

夏艳玲, 谭涌波, 向春燕, 等. 2017. 放电后电荷重置对雷暴云电荷结构及闪电行为的影响 [J]. 气候与环境研究, 22 (4): 487–498. Xia Yanling, Tan Yongbo, Xiang Chunyan, et al. 2017. Effects of charge redistribution after discharges on the charge structure of thunderstorms and lightning characteristics [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (4): 487–498, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16213.

# 放电后电荷重置对雷暴云电荷结构及闪电行为的影响

夏艳玲 谭涌波 向春燕 马肖 张鑫

南京信息工程大学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/中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044

**摘 要** 为探究放电后电荷重置对雷暴云电过程的影响, 在已有的三维雷暴云起、放电模式中分别加入两种不同的电荷重置方案: 一种是植入法即放电后闪电通道上的感应电荷与原空间电荷叠加(简称 ZR 方案); 另一种是中和法即放电后直接按一定比例降低闪电通道处的空间电荷浓度(简称 ZH 方案)。利用长春一次探空个例进行敏感性试验, 发现放电后重置方式的不同会导致闪电特征存在明显差异: 1) ZR 方案下的云闪发生率比 ZH 方案下的云闪发生率少。闪电放电后 ZR 方案在云中植入异极性电荷, 对雷暴云中电荷的中和量比 ZH 方案多, 摧毁云中电场的能力更强; 2) ZR 方案下的正、负地闪发生率均比 ZH 方案多。相对于 ZH 方案, ZR 方案中主正电荷区的分布范围大于主负电荷区, 导致其出现了更多的正地闪; ZR 方案中的云顶屏蔽层与主正电荷区的混合程度高, 混合时间长, 导致 ZR 方案在主正电荷区与主负电荷区之间触发了更多的负地闪; 3) ZR 方案下的闪电通道长度比 ZH 方案下的闪电通道长度短。ZR 方案在云中植入异极性电荷, 导致云中难以形成大范围同极性电荷堆, 闪电通道传播局限在一对较小的异极性电荷堆内, 而 ZH 方案不改变云中电荷分布, 存在大范围同极性电荷堆, 闪电通道传播范围较大。

**关键词** 放电 电荷重置 电荷结构 闪电发生率 通道长度

**文章编号** 1006-9585 (2017) 04-0487-12

**中图分类号** P427.3

**文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16213

## Effects of Charge Redistribution after Discharges on the Charge Structure of Thunderstorms and Lightning Characteristics

XIA Yanling, TAN Yongbo, XIANG Chunyan, MA Xiao, and ZHANG Xin

*Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/ Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/ Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

**Abstract** To investigate the effects of charge redistribution after discharges on lightning characteristics, a three-dimensional (3-D) cumulus model with electrification and lightning process is coupled with two different schemes of charge redistribution. In one scheme, i.e. the ZR scheme for short, the induced charges are added to the space charges along the lightning channel; in the other scheme, called ZH scheme for short, the charge density along the lightning channel is reduced by a certain percentage. Sensitivity experiments are performed using the sounding data collected at Changchun. Obvious differences between the lightning characteristics are found using the above two different ways of charge redistribution. The results show that: 1) The intra-cloud flash rate in the ZR scheme is less than that in the ZH

**收稿日期** 2016-12-01; **网络预出版日期** 2017-03-23

**作者简介** 夏艳玲, 女, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气电学和雷电物理研究。E-mail: 1522939462@qq.com

**资助项目** 国家自然科学基金项目 41475006, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2014CB441403

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grant 41475006), National Key Project of Basic Research (973 Program, Grant 2014CB441403)

scheme. Charges with opposite polarity are embedded in the charge region, and more charges are neutralized in the ZR scheme than in the ZH scheme, which causes the electric field in the ZR scheme to drop more sharply. 2) The positive and negative cloud-to-ground flash rates in ZR scheme both are higher than that in the ZH scheme. Compared with that in the ZH scheme, the distribution range of the positive charge region is larger than the lower negative charge region, leading to a higher positive cloud-to-ground flash rate in the ZR scheme than that in the ZH scheme. Meanwhile, the degree of mixing of the shielding charge region at the cloud top with the positive charge region is stronger and the time of mixing is longer in the ZR scheme, thereby more negative cloud-to-ground flashes initiated between the positive charge region and the lower negative charge region are triggered in the ZR scheme. 3) The lightning channel length in the ZR scheme is shorter than that in the ZH scheme. Charges with opposite polarity are embedded in the charge region, and it is difficult to form large charge regions with the same polarity. The transmission of the lightning channel is limited to a couple of small charge regions with opposite polarity in the ZR scheme. However, the distribution of the charge regions in the ZH scheme does not change and there are large charge regions with the same polarity, while the range of the transmission of the lightning channel is also larger.

**Keywords** Lightning discharge, Charge redistribution, Charge structure, Flash rate, Channel length

## 1 引言

闪电是一种强烈的放电现象,并伴有大量的电荷转移。那么,这些转移的电荷如何而来,以及这些转移的电荷如何去作用云中原先存在的空间电荷,一直是大气电学研究领域中备受关注的话题。关于闪电通道里电荷的来源目前主要有两种看法,一种认为来源于原先存在的空间电荷(源电荷模型)(Schonland, 1938),另一种则认为是由通道与环境之间的电位差感应产生的(双向先导理论)(Kasemir, 1960)。Shao and Krehbiel (1996) 利用窄带干涉仪定位系统发现云闪通道的上、下双层分枝结构分别对应于雷暴云上部正电荷区和下部负电荷区;董万胜等(2003)利用闪电宽带干涉仪系统也观测到云内闪电通道双向发展;Coleman et al. (2003)通过对新墨西哥山地雷暴进行云中电场廓线气球探空和闪电 VHF 源定位进行联合探测发现:云闪通道的双层分枝结构与位势阱所在位置高度一致,并且闪电在雷暴云中上部正电荷区和中部负电荷区的相对局部区域沉积异极性电荷。大量的观测结果证明双向先导理论更具合理性。而闪电结束后,通道内的电荷又是如何作用于云中空间电荷,目前关于这方面的探讨分析很少。

由于缺乏有效的观测手段,目前绝大部分的模式工作都是采用直接中和法,即直接按照一定的比例降低放电后空间电荷浓度以达到中和的效果(Rawlins, 1982; Takahashi, 1987; Ziegler and MacGorman, 1994; Baker et al., 1995; MacGorman et al., 2001; 徐良韬等, 2012; Liu et al., 2014; Zhao et

al., 2015; 郭凤霞等, 2016),但这种处理不会改变云中原先的电荷结构。谭涌波等(2007)、Tao et al. (2009)利用双向先导理论分别讨论了云闪以及地闪对云中电荷的影响,发现闪电通道产生的感应电荷不仅会使云中电荷浓度降低,还会在原先电荷区中植入异极性电荷,从而改变云中电荷分布。而大量的研究表明,闪电类型与云中电荷的分布特征息息相关(Takeuti et al., 1978; Brook et al., 1982; Carey et al., 2003; Qie et al., 2005; Zheng et al., 2010; Tan et al., 2014)。一些研究也表明闪电通道的传播特征依赖于云中电荷分布(Tan et al., 2006; Akita et al., 2011; 谭涌波等, 2015)。因此,放电后电荷重置也可能会对云中的闪电行为产生影响。

目前,不少模式研究者关于放电后电荷重置问题采用直接中和法。其中部分研究者基于整体放电参数化方案,当模拟域中一个或多个格点场强超过击穿阈值时,直接按一定比例降低格点上的电荷浓度(Rawlins, 1982; Takahashi, 1987; Ziegler and MacGorman, 1994; Baker et al., 1995; 徐良韬等, 2012; Zhao et al., 2015)。然而,这种处理方式不能模拟双向闪电通道,与现在得到广泛认可的闪电通道双向传播这一理论不符。也有一些研究者基于双向先导理论和单次闪电参数化方案,模拟双向闪电通道,但是在处理放电后的电荷重置问题时却不考虑正负通道上的感应电荷,而是直接按一定比例降低通道处的空间电荷浓度(MacGorman et al., 2001; Liu et al., 2014; 郭凤霞等, 2016)。这种方法不需要计算放电后闪电通道上的电荷量,这可以减少模式工作中的计算量,但这种方法实际上也是一种估算,缺乏必要的物理依据。另一方面,一些研究者

