

肖云,马中元,努尔夏提,等. 袁河流域强降水的天气背景与回波特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2023, 47(2): 10 - 17.

袁河流域强降水的天气背景与回波特征分析

肖云^{1,2}, 马中元³, 努尔夏提¹, 马博涵¹, 李栩婕², 李欢欢²

(1. 新疆维吾尔自治区克孜勒苏柯尔克孜自治州气象局, 新疆 克州 845350;

2. 江西省新余市气象局, 江西 新余 338025; 3. 江西省气象科学研究所, 江西 南昌 330046)

摘 要:为了更好地监测预警江西袁河流域强降水天气,使用江西雨量资料、欧洲中心格点($1^{\circ} \times 1^{\circ}$)再分析资料和江西雷达回波等资料,对袁河流域 5 次大暴雨过程进行分析,结果表明:(1)袁河流域强降水天气形势场是 925 ~ 700 hPa 切变线、低层辐合高层辐散中心、西南气流达到 $12 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 等因素影响;T - lnP 图上整层水汽充沛,可降水量在 75 mm 以上;降水前低层累积不稳定能量 CAPE($1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和对流抑制能 CIN($100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)。(2)强降水回波的组合反射率 CR 在 50 dBz 左右,其回波顶高在 13 km 左右,垂直积分液态水含量在 $12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右;40 dBz 回波顶高在 6 ~ 7 km,45 dBz 回波顶高在 6.5 km 以下。(3)强降水和回波强度成正相关,随降水的增强,回波明显增强;当回波强度 ≤ 20 dBz 时,雨强几乎不变;当回波强度在 20 ~ 35 dBz 之间,雨强随回波强度增加而缓慢加大;当回波强度在 35 ~ 50 dBz 之间,雨强随回波强度加大明显增加;而当回波强度 ≥ 50 dBz 时,雨强反而趋于下降或维持。研究结果对袁河流域强降水预报服务有明显的指导意义。

关键词:袁河流域;强降水;天气系统;回波特征;相关分析

中图分类号:P458.1⁺21 **文献标识码:**A

Analysis of Weather Background and Echo Characteristics of Heavy Precipitation in Yuanhe River Basin

XIAO Yun^{1,2}, MA Zhongyuan³, NUR Shati¹, MA Bohan¹, LI Xujie², LI Huanhuan²

(1. Kizilsu Kyrgyz Autonomous Prefecture Meteorological Bureau, Xinjiang Uygur Autonomous

Region, Kizilsu Kyrgyz 845350, China; 2. Xinyu Meteorological Bureau of Jiangxi Province,

Xinyu 338025, China; 3. Jiangxi Institute of Meteorological Science, Nanchang 330046, China)

Abstract: In order to better monitor and warn the heavy precipitation weather in Yuanhe River Basin, Jiangxi rainfall data, European Central grid ($1^{\circ} \times 1^{\circ}$) reanalysis data and Jiangxi radar echo data are used to analyze five heavy rainstorm processes in Yuanhe River Basin. The results show that: (1) the heavy precipitation weather situation field in Yuanhe River Basin is affected by 925 ~ 700 hPa shear line, low - level convergence, high - level divergence center, southwest air flow reaching $12 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and other factors; on the T - lnP map, the whole layer has abundant water vapor, and the precipitable water is more than 75 mm; accumulated instability energy CAPE($1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$) and convective suppression energy CIN($100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$) in the lower layer before precipitation. (2) The combined reflectivity CR of heavy precipitation echo is about 50 dBz, the echo top height is about 13 km, and the vertical integrated liquid water content is about $12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; the top height of 40 dBz echo is 6 ~ 7 km, and the top height of 45 dBz echo is less than 6.5 km. (3) There is a positive correlation between heavy precipitation and echo intensity, and the echo increases obviously with the increase of precipitation; when the

收稿日期: 2022 - 04 - 10

第一作者简介: 肖云 (1982—), 男, 硕士, 高工, 主要从事天气预报和预报技术研究, E - mail: 105685123@qq.com。

通讯作者简介: 马中元 (1954—), 男, 高工, 主要从事天气预报和预报技术研究, E - mail: mazhongyuan1@163.com。

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类 - XDA19040202); 国家自然科学基金项目 (41975001); 江西省气象科技项目面上项目 (JX2021M12); 袁河流域大暴雨短时强降水特征分析。

echo intensity is ≤ 20 dBz, the rain intensity is almost unchanged; when the echo intensity is between 20 ~ 35 dBz, the rain intensity increases slowly with the increase of echo intensity; when the echo intensity is between 35 ~ 50 dBz, the rain intensity increases significantly with the increase of echo intensity; when the echo intensity is ≥ 50 dBz, the rain intensity tends to decrease or maintain. The research results have guiding significance for the service of heavy precipitation in Yuanhe River Basin.

