

建筑物高度对上行闪电触发以及传播影响的数值模拟^{* 1}

谭涌波^{1,2} 周博文^{1,2} 郭秀峰^{1,2} 张冬冬^{1,2} 师正^{1,2} 陈超^{1,2}

TAN Yongbo^{1,2} ZHOU Bowen^{1,2} GUO Xiufeng^{1,2} ZHANG Dongdong^{1,2} SHI Zheng^{1,2} CHEN Chao^{1,2}

1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京, 210044

2. 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, 南京, 210044

1. *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*

2. *Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*

2014-08-12 收稿, 2014-12-24 改回.

谭涌波, 周博文, 郭秀峰, 张冬冬, 师正, 陈超. 2015. 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, 73(3): 546-556

Tan Yongbo, Zhou Bowen, Guo Xiufeng, Zhang Dongdong, Shi Zheng, Chen Chao. 2015. A numerical simulation of the effects of building height on single upward lightning trigger and propagation. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(3): 546-556

Abstract Combined with the stochastic lightning parameterization scheme of self-initiated upward lightning, a fixed background electric field is set, and then 2-dimensional fine-resolution lightning discharge simulations are performed to investigate the effect of building height on single upward lightning trigger and propagation. The results show: (1) The upward lightning branch is less in the initial stage; to about 2 km away from the ground, the upward lightning begins to appear a lot of branch, the lightning channel begins to appear obvious bifurcation; some part of the path transmits to the high charge density centre vertically, and another part of the channel bypasses the high charge density with outward horizontal transmission; the upward lightning vertical transmission reaches only to 4 km, where is the negative charge center located, and it is unable to reach, through the zero potential line, to the positive charge area above. (2) Building height plays a key role in upward lightning trigger, and it is more likely to trigger the upward lightning with the increasing height. And (3) building height has certain adverse effect on upward lightning spread, and with the increase of building height, the horizontal and vertical propagation distance of upward lightning, the fractal dimension and the total propagation length of the lightning channel are all decreased gradually.

Key words Building height, Upward lightning, Trigger condition, Propagation characteristics, Numerical simulation

摘 要 为了探讨建筑物高度对单个上行闪电触发以及传播的影响, 设定了一个固定的背景电场, 并结合自行触发的上行闪电随机放电参数化方案, 进行了二维高分辨率上行闪电放电的模拟试验。结果表明: (1) 上行闪电在初始阶段分支比较少; 发展到离地面 2 km 左右后, 闪电开始出现大量的分支, 闪电通道开始出现明显的分叉; 一部分通道继续向高电荷密度中心垂直传播, 另一部分通道绕过高电荷密度中心, 向外水平传播; 模拟的上行闪电只能垂直传播到 4 km 处的负电荷中心, 不能穿过 0 电势线向上方的正电荷区传播。(2) 建筑物高度对上行闪电的触发起到了关键作用, 建筑物越高, 越容易触发上行闪电。(3) 建筑物高度对上行闪电传播具有一定的反作用, 随着建筑物高度增高, 模拟出的上行闪电的水平 and 垂直传播距离都有所减小, 通道的分形维数变小, 通道传播的总长度也逐渐减小。

* 资助课题: 国家重点基础研究发展计划项目(2014CB441403)、国家自然科学基金项目(41175003)。

作者简介: 谭涌波, 主要从事雷电物理及数值模拟研究。E-mail: ybtan@ustc.edu

关键词 建筑物高度, 上行闪电, 触发条件, 传播特征, 数值模拟

中图法分类号 P427.3

1 引言

雷暴云过境时,由于地面高大建筑对周围大气电场的畸变作用,在一些高大建筑物顶端会触发上行闪电(鄒秀书等,2013)。上行闪电最初从建筑物顶端触发一个或多个上行先导并向上传播,当先导到达空中电荷区时,上行先导的通道内会出现初始的连续电流过程,先导和连续电流构成了上行闪电的初始阶段,近几年的研究发现初始阶段结束后有时还会出现直窜先导-后继回击现象(Warner, 2012; Warner, et al, 2012b; Zhou, et al, 2012a, 2012b; Smorgonskiy, et al, 2013)。最早 McEachron(1939)观测到起始于纽约帝国大厦的上行闪电。在此之后,世界上越来越多的国家和地区都观测到了上行闪电事件,而这种闪电的初始往往与建筑物自身高度息息相关(Rakov, et al, 2003)。

目前上行闪电的研究主要是通过高速摄像机、地面电场仪等进行数据观测,得到的大部分结论主要分为两部分:一是上行闪电的触发机制,二是上行闪电云下部分通道的一些电学、光学特征。“上行闪电的触发机制”是近几年上行闪电研究的主要问题。Wang等(2008,2010)通过观测实验指出,上行闪电触发机制有两种,一种是自行触发的,另一种是被附近放电活动产生的强大电场激发的;并分析得出,在强对流雷暴天气条件下更容易产生被附近放电活动激发的上行闪电(简称被触发上行闪电),而在非强对流雷暴天气条件下,自行触发的上行闪电(简称自触发上行闪电)比较容易产生;更大的环境风速有利于自触发上行闪电的产生,提出了最小风速阈值8 m/s的概念。Lu等(2009)通过观测发现前一次的上行闪电能触发后面的极性相反的上行闪电。Zhou等(2012b)分析2005—2009年观测的Gaisberg Tower产生的上行闪电资料,发现87%的上行闪电是自触发上行闪电,79%的自触发上行闪电都发生在冬季非强对流雷暴天气(9月—次年3月),并认为导致自触发上行闪电概率高的原因与建筑物相对周围地形的高度和冬季雷暴云电荷结构有关,在其研究中没有考虑风速的影响。Warner等(2012a,2014)统计了2004—2010年Rapid City的上行闪电,得到83%的上行闪电是由周围的放电活动触发的,而其中67%的上行闪电由附近的正极性地闪触发,只有25%的上行闪电由附近的云闪触

