

雷艺楠, 谭涌波, 余骏皓, 等. 高矮建筑物多上行先导连接过程的数值模拟. 应用气象学报, 2022, 33(1): 80-91.
DOI: 10.11898/1001-7313.20220107

高矮建筑物多上行先导连接过程的数值模拟

雷艺楠¹⁾²⁾ 谭涌波^{1)*} 余骏皓¹⁾ 郑天雪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

运用改进后的三维多先导模型, 允许高矮建筑物上均可以始发上行先导, 对多次地闪的连接过程进行模拟。结果表明: 矮建筑物始发上行先导和被击中的概率较小, 高建筑物对矮建筑物上行先导的始发具有较明确影响。建筑物间的高度差是影响上述连接过程的主要因子, 当建筑物间高度差较小时, 高建筑物对矮建筑物的屏蔽效应不明显, 下行先导通道的相对位置对矮建筑物是否优先始发上行先导存在影响; 随着建筑物间高度差的增加, 矮建筑物难以优先始发上行先导, 只在下行先导通道明显偏向矮建筑物时, 矮建筑物才可能始发上行先导, 并有一定概率与下行先导连接形成回击; 当建筑物间高度差超过某阈值后, 矮建筑物既不会始发上行先导, 更不会被击中。

关键词: 数值模拟; 连接过程; 多上行先导; 建筑物间高度差

引 言

在地闪过程中, 随着下行先导传播至地面以上几十米至上百米距离时, 其分叉的通道头部产生的局部强电场对地面凸起物体影响增加, 使其表面一点或多点处的电场增加到超过空气击穿阈值, 产生一个或多个上行先导(upward leader, UL), 此时直至下行先导(downward leader, DL)与其中某一 UL 连接形成回击, 这个阶段称为连接过程^[1]。与 DL 连接的 UL 为上行连接先导(upward connecting leader, UCL), 未连接的为上行未连接先导(unconnected upward leader, UUL)^[2]。近地面闪电连接过程的机理是雷电物理研究中重要问题之一, 大量光学研究表明: 在地闪连接过程中, 随 DL 传播, 通常不只有一个 UL, 而是始发多个 UL^[3-12], 这些 UL 始发时间以及位置不尽相同^[6], DL 会与其中一个或多个连接, 形成回击过程。随着高大建筑物群的

出现, 不同建筑物先后始发 UL 的观测事实日益增多^[6-14]。当不同建筑物始发多个 UL 时, 应存在某些决定性因子影响 DL 的选择连接, 从而决定地闪击地位置。

观测是研究闪电连接过程的有效手段, 且随着科技进步不断发展。早在 20 世纪 30 年代, McEachron^[3] 使用条纹摄像机首次拍摄到发生在美国纽约帝国大厦的多先导连接过程, 证实多上行先导的存在。此后许多研究者参与闪电连接过程观测, 分析闪电多先导连接过程中 UL 的传播速度、长度及起始位置^[4,7-16]、落雷点分布^[17]、连接方式^[18]、先导发展特征^[19-20]、电流和磁场特征^[5-6,21-24], 如 Warner^[4] 使用高速摄像机拍摄到发生在美国的一次闪电连接过程的照片, 详细分析 UL 的二维速度、长度等特征。2009 年中国气象科学院与广州热带海洋气象研究所共建广州高建筑物雷电观测站, 近年针对高建筑物闪电连接过程在先导起始、发展特征等方面取得了许多成果^[8-14,17-19]。尽管已观测到

2021-08-06 收到, 2021-09-26 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

DL与后始发的UL进行连接的个例^[9-12],但由于样本量少,以及UL初始时间难以确认,并未针对建筑物群多先导连接情况的多样化进行深入探讨,需要在观测数据的基础上辅以模式分析下垫面为建筑物群时DL选择UL连接的影响因素。

目前有关闪电连接过程模型大多为单先导模型,基于单先导模型的模式研究已取得一些进展^[25-30]。谭涌波等^[29]运用近地面二维随机模型研究发现高建筑物对矮建筑物有屏蔽作用,且存在临界保护距离。但多先导连接过程的存在表明单先导模型对于新问题探讨存在局限:单先导模型中无法再现多先导情况,UL一旦触发意味着落雷点基本确定。Arevalo等^[31]运用物理模型简要分析两个UL存在时,会引起背景电场变化进而影响闪电连接过程。Jiang等^[32]采用二维多先导随机模型定量探讨单一建筑物高度、DL初始位置与建筑物间水平距离对落雷点分布特征的影响。也有研究学者运用多先导模型模拟出DL与先后始发UL连接的不同现象^[32-33],但对于多个UL触发后,DL如何选择与之连接还缺乏深入研究。本文在余骏皓等^[33]工作基础上,优化建筑物群多先导模型,使建筑物能够始发多个UL,利用电场并行计算技术提高模拟效率使其更好地满足三维计算需求,在改进的三维多先导模型基础上,进行多次地闪模拟,探讨多先导情况中连接过程的多样性以及影响因素。

1 模式简介

余骏皓等^[33]建立三维近地面建筑物群多上行先导模型,但其多个UL通过各高建筑物分别只始发一个UL实现,这与观测事实^[3-12]存在差距。本研究在上述工作基础上进行改进,允许单个建筑物始发多个UL,实现对多个UL起始、传播和发展的模拟。此外,据观测统计,下行负地闪占全部地闪数量的90%以上^[34-35],本次模拟的是下行负地闪的近地面连接过程,相关参数的设置参照下行负先导和上行正先导发展特性^[25,33,36-37]。本章主要介绍三维多上行先导模型改进部分,有关DL发展可参考文献^[33]。

1.1 多上行先导的始发、发展与连接

观测表明:随着DL的接近,地面建筑物群通常

始发多个UL^[3-12],这些UL可能来自同一建筑物,也可能来自不同建筑物,本文改进的模型能够实现单一建筑物始发多个UL。本文考虑地面及建筑物各格点始发UL的可能性,满足始发条件的建筑物格点均可始发UL,当同一建筑物有多个格点同时满足先导始发条件时,选取最大电场值处始发UL,当不同建筑物的格点同时满足先导始发条件,则可同时发展,每次始发新的UL后重新求解全域电位,DL每发展一步也重新求解空间电位分布并搜寻建筑物群及地面是否存在UL始发点,满足先导始发条件则始发新的UL。

上述搜寻完成后若存在已经始发的UL,则UL开始发展,UL发展通常不分叉^[8-12],因此,在模型中设置UL只有头部可发展,判断头部点与周围环境点的电位梯度,若达到传播阈值,则将该环境点视为可能的发展点,UL的每步发展在可能的发展点中随机选择^[38],传播阈值与先导起始阈值相同,为 $200 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$,通道内部压降为 $500 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[25,33,36-37]。DL和UL循环发展,存在多个UL时,多先导同步发展。

DL和UL循环发展,每次循环发展后,计算DL头部与UL所有通道点之间的电场值,连接阈值为 $500 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[25,33],若有达到连接阈值的情况,则完成连接,结束本次地闪模拟。

