

董文韬,毛倩,李舒颖,等. 榕江双偏振雷达与三穗雷达在黔东南一次大暴雨过程中的应用对比分析[J]. 中低纬山地气象,2023,47(6):30-36.

榕江双偏振雷达与三穗雷达在黔东南一次大暴雨过程中的应用对比分析

董文韬¹, 毛倩¹, 李舒颖², 蔡垚³, 张超¹

(1. 贵州省黔东南苗族侗族自治州气象局, 贵州 凯里 556000; 2. 贵州省岑巩县气象局, 贵州 岑巩 557800;
3. 贵州省榕江县气象局, 贵州 榕江 557200)

摘要:为进一步提升黔东南三穗 CINRAD-CD 雷达及榕江双偏振雷达产品在山区强降雨过程中的应用能力,提升短临预报预警服务水平,对 2 部雷达在 2022 年 7 月 18 日大暴雨过程中观测和定量降水估测的差异进行对比分析。结果表明:榕江雷达总体探测能力强于三穗雷达,在黔东南州西部地区,由于雷公山地形阻挡作用,榕江雷达对低层探测能力减弱,在黔东南州中部及以东地区榕江雷达探测能力明显强于三穗雷达;2 部雷达探测得到的组合反射率因子峰值与地面分钟降雨量峰值对应关系较好,当降雨减弱时,三穗雷达衰减更明显;三穗单偏振雷达对降水的起止时段及累积降水量的估测能力明显不足,而榕江双偏振雷达 QPE 产品对降水起止时间及降雨定量估测结果基本接近实况,在业务应用中具有较高的参考价值。

关键词:黔东南;C 波段;双偏振雷达;定量降水估测

中图分类号:P458.1⁺21.1 **文献标识码:**A

Comparative Analysis of Rongjiang Dual Polarization Radar and Sansui Radar in a Heavy Rainstorm Process in Qiandongnan

DONG Wentao¹, MAO Qian¹, LI Shuying², CAI Yao³, ZHANG Chao¹

(1. Qiandongnan Miao and Dong Prefecture Meteorological Bureau of Guizhou Province, Kaili 556000, China;
2. Cengong Meteorological Bureau of Guizhou Province, Cengong 557800, China;
3. Rongjiang Meteorological Bureau of Guizhou Province, Rongjiang 557200, China)

Abstract: In order to further enhance the products application capability of Qiandongnan Sansui CINRAD-CD Radar and Rongjiang dual polarization Radar during heavy rainfall processes in mountainous areas, and improve the service level of short-term forecasting and early warning, the differences between the observation and quantitative precipitation estimation of the two radars in the heavy rainstorm process on July 18, 2022 were compared and analyzed. The results show that the overall detection capability of Rongjiang radar is stronger than that of Sansui radar. In the western part of Qiandongnan, the detection capability of Rongjiang radar to lower levels is weakened due to the topographic blocking effect of Leigong Mountain, and the detection capability of Rongjiang radar is significantly stronger than that of Sansui radar in the central and eastern parts of Qiandongnan. The CR peak value detected by the two radars has a good correspondence with the ground minute rainfall peak value, Sansui radar attenuates faster while the rainfall decreases. The ability of Sansui single polarization radar to estimate the starting and ending time of precipitation and the accumulated precipitation is obviously insufficient, while the Rongjiang

收稿日期:2023-05-24

第一作者简介:董文韬(1996—),女(侗族),助工,主要从事中短期天气预报工作,E-mail:780152005@qq.com。

通讯作者简介:张超(1987—),男,硕士,工程师,主要从事中短期天气预报工作,E-mail:651486094@qq.com。

资助项目:贵州省山地气候与资源重点实验室省市联合基金项目(sslj[2022]06):贵州雷暴大风潜势预报研究;中国气象局预报员专项(CMAYBY[2019]105):贵州东南部致灾暴雨短临预报技术总结分析。

dual polarization radar QPE product for the starting and ending time of precipitation and the quantitative estimation result of precipitation is basically close to the actual situation, which has high reference value in business applications.

Key words: Qiandongnan; C – band; dual polarization radar; QPE

0 引言

新一代多普勒天气雷达作为雷暴和强对流天气探测和预警的主要工具,极大地提升了临近天气预报精度。黔东南州分别于 2010 年、2019 年在三穗县、榕江县建设了 2 部 C 波段多普勒天气雷达。其中,榕江雷达为双偏振雷达。双偏振雷达通过同时发射和接收垂直与水平方向的电磁波,在原有的反射率因子、平均径向速度和速度谱宽 3 个基数据的基础上增加了差分反射率(Z_{DR})、差分传播相移(Φ_{DP})、差分传播相移率(K_{DP})、相关系数(CC)等观测量,由于 Z_{DR} 、 K_{DP} 等偏振参量对雨滴谱变化不敏感,又考虑了雨滴球型的影响,从而在定量降水估测时,比单偏振方法更加准确^[1-2]。

为了对比分析不同雷达观测差异,国内气象工作者做了大量的分析研究。胡明宝等^[3]对 S 波段双偏振多普勒天气雷达和 CINRAD – SA 等距离线上的回波强度以及定量降水估测效果进行了对比分析,结果表明利用双偏振雷达观测的 K_{DP} 数据计算的降雨量与实际降雨量最为接近。张羽等^[4]对比发现双偏振雷达灵敏度及对 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上降水估测优于单偏振雷达。在贵州地区,杨哲等^[5]对比威宁 X 波段双偏振雷达与昭通 C 波段雷达回波强度发现,观测目标距离越近回波强误差值越小,

