

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.
DOI: 10.11898/1001-7313.20200609

建筑物群中多上行先导三维模型的建立

余骏皓¹⁾²⁾ 谭涌波^{1)*} 郑天雪¹⁾ 王艺儒¹⁾ 师正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/雷电物理与防护工程实验室, 北京 100081)

摘 要

为实现对地闪过程中多上行先导现象的模拟,在已有三维随机放电参数化方案基础上,植入多先导始发与发展模块以建立高建筑群多上行先导模型,利用电场并行计算技术提高模拟效率。将新模型应用于实际地闪模拟并就统计数据与先导形态特征同观测数据进行对比。结果表明:上行未连接先导长度为 12~709 m,起始高度为 360~600 m,距连接点水平距离为 255~1026 m,距下行先导最近分支的距离为 326~589 m,与观测统计结果具有较高的一致性;形态上再现了实际地闪个例 F1215 中上行未连接先导始发时间早,通道笔直的特点,也能够模拟下行先导与单上行先导头部、单上行先导侧面、多上行先导中连接先导头部、多上行先导中连接先导侧面 4 种已有观测记录的连接情况,为后续研究提供基础模型。分析模拟结果初步得出结论:最高的广州塔能够对附近一定范围建筑起保护作用且能吸引较远处的下行先导分支;多先导的始发与最后一跳的连接受地面高建筑物群分布、高度以及下行先导位置综合影响。

关键词: 数值模拟; 连接过程; 多上行先导

引 言

地闪过程中,下行梯级先导传播至近地面区域可使地面尖端物体表面一点或几点处的电场增加至周围空气的击穿阈值,始发一个或多个向上发展的先导^[1],后者被称为多上行先导。根据是否与下行先导相连接可将其分为上行连接先导(upward connecting leader, UCL)与上行未连接先导(unconnected upward leader, UUL)^[2]。早在 20 世纪 30 年代,McEachron^[3]通过条纹摄像机拍摄到美国纽约帝国大厦附近建筑物始发未连接的上行流光,证实多上行先导的存在。受限于观测手段,当时未能记录下先导发展全过程数据^[3-6]。高速摄像的应用推动这一领域的发展,大量光学研究表明,不同地面条件,地闪连接过程中出现多上行先导并非个

例^[7-14],密集的高建筑物对其影响尤为显著。Lu 等^[12]整理中国广州珠江新城 19 次地闪数据,得出建筑物越高,该建筑物越易受较远下行先导影响而始发 UUL。Gao 等^[13]利用双站摄像数据重建三维闪电通道,统计 6 次 UCL 长度范围为 180~818 m,平均值为 426 m。吴珊珊等^[14]通过分析广州塔附近地闪分布得出广州塔能够吸引附近 1 km 内的地闪分支,UUL 大多始发于较高建筑物的结论。

观测工作能够直观展现多上行先导发展特征,模式研究则从仿真模拟的角度给出分析。目前已有相关工作^[15-20]使用单连接先导模型从正、负先导间连接方式、侧击雷的产生机制及高建筑对附近低矮建筑的临界保护距离等方面开展研究。吴珊珊^[19]利用二维随机模式模拟广州珠江新城各高建筑对附近建筑物的保护效果,分析得出最高的广州塔对周围地闪吸引作用最大。此类基于单连接先导模型的

2020-05-12 收到, 2020-07-06 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发发展计划(2017YFC1501504), 国家自然科学基金项目(41875003), 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.

模式工作对地闪连接过程已取得一些成果,然而受限于对多先导过程认知不足与高精度模拟效率过低,涉及多上行先导的模式研究较为欠缺。Arevalo等^[21]利用三维物理模型,模拟下行先导垂直且无分叉的发展并从先导发展速度和时间的角度分析同一建筑物上UCL和UUL间的竞争关系。考虑多上行先导的三维随机模式工作处于空白状态,相较于物理模型,随机模型能够在空间形态上模拟出与实际相近的先导通道,且三维模拟能更精准还原地面建筑物群的分布与几何特征,也是模拟研究多先导的有效方法。

综上所述,高速摄像技术未普遍用于地闪观测时,模式研究大多用单连接先导模型处理下行先导到达近地面区域时诱发上行先导的情形。随着观测能力提高,更多始发UUL的案例被完整记录,与之对应的多上行先导模拟研究仍较欠缺,三维物理模型探讨同一建筑物上多先导间的竞争关系,三维随机模型下的先导形态更接近实际闪电通道,适用于建筑物群中多连接先导研究。因此,本文拟建立一个始发于高建筑物群的多上行先导三维随机模型并结合广东省高建筑物闪电观测站(Tall-Object Lightning Observatory in Guangzhou, TOLOG)光学观测数据,对模型中UUL起始及发展部分进行合理性验证,为探讨多上行先导始发的有利条件及UUL,UCL间的竞争关系提供基础模型。

