

地闪先导通道中电荷分布的数值模拟*

余 晔 郅秀书**

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

摘要 将雷暴云电荷结构与闪电先导的发展相联系, 模拟计算了不同雷暴云电荷结构下, 先导通道中的感应电荷量. 结果表明: 随先导接近地面, 通道中感应电荷密度不断增加, 在先导通道接地瞬间, 其通道中的总正(负)电荷量约为 0.2~1.6 C, 通道中平均感应电荷线密度约为 0.08~0.35 mC/m. 感应电荷密度大小虽然随不同的雷暴云电荷结构有所变化, 但仅由感应电荷无法解释先导通道中的电荷量, 通道中的主要电荷来源为云内电荷的转移.

关键词 雷暴 地闪 先导 感应电荷密度

先导是对地闪电(地闪)的始发阶段, 也是地闪中的两个主要物理过程之一. 由于先导过程在闪电物理和雷电防护研究中的重要性, 近年来对它的研究日益增多^[1,2]. 但由于缺少直接测量先导通道中电荷量的有效方法, 目前还没有电荷在先导通道中沉积的直接证据. 本文将雷暴云电荷结构与地闪先导的发展相联系, 利用双向不荷电先导概念模型, 讨论了雷暴成熟期地闪先导的发展演变, 对先导通道中的电荷分布进行了数值模拟计算, 并探讨了先导通道中电荷的可能来源.

1 模式

模式由一个雷暴云二维轴对称电荷模型和一个近地面电晕离子演化的二维时变模式组成, 并利用了 Kasemir^[3]提出的双向不荷电先导概念模型, 它将先导通道看作环境电场中的导体, 极性相反的先导从电场中汲取能量并沿相反方向传输, 而整个先导系统为电中性.

1.1 雷暴云二维轴对称电荷模型

雷暴云的二维轴对称电荷模型示于图 1. 假定主电荷均匀分布于半径为 5 km 的垂直圆柱中, -80C 的主负电荷区位于 2 km(雷暴云底)和 9 km 之间, 而 +50C 的主正电荷区位于 9 km 和 12 km(雷暴云顶)之间, 区域电荷密度分别为 -0.18 nC/m^3 和 0.21 nC/m^3 ^[4]. 由云中强上升气流而形成的半径为 0.5 km 的高荷电中心由一个小的 +3C 的正电荷中心(位于云底和 5 km 之间, 电荷密度为 1.3 nC/m^3)和一个小的 -10C 的负电荷中心(位于 5 km 和 9 km 之间, 电荷密度为 -3.2 nC/m^3)组成.

2000-10-09 收稿, 2000-12-02 收修改稿

* 中国科学院资源环境领域知识创新工程重要方向项目(批准号: KZCX2-201)和国家自然科学基金(批准号: 49975003)项目资助

** 联系人, E-mail: qiex@ns.lzb.ac.cn

1.2 近地面电晕离子演化的二维时变模式

近地面电晕离子演化的二维时变模式在原有一维时变模式^[5]的基础上发展而来,由各类离子的连续性方程和 Poisson 方程组成,计算方程组为

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_i}{\partial t} &= -\beta_{i0}n_iN_0 - \beta_{ij}n_iN_j - \alpha n_i n_j - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{i1}E_z n_i - D \frac{\partial n_i}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(E_{i1}E_r n_i - D \frac{\partial n_i}{\partial r} \right) - \\ &\quad \frac{1}{r} \left(E_{i1}E_r n_i - \frac{\partial n_i}{\partial r} \right), \\ \frac{\partial N_i}{\partial t} &= \beta_{i0}n_iN_0 - \beta_{ij}n_iN_j - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{i2}E_z N_i - D \frac{\partial N_i}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(K_{i2}E_r N_i - D \frac{\partial N_i}{\partial r} \right) - \\ &\quad \frac{1}{r} \left(E_{i2}E_r N_i - \frac{\partial N_i}{\partial r} \right), \\ \frac{\partial N_0}{\partial t} &= \beta_{ij}n_iN_j + \beta_{ji}n_jN_i - \beta_{i0}n_iN_0 - \beta_{j0}n_jN_0 + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial N_0}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(D \frac{\partial N_0}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (DN_0) \\ \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} &= - (e/\epsilon_0)(n_i + N_i - n_j - N_j) = - \rho_c/\epsilon_0, \end{aligned}$$

