

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.

DOI: 10.11898/1001-7313.20200201

广州高建筑物雷电观测与研究 10 年进展

吕伟涛^{1)*} 陈绿文²⁾ 马颖¹⁾ 齐奇¹⁾ 武斌¹⁾ 姜睿娇¹⁾

¹⁾(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)

²⁾(中国气象局广州热带海洋气象研究所,广州 510080)

摘 要

作为中国气象局雷电野外科学试验基地(CMA_FEELS)的重要组成部分,广州高建筑物雷电观测站(TOLOG)始建于 2009 年,迄今已积累数百次高建筑物雷电资料。对于雷电连接过程,高建筑物会起到“放大镜”的作用;TOLOG 的观测在国际上首次发现了连接过程中负-正先导之间“头部-侧面”连接的现象,给出了先导连接行为的两种基本形态;揭示了负先导梯级发展过程的精细化结构,给出了下行先导和上行先导的二维/三维发展特征;估算了不同高度建筑物上雷电的闪击距离。高建筑物对雷电电磁场具有“放大器”的作用,且建筑物越高增强效应越显著。高建筑物是下行和上行闪电的“汇集点”;对下行闪电的吸引作用可保护高建筑物附近的其他物体免遭雷击;正地闪的回击、延续电流和云内放电过程均可在高建筑物上触发负极性上行闪电。另外,高建筑物区域可作为闪电监测系统“标校场”,TOLOG 的观测资料在地闪定位系统探测效率和定位精度的评估方面也得到了应用。

关键词: 高建筑物;下行闪电;上行闪电;先导;连接过程

引 言

当雷暴天气发生时,相对于地面或低矮物体,高耸物体(自然或人造的,如高大树木、高压线塔、通信基站、高楼大厦等)顶部因电场畸变增强的作用而更容易达到先导始发的阈值^[1-2],导致其不仅易被下行闪电击中,还可能激发上行闪电。随着社会经济的发展,人类活动对建筑物的数量和高度的需求越来越大。现代化城市中高建筑物越来越多,高度也越来越高,甚至形成了密集的高建筑物群,使得高建筑物上的雷电(以下简称高建筑物雷电)现象越来越频繁地进入大众视野。同时,高建筑物上相对较高的雷电发生概率使其成为开展雷电观测和研究的一个重要平台。

20 世纪 30 年代以来,世界上许多国家都针对高建筑物雷电开展了观测和研究^[2-4],曾被用于雷电

观测的高建筑物包括美国帝国大厦、加拿大国家电视塔(CN 塔)、俄罗斯莫斯科电视塔、德国 Peissenberg 塔、奥地利 Gaisberg 塔、瑞士 San Salvatore 山上的试验塔和南非的 CSIR Research Mast 等等,高度从 40 m 到 553 m 不等。观测和统计分析结果表明^[2-3]:对于 100~500 m 的高度范围,建筑物越高,其上发生的雷电中上行闪电所占比例越高;高度低于 100 m 的建筑物上很少发生上行闪电;而高度超过 500 m 建筑物上发生的雷电绝大多数为上行闪电。

近些年国内学者也针对高建筑物雷电开展了观测和研究,如中国气象科学研究所和中国气象局广州热带海洋气象研究所的雷电科研团队联合共建了中国气象局雷电野外科学试验基地(Field Experiment Base on Lightning Sciences, China Meteorological Administration, CMA_FEELS),自 2006 年起持续开展广东野外雷电综合观测试验^[5],并于 2009 年

2019-10-15 收到,2019-12-27 收到再改稿。

资助项目:国家重点研究发展计划(2017YFC1501504),国家自然科学基金项目(41775010,41805005,41475003,41075003),中国气象科学研究所基本科研业务费专项(2018Z003,2015Z006)

* 邮箱: lyuwt@foxmail.com

建立了广州高建筑物雷电观测站(Tall-Object Lightning Observatory in Guangzhou, TOLOG),利用多种先进的雷电探测设备对发生在广州珠江新城区域的高建筑物雷电开展了综合观测,获取了丰富的观测资料,发表了一系列成果^[6-36];中国科学院大气物理研究所从2012年开始,以325 m高的气象铁塔为平台,在北京开展了高塔闪电综合观测试验^[37-42];广东省深圳市气象局和香港理工大学从2016年开始,对击中356 m高的深圳气象梯度塔的雷电开展了观测与研究^[43-45]。

本文将系统介绍 TOLOG 的观测站点、设备和资料情况,综述 TOLOG 建站 10 年(2009—2018 年)的主要研究进展。

1 TOLOG 观测点和设备情况

广州珠江新城区域发展非常迅速,高度超过 300 m 的建筑物在 2009 年只有广州塔(610 m 高,2009 年以后降为 600 m)和广州国际金融中心(也称广州西塔,本文简称西塔,440 m 高),到 2014 年已增加至 8 个,高度在 100 m 以及 200 m 以上的建筑物更是难以细数。众多的高建筑物为雷电的观测和研究提供了非常好的条件。TOLOG 始建于 2009 年,从最初的 1 个观测点逐步扩展到目前的 6 个观测点。TOLOG 主观测点(观测点 1)位于广东省气象局一栋高约 100 m 的建筑物的顶部(图 1),



图 1 TOLOG 主观测点的观测室(拍摄于 2018 年 7 月 13 日)

Fig. 1 The observation room at the TOLOG main station
(taken on 13 Jul 2018)

其东南方向视野范围内有 8 座高度超过 300 m 的建筑物,本文按照从高到低将它们依次编号为 A~H(高度相同时按建成时间先后编号),具体信息见表 1。

TOLOG 主观测点架设了包括高速摄像机、闪电连接过程观测系统(Lightning Attachment Process Observation System, LAPOS)^[46]、闪电通道成像仪(Lightning Channel Imager, LCI, http://www.lcimager.com/lci_hs.htm)^[47]、全视野闪电通道成像仪(Total-sky Lightning Channel Imager, TLCI, ht-

[tp://www.lcimager.com/tlci.htm](http://www.lcimager.com/tlci.htm))^[48-49]和高分辨率单反相机等多种光学观测设备,还架设了雷声探测麦克风阵列^[11,50]、大气平均电场仪、快慢天线电场变化仪、闪电低频电场变化探测阵列子站^[51]、闪电磁场变化测量仪、先导电流测量仪等多套设备。其中,除了部分连续记录设备(如大气平均电场仪)或自触发记录设备(如 LCI, TLCI 和闪电低频电场变化阵列子站)以外,其他设备构成了雷电声、光、电、磁多参量同步自动观测系统。研究组通过长期的野外观测经验积累,结合对各种设备性能的深入

了解,设计出了合理有效的闪电触发方案,实现了这些设备的同步触发和无人值守式的全自动观测。LCI 和 TLCI 均基于数字成像技术,结合闪电通道检测算法,自动拍摄、处理、提取并存储闪电发生前

后预设时段内的图像,同时记录闪电发生时间。闪电低频电场变化阵列子站除了自行触发记录外,其传感器信号同时输出到多参量同步自动观测系统进行记录。

表 1 TOLOG 主观测点东南方向视野范围内高度超过 300 m 的 8 个高建筑物
Table 1 Eight tall-objects higher than 300 m in the south-east field of view of the TOLOG main station

建筑物编号	建筑物名称	高度/m	建成时间
A	广州塔	600*	2009 年
B	广州周大福金融中心,又称广州东塔	530	2014 年
C	广州国际金融中心,又称广州西塔	440	2009 年
D	广晟国际大厦	360	2011 年
E	环球都会广场	318	2014 年
F	珠江城大厦	310	2010 年
G	越秀金融大厦	310	2013 年
H	利通广场	303	2010 年

注: * 广州塔高度 2009 年为 610 m,2009 年以后降为 600 m。

由于高速摄像机的帧率设置越高,可用的像素数量越少,对应的视野范围也越小。为了兼顾观测视野和时空分辨率的需求,在 TOLOG 主观测点架设了多套高速摄像机(最多时为 5 套)。帧率相对较低的高速摄像机采用大视野的配置,用于捕捉大视野范围内发生的所有闪电过程,并采用尽量长的记录时长以完整记录闪电放电的总体过程。高帧率的高速摄像机采用小视野的配置,主要针对放电物理

过程(如雷电连接过程、先导发展过程等)精细化观测的需求,以捕捉雷电放电高时空分辨率精细化光学图像。

TOLOG 现有的 6 个观测点的分布情况见图 2,各观测点架设的设备信息见表 2。除了主观测点,其他观测点目前均只架设了 LCI 和(或)TLCI,目的包括:①一定程度上降低对架设环境、设备维护和经费投入等的要求;②实现对所关注区域内闪电事件

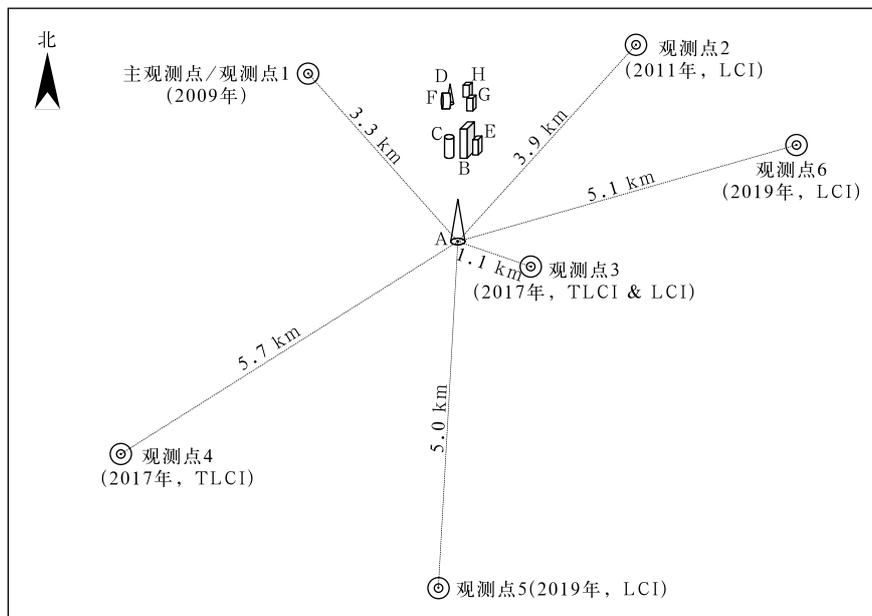


图 2 TOLOG 的 6 个观测点与表 1 中所列高建筑物的位置分布
Fig. 2 Location of six observation stations of the TOLOG and tall-objects listed in Table 1

