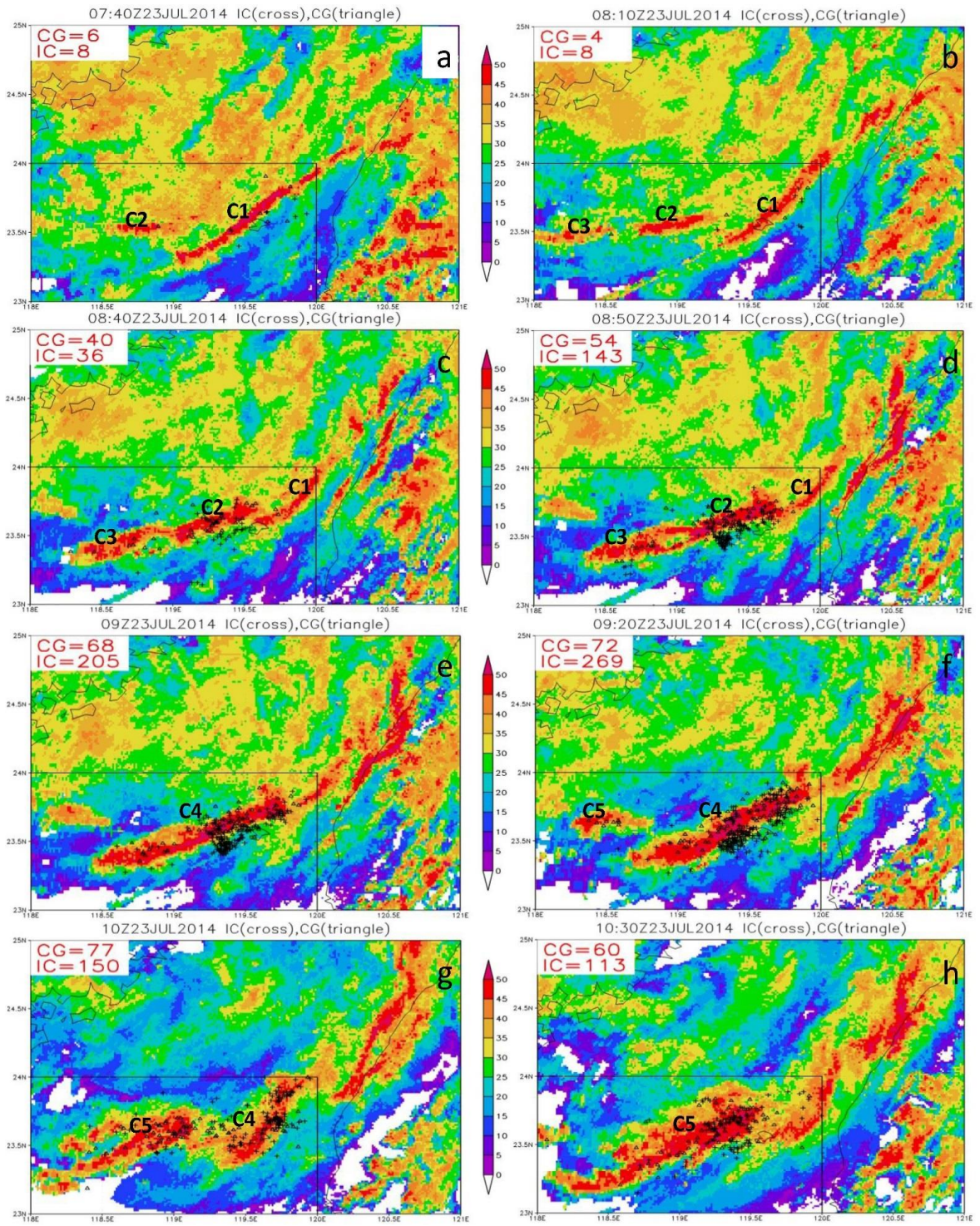


圖 11 2014 年 7 月 23 日 Matmo 外圍雨帶(a) 0740、(b) 0810、(c) 0840、(d) 0850、(e) 0900、(f) 0920、(g) 1000、(h) 1030、(i) 1050、(j) 1100、(k) 1120 及(l) 1140 UTC 之整合 CV (色階) 與 10 分鐘閃電頻率 (各圖左上角); 圖中黑色框為閃電頻率及 CV 格點數的計算區域。

