



安徽省ADTD闪电定位系统监测数据质量评估

杨春明 陈进 孙浩

Quality assessment of monitoring data from the Anhui ADTD lightning location system

YANG Chunming, CHEN Jin, SUN Hao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-205>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

湖北省两套闪电定位网地闪数据的对比分析

Comparative analysis of cloud-ground flash data of two lightning location networks in Hubei Province

暴雨灾害. 2021, 40(6): 646–654 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.009>

京津城际铁路沿线雷电活动特征及危险性评估

Assessment of dangerousness and characteristics on lightning along the Beijing-Tianjin intercity railway

暴雨灾害. 2025, 44(3): 332–339 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-016>

广西前汛期和后汛期地闪特征差异及影响因子分析

Comparative analysis of the cloud to ground lightning activity during pre and post flood season in Guangxi

暴雨灾害. 2022, 41(2): 224–231 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.013>

基于不同测站布局的闪电定位误差分析

Analysis of lightning localization errors based on different station layouts

暴雨灾害. 2024, 43(6): 741–748 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-216>

基于GIS的安徽省雷电致灾危险性评估与区划

Assessment and zoning of lightning disaster-causing hazards in Anhui Province based on GIS

暴雨灾害. 2024, 43(6): 733–740 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-186>

2024年2月我国两次雨雪冰冻过程中闪电活动特征对比分析

Comparative analysis of lightning activity characteristics during two rainfall/snowfall and freezing events in China in February 2024

暴雨灾害. 2024, 43(4): 479–489 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-082>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

杨春明,陈进,孙浩. 2026. 安徽省 ADTD 闪电定位系统监测数据质量评估[J]. 暴雨灾害, 45(4):588–597. YANG Chunming, CHEN Jin, SUN Hao. 2026. Quality assessment of monitoring data from the Anhui ADTD lightning location system [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 45(4):588–597 (in Chinese). doi:[10.12406/byzh.2025-205](https://doi.org/10.12406/byzh.2025-205)

安徽省 ADTD 闪电定位系统监测数据质量评估

杨春明¹, 陈进¹, 孙浩²

(1. 安徽省马鞍山市气象局, 马鞍山 243000; 2. 安徽省气象灾害防御中心, 合肥 230031)

摘 要: 强对流天气往往伴随雷电出现, 闪电定位 (Advanced Direction and Time Difference, ADTD) 系统可监测闪电发生位置, 提供雷电预警信息。为评估安徽省 ADTD 闪电监测数据有效性和精确性, 提升监测数据的适用性, 基于 2014—2023 年安徽省 ADTD 闪电定位系统地闪回击数据, 选取参考点和雷电案例, 采用网格法、统计与一致性分析等方法, 从定位精度和雷电参数 (地闪极性、雷电流幅值) 方面对地闪回击监测数据质量进行评估。结果表明: (1) 在参考点周边, 地闪回击高值区与实际位置误差 571~1 442 m, 高于系统标称误差 (500 m), 山区地形导致定位误差显著增大, 各参考点周边地闪回击次数等值线分布呈现“0~1 km 范围内密度偏高, 1~2 km 范围内逐步趋近区域均值, 2 km 外显著偏低”的分布规律, 且等值线形态与山体走向基本吻合。(2) 基于 10 起典型雷灾案例统计显示, 平原地区平均定位误差为 428 m, 低于该系统 500 m 的理论定位误差上限, 山区受地形遮挡影响, 平均误差达 1 070 m, 属于复杂地形下的正常观测偏差。(3) 安徽省地闪回击的极性比例、闪电活动的月际、日变化统计特征与本地强对流气候演变规律匹配良好; 雷电流幅值累积概率分布与 IEEE 标准模型的拟合一致性达 99.2%, 与标准模型匹配程度极高, 安徽 ADTD 系统在地闪极性识别、时间一致性方面表现出较高的可靠性, 但在 10~50 kA 区间存在系统性高估倾向。该研究反映了不同地形下闪电数据的误差特征, 可为安徽雷电预警、雷灾鉴定、防雷设计提供校正依据, 也可为国内多地形闪电定位系统质量评估提供参考方法。

关键词: ADTD; 地闪回击; 定位误差; 雷电流幅值累积概率

中图法分类号: P446

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025-205

Quality assessment of monitoring data from the Anhui ADTD lightning location system

YANG Chunming¹, CHEN Jin¹, SUN Hao²

(1. *Maanshan Meteorological Bureau of Anhui Province, Maanshan 243000;*

2. Anhui Meteorological Disaster Prevention Center, Hefei 230031)

Abstract: Severe convective weather is frequently accompanied by abundant thunder and lightning. Lightning location (Advanced Direction and Time Difference, ADTD) systems are capable of capturing lightning strike positions and supporting thunderstorm early warning services. To evaluate the effectiveness and accuracy, improve the application of lightning monitoring data from the ADTD lightning location system across Anhui Province, this study evaluates cloud-to-ground (CG) return stroke observations collected by the Anhui ADTD network during 2014–2023. Reference observation points and typical lightning disaster cases are selected, and grid analysis, statistical analysis and consistency test methods are comprehensively utilized to evaluate the monitoring data quality of CG return strokes from two aspects: positioning accuracy and lightning parameters (CG flash polarity and lightning current amplitude). The results are as follows. (1) Around the reference points, the positional error between high-value zones of CG return strokes and actual lightning locations ranges from 571 m to 1 442 m, exceeding the nominal systematic error of 500 m. Positioning error increases in mountainous terrains. The contour distribution of CG return stroke counts around each reference point follows a consistent pattern: flash density is overestimated within the 0~1 km buffer, gradually converges to the regional average in the 1~2 km zone, and is markedly underestimated beyond 2 km; furthermore, the contour shapes basically coincide with mountain strike trends. (2) Statistics based on 10 representative lightning disaster cases reveal that the average positioning error over plain areas is 428 m, lower than the theoretical upper limit of systematic positioning error (500 m). Terrain shielding increases the average positioning error to 1 070 m, which remains within the normal observational

收稿日期: 2025-10-13; 定稿日期: 2026-06-16

资助项目: 安徽省气象局自主创新发展专项 (AHQXZC202401); 马鞍山市科技计划项目 (QX-2024-01)

第一作者: 杨春明, 主要从事雷电灾害防御技术研究。E-mail: 1615112604@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

uncertainty under complex terrain conditions. (3) Polarity ratio of cloud-to-ground lightning return strokes, the monthly and diurnal statistical characteristics of lightning activity are well consistent with the climatological characteristics of severe convection in Anhui Province. The cumulative probability distribution of lightning current amplitudes achieves excellent agreement with the IEEE standard model, with a fitting consistency of 99.2%, indicating high reliability of the ADTD system in CG polarity identification and temporal consistency. However, it exhibits a systematic overestimation bias for lightning current values within the 10~50 kA range. This study quantifies the error characteristics of lightning data under diverse terrain conditions, which can provide a scientific basis for improving lightning early warning, lightning disaster identification and lightning protection design in Anhui Province. The proposed evaluation also offers a reference method for quality evaluation of lightning location systems in regions with complex terrain nationwide.

