

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.
DOI: 10.11898/1001-7313.20220307

基于人工引雷的粤港澳闪电定位系统性能评估

张悦¹⁾ 吕伟涛^{1)*} 陈绿文²⁾ 武斌¹⁾ 齐奇¹⁾ 马颖¹⁾
张阳¹⁾ 郑栋¹⁾ 颜旭²⁾ 孟青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 510641)

摘要

利用 2014—2019 年中国气象局雷电网野外科学试验基地广州从化人工触发闪电试验所获资料, 评估粤港澳闪电定位系统 (Guangdong-Hongkong-Macau Lightning Location System, GHMLLS) 性能, 结果表明: GHMLLS 对人工触发闪电和回击的探测效率分别为 96% (48/50) 和 88% (233/265), 回击位置定位误差的算术平均值、几何平均值和中值分别为 279 m, 193 m 和 202 m。对于触发闪电的回击过程, GHMLLS 探测的回击电流峰值 (I_{LLS}) 全部偏低, 与通道底部雷电流峰值的直接测量结果 (I_{DM}) 相比, I_{LLS} 的相对偏差平均值 (中值) 为 -37% (-36%), 但 I_{LLS} 和 I_{DM} 相关系数为 0.93, 存在显著正相关关系 (达到 0.01 显著性水平); 截距为 0 的线性拟合结果表明 I_{LLS} 与 I_{DM} 存在 65% 的比例关系, 利用该系数校正 I_{LLS} , 结果的相对偏差绝对值的平均值 (中值) 为 15% (12%)。GHMLLS 有对应定位记录的 233 次触发闪电回击中, 16 次定位结果为云闪, 判别正确率为 93%。被误判为云闪的回击的 I_{DM} 更低, 可用于定位的站点数量更少, 定位误差更大, I_{LLS} 的精度更低。

关键词: 闪电定位系统; 触发闪电; 探测效率; 定位精度

引言

闪电定位系统是目前雷电监测的主要手段, 其观测资料可用于雷电灾害防护、对流天气监测预警及云物理和闪电活动特征等方面研究^[1-3]。闪电定位系统探测性能的检验是有效应用闪电定位资料的重要依据, 也能够为系统升级改进提供可参考的量化指标。近年国内外学者利用多种资料和方法对闪电定位系统进行评估^[4-12], 其中人工触发闪电和高塔 (或高建筑物) 闪电的观测资料具有可准确测量且拥有真值的特征。

人工触发闪电指在适宜雷暴条件下人为引发到地面的闪电^[13], 可直接利用电流传感器测量其雷电流^[14-15]。触发闪电过程不包含自然下行地闪的首次

回击, 与自然上行闪电过程类似^[16], 通常由初始阶段开始, 伴随初始连续电流和初始连续电流脉冲发展入云, 后续可能包含下行先导/回击等过程^[17]。由于人工触发闪电发生位置已知、时间可测, 通道电流可直接测量^[18-19], 因此作为校验闪电定位系统性能的有效手段, 可得到真实客观的结果。已有许多学者利用该方法对国内外多套闪电定位系统的探测效率、定位精度、电流峰值反演结果 (I_{LLS}) 的精度、云闪/地闪判别的正确率进行评估^[13, 20-25]。

粤港澳闪电定位系统 (Guangdong-Hongkong-Macau Lightning Location System, GHMLLS) 是对广东地区雷电活动进行实时监测的业务系统之一。本文基于 2014—2019 年中国气象局雷电网野外科学试验基地广州从化人工触发闪电试验所获资料, 对 GHMLLS 的探测性能进行评估。

2022-01-07 收到, 2022-03-28 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划 (2017YFC1501504), 国家自然科学基金项目 (42175108), 中国气象科学研究院基本科研业务费专项 (2021Z011), 中国铁道科学研究院集团有限公司院基金课题 (2020YJ171)

* 通信作者, 邮箱: wtlu@ustc.edu

1 资料和方法

1.1 GHMLLS 简介

GHMLLS 采用芬兰维萨拉公司的产品,由粤港澳三地的气象部门共同建设。截至 2012 年,系统共有 17 个探测子站^[11]。2018 年该系统增加两个探

测子站^[26]。GHMLLS 采用时差-方向综合定位方法,可实时探测云闪、地闪及回击所在位置的经纬度、GPS 时间、极性、电流强度,并可区分云闪和地闪。图 1 为 GHMLLS 探测子站及人工触发闪电试验场分布。由图 1 可以看到, GHMLLS 有 15 个站位于试验场偏南方向,各站与试验场的距离为 28~260 km,平均距离为 146 km。

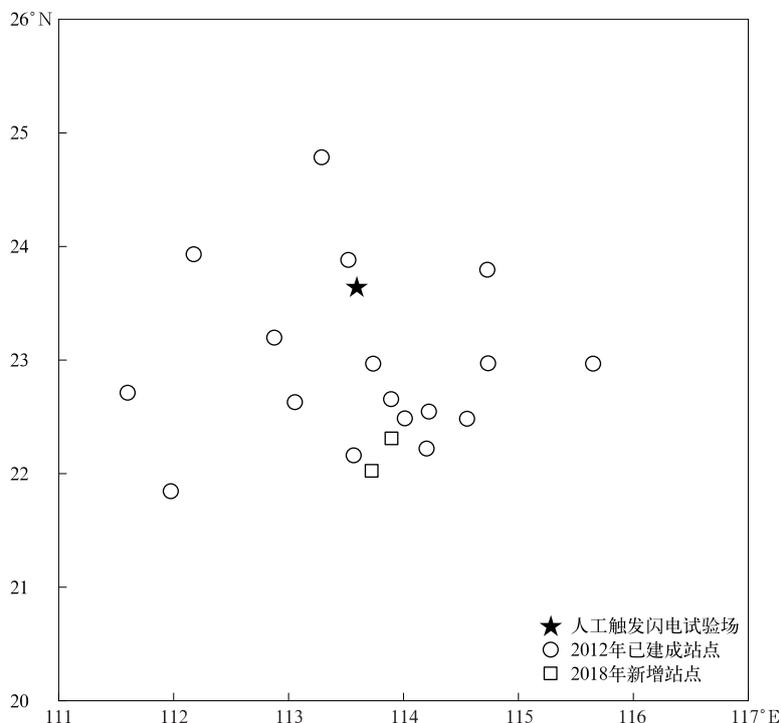


图 1 GHMLLS 探测子站分布及人工触发闪电试验场位置

Fig. 1 Distribution of sensors in GHMLLS and experiment site for artificially triggered lightning

