

文章编号: 2096-1618(2024)05-0602-06

# 基于人工引雷数据的闪电探测效率及精度评估

蔚立存<sup>1,2</sup>, 李海雷<sup>1,3</sup>

(1. 山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2. 济南市气象局, 山东 济南 250000; 3. 山东省气象工程技术中心, 山东 济南 250031)

**摘要:** 利用在山东滨州沾化区人工引雷实验得到的 2017–2020 年 30 次闪电数据, 对比分析 ADTD 闪电定位系统在人工引雷场地及其相似地区的定位效率、定位精度及电流峰值偏差。结果表明 ADTD 对人工引雷触发闪电事件定位效率为 60% (即 18/30), 回击闪电定位效率为 88.89% (即 8/9), 回击过程定位效率 34.48% (10/29), ICC 闪电定位效率 47.62% (10/21)。定位精度 31.724 km, 负地闪定位精度高于正地闪, 2 站以上定位精度高于 2 站定位。电流峰值偏差 36.38%。

**关键词:** 人工引雷; ADTD 定位系统; 定位效率; 定位精度; 峰值偏差

**中图分类号:** P427.3

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcui.2024.05.013

## 0 引言

闪电是一种长距离放电事件, 是强对流天气的重要特征之一。随着电子设备的广泛应用, 闪电对人类的危害也越来越大, 被联合国定为最严重的 10 种自然灾害之一。雷电实时监测和雷电预警是众多防雷减灾的重要手段, 闪电定位系统是应用最广泛的实时监测手段之一<sup>[1]</sup>, 被广泛应用于雷电物理研究、雷电灾害调查鉴定、雷电灾害风险评估及雷电预警预报, 是防雷减灾、保障人民生命财产安全的重要手段之一。基于 VLF/LF 频段的雷电辐射信号发展出众多的区域性和世界性的雷电定位系统, 例如中国气象局闪电定位系统 (ADTD)、北京闪电综合探测网 (BLNET)、美国国家闪电定位网 (NLDN)、欧洲闪电定位网 (LINET)、全球闪电定位网 (WWLLN), 这些系统可以实时监测雷电对地放电的时间、极性、强度、位置等信息。

定位系统的探测性能是表征闪电定位系统效能的重要参数<sup>[1-2]</sup>。国内外众多学者利用各种方法对各种闪电定位系统进行评估<sup>[3-4]</sup>。陈绿文等<sup>[5-6]</sup>利用 2007–2008 年广州从化人工引雷资料评估了广东电网闪电系统的定位性能, 结果表明对闪电事件探测效率 93%, 对回击探测效率 42%, 平均定位误差 760 m, 电流峰值相对误差 14%; 利用 2008 年人工触发的一次多回击闪电事件评估了广东省气象闪电定位系统, 结

果表明回击探测效率 75%, 定位误差 3768 m, 并分析定位误差主要来源于误差范围较大的子站。禹继等<sup>[1]</sup>利用 2007–2011 年广州人工引雷及高建筑物自然闪电数据, 评估了粤港澳闪电定位系统探测效率及精确度, 认为闪电探测效率和回击探测效率分别为 74% 和 40%, 2012 年增加探测站点后提高到 97% 和 90%。张义军等<sup>[7]</sup>利用广东人工引雷 10 年数据评估了粤港澳闪电定位系统的探测效率, 闪电和回击探测效率分别为 96% 和 89%, 定位误差 532 m。Quanxin Li 等<sup>[8]</sup>利用人工引雷触发闪电电流回击模拟公式, 评估了佛山电网闪电定位系统, 结果表明闪电和回击探测效率分别为 87.5% 和 93%, 回击探测效率高于闪电探测效率, 与其他学者的研究相反。王志超等<sup>[2]</sup>利用京津冀地区闪电定位数据统计分析了北京地区 ADTD 闪电探测效率, 网内探测效率为 85% ~ 95%, 且探测效率在 60 ~ 80 km 最高, 距离增加或减小后明显降低, 该评估对象为 ADTD 的定位算法探测效率。Abhay Srivastava 等<sup>[9]</sup>对比了 ADTD、BLNET、WWLLN 3 套闪电定位系统, 认为北京地区 ADTD 总体探测效率为 49.4%。包坤等<sup>[10]</sup>利用广东潮汕机场的一次雷击事件对 ADTD 定位分析, 2 个 ADTD 站点定位精度最大误差达 43.284 km, 最小误差 1.079 km, 2 站以上定位精度逐步提高。

