

支树林,李婕,陈娟,2018.江西不同类型强对流天气的地闪统计特征及与雷达回波特征对比分析[J].气象,44(2):222-232.

江西不同类型强对流天气的地闪统计特征 及与雷达回波特征对比分析*

支树林 李婕 陈娟

江西省气象台,南昌 330096

提 要: 选取 2004—2014 年江西省 11 个 ADTD 雷电探测定位组网系统所得云地闪探测数据、省内多普勒雷达、探空和自动站资料,并结合重要天气报,将此 11 年的强对流天气分成短时强降水、有短时强降水伴随的雷暴大风和冰雹(以下简称风雹)和无短时强降水伴随的风雹这三种主要类型,分析它们发生前后的地闪活动特征及其与雷达回波的关系,结果发现,(1)江西省短时强降水、雷暴大风和冰雹分别主要发生在 5—8、7—8 月和 3 月;仅发生短时强降水时的站次远多于发生风雹天气时;除早春和盛夏无短时强降水伴随的雷暴大风发生站次较多外,风雹天气常与短时强降水相伴发生。(2)仅有短时强降水天气发生时,其站点地理位置越偏北、小时雨量越大,对应的地闪活动就越剧烈。不同小时雨量对应的地闪数存在较明显的季节性差异,表现为 3、4 月地闪数以小时雨量为 50~55 mm 时最多;5—7 月地闪数随着小时雨量增大总体呈增多趋势,尤以小时雨量为 55~60 mm 时最多;8—9 月则以小时雨量为 40~45 mm 时最多。(3)就无短时强降水伴随的风雹天气而言,在 3—5 月雷暴大风和冰雹发生前 30 min 内的地闪数差异不大,但平均电流强度后者大于前者;在 6—9 月雷暴大风发生前 30 min 内的地闪数则为冰雹发生前的 2~4 倍,平均电流强度前者大于后者;该类风雹发生前的地闪数多于仅有短时强降水发生前,正地闪的平均电流强度前者也略强。(4)有短时强降水伴随的风雹发生前的平均正地闪数以 8 月为最多,而负地闪数则在 6 月最多;冰雹发生前 1 h 内的地闪数随季节变化不大,而雷暴大风发生前的地闪数存在季节差异,夏季多于春季;另外冰雹的地闪数与冰雹直径存在较好的正相关性。(5)3—8 月,有短时强降水伴随的风雹地闪数远多于无短时强降水伴随时;其平均电流强度前者大于后者;该类风雹天气发生前,地闪平均电流强度随季节呈先增大后减小的趋势,而无短时强降水伴随的风雹天气则无此特点。(6)强对流天气发生前,较强回波出现前的负地闪活动远比正地闪活跃,但其电流强度弱于正地闪;45 dBz 以上回波伸展高度越高,伴随的地闪数也越多,但其平均电流强度变化不明显。

关键词: 地闪,短时强降水,风雹,回波强度,识别

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.02.002

Statistical Characteristics of CG Flashes and Comparison to Radar Echoes in Different Types of Severe Convections in Jiangxi Province

ZHI Shulin LI Jie CHEN Juan

Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330096

Abstract: Based on the data from cloud-to-ground (CG) lightning detection network with 11 ADTD equipment, doppler radar, sounding, AWS data and important weather reports in Jiangxi Province during 2004—2014, severe convective weather events in these years are divided into three types; the short-time heavy rainfall, the thunderstorm gale or hail with and without short-time heavy rainfall. The characteristics of the CG flashes and their relations to radar echoes are analyzed statistically. The results show that; (1) The

* 中国气象局气象预报业务关键技术发展专项[YBGJXM(2017)02]、中国气象局预报员专项(CMAYBY2017-037)和江西省重点研发计划项目(20161BBG70094)共同资助

2017年1月18日收稿; 2017年9月1日收修定稿

第一作者:支树林,主要从事短时临近预报业务. Email: zhisl00@126.com

short-time heavy rainfall, thunderstorm gale and hail in Jiangxi occur mainly from May to August, July to August and March respectively. The stations with short-time heavy rainfall are much more than those with thunderstorm gale or hail. The thunderstorm gale or hail weather accompanied by short-time heavy rainfall often occurs in most seasons in addition to early spring and middle summer. (2) The more short-time heavy rainfall intensity is the more northern its position, and the more severe the CG flashes are. There are obvious seasonal differences of CG flash totals with different hourly rainfall: In March and April, the CG flashes are most evident with hourly rainfall of 50–55 mm, while in May, June and July, the CG flashes increase with hourly rainfall, reaching the top with hourly rainfall of 55–60 mm. In August and September, the most evident is the events with the hourly rainfall of 40–45 mm. (3) From March to May, CG flashes seen 30 min before hail without short-time heavy rainfall have no significant differences compared with those of thunderstorm gale, yet the average intensity of thunderstorm gale is higher than that of hail weather. From June to September, CG flashes in thunderstorm gales are 2–4 times more than that of hail, the average intensity of the flashes is higher than the former, and the intensity of +CGs is also slightly more intense. (4) The +CGs and –CGs with short-time heavy rainfall occurrence are separately in August and June. For the total CGs one hour before the severe weather happens, the seasonal change of that with hail is not evident, but it turns contrary to thunderstorm gales, more evident in summer than in spring. Also, there is a positive correlation between the hail CG flash totals and hail diameters. (5) From March to August, the CG flashes of thunderstorm gale or hail accompanied with short-time heavy rainfall are much higher than that without short-time heavy rainfall, while the average intensity of the former is much higher than the latter. (6) Before the severe convections take place, the negative CG flashes frequency is more evident than the positive one, but its intensity is lower than the latter. The higher the echo of reflectivity above 45 dBz extends, the more the CG flash totals are, but the average intensity change is not obvious.