1 模型建立

本工作在谭涌波等^[16]建立的三维近地面随机模式的基础上,建立高建筑物群多上行先导模型,实现对多个先导起始、发展及最后一跳的模拟。本章着重介绍新建立的模型并将其应用于广州珠江新城的地闪模拟。

1.1 多上行先导模型

多上行先导模型的建立需要考虑先导的始发、传播、终止及电场计算,作为近地面区域的地闪模拟,各主要参数及处理方法均参考随机放电参数化方案,与单连接先导模型的主要区别在于多先导的启动以及优化电场算法等。本模型选取近地面上方 $1000\text{ m}\times 1000\text{ m}\times 1000\text{ m}$ 空间范围为模拟区域,分辨率为 $5\text{ m}\times 5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 。在地面中心放置9座 $50\text{ m}\times 50\text{ m}\times 300\text{ m}$ 的建筑物,间隔统一为 50 m 。除分辨率外的其他参数均可根据不同模拟需求进行调

整,在此设置下建模。

1.1.1 下行先导发展

由于地闪中90%以上为负地闪^[22],本模型在模拟域的顶部正中设置长 25 m ,初始电位为 -30 MV 的下行负先导以模拟负地闪到达近地面区域的情况,这与Mazur等^[23]、谭涌波等^[17]、任晓毓等^[20]的假设相似。根据已有观测结果^[3-14],下行先导到达近地面区域时具有倾斜、分叉、总体向下发展的形态特征,因此本模型中的下行先导第1步发展仅能在先导头部周围格点中选择,此后每步都可从通道周围选择符合发展条件的格点,即满足下行先导传播阈值为 $220\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[16-19,24-26]。若发展过程中有多个符合条件的候选点,则根据电场值的权重随机发展下一步通道。与Tan等^[18]工作类似,认为先导通道是有电阻的导体,通道内部电压降为 $500\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ 。本模型除最后一跳外,下行先导不可向上发展。

1.1.2 多上行先导的起始

实现多上行先导起始的关键是合理搜寻建筑物并始发先导。根据多上行先导观测数据,UUL与UCL多始发于不同的建筑物上^[3-14],因此本模型仅允许多先导在建筑物群中的不同建筑物启动,始发位置包括天线、建筑物顶部、侧面等,即只要满足始发条件的建筑物表面格点均可始发。下行先导每发展一步则重解空间电位分布并搜寻建筑物群是否存在上行先导起始点。模拟域的网格化使得建筑物上电场离散变化,即便提高模型分辨率,每步下行先导发展长度仅 $5\sim 10\text{ m}$,也存在下行先导发展至某步时,同一建筑物上多个格点同时达到始发上行先导条件的可能,本文选择其中最大电场值处启动先导,认为该点为该建筑上首个满足条件的点。对多个建筑物,从顶部向下同时进行搜寻,不同建筑物上的上行先导起始点可在同一次搜寻中同时始发先导,也可在下行先导发展至不同位置时分别始发,均以始发点电场值达到始发阈值作为上行先导始发标准,以此实现多先导同时或是先后始发,每次始发新的上行先导后重解全域电位。由于不可预测多先导中哪一支成为UCL,且研究表明^[21,27],UCL与UUL的电流脉冲的峰间间隔与电流大小都非常相似,设置多连接先导的起始阈值同为 $220\text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[16-19,24-26]。

1.1.3 多先导发展与连接

不同于下行先导的多分叉现象,UCL和UUL

在传播过程中,几乎没有分支存在^[3-14]。因此,设置多上行先导的每一步发展只可在其先导头部周围环境点随机选择,传播阈值与先导起始阈值相同。正、负先导循环发展,存在多上行先导时,多先导同时发展。本模型中,正、负先导的发展都采用步进式(step-by-step)随机参数化方案,即每次正、负先导通道的扩展只选取 1 个后继通道点,各符合条件的候选点根据其电场值大小分配其在概率函数中相应权重以实现先导随机发展^[28]。与下行先导设置相似,上行先导除了最后一跳外,不得向下发展。

观测工作中仅有正、负先导头部对头部,下行先导头部对上行先导侧面两种连接方式^[29]的记录,本模型也在最后一跳模拟这两种连接形态:每次循环发展完正、负先导,计算下行先导头部与上行先导所有通道点之间的电场值,若达到连接阈值 $500 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[24-26],则完成连接,结束本次地闪模拟。

