

于梦颖, 谭涌波, 师正, 等. 通道感应电荷对放电活动特征的影响. 应用气象学报, 2019, 30(1): 105-116.

DOI: 10. 11898/1001-7313. 20190110

## 通道感应电荷对放电活动特征的影响

于梦颖 谭涌波\* 师正 刘俊 王梦旖 郑天雪

(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

为探究闪电放电后电荷重置方案中异极性电荷植入法对雷暴云放电效应的影响, 利用已有的三维雷暴云起放电模式, 结合 2011 年 8 月 12 日发生在南京地区一次典型的雷暴个例, 通过控制倍数改变闪电通道感应电荷量进行大量敏感性试验。模拟结果表明: 闪电通道感应电荷量对空间电荷结构分布和云闪通道长度有明显影响。通道感应电荷量增加, 即空间异极性电荷堆增多, 加大空间电荷结构复杂程度; 云闪通道在发展过程中难以穿越与自身极性相同的电荷堆, 导致短通道云闪频次增加。通道感应电荷累积总量相同, 不同闪电通道感应电荷量下云闪频次与通道电荷平均累积量呈负相关, 即通道感应电荷平均累积量增大, 云闪频次减少。而地闪频次、类型与通道感应电荷量相关性不明显。

**关键词:** 通道感应电荷量; 电荷结构; 云闪通道长度; 闪电频次

### 引 言

雷暴云空间电荷结构与闪电的产生联系密切。在首次闪电前, 云中空间电荷结构主要受水成物粒子相互作用以及平流、扩散、沉降等活动的影响<sup>[1-2]</sup>; 放电后, 空间电荷结构不但受云内微物理及起电过程的作用, 而且受到闪电放电的影响<sup>[3-4]</sup>。放电后电荷重新分配使云中电荷结构发生改变, 进而影响接下来的闪电活动<sup>[5]</sup>。在实际观测中, 一次雷暴过程的电荷结构分布较为复杂。在相同高度可能存在相反极性电荷堆, 并且在雷暴发展不同阶段空间电荷结构分布均有差异<sup>[6-7]</sup>。由于现阶段观测手段的局限性, 无法全面获取空间电荷结构分布特征, 难以深入探讨闪电放电对雷暴云电过程的影响, 利用数值模拟探讨雷暴云放电效应是当前最有效的手段之一。

放电后空间电荷的重新分配是雷暴云起、放电模式需考虑的一个重要环节, 目前有两种主要方法:

一种是根据闪电结束后空中电荷应减少, 直接考虑其效果而忽略物理过程的中和法, 即放电结束后, 直接按照一定比例降低闪电通道处空间电荷密度<sup>[8-16]</sup>。该方法未计算通道处感应电荷, 因此, 大大减少了模式计算量; Coleman 等<sup>[17]</sup>对比美国新墨西哥州(New Mexico)山地雷暴三维闪电观测网及气球电场探空资料表明: 闪电放电后在雷暴云上部正电荷区和中部负电荷区的相对局部区域内会沉积异极性电荷, 而这一现象无法通过中和法解释清楚。除此之外, 一些观测结果表明, 闪电结束后, 下一次闪电可能在前一次闪电通道经过的地方初始<sup>[18]</sup>, 与中和法直接降低云中电荷密度也不匹配。另一种是根据双向先导理论, 认为降低云中电荷密度可通过在闪电通道经过的某些区域嵌入与周围环境极性相反的感应电荷, 并使沿闪电通道附近格点处电荷极性发生反转。该过程可通过将放电后通道感应电荷替换空间原有电荷或通道感应电荷和空间原有电荷叠加实现<sup>[4, 18-22]</sup>, 这种方法被称为异极性电荷植入法。夏艳玲等<sup>[23]</sup>对比这两种电荷重置方案下闪电类型、

2018-08-02 收到, 2018-09-05 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研究发展计划(2017YFC1501504), 国家自然科学基金项目(41875003), 南京信息工程大学人才启动项目(2016r042)

\* 通信作者, 邮箱: ybtan@ustc.edu

闪电发生率及闪电通道传播的差异,认为处理放电后电荷重新分配方式采用异极性电荷植入法较为合理。由于目前大部分放电模式所选取的空间分辨率<sup>[4,18]</sup>均远大于实际先导的直径,通过高斯方程计算得到的通道感应电荷量具有很大不确定性<sup>[4,18-19]</sup>,如何合理评估闪电放电对雷暴云电过程的影响仍然是目前学术界面临的难题之一。

本文在已有的三维雷暴云起、放电数值模式中,结合南京地区的一次典型雷暴过程,通过调整通道电荷感应电荷量进行大量敏感性试验,分析在异极性电荷植入法中雷暴云电荷结构、闪电类型和频次以及闪电通道长度的变化规律。

## 1 模式简介

本研究采用已有的三维起放电雷暴模型,该模型的微物理和动力学框架、起电放电过程可参考文献<sup>[5,18-19]</sup>,本文不再详细阐述。模式选用2011年8月12日发生在南京一次典型雷暴过程作为雷暴云背景进行三维放电模拟。模拟区域为 $76\text{ km} \times 76\text{ km} \times 20\text{ km}$ ,云模式框架以及放电模块均采用 $500\text{ m}$ 为三维空间分辨率。其中南京个例的探空曲线如图1所示,模式中椭圆热湿泡扰动水平半径为 $5\text{ km}$ ,垂直半径为 $1\text{ km}$ ,中心最大温度及相对湿度扰

