

丁艺涵,支树林,许东蓓,等,2024.江西省地闪特征及其与雷达特征量关系研究[J].气象,50(5):591-602. Ding Y H, Zhi S L, Xu D B, et al, 2024. Research on the characteristics of cloud-to-ground lightning and its relationship with radar characteristics in Jiangxi Province[J]. Meteor Mon, 50(5):591-602(in Chinese).

江西省地闪特征及其与雷达特征量关系研究*

丁艺涵¹ 支树林² 许东蓓¹ 燕若彤¹ 常秉松¹

1 成都信息工程大学大气科学学院,高原大气与环境四川省重点实验室,成都 610225

2 江西省气象台,南昌 330096

提 要: 利用 2013—2020 年 3—9 月江西省多普勒天气雷达和地闪观测资料,对地闪分布特征及其与雷达主要特征量之间的关系进行统计分析。结果表明:江西省地闪频数从东北到西南逐渐减小,其北部鄱阳湖平原为地闪频数高值区;地闪频数具有明显的季节变化和日变化特征,总地闪频数在 16:00 达到一天的峰值;地闪频数与低层(3 km)雷达回波强度的关系可用对数拟合方程来描述,地闪频数与低层雷达回波面积的变化趋势正相关,回波越强相关性越强,但二者存在位相差,地闪增加先于回波面积增加的情况约占 57%~60%,大多数情况下可在 18 min 内发现两者均有增加;箱线图特征显示,随着回波强度增大,地闪发生时的回波伸展高度相应减小,而回波厚度略增大,从而得出不同强度回波的地闪发生格点周围 10 km 半径范围的雷达回波特征。

关键词: 地闪,雷达回波,特征分析

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.061001

Research on the Characteristics of Cloud-to-Ground Lightning and Its Relationship with Radar Characteristics in Jiangxi Province

DING Yihan¹ ZHI Shulin² XU Dongbei¹ YAN Ruotong¹ CHANG Bingsong¹

1 Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province,

College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330096

Abstract: Using the Doppler weather radar and cloud-to-ground (CG) lightning observation data in Jiangxi Province from March to September in 2013—2020, we carried out a statistical analysis on the distribution characteristics of lightning and its relationship with the main features of radar. The results show that the CG lightning frequency in Jiangxi Province gradually decreases from the northeast to the southwest, and the Poyang Lake Plain in the north is the area with high CG lightning frequency. The CG lightning frequency has obvious seasonal and diurnal variation characteristics, and the total CG lightning frequency reaches the peak of one day at 16:00 BT. The relationship between CG lightning frequency and the low-level (3 km) radar echo intensity can be described by a logarithmic fitting equation. The number of CG lightning frequency is positively correlated to the variation trend of the low-level (3 km) radar echo area, and the stronger the echo, the stronger the correlation. However, there is a phase difference between the two, and the increase of the CG lightning frequency precedes the increase of the echo area by about 57%—60%. In most cases, the increase in both of CG lightning frequency and echo area can be found within 18 minutes.

* 国家自然科学基金青年基金项目(42205137)、上海台风研究基金项目(TFJJ202209)和江西省气象科技重点项目(JX2020Z02)共同资助

2022 年 11 月 8 日收稿; 2024 年 1 月 22 日收修定稿

第一作者:丁艺涵,主要从事灾害性天气形成机制研究. E-mail: zjlxdyh@outlook.com

通讯作者:支树林,主要从事临近预报业务和研究. E-mail: zhisl00@126.com

The boxplot features show that with the increase of the echo intensity, the extension height of the echo is lowered correspondingly, but the echo thickness is added slightly. Thus, the radar echo characteristics of the 10 km radius range around the CG lightning occurrence grid point, where the radar echo intensities are different, are obtained.

Key words: cloud-to-ground (CG) lightning, radar echo, characteristic analysis

引 言

闪电是指不同极性电荷中心区域之间的一种长距离放电现象,具有瞬态大电流、高电压、高温、强电磁辐射等特征,其中地闪是指发生在云内电荷中心与地物和大地之间的一种对地放电的过程。通常认为是在对流不稳定条件下,雷暴云中部分不同相态的水成物粒子在相互碰撞和反弹过程中发生了电荷的转移,从而产生正负电荷区,最终形成闪电(郟秀书等,2014)。闪电的形成与对流性天气有密切联系,因此可以在很大程度上对强对流的发生发展到指示作用。

随着闪电探测和定位技术的发展以及多普勒天气雷达业务的应用,国内外众多学者利用这两种资料针对强对流活动特征及其预报预警方法开展了很多研究。其中包括对研究区域的闪电活动特征进行统计分析,可侧面反映出区域对流活动规律。Herrera et al(2018)利用哥伦比亚 14 年的地闪资料,发现地闪活动的日变化高峰出现在 23:00—02:00,月变化为双峰型。杨钢等(2021)分析了 2004—2014 年江西省闪电活动时空分布特征,发现江西省闪电活动高发期为 6—9 月,闪电活动多集中于午后到前半夜,多发于山地与地势较低的过渡带。王娟和谌芸(2015)统计了 2009—2012 年我国闪电的时空分布特征,其结果显示闪电白天在江浙以及广东沿海活跃,夜间则主要发生在云贵、川渝内陆地区。张恒进和郑永光(2022)基于 1971—2010 年逐时雷暴观测数据,发现中国大部分地区的日雷暴时数候变化为单峰型,但长江中下游和华南地区为双峰型。

一些学者对雷达特征参量和闪电活动的相关性进行分析,确定预示闪电活动变化的参数和阈值。对雷达和闪电的统计特征进行对比分析(Hondl and Eilts, 1994; Gremillion and Orville, 1999; 刘维成等,2015; Mecikalski and Carey, 2018),其中有研究指出 -10°C 高度的雷达反射率达到 40 dBz 是地闪发生的较好特征。石玉恒等(2012)发现 40 dBz 的

回波顶高、 -15°C 层以上超过 30 dBz 的回波体积可作为地闪活动结束的预警因子。Srivastava et al (2022)的研究表明闪电主要从对流核心向雷达回波 45 dBz 以上的近外围区域分布。基于相关研究目前已有一些闪电预报方法(Price and Rind, 1992; 姚叶青等,2011; 苟阿宁等,2022)。除此之外,也有关于闪电频数与雷达回波特征量、强对流天气发生时间先后关系的研究。易笑园等(2009)、张春燕等(2021)对地闪频数和雷达强回波高度的统计关系进行分析,发现回波顶高常先于地闪频数达到峰值,表明前者在一定程度上能预报地闪的演变趋势。于函等(2022)发现在 7 次飏线过程中有 5 次的闪电频数峰值同时或提前于 $V_{30\text{ dBz}}$ (大于 30 dBz 的雷达回波体积)的峰值出现,提前时间为 0~96 min。Williams et al(1999)对美国佛罗里达州的一些强对流风暴进行分析,指出总闪电频数峰值先于强对流天气 5~20 min 发生。阮悦等(2022)对福建 31 个冰雹单体进行分析,指出 80%冰雹云地面降雹出现在闪电峰值后的 3~25 min,闪电快速跃增先于降雹前 6~40 min。

