

# 1 随州夏季两类短时强降水时空分布及双偏 2 振雷达回波统计特征\*

3 贺晓露<sup>1</sup> 李格 秦幼文\* 郝元甲 杨涛 唐佳

4 湖北省随州市气象局, 随州 441300

5  
6 **提 要:** 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, 根据天气尺度系统将短时强降水分为强  
7 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), 对两类的分布特征和雷达回波特征进  
8 行对比分析。结果表明: (1)强强迫型过程更多、范围更广、站次更多, 持续时间更长。(2)强强迫型中, 7  
9 月发生次数最多, 6 月次之, 8 月最少, 大洪山及桐柏山是最频发区。日变化呈三峰型, 最多在 05—08 时  
10 (北京时, 下同), 次多在 23—00 时, 第三在 15 时前后。弱强迫型中, 7 月和 8 月发生次数基本相当, 6  
11 月最少, 高频区较分散, 但山区仍是高频区。日变化为单峰型, 峰值出现在 15 时。(3)两种天气型均有降  
12 水强度越大, 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。(4)相同降水强  
13 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  
14 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  
15 移率区间值和平均值明显小于弱强迫型, 1 km 高度相关系数区间值和平均值略大于弱强迫型。

16 **关键词:** 短时强降水, 分布特征, 双偏振参量, 对比分析

17 **中图分类号:** P456 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.100701

## 19 Distribution and Dual Polarization Radar Echoes Statistics of Two Types of 20 Short-time Heavy Rainfall in Suizhou in Summer

21 HE Xiaolu LI Ge QIN Youwen\* HAO Yunajia YANG Tao TANG Jia

22 Suizhou Meteorological Office of Hubei Province, Suizhou 441300

23 **Abstract:** Based on conventional observation data and Suizhou S-band dual polarization weather  
24 radar observation data, the short-time heavy rain events are classified into strong synoptic-scale  
25 system forcing type (strong forcing type) and weak synoptic-scale system forcing type (weak  
26 forcing type) according to the weather circulation patterns. The distribution characteristics and  
27 dual polarization radar echo characteristics of between the two are comparatively analyzed. The  
28 results show that the strong forcing type of short-time heavy rainfall occurs more frequently at  
29 more stations, covering wider areas and lasting longer times. July has the highest frequency of this  
30 type of heavy rain, followed by June and August in order. Dahong Mountain and Tongbai  
31 Mountain are the areas tending to have the strong forcing type of heavy rain most frequently. The

\*湖北省气象局面上项目(2022Y20)和湖北省自然科学基金项目(JCZRLH202601280)共同资助

2024 年 11 月 12 日收稿; 2026 年 3 月 4 日收修订稿

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

通讯作者: 秦幼文, 主要从事短期和短临预报预警技术方法研究。E-mail:312294600@qq.com。

32 daily variation characteristics of such rainfall show a three-peak pattern, with the highest  
33 occurrence from 05:00 BT to 08:00 BT, then from 23:00 BT to 00:00 BT and at around 15:00 BT  
34 in order. In terms of the weak forcing type of short-time heavy rainfall, its occurrence frequency is  
35 basically the same in July and August, with the least in June. The distribution of its high-frequency  
36 areas is scattered, but mountainous areas are still the high-frequency areas. Its daily variation  
37 follows a unimodal distribution, with the peak occurring at 15:00 BT. Both the two types of  
38 short-time heavy rainfall have the characteristics of higher rainfall intensity, stronger echo  
39 intensity, higher concentration of liquid particles, higher echo top, and larger diameters of liquid  
40 particles. At the same rainfall intensity level, the two types of heavy rainfall do not show  
41 significant difference in composite reflectivity( $CR$ ), horizontal reflectivity ( $Z_h$ ) at 1 km height, and  
42 echo top height ( $ET$ ), and they all have low centroid characteristics, with the strong forcing type  
43 having more obvious low centroid characteristics. However, the interval and average values of the  
44 1 km differential reflectivity( $Z_{dr}$ ) at and specific differential phase ( $K_{dp}$ ) for the strong forcing type  
45 are significantly smaller than those for the weak forcing type, while the interval and average  
46 values of the 1 km correlation coefficient( $CC$ ) are slightly larger than those for the weak forcing  
47 type.

48  
49 **Key words:** short-time heavy rain, distribution characteristics, dual-polarization parameter,  
50 comparative analysis

## 51 52 引言

53 随州位于湖北北部,地处长江流域和淮河流域的交汇地带,地形复杂,其西南部有大洪  
54 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  
55 强降水天气频发,局地突发性短时强降水易引发山洪、城市内涝等次生灾害,并给经济社会  
56 造成严重影响。如 2021 年 8 月 11 日晚至 12 日白天随州南部遭遇极端短时强降水天气,12  
57 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,  
58 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、  
59 山洪突发,24 人因灾死亡,直接经济损失约 10.69 亿元(贺晓露等,2023)。又因短时强降  
60 水天气大多由中小尺度对流系统产生,时间尺度和空间尺度相对较小,具有局地性特征,突  
61 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  
62 等,2022;王莹等,2024;尉英华等,2024),因此针对该地区短时强降水做深入研究很有  
63 必要。

64 近年来针对湖北的短时强降水时空特征已有较多相关研究(林春泽等,2016;冷亮等,  
65 2021;谌伟等,2022)。如冷亮等(2021)研究发现强降水中心主要集中在湖北东南、东北、  
66 西南及武汉等区域,频次分布具有明显的月变化和日变化特征,极端短时强降水具有夜发性  
67 特征。谌伟等(2022)指出湖北的短时强降水主要集中在梅雨期以及梅雨结束后的 7 月中旬,  
68 6 h 以上的长历时强降水夜发性特征突出,而 6 h 以内的短历时强降水则主要发生于午后到  
69 傍晚时分。