发。此外,其还在2011年2月一次暴风雪天气情况下观测到有93%的闪电可能为自触发上行闪电,并认为暴风雪天气条件下的气旋大风和过低的雷暴云电荷结构是导致自触发上行闪电概率较高的原因。关于上行闪电的极性,定义有上行传播的正先导,并且通道内流过负极性电荷的上行闪电为负极性上行闪电,也定义有上行传播负先导,并且通道内流过正极性电荷的上行闪电为正极性上行闪电,先导通道内出现两种电荷流过的上行闪电为双极性上行闪电(Berger, 1967; Berger, et al, 1969; Rakov, et al, 2003; Diendorfer, et al, 2009)。大量的观测结果显示,负极性上行闪电在自然界中占主导地位(Berger, 1967; Eriksson, 1978; Gorin, et al, 1984; Chang, et al, 1985; Suzuki, 1992; Manhardt, et al, 2012; Warner, et al, 2012a; Zhou, et al, 2012b; Guimarães, et al, 2014; Jiang, et al, 2014a, 2014b)。此外,正极性上行闪电和双极性上行闪电所占的比例较小(Diendorfer, et al, 2011; Zhou, et al, 2012a)。由此可见,目前关于上行闪电的研究主要是针对上行闪电触发时的环境特征以及对云下部分闪电通道的物理特性进行探讨,也累计了一定的科研成果,而由于云体的遮挡,关于上行闪电入云后的各种特征,目前尚缺乏有效地手段进行研究和探讨。

由于观测手段的限制,需要建立相应的理论模型进行讨论,目前关于上行闪电模式的研究尚少见报道,大部分都是探讨下行地闪连接过程中的上行先导过程。Becerra等(2006a,2006b)提出了一种上行先导的物理模式,模拟从任何接地建筑产生的上行先导的传播。贺恒鑫等(2008)、He等(2009)模拟了闪电先导与传输线的相互作用,在考虑下行负先导传播同时,允许产生多个上行先导并且对最后一跳进行了判断。任晓毓等(2010)结合随机放电理论建立了一个闪电先导的二维模型,分析了下行先导与宽度40 m的建筑的相互作用和连接过程。这些模拟研究主要采用先导模式,上行先导都需要下行先导激发才能产生,并且其传播距离一般比较短,这与上行闪电的表现特征还存在较大差异。因此,如何通过数值模式再现始发于超高建筑物尖端的上行闪电是一个难点。

综上所述,目前对于上行闪电的研究主要还是通过实地观测,而模式研究尚属少见,基于此,本研

究在理论雷暴云电荷结构模型(Tan, et al, 2014a)的基础上,加入能够自行触发的单个上行闪电随机放电参数化方案,建立一个上行闪电理论模型,模拟上行闪电的初始传播入云过程,并通过大量敏感性试验,探讨高大建筑物的高度对上行闪电触发以及传播的影响。

2 模拟方法

构建一个模拟区域(10 km×15 km),加入固定电荷结构模型,以此为模拟域提供一个与雷暴云电场类似的背景电场。此外,在区域中心处设置一个高层建筑物,并修改双向先导闪电随机参数化方案(Mansell, et al, 2002; Tan, et al, 2006; 谭涌波等, 2007, 2012; Tan, et al, 2014b),建立单向先导的上行闪电随机参数化方案,模拟单个上行闪电的触发以及开展后续的闪电模拟试验。

2.1 模拟结构的建立

图1为模拟域示意图,分辨率为10 m×10 m。假定水平区域中心处存在一个高为 h (m),宽为 w (m)的高层建筑,建筑物与地面充分接触形成统一的等势体,且电位为0。此外,关于边界条件(郭立新等, 2009),将地面、建筑物设为第一类边界条件(即狄里赫利边界条件),使用条件是物理量在此边界上的值为常数;对于周围的大气边界所采用的是第二类边界条件(即诺伊曼边界条件),使用条件是物理量的法向导数在边界上的值为常数。

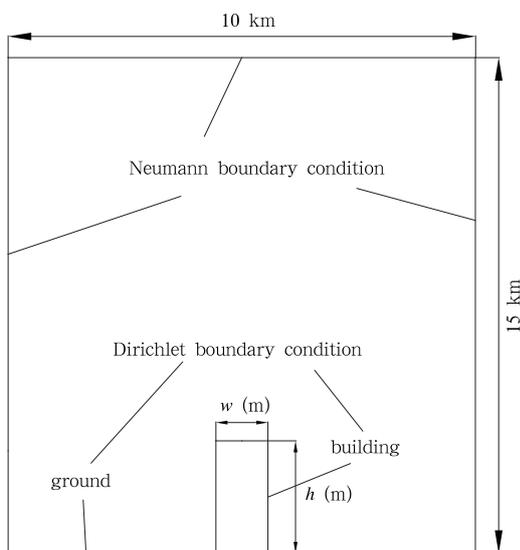


图1 模拟结构示意图

Fig. 1 Sketch for the simulative structure

2.2 背景电荷的设定

产生自触发上行闪电的主要条件是较大的环境风速以及离地面比较低的雷暴云电荷结构(Wang, et al, 2008, 2010; Zhou, et al, 2012b; Warner, et al, 2014), Jiang等(2014a)通过多普勒雷达也观测到两个建筑物上自触发上行闪电时其上空2—3 km出现回波较强的负电荷层。较强的环境风速在模型中还无法实现,但为了更容易产生自触发上行闪电,本研究在模拟区域内加入一个类似于日本冬季雷暴的偶极性电荷结构。雷暴云电荷分布是在偶极电荷结构的基础上外加一个云顶屏蔽层电荷(Tan, et al, 2014a),即电荷的从上到下的垂直分布顺序依次为:负的屏蔽层电荷区(S)、正电荷区(P)、负电荷区(N)。将雷暴云电荷区设置成椭圆形(图2), z 为离地高度,以 x_0 和 z_0 为中心位置,以 r_x 和 r_z 为椭圆的长半轴和短半轴。电荷区的电荷密度分布采用高斯分布,在电荷区的中心处电荷密度最大,具体模拟域中正、负电荷区的电荷密度分布为

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

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

式中, ρ_0 为正、负电荷区的最大电荷密度,可以看出,电荷区的电荷密度大小和分布范围是由 ρ_0 、 x_0 、 z_0 、 r_x 、 r_z 这5个参数决定的,其中,电荷区的分布范围和取值参考Krehbiel等(2008)建立的模型,具体参数取值见表1。

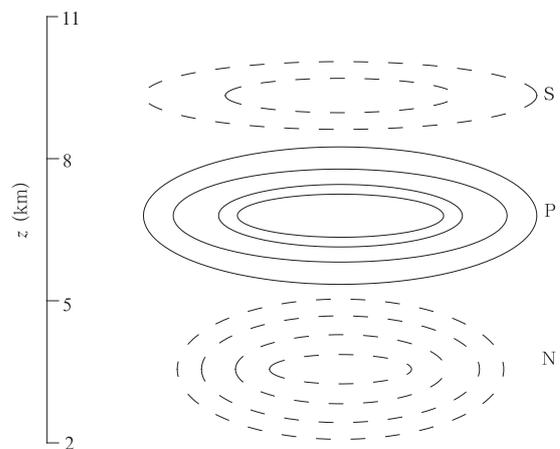


图2 雷暴云经典偶极性结构示意图

Fig. 2 Sketch for the classic dipole charge structure in a thundercloud

表1 雷暴云电荷区的几何和电参数
Table 1 The geometrical and electrical parameters in the thundercloud charge regions

