

文章编号: 2096-1618(2024)04-0477-04

# 海南岛二维、三维闪电定位数据的时空分布和对比分析

李敏<sup>1,2</sup>, 高燚<sup>2</sup>, 劳小青<sup>2</sup>, 周方聪<sup>2</sup>

(1. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203; 2. 海南省气象灾害防御技术中心, 海口 570203)

**摘要:**为分析比较不同类型雷电定位系统的探测数据和探测效率,利用安装在海南岛的ADTD(二维)和DDW1(三维)两套雷电定位系统的观测数据以及海口、东方、万宁的雷达回波资料,应用归并、回波过滤以及数据统计的方法,对2021年4–10月海南岛二维、三维闪电定位数据进行质控处理。通过对质控后的数据进行分析,二维、三维地闪和三维云闪的总次数分别为40685次、49134次、96767次,三维闪电定位系统的探测灵敏度和探测效率明显优于二维闪电定位系统。对比分析两套系统的闪电时空分布,结果表明:二维、三维地闪和三维云闪的密度分布较为相似;二维地闪以白沙为高值中心,三维地闪以儋州为高值中心,三维云闪以儋州和白沙为高值中心;二维、三维地闪和三维云闪的日变化特征相似,峰值时间同为15:00–16:00;二维地闪、三维云闪的月变化呈双峰曲线特征,峰期分别在7月和9月,7月为主峰期;三维地闪的月变化呈多峰曲线特征,峰期在5月、7月和9月,7月为主峰期。

**关键词:**闪电定位数据;二维地闪;三维地闪;三维云闪;日变化;月分布

**中图分类号:**P427

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcui.2024.04.013

## 0 引言

闪电是通常发生于雷暴期间的一种瞬态大电流放电过程,根据闪电发生的区域和其发展的结果,一般分为地闪和云闪两种。云闪和地闪有各自的独特物理过程,每一种物理过程都与其电场磁场特征有关,闪电在大约5 Hz~300 MHz发射大量电磁辐射,目前国内外主要的闪电电磁辐射定位方式为磁定向法、时间差法和干涉法等。华云东方公司利用VLF/LF辐射源定位技术研发的ADTD可以实现大范围的地闪探测(二维),并以此完成了全国雷电监测网的布设。目前通过改进后的DDW1还实现了云闪定位(三维),而利用干涉仪采用长短基线组合的天线阵列,根据闪电VHF辐射源到达不同天线的相位差,确定辐射源的方法能较好地定位连续脉冲信号,精细化描述闪电发生发展的预击穿、梯级先导、回击、直窜先导、K过程、M分量等全过程,真正实现对云地闪和闪电通道的三维结构探测将是闪电定位系统的发展方向<sup>[1]</sup>。

海南岛是中国雷电的高发区,年平均雷暴日超100天<sup>[2]</sup>,列中国之冠。海南的雷击非常严重,据不完全统计,2012–2021年因雷击死亡19人,9人受伤,直接经济损失304万元<sup>[3]</sup>。为充分认识海南闪电活动规律,做好防雷减灾工作,海南省气象局于2009年建成ADTD二维闪电定位系统并投入业务使用超过10 a,二维闪电定位资料成熟运用在雷电监测预警<sup>[4–6]</sup>、区域雷电灾害风

险评估<sup>[7]</sup>、雷电灾害调查等多个方面。为进一步提高闪电监测能力,海南省气象局于2020年新建了DDW1三维闪电定位系统,并于2021年投入使用。

近年来,许多研究人员基于海南二维闪电定位资料进行了大量研究<sup>[8–10]</sup>,并取得不少的成果。海南三维闪电定位系统由于刚建成,监测数据还没有进行过对比分析,对三维和二维闪电数据进行多元对比分析成了当务之急。本文将比较分析海南省二维和三维闪电数据的时空分布和参数特征,为防雷减灾业务以及科研工作中使用闪电定位数据提供依据。

## 1 数据和处理

### 1.1 数据来源

海南岛二维、三维闪电定位系统均由华云东方探测技术有限公司研制,二维闪电观测系统由5部ADTD闪电定位仪和1个监测定位中心站组成,分别在海口、东方、琼中、琼海、三亚设立站点,三维闪电观测系统同样由5部DDW1闪电定位仪和1个监测定位中心站组成,与ADTD闪电定位仪安装于同一站点。ADTD、DDW1闪电定位仪探测距离同样300 km,ADTD采用时差法和定向时差联合法进行闪电定位,DDW1采用空间TOA定位法进行闪电定位。ADTD、DDW1闪电定位系统同样可实现500 m(中值)的探测精度,ADTD站的探测效率可达80%~90%,DDW1的探测效率以闪电类型分为地闪95%、回击60%、云闪40%。ADTD探测要素包括闪电时间、经纬度、强度、

