

福建省前汛期暴雨天气雷电特征的个例分析

林炳干¹⁾ 谢兴生²⁾ 陶善昌²⁾

(1) 福建省气象局, 福州 350001; 2) 中国科技大学, 合肥 230026)

摘要: 利用福建省中尺度灾害性天气预警系统(简称福建二级基地) 的闪电定位站网、雷达和常规天气观测资料, 对 1997 年 5 月 5 日至 7 日晨发生在闽东南沿海各县市一场特大暴雨天气过程的闪电特征及其与降雨的相互关系进行分析。结果表明: 这次暴雨过程地闪和云闪总数超过 5 000 次, 闪电密度极值超过 1 次/ km^2 , 地闪次数超过云闪次数, 负地闪占绝对优势, 正云闪占 2/3 以上。暴雨区的闪电频数- 时间曲线很好地反映了暴雨过程降水高峰的到来和消亡的演变趋势。闪电密度中值区与暴雨落区吻合, 闪电密度高值区与雷暴降雨贡献之暴雨中心一致, 但闪电密度极值位置偏离暴雨极值中心。

关 键 词: 暴雨; 地闪; 云闪; 相关

中文分类号 P427. 3 **文献标识码:** A

强对流天气过程经常伴随剧烈的雷电活动, 产生暴雨、大风或冰雹、龙卷。研究这些过程的闪电特征及其跟降雨和其他气象条件的关系, 是深入揭示中尺度强风暴发生、发展机理的需要, 也有助于提高灾害性雷暴的监测诊断和预报服务水平。关于这一课题, 国内外已开展了大量研究, 取得了不少进展, 但仍存在许多问题有待深入探讨。Goodman 等(1986)^[1]曾报导美国的一次中尺度对流复合体(MCC) 的峰值地闪频数达到 2 700 次/h, 该过程在一个地区产生的地闪总数达到那个地区全年地闪总数的四分之一, 而他总结的不同地区中尺度对流系统峰值闪电频数从 3 次/min 到 120 次/min, 可惜没有提到相应的峰值降水强度是多少。D E Buchler 等(1990)¹⁾研究了气团雷暴 10 min 地闪频数与雷达测量的降雨通量极值, 发现两者呈正相关(相关系数 0. 94)。但是, R E Lepez 等人(1991)²⁾指出: 在美国佛罗里达州的对流云降水跟雷电活动之间关系复杂: 第一, 有时很少或没有闪电活动却产生显著的降水; 第二, 有时有大量闪电发生却降水很少; 第三, 闪电和降水间存在很好的相关。在国内, 陈哲彰(1995)^[2]研究了我国华北地区中尺度对流系统, 指出暴雨过程地闪频数很高、正地闪百分比很低, 而冰雹大风天

收稿日期: 1998-07-06; 改回日期: 1998-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(49775252) 及国家气象局科教司研究项目资助

第一作者简介: 林炳干, 男, 1965 年 1 月生, 硕士, 工程师

1) BUECHLER D E, WRIGHT P D, GOODMAN S J. Lightning/ Rainfall relationships during COHME X. Preprints AMS conference on atmospheric electricity, Alberga: 1990. 710- 714

2) LOPEZ R L, ORTIZ R, OTTO W D, et al. The lightning activity and precipitation yield of convective cloud systems in central Floridap. Preprints 25th international conference on radar meteorology, Paris: 1991. 241- 244

气的地闪频数很低、正地闪百分比很高。陶善昌等(1995)^[3]研究指出,冰雹大风天气的地闪频数确实很低,跟暴雨天气的地闪特征不同,同时云中闪电频数却很高,多于地闪。张义军等(1995)^[4]则讨论了对流和降水特征的相关。事实说明,不同类型风暴的闪电特征不同,同一次风暴的不同发展阶段的闪电特征也不同,因此,进一步观测积累和分析我国不同地区不同类型强风暴的闪电特征,同时深化对过程机理的认识,并进而建立可靠的诊断指标和雷暴短时预报方法是十分必要的。

本文利用福建省中尺度灾害性天气预警系统的闪电定位站网、雷达和常规天气观测资料,对1997年5月5日至7日晨,闽东南沿海各县市一场特大暴雨天气过程进行资料分析,以期了解福建省前汛期暴雨天气过程的闪电特征,闪电频数与降水强度相关性、闪电密度与降雨量两者空间分布相关性。