江西省位于长江中下游,北部为鄱阳湖平原,东、西、南三面环山,冷暖空气在春夏季节常交汇于此,天气成因复杂,强对流天气发生频繁,气象灾害种类较多,夏半年强对流天气造成的雷击、洪涝等灾害给人民生命财产安全带来巨大威胁(刘献耀等,2009)。江西省所在的江南中南部地区闪电活动的活跃期长(集中于 3—9 月),发生雷击的潜在危害性大,因此开展基于长时间序列的地闪定位观测资料和多普勒雷达回波资料的对比或融合分析,有助于较系统地认识我国长江中下游偏南地区的地闪活动特点,也为更好地开展精准化防灾减灾工作提供参考,但这方面的研究成果仍较少。本文针对江西省长时间序列的地闪活动特征进行研究,并统计分析地闪频数和雷达回波主要特征量之间的对应关系,可更好地掌握该区域对流活动中地闪及雷达特征的演变规律,进而探讨该地区地闪发生时的回波特征,地闪频数与雷达回波特征量出现时间先后关

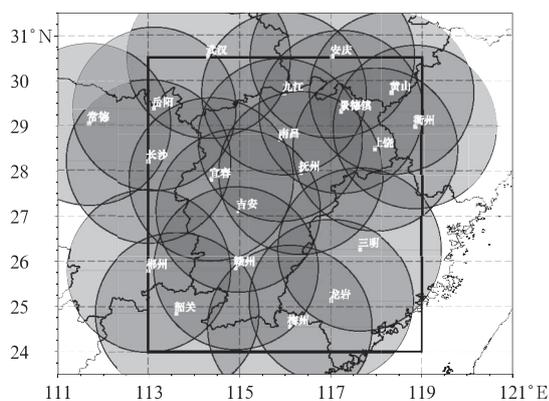
系,从而丰富已有的强对流研究工作,并为雷电预警防护提供更多科技支撑。

1 资料与方法

1.1 资料及地区选取

本文主要是对江西省地闪及雷达特征进行研究,为此选取 2013—2020 年 3—9 月 SA 型多普勒天气雷达资料,包括江西省 8 部雷达(九江、景德镇、南昌、抚州、上饶、宜春、吉安、赣州)及其周边 12 部雷达(武汉、安庆、常德、岳阳、黄山、衢州、长沙、郴州、韶关、梅州、龙岩、三明)所能获取的雷达基数据。资料序列为 8 年观测,具有较好的气候学统计意义和参考价值。图 1 为上述雷达覆盖区域($23.5^{\circ}\sim 31.5^{\circ}\text{N}$, $111^{\circ}\sim 121^{\circ}\text{E}$)200 km 半径扫描圈的分布情况,完全涵盖了本文的研究区域($24.0^{\circ}\sim 30.5^{\circ}\text{N}$, $113^{\circ}\sim 119^{\circ}\text{E}$),即图 1 中方框所示区域。选取同时段全国气象部门共享的地闪观测资料,其中包括了江西省 11 个 ADTD 雷电探测仪所得数据,采用脉冲时间到达法(时差法)和定向时差联合法进行定位,各站探测半径为 300 km,网内探测定位精度在 150 km 内约为 500 m(Xia et al,2015)。

本文对雷达和地闪观测资料的处理和统计均在研究区域内;文中涉及地图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的标准地图制作,审图号为 GS(2020)4619,底图无修改。



注:方框代表研究区域。

图 1 江西省及周边地区的 SA 型多普勒天气雷达网覆盖范围示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SA-type Doppler weather radar network and coverage in and around Jiangxi Province

1.2 数据处理

1.2.1 雷达资料的处理

将 SA 型多普勒天气雷达基数据,经过非气象杂波抑制、波束阻挡、 0°C 层亮带等质量控制,内插到统一的笛卡儿坐标系下,形成空间分辨率均匀的 3D 网格拼图(经、纬度和高度坐标)数据,将相邻几个雷达站的基数据资料进行组网拼图,生成雷达三维反射率因子拼图数据。拼图数据的时间分辨率为逐 6 min;经纬度范围为研究区域,在水平方向的格点分辨率为 $0.01^{\circ}\times 0.01^{\circ}$;垂直方向上的高度为 1~20 km,其中 1~12 km 间隔为 0.5 km、12~20 km 间隔为 1 km,即总共 31 个高度层。12 km 以下的高度间隔设置为 0.5 km,其原因是为了更多地关注浅-普通对流在垂直方向上的回波细节特征。

利用拼图数据,在研究区域内计算得到不同强度回波的最大高度、厚度和面积等参数,为统计分析雷达回波特征参数与地闪频数的关系提供数据基础。由于回波高度的计算受仰角的影响很大,这种不足在单部雷达资料处理过程中难以被完全避免,为此采用多部雷达资料进行拼图,形成不同高度的 CAPPI 产品,就能较好地填充弥补单部雷达 0.5° 仰角以下和 19.5° 仰角以上的空白,基于此计算得到的回波高度就更为准确。另外,还计算了不同强度回波的垂直厚度,即遍历不同高度上的反射率值,取其介于指定阈值间的高度差即为厚度。

通常而言,江西省在 3 月开始逐渐进入对流活动活跃期,下旬以后 0°C 层高度会接近或达到 4 km,为避免 0°C 层亮带对回波强度的污染作用,也为了消除固态降水的影响,本文取 3 km 高度上的回波来计算不同强度回波的面积,若无特别说明,本文的回波强度和面积均指该高度上的。同一高度上的回波强度或面积具有很好的可比性,而组合反射率数据不同位置的高度不一样,因此无法计算面积或者说该面积的物理意义不清晰,故本文没有基于组合反射率计算面积,而只对同一高度上的回波计算了其面积,以此反映出回波区域的大小。

在雷达资料的质量控制方面,Steiner and Smith(2002)在研究一系列反射率参数的基础上,认为雷达回波的垂直伸展、反射率因子场的水平变化和反射率的垂直梯度对于剔除非气象回波最有用,同时参考万玉发等(2013)在计算反射率垂直梯度时的做法,将 Steiner 算法中的仰角改为高度,从而减

小波束随距离带来的展宽影响。通过分析回波强度在水平和垂直方向上的梯度,来分辨和剔除非气象回波。

1.2.2 地闪资料的处理

气象部门共享的地闪资料已经经过质量控制,本文在此基础上处理获得年际地闪数据,具体为:一是考虑通常正地闪的电流值较强,因此在处理资料时参考了 Cummins et al(1998)的做法,将电流值小于 10 kA 的正地闪滤除;二是将图 1 的区域划分成多个网格,以便于与雷达回波数据进行对比分析。地闪频数数据的时间分辨率为逐 6 min;经纬度范围为研究区域,在水平方向的格点分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$;在统计分析地闪与雷达回波的相关关系时,将所得地闪频数的格点数据分辨率调整为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$,以使两者的网格大小相一致,研究区域与雷达资料对应。

1.3 主要分析方法

1.3.1 归一化处理

为了突出趋势变化、消除偶然异常值,同时弱化数值大小对相关性的影响,将相关数据集进行归一化和滑动平均处理。其中,归一化处理将原始数据线性化转换到 $[0, 1]$ 的范围。假设原数据为 x ,归一化处理后为 x' ,则公式为:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

1.3.2 DTW 算法

已有研究表明,回波面积和地闪频数在时间变化上有明显的相关性(支树林等,2018;孙玉婷等,2019),但在不同强度下相关性的存在差异。为进一步探求这种差异,本文使用动态时间规整(dynamic time warping,DTW)算法(Keogh and Ratanamahatana,2005)。DTW 算法可以衡量 2 个长度不同的时间序列的相似度(Magdy et al,2018),其步骤为:(1)计算时间序列 1 和时间序列 2 各个点之间的累计距离矩阵 \mathbf{P} ;(2)寻找一条从矩阵左下角到右上角且元素和最小的路径,则从矩阵左上角 $(1, 1)$ 到任一点 (i, j) 的最短路径长度为 $D(i, j)$ 。其起始条件和递推公式如下:

$$D(1, 1) = \mathbf{P}(1, 1) \quad (2)$$

$$D(i, j) = \mathbf{P}(i, j) + \min\{D(i, j-1), D(i-1, j), D(i-1, j-1)\} \quad (3)$$