Key words: Yuanhe River Basin; heavy precipitation; weather system; echo characteristics; correlation analysis

0 引言

强降水事件是一种损害性大,突发性强的小概率事件。近些年来,强降水出现概率增大,表现出更容易、更频繁地发生强降水事件的趋势。短时强降水是形成大暴雨事件的基本单元,在大暴雨、特大暴雨过程中,往往由于短时强降水的出现而引发强降水事件。“75·8”河南特大暴雨(最大累积雨量达 1631 mm)引发暴雨灾害之后,气象学家越来越重视暴雨预报,从不同方向开展科学研究。2021 年 7 月 20 日 17 时(北京时,下同),河南出现特大暴雨,最强降雨为荥阳市环翠峪的 728.0 mm,小时雨强最大值为郑州的 $201.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (7 月 20 日 16—17 时),打破中国 $198 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 小时雨强记录^[1-2]。

近年来国内很多气象学者在强降水事件方面做了很多研究。利用雷暴单体识别、追踪和分析算法,对局地短时强降水进行分析,认为午后局地中尺度环境有利于对流暴雨的产生^[3-6]。珠三角地区重大短时强降水天气流型主要有台风型、西南季风型、北部湾低压型、冷(式)切变线型和热带云团型等 5 种^[7-8]。利用雷达径向速度特征,对不同天气系统背景下特殊地形影响的极端短时强降水成因进行分析^[9-10]。使用常规天气图、灾情、自动站、卫星云图、雷达回波和风廓线雷达等资料,对江西短时强降水造成的暴雨和大暴雨天气进行分析,得到江西短时强降水的天气、云图和回波等特征^[11-19]。采用天气雷达风暴识别跟踪信息 STI(Storm Tracking Information)拼图技术,对江西短时强降水、雷电、雷暴大风、冰雹等强天气进行监测预警分析,多部雷达组合 STI 产品弥补了单部雷达 STI 的不足,对于判断未来 1 h 回波的移动方向、移动速度有明显的指示意义^[20]。对短时强降水进行分析研究,得出不同地区、不同天气系统下的短时强降水大气环流配置与雷达回波特征^[21-25]。持续时间较长的区域性暴雨过程是由于副高阻挡,使得高空槽系统长时间停留,配合低层从孟加拉湾和南海输送而来的丰沛水汽,为区域持续性暴雨提供了有利的动力条

件和水汽条件。上述 2 次过程水汽输送均集中在 600 hPa 以下层,以经向偏南水汽输送为主,水汽输送增强时间较强降雨开始时间提前 48 ~ 72 h。南亚高压强大、稳定地维持在青藏高原上空,桂北地区位于南亚高压东部脊线上的强辐散区,低层位于低空西南风急流左侧强辐合区,形成很好的低层辐合上升、高层辐散下沉的垂直环流形势,与高低空急流耦合共同为此次持续暴雨提供了较好的动力机制^[26-28]。研究成果为本文提供了参考依据,但由于江西袁河流域研究分析文章较少,尤其是使用雷达拼图监测袁河流域强降水的文献更少,这是本文开展研究的出发点。

本文通过对袁河流域 5 次暴雨天气过程的分析,梳理出袁河流域强降水天气系统配置、物理量探空参数特征、天气系统配置、强降水雷达回波特征、雨量与回波强度相关性等特征,对提高袁河流域暴雨预报准确率和预报能力有重要的意义和作用。

1 资料和方法

1.1 资料来源

袁河流域位于江西省西部,发源于江西省武功山,经过萍乡市芦溪县向东奔流,流经宜春、分宜、新余、樟树市昌傅镇,新干县三湖镇,最后在樟树市区注入赣江,为赣江水系,河道全长 273 km,流域面积 6286 km²。将萍乡、宜春、分宜、新余、新干、樟树共 6 个国家气象观测站作为袁河流域指标站(图略)。

流域降水量是指 6 个指标站平均降水量,当 24 h(20—20)降水量 $\geq 50 \text{ mm}$ 的指标站 ≥ 2 个时,即为 1 次流域暴雨天气日;当暴雨日间隔不超过 1 d 时为 1 次暴雨天气日;当暴雨日超过 2 d 为 1 次连续性暴雨过程。本文使用北京时间。

1.2 方法

暴雨日气候概况:袁河流域 1960—2020 年暴雨日共有 377 d,336 个暴雨天气过程,其中连续 2 d 以上的暴雨过程有 38 个,连续 3 d 的暴雨过程有 3 个(图略)。最大流域日降水量为 151.7 mm,出现在

1995 年 6 月 26 日,超过 100.0 mm 的流域日降水量有 19 d。最大流域过程降水量出现在 2019 年 7 月 7—9 日,达 317.4 mm。袁河流域年平均暴雨日有 6.3 d,除了 1963 年和 1978 年外,每年都有暴雨发生,最多暴雨日出现在 1977 年和 2012 年,达 12 d。从 1960—2020 年暴雨日的月分布可以看出(图略),袁河流域暴雨日数以 6 月为最多,高达 112 d;5 月次之,为 76 d;12 月和 1 月出现的暴雨日最少,均为 3 d。

强降水天气过程流域雨量采用算术平均法计算,即袁河流域雨量为萍乡、宜春、分宜、宜春、新干、樟树共 6 个国家站同时期的降水量平均,选取如

表 1 5 次强降水过程降水量统计表(单位:mm)

Tab. 1 Precipitation statistics of 5 strong precipitation processes (unit:mm)

降水过程	萍乡	宜春	分宜	新余	新干	樟树	流域雨量
过程 1	262.9	202.3	195.8	177.9	199.8	180.4	203.2
过程 2	119.6	162.6	199.9	237.9	107.1	122.1	158.2
过程 3	94.0	194.2	127.7	129.9	115.4	177.4	139.8
过程 4	400.4	358.7	321.1	274.6	205.6	270.5	305.2
过程 5	122	106.6	97.8	121.6	225.1	222.2	149.2

