

吴萌,谭涌波,林雨荷,等. 高建筑物对矮建筑物保护作用的三维数值模拟. 应用气象学报, 2023, 34(6): 749-758.

DOI: 10.11898/1001-7313.20230610

高建筑物对矮建筑物保护作用的三维数值模拟

吴萌¹⁾²⁾ 谭涌波^{1)*} 林雨荷¹⁾ 王雪雯¹⁾

¹⁾(南京信息工程大学应急管理学院, 南京 210044)

²⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/中国气象局雷电重点开放实验室, 北京 100081)

摘要

运用三维高分辨率随机多先导连接模型,设置高矮两座建筑物并改变其中矮建筑物的高度以及高矮两座建筑物水平距离,同时设置孤立矮建筑物进行对照,探究多先导模式下高建筑物对矮建筑物的保护作用。结果表明:高矮建筑物距离较近时,下行先导的发展完全受高建筑影响;随着建筑物水平距离增加,高建筑物对先导主通道仍然存在明显吸引效应。当矮建筑物雷击概率的增长趋势出现明显减缓的分界点,此时与孤立矮建筑物的雷击概率仅相差3.6%,但单次闪电的连接过程仍存在显著差异。通过对比不同建筑物水平距离与孤立建筑物的雷击结果,高矮建筑物水平距离由400 m增至600 m,差异则从44.5%降低至22.7%。在相同高建筑物影响下,不同高度矮建筑物的雷击概率变化趋势亦存在该特征,高度为50,100,150 m和200 m的矮建筑物对应的雷击增长速率分界点的水平距离为300,450,550 m和600 m。

关键词: 空间形态; 电场畸变; 保护作用; 数值模拟; 多上行先导

引言

高建筑物的存在会导致周围环境电场发生畸变,使建筑物顶角的电场相对较强,影响雷击过程^[1-2]。随着高建筑物数量日益增多,建筑物周围的环境电场不仅受建筑物自身的影响,还与周围建筑物分布有关^[3-4],低矮建筑物受高建筑物的保护程度与二者距离有关。目前有关高建筑物对附近建筑物保护作用的研究主要集中在二者距离较近的情况^[5-6],缺少距离较远情况的研究。现行防雷设计仅将建筑物之间的相互作用定义为多个建筑物等效截收面积的简单叠加^[7]。

等效截收面积的评估对象是孤立建筑物,当评估对象周围存在其他建筑物时,截收面积需要进行修正^[8]。国际电工委员会发布的国际标准^[9]引入位置因子 C_d ,量化周围环境对建筑物危险事件次数的影响程度,但仅考虑评估对象周围是否存在其他物

体、周围其他物体的相对高度以及是否处于山顶或山丘等情况,尚无定量标准,导致实际评估工作误差较大^[8]。我国的国家标准^[10]将周边建筑物的复杂情况以 $2D$ (D 为建筑物的扩大宽度)范围内进行定性划分,忽略了周围建筑物高低、远近程度的不同^[11]。以上两种防雷设计,均先计算各建筑物等效截收面积,再根据截收面积有无重叠部分区分孤立与非孤立建筑物^[7],未考虑建筑物群内的相互影响,缺乏对具体环境的针对性。对建筑物距离也无定量判定,与真实情况差距较大。

在观测方面,研究高建筑物对周围建筑物的保护作用对观测数据的长度要求较高,通常需要针对固定建筑物开展长期观测试验,分别统计高建筑物建成前后目标建筑物遭雷击次数。已有多个国家的科研团队针对孤立高建筑物开展了观测和研究^[12-17]。Hussein等^[14]和Birkl等^[15]等认为高建筑物附近地闪次数因高建筑物的吸引作用而明显减小。基于广州高建筑物雷电观测站的广州塔建成前

2023-09-20收到,2023-11-02收到再改稿。

资助项目: 灾害天气国家重点实验室开放课题(2023LASW-A03),国家自然科学基金面上项目(42275075)

* 通信作者, 邮箱: ybtan@ustc.edu

后地闪活动数据,Zhang等^[16]发现广州塔对附近区域下行地闪的吸引作用使其1 km范围内未观测到地闪,且1~3 km范围内随着距离增加下行地闪密度逐渐增加。对于处于建筑物群中的建筑物所受到的保护作用,吴姗姗等^[17]分析广州东塔(高度为530 m)建成前后的观测数据,发现与其相距270 m的西塔(高度为440 m)的雷击次数明显降低,证明了东塔对西塔的保护作用。由于系统性观测数据的缺失,相关观测数据较少,而且实际观测到下行地闪的分布特征往往是区域内多个建筑物共同影响的结果^[18-20],很难得到建筑物实际保护范围。

理论研究模型可以灵活设置数值模拟的放电参数和背景场,能够得到观测中难以满足的条件并进行机理研究^[2]。理论研究模型主要分为物理模型和随机模型^[21-22]。物理模型通常用于研究雷击距离、先导长度等影响先导放电过程的物理参数,而且模拟的下行先导空间形态不如随机模型能体现先导分支和曲折的自然特征^[23],随机模型在计算建筑物雷击概率和接地点分布等方面也具有明显优势^[24-26]。运用二维随机模型可分析建筑物的保护范围^[5-6],但单先导模型无法再现多上行先导情况以及接地点仅能一维分布,模拟的闪电与观测存在差距。在此基础上,可通过对比高建筑物存在与否的空间电位研究其对附近建筑物的影响^[3],也可利用三维随机模型探讨高矮建筑物共存时多先导连接过程及影响因素^[27],但尚缺少对建筑物的保护范围的深入研究。