已有研究利用不同资料对 GHMLLS 探测能力进行评估: Zhang 等^[11]利用 2012—2014 年人工触发闪电资料评估 2012 年升级后 GHMLLS 的探测效率、定位精度和 I_{LLS} 精度,发现探测能力明显提高,但 I_{LLS} 偏低;郭宏博等^[27]利用 2016 年深圳高塔雷电观测系统资料对 GHMLLS 进行评估,发现回击探测效率约为 92.9% (13/14), GHMLLS 定位误差小于 300 m;陈绿文等^[26]利用 2016—2017 年广州高建筑物雷电观测资料对 GHMLLS 进行评估,结果显示 GHMLLS 的闪电和回击探测效率分别为 93% (214/229) 和 93% (449/481), 对下行闪电首次回击的定位误差平均值为 361 m, 下行闪电继后回击和上行闪电回击的定位误差均在 300 m 以内。

1.2 人工触发闪电试验

本研究的人工触发闪电资料来自在中国气象局雷电野外科学试验基地广州从化人工引雷试验场的外场试验,该试验场位于广州从化北部的光联村,自 2006 年初次引雷成功以来持续进行,为研究雷电的物理特性、开展各种雷电防护和效应试验提供了有利条件。试验采用火箭拖带细金属导线的方法,包括地面触发和空中触发两种方式,其中地面触发闪电的接地地点为引流杆,空中触发闪电的雷击位置存在不确定性^[23]。试验中,人工触发闪电的雷电流、电场、磁场、GPS 时间信息通过示波器进行同步记录,且同时利用高速摄像和普通摄像机在一定距离远处的光学观测点进行记录^[28-29]。

评估中仅选择接地点在引流杆上、含有回击过程、拥有雷电流波形资料的地面触发闪电个例,且排除 GHMLLS 系统调试和维护时段。2014—2019 年资料中共选取 50 次符合上述标准的地面触发闪电。

图 2a 是 50 次触发闪电的回击数量分布。由图

2a 可知,50 次触发闪电共包含 265 次回击,其中 16%(8/50)只有 1 次回击,84%(42/50)具有多次回击,在 42 次具有多次回击的触发闪电事件中,具有 3 次回击的比例最高,约为 17%;单次触发闪电中包含的回击数量最多为 14 次。图 2b 为回击间时间间隔分布,时间间隔多低于 100 ms,最大值为 503 ms。

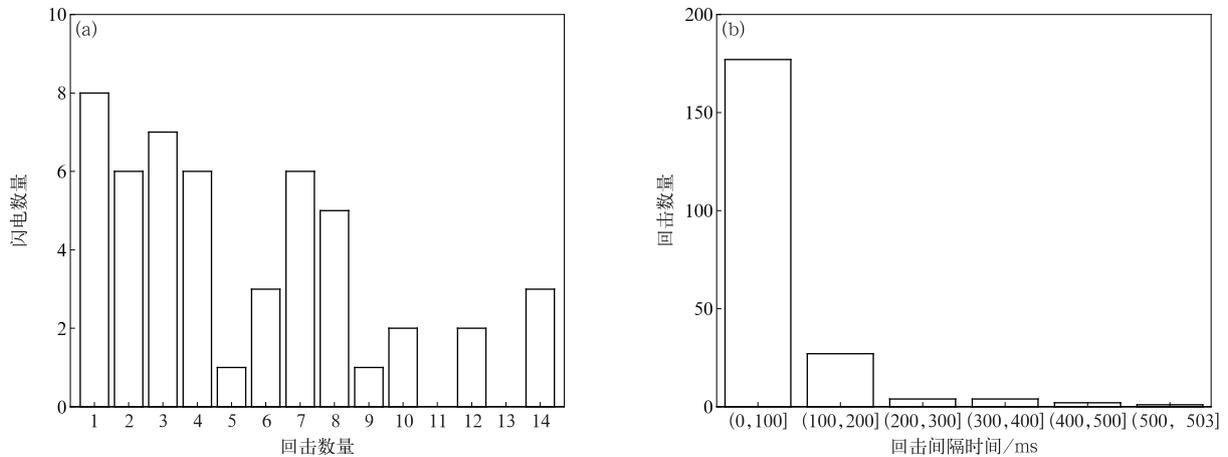


图 2 50 次人工触发闪电回击数量(a)和回击间时间间隔(b)

Fig. 2 Number of return strokes in 50 artificially triggered lightning flashes(a) and time interval between return strokes(b)

1.3 研究方法

为利用人工触发闪电对 GHMLLS 探测性能进行评估,需将 50 次触发闪电与 GHMLLS 的探测结果进行匹配,方法与 Chen 等^[22]类似:确认每次触发闪电回击的 GPS 时间,在 GHMLLS 定位记录中搜索与回击事件的时间偏差不超过 2 ms 的定位匹配记录,将与引流杆之间的距离超过 50 km 的记录剔除。

利用经过匹配后的记录可从探测效率、定位精度、回击 I_{LLS} 的精度、云闪/地闪判别 4 个角度对 GHMLLS 在 2014—2019 年的探测性能进行评估。

2 GHMLLS 性能评估

2.1 探测效率

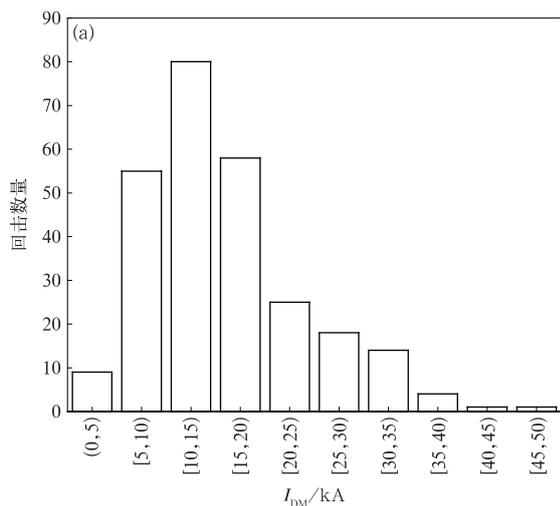
表 1 是 2014—2019 年 GHMLLS 对人工触发闪电的探测情况,表中 LLS(lightning location system, 闪电定位系统)-CG 和 LLS-IC 分别表示被 GHMLLS 判别为地闪回击和云闪的记录。50 次触发闪电 GHMLLS 有定位记录的为 48 次(96%), 265 次回击 GHMLLS 有定位记录的为 233 次(88%)。由表 1 可知,对于触发闪电的探测效率,