5 次强降水过程的逐小时降水分析有如下特征(图略)。过程 1 主要降水时段有 2 个,持续时间前段较长(14 时),后段较短(9 时),分别为 14 日 06 时、15 日 10 时和 16 日 10—19 时,小时降水量 ≥ 20 mm 有 8 站次,短时强降水(小时降水量 ≥ 30 mm)出现了 2 站次,都为萍乡站,分别为 14 日 22—23 时的 41.6 mm 和 14 日 23 时—15 日 00 时的 55.0 mm。过程 2 主要降水时段也是 2 段,2 段降水持续时间接近,小时降水量 ≥ 20 mm 有 5 站次,强降水仅出现 1 站次,为新余站 15 日 06—07 时的 55.3 mm。过程 3 也有 2 段主降水时段,前段降水持续时间较短,后段降水持续时间较长,小时降水量 ≥ 20 mm 有 10 站次,强降水出现 1 站次,为萍乡站 7 日 04—05 时 39.3 mm。过程 4 对流性降水特征明显,表现为强降水出现的站次多,24 h 内出现了 7 站次,分别为樟树站、新干站、宜春站各 2 站次,新余站 1 站次,最大小时降水量最大为樟树站 22 日 04—05 时的 48.9 mm,过程小时降水量 ≥ 20 mm 有 12 站次。过程 5 同样表现为对流性降水特征,强降水出现站次达 8 站次,分别为樟树、新干各 3 站次,宜春和萍乡各 1 站次,最大小时降水量为萍乡站 10 日 05—06 时的 57.5 mm,小时降水量 ≥ 20 mm 有 14 站次。

相关性分析皮尔森(Pearson)相关系数是一种线性相关系数,用来反映 2 个变量线性相关程度, r 的绝对值越大,表明两者之间相关性越强。Pear-

son 相关系数 r 的表达式为^[29]:(1)1982 年 6 月 14—16 日(简称过程 1,过程流域降水量 203.2 mm,过程持续时间 3 d);(2)2012 年 7 月 15—16 日(简称过程 2,过程流域降水量 158.2 mm,过程持续时间 2 d);(3)2019 年 6 月 22 日(简称过程 3,过程流域降水量 139.8 mm,过程持续时间 1 d);(4)2019 年 7 月 7—9 日(简称过程 4,过程流域降水量 305.2 mm,过程持续时间 3 d);(5)2020 年 7 月 9—10 日(简称过程 5,过程流域平均降水量 149.2 mm,过程持续时间 2 d)。过程 4 累积降水量最大,达 305.2 mm,过程 3 降水强度最大,日降水量达 139.8 mm(表 1)。

son 相关系数 r 的表达式为^[29]:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{S_X} \right) \left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{S_Y} \right) \quad (1)$$

式中, n 为样本数, $\bar{X}$ 为样本 X_i 的平均值, $\bar{Y}$ 为样本 Y_i 的平均值。 r 值在 0.8 ~ 1.0 之间为极强相关,0.6 ~ 0.8 之间为强相关,0.4 ~ 0.6 之间为中等程度相关,0.2 ~ 0.4 之间为弱相关,0.0 ~ 0.2 则无相关性。

用 paired - samples t test 来进行配对样本 T 检验的分析,可以使用来自 2 个总体的配对样本,推断 2 个总体的均值差异的显著水平,从而说明得到的相关性分析的统计学意义。当 $P < 0.05$ 时,表示变量之间相关性显著,即在 0.05 水平显著;当 $P < 0.01$ 时,即在 0.01 水平显著。 P 越小表明结论越好,当 $P < 0.05$ 时,可认为 2 个变量之间相关性很显著。

2 天气背景

2.1 天气系统配置

袁河流域强降水属于比较典型的江西暴雨发生形势,低层辐合、高层辐散明显,主要表现为:袁河流域高层位于 100 hPa 南亚高压东部脊线一侧偏北下沉气流中,200 hPa 高空急流出口区右侧,负涡度平流中心值在 $-35 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 以下,辐散强度在 $10 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 以上,高空辐散明显(图 1a)。由图 1b 看出,中层 500 hPa 副热带高压位于太平洋西部,西南

地区东部存在一短波槽,主降水区位于 584 dagpm 线上西南气流中;700 hPa 切变线位于江西北部沿江一带,切变线南侧,存在风速 $\geq 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 西南急流,且有风速辐合,动力场上袁河流域附近位于正涡度平流和辐合的中心,正涡度平流在 $25 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 以上,辐合中心强度在 $-6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 左右。低层 850 hPa、925 hPa 切变线正好位于袁河流域上空,且基本重合,切变线南侧西南气流强盛,由图 1c 看出,袁河流域附近低层辐合抬升运动明显,低层正涡度平流在 $20 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 左右,辐合强度 $> -8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。由此可见,此种天气系统配置有利于袁河流域的强降水发生。