鉴于此,为了明确高建筑物对矮建筑物的保护作用以及对下行先导空间形态和击地点的影响,本文利用三维高分辨率多先导随机模型,通过改变高建筑物附近矮建筑物参数、建筑物水平距离和闪电始发位置开展敏感性试验。本文以建筑物的保护范围为切入点,深入研究多上行先导模式下高建筑物对矮建筑物的保护作用,分析高建筑物存在与否条件下矮建筑物的雷击规律,讨论高建筑物影响下矮建筑物的雷击过程。

1 模式简介

基于三维高分辨率随机多先导连接模型^[22],考虑正、负先导循环发展的判断条件,依据观测研究结果,随着下行、上行先导传播的靠近设置两者速度

比,在形态上与观测的契合度逐步提升。本文以此为基础,对高矮建筑物共存时的地闪连接过程进行敏感性试验。考虑到自然界中地闪多为负地闪^[28],本研究只模拟负地闪引发的上行正先导以及它们之间的回击过程,不考虑云中放电部分。在模拟域顶部设置初始先导,作为闪电在近地面发展的起始条件。模式中先导通道为步进式发展,每次先导发展均通过迭代技术对全域电位进行重置计算,下行先导的传播阈值为 $220 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[29-30]。先导通道内部电压降为 $500 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[31]。考虑多建筑物可能始发多先导,设置满足先导始发条件的格点均可始发上行先导,选取最先达到触发阈值的格点优先发展^[21],观测发现上行先导无明显分支^[32-34],所以上行先导只有头部向上发展,允许多个上行先导同时发展,上行先导的传播阈值与触发阈值相同,为 $220 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[35-36]。当下行先导和上行先导间的电位差大于连接阈值 $500 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 时发生连接^[2,29]。具体先导发展模型可参考文献^[22]。

本文选取近地面区域为研究范围,构建 $1300 \text{ m} \times 1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 的三维空间模拟域,分辨率为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 。假定模拟域内的初始背景电场强度由下至上递增均匀分布^[37-38],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。二维随机模型研究发现,当下行地闪始发范围与建筑物高度相近时,闪电更容易击中建筑物^[6]。为了得到更多矮建筑物上的闪电连接个例,规定下行先导的始发区域为模拟域顶部的圆形区域,范围以矮建筑物中心为圆心,以其高度为半径,且随着矮建筑物水平移动,在此区域内随机选择下行先导初始位置。由于模拟域内只能取整数格点,不是完整的圆形,为了取到更多格点,设置每个圆的半径误差不超过5 m(图1)。初始下行先导长度设为25 m,内部初始电位设为 -35 MV ^[15,39]。模拟域地面中轴线左右两边分别对称设置一座高建筑物和一座矮建筑物(如图1a所示),高建筑物尺寸为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 250 \text{ m}$,矮建筑物尺寸为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 150 \text{ m}$,高矮建筑物水平距离为150 m的模拟区域示意图。设置尺寸为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 150 \text{ m}$ 的孤立矮建筑物为对照组,除了下垫面不同,其他空间设置均与试验组相同,如图1b所示。

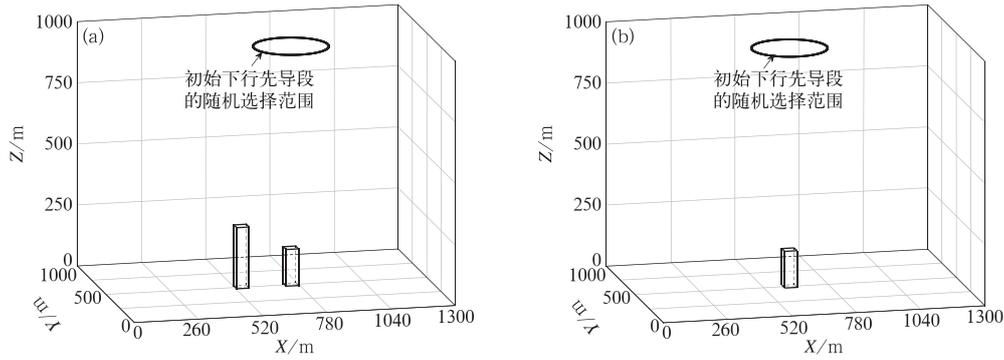


图 1 模拟区域示意图 (a)两座建筑物,(b)孤立建筑物

Fig. 1 Schematic diagram of simulation area (a)two buildings,(b)isolated building

2 模拟结果

以高建筑物存在与否条件下矮建筑物雷击概率表示高建筑物对矮建筑物的保护作用。设置试验组和对照组,对照组为孤立建筑物,尺寸为 50 m×50 m×150 m。试验组在矮建筑物附近设置高建筑物,尺寸为 50 m×50 m×250 m。另外,改变高矮建筑物水平距离,取值范围为 50~600 m,以 50 m 为间隔递增,共计 12 种距离。由于地闪空间发展形态的随机性对击地点影响较大^[40],在保持参数化方案其他参数不变的前提下,每组随机选取下行先导初

始位置进行 200 次模拟,对试验组和对照组共 13 种情况的建筑物模型共进行 2600 次闪电空间发展模拟。选取 4 次典型的雷击个例,将雷击分为击中高建筑物、击中矮建筑物和击中地面 3 种情况(图 2),每种情况均允许建筑物触发多个上行先导,正先导在向上发展的过程中被负先导吸引,先导通道向下行先导方向偏移,允许后续始发的先导与下行先导完成连接^[41-42],避免单先导模型中单先导确定落地点的局限性。以上情况在观测中均有报道^[32,43-44],验证了该模型能较好地仿真各种雷击事件。本次试验中,击中高建筑物为多数情况,与 Becerra 等^[45]的观测结果接近。

