

王艺儒, 谭涌波, 郑天雪, 等. 利于上行负地闪始发的电荷区参数数值模拟. 应用气象学报, 2020, 31(2): 175-184.

DOI: 10.11898/1001-7313.20200205

利于上行负地闪始发的电荷区参数数值模拟

王艺儒¹⁾²⁾ 谭涌波^{1)*} 郑天雪¹⁾ 余骏皓¹⁾ 李春笋¹⁾ 刘敏芝¹⁾

¹⁾(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)

²⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/雷电物理和防护工程实验室, 北京 100081)

摘 要

在经典偶极性电荷结构下, 结合已有的闪电放电参数化方案及中国气象局雷电野外科学试验基地的广州高建筑物雷电观测站(Tall-Object Lightning Observatory in Guangzhou, TOLOG)观测分析结果, 不断调整主负电荷区参数进行二维高分辨率闪电模拟试验, 讨论自持型上行负地闪与云中闪电之间的相互竞争关系以及有利于自持型上行负地闪始发的云中电荷结构。数值模拟结果表明: 自持型上行负地闪始发与电荷结构存在一定关系, 在主负电荷区越高的情况下, 始发自持型上行负地闪需要的主负区电荷密度与电荷分布范围越大。对于不同类型的闪电始发条件, 推测存在自持型上行负地闪始发的主负电荷区高度阈值, 当主负电荷区高度高于该值时, 随着主负区电荷量的不断累积, 会始发起始于云中的闪电而不是自持型上行负地闪, 当主负电荷区高度低于该值时, 电荷的不断积累会导致自持型上行负地闪始发。

关键词: 上行负地闪; 数值模拟; 电荷结构; 放电特征

引 言

根据始发位置的不同, 闪电可以分成始发于高大建筑尖端的上行闪电与始发于云内的闪电, 上行闪电数量相对较少。随着观测手段的进步以及高大建筑的增多, 包括中国气象局雷电野外科学试验基地的广州高建筑物雷电观测站(Tall-Object Lightning Observatory in Guangzhou, TOLOG)在内, 世界各地研究机构陆续开展了针对上行闪电的观测与研究^[1-16]。

不同闪电的始发条件一直是雷电研究的热点, 大量研究表明: 不同类型闪电的始发与云中电荷结构密切相关^[17-21], 对于上行闪电而言, 通过观测推测上行闪电的起始与雷暴云中电荷区高度有关, 当雷暴云电荷结构较低时, 地面电场强度通常较强, 容易产生上行地闪^[22-24]。此外, 建筑高度与建筑尖端的

电晕层都是影响上行闪电始发的因素, 一般认为建筑物越高, 触发上行闪电需要的环境电场越小, 越容易始发上行闪电, 并且建筑物尖端电晕层对建筑尖端电场存在抑制作用, 进而影响上行闪电始发^[25-27]。根据上行闪电始发因素的不同, 可将上行闪电分成触发型与自持型两类, 触发型上行闪电的起始主要受其他闪电放电产生的瞬时强电场的影响, 自持型上行闪电则是云中电荷不断累积引发的^[28], 自持型上行闪电的起始可能与云中电荷结构尤其是电荷区高度关系更为密切。总结目前已有的观测结果不难发现, 自持型上行闪电更容易在冬季或者山地雷暴中始发^[1, 2, 29], 这可能与这两种雷暴发生时地面温度较低、云中电荷结构整体高度较低有关^[29-31]。

综上所述, 云中电荷提供上行闪电需要的环境电场, 建筑尖端增强环境电场以达到闪电始发条件, 电荷结构可能也是影响自持型上行负地闪始发的重要因素^[32-33]。上行闪电数量较少, 针对自持型上行

2019-11-11 收到, 2020-01-08 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划(2017YFC1501504), 国家自然科学基金项目(41875003), 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2019LASW-A03)

* 通信作者, 邮箱: ybtan@ustc.edu

负闪电的观测数据更少,并且观测大多针对闪电通道的形态、通道速度等,难以探测闪电发生时云中的电荷结构,数值试验可以通过改变设定的背景电荷结构模拟不同类型电荷结构下引发不同类型的闪电,并且可以记录闪电发生时云中的最大电场强度以及建筑尖端的环境电场,通过该方式可讨论有利于始发自持型上行负地闪的云中电荷结构。本文在已有的闪电参数化方案基础上^[26,34],加入偶极性雷暴云电荷结构模型,通过敏感性试验,分析利于自持型上行负地闪始发的电荷结构特征,讨论不同电荷背景下自持型上行负地闪的传播特征。

1 闪电数值模式

本文与 TOLOG 观测分析结果进行简要对比,并对观测分析进行补充,主要探讨利于自持型上行负地闪始发的云中电荷初始条件,采用已有的高分辨率上行闪电参数化方案^[34],在模拟域底端固定一个宽 50 m,高 200 m 的建筑。电荷结构采用经典的偶极电荷模型,并开展相关的敏感性试验。

1.1 雷暴云背景电荷的设定

观测发现自持型上行闪电大多出现在山地与冬季雷暴过程中,雷达探测和闪电三维定位数据的分析表明这类雷暴通常云层较低,电荷结构大多呈现偶极性^[20,32,35]。本文分析利于负极性自持型上行负地闪始发的电荷结构特征,重点考虑主负电荷区电荷参数,由于目前少有针对上行闪电始发时的电荷分布探测结果,同时难以使用一个电荷分布概括所有的雷暴云电荷实际分布,因此本文背景电荷选用最为常见的经典偶极性电荷结构,并针对上行闪电始发时电荷层较低这一观测结论,降低了整体的电荷高度。