1 天气形势和观测资料

5月初,福建省天气形势主要为午后对流发展的雷阵雨天气,局部县市出现暴雨。5月6日晨至7日,受中低层暖切变线和南海东移北上云团的共同影响,全省中南部沿海地区普降暴雨到大暴雨,过程雨量大于100 mm有25站,大于200 mm有11站,大于300 mm有6站,以漳州382 mm为最大。闽东南沿海暴雨出现这么早,强度这么强,实属罕见。图1a给出了这次过程的降水分布情况,图1b则给出5月5~7日闪电定位站网观测的地闪密度等值线图,计算闪电密度的网格为10 km×10 km,图上数字1.0, 5.0, 10.0, 20.0, 50.0分别表示在每个网格上出现的地闪次数。

本文所用资料是1997年5月5~7日福州、厦门和龙岩三站闪电定位仪组网资料,包括云地闪资料和云闪资料(这套站网设备由中国科技大学和中国气象科学研究院联合研制,地闪定位均方偏差小于5%),厦门714SD多普勒天气雷达资料,厦门、晋江、莆田等18个气象站逐时雨量资料,以及厦门、福州高空风场资料。

雨量记录反映出:包括5月5日午后局地暴雨,这次暴雨过程先后在不同地区出现过四个降雨峰,即5日12:00~18:00(下面称第一时段)在平和、长泰地区首先出现了大于50 mm的局地暴雨,这是这次暴雨的前奏——第一降雨峰;5日20:00~6日4:00(第二时段)在漳州、泉州和龙海等地出现大暴雨,这是第二降雨峰;6日8:00~16:00(第三时段)以仙游、莆田为中心的地区,又一次出现大暴雨,这是第三降雨峰;6日21:00~7日8:00(第四时段)以同安县为中心最后一次出现最强大暴雨,这是第四降雨峰。从探空、地面观测记录及雷达RHI图分析发现:5月5~7日,暴雨区地面温度22~25℃,0~500 hPa层高度约4.2 km;高空1.0~8.0 km高度层偏南风,无明显风向、风速切变。

2 暴雨区的闪电特征

以(24.99°E, 118.47°N)为中心,半径92 km范围为暴雨分析区,在分析区内统计出暴雨闪电特征,包括正负地闪数,正负云闪数,以及地闪百分比,云闪百分比和正地闪百分比,负云闪百分比,结果如表1所示。

表1中,地闪百分比是指闪电中地闪占闪电总数的百分比,即 $P_g = N_g / N_t$;云闪百分比是指闪电中云闪占闪电总数的百分比,即 $P_c = N_c / N_t$;正地闪百分比是指地闪中正地闪占地闪总数的百分比,即 $P_{gp} = N_{gp} / (N_{gp} + N_{gn})$;正云闪百分比是指云地闪中正云闪占云闪总数的百分比,即 $P_{cp} = N_{cp} / (N_{cp} + N_{cn})$ 。

