

贺晓露,秦幼文,李格,等,2026. 湖北随州夏季两类短时强降水时空分布及双偏振雷达参数统计特征[J]. 气象,52(7):822-833. He X L, Qin Y W, Li G, et al, 2026. Distribution and statistics for dual-polarization radar parameter of two types of short-time heavy rainfall in summer in Suizhou of Hubei[J]. Meteor Mon, 52(7):822-833(in Chinese).

湖北随州夏季两类短时强降水时空分布及 双偏振雷达参数统计特征^{*}

贺晓露 秦幼文 李 格 郝元甲 杨 涛 唐 佳

湖北省随州市气象局, 随州 441300

提 要: 根据天气尺度系统背景将短时强降水分为强天气尺度系统强迫型(强强迫型)和弱天气尺度系统强迫型(弱强迫型), 利用常规高空地面观测资料和随州 S 波段双偏振天气雷达观测数据, 对两类短时强降水的分布特征和雷达回波特征进行对比分析。结果表明: 强强迫型过程更多、范围更广、站次更多、持续时间更长。强强迫型中, 7 月发生次数最多, 6 月次之, 8 月最少, 大洪山及桐柏山是最高频区; 日变化呈三峰型, 最多在 05—08 时(北京时, 下同), 次多在 22 时至次日 01 时, 第三多在 15 时前后。弱强迫型中, 7 月和 8 月发生次数基本相当, 6 月最少, 高频区较分散, 但山区仍是高频区; 日变化为单峰型, 峰值在 15 时。两类短时强降水均有降水强度越大, 对应的回波强度越强、液态粒子浓度越大、回波顶越高、液态粒子直径越大的特征。相同降水强度等级中, 两类短时强降水的组合反射率因子、1 km 高度水平反射率因子以及回波顶高差异不明显, 且均具有低质心特征, 其中强强迫型的低质心特征更明显。但强强迫型的 1 km 高度差分反射率因子、差分传播相移率的区间值和平均值明显小于弱强迫型, 1 km 高度相关系数的区间值和平均值略大于弱强迫型。

关键词: 短时强降水, 分布特征, 双偏振参量, 对比分析

中图分类号: P412, P466

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.100701

Distribution and Statistics for Dual-Polarization Radar Parameter of Two Types of Short-Time Heavy Rainfall in Summer in Suizhou of Hubei

HE Xiaolu QIN Youwen LI Ge HAO Yuanjia YANG Tao TANG Jia

Suizhou Meteorological Office of Hubei Province, Suizhou 441300

Abstract: Based on conventional observation data and Suizhou S-band dual-polarization weather radar observation data, the short-time heavy rainfall events are classified into strong synoptic-scale system forcing type (strong forcing type) and weak synoptic-scale system forcing type (weak forcing type) according to the weather circulation patterns. The distribution characteristics and dual-polarization radar echo characteristics of the two are comparatively analyzed. The results show that the strong forcing type of short-time heavy rainfall occurs more frequently at more stations, covering wider areas and lasting longer. July has the highest frequency of this type of heavy rainfall, followed by June and then August. Dahong Mountain and Tongbai Mountain are the areas where the strong forcing type of heavy rainfall most frequently. The daily variation characteristics of such rainfall show a three-peak pattern, with the highest occurrence from 05:00 BT to 08:00 BT, then from 22:00 BT to 01:00 BT the next day, and at around 15:00 BT in order. In terms of the weak forcing type of short-time heavy rainfall, its occurrence frequency is basically the

^{*} 湖北省气象局面上项目(2022Y20)和湖北省自然科学基金项目(2026AFC0712)共同资助

2025 年 1 月 12 日收稿; 2026 年 3 月 4 日收修定稿

第一作者: 贺晓露, 主要从事短期和短时临近预报预警技术方法研究. E-mail: 124534651@qq.com

same in July and August, with the least in June. The distribution of its high-frequency areas is scattered, but mountainous areas are still the high-frequency areas. Its daily variation follows a unimodal distribution, with the peak occurring at 15:00 BT. Both types of short-time heavy rainfall have the characteristics of higher rainfall intensity, the corresponding stronger echo intensity, higher concentration of liquid particles, higher echo top, and larger diameters of liquid particles. At the same rainfall intensity level, the two types of heavy rainfall do not show significant differences in composite reflectivity, horizontal reflectivity at 1 km height, and echo top height, and they all have low centroid characteristics, with the strong forcing type having more obvious low centroid characteristics. However, the interval and average values of the 1 km differential reflectivity and specific differential phase for the strong forcing type are significantly smaller than those for the weak forcing type, while the interval and average values of the 1 km correlation coefficient are slightly larger than those for the weak forcing type.

Key words: short-time heavy rainfall, distribution characteristic, dual-polarization parameter, comparative analysis

引 言

随州位于湖北北部,属于长江流域和淮河流域的交汇区,地形相对复杂,其西南部有大洪山,北部有桐柏山,两山之间为狭长的西北—东南向的平原岗地。夏季天气系统活跃,短时强降水天气频发,局地突发性短时强降水易引发城市内涝、山洪等次生灾害,造成严重影响。如2021年8月11—12日随州南部遭遇极端短时强降水天气,其中12日04—08时(北京时,下同)持续5 h出现降水强度超过 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的极端短时强降水,05—06时连续2 h降水强度超过 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,导致大量农田房屋等进水被淹、道路中断、山洪突发,直接经济损失约10.69亿元(贺晓露等,2023)。由于短时强降水天气大多由中小尺度对流系统产生,时空尺度较小,具有局地性特征,突发性强、预报难度大(侯淑梅等,2020;赵渊明和漆梁波,2021;王孝慈等,2022;吴照宪等,2022;王莹等,2024;尉英华等,2024),因此开展该地区短时强降水的系统性研究具有重要意义。

近年来,不少学者从精细化分布方面对湖北地区的短时强降水开展研究(吴翠红等,2013;林春泽等,2016;冷亮等,2021;谌伟等,2022),相关研究表明,湖北短时强降水高频区主要位于湖北南部、东北部及武汉周边地区,尤其是幕阜山北侧和大别山南侧;极端短时强降水以及6 h以上的长历时过程夜间多发,而短历时过程则多发于午后至傍晚。

天气雷达是短时强降水外推和临近预警的主要技术手段。传统单偏振雷达仅能获取与降水强度相

关的水平反射率因子(Z_H),因此降水估测普遍采用雷达反射率因子-降水强度($Z-R$)关系来计算(俞小鼎,2013)。由于雨滴谱分布存在差异,基于 $Z-R$ 关系的降水估测值与实测值存在较大偏差(Uijlenhoet et al,2003;陈静等,2015;苟阿宁等,2022)。相较而言,双偏振雷达不仅可获取 Z_H ,还能提供差分传播相移率(K_{DP})、相关系数(CC)、差分反射率因子(Z_{DR})等与降水相关性较大的关键偏振参量,能更精细地反映水凝物粒子的尺寸、形态及相态分布,为提升降水估算准确性提供了重要支撑(陈超等,2019)。随着双偏振雷达的逐步增多,国内外学者对降水的双偏振量和微物理过程开展了广泛研究(刘黎平等,1996;张杰等,2010;张羽等,2017;申高航等,2021;黄旋旋等,2024;黄兆楚等,2025;潘佳文等,2025;王赢等,2025)。其中,刘黎平等(1996;2002)针对甘肃平凉单双偏振雷达特征进行对比分析研究,证实了双偏振雷达能一定程度改善降水估测精度,且 Z_{DR} 和 K_{DP} 在反演降水量和液态含水量方面有较好的应用价值。张杰等(2010)基于四川双偏振雷达观测数据,建立了不同类型降水的定量化双偏振量阈值区间,为实际预报业务中各参数的使用提供了参考依据。张羽等(2017)对广州地区小时降水量超50 mm的降水进行分析,确立了极端短时强降水有关双偏振参量的阈值范围。苟爱萍等(2019)统计厦门不同强度降水的双偏振雷达特征发现,随着降水强度增强,雨滴直径增大, Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 呈增大趋势。郭飞燕等(2023)针对山东两次强降水风暴过程进行双偏振参量对比分析发现,风暴低层具有适中的 Z_{DR} ,较大的 K_{DP} 和CC是决定降水强度的关键因

