

王东方, 宣越健, 刘继明, 等. 2011. 大兴安岭林区地闪放电特征的观测与分析 [J]. 大气科学, 35 (1): 147 - 156. Wang Dongfang, Xuan Yuejian, Liu Jiming, et al. 2011. Analyses on the characteristic of cloud-to-ground lightning flash in Da Hinggan Ling forest region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (1): 147 - 156.

大兴安岭林区地闪放电特征的观测与分析

王东方¹ 宣越健¹ 刘继明² 张其林³ 房广洋¹ 曹冬杰¹
张伟伟¹ 张廷龙⁴ 刘明远³ 刘晓东³

1 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029

2 大兴安岭林业集团公司森林经营部, 大兴安岭 165000

3 南京信息工程大学大气物理学院气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

4 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所西部气候环境与灾害实验室, 兰州 730000

摘要 利用 2009 年夏季在大兴安岭林区开展的雷暴及闪电的多站 GPS 同步观测资料, 详细分析了该地区的地闪放电特征。通过对 464 次地闪资料的分析, 发现具有单次回击的地闪所占的比例高达 69%, 且正地闪比例较高, 达到了 22%。对连续电流的统计表明, 约有 27% 的地闪伴随有连续电流过程且长连续电流过程主要出现在具有单次回击的负地闪中, 其平均持续时间为 127.4 ms。进一步分析发现连续电流的持续时间与引发连续电流的回击电场变化及其回击之前击间间隔具有较好的对应关系: 当引发连续电流回击电场变化及其之前击间间隔越小, 连续电流持续时间越长。对两次正地闪的拟合研究表明, 二者释放的电荷量相当可观, 分别为 38 C、36 C, 海拔高度分别为 7.6 km、7.0 km。

关键词 大兴安岭林区 雷暴 地闪 连续电流

文章编号 1006-9895 (2011) 01-0147-10

中图分类号 P427

文献标识码 A

Analyses on the Characteristic of Cloud-to-Ground Lightning Flash in Da Hinggan Ling Forest Region

WANG Dongfang¹, XUAN Yuejian¹, LIU Jiming², ZHANG Qilin³, FANG Guangyang¹, CAO Dongjie¹, ZHANG Weiwei¹, ZHANG Tinglong⁴, LIU Mingyuan³, and LIU Xiaodong³

1 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Department of Forestry, Forest Management Group of Da Hinggan Ling, Da Hinggan Ling 165000

3 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, College of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

4 Laboratory for Climate Environment and Disaster of Western China, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

Abstract By using multi-station observations on thunderstorm in Da Hinggan Ling forest region which was conducted in the summer of 2009, the characteristics of cloud-to-ground (CG) lightning discharges were analyzed. The results show that 69% of 464 CG lightning flashes were single-stroke CG lightning flashes and the percent of positive

收稿日期 2010-01-24, 2010-06-21 收修定稿

资助项目 林业公益性行业科研专项经费课题 (200704027-1), 国家自然科学基金资助项目 40930949, 中国科学院“百人计划”专项经费

作者简介 王东方, 男, 硕士, 主要从事大气电学和雷电探测技术研究。E-mail: wangdf@mail.iap.ac.cn

CG lightning flashes was up to 22%. Statistics show that 27% of CG lightning flashes were followed by continuing current and single-stroke CG lightning flashes were usually followed by long continuing current. The mean duration of long continuing current is 127.4 milliseconds. Furthermore, results show that there is corresponding relationship among the duration of continuing current, the inter-stroke interval just preceding the interval containing continuing current, and the electric field change of stroke initiating continuing current; the smaller the inter-stroke interval just preceding the interval containing continuing current and the electric field change of stroke initiating continuing current, the longer the duration of continuing current. In addition, two positive CG lightning flashes have been calculated by using the nonlinear least-square method. The results show that the two positive CG lightning flashes occurred at 7.6 km and 7.0 km above mean sea level, respectively. And 38 coulombs quantity of electricity and 36 coulombs quantity of electricity have been neutralized during discharge process for these two flashes, respectively.

Key words Da Hinggan Ling forest region, thunderstorm, CG flash, continuing current

1 引言

地闪放电是将云内的电荷输送到地面的放电过程,一次地闪放电过程通常将几十库仑的电荷带到地面(王道洪等,2000)。由于地闪放电过程往往造成严重的影响,长期以来受到人们的关注。研究发现,地闪放电活动具有明显的地域性特征,随地理环境的不同,放电特征表现出很大的差异。Mackeeras et al. (1998)、Christian et al. (1999)、Bocippio and Goodman (2000)、郗秀书等(2005)利用卫星闪电观测资料对全球的闪电活动进行了分析,发现闪电密度和电学特征随不同经纬度、海陆下垫面、不同地形、不同季节都呈现明显的差异。张敏峰和冯霞(1998)、张义军和言穆弘(2000)、张翠华等(2000)、张敏峰和刘欣生(2001)、郗秀书等(1988, 2001, 2003)、袁铁和郗秀书(2004, 2005)、张廷龙等(2007)、冯桂力等(2008)对中国区域的雷暴活动以及闪电特征的研究也说明了我国不同地区的雷暴和闪电活动也具有明显的差异。以上研究结果表明不同地区雷暴云电荷分布的差异往往会引起放电过程、闪电特征等的不同,因而对不同地区闪电放电特征的研究是十分必要的。

除了关注不同区域闪电的放电特征,由于连续电流,特别是长连续电流产生的热效应往往造成很严重的破坏(比如森林火灾、飞行器金属外盒的燃烧洞、烧焦头顶输电线的地线等),相关的研究也比较多(Kitagawa et al., 1962; Rakov and Uman, 2003; Ballarotti et al., 2005)。早在 20 世纪 60 年代, Brook et al. (1962) 指出长连续电流之前回击转移的电荷比其它回击要少。Livingston and Kridner (1978) 研究表明,引发连续电流回击的电场变