1.1.4 并行算法下的电场求解

泊松方程求解是闪电数值模拟过程中最耗时的部分,尤其是三维高精度的模拟工作,若沿用 CPU (central processing unit, 中央处理器) 串行的超松弛迭代计算方法,本模型模拟 1 次地闪的时间长达 72 h,用于大规模敏感性试验显然效率过低。若是为提升速度而降低计算精度或模式分辨率,这种牺牲模拟效果的做法也不可取。为同时满足高计算精度和低计算耗时的需求,本模型基于 GPU (graphics processing unit, 图形处理器) 并行计算技术,通过双数组交替法去除原先超松弛迭代计算中的数据相互依赖性,使之适应 GPU 并行计算要求,选取 pgFortran 作为计算平台^[30]求解泊松方程。本模型中,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,将电场强度达到相应阈值作为先导始发、发展以及连接的依据,闪电先导通道每发展一步,则使用上述 GPU 并行计算方法重解全模拟域的电位。由于模拟域网格的离散化,采用七点中心差分法计算每一格点在各方向上的电场强度^[16-17],根据概率函数在候选点中选择发展的下一步通道^[16-20]。

图 1 为建模后进行的一次模拟,图中下行先导大体形态垂直向下,有 3 个主要分支,共始发 6 个上行先导,包括 1 个 UCL 与 5 个 UUL,多先导出现位置在建筑物群的四角或边缘,发展高度从 15~135 m 不

等,连接方式为正、负先导头部与头部相连接。

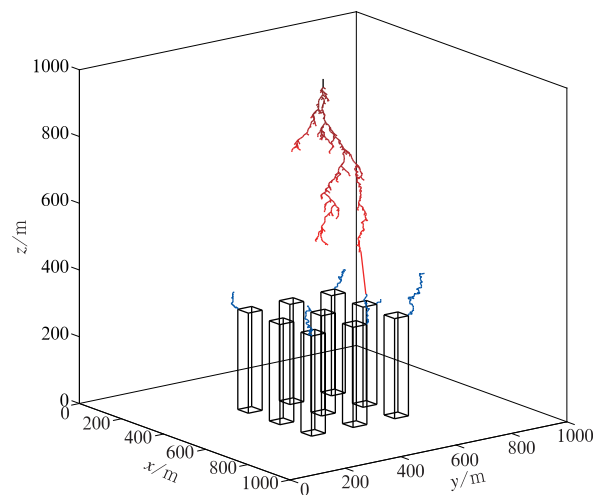


图 1 一次地闪过程的模拟

Fig. 1 Simulation of cloud-to-ground lightning

1.2 模拟设置

为验证所建模型的合理性,将其应用于广州珠江新城区域的实际地闪模拟。根据 TOLOG 的观测视野^[14],调整近地面上方 $1000 \text{ m} \times 2500 \text{ m} \times 1500 \text{ m}$ 空间范围作为模拟区域。该水平范围的选取既包括模拟测站视野范围内的 8 座最高建筑物,又保持建筑物与模拟域边界之间的合理距离,消除地闪模拟中边界带来的影响,设置的模拟域高度足以展现下行先导发展至近地面时弯曲与分叉的形态特性。

模拟的 8 座建筑物分别为广州塔(600 m)、广州周大福金融中心(又称广州东塔(530 m))、广州国际金融中心(又称广州西塔(440 m))、广晟国际大厦(360 m)、环球都会广场(318 m)、珠江城大厦(310 m)、越秀金融大厦(310 m)和利通广场(303 m)^[31]。其中,广州塔塔身为椭圆形柱体,顶部有 145 m 长的天线,东塔的塔顶设计为一斜坡与一小平台;西塔是正三角柱体;广晟国际大厦顶部由 3 个小平台和 50 m 长的天线组成,4 座较矮建筑物均为长方体。广州塔与其余 7 座高建筑物距离较远,高建筑物群的相对位置与形状严格根据上述调研情况^[14]设置。由于模拟域的网格化,广州塔的塔身用相应尺寸长方体模拟,西塔用直角三角形柱体模拟,使得建筑物各面尽可能处于格点上,利于上行先导起始点的搜寻。鉴于建筑物的顶部形状与天线对于大气电场的畸变效果明显^[32],模型中精细模拟各建筑物顶部形状,包括东塔顶部的斜坡、广晟国际大厦