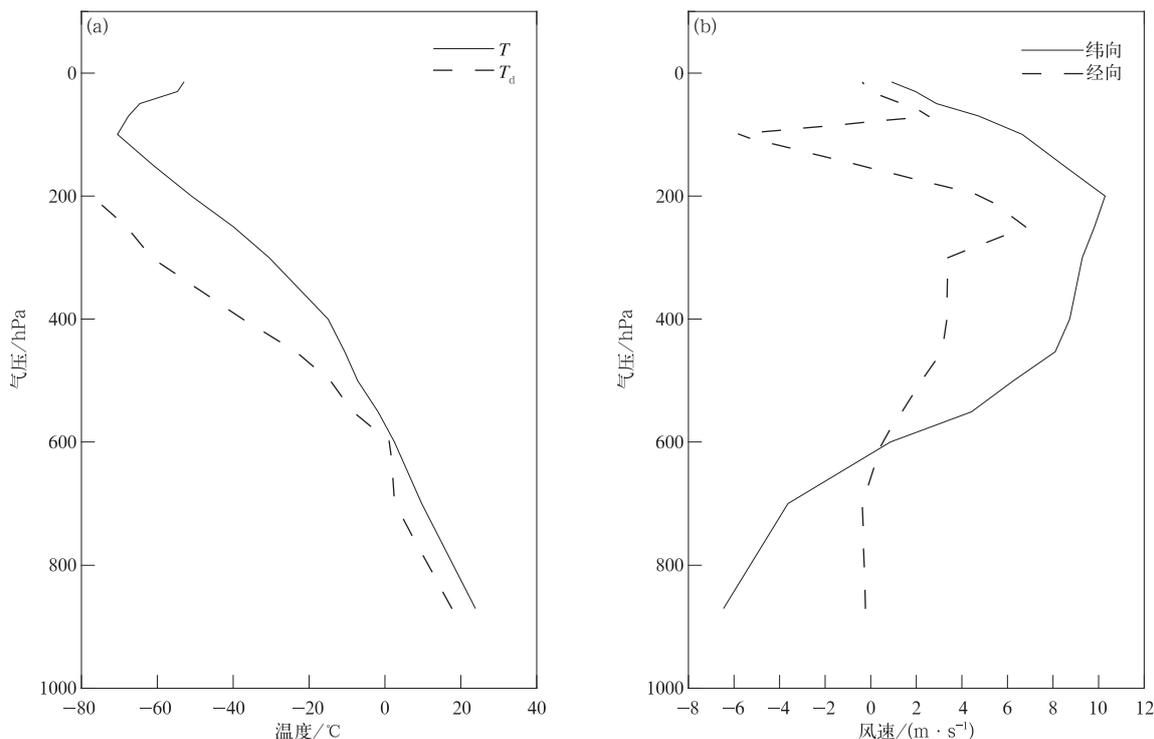


图1 模式采用的环境层结曲线(a)和垂直风廓线(b)

Fig.1 Environmental stratification curve(a) and vertical wind profile(b)

动分别为 $2\text{ K}$ 和 $75\%$ ;模拟时间为 $90\text{ min}$ ,时间步长为 $4\text{ s}$ 。需要说明的是,本文中所用的雷暴云个例只用来提供初始场数据以及雷暴云背景,其演变过程并未在文中展开讨论。

### 1.1 通道内感应电荷的计算

对于闪电通道内感应电荷的计算,本研究将闪电通道视为良导体,导体内部电位为常数,根据高斯定理,通道表面的面电荷密度可以通过计算获得。为了有效控制通道内感应电荷量,增加控制系数,

$$\alpha \times \epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial n} = -\sigma. \quad (1)$$

式(1)中, $\alpha$ 为通道感应电荷控制倍数, $\epsilon$ 为空气的介电常数, $\varphi$ 为通道格点处电位, $n$ 为导体表面的法线方向, $\sigma$ 为通道导体的面电荷密度。模式中通过调整 $\alpha$ 改变通道内感应电荷量进行敏感性试验,探讨其对雷暴云电过程的影响。其中感应控制倍数 $\alpha$ 分别选取 $0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 1$ ;文中闪电通道长度利用模拟域中的网格点数表示。

## 1.2 电荷再分配

在一次闪电放电结束后,通道上的异极性感应电荷按照闪电通道以及附近格点处各水成物粒子的表面积分配这些感应电荷,同时考虑了水成物粒子自身的电荷,该方法参考了郭凤霞等<sup>[4]</sup>关于电荷再分配的处理方式,

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

式(2)中, $\delta Q_k$ 为放电后水成物粒子  $k$  的电荷密度, $\sigma_k$ 为水成物粒子  $k$  的表面积, $\sum_i \sigma_i$ 为所有水成物粒子的表面积总和, $\delta \rho_T$ 为通道格点上的感应电荷密度, $\delta \rho_{ex}$ 为闪电发生前该格点水成物所携带的电荷密度。

## 2 模拟结果

### 2.1 不同感应控制倍数下通道电荷量对电荷结构、通道长度的影响

放电后云中电荷密度降低并不是简单地被闪电通道感应电荷中和或者抵消,而是在通道经过的地方嵌入与周围空间电荷极性相反的异极性电荷<sup>[5]</sup>。植入异极性电荷与空中原有电荷叠加后,导致空间电荷结构分布不平衡,即在相同电荷区域内云中电荷极性出现相互交错的空间结构分布<sup>[18,24-27]</sup>。而通道感应电荷量不同,空间电荷结构分布不平衡将有所差异。图 2 给出不同感应控制倍数下前 10 次闪电过程放电前后空间电荷极性反转情况,图中横坐标表示连续发生的 10 次闪电,纵坐标表示放电前后空间电荷极性反转格点数。其中,电荷极性反转格点数指放电结束后空中格点的电荷极性与放电前不一致,则记录为 1 个反转格点数,统计整个空间所有格点的反转情况。放电发生时,云的动力-微物理过程并不发生变化,空间电荷极性的变化皆由放电过程引起。由图 2 可知,在首次云闪时放电前后空间电荷极性反转格点数相同,但随着闪电次数增加,放电前后空间电荷极性反转格点数和闪电发生次序呈正相关;不仅如此,放电前后空间电荷密度反转格点数在不同通道感应倍数下,通道感应电荷量越多,放电前后电荷密度反转格点数也会增多,即通道感应电荷量与放电前后空间电荷极性反转格点数呈正相关。这说明通道感应电荷量越多,雷暴云中出現与原有空间电荷极性相反的电荷堆增多,加大了空间

电荷结构分布不均的程度。

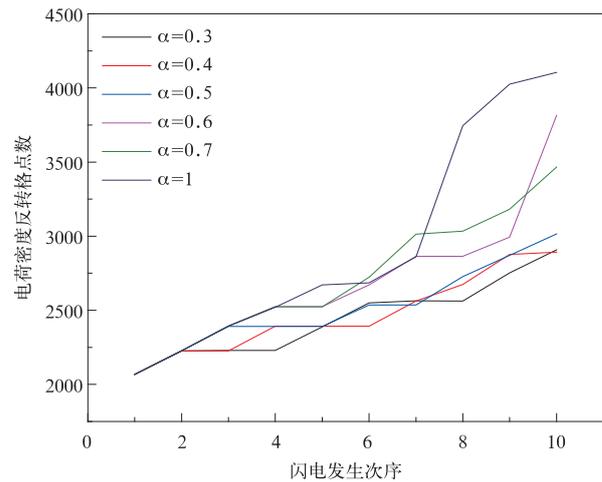


图 2 不同感应控制倍数下空间电荷极性反转格点数随闪电次序变化趋势

Fig. 2 The variation trend of spatial charge polarity reversal lattice points with lightning order under different induction control multiples

本文选取的这 10 次连续闪电发生时期处于雷暴发展初期(17~25 min),因此,挑选了在不同感应控制倍数下时间  $t=21$  min,水平方向  $y=42$  km 时雷暴云空间电荷结构剖面(如图 3 所示)。通过对比不同感应控制倍数下电荷结构特征可以看到,该时刻雷暴云呈三极性结构,表现为屏蔽层、主正、主负及底部正电荷区。图 3 中, $\alpha=0.3$  时雷暴云电荷结构相对规整(通过异极性电荷堆多少说明电荷结构的复杂程度,异极性电荷堆越多,即空间结构越发复杂,反之较为规整),主正、负电荷区中夹杂的异极性电荷堆相对于其他几种感应控制倍数下最小;图 3 中, $\alpha=0.4, \alpha=0.5, \alpha=0.6, \alpha=0.7, \alpha=1$  时主正、负电荷区都夹杂着不同程度异极性电荷堆。图 3 中, $\alpha=1$  时空间电荷结构复杂程度最高,主负电荷区中正极性电荷堆最多,电荷密度相对较大,且主正电荷区也因异极性电荷堆显得杂乱无章。由于通道感应电荷量的不同,闪电通道长度以及闪电发生频次均有变化,导致异极性电荷沉积的区域也会发生改变。图 3 中, $\alpha=0.3, \alpha=0.5$  时,主正电荷区电荷相对规整,在负极性电荷区则会有一些异极性电荷堆;而  $\alpha=0.4, \alpha=0.6, \alpha=0.7, \alpha=1$  时,主正电荷区中沉积的异极性电荷更多,主负电荷区相对较少。虽然截取的剖面受到闪电通道长度以及该时刻所发生的闪电次数而存在差异,仅通过该图说明通道感应电