DTW 算法给出 2 个计算结果:一是时间规整

后 2 个序列各个对应点之间的距离之和,即欧几里得距离(DIS);二是匹配特征对,即时间规整后的序列与原序列的对应坐标关系(PATH),如匹配特征对 $(\text{PATH}[i][1], \text{PATH}[i][2])$ 表示时间规整后的序列 1 的第 i 个点对应原序列的第 $\text{PATH}[i][1]$ 个点,时间规整后的序列 2 的第 i 个点对应原序列的第 $\text{PATH}[i][2]$ 个点。本文中 $\text{PATH}[i][1]$ 代表地闪时间序列, $\text{PATH}[i][2]$ 代表雷达时间序列。

以 2020 年 6 月 1 日江西境内的雷电天气为例,经过归一化和滑动平均处理的回波面积和地闪频数曲线如图 2a 所示,经过 DTW 算法得到的不同强度雷达回波的面积出现时间如图 2b 所示,可以看到,回波强度越大,其面积就越早达到峰值。尽管回波面积和地闪频数的趋势变化间存在一致性,但其变化在时间上有先后,而 DTW 算法很好地消除了地闪频数变化和回波面积变化之间的时间差,因此本文对动态时间规整后的 2 个时间序列做相关系数分析。

1.3.3 Spearman 秩相关系数计算

使用科尔莫戈罗夫-斯米尔诺夫检验(Kolmogorov-Smirnov test),验证数据是否属于正态分布,检验结果均为显著性水平 $P < 0.001$,即 DTW 算法处理后的地闪频数和回波面积数据均不符合正态分布。对于非正态资料,应使用 Spearman 秩相关来做线性相关分析。假设 d_i 表示第 i 个数据对的位次值的差值, n 表示总的观测样本数, ρ 表示相关系数,则其公式为:

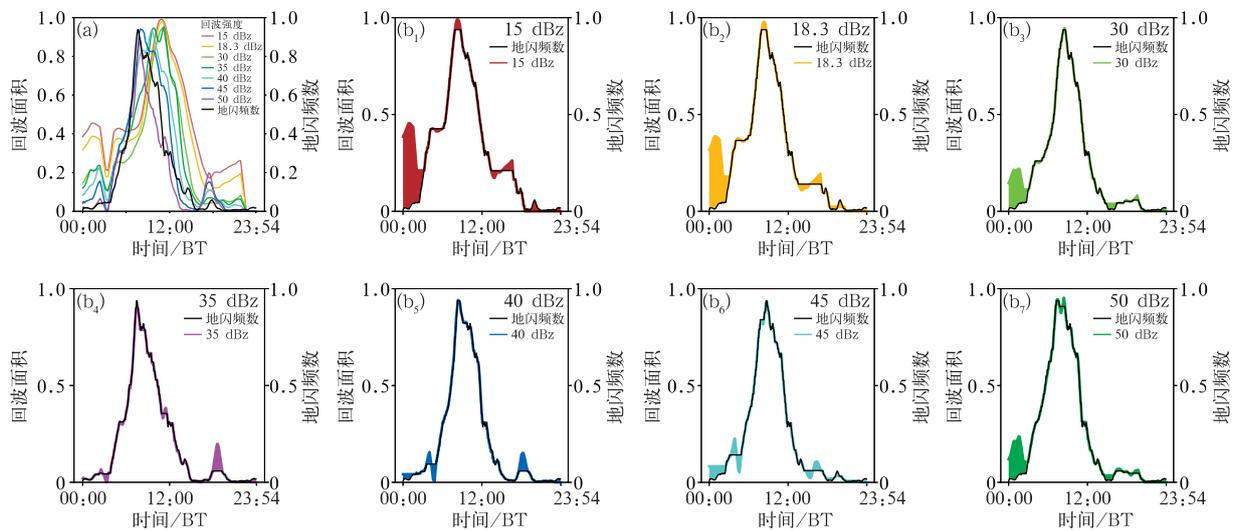
$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (4)$$

经上述处理和计算,便可得到地闪频数与雷达回波面积的相关系数,其值范围在 $[-1, 1]$,其中 -1 表示完全负相关, 0 表示无相关, 1 表示完全正相关,从而为更好地分析二者的相关性关系提供了可能。

2 江西省地闪分布特征

2.1 地闪频数空间分布特征

由图 3 可以看出,江西省的地闪频数呈现出明显的区域差异性,从东北到西南地闪频数逐渐减小。江西省北部的鄱阳湖平原地闪频数较高,达到每日 15~24 次,中南部的地闪频数为 10~18 次。由于



注:图 b 填色代表 2 条曲线相夹部分填充。

图 2 2020 年 6 月 1 日经过(a)归一化和滑动平均处理, (b)DTW 算法处理的回波面积与地闪频数时间序列曲线

Fig. 2 Time series curve of echo area and CG lightning frequency after (a) normalization and moving average processing and (b) DTW algorithm processing on 1 June 2020

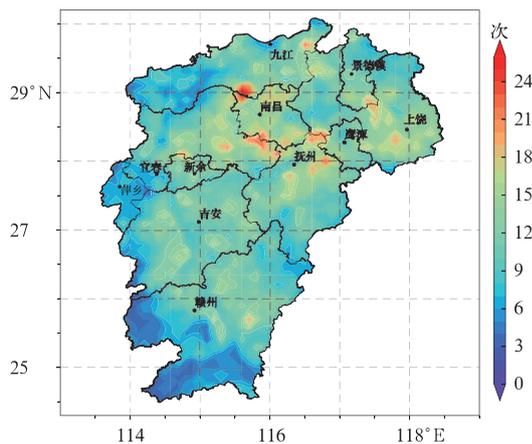


图 3 2013—2020 年 3—9 月江西省地闪频数日平均空间分布

Fig. 3 Daily average spatial distribution of CG lightning frequency in Jiangxi Province from March to September in 2013—2020

江西中北部地区多冷暖气流交汇,叠加西太平洋副热带高压进退,导致强对流多发且集中,尤其是浙赣铁路沿线,其附近区域是暴雨中心带之一,甚至也是雷击和洪涝灾害的易发区。而江西省周边多山地地形,地势较高,西北部有幕阜山和九岭山,西边界有罗霄山脉和武功山,西南边界有大庾岭、九连山等,这些山脉所在地区的对流性天气多呈局地性和间歇性,每日地闪频数大多不超过 6 次。

2.2 地闪频数月变化特征

逐月地闪频数空间分布(图 4)显示,江西省地闪频数的整体分布特征表现出明显的季节性变化。地闪频数在 3 月和 4 月均较小,大部分地区月均在 10~50 次。5 月江西境内的地闪频数大幅度、大范围增加,大部分地区达到 60 次以上,但北、西、南三面与邻省接壤的山脉地区地闪频数依然较小。6 月地闪频数继续增大,达到 100 次以上的地区扩大至江西北部的景德镇和上饶地区。至 7 月和 8 月,几乎整个江西省的地闪频数都在 60 次以上,过半地区的地闪频数在 100 次以上。9 月地闪频数骤减,60 次以上的区域呈现出小面积且零散的分布特征。

