

辛玮琦,马中元,谌云,等.宜丰短时强降水雷达回波特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(2):70-80.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2021.02.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



宜丰短时强降水雷达回波特征分析

辛玮琦^{1,2},马中元¹,谌云³,罗燕²,黎辉文²,洪丽霞²

(1.江西省气象科学研究所,江西 南昌 330046;2.宜丰县气象局,江西 宜丰 336300;
3.国家气象中心,北京 100081)

摘要:使用江西自动站数据、MICAPS 天气图资料、雷达拼图 CR 产品和单部雷达基数据等资料,采用统计分析、形态对比、特征提取等方法,对 2017—2019 年宜丰 4 次暴雨和大暴雨过程中的短时强降水天气的演变与回波特征进行分析,结果表明:(1)宜丰暴雨或大暴雨过程都出现了 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降水。(2)200 hPa 赣北处辐散分流区中,500 hPa 588 dagpm 线稳定维持在江西南部,赣北处于 850 hPa 西南急流的左侧及前端,形成上干下暖湿的不稳定层结;地面辐合线是短时强降水的主要触发系统。(3)在短时强降水期间,雷暴回波群中超级单体回波强度为 60~65 dBZ,短带回波强度为 50~55 dBZ,复合体回波强度为 55~60 dBZ,絮状回波带回波强度为 40~45 dBZ。(4)在单部雷达回波产品上,雷暴回波群、回波短带、复合单体回波和絮带状回波,组合反射率 CR 为 40~65 dBZ,回波顶高 ET 为 8~15 km,垂直液态水含量 VIL 为 10~60 kg/m²,50 dBZ 强回波顶高为 5~12 km。

关键词:宜丰;暴雨;短时强降水;天气系统;回波特征

中图分类号:P458.121.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2021)02-0070-11

江西是暴雨频发省份,尤其是短时强降水,具有明显的局地性和地域性,已经严重威胁到人们的生活和社会活动。因此,开展本地短时强降水研究具有十分重要的意义。

国内专家学者对暴雨中短时强降水进行了大量研究。常煜^[1]研究内蒙古地区短时强降水过程得出降水持续最长时间为 38 h,其中持续 3 h 所占比例最大。杨银等^[2]研究甘肃河东强降水主要发生在汛期(4—9 月)。何钰等^[3]分析云南短时强降水集中出现在 6—8 月,且一天中存在两个明显的峰值。毛冬

艳等^[4]分析西南地区短时强降水主要集中在 4—10 月。庄晓翠等^[5]研究新疆地区短时强降水发生前大多数环境参数阈值小于中国中东部地区。徐慧燕等^[6]研究地形陡峭区、喇叭口等特殊地形对短时强降水有增幅作用。

白晓平等^[7]根据能量天气学理论分类建立了西北地区东部短时强降水的低涡型、低槽型、两高切变型和西南气流型等 4 类天气学中尺度概念模型。黄艳等^[8]研究南疆短时强降水事件的天气型有三种概念模型:中亚低槽型、西伯利亚低槽型和西风短波槽型。陈元昭等^[9]分析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。魏晓雯等^[10]研究中尺度对流系统主要与非均匀加热导致的局地垂直环流及其伴随的冷空气卷入相联系。周芯玉等^[11]研究表明,60%以上的强降水发生前 3 h 低空急流便已经存在,超过 80%的过程强降水出现时有低空急流相配合。张超等^[12]通过分析 22 场短时强降水天

收稿日期:2019-11-18;修回日期:2020-05-26

基金项目:国家自然科学基金面上项目“江南地区暖区暴雨对流触发机制及组织结构研究”(41975001);中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2013M74);中国气象科学研究院开放课题(2012LASWB01);江苏省气象局北极阁开放研究基金(BJG201205)

作者简介:辛玮琦(1991—),男,工程师,主要从事气象综合业务与短临预报技术研究。E-mail: xinweiq0503@163.com

通信作者:马中元(1954—),男,高级工程师,主要从事短临天气预报技术研究。E-mail: mazhongyuan1@163.com

气过程,按照 500 hPa 影响系统分类,建立了西西伯利亚低槽、中亚低涡和西北气流 3 类环流形势及概念模型。曾勇等^[13]分析中亚低涡背景下新疆连续短时强降水具有明显的月变化。张小玲等^[14]研究得到与梅雨锋相伴的短时强降水系统回波演变模式主要为纬向型、经向型、转向型和合并型 4 类。

任丽等^[15]研究暴雨是由 MCS 活动造成的,每次短时强降水均与 TBB 低值中心相对应。王珏等^[16]研究归纳了湖北省 6 类极端短时强降水 MCS 模式,其中包括 4 类线状(尾随层状云、平行层状云、后向扩建类、邻近层状云类)和 2 类非线状(涡旋状类和层状云环绕类)MCS 模式。燕亚菲等^[17]研究卫星估算与地面实测的降水落区有较好的对应关系。狄潇泓等^[18]研究甘肃省短时强降水过程相关的特征云型共有 6 类:副热带高压边缘型、逗点云型、冷锋前部型、冷锋尾部与南亚高压东侧叠置型、冷涡后部型、弱冷锋前部椭圆形 MCS 型。常煜等^[19]研究中尺度对流系统(MCS)是造成内蒙古短时强降水的直接影响系统。

赵文等^[20]研究 1 h 降水量与 VIL(垂直累积液态含水量)有一定的滞后相关(滞后响应)。王楠等^[21]分析中 β 尺度对流云团对应于中 γ 尺度的超级单体回波,发展形成列车效应。李明等^[22]研究短时强降水雷达反射率因子呈低质心结构,具有热带降雨型特征。刘国强等^[23]分析短时强降水的雷达回波具有较明显的强回波低质心结构特征。

王楠等^[24]研究风廓线雷达能够探测到冷锋系统的精细化垂直风场结构,反映了冷锋的垂直结构信息。刘帆等^[25]分析发现,在暴雨雷达图上表现为低质心结构,最强回波中心(45~55 dBZ)高度在 6 km 以下。苏俐敏等^[26]研究短时强降水是由若干个 10 min 超短时强降水(≥ 10 mm/10 min)组成。这些研究成果为宜丰短时强降水天气的研究提供了理论依据。

本文使用江西省自动站实时数据、MICAPS 天气图资料、江西 WebGIS 雷达拼图产品和单部雷达产品等资料,采用统计分析、形态对比、特征提取等方法,对 2017—2019 年宜丰 4 次暴雨和大暴雨过程中的短时强降水天气的演变与特征进行分析,试图总结宜丰短时强降水天气的识别和预报方法,为做好短时强降水天气的预警预报和开展气象服务工作提供理论依据。