荷量越多,空间电荷结构越复杂仍不充分。结合图2可知,空间电荷结构分布随通道电荷量的增加其杂乱程度也会有所增加,即通道感应电荷量越多,空间电荷结构相对越复杂。就底部正电荷区的差异而言,不同感应控制倍数下底部正电荷区范围及电荷量均有一定变化。由图3可以发现,顶部屏蔽层与

主正电荷区混合程度在不同感应控制倍数下也有差异,Krehbiel等<sup>[28]</sup>在实际观测中发现:当云中电荷区分布不平衡及主正电荷区与屏蔽层存在一定程度混合,可能引发逃离雷暴云放电。由此可见,不同通道感应电荷量下,通道感应电荷累积量、闪电通道长度与电荷结构复杂程度关系密切<sup>[29-31]</sup>。

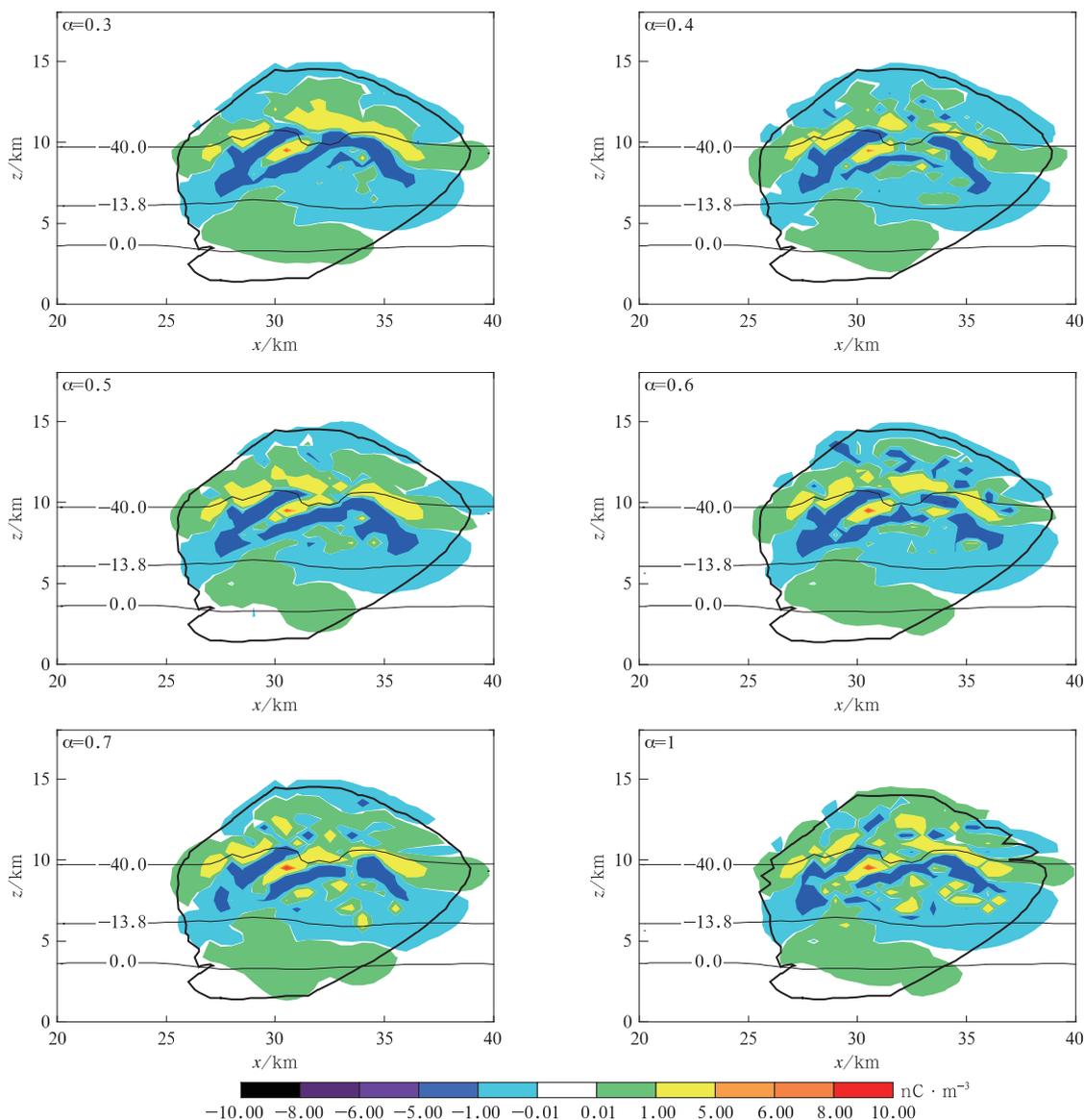


图3 不同感应控制倍数下  $t=21$  min,  $y=42$  km 时电荷结构剖面

(水平横线代表  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $-13.8^{\circ}\text{C}$ ,  $-40^{\circ}\text{C}$  等温线;粗黑线代表雷暴云轮廓)

Fig. 3 Cross-section of the charge structure when  $t=21$  min,  $y=42$  km

(isotherms of  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $-13.8^{\circ}\text{C}$ ,  $-40^{\circ}\text{C}$  are shown, thick black lines show the contour structure of the thundercloud)

图4给出了云闪通道感应电荷平均累积量、通道长度及闪电频次随时间变化趋势。由图4a、图4b

可以看到,不同感应控制倍数下通道感应电荷平均累积量在雷暴发展期(17~25 min)呈递增趋势且在

25 min 达到峰值,通道平均长度与通道感应控制倍数保持了同样趋势。通道感应电荷平均累积量、通道平均长度与感应控制倍数分别呈正、负相关,结合图 4c 可知,在雷暴发展期闪电通道平均长度随通道感应电荷量的增多呈减少趋势,但闪电频次随通道感应倍数的增大而增多,导致通道感应电荷平均累积量变多;雷暴成熟期(26~55 min),不同感应控制倍数下(图 4a),通道电荷平均累积量在 30~33 min 出现谷值,闪电通道的平均长度及闪电频次在这段

时间内均呈现较小的变化趋势。由图 4 可知,雷暴消散期(56~70 min),随时间变化通道电荷平均累积量和闪电频次均呈递减趋势,且在不同感应控制倍数下变化差异不大。但通道平均长度却出现波动,整体随通道感应电荷量的增大而减少,由此可见,通道电荷平均累积量不仅与云闪通道长度及云闪频次有关,还可能与通道格点处和周围环境的电位差有关。

