

陈绿文, 吕伟涛, 张义军, 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.

DOI: 10.11898/1001-7313.20200204

## 粤港澳闪电定位系统对高建筑物雷电的探测

陈绿文<sup>1)2)</sup> 吕伟涛<sup>2)\*</sup> 张义军<sup>3)</sup> 马颖<sup>2)</sup> 齐奇<sup>2)</sup> 武斌<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080)

<sup>2)</sup>(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)

<sup>3)</sup>(复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438)

### 摘 要

基于 2016—2017 年广州高建筑物雷电观测站获取的资料对粤港澳闪电定位系统(简称定位系统)的性能进行评估,并根据 2014—2018 年定位系统历史资料对广州高建筑物区域的雷电活动特征进行初步分析,结果表明:定位系统对闪电的探测效率为 93%(214/229),对回击的探测效率为 93%(449/481),对下行闪电首次回击、继后回击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)和 294 m(173 m);当接地点高度低于 200 m(不低于 200 m)时,定位系统对下行负极性闪电首次和继后回击的云闪/地闪识别正确率分别为 99%(80%)和 93%(35%),有 83%的上行负地闪回击被定位系统误判为云闪,广州高建筑物区域内绝大部分负云闪定位记录实际是高建筑物地闪;对定位系统得到的孤立高建筑物闪电密度中心进行分析后发现,广州塔(600 m)闪电密度中心 200 m 半径范围内年均回击次数约为中信广场(390 m)和广发证券大厦(308 m)的 5 倍,推测广州塔闪电的主要类型为上行闪电,而中信广场和广发证券大厦则为下行闪电。

**关键词:** 粤港澳闪电定位系统; 高建筑物; 回击; 性能评估

### 引 言

利用高建筑物开展雷电特征观测一直都是大气电学领域的重要研究方式。世界上很多国家的研究人员针对不同的高建筑物开展了雷电观测试验。通过雷电流直接测量装置、高速摄像机以及电磁场天线等探测设备,研究人员获取了高建筑物雷电的多参量精细化观测资料,为推进雷电物理以及雷电防护工程技术的研究提供了珍贵的基础资料<sup>[1-3]</sup>。近年,我国科研人员也相继在广州、北京等地开展了高建筑物雷电综合观测试验,并取得了一系列重要研究成果<sup>[4-13]</sup>。

高建筑物雷电综合观测试验虽然可以获取较为全面的闪电观测资料,但通常需要投入大量的人力物力,很难大规模开展。近年,我国多地已经建设了

业务闪电定位系统,可对大范围闪电放电的时间、位置、强度和极性参量进行实时探测,不少人员也尝试将业务闪电定位资料应用到高建筑物雷电研究中。如 Zhang 等<sup>[14]</sup>利用 1999—2015 年广东电网地闪定位系统观测资料,分析了 600 m 高的广州塔对其周围地闪活动的影响,发现广州塔建成后其 1 km 半径范围内地闪密度显著上升,而周围 1~4 km 范围内的地闪活动出现减少。陈绿文等<sup>[15]</sup>分析了 2009—2012 年广州高建筑物雷电观测试验中获取的能确认接地点高度的 58 次下行负极性地闪的光电同步观测资料以及相应的广东电网地闪定位系统探测记录,发现接地点高于 200 m 的地闪的首次回击电流幅值和继后回击电流幅值的算术平均值(几何平均值)分别为接地点不高于 200 m 的地闪的 1.8(2.1)倍和 1.5(1.4)倍。

粤港澳闪电定位系统(Guangdong-Hongkong-

2019-10-15 收到, 2020-01-20 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划(2017YFC1501504), 国家自然科学基金面上项目(41775010), 灾害天气国家重点实验室开放课题项目(2017LASW-B05), 广东省自然科学基金项目(2018A030313969)

\* 通信作者, 邮箱: lyuwt@foxmail.com

Macao Lightning Location System, GHMLLS) 经过 2012 年的升级改造后, 已成为广东地区最主要的业务闪电定位系统之一。本文基于 2016—2017 年广州高建筑物雷电观测试验获取的地闪个例综合观测资料, 对粤港澳闪电定位系统的地闪探测性能进行评估, 并根据该定位系统近 5 年的历史资料对广州高建筑物区域的雷电活动特征进行初步分析。

## 1 资料和方法

粤港澳闪电定位系统由广东省、香港、澳门三地气象部门从 2005 年开始共同建设, 截至 2007 年共

建成了 6 个探测子站(采用 IMPACT 探头)。2012 年粤港澳闪电定位系统新增 11 个探测子站<sup>[16]</sup>。新建设的探测站采用了 Vaisala 公司的 LS-700X 系列探头, 能同时探测地闪和云闪(对云闪的理论探测效率约为 40%~50%<sup>[17]</sup>), 从而提高了对珠江三角洲区域内雷电活动的探测能力。2018 年粤港澳闪电定位系统采用 LS-700X 系列探头全部取代了原有的 IMPACT 探头, 并新增了两个子站。粤港澳闪电定位系统采用时差-方向综合定位方法, 探测参量包括闪电放电的 GPS 时间、经纬度、强度、云闪/地闪识别和极性。图 1 为粤港澳闪电定位系统探测子站的分布, 可以看到, 广州高建筑物区域正处于粤港

