

冯民学, 虞 敏, 周 宇, 等. 一次飑线过程的全闪活动特征分析[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 51–55. [Feng Minxue, Yu Min, Zhou Yu, et al. Analysis of Total Lightning Characteristics of a Squall Line [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 51–55.]

一次飑线过程的全闪活动特征分析^{*}

冯民学^{1,2}, 虞 敏¹, 周 宇¹, 焦 雪^{1,2}

(1. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044; 2. 江苏省防雷中心, 江苏 南京 210009)

摘 要: 结合 VLF/LF 全闪定位系统、多普勒天气雷达、探空资料, 对 2013 年 7 月 5 日江苏地区一次典型飑线过程的全闪活动特征进行了详细分析。结果表明: 云地闪比的下降、上升预示着飑线过程中雷暴的加强、减弱; 云闪主要分布在 4~8 km 高度, 云闪频数最大值出现在 5 km 处; 结合云闪变化情况和探空资料推测雷暴云内电荷为三极性电荷结构; 对流区的闪电密度远大于层状云区。相比于正地闪, 负地闪集中在雷达回波的强对流区。云闪发生位置更具随机性, 易发生在弱回波区和层状云区; 闪电的发生与云顶高度有很高的相关性, 云闪发生位置与剖面反射率因子中强回波区的发展有很好的 consistency。

关键词: 飑线; 全闪特征; 雷达回波; 云闪

中图分类号: P427.32; X4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)01-0051-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.01.011

中尺度对流系统是夏季重要的降水天气系统, 同时它也是雷电发生最多、雷灾最重的系统之一。飑线是属于中尺度带状对流系统, 它是由许多雷暴单体侧向排列而形成的强对流云带, 其水平尺度长、宽约几十至上百公里, 持续时间几小时至十几小时。飑线过境时, 通常会出现气压涌升、气温急降、风向突变、风速剧增以及强降水, 其能量大, 破坏力较强, 预报难度大, 能造成严重灾害。国内外学者利用闪电资料和雷达资料对飑线系统的发生发展及飑线过程中闪电活动特征进行了研究。Orville 等^[1]指出飑线系统中地闪通常呈偶极子型空间分布。Lang 等^[2]使用 LMA 系统来研究 MCS 系统中的闪电活动, 尤其是在中尺度雷暴典型直径 100 km 范围内层状区域发生的正地闪。Mazur 等^[3]首次分析了飑线过程中的全闪(包括云闪和地闪)活动特征, 指出闪电一般发生在深对流后方。Ely 等^[4]利用 LDAR II 探测资料和雷达回波资料研究了飑线过程中三维全闪结构和前导线、尾随层状云区域的变化, 发现中尺度系统呈现三极性电荷结构。Carey 等^[5]基于相同的探测网络对一次飑线过程进行研究, 提出了 LLTS-MSC 的全闪结构概念模型。国内的研究主要集中在飑线过程中地闪特征, 尹丽云等^[6]对滇西南一次典型飑线过程的地闪变化特征进行分析, 指出负地闪主要发生在对流辐合区, 密集的正地闪对应辐合区附近的强回波区域, 稀疏的正地闪发生在强回波外围的云砧或稳定性降水部位。冯桂力等^[7]利用地

闪定位资料和 LIS 观测的总闪资料分析了一次飑线过程的闪电活动, 正地闪发生在对流区, 负地闪发生在层状云区。刘冬霞等人^[8]利用 SAFIR3000 闪电定位资料和雷达回波资料对飑线系统中的全闪活动特征和电荷结构进行分析, 得出闪电辐射源密度的分布呈现出双层结构的分布特征。

虽然目前对飑线过程中闪电活动特征已经有了一定的研究, 但是对于飑线过程中云闪特征研究及云闪与地闪关系研究还很少。而随着航空事业的发展, 云闪对飞机的飞行存在巨大的危险性^[9]。此外, 云闪记录对于研究雷电及雷暴云内的物理过程, 以及改善雷电监测与预警, 会比地闪记录更有效^[10]。因此, 研究飑线系统下的全闪活动特征显得尤为重要。本文对 2013 年 7 月 5 日江苏地区的一次飑线过程的全闪定位资料和雷达回波资料进行了分析, 尝试通过对飑线过程中全闪活动特征的分析为雷暴的监测预警提供参考。