谭涌波等<sup>[32]</sup>研究表明:闪电通道长度(通道范

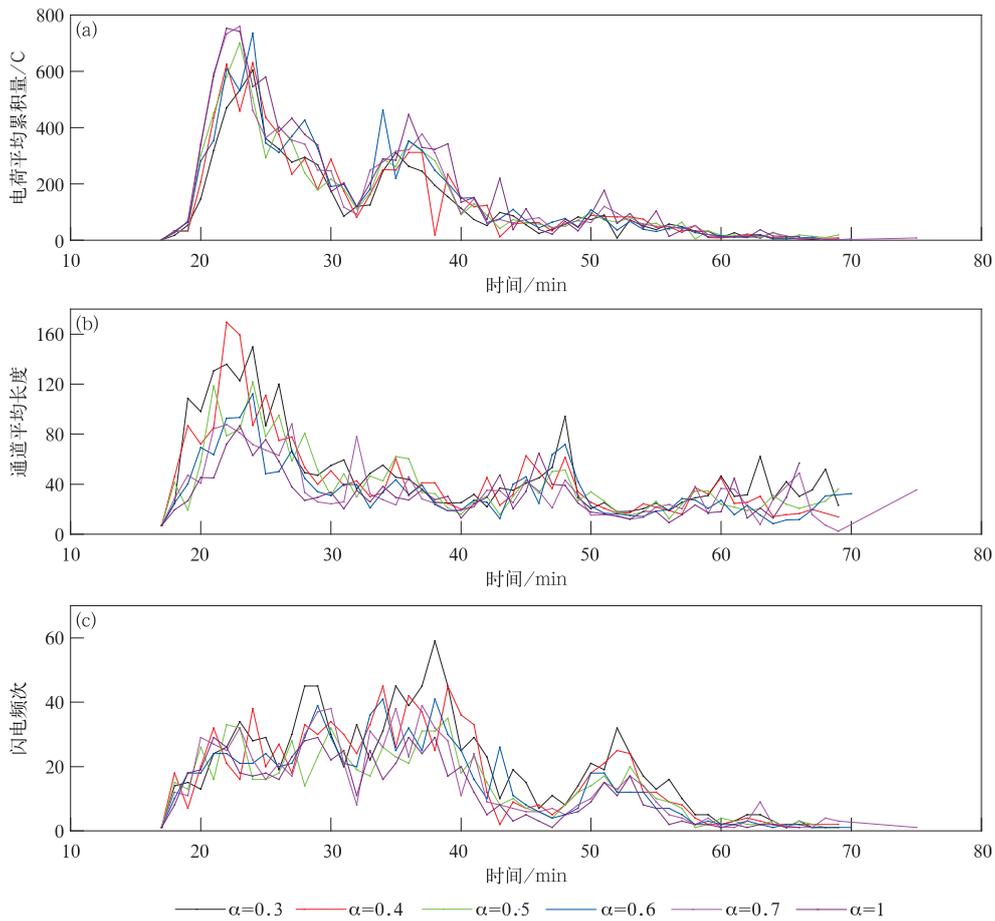


图 4 云闪的通道感应电荷平均累积量、通道平均长度及闪电频次随时间变化

(a)云闪通道感应电荷平均累积量,(b)云闪通道平均长度,(c)云闪频次

Fig. 4 The average cumulative amount of channel-induced charge, mean channel length, and lightning frequency change over time in the intra-cloud flash

(a)the average cumulative amount of induced charges of the intra-cloud flash channel,