1.2 模拟设置

本文选取地面上方 $600 \text{ m} \times 600 \text{ m} \times 750 \text{ m}$ 范围为研究区域,分辨率为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 。模型中,地面、建筑物群、先导通道以及模拟域上边界均满足Dirichlet边界条件,模拟域的侧边界满足Neumann边界条件。图1为模型示意图,模拟域顶部存在一段位置随机、长度为 25 m ,参考电位为 -20 MV 的初始下行先导段,由于真实环境中建筑物高度存在差异,为了贴近真实环境,探讨高矮建筑物的存在对DL选择连接的影响,在模拟域地面中间设置高、矮建筑物各1座,P1~P8分别为矮、高建筑物的顶角,高、矮建筑物水平距离为 50 m ,其中矮建筑物尺寸为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 固定不变,高建筑物底面与矮建筑物相同,高度为 $210 \sim 300 \text{ m}$,间隔 10 m 递增,每个高度下,在模拟域顶部中心 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ 的区域随机选取100个不同的下行先导段初始位置进行地闪模拟,共计1000个模拟个例。

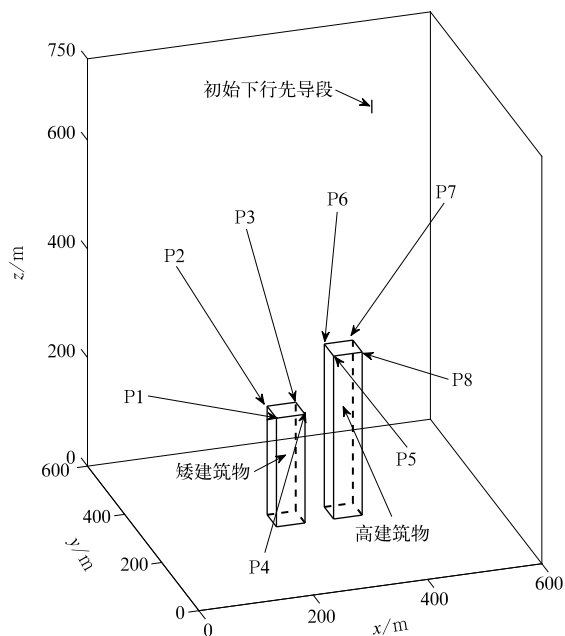


图 1 模型示意图
Fig. 1 Model diagram

2 结果与分析

2.1 模拟结果

模拟试验中,将所有个例分为单 UL(图 2a)和多 UL 两类。考虑到单一建筑物允许始发多 UL,也可将多先导个例分为两类:只有高建筑物或矮建筑物始发多 UL 的单建筑多先导个例(图 2b),高建筑物和矮建筑物均始发 UL 的多建筑多先导个例(图 2c)。除此之外,存在少数先导发展到边界的个例,这些个例不在统计范围内。由于建筑物高度差的存在以及已始发 UL 对后继 UL 的抑制作用,单 UL 个例最多,共计 613 次,且集中始发于高建筑物;单建筑多先导个例为 217 次,其中始发于矮建筑物的 6 次,均发生于建筑物高度差小于 40 m 时,且 DL 明显偏向矮建筑物一侧;多建筑多先导为 141 次。UL 的始发决定地闪击地点,而单 UL 个例以及单建筑多先导个例中,建筑物雷击情况基本确定,

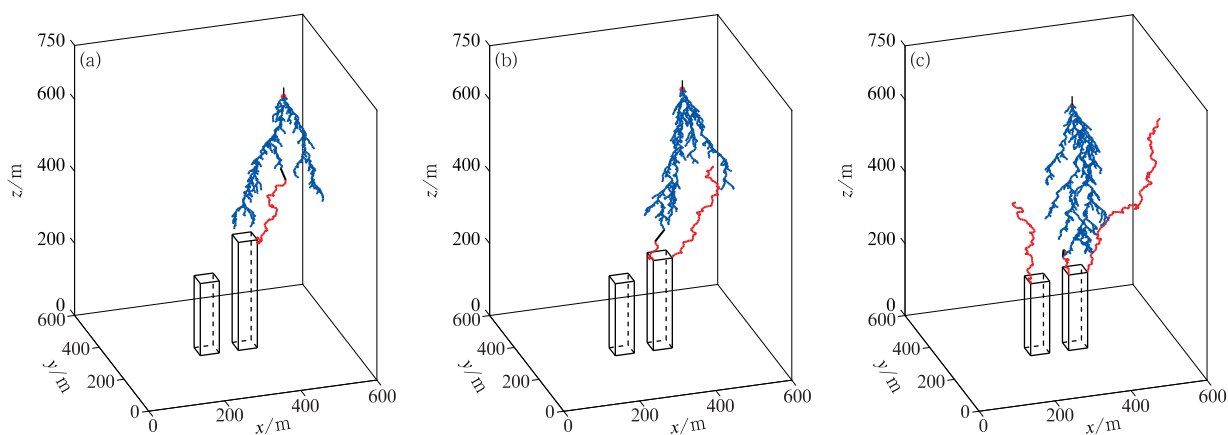


图 2 模拟试验结果闪电通道图

- (a) 单先导连接过程(高、矮建筑物的高度分别为 300 m, 200 m),
 (b) 单建筑多先导连接过程(高、矮建筑物的高度分别为 250 m, 200 m),
 (c) 多建筑多先导连接过程(高、矮建筑物的高度分别为 210 m, 200 m)

Fig. 2 Simulation of lightning channel

- (a) single upward leader attachment process (the heights of high and low buildings are 300 m and 200 m, respectively),
 (b) multiple upward leaders attachment process which from the same building (the heights of high and low buildings are 250 m and 200 m, respectively),
 (c) multiple upward leaders attachment process which from different building (the heights of high and low buildings are 210 m and 200 m, respectively)

只有在多建筑多先导情况下,才存在地闪击中建筑物不确定情况,因此本文主要探讨多建筑多先导情况。单先导、单建筑多先导的连接过程以及先导发

展到边界的个例不在本文讨论范围,以下研究所用数据均来自于多建筑物多先导的 141 次个例。

考虑到多个 UL 始发的时间和位置均不同,对

于本次模拟的个例,按照高、矮建筑物始发 UL 的先后顺序,分为矮建筑物先始发 UL 和高建筑物先始发 UL 两类。按照高、矮建筑物是否被击中,分为矮

建筑物被击中和高建筑物被击中两类。表 1 给出上述情况的具体统计结果。

本研究规定,若某种情况的概率小于 5%,则将

表 1 多建筑多先导分类统计

Table 1 Statistics of multiple buildings with multiple leaders

高建筑物高度/m	多建筑多先导	矮建筑物先始发 UL	高建筑物先始发 UL	矮建筑物被击中	高建筑物被击中
210	36	19	17	27	9
220	31	10	21	22	9
230	28	6	22	13	15
240	17	3	14	11	6
250	15	0	15	8	7
260	10	0	10	3	7
270	2	0	2	1	1
280	1	0	1	0	1
290	0	0	0	0	0
300	1	0	1	1	0
合计	141	38	103	86	55