70 对于短时强降水的估测与外推,天气雷达是主要技术手段。单偏振天气雷达只能获取一  
71 个与降水强度相关的参数即高度水平反射率因子( $Z_h$ ),降水估测最直观的方法是采用不同  
72 的雷达反射率因子-降水强度( $Z-R$ )关系(俞小鼎,2013),但  $Z-R$  关系受雨滴谱影响较大,  
73 降水估测误差较大(Uijlenhoet et al,2003;陈静等,2015;苟阿宁等,2022)。相比之下,  
74 双偏振雷达除了提供常规雷达数据外,还可探测如差分反射率因子( $Z_{dr}$ )、相关系数( $CC$ )、

75 差分传播相移率 ( $K_{dp}$ ) 等双偏振参量, 能更好地判断水凝物粒子的形状、大小、相态分布  
76 等信息, 有助于提高定量降水估算精度 (陈超等, 2019)。近年来, 随着双偏振雷达的建设  
77 增多, 气象工作者对双偏振雷达资料在强降水方面的应用开展了大量研究 (刘黎平等, 1996;  
78 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  
79 文等, 2025; 王赢等, 2025)。刘黎平等 (1996; 2002) 对比分析了甘肃平凉 C 波段双偏  
80 振雷达和普通雷达对不同强度降水的测量效果, 得出双偏振雷达在一定范围内可以改善小到  
81 中雨的测量效果, 并指出  $Z_{dr}$  和  $K_{dp}$  受滴谱变化的影响较小, 能够较好地反演降水量和液态  
82 含水量。张杰等 (2010) 利用四川双偏振天气雷达 2008 年 7—8 月的观测资料归纳了不同降  
83 水类型对应的常用双偏振参量的一般取值范围, 提高了实际预报工作中各参数的应用效益。  
84 张羽等 (2017) 指出广州小时降水量  $>50$  mm 所对应的  $Z_{dr}$ 、 $K_{dp}$  和  $CC$  的平均值分别为 1.25~1.66  
85 dB、0.8~1.48  $^{\circ}$   $\text{km}^{-1}$  和  $>0.95$ 。荀爱萍等 (2019) 统计分析厦门不同降水强度下的双偏振参  
86 量值分布, 发现随着降水强度的增大, 雨滴粒子增大,  $Z_h$ 、 $Z_{dr}$ 、 $K_{dp}$  总体趋势均是不断增大  
87 的。郭飞燕等 (2023) 对比分析了山东两次强降水风暴的双偏振参量, 发现决定降水强度的  
88 的关键因素是风暴低层双偏振参量有适中的  $Z_{dr}$ , 较大的  $K_{dp}$  和  $CC$ 。

89 由于双偏振雷达业务应用还未完全普及, 目前短时强降水的双偏振特征研究主要集中在  
90 沿海地区, 湖北地区双偏振雷达参量本地化特征尚缺少研究。且以往对于短时强降水的研究  
91 多集中在有低槽、低涡、切变线、急流等强天气尺度系统强迫下, 对于西风环流、高压脊等  
92 系统控制的弱天气尺度强迫下的短时强降水研究十分有限, 而这类短时强降水更是预报中的  
93 难点。因此, 对比强弱天气尺度系统强迫下的短时强降水时空分布特征和双偏振雷达参量特  
94 征, 将有助于进一步深入探究短时强降水的发生发展, 为进一步提高短时强降水预警技术水  
95 平提供客观依据。

## 96 1 数据来源与研究方法

### 97 1.1 数据来源

98 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  
99 家级气象观测站和 64 个区域级自动站共 66 个气象站的逐小时降水资料, 资料来源于湖北省  
100 气象信息与技术保障中心, 数据通过了实时业务质量控制, 已剔除疑误数据。(2) 逐 6 min  
101 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 ( $ET$ ) ( $Z_h$   
102  $\geq 18.3$  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  
103 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  
104 降水粒子浓度和大小, 对粒子浓度尤其敏感; 降水回波的  $CC$  值通常都较大, 而一些情况下  
105  $CC$  值会较小, 如尺度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  
106 规观测资料, 资料来源于国家气象中心。

### 107 1.2 研究方法

#### 108 1.2.1 短时强降水分型及过程统计

109 短时强降水分型依据: 本文参考钱卓蕾等 (2022) 和沈晓玲等 (2023) 的研究, 从是否  
110 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  
111 下简称强强迫型) 和弱天气尺度系统强迫 (以下简称弱强迫型), 其中强强迫型指随州及其  
112 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  
113 带气旋, 或者地面有锋面, 即存在高空槽、低涡、切变线、锋面、热带气旋等天气尺度系统;  
114 弱强迫型指随州及其周边 200 km 范围内的 500 hPa 无低槽低涡, 中低层 700、850、925 hPa  
115 无切变线、热带气旋, 地面无锋面。

116 短时强降水过程定义: 随州境内有  $\geq 2$  个站次气象站出现小时降水量  $\geq 20$  mm 的短时强  
117 降水, 则视为一次短时强降水过程。在一次短时强降水过程中, 当有气象站出现小时降水量

118  $\geq 20$  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  $\geq 20$  mm, 则认  
 119 为短时强降水过程结束。根据随州市 2019—2023 年 6—8 月 66 个气象站逐小时降水观测资  
 120 料, 按照小时降水量  $\geq 20$  mm 的标准, 筛选短时强降水数据, 统计出 87 个短时强降水过程  
 121 并按照 1.3.1 方法分型 (表 1)。将短时强降水过程进行不同时长划分, 将持续时长  $\leq 3$  h 的  
 122 过程, 划分为短历时过程; 持续时长  $> 3$  h 则划分为长历时过程。

123 表 1 随州市 2019—2023 年 6—8 月短时强降水过程统计表

124 Table 1 Statistics of short-time heavy rain processes in Suizhou 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 <sup>-1</sup>
	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

130 1.2.2 雷达数据处理

131 在实际观测过程中, 雷达资料为每 6 min 一次的极坐标数据, 难以直接与站点小时降水  
 132 量对应起来, 因此需要对雷达数据进行处理, 主要步骤如下:

133 第一步: 利用基数据  $Z_h$  计算出  $HT$  (即最大  $Z_h$  所在高度)。

134 第二步: 将 66 个站点 13 个高度层 (1、1.5、2.5、3.5、4.5、5.5、6.5、7.5、8.5、9.5、  
 135 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。每个站点的插  
 136 值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  
 137 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  
 138 对应仰角上的值。对 66 个站点进行插值, 得到 66 个站点逐 6 min 的 13 层  $Z_h$ 、 $Z_{dr}$ 、 $K_{dp}$ 、  
 139  $CC$  以及 1 层  $ET$ 、 $CR$ 、 $HT$ 。

140 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  $\leq 15$  dBz  
 141 的  $Z_h$  无法形成有效降水, 因此计算时剔除掉  $Z_h \leq 15$  dBz 对应的雷达数据。如将某一站点 08  
 142 —09 时  $Z_h > 15$  dBz 对应的雷达数据求算数平均值, 作为该站 09 时的雷达数据, 以此类推。  
 143 最终得到 66 站逐 1 h 的 13 层  $Z_h$ 、 $Z_{dr}$ 、 $K_{dp}$ 、 $CC$  以及 1 层  $ET$ 、 $CR$ 、 $HT$ 。

144 本文按照 1.3.1 中的定义筛选出 87 个短时强降水过程, 并按照 1.3.2 中的方法对 87 个过  
 145 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, 并筛选  
 146 出 87 个过程中小时降水量  $\geq 20$  mm 的 1335 个短时强降水样本, 其中强强迫型样本数为 1200  
 147 个, 弱强迫型样本数为 135 个。

148 1.2.3 相关性及其显著性水平检验

149 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。又因两种天气  
 150 型下短时强降水样本数存在较大差异, 为排除其雷达参量特征的分布差异或由样本不均衡导  
 151 致, 本文利用 Welch 检验对两类天气型对应的各雷达参量均值差异进行显著性水平检验。

152 2 短时强降水的分布特征

153 2.1 概况

154 统计分析所选取的 87 个短时强降水过程 (表 1 和表 2), 结果表明: 2019—2023 年 6  
 155 —8 月共有 87 个短时强降水过程, 其中强强迫型过程为 54 个, 弱强迫型过程 33 个。强强  
 156 迫型过程平均短时强降水站次为 22.2 个站次, 而弱强迫型为 4.1 个站次, 说明强强迫型较  
 157 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  
 158 历时过程, 有 37% 为短历时过程; 而弱强迫型过程中短历时过程占比达 85%, 长历时过程  
 159 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。

160 87 个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  
 161 个站次,远超弱强迫型的 135 个站次。而两类短时强降水的不同降水强度占比均与总短时强  
 162 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 8 成左右集中在降水  
 163 强度 20~40 mm h<sup>-1</sup> 之间,约 2 成超过 40 mm h<sup>-1</sup>,而 100 mm h<sup>-1</sup> 以上的强降水均出现在强强  
 164 迫型中。

166 表 2 随州市 2019—2023 年 6—8 月两类短时强降水的降水强度分布

167 Table 2 Rainfall intensity distribution of two types of short-time heavy rain in Suizhou from June to August of  
 168 2019-2023

天气类型	20~30 mm h <sup>-1</sup> 30~40 mm h <sup>-1</sup> 40~50 mm h <sup>-1</sup> 50~80 mm h <sup>-1</sup> 80~100 mm h <sup>-1</sup> ≥100					mm h <sup>-1</sup>
	站次 (个) / 比例					
强强迫型	692/58%	279/23%	138/12%	83/7%	5/0.4%	3/0.2%
弱强迫型	79/59%	32/24%	15/11%	8/6%	1/0.8%	0/0%
两类总计	771/58%	311/23%	153/11%	91/7%	6/0.4%	3/0.2%

177 2.2 年变化

178 2.2.1 时间变化

179 从表 3 可见,短时强降水过程年变化不大,基本在 15~20 个,年均短时强降水过程数为  
 180 17.4 个。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  
 181 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  
 182 水站次的年际变化较大,在 161~374 个站次,年均短时强降水站次为 267 个站次,其中强强  
 183 迫型有 240 个站次,占总量 90%,而弱强迫型仅 27 个站次,占总量 10%,说明大部分短时  
 184 强降水是出现在强强迫型过程中,进一步证明强强迫型较弱强迫型短时强降水的范围更广、  
 185 站次更多、时间更长。

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

187 Table 3 Annual distribution of two types of short-time heavy rain in Suizhou from June to August of 2019-2023

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

194 2.2.2 空间变化

195 两类短时强降水的年均频次空间分布如图 2 所示,随州全市范围都有可能发生短时强降  
 196 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  
 197 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  
 198 一带以及东北部的桐柏山一带是短时强降水最频发区,年均发生 5~6 次,而随县中部及西北  
 199 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  
 200 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  
 201 是最频发区(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  
 202 次数基本在 1 次以下,且高频区分布较分散,但大洪山一带及桐柏山一带山区高频区的分布  
 203 特征依然存在(图 1c)。

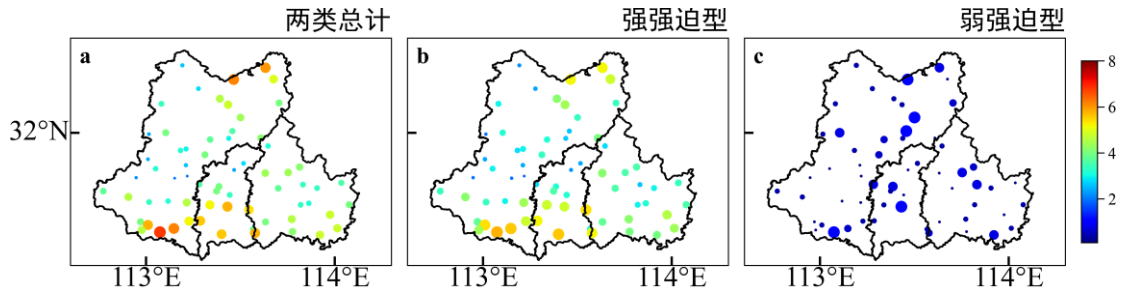


图 1 2019—2023 年 6—8 月随州两类短时强降水的年均频次空间分布

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

### 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 2）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，这可能跟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，这可能跟盛夏季易触发对流有关。