素。

然而,受双偏振雷达业务化应用尚未全面普及的现状制约,针对短时强降水双偏振雷达参量特征的研究仍主要集中于沿海区域,湖北地区的相关研究尚不充分。现有研究大多聚焦于低涡、低槽、急流、切变线等强天气尺度系统强迫下的短时强降水过程,针对高压脊或平直西风环流等系统影响的弱天气尺度强迫型短时强降水特征研究较为匮乏,而这类强降水事件更是预报业务中的难点所在。因此,本文将对对比两类短时强降水的时空分布特征及双偏振雷达参量特征,以期提升预警技术水平提供参考依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文所用资料时间为 2019—2023 年 6—8 月,包括:(1)随州实时业务存储的 2 个国家级气象观测站和 64 个区域级自动气象站共 66 个气象站的逐小时降水资料,资料来源于湖北省气象信息与技术保障中心,数据已通过实时业务质量控制剔除了疑误数据。(2)逐 6 min 的随州 S 波段双偏振天气雷达基数据 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC 以及产品数据回波顶高(ET)($Z_H \geq 18.3$ dBz 的最大高度)、组合反射率因子(CR),每个体扫共 9 个仰角,资料来源于湖北省气象信息与技术保障中心。其中 Z_{DR} 可反映降水粒子群体偏离球形的情况; K_{DP} 可反映降水粒子浓度和大小,对粒子浓度尤其敏感;降水回波的 CC 一般

比较大,而一些特殊情况下 CC 较小,如直径较小的外包水膜冰雹、雨滴与小冰雹共存等。(3)全国高空、地面常规观测资料,资料来源于国家气象信息中心。

1.2 研究方法

1.2.1 短时强降水分型及过程统计

参考钱卓蕾等(2022)和沈晓玲等(2023)的研究,从是否有天气尺度系统影响进行主观定性分析,将短时强降水过程分为强天气尺度系统强迫型(以下简称强强迫型)和弱天气尺度系统强迫型(以下简称弱强迫型),其中强强迫型指过程发生期间随州及其周边 200 km 范围内的 500 hPa 有低槽、低涡,或者中低层 700、850、925 hPa 有切变线、热带气旋,或者地面有锋面;弱强迫型指过程发生期间随州及其周边 200 km 范围内的 500 hPa 无低槽、低涡,中低层 700、850、925 hPa 无切变线、热带气旋,地面无锋面。

按此定义短时强降水过程:随州境内有 2 个及以上气象站出现小时降水量 ≥ 20 mm 的短时强降水,则视为一次短时强降水过程。参考贺晓露等(2026)的方法判断短时强降水的起止时间,即在一次短时强降水过程中,当有气象站出现小时降水量 ≥ 20 mm,认为短时强降水过程开始;当连续 2 h 气象站未出现小时降水量 ≥ 20 mm,则认为短时强降水过程结束。共统计出 87 次短时强降水过程并按照上述方法分型(表 1),同时将短时强降水过程进行不同时长划分,持续时长 ≤ 3 h 划分为短历时过程, >3 h 划分为长历时过程。

表 1 湖北随州 2019—2023 年 6—8 月短时强降水过程统计

Table 1 Statistics of short-time heavy rainfall processes in Suizhou of Hubei from June to August of 2019—2023

天气类型	月过程数/次			总过程数/次	长历时占比/%	短历时占比/%	最大降水强度/(mm·h ⁻¹)
	6 月	7 月	8 月				
强强迫型	18	24	12	54	63	37	107.1
弱强迫型	7	14	12	33	15	85	84.9

1.2.2 雷达数据处理

在实际业务中,雷达观测数据以 6 min 为采样间隔获取,存储形式为极坐标数据,其时空分辨率与站点小时降水量之间存在差异,难以直接进行分析,因此需对雷达资料进行预处理,主要步骤如下:

第一步:利用基数据 Z_H 计算出 HT(即最大 Z_H 所在高度)。

第二步:将 66 个站 13 个高度层(1.0、1.5、2.5、3.5、4.5、5.5、6.5、7.5、8.5、9.5、10.5、11.5、12.5 km)转换为随州雷达极坐标对应的径向距离、方位、仰角。每个站分为水平方向和垂直方向两个方向进行插值,首先通过水平方向的双线性插值得到站点对应的径向距离和方位上不同仰角的值,再通过垂直方向的线性插值得到该站点 13 个高度层对应仰角

上的值。对 66 个站点进行插值,得到 66 个站逐 6 min 的 13 层 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、CC 以及 1 层 ET、CR、HT。

第三步:将 66 个站逐 6 min 的站点雷达数据按照整点时间计算其平均值,考虑 $Z_H \leq 15$ dBz 时通常无法形成有效降水,因此计算时剔除掉其所对应的雷达数据。如将某一站 08—09 时 $Z_H > 15$ dBz 对应的雷达数据求算术平均值,作为该站 09 时的雷达数据;以此类推。最终将第二步得到的逐 6 min 数据处理为逐 1 h 数据。

本文筛选出 87 次短时强降水过程,并对 87 次过程相应时段雷达资料进行处理,形成站点逐小时降水量与雷达数据的一一对应关系,筛选出这些过程中小时降水量 ≥ 20 mm 的短时强降水样本。

1.2.3 相关性及其显著性水平检验

采用 Pearson 相关性分析法,计算降水量与各雷达参量的线性相关程度。又因两类短时强降水样本数存在较大差异,其雷达参量特征的分布存在差异或样本不均衡,利用 Welch 检验对这两类短时强降水所对应的各雷达参量均值差异分别进行显著性水平检验。

2 短时强降水的分布特征

2.1 概 况

统计分析所选取的 87 次短时强降水过程(表 1,表 2),结果表明:在 2019—2023 年 6—8 月 87 次短

时强降水过程中,强强迫型过程为 54 次,弱强迫型过程为 33 次。强强迫型过程平均短时强降水站次数为 22.2 个,而弱强迫型为 4.1 个,说明强强迫型较弱强迫型短时强降水的范围更广、站次更多。从持续时间来看,强强迫型过程中有 63% 为长历时过程,而弱强迫型过程中长历时过程仅为 15%。总体来看,强强迫型较弱强迫型短时强降水的持续时间更长。

87 次短时强降水过程中共有 1335 个站次达短时强降水标准,其中强强迫型站次达 1200 个,远超弱强迫型的 135 个。两类短时强降水的不同降水强度占比与总短时强降水过程的占比基本一致,随着降水强度增大,其占比明显减小,其中约 80% 集中在降水强度 $20 \sim 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,约 20% 超过 $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,而 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的强降水均出现在强强迫型中。

2.2 年变化

2.2.1 时间变化

从表 3 可见,短时强降水过程年变化不大,基本在 15~20 次,年均短时强降水过程数为 17.4 次。但从不同类型短时强降水过程来看,2019—2020 年的强强迫型和弱强迫型的过程数基本不变,2021—2023 年强强迫型过程有所增多,而弱强迫型过程略有减少。短时强降水站次的年际变化较大,在 161~374 个,年均短时强降水站次为 267 个,其中强强迫型 240 个,占总量 90%,而弱强迫型仅 27 个,占总量 10%,说明大部分短时强降水出现在强强迫型过程中。

