云南地区雷击正地闪时空分布特征分析

基于2010～2014年连续5年云南地区地闪定位资料，针对云南省总闪及正地闪次数、电流强度以及正地闪百分比，详细分析了其年份变化、月份分布规律以及空间分布特征。结果表明：①云南省平均雷暴日高达321天，其平均回击次数为2.08次，绝大多数正地闪为单回击闪电。正地闪的年平均百分比为7.7%，年平均电流为47.69 kA，远高于总闪的年平均电流。并且年平均地闪次数越多，正地闪平均电流越小。②云南省月平均雷暴日为26.5天，1～8月地闪活动逐渐增加，而正地闪比例随之减小，其中1月份正地闪比例高达19.4%。汛期以后，正地闪比例再度增加。同时，正地闪比例较高的月份，其正地闪月平均电流也较大。③云南地区正地闪次数整体上东部多于西部，但正地闪次数的高值区对应的正地闪电流强度较弱。云南正地闪电流的空间分布没有明显区域变化特征，全省正地闪电流高低值区小范围密集出现。

周仿荣[1] 黄修乾[2] 马御棠[1] 马 仪[1] 申 元[1]/1.云南电网有限责任公司电力科学研究院 2.云南电网有限责任公司

周仿荣/高级工程师

关键词/Keywords

云南地区·

正地闪·

时空分布·

0 引言

雷电是发生在大气中的一种强放电现象，能够产生高电流、强电磁辐射，是自然界十大电子公害[1-2]。按照其在空气中发生的部位，大概可分为云中、云间或云地之间三大放电种类。云中和云间放电占闪电的绝大多数，云地之间放电则是对人类的生产、生活产生影响的主要形式。人们感受到的雷电画面主要是云地间放电，常称作云地闪。云地闪根据转移电荷的不同可以分为正地闪和负地闪。一般夏季雷暴多产生负地闪（约90%），即地闪中和了雷暴云中的负电荷。但越来越多的观测发现，在一些灾害性雷暴或雷暴的某些阶段、某些区域也会产生大量中和云中正电荷的正地闪。例如在雷暴的消散阶段、中尺度对流系统的平流区、产生冰雹和龙卷等灾害性天气过程的雷暴中都时常出现正地闪占有很大比例的现象[3-6]。正地闪具有大的峰值电流、连续电流及中和电荷量，所造成的危害更加严重。以往的研究表明，正地闪连续电流幅值比负地闪连续电流大一个量级，常常引起诸如森林火灾、油库爆炸等更为严重的雷电事故[7]，因此，正地闪的研究逐渐成为了雷电防护领域的重要内容。

根据以往的研究结果，正地闪随着纬度、海拔高度以及地形地貌的不同，其发生比例也显著不同，并且不同季节、不同地区的正地闪分布特征也不相同。日本冬季雷暴正地闪的比例最高可达100%，通常在40%～90%之间，而美国正地闪比例小于10%，我国内陆高原正地闪比例较美国略高[8]。虽然正地闪具有较严重的危害，但是，由于其相对较小的发生比例，到目前为止，对正地闪的认识仍然远远不够，需要进一步探讨发生分布规律，以期给不同地区的雷电防护及预警提供基础数据。

云南省位于北纬21.139°～29.257°，东经97.528 4°～106.213 4°的范围，地处我国西南地区，常年受西南季风影响，大部分地区属于亚热带高原季风气候，雷暴活动频繁，是雷灾危害较为严重的省份之一[9]，为有效地开展防雷减灾工作，进一步提高对雷电灾害的实际预防及利用能力，对云南地区正地闪分布特征及活动规律进行研究的意义格外重大。

1 雷电正地闪数据收集

云南地区雷电监测网络由47个探测子站组成，探测范围基本覆盖云南全境，每个站探测范围超过300 km，站间通过GPS同步（时间准确度为100 ns），能够测量地闪每次回击过程的时间、位置、极性和峰值强度等参数。该监测网络采用时差测向混合定位技术，一般情况下能达到优于1 000 m 的定位准确度。监测网络使用波形前沿时间、波形后沿时间、幅值阈值、多峰干扰、反极性干扰和尖峰干扰等多参量云地闪回击波形鉴别技术，对云地闪的理想鉴别率可达95%。

选取2010～2014年该雷电监测网络的定位资料，期间共探测到4 192 517个地闪。每个闪电定位资料包括的信息为时间、经纬度、正负极性和强度等参数，分析雷电空间分布时采用0.1°×0.1°的网格划分。

