



湖北省对流初生时空分布特征及其与地形关系

潘梦莹 胡志群 张炜 张东 陈源 王梦遥

Spatiotemporal distribution characteristics and relationship on terrain of Convection Initiation in Hubei Province

PAN Mengying, HU Zhiqun, ZHANG Wei, ZHANG Dong, CHEN Yuan, WANG Mengyao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-267>

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

青藏高原夏季FY-4A卫星对流初生产品的分类识别

Classification and identification of FY-4A convective initiation products in summer on the Qinghai-Tibet Plateau

暴雨灾害. 2024, 43(2): 214–223 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-193>

基于地面分钟雨量数据的湖北省短时强降水时空分布特征分析

Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of flash heavy rain in Hubei Province based on minute rain gauge data

暴雨灾害. 2021, 40(1): 61–68 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.008>

1961—2020年安徽省区域性暴雨和干旱过程识别及演变特征

Characteristics of identification and evolution of regional rainstorm and drought processes in Anhui Province during 1961-2020

暴雨灾害. 2022, 41(6): 671–678 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-088>

湖北省不同类型雷暴大风的时空分布及环境参数特征

Spatial-temporal distribution and environmental parameter characteristics for different types of thunderstorm gales in Hubei Province

暴雨灾害. 2022, 41(1): 66–75 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.008>

近43 a影响浙江并引发区域性暴雨的大气涡旋统计特征

Statistical analysis of atmospheric vortexes affecting Zhejiang and causing regional rainstorms nearly 43 years

暴雨灾害. 2025, 44(2): 215–225 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-074>

汉江上游致洪暴雨天气概念模型客观识别算法的应用与检验

Application and verification of objective identification for the conceptual weather model of flood-causing rainstorm in the upper reaches of Hanjiang River

暴雨灾害. 2025, 44(6): 713–722 <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-036>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

潘梦莹,胡志群,张炜,等.2026.湖北省对流初生时空分布特征及其与地形关系[J].暴雨灾害,45(4):554–563. PAN Mengying, HU Zhiquan, ZHANG Wei, et al. 2026. Spatiotemporal distribution characteristics and relationship on terrain of Convection Initiation in Hubei Province [J]. Torrential Rain and Disasters,45(4):554–563 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–267

湖北省对流初生时空分布特征及其与地形关系

潘梦莹^{1, 3}, 胡志群², 张炜¹, 张东¹, 陈源¹, 王梦遥¹

(1. 湖北省黄石市气象局, 黄石 435000; 2. 中国气象科学研究院灾害天气科学与技术全国重点实验室, 北京 100081;
3. 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225)

摘 要: 对流初生 (Convection Initiation, CI) 是强对流天气开始活动的标志, 其识别对于强对流预警具有重要意义。基于 2020—2024 年湖北省高时空分辨率雷达组合反射率拼图数据和地面自动气象站降水资料, 采用改进的 CI 客观识别算法, 构建湖北省 CI 数据集, 并分析了 CI 的时空分布特征及其与地形的关系。结果表明: (1) 2020—2024 年湖北省识别 CI 共 107 322 次, 日平均 CI 次数 59 次, 日数占比 73%, 其中 2020 年日平均 CI 次数和日数占比最多, 2022 年最少; 季节分布上, 夏季最活跃, 春、秋季次之, 冬季最少。(2) 湖北省 CI 月变化呈双峰型, 主峰位于 6—7 月, 对应梅雨季, 次峰位于 10—11 月, 与季节转换冷暖气团交汇以及台风等热带系统影响相对应。(3) CI 日变化特征呈午后至傍晚的单峰或主峰结构, 夏季后半夜存在次峰; 除秋季外, 白天 CI 次数普遍高于夜间。(4) CI 分布受下垫面影响显著, 湖北省高频区主要集中在鄂西南山地的恩施与宜昌交界处, 鄂东南幕阜山、鄂东北大别山、鄂西北山地及大型湖泊水库周边为 CI 次高频区, 而中部平原盆地为低频区。上述结果反映了湖北省 CI 的发生发展规律, 有助于本地化 CI 预报模型的构建, 以实现**对强对流天气的早发现、早预警。**

关键词: 对流初生; 客观识别; 时空分布; 地形影响

中图法分类号: P412.25

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–267

Spatiotemporal distribution characteristics and relationship on terrain of Convection Initiation in Hubei Province

PAN Mengying^{1, 3}, HU Zhiquan², ZHANG Wei¹, ZHANG Dong¹, CHEN Yuan¹, WANG Mengyao¹

(1. Huangshi Meteorological Bureau of Hubei Province, Huangshi 435000; 2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 3. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

Abstract: Convection Initiation (CI) is an critical precursor to severe convective weather, and its accurate identification are of great significance for severe convective weather early warning. Using high spatiotemporal resolution radar composite reflectivity mosaic data and surface automatic weather station precipitation data from Hubei Province during 2020–2024, this study applied an improved high-resolution grid-based objective CI identification algorithm to construct a CI dataset. The spatiotemporal distribution characteristics of CI and their relationship with topography were subsequently analyzed. The results are as follows. (1) A total of 107,322 CI number were identified in Hubei Province from 2020 to 2024, corresponding to an average of 59 events per day and a CI-day occurrence frequency of 73%. Both the daily mean CI number and the frequency of CI days were highest in 2020 and lowest in 2022. Seasonally, CI was most active in summer, followed by autumn and spring, and least active in winter. (2) The monthly variation of CI exhibited a bimodal pattern, with the primary peak observed in June–July, corresponding to the Meiyu season, and a secondary peak noted in October–November, associated with seasonal transition, cold-warm air convergence, and the influence of tropical systems such as typhoons. (3) The diurnal variation of CI was characterized by a single or dominant peak from afternoon to evening, with a secondary peak identified in the late night during summer. Except in autumn, daytime CI occurrences were generally higher than those at night. (4) The distribution of CI was

收稿日期: 2025–12–18; 定稿日期: 2026–05–14

资助项目: 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2025J106); 长岛国家气候观象台开放基金项目 (2024cdkzfz03); 湖北省气象局科技发展基金项目 (2025Y22, 2025Y35)

第一作者: 潘梦莹, 主要从事短时临近天气预报技术研究。E-mail: 575526339@qq.com

通信作者: 胡志群, 主要从事人工智能技术应用与雷达气象研究。E-mail: huzq@cma.gov.cn

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

found to be uneven and significantly influenced by underlying surfaces. High-frequency areas were concentrated mainly in the mountainous regions of southwestern Hubei, particularly along the Enshi-Yichang border. Other relatively active areas included the Mufu Mountains in southeastern Hubei, the Dabie Mountains in northeastern Hubei, mountainous regions in northwestern Hubei, and areas surrounding large lakes and reservoirs. In contrast, the central plains and basins exhibited relatively lower CI frequencies. These findings provide a preliminary understanding of the occurrence and evolution characteristics of CI in Hubei Province and offer a scientific basis for the development of a localized CI forecasting model. Such models can improve the early detection and warning of severe convective weather, thereby enhancing meteorological disaster preparedness and mitigation efforts.

