

毛倩,宋光勇,董文韬,等. 一次秋季对流性暴雨的双偏振雷达回波特征分析[J]. 中低纬山地气象,2023,47(3):38-44.

一次秋季对流性暴雨的双偏振雷达回波特征分析

毛倩¹,宋光勇¹,董文韬¹,丁泳尹²,白慧¹

(1. 贵州省黔东南苗族侗族自治州气象局,贵州 凯里 556000;2. 贵州省麻江县气象局,贵州 麻江 557600)

摘要:该文利用黔东南榕江 C 波段双偏振多普勒天气雷达资料、常规观测资料及地面加密自动站观测资料等,对 2021 年 9 月 6 日傍晚到夜间贵州东部地区出现的对流性暴雨天气过程的环流背景、影响系统和雷达回波特征进行总结分析。结论如下:(1)此次天气过程是在副高西伸北抬形成高压坝的背景条件下,中高纬冷涡低槽与高原东移的短波槽在四川东部同位相合并加强东移,引导冷空气从西北路径和东北路径两面夹击影响贵州东部地区,配合长时间稳定维持的南北向低空切变线,共同触发不稳定能量强烈释放,产生对流性暴雨天气。(2)带状对流回波东段东移至铜仁、黔东南州境内后逐渐转为片状积层混合降水回波,并长时间稳定维持少动。暴雨发生期间,回波具有明显的低质心高效率的热带暖云降水回波特征; VIL 值在 $10 \sim 30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,局地出现明显的跃增现象;低仰角径向速度图上长时间维持明显的风场辐合。(3)此次过程雷达偏振参量具有产生强降水的特征,最大 Z_H 在 $40 \sim 60 \text{ dB}$ 之间, Z_{DR} 在 $0.2 \sim 5 \text{ dB}$ 之间, K_{DP} 范围为 $0.5 \sim 7.0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, CC 在 $0.9 \sim 0.98$ 之间,最大时 ≥ 0.98 。

关键词:C 波段双偏振雷达;偏振参数;对流性暴雨;回波特征

中图分类号:P412.25;P458.1+21.1 **文献标识码:**A

Analysis of Dual - polarization Radar Echo Characteristics of a Convective Rainstorm in Autumn

MAO Qian¹, SONG Guangyong¹, DONG Wentao¹, DING Yongyin², BAI Hui¹

(1. Qiandongnan Miao and Dong Autonomous Prefecture Meteorological Bureau of Guizhou Province, Kaili 556000, China; 2. Majiang Meteorological Bureau of Guizhou Province, Majiang 557600, China)

Abstract: In this paper, using the C - band dual polarization doppler weather radar data of Rongjiang in southeast Guizhou, conventional observation data and ground densified automatic station observation data, the circulation background, influence system and radar echo characteristics of the convective rainstorm weather process in eastern Guizhou from the evening to the night on September 6, 2021 are summarized and analyzed. It is concluded that, (1) this weather process is under the background that the subtropical high extends westward and uplifts northward to form a high - pressure dam. The mid high latitude cold vortex trough and the short wave trough moving eastward from the plateau are in the same phase in eastern Sichuan, strengthening and moving eastward, leading the cold air to strike the eastern Guizhou from both sides of the northwest path and the northeast path, together with the south - north low level shear line that has been stably maintained for a long time, to jointly trigger the strong release of unstable energy and generate convective rainstorm weather. (2) After moving eastward to Tongren and Qiandongnan Prefecture, the eastern segment of the band convective echo gradually turns into the mixed precipitation echo of sheet cumulus and stratocumulus, which is stable and less dynamic for a long time. During the rainstorm, the echo has obvious characteristics of tropical warm cloud precipitation echo with low

收稿日期:2022-11-01

第一作者简介:毛倩(1997—),女,助工,主要从事中短期天气预报及短时临近预报预警,E-mail:2416911309@qq.com。

通讯作者简介:白慧(1971—),女,高工,主要从事中短期天气预报及短时临近预报预警,E-mail:745615617@qq.com。

资助项目:黔东南州科技计划项目(黔东南科合基础[2022]09号);基于区域自动站的黔东南“两山”地区致灾暴雨研究。

centroid and high efficiency; the VIL value is between 10 and 30 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, and there is obvious jump phenomenon locally; the obvious wind convergence is maintained on the low elevation radial velocity map for a long time. (3) The radar polarization parameters in this process have the characteristics of producing heavy precipitation, the maximum Z_H is between 40 and 60 dBz, Z_{DR} is between 0.2 and 5 dB, K_{DP} ranges from 0.5 to 7.0 $^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$, CC is between 0.9 and 0.98, and ≥ 0.98 at the maximum.

