

双层均匀口袋电荷模型下闪电起放电特征的数值模拟研究

罗林洁^{1,2}, 谭涌波^{1*}, 郑天雪^{1,2}

1 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室/气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏南京 210044

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘要 大量基于观测的研究认为闪电通道的延展尺度与电荷的分布形态息息相关, 强对流区频繁始发的小尺度闪电对应雷暴云内的背景电荷很有可能为“口袋电荷”的分布模式。为验证口袋电荷背景下能形成此类云闪并给出该电荷背景下闪电起、放电的一般规律, 本研究将闪电放电参数化方案植入到双层均匀口袋电荷模型中开展了大量随机模拟试验。模拟过程中固定了电荷区的总尺度, 通过改变电荷对数进行探讨, 着重讨论各电荷背景下闪电起始和放电行为的异同。模拟结果表明 (1) 随着电荷对数的增加, 闪电启动需要的电荷浓度和电荷总量均增加。(2) 小电荷区的水平垂直尺度比是影响闪电起始行为的关键因子, 除此之外各电荷背景下闪电起始位置和启动概率在水平、垂直方向上的差异还与多对电荷的空间配置关系和逃逸击穿阈值有关。(3) 闪电的水平、垂直范围和面积均与小电荷区的尺度息息相关, 小电荷区的几何特征限制了闪电的空间特征。(4) 电荷区的分布也显著影响着闪电的发展形态, 各电荷背景下闪电初始先导角度的分布范围和集中区域有所差异。相较于电荷区倾向于为扁平椭圆形的情况, 当电荷区垂直与水平尺度相等时, 初始先导角度变化范围明显增大, 水平发展的个例明显增多。

关键词 数值模拟, 小尺度闪电, 电荷分布模式, 口袋电荷, 起始位置, 闪电面积

文章编号 **中图分类号** P427.3 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2209.22078

收稿日期 2022-05-12; **网络预出版日期**

作者简介 罗林洁, 女, 1998 年 7 月出生, 硕士研究生, 主要从事雷电物理及模式研究。E-mail: L18651890615@163.com

通讯作者 谭涌波, E-mail: ybtan@ustc.edu

资助项目 国家重点研发计划项目 2017YFC1501504, 国家自然科学基金项目 41875003, 灾害天气国家重点实验室开放课题 2019LASW-A03

Funded by National Key Research Development Program of China (Grant 2017YFC1501504), National Natural Science Foundation of China (Grant 41875003), Open Research Program of the State Key Laboratory of Severe Weather (Grant 2019LASW-A03).

Numerical simulation of the initiation and discharge characteristics of lightning under the double-layer uniform pocket charge model

LUO Linjie^{1,2}, TAN Yongbo^{1,*}, ZHENG Tianxue^{1,2}

1 China Meteorological Administration Aerosol-Cloud-Precipitation Key Laboratory/ Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/ Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract A large number of studies based on observation have proposed that the extension scale of lightning channels is closely related to the charge distribution pattern, and these small and frequent lightning in the strong convection area is likely to be formed in the pattern of charge pockets. In order to verify that such cloud flashes can be formed under the background of pocket charge, and give the general law of lightning initiation and discharge under this charge distribution pattern, in this study, the lightning discharge parameterization scheme was coupled into the double-layer uniform pocket charge model, and a large number of random simulation tests were carried out. The total dimension of the charge region was fixed while changing the pairs of charge region in the simulation process to discuss the similarities and differences of lightning initiation and discharge behavior under each charge background. Simulation results indicate that (1) With the increase of charge pairs, the charge concentration and the total charge quantity for lightning start-up both increase. (2) The axial ratio of each small charge region is the key factor affecting the lightning initiation behavior. In addition, the spatial configuration relationship of multiple pairs of charges and the runaway breakdown threshold, these two key factors also make the lightning starting position and probability different in the horizontal and vertical directions in each case. (3) The spatial characteristics of lightning are limited by the geometric characteristics of small charge region. (4) Besides, the distribution of charge region significantly affects the development shape of lightning. Under each charge background, the distribution range and concentration area of initial leader angle are different. Compared with the previous charge structure(flat ellipse), when the vertical and horizontal radius of the small charge region are equal, the variation range of initial leader angle is significantly increased, and the

number of horizontal development cases is significantly increased.

Keywords Numerical simulation, Pocket lightning, Charge distribution pattern, Pockets charge, Initial position, Flash Size

1 引言

云闪是发生在大气中的一种强烈放电现象，闪电辐射源定位技术和甚高频闪电探测技术的应用与发展逐渐揭示了闪电的放电特征，为人们理解闪电放电行为与雷暴云动力学、微物理学间的相互关系提供了重要的理论基础（例如：Shao and Krehbiel, 1996; 董万胜等, 2003; Qie et al., 2009; Qiu et al., 2009; Lu et al., 2009; Wu et al., 2015）。强对流区的闪电具有启动频繁，持续时间短，水平范围小等特点（Calhoun et al., 2013; Zheng and MacGorman et, 2016; Zhang et al., 2017）受到了人们的广泛关注。已有研究表明，闪电的类型取决于雷暴云内正负电荷的分布情况，电荷结构与强上升气流，温度，相对湿度等因素密切相关（Sun et al., 2002; 郭凤霞等, 2003, 2007; Zheng et al., 2008; Zhou and Guo, 2009）。受强上升气流、风切变、夹卷等的影响（Zhang et al., 2017），上升气流区附近的电荷结构更加复杂，部分区域可能会出现许多“口袋电荷”（不同极性电荷呈现紧凑和相对混乱的分布）。此外湍流也被认为可能是产生零碎的“口袋电荷”的机制之一（Mareev and Dementyeva, 2017）。

随着云闪放电特征与雷暴电荷结构之间关系的研究加深，人们逐渐将闪电通道的延伸扩展与“口袋电荷”联系在一起。Bruning and MacGorman（2013）最早提出“口袋电荷”的概念，他们简单讨论了层状电荷分布模式下和口袋电荷分布模式下闪电通道的扩展情况和闪电起始要求的最小电荷浓度，指出以往的层状分布模式（电荷区水平尺度大、范围大）并不适用于描述强对流区的闪电，至少在水平方向上需要增加电荷极性的变化，且在口袋电荷的分布模式下产生能够始发闪电的强电场需要更大的电荷浓度（每块电荷区体积小，存储电荷量小）。随后，Calhoun et al.（2013）对比了超级单体雷暴和普通弱雷暴与上升气流有关的闪电行为，进一步证实两种雷暴的电荷结构存在明显差异。Zheng and MacGorman et（2016）具体就闪电的启动特征进行了详细的探讨，他们根据Lemon and Doswell（1979）给出的超级单体风暴的平面基本结构图比较了平面不同区域闪电的起始密度、起始高度、辐射源密度、面积等参量的差异，认为前砦区域以平流引起的大尺度的、水平延伸广的电荷为主，倾向于大闪电的产生，而在风切变的作用下，后、右、Z_{DR}弧覆盖区域以口袋电荷为主，倾向于产生小闪电。Zhang et al.（2017）进一步比较了上升气流周围和前砦区闪电尺度和起始密度的垂直分布情况，给出不同区域不同电荷分布模式形成的更多可能因素（夹卷、重力分离等）。此外，电荷区的分布形态对闪电初始先导属性也有显著影响。Zheng et al.（2018）统计了强

弱运动学区域始发的初始先导的诸多特征，从电荷分布形式的角度解释了超级单体强动力区始发的闪电其初始先导具有速度小、发展方向多样、位移距离短等特点的成因。大量基于观测的研究都提出雷暴云内强动力区的电荷很有可能为口袋电荷的分布模式。