Key words: ADTD; cloud-to-ground lightning return stroke; positioning error; cumulative probability of lightning current amplitude

引言

雷电是强对流天气的典型现象,具有高电压、强电磁辐射等特征,容易对电力设施、通信基站、高层建筑等造成直接破坏,甚至导致人员伤亡(田德宝等, 2020; 鞠晓雨等, 2022)。为认识雷电机理并减轻其灾害影响,我国自 20 世纪 80 年代起开展雷电监测及相关技术研究,目前已形成以电力部门雷电定位系统(Lightning Location Systems, LLS)和气象部门 ADTD (Advanced Direction and Time Difference) 闪电定位系统(以下简称 ADTD 系统)为主的监测网络。ADTD 系统由中国科学院空间科学与应用研究中心研制,采用时差法与定向时差联合法进行定位,单站探测半径达 150 km,探测效率优于 90%,理论定位误差不超过 500 m(李亚飞等, 2025; 朱浩等, 2024),是气象部门雷电业务的核心数据来源。

近年来,国内学者围绕 ADTD 系统的定位性能开展了广泛研究。冯民学等(2015)利用江苏省 63 站人工观测雷暴日数据,验证了 ADTD 系统的平均探测效率为 61.4%,但其研究区域以平原为主,未涉及复杂地形的影响。王志超等(2018)研究表明,ADTD 系统在北京地区的探测效率为 85%~95%,但评估对象仅限于探测效率,缺乏雷电参数一致性与闪电定位精度的协同分析。崔逊等(2016)通过对比全球闪电定位网 WWLLN (World-Wide Lightning Location Network) 与 ADTD 系统监测数据发现,二者定位精度无显著差异。包坤等(2020)基于 ADTD 系统监测数据,选取广东潮汕机场真实雷击事件开展定位检验,测得平原区域系统定位误差小于 500 m。杨敢等(2022)以 ADTD 系统观测事实为基础,基于乌鲁木齐地区实际地形构建二维 FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 模型,发现山地地形可导致最大定位误差达 3 800 m,并提出不同步长的地形包络法进行修正,最大可修正 510 m。张坚等(2015)指出 ADTD 与人工观测雷暴的一致性存在区域差异,给出了不同统计条件下两套资料参数一致性定量评价指标,评估两套观测序列的匹配程度。上述研究

既证实了 ADTD 系统在平原、机场等单一场景下的应用潜力,也暴露了其在复杂地形适配、多参数监测性能协同评估等方面的不足。这一不足的核心原因在于 ADTD 系统采用时差法定位,依赖稳定的电磁信号传播环境,在山区山体遮挡、子站间距不均或电磁干扰等条件下,定位精度易大幅偏离理论值(500 m),从而产生不同程度的误差。

针对复杂地形下的定位精度研究,侯安校等(2022)针对海南省 ADTD 系统评估显示,闪电回击定位距离误差平均值为 1 602 m,波动范围较大(60~5 110 m),无明显地形关联。刘平英等(2024)分析云南省 ADTD 系统监测资料发现,定位误差稳定在 1 km 内,未出现“平原-山区”误差悬殊的现象。上述研究虽然针对复杂场景进行综合评估,但尚未揭示系统定位精度缺陷在复杂地形中的具体表现,结论普适性有限。

安徽省 ADTD 系统于 2010 年建成并投入使用(程向阳等, 2018),该系统为雷电监测预警、灾害事故鉴定及区域雷暴天气演变特征研究等提供支撑。然而,实际应用与灾害调查显示,该系统监测数据存在一定误差,且误差特征与其他省份存在显著差异。汪开斌(2024)基于 2022 年 8 月 26 日安徽南陵(江淮丘陵)一次雷击个例对 ADTD 系统的校验发现,ADTD 系统 4 个定位点与真实雷灾点的误差范围为 670~1 106 m。刘岩等(2015)对 2010 年 3—9 月安徽省闪电定位系统 LD-II 与 ADTD 系统的对比分析也证实,ADTD 系统记录的闪电位置与实际雷灾点误差普遍超过 500 m。可见,ADTD 系统在不同省份的定位误差特征各异,虽然有针对安徽省雷电个例定位误差的研究,但针对安徽“平原-丘陵-山区”复杂地形导致的 ADTD 系统监测误差空间分异特征,目前尚无研究系统揭示。

为评估安徽省地闪监测数据可靠性,厘清安徽省复杂地形下 ADTD 系统的监测误差特征,提升 ADTD 监测数据业务应用精度,本文基于 2014—2023 年安徽省 ADTD 闪电定位系统地闪回击监测数

据,选取参考点和雷电案例,采用网格法、统计与一致性分析等方法,从定位精度和雷电参数(地闪极性、雷电流幅值)方面对地闪回击监测数据质量展开综合评估,以期对安徽省雷电监测、雷灾预警、雷击灾害鉴定提供依据。

1 资料与方法

1.1 资料介绍

本文使用的数据包括:(1) ADTD 系统监测数据,来源于安徽省气象信息中心提供的 2014 年 1 月至 2023 年 12 月地闪回击数据,包括每次回击的发生时间、经纬度、雷电流幅值、极性、定位方式等参数。依据《雷电灾害风险区划技术指南》(中国气象局, 2017)对地闪回击数据进行质量控制,剔除雷电流幅值绝对值大于 200 kA 或小于 2 kA 的记录,以确保地闪数据的可靠性。(2) 参考点的地理位置与建筑数据。前者指通过 Google Earth 获取参考点的经纬度数据,用于对 ADTD 系统定位误差的影响分析计算;后者来源于项目竣工备案资料的建筑高度、建成年限、接闪装置配置,为评估系统定位精度提供可靠基准。(3) 雷击灾害(以下简称雷灾)案例数据,来源于 2007—2020 年《全国雷电灾害汇编》,为匹配 ADTD 监测时段(2014—2023 年),同时考虑到部分的雷灾案例日期时间记录不完整,筛选了 2014—2020 年 10 起含事故时间、经纬度、损害类型的完整案例,确保数据关联有效。

安徽省 ADTD 系统包括 7 个子站(图 1),分别位于蚌埠、阜阳、合肥、六安、安庆、宣城与黄山,能有效覆盖皖北平原、江淮丘陵、大别山区及皖南山区等主要地形。

1.2 分析方法

1.2.1 参考点选取

采用高建筑作为参考点,以引雷高塔为真值基准量化 ADTD 系统地闪定位偏差,对比地形对定位误差的影响,并通过网格法检验系统对地闪空间集聚特征的还原能力。高层建筑存在显著引雷集聚效应,可作为定位校验基准(Becerra, et al., 2007; Diendorfer, 2010; Zhu et al., 2020)。蔡然等(2019)研究指出高层建筑能增强顶部雷电感应电荷;张长秀(2017)研究证实高塔会聚集周边地闪回击;魏韬等(2018)分析表明建筑金属尖端易诱发上行先导。综上,高塔附近地闪回击呈空间聚集特征,参考张科杰等(2022)开展 ADTD 监测数据评估时建立的高层建筑选取方案,按以下条件选定省内不同区域建筑作为参考点:(1) 参考点主体建筑自身高度或海拔不低