2 云南地闪总体特征和年变化特征

云南地处我国低纬度地区，纬度范围从北纬21°～29°。2010～2014年连续5年的雷电活动情况如表1所示，5年平均雷暴日到达了321天，雷暴日占了全年天数的88%，属于雷暴高发区。其中雷暴日最多的一年是2012年，高达363天，雷暴日最少的一年是2011年，为221天。这5年闪电的平均回击次数为2.08次，而正地闪的平均次数为1.12次，表明云南地区绝大多数正地闪为单回击正地闪。

表1 云南省2010～2014年总地闪及正地闪参数

年份	有雷日	总数	正极比例(%)	平均回击/次	平均电流/kA	正极性数	正平均电流/kA	正平均回击/次
2010	304	814 957	3.8	2.1	36.2	31 257	67.7	1.1
2011	221	123 471	3.0	1.6	57.1	3 689	115.3	1.0
2012	363	1 048 246	8.8	2.3	33.9	92 532	45.0	1.2
2013	361	1 361 479	9.2	2.3	34.4	125 892	43.0	1.2
2014	358	844 363	8.3	2.1	35.0	69 814	47.2	1.1
平均	321	838 503	7.7	2.08	35.42	64 637	47.69	1.12

2010～2014年，年平均发生闪电次数为838 503次，其中正地闪年平均数目为64 637次，正地闪年平均比例为7.7%，该比例低于北京平原地区10.88%的比例[10]，更低于甘肃地区16%的比例，但高于广东地区5.03%的比例[11]。这几个地区正地闪比例的不同进一步表明，在大的空间范围内，纬度和海拔高度是影响正地闪比例的重要因素。甘肃地区正地闪比例高于云南地区，虽然海拔高度的增加有利于正地闪的出现，但是甘肃地区和云南地区海拔可比拟，两者之间正地闪比例的差别主要来自于纬度的不同，云南处于北纬21°～29°之间，而甘肃处于32°～42°之间，高纬度地区具有更高的正地闪比例。而广州地处北纬20°～25°之间，纬度和云南地区纬度可比拟，其两者正地闪比例的差别来自于海拔的差别，云南地区位于云贵高原，其海拔平均高度在2 000 m左右，而广东地区位于岭南丘陵地带，平均海拔在几百米左右，随海拔高度增加，正地闪比例也相应增加，因此，云南地区正地闪比例高于广东地区；而北京地区、甘肃地区和云南地区的正地闪比例的差异，正是两个地区之间纬度和海拔之间差异的综合作用结果，北京地区、甘肃地区纬度范围为北纬39°～41°，纬度远远高于云南地区，有利于正地闪的出现。

地闪电流的大小是反映雷电危害程度的重要特征，为此，对2010～2014年5年云南省发生的4 192 517次闪电电流数据进行统计分析。统计结果表明，正地闪具有较大的电流强度，是致灾的重要因素，虽然所占比例较低（年平均比例7.7%），但平均电流为47.69 kA，而负地闪虽然占总地闪的绝大部分，但平均电流仅为－34.39 kA。2010～2014年内正地闪电流平均值＞100 kA的天数为44天，占总正地天数的3.01%，集中发生在每年的1～3月以及11～12月，平均电流＜30 kA 的天

数为206天，占正地闪天数的14.13%，平均电流介于30～100 kA的天数的比例为82.86%。正地闪电流的极值中心出现在41 kA，随后向两侧减少。

在表1的云南省2010～2014年总地闪及正地闪年变化特征中，其闪电次数、闪电强度以及正地闪比例的年变化结果如图1～图3所示。对比图1～图3可以发现，地闪平均电流强度和闪电次数具有一定的相关性。年地闪次数越高，地闪平均电流越小，正地闪平均电流也越小，而正地闪比例越大，且闪电的回击次数明显较大。例如，2013年地闪次数高达1 361 479次，而正地闪平均电流仅为43 kA，小于其他年份，正地闪百分比为9.2%，高于其他年份。反之亦然，在地闪次数最少的2011年，地闪平均电流最大，高达57.1 kA，同时正地闪的平均电流也远远高出其他年份，为115.3 kA，而这一年正地闪的百分比最小，仅为3%，且地闪及正地闪回击次数最少。上述现象形成的原因部分可能归因到继后回击电流小于首次回击。该特征和规律提醒防雷工作者，地闪较少的年份，由于正地闪高电流的特征，其雷电引起灾害的可能性也很大，仍需格外关注。