上述研究都尝试将闪电起始行为和放电特征与电荷结构结合起来进行探讨，并用“口袋电荷”解释了该电荷背景下起始的闪电的一些特性，但“口袋电荷”这一概念只是诸多学者基于观测到的闪电行为的推测，更无法仅通过观测结果来深入分析云闪放电特征与雷暴电荷分布之间的关系，产生小尺度闪电的云中电荷结构特征如何定义？这些闪电启动、传播的特征又与电荷结构的哪些参量息息相关？这些问题难以通过观测证实，而模式的优势在于它可以给出模拟域中任一位置处的任一物理量进而解释一些现象，因此有必要开展相应的数值模拟研究对上述问题进行补充分析。本文基于课题组已有的二维高分辨率（十米量级）云地闪放电参数化方案和构建的双层均匀电荷模型，探讨哪些位置容易始发闪电，比较不同电荷分布形式下的闪电放电特征参量，以期在强对流区始发闪电的起始特征和传播行为方面给出一些规律，深化对电荷结构的认知。

2 模式介绍

采用谭等人的放电参数化方案（谭涌波, 2006; Tan et al., 2006），大量研究表明该放电参数化方案可以产生所有主要类型的闪电，包括云闪、地闪和上行闪电，能比较好的模拟闪电放电的宏观特征（Tan et al., 2006, 2007, 2014, 2016, 2019; 林辉等, 2018; 王艺儒等, 2020; 郑天雪等, 2022）。下面简要介绍原有的二维模型及其改动和雷暴背景电荷的设置。

2.1 闪电放电参数化方案

本节主要介绍云闪的起始、传播、终止几个方面的设置和相关改动，具体参数选择参考 Mansell et al.（2002）和 Tan et al.（2006）。

闪电的起始拟采用两种方式：一种为传统的水凝物粒子单点击穿，本研究中常规击穿阈值取 500 kV/m，该值高于飞机穿云试验、气球探空等得到的观测结果（Winn et al., 1974; Dye et al., 1988; Marshall and Rust, 1991）；一种为高能粒子逃逸击穿，逃逸电子无损场的选择我们参照 Marshall et al.（1995）给出的随高度变化的阈值公式，根据后续多位研究学者通过探空实验记录的闪电发生前的环境电场值进行了调整（Symbalisty et al., 1998; Dwyer, 2003; Stolzenburg et al., 2007）。本研究选择的高能粒子逃逸击穿方式起始闪电的起始阈值 E_{init} 如下：

$$E_{init}(z) = \pm 300(1.208 \exp(-z/8.4)) \quad (1)$$

其中, E_{init} 单位为 kV/m, z 为海拔高度 (单位 km), $(1.208\exp(-z/8.4))$ 代表空气密度项, 在较低的气压和空气密度下, 自由电子的平均自由程变长且先导尖端的流光区更大 (Edens et al., 2014), 碰撞其他粒子的几率更小, 更容易击穿, 逃逸击穿阈值随高度的增加而减小。逃逸子域 (RS) 的大小设置为 $1.5 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$, 当该范围内各点的电场强度超过逃逸击穿阈值时, 区域的中心点视作一个可能的起始点 (Gurevich et al., 1992; Solomon et al., 2001)。

考虑到本文采用多对电荷的分布形式以及击穿阈值随高度递减, 在开展电荷浓度增大的敏感性实验中, 在不同高度处均有可能出现满足击穿条件的初始点, 在这些可能初始点中如何选取启动点, 是本研究的一个关键问题。为了表征不同高度空气稀薄程度对闪电启动的影响并体现一定的随机性, 本文采用相对值随机起始的方式, 即超过所在高度击穿阈值的比例越高, 则该点闪电启动的概率越大, 公式如下 (p_i 为概率, F 为归一化函数, E_i 为空间每个点的电场强度, 单位为 kV/m) :

$$p_i(E) = \begin{cases} 1/F \left(|(E_i - E_{init})/E_{init}| \right) & |E_i| > |E_{init}| \\ 0 & |E_i| \leq |E_{init}| \end{cases} \quad (2)$$

$$F = \sum_k \left(|(E_i - E_{init})/E_{init}| \right) \quad (3)$$

闪电起始后, 正、负先导沿着电场线双向传播, 本研究中闪电的传播阈值也选用随高度递减的设置方式, 考虑正、负先导的不对称性 (Williams, 2006; Montanya et al., 2015; Qie et al., 2017; Kostinskiy et al., 2018), 参考 Syssoev et al. (2020) 先导传播阈值的设置, 假定不同极性下电场阈值差异系数为 0.8, 下式给出正负先导在逃逸击穿域 (RS) 内、外的传播阈值 (E_{critN} 代表负先导传播阈值, E_{critP} 代表正先导传播阈值, 单位均为 kV/m) :

$$\begin{cases} E_{critN} = E_{init}, E_{critP} = 0.8E_{critN} & \text{RS内} \\ E'_{critN} = 2E_{init}, E'_{critP} = 0.8E'_{critN} & \text{RS外} \end{cases} \quad (4)$$

后继通道点的选取、闪电通道的扩展、放电通道的处理参考 Mansell et al. (2002) 的做法。当先导通道发展至模拟域边界或先导通道与其周围环境之间的电场强度的绝对值不满足传播阈值时, 先导停止传播, 放电终止。

2.2 背景电荷的设置

本研究中为探讨口袋电荷分布形式下闪电起始及放电行为特征, 参考超级单体辐射源密度的高度分布图和雷达体扫图, 调研主上升气流区域的尺度范围以及超级单体雷暴中的电荷区高度 (张亚军等, 2004; Calhoun et al., 2013; Davies-Jones, 2015; Zheng and MacGorman, 2016; Zhang et al., 2017)

作为建立模型的依据。构建大小为 $30\text{ km}\times 20\text{ km}$ 的模拟域，其中电荷区大小为 $12\text{ km}\times 6\text{ km}$ ，闪电放电模块的空间分辨率为 10 m 。设置均匀分布的、紧挨的双层电荷结构，分别进行电荷对数为 1、2、3、4 的模拟，不同电荷结构下，电荷区的总尺度保持不变。本研究所采用的几种雷暴背景电荷配置的示意图如图 1 所示。

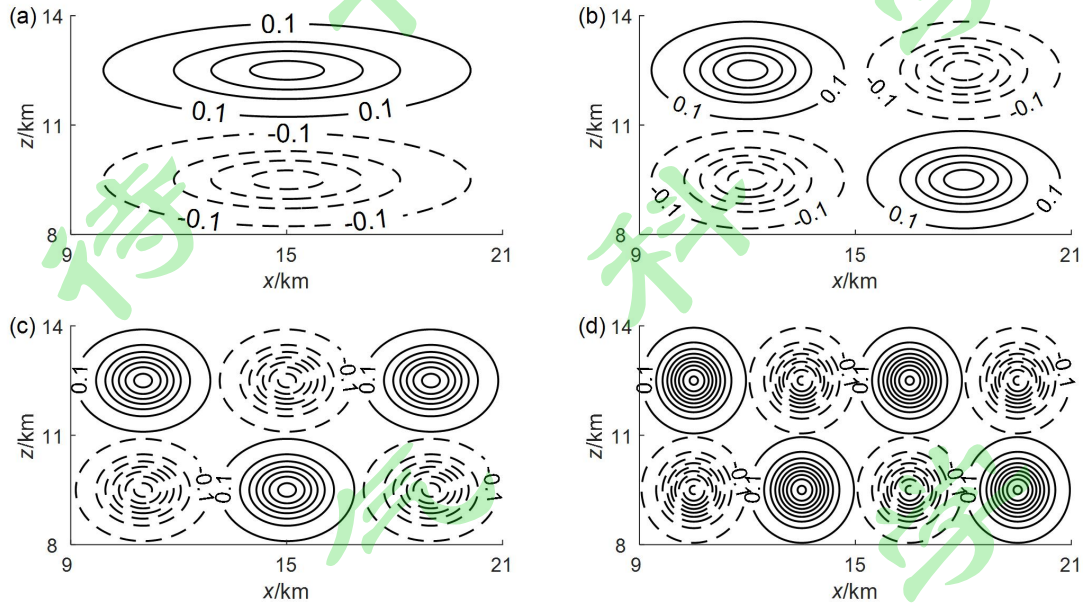


图 1 雷暴背景电荷示意图。(a)-(d)分别给出电荷对数为 1、2、3、4 时的背景电荷分布。图中黑色等值线代表正电荷区，虚线代表负电荷区，电荷浓度等值线从 $\pm 0.1\text{ nC/m}^3$ 开始，间隔为 0.5 nC/m^3 。

Fig. 1 Schematic diagram of thunderstorm background charge. (a)-(d) give the distribution of background charge when the pairs of charge regions are 1, 2, 3 and 4 respectively. Black solid lines are for positive charge and dashed lines are for negative charge with contour values starting at $\pm 0.1\text{ nC/m}^3$ with intervals of 0.5 nC/m^3 .