江西省地闪频数的高值区随季节而移动变化,月均 ≥ 150 次的高值区 5 月出现在抚州,6 月从抚州向西北扩大到南昌,7 月向东北扩大到上饶,位于上饶的最大中心值达到 388 次。8 月 ≥ 150 次的高值区转移到了赣州和吉安。

2.3 地闪频数日变化特征

支树林等(2012)针对江西省地闪特征的研究结果表明,地闪频数位于前 3% 的高值区可以一定程度反映较强的对流活动。经统计发现,小时地闪频数 ≥ 16 次的格点数所占比例最接近 3%,因此可用

小时地闪频数 ≥ 16 次来反映较强对流活动。由图 5 可以看到,小时地闪频数 ≥ 16 次的区域在 12:00—00:00 集中在江西北部地区,表明该时段内江西北部地闪活动较强,其他时段地闪活动普遍较弱,较强

地闪活动区域小且分散。总体看来,江西北部出现小时地闪频数 ≥ 16 次的区域范围最大、中部次之、南部最小。九江、南昌、鹰潭、上饶和抚州等地的较强地闪活动集中,这些地区位于鄱阳湖区附近,也是

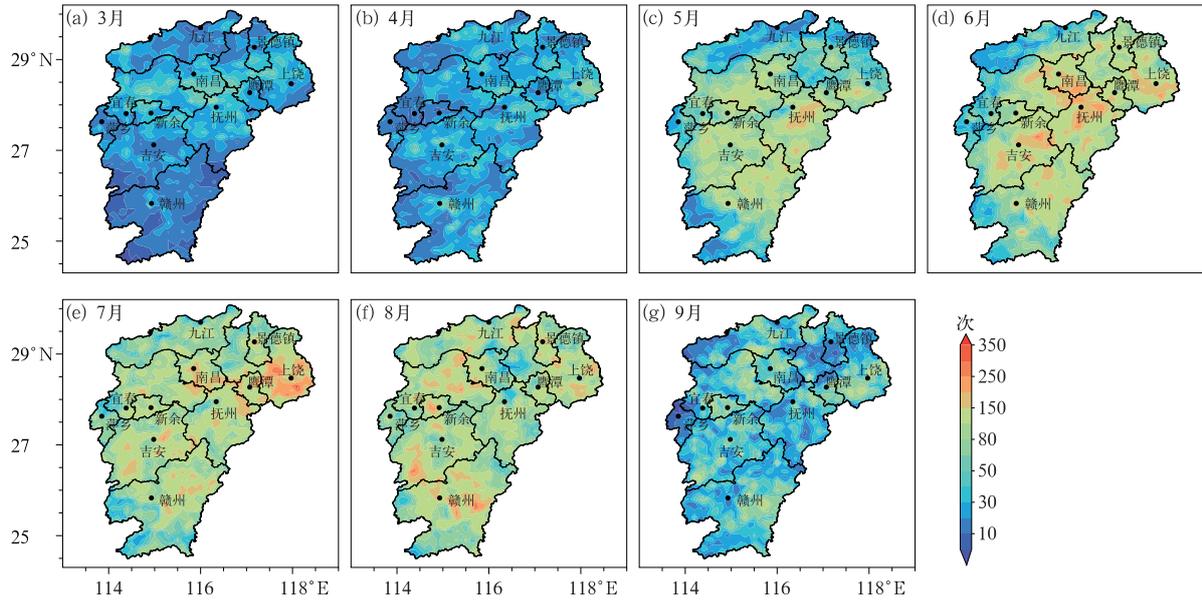


图 4 2013—2020 年 3—9 月江西省地闪频数逐月的空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of monthly CG lightning frequency in Jiangxi Province from March to September in 2013—2020

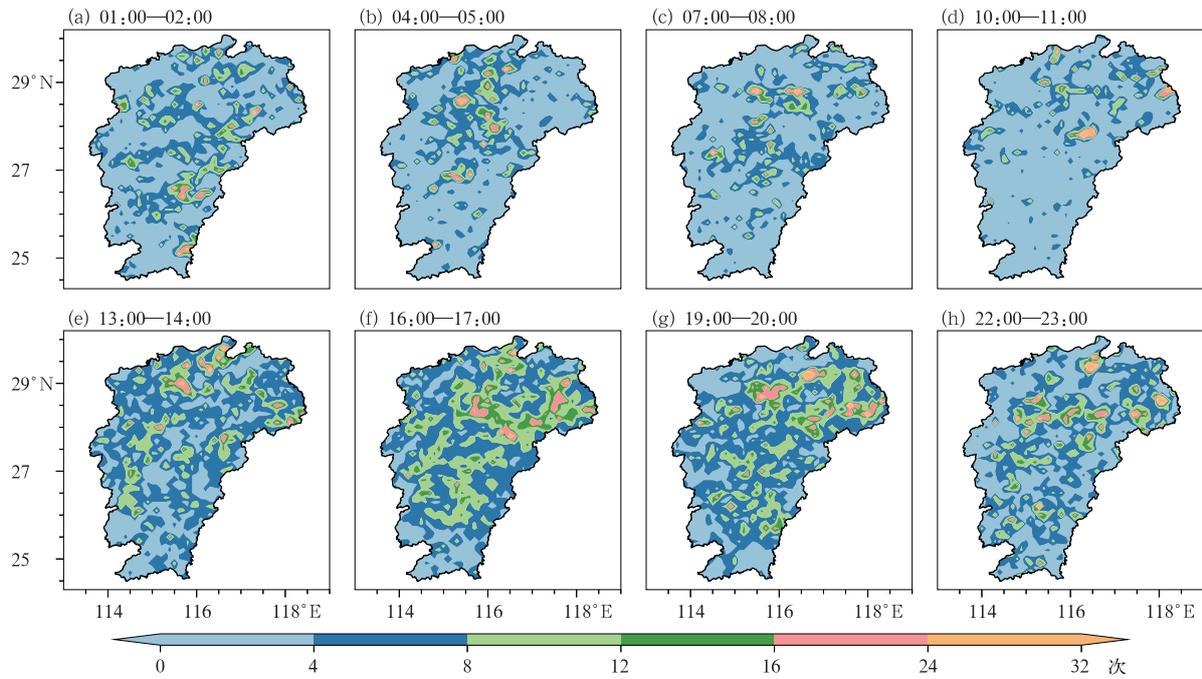


图 5 2013—2020 年 3—9 月江西省地闪频数小时均值的空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of hourly average CG lightning frequency in Jiangxi Province from March to September in 2013—2020

江西省对流和降水的多发地。

图 6 为总地闪频数的时间变化,可以看到,总地闪频数的小时均值为 19 776 次,09:00 最低,为 14 806 次,10:00 后逐渐增大,至 16:00 达最大,为 25 343 次,这是午后至傍晚间热力作用增强的表现。16:00—22:00,随着热力条件转差,地闪频数也缓慢减小,对流渐趋减弱。23:00 和 06:00 出现短暂波动,这可能与夜间和凌晨边界层急流变化导致降水或对流增强有关。

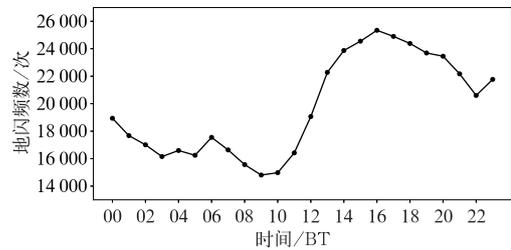


图 6 2013—2020 年 3—9 月江西省总地闪频数时间变化曲线

Fig. 6 Change curve of total CG lightning frequency in Jiangxi Province from March to September in 2013—2020