表 2 湖北随州 2019—2023 年 6—8 月两类短时强降水过程在不同降水强度的站次分布(单位:个)

Table 2 Distribution of station counts for two types of short-time heavy rainfall in Suizhou of Hubei from June to August of 2019—2023, categorized by rainfall intensity (unit: number)

天气类型	20~30 mm · h ⁻¹	30~40 mm · h ⁻¹	40~50 mm · h ⁻¹	50~80 mm · h ⁻¹	80~100 mm · h ⁻¹	≥100 mm · h ⁻¹
强强迫型	692	279	138	83	5	3
弱强迫型	79	32	15	8	1	0
两类总计	771	311	153	91	6	3

表 3 湖北随州 2019—2023 年逐年的 6—8 月两类短时强降水过程分布

Table 3 Annual distribution of two types of short-time heavy rainfall in Suizhou of Hubei from June to August of 2019—2023

天气类型	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年	年均
强强迫型	7 次/132 个	9 次/339 个	15 次/230 个	13 次/255 个	10 次/244 个	10.8 次/240 个
弱强迫型	8 次/29 个	9 次/35 个	5 次/15 个	5 次/26 个	6 次/30 个	6.6 次/27 个
两类总计	15 次/161 个	18 次/374 个	20 次/245 个	18 次/281 个	16 次/274 个	17.4 次/267 个

2.2.2 空间变化

两类短时强降水的年均频次空间分布如图 1 所示,随州全市范围都有可能发生短时强降水,但不同类型高频区位置有所不同。整体来看,短时强降水高频区集中在随县南部、曾都南部以及随县东北部,与随州的年降水量中心位置(图略)大致对应。随县西南部的大洪山一带以及东北部的桐柏山一带是短时强降水最高频区,年均发生 5~6 次,而随县中部及西北部、曾都北部、广水中部是短时强降水低发区,年均少于 2 次(图 1a)。强强迫型短时强降水高频中心与总的年均分布基本一致,随县西南部的大洪山一带以及东北部的桐柏山一带是最高频区(图 1b)。弱强迫型的年均短时强降水频次相比强强迫型频次明显减少,年均次数基本在 1 次以下,且高频区分布较分散,但大洪山及桐柏山一带山区高频区的分布特征依然存在(图 1c)。

2.3 月变化

2.3.1 时间变化

从两类短时强降水的逐月过程数分布(表 1)和逐月站次分布(图 2a)所示,随州 6—8 月均有短时强降水发生,其中 7 月的过程数和站次均最多,6 月次之,而 8 月最少。强强迫型短时强降水逐月的过程数和站次与总分布情况几乎一致,也是 7 月最多,6 月次之,8 月最少,这可能与随州梅雨季形成的降水集中期有密切关系;而弱强迫型短时强降水的过程数和站次为 7 月和 8 月基本相当,6 月最少,这可能与盛夏易触发对流有关。

2.3.2 空间变化

两类短时强降水的逐月频次空间分布如图 3 所示,6 月在随县东北部的桐柏山一带有年均均为 3 次左右的短时强降水高频区(图 3a),其他地区短时强

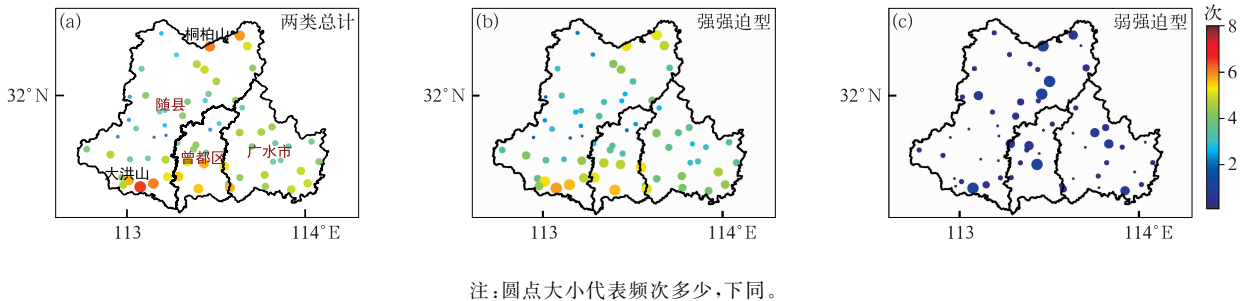


图 1 2019—2023 年 6—8 月湖北随州两类短时强降水年均频次的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of annual average frequency of two types of short-time heavy rainfall in Suizhou of Hubei from June to August of 2019–2023

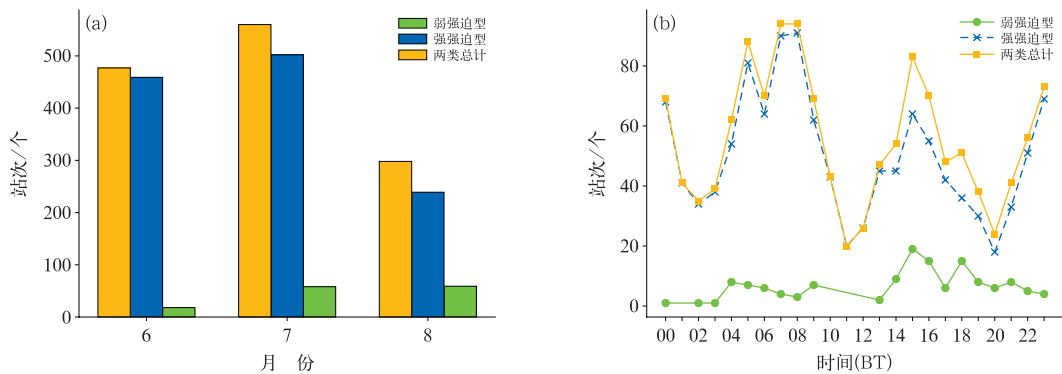


图 2 2019—2023 年 6—8 月湖北随州两类短时强降水发生站次的(a)月变化和(b)日变化

Fig. 2 (a) Monthly and (b) diurnal distributions of two types of short-time heavy rainfall in Suizhou of Hubei from June to August of 2019–2023