在处理放电后的电荷重置时采用异极性电荷植入法, 他们依据双向先导理论, 认为放电会沿闪电通道在云中沉积异极性电荷。这其中, 一些研究者认为放电后闪电通道上的感应电荷替代了原空间电荷 (Mansell et al., 2002, 2005; 谭涌波等, 2007; 郑栋等, 2007; 黄丽萍等, 2008)。也有研究者将放电后闪电通道上的感应电荷与原空间电荷进行了叠加 (郭凤霞等, 2015)。那么在雷暴云电过程模拟工作中不考虑植入异极性感应电荷与考虑植入异极性感应电荷对雷暴云电过程有怎样的影响? 不同重置方式下的雷暴云电荷分布、闪电类型、闪电发生率、通道传播等又存在怎样的区别呢? 目前关于这方面的探讨分析还很少。

基于此, 本研究中拟采用数值模拟研究的方法, 在已有的三维雷暴云起、放电数值模式中分别加入两种不同的电荷重置方案: 一种是放电后闪电通道上感应电荷与原空间电荷叠加, 另一种是放电后直接按一定比例降低闪电通道处的空间电荷浓度。通过对比模拟实验, 定量分析不同重置方案下雷暴云电荷结构的差异性, 以及不同方案下闪电类型、闪电发生率以及闪电通道传播的区别。

## 2 模式介绍

谭涌波等 (2006) 以中国气象科学研究院发展的积云对流模式为微物理和动力学框架, 加入起电、放电参数化方案, 对雷暴云起、放电过程进行了数值模拟。起电过程主要考虑了感应、非感应起电过程, 其中感应起电参数化方案采用了 Ziegler et al. (1991) 起电方程, 非感应起电过程采用了 Gardiner 参数化方案 (Gardiner et al., 1985)。该模式能够合理地模拟雷暴云微物理和起、放电过程。本文的数值模拟研究采用谭涌波等 (2006) 建立的雷暴云三维起、放电数值模型, 研究的模拟域为  $76 \text{ km} \times 76 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ , 分辨率为  $500 \text{ m}$ , 下面着重对本研究采用的放电参数化方案以及电荷重置方案进行说明。

### 2.1 放电参数化方案

Mansell et al. (2002) 将双向先导概念和随机介质击穿模式应用于雷暴云放电过程的三维数值模拟, 并且考虑到了闪电通道上的感应电荷对雷暴云中电场分布的影响, 成功模拟出了类似真实闪电分叉结构的云闪与正、负地闪。谭涌波等 (2006) 在

Mansell 放电参数化方案的基础上做了一些修改, 实现了高分辨率 ( $12.5 \text{ m}$ ) 的二维云闪数值模拟, 其中: 闪电启动的击穿阈值采用随高度变化的电场阈值或者常规空气击穿阈值 ( $300 \text{ kV/m}$ ); 不强制要求正、负先导同时启动或同时终止, 正、负先导根据自身传播条件决定其是否可以发展, 并且假定正、负先导传播条件相同, 双向随机发展, 传播阈值为  $150 \text{ kV/m}$ 。

本文基于 Mansell et al. (2002) 和谭涌波等 (2006) 提出的放电参数化方案, 对雷暴云放电过程进行三维数值模拟。其中, 闪电启动的初始阈值  $E_{\text{init}}$  采用随高度变化的或逃逸电子电场阈值 ( $150 \text{ kV/m}$ ), 闪电的起始击穿点从所有电场强度满足  $0.9E_{\text{init}}$  的格点中随机选取; 闪电触发后, 正、负通道根据自身条件随机发展, 传播阈值为  $0.6E_{\text{init}}$ ; 闪电通道的扩展采用的是 Mansell et al. (2002) 提出的步进方式, 即每次正负通道只扩展一个后继通道点。当完成每一步新的通道扩展后, 非通道格点的电位分布要重新调整, 当整个模拟域中不再有后继通道扩展点时闪电便终止。基于此, 本文实现了云闪、地闪的三维数值模拟。

### 2.2 电荷重置方案

雷暴云中的放电过程不仅中和了云中电荷, 降低了云中净电荷浓度, 抑制雷暴云中的电场强度, 减少雷暴云中的电场能量, 还会影响云中的电荷分布, 形成复杂的电荷结构, 进而影响后继闪电的放电行为, 所以放电之后的电荷再分配过程对雷暴的电荷结构及闪电行为有重要的影响。本文拟对放电后的电荷再分配过程采取植入法 (简称 ZR 方案) 和中和法 (简称 ZH 方案) 两种电荷重置方案, 具体的重置方案如下:

#### (1) ZR 方案

本方案采取了郭凤霞等 (2015) 关于电荷重置的处理方法, 基于双向先导的概念, 认为闪电通道在环境电场的作用下产生异极性感应电荷, 感应电荷的分布及大小对雷暴云中的电荷结构产生重要影响。为了确定闪电通道上的电荷密度, 将闪电通道近似地看作为良导体, 根据高斯定理, 由于导体内部电位为常数, 那么通道表面的面电荷密度的计算表达式为

$$\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial n} = -\sigma, \quad (1)$$

其中,  $\varepsilon$  为空气的介电常数,  $\varphi$  是通道格点电位,  $n$

为导体表面的法线方向,  $\sigma$  为通道表面的面电荷密度。闪电通道上的异极性感应电荷以通道及邻近若干格点内的水成物粒子为载体, 在云中湍流扩散效益的影响下, 扩散在云中。这些水成物粒子按其表面积所占比例分配这些感应电荷, 并且考虑它们自身原来携带的电荷, 计算公式如下:

$$\delta Q_k = \frac{\sigma_k}{\sum_i \sigma_i} \delta \rho_T + \delta \rho_{ex}, \quad (2)$$

其中,  $\delta Q_k$  是放电结束后水成物粒子电荷密度,  $\delta \rho_T$  是通道格点上感应电荷密度,  $\delta \rho_{ex}$  是该通道格点原来的电荷密度,  $\sigma_k$  是水成物粒子  $k$  的表面积,  $\sum_i \sigma_i$  是所有水成物粒子的表面积总和。

## (2) ZH 方案

本方案采取了与 Liu et al.(2014)相同的电荷再分配处理方式, 为了直接体现出放电后净电荷浓度减少这一效应, 本方案不计算通道感应电荷, 而是直接按一定比例降低通道及邻近若干格点各种水成物粒子原来携带的电荷密度, 计算公式如下:

$$\delta Q_k = \beta \times \frac{\sigma_k}{\sum_i \sigma_i} \delta \rho_{ex}, \quad (3)$$

其中  $\beta$  是水成物粒子电荷密度降低的比例。在本研究中, 拟将放电后通道及邻近格点各种水成物粒子的电荷密度降为放电前的 30%。

## 2.3 试验个例

本文选取 2005 年 6 月 10 日发生在长春的一次

雷暴个例作为雷暴云背景进行敏感性实验, 图 1 为长春站当天 20:00 (北京时间, 下同) 的环境温、湿层结曲线。需特别说明的是, 本文的主要目标是通过数值模拟敏感性实验来探讨放电后电荷再分配方式的不同对雷暴云电荷结构及闪电行为的影响, 所选取的雷暴云个例仅仅是提供初始场数据以及雷暴云背景, 其雷暴云的消演变过程不是本文探讨的重点。本模式的初始时间给出了一个水平半径为 5 km, 垂直半径为 1 km 的椭圆湿热泡扰动, 其中心位于模式模拟区域中心左侧高度为 1 km 的格点上, 中心最大温度和相对扰动湿度分别为 2.5 K 和 80%, 从中心向外以余弦函数递减。模拟时间为 90 min, 时间步长为 4 s。