的各层小平台与天线,其外形与分布情况如图2所示,该视角的选取对应吴珊珊等^[14]在拍摄到的实际建筑图像。

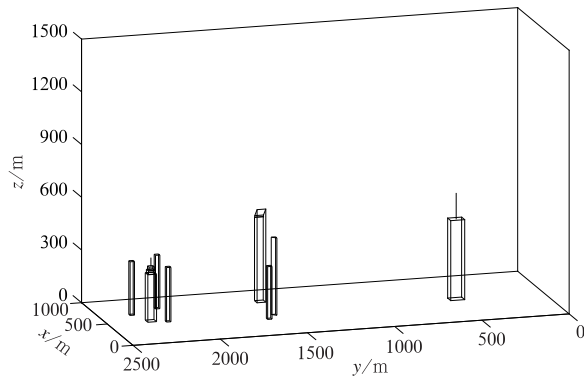


图2 建筑物群模型

Fig. 2 Model of simulated buildings

2 结果与分析

通过对比实际统计数据验证多先导模型具有一定合理性,展示本模型下多先导形态特征及统计规律。

2.1 模拟结果检验

将模式输出结果与 Lu 等^[12]整理归纳的 19 次下行负地闪过程中始发的 45 次 UUL 各项参数进行对比。选择 UUL 进行对比,一方面,新模型中 UCL 部分与单先导模型相似,已应用于模式研究且合理,验证新加入的 UUL 合理即验证本模型的合理性;另一方面,所选的观测数据积累了足够 UUL 案例并进行较全面统计,适用于对比验证工作。在上文的模拟设置下,使下行负先导初始位置从模拟域 x 轴正中位置沿 y 轴正方向以 100 m 步长等间距地进行 18 次模拟对比试验,统计不同下行先导初始位置下,包括 UUL 的起始高度、二维长度、距连接点的水平距离、起始点距下行先导最近分支的二维距离 4 个参数范围,前两者为 UUL 的基本参数,后两者是影响 UUL 始发的参数,共同代表 UUL 的特征。由于三维通道相较于二维通道更加

曲折复杂,Gao 等^[13]对 6 次负地闪进行三维重建工作并给出三维/二维的通道长度比值范围为 1.1~1.7,本工作参考该比值范围。

观测与模式的参数统计如表 1 所示。由于 UUL 起始高度即为建筑物高度,因此不需要乘以比例系数。具体数据对比分析如下:

①观测数据中 UUL 起始高度范围为 40~503 m,模式中统计结果为 360~600 m。起始高度下限不同主要由于模式中暂未模拟低矮建筑物群,这是出于以下考虑:一方面,本模型对于近地面先导起始的搜寻方式为对建筑物逐个从顶部到侧面搜寻,不同于存在电荷背景情况下虚拟设置 300 m 高建筑物时的搜索方法^[34],更注重多先导始发的具体位置,搜寻过程也更复杂,三维高精度的模拟已使计算量与耗时大幅增加,加入低矮建筑物群会更大幅度地增加模拟时间而降低模拟效率;另一方面,雷暴天气过境时,相对于地面或低矮物体,高建筑物更易始发上行的连接先导而被下行地闪击中^[2],该区域高建筑物密集,几座高建筑更易吸引下行先导^[11,14,17],根据该地区地闪观测统计,高度低于 300 m 的建筑物大多仅受 600 m 范围内的闪击影响而始发 UUL^[12],超过这一距离则不易启动,且本文探讨的是高建筑物群上多先导的始发,因而未加入低矮建筑物群的模拟,在未来的工作中可尝试加入低矮建筑物群。统计结果上限的差异,是由于 19 次负地闪的观测中未计入广州塔始发 UUL 类似的个例,但如个例对比部分所选取的 F1215 观测个例所示,广州塔也可始发 UUL。在地闪模拟中,各建筑物都存在始发 UUL 的情况,与观测相符。

②观测得到先导二维长度范围为 0.48~399 m,模式模拟得到的三维范围为 12~709 m,乘以比例系数后的观测数据范围与模拟结果范围几乎完全重合,上、下限相差均约为 10 m。一方面,模拟域的网格化且 5 m 的精度使得模拟数值与现实情况仍有出入;另一方面,三维与二维的参数比值由对 6 次不同地闪重建得出,仅提供参考的范围。综合

表 1 观测数据与模式结果对比

Table 1 Comparison of observations and model output

对比数据	UUL 起始高度/m	UUL 长度/m	距连接点水平距离/m	距下行先导最近分支距离/m
二维观测数据	40~503	0.48~399	20~1300	99~578
三维观测数据		0.53~678.3	22~2210	108.9~982.6
三维模式结果	360~600	12~709	255~1026	326~589

以上因素,对于长度上百米的先导而言,10 m 左右的误差在合理区间范围内。

③观测得到的 UUL 距连接点水平距离范围是 20 m~1.3 km,模式中统计为 255~1026 m;观测得到 UUL 起始点距下行先导分支最小距离范围是 99~578 m,模式中统计为 326~589 m。将以上两组二维观测数据乘以比例系数后,模式得到的相应范围完全在三维观测数据范围内,即从 UUL, UCL 始发角度增加了模式的合理性。

尽管该验证工作中仍存在模拟次数不足的缺点,模拟精度和电场计算准确度影响模拟统计结果,但根据以上对比,认为该多先导模型存在一定合理性。

2.2 地闪个例模拟

目前大多数观测资料仅是二维图像,无法准确描述先导实际发展特征, Lu 等^[33]通过双测站观测以及三维通道重建再现观测个例 F1215 的三维形态。本模型能够模拟出与 F1215 个例先导特征相似的地闪,以下是分析。