其视为极小概率事件。可以看到,多建筑多先导情况在 1000 个个例中仅占 14.1%,后续描述的所有类型的连接过程在这 141 个个例中。由表 1 可以看到,矮建筑物先始发 UL 情况与矮建筑物被击中的次数不相等,高建筑物先始发 UL 与高建筑物被击中的次数也不相等,这说明一座建筑物先始发 UL 并非一定会被击中,即模拟可再现 DL 与后始发的 UL 连接现象^[9-12]。随着高建筑物高度的增加,其优先始发 UL 情况增加,矮建筑物优先始发 UL 情况快速减小,当高建筑物高于 240 m 时,矮建筑物基本不再优先始发 UL,这是由于高建筑物对附近矮建筑物的屏蔽效应^[29],随着高度增加,其顶角的电场畸变效应增强^[39],UL 更易始发。在多建筑多先导事件中,矮建筑物被击中的次数大于高建筑物被击中的次数(1000 次模拟试验中,高建筑物被击中的次数大于矮建筑物被击中的次数),说明矮建筑物始发 UL 后,被击中的概率将增加。

为了更好地展现矮建筑物上发生连接过程的多样化,从矮建筑物是否先始发 UL 和矮建筑物是否被击中的角度,将其分为 4 类:矮建筑物优先始发 UL 且被击中,矮建筑物优先始发 UL 但未被击中,矮建筑物后始发 UL 但被击中,矮建筑物后始发 UL 且未被击中。图 3 给出这 4 类连接过程在不同高建筑物高度下的数量统计。

由图 3 可以看到,4 类连接过程发生数量随高建筑物高度增加而减小。矮建筑物优先始发 UL 且

被击中的次数随高建筑物高度增加快速下降,矮建筑物优先始发 UL 但未被击中的次数随高建筑物高度增加缓慢减小,且次数不超过 2,可忽略不计,这说明矮建筑物只要能先始发 UL 便会被击中,这两类连接过程在高建筑物高于 250 m 时不再发生。矮建筑物后始发 UL 但被击中的次数整体略大于矮建筑物后始发 UL 且未被击中的次数,前者共计 53 次,后者共计 50 次。由此可知,矮建筑物后始发 UL 时,被击中概率约为 50%,且随高度差变化有所波动。这两类连接过程数量随高建筑物高度增加整体呈减小趋势,当高建筑物高于 250 m 时,几乎不再发生矮建筑物后始发 UL 但被击中的情况,当高建筑物高于 260 m 时,不再发生矮建筑物后始发 UL 且未被击中的情况。即当高矮建筑物高度差不大时,矮建筑物能够优先始发 UL 并大概率被击中,随着高度差的增大,矮建筑物难以优先始发 UL,但也存在被击中的情况,而后始发 UL 但被击中的概率随建筑物间高度差的增加而减小,当高度差超过某个阈值时,矮建筑物后始发 UL 也不会被击中。模拟结果显示:高建筑物对矮建筑物的影响,一方面是矮建筑物能否始发 UL,另一方面是矮建筑物能否被击中(高建筑物优先始发 UL 时也存在矮建筑物会被击中情况)。

为了更清晰地展示在高建筑物影响下,矮建筑物上始发 UL 和被击中的情况,分别统计矮建筑物始发 UL、矮建筑物被击中、矮建筑物优先始发 UL

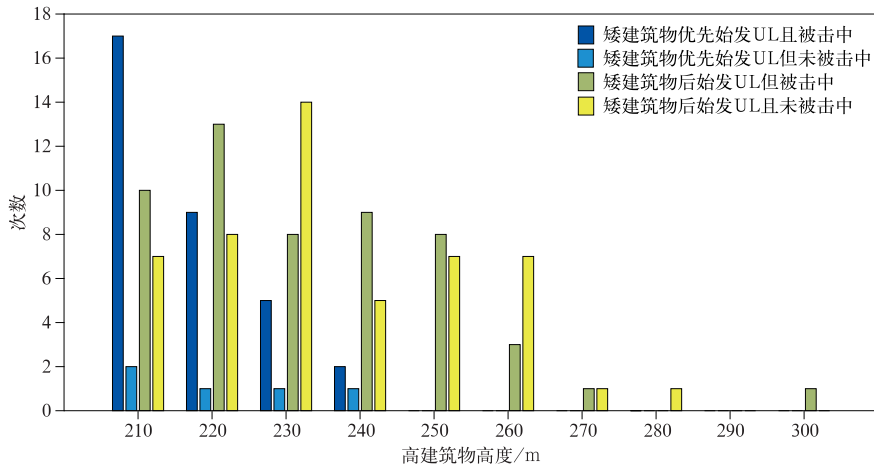


图 3 不同类型连接过程数量统计

Fig. 3 Statistics of different attachment processes

且被击中、矮建筑物后始发 UL 但被击中的概率(此处概率是指某种情况的数量占 100 次个例的比例)。由图 4 可知,矮建筑物始发 UL 和被击中的概率均小于 40%,且随着高建筑物高度增加,概率快速减小,当高建筑物高于 250 m 时,矮建筑物被击中是极小概率事件,当高建筑物高于 260 m 时,矮建筑物始发 UL 为极小概率事件。矮建筑物始发 UL 和被击中的概率并不相等,这说明建筑物始发 UL 未必一定被击中,始发 UL 后被击中的概率整体大于 50%(击中个例与始发 UL 个例之比),由此可见,虽然矮建筑物始发 UL 是小概率事件,但一旦始发 UL 便存在较大概率被击中。随高度差增大,矮建筑物优先始发 UL 且被击中的概率减小得最快,当高建筑物高于 250 m 时,概率为 0。当高建筑物高于 250 m 时,矮建筑物被击中概率与矮建筑物后始发 UL 但被击中概率一致,矮建筑物不再优先始发 UL,矮建筑物上的连接过程均为后始发 UL 但被击

中的情况。

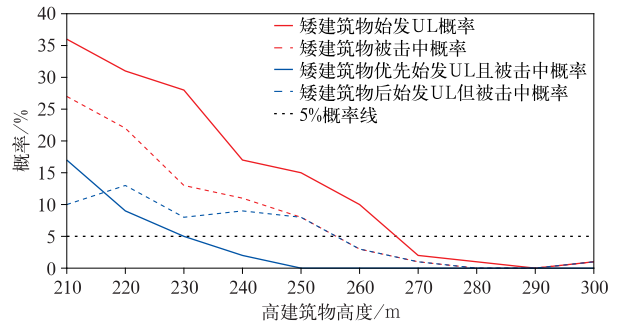


图 4 矮建筑物始发 UL 以及矮建筑物被击中的概率随高建筑物高度变化

Fig. 4 Probabilities of the low building lightning strike and the upward leaders initiated from the low building