1 资料来源

本文所用的闪电数据来源于江苏省气象局 VLF/LF 三维全闪定位系统, 2012 年 8 月 15 日正式投入运行。该系统覆盖江苏全省, 提供的信息包括云闪、地闪的发生时间、位置、强度、陡度、极性、高度。根据中国气象局气象探测中心

^{*} 收稿日期: 2014-08-04 修回日期: 2014-09-10

基金项目: 江苏省科技支撑计划(社会发展)项目(SBE201371159)

作者简介: 冯民学(1962-), 男, 江苏江阴人, 博士, 正高级工程师, 主要从事雷电防护研究. E-mail: fengminxue@tom.com

提供的数据,系统的探测范围为 600 km,雷电流强度大于 5 kA 的闪电探测效率大于 95%,平面位置定位精度为 300 m,高度定位精度为 500 m。

雷达产品来源于位于泰州市、常州市的多普勒天气雷达 CINRAD/SA,数据的接受处理设在江苏省气象台内,其经纬度分别为(32.557°N, 119.994°E)、(31.901°N, 119.780°E),海拔高度分别为 57.3 m、37.5 m。雷达可监测到 230 km 范围内的强对流降水等天气,时间分辨率为 6 min,其最大探测距离可达 460 km,可有效地监测雷暴的发生、发展。由于雷达存在盲区,所以根据飊线的移动位置选择不同雷达站的资料进行分析。

根据 2013 年 7 月 5 日徐州站、南京站、射阳站探空资料,0℃层的高度在 5 km 附近, -10℃层的高度在 7 km 附近, -20℃层的高度在 9 km 附近。

2 飊线过程环流特征

2013 年 7 月 5 日在江苏沿淮及以南地区发生一次飊线过程,这次过程伴有强雷电、7 级以上大风、暴雨。在 7 月 5 日 08 时 500 hPa 高空图上,西太平洋副热带高压有一次东撤南落的过程。由于副热带高压东撤南落,沿海地区高空低槽加深,在槽后有一支西北急流从华北南部到江苏北部,槽后有冷空气随西北急流南下。7 月 5 日 08 时 850 hPa 高空图上,沿淮地区有一东北风和西南风的冷式切变线,为对流的发展提供了动力条件。在切变线南侧有一支风速大于 14 m/s 的西南急流,为对流的发展提供了水汽条件。该急流和高空西北急流交汇在本省的沿淮地区,易于激发中尺度对流系统,为这次飊线过程提供有利的环流条件。雷电的发生发展与大气不稳定性密切相关^[11],沿淮及以南地区 K 指数≥32℃,沙氏指数<0℃,大气呈现出不稳定状态,这为该地区强雷电发生提供了有利的热力条件。

3 飊线过程中闪电特征

3.1 全闪总体特征

此次飊线过程的对流生命史长,持续时间 8 h (0-7 时段)。整个飊线过程共观测到闪电 4 185 次,其中云闪 1 043 次,地闪 3 142 次。云闪中负云闪占 72.29%,地闪中负地闪占 70.24%。这是因为大多数雷暴云中,正电荷位于云的上部,云的下部有大量的负电荷,负电荷中心离地面比较近,放电相对更容易。不论正负,云闪比地闪平均电流强度稍微大一点,如表 1 所示。但是地闪的雷电流强度的变化范围比云闪大,正、负地闪的最大雷电流强度也比正、负云闪的最大雷电流强度大。高的负地闪比例也对应着当天的降水过程,与 Carey^[5]指出的雨滴与负地闪的相关性较高一致。飊线过程中江苏各市全闪频数最大值在盐城,