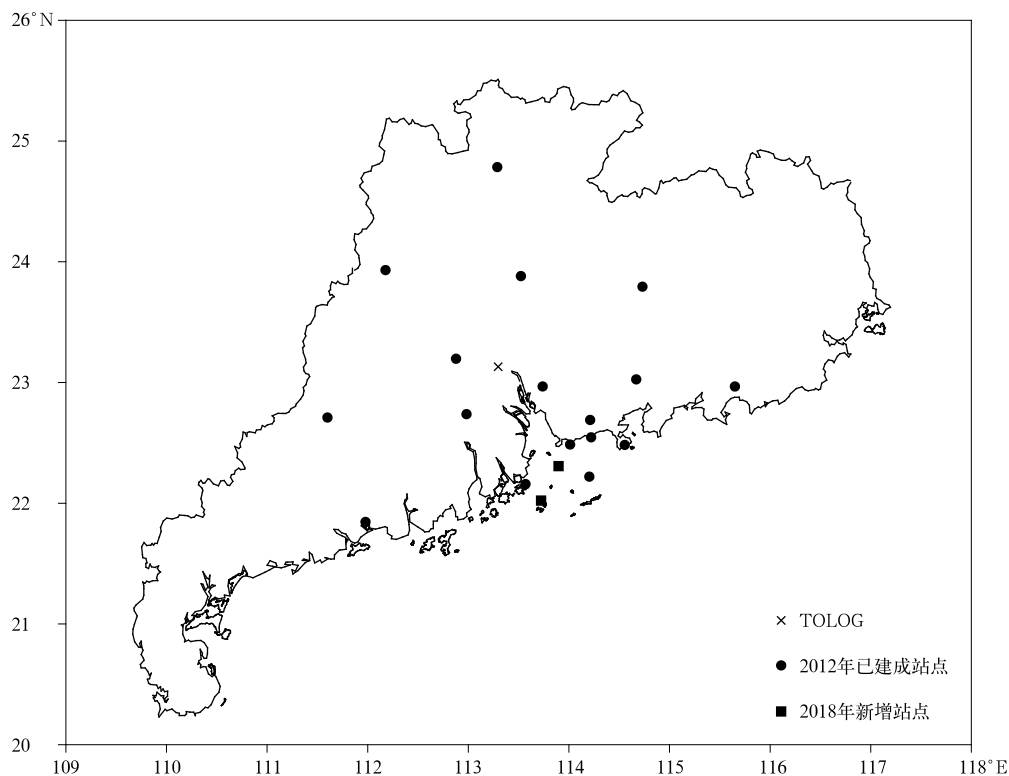


图 1 粤港澳闪电定位系统探测子站分布及 TOLOG 站点位置

Fig. 1 Distribution of sensors of GHMLLS and the site of the TOLOG

澳闪电定位站网的中心位置。

广州高建筑物雷电观测站(Tall-Object Lightning Observatory in Guangzhou, TOLOG), 始建于 2009 年, 是中国气象局雷田野外科学试验基地的重要组成部分, 主要针对广州珠江新城高建筑物区域的雷电活动开展观测试验。在 TOLOG 的主观测站, 架设多台高速摄像机、快慢电场变化仪以及闪电电磁场变化测量仪等闪电光、电、磁多参量同步自动探测设备。各台高速摄像机的时间分辨率均不低于 1000 帧/s, 记录时间长度为 1 ms~1.5 s。电磁场

探测信号利用 DL-850 示波器进行记录和储存, 采样率设为 10 MS/s, 记录时间长度不少于 1 s。另外, 观测系统的触发时间利用精度优于 50 ns 的高精度 GPS 时钟系统进行记录。

为了便于与闪电定位记录进行确切的比对, 高建筑物地闪个例的挑选工作按照以下原则进行: ①具有回击过程, ②具有相应的高速摄像记录且回击通道处于高速摄像机的视野范围内, ③具有准确的 GPS 触发时间记录。

按照以上原则, 从 2016—2017 年期间获取的

TOLOG 观测资料集中共挑选出 229 次地闪个例,其中包括 25 次上行负极性闪电、195 次下行负极性闪电和 9 次下行正极性闪电。

与 Chen 等<sup>[18]</sup>对广东电网地闪定位系统的评估方法相类似,本文中地闪个例与相应闪电定位记录的匹配,首先根据高速摄像和电磁场变化等综合观测资料辨认闪电的类型(如分辨属于上行闪电或下行闪电),对每次闪电中的回击事件进行辨识,确定所有回击事件的 GPS 时间,然后在闪电定位记录数据库中按照同时满足与 TOLOG 的水平距离不超过 30 km(当只有两个站定位时可放宽到 50 km),且与回击事件的时间偏差不超过 100  $\mu$ s 这两个条

件搜索相应的闪电定位匹配记录。

## 2 粤港澳闪电定位系统探测性能评估

### 2.1 探测效率

表 1 为对粤港澳闪电定位系统探测效率的评估结果。在挑选的 229 次地闪个例中,粤港澳闪电定位系统共探测到 214 次,闪电探测效率达到 93%。其中,对下行负极性闪电和上行负极性闪电的闪电探测效率均达到 95%以上,但对下行正极性闪电的探测效率仅 56%。