参数	ρ_0 (nC/m ³)	x_0 (km)	z_0 (km)	r_x (km)	r_z (km)
S区	-0.8	5	9.5	3	1
P区	3.24	5	7	3	1.5
N区	变化	5	4	2	1.5

2.3 放电参数化方案

目前,上行闪电的参数化方案还比较少,本研究在随机双向先导闪电参数化方案的基础上,考虑到上行闪电初始阶段为单向传播的特征,加入一个建筑物,建立始发于建筑物尖端的上行闪电参数化方案。

2.3.1 上行闪电的启动

建筑物尖端对环境电场具有畸变作用,使建筑物尖端附近的电场强度远大于环境电场强度,当尖端附近某一点的电场强度大于上行闪电启动阈值时,上行闪电启动。目前,关于上行闪电的模式还很少见,更多的研究工作是模拟下行地闪连接过程中的上行连接先导。因此,文中上行闪电启动阈值参照任晓毓等(2010)的连接先导模式中上行先导的启动阈值,设定上行闪电的启动阈值为500 kV/m。

由于上行闪电模式或上行先导模式均为离散化的数学模型,在计算时分辨率对建筑物尖端处的电场畸变系数有很大的影响(Tan, et al, 2014c)。任晓毓等(2010)在空间分辨率为0.1 m的先导模式中将启动阈值设置为500 kV/m,而本研究模式的空间分辨率为10 m,故需对启动阈值(500 kV/m)进行标定。建筑物尖端处电场畸变系数与分辨率的关系(郭秀峰等, 2012)为

$$\delta = 1202.89e^{-(d/0.8766)} + 112.15 \quad (3)$$

式中, δ 为尖端畸变系数, d 为网格间距(m)。

当模式分辨率为10 m时,尖端的畸变系数可以算出约为112.16,当模式分辨率为1 m时,畸变系数为496.56。两个不同分辨率下尖端的畸变系数约相差4倍,所以,当模式分辨率为10 m时,选用的上行闪电启动阈值(E_{int})为125 kV/m。

2.3.2 通道初始阶段的单向、随机发展

上行闪电与云中触发的双向传播的闪电不同,其初始阶段为单向传播的闪电。模式中设置闪电先导通道点与其周围环境点之间电场强度的绝对值大于传播阈值(E_{crit}),先导就能继续发展,这样使上行闪电能够延伸到不同的电荷区。基于双向先导理论

(Berger, 1978),认为闪电通道为导体,考虑其始终与地保持连接,因此,闪电通道周围的电场畸变应与建筑物情况相似,无法忽略空间分辨率所带来的影响。所以,模式中设定传播阈值 E_{crit} 时也应与处理启动阈值的方法一样使用标定值(125 kV/m)。

闪电通道的扩展采用随机的步进方式(Mansell, et al, 2002; 谭涌波等, 2006),即每次正负通道各自只扩展一个后继通道点。计算全部已有的通道点与其环境点之间的电场强度,按照概率公式(4)随机选取通道的下一个通道后继点。

$$p_i(E) = \begin{cases} \frac{1}{F} (|E_i| - |E_{\text{crit}}|) & |E_i| \geq |E_{\text{crit}}| \\ 0 & |E_i| < |E_{\text{crit}}| \end{cases}$$

$$F = \sum_{i=1}^{i=k} (|E_i| - |E_{\text{crit}}|) \quad (4)$$

式中, p 为概率, F 为归一化函数, E_i 为通道周围第*i*个点与该通道点之间的电场强度。

2.3.3 通道电位以及通道扩展后的电位调整

模式中把闪电通道看成一个有电阻的导体,或者认为闪电通道具有非0的内部电场 E_{int} (Mansell, et al, 2002)。考虑到相对于云中触发的闪电,上行闪电的放电过程较弱,可能是由于通道中的电离程度较低,所以,双向先导模式中闪电通道的内部电场值(500 V/m)不适用,模式将其调整为3000 V/m。当新的扩展点选定以后,该点的电位为

$$\phi(m) = \phi_{\text{ref}} - s \sum_{i=1}^m E_{\text{int}} d_i \quad (5)$$

式中, $\sum_{i=1}^m E_{\text{int}} d_i$ 为该点距该通道起始点的路径长度, m 为路径段数, d 为各段长度, s 为通道携带电荷的极性, ϕ_{ref} 为参考电位(取初始点的环境电位),由于上行闪电初始于建筑物上,模式中又假设建筑物与大地均为0电位的良导体,则本模式中初始点的参考电位为0。

考虑通道对环境电位分布的影响,当每完成一步新的通道扩展后,需调整空间电位分布。将建筑物和扩展后的闪电通道当作固定边界条件(第一类边界条件),通道电位值为

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (6)$$

采用超松弛迭代技术解泊松方程、重新计算得到新的电位分布。这样,随着通道的扩展,通道周围的空间电位不断调整,某些点的电场强度可能会从原来

低于扩展阈值改变到超过阈值,使通道得以继续扩展。

2.3.4 闪电过程的终止

在模式中,当所有的上行闪电先导通道点与其周围环境点之间电场强度的绝对值均小于传播阈值 E_{crit} 时,或是上行闪电的通道达到了边界(非地面)时,上行闪电过程结束。需要说明的是,由于目前模型是固定的背景电场,只考虑上行闪电初始阶段的启动和传播过程,不考虑上行闪电初始过程结束后可能会产生的回击以及后继放电导致的电荷结构重新分配过程,所以模式里暂时不考虑通道内部感应电流。

3 模拟结果

图3为不同高度建筑物尖端电场刚好达到闪电启动条件时,触发的负极性的上行闪电通道结构、空

间电位分布以及空间电荷分布,其中,图3a—d分别为不同高度建筑物触发的闪电通道结构与空间电位分布,图3e—h分别为所对应的空间电荷与闪电通道分布。图中的电荷结构配置一致,电荷结构尺度大小一致,且建筑物宽度也相同均为50 m。但由于建筑物高度不同,为了使上行闪电刚好达到启动条件,负电荷区的 ρ_0 取值依次为3.89、2.84、2.19、1.8 nC/m³。

从图3中不难发现,(1)上行闪电与云中触发的双向传播的闪电不同,其初始阶段为单向传播的闪电,只有单极性的先导通道,且模拟的上行先导为正极性,模拟出来的上行闪电为负极性上行闪电。Saba等(2008)观测到的73%的上行闪电都是从尖端触发的上行正先到达达云内产生的负极性上行闪电,Dienddorfe等(2009)也观测到在上行闪电中上行正先的比例很高。闪电起始于建筑物的顶端拐