Key words: convective initiation; objective identification; spatio-temporal distribution; topography influence

引言

对流初生 (Convection Initiation, CI) 是强对流天气的起始阶段, 也是对流系统生命周期的关键环节 (Wilson and Roberts, 2006; Bei and Zhang, 2007; 姚秀萍和曹晓敏, 2023)。在满足一定的水汽、动力、热力不稳定等环境条件下, CI 进一步发展可诱发雷暴大风、短时强降水、冰雹等强对流天气 (孙继松等, 2014; Peters and Schumacher, 2015; Li et al., 2019)。此类天气突发性强、尺度小、强度大、破坏力强 (方宗义, 2014; Wilson et al., 2018), 严重威胁人民群众生命财产安全。因此, CI 预报是强对流天气监测、预报的重点和难点 (Weckwerth et al., 2019; 崔林丽, 2022), 也是提高强对流天气临近预报和预警水平的关键所在。

利用高时空分辨率的气象卫星与天气雷达资料, 能够实现对 CI 过程的精细化捕捉与早期识别, 进而提升短临预报的精准度与时效性 (黄亦鹏等, 2019)。CI 识别算法主要分为基于天气雷达和气象卫星两类: 前者核心在于利用雷达回波捕捉对流强度及结构演变, 后者侧重分析亮温以揭示云顶温度与高度变化, 天气雷达凭借高时空分辨率优势, 对短临预警极为有利, 但受限于探测盲区、地形干扰、覆盖范围及季节等环境因素影响; 气象卫星虽具备广覆盖、多通道优势且能早于雷达探测积云, 但其亮温信号易受遮挡干扰 (覃丹宇和方宗义, 2014; 姚秀萍和曹晓敏, 2023)。由于天气雷达资料能够获取对流系统内部结构信息, 同时具有更高的空间分辨率, 有利于分析 CI 与精细地形之间的空间匹配关系, 因此本文选用雷达资料进行 CI 研究。

进行 CI 研究首先要对 CI 进行识别, 基于天气雷达资料的 CI 识别算法, 通过分析雷达回波反演的对流强度与结构演变特征, 可以判断 CI 的起始位置, 以确定 CI 产生 (曹林兮等, 2024)。CI 识别通常被定义为天气雷达第一次监测到由对流云产生的反射率因子达 35 dBz 的云团 (Roberts and Rutledge, 2003; Walker et al., 2012; Senf and Deneke, 2017)。为了准确判断对流的“首次出现”, 研究人员采用设定特定时空阈值的方法, 通过筛选去除那些在对流块任意方

向上已经达到或接近对流标准的样本, 实现完全孤立的 CI 识别。Fabry 等 (2013) 提出 FCB2013 算法, 要求对流事件发生前 30 min 内, 预期位置 30 km 范围内无 25 dBz 以上像素; 或前 30 min 内 30 km 范围无 35 dBz 像素且前 60 min 内 50 km 范围内无 25 dBz 以上像素, 旨在探究孤立 CI 的时空分布。Bai 等 (2020a) 通过风暴移动速度估算移动距离来放大筛选半径, 该方法减少了因位置估计不准确而漏掉真实 CI 的可能, 从而提高了 CI 识别的可靠性。曹林兮等 (2024) 将“对流块”定义为雷达组合反射率达到 35 dBz 且面积不小于 4 km² 的严格连续区域, 结合对流块移动速度和持续时间设定条件: 前 30 min 内 10 km 半径内无其他对流块, 且后 10 min 内该对流块持续存在, 以此来判定为一次 CI。上述算法从不同角度对 CI 的“首次出现”进行了时空约束, 均体现了孤立性与持续性并重的识别思路。已有的算法阈值多基于其他区域设定, 为支撑后期本地化 CI 预报模型构建, 本文参考上述算法并进行本地化改进, 提出了改进的 CI 客观识别方法, 对湖北省 CI 进行识别和分析。

研究 CI 的时空分布特征可揭示对流活动的演变规律, 其分布形态受地理环境 (如下垫面、地形) 及季节背景等因素的显著影响。Weckwerth 等 (2011) 对 CI 分布特征研究得出, 夏季德国西南部和法国东部山区 CI 频繁, 且山区密度较高, CI 在夏季频繁发生, 中午时段达到高峰。Li 等 (2021) 对中国及其周边地区暖季发生 CI 的密度和时空分布特征进行统计, 研究得出 CI 极大值中心在云贵高原、华南中东部、青藏高原西南部, 7 月和 8 月 CI 达到峰值。李扬 (2023) 分析得出青藏高原、云贵高原和华南地区强对流和 CI 频繁, CI 白天主要在发生在山脉附近, 夜间则发生在盆地、平原和海岸线附近; 陆地和海洋 CI 在 7—8 月达到峰值, 陆地 CI 日变化在 11—14 时 (北京时, 下同) 达到峰值。曹林兮等 (2024) 研究得出苏沪城市群区域存在 3 个较高 CI 发生频次区域: 沿长江的“上海-苏锡常-南京”城市带、从南通北部到黄海近海、天目山系部分区域, CI 频次日变化呈现 11—14 时 (北京时) 主峰特征。刘洁莉等 (2025) 研究华北区域暖季 CI 的时空分布特征, 分析得出 CI 在 7 月

和 8 月最为活跃, CI 在山地最为频发,而在平原、盆地、平坦高原少发。上述部分研究基于较低空间分辨率资料,难以有效捕捉地形起伏较大区域的小尺度对流初生信号。

近年来,利用高分辨率天气雷达组网资料在 CI 识别方面开展了大量研究。多普勒天气雷达空间分辨率可达 1 km,时间分辨率达分钟级 (Bai et al., 2020a),天气雷达组网观测凭借高时空分辨率与连续覆盖优势,实现了对中小尺度系统及 CI 关键信息的精细化监测与精准捕捉,显著提升了强对流天气预警能力 (黄亦鹏等, 2019)。曹林兮等 (2024) 采用时间分辨率为 10 min,空间分辨率为 1 km 的业务天气雷达组网资料,在苏沪城市群区域识别出沿长江城市带、近海区域及天目山系分布的三个高 CI 频次带,展现了高分辨率资料在研究城市下垫面与复杂地形协同作用方面的独特优势。Bai 等 (2020b) 利用公里级中国气象局雷达反射率拼图资料,得出华南季风海岸区的 CI 对季风活动、海陆差异及海岸地形具有显著依赖性。刘洁莉等 (2025) 基于华北雷达组合反射率拼图资料,分析了 CI 活动在山脉与盆地之间的空间差异,得出 CI 集中于山地、少发于平原与盆地,为理解地形对 CI 的影响机制提供了高分辨率观测依据。上述研究表明,高时空分辨率天气雷达组网资料为揭示 CI 精细时空分布特征、发展客观定量 CI 识别方法提供了数据支撑。

湖北省地处亚热带季风气候区,地理位置特殊,地形地貌复杂。受西南暖湿气流北上与北方冷空气南下的共同影响,冷暖气团频繁在此交汇,加之地形的动力抬升作用,极易诱发强对流天气。复杂的地形往往导致对流天气的触发具有局地性和非均匀性,揭示 CI 与地形的内在关联,厘清不同下垫面条件 CI 的发生规律,是开展本地化研究的必要前提。Li 等 (2021) 和李扬 (2023) 虽然研究了全国范围包括湖北的 CI 分布特征,但采用的是卫星资料探测结果,一方面卫星观测资料分辨率不如雷达资料精细,另一方面由于探测方式不同,探测结果也可能不尽相同。姚秀萍和曹晓敏 (2023) 指出,虽然采用卫星资料研究 CI 时效性更高,但雷达的高时空分辨率使其能够捕捉小尺度结构特征,还可细化分析本地地形对 CI 的影响,特别是地形触发的小尺度 CI。本文利用高时空分辨率的雷达组合反射率拼图数据和气象观测站小时降水资料,对 2020—2024 年湖北省的 CI 进行客观智能识别,并分析了湖北省 CI 的时空分布特征及其与地形的关系,为进一步开展湖北省 CI 的潜势预报及短时临近预报提供数据支撑与科学依据。