达 2 092 次,最小值在无锡,有 3 次。从图 1 可以看出闪电主要发生在江苏北部及中部地区,闪电的移动由北向南,从淮安盐城地区到泰州扬州地区。

表 1 飊线过程全闪分析

闪电类别	极性	频数	最大/最小雷电流强度/kA	平均电流强度/kA	正闪比例/%
云闪	正闪	289	174.565/8.337	26.865	27.71
	负闪	754	141.327/7.808	28.054	
地闪	正闪	935	213.702/2.774	21.583	29.76
	负闪	2 207	235.873/2.584	27.624	

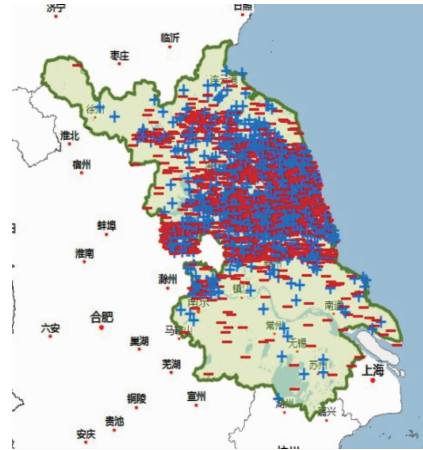


图 1 飊线过程全闪空间分布

3.2 闪电频数演变特征

飊线是一种由多个雷暴单体或雷暴群组成的狭窄的强对流带,飊线的发展也就是雷暴整体发展的体现,所以根据飊线过程的不同阶段来分析云闪、地闪的活动特征。根据雷达和闪电信息,此次飊线过程可分为三个阶段:发展阶段(0-2 时段)、成熟阶段(3-5 时段)、衰退阶段(6-7 时段)。发展阶段,云闪活动相对地闪较活跃,00:01 发生第一次云闪,0-2 时共发生云闪 116 次,这可能是由于上升气流不断增强,云内电荷不断积累,使得云内放电加剧。同时,云地闪比(云闪频数/地闪频数)也随着闪电活动的上升迅速下降(图 2),云地闪比的下降预示着雷暴的加强发展。在成熟阶段,云地闪一直保持较低值,全闪活动旺盛,最高全闪频数达 1 175 次/h。衰退阶段,全闪频数一直下降,而云闪活动则大幅增加,云地闪比的上升预示着雷暴的减弱。云闪频数与地闪频数这种交替变化和 Williams 等^[12]的结论一致,云闪活动增加时,地闪活动受到抑制,说明不同闪电类型对同一电荷源存在竞争。进一步分析正闪比(正闪频数/全闪频数)、正云闪比(正云闪频数/云闪频数)、正地闪比(正地闪频数/地闪频数)的演变特征,在发展阶段,正地闪比保持在 0.4 左右,正闪比和正云闪比都经历了先上升后下降的过程。在成熟阶段,三者变化基本一致,处于下降趋势。在衰退阶段,三者变化虽然上升幅度不一致,但都处于上升趋势。相比于成熟阶段,发展阶段和衰退阶段正闪活动更活跃。正闪比、正