## 3 模拟结果分析

### 3.1 电荷重置对电荷结构的影响

图 2 给出了 ZR 方案与 ZH 方案在雷暴发展初期, 首次闪电触发之前 (14 min)、雷暴发展旺盛阶段 (23 min、38 min) 以及雷暴消散期 (51 min) 的雷暴云空间电荷结构剖面图。本文在 14 min 选取的电荷结构剖面为  $y=42.5$  km, 23 min、38 min 时选取的剖面为  $y=48.5$  km, 51 min 时选取的剖面为  $y=55$  km。对比两种方案下不同时期的电荷分布特征发现: 在非感应起电机和感应起电机的共同作用下, 首次闪电发生之前, 雷暴云中的电荷结构为四

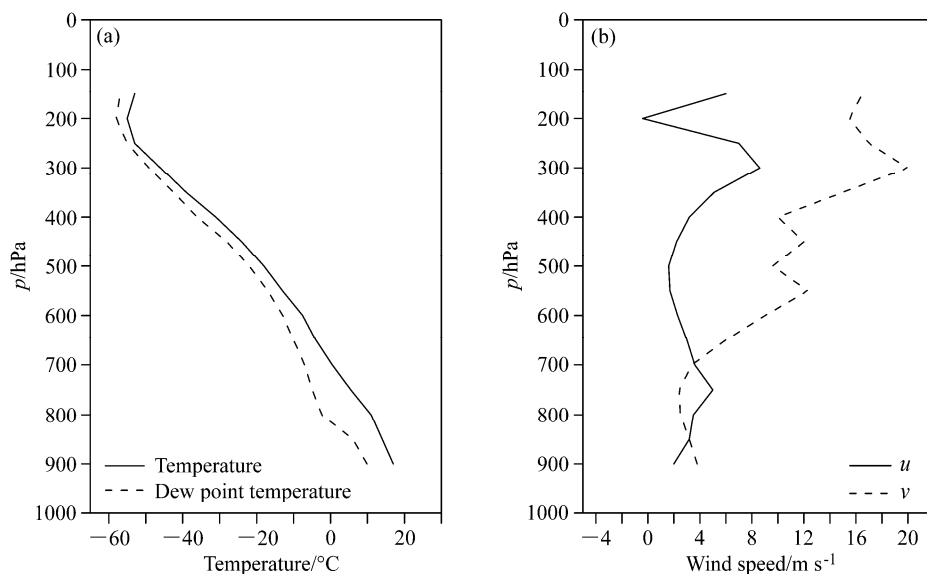


图 1 模式所采用的 (a) 环境层结曲线 (黑实线代表环境温度、黑虚线代表露点温度) 以及 (b) 垂直风廓线 (黑实线代表  $u$  方向上的风速、黑虚线代表  $v$  方向上的风速)

Fig. 1 (a) Environmental stratification curve (black solid line represents the environmental temperature and the dash line represents the dew point) and (b) vertical wind profile (black solid line represents the wind speed of  $u$  component and the dashed line represents the wind speed of  $v$  component)

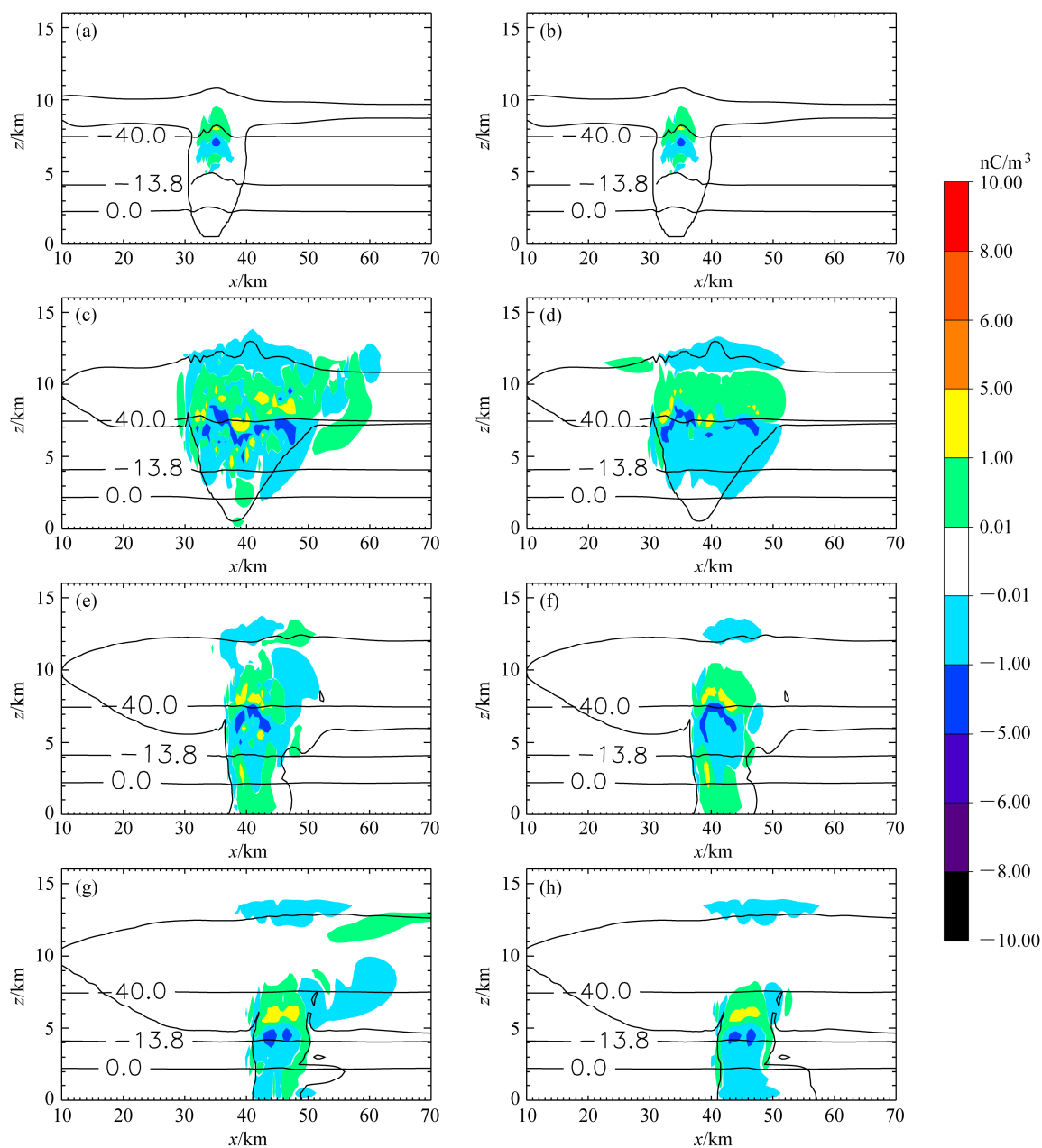


图2 ZR 方案(左列)和 ZH 方案(右列)的不同时刻电荷结构垂直剖面分布: (a, b) 14 min ( $y=42.5$  km); (c, d) 23 min ( $y=48.5$  km); (e, f) 38 min ( $y=48.5$  km); (g, h) 51 min ( $y=55$  km)。水平横线代表等温线 ( $0^{\circ}\text{C}$ 、 $-13.8^{\circ}\text{C}$ 、 $-40^{\circ}\text{C}$ ), 粗黑线代表雷暴云轮廓

Fig. 2 Vertical cross sections of the charge structure at different times from ZR scheme (left panel) and ZH scheme (right panel): (a, b) 14 min ( $y=42.5$  km); (c, d) 23 min ( $y=48.5$  km); (e, f) 38 min ( $y=48.5$  km); (g, h) 51 min ( $y=55$  km). The thin horizontal lines show  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $-13.8^{\circ}\text{C}$ , and  $-40^{\circ}\text{C}$  isotherms; the thick black lines show the contour structure of the thundercloud

极结构, 主正电荷区与主负电荷区分布尺度较大, 量级相当, 次正电荷区与次负电荷区的分布很小, 整个电荷分布较高。首次闪电发生之前两种方案下的电荷分布完全一样, 但放电后的电荷分布却表现出明显差异。随着雷暴的不断发展, 雷暴云中的电荷结构演变为偶极结构, 顶部存在屏蔽层, 屏蔽层