1 研究区域及资料与方法

1.1 研究区域

本文研究区域为包含湖北省在内的矩形区域 (107.75°—116.75°E, 28.5°—33.75°N) (图 1)。湖北省地形呈现显著的西高东低,东、西、北三面环山,中部低平,略呈向南敞开不完整盆地格局。其地貌构成以山地为主体,约占全省总面积的 56%,辅以丘陵与平原,形成多层次的地形特征。

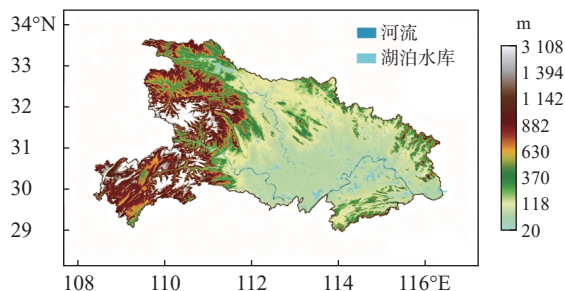


图 1 湖北省地形高程 (色斑) 图

Fig. 1 Topographic elevation map (color shading) of Hubei Province

1.2 资料说明

本文所用资料包括: (1) 2020—2024 年中国气象局天擎云平台上经过质控的研究范围内雷达组合反射率拼图资料,时间分辨率为 6 min,空间分辨率为 0.01°,用以识别 CI; (2) 2020—2024 年中国气象局天擎云平台上的湖北省及周边国家气象观测站 (以下简称国家站) 和区域气象观测站 (以下简称区域站) 逐小时降水数据辅助识别 CI,构建 CI 数据集; (3) 来源于地理空间数据云的 DEM 数字高程数据,主要包括 ASTER GDEM 30 m 分辨率数字高程数据和 Landsat 中国内陆水体信息产品。

本文以气候季节划分标准,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月—次年 2 月为冬季。定义当日 08 时至次日 08 时至少发生一次 CI 为 CI 日,CI 日定义与中国气象业务规定的日界 (如日降水量统计) 保持一致,确保数据统计、分析和服务的标准统一。

1.3 研究方法

1.3.1 CI 识别算法

刘洁莉等 (2025) 提出了一种 CI 的客观识别方法,首先识别组合反射率因子 ≥ 35 dBz 且连续面积超过 10 km² 的对流块;其次判断该对流块在 1 h 内半径 54 km 范围内无其他对流块存在;最后通过半径 5 km 范围内两个体扫连续存在,确认该对流块为一次孤立 CI。该方法在常规分辨率雷达数据下对较大尺度孤立对流触发的识别效果较好,然而在高分辨率观测条件下,其局限性表现明显,对小尺度、发展迅速或空间分布稀疏的对流触发过程存在识别遗漏。为

进一步提高 CI 识别的精准度,本文在保留其反射率阈值、孤立性判定及时间连续性等核心逻辑的基础上,取消连续面积阈值设定,缩小无其他对流块存在的判断半径,并采用更短的时间间隔进行连续两个体扫的追踪,建立了一套基于高精度格点的高分辨率 CI 识别算法,使其能够识别和追踪对流触发过程,特别是小规模 and 孤立的对流事件。该算法的具体识别条件及步骤如下(图 2): (1) 循环读取每一个格点的组合反射率 (Composite Reflectivity, CR), 第 0 个体扫回波强度小于 15 dBz, 确保对流是从无到有; (2) 连续 5 个拼图数据, 即 30 min 内, 回波强度大于 35 dBz; (3) 设置筛选半径为 30 km, 没有大于等于 35 dBz 的格点, 确定是本地 CI, 不是外部移入; (4) CI 格点在下一个体扫(即 6 min)以格点位置为中心, 半径为 5 km 的圆内仍能识别到超过 35 dBz 的回波, 以确定对流连续存在两个体扫时间; (5) 保存筛选后的

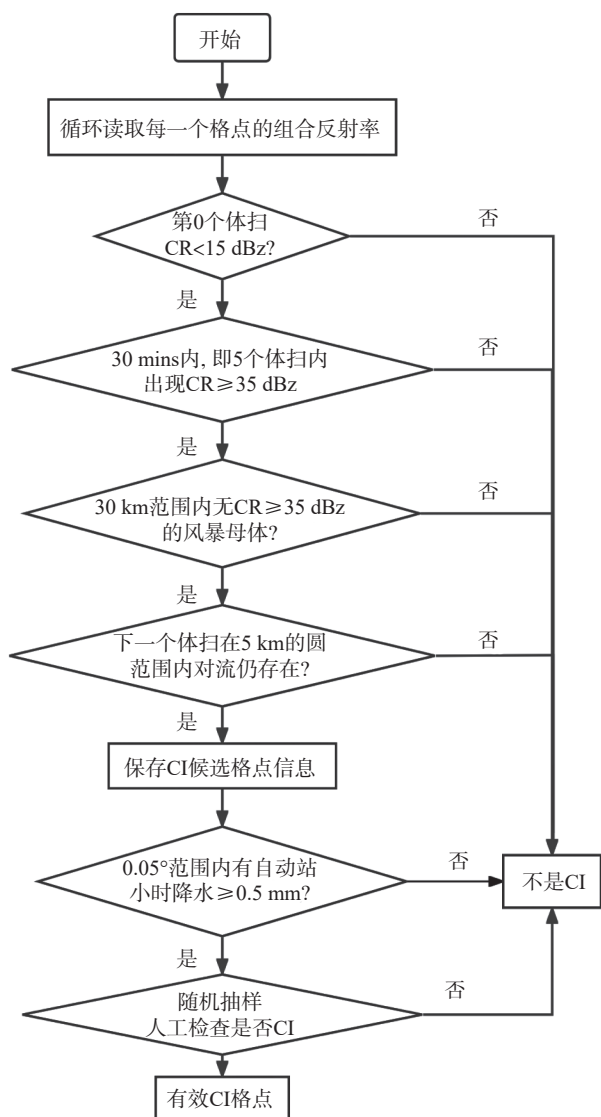


图 2 CI 客观识别流程图

Fig. 2 Schematic diagram of the objective CI identification process

CI 候选格点相关信息, 并输出首次出现大于 35 dBz 格点之后 30 min 的 CI 演变信息, 包括以该格点为中心, 31×31 格点范围内, CR 大于 35 dBz、45 dBz 的格点总数, CR 平均、CR 最大值等, 用于进一步判断 CI 的演变及质控。

1.3.2 CI 数据质控

为确保 CI 格点识别的准确性, 利用逐小时地面自动气象观测站降水数据, 对 CI 格点开展进一步验证, 过滤虚假 CI 格点, 对每个 CI 格点, 若在其半径 0.05°范围内有气象观测站小时降水量大于等于 0.5 mm, 则该 CI 格点予以保留; 若无满足条件的自动站降水记录, 则将该 CI 格点剔除。此外, 针对 CI 数量异常偏高数据, 进行人工核查, 排查是否存在数据质量问题, 并剔除其中不合理的 CI 格点。经过上述质控流程, 在湖北省区域内保留的 CI 格点数量占原始识别总数的 11.7%。