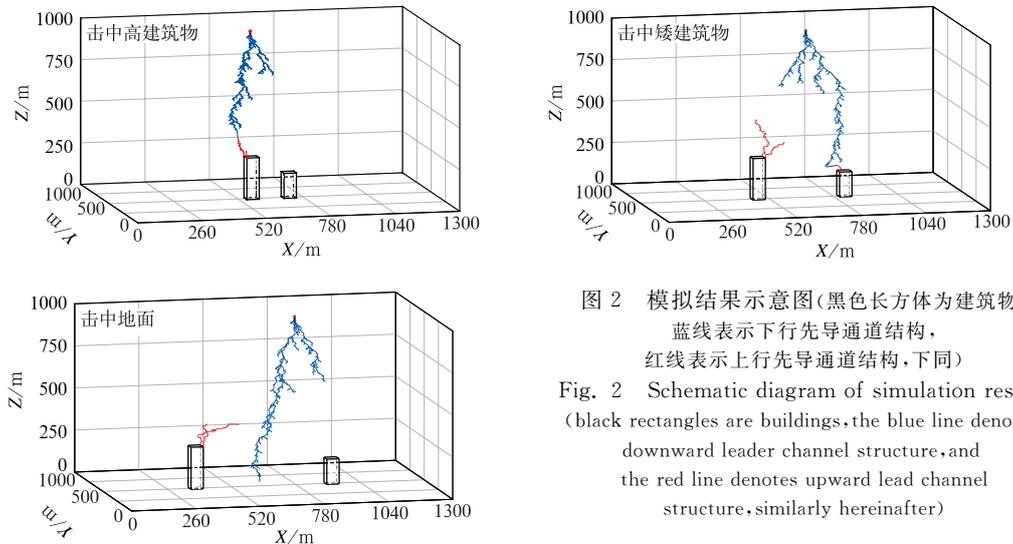


图 2 模拟结果示意图(黑色长方体为建筑物,蓝线表示下行先导通道结构,红线表示上行先导通道结构,下同)

Fig. 2 Schematic diagram of simulation results (black rectangles are buildings,the blue line denotes downward leader channel structure,and the red line denotes upward lead channel structure,similarly hereinafter)

不同水平距离矮建筑物的雷击概率(建筑物遭受雷击次数与模拟次数之比)如图 3 所示。由图 3 可见,高建筑物可以影响 600 m 范围内矮建筑物的雷击概率,对 350 m 范围内的矮建筑物影响较大。

水平距离为 50~600 m 时,矮建筑物的雷击概率分别为 8.3%,15.0%,26.5%,36.7%,39.5%,47.5%,58.9%,57.0%,56.0%,57.2%,61.0%和 62.5%,可见随着水平距离增加,高建筑物对矮建筑物的影响程

度呈指数降低。当高矮建筑物水平距离为 350 m 时,矮建筑物雷击概率的增长趋势出现明显减缓的分界点,矮建筑物被击中的概率为 58.9%,与孤立建筑物的雷击概率(62.5%)仅相差 3.6%,此时闪电除了击中矮建筑物外,其余情况为击中地面。超过分界点后,矮建筑物的雷击概率出现小幅度波动,说明高建筑物对矮建筑物的雷击概率仍然存在影响,随着水平距离继续增加波动幅度减小,由此推测高矮建筑物相距足够远时高建筑物完全不影响矮建筑物雷击概率,即矮建筑物摆脱高建筑物的保护作用,两座建筑物是相互独立的个体。

为进一步探究高建筑物对矮建筑物的保护作用,固定矮建筑物和下行先导初始点位置,设置高矮建筑物不同水平距离开展地闪模拟试验,并与孤立矮建筑物情况进行对比,其他空间参数设置完全相同,结果如图 4 所示。由图 4 可见,对于孤立建筑

物,下行先导为分支较少的主通道垂直向下发展,建

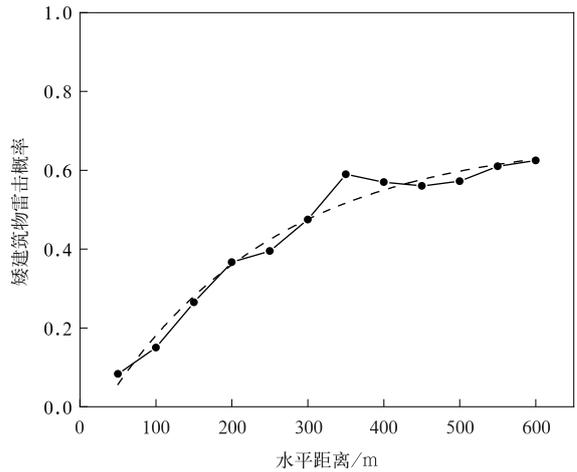


图 3 矮建筑物雷击概率(虚线为拟合曲线)
Fig. 3 Probability of lightning strikes for short building (the dashed line denotes fitting curve)

