张廷龙, 郄秀书, 袁铁, 等. 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. 大气科学, 2008, **32** (5): 1221~1227 Zhang Tinglong, Qie Xiushu, Yuan Tie, et al. The characteristics of cloud-to-ground lightning flashes and charge structure of a typical thunderstorm in Chinese inland plateau. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (5): 1221~1227

# 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

张廷龙1 郄秀书2 袁铁3 张广庶1 张彤1 赵阳1

1 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
 2 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室,北京 100029
 3 兰州大学大气科学院学院,兰州 730000

**摘 要**利用 2002 年夏季在青海省大通县进行的雷暴及闪电综合观测实验中所获取的 6 站 GPS 同步闪电电场变 化资料,对 8 月 4 日一次下部具有大范围正电荷区的典型性雷暴过程的雷电特征进行详细研究。利用点电荷模式 对 16 次负地闪和 2 次正地闪所包含的共 65 次回击所中和电荷源进行的非线性最小二乘法拟合研究发现,负地闪 所中和的负电荷距离地面的相对高度在 3~5 km,而两次正地闪所中和的雷暴云电荷在 5~6 km 的高度,表明该 雷暴云呈三极性电荷结构。负地闪单次回击所中和电荷量平均为 1.48 C,而两次正地闪都为单次回击且中和的 电荷量分别为 1.37 C 和 2.68 C。

关键词 电荷结构 回击 内陆高原 点电荷模式文章编号 1006 - 9895 (2008) 05 - 1221 - 08 中图分类号 P427 文献标识码 A

# The Characteristics of Cloud-to-Ground Lightning Flashes and Charge Structure of a Typical Thunderstorm in Chinese Inland Plateau

ZHANG Tinglong<sup>1</sup>, QIE Xiushu<sup>2</sup>, YUAN Tie<sup>3</sup>, ZHANG Guangshu<sup>1</sup>, ZHANG Tong<sup>1</sup>, and ZHAO Yang<sup>1</sup>

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

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

3 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

**Abstract** Six-station measurements on electric field change of lightning flashes were carried out in the summer of 2002 in Qinghai area [ (37°3, 795′N, 101° 34, 94′E), 2553, 32 m above sea level], the northeastern verge of the Tibetan Plateau. By using the point charge model, the height and magnitude of charge neutralized by return strokes have been fitted, with the nonlinear least-square method, based on the electric field changes of cloud-to-ground (CG) flashes observed in a typical thunderstorm with larger-than-usual lower positive charge center (LPCC) occurring in the afternoon of 4 August 2002. A total of 65 return strokes in 16 negative CG and 2 positive CG flashes has

**收稿日期** 2007-01-17, 2007-12-13 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX-YW-206, 国家自然科学基金资助项目 40675008、40325013

作者简介 张廷龙, 男, 1978年出生, 博士, 主要从事大气电学方面的研究。E-mail: tlzhang@lzb. ac. cn

been analyzed. The results show that the height of charge region neutralized by negative CG flashes ranges from 3 km to 5 km above the ground. For the two positive CG flashes, the neutralized charge region is located in a height range from 5 km to 6 km. It shows that the thunderstorm has a triple charge structure. The average charges neutralized by a negative return stroke and a positive return stoke are about 1.48 C and 2.02 C, respectively.