3 地闪与雷达主要特征量的关系

3.1 地闪频数与最大回波强度的关系

由于 15 dBz 以下的回波能触发的地闪极少且未达到有效降水标准(李国梁等,2015),为了能更好地反映地闪与回波强度的关系,将其去除,得到研究区域和雷达体扫时间(通常为 6 min)内地闪频数与

其对应的 3 km 高度上反射率最大值,进而对比分析两者间的关系。参考支树林等(2012)和孙玉婷等(2019)对地闪频数的分类方法,分组结果见表 1,计算不同地闪频数区间的格点数占所有存在地闪的格点数的比例,发现 6 min 内地闪频数小于 8 次的占比超过了 90%,尤以小于 3 次的居多;频数越高,占比越低,且这种降低特征变化迅速。

表 1 2013—2020 年 3—9 月江西省不同地闪频数区间的占比

Table 1 The proportion of grid points in the interval of CG lightning frequency in Jiangxi Province from March to September in 2013—2020

| 地闪频数区间/次 | [1,3] | [4,8] | [9,15] | [16,30] | [31,45] | [46,60] | [61,75] |
|----------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 占比/% | 76.3 | 14.5 | 5.3 | 2.8 | 0.66 | 0.21 | 0.15 |

考虑到 6 min 地闪频数 > 75 次的样本数小于 60 个,因此该部分不参与拟合分析,分别建立间隔为 1 次的地闪频数和回波强度均值、中位数的对应关系数组,通过最小二乘法做拟合分析,结果如图 7

和表 2 所示。2 个拟合方程均通过了显著性水平为 0.05 的 F 分布临界值检验。其中,对数曲线与均值的相关性更好,S 曲线与中位数的相关性更好,拟合效果都比较理想,相较而言对数曲线拟合优度更高一些,达到了 0.816。因此,江西省的地闪频数与雷达回波强度的关系可以用拟合方程 $y = 1.919 \ln x + 41.107$ 来描述。

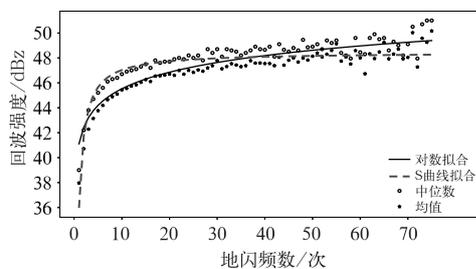


图 7 2013—2020 年 3—9 月江西省 6 min 地闪频数与回波强度均值和中位数的散点分布、对数拟合及 S 曲线拟合

Fig. 7 Scatter distribution, logarithmic fitting and S-curve fitting of 6 min CG lightning frequency and the mean and median of echo intensity in Jiangxi Province from March to September in 2013—2020

3.2 地闪频数与回波面积的关系

3.2.1 地闪频数与回波面积的相关性分析

雷达回波强度能直接反映对流活动的强弱程度,因此与地闪频数关系密切,而回波面积的大小及变化则能反映出对流活动的持续时间,因此回波面积也与地闪频数有较好的正相关关系。为研究基于长时间序列资料的两者的关系,针对研究区域分别计算了 3 km 高度上逐 6 min 不低于 15、18.3、30、35、40、45 和 50 dBz 的回波面积,并与研究区域内同时段的总地闪频数做相关性计算,所得结果如图 8 所

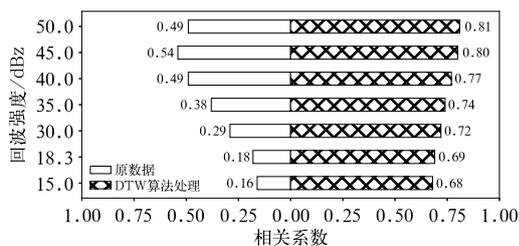
表 2 2013—2020 年 3—9 月江西省地闪频数与回波强度的拟合方程及相关参数

Table 2 Fitting equation and related parameters of CG lightning frequency and echo intensity in Jiangxi Province from March to September in 2013—2020

| 拟合方式 | 表达式 | 拟合优度(R^2) | F 值 | $F_{0.05}$ | 拟合方程 |
|--------|---------------------|---------------|--------|------------|-----------------------------|
| 对数拟合 | $y = a \ln x + b$ | 0.816 | 120.71 | 3.91 | $y = 1.919 \ln x + 41.107$ |
| S 曲线拟合 | $y = \exp(b + a/x)$ | 0.771 | 114.08 | 3.91 | $y = \exp(3.881 - 0.298/x)$ |

示。由图 8 可知,原数据不同回波强度的相关系数均为正数,即回波面积与地闪频数具有单调同增/同减的正相关性。回波强度为 15 dBz 和 18.3 dBz 时表现为极弱相关(0.0~0.2];在 30 dBz 和 35 dBz 时表现为弱相关(0.2~0.4];在 40、45、50 dBz 时表现为中等相关(0.4~0.6]。这与赖悦等(2015)、朱义青和高安春(2021)及日常业务认知是吻合的,即 35 dBz 或 40 dBz 以下强度的较弱回波很少伴随发生地闪,亦表现为两者的相关性很低。50 dBz 相关性的降低可能是因为达到回波强度 50 dBz 的时段比较分散,这些时段拼接形成的时间序列会弱化原本所体现的趋势。

DTW 算法处理后的相关系数在 15、18.3、30、35 和 40 dBz 属于强相关(0.6~0.8],45 dBz 和 50 dBz 属于极强相关(0.8~1.0]。由于 DTW 算法在一定程度上弱化了回波面积与地闪频数趋势变化的时间差、增减幅度和持续时间对相关性的影响,而经过 DTW 算法处理的数据相关性有了显著提高,这说明时间差是一个影响其相关性的重要因素。



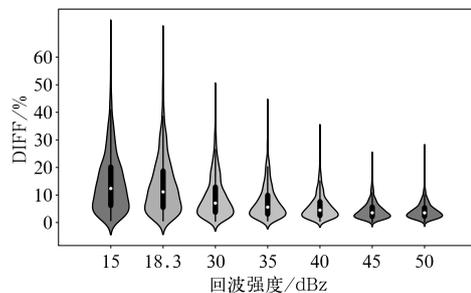
注:各相关系数已通过显著性水平 $P < 0.001$ 的检验。

图 8 2013—2020 年 3—9 月有无 DTW 算法处理下,江西省不同强度回波的面积与地闪频数之间的 Spearman 秩相关系数

Fig. 8 Variation of Spearman's rank correlation coefficients between areas of radar echoes of different intensities and CG lightning frequency with and without DTW algorithm processing in Jiangxi Province from March to September in 2013—2020

假设时间规整后得到的时间序列的元素个数为 n ,定义平均差异百分比 $\text{DIFF} = \text{DIS}/n \times 100\%$,其中 DIS/n 表示 2 个序列对应点的平均距离,由于数据已做归一化处理,因此可直接转化为百分率的形式来衡量时间规整后 2 个序列的差异度,即地闪频数和回波面积趋势变化曲线的平均差异百分比。

图 9 为统计了回波面积和地闪频数变化趋势曲线的 DIFF , DIFF 越小,2 条曲线的相似度越高,反之差异度越高。由图 9 可知,无论何种回波强度下的 DIFF ,其数据分布都呈现出明显的右偏分布特征,大部分数值集中于低值区,高值区有一个较长的拖尾,数据整体为单峰型。回波强度越大, DIFF 的离散程度和数值范围越小,右偏分布特征越显著,高值区的拖尾越短,即回波面积和地闪频数趋势曲线的相似度越高。15 dBz 和 18.3 dBz 的 DIFF 25%分位数在 20%附近,但其上端线在 40%附近,最大值甚至在 70%以上;而 45 dBz 和 50 dBz 的 DIFF 25%分位数分别为 5.6%和 5.4%,其最大值分别为 24.0%



