暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

2σ闪电跃增算法在湖北地区冰雹预警中的应用与改进研究

余蓉 杜牧云 余田野 许冠宇 宋琳 刘佩廷

A study on the application and enhancement of the 2σ lightning jump algorithm for hail warning in Hubei province

YU Rong，DU Muyun，YU Tianye，XU Guanyu，SONG Lin，LIU Peiting

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-011

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

一次多单体冰雹天气过程的雷达回波与闪电特征分析

Analysis of radar echo and lightning characteristics in a multi-cell hail weather event

暴雨灾害. 2020, 39(3): 250-258 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.005

鄂西南一次早春强对流过程的多源资料分析

Analysis of an early spring convective weather event in southwest of Hubei province based on multi-source data

暴雨灾害. 2022, 41(2): 174-183 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.008

湖北省2020年“6·27”特大暴雨过程闪电与降水关系分析

Analysis of relationship between lightning and rainfall during "6·27" super rainstorm of Hubei Province in 2020

暴雨灾害. 2020, 39(6): 620-628 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.06.010

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

一次冰雹过程的多源资料观测特征分析

Analysis of the characteristics of a hail event with multi-source data

暴雨灾害. 2024, 43(3): 322-331 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-032

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

关注微信公众号，获得更多资讯信息

余蓉,杜牧云,余田野,等.2025.2σ 闪电跃增算法在湖北地区冰雹预警中的应用与改进研究[J].暴雨灾害,44(6):823−834. YU Rong, DU Muyun, YU Tianye, et al. 2025. A study on the application and enhancement of the 2σ lightning jump algorithm for hail warning in Hubei province [J]. Torrential Rain and Disasters,44(6):823−834 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−011

2σ 闪电跃增算法在湖北地区冰雹预警中的应用与改进研究

余蓉[1, 2, 3], 杜牧云[1], 余田野[2], 许冠宇[4], 宋琳[3], 刘佩廷[5]

(1. 中国气象局武汉暴雨研究所 全国暴雨研究中心/中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205; 2. 湖北省防雷中心, 武汉 430074; 3. 中国气象局雷电重点开放实验室, 北京 100081; 4. 湖北省气象台, 武汉 430074; 5. 武汉市气象局, 武汉 430040)

摘　要: 2σ 闪电跃增算法是一种用于分析闪电频次变化率来预警冰雹、龙卷等灾害性天气的常用算法。然而, 该算法在实际应用中可能会出现虚警现象, 且在不同地区其适用性存在差异。为此, 基于冰雹过程中雷达垂直积分液态水含量 (VIL) 跃增量 (GVIL) 变化特征, 增加 GVIL 判定条件以改进 2σ 闪电跃增算法, 并结合 2015—2023 年湖北省 116 个冰雹事件与相应的雷达、闪电数据, 系统评估改进算法在湖北地区的冰雹预警能力。结果表明, 改进 2σ 算法在保持高命中率 (POD=90.5%) 的同时, 虚警率 FAR 由 41.4% 降低到 20.1%, 临界成功指数 CSI 由 56.4% 提升至 73.7%, 平均预警提前时间约 21.8 min。通过将其应用于典型冰雹个例, 进一步验证了改进 2σ 算法的有效性和适用性。研究成果可为提升湖北地区冰雹预警能力提供新的技术手段。

关键词: 冰雹; 闪电; 2σ 闪电跃增算法; 湖北

中图法分类号: P427.3　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−011

A study on the application and enhancement of the 2σ lightning jump algorithm for hail warning in Hubei province

YU Rong[1, 2, 3], DU Muyun[1], YU Tianye[2], XU Guanyu[4], SONG Lin[3], LIU Peiting[5]

(1. *Heavy Rainfall Research Center of China/China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/ Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research*, *Institute of Heavy Rain*, *China Meteorological Administration*, *Wuhan* 430205, *China*; 2. *Hubei Lightning Protection Center*, *Wuhan* 430074; 3. *Key Laboratory of Lightning China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081; 4. *Wuhan Meteorological Bureau*, *Wuhan* 430040; 5. *Wuhan Meteorological Bureau*, *Wuhan* 430040)

Abstract: The 2σ lightning jump algorithm is a method used to predict severe weather events, such as hail and tornadoes, by analyzing the rate of change in lightning frequency. However, this algorithm exhibits false alarm issues in practical applications, and its applicability varies in actual effectiveness across different regions. To address these limitations, the algorithm is improved by incorporating determination conditions based on the variation characteristics of the gradient of vertical integrated liquid (GVIL), which represents changes in radar vertically integrated liquid water (VIL) during hail processes. The performance of the improved algorithm in predicting hail is systematically evaluated using radar and lightning data from 116 hail events that occurred in Hubei Province between 2015 and 2023. The results indicate that the improved 2σ algorithm maintains a high probability of detection (POD=90.5%), while reducing the false alarm rate (FAR) from 41.4% to 20.1%, increaing the critical success index (CSI) from 56.4% to 73.7%, and providing an average warning lead time of approximately 21.8 minutes. By applying it to typical hail cases, the effectiveness and applicability of the improved 2σ algorithm are further validated. This study provides a new technical approach to enhance hail warning capabilities in the Hubei region.

Key words: hail; lightning; 2σ lightning jump algorithm; Hubei

收稿日期: 2025−01−21; **定稿日期**: 2025−07−19

资助项目: 湖北省自然科学基金气象联合基金项目 (2022CFD123, 2022CFD011, 2023AFD095); 全国暴雨研究开放基金项目 (BYKJ2024Z08); 武汉市气象科技联合项目 (2024020901030452); 中国气象局雷电重点开放实验室开放课题 (2024KELL-B013, 2025KELL-B001)

第一作者: 余蓉, 主要从事雷电预报预警方法研究。E-mail: yurong@whihr.com.cn

通信作者: 杜牧云, 主要从雷达数据质量控制与资料同化研究。E-mail: dumy@whihr.com.cn

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

引　言

冰雹是一种常见的灾害性天气，常常会给农业、交通等行业及其相关基础设施造成重大损失，是湖北主要气象灾害之一。由于冰雹天气具有局地性和突发性特点，使得对其提前预警的难度较大 (徐小红等, 2022)。目前，冰雹临近预警主要基于天气雷达和卫星开展冰雹云识别 (王研峰等, 2019; 李腊平等, 2024; 杨湘婧等, 2025; 王青霞等, 2025)。然而，传统的人工识别方法存在主观性强、虚警率高的问题，难以满足精准预警的需求。近年来，随着机器学习技术的发展，部分学者开始探究基于机器学习的冰雹云识别方法 (张文海和李磊, 2019; 袁凯等, 2023)。研究表明，机器学习算法在冰雹云识别准确率上较传统方法有显著提升，但在实际业务应用中仍存在模型泛化能力不足、对极端个例识别效果欠佳等问题 (黄静等, 2024)。因此，如何进一步提升冰雹预警的准确性和时效性，仍是当前气象业务中亟待解决的关键问题。

相较于雷达，闪电定位系统具有造价低、时效性强、覆盖范围大、受地形影响小等优势，可作为雷达观测的有益补充 (郑栋等, 2010)。大量研究表明，冰雹发生前后往往伴随着闪电频数的突然增加，这种现象被称为闪电跃增或闪电跳跃 (Lightning Jump)。如，Richard (1991) 研究表明，在地闪频数出现显著峰值后，大约 10~15 min 发生龙卷风和大冰雹。阮悦等 (2022) 指出，福建地区 80% 的冰雹云在闪电峰值后 3~25 min 开始降雹。河南 (赵战友和杨美荣, 2022)、山东 (冯桂力等, 2008)、贵州 (袁春梅和周筠珺, 2024) 等地的雹暴统计结果也表明，雹前或雹后呈现出闪电频率峰值。

Williams 等 (1999) 研究指出，闪电活动的突然增加是对上升气流迅速加强的反应，上升气流加强导致冰粒子碰撞次数增加，从而导致更强的电荷分离和更频繁的闪电 (Williams, 2001; Steiger et al., 2007)。鉴于闪电和冰雹往往都是雷暴系统在一定阶段相同的动力和微物理过程的产物，而这种动力和微物理过程与雷暴中降水粒子、电荷的产生直接相关，最终决定了冰雹、短时强降水等恶劣天气的发生和发展 (Carey and Rutledge, 1996; Carey et al., 2019; Qie et al., 2021)。因此，闪电活动的变化趋势，特别是闪电跃增现象，可以作为恶劣天气发生的重要指示信号 (Deierling and Petersen, 2008; Schultz et al., 2011; Metzger and Nuss, 2013)。