与主正电荷区有连接混合现象; 在雷暴发展旺盛期, 雷暴云中的电荷分布高度降低, 电荷结构表现为三极结构, 顶部存在屏蔽层, 屏蔽层与主正电荷区逐渐分离。雷暴消散期的电荷分布较低, 电荷结构又演变为偶极结构, 屏蔽层与主正电荷区分离。

由于放电后雷暴云中电荷再分配的处理方式

不同, 两种方案下放电后的电荷分布存在明显区别: ZR 方案中, 电荷分布杂乱无章, 主正电荷区出现了负电荷, 主负电荷区出现了正电荷。这是由于放电之后, 闪电通道上的异极性感应电荷浓度大于放电前通道上原有的空间电荷浓度, 它们叠加之后通道上的电荷表现出与放电前相反的极性, 从而使电荷区内出现异极性电荷, 极大地改变了原有的电荷分布; 而 ZH 方案中, 由于是直接按一定比例降低了闪电通道处的电荷浓度, 电荷堆的浓度发生了变化但分布形式没有发生变化, 依然表现出清晰的分布特征。在模拟过程中我们还发现: ZR 方案中的电荷堆的水平分布尺度大于 ZH 方案中电荷堆的水平分布尺度, ZR 方案中的主正电荷区与主负电荷区的电荷分布出现差异较大现象, 而 ZH 方案中主正电荷区与主负电荷区分布差异较小。此外, ZR 方案比 ZH 方案更早出现底部正电荷区形成三极电荷结构。

对比两种方案屏蔽层的分布特征可知: ZR 方案中顶部屏蔽层的分布比 ZH 方案大, 并且在雷暴发展初期到旺盛阶段 (35 min 前) ZR 方案中的屏蔽层与主正电荷区出现了大量混合的现象, 导致屏蔽层中有正电荷, 主正电荷区也存在负电荷; 而 ZH 方案中仅在雷暴发展初期 (25 min 前), 电荷分布较高时主正电荷区与屏蔽层出现连接混合现象, 相对 ZR 方案而言, ZH 方案下的屏蔽层与主正电荷区的混合时间较短, 混合的程度也较低。

### 3.2 电荷重置对闪电类型及闪电发生率的影响

电荷重置影响雷暴云的电荷结构, 而闪电放电特征与雷暴云电荷结构紧密相关, 因此电荷重置必然影响闪电放电特征。表 1 给出了两种重置方案下各种闪电的闪电发生率, 由表可知: ZR 方案总共触发了 509 次云闪, 22 次正地闪, 15 次负地闪; ZH 方案总共触发了 905 次云闪, 5 次正地闪, 3 次负地闪。图 3 表示的是两种重置方案下各种闪电过程随时间的变化曲线。由图可知: 该个例在 15 min 发生了首次闪电, 首次闪电为云闪。而首次闪电触发后不同重置方案下的各种闪电特征存在明显的差别: ZR 方案中每分钟的云闪发生率都比 ZH 方案下的云闪发生率低。ZR 方案在闪电通道及其附近植入了大量异极性电荷, 嵌入的异极性电荷对雷暴云中原有的空间电荷中和量多, 从而导致雷暴云中强电场被摧毁的程度高。而 ZH 方案只是按照一定比例降低了闪电通道处的电荷浓度, 没有改变原电

荷堆的极性, 对雷暴云中原有空间电荷量中和较少, 因此对云中强电场的摧毁能力也较弱。图 4 给出了两种重置方案下最大垂直电场强度随时间的变化。从图中可以看出: 在闪电发生的 15~55 min (图 3) 之间的大部分时间内, ZH 方案下的最大垂直电场强度都比 ZR 方案下的最大垂直电场强度大 (本文约定垂直电场强度方向向上为正), 尤其在 28~55 min 这一特征表现得更为明显, 说明 ZR 方案对强电场的摧毁能力比 ZH 方案强, 所以 ZR 方案下的云闪发生率少于 ZH 方案下的云闪发生率。

表 1 两种重置方案各种闪电的闪电发生率

Table 1 The flash rate of different lightning in two schemes of charge redistribution

重置方案	云闪发生率	正地闪发生率	负地闪发生率
ZR	509	22	15
ZH	905	5	3

ZR 方案下的正、负地闪发生率均比 ZH 方案多。研究表明: 正负电荷区电荷量分布不平衡是产生地闪的重要条件, 正负电荷区的上下配置关系决定了地闪的类型 (Takeuti et al., 1978; Brook et al., 1982; Carey et al., 2003; Krehbiel et al., 2008; Tan et al., 2014; Wang et al., 2016)。本研究中两种方案下模拟的正地闪均触发于主正电荷区与主负电荷区之间, 那么 ZR 方案下的正地闪发生率为什么会比 ZH 方案多? 图 5a、5b 给出了两种方案在 21 min 时的电荷结构剖面图, ZR 方案在 21 min 时触发了两次正地闪, ZH 方案没有正地闪发生。由图可知: ZR 方案中主正电荷区的水平分布大于主负电荷区的水平分布, 主正电荷区的电荷量也大于主负电荷区的电荷量; 而 ZH 方案中主正电荷区与主负电荷区分布尺度以及电荷量相当。Takeuti et al. (1978) 在观测冬季雷暴时发现偶极结构下触发的正地闪, 上部的正电荷堆呈广阔的水平分布并超过了下部的负电荷堆。Wang et al. (2016) 在研究中也提出当上部正电荷堆分布范围和浓度足够大时有利于正地闪的发生。ZR 方案下主正电荷区与主负电荷区电荷分布不平衡程度更高, 主正电荷区的水平分布以及电荷浓度大于主负电荷区, 从而导致 ZR 方案下的正地闪更多。

ZR 方案共触发了 15 次负地闪, 其中有 14 次触发于主正电荷区与主负电荷区之间, 1 次触发于主负电荷区与底部的次正电荷区之间; ZH 方案共

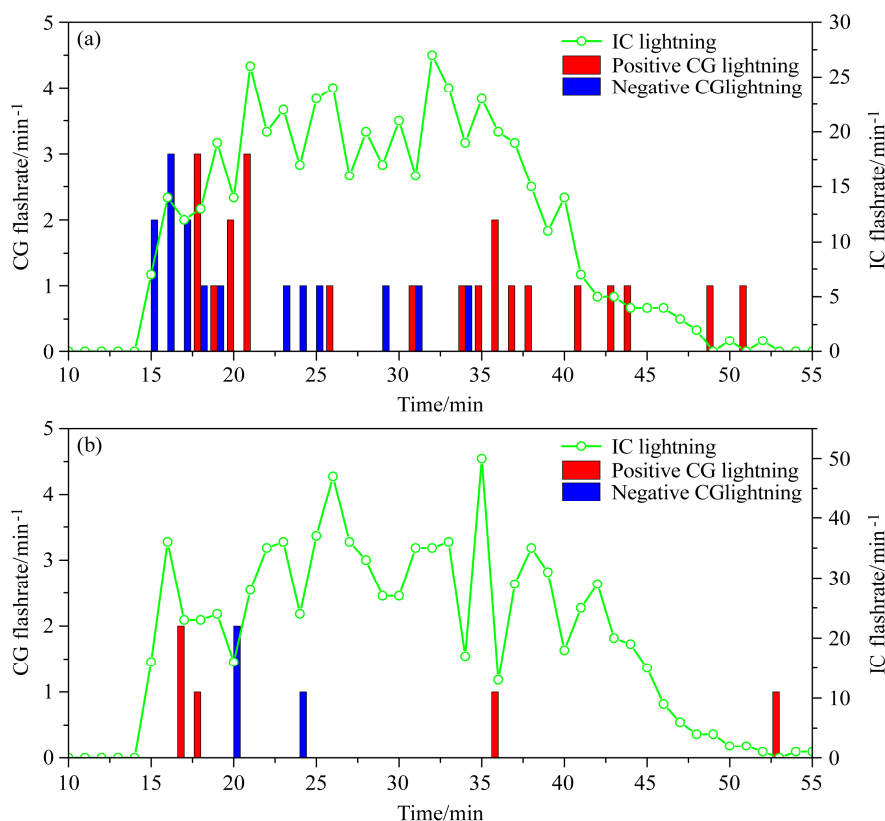


图3 两种重置方案 (a) ZR 方案、(b) ZH 方案下闪电发生率随时间的变化 (IC 为云闪、CG 为地闪)