1 资料来源

降水资料来源于江西省自动站实时数据服务平台(江西省气象局内网 <http://10.116.32.81/>, 自动站

部分)。暴雨统计标准:以宜丰国家站 08—08 时(24 h)为日界,统计 24 h 内 ≥ 50 mm 的暴雨或大暴雨过程。

天气和云图资料来源于 MICAPS V4.5 系统平台,按照国家局天气系统中尺度综合分析要求进行中尺度分析,云图选择 FY2G 卫星红外云图。

雷电数据来源于 CIMISS 数据库。10 min 雷电数据与 10 min 雷达拼图、10 min 雨量数据相配合,在 WebGIS 雷达拼图上可以选择叠加使用。

雷达回波资料来源于江西 WebGIS 雷达拼图平台。这是由 24 部 S 波段多普勒天气雷达组成的雷达综合图(江西省气象局内网 <http://10.116.32.81/>, 2012 年开发),拼图间隔为 10 min,拼图精度为 1 km $\times$ 1 km。使用雷达拼图中组合反射率 CR 产品。

单部雷达产品来源于宜春 SA 天气雷达基数据反演产品。

2 降水实况

2.1 暴雨和大暴雨

2017—2019 年汛期,宜丰出现 4 次暴雨和大暴雨天气过程(图 1),24 h 最小雨量为 58.0 mm,最大雨量为 152.7 mm,4 次暴雨天气都出现 ≥ 30 mm $\cdot$ h⁻¹的短时强降水天气(表 1),可见,宜丰暴雨或大暴雨过程中常有短时强降水过程。

表 1 2017—2019 年宜丰 4 次暴雨和大暴雨与短时强降水统计

日 期	24 h 降水量		降水 维持 时间/h	1 h 短时强降水	
	时间	雨量/mm		时间	雨量/mm
2017 年 5 月 11—12 日	08—08 时	58.0	10	15—16 时	31.2
2018 年 4 月 12—13 日	08—08 时	63.1	11	20—21 时	31.8
2019 年 5 月 18—19 日	08—08 时	70.7	9	22—23 时	33.7
2019 年 6 月 8—9 日	08—08 时	152.7	19	09—10 时	38.6

注:连续 24 h 出现降水累计 ≥ 50 mm 为暴雨或大暴雨日。短时强降水出现多个小时,则分解成多个短时强降水过程。

这 4 次暴雨和大暴雨过程,宜丰都在暴雨中心(图 1)。2017 年 5 月 11—12 日(图 1a),江西有 3 个暴雨中心,宜丰雨量为 58.0 mm,降水维持 10 h;2018 年 4 月 12—13 日(图 1b),江西只有 1 个暴雨中心,宜丰雨量为 63.1 mm,降水维持 11 h;2019 年 5 月 18—19 日(图 1c),江西有 2 个暴雨中心,宜丰雨量 70.7 mm,降水维持 9 h;2019 年 6 月 8—9 日(图 1d),江西大范围暴雨和大暴雨,宜丰雨量最大,为 152.7 mm,降水维持 19 h。

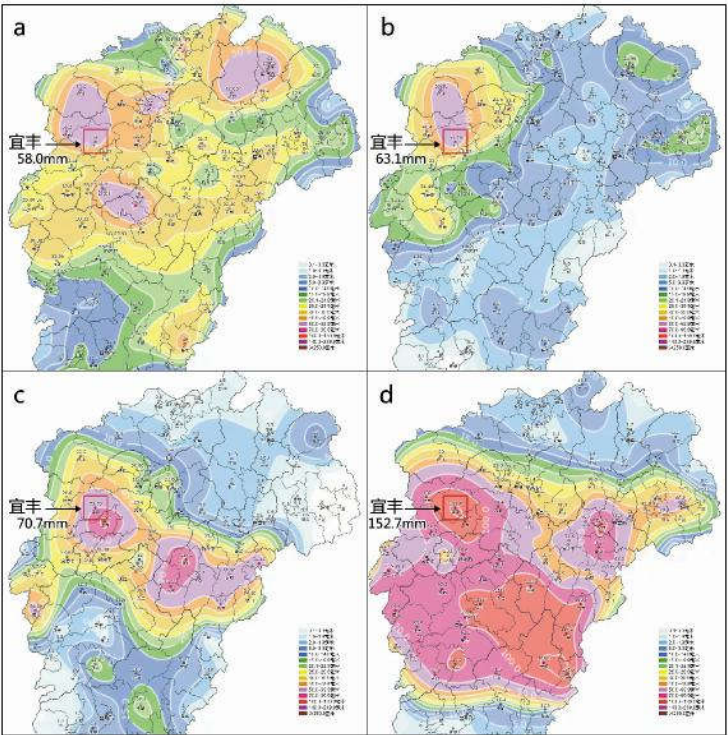


图 1 2017—2019 年江西 4 次暴雨过程雨量分布
(a 为 2017 年 5 月 11—12 日 08—08 时;b 为 2018 年 4 月 12—13 日 08—08 时;
c 为 2019 年 5 月 18—19 日 08—08 时;d 为 2019 年 6 月 8—9 日 08—08 时)

小时平均雨量是日雨量与维持时间的均值,小时均值越大,雨强越大。这 4 次暴雨和大暴雨过程的小时平均雨量分别为:5.80、5.74、7.86、8.04 mm,最后一次大暴雨的小时平均雨量最大。

2.2 短时强降水和超短时强降水

国家气象中心将短时强降水定义为 $\geq 20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降水;江西降水频繁,雨量较大,短时强降水被定义为 $\geq 30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 或 $\geq 50 \text{ mm}/2 \text{ h}$ 的降水。在宜丰 4 次暴雨和大暴雨过程中都出现了 1 h 短时强降水。2017 年 5 月 11 日 15—16 时,宜丰降水 31.2 mm;2018 年 4 月 12 日 20—21 时,宜丰降水 31.8 mm;2019 年 5 月 18 日 22—23 时,宜丰降水 33.7 mm;2019 年 6 月 8 日 09—10 时,宜丰降水 38.6 mm。可见, $\geq 30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时强降水最容易形成宜丰暴雨或大暴雨过程。

小时雨量比是小时平均雨量与短时强降水的比值,这 4 次暴雨和大暴雨过程的小时雨量比分别为:0.186、0.181、0.233、0.208,可见,小时雨量比都超过 0.18,小时雨量比越大,表明短时强降水的贡献率越大。

