暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

伊犁河谷两次短时强降水过程的双偏振雷达特征对比分析

李晓萌 李建刚 杨莲梅 曾勇 仝泽鹏 江雨霏

A comparative analysis of Dual-Polarization Radar characteristics of two short-term heavy precipitation events in the Ili river valley

LI Xiaomeng，LI Jiangang，YANG Lianmei，ZENG Yong，TONG Zepeng，JIANG Yufei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-124

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

X波段双偏振相控阵雷达定量降水估测研究

Analysis of radar quantitative precipitation estimation using X-band polarimetric radar

暴雨灾害. 2023, 42(4): 437-445 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-043

湖南一次雨雪天气降水相变的环境条件与双偏振雷达特征分析

Analysis on environmental conditions and dual-polarization radar characteristics of the phase transformation of precipitation in a rain and snow event in Hunan

暴雨灾害. 2023, 42(3): 293-302 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-065

江西一次冰雹过程的S波段双偏振雷达回波特征分析

Analysis on characteristics of S-band dual-polarization radar echo of a hail event in Jiangxi Province

暴雨灾害. 2022, 41(6): 621-630 https://doi.org/10.12406/byzh.2020-242

短时强降水和持续性强降水的雨滴谱特征对比

Comparative analysis on characteristics of raindrop spectrum of short-term and persistent heavy rain

暴雨灾害. 2023, 42(1): 1-12 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-119

湘东北一次降雹超级单体过程的双偏振雷达回波特征

Dual-polarization radar echo characteristics of a hail supercell event in northeastern Hunan

暴雨灾害. 2023, 42(2): 211-222 https://doi.org/10.12406/byzh.2021-235

基于双偏振雷达资料的洞庭湖区一次强对流过程的分阶段特征分析

Staged characteristics analysis of a severe convection over the Dongting Lake area based on dual-polarization Doppler weather radar data

暴雨灾害. 2023, 42(6): 692-703 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-170

关注微信公众号，获得更多资讯信息

李晓萌,李建刚,杨莲梅,等.2025.伊犁河谷两次短时强降水过程的双偏振雷达特征对比分析[J].暴雨灾害,44(4):504−514. LI Xiaomeng, LI Jiangang, YANG Lianmei, et al. 2025. A comparative analysis of Dual-Polarization Radar characteristics of two short-term heavy precipitation events in the Ili river valley [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4):504−514 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−124

伊犁河谷两次短时强降水过程的双偏振雷达特征对比分析

李晓萌[1, 2, 3, 4], 李建刚[1], 杨莲梅[1], 曾勇[1],
仝泽鹏[1, 2], 江雨霏[1, 2, 3]

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002; 2. 新疆空中云水资源开发利用创新研究院, 乌鲁木齐 830002; 3. 新疆云降水物理与云水资源开发实验室, 乌鲁木齐 830002; 4. 西天山云降水物理野外科学观测试验基地, 新源 844900)

摘　要: 基于常规观测资料、新源 C 波段双偏振雷达资料和 ERA5 再分析资料, 对伊犁河谷东段 2023 年 6 月 12 日和 8 月 7 日两次降水过程 (以下简称“6·12”过程和“8·7”过程) 的环流形势、中尺度对流系统、雷达特征及微物理过程进行对比分析, 结果表明: (1) “6·12”过程由中亚短波槽快速东移引起, 槽前西南气流提供充足水汽供应; “8·7”过程由中亚长波槽缓慢东移引起, 中尺度辐合切变线是导致短时强降水的直接影响系统, 西南气流叠加副高西侧偏南气流共同输送水汽。(2) 影响两次过程的中尺度对流系统不同, β 中尺度线状对流带内 γ 中尺度对流风暴造成“6·12”过程短时强降水, 组合反射率因子 (CR) 最大值为 50 dBz; γ 中尺度块状对流风暴造成“8·7 过程”短时强降水, CR 最大值为 45 dBz, 均为低质心强风暴, 非短时强降水阶段, 出现 γ 中尺度块状回波单体, 强度低于 35 dBz。(3) 两次过程的微物理特征也不同, “6·12”过程中 5 km 以上高度层存在冰相粒子, 在下落过程中逐渐融化并不断凝结和碰并增长, 1.5°仰角偏振量差分反射率因子 (ZDR) 为 0~2.4 dB, 差分传播相移率 (KDP) 为 0°~3.0 °·km^{-1}, 相关系数 (CC) 接近 1。“8·7”过程中高空无冰相粒子, 小雨滴在下落过程中不断碰并增长为高浓度的大雨滴, 1.5°仰角偏振量 ZDR 为 2.4~4.0 dB, KDP 为 0.6°~1.8 °·km^{-1}, CC 接近 1, 过程中的其他降水阶段, 双偏振量数值变化不大, 但高值区范围减小, 主要以小范围高浓度和粒子相态均一性强的小雨滴为主。两次过程双偏振量高值区均与强降水中心重叠。