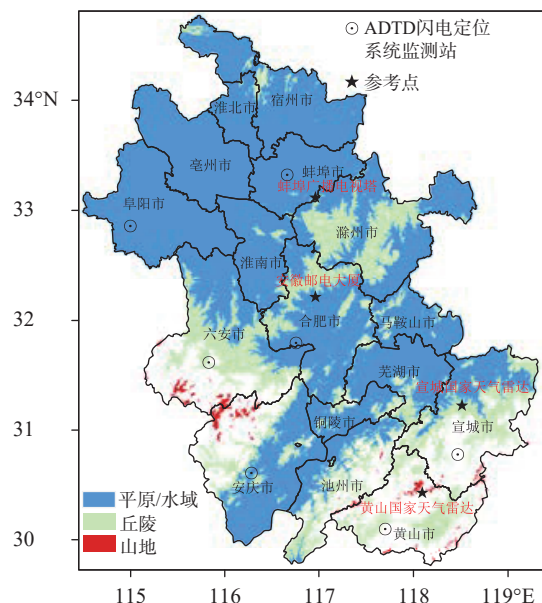


图 1 安徽省 ADTD 闪电定位系统 7 个监测子站及 4 处参考点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of 7 monitoring substations and 4 reference points of the ADTD lightning location system in Anhui Province

于 100 m, 参考点周边 3 km 内其他建筑物的自身高度不超过参考点主体建筑高度的 60%; (2) 建筑物顶端设有金属接闪装置, 易激发上行先导与下行先导连接; (3) 建成后有不少于 5 a 完整地闪回击数据。

需说明的是, 所选建筑仅作为“地闪回击集聚的参考点”, 并非安放 ADTD 定位系统的站点。为验证 ADTD 系统在不同环境下的定位精度, 依据参考点选取原则, 结合建成时间设定地闪回击数据统计时段: 宣城国家天气雷达(2017 年建成)统计 2017—2023 年数据, 其余 3 处(均早于 2014 年建成)统计 2014—2023 年数据。经核查, 各时段均满足“不少于 5 a 完整监测数据”要求。为精准分析定位误差, 依据规范《雷电防护 第 2 部分: 风险管理》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会, 2015), 雷电定位系统定位误差应不超过 1 000 m (复合地形可适当放宽), 结合 ADTD 系统理论定位误差不超过 500 m 的指标, 本文将统计范围从 500 m 扩大至 2 km, 以覆盖复合地形下的误差范围。以各参考点为中心, 统计其周边 2 km 半径范围内的地闪回击记录, 并借助 Surfer 工具绘制 4 km×4 km 范围内的地闪回击次数等值线图。

据此选取 4 处参考点, 本文统一将其编号为 1、2、3、4。1 为蚌埠广播电视塔(自身高度 169 m, 海拔 32 m, 2009 年建立, 位于皖北平原); 2 为安徽邮电大厦(自身高度 178.3 m, 海拔 50 m, 1998 年建成, 位于江淮丘陵); 3 为宣城国家天气雷达(自身高度 146.7 m, 海

拔 51 m, 2017 年建成, 位于皖南丘陵的庙古山); 4 为黄山国家天气雷达 (自身高度 42 m, 海拔 1 847 m, 1986 年建成, 位于皖南山区的黄山), 参考点代表了平原、丘陵与复杂山区环境, 可全面检验 ADTD 系统在不同地理、电磁环境下的定位性能, 参考点分布见图 1。

1.2.2 定位误差计算与验证

利用地理数据处理工具对参考点周边地闪回击数据进行网格化分析, 生成地闪回击次数等值线图, 通过识别高值区与参考点的位置误差, 验证系统定位可靠性。对于雷灾案例的定位验证, 通过比对实际雷击位置与系统监测的地闪回击位置来分析定位误差。定位误差计算采用“地球近似球体”模型 (取地球半径 $R=6\,371\text{ km}$), 通过球面距离公式计算实际雷击点与 ADTD 系统监测地闪回击点的直线距离 D , 公式如下 (张科杰等, 2022)

$$D = R \cdot \arccos [\cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \cos(\lambda_1 - \lambda_2) + \sin(\varphi_1) \cdot \sin(\varphi_2)] \quad (1)$$

式中, φ_1 、 λ_1 分别为实际雷击位置的纬度和经度; φ_2 、 λ_2 分别为闪电定位系统回击位置纬度和经度。雷灾案例的定位验证, 按以下流程操作: (1) 定位误差计算。采用“地球近似球体”模型, 通过球面距离公式 (公式 1) 计算实际雷击点与 ADTD 系统监测地闪回击点的直线距离; (2) 数据提取。以实际雷击时间为基准, 扩展至前后各 5 min, 并限定事故点周边 2 km 范围, 确保数据与雷击事件强相关性; (3) 数据预处理。剔除单站、双站定位记录, 仅保留三站及以上联合定位数据, 提升数据可靠性; (4) 致灾回击筛选。为每个案例匹配 1~5 条候选地闪回击记录, 按“时间同步、距离最近、强度匹配”原则, 选取“致灾关联回击”计算定位误差。

1.2.3 雷电参数评估方法

为评估 ADTD 系统地闪极性、时间记录及雷电流强度等监测数据质量, 从两方面对其进行检验。(1) 统计分析: 统计地闪回击数据的正负闪比例及月、日变化特征, 与本地气候演变规律进行比对, 验证系统在地闪极性识别和时间分布统计方面的合理性; (2) 雷电流幅值一致性分析: 拟合雷电流幅值累积概率分布曲线, 与 IEEE 标准模型 (朱海燕等, 2018) 进行定量对比, 通过拟合优度衡量分布曲线的一致性程度。其中, 雷电流幅值概率分布的拟合与比对方法采用 IEEE 工作组推荐的通用模型作为基准, 该模型的累积概率计算公式为 (朱海燕等, 2018)

$$P_c(> I_p) = 1 / \left[1 + \left(\frac{I_p}{31} \right)^{2.6} \right] \quad (2)$$

式中, I_p (单位: kA) 为任意给定的待统计雷电流幅值变量, P_c 为雷电流幅值超过 I_p 累积概率, 31 为中值电流 (对应 50% 累积概率), 2.6 为拟合指数, 反映幅值分布的集中性。IEEE 工作组推荐的通用模型理论曲线基于全球多地雷电流观测数据构建, 其核心特征为: 中值电流 31 kA (对应 50% 累积概率), 拟合指数 2.6, 反映雷电流幅值呈偏态分布, 中小幅值雷电流占比高、高幅值雷电流占比低的规律 (公式 2)。该模型中的雷电流指首次回击雷电流, 而本研究所用 ADTD 数据为闪击数据 (未归闪), 通常首次回击雷电流峰值比继后回击峰值明显更大, 但由于 ADTD 系统未区分首次与继后回击, 闪击雷电流幅值分布综合了各类回击的特征。

基于 2014—2023 年安徽省 ADTD 系统地闪回击数据 (共 1 665 658 条有效记录), 以公式 (2) (IEEE 通用模型) 为基础框架, 运用最小二乘法对雷电流幅值累积概率进行拟合: 通过迭代计算调整中值电流和拟合指数, 使拟合曲线与实测数据的残差平方和最小, 最终得到本地化模型, 具体公式如下

$$P_c(> I_p) = 1 / \left[1 + \left(\frac{I_p}{31.2} \right)^{3.41} \right] \quad (3)$$