2.2 多建筑多先导连接过程

图 5 为矮建筑物优先始发 UL 且被击中个例(简称个例 0214)的闪电通道变化图,图 6 为矮建筑

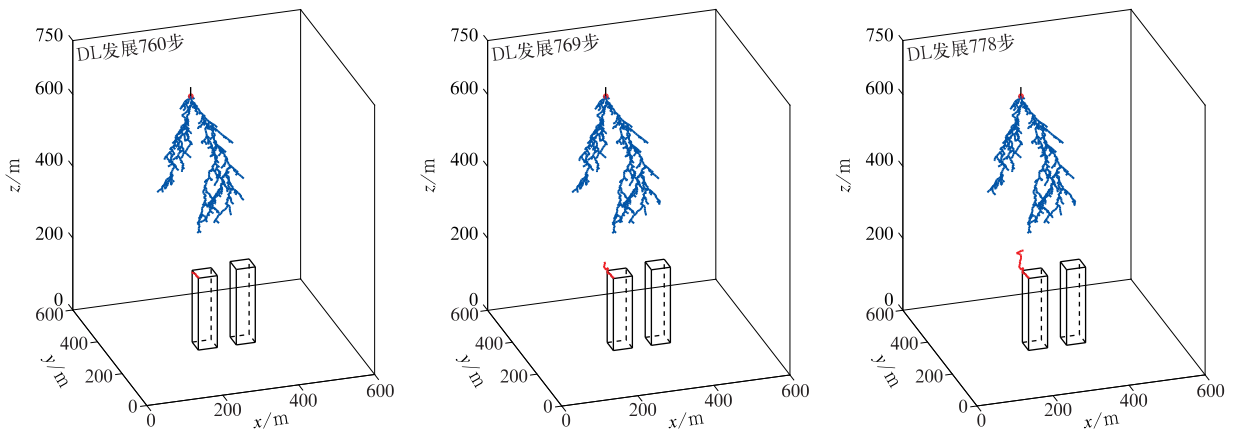
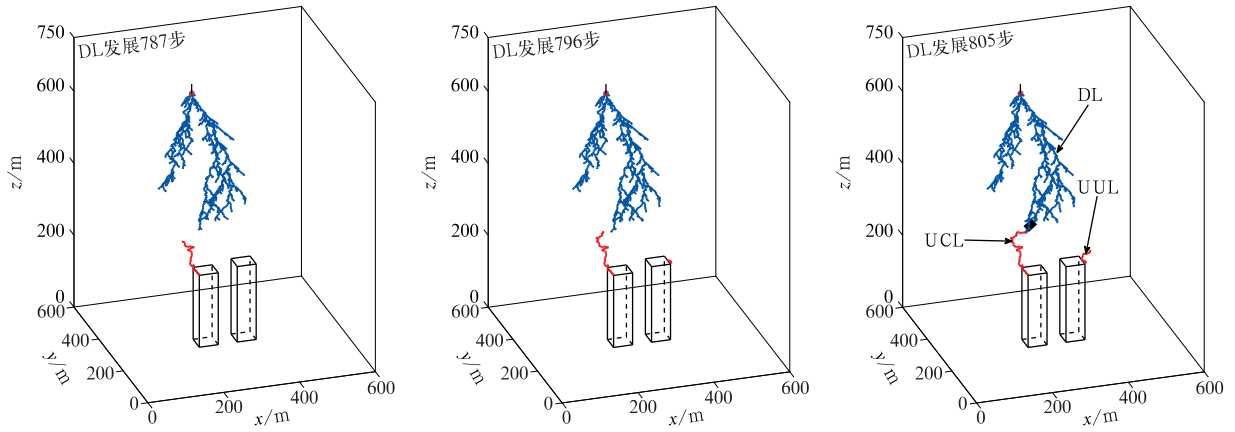


图 5 个例 0214 的闪电通道变化

Fig. 5 Variation diagram of lightning channel in Case 0214



续图 5

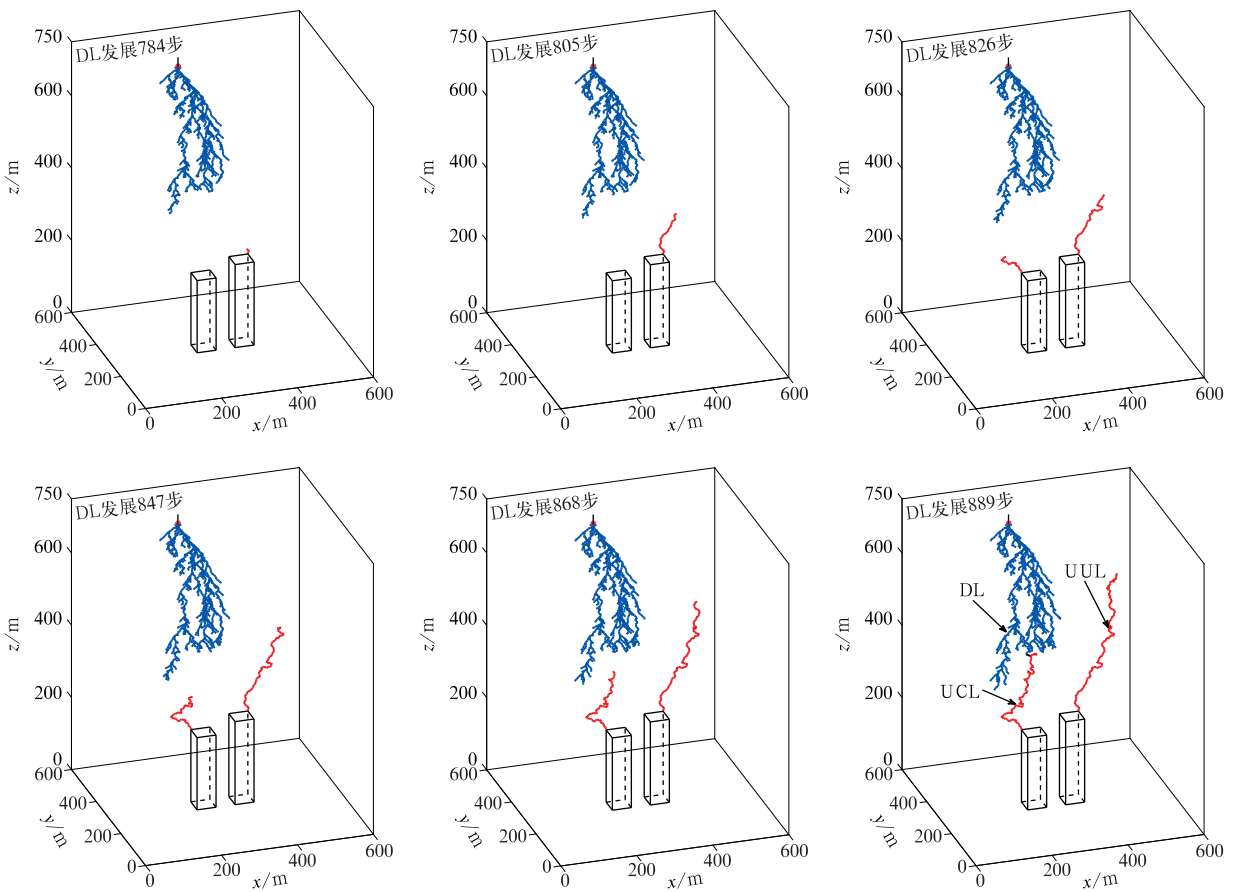


图 6 个例 0412 的闪电通道变化图

Fig. 6 Variation diagram of lightning channel in Case 0412

物后始发 UL 但被击中个例(简称个例 0412)的闪电通道变化图,图 7 为矮建筑物后始发 UL 且未被击中个例(简称个例 0511)的闪电通道变化图。红点为下行先导段的初始位置,蓝线为 DL,图 5~图 7 中红线分别为 UL,UUL 和 UCL 并以箭头标注。

个例 0214(图 5)中,高、矮建筑物高度分别为

210 m 和 200 m,初始下行先导段在 x 轴方向上与矮建筑物的距离更近,矮建筑物优先始发 UL,随着 DL 发展,高建筑物也始发了 UL,但 DL 的空间形态偏向矮建筑物,最终 DL 与矮建筑物始发的 UL 连接形成回击过程。