$\geq 30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时强降水是由 1 个或多个 $\geq 10 \text{ mm}/10 \text{ min}$ 的超短时强降水^[26]组成,连续几个超

短时强降水必将形成短时强降水(表 2)。

表 2 宜丰 4 次短时强降水中的超短时强降水统计

2017-05-11		2018-04-12		2019-05-18		2019-06-08	
时间	10 min 雨量/mm	时间	10 min 雨量/mm	时间	10 min 雨量/mm	时间	10 min 雨量/mm
15:00	3.2	20:00	2.9	22:00	10.3	09:00	0.4
15:10	11.3	20:10	2.7	22:10	10.3	09:10	1.7
15:20	13.8	20:20	9.1	22:20	12.5	09:20	6.1
15:30	1.0	20:30	12.9	22:30	10.4	09:30	13.8
15:40	0.4	20:40	4.8	22:40	0.5	09:40	9.2
15:50	4.1	20:50	1.5	22:50	0.0	09:50	5.9
16:00	0.6	21:00	0.8	23:00	0.0	10:00	1.9

江西汛期宜丰常出现暴雨或大暴雨,并伴随出现 $\geq 30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时强降水。在 $\geq 30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时强降水中, $\geq 10 \text{ mm}\cdot 10 \text{ min}^{-1}$ 的超短时强降水是形成 1 h 短时强降水的 6 个基本时间段。雷达拼图与降水资料统一是 10 min 间隔,根据 10 min 雷达拼图回波强度和 10 min 超短时强降水的出现,不必等到整点后才确定短时强降水,可以提前发布短时强降水的预警预报。

3 天气系统配置与层结稳定度分析

3.1 天气系统配置

3.1.1 2017年5月11日暴雨过程

2017年5月11日08时,200 hPa 赣北处于辐散分流区中,500 hPa 588 dagpm 线稳定维持在赣南南部,500 hPa 有阶梯槽东移,江西受槽前西南气流影响,干舌控制赣北、赣中,中低层有暖脊存在,赣北处中低层显著气流的左侧及前端且温度垂直递减率达到特征值,其中赣东北热力不稳定更明显($T_{850}=27\text{ }^{\circ}\text{C}$),有利于热力和动力不稳定持续增长,形成上干下暖湿的不稳定结构。地面图上,赣北、赣中及赣南有辐合线生成,赣东北则有辐合区存在,有利于短时强降水和雷暴大风的发生。

3.1.2 2018年4月12日暴雨过程

2018年4月12日08时,200 hPa 赣北赣中处于辐散区,500 hPa 低槽东移,江西大部区域受干舌控制,赣南北部、赣中、赣北位于700 hPa 偏西急流的左侧,赣中及赣北则位于850 hPa 西南急流的前端且有暖脊存在,上干下湿特征明显。地面图上,湖南东部、江西中部以及赣东北一带存在明显辐合区、辐合线,有利于抬升触发形成对流,易出现短时强降水,局地可能出现雷雨大风。

3.1.3 2019年5月18日暴雨过程

2019年5月18日08时,500 hPa 588 dagpm 线主体位于海上。500 hPa 上有低槽东移,江西受干舌控制。低层赣北南部、赣中及赣南地区存在湿度大值区,上干下湿特征明显。925 hPa 赣中至赣东北一线存在明显辐合,动力抬升条件好,700 hPa 赣北南部有露点锋生成,有利于触发对流。地面图上,赣北南部、赣中东部有辐合线生成,有利于地面辐合抬升的加强,产生短时强降水。

3.1.4 2019年6月7日暴雨过程

2019年6月7日20时,200 hPa 赣北南部处于辐散分流区,500 hPa 588 dagpm 线位于赣南境内,势力较强,呈东西向水平分布,500 hPa 江西受槽后偏北气流控制,冷平流强盛,湖南东北部边界存在显著降温区及温度直减率大值区,低层赣北南部受显著湿区控制,水汽呈“上下干、中间湿”分布,有显著南风吹向北部,低层切变位于赣北并逐渐南压,温度对比明显,水平斜压不稳定增长,热力和动力不稳定度强,江西赣北南部及赣中易产生强降水。

由此可见,200 hPa 赣北处于辐散分流区中,500 hPa 588 dagpm 线稳定维持在赣南南部,500 hPa 有阶梯槽东移,中低层有暖脊存在,赣北处于中低层

显著气流的左侧及前端,有利于热力和动力不稳定因素持续增长,形成上干下暖湿的不稳定层结;地面辐合线生成有利于暴雨或大暴雨,以及短时强降水的发生。

3.2 层结稳定度分析

大气层结稳定度决定了对流天气是否发生,只有具备一定的不稳定能量,对流天气才可能发生发展。2017—2019年,宜丰出现4次暴雨和大暴雨过程,因为宜丰距离南昌探空站最近,所以选择南昌探空资料作为分析层结稳定度的数据源。

2017年5月11日08时南昌站850~600 hPa 湿度较大,其余层较干,CAPE 值为22.9 J/kg,CIN 达到480.6 J/kg,K 指数为33 $^{\circ}\text{C}$,表明存在明显的不稳定能量。925 hPa 以下存在逆温层,有利于不稳定能量的累积, $T_{850-500}$ 达到28 $^{\circ}\text{C}$,达到了江西发生强对流的特征值。

2018年4月12日08时南昌站700 hPa 以下湿度较大,700 hPa 以上较干,呈“喇叭口”状,上干下湿有利于强对流出现,CAPE 值达到94.7 J/kg,呈细长条状,K 指数为35 $^{\circ}\text{C}$,表明存在明显的不稳定能量,近地面为偏东北风,925 hPa 以上为偏西风,有较强的风垂直切变,有利于对流性天气的出现,同时零度层高度在4.2 km 左右,EL 高度在-30 $^{\circ}\text{C}$ 层,有利于对流性天气的出现。

2019年5月18日08时南昌站700 hPa 以下湿度较大,700 hPa 以上较干,呈“喇叭口”状,上干下湿有利于强对流的出现,CAPE 值达到55 J/kg,呈细长条状,K 指数为32 $^{\circ}\text{C}$,表明存在明显的不稳定能量,低层偏东风,850 hPa 转为偏西风,且风速逐渐加大,有较强的风垂直切变,有利于对流性天气的出现。

2019年5月7日20时南昌站700 hPa 以下湿度较大,700 hPa 以上较干,上干下湿有利于强对流的出现,CAPE 值达到1338.6 J/kg,K 指数为30 $^{\circ}\text{C}$,表明存在明显的不稳定能量,低层偏南风,往上顺转转为偏西风,且风速逐渐加大,有较强的风垂直切变,有利于对流性天气的出现。