Key words: cloud-to-ground (CG) flash, short-time heavy rainfall, hail and gale, echo intensity, identify

引 言

江西省地处江南南部和华南北部,春、夏季多受冷暖空气交绥和台风影响,加之境内地形非常复杂,因而每年都会出现因强对流天气造成的雷击伤亡、洪涝、山体滑坡或泥石流等,气象灾害非常严重。导致引起气象灾害的强对流天气类型包括雷暴、冰雹、大风、短时强降水和暴雨及龙卷等,相应的灾害表现形式也多种多样。有效减免气象灾害的有效途径之一是开展不同类型强对流天气的分类监测和预警,这就需要进一步开展雷达、闪电等监测资料的深入和综合应用,并研究这些监测资料在不同类型强对流天气中的不同特征。

闪电监测定位系统是开展强对流天气监测预警业务最常用的参考资料来源之一。有关该资料在强对流天气的监测和预警中的应用方面,Rigo et al (2010)发现地闪大都存在于对流风暴成熟期,初生

发展和消亡阶段仅各占 2%~5% 和 10%~15%。冯真祯等(2013)发现一天中各时段都以 0~37.5 kA 的地闪为主。罗树如等(2005)发现对流单体初生和风暴处发展阶段时的正地闪数明显多于风暴处于成熟和消亡阶段时的正地闪数,而风暴处于成熟阶段时正地闪数最少;与此相应,风暴处于成熟阶段时的负地闪数明显多于其他阶段。孙凌等(2012)对湖南夏季雷暴的天气背景、持续时间以及雷暴过程中地闪的活动进行分析,利用逐步回归方法分别得到了雷暴持续时间及地闪频次指数的预报方程。周筠珺等(2010)认为雷暴系统或单体中心区地闪频次峰值提前或同步于降水量峰值出现;而位于雷暴系统或单体边缘区地闪频次峰值则易滞后于降水量峰值。支树林等(2012)统计计算了 2003—2010 年江西境内的地闪与回波强度的相关性,发现 0℃层以上最大回波强度介于 45~55 dBz 时,对应地闪活动最强;当地闪频次超过 40 个·h⁻¹时,相应的地闪活动也可被描述为“强”,而地闪频次为≤

10 个 $\cdot\text{h}^{-1}$ 和在10~40个 $\cdot\text{h}^{-1}$ 时,地闪活动的强弱程度可分别被描述成“弱”和“中等”。周康辉等(2016)基于地闪数据,利用密度极大值快速搜索聚类算法实现了雷暴的识别,并采用 Kalman 滤波算法实现了雷暴的追踪与外推,具有较好的0~60 min的临近外推预报能力。但这些研究结果由于没有考虑强天气的不同类型,因而在业务应用中存在着一定的局限性。

不同类型强对流天气时的地闪活动特征,国内外有一些研究成果,但大都也是基于个例分析的结果。如陈哲彰(1995)在对我国华北地区中尺度对流系统的研究中得出,强降水以负地闪为主,而冰雹、大风等天气中正地闪占绝对优势。苟阿宁等(2013)发现正、负地闪同时跃增至峰值是 MCS 成熟阶段的标志之一,地闪密集区和 MCS 中移速较强的强回波位置基本吻合, MCS 强回波区域出现的正、负地闪和45~55 dBz 回波后部区域对应较好。张一平等(2010)发现暴雨整个时段地闪频次具有双峰或多峰值,地闪频次的增加预示强暴雨进入持续阶段,地闪减弱比暴雨回波减弱有明显的提前量。范江琳等(2014)也有相似研究结果,即发现负地闪频次和降水强度随时间的变化较一致,有单峰、多峰的特征;负地闪频次峰值的出现可预示雨强峰值的迅速到来,地闪频次突增对持续性强降水的开始有较好的指示意义。另外,负地闪活动主要集中在35 dBz 以上的强回波区,且移向与强回波的移动方向较一致。张义军等(1995)的研究中表明雷暴中强烈的闪电活动与强降雨成正相关,闪电多发生在30 dBz 强回波高度超过 -10°C 层的时段内。在不同类型强对流天气时的地闪活动统计特征分析方面,支树林和娄桂杰(2009)统计分析了2003—2008年江西冰雹过程期间的地闪频次和强度等,发现多数情况下正、负地闪频次比增大时,相应的冰雹直径也增大,且正地闪平均强度越强,发生冰雹天气的可能性就越大;地面降雹后,负地闪频次会减小,正地闪频次则会有所增大。曾金全等(2017)发现福建省降雹之前,地闪的最大强度(陡度)绝对值呈变大趋势,降雹过程中无明显变化规律,在降雹结束阶段则呈减小趋势。总体而言,短时强降水等对流性天气发生前后的地闪活动统计特征的相关研究成果仍较少。

在地闪活动规律与雷达回波的关系方面,国内外有诸多研究成果,如尹丽云等(2012)发现在飚线整个发展阶段, -10 和 -20°C 层高度上雷达回波强

度的每一次跳跃变化都对应着地闪频次的跃增,且 -10 和 -20°C 层高度上雷达回波强度跃变总在地闪频次变化之前6~30 min 发生。此外,暴雨过程伴随着频繁的地闪活动,地闪密集地出现在单体回波合并后的强回波区域、对应着径向速度 $\leq 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的辐合区和逆风区后部及回波顶高 $\geq 15\text{ km}$ 的区域, TBB 和地闪的峰值超前于强降水1~2 h 发生。钟颖颖等(2012)发现40 dBz 及以上的回波区域地闪尤为密集,但也有部分地闪尤其是正地闪,发生在强回波边缘或回波较弱的地方;40 dBz 回波高度突破 -10°C 温度层结高度的时间提前于第一次地闪,与地闪频次的变化一致性高。吴学珂等(2013)发现地闪主要集中在6 km 高度上雷达回波 $\geq 35\text{ dBz}$ 的区域,地闪频次与45 dBz 以上强回波面积的相关系数达到0.89,但也有少量地闪零星分布在弱回波区域;地闪频次与45 dBz 回波顶高的相关性要好于与35和50 dBz 回波顶高的关系。孙哲和魏鸣(2016)发现地闪主要分布在强回波区($>40\text{ dBz}$)及其外围区域,但在较强雷暴云的发展阶段,地闪多发生在风暴体伸展方向的一侧,具有引导雷达回波移动的作用。这些研究成果为更好地将地闪资料应用于分类强对流天气的监测和预警业务提供了很好的参考,但它们都是针对某次或几次强天气过程的研究结果,因而缺乏普遍性。强对流天气发生前后的地闪与回波强度和顶高等的统计关系也鲜有研究,更未见江西省内的相关研究成果。

为在一定程度上弥补上述研究的部分不足,本文将江西近11年的大样本强对流天气分成短时强降水、有短时强降水伴随的雷暴大风或冰雹(简称风雹,下同)和无短时强降水伴随的风雹这三种主要类型,统计分析其伴随发生的地闪数和电流强度及其与雷达回波的关系,以提升对江西省内不同类型强天气发生前后的地闪活动特征的认知。

1 资料

选取2004—2014年的江西省11个雷电探测定位组网系统(advanced TOA and direction system, ADTD)所得云地闪资料,其时间精度为 $0.1\ \mu\text{s}$,网内探测定位精度 $<300\text{ m}$,探测效率理论值约为95%。考虑到通常正地闪的电流值较强,因此在处理资料时参考了 Cummins et al(1998)的做法,将电流值 $<10\text{ kA}$ 的正地闪滤除。雷达资料取自江西省