Fig. 3 The evolution of the flash rate of charge redistribution from (a) ZR scheme and (b) ZH scheme (IC and CG denotes intracloud flash and cloud-to-ground flash, respectively)

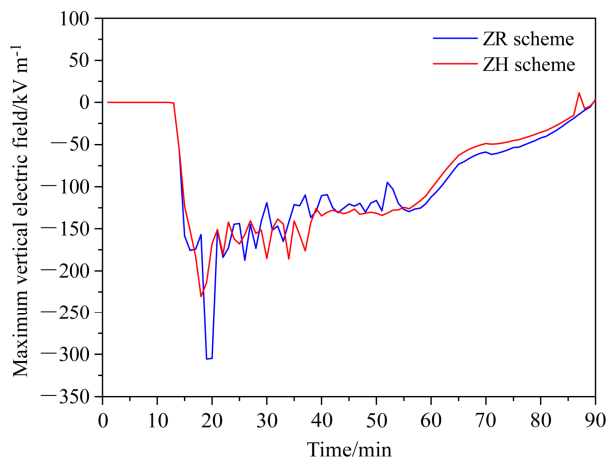


图4 最大垂直电场随时间的变化

Fig. 4 The evolution of the maximum vertical electric field during the lifetime of the thunderstorm

触发了 3 次负地闪, 均触发于主正电荷区与主负电荷区之间。图 6 给出了 ZR 方案在 29 min 触发于主正电荷区与主负电荷区之间的负地闪闪电通道, 正、负先导分别在主负、主正电荷区传播, 负先导穿出上部正电荷区到达地面从而形成负地闪, 负先

导的传播长度远远超过正先导的长度。图 5c、5d 给出了两种方案在 29 min 中的电荷结构剖面图, 由图可以看出: ZR 方案中主正电荷区与主负电荷区的分布不平衡, 并且其主正电荷区与顶部负的屏蔽层发生了混合, 而 ZH 方案中主正电荷区与主负电荷区的电荷分布范围及浓度相当, 并且其主正电荷区没有与顶部的屏蔽层混合。Krehbiel et al. (2008) 在实际观测工作中, 观测到触发于主正电荷区与主负电荷区之间, 负先导穿出上部正电荷区形成的负地闪。他在研究中指出, 云中电荷区之间分布的不平衡以及主正电荷区与顶部屏蔽层的混合有利于类似图 6 的负地闪触发, 这证明我们的模拟是合理的。在模拟过程中发现, ZR 方案在雷暴发展初期到 35 min, 主正电荷区与顶部屏蔽层均有混合现象, 混合时间较长, 混合程度较高; 而 ZH 方案仅在雷暴发展初期 (25 min 前) 主正电荷区与顶部屏蔽层有少量连接混合现象, 而后期主正电荷区与顶部屏蔽层分离。同时由于 ZR 方案中嵌入了大量的异极性电荷, 导致电荷区之间的电荷分布不平衡程度更高, 因此, ZR 方案在雷暴发展初期到 35 min 发生



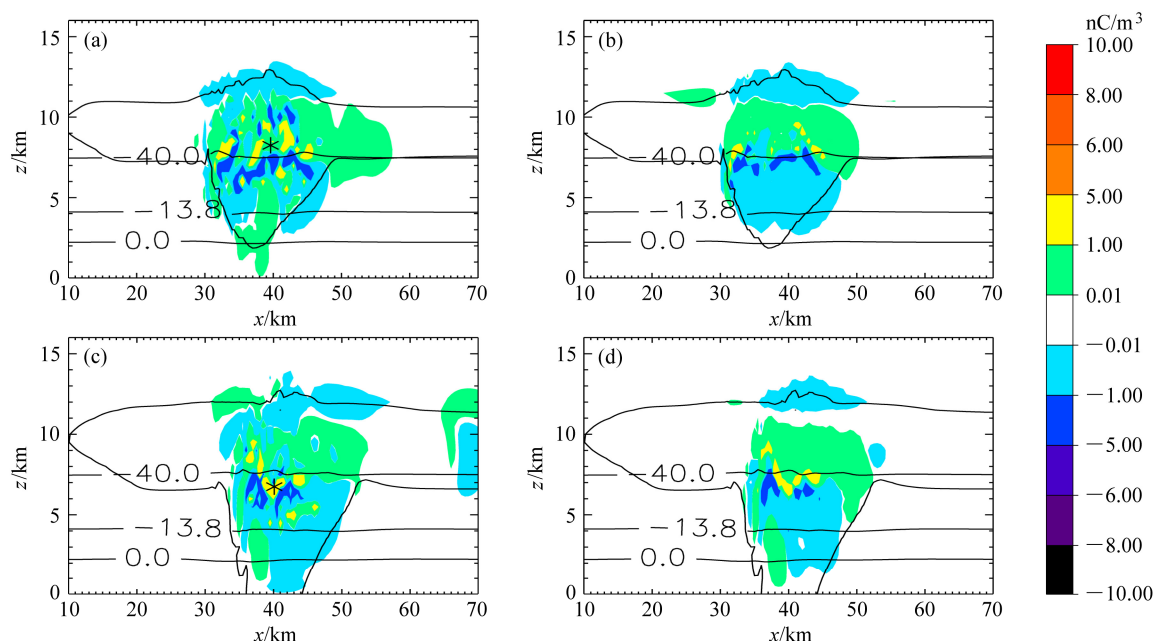


图5 ZR方案(左列)和ZH方案(右列)(a、b) 21 min、(c、d) 29 min 电荷结构垂直剖面分布( $y=48.5$  km)。星号代表闪电电初始触发位置

Fig. 5 Vertical cross sections ( $y=48.5$  km) of the charge structure in the two schemes of charge redistribution at (a, b) 21 min and (c, d) 29 min from ZR scheme (left panel) and ZH scheme (right panel). The asterisk represents the initial point

多次负地闪, ZH 方案仅在 25 min 前发生 3 次负地闪。此外, 由于雷暴发展后期, 电荷结构高度降低, 屏蔽层与主正电荷区分离, 两种重置方案下主正电荷区与主负电荷区之间均没有负地闪触发, 只有正地闪发生。

研究指出, 雷暴云底部正电荷区的大小与负地闪的发生有关, 当底部正电荷区与主负电荷区大小相当时有利于反极性云闪的发生, 而底部正电荷区相对较小时有利于负地闪发生 (Mansell et al., 2002; Qie et al., 2005; Nag and Rakov, 2009; 谭涌波等, 2014)。ZR 方案在 34 min 于主负电荷区与底部正电荷区之间触发了一次负地闪, 通过模拟我们发现: 34 min 时, ZR 方案底部正电荷区的分布范围相对主负电荷区较小, 而 ZH 方案底部正电荷区相对较大, 所以 ZR 方案易在主负电荷区与底部正电荷区之间触发负地闪。

### 3.3 电荷重置对闪电通道长度的影响

闪电产生的氮氧化物 ( $\text{LNO}_x$ ) 作为对流层内氮氧化物的主要来源之一, 控制着对流层  $\text{O}_3$  和 OH 自由基含量, 影响全球环境和气候变化 (郭凤霞等, 2013)。而另一方面, 大量研究表明, 闪电通道长度与  $\text{LNO}_x$  的生成量密切相关 (张义军等, 2002; 周筠珺和鄢秀书, 2002; 郭凤霞等, 2006), 因此,