(b)the average length of the intra-cloud flash channel,

(c)the frequency of intra-cloud flash

围)与雷暴云中空间电荷分布(电荷密度、电荷范围)密切相关。为进一步探讨不同感应控制倍数下空间电荷结构与闪电通道长度的关系,图 5 给出了先导

长度对应的云闪发生率占总云闪发生率的百分比随闪电通道长度的变化趋势。由图 5a 可以看到,云闪发生率占总云闪发生率百分比随通道长度延长呈先

增加后减少趋势,对比感应控制倍数为0.3~0.7及1的情况下,发现1~40格点内云闪发生率所占百分比差异更明显。因此,对云闪通道长度处在1~

42格点内的云闪发生率所占百分比进行详细划分(图5b)。由图5b可知,随云闪通道长度增加即格点数增多,云闪发生率也呈先增加后减少趋势,但不

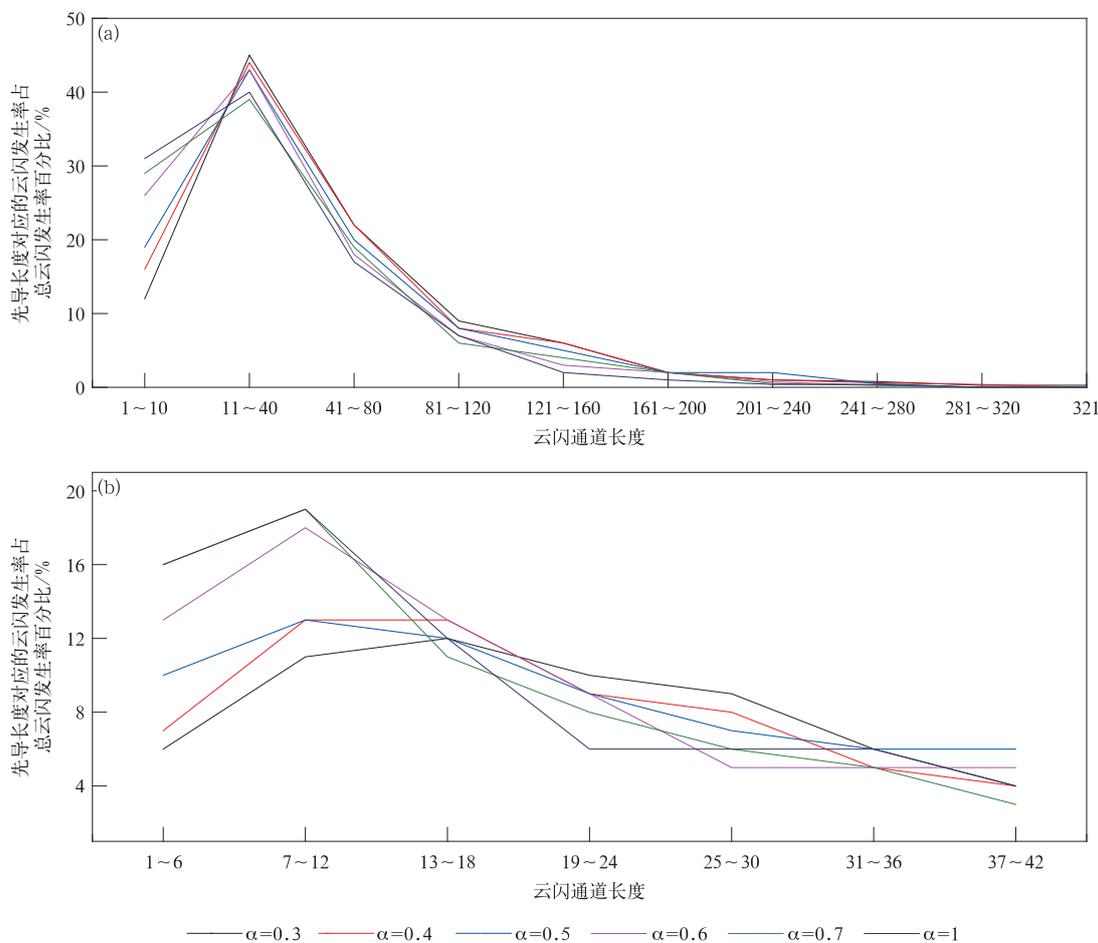


图5 不同感应控制倍数下先导长度对应的云闪发生率占总云闪发生率的百分比  
(a)云闪通道长度在1~321个格点处,(b)云闪通道长度在1~42个格点处

Fig. 5 Ratio of intra-cloud flash of channel lengths to total intra-cloud flash  
under different induction control multiples

(a)channel lengths of the intra-cloud flash at 1-321 grid points,

(b)channel lengths of the intra-cloud flash at 1-42 grid points

同感应控制倍数下云闪发生率峰值点所处闪电通道长度有所差异,随感应控制倍数增加,云闪发生率峰值点所处位置的闪电通道长度减少。且在1~12格点处,云闪发生率与感应控制倍数呈正相关,即感应控制倍数越大,短通道云闪(通道长度在1~12格点内所触发的云闪)越多。图5所体现的特征可以结合图2和图3空间电荷结构进行解释:通道感应电荷量的增多导致空间电荷结构越发复杂,即异极性电荷堆增多,难以形成大范围同极性电荷堆。闪电通

道在传播过程中很难穿越与通道极性相同的电荷堆,因此,云闪通道在发展过程中仅局限于一对较小的异极性电荷堆中,这样闪电通道长度在较短范围内触发的云闪会增加,即短通道云闪增多。

由于短通道云闪占总云闪比例较高,图6给出了不同感应控制倍数下正负极性短通道云闪触发高度分布特征。由图6可知,在这6种感应电荷控制倍数下,短通道云闪所触发的高度大致相同。其中,正、负极性短通道云闪发生在不同高度范围,正极性

短通道云闪主要发生高度为 8~11 km,在雷暴云主正与主负电荷区触发,负极性短通道云闪主要发生高度为 4~6 km,触发在雷暴云主负与次正之间;且在云闪频次上有所差异,随着感应控制倍数增加,正极性短通道云闪频次变多,而负极性短通道云闪变化差异不明显。由图 6 还可知,这种短通道云闪与观测中双极性窄脉冲事件(放电空间尺度很小,且放电过程有强烈的甚高频辐射)的触发高度较为相似,

且具有较短的空间尺度。正极性短通道云闪触发高度也符合 Smith 等<sup>[33]</sup>、Zhu 等<sup>[34]</sup>和吴亭等<sup>[35]</sup>的计算结果;由于较低高度负极性窄脉冲观测个例较少<sup>[36-38]</sup>,其结果有待进一步探究。姜睿娇等<sup>[39]</sup>、张骁等<sup>[40]</sup>利用观测资料对双极性窄脉冲的发生位置进行分析,再次说明在 4~8 km(即中部主负电荷区与次正电荷区)也有少量的负极性云闪触发。

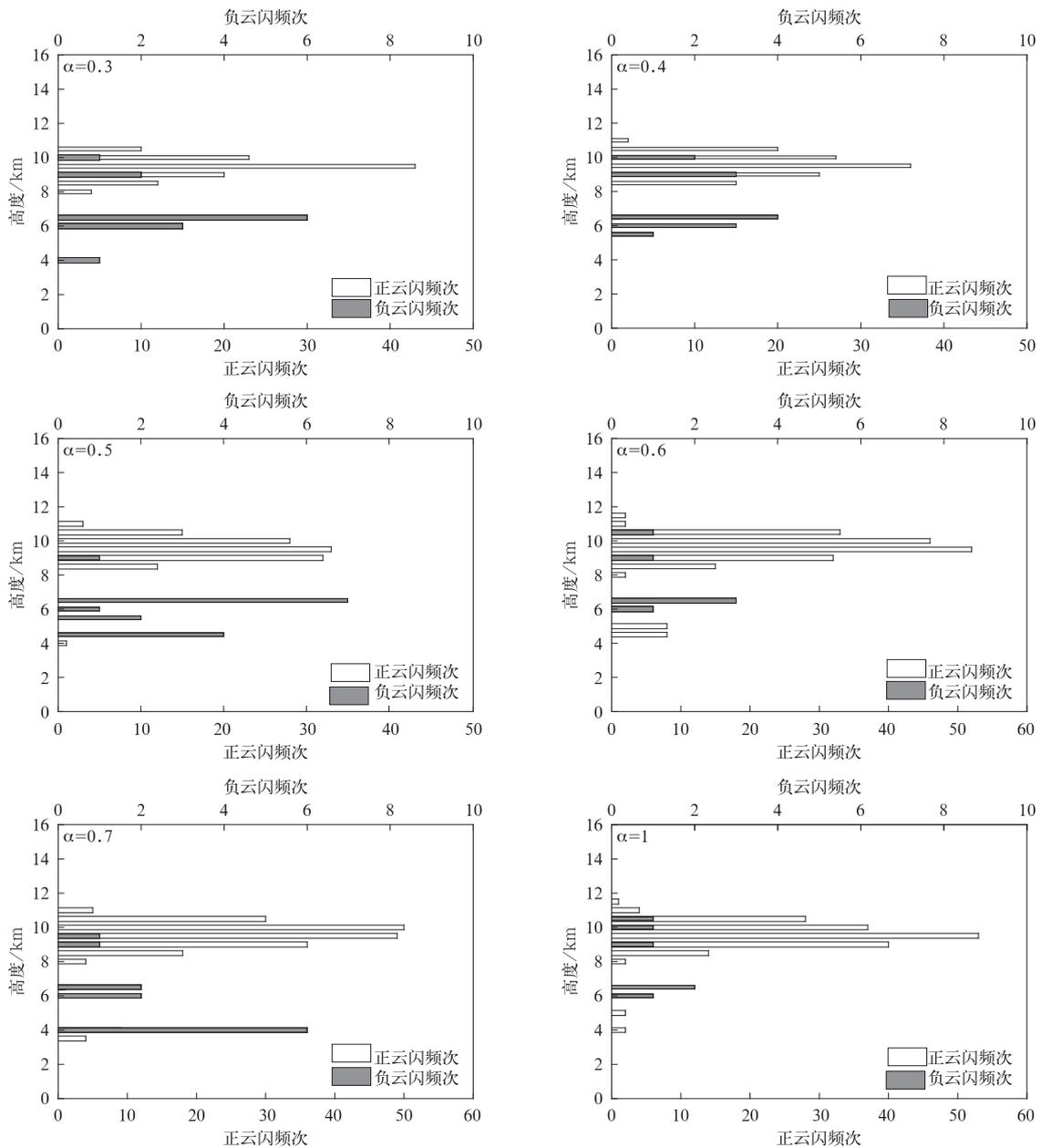


图 6 不同感应控制倍数下小范围通道长度随时间变化的触发高度

Fig. 6 Trigger height of small channel length varying with time under different induction control multiples