内的 6 部 WSR-98D SA 雷达基数据,共收集强对流天气发生前后的数据文件 15092 个;探空资料取自江西省内及周边靠近强对流发生地的探空站,且未受对流活动影响,共有 1290 个数据文件。所用不同类型强天气的观测实况记录取自江西省各市(县)气象台站(共 92 个)记录整理的重要天气报。非站点上发生的冰雹天气往往缺乏观测记录,但雨量和风则由附近的区域自动站获得,因此文中也适当地采用了部分上述资料进行相关分析。

2 强对流天气的季节分布

不同类型强对流天气的统计特征,国内有诸多研究成果(伍红雨等,2017;蔡荣辉等,2017;黄玉霞等,2017;王福侠等,2016;杨波等,2016),但江西省相关的研究较少。本文依据主要表现形式,将江西省强对流天气划分成三种主要类型,即短时强降水(小时雨量 ≥ 30 mm 且无大风或冰雹伴随)、有短时强降水伴随的风雹(伴有雷暴发生且地面最大风速 ≥ 17 m \cdot s $^{-1}$ 或有冰雹出现)和无短时强降水伴随的风雹。统计得到各类型强对流天气发生站次结果如图 1 所示。

从图 1 可以看到,江西省内的短时强降水天气集中于 5—8 月,尤以 6 月为最多,平均每年发生约 56 站次。无论有无短时强降水伴随,风雹则以 8 月最多,但相较 6 月而言,7—8 月发生无短时强降水伴随的风雹站次有明显的跃增,而发生有短时强降水伴随发生的的风雹站次则无明显增多的特征。另外,7—8 月发生无短时强降水伴随风雹的站次为有

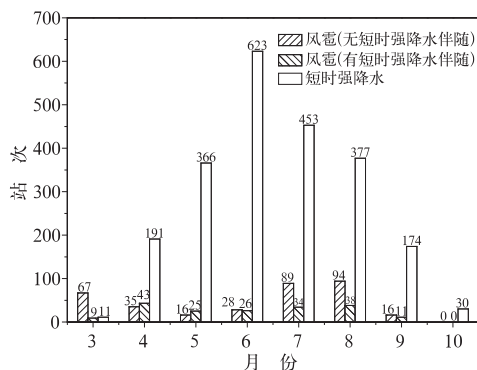


图 1 2004—2014 年江西省内强对流天气的站次分布

Fig. 1 Monthly distribution of station numbers of severe convection weather in Jiangxi from 2004 to 2014

短时强降水伴随风雹站次的 2 倍多。

此外,从冰雹天气的季节分布(图略)可以看到,冰雹在 3—5 月出现最多,6 月后急剧减少。就雷暴大风的季节分布而言,7、8 月为最多,且风速超过 20 m \cdot s $^{-1}$ 的站次均有 34 个;其他月份的则明显偏少。从发生短时强降水的季节分布结果也可发现,5—8 月为短时强降水的多发季节,尤其 6 月最多,达 836 站次。

可见,2004—2014 年江西省内短时强降水、雷暴大风和冰雹分别集中发生于 5—8、7—8 月和 3 月,仅发生短时强降水时的站次则远多于风雹天气发生时;除早春和盛夏时干雷暴大风发生站次较多外,风雹天气常伴有短时强降水发生。

3 短时强降水的地闪特征

选取了江西省内 2004—2014 年和小时雨量超过 30 mm 的短时强降水雨量资料,剔除有雷暴大风或冰雹伴随发生的样本,共有 2239 站次。业务经验表明,造成江西省内短时强降水天气的回波移速大都小于 60 km \cdot h $^{-1}$,即 1 h 内的影响区域大致为 60 km,反之若移速太快,则不易在站点上形成短时强降水,因此人为设定强降水发生期间(强降水开始发生)、站点周围 30 km 内有地闪出现,即认为此次短时强降水伴随地闪活动,进而统计了各站发生短时强降水期间的地闪数和电流强度(简称强度,下同)分布,结果有 308 次无地闪活动伴随,约占总样本数的 14%。在 1931 站次伴有地闪活动的短时强降水发生期间,正、负地闪的平均频次各为 4.7 和 229.5 次 \cdot h $^{-1}$,而强度则分别为 13.3 和 -8.4 kA,表明伴随短时强降水发生的地闪活动以负地闪占绝大多数,而其平均强度则略低于正地闪。

3.1 区域分布

江西省的地理轮廓呈长方形,南北气候差异很大,为区分强对流天气的空间分布差异特征,参照业务的通常做法,将江西省内 28°N 以北及 26.5°N 以南分别定义为赣北和赣南,介于两者之间的区域为赣中,分别统计全省和这三个区域内发生短时强降水的站点上的地闪数与小时雨量分布的关系,结果如图 2 所示。可以看到,平均地闪数分布有较明显的地域差异:随着小时雨量的增大,赣北和赣中的地闪数总体而言呈增多的趋势,而赣南这种趋势不明

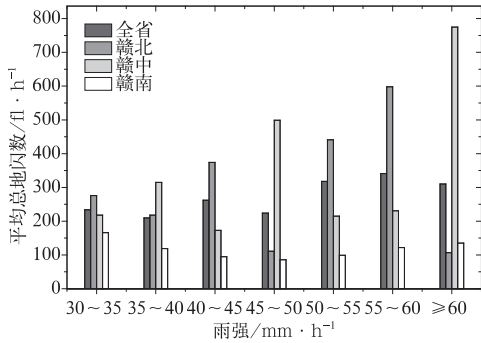


图 2 不同地理区域和小时雨强的平均总地闪数分布

Fig. 2 Mean total CG flashes accompanied by different hourly rainfall intensities in different regions

显,就赣北而言,当小时雨量在 50~60 mm 时,对应的地闪活动最剧烈(与全省的平均状况一致),最强为 598 次·h⁻¹,而赣中各站点的小时雨量在 45~50 mm 时相应的地闪活动最强,赣南的地闪活动最强时,对应的雨量仅 30~35 mm;即当发生了短时强降水的站点的地理位置越偏北且小时雨量越大时,相应的地闪活动也就越剧烈,当这些站点的地理位置越偏南且小时雨量越小时,相应的地闪活动也越强。

究其可能原因,是赣南地处南岭、武夷山、诸广山三大山脉的交接处,属江南丘陵地带,多受热带系统影响,对流系统的降水效率往往较高,而云中粒子相态多为液态,因而常表现为小时雨量较大而地闪活动并不明显;而赣北、赣中多平原,冷暖空气常在这里激烈交汇,对流活动非常频繁,且降水强度与对流的强弱程度密切相关,因而常表现为地闪活动越剧烈时,相应的小时雨量或累积雨量就越大。