Key words charge structure, return stroke, inland plateau, point charge model

# 1 引言

雷暴云电荷结构的研究一直是大气电学领域的 一个重要内容,其研究手段分为直接和间接两种。 最为直接的方法是采用雷暴云电场的穿云观测,以 获取探空路径上电场分布特征。Simpson 等<sup>[1,2]</sup>通 过电场探空给出雷暴云三极性电荷结构的物理模 型,即上部正电荷区、中部负电荷区以及雷暴云底 部的小正电荷区。这一结论长期以来得到学术界的 广泛认同和接受, 但近来越来越多的电场探空显 示, 雷暴云的电荷结构远比 Simpson 的模型<sup>[1, 2]</sup>复 杂得多<sup>[3,4]</sup>。Stolzenburg 等<sup>[5~8]</sup>通过电场探空对不 同尺度的雷暴云电荷结构做了深入的研究,其中包 括中尺度对流系统、孤立雷暴及新墨西哥山地雷 暴,结果表明这三种对流雷暴的电荷结构基本一 致:在雷暴上升气流区存在4个电荷区,最下部为 正电荷区,往上依次改变极性,而在上升气流区外 部至少有6个以上的电荷区存在。除了直接对雷暴 云进行电场的穿云观测,间接的手段就是通过闪电 放电的多站同步观测资料来拟合闪电所中和的电荷 源位置,以对雷暴云电荷结构进行反演, Workman 和 Holzer<sup>[9]</sup>首先在新墨西哥进行雷暴闪电的 8 站 同步观测,分析结构表明正、负电荷区分布于云内  $-5 \sim -25$ <sup>°</sup>C的环境温度区域内。Jacobson和 Krider<sup>[10]</sup>利用多站同步观测得到的结论与 Workman 等<sup>[9]</sup>的基本一致。Krehbiel 等<sup>[11]</sup>通过 8 站同 步观测发现地闪起源干-17~ -9℃的环境温度区 域内。

自 20 世纪 80 年代以来大量的雷暴及闪电观测 实验表明,中国内陆高原地区的雷暴云具有特殊的 电荷结构特征,即在雷暴云底部存在较常规雷暴强 得多的正电荷区,并初步分析认为下部正电荷区的 存在与降水有一定的关系<sup>[12~15]</sup>。1996~1997 年在 甘肃中川和平凉地区的闪电多站同步观测进一步证 实了云下部大范围正电荷区(LPCC)的存在,通过 闪电引起的地面电场变化的多站同步观测对雷暴云 内云闪中和电荷源位置的反演,定性推断雷暴云电 荷结构为三极性电荷结构,且云内闪放电主要发生 在中部主负电荷区与 LPCC 之间<sup>[16~18]</sup>。随后于 2002~2005年在青海、西藏、甘肃地区进行的野外 综合观测表明,这三个地区雷暴和闪电放电特征都 具有一定的相似性,并且发现在雷暴发展的不同时 期,闪电引起的地面电场变化和闪电放电特征显著 不同<sup>[19,20]</sup>。郭凤霞等<sup>[21]</sup>利用模式分析认为高原雷 暴电荷结构主要受反转温度和上升气流强弱的影响 呈不同的特征。本文结合雷暴及闪电的多站同步观 测对青海地区一次典型雷暴及闪电的多站同步观 测对青海地区一次典型雷暴及闪电的多站同步观

### 2 实验场地及观测设备介绍

为了对青藏高原周边地区雷暴及闪电特征进行 分析和研究,我们于2002年在青海开展了雷暴及闪 电的多站同步观测实验,实验场地设在位于西宁市 西北方向约 50 km 的大同县, 该地区平均海拔约为 2650 m,由于地形多以丘陵为主,夏季局地雷暴极易 发生。观测场地布局见图1所示。除了主观测站新 庄[(37°3.795′N, 101° 34.94′E), 海拔 2553.32 m, 简称 A]以外, 还设有 5 个观测子站, 分别为良教 (海拔 2462 m, 简称 B)、极乐 (海拔 2687 m, 简称 C)、城关(海拔 2573 m, 简称 D)、苗圃(海拔 2532 m, 简称 E) 和吉仓 (海拔 2510 m, 简称 F), 图 1 中黑色方框以及括号内数字标出了各测站的坐 标位置。每个测站所涉及到的设备主要有:倒置式 大气平均电场仪,用来监测地面附近的平均电场强 度和极性,测量范围为±50 kV/m,响应时间为 0.1 s; 高精度 GPS 时钟同步的快、慢天线电场变 化仪,用来监测闪电引起的地面电场快、慢变化, 时间常数分别为2ms和6s,带宽分别为5MHz 和 2 MHz, 模拟输出信号经 16 位的 A/D 转换后由 微机进行记录,采样频率为2.5 MHz,记录长度为