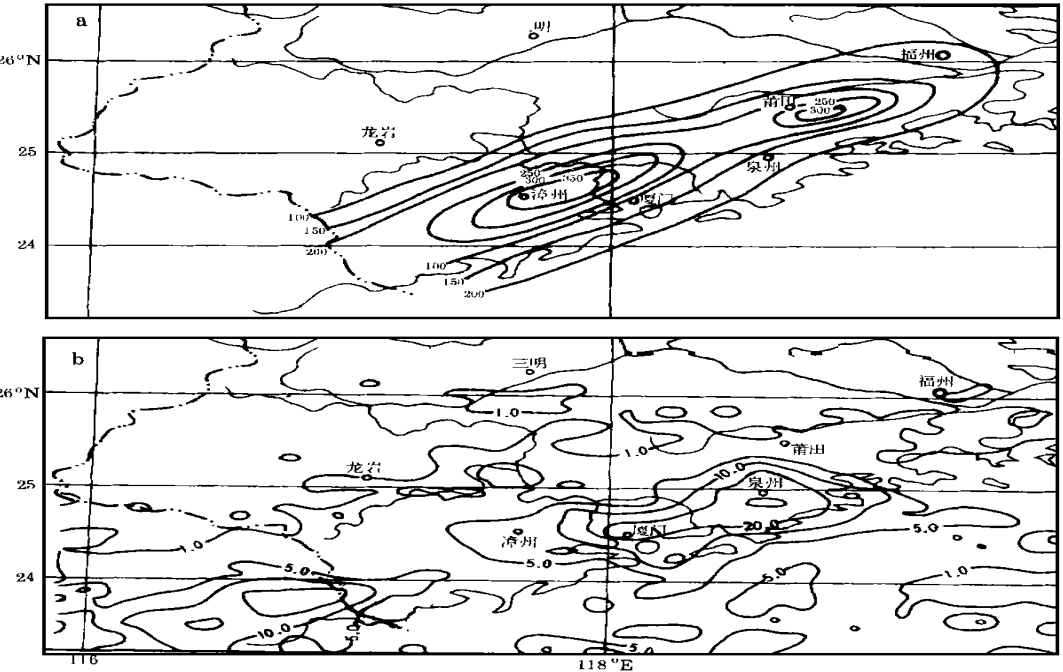


图 1 1997 年 5 月 5 日至 7 日福建省前汛期暴雨过程降雨分布 (a) 及闪电密度分布 (b)

Fig. 1 a. Precipitation distribution of torrential rain from May 5 to 7, 1997, during the early flood season in Fujian province;
b. Lightning density (0.01 times/km^2) in the same precipitation process

表 1 1997 年 5 月 5~7 日福建省东南部沿海地区暴雨过程闪电特征

Table 1 Lightning features of torrential rain from May 5 to 7, 1997
in the south- east coastal area of Fujian province

闪电总数 (N_t)	地闪总数(N_g)			地闪百分比 ($P_g/\%$)	云闪总数(N_c)			云闪百分比 ($P_c/\%$)
	正闪 (N_{gp})	负闪 (N_{gn})	正闪比 ($P_{gp}/\%$)		正云闪 (N_{cp})	负云闪 (N_{cn})	正闪比 ($P_{cp}/\%$)	
3 966	342	2 169	13.6	63.3	1 014	441	69.7	36.7

从表 1 中可以看出,地闪总数 N_g (2 511) 高于云闪总数 N_c (1 455),而在地闪中正地闪所占比例为 13.6 %,略大于盛夏季节平均正地闪百分比,这与有关研究文献在暴雨过程中负地闪占绝对优势是吻合的;在云闪中正云闪所占的比例接近 70 %,远大于负云闪比例。关于暴雨过程不同阶段的闪电特征在下面各部分陆续予以说明。

3 闪电频数与降雨的时间相关性

3.1 局地闪电特征与单点雨强的相关性

为检验暴雨分析区内单站雨强与局地闪电特征的相关性,在暴雨区内任选一个站。以厦门站为例进行分析,厦门站的闪电特征以该站为中心,半径 20 km 的区域进行统计(表 2)。

图 2 给出了 1997 年 5 月 5~7 日厦门站闪电频数与雨强的时间相关图,其中图 2a 对应于地闪和正地闪,而图 2b 对应于云闪和正云闪,纵坐标是 20 min 间隔统计的闪电频数,单位换

算为次数/h; 而雨强曲线是根据雨量计记录得到的 20 min 平均雨强, 单位为 mm/h。从图 2 明显看出, 在前面提到的四个高峰时段, 厦门站都记录到有闪电活动, 只有第二和第四时段, 地闪频数超过 140 次/h。但是地闪和云闪频数-时间曲线与雨强-时间曲线两者的峰值出现时间并不一致, 差异在 ± 1 h 左右; 另外, 在第一时段, 闪电较多, 而雨强为零, 反之, 在第三时段, 闪电稀少而降雨很大(1 h 降雨达到 43.7 mm)。在资料分析过程中, 我们也点绘了泉州、德化、莆田和漳州四站的闪电频数-雨强时间曲线, 现象和分析的结果完全类似于厦门站的情况, 这里没有一一列举。由此看来, 局地闪电特征跟单点雨强记录之间相关性很差。关于第一时段的闪电较多却未下雨的现象, 我们仔细对照分析了当时厦门雷达回波 PPI 和 RHI 图发现: 在距厦门小于 20 km 处受一回波顶高 9 km 的雷暴单体影响在降雨, 由于距离小于 20 km, 属于器测或目测的可测范围, 这样出现有闪电而本站雨强记录为 0 就不奇怪了。另外, 由于闪电活动源经常偏离雷暴降水核心, 在该单体从雨量站不同方位或以不同速度移动时, 闪电峰较雨强峰提取或滞后一端时间出现是可能的。