Key words: C – band dual linear polarization radar; polarization parameter; convective rainstorm; radar echo characteristics

0 引言

双偏振多普勒天气雷达能识别降水粒子的形状、大小和相态分布等特征,相对于常规多普勒天气雷达在强对流和强降水等灾害性天气的监测预警中更具有优势^[1-6]。不少气象工作者通过对天气个例分析,总结出冰雹、龙卷、强降水等灾害性天气在不同波段雷达的差分反射率因子(Z_{DR})、差分相移率(K_{DP})及相关系数(CC)等主要偏振参量的特征和阈值^[4-22],对双偏振雷达在基层业务中的应用发挥了重要的指导作用。郭桐等^[4]对 C 波段双偏振多普勒天气雷达原理和主要偏振参量应用分析进行了阐述,认为雨滴的 Z_{DR} 的取值一般 > 0 ,当雨滴比较大时,其值可达 3 ~ 5 dB,当有冰雹时, Z_{DR} 值一般在 0 附近;在稳定的层状云中 CC 值一般可以达到 0.95,当遇到尺度较小的外包水膜冰雹、扁旋转椭球状或锥球状大冰雹、雨滴与小冰雹共存时,其值会变小。寇蕾蕾等^[5]研究指出,与 SA 雷达数据相比,C 波段双偏振雷达的回波强度(Z_H)值偏小,平均偏小 3.8 dBz 左右。宋歌等^[6]对比分析了 X 波段双偏振雷达与 S 波段天气雷达探测产品在北京夏季强对流天气过程中的应用,得出双偏振雷达在强降水识别方面, Z_{DR} 大值和 K_{DP} 能够较好地指示雨强较大的降水;低仰角的 Z_{DR} 达 5 dB 以上, K_{DP} 在 $8^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ 以上, CC 达 0.95 以上时,地面 5 min 雨量 ≥ 10 mm。钟晨等^[7]研究指出,出现冰雹时 Z_{DR} 均为负值, K_{DP} 范围在 $-0.5 \sim 1.0^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ 之间,较大降水则在 $1.0 \sim 10.0^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ 之间, CC 在 0.88 ~ 0.97 之间。喻谦花等^[8]分析郑州“7·20”特大暴雨的双偏振雷达特征,得出强降水过程期间,郑州上空 Z_{DR} 为 1 ~ 3 dB;大范围的强 K_{DP} 能很好地反映降水强度。暴雨过程中,小时雨强 ≥ 40 mm 时, K_{DP} 值为 $1.7 \sim 2.4^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$;小时雨强 ≥ 100 mm 时, $K_{DP} \geq 3.1^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ 的回波连成片。上述偏振参量总结分析均是外省的,黔东南州榕江 C 波段双偏振多普勒天气雷达 2020 年正式投入业务应用以来,对贵州东

南部地区强对流和强降水的监测预警发挥了重要作用,但由于投入业务应用时间短,对主要的偏振参量总结分析较少,还没有形成系统的对业务具指导性的阈值,因此,很有必要多总结分析天气个例,得出本地特征和阈值。

2021 年 9 月 6 日傍晚到夜间贵州东部铜仁、黔东南州出现了一次对流性暴雨—大暴雨天气过程。为总结分析此次过程的发生发展机制和雷达回波的主要特征,本文利用 Micaps 预报平台提供的常规观测资料,贵州省气象局短临预报预警一体化平台提供的地面逐小时风场、雷达组合反射率因子、地面加密自动站降水资料和榕江 C 波段双偏振多普勒天气雷达资料,对此次过程的环流背景、影响系统和雷达回波特征及主要偏振参量特征进行总结分析,得出此次对流性暴雨的触发机制和雷达主要偏振参量特征,以期能对今后暴雨的监测预警提供参考。

1 天气过程概况

2021 年 9 月 6 日傍晚到夜间贵州东部铜仁市和黔东南州境内出现暴雨—大暴雨天气,共出现 28 站大暴雨、124 站暴雨,国家站铜仁江口,黔东南州三穗、榕江出现大暴雨,铜仁玉屏,黔东南州剑河、镇远出现暴雨。暴雨落区呈南北向带状分布,主要集中在铜仁和黔东南两市(州)中部一线,最北端到铜仁沿河县东南部,最南端到黔东南州从江县西部。大暴雨分布在铜仁江口、玉屏和黔东南三穗、锦屏、榕江境内(图 1)。过程最大降雨量为铜仁江口太平乡山塘 169.5 mm,黔东南最大降雨量为三穗县长吉 160.0 mm。本次过程为对流性暴雨,降雨时间短、雨强大、降雨高度集中,共有 264 站次出现雨强 ≥ 20 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降雨,最大雨强为黔东南州锦屏县三江镇小江 87.2 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图略)。据黔东南州应急管理局不完全统计,此次暴雨和大暴雨天气造成岑巩、三穗、锦屏、榕江等县部分房屋倒塌或损毁、道路塌方、农田冲毁等灾情,仅三穗、榕江直接经济损失就达 30 余万元。