式中 n, N 和 N_0 分别为小离子、大离子和中性气溶胶粒子的数密度. i, j 为 + 或 -. 地面自然尖端产生的电晕离子作为边界条件引入,电晕电流密度 J_c 与地面电场 E 的关系为^[6]

$$J_c = C_0(E - E_0)^2 E,$$

E_0 为产生电晕放电的电场阈值, C_0 为常数. 上述各式中参数的取值见文献^[5].

假设先导起始于 5 km 高度处,并沿对称轴垂直向上、向下发展,且具有均匀电势 ϕ_0 ,那么先导通道某高度 z 处的线电荷密度 $q(z)$ 与云电势 $\phi(z)$ 成正比;由于先导接地之前,通道中的净电荷量为零,因此通道电势 $\phi_0 = \frac{1}{z_u - z_l} \int_{z_l}^{z_u} \phi(z) dz$ (其中 z_u

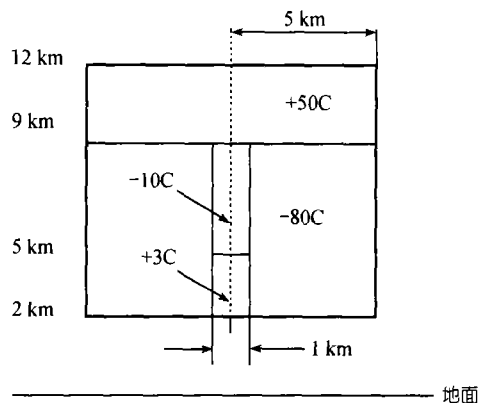


图 1 雷暴云二维轴对称电荷模型

和 z_l 分别为通道上、下端所在高度). 利用 Gauss 定理可得通道表面感应电荷线密度 $q(z)$ 与空间电势 $\phi_r(z)$ 的关系: $q(z) = (\phi_0 - \phi_r(z)) \cdot 2\pi\epsilon_0/\ln(r/r_0)$. 计算中假设通道顶端附近区域电场强度大于 1.5×10^5 V/m 时,先导可持续传播,否则将停止传播^[7]. 模拟区域径向和垂直方向均为 25 km,网格距为 50 m,时间步长为 0.5 ms. 为了较精确地求出通道附近区域的电势分布以便计算通道上的感应电荷密度 $q(z)$,在先导通道附近半径为 200 m 的范围内用 1 m 的细网格进行计算. 数值计算采用奇偶排序对方程进行迭代求解.

2 计算结果

2.1 雷暴云对称轴上电势和垂直电场廓线

云电势的分布形式在静电闪电理论中有非常重要的作用,它反映了雷暴云内电能的分布,决定了闪电放电过程从云中获取能量的方式. 图 2(a)给出了二维轴对称云电荷模型中对称轴

上电势的垂直廓线. 由图可见云电势在地面为零, 随着高度的增加迅速向负值方向增大, 并在进入云层后不久达到负的极大值, 随后云电势开始减小并在约 9.6 km 高度处减小为零. 在 9.6 km 以上的正电荷区电势先随高度向正值方向增加, 并在约 12 km 处达到正的极大值, 随后云电势开始减小直至达到稳定值 300 kV. 图 2(b) 给出了相应的垂直电场廓线(定义头顶为正电荷时, 地面电场为负值). 由图可见, 云内电场在 5 km 和 9 km 两个高度上有极大值, 这两个高度是正、负电荷区的交界处, 最大场强可达 1.2×10^5 V/m.