图 1 观测实验点布局 Fig. 1 Map of the measurement sites

2兆个数据点。同时在主站新庄还配有每秒 1000 幅的数字化高速摄像系统。

# 3 分析方法

本文使用点电荷模式对地闪放电中和电荷源位 置进行了拟合,对于该模式的描述如下所述:如果 假定地闪放电所中和的电荷源为球对称分布,且几 何尺寸与观测距离相比可以忽略不计,则地闪引起 的地面电场变化 Δ*E*<sub>i</sub>可等效为云内的点电荷所引 起:

$$\Delta E_{i} = \frac{1}{4\pi\epsilon_{0}} \frac{2Qz}{\left[(x-x_{i})^{2} + (y-y_{i})^{2} + (z-z_{i})^{2}\right]^{3/2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_{0}} \frac{2Qz}{R_{i}^{3}},$$
(1)

其中, x、y、z分别为点电荷Q的坐标,  $x_i$ 、 $y_i$ 分别 为地面各测站的位置,  $R_i$ 为点电荷源Q到各个观 测站的距离。(1)式共有4个未知参量, 如果有4 个测站以上的 $\Delta E_i$ 测量就可拟合确定地闪所中和 的电荷源位置和电荷量, 其拟合优度为

$$\chi^{2} = \frac{1}{v} \sum_{1}^{n} \frac{\left[\Delta E_{mi} - \Delta E_{i}(x, y, z, Q)\right]^{2}}{\sigma^{2}}, \qquad (2)$$

n 为测站数,  $\Delta E_{mi}$  为第 *i* 个测站测得的电场变化, 文中各测站的拟合数据  $\Delta E_{mi}$  由慢天线电场变化仪 测量给出;  $\Delta E_i(x, y, z, Q)$  是由模式拟合出的电场 变化, *v* 为自由度, 即为测站数与未知量之差, *σ* 是 测量误差,估计为 10%。使得拟合优度值最小的一 组(*x*, *y*, *z*, *Q*) 即为所求的电荷中心的位置和电 荷量。

考虑到点电荷模式的放电仅涉及云中单一极性 电荷,因此计算结果只是放电涉及的那部分电荷。 同时对于该模式,最为理想的闪电探测网络应该布 局在无山体或高大建筑物遮挡的平原地区,这样计 算的结果更为准确。由于青海大通地区处于丘陵地 带,不规则地形会引起电场畸变,因此闪电的电场 波形会受到一定的影响,导致计算结果存在一定的 误差,但相对而言,6个测站的海拔高度差异不是 很大,因此地闪回击在各站引起的电场变化主要还 是与距离有关,在数值计算时加入测站高度并给了 较大的测量误差,因此利用点电荷模式对地闪中和 电荷源位置进行计算仍是合理可行的。

1223

## 4 资料分析及结果

#### 4.1 雷暴引起的地面电场及闪电频数

青海地区雷暴及闪电活动主要发生于午后,雷 暴活动比较频繁,在45天的连续观测中,雷暴日 数达20天,但雷暴过程强度一般都比较弱,且持 续时间也比较短。通过对10次过顶雷暴(即雷暴 移动到其中至少一个测站上空)引起的地面电场分 析发现,有6次雷暴在成熟阶段地面电场为正极性 (这里定义头顶正电荷在地面产生正电场),即在雷 暴云底部有强度较大的正电荷区存在,这是该地区 最为典型的雷暴地面电场过程,而只有4次过程为 负极性,这与常规夏季雷暴的地面电场极性是一致 的。