为评估 CI 客观识别方法的表现, 随机抽取个例进行人工标注验证, 图 3 为 2024 年 8 月 23 日个例的组合反射率雷达拼图, 反映了 CI 客观识别及质控后的效果, 在该个例中, 第 0 个体扫(11:42) 保康县附近组合反射率强度低于 15 dBz, 且 30 km 范围内无强回波(图 3a); 经过 4 个体扫的发展, 至 12:06 回波强度增至 35 dBz 以上(图 3b), 并持续维持两个体扫(图 3c)。结合 13 时该位置 0.05°范围内站点观测到 2.4 mm 的降水, 综合判定 12:06 为 CI 出现时间。

本文将研究区域划分为 0.05°×0.05°的网格, 同一时次在同一网格内有 3 个以上 CI 格点, 记为一次 CI。2020—2024 年湖北省区域共识别到 CI 107 322 次, 日平均 CI 次数为 59 次, CI 日数 1 335 d, CI 日数占比为 73%。

2 CI 时间分布特征

本文分析 2020—2024 年湖北省全年和四季 CI 时空分布特征, 主要针对 CI 次数、日平均 CI 次数、CI 日数占比。

2.1 年际和季节变化

2.1.1 日平均 CI 次数的年际和季节变化

图 4a 为日平均 CI 次数的年际变化和季节变化综合图, 其中, 热图反映各年各季节的日平均 CI 次数分布, 上方柱状图表示各年日平均 CI 次数, 右侧柱状图表示各季节日平均 CI 次数。日平均 CI 次数的年变化与 CI 次数的年变化趋势基本一致, 均为 2020 年值最大, 2020 年平均日 CI 次数达 70 次, 是 2020—2024 年 CI 次数最多的年份, 2020 年湖北省国家站平均年降水总量达 1 707.5 mm, 较常年偏多 4 成, 是 1961 年以来第一位; 2022 年平均日 CI 次数

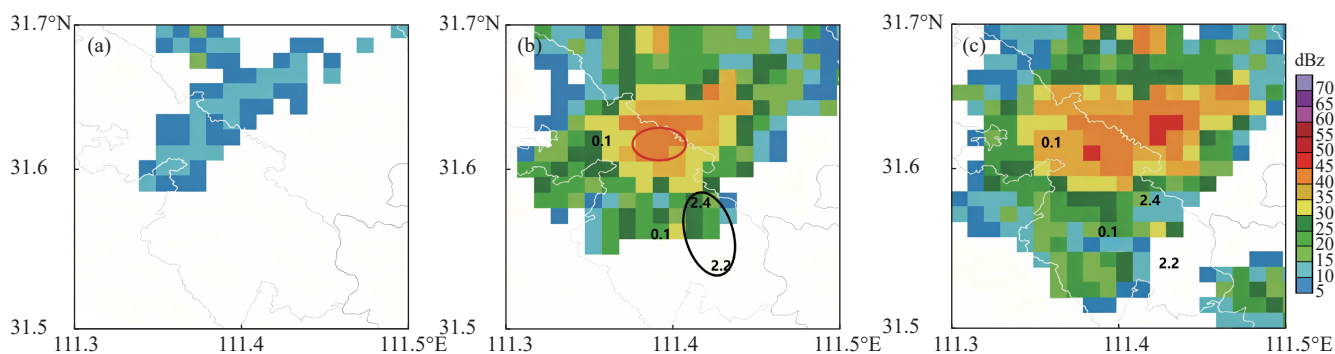


图 3 湖北省保康县 2024 年 8 月 23 日 11:42 (a)、12:06 (b)、12:12 (c) 组合反射率雷达拼图 (红色圆圈内为 CI 区域, 黑色圆圈内为小时降水量 ≥ 0.5 mm 区域, 数字为 13:00 小时雨量, 单位: mm)

Fig. 3 Composite reflectivity radar mosaics in Baokang in HuBei province at (a) 11:42 BT, (b) 12:06 BT, and (c) 12:12 BT on 23 August 2024 (The red circles mark the areas of CI, and the black circles denote the areas with hourly precipitation ≥ 0.5 mm, the numbers represent hourly rainfall at 13:00 BT, unit: mm)

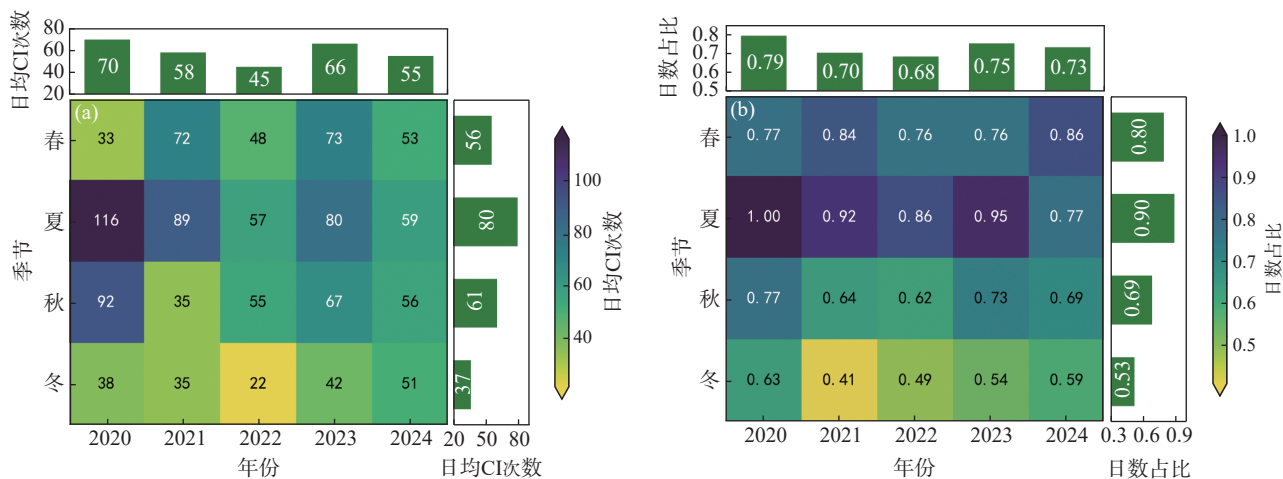


图 4 2020—2024 年湖北省日平均 CI 次数 (a)、CI 日数占比 (b) 的年际变化和季节变化综合图 (热图为每年每季节值, 上方柱状图为逐年值, 右侧柱状图为逐季节值)

Fig. 4 Comprehensive diagram of interannual and seasonal variations of (a) daily mean CI number and (b) percentage of CI days in Hubei Province from 2020 to 2024 (The heat map presents the values for each season of each year, with the bar chart above showing the annual values and the bar chart on the right side showing the seasonal values)