这4次暴雨过程的南昌探空物理量数据见表3,CAPE 对流有效位能为377.8 J/kg,CIN 对流抑制有效位能为153.4 J/kg,DCAPE下沉对流有效位能为305.5 J/kg,A 指数为-7 $^{\circ}\text{C}$,K 指数为32.5 $^{\circ}\text{C}$,SI 沙氏指数为-0.37 $^{\circ}\text{C}$,SSI 风暴强度指数为253.6 $^{\circ}\text{C}$,SWEAT 强天气威胁指数为238.5 $^{\circ}\text{C}$,ZH 零度层高度为4719 m, H_{20} 高度为7349 m,均值对江西对流

性天气有较好的指示意义。

4 短时强降水回波演变

江西 WebGIS 雷达拼图是由 24 部多普勒天气雷达图的叠加显示, 雷达探测覆盖面积远大于单部雷达, 弥补了单部雷达挡角盲区和远距离电磁波衰减等缺陷, 适宜针对中小尺度雷暴系统的观测与跟踪。同时, 雷达拼图保留了单部雷达 1 km×1 km 的分辨率精度。

4.1 2017 年 5 月 11 日暴雨过程回波演变

2017 年 5 月 11—12 日, 宜丰雨量为 58.0 mm, 降水维持时间 10 h(图 1a, 表 1)。15—16 时, 宜丰出现 31.2 mm 的短时强降水, 占日雨量的 54%。图 2 给出了宜丰短时强降水前后 4 h 的江西 WebGIS 雷达拼图 CR 产品回波演变。

13 时(图 2a), 影响宜丰的回波系统是西南移动过来的雷暴回波群, 回波群北起萍乡上栗北部, 南至

万安遂川南部, 呈不连续南北向回波群。雷暴回波群由若干个雷暴单体回波组成, 单体处在各自不同发展阶段, 回波强度为 55~60 dBZ, 整体处在不断发展期间。14 时(图 2b), 雷暴回波群体移近宜丰, 群内单体回波进一步发展, 位于宜丰南面的超级单体回波强度达到 60~65 dBZ。15 时(图 2c), 雷暴回波群中超级单体回波开始影响宜丰, 回波强度为 60~65 dBZ (紫色回波), 在紫色回波上伴随较多雷电。15—16 时, 宜丰出现 31.2 mm 短时强降水。16 时(图 2d), 超级单体移出宜丰, 强度有所减弱, 继续影响下游地区。

这次过程受 500 hPa 低槽东移, 700~850 hPa 有低涡切变和西南急流, 地面处于高压后部, 有弱冷空气影响, 江西出现强对流天气。雷达拼图回波出现超级单体、回波群、飚线带状、弓状回波等结构。全省出现 4 站冰雹、11 站大风(国家站)和 76 站大风(区域站), 最大风速达 37.1 m·s⁻¹。这次超级单体回波影响

表 3 4 次暴雨过程南昌探空物理量统计

时间	CAPE/(J/kg)	CIN/(J/kg)	DCAPE/(J/kg)	A/℃	K/℃	SI/℃	SSI/℃	SWEAT/℃	ZH/m	H ₋₂₀ /m
2017-05-11T08	22.9	480.6	241.8	-11	33	0.68	261.2	204.3	4 595	7 550
2018-04-12T08	94.7	79.3	24.5	0	35	-0.09	267.6	296	4 249	7 349
2019-05-18T08	55	33.3	940.1	-28	32	1.98	247.8	223.1	5 145	8 307
2019-06-07T20	1 338.6	20.5	15.4	11	30	-0.08	237.7	230.5	4 887	8 508
平均值	377.8	153.4	305.5	-7	32.5	-0.37	253.6	238.5	4 719	7 929

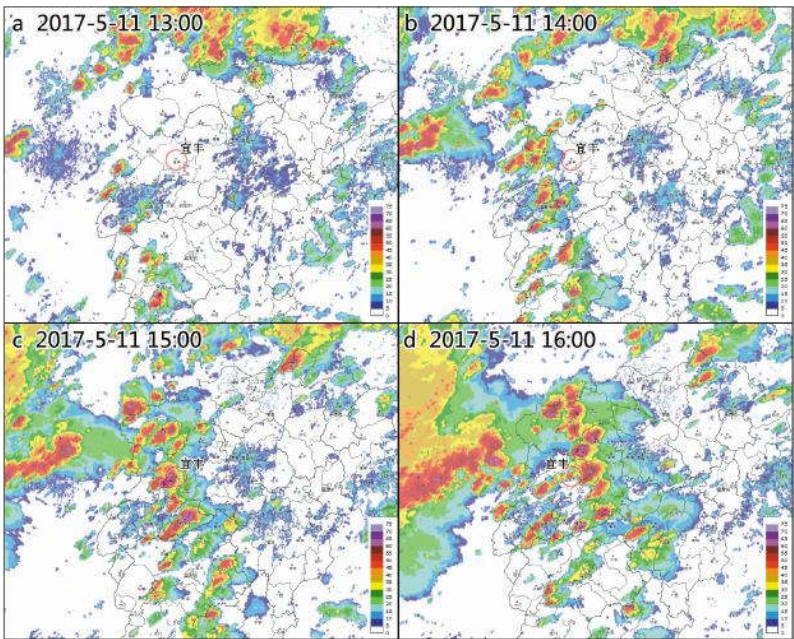


图 2 2017 年 5 月 11 日江西 WebGIS 雷达拼图 CR 产品回波演变

宜丰只出现短时强降水和 6~8 级大风,没有出现冰雹。

4.2 2018 年 4 月 12 日暴雨过程回波演变

2018 年 4 月 12—13 日,宜丰雨量为 63.1 mm,降水维持时间 11 h(图 1b,表 1)。20—21 时,宜丰出现 31.8 mm 短时强降水,占日雨量的 50%。

18 时,影响宜丰的回波系统是一条狭窄东—西走向的短带回波,在较长辐合线上生成一条西北—东南走向的回波带,带上存有几条较小尺度的短带回波。这条短带回波整体缓慢北抬,单体沿高空风向东移动,回波强度为 50~55 dBZ,宜丰处在辐合线较宽广的回波之中。19 时,短带回波发展并向宜丰逼近,回波强度为 55~60 dBZ。20 时,短带回波强中心开始影响宜丰,回波强度为 55~60 dBZ,造成宜丰 20—21 时出现 31.8 mm 的短时强降水。21 时,短带回波慢慢移过宜丰,回波强度为 55~60 dBZ,但降水依然维持。由于短带回波北抬速度较慢,带上强单体回波不断向东移动,路径宜丰,造成宜丰 63.1 mm 的暴雨。