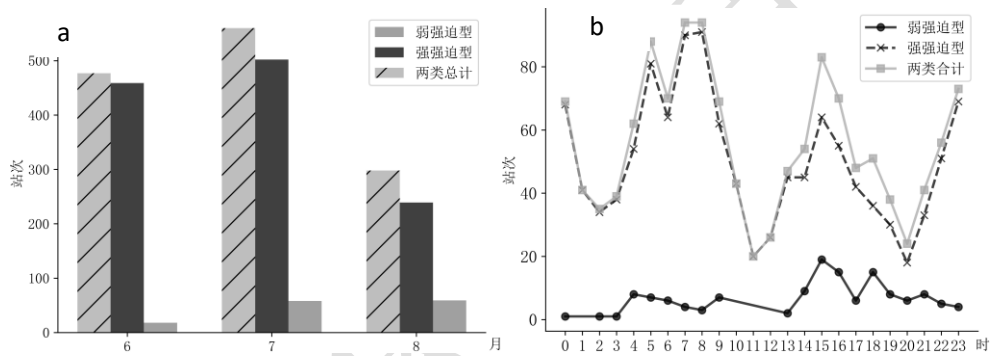


图 2 2019—2023 年随州两类短时强降水的时间分布情况

(a) 月分布, (b) 时间分布

Fig. 2 (a) Monthly and (b) temporal distributions of two types of short-time heavy rain in Suizhou from 2019 to 2023

#### 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），其余地区短时强降水发生频次基本在 1~2 次，短时强降水主要在强天气尺度系统强迫下发生，大部分地区的强强迫型占比达 80%~100%（图 3b, 3c）。7 月，南部的短时强降水明显增多，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的桐柏山一带(图 3d)，短时强降水仍以强天气尺度系统强迫为主（图 3e），其占比为 70%~100%，但弱天气尺度系统强迫的短时强降水频次和范围较 6 月有所增加（图 3f）。8 月，短时强降水频次较 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，其中弱天气尺度系统强迫的短时强降水频次和范围较 7 月略有增加（图 3i），其占比升至 30%~60%。

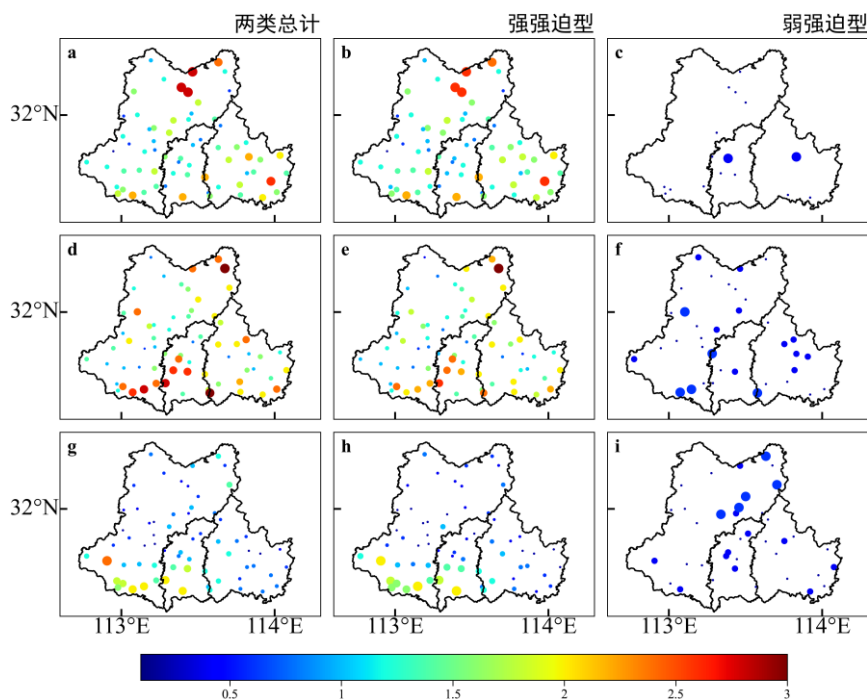


图3 随州市6—8月两类短时强降水的年均频次空间分布  
(a~c) 6月, (d~f) 7月, (g~i) 8月

Fig. 3 Spatial distribution of annual average frequency of two types of short-time heavy rain in Suizhou from June to August  
(a-c) June, (d-f) July, (g-i) August

## 2.4 日变化

### 2.4.1 时间变化

从短时强降水发生的时次分布来看(图 2b), 其日变化特征明显, 主要呈现三峰型分布: 主峰区即短时强降水站次最多时段为 05—08 时, 峰值出现在 07—08 时; 次峰区为 14—18 时, 峰值出现在 15 时; 第三峰区为 22 时至次日 01 时, 峰值出现在 23 时。其中强强迫型短时强降水的分布与总分布情况相似, 也呈三峰型分布, 但短时强降水站次最多的两个时段为 05—08 时和 22 时至次日 01 时, 这说明引发短时强降水的天气尺度系统多在上半夜和早晨影响随州地区。弱强迫型短时强降水为单峰型分布, 发生站次最多的时段是 15—18 时, 峰值出现在 15 时, 这可能是由于午后到傍晚气温升高、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 时这三个短时强降水的峰值时次, 统计两类短时强降水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 次短时强降水高频区(图 4a), 其余地区短时强降水发生频次基本在 0~1.5 次, 短时强降水主要在强天气尺度系统强迫下发生, 大部分地区的强强迫型占比达 80%~100%(图 4b 和图 4c)。14—18 时, 短时强降水高频区东移至曾都南部和广水西部(图 4d), 短时强降水仍以强天气尺度系统强迫为主(图 4e), 但弱强迫型短时强降水的范围较 05—08 时明显增加(图 4f)。22 时至次日 01 时, 短时强降水高频区进一步东移至广水中东, 其中弱强迫型短时强降水的频次和范围较 14—18 时范围明显减小(图 4i)。