化的幅值和上升时间都小于其之前的回击。Uman (1987) 得出的结论是,与连续电流有关的回击和先导有一些差异。Shindo and Uman (1989) 同样认为,引发短连续电流和长连续电流回击的电场峰值比没有连续电流和有疑问的连续电流小。Rakov and Uman (1990a) 的研究进一步表明,紧跟长连续电流的继后回击和只有一次首次回击的闪电比常规继后回击小。Biagi et al. (2006) 比较了美国国家闪电定位网所记录的地闪、光学记录、摄像记录及电场变化波形,发现负地闪回击中较低的电流很大一部分后面紧跟长连续电流。

大兴安岭林区位于我国东北边陲,是重要的森林资源宝库,闪电活动比较频繁。闪电活动曾经给林区造成比较严重的后果,但是由于受观测手段和环境的限制,目前对林区的闪电特征尚没有一系统的认识。因此,为揭示我国大兴安岭林区的雷电放电特征,特别是易于引发雷击火灾的长连续电流特征。2009 年夏季,我们在大兴安岭林区采用了高时间分辨率的多通道高速雷电信号采集系统对林区的雷暴进行了多站同步观测,取得了宝贵的观测资料。本文利用这次试验中的快、慢电场资料对该地区雷电的宏观特征进行了统计分析,并与国内外的结果进行了比较。

2 试验及设备介绍

2009 年夏季在大兴安岭地区进行了雷暴及闪电的 7 站 GPS 同步观测试验。测站布局如图 1 所示,主观测站设在营林局技术推广站[(50.32°N, 124.11°E), 海拔高度为 385 m], 测网网络覆盖面积为 20 km×28 km。各测站均配有 GPS 同步授时的快、慢电场变化测量仪和多通道高速雷电信号采

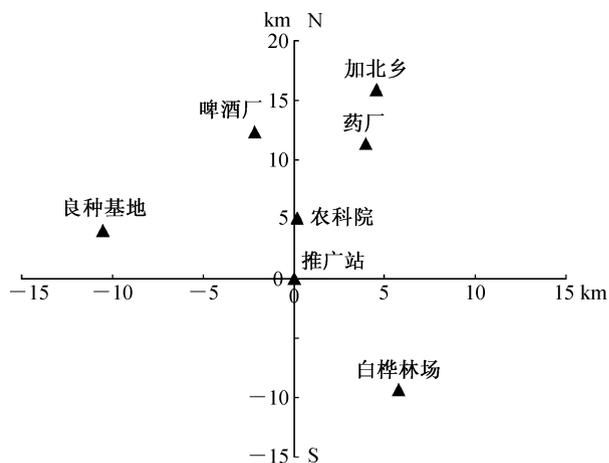


图1 测站分布示意图

Fig. 1 Sketch map of the observation stations

集系统。另外,主观测站还配备倒置式大气平均电场仪和短基线窄带干涉闪电定位系统。倒置式大气平均电场仪可以用来连续监测地面附近的大气平均电场强度和极性,测量范围为 ± 50 kV/m、分辨率为 10 V/m、响应时间为 0.1 s,最大探测距离约为 25 km。闪电快、慢电场变化测量仪,主要用来监测闪电引起的地面电场快变化过程和慢变化过程,时间常数分别为 2 ms、 6 s,带宽分别为 2 MHz、 1 MHz,采样频率均为 5 MHz,单次闪电的最长记录长度为 1 s。值得指出的是,为了得到定量的结果,各个测站的主要观测仪器(快、慢电场变化测量仪)在试验之前都进行了实验室的标定。各个测站的海拔高度范围为 $372\sim 484$ m,观测仪器均处在较开阔的平整空地上,周围没有高大建筑物和林木的遮挡,观测视野开阔,且远离城区,基本没有干扰。

3 分析方法

本文除了对雷暴及闪电进行了初步的数理统计之外,还利用点电荷模式对地闪进行了多站拟合研究。在电场测量的分析工作中,点电荷模式是使用较早且应用比较广泛的一种方法(Wilson, 1916; 张廷龙等, 2008),在点电荷模式假定下,地面上观测到的闪电电场变化等效为由理想的地表平面上空的一个点电荷或者球对称电荷所产生,其计算公式为:

$$\Delta E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Qz}{[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + z^2]^{3/2}},$$

这里, Q 是中和的电荷量, (x,y,z) 是中和电荷量的位置, (x_i,y_i) 是测站的位置。只要有 4 个以上测站的 ΔE ,就可以利用非线性最小二乘法拟合求出 x 、 y 、 z 、 Q (张廷龙等, 2008; 王东方等, 2009)。对于单极电场分布,且放电的空间尺度相对离地高度比较小的情况下,利用点电荷进行计算是比较适合的。

4 分析结果

在 $6\sim 8$ 月的整个连续观测期间(90 天)共观测到 30 个雷暴日,其中探测到过顶雷暴 15 次,有 8 次过程为强雷暴。探测到闪电 3141 次,其中地闪 464 次,约占总闪的 15% 。对过顶雷暴的统计分析表明,有 11 次雷暴过程发生在 $11:00\sim 17:00$ (北京时间,下同),其余 4 次发生在 $07:00\sim 10:00$ 。其它的雷暴也都基本发生在这两个时段,其中 $11:00\sim 17:00$ 是雷暴活动的主峰值。这主要是由于上午以后山区的低层受太阳辐射加热强烈,地表温度迅速升高,在中午左右温度达到最大,辐射释放热量,导致低层大气受热抬升,容易形成沿山谷向上的谷风,林区地表较为潮湿,低层的水汽很容易被带到高空。同时,本次试验所观测区域地处大兴安岭山脉的东南坡,受其北面的伊勒呼里山脉影响,暖湿气流在移动过程中受地形的抬升作用,也有利于雷暴云的形成,所以该时段山区的雷暴活动很活跃。