表 1 2014—2019 年 GHMLLS 对人工触发闪电的探测
Table 1 GHMLLS detection of flashes and return strokes in artificially triggered lightning experiment during 2014—2019

年份	人工触发闪电		GHMLLS 探测			GHMLLS 探测效率/%	
	闪电数量	回击数量	闪电数量	LLS-CG 数量	LLS-IC 数量	闪电	回击
2014	7	34	6	28	0	86	82
2015	13	80	12	62	3	92	81
2016	3	14	3	8	0	100	57
2017	7	38	7	26	9	100	92
2018	6	27	6	27	0	100	100
2019	14	72	14	66	4	100	97

2015年较低,为92%,2014年最低,仅为86%,2016—2019年均达到100%;对于回击探测效率,除2016年仅为57%外,其他5年均均在80%以上。各年闪电和回击探测效率间差异较大可能由样本量不同导致。

对于2014—2019年人工触发闪电过程的265次回击,电流峰值直接测量值(I_{DM})的分布如图3a所示。由图3a可以看到,人工触发闪电回击的 I_{DM} 为3.1~46.0 kA,算术平均值为15.8 kA,几何平均值为14.0 kA,且主要集中在5~20 kA,其中10~



15 kA回击数量最多。

图3b为GHMLLS在 I_{DM} 各回击探测效率。由图3b可知,当回击 $I_{DM} > 35$ kA时,回击探测效率为100%(6/6);当回击 I_{DM} 为5~35 kA时,探测效率在各区间均达到78%以上;当回击 $I_{DM} < 5$ kA时,探测效率最低,为11%(1/9)。因此,回击 I_{DM} 较小时,GHMLLS的探测效率较低。若仅统计2014—2019年 $I_{DM} > 5$ kA的256次人工触发闪电回击事件,GHMLLS的回击探测效率可达91%(232/256)。

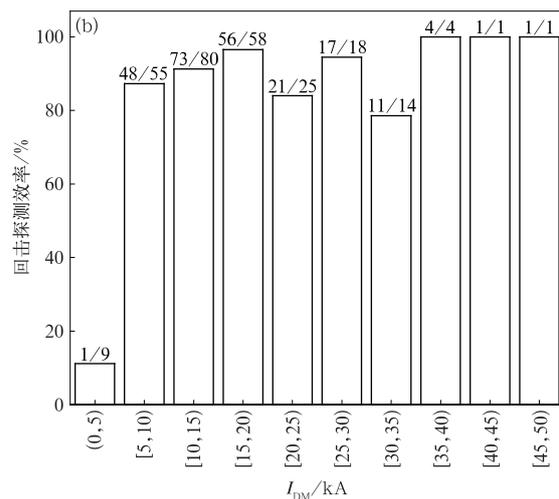


图3 50次人工触发闪电中265次回击的 I_{DM} 分布(a)和GHMLLS在各区间回击的探测效率(b)

Fig. 3 Distribution of I_{DM} of 265 return strokes in 50 artificially triggered lightning flashes(a) and corresponding GHMLLS detection efficiency(b)

2.2 定位精度

本文265次人工触发闪电回击中,233次有对应的GHMLLS定位记录,其定位误差为8~4410 m。图4为GHMLLS探测子站和2014—2019年265次人工触发闪电回击定位位置分布及各方向定位误差箱线图。由定位位置8 km×8 km及2 km×2 km放大图可知,GHMLLS定位的多数回击相对于真实值均偏向西南方向,占总数的75%(174/233),这和陈绿文等^[26]基于2016—2017年广州高建筑物地闪个例对GHMLLS的评估结果相似;其中LLS-CG和LLS-IC的偏西南方向的数量均分别占总数的75%。由各方向定位误差箱线图可知,GHMLLS探测的相较于真实值偏西南方向的回击定位误差平均值最小,为233 m;偏东南方向的回击定位误差平均值最大,为673 m。总体看,GHMLLS对人工触发闪电回击的定位误差算术平均值和几何平

均值分别为279 m和193 m,中值为202 m;定位误差在200 m以内的数量约占总数的50%,500 m以内的数量约占总数的90%。

将233次人工触发闪电回击的GHMLLS定位位置的算术平均值与实际雷击位置进行对比,发现存在西南方向的系统偏差,偏西约170 m和偏南约50 m。利用该系统偏差对233次定位结果逐条进行校正,重新计算的定位误差算术平均值和几何平均值分别为198 m和108 m,中值为103 m;定位误差在100 m以内的数量约占总数的50%,200 m以内的数量约占总数的80%。

2014—2019年GHMLLS对人工触发闪电回击定位中,约85%由5个及以上站点探测得到,其定位误差的算术平均值和几何平均值分别为233 m和171 m。图5a为GHMLLS对人工触发闪电回击的定位误差与探测站点数量的散点图。由图5a可