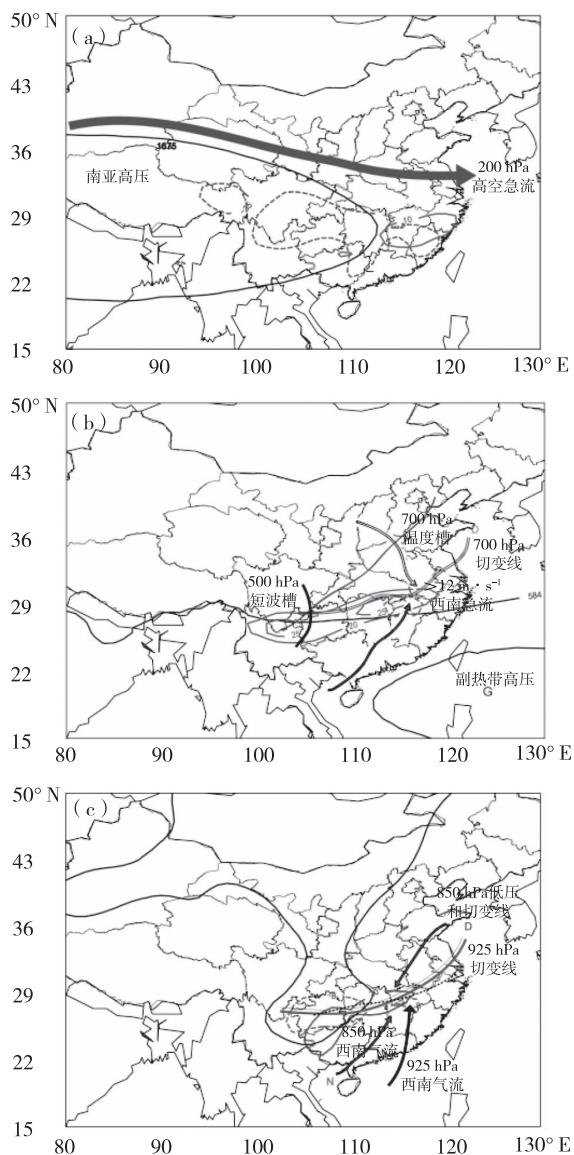


图1 江西袁河流域强降水天气系统平均场配置图:
100 hPa 和 200 hPa 高层系统配置(a);500 hPa 和 700 hPa 中层系统配置(b);850 hPa 和 925 hPa 低层系统配置(c)
Fig.1 Mean field configuration of heavy precipitation weather system in Yuanhe River Basin, Jiangxi Province;100 hPa and 200 hPa(a),500 hPa and 700 hPa(b),850 hPa and 925 hPa(c)

2.2 T-lnP 探空分析

袁河流域强降水发生前(5次过程发生前 20 h 平均)低层为湿区,中高层为相对干层,主要表现在 750 hPa 以下温度露点差 $< 4^\circ\text{C}$,750 ~ 350 hPa 温度露点差 $> 4^\circ\text{C}$,600 ~ 450 hPa 温度露点差 $> 5^\circ\text{C}$,整层大气可降水量约 82.7 mm。风随高度顺转,有暖平流,低空(850 ~ 700 hPa)西南风速在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,急流尚未形成;500 ~ 1000 hPa 为西南风,提供充沛的水汽,风垂直切变在 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。 0°C 层和 -20°C 层都较高,分别位于 650 hPa 和 450 hPa。对流有效位能较大 CAPE 约 $950 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,近地层有一定的对流抑制, CIN 约 $80 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2a)。250 hPa 温度递减率增加,说明高空有强降温,与地面的高温之间增加了温度梯度,促进热力不稳定,有利于对流发展。

袁河流域强降水发生过程中,袁河流域上空整层增湿,等露点线和等温线接近,温度露点差都在 3°C 以下,整体风随高度顺转,有暖平流,低层西南气流增强,775 ~ 600 hPa 出现西南急流,风垂直切变增大,500 ~ 1000 hPa 风速差在 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右; $0 \sim -20^\circ\text{C}$ 层变化不大,平衡高度由 169 hPa 降低到 325 hPa,自由对流高度由 806 hPa 升高到 764 hPa;降水开始后由于能量的释放,降水过程中的对流有效位能 CAPE 值和对流抑制 CIN 值都明显降低,分别为 $176 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $85 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2b)。

综上所述,袁河流域发生强降水的主要特征是:(1)袁河流域处于中低层(925 ~ 700 hPa)切变线上或略偏南几十公里处,同时也是低层辐合高层辐散的最强中心,西南气流较强,达 $12 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且存在风速和风向的辐合;(2)T-lnP 探空图上整层水汽充沛,湿区深厚,整层大气可降水量在 75 mm 以上,低层风向随高度顺转,有暖平流,降水开始前低层累积了一定不稳定能量 CAPE($1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)和对流抑制 CIN($100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右)有利于强降水的发生发展。(3)250 hPa 以上温度递减率增加,高空强降温增加了温度垂直梯度,促进了对流发展。

3 回波参数统计与回波特征

3.1 短时强降水的回波参数统计

由于过程 1 和过程 2 出现的年份较早(1982 年和 2012 年)无雷达资料,故只能分析过程 3、4、5 共 15 站次短时强降水回波特征(见表 2)。分析了 15 个短时强降水最强回波出现的时间,组合反射率(CR),回波顶高(ET),垂直积分液态水含量(VIL),

40 dBz 回波顶高 ($H40$), 速度场垂直结构 (VCS) 等。由表 2 看出, 15 次短时强降水 CR 在 45 ~ 55 dBz 之间, 平均值为 49.3 dBz, 其中 86.7% 个例最强 CR 为 50 dBz; ET 在 10 ~ 16 km 之间, 平均高度为 12.9 km, 大多数 (73.3%) ET 发展到 12 km 或以上高度;

VIL 在 10 ~ 20 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间, 平均值为 13.5 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; $H40$ 在 6 ~ 7 km 之间, 平均值为 6.1 km, 86.7% 的个例 40 dBz 发展高度在 6 km; VCS 普遍 (73.3%) 在正速度区, 负速度区和正负速度区各 2 次。