两者对距离较近的观测目标回波强度值一致性都较好。邹书平等^[6]对比分析了贵阳、毕节、遵义 3 部雷达在强对流天气的雷达回波强度的变化特征,结果表明 3 部雷达观测的回波强度具有一致性的波动特征,2 部雷达之间回波强度差异主要是由云和降水对雷达波的衰减所产生。关于黔东南地区 2 部天气雷达产品的对比分析暂未见相关研究。

本文以 2022 年 7 月 18 日大暴雨天气过程为样本,开展榕江、三穗雷达产品应用对比分析,以期进一步提升黔东南及周边地区的灾害性天气预警预报能力,为保障社会经济发展和人民生命财产安全提供有力的气象支撑。

1 资料选取

1.1 雷达参数

黔东南三穗雷达和榕江雷达水平距离约 120 km,2 部雷达均为 C 波段雷达,扫描仰角为 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 、 3.4° 、 4.3° 、 6.0° ,雷达主要参数对比见表 1。由于天气雷达存在波束中心高度随距离增加、波束宽度随距离展宽的局限性,导致雷达对远距离目标探测能力降低^[7]。为客观对比 2 部雷达观测差异,选择经过雷达中垂线的站点及附近区域进行对比分析,中垂线上任意点与 2 部雷达距离相等。

表 1 三穗、榕江雷达主要参数对比

Tab. 1 Comparison of the main parameters of Sansui and Rongjiang radar

	海拔高度/m	波长/cm	发射体制	体扫模式	波束宽度/ $^\circ$	频率/MHz
三穗雷达	748	5	单极化	VCP21	0.95	5 420
榕江雷达	1 248	5	双极化	VCP21D	0.95	5 600

1.2 地面降水资料

受两高之间的切变线及西南涡影响,2022 年 7 月 18 日黔东南州出现了一次范围较广的大暴雨天气过程,全州除台江、施秉外,各县(市)均出现了暴雨(图 1)。将雷达垂直平分线附近的 3 个大暴雨区自西向东分别编号为 1、2、3,对比分析 2 部雷达在此次大暴雨过程中的探测差异及产品应用情况。

大暴雨区 1:麻江县南部贤昌、龙山、宣威 3 个乡镇 6 站大暴雨,降雨主要集中在 18 日 02—06 时,最大降雨量贤昌 130.7 mm ,最大小时雨强贤昌塘山

$67.3\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,出现在 18 日 03—04 时。

大暴雨区 2:凯里龙场、湾水 2 个乡镇 4 站大暴雨,降雨主要集中在 18 日 00—03 时,最大降雨量龙场 167.1 mm ,最大小时雨强龙场 $101.2\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,出现在 18 日 01—02 时。

大暴雨区 3:黎平德化、平寨、大稼、敖市,锦屏固本、启蒙、隆里、钟灵 8 个乡镇 8 站大暴雨,降雨主要集中在 18 日 07—10 时,最大降雨量黎平平寨 167.1 mm ,最大小时雨强锦屏隆里 $82.6\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,出现在 18 日 08—09 时。

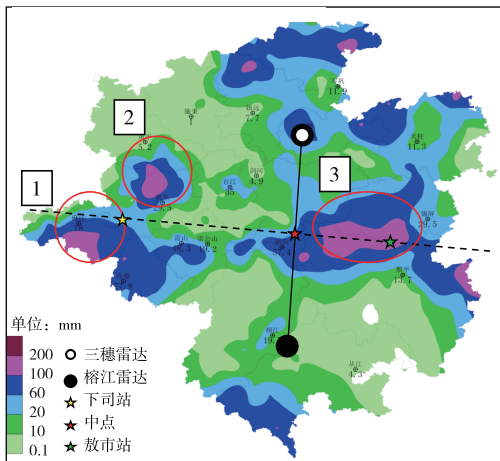


图 1 黔东南 7 月 17 日 20 时—18 日 20 时
降雨分布及雷达相对位置示意图

Fig. 1 Rainfall distribution map of Qiongdongnan from
20:00 on July 17th to 20:00 on July 18th and Schematic
diagram of relative position of radar

2 雷达产品对比

2.1 反射率因子产品

反射率因子(R)产品是雷达扫描得到的不同仰

角上的回波强度分布,分别挑选垂直平分线上雷达中点 O 及中点以东、以西各 1 个站点(图 1)进行对比分析:

站点 1:凯里下司,中点以西 84.3 km,由地面观测站降雨数据分析,降水主要集中在 18 日 02—04 时,最大分钟降雨量为 02 时 50 分的 1.9 mm。

中点 O:由于 2 部雷达中点位置没有地面观测站,故挑选离中点距离最近、有分钟数据的榕江朗洞、岑最、黎平尚重,分析发现降雨主要集中在 18 日 08—10 时,最大分钟降雨量为榕江岑最 09 时 18 分的 3.5 mm。