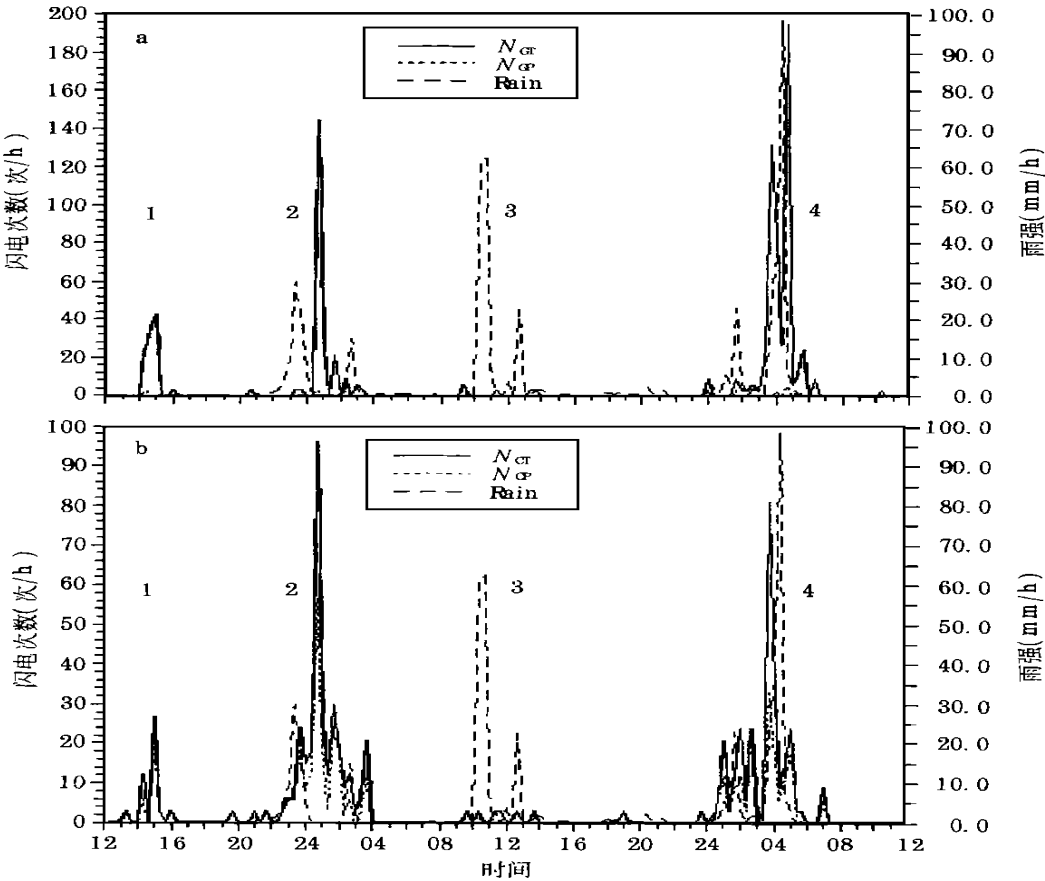


图 2 厦门 1997 年 5 月 5 日 12: 00 至 7 日 12: 00 局地闪电特征与单点雨强随时间变化
Fig.2 The temporal evolution of local Lightning features and rain intensity at Xiamen site from 12:00 BST May 5 to 12:00 BST May 7
a. for ground strokes; b. for cloud flashes

3.2 暴雨区闪电特征与积分雨强的相关性

为了考察整个暴雨区的降雨和闪电特征量之间相关性,取暴雨分析区内 18 个气象站的逐时雨量求和,定义为暴雨区的积分雨量,显然它正比于暴雨区逐时总降水体积,由积分雨强进一步估算暴雨区总降水体积是很方便的,而逐时总降水体积能更好地反映暴雨雨势的变化,对水文部门预测洪水灾情有重要价值。应指出,这 18 个气象站全部在陆地,没有海洋部分雨量记录;与之对应,在统计暴雨区地闪、云闪频数时扣除了前面提到的暴雨分析区包含的海洋部分的闪电记录。

表 2 1997 年 5 月 5 ~ 7 日厦门站雷电特征
Table 2 Lightning features at Xiamen site from May 5 to 7, 1997

闪电总数 (N_t)	地闪总数(N_g)			地闪百分比 ($P_g/\%$)	云闪总数(N_c)			云闪百分比 ($P_c/\%$)
	正闪	负闪	正闪比		正云闪	负云闪	正闪比	
	(N_{gp})	(N_{gn})	($P_{gp}/\%$)		(N_{cp})	(N_{cn})	($P_{cp}/\%$)	
515	11	283	3.7	57.1	129	92	58.4	42.9