153 次闪电个例的回击次数可以确认,共包含

表 1 基于 2016—2017 广州高建筑物地闪个例的粤港澳闪电定位系统探测效率评估  
Table 1 Evaluation of the detection efficiency of GHMLLS based on the tall-object lightning flashes observed in Guangzhou during 2016—2017

| 地闪类别    | 闪电次数 | 探测到的闪电次数 | 闪电探测效率/% | 能确认的回击次数 | 探测到的回击次数 | 回击探测效率/% |
|---------|------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 下行负极性闪电 | 195  | 185      | 95       | 385      | 360      | 93       |
| 下行正极性闪电 | 9    | 5        | 56       | 9        | 5        | 56       |
| 上行负极性闪电 | 25   | 24       | 96       | 87       | 84       | 97       |

481 次回击,粤港澳闪电定位系统探测到其中的 449 次回击,回击探测效率约为 93%。需要说明的是,有 76 次闪电个例由于各种原因未能获取闪电全过程的高速摄像记录,无法确认其准确回击次数,因此未纳入表 1 中探测到的回击次数以及回击探测效率的统计范围。

### 2.2 定位精度

当闪电击中位于高速摄像机视野内高耸建筑物顶端时,其接地点易于辨认,但由于受到地物、雨雾遮挡等因素的影响,也有部分闪电个例的接地点无法确认。

共有 208 次闪电回击事件可以辨认出准确的接地点,其中包括 51 次下行负极性闪电首次回击、63 次下行负极性闪电继后回击和 94 次上行负极性闪电回击。表 1 中探测到的 5 次下行正极性闪电回击均无法准确辨认其接地点。总体上,粤港澳闪电定位系统对下行负极性闪电首次回击、继后回击以及上行闪电回击的定位误差的算术平均值(中值)分别为 361 m(188 m)、252 m(167 m)以及 294 m(173 m)。

王智敏等<sup>[19]</sup>和陈绿文等<sup>[15]</sup>曾对广州珠江新城区域闪电回击特征进行分析,发现不同高度范围建筑物上发生的闪电回击电磁场的波形和强度均有着明显的差异。为了分析不同闪电回击类型以及回击

接地点高度等因素对闪电定位结果的影响,这 208 次闪电回击被划分为以下 5 种类别:T1,下行闪电首次回击,接地点高度低于 200 m(样本量为 11);T2,下行闪电继后回击,接地点高度低于 200 m(样本量为 9);T3,下行闪电首次回击,接地点高度不低于 200 m(样本量为 40);T4,下行闪电继后回击,接地点高度不低于 200 m(样本量为 54);T5,上行闪电回击,接地点高度均不低于 300 m(样本量为 94)。

图 2 为 T1~T5 类闪电回击定位误差的箱型图,可以看到,各类闪电回击定位误差的中值均小于 200 m, T2 和 T3 类闪电回击定位误差的离散性相对较大,而 T1, T4 和 T5 类闪电回击定位误差的离散性则相对较小。

T3~T5 类回击中有 113 次回击(17 次下行闪电首次回击、13 次下行闪电继后回击以及 83 次上行闪电回击)的接地点位于 600 m 高的广州塔顶部。图 3 为广州塔闪电回击的定位结果分布(仅显示广州塔周围 600 m 范围内的定位结果)。可以看到,广州塔闪电回击的定位结果存在西南方向的系统偏差。将 113 次广州塔闪电回击定位结果经纬度的算术平均值与广州塔所在位置进行对比后发现,该系统偏差为偏西约 80 m,偏南约 100 m。对每条广州塔回击定位结果都进行同样的系统偏差纠正后,广州塔下行闪电首次回击、继后回击以及上行闪

电回击的定位误差算术平均值(中值)分别从 599 m 563 m(192 m)、185 m(89 m)和 225 m(106 m)。(297 m)、234 m(137 m)和 277 m(182 m)降低到