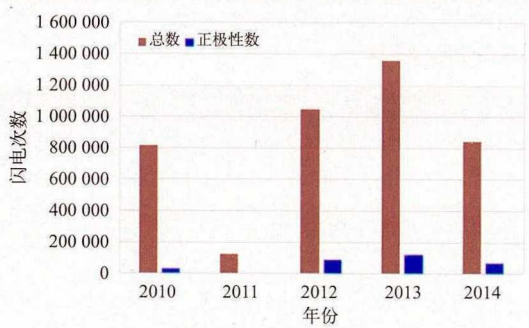

图1 云南省2010～2014年闪电次数年变化柱状图

图2 云南省2010～2014年闪电电流强度年变化柱状图

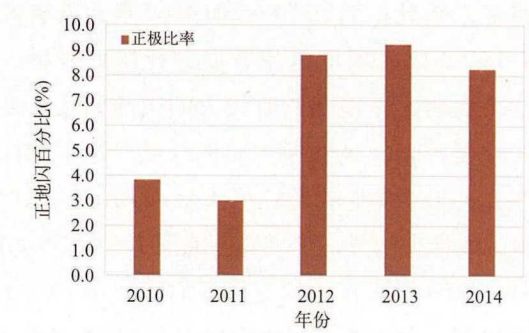

图3 云南省2010～2014年正地闪比例年变化柱状图

3 云南地区雷电正地闪月度变化特征

表2给出了云南2010～2014年5年按月统计的总地闪及正地闪特征参数，可以看出，5年间的每个月份均有闪电发生，月平均的雷暴日为26.5天，闪电数为69 875次，而平均正地闪数为5 386次。从全省闪电数的逐月分布来看，1～8月全省闪电活动呈逐渐增加趋势，1月份全省总闪电数仅为1 723次，8月份总闪电数就高达231 323次，是雷电发生最多的月份，随着总闪电数的增加，正地闪所占比例逐渐减小，由1月份的19.4% 急剧减少到5月份的6.4%，然后以很小的幅度上升，整体仍处于较低的比例区间，平均回击次数也相应增加，特别是进入汛期以后，全省正地闪发生频率较小。10月以后，由于全省强对流活动减弱，全省闪电活动也开始减少，而随着汛期的结束，正

表2 云南2省010～2014年月平均的总地闪及正地闪参数

月份	总数	正极比率(%)	平均回击/次	平均电流/kA	正极性数	正平均电流/kA	正平均回击/次
1	1 723	19.4	1.3	43.3	334	79.3	1.1
2	2 063	14.5	1.6	37.6	299	66.9	1.1
3	23 915	15.9	1.9	33.2	3 810	64.7	1.1
4	52 753	10.2	1.8	28.0	5 370	58.9	1.1
5	105 588	6.4	2.0	27.2	6 753	46.6	1.1
6	124 139	7.9	2.1	34.4	9 750	49.5	1.1
7	154 458	8.5	2.3	37.7	13 147	44.9	1.2
8	231 323	6.9	2.4	37.6	15 941	41.3	1.2
9	118 203	6.5	2.2	39.5	7 659	42.5	1.1
10	17 996	5.3	1.7	38.2	949	61.0	1.1
11	3 484	6.5	1.2	38.0	228	68.7	1.1
12	2 854	13.9	1.3	40.5	396	70.5	1.1
平均	69 875	10.2	1.8	36.3	5 386	57.9	1.1

地闪所占比例又开始呈逐渐增加趋势，12月全省正地闪上升至13.9%。由于地闪较少的月份具有较多的正地闪，而正地闪具有较高的电流强度，其雷电防护仍需重视。

通过进一步分析，给出了闪电次数、闪电强度以及正地闪比例的月变化结果柱状图，如图4～图6所示。可以看出，正地闪电流的月分布和总地闪电流分布并不相同，其中1～4月以及10～12月是正地闪电流较大的时间段，远远高于5～9月的正地闪月平均电流，而总地闪电流月分布4～5月是相对较小的时段，其他时段差别并不明显。对比图4～图6，发现地闪平均电流的强度和闪电次数及正地闪百分比具有一定的相关性。