## 2.2 不同感应控制倍数下通道电荷量对闪电频次、地闪类型的影响

表1给出了6种不同感应控制倍数下云闪通道感应电荷累积量、云闪通道感应电荷平均累积量及云闪频次。在误差范围内总体上可认为在雷暴过程中通道感应电荷累积总量相当,通过表1可以得出云闪通道感应电荷累积量并未因通道感应电荷量产生较大差异;当通道电荷累积总量相同时,通道感应

电荷平均累积量与云闪频次在不同感应控制倍数下呈负相关,即随着通道感应电荷量的增加,通道感应电荷平均累积量递增,云闪频次减少。云闪频次在通道感应倍数为0.3时达到最大,云闪频次为1041,通道电荷的平均感应量最小,即6.73 C;感应控制倍数为1时,通道电荷平均感应量为15.3 C,在6种不同感应电荷量下达到最大值,云闪频次最小,即为623次。

表1 不同感应控制倍数下电荷平均累积量、云闪频次及通道感应电荷累积量

Table 1 The average charge accumulation, intra-cloud flash frequency and channel induced charge accumulation under different induction control multiples

感应控制倍数 $\alpha$	电荷平均累积量/C	云闪频次	通道感应电荷累积量/C
0.3	6.73	1041	6684.5
0.4	6.73	911	7454.1
0.5	10.50	747	8355.5
0.6	10.30	801	8320.1
0.7	11.16	774	8644.9
1	15.30	623	9567.9

表2给出了模式中总地闪与正、负地闪在不同感应控制倍数下发生频次。由表2可知,在不同感应控制倍数下,地闪频次变化规律不显著,即感应控制倍数为0.3,0.7,1时,负地闪发生率较大,其他感应控制倍数下正地闪所占比例较大。

表2 不同感应控制倍数下总地闪及正、负地闪发生频次

Table 2 The total and the positive/negative ground flash frequency in different induction control multiples

感应控制倍数 $\alpha$	总地闪频次	正地闪频次	负地闪频次
0.3	194	58	136
0.4	158	102	56
0.5	139	93	46
0.6	153	96	57
0.7	160	47	113
1	117	40	77

大量研究表明:产生地闪的重要条件是正负电荷区电荷量分布不平衡,且电荷区上下配置关系将会影响地闪类型<sup>[32,41-42]</sup>。Wang等<sup>[43]</sup>基于理想电荷分布的数值模型发现,当上部正电荷区分布范围以及浓度足够大时,有利于正地闪的触发。谭涌波等<sup>[36]</sup>定量探讨雷暴云底部正电荷对闪电类型的影响,结果表明:雷暴云底部正电荷堆对负地闪的产生起了关键作用,同时负地闪还受底部正电荷电荷密度大小及分布范围的影响<sup>[4,44-47]</sup>。为了衡量雷暴云中电荷区电荷量分配关系,图7给出了不同感应控

制倍数下各电荷区电荷量分配关系,其中统计了雷暴云3个阶段,即雷暴云初期、成熟期、消散期电荷区空间电荷量,并依次对比不同感应控制倍数下屏蔽层、主正电荷区、主负电荷区、次正电荷区之间电荷量。

由图7可以看到,随着感应控制倍数的变化,云中电荷区电荷量分布不平衡。在雷暴云发展初期(图7a),屏蔽层电荷量随感应控制倍数增加而增加;主正电荷区电荷量大于主负电荷区电荷量,且随着感应控制倍数增加,主正、主负电荷区电荷量差值增大;底部正电荷区电荷量随感应控制倍数增加呈递增趋势。在雷暴云成熟期(图7b),顶部屏蔽层电荷量明显增大且与初期有相同变化;主正电荷区电荷量减少,主负电荷区电荷量增加,主负电荷区电荷量大于主正电荷区电荷量,且随感应控制倍数增加两个电荷区电荷量差值也呈递增趋势,底部正电荷区电荷量与感应控制倍数呈正相关。在雷暴消散期(图7c),顶部屏蔽层电荷量随感应控制倍数增加逐渐减少;主正、主负电荷区电荷量也减少,但主正电荷区电荷量大于主负电荷区电荷量,两电荷区间的差值与感应控制倍数相关性不明显;底部正电荷区电荷量减少,且受感应控制倍数影响不大。由此可见,不同感应控制倍数下,雷暴云中电荷区电荷量分布有显著差异,而地闪类型及频次影响因素较多,因此,地闪频次及类型与感应控制倍数相关性不大。