其中中值电流修正为 31.2 kA, 拟合指数修正为 3.41。

2 ADTD 系统定位精度评估

定位精度是 ADTD 闪电定位系统数据质量的核心指标, 决定其在雷灾鉴定、风险评估与预警发布等业务中的应用效果。为全面、客观评估安徽 ADTD 系统在实际环境中的定位能力, 本研究分别采用“参考点”和“真实雷灾案例”两种方式进行精度分析。其中, 基于参考点的网格分析, 旨在检验 ADTD 系统在已知雷击点附近的空间响应误差及其地形影响规律, 为定位误差提供系统性、量化的评估基准; 而基于真实雷灾案例的验证, 则从实际应用场景出发, 通过回溯性比对来评估 ADTD 系统在致灾闪电识别中的实际准确性与可靠性。两者互为补充, 共同构成了对系统定位性能的综合检验。

2.1 参考点定位精度分析

图 2 为 4 处参考点 4 km×4 km 网格范围内地闪回击次数分布。由图可见, 参考点 1 (图 2a) 高值区向实际位置西南方偏离约 625 m; 参考点 2 (图 2b) 高值区向实际位置东北方向偏离约 571 m; 参考点 3 (图 2c) 高值区向实际位置西北方向偏离约 1 125 m; 参考点 4 (图 2d) 高值区向实际位置西南方向偏离约 1 442 m。值得注意的是, 参考点 3、4 地处皖南山区

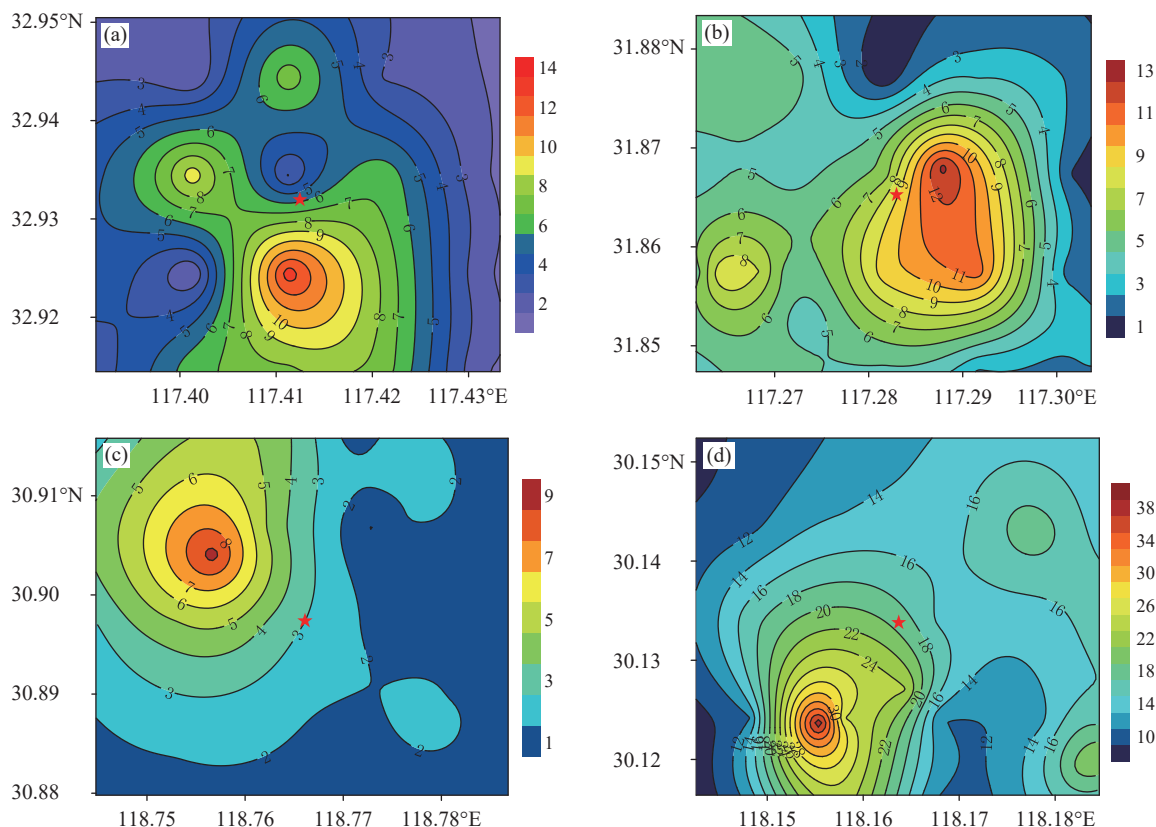


图 2 2014—2023 年安徽省 ADTD 系统以参考点 1 (a)、2 (b)、3 (c)、4 (d) 为中心 $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ 网格内地闪回击次数 (单位: 次) 分布 (五角星号表示各参考点实际位置)

Fig. 2 Distribution of cloud-to-ground return stroke counts (unit: num) of ADTD system within $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ grids centered at reference points (a) 1, (b) 2, (c) 3, and (d) 4 in Anhui province during 2014 to 2023 (pentagrams denote actual reference positions)

(地形分布见图 1), 回击频次等值线的延展走向与山体形态基本吻合, 印证了山体遮挡干扰雷电电磁信号传播, 是山区定位误差明显增大的重要诱因。

为进一步验证地闪回击高值中心由参考点特定环境主导, 而非周边其他易引雷因素干扰, 对原经纬度进行偏移 (张科杰等, 2022), 以高值中心为经纬度中心点, 重新绘制 4 个参考点所在区域的地闪回击次数等值线图 (图略)。结果显示, 每个区域 $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ 范围内均仅存单一高值区。由此可判定, 参考点周边无其他显著影响地闪分布的易引雷环境, 前文计算的误差即为各参考点附近地闪回击的实际定位误差范围。

通过对 4 处参考点的雷击环境检验表明, ADTD 系统能有效反映大尺度区域雷电活动, 但实际定位精度 ($571 \sim 1\,442\text{ m}$) 大于系统标称的理论误差 (不超过 500 m)。同时, 各参考点周边地闪回击密度呈现“ $0 \sim 1\text{ km}$ 范围内密度偏高, $1 \sim 2\text{ km}$ 范围内逐步趋近区域均值, 2 km 外显著偏低”的规律, 这与高建筑物引雷理论完全一致, 进一步验证了监测数据的合理性。其定位精度与地形、参考点至监测子站距离相关。参考点 1 受地形遮挡小、周边子站密度相对较

高, 定位误差较小, 参考点 4 因山体遮挡、子站间距较大, 定位精度显著降低。

2.2 雷灾案例定位误差

为进一步分析 ADTD 系统闪电定位误差特征, 选取 10 起典型雷灾案例 (表 1) 分析定位误差情况, 以验证地形对定位误差的影响。分析可知, ADTD 系统监测的地闪回击与实际雷击点的直线距离误差范围为 $182 \sim 1\,362\text{ m}$, 平均误差 813 m 。按地形分类统计显示地域差异显著: 4 起以平原为主的案例 (案例 2、4、5、10), 其平均定位误差为 428 m , 最大误差 644 m (案例 5), 最小误差 182 m (案例 10)。山区丘陵 6 起案例 (案例 1、3、6、7、8、9) 的平均定位误差达 $1\,070\text{ m}$, 为平原地区的 2.5 倍, 最大误差 $1\,362\text{ m}$ (案例 1)。原因可能是, 皖北、皖中地形相对平坦, 电磁信号传播稳定, 定位精度更高, 山区山体对雷电电磁信号产生反射与折射, 延长了信号传播时长 (陈佳雯等, 2021)。Kohlmann 等 (2021) 通过三维数值模拟进一步证实, 山地会同步产生测向角度与传播时延两类误差, 由此加剧时差计算误差, 降低闪电系统定位精度。