最少, 为 45 次, 与 2022 年湖北省遭遇伏秋连旱综合强度历史最强事件相吻合, 2022 年湖北省国家站平均年降水总量 984.8 mm, 较常年同期偏少 2 成, 是 1961 年以来倒数第 7 位。从季节变化分析, 2020—2024 年日平均 CI 次数的季节从多到少依次为夏、秋、春、冬, 夏季日平均 CI 次数为 80 次, 冬季为 37 次。根据热图可见, 2020 年夏季和秋季日平均 CI 次数较其余时期更为频发, 均达 90 次以上, 尤其 2020 年夏季日均达 116 次, 对应年份湖北省夏季降水偏多 7 成, 列 1961 年以来第一位, 入梅早、出梅晚, 梅雨强度历史第一 (肖莺等, 2020); 2022 年冬季日平均 CI 次数最少, 不足 40 次。

2.1.2 CI 日数占比的年际和季节变化

图 4b 为 CI 日数占比的年际变化和季节变化综合图, 从年变化来看, 2020—2024 年日数占比逐年变

化不大, 均在 0.68~0.79 范围内, 其中 2020 年日数占比最高, 2023 年次之, 2022 年最少。从图 4b 季节变化来看, 春、夏、秋、冬各季节 CI 日数占比分别为 0.80、0.90、0.69 和 0.53, 夏季 CI 日数占比最高, 冬季 CI 日数占比最低。2020 年、2021 年、2023 年夏季 CI 日数占比均高达 0.90 及以上, 尤其 2020 年占比值达 1.0, 说明每天至少发生一次 CI; 2024 年春季 CI 日数占比也达到 0.86。各年冬季、2021 年和 2022 年秋季 CI 日数占比相对较低, 占比值均低于 0.65, 其中 2021 年冬季 CI 日数占比最低。

2.2 月变化

图 5 为 2020—2024 年湖北省 CI 次数的月变化综合图。由累计逐月 CI 次数折线图可见, 6—7 月 CI 次数出现峰值, 与梅雨季时间段相呼应, 6 月 CI 频次最多, 达 14 271 次; 10—11 月为弱次峰, 此时段为

湖北季节转换期,冷暖空气交汇,且台风活跃,有利于远距离输送水汽(柳草等,2015),有助于CI产生;进入冬季CI次数明显减少,12月CI次数最少。从热力图可见,2020年6月和7月CI异常活跃,CI次数均达到4300次以上,同年11月CI次数也较大,在3000次以上;2021年8月、2023年5—6月和9月的月CI次数均在2800次以上,CI较为活跃。本文得出湖北省CI月变化峰值在6—7月,最大值出现在7月的结论,与李扬(2023)和Li等(2021)的结论基本一致。

2.3 日变化

图6为2020—2024年湖北省全年累计和各季节小时CI次数的日变化,并计算了对应时段CI次数日变化距平,其中08时—20时为白天,20时—次日08时为夜间。

图6a为春季CI次数日变化图,可见CI次数日变化为“多波动单峰”结构,峰值出现在18—20时,19时最多,白天CI次数逐步上升,由负距平转为正距平,午

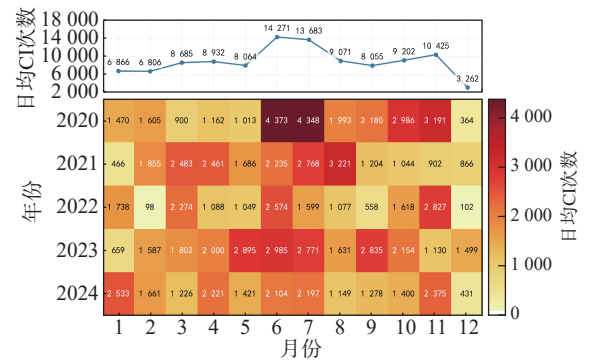


图5 2020—2024年湖北省逐年(热图)和日平均(折线图)CI次数的月变化综合图

Fig. 5 Comprehensive diagram showing the monthly variation of annual (heatmap) and daily average (line chart) of CI number in Hubei Province from 2020 to 2024

后到傍晚正距平在0~0.2之间,20时后CI次数及距平明显减少,22时距平转为负值,最低CI次数在01时;从CI占比来看,白天CI次数占比为52.9%,夜间CI次数占比为47.1%,CI次数白天略多于夜间。从夏

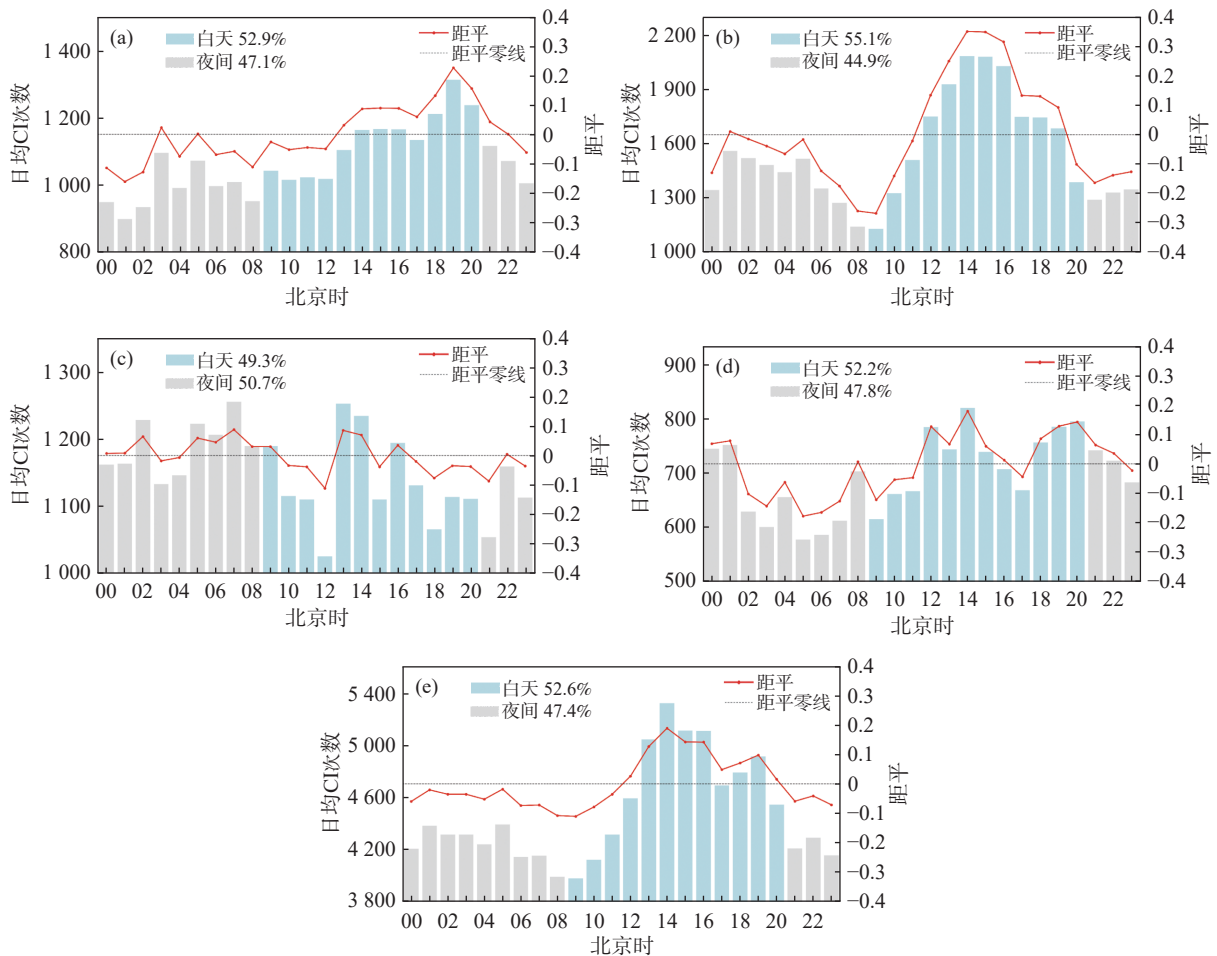


图6 2020—2024年湖北省春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d)、全年(e)CI次数及距平日变化(左上角图例数字表示白天和夜间CI次数占比)