图 3 给出 1997 年 5 月 5 ~ 7 日暴雨区的闪电频数- 时间和积分雨强- 时间曲线,图 3a 对应地闪,图 3b 对应云闪。

从这些曲线可以看出:

第一,这次暴雨的降雨和雷电活动各有四个高峰期,分别出现在每天午夜和午后,地闪和云闪频数峰值以及积分雨强峰值的出现时间相互对应,第 1、3、4 三个峰值出现时间彼此一致,闪电频数曲线的第二峰值出现时间超前于积分雨强的相应峰值时间约 1 h。

第二,第一时段局地暴雨跟第二、四时段大暴雨的闪电特征类似,这三个时段地闪总数 2 159,正地闪比 8.5 %,而云闪总数 1 290,正云闪百分比 68.3 %;相应的第 1、2、4 三个积分雨强峰值依次增大,与之对应的三个闪电(地闪和云闪)频数峰值也依次增大,表现了积分雨强与闪电频数之间呈正相关关系。

第三,第三时段闪电特征大不一样,整个暴雨区地闪总数 250 次,正地闪百分比 56 %,云闪 154 次,正云闪百分比 83 %,而积分雨强超过第二时段暴雨区的积分雨强,表现了积分雨强很大而雷电活动较弱的特点,显然不符合雨强和闪电频数之间正相关关系。事实上,这一时段的暴雨中心莆田站 5 月 6 日 12: 00 ~ 16: 00 四个小时降雨量达到 190.8 mm,而以莆田为中心半径 30 km 范围内地闪总数才 11 次(正地闪 10 次),云闪总数 2 次(正云闪 2 次)。分析雷达回波图发现,莆田地区处在较大面积、强度均匀回波的降雨区内,也出现过对流单体回波,顶高 7.5 km(云顶温度高于- 16)回波核强度 42.5 dBZ。言穆弘等(1996)^[5]根据雷暴起电数值模拟研究指出,只有在强上升气流穿过- 20 高层是才会产生强起电。由此看来,莆田地区当时的对流云顶温度尚不满足强起电条件,因而未观测到强闪电活动;从闪电特征看,可以认为第三时段暴雨属弱雷暴型暴雨。为了对照,统计了第 1、2、4 三个时段的对流云平均回波顶高和云顶温度分别为 8.5 km(- 23.0)、13.7 km(- 62.3)和 13.7 km(- 63.0),这说明这次暴雨过程的不同时段中,制约雷暴电活动的宏观气象条件有相当不同。