雷暴云内各个电荷区呈椭圆形，每种背景电荷配置下各小电荷区的形状相同、电荷浓度一致。小电荷区的电荷浓度在其中心处最大，并由中心向外指数递减，呈高斯分布。电荷浓度分布的具体公式如下：

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-4\left((x-x_0)^2/r_x^2 + (z-z_0)^2/r_z^2\right)\right) \quad (5)$$

其中， ρ_0 为小电荷区中心最大电荷浓度（单位 nC/m^3 ），该值可以表征电荷区整体电荷浓度情况。 x_0 和 z_0 为小电荷区中心点坐标， r_x 和 r_z 分别为小电荷区的水平和垂直半径，单位均为 km 。当电荷浓度衰减至 0.1 nC/m^3 ，设定此处为小电荷区的边界。不同电荷结构下闪电模拟的具体参数如表 1 所示。

149 表 1 雷暴背景电荷的配置情况

150 Table 1 Parameters of thunderstorm background charge configurations

电荷对数	水平半径 r_x (km)	垂直半径 r_z (km)	起始电荷浓度 ρ_{init} (nC/m ³)	最优电荷浓度 ρ_{optim} (nC/m ³)
1	6	1.5	1.4	1.8
2	3	1.5	1.9	2.4
3	2	1.5	2.6	3.3
4	1.5	1.5	3.3	4.2

151 表 1 给出了电荷对数不同时电荷的具体参数。区域的总电荷量由小电荷区的 r_x 、 r_z 、 ρ_0 和个数
152 共同决定，且变量之间相互独立。除此之外，表 1 还给出了起始电荷浓度 ρ_{init} ，该浓度是指各电荷背
153 景下刚好满足闪电起始条件时的中心最大电荷浓度，通过模拟实验逐次调整获得，记录该电荷浓度
154 下空间的电场强度 E_{maxi} （单位 kV/m）；最优电荷浓度 ρ_{optim} 为在 ρ_{init} 的基础上，以 0.1nC/m³ 为步长
155 不断增加中心电荷浓度值，直至模拟域出现电场强度为 $1.3E_{maxi}$ 时对应的中心最大电荷浓度。
156 本文的重点为敏感性实验，并给出口袋电荷特征与闪电启动以及传播特征之间的关系，为了探讨这
157 些参量之间的关系，需选取一个能有较多空间点同时满足启动条件的情况，并开启大量的随机模拟
158 试验，又需保证空中电场不至于远超起始阈值而与实际情况差别过大，因此选取了这个最优电荷浓
159 度。在该最优值的基础上通过随机选取不同位置的起始点进行 1000 次模拟，四种电荷设置下总计
160 开展 4000 次闪电放电模拟。

161 **3 模拟结果与分析**

162 **3.1 闪电起始特征与雷暴电荷结构的关系**

163 闪电的类型取决于雷暴电荷结构，基于对多种类型雷暴电荷结构分析，已提出偶极性、三极性、
164 反极性的等多种经典的电荷结构，利用电场探空资料建立了层状区、过渡区、对流区电荷结构的概
165 念模型（Schuur et al., 1991; Stolzenburg et al., 1994, 1998; 张廷龙等, 2008）。然而真实雷暴云中的电
166 荷结构要比概念模型所描绘的复杂得多，在强烈上升气流的推动下，电荷区的形状、位置、电荷浓
167 度均可能发生改变，不再如经典电荷结构那样呈上下垂直分布形态。上升气流区是起电的主要区域
168 （Calhoun et al., 2014），受湍流、风切变、夹卷等影响，理论上层状电荷结构很难存在，部分雷暴
169 中甚至可能会出现许多口袋电荷（Bruning and MacGorman, 2013; Zheng and MacGorman, 2016;
170 Mareev and Dementyeva, 2017; Zhang et al., 2017）。高密度的小电荷包相互之间的距离近，由此产生
171 的强电场允许闪电的频繁启动，同时这种小电荷区交错的电荷分布形式使得闪电可以在各个位置、
172 各个高度上起始。本节通过比较不同电荷结构下闪电启动需要的最小电荷浓度、可能起始点的位置
173 以及各点的启动概率，对模拟得到的闪电起始特征与雷暴电荷结构之间的关系进行简要分析。

首先对比各电荷背景下闪电启动所需的最小电荷浓度和对应二维电荷量大小，电荷对数为 1-4 时对应 ρ_{init} 值分别为 1.4、1.9、2.6、3.3 nC/m³，单个小电荷区的电荷量 Q_{sin} 分别为 9.19×10^6 、 6.36×10^6 、 5.89×10^6 、 5.66×10^6 nC/m，电荷区的总电荷量 Q_{tot} 分别为 1.84×10^7 、 2.54×10^7 、 3.53×10^7 、 4.52×10^7 nC/m。可以明显看出随着电荷堆混乱程度的增加， ρ_{init} 和 Q_{tot} 呈增加趋势，而 Q_{sin} 随小电荷区尺度的减而减小，说明在更复杂的电荷背景下，闪电启动需要更大的电荷浓度和电荷总量。模拟结果与 Zheng et al. (2018, 2019) 推测的强动力学区域处的电荷密度很大，但由于电荷区尺度小，存储电荷量小的观点具有一致性。

为得到各电荷背景下闪电的启动情况，输出不同电荷结构在其各自 ρ_{init} 和 ρ_{optim} 下的所有可能起始点的位置，并用颜色的深浅代表各可能起始点启动概率的大小。当电荷浓度为 ρ_{init} 时，闪电的可能起始点均出现在两侧垂直相邻的异极性电荷间（图略）；当电荷浓度增至 ρ_{optim} 时，不同电荷结构下闪电可能起始点的位置在水平方向上出现了显著区别：电荷对数为 3 时，上方水平相邻异极性电荷间出现了可能的起始点，电荷对数进一步增至 4 时，闪电在上方水平相邻异极性电荷间启动的概率大大增加，甚至大于垂直相邻异极性电荷间的启动概率；同时，从图中可以明显看出同一区域附近，上方启动概率大。

