



# 一次单体雷暴云的穿云电场探测及云内电荷结构

赵中阔, 郅秀书\*, 张廷龙, 张彤, 张鸿发, 王勇, 余勇, 孙宝来, 王怀斌

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和全球环境探测重点实验室, 北京 100029;

③ 成都信息工程学院新技术研究所, 成都 610225

\* 联系人, E-mail: [qiex@mail.iap.ac.cn](mailto:qiex@mail.iap.ac.cn)

2009-01-19 收稿, 2009-06-16 接受

国家自然科学基金(批准号: 40675008)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX-YW-206)资助

**摘要** 自行设计制作了携带 GPS 的强电场探空系统, 可以获取探测路径上的电场垂直分量、温度、相对湿度和 GPS 定位数据. 2008 年夏季, 在地面大气平均电场仪以及一部 X 波段天气雷达的配合下, 在甘肃平凉地区进行了雷暴云内的电场探空实验, 获得了中国内陆高原地区雷暴云内的电场廓线资料. 通过对一次过顶雷暴活跃阶段的探空资料分析, 表明在雷暴云及其下边界存在 4 个电荷区域: 在海拔高度 4.3~4.5 km 之间(云底)存在一个负屏蔽电荷层; 在 4.5~5.3 km 存在一个正电荷区, 对应 3~2 温度层; 在 5.4~6.6 km 存在一个负电荷区, 对应温度-3~-10; 在 6.7~7.2 km 存在一个正电荷区, 对应温度-11~-14. 本文提供的观测结果支持中国内陆高原地区雷暴云内(0 层之上)存在三极性电荷结构, 但下部正电荷区较正常三极性结构要强的结论.

**关键词**

雷暴云  
电场探空  
电荷结构  
中国内陆高原  
起电机制

雷暴云电荷结构一直是大气电学研究的重要内容, 也是雷电发生、发展过程研究的基础. 最早 Simpson 等人<sup>[1,2]</sup>通过穿云观测给出了雷暴云的三极性电荷结构模型, 并被学术界广泛认同和接受. Stolzenburg 等人<sup>[3]</sup>发现在雷暴云顶附近存在一个屏蔽电荷层, 并据此提出了雷暴上升气流区存在四极电荷结构的观点. 但屏蔽电荷由云边界电导率的不连续所致, 在雷暴起电过程中的作用并不显著, 因此四极模型与 Simpson 的三极模型并无本质差异. 总体上来讲, 大部分雷暴云的主要电荷区基本上都呈现出三极性电荷结构特征<sup>[4]</sup>.

近来, 国外雷暴云电特征的研究进入了多种高新技术相结合的阶段, 如美国进行的 STEPS<sup>[5]</sup>和 TELEX<sup>[6]</sup>野外实验计划, 联合了多参数雷达、LMA, 电场探空仪等多种观测手段, 取得了一批研究结果,

并发现了反极性电荷结构的存在<sup>[7,8]</sup>, 即相对常规电荷结构<sup>[3]</sup>, 这类垂直电荷序列的极性发生了反转. 而 Weiss 等人<sup>[9]</sup>研究的一例多单体雷暴, 依据其电结构将雷暴分为 4 个不同的部分, 因而很难对其整体电荷结构进行归类. 不同雷暴甚至同一雷暴的电荷结构差异显著, 呈多样性.

自 20 世纪 80 年代以来, 我国学者通过雷暴地面电场反演推断<sup>[10~13]</sup>, 云闪中和的电荷源定位<sup>[14~18]</sup>、多站同步闪电电场变化测量和地闪电电荷源定位<sup>[19~21]</sup>等多种手段, 对中国内陆高原和青藏高原雷暴的电特征进行了长期的观测和研究, 结果表明: 中国内陆高原地区的雷暴云电荷结构基本呈三极性, 但下部正电荷区(LPCC)分布范围大, 持续时间长, 云内放电主要发生在中部负电荷区与下部正电荷区之间, 使得雷暴云电学特征与常规雷暴又有所不同, 具有