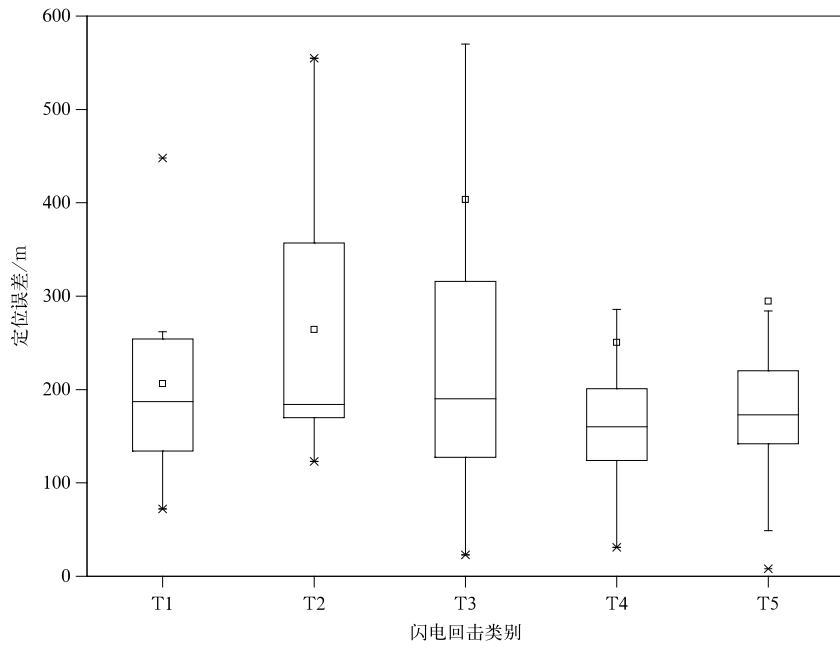


图 2 闪电回击定位误差箱型图

Fig. 2 Box plots for location errors of lightning strokes

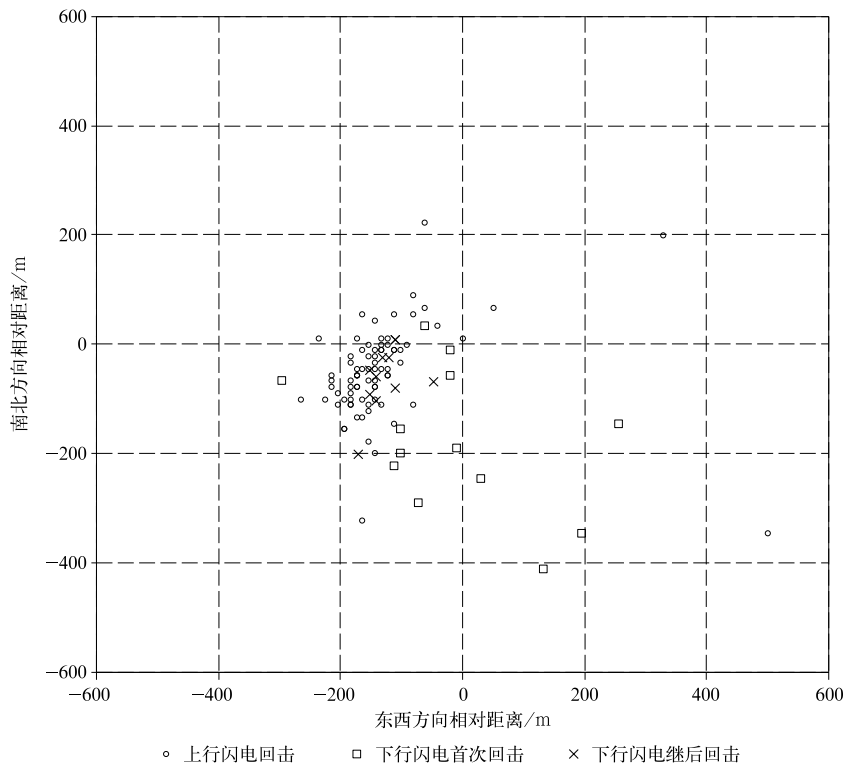


图 3 广州塔闪电回击定位结果分布

Fig. 3 Distribution of the Canton Tower strokes (the origin corresponds to the location of the Canton Tower)

### 2.3 云闪/地闪识别

在挑选出的匹配闪电定位记录中,除 208 次闪电回击事件可以辨认出准确的接地点以外,还有 191 次闪电回击事件虽然无法辨认出准确的接地点,但仍可根据闪电回击通道的方位以及广州市区高建筑物的具体分布情况确认其接地点高度低于 200 m。

表 2 为粤港澳闪电定位系统对不同接地点高度的地闪回击的云闪/地闪识别结果。当接地点高度低于 200 m 时,下行负极性闪电首次回击和继后回

击被误判为云闪的概率分别为 1% 和 7%;当接地点高度不低于 200 m 时,下行负极性闪电首次、继后回击以及上行负极性闪电回击被误判为云闪的概率分别为 20%,65% 和 83%。总体上,较高建筑物上发生的地闪回击被粤港澳闪电定位系统误判为云闪的概率显著高于低矮建筑物,而且继后回击的误判概率比下行闪电首次回击的更大。另外,表 1 中的 5 次正地闪回击的接地点位置均无法准确辨识,但粤港澳闪电定位系统均正确地将其识别为地闪。

表 2 基于 2016—2017 广州高建筑物地闪个例的粤港澳闪电定位系统云闪/地闪识别正确率的评估

Table 2 Evaluation of intra-cloud and cloud-to-ground lightnings classification based on tall-object strokes observed in Guangzhou during 2016—2017

| 地闪回击类别    | 接地点高度低于 200 m |      |         | 接地点高度不低于 200 m |      |         |
|-----------|---------------|------|---------|----------------|------|---------|
|           | 总次数           | 误判次数 | 识别正确率/% | 总次数            | 误判次数 | 识别正确率/% |
| 下行负闪电首次回击 | 84            | 1    | 99      | 41             | 8    | 80      |
| 下行负闪电继后回击 | 126           | 9    | 93      | 54             | 35   | 35      |
| 上行负闪电回击   |               |      |         | 94             | 78   | 17      |

## 3 广州高建筑物区域地闪回击分布特征

### 3.1 整体分布特征

广州市高建筑物最为密集的区域主要位于在从广州塔到中信广场的广州南北向中轴线一带。该区域内主要高建筑物的分布情况如图 4 所示,其中字母 A,B,C,D,E 分别代表广州塔(600 m 高,2009 年建成)、广州周大福金融中心(530 m 高,2014 年建成)、广州国际金融中心(440 m 高,2009 年建成)、中信广场(390 m 高,1996 年建成)和广晟国际大厦(360 m 高,2011 年建成)5 座高度超过 350 m 的高建筑物,实心三角、空心三角和交叉号则分别代表高度在 300~349 m, 250~299 m 以及 200~249 m 不同范围内的高建筑物。