云闪比、正地闪比的下降和上升也分别预示着飊线系统进一步加强和减弱。

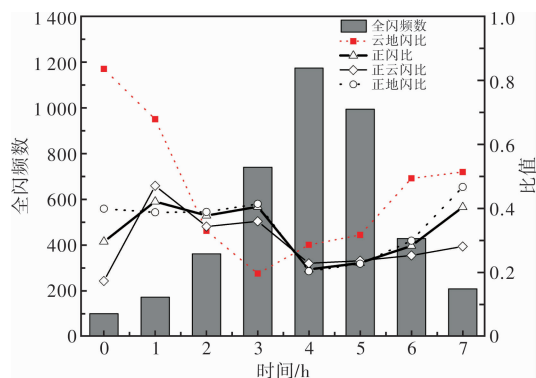


图2 全闪频数、云地闪比、正闪比、正云闪比、正地闪比随时间的变化

3.3 云闪高度特征

云闪的高度随时间发展变化也有一定规律(图3)。发展阶段,云闪零星发生,主要发生在4~10 km。成熟阶段,云闪发生的高度范围扩展至3~13 km,云闪频数大量增加。衰退阶段,云闪频数减少,发生高度较成熟阶段减小,但是高度范围仍很大,这可能是因为残余的云砧仍携带有大量净电荷。云闪高度的发展具有阶段性、不连续的特征。整体来看,小于4 km的闪电很少,闪电主要分布在4~10 km。由正云闪比、云闪频数与云闪高度关系图可以看出云闪频数最大值出现在5 km处,主要范围在4~8 km高度。从图4可以看出7~11 km正云闪比例低,3~7 km和11~13 km正云闪比例相对较高。雷暴云内电荷分布一般为偶极性或三极性,Simpson^[13]最早提出三极性电荷分布模式:云体上部有一主正电荷区,对应温度低于-20℃;云体中部有一主负电荷区,对应温度为-7℃;云体下部有一次正电荷区,对应温度为0℃。结合正云闪比随高度变化情况和探空资料大致推测雷暴云内电荷为三极性电荷结构。云中主正电荷区大致位于11 km高度以上,温度低于-30℃,云中主要是冰晶、雪晶;云中负电荷区大致位于7~11 km高度,温度低于-10℃,云中同时存在冰晶与过冷水滴;云中次正电荷区则大致位于4~7 km高度处,温度位于0℃附近。这与中尺度对流系统(MCS)对流云区内基本电荷结构一致。相较普通积雨云电荷分布模式,飊线过程因上升气流作用更强烈所以电荷分布的高度更高。

4 飊线过程中闪电分布与雷达回波

从雷达组合反射率因子图可以看出这是一次典型的飊线过程,雷达回波非常强,强回波中心强度超过50 dBz,最大值为61 dBz。强对流单体呈东北西南走向线状排列,强对流回波集中在系统的前部,后部为大范围层状云降水区。图5a、b、c、d、e、f分别为00:56、02:00、03:34、04:27、06:02、07:30组合反射率因子与闪电叠加

图, a、b、c、d为泰州站, e、f为常州站。图5a的探测范围是460 km,其他探测范围是230 km。正云闪用红色正号表示,负云闪用红色圈表示,正地闪用黑色正号表示,负地闪用黑色圈表示,下同。

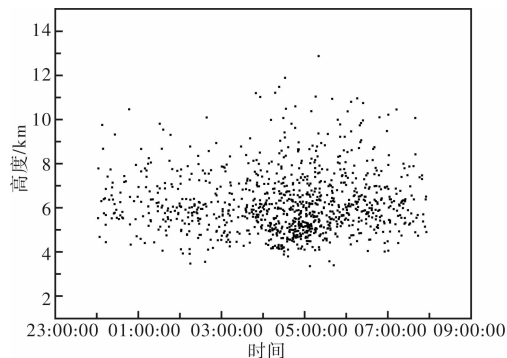


图3 云闪高度随时间的变化

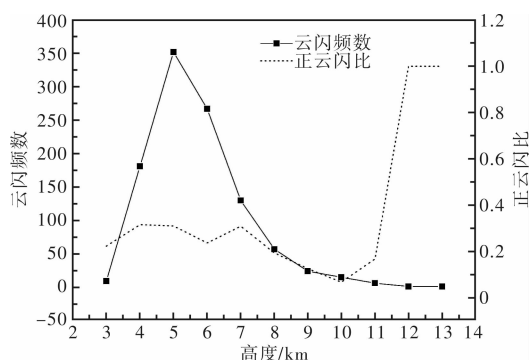


图4 云闪频数、正云闪比随高度的变化

发展阶段,江苏北部被强回波覆盖,强回波区内产生许多零星的单体(图5a)。闪电频数低且分布比较分散,但多分布在大于35 dBz的区域内。分析图5b发现,对流区开始形成,其在东北西南方向的尺度达到150 km。闪电发生密集,主要集中在对流区内,后部的层状云区很少发生闪电。成熟阶段,整个强回波区向东南方向移动,强回波区面积进一步增大。伴随着对流云区的加强,层状云区也在不断扩大。闪电更加密集,闪电频数最大达到1175次/h,云闪频数和地闪频数都达到最大值,闪电发生的位置仍主要集中在对流区。分析图5c、d发现,相比于正地闪,负地闪发生的位置更集中在对流强烈的区域。而云闪的分布则比较分散,一部分云闪和地闪发生在层状云区,这可能是因为飊线系统内气流把带电粒子从前方对流区带到了后方相对稳定的层状云区。Stolzenburg等^[14]建立的飊线中云内放电模型指出:对流区的上部放电区域会延伸到层状云区,来自对流区的气流和冰相粒子的碰撞都会对层状云区的放电有贡献。衰退阶段,雷达回波减弱,对流区从密集的整体变为弱对流单体。闪电频数明显减少,地闪发生位置比云闪更集中(图5e、f)。纵观整个飊线过程的闪电分布位置与雷达回波,发现对流区的闪电密度远大于层状云区。相比于地闪,云