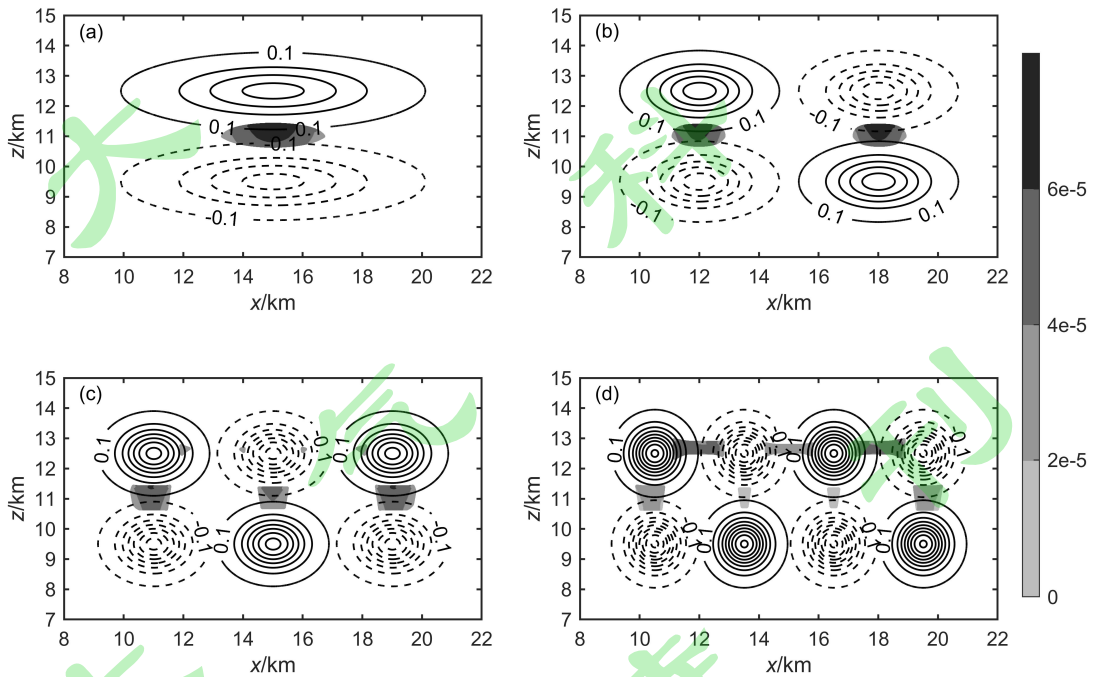


图 2 ρ_{optim} 下闪电可能启动位置分布图。(a)-(d)代表电荷对数为 1-4 的情况，图中黑色等值线代表正电荷区，虚线代表负电荷区，等值线从 ± 0.1 nC/m³ 开始，间隔为 0.5 nC/m³。阴影代表闪电的可能起始位置，图例表示各可能起始点的启动概率 p_i 。

Fig. 2 Distribution of possible starting positions under ρ_{optim} . (a)-(d) indicate the case when the pairs of charge regions are 1,

2, 3 and 4 respectively. Black solid lines are for positive charge and dashed lines are for negative charge with contour values starting at $\pm 0.1 \text{ nC/m}^3$ with intervals of 0.5 nC/m^3 . The shadow represents the positions of all possible starting points, and the legend represents the initial probability p_i of each possible starting point.

当电荷中心最大浓度为 ρ_{init} 时，闪电的可能起始点出现在垂直相邻的异极性电荷间，这可能与本文电荷的分布形式息息相关。电荷对数为 1-3 时，各电荷区均为扁平的椭圆形，垂直方向上正负电荷交界处距电荷高密度中心距离小，垂直相邻异极性电荷间的场强更大，先达到闪电的起始条件。当电荷对数增至 4 时，各电荷区为水平、垂直半径相等的正圆形，由电荷区水平垂直尺度比的差异所带来的电场垂直水平方向异性可以抛除，但由于多对电荷堆的相对空间配置关系，最大场强仍出现在边缘的一对垂直相邻的电荷堆之间。当中心最大电荷浓度达到 ρ_{optim} 时，电荷配置关系对闪电起始点的影响还体现在以下方面：电荷对数为 3 时，闪电的可能起始点先出现在水平位置 $x=12, 14, 16, 18 \text{ km}$ 附近，并不出现在水平相邻电荷堆交界处 ($x=13, 17 \text{ km}$)。模式计算时采用的电场强度为水平电场和垂直电场的矢量和，交界处的水平电场很强但其垂直方向的电位差几乎为零。图 3 为闪电的可能启动位置和电位分布图，由图可知，当区域内电荷对数增多时，在两边电荷的挤压下电位沿垂直方向拉伸，小电荷区内部一些位置处的水平电场快速增强，且由于这些位置的垂直电场本身大于交界处的垂直电场，总电场强度更大，先达到了闪电的起始条件。当电荷对数进一步增至 4 时，电位拉伸作用更加明显。

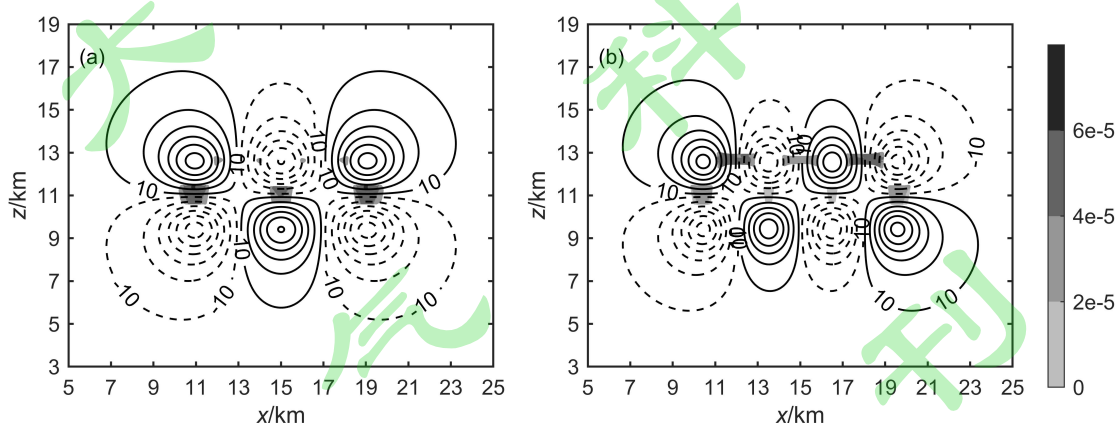


图 3 ρ_{optim} 下闪电的可能启动位置和电位分布图。(a,b) 分别表示电荷对数为 3、4 的情况，细实线代表正电位，虚线代表负电位，等势线数值起始于 $\pm 10 \text{ MV}$ ，间距为 30 MV/m 。阴影代表闪电的可能起始位置，图例表示各可能起始点的启动概率 p_i 。

Fig. 3 Distribution of possible starting positions and potential under ρ_{optim} . (a,b) indicate the case when the pairs of charge regions are 3 and 4 respectively, black solid lines are for positive potential and dashed lines are for negative potential with contour values starting at $\pm 10 \text{ MV}$ with intervals of 30 MV/m . The shadow represents the positions of all possible starting points, and the legend represents the initial probability p_i of each possible starting point.

此外,可能起始点的启动概率 p_i 在垂直方向上的变化与逃逸击穿阈值有关。计算域内电环境左右且上下对称, p_i 取决于该点的电场强度和该高度的起始阈值,同一区域附近,电荷交界处往上的电场强度及起始阈值均递减,往下的电场强度递减而起始阈值增加,且起始阈值随高度变化幅度更大。上方位置电场强度超出起始阈值的相对比例更大,对应闪电启动的概率更大。

综上所述,不同电荷结构下闪电可能起始点的位置和各点启动概率在水平、垂直方向上的差异是电荷区自身特征和逃逸击穿阈值的共同作用结果。选择启动概率最大的一点作为闪电的起始点,并记录随着各电荷区中心浓度增加闪电起始高度的变化(从 ρ_{init} 开始以 0.1 nC/m^3 为步长往后增加 10 步),如图 4 所示。可以看到,各电荷背景下,闪电的起始高度会有一定起伏,随着电荷浓度的增大,起始高度增加,电荷对数为 1-3 时闪电起始高度的变化主要与逃逸击穿阈值随高度递减(Marshall et al., 1995; Mansell et al., 2002; Edens et al., 2014)有关。电荷对数为 4 时起始高度出现跳变,从 11.16 km 增至 12.69 km,且电荷中心浓度达到 3.7 nC/m^3 后该值趋于稳定。由上述知,电荷对数为 4 时的特殊性在于电荷区的轴比不同,垂直和水平方向的正负电荷交界处距电荷高密度中心距离相等,当电荷中心浓度为 ρ_{init} 时受电荷空间配置关系的影响,垂直异极性电荷堆交界处的电场强度略大于水平方向电荷交界处的电场强度。但随着电荷中心浓度的增加,上方水平异极性电荷间场强逐渐满足了起始条件,再加上此处高度高,起始阈值小,且起始阈值随高度降低幅度大于环境电场的幅度,闪电启动的相对概率大,闪电倾向于在水平相邻的异极性电荷间起始。