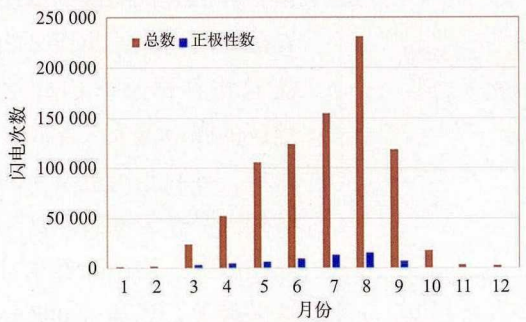

图4 云南省2010～2014年闪电次数月变化柱状图

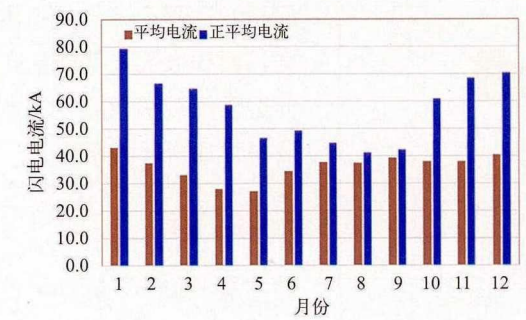

图5 云南省2010～2014年闪电电流强度月变化柱状图

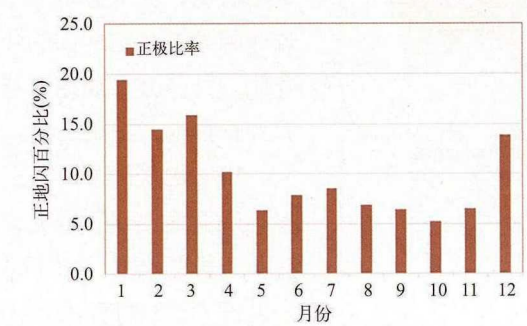

图6 云南省2010～2014年正地闪比率月变化柱状图

闪电次数越多，正地闪电流强度越小，这和云南地区年变化规律相似，但是其正地闪百分比会越低。其中8月份有最高的闪电次数，也对应最低的正地闪平均电流，其值为41.3 kA。而1月份具有最少的闪电数，其正地闪比例高达19.4%，正地闪平均电流也高达79.3 kA。这说明，虽然在冬春季节，闪电发生次数较少，但是其闪电回击强度更大，同样可能造成较为严重的灾害，需要格外重视。

正地闪的上述月分布特性与雷暴云动力、电荷结构及雷暴环境有十分密切的关系。正地闪不仅易发生在超强雷暴中，而且也容易发生在较浅的雷暴云、消散阶段的小孤立雷暴和弱降水的雷暴中。文献[12]提出，在对流的混相区，较强的上升气流、更大的过冷水含量能引起霰和雹带正电，形成中层正电荷区域，从而产生更多的正地闪。文献[13]所得到的结果支持了上面的假设，认为正地闪雷暴出现的环境具有下述特征：中低对流层较干燥、云底较高、暖云深度较小、不稳定条件较强、风切变较大和风速较大等。云南地区正地闪在冬季具有较高比例，是因为相对于夏季，冬季一般较为干燥，暖云深度小，对流较弱，并且云底较高，符合产生正地闪雷暴的特征。

4 云南地区正地闪空间分布特征

图7为2010～2014年5年平均的正地闪次数空间分布特征，5年的正地闪整体分布东部多于西部，而正地闪次数的高值区（红黄）多位于相对低海拔地区，此区域海拔处于100～1 400 m区间范围。从图8 2010～2014年的正地闪强度的分布可以看出，正地闪强度空间分布和次数空间分布不同，云南省西部地区也具有较高的正地闪强度，而中部地区正地闪强度较低，图8中的正地闪次数高值区对应的正地闪强度较弱，为小于41.3 kA的范围。正地闪电流强度的空间分布没有明显区域变化特征，全省正地闪电流高低值区小范围密集出现，总体来说云南北部的正地闪电流高于南部