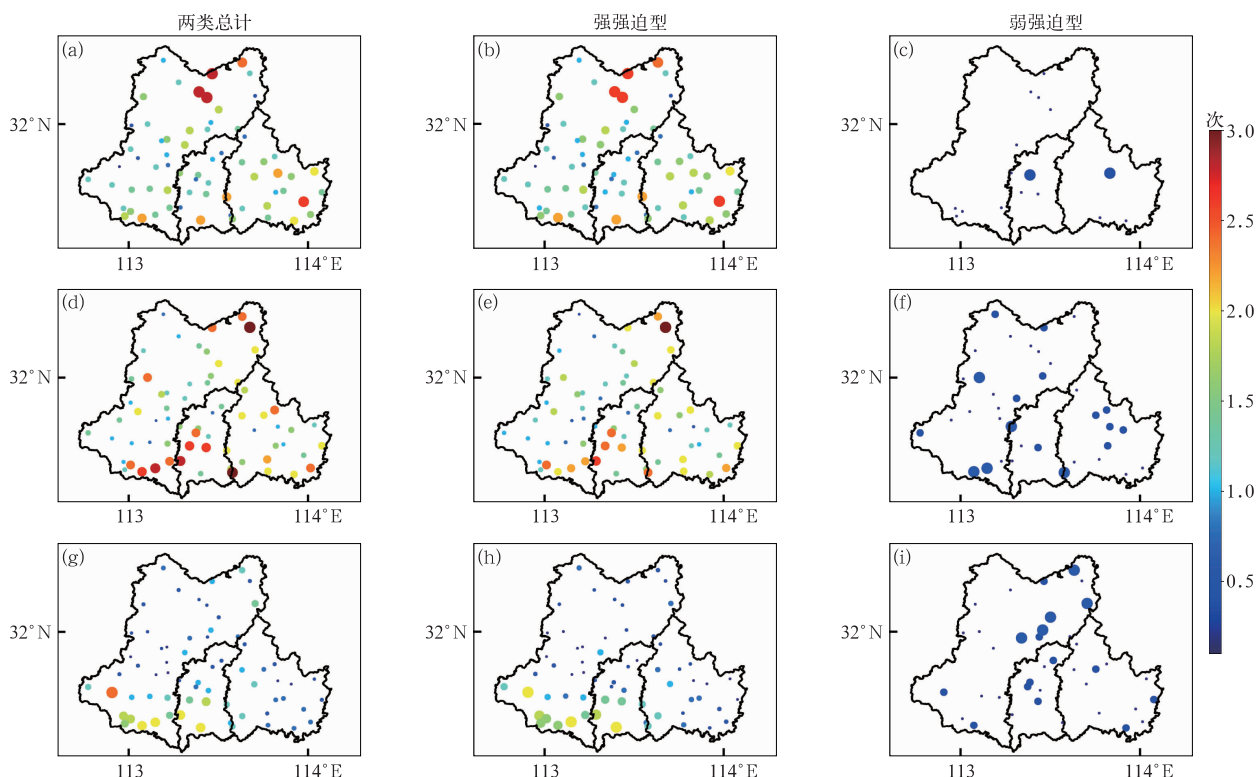


图3 2019—2023年(a~c)6月,(d~f)7月,(g~i)8月湖北随州

两类短时强降雨的年均频次空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of annual average frequency of two types of short-time heavy rainfall in Suizhou of Hubei in (a—c) June, (d—f) July, (g—i) August of 2019—2023

降水发生频次基本在1~2次,短时强降雨主要在强强迫型下发生,大部分地区的强强迫型占比达80%~100%(图3b,3c)。7月,随州南部的短时强降雨明显增多,年均2.5次以上的高频区在随县西南部的大洪山一带至曾都区中部以及随县东北部桐柏山一带(图3d),短时强降雨仍以强强迫型为主(图3e),其占比为70%~100%,但弱强迫型的频次和范围较6月有所增加(图3f)。8月,短时强降雨频次较6月和7月均有所减少,年均2次左右的高发区位于随县西南部的大洪山一带至曾都区南部,其中弱强迫型频次和范围较7月略有增加(图3i),其占比升至30%~60%。

2.4 日变化

2.4.1 时间变化

短时强降雨的分布有明显的日变化特征(图2b),整体呈三峰型分布:主峰区为05—08时,此时段短时强降雨的站次最多,峰值在07—08时;次峰区为14—18时,峰值在15时;第三峰区为22时至次日01时,峰值在23时。其中强强迫型短时强降雨的分布与总分布情况相似,也呈三峰型分布,

但短时强降雨站次最多的两个时段为05—08时和22时至次日01时。弱强迫型短时强降雨为单峰型分布,发生站次最多的时段是15—18时,峰值出现在15时,这可能是由于午后至傍晚气温升高、对流性不稳定增强,对流更容易触发。

2.4.2 空间变化

选取05—08时、14—18时、22时至次日01时这三个短时强降雨的峰值时段,统计两类短时强降雨的年均频次空间分布情况(图4)。结果显示,05—08时在随县西南部的大洪山一带有年均2~3次短时强降雨高频区(图4a),其他地区短时强降雨发生频次基本在0~1.5次,短时强降雨主要在强强迫型下发生,大部分地区的强强迫型占比达80%~100%(图4b,图4c)。14—18时,短时强降雨高频区东移至曾都南部和广水西部(图4d),短时强降雨仍以强强迫型为主(图4e),但弱强迫型的范围较05—08时明显增加(图4f)。22时至次日01时,短时强降雨高频区进一步东移至广水中东部,其中弱强迫型的频次和范围较14—18时范围明显减小(图4i)。

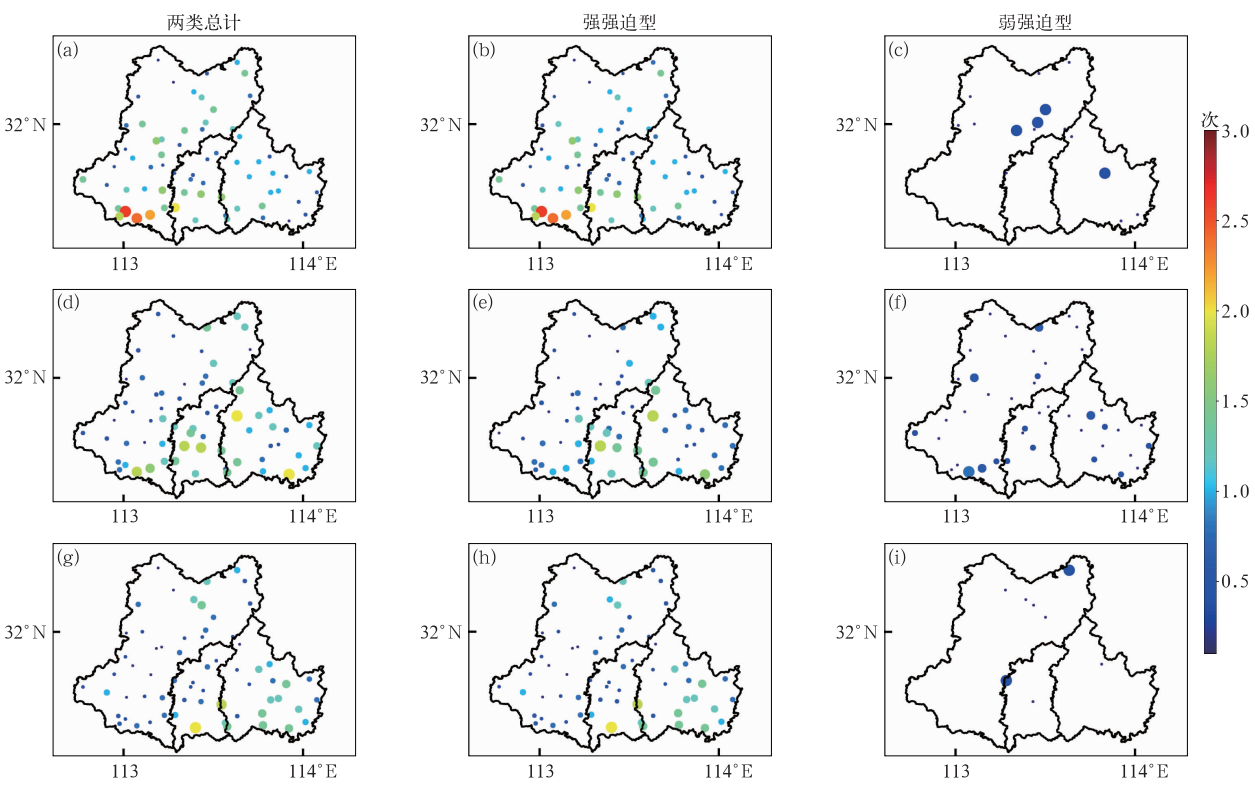


图 4 2019—2023 年湖北随州两类短时强降水不同时段의年均频次空间分布
(a~c)05—08 时,(d~f)14—18 时,(g~i)22 时至次日 01 时

Fig. 4 Spatial distribution of annual average frequency of two types of short-time heavy rainfall in Suizhou of Hubei in different time periods of 2019–2023

(a–c) 05:00 BT–08:00 BT, (d–f) 14:00 BT–18:00 BT, (g–i) 22:00 BT to 01:00 BT the next day