的无遗漏光学观测;③获取高建筑物雷电的多站闪电通道图像,与主观测点的高速摄像资料配合重建闪电三维光学通道,并分析通道的三维发展特征。

另外,目前共有 4 套业务闪电定位系统覆盖了广州地区,包括气象部门建设的粤港澳闪电定位系统(始建于 2005 年,由广东省及港、澳三地气象部门联合共建,可探测地闪和部分云闪)、ADTD 地闪定位系统(始建于 2010 年)和 Earth Networks(EN)全

闪定位系统(始建于 2013 年)以及电力部门建设的广东电网地闪定位系统(始建于 1997 年)。中国气象科学研究院从 2014 年开始,在广州地区建设了由多个快电场变化测量仪构成的闪电低频电场变化探测阵列(其中 1 个架设于 TOLOG 主观测点),具备全闪电三维定位能力。这些定位系统能够为高建筑物雷电研究提供地闪或总闪活动的位置及强度信息。

表 2 TOLOG 各观测点架设的设备信息

TOLOG 观测点	建成时间	设备信息
主观测点(观测点 1)	2009 年	5 套高速摄像机(不同帧率、不同视野) 2 套 LAPOS(不同灵敏度) 2 台 TLCI 2 台 LCI
		4 部单反相机(不同视野、不同曝光参数) 1 套雷声探测麦克风阵列 1 部大气平均电场仪 3 套快天线电场变化仪(不同量程) 3 套慢天线电场变化仪(不同量程) 1 个闪电低频电场变化探测阵列子站 4 套闪电磁场变化测量仪(不同量程) 2 套先导电流测量仪(不同量程)
观测点 2	2011 年	2 套 LCI(不同视野)
观测点 3	2017 年	1 套 TLCI, 1 套 LCI
观测点 4	2017 年	1 套 TLCI
观测点 5	2019 年	1 套 LCI
观测点 6	2019 年	1 套 LCI

2 2009—2018 年 TOLOG 观测资料整体情况

表 3 是 2009—2018 年 TOLOG 观测到的 8 个高建筑物(表 1)上的雷电数量。10 年中,TOLOG

的设备和观测方案经过了 2012 年初和 2015 年下半年两次重要升级,2015 年因主观测点观测室扩建导致观测期不完整。

由表 3 可以看到,总体上 TOLOG 两次重要升级均显著提升了资料获取效率,特别是 2015 年经观测

表 3 2009—2018 年 TOLOG 观测到的高度超过 300 m 的建筑物上的雷电数量

年份	建筑物编号							
	A	B	C	D	E	F	G	H
2009	3		2					
2010	1		0			0		2
2011	1		2	1		0		0
2012	6		5	6		0		0
2013	4		1	0		0	0	1
2014	4	9	2	2	0	2	2	1
2015	13	8	0	0	1	1	0	1
2016	71	9	4	8	0	0	1	4
2017	44	8	0	1	0	1	0	0
2018	33	10	2	4	0	0	0	2
合计	180	44	18	22	1	4	3	11

室扩建、设备升级和观测方案改进后, TOLOG 在这 8 个高建筑物上平均每年可观测到近 70 例闪电, 其中在最高的广州塔上每年可观测到近 50 例。如果再加上观测到的击中其他高建筑物的雷电个例, 每年 TOLOG 获取的高建筑物雷电数量不低于 100 例。多个观测点多套观测设备的相互对比检验表明, 目前 TOLOG 的观测方案和设备基本实现了对视野范围内高建筑物雷电的无遗漏观测。这些丰富的高建筑物雷电观测资料为开展相关研究奠定了良好的基础。

3 基于 TOLOG 观测资料取得的主要成果

雷电连接过程决定了雷电接地点的位置(雷击位置)和可能导致灾害的区域, 一直是雷电物理和防护研究中重点关注的对象。地面或低矮建筑物被雷击的概率很低, 雷击过程中的上行连接先导的长度也很短, 很难获取到雷电连接过程的高时空分辨率光学观测资料。而在高建筑物顶部容易激发上行先导, 先导的持续时间和发展长度均较长, 因此, 对于雷电连接过程来说, 高建筑物起到了很好的“放大镜”的作用。对于雷电电磁场, 高建筑物具有“放大器”(增强)的作用, 且建筑物越高, 增强作用越显著。对于附近的下行闪电, 高建筑物具有吸引作用, 同时高建筑物上还易形成上行闪电, 因此, 高建筑物一定程度上起到了闪电“汇集点”的作用, 为观测和研究雷电物理过程提供了更多的机会。也正因为高建筑物的闪电“汇集点”的特点, 加上 TOLOG 先进的观测设备和成熟的观测方案, 丰富、直观的观测资料使 TOLOG 观测区可以作为其他地基、天基闪电监测系统的“标校场”。本章将按照高建筑物上述几方面的作用来总结 TOLOG 取得的主要科研成果。

3.1 雷电连接过程的“放大镜”

3.1.1 连接过程中先导之间的连接形态

以往通常认为先导最后的连接发生在下行先导头部与上行先导头部之间(简称“头部-头部”连接), 在所有雷击模式中均采用这样的连接方案^[52-56]。但采用帧率达 10^4 帧/s 量级的高速摄像机, 在一次击中西塔的下行负地闪过程中观测到雷电连接过程中下行负先导头部击中上行正先导侧面(简称“头部-侧面”连接或侧击)的现象(图 3)^[8], 在国际上首次

给出连接过程中先导之间非“头部-头部”连接的观测事实。帧率较低的高速摄像或者静态图片资料难以捕捉到此类侧击现象, 如在图 3 的个例中, 5×10^4 帧/s 的高速摄像记录清晰地呈现了侧击过程, 而 1×10^4 帧/s 的记录无法体现出侧击过程(见文献[8]的图 1)。

基于广州数个高度超过 300 m 的建筑物上 24 次下行负地闪的高速摄像光学资料, 统计发现下行负先导与上行正先导之间的连接行为可分为 3 类^[21]: “头部-头部”连接, 占 42%(10/24); “头部-侧面”连接, 占 50%(12/24); 有 2 次闪电的首次回击过程分别包含了 2 个连接过程, 且均是 1 个“头部-头部”和 1 个“头部-侧面”的混合, 占 8%(2/24); 未观测到负-正先导之间“侧面-头部”连接的现象。因此, 负-正先导之间的连接行为具有“头部-头部”和“头部-侧面”两种基本的形态。如果按照 26 个连接过程统计, “头部-侧面”连接占 14/26(54%), 即至少对于 TOLOG 视野内高度超过 300 m 的建筑物上的负极性地闪而言, 下行负先导与上行正先导之间的侧击现象更为普遍。Kostinskiy 等^[57]在带负电荷的云的米量级尺度放电试验中, 也观测到负-正先导之间“头部-侧面”的连接形态, 同样未观测到负-正先导之间“侧面-头部”的连接形态。下行负先导的多分叉特征和多个上行正先导的存在, 可能是先导之间连接行为呈现多样性的主要原因。另外, 迄今还未观测到负先导侧面和正先导头部连接的现象, 产生这种差异的原因估计与正、负极性先导的发展机制有关。

在上述 14 个呈现负-正先导“头部-侧面”连接形态的连接过程中, 有 13 个过程(93%)的闪电通道在连接点附近呈现出接近 90° 的快速转折现象(如图 4 所示), 仅 1 次过程未呈现该现象, 可能是摄像视角所导致。基于这些光学观测资料, 提出了从闪电图像上识别先导之间侧击现象的判据——“在连接点附近闪电通道是否存在快速转折”, 该判据对于帧率较低的摄像资料、甚至是闪电静态图像也是有效的。

考虑到下行负极性地闪过程中上行正先导发展时大多不分叉的观测事实, 基于已有的闪电先导二维随机模式, 廖义慧等^[19]修改了上行正先导的模拟方案, 使其发展时不产生分叉, 实现了对雷击高建筑