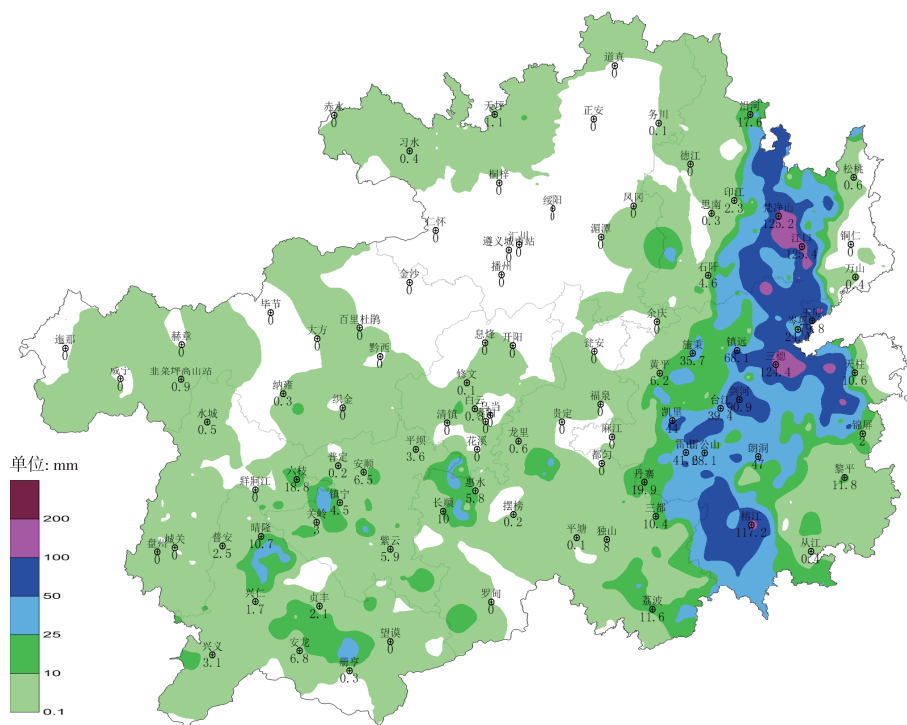


图 1 2021 年 9 月 6 日 17 时—7 日 08 时过程累计降雨量分布图

Fig. 1 Distribution map of cumulative rainfall during the process from 17:00 on September 6th to 8:00 on September 7th, 2021

2 环流背景与影响系统分析

9 月 5 日 08 时—6 日 08 时 500 hPa 形势图上(图略),亚洲中高纬度地区为两脊一槽形势,巴尔喀什湖及以北地区和我国东北地区分别为高压脊控制,贝加尔湖西部的冷槽发展东移,在贝加尔湖附近加深成低涡槽后进一步发展东移南压,6 日 08 时冷涡低槽东移南压至华北,受东部高压脊影响,冷涡低槽东移缓慢。中低纬度地区西太平洋副热带高压(以下简称副高)加强西伸,588 dagpm 等值线由贵州东部西伸与高原大陆高压打通形成高压坝,592 dagpm 等值线由江西东部西伸至湖南中部—广西东部,高原东侧有短波槽沿副高北侧东

移。6 日 20 时—7 日 08 时高原短波槽与冷涡低槽南段合并,缓慢东移南压,588 dagpm 等值线由四川北部南压到重庆南部,高空槽南段南压到贵州北部(图 2a);对应 700 ~ 850 hPa 图上,6 日 08 时广西—贵州为高压西侧弱偏南气流影响,风速为 $4 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,四川东部有切变东移南压。6 日 20 时 700 hPa 切变线东移南压到重庆中部—贵州中北部地区稳定维持(图 2b);850 hPa 切变线东移南压到贵州东部地区,受西北和东北 2 路冷空气共同影响,切变线两侧由西北风与西南风辐合转为西北风与东北风辐合,风速减弱为 $2 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,切变线由东北西南向转为南北向稳定维持到 7 日 08 时;同时华北经湖北有明显的冷舌入侵贵州,冷暖气流在贵州东部

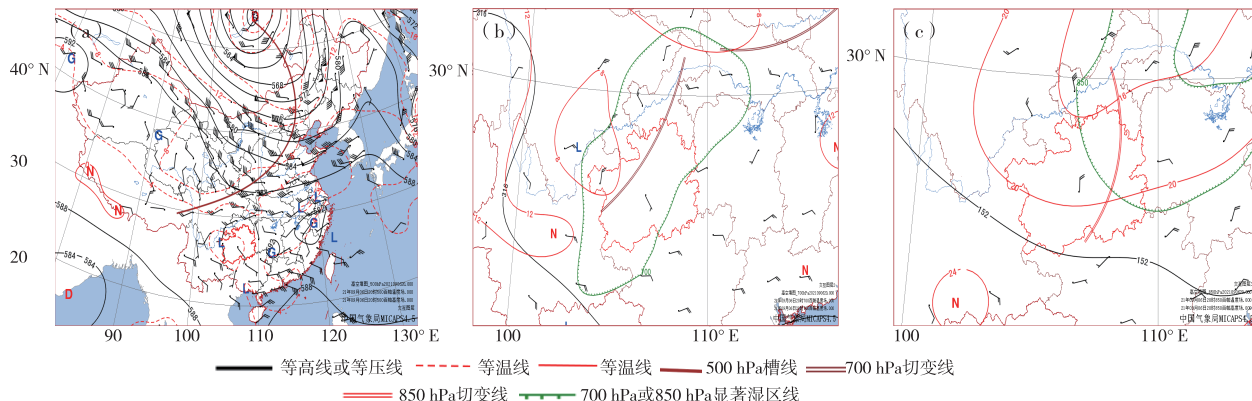


图 2 2021 年 9 月 6 日 20 时 500 hPa(a)、700 hPa(b)、850 hPa(c) 形势图

Fig. 2 The situation map of 500 hPa(a), 700 hPa(b), 850 hPa(c) at 20:00 on September 6th, 2021