在使用近 5 年(2014—2018 年)的粤港澳闪电定位历史资料分析广州高建筑物区域的地闪分布特征前,剔除了该资料的正极性云闪记录。考虑到强度在 0~10 kA 的正极性地闪定位记录很可能是由于闪电定位系统将云闪误判为正地闪而得到<sup>[20]</sup>,所以也将其予以剔除。另外,根据 2.3 节的分析,接地点高度不低于 200 m 的负极性地闪很容易被误判为云闪,因此,定位资料中保留了负极性云闪记录。

经上述处理之后,如果某两条回击记录(无论是地闪或负云闪)的间隔时间不超过 0.5 s 且定位点距离不超过 1 km,则其视为属于同一次闪电。处理后的粤港澳闪电回击定位记录被划分为以下 4 类:S1,一次闪电中的第 1 次回击(该次闪电中可以仅有 1 次定位记录),被识别为地闪;S2,一次闪电中的继后回击,被识别为地闪;S3,一次闪电中的第 1 次回击(该次闪电中可以仅有 1 次定位记录),被识别为云闪;S4,一次闪电中的继后回击,被识别为云闪。

图 4 为 2014—2018 年广州高建筑物区域内 S1~S4 类闪电回击频次分布情况。可以看到,S1 类和 S2 类闪电回击主要集中在广州塔和中信广场(广州中轴线高建筑物群的南北两端)附近。S3 类闪电回击几乎全部集中在广州塔附近,S4 类闪电回击则主要集中在广州塔、广州周大福金融中心、中信广场以及位于 23.12°N,113.34°E 附近的广发证券大厦(308 m 高,2016 年初建成,图 4 中标记为 F)等高建筑物周围。从整个区域看,S3 类、S4 类闪电回击几乎全部集中分布在高建筑物附近,说明这些负极性云闪定位记录实际是高建筑物地闪回击,这与 2.3 节分析结果一致。另外,由图 4 还可以看到,各高建筑物附近的回击密度的高值中心总体偏西,这与 2.2 节分析的广州塔闪电回击定位系统偏差情况基本吻合。