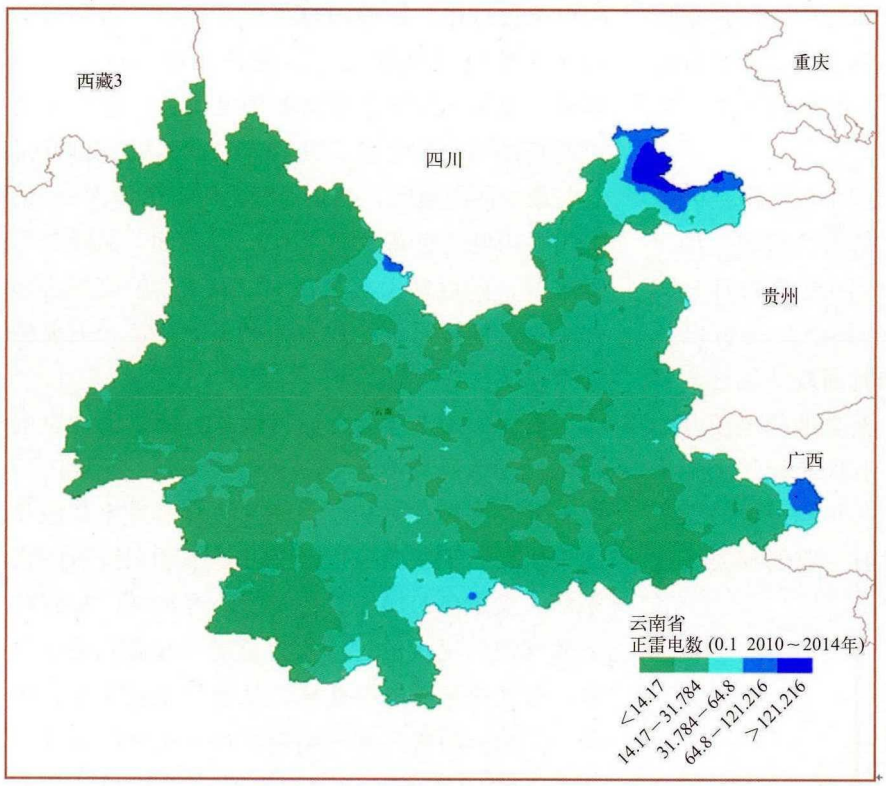

图7 云南2010～2014年正地闪次数空间分布图
（其中网格大小为0.1°×0.1°）

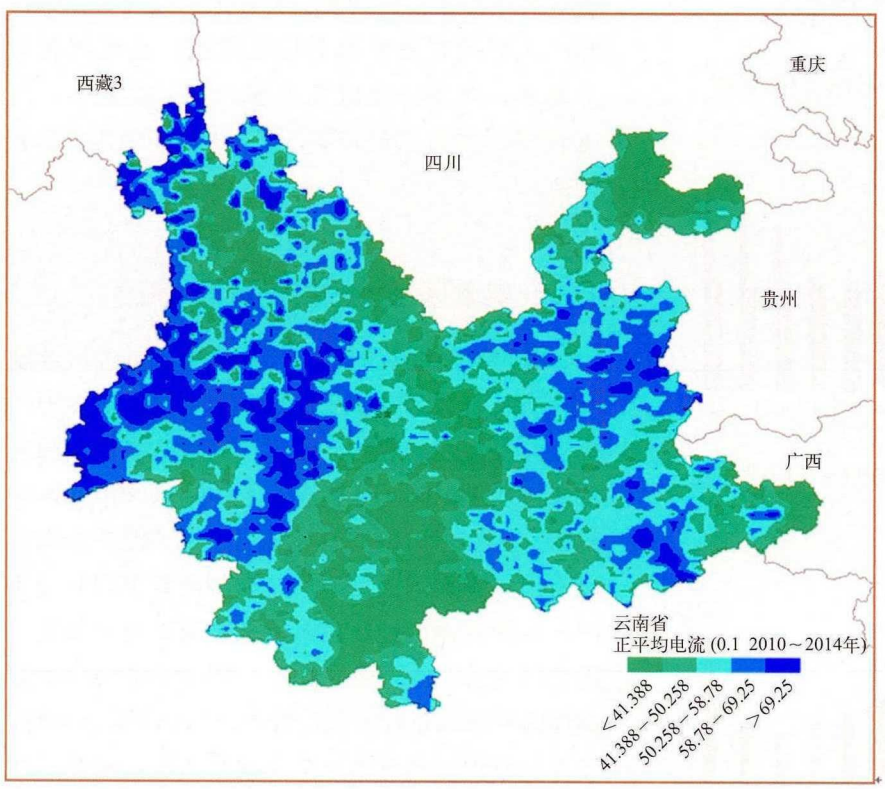

图8 云南2010～2014年正地闪强度空间分布图
（其中网格大小为0.1°×0.1°）

的正地闪电流。

云南省东部为滇东、滇中高原和云贵高原的组成部分，平均海拔为2 000 m，表现为起伏和缓的低山和浑圆丘陵，由于受西南季风气候影响，此地形容易形成上升气流，产生强对流天气，来自背面的冷空气与来自西南或东南的暖湿气流容易在昆明、玉溪和曲靖等地区地势平坦的地方相会，而在云南省东部靠近昭通等地又有逐渐抬升的起伏和缓的低山和丘陵，对南北汇集而来的气流有抬升作用，因此这些地区的强对流天气比较容易形成，导致正闪电发生的频数较大[14]。云南省西部为横断山脉区，高山深谷相对高度差较大，约为 4 000 m。西部地区的气流在经过山体的抬升过程中，由于山体太高，面积太大，其能量在上升过程中被消耗完，基本不具备形成雷暴的条件。

5 结束语

基于2010～2014年连续5年云南地区地闪定位网络定位数据，详细分析了云南省地闪尤其是正地闪的年度变化、月份分布规律以及空间分布特征，结果表明：

1）2010～2014年云南省平均雷电日为321天，占全年天数的88%，属于雷暴高发区。5年的平均回击次数为2.08次，绝大多数正地

闪是单回击正地闪，正地闪年平均比例为7.7%，年平均电流为47.69 kA，高于总地闪平均电流35.42 kA的水平。5年正地闪平均电流大于 100 kA的天数为44天，占总正地闪天数的3.01%，集中发生在每年的1～3月以及11～12月，小于30 kA的天数为206天，占正地闪天数的14.13%。并且年平均地闪次数越多，正地闪平均电流越小，而正地闪比例越大。

2）云南省月平均的雷暴日为26.5天，1～8月闪电活动呈逐渐增加趋势，随着总闪电次数的增加，正地闪所占比例逐渐减小，由1月的19.4% 减少到8月的6.9%。10月以后，随着汛期的结束，正地闪比例又逐渐增加，12月全省正地闪上升至13.9%。1～4月以及10～12月正地闪电流较大，远远高于5～9月的正地闪的月平均电流，其中8月正地闪电流具有最低值。闪电月平均次数越多，正地闪电流强度越小。

3）云南地区正地闪次数整体东部多于西部，但正地闪次数的高值区对应的正地闪电流强度较弱。云南省正地闪电流的空间分布没有明显区域变化特征，由于复杂多变的地形地貌，全省正地闪电流高低值区小范围密集出现，西部地区也具有较高的正地闪强度。

参考文献

[1] 张义军，孟青，马明，等．闪电探测技术发展和资料应用 [J]．应用气象学报，2006，17 (5)：611-620.

