

武智君, 郄秀书, 王东方, 等. 2016. 北京地区负地闪回击转移的电荷量 [J]. 气候与环境研究, 21 (3): 247–257. Wu Zhijun, Qie Xiushu, Wang Dongfang, et al. 2016. Charge transferred by the return stroke of negative cloud-to-ground lightning in the Beijing region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (3): 247–257, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14282.

北京地区负地闪回击转移的电荷量

武智君^{1,2} 郄秀书¹ 王东方^{1,2} 王宇^{1,2}

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

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 负地闪是闪电危害的主要来源, 其对地转移电荷源特征和电荷量不仅对闪电放电机理的研究有重要意义, 而且对雷电防护也具有重要的实际应用价值。为了研究具有典型城市下垫面环境的北京地区的闪电活动特征和放电强度, 利用北京地区 2011 年两次雷暴过程的多站 GPS (Global Position System) 同步闪电地面电场变化定量观测资料, 在考虑消除场地和环境因素对电场变化观测资料影响的基础上, 基于蒙特卡洛数据处理方法和非线性最小二乘法拟合反演算法, 定量研究了负地闪回击中和的电荷源位置和电荷量, 并对回击特征与回击转移电荷源之间的关系进行了讨论, 得到如下结果: (1) 单次回击中和的电荷量为 1.1~27.6 C, 平均为 8.6 ± 5.2 C, 不同序数回击转移电荷量的最小值基本不随回击序数的上升而变化, 最大值和均值随回击序数的上升而减小; 一次负地闪中和的总电荷量随着回击数的增加而增加。(2) 负地闪回击数和回击时间间隔都呈对数正态分布, 其中负地闪总数 70.4% 的多回击负地闪其回击间隔平均为 99 ± 95 ms, 不同序数回击的时间间隔最小值随回击序数的上升基本不变, 时间间隔最大值和均值随回击序数的上升而减小。(3) 回击转移电荷量的均值随回击间隔的增加呈波动形式的逐渐上升; 相邻回击转移电荷源的空间距离均值随回击间隔的增加而增大。

关键词 负地闪 回击特征 回击转移电荷源 北京地区

文章编号 1006-9585 (2016) 03-0247-11

中图分类号 P427.32⁺1

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14282

Charge Transferred by the Return Stroke of Negative Cloud-to-Ground Lightning in the Beijing Region

WU Zhijun^{1,2}, QIE Xiushu¹, WANG Dongfang^{1,2}, and WANG Yu^{1,2}

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

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The characteristics and amount of charge transferred by negative cloud-to-ground (CG) lightning have not only become an important research field with respect to the mechanisms of lightning discharge, but also have important practical applications for lightning protection. In order to study the lightning discharge characteristics and intensity in the Beijing region over a typical urban surface environment, using the slow and fast antenna synchronized by GPS (Global Position System), quantitative observation data were obtained and analyzed to study the characteristics of negative return strokes. After eliminating the effect of the observation site and environmental factors on the electric field change as much as possible, the magnitude and locations of charge sources neutralized by strokes were fitted by using a Monte Carlo data

收稿日期 2014-12-29; 网络预出版日期 2015-09-25

作者简介 武智君, 女, 博士研究生, 主要从事雷电物理和雷暴电学方面的研究。E-mail: wu_zhijuniap@126.com

通讯作者 郄秀书, E-mail: qiex@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2014CB441401, 国家自然科学基金项目 41475002

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2014CB441401), National Natural Science Foundation of China (Grant 41475002)

processing method and nonlinear least-squares fitting algorithm. In addition, the relations between the stroke characteristics and the charge magnitude and locations were also studied. The results were as follows: (1) The charge lowered by a discrete negative return stroke ranged from 1.1 to 27.6 C with an arithmetic mean of 8.6 ± 5.2 C. The minimum of the stroke charge did not change significantly with the stroke order, while the maximum and the arithmetic mean of the stroke charge increased with the stroke order. The total charge lowered to the ground by a single negative flash increased with the number of strokes it contained. (2) The percentage of multi-stroke negative CG lightning flashes was 70.4%, and the stroke number and the interstroke interval both fitted a lognormal distribution. The interstroke interval ranged from 3 to 967 ms with an arithmetic mean of 99 ± 95 ms. The minimum of the interstroke interval did not change significantly with the stroke order either, while the maximum and the arithmetic mean of the interstroke interval also increased with the stroke order. (3) The average charge lowered by a discrete stroke increased with the interstroke interval preceding it, and the average distance between the adjacent stroke sources showed a similar trend.

Keywords Negative cloud-to-ground lightning, Return stroke characteristics, Charge sources, Beijing region

1 引言

负地闪是闪电危害的主要来源,其对地转移电荷源特征和电荷量不仅对闪电放电机理的研究有重要意义,而且对雷电防护也具有重要的实际应用价值。一次地闪(云对地之间的放电)放电转移的电荷量是评估闪电能量或强度的一个重要参数,而负地闪回击是雷暴云对地转移电荷的重要形式之一。最近,随着发生于雷暴云上方的中高层大气放电现象研究的不断深入,具有较大电荷矩(中和电荷量与放电长度的乘积)的闪电放电过程被认为是产生中高层大气放电现象——红色精灵(Red Sprite)的根源(Lu et al., 2009),因此闪电放电的电荷转移问题进一步受到重视。

自 20 世纪 70 年代末开始,借助电场、磁场、电流和光学等不同的探测手段,在全球不同地区开展的闪电活动观测,在很大程度上增进了人们对回击特征的认识(Krehbiel et al., 1979; Qie et al., 2000; Saba et al., 2006; Rakov and Uman, 2007),但仍有许多问题有待研究和解答。Krehbiel et al. (1979)最早利用多站闪电电场变化的同步观测,研究了美国新墨西哥地区单体雷暴中地闪回击中和的电荷量,研究结果发现相比于继后回击,首次回击一般趋向于转移更多的电荷量之后。Brook et al. (1982)基于类似的方法,对日本冬季雷暴正、负回击中和的电荷量进行了计算。两地的研究通过回击中和的负电荷源位置,证明了雷暴云中的负电荷对温度的依赖性。Qie et al. (2002)和武智君等(2013)对甘肃中川和大兴安岭地区的多站同步观测研究发现,虽然首次回击中和的电荷量较大,但首次和继后回击的电荷量差距并不大,并推测可能与这两个

地区回击转移的电荷量级明显较其他地区偏小有关。最近, Michishita et al. (2015) 基于单站慢天线闪电电场变化观测数据,对日本九州南部地区击中电力线的负闪电回击转移的电荷量进行了估计,并研究了回击转移的电荷量与回击电流峰值之间的关系。但是,这些研究中并没有对不同次序回击的强度或转移电荷量做定量分析。

Krehbiel (1981) 曾结合其他研究结果推测回击中和的电荷量受到回击特征,如回击间隔的影响;Cooray and Pérez (1994) 和 Thottappillil et al. (1992) 对回击间隔的统计显示,电场峰值较首次回击更大的继后回击其对应的回击间隔均值比一般的回击间隔均值更大;祝宝友等(2002)也提到回击间隔与回击强度之间的正相关关系。这些研究都显示,回击间隔与回击强度、回击转移电荷量和电荷源特征之间存在一定的联系。从更深层面上来说,回击特征与回击转移电荷源之间的存在某种联系,但这种联系及其背后的物理规律尚有待进一步研究。