4.1 地闪统计特征

表1给出了大兴安岭林区地闪统计特征,对 464 次地闪的 868 次回击统计发现,平均每次闪电的回击数约为 1.9 次,单次闪击地闪所占的比例高达 69% 。与Saba et al. (2006)的研究结果相比,大兴安岭林区单闪击负地闪所占的比例远高于巴西东南部地区(20%),平均每次地闪的回击数 1.9 次小于巴西东南部地区 3.8 次。正地闪所占比例相对其他低海拔地区要高(张翠华等, 2000),达到了 22% 。Lewis and Foust (1945)曾经指出,随着海拔高度的增加,正地闪发生的比例也在增加。而研究地区较高的正地闪比例有可能与该地区的下垫面条件、地形和纬度有关,它们对雷暴的发生发展以及电学特征具有较大的影响。根据过顶雷暴的大气平均电场仪的记录资料看,雷暴过程中,地面的大气电场时正时负,比较零散,长时间受某一极性的

电荷控制的情况比较少。这可以大致推断该地区雷暴云低层的电荷层比较零乱。因此,高层的正电荷层对地放电过程比较容易到达地面。361次负地闪中,单次闪击地闪约占62%,平均每次负闪的回击数约为2次,有连续电流的负地闪98次且具有单次闪击的地闪约占53%。对于其它103次正地闪而言,单次闪击地闪约占96%,平均每次正闪的回击数约为1次,有连续电流的正地闪29次。由于大兴安岭林区单次闪击闪电所占的比率较高,显著降低了单个地闪的平均闪击数。造成单闪击地闪占绝大多数的主要原因可能是由于该地区受太阳的辐射加热强烈、下垫面的水汽条件比较充分,且受地形的抬升作用明显,雷暴的局地性强、移动速度快所致。但是由于抬升的动力条件比较强,闪电的放电过程往往比较强烈。

表1 大兴安岭林区6~8月地闪统计特征

Table 1 Statistic characteristics of cloud-to-ground (CG) lightning in Da Hinggan Ling forest region from Jun to Aug

闪电类型	总地闪	正地闪	负地闪
总闪次数	464	103	361
总回击次数	868	109	759
单闪击比例	69%	21%	48%
连续电流发生次数	146	29	117
带连续电流的闪电次数	127	29	98
带连续电流的闪电比例	27%	6%	21%

4.2 连续电流的持续时间分布

依据慢电场变化测量仪所记录的电场波形来看,连续电流是回击以后波形中出现一段变化相对比较缓慢、形似斜面的波形(如图2所示)。关于连续电流的分类,许多学者(Kitagawa et al., 1962; Brook et al., 1962; Shindo and Uman, 1989)已经进行了详细的定义,主要依据持续时间长短划分为长连续电流(超过40 ms)和短连续电流(小于40 ms)。实际上无论是长连续电流或者是短连续电流,它们形成的物理过程可能是相似的。由于长连续电流持续的时间相对较长,对地释放电荷量大,造成的危害也大,短连续电流虽然持续的时间相对较短,但是其造成的潜在危害亦不容忽视。

通过对146次连续电流的统计结果表明,带有连续电流的地闪共有127次,负地闪约占77%,其

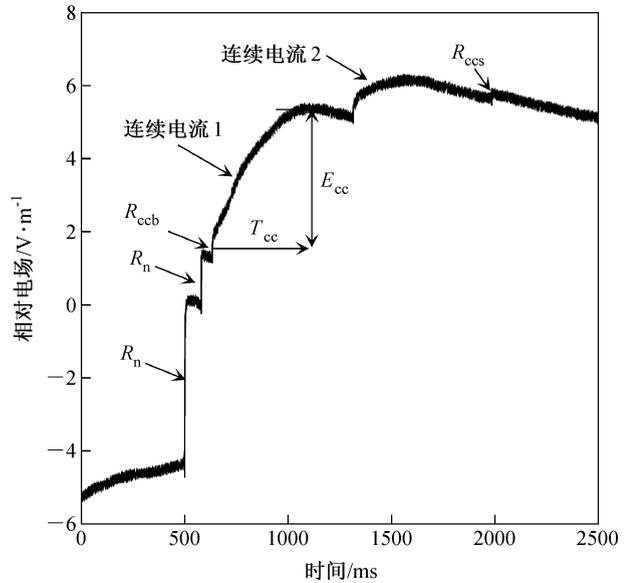


图2 6月23日一次闪电的连续电流电场波形。 T_{cc} :持续时间; E_{cc} :电场变化; R_{ccb} :连续电流开始的回击; R_{ccs} :连续电流结束的回击; R_n :常规回击

Fig. 2 The waveform of electric field change caused by continuing current which happened on 23 Jun. T_{cc} : lasting time; E_{cc} : electric field change; R_{ccb} : preceding stroke of continuing current; R_{ccs} : ending stroke of continuing current; R_n : stroke (neither R_{ccb} nor R_{ccs})

中有8次负地闪带有两次以上的连续电流,共有117次连续电流,平均持续时间为74.8 ms,图3给出了6~8月连续电流的时间分布。由图3可知,连续电流持续时间在20~40 ms所占的比例最多,约为23%,其次是10~20 ms,约为12%;持续时间在80~100 ms和40~60 ms分别约为11%、10%。在所有的连续电流中,负地闪具有持续时间很长的连续电流过程,平均持续时间为127.4 ms,最长持续时间超过了400 ms,且所占的比例很高,约占56%,短连续电流约占44%,平均持续时间约为20.4 ms。Kitagawa et al. (1962)和Brook et al. (1962)曾经结合电场仪和摄像机研究了连续电流的电场变化,发现连续电流持续时间为40~500 ms,平均为150 ms,计算得到的在连续电流期间带下去的电荷为3.4~29.2 C,平均值为12 C,这个连续电流的大小变化范围为38~130 A。我们没有对连续电流进行直接的测量,但根据连续电流持续时间的统计结果来看,大兴安岭地区地闪的连续电流所释放的电荷是不容忽视的。

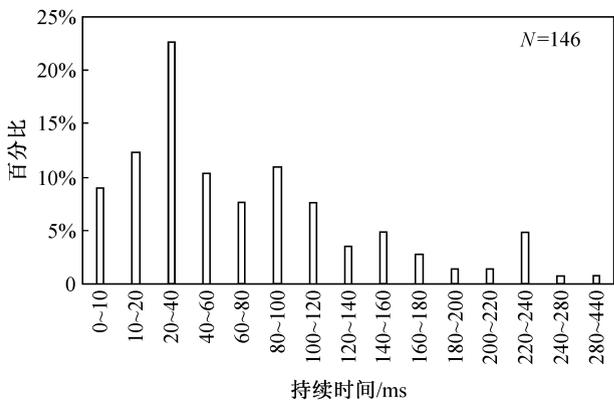


图 3 6~8 月连续电流的时间分布

Fig. 3 Distribution of the lasting time of continuing current from June to August