2002 年 8 月 4 日下午 (北京时,下同) 在探测 网络东南方向有一雷暴生成,图 2a~e 给出该雷暴 过程在测站 A、E、F 处产生的地面电场以及总闪 电频数和负地闪频数随时间的演变特征。测站网络 于 15:35:02 探测到第一个闪电发生,且 15:57 以 后闪电已经开始频繁发生,16:07 闪电频数达到 4 个/min。从图 2a 和 2b 可以看出从观测开始,地面 电场长时间都为负极性,大约1小时以后,测站 A、 E、F 的地面电场分别于 16:46、16:51、16:53转为 正极性,测站 A 和 E 处的正电场在持续 11 分钟后 都又转为负极性。由于 PC 机记录设备的故障,测



图 2 2002 年 8 月 4 日雷暴过程在 A 站 (a)、E 站 (b) 和 F 站 (c) 引起的地面电场以及总闪电频数 (d) 和地闪频数 (e) 随时间的演变 Fig. 2 The evolutions of surface electric (E) fields at (a) site A, (b) site E and (c) site F, (d) total lightning flash rate and (e) negative CG (cloud-to-ground) flash rate

站 F 处的正电场在持续 33 分钟后观测中断。综合 分析其他站点的观测,该雷暴总持续时间约为 140 分钟左右,最终于 18:00 移出网络探测范围,也没 有闪电再发生。由地闪统计得到该过程是一次负地 闪比例较高的天气过程,共发生 116 个负地闪和 5 个正地闪。从负地闪的时间演变图 2e 可以看出, 尽管在雷暴的整个演变过程中都有负地闪发生,但 主要发生在雷暴总闪电频数较大的时段,最大负地 闪频数为 6 个/min。

由于没有雷达的配合观测,仅凭地面电场很难 判断雷暴是否为典型性或常规性雷暴,然而,根据 地面闪电声光差的记录显示,在地面电场为负极性 的时候,发生的大部分闪电都处于离测站 6~ 12 km 之间,这表明雷暴有可能处于雷暴电场的反 号距离之外。从三个测站地面电场来看,尽管正极 性电场持续时间较短,但电场强度要大于极性发生 反转前后的负极性电场,同时在该时段内发生的大



图 3 回击间间隔分布特征

Fig. 3 The distribution of interstroke intervals

部分闪电距离约 3~7 km 的范围内。由雷暴靠近 测站时的正极性地面电场可以表明该雷暴下部具有 强度较大的正电荷区,即该雷暴属于高原典型性雷 暴。

1225

#### 4.2 雷暴的地闪特征

该雷暴过程产生的 116 个负地闪中,大部分地 闪以单次回击为主,约占 61%,且主要发生在雷暴 的开始和消亡阶段,而多回击地闪大多发生在雷暴 的成熟阶段,回击次数最多可达 11 次。对多回击 负地闪的分析发现,随着回击次数的增多,回击间 间隔有逐渐减小的趋势,图 3 给出平均回击间间隔 与回击次数之间的对应关系,可以看出回击间间隔 在 100 ms 以内。同时发现,对于大部分负地闪在 首次回击之前和最后一次回击之后都有较长时间的 云内放电过程,其中首次回击之前的云内放电过程 最大可达 323 ms,平均为 101.1 ms。这与 Qie 等<sup>[22]</sup>对中国内陆高原地区地闪回击前云内过程的 统计特征一致。而在该雷暴过程中探测到的 5 个正 地闪都为单次回击。

#### 4.3 正、负地闪特征分析

图 4 给出该雷暴产生的一次正地闪和一次负地 闪引起的快、慢天线电场记录,这两个闪电都发生于 雷暴的成熟稳定、且闪电频数较高的时段(正、负地 闪分别发生于 16:59:24 和 16:40:32)。从图 4a 中可 以看出该正地闪只有一个回击组成,回击前有长达 131 ms 的云内放电过程,占总持续时间的 93.5%。 由点电荷模式计算得到该闪电中和电荷源高度为