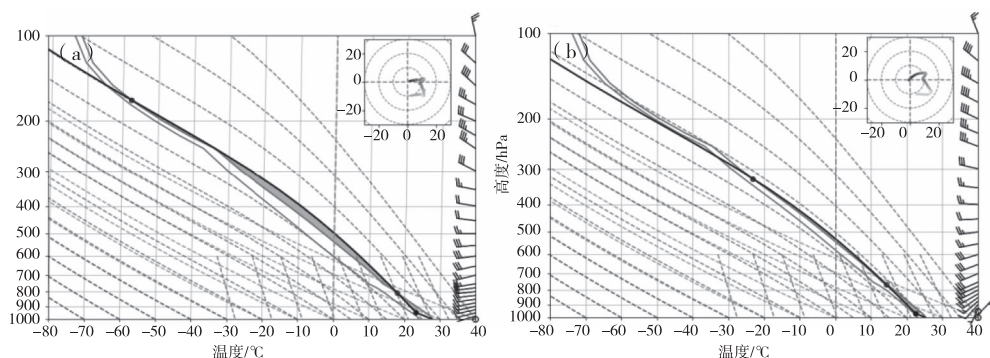


图 2 袁河流域 5 次过程发生前 20 h 平均 $T - \ln p$ (a), 5 次过程平均 $T - \ln p$ (b)

Fig. 2 Average $T - \ln p$ in the first 20 hours of 5 processes (a), and average $T - \ln p$ in 5 processes (b) in Yuanhe River Basin

表 2 袁河流域短时强降水宜春 (长沙) SA 雷达部分参数统计表

Tab. 2 Statistics of some parameters of Yichun (Changsha) SA Radar for short-term heavy precipitation in Yuanhe River Basin

序号	日期	短时强降水			雷达部分参数					雷达
		站名	时间	量级/ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	CR/dBz	ET/km	$VIL/\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	$H40/\text{km}$	$VRHI/\text{文字}$	
1	2019-6-21	樟树	23 时 22 分	42.0	50	15	15	6	负速度区	宜春
2	2019-6-22	新干	04 时 32 分	37.2	50	15	20	6	正速度区	宜春
3	2019-6-22	樟树	04 时 38 分	48.9	50	15	15	6	正速度区	宜春
4	2019-6-22	新余	05 时 23 分	34.7	50	12	15	6	正速度区	宜春
5	2019-6-22	新干	05 时 29 分	37.1	50	14	12	6	正速度区	宜春
6	2019-6-22	宜春	07 时 27 分	39.6	50	16	20	7	正速度区	长沙
7	2019-7-7	萍乡	04 时 30 分	39.3	50	11	12	6	正负速度层	宜春
8	2020-7-9	樟树	06 时 39 分	34.2	50	11	12	6	正速度区	宜春
9	2020-7-9	樟树	07 时 30 分	47.1	50	14	15	6	正速度区	宜春
10	2020-7-9	樟树	08 时 21 分	33.1	50	12	12	7	正速度区	宜春
11	2020-7-9	新干	09 时	34.3	50	12	10	6	正速度区	宜春
12	2020-7-9	新干	10 时 02 分	34.1	50	14	12	6	正速度区	宜春
13	2020-7-9	宜春	12 时 12 分	30.7	45	11	10	6	正速度区	长沙
14	2020-7-9	新干	14 时 27 分	35.6	45	10	10	6	正负速度区	宜春
15	2020-7-10	萍乡	05 时 19 分	57.6	50	12	12	6	负速度区	宜春
雷达参数最大值					50.0	16.0	20.0	7.0	正速度区 11 次	
雷达参数平均值					49.3	12.9	13.5	6.1	负速度区 2 次	

注:宜春 2 次短时强降水 (序号 6 和 13) 受到静锥区影响, 使用长沙 SA 雷达资料反演。

3.2 回波特征

短时强降水的典型回波如图 3 所示, 2020 年 7 月 10 日 05 时 19 分, 宜春雷达站组合反射率上 CR (图 3a), 萍乡附近强降水回波已经形成, 回波呈团状, 结构密实, 且范围较大, 最大回波强度在 50 ~ 55 dBz 之间, 回波发展的高度 ET (图 3b) 在 10 ~ 11 km 之间, 垂直积分液态水含量 VIL (图 3c) 在 10 ~ 12 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间; 垂直剖面 RCS 上, 40 dBz 回波顶高在 6

km 左右, 6 km 以下回波密实, 较均匀, 属于 40 dBz 强回波顶分布在 6 km 以下的高效降水回波特征 (图 3d); 垂直速度剖面 VCS (Velocity Cross Section), 整个回波区都为负速度控制, 风速大值区 (10 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上) 在 2 ~ 6 km 之间, 风速最大值为 19 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 出现在 4 km 高度左右, 4 km (离雷达 40 ~ 60 km) 以下风速随高度增加, 以上风速随高度减小 (图 3e)。