注:小提琴图是核密度图和箱线图的结合,阴影部分代表数据的密度分布,小提琴图内箱体上、下底分别代表 25%分位数 Q_1 和 75%分位数 Q_2 ,圆圈表示中位数,上、下边缘分别是 $Q_1 + 1.5(Q_2 - Q_1)$ 和 $Q_2 - 1.5(Q_2 - Q_1)$ 。

图 9 2013—2020 年 3—9 月江西省不同强度回波的面积与地闪频数变化的 DIFF

Fig. 9 Difference degree of flash frequency between areas of radar echoes of different intensities and CG lightning frequency in Jiangxi Province from March to September in 2013—2020

和 26.9%,表明回波面积和地闪频数的变化趋势曲线之间的差异通常是较小的,较强回波的趋势一致性更好。

综上所述,3 km 高度上不同强度回波的面积变化与地闪频数的变化趋势具有较高的一致性,尤其当回波强度越大时,这种一致性更好,相关程度更高。

3.2.2 回波面积与地闪频数的变化趋势先后关系

选取闪电开始增加时刻的前后一小时范围作为一次地闪活动,对比分析该时段地闪频数和回波面积变化趋势,计算回波面积增加与地闪频数增加的最初时刻的差值,得到两者的时间差。以时间差为横坐标,以各时间差的统计次数为纵坐标,分别统计地闪超前于回波产生的次数和地闪滞后于回波产生的次数(图 10)。由图可见,各回波强度的超前次数大多高于滞后次数,随回波强度增大,时间差统计次数明显增加,其分布越向 6 min 集中。表 3 为计算的不同回波强度的时间差平均值,随回波强度增大,

平均时间差减小;各回波强度的平均超前时间均略小于平均滞后时间。进一步统计发现各回波强度的超前次数约占 57%~60%。以上数据说明地闪活动先于回波面积增加的情况更为普遍,并且较高回波强度的回波面积与地闪发生的联系更紧密,大多数情况下可在 18 min 内发现两者均有增值,对于利用地闪资料开展对流活动的提前预警预报具有很好的业务应用价值。

3.3 地闪发生时回波高度、厚度的特征

35 dBz 以上强度的回波伴随地闪发生的概率较高(赖悦等,2015;朱义青和高安春,2021),因此仅统计 35 dBz 以上回波的特征值。以存在地闪的格点为基础,遍历其周边 10 km 半径范围内所达到的最大回波强度的回波高度和厚度,回波高度取该回波强度达到的最大高度,回波厚度则为该回波强度在垂直方向的最大高度差,绘制箱线图(图 11)。由图 11a 可见,回波强度越大,发生地闪时的回波伸展

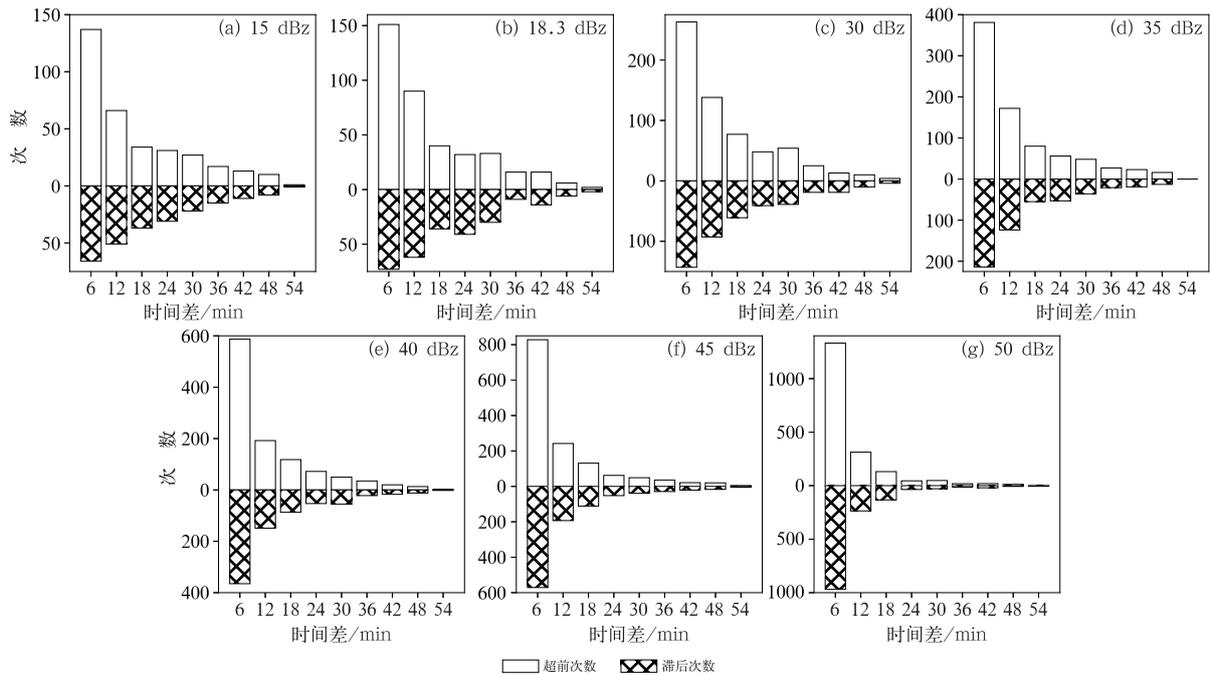
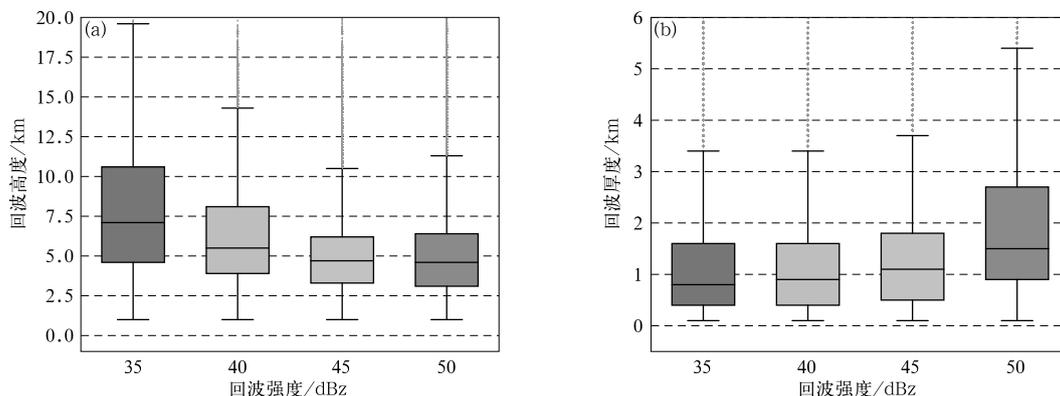


图 10 2013—2020 年 3—9 月江西省不同强度回波的面积变化超前或滞后于地闪频数变化的次数分布
Fig. 10 Times of area changes of different intensity echoes exceeding or lagging behind that of CG lightning frequency in Jiangxi Province from March to September in 2013—2020