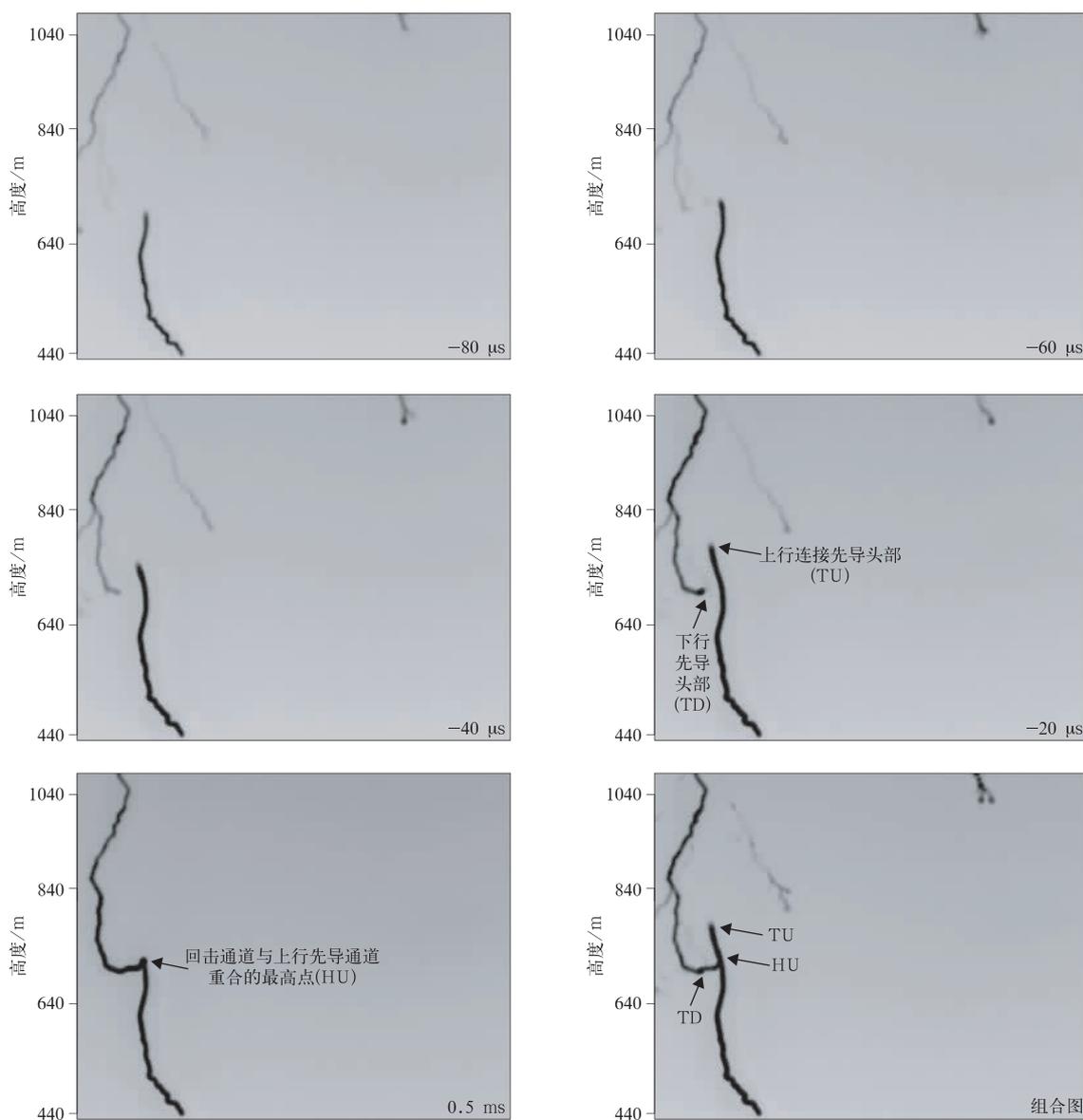


图 3 雷电连接过程中先导之间侧击形态的高速摄像记录示例
(文献[8],为提升可视效果所有图像经过了反相处理)

Fig. 3 High-speed video examples of the “tip-to-lateral” connection behavior of leaders during lightning attachment process
(from Reference [8], all the images are inverted for a better view)

物过程中下行负先导与上行正先导之间“头部-头部”连接和“头部-侧面”连接两种形态的模拟,并模拟分析了下行先导起始位置不同时接地点落在高建筑物顶面、侧面以及地面的概率。

需要强调的是,连接过程中先导之间的侧击现象与雷电侧击高建筑物^[58]不同,高建筑物自身静止不动,而连接过程中不同先导一直在持续发展。另

外,不管雷电是击中了高建筑物顶部还是侧击高建筑物,其物理过程中均包含不同先导之间的连接过程。因雷电侧击建筑物的现象相对较少,且出现这种情况时连接先导长度较短^[35],迄今还没有关于雷电侧击高建筑物过程中先导连接形态观测结果的报道。

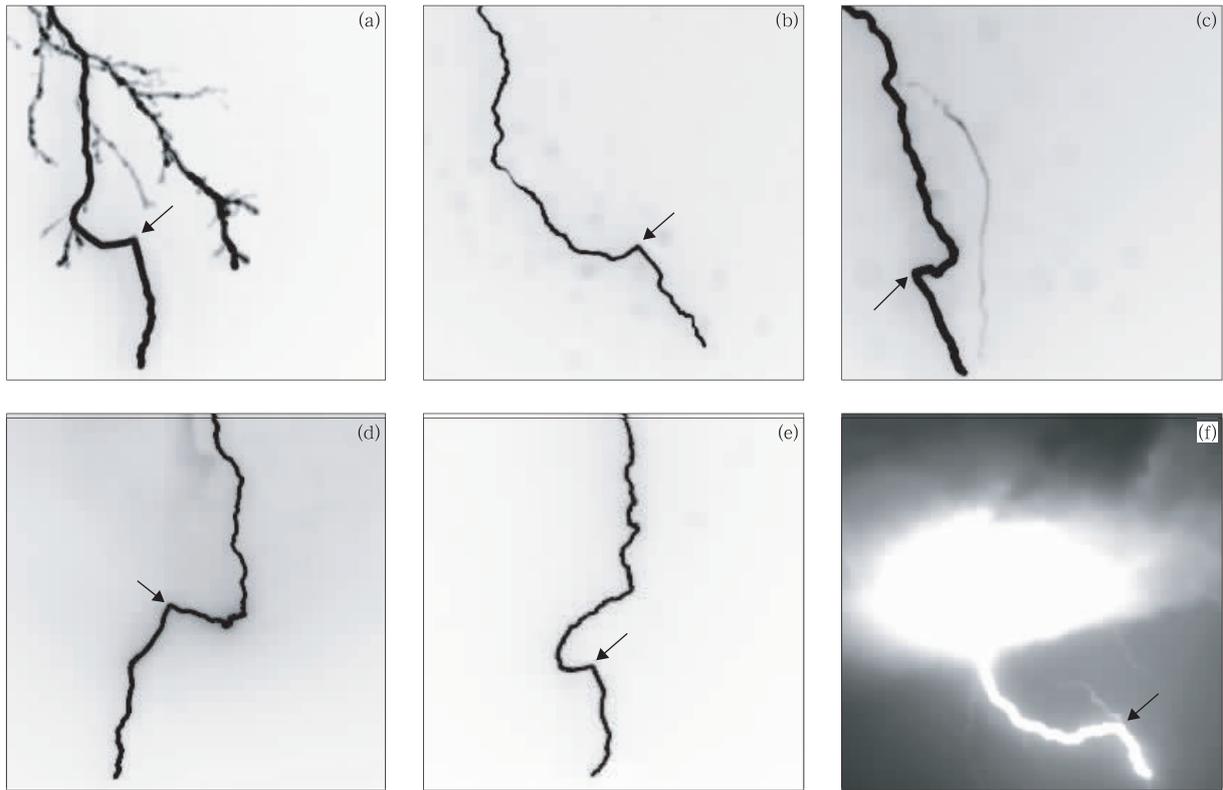


图 4 先导之间侧击连接现象的图像示例(图中箭头指示连接点位置,图 4a~图 4e 经反相处理以提升可视效果)

(a)F1103,(b)F1243,(c)F1248,(d)F1258,(e)F1422,(f)F1443

Fig. 4 Image examples of “tip-to-lateral” connection of leaders(arrows denote the location of junction points, Fig. 4a—Fig. 4e are inverted for a better view) (a)F1103,(b)F1243,(c)F1248,(d)F1258,(e)F1422,(f)F1443

3.1.2 连接过程中不同先导的发展特征

3.1.2.1 下行先导

虽然下行梯级负先导光脉冲波形上升时间大都小于 $1 \mu\text{s}$ ^[59],目前较多使用帧率为 10^4 或 10^5 帧/s 量级(每帧图像的曝光时间为 $10 \mu\text{s}$ 或 $10^0 \mu\text{s}$ 量级)的高速摄像机无法解析每一个梯级的精细发展过程,但利用这些高速摄像机捕捉梯级过程的不同发展阶段是可能的。这是因为负先导的梯级发展包括了多个子过程,在高速摄像机视野内可能会有多个梯级同时发展,在每帧图像曝光结束的时刻不同梯级所处的阶段也可能不一样,所以即使图像曝光时间大于 $1 \mu\text{s}$,仍可能拍摄到处于不同阶段的梯级发展过程^[20,33,60-63]。

Qi 等^[20]对一次距离 TOLOG 约 350 m 的下行负地闪进行了分析,得到下行梯级先导发展的精细化特征:在先导阶段的电磁场波形上记录到一些可能由梯级过程导致的波形变化,波峰之间的时间间隔为 $13.9 \sim 23.9 \mu\text{s}$ (平均值为 $17.4 \mu\text{s}$,本文未特别

说明的平均值均为算术平均值);在高速摄像资料中观测到一些明亮的发光段(空间茎/空间先导),二维长度为 $1 \sim 13 \text{ m}$ (平均值为 5 m),距离先导头部 $1 \sim 8 \text{ m}$ (平均值为 4 m)。根据这次近距离闪电的光学观测和分析,结合 Hill 等^[61]的研究成果,推测了负极性先导梯级的形成过程以及空间茎/空间先导 3 种可能的发展情形:没有与已存在先导通道连接;与已存在先导通道连接,但随后消失或间歇性(间隔几十微秒)微弱发光后消失;与已存在先导通道连接并形成了后续发展的分叉,有明亮的光波沿通道向上传播。