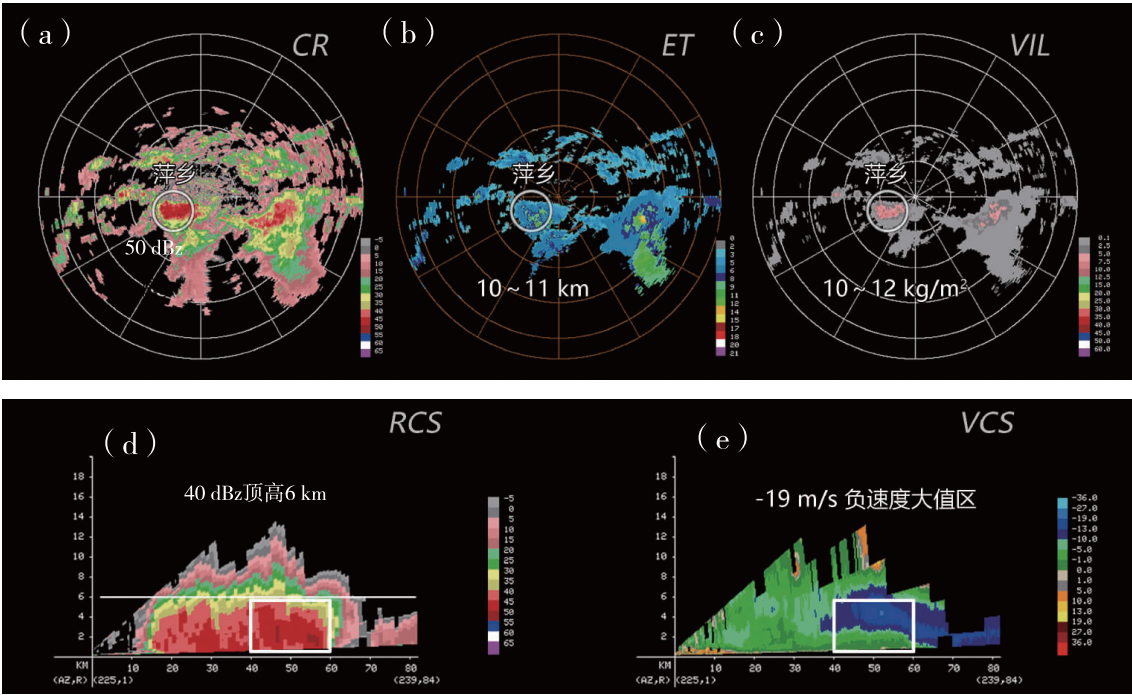


图3 2020年7月10日05时19分宜春SA雷达产品图:组合反射率CR(a)、回波顶高ET(b)、垂直液态含水量VIL(c)、反射率因子垂直剖面RCS(d)、径向速度垂直剖面VCS(e)

Fig.3 Yichun SA radar products at 05:19 on July 10, 2020, combined reflectivity CR(a), echo top height ET(b), vertical liquid water content VIL(c), reflectivity factor vertical profile RCS(d), radial velocity vertical profile VCS(e)

3.3 雷达拼图回波特征

图4为2020年7月9—10日连续暴雨天气过程中的2次强降水过程。图4a是2020年7月9日09时雷达拼图以及剖面,该时间之后新干站09—11时连续2h出现短时强降水(34.1mm、34.3mm),强降水持续时间较长。图4b为7月10日05时雷达拼图以及剖面,该时间之后萍乡站05—06时出现1h降水量达57.5mm的短时强降水,降水强度较大。对比分析图4a、图4b发现:(1)2次短时强降水的45dBz回波顶高都在6.5km以下,具有一致性;(2)造成新干站连续2h短时强降水回波范围较大,且强回波呈现东北西南的带状分布,回波带走向与850hPa西南急流走向一致时,回波由西南向东北方向移动,带状强回波多次经过新干站,列车效应导致新干站强降水时间较长,连续2h出现短时强降水;而造成萍乡短时强降水的回波呈现块状分布,结构密实,强回波区(45dBz)高度较低,降水效率较高,降水强度较大,但影响萍乡站的时间较短,只出现1h短时强降水。

由此可见,袁河流域短时强降水回波的组合反射率最强中心在50dBz左右,回波发展高度在13km左右,垂直积分液态水含量在 $12\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上,

40dBz回波顶高在6~7km,45dBz回波顶高在6.5km以下,强降水与大速度区有关,强降水的持续时间和强度与回波的形态和垂直结构有很大关系。

4 雨量与回波强度相关性分析

表1中过程3~过程5为袁河流域3次大暴雨天气过程,6站共出现15次 $\geq 30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时强降水。

通过对袁河流域3次大暴雨过程中,6个国家站的小时雨量与回波强度(dBz)进行线性拟合得到相关性(r),可知雨量与回波强度(dBz)有显著的相关性(r 为0.42~0.78, $P<0.05$)。

通过对雨量和回波强度的对应关系进行回归分析(图5a),雨量与回波强度趋势基本一致,对雨量记录按0~5mm、5~10mm按每5mm的间隔序列内分级为 x 轴,回波组合反射率CR对应的dBz均值为 y 轴,作回归分析,得到的回归方程为:

$$y = -0.0159x^6 + 0.4829x^5 - 5.7731x^4 + 34.523x^3 - 108.48x^2 + 173.01x - 75.595 \quad (2)$$