4.3 2019 年 5 月 18 日暴雨过程回波演变

2019 年 5 月 18—19 日,宜丰雨量 70.7 mm,降水维持时间 9 h(图 1c,表 1)。22—23 时,宜丰出现 33.7 mm 短时强降水,占日雨量的 48%。图 5 给出了宜丰短时强降水前后 4 h 的江西 WebGIS 雷达拼图 CR 产品回波演变图。

20 时(图 3a),由多个强回波单体组成的复合体回波系统,从宜丰西面偏北方向侵入,在同一大云罩

下,复合体回波面积较大,回波强度为 55~60 dBZ,并伴有强雷电。21 时(图 3b),复合体回波逼近宜丰,其中一块回波发展成为超级单体结构,回波强度 60~65 dBZ,雷电开始增多(紫色×为 10 min 雷电位置),几乎覆盖整个超级单体回波。22 时(图 3c),超级单体回波开始影响宜丰南部地区,回波强度为 60~65 dBZ,雷电维持。超级单体回波偏离宜丰南侧,主要影响上高区域,造成上高 22—23 时出现 35.0 mm 的短时强降水;宜丰回波强度为 55~60 dBZ,22—23 时只出现 33.7 mm 的短时强降水。从上高强回波垂直结构图上分析,22:02 出现上下结构正负速度区,差值达到 32 kg/m²。23 时(图 3d),复合体回波移出宜丰、上高,继续对下游地区产生影响。

2019 年 5 月 18 日,由复合体回波中的强单体发展成为超级单体的回波,强度达到 60~65 dBZ,回波顶高 ET 为 18 km,50 dBZ 强回波顶高为 12 km,中低空悬挂高度为 1~12 km,具备产生冰雹的条件。2019 年 5 月 18 日 21:45,宜丰县气象台发布了冰雹橙色预警信息(摘自中国天气网),但针对这次超级单体过程,宜丰并没有冰雹和雷暴大风的气象记录,可能位置偏南或在乡镇村出现了冰雹。

4.4 2019 年 6 月 8 日暴雨过程回波演变

2019 年 6 月 8—9 日,江西大范围暴雨和大暴雨,宜丰雨量 152.7 mm 为最大,降水维持时间 19 h(图 1d,表 1)。09—10 时,宜丰出现 38.6 mm 短时强降水,占日雨量的 25%。

07 时,大范围絮状回波一直在宜丰北部停留,

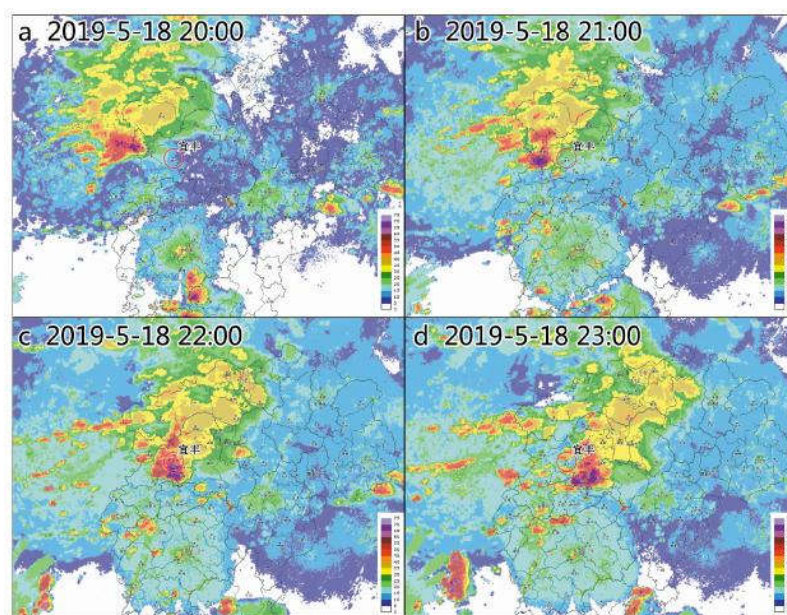


图 3 2019 年 5 月 18 日江西 WebGIS 雷达拼图 CR 产品回波演变

宜丰西南面不断有对流回波移入,并有与北面回波混合趋势。大片絮状回波的强度比较弱,只有40~45 dBZ。08时,西南回波与絮状回波合并,较强回波集中在宜丰、上高一带,回波强度为45~50 dBZ。09时,宜丰开始出现38.6 mm短时强降水,回波强度并不强,回波强度为45~50 dBZ,但降水效率很高,降水强度比较稳定,降水时间持续19 h,造成宜丰出现152.7 mm的大暴雨。10时,大片絮状回波一直在宜丰停留,降水持续。大片絮状回波中,有多个分散较强雷暴带,分散的雷暴带逐步合并,在大片絮状回波的南侧形成东南—西北雷暴带。

由此可见,雷暴回波群呈不连续南北走向,雷暴回波群中单体回波强度为60~65 dBZ,伴随较强雷电,宜丰出现短时强降水。短带回波强度为50~55 dBZ,由于短带回波北抬速度较慢,带上强单体回波不断向东移动,造成宜丰短时强降水。由多个强回波单体组成的复合体回波系统,回波面积较大,回波强度为55~60 dBZ,并伴有强雷电,同时造成宜丰、上高两地出现短时强降水。宜丰西南对流回波与宜丰大片絮状回波混合趋势,尽管回波比较弱,回波强度为40~45 dBZ,但降水效率很高,降水强度稳定,降水持续时间长,同样可以形成宜丰大暴雨。

5 短时强降水雷达回波产品

短时强降水在单部雷达产品上具有多种形态特征,尤其是在CR、ET、VIL水平结构和垂直剖面反射率因子、垂直剖面径向速度上都具有明显特征,例如:超级单体回波的中气旋结构、强回波单体的上下速度层等。

5.1 短时强降水回波水平结构

2017年5月11日14:59(图4a,4b,4c),从宜丰西南方移来的雷暴回波群中的强回波单体,组合反射率CR为60~65 dBZ,ET为14~15 km,垂直液态水含量VIL为45~50 kg/m²,宜丰15—16时出现31.2 mm的短时强降水。

2018年4月12日20:02(图4d,4e,4f),从宜丰西面移来的雷暴回波短带,组合反射率CR为50~55 dBZ,回波顶高ET为8~9 km,垂直液态水含量VIL为15~20 kg/m²,宜丰20—21时出现31.8 mm短时强降水。短带回波并不强,但其走向与移动方向一致,表示有“列车效应”,造成了宜丰短时强降水天气。