另外,大量研究显示,负地闪回击放电活动具有明显的地域差异和年际变化,并且其特征还可能会随雷暴过程的不同而不同,例如负地闪回击数特征(薛秋芳等, 1999; Pinto et al., 2003; Rakov and Huffines, 2003; Schulz et al., 2004; 王东方等, 2011)、回击时间间隔、回击引发连续电流的概率(Cooray and Pérez, 1994; 鄯秀书等, 2001; Qie et al., 2002; De Miranda et al., 2003; Saraiva et al., 2010; 张伟伟等, 2011),以及回击转移的电荷量等(Krehbiel et al., 1979; Krehbiel, 1981; Thomson et al., 1984; Krider, 1989; Nag et al., 2008; Qie et al., 2009; Baranski et al., 2012; 武智君等, 2013)。在不同的地区开展连续的观测研究,积累更多不同气象条件

下的观测资料对于认识地闪回击特征与气象和地理等因素之间的制约关系有重要的意义。

近几年, 北京地区城市化建设发展迅速, 由此发生改变的区域气候环境和下垫面条件可能对当地闪电活动造成一定的影响。为了研究城市环境中地闪回击的特征, 本文利用北京地区闪电综合探测网络 (BLNet, Beijing Lightning Network) 的观测资料, 对占总地闪 70% 以上的负地闪回击的特征参量进行统计, 对回击转移的电荷量和电荷源进行研究, 并将两者相结合对回击特征与回击转移电荷源、电荷量之间的联系进行分析讨论。

2 观测资料的处理方法与拟合算法简介

本文所分析的数据来自于 2011 年 8 月 9 日和 8 月 11 日雷暴过程期间北京地区闪电探测网所获得的地面电场变化数据 (王宇等, 2014)。探测网络由 7 个测站组成 (参见图 1), 海拔高度 31~99 m。各站采用统一的闪电电场变化探测仪系统, 包括闪电慢电场变化探测仪 (慢天线)、闪电快电场变化探测仪 (快天线)、高速大容量数据采集系统, 并通过时间精度为 50 ns 的 GPS (Global Position System) 进行同步。快、慢天线的带宽分别为 1 MHz 和 2 MHz, 时间常数为 2 ms 和 6 s, 采用相同的数据采样频率 5 MHz。另外, 中国科学院大气物理研究所观测站还配备有大气平均电场仪用于连续监测地面附近的大气平均电场强度和极性, 结合南苑

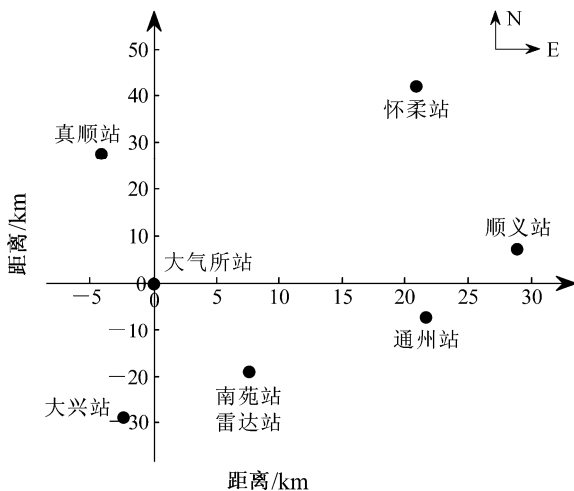


图 1 2011 年北京地区闪电探测网的测站分布及雷达站位置

Fig. 1 The station distribution of BLNet (Beijing Lightning Network) and the radar location in 2011

站附近的天气雷达共同对雷暴的发展和移动情况做实时观测。

2.1 拟合算法简介

本文利用多站同步的电场变化观测数据对回击中和的电荷源进行拟合反演计算。拟合使用了基于点电荷模式的非线性最小二乘法, 计算公式如下:

$$\Delta E_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2QZ}{[(X-x_i)^2 + (Y-y_i)^2 + (Z-z_i)^2]}, \quad (1)$$

其中, (X, Y, Z) 是点电荷的坐标, Q 为中和的电荷量, (x_i, y_i, z_i) 为地面 i 测站的位置。利用 4 站以上同步的电场变化 ΔE_i 就可以求出 X 、 Y 、 Z 和 Q 。这里规定当云中负电荷被释放到地面时, 引起的地面电场变化为正。使用最小二乘法计算, 拟合优度由下式决定:

$$\chi^2 = \frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^n \frac{[\Delta E_i - \Delta E_i(X, Y, Z, Q)]^2}{\sigma_i^2}, \quad (2)$$

其中, n 为测站数, 拟合数据 ΔE_i 为测站 i 的实测电场变化; $\Delta E_i(X, Y, Z, Q)$ 是模式拟合出的测站 i 处的电场变化; σ_i^2 为误差, 取实测值的 5% 到 10%; ν 表示自由度, 由测站数量 n 和未知量数之差决定。这种方法被广泛应用, 其结果的可靠性也得到了证明 (Krehbiel et al., 1979; Qie et al., 2002; 张廷龙等, 2008)。

2.2 观测数据的订正和处理

闪电电场变化数据的定量准确测量是进行闪电中和和电荷源拟合计算的基础。图 2 给出了经过实验室严格标定后得到的一次快、慢天线测得的一次负地闪地面电场变化波形, 其中慢天线电场变化的分辨率在 5 V/m 左右, 拟合结果显示, 电场变化值在该分辨率范围内上下波动对拟合结果无明显影响。但是由于各测站观测设备放置的位置和所处环境的不同, 将导致各测站数据测量误差的不同, 特别是在北京超大城市附近进行的多站测量, 环境的影响更是不能忽略。因此, 如图 2 给出的慢天线测量得到的数据需要经过进一步订正和处理后才能用于拟合计算, 从而保证拟合结果的正确性。

观测仪器放置的环境尽量选择平坦开阔无遮挡的地面, 但是在个别测站, 设备仍只能架设在建筑物顶部或附近有少量的树木和建筑物, 可能对所测量的闪电电场变化造成影响, 因此本文各测站的电场变化数据在分析前, 首先经过了户外环境参数