个例 0412(图 6)中,高、矮建筑物高度分别为

230 m 和 200 m, 初始下行先导段在 x 轴方向上与矮建筑物的距离较近, 且 DL 后续发展的分支也偏向矮建筑物, 高建筑物优先始发 UL, 随着 DL 发展, 矮建筑物也始发了 UL, 但 DL 发展的大量分支离矮建筑物始发的 UL 更近, 最终与其连接形成回击过程。

个例 0511(图 7)中, 高、矮建筑物高度分别为 240 m 和 200 m, 初始下行先导段在 x 轴方向上与高建筑物的距离更近, 高建筑物优先始发两个 UL, 随着 DL 分支向矮建筑物靠近, 矮建筑物也始发了 UL, 随着 DL 发展, 最终与高建筑物上第 2 个触发的 UL 连接形成回击过程。

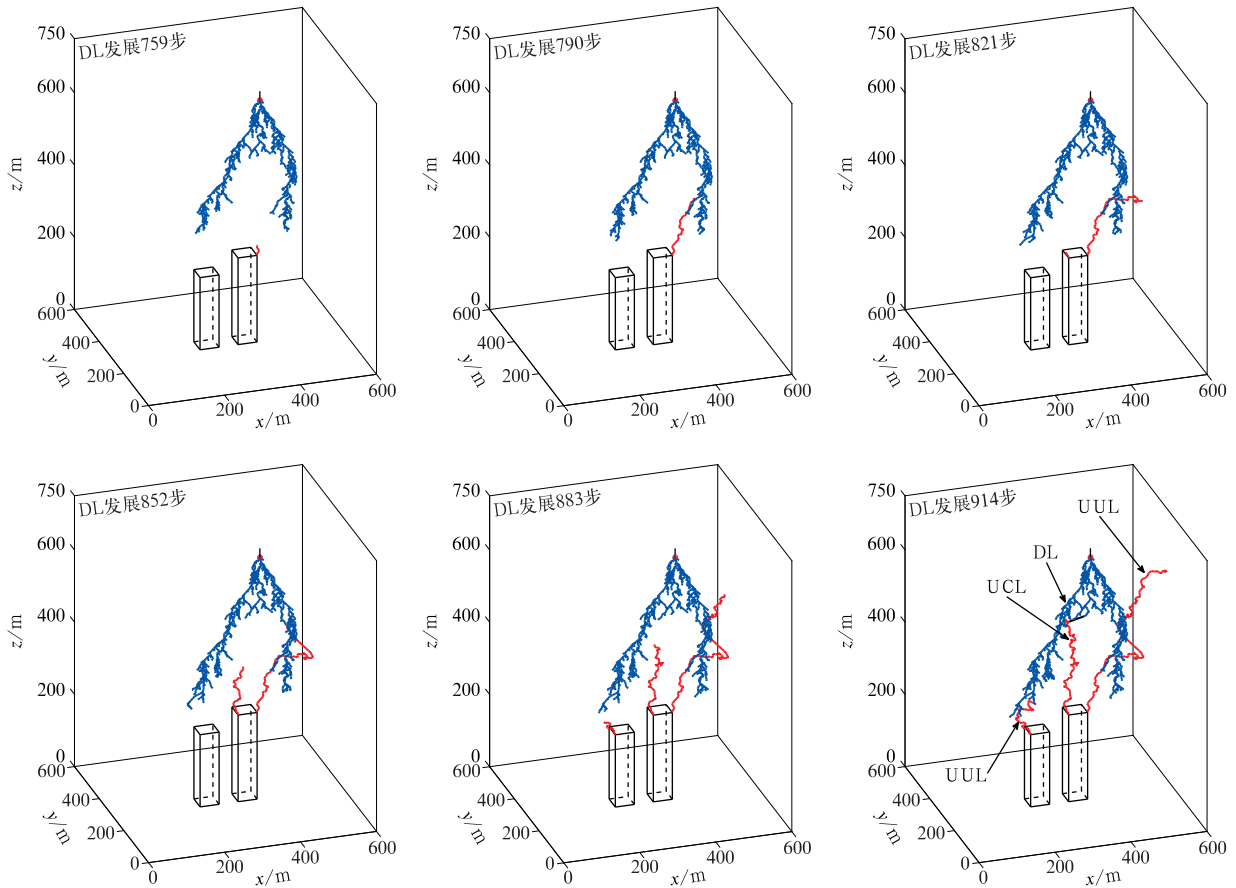


图 7 个例 0511 的闪电通道变化图

Fig. 7 Variation diagram of lightning channel in Case 0511

图 8 为个例 0214、个例 0412 和个例 0511 连接时的俯视图。图 9 为个例 0214、个例 0412 和个例 0511 两座建筑物顶角电场强度随先导发展的变化图。

如图 8a 和图 9a 所示, 初始下行先导段在 x 轴方向上与矮建筑物的距离较之与高建筑物近 50~150 m。高、矮建筑物内侧顶角处电场强度较小, 这是由于建筑物间存在相互影响^[40]。建筑物间高度差仅为 10 m, 高建筑物对矮建筑物外侧顶角处电场强度抑制作用不明显, DL 向矮建筑物发展, 矮建筑物距 DL 最近的外侧顶角(P1)处电场强度优先达到触发阈值, 始发了 UL。UL 始发后对同建筑上其他

3 个顶角的电场强度有一定抑制作用, 对 P2 电场强度抑制作用最强, P1 与 P7, P8 距离最远, 对其屏蔽效应可忽略不计。高建筑物外侧顶角距 DL 较远, 其顶角处电场畸变效应较弱, P8 在首个 UL 发展 37 步后始发 UL。两个 UL 同时传播, 对两个建筑物其他顶角处电场强度的抑制作用较明显。DL 的空间形态偏向矮建筑物, UUL 仅发展 12 步后, DL 与 UCL 连接形成回击过程。

如图 8b 和图 9b 所示, 初始下行先导段在 x 轴方向上距矮建筑物更近, 且 DL 后续发展的分支也偏向矮建筑物, 建筑物间高度差为 30 m, 高建筑物顶角处存在更强的电场畸变效应^[39]。高建筑物对

矮建筑物内侧顶角处电场强度屏蔽作用较强,对矮建筑物外侧顶角也有一定屏蔽作用,P3,P4 处电场强度最低。高建筑物外侧顶角处电场强度率先达到触发阈值(P7),优先始发 UL,始发后对 P6 的电场强度抑制作用最明显,导致其未能始发 UL,对同建筑物顶角处电场强度也有一定抑制作用,但对矮建

筑物外侧顶角(P1,P2)的抑制作用可忽略不计,随着 DL 向下延伸,P2 处电场强度在首个 UL 发展 23 步后达到触发阈值并始发 UL。两个 UL 同时传播,对两个建筑物的其他顶角处电场强度抑制作用明显,很难再始发第 3 个 UL。在随后发展中,DL 发展的大量分支离 P2 始发的 UL 更近,最终与其连接。