3.2 季节变化

统计了上述 11 年江西省内国家气象站上出现短时强降水的站次,结果显示,6 月发生短时强降水的站次最多(623 站次),约占全年所有站次的 28%。小时雨量为 30~35 mm 的站数占当月所有发生短时强降水站次的比例均超过 80%,小时雨量超过 40 mm 的站次仅占所有发生短时强降水站次的 5%,表明江西省内短时强降水的小时雨量大都低于 40 mm。

根据江西省发生对流性天气的主要季节的分布特点,将短时强降水易发季节分为三个阶段:3—4、

5—7 和 8—9 月。其中,3—4 月是江西省短时强降水天气逐渐发展的时期,5—7 月则是出现短时强降水和暴雨最集中的时段,常引发洪涝灾害,并伴有雷暴大风,而冰雹则较少发生;8—9 月的强对流天气大都表现为分散性雷雨和局地的短时强降水,雷暴大风天气也较多;若受东风带系统影响,则往往会有较大范围的强降水天气。分别统计了这三个时节内不同小时雨量站点周围的正、负地闪数,统计时段为地面强降水发生前 1 h,结果显示(图略),小时雨量在 30~35 mm 时,正、负地闪的活动都最明显,其地闪数甚至为小时雨量在 35~40 mm 时的 17 倍之多;随着小时雨量的逐渐增大,上述各季节时段内的正、负地闪活动总体呈明显减弱的变化趋势。这跟地闪频次和小时雨量随地域的分布关系结果有所不同。

尽管正、负地闪数均以小时雨量为 30~35 mm 时最多,但每个站点上的平均总地闪数却并非如此,表现为其不仅与小时雨量有关,也与该短时强降水出现季节有关,表 1 给出了详细的统计结果。可以看到,不同小时雨量对应的站点上的平均总地闪数分布存在较明显的季节性差异:3—4 月、小时雨量为 50~55 mm 时站点的平均地闪数最多,为 168 次;5—7 月时,随着小时雨量的增大,地闪数总体而言也呈逐渐增多的趋势,小时雨量≥50 mm 时地闪数较多,尤其 55~60 mm 时地闪活动最强,平均地闪数达 189 次;8—9 月则是小时雨量<50 mm 时相应的地闪较多,尤其 40~45 mm 的地闪活动最强,达 213 次。因此,上述统计结果表明站点上的平均地闪数不仅与雨强有关,也与短时强降水的出现季节有关。

表 1 2004—2014 年不同小时雨量时的平均地闪数随月份的变化

Table 1 Monthly variation of mean total CG flashes accompanied by different hourly rainfall amounts from 2004 to 2014

小时雨量/mm	平均地闪数/个·h ⁻¹		
	3—4 月	5—7 月	8—9 月
30~35	84	75	145
35~40	61	78	85
40~45	26	61	213
45~50	30	79	124
50~55	168	117	3
55~60	0	189	38
≥60	0	112	74

造成发生短时强降水的站点上的平均总地闪数有如上分布特点的原因包括:5—7月是江西省发生强降水天气的集中期,最大小时雨量可以达到60 mm以上,且短时强降水天气大都同时伴随地闪发生,表现为当对流程度越强时,地闪活动越明显,相应地降水也就越强。3—4月的对流天气的剧烈程度大都不及5—7月,表现为地闪活动和小时雨量均较后者弱,尤其很少出现小时雨量超过55 mm,但对流程度越强时,小时雨量越大、伴随地闪活动越明显的特征依然显著。8—9月是江西省的盛夏时节,由于大气普遍较暖湿,因而缺乏冰相粒子,尤其对于降水效率高、强度大的暖云降水而言更是如此,因此可能导致降水强度大时,地闪活动却不十分剧烈;另外,当降水强度大时,较强的降水可能也会对地闪活动有抑制作用。

3.3 分钟级雨量与地闪的定量关系

为更好地理解地闪活动在强降水发生过程中的变化特征,选取了2004年以来小时雨量超过30 mm的对流性降水数据样本共807站次,对这些强降水发生前后的逐5 min雨量和相应站点周围50 km内的地闪数进行统计分析。结果显示:当5 min内的地闪数减少时,随后5 min内的雨量减小和增大的各有1465和1363次;反之当地闪数增多时,随后5 min内雨量增大或减小的各有1396和1634次。也就是说,地闪数的增多或减少导致随后5 min内的雨量增大的次数有2861次,反之有2997次,即两者相差不大,表明地闪数的增多或减少并不一定意味着随后的雨势会增强或减弱,甚至多数时候是相反的。换言之,地闪数的变化对后面5 min内的雨量变化无明显的“预报”作用。

由于短时强降水的形成机制很复杂,其对应的雨量受对流云伸展高度、维持时间和降水效率等多个因素的共同影响,同样,地闪的形成与维持也受众多因素的制约,其对降水的影响作用也很复杂,因此,短时强降水的雨量与地闪的关系及其随季节的变化特征仍有待深入研究。

4 风雹的地闪活动特征

江西省春夏季多对流性大风发生,冰雹则主要出现于2—4月。对冰雹天气的地闪活动特征,已有一定的研究成果,如支树林和娄桂杰(2009)对江西

2003—2008年冰雹天气时的地闪特征作了分析,发现冰雹发生前后地闪多集中于回波强度 >40 dBz的区域内,其中正地闪多分布于强回波区的前沿和后部,强回波区内则分布不多,且呈分散分布特征,负地闪主要集中在强回波区(一般 ≥ 50 dBz)或其邻近区。随着近年来风雹天气历史个例样本的增多,有必要在已有的基础上继续进行相关研究。另外,与仅发生短时强降水或仅有风雹相比较而言,伴有短时强降水发生的风雹是强对流程度最剧烈的天气之一,因此有必要对风雹进行有无短时强降水伴随进行划分,并分别对其地闪特征进行研究。

4.1 无短时强降水伴随风雹

选取了2004—2014年的风雹天气过程,剔除有短时强降水(小时雨量超过30 mm)伴随发生的样本,得到风速超过 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的雷暴大风,或者冰雹直径超过5 mm的共444站次。