在每小时降水10mm以下时,随降水的增强,回波明显增强,之后增加速度放缓;每小时雨量在20~35mm区间的回波强度在45dBz左右波动。

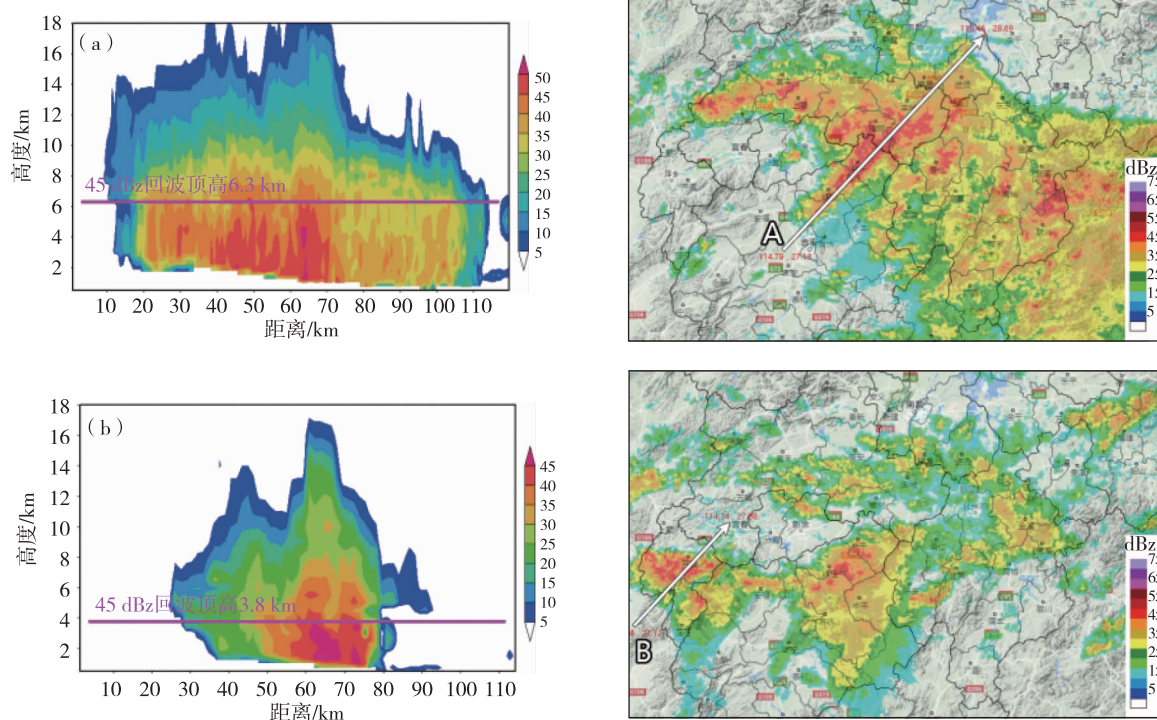


图 4 2020 年 7 月 9—10 日连续暴雨天气过程的雷达拼图回波垂直结构图(a:9 日 09 时沿 A 作垂直剖面,b:10 日 05 时沿 B 垂直剖面)

Fig. 4 Vertical structure of radar puzzle echo(a:vertical section along A at 09:00 on 9th,b:vertical section along B at 05:00 on 10th)

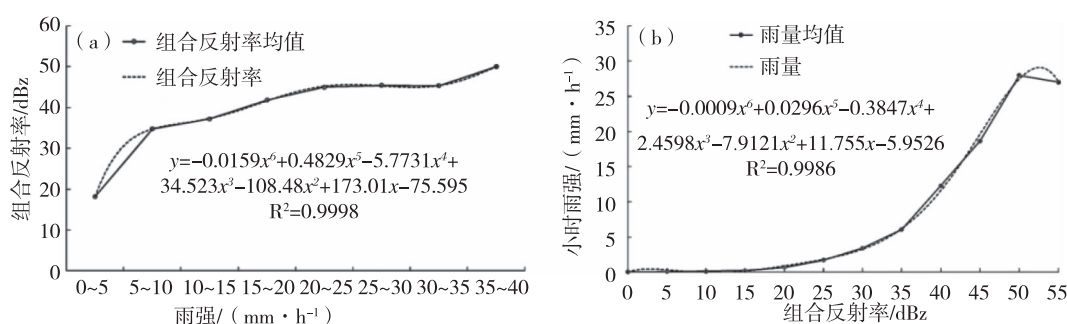


图 5 以雨量分级回波强度均值趋势(a)、以回波强度分级雨量均值趋势(b)

Fig. 5 Average trend of echo intensity graded by rainfall(a), average trend of rainfall graded by echo intensity(b)

对样本以回波强度进行分级雨量均值趋势,按以 5 dBz 的间隔分级为 x 轴, y 轴为小时雨强,作回归分析,得回归方程:

$$y = -0.0009x^6 + 0.0296x^5 - 0.3847x^4 + 2.4598x^3 - 7.9121x^2 + 11.755x - 5.9526 \quad (3)$$

如图 5b 所示,在回波强度为 15 dBz 之前,随回波强度增大雨量几乎不变,雨强接近为 0;当回波强度在 15 ~ 35 dBz 之间,雨强随回波强度加大缓慢加大;当回波强度在 35 ~ 50 dBz 之间,雨强随回波强度加大明显增加;而当回波强度加大到 50 dBz 以上时,雨强反而趋于下降。

5 结论与讨论

通过对江西袁河流域 5 次强降水的天气背景和雷达回波特征分析,得到以下结论:

(1) 袁河流域发生强降水形势场上,该区域于中低层(925 ~ 700 hPa)切变线上或略偏南几十公里处,同时也是低层辐合高层辐散的最强中心,西南气流较强 $12 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且存在风速和风向的辐合; $T - \ln P$ 探空图上整层水汽充沛,湿区深厚,整层大气可降水量在 75 mm 以上,低层风向随高度顺转,有暖平流,降水开始前低层累积了一定不稳定

能量 $CAPE(1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1})$ 和对流抑制 $CIN(100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1})$ 左右)有利于强降水的发生发展。250 hPa 以上温度递减率增加,高空强降温增加了温度垂直梯度,促进了对流发展。

(2)袁河流域短时强降水回波的组合反射率最强中心在 50 dBz 左右,回波发展高度在 13 km 左右,垂直积分液态水含量在 $12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右,40 dBz 回波顶高在 6~7 km,45 dBz 回波顶高在 6.5 km 以下,大部分强降水出现在正速度区,强降水的持续时间和强度与回波的形态和垂直结构有很大关系。