目前气象部门应用最广泛的是 ADTD 定位系统, 雷暴日、雷电灾害鉴定、雷电灾害风险评估等数据都基于该系统。山东省气象部门出具的雷电灾害鉴定报告中, 实际灾害发生地与 ADTD 定位点之间存在时间及

收稿日期: 2023-08-04

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2020MF130)

通信作者: 李海雷, E-mail: 381164530@qq.com.

空间的差异,时间差异最大20 min,最小1 min左右,空间差异最大1.4 km,最小0.3 km。探测效率的评估能有效提高闪电定位数据的准确性,提高防雷减灾水平。任何闪电定位系统都会不同程度地产生误差,分析误差的来源和特征既是对定位方式及算法的检验,也是提高探测效率的主要前提。利用模拟法、对比法、替代法或基于自身探测结果的统计分析法评估 ADTD 探测效率有其局限性,无法真实地反映设备布置、地形地貌、定位算法、噪声干扰等对探测效率的影响。利用已知或光学观测到的闪电对定位系统进行评估是最佳方法,目前已知的基于真实闪电对 ADTD 进行评估的,仅有包坤利用一次雷击事件进行了定位精度评估,样本数量偏少,利用多样本真实的闪电数据对 ADTD 定位系统进行性能评估显得尤为重要,既能提高定位数据的应用效果,又能充分利用闪电特性、定位误差分析成果,有效提高闪电探测效率。

## 1 数据来源及筛选

### 1.1 数据来源

人工引雷数据来源于2017–2020年夏季在山东滨州沾化区开展的人工触发闪电实验,实验基地主要由引雷场地、主观测站和观测网络组成。采用火箭—导线技术,即向雷暴云发射火箭拖曳金属线,以100 m/s速度上升,当达到闪电触发阈值时,即触发闪电事件。实验采用传统触发、空中触发两种方式。金属线分别与发射架(37.819261°N,118.111835°E)、油罐(37.817042°N,118.111855°E)可靠连接,为传统触发方式。金属线底部通过80 m左右尼龙线固定在高塔(37.819729°N,118.11233°E)附近,为空中触发方式。通过同轴分流器、Pearson 线圈测量雷电流,快慢天线测量快慢电场,通过光纤传输至发射控制室并记录<sup>[11–15]</sup>。2017年触发闪电7次(2次传统触发),2018年触发7次(3次传统触发),2019年触发10次(8次传统触发),2020年触发6次(3次传统触发),合计触发30次闪电,其中16次为传统触发,14次为空中触发。人工引雷触发闪电的时间信息为自动触发GPS时钟,人工引雷发射架等GPS位置信息为现场测量得到。

闪电定位数据由中国气象局布设的ADTD定位系统采集,该套系统采用磁环天线和平板天线分别测量

闪电的磁场和电场变化,通过各子站同时响应同一闪电辐射电磁场,利用时间到达差(TOA)确定闪电发生的位置和时间,该系统理论地闪探测效率95%,探测频段1 k~400 kHz,回击分辨率<0.5 ms。采集的数据包括闪电发生的时间、位置、雷电流极性及强度、定位子站数量等信息。山东省ADTD定位系统于2016年正式投入业务应用,本次数据采集时间为2017年1月–2020年8月,共采集山东省境内闪电信息44.41万条,其中负地闪数据36.25万条,占比81.63%,最小雷电流峰值–1.717 kA,正地闪8.16万条,最小雷电流峰值0.916 kA,雷电流峰值绝对平均值37.41 kA。图1为距离引雷场地(37.819261°N,118.111835°E)有效探测距离250 km范围内各子站位置分布图,其中红色“+”为ADTD子站,蓝色“◇”为引雷场地。