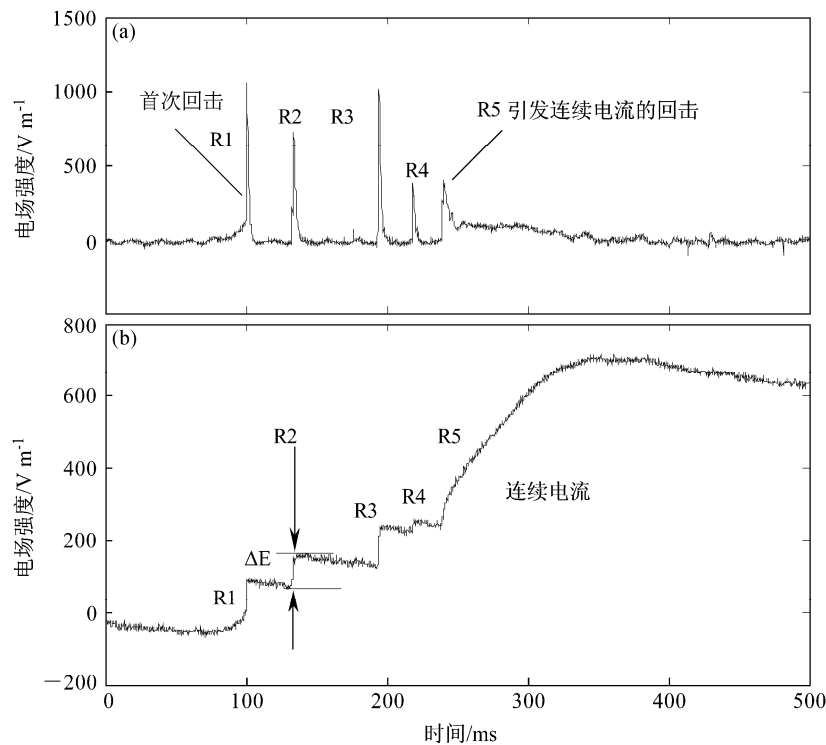


图2 一次负地闪快、慢电场变化波形 (Rn: 第n次回击, ΔE : 此次回击引起的慢电场变化): (a) 快电场; (b) 慢电场

Fig. 2 Waveforms of electric field changes of a negative CG (cloud-to-ground) flash detected by (a) fast antenna and (b) slow antenna (Rn: the nth return stroke; ΔE : electric field change of the stroke on slow antenna)

的订正。本文综合了 Liu and Krehbiel (1985) 给出的订正系数 (0.8~2)、范祥鹏等 (2011) 穷举法得到的不同环境下的订正系数 (0.88~1.04) 和耿雪莹等 (2012) 利用有限元法对不同建筑环境下空间某点静电场强度和畸变情况的模拟计算结果, 个别测站还同时在观测设备附近地面架设另一组天线以分析架设高度对电场变化数据的影响。上述方法所得结果结合实地勘察发现, 北京地区大气所测站由于架设位置较高因而订正参数偏离 1 的程度较大约为 0.15, 其他测站由于分布在城市边缘郊野区域, 附近高建、构筑物 and 树木等较少且架设高度基本低于 3 m, 因而订正参数分布在 0.97、1 之间, 对拟合结果的影响很小。

经过上述订正后的电场变化数据仍具有一定的误差, 这是因为在实际闪电发生时, 入射电磁波方向不同所受到遮挡、测站附近人员活动和电磁环境的变化等各种可能的原因不同, 会对电场变化数据产生微小的影响, 这种影响是无规律、不可预见的, 因此本文采用蒙特卡罗法对订正后的数据进一步微调 (武智君等, 2013), 然后再代入算法计算。具体原理如下:

$$\Delta E_{mi} = \gamma_i \Delta E'_{mi} \pm \eta_i R_i, \quad (3)$$

其中, ΔE_{mi} 为调整后电场变化值, $\Delta E'_{mi}$ 为原始电场变化值, γ_i 为环境订正系数, η_i 为蒙特卡罗调整系数, R_i 为调整范围。考虑到城市环境的复杂性, 调整系数 η_i 在 -2~2 以 0.1 为步长取值, 调整范围 R_i 取决于 $\Delta E'_{mi}$ 本身以及电场值浮动范围, 一般设定为 $\Delta E'_{mi}$ 的 2%~10%。将各站调整后的电场变化值 $\Delta E'_{mi}$ 排列组合代入算法计算, 从中选取拟合结果。选取拟合结果的原则如下:

- (1) 一般要求拟合优度于 1~10。
- (2) 拟合得到的电荷源高度和电荷量值符合一般物理规律。
- (3) 电荷源的水平位置位于测网探测范围内, 且距离各站的距离符合对多站同步电场变化数据的定性分析。
- (4) 电荷源的水平位置和垂直高度与临近时刻 (3 min 内) 雷达回波图相叠加以证明其位置的合理性。上述原则的具体分析参考武智君等 (2013) 给出的论述, 在此不详细分析。
- (5) 拟合结果表现出一定的稳定性。从多年的数据处理和拟合运算经验中发现, 拟合得到的所有

结果中, 最接近真实值的结果常常表现出一定稳定性。趋于稳定的结果有以下两种情况: 一种情况, 电荷源的位置在一定空间范围内变化时, 电荷量基本不随电荷源位置的变化而显著变化, 多组结果之间电荷量保持相对稳定, 差异很小, 拟合优度基本一致; 另一种情况, 多组拟合结果之间, 水平位置的大致重叠, 高度值和电荷量的变化具有一定规律, 高度值增加的同时电荷量减小, 80%的结果中高度值和电荷量的变化范围分别在 $0.5 \sim 1$ km, 拟合优度基本一致。这两种情况均以多组结果的几何均值为最终结果, 其结果的变化范围视作结果误差, 拟合优度的大小符合之前的要求但并不一定为最小值。

值得注意的是, 从假定模型验证和实际拟合结果中可以发现, 当环境系数使得订正后的拟合数据越接近真实值时, 最小二乘法得到的拟合结果越稳定, 主要表现为趋于稳定的迭代结果不会随着拟合数据的微调(在该数据值的 $5\% \sim 10\%$ 范围内)而有明显的改变, 这是因为自由度是衡量拟合结果与测量值之间是否相符的参量, 测量数据本身的误差导致自由度是存在于拟合所使用的数据内部的, 拟合算法本身使得自由度是有意义的, 以一组假设数据

作为拟合计算的起点, 通过一定可变的步长逐步使计算结果趋向于无限接近测量结果是算法本身的意义, 在测量数据自身的误差无法准确确定的情况下, 最满足测量数据的拟合结果并不是具有真实意义的某一组解, 而是在一定优度范围内的拟合结果都有可能是最接近真实值的, 因此拟合结果的稳定性可以从侧面反应拟合数据的真实性。

3 结果分析

3.1 回击中和的电荷量

两次雷暴过程中记录到的负极性地闪中有 51 次负地闪(包含有 127 次回击)在 4 个以上测站观测到了同步的慢电场变化波形且可用于电荷源反演计算。对 127 次回击中和电荷源进行非线性最小二乘法拟合反演, 结果示于图 3。由图 3 可见, 单次回击中和的电荷量为分布在 $1.1 \sim 27.6$ C, 平均为 8.6 ± 5.2 C, 约 90% 在 $0 \sim 15$ C 区间内, 总体呈对数正态分布分布。单回击地闪中, 回击转移的电荷量为 $2.5 \sim 24.5$ C; 在多回击地闪中, 首次回击和继后回击转移的电荷量分别为 $2.0 \sim 27.6$ C 和 $1.1 \sim 27.3$ C, 继后和首次回击中和电荷量的分布比较相似,