目前，用于计算闪电跃增的方法主要是 Gatlin 算法和 σ 算法。Gatlin (2007) 提出了一种基于闪电跳跃识别预警强风暴的算法，即 Gatlin 算法。Schultz 等 (2009, 2011) 在此基础上研发了 σ 算法，其中 2σ 闪电跃增算法 (以下简称 2σ 算法) 表示当前闪电频次是前 10 min 闪电频次变率标准差 σ 的 2 倍以上时进行冰雹预警。国外多个地区的应用评估表明，2σ 算法对冰雹、龙卷等灾害性天气具有较好的预警效果。例如，Schultz 等 (2009) 对美国田纳西流域和华盛顿地区的 85 例灾害性天气 (冰雹和龙卷风) 研究时发现，2σ 算法的命中率 (POD) 为 87%，虚警率 (FAR) 为 33%。Schultz 等 (2011) 研究了美国 711 次雷暴事件，结果表明总闪 (地闪与云闪) 在预测强对流天气方面比地闪更有效；其中，总闪的 POD 为 79%，FAR 为 36%；而地闪的 POD 为 66%，FAR 为 53%。此外，总闪的平均预警时效也比地闪更长。Farnell 等 (2017) 未使用雷达数据的情况下，利用 2σ 算法对加泰罗尼亚地区的灾害性天气事件 (大部分为冰雹) 的预警评估结果表明，其成功率接近 75%，而误报率为 10%。国内，Yao 等 (2013) 对京津冀地区 2σ 算法的应用研究表明，总闪和地闪的跳变对冰雹事件的平均提前时间分别为 32.2 min 和 25.4 min。Tian 等 (2019) 指出，2σ 算法能够对北京地区 81.8% 的降雹个例进行有效预警，平均预警提前时间为 27.1 min，但虚警率为 38.6%。田野等 (2021) 对比分析了 Gatlin 和 σ 两种闪电跳跃算法对北京地区 177 次冰雹天气过程的预警效果，结果表明 2σ 算法更适于对北京冰雹天气预警，但两者的虚警率均高于 41%。为解决 2σ 算法在实际应用中存在的虚警率较高的问题，Tian 等 (2022) 将双偏振雷达相态识别算法引入 2σ 算法，虚警率得到显著降低，从 58.8% 降至 29.2%。随后，田野等 (2023) 基于空间聚类 (DBSCAN) 技术改进 2σ 算法，有效解决了雷达观测遮挡与产品延迟问题，在灾害性天气的临近预警方面展现出了良好的应用效果。

此外，在冰雹回波识别中，垂直积分液态水含量 (VIL) 是一个非常重要的特征参量 (张祟莉等, 2012; 严红梅等, 2019; 田白等, 2023)。研究表明，VIL 及其跃增量 (GVIL) 常被作为冰雹预警 (刁秀广等, 2008; 王莎等, 2019; 李腊平等, 2024) 和人工防雹的 (袁正腾等, 2012; 段艺萍等, 2014) 的重要指标。李腊平等 (2024) 对山西 38 次具有多普勒雷达 V 型缺口特征的冰雹进行了统计分析，表明 V 型缺口对应的最大 VIL 大于 22 $kg\cdot m^{-2}$、GVIL 大于 26 $kg\cdot m^{-2}$，降雹概率较大。王莎等 (2019) 指出冀东地区平均最大 GVIL 为 17 $kg\cdot m^{-2}$，这种跃变的出现比冰雹发生时刻平均提前 25 min，可作为冰雹发生前的重要判断依据。

尽管 2σ 算法在国内外多个地区的应用评估中表现出较好的预警效果, 但国内相关研究主要集中在京津冀地区, 针对湖北地区的应用评估尚未展开。此外, 如何结合雷达特征参量对 2σ 算法进行改进, 以进一步提升其冰雹预警效果, 仍是亟待解决的关键问题。Tian 等 (2022) 将双偏振雷达的水凝物相态识别结果与 2σ 算法相结合, 有效降低了虚警率。然而, 双偏振雷达还尚未实现湖北地区全覆盖, 且大部分冰雹个例缺乏双偏振雷达观测数据。相比之下, VIL 作为传统雷达产品, 具有数据获取便捷、业务化程度高的优势, 且已有研究 (王莎等, 2019; 李腊平等, 2024) 表明 VIL 和 GVIL 与冰雹发生具有显著相关性。因此, 本文通过引入雷达特征参量 GVIL 以改进 2σ 算法, 期望能提升其在湖北地区的冰雹预警效果及其业务适用性。

鉴于此, 本文选取 2015—2023 年湖北地区 116 个冰雹过程作为研究对象, 旨在深入分析湖北地区冰雹与闪电活动的相关性。通过提炼雷达特征参量的变化判据对 2σ 算法进行改进, 并重点评估改进前后 2σ 算法在湖北冰雹天气预警中的应用效果, 为湖北地区冰雹天气精准预警提供新的技术手段。

1 资料说明

本文使用的资料包括: (1) 冰雹数据来源于县市 (区) 级气象部门核实并通过中国气象局气象灾害管理系统上报的冰雹灾情直报信息, 用于 2σ 闪电跃增算法的冰雹预警效果评估。(2) 闪电数据来源于湖北省防雷中心业务运行的三维闪电定位网 (HBLLS), 用于 2σ 闪电跃增算法的计算与判断。(3) 雷达数据来源于湖北省气象台业务运行的灾害性天气短时临近预报业务系统 (SWAN), 用于雷暴系统的雷达回波定位追踪以及特征参量的计算。上述资料的质量控制方法及其他说明信息具体如下。

1.1 冰雹数据

文中冰雹天气过程的筛选方法主要包括: (1) 根据官方媒体的灾情报道新闻以及微博等新媒体手段发布的目击报告, 从中筛选出具有确切照片记录和实时定位信息的冰雹发生记录, 剔除冰雹尺寸模糊, 时间、地点信息不明确的报告, 同时确保具有完整的闪电资料; (2) 为了尽可能保证冰雹过程的闪电数据不受其他雷暴系统干扰, 仅挑选雷达回波周边 15 km 范围无其他雷暴系统的个例。同时, 剔除冰雹发生时无对应雷达数据 (故障维修) 或闪电数据 (系统未运行) 的个例。最终, 2015—2023 年湖北省共筛选出 116 个冰雹天气过程, 其空间分布如图 1 所示。需要说明的是, 每个冰雹天气过程代表雷暴系统的整个生命史, 可能存在 1 个冰雹天气过程出现多次降雹事件的情况。此外, 本文在分析过程中未区分冰雹直径的大小。

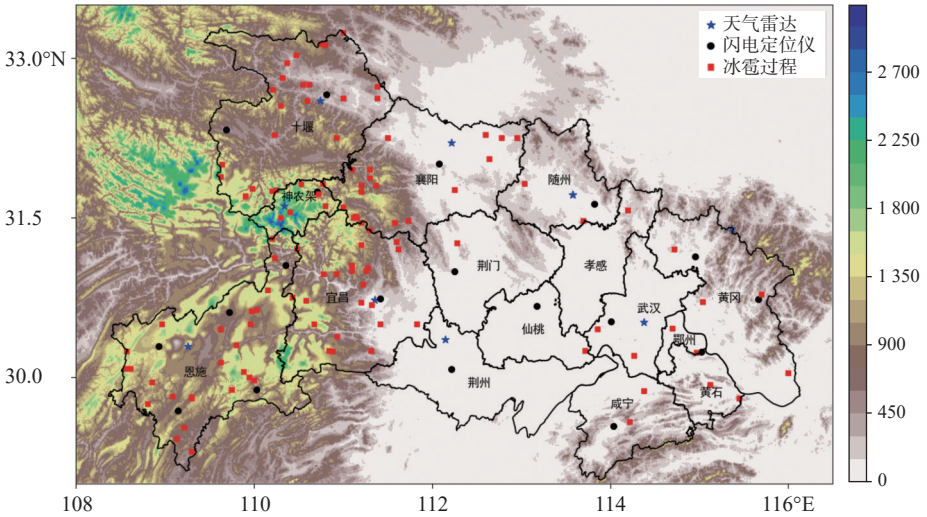


图 1 2015—2023 年湖北省 116 个冰雹过程 (红方块) 以及业务天气雷达 (五角星) 和闪电定位仪 (黑圆点) 以及地形高度 (填色, 单位: mm) 的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of operational weather radars (stars), lightning locators of HBLLS (black dots), 116 hail events (red blocks) and topographic height (color-filled, unit: m) in Hubei province from 2015 to 2023

1.2 闪电数据

闪电资料来源于由中国科学院电工研究所研制的 VLF/LF (Very Low Frequency / Low Frequency) 闪电定位仪构建的湖北三维闪电定位网 (HBLLS)。目前, 湖北省共建设有 19 台 VLF/LF 闪电定位仪 (图 1), 实现了全省范围内总闪的实时高精度组网观测。该

网络通过 GPS 卫星精确测量闪电回击辐射的 VLF/LF 脉冲信号到达时间，并基于宽带网络通讯技术和 TOA (Time Of Arrival) 定位方法，获取闪电的时间、位置、极性和强度等主要参数。其中，HBLLS 对 10 kA 以上闪电的整体探测效率大于 90%；湖北大部地区的水平定位误差小于 200 m，高度定位误差小于 500 m，但在恩施西部、十堰西北部等局部区域的高度定位误差接近 1 200 m (朱传林等, 2017)。

在闪电数据的定量应用与研究中，合理的质量控制是获取准确结果的重要前提。为了提高闪电定位的准确性，本文在闪电资料处理过程中仅保留了三站以上定位的闪电数据，且电流强度小于 10 kA 的正地闪归为云闪 (郑栋等, 2010)。此外，闪电定位仪主要探测地闪回击信号以及云中放电过程，其中，一次地闪可能由多次回击组成，而一次云闪也可能包含多次云中放电 (Liu et al., 2011)。因此，需要对全闪数据进行“归闪”处理。本文参照 Cummins (2014) 提出的方法，即：将距离在 10 km 范围内、时间间隔小于 1 s 且相邻回击间隔小于 500 ms 的所有同极性地闪回击归为同一次地闪，该地闪信息 (经纬度、电流强度、极性等) 以首次地闪回击信号的探测结果为准。同理，采用相同方法将云中放电过程“归闪”为云闪。