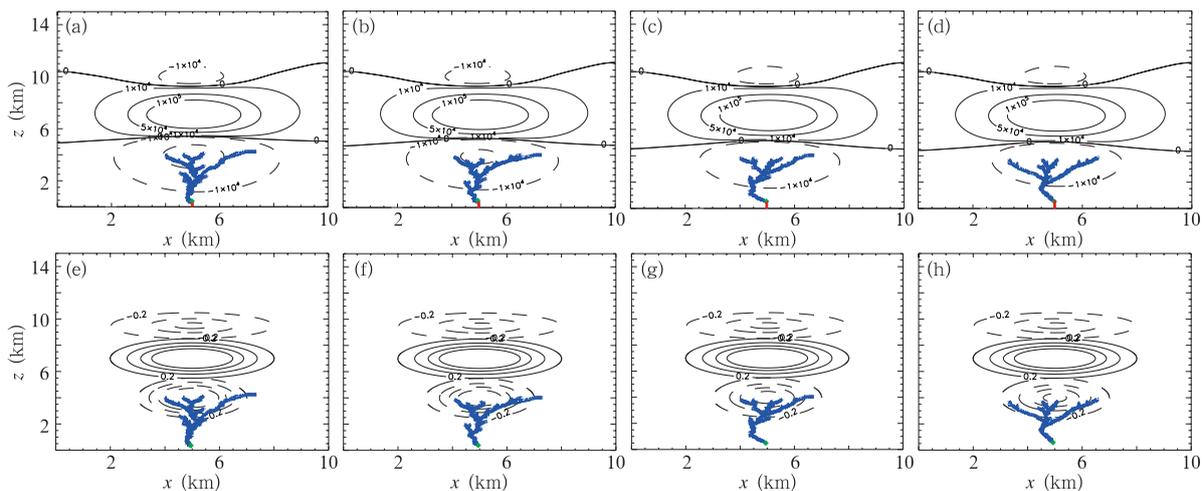


图3 不同建筑物触发的上行闪电通道与空间电位(a、b、c、d)以及空间电荷(b、d、e、f)的分布
(横坐标是模拟域的水平距离,纵坐标是雷暴云离地面的高度,蓝色实线表示上行闪电先导通道;a、b、c、d、

建筑物高度300、400、500、600 m,实线和虚线分别代表正、负电位线等值线,其间隔为 ± 50 MV,

红色长方形代表建筑物;e、f、g、h.建筑物高度300、400、500、600 m,实线和虚线分别代表正、

负电荷密度等值线,其值依次为 ± 0.2 、 ± 0.8 、 ± 1.2 、 ± 1.8 nC/m³,图中没画

建筑物轮廓,用绿色实心菱形代表闪电的起始点)

Fig. 3 Lightning channel structure and the potential distribution as well as the space charge distribution for the different heights of buildings (Horizontal ordinate is the horizontal distance of the simulative domain, ordinate is the height from the ground, blue lines are for the leader; solid and dashed lines are for positive and negative potential contours, respectively, and the interval is ± 50 MV; the rectangle is for buildings in (a) – (d), the height of building is 300, 400, 500 and 600 m, respectively; solid line is for positive charge density contour and dashed line is for negative charge density contour. The charge density contour is equal to ± 0.2 , ± 0.8 , ± 1.2 and ± 1.8 nC/m³ in turn, the black diamond is for initiation point in (e) – (h), and the height of buildings is 300, 400, 500 and 600 m, respectively)

点处,上行闪电从启动点单向垂直传播一段距离,闪电在这阶段,分支比较少;约到达 2 km 后,闪电开始出现大量的分支,并且通道开始出现明显的分叉:一部分通道受云中负电荷区产生的电场作用,继续向负电荷区的高电荷密度中心垂直发展,另一部分通道则绕过高电荷密度中心,向外水平延伸,Warner(2012)观测了不同建筑物上触发的上行先导,发现上行先导首先垂直发展,到达一定高度(1 km 处)后开始向水平方向延伸,这个观测高度低于模拟结果可能是由于观测条件下的云底高度为 1.5 km,相比模拟试验较低。(2)当建筑物模拟高度逐步增高,满足上行闪电触发条件所需的负电荷区电荷量减少,即所加背景电场强度降低,上行闪电通道分支明显减少。表 2 为对应图中 3a—d 建筑物触发的上行闪电通道的垂直以及水平延伸的距离,可见随着建筑物的高度增高,上行闪电发展的水平距离和垂直距离均有所减小。

表 2 不同高度建筑触发上行闪电的垂直和水平延伸距离

Table 2 The vertical and horizontal extension distance of upward lightning triggered by the buildings of different height

高度 (m)	垂直延伸距离 (km)	水平延伸距离 (km)
300	3.6	2.7
400	3.5	2.6
500	3.2	2.0
600	3.2	1.6

注:延伸距离为距初始点的最远距离。

4 结果分析

为了研究建筑物高度对上行闪电触发以及传播的影响,设计了敏感性模拟试验:假定高大建筑物的宽度 w (取 50 m)和位置是固定的,仅改变建筑物的高度 h (取值范围为 300—700 m,以步长 10 m 逐步增高)。根据式(1)可知,N 区的 ρ_0 值反映的是电荷区的电荷密度大小分布,为高大建筑物的电场畸变提供了背景电场。对 41 组(300, 310, 320, ..., 700 m)不同高度的建筑物进行试验,其中,对应每一个固定的高度,N 区的 ρ_0 起始值取 0.5 nC/m^3 ,以步长 0.01 nC/m^3 增加,使之达到上行闪电的触发条件,最大值取 4 nC/m^3 ,这与 Marshall 等(1998)通过气球探空得到的云电荷密度范围($0\text{--}5 \text{ nC/m}^3$)相当。在实际情况中,较高的建筑物由于具体条件不同,也可能存在雷暴环境电场大于阈值之后才触

发的闪电。但文中主要讨论的是自触发上行闪电,自触发上行闪电不同于被触发上行闪电,在其之前没有闪电活动产生的快速变化的电场,而是由雷暴云中的电荷缓慢积累达到触发条件后产生的上行闪电,这是一个相对静态的过程,所以,只考虑了电场缓慢变化的情况,而没有考虑电场快速变化的情况。