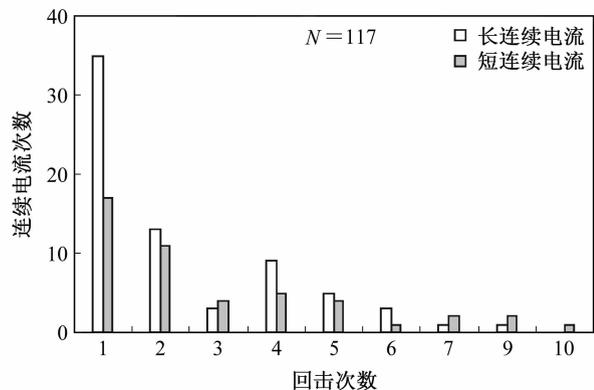


图 5 有连续电流的负地闪回击次数分布

Fig. 5 Distribution of the stroke numbers of negative CG flash with continuing current

分析 (如图 5 所示)。对于长连续电流 (70 次), 单次闪击出现最多, 约占 50%, 2 次回击地闪约占 19%, 出现长连续电流回击次数最多的负地闪有 9 次回击。对于 47 次短连续电流, 单次回击的负地闪约占 36%, 2 次回击的负地闪约占 23%, 4 次回击的负地闪约占 11%。从上面的分析可知, 无论是长连续电流还是短连续电流, 主要出现在单次回击的地闪, 其次是具有 2 次回击的地闪, 随着地闪回击次数的增加, 连续电流出现的几率越小, 这表明连续电流和回击有可能具有相互抑制的作用。当通道条件、电荷源等条件适合产生连续电流, 负地闪很少会通过多继后回击的方式向地面释放电荷, 但是当条件不满足或阻碍连续电流的发生时, 放电过程主要以多继后回击的方式向地面释放电荷。长连续电流多出现在单次闪击的可能原因是, 当首次回击发生以后, 云中电位仍然很高或者还有比较多的电荷没有释放完, 仍然能够继续支持连续电流的流动。

图 6 给出了多回击负地闪回击后出现连续电流的分布情况。由图 6 可知, 35 次长连续电流的平均持续时间为 127.4 ms, 其中发生在第 2 次回击以后最多, 约占 34%, 其次是发生在首次回击以及第 3 次回击以后, 所占的比例分别为 20%、17%, 发生在第 4 次回击和第 6 次回击以后的均约为 11%, 6 次回击以后的没有长连续电流。对于短连续电流, 共有 30 次, 平均持续时间为 23.4 ms, 发生在第 2 次回击以后最多, 约占 33%, 其中约 23% 的短连续电流出现在第 4 次回击以后。从上面的分析可知, 对多闪击负地闪无论是长连续电流和短连续电流,

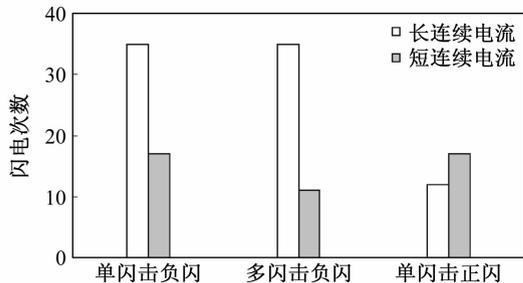


图 4 不同闪电类型连续电流的分布

Fig. 4 Distribution of different types of lightning flash with continuing current

为了了解大兴安岭地区长连续电流的分布情况, 图 4 给出了不同闪电类型长连续电流的分布。由图 4 可知, 对带有连续电流的 98 次负地闪来说, 长连续电流约占 71%, 其中单次闪击和多次闪击的长连续电流各占一半。Kitagawa et al. (1962) 的观测结果表明, 美国新墨西哥州西部的索科罗地区 193 次地闪中, 长连续电流主要出现在多回击地闪中。Shindo and Uman (1989) 对 90 次负地闪的研究结果表明, 仅有一次负地闪首次回击后出现连续电流, 与他们的结果不同的是, 大兴安岭林区的长连续电流出现在单次回击地闪比例高于多次回击地闪, 这与 Malan (1954) 和 Pierce (1955) 的观测结果是一致的。不同地区的这种差异可能跟连续电流的产生条件密切相关, 包括云中电荷源的电荷密度、周围电荷的分布、闪击通道的导电状态。

4.3 连续电流与回击数的关系

由于连续电流的发生与闪电的回击次数有密切的关系, 下面对有连续电流的负地闪回击情况进行

发生在第二次回击以后的几率是最大的,随着继后回击的增加,连续电流发生的几率越来越小。其主要原因可能是,首次回击发生以后,云内的电荷很大部分被输送到地面,如果电荷源的电荷密度下降比较明显,且周围电荷如不能在很短的时间内补充进来,即使通道的电导率很高,也不会产生连续电流,特别是长连续电流;经过了一定时间的电荷重新积累,电荷源的电荷越来越多,但是原来的击穿通道随着时间的推移,电导率下降,所以地闪需要以继后回击的方式再次打通通道,此后,云中的电荷源会继续以连续电流的方式向地面转移电荷。但是如果首次回击发生以后,电荷源的电荷仍然很多,加上通道导电状态良好,首次回击以后也可能出现连续电流。