地区交汇(图 2c)。地面冷空气从贝加尔湖地区分裂南下,经河套西部从四川盆地和两湖盆地入侵贵州,6 日 08—14 时先从西北路径入侵影响贵州西部地区,贵州东部地区天气晴朗,气温升到 30 ℃ 以上,17 时西北路冷空气已影响贵州中部偏东地区,东路冷空气开始影响铜仁东北部,20 时西北路径和东北路径 2 路冷空气夹击影响贵州东部地区,此时 850 hPa 怀化比湿达 $16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,CAPE 值为 $719.2\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, $T_{850}\sim T_{500}$ 差值为 23 ℃,贵州东部地区大气处于高能高湿状态,有利于暴雨的产生。20 时—7 日 03 时在地面 2 路冷空气的夹击影响下,使锋区和 850 hPa 南北向切变线长时间稳定维持在贵州东部地区,暖湿空气被强烈抬升,触发不稳定能量释放,产生大范围对流性暴雨天气。

3 双偏振雷达回波特征分析

3.1 组合反射率因子演变

贵州省气象局短临预报预警一体化平台提供的地面逐小时风场、雷达组合反射率因子显示:6 日 09 时西北路径冷空气开始进入毕节市北部和遵义市西部地区;10 时在冷锋附近有分散对流回波生成发展;12—15 时贵州中南部锋前暖区里也有分散对流回波生成,随着冷锋东移南压,锋面附近的对流单体不断发展加强,并有形成带状的趋势。16 时冷锋缓慢东移南压到遵义市务川、铜仁市德江、黔南州福泉、贵阳市花溪、安顺市平坝一线,此时回波已发展形成带状,

并且有多个对流体发展旺盛,中心强度达到 55 ~ 60 dBz(图 3a、3d)。17—21 时,冷锋西段快速南压到贵州南部地区,东段回波受西北路径和东北路径冷空气夹击影响,移动缓慢并逐渐转为南北向,与之对应的回波西段南压逐渐减弱消散,东段回波发展旺盛并呈准南北向分布,东移到黔东南州台江、剑河、镇远、岑巩和铜仁市江口以及印江、沿河、松桃 3 县交界地区稳定少动,中心强度达 60 dBz(图 3b、3e),此时上述地区降雨增强,江口县多站出现大暴雨,20—21 时江口县国家站和太平乡云舍 1 h 降雨量分别达 86.9 mm、80.1 mm。22 时—7 日 00 时冷锋和对应的回波均呈准南北向分布,强度有所减弱,中心强度减弱为 50 ~ 55 dBz,回波面积东西向明显扩大,同时南段不断向南扩展,由积状和带状对流回波逐渐形成大范围片状积层混合降水回波,覆盖铜仁市印江、江口、松桃中西部、玉屏,黔东南州镇远、岑巩、三穗、剑河、台江、雷山、榕江北部和天柱中西部、锦屏东部等地区(图 3c、3f),回波呈静止状态稳定少动,造成上述地区出现大范围暴雨和大暴雨天气,黔东南州三穗国家站和长吉乡等 10 站出现大暴雨,22—23 时长吉乡出现 82.2 mm 的短时强降雨。7 日 00—03 时黔东南州地面仍维持西北风与东北风的辐合,铜仁市境内和黔东南州北部和中西部地区的回波减弱趋于消散,但在黔东南州天柱中部、锦屏西部、榕江、从江西部地区又明显发展加强,中心强度为 50 ~ 55 dBz