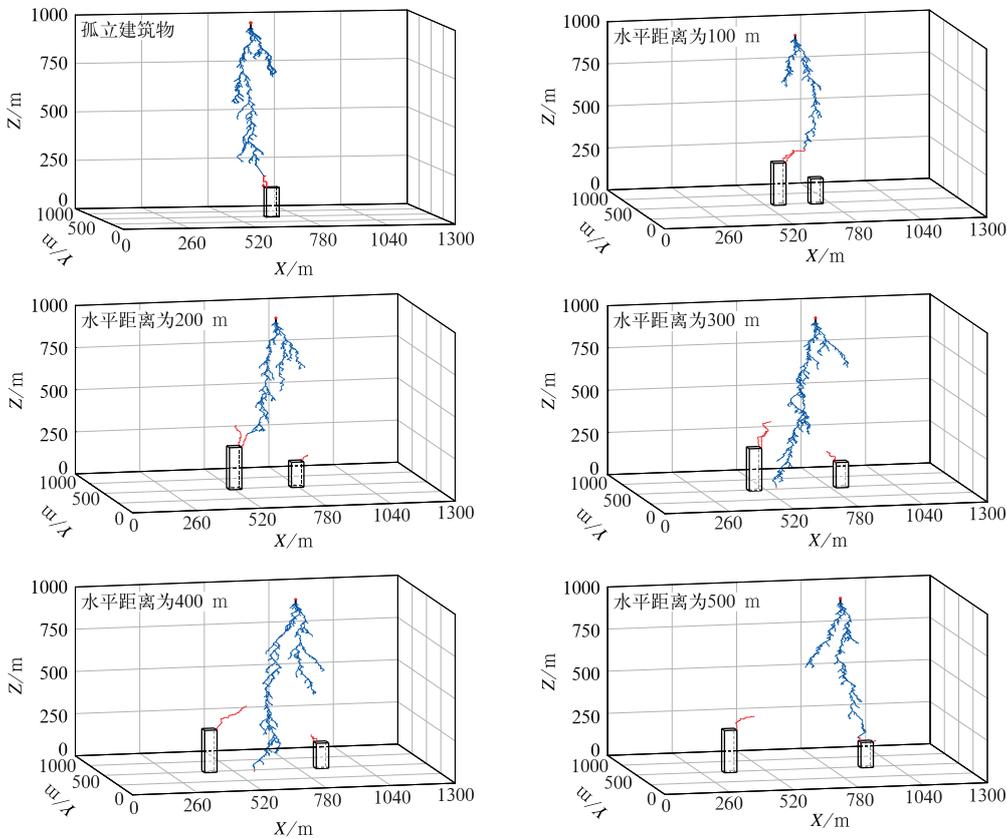


图 4 不同建筑物水平距离的地闪空间发展形态

Fig. 4 Lightning space development pattern with different distance between buildings

筑物左侧顶角始发两个上行先导,其中一支与下行先导连接形成回击过程。当空间内为高矮建筑物且

二者距离为 100 m 时,高建筑物内侧顶角触发多上行先导,矮建筑物受到高建筑物电场屏蔽作用未触

发上行先导^[46-47],此时高建筑物对矮建筑物屏蔽作用显著,其负地闪空间发展形态与孤立建筑物的差别较大。随着两座建筑物水平距离的增加,高建筑物对矮建筑物屏蔽作用逐渐减弱。当高矮建筑物相距 200 m 时,矮建筑物外侧顶角比内角先触发上行先导,随着水平距离增加,矮建筑物内侧顶角也可以触发一个或者多个上行先导。距离增加但下行先导发展通道相似,随着下行先导通道不断发展,高建筑物及其始发多上行先导对靠近建筑物的下行先导通道的吸引作用更强,下行先导主通道向左侧倾斜发展。由于高建筑物和下行先导的空间距离不同,最终击地结果也不同。高矮建筑物水平距离为 400 m 的下行先导右侧主分支比水平距离为 300 m 的右侧主分支发展更长,表明随建筑物水平距离增加,矮建筑物及其上行先导对下行先导通道也产生一定的吸引效应并逐渐增强。当两座建筑物水平距离为 500 m 时,下行先导为分支较少的主通道伴随一个主分支,下行先导主通道无明显偏向,下行先导左侧主分支向高建筑物倾斜发展,虽然此时高建筑物不影响雷击结果,但下行先导通道与孤立矮建筑物时的先导发展形态存在差异,表明高建筑物的存在影响空间电位,改变了下行先导的传播趋势。

结合图 3 和图 4 可以看到,当矮建筑物紧靠高建筑物时,下行先导的发展完全受高建筑影响,矮建

筑物几乎不可能被雷击。随着高矮建筑物水平距离增加,矮建筑物的雷击概率由明显增长变为平缓发展,高建筑物对下行先导主通道存在明显吸引效应;高矮建筑物水平距离存在分界点,当水平距离超过分界点,矮建筑物的雷击概率出现起伏变化,整体而言与孤立矮建筑物的雷击概率相差较小,但其先导空间形态与孤立矮建筑物时明显差异。可见,虽然整体雷击概率差异较小,但对于单次闪电而言存在显著偏差。随着高矮建筑物水平距离进一步增加,推测雷击概率的起伏不断缩小,直至高建筑物对整个闪电连接过程无任何影响。

先导的启动及延伸趋势由空间电位分布决定,建筑物对闪电吸引效应主要由空间电场畸变效应引发^[1,40,46]。图 5 为高矮建筑物不同水平距离的空间电场畸变范围,空间电场初始为均匀背景场,上边界固定为 -35 MV,阴影部分为电场畸变系数大于 1 的点。电场畸变系数指同一雷暴云背景场下的同一模拟区域中,无建筑物与有建筑物时各网格点空间电场的比值。由图 5 可见,两座建筑物水平距离为 50 m 时,高建筑物顶角产生的畸变效应较矮建筑物强,高建筑物的电场畸变范围几乎完全包含矮建筑物的电场畸变范围,两座建筑物的电场畸变范围大部分相交,此时高建筑物对矮建筑物的保护效应显著,矮建筑物被击中的概率很低。随着建筑物水平