有很多类型的电荷分布结构^[35-37],图 1 是本研究模拟设定的电荷结构分布示意图,雷暴云电荷垂直分布从上到下依次为负的屏蔽层电荷区(S)、上部正电荷区(P)和主负电荷区(N)。模拟域采用高分辨率的二维直角坐标系,范围为 20 km×15 km,空间分辨率为 10 m×10 m。图 1 中虚线是负电荷等密度线,实线是正电荷等密度线。雷暴云各个电

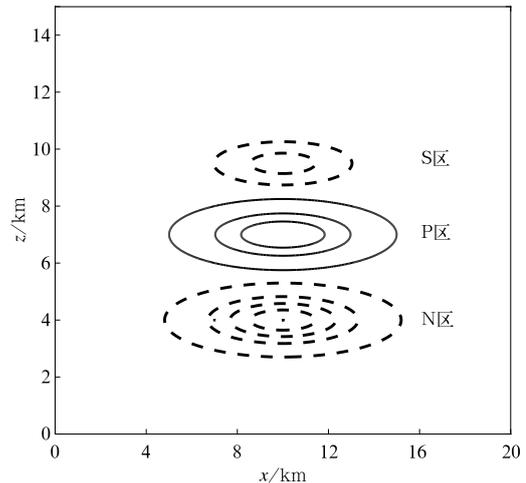


图 1 雷暴云偶极性电荷结构示意图^[35]

Fig. 1 Diagram of dipolar charge structure in thunderstorm clouds(from Reference [35])

荷区呈椭圆形,其中电荷区的电荷密度在电荷区的中心处最大,由中心向外指数递减,呈高斯分布。模拟域中电荷区的电荷密度分布由以下公式决定^[35]:

$$\rho = \rho_0 e^{-(2\phi)^2}, \quad (1)$$

$$\phi = \sqrt{\frac{(x-x_0)^2}{r_x^2} + \frac{(z-z_0)^2}{r_z^2}}. \quad (2)$$

其中, ρ_0 是各个电荷区中最大电荷密度,该值可以表征电荷区整体电荷密度情况; x_0 和 z_0 为电荷区中心坐标,各电荷层的椭圆长半轴为 r_x ,短半轴为 r_z ,如无特殊说明,下文 z_0, ρ_0 与 r_x 均指主负电荷区参数,当电荷浓度衰减至 $0.1 \text{ nC} \cdot \text{m}^{-3}$,设定此处为电荷区的边界。

为了保证上行负地闪能够始发,结合观测发现上行闪电多出现在雷暴云较低情况下^[30-31],模拟中需要控制除主负电荷区以外的电荷参数,电荷区参数范围取值参考了郭凤霞等^[38]模拟的青藏高原地区雷暴消散期云层较低时使用的参数以及张廷龙等^[39]在中国高原地区探测到的偶极性电荷结构参数,任何类型闪电的始发都需要足够大的电荷总量,为了保证闪电的始发及敏感性试验中主负电荷区是唯一变化的影响因子,全文控制了 P 区的水平范围以及电荷浓度,具体参数及变化范围见表 1。

表 1 雷暴云电荷区的空间参数和电荷参数
Table 1 Geometrical and electrical parameters of thunderstorm clouds

电荷区	$\rho_0 / (\text{nC} \cdot \text{m}^{-3})$	z_0 / km	r_x / km	r_z / km
S 区	-1.0	9.5	4.0	1.0
P 区	2.2	7.0	4.0	1.5
N 区	0.8~3.6	2.5~4.0	3.0~4.5	1.5

1.2 放电参数化方案

1.2.1 闪电的启动

本文为了考虑有利于自持型上行负地闪发展的云中电荷结构,需要考虑云中的闪电先导与始发于建筑物尖端的上行负地闪之间始发的先后关系,也就是本模式同时监测云中与建筑尖端的最高电场,如果云中电场已达到闪电启动阈值,则自持型上行负地闪不会始发。

对于具体的闪电启动阈值,起始于云中的闪电阈值采取常规空气击穿阈值 $150 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[40]。通常背景电荷在建筑物高度处产生的环境电场量级为 $10^1 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$,达不到击穿空气所需的阈值,自持型上行负地闪的启动所需的强电场由建筑物尖端畸变而来,本文不模拟建筑尖端的畸变效应,使用的是未计算畸变效应之前的环境电场阈值,设定为 $15 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$,具体畸变效应以及计算过程详见文献[26]。

1.2.2 上行先导的传播

上行闪电的发展采用步进式,即下一个时间点闪电通道只会延伸一个空间格点。闪电发展时,通道周围可能会出现不止一个满足传播阈值的点,选取其中一个作为下一个传播点。闪电容易朝着与通道之间电位差较高的地方发展,根据该现象,计算全部已有的通道点与其环境点之间的电位差,选取所有超过传播阈值的空间点,并以电势差与传播阈值的差为权重随机选取下一个通道点,电位差越强的点越容易成为下一个闪电通道点。在此基础上,本模式对闪电通道的发展顺序进行标记,也就是可以在通道图中看到闪电主通道、各分支发展的顺序,并在通道图中用颜色标记,借此讨论闪电分支发展的特征。