第四,还应提到,这次暴雨过程中每一时段的闪电频数- 时间曲线高峰的下降沿末端,即该次雷暴活动消亡阶段,正地闪百分比都增高到 30 % 以上。

总之,了解暴雨过程的地闪、云闪频数和极性特征,有助于深入认识暴雨发生发展过程的机理,也有利于从整体上诊断和预测暴雨过程演变趋势。

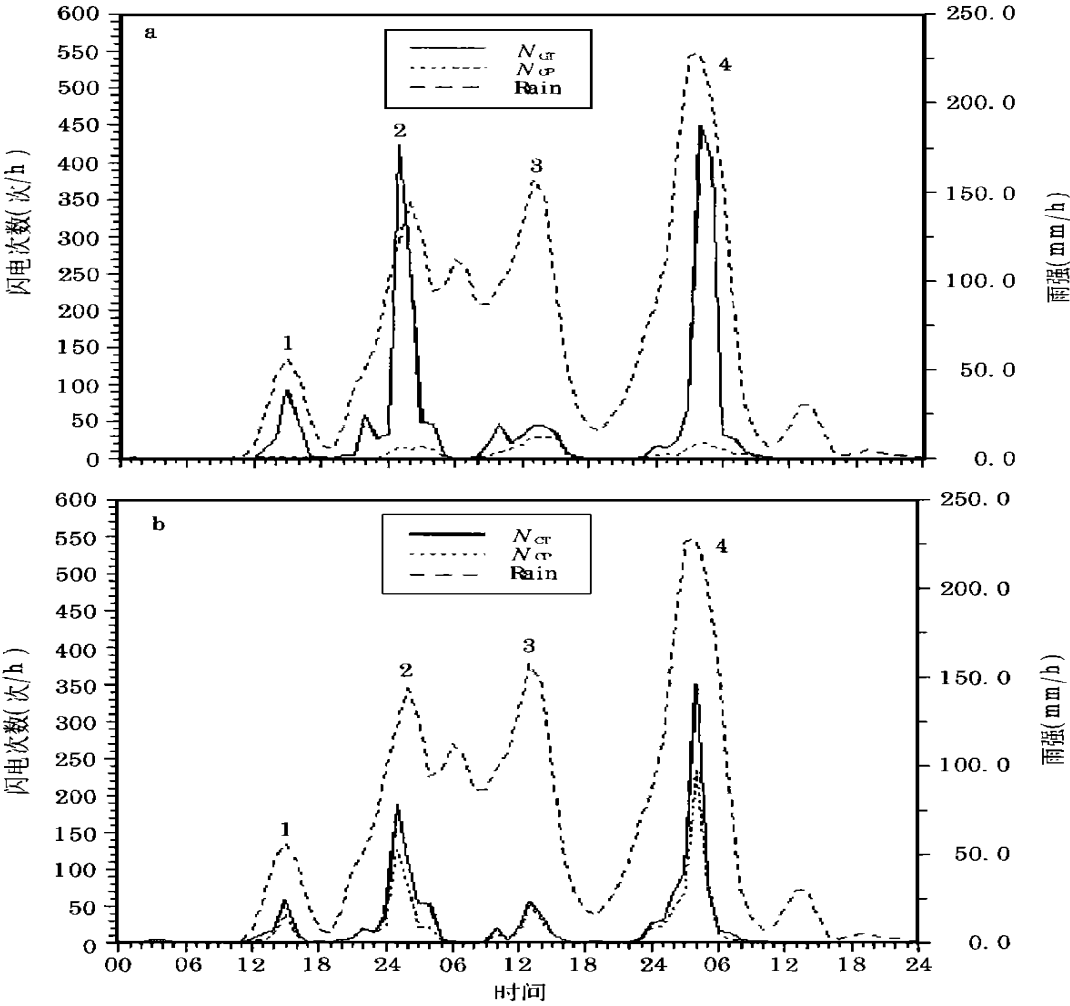


图3 暴雨区内地闪、云闪频数与积分雨强随时间变化

Fig. 3 The temporal evolution of lightning frequency and integrated rain intensity in the torrential rain area from 00:00 BST May 5 to 24:00 BST May 7
a. for ground strokes; b. for cloud flashes

4 闪电密度与降雨的空间相关性

4.1 闪电活动和雷达回波的空间分布与演变

5月7日00:00~08:00是暴雨过程的第四时段,也是最后阶段,雷达回波显示强降雨中心主要发生在以同安县为中心的闽东南地区,部分县市雨强达到20~60 mm/h,持续2~3 h,同安站02:00~04:00雨量达到120 mm/h。图4给出其中八个时次的闪电落点与雷达回波叠加图,闪电数据是根据雷达观测时间前后15 min进行统计,图中“+”和“-”分别表示一次正极性和负极性闪电,图上的闭合曲线表示回波强度大于20 dBz的回波区轮廓线。从雷达回波演变和相应的闪电落点分布可以看出:闪电定位落点的质心位置可大概反映整个暴雨过程的闪电活动情况,呈西南-东北走向排列,与雷达回波带走向一致。随时间这些质心位置以比较缓慢的移速(大约10 km/h)向东北偏东方向推移,与雷达回波带移动配合相当一致。图

4d, 4e, 4f, 4g 表示的雷达站(厦门) 正北偏东方向约 35 km 同安地区闪电定位点很密集, 对流发展极强, 在这时段降雨量也很大, 这与实际降水过程是完全吻合。6: 41 以后, 闪电落点开始弥散, 雷达回波移到海上, 强度减弱, 8: 00 以后暴雨过程基本结束。从雷达图强回波中心区与闪电落点匹配情况看, 多数情况闪电落点密集在回波强中心边缘。这与国外其他研究结果(Ray, 1989)^[6]是一致的。