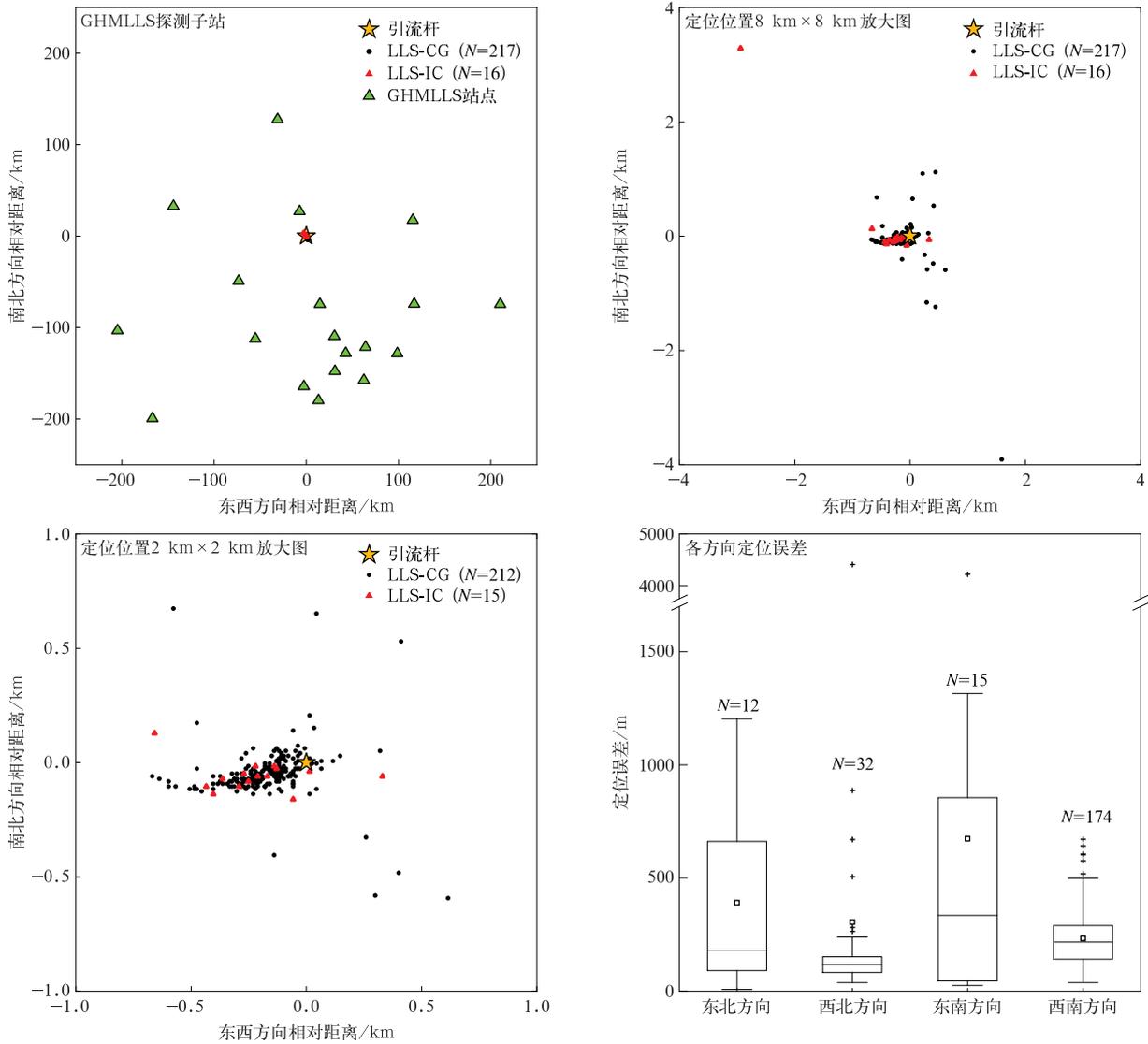


图 4 GHMLLS 探测子站和 2014—2019 年 265 次人工触发闪电回击定位位置分布及各方向定位误差箱线图
(N 为样本量, + 为异常值, 下同)

Fig. 4 Location of GHMLLS sensors and reported locations for 265 return strokes in artificially triggered lightning and box plot of location errors in four directions during 2014–2019
(N denotes sample size, + denotes outliers, the same hereinafter)

以看到,定位误差最大的两次记录中可用于定位的站点分别为 4 站和 6 站,且 LLS-IC 主要被 6 个及以下站点探测到,大多数记录的定位误差低于 500 m。图 5b 为利用定位站点数量对定位误差分类的箱线图。由图 5b 可知,定位误差的最小值为 8 m,最大值为 4410 m,算术平均值和几何平均值分别为 279 m 和 193 m,3~4 个站点的定位误差更大。随着定位站点数量的增加,3~6 个站的定位误差逐渐减小;6 站及以上站点数量的定位误差趋于稳定,中

值均小于 200 m。

将 233 次人工触发闪电回击的 GHMLLS 定位记录按照 I_{DM} 大小分为 10 类,分别统计其定位误差(图 6)。由图 6 可以看到,随 I_{DM} 的增大,定位误差总体呈减小趋势。 I_{DM} 大于 10 kA 的各组,定位误差的中值在 230 m 以内; I_{DM} 在 10 kA 以下的回击,定位误差平均值和中值分别为 349 m 和 332 m。若将各组内的异常值剔除,剩下的 221 次回击定位误差平均值和中值分别为 215 m 和 184 m。