在模拟过程中,当上行闪电发展至闪电通道与周边所有环境点之间的电位差均未达到传播阈值,或闪电通道发展到边界时,认为闪电终止。本文重点研究有利于上行闪电始发的电荷结构,不考虑闪电停止发展或是击中地面的后续过程。

2 模拟结果

由于电荷区垂直尺度的可变化范围小^[41],本文考虑的主负电荷区参数有 ρ_0, z_0 与 r_0 。由式(1)和式(2)可知,主负电荷区的电荷大小由电荷区的 ρ_0

和 r_0 共同决定,且两个变量之间相互独立,本文固定两者中的一个参数,寻找主负电荷区在不同高度下可以始发自持型上行负地闪的另一个参数,以此讨论有利于上行闪电始发的电荷参数。

2.1 有利于上行闪电发展的主负电荷区高度与电荷密度关系

本节将固定主负电荷区 r_0 (3.0 km),将 z_0 从 4.0 km 以 10 m 为步长不断调整,在每一个既定 z_0 下,将 ρ_0 从 $0.8 \text{ nC} \cdot \text{m}^{-3}$ 以 $0.1 \text{ nC} \cdot \text{m}^{-3}$ 为单位步长不断增加,直至刚好始发自持型上行负地闪或者云中闪电先导,以此找到有利于始发自持型上升负地闪的电荷参数。

图2是始发自持型负极性上行闪电的4个案例,图2中闪电通道均始发了负极性上行闪电,按照顺序编号为 UNL1, UNL2, UNL3 以及 UNL4, z_0 分别为 $3.75, 3.5, 3.2 \text{ km}$ 以及 3.0 km 。

表2是云中电场极值与建筑物尖端的环境电场大小以及其他一些参数,综合图2和表2可以发现,UNL1~UNL4中设定的 z_0 越低,引发上行负地闪需要的 ρ_0 越低,这可能是由于近地面高度的电场强度主要是受离地最近的电荷区控制,静电场的场强与距离的平方成反比,在雷暴云电荷偶极性结构下,主负电荷区离地越近,近地面的场强越高,达到上行负地闪始发的电场阈值所需要的 ρ_0 也就越低。模拟出的上行负地闪传播在闪电发展初期,通道垂直向上发展逐渐形成闪电的主通道。随着闪电持续发展,闪电通道在水平方向也有所延伸。当闪电通道发展至主负电荷区附近,通道开始沿各个方向延伸,通道不断出现大大小小的分支,这些形态特征都与上行闪电的光学观测相吻合^[3]。图2中闪电通道的颜色代表了闪电通道发展的顺序,同一高度处分支颜色几乎一致,说明了分支同时发展,并且闪电的主要分支都是在电位 40 MV 处出现。UNL1~UNL4的 z_0 逐渐降低,始发的闪电总步长随之减少,这与模拟使用的电荷结构相似,以及上行闪电一般发展到云中电位势阱处不无关系^[42],当主负电荷区下移时,图2中主负电荷区的电位势阱垂直高度下移,限制了闪电通道发展的高度,造成闪电总步长的减少。此外,主负区电荷高度的降低,导致负极性上行闪电始发所需的 ρ_0 随之降低,这会减少主负电荷区的整体电场强度,这也是造成闪电总步长降低的因素。