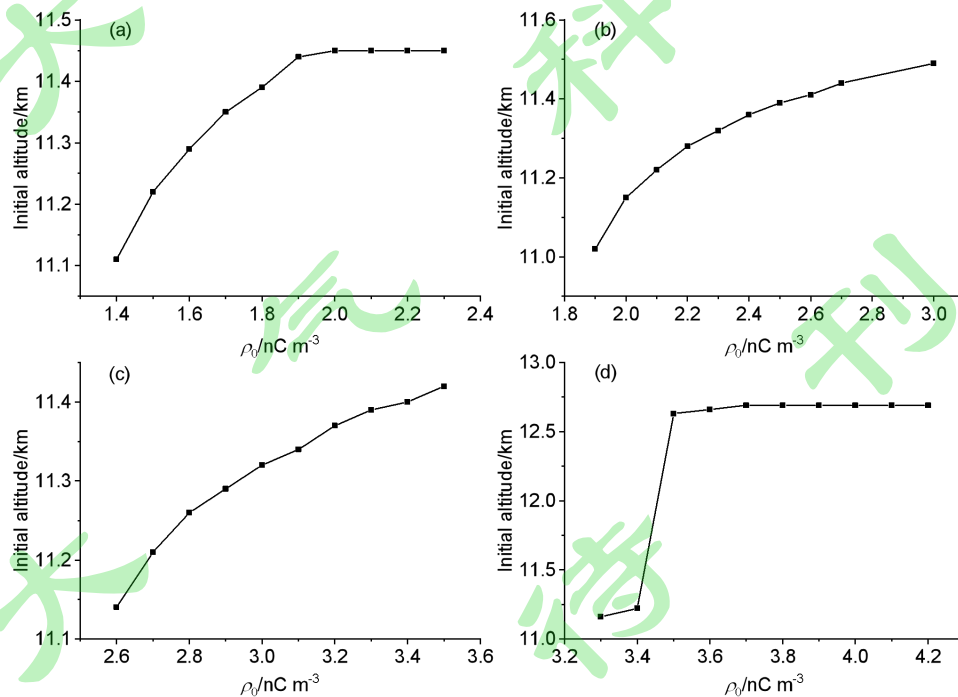


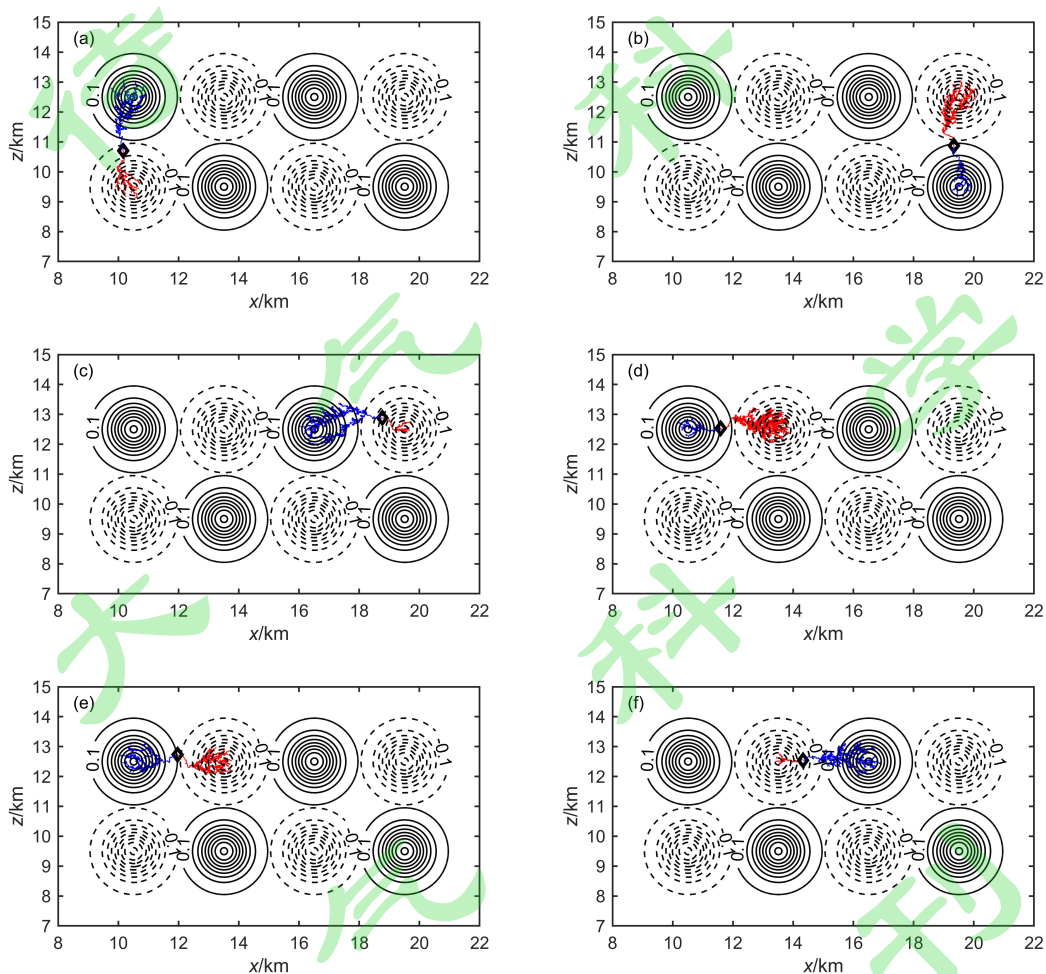
图 4 闪电起始高度随电荷中心浓度的变化图。(a)-(d)分别代表计算域内电荷对数为 1-4 的情况。

Fig. 4 Variation of lightning initial height with central charge concentration. (a)-(d) indicate the case when the pairs of charge

236 regions are 1, 2, 3 and 4 respectively.

237 3.2 闪电放电行为与雷暴电荷结构的关系

238 雷暴电荷结构也会显著影响云闪的放电行为，在这种交错的电荷分布形式下，小尺度且距离较
239 近的各个电荷区限制了先导的位移与持续时间（Zheng et al., 2018），同时这种混乱的电荷分布也使
240 得闪电的发展方向多样且形态各异，闪电倾斜发展的可能性大大增加。本节通过比较不同电荷结构
241 下闪电初始先导角度以及正、负先导发展范围的异同，探讨口袋电荷背景下闪电的放电行为特征。



242 图 5 云闪通道结构和电荷空间分布图。电荷具体参数参照表 1 中电荷对数为 4 时的情况。黑色菱形代表云闪的起始
243 点，红色实线代表正先导通道，蓝色实线代表负先导通道。其它细节参考图 2。

245 Fig. 5 Lightning channels and charge distribution. The specific values of charge refer to the case when the pairs of of charge
246 regions are 4 in Table 1. The black diamonds represent the initiation points of flashes, the solid red lines represent positive
247 leaders, and the solid blue lines represent negative leaders. The details are same as those in Fig.2.

248 分别在不同电荷结构各自的 ρ_{optim} 下进行 1000 次随机模拟试验。图 5 展示了电荷对数为 4 时的 6
249 次具有代表性的云闪个例及其对应的背景电荷分布。由图 5 不难发现，当启动点靠近正电荷区时，

闪电正先导端发展较旺盛，反之，当启动点靠近负电荷区时，则闪电负先导端发展更旺盛。先导两端的分叉数量和通道尖端与环境之间的电位差有关（由闪电的初始参考电位以及中心位势阱深度决定），闪电通道进入高密度中心以后，由于电位差增加，分叉数明显增多（谭涌波, 2006; Tan et al., 2006, 2016; 王艺儒等, 2020）。当闪电在靠近正电荷区启动时，其初始参考电位远大于 0MV，这会加大正先导尖端与环境负位势阱间的电位差，从而形成大量分支，并且减小负先导尖端与环境之间的电位差，限制负先导的发展；而当闪电在靠近负电荷区启动时，则反然。另外，尽管此时的电荷中心浓度高，但闪电仍很难穿过小电荷区往其他地方延伸，可能与电荷区的大小限制了闪电的最大传播范围有关。本文将正、负先导出现第一个分叉点连线与垂直方向的夹角记为初始先导角度（ θ_{init} ），图 5 中 6 次闪电对应 θ_{init} 值分别为 2.16° 、 30.54° 、 60.58° 、 70.31° 、 80.06° 、 90° ，可见在不同位置起始的闪电其初始先导角度千差万别，闪电传播趋势也具有显著差异。这与 Zheng et al.(2018) 观测得到的超级单体雷暴中闪电初始先导角度的多样性具有很好的相似度，说明本文的模拟结果具有较好的合理性。