Fig. 4 The E field changes produced by (a) a positive CG flash at 1659:24 LST and (b) a negative CG flash at 1640:32 LST on 4 Aug 2002

5.45 km (注: 文中所给的电荷源高度均为距离地面的相对高度,下同),释放电荷量为 1.37 C。

从负地闪引起的快慢天线电场变化(图 4b)分 析发现,该闪电共有11次回击组成,放电总持续 时间达446 ms,回击间间隔最大为175.2 ms,最小 为12.8 ms,平均为37.7 ms,梯级先导过程持续时 间为23.1 ms。

利用非线性最小二乘法拟合可以得到该次地闪 11次回击所中和的电荷源位置及电荷量(表1), 从表1中可以看出,该闪电单次回击所中和的电荷 量最小为0.19C,最大为1.92C,释放总电荷量为 9.71C。由于该地区海拔高度相对甘肃中川地区要 高,因此负地闪放电强度比中川地区还是要弱一 些<sup>[18]</sup>。闪电放电位置在测站A东南方向6~7km 处(如图1中灰色区域所示),这与地面声光差记 录计算得到的距离基本吻合。结合各次回击中和电 荷源位置可以看出,除了首次回击电荷源位置离地 高度较高外,其他 10 次回击高度差别不是很大,都在 3.5~4.5 km 之间,尽管该闪电回击次数较 多,但闪电水平扩展相对比较小,最大也只有 1 km 左右。

#### 4.4 正、负地闪中和的电荷源

该雷暴过程中,4个以上测站同时观测到的 正、负地闪数分别为16个和2个,图2c中向下和 向上箭头分别表示这16次正、负地闪发生的时间。 图5给出16次正、负地闪共65次回击所中和的电 荷量及电荷源位置在x-z及y-z方向上的投影, 从图中可以看出,负地闪释放的云内负电荷离地高 度主要分布在3~5 km的范围内,而两个正地闪发 生于5~6 km的范围,且中和的电荷量分别为 1.37 C和2.68 C。平均而言,负地闪中和总电荷 量在1.8~10.4 C之间,平均值为5.9 C,大于正 地闪中和电荷量,但就单次回击平均所中和电荷量 而言,负地闪为1.48 C,略小于正地闪。

表 1 2002 年 8 月 4 日 16:40:32 多回击负地闪中和电荷源位置及电荷量的拟合结果

Table 1Fitting results of locations and magnitudes of charges neutralized by 11 strokes of the negative CG flash at 1640:32 LST 4Aug 2002

| 回击序列           | $x/\mathrm{m}$      | y/m                  | $z/\mathrm{m}$      | Q/C            | $\chi^2$ |
|----------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------|----------|
| $R_1$          | 1040.47±305.4       | $-6166.05\pm281.1$   | 5009.46±793.9       | $1.63 \pm 0.2$ | 8.23     |
| $\mathbf{R}_2$ | 1816.02±563.4       | $-5475.91 \pm 463.6$ | 4153.21±373.9       | $1.30 \pm 0.2$ | 43.11    |
| $R_3$          | 814.53±249.3        | $-6130.54\pm250.2$   | 4403.86±697.2       | $0.90 \pm 0.1$ | 8.49     |
| ${ m R}_4$     | 970.25±226.0        | $-5826.87\pm233.0$   | $3563.96 \pm 573.6$ | $1.92 \pm 0.1$ | 19.12    |
| $\mathbf{R}_5$ | 1158.44 $\pm$ 279.7 | $-5992.95\pm 265.1$  | 4250.00±683.8       | 0.86 $\pm$ 0.1 | 21.24    |
| $R_6$          | 952.39±236.9        | $-6006.45\pm234.2$   | $3817.74 \pm 609.5$ | $0.19 \pm 0.1$ | 13.15    |
| $R_7$          | 840.62±266.1        | $-6279.60\pm 268.7$  | 4628.19±776.8       | 0.34 $\pm$ 0.1 | 14.62    |
| $R_8$          | 779.36 $\pm$ 257.2  | $-6370.47\pm257.3$   | 4565.69±761.6       | $0.41 \pm 0.1$ | 8.74     |
| $R_9$          | $1069.56 \pm 280.8$ | $-6039.71\pm268.2$   | 4498.61±715.0       | 0.55 $\pm$ 0.1 | 16.03    |
| $R_{10}$       | 1683.78±318.4       | $-4982.05\pm299.0$   | 4352.14±526.8       | $1.12 \pm 0.2$ | 25.82    |
| $R_{11}$       | $1061.46 \pm 272.2$ | $-6134.33 \pm 257.9$ | 4293.59±698.1       | 0.49 $\pm$ 0.1 | 15.76    |