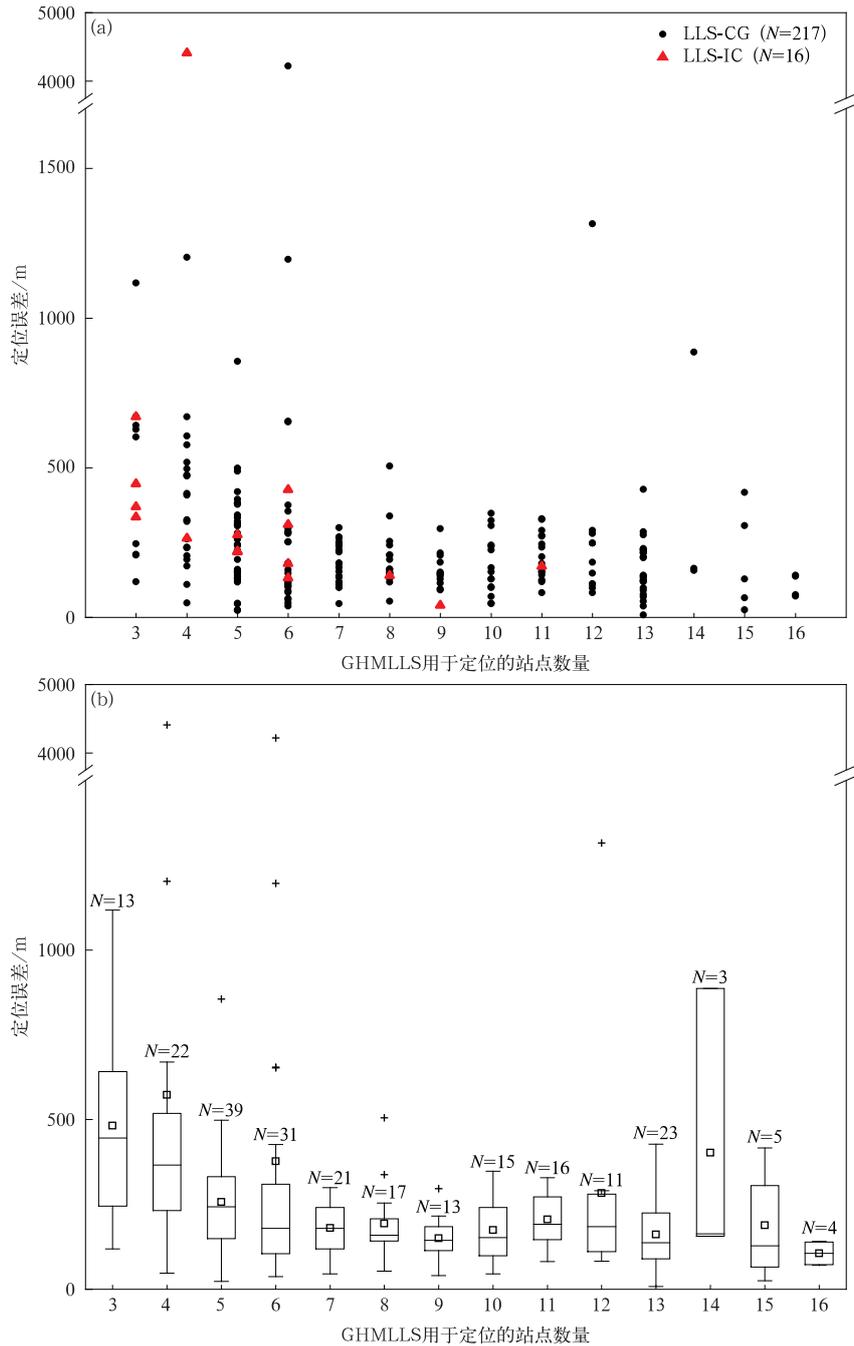


图 5 2014—2019 年 GHMLLS 对人工触发闪电回击的定位误差与探测站点数关系散点图(a)和箱线图(b)

Fig. 5 Scatter plot(a) and box plot(b) of relationship between the location error of GHMLLS for return strokes in artificially triggered lightning and number of reporting sensors during 2014—2019

2.3 I_{LLS} 的精度

GHMLLS 有定位记录的 233 次人工触发闪电回击, I_{DM} 为 4.5~46.0 kA, 图 7 为 2014—2019 年人工触发闪电回击探测的 I_{LLS} 和 I_{DM} 对比。由图 7 可知, GHMLLS 对人工触发闪电回击记录的 I_{LLS} 全

部偏低, I_{LLS} 和 I_{DM} 相关系数为 0.93, 存在显著正相关关系(达到 0.01 显著性水平); 通过截距为 0 的线性拟合, 二者关系为 $I_{LLS} = 0.65 \times I_{DM}$, R^2 为 0.97, 这与张悦等^[30]将广东电网闪电定位系统和 GHMLLS 资料进行对比的结果类似。对于 16 次 LLS-IC, I_{LLS}

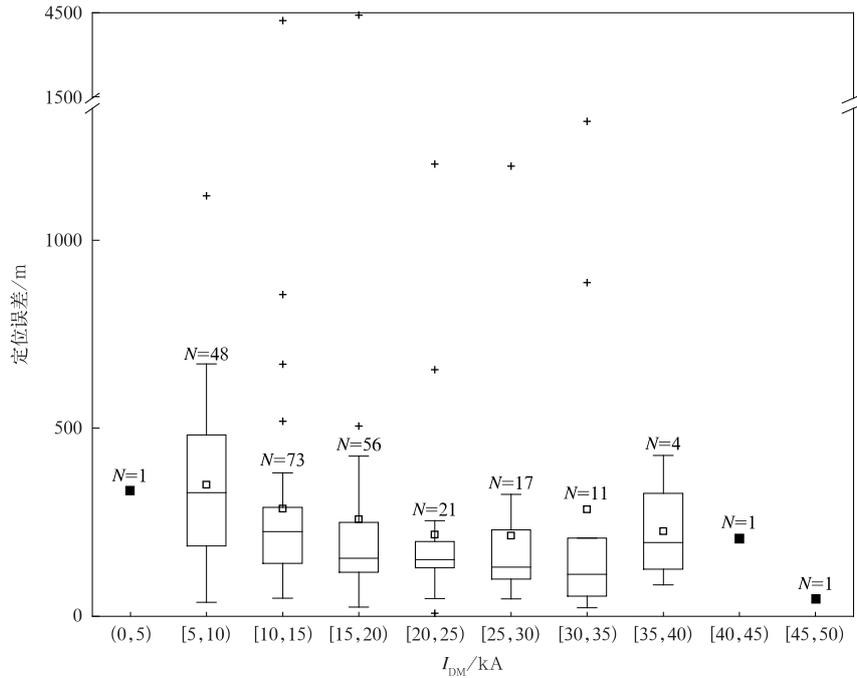


图 6 2014—2019 年 GHMLLS 对人工触发闪电回击事件定位误差与 I_{DM} 关系
(黑色小矩形表示仅有 1 个样本的类别)

Fig. 6 Box plot of relationship between the location error and I_{DM} during 2014—2019
(the small black rectangle denotes the category with only one sample)

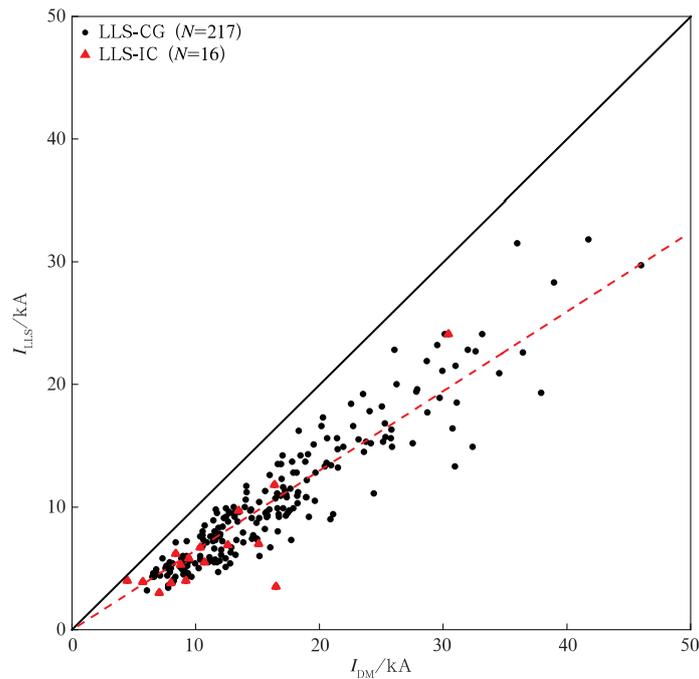


图 7 2014—2019 年人工触发闪电回击事件电流峰值的
GHMLLS 反演结果 I_{LLS} 和直接测量值 I_{DM} 对比

Fig. 7 Scatter plot of relationship between LLS-inferred peak current of GHMLLS (I_{LLS}) and direct measurement peak current (I_{DM}) during 2014—2019