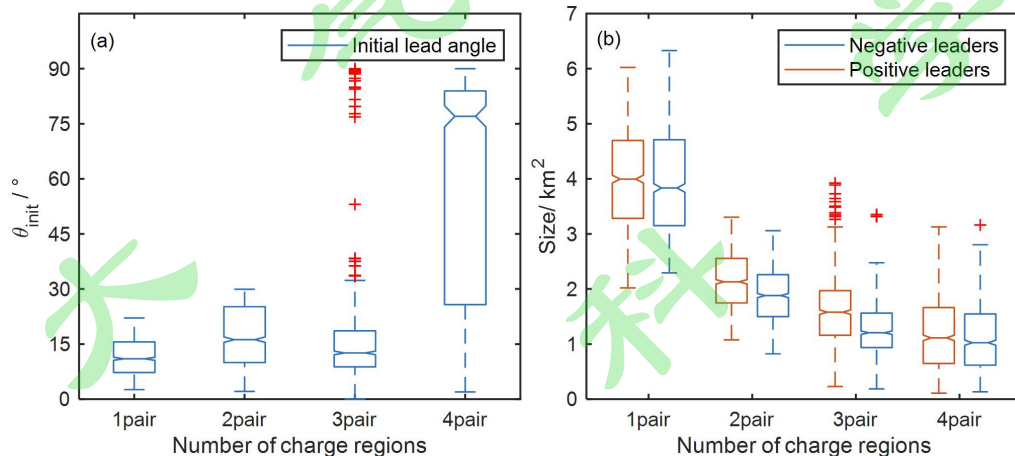


图 6 不同电荷结构下闪电放电特征参数统计图。(a)初始先导角度（ θ_{init} ）；(b)闪电面积。每种电荷结构下正负电荷中心浓度的具体数值参照表 1 中 ρ_{optim} 。(a,b)中从下至上的线条分别代表下限、第一分位数、中位数、第三分位数、上限，加号代表离群值。

Fig. 6 Statistical diagram of characteristic parameters of lightning discharge under different charge structures. (a) Initial lead angle(θ_{init}); (b) Flash size. The specific values of the concentration of positive and negative charge center under each charge structure refer to ρ_{optim} in Table 1. In (a,b) the lines from bottom to top represent the lower limits, the first quartile, the median, the third quartile and the upper limits respectively, and the red plus sign is the outlier.

对不同电荷结构下的闪电放电特征参数进行统计，如图 6 所示，由图 6（a）不难发现当电荷对数为 1-3 时， θ_{init} 的分布较集中；当电荷对数为 4 时， θ_{init} 的变化范围明显增大，先导的发展方向更加多样且更倾向水平，这与大量的闪电（69.6%）在上方水平相邻的异极性电荷间发生发展有关。

且结合图 7 不难发现, θ_{mit} 的最大值(即图中标注的 Max 值)随电荷对数的增加而增大。Zheng et al. (2018) 对超级单体雷暴中闪电初始负先导(NIL)的属性进行统计, 其中初始先导角度变化范围很大, 大部分集中在 $40\text{-}60^\circ$, 而普通雷暴 NIL 对应角度集中在 $10\text{-}40^\circ$ (Zheng et al., 2019), 闪电的属性与雷暴电荷分布形态息息相关, 通过对比不同类型雷暴初始先导特征的差异, 推断超级单体雷暴中(强动力区)的电荷结构区别于普通雷暴的层状电荷分布模式, 其电荷很难是水平尺度远远大于垂直尺度的情况。同时, 比较各电荷背景下闪电水平范围(定义为先导通道点间的最大水平距离)和垂直范围(定义为先导通道点间的最大高度差), 发现闪电的发展范围受电荷尺度的限制。当电荷对数为 1-3 时, 闪电的水平范围随电荷水平半径的减小而减小, 而先导的垂直范围变化不大。当电荷对数为 4 时, 闪电横向启动的概率大大增加, 水平和垂直范围的分布明显区别与其他电荷结构(图略)。不同电荷结构下正(负)先导水平范围的中位数分布为 3.38(3.33)、1.8(1.65)、1.26(1.12)、1.34(1.41)km, 垂直范围的中位数分别为 2.18(2.10)、2.02(2.01)、2.04(1.9)、1.13(1.11)km, 由上文分析可知当电荷对数为 4 时相比其他三种情况有更多水平发展的先导, 这导致了该电荷背景下先导水平范围的中位数反而大于电荷对数为 3 时对应的数值。考虑到水平和垂直范围只能代表闪电空间范围的绝对值, 本文还统计了不同电荷结构下的闪电面积(与之前的研究类似, 定义为覆盖先导所有通道点的最小凸包面积(Bruning and MacGorman, 2013; Zheng and MacGorman, 2016; Zhang et al., 2017; Zheng et al., 2018), 该值可以较好的代表闪电的整体发展范围)。如图 6(b)所示, 随着电荷对数的增多, 闪电面积明显减小。这些都说明了电荷区的几何特征限制了闪电的空间特征。

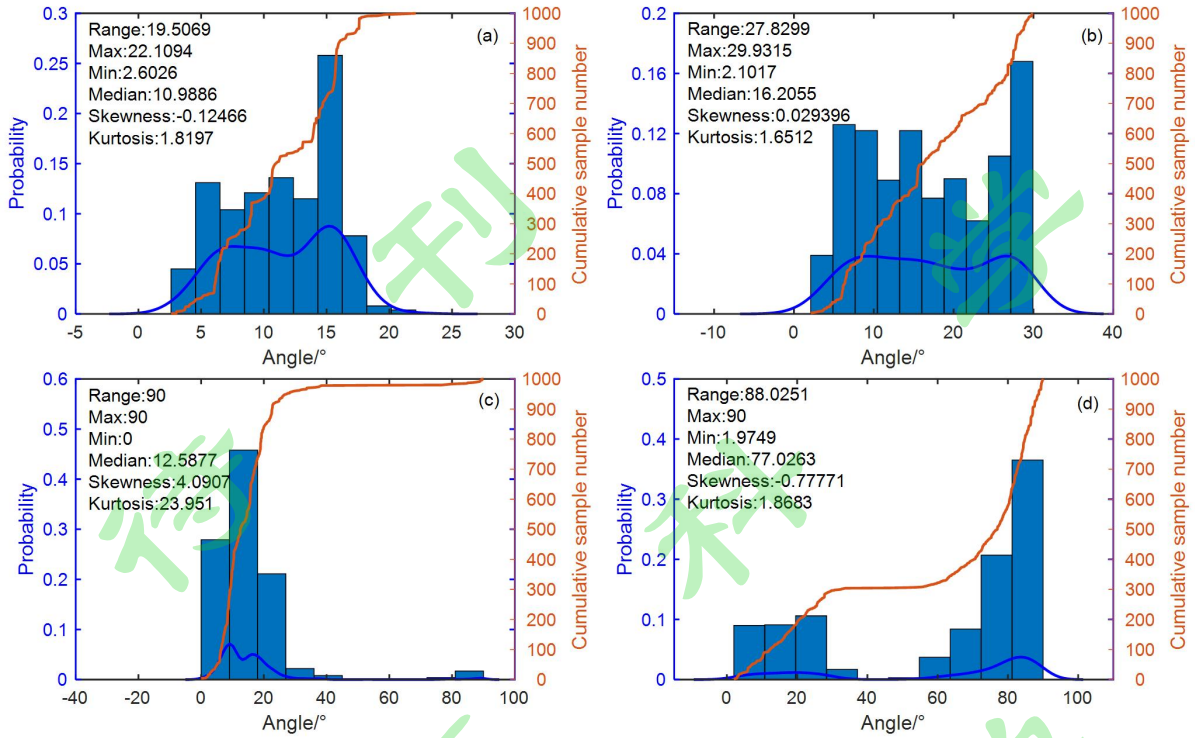


图 7 初始先导角度的概率累计分布图。(a)-(d)分别表示电荷对数为 1-4 的情况，蓝线为概率密度函数曲线，红线为累积分布函数，每种电荷结构下正负电荷中心浓度的具体数值参照表 1 中 ρ_{optim} 。

Fig. 7 The probability and cumulative distributions of the initial lead angle. (a)-(d) indicate the case when the pairs of charge regions are 1, 2, 3 and 4 respectively. The blue line is the probability density function curve and the red line is the cumulative distribution function curve. The specific values of the concentration of positive and negative charge center under each charge structure refer to ρ_{optim} in Table 1.