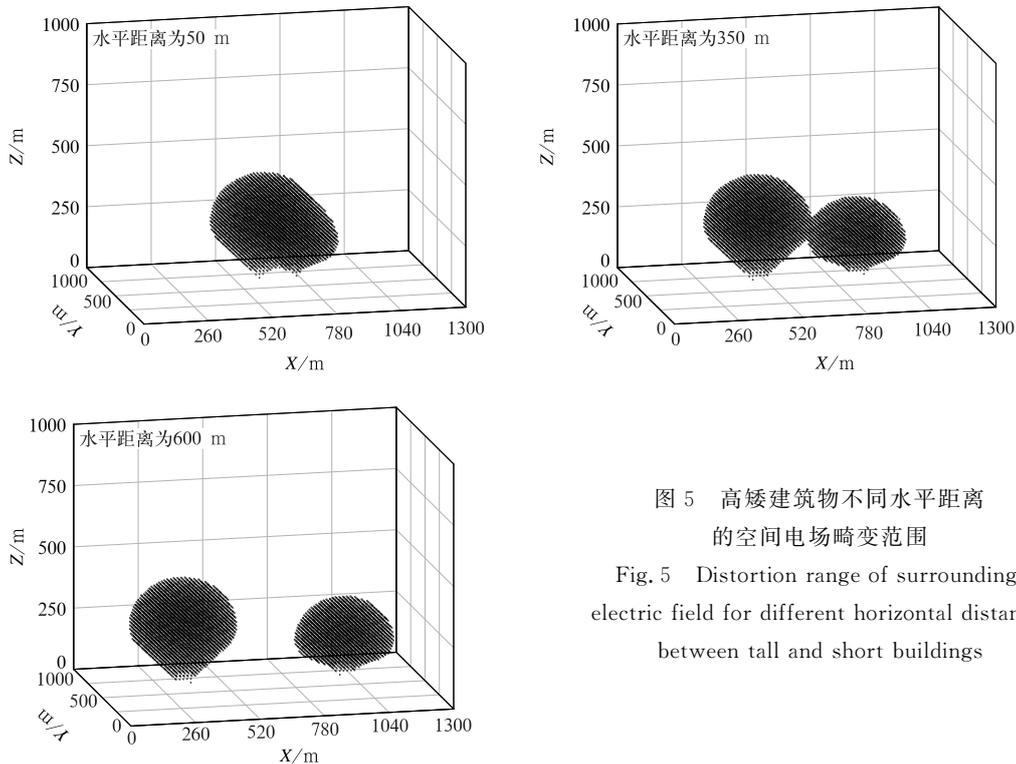


图 5 高矮建筑物不同水平距离的空间电场畸变范围
Fig. 5 Distortion range of surrounding electric field for different horizontal distance between tall and short buildings

距离的增加,高矮建筑物电场畸变范围的相交部分减少直至边缘相切,结合图 3 可以看到,雷击概率变化分界点对应的图 5 两座建筑物水平距离为 350 m,该临界距离以内畸变范围的重叠与雷击概率的增速存在相关性。超过临界水平距离,高建筑物不会影响矮建筑物的电场畸变范围,但在下行先导随机发展过程中,建筑物电场畸变范围会相应增大^[48],导致雷电通道向高建筑物方向靠近,高建筑物对闪击过程仍然存在影响,矮建筑物的雷击概率出现小幅度波动。

由以上分析可知,当两座建筑物的电场畸变范围无重叠时,高建筑物对闪电连接过程仍然存在影响。为了探究两座建筑物水平距离较远情况下,高建筑物影响雷击过程的具体表现,以 400,500 m 和 600 m 水平距离的雷击为例,将下行先导初始位置与上述试验矮建筑物上方保持一致,下垫面设置为孤立矮建筑物进行对照试验,共模拟 600 次。根据雷击结果分为 4 类(表 1):①情形 1,有无高建筑物存在闪电均击中地面;②情形 2,有高建筑物存在时击中地面,无高建筑物存在时击中矮建筑物;③情形 3,有高建筑物存在时击中矮建筑物,无高建筑物存在时击中地面;④情形 4,有无高建筑物存在闪电均击中矮建筑物。其中,情形 1 和情形 4 为有无高建筑物存在均存在相同雷击结果,不改变矮建筑物的雷击概率;情形 2 和情形 3 占比越大表明高建筑物对闪电连接过程的影响越大。表 1 为不同建筑物水平距离的雷击概率统计。由表 1 可见,在孤立建筑物情况下,建筑物的雷击概率为 62.5%,击地概率为 27.5%。高矮建筑物水平相距 400 m 时相同雷击结果最少,情形 1 和情形 4 共占 55.5%,高建筑物对雷击结果的影响较大。高矮建筑物水平相距为 500 m 时,击地概率比孤立建筑物偏高 5.3%,情形 2 明显增多,高建筑物使本应该击中建筑物的负地闪击中地面。当高矮建筑物水平相距 600 m 时,雷击概率与孤立建筑物的雷击概率相当,情形 1 和情

形 4 均为 77.3%,此时高建筑物的存在与否对于雷击结果的影响很小,因此推测该影响随着建筑物水平距离增加不断变小,直至高建筑物对整个闪电连接过程无影响。

以上分析表明,当两座建筑物距离较远时,高建筑物仍可影响矮建筑物的雷击过程。建筑物的高度可影响空间电场分布和上行先导的起始,进而影响下行先导迫近时连接结果的选择^[2],矮建筑物受到的保护范围与其高度有关^[5]。为了探究高建筑物对矮建筑物的保护作用,设置试验组 and 对照组:对照组为孤立矮建筑物,高度分别为 50,100,150 m 和 200 m。试验组为该矮建筑物附近设置高建筑物,其尺寸为 50 m×50 m×250 m,改变两座建筑物水平距离,取值范围为 200~650 m,取值间隔为 50 m,共 10 种距离。其他设置均与上文相同。每种情况进行 200 次试验,两组试验共得到 8800 次闪电空间发展形态个例。