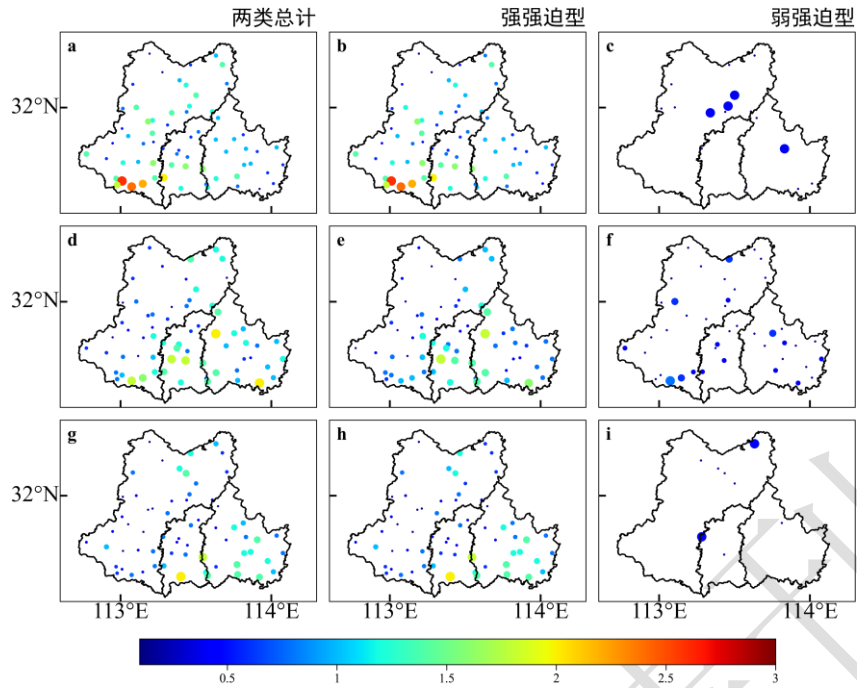


图 4 随州市两类短时强降水不同时段의年均频次空间分布  
(a~c) 05—08 时, (d~f) 14—18 时, (g~i) 22 时至次日 01 时

Fig. 4 Spatial distribution of annual average frequency of two types of short-time heavy rain in Suizhou in different time periods

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

### 3 短时强降水的雷达回波参量分布特征

2.1 节统计分析发现, 两类短时强降水均有 8 成左右的降水强度集中在  $20\sim 40\text{ mm h}^{-1}$  之间, 而降水强度超过  $40\text{ mm h}^{-1}$  的占比仅约 2 成, 但因其降水强度大, 无论是影响力还是致灾性都较高, 为此, 本节将降水强度分为  $20\sim 40\text{ mm h}^{-1}$  和  $\geq 40\text{ mm h}^{-1}$  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。

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), 结果显示, 两类短时强降水双偏振雷达回波参量与降水强度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, 因此本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  $Z_h$ 、 $Z_{dr}$ 、 $K_{dp}$ 、 $CC$  箱线图 (图 5) 和散点图 (图 6) 分布特征。

表 4 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

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	<b>-0.03</b>	<b>-0.09</b>
1.5	0.46	0.36	0.18	0.16	0.55	0.44	<b>-0.02</b>	<b>0.11</b>
2.5	0.47	0.33	0.18	<b>0.13</b>	0.51	0.33	<b>0.02</b>	<b>0.07</b>
3.5	0.45	0.27	0.21	<b>0.16</b>	0.49	0.32	<b>-0.04</b>	<b>-0.07</b>
4.5	0.4	0.27	0.15	<b>0.12</b>	0.38	0.35	<b>0.04</b>	<b>0.13</b>
5.5	0.35	0.30	0.08	0.17	0.37	0.35	<b>0.02</b>	<b>-0.09</b>

6.5	0.32	0.31	<b>0.02</b>	<b>0.17</b>	0.23	0.33	<b>-0.02</b>	<b>-0.06</b>
7.5	0.28	<b>0.13</b>	-0.07	0.28	0.08	0.24	<b>0.02</b>	<b>-0.13</b>
8.5	0.23	<b>0.12</b>	<b>-0.06</b>	0.23	<b>-0.01</b>	<b>0.15</b>	<b>-0.03</b>	<b>0.15</b>
9.5	0.16	<b>0.20</b>	-0.11	<b>0.08</b>	<b>0.00</b>	<b>0.10</b>	<b>0.03</b>	<b>-0.04</b>
10.5	0.18	<b>0.15</b>	-0.15	<b>-0.03</b>	<b>-0.08</b>	<b>0.04</b>	<b>0.06</b>	<b>0.10</b>