表 3 2013—2020 年 3—9 月江西省不同强度回波的面积与地闪频数面积变化的平均时间差
Table 3 Mean time difference of area changes of different intensity echoes exceeding or lagging behind that of CG lightning frequency in Jiangxi Province from March to September in 2013—2020

| 时间差 | 15 dBz | 18.3 dBz | 30 dBz | 35 dBz | 40 dBz | 45 dBz | 50 dBz |
|------------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 平均超前时间/min | 16.3 | 15.8 | 15.1 | 14.1 | 12.9 | 12.0 | 9.9 |
| 平均滞后时间/min | 18.7 | 18.4 | 17.3 | 15.5 | 14.0 | 12.7 | 10.2 |



注:箱体上、下底分别代表 25%分位数 Q_1 和 75%分位数 Q_2 , 箱体中间的横线表示中位数, 上、下边缘分别是 $Q_1 + 1.5(Q_1 - Q_2)$ 和 $Q_2 - 1.5(Q_1 - Q_2)$, 灰点表示异常值。

图 11 2013—2020 年 3—9 月江西省地闪发生时最大强度回波的(a)高度及(b)厚度

Fig. 11 Boxplots of echo (a) height and (b) thickness of the maximum echo reflectivity

at the occurrence time of CG lightning in Jiangxi Province from March to September in 2013–2020

高度越低, 35 dBz 和 40 dBz 的回波高度数值较分散, 45 dBz 和 50 dBz 的回波高度较集中。通常而言, 40 dBz 回波伸展到 -10°C 附近后有利于地闪出现 (Gremillion and Orville, 1999; 刘维成等, 2015), 而数据异常值均位于箱体上方, 因此异常值对地闪发生时的回波特征的确定影响不大。上述特征说明具有强回波的对流云, 其达到能触发地闪的伸展高度差异小, 作为地闪的判识条件较为准确。参考管理等 (2020) 的做法, 将研究时段内 75% 以上地闪发生时的回波高度定为江西省地闪发生时具有的回波特征, 则 35 dBz 回波达到的高度不低于 4.6 km, 40 dBz 回波达到的高度不低于 3.9 km, 45 dBz 回波达到的高度不低于 3.3 km, 50 dBz 回波的伸展高度至少要达到 3.1 km。

图 11b 回波厚度箱线图显示, 随回波强度增大, 地闪发生时的回波厚度略有增加, 数据离散度也有所增加。将研究时段内 75% 以上地闪发生时的回波厚度定为江西省地闪发生时具有的回波特征, 即 35 dBz 和 40 dBz 回波的厚度要达到 0.4 km 以上, 45 dBz 回波的厚度要达到 0.5 km 以上, 50 dBz 回波的厚度要达到 0.9 km 以上。

统计满足上述回波高度和厚度值时地闪发生的次数占比, 结果发现 35、40、45、50 dBz 回波分别有 7.3%、12.6%、19.5% 和 33.6% 的概率出现地闪。

4 结论与讨论

江西省的地闪频数分布从东北到西南逐渐减

小, 其北部鄱阳湖平原为地闪频数高值区, 达到平均每日 15~24 次。夏季的地闪频数较高, 最大值出现在 7 月的上饶地区, 3 月和 4 月则较低。地闪频数具有明显的日变化特征, 在 16:00 达到一天的峰值。通过分析地闪与雷达回波主要特征量之间的关系, 发现江西省地闪频数与低层 (3 km) 雷达回波强度的关系可用对数拟合方程来描述。地闪频数与低层 (3 km) 雷达回波面积在变化趋势上有正相关性, 回波强度越高, 相关系数越大。地闪频数的增加可能超前也可能滞后于回波面积的增加, 超前的情况约占 57%~60%, 大多数情况下可在 18 min 内发现两者均有增值。当有地闪发生时, 不同强度回波伸展高度和厚度的下限存在差异, 比如 35 dBz 回波达到的高度不低于 4.6 km、厚度不低于 0.4 km, 而 50 dBz 回波的伸展高度达到 3.1 km、厚度要达到 0.9 km。由此可初步得到江西省地闪发生时周围 10 km 半径范围不同强度回波的回波高度和厚度特征。

本文在研究地闪频数和回波面积的相关性过程中, 发现其受时间差等因素的影响较大, 因此引入了 DTW 算法, 目的在于弱化干扰因素后能更好地体现其正相关的程度。此算法可在分类强天气的环境因子影响作用方面继续试用, 从而提升分类强天气的客观判识和精细化预报准确率。

江西省是强对流天气的高发区, 对应地闪活动既频繁又具有复杂性。本文基于地闪和雷达监测资料进行统计特征的初探, 有助于了解和把握该地区地闪特征及其演变规律, 以及与雷达特征量的对应

关系。需要指出,为避免 0°C 层亮带和地物等杂波对回波强度的污染作用以及消除固态降水的影响,本文选取了 3 km 高度的回波进行计算研究。但该高度低于闪电的起电高度,后者多位于 -10°C 高度附近,即大于 3 km 。液态降水回波与地闪活动的形成高度不同会使统计结果存在一定的不确定性。更多研究有待推进,如补充探究起电高度层附近及其他高度上的回波变化特征,以及结合三维闪电或卫星闪电等多源探测资料,深入分析对流云内部的闪电活动与雷达回波的关系等,以期取得更多有价值的结果。