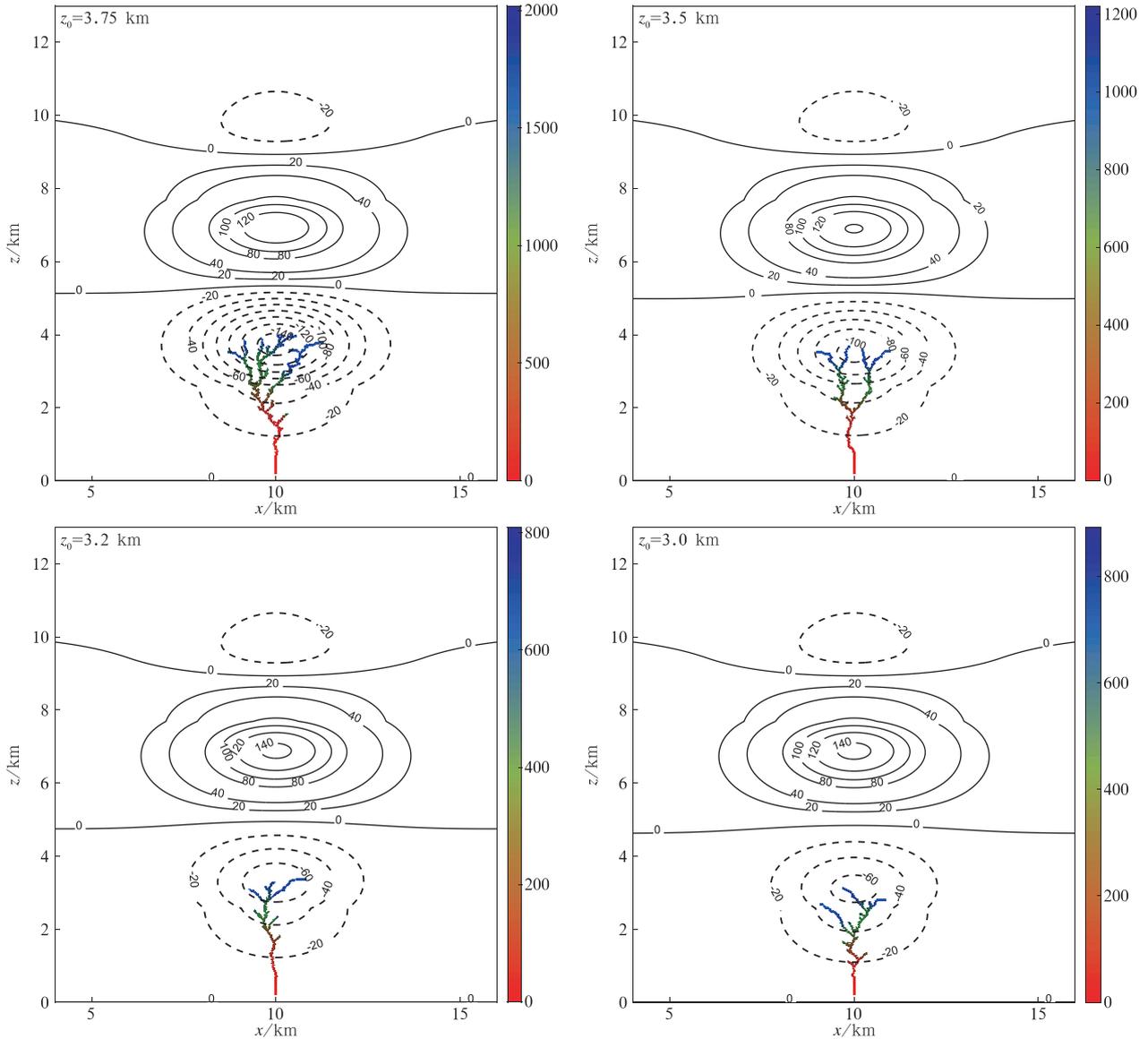


图 2 主负电荷区不同高度的闪电通道结构及放电前电位分布
 (实线和虚线分别代表正、负电位等值线,单位: MV; 彩色代表闪电通道发展步数)
 Fig. 2 Lightning channel structure and potential distribution at different heights
 in the main negative charge zone before discharge
 (solid and dashed lines denote the positive and negative potential contours, unit, MV;
 the color denotes the sequence of lightning channel development)

表 2 主负电荷区不同高度下有利于上行负地闪发展电荷背景及其他参数
 Table 2 Charge background and other parameters for upward negative cloud-to-ground
 lightning development in the main negative charge area at different heights

案例	主负电荷区 z_0/km	主负电荷区 $\rho_0/(\text{nC} \cdot \text{m}^{-3})$	云中电场强度 极值/ $(\text{kV} \cdot \text{m}^{-1})$	地面建筑高度 电场/ $(\text{kV} \cdot \text{m}^{-1})$	闪电通道 总步长/km
UNL1	3.75	2.5	139.3	15.4	20.19
UNL2	3.5	1.8	124.2	15.2	12.56
UNL3	3.2	1.3	127.5	15.4	8.12
UNL4	3.0	1.2	129.5	15.6	8.93

2.2 水平范围对始发上行负地闪发展的影响

本节则固定 z_0 (3.5 km), 讨论利于自持型上行负地闪始发的不同 r_x 与 ρ_0 的参数组合。具体做法为先固定 r_x 为 3.0 km, 在这个值下以 $0.1 \text{ nC} \cdot \text{m}^{-3}$ 为步长将 ρ_0 从 $1.2 \text{ nC} \cdot \text{m}^{-3}$ 不断调整, 直到始发了自持型上行负地闪或是云中闪电先导, 随后以 100 m 为步长扩大 r_x , 重复之前操作以寻找对应的

ρ_0 值。

图 3 中 4 个案例均为负极性自持型上行负地闪, 编号为 UNL5, UNL6, UNL7 和 UNL8。UNL2 中 z_0 与图 3 中一致, 因此, 讨论时将 UNL2 加入其中。UNL2 与 UNL5~UNL8 设定的 r_x 分别为 3.0, 3.25, 3.5, 4.0 km 与 4.25 km, 在对应的 r_x 下得到有利于上行负地闪始发的 ρ_0 以及其他结果见表 3。