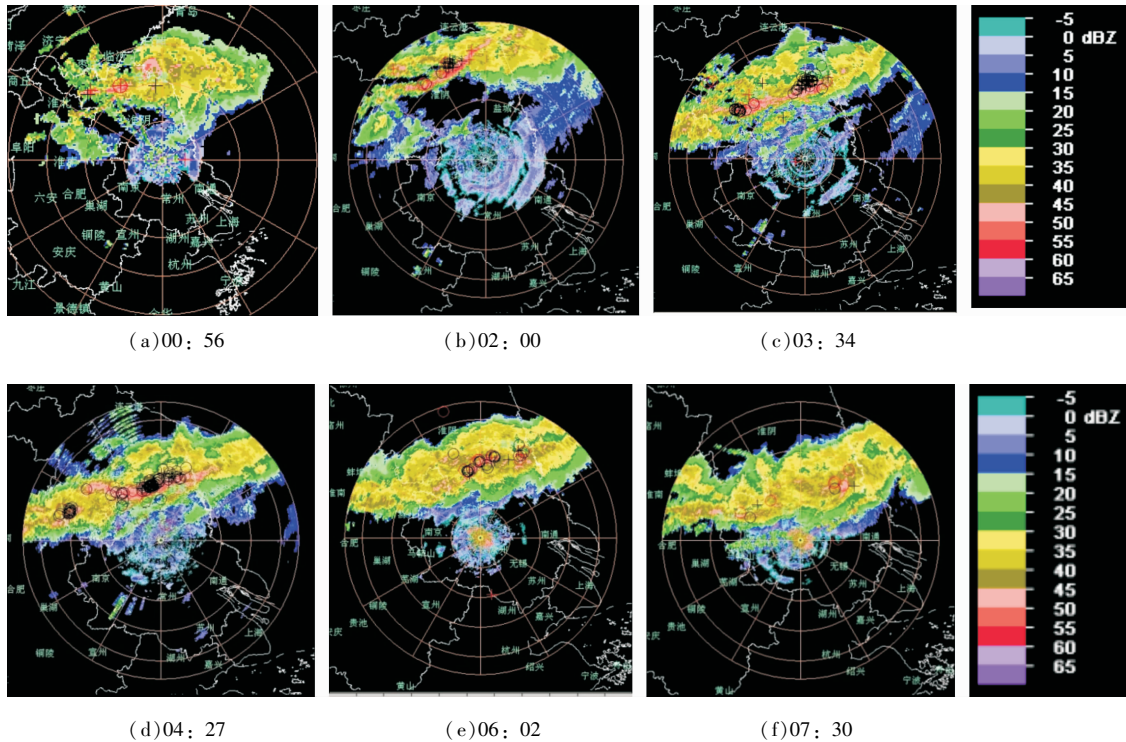


图5 组合反射率因子与闪电叠加图

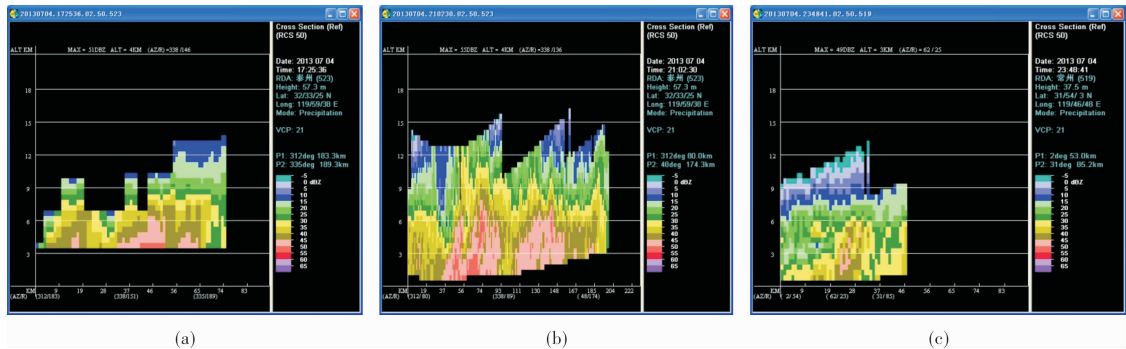


图6 RHI剖面反射率因子图

闪发生的位置更随机,更易发生在弱回波区和层状云区。相比于正地闪,负地闪发生位置更集中在强对流区域。

5 飊线过程中雷暴云垂直发展与雷达回波

图6a、b为泰州站01:25、05:02对流区剖面反射率因子图,6c为常州站07:48对流区剖面反射率因子图。发展阶段,雷暴单体开始产生,云体厚度达10 km,3~7 km高度出现强回波区,与云闪发生高度4~10 km一致(图6a)。云顶高度突破9 km即-20℃温度层,一般当云顶发展到-20℃温度层高度以上时,云中有了足够多冰晶,闪电开始产生。成熟阶段,多个雷暴单体发展合并,闪电频数增加,云顶高度突破15 km,强回波区也扩大到0~8 km(图6b)。上升气流的增强使得云顶高度不断增加,同时也把带电粒子带到更高高度,与其他的不同高度的冰相离子碰撞形成

带电层,通过电荷分离形成稳定的带电层,这也使得云闪发生位置的高度范围扩大。衰退阶段,雷暴单体消散,闪电频数明显减少,云顶高度降到13 km以下。9~12 km高度仍有弱回波(图6c),这可能对应着携带大量净电荷残余的云毯,这也解释了衰退阶段仍有闪电发生在9~12 km处。整个飊线过程中,云闪主要分布在4~8 km,这一高度与强回波中心所在的高度一致。