站点 2:黎平散市,中点以东 42.6 km,降雨主要集中在 18 日 08—10 时,最大分钟降雨量为 08 时 51 分 2.9 mm。

对比不同仰角、不同位置反射率因子差别(表 2)发现,在站点 1,三穗雷达除 1.5°仰角反射率因子略小于榕江雷达外,其余各仰角均偏大,偏大平均值为 3.6 dBz 左右;在中点 O 和站点 2,三穗雷达观测值普遍小于榕江雷达,偏小的平均值为 6.7 ~ 9.9 dBz。

表 2 不同仰角、不同位置处三穗、榕江雷达反射率因子对比(单位:dBz)

Tab. 2 Comparison of radar reflectivity factors of Sansui and Rongjiang at different elevations and positions(unit: dBz)

仰角/°	站点 1(凯里下司, 中点以西 84.3 km)			中点 O			站点 2(黎平散市, 中点以东 42.6 km)		
	三穗雷达	榕江雷达	差值	三穗雷达	榕江雷达	差值	三穗雷达	榕江雷达	差值
0.5	38.5	32.5	6.0	8.5	35.5	-27.0	32.0	35.5	-3.5
1.5	38.0	38.5	-0.5	33.0	37.0	-4.0	40.5	44.0	-3.5
2.4	36.5	32.5	4.0	29.0	34.5	-5.5	35.5	50.5	-15.0
3.4	37.5	31.5	6.0	35.0	30.0	5.0	35.5	40.0	-4.5
4.3	24.0	21.0	3.0	22.5	28.5	-6.0	30.5	34.5	-4.0
6.0	19.5	16.5	3.0	0.0	22.0	-22.0	19.5	29.0	-9.5
平均误差			3.6			-9.9			-6.7

2.2 组合反射率因子产品

2.2.1 大暴雨区组合反射率因子产品对比 组合反射率因子(CR)产品显示可探测范围内最大反射率因子分布,有助于探测风暴结构和特征。分别选取大暴雨区分分钟降雨最强时段对应的 CR 产品(大暴雨区 1:麻江贤昌塘山,18 日 03 时 26 分,2.7 mm;大暴雨区 2:凯里龙场,18 日 00 时 53 分,4.1 mm;大暴雨区 3:锦屏隆里,18 日 08 时 27 分,4.2 mm),如图 2。对比发现,2 部雷达对于 3 个大暴雨区探测得到的回波形态较为相似。在大暴雨区 1 和 2,即黔东南州西部地区,2 部雷达探测到的最大组合反射率因子均为 50 dBz 左右,三穗雷达探测到的 ≥ 45 dBz 的回波范围略大于榕江雷达。在大暴雨区 3,即

黔东南州中东部地区,三穗雷达探测到的最大组合反射率因子及 ≥ 45 dBz 回波范围明显小于榕江雷达。

2.2.2 不同距离处组合反射率因子演变分析 读取垂直平分线上距中点不同距离的站点对应最强降雨时段的雷达组合反射率因子 CR 及站点分钟降雨量随时间演变值,如图 3。发现 2 部雷达组合反射率演变与站点分钟降雨量变化趋势对应较好,分钟降水较强的阶段组合反射率因子也体现出明显增大的峰值,且组合反射率因子峰值出现时间较分钟降雨有 10 ~ 15 min 提前量,对于单站点而言,组合反射率因子强度 ≥ 40 dBz 对于短时强降水有较好的指示意义。