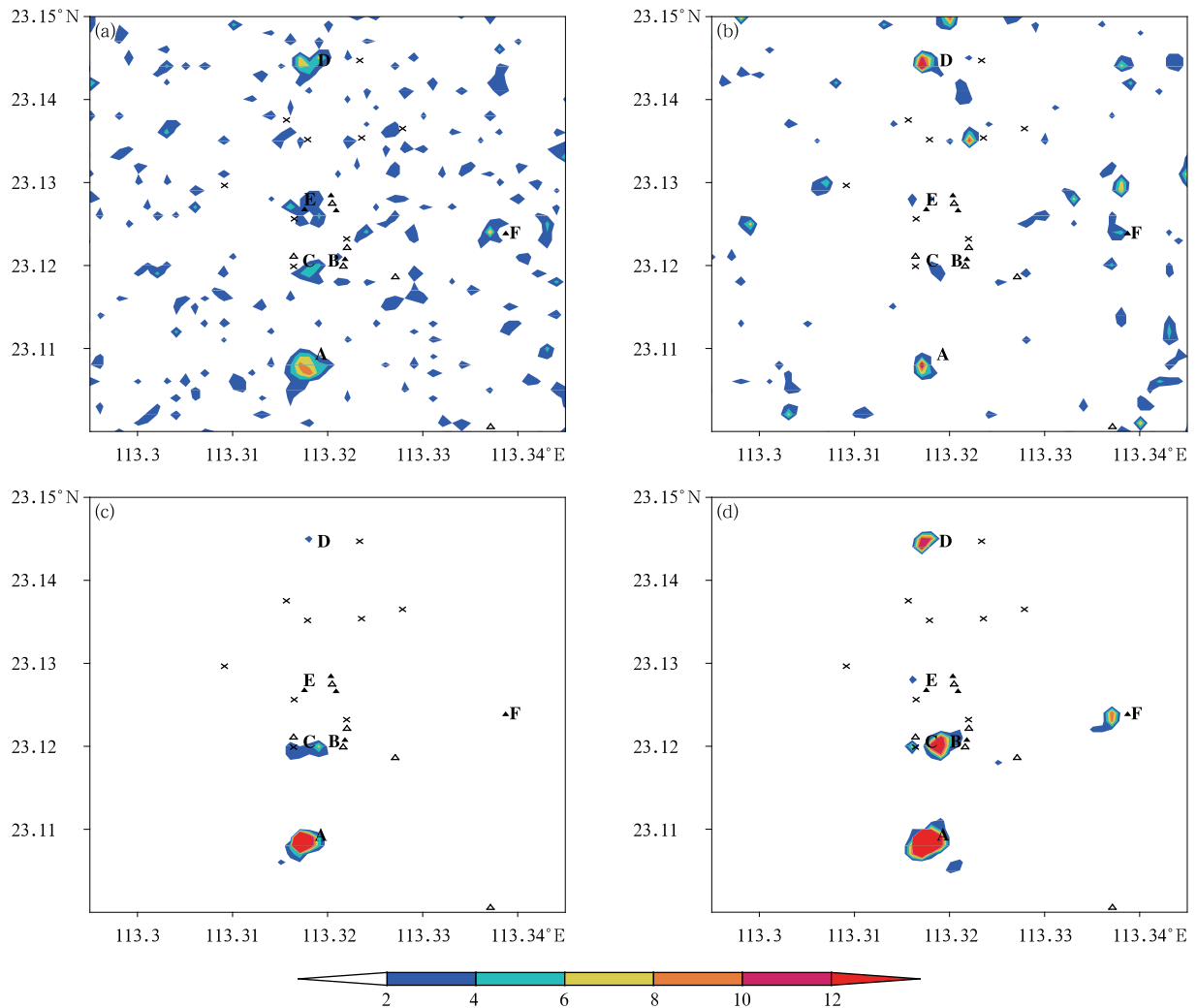


图 4 2014—2018 年广州高建筑物区域 S1(a)、S2(b)、S3(c)和 S4(d)类型回击的频次分布

(网格尺寸  $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ , 字母 A 到 E 代表高度不低于 350 m 的建筑, 实心三角、空心三角和交叉号分别代表高度在 300~349 m, 250~299 m 以及 200~249 m 的建筑)

Fig. 4 Frequency distribution of strokes of type S1(a), S2(b), S3(c) and S4(d) in Guangzhou tall-object area

(the cell size is  $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ , A—E denote buildings with heights no less than 350 m, the solid triangle, hollow triangle and the cross symbols denote buildings with heights within ranges of 300—349 m, 250—299 m and 200—249 m, respectively)

### 3.2 孤立高建筑物附近闪电定位记录特征

建筑物遭受雷击的类型、次数及其与建筑物高度的关系一直是雷电物理和防雷工程中非常关注的问题<sup>[3]</sup>。由图 4 中可以看到, 广州周大福金融中心(B)、广州国际金融中心(C)和广晟国际大厦(E)附近不远处都有较为密集的高建筑物存在, 而广州塔(A)、中信广场(D)和广发证券大厦(F)3 个高建筑物则相对较为孤立。下面利用粤港澳闪电定位资料对这 3 个不同高度建筑物的雷击情况进行对比。

吴姗姗等<sup>[21]</sup>利用 2009—2014 年的 TOLOG 光学观测资料, 发现广州塔对附近区域下行地闪的吸

引作用使其附近约 1 km 范围内未观测到地闪, 可以看到, 高建筑物对其周围的雷电具有较强的“汇集”效应。根据 2.2 节的分析, 粤港澳闪电定位系统对广州高建筑物地闪回击的定位误差的中值不超过 200 m, 而且在经过系统偏差校正后, 定位误差还会继续降低。因此, 可以认为广州塔、中信广场和广发证券大厦等孤立高建筑物附近 200 m 范围内的闪电定位记录被附近雷电活动“污染”的概率较小。

考虑到粤港澳闪电定位系统对高建筑物雷电的定位结果可能存在系统性误差, 采用均值漂移(mean shift)算法<sup>[22]</sup>对广州塔、中信广场和广发证

券大厦附近的闪电回击记录(S1~S4 的总和)密度中心进行解算,在算法中将各高建筑物所在的经纬度作为位置解算的初始值,跟踪窗半径设置为 200 m。图 5 为这 3 个高建筑物附近闪电密度中心周围 200 m 和 500 m 半径范围内 S1~S4 类闪电回

击记录的分布情况,由于广发证券大厦于 2016 年初才建成,所以图 5c 中给出的是 2016—2018 年的结果。可以直观地看到,均值漂移算法能较好地识别孤立高建筑物引起的闪电密度高值中心。

表 3 中列出了 3 个高建筑物附近闪电定位记录

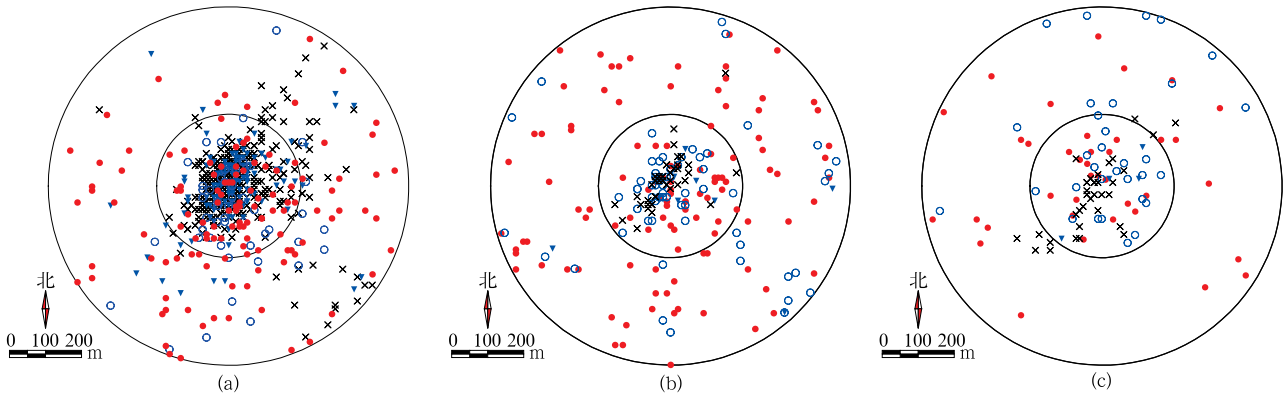


图 5 2014—2018 年广州塔(a)、中信广场(b)和 2016—2018 年广发证券大厦(c)附近闪电密度中心周围 200 m 和 500 m 半径范围内的定位记录 (实心圆、空心圆、实心倒三角和交叉号分别代表 S1, S2, S3, S4 类回击)