(3)通过对雨量和回波强度的对应关系进行回归分析,在每小时降水 10 mm 以下时,随降水的增强,回波明显增强,之后增加速度放缓;每小时雨量在 20~35 mm 区间的回波强度在 45 dBz 左右波动;当回波强度在 35~50 dBz 之间,雨强随回波强度加大明显增加;而当回波强度 $\geq 50 \text{ dBz}$ 时,雨强反而趋于下降或维持。

由于袁河流域短时强降水个例不多,还需要进一步收集个例,完善对袁河流域短时强降水的分析,这是今后努力的方向。

参考文献

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社,1980:1-71.
- [2] 李泽椿,湛芸,张芳华,等. 由河南“75·8”特大暴雨引发的思考[J]. 气象与环境科学,2015,38(3):1-12.
- [3] 陈明轩,俞小鼎,谭晓光,等. 北京 2004 年“7. 10”突发性对流强降水的回波特征分析[J]. 应用气象学报,2006,17(3):333-345.
- [4] 章丽娜,王秀明,熊秋芬,等. “6. 23”北京对流暴雨中尺度环境时空演变特征及影响因子分析[J]. 暴雨灾害,2014,33(1):1-9.
- [5] 鲁坦,徐文明,俞小鼎,等. 2003—2014 年河南春季暴雨特征及影响系统分析[J]. 气象与环境科学,2017,40(2):92-99.
- [6] 肖递祥,杨康权,俞小鼎,等. 四川盆地极端暴雨过程基本特征分析[J]. 气象,2017,43(10):1165-1175.
- [7] 陈元昭,俞小鼎,陈训来. 珠江三角洲地区重大短时强降水的基本流型与环境参量特征[J]. 气象,2016,42(2):144-155.
- [8] 王啸华,郑媛媛,徐芬,等. 2011 年江苏南部两场大暴雨对比分析[J]. 气象科学,2015,35(4):497-505.
- [9] 王福侠,俞小鼎,王宗敏,等. 河北暴雨的多普勒天气雷达径向速度特征[J]. 气象,2014,40(2):206-215.
- [10] 王丛梅,俞小鼎,李芷霞,等. 太行山地地形影响下的极端短时强降水分析[J]. 气象,2017,43(4):425-433.
- [11] 马中元,苏俐敏,湛芸,等. 一次强飑线及飑前中小尺度系统特征分析[J]. 气象,2014,40(8):916-929.
- [12] 陈鲍发,马中元. 江西局地冰雹 WebGIS 雷达拼图回波特征分析[J]. 气象与环境科学,2019,42(2):104-114.
- [13] 周芳,黄龙飞,肖潇. 江西省汛期局地短时强降水的时空分布特征[J]. 气象与减灾研究,2018,41(3):176-182.
- [14] 邓虹霞,智海,马中元,等. 2017 年江西汛期设区市区暴雨回波特征分析[J]. 气象科学,2019,39(2):274-284.
- [15] 李欢欢,马中元,肖云,等. 袁河流域大暴雨天气中尺度特征分析[J]. 气象水文海洋仪器,2021,38(4):34-36.
- [16] 彭莎,马中元,卢秋芳,等. 2019 年鹰潭 3 次大暴雨过程雷达回波特征分析[J]. 气象水文海洋仪器,2021,38(4):29-33.
- [17] 李翔婕,马中元,肖云,等. 袁河流域地面雨量与雷达回波强度对比分析[J]. 气象水文海洋仪器,2021,38(4):41-43.
- [18] 洪丽霞,马中元,罗燕,等. 宜丰县短时强降水云图回波数值产品特征分析[J]. 气象水文海洋仪器,2021,38(1):36-41.
- [19] 付超,湛芸,朱克云,等. 2010-2016 年江西省暖季短时强降水特征分析[J]. 气象,2019,45(9):1238-1247.
- [20] 陈鲍发,马中元,徐芬,等. 天气雷达风暴跟踪信息拼图技术设计与应用[J]. 气象科学,2020,40(6):838-848.
- [21] 杨芳园,甄廷忠,邹灵宇,等. 昆明市主城区一次局地短时强降水特征研究[J]. 沙漠与绿洲气象,2021,15(1):28-35.
- [22] 张金霞,张云惠,于碧馨,等. 基于多源资料的乌鲁木齐市两次极端短时强降水对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2021,15(3):10-19.
- [23] 杨涛,杨莲梅,张云惠,等. 新疆短时强降水天气系统环流配置及雷达回波特征[J]. 干旱气象,2021,39(4):631-640.
- [24] 郑婧,陈娟,徐星生,等. 一次低空急流加强下的暴雨过程成因分析[J]. 干旱气象,2020,38(3):411-422.
- [25] 王艳兰,伍静,唐桥义,等. 2019 年 6 月桂林三次强降水天气成因对比分析[J]. 暴雨灾害,2020,39(2):136-147.
- [26] 杨熠,武正敏,陈茜茜,等. 1960—2019 年遵义地区区域性暴雨特征分析[J]. 中低纬山地气象,2022,45(6):66-70.
- [27] 马志敏,朱莉,连钰,等. 云南两次局地暴雨过程水汽输送特征分析[J]. 中低纬山地气象,2022,45(6):50-58.
- [28] 张凌云,刘蕾,苏小玲. 桂北后汛期一次持续性暴雨天气过程分析[J]. 中低纬山地气象,2020,44(6):25-31.