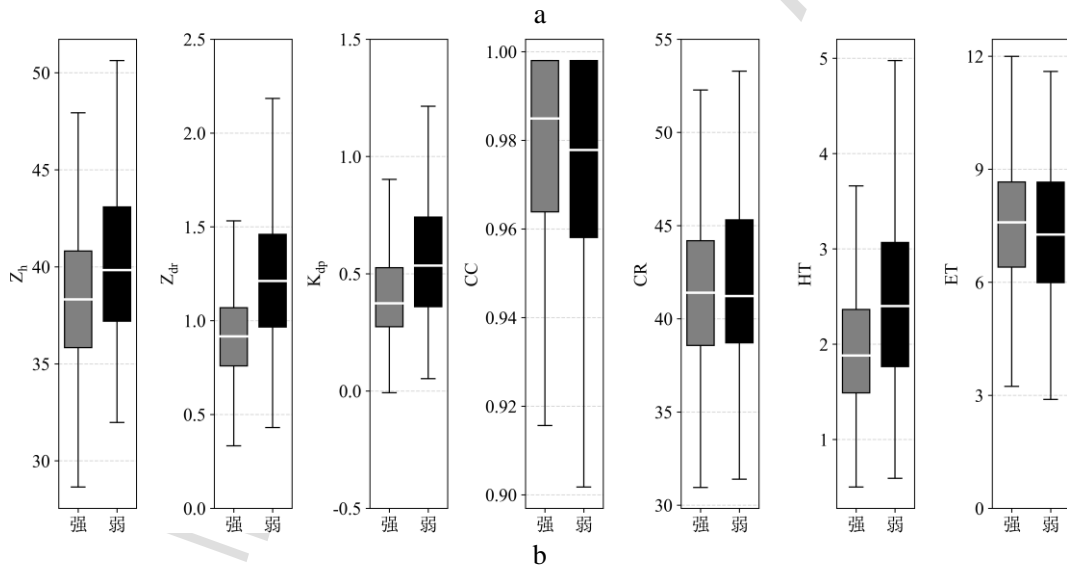
274 注：加粗表示未通过 0.05 显著性水平检验。

### 275 3.1 强强迫型雷达回波参量特征

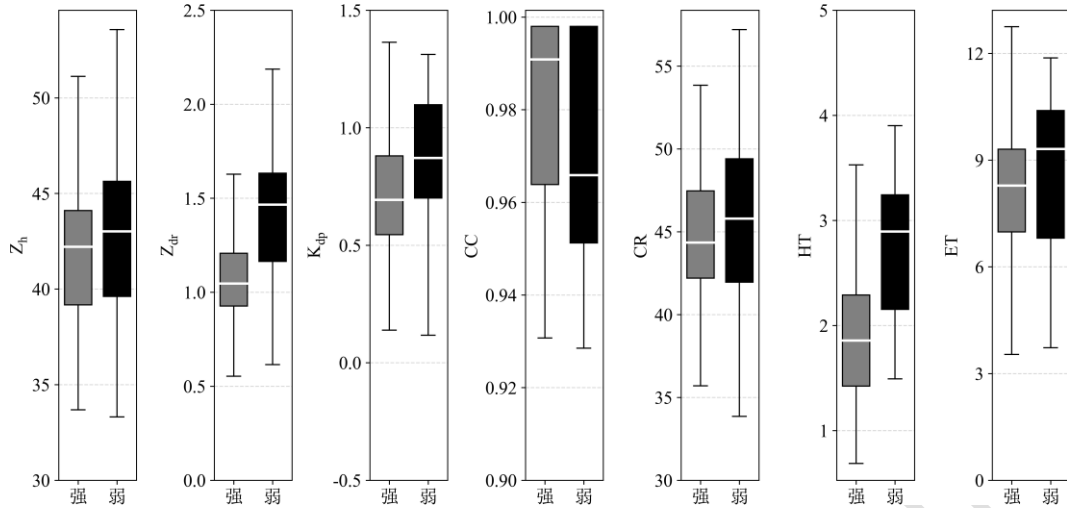
276 使用箱线图（图 5）和散点图（图 6）分析不同等级降水强度的雷达回波参量分布情况，  
 277 由箱线图（图 5）所示， $\geq 40 \text{ mm h}^{-1}$  降水强度  $CR$ 、 $ET$  和 1 km 高度  $Z_h$ 、 $Z_{dr}$ 、 $K_{dp}$  的平均值以  
 278 及 25%~75%分位值均大于  $20\sim 40 \text{ mm h}^{-1}$ ，这说明强强迫型中，降水强度越大，回波强度越  
 279 强，液态粒子浓度越大，回波顶越高，对流发展越旺盛，粒子直径越大；而  $CC$  则随降水强度  
 280 等级增大变化不大，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，  
 281 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。

282 散点图（图 6a）中所示， $CR$ 、 $ET$  和 1 km 高度  $Z_h$ 、 $Z_{dr}$ 、 $K_{dp}$  随降水强度增大有增大趋  
 283 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  
 284 显，这与表 4 以及上述对比分析结果基本一致。这表明， $K_{dp}$  越大，表明低层液态粒子浓度  
 285 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  
 286 明显，说明虽然整体有降水强度越大粒子直径越大的趋势，但不同降水强度中仍可能包含各  
 287 种尺度降水粒子，导致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  
 288 结果基本一致。

289



290  
291



292

293

注：箱线图中箱形上部框线、白色线、下部框线分别代表样本总数的 75%分位值，中位值和 25%分位值。

294

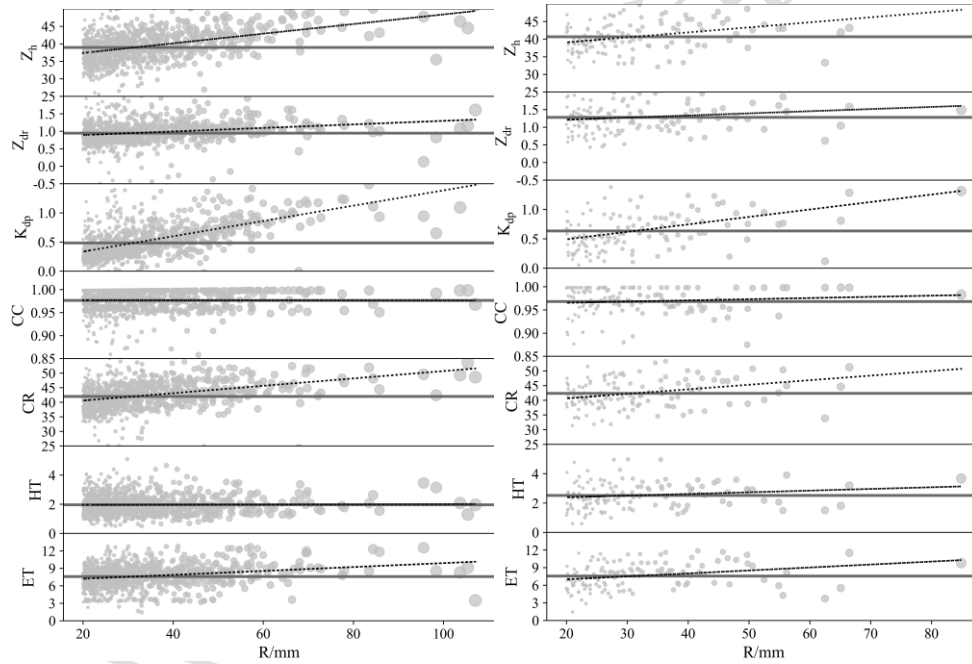
图 5 两类短时强降水(a)20~40 mm h<sup>-1</sup>和(b)≥40 mm h<sup>-1</sup> CR、HT、ET 和 1 km 高度 Z<sub>h</sub>、Z<sub>dr</sub>、K<sub>dp</sub>、CC 箱线图