**引用格式:** 赵中阔, 郅秀书, 张廷龙, 等. 一次单体雷暴云的穿云电场探测及云内电荷结构. 科学通报, 2009, 54: 3532~3536

Zhao Z K, Qie X S, Zhang T L, et al. Electric field soundings and the charge structure within an isolated thunderstorm. Chinese Sci Bull, doi: 10.1007/s11434-009-0471-1

一定的地域特殊性. 但由于这些观测都在地面进行, 据此反演得出的结论存在一定的局限性或不完整性, 而利用电场探空进行穿云测量是准确了解该地区雷暴电特征的根本方法. 袁箴等人<sup>[22]</sup>于 1965 年在南京进行过雷暴云内的电场探空测量, 但是由于雷暴云内探空难度大, 对探空仪传感器要求高, 此后 40 余年我国一直没有成功的雷暴云内电场探空, 严重制约了我国对雷暴云内电特征的认识与了解. 罗福山等人<sup>[23]</sup>虽曾制作了双球型电场仪, 但未见到其雷暴云电场探测结果. 为了深入分析中国内陆高原雷暴的电荷结构, 我们自行设计制作了携带 GPS 的强电场探空系统, 并于 2008 年夏季在甘肃省平凉地区进行了雷暴穿云电场观测, 取得了一次较为完整的云内探空结果, 本文基于这一探空资料对雷暴云内的电荷结构进行分析.

## 1 实验设备与场地介绍

强电场探空仪根据电晕放电的原理制作而成<sup>[24]</sup>, 电晕电流测量范围为  $\pm 16 \mu\text{A}$ . 通过室内实验和野外观测对其标定, 得出的电场  $E$  与电晕电流  $I$  的拟合关系为

$$I = 4.8 \times 10^{-3} E(E - E_0), \quad (1)$$

其中  $E_0$  为起晕电场强度.  $I$  的单位为  $\mu\text{A}$ ,  $E$ ,  $E_0$  的单位为  $\text{kV/m}$ . 影响电场-电晕电流关系的因素有探针的倾斜、气流、云滴、湿度和气压<sup>[25]</sup>. 在假设电晕探针倾角为  $15^\circ$ 、气流速度为  $20 \text{ m/s}$  时, 并考虑到云滴和相对湿度变化等因素的共同作用, 电晕电流测量的相对误差估计约为  $21\%$ <sup>[25]</sup>. 考虑气压作用时, 探空过程中电晕电流-电场的关系可以表达为<sup>[25]</sup>

$$I = 4.8 \times 10^{-3} E(E - E_0)(P_0/P)^{1.5}, \quad (2)$$

其中  $P_0$  为地面气压值,  $P$  为测量处的气压值. 利用 GPS 定位数据和气压-高度公式, 便可求得探空路径上的  $(P_0/P)$ . 在各种极端条件下, 测量误差有可能超过  $50\%$ .

采用电场垂直分量廓线和高斯定理的一维近似, 来计算探空路径上的电荷极性和密度, 电荷密度  $\rho$  的表达式为

$$|\rho| = \varepsilon \left| \frac{\Delta E_z}{\Delta z} \right|, \quad (3)$$

其中  $\varepsilon$  为空气的介电常数 ( $8.86 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ). (3) 式的应

用含有两点假设: (a) 电荷层密度的水平变化可以忽略<sup>[26]</sup>; (b) 探空时段, 空中电场分布不随时间变化<sup>[27]</sup>. 本文中, 由于空中电场由电晕电流反演得到, 而电晕电流的方向与电力线方向相同, 所以若定义向下的电晕电流为正值, 产生正电晕电流时的空中电场也定义为正, 则此时空中电场极性的定义符合大气电学惯例. 在这样的定义下, 探空路径上电荷的极性与电场廓线斜率极性相反. 文中所给高度均指海拔高度(ASL).