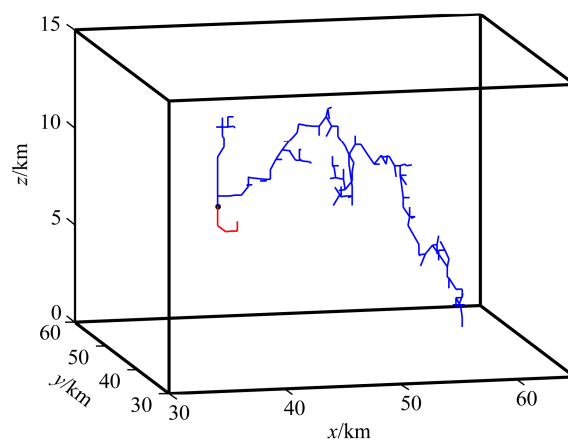


图6 ZR 方案 29 min 时的一次负地闪(蓝线: 负先导; 红线: 正先导; 黑点: 闪电触发点)

Fig. 6 A negative cloud-to-ground (CG) flash at 29 min in the ZR scheme (blue line: negative leader; red line: positive leader; black spot: the initial point)

闪电通道长度具有重要的研究意义。由研究可知, 闪电通道范围 (通道长度) 与雷暴云空间电荷分布 (电荷密度、电荷范围) 紧密相关 (谭涌波等, 2015)。而根据前面的分析, 放电之后雷暴云中电荷再分配方式的不同会导致雷暴云电荷分布表现出明显的差异, 那么不同重置方案下的闪电通道传



播范围也有可能存在差异。

图 7 给出了两种重置方案下不同闪电通道长度对应的云闪(地闪)发生率占总云闪(地闪)发生率的百分比。本文利用闪电通道格点数来表示闪电通道长度, 图中的横坐标表示闪电通道格点数。由图 7a 可知: ZR 方案中随着闪电通道长度增大, 对应的云闪发生率随之减少; 闪电通道长度在 1~21 个格点数的触发的云闪最多, 占总云闪发生率的 64.64%, 超过总云闪的一半以上; 其次是闪电通道长度在 22~61 个格点数的云闪发生率, 占总云闪发生率的 21.81%。ZR 方案中闪电通道长度在 1~61 个格点的云闪发生率接近总云闪发生率的 87%, 说明 ZR 方案触发的云闪闪电通道长度比较短。ZH 方案中随着闪电通道长度增大, 对应的云闪发生率先增加后减少。通道长度在 22~61 个格点数的云闪发生率最多, 占据总云闪发生率的 30.94%, 其次是通道长度在 62~101 个格点数的云闪发生率, 占据总云闪发生率的 23.31%, ZH 方案中接近 67% 的云闪的通道长度在 22~141 个格点数。此外, 对比两种方案下各通道长度对应的云闪发生率占总云闪的比例发现: 对于通道长度在 1~21 个格点数的

云闪发生率占总云闪发生率的比例, ZR 方案远多于 ZH 方案; 而对于通道长度在 22 个格点以上的云闪发生率占总云闪发生率的比例, ZH 方案均比 ZR 方案多。上述结论表明: 放电后雷暴云中电荷如何再分配影响闪电通道长度, ZR 方案下的云闪闪电通道长度小于 ZH 方案下的闪电通道长度。观测发现, 云闪放电过程中有时产生孤立的双极性大脉冲或类似双极性大脉冲, 该放电的空间尺度很小, 通常只有几百米, 一般称为“袖珍云闪”(Smith et al., 1999; 祝宝友等, 2007; 吴亭等, 2012)。袖珍云闪的闪电通道长度很短, 而上述研究表明电荷重置影响云闪通道长度, ZR 方案下的云闪通道长度较短, 那么袖珍云闪的产生可能与放电后异极性电荷植入有关, 这一问题值得进一步探讨分析。

不同电荷重置方案下的云闪通道长度表现出明显的差异, 那么地闪通道长度是否也存在差异性呢? 图 7b 给出了不同闪电通道长度对应的地闪发生率占地闪发生率的百分比。由图可知: ZR 方案中通道长度在 1~21 个格点数的地闪发生率最多, 占据总地闪的 31.08%, 其次是通道长度在 22~61 个格点数的地闪发生率, 占据总地闪的 27.03%,

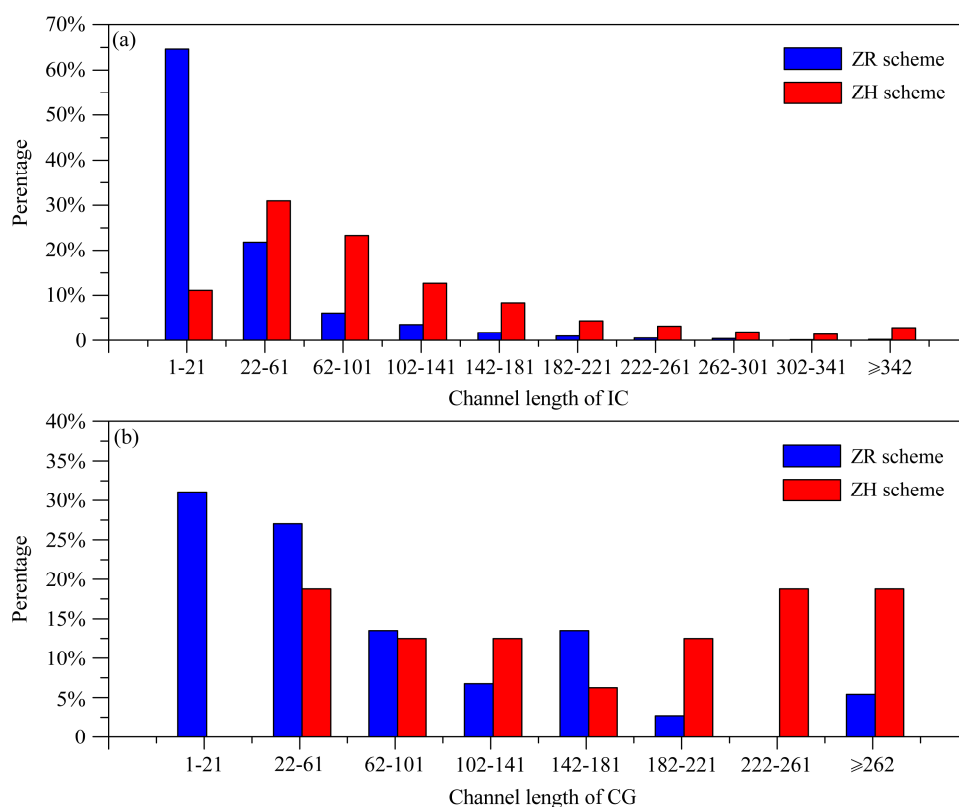


图 7 不同先导长度对应的 (a) 云闪发生率占总云闪发生率的百分比; (b) 同 (a), 但为地闪

Fig. 7 (a) Ratio of intra-cloud flash of different channel lengths to total IC; (b) Same as (a), but for cloud-to-ground flash

通道长度在 1~61 格点数的地闪发生率接近总地闪的 58%; ZH 方案中, 地闪通道长度全部在 22 个格点以上, 闪电通道长度在 22~61、222~261、262 及以上格点数的地闪发生率最多均为 18.75%, 通道格点数在 142 个格点上的地闪发生率接近总地闪的 57%。此外, 对于通道长度在 182 个格点数以上的地闪发生率占总地闪的比例, ZH 方案均比 ZR 方案多。所以, 电荷重置也影响地闪通道长度, ZR 方案下的地闪长度小于 ZH 方案下的地闪长度。

根据以上讨论分析, 可以说明无论是云闪还是地闪, ZR 方案中的闪电通道长度比 ZH 方案中的闪电通道长度短。这主要是由于放电之后, ZR 方案在闪电通道处嵌入了异极性电荷, 使得雷暴在发展的过程中难以形成大范围的同极性电荷堆, 闪电通道在传播的过程中难以穿越与通道极性相同的电荷堆, 闪电传播局限在一对较小的异极性电荷堆里, 因而闪电的通道长度比较小。而 ZH 方案中, 放电之后只是按一定比例降低了闪电通道附近的电荷浓度却并未改变原有的电荷分布形式, 大范围的同极性电荷堆仍然存在, 电荷分布范围比 ZR 方案的范围大, 使得闪电通道的传播范围比较大(谭涌波等, 2015), 所以 ZH 方案中的闪电通道长度比较大。