为了更好地统计对流系统的闪电频次并避免对流单体自动识别算法引入的不确定性，本文采用“雷暴系统多源数据分析软件 V1.0”进行雷暴系统的人工标注与闪电统计。即：在雷达组合反射率 (CR) 图上人工圈选出目标雷暴系统，并确保雷暴回波主体位于圈选范围内，软件可自动统计分布在雷暴回波及其周边区域 (CR≥20 dBz) 的闪电数据 (Ding et al., 2025; 郄秀书等, 2025)，并记录为相应时段的闪电频次。

1.3 雷达数据

对流系统识别是实现对流追踪和研究系统内闪电频次变化的基础。基于湖北省 9 部 S 波段业务天气雷达 (站点分布见图 1) 的观测数据，湖北省气象台业务运行的灾害性天气短时临近预报业务系统 (SWAN) 可生成水平分辨率为 1 km、时间分辨率为 6 min 的雷达组网拼图格点数据。本文选用 SWAN 系统的组合反射率因子 (MCR) 和垂直积分液态水含量 (MVIL) 二维拼图产品，开展致雹对流系统的雷达回波识别追踪以及特征参量的计算。

2 研究方法

2.1 2σ 算法

为了减少低频闪电活动对 2σ 算法预警效能的干扰，避免由此引发的虚假预警，通常会设置闪电频次激活阈值。该阈值用于限定算法启动的最低闪电频次条件，即当总闪频次超过此阈值时，2σ 算法才会启动并判断是否满足冰雹预警条件。虽然，设置闪电频次激活阈值可能会引起冰雹漏报，但经过评估，其对冰雹预警的准确率影响不大，但可以有效降低预警的虚警率，故本研究仍选择设置闪电频次激活阈值，相关评估内容详见 4.2 节。

然而，闪电频次激活阈值的设定并非一成不变，而是因研究区域和对流特征的不同有所差异。例如，Schultz 等 (2009) 通过对大量强雷暴和非强雷暴样本的统计分析，确定了 10 min^{-1} 的激活阈值。在后续的研究中，Schultz 等 (2011) 为了使激活阈值与普通对流的平均地闪率相匹配，将该阈值从 10 min^{-1} 调整至 2 min^{-1}。类似地，Tian 等 (2022) 在对北京地区的冰雹预警效果进行评估时，根据地区差异将北京主城区的激活阈值设定为 10 min^{-1}，而其他地区的阈值则为 4 min^{-1}。

鉴于本文所研究的冰雹个例涵盖了较大的地域范围，且这些区域地形复杂多样，部分个例的闪电活动并不活跃，为了更好地适应这种复杂情况，本研究将激活阈值设定为 2 min^{-1}。

2σ 算法的主要步骤 (Schultz et al., 2009) 如下：

(1) 在 t 时刻，计算雷暴系统最近 2 min 内总闪频次 LF 的平均值 (记为$\overline{L_F}$，单位：min^{-1})，即

$$\overline{L_F(t)} = \frac{L_F(t) + L_F(t-1)}{2} \tag{1}$$

(2) 同理，将 t 时刻之前的 2~14 min 划分为 2 min 间隔的 6 个时间段，并按照步骤 (1) 分别计算得到总闪平均频次：$\overline{L_F(t-2)}$、$\overline{L_F(t-4)}$、$\overline{L_F(t-6)}$、$\overline{L_F(t-8)}$、$\overline{L_F(t-10)}$、$\overline{L_F(t-12)}$；

(3) 对相邻两个总闪平均频次求差，得到总闪频次随时间的变化率 D (单位：min^{-2})，用以表征闪电活动的变化趋势。即

$$D(t) = \frac{\overline{L_F(t)} - \overline{L_F(t-2)}}{2} \tag{2}$$

由此，步骤 (1)、(2) 得到的 7 个总闪平均频次可以进一步求得 6 组 D 值：$D(t)$、$D(t-2)$、$D(t-4)$、$D(t-6)$、$D(t-8)$、$D(t-10)$。

(4) 计算步骤 (3) 得到的 6 组 D 值的标准差 σ，用以表征当前时刻前 2—14 min 内总闪频次时间变率的离散度，即

$$\sigma = \mathrm{std}(D(t-2), D(t-4), D(t-6), D(t-8), D(t-10)) \tag{3}$$

(5) 判断闪电是否满足跳跃条件，即

$$D(t) > 2\sigma \tag{4}$$

若总闪频次变化率 D>2σ, 则表明闪电发生跳跃, 满足预警条件。

预警时效的选择对于 2σ 算法的效果评估至关重要。以往研究中的预警时效各不相同。例如, Gatlin (2007) 和 Schultz 等 (2009) 采用了 30 min 的预警时效, 而 Schultz 等 (2011) 则将预警时效设为 45 min。Tian 等 (2019) 评估 2σ 算法对北京地区冰雹的预警效果时发现, 60 min 预警时效的 POD 和 CSI 最高, FAR 最低。为此, 本文对 2σ 闪电跃增算法的有效性判定采用如下标准: 若 2σ 闪电跃增发生后 60 min 内出现冰雹, 则该闪电跃增被定义为有效闪电跃增; 反之, 若 2σ 闪电跃增发生后 60 min 内未出现冰雹, 或者闪电跃增出现在冰雹事件之后, 则该闪电跃增被定义为无效闪电跃增 (Tian et al., 2019; 田野等, 2021)。此外, 考虑到雷暴生命史期间可能出现多次有效闪电跃增, 为了更准确地评估预警效果, 本研究将最早出现的有效闪电跃增时间记为有效预警时间。

2.2 改进 2σ 算法

为了进一步改善 2σ 算法虚警率过高的问题, 通过引入 GVIL(记为 G_{VIL}) 来改进 2σ 算法 (以下简称改进 2σ 算法)。为此, 首先将大量历史冰雹过程中的有效闪电跃增与无效闪电跃增进行区分; 然后, 提取闪电跃增发生时几个临近时次的 GVIL 值; 通过观察不同闪电跃增对应的雷达特征参量 GVIL 的演变特征, 最终制定出相应的 GVIL 判断条件作为约束来提升冰雹预警效果。其中, GVIL 是雷暴单体当前时次与前一个时次的 VILmax (记为 V_{IL}-max) 之差, 即: G_{VIL}=V_{IL}-max(i)−V_{IL}-max(i−1); 而 GVILthres1 和 GVILthres2 均为 GVIL阈值。

针对满足闪电跃增条件的时次, 搜索当前雷达时次及前两个雷达时次的 GVIL 值, 并进行如下条件判断: (1) 所有时次 GVIL 大于 GVILthres1, 且 GVIL 不连续为负值; (2) 至少一个时次 GVIL 大于 GVILthres2, 或连续两个时次的 GVIL之和大于 GVILthres2; 经历史冰雹过程数据统计, 4–9 月 GVILthres1 为 −20 kg·m^{-2}, GVILthres2 为 10 kg·m^{-2}; 其他月份 GVILthres1 为 −16 kg·m^{-2}, GVILthres2 为 8 kg·m^{-2}若三个 GVIL 值同时满足判断条件 (1) 和 (2), 即认为当前的闪电跃增为有效冰雹预警信号, 反之则为无效冰雹预警信号。

2.3 评估指标

本研究采用命中率 (POD)、虚警率 (FAR)、漏报率 (PO) 以及临界成功指数 (CSI) 共 4 个指标 (余蓉等, 2016; 刘段灵和陈超, 2022) 定量评估 2σ 算法对湖北地区冰雹天气的预警效果, 表 1 为 2σ 算法改进前后的冰雹预警性能, 其中, POD (记为 P_{OD})、FAR (记为 F_{AR})、PO (记为 P_{O}) 和 CSI (记为 C_{SI}) 的计算公式如下

$$P_{\mathrm{OD}} = \frac{N_{\mathrm{A}}}{N_{\mathrm{A}} + N_{\mathrm{C}}} \tag{5}$$

$$F_{\mathrm{AR}} = \frac{N_{\mathrm{B}}}{N_{\mathrm{A}} + N_{\mathrm{B}}} \tag{6}$$

$$P_{\mathrm{O}} = \frac{N_{\mathrm{C}}}{N_{\mathrm{A}} + N_{\mathrm{C}}} \tag{7}$$

$$C_{\mathrm{SI}} = \frac{N_{\mathrm{A}}}{N_{\mathrm{A}} + N_{\mathrm{B}} + N_{\mathrm{C}}} \tag{8}$$

式中, NA (记为N_{A}) 为成功预警冰雹的样本数量, NB (记为N_{B}) 为有冰雹预警却无冰雹实况的样本数, NC (记为N_{C}) 为出现冰雹实况却无冰雹预警的样本数。

3 典型个例应用效果分析

为了更清晰地展示 2σ 算法及其改进算法在湖北地区冰雹预警中的应用效果, 本文选取了 2022 年 6 月 16 日襄阳保康冰雹和 2022 年 9 月 12 日十堰冰雹两个典型冰雹事件进行详细分析。通过对比 2σ 算法改进前后的性能, 以便直观体现其改进算法的优势。