图 6 为不同高度的矮建筑物雷击概率图,对照组孤立建筑物的雷击概率分别为 50%(高度为 50 m),57%(高度为 100 m),62.5%(高度为 150 m)和 63.7%(高度为 200 m)。不同高度矮建筑物雷击概率变化趋势相似,即随着建筑物水平距离增加,矮建筑物雷击概率先明显增长后平缓增长,存在明显分界点。建筑物越矮,雷击概率的递增速率越大,较早达到分界点,表明高建筑物对较矮建筑物的保护作用明显。雷击概率出现分界点时,50,100,150 m 和 200 m 高度的矮建筑物对应的高矮两座建筑物水平

表 1 相同始发位置负地闪的雷击结果对比

Table 1 Comparison of negative ground flash lightning strike for the same initial position

建筑物水平 距离/m	闪电击中 地面概率/%		闪电击中 矮建筑物/%	
	情形 1	情形 2	情形 3	情形 4
400	15.0	22.0	22.5	40.5
500	18.8	24.0	19.0	38.2
600	26.0	11.2	11.5	51.3

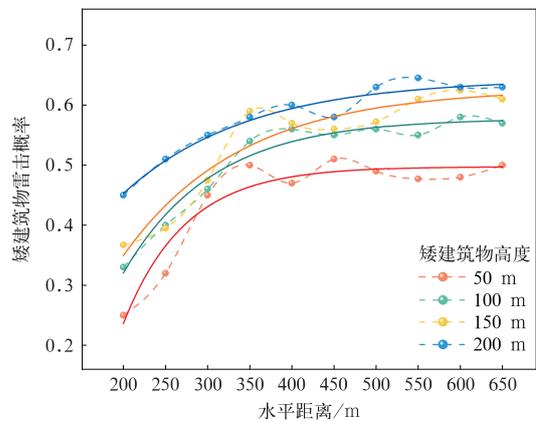


图 6 不同高度矮建筑物的雷击概率 (实线为对应雷击概率的拟合曲线)

Fig. 6 Lightning strike probability for short building with different heights (solid lines denote fitted curves)

距离分别为 300, 450, 550 m 和 600 m。随着高矮建筑物水平距离增加,不同高度的矮建筑物雷击概率均出现起伏波动,说明高建筑物对矮建筑物的雷击概率仍然存在影响。将该模拟结果与二维模拟结果^[3]对比可见,矮建筑物雷击概率变化趋势相同。根据以上共有特征,对各高度的矮建筑物雷击概率进行拟合,得到特定建筑物高度分界点 y 的变化曲线,即 $y = -642.53 \times e^{-\frac{x}{99.20}} + 687.47$, 拟合优度为 0.99。

3 结论与讨论

运用三维多先导模型模拟随机下行先导初始位置的地闪,通过改变矮建筑物高度和高矮两座建筑物水平距离,对高建筑物对矮建筑物的闪电连接过程进行模拟试验,讨论多上行先导模式下高建筑物对矮建筑物的保护作用,得到以下主要结论:

1) 高建筑物高度为 250 m,矮建筑物高度为 150 m,高矮建筑物水平距离为 50~600 m,每 50 m 间隔变化时,矮建筑物雷击概率依次为 8.3%, 15.0%, 26.5%, 36.7%, 39.5%, 47.5%, 58.9%, 57.0%, 56.0%, 57.2%, 61.0% 和 62.5%,当矮建筑物雷击概率的增长趋势出现明显减缓分界点时,矮建筑物雷击概率与其孤立时的雷击概率仅相差 3.6%。

2) 高矮建筑物水平距离较近时,高建筑物的电场畸变范围几乎包含矮建筑物的电场畸变范围,下行先导的发展完全受高建筑影响;随着建筑物水平距离增加,高建筑物对先导主通道仍然存在明显的吸引效应。通过对比不同建筑物水平距离与孤立建筑物的雷击结果,当高矮建筑物水平距离由 400 m 增至 600 m 时,高建筑物存在与否的雷击结果差异从 44.5% 降低至 22.7%。

3) 在相同高建筑物影响下,不同高度矮建筑物的雷击概率变化趋势相似,随着高矮建筑物水平距离增加,矮建筑物雷击概率由明显增长变为平缓发展,均存在明显分界点,50~200 m 高的矮建筑物对应高矮两座建筑物水平距离分别为 300, 450, 550 m 和 600 m。

本文以建筑物保护范围为切入点,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,所

得结论尚需扩大模拟域进行验证。今后将深入研究建筑物相距较远时地闪活动特征,探讨建筑物群的不同形态特征对闪电连接过程的影响,为城市建筑物雷击防护工作提供理论参考。

参 考 文 献

- [1] 郭秀峰,谭涌波,郭凤霞,等. 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.
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.
- [2] Jiang R J, Lyu W T, 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. DOI:10.1016/j.jastp.2020.105274.
- [3] 姜睿娇. 高建筑物区域地闪活动特征的观测和模拟研究. 北京: 中国气象科学研究院, 2021.
Jiang R J. Observation and Simulation of CG Lightning Activity Characteristics in the Regions with Tall Structures. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2021.
- [4] 吴啸天, 王晓妍, 郑栋, 等. 不同类型气溶胶对长三角地区地闪活动影响. 应用气象学报, 2023, 34(5): 608-618.
Wu X T, Wang X Y, Zheng D, et al. Effects of different aerosols on cloud-to-ground lightning activity in the Yangtze River Delta. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(5): 608-618.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 高磊, 凌晨. 关于建筑物等效截收面积计算的若干问题探讨. 气象科技, 2014, 42(6): 1126-1130.
Gao L, Ling C. Problems encountered in calculating equivalent collection areas of structures. *Meteor Sci Technol*, 2014, 42(6): 1126-1130.
- [8] 史雅静, 赵佳, 陈仁君. 电气-几何模型对位置因子精细化取值的应用研究. 湖北农业科学, 2019, 58(13): 60-63.
Shi Y J, Zhao J, Chen R J. Study on the application of electrogeometric model in calculating the position factor. *Hubei Agric Sci*, 2019, 58(13): 60-63.
- [9] IEC. Protection against Lightning. Part 2: Risk Management. 2006.
- [10] 中华人民共和国国家标准, GB50057—2010. 建筑物防雷设计