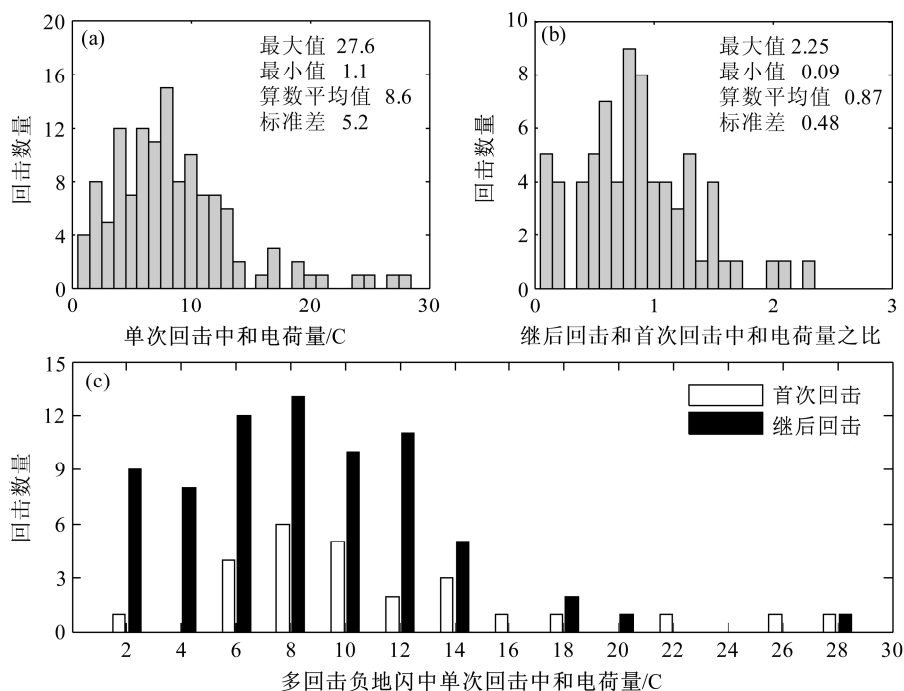


图 3 负地闪回击中和电荷量直方图: (a) 单次回击中和电荷量; (b) 继后回击与首次回击中和电荷量之比; (c) 多回击负地闪的首次和继后回击中和电荷量

Fig. 3 Histograms of the charges neutralized by return strokes: (a) The charges neutralized by a single stroke; (b) ratio of the subsequent-stroke charges to first-stroke charges; (c) the charges neutralized by first- and subsequent-return strokes

都是以 8 C 为中心呈现近似的对数正态分布。与单回击负地闪相比,多回击负地闪回击转移的电荷量略微偏大。多回击地闪的继后回击与首次回击的电荷量之比为 0.09~2.25,平均为 0.87 ± 0.48 ,接近于 Nag et al. (2008) 统计得到的继后和首次回击电场峰值之比 (0.55~0.87) 中的最大值,但是分析显示电荷量大于首次回击的继后回击达 44.4%,明显大于以往研究中分析电场变化得到的约 30% (祝宝友等, 2002) 和 20% 的结果 (鄯秀书等, 2001),显然对电场变化峰值的分析仅能作为回击强度分析的一个方面,不能代表回击转移的电荷量。

进一步分析不同次序回击转移的电荷量可以发现 (图 4),回击转移电荷量的最小值在 2 C 上下波动,不低于 1 C,随回击序数的上升没有明显的增加或减小趋势;最大值随回击序数的上升呈减小趋势,最大落差出现在第二次和第三次回击之间;电荷量的均值同样随回击序数的上升缓慢下降。武智君等 (2013) 对大兴安岭地区的多回击负地闪做逐例分析的结果也显示:当回击次数小于 4,回击中和的电荷量随回击序数下降的可能性较大。

3.2 负地闪回击转移的电荷量与回击序数的关系

3.2.1 回击数分布特征

多回击负地闪在负地闪中所占的比例一般较单回击负地闪偏大。8 月 9 日雷暴过程多回击负地闪的比例为 56.7%,其中含 2~5 次回击的负地闪分别占 40.0%、21.0%、15.7%和 9.3%,随着回击数的增加快速下降,含 5 次回击以上的负地闪仅占总量的 14%。同样发生在北京地区,8 月 13 日雷暴过程的多回击负地闪的比例为 86%,其中含 2~5 次回击的负地闪分别占 13.5%、12.8%、10.6%和 10.4%,随着回击数增加的变化并不十分显著,含 5 次回击以上的负地闪比例高达 38.7%,是 8 月 9 日雷暴过程的 3 倍左右。对 8 月 9 日和 8 月 13 日雷暴过程的具有固定回击数 n 的负地闪占负地闪总量的百分比 P 进行分析得到:8 月 9 日雷暴过程 $P_{0809} = 0.7674\exp(-0.5824n)$,8 月 13 日雷暴过程 $P_{0813} = 0.1889\exp(-0.1502n)$ 。8 月 9 日的结果与鄯秀书等 (1990) 的结论十分接近,而 8 月 13 日结果中 P 的衰减速度明显小于鄯秀书等 (1990) 的研究结果,更接近线性趋势。可见雷暴系统的不同使得其负地闪回击放电特性显著改变。总体上,负地闪发生几率 P 随回击数 n 满足 $P = 0.4013\exp(-0.3438n)$, $R^2 = 0.9859$,参见图 5。北京地区 P 随 n 的衰减速度

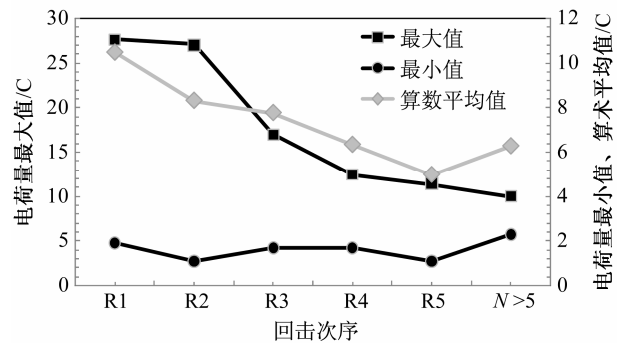


图 4 不同次序回击中和电荷量的最小值、最大值和算术平均值 (最大值对应左边纵轴)

Fig. 4 The maximum, minimum, and arithmetic mean of the stroke charges corresponding to different stroke orders (the maxima correspond to the y-axis on the left)

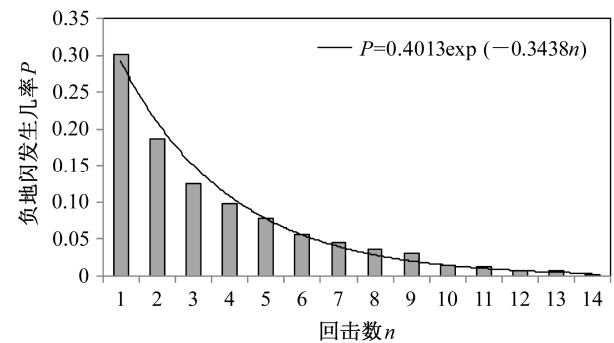


图 5 具有不同回击数的负地闪所占的百分比

Fig. 5 The percentage of negative CG flashes with different numbers of return strokes