## 4 结论与讨论

在已有的雷暴云起、放电模式中分别加入两种不同的电荷重置方案, 利用长春一次雷暴天气的探空个例进行敏感性试验, 对比分析了两种电荷重置方案下的电荷结构特征以及闪电行为之间的差异性, 探讨了放电后电荷重置对雷暴云电过程的影响。通过以上研究, 本文得到以下主要结论:

(1) ZR 方案下的每分钟的云闪均比 ZH 方案少。电荷重置影响雷暴云中的电荷分布, 进而影响雷暴云中的闪电行为。ZR 方案在电荷堆植入了大量异极性电荷, 对雷暴云中原有的空间电荷中和的较多, ZH 方案只是按一定比例降低闪电通道处的电荷浓度, 对雷暴云中原有的空间电荷中和的较少, ZR 方案对雷暴云中强电场的摧毁能力比 ZH 方案强, 所以 ZR 方案下的云闪发生率少于 ZH 方案下的云闪发生率。

(2) ZR 方案下的正、负地闪发生率比 ZH 方案多。由于 ZR 方案下主正电荷区与主负电荷区电荷

分布不平衡, 主正电荷区的水平分布尺度以及电荷量大于主负电荷区, 有利于正地闪发生; 而 ZH 方案下主正电荷区与主负电荷区电荷分布相当, 正地闪发生少。此外, ZR 方案下的主正电荷区与主负电荷区分布不平衡并且主正电荷区与顶部屏蔽层发生大量混合, 容易使在上部正电荷区传播的负先导穿出云内到达地面形成负地闪, 而 ZH 方案主正电荷区与主负电荷区分布相当, 并且在整个雷暴发展期间, 主正电荷区与顶部屏蔽层混合时间短, 混合程度相对较小, 所以 ZH 方案下的负地闪较少。

(3) ZR 方案下的闪电通道长度比 ZH 方案下的闪电通道长度短。ZR 方案在电荷区域嵌入了异极性电荷, 使得雷暴在发展的过程中难以形成大范围的同极性电荷堆, 闪电通道在传播的过程中难以穿越与通道极性相同的电荷堆, 局限在一对较小的异极性电荷堆里, 因而闪电的通道长度比较小。而 ZH 方案中, 放电之后只是按一定比例降低了闪电通道附近的电荷浓度却并未改变原有的电荷分布形式, 大范围的同极性电荷堆仍然存在, 电荷分布范围比 ZR 范围大, 使得闪电通道的传播范围比较大, 所以 ZH 方案下的闪电通道长度更大。

需要说明的是, 现阶段雷暴云起放电数值模式工作中关于放电后电荷再分配问题的处理多数研究者采用直接中和法, 但这种处理都是一种简便处理, 没有必要的物理依据, 缺乏一定的合理性, 而放电后异极性电荷的植入更符合现在得到广泛认可的双向先导理论。Coleman et al. (2003) 在对新墨西哥山地雷暴开展云中电场廓线气球探空和闪电 VHF 源定位的联合探测时发现: 闪电放电在中层负电荷区和上部正电荷区的相对局部区域沉积异极性电荷。因此, 我们认为放电后关于电荷再分配的处理考虑异极性电荷的植入更为合理。当然, 模式工作的模拟结果需要观测结果的验证才更具说服力, 实际观测中探测技术在不断进步, 得到的数据资料也在不断更新, 在后面的工作中, 我们将对多个个例进行模拟试验并与观测实验进行对比分析, 进一步佐证完善我们的结论。另一方面, 鉴于不少模式工作者在雷暴云起放电模式中关于放电后电荷再分配的处理采用直接中和法的简单化处理, 这种处理与考虑异极性电荷植入的模拟结果存在多大的差异, 如何评估他们的放电结果, 还需要进行大量个例的模拟对比分析, 从而给出一些定量性的

结论, 这也将是我们下一步工作的重点。

**致谢** 本文所采用的积雨云微物理过程由中国气象科学研究院胡志晋研究员提供。

## 参考文献 (References)

- Akita M, Yoshida S, Nakamura Y, et al. 2011. Effects of charge distribution in thunderstorms on lightning propagation paths in Darwin, Australia [J]. *J. Atmos. Sci.*, 68 (4): 719–726, doi: 10.1175/2010JAS3597.1.
- Baker M B, Christian H J, Latham J. 1995. A computational study of the relationships linking lightning frequency and other thundercloud parameters [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 121 (527): 1525–1548, doi: 10.1002/qj.49712152703.
- 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.
- Carey L D, Petersen W A, Rutledge S A. 2003. Evolution of cloud-to-ground lightning and storm structure in the Spencer, South Dakota, tornadic supercell of 30 May 1998 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131 (8): 1811–1831, doi: 10.1175//2566.1.
- Coleman L M, Marshall T C, Stolzenburg M, et al. 2003. Effects of charge and electrostatic potential on lightning propagation [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D9): 4298, doi:10.1029/2002JD002718.
- 董万胜, 刘欣生, 陈慈萱, 等. 2003. 用宽带干涉仪观测云内闪电通道双向传输的特征 [J]. *地球物理学报*, 46 (3): 317–321. Dong Wansheng, Liu Xinsheng, Chen Cixuan, et al. 2003. Broadband interferometer observations of the bi-directional breakdown process in natural lightning [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 46 (3): 317–321.
- Gardiner B, Lamb D, Pitter R L, et al. 1985. Measurements of initial potential gradient and particle charges in a Montana summer thunderstorm [J]. *J. Geophys. Res.*, 90 (D4): 6079–6086, doi: 10.1029/JD090iD04p06079.
- 郭凤霞, 言穆弘, 张义军. 2006. 闪电产生氮氧化物 ( $\text{LNO}_x$ ) 及其输送过程的模式计算 [J]. *高原气象*, 25 (2): 229–235. Guo Fengxia, Yan Muhong, Zhang Yijun. 2006. A model study of lightning-generated  $\text{NO}_x$  ( $\text{LNO}_x$ ) and its transportation [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25 (2): 229–235.
- 郭凤霞, 鞠晓雨, 陈聪. 2013. 估算闪电产生氮氧化物量的研究回顾与进展 [J]. *地球科学进展*, 28 (3): 305–317. Guo Fengxia, Ju Xiaoyu, Chen Cong. 2013. Review and progress of estimate on nitrogen oxide production by lightning [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 28 (3): 305–317, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2013.03.0305.
- 郭凤霞, 王昊亮, 孙京, 等. 2015. 积云模式下三维闪电分形结构的数值模拟 [J]. *高原气象*, 34 (2): 534–545. Guo Fengxia, Wang Haoliang, Sun Jing, et al. 2015. Simulation of three-dimensional fractal structure of lightning in a thunderstorm model [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 34 (2): 534–545, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00193.
- 郭凤霞, 陆干沂, 吴鑫, 等. 2016. 强雷暴中正地闪发生的条件 [J]. *中国科学: 地球科学*, 46 (5): 730–742. Guo Fengxia, Lu Ganyi, Wu Xin, et al. 2016. Occurrence conditions of positive cloud-to-ground flashes in severe thunderstorms [J]. *Science China: Earth Sciences*, 59 (7): 1401–1413.
- 黄丽萍, 管兆勇, 陈德辉, 等. 2008. 基于高分辨率中尺度气象模式的实际雷暴过程的数值模拟试验 [J]. *大气科学*, 32 (6): 1341–1351. Huang Liping, Guan Zhaoyong, Chen Dehui, et al. 2008. Numerical simulation experiments of a thunderstorm process based on a high resolution mesoscale model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (6): 1341–1351, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.06.09.
- Kasemir H W. 1960. A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge [J]. *J. Geophys. Res.*, 65 (7): 1873–1878, doi: 10.1029/JZ065i007p01873.
- Krehbiel P R, Rioussset J A, Pasko V P, et al. 2008. Upward electrical discharges from thunderstorms [J]. *Nature Geoscience*, 1 (4): 233–237, doi: 10.1038/ngeo162.
- Liu D X, Qie X S, Peng L, et al. 2014. Charge structure of a summer thunderstorm in North China: Simulation using a regional atmospheric model system [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 31 (5): 1022–1034, doi: 10.1007/s00376-014-3078-7.
- MacGorman D R, Straka J M, Ziegler C L. 2001. A lightning parameterization for numerical cloud models [J]. *J. Appl. Meteor.*, 40 (3): 459–478, doi: 10.1175/1520-0450(2001)040<0459:ALPFCN>2.0.CO;2.
- Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. 2002. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D9): ACL 2-1–ACL 2-12, doi: 10.1029/2000JD000244.
- Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. 2005. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D12): D12101, doi: 10.1029/2004JD005287.
- Nag A, Rakov V A. 2009. Some inferences on the role of lower positive charge region in facilitating different types of lightning [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (5): L05815, doi:10.1029/2008GL036783.
- Qie X S, Zhang T L, Chen C P, et al. 2005. The lower positive charge center and its effect on lightning discharges on the Tibetan Plateau [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (5): L05814, doi:10.1029/2004GL022162.
- Rawlins F. 1982. A numerical study of thunderstorm electrification using a three dimensional model incorporating the ice phase [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 108 (458): 779–800, doi: 10.1002/qj.49710845804.
- Schonland B F J. 1938. Progressive lightning. IV. The discharge mechanism [J]. *Proc. Roy. Soc. London*, 164 (916): 132–150, doi:10.1098/rspa.1938.0009.
- Shao X M, Krehbiel P R. 1996. The spatial and temporal development of intracloud lightning [J]. *J. Geophys. Res.*, 101 (D21): 26641–26668, doi: 10.1029/96JD01803.
- Smith D A, Shao X M, Holden D N, et al. 1999. A distinct class of isolated intracloud lightning discharges and their associated radio emissions [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D4): 4189–4212, doi: 10.1029/1998JD200045.
- Takahashi T. 1987. Determination of lightning origins in a thunderstorm model [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65 (5): 777–794, doi:10.2151/jmsj1965.65.5\_777.
- Takeuti T, Nakano M, Brook M, et al. 1978. The anomalous winter thunderstorms of the Hokuriku Coast [J]. *J. Geophys. Res.*, 83 (C5): 2385–2394, doi:10.1029/JC083iC05p02385.