3.1 2022 年 6 月 16 日襄阳保康冰雹事件

2022 年 6 月 16 日下午, 湖北省襄阳市保康县后坪镇出现孤立雷暴并产生冰雹, 其雷达回波 (组合反射率因子) 的演变见图 2。雷暴单体在 15:24 (北京时, 下同) 初生; 15:36, 雷暴系统首次出现 50 dBz 以上的强回波, VILmax 超过 20 kg·m^{-2} (图 2a)。经过 24 min 的快速发展, 雷暴系统明显增强, 最强回波达 62.5 dBz, 闪电也开始活跃。16:00, 雷暴进入成熟期并产生冰雹, 此时强回波 (>60 dBz) 中心高度在 5 km 左右 (图 2d), VILmax 跃增至 62.5 kg·m^{-2}, 闪电集中分布在 50 dBz 以上的强回波区 (图 2b)。随着降雹的发生, 雷暴系统开始减弱, 回波强度和发展高度迅速减小, 闪电活动也随之减弱。16:24, 强回波范围大幅缩小, VILmax 降至 20 kg·m^{-2} 以下, 闪电活动也已停止 (图 2c)。由图 2 可见, 该雷暴单体强回波面积小, 稳定少动, 生命史较短。整个周期共记录了 137 次闪电, 其中, 云闪 105 次, 地闪 32 次。

图 3 展示了该雷暴系统在其生命期内地闪频次和总闪频次 (图 3a)、2σ 算法闪电跃增判断结果 (图 3b) 以及 VILmax 和 GVIL(图 3c) 的时间演变特征。由图 3a 的总闪频次变化可以看到, 在 15:46 前

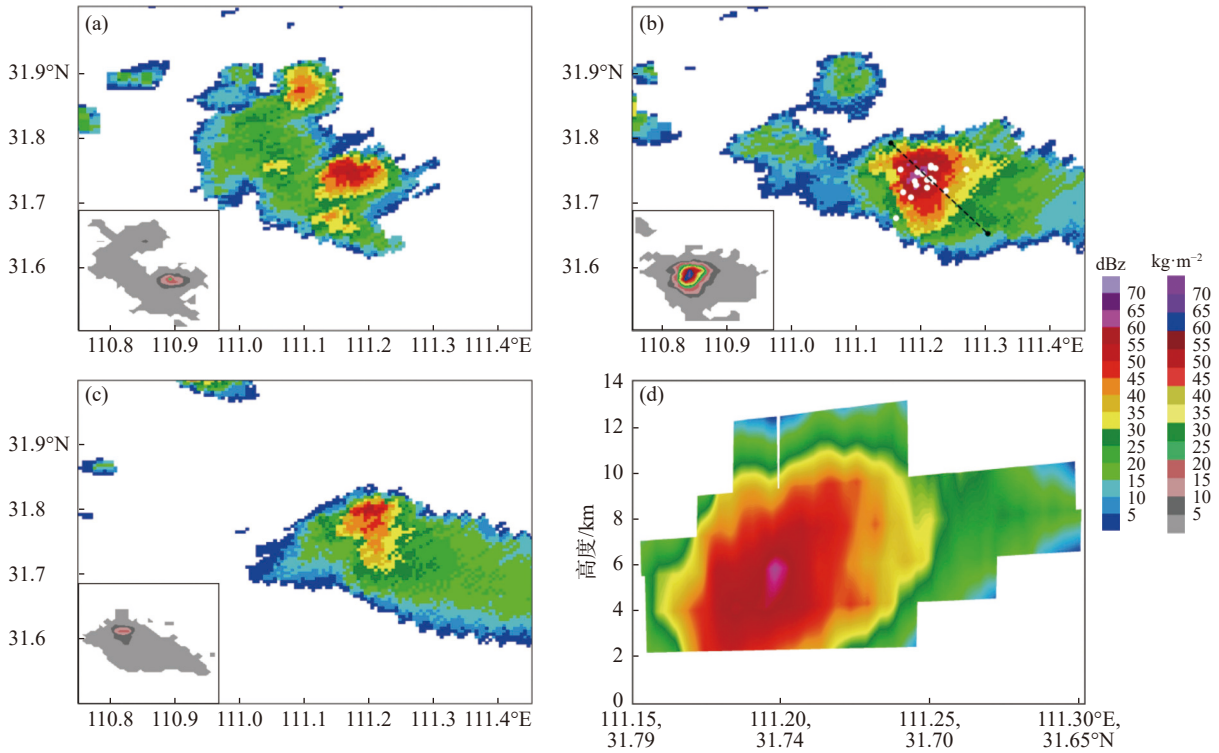


图 2 2022 年 6 月 16 日 15:36 (a), 16:00 (b), 16:24 (c) 襄阳保康雷暴系统的雷达组合反射率因子演变以及沿图 b 中虚线所作的组合反射率因子剖面图 (d) (白色圆点表示闪电位置, 图 a—c 中左下角显示雷暴系统的 VIL, 下同)

Fig. 2 Evolution of radar composite reflectivity of the thunderstorm in Baokang, Xiangyang at (a) 15:36 BT, (b) 16:00 BT, and (c) 16:24 BT on June 16, 2022, and (d) the vertical profile along the dashed line in panel b (White dots indicate the location of lightning flashes and the VIL of the thunderstorm is displayed in the lower left corner in Fig. 2a-c, the same as below)

闪电活动一直维持在较低水平, 基本不超过 2 min^{-1}; 15:48 后开始有地闪活动且闪电频次逐渐增多; 15:54 时总闪频次迅速提升至峰值 (10 min^{-1}), 随后震荡减小。此外, 该过程的正地闪并不活跃, 仅在降雹前与降雹期间探测到零星正地闪, 正地闪占比为 9.4%, 低于湖北省平均正地闪比 (余蓉等, 2021)

如 2σ 算法跃增阈值判断结果 (图 3b) 所示, 总闪频次超过激活阈值, 且闪电时间变率 (*D*) 值大于等于跃增阈值的时刻即为闪电跃增时刻 (红色柱状表示), 反之则为非闪电跃增时刻 (蓝色柱状表示)。在 15:10 左右, 尽管存在闪电频次的波动, 但由于总闪频次过低, 未能达到激活阈值, 因此 2σ 算法尚未启动。对于此次冰雹过程, 2σ 算法在 15:48 首次被激活, 并在随后的两个时次 (15:48 和 15:50) 连续判定存在闪电跃增现象。这两次闪电跃增均为有效冰雹预警, 其中第一次闪电跃增时刻 (15:48) 提前降雹发生 (16:00—16:06) 约 12 min。此外, 冰雹发生后还出现了一次闪电跃增 (16:12), 但此时的雷暴系统已明显减弱 (见图 2c), 且总闪频次进入快速减少阶段。此后未再记录到冰雹实况, 因此该闪电跃增被判定为无效冰雹预警。

由图 3c 所示的 VILmax 与 GVIL 的时间变化可知, 本次冰雹过程的 VILmax 呈现出单峰分布特征; 其中, 在 15:24—16:06 期间, VILmax 处于单调递增阶段, 期间 GVIL 一直维持正值, 表明雷暴单体在此阶段处于持续增强状态; VILmax 在 16:06 达到峰值 (72.3 kg·m^{-2}), 随后迅速转为快速减小趋势, GVIL 也变为负值。在 16:12, GVIL 达到谷值 (−29.0 kg·m^{-2}), 此后虽有所增大, 但仍维持负值。对于引入 GVIL 判断条件的改进 2σ 算法, 在 15:48 闪电跃增发生以后及其前两个雷达时次 (15:36 和 15:42), GVIL 分别为 0.9 kg·m^{-2}、15.3 kg·m^{-2} 和 15.9 kg·m^{-2}, 这些 GVIL 正值说明雷暴系统仍在持续发展增强, 且连续两个雷达时次的 GVIL 都大于 GVILthres1 阈值, 故改进 2σ 算法维持了有效预警的判定结果。相反, 在第 3 次闪电跃增时刻 (16:12) 及临近时次 (16:00 和 16:06), GVIL 分别为−29.0 kg·m^{-2}、3.8 kg·m^{-2} 和 9.8 kg·m^{-2}, 且 16:12 之后的 GVIL 持续为负值, 均不满足 GVIL 预警判断条件。因此, 改进 2σ 算法将其判定为无效预警。由此可见, 本文通过引入 GVIL 作为约束条件, 改进 2σ 算法在保持高命中率 (POD=100%) 的同时, 成功消除了 16:12 的冰雹虚警, 有效降低了虚警率, FAR 由 33.3% 降低至 0, 有效地提升冰雹预警效果。