以上述强电场探空仪为基础, 通过集成 GPS 模块、电晕电流传感器和温湿度模块, 设计制作了由气球携带的 GPS 强电场探空仪, 图 1 为 GPS 强电场探空仪的结构框图, 各传感器信号经单板机收集整理后, 由中心频率为  $402 \text{ MHz}$ 、发射功率  $200 \text{ mW}$  数字发射机向地面传送数据, 发射天线为圆极化方式. 地面接收天线同样为圆极化方式, 增益为  $8 \text{ dB}$ , 通过数字接收机和计算机 RS232 串口采集记录信号. 这套数字化探空系统, 结构简单, 不易受电磁干扰, 较好地保证了信号的收发.

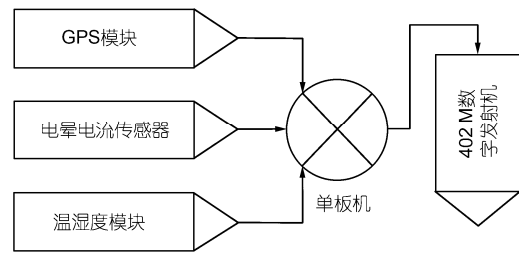


图 1 GPS 强电场探空仪结构框图

探空实验地点选在甘肃省平凉地区 ( $106.59^\circ\text{E}$ ,  $35.57^\circ\text{N}$ , 海拔  $1400 \text{ m}$ ). 图 2 为探空点与雷达站点相对位置与周围地形分布示意图, 从图 2 中可以看出, 探空实验点距离雷达站约  $10 \text{ km}$ ; 实验点西、南两面环山, 北面还有相对高度  $200 \sim 300 \text{ m}$  的塬地, 只有东面为缺口, 呈典型的喇叭口地形, 属冰雹、雷暴的多发地<sup>[28]</sup>, 是定点探空的理想场地. 探空点地面观测设备有一部大气平均电场仪, 来监测雷暴电场的变化. 中国科学院平凉雷电与雹暴实验站 ( $106.69^\circ\text{E}$ ,  $35.57^\circ\text{N}$ ) 一部 X 波段气象雷达提供雷暴发展和移动情况预警, 并以 PPI 和 RHI 回波形式显示.

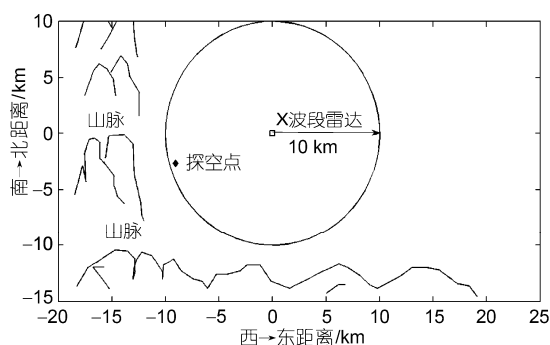


图2 探空点周边地形图

## 2 观测结果及分析

2008 年 7 月 20 日 14:30, 测站西北(六盘山北)生成强对流过程, 并向测站方向移动. 根据地面雷暴电场监测与雷达回波信息, 17:42 释放探空气球. 根据现场目测, 17:45 气球入云. 图 3 为 18:00 时刻 4.6 km 高度层的 PPI 回波图, 图中红色曲线为气球飞行轨迹的水平投影. 由于雷达数据的缺失, 气球到达 4.6 km 高度的时刻为 17:54:30, 而 18:00 气球所在的高度为 5.6 km, 所以探空路径未显示在强回波区域之内. 根据目测和现场记录, 推测气球至少进入了雷暴边缘.

图3 18:00 时刻 4.6 km(ASL)高度 PPI 回波图

红色曲线为探空路径的水平投影

图 4 给出了 7 月 20 号 17:42~18:10 的探空曲线. 探空曲线的高度范围为地面至 7.2 km. 气球升速廓线显示, 在 5.6 km(-4) 以下, 气球升速约 5~6 m/s, 大于气球在静止空气中约 4 m/s 的升速;