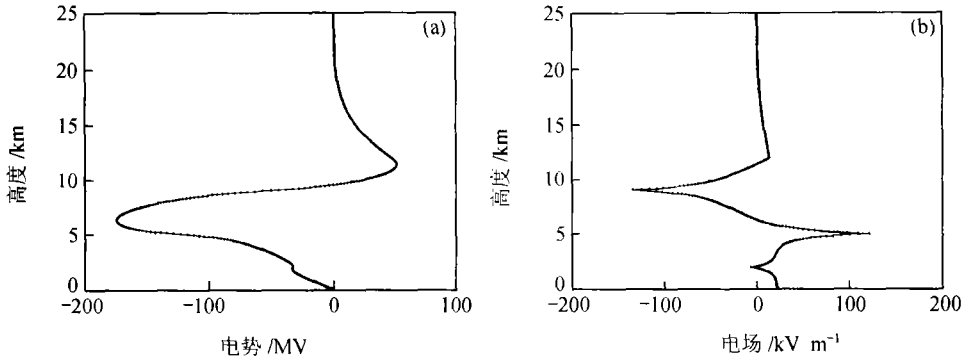


图 2 二维轴对称云电荷模型中对称轴上电势(a)和电场(b)廓线

2.2 先导通道上电势和通道中电荷密度的演变

图 3(a) 给出了考虑近地面空间电荷层时, 先导发展过程中通道所在位置不同时刻电势垂直廓线的模拟结果. 先导起始时刻假定为零时刻, 图中曲线 1 对应 5 ms 时刻的模拟结果, 相邻两条曲线之间的时间相隔为 5 ms. 由图可见, 在先导通道两端沿先导传播方向其电势迅速接近云电势. 电势的这种变化趋势使先导头部附近区域能够保持足够高的电位差, 以维持通道两端的击穿条件. 在先导传播过程中由于通道的纵向伸展使其电势逐渐降低, 在第 7 步时上行正先导停止传播. 当下行负先导到达地面时, 正先导头部所在高度约为 8.6 km. 与图 2(a) 比较, 可以发现此高度与零电势高度接近.

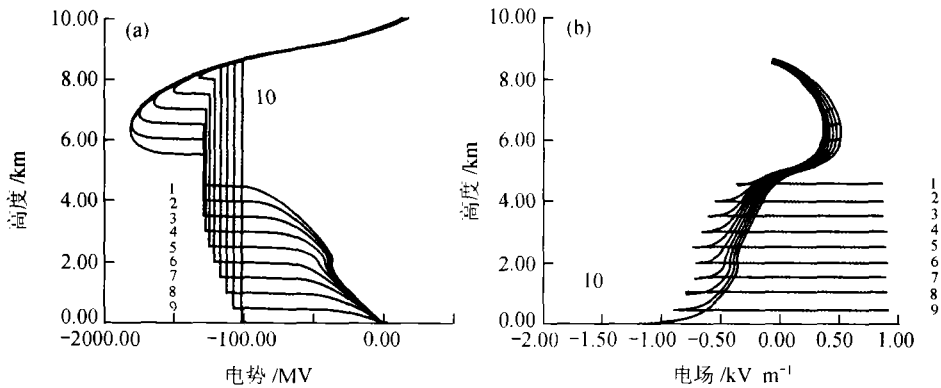


图 3 先导发展过程中通道中电势(a)和电荷密度(b)的演变

图 3(b)给出了与图 3(a)相应时刻先导通道感应电荷密度的模拟结果. 由图可见, 在先导发展过程中, 感应电荷密度不断增加, 其变化基本上跟随云内电势的变化趋势, 只是在通道两端有显著偏离. 先导接地时, 通道中的总正(负)电荷量 $|Q|$ 约为 1.6 C, 通道中的平均电荷线密度 q 约为 0.35×10^{-3} C/m.

2.3 不同雷暴云电荷结构下先导通道上的感应电荷密度

本节选取 4 种典型的雷暴云电荷结构, 对整个先导通道的平均感应电荷密度分别进行计算, 结果示于表 1. 计算表明对于不同的雷暴云电荷结构, 先导通道平均感应电荷线密度 q 约为 $(0.08 \sim 0.34) \times 10^{-3}$ C/m, 先导接地瞬间通道中的总正(负)电荷量 Q 约为 0.2 ~ 1.6 C, 与上节得到的结果接近. 这一结果比以往研究者所给出的一个发展完全的梯级先导通道中的电荷线密度 10^{-3} C/m 小一个量级^[8], 表明在通常情况下仅由通道上的感应电荷无法解释先导通道中的平均电荷量.