图 5 回击中和电荷源的位置及电荷量。圆的中心表示电荷源的位置,圆的大小代表回击所中和电荷量的大小 Fig. 5 The locations (circle centers) and magnitudes (circle sizes) of charges neutralized by return stokes of total 18 CG flashes

在对闪电的分析中发现,具有多次回击的负地 闪各次回击所释放电荷源的高度位置变化趋势有所 不同。通常认为随着回击次数的增加,回击所中和 电荷源高度也随之增加,但这里所分析的有些闪电 却刚好相反。这表明在雷暴发展的不同时段,云内 电荷区域的分布及起电强度可能会对闪电放电的起 始高度有所影响,而电荷区的分布除了与温度的垂 直分布有关外,还可能与上升气流区与下沉气流区 的位置有关。当闪电发生于上升气流区时,由于受 较强上升气流的抬升,强电荷区域位置较高,放电 的起始区域高度较高,电荷的分离相对也较强,并 向下延升通道;当闪电发生在雷暴下沉气流区时, 由于受下沉气流的拖曳作用,负电荷区域下边界高 度有所降低,首次回击中和电荷源的位置偏低。

# 5 结论与讨论

通过对青海地区 2002 年 8 月 4 日一次典型雷 暴过程及其地闪的分析得到以下结论:

(1)该雷暴过程产生的地闪主要以负地闪为 主,单次回击的闪电占61%,且主要发生在雷暴的 开始和消亡阶段,而多回击地闪多发生在雷暴的成 熟阶段,正地闪主要发生在雷暴的后期且都为单次 回击。

(2) 从闪电放电位置来看,该雷暴云呈三极性 电荷结构,负电荷区离地高度在 3~5 km,上部正 电荷区在 5~6 km,进一步证实了下部具有大范围 正电荷区的雷暴其上部存在正电荷区的证据,但没 有观测到由下部正电荷区激发的正地闪。

(3)负地闪中和总电荷量平均为5.9C,大于 正地闪中和电荷量,但就单次回击平均所中和电荷 量而言,负地闪为1.48C,略小于正地闪的2.02C。

(4)虽然一次雷暴过程的电荷结构并不能完全 代表高原地区所有的雷暴,但事实上,范围较大的 LPCC是内陆高原雷暴一个较为典型的特征,而且 以往的工作,包括对地面电场的演变、雷暴的多站 观测以及模式都推断内陆高原地区大部分雷暴的基 本电荷结构为三极性。因此对该雷暴过程的分析结 果仍具有一定的代表性。同时,文中所计算结果的 拟合优度偏大,这可能是由于受观测场地的影响以 及探测设备的系统误差造成的,但计算结果与以往 工作所得出的结论基本相符,因此本文结论也是较 为合理的。 国外学者研究认为雷暴云下部次正电荷区的存 在易于激发负电荷区的对地放电<sup>[23]</sup>,这是因为大 部分负地闪都是由负先导过程开始的,云下部正电 荷区的存在会造成强电场区,使先导过程易于激发 和向地面传输,虽然内陆高原地区雷暴云底部普遍 存在范围较大的正电荷区,但大部分由中部负电荷 区激发的负流光都终止于该正电荷区,无法到达地 面形成地闪;主负电荷区与下部正电荷区之间频繁 的云内放电会起到减弱下部正电荷区的作用,从而 使得仍有一部分负流光穿过下部正电荷区形成地 闪。本文所分析的雷暴过程产生较多的负地闪有可 能就是由于该原因造成的。