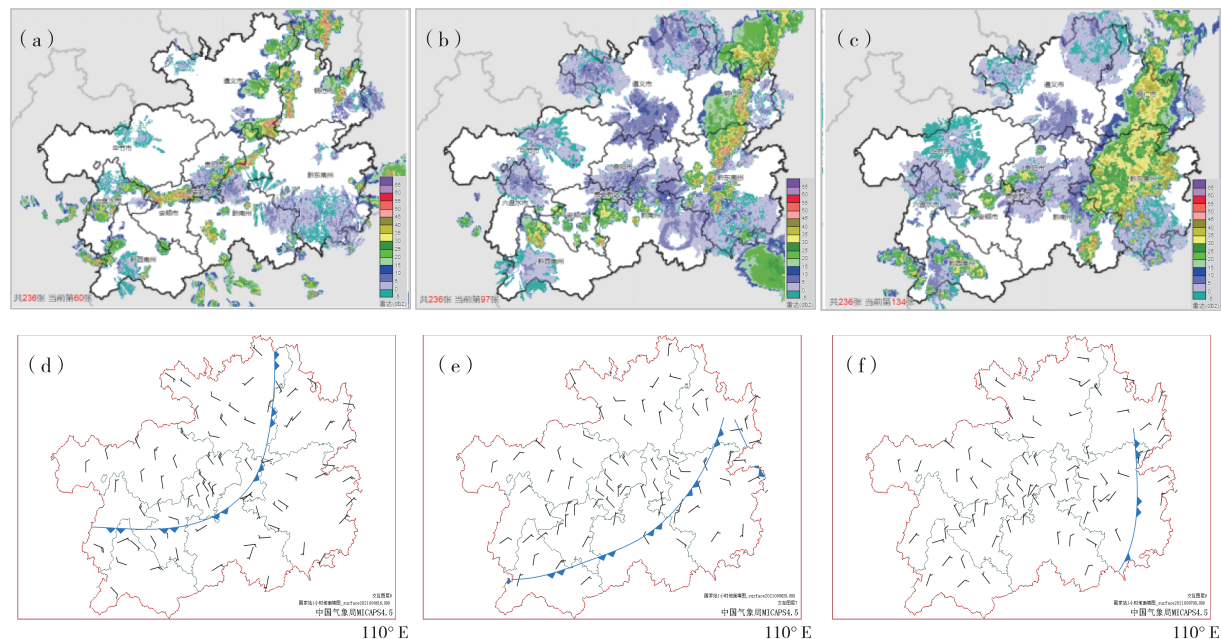


图 3 9 月 6 日 16 时(a)、20 时(b)、23 时 54 分(c)雷达组合反率拼图及 9 月 6 日 16 时(d)、20 时(e)、7 日 00 时(f)地面风场
Fig. 3 The composite inverse ratio puzzle of radar at 16:00(a), 20:00(b) and 23: 54(c) on September 6th and the surface wind field at 16:00(d), 20:00(e) on September 6th and at 00:00 on September 7th(f)

(图略),回波稳定少动,上述地区出现强降雨,00—01 时锦屏县小江出现 87.2 mm 短时强降雨,00—03 时榕江国家站连续 3 h 出现 30 mm 以上的短时强降雨,累计降雨量达大暴雨。03—05 时,地面转为一致的东北风,回波逐渐减弱南移到从江南部一带消散,强降雨天气结束。

3.2 雷达反射率因子垂直剖面及垂直积分液态水含量分析

强降雨风暴具有低质心热带降水特征^[14],存在明显的 *VIL* 跃增^[17]。根据黔东南州榕江 C 波段双偏振多普勒雷达回波资料,分析黔东南州境内暴雨和大暴雨区域上空的雷达回波垂直剖面 (*VCS*) 和垂直积分液态水含量 (*VIL*) 发现,45 dBz 以上的强回波高度均在 5 km 以下,低于 0 °C 层高度 (5.2 km),具有明显的低质心高效率的热带暖云降水回波特征,*VIL* 值在 10 ~ 30 kg · m⁻² 之间。三穗境内大暴雨发生在 6 日 21 时—7 日 00 时,此期间回波顶高在 8 km 左右,最高时可达 10 km 左右,45 dBz 以上的强回波高度在 5 km 以下,*VIL* 值最大时达到 20 ~ 30 kg · m⁻² (图略),降水效率高,22—23 时长吉乡出现 82.2 mm 的短时强降雨。锦屏上空强降雨时段出现在 6 日 23 时—7 日 01 时,强降雨发生期间,回波顶高在 8 ~ 10 km 之间,最高时达 12 km 左右,45 dBz 以上的强回波高度在 5 km 以下,*VIL* 值在 10 ~ 20 kg · m⁻² 之间,并伴有跃增现象,跃增量在 10

kg · m⁻² 左右,降水效率非常高,00—01 时锦屏小江出现 87.2 mm 短时强降雨。榕江和从江强降雨主要集中在 7 日 00—03 时,此期间,45 dBz 以上的强回波高度也在 5 km 以下,但由于离雷达较近,回波顶高剖面出现明显静锥区,*VIL* 值最大时达 10 ~ 20 kg · m⁻²,降水效率也较高,7 日 00—03 时榕江国家站连续 3 h 出现超过 30 mm 的短时强降雨,02—03 时最大雨强达 35.2 mm。

3.3 径向速度特征

径向速度图上长时间维持速度径向辐合,是强降雨产生的重要原因^[17-18]。分析此次过程对应的径向速度产品发现,在暴雨持续期间,暴雨和大暴雨发生区域上空低层 0.5 ~ 1.5° 仰角径向速度图上均有明显的风场辐合,且辐合时间维持较长。以三穗和榕江上空风场为例,三穗境内强降雨集中在 6 日 21 时—7 日 00 时,20—00 时期间三穗上空低层径向速度存在明显辐合,21—23 时随着强降雨加强,风场上出现明显气旋式辐合 (图 4a、4b),辐合时间长达 4 h 之久,此期间三穗出现 10 站大暴雨,长吉乡 22—23 时出现 82.2 mm 的短时强降雨,三穗国家站 21—23 时连续 2 h 出现 50 mm 以上的短时强降雨。榕江境内强降雨主要集中在 7 日 00—03 时,对应径向速度图上从 00 时开始风场有明显辐合 (图 4c、4d),辐合维持时间超过 3 h,榕江连续 3 h 出现 30 mm 以上短时强降雨。