Fig. 5 Lightning location plots within a radius of 200 m and 500 m around the lightning density center produced by the Canton Tower(a), the CITIC Plaza(b) during 2014—2018, and the GF Securities Headquarters during 2016—2018(c) (the solid circle, hollow circle, solid inverted triangle and the cross symbols denote the stroke records belonging to class S1, S2, S3, S4)

表 3 广州塔、中信广场和广发证券大厦附近闪电定位记录密度中心周围不同距离范围内年平均回击次数对比  
Table 3 Comparison of annual number of strokes within different distance ranges around the stroke records center near the Canton Tower, the CITIC Plaza and the GF Securities Headquarters

| 高建筑物   | 距离闪电密度中心的半径 $d/m$  | 年平均回击次数 |     |      |      |       |
|--------|--------------------|---------|-----|------|------|-------|
|        |                    | S1      | S2  | S3   | S4   | 合计    |
| 广州塔    | $d < 200$          | 12.4    | 7.2 | 23.0 | 88.4 | 131.0 |
|        | $200 \leq d < 500$ | 12.6    | 3.0 | 3.8  | 9.2  | 28.6  |
| 中信广场   | $d < 200$          | 8.0     | 8.4 | 1.4  | 8.4  | 26.2  |
|        | $200 \leq d < 500$ | 14.0    | 4.6 | 0.6  | 0.2  | 19.4  |
| 广发证券大厦 | $d < 200$          | 6.0     | 7.0 | 1.7  | 9.0  | 23.3  |
|        | $200 \leq d < 500$ | 6.7     | 3.7 | 0.0  | 2.7  | 13.0  |

密度中心周围 200 m 范围内以及 200~500 m 范围内不同类型回击记录的年平均次数。可以看到,大部分的闪电定位记录都集中于各高建筑物闪电密度中心周围 200 m 半径范围以内。总体上,广州塔闪电密度中心 200 m 半径范围内的年均总回击次数约为其余两个高建筑物的 5 倍。

需要指出的是,由于广州塔等 3 个高建筑物的高度均超过 300 m,因此,它们不仅会拦截周围的下行闪电,还会产生上行闪电<sup>[23]</sup>。根据 2.3 节的分析,当遭受雷击的建筑物的高度不低于 200 m 时,

对于下行闪电首次回击,粤港澳闪电定位系统通常可正确地将其识别为地闪(准确率达到 80% 以上),而对于上行闪电回击则基本上会将其误判为云闪(误判率达 83%)。因此,可以认为这 3 个高建筑物附近的 S1 类和 S3 类回击记录数量在很大程度上反映了该建筑物上发生的下行闪电和上行闪电的次数。由表 3 可以看到,广州塔闪电密度中心 200 m 半径范围内的 S3 类回击次数大约是 S1 类回击次数的两倍,而中信广场和广发证券大厦附近 S3 类回击次数不到 S1 类回击次数的 1/3。这说明广州塔上

发生的闪电的主要类型为上行闪电,而中信广场和广发证券大厦上发生更多的是下行闪电。

现行的国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)62305 系列国际防雷标准认为建筑物的年预计雷击次数等于建筑物对周围雷电的等效截收面积与当地平均地闪密度的乘积,而高度为  $H$  的孤立建筑物的雷电截收面积等于该建筑物周边外扩至  $3H$  宽度后形成的闭合图形的面积(对于垂直尺度远大于水平尺度的孤立高耸建筑物,则近似为半径为  $3H$  的圆形)。可以看出,按照 IEC 标准的观点,孤立高耸建筑物拦截的闪电次数与其高度的平方近似成正比。广州塔的高度约为中信广场和广发证券大厦的 1.5 和 2 倍,广州塔闪电密度中心 200 m 半径范围内的 S1 类回击次数是其余两个高耸建筑物的 1.5 倍和 2 倍,而 S3 类回击次数则达到后两者的 10 倍以上。这表明高耸建筑物不同类型(上行或下行)的雷电次数与建筑物高度的关系十分复杂,未必遵循同样的规律,还需要更深入研究。

#### 4 结论与讨论

本文根据 2016—2017 年 TOLOG 获取的地闪观测资料对粤港澳闪电定位系统的探测性能进行评估,并基于 2014—2018 年的粤港澳闪电定位系统历史资料对广州高耸建筑物区域闪电分布特征进行初步分析,结果表明:

1) 粤港澳闪电定位系统对下行负极性闪电、上行负极性闪电以及下行正极性闪电的闪电探测效率(回击探测效率)分别为 95%(93%)、96%(97%)和 56%(56%)。

2) 粤港澳闪电定位系统对下行负极性闪电首次回击、继后回击以及上行负极性闪电回击的定位误差平均值(中值)分别为 361 m(188 m)、252 m(167 m)以及 294 m(173 m)。

3) 当接地点高度低于 200 m 时,粤港澳闪电定位系统对下行负极性闪电首次回击、继后回击的云闪/地闪识别正确率分别为 99%(83/84)和 93%(117/126),当接地点高度不低于 200 m 的则分别为 80%(33/41)和 35%(19/54),上行负极性闪电回击的云闪/地闪识别正确率仅为 17%(16/94),在广州高耸建筑物区域的绝大部分负极性云闪定位记录实际上是高耸建筑物地闪回击。