F1215 个例为 2012 年 5 月 6 日拍摄于广州的地闪个例^[32],共始发 3 个上行先导,其中 UCL 起始于 440 m 高的西塔,三维与二维的通道长度分别为 818 m 和 610 m,比值为 1.34,两个 UUL 起始于高度为 600 m 的广州塔和 360 m 的广晟国际大厦,二维长度分别为接近 2000 m 和 322 m。该个例中,广州塔优先于西塔与广晟国际大厦始发上行先导,最终却并未与下行负先导连接,其整体发展趋势垂直向上,呈现出 UUL 始发时间早、通道垂直的特点,这些特性仅从二维图像难以获得。对应的模拟结果同样始发 3 个上行先导(如图 3 所示)。UCL 起始于 530 m 高的东塔,长度为 315.1 m,两支 UUL 始发于 600 m 高的广州塔和 440 m 高的西塔,长度分别为 895.2 m 与 147.5 m,闪电发展高度和形态与 F1215 相似,该视角的选取对应文献^[32]中 F1215 个例的观测图像。

在本次模拟中,下行先导初始位置处于 3 座建筑物之间,发展 3 个主要分支。当负先导传播至近地面时,广州塔作为最高建筑物,其尖端电场值变化最明显,且下行先导的某一分支试图发展至广州塔,二者综合影响下使其过早始发 UUL,但正、负先导实际相隔距离较远,该 UUL 受整体雷暴云电场的

吸引作用更强,因而首先始发的 UUL 较笔直地向上延伸,最终却未发展成为 UCL,负先导其余分支同步发展接近并击中地面其余高建筑物。本文模拟真实地闪特征,在今后工作中将从 UUL 和 UCL 的竞争与促进关系进行研究。

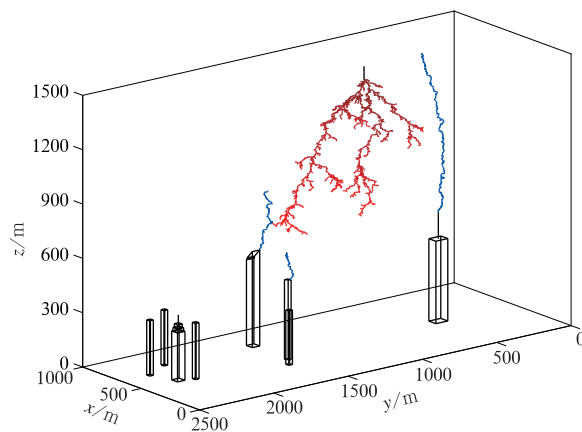


图 3 模拟 F1215 闪电通道

Fig. 3 Simulation of F1215 lightning channel

2.3 先导形态展示与统计

新建多上行先导模型并非否定单先导模型,而是提供多先导始发的可能,该模型同样能够模拟单连接先导的情形。图 4 为广州珠江新城地闪模拟中出现的 4 种不同连接情况,其中图 4a 与图 4b 为始发单连接先导,图 4c 与图 4d 为始发多连接先导的情况;就连接方式而言,图 4a 与图 4c 为上、下行先导间“头部-头部”的连接,图 4b 与图 4d 分别为下行先导头部与上行先导侧面相连接,如每张图中局部放大区域所示。本模型能够合理地对这 4 种已有观测记录且具代表性的先导通道进行模拟。

先导模拟统计如图 5 所示, x 轴为模拟试验中初始下行先导距模拟域边界的距离,该距离的增加表示每次地闪模拟从图 2 中的广州塔正上方向建筑物群靠近的过程,直至广晟国际大厦正上方;柱状图代表每次模拟中始发的上行先导数量;图 5 中虚线为每次模拟中连接点的高度统计,实线为每次模拟中被击中的建筑物高度统计。

本模拟试验中的 8 座建筑物根据其相对位置可视为单一高建筑物(广州塔)与高建筑物群的组合。初始的下行先导从单一高建筑物上方向建筑物群移

动的过程中, 当其位于广州塔 300 m 范围内时, 仅有广州塔始发上行先导, 而距其 600 m 处, 广州塔始发的上行先导仍能发展成为 UCL。当下行先导位于建筑物群上方 1200 m 范围内, 几乎每次模拟都触发多上行先导, 与下行先导位于广州塔上方只有单一连接先导的情况形成反差。不仅如此, 通过折线图可以发现, 随着模拟中多上行先导的出现, 连接点高度略有降低, 这是由于建筑物群高度低于广州塔, 下行先导需要在更低的高度才可诱发 UCL 且多上行先导为下行先导提供更多选择, 一定程度使最后一跳更易发生。统计发现下行先导

能够诱发较低建筑物上的 UUL, 但从实线可以看出, 下行先导更倾向于击中较高建筑物上的上行先导。多上行先导发生规律如下: 地闪发生于最高的广州塔附近时, 高建筑能始发连接先导而对一定范围的建筑物起保护作用, 也能够吸引较远处的下行先导分支; 多先导始发较大程度受地面高建筑物群的分布、高度以及下行先导的位置影响; 越高的建筑物始发的上行先导越易与下行先导相连接。本文旨在建立新模型并进行合理性分析, 后续会开展更明确的结果统计与分析。