2019年5月18日22:02(图4g,4h,4i),从宜丰西北方向移动过来的复合单体回波,发展旺盛。复合

体有两块单体,影响宜丰的回波并不强,组合反射率CR为45~50 dBZ,回波顶高ET为9~10 km,垂直液态水含量VIL为10~15 kg/m²,宜丰22—23时出现33.7 mm的短时强降水。影响上高的回波很强,组合反射率CR为60~65 dBZ,回波顶高ET为14~15 km,垂直液态水含量VIL达60 kg/m²,上高22—23时出现35.0 mm的短时强降水,并且出现超短时强降水(表4)。上高回波具有超级单体回波结构。

表4 2019年5月18日宜丰、上高短时强降水对比

2019-05-18 宜丰		2019-05-18 上高	
时间	10 min 降水量/mm	时间	10 min 降水量/mm
22:00	10.3	22:00	0.0
22:10	10.3	22:10	0.7
22:20	12.5	22:20	5.2
22:30	10.4	22:30	13.3
22:40	0.5	22:40	7.8
22:50	0.0	22:50	6.7
23:00	0.0	23:00	1.3
合计	33.7		35.0

2019年6月8日09:02(图4j,4k,4l),宜丰受宽广的絮带状回波影响,带上单体并不强,组合反射率CR为40~45 dBZ,回波顶高ET为8~9 km,垂直液态水含量VIL为10~12 kg/m²,但降水效率很高,宜丰09—10时出现38.6 mm短时强降水。絮带状回波并不强,但其走向与移动方向一致,在宜丰产生“列车效应”,连续降水19 h,造成宜丰152.7 mm的大暴雨天气,属于江西“弱回波暴雨”。

5.2 短时强降水回波垂直结构

垂直速度剖面RHI是在平面PPI上沿着雷达径向做剖面,即从原点沿方位线向外做剖面。

2017年5月11日14:59(图5a,5b),从宜丰西南方移来的雷暴回波群中的强回波单体,在垂直剖面反射率因子图上,反射率因子R为60~65 dBZ,回波顶高ET为17 km,50 dBZ强回波顶高为8 km,中低空悬挂高度为2~8 km。在垂直剖面径向速度图上,低层远处为负(绿色),近处为正(黄色),表示低层有风向辐合。高层远处为大正值(红色),近处为小正值(黄色),表示高层有风速辐散。

2018年4月12日20:02(图5c,5d),从宜丰西面来的雷暴回波短带,在垂直剖面反射率因子图上,反射率因子R为50~55 dBZ,回波顶高ET为12 km,50 dBZ强回波顶高为5 km,中低空悬挂高度为2~5 km,属于低质心强降水。在垂直剖面径向速度图

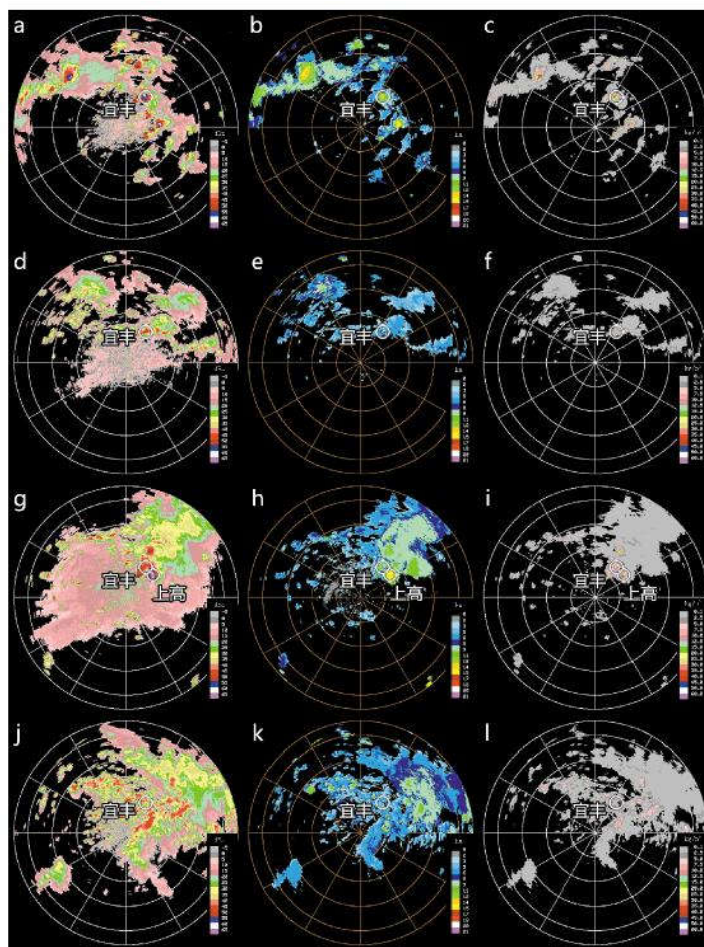


图4 宜丰短时强降水宜春站雷达回波 PPI 产品结构图

(a,b,c 分别为 2017-05-11T14:59 组合反射率 CR、回波顶高 ET、垂直液态水含量 VIL;
d,e,f 分别为 2018-04-12T20:02 组合反射率 CR、回波顶高 ET、垂直液态水含量 VIL;
g,h,i 分别为 2019-05-18T22:02 组合反射率 CR、回波顶高 ET、垂直液态水含量 VIL;
j,k,l 分别为 2018-06-08T09:02 组合反射率 CR、回波顶高 ET、垂直液态水含量 VIL)

上,低层有逆风区,顶高在 3 km。

2019 年 5 月 18 日 22:02(图 5e,5f),从宜丰西北方向移动过来的与移动方向一致的复合单体回波,在宜丰垂直剖面反射率因子图上,反射率因子 R 为 45~50 dBZ,回波顶高 ET 为 16 km,50 dBZ 强回波顶高为 6 km,中低空悬挂高度为 1~6 km,属于低质心强降水。在上高垂直剖面反射率因子图上,反射率因子 $R \geq 65$ dBZ,回波顶高 ET 为 18 km,50 dBZ 强回波顶高为 12 km,中低空悬挂高度为 1~12 km。在宜丰垂直剖面径向速度图上,3 km 以下为负速度区,正速度区中存在 19 kg/m^2 的速度核。在上高垂直剖面径向速度图上,强回波区具有上下结构正负速度层,切变差值($-5 \sim 27 \text{ kg/m}^2$)达到 32 kg/m^2 。这种上下气流结构,依据垂直速度判定法则,当降水维持时,低层的风与高层的风相反,往往低层是东南风,