和 I_{DM} 相关系数为 0.89, 存在显著正相关关系(达到 0.01 显著性水平); 通过截距为 0 的线性拟合, 二者关系为 $I_{LLS} = 0.63 \times I_{DM}$, R^2 为 0.91。

将 233 次回击按照 I_{DM} 大小分为 10 类, 分别统计每类 I_{LLS} 的相对偏差, 由于所有 I_{LLS} 均偏低, 因此相对偏差值均为负数。0~20 kA 范围内 I_{LLS} 的相对偏差较大, 平均值为 -38%; 20~50 kA 范围内相对偏差稍小, 平均值为 -33%。随 I_{DM} 增强, I_{LLS} 相对偏差的降低并不显著。整体看, 2014—2019 年 I_{LLS} 相对偏差为 -79%~-10%, 算术平均值和中值分别为 -37% 和 -36%。Zhang 等^[11] 利用 2012—2014 年 70 次人工触发闪电回击事件对 GHMLLS 的 I_{LLS} 精度进行评估, 得出其相对偏差绝

对值为 4%~76%, 平均值和中值分别为 39% 和 40%, 与本文结果差异不显著。

由以上分析可知, GHMLLS 的 I_{LLS} 整体上相对 I_{DM} 偏低约 35%, 应用 I_{LLS} 资料时建议除以 0.65 进行校正。校正后重新计算每次回击的 I_{LLS} 相对偏差, 仍对 10 类 I_{DM} 范围的相对偏差进行统计, 结果见图 8。由图 8 可知, 校正后 GHMLLS 的 I_{LLS} 相对偏差为 -67%~38%, 相对偏差绝对值为 0~67%, 算术平均值和中值分别为 15% 和 12%。

2.4 云闪/地闪判别

2014—2019 年 GHMLLS 对人工触发闪电回击的定位记录共 233 次, 云闪/地闪判别正确率如表 2 所示。由表 2 可知, GHMLLS 对人工触发闪电回

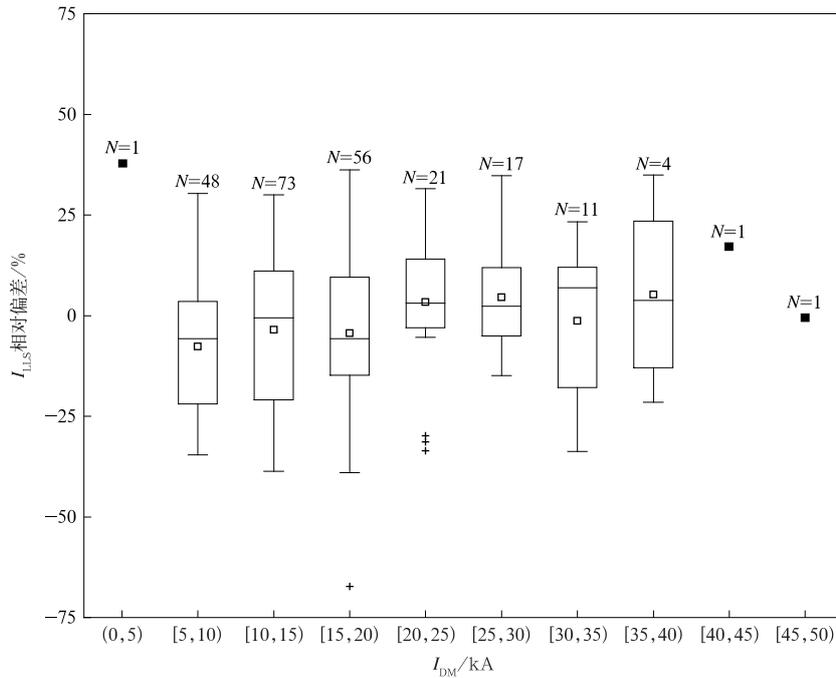


图 8 2014—2019 年 GHMLLS 对人工触发闪电回击的 I_{LLS} 校正后的相对偏差与 I_{DM} 关系 (黑色小矩形表示仅有 1 个样本的类别)

Fig. 8 Box plot of relationship between the error of I_{LLS} of GHMLLS after correction and I_{DM} during 2014—2019 (the small black rectangle denotes the category with only one sample)

表 2 2014—2019 年 GHMLLS 对人工触发闪电回击的云闪/地闪判别正确率
Table 2 Classification accuracy of cloud-to-ground and intra-cloud lightning detected by GHMLLS for return strokes in artificially triggered lightning during 2014—2019

年份	LLS-CG 数量	LLS-IC 数量	回击判别正确率/%
2014	28	0	100
2015	62	3	95
2016	8	0	100
2017	26	9	74
2018	27	0	100
2019	66	4	94

击事件的判别正确率在2014,2016年和2018年均达到100%,2014—2019年GHMLLS的判别正确率为93%。

将GHMLLS有对应定位记录的233次回击中217次LLS-CG和16次LLS-IC分别统计,结果如表3所示。由表3可知,LLS-IC的 I_{DM} 和 I_{LLS} 的平均值(中值)分别为LLS-CG的0.71倍(0.66倍)和

0.66倍(0.61倍);LLS-IC的 I_{LLS} 的相对偏差平均值为LLS-CG的1.1倍;LLS-IC的定位站点数量平均值为LLS-CG的0.67倍;LLS-IC的定位误差平均值(中值)为LLS-CG的2.1倍(1.4倍)。

总体看,与LLS-CG相比,LLS-IC的 I_{DM} 更低,且可用于定位的站点数量更少、定位误差更大, I_{LLS} 的精度更低。

表3 2014—2019年人工触发闪电回击的LLS-CG和LLS-IC特征
Table 3 Characteristic statistics of return strokes in artificially triggered lightning of LLS-CG and LLS-IC from 2014 to 2019

统计量	LLS-CG		LLS-IC	
	平均值	中值	平均值	中值
I_{DM}/kA	16.5	14.9	11.7	9.9
I_{LLS}/kA	10.6	9.4	7.0	5.7
I_{LLS} 的相对偏差/%	-36.7	-35.8	-40.8	-39.2
定位站点数量	8.1	7	5.4	5
定位误差/m	260	193	538	270