5.6 km 之上的气球升速显著减小, 约 2~3 m/s. 这表明 5.6 km 高度之下存在较强的上升气流, 而之上则上升气流较弱、甚至出现了下沉气流. 由于温度传感器可能是焊接过程中受到污染而失效, 图中温度曲线利用了当地气象局 20:00 的探空资料, 因此与实际情况可能存在一定偏差. 由图 4 可知, 在 0℃ 层以下, 2.7~3.3 km 之间存在一正一负两个电荷区, 其中负电荷所在的高度范围为 2.65~2.8 km, 估计的电荷密度约  $-2 \text{ nC/m}^3$ , 正电荷的范围 2.8~3.3 km, 密度约为  $0.6 \text{ nC/m}^3$ , 这两个电荷区电量相当而极性相反, 呈电中性; 推测这对电荷区可能由带电的暖云与近地面的电晕电荷层<sup>[29]</sup>形成, 处于雷暴主体之下. 在 4.3~4.5 km 高度范围内, 存在一个负电荷区, 电荷密度约  $-0.9 \text{ nC/m}^3$ , 综合该区域之上的电场分布情况, 该电荷区应该为一个屏蔽电荷区. 在 4.5~5.3 km 范围内存在一个正电荷区, 密度约为  $0.9 \text{ nC/m}^3$ , 对应 3~-2 温度层. 从 5.4~6.6 km 范围内存在一个负电荷区, 密度约为  $-0.4 \text{ nC/m}^3$ , 对应的温度范围-3~-10; 在 6.7~7.2 km 存在一个正电荷区, 电荷密度约为  $0.4 \text{ nC/m}^3$ , 对应的温度范围-11~-14. 简单计算表明, 上述雷暴云内的电荷分布使得雷暴云整体大体上呈电中性.

可以发现, 0 层之上的 3 个电荷区对应于云内的主要电荷区, 它们的形成可以用目前国际公认的非感应起电机制<sup>[30,31]</sup>进行解释: 当环境温度低于反转温度 RT(reversal temperature, 大概在-10~-15 之间)时, 过高或过低的液态水含量条件下, 下落的软雹与冰晶在回弹碰撞过程中带正电荷, 冰晶带负电荷; 而在适中的液态水含量条件下, 软雹则会获得负电荷, 冰晶带正电荷. 当环境温度高于 RT 时, 软雹在任何液态水含量条件下获得的都是正电荷. 而我们的这次观测个例上部正电荷区所处的温度层结在-11~-14, 推测该电荷区为在适中液态水含量环境中获得正电的冰晶所构成; 下部正电荷区处于 3~-2 之间, 高于反转温度, 带正电荷的软雹构成了此电荷区, 可能是重力作用导致部分软雹下降到 0 层之下; 处于-3~-10 之间的负电荷区, 则由受重力作用从反转温度层之上沉降而来的软雹和上升气流从下部输运来的冰晶共同构成, 而它们均带负电荷.