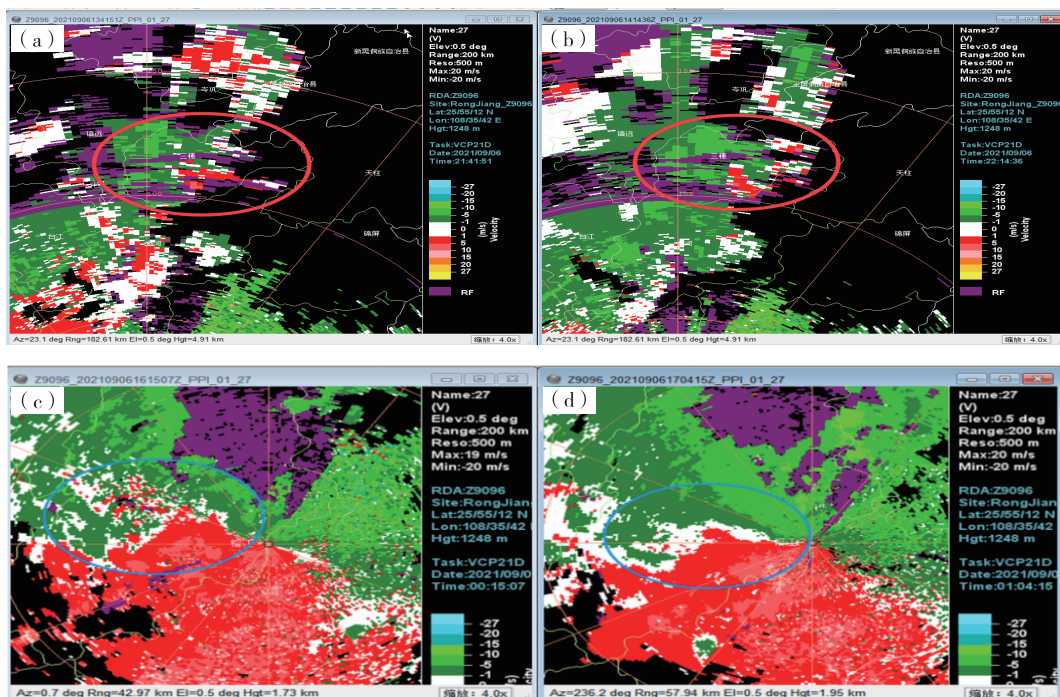


图 4 9 月 6 日 21 时 41 分 (a)、22 时 14 分 (b) 三穗和 7 日 00 时 15 分 (c)、01 时 04 分 (d) 榕江上空 0.5° 仰角平均相对径向速度图 (单位: m · s⁻¹)
Fig. 4 Sansui 21:41 (a), 22:14 (b) on September 6th and Rongjiang 00:15 (c), 01:04 (d) on September 7th, average relative radial velocity map at 0.5° elevation (unit: m · s⁻¹)

3.4 双偏振参量特征

选取黔东南州三穗和榕江出现大暴雨的2个区域,分析其对应的主要双偏振参量。发现随着雨强的增强, Z_{DR} 、 K_{DP} 、 CC 均逐渐变大,这与雍佳^[3]、苟爱萍等^[13]、郑佳锋等^[19]研究结论相一致。较大的 Z_{DR} 和 K_{DP} 值表明降水粒子谱中含有大量较大的水滴,是造成短时强降雨的主要原因^[14]。对于三穗境内的大暴雨区域,分析发现其对应的最大 Z_H 在55~60 dBz之间, Z_{DR} 在1~3 dB之间,最大可达4~5 dB, K_{DP} 范围为 $0.75 \sim 4.0 \text{ }^\circ \cdot \text{km}^{-1}$,最大可达 $5.0 \sim$

$7.0 \text{ }^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, CC 整体 >0.9 ,同时 $CC \geq 0.95$ 的范围逐渐扩大(图5),说明三穗上空以大雨滴为主,雨滴浓度大,降水强度强。对于榕江境内的大暴雨区域,其对应的最大 Z_H 在40~45 dBz之间, Z_{DR} 在0.2~1.5 dB之间,最大可达2 dB左右, K_{DP} 范围为 $0.5 \sim 3.0 \text{ }^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, $CC \geq 0.98$ (图6),说明榕江上空以小雨滴为主,雨滴浓度较大,降水强度相对三穗境内弱。说明此次过程存在大雨滴和小雨滴,但雨滴浓度均较大,降水强度强,是造成暴雨一大暴雨的主要原因。