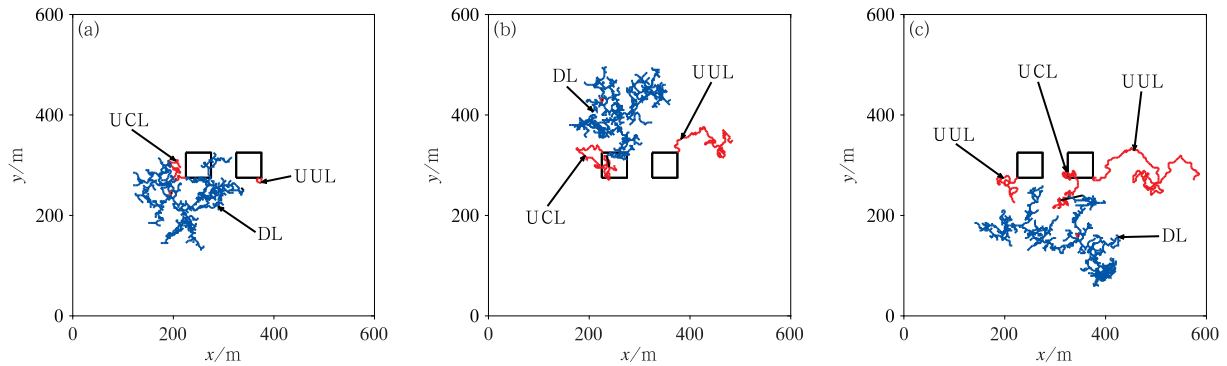


图 8 个例 0214(a)、个例 0412(b)和个例 0511(c)连接时的俯视图

Fig. 8 Top views during connection of Case 0214(a), Case 0412(b) and Case 0511(c)

如图 8c 和图 9c 所示,初始下行先导段在 x 轴方向上距高建筑物更近,建筑物间高度差为 40 m,矮建筑物内侧顶角的电场强度最弱,矮建筑物对高建筑物内侧顶角电场畸变的影响变小,P5 处电场强度仅小于 P8,高建筑物对矮建筑物屏蔽作用明显增强,矮建筑物两个内侧顶角处电场强度最小,外侧顶角处电场畸变也小于高建筑物内侧顶角。高建筑物靠近 DL 的 1 个外侧顶角电场强度优先达到触发阈值,始发 UL(P8)。首个 UL 始发后向远离高建筑物的方向延伸,除 P7 外,该 UL 对两个建筑物其他顶角处的电场抑制作用不明显,随着 DL 继续延伸,P5 处在首个 UL 发展 65 步后电场强度达到触发阈值,始发第 2 个 UL。已始发的两个 UL 对建筑物各顶角处的电场均表现出一定抑制作用,但当 DL 的一分支不断向矮建筑物靠近后,P1 处的电场强度在首个 UL 发展 112 步后达到触发阈值,始发 UL。3 个 UL 同时发展,对空间中其他顶角处电场强度的抑制作用很强。DL 最终与发展较高、距离最近的 UL 连接并形成回击过程。

DL 的空间形态及其与建筑物的水平距离、建筑物间的高度差以及相对位置均会影响建筑物上的闪电连接过程^[29-30,32]。上述 3 次个例均显示 DL 与 UCL 距离更近。在模式中,DL 与 UL 通道间的电位梯度是判断连接与否的决定性条件,不论是 UL 还是 DL 内部电位均相对固定,因此通道格点间的

距离基本决定了连接过程。距离是一种外在表现形式,受多种因子影响,如下行先导段的初始位置、后续分支的空间形态分布和建筑物间的高度差等。建筑物间的高度差是影响闪电连接过程的主要因子,当建筑物间高度差不大时,高建筑物对矮建筑物的屏蔽效应不明显(尤其是对矮建筑物外侧顶角处的电场强度),矮建筑物外侧顶角处的电场强度在 DL 空间形态偏向矮建筑物时优先达到触发阈值,始发 UL,被击中概率大;随着建筑物间高度差的增加,高建筑物对矮建筑物的屏蔽效应逐渐增强,高建筑物的外侧顶角通常优先始发 UL(通常是靠近 DL 一侧的顶角),若 DL 通道明显偏向矮建筑物并不断向其靠近,矮建筑物有可能后始发 UL,并有一定概率与 DL 连接形成回击过程;当建筑物间高度差超过某个阈值后,高建筑物对矮建筑物的屏蔽效应较强,此时 DL 的空间形态和相对位置对闪电连接过程的影响可忽略不计,矮建筑物既不会始发 UL,也不会被击中。

UL 一旦触发,对周围顶角处的电场强度会产生一定抑制作用,这种抑制作用与 UL 数量以及 UL 与顶角的距离有关(UL 与顶角的距离既可以指始发 UL 的顶角与其他顶角的水平距离,也可以指 UL 与其他顶角的三维距离)。UL 数量越多,抑制作用越大,始发 UL 的顶角与其他顶角的水平距离越近,抑制作用越明显,随着 UL 发展,若 UL 的空间形态逐渐偏向某一顶角,这种抑制作用也会加强。