关键词: 双偏振雷达; 短时强降水; 组合反射率因子; 双偏振参量
中图法分类号: P412.25　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−124

A comparative analysis of Dual-Polarization Radar characteristics of two short-term heavy precipitation events in the Ili river valley

LI Xiaomeng[1, 2, 3, 4], LI Jiangang[1], YANG Lianmei[1], ZENG Yong[1],
TONG Zepeng[1, 2], JIANG Yufei[1, 2, 3]

(1. *Institute of Desert Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Urumqi* 830002; 2. *Xinjiang Innovation Institute of Cloud Water Resource Development and Utilization*, *Urumqi* 830002; 3. *Xinjiang Cloud Precipitation Physics and Cloud Water Resources Development Laboratory*, *Urumqi* 830002; 4. *Field Scientific Observation Base of Cloud Precipitation Physics in West Tianshan Mountains*, *Xinyuan* 830002)

Abstract: Based on the conventional observation data, Xinyuan C-band dual-polarization radar data and ERA5 reanalysis data, a comparative analysis was conducted on the circulation patterns and radar characteristics of two precipitation events in the eastern section of the Ili River Valley on June 12 and August 7, 2023 (referred to as the "6·12" event and the "8·7" event). The results are as follows. (1) The "6·12" event was characterized by short-term heavy precipitation (SHP), caused by the rapid eastward movement of Central Asian short-wave trough. The southwesterly flow ahead of the trough provided sufficient water vapor. In contrast, the "8·7" event involved

收稿日期: 2024−06−25; **定稿日期**: 2024−09−22
资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (IDM2023002); 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所科技发展基金项目 (KJFZ202504)
第一作者: 李晓萌, 主要从事极端天气机理及云降水物理研究。E-mail: lixm@idm.cn
通信作者: 李建刚, 主要从事中亚灾害性天气机理研究。E-mail: shzljg_qxj@163.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

mixed precipitation, resulting from the slow eastward movement of the Central Asian long-wave trough, with mesoscale convergent shear serving as the direct influence system responsible for the SHP. (2) The mesoscale convective systems (MCS) affecting the two events differed. In the "6·12" event, meso-γ-scale convective storms within a meso-β-scale linear convective zone caused the SHP, with a maximum composite reflectivity (CR) value of 50 dBz. In the “8·7” event, meso-γ-scale clustered convective storms were responsible, with a maximum CR value of 45 dBz. Both events featured strong storms with low mass centers. Other precipitation phases of the "8·7" event exhibited meso-γ-scale clustered echo cells with intensities below 35 dBz. (3) The microphysical characteristics of the two events also differed. In the "6·12" event, ice-phase particles were present above 5 km, gradually melting and undergoing continuous condensation, collision, and growth during their descent. At the 1.5° elevation angle, the dual-polarization parameters indicated differential reflectivity (ZDR) of 0–2.4 dB, specific differential phase (KDP) of 0–3.0 °·km^{-1}, and co-polar cross-correlation coefficient (CC) of close to 1. During the SHP phase of the "8·7" event, no ice-phase particles were present in the high-altitude layers. Small raindrops continuously collided and grew into a high concentration of large raindrops during their descent. At the 1.5° elevation angle, the dual-polarization parameters showed ZDR of 2.4–4.0 dB, KDP of 0.6–1.8 °·km^{-1}, and CC of near 1. During the non-SHP phase of the "8·7" event, the values of dual-polarization variables did not change significantly, but the extent of high-value area decreased, indicating a dominance of small droplets with high concentrations and strong homogeneity in the particle phase. For both events, the areas of high dual-polarization parameters overlapped with the centers of heavy precipitation, providing indicative insights.