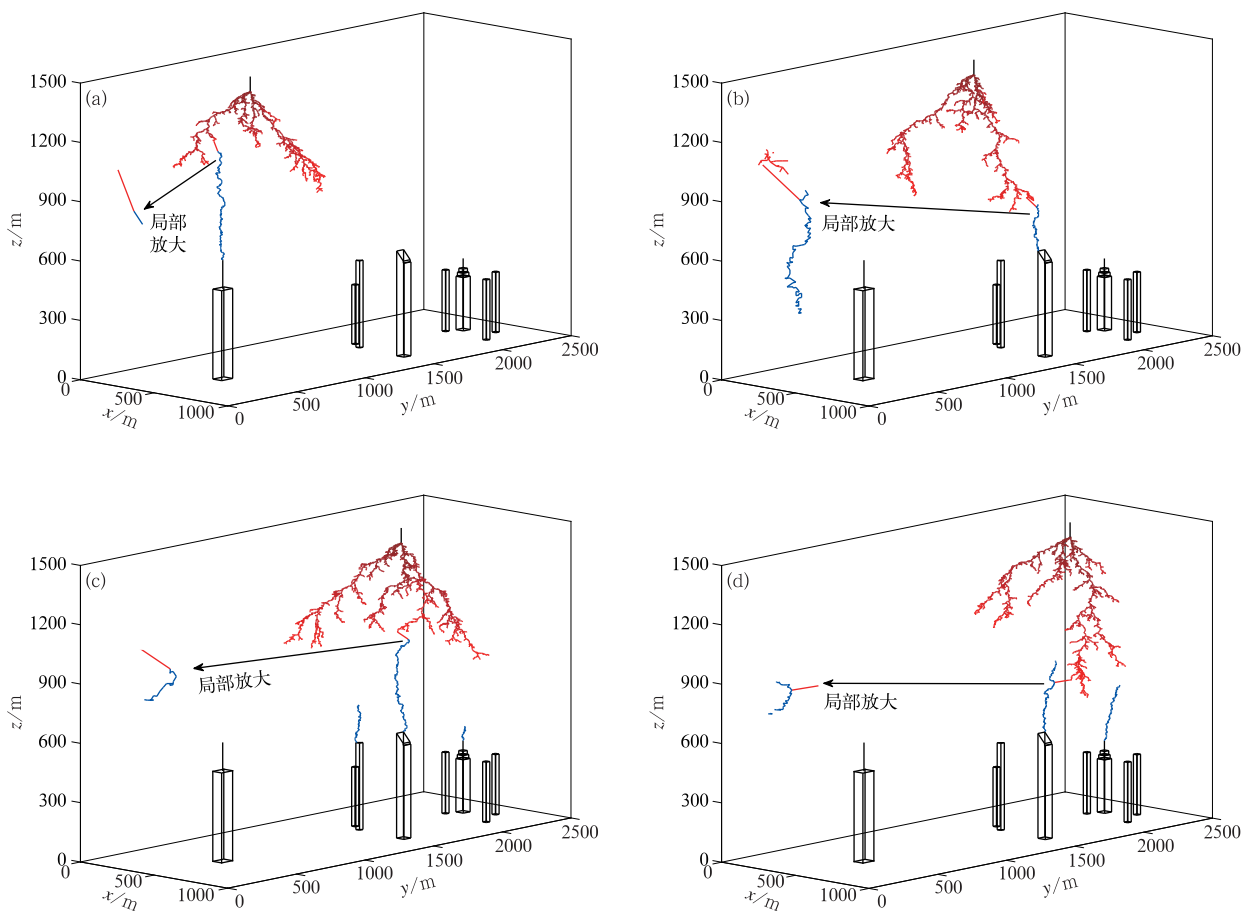


图 4 高建筑物群中上行先导连接情况的模拟

(a) 始发单连接先导, “头部-头部”连接方式, (b) 始发单连接先导, “头部-侧面”连接方式, (c) 始发多连接先导, “头部-头部”连接方式, (d) 始发多连接先导, “头部-侧面”连接方式

Fig. 4 Simulation of upward leaders in high building groups
 (a) the single connecting leader, the “tip-tip” connecting mode,
 (b) the single connecting leader, the “tip-side” connecting mode,
 (c) the multiple connecting leaders, the “tip-tip” connecting mode,
 (d) the multiple connecting leaders, the “tip-side” connecting mode