为明确不同地形 ADTD 系统定位精度差异, 选

表 1 2014—2020 年安徽省 10 起雷灾案例定位信息

Table 1 Location information of 10 lightning disaster cases in Anhui Province during 2014 to 2020

案例编号	发生时间/ (年.月.日 时:分)	雷灾地点	实际雷击位置/ (经/纬度)	定位回击位置/ (经/纬度)	位置 偏差/m	雷击类型/ 损害类型
1	2014.04.24 17:10	歙县桂林中心学校	118.474 1°E/ 29.886 1°N	118.477 9°E/ 29.897 9°N	1 362	感应雷/设备损坏
2	2014.07.20 15:30	宿州埇桥区胡里村	117.109 4°E/ 33.611 6°N	117.104 5°E 33.610 7°N	464	直击雷/设备损坏
3	2015.04.12 22:40	桐城市龙眠双燕茶厂	116.898 5°E/ 31.107 9°N	116.886 8°E/ 31.112 3°N	1 217	直击雷/设备损坏
4	2015.06.29 06:30	肥东八斗镇南钟村	117.677 5°E/ 32.150 9°N	117.675 5°E/ 32.154 3°N	422	直击雷/人员伤亡
5	2015.11.06 02:20	蚌埠广播电视台	117.412 3°E/ 32.932 5°N	117.409 8°E/ 32.927 1°N	644	直击雷/设备损坏
6	2016.07.01 15:28	马鞍山博望镇董塘村	118.710 3°E/ 31.552 9°N	118.712 2°E/ 31.556 7°N	459	感应雷/设备损坏
7	2016.04.03 11:30	歙县长江徽杭高 速公路有限公司	118.298 6°E/ 29.692 2°N	118.293 3°E/ 29.681 1°N	1 336	直击雷/设备损坏
8	2017.07.14 14:00	天柱山仙人洞	116.458 0°E/ 30.742 8°N	116.449 3°E/ 30.735 6°N	1 154	直击雷/人员伤亡
9	2018.07.27 15:57	黄山工行干部培训中心	118.316 2°E/ 29.716 4°N	118.309 1°E/ 29.711 3°N	890	感应雷/设备损坏
10	2019.08.26 19:17	天长天然水岸小区	119.011 8°E/ 32.692 3°N	119.012 2°E/ 32.693 9°N	182	感应雷/设备损坏

取平原与山区的 2 起典型案例进行分析(表 2)。平原典型案例为天长天然水岸小区雷击事件(案例 10): 2019 年 8 月 26 日 19:17 (北京时,下同),该小区 1 号楼电梯机房外墙遭雷击,电梯停运(停运时间与雷击同步)。提取事发前后 5 min (19:12—19:22)、周边 2 km 内的地闪回击数据,筛选出 2 条四站定位的有效记录。第一条回击发生于 19:17:42,雷电流 28.9 kA,与实际雷击点误差 420 m;第二条回击发生于 19:17:05,雷电流达 35.8 kA,与实际雷击点误差为 182 m。结合现场损害程度分析,第二条回击的雷电流强度(35.8 kA)更符合电梯机房外墙面损坏特征,且发生时间与电梯停运记录仅相差 5 s,满足“时间同步、距离最近、强度匹配”原则,可确认为致灾地闪回

击。该案例 182 m 的误差远低于平原地区平均定位误差及系统理论误差,验证了 ADTD 系统在实际应用中具备一定的准确性。山区典型案例为歙县长江徽杭高速公路有限公司雷击事件(案例 7): 2016 年 4 月 3 日 11:30,该公司遭受雷击,导致供电中断。提取事故时间前后 5 min (11:25—11:35)、2 km 半径内的地闪回击数据,得到 3 条三站定位有效记录。第一条回击发生于 11:28:31,雷电流 47.2 kA,误差 1 424 m;第二条发生于 11:30:18,雷电流 52.3 kA,误差 1 336 m;第三条发生于 11:31:55,雷电流 39.6 kA,误差 1 483 m。其中,第二条回击时间与供电中断记录仅相差 18 s,距离最近,雷电流强度(52.3 kA)与变压器外壳击穿的损害程度匹配,可确认为致灾地闪

表 2 安徽省 2 起典型雷击事故点 2 km 范围内地闪回击信息

Table 2 Cloud-to-ground lightning return stroke data within 2 km of two lightning strike accident sites in Anhui Province

案例	发生时间/ (年.月.日 时:分:秒)	定位回击位置/ (经度/纬度)	雷电流 强度/kA	与事故点 距离/m
天长市天然水岸小区	2019.08.26 19:17:42	119.013 5°E/32.695 8°N	-28.9	420
	2019.08.26 19:17:05	119.012 2°E/32.693 9°N	-35.8	182
歙县长江徽杭高速公路有限公司	2016.04.03 11:28:31	118.284 8°E/29.687 7°N	-47.2	1 424
	2016.04.03 11:30:18	118.293 3°E/29.681 1°N	-52.3	1 336
	2016.04.03 11:31:55	118.285 6°E/29.685 1°N	-39.6	1 483

回击。该案例 1 336 m 的误差印证了山区地形对雷电磁信号传播具有阻碍作用(陈佳雯等, 2021)。

上述分析表明,无论是基于参考点的网格分析,还是雷灾案例的验证结果,均证实 ADTD 系统在实际应用中具备一定准确性(如平原定位误差小、大尺度区域反映准确),但山区地形的定位误差显著大于平原地区。因此,在山区进行雷击灾害调查时,有必要将致灾闪电的识别范围适当扩大,以提升雷击灾害与致灾闪电的匹配度,减少因定位误差导致的漏判。

3 雷电参数特征

为检验安徽省 ADTD 系统雷电参数监测数据准确性,本章首先分析地闪极性识别、地闪月际、日变化时间分布规律,对照区域强对流和降水气候规律验证 ADTD 系统监测数据可靠性;在此基础上,进一步拟合雷电流幅值累积概率分布,与 IEEE 标准模型对比,评估 ADTD 系统表征雷电活动、反演雷电流强度的监测精度。

3.1 地闪极性及时间分布特征

2014—2023 年,安徽省 ADTD 系统共监测到地闪回击 1 665 658 次,正极性地闪回击占比为 5.4%,与全国地闪正闪占比约 5% 的总体特征基本一致(王娟和湛芸, 2015),与长三角全域正闪平均占比 4.45%,其中安徽省正闪占比 5.25% 也基本一致(王凯等, 2021)。地闪极性以单次回击的电荷属性判定,统计样本为全部地闪回击;一次地闪过程可包含多次回