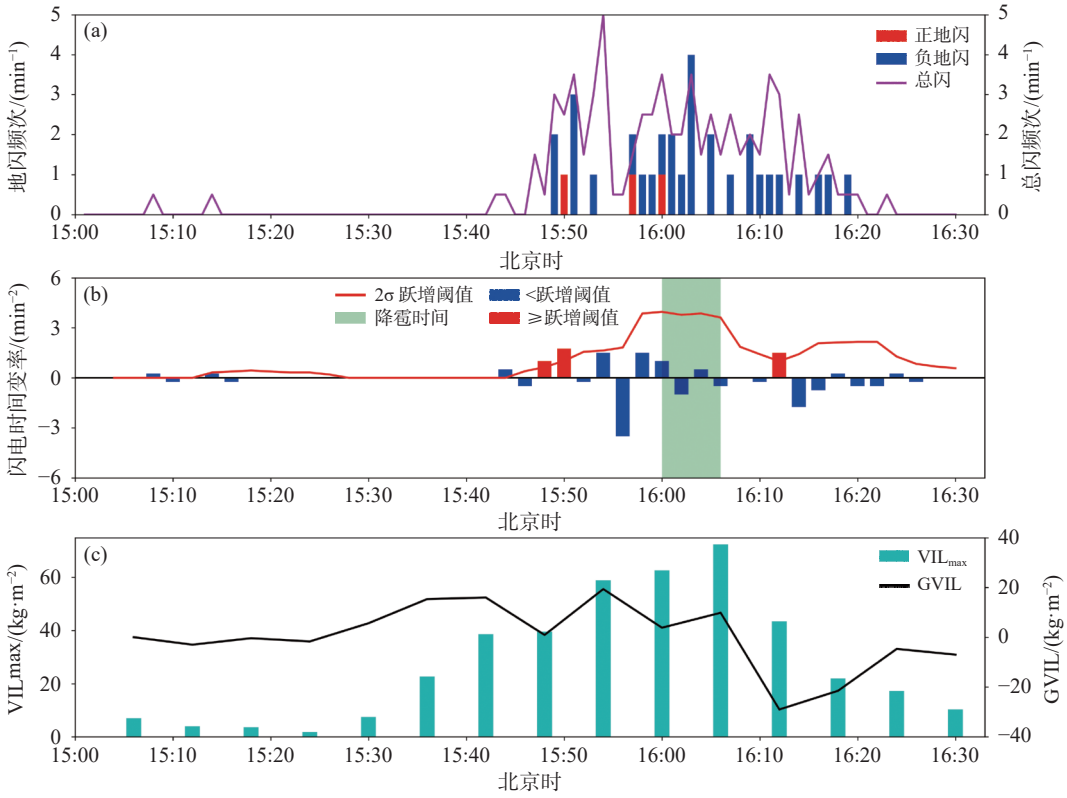


图 3 2022 年 6 月 16 日襄阳保康雷暴系统的地闪和总闪频次 (a), 2σ 算法判断结果 (b), VILmax 和 GVIL(c) 随时间的变化 (绿色阴影表示降雹时间, 下同)

Fig. 3 Temporal variation of (a) frequency of CG lightning and total lightning, (b) judgement result of the 2σ lightning jump algorithm, (c) VILmax and GVIL of the thunderstorm in Baokang, Xiangyang on June 16, 2022 (The green shaded area indicates the time period of hailfall, the same below)

3.2 2022 年 9 月 12 日十堰冰雹事件

2022 年 9 月 12 日午后, 十堰市多地相继出现强对流天气, 伴随明显降温、降雨, 部分地区还出现冰雹。其中, 一个强雷暴系统在其长达 4 h 的生命史中呈现出“先增强—略减弱—再增强”的强度演变特征, 并在东南向移动过程中, 先后在竹山县和房县两地引发降雹。通过雷达回波演变 (图 4) 可以清晰地看到, 12:30, 竹山县西北角新生对流单体, 并在准静止发展约 1 h 后开始向东南方向移动。14:00, 单体强回波整体呈现出南、北两条状结构, 南侧强回波区出现零星闪电, 其 VILmax 小于 15 kg·m^{-2} (图 4a)。30 min 后, 雷暴单体的回波形态转为团状, 结构更加紧实, 最大回波强度首次超过 60 dBz, VILmax 增至 43.5 kg·m^{-2}, 闪电活动略有增强 (图 4b)。14:48, 雷暴单体显著增强, 最大回波强度达 64 dBz, 呈现出明显的冰雹回波特征, 即三体散射回波 (TBSS) 和旁瓣回波; VILmax 也增至 66.4 kg·m^{-2}, 闪电活动进一步增强 (图 4c); 此时竹山县城关镇出现地面降雹。此后, 冰雹回波特征持续 2 个体扫后消失, 回波强度略有减小 (最大回波强度在 60 dBz 附近), VILmax 降至 50.9 kg·m^{-2}, 但闪电活动依然活跃 (图 4d)。15:48, 雷暴单体快速增强, 再次出现三体散射和旁瓣回波特征; 最强回波达 69 dBz, VILmax 突破至 109.4 kg·m^{-2}, 均显著超过前次降雹的雷达特征值, 闪电活动更加强烈, 强回波 (>60 dBz) 中心闪电密集分布 (图 4e), 房县门古寺镇出现冰雹。维持 3 个体扫的冰雹特征后, 雷暴单体再次减弱, 最强回波迅速减小到 60 dBz 以下, 与南部单体合并后逐渐减弱至消散, 闪电频次降至峰值的 1/4 以下, 且零散分布, VILmax 减小到 15 kg·m^{-2} 以下 (图 4f)。上述演变特征表明, 雷达回波特征和闪电活动的监测对于冰雹预警具有重要的指示意义。

此次雷暴系统自西北向东南移动, 闪电活动主要集中在 40 dBz 以上的强回波区域。在 14:00—16:30 时段, 十堰市竹山县和房县共记录闪电 543 次, 其中云闪 436 次, 正地闪 25 次, 负地闪 82 次, 正地闪占比为 23.4%, 高于湖北省平均正闪电比 (余蓉等, 2021)。

由图 5 所示的雷暴闪电频次、2σ 算法闪电跃增判断结果以及雷达特征参量随时间的演变特征可知, 此次雷暴过程的闪电活动频繁, 总闪频次远超 2σ 算法的激活阈值 (图 5a)。该过程共出现了 7 次闪电跃增事件 (图 5b)。具体而言, 前三次闪电跃增 (14:38、14:40 和 14:46) 为该雷暴系统首次降雹的有

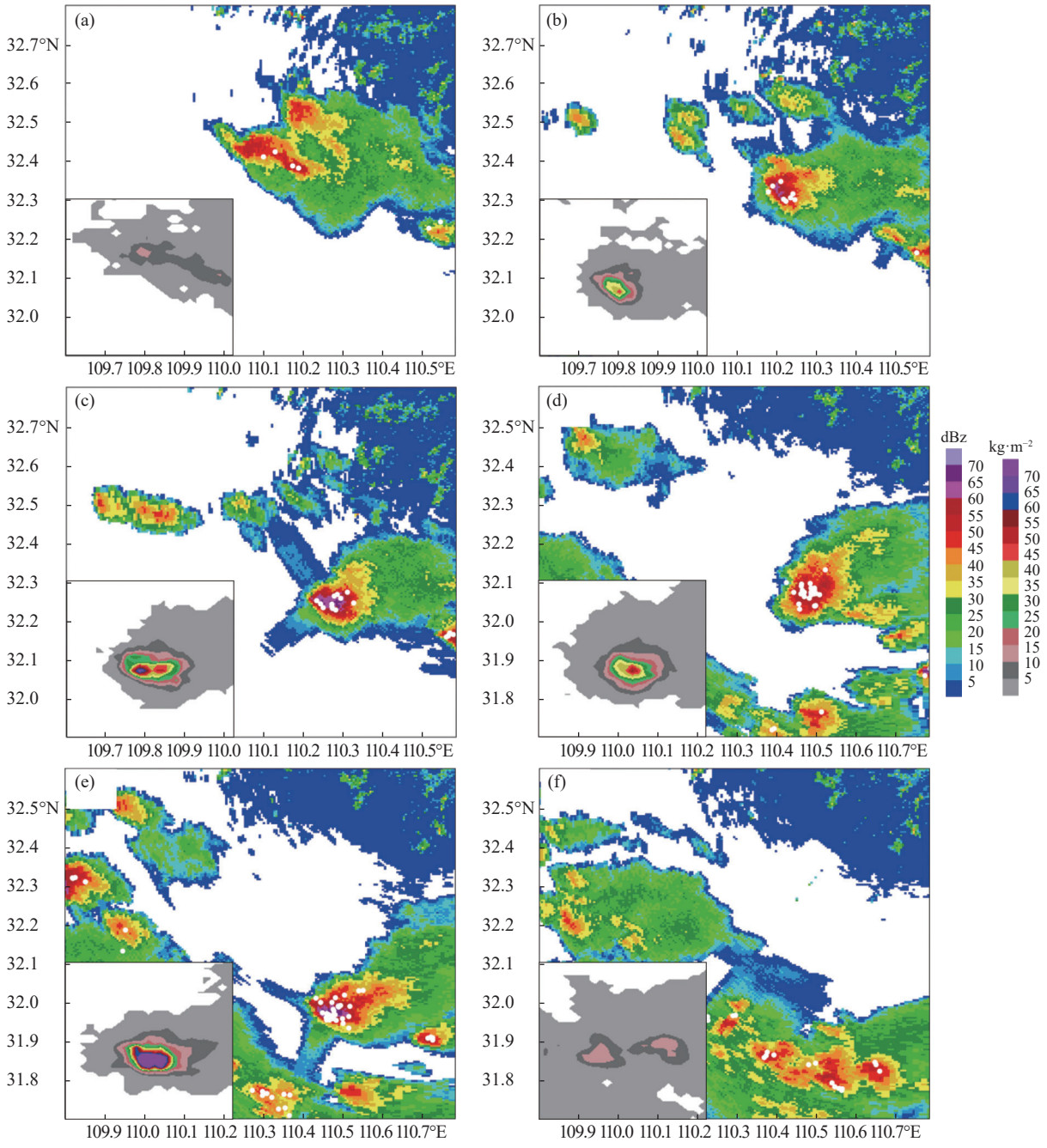


图 4 2022 年 9 月 12 日 14:00 (a)、14:30 (b)、14:48 (c)、15:30 (d)、15:48 (e)、16:24 (f) 十堰雷暴的雷达组合反射率因子演变