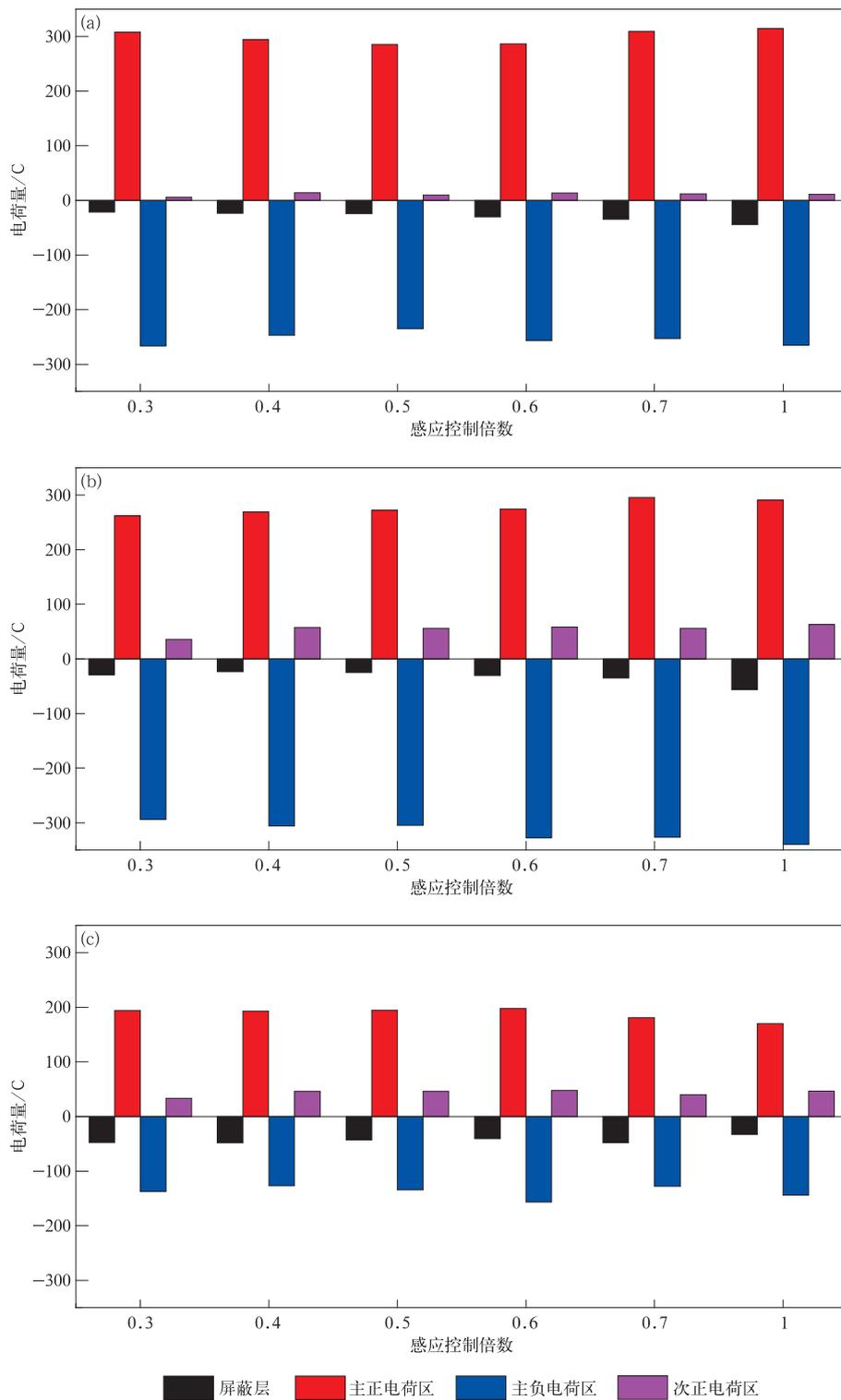


图 7 不同感应控制倍数下雷暴云发展初期(a)、成熟期(b)、消散期(c)的顶部屏蔽层、主正和主负及底部正电荷区电荷量  
Fig. 7 Charge of the top shield, main positive and negative, and bottom positive charge in the early(a), mature(b), and dissipative(c) phases of thunderstorms at various induction control times

### 3 结论与讨论

本文在已有的三维雷暴云起、放电模式中,利用南京一次雷暴天气探空个例进行敏感性试验,通过改变植入法方案中通道电荷感应量,分析闪电放电后通道内不同感应电荷量对电荷结构特征、闪电通道长度的影响,进而探讨其给闪电放电所带来的差异,得到以下的主要结论:

1) 随着通道感应电荷量的增加,放电前后空间电荷极性发生反转的格点数增多,空间电荷结构越发复杂,进而闪电通道长度较短的闪电增多。空间电荷结构杂乱,雷暴在发展过程中难以形成大范围的同极性电荷堆,闪电通道在传播过程中很难穿越与通道极性相同的电荷堆,使云闪通道在发展的过程中仅局限于一对较小的异极性电荷堆里面,最终导致闪电通道长度较短的闪电频次增多。

2) 随着通道电荷感应量的增加,通道感应电荷平均累积量增加,云闪频次减少,由于模式中通道感应电荷总量不变,感应系数变大后,单次感应电荷量基数增大,导致放电次数减少。

3) 通道感应电荷量的改变使空间电荷区电荷量分布不平衡,地闪频次及类型受影响因素较多,其变化规律不明显。因此,通道感应电荷量与地闪频次及地闪类型相关性不大。

闪电放电后电荷重新分配对雷暴云电过程有重要影响,目前对于放电过程的研究还处于资料累积和继续发展阶段,针对放电结束后雷暴云中电荷结构及后续放电的问题仍需要深入探讨。同时,目前工作还存在两大难点:首先,数值模拟工作与实际观测资料的对应和检验,这仍然是工作中需要完善的重点;其次,对于地闪与通道感应电荷量相关性不明显问题,虽然地闪和云闪的空中通道传播行为类似,但地闪过程十分复杂,它与雷暴云电荷结构之间关系的复杂程度远高于云闪,需要大量的实际观测、理论研究及数值模拟才能充分了解其物理机制。

#### 参考文献

- [1] 张廷龙,杨静,楚荣忠,等. 平凉一次雷暴云内的降水粒子分布及其电学特征的探讨. 高原气象,2012,31(4):1091-1099.
- [2] 郭凤霞,孙京. 雷暴云起电机制及其数值模拟的回顾与进展. 高原气象,2012,31(3):862-874.
- [3] 张义军,言穆弘,杜健. 闪电产生氮氧化物(LNO<sub>x</sub>)区域特征计算(I):理论和计算方法. 高原气象,2002,21(4):348-353.
- [4] 郭凤霞,王昊亮,孙京,等. 积云模式下三维闪电分形结构的数值模拟. 高原气象,2015,34(2):534-545.
- [5] 谭涌波,陶善昌,祝宝友,等. 云闪放电对云内电荷和电位分布影响的数值模拟. 地球物理学报,2007,50(4):1053-1065.
- [6] Macgorman D R, Rust W D. The Electrical Nature of Storms. New York: Oxford University Press, 1998, 8: 791-794.
- [7] David R W, Macgorman D R, Arnold R T. Positive cloud-to-ground lightning flashes in severe storms. *Geophys Res Lett*, 2013, 8(7): 791-794.
- [8] Rawlins F. A numerical study of thunderstorm electrification using a three dimensional model incorporating the ice phase. *Q J R Meteorol Soc*, 1982, 108(458): 779-800.
- [9] Takahashi T. Determination of lightning origins in a thunderstorm model. *J Meteor Soc Japan*, 1987, 65: 777-794.
- [10] Ziegler C L, MacGorman D R. Observed lightning morphology relative to modeled space charge and electric field distributions in a tornadic storm. *J Atmos Sci*, 1994, 51(51): 833-851.
- [11] Baker M B, Christian H J, Latham J. A computational study of the relationships linking lightning frequency and other thundercloud parameters. *Q J R Meteorol Soc*, 1995, 121(527): 1525-1548.
- [12] Macgorman D R, Straka J M, Ziegler C L. A lightning parameterization for numerical cloud models. *J Appl Meteorol*, 2001, 40(3): 459-478.
- [13] 徐良韬,张义军,王飞,等. 雷暴起电和放电物理过程在WRF模式中的耦合及初步检验. 大气科学,2012,36(5):1041-1052.
- [14] Liu D, Xiushu Q, Peng L, et al. Charge structure of a summer thunderstorm in North China: Simulation using a regional atmospheric model system. *Adv Atmos Sci*, 2014, 31(5): 1022-1034.
- [15] Zhao P, Yin Y, Xiao H. The effects of aerosol on development of thunderstorm electrification: A numerical study. *Atmos Res*, 2015, 153: 376-391.
- [16] 郭凤霞,陆干沂,吴鑫,等. 强雷暴中正地闪发生的条件. 中国科学:地球科学,2016,59(7):1401-1413.
- [17] Coleman L M, Marshall T C, Stolzenburg M, et al. Effects of charge and electrostatic potential on lightning propagation. *J Geophys Res Atmos*, 2003, 108(9): 1601-1612.
- [18] 谭涌波,陶善昌,祝宝友,等. 云闪放电对云内电荷和电位分布影响的数值模拟. 地球物理学报,2007,50(4):1053-1065.
- [19] Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. Simulated three dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model. *J Geophys Res Atmos*, 2002, 107(9): ACL 2-1-ACL 2-12.
- [20] Mansell E R, Macgorman D R, Ziegler C L, et al. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm. *J Geophys Res Atmos*, 2005, 110(12): 1545-1555.
- [21] 郑栋,张义军,马明,等. 大气环境层结对闪电活动影响的模拟研究. 气象学报,2007,65(4):622-632.