[2] 马明，吕伟涛，张义军，等．1997—2006年我国雷电灾情特征 [J]．应用气象学报，2008，19 (4)：393-400.

[3] 张义军，言穆弘，张翠华，等．甘肃平凉地区正地闪特征分析 [J]．高原气象，2003，22 (3)：295-300.

[4] Uman M A．The lightning discharge [M]．San Diego，California：Academic Press，1987.

[5] MacGorman D R，Rust W D．The electrical nature of storms [M]．New York：Oxford University Press，1998.

[6] 邵选民，刘欣生．云中闪电及云下部正电荷的初步分析 [J]．高原气象，1987，6 (4)：317-325

[7] 张义军，周秀骥．雷电研究的回顾和进展 [J]．应用气象学报，2006，17 (6)：829-834.

[8] 郑栋，孟青，吕伟涛，等．北京及其周边地区夏季地闪活动时空特征分析 [J]．应用气象学报，2005，16 (5)：638-644.

[9] 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)：73-39.

[10] 张阳，张义军，孟青，等．北京地区正地闪时间分布及波形特征 [J]．应用气象学报，2010，21 (4)：442-449.

[11] 张敏锋，刘欣生，张义军，等．广东地区雷电活动的气候分布特征 [J]．热带气象学报，2000，16 (1)：46-53.

[12] Wiens K C，Rutledge S A，Tessendorf S A．The 29 June，2000 supercell observd during STEPS．Part Ⅱ：Lightning and charge structure [J]．J. of Atmos.Sci.，2005，62 (12)：4151-4177.

[13] Carey L D，Buffallo K M．Enviromental cotrol of cloud to ground lightning polarity in severes storms [J]．Mon.Wea.Rev.，2007，135：1327-1353.

[14] 姜勇．基于ADTD监测网络2012年云南省地闪特征分析 [J]．云南大学学报：自然科学版，2013，35 (增刊2)：315-322.

（收稿日期：2016－11－29） EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告