收稿日期:2023-03-28

基金项目:海南省自然科学基金资助项目(2019RC361、421MS103、422MS151);海南省气象局科研资助项目(hnqxZC202111)

通信作者:高燚. E-mail: qjgaogi@qq.com

陡度、误差、定位方式等 6 项,DDW1 探测要素包括闪电类型、时间、经纬度、高度、强度、误差、定位方式等 7 项。文中将采用 2021 年 4–10 月的二维、三维闪电定位数据作对比分析。

雷达回波资料来自海口、东方、万宁 3 部 S 波段雷达,S 波段雷达最大观测距离 460 km,径向空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 6 min。首先经过解析基数据,

形成地球坐标文本文件,再通过时间剔除法、区域分割法形成体扫时间 6 min 的数字集,经过 1 km×1 km 的格点最大值处理转化为格点文件,再由格点文件转为文本文件,文本文件中的每一组数据表示 1 km<sup>2</sup> 的最大回波强度。文中将采用 2021 年 4–10 月的雷达回波资料作为二维、三维闪电数据的质控处理,二维、三维闪电主要技术参数对比见表 1。

表 1 海南岛 ADTD 和 DDW1 闪电定位系统主要技术参数

仪器名称	定位方法	定位方式	主要参数	探测精度	探测效率	闪电类型
ADTD 二维闪电定位系统	时差法和定向时差联合合法	二站振幅、二站混合、三站混合、四站算法	时间、经纬度、强度、陡度、误差、定位方式	500 m	80% ~90%	地闪
DDW1 三维闪电定位系统	空间 TOA 定位法	三站定位、四站定位、五站定位	类型、时间、经纬度、高度、强度、误差、定位方式	500 m	地闪 95% 回击 60% 云闪 40%	地闪、云闪

1.2 数据质控

1.2.1 归闪

一次闪电放电过程通常含多次回击,两套闪电定位系统均未区分探测的闪击是首次回击还是继后回击,因此,需要参照一定的标准将多次回击归类为一次闪电,即称为“归闪”<sup>[11]</sup>。归闪标准按国家标准(GB/T37047–2018)<sup>[12]</sup>执行,即首次回击和后续极性(正/负)相同回击间距离差小于 10 km,时间间隔小于 1 s,且相邻回击之间小于 500 ms 的所有回击归属于同一次地闪。为防止“回波过滤”中雷达反射率强度因距离过大而失真,需进一步缩小闪电范围,只保留海南岛陆地上空的闪电数据,简称“岛闪”。归闪结果见表 2。

表 2 2021 年 4–10 月海南岛二维、三维闪电归闪结果

类型	原始数据/次	归闪次数	白化次数
二维地闪	260129	168633	94993
三维地闪	415063	356537	247260
三维云闪	188423	188423	96831

1.2.2 回波过滤

二维闪电和三维闪电同样存在“晴天”观测到闪电的现象,一般称这一部分闪电为“误测”。“误测”包括:一种是外部干扰所产生的闪电;一种是定位不准确、落雷距离超出范围的闪电;还有一种是定位准确、落雷距离超出常规范范围的闪电。前一种闪电占“误测”闪电的大部分,后二种闪电占“误测”闪电的小部分。为删除“误测”让闪电与回波配合得更好,引入“30 dBZ 以上组合反射率”指标来过滤,即闪电在距离 30 dBZ 以上(含)组合反射率 15 km 范围内为真,否则为“误测”。因为在 30 dBZ 以下正常很少出现闪电,15 km 是闪电定位的误差或真实位置<sup>[13–16]</sup>。用该过滤方法虽不能 100% 判断闪电为真或者“误测”,但能使闪电很好地配合回波出现,表 3 为回波过滤后的结果。

表 3 2021 年 4–10 月海南岛二维、三维闪电回波过滤结果

类型	定位方式	过滤前数据/次	过滤后数据/次	百分比/%
二维地闪	二站振幅	7725	5307	68. 70
	二站混合	46106	29150	63. 22
	三站混合	18844	18559	98. 49
	四站算法	22318	22126	99. 14
三维地闪	三站定位	197023	127593	64. 76
	四站定位	29538	28486	96. 44
	五站定位	20699	20648	99. 75
三维云闪	五站定位	96831	96767	99. 93