使用 2×10^4 帧/s 和 52.5×10^4 帧/s 的高速摄像资料,Qi 等^[33]分析了距离 TOLOG 主观测点约 490 m 的一次地闪连接过程。在所观测到的 47 个下行先导的梯级过程中,共捕获了 12 个空间茎/空间先导,它们的长度范围为 $2 \sim 5.9 \text{ m}$,平均值为 3 m 。下行梯级先导的平均梯级间隔为 $15 \mu\text{s}$,平均梯级长度为 5.6 m ,二维平均速率为 $5.5 \times 10^5 \text{ m/s}$ 。

此外, TOLOG 还观测到 1 次包含正极性首次回击和 5 次负极性继后回击(通道与首次回击通道一致)的双极性闪电, Chen 等^[13] 分析发现: 首次回击之前的下行正先导在高速摄像机视野范围内通道光滑、没有分叉, 平均二维发展速率为 2.5×10^6 m/s, 在发展过程中正先导的光强呈现出明显的脉冲变化特征; 继后回击前负极性下行直窜先导的平均二维发展速率最小约为 4.0×10^6 m/s, 最大可超过 1.24×10^7 m/s。

3.1.2.2 上行先导

对 TOLOG 捕捉到的 19 次下行负地闪过程中 45 个上行未连接先导(unconnected upward leader, UUL)的分析表明^[6]: 起始时间提前回击 0.5 ms 以上的 UUL 的起始高度均高于 300 m; 起始高度在 300 m 以下的 UUL 的长度很少超过 50 m; 超过 80% 的 UUL 的发展速率低于 1.7×10^5 m/s; 起始高度低于 300 m 的 UUL 均被发生在大约 600 m 以内的下行闪电所激发, 而起始高度超过 400 m 的 UUL 甚至可以被 1 km 以外的闪电所激发; 对于起始高度分别为 100~200 m, 200~300 m 和超过 400 m 的 UUL, UUL 被激发时下行先导的头部需要发展到距离 UUL 起始位置的 350 m, 450 m 和 600 m 范围内。

基于 TOLOG 观测点 1 和 2(图 2)的双站闪电光学资料, 还针对先导通道的三维发展特征进行分析。高彦等^[7] 建立了一种利用双站摄像资料重建闪电三维通道的方法, 采用该方法重建了 6 次下行负地闪的三维通道, 统计分析了下行负地闪过程中上行连接先导通道的三维特征, 结果表明^[10]: 6 次负地闪上行连接先导的三维长度范围为 180~818 m, 三维速率范围为 $8 \times 10^4 \sim 1.43 \times 10^6$ m/s, 是二维速率的 1.1~1.8 倍。

3.1.2.3 不同先导发展特征的对比

图 3 中的闪电个例的高速摄像资料分析结果表明^[8]: 上行连接先导的发展受下行先导的影响(所有分支的综合影响)明显, 随着下行先导的逐渐接近, 上行连接先导的速率和亮度都呈现逐渐增加的趋势, 特别是在回击前 0.3 ms 内, 增加显著; 除了在回击前约 80 μ s 内, 下行先导的发展特征几乎没有明显变化; 当下行先导与上行先导头部二维距离小于 60 m 后, 其发展方向才明显朝向上行先导弯曲; 下行与上行先导二维发展速率的比值随时间由 1.8 逐渐降低至 0.12。

对另一次击中西塔的下行地闪连接过程中先导的三维发展特征分析^[18] 表明: 在首次回击前 2 ms 内, 下行先导的三维发展速率变化范围为 $1.3 \times 10^5 \sim 6.8 \times 10^5$ m/s(平均值为 2.7×10^5 m/s), 对应的二维速率的变化范围为 $1.1 \times 10^5 \sim 4.9 \times 10^5$ m/s(平均值为 2.1×10^5 m/s); 除了回击前的 0.2 ms 内, 下行先导发展速率无明显的变化趋势; 上行连接先导三维发展速率的变化范围为 $8 \times 10^4 \sim 1.37 \times 10^6$ m/s(平均值为 4.5×10^5 m/s); 上行先导从高建筑物顶部起始后, 其发展速率随时间增加明显, 特别是回击前的 1 ms 内; 下行与上行先导三维发展速率的比值随时间从 2.2 逐渐减小到 0.2。

在国际上现有的先导发展模式, 对下行与上行先导发展速率比值的假设有两种: 恒定值(如 1, 2, 4 等)^[52-54] 或线性递减(如从 4 到 1^[53]、从 4 到 0.5^[56] 等), 大多假设的速率比的最小值均不小于 1, 即认为下行先导的速率一直是不低于上行先导的, 而 TOLOG 的观测结果表明^[8, 18, 35]: 下行与上行先导发展速率的比值会明显小于 1, 即上行先导的发展速率可能会明显高于下行先导。

在 163 m 高的铁塔上, Warner^[64] 观测到两次连接过程, 上行连接先导长度均超过 200 m, 发展速率同样呈现出随时间逐渐增加趋势(从 10^4 m/s 量级增加到 10^5 m/s 量级), 而下行先导的速率没有明显的变化趋势, 一直为 10^5 m/s 量级。Saba 等^[65] 观测分析了两个 60 m 高的建筑物上的 3 次雷击过程, 发现在连接过程中不管是下行先导还是上行连接先导, 发展速率均几乎为常数, 下行与上行先导发展速率的比值为 2.3~4.8, 即上行先导发展速率一直比下行先导慢。总体而言, 对不同高度建筑物上雷电连接过程的观测和分析还相对较少, 需积累更多观测资料进行更为深入的对比分析。

3.1.3 雷电闪击距离的特征

虽然通过大量的光学观测对连接过程中先导发展的特征有了一定认识, 但针对闪击距离这一雷电防护中重点关注的关键参量的观测和分析还比较少。利用高速摄像资料, Qi 等^[33] 对发生在距 TOLOG 主观测点约 490 m 的一座高约 100 m 的建筑物上的 4 次雷击连接过程进行分析, 得到的闪击距离分别为 55 m, 183 m, 183 m 和 85 m, 并在其中一次闪电过程中利用了 5.25×10^5 帧/s 的高速摄像资料(迄今为止自然闪电连接过程最高帧率的高速摄像资料), 估算出下行先导最后一跳的二维长度约为

13 m。

另外,齐奇等^[35]还统计分析广州塔和广晟国际大厦两座尖顶高建筑物上 21 次下行地闪的闪击距离特征,结果表明:12 次广州塔雷击的闪击距离的中值为 981 m;9 次广晟国际大厦雷击的闪击距离的中值为 508 m;结合广东电网闪电定位系统提供的回击峰值电流资料,分析发现对于确定高度的建筑物,回击峰值电流越强,对应的闪击距离也越大。

3.2 雷电电磁场的“放大器”

3.2.1 高建筑物雷电电磁场的观测资料分析

Lafkovic 等^[66]和 Kazazi 等^[67]分析发现闪电定位系统对 CN 塔闪电回击电流幅值的反演结果(为了与电流直接测量结果相区分,本文采用 LLS-回击电流幅值表示闪电定位系统通过电磁场遥测反演得到的回击电流幅值)达到了塔顶雷电流直接测量结果的 3 倍左右。Baba 等^[68]通过数值模拟分析指出,高建筑物对闪电回击电磁场的增强效应与建筑物高度、建筑物自身及其接地系统的特征阻抗等因素有关。

为研究广州不同高度建筑物对雷电电磁场的影响,王智敏等^[14]对 TOLOG 获取的击中 14 个高建筑物的 40 次雷电(均为负极性)的磁场资料进行统计,结果表明:高建筑物对回击的磁场峰值有增强作用,且建筑物越高增强作用越大,高度在 200 m 以上的建筑物上雷电首次回击磁场峰值的几何平均值是高度在 200 m 以下的建筑物上的 2.4 倍。

陈绿文等^[15]将 2009—2012 年获取的 58 次下行负极性地闪个例按照接地点高度分为两组,对比分析了不同高度建筑物上发生的下行地闪回击特征的差异。结果表明:接地点高度大于 200 m 的地闪的首次(继后)回击的 LLS-回击电流幅值和光强脉冲的 10%~90%波前时间以及 10%波前~50%波后半宽时间的平均值分别为接地点高度不大于 200 m 地闪的 1.8(1.5),7.4(3.1)和 4.6(2.4)倍。

张长秀等^[23,69]对广东电网闪电定位资料的分析也表明:建筑物越高对 LLS-回击电流幅值的增强作用越明显,广州塔(600 m)、西塔(440 m)和广晟国际大厦(360 m)各自 250 m 范围内的 LLS-回击电流幅值的平均值分别为 65 kA,48 kA 和 34 kA。

3.2.2 高建筑物雷电电磁场的数值模拟分析

基于三维时域有限差分电磁场数值算法,宿志国等^[24,26]建立了高建筑物雷电电磁场模拟程序,通

过调整高建筑物顶部和底部的电流反射系数以及建筑物高度等参数,深入研究了上述参数对雷电垂直电场、水平电场以及角向磁场波形特征和峰值影响。模拟结果表明:建筑物高度对雷电电场峰值有显著影响;电流反射系数的变化对雷电电磁场波形的多峰特征以及各个分量峰值的影响明显。

为探讨城市区域多个建筑物存在时(如 TOLOG 的观测区域的情况)对雷电电磁场传播过程的影响,Su 等^[30]通过在模拟程序中加入多个建筑物,分析非孤立建筑物存在时附近雷电电磁场的分布特征。结果表明:当观测点位于建筑物顶部时,观测点所在建筑物的高度对垂直电场的影响明显,附近其他建筑物(屏蔽体)会对垂直电场的测量产生一定屏蔽作用;屏蔽体的屏蔽作用受其高度影响最大,观测距离、建筑物之间的相对距离以及截面长度的影响次之,土壤电导率的影响最弱。