295

Fig. 5 Box plots of CR, HT, ET and Z<sub>h</sub>, Z<sub>dr</sub>, K<sub>dp</sub>, CC at 1 km height for two types of short-time heavy rain with

296

intensities of (a) 20-40 mm h<sup>-1</sup> and (b) ≥40 mm h<sup>-1</sup>



297

298

图 6 (a)强强迫型和(b)弱强迫型 CR、HT、ET 和 1 km 高度 Z<sub>h</sub>、Z<sub>dr</sub>、K<sub>dp</sub>、CC 散点图

299

Fig. 6 Scatter plots of CR, HT, ET and Z<sub>h</sub>, Z<sub>dr</sub>, K<sub>dp</sub>, CC at 1 km height for (a) strong synoptic-scale forcing and (b)

300

weak synoptic-scale forcing

301

### 3.2 弱强迫型雷达回波参量特征

302

箱线图 (图 5) 所示,  $\geq 40 \text{ mm h}^{-1}$  降水强度 CR、HT、ET 和 1 km 高度 Z<sub>h</sub>、Z<sub>dr</sub>、K<sub>dp</sub> 的平均值以及 25%~75%分位值均大于 20~40 mm h<sup>-1</sup>, 这说明弱强迫型中, 降水强度越大, 回波强度越强, 液态粒子浓度越大, 回波顶越高, 粒子直径越大, 且回波质心越高; 而 CC 随降水强度等级增大而略微下降, 说明降水强度越大, 在低层粒子相关性越低, 越容易受冰相粒子干扰。CC 和 HT 随降水强度的变化趋势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。

303

散点图 (图 6b) 中所示, 弱强迫型的特征与强强迫型基本一致, CR、ET 和 1 km 高度

309  $Z_h$ 、 $Z_{dr}$ 、 $K_{dp}$  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。

310 3.3 两类短时强降水雷达回波参量特征对比

311 根据前述 3.2 节和 3.3 节概括出随州两类短时强降水的雷达回波参量区间值（25%~75%  
312 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  
313 高度  $Z_h$ 、 $Z_{dr}$ 、 $K_{dp}$  平均值均小于弱强迫型，区间值也大部小于弱强迫型，1 km 高度  $CC$  的区  
314 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。

315 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 dBz  
316 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  
317 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变化区间更大。 $HT$  基本  
318 都在 3.5 km 以下，说明两类短时强降水都有雷达回波质心低的特征，其中强强迫型  $HT$  更  
319 低，低质心特征更为明显。但二者在 1 km 高度  $Z_{dr}$  的差值较明显，强强迫型  $Z_{dr}$  明显小于弱  
320 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  
321 强迫型  $K_{dp}$  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，  
322 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  
323 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  
324 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  
325 分个例中低层有未完全融化冰相粒子导致的。

326 表 5 两类短时强降水的双偏振参量对比

327 Table 5 Comparison of dual-polarization parameters of two types of short-time heavy rain

降水强度 /mm h <sup>-1</sup>	天气类型	$Z_r$ /dBz		$Z_{dr}$ /dB		$K_{dp}$ /deg km <sup>-1</sup>		$CC$		$CR$ /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
	差值		1.9		0.33		0.15		-0.008		0.2		0.49		-0.1
≥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
	差值		1.3		0.34		0.14		-0.009		0.7		0.84		0.4

328 注： $Z_h$ 、 $Z_{dr}$ 、 $K_{dp}$ 、 $CC$  均为 1 km 高度处的统计值。

329 4 结论与讨论

330 本文利用随州逐小时降水资料和 S 波段双偏振雷达探测资料，将随州市 2019—2023 年  
331 6—8 月 87 个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  
332 量特征，得出如下结论：

333 (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，  
334 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 8 成降水强度集中在 20~40  
335 mm h<sup>-1</sup> 之间，40 mm h<sup>-1</sup> 以上降水强度占比约 2 成。

336 (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  
337 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频发区。日变化呈三峰型  
338 分布，最多在 05—08 时，次多在上 23—00 时，第三在 15 时前后，且高频区随时间逐步西  
339 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  
340 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。

341 (3)两类短时强降水均有降水强度越大，回波强度越强，低层液态粒子浓度越大，回波  
342 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  
343 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。

344 (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  
345 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  $1\text{ km}$  高度  $Z_{dr}$ 、 $K_{dp}$  区间值和  
346 平均值明显小于弱强迫型, $1\text{ km}$  高度  $CC$  区间值和平均值略大于弱强迫型。

347 本文首次揭示了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  
348 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  
349 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  
350 景下短时强降水的短临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  
351 水过程对应的样本数量存在显著不平衡,这是本研究的主要局限。这种样本不对称性可能导  
352 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  
353 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  
354 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  
355 研究探讨。

### 356 参考文献

357 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  
358 Q, Hu S, et al, 2019. Preliminary application of CINRAD-SA dual polarization radar data in rainfall estimation[J]. Meteor Mon, 45(1):  
359 113-125 (in Chinese).