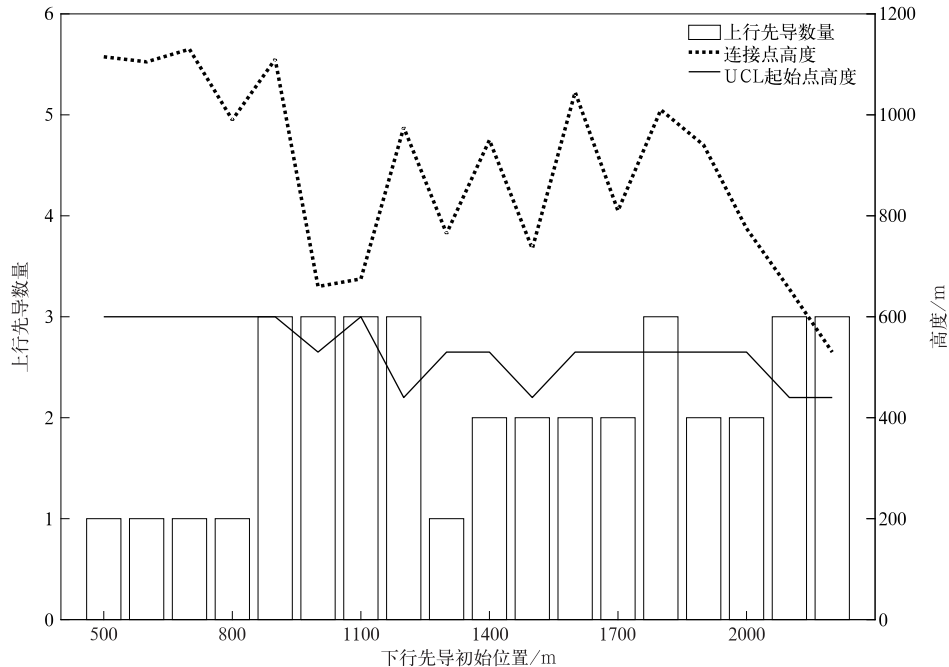


图 5 地闪模拟中先导参数统计

Fig. 5 Parameter statistics of upward leaders in cloud-to-ground lightning simulation

3 结论与讨论

本文在随机放电参数化方案中加入新建立的建筑物群多上行先导模型,在该模型中增加建筑物数量,调整建筑物上始发点的搜寻方式与发展顺序,使用 GPU 并行计算技术求解泊松方程,实现地闪过程中多上行先导的三维高精度模拟,并将新建立的模型应用于广州珠江新城的地闪模拟,主要得到以下结论:

1) 统计的 4 个模式输出参数包括:UUL 始发高度范围为 360~600 m,UUL 三维长度范围为 12~709 m,UUL 始发时距下行先导水平距离为 254~1026 m,UUL 距连接点的距离范围是 325~589 m,与观测数据的范围有很好的一致性。

2) 对实际闪电 F1215 个例进行模拟,始发 3 个上行先导,且最高的广州塔率先始发,但并非最后被击中的建筑物,其上的 UUL 具有通道笔直、发展距离长的特点,推断是地面建筑物群分布、高度及下行先导位置共同影响的结果。不仅如此,本模型能够实现观测中下行先导与单上行先导头部、单上行先导侧面、多上行先导中连接先导头部、多上行先导中连接先导侧面 4 种连接情况的模拟。

3) 通过对模拟的先导数量、起始高度以及连接

点高度的统计发现,最高的广州塔能够对附近一定范围的建筑物起保护作用,也能够吸引较远处的下行先导分支;多先导的始发较大程度受地面高建筑物群的分布、高度以及下行先导的位置综合影响,越高的建筑越易被下行先导击中。

本文主要是建筑物群多先导模型并进行合理性验证,为后续研究工作提供基础模型。该模型可研究建筑物群的几何特征、分布情况,下行先导的强度与形态等对多先导全过程的影响,也能够探讨 UCL 与 UUL 间竞争关系以及下行先导选择 UCL 的机理分析等科学问题。这不仅可加深对多上行先导的认识,也能够为实际建筑物群的雷电防护提供设计思路。由于可参考的多先导模式工作不多,设计该模型时仍存在不足,需要今后完善。首先,大量多先导光学观测资料表明,UUL 和 UCL 能够始发于不同的建筑物^[3-14],也存在单一建筑物上的多个尖端同时始发上行先导的案例^[12],下一步工作需丰富该模型并实现多先导始发于同一建筑物的模拟,并深入分析;其次,由于三维高精度的电场计算耗时长,限制模拟域的范围不能过大,致使本研究未加入云中固定背景电荷而始发下行先导,也未模拟低矮建筑物群,与实际情况存在差异;最后,从观测的角度,下行先导到达近地面区域时有垂直向下发展、倾斜向下发展、多分支同时向下发展 3 种形态,而本模

型设置的下行先导初始形态为垂直向下,在未来工作中可加入多种常见的背景电荷层、始发不同形态的下行先导,进一步探讨该问题。此外,希望本模型能够为多上行闪电的模型提供思路,在今后工作中实现多上行闪电的模拟。