1227

但是, 较强的下部正电荷区却为什么很少产生 正地闪? Qie 等<sup>[19]</sup>分析认为下部正电荷区不易发生 正地闪的原因可能是由于主负电荷区与下部正电荷 区之间强大的电场, 使得云闪极易在这两个电荷区 之间发生,而正地闪相对较难发生。Mansell 等[24, 25]结合观测和模式计算发现负地闪一般总是 在负电荷区下部的正电荷区发展起来以后才发生, 而正地闪同样在正电荷区下部有负电荷存在的情况 下才会发生。根据非感应起电机制<sup>[26~28]</sup>,起电主 要是通过冰雹、软雹等大粒子和冰晶等小粒子在 0~40℃的混合区内通过碰撞发生电荷转移。由于 内陆高原雷暴云下部 LPCC 的存在与反转温度层 以下的冰雹、软雹和冰晶等起电粒子有关。受反转 温度的控制,LPCC以下区域不可能有负电荷区存 在。由此不难得出,由于 LPCC 下部缺少一个激发 其对地放电的负电荷区而很难发生正地闪。

#### 参考文献 (References)

- [1] Simpson G C, Scrase F J. The distribution of electricity in thunderclouds. Proc. Roy. Soc. London, 1937, 161: 309~ 352
- [2] Simpson G C, Robinson G D. The distribution of electricity in thunderclouds. II. Proc. Roy. Soc. London, 1941, 177: 281~329
- [3] Marshall T C, Rust W D. Electric field soundings through thunderstorms. J. Geophys. Res., 1991, 96: 22297~22306
- [4] Hunter S M, Schuur T J, Mapshall T C, et al. Electric and kinematic structure of the Oklahoma mesoscale convective system of 7 June 1989. Mon. Wea. Rev., 1992, 120: 2226 ~2239
- [5] Stolzenburg M, Rust W D, Smull B F, et al. Electrical structure in thunderstorm convective regions. 1. Mesoscale

convective systems. J. Geophys. Res., 1998, 103 (D12): 14059~14078

- [6] Stolzenburg M, Rust W D, Marshall T C. Electrical structure in thunderstorm convective regions. 2. Isolated storms.
   J. Geophys. Res., 1998, 103 (D12): 14079~14096
- Stolzenburg M, Rust W D, Marshall T C. Electrical structure in thunderstorm convective regions. 3. Synthesis. J. Geophys. Res., 1998, 103 (D12): 14097~140108
- Stolzenburg M, Marshall T C. Charged precipitation and electric field in two thunderstorms. J. Geophys. Res., 1998, 103 (D16): 19777~19790
- [9] Workman E J, Holzer R E. A preliminary investigation of the electrical structure of thunderstorms. Aero. Tech. Notes, 1942, 850: 1~29
- [10] Jacbson E A, Krider E P. Electrostatic field changes produced by Florida lightning. J. Atoms. Sci., 1976, 33: 103 ~117
- [11] Krehbiel P R, Brook M, McCrocy R A. An analysis of the charge structure of lightning discharges to ground. J. Geophys. Res., 1979, 84: 2432~2456
- [12] 王才伟,陈茜,刘欣生,等. 雷雨云下部正电荷中心产生的 电场. 高原气象, 1987, 6 (1): 65~74
  Wang Caiwei, Chen Qian, Liu Xinsheng, et al. The electric field produced by the lower positive charge center of thundercloud *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1987, 6 (1): 65~74
- [13] 刘欣生,郭昌明,王才伟,等. 闪电引起的地面电场变化特 征及雷暴云下部的正电荷层. 气象学报,1987,45 (4):500 ~504