Key words: dual-polarization radar; short-term heavy precipitation; combined reflectivity factor; dual-polarization radar parameters

引　言

短时强降水是指在短时间内出现的强降水事件, 由于其突发性强、降水强度大、成因复杂以及监测预警难度高, 往往会造成山体崩塌、滑坡、城市道路积水、暴洪等灾害, 严重影响受灾地区的经济发展和人民生命财产安全 (孙继松, 2017; 胡鹏宇等, 2024)。因此, 加强其分析研究对提高其监测预警水平具有重要意义。

双偏振雷达不仅可以提供更精细的高时空分辨率的大范围大气观测, 还能探测到不同降水粒子的云微物理过程、强对流系统的三维结构演变以及对流系统内部的风场动力结构特征, 成为深入研究强对流系统内部结构及云微物理机制的重要手段, 并在强对流天气监测、短时临近预报以及数值预报资料同化中起着巨大作用 (张培昌等, 2018; 吕建等, 2023)。国内外学者基于双偏振雷达资料对短时强降水的发生发展特征、机理及演变规律开展了许多研究工作。由于国外的双偏振雷达研究起步和发展早, 许多国外学者在早期便建立了偏振参量回波特征关系, 利用偏振参量推断粒子大小及相态 (Aydin et al., 1986; Bringi et al., 2001)。Kumjian 和 Ryzhkov (2008) 发现在风暴前侧下沉气流具有高反射率因子与接近零差分反射率的特征, 其南部会出现较窄的高差分反射率弧状特征, 主上升气流附近可以观测到高差分相位常数柱状特征。

自我国新一代天气雷达布网建设以来, 我国强对流天气监测预警水平得到显著提高 (刘晶等, 2019; 俞小鼎和郑永光, 2020)。国内气象学者针对强对流天气利用双偏振雷达资料开展了许多研究工作。张杰等 (2010) 利用双偏振雷达资料归纳了不同降水类型对应的偏振参量的一般取值范围。张磊 (2017) 研究指出短时强降雨的差分反射率因子 (ZDR) 和差分传播相移率 (KDP) 均随着回波强度的增加而增加。黄琴 (2018) 对南京一次暴雨过程分析了双偏振雷达回波特征, 利用偏振回波可以较好的区分降水粒子相态以及改善定量估测降水效果。潘佳文等 (2020) 利用双偏振雷达分析了超级单体风暴内的回波特征与云维物理结构, 指出风暴低层上升气流位置可以通过有界弱回波区和钩状回波之前的低相关系数区识别, 差分反射率弧特征可以较好的指示风暴的发展程度, 而差分反射率柱可以用于指示风暴主上升气流的位置, 差分相位常数柱型特征可以用来指示地面雨强中心位置。方桃妮等 (2022) 针对一次短时暴雨分析双偏振雷达回波特征, 指出对于短时暴雨区反射率因子在 35~55 dBz 之间对应的差分反射率与差分传播相位常数会随着反射率因子的增大而增大, 并且三者强中心基本重叠, 体现强降水区降水效率最高, 雨滴最大浓度最高, 同反射率因子的条件下, 差分反射率与差分传播相位常数越大, 降水越强。唐明晖等 (2023) 研究发现, 不同相态降水时段相关系数 (CC)、差分反射率 (ZDR)、水平反射率 (ZH) 存在差异, 对雨雪天气过程中降水相态转变的识别有指示作用。

本文使用常规气象观测资料、新源 C 波段双偏振雷达资料和 ERA5 再分析资料等, 对 2023 年 6 月 12 日 (以下简称“6·12”过程) 和 8 月 7 日 (以下简称“8·7”过程) 发生在伊犁河谷的两次短时强降水过程进行分析。选取这两次过程的原因在于: 1) 两次过程均在新源雷达有效探测范围内; 2) 降水强度、持续

时间等特征差异显著, 有利于对比分析不同天气背景下短时强降水的微物理特征差异。通过研究旨在揭示伊犁河谷短时强降水过程微物理特征演变机制, 为双偏振雷达资料在新疆短时强降水监测预警中的应用提供科学依据。