4.1 建筑物高度对上行闪电触发的影响

统计了 41 组刚好达到上行闪电启动条件时建筑物高度 h 与负电荷区最大电荷密度 ρ_0 的关系,如图 4 所示,可见建筑物的高度 h 与负电荷区最大电荷密度 ρ_0 为负相关,触发上行闪电所需建筑物高度 h 随着最大电荷密度 ρ_0 的增大而线性递减。这是因为模拟的建筑物高度越高,对周围大气电场的畸变越大,高大建筑物上触发上行闪电要比相对矮小的建筑物触发上行闪电所需要的背景电场更小,所以,建筑物高度越高越容易产生自触发上行闪电。Zhou 等(2012b)也观测到 87% 的上行闪电是自触发的,且均为负极性上行闪电。此次观测中的自触发上行闪电比例远大于 Warner 等(2012a)的观测结果,其原因之一是 Gaisberg Tower 坐落的山比周围地形高 800 m,而美国 Rapid City 坐落的黑山只比周围地形高 225 m,Gaisberg Tower 相对高度更高,能产生更强的畸变电场。

由上述分析可知,上行闪电的自触发条件除了高度外还有另一个关键因素——建筑物周围的背景电场。雷暴云底层电荷区的电荷量决定了建筑物周围的背景电场,因此,雷暴云底层电荷区的电荷量越大,建筑物周围的背景电场越强,越利于上行闪电的触发。同时,近地面电荷区的电荷极性也影响自行触发的上行闪电的极性。Manhardt 等(2012)观测到德国 Peissenberg Tower 上产生的 34 次自行触发的负极性上行闪电均出现在冬季,并指出冬季温度比较低, 0°C 层相比夏季会更加靠近地面,使得负电荷区更靠近地面,地面受强大负电场控制,容易产生正极性的上行先导向上传播,形成负极性的上行闪电。Jiang 等(2014a)观测到自行触发的负极性上行闪电产生于雷暴活动的消散期,此时伴随着降雨,雷暴云中部的负电荷会下降到近地面,地面受负电场影响,产生负极性上行闪电。通过查看多普勒雷达剖面图可以看到,在建筑物顶端触发负极性上行闪电时,其上空 2—3 km 处出现了一个负极性电荷中心,这也证实了上面的猜想。Warner 等(2014)在

2011年2月的一次暴风雪天气中观测到96%的闪电为负极性闪电,其中,93%为自行触发的上行闪电,其分析认为,暴风雪天气条件下的层状性降水使得空中的负电荷区离地面更近,并且,暴风雪产生的气旋大风将底层的次正电荷区吹散,使得中间的负电荷区暴露出来,地面受到负电场影响。

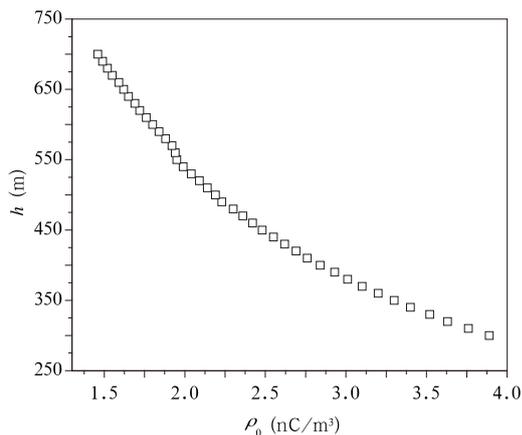


图4 达到触发条件时建筑物高度 h 与负电荷区最大电荷密度 ρ_0 的曲线关系

Fig. 4 Variation of h with ρ_0 when lightning is triggered

4.2 建筑物高度对上行闪电传播的影响

分析建筑物高度对上行闪电传播特征的影响,统计了不同高度的建筑物刚好达到上行闪电启动条件时,触发的上行闪电的分形维数和通道总步长。分形维数能够有效地表征闪电通道分支的情况,总步长代表上行闪电通道所经过的距离,反应闪电通道总体发展状况。

4.2.1 建筑物高度对上行闪电的分形维数的影响

分形特征是介质击穿放电现象的一个基本特征,闪电先导通道的弯曲和多分支结构具有一定的随机特性和自相似性,可以用分形几何学进行研究 (Tsonis, 1991; Sañudo, et al, 1995; Kawasaki, et al, 2000; 谭涌波等, 2006; Tao, et al, 2009; Amarasinghe, et al, 2008),因此,文中采用分形的方法对云闪通道的传播行为进行描述。根据分形几何学,可将放电分支的总长度(或总的通道格点数)与放电半径的关系写成(Niemeyer, et al, 1984)

$$N(r) \sim r^D \quad (7)$$

式中, r 为放电半径; $N(r)$ 为放电分支的总长度; D

为分形维数。

从以上公式得知分形维数 D 反映的是通道分支数的发展情况,对于二维平面 $1 < D < 2$, $D = 1$ 时表示通道呈单线发展, $D = 2$ 时表示通道格点占满二维平面,因而在一定的放电半径范围内, D 取不同值时表示通道分支数的发展情况不同, D 越大通道分支越多,通道分支的密集程度越高,通道结构越复杂。

图5为统计得到的不同高度的建筑物产生上行闪电通道的分形结果,依次对应图3的4种情况,从图5中可以看出,在 r 大于75个格点小于250个格点的范围内, $N(r)$ 和 r 有很好的幂指数关系 ($N(r) = ar^D$), 4种建筑物产生上行闪电的通道分形维数相差不大,这表明在距起始点一定尺度范围内,产生上行闪电通道表现出一致的分形特征,小于这个范围通道不表现出分形特征是因为在1 km以下受到建筑物畸变作用,电场很大,通道很容易满足发展阈值的条件,所以通道发展很快,分支很少;超过这个范围不表现出分形特征是由于通道发展到3 km以外在低电荷密度区延伸,通道端点与环境的电位差逐渐减小,所以,通道分支显著减少。此外,分形维数 D 会随着建筑物高度的增高而减小,这表明随着模拟建筑高度的增高,通道的分支密集程度越低,通道结构越简单。这可能是由于建筑物高度增高,触发上行闪电所需的背景电场就降低了,相应的云中次正电荷的电荷量降低,导致闪电通道入云后分形维数的减小。

4.2.2 建筑物高度对上行闪电通道总步数的影响

统计了一次完整上行闪电放电过程中通道所经过的总步数,上行闪电通道总步数越大,则总的通道长度就越大,它反映的是上行闪电通道总的发展情况。

图6给出了建筑物高度与上行闪电总步数的关系,其中, P 表示上行闪电的总步数, h 表示建筑物高度。可以发现,模拟的建筑物高度对上行闪电通道的总步数影响很大,随着模拟建筑物的高度不断增高,所触发的上行闪电的总步数总体是成一个下降的趋势;图中给出了一条高度与总步数的线性拟合曲线, $P = 2310.41 - 1.29h$, 决定系数 R^2 为0.69。此结果表明,建筑物越高,上行闪电传播的总步数越少,上行闪电的发展越弱;反之,若上行闪电能触发并且传播入云,则此次上行闪电的发展会很强烈。