4 结论与展望

本研究利用已有的闪电放电参数化方案开展了大量随机模拟试验，模拟过程中固定了电荷区的总尺度，通过改变区域内的电荷对数进行探讨，着重讨论各电荷背景下闪电起始和放电行为的异同，主要结论如下：

(1) 随着电荷对数的增加，闪电启动需要的电荷浓度和电荷总量均增加。电荷区的水平垂直尺度比以及空间配置关系是影响闪电起始位置的关键因子：在双层均匀口袋电荷背景下，闪电更容易在外侧的一对正负电荷堆之间启动，当中心电荷浓度满足一定条件且小电荷区的垂直水平尺度相近时，甚至会出现闪电水平启动的情况；同时，当空中电荷为多对分布时，在电荷挤压电位拉伸的作用下闪电更倾向于从某一电荷区边缘地带而不是在正负电荷交界的地方启动。除此之外，由于逃逸击穿阈值与环境电场均随高度递减，且击穿阈值对应降低幅度大于环境电场，上方位置处电场强度超出起始阈值的相对比例大，闪电初始击穿的概率随高度递增。

(2) 闪电的放电特征与电荷区尺度密切相关。当大部分闪电在垂直相邻异极性电荷间发生发展时, 先导的水平范围随电荷区水平半径的减小而减小, 而由于电荷区垂直尺度保持不变其垂直范围变化不大。同时, 闪电面积明显随小电荷区尺度的减小而减小; 此外电荷区的分布影响着闪电的发展形态, 随着电荷对数的增多, 闪电初始先导角度的最大值增加。相较于电荷区为扁平椭圆形的情況, 当电荷区垂直与水平尺度相等时, 初始先导角度的变化范围明显增大, 水平发展个例明显增多。

需要说明的是, 本文给出的是规整电荷分布下的模拟结果, 而强风暴中不同区域动力学上差异显著, 电荷分布形式的差异可能会更明显, 实际雷暴云中的电荷结构会比我们考虑的更为复杂, 电荷区的分布可能是不规则的; 电荷浓度的分布除了高斯分布还可能是均匀分布、偏心分布等其他分布形式。真实雷暴云中电荷水平分布到底是什么形式还缺乏相应观测结果的支撑, 后续希望观测上提供更多有效数据。除此之外, 为了使模拟结果与观测到的闪电行为更加接近, 在今后的工作中还需对电荷区进行更为合理的剖分, 建立合适的口袋电荷结构的概念模型并在复杂电荷分布形式下进一步探讨闪电起始和放电行为特征。

参考文献 (References)

- Bruning E C, MacGorman D R. 2013. Theory and observations of controls on lightning flash size spectra [J]. *J. Atmos. Sci.*, 70(12), 4012-4029. doi:10.1175/jas-d-12-0289.1
- Calhoun K M, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. 2013. Evolution of lightning activity and storm charge relative to dual-Doppler analysis of a high-precipitation supercell storm [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141(7), 2199-2223. doi:10.1175/mwr-d-12-00258.1
- Calhoun K M, Mansell E R, MacGorman D R, et al. 2014. Numerical simulations of lightning and storm charge of the 29–30 May 2004 Geary, Oklahoma, supercell thunderstorm using EnKF mobile radar data assimilation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 142(11), 3977-3997. doi:10.1175/mwr-d-13-00403.1
- Davies-Jones R. 2015. A review of supercell and tornado dynamics [J]. *Atmos. Res.*, 158, 274-291. doi:10.1016/j.atmosres.2014.04.007
- 董万胜, 刘欣生, 张义军, 等. 2003. 云闪放电通道发展及其辐射特征 [J]. *高原气象*, 22(03): 221-225. Dong W, Liu X, Zhang Y, et al. 2003. Propagation of the Lightning Channel and Electromagnetic Radiation in IC Flashes[J]. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 22(03): 221-225. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2003.03.003
- Dwyer J R. 2003. A fundamental limit on electric fields in air [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30(20). doi:10.1029/2003gl017781
- Dye J E, Jones J J, Weinheimer A J, et al. 1988. Observations within two regions of charge during initial thunderstorm electrification [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 114(483), 1271-1290. doi:10.1002/qj.49711448306
- Edens H E, Eack K B, Rison W, et al. 2014. Photographic observations of streamers and steps in a cloud-to-air negative

338 leaderr [J]. Geophys. Res. Lett., 41(4), 1336-1342. doi:10.1002/2013gl059180
 339 郭凤霞,张义军,鄯秀书,等. 2003. 雷暴云不同空间电荷结构数值模拟研究 [J]. 高原气象, 22(03):268-274. Guo F,
 340 Zhang Y, Qie X, et al. 2003. Numerical simulation of different charge structures in thunderstorm[J]. Plateau Meteor. (in
 341 Chinese), 22(03), 268 - 274. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2003.03.010
 342 郭凤霞,张义军,言穆弘. 2007. 青藏高原那曲地区雷暴云电荷结构特征数值模拟研究 [J]. 大气科学, (01):28-36. Guo F,
 343 Zhang Y, Yan M. 2007. A numerical study of the charge structure in thunderstorm in Nagqu area of the Qinghai-Xizang
 344 Plateau[J]. Chinese J. Atmos. Sci.(in Chinese), 31(1), 28-36. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.01.03
 345 Gurevich A V, Milikh G M, Roussel-Dupre R. 1992. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning
 346 during a thunderstormr [J]. Phys. Lett. A., 165(5-6), 463-468. doi:10.1016/0375-9601(92)90348-p
 347 Kostinskiy A Y, Syssoev V S, Bogatov N A, et al. 2018. Abrupt elongation (stepping) of negative and positive leaders
 348 culminating in an intense corona streamer burst: Observations in long sparks and implications for lightning [J]. J.
 349 Geophys. Res.: Atmos., 123(10), 5360-5375. doi:10.1029/2017jd027997
 350 Lemon L R, Doswell III C A. 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis
 351 [J]. Mon. Wea. Rev., 107(9), 1184-1197. doi:10.1175/1520-0493(1979)107<1184:steams>2.0.co;2
 352 林辉, 谭涌波, 马宇翔, 等. 2018. 雷暴云内电荷水平分布形式对闪电放电的影响 [J]. 应用气象学报, 29(03): 374-384.
 353 Lin H, Tan Y, Ma Y, et al. 2018. Effects of Horizontal Charge Distribution in Thunderstorm Clouds on Lightning
 354 Discharge[J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 29(03): 374-384. doi:10.11898/1001-7313.20180311
 355 Lu W, Wang D, Zhang Y, et al. 2009. Two associated upward lightning flashes that produced opposite polarity electric field
 356 changes [J]. Geophy. Res. Lett., 36(5). doi:10.1029/2008gl036598.
 357 Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. 2002. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical
 358 thunderstorm model [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 107(D9), ACL-2. doi:10.1029/2000jd000244
 359 Mareev E A, Dementyeva S O. 2017. The role of turbulence in thunderstorm, snowstorm, and dust storm electrification [J]. J.
 360 Geophys. Res.: Atmos., 122(13): 6976-6988. doi:10.1002/2016jd026150
 361 Marshall T C, Rust W D. 1991. Electric field soundings through thunderstorms [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 96(D12),
 362 22297-22306. doi:10.1029/91jd02486
 363 Marshall T C, McCarthy M P, Rust W D. 1995. Electric field magnitudes and lightning initiation in thunderstorms [J]. J.
 364 Geophys. Res.: Atmos., 100(D4), 7097-7103. doi:10.1029/95jd00020
 365 Montanyà J, Van Der Velde O, Williams E R. 2015. The start of lightning: Evidence of bidirectional lightning initiation [J].
 366 Sci. Rep., 5(1), 1-6. doi:10.1038/srep15180
 367 Qie X, Zhang T, Zhang G, et al. 2009. Electrical characteristics of thunderstorms in different plateau regions of China [J].