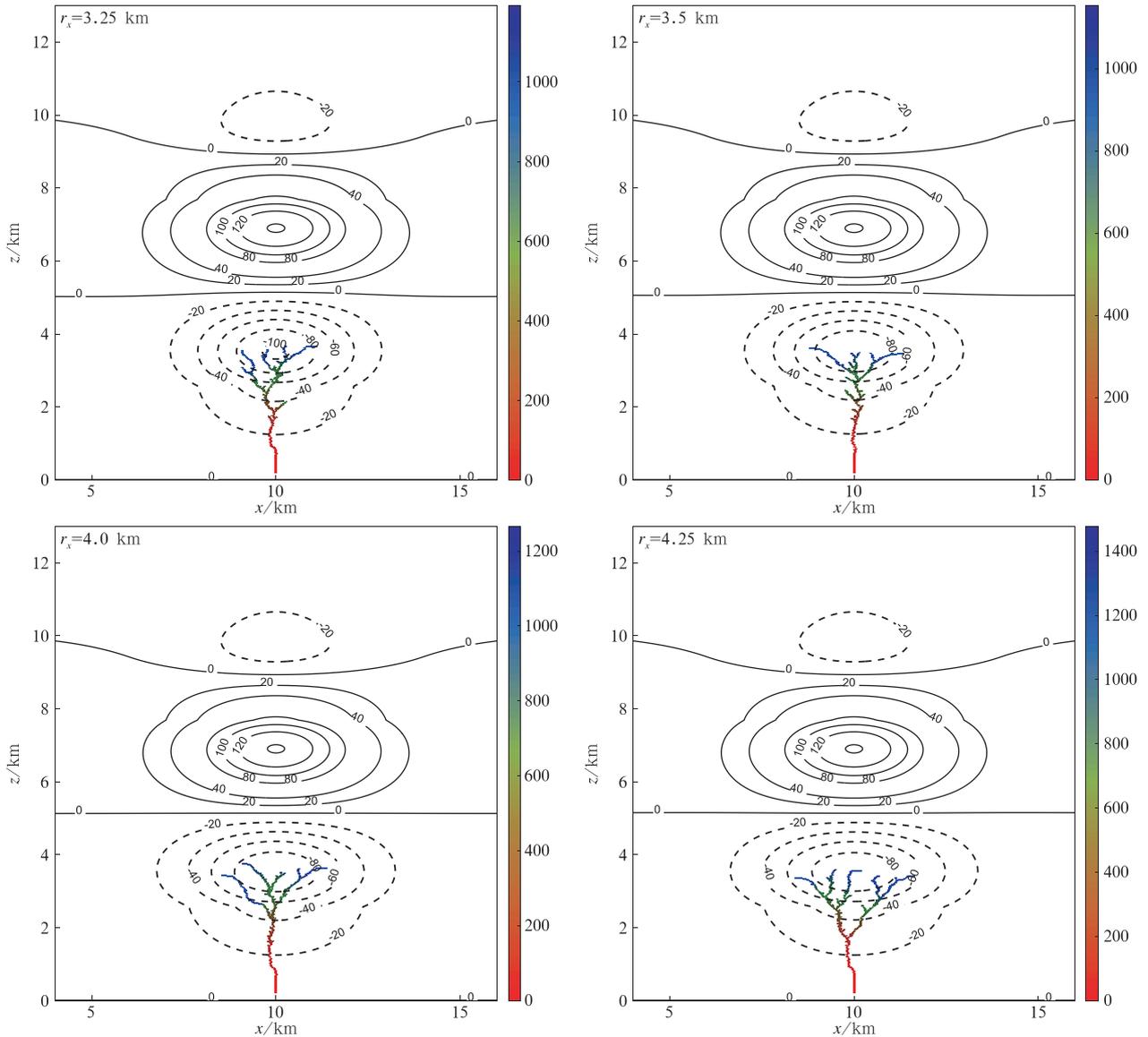


图 3 主负电荷区不同水平范围的闪电通道结构及放电前电位分布
(实线和虚线分别代表正、负电位等值线, 单位: MV; 彩色代表闪电通道发展步数)

Fig. 3 Lightning channel structure and potential distribution map in different horizontal ranges of the main and negative charge zone before discharge
(solid and dotted lines denote the positive and negative potential contours, unit: MV; the color denotes the sequence of lightning channel development step)

由图3与表3可以发现,在 z_0 相同情况下,主负电荷区的水平分布越大,引发上行负地闪所需要的 ρ_0 越低,对于偶极性电荷结构而言,电荷量大小决定了整体电势能的大小,主负电荷区电荷总量是由主负区 ρ_0 与主负区 r_x 共同决定,其他参数不变时,刚好

触发上行负地闪需要的 ρ_0 与 r_x 呈反相关。本节上行负地闪的传播特征与之前类似,在闪电发展初期,闪电通道几乎没有水平方向的延伸,在近地面闪电很少出现水平方向的发展。UNL5~UNL8的闪电通道均在电位40 MV附近开始出现主要分支。

表3 主负电荷区不同水平范围下有利于上行负地闪发展电荷背景及其他参数

Table 3 Charge background and other parameters for upward negative cloud-to-ground lightning development in the main negative charge area for different horizontal ranges

案例编号	主负电荷区 r_x/km	主负电荷区 $\rho_0/$ ($\text{nC}\cdot\text{m}^{-3}$)	云中电场最大值/ ($\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$)	地面建筑高度 电场/($\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$)	闪电通道总 步长/km
UNL2	3.0	1.8	124.2	15.2	12.56
UNL5	3.25	1.7	124.2	15.2	11.91
UNL6	3.5	1.6	124.2	15.0	11.54
UNL7	4.0	1.5	124.1	15.3	12.66
UNL8	4.25	1.4	123.9	15.9	14.77

3 结果分析

将主负电荷区的 r_x 固定为3.0 km,将雷暴云主负区从最高处(上边界紧贴主正区下边界, $z_0 = 4.0$ km)以10 m为步长不断下移,高度最低值 z_0 为2.5 km,在每一个既定的主负电荷区高度下,将 ρ_0 从 $0.5 \text{ nC}\cdot\text{m}^{-3}$ 以 $0.1 \text{ nC}\cdot\text{m}^{-3}$ 为步长不断增加,直到始发自持型上行负地闪或云中闪电先导,得到若干组有利于上行负地闪始发的电荷参数点,以此探讨影响自持型上行负地闪始发的主负电荷区因子。