Fig. 6 Diurnal variation of CI number and anomaly for (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, and (e) annual cumulative in Hubei Province from 2020 to 2024 (The legend in the upper-left corner indicates the proportion of daytime to nighttime CI events)

季 CI 次数日变化图(图 6b)可见, CI 次数日变化呈“一强一弱双峰”结构, 其中主峰发生在 13—16 时, 次峰发生在 01—05 时, 最大 CI 次数发生在 14 时, 最小 CI 次数出现在 09 时; 距平曲线振幅较大, 午后到傍晚 CI 次数明显偏多, 15 时距平值超过 0.3; 从白天和夜间 CI 次数占比来看, 白天占比 55.1%, 夜间占比 44.9%, CI 次数白天多于夜间。秋季 CI 次数日变化图(图 6c)显示, CI 次数日变化呈“多波动”型, 02 时、07 时、13—14 时 CI 次数相对较大, 12 时和 21 时为明显的谷区, 最低次数出现在 12 时; 距平振幅整体变化不大, 所有时段距平均在 $-0.1 \sim 0.1$ 之间; 白天 CI 次数占比与夜间 CI 次数占比相近。图 6d 为冬季 CI 次数日变化图, CI 次数日变化以“三峰”结构为主, 主要集中在 00—01 时、12—14 时和 19—20 时, 分别对应距平值为 0.1、0.2、0.15 左右, 14 时 CI 次数最高; CI 次数存在两个谷区, 分别为 02—03 时和 05—07 时, 07 时 CI 次数最低; 根据白天和夜间 CI 次数占比, 夜间次数少于白天。结合 CI 次数全年日变化(图 6e)可见, 全年日变化与夏季日变化特征最为相似, 总体呈现“一强一弱双峰”结构, 但距平振幅小于夏季。CI 次数主峰出现在

13—16 时, 峰值为 14 时, 白天 CI 次数多于夜间。研究结果与李扬(2023)基于卫星资料研究发现的“华中地区 CI 在 13—14 时达到峰值, 其日变化曲线呈现微弱的双峰分布特征”的结论也基本一致。

综上所述, 各季节和全年 CI 发生最主要时段集中在中午到傍晚, 夏季后半夜还存在另一个峰值。对比白天 CI 次数和夜间 CI 次数占比情况, 除秋季外, 全年累计和其他三个季节白天的 CI 次数均多于夜间, 其中, 夏季白天 CI 次数占比最高, 达 55.1%。

3 CI 空间分布特征

对研究区域按照空间分辨率 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 划分网格, 共计 18 900 个网格, 统计每个网格内发生 CI 次数及研究区域内各 CI 次数区间对应的网格数, 可得出空间分布规律。根据各季节和全年累计 CI 次数分布(图 7)可知, CI 的空间分布明显不均, 各季节也存在差异。

3.1 CI 次数的空间分布

春季湖北省 CI 活动(图 7a)的高频区(CI 次数 ≥ 50 次)主要位于恩施东部和宜昌西部的山地, 以及黄

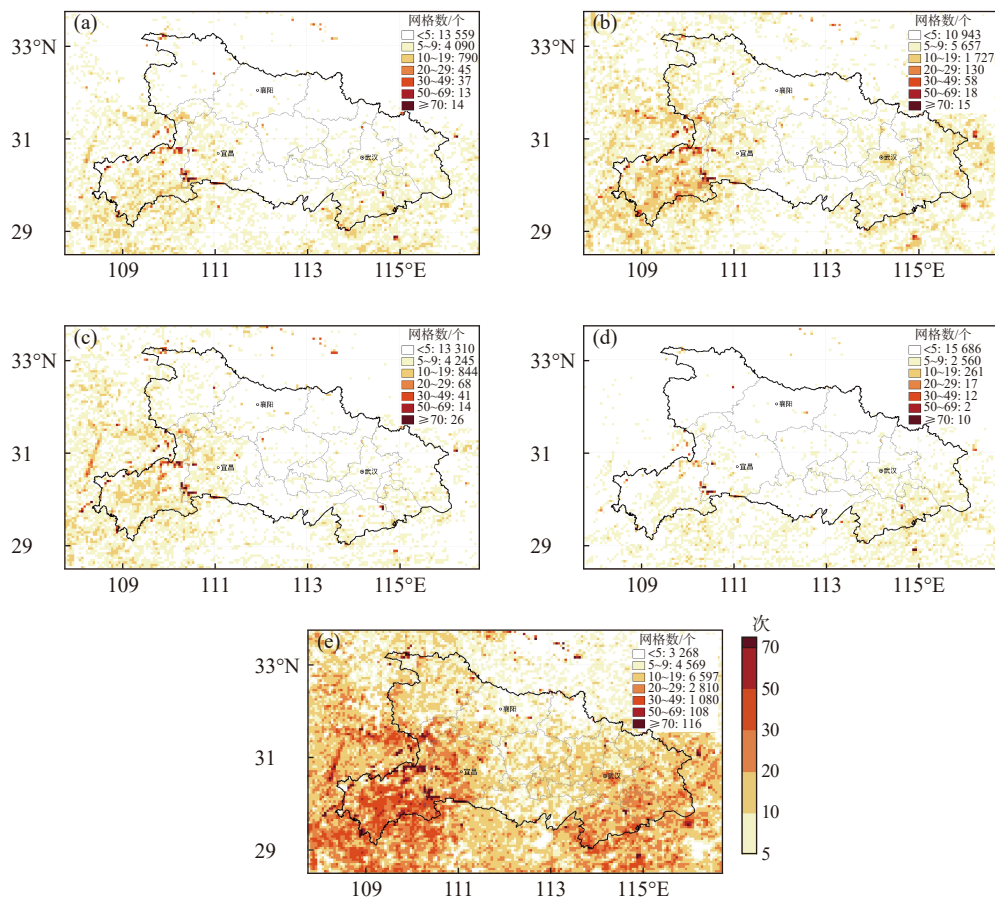


图 7 2020—2024 年湖北省春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d)、累计(e) CI 次数空间分布图(网格数指单个网格 CI 次数范围的格点数)

Fig. 7 Spatial distribution of CI number for (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, and (e) the cumulative total in Hubei Province from 2020 to 2024 (The number of grids refers to the number of points within the range of CI occurrences for a single grid)