- 规范.北京:2010:8-12.
National Standard of the People's Republic of China,GB50057—2010. Design Code for Protection of Structures Against Lightning. Beijing,2010:8-12.
- [11] 汝洪博,马金福,冯志伟,等.建筑物雷击次数等效截收面积计算方法.气象科技,2013,41(1):191-195.
Ru H B, Ma J F, Feng Z W, et al. Method for calculating equivalent area of a building with same lightning stroke frequency. *Meteor Sci Technol*, 2013, 41(1):191-195.
- [12] 高攀亮,史东东,吴亭,等.反极性云闪的初始击穿特征.应用气象学报,2023,34(3):324-335.
Gao P L, Shi D D, Wu T, et al. Characteristics of the preliminary breakdown in inverted-polarity intracloud lightning flashes. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(3):324-335.
- [13] 关雨依,吕伟涛,齐奇,等.一次上行闪电中先导二维和三维发展特征的差异.应用气象学报,2023,34(5):598-607.
Guan Y N, Lü W T, Qi Q, et al. Difference between 2D and 3D development characteristics of an upward lightning leader. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(5):598-607.
- [14] Hussein A, Jan S, Todorovski V, et al. Influence of the CN Tower on the Lightning Environment in its Vicinity // Proceedings of the International Lightning Detection Conference (ILDC). 2010:1-19.
- [15] Birkel J, Diendorfer G, Thern S, et al. Initial Investigation of Influence of Wind Farms to Lightning Events. 2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). Estoril, Portugal. IEEE, 2016:1-7.
- [16] Zhang C X, Lu W T, Chen L W, et al. Influence of the Canton Tower on the cloud-to-ground lightning in its vicinity. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122(11):5943-5954.
- [17] 吴姗姗,吕伟涛,齐奇,等.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.
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] 闫琳城,张文娟,张义军,等.南海雷暴大风时空分布及闪电和对流活动特征.应用气象学报,2023,34(4):503-512.
Yan L C, Zhang W J, Zhang Y J, et al. Temporal and spatial distribution of thunderstorms and strong winds with characteristics of lightning and convective activities in the South China Sea. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(4):503-512.
- [19] 马瑞阳,郑栋,姚雯,等.雷暴云特征数据集及我国雷暴活动特征.应用气象学报,2021,32(3):358-369.
Ma R Y, Zheng D, Yao W, et al. Thunderstorm feature dataset and characteristics of thunderstorm activities in China. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3):358-369.
- [20] 张悦,吕伟涛,陈绿文,等.基于人工引雷的粤港澳闪电定位系统性能评估.应用气象学报,2022,33(3):329-340.
Zhang Y, Lü W T, Chen L W, et al. Evaluation of GHMLLS performance characteristics based on observations of artificially triggered lightning. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(3):329-340.
- [21] 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.
- [22] 林雨荷,谭涌波,余骏皓,等.地闪三维随机模型的改进及多上行先导的数值模拟研究.气象学报,2022,80(6):999-1008.
Lin Y H, Tan Y B, Yu J H, et al. Improvement of the three-dimensional stochastic cloud-to-ground lightning model and numerical simulation of multiple upward leaders. *Acta Meteor Sinica*, 2022, 80(6):999-1008.
- [23] Lalonde P, Mazur V. A physical model of branching in upward leaders. *Journal AerospaceLab*, 2012(5):1-7.
- [24] 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.
Tan Y B, Zhang X, Xiang C Y, et al. Three-dimensional numerical simulation of side flash on buildings. *J Appl Meteor Sci*, 2017, 28(2):227-236.
- [25] 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.
Ren X Y, Zhang Y J, Lü W T, et al. Establishment and application of random lightning leader model. *J Appl Meteor Sci*, 2011, 22(2):194-202.
- [26] Tan Y B, Zheng T X, Shi Z. Improved lightning model: Application to discuss the characteristics of upward lightning. *Atmos Res*, 2019, 217:63-72.
- [27] 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.
Lei Y N, Tan Y B, Yu J H, et al. Numerical simulation on multiple upward leader attachment process of tall and low buildings. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(1):80-91.
- [28] Rakov V A, Uman M A. Lightning: Physics and Effects. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [29] Becerra M, Cooray V. On the velocity of positive connecting leaders associated with negative downward lightning leaders. *Geophys Res Lett*, 2008, 35(2), L02801. DOI: 10.1029/2007GL032506.
- [30] Helsdon J H Jr, Wu G, Farley R D. An intracloud lightning parameterization scheme for a storm electrification model. *J Geophys Res*, 1992, 97(D5):5865-5884.
- [31] Tan Y B, Tao S C, Zhu B Y. Fine-resolution simulation of the channel structures and propagation features of intracloud lightning. *Geophys Res Lett*, 2006, 33(9). DOI: 10.1029/2005GL025523.
- [32] Lu W T, Chen L W, Zhang Y, et al. Characteristics of uncon-