1 资料说明和天气实况

1.1 资料说明

本文使用的研究资料包括: (1) 中国气象局业务观测网提供的 2023 年 6 月 11—12 日和 8 月 7—8 日区域气象观测站降水观测数据, 用于分析两次降水过程的实况特征; (2) 同时段 ERA5 再分析数据, 时间分辨率为 1 h, 空分辨率为 0.25°×0.25°, 同于分析天气形势背景; (3) 双偏振雷达资料来自新疆伊犁新源地区的 C 波段双偏振雷达, 时间分辨率为 6 min, 其它因子的测量分辨率分别为, 反射率因子 0.5 dBz、速度 0.2 m·s^{-1}、谱宽 0.2 m·s^{-1}。双偏振探测范围≥150 km, 探测高度范围为 0.12~20 km, 用于分析对比两次过程的双偏振雷达特征及微物理过程差异。本研究使用的参量除了反射率因子 (Z) 以外还包括偏振参量 ZDR、KDP 和 CC 等。其中, ZDR 与降水粒子的轴长比呈正相关, 雨滴粒子直径越大, 形态越扁平, ZDR 越大; KDP 与降水粒子轴长比及浓度有关, 当粒子越扁平、浓度越大, KDP 越大; CC 与降水粒子的形态、指向和大小一致性等相关, CC 越接近 1, 表明其一致性越高 (Kumjian, 2013)。

图 1 给出伊犁河谷地形图。可见, 伊犁河谷地处西天山, 北、东、南三面环山, 向西开口的喇叭状地形有利于西风环流在山地形成地形雨, 是我国西北最大降水中心 (杨涛等, 2023)。新源县在空间上呈东西长、南北窄、东高西低、两边高中间低的特殊地形,

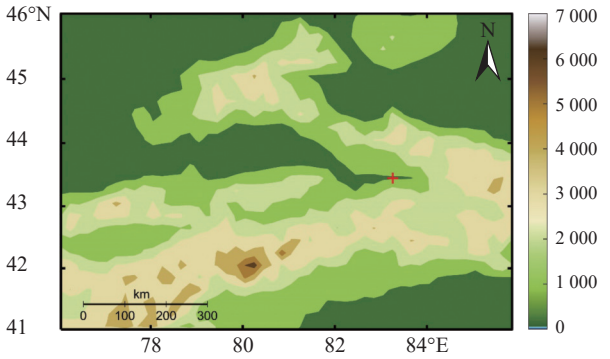


图 1 伊犁河谷地形图 (单位: m; 红色“+”为新源站点位置)

Fig. 1 Topographic map of the Ili Valley (unit: m, red "+" indicates the location of the Xinyuan station)

是伊犁河谷降水量最大区域, 位于河谷东部, 新源气象站站海拔低于 1 000 m。

不同于中央气象台对短时强降水的定义, 即 1 h 降水量≥20 mm 记为短时强降水 (俞小鼎, 2013), 新疆气象部门基于新疆干旱气候背景, 并结合多年的预报服务实践、暴雨洪水成灾事实和干旱半干旱地区强降水特点, 将 1 h 降水量≥10 mm 记为短时强降水 (杨莲梅等, 2020; 杨涛等, 2022)。

1.2 天气实况

2023 年 6 月 11—12 日, 伊犁河谷范围出现分散性短时强降水过程, 小时降水量高值区出现在伊犁河谷西南侧的昭苏县北部, 达 28 mm (图略), 伊犁河谷东段的新源 12 日 00:00 (北京时, 下同) 出现短时强降水 (图 2a), 小时降水量达 15.2 mm, 01:00 降水强度减小, 小时降水量为 5.4 mm, 02:00 降水强度迅速减小至 0.2 mm, 而后降水事件结束。同年 8 月 7—8 日, 伊犁河谷出现区域性降水过程, 降水中心出现在新源县中部和巩留县东南部 (图略), 新源在 8 月 7 日 18:00—8 日 11:00 降水分为两个阶段 (图 2b),