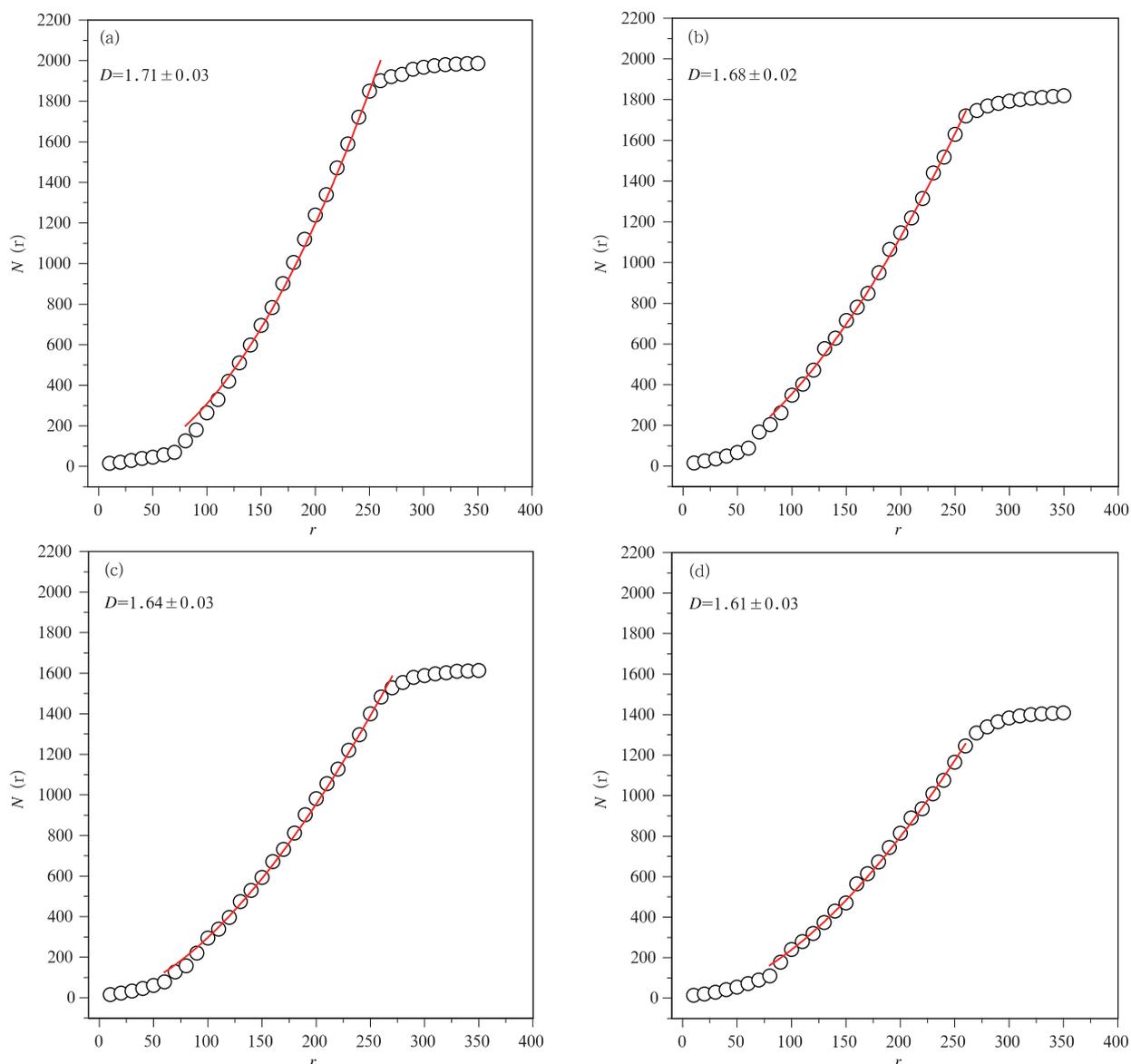


图5 放电半径与通道格点数的幂指数关系

(a—d. 为图 3a—d 的情况; r 为距闪电初始点的格点数, $N(r)$ 为以 r 为半径的圆内的通道格点数, D 为拟合的分形维数)

Fig. 5 Power relationship between the discharge radius and the total number of the channel grid points

(a—d. corresponding to Fig. 3(a) — (d); r is the number of the points away from the lightning initiation point, and $N(r)$ is the number of the points within the circle whose radius is r , and D is the fractal dimension)

5 结论与讨论

目前关于上行闪电的研究局限于地面电场变化和云下高速摄像等的实地观测和分析,由于云体的遮挡,上行闪电入云后的各种特征尚缺少有效手段进行研究和探讨,而且相应的模式研究亦较缺乏。针对这种现状,本研究设置了一个固定雷暴云偶极电荷结构,结合自行触发的上行闪电随机放电参数

化方案,进行了二维高分辨率上行闪电数值模拟试验,探讨了雷暴云下建筑物高度对单个自行触发的上行闪电触发以及传播的影响,主要得到以下几个结论:

(1)模拟的上行闪电均为负极性上行闪电,在闪电起始阶段主要垂直向上发展,闪电分支比较少;约到达 2 km 后,闪电开始出现大量的分支,且通道开始出现明显的分叉:一部分通道由于云中负电荷区

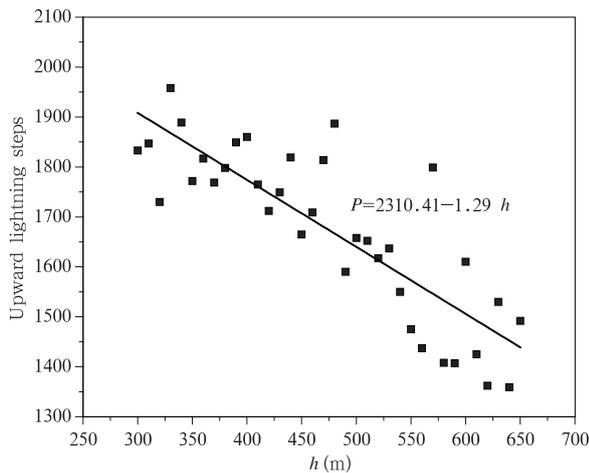


图6 不同高度的建筑物所触发的上行闪电的总步数

Fig. 6 Variation of the total upward lightning steps with h

产生的电场作用,继续向负电荷区的高电荷密度中心垂直发展,另一部分通道则绕过高电荷密度中心,向外水平延伸;模拟的上行闪电只能垂直传播到4 km左右的负电荷中心。

(2)建筑物高度对上行闪电的触发起关键作用,建筑物越高,触发上行闪电所需要的空间背景电场就越弱、越容易触发上行闪电;反之,建筑物越矮,触发上行闪电所需要的空间背景电场就越强、越难触发上行闪电。