在这一高度上冰相、水相的降水颗粒发生形态转换,由于冰晶、水滴的荷电性质不同所以云中电场在这一高度附近较强,更易发生闪电。可以看出,闪电的发生与云顶高度有很高的相关性。这是因为只有云顶达到一定高度才能有产生大量冰相粒子和净电荷分离的条件。对流越强烈,云顶高度越高,闪电就更容易发生。

6 结论与讨论

通过对这次飊线过程的全闪活动分析,得出

以下主要结论。

(1) 云地閃比的下降、上升分别预示着飢线过程中雷暴的加强、减弱。相较成熟阶段, 发展阶段和衰退阶段正閃活动更活跃。正閃比、正云閃比、正地閃比随时间变化大致相同, 其下降和上升也分别预示着飢线过程中雷暴的进一步加强和减弱。

(2) 飢线过程中云閃频数最大值出现在 5 km 处, 主要分布在 4 ~ 8 km 高度。结合云閃中正閃比随高度变化情况和探空资料大致推测雷暴云内电荷为三极性电荷结构。云中主正电荷区大致位于 11 km 高度以上区域, 温度低于 -30 °C; 云中负电荷区大致位于 7 ~ 11 km 高度, 温度低于 -10 °C; 云中次正电荷区则大致位于 4 ~ 7 km 高度处, 温度位于 0 °C 附近。

(3) 对流区的閃电密度远大于层状云区的閃电密度。相较正地閃, 负地閃更集中发生在强对流区域。相较地閃, 云閃发生位置更具随机性, 更易发生在弱回波区和层状云区。

(4) 閃电的发生与云顶高度有很高的相关性, 云顶高度越高, 閃电活动越活跃。云閃发生位置与 RHI 剖面反射率因子中强回波区的发展有很好的 consistency。