- Tan Y B, Tao S C, Zhu B Y. 2006. Fine-resolution simulation of the channel structures and propagation features of intracloud lightning [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (9): L09809, doi: 10.1029/2005GL025523.
- Tan Y B, Tao S C, Liang Z W, et al. 2014. Numerical study on relationship between lightning types and distribution of space charge and electric potential [J]. *J. Geophys. Res.*, 119 (2): 1003–1014, doi: 10.1002/2013JD019983.
- 谭涌波, 陶善昌, 祝宝友, 等. 2006. 雷暴云内闪电双层、分枝结构的数值模拟 [J]. *中国科学: 地球科学*, 36 (5): 486–496. Tan Yongbo, Tao Shanchang, Zhu Baoyou, et al. 2006. The numerical simulation of thundercloud lightning double and branch structure [J]. *Science China: Earth Sciences (in Chinese)*, 36 (5): 486–496.
- 谭涌波, 陶善昌, 祝宝友, 等. 2007. 云内放电对云内电荷和电位分布影响的数值模拟 [J]. *地球物理学报*, 50 (4): 1053–1065. Tan Yongbo, Tao Shanchang, Zhu Baoyou, 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 Journal of Geophysics (in Chinese)*, 50 (4): 1053–1065.
- 谭涌波, 梁忠武, 师正, 等. 2014. 雷暴云底部正电荷区对闪电类型影响的数值模拟 [J]. *中国科学: 地球科学*, 44 (12): 2743–2752. Tan Yongbo, Liang Zhongwu, Shi Zheng, et al. 2014. Numerical simulation of the effect of lower positive charge region in thunderstorms on different types of lightning [J]. *Science China: Earth Sciences*, 57 (9): 2125–2134.
- 谭涌波, 梁忠武, 师正, 等. 2015. 空间电荷分布特征对云内传播行为的影响 [J]. *高原气象*, 34 (5): 1502–1510. Tan Yongbo, Liang Zhongwu, Shi Zheng, et al. 2015. Effect of distribution characteristic of space charge on propagation behavior of intra-cloud lightning discharge [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 34 (5): 1502–1510.
- Tao S C, Tan Y B, Zhu B Y, et al. 2009. Fine-resolution simulation of cloud-to-ground lightning and thundercloud charge transfer [J]. *Atmospheric Research*, 91 (2–4): 360–370, doi:10.1016/j.atmosres.2008.05.012.
- Wang H L, Guo F X, Zhao T L, et al. 2016. A numerical study of the positive cloud-to-ground flash from the forward flank of normal polarity thunderstorm [J]. *Atmospheric Research*, 169: 183–190, doi: 10.1016/j.atmosres.2015.10.011.
- 吴亨, 董万胜, 李良福, 等. 2012. 基于电离层反射的袖珍云闪 (CID) 三维定位研究 [J]. *地球物理学报*, 55 (4): 1095–1103. Wu Ting, Dong Wansheng, Li Liangfu, et al. 2012. 3D location of compact intracloud discharge based on its ionospheric reflection pair [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 55 (4): 1095–1103, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.004.
- 徐良韬, 张义军, 王飞, 等. 2012. 雷暴起电和放电物理过程在 WRF 模式中的耦合及初步检验 [J]. *大气科学*, 36 (5): 1041–1052. Xu Liangtao, Zhang Yijun, Wang Fei, et al. 2012. Coupling of electrification and discharge processes with WRF model and its preliminary verification [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (5): 1041–1052, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11235.
- 张义军, 言穆弘, 杜健. 2002. 闪电产生氮氧化物 ( $\text{LNO}_x$ ) 区域特征计算(I): 理论和计算方法 [J]. *高原气象*, 21 (4): 348–353. Zhang Yijun, Yan Muhong, Du Jian. 2002. Regional characteristic calculation of lightning production of nitrogen oxides ( $\text{LNO}_x$ ) (I): Theory and calculation method [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 21(4): 348–353.
- Zhao P G, Yin Y, Xiao H. 2015. The effects of aerosol on development of thunderstorm electrification: A numerical study [J]. *Atmospheric Research*, 153: 376–391, doi: 10.1016/j.atmosres.2014.09.011.
- 郑栋, 张义军, 马明, 等. 2007. 大气环境层结对闪电活动影响的模拟研究 [J]. *气象学报*, 65 (4): 622–632. Zheng Dong, Zhang Yijun, Ma Ming, et al. 2007. Simulation study on the influence of atmospheric stratification on lightning activity [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (4): 622–632, doi:10.11676/qxb2007.057.
- Zheng D, Zhang Y J, Meng Q, et al. 2010. Lightning activity and electrical structure in a thunderstorm that continued for more than 24 h [J]. *Atmospheric Research*, 97 (1–2): 241–256, doi: 10.1016/j.atmosres.2010.04.011.
- 周筠珺, 鄯秀书. 2002. 闪电产生  $\text{NO}_x$  机制及中国内陆闪电产生  $\text{NO}_x$  量的估算 [J]. *高原气象*, 21 (5): 501–508. Zhou Yunjun, Qie Xiushu. 2002. Mechanism and estimation of lightning-generated  $\text{NO}_x$  in Chinese inland area [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 21 (5): 501–508.
- 祝宝友, 陶善昌, 谭涌波. 2007. 伴随超强 VHF 辐射的闪电双极性窄脉冲初步观测 [J]. *气象学报*, 65 (1): 124–130. Zhu Baoyou, Tao Shanchang, Tan Yongbo. 2007. Initial observations of the lightning narrow bipolar pulses with very powerful VHF radiation [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (1): 124–130.
- Ziegler C L, MacGorman D R, Dye J E, et al. 1991. A model evaluation of noninductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorm [J]. *J. Geophys. Res.*, 96 (D7): 12833–12855, doi: 10.1029/91JD01246.
- Ziegler C L, MacGorman D R. 1994. Observed lightning morphology relative to modeled space charge and electric field distributions in a tornadic storm [J]. *J. Atmos. Sci.*, 51 (6): 833–851, doi: 10.1175/1520-0469(1994)051<0833:OLMRTM>2.0.CO;2.