由图4可以看到,在固定 r_x 情况下,有利于自持型上行负地闪发展的主负电荷区 z_0 与 ρ_0 关系密切, z_0 越大,始发上行负地闪所需 ρ_0 越大,这是由于地面建筑处的环境电场强度与电荷区之间距离的平方成反比,云层较高时电荷离地较远,需要更大的 ρ_0 满足上行负地闪所需要的环境电场强度。由表3可以看到,主负电荷区 z_0 不变时,若主负电荷区的 r_x 减小,为了满足上行闪电始发的初始电场阈值,始发上行负地闪所需的主负电荷区 ρ_0 会同时增加。由图4可知,在满足始发自持型上行负地闪的参数中,电荷区位于较高位置时,需要较大的 ρ_0 以达到上行负地闪所需电场强度起始阈值,增大的 ρ_0 又会导致云中电场强度抬升,同时主负电荷区离地越远,

电荷的积累过程对云中电场强度增幅效果越好,如 z_0 为3.8 km时云中电场强度已经接近常规空气击穿阈值,可以推测,如果主负电荷区高度再次抬升,随着主负电荷区电荷不断累积,始发于云中的闪电会先于自持型上行负地闪始发,因此,电荷区高度值可能是影响上行负地闪始发的关键因素,这也与观测发现上行闪电多始发于电荷结构较低的环境这一结论一致^[2-3]。可以推测存在一个能够始发上行负地闪的 z_0 阈值,当主负电荷区高度高于该值时,随着电荷的不断累积,会发生起始于云中的闪电而不是自持型上行负地闪,只有在 z_0 低于该值时,电荷的不断积累促使自持型上行负地闪始发。这是由于 z_0 较大时,云中电荷离地较远,电荷累积过程对云中电场的增幅效果远大于对建筑尖端电场的增幅效果,始发于云中的闪电会先于建筑尖端的自持型上行负地闪始发,这就使得两种闪电之间存在一定竞争。这个高度阈值在不同的云中电荷环境下不同,之前模拟试验固定了主正电荷区水平范围,当主正电荷区水平范围扩大时,由于主正电荷区对云中电场强度的增幅作用大于对地面处,云中更容易始发闪电,那么之前推测出上行负地闪始发阈值 z_0 可能会降低,主负电荷区需要在更低的位置才能使云中电荷不断累积致使自持型上行负地闪始发,同时该阈值也受风速、温度、建筑高度等环境因素影响。

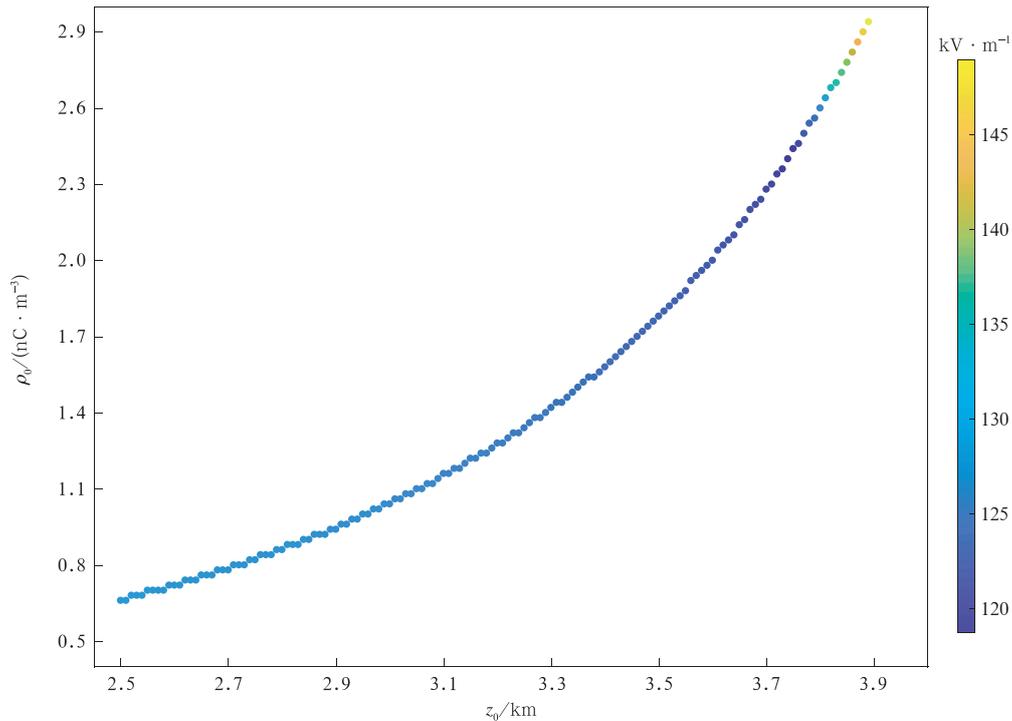


图 4 有利于上行负地闪发展的主负电荷区高度与电荷浓度以及云中电场极值
(离散点为有利于自持型上行负地闪的参数点,彩色为对应参数下的云中最强电场)

Fig. 4 The height and charge concentration of the main negative charge region and the extreme value of electric field in cloud for the development of upward negative cloud-to-ground lightning
(the discrete point is the parameter point which is beneficial to self-sustaining up-going ground flashover, the color is the strongest electric field in space under corresponding parameters)

4 小 结

为了探讨有利于上行负地闪始发的云内电荷结构与自持型上行负地闪的传播特征,弥补 TOLOG 上行闪电观测手段的不足,本文在设定的偶极性电荷结构基础上结合已有的上行闪电参数化方案,进行高分辨率的二维上行闪电数值模拟,得到以下主要结论:

1) 模拟出的自持型上行负地闪通道传播具有一定特征,表现为闪电于建筑尖端起始的部分几乎没有分叉,笔直地朝着垂直方向传播开去,随着闪电的持续发展,闪电渐渐出现水平方向的延伸,闪电通道分支也逐渐增多。分支一般从下向上发展,主通道前段发展出新的分支一定程度上会阻碍位于下方的闪电分支的发展,位于同一高度的分支可能存在同时发展的趋势。

2) 通过不断调整电荷参数寻找有利于自持型上行负地闪的参数,发现随着主负电荷区越高,始发

上行负地闪需要更高的电荷浓度与更大的电荷水平分布范围。主负电荷区高度是影响自持型上行负地闪始发的重要因素,推测存在一个上行负地闪始发的主负电荷区高度阈值,当主负电荷区高度高于该值时,随着电荷量的不断累积,可能出现云中先于建筑尖端满足闪电始发条件,该雷暴云电荷环境下会发生起始于云中的闪电而不是自持型上行负地闪,该始发阈值与主正电荷区结构以及地面建筑高度都存在相关性。

本文在偶极性电荷结构下,结合已有的上行闪电放电参数化方案,探讨了有利于上行负地闪始发的云内电荷结构,得到了一些关于上行负地闪传播特征与有利于上行负地闪发展的主负电荷区参数。本文重点在于离地最近的电荷区对上行负地闪始发的作用,在实际中主正电荷区也会对云中电场产生较大影响,继而影响自持型上行负地闪的发生。除了电荷分布的影响之外,建筑高度、建筑尖端的电晕电荷、风速、温度等对自持型上行负地闪的始发均有一定影响。如何结合 TOLOG 观测分析资料,建立

更加真实且有效的参数化方案以及考虑更多因素对上行负地闪的始发作用,这将是今后工作重点。

参考文献

- [1] Zhou H, Diendorfer G, Thottappillil R, et al. Measured current and close electric field changes associated with the initiation of upward lightning from a tall tower. *J Geophys Res Atmos*, 2012, 117(D8):102-105.
- [2] Zhou H, Diendorfer G, Thottappillil R, et al. Characteristics of upward positive lightning flashes initiated from the Gaisberg Tower. *J Geophys Res Atmos*, 2012, 117(D6):110-123.
- [3] Warner T A. Observations of simultaneous upward lightning leaders from multiple tall structures. *Atmos Res*, 2012, 117(11):45-54.
- [4] Takagi N, Wang D, Watanabe T A. Study of upward positive leaders based on simultaneous observation of E-fields and high-speed images. *IEEE Transactions on Fundamentals & Materials*, 2006, 126(126):256-259.
- [5] 武斌, 吕伟涛, 齐奇, 等. 次正地闪触发两个并发上行闪电的光电观测. *应用气象学报*, 2019, 30(3):257-266.
- [6] Wu B, Lv W, Qi Q, et al. High-speed video observations of recoil leaders producing and not producing return strokes in a Canton-Tower upward flash. *Geophys Res Lett*, 2019, 46:14-27.
- [7] Wu B, Lyu W, Qi Q, et al. Synchronized two-station optical and electric field observations of multiple upward lightning flashes triggered by a 310-kA+CG flash. *J Geophys Res Atmos*, 2019, 124:1050-1063.
- [8] Qi Q, Lyu W, Wu B, et al. Three-dimensional optical observations of an upward lightning triggered by positive cloud-to-ground lightning. *Atmos Res*, 2018, 214:275-283.
- [9] Wang Z, Qie X, Jiang R, et al. High-speed video observation of stepwise propagation of a natural upward positive leader. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121(24):14307-14315.
- [10] Yuan S, Jiang R, Qie X, et al. Characteristics of upward lightning on the Beijing 325 m meteorology tower and corresponding thunderstorm conditions. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122(22):93-105.
- [11] Tan Y, Tao S, Liang Z, et al. Numerical study on relationship between lightning types and distribution of space charge and electric potential. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119(2):1003-1014.
- [12] 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.
- [13] 周康辉, 郑永光, 蓝渝. 基于闪电数据的雷暴识别、追踪与外推方法. *应用气象学报*, 2016, 27(2):173-181.
- [14] 廖义慧, 吕伟涛, 齐奇, 等. 基于闪电先导随机模式对不同连接形态的模拟. *应用气象学报*, 2016, 27(3):361-369.
- [15] 张义军, 张阳. 雷暴闪电放电活动对电离层影响的研究进展. *应用气象学报*, 2016, 27(5):570-576.
- [16] 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.
- [17] 张义军, 孟青, 吕伟涛, 等. 两次超级单体雷暴的电荷结构及其地闪特征. *科学通报*, 2005, 50(23):2663-2675.
- [18] Krehbiel P R, Rioussset J A, Pasko V P, et al. Upward electrical discharges from thunderstorm. *Nat Geosci*, 2008, 1:233-237.
- [19] Zheng D, Zhang Y, Meng Q, et al. Lightning activity and electrical structure in a thunderstorm that continued for more than 24 h. *Atmos Res*, 2010, 97(1/2):241-256.
- [20] 谭涌波, 陈超, 周洁晨, 等. 积云模式中上行地闪的参数化方案及起始有利云内环境特征的探讨. *中国科学(D辑)*, 2016, 46(7):986-999.
- [21] 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(D辑)*, 2014, 44(12):2743-2752.
- [22] Carey L D, Murphy M J, McCormick T L, et al. Lightning location relative to storm structure in a leading-line, trailing-stratiform mesoscale convective system. *J Geophys Res*, 2005, 110(D3):105-128.
- [23] Liu D, Qie X, Pan L, et al. Some characteristics of lightning activity and radiation source distribution in a squall line over north China. *Atmos Res*, 2013, 118(10):423-433.
- [24] Jiang R, Sun Z, Wu Z. Concurrent upward lightning flashes from two towers. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 2014, 7(3):260-264.
- [25] 郭秀峰, 张其林, 张金波, 等. 具有不对称结构的电晕放电模型建立及应用. *科学技术与工程*, 2018, 18(8):13-20.
- [26] 谭涌波, 周博文, 郭秀峰, 等. 建筑物高度对上行闪电触发以及传播影响的数值模拟. *气象学报*, 2015, 73(3):546-556.
- [27] Tan Y, Guo X, Zhu J, et al. Influence on simulation accuracy of atmospheric electric field around a building by space resolution. *Atmos Res*, 2014, 138(138):301-307.
- [28] Wang D, Takagi N, Watanabe T, et al. Observed characteristics of upward leaders that are initiated from a windmill and its lightning protection tower. *Geophys Res Lett*, 2008, 35(2):196-199.
- [29] Warner T A, Lang T J, Lyons W A. Synoptic scale outbreak of self-initiated upward lightning(SIUL) from tall structures during the central US blizzard of 1-2 February 2011. *J Geophys Res*, 2014, 119:9530-9548.
- [30] 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.
- [31] Hager W W, Aslan B C, Sonnenfeld R G, et al. Three-dimensional charge structure of a mountain thunderstorm. *J Geophys Res*, 2010, 115(D12):119-143.
- [32] Jiang R, Qie X, Wu Z, et al. Characteristics of upward lightning from a 325-m-tall meteorology tower. *Atmos Res*, 2014, 149:111-119.
- [33] Ishii M, Saito M, Miki T, et al. Observation of Downward and Upward Lightning Flashes at 634-m Tower//XV International