Fig. 4 Evolution of radar composite reflectivity of the thunderstorm in Shiyan at (a) 14:00 BT, (b) 14:30 BT, (c) 14:48 BT, (d) 15:30 BT, (e) 15:48 BT, (f) 16:24 BT on September 12, 2022

效预警; 14:58 和 15:16 的两次闪电跃增则为雷暴二次降雹的有效预警, 此后又出现了两次闪电跃增 (16:08 和 16:12), 此时雷暴系统开始减弱且无冰雹发生, 故为无效预警。这表明, 利用 2σ 算法开展冰雹预警时, 存在 5 次成功预警和 2 次虚警。以最早出现闪电跃增的时刻为准, 2σ 算法对两次降雹的预警提前时间约为 10 min 和 44 min。由图 5c 可知, 此次冰雹过程的 VILmax 呈现双峰分布特征, 次峰较早出现在 14:48, 主峰则位于 15:54。首次降雹前, VILmax 在 25 kg·m^{-2} 以内平缓变化, 随后波动增长并在降雹期内达到次峰值 (66.4 kg·m^{-2}), 同时 GVIL 基本维持正值, 表明雷暴系统处于稳定发展阶段。此后, VILmax 略有减小但仍维持在 40 kg·m^{-2} 以上, GVIL 转为负值并在 0 值附近波动。前三次闪电跃增临近雷达时次的 GVIL 为正值或小负值, 且 14:30 的 GVIL 为 25.7 kg·m^{-2}, 超过 GVILthres1 阈值, 表明雷暴系统仍在增强, 改进 2σ 算法维持了有效预警判定结果。第 4 次闪电跃增前, GVIL 由 23.1 kg·m^{-2}骤降至 −18.6 kg·m^{-2}, 但仍满足 GVIL 判断条件 (GVIL 大于 GVILthres1 且 GVIL 大于 GVILthres2)。因此, 改进

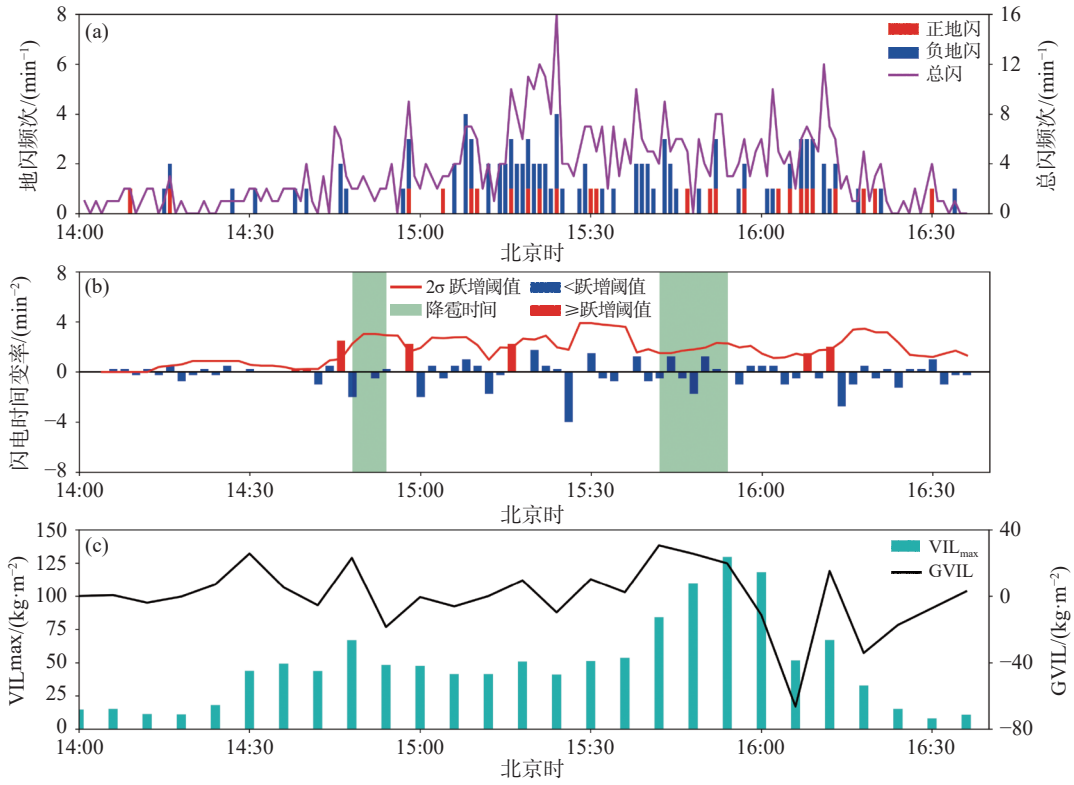


图 5 2022 年 9 月 12 日十堰雷暴的地闪和总闪频次 (a), 2σ 算法判断结果 (b), VILmax 和 GVIL(c) 随时间的变化

Fig. 5 Temporal variation of (a) frequency of CG lightning and total lightning, (b) judgement result of the 2σ lightning jump algorithm, (c) VILmax and GVIL of the thunderstorm in Shiyan on September 12, 2022

2σ 算法同样判定为有效预警。然而, 第 5 次闪电跃增时, 前后三个时次的 GVIL 分别为−6.2 kg·m^{-2}、0.0 kg·m^{-2} 和 9.5 kg·m^{-2}, 尽管 GVIL 由负转正表明雷暴系统有所增强, 但所有 GVIL 小于 GVILthres1, 导致改进 2σ 算法将其误判为无效预警。最后两次闪电跃增前, 连续两个雷达时次的 GVIL 为负值, 且 16:06 的 GVIL 达到谷值 (−66.4 kg·m^{-2}), 显著低于 GVILthres2 阈值, 表明雷暴系统已进入减弱阶段, 改进 2σ 算法正确判定为无效预警。

总体而言, 改进 2σ 算法通过引入雷达特征信息, 成功消除了两次虚警, FAR 由 28.6% 降低至 0。尽管对第 5 次闪电跃增的误判导致命中率略有下降, POD 由 100% 减小为 80%, 但对二次降雹事件仍做出有效预警, 其整体准确性有所提升。上述结果表明, 闪电监测与雷达特征的协同分析能够有效提高强对流天气预警的可靠性, 而该算法仍存在优化空间。

4 2σ 闪电跃增算法的冰雹预警效果评估

表 1 展示了 116 例冰雹事件中原始 2σ 算法与改进 2σ 算法的预警效果对比。从中可见, 原始 2σ 算法的 POD 为 93.7%, FAR 为 41.4%, CSI 为 56.4%。这些指标与田野等 (2021) 对北京地区 177 例冰雹事件的评估结果(POD 为80.2%,FAR 为41.6%,CSI 为51.1%)相近, 且命中率更高, 表明 2σ 算法在湖北地区的适用性较好。与该算法在美国的应用效果 (Schultz et al., 2009, 2011; Farnell et al., 2017) 相比, 湖北地区的评估结果表现出更高的命中率和虚警率, 这可能与湖北西部山区的冰雹多发性有关 (见图 1)。该地区的 VLF/LF 三维闪电定位网存在边缘效应, 探测效率降低, 可能导致部分产生冰雹的强雷暴系统闪电频次偏少, 其闪电的突然增多或减少极易引发虚假预警 (田野等, 2023)。统计表明, 湖北地区的冰雹过程在闪电跃增信号出现后的 2~58 min 内开始降雹, 原始 2σ 算法的平均预警提前时间为 25.7 min, 略短于京津冀地区的预警时效 (Yao et al., 2013; Tian et al., 2019)。此外, 6.3% 的漏报率整体偏低, 且 14 例漏报中仅有 1 例是由于设置闪电频次激活阈值引起, 占

表 1 2015—2023 年湖北省 116 个冰雹天气过程 2σ 算法应用评估结果

Table 1 The 2σ lightning jump effect assessment of 116 hail events in Hubei province from 2015 to 2023

算法	NA	NB	NC	POD/%	FAR/%	PO/%	CSI/%
原始2σ	208	147	14	93.7	41.4	6.3	56.4
改进2σ	171	43	18	90.5	20.1	9.5	73.7

比仅 7%。其他漏报个例均是因为闪电活动整体较弱，闪电频次太少，无法激活 2σ 算法。而且，调小激活阈值虚警增加明显，但对漏报的影响较小。

同时，如图 6 所示，针对不同预警时效 (20~60 min) 开展了 2σ 算法的效果评估。结果表明，随着预警时效的缩短，2σ 算法的预警性能指标逐步下降，POD 和 CSI 分别从 93.7% 和 56.4% 降低至 83.9% 和 34.6%，而 FAR 则由 41.4% 增大至 62.9%，这也与 Tian 等 (2019) 的研究结论相一致。