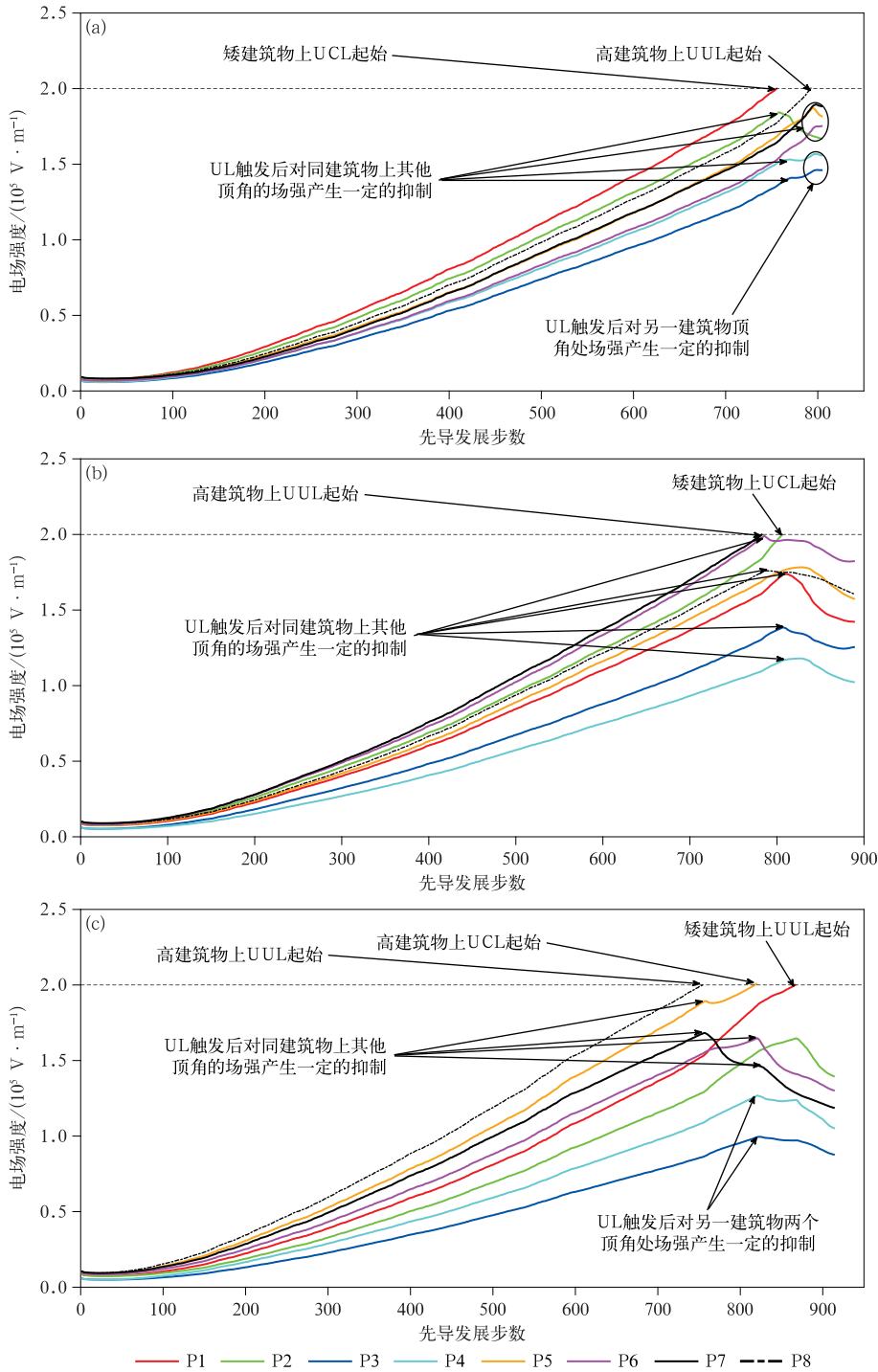


图 9 两座建筑物顶角电场强度随先导发展的变化

(a) 个例 0211, (b) 个例 0412, (c) 个例 0511

Fig. 9 Variation of electric field at buildings top angle with leaders development in Case 0214(a), Case 0412(b) and Case 0511(c)

3 结论与讨论

运用改进后的三维多先导模型进行下行先导段

初始位置随机的地闪模拟,模型设置两座建筑物并改变其中一座建筑物的高度,着重讨论多建筑多先导过程,得到如下结论:

1) 矮建筑物上始发 UL 的概率较小,一旦始发

UL 则被击中的概率较大。在多建筑多先导事件中,随着建筑物间高度差的变化,可分为4类:矮建筑物优先始发 UL 且被击中,矮建筑物优先始发 UL 但未被击中,矮建筑物后始发 UL 且被击中,矮建筑物后始发 UL 但未被击中。

2) 建筑物间高度差是影响闪电连接过程的主要因子。当建筑物间高度差不大时,若 DL 通道偏向矮建筑物,矮建筑物可优先始发 UL,被击中概率大;随着建筑物间高度差的增加,在 DL 通道明显偏向矮建筑物并不断向其靠近的情况下,矮建筑物有可能后始发 UL,并有一定概率与 DL 连接形成回击过程;当建筑物间高度差超过某个阈值后,DL 的空间形态对闪电连接过程几乎没有影响,矮建筑物既不会始发 UL,也不会被击中。

3) 在多先导过程中,UL 始发有先后顺序,也会影响连接过程。UL 始发后对周围顶角的电场强度会产生一定抑制作用,这种抑制作用与 UL 的数量以及始发 UL 的顶角与其他顶角的水平距离有关,UL 数量越多,抑制作用越大,水平距离越小,抑制作用越明显,除此之外,随着 UL 发展,若 UL 与某一顶角的三维距离逐渐减小,这种抑制作用也会加强。

本文结论仅限于所设置的空间配置,其他空间配置有待深入研究。在今后工作中,提高分辨率以更加精细化地模拟闪电的连接过程,并设置形状更为复杂的建筑物,或设置多座建筑物(不同高度、不同水平距离、不同顶部形状)讨论下垫面为建筑物群时闪电连接过程;扩大模拟区域,减少边界对模拟地闪连接过程的影响。另外,可基于目前工作,定量探讨影响建筑物始发单先导、多先导的决定性因子,以及多先导过程中影响落雷点位置分布的决定性因子,为建筑物防雷提供参考。

参考文献

- [1] 鄧秀书,张其林,袁铁,等. 雷电物理学. 北京: 科学出版社, 2013.
Xie X S, Zhang Q L, Yuan T, et al. Lightning Physics. Beijing: Science Press, 2013.
- [2] Rakov V A, Uman M A. Lightning: Physics and Effects. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [3] McEachron K B. Lightning to the empire state building. *Electrical Eng*, 1938, 57(12): 493-505.
- [4] Warner T A. Upward Leader Development from Tall Towers in Response to Downward Stepped Leaders // 30th Int Conf on Lightning Protection (ICLP). IEEE, 2010: 1-4.
- [5] Wang D, Takagi N, Watanabe T. Observed characteristics of upward leaders that are initiated from a windmill and its lightning protection tower. *Geophys Res Lett*, 2008, 35(2), L02803.
- [6] Araujo L S, Miguel B G, Pedrosa A G. Assessing Events of Upward Lightning Measured at Morro do Cachimbo Station // Conf on Lightning Protection. IEEE, 2012: 1-4.
- [7] Cummins K L, Krider E P, Olbinski M. A case study of lightning attachment to flat ground showing multiple unconnected upward leaders. *Atmos Res*, 2018, 202: 169-174.
- [8] Lu W, Chen L, Zhang Y. Characteristics of unconnected upward leaders initiated from tall structures observed in Guangzhou. *J Geophys Res*, 2012, 117(D19), D19211.
- [9] Gao Y, Lu W, Ma Y. Three-dimensional propagation characteristics of the upward connecting leaders in six negative tall-object flashes in Guangzhou. *Atmos Res*, 2014, 149: 193-203.
- [10] Lu W, Gao Y, Chen L, et al. Three-dimensional propagation characteristics of the leaders in the attachment process of a downward negative lightning flash. *Atmos Sol-Terr Phys*, 2015, 136: 23-30.
- [11] Lu W, Chen L, Zhang Y, et al. Unconnected Upward Leaders Observed in Guangzhou During 2009-2010 // 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, 2011: 609-613.
- [12] Qi Q, Lu W, Ma Y, et al. High-speed video observations of natural lightning attachment process with framing rates up to half a million frames per second. *Geophys Res Lett*, 2019, 46(21): 12580-12587.
- [13] 齐奇, 吕伟涛, 武斌, 等. 广州两座高建筑物上闪击距离的二维光学观测. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 156-164.
Qi Q, Lü W T, Wu B, et al. Two-dimensional optical observation of striking distance of lightning flashes to two buildings in Guangzhou. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 156-164.
- [14] 吕伟涛, 陈绿文, 马颖, 等. 广州高建筑物雷电观测与研究 10 年进展. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 129-145.
Lü W T, Chen L W, Ma Y, et al. Advances of observation and study on tall-object lightning in Guangzhou over the last decade. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 129-145.
- [15] Saba M M F, Paiva A R, Schumann C, et al. Lightning attachment process to common buildings. *Geophys Res Lett*, 2017, 44(9): 4368-4375.
- [16] Visacro S, Guimaraes M, Murta Vale M H. Features of upward positive leaders initiated from towers in natural cloud-to-ground lightning based on simultaneous high-speed videos, measured currents, and electric fields. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122(23): 12786-12800.
- [17] 吴姗姗, 吕伟涛, 齐奇, 等. 基于光学观测资料的广州塔附近下行地闪特征. *应用气象学报*, 2019, 30(2): 203-210.
Wu S S, Lü W T, Qi Q, et al. Characteristics of downward cloud-to-ground lightning flashes around Canton Tower based on optical observations. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(2): 203-210.