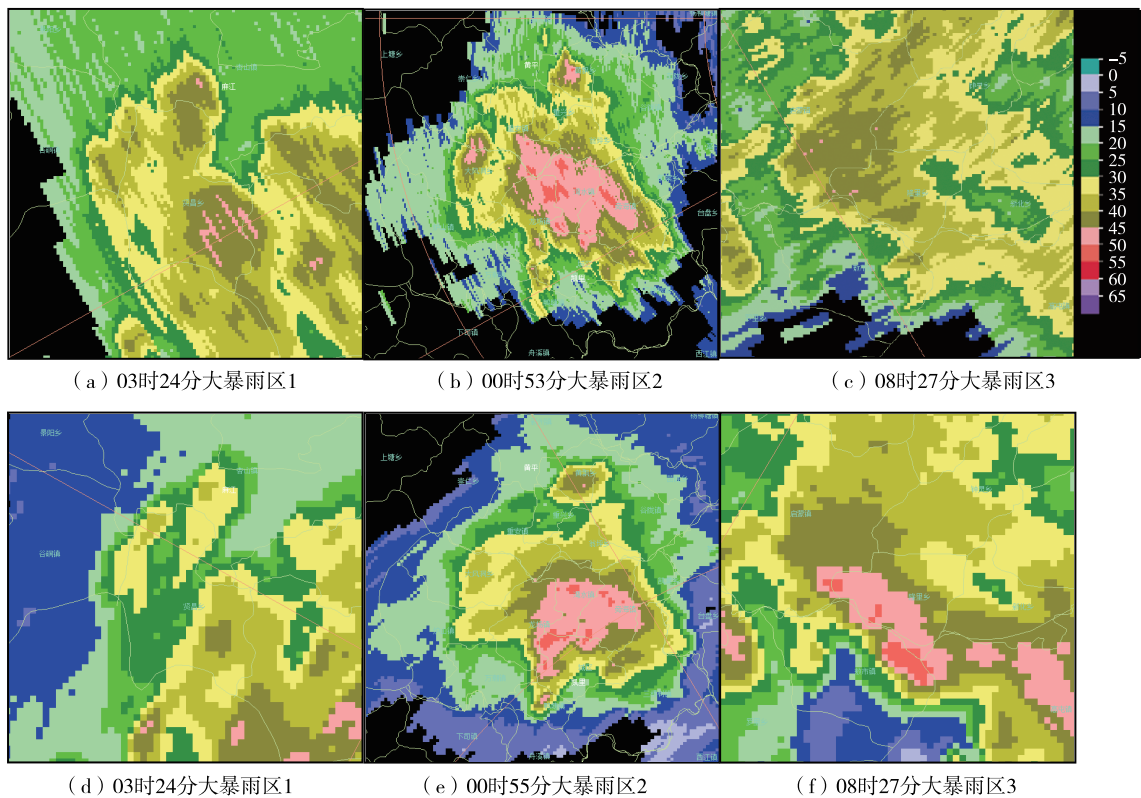


图2 大暴雨区组合反射率产品对比(上图:三穗雷达,下图:榕江雷达)

Fig. 2 Comparison of combined reflectivity products in heavy rainstorm area (above: Sansui radar, below: Rongjiang radar)

在黔东南州西部地区(下司)三穗雷达探测得的CR值略强于榕江,东部地区(敖市)榕江雷达强于三穗雷达;中点处2部雷达表现较为接近。对于

弱降水回波,三穗雷达衰减较为明显,表现为CR随降水减弱下降幅度明显大于榕江雷达。

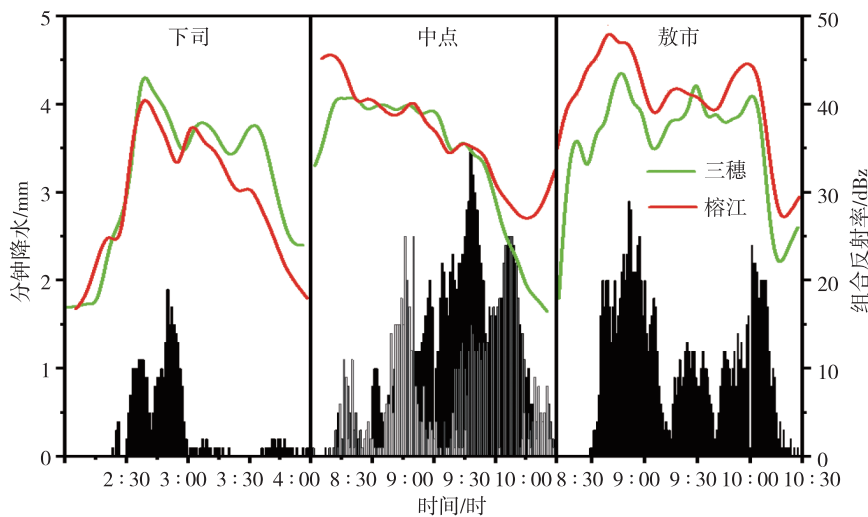


图3 榕江、三穗雷达组合反射率因子及分钟降水量演变时序图(折线图为组合反射率因子,柱状图为分钟降水量)

Fig. 3 Time series diagram of the combined reflectivity factor and minute precipitation evolution of Rongjiang and Sansui radar (line: combined reflectivity factor, histogram: minute precipitation)

2.3 风暴追踪信息产品及风暴属性产品对比

风暴追踪信息(STI)产品常用于判断对流单体过去的移动路径及未来移向。分析影响大暴雨区2的风暴单体(图4)发现,2部雷达在黔东南州西部

地区探测到的单体外推趋势及风暴最大反射率因子、垂直积分液态水含量、回波底高、回波质心高度均较为一致,但三穗雷达探测到的回波顶高比榕江雷达高2~3 km,且在黔东南州东部地区三穗雷达