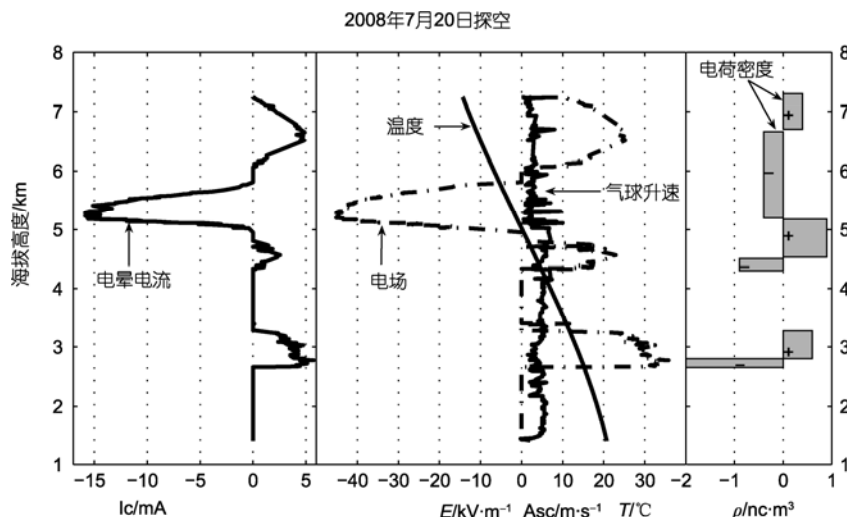


图4 2008年7月20日17:42~18:10(北京时间)的探空廓线  
自左向右依次为电晕电流、电场、气球升速、温度。右边的矩形框代表电荷密度和电荷层厚度

### 3 结论与讨论

本文分析的这次雷暴云内及其下边界存在4个极性交错、垂直排列的电荷区：6.7~7.2 km(−11~−13)之间的上部正电荷区，5.4~6.6 km(−3~−10)高度范围内的负电荷区，4.5~5.3 km范围内下部正电荷区(3~−2)和4.3~4.5 km之间云底附近的一个负屏蔽电荷层。其中，云内的3个电荷区可由所谓非感应起电机[30,31]解释：上部正电荷区温度低于反转温度，由带正电的冰晶形成；下部正电荷区温度高于反转温度，由带正电的软雹形成；中间的主负电荷区是带负电的冰晶和带负电的软雹共同组成。由于下部正电荷区的垂直尺度、强度均较大，因此我们还在其下观测到了一个负屏蔽电荷区的存在，这符合Marshall和Rust[32]提出的云上、下边界普遍存在屏蔽电荷层的观点。由于气球下落，我们没有观测到云上边界屏蔽电荷层的存在，但从形成机制推断应该有这样一个电荷层的存在。

值得指出的是，这次雷暴云内(0层之上)的三极电荷结构显著不同于经典三极性电荷结构[4]，而

与Qie等人[12,13]根据雷暴当顶时的地面电场演化和Cui等人[18]根据云闪中和的电荷源位置所得到的结论一致，即高原雷暴为三极性电荷结构，但是在某些雷暴云中的下部正电荷中心显著偏强。本文探空结果发现的云下边界较强的屏蔽电荷层的存在也与云下部较强的正电荷中心的存在有很大关系。另外，探空结果还显示，这次雷暴的下部正电荷区电荷量大于中部负电荷量，这种相对强弱关系的形成，可能与该雷暴内上升气流的垂直切变有关。从气球升速判断，反转温度层上下上升气流变化明显。反转温度层之下，上升气流强盛，丰富的软雹与冰晶碰撞起电，带正电的软雹沉降分离，产生了一个显著的下部正电荷区，同时带负电的冰晶受上升气流抬升形成中部负电荷区。而反转温度之上，上升气流减弱显著，输运冰晶的能力和带电的软雹、冰晶分离程度均降低，这个区域所产生的带负电的软雹对中部负电荷区的增强作用减弱。在这样的条件下，反转温度层之下起电对中部负电荷区的贡献比重增大，所以导致了下部正电荷区与中部负电荷区相对强弱关系的变化。

### 参考文献

- 1 Simpson G, Scrase F G. The distribution of electricity in thunderstorm. Proc R Soc London Ser A, 1937, 161: 309—352[doi]
- 2 Simpson G, Robinson F G. The distribution of electricity in thunderclouds, 2. Proc R Soc London Ser A, 1941, 177: 281—329[doi]
- 3 Stolzenburg M, Rust W, Marshall T. Electrical structure in thunderstorm convective regions 3. Synthesis. J Geophys Res, 1998, 103: 14097—14108[doi]
- 4 Williams E. The tripole structure of thunderstorms. J Geophys Res, 1989, 94: 13151—13167[doi]