3.3 下行和上行闪电的“汇集点”

3.3.1 高建筑物对附近区域雷电活动的影响

Hussein 等^[70]利用 2005 年 8 月 19 日地闪定位资料和 CN 塔上雷电电流测量资料,分析了 CN 塔对其周围闪电活动特征的影响,结果表明:扣除直接击中 CN 塔的回击后,定位位置在 CN 塔附近数千米范围内的回击密度低于较远区域。Hussein 等^[70]认为 CN 塔会吸引附近的地闪击中塔身,导致附近区域地闪密度降低,但他们也指出因分析资料较少,还需要更多的观测和分析进一步验证。Diendorfer 等^[71]对比了 2000—2007 年击中奥地利 Gaisberg 塔的闪电(有雷电电流记录)和闪电定位系统观测到的塔附近 10 km 范围内的闪电,发现塔上记录有雷击的日期中有 84%周围没有明显的雷暴活动,而周围有雷暴活动的日期中有 77%在塔上没有雷击的记录,他们认为 Gaisberg 塔虽然会导致大量上行闪电发生,但这些上行闪电一定程度上与周围的地闪活动关系不大,因此,他们推测高建筑物不会显著增加或减少其附近雷击次数。

张长秀等^[23,69]基于 1999—2015 年的广东电网地闪定位资料,选取广州塔、西塔和广晟国际大厦作为研究对象,对高建筑物建成前后其附近区域地闪活动的分布特性及不同高度建筑周围地闪活动分布特征差异进行详细分析。结果表明:广州塔建成后,与其周围 10 km 范围内回击密度和闪电密度的平均值($40.2 \text{ km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $20.0 \text{ km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)相比,广州塔周围 1 km 范围内的回击密度和闪电密度

($51.4 \text{ km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $29.1 \text{ km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 明显偏大, 而广州塔周围 1~4 km 范围内的回击密度和闪电密度(分别为 $34.4 \sim 37.2 \text{ km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $18.2 \sim 19.5 \text{ km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 均比周围 10 km 范围的平均值要低。图 5 是以广州塔为中心不同半径的圆环区域内回击密度和闪电密度在广州塔建成后相对建成前的变化率(已消除定位系统升级的影响), 可以看到广州塔建成后, 其周围 1 km 范围内回击和闪电密度显著增加, 而 1~4 km 范围内的数值明显减小。因此, 可以推测 600 m 高的广州塔可触发很多上行闪电, 且能够将周围一定范围内的下行闪电吸引至其

自身。另外, 还发现广州塔周围 1 km 范围内的 LLS-回击电流幅值的平均值(47 kA) 也明显高于 10 km 范围的平均值(29 kA), 而 1 km 以外区域的值与大范围的平均值相比没有明显差异。

经过对广东电网地闪定位资料在 TOLOG 观测区域的系统偏差订正, 张长秀^[69]更细致地分析了 3 栋建筑物周围的地闪活动特征, 结果表明: 广州塔附近高回击密度值的范围在 500 m 范围内, 西塔和广晟国际大厦附近高回击密度值的范围集中在 250 m 范围内, 3 栋建筑物各自 250 m 范围内的回击密度分别为 $140, 54, 55 \text{ km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

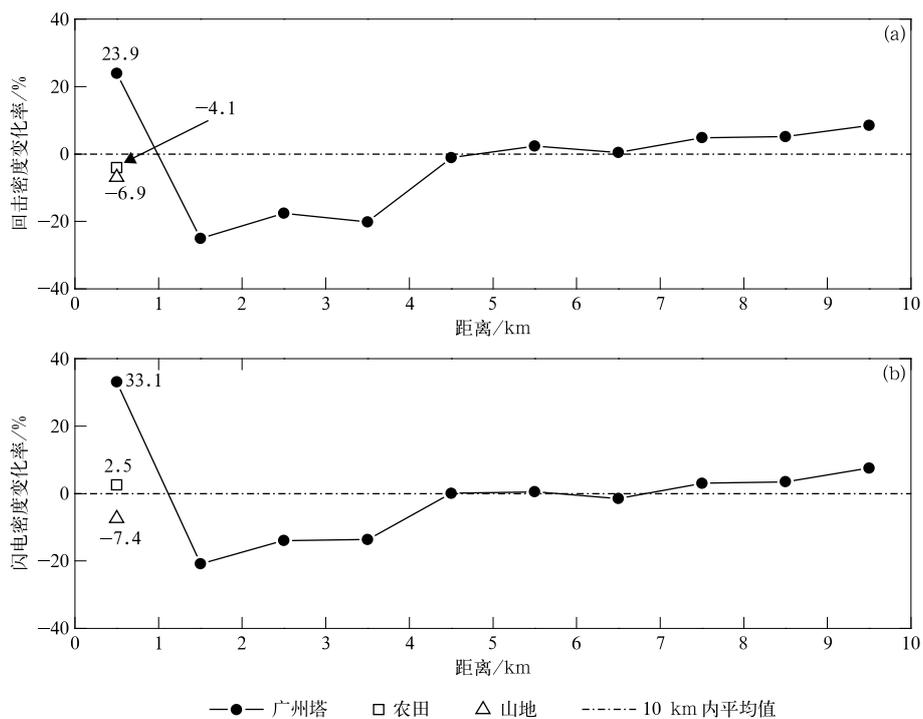


图 5 广州塔建成前后其周围不同距离范围内回击密度(a)和闪电密度(b)算术平均值的相对变化率^[23]

Fig. 5 Relative change rates of arithmetic mean value of stroke density(a) and flash density(b) in the vicinity of the Canton Tower as a function of distance (from Reference [23])

吴姗姗等^[28]利用 2009—2014 年 TOLOG 的观测资料, 对广州塔西北部 119 次下行地闪击中的高建筑物的分布特征进行了统计分析, 结果表明: 44% (52/119) 的地闪击中了区域内最高的 4 个建筑物; 击中广州塔的有 20 次(17%), 除此之外, 广州塔附近 0~1 km 的区域未观测到其他地闪; 在距广州塔 1~2 km 的区域内共观测到 35 次地闪(29%), 每个高度低于 300 m 的建筑被击中的次数不超过 1 次,

其中距广州塔最近的闪电离广州塔约 1.2 km; 在距广州塔 2~3 km 的区域内共观测到 64 次地闪(54%), 有些高度低于 300 m 的建筑物被击中 1 次以上(最长达 5 次)。因此, 广州塔对下行地闪的吸引作用使得其附近 1 km 左右的范围内未观测到其他地闪, 且 1~3 km 范围内随着距离的增加下行地闪的密度有逐渐增加的趋势。

图 6 是 2015—2017 年 TOLOG 观测到的高建

建筑物雷电接地点的频次分布。结合图 2、图 6 和表 2 可以看到,虽然有 8 个建筑物的高度均超过 300 m,但每个建筑物上雷电的发生频次差异明显:高度最高、顶部是尖顶且相对孤立的广州塔 A 上雷电的频次最高;广州东塔 B(530 m 高,平顶,简称东塔)建成之前,西塔 C(440 m 高,平顶)和广晟国际大厦 D(360 m 高,尖顶)上雷电频次相当,但东塔 B 建成之后,距离其较近(约 270 m)的西塔 C 上的雷电频次显著减少;环球都会广场 E 虽然高达 318 m,但建成后只观测到 1 次雷击,且是 1 次正极性地闪,这主要因为其距离东塔 B 仅 150 m;珠江城大厦 F(310 m 高,弧形顶)也因距离广晟国际大厦 D 仅约 110 m 且顶部非尖顶而很少遭到雷击。

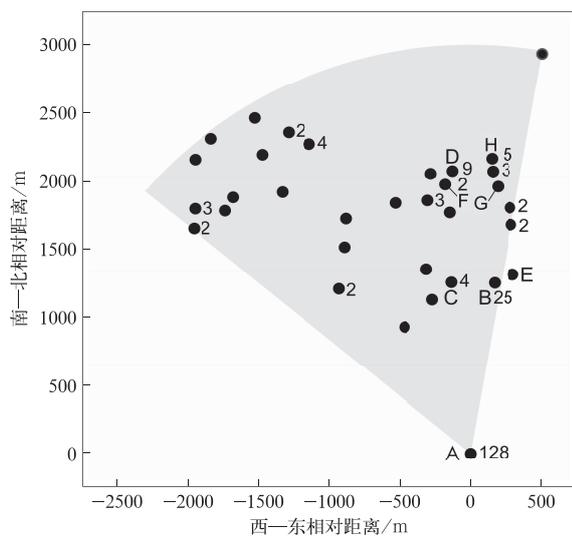


图 6 2015—2017 年 TOLOG 观测到的高建筑物雷电频次位置分布(未标数字的点均代表 1 次雷电)

Fig. 6 Locations of tall-object lightning flashes obtained at the TOLOG during 2015–2017 (points without numbers mean one flash)

3.3.2 上行闪电特征

TOLOG 视野内众多的高建筑物为观测上行闪电提供了很好的条件,虽然 2015 年前受捕获效率的限制很少观测到上行闪电,但通过升级和完善,2016 年后已捕捉到上百例上行闪电,其中还包括多例并发上行闪电,为研究上行闪电特征积累了丰富资料,细致深入的分析工作仍然在进行中。初步分析表明:在 TOLOG 观测到的上行闪电中目前能够确认类型的均为触发型上行闪电,即均被附近其他放电过程所触发。