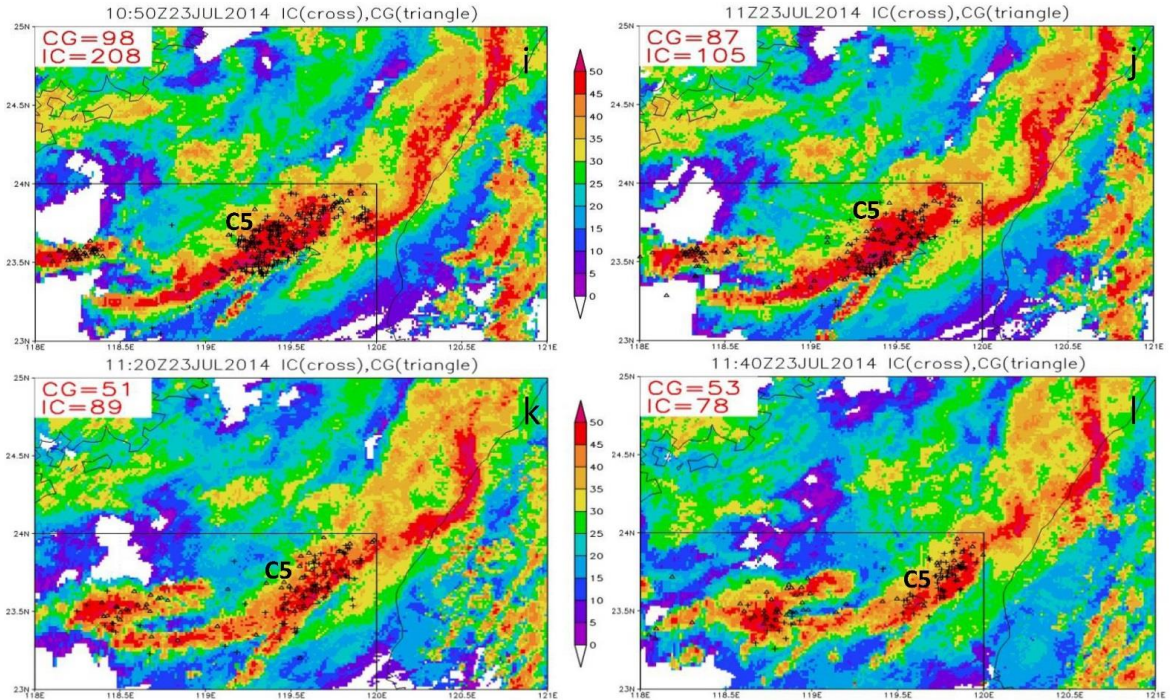


圖 11 (續)。

的 IC 次數時間變率均 >0 且增加」之門檻，探討三種不同型態雷暴系統於各個案固定區域內，IC 次數時間變率之演變與天氣現象之關連。結果顯示，在 2008 年 8 月 15 日個案 A 之午後雷暴個案裡，對流胞群合併成對流系統的過程中達到 IC jump 門檻，並於達到 IC jump 門檻 40 分鐘後出現最強的單站及區域 10 分鐘瞬時降雨。在 2013 年 3 月 28 日個案 B 之移動性雷暴系統裡，IC 次數大量增加約 15 分鐘後冰雹被觀測到。在 2014 年 7 月 23 日個案 C 之 Matmo 颱風近似滯留雨帶內移動性雷暴系統裡，當達 IC jump 門檻 40 分鐘後出現單站 10 分鐘強瞬時降雨。本文雖只有三個個案之分析結果，仍顯示判斷 IC jump 出現之時間，有助於針對伴隨雷暴出現之劇烈天氣及／或強瞬時降雨的預警。實務上，現行臺灣雷達網自觀測開始至雷達圖像產品完成，常需 10~15 分鐘左右之資料處理時間，但閃電資料的處理時間，

即使是採用較複雜的演算法（例如：Gatlin and Goodman 2010 所建議之方法）處理新的 TLDS 資料，所需時間應僅數分鐘左右。因此，對於極短時天氣預警與對流性天氣預報而言，分析 IC jump 可爭取額外的預警時間，也有助於對雷暴發展歷程之理解。此外，但由於 IC jump 計算必須建立在定位誤差明確的基礎上，未來仍需利用較長期的資料來進一步加以分析並確認。

2014 年底中央氣象局已建置另一套閃電偵測網，利用台電及中央氣象局兩套可平行偵測之閃電系統，將可提供更密集之閃電觀測，以做為雷暴個案之 IC jump 分析，相信在結合雷達觀測後，可將此預警技術應用在極短期預報作業上，以提升防災應變決策及飛航安全之預警時間與準確度。