- 5 Lang T J, Miller L J, Weisman M, et al. The severe thunderstorm electrification and precipitation study. *Bull Am Meteorol Soc*, 2004, 85: 1107—1125[[doi](#)]
- 6 Bruning E C, Rust W D, Schuur T J, et al. Electrical and polarimetric radar observations of a multicell storm in TELEX. *Mon Weather Rev*, 2007, 135: 2525—2544[[doi](#)]
- 7 Rust W D, MacGorman D R. Possibly inverted-polarity electrical structures in thunderstorms during STEPS. *Geophys Res Lett*, 2002, 29 [[doi](#)]
- 8 MacGorman D R, Rust W D, Krehbiel P, et al. The electrical structure of two supercell storms during STEPS. *Mon Weather Rev*, 2005, 133: 2583—2607[[doi](#)]
- 9 Weiss S A, Rust W D, MacGorman D R, et al. Evolving complex electrical structures of the Steps 25 June 2000 multi-cell storm. *Mon Weather Rev*, 2008, 136: 741—756[[doi](#)]
- 10 叶宗秀, 邵选民, 刘欣生. 雷暴云的电场及电荷分布模式. *高原气象*, 1987, 6: 234—243
- 11 Qie X, Kong X, Zhang G, et al. The possible charge structure of thunderstorm and lightning discharges in northeastern verge of Qinghai-Tibetan Plateau. *Atmos Res*, 2005, 76: 231—246[[doi](#)]
- 12 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 [[doi](#)]
- 13 Qie X, Zhang T, Zhang G, et al. Electrical characteristics of thunderstorms in different plateau regions of China. *Atmos Res*, 2009, 91: 244—249[[doi](#)]
- 14 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
- 15 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: 500—504
- 16 郝秀书, 余晔, 张广庶. 云闪的 K-型击穿过程的观测研究. *自然科学进展*, 2000, 10: 333—337
- 17 张义军, 董万胜, 赵阳, 等. 青藏高原雷暴电荷结构和闪电云内过程的辐射特征研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33: 101—107
- 18 Cui H, Qie X, Zhang Q, et al. Intracloud discharge and the correlated basic charge structure of a typical thunderstorm in Zhongchuan, a Chinese inland plateau region. *Atmos Res*, 2009, 91: 425—429[[doi](#)]
- 19 郝秀书, 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: 312—322
- 20 Zhang T, Qie X, Yuan T, et al. Charge source of cloud-to-ground lightning and charge structure of a typical thunderstorm in the Chinese inland Plateau. *Atmos Res*, 2009, 92: 475—480[[doi](#)]
- 21 郝秀书, 张广庶, 孔祥贞, 等. 青藏高原东北部地区夏季雷电特征的观测研究. *高原气象*, 2003, 22: 209—216
- 22 袁箴, 蒋本汤, 任丽新, 等. 强电场探空仪及雷雨云电场探测结果的分析. *气象学报*, 1965, 35: 440—448
- 23 罗福山, 庄洪春, 何渝晖, 等. 球载双球式电场仪及其应用. *地球物理学报*, 1999, 42: 772—777
- 24 赵中阔, 郝秀书, 张广庶, 等. 雷暴云内电场探测仪及初步实验结果. *高原气象*, 2008, 27: 881—887
- 25 周诗健, 任丽新, 陈立祥. 强电场探空仪尖端感应元件的实验研究. *地球物理学报*, 1965, 14: 20—32
- 26 Stolzenburg M, Marshall T. Testing models of thunderstorm charge distributions with Coulomb's law. *J Geophys Res*, 1994, 99: 25921—25932[[doi](#)]
- 27 Marshall T, Rison W, Rust W, et al. Rocket and balloon observations of electric field in two thunderstorms. *J Geophys Res*, 1995, 100: 20815—20828[[doi](#)]
- 28 黄美元, 许华英. 云和降水物理. 北京: 科学出版社, 1999. 144
- 29 Stolzenburg M, Rust W, Marshall T. Electrical structure in thunderstorm convective regions 2. Isolated storms. *J Geophys Res*, 1998, 103: 14079—14096[[doi](#)]
- 30 Takahashi T. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. *J Atmos Sci*, 1978, 35: 1536—1548[[doi](#)]
- 31 Pereyra R G, Avila E E, Castellano N E, et al. A laboratory study of graupel charging. *J Geophys Res*, 2000, 105: 20803—20812[[doi](#)]
- 32 Marshall T, Rust W. Electric field soundings through thunderstorms. *J Geophys Res*, 1991, 96: 22297—22306[[doi](#)]