与 Saraiva et al. (2010) 在 São Paulo (巴西) 和 Arizona (美国) 得到的结果基本一致,明显慢于兰州地区的结果鄯秀书等 (1990)。可见,负地闪回击数的特征在表现出地域差异的同时也具有一定的共性,雷暴云中电荷分布的不同是导致负地闪回击放电特性显著改变的因素之一。

综合分析两次雷暴过程的 2920 次负地闪,多回击负地闪的比例为 70.4%,平均回击次数为 1.3,最大回击数为 15。根据国内外其他工作者的研究,巴西南部、澳大利亚、美国佛罗里达和新墨西哥地区多回击负地闪比例分别为 80%、60%、56%、49% (Thomson et al., 1984; Pinto et al., 2003; Rakov and Huffines, 2003; Saba et al., 2006),我国大兴安岭地区、兰州和内陆高原地区多回击负地闪比例分别为 48%~79%、50.8%和 39% (张廷龙等, 2008; 王东方等, 2011; 武智君等, 2013),北京地区总体上属于多回击负地闪高发区域。

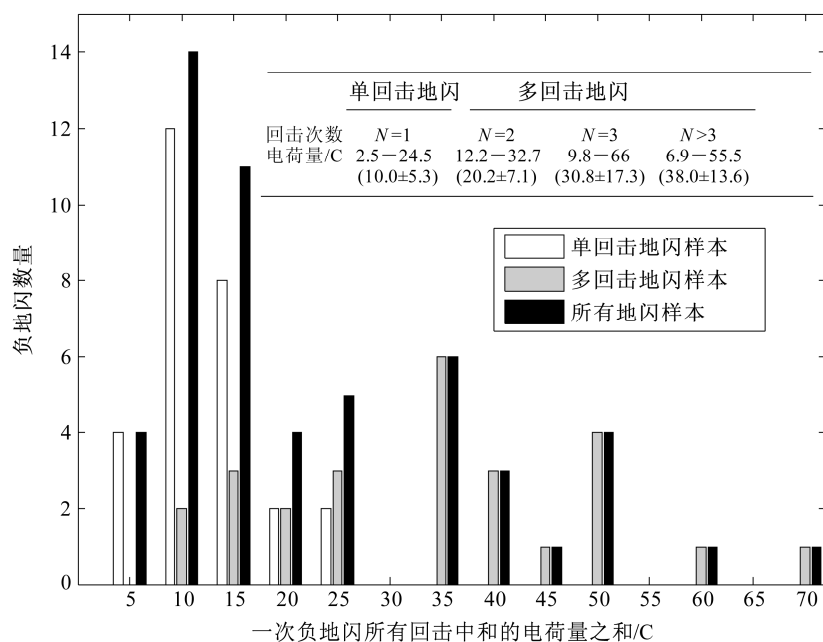


图 6 负地闪中和的总电荷量直方图

Fig. 6 Histograms of the total charges neutralized by return strokes in a negative CG flash

3.2.2 具有不同回击数的负地闪转移的电荷量

在对单次回击中和的电荷量进行计算的基础上,对 51 次负地闪中和的总电荷量进行了统计(图 6),发现单次负地闪中和的总电荷量为 2.2~66.0 C。其中 26 次单回击地闪中和的总电荷量为 2.5~24.5 C,总体呈对数正态分布形式分布。多回击负地闪中和的总电荷量(本文中为回击该地闪所有电荷量之和)为 6.9~66.0 C,大致以 35 C 为中心呈正态分布,较单回击负地闪中和电荷量明显增大。图 6 表进一步给出了具有不同回击数负地闪中和的电荷量及其算术平均值和标准差(括号内),单回击、双回击、三回击及回击数大于 3 次的负地闪中和总电荷量的平均值分别为 10.0 C、20.2 C、30.8 C 和 38.0 C,地闪中和的总电荷量随着其所包含的回击数目的增加而增加。显然,多回击负地闪较单回击负地闪释放电荷的能力更强。对比处于较高纬度的我国内陆高原地区和大兴安岭地区(Qie et al., 2002; 张廷龙等, 2008; 武智君等, 2013),北京地区负地闪转移的电荷量明显偏大。

3.3 回击中和电荷与回击间隔的关系

3.3.1 回击之间的时间间隔

8 月 9 日和 8 月 13 日雷暴过程的多回击负地闪回击间隔呈现较一致的统计特征,这里将两次雷暴过程的数据合并分析。对 8002 个回击时间间隔的

分析结果在图 7 中给出,回击间隔最大值和最小值分别为 3 ms 和 967 ms,平均为 99 ± 95 ms,分布总体呈对数正态分布形式;并且不同序数回击与前一次回击的时间间隔同样呈对数正态分布形式分布,例如图 4a、4b 给出 R1 与 R2 和 R2 与 R3 的时间间隔。

统计不同序数回击与前一次回击时间间隔的最小值、最大值和算术平均值,结果示于图 8。分析显示:(1)回击间隔的最小值在第 8 次回击之前的以 4 ms 为中心做小幅波动,在第 8 次回击之后随回击序数的上升略有增大,但变化不显著;(2)回击间隔的最大值随回击序数的上升呈缓慢减小趋势;(3)回击间隔均值随回击序数的上升同样呈减小趋势。继后回击可以沿着之前形成的放电通道发生,随着这些通道又被进一步电离,很容易产生向上传播的先导再次引发回击。上述回击间隔随回击序数的变化特征与 3.1 节提到的回击中和电荷量随回击序数的变化特征有很明显的一致性,从中可以推测回击时间间隔—回击序数—回击中和电荷量三者之间可能存在一定的联系,下面一节就回击间隔与回击转移电荷量之间的关系进行讨论。