探测到的风暴单体明显少于榕江雷达(图略)。

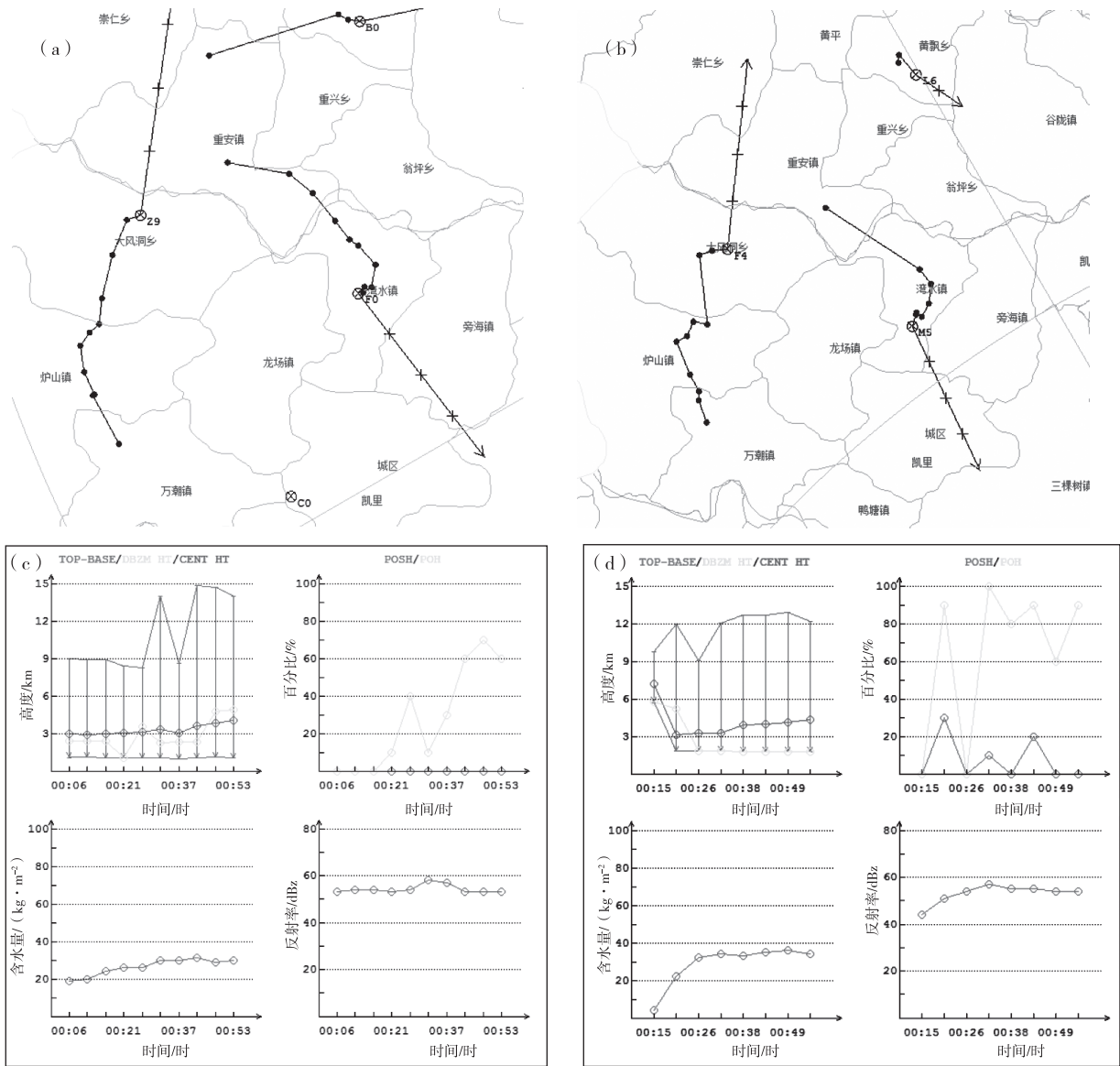


图 4 18 日 00 时 53 分三穗雷达(a)、榕江雷达(b)风暴追踪信息产品及三穗雷达(c)、榕江雷达(d)风暴属性产品
Fig.4 Sansui radar (a), Rongjiang radar (b) storm tracking information products,
and Sansui radar (c), Rongjiang radar (d) storm attribute products at 00:53 on July 18th

2.4 径向速度产品对比

径向速度(v)产品表示雷达在各仰角探测到的垂直于雷达波束的风速,常用于探测地面相对风场及确定高空冷暖平流等^[7]。分析 2 部雷达对 3 个大暴雨区内小时雨强最大时段的 0.5°仰角径向速度产品(图 5)发现,2 部雷达产品在大暴雨区均有明

显风速辐合。查询地面自动站数据,对应时段 3 个大暴雨区均有站点出现了较明显的瞬时大风(表 3)。将实况与雷达探测值对比可见,榕江雷达探测图像较为平滑,且探测数据与实况地面风速较为接近;三穗雷达探测图像噪点较多,识别出的径向速度偏大,从而导致误判中气旋。

表 3 雷达 0.5°仰角径向速度与地面极大风速实况对比(单位:m·s⁻¹)

Tab.3 Comparison of Radar 0.5°elevation radial velocity with ground maximum wind speed(unit: m·s⁻¹)

大暴雨区	站点	极大风出现时间	地面极大风速实况	雷达探测速度		误差	
				三穗雷达	榕江雷达	三穗雷达	榕江雷达
1	麻江宣威	03:51	14.5	23.5	14.5	9.0	0.0
2	凯里杉树林	01:17	11.8	-25.0	12.5	13.2	0.7
3	黎平散市	08:34	10.0	22.0	12.0	12.0	2.0