下一步会利用更多个例, 结合 VHF 閃电辐射源定位系统、大气电场仪、双偏振多普勒雷达对飢线过程中雷暴系统的动力结构和云物理过程及在雷电监测预警中的应用进行深入研究。

参考文献:

- [1] Orville R E, Henderson R W, Bosart L F. Bipole patterns revealed by lightning locations in mesoscale storm systems[J]. *Geophysical Research Letters*, 1988, 15(2): 129 - 132.
- [2] Lang T J, Rutledge S A, Wiens K C. Origins of positive cloud-to-ground lightning flashes in the stratiform region of a mesoscale convective system[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(10), L10105, doi: 10. 1029/2004GL019823.
- [3] Mazur V, Rust W D. Lightning propagation and flash density in squall lines as determined with radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978 - 2012), 1983, 88 (C2): 1495 - 1502.
- [4] Ely B L, Orville R E, Carey L D, et al. Evolution of the total lightning structure in a leading line, trailing stratiform mesoscale convective system over Houston, Texas[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984 - 2012), 2008, 113 (D8), D08114, doi: 10. 1029/2007JD008445.
- [5] Carey L D, Murphy M J, McCormick T L, et al. Lightning location relative to storm structure in a leading line, trailing stratiform mesoscale convective system [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984 - 2012), 2005, 110 (D3), D03105, doi: 10. 1029/2003JD004371.
- [6] 尹丽云, 张杰, 张腾飞, 等. 低纬高原一次飢线过程的地閃演变特征分析[J]. *高原气象*, 2012, 31(4): 1100 - 1109.
- [7] 冯桂力, 王俊, 龚佃利. 一次飢线过程的閃电活动特征[J]. *山东气象*, 2009, 29(1): 6 - 11.
- [8] 刘冬霞, 郗秀书, 王志超, 等. 飢线系统中的閃电辐射源分布特征及云内电荷结构讨论[J]. *物理学报*, 2013, 62(21): 219 - 201.
- [9] 陈渭民. 雷电学原理[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 79 - 141.
- [10] 许小峰. 国外雷电监测和预报研究[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 465 - 470.
- [11] 张腾飞, 尹丽云, 许迎杰, 等. 2007 年 5 - 8 月云南省雷电活动特点和致灾因子分析[J]. *灾害学*, 2009, 24(1): 73 - 79.
- [12] Williams E R, Weber M E, Orville R E. The relationship between lightning type and convective state of thunderclouds[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984 - 2012), 1989, 94 (D11): 13213 - 13220.
- [13] Simpson G, Scrase F J. The distribution of electricity in thunderclouds[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1937: 309 - 352.
- [14] Stolzenburg M, Rust W D, Smull B F, et al. Electrical structure in thunderstorm convective regions: 1. Mesoscale convective systems[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984 - 2012), 1998, 103 (D12): 14059 - 14078.

Analysis on Total Lightning Characteristics of a Squall Line

Feng Minxue^{1, 2}, Yu Min¹, Zhou Yu¹ and Jiao Xue^{1, 2}

(1. College of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
2. Lightning Protection Center in Jiangsu Province, Nanjing 210009, China)

Abstract: The characteristics of total lightning in a squall line in Jiangsu on July 5, 2013 are studied in detail by combining the data from VLF total lightning location system, Doppler radar and air sounding data. Results show that the descending, ascending of intracloud lightning ratio can respectively indicate the reinforcing, receding of thunderstorm in the process of the squall line. Intracloud lightning mainly distribute in 4 - 8 km. The maximum of intracloud lightning frequency appears in 5 km. Charge structure in thunderstorm cloud is inferred as tripole charge structure by combining the change of intracloud activity and sounding data. Lightning density in the convective region is far higher than that in the stratiform region. Comparing with positive cloud-to-ground lightning, negative cloud-to-ground lightning draws its focus on the severe convection region of radar echoes. The location of intracloud lightning are more random and easy to happen in weak echoes region and stratiform region. There is a high correlation between the occurrence of lightning and cloud top height. The occurrence of intracloud lightning is consistent with the development of strong echo region in profile of reflectivity factor.

Key words: squall line; total lightning characteristics; radar echo; intracloud lightning