Wang 等^[72]对日本冬季雷暴中一个风力发电机(100 m 高)及其雷电防护塔(105 m 高)上起始的 53 个上行闪电的观测发现:53%(28/53)为触发型上行闪电,47%(25/53)为自发型上行闪电(即上行闪电自行始发,始发前附近无其他放电过程发生)。Zhou 等^[73]分析了 2005—2009 年在奥地利 Gaisberg 塔(100 m 高,坐落在 800 m 高的山顶上)上记录到的 205 次上行闪电,结果表明:87%(179/205)为触发型上行闪电,只有 13%(26/205)为自发型上行闪电。利用美国闪电定位系统资料和 2004—2010 年 South Dakota 州 Rapid City 的 10 个铁塔(高度范围为 91~191 m)上 81 次上行闪电的光学观测资料,Warner 等^[74]确定几乎所有的上行闪电均为触发型上行闪电。2012—2016 年中国科学院大气物理研究所在北京 325 m 高的气象铁塔上共观测到 19 次上行闪电^[41],其中 84%(16/19)为触发型上行闪电,16%(3/19)为自发型上行闪电。因此,不同高度的建筑物、不同的地区、不同的雷暴类型、雷暴的不同阶段、不同的环境参数等因素都可能影响高建筑物上行闪电的比例。

3.3.2.1 TOLOG 观测到的触发型上行闪电

Wu 等^[27]详细分析了一次单回击峰值电流高达 +310 kA 的正地闪在多个高建筑物上触发上行闪电的过程,探讨了上行闪电的始发机制。观测发现高速摄像视野内的 3 个上行闪电从不同高建筑物上先后始发(图 7),且后始发的上行闪电的首个先导/回击序列仅在前一个上行闪电的最后一个先导/回击序列结束后发生。雷达回波强度资料显示 3 个上行闪电发生在一次飑线过程的云砧区。正地闪回击使大量正电荷被中和或带负电荷的云内通道朝高建筑物方向伸展的作用在 600 m 高的广州塔上触发了上行闪电,该过程同样会使高度更低(308 m 和 311 m)和距离更远(14 km 和 18 km)的两个建筑物顶部的电场得到增强,但却不足以在其上触发上行闪电。后两个上行闪电在 K 变化引发的云内亮度明显增强后才始发,它们的激发可能由正地闪回击、回击后连续电流以及云内 K 过程共同作用所导致。

利用高速和普通摄像及电场变化资料,武斌等^[31]分析了一次单回击正地闪(峰值电流为 +141 kA)触发两个并发上行闪电的过程,探讨了触发型上行闪电的始发特征和机理。结果表明:正地闪回击后约 0.8 ms 内,在距正地闪接地点约 3.9 km 的广州

塔上和 4.1 km 的东塔上分别有上行闪电始发。推测造成高建筑物顶部电场发生突变,进而激发两个上行闪电的原因是正地闪回击过程快速中和云内的

大量正电荷,回击后可能有云内负先导朝高建筑物方向伸展。

基于双站闪电通道光学资料、电场变化和雷达

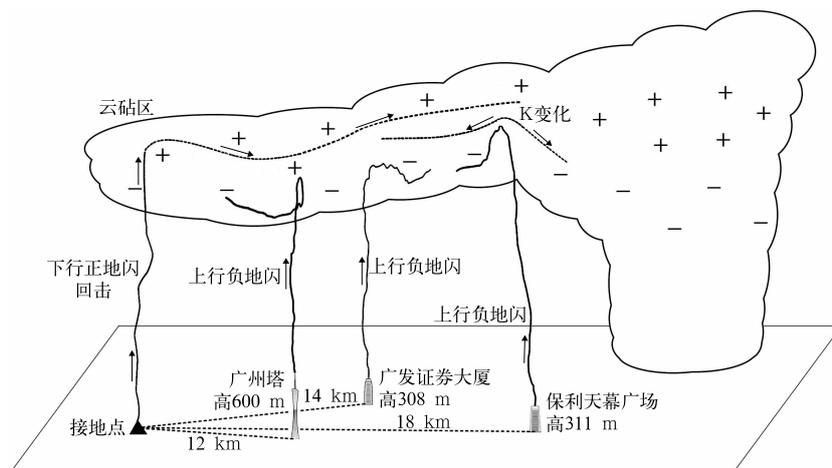


图 7 1 次正地闪及其触发的 3 个上行闪电示意图(+表示正电荷,-表示负电荷,▲为闪电定位系统提供的正地闪接地点位置,箭头表示通道传输方向)^[27]

Fig. 7 The scenario of a positive cloud-to-ground flash and three upward flashes triggered by the positive flash

(+ denotes positive charge, - denotes negative charge, ▲ is the ground termination point of positive cloud-to-ground flash reported by the lightning location system, arrows denote directions of channels extension)(from Reference [27])

数据, Qi 等^[25]详细分析了一次由附近的正地闪触发的广州塔上行闪电的过程。上行闪电发生在一次飏线系统之后的层状云区域,该区域的雷达回波强度相对较弱(30~40 dBZ),最强雷达回波中心的高度约为 4 km。由双站光学资料三维重建了上行闪电通道和正地闪的部分通道,正地闪通道三维重建部分的长度约为 3660 m,其高度发展范围为 3410~4170 m,平均高度为 3640 m。基于上述结果,推测正电荷层高度与最强回波中心高度基本一致。

3.3.2.2 上行闪电中观测到的反冲先导特征

近年,研究人员利用高速摄像资料对反冲先导特征进行分析,取得了一系列研究成果^[38,74-79]。但由于反冲先导通常始发于云内,迄今为止高速摄像机捕获的未被云层遮挡的反冲先导完整通道的个例还很少^[38,74,76-77]。

利用 TOLOG 不同帧率的高速摄像记录和电场变化同步资料,武斌等^[32,34]详细分析了一次广州塔上行闪电过程中反冲先导的特征,结果表明:该上行闪电包含 21 个反冲先导,其中 7 个发展成为直窜(或直窜-梯级)先导并引发回击,另外 14 个未能回退至塔顶而成为企图先导;高速摄像清晰地体现出

了 3 个直窜先导和两个企图先导的双向传输过程,每个直窜(或直窜-梯级)先导出现前都至少发生一次企图先导,且始发于靠近前一次企图先导正端头部的位臵;在一次双向发展的直窜先导的正端发生了 3 次突然延展现象,其中第 2 次突然延展由正端与在其头部附近出现的漂浮通道序列(疑似空间先导)相连而引发,并使正端伸展至未击穿空气中,表明双向直窜先导正端的突然延展可能由头部前端出现的疑似空间先导所引发。

TOLOG 光学观测资料使对同一次上行闪电中多个反冲先导特征的统计和对比分析成为可能,不仅明确了反冲先导的确切始发位置,清晰呈现了双向发展的反冲先导正、负端传输的细节特征,还记录到了引发其正端突然延展的疑似空间先导现象。研究结果进一步深化了对反冲先导始发和传输特征以及不同先导之间的联系等方面的科学认识。

3.4 闪电监测系统的“标校场”

加拿大的 CN 塔和奥地利的 Gaisberg 塔上积累了丰富的雷电观测资料,为北美闪电探测网和欧洲联合闪电探测网等业务闪电定位系统的性能评估工作提供了重要基础^[67,80]。

Chen等^[7]基于2007—2011年的广州从化人工触发闪电以及2009—2011年TOLOG获取的广州高建筑物雷电观测资料,对广东电网闪电定位系统性能进行了评估,发现其闪电探测效率及回击探测效率分别为94%和60%,平均定位误差为710 m,LLS-回击电流幅值估算的平均相对误差约为16.3%。若只利用广州高建筑物雷电资料,分析发现广东电网闪电定位系统对广州高建筑物雷电及其回击的探测效率分别为97%和74%,对回击的定位误差的平均值为633 m。

通过分析广州塔建成后其1 km范围内地闪定位结果的分布特征,张长秀^[69]分析了广东电网地闪定位系统对广州珠江新城区域地闪回击位置定位结果的系统偏差,并利用TOLOG获取的广州塔闪电观测结果进行对比,估算得到该系统偏差相对真实位置约偏东170 m、偏南150 m。

基于2016—2017年TOLOG获取的试验结果,陈绿文等^[36]对粤港澳闪电定位系统的性能进行了评估。结果表明:粤港澳闪电定位系统对闪电和回击的探测效率均为93%;对下行闪电首次回击、下行闪电继后回击以及上行闪电回击的定位误差的平均值(中值)分别为361 m(188 m)、252 m(167 m)以及294 m(173 m),对所有回击的定位误差的平均值(中值)约为300 m(170 m)。

4 结论与讨论

本文对2009—2018年广州高建筑物雷电观测站(TOLOG)试验的开展情况、资料获取情况进行了介绍,并从雷电连接过程的“放大镜”、雷电电磁场的“放大器”、下行和上行闪电的“汇集点”、闪电监测系统的“标校场”4个方面对广州高建筑物雷电观测和研究进展进行了总结:

1) 充分发挥高建筑物在雷电连接过程中“放大镜”的优势:在国际上首次发现了下行负地闪连接过程中下行负先导击中上行连接先导侧面(侧击)的现象;统计发现负-正先导之间的连接行为具有两种基本形态,高建筑物雷电过程中先导之间的侧击现象更为普遍;提出了从闪电图像上识别先导之间侧击现象的判据;基于近距离的高速摄像观测揭示了自然闪电中负先导梯级发展的精细化结构,分析得到下行先导和上行先导的二维/三维发展特征;估算了不同高度建筑物上雷电的闪击距离。