- al Conference on Atmospheric Electricity, 2014: 15-20.
- [34] Tan Y, Zheng T, Shi Z, et al. Improved lightning model: Application to discuss the characteristics of upward lightning. *Atmos Res*, 2019, 217: 63-72.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 郭凤霞, 王曼霏, 黄兆楚, 等. 青藏高原雷暴电荷结构特征及成因的数值模拟研究. *高原气象*, 2018, 37(4): 911-922.
- [39] 张廷龙, 郗秀书, 袁铁等. 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. *大气科学*, 2008, 32(5): 1221-1228.
- [40] Mansell E R. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model. *J Geophys Res*, 2002, 107(D9): 4075-4088.
- [41] Stolzenburg M, Rust W D, Marshall T C. Electrical structure in thunderstorm convective regions; 2. Isolated storms. *J Geophys Res*, 1998, 103(D12): 14079-14096.
- [42] 谭涌波, 陶善昌, 祝宝友, 等. 雷暴云内闪电双层、分支结构的数值模拟. *中国科学(D辑)*, 2006, 36(3): 486-496.

Numerical Simulation of Main Negative Charge Area Parameters for Upward Negative Cloud-to-ground Lightning

Wang Yiru¹⁾²⁾ Tan Yongbo¹⁾ Zheng Tianxue¹⁾ Yu Junhao¹⁾ Li Chunsun¹⁾ Liu Minzhi¹⁾

¹⁾ (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)

²⁾ (Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering/State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Different types of lightning initiation condition are the focus of scientific research. The initiation of cloud lightning is competitive with self-sustaining uplink lightning. Based on the classical dipolar charge structure and the existing lightning discharge parameterization schemes, under the background of the classic dipolar charge structure, two-dimensional (2-D) high-resolution lightning discharge simulation experiments are carried out by adjusting the parameters of the main negative charge regions. Cloud charge structures which are beneficial to the onset of self-sustaining upward lightning are discussed. Results show that the part of the lightning at the beginning of the building has almost no bifurcation, and spreads straight toward the vertical direction. As the lightning continues developing, it gradually extends horizontally, and lightning channel branches gradually increase. Branches generally develop from bottom to top. The development of new branches in the front section of the main channel will hinder the development of lightning branches located to a certain extent. Branches at the same height may have a simultaneous developing trend. It can be inferred that this is related to the flat surface potential direction and the potential well in the charge region of the cloud. It is found that the higher the charge area is, the larger the charge density and distribution range the initial-self-sustaining uplink lightning needs. There speculates a threshold of the height of the main negative charge regions for the onset of upward lightning. When the negative charge region is higher than that, with the accumulation of charge in the main negative regions, the lightning will start in clouds instead of upward lightning. Only when the main negative area is lower than the threshold, the steady accumulation of electric charge will cause the flash originating. This may charge far away from the earth, and the cloud charge accumulation effects are greater than the increasing process of the electric field in the cloud for building sophisticated growth effects of electric field. As the main negative charge accumulates, the lightning starting conditions are firstly met in the cloud, initiating flashes in the clouds.

Key words: upward negative cloud-to-ground lightning; numerical simulation; charge structure; discharge characteristics