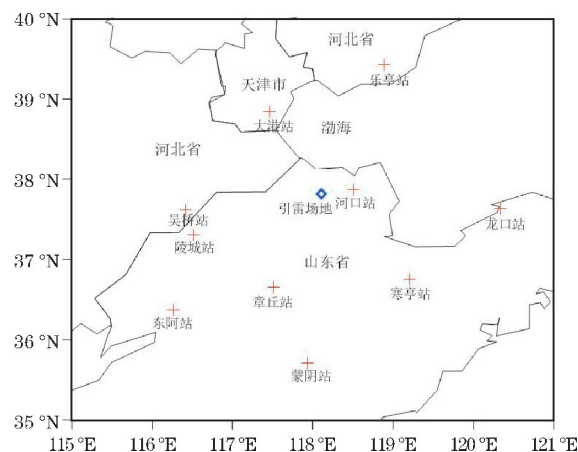


图1 引雷场地及ADTD子站分布图

### 1.2 数据筛选

包坤等<sup>[10]</sup>研究表明,2个ADTD站点定位精度最大误差达43.284 km,最小误差1.079 km,2站以上定位精度逐步提高。本次数据筛选空间阈值按照50 km设定。

考虑到未同步ADTD时钟与人工引雷设备时钟,在50 km空间范围内,采用时间趋势分析法,分别按照两套系统时钟的时差1 min、2 min、3 min匹配定位数据和人工引雷触发闪电数据,发现在2 min和3 min匹配时间内,匹配成功的数据趋于平稳,差别不大。在雷电灾害调查鉴定时,现场调查的事故时间与ADTD定位时间差别较大,普遍在1 min以上,因此本次筛选时间阈值定为人工引雷触发闪电时间前后2 min。

经筛选,30次人工触发的闪电,共有18次闪电信息与ADTD定位信息匹配成功,如表1所示。

表 1 人工引雷触发闪电事件与 ADTD 定位信息匹配结果

编号	日期	实际回 击时间(BT)	ADTD 定 位时间(BT)	回击 次数	回击定位 成功次数	实际电流 峰值/Ka	ADTD 电流 峰值/Ka	雷击点	定位与雷 击点距离/km	定位子 站数
F1	2017-7-5	4:3:47 (非 GPS)	4:2:32	/	/	/	-22.101	地面	0.904	6
F2	2017-7-31	2:31:48	2:32:44	2	1	/	-29.437	高塔	1.622	6
F3	2017-7-31	2:41:49	2:41:49	2	1	/	-61.311	高塔	0.496	6
F4	2017-8-5	16:37:38	16:37:37	/	/	/	21.265	地面	40.908	5
F5	2017-8-5	16:39:58	16:41:23	2	1	-33.934	-20.688	地面	41.838	2
F6	2017-8-17	6:31:51	6:32:45	1	1	/	-32.034	高塔	17.169	5
F7	2018-7-13	14:25:9	14:23:54	/	/	/	-19.910	高塔	48.259	2
F8	2018-8-8	7:35:54	7:35:6	4	3	/	64.166	地面	30.308	2
F9	2018-8-8	7:38:26	7:38:26	6	1	-12.200	-22.423	地面	6.492	2
F10	2019-7-6	4:23:43	4:23:44	/	/	/	-31.826	地面	0.433	6
F11	2019-7-6	4:31:59	4:30:29	/	/	/	96.787	地面	22.885	6
F12	2019-7-6	4:35:13	4:34:2	/	/	/	111.923	地面	9.631	6
F13	2019-7-6	4:38:7	4:37:21	/	/	/	34.288	高塔	8.770	6
F14	2019-7-6	4:40:3 (非 GPS)	4:41:53	/	/	/	-19.97	高塔	5.310	5
F15	2020-8-13	8:7:59	8:7:31	/	/	/	-42.037	高塔	14.577	6
F16	2020-8-13	12:30:44	12:30:44	1	1	-43.418	-37.011	油罐	1.280	6
F17	2020-8-13	12:34:3	12:34:34	/	/	/	-34.108	高塔	0.430	6
F18	2020-8-13	12:37:17	12:37:50	2	1	-44.600	-37.932	地面	27.364	5