二维地闪过滤后,二站振幅、二站混合的百分比分别为 68. 70%、63. 22%,三站混合、四站算法的百分比分别为 98. 49%、99. 14%。三维地闪过滤后,三站定位的百分比为 64. 76%,四站定位、五站定位的百分比分别为 96. 44%、99. 75%。三维云闪过滤后,五站定位的百分比 99. 93%。为保证数据质量和对比结论的准确性,只保留回波过滤后百分比在 90% 以上的数据,即二维地闪的三站混合、四站算法数据,三维地闪的四站定位、五站定位数据,还有三维云闪的五站定位数据。

质控后,三维云闪 96767 次是二维地闪 40685 次的 2. 38 倍,是三维地闪 49134 次的 1. 97 倍,表明三维闪电定位系统 DDW1 的探测灵敏度和探测效率明显要高于二维闪电定位系统 ADTD,质控后的数据将用于时空分析和参数特征对比分析。

2 结果与分析

2.1 闪电密度

闪电密度采用网格大小 5 km×5 km。从图 1 看,二维、三维地闪和三维云闪的密度高值区相似,都是密度高值区主要分布在海南岛西部。二维地闪明显比三维地闪少,高值区有两个高值中心,一个在以儋州为中

心,二维地闪密度为 5 次/km<sup>2</sup>,三维地闪密度为 7 次/km<sup>2</sup>;另一个在以白沙为中心,二维地闪密度为 5 次/km<sup>2</sup>,三维地闪密度为 6 次/km<sup>2</sup>,位置配合得非常好。三维云闪在以儋州为中心有一密度高值区,中心值为 18 次/km<sup>2</sup>,另一白沙划在 14 次/km<sup>2</sup> 的密度高值区里边,与二维、三维地闪的密度高值区位置配合得很好。总体比较来看,三维云闪与二维地闪的密度高值区更为相似,三维云闪的密度高值区在二维地闪上大小都有对应,三维地闪则不然。

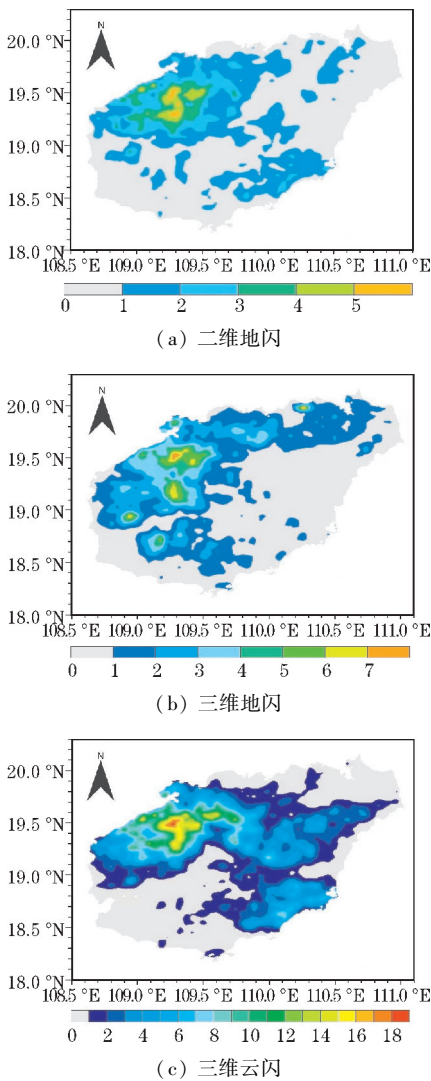


图 1 2021 年 4-10 月海南岛二维、三维闪电密度

2021 年二维、三维地闪和三维云闪的密度高值区与海南岛二维地闪历年平均的密度高值区分布并不一致,历年平均的密度高值区除了儋州、白沙,还有澄迈南部。

2.2 闪电日变化

二维地闪、三维地闪、三维云闪的日变化趋势均呈单峰曲线特征(图 2),以 15:00-16:00 的地闪次数最多,为日变化的最高期。三维云闪 22130 次,三维地闪 10636 次,二维地闪 9020 次,分别占总数的 22.9%、21.6%、22.2%。