高层是西北风。

2019 年 6 月 8 日 09:02(图 5g,5h),宜丰受宽广的絮状回波影响,其中单体并不强,在垂直剖面反射率因子图上,反射率因子 R 为 40~45 dBZ,回波顶高 ET 为 14 km,50 dBZ 强回波顶高为 5 km,中低空悬挂高度为 3~5 km,属于低质心强降水。在垂直剖面径向速度图上,8 km 以下径向速度为一致的正速度区($5 \sim 19 \text{ kg/m}^2$),8 km 以上出现负速度区($-1 \sim -5 \text{ kg/m}^2$),降水过程比较平稳。

由此可见,西风带系统移过宜丰的雷暴回波群中的强回波单体、雷暴回波短带、复合单体回波和絮状回波,组合反射率 CR 为 40~65 dBZ,回波顶高 ET 为 8~15 km,垂直液态水含量 VIL 为 $10 \sim 60 \text{ kg/m}^2$ 。回波顶高 ET 为 12~18 km,50 dBZ 强回波顶高为 5~12 km,中低空悬挂高度为 1~8 km。6 km 以下的

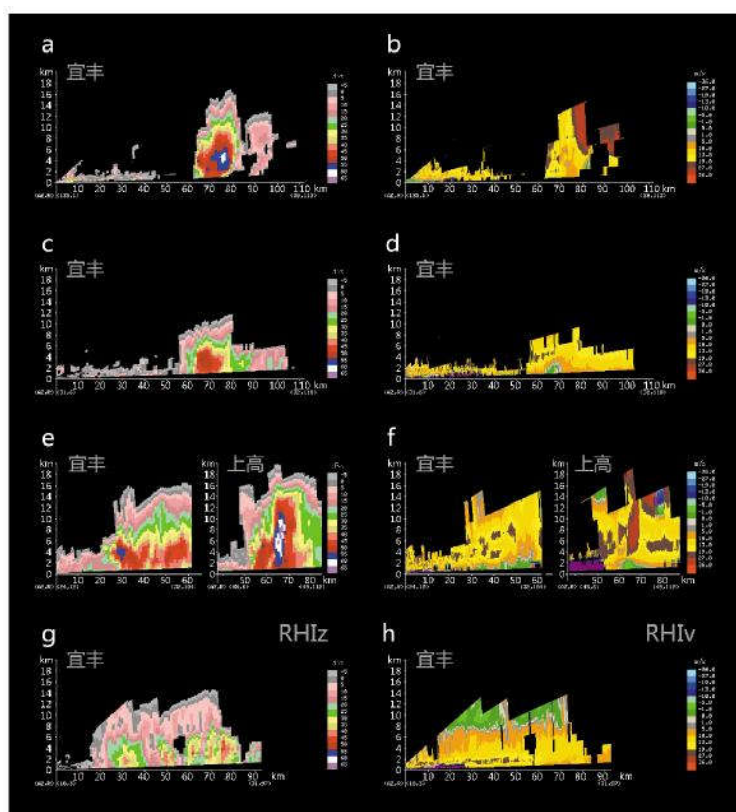


图5 宜丰短时强降水宜春(Z9795)雷达回波 RHI 产品结构

(a、c、e、g 分别为 2017-05-11T14:59、2018-04-12T20:02、2019-05-18T22:02、2019-06-08T09:02 的反射率因子 RHIz;
b、d、f、h 分别为 2017-05-11T14:59、2017-05-11T14:59、2017-05-11T14:59、2017-05-11T14:59 的径向速度 RHIv)

低质性强降水,降水效率高于 50 dBZ 强回波伸展到 12 km 的强对流性强降水。强回波单体往往形成短时强降水,絮状回波虽然不强,若其走向与移动方向一致,容易产生“列车效应”,连续降水数小时,也可形成暴雨和大暴雨天气。径向速度以正速度区为主(10~19 kg/m²),速度区中有小块负速度点。径向速度伴有较弱的速度对(-1~10 kg/m²),负速度区顶高在 3 km。3 km 以下为负速度区,正速度区中存在 19 kg/m² 的速度核。强回波区具有上下结构正负速度层,切变差值(-5~27 kg/m²)达到 32 kg/m²。8 km 以下径向速度为一致的正速度区(5~19 kg/m²),8 km 以上出现负速度区(-1~-5 kg/m²),降水过程比较平稳。

6 结论

使用江西省自动站实时数据、MICAPS 天气图资料、江西 WebGIS 雷达拼图产品和单部雷达产品等资料,采用统计分析、形态对比、特征提取等方法,对 2017—2019 年宜丰 4 次暴雨和大暴雨过程中的短时强降水天气的演变与特征进行分析,得到以下结论:

(1)在宜丰暴雨过程中,伴有 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降水出现;在短时强降水中, $\geq 10 \text{ mm}/10 \text{ min}$ 超短时强降水是形成 1 h 短时强降水的基本时段,根据雷达拼图 CR 产品和 $\geq 10 \text{ mm}/10 \text{ min}$ 超短时强降水的演变,可以提前发布 1 h 短时强降水的预警预报。

(2)200 hPa 赣北处于辐散分流区中,500 hPa 588 dagpm 线稳定维持在赣南南部,500 hPa 有阶梯槽东移,中低层有暖脊存在,赣北处于中低层显著气流的左侧及前端,有利于热力和动力不稳定因素持续增长,形成上干下暖湿的不稳定层结;地面辐合线生成有利于暴雨、大暴雨及短时强降水的发生。

(3)雷暴回波群中单体回波强度为 60~65 dBZ,伴随较强雷电。短带回波强度为 50~55 dBZ,短带回波整体北抬,带上强单体回波不断向东移动。复合体回波面积较大,回波强度为 55~60 dBZ,并伴有强雷电。大片絮状回波强度为 40~45 dBZ,但降水效率很高,降水稳定,降水时间长,同样可以形成宜丰大暴雨。

(4)雷暴回波群、回波短带、复合单体回波和大片絮状回波,组合反射率 CR 为 40~65 dBZ,回波顶

高 ET 为 8~15 km, 垂直液态水含量 VIL 为 10~60 kg/m². 50 dBZ 强回波顶高为 5~12 km, 中低空悬挂高度为 1~8 km.