3.3.2 回击转移电荷与回击间隔的关系

考虑到样本数量对结果的影响,这里仅对 0~100 ms 回击间隔内回击转移电荷量特征进行分析。

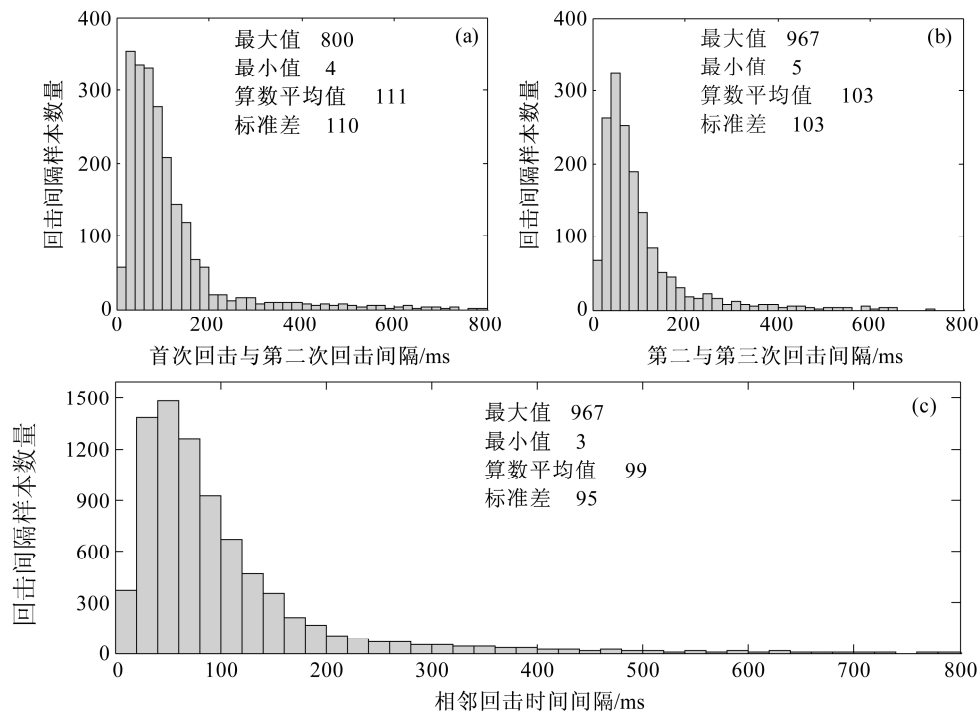


图 7 回击间隔分布: (a) R1 与 R2 时间间隔分布; (b) R2 与 R3 时间间隔分布; (c) 所有回击时间间隔的分布

Fig. 7 The distribution of the time intervals between adjacent strokes: (a) Interval between R1 and R2; (b) interval between R2 and R3; (c) all the intervals

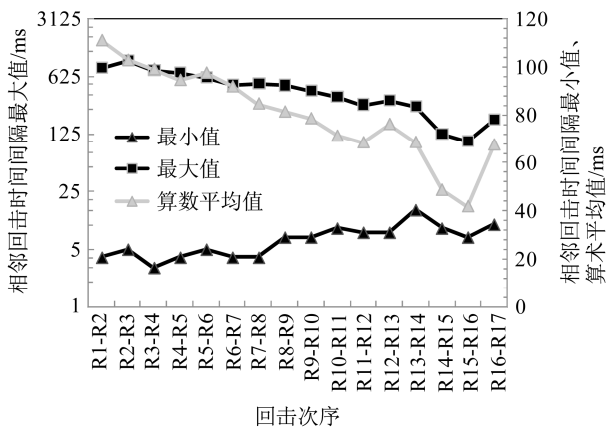


图 8 固定回击序号下回击间隔的最大值、最小值和算术平均值 (其中最大值对应左边纵轴, 最小值和平均值对应右边纵轴)

Fig. 8 The maximum, minimum, and arithmetic mean of the stroke intervals corresponding to different stroke orders (the maximum corresponds to the y-axis on the left and the minimum and arithmetic mean correspond to the y-axis on the right)

图 9a 给出了回击时间间隔及其对应的随后回击(即该时间间隔后随即发生的回击过程)转移的电荷量,并在此基础上给出了不同回击间隔区间(10 ms 为一区间)包含的随后回击中和电荷量的均值。回击间隔在 0~100 ms 时,随后回击中和的电荷量主

要分布在 0~15 C, 其算术平均值随回击间隔的增大总体上呈现波动形式的缓慢上升。中和电荷量大于 15 C 的 4 次随后回击其对应的回击间隔都大于 70 ms。祝宝友等(2002)也曾发现回击间隔与间隔前后回击相对强弱之间存在系统性变化趋势,随着回击间隔逐渐增大,“前弱后强”的回击组合所占比重逐渐增大。武智君等(2013)对负地闪的研究也提出回击时间间隔增大可能为继后回击中和更多的电荷量提供了有利条件。在相似的电学环境下,回击时间间隔增大可能意味着云中电荷积累的时间增加,从而为先导通道中沉积更多电荷提供条件,因此回击中和电荷量的上限有随回击间隔增加而增大的趋势。

另外,两次回击之间闪电通道在云中延伸,因此回击间隔可能同样影响着随后回击中和电荷源的位置,对相邻回击转移电荷源之间的垂直高度差和水平距离进行分析。图 9b 显示,当回击间隔在 0~50 ms 时,前后回击中和电荷源的高度差大致均匀地分布在 0~6 km; 当回击间隔大于 50 ms 时,高度差趋于集中于 0~2 km。从垂直高度差均值上看,高度差均值的极大值出现在 20~40 ms 回击间隔区间内; 当回击间隔大于 40 ms 时,高度差均值明显

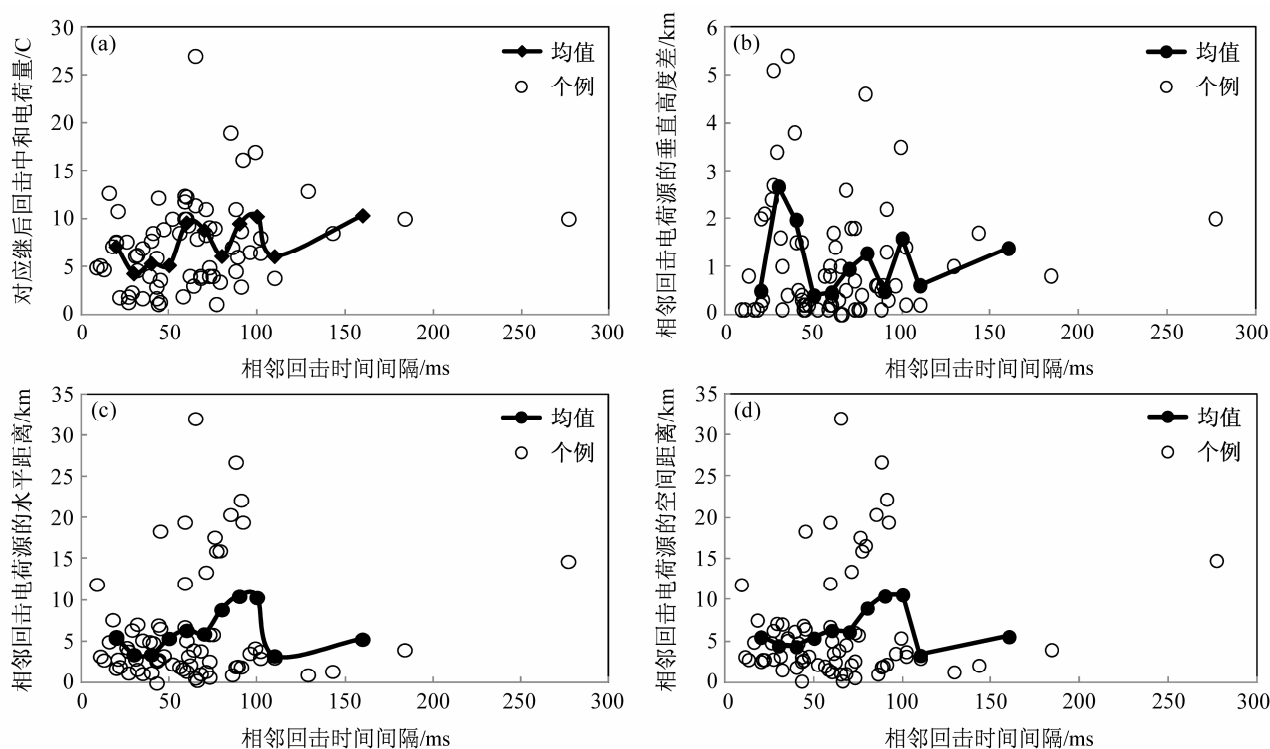


图 9 回击时间间隔与相应回击中和的电荷量和电荷源分布: (a) 回击中和电荷量的分布; (b) 相邻回击中和电荷源垂直高度差的分布; (c) 相邻回击中和电荷源水平距离的分布; (d) 相邻回击中和电荷源空间距离的分布