誌謝

感謝空軍氣象聯隊提供台灣電力公司之全閃電資料、中央氣象局張保亮博士及兩位審查者的寶貴建議。本研究在經濟部水利署計畫 MOEAWRA 1030168 支持下完成。

參考文獻

- 吳依璇、林博雄及王寶貴，2009：臺灣西南海域總閃電頻率之診斷與模擬。天氣分析與預報研討會，中央氣象局，台北。
- 林熹閔，1999：雲對地閃電與降水關係之研究。*大氣科學*，27，1，75-98。
- 陳泰然，1994：臺灣地區梅雨季中尺度現象之氣候研究（一）。國科會研究報告 NSC 83-0202-M002-002，112 頁。
- 戴志輝、林得恩及賴世運，2008：臺灣北部午後對流閃電與綜觀氣流風向之關係。*大氣科學*，36，3，179-196。
- 譚振威，2006：臺灣地區閃電與降雨的分類及其氣候特徵。國立中央大學大氣物理研究所碩士論文，120 頁。
- Boussaton, M. P., S. Soula, and S. Coquillat, 2007: Total lightning activity in thunderstorms over Paris. *Atmos. Res.*, 84, 221-232. DOI:10.1016/j.atmosres.2006.07.003.
- Darden, C. B., D. J. Nadler, B. C. Carcione, R. J. Blakeslee, G. T. Stano, and D. E. Buechler, 2010: Utilizing total lightning information to diagnose convective trends. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 167-175. DOI:10.1175/2009BAMS2808.1.
- Deierling, W., J. Latham, W. A. Petersen, S. M. Ellis, and H. J. Christian Jr., 2005: On the relationship of thunderstorm ice hydrometeor characteristics and total lightning measurements. *Atmos. Res.*, 76, 114-126. DOI:10.1016/j.atmosres.2004.11.023.
- Gatlin, P. N., and S. J. Goodman, 2010: A total lightning trending algorithm to identify severe thunderstorms. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 27, 3-22. DOI:10.1175/2009JTECHA1286.1.
- Hodapp, C. L., L. D. Carey, and R. E. Orville, 2008: Evolution of radar reflectivity and total lightning characteristics of the 21 April 2006 mesoscale convective system over Texas. *Atmos. Res.*, 89, 113-137. DOI:10.1016/j.atmosres.2008.01.007.
- Lang, T. J., and S. A. Rutledge, 2002: Relationships between convective storm kinematics, precipitation, and lightning. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 2492-2506.
- MacGorman, D. R., and Coauthors, 2008: TELEX: The Thunderstorm Electrification and Lightning Experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89, 997-1013. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2007BAMS2352.1>.
- Makowski, J. A., D. R. MacGorman, M. I. Biggerstaff, and W. H. Beasley, 2013: Total lightning characteristics relative to radar and satellite observations of Oklahoma mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 1593-1611. DOI: 10.1175/MWR-D-11-00268.1.

- Petrova, S., R. Mitzeva, and V. Kotroni, 2014: Summer-time lightning activity and its relation with precipitation diurnal variation over maritime, coastal and continental areas. *Atmos. Res.*, 135-136, 388-396. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.015>.
- Schultz, C. J., W. A. Petersen, and L. D. Carey, 2009: Preliminary development and evaluation of lightning jump algorithms for the real-time detection of severe weather. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 2543-2563. DOI:10.1175/2009JAMC2237.1.
- Wang, K. -Y., and S. -A. Liao, 2006: Lightning, radar reflectivity, infrared brightness temperature, and surface rainfall during the 2-4 July 2004 severe convective system over Taiwan area. *J. Geophys. Res.*, 111, D05206, DOI:10.1029/2005JD006411.
- Yoshida, S., T. Morimoto, T. Ushio, and Z. Kawasaki, 2009 : A fifth-power relationship for lightning activity from Tropical Rainfall Measuring Mission satellite observations. *J. Geophys. Res.*, 114, D09104, DOI:10.1029/2008JD010370.

The Study of Applying Intra-Cloud Lightning Data to Thunderstorm Nowcasting

Jyh-Huei Tai¹ Mark Yin-Mao Wang² An-Hsiang Wang³ Po-Hsiung Lin¹

¹Center for Atmospheric Resource and Disaster Studies, National Taiwan University

²Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University

³National Science and Technology Center for Disaster Reduction

(manuscript received 19 March 2015 ; in final form 30 April 2015)

ABSTRACT

Since the increase of total lightning activity represents that the convective system is active, the total lightning jump, which defined as the rapid growth of the time rate of total flash in a specific time, is indicative of the following severe weather associated with the thunderstorm. In this study, the intra-cloud (IC) lightning data observed by Taiwan Power Company were used to assess the utility of the IC jump for thunderstorm nowcasting. With a relatively simple IC jump definition, three thunderstorms occurred at Taiwan were investigated. In an afternoon thunderstorm case, IC jump appeared when several cells merged into one larger convective system. Forty minutes later, not only single-station but also regional heavy 10-min accumulated precipitations were observed. In a moving hail storm case, surface hail was observed unofficially about 15 minutes later than the IC flashes increased abruptly. In typhoon Matmo's rainband-embedded moving thunderstorm case, heavy 10-min rainfall was observed 40 minutes after the IC jump. This study suggests that the severe weather/heavy short-term rainfall associated with thunderstorm can potentially be diagnosed by analyzing IC jump.

Key Words: Thunderstorm nowcasting, IC Jump, Severe weather, Heavy 10-min accumulated precipitations