击,本文以回击为基本统计单元,正极性回击占比表征区域地闪极性分布特征。

从时间分布看,安徽省地闪月际变化呈显著单峰型(图 3a),峰值集中于 7—8 月,该时段地闪占全年总量 56.6%;4—9 月为地闪高发期,累计占比 94.1%;10 月至次年 3 月地闪活动显著偏弱,月占比均不足 5%。区域降水过程与地闪回击存在显著关联(刘泽等, 2020; 周威等, 2026),安徽省 4—9 月集中降水的气候规律与地闪月分布高度匹配。安徽地处亚热带与暖温带气候过渡区,4—9 月东亚夏季风输送充沛水汽,江淮丘陵、皖南山区地形抬升作用显著,对流降水集中频发,是地闪集中高发的气候背景,地闪月分布和降水分布特征吻合良好。

在日变化方面(图 3b),安徽地闪活动存在明显午后集中特征。高发时段为 13:00—20:00,峰值出现在 15:00—16:00;07:00—11:00 地闪频次显著偏低。午后地表升温驱动垂直对流旺盛,为雷电生成提供热力与动力条件,是该分布特征的核心成因。ADTD 观测得到的本地地闪小时频次分布,与安徽降水日变化规律高度吻合(郑佳玥等, 2024),直观反映区域对流活动的日内演变规律。

需说明的是,上述研究多基于归闪后的地闪统计数据,而本文为未归闪的回击数据。由于正极性回击在多数地闪中占比较低,且区域极性分布主要受气候环境影响,对数据归闪处理的敏感性不高,该对比仍可反映区域一致性特征。

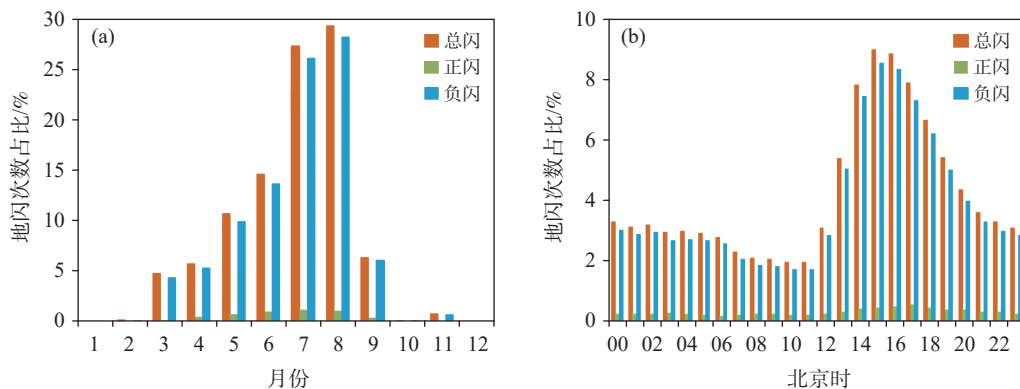


图 3 2014—2023 年安徽省 ADTD 系统各月 (a) 和各时次 (b) 地闪次数占比分布

Fig. 3 Cumulative proportion distribution of the monthly (a) and hourly (b) counts of cloud-to-ground lightning strokes of ADTD system in Anhui Province from 2014 to 2023

3.2 雷电流幅值累积概率分布特征

图 4 对比了安徽省 ADTD 系统实测雷电流累积概率与 IEEE 推荐模型(朱海燕等, 2018)的理论曲线(0~200 kA 区间)。由图可见,两条曲线整体吻合良好,拟合一致性水平达 99.2%,平均误差仅为 0.2%。具体而言,在 10~50 kA 区间,ADTD 系统监测值略高

于 IEEE 推荐值,可能与安徽地处气候过渡带、中小幅值雷电流活动较为活跃有关;在 70 kA 以上高幅值区间,误差均低于 1%;最大误差出现在 20~30 kA 段(中小幅值区间),误差比为 1.45%,整体误差处于较低水平。需要说明的是,上述拟合结果的高一致性需结合回击特征与系统探测特性进行深入解析。

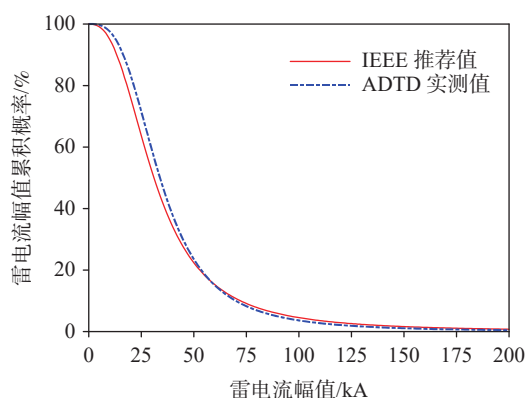


图4 2014—2023年安徽省ADTD系统实测与IEEE推荐模型雷电流幅值累积概率分布对比

Fig. 4 Comparison of cumulative probability distributions of lightning current amplitudes between measured data from Anhui ADTD system during 2014 to 2023 and the IEEE recommended model

ADTD和LLS两套定位系统比对发现:王学良等(2021)基于ADTD系统统计的多回击负地闪中后续回击(即非首次回击)的峰值电流中位数为33.0 kA,而赵晓凤等(2023)基于电力部门雷电定位系统(LLS)统计的多回击负地闪中后续回击的峰值电流中位数为24.4 kA。研究表明,不同监测系统对同类闪电参数的观测结果存在显著差异,其中ADTD系统给出的多回击负地闪中后续回击峰值电流中位数相对更高。

从理论上讲,未归闪数据因包含大量幅值偏弱的后续回击,其累积概率分布应比仅基于首次回击的IEEE模型更偏向低幅值区间。然而,本研究分析发现,在10~50 kA区间,ADTD系统实测数据反而略高于IEEE推荐值。高塔雷击的对比观测证实,依托远距离电磁场推算雷电流的闪电定位系统,易对中小幅值回击产生稳定的电流幅值高估现象(Baba and Rakov, 2007),这一与理论预期相反的偏移特征,其主导原因可能是ADTD系统在雷电流幅值反演中存在系统性高估倾向。该倾向在10~50 kA区间表现尤为明显,其抬升作用超过了未归闪数据中大量弱回击对分布曲线的拉低效应,从而导致累积概率在该区间高于理论预期值。

综上,安徽省ADTD系统监测正极性地闪回击占比为5.4%,7—8月为月变化峰值,日变化峰值15:00—16:00,在地闪极性识别及月、日变化规律方面,与周边省市闪电监测结果及本地降水特征均吻合良好。同时,其雷电流幅值累积概率分布与IEEE标准模型高度一致。以上分析表明,安徽省ADTD系统雷电监测数据质量良好。

4 结论与讨论

本文基于2014—2023年安徽省ADTD闪电定位系统地闪回击数据,选取参考点和雷电案例,采用网格法、统计与一致性分析等方法,从定位精度和雷电参数(地闪、雷电流幅值)方面,评估了ADTD系统地闪回击监测数据质量。得出主要结论如下:

(1) 定位精度上,ADTD系统在参考点周边存在571~1 442 m的系统性定位误差,高于系统标称误差(500 m),且方向无规律。空间分布上,各参考点周边地闪回击密度呈现“0~1 km范围内密度偏高,1~2 km范围内逐步趋近区域均值,2 km外显著偏低”的规律,这与高建筑物引雷理论完全一致,表明监测数据的合理性;从地形影响来看,该误差在平原地区较小(平均428 m),在山区则显著增大至1 070 m。地闪回击等值线形态与山体走向基本吻合,表明复合地形通过遮挡与畸变电磁信号是导致定位误差增大的主要原因。