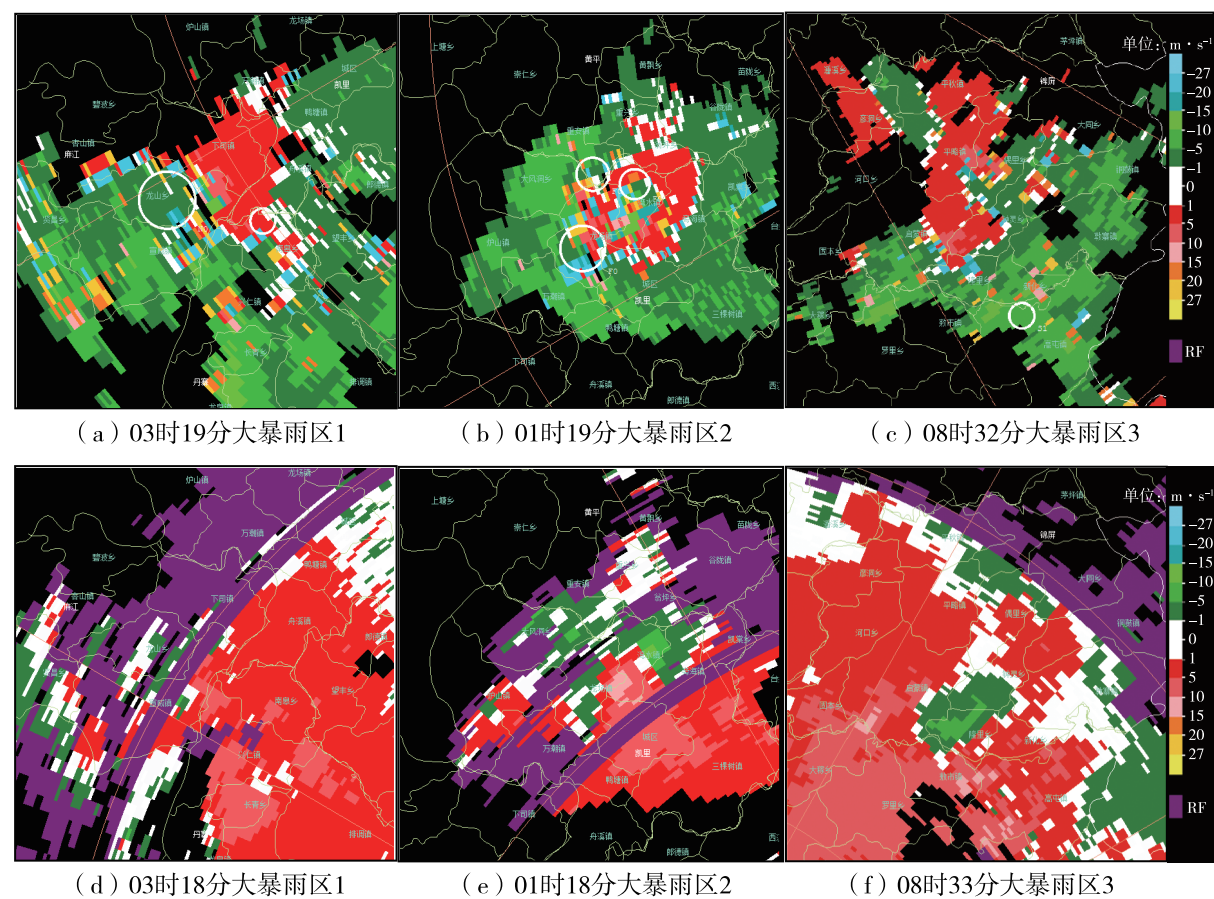


图5 大暴雨区 0.5°仰角径向速度产品对比(上:三穗雷达,下:榕江雷达)

Fig. 5 Comparison of radial velocity products at 0.5 ° elevation in heavy rainstorm area (above: Sansui radar, below: Rongjiang radar)

3 降水估测产品对比

3.1 风暴总降水量估测产品

分析2部雷达对大暴雨区2的风暴总降水量估测产品(图略)发现,在18日00—03时凯里龙场—湾水附近降雨中,三穗雷达仅识别出了00时38分—01时25分、01时36分—02时23分、02时33分—02时59分3段较明显降水时间,估测雨量较小。而榕江雷达识别到的降雨时间较完整,为00时29分—03时00分,对龙场周边区域估测的最大降雨量为166 mm。查询地面雨量数据得知龙场站从00时28分开始降雨,截至03时00分累积雨量154.6 mm。可见,榕江雷达的降水定量估测产品与实况更为接近,三穗雷达对降水的起止时段及降水量的估测能力明显不足。

3.2 小时累计降水量估测产品

分析2部雷达对3个大暴雨区域的小时累计降水量估测产品(图6、表4)发现,三穗雷达对3个大暴雨区的最大小时降水估测误差分别偏小了48.3 mm、98.5 mm、89.9 mm,而榕江雷达对小时降水量的估测结果与实况较为接近,这与毛倩等^[8]在2020

年5月31日及6月8日2次暴雨过程雷达回波特征分析中得出的结论一致。需要注意的是,2部雷达估测区域最大降水位置与地面站点位置不完全一致,如三穗、榕江雷达估测的龙场上空最大降水中心在地面龙场站以东5~8 km位置。站点上空对应的降水估计值比实际观测到的降水量偏少得多,这可能是由于雨滴下落过程中被低层风拖曳产生偏移或是地面观测站点密度不够造成的误差。

张哲等^[9]、黄铃光等^[10]在研究中发现使用双偏振参数的定量降水估测(QPE)产品进行定量降水估计的精度较高,但由于QPE方法对反射率设置上限等原因,雷达对于极端降雨存在雨量低估的问题。在后续工作中可尝试通过基于不同参数的衰减订正方法^[11-13]提升复杂地形下雷达探测能力及降雨估测精度,更好地指导短临预警预报。

4 结论

本文利用黔东南地区2部C波段天气雷达,结合地面气象站雨量观测数据,对比分析了2部雷达在黔东南州不同地区的观测差异及单偏振雷达与双偏振雷达在定量降水估测中的差异,得到主要结