- nected upward leaders initiated from tall structures observed in Guangzhou. *J Geophys Res*, 2012, 117, D19211. DOI: 10.1029/2012JD-18035.
- [33] Saba M M F, Schumann C, Warner T A, et al. Upward lightning flashes characteristics from high-speed videos. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121(14): 8493-8505.
- [34] Warner T A. Observations of simultaneous upward lightning leaders from multiple tall structures. *Atmos Res*, 2012, 117: 45-54.
- [35] MacGorman D R, Straka J M, Ziegler C L. A lightning parameterization for numerical cloud models. *J Appl Meteor*, 2001, 40(3): 459-478.
- [36] Mansell E R, MacGorman D R, Ziegler C L, et al. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model. *J Geophys Res*, 2002, 107(D9): ACL 2-1-ACL 2-12.
- [37] Biagi C J, Uman M A, Gopalakrishnan J, et al. Determination of the electric field intensity and space charge density versus height prior to triggered lightning. *J Geophys Res*, 2011, 116(D15): D15201.
- [38] Chauzy S, Médale J C, Prieur S, et al. Multilevel measurement of the electric field underneath a thundercloud: 1. A new system and the associated data processing. *J Geophys Res*, 1991, 96(D12): 22319-22326.
- [39] 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.
Tan Y B, Zhou B W, Guo X F, et al. A numerical simulation of the effects of building height on single upward lightning trigger and propagation. *Acta Meteor Sinica*, 2015, 73(3): 546-556.
- [40] 谭涌波, 师正, 王宁宁, 等. 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*, 2012, 55(11): 3534-3541.
Tan Y B, Shi Z, Wang N N, et al. Numerical simulation of the effects of randomness and characteristics of electrical environment on ground strike sites of cloud-to-ground lightning. *Chinese J Geophys*, 2012, 55(11): 3534-3541.
- [41] Lyu W T, Zhang Y, Chen L, et al. Observation and Preliminary Analysis on the Attachment Process of Lightning Flashes Striking on High Structures. Paper Presented at Asia-pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility. IEEE, 2010.
- [42] Warner T A. Upward Leader Development from Tall Towers in Response to Downward Stepped Leaders. Paper Presented at 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP). IEEE, 2010: 1-4.
- [43] Hussein A M, Milewski M, Janischewskij W, et al. Characteristics of lightning flashes striking the CN Tower below its tip. *J Electrostat*, 2007, 65(5/6): 307-315.
- [44] Cummins K L, Krider E P, Olbinski M, et al. A case study of lightning attachment to flat ground showing multiple unconnected upward leaders. *Atmos Res*, 2018, 202: 169-174.
- [45] Becerra M, Cooray V, Hartono Z A. Identification of lightning vulnerability points on complex grounded structures. *J Electrostat*, 2007, 65(9): 562-570.
- [46] 鄒秀书, 张其林, 袁铁. 雷电物理学. 北京: 科学出版社, 2013.
Qie X S, Zhang Q L, Yuan T. Lightning Physics. Beijing: Science Press, 2013.
- [47] D'Alessandro F. The use of 'field intensification factors' in calculations for lightning protection of structures. *J Electrostat*, 2003, 58(1/2): 17-43.
- [48] 张鑫. 建筑物上侧击雷电的三维数值模拟. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
Zhang X. A Model Study on Three Dimensional Numerical of Side Flash on Buildings. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017.

Three-dimensional Numerical Simulation of the Protective Effect of Tall Building on Short Building

Wu Meng¹⁾²⁾ Tan Yongbo¹⁾ Lin Yuhe¹⁾ Wang Xuewen¹⁾

¹⁾ (Emergency Management College, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

²⁾ (State Key Laboratory of Severe Weather & CMA Key Laboratory of Lightning, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Tall buildings distort the electric field of the surrounding environment, resulting in a relatively strong electric field at top corners, which affects the lightning strike process, and the protection effect that short buildings receive from tall buildings varies with the distance between them. A three-dimensional fine-resolution lightning attachment model with multiple upward leaders (LMM) is used to simulate protection effect of a tall building and a short building with different height and distance, with an isolated building set as a control group. Experimental results show that when there is a tall building with a short building in the space and two buildings are close to each other, the distortion range of the tall building almost completely contains the distortion range of the short building, the development of downward leader is completely affected by the tall building, and the shielding effect of the tall building on the short building is significant. With the increase of the building distance, the shielding effect of the tall building on the short building decreases exponentially. When tall building is 250 m high and the short building is 150 m high, probabilities of lightning strikes on short building with distance from 50 m to 600 m with interval of 50 m are 8.3%, 15.0%, 26.5%, 36.7%, 39.5%, 47.5%, 58.9%, 57.0%, 56.0%, 57.2%, 61.0%, and 62.5%. When there is a cut-off point where the increasing trend of the probability of lightning strikes on short buildings appears to slow down significantly, the probability of lightning strikes on short building differs from its probability of lightning strikes in isolation by only 3.6%. Comparing the lightning strike results for different building distance and isolated building, the difference in lightning strike results caused by the presence of tall building decreases from 44.5% to 22.7% when the horizontal distance between tall and short buildings is increased from 400 m to 600 m. Given the height of tall building, the probability of lightning strikes on short building with different heights follows a similar trend from a large increase to a flat increase with an inflection point. Corresponding to short building height from 50 m to 200 m, the horizontal distances reaching cut-off point are 300, 450, 550 m and 600 m, respectively. When two buildings are far separated, the effect of tall building on the probability of lightning strikes on short building is weaker, and it can be assumed that there is a state when tall building have no effect on the lightning attachment process.

Key words: spatial morphology; electric field distortion; protective effect; numerical simulation; multiple upward leaders