(3)建筑物高度对上行闪电传播具有一定的反作用,由于建筑物高度增高,触发上行闪电所需的背景电场强度就降低了,相应的云中负电荷区的电荷量降低,所以模拟出的上行闪电的水平和垂直传播距离都有所减小、通道的分形维数变小、通道传播的总长度也逐渐减小。

在固定的电荷结构的设定下,结合修改的上行闪电放电参数化方案,定量地探讨了建筑物高度对上行闪电自行触发以及空中传播的影响。观测研究发现,对于上行闪电触发机制,上行闪电分为两种:一种是自行触发的上行闪电(简称自触发上行闪电),另一种是被附近放电活动产生的强大电场所激发的上行闪电(简称被触发上行闪电)。文中研究的是自触发的上行闪电,由雷暴云底层电荷区电荷逐步积累,建筑物顶端电场达到上行先导触发阈值产生的上行闪电。上行闪电的极性以及触发受底层电荷区影响,闪电极性与电荷区电荷相同。而另一种被触发上行闪电是被附近的下行地闪(大多为正极

性)或是云闪触发形成的,附近的放电活动使得建筑物周围的电场环境瞬间变化,促使上行闪电触发。被触发上行闪电的极性和触发条件不仅是依靠于雷暴云底层电荷区,建筑物附近地闪的通道极性、云闪的通道极性以及地闪回击产生的大电流都会对其产生影响。但目前就模型而言,模拟被触发上行闪电触发前的一系列放电活动还是有一定的难度。此外,实际雷暴云过境时,建筑物的尖端会产生大量的电晕粒子。考虑在设置上行闪电的触发条件时,由于仅用了电场强度一个参数来判断,电晕粒子对上行闪电触发的影响有多大?尚有待进一步研究。优化上行闪电的触发条件,把现有的上行闪电放电参数化方案耦合到云模式中,建立与实际雷暴云相似的复杂电荷结构,使模拟结果更接近真实情况,加入云闪和下行地闪,探讨他们对上行闪电触发的影响是今后工作的重点。

参考文献

- 郭立新, 李江挺, 韩旭彪等. 2009. 计算物理学. 西安: 西安电子科技大学出版社, 280pp. Guo L X, Li J T, Han X B, et al. 2009. The computational physics. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 280pp (in Chinese)
- 郭秀峰, 谭涌波, 朱俊儒等. 2012. 分辨率对建筑物周围大气电场计算结果不确定性的影响. 中国气象学会年会: S13 第十届防雷减灾论坛. 沈阳, 1: 1-12. Guo X F, Tan Y B, Zhu J R, et al. 2012. The influence of resolution ratio in atmospheric electric field calculation result uncertainty around the buildings. Annual Conference of Chinese Meteorological Society; S13 10th Lightning Protection and Disaster Mitigation BBS. Shenyang, 1: 1-12 (in Chinese)
- 贺鑫鑫, 何俊佳, 钱冠军等. 2008. 棒-板长间隙正极性流注生长概率模型及应用. 高电压技术, 34(10): 2047-2053. He H X, He J J, Qian G J, et al. 2008. Stochastic model of streamer growth in air for a Rod-plate gap and its application. High Volt Engin, 34(10): 2047-2053 (in Chinese)
- 任晓毓, 张义军, 吕伟涛等. 2010. 雷击建筑物的先导连接过程模拟. 应用气象学报, 21(4): 450-457. Ren X Y, Zhang Y J, Lü W T, et al. 2010. Simulation of lightning leaders and connection process with structures. J Appl Meteor Sci, 21(4): 450-457 (in Chinese)
- 谭涌波, 陶善昌, 祝宝友等. 2006. 雷暴云内闪电双层、分支结构的数值模拟. 中国科学(D辑), 36(5): 486-496. Tan Y B, Tao S C, Zhu B Y, et al. 2006. Numerical simulations of the bi-level and branched structure of intra-cloud lightning flashes. Sci China(Ser D), 36(5): 486-496 (in Chinese)
- 谭涌波, 陶善昌, 祝宝友等. 2007. 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, 50(4): 1053-1065. Tan Y B, Tao S C, Zhu B Y, et al. 2007. A simulation of the effects of intra-cloud lightning discharge on the charges and electrostatic potential distributions in a thundercloud. Chinese J Geophys, 50(4): 1053-1065 (in Chinese)
- 谭涌波, 师正, 王宁宁等. 2012. 随机性与电环境特征对地闪击地点影响的数值模拟. 地球物理学报, 55(11): 3534-3541. Tan Y B, Shi Z, Wang N N, et al. 2012. Numerical simulation of effects of randomness and characteristics of electrical environment on ground strike sites of cloud-to-ground lightning. Chinese J Geophys, 55(11): 3534-3541 (in Chinese)
- 郟秀书, 张其林, 袁铁等. 2013. 雷电物理学(地学卷). 北京: 科学出版社, 291pp. Qie X S, Zhang Q L, Yuan T, et al. 2013. Lightning Physics(Earth). Beijing: Science Press, 291pp (in Chinese)
- Amarasinghe D, Sonnadara U. 2008. Fractal characteristics of simulated electrical discharges. J Nat Sci Found Sri Lanka, 36(2): 137-143
- Berger K. 1967. Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore. J Franklin Inst, 283(6): 478-525
- Berger K, Vogelsanger E. 1969. New results of lightning observations, in Planetary Electrodynamics//Proceedings of the 4th International Conference on the Universal Aspects of Atmospheric Electricity. New York: Gordon and Breach, 489-510
- Berger K. 1978. Blitzstrom-Parameter von Aufwärtsblitzen. BullSchweizElektrotech, 69: 353-360
- Becerra M, Cooray V. 2006a. A self-consistent upward leader propagation model. J Phys D: Appl Phys, 39(16): 3708-3715
- Becerra M, Cooray V. 2006b. A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception. IEEE Trans Power Deliv, 21(2): 897-908
- Chang J S, Beuthe T G, Hu G G, et al. 1985. Thundercloud electric field measurement in the 553-m CN tower during 1978-1983. J Geophys Res, 90(D4): 6087-6090
- Diendorfer G, Pichler H, Mair M, et al. 2009. Some parameters of negative upward-initiated lightning to the Gaisberg Tower (2000—2007). IEEE Trans Electromagn Compatib, 51(3): 443-452
- Diendorfer G, Zhou H L, Pichler H, et al. 2011. Review of upward positive and bipolar lightning flashes at the Gaisberg Tower//7th Asia-Pacific International Conference on Lightning. Chengdu: IEEE, 263-267
- Eriksson A J. 1978. Lightning and tall structures. Transactions South African Institute of Electrical Engineering, 69(8): 238-253
- Gorin B N, Shkilev A V. 1984. Measurements of lightning currents at the Ostankino tower. Elektrichestvo, 8: 64-65
- Guimarães M, Araujo L, Pereira C, et al. 2014. Assessing currents of upward lightning measured in tropical regions. Atmos Res, 149: 324-332
- He J L, Zhang X W, Dong L, et al. 2009. Fractal model of lightning channel for simulating lightning strikes to transmission lines. Sci China Ser E(TechnolSci), 52(11): 3135-3141
- Jiang R B, Sun Z L, Wu Z J. 2014a. Concurrent upward lightning flashes from two towers. Atmos Oceanic Sci Lett, 7(3): 260-264
- Jiang R B, Qie X S, Wu Z J, et al. 2014b. Characteristics of upward lightning from a 325-m-tall meteorology tower. Atmos Res, 149: 111-119
- Kawasaki Z, Matsuura K. 2000. Does a lightning channel show a fractal? Appl Energy, 67(1-2): 147-158
- Krehbiel P R, Rioussset J A, Pasko V P, et al. 2008. Upward electrical discharges from thunderstorms. Nat Geosci, 1(4): 233-237, doi: 10.1038/ngeo162
- Lu W T, Wang D H, Zhang Y, et al. 2009. Two associated upward lightning flashes that produced opposite polarity electric field changes. Geophys Res Lett, 36(5): L05801, doi: 10.1029/2008GL036598
- Manhardt M, Heidler F, Stimper K. 2012. The electric field of negative upward lightning strikes at the Peissenberg Tower, Germany. 31th International Conference on Lightning Protection, Vienna, Austria
- Mansell E R, MacGorran D R, Ziegler C L, et al. 2002. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model. J Geophys Res, 107(D9): ACL 2-1-ACL 2-12
- Marshall T C, Stolzenburg M. 1998. Estimates of cloud charge densities in thunderstorms. J Geophys Res, 103(D16): 19769-19775
- McEachron K B. 1939. Lightning to the empire state building. J Franklin Inst, 227(2): 149-217
- Niemeyer L, Pietronero L, Wiesmann H J. 1984. Fractal dimension of dielectric breakdown. Geophys Res Lett, 52(12): 1033-1036
- Rakov V A, Uman M A. 2003. Lightning: Physics and Effects. U. K.: Cambridge Univ. Press, 687pp
- Saba M M F, Cummins K L, Warner T A, et al. 2008. Positive leader characteristics from high-speed video observations. Geophys Res Lett, 35(7): L07802, doi: 10.1029/2007GL033000
- Sañudo J, Gómez J B, Castaño F, et al. 1995. Fractal dimension of lightning discharge. Nonlin Proc Geophys, 2: 101-106
- Smorgonskiy A, Rachidi F, Rubinstein M, et al. 2013. On the proportion of upward flashes to lightning research towers. Atmos Res, 129-130: 110-116
- Suzuki T. 1992. Long term observation of winter lightning on Japan Sea coast. Res Lett Atmos Electr, 12: 53-56
- Tan Y B, Tao S C, Zhu B Y. 2006. Fine-resolution simulation of the channel structures and propagation features of intracloud lightning. Geophys Res Lett, 33(9): L09809, doi: 10.1029/2005GL025523
- Tan Y B, Liang Z W, Shi Z, et al. 2014a. Numerical simulation of