4.1.1 季节及地域分布

仍参照前面的地理区域划分法,统计了各区域内的风雹发生站次,结果显示(表略),就冰雹而言,北部、中部和南部地区的冰雹站次各为68、42和19,各区域内国家气象站在11年间发生冰雹的平均次数分别为1.5、1.4和1.0,表明赣北地区发生冰雹的概率最大,赣南最小。从季节分布来看,3月发生冰雹最多,达45站次,2、4月次之(各24站次)。就尺寸而言,直径超过15 mm的降雹有16站次,占总站次的12.4%,表明降雹大部分直径在15 mm以下。就雷暴大风而言,最大风速超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的有90站次,占总数的28.6%;北部、中部和南部地区各发生142、112和61站次,各区域内国家气象站发生雷暴大风的平均次数分别为3.2、3.9和3.1,即中部地区出现雷暴大风的几率最高。

造成北部地区发生无短时强降水伴随的冰雹概率最大,而中部地区发生雷暴大风概率最高的可能原因是相较中、南部而言北部温度更低,即更容易具备形成冰雹的温度条件;而在中部地区,由于温度相对更高些,因此冷暖空气交汇形成的对流性天气的剧烈程度可能比北部更强些,因此更有利于形成雷暴大风。若北方干冷空气的强度不强,则其南下后往往会快速变性,导致对流性天气的剧烈程度有所下降,也可能造成南部地区的雷暴大风天气发生的可能性变小,这是江西南部发生雷暴大风的站次比中部地区少的可能原因。此外,江西南部多为山地

地形,且观测站较北部和中部地区少,也是导致形成上述统计结果的可能原因之一。

4.1.2 地闪特征

上述 11 年间伴有地闪但无短时强降水发生的雷暴大风天气有 281 站次。统计了这些地面大风发生前 30 min 内的地闪分布,结果显示,各站的平均正、负地闪数之比为 1 : 53;就平均强度而言,正地闪约为负地闪的 2 倍,表明尽管负地闪占绝大多数,但其强度却低于正地闪。就区域分布而言,北部、中部和南部各站的平均地闪数分别为 591、509 和 226 个,即南部地区雷暴大风发生前的地闪数明显少于中、北部地区。

伴有地闪而无短时强降水的冰雹天气共有 105 站次,地面降雹前 30 min 的正、负地闪数之比为 1 : 40,地闪数超过 200 次的降雹天气主要出现在中北部(占总站数的 81.8%)。此外,从冰雹直径与地闪数的分布(图略)还可看到,两者并无确定的正相关关系,即 30 min 内的地闪数多并不意味着随后的冰雹直径就大(可能性约为 50%),因而无法利用地闪数的多少来预测或判断地面降雹尺寸的大小。

对上述 386 站次的风雹天气发生前 30 min 的总地闪数和平均强度进行统计,结果如图 3 所示。可以看到,降雹前的地闪数以 3 月最多(图 3a),30 min 内有 108 个,同期雷暴大风时为 58.3%。随着季节的推移,冰雹天气发生前的地闪数基本呈现逐渐减少的趋势,但变化趋势较平缓;也就是说,盛夏时节里即使出现地面降雹,其前期的地闪活动也较春季有所减少。而雷暴大风发生前的地闪数则呈起伏变化特征,表现为 9 月的地闪数最多,6 月次之,且 6—9 月的地闪数明显多于 3—5 月,表明雷暴大

风伴随的地闪活动从 6 月开始进入明显的活跃期。总体而言,江西春季时冰雹和雷暴大风发生前的地闪数差异不大,而夏季的冰雹天气不仅少,且冰雹发生前的地闪数也不多,雷暴大风发生前的地闪数则为冰雹发生前的 2~4 倍。就平均强度而言(图 3b),春季时冰雹高于雷暴大风时,夏季则相反。另外,由于春季时冰雹常与雷暴大风伴随出现,因此两者伴随的地闪数及其平均强度差异不大;而夏季则多雷暴大风而较少冰雹,因此两者的地闪平均强度分布特征差异较明显。总之,6 月及其以后的风雹天气伴随地闪活动的特征存在较显著的转折变化。

4.1.3 与短时强降水的对比

对以上统计结果进行分析,发现短时强降水发生前 1 h 内的地闪数平均为 84 个,而风雹发生前 30 min 内的地闪数平均则为 115 个,约为前者的 1.4 倍,表明风雹伴随的地闪数明显多于短时强降水发生前。就平均强度而言,无风雹伴随的短时强降水发生前的正、负地闪平均强度分别为 13.3 和 -8.4 kA,无短时强降水伴随的风雹天气发生前则分别为 15.9 和 -7.1 kA,即风雹发生前的正地闪平均强度略强,而短时强降水发生前的负地闪平均强度略强,但相差不大。

4.2 有短时强降水伴随风雹

相较仅发生短时强降水或仅有风雹而言,伴有短时强降水发生的风雹是强对流程度最剧烈的天气之一,因此有必要加强对此类天气的研究。选取了 2004—2014 年的风雹天气过程,将有雷暴和短时强降水伴随,且出现了极大风速 $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风,或者出现了冰雹且其直径 $\geq 5 \text{ mm}$ 的国家气象站作

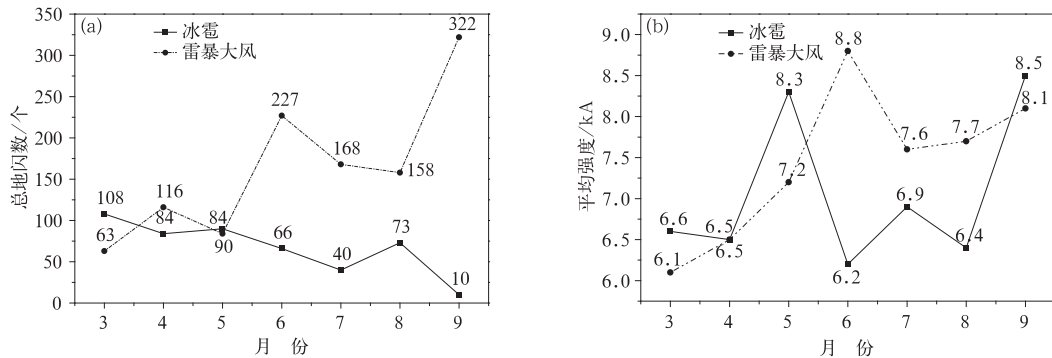


图 3 无短时强降水伴随的风雹发生前 30 min 的总地闪数(a)和平均强度(b)随季节的变化

Fig. 3 Monthly variation of total CG flashes (a) and mean intensity (b) in 30 min prior to the occurrence of hail and gale without short-time heavy rainfall