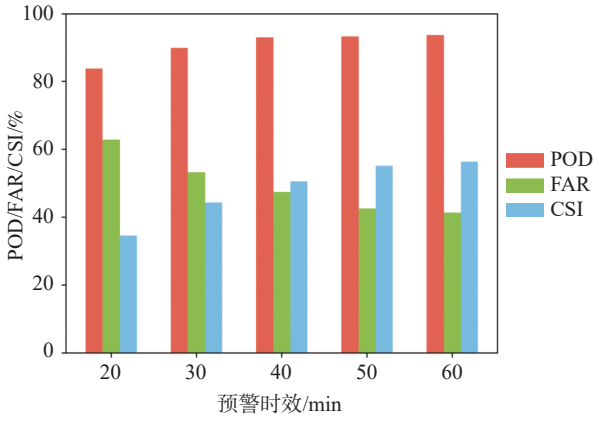


图 6 不同预警时效下 2σ 算法的 POD、FAR 和 CSI

Fig. 6 The POD, FAR and CSI of the 2σ algorithm under different warning lead times

改进后的 2σ 算法引入 GVIL 作为判断条件，在冰雹预警方面表现出色。虽然冰雹成功预警样本数 (NA) 从 208 减少到 171，导致命中率略微下降了 3.2%，降至 90.5%。每个冰雹过程的平均有效预警次数从 1.79 降至 1.47，平均预警时长也从 25.3 min 缩短到 21.8 min，表明改进 2σ 算法在减少重复预警的同时，也降低了预警提前量。更为重要的是，冰雹虚假预警样本数 (NB) 从 147 显著减少到 43，使得 FAR 降低了一倍多，从 41.4%降至 20.1%。同时，冰雹预警漏报样本数 (NC) 未显著增加，漏报率仅从 6.3% 上升到 9.5%，表明改进 2σ 算法在有效降低虚警率的同时，对漏报率的影响较小。

总体而言，临界成功指数由 56.4% 大幅提升至 73.7%，表明改进 2σ 算法的冰雹预警效果显著优于原始 2σ 算法，证明了利用 GVIL 辅助闪电跃增进行冰雹预警的可行性。需要注意的是，降雹资料的准确性直接影响冰雹预警效果的评估。当前，冰雹实况主要来自各地气象部门的灾情上报数据。为了保障数据的可靠性，本研究根据雷达回波特征对冰雹数据进行二次确认。未来可以结合双偏振雷达、雹谱仪等新型观测资料进一步优化预警算法与效果评估。

5 结论与讨论

基于 2015—2023 年湖北省 116 个冰雹天气过程，本文利用 VLF/LF 三维闪电定位网的全闪 (地闪与云闪) 数据以及 SWAN 雷达拼图数据，对 2σ 闪电跃增算法的冰雹预警效果进行了定量评估，并引入 GVIL 进行算法改进研究，得到如下主要结论：

(1) 2σ 闪电跃增算法的 POD 为 93.7%，FAR 为 41.4%，PO 为 6.3%，CSI 为 56.4%。闪电跃增对冰雹的平均预警提前时间约为 25.7 min。评估结果表明，2σ 闪电跃增算法对湖北地区的冰雹预警效果良好。

(2) 针对 2σ 闪电跃增算法虚警率较高的问题，基于冰雹历史个例中不同闪电跃增效果下的 GVIL 变化特征，引入 GVIL 判断条件辅助冰雹预警，以此改进 2σ 算法。经评估，改进 2σ 算法的 POD 为 90.5%，FAR 降低至 20.1%，PO 为 9.5%，CSI 提升至 73.7%。改进 2σ 算法在命中率和漏报率小幅变化的同时，虚警率降低了 21.3%，临界成功指数提升了 17.3%，整体效果优于原始 2σ 算法。

(3) 引入 GVIL 判断条件辅助闪电跃增进行冰雹预警，在降低虚警率的同时，也提高了漏报率，并可能减小预警时效。因此，在业务应用时需要综合考虑实际需求。

2 σ 闪电跃增算法出现漏报的原因可能是：在闪电探测网的边缘地带或地形复杂的山区，闪电的探测能力有所不足，导致部分雹暴系统的闪电频次整体偏少，2σ 算法无法被激活。产生误报可能是因为：在复杂地形条件下，受站网布局限制，闪电的探测效率存在梯度分布特征，当雹暴系统在探测效率不同的地区之间移动时，闪电突然的增多或减少极易引起闪电跃增，导致错误预警；此外，闪电活动特征因雷暴类型和环境条件而异，且与微物理过程或电荷结构差异有关，非冰雹雷暴的闪电跃增也会干扰算法判断。为此，闪电跃增冰雹预警算法出现漏报和误报可结合多源数据 (如：双偏振雷达、探空等) 进行优化。

综上，相较于原始 2σ 算法，改进后的 2σ 算法在降低虚警率方面表现出色，但需要权衡漏报率和预警时效的潜在影响。同时，选择不同的预警时效 (20~60 min) 可能得到不同的评估结果。此外，文中冰雹个例的闪电数据是由人工圈选雷暴回波统计得到。在算法实际应用时，可根据自动识别的雷暴强回波中心进行一定范围的搜索，具体搜索半径需根据各地情况开展检验评估来优选。未来的研究将利用机器学习方法来进一步优化算法，提高冰雹预警的准确性和可靠性。

参考文献 (References):

刁秀广,朱君鉴,黄秀韶,等.2008. VIL 和 VIL 密度在冰雹云判据中的应用[J].高原气象,27(5):1131−1139. Diao X G, Zhu J J, Huang X S, et al. 2008. Application of VIL and VIL density in warning criteria for hailstorm [J]. Plateau Meteorology,27(5):1131−1139 (in Chinese)

段艺萍,刘寿东,刘黎平,等.2014.新一代天气雷达三维组网产品在人工防雹的应用[J].高原气象,33(5):1426−1439. Duan Y P, Liu S D, Liu L P, et al. 2014. Application of CINRAD mosaic products on artificial hail suppression [J]. Plateau Meteorology,33(5):1426−1439 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2013.00139

冯桂力,郄秀书,吴书君.2008.山东地区冰雹云的闪电活动特征[J].大气科学,32(2):289−299. Feng G L, Qie X S, Wu S J. 2008. Cloud-to-Ground lightning characteristics of hail clouds in Shandong province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,32(2):289−299 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2008.02.08

黄静,佘勇,樊予江.2024.深度学习方法预测阿克苏地区冰雹云雷达回波个例分析[J].沙漠与绿洲气象,18(2):107−113. Huang J, She Y, Fan Y J. 2024. A case analysis of deep learning methods for predicting radar echoes of hail clouds in Aksu region [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(2):107−113 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.02.014

刘段灵,陈超.2022.最优 TS 评分方法在逐时降水订正中的初步应用及评估[J].热带气象学报,38(4):611−620. Liu D L, Chen C. 2022. Preliminary application and evaluation of optimal threat score method in hourly precipitation forecast [J]. Journal of Tropical Meteorology, 38(4):611−620 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2022.055

李腊平,杨淑华,刘洁莉,等.2024.多普勒雷达 V 型缺口特征在冰雹预报预警中的应用分析[J].高原气象,43(3):749−761. Li L P, Yang S H, Liu J L, et al. 2024. Application analysis on the characteristics of Doppler radar V-shaped gap in hail forecasting and warning [J]. Plateau Meteorology,43(3):749−761 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2024.00008

郄秀书,刘冬霞,李丰全,等.2025.青藏高原单体雷暴的电荷结构及“晴天霹雳”闪电成因[J].科学通报,70(7):944−954. Qie X S, Liu D X, Li F Q, et al. 2025. Charge structure of an isolated thunderstorm on the Tibetan Plateau and the formation of bolt-from-the-blue lightning [J]. Chinese Science Bulletin,70(7):944−954 (in Chinese). doi:10.1360/TB−2024−1144

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]. Meteorological Monthly,48(4):442−451 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.011501

田白,马中元,陈鲍发,等.2023. 2022 年 3 月 14 日江西及周边地区冰雹回波特征分析[J].气象,49(12):1521−1531. Tian B, Ma Z Y, Chen B F, et al. 2023. Analysis of hail echo characteristics in Jiangxi and surrounding areas on 14 March 2022 [J]. Meteorological Monthly,49(12): 1521−1531 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2023.040101

田野,姚雯,尹佳莉,等.2021.不同闪电跃增算法在北京地区应用效果对比[J].应用气象学报,32(2):217−232. Tian Y, Yao W, Yin J L, et al. 2021. Comparison of the performance of different lightning jump algorithms in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 32(2):217−232 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20210207

田野,庞文静,陈泽方,等.2023.基于 DBSCAN 聚类的 2σ 闪电跃增算法应用[J].应用气象学报,34(3):309−323. Tian Y, Pang W J, Chen Z F, et al. 2023. Application of the 2σ lightning jump algorithm based on DBSCAN cluster [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 34(3):309−323 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20230305

王青霞, 唐明晖, 吴亚昊, 等.2025.基于多源观测资料的长沙“4·29”强对流天气过程分析[J].暴雨灾害,44(3):309−321. Wang Q X, Tang M H, Wu Y H, et al. 2025. Analysis of "4·29" severe convective weather event in Changsha based on multi-source observation data [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):309−321 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−112