论如下：

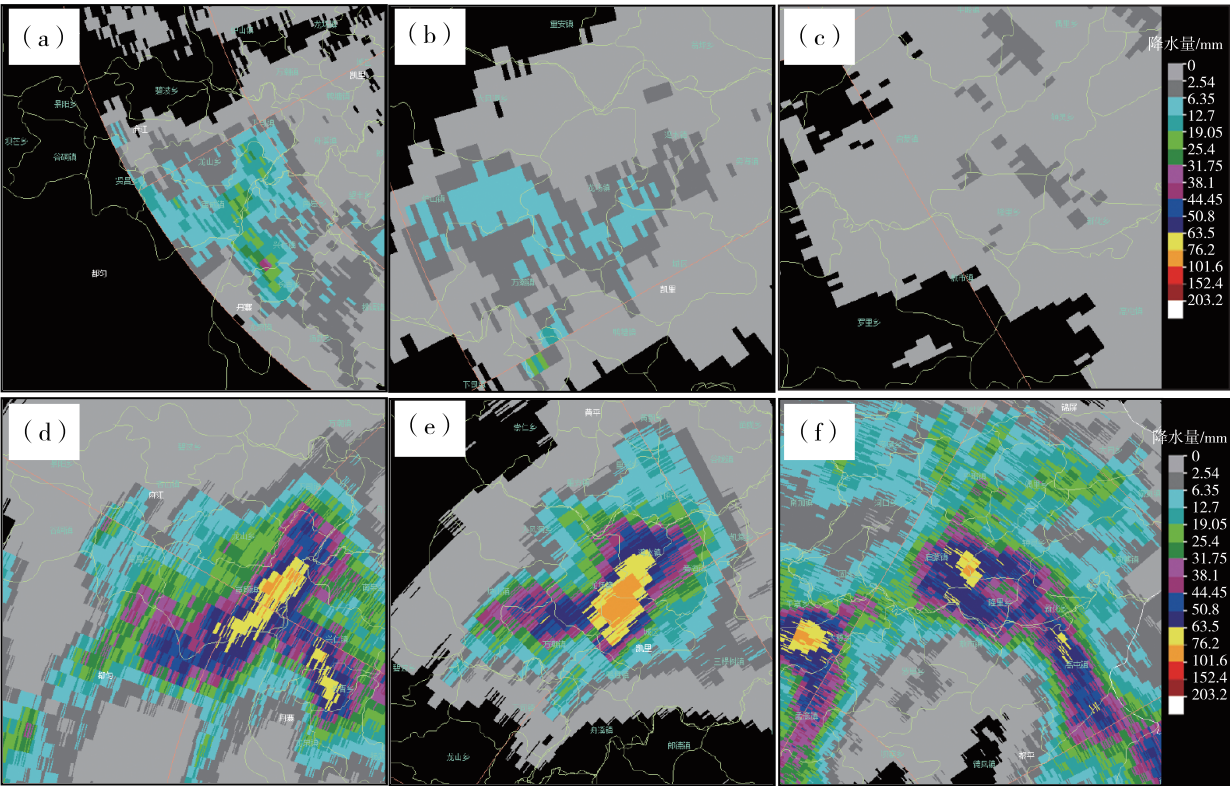


图 6 大暴雨区小时降水量估测产品(上为三穗雷达、下为榕江雷达,a,d:03—04 时大暴雨区 1;
b,e:01—02 时大暴雨区 2;c,f:08—09 时大暴雨区 3)

Fig.6 Hour precipitation estimation in heavy rainstorm area (above: Sansui radar, below: Rongjiang radar.
a,d:03:00—04:00 heavy rainstorm area 1;b,e:01:00—02:00 heavy rainstorm area 2;c,f:08:00—09:00 heavy rainstorm area 3)

表 4 三穗、榕江雷达对大暴雨区内小时降水量估测误差对比(单位:mm)

Tab.4 Error comparison of hourly precipitation estimation in torrential rain area(unit: mm)

大暴雨区	地面降水实况	雷达估测雨量		误差	
		三穗雷达	榕江雷达	三穗雷达	榕江雷达
1	67.3	19.0	43.3	48.3	24.0
2	101.2	11.0	98.5	90.2	2.7
3	82.6	3.3	89.9	79.3	-7.3

(1)榕江雷达总体探测能力强于三穗雷达。在黔东南州西部地区,由于雷公山地形阻挡作用导致榕江雷达对低层探测能力减弱,但 2 部雷达对单体的最大反射率因子、垂直积分液态水含量、回波底高、回波质心高度的探测能力较为一致。在黔东南州中部及以东地区榕江雷达探测能力明显强于三穗雷达。

(2)2 部雷达探测得到的组合反射率因子峰值与地面分钟降雨量峰值对应关系较好,组合反射率因子演变均能表现出单站降雨增强或减弱的趋势,但三穗雷达对于弱降水的探测能力明显偏弱。

(3)2 部雷达对于风暴总降水量和小时降水量的估测有一定的偏差。三穗单偏振雷达对降水的

起止时段及累积降水量的估测能力明显不足,而榕江双偏振雷达 QPE 产品对于降水起止时间及降雨定量估测结果基本接近实况,具有很高的参考价值。

参考文献

[1] 俞小鼎. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京:气象出版社,2020.
[2] 张培昌. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,2000.
[3] 胡明宝,赵景志,夏文梅,等. 双偏振多普勒天气雷达和 CINRAD-SA 对比分析[J]. 现代雷达,2012,34(1):5-8.
[4] 张羽,傅佩玲,郭春辉. CINRAD/SD 双偏振雷达与 CINRAD/SA 雷达对比分析[C]//中国气象学会. 第 34 届中国气象学会年会论文集:气象雷达探测新技术与数据质控的业务应用,2017:329-337.