4.4 连续电流与回击电场变化的关系

闪电中的连续电流与回击的电场变化关系密

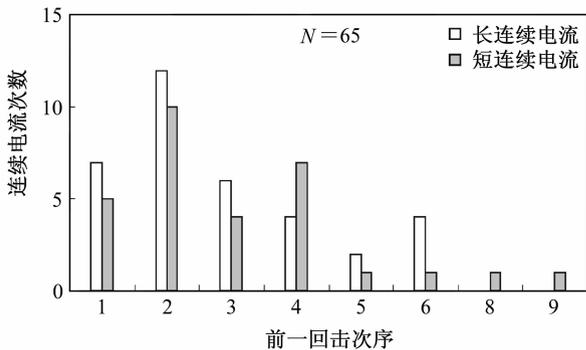


图6 多回击负地闪回击后出现连续电流的次数

Fig. 6 The number of continuing current following strokes with different orders of negative multi-return stroke CG lightning discharges

切,下面分别分析了与连续电流有关的回击之间的关系、连续电流的持续时间与引发连续电流的回击及其之前击间间隔(两次相邻回击之间的时间间隔)之间的关系。

这里把回击分为两类:引发连续电流的回击和不引发连续电流的常规回击。不引发连续电流常规回击的电场变化指的是同一次闪电中与连续电流无关的所有常规回击电场变化的均值。通过对60次多回击负地闪的60次连续电流的统计结果表明:(1)约88%的常规回击电场变化大于引发连续电流回击的电场变化,约40%的常规回击的电场变化是引发连续电流回击电场变化的2倍以上,其中引发长连续电流回击的电场变化远小于常规回击的电场变化,这与Rakov and Uman (1990b)和Ferro et al. (2009)的研究结果是一致的;(2)约83%的引发连续电流回击之前回击的电场变化是引发连续电流回击的电场变化的1倍以上,其中约占29%在2倍以上。

由于回击电场的大小与闪电的发生距离有关,为了使不同距离发生的闪电具有可比性,下面定义无量纲量 $R_a = E_{p-cc} / E_{pr}$ 来表征引发连续电流回击的电场变化大小,其中 E_{p-cc} 为引发连续电流回击的电场变化, E_{pr} 为该次闪电中所有不引发连续电流的常规回击电场变化的均值。图7给出了这60次多回击负地闪连续电流的持续时间与 R_a 值的关系,拟合得出它们之间的关系式为 $y = 27.0x^{-1.0}$,二者呈负幂指数的关系。其中 y 指的是连续电流的持续时间, x 指的是引发连续电流回击的电场变化与常规回击电场变化的比值(R_a), R 是相关系数。由图7可知,当引发连续电流的回击电场变化越

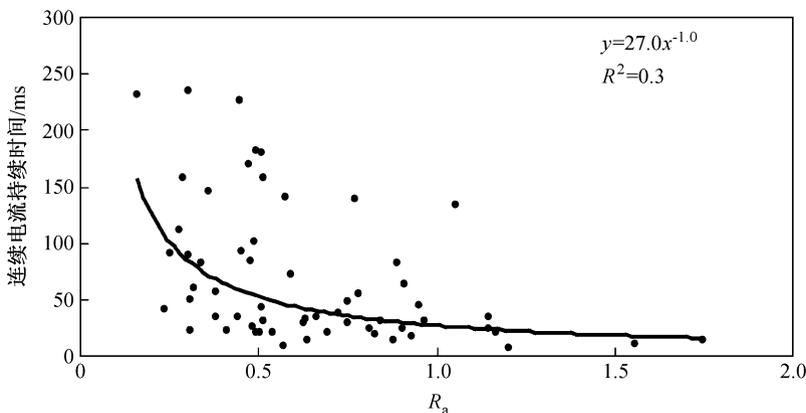


图7 连续电流的持续时间与 R_a 值的关系

Fig. 7 The relation between the lasting time of continuing current and the value of R_a

小, 连续电流持续时间越长; 反之, 当引发连续电流的回击电场变化越大, 连续电流持续时间越短。这与 Brook et al. (1962) 和 Saba et al. (2006) 结果一致。

图 8 给出了 33 次多回击负地闪的 33 次连续电流持续时间与引发连续电流回击前击间间隔之间的关系, 拟合得出它们之间的关系式为 $y=478.2x^{-0.6}$, 二者也呈负幂指数的关系。其中 y 指的是连续电流的持续时间, x 指的是引发连续电流回击前的击间间隔。由图 8 可知, 当引发连续电流回击前击间间隔的持续时间越短, 连续电流的持续时间越长; 反之, 当引发连续电流回击前击间间隔的持续时间越长, 连续电流的持续时间越短。

总之, 通过分析连续电流与回击电场变化发现, 相对于常规回击, 引发连续电流的回击往往电场变化较小。这说明在一定的范围内, 引发连续电流回击的电场变化越小可能越有利于连续电流的发生, 同时, 常规回击的电场变化越大, 越有利于产生良好的电流通道。连续电流的持续时间与引发连续电流回击和引发连续电流回击之前击间间隔均呈负幂指数的关系, 它们的这种负幂指数关系说明了两点: 其一, 引发连续电流回击的电场变化不能太小, 否则无法创造良好的通道条件, 连续电流可能不会产生或者持续的时间不会很长; 但是电场变化又不能太大, 否则消耗太多的电荷以后, 如果周围没有其它的电荷补充或者电荷源的电位下降太多, 将无法继续支持连续电流的流动; 其二, 回击发生以后, 云中电荷源需要一定时间以积累足够的电荷支持接下来连续电流的流动, 但是如果击间间隔太

长, 通道电导率下降, 将不利于连续电流的流动。

4.5 正地闪释放电荷量的反演

通常正地闪的峰值电流和所中和的电荷量比一般的负地闪大得多, 一般认为是造成雷击火的主要原因之一。为了分析正地闪放电过程所释放的电荷量, 利用 2009 年 7 月 16 日一次较强的过顶雷暴产生的 2 次有多站同步观测记录的正地闪进行拟合研究。该雷暴于 07:22 在相对中心站的东南方向开始发展, 雷暴中心经过主站, 并继续向西北方向发展, 持续时间比较长, 于 14:44 结束。共观测到了 459 次闪电, 地闪占总闪的 13%, 其中以正地闪为主, 约占总地闪的 88%。