- [18] Lu W, Chen L, Ma Y, et al. Lightning attachment process involving connection of the downward negative leader to the lateral surface of the upward connecting leader. *Geophys Res Lett*, 2013, 40:5531-5535.
- [19] 武斌, 吕伟涛, 齐奇, 等. 双向先导正端突然延展现象的高速摄像观测. *应用气象学报*, 2020, 31(2):146-155.
Wu B, Lü W T, Qi Q, et al. High-speed video observations on abrupt elongations of the positive end of bidirectional leader. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2):146-155.
- [20] Gamerota W R, Idone V P, Uman M A, et al. Dart-stepped-leader step formation in triggered lightning. *Geophys Res Lett*, 2014, 41(6):2204-2211.
- [21] Golde R H. Lightning and tall structures. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1978, 125(4):347-351.
- [22] Shindo T. Lightning striking characteristics to tall structures. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2018, 13(7):938-947.
- [23] Cummer S A, Lyu F, Briggs M S, et al. Lightning leader altitude progression in terrestrial gamma-ray flashes. *Geophys Res Lett*, 2015, 42(18):7792-7798.
- [24] Zhang Y, Lu W, Chen S, et al. A review of advances in lightning observations during the past decade in Guangdong, China. *J Meteor Res*, 2016, 30(5):800-819.
- [25] Becerra M, Cooray V. A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception. *IEEE Trans Power Delivery*, 2006, 21(2):897-908.
- [26] Yang N, Zhang Q, Hou W, et al. Analysis of the lightning attractive radius for wind turbines considering the developing process of positive attachment leader. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122(6):3487-3497.
- [27] Ludin D I, Rakov V A, Mareev E A, et al. Advanced numerical model of lightning development; Application to studying the role of LPCR in determining lightning type. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122(12):6416-6430.
- [28] 吴姗姗. 广州塔及其附近下行地闪的特征分析和模拟. 北京: 中国气象科学研究院, 2019.
Wu S S. Characteristic Analysis and Simulation of Downward Cloud-to-ground Lightning Flashes around the Canton Tower. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2019.
- [29] 谭涌波, 陈之禄, 张冬冬, 等. 高建筑对周围建筑雷击保护距离的模拟. *应用气象学报*, 2016, 27(4):498-505.
Tan Y B, Chen Z L, Zhang D D, et al. Simulation on the stroke protection distance of tall buildings to surrounding buildings. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(4):498-505.
- [30] 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.
Tan Y B, Zhang D D, Zhou B W, et al. A numerical study on characteristics of cloud-to-ground lightning near surface configuration. *J Appl Meteor Sci*, 2015, 26(2):211-220.
- [31] Arevalo L, Cooray V. Influence of Multiple Upward Connecting Leaders Initiated from the Same Structure on the Lightning Attachment Process // X International Symposium on Lightning Protection, 2009:221-226.
- [32] Jiang R, Lu W, Wu B, et al. Simulation of cloud-to-ground lightning strikes to structures based on an improved stochastic lightning model. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2020, 203:105274.
- [33] 余骏皓, 谭涌波, 郑天雪, 等. 建筑物群中多上行先导三维模型的建立. *应用气象学报*, 2020, 31(6):740-748.
Yu J H, Tan Y B, Zheng T X, et al. A three-dimensional model establishment of multiple connecting leaders initiated from tall structures. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(6):740-748.
- [34] Eriksson A J. The Lightning Ground Flash: An Engineering Study. Pretoria: University of Natal, 1979.
- [35] Rakov V A. The physics of lightning. *Surveys in Geophysics*, 2013, 34:701-729.
- [36] Tan Y B, Tao S C, Liang Z W, et al. Numerical study on relationship between lightning types and distribution of space charge and electric potential. *J Geophys Res*, 2014, 119:1003-1014.
- [37] Zheng T X, Tan Y B, Wang Y R, Numerical simulation to evaluate the effects of upward lightning discharges on thunderstorm electrical parameters. *Adv Atmos Sci*, 2021, 38(3):446-459.
- [38] 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.
Wang Y R, Tan Y B, Zheng T X, et al. Numerical simulation of main negative charge area parameters for upward negative cloud-to-ground lightning. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2):175-184.
- [39] 郭秀峰, 谭涌波, 郭风霞, 等. 建筑物尖端对大气电场变影响的数值计算. *应用气象学报*, 2013, 24(2):189-196.
Guo X F, Tan Y B, Guo F X, et al. Numerical simulation of effects of building tip on atmospheric electric field distortion. *J Appl Meteor Sci*, 2013, 24(2):189-196.
- [40] 耿雪莹, 张其林, 刘明远. 地面建筑物(群)对雷暴云大气电场影响的模拟研究. *气象科技*, 2012, 40(5):827-833.
Geng X Y, Zhang Q L, Liu M Y. Effect of tall buildings on thunderstorm electric field. *Meteor Sci Technol*, 2012, 40(5):827-833.

Numerical Simulation on Multiple Upward Leader Attachment Process of Tall and Low Buildings

Lei Yanan¹⁾²⁾ Tan Yongbo¹⁾ Yu Junhao¹⁾ Zheng Tianxue¹⁾

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

The multiple upward leader's attachment process on buildings is an important topic in lightning physics research, but the research on its physical mechanism is still insufficient. An improved 3D high-resolution multiple upward leader's stochastic method is used to simulate the development and attachment process of downward negative cloud-to-ground lightning in the near-ground area. The model allows upward leaders to be initiated on both tall and low buildings. The attachment process is analyzed when the multiple upward leaders are initiated and connected from both high and low buildings. The results show that low buildings have very small probability of initiating upward leaders directly and being struck, while high buildings have a clear influence on the initiation of upward leader of low buildings. Once low buildings initiate upward leaders, they are more likely to be stricken. The height difference between buildings is the main factor affecting the lightning attachment process. When the height difference between buildings is not large, the shielding effect of high buildings on the low buildings is not obvious, and the relative position of the downward leader channel will affect whether the low buildings can first initiate the upward leader. With the increase of the height difference between buildings, it is difficult for low buildings to preferentially initiate the upward leader. Only when the downward leader channel is obviously closer to low buildings, low buildings can initiate the upward leader and have a certain probability to connect with the downward leader to form a return stroke. When the height difference between buildings is large enough to a certain extent, the space form of the downward leader has little influence on the lightning attachment process. The low buildings will not be struck without initiating an upward leader. After the upward leader is initiated, it will have a certain inhibitory effect on the electric field intensity of the surrounding top angle. This inhibitory effect is related to the number of upward leaders and the horizontal distance between the top angle of the initiating upward leader and other top angles. The inhibitory effect is positively correlated with the amount of upward leaders while negatively correlated with the horizontal distance.

Key words: numerical simulation; cloud-to-ground lightning attachment process; multiple upward leader; height difference between buildings