参考文献:

- [1] 常煜. 内蒙古夏季降雨过程持续性特征 [J]. 高原气象, 2019, 38(4): 817-828.
- [2] 杨银, 李岩瑛, 陈豫英, 等. 基于 Copula 函数的甘肃河东短时强降水特征分析[J]. 气象, 2019, 45(5): 632-640.
- [3] 何钰, 陈小华, 杨素雨, 等. 基于“配料法”的云南短时强降水预报概念模型建立[J]. 气象, 2018, 44(12): 1542-1554.
- [4] 毛冬艳, 曹艳察, 朱文剑, 等. 西南地区短时强降水的气候特征分析[J]. 气象, 2018, 44(8): 1042-1050.
- [5] 庄晓翠, 赵江伟, 李健丽, 等. 新疆阿勒泰地区短时强降水流型及环境参数特征[J]. 高原气象, 2018, 37(3): 675-685.
- [6] 徐慧燕, 邓霞君, 周国华. 丽水地区短时强降水时空分布特征及成因分析[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(3): 44-49.
- [7] 白晓平, 王式功, 赵璐, 等. 西北地区东部短时强降水概念模型[J]. 高原气象, 2016, 35(5): 1248-1256.
- [8] 黄艳, 俞小鼎, 陈天宇, 等. 南疆短时强降水概念模型及环境参数分析[J]. 气象, 2018, 44(8): 1033-1041.
- [9] 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.
- [10] 魏晓雯, 梁萍, 何金海. 上海地区不同类型短时强降水的大尺度环流背景特征分析[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(2): 69-75.
- [11] 周芯玉, 廖菲, 胡东明. 利用风廓线雷达对广东前汛期短时强降水类暴雨过程低空风场特征的研究[J]. 热带气象学报, 2019, 35(3): 332-342.
- [12] 张超, 贾健. 乌鲁木齐市短时强降水分布特征及环境条件分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 41-47.
- [13] 曾勇, 杨莲梅. 中亚低涡背景下新疆连续短时强降水特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(4): 67-73.
- [14] 张小玲, 余蓉, 杜牧云. 梅雨锋上短时强降水系统的发展模态[J]. 大气科学, 2014, 38(4): 770-781.
- [15] 任丽, 赵玲, 马国忠, 等. 台风残涡北上引发东北地区北部大暴雨的中尺度特征分析[J]. 高原气象, 2018, 37(6): 1671-1683.
- [16] 王珏, 张家国, 吴涛, 等. 湖北省极端短时强降水 MCS 类型及特征分析[J]. 气象, 2019, 45(7): 931-944.
- [17] 燕亚菲, 谈建国, 崔林丽, 等. 利用葵花 8 号(Himawari-8)高时空分辨率的红外亮温资料估计台风莫兰蒂的短时强降水及其演变[J]. 气象, 2019, 45(3): 318-329.
- [18] 狄潇泓, 王小勇, 肖玮, 等. 高原边坡复杂地形下短时强降水的云型特征分类[J]. 气象, 2018, 44(11): 1445-1453.
- [19] 常煜, 马素艳, 仲夏. 内蒙古夏季典型短时强降水中尺度特征[J]. 应用气象学报, 2018, 29(2): 232-244.
- [20] 赵文, 张强, 赵建华. 陇东南地区强降水过程与雷达 VIL 产品的定量关系研究[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 528-537.
- [21] 王楠, 李萍云, 井宇, 等. 黄土高原一次超级单体短时强降水中尺度分析[J]. 气象科学, 2016, 36(6): 742-751.
- [22] 李明, 高维英, 李萍云. 陕西关中西北部一次短时强降水过程的成因分析[J]. 气象科学, 2016, 36(5): 689-696.
- [23] 刘国强, 佟欣怡, 杨莲梅, 等. 新疆巴州一次短时强降水过程的中尺度特征分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(1): 61-70.
- [24] 王楠, 赵强, 井宇, 等. 秦岭北麓一次冷锋触发的短时强降水成因分析[J]. 高原气象, 2018, 37(5): 1277-1288.
- [25] 刘帆, 高萌, 谢逸雯, 等. 陕西关中地区一次突发性暴雨的雷达回波特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(2): 48-54.
- [26] 苏俐敏, 夏文梅, 马中元, 等. 2012 年江西宜春四类短时强降水特征分析[J]. 气象科学, 2014, 34(6): 700-708.
- [27] 魏晓雯, 梁萍, 何金海. 上海地区不同类型短时强降水的大尺度背景特征分析[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(2): 69-75.
- [28] 侯凯, 邢辰飞, 沙澧河流域短时强降水特征和概念模型[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(4): 92-98.
- [29] 张宇星, 张宁, 王超杰. 2012 年 7 月 4 日河南大暴雨过程的短时强降水成因分析[J]. 气象与环境科学, 2014, 37(4): 40-49.

Radar Echo Characteristics of Short-term Heavy Rainfall in Yifeng

XIN Weiqi^{1,2}, MA Zhongyuan¹, CHEN Yun³, LUO Yan², LI Huiwen², HONG Lixia²

(1. Jiangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanchang 330046, China;

2. Yifeng Meteorological Bureau, Yifeng 336300, China;

3. National Meteorological Centre, Beijing 100081, China)

Abstract Using Jiangxi automatic station data, MICAPS weather map data, radar jigsaw CR products and single radar-based data, the evolution and echo characteristics of short-term heavy precipitation during four rainstorms and heavy rain process in Yifeng from 2017 to 2019 were analyzed by means of statistical analysis, morphological comparison and feature extraction. The results show that: (1) Short-term heavy precipitation occurred in Yifeng rainstorm or heavy rainstorm process. (2) In the divergence and distributary area at 200 hPa in northern Jiangxi, the 500 hPa 588 dagpm line is stably maintained in the south of Jiangxi, and northern Jiangxi is at the left and front end of the southwest jet at 850 hPa, forming unstable stratification with upper dryness and lower warmth and humidity; Ground convergence line is the main trigger system of short-term heavy rainfall. (3) During short-term heavy precipitation, the echo intensity of supercell in thunderstorm echo group is 60–65 dBZ; The intensity of short band wave is 50–55 dBZ; The echo intensity of complex is 55–60 dBZ; The echo intensity of floc echo is 40–45 dBZ. (4) On a single radar echo product, the combined reflectivity CR of thunderstorm echo group, echo short band, composite monomer echo and floc echo is 40–65 dBZ, the echo top height ET is 8–15 km, the vertical liquid water content VIL is 10–60 kg/m², and the 50 dBZ strong echo top height is 5–12 km.

Key words Yifeng; rainstorm; short-time heavy rainfall; weather system; echo characteristics