Fig. 9 The inter-stroke time intervals and the charges and locations of the corresponding subsequent strokes: (a) Distribution of the charges; (b) distribution of the height differences between adjacent-stroke charges; (c) distribution of the horizontal distance between adjacent-stroke charges; (d) distribution of the distance between adjacent-stroke charges

较之前偏小, 以 1 km 为中心在 0.4~1.5 km 之间波动, 这个值与 Krider (1989) 的研究中给出的回击电荷源高度变化范围的平均值 1.3 ± 0.6 km 十分接近。

图 9c 给出的是相邻回击中和电荷源的水平距离。回击间隔为 0~50 ms 时, 相邻回击中和电荷源的水平距离基本小于 8 km; 回击间隔为 50~100 ms 时, 相邻回击中和电荷源的水平距离有明显增加的趋势, 不少个例大于 10 km。实际上, 在 20~40 ms 回击间隔区间, 水平距离的均值出现一个极小值, 这与高度差均值的变化特征正好相反。随回击间隔的增加, 水平距离的均值呈明显的逐渐上升趋势。

对比图 9c 和图 9d 可以看到, 相邻回击转移电荷源的空间距离受水平距离的影响很大。另外在 20~40 ms 回击间隔区间上, 垂直高度差均值对水平距离均值有一定的补偿作用。综合这两点, 相邻回击中和电荷源空间距离的均值随回击间隔的增加基本呈线性的逐渐上升趋势。

在云中电环境一定的前提下, 回击时间间隔的增加意味着云中电荷积累的时间增加。一些学者的

观测结果也显示, 如果回击间隔较短, 通道还保持相当程度的导电性, 云中很容易产生向下传播的先导引发回击, 这不利于通道中电荷大量积累。另一方面, 两次回击之间闪电通道在云中延伸, 为回击中和云中其他位置处的电荷提供条件。结合雷暴云的电荷结构特征, 成熟阶段的强对流中心区, 起、放电活动活跃, 主负电荷区的垂直尺度较大; 雷暴系统后方的层状云降水区以及消散阶段的雷暴云中, 起、放电活动较弱, 主负电荷区的垂直尺度较小, 水平尺度较大。前者为闪电通道纵向发展和电荷的快速聚集提供了条件; 后者则为闪电通道在水平方向上大范围延伸提供了可能性。

4 结论

本文利用北京地区 2011 年两次雷暴过程的闪电多站 GPS 同步观测资料, 对 2920 次负地闪的回击数和回击间隔特征进行了统计, 利用点电荷模式对具有多站同步观测的 51 次负地闪所包含的 127 次回击中和的电荷量和电荷源位置进行了计算, 在此基础

上对回击中和电荷量、电荷源分布与回击数、回击间隔之间的联系进行了讨论。得出如下结论:

(1) 负地闪回击中和的电荷量为 $1.1\sim 27.6\text{ C}$, 平均为 $8.6\pm 5.2\text{ C}$ 。在多回击负地闪中, 不同序数回击转移电荷量的最小值不随回击序数的上升有明显的增加或减小趋势, 而最大值和均值均随回击序数的上升呈逐渐减小的趋势。

(2) 负地闪回击数呈对数正态分布, 具有固定回击数的负地闪发生几率 P 随回击数 n 呈幂指数形式下降, 两者之间满足 $P=0.4013\exp(-0.3438n)$ 。对 51 次负地闪回击中和总电荷量的统计显示, 单回击、双回击、三回击及回击数大于 3 次的地闪中和总电荷量的平均值分别为 10.0 C 、 20.2 C 、 30.8 C 和 38.0 C , 负地闪中和总电荷量随着回击数的增加而增加。

(3) 负地闪回击间隔呈对数正态分布, 回击间隔最大值和最小值分别为 3 ms 和 967 ms , 平均为 $99\pm 95\text{ ms}$ 。不同序数回击时间间隔的分析显示: 回击间隔的最小值在第 8 次回击之前的以 4 ms 为中心做小幅波动, 在第 8 次回击之后随回击序数的上升缓慢增大; 回击间隔的最大值和均值随着回击序数的上升呈缓慢减小趋势, 这与回击电荷量的变化特征一致。

(4) 回击转移电荷量的均值随回击间隔的增加呈现波动形式的逐渐上升; 相邻回击中和电荷源的空间距离均值随回击间隔的增加而增大。

值得注意的是, 本文中提及两次雷暴过程的负地闪回击特征存在一定的差异, 显然要对该地区回击的特征有更深入的认识, 应该在此基础上对不同雷暴过程中以及雷暴过程不同阶段发生负地闪分别进行分析, 从而对制约回击活动特征的因素做更深层次上的探讨。另外, 由于可以进行电荷源拟合的电场变化数据有限, 本文没有对回击间隔大于 100 ms 的回击电荷源的特征进行分析。一些研究显示, 时间大于 100 ms 的回击间隔可能达到 50% , 并且以 100 ms 为分界点回击强度特征可能有较大的变化。因此, 今后的工作中还需要对更多的负极性回击个例进行分析拟合, 从而对回击转移电荷源的特征有更加全面的认识。

参考文献 (References)

Baranski P, Loboda M, Wiszniowski J, et al. 2012. Evaluation of multiple ground flash charge structure from electric field measurements using the