王莎,沙勇,宋金妹,等.2019.冀东地区冰雹云多普勒雷达参数特征分析[J].气象,45(5):713−722. Wang S, Sha Y, Song J M, et al. 2019. Characteristic analysis of hail cloud Doppler radar parameters in the eastern Hebei province [J]. Meteorological Monthly,45(5):713−722 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2019.05.013

王研峰,黄武斌,王聚杰,等.2019.一次甘肃天水强冰雹的雷达回波特征及成因分析[J].高原气象,38(2):368−376. Wang Y F, Huang W B, Wang J J, et al. 2019. Analysis on the characteristic of radar echo and the causes of a strong hail in Tianshui city of Gansu province [J]. Plateau Meteorology,38(2):368−376 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2018.00077

徐小红,余兴,刘贵华,等.2022.冰雹云卫星早期识别与自动预警[J].大气科学,46(1):98−110. Xu X H, Yu X, Liu G H, et al. 2022. Early identification and automatic warning of hail clouds by satellite [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(1):98−110 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2104.21010

杨湘婧,唐明晖,袁韬,等.2025.基于双偏振雷达和 FY-4A 卫星资料的一次湖南秋季强冰雹预警特征分析[J].气象,51(1):68−84. Yang X J, Tang M H, Yuan T, et al. 2025. Analysis on early warning characteristics of an autumn severe hail in Hunan province based on dual-polarization radar and FY-4A satellite data [J]. Meteorological Monthly, 51(1):68−84 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2024.111201

严红梅,梁亮,黄艳,等.2019.金华地区 18 次冰雹天气的大气环境与雷达回波特征分析[J].暴雨灾害,38(1):48−58. Yan H M, Liang L, Huang Y, et al. 2019. Study on the atmospheric environment and radar echo characteristics of 18 hail events in Jinhua [J]. Torrential Rain and Disasters,38(1):48−58 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.01.006

余蓉,杜牧云,杜九三,等.2016.基于多对流参数的武汉地区雷电活动预报方法研究[J].气象科技,44(2):269−274. Yu R, Du M Y, Du J S, et al. 2016. Methods of lightning forecast in Wuhan based on convective indexes [J]. Meteorological Science and Technology,44(2):269−274 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671−6345.2016.02.016

余蓉,杜牧云,晏紫淙,等.2021.湖北省两套闪电定位网地闪数据的对比分析[J].暴雨灾害,40(6):646−654. Yu R, Du M Y, Yan Z C, et al. 2021. Comparative analysis of cloud-ground flash data of two lightning location networks in Hubei province [J]. Torrential Rain and Disasters,40(6):646−654 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.06.009

袁正腾,唐仁茂,李德俊,等.2012.基于 SWAN 和 LAPS 产品的人影作业参数自动估算方法研究[J].暴雨灾害,31(1):78−82. Yuan Z T, Tang R M, Li D J, et al. 2012. Study on methods for estimating automatically technique parameters of weather modification based on products of SWAN and LAPS [J]. Torrential Rain and Disasters, 31(1):78−82 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2012.01.012

袁凯,李武阶,庞晶.2023.基于决策树算法的鄂东地区冰雹识别技术[J].

应用气象学报,34(2):234−245. Yuan K, Li W J, Pang J. 2023. Hail identification technology in eastern Hubei based on decision tree algorithm [J]. Journal of Applied Meteorological Science,34(2):234−245 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20230209

袁春梅,周筠珺.2024.我国西南地区春季典型雹暴观测与数值模拟研究[J].高原山地气象研究,44(2):19−31. Yuan C M, Zhou Y J. 2024. Observation and numerical simulation of typical hailstorm in southwest China [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(2):19−31 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.02.003

赵战友,杨美荣.2022.基于闪电数据和雷达数据的河南省冰雹天气过程研究[J].气象与环境科学,45(4):83−89. Zhao Z Y, Yang M R. 2022. Research of hail-falling processes in Henan province based on lightning data and radar data [J]. Meteorological and Environmental Sciences,45(4):83−89 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2022.04.011

张崇莉,钱宝敏,和卫东,等.2012. VIL 产品在高山雷达中的应用研究[J].高原气象,31(2):562−567. Zhang C L, Qian B M, He W D, et al. 2012. Application of VIL product in high mountain radar [J]. Plateau Meteorology,31(2):562−567 (in Chinese)

张文海,李磊.2019.人工智能在冰雹识别及临近预报中的初步应用[J].气象学报,77(2):282−291. Zhang W H, Li L. 2019. A preliminary application of artificial intelligence on the detection and nowcasting of hail weather [J]. Acta Meteorological Sinica,77(2):282−291 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2019.014

朱传林,李国梁,张弛儿,等.2017.湖北省三维闪电定位系统定位误差仿真分析[J].暴雨灾害,36(1):91−96. Zhu C L, Li G L, Zhang C E, et al. 2017. Error simulation analysis on three-dimensional lightning location network in Hubei province [J]. Torrential Rain and Disasters,36(1):91−96 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2017.01.013

郑栋,张义军,孟青,等.2010.北京地区雷暴过程闪电与地面降水的相关关系[J].应用气象学报,21(3):287−297. Zheng D, Zhang Y J, Meng Q, et al. 2010. Relationship between lightning activities and surface precipitation in thunderstorm weather in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science,21(3):287−297 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20100304

Carey L D, Rutledge S A. 1996. A multiparameter radar case study of the microphysical and kinematic evolution of a lightning producing storm [J]. Meteorology Atmospheric Physics,59:33−64. doi:10.1007/BF01032000

Carey L D, Schultz E V, Schultz C J, et al. 2019. An evaluation of relationships between radar-inferred kinematic and microphysical parameters and lightning flash rates in Alabama storms [J]. Atmosphere,10(12):796. doi:10.3390/atmos10120796

Cummins K L. 2014. Mapping the impact of terrain on lightning incidence and multiple ground contacts in cloud-to-ground flashes [C]// Proceedings 15th International Conference on Atmospheric Electricity. 1-16.

Deierling W, Petersen W A. 2008. Total lightning activity as an indicator of updraft characteristics [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,113:D16210. doi:10.1029/2007jd009598

Ding J X, Zhang W J, Zheng D, et al. 2025. Thunderstorm structure and lightning properties in South China and over the South China Sea: A comparative study [J]. Journal of Meteorological Research,39(2):415−430. doi:10.1007/s13351−025−4091−8

Farnell C, Rigo T, Pineda N. 2017. Lightning jump as nowcast predictor: Application to severe weather events in Catalonia [J]. Atmospheric Research,183:130−141. doi:10.1016/j.atmosres.2016.08.021

Gatlin P N. 2007. Severe weather precursors in the lightning activity of Tennessee Valley thunderstorms [D]. Department of Atmospheric Sciences, University of Alabama.

Liu D X, Qie X S, Xiong Y J, et al. 2011. Evolution of the total lightning activity in a leading-line and trailing stratiform mesoscale convective system over Beijing [J]. Advances in Atmospheric Sciences,28(4):866−878. doi:10.1007/s00376−010−0001−8

Metzger E, Nuss W A. 2013. The relationship between total cloud lightning behavior and radar-derived thunderstorm structure [J]. Weather Forecasting,28(1):237−253. doi:10.1175/WAF−D−11−00157.1

Qie X S, Yuan S F, Chen Z X, et al. 2021. Understanding the dynamical-microphysical-electrical processes associated with severe thunder storms over the Beijing metropolitan region [J]. Science China Earth Sciences,64:10−26. doi:10.1007/s11430−020−9656−8

Richard J K. 1991. Correlating lightning to severe local storms in the Northeastern United States [J]. Weather Forecasting,6(1):3−12. doi:10.1175/1520−0434(1991)006<0003:CLTSLS>2.0.CO;2

Schultz C J, Petersen W A, Carey L D. 2009. Preliminary development and evaluation of lightning jump algorithms for the real-time detection of severe weather [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,48(12):2543−2563. doi:10.1175/2009JAMC2237.1

Schultz C J, Petersen W A, Carey L D. 2011. Lightning and severe weather: a comparison between total and cloud-to-ground lightning trends [J]. Weather Forecasting,26(5):744−755. doi:10.1175/WAF−D−10−05026.1

Steiger S M, Orville R E, Carey L D. 2007. Total lightning signatures of thunderstorm intensity over North Texas. Part II: mesoscale convective systems [J]. Monthly Weather Review,135(10):3303−3324. doi:10.1175/MWR3483.1

Tian Y, Qie X S, Sun Y, et al. 2019. Total lightning signatures of thunderstorms and lightning jumps in hailfall nowcasting in the Beijing area [J]. Atmospheric Research,230:104646. doi:10.1016/j.atmosres.2019.104646

Tian Y, Yao W, Sun Y, et al. 2022. A method for improving the performance of the 2σ lightning jump algorithm for nowcasting hail [J]. Atmospheric Research,280:106404. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106404

Williams E, Boldi B, Matlin A, et al. 1999. The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms [J]. Atmospheric Research,51(3):245−265. doi:10.1016/S0169−8095(99)00011−3

Williams E R. 2001. The electrification of severe storms. Severe Convective Storms [M]. Springer. , pp. 527-561. doi:10.1007/978−1−935704−06−5_13

Yao W, Zhang Y J, Meng Q, et al. 2013. A comparison of the characteristics of total and cloud-to-ground lightning activities in hailstorms [J]. Journal of Meteorological Research,27(2):282−293. doi:10.1007/s13351−013−0212−x

(责任编辑 闵爱荣)