为一个风雹站点,共得到 156 站次。

4.2.1 季节与地域分布

仍参照前面的区域划分办法,统计发现(表略),北部、中部和南部各区域内有短时强降水伴随冰雹天气发生的站次分别有 9、8 和 11 个,雷暴大风发生的站次分别有 55、53 和 84 个,表明无论冰雹或雷暴大风都是南部明显较多,而北部和中部地区则几乎同样多,但都比无短时强降水伴随时的站次少得多。从季节分布可以看到(图略),伴有短时强降水发生的冰雹天气的站次在 3 月最多(有 6 站次),5 和 7 月次之,而雷暴大风天气在 3—8 月的发生站次则呈逐月增多的变化趋势,最多出现在 8 月(有 35 站次),为 3 月的 11 倍。究其可能原因,是冰雹的生成需要合适的温度层结条件,3—4 月是江西最适宜出现冰雹天气的季节,夏季时则不容易发生,因而表现为江西境内春季时短时强降水和冰雹天气相伴发生的站次最多;而随着地面温度的逐渐升高,加之水汽较春季更充沛,因此夏季时对流性天气也更容易发展起来,易导致形成雷暴大风与短时强降水等天气,

因此本文基于上述统计结果得到并证实:江西省内夏季时雷暴大风和短时强降水伴随发生的机会要比春季高。

4.2.2 地闪特征

统计有短时强降水伴随的风雹发生前 1 h 每个站点上的平均地闪数和强度,所得结果如表 2 所示。由表可见,短时强降水和风雹天气伴随发生前以负地闪居多,但其平均强度小于正地闪;8 月的平均正地闪数最多,其他季节相差不大,而负地闪数则在 6 月最多且夏季多于春季。

分别对有短时强降水伴随的冰雹和雷暴大风天气的地闪进行统计分析(图略),发现平均每个站点上发生冰雹前 1 h 内的地闪数随季节的变化不大,而雷暴大风发生前的地闪数随季节的变化较大:夏季多于春季,且在 6 月最高(达 811 个)。就每个发生风雹的站点周围的地闪平均强度而言,正地闪明显大于负地闪;负地闪随季节的变化不大,而正地闪则在 4 和 8 月各有一个平均强度峰值,其可能原因有待进一步研究。

表 2 有短时强降水伴随的风雹发生前 1 h 的平均地闪数与强度
Table 2 Mean CG flashes and intensities 1 h prior to the occurrence of hail and gale events with short-time heavy rainfall

月份	平均正地闪数/个	平均负地闪数/个	平均总地闪数/个	平均强度/kA		
				正地闪	负地闪	总地闪绝对值
3	5	286	291	11.4	-6.5	6.5
4	6	259	265	23.7	-7.3	7.6
5	5	353	359	10.6	-6.8	6.9
6	8	771	779	11.3	-7.2	7.3
7	7	492	499	13.3	-7.2	7.3
8	15	377	392	32.9	-7.5	8.4
9	4	569	573	12.5	-10.1	10.2

进一步对上述 11 年内有短时强降水伴随的风雹发生前 30 min 内的地闪数进行统计,发现较大尺寸冰雹发生前大都有明显的地闪活动,反之亦然(图 4a),且计算发现冰雹直径与地闪数的相关系数为 0.34(为显著相关),表明两者有较好的正相关关系。雷暴大风的最大风速与大风发生前 30 min 的地闪数(图 4b)显示,两者无明显正相关关系,进一步计算显示出它们的相关系数仅为 0.006,因此可借助地闪数大致评估降雹尺寸,但不宜用其评估地面大风风速。

4.2.3 与无短时强降水伴随风雹的对比

为方便将有或无短时强降水伴随的风雹天气的地闪特征进行比较,统计了有短时强降水伴随的风

雹发生前 30 min 的地闪数和平均强度(图 5)。与图 3 对比发现,就地闪数而言,在 3—8 月,无论冰雹或雷暴大风天气,有短时强降水伴随都远多于无短时强降水伴随,差异最大时前者约为后者的 91 倍,究其可能原因,是前者的中尺度天气系统的强度和维持时间往往会比后者更强和持久。6 月后,冰雹伴随的地闪数则均大体呈逐渐减少的趋势,雷暴大风伴随的地闪数则显著增多,不同的是,无短时强降水伴随的地闪数在 6 和 9 月最多(其可能原因是风雹本身的强度较强所致),而有短时强降水伴随的则在 7 和 8 月最多。

就平均强度而言,无论冰雹或雷暴大风天气,有短时强降水伴随时的平均地闪强度均大于无短时强

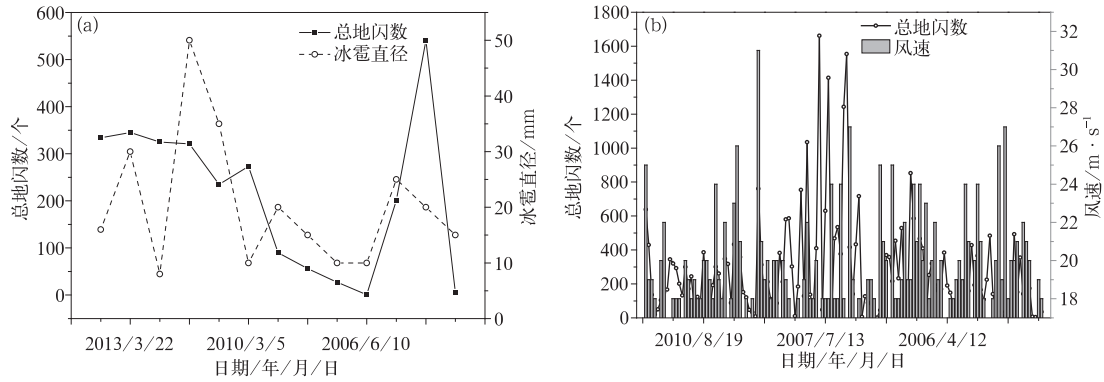


图 4 有短时强降水伴随的风雹发生前 30 min 的总地闪数分布

(a)冰雹,(b)雷暴大风

Fig. 4 Total CG flashes in 30 min prior to the occurrence of hail (a) and thunderstorm gale (b) with short-time heavy rainfall