参考文献

- 苟阿宁,吴翠红,袁延得,等,2022. 基于雷达参量的湖北地闪预警方法及效果检验[J]. 气象,48(7):878-890. Gou A N, Wu C H, Yuan Y D, et al, 2022. Early-warning method and effect test of cloud-to-ground lightning using Doppler radar data parameters in Hubei Province[J]. Meteor Mon, 48(7):878-890(in Chinese).
- 管理,戴建华,赵渊明,等,2020. 上海地区暖季午后对流的雷达气候学特征分析[J]. 气象,46(12):1543-1554. Guan L, Dai J H, Zhao Y M, et al, 2020. Radar climatology analysis of warm season afternoon convective storm over Shanghai[J]. Meteor Mon, 46(12):1543-1554(in Chinese).
- 赖悦,张其林,陈洪滨,等,2015. 深圳一次强飑线过程的闪电频数与天气雷达回波关系分析[J]. 热带气象学报,31(4):549-558. Lai Y, Zhang Q L, Chen H B, et al, 2015. Analysis of the relationship between cloud-to-ground flash frequency and radar echo during a severe squall line in Shenzhen[J]. J Trop Meteor, 31(4):549-558(in Chinese).
- 李国梁,李俊,李享,等,2015. 武汉地区雷电预警阈值研究[J]. 气象科技,43(5):874-879. Li G L, Li J, Li X, et al, 2015. Thresholds of lightning warning in Wuhan[J]. Meteor Sci Technol, 43(5):874-879(in Chinese).
- 刘维成,苟尚,傅朝,2015. 雷达资料在高原东北侧雷电预警中的应用[J]. 气象,41(10):1253-1259. Liu W C, Gou S, Fu Z, 2015. Application of radar data in lightning warning over the northeast of Tibetan Plateau[J]. Meteor Mon, 41(10):1253-1259(in Chinese).
- 刘献耀,许爱华,刘芳,2009. 江西省春夏季强对流天气气候特征[J]. 气象与减灾研究,32(4):50-56. Liu X Y, Xu A H, Liu F, 2009. Climatic characteristics of severe convective weather in spring and summer in Jiangxi[J]. Meteor Dis Reduct Res, 32(4):50-56(in Chinese).
- 郝秀书,刘冬霞,孙竹玲,2014. 闪电气象学研究进展[J]. 气象学报,72(5):1054-1068. Qie X S, Liu D X, Sun Z L, 2014. Recent advances in research of lightning meteorology[J]. Acta Meteor Sin, 72(5):1054-1068(in Chinese).
- 阮悦,黄慧琳,魏鸣,等,2022. 福建冰雹云三维闪电及双偏振雷达回波特征分析[J]. 气象,48(4):442-451. Ruan Y, Huang H L, Wei M, et al, 2022. Analysis of three dimensional lightning and dual-polarization radar echo characteristics of hail cloud over Fujian[J]. Meteor Mon, 48(4):442-451(in Chinese).
- 石玉恒,张义军,郑栋,等,2012. 北京地区雷暴的雷达回波特征与闪电活动的相关关系[J]. 气象,38(1):66-71. Shi Y H, Zhang Y J, Zheng D, et al, 2012. The relationship between lightning activity and radar echo characteristics of thunderstorm in Beijing Area[J]. Meteor Mon, 38(1):66-71(in Chinese).
- 孙玉婷,赖安伟,王明欢,等,2019. 基于地形差异的闪电频数与雷达回波关系分析[J]. 高原气象,38(6):1320-1331. Sun Y T, Lai A W, Wang M H, et al, 2019. Analysis of the relationship between lightning flashes and radar echo based on terrain difference[J]. Plateau Meteor, 38(6):1320-1331(in Chinese).
- 万玉发,王志斌,张家国,等,2013. 长江中游临近预报业务系统及其应用[J]. 应用气象学报,24(4):504-512. Wan Y F, Wang Z B, Zhang J G, et al, 2013. Nowcasting & warning operational system in the middle reaches of the Yangtze with its implementation[J]. J Appl Meteor Sci, 24(4):504-512(in Chinese).
- 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]. Meteor Mon, 41(2):160-170(in Chinese).
- 杨钢,赖晨,支树林,2021. 基于TRMM卫星的江西省闪电时空分布特征[J]. 气象与减灾研究,44(1):42-50. Yang G, Lai C, Zhi S L, 2021. Temporal and spatial distribution characteristics of lightning in Jiangxi Province based on TRMM satellite[J]. Meteor Dis Reduct Res, 44(1):42-50(in Chinese).
- 姚叶青,袁松,张义军,等,2011. 利用闪电定位和雷达资料进行雷电临近预报方法研究[J]. 热带气象学报,27(6):905-911. Yao Y Q, Yuan S, Zhang Y J, et al, 2011. A study of lightning nowcasting method using LD-II and Cinrad-SA radar data[J]. J Trop Meteor, 27(6):905-911(in Chinese).
- 易笑园,宫全胜,李培彦,等,2009. 华北飑线系统中地闪活动与雷达回波顶高的关系及预警指标[J]. 气象,35(2):34-40. Yi X Y, Gong Q S, Li P Y, et al, 2009. Analysis of correlation between cloud-to-ground lightning activity and echo top of Doppler radar data in squall lines in North China[J]. Meteor Mon, 35(2):34-40(in Chinese).
- 于函,张鸿波,刘冬霞,等,2022. 飑线系统中的闪电活动与雷达回波特征的相关性研究[J]. 大气科学,46(4):835-844. Yu H, Zhang H B, Liu D X, et al, 2022. Relationship between lightning activities and radar echoes of squall line convective systems[J]. Chin J Atmos Sci, 46(4):835-844(in Chinese).
- 张春燕,刘霞,高文俊,等,2021. 强雷暴天气的闪电和雷达回波特征个例分析[J]. 热带气象学报,37(3):419-426. Zhang C Y, Liu X, Gao W J, et al, 2021. Analysis of lightning and radar echo characteristics in a severe thunderstorm[J]. J Trop Meteor, 37(3):419-426(in Chinese).
- 张恒进,郑永光,2022. 基于逐时观测的1971—2010年中国大陆雷暴气候特征[J]. 气象学报,80(1):54-66. Zhang H J, Zheng Y G, 2022. Thunderstorm climatology over mainland China based on

- hourly observations during 1971–2010[J]. *Acta Meteor Sin*, 80(1):54–66(in Chinese).
- 支树林, 李婕, 陈娟, 2018. 江西不同类型强对流天气的地闪统计特征及与雷达回波特征对比分析[J]. *气象*, 44(2):222–232. Zhi S L, Li J, Chen J, 2018. Statistical characteristics of CG flashes and comparison to radar echoes in different types of severe convections in Jiangxi Province[J]. *Meteor Mon*, 44(2):222–232(in Chinese).
- 支树林, 许爱华, 李俊, 等, 2012. 江西省地闪气候特征及其活动强弱评价方法探讨[J]. *气象与减灾研究*, 35(2):37–44. Zhi S L, Xu A H, Li J, et al, 2012. Climatic feature of cloud-to-ground lightning in Jiangxi and the preliminary study of evaluation methods of its activity[J]. *Meteor Dis Reduct Res*, 35(2):37–44(in Chinese).
- 朱义青, 高安春, 2021. 山东一次飑线过程的闪电特征和大风形成机制分析[J]. *气象科学*, 41(2):191–199. Zhu Y Q, Gao A C, 2021. Analysis of lightning characteristics and formation mechanism of strong wind in a squall line in Shandong[J]. *J Meteor Sci*, 41(2):191–199(in Chinese).
- Cummins K L, Murphy M J, Bardo E A, et al, 1998. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U. S. National Lightning Detection Network[J]. *J Geophys Res*, 103(D8):9035–9044.
- Gremillion M S, Orville R E, 1999. Thunderstorm characteristics of cloud-to-ground lightning at the Kennedy Space Center, Florida: a study of lightning initiation signatures as indicated by the WSR-88D[J]. *Wea Forecasting*, 14(5):640–649.
- Herrera J, Younes C, Porras L, 2018. Cloud-to-ground lightning activity in Colombia: a 14-year study using lightning location system data[J]. *Atmos Res*, 203:164–174.
- Hondl K D, Eilts M D, 1994. Doppler radar signatures of developing thunderstorms and their potential to indicate the onset of cloud-to-ground lightning[J]. *Mon Wea Rev*, 122(8):1818–1836.
- Keogh E, Ratanamahatana C A, 2005. Exact indexing of dynamic time warping[J]. *Knowl Inf Syst*, 7(3):358–386.
- Magdy N, Abdelkader T, El-Bahnasy K, 2018. A comparative study of similarity evaluation methods among trajectories of moving objects[J]. *Egypt Inform J*, 19(3):165–177.
- Mecikalski R M, Carey L D, 2018. Radar reflectivity and altitude distributions of lightning flashes as a function of three main storm types[J]. *J Geophys Res Atmos*, 123(22):12814–12828.
- Price C, Rind D, 1992. A simple lightning parameterization for calculating global lightning distributions[J]. *J Geophys Res*, 97(D9):9919–9933.
- Srivastava A, Liu D X, Xu C, et al, 2022. Lightning nowcasting with an algorithm of thunderstorm tracking based on lightning location data over the Beijing Area[J]. *Adv Atmos Sci*, 39(1):178–188.
- Steiner M, Smith J A, 2002. Use of three-dimensional reflectivity structure for automated detection and removal of nonprecipitating echoes in radar data[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 19(5):673–686.
- Williams E, Boldi B, Matlin A, et al, 1999. The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms[J]. *Atmos Res*, 51(3–4):245–265.
- Xia R D, Zhang D L, Wang B L, 2015. A 6-yr cloud-to-ground lightning climatology and its relationship to rainfall over central and eastern China[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 54(12):2443–2460.

(本文责编:王婷波 何晓欢)