石市与咸宁市交界处的王英水库和富水水库附近;较高频区(CI次数 ≥ 20 次)位于恩施西部、十堰西北部和咸宁西南部山区,以及黄石大冶湖,湖北中部盆地CI活动频次相对较低;从各CI次数范围内所含的网格数来看,95%的网格内CI数小于10次,整体来看春季海拔较高的山地和湖泊水库位置更容易触发CI。夏季CI高频区(图7b)范围扩大,CI活动明显增多,尤其在鄂西山区,呈现西部高、东部次高、中部频次最低的特征;从各范围网格数来看,高频和较高频区网格数明显增加,网格内CI数达到10次及以上的网格数对总网格数的占比超过10%,夏季湖北省CI活动受复杂下垫面影响显著,由地形抬升、水陆热力差异、城市热岛效应等作用,共同构成了此阶段CI显著增加的形成机制。秋季CI次数分布特征(图7c)与春季相似,高频区和较高频次区位置基本一致,鄂西地区CI活动较春季更活跃,而鄂东南网格内CI次数较春季略偏少。冬季CI次数(图7d)整体分布相比其他三个季节相对均匀,各区域差异减小,冬季整体CI频次数量减少,网格内CI数大于10次的网格数减少,仅占总网格数的0.22%;CI频次南部高于北部地区,冬季大气层结稳定,不利于对流发展,导致CI活动整体减弱、分布相对均匀,但鄂西南山地和鄂东南湖泊水体处CI活动频次相对略高,鄂西南CI活跃区域较其它三个季节位置维持稳定,山地地形本身对气流产生动力抬升和扰动,此外冬季水体降温慢,相对于已迅速变冷的大陆地表而言,湖泊是一个

“热源”,为CI提供了必要的初始扰动和能量。从全年累计CI次数分布图(图7e)可见,鄂西南和鄂东南地区CI活动频繁,中部地区CI活动较少。与李扬(2023)及Li等(2021)的研究相比,本文具有更高的空间分辨率,且结合了本地精细地形特征,更精准地刻画了CI活动的空间特征。

4 CI次数随海拔高度及不同地形的分布特征

根据平均CI次数随海拔高度图(图8a)可知,平均CI次数(总CI次数与不同海拔区间格点数的比值)总体随海拔高度增高而增多,在1300 m海拔以下增幅相对平稳,1300~2100 m之间呈波动上升,在2000 m以上显著上升;而不同地形的CI平均次数对比图(图8b)可知,山地CI平均次数最大,平原最小。上述分析同样印证了Li等(2021)的发现,即中国中东部地区的CI多发生于山区。

综合来看,湖北省CI活动在空间分布上与下垫面密切相关,四个季节均在鄂西山地、鄂东南幕阜山、鄂东北大别山附近表现出程度不同的高频区,尤其在鄂西南恩施和宜昌交界的高海拔地区CI活动频繁,说明湖北省CI活动与山脉等地形的抬升和气流汇合作用存在密切联系。此外,大型水体湖泊周边也是CI较高频区,表明湖陆风环流等由水陆热力差异引起的局地热力驱动,与中小尺度地形共同作用,在CI过程中扮演了重要角色,增加了CI的发生频率。

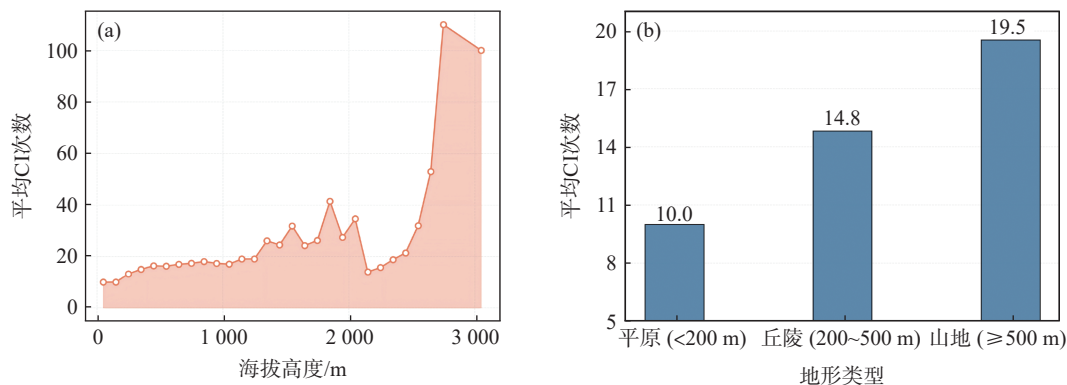


图8 2020—2024年湖北省平均CI次数随海拔高度(a)和地形类型(b)分布

Fig. 8 Variation of the average CI numbers with (a) elevation and (b) terrain types in Hubei Province from 2020 to 2024

5 结论与讨论

本文利用2020—2024年湖北区域的高时空分辨率雷达组合反射率拼图资料,基于改进的高时空分辨率CI客观识别算法,并结合气象站观测降水数据进行质量控制,建立了湖北省CI数据集,并分析了2020—2024年湖北省CI的时空分布特征及其与地

形的关系,得到以下主要结论:

(1) 2020—2024年湖北省识别出CI共107322次,日平均CI次数为59次,CI日数占比达73%。2020年日平均CI次数和日数占比最多,对应年降水量显著偏多的年份,为1961年以来第一位,CI活动频繁;而在2022年CI出现最少,对应湖北省遭遇伏秋连旱综合强度历史最强事件。

(2) CI 活动呈现显著的“夏高冬低”季节性特征。夏季受梅雨锋及高温高湿环境共同影响, CI 次数最多; 秋季次之, 冬季最少。在月变化上, 6—7 月对应湖北梅雨主汛期, 是 CI 最为活跃的时段; 10—11 月出现次峰值, 可能归因于季节转换期间冷暖空气的频繁交汇以及秋季台风外围的水汽输送作用。

(3) 湖北省 CI 日变化总体表现为“昼多夜少”及“午后主峰”特征。全年及各季节的峰值时刻多集中在 13—16 时, 此外, 夏季在夜间 (01—05 时) 存在次峰, 秋季和冬季日变化呈三峰及以上的多波动结构; 夏季日变化振幅最大, 午后爆发性最强。

(4) CI 的空间分布与湖北省“西高东低、三面环山”的地形地貌高度吻合。鄂西南山区是 CI 高频区, 尤其在恩施与宜昌交界处, 同时鄂东南幕阜山、鄂东北大别山、鄂西北山地附近为 CI 较高频区, 地形强迫抬升对对流触发起关键作用。江汉平原及中部盆地则为相对低频区。大型水体 (如湖泊、水库) 周边也存在 CI 较高频次区, 水陆热力差异诱发的局地环流对 CI 频发的贡献。

本文基于高分辨率天气雷达拼图资料构建了湖北省 CI 数据集, 揭示了湖北省 CI 多尺度时空分布特征, 深化了对复杂地形 CI 触发机制的科学认知, 所建立的数据集与统计特征可支撑 CI 潜势预报、短临预报预警和预报模型构建, 具有业务应用价值。然而, 需要指出的是, 一方面天气雷达波束受山脉遮挡, 低仰角探测存在盲区, 特别是在鄂西山区等复杂地形区域, 导致对低层 CI 信号的捕捉能力下降, 低估实际 CI 发生频率; 另一方面, 天气雷达拼图数据 (特别是 CAPPI 数据) 在冬季易受零度层亮带干扰, 回波在特定高度层显著增强, 从而引发 CI 误判, 影响识别精度与真实性。此外, 针对不同区域与季节 CI 触发的关键影响因子, 目前研究尚显不足。后续研究将重点开展两方面工作: 一是聚焦雷达数据本身的误差订正, 开展波束遮蔽效应与冬季零度层亮带干扰的定量评估与校正; 二是利用 ERA5 再分析资料提取 CI 环境因子物理量参数, 并结合地形高程资料与风场构建动态地形强迫因子, 在此基础上, 可基于深度学习网络架构, 构建适用于湖北省的 CI 预报模型, 提高强对流天气早发现、早预警能力, 从而提升本地强对流天气的预报预警水平。