3 结论

本文选取2014—2019年中国气象局雷电野外科学试验基地广州从化人工触发闪电试验的50次闪电个例,对GHMLLS探测性能进行评估分析,结果表明:

1) GHMLLS对人工触发闪电和回击的探测效率分别为96%(48/50)和88%(233/265);回击 I_{DM} 小于5 kA时探测效率最低(仅为11%),回击 I_{DM} 大于35 kA时,回击探测效率可达100%。

2) GHMLLS对人工触发闪电回击定位误差的算术平均值、几何平均值和中值分别为279 m,193 m和202 m;触发闪电试验场附近的定位存在西南方向的系统偏差,偏西约170 m和偏南约50 m,校正后定位误差的算术平均值、几何平均值和中值分别为198 m,108 m和103 m。

3) GHMLLS对人工触发闪电回击电流峰值的反演结果 I_{LLS} 全部偏低,与 I_{DM} 相比, I_{LLS} 相对偏差的平均值和中值分别为-37%和-36%,但 I_{LLS} 和 I_{DM} 相关系数为0.93,存在显著正相关关系(达到0.01显著性水平)。截距为0的线性拟合表明 I_{LLS} 与 I_{DM} 存在65%的比例关系,利用该系数对 I_{LLS} 的系统偏差进行校正,校正后 I_{LLS} 相对偏差绝对值的平均值和中值分别为15%和12%。

4) GHMLLS对人工触发闪电回击的判别正确率为93%(217/233),LLS-IC的 I_{DM} 更低,可用于定

位的站点更少,定位精度和 I_{LLS} 的精度更低。

总体上,GHMLLS的探测效率和定位精度较好,云闪/地闪判别正确率较高,但 I_{LLS} 存在明显系统偏差,使用GHMLLS的 I_{LLS} 资料时,建议将其除以0.65,以获得更为可靠的分析结果。为深入分析GHMLLS的 I_{LLS} 系统偏低的原因,下一步将通过开展人工触发闪电的远场电磁场测量,探讨影响 I_{LLS} 的不同因素。

参考文献

- [1] 田野,姚雯,尹佳莉,等.不同闪电跃增算法在北京地区应用效果对比.应用气象学报,2021,32(2):217-232.
Tian Y, Yao W, Yin J L, et al. Comparison of the performance of different lightning jump algorithms in Beijing. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(2): 217-232.
- [2] 赵伟,姜瑜君,童杭伟,等.浙江省两套闪电定位系统地闪数据对比.应用气象学报,2015,26(3):354-363.
Zhao W, Jiang Y J, Tong H W, et al. Comparative analysis of the cloud-to-ground lightning data between two lightning location systems. *J Appl Meteor Sci*, 2015, 26(3): 354-363.
- [3] 张义军,孟青,马明,等.闪电探测技术发展和资料应用.应用气象学报,2006,17(5):611-620.
Zhang Y J, Meng Q, Ma M, et al. Development of lightning detection technique with application of lightning data. *J Appl Meteor Sci*, 2006, 17(5): 611-620.
- [4] Orville R E. An analytical solution to obtain the optimum source location using multiple direction finders on a spherical surface. *J Geophys Res Atmos*, 1987, 92(D9): 10877-10886.
- [5] 陈明理,刘欣生,郭昌明,等.确定雷电定位系统场地误差的参数化方法.高原气象,1990,9(3):307-319.

- Chen M L, Liu X S, Guo C M, et al. A parameterization method of the site errors estimation of lightning location system. *Plateau Meteor*, 1990, 9(3): 307-319.
- [6] Brundell J B, Rodger C J, Dowden R L. Validation of single-station lightning location technique. *Radio Science*, 2002, 37(4): 11-12.
- [7] Berger G, Pedebay S. Comparison Between Real CG Flashes And CG Flashes Detected by A Lightning Detection Network. International Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE), Blackpool, UK, 2003.
- [8] Jerauld J, Rakov V A, Uman M A, et al. An evaluation of the performance characteristics of the US National Lightning Detection Network in Florida using rocket-triggered lightning. *J Geophys Res Atmos*, 2005, 110(D19): 1-16.
- [9] Nag A, Mallick S, Rakov V A, et al. Evaluation of US National Lightning Detection Network performance characteristics using rocket-triggered lightning data acquired in 2004-2009. *J Geophys Res Atmos*, 2011, 116(D2): 1-8.
- [10] Pohjola H, Mäkelä A. The comparison of GLD360 and EUCLID lightning location systems in Europe. *Atmos Res*, 2013, 123: 117-128.
- [11] 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.
- [12] Schulz W, Diendorfer G, Pedebay S, et al. The European lightning location system EUCLID—Part 1: Performance analysis and validation. *Nat Hazards and Earth Syst Sci*, 2016, 16(2): 595-605.
- [13] 张义军, 杨少杰, 吕伟涛, 等. 2006—2011年广州人工触发闪电观测试验和应用. *应用气象学报*, 2012, 23(5): 513-522.
Zhang Y J, Yang S J, Lü W T, et al. Comprehensive observation experiments and application study of artificially triggered lightning during 2006—2011. *J Appl Meteor Sci*, 2012, 23(5): 513-522.
- [14] 肖桐, 张阳, 吕伟涛, 等. 人工触发闪电 M 分量的电流与电磁场特征. *应用气象学报*, 2013, 24(4): 446-454.
Xiao T, Zhang Y, Lü W T. Current and electromagnetic field of M component in triggered lightning. *J Appl Meteor Sci*, 2013, 24(4): 446-454.
- [15] 张义军, 吕伟涛, 陈绍东, 等. 广东野外雷电综合观测试验十年进展. *气象学报*, 2016, 74(5): 655-671.
Zhang Y J, Lv W T, Chen S D, et al. A review of lightning observation experiments during the last ten years in Guangdong. *Acta Meteor Sinica*, 2016, 74(5): 655-671.
- [16] Rakov V A, Uman M A. *Lightning: Physics And Effects*//Cambridgeshire: Cambridge University Press, 2003.
- [17] 张义军, 张阳, 郑栋, 等. 2008-2014年广东人工触发闪电电流特征. *高电压技术*, 2016, 42(11): 3404-3414.
Zhang Y J, Zhang Y, Zheng D, et al. Current Characteristics of triggered lightnings in Guangdong from 2008 to 2014. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(11): 3404-3414.
- [18] 王敬轩, 张阳, 陈泽方, 等. 人工触发闪电不同放电阶段电流特征关系. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 224-235.
Wang J X, Zhang Y, Chen Z F, et al. Relationship between current characteristics of rocket-triggered lightning during different discharge stages. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 224-235.
- [19] 钱勇, 张阳, 张义军, 等. 人工触发闪电先驱电流脉冲波形特征及模拟. *应用气象学报*, 2016, 27(6): 716-724.
Qian Y, Zhang Y, Zhang Y J, et al. Characteristics and simulation of artificially triggered lightning precursor current pulse. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(6): 716-724.
- [20] 曹雪芬, 张源源, 刘三梅, 等. 闪电定位真实地表修订算法的检验评估. *广东气象*, 2021, 43(3): 47-50.
Cao X F, Zhang Y Y, Liu S M, et al. Evaluation of real surface revision algorithm for lightning location. *Guangdong Meteor*, 2021, 43(3): 47-50.
- [21] 陈绿文, 张义军, 吕伟涛, 等. 闪电定位资料与人工引雷观测结果的对比分析. *高电压技术*, 2009, 35(8): 1896-1902.
Chen L W, Zhang Y J, Lü W T, et al. Comparative analysis between LLS and observation of artificial triggered lightning. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(8): 1896-1902.
- [22] Chen L W, Zhang Y J, Lu W T, 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.
- [23] 禹继, 杨仲江, 陈绿文, 等. 粤港澳闪电定位系统探测效率及精确度评估. *高原气象*, 2015, 34(3): 863-869.
Yu J, Yang Z J, Chen L W, et al. Evaluation of detection efficiency and accuracy of lightning location system of Guangdong-Hongkong-Macau. *Plateau Meteor*, 2015, 34(3): 863-869.
- [24] Zhu Y, Rakov V A, Tran M D, et al. Evaluation of ENTLN performance characteristics based on the ground truth natural and rocket-triggered lightning data acquired in Florida. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122(18): 9858-9866.
- [25] Li Q X, Wang J G, Cai L, et al. On the return-stroke current estimation of Foshan Total Lightning Location System (FTLLS). *Atmos Res*, 2021, 248: 1-9.
- [26] 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.
Chen L W, Lü W T, Zhang Y J, et al. Detection results of Guangdong-Hongkong-Macao lightning location system for tall-object lightning. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 165-174.
- [27] 郭宏博, 邱宗旭, 杨悦新, 等. 粤港澳闪电定位系统与深圳高塔雷电光学观测对比分析. *广东气象*, 2017, 39(6): 60-63.
Guo H B, Qiu Z X, Yang Y X, et al. Comparative analysis of Guangdong-Hongkong-Macao lightning location system and lightning optical observation of the high tower in Shenzhen. *Guangdong Meteor*, 2017, 39(6): 60-63.