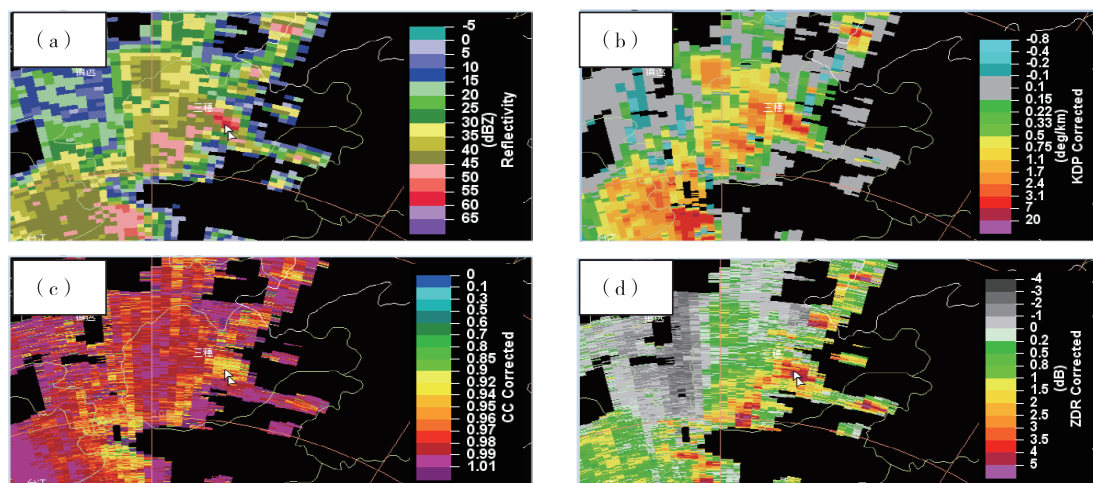


图5 9月6日21时30分三穗县 0.5° 仰角水平反射率因子 Z_H (a)、
差分相移率 K_{DP} (b)、相关系数 CC (c)、差分反射率因子 Z_{DR} (d)分布图

Fig.5 Sansui 21:30 on September 6th, horizontal reflectivity factor(Z_H)(a), differential phase shift rate(K_{DP})(b), correlation coefficient(CC)(c), and differential reflectivity factor(Z_{DR})(d) at 0.5° elevation

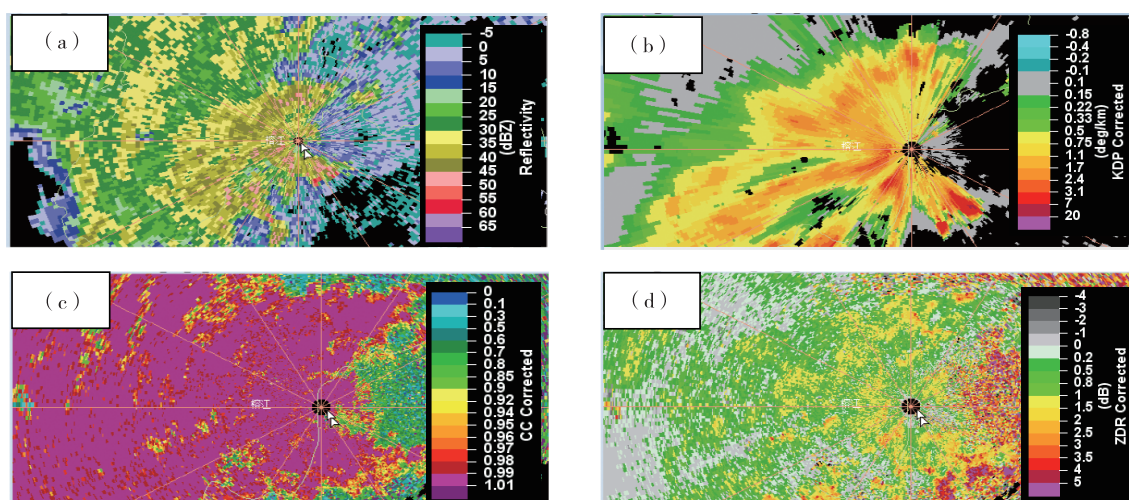


图6 9月7日02时15分榕江县 0.5° 仰角水平反射率因子 Z_H (a)、
差分相移率 K_{DP} (b)、相关系数 CC (c)、差分反射率因子 Z_{DR} (d)分布图

Fig.6 Rongjiang 02:15 on September 7th, horizontal reflectivity factor(Z_H)(a), differential phase shift rate(K_{DP})(b), correlation coefficient(CC)(c), and differential reflectivity factor(Z_{DR})(d) at 0.5° elevation

4 结论

(1) 此次天气过程是在副高 588 dagpm 等值线西伸北抬形成高压坝的背景条件下, 中高纬冷涡低槽与高原东移的短波槽在四川东部同位相合并加强东移, 引导低层切变线和冷空气南下, 冷空气从贵州西北部和湖南西部两面夹击影响贵州东部地区, 使锋面和低空切变线长时间稳定维持在贵州东部地区, 触发不稳定能量强烈释放, 产生对流性暴雨天气。