3 短时强降水的雷达回波参量分布特征

将两类短时强降水的双偏振雷达回波参量与降

水强度进行相关性分析(表 4),其中 11.5 km 和 12.5 km 高度的相关性较差,故未引出。结果显示,两类的相关性特征基本一致:与降水强度相关性最高的参数为 K_{DP} ,其次为 Z_H ,第三为 Z_{DR} ,而 CC 与降水强度没有明显相关性。 K_{DP} 和 Z_H 的相关性随

表 4 2019—2023 年湖北随州不同高度雷达参数与降水强度的相关系数
Table 4 Correlation coefficients between radar parameters at different heights and rainfall intensity in Suizhou of Hubei during 2019–2023

高度/km	Z_H		Z_{DR}		K_{DP}		CC	
	强强迫型	弱强迫型	强强迫型	弱强迫型	强强迫型	弱强迫型	强强迫型	弱强迫型
1.0	0.48	0.46	0.15	0.31	0.45	0.55	−0.03	−0.09
1.5	0.46	0.36	0.18	0.16	0.55	0.44	−0.02	0.11
2.5	0.47	0.33	0.18	0.13	0.51	0.33	0.02	0.07
3.5	0.45	0.27	0.21	0.16	0.49	0.32	−0.04	−0.07
4.5	0.40	0.27	0.15	0.12	0.38	0.35	0.04	0.13
5.5	0.35	0.30	0.08	0.17	0.37	0.35	0.02	−0.09
6.5	0.32	0.31	0.02	0.17	0.23	0.33	−0.02	−0.06
7.5	0.28	0.13	−0.07	0.28	0.08	0.24	0.02	−0.13
8.5	0.23	0.12	−0.06	0.23	−0.01	0.15	−0.03	0.15
9.5	0.16	0.20	−0.11	0.08	0.00	0.10	0.03	−0.04
10.5	0.18	0.15	−0.15	−0.03	−0.08	0.04	0.06	0.10

注:加粗数值表示未通过 0.05 显著性水平检验。

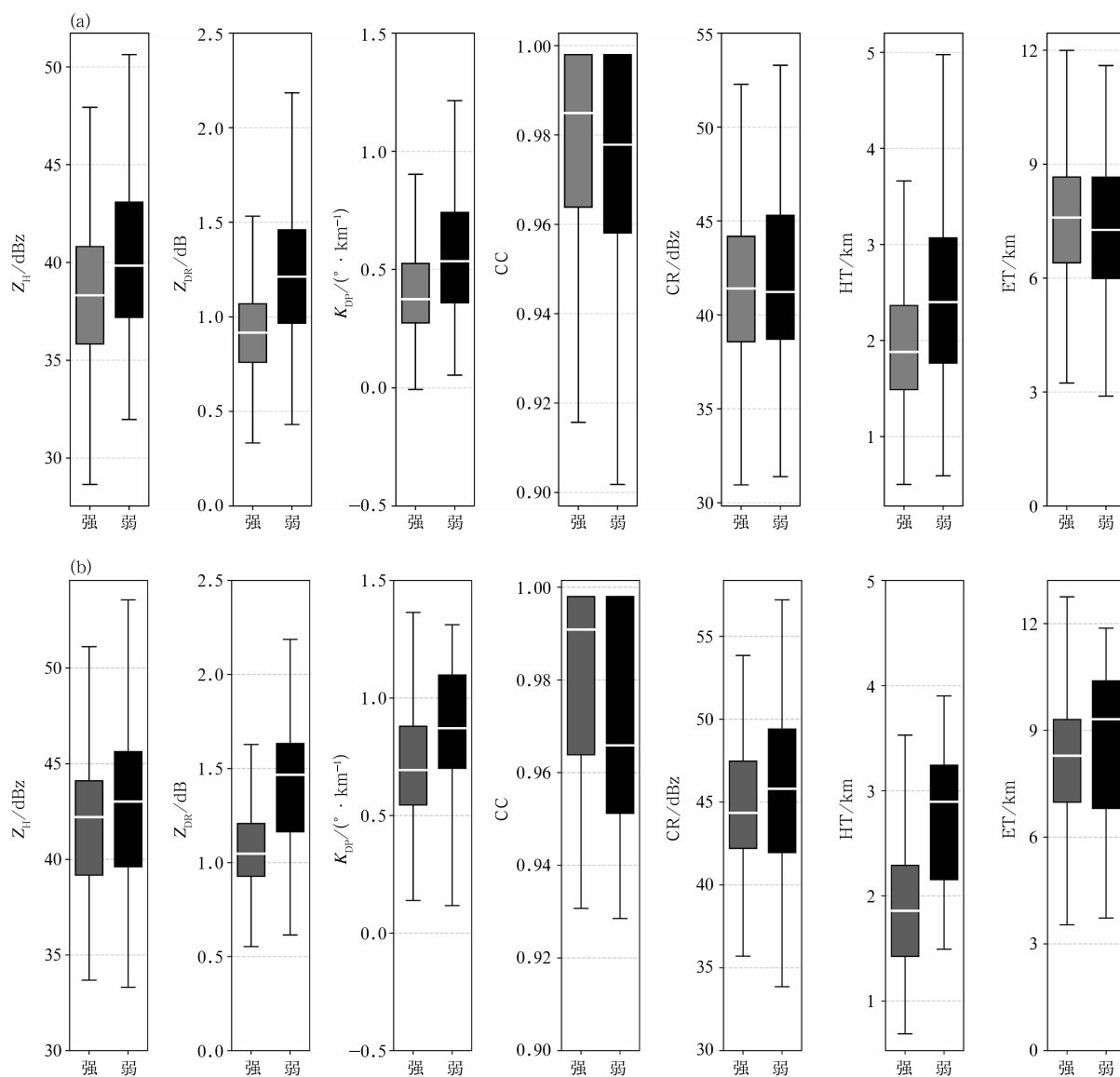
高度增加而下降,高相关性的参数主要集中在 3.5 km 以下(简称低层),并在 1 km 高度相关性最高,因此下文将重点对比分析两类短时强降水中 CR、ET、HT 以及 1 km 高度的 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、CC 的分布特征。

2.1 节统计分析发现,两类短时强降水均约有 80% 的降水强度集中在 $20 \sim 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,而降水强度超过 $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的占比仅约 20%,但因其降水强度大,影响力和致灾性都较高,为此,下文将降水强度分为 $20 \sim 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $\geq 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 两个

等级对两类短时强降水的雷达回波参量特征进行统计分析(图 5)。

3.1 强强迫型雷达回波参量特征

使用箱线图(图 5)和散点图(图 6)分析不同等级降水强度的雷达回波参量分布特征,由图 5 所示, $\geq 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降水的雷达回波 CR、ET 和 1 km 高度 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 的平均值以及第 25%~75% 分位值均大于 $20 \sim 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的,表明强强迫型中,降水强度与回波强度、液态粒子浓度、回波顶高度呈正相



注:箱形自上而下 3 条线分别代表样本总数的第 75% 分位值、中位值和第 25% 分位值;“强”为强强迫型,“弱”为弱强迫型。

图 5 2019—2023 年湖北随州两类短时强降水(a) $20 \sim 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和(b) $\geq 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的 1 km 高度的 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、CC 和 CR、HT、ET 箱线图

Fig. 5 Box plots of Z_H , Z_{DR} , K_{DP} , CC at 1 km height and CR, HT, ET for two types of short-time heavy rainfall with intensities of (a) $20 \sim 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ and (b) $\geq 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ in Suizhou of Hubei during 2019—2023