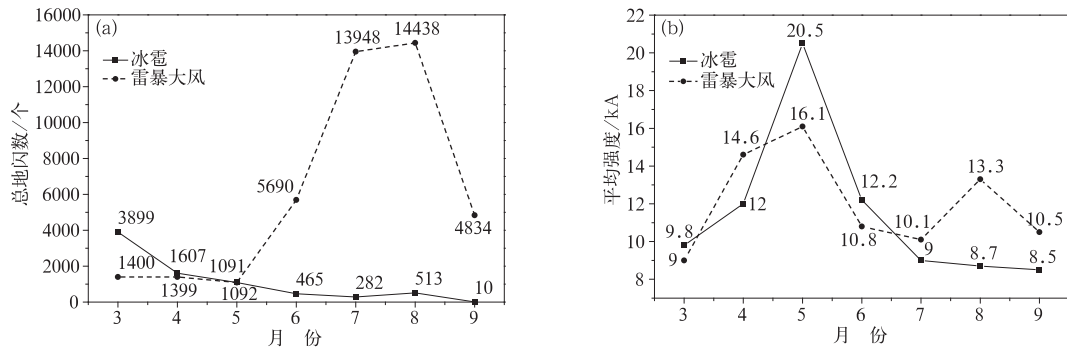


图 5 有短时强降水伴随的风雹发生前 30 min 的总地闪数(a)和

平均强度(b)随季节的变化

Fig. 5 Seasonal variation of total CG flashes (a) and mean intensities (b) in 30 min prior to the occurrence of hail or thunderstorm gale with short-time heavy rainfall

降水伴随时的。无短时强降水伴随时,冰雹天气的地闪平均强度在 9 月最大,但与 5 月相当(两者仅相差 0.2 kA),雷暴大风则在 6 月最大;而有短时强降水伴随时则均在 5 月最大。进一步对比分析后可发现:有短时强降水伴随的风雹天气发生前,地闪平均强度随季节的变化先增大后减小,而无短时强降水伴随时则无此特点。出现这种现象的可能原因,是 5—6 月是江西的春、夏交替之际,也是短时强降水天气的最集中期,伴随发生的风雹天气又较剧烈,因此表现出地闪的平均强度高于其他季节。

5 雷达回波与地闪的对比分析

关于雷达回波与闪电的关系,国内已有诸多研究成果,如 Liu and Qie(2015)对北京地区的 58 个

线状中尺度系统中的 SAFIR 3000 雷电定位系统结果进行分析,发现总闪大致位于线状对流区内,而较少甚至没有闪电在其尾部的层状云区里,且雹暴回波的正地闪数高于非雹暴回波。许迎杰和尹丽云(2013)对一次局地特大暴雨的分析表明,正、负地闪均密集地出现在单体回波合并后的强回波区域,对应着明显的对流区,层状云区域和混合性回波区较少出现地闪活动,速度场上,地闪活动较密集地出现在径向速度 $\leq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的辐合区和逆风区后部,同时对应着回波顶高 $\geq 15 \text{ km}$ 的位置。Chronis et al(2015)发现相较于没有闪电跃增现象伴随的对流风暴而言,伴随有跃增现象的风暴族会维持更久,且有更大的冰雹尺寸、垂直累积液态含水量和闪击率;闪电跃增是风暴的动力和微物理状态的表征。易笑园等(2009)对 3 次飕线的回波与地闪的相关性分析,

发现 6 min 内地闪频数与对流云回波顶高高于 11 或 12 km 的回波面积有正相关关系,而且在爬线系统内的地闪活跃区,回波顶高高于 11 km 的回波面积对地闪活动激烈程度具有预警意义。总的来说,雷达回波与地闪的定量关系研究仍多以个例分析为主,而缺乏气候统计特征分析,因此有必要多开展针对不同地域的相关研究。

收集了江西省内多普勒雷达的 15092 个体扫数据文件,对 40 dBz 以上回波出现前 12 min、周边 10 km 范围内的地闪进行统计,得到超过 10 个正、负地闪的次数分别占总次数的 8% 和 59.8%,平均强度分别为 21.4 和 -8.8 kA,即较强回波出现前的负地闪远比正地闪活跃,而其强度却相对较弱。

取 13835 个伴有地闪发生的对流回波数据,将

45 dBz 高度(以 H_{45} 表示)、0/-20°C 所在高度(分别用 H_0 和 H_{n20} 表示)做对比,统计各高度上的强对流天气样本数占比,并取回波时间前后各 6 min 内的地闪资料,统计正、负地闪数及其平均强度的分布,所得结果如表 3 所示。可以看到, H_{45} 大都介于 H_0 和 H_{n20} 之间,低于 H_0 的比例最少。对流性天气发生时的 H_0 和 H_{n20} 分别为 4.7 和 8 km 左右。就地闪数而言, H_{45} 低于 H_{n20} 时的正(负)地闪数均少于 H_{45} 超过 H_{n20} 时,但其强度变化却不大,即 45 dBz 回波伸展高度越高时,伴随的地闪数也越多,但其强度却无明显变化。还可以看到,正地闪数总是少于负地闪数(后者为前者的 12.4 倍),其平均强度却高于负地闪数,即它们与 H_{45} 无关。

表 3 45 dBz 高度与 0 和 -20°C 所在高度的对比及各高度上的强对流天气样本数占比、地闪数及平均强度的分布

Table 3 Proportion distribution of convection sample numbers, CG flashes and their mean intensities at different heights of the echo position at 45 dBz contrasted to the heights between 0 and -20°C

条件	所占比例 /%	H_{45} 均值 /km	H_0 均值 /km	H_{n20} 均值 /km	正地闪数	负地闪数	正地闪平均强度/kA	负地闪平均强度/kA
$H_{45} < H_0$	4	4.5	4.8	8.1	1.4	15.8	18.2	-7.8
$H_0 \leq H_{45} < H_{n20}$	78.4	6.1	4.8	8.2	1.6	18.9	17.6	-8.3
$H_{45} \geq H_{n20}$	17.6	9.4	4.6	7.7	2.1	28.7	17.7	-8

6 结论和讨论

本文将江西省常见的强对流天气分作三种主要类型:短时强降水、有短时强降水伴随的风雹和无短时强降水伴随的风雹,对它们伴随的地闪数和强度等进行了统计,并将地闪发生前后的回波强度及伸展高度等作分析,得出以下主要结论:

(1) 江西省短时强降水、雷暴大风和冰雹分别主要发生于 5—8、7—8 月和 3 月;仅发生短时强降水时的站次远多于风雹天气时;除早春和盛夏时于雷暴大风发生站次较多外,风雹天气常伴有短时强降水发生。

(2) 仅有短时强降水发生的地闪活动以负地闪占多数,其平均强度略低于正地闪;发生短时强降水的站点地理位置越偏北且小时雨量越大时,对应地闪活动也越剧烈。短时强降水天气中,当站点上的小时雨量变化时,对应的地闪数也存在较明显的季节性差异,具体表现为 3—4 月平均地闪数以 50~