- local lightning detection network in the region of Warsaw [J]. Atmospheric Research, 117: 99–110, doi: 10.1016/j.atmosres.2011.10.011.
- Brook M, Nakano M, Krehbiel P, et al. 1982. The electrical structure of the Hokuriku winter thunderstorms [J]. J. Geophys. Res., 87 (C2): 1207–1215, doi: 10.1029/JC087iC02p01207.
- Cooray V, Pérez H. 1994. Some features of lightning flashes observed in Sweden [J]. J. Geophys. Res., 99 (D5): 10683–10688, doi: 10.1029/93JD02366.
- De Miranda F J, Pinto O Jr, Saba M M F. 2003. A study of the time interval between return strokes and K-changes of negative cloud-to-ground lightning flashes in Brazil [J]. Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics, 65 (3): 293–297, doi: 10.1016/S1364-6826(02)00313-9.
- 范祥鹏, 张广庶, 王彦辉, 等. 2011. 高原复杂地形条件下慢天线测量值的订正[J]. 高原气象, 30 (4): 1046–1051. Fan Xiangpeng, Zhang Guangshu, Wang Yanhui, et al. 2011. Revision of the measured value of slow antenna under the complex terrain condition of Qinghai–Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (4): 1046–1051.
- 耿雪莹, 张其林, 刘明远. 2012. 地面建筑物(群)对雷暴云大气电场影响的模拟研究 [J]. 气象科技, 40 (5): 828–833. Geng Xueying, Zhang Qilin, Liu Mingyuan. 2012. Effect of tall buildings on thunderstorm electric field [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 40 (5): 828–833, doi: 10.3969/j.issn.1671-6345.2012.05.025.
- Krehbiel P R. 1981. An analysis of the electric field change produced by lightning [D]. Ph. D. dissertation, Univ. of Manchester Inst. of Sci. and Technol.
- Krehbiel P R, Brook M, McCrory R A. 1979. An analysis of the charge structure of lightning discharges to ground [J]. J. Geophys. Res., 84 (C5): 2432–2456, doi: 10.1029/JC084iC05p02432.
- Krider E P. 1989. Electric field changes and cloud electrical structure[J]. J. Geophys. Res., 94(D11): 13145–13149, doi: 10.1029/JD094iD11p13145.
- Liu X S, Krehbiel P R. 1985. The initial streamer of intracloud lightning flashes [J]. J. Geophys. Res., 90 (D4): 6211–6218, doi: 10.1029/JD090iD04p06211.
- Lu G, Cummer S A, Li J, et al. 2009. Charge transfer and in-cloud structure of large-charge-moment positive lightning strokes in a mesoscale convective system[J]. Geophys Res Lett, 36 (L15805), doi: 10.1029/2009GL038880.
- Michishita K, Sato H, Yokoyama S, et al. 2015. Negative first return-stroke current peaks and impulse charge transfer [J]. Electrical Engineering in Japan, 190 (3): 37–44, doi: 10.1002/eej.22667.
- Nag A, Rakov V A, Schulz W, et al. 2008. First versus subsequent return-stroke current and field peaks in negative cloud-to-ground lightning discharges [J]. J. Geophys. Res., 113 (D19): D19112, doi: 10.1029/2007JD009729.
- Pinto O Jr, Pinto I R C A, Diniz J H, et al. 2003. A seven-year study about the negative cloud-to-ground lightning flash characteristics in southeastern Brazil [J]. Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics, 65 (6): 739–748, doi: 10.1016/S1364-6826(03)00077-4.
- 鄯秀书, 郭昌明, 刘欣生. 1990. 北京与兰州地区的地闪特征 [J]. 高原气象, 9 (4): 388–394. Qie Xiushu, Guo Changming, Liu Xinsheng. 1990. The characteristics of ground flashes in Beijing and Lanzhou regions [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 9 (4): 388–394.
- 鄯秀书, 余晖, 王怀斌, 等. 2001. 中国内陆高原闪电特征的统计分析

- [J]. 高原气象, 20 (4): 395–401. Qie Xiushu, Yu Ye, Wang Huaibin, et al. 2001. Analyses on some features of ground flashes in Chinese inland plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 20 (4): 395–401, doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2001.04.008.
- Qie X S, Yu Y, Liu X, et al. 2000. Charge analysis on lightning discharges to the ground in Chinese inland plateau (close to Tibet) [J]. Annales Geophysicae, 18 (10): 1340–1348, doi: 10.1007/s00585-000-1340-z.
- Qie X S, Yu Y, Wang D H, et al. 2002. Characteristics of cloud-to-ground lightning in Chinese inland plateau [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 80 (4): 745–754, doi: 10.2151/jmsj.80.745.
- Qie X S, Zhang T L, Zhang G S, et al. 2009. Electrical characteristics of thunderstorms in different plateau regions of China[J]. Atmospheric Research, 91(2–4): 244–249, doi: 10.1016/j.atmosres.2008.04.014.
- Rakov V A, Huffines G R. 2003. Return-stroke multiplicity of negative cloud-to-ground lightning flashes [J]. J. Appl. Meteor., 42 (10): 1455–1462, doi: 10.1175/1520-0450(2003)042<1455:RMONCL>2.0.CO;2.
- Rakov V A, Uman M A. 2007. Lightning: Physics and Effects[M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.
- Saba M M F, Ballarotti M G, Junior O P. 2006. Negative cloud-to ground lightning properties from high-speed video observations [J]. J. Geophys. Res., 111 (D3): D03101, doi: 10.1029/2005JD006415.
- Saraiva A C V, Saba M M F, Pinto O Jr., et al. 2010. A comparative study of negative cloud-to-ground lightning characteristics in São Paulo (Brazil) and Arizona (United States) based on high-speed video observations [J]. J. Geophys. Res., 115 (D11): D11102, doi: 10.1029/2009JD012604.
- Schulz W, Cummins K, Diendorfer G, et al. 2004. Cloud-to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system [J]. J. Geophys. Res., 110 (D9): D09101, doi: 10.1029/2004JD005332.
- Thomson E M, Galib M A, Uman M A, et al. 1984. Some features of stroke occurrence in Florida lightning flashes [J]. J. Geophys. Res., 89 (D3): 4910–4916, doi: 10.1029/JD089iD03p04910.
- Thottappillil R, Rakov V A, Uman M A, et al. 1992. Lightning subsequent-stroke electric field peak greater than the first stroke peak and multiple ground terminations [J]. J. Geophys. Res., 97 (D7): 7503–7509, doi: 10.1029/92JD00557.
- 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, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.12.
- 王宇, 郗秀书, 王东方, 等. 2014. 正地闪和负地闪预击穿脉冲序列的统计分析对比 [J]. 大气科学, 38 (1): 21–31. Wang Yu, Qie Xiushu, Wang Dongfang, et al. 2014. Comparisons of preliminary breakdown pulse trains in positive and negative cloud-to-ground lightning flashes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (1): 21–31, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12167.
- 武智君, 郗秀书, 王东方, 等. 2013. 大兴安岭林区负地闪电电荷源的反演 [J]. 气象学报, 71 (4): 783–796. Wu Zhijun, Qie Xiushu, Wang Dongfang, et al. 2013. Retrieval of the charge sources neutralized by negative cloud-to-ground lightning flashes in the Daxing'anling Forest region[J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 71(4): 783–796, doi: 10.11676/qxxb2013.057.
- 薛秋芳, 孟青, 葛润生. 1999. 北京地区闪电活动及其与强对流天气的关系 [J]. 气象, 25 (11): 15–20. Xue Qiufang, Meng Qing, Ge Runsheng. 1999. The relationship between lightning activity and severe convection weather in Beijing area in summer from 1995 to 1997 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 25 (11): 15–20, doi: 10.3969/j.issn.1000-0526.1999.11.003.
- 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 Tinglong, Qie Xiushu, Yuan Tie, 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, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.05.19.
- 张伟伟, 田杨萌, 王彩霞, 等. 2011. 北京地区的雷电物理特征 [J]. 北京信息科技大学学报, 26 (3): 53–57. Zhang Weiwei, Tian Yangmeng, Wang Caixia, et al. 2011. The physical characteristics of lightning flashes occurred in Beijing[J]. Journal of Beijing Information Science and Technology University (in Chinese), 26 (3): 53–57, doi: 10.3969/j.issn.1674-6864.2011.03.011.
- 祝宝友, 陶善昌, 刘亦风. 2002. 合肥地区地闪特征 [J]. 高原气象, 21 (3): 296–302. Zhu Baoyou, Tao Shanchang, Liu Yifeng. 2002. Characteristics of ground flashes in Hefei region[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (3): 296–302, doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2002.03.011.