Atmos. Res., 91(2-4), 244-249. doi:10.1016/j.atmosres.2008.04.014

Qie X, Pu Y, Jiang R, et al. 2017. Bidirectional leader development in a preexisting channel as observed in rocket-triggered lightning flashes [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 122, 586-599. doi:10.1002/2016JD025224

Qiu S, Zhou B H, Shi L H, et al. 2009. An improved method for broadband interferometric lightning location using wavelet transforms [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 114(D18). doi:10.1029/2008JD011655

Schuur T J, Rust W D, Smull B F, et al. 1991. Electrical and kinematic structure of the stratiform precipitation region trailing an Oklahoma squall line [J]. *J. Atmos. Sci.*, 48(6), 825-842. doi:10.1175/1520-0469(1991)048<0825:eaksot>2.0.co;2

Shao X M, Krehbiel P R. 1996. The spatial and temporal development of intracloud lightning [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 101(D21), 26641-26668. doi:10.1029/96JD01803

Solomon R, Schroeder V, Baker M B. 2001. Lightning initiation—conventional and runaway-breakdown hypotheses [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127(578), 2683-2704. doi:10.1256/smsqj.57808

Stolzenburg M, Marshall T C, Rust W D, et al. 1994. Horizontal distribution of electrical and meteorological conditions across the stratiform region of a mesoscale convective system [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122(8), 1777-1797. doi:10.1175/1520-0493(1994)122<1777:hdoeam>2.0.co;2

Stolzenburg M, Rust W D, Smull B F, et al. 1998. Electrical structure in thunderstorm convective regions: 1. Mesoscale convective systems [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 103(D12), 14059-14078. doi:10.1029/97jd03546

Stolzenburg M, Marshall T C, Rust W D, et al. 2007. Electric field values observed near lightning flash initiations [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34(4). doi:10.1029/2006gl028777

Sun A, Chun H Y, Baik J J, et al. 2002. Influence of electrification on microphysical and dynamical processes in a numerically simulated thunderstorm [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 41(11), 1112-1127. doi:10.1175/1520-0450(2002)041<1112:ioeoma>2.0.co;2

Symbalisty E M D, Roussel-Dupre' R, Yukhimuk V. 1998. Finite volume solutions of the relativistic Boltzmann equation for electron avalanche studies [J]. *IEEE T. Plasma Sci.*, 26, 1575-1582. doi:10.1109/27.736065

Syssoev A A, Iudin D I, Bulatov A A, et al. 2020. Numerical simulation of stepping and branching processes in negative lightning leaders [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 125(7), e2019JD031360. doi:10.1029/2019jd031360

谭涌波. 2006. 闪电放电与雷暴云电荷、电位分布相互关系的数值模拟 [D]. 中国科学技术大学博士学位论文. Tan Y. 2006. Numerical Simulation of the Relationship of the Lightning Discharge with the Space Charge and Potential Distribution in Thundercloud[D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Science and Technology of China.

Tan Y, Tao S, Zhu B. 2006. Fine-resolution simulation of the channel structures and propagation features of intracloud lightning [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33(9). doi:10.1029/2005gl025523

- Tan Y B, Tao S C, Zhu B Y, et al. 2007. A simulation of the effects of intra-cloud lightning discharges on the charges and electrostatic potential distributions in a thundercloud [J]. *Chinese J. Geophys.*, 50(4), 916-930. doi:10.1002/cjg2.1109
- Tan Y, Tao S, Liang Z, et al. 2014. Numerical study on relationship between lightning types and distribution of space charge and electric potential [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 119(2), 1003-1014. doi:10.1002/2013jd019983
- Tan Y, Chen C, Zhou J, et al. 2016. A parameterization scheme for upward lightning in the cloud model and a discussion of the initial favorable environmental characteristics in the cloud [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 59(7), 1440-1453. doi:10.1007/s11430-016-5309-5
- Tan Y, Zheng T, Shi Z. 2019. Improved lightning model: Application to discuss the characteristics of upward lightning [J]. *Atmos. Res.*, 217: 63-72. doi:10.1016/j.atmosres.2018.10.011
- 王艺儒, 谭涌波, 郑天雪, 等. 2020. 利于上行负地闪始发的电荷区参数数值模拟 [J]. *应用气象学报*, 31(02): 175-184.
- Wang Y, Tan Y, Zheng T, et al. 2020. Numerical Simulation of Main Negative Charge Area Parameters for Upward Negative Cloud-to-ground Lightning[J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 31(02): 175-184. doi:10.11898/1001-7313.20200205
- Williams E R. 2006. Problems in lightning physics-The role of polarity asymmetry [J]. *Plasma Sources Sci. T.*, 15(2): S91. doi:10.1088/0963-0252/15/2/s12
- Winn W P, Schwede G W, Moore C B. 1974. Measurements of electric fields in thunderclouds [J]. *J. Geophys. Res.*, 79(12): 1761-1767. doi:10.1029/jc079i012p01761
- Wu T, Yoshida S, Akiyama Y, et al. 2015. Preliminary breakdown of intracloud lightning: Initiation altitude, propagation speed, pulse train characteristics, and step length estimation [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 120(18), 9071-9086. doi:10.1002/2015JD023546
- 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(05): 1221-1228. Zhang T, Qie X, 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 J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 32(05): 1221-1228. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.05.19
- 张义军, 孟青, 刘欣生, 等. 2004. 超级单体雷暴中闪电 VHF 辐射源的时空分布特征 [J]. *科学通报*, 49(5), 499-505.
- Zhang Y, Meng Q, Liu X, et al. 2004. Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Lightning VHF Radiation Sources in Supercell Storms[J]. *Science Bulletin.* (in Chinese), 49(5), 499-505. doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2004.05.017
- Zhang Z, Zheng D, Zhang Y, et al. 2017. Spatial-temporal characteristics of lightning flash size in a supercell storm [J]. *Atmos. Res.*, 197: 201-210. doi:10.1016/j.atmosres.2017.06.029

428 Zheng D, Zhang Y, Lu W, et al. 2008. Simulation Study About the Influence of Atmospheric Stratification on Lightning
429 Activities [J]. J. Meteor. Res., 22(1): 78-90. doi: 10.11676/qxxb2007.057

430 Zheng D, MacGorman D R. 2016. Characteristics of flash initiations in a supercell cluster with tornadoes [J]. Atmos. Res.,
431 167, 249-264. doi:10.1016/j.atmosres.2015.08.015

432 Zheng D, Zhang Y, Meng Q. 2018. Properties of negative initial leaders and lightning flash size in a cluster of supercells [J].
433 J. Geophys. Res.: Atmos., 123, 12,857–12,876. doi:10.1029/2018jd028824

434 Zheng D, Shi D, Zhang Y, et al. 2019. Initial leader properties during the preliminary breakdown processes of lightning
435 flashes and their associations with initiation positions [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 124(14): 8025-8042.
436 doi:10.1029/2019jd030300

437 郑天雪, 谭涌波, 罗林洁. 2022. 雷暴电荷分布对正极性云闪电特征影响的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 46(6):
438 1407-1424. Zheng T, Tan Y, Luo L. 2022. Numerical simulation of the effects of thunderstorm charge distributions on
439 the discharge characteristics of positive intracloud lightning flashes[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in
440 Chinese), 46(6): 1407-1424. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21079

441 Zhou Z, Guo X. 2009. 3D modeling on relationships among intracloud lightning, updraft and liquid water content in a severe
442 thunderstorm case [J]. Climatic and Environmental Research, 14(1): 31-44. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.01.04