(下转第 58 页)

日照时数多寡分布规律一致,即夏季>秋季>春节>冬季,其中日照最多的夏季占全年日照的 41%~45%。

(3)各县不同月份日照时数多寡变化规律基本一致,均呈双峰型,主峰值在 8 月,次峰值在 3 月,2 月、9—12 月自动观测日照值均大于人工观测值。从空间分布上对比分析 2 种观测方式月日照,各月最大值的变化趋势比较一致,即 1—2 月、5—8 月和 10 月最大值均出现在沿河,3 月均出现在德江,11—12 月均出现在石阡。

(4)自动观测与人工观测值产生的差异受仪器工作方式、不同天气条件、太阳高度角等因素影响,自动观测得到的日照时数准确性更高。

(5)同一台站 2 种观测方式得到的日照时数虽然存在差异,但是相对差值不大,变化规律基本一致,表明从人工观测过渡到自动观测的前后资料可延续使用。从空间分布上看,除德江人工、印江自动观测日照值外,其他相邻县的日照值相对差值不大,表明县域国家站的日照数据在本县范围内具有一定的代表性,可用于一定范围内的气候资源开发利用和农业生产研究参考。

参考文献

- [1] 丁立国,黄晨然. 贵州省光伏电站集中开发区太阳能资源评估[J]. 中低纬山地气象,2019,43(5):59-61.
- [2] 赵世军,刘西川,高太长,等. 直接辐射式日照计业务应用关键技术分析[J]. 大气与环境光学学报,2011,6(6):457-462.
- [3] 郎贵英,安承德,袁庆. DFC1 型光电式数字日照计与暗筒式日照计观测日照时数的对比分析[J]. 中低纬山地气象,2021,45(2):100-103.
- [4] 张道远,乔贺,王大鹏,等. 光电式数字日照计与暗筒式日照计数据质量对比分析[J]. 气象水文海洋仪器,2020,37(3):53-55.
- [5] 查书平,陈志军,高阳华,等. 基于 GIS 的重庆地区实际日照时间空间分布研究[J]. 气象科学,2008,28(5):548-551.
- [6] 谢智涛,吴曲琳,田维微. 黔南州 2019 年人工与自动站日照数据对比分析[J]. 中低纬山地气象,2020,44(6):80-83.
- [7] 益西卓玛,冉不辉,白宇轩. 冬季不同天空状况下三种日照测量仪器比较[J]. 中低纬山地气象,2020,44(2):98-101.
- [8] 宋云,王东. 数字日照计和暗筒式日照计资料对比分析[J]. 气象水文海洋仪器,2021,38(4):37-40.
- [9] 迟庆红,陆桂荣,吴炫,等. DFC2 型光电式数字日照计与暗筒式日照计对比分析[J]. 气象水文海洋仪器,2023,40(2):25-27.
- [10] 黄维,董德保,沈玉亮. 日照传感器与人工观测数据差异分析[J]. 气象水文海洋仪器,2022,39(4):46-50.
- [11] 催讲学,柯怡明,杨志彪. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,2011.
- [5] 杨哲,邹书平,李翠翠,等. 威宁 X 波段双偏雷达与昭通 C 波段天气雷达回波强度对比[J]. 中低纬山地气象,2019,43(6):37-40.
- [6] 邹书平,李波,杨哲,等. 强对流天气雷达回波强度相关性对比分析[J]. 中低纬山地气象,2018,42(6):1-7.
- [7] 俞小鼎. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006.
- [8] 毛倩,孙飞飞,杨昌洪,等. 月亮山区两次暖区暴雨天气过程双偏振雷达回波特征分析[J]. 中低纬山地气象,2022,46(6):48-55.
- [9] 张哲,戚友存,李东欢,等. 2021 年郑州“7·20”极端暴雨雨滴谱特征及其对雷达定量降水估测的影响[J]. 大气科学,2022,46(4):1002-1016.
- [10] 黄铃光,黄慧琳,陈赛. 厦门双偏振雷达定量降水估测产品在台风“艾利”中的应用分析[C]//中国气象学会. 第 35 届中国气象学会年会论文集:灾害天气监测分析与预报,2018:592-598.
- [11] 靳奎峰,巢惟志,陈虹杏,等. 双偏振天气雷达在灾害性降水估测中的应用——以广州“5.22”特大暴雨灾害为例[J]. 灾害学,2021,36(3):140-146.
- [12] 夏丰,刘显通,郑腾飞,等. C 波段双偏振天气雷达降雨和部分地形遮挡衰减订正研究[J]. 热带气象学报,2021,37(4):556-568.
- [13] 李晓敏,魏挪巍,娄宇航. 基于 X 波段双线偏振雷达质量控制及云内水成物粒子识别方法研究[J]. 高原山地气象研究,2020,40(4):82-89.

(上接第 36 页)