2) 利用TOLOG获取的雷电电磁场波形资料,结合闪电定位资料和数值模拟手段,分析了高建筑物对雷电电磁场的影响:高建筑物对回击磁场峰值有增强作用,高度在200 m以上的建筑物上雷电首次回击磁场峰值的几何平均值是高度在200 m以下的建筑物上的2.4倍;广州塔、西塔和广晟国际大厦各自250 m范围内的LLS-回击电流幅值的算术平均值分别为65 kA、48 kA和34 kA;数值模拟分析也发现建筑物越高,对雷电回击电磁场的增强效应越显著。

3) 基于地闪定位资料和TOLOG的光学观测资料,分析了高建筑物对附近区域雷电活动的影响:发现广州塔建成后,回击密度和闪电密度在其周围1 km范围内明显增加,而在1~4 km范围内有所减少;光学资料表明广州对下行闪电的吸引作用使其1 km左右范围内未观测到其他建筑物遭受雷击;正地闪回击过程、回击后的延续电流过程和K过程等均可能在高建筑物上触发上行闪电;分析给出了广州塔上行闪电过程中反冲先导始发和传输的细节特征。

4) 基于TOLOG的观测资料,对闪电定位系统的探测性能进行了评估,结果表明:广东电网闪电定位系统对广州高建筑物雷电及其回击的探测效率分别为97%和74%,对回击的定位误差的平均值约为630 m;广东电网闪电定位系统对广州塔闪电的定位结果存在约偏东170 m、偏南150 m的系统偏差;粤港澳闪电定位系统对广州高建筑物雷电的探测效率约为93%,对回击的定位误差的平均值和中值分别约为300 m和170 m。

虽然已取得了一些研究成果,但TOLOG观测资料仍需深入分析,同时根据观测资料揭示的一些现象和规律还需要结合数值模拟手段探讨其物理机制,因此,今后将在下述几方面开展观测和研究:①继续针对雷电连接过程中不同先导的发展特征(包括二维和三维)进行观测和分析,特别是不同高度建筑物上的闪击距离、雷击过程中的最后一跳和不同先导的高时空分辨率精细化发展特征等;②结合资料分析和数值模拟,研究雷击过程中不同先导之间的相互作用、高建筑物对先导起始与发展过程的影响、高建筑物(群)对区域闪电活动的影响等;③补充对高建筑物雷电电磁场的多站观测手段,提升对闪电通道三维定位和放电参量反演的能力,更全面、深入地分析高建筑物雷电的物理过程及其机理;④利

用 TOLOG 积累的丰富的高建筑物雷电观测资料,对地基(用于业务和科研的多套闪电定位系统)和天基(如 FY-4 气象卫星搭载的闪电成像仪)闪电监测系统的探测性能进行评估和标校,为这些系统的监测资料应用提供参考依据。

致谢: TOLOG 的建设和观测试验的开展得到了中国气象科学研究院、广东省气象局和中国气象局广州热带海洋气象研究所的持续大力支持,国内外多家单位和许多科研人员一直关心并支持着 TOLOG 的发展,已有数十位科研人员和研究生参与过 TOLOG 的建设、观测和资料分析工作,在此一并表示衷心的感谢!

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.
- [2] Rakov V A, Uman M A. *Lightning: Physics and Effects*. New York: Cambridge University Press, 2003.
- [3] Eriksson A J. Lightning and tall structures. *Trans South Afr IEE*, 1978, 69(8): 238-252.
- [4] Shindo T. Lightning striking characteristics to tall structures. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2018, 13(7): 938-947.
- [5] Zhang Y, Lü 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, DOI: 10. 1007/s13351-016-6928-7.
- [6] Lu W, Chen L, Zhang Y, et al. Characteristics of unconnected upward leaders initiated from tall structures observed in Guangzhou. *J Geophys Res Atmos*, 2012, 117, D19211, DOI: 10. 1029/2012JD018035.
- [7] Chen L, Zhang Y, Lu W, et al. Performance evaluation for a lightning location system based on observations of artificially triggered lightning and natural lightning flashes. *J Atmos Oceanic Technol*, 2012, 29(12): 1835-1844.
- [8] 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.
- [9] 周方聪,吕伟涛,陈绿文,等. 高建筑物上闪电普通摄像观测与分析. *气象科技*, 2013, 41(2): 224-230.
- [10] Gao Y, Lu W, Ma Y, et al. Three-dimensional propagation characteristics of the upward connecting leaders in six negative tall-object flashes in Guangzhou. *Atmos Res*, 2014, 149: 193-203.
- [11] 杨了,吕伟涛,张阳,等. 改进的互功率谱相位法在雷声声源定位中的应用. *应用气象学报*, 2014, 25(2): 193-201.
- [12] 杨欣怡,吕伟涛,杨俊,等. 3种阈值方法在闪电通道图像识别中的应用. *应用气象学报*, 2014, 25(4): 427-435.
- [13] Chen L, Lu W, Zhang Y, et al. Optical progression characteristics of an interesting natural downward bipolar lightning flash. *J Geophys Res Atmos*, 2015, 120(2): 708-715.
- [14] 王智敏,吕伟涛,陈绿文,等. 2011—2012年广州高建筑物雷电电磁场特征统计. *应用气象学报*, 2015, 26(1): 87-94.
- [15] 陈绿文,吕伟涛,张义军,等. 不同高度建筑物上的下行地闪回击特征. *应用气象学报*, 2015, 26(3): 311-318.
- [16] 李丹,张义军,吕伟涛,等. 闪电先导三维自持发展模式的建立. *应用气象学报*, 2015, 26(2): 203-210.
- [17] 高彦,吕伟涛,陈绿文,等. 双站摄像资料重建闪电三维通道的方法. *高原气象*, 2015, 34(3): 842-849.
- [18] 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. *J Atmos Sol Terr Phys*, 2015, 136: 23-30.
- [19] 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.
- [20] Qi Q, Lu W, Ma Y, et al. High-speed video observations of the fine structure of a natural negative stepped leader at close distance. *Atmos Res*, 2016, 178/179: 260-267.
- [21] Lu W, Qi Q, Ma Y, et al. Two basic leader connection scenarios observed in negative lightning attachment process. *High Voltage*, 2016, 1(1): 11-17.
- [22] 李峰,吕伟涛,李清勇,等. 基于线支持区域的闪电通道识别算法. *应用气象学报*, 2016, 27(6): 725-733.
- [23] Zhang C, Lu W, Chen L, 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.
- [24] 宿志国,吕伟涛,陈绿文,等. 建筑物高度对地闪回击电磁场影响的模拟. *应用气象学报*, 2018, 29(4): 487-495.
- [25] Qi Q, Lyu W, Wu B, et al. Three-dimensional optical observations of an upward lightning triggered by positive cloud-to-ground lightning. *Atmos Res*, 2018, 214: 275-283.
- [26] 宿志国,吕伟涛,王万富. 建筑物顶部雷电电磁场的畸变效应研究. *电瓷避雷器*, 2018, 285(5): 27-30.
- [27] Wu B, Lyu W, Qi Q, et al. Synchronized two-station optical and electric field observations of multiple upward lightning flashes triggered by a 310-kA +CG Flash. *J Geophys Res Atmos*, 2019, 124(2): 1050-1063.
- [28] 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.
- [29] Chen L, Lyu W, Zhang Y, et al. Correlated luminosity and magnetic field peaks produced by canton tower-strokes. *Atmos Res*, 2019, 218: 59-69.
- [30] Su Z, Lyu W, Chen L, et al. Shielding effect of surrounding buildings on the lightning-generated vertical electric field at the top of a tall building. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2019, 61(1): 174-182, DOI: 10. 1109/TEM. 2018. 2790346.
- [31] 武斌,吕伟涛,齐奇,等. 一次正地闪触发两个并发上行闪电的光电观测. *应用气象学报*, 2019, 30(3): 257-266.
- [32] Wu B, Lyu W, Qi Q, et al. High-speed video observations of recoil leaders producing and not producing return strokes in a