图 9 给出了这 2 次正闪在 4 个观测站所观测到的同步慢电场变化波形, 图中 R_n 对应的时间指的是回击发生的时刻。正地闪 A 发生在 14:04:46, 由推广站的慢电场变化波形可知 (如图 9a 所示), 回击发生之前云内过程持续了约 83.8 ms, 回击阶段对应的是一个比较明显的负极性台阶变化。电场的负变化表明对地放电过程将正电荷输送到了地面或者对应头顶的正电荷减少了。根据实际电场测量, 这次闪击过程在推广站产生的电场变化幅度最大, 约为 9.0 kV/m, 其次是农科院站, 约为 6.3 kV/m, 距离较远的两个测站 (啤酒厂站、药厂站) 测得的电场变化分别为 1.9 kV/m、1.6 kV/m。

正地闪 B 发生在 14:17:23, 由图 9b 推广站的慢电场变化波形可知, 该地闪的云内放电过程持续时间较正地闪 A 长, 回击发生之前云内过程持续了 174 ms, 但在此阶段, 不同的测站电场变化的极性明显不同, 其中推广站和农科院站是正极性变

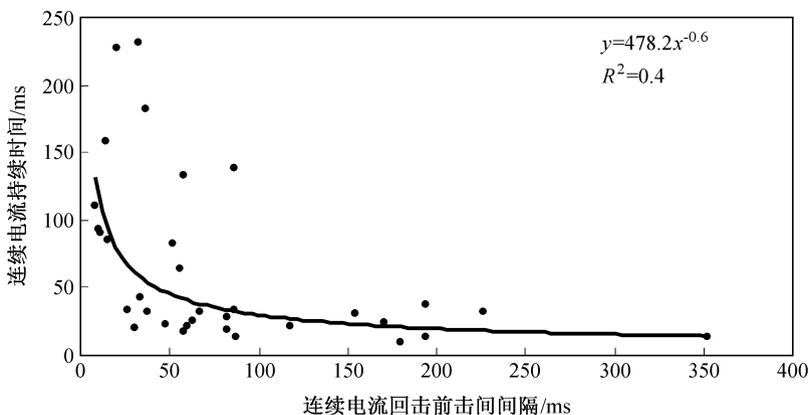


图 8 连续电流回击前击间间隔与连续电流持续时间的关系

Fig. 8 The relation between of the lasting time of continuing current and the inter-stroke intervals before strokes initiating continuing current

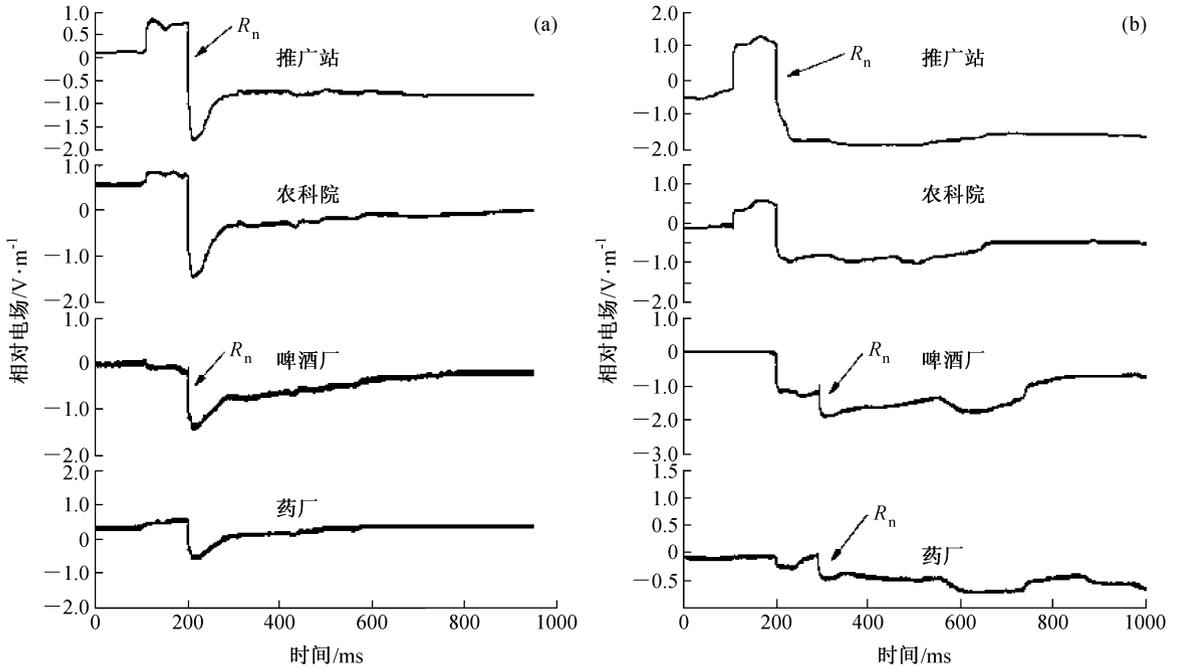


图9 慢电场变化波形: (a) 正地闪 A; (b) 正地闪 B

Fig. 9 Slow electric field change waveforms: (a) Flash A; (b) flash B

表2 7月16日正地闪的拟合结果

Table 2 Least-square fitting result for positive cloud-to-ground lightning discharges which happened on 16 Jul

闪电编号	发生时间	x/km	y/km	z/km	Q/C	χ^2	σ_x/m	σ_y/m	σ_z/m
A	14:04:46	-3.3	0.8	7.6	38	2.2×10^{-10}	90	63	19
B	14:17:23	-2.7	-0.4	7.0	36	8.5×10^{-13}	105	54	14

注: x 、 y 、 z : 以推广站为坐标原点 (0, 0, 0); Q : 拟合的电荷量; χ^2 : 拟合优度的范围; σ_x 、 σ_y 、 σ_z : 分别表示在 x 、 y 、 z 方向拟合的误差。

化, 而啤酒厂站和药厂站是负极性变化, 这说明它们分别位于反号距离的两端, 受云中不同电荷层的影响。跟正地闪 A 一样, 回击阶段对应的是一个比较明显的负极性台阶变化, 表明对地放电过程将正电荷输送到了地面或者对应头顶的正电荷减少了。该闪电在推广站、农科院站、啤酒厂站及药厂站引起的电场变化分别约为 10.6 kV/m、5.5 kV/m、1.4 kV/m 和 1.3 kV/m。