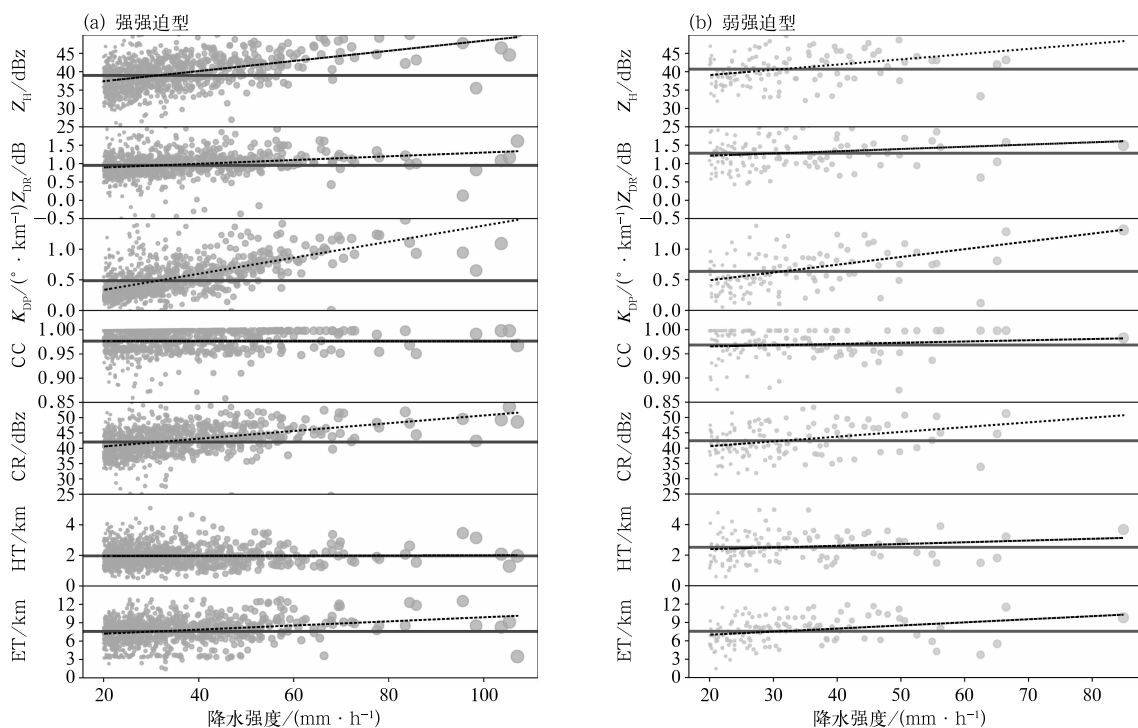


图 6 2019—2023 年湖北随州两类短时强降水的 1 km 高度 Z_H 、 Z_{DR} 、

K_{DP} 、CC 和 CR、HT、ET 与降水强度的散点图

Fig. 6 Scatter plots of Z_H , Z_{DR} , K_{DP} , CC at 1 km height and CR, HT, ET as a function of rainfall intensity for two types of short-time heavy rainfall in Suizhou of Hubei during 2019—2023

关:降水强度越大,对应的回波强度越强,液态粒子浓度越大,回波顶越高,表明对流发展更为旺盛,同时降水粒子的平均直径也越大。而 CC 则随降水强度等级增大变化不大,说明 CC 与降水强度基本不相关;HT 随降水强度等级增大变化不大,基本集中在 2.5 km 以下,说明不同强度短时强降水均具有低质心的特征。

由图 6a 可见,CR、ET 和 1 km 高度 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 随降水强度增大有增大趋势,其中 CR、 Z_H 、 K_{DP} 增大趋势相对明显,而 HT 和 1 km 高度 CC 与降水强度相关性不明显,这与表 4 以及上述对比分析结果基本一致。可见, K_{DP} 越大,则低层液态粒子浓度增大,从而导致回波强度 CR 和 Z_H 有所增大,降水强度加强; Z_{DR} 随降水强度增强的趋势不明显,这表明虽然从整体趋势上看,降水强度越大对应粒子直径越大,但不同降水强度仍混杂着多种尺度的粒子,使降水强度与粒子直径相关性不高,这与李芳和刁秀广(2023)的研究结果基本一致。

3.2 弱强迫型雷达回波参量特征

由图 5 所示,HT 随降水强度等级增大而略增

大,CC 随降水强度等级增大而略微下降,可见弱强迫型中,降水强度越大,回波质心越高,低层粒子相关性越低,越容易受冰相粒子干扰。这与强强迫型略有不同,其余各雷达参数随降水强度的变化趋势与强强迫型基本一致。

由图 6b 所示,弱强迫型的特征与强强迫型基本一致,CR、ET 和 1 km 高度 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 随降水强度增大有增大趋势,而 HT 和 1 km 高度 CC 与降水强度相关性不明显。

3.3 两类短时强降水雷达回波参量特征对比

根据 3.1 节和 3.2 节概括出随州两类短时强降水的雷达回波参量区间值(第 25%~75%分位值)和平均值(表 5),对比发现,相同降水强度等级中,强强迫型的 CR、HT 和 1 km 高度 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 平均值均小于弱强迫型,区间值也大多小于弱强迫型,1 km 高度 CC 的区间值和平均值略大于弱强迫型,而 ET 的区间值范围跨度略小于弱强迫型。

从相同降水强度等级中两类短时强降水雷达回波参量差异来看,CR 和 Z_H 的差值在 2 dB 以内,说明两类短时强降水的反射率因子强度基本相当,并

无明显差异。ET 平均值也无明显差异,但弱强迫型的区间范围更大,说明弱强迫型对应的回波顶高变化区间更大。HT 基本都在 3.5 km 以下,说明两类短时强降水雷达回波都有低质心的特征,其中强强迫型 HT 更低,低质心特征更为明显。但两者在 1 km 高度 Z_{DR} 的差值较明显,其中强强迫型明显小于弱强迫型,说明强强迫型的低层粒子直径整体小于弱强迫型。1 km 高度 K_{DP} 差值也较明显,强强迫

型同样明显小于弱强迫型,可能是强强迫型的低层液态粒子浓度小于弱强迫型导致的,也可能是弱强迫型的低层粒子中有融化的冰相粒子干扰导致的(K_{DP} 不仅对液态粒子浓度较为敏感,融化的冰相粒子也可导致 K_{DP} 增大)。同时强强迫型 1 km 高度 CC 值略高于弱强迫型,说明弱强迫型低层粒子相关性更低。弱强迫型对应低 CC 及高 Z_{DR} 、高 K_{DP} ,可能是部分个例中低层有未完全融化冰相粒子导致的。

表 5 2019—2023 年湖北随州两类短时强降水的双偏振参量对比
Table 5 Comparison of dual-polarization parameters of two types of short-time heavy rainfall in Suizhou of Hubei during 2019—2023

降水强度/ (mm·h ⁻¹)	天气 类型	Z_H /dBz		Z_{DR} /dB		$K_{DP}/(^{\circ}\cdot\text{km}^{-1})$		CC		CR/dBz		HT/km		ET/km	
		区间	均值	区间	均值	区间	均值	区间	均值	区间	均值	区间	均值	区间	均值
20~40	强强迫型	35.8~40.8	38.3	0.76~1.07	0.92	0.27~0.53	0.43	0.964~0.998	0.976	38.6~44.2	41.5	1.5~2.4	1.97	6.4~8.7	7.46
	弱强迫型	37.2~43.1	40.2	0.97~1.46	1.25	0.36~0.74	0.58	0.958~0.998	0.968	38.7~45.3	41.7	1.8~3.1	2.46	6.0~8.7	7.35
≥40	强强迫型	39.2~44.1	41.8	0.93~1.21	1.07	0.55~0.88	0.74	0.964~0.998	0.977	42.2~47.5	44.6	1.4~2.3	1.94	7.0~9.3	8.2
	弱强迫型	39.6~45.6	43.1	1.12~1.65	1.41	0.67~1.1	0.88	0.950~0.998	0.968	41.4~49.5	45.3	2.1~3.3	2.78	6.7~10.5	8.6