2 探测效率分析

探测效率可以表征为定位效率、定位精度、雷电流峰值偏差。

2.1 ADTD 定位效率

ADTD 系统定位成功 30 次人工引雷触发闪电事件中的 18 次,总体定位效率 60%。30 次人工引雷触发闪电中,有 9 次闪电确认存在 1 次及以上回击过程(以下称回击闪电),回击闪电定位成功 8 次,仅有 2017 年一次包含 9 次回击过程的闪电未被定位成功,回击闪电定位效率88.89% (8/9)。9 次包含回击的闪电中,可以确认的回击有 29 次,平均每次人工引雷触发闪电有3.2次回击,定位成功的回击过程 10 次,回击定位效率34.48% (10/29)。21 次连续电流 (ICC) 闪电被定位成功 10 次(以下称 ICC 闪电),ICC 闪电定位效率 47.62% (10/21),定位效率低于回击闪电。ADTD 的总体定位效率远低于王志超等<sup>[2]</sup> 分析的效率,高于 Abhay Srivastava 等<sup>[9]</sup> 验证的北京地区 ADTD 总体探测效率(49.4%)。

2.2 ADTD 定位精度

ADTD 空间定位精度算数平均值15.482 km,远高于其理论定位精度500 m,也高于粤港澳闪电定位系统2660 m的定位精度。表 1 中共有 4 次闪电由 2 个子站定位,其定位精度算数平均值31.724 km,剩余 14 次闪电由 5 个及以上子站定位,定位精度算数平均值 10.841 km。由此可见,增加定位子站数量,可以有效提高定位精度,但不一定是最佳效果。定位成功的 18 次闪电中,仅有 5 次正闪,占27.78%,略高于 ADTD 总体定位正闪占比(18.37%)。正闪定位精度算数平均值37.746 km,负地闪定位精度算数平均值12.783 km,负地闪定位精度优于正地闪。

2.3 ADTD 雷电流峰值偏差

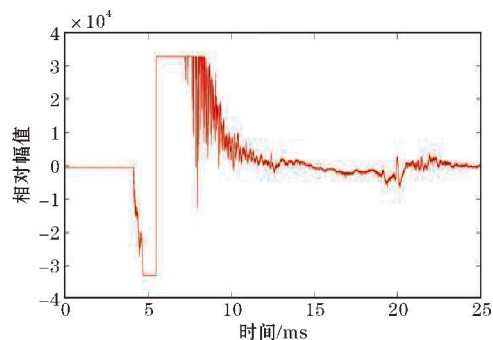
定位成功的 8 次回击闪电中,有 4 次回击过程记录了电流峰值数据,具体信息如表 1 所示。4 次定位闪电电流峰值强度,误差绝对平均值9.136 kA,电流峰值偏差36.38%,高于广东电网闪电定位系统平均相对偏差 14%,但在其计算的偏差范围之内(相对偏差范围0.4%~42%)<sup>[7]</sup>。由于电流峰值数据偏少,不能代