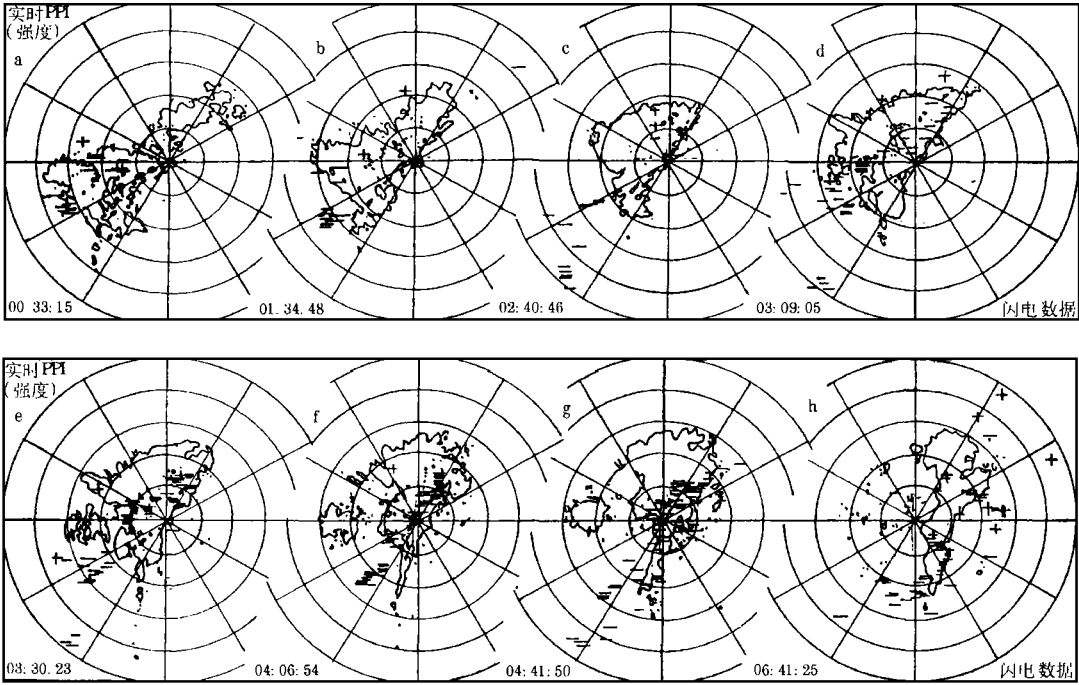


图4 5月7日3:00~4:00厦门雷达回波与闪电叠加图

Fig.4 Overlap of lightning stroke positions and the echo isopleths observed by Xiamen Doppler Radar from 0300 to 0400 BST of May 7

4.2 地闪密度与降雨量的空间分布

对比图 1a 和 1b 可以发现, 地闪密度 1.0 等值线分布区域(中值区) 大体与暴雨落区一致, 同时也清楚地显示了邻近海域和邻省广东北部地区的雷暴活动情况。地闪密度 20.0 等值线圈出了这次暴雨期间雷电活动最为剧烈的地区(高值区), 包括了同安, 长泰, 龙海地区的暴雨中心, 但更向东北方向延伸, 极值落在泉州地区附近, 而莆田、仙游的暴雨中心则不在高闪电密度区内。造成这种情况的原因是: 这次暴雨期间莆田站总雨量 297.4 mm, 其中三分之二以上的降雨出现在第三时段, 即 5 月 6 日白天。前面分析已经提到, 雷达观测回波图证实该时段莆田地区被较为均匀的大面积强回波覆盖, 出现的对流云典型高度仅 7.5 km, 云顶温度 - 16.0 。这种降雨天气条件下, 雷暴是不活跃的。

因而, 闪电密度分布图真实可靠地反映了这次暴雨过程雷暴活动空间分布情况, 并显示: 中尺度对流天气系统在这次闽东南特大暴雨形成发展过程中非常活跃, 有强雷暴活动的对流云团带来了大暴雨, 但是雷电很不活跃的对流云团也可以产生大暴雨, 值得注意和进一步研究。

5 结论和讨论

(1) 这次闽东南前汛期暴雨天气过程中中尺度强对流系统十分活跃, 雷电活动频繁, 总闪超过 5 000 次, 闪电密度极值超过 $1 \text{ 次}/\text{km}^2$, 20 min 间隔统计的地闪频数极值超过 450 次/h, 云闪频数极值超过 340 次/h。这对 5 月上旬, 中纬度地区来说可以算是重要的典型天气事件了。地闪次数超过云闪次数, 负地闪占绝对优势, 但略低于盛夏季节雷暴暴雨的负地闪百分比, 正云闪占云闪三分之二以上。这些闪电特征与国内外报道的暴雨闪电特征基本一致。