(2) 基于10起典型雷灾案例统计显示,ADTD系统在平原地区的平均定位误差为428 m,低于该系统500 m理论定位误差上限;受地形遮挡影响,山区平均误差达1 070 m,约为平原的2.5倍,该偏差属于复杂地形下的正常观测偏差。

(3) 安徽省地闪回击的极性比例、月际与日变化特征与本地强对流及降水气候变化规律匹配良好;雷电流幅值累积概率分布与IEEE标准模型的拟合一致性达99.2%,表明ADTD系统在地闪极性、时间一致性方面具有较高的可靠性,但在10~50 kA区间存在系统性高估倾向。

本文揭示的定位误差随地形起伏呈现“平原-丘陵-山区”逐级增大的梯度规律,可为安徽复杂地形条件下ADTD系统观测数据的订正与应用提供参考;基于安徽复杂地形的实测误差规律,在山区雷电灾害调查中将统计半径适当扩大,可提高致灾闪电识别的准确性,较通用应用方案更贴合复杂区域的业务需求。因此,在系统后续业务应用中,应避免仅通过单一指标判定雷击点,建议结合时间同步性与位置关联性双参数综合识别,以提升致灾回击判定准确性。关于定位误差规律的量化验证、双参数协同判定的具体阈值标准,有待后续补充样本深入研究。此外,在应用安徽省ADTD系统数据进行雷电风险评估或防护设计时,需充分关注其幅值可能系统性偏高的潜在影响,建议后续通过优化归闪算法,并重点推动与本地电力部门LLS等多源数据的交叉验证与协同校准,进一步提升雷电流参数反演的精度和业务应用的可靠性。

参考文献 (References):

- 包坤,赖晋科,李庆申,等.2020.基于一次机场雷击事件评估 ADTD 闪电定位性能[J].*气象科技*,48(4):459–464. Bao K, Lai J K, Li Q S, et al. 2020. Evaluation of ADTD cloud-to-ground flash location performance based on an airport lightning event [J]. *Meteorological Science and Technology*,48(4):459–464 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671-6345.20190211
- 蔡然,罗欣,高彦,等.2019.闪电回击过程中高层建筑物顶部感应电流电荷特征分析[J].*气象科技进展*,9(3):190–194. Cai R, Luo X, Gao Y, et al. 2019. Induced current and charge at the top of high buildings during lightning return stroke [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*,9(3):190–194 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2019.03.028
- 陈佳雯,王磊,王超,等.2021.连绵起伏山体对雷电电磁信号的影响研究[J].*电瓷避雷器*, (3):57–66. Chen J W, Wang L, Wang C, et al. 2021. Influences of the mountainous terrain on lightning electromagnetic signal [J]. *Insulators and Surge Arresters*, (3):57–66 (in Chinese). doi:10.16188/j.isa.1003-8337.2021.03.009
- 程向阳,陶寅,邱阳阳.2018.安徽省雷电易发区域划分[J].*气象科技*,46(4):785–791. Cheng X Y, Tao Y, Qiu Y Y. 2018. Study of lightning prone region division in Anhui [J]. *Meteorological Science and Technology*,46(4):785–791 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671-6345.2017.0637
- 崔逊,高金阁,樊荣.2016. WWLLN 与江苏省 ADTD 闪电定位系统数据的对比分析[J].*大气科学学报*,39(2):270–279. Cui X, Gao J G, Fan R. 2016. Comparison and analysis of lightning characteristics in Jiangsu Province based on data from the Worldwide Lightning Location Network and the Advanced Time of Arrival and Direction System lightning location network [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*,39(2):270–279 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130310002
- 冯民学,周宇,虞敏,等.2015. 2013 年江苏省 ADTD 闪电定位系统资料的评估分析[J].*科学技术与工程*,15(7):79–84. Feng M X, Zhou Y, Yu M, et al. 2015. Evaluation of Jiangsu ADTD lightning location system data in 2013 [J]. *Science Technology and Engineering*,15(7):79–84 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671-1815.2015.07.015
- 毓韬,沈平,杨恒,等.2018.云闪过后云中电荷结构变化对触发上行闪电影响的数值模拟[J].*电瓷避雷器*, (2):77–82. Guo T, Shen P, Yang H, et al. 2018. Numerical simulation of effects of the thundercloud charge structure diversification on the upward lightning triggering after the cloud flash [J]. *Insulators and Surge Arresters*, (2):77–82 (in Chinese). doi:10.16188/j.isa.1003-8337.2018.02.016
- 侯安校,周方聪,邓发斌,等.2022.近 10 年海南省雷电灾情及其对闪电定位性能的评估[J].*气象研究与应用*,43(2):80–86. Hou A X, Zhou F C, Deng F B, et al. 2022. Lightning disaster in Hainan in recent 10 years and its evaluation on lightning location performance [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*,43(2):80–86 (in Chinese). doi:10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.2.14
- 鞠晓雨,王凯,朱浩.2022. 2011—2021 年安徽省闪电时空分布特征分析[J].*沙漠与绿洲气象*,16(5):110–117. Ju X Y, Wang K, Zhu H. 2022. Temporal and spatial distribution characteristics of lightning in Anhui from 2011 to 2021 [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,16(5):110–117 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.05.015
- 李亚飞,祝传栋,刘邕,等.2025.京津城际铁路沿线雷电活动特征及危险性评估[J].*暴雨灾害*,44(3):332–339. Li Y F, Zhu C D, Liu Y, et al. 2025. Assessment of dangerousness and characteristics on lightning along the Beijing-Tianjin intercity railway [J]. *Torrential Rain and Disasters*,44(3):332–339 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-016
- 刘平英,徐伟新,李思,等.2024.云南省两套闪电定位系统地闪回击参数对比及探测性能分析[J].*热带气象学报*,40(4):607–622. Liu P Y, Xu W X, Li S, et al. 2024. Comparison of cloud-to-ground lightning parameters and detection performance of two lightning location systems in Yunnan Province [J]. *Journal of Tropical Meteorology*,40(4):607–622 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2024.054
- 刘岩,李征,程向阳,等.2015. LD-II 和 ADTD 型闪电定位资料的对比分析[J].*南京信息工程大学学报(自然科学版)*,7(4):380–384. Liu Y, Li Z, Cheng X Y, et al. 2015. Comparative analysis of LD-II and ADTD lightning location data [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology(Natural Science)*,7(4):380–384 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.jnuist.2015.04.011
- 刘泽,郭凤霞,郑栋,等.2020.一次暖云强降水主导的对流单体闪电活动特征[J].*应用气象学报*,31(2):185–196. Liu Z, Guo F X, Zheng D, et al. 2020. Lightning activities in a convection cell dominated by heavy warm cloud precipitation [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*,31(2):185–196 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20200206
- 田德宝,冯瑜骅,张雪慧,等.2020. 2012—2017 年全国雷电灾害事故统计分析[J].*科技通报*,36(5):42–47. Tian D B, Feng Y H, Zhang X H, et al. 2020. Statistics analysis of lightning disaster accidents in China from 2012 to 2017 [J]. *Bulletin of Science and Technology*,36(5):42–47 (in Chinese). doi:10.13774/j.cnki.kjtb.2020.05.007
- 王娟,湛芸.2015. 2009—2012 年中国闪电分布特征分析[J].*气象*,41(2):160–170. Wang J, Chen Y. 2015. Analysis of the 2009–2012 lightning distribution characteristics in China [J]. *Meteorological Monthly*,41(2):160–170 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.02.004
- 王凯,周丽雅,鞠晓雨,等.2021. 2011—2019 年中国长江三角洲区域闪电时空分布特征[J].*气象与环境学报*,37(4):100–106. Wang K, Zhou L Y, Ju X Y, et al. 2021. Temporal and spatial distribution characteristics of lightning in the Yangtze River Delta of China from 2011 to 2019 [J]. *Journal of Meteorology and Environment*,37(4):100–106 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2021.04.014
- 汪开斌.2024.基于一次雷电灾害的安徽 ADTD 定位精度分析[J].*陕西气象*,2024(5):77–82. Wang K B. 2024. Location accuracy analysis of Anhui ADTD based on a lightning disaster [J]. *Journal of Shanxi Meteorology*,2024(5):77–82 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1006-4354.2024.05.012
- 王学良,成勤,王清龙,等.2021.基于 LLS 的多回击地闪及其雷电流幅值分布特征[J].*热带气象学报*,37(3):309–319. Wang X L, Cheng Q, Wang Q L, et al. 2021. The distribution characteristics of multiple strokes of cloud-to-ground lightning and their lightning current magnitude based on LLS [J]. *Journal of Tropical Meteorology*,37(3):309–319 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2021.029
- 王志超,庞文静,梁丽,等.2018. ADTD 闪电定位网在北京地区定位效率的自评估[J].*气象科技*,46(4):638–643,664. Wang Z C, Pang W J, Liang L, et al. 2018. Self-evaluation on detection efficiency of ADTD lightning location network in Beijing [J]. *Meteorological Science and*