表 ADTD 系统的总体电流峰值偏差。

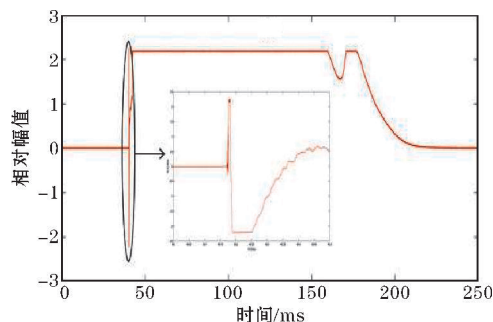
3 探测效率误差原因分析

3.1 闪电极性定位误差分析

表 1 中编号为 F10 及 F14 的闪电定位极性与测量极性不符。ADTD 定位两次闪电为负极性,现场测量的为正极性,均无回击过程,为 ICC 闪电。由图 2 可见两次闪电极性均发生了反转,极性反转普遍发生在连续电流或回击过程,有研究表明,约 17% 的闪电存在极性反转现象<sup>[16]</sup>。F10 闪电在正极性连续电流(强度极小)约 500 ms 后,有一个较强的电场极性反转大脉冲,图 2(a)为 F10 闪电快电场波形,强脉冲反转陡度最大处为负向转正向脉冲(与电流极性相反),上升时间宽度为 0.6 μs。图 2(b)为 F14 闪电电流波形,由正极性反转负极性,时间宽度 8 μs,再由负极性反转为正极性,时间宽度约 100 μs,总体呈正极性闪电。一般认为闪电回击的特点是上升快,持续约 10 μs 以内<sup>[17-19]</sup>,2 种波形特征与负地闪回击相似,造成定位为负闪。因此考虑定位成功的并非 ICC 过程,而是期间的初始电流大脉冲(ICCP),若连续电流过程无 ICCP,则无法定位。



(a) F10 闪电快电场波形



(b) F14 闪电电流波形

图 2 电场及电流波形图

一般认为连续电流是回击后产生的放电过程,为继后回击开通电离通道<sup>[20-21]</sup>。但在人工引雷触发闪

电过程中,因火箭—导线为电流开辟了通道,使连续电流出现在回击之前,理论上,自然界中建立了类似火箭—导线电离通道的地方,均可能存在 ICC 闪电,如顶端深入雷暴云的高层建筑物等。人工触发的 ICC 闪电与自然闪电的 ICC 一样,都具有放电时间长,释放电荷量大的特点,如 F14 次闪电连续电流转移电量 10.23 C,2019 年一次未被定位成功的连续电流释放 121.31 C 电荷。连续电流直接雷击损害大于回击,其连续电荷转移会在通道内长时间释放热量,热效应损害明显<sup>[20]</sup>,是引起雷击爆炸、火灾的主要原因。如何加强 ICC 闪电的定位能力,是今后研究的方向之一。

3.2 定位效率及定位精度误差分析

距离人工引雷场地最近的 6 个子站分别为河口 ( 35.392 km )、大港 ( 126.000 km )、章丘 ( 138.473 km )、陵城 ( 150.255 km )、吴桥 ( 150.288 km )、寒亭 ( 151.006 km )。王志超等<sup>[2]</sup>评估的北京地区 ADTD 基于定位算法的探测效率在 60 ~ 80 km 达到最大值,小于 60 km 及大于 80 km 的效率逐步减小,以上 6 站空间距离均未在最佳探测效率范围内。ADTD 闪电定位与引雷场地分布关系如图 3 所示,其中红色“+”为定位闪电信息,蓝色“◇”为引雷场地,发现 ADTD 闪电定位主要集中在场地周围、西侧及北侧方向,南侧及东侧密度较低,6 个距离最近的 ADTD 子站分布密度在场站西侧及北侧较高,西侧的定位精度低于北侧,主要原因是西侧的吴桥站和陵城站仅相距 35.7 km,布局不合理。引雷场地东侧及南侧各有两次定位成功。ADTD 站点的布设密度过低及布局不合理是造成探测效率过低的原因之一,增加 ADTD 各子站密度,且合理布局是提高定位精度的手段之一。