参考文献 (References):

曹林兮, 吴梦雯, 罗亚丽, 等. 2024. 苏沪城市群区域出梅后期对流初生客观识别方法及其时空分布特征[J]. *气象学报*, 82(3): 275–288. Cao L X, Wu M W, Luo Y L, et al. 2024. An objective algorithm for identi-

- fication of post-Meiyu convection initiation and its spatiotemporal distribution over the urban agglomeration of Jiangsu and Shanghai [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 82(3): 275–288 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2024.20230168
- 崔林丽. 2022. 新型静止气象卫星对流初生识别展望[J]. *气象科技进展*, 12(5): 80–84. Cui L L. 2022. Prospect of convective initiation identification based on new generation geostationary meteorological satellite [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 12(5): 80–84 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095–1973.2022.05.011
- 方宗义. 2014. 气象卫星发展历程和启示[J]. *气象科技进展*, 4(6): 27–34. Fang Z Y. 2014. The evolution of meteorological satellites and the insight from it [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 4(6): 27–34 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095–1973.2014.06.003
- 黄亦鹏, 李万彪, 赵玉春, 等. 2019. 基于雷达与卫星的对流触发观测研究和临近预报技术进展[J]. *地球科学进展*, 34(12): 1273–1287. Huang Y P, Li W B, Zhao Y C, et al. 2019. A review of radar- and satellite-based observational studies and nowcasting techniques on convection initiation [J]. *Advances in Earth Science*, 34(12): 1273–1287 (in Chinese). doi:10.11867/j.issn.1001–8166.2019.12.1273
- 李扬. 2023. 基于深度学习的强对流临近预报方法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. Li Y. 2023. Using deep learning for severe convective nowcasting [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)
- 柳卓, 李德俊, 马德栗, 等. 2015. 2014 年湖北深秋大范围暴雨天气过程分析[J]. *安徽农业科学*, 43(30): 161–166. Liu C, Li D J, Ma D L, et al. 2015. Analysis of large range rainstorm weather process in late autumn 2014 in Hubei Province [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 43(30): 161–166 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.0517–6611.2015.30.058
- 刘洁莉, 胡志群, 张磊, 等. 2025. 华北区域暖季“孤立”对流初生客观识别方法和时空分布特征[J]. *气象科技*, 53(5): 681–690. Liu J L, Hu Z Q, Zhang L, et al. 2025. An objective identification method and spatiotemporal distribution characteristics of “isolated” convection initiation during the warm season in North China Region [J]. *Meteorological Science and Technology*, 53(5): 681–690 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671–6345.20250029
- 覃丹宇, 方宗义. 2014. 利用静止气象卫星监测对流初生的研究进展[J]. *气象*, 40(1): 7–17. Qin D Y, Fang Z Y. 2014. Research progress of geostationary satellite-based convective initiation [J]. *Meteorological Monthly*, 40(1): 7–17 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2014.01.002
- 孙继松, 戴建华, 何立富, 等. 2014. 强对流天气预报的基本原理与技术方法: 中国强对流天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社: 22. Sun J S, Dai J H, He L F, et al. 2014. Fundamental Principles and Technical Methods for Severe Convective Weather Forecasting: China Severe Convective Weather Forecasting Handbook [M]. Beijing: Meteorological Press: 22 (in Chinese)
- 肖莺, 杜良敏, 高雅琦. 2020. 2020 年湖北梅雨异常特征及成因分析[J]. *暴雨灾害*, 39(6): 571–577. Xiao Y, Du L M, Gao Y Q. 2020. Analysis

- on anomalous characteristics and causes of Hubei Meiyu in 2020 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,39(6):571–577 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.06.003
- 姚秀萍,曹晓敏.2023.大气对流初生的研究进展与展望[J].*大气科学学报*,46(6):940–949. Yao X P, Cao X M. 2023. Research progress and prospects of convection initiation [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*,46(6):940–949. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20230224001
- Bai L Q, Chen G X, Huang L. 2020a. Image processing of radar mosaics for the climatology of convection initiation in South China [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*,59(1):65–81. doi:10.1175/JAMC-D-19-0081.1
- Bai L Q, Chen G X, Huang L. 2020b. Convection initiation in monsoon coastal areas (South China) [J]. *Geophysical Research Letters*, 47(11). doi:10.1029/2020GL087035
- Bei N F, Zhang F Q. 2007. Impacts of initial condition errors on mesoscale predictability of heavy precipitation along the Mei-Yu front of China [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133(622):83–99. doi:10.1002/qj.20
- Fabry F, Cazenave Q, Basivi R. 2013. Echo climatology, impact of cities, and initial convection studies:new horizons opened using 17 years of conterminous US radar mosaics [C] // Preprints, 36th Conference on Radar in Meteorology. Breckenridge, CO:American Meteorological Society
- Li P X, Guo Z, Furtado K, et al. 2019. Prediction of heavy precipitation in the eastern China flooding events of 2016:Added value of convection-permitting simulations [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,145(724):3300–3319. doi:10.1002/qj.3621
- Li Y, Liu Y B, Chen Y, et al. 2021. Characteristics of deep convective systems and initiation during warm seasons over China and its vicinity [J]. *Remote Sensing*,13(21):4289. doi:10.3390/rs13214289
- Peters J M, Schumacher R S. 2015. Mechanisms for organization and echo training in a flashflood-producing mesoscale convective system [J]. *Monthly Weather Review*,143(4):1058–1085. doi:10.1175/MWR-D-14-00070.1
- Roberts R D, Rutledge S. 2003. Nowcasting storm initiation and growth using GOES-8 and WSR-88D data [J]. *Weather and Forecasting*, 18(4):562–584. doi:10.1175/1520-0434(2003)018<0562:NSIAGU>2.0.CO;2
- Senf F, Deneke H. 2017. Satellite-based characterization of convective growth and glaciation and its relationship to precipitation formation over central Europe [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*,56(7):1827–1845. doi:10.1175/JAMC-D-16-0293.1
- Walker J R, Mackenzie W M, Mecikalski J R, et al. 2012. An enhanced geostationary satellitebased Convective Initiation algorithm for 0-2-h nowcasting with object tracking [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*,51(11):1931–1949. doi:10.1175/JAMC-D-11-0246.1
- Weckwerth T M, Hanesiak J, Wilson J W, et al. 2019. Nocturnal convection initiation during PECAN 2015 [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,100(11):2223–2239. doi:10.1175/BAMS-D-18-0299.1
- Weckwerth T M, Wilson J W, Hagen M, et al. 2011. Radar climatology of the COPS region [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,137(S1):31–41. doi:10.1002/qj.747
- Wilson J W, Roberts R D. 2006. Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: Observational and modeling perspective [J]. *Monthly Weather Review*,134(1):23–47. doi:10.1175/MWR3069.1
- Wilson J W, Trier S B, Reif D W, et al. 2018. Nocturnal elevated convection initiation of the PECAN 4 July hail storm [J]. *Monthly Weather Review*,146(1):243–262. doi:10.1175/MWR-D-17-0176.1

(责任编辑 张 文)