360 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  
361 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].  
362 Meteor Mon, 41(3): 296-303 (in Chinese).

363 谌伟,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):  
364 216-226. Chen W, Liu P T, Xu Z F, et al, 2022. Spatio-temporal characteristics of frequency of heavy rainfall events in Hubei Province  
365 and analysis of topographic relationship based on GWR[J]. J Trop Meteor, 38(2): 216-226 (in Chinese).

366 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,  
367 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  
368 radar[J]. J Arid Meteor, 40(1): 84-94 (in Chinese).

369 苟爱萍,张伟,黄惠镛,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. Gou A P,  
370 Zhang W, Huang H R, et al, 2019. Analysis of rainfall measuring errors of S-band dual polarization weather radar in Xiamen[J]. Meteor  
371 Environ Sci, 42(4): 103-110 (in Chinese).

372 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  
373 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,  
374 41(1): 103-113, 122 (in Chinese).

375 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,  
376 et al, 2023. Analysis of characteristics and causes of “8·12” extreme precipitation in Hubei Province[J]. Torrential Rain Disasters, 42(1):  
377 13-23 (in Chinese).

378 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  
379 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  
380 characteristics of extreme short-time severe precipitation in Shandong based on the dense observations from automatic weather stations  
381 and national stations[J]. Meteor Mon, 46(2): 200-211 (in Chinese).

382 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,  
383 50(12): 1519-1530. Huang X X, Chen G, Zhao K, et al, 2024. Improved nowcasting of short-time heavy precipitation and thunderstorm  
384 gale based on vertical profile characteristics of dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 50(12): 1519-1530 (in Chinese).

385 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.  
386 Huang Z C, Yin J N, Yang Y, et al, 2025. Application of S-band and X-band dual polarization radar for quantitative precipitation  
387 estimation in Shijiazhuang[J]. Plateau Meteor, 44(1): 253-264 (in Chinese).

388 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.

389 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

390 based on minute rain gauge data[J]. *Torr Rain Dis*, 40(1): 61-68 (in Chinese).

391 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.

392 Comparative analysis of low-level dual polarization parameters of different types of severe rainfall storm[J]. *Meteor Mon*, 49(9):

393 1075-1084 (in Chinese).

394 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

395 al, 2016. Characteristics of summer precipitation diurnal variations in Hubei Province[J]. *Trans Atmos Sci*, 39(4): 490-500 (in Chinese).

396 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

397 Z J, et al, 1996. Comparitive study on dual linear polarization radar measuring rainfall rate[J]. *Sci Atmos Sin*, 20(5): 615-619 (in

398 Chinese).

399 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):

400 709-720. 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

401 dual linear polarization Doppler radar[J]. *Chin J Atmos Sci*, 26(5): 709-720 (in Chinese).

402 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):

403 366-388. Pan J W, Gao S, Zheng X Y, et al, 2025. Analysis of microphysical features in the inner core of super typhoon Meranti (2016)

404 based on dual-polarization radar observations[J]. *Acta Meteor Sin*, 83(2): 366-388 (in Chinese).

405 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

406 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

407 synoptic scale background[J]. *Meteor Sci Technol*, 50(5): 713-723 (in Chinese).

408 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,

409 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):

410 737-745 (in Chinese).

411 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):

412 443-452. Shen X L, Zhang L N, Sang M H, et al, 2023. Characteristics of local thermal convection in summer afternoon under weak

413 synoptic-scale forcing in Zhejiang[J]. *J Trop Meteor*, 39(4): 443-452 (in Chinese).

414 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

415 S J, Meng Y J, 2022. Characteristics of four low-echo-centroid convective storms of short-time heavy rainfall in Wuhan[J]. *Meteor Mon*,

416 48(5): 633-646 (in Chinese).

417 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

418 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].

419 *Meteor Mon*, 50(12): 1451-1466 (in Chinese).

420 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):

421 427-439. Wang Y, Luo Y L, Liu X, et al, 2025. Macro-and microphysical characteristics of extreme rainfall producing-convective clouds

422 observed by the Nanjing dual-polarimetric radar during the 2020-2022 warm seasons[J]. *J Trop Meteor*, 41(3): 427-439 (in Chinese).

423 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.

424 Wei Y H, Chen H, Wang Y C, et al, 2024. Mesoscale characteristics and triggering mechanism of three sudden rainstorms under weak

425 synoptic scale background in Tianjin[J]. *Meteor Mon*, 50(9): 1093-1104 (in Chinese).

426 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

427 X, Luo Y L, Liu X, et al, 2022. Statistical characteristics of the hourly heavy rainfall events over Anhui Province during the 2011-2018

428 warm seasons and the associated synoptic circulation patterns[J]. *Meteor Mon*, 48(8): 963-978 (in Chinese).

429 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

430 method of flash heavy rain[J]. *Torr Rain Dis*, 32(3): 202-209 (in Chinese).

431 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

- 432 Y, et al, 2010. Analysis on the products and echo of dual-linear polarization Doppler weather radar[J]. Plateau Mt Meteor Res, 30(2):  
433 36-41 (in Chinese).
- 434 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,  
435 Li H Y, 2017. Preliminary application of a dual polarization weather radar in Guangzhou during a short-range intensive rain[J].  
436 Guangdong Meteor, 39(2): 26-29 (in Chinese).
- 437 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.  
438 Multi-model integration technology for probabilistic forecasting of short-time severe rainfall[J]. Meteor Mon, 47(5): 529-538 (in  
439 Chinese).
- 440 Uijlenhoet R, Smith J A, Steiner M, 2003. The microphysical structure of extreme precipitation as inferred from ground-based  
441 raindrop spectra[J]. J Atmos Sci, 60(10): 1220-1238.