- Canton-Tower upward flash. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 8546-8553.
- [33] Qi Q, Lyu 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: 12580-12587.
- [34] 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.
- [35] 齐奇, 吕伟涛, 武斌, 等. 广州两个不同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.
- [36] 陈绿文, 吕伟涛, 马颖, 等. 粤港澳闪电定位系统对高建筑物雷电的探测. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 165-174.
- [37] Jiang R, Qie X, Wu Z, et al. Characteristics of upward lightning from a 325-m-tall meteorology tower. *Atmos Res*, 2014, 149: 111-119.
- [38] Jiang R, Wu Z, Qie X, et al. High-speed video evidence of a dart leader with bidirectional development. *Geophys Res Lett*, 2014, 41(14): 5246-5250.
- [39] Jiang R, Sun Z, Wu Z, et al. Concurrent upward lightning flashes from two towers. *Atmospheric and Oceanic Science Letter*, 2014, 7(3): 260-264.
- [40] Wang Z, Qie X, Jiang R, et al. High-speed video observation of stepwise propagation of a natural upward positive leader. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121(24): 14307-14315.
- [41] Yuan S, Jiang R, Qie X, et al. Characteristics of upward lightning on the Beijing 325 m meteorology tower and corresponding thunderstorm conditions. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122(22): 12093-12105.
- [42] Yuan S, Jiang R, Qie X, et al. Development of side bidirectional leader and its effect on channel branching of the progressing positive leader of lightning. *Geophys Res Lett*, 2019, 46(3): 1746-1753.
- [43] Qiu Z, Gao H, Yang Y. Lightning Parameters Measurement Systems and Instrumentation on Meteorological Gradient Observation Tower in Shenzhen China. 2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), Balneário, Camboriú, Brazil, 2015.
- [44] Yang Y, Qiu Z, Qin Z, et al. Preliminary Results of Lightning Current Measurements at the 356 m High Shenzhen Meteorological Gradient Tower in South China. 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Rzeszow, Poland, 2018.
- [45] Gao Y, Chen M, Qin Z, et al. The spatial evolution of upward positive stepped leaders initiated from a 356-m-tall tower in southern China. *J Geophys Res Atmos*, 2020, 125(2), DOI: 10.1029/2019JD031508.
- [46] Wang D, Takagi N, Gamerota W R, et al. Initiation processes of return strokes in rocket-triggered lightning. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118(17): 9880-9888.
- [47] 马颖, 吕伟涛, 杨俊, 等. 一种闪电通道自动观测系统: 201911-003352. 1. 2019-10-22.
- [48] 吕伟涛, 张阳, 马颖, 等. 全视野闪电事件观测系统及方法: ZL201110066285. 5. 2013-09-11.
- [49] Lv W, Ma Y, Zhang Y, et al. Total-sky Lightning Event Observation System and Method; US Patent, US 8902312 B2. 2014-12-02.
- [50] 章涵, 王道洪, 吕伟涛, 等. 基于雷声到达时间差的单站闪电通道三维定位系统. *高原气象*, 2012, 31(1): 209-217.
- [51] Shi D, Zheng D, Zhang Y, et al. Low-frequency E-field Detection Array (LFEDA)-Construction and preliminary results. *Science China (Earth Sciences)*, 2017, 60(10): 1896-1908.
- [52] Eriksson A. The incidence of lightning strikes to power lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1987, 2(3): 859-870.
- [53] Dellera L, Garbagnati E. Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. I. Description of the model and evaluation of exposure of free-standing structures. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1990, 5(4): 2009-2022.
- [54] Rizk F A. Modeling of lightning incidence to tall structures. I. Theory. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994, 9(1): 162-171.
- [55] Mazur V, Ruhnke L, Bondiou-Clergerie A, et al. Computer simulation of a downward negative stepped leader and its interaction with a ground structure. *J Geophys Res Atmos*, 2000, 105(D17): 22361-22369.
- [56] Ait-Amar S, Berger G. Lightning Interception on Elevated Building. 5th WSEAS Int Conf on Power Systems & EMC, Corfu, Greece, 2005.
- [57] Kostinskiy A Y, Syssoev V, Bogatov N, et al. Observations of the connection of positive and negative leaders in meter-scale electric discharges generated by clouds of negatively charged water droplets. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121(16): 9756-9766.
- [58] Hussein A, Milewski M, Janischewskij W, et al. Characteristics of lightning flashes striking the CN Tower below its tip. *Journal of Electrostatics*, 2007, 65(5/6): 307-315.
- [59] Lu W, Wang D, Takagi N, et al. Characteristics of the optical pulses associated with a downward branched stepped leader. *J Geophys Res Atmos*, 2008, 113, D21206, DOI: 10.1029/2008JD010231.
- [60] Biagi C, Jordan D, Uman M, et al. High-speed video observations of rocket-and-wire initiated lightning. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, L15801, DOI: 10.1029/2009GL038525.
- [61] Hill J, Uman M, Jordan D. High-speed video observations of a lightning stepped leader. *J Geophys Res Atmos*, 2011, 116, D16117, DOI: 10.1029/2011JD015818.
- [62] Petersen D A, Beasley W H. High-speed video observations of a natural negative stepped leader and subsequent dart-stepped leader. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118(21): 12110-12119.
- [63] Tran M D, Rakov V A, Mallick S. A negative cloud-to-ground flash showing a number of new and rarely observed features. *Geophys Res Lett*, 2014, 41(18): 6523-6529.
- [64] Warner T. Upward Leader Development from Tall Towers in

- Response to Downward Stepped Leader. 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cagliari, Italy, 2010.
- [65] Saba M, Paiva A, Schumann C, et al. Lightning attachment process to common buildings. *Geophys Res Lett*, 2017, 44(9): 4368-4375.
- [66] Lafkovic A, Hussein A M, Janischewskyj W, et al. Evaluation of the performance characteristics of the North American Lightning Detection Network based on tall-structure lightning. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2008, 50(3): 630-641.
- [67] Kazazi S, Hussein A, Liatos P. Evaluation of NALDN performance characteristics in the vicinity of the CN Tower based on tall-structure lightning. *Electric Power Systems Research*, 2017, 153: 19-31.
- [68] Baba Y, Rakov V A. Lightning strikes to tall objects: Currents inferred from far electromagnetic fields versus directly measured currents. *Geophys Res Lett*, 2007, 34, L19810, DOI: 10.1029/2007gl030870.
- [69] 张长秀. 广州高建筑物对其周围地闪活动特征影响的研究. 北京: 中国气象科学研究院, 2017.
- [70] Hussein A, Jan S, Todorovski V, et al. Influence of the CN Tower on the Lightning Environment in Its Vicinity. International Lightning Detection Conference and International Lightning Meteorological Conference (ILDC/ILMC), Orlando, Florida, USA, 2010.
- [71] Diendorfer G, Schulz W, Umprecht H, et al. Effect of Tower Initiated Lightning on the Ground Stroke Density in the Vicinity of the Tower. International Lightning Detection Conference and International Lightning Meteorology Conference (ILDC/ILMC), Orlando, Florida, USA, 2010.
- [72] Wang D, Takagi N. Characteristics of winter lightning that occurred on a windmill and its lightning protection tower in Japan. *IEEJ Transactions on Power and Energy*, 2012, 132(6): 568-572.
- [73] Zhou H, Diendorfer G, Thottappillil R, et al. Measured current and close electric field changes associated with the initiation of upward lightning from a tall tower. *J Geophys Res Atmos*, 2012, 117, D08102, DOI: 10.1029/2011JD017269.
- [74] Warner T A, Cummins K L, Orville R E. Upward lightning observations from towers in Rapid City, South Dakota and comparison with National Lightning Detection Network data, 2004-2010. *J Geophys Res Atmos*, 2012, 117, D19109, DOI: 10.1029/2012JD018346.
- [75] Mazur V, Ruhnke L H. Physical processes during development of upward leaders from tall structures. *Journal of Electrostatics*, 2011, 69(2): 97-110.
- [76] Mazur V, Ruhnke L H, Warner T A, et al. Recoil leader formation and development. *Journal of Electrostatics*, 2013, 71(4): 763-768.
- [77] Velde O A, AMontanya J. Asymmetries in bidirectional leader development of lightning flashes. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118(24): 13504-13519.
- [78] Mazur V. The physical concept of recoil leader formation. *Journal of Electrostatics*, 2016, 82: 79-87.
- [79] Qie X, Pu Y, Jiang R, et al. Bidirectional leader development in a preexisting channel as observed in rocket-triggered lightning flashes. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122(2): 586-599.
- [80] Schulz W, Diendorfer G, Pedebay S, et al. The European lightning location system EUCLID-Part 1: Performance analysis and validation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16(2): 595-605.

Advances of Observation and Study on Tall-object Lightning in Guangzhou over the Last Decade

Lü Weitao¹⁾ Chen Lüwen²⁾ Ma Ying¹⁾ Qi Qi¹⁾ Wu Bin¹⁾ Jiang Ruijiao¹⁾

¹⁾ (Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering / State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080)

Abstract

Comparing to the ground or low-object, tall-object is more likely to reach the threshold for the initiation of leader on its top due to the distortion and enhancement of electric field, therefore tall-object is not only easier to get struck by downward lightning, but also can initiate upward lightning. A field experiment, mainly focusing on the observation of lightning flashes terminating on tall structures, has been conducted since 2009 at the Tall-Object Lightning Observatory in Guangzhou (TOLOG), which is the important part of the Field Experiment Base on Lightning Sciences, China Meteorological Administration (CMA_FEBLS). Hundreds of tall-object lightning flashes have been captured during 2009–2018.

For the lightning attachment process, tall-object will play the role of “magnifier”: The TOLOG high-speed optical observation discovers the connection of the downward negative leader to the lateral surface of the upward connecting leader for the first time, and shows two basic types of the leader connection behaviors during the attachment process in negative cloud-to-ground lightning; the fine structure of negative stepped leader in natural lightning at close distance is revealed by using high-speed video records; the 2D/3D propagation characteristics of downward and upward leaders are analyzed; and the striking distances of lightning flashes to tall-object with different heights are also estimated.

Tall-object plays an “amplifier” role on lightning electromagnetic field; Statistical analysis of the TOLOG data show that the magnetic field peak values induced by the first return stroke of lightning flashes to objects higher than 200 m is 2.4 times of that of lightning flashes to objects lower than 200 m; the higher the tall-object is, the larger the lightning location system inferred peak current of strokes are recorded in the vicinity of the tall-object; and the numerical simulation of the tall-object on electromagnetic field of lightning return stroke also show that the height of tall-object has significant enhancing effects.

Tall-object is the “hot spot” of downward and upward lightning; Attraction effects of tall-object on downward lightning can protect other objects near tall-object from lightning strikes; the upward negative lightning from the tall-object can be triggered by the return stroke, the continuing current or the discharging process in cloud of positive cloud-to-ground lightning; and in upward lightning, abrupt extension is found at the positive end of the recoil leader which propagates bidirectionally.

Using data of the TOLOG, the detection efficiency, the location error and the systematic bias of lightning location systems in Guangdong are evaluated, showing that the observation area of the TOLOG can be used as a “calibration field” for ground-based or space-based lightning monitoring system.

Key words: tall-object; downward lightning; upward lightning; leader; attachment process