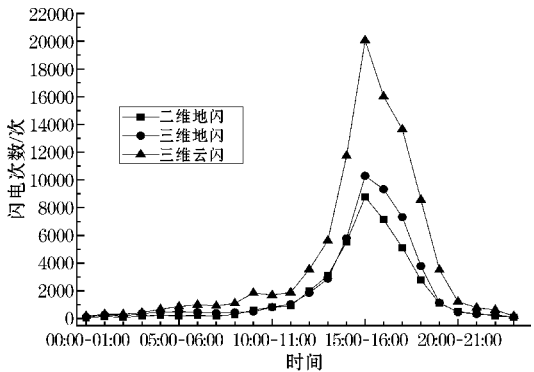


图 2 2021 年 4-10 月海南岛二维、三维闪电次数的日变化

2021 年二维、三维地闪和三维云闪的日变化与海南二维地闪历年平均日变化特征并不一致,虽然同为单峰特征,但历年的高峰期为 16:00-17:00;而各地的云闪与地闪的日变化也并不相同,2015-2016 年湖北的云闪日变化滞后于地闪<sup>[17]</sup>,而 2005-2007 年北京云闪日变化要提前于地闪<sup>[18]</sup>。

2.3 闪电月分布

二维地闪、三维云闪月变化趋势均呈双峰曲线特征(图 3),7 月为地闪次数的主峰期,9 月为地闪次数的次峰期。三维地闪月分布趋势呈三峰曲线特征,同样 7 月为地闪次数的主峰期,9 月为地闪次数的次峰期,5 月相对于三维云闪稍微拱起,比 6 月三维地闪要高,成为地闪次数的第三峰期。

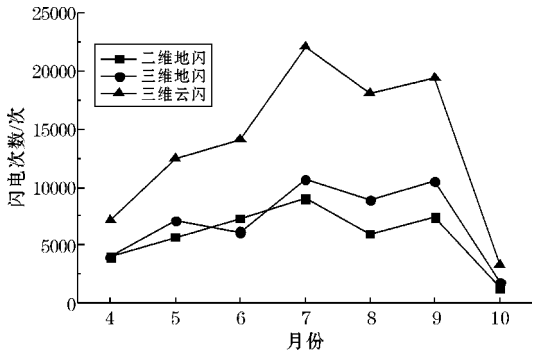


图 3 2021 年 4-10 月海南岛二维、三维闪电次数的月分布

2021 年二维地闪、三维云闪月变化与海南二维地闪历年平均月分布并不一致,虽然同样为双峰特征,但历年平均主峰期在 5 月,次峰期在 8 月。

3 结论

通过对 2021 年 4-10 月二维、三维闪电数据的质控处理,并对比分析两套系统的时空分布和参数特征,得到以下结论:

- (1) 三维闪电定位系统的探测灵敏度和探测效率明显高于二维闪电定位系统,且多出了对三维云闪的观测。
- (2) 两套闪电定位系统的密度分布基本一致,二维地闪以白沙为高值中心,三维地闪以儋州为高值中心,三维云闪以儋州和白沙为高值中心。
- (3) 二维、三维地闪和三维云闪的日变化均呈单



峰曲线特征,峰值均出现在 15:00–16:00。

(4)二维地闪和三维云闪的月分布均呈双峰曲线特征,主峰期在 7 月,次峰期 9 月。三维地闪的月分布呈三峰曲线特征,主峰期在 7 月,次峰期 9 月,第三峰期在 5 月。

基于归闪标准、雷达回波、定位方式等 3 个方面对两套系统的回击数据进行质控研究。结果表明,质控后的三维闪电数据与二维闪电数据在闪电密度分布和日变化、月分布趋势上相似。这也说明该质控方案有效可行,可以利用质控后的闪电数据开展雷击风险评估、雷击事故鉴定和雷电监测预警等应用。

## 参考文献:

- [1] 高燧. 雷电与防护技术培训教程[M]. 北京:气象出版社,2021:91–101.
- [2] 王春乙,吴慧,邢旭煌,等. 海南气候[M]. 北京:气象出版社,2014:71–73.
- [3] 候安校,周方聪,邓发斌,等. 近 10 年海南省雷电灾情及其对闪电定位性能的评估[J]. 气象应用与研究,2022,43(6):80–86.
- [4] 劳小青,韦传波,周方聪. 西南低压槽影响下的海南岛地闪活动特征[J]. 气象科技进展,2021,11(4):7–11.
- [5] 李敏,劳小青,高燧,等. 南海低压槽影响下的海南岛地闪活动特征[J]. 海南大学学报(自然科学版),2021,39(2):169–176.
- [6] 劳小青,周方聪,潘家利,等. 海南岛低压槽类天气系统雷达回波和地闪特征分析[J]. 气象与环境科学,2021,44(1):96–103.
- [7] 高燧,蒙小亮,劳小青. 基于聚类分析的海南岛雷电灾害易损度风险区划[J]. 自然灾害学报,2013,22(1):175–182.
- [8] 劳小青,石华,李敏. 海南岛正地闪时空分布特征的分析[J]. 海南大学学报(自然科学版),

2021,39(3):288–296.