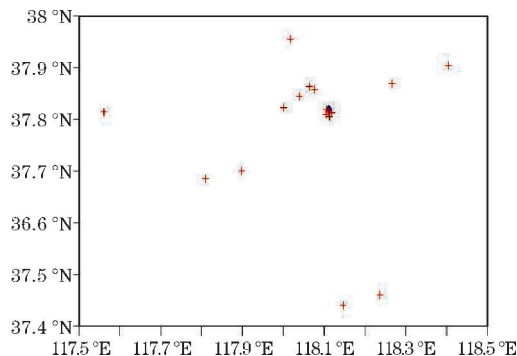


图 3 引雷场地与 ADTD 闪电定位分布图

经统计发现,定位成功的 8 次回击闪电中,有 7 次测量到完整的快慢电场数据,快电场平均相对幅值变化  $5.7 \times 10^4$ ,最大  $7 \times 10^4$ ,最小  $4.2 \times 10^4$ 。图 4 为未被定位成功的回击闪电快电场波形图,该闪电为正极性闪



电,引起相对幅值变化最大的回击为 R8,变化 $2.7 \times 10^4$ ,远小于定位成功的闪电相对幅值变化,即该次闪电向外辐射的电场强度较弱,是该次人工引雷触发闪电未被定位成功的主要原因,提高 ADTD 设备的测量精度,是提高总体探测效率的有效手段之一。

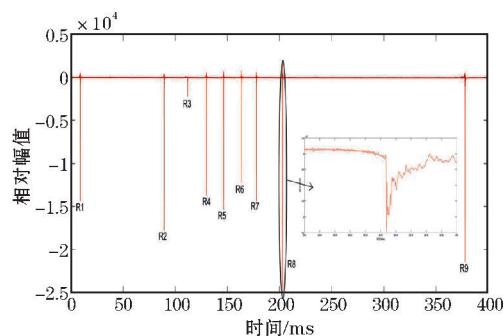


图4 未被定位的回击闪电快电场波形图

## 4 结论

通过对比 ADTD 闪电定位数据与人工引雷观测资料,分析 ADTD 系统的探测效率,结果表明:

(1) ADTD 定位系统在人工引雷场地及其相似地区的总体定位效率为 60%,回击闪电定位效率为 88.89%,回击过程定位效率 34.48%,ICC 闪电定位效率 47.62%。定位精度 31.724 km,负地闪定位精度高于正地闪,2 站以上定位精度高于 2 站定位。闪电电流峰值偏差 36.38%。

(2) ADTD 对 ICC 闪电的定位基于 ICCP,并不是所有的 ICC 过程都存在 ICCP,需针对 ICC 的波性特征改进算法,才能有效提高 ICC 闪电探测效率。

(3) 增加 ADTD 站点密度并合理布局,是提高定位精度的重要手段之一。

(4) 提高 ADTD 设备的测量精度,并基于闪电地闪波形特征改进算法,是提高总体探测效率的有效手段之一,而地闪波形特征最佳来源是人工触发的闪电。

本次对比分析采用的时间跨度较短,样本数量偏少,随着闪电定位网络的发展,进一步开展人工引雷实验工作,积累的数据越来越全面,对 ADTD 闪电定位系统的评估将更全面,更精细化。

## 参考文献:

[1] 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[J]. 高原气象,2015,34(3):863-869.

[2] 王志超,庞文静,梁丽,等. ADTD 闪电定位网在

北京地区定位效率的自评估[J]. 气象科技,2018,46(4):638-643.