55 mm 的小时雨量时最多,5—7 月随着小时雨量的增大,对应的平均地闪数总体呈增多趋势,尤以 55~60 mm 最多;8—9 月以小时雨量为 40~45 mm 最多。另外分钟级雨量与地闪的关系不明显,即 5 min 内的总地闪数对随后 5 min 内的雨量无明显“预报”意义。

(3) 春季(3—5 月)时,无短时强降水伴随的冰雹和雷暴大风发生前 30 min 内的地闪数差异不大,但其平均电流强度后者高于前者;夏季(6—9 月)时,雷暴大风发生前的地闪数则为冰雹发生前的 2~4 倍,且其平均电流强度前者也高于后者。

(4) 有短时强降水伴随的风雹发生前 1 h 内的平均正地闪数以 8 月为最多,负地闪数则在 6 月为最多且夏季多于春季。有短时强降水伴随的冰雹天气的地闪数与冰雹直径存在较好的正相关关系,因而可借助地闪数大致评估降雹尺寸,但有短时强降水伴随发生的雷暴大风的风速则与地闪数关系不明显。

(5) 3—8 月,对有短时强降水伴随的风雹天气

来说,其伴随的地闪数远多于无短时强降水伴随时,而地闪平均强度前者大于后者;有短时强降水伴随的风雹发生前,地闪平均强度随季节呈先增大后减小的趋势,无短时强降水伴随的风雹天气则无此特点。

(6) 对较强回波出现前 12 min、周边 10 km 范围内的地闪进行统计,发现 45 dBz 以上回波出现前的负地闪数远比正地闪多,但前者的强度弱于后者,且回波伸展高度越高时,伴随的地闪数也越多,但其平均强度变化不明显。

由于短时强降水等对流性天气的形成机制很复杂,其剧烈程度也受对流云伸展高度、维持时间等多个因素的共同影响,导致其在地面的灾害表现方式也多有不同。同样,地闪的形成与维持也受众多因素的制约,其对降水等天气的影响也很复杂,因此,地闪与雨量、风速及雷达回波的定量关系及其随季节的变化特征仍需进行更多的统计分析验证。

参考文献

- 蔡荣辉,姚蓉,黄小玉,等,2017. 洞庭湖区域雷暴大风分型及预报分析研究[J]. 气象,43(5):560-572.
- 陈哲彰,1995. 冰雹与雷暴大风的云对地闪电特征[J]. 气象学报,53(3):367-374.
- 范江琳,马力,青泉,2014. 四川盆地地闪与对流性降水和雷达回波的关系[J]. 气象科技,42(1):118-124.
- 冯真祯,曾金全,张焯方,等,2013. 福建省地闪时空分布特征分析[J]. 自然灾害学报,22(4):213-221.
- 苟阿宁,赵玉春,黄延刚,等,2013. 一次西南涡引发暴雨的地闪特征[J]. 气象与环境学报,29(4):59-63.
- 黄玉霞,王宝鉴,王研峰,等,2017. 1974—2013 年甘肃冰雹日数的变化特征[J]. 气象,43(4):450-459.
- 罗树如,支树林,俞炳,2005. 强对流天气雷电参数和雷达回波特征个例分析[J]. 气象科技,33(3):222-226.
- 孙凌,周筠珺,郭在华,2012. 雷暴持续时间与地闪活动的预报方法研究[J]. 气象科学,32(2):182-187.
- 孙哲,魏鸣,2016. 春季与夏季两次雷暴大气结构及地闪特征对比[J]. 大气科学学报,39(2):260-269.
- 王福侠,俞小鼎,裴宇杰,等,2016. 河北省雷暴大风的雷达回波特征及预报关键点[J]. 应用气象学报,27(3):342-351.
- 伍红雨,李春梅,刘蔚琴,2017. 1961—2014 年广东小时强降水的变化特征[J]. 气象,43(3):305-314.
- 吴学珂,袁铁,刘冬霞,等,2013. 山东半岛一次强飚线过程地闪与雷达回波关系的研究[J]. 高原气象,32(2):530-540.
- 许迎杰,尹丽云,2013. 滇西南两次飚线过程的地闪演变特征分析[J]. 云南地理环境研究,25(4):1-9.
- 杨波,孙继松,毛旭,等,2016. 北京地区短时强降水过程的多尺度环流特征[J]. 气象学报,74(6):919-934.
- 易笑园,宫全胜,李培彦,等,2009. 华北飚线系统中地闪活动与雷达回波顶高的关系及预警指标[J]. 气象,35(2):34-40.
- 尹丽云,张杰,张腾飞,等,2012. 低纬高原一次飚线过程的地闪演变特征分析[J]. 高原气象,31(4):1100-1109.
- 曾金全,朱彪,王颖波,等,2017. 地闪特征在冰雹天气识别中应用分析[J]. 复旦学报(自然科学版),56(1):117-123.
- 张义军,华贵义,言穆弘,等,1995. 对流和层状云系电活动、对流及降水特性的相关分析[J]. 高原气象,14(4):396-405.
- 张一平,王新敏,牛淑贞,等,2010. 河南省强雷暴地闪活动与雷达回波的关系探析[J]. 气象,36(2):54-61.
- 支树林,娄桂杰,2009. 江西冰雹天气期间的闪电活动特征[J]. 气象与减灾研究,32(3):36-41.
- 支树林,许爱华,李俊,等,2012. 江西省地闪气候特征及其活动强弱评价方法探讨[J]. 气象与减灾研究,35(2):37-44.
- 钟颖颖,冯民学,焦雪,等,2012. 两次雷暴过程的地闪及回波特征[J]. 气象科技,40(4):620-626.
- 周筠珺,瞿焯,李展,等,2010. 两次雷暴的地闪及降水宏微观特征[J]. 气象科学,30(6):791-800.
- 周康辉,郑永光,蓝渝,2016. 基于闪电数据的雷暴识别、追踪与外推方法[J]. 应用气象学报,27(2):173-181.
- Chronis T, Carey L D, Schultz C J, et al, 2015. Exploring lightning jump characteristics[J]. Wea Forecasting, 30(1):23-37.
- Cummins K L, Murphy M J, Bardo E A, et al, 1998. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U. S. National Lightning Detection Network[J]. J Geophys Res Atmos, 103(D8):9035-9044.
- Liu Dongxia, Qie Xiushu, 2014. Lightning characteristics related to radar morphology and hail distribution in linear convective systems[C]// XV International Conference on Atmospheric Electricity. Norma: American Geophysical Union: 1-6.
- Rigo T, Pineda N, Bech J, 2010. Analysis of warm season thunderstorms using an object-oriented tracking method based on radar and total lightning data[J]. Nat Hazards Earth Syst Sci, 10(9): 1881-1893.