- [9] 高燧,陈汇林,劳小青,等. 海南文昌火箭发射场雷电环境分析[J]. 自然灾害学报,2012,21(4):182–189.
- [10] 郭冬艳,陈红,陈有龙,等. 海南岛地闪活动的时空特征与海陆风关系[J]. 2020,10(4):102–107.
- [11] 余蓉,杜牧云,晏紫淙,等. 湖北省两套闪电定位网地闪数据的对比分析[J]. 暴雨灾害,2021,40(4):646–654.
- [12] 谷山强,王剑,张义军,等. 基于雷电定位系统(LLS)的地闪密度总则[S]. 2018. (GB/T37047–2018).
- [13] 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.
- [14] 张科杰,谢超,郑琦玉. 湖北 ADTD 闪电定位系统监测数据质量分析[J]. 气象科技,2022,50(2):178–188.
- [15] 邹斌,崔海华,张其林,等. 海南地区山体地形对地闪回击定位精度的影响[J]. 科技技术工程,2021,21(28):11989–11998.
- [16] 殷启元,范祥鹏,张义军,等. 一次“晴天霹雳”致死事件分析[J]. 气象学报,2019,77(2):292–302.
- [17] 王慧,高玉龙,胡晋. 基于 VLF/LF 三维闪电定位仪资料的湖北省闪电特征分析[J]. 气象水文海洋仪器,2021,9(3):48–52.
- [18] 吴凡,崔晓鹏,张大林,等. 2005–07 年北京地区地闪和云闪的统计特征[M].
- [19] 成勤,王学良,肖稳安,等. 我国中部五省云地闪电时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害,2011,30(3):254–259.
- [20] 田芳,肖稳安,冯民学,等. 闪电定位仪观测结果的修订分析[J]. 华东电力,2008,38(6):655–660.
- [21] 李京校,郭凤霞,扈海波,等. 2017 北京及其周边地区 SAFIR 和 ADTD 闪电定位资料对比分析[J]. 高原气象,36(4):1115–1126.

## Spatiotemporal Distribution of 2D and 3D Lightning Location Data in Hainan Island and Comparative Analysis

LI Min<sup>1,2</sup>, GAO Yi<sup>2</sup>, LAO Xiaoqing<sup>2</sup>, ZHOU Fangcong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203, China; 2. Meteorological Disaster Prevention Technology Center of Hainan Province, Haikou 570203, China)

**Abstract:** To analyze and compare the detection data and detection efficiency of different types of lightning positioning systems, the observation data of ADTD (2D) and DDW1 (3D) lightning positioning systems installed in Hainan Island and the radar echo data of Haikou, Dongfang, and Wanning are used. the methods of flash return, echo filtering and data statistics are applied. The 2D and 3D lightning location data of Hainan Island from April to October 2021 were subjected to quality control processing. Through the analysis of the quality control data, the total number of 2D, and 3D ground flashes and 3D cloud flashes were 40685, 49134, and 96767 times respectively. The detection sensitivity and detection efficiency of the 3D lightning location system were significantly better than that of the 2D lightning location system. The results show that the density distribution of 2D ground flash and 3D cloud flash are similar. The 2D ground flash takes Baisha as high-value center, the 3D ground flash takes Danzhou as high-value center, and the 3D cloud flash takes Danzhou and Baisha as high-value center. The diurnal variation characteristics of 2D, 3D ground flash, and 3D cloud flash are similar, and the peak time is 15:00–16:00. The monthly variation of two-dimensional ground flash and three-dimensional cloud flash showed a bimodal curve, and the peak period was in July and September, respectively, with July being the main peak period. The monthly variation of the three-dimensional ground lightning is characterized by a multi-peak curve, and the peak period is in May, July, and September, with July being the main peak period.

**Keywords:** lightning location data; two-dimensional ground flash; three-dimensional ground flash; three-dimensional cloud flash; daily variation; monthly distribution