注: Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、CC 均为 1 km 高度处统计值。

4 结论与讨论

本文利用随州逐小时降水资料和 S 波段双偏振雷达观测数据,将随州 2019—2023 年 6—8 月 87 次短时强降水过程分为强强迫型和弱强迫型两类,并分析时空分布特征及雷达参量特征,得出如下结论:

(1)短时强降水中强强迫型多于弱强迫型,强强迫型短时强降水的范围更广、站次更多,持续时间更长。两类短时强降水的不同降水强度占比基本一致,约 80%降水强度集中在 20~40 mm·h⁻¹,40 mm·h⁻¹以上降水强度占比约 20%。

(2)强强迫型中,短时强降水过程数和站次均为 7 月最多,6 月次之,8 月最少,高频区在随县南部、曾都南部以及随县东北部,其中大洪山及桐柏山是最高频区。日变化呈三峰型分布,最多在 05—08 时,次多在 22 时至次日 01 时,第三多在 15 时前后,且高频区随时间逐步东移。弱强迫型中,短时强降水的过程数和站次均为 7 月和 8 月基本相当,6 月最少,高频区分布分散,但山区仍是高频区。日变化为单峰型分布,峰值在 15 时。

(3)两类短时强降水均有降水强度越大,对应的回波强度越强、低层液态粒子浓度越大、回波顶越高、液态粒子直径越大的特征,但 Z_{DR} 随降水强度增大趋势不明显,说明在低层不同降水强度中均包含各种尺度液态粒子群,降水强度增大与液态粒子直

径相关性不高。

(4)相同降水强度等级中,两类短时强降水的 CR 和 Z_H 以及 ET 差异不明显,且均具有低质心特征,其中强强迫型的低质心特征更明显。但强强迫型的 1 km 高度 Z_{DR} 、 K_{DP} 区间值和平均值明显小于弱强迫型,1 km 高度 CC 区间值和平均值略大于弱强迫型。

本文系统分析随州地区强、弱天气尺度系统强迫下短时强降水发生频率、持续时间、时间峰值、高频区等时空分布特征及相应的双偏振雷达回波参量分布情况,发现两类短时强降水在偏振参量尤其是 Z_{DR} 、 K_{DP} 存在较明显差异,为实际业务中两种不同天气尺度系统强迫背景下短时强降水的短时临近预警提供雷达定量参考指标。但研究仍不够深入全面,两类短时强降水过程对应的样本数量存在显著不平衡。这种样本不对称性可能导致从少量样本中得出的弱强迫型物理量统计特征不够稳健,从而影响了两种类型对比分析和物理解释的可靠性。此外,两类短时强降水雷达回波特征差异形成的物理机制以及其特征是否适用于其他地区等问题,均有待未来积累更多个例,特别是弱强迫型个例,进行更深入的研究探讨。

参考文献

陈超,胡志群,胡胜,等,2019. CINRAD-SA 双偏振雷达资料在降水估测中的应用初探[J]. 气象,45(1):113-125. Chen C, Hu Z Q,

- Hu S, et al, 2019. Preliminary application of CINRAD-SA dual polarization radar data in rainfall estimation[J]. Meteor Mon, 45(1): 113-125(in Chinese).
- 陈静, 铃伟妙, 韩军彩, 等, 2015. 基于动态 $Z-I$ 关系雷达回波定量估测降水方法研究[J]. 气象, 41(3): 296-303. Chen J, Qian W M, Han J C, et al, 2015. An approach for radar quantitative precipitation estimate based on $Z-I$ relations varying with time and space[J]. Meteor Mon, 41(3): 296-303(in Chinese).
- 湛伟, 刘佩廷, 徐枝芳, 等, 2022. 湖北强降水频次时空特征及基于 GWR 模型的地形关系分析[J]. 热带气象学报, 38(2): 216-226. Chen W, Liu P T, Xu Z F, et al, 2022. Spatio-temporal characteristics of frequency of heavy rainfall events in Hubei Province and analysis of topographic relationship based on GWR[J]. J Trop Meteor, 38(2): 216-226(in Chinese).
- 苟阿宁, 吴翠红, 王玉娟, 等, 2022. 基于风廓线雷达的湖北梅雨期暴雨中小尺度特征[J]. 干旱气象, 40(1): 84-94. Gou A N, Wu C H, Wang Y J, et al, 2022. Meso and small-scale characteristics of heavy rain during Meiyu period in Hubei based on wind profile radar[J]. J Arid Meteor, 40(1): 84-94(in Chinese).
- 郭飞燕, 刁秀广, 褚颖佳, 等, 2023. 两次极端强降水风暴双偏振参量特征对比分析[J]. 干旱气象, 41(1): 103-113, 122. Guo F Y, Diao X G, Chu Y J, et al, 2023. Contrast analysis of dual-polarization signatures for the two extreme rainfall storms[J]. J Arid Meteor, 41(1): 103-113, 122(in Chinese).
- 贺晓露, 郝元甲, 祁海霞, 等, 2023. 湖北“8·12”极端降水特征及成因初探[J]. 暴雨灾害, 42(1): 13-23. He X L, Hao Y J, Qi H X, et al, 2023. Analysis of characteristics and causes of “8·12” extreme precipitation in Hubei Province[J]. Torr Rain Dis, 42(1): 13-23(in Chinese).
- 贺晓露, 秦幼文, 李格, 等, 2026. 鄂北短时强降水特征及双偏振雷达预警指标[J]. 沙漠与绿洲气象, 20(1): 102-108. He X L, Qin Y W, Li G, et al, 2026. Characteristics of short-duration heavy rainfall and early warning indicators with dual-polarization radar in northern Hubei[J]. Desert Oasis Meteor, 20(1): 102-108(in Chinese).
- 侯淑梅, 孙敬文, 孙鹏程, 等, 2020. 基于加密自动气象观测站和国家气象观测站的山东省极端短时强降水时空分布特征的对比分析[J]. 气象, 46(2): 200-211. Hou S M, Sun J W, Sun P C, et al, 2020. Comparative analysis of spatio-temporal distribution characteristics of extreme short-time severe precipitation in Shandong based on the dense observations from automatic weather stations and national stations[J]. Meteor Mon, 46(2): 200-211(in Chinese).
- 黄旋旋, 陈刚, 赵坤, 等, 2024. 基于双偏振雷达变量垂直廓线特征的短时强降水和雷暴大风短时临近预报方法[J]. 气象, 50(12): 1519-1530. Huang X X, Chen G, Zhao K, et al, 2024. Improved nowcasting of short-time heavy precipitation and thunderstorm gale based on vertical profile characteristics of dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 50(12): 1519-1530(in Chinese).
- 黄兆楚, 印佳楠, 杨洋, 等, 2025. 石家庄 S 波段和 X 波段双偏振雷达定量降水估测应用研究[J]. 高原气象, 44(1): 253-264. Huang Z C, Yin J N, Yang Y, et al, 2025. Application of S-band and X-band dual polarization radar for quantitative precipitation estimation in Shijiazhuang[J]. Plateau Meteor, 44(1): 253-264(in Chinese).
- 冷亮, 周伶俐, 肖艳姣, 等, 2021. 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[J]. 暴雨灾害, 40(1): 61-68. Leng L, Zhou L L, Xiao Y J, et al, 2021. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of flash heavy rain in Hubei Province based on minute rain gauge data[J]. Torr Rain Dis, 40(1): 61-68(in Chinese).
- 李芳, 刁秀广, 2023. 不同类型强降水风暴低层双偏振参量对比分析[J]. 气象, 49(9): 1075-1084. Li F, Diao X G, 2023. Comparative analysis of low-level dual polarization parameters of different types of severe rainfall storm[J]. Meteor Mon, 49(9): 1075-1084(in Chinese).
- 林春泽, 刘琳, 林文才, 等, 2016. 湖北省夏季降水日变化特征[J]. 大气科学学报, 39(4): 490-500. Lin C Z, Liu L, Lin W C, et al, 2016. Characteristics of summer precipitation diurnal variations in Hubei Province[J]. Trans Atmos Sci, 39(4): 490-500(in Chinese).
- 刘黎平, 葛润生, 张沛源, 2002. 双线偏振多普勒天气雷达遥测降水强度和液态含水量的方法和精度研究[J]. 大气科学, 26(5): 709-720. Liu L P, Ge R S, Zhang P Y, 2002. A study of method and accuracy of rainfall rate and liquid water content measurements by dual linear polarization Doppler radar[J]. Chin J Atmos Sci, 26(5): 709-720(in Chinese).
- 刘黎平, 钱永甫, 王致君, 等, 1996. 双线偏振雷达测雨效果的对比分析[J]. 大气科学, 20(5): 615-619. Liu L P, Qian Y F, Wang Z J, et al, 1996. Comparative study on dual linear polarization radar measuring rainfall rate[J]. Chin J Atmos Sci, 20(5): 615-619(in Chinese).
- 潘佳文, 高珊, 郑秀云, 等, 2025. 超强台风“莫兰蒂”(2016)内核微物理特征的双偏振雷达观测分析[J]. 气象学报, 83(2): 366-388. Pan J W, Gao S, Zheng X Y, et al, 2025. Analysis of microphysical features in the inner core of Super Typhoon Meranti (2016) based on dual-polarization radar observations[J]. Acta Meteor Sin, 83(2): 366-388(in Chinese).
- 钱卓蕾, 马洁华, 沈晓玲, 等, 2022. 弱天气强迫背景下浙江两次暖区大暴雨过程成因分析[J]. 气象科技, 50(5): 713-723. Qian Z L, Ma J H, Shen X L, et al, 2022. Analysis of causes of two warm-sector heavy rainfall processes in Zhejiang Province under weak synoptic scale background[J]. Meteor Sci Technol, 50(5): 713-723(in Chinese).
- 申高航, 高安春, 李君, 2021. 雨滴谱及双偏振雷达等资料在一次强降水过程中的应用[J]. 气象, 47(6): 737-745. Shen G H, Gao A C, Li J, 2021. Application of raindrop spectrum and dual polarization radar data to a heavy rain process[J]. Meteor Mon, 47(6): 737-745(in Chinese).
- 沈晓玲, 章丽娜, 桑明慧, 等, 2023. 浙江夏季弱天气尺度强迫背景下午后局地热对流特征分析[J]. 热带气象学报, 39(4): 443-452. Shen X L, Zhang L N, Sang M H, et al, 2023. Characteristics of