- the effect of lower positive charge region in thunderstorms on different types of lightning. *Sci China: Earth Sci*, 57(9): 2125-2134, doi: 10.1007/s11430-014-4867-7
- Tan Y B, Tao S C, Liang Z W, et al. 2014b. Numerical study on relationship between lightning types and distribution of space charge and electric potential. *J Geophys Res: Atmos*, 119(2): 1003-1014, doi: 10.1002/2013JD019983
- Tan Y B, Guo X F, Zhu J R, et al. 2014c. Influence on simulation accuracy of atmospheric electric field around a building by space resolution. *Atmos Res*, 138: 301-307
- Tao S C, Tan Y B, Zhu B Y, et al. 2009. Fine-resolution simulation of cloud-to-ground lightning and thundercloud charge transfer. *Atmos Res*, 91(2-4): 360-370
- Tsonis A A. 1991. A fractal study of dielectric breakdown in the atmosphere // *Non-linear Variability in Geophysics*. Amsterdam: Springer, 167-174
- Wang D, Takagi N, Watanabe T, et al. 2008. Observed characteristics of upward leader that initiated from a windmill and its lightning protection tower. *Geophys Res Lett*, 35(2): L02803, doi: 10.1029/2007GL032136
- Wang D, Takagi N, Takagi Y, et al. 2010. A comparison between self-triggered and other-triggered upward lightning discharges // *Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection*. Cagliari, Italy, 13-17
- Warner T A. 2012. Observations of simultaneous upward lightning leaders from multiple tall structures. *Atmos Res*, 117: 45-54
- Warner T A, Cummins K L, Orville R E. 2012a. Upward lightning observations from towers in Rapid City, South Dakota and comparison with National Lightning Detection Network data, 2004–2010. *J Geophys Res: Atmos*, 117(D19): D19109, doi: 10.1029/2012JD018346
- Warner T A, Saba M M F, Orville R E. 2012b. Characteristics of upward leaders from tall towers. 22nd International Lightning Detection Conference, Broomfield, Colorado, USA
- Warner T A, Lang T J, Lyons W A. 2014. Synoptic scale outbreak of self-initiated upward lightning (SIUL) from tall structures during the central U. S. blizzard of 1-2 February 2011. *J Geophys Res: Atmos*, 119(15): 9530-9548, doi: 10.1002/2014JD021691
- Zhou H L, Diendorfer G, Thottappillil R, et al. 2012a. Characteristics of upward positive lightning flashes initiated from the Gaisberg Tower. *J Geophys Res: Atmos*, 117(D6): D06110, doi: 10.1029/2011JD016903
- Zhou H L, Diendorfer G, Thottappillil R, et al. 2012b. Measured current and close electric field changes associated with the initiation of upward lightning from a tall tower. *J Geophys Res: Atmos*, 117(D8): D08102, doi: 10.1029/2011JD017269