表 1 不同雷暴云电荷结构下先导通道中平均感应电荷密度对比

地区	雷暴云特征区域高度 ^{a)} /km				区域电荷密度/nC·m ⁻³			$ Q /C$	$q/mC \cdot m^{-1}$
	z_1	z_2	z_3	z_4	主正电荷区	主负电荷区	下部小正电荷区		
南非 ^[8]	2	5	8	12	0.13	-0.08	4.2	0.84	0.21
日本 ^[8]	2	4	7	10	0.51	-0.31	3.82	1.06	0.34
兰州 ^{[9]1)}	1	2	6	9	0.1	-0.1	4.0	0.24	0.14
南昌 ¹⁾	2	5	9	12	0.1	-0.1	0.0	0.35	0.08

a) z_1 : 雷暴云底所在高度; z_2 : 云底小正电荷区与主负电荷区交界处所在高度; z_3 : 主正电荷区与主负电荷区交界处所在高度; z_4 : 雷暴云顶所在高度

先导通道中的电荷源除感应电荷外, 还有通道边缘的电晕电流和云中电荷的转移. Heckman 等^[10]的模式计算表明通道的电晕电流比闪电放电任一阶段由通道纵向伸展所产生的电流都小得多. 对于梯级先导, 最大电晕电流约为 3A, 若取梯级先导的平均传播速度 10^5 m/s, 则相应的通道平均电荷线密度为 0.3×10^{-4} C/m, 此值比这里模拟得到的感应电荷密度还要小一个量级. 由此推断先导通道中的电荷大部分来源于第 3 种电荷源, 即云中电荷的转移.

3 结论和讨论

本文利用雷暴云二维轴对称电荷模型, 模拟计算了雷暴云对称轴上电势和垂直电场的分布. 与双向不荷电先导概念模型结合, 考虑近地面电晕离子的作用, 模拟计算了先导发展过程中通道上电势及感应电荷密度的演变. 模拟计算结果表明, 随先导接近地面, 通道上的电势逐渐降低; 感应电荷密度逐渐增加. 对于不同的雷暴云电荷结构, 先导接地瞬间通道中的总正(负)电荷量约为 0.2 ~ 1.6C, 接地前通道中的平均感应电荷线密度约为 $(0.08 \sim 0.35) \times 10^{-3}$ C/m. 此值比一个发展完全的先导通道中的平均线电荷密度小近一个量级. 由此推断先导通道中的电荷主要来源于云中电荷的转移, 而由雷暴电场在先导通道上产生的感应电荷以及通道附近水成物的电晕放电及离子漂移产生的电荷约占通道中总电荷量的 3% ~ 30%.

1) 张义军. 强风暴中动力和电过程的观测与模式研究. 中国科学院兰州高原大气物理研究所博士论文, 1998

参 考 文 献

- 1 Lalonde P, et al. Leader properties determined with triggered lightning techniques. *J Geophys Res*, 1998, 103: 14109
- 2 王才伟, 等. 空中触发闪电的下行先导及其接地行为. *高原气象*, 1998, 17: 24
- 3 Kasemir H W. A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge. *J Geophys Res*, 1960, 65: 1873
- 4 Mazur V, et al. Model of electric charges in thunderstorms and associated lightning. *J Geophys Res*, 1998, 103: 23299
- 5 Qie X, et al. The influence of ion attachment on the vertical distribution of electric field and charge density underneath thunderstorm. *Ann Geophysicae*, 1994, 12: 1218
- 6 Jhwar D S, et al. Point-discharge current through small trees in artificial field. *J Atmos Terr Physics*, 1967, 29: 1459
- 7 Griffiths R F, et al. A model for lightning initiation arising from positive corona streamer development. *J Geophys Res*, 1976, 81: 3671
- 8 Uman M A. *The Lightning Discharge*. Orlando: Academic Press, Florida, 1987
- 9 郗秀书, 等. 甘肃中川地区雷暴的地闪特征. *气象学报*, 1998, 56: 312
- 10 Heckman S J, et al. Corona envelopes and lightning currents. *J Geophys Res*, 1989, 94: 13287