(2) 雷达组合反射率因子由分散对流回波逐渐合并成带状, 并随冷锋东移南压, 对流回波西段逐渐减弱消散, 回波东段在两路冷空气夹击影响下, 东移到贵州东部铜仁、黔东南州境内后稳定少动, 暴雨发生后带状对流回波面积逐渐扩大, 并转为片状积层混合降水回波, 长时间稳定维持少动, 是贵州东部出现大范围暴雨到大暴雨天气的主要原因。

(3) 暴雨发生期间, 回波顶高达 8 km 以上, 但 45 dBz 以上的强回波高度均在 5 km 以下, 低于 0 °C 层高度 (5.2 km), 具有明显的低质心高效率的热带暖云降水回波特征; VIL 值在 $10 \sim 30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间, 局地出现明显的跃增现象, 同时低层 $0.5 \sim 1.5$ °仰角径向速度图上均有明显的风场辐合, 且辐合时间维持较长, 最长时间长达 4 h。

(4) 此次过程雷达偏振参量具有产生强降水的特征, 最大 Z_H 在 40 ~ 60 dBz 之间, Z_{DR} 在 0.2 ~ 5 dB 之间, K_{DP} 范围为 $0.5 \sim 7.0 \text{ } ^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, CC 在 0.9 ~ 0.98 之间, 最大时 ≥ 0.98 。

参考文献

- [1] 尹忠海, 胡绍萍, 张沛源. 双线偏振多普勒雷达测量降水[J]. 气象科技, 2002, 30(4): 204-212.
- [2] 刘黎平, 王致君, 徐宝祥, 等. 我国双线偏振雷达探测理论及应用研究[J]. 高原气象, 1997(1): 99-104.
- [3] 雍佳. 双偏振雷达探测暴雪/暴雨垂直结构的云微物理特征研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.

- [4] 郭桐, 柳东慧. C 波段双偏振多普勒天气雷达原理及主要偏振参量应用分析[J]. 地球与环境, 2021, 40(19): 140-142.
- [5] 寇蕾蕾, 李应超, 楚志刚, 等. C 波段双偏振多普勒天气雷达资料分析及在定量估计降水中的应用研究[J]. 热带气象学报, 2018, 34(4): 460-471.
- [6] 宋歌, 雷蕾, 马建立, 等. 北京强对流天气中 X 波段双偏振雷达特征及应用[J]. 中低纬山地气象, 2022, 46(6): 63-69.
- [7] 钟晨, 张羽, 高建秋, 等. 双偏振天气雷达在冰雹识别中的应用[J]. 广东气象, 2014, 36(4): 76-80.
- [8] 喻谦花, 吕哲源, 李姝霞, 等. 郑州“7·20”特大暴雨卫星云图和双偏振雷达特征分析[J]. 气象与环境科学, 2022, 45(2): 102-111.
- [9] 曹舒娅, 孙伟, 韦芬芬, 等. 双偏振雷达在江苏“7.6”降雹过程中的应用分析[J]. 大气科学学报, 2021, 44(4): 499-557.
- [10] 李玮, 李皓, 刘伟, 等. 贵州中部冰雹的双偏振雷达参量特征与识别[J]. 中低纬山地气象, 2019, 43(2): 53-57.
- [11] 江慧远, 魏鸣, 张深寿, 等. 一次冬季冰雹的双偏振多普勒天气雷达回波分析[J]. 气象科学, 2019, 39(6): 756-762.
- [12] 项阳, 吴林林. 一次超级单体龙卷双偏振多普勒天气雷达分析[J]. 气象科技, 2021, 49(4): 579-588.
- [13] 荀爱萍, 张伟, 黄惠镛, 等. 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, 2019, 42(4): 103-110.
- [14] 刁秀广, 张磊, 孟宪贵, 等. 两次强降水风暴双偏振参量特征分析[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(3): 27-36.
- [15] 张羽, 胡东明, 李怀宇. 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, 2017, 39(2): 26-29.
- [16] 李云, 沃伟峰, 方艳莹. 双偏振雷达偏振参量产品在宁波的初步释用[J]. 浙江气象, 2020, 45(2): 38-44.
- [17] 文海松, 杨辉, 王格, 等. 多普勒雷达产品在 2 次短时强降水过程中的对比分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(20): 90-94.
- [18] 闵涛, 吴筱, 高文良, 等. 雅安市一次暖区强降水过程中多普勒雷达回波特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(3): 13-18.
- [19] 郑佳峰, 张杰, 朱克云, 等. 双偏振天气雷达测雨误差及水凝物识别分析[J]. 气象科技, 2014, 42(3): 364-372.
- [20] 申高航, 高安春, 李君. 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, 2021, 47(6): 737-745.
- [21] 李霞, 杨熠, 武正敏, 等. 一次极端特大暴雨天气过程 C 波段双偏振雷达资料分析[J]. 中低纬山地气象, 2022, 46(5): 45-50.
- [22] 李力, 周永水, 顾天红, 等. 双偏振雷达对贵州一次强对流过程的应用分析[J]. 中低纬山地气象, 2022, 46(6): 21-28.