致谢:感谢中国气象科学研究院提供的观测对比数据。

参考文献

- [1] 鄢秀书,张其林,袁铁,等.雷电物理学.北京:科学出版社,2013.
- [2] Vladimir A R, Martin A U. Lightning Physics and Effects. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 137-143.
- [3] McEachron K B. Lightning to the empire state building. *Electr Eng*, 1938, 57(12): 493-505.
- [4] Golde R H. Lightning. San Diego: Academic, 1977.
- [5] Idone V P. Length bounds for connecting discharges in triggered lightning subsequent strokes. *J Geophys Res*, 1990, 95(D12): 20409-20416.
- [6] Krider E P, Ladd C G. Upward streamers in lightning discharges to mountainous terrain. *Weather*, 1975, 30(3): 77-81.
- [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] 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.
- [9] Warner T A. Upward Leader Development from Tall Towers in Response to Downward Stepped Leaders // 2010 30th Int Conf on Lightning Protection (ICLP). IEEE, 2010: 1-4.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 吴姗姗,吕伟涛,齐奇.基于光学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.
- [15] 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.
- [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] 谭涌波,陈之禄,张冬冬.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.
- [18] Tan Y B, Tao S C, Zhu B Y. Fine-resolution of the channel structures and propagation features of intracloud lightning. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L0980.
- [19] 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.
- [20] 任晓毓,张义军,吕伟涛,等.闪电先导随机模式的建立与应用. *应用气象学报*, 2011, 22(2): 194-202.
- [21] 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.
- [22] Rakov V A, Uman M A. Lightning: Physics and Effects. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [23] Mazur V, Ruhnke L H, Lalonde P. Computer simulation of a downward negative stepped leader and its interaction with a ground structure. *J Geophys Res*, 2000, 105(D17): 22361-22369.
- [24] 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.
- [25] Becerra M, Cooray V. On the velocity of positive connecting leaders associated with negative downward lightning leaders. *Geophys Res Lett*, 2008, 35(2), L02801.
- [26] Ait-Amar S, Berger G. Lightning Interception on Elevated Building // Proc of 5th WSEAS Int Conf on Power Systems & EMC. 2005: 17-23.
- [27] Tran M D, Rakov V A. A study of the ground-attachment process in natural lightning with emphasis on its breakthrough phase. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 1-13.
- [28] 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.
- [29] Lu W, Qi Q, Ma Y. Two basic leader connection scenarios observed in negative lightning attachment process. *High Voltage*, 2016, 1(1): 11-17.
- [30] 何沧平. OpenACC 并行编程实践.北京:机械工业出版社,2017.
- [31] 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.
- [32] 郭秀峰,谭涌波,郭凤霞.建筑物尖端对大气电场畸变影响的数值计算. *应用气象学报*, 2013, 24(2): 189-196.
- [33] Lu W, Gao Y, Chen L. 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.
- [34] 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(地球科学)*, 2016, 46(7): 986-999.

A Three-dimensional Model Establishment of Multiple Connecting Leaders Initiated from Tall Structures

Yu Junhao¹⁾²⁾ Tan Yongbo¹⁾ Zheng Tianxue¹⁾ Wang Yiru¹⁾ Shi Zheng¹⁾

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

A new model for simulating multiple upward leaders initiated from tall structures in cloud-to-ground (CG) lightning flash is established, in which the initiation and development module of are implanted in the existing 3D stochastic parameterization of leader attachment process, using electric field parallel computing technology to improve the simulation efficiency. The new model is applied to simulate real CG lightning and is compared with observation results of statistical data and leader morphological characteristics. Several model output parameters include the length of upward unconnected leaders (UULs), the inception height of UULs, horizontal distance between the strike point and the UUL's inception point, 3D distance between the nearest tip of the downward leader branches and the UUL's inception point when the UUL is initiated. Values range from 12 m to 709 m, 360 m to 600 m, 255 m to 1026 m, 326 m to 589 m, which are in high agreement with the observation. The new model can represent characteristics that UUL starts earlier than upward connected leaders (UCL) and channels of UUL are straight in a real CG lightning case F1215. It can also simulate 4 typical connecting behaviors which are observed in natural CG lightning flash, including the tip of downward leader (DL) to the tip of upward connecting leader (UCL) and the DL's tip to the lateral surface of UCL in cases where one or more upward leaders starts. The comparison with the observation proves that the simulation is reasonable to some extent and provides a basic model. By analyzing the simulated CG lightning data and morphological characteristics, it shows that the highest tower can protect a certain area of buildings nearby and attract more distant downward leader branches. The inception of multiple upward leaders and the strike point of last jump are influenced by the distribution, height of high structures and the initial position of the DL, which are of great significance to the lightning protection.

Key words: numerical simulation; CG lightning attachment process; multiple upward leaders