(2) 单点雨强记录不能代表一个雷暴或地区的降水实际情况, 暴雨区的积分雨强或逐时总降水体积及其变化比较好地代表了暴雨天气过程总输出水量和其变化情况。而暴雨区的闪电特征很好地反映了这一暴雨过程的整体演变特征: 1) 总闪次数和正地闪比、正云闪比等参数的显著差异标识出这次暴雨天气存在强雷暴型和弱雷暴型两种类型的暴雨降水过程; 对应前者, 闪电频数与积分雨强彼此正相关, 但是否可能把闪电频数表达为积分雨强或雨强的单变量函数关系还应当深入研究。2) 闪电频数时间曲线很好地反映了暴雨过程降水高峰的到来和消亡的演变趋势。

(3) 闪电密度中值区(1.0 等值线以内) 闭合曲线与暴雨落区大体吻合, 闪电密度高值区(20.0 等值线以内) 闭合曲线包括了这次暴雨的龙海、长泰、同安这一强中心, 而该暴雨的第二个偏东北的中心跟闪电密度极值区(极值 $1.02 \text{ 次}/\text{km}$) 相互并不重合, 这值得进一步加以注意和探讨。

(4) 这是一个闽东南前汛期特大暴雨闪电特征的个例分析研究, 无疑上面分析的结论反映了这个地区和这种类型的暴雨过程的一些典型性质, 但难免带有局限性。这些分析的大部分雨量站记录的时间分辨率为 1 h, 数量只有 18 个, 雨强的时间和空间分辨率不够, 这限制了积分雨强和闪电频数相关时间的可靠决定; 还有闪电定位站网的探测效率空间分布订正尚未进行, 可能给闪电密度极值区位置带来一定不确定性。因此, 提高分析资料质量进行更多的强风暴天气过程资料分析是必要的。

致谢: 本文雷达资料取自 厦门雷达站, 特此致谢!

参 考 文 献

- [1] GOODMAN S J, MACGORMAN D R. Cloud- to - Ground lightning activity is mesoscale convective complex[A]. Mon Wea Rev, 1986, 114(12): 2320- 2328
- [2] 陈哲彰. 冰雹与雷电网的云对地闪电特征[A]. 气象学报, 1995, 53(3): 365- 374
- [3] TAO SHANGCHANG, MENG QING, LIN BINGGAN. Remote sensing of thunderstorm cloud flashes with M - LDARS[A]. preprints the workshop on mesoscale met and heavy rain in east Asia[C], Fuzhou: 1995. 127- 128
- [4] 张义军, 华贵义, 言穆弘. 对流和层状云系电活动, 对流及降水特性的相关分析[A]. 高原气象, 1995, 14(4): 396- 405
- [5] 言穆弘, 刘欣生, 安学敏. 等. 雷暴非感应起电机制的模拟研究[A]. 高原气象, 1996, 15(4): 425- 437
- [6] RAY P S, MACGORMAN D R, RUST W D. Lightning location relative to storm structure in a supercell storm and a multicell storm[A]. J G R, 1987, 92(D5): 5713- 5724

CASE STUDY OF THE LIGHTNING CHARACTERISTICS FOR TORRENTIAL RAIN DURING THE EARLY FLOOD SEASON IN FUJIAN PROVINCE

LIN Bing-gan¹⁾ XIE Xing-sheng²⁾ TAO Shan-chang²⁾

(1) Meteorology Bureau of Fujian Province, Fuzhou 350001;

2) University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract: Using the data from the Lightning Location Network, Doppler Radar and conventional Meteorological Observations of Fujian Province, The Lightning characteristics and Lightning/Rain relationships for the torrential rain weather of May 5 to 7, 1997 in the south-east coastal area of the province are analysed. It is shown that thunderstorm is active frequently during the weather process, and the total amount of Lightning is over 5000 times, with the density maximum of Cloud-to-Ground Lightning (CGL) over 1 times/km² and the frequency maximum of CGL and Intra-Cloud Lightning (ICL) over 450 and 350 times/hour respectively. Whereas, the CGL frequency is larger than that of ICL, and the percentages of negative CGL and positive ICL are over 86 % and 66 % respectively, in the torrential rain region. The results also show that the torrential rain weather involves both types of the processes with Strong and Weak thunderstorm activities, there are very different characteristics of Lightning frequency and polarity for both processes. In addition, the curves of Lightning frequency versus time represent the tendency of precipitation during the torrential rain process, while the middle value area of the CGL density is overlapped with one of heavy rain and the high value area is coincided with the central part of the torrential rain produced by thunderstorm, but with the maximum point of CGL density deviated from the maximum center of the torrential rain, which needs to be researched further.

Keywords: torrential rain; ground strokes; cloud flashes; correlation