- local thermal convection in summer afternoon under weak synoptic-scale forcing in Zhejiang[J]. *J Trop Meteor*, 39(4): 443-452(in Chinese).
- 王孝慈,李双君,孟英杰,2022. 武汉地区4次低质心类短时强降水对流风暴特征分析[J]. *气象*, 48(5): 633-646. Wang X C, Li S J, Meng Y J, 2022. Characteristics of four low-echo-centroid convective storms of short-time heavy rainfall in Wuhan[J]. *Meteor Mon*, 48(5): 633-646(in Chinese).
- 王赢,罗亚丽,刘希,等,2025. 南京双偏振雷达2020—2022暖季观测极端降雨的对流云宏微观特征[J]. *热带气象学报*, 41(3): 427-439. Wang Y, Luo Y L, Liu X, et al, 2025. Macro- and micro-physical characteristics of extreme rainfall producing-convective clouds observed by the Nanjing dual-polarimetric radar during the 2020—2022 warm seasons[J]. *J Trop Meteor*, 41(3): 427-439(in Chinese).
- 王莹,王艳春,易笑园,等,2024. 天津一次夜间极端短时强降水的中尺度特征及成因探究[J]. *气象*, 50(12): 1451-1466. Wang Y, Wang Y C, Yi X Y, et al, 2024. Mesoscale characteristics and causes of a nighttime extreme short-time severe precipitation in Tianjin[J]. *Meteor Mon*, 50(12): 1451-1466(in Chinese).
- 尉英华,陈宏,王艳春,等,2024. 弱天气背景下天津三次局地突发暴雨中尺度特征及触发机制[J]. *气象*, 50(9): 1093-1104. Wei Y H, Chen H, Wang Y C, et al, 2024. Mesoscale characteristics and triggering mechanism of three sudden rainstorms under weak synoptic scale background in Tianjin[J]. *Meteor Mon*, 50(9): 1093-1104(in Chinese).
- 吴翠红,王晓玲,龙利民,等,2013. 近10 a湖北省强降水时空分布特征与主要天气概念模型[J]. *暴雨灾害*, 32(2): 113-119. Wu C H, Wang X L, Long L M, et al, 2013. Spatial and temporal characteristics of severe precipitation in Hubei Province during the past 10 years and main weather conceptual model[J]. *Torr Rain Dis*, 32(2): 113-119(in Chinese).
- 吴照宪,罗亚丽,刘希,等,2022. 2011—2018年安徽暖季短时强降水及其环流背景统计特征[J]. *气象*, 48(8): 963-978. Wu Z X, Luo Y L, Liu X, et al, 2022. Statistical characteristics of the hourly heavy rainfall events over Anhui Province during the 2011—2018 warm seasons and the associated synoptic circulation patterns[J]. *Meteor Mon*, 48(8): 963-978(in Chinese).
- 荀爱萍,张伟,黄惠镭,等,2019. 厦门市S波段双偏振雷达测雨效果分析[J]. *气象与环境科学*, 42(4): 103-110. Xun A P, Zhang W, Huang H R, et al, 2019. Analysis of rainfall measuring errors of S-band dual polarization weather radar in Xiamen[J]. *Meteor Environ Sci*, 42(4): 103-110(in Chinese).
- 俞小鼎,2013. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. *暴雨灾害*, 32(3): 202-209. Yu X D, 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain[J]. *Torr Rain Dis*, 32(3): 202-209(in Chinese).
- 张杰,田密,朱克云,等,2010. 双偏振雷达基本产品和回波分析[J]. *高原山地气象研究*, 30(2): 36-41. Zhang J, Tian M, Zhu K Y, et al, 2010. Analysis on the products and echo of dual-linear polarization Doppler weather radar[J]. *Plateau Mountain Meteor Res*, 30(2): 36-41(in Chinese).
- 张羽,胡东明,李怀宇,2017. 广州双偏振天气雷达在短时强降水中的初步应用[J]. *广东气象*, 39(2): 26-29. Zhang Y, Hu D M, Li H Y, 2017. Preliminary application of a dual polarization weather radar in Guangzhou during a short-range intensive rain[J]. *Guangdong Meteor*, 39(2): 26-29(in Chinese).
- 赵渊明,漆梁波,2021. 短时强降水概率预报的多模式集成技术研究[J]. *气象*, 47(5): 529-538. Zhao Y M, Qi L B, 2021. Multi-model integration technology for probabilistic forecasting of short-time severe rainfall[J]. *Meteor Mon*, 47(5): 529-538(in Chinese).
- Uijlenhoet R, Smith J A, Steiner M, 2003. The microphysical structure of extreme precipitation as inferred from ground-based rain-drop spectra[J]. *J Atmos Sci*, 60(10): 1220-1238.

(本文责编:王婷波)