4) 广州塔(600 m)闪电密度中心 200 m 半径范

围内年均回击次数约为中信广场(390 m)和广发证券大厦(308 m)的 5 倍,推测广州塔闪电的主要类型为上行闪电,而中信广场和广发证券大厦则为下行闪电。

总体上,粤港澳闪电定位系统的探测效率和定位精度较好,但对高于 200 m 的建筑物上发生的继后回击的云闪/地闪识别准确率较低。这可能是由于高耸建筑物的存在,导致继后回击的电磁场波形存在明显的提前过零特征<sup>[24-25]</sup>,因此,闪电定位系统易将其误判为云闪放电。在下一步工作中,通过开展高耸建筑物雷电观测试验,积累更多的观测样本,深入分析高耸建筑物地闪回击与云闪放电之间的电磁场波形特征差异,为改进闪电定位系统的云闪/地闪识别方法提供更可靠的依据。

#### 参考文献

- [1] Eriksson A J. Lightning and tall structures. *Trans South Afr IEE*, 1978, 69(Pt 8): 238-252.
- [2] Rakov V A, Uman M A. Lightning, Physics and Effects. New York: Cambridge University Press, 2003.
- [3] Shindo T. Lightning striking characteristics to tall structures. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2018, 13(7): 938-947.
- [4] 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(D19), DOI:10.1029/2012JD018035.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [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] Zhang Y J, Lu W T, Chen L W, et al. Performance Characteristics of the Lightning Location System of Guangdong-Hongkong-Macau after the Upgrade in 2012. 24th International Lightning Detection Conference, San Diego, California, USA, 2016.
- [17] Nag A, Murphy M J, Cummins M L, et al. Recent Evolution of the US National Lightning Detection Network. 23th International Lightning Detection Conference, Tucson, Arizona, USA, 2014.
- [18] 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.
- [19] 王智敏, 吕伟涛, 陈绿文, 等. 2011—2012年广州高建筑物雷电磁场特征统计. *应用气象学报*, 2015, 26(1): 87-94.
- [20] Cummins K L, Murphy M J. An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the US NLDN. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 2009, 51(3): 499-518.
- [21] 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.
- [22] Cheng Y Z. Mean shift, mode seeking, and clustering. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(8): 790-799.
- [23] 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.
- [24] Pavanello D, Rachidi F, Janischewskyj W, et al. On return-stroke currents and remote electromagnetic fields associated with lightning strikes to tall structures. Part II: Experiment and model validation. *J Geophys Res*, 2007, 112, D13122, DOI: 10. 1029/2006JD007959.
- [25] 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.

## Detection Results of Guangdong-Hongkong-Macao Lightning Location System for Tall-object Lightning

Chen Lüwen<sup>1)2)</sup> Lü Weitao<sup>2)</sup> Zhang Yijun<sup>3)</sup> Ma Ying<sup>2)</sup> Qi Qi<sup>2)</sup> Wu Bin<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (*Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080*)

<sup>2)</sup> (*Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering/State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

<sup>3)</sup> (*Department of Atmospheric and Oceanic Sciences & Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438*)

### Abstract

Tall-object lightning is one hot topic in the field of atmospheric electricity. In order to explore the application of Guangdong-Hong Kong-Macao Lightning Location System (GHMLLS) data on tall-object lightning, the performance of GHMLLS is evaluated based on the observation obtained at the Tall-Object Lightning Observatory in Guangzhou (TOLOG) during 2016 to 2017, and a preliminary comparative analysis on characteristics of lightning activities in the tall-object area in Guangzhou are made. Results show that the flash detection and the stroke detection of GHMLLS is about 93% (214/229) and 93% (449/481). The arithmetic mean (median) value of the location error is about 361 m(188 m), 252 m(167 m) and 294 m(173 m) for downward first negative strokes, downward subsequent negative strokes and upward negative strokes respectively. It is found that the cloud-to-ground (CG) lightning with higher grounding points are more likely to be misidentified as intro-cloud (IC) lightning by the GHMLLS. When the grounding point is (is not) lower than 200 m, the identification accuracy of the IC/CG classification is 99% (80%) and 93% (35%), respectively, for downward first negative strokes and the subsequent negative strokes. The accuracy of the IC/CG classification for upward negative strokes is found to be only 17%. According to statistical results of GHMLLS dataset from 2014 to 2018, negative IC records in tall-object area in Guangzhou are found to be more prominently gathered near buildings with height over 300 m than CG records, indicating that most negative IC records are actually tall-object strokes but just misjudged by GHMLLS. Mean shift algorithm is used to identify the lightning density centers of three relatively isolated tall buildings, namely the Canton Tower (600 m), the CITIC Plaza (390 m) and the GF Securities Headquarters (308 m). It's found that the number of strokes within the radius of 200 m in the lightning density center of the Canton Tower is about 5 times as much as that of the CITIC Plaza or the GF Securities Headquarters. It is speculated that most lightning occurred on the Canton Tower belonging to upward type, while those hitting the CITIC Plaza and the GF Securities Headquarters are mainly downward type.

**Key words:** Guangdong-Hongkong-Macao Lightning Location System; tall-object; return stroke; performance evaluation