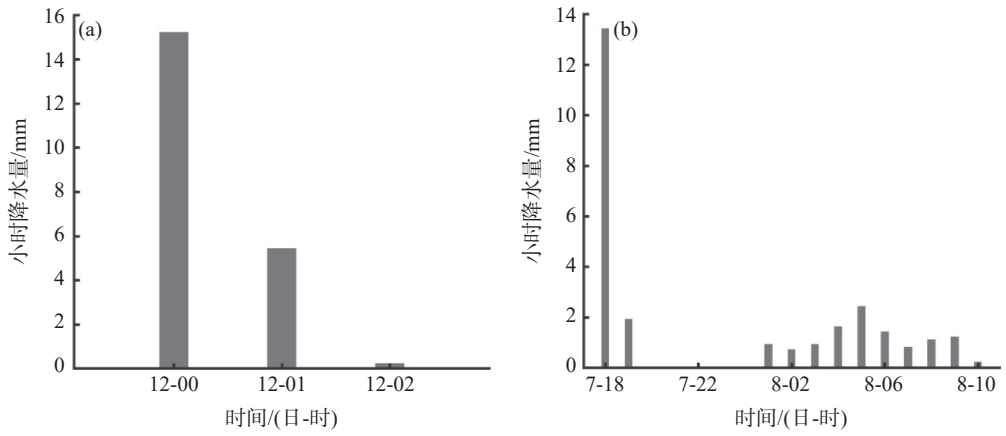


图 2 2023 年 6 月 12 日 00:00—02:00 (a) 和 8 月 7 日 18:00—8 日 10:00 (b) 新源站逐小时降水量直方图

Fig. 2 Histograms of the precipitation at Xinyuan station from (a) 00:00 BT to 02:00 BT on June 12 and (b) 18:00 BT on August 7 to 10:00 BT on August 8, 2023

第一阶段 18:00 小时降水量为 13.4 mm, 19:00 小时降水量减小至 1.9 mm。7 日 20:00—8 日 00:00 为降水间歇期, 8 日 01:00—10:00 为第二个降水阶段, 持续时间为 10 h, 小时降水量均小于 3 mm, 最大小时降水量为 2.4 mm。因为昭苏无天气雷达观测, 而新源架设有一部 C 波段双偏振雷达, 因此选择上述两次降水过程中均出现短时强降水的新源站对双偏振雷达偏振量特征的异同进行分析。

2 结果与分析

2.1 天气形势

图 3a 为 2023 年 6 月 12 日 00:00 100 hPa 位势高度场, 可见, 南亚高压中心位于青藏高原西南侧, 呈单体型分布, 伊犁河谷位于高压脊后西南气流控制下, 强的辐散抽吸利于强对流垂直运动的发展, 为短时强降水的发生提供有利动力条件。500 hPa 中亚短波槽位于巴尔喀什湖东侧, 该低槽快速东移影响伊犁河谷造成短时强降水 (图 3b)。500 hPa 中亚短波槽西南风输送明显水汽输送至降水区, 为“6·12”过程短时强降水的发生发展提供充沛水汽条件 (图 3c)。700 hPa 由于高空受槽前西北气流影响, 在降水区存在西北风和西南风的辐合, 加上西天山山区有利的地形抬升作用, 在降水区形成动力抬升机制造成本次短时强降水 (图 3d)。6 月 12 日 02:00 后, 南亚高压强度减弱南压, 伊犁河谷高层受西风气流控制, 低层由气旋式切边辐合转变为反气旋式, 不利于垂直上升运动发展; 中层中亚低槽东移北抬减弱, 槽前西南气流水汽输送带随之北抬, 伊犁河谷水汽供应不足, 降水过程结束 (图略)。

图 4a 为 2023 年 8 月 7 日 18:00 100 hPa 位势高度场, 可见, 南亚高压呈双体型分布, 高压中心分别位于地中海东部和青藏高原上空, 中纬度低槽位于里海东侧, 槽前西南急流强盛, 最大风速为 50 m·s^{-1}, 降水区位于急流带中西南风转偏西风的区域, 高空辐散及槽前正涡度平流为短时强降水的发生提供有利动力条件。500 hPa 中亚长波槽位于咸海和巴尔喀什湖之间, 西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 西伸北抬使得中亚长波槽移动缓慢造成降水过程较长, 槽前西南气流携带低层的水汽持续输送至降水区。除了一条明显的西南风水汽输送带之外, 由于副高的西伸其西侧的偏南气流携带水汽与槽前的西南气流在青藏高原汇合, 共同以偏南风将水汽输送至降水区, 为降水的发生提供充足的水汽供应 (图 4b、c)。700 hPa 强的东北气流与西南气流在降水