- [28] 陈绿文,黄智慧,禹继,等.一次人工触发闪电事件的定位误差分析.广东气象,2010,32(1):15-17.
Chen L W,Huang Z H,Yu J,et al. Location error analysis of a triggered lightning flash. *Guangdong Meteor*, 2010,32(1): 15-17.
- [29] 樊艳峰,陆高鹏,张阳,等.人工触发闪电初始连续电流的中低频磁场特征.应用气象学报,2020,31(2):213-223.
Fan Y F,Lu G P,Zhang Y,et al. Characteristics of medium-low frequency magnetic fields of initial continuous current in rocket-triggered lightning. *J Appl Meteor Sci*, 2020,31(2): 213-223.
- [30] 张悦,吕伟涛,陈绿文,等.粤港澳大湾区两套闪电定位系统地闪探测性能的对比分析.热带气象学报,2021,37(3):409-418.
Zhang Y,Lyu W T,Chen L W,et al. The comparative analysis of detection of cloud-to-ground lightning of two lightning location systems in Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area. *J Trop Meteor*, 2021,37(3):409-418.

Evaluation of GHMLLS Performance Characteristics Based on Observations of Artificially Triggered Lightning

Zhang Yue¹⁾ Lü Weitao¹⁾ Chen Lüwen²⁾ Wu Bin¹⁾ Qi Qi¹⁾ Ma Ying¹⁾
Zhang Yang¹⁾ Zheng Dong¹⁾ Yan Xu²⁾ Meng Qing¹⁾

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 510641)

Abstract

Artificially triggered lightning refers to the lightning that is artificially triggered to the ground under appropriate thunderstorm conditions. The location of artificially triggered lightning can be determined; the occurring time can be precisely stamped, and the channel-base current can be measured directly. Therefore, it's one of the effective methods to evaluate the performance of lightning location system (LLS). From the observations of artificially triggered lightning experiment conducted at the Field Experiment Base on Lightning Sciences, China Meteorological Administration from 2014 to 2019, 50 lightning flashes are selected to evaluate and analyze the performance characteristics of Guangdong-Hongkong-Macau Lightning Location System (GHMLLS).

The results show that the lightning detection efficiency and stroke detection efficiency are about 96% (48/50) and 88% (233/265), respectively. The arithmetic mean, geometric mean and median values of location error are 279 m, 193 m and 202 m, respectively. The results show that there is a systematic deviation to the southwest in GHMLLS observations around the triggered lightning experiment site, which is about 170 m to the west and 50 m to the south. After correction, the arithmetic mean, geometric mean and median values of location error are reduced to 198 m, 108 m and 103 m, respectively. The linear fitting result with intercept of 0 shows that the LLS-inferred peak current of GHMLLS is about 65% of the direct measurement value of the channel-base current. Meanwhile, the arithmetic mean (median) value of the LLS-inferred peak current error is -37% (-36%). However, there is a strong positive correlation and the correlation coefficient is 0.93. The arithmetic mean (median) value of the absolute value of the LLS-inferred peak current error is reduced to 15% (12%) when the ratio of 65% is used to correct them. Among 233 return strokes of triggered lightning flashes, 16 return strokes are mistakenly classified as intra-cloud lightning, so the return stroke classification accuracy of GHMLLS is 93%. The peak currents of these mistakenly classified return strokes are lower, the stations available for locating are fewer, and the errors of location and LLS-inferred peak current are larger.

In conclusion, GHMLLS have good detection efficiency and location accuracy. The return stroke classification accuracy of GHMLLS is at a high level as well. Nevertheless, there is an obvious systematic deviation in the LLS-inferred peak current of GHMLLS. In order to obtain more reliable analysis results, it's recommended to divide it by 0.65 when using the LLS-inferred peak current of GHMLLS.

Key words: lightning location system; triggered lightning; detection efficiency; location accuracy