- [3] Jerauld J, Rakov V A, Uman M A. An evaluation of the performance characteristics of the US. national lightning detection net work in florida using rocket triggered lighting [J]. Geophys Res, 2005, 110(10):19106-19121.
- [4] Cummins K L, Murphy M J, Bardo E A, et al. A combined TOA/MDF technology upgrade of the US National Lightning Detection Network [J]. Geophys Res, 1998, 103(D):9035-9044.
- [5] 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[J]. 高电压技术,2009,35(8):1896-1902.
- [6] 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[J]. 广东气象,2010,32(1):15-17.
- [7] 张义军,吕伟涛,陈绍东,等. 广东野外雷电综合观测实验十年进展[J]. 气象学报,2016,74(5):655-671.
- [8] Quanxin Li, Jianguo Wang, Li Cai, et al. On the return-stroke current estimation of Foshan Total Lightning Location System (FTLLS) [J]. Atmospheric Research, 2020, 248: 105194.
- [9] Abhay Srivastava, Ye Tian, Xiushu Qie, et al. Performance assessment of Beijing Lightning Network (BLNET) and comparison with other lightning location networks across Beijing [J]. Atmospheric Research, 2017, 197(2017):76-83.
- [10] 包坤,赖晋科,李庆申,等. 基于一次机场雷击事件评估 ADTD 地闪定位性能[J]. 气象科技,2020,48(4):459-464.
- [11] 蒋如斌,郑秀书,王彩霞,等. 峰值电流达几千安量级的闪电 M 分量放电特征及机理探讨[J]. 物理学报,2011,60(7):0792011-0792018.
- [12] 樊艳峰,陆高鹏,蒋如斌,等. 利用低频磁场天线遥感测量人工引雷中的初始连续电流[J]. 大气科学,2017,41(5):1027-1036.
- [13] 郑秀书,杨静,蒋如斌,等. 新型人工引雷专用火箭及其首次引雷实验结果[J]. 大气科学,2010,34(5):937-946.
- [14] 郑天雪,陆高鹏,谭勇波,等. 人工引雷上行正先导传播过程中爆发式磁场脉冲极性反转现象的观测与分析[J]. 大气科学,2018,42(1):

- 124-133.
- [15] 郝秀书,杨静,蒋如斌,等. 山东人工引发雷电综合观测实验及回击电流特征[J]. 大气科学, 2012,36(1):77-88.
- [16] 唐国瑛,孙竹玲,蒋如斌,等. 一次对地转移电荷极性两次反转的人工引发雷电特征及反转机制分析[J]. 物理学报,2020,69(18):388-401.
- [17] 王道洪. 雷电与人工引雷[M]. 上海:上海交大出版社,2000:55-80.
- [18] 郝秀书,张其林,袁铁,等. 雷电物理学[M]. 北京:科学出版社,2012:70-71.
- [19] 李海雷,刘向科,商鹏. 基于快慢天线的闪电电场特征分析[J]. 山东气象,2016,36(4):34-38.
- [20] 陈昌,陈绍东,刘丁齐,等. 一次人工触发闪电连续电流特征分析及其在防护工程中的应用[J]. 广东气象,2014,36(4):44-48.
- [21] 王东方,宣越健,刘继明,等. 大兴安岭林区地闪放电特征的观测与分析[J]. 大气科学, 2011,35(1):147-156.

## Lightning Detection Efficiency and Accuracy Evaluation based on Manual Lightning Data

WEI Licun<sup>1,2</sup>, LI Hailei<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Jinan Meteorological Bureau, Jinan 250000, China; 3. Meteorological Engineering Technology Center of Shandong, Jinan 250031, China)

**Abstract:** Using the 30 lightning data from 2017 to 2020 obtained from the rocket-triggered lightning test in Binzhou Zhanhua District of Shandong Province, the positioning efficiency, positioning accuracy, and current peak deviation of the ADTD lightning location system in the Rocket-Triggered place and similar areas are compared, and analyzed. The results show that ADTD has a positioning efficiency of lightning events is 60% (18/30). The lightning location efficiency with return stroke is 88.89% (8/9). Positioning efficiency of lightning return is 34.48% (10/29). Continuous current positioning efficiency is 47.62% (10/21). Positioning accuracy is 31.724 km. The positioning accuracy of negative cloud-to-ground lightning is higher than that of positive cloud-to-ground lightning. The positioning accuracy of more than 2 stations is higher than that of 2 stations. Peak current deviation is 36.38%.

**Keywords:** rocket-triggered lightning; ADTD lightning location system; positioning efficiency; positioning accuracy; peak current deviation