Liu Xinsheng, Guo Changming, Wang Caiwei, et al. The surface electrostatic field-change produced by lightning flashes and the lower positive charge layer of the thunderstorm. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 1987, **45** (4): 500~504

[14] 李荣,王才伟.我国两类不同电结构的雷暴云.高电压技术, 1998,24(1):80~84

> Li Rong, Wang Caiwei. Two types of thunderclouds with different charge structure in China. *High Voltage Engineering* (in Chinese), 1998, **24** (1): 80~84

- [15] 李荣,王才伟. 甘肃雷暴云电荷分布和闪电特征的个体差 异. 高电压技术, 2001, 27 (2): 74~75
  Li Rong, Wang Caiwei. Disparity of charge structure and lightning characteristics in different thunderclouds in Gansu area. *High Voltage Engineering* (in Chinese), 2001, 27 (2): 74~75
- [16] 邵选民,刘欣生.云中闪电及云下部正电荷的初步分析.高 原气象,1987,6:317~325

Shao Xuanmin, Liu Xinsheng. A preliminary analysis of intracloud lightning flashes and lower positive charge of thunderclouds. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1987, **6**:  $317 \sim$ 325

[17] 王道洪, 刘欣生, 王才伟. 甘肃中川地区雷暴地闪特征的初

步分析. 高原气象, 1990, 9 (4): 405~410

Wang Daohong, Liu Xinsheng, Wang Caiwei. A preliminary analysis of the characteristics of ground discharges in thunderstorms near Zhongchuan, Gansu Province. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1990, **9** (4): 405~410

- [18] 郄秀书,刘欣生,张广庶,等.甘肃中川地区雷暴的地闪特征. 气象学报,1998,56(3):312~322
  Qie Xiushu, Liu Xinsheng, Zhang Guangshu, et al. Characteristics of lightning discharge to ground in Zhongchuan area. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1998, 56 (3):312~322
- [19] Qie X, Zhang T, Chen C, et al. The lower positive charge center and its effect on lightning discharges on the Tibetan Plateau. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L05814, doi:10. 1029/2004GL022162
- [20] Qie X, Kong X, Zhang G, et al. The possible charge structure of thunderstorm and lightning discharges in northeastern verge of Qinghai – Tibetan Plateau. Atmospheric Research, 2005, 76: 231~246
- [21] 郭凤霞,张义军,言穆弘. 青藏高原那曲地区雷暴云电荷结构特征数值模拟研究. 大气科学, 2007, 31 (1): 28~36 Guo Fengxia, Zhang Yijun, Yan Muhong. A numerical study of the charge structure in thunderstorm in Nagqu area of the Qinghai - Xizang Plateau. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, 31 (1): 28~36
- [22] Qie X, Yu Y, Wang D, et al. Characteristics of cloud-toground lightning in Chinese inland plateau. J. Meteor. Soc. Japan, 2002, 80 (4): 745~754
- [23] Pawar S D, Kamra A K. Evolution of lightning and the possible initiation/triggering of lightning discharges by the lower positive charge center in an isolated thundercloud in the tropics. J. Geophys. Res., 2004, 109: D02205, doi: 10.1029/ 2003JD003735
- [24] Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model. J. Geophys. Res., 2002, 107 (D9): D94075, doi: 10.1029/2000JD000244
- [25] Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm. J. Geophys. Res., 2005, 110: D12101, doi: 10.1029/2004JD005287
- [26] Takahashi T. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. J. Atmos. Sci., 1978, 35: 1536~1548
- [27] Jayaratne E R, Saunders C P R, Hallet J. Laboratory studies of the charging of soft-hail during ice crystal interactions. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1983, 109: 609~630
- [28] Jayaratne E R, Saunders C P R. The "rain gush", lightning, and the lower positive charge center in thunderstorms. J. Geophys. Res., 1984, 89: 11816~11818