表 2 给出了这两次正地闪的拟合结果, 可以看出, 正地闪 A 中和的电荷量约为 38 C, 海拔高度为 7.6 km。根据对中和电荷量的拟合结果计算, 电场变化较大的测站距离中和的电荷量位置也较近。回击发生位置位于推广站西北方向 8.3 km 处。根据现场记录, 测得该闪击到达推广站的声光差为约 26 s, 则可以推断闪电距离测站 8.8 km 左右, 考虑到其它误差, 这与计算的结果吻合。与正地闪 A 相

比, 正地闪 B 中和的电荷量相对小一些, 为 36 C, 海拔高度为 7.0 km。回击位置位于推广站西南方向 7.5 km。根据到达推广站的声光差约为 22 s, 则推断闪电距离测站 7.48 km 左右, 这与计算的结果比较吻合。

5 结论和讨论

本文利用 2009 年夏季在大兴安岭林区开展的雷暴及闪电的多站 GPS 同步观测资料, 对 15 次雷暴过程的 464 次地闪资料进行了详细的分析, 给出了该地区地闪的放电特征, 并结合点电荷模式对两次正地闪进行了分析和讨论, 得出的主要结论如下:

(1) 通过对 464 次地闪的统计表明, 该地区的地闪次数占总闪的比例为 15%, 而正地闪比例相对其它地区较高, 达到了 22%。约有 69% 的地闪只

有一次回击过程且每次地闪平均只有 1.9 次回击。

(2) 对 127 次地闪中的 146 次连续电流过程分析表明, 负地闪约占 77%, 其中有 8 次负地闪带有两次以上的连续电流。连续电流平均持续时间为 74.8 ms, 其中 10~40 ms 之间的约占 35%, 80~100 ms 之间的占 11%。56% 的负地闪具有超过 40 ms 的长连续电流过程, 平均持续时间为 127.4 ms, 而短连续电流平均持续时间只有 20.4 ms。

(3) 统计结果表明, 60 次多回击负地闪的 60 次连续电流中, 约 88% 的常规回击电场变化幅值大于引发连续电流回击的电场变化幅值, 约 40% 的常规回击的电场变化是引发连续电流回击电场变化的 2 倍以上, 其中引发长连续电流回击的电场变化远小于常规回击的电场变化。进一步分析发现, 当引发连续电流的回击电场变化越小, 连续电流持续时间越长; 反之, 当引发连续电流的回击电场变化越大, 连续电流持续时间越短。当引发连续电流回击前击间间隔的持续时间越短, 连续电流的持续时间越长, 反之, 当引发连续电流回击前击间间隔的持续时间越长, 连续电流的持续时间越短。

(4) 利用 7 月 16 日一次强度较大、正地闪比例较高 (88%) 雷暴过程产生的有多站同步观测记录的正地闪进行拟合研究得到, 2 次正地闪中和的电荷量分别为 38 C、36 C, 海拔高度分别为 7.6 km、7.0 km。这表明该地区正地闪对地释放电荷量相当可观, 对森林火灾具有很大隐患, 同时从电荷释放高度来看, 推断是雷暴云上部正电荷区的对地放电。

需要指出的是, 本文主要针对大兴安岭地区的地面电学观测资料对该地区的闪电进行统计分析, 虽然闪电样本数只有一个夏季的, 但对于统计得到的闪电特征结果应该是可信的, 但雷暴的样本数明显偏少。今后, 将在此基础上通过长期观测, 获取更多雷暴过程的信息, 逐步认识该地区雷暴的差异, 从而达到探讨不同雷暴间闪电放电特征的研究。另外, 由于受观测条件的限制, 相关的雷达、卫星资料在匹配上有一定的难度。今后希望根据雷达的观测范围, 进一步的调整和优化观测网络以期对相关的问题进行更深入的研究。

参考文献 (References)

Ballarotti M G, Saba M M F, Pinto O Jr. 2005. High-speed Camera

- Observations of Negative Ground Flashes on a Millisecond-scale [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L23802, doi: 10.1029/2005GL-023889.
- Biagi C J, Cummins K L, Kehoe K E, et al. 2006. NLDN Performance in southern Arizona, Texas, and Oklahoma in 2003 - 2004 [C]. Paper Presented at 19th International Lightning Detection Conference, Vaisala, Tucson, Arizona.
- Boccippio D J, Goodman S J, Heckman S. 2000. Regional differences in tropical lightning distributions [J]. *J. Appl. Meteor.*, 39: 2231 - 2248.
- Brook M, Kitagawa N, Workman E J. 1962. Quantitative study of strokes and continuing currents in lightning discharges to ground [J]. *J. Geophys. Res.*, 67: 649 - 659.
- Christian H J, Blackeslee R J, Boccippio D J, et al. 1999. Global frequency and distribution of lightning as observed by the optical transient detector (OTD) [C]. Proceeding 11th International Conference on Atmospheric Electricity, Guntersville, AL, ICAE, 726 - 729.
- Ferro M A, Saba M M F, Pinto O Jr. 2009. Continuing current in multiple channel cloud-to-ground lightning [J]. *Atmospheric Research*, 91: 399 - 403.
- 冯桂力, 郗秀书, 吴书君. 2008. 山东地区冰雹云的闪电活动特征 [J]. *大气科学*, 32 (1): 1 - 11. Feng G L, Qie X S, Wu S J.
2008. Cloud-to-ground lightning characteristics of hail clouds in Shangdong province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (1): 1 - 11.
- Kitagawa N, Brook M, Workman E J. 1962. Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges [J]. *J. Geophys. Res.*, 67: 637 - 647.
- Lewis W W, Foust C M. 1945. Lightning investigation on transmission lines [J]. *Transmission American Institute of Electrical Engineers*, 7, 25: 54 - 57.
- Livingston J M, Krider E P. 1978. Electric fields produced by Florida thunderstorms [J]. *J. Geophys. Res.*, 83: 385 - 401.
- Malan D J. 1954. Descharges orageuses intermittentes et continue de la colonne de charge Qegative [J]. *Ann. Geophys.*, 10, 271 - 281.
- Mackeeran D, Darveniza M, Orville R E, et al. 1998. Global lightning total, cloud and ground flash estimates [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (D16): 19791 - 19809.
- Pierce E T. 1955. Electrostatic field changes due to lightning discharges [J]. *Quart. J. Roy. Meteor Soc.*, 81: 211 - 228.
- 郗秀书, 郭昌明, 张广庶. 1988. 闪电辐射场的宽带频谱测量及地闪首次回击放电参数的估算 [J]. *高原气象*, 7 (4): 312 - 320.
- Qie X S, Guo C M, Zhang G S. 1988. The measurements of amplitude spectral distribution of lightning radiation field and the estimation of first return stroke parameters [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 7 (4): 312 - 320.
- 郗秀书, 余晔, 王怀斌, 等. 2001. 中国内陆高原地闪特征的统计分析 [J]. *高原气象*, 20 (4): 395 - 401. Qie X S, Yu Y, Wang H