- [22] 黄丽萍,管兆勇,陈德辉,等.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.大气科学,2008,32(6):1341-1351.
- [23] 夏艳玲,谭涌波,向春燕,等.放电后电荷重置对雷暴云电荷结构及闪电行为的影响.气候与环境研究,2017,22(4):487-498.
- [24] Shao X M, Krehbiel P R. The spatial and temporal development of intracloud lightning. *J Geophys Res Atmos*, 1996, 101(21):26641-26668.
- [25] 董万胜,刘欣生,陈慈萱,等.用宽带干涉仪观测云内闪电通道双向传输的特征.地球物理学报,2003,44(3):317-321.
- [26] 刘恒毅,董万胜,徐良韬,等.闪电起始过程时空特征的宽带干涉仪三维观测.应用气象学报,2016,27(1):16-24.
- [27] Tao S, Tan Y, Zhu B, et al. Fine-resolution simulation of cloud-to-ground lightning and thundercloud charge transfer. *Atmos Res*, 2009, 91(2):360-370.
- [28] Krehbiel P R, Rioussel J A, Pasko V P, et al. Upward electrical discharges from thunderstorms. *Nat Geosci*, 2008, 1(4):233-237.
- [29] 张义军,徐良韬,郑栋,等.强风暴中反极性电荷结构研究进展.应用气象学报,2014,25(5):513-526.
- [30] 武斌,张广庶,文军,等.闪电初始预击穿过程辐射脉冲特征及电流模型.应用气象学报,2017,28(5):555-567.
- [31] 林辉,谭涌波,马宇翔,等.雷暴云内电荷水平分布形式对闪电放电的影响.应用气象学报,2018,29(3):374-384.
- [32] 谭涌波,梁忠武,师正,等.空间电荷分布特征对云闪传播行为的影响.高原气象,2015,34(5):1502-1510.
- [33] Smith D A, Shao X M, Holden D N, et al. A distinct class of isolated intracloud lightning discharges and their associated radio emissions. *J Geophys Res Atmos*, 1999, 104(D4):4189-4212.
- [34] Zhu Baoyou, Zhou Helin, Ma Ming, et al. Observations of narrow bipolar events in East China. *J Atmos Solar-Terr Phy*, 2009, 72(2-3):271-278.
- [35] 吴亭,董万胜,李良福,等.基于电离层反射的袖珍云闪(CID)三维定位研究.地球物理学报,2012,55(4):1095-1103.
- [36] 祝宝友,陶善昌,谭涌波.伴随超强 VHF 辐射的闪电双极性窄脉冲初步观测.气象学报,2007,65(1):124-130.
- [37] Liu H, Dong W, Wu T, et al. Observation of compact intracloud discharges using VHF broadband interferometers. *J Geophys Res Atmos*, 2012, 117, D0103.
- [38] Wu T, Takayanagi Y, Yoshida S, et al. Spatial relationship between lightning narrow bipolar events and parent thunderstorms as revealed by phased array radar. *Geophys Res Lett*, 2013, 40(3):618-623.
- [39] 姜睿娇,董万胜,刘恒毅,等.雷暴中双极性窄脉冲事件的位置与辐射强度.应用气象学报,2018,29(2):177-187.
- [40] 张骁,张阳,张义军,等.NBE和IBP始发的闪电初始特征.应用气象学报,2018,29(3):364-373.
- [41] Takeuti T, Nakano M, Brook M, et al. The anomalous winter thunderstorms of the Hokuriku Coast. *J Geophys Res Atmos*, 1978, 83(C5):2385-2394.
- [42] Brook M, Nakano M, Krehbiel P, et al. The electrical structure of the hokuriku winter thunderstorms. *J Geophys Res Oceans*, 1982, 87(C2):1207-1215.
- [43] Wang H, Guo F, Zhao T, et al. A numerical study of the positive cloud-to-ground flash from the forward flank of normal polarity thunderstorm. *Atmos Res*, 2016, 169(4):183-190.
- [44] 谭涌波,梁忠武,师正,等.雷暴云底部正电荷区对闪电类型影响的数值模拟.中国科学(地球科学),2014,44(12):2743-2752.
- [45] 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(32):215-236.
- [46] 谭涌波,张冬冬,周博文,等.地闪近地面形态特征的数值模拟.应用气象学报,2015,26(2):211-220.
- [47] 谭涌波,张鑫,向春燕,等.建筑物上侧击雷电的三维数值模拟.应用气象学报,2017,28(2):227-236.

## Effects of Channel-induced Charge on Discharge Activity Characteristics

Yu Mengying Tan Yongbo Shi Zheng Liu Jun Wang Mengyi Zheng Tianxue

(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)/Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

### Abstract

In order to explore effects of different polarity charge implantation method on the discharge of thunderstorm clouds in the charge-replacement scheme after lightning discharge, a batch of sensitive experiments are implemented by changing the channel-induced charge to simulate a typical thunderstorm case in Nanjing, based on existing three-dimensional (3-D) thunderstorm cloud electrification and discharge patterns. Effects of thunderstorm cloud discharge are discussed from the perspective of space charge structure after discharge, lightning channel length, lightning frequency and type. Simulations show that the amount of induced charge by the lightning channel has a significant effect on the spatial charge structure distribution and the length of the intra-cloud flash channel. As the amount of induced charge in the channel increases, the number of lattice points where the polarity of the space charge is reversed before and after discharge increases, and the space charge structure becomes more complex, which in turn increases the intra-cloud flash with a shorter length of the lightning channel. The space charge structure is disordered, and it becomes more difficult for a wide range of identical-polar charge stacks to form during the development process. Meanwhile, it is also difficult for the lightning channel to pass through charge stack with the same polarity during the propagation process, and therefore the intra-cloud flash channel is limited to a pair of smaller heteropolar charge stacks. Eventually, the frequency of intra-cloud flashes that leads to shorter lightning channel lengths increases. The total amount of channel induced charge accumulation under different induction control multiples can be considered approximately the same within the error tolerance. The frequency of intra-cloud flashes is negatively correlated with the average cumulative amount of channel charges in different lightning channel induced charges; When the average cumulative amount of channel induced charges increases, the frequency of intra-cloud flashes will decrease. The change of the induced charge amount in the channel makes the charge distribution of the space charge region unbalanced. The frequency and type of the cloud-to-ground flash are affected by many factors, and the changing pattern is not obvious. Therefore, the channel-induced charge amount has little correlation with the frequency and type of cloud-to-ground flashes.

**Key words:** channel-induced charge; charge structure; intra-cloud flash channel length; lightning frequency