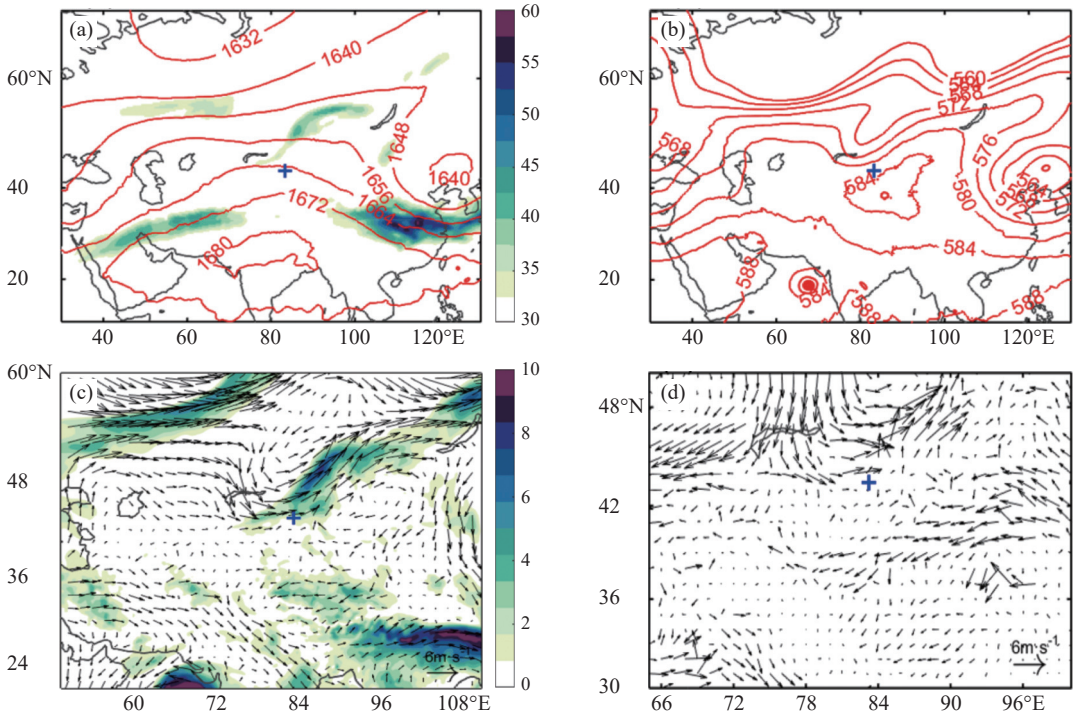


图 3 2023 年 6 月 12 日 00:00 100 hPa 位势高度场 (等值线, 单位: dagpm) 和 200 hPa 风速 (阴影, 单位: m·s^{-1}) (a)、500 hPa 位势高度场 (b, 单位: dagpm)、500 hPa 风场 (箭头) 和水汽通量 (阴影, 单位: g·(cm·hPa·s)$^{-1}$) (c) 以及 700 hPa 风场 (d) (蓝色“+”为新源站点位置, 下同)

Fig. 3 (a) The 100 hPa potential height field (contours, unit: dagpm) and 200 hPa wind field (shaded, unit: m·s^{-1}), (b) the 500 hPa potential height field (unit: dagpm), (c) the 500 hPa wind (arrow) and water vapor flux (shaded, unit: g·(cm·hPa·s)$^{-1}$) and (d) the 700 hPa wind field at 00:00 BT on June 12, 2023 (blue "+" indicates the location of the Xinyuan station, the same hereinafter)

区形成辐合，加上特殊地形的抬升作用，有利于垂直上升运动的发展，造成 18—19 时短时强降水 (图 4d)。8 月 7 日 20:00—8 月 8 日 00:00，由于低层风场不再辐合，受偏西气流控制，不利于垂直上升运动发展，并且随着 500 hPa 中亚长波槽东移北抬，伊犁河谷出现降水间歇期 (图 2b)。2023 年 8 月 8 日 01:00 开始又有降水出现，这是由于高层南亚高压维持，高压系统前的低槽系统加深，低层偏西气流和偏东气流在伊犁河谷形成辐合，加之地形作用形成低层辐合，配合高层辐散，形成有利的动力条件。在副高西伸的影响下，高压系统西侧的偏南气流与中纬度低槽前的偏西南气流汇合，在青藏高原北部形成水汽辐合中心输送至伊犁河谷，但输送的水汽通量远小于短时强降水阶段，因此降水强度小 (图 2b)。