- B, et al. 2001. Analyses on some features of ground flashes in Chinese inland plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 20 (4): 395-401.
- 郗秀书, 张广庶, 孔祥贞, 等. 2003. 青藏高原东北部地区夏季雷电特征的观测研究 [J]. 高原气象, 22 (3): 209-216. Qie X S, Zhang G S, Kong X Z, et al. 2003. Observation on the summer lightning discharge in the northeastern verge of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (3): 209-216.
- 郗秀书, 张义军, 张其林. 2005. 闪电放电特征和雷暴电荷结构研究 [J]. 气象学报, 63 (5): 646-658. Qie X S, Zhang Y J, Zhang Q L. 2005. Study on the characteristics of lightning discharges and the electric structure of thunderstorm [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (5): 646-658.
- Rakov V A, Uman M A. 1990a. Some properties of negative cloud-to-ground lightning flashes versus stroke order [J]. J. Geophys. Res., 95: 5447-5453.
- Rakov V A, Uman M A. 1990b. Long continuing current in negative lightning ground flashes [J]. J. Geophys. Res., 95: 5455-5470.
- Rakov V A, Uman M A. 2003. Lightning: Physics and Effects [M]. New York; Cambridge Univ. Press, 687pp.
- Shindo T, Uman M A. 1989. Continuing current in negative cloud-to-ground lightning [J]. J. Geophys. Res., 94: 5189-5198.
- Saba M M F, Ballarotti M G, Pinto O Jr. 2006. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations [J]. J. Geophys. Res., 111, D03101, doi: 10.1029/2005JD006415.
- Uman M A. 1987. The Lightning Discharge [M]. New York; Elsevier, 377 pp.
- Wilson C T R. 1916. On some determinations of the sign and magnitude of electric discharges in lightning flashes [J]. Proc. Roy. Soc. (Ser. A), 92: 555-574.
- 王道洪, 郗秀书, 郭昌明, 等. 2000. 雷电与人工引雷 [M]. 上海交通大学出版社, 58. Wang D H, Qie X S, Guo C M, et al. 2000. Lightning and Artificially Initiated Lightning (in Chinese) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, P58.
- 王东方, 郗秀书, 袁铁, 等. 2009. 利用快电场变化脉冲定位进行云闪初始放电过程的研究 [J]. 气象学报, 67 (1): 165-174. Wang D F, Qie X S, Yuan T, et al. 2009. Analysis on the initial stage of intracloud lightning with the location technique of fast electric field change pulses [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (1): 165-174.
- 袁铁, 郗秀书. 2004. 卫星观测到的我国闪电活动的时空分布特征 [J]. 高原气象, 23 (4): 488-494. Yuan T, Qie X S. 2004. Spatial and temporal distributions of lightning activities in China from satellite observation [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (4): 488-494.
- 袁铁, 郗秀书. 2005. 青藏高原中部闪电活动与相关气象要素季节变化的相关分析 [J]. 气象学报, 63 (1): 123-127. Yuan T, Qie X S. 2005. Seasonal variation of lightning activities and related meteorological factors over the central Qinghai-Xizang Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (1): 123-127.
- 张廷龙, 郗秀书, 言穆弘. 2007. 青藏高原雷暴的闪电特征及其成因探讨 [J]. 高原气象, 26 (4): 774-782. Zhang T L, Qie X S, Yan M H. 2007. The Lightning Characteristics of thunderstorm over Tibetan Plateau and its origin discussion [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (4): 774-782.
- 张廷龙, 郗秀书, 袁铁, 等. 2008. 中国内陆高原地区典型雷暴过程的地闪特征及电荷结构反演 [J]. 大气科学, 32 (5): 1221-1228. Zhang T L, Qie X S, Yuan T, et al. 2008. The characteristics of cloud-to-ground lightning flashes and charge structure of a typical thunderstorm in Chinese inland plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (5): 1221-1228.
- 张义军, 言穆弘. 2000. 不同地区雷暴电荷结构的模式计算 [J]. 高原气象, 19 (5): 617-627. Zhang Y J, Yan M H. 2000. Simulating calculation of charge structure in thunderstorm for different areas [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 19 (5): 617-627.
- 张翠华, 张义军, 张广庶, 等. 2000. 地闪连续电流特征的统计分析 [J]. 高原气象, 19 (3): 371-378. Zhang C H, Zhang Y J, Zhang G S, et al. 2000. Statistics analysis of characteristics of continuing current in C-G lightning [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19 (3): 371-378.
- 张敏峰, 冯霞. 1998. 我国雷暴天气的气候特征 [J]. 热带气象学报, 14 (2): 156-162. Zhang M F, Feng X. 1998. Climatic features and anomalies of thunderstorm in China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 14 (2): 156-162.
- 张敏峰, 刘欣生. 2001. 利用 GCM 模式对全球雷电活动的模拟分析. 大气科学 [J], 25 (5): 689-696. Zhang M F, Liu X S. 2001. Simulation experiments of global lightning distributions by a coupled GCM [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (5): 689-696.