- Technology,46(4):638–643,664 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671–6345.20170406
- 杨敢,陈佳雯,戴炳哲,等.2022.乌鲁木齐地区山体地形对地闪回击定位精度的影响[J].*电瓷避雷器*, (3):42–48. Yang G, Chen J W, Dai B Z, et al. 2022. Effect of mountain terrain on lightning return strokes location accuracy in Urungi [J]. *Insulators and Surge Arresters*, (3): 42–48 (in Chinese). doi:10.16188/j.isa.1003–8337.2022.03.006
- 张长秀.2017.广州高建筑物对其周围地闪活动特征影响的研究[D].北京:中国气象科学研究院:41–43. Zhang C X. 2017. Study on the influence of high-rise buildings on the characteristics of cloud-to-ground lightning activities around them in Guangzhou [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences:41–43 (in Chinese)
- 张坚,袁松,姚叶青.2015.江淮地区雷暴的闪电定位系统与人工观测的一致性分析[J].*暴雨灾害*,34(3):286–292. Zhang J, Yuan S, Yao Y Q. 2015. Analysis on consistency of thunderstorm data from lightning detection network and manual observation in the Jianghuai region [J]. *Torrential Rain and Disasters*,34(3):286–292 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2015.03.013
- 张科杰,谢超,郑琦玉.2022.湖北 ADTD 闪电定位系统监测数据质量分析[J].*气象科技*,50(2):179–188. Zhang K J, Xie C, Zheng Q Y. 2022. Analysis of monitoring data quality of Hubei ADTD lightning location system [J]. *Meteorological Science and Technology*,50(2):179–188 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671–6345.20210209
- 赵晓凤,杨雷,李谦,等.2023.基于雷电定位系统和实测的多回击地闪雷电流参数及模型分析[J].*广东电力*,36(8):97–103. Zhao X F, Yang L, Li Q, et al. 2023. Analysis of lightning current parameters and model based on Lightning Location System and measured multi-return stroke of cloud-to-ground lightning [J]. *Guangdong Electric Power*,36(8):97–103 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007–290X.2023.08.011
- 郑佳玥,唐晓文,刘高平,等.2024.安徽地区暖季降水回波日变化及环境场特征研究[J].*成都信息工程大学学报*,39(2):200–207. Zheng J Y, Tang X W, Liu G P, et al. 2024. Diurnal variation and environmental characteristics of precipitation echo in warm season in Anhui [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*,39(2): 200–207 (in Chinese). doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2024.02.011
- 中国气象局.2017.雷电灾害风险区划技术指南[S].北京:气象出版社:2–3. China Meteorological Administration. 2017. Technical guidelines for lightning disaster risk zoning [S]. Beijing:China Meteorological Press: 2–3 (in Chinese)
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.2015.雷电防护 第2部分:风险管理[S].北京:中国标准出版社:27–29. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. 2015. Protection against lightning-Part 2: Risk management [S]. Beijing: Standards Press of China: 27–29 (in Chinese)
- 周威,青泉,魏庆,等.2026.闪电活动在四川盆地极端短时强降水中的先兆性特征[J].*高原山地气象研究*,46(1):69–75. Zhou W, Qing Q, Wei Q, et al. 2026. Precursory characteristics of lightning activity in extreme short-duration heavy rainfall over Sichuan Basin [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,46(1):69–75 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–2184.2026.01.008
- 朱浩,程向阳,田红,等.2024.基于 GIS 的安徽省雷电致灾危险性评估与区划[J].*暴雨灾害*,43(6):733–740. Zhu H, Cheng X Y, Tian H, et al. 2024. Assessment and zoning of lightning disaster-causing hazards in Anhui Province based on GIS [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 43(6):733–740 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–186
- 朱海燕,刘海兵,张新兴.2018.基于雷电监测数据的雷电流幅值累积概率分布特征[J].*气象与减灾研究*,41(3):219–225. Zhu H Y, Liu H B, Zhang X X. 2018. Study on the cumulative probability of lightning current amplitudes based on the lightning monitoring data [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*,41(3):219–225 (in Chinese). doi:10.12013/qxyjzyj2018–031
- Baba Y, Rakov V A. 2007. Lightning strikes to tall objects: Currents inferred from far electromagnetic fields versus directly measured currents [J]. *Geophysical Research Letters*,34(20):L19810. doi:10.1029/2007GL030870
- Becerra M, Cooray V, Hartono Z A. 2007. Identification of lightning vulnerability points on complex grounded structures [J]. *Journal of Electrostatics*,65(9):562–570. doi:10.1016/j.elstat.2006.12.003
- Diendorfer G. 2010. LLS performance validation using lightning to towers[C]//Proceedings of the 21st International Lightning Detection Conference. Orlando:Vaisala:1–15
- Kohlmann H, Schulz W, Rachidi F. 2021. Evaluation of site errors in LLS magnetic direction finding caused by large hills using the 3D-FDTD technique [J]. *Earth and Space Science*,8(10):e2021EA001914. doi:10.1029/2021EA001914
- Zhu Y, Lyu W, Cramer J A, et al. 2020. Analysis of location errors of the U. S. National lightning detection network using lightning strikes to towers [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,125(D8): e2020JD032530. doi:10.1029/2020JD032530

(责任编辑 张 文)