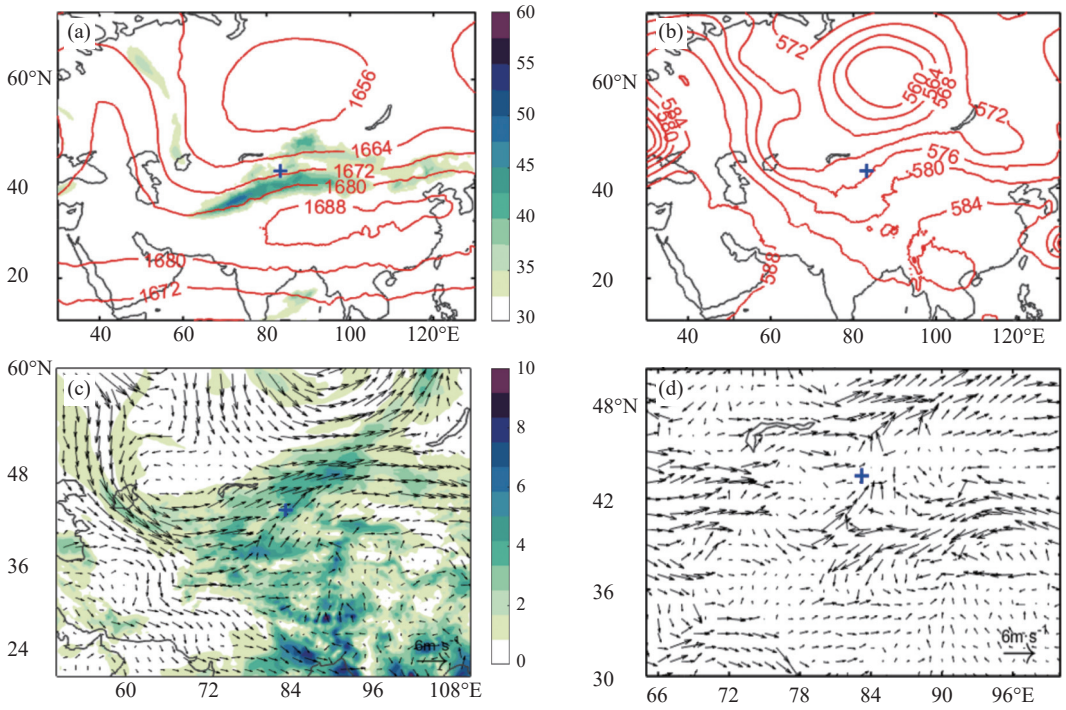


图 4 同图 3，但为 2023 年 8 月 7 日 18:00 形势场

Fig. 4 Same as Fig. 3, but the time for 18:00 BT on August 7, 2023

2.2 “6·12”过程和“8·7”过程的雷达回波演变特征

图 5 给出了“6·12”过程中组合反射率因子的演变过程。降水开始前，新源站西侧出现一条东北-西南向的 β 中尺度的线状对流带 (图略)。在引导气流与西天山特殊地形的影响下，在 6 月 11 日 23:16 和 23:22 逐渐演变成向西开口的 β 中尺度喇叭状对流带 (图 5a、b)，其东部 γ 中尺度对流风暴持续发展并维持，移过新源站的最强组合反射率因子达 50 dBz，造成新源短时强降水。β 中尺度喇叭状对流带 6 月 12 日 00:02，在引导气流作用下，向东北方向快速减弱东移，其尾部回波移过新源站，回波强度减至 40 dBz，降水强度减弱 (图 5c)。00:30 之后，持续受引导气流影响，β 中尺度的线状对流风暴快速向东北移动，强度减弱，尺度减小，并远离新源站降水结束 (图 5d)。

图 6 给出“8·7”过程组合反射率因子演变。8 月 7 日 17:12，由新源站西侧发展的 γ 中尺度块状对流风暴在引导气流作用下，东移移入新源站上空，回波强度最大值达 45 dBz (图 6a)。在引导气流和地形的影响下，与其西侧回波单体合并发展为 β 中尺度线状对流风暴维持在新源站上空，造成短时强降水 (图 6b)。18:21 持续受引导气流影响，原 β 中尺度线状对流风暴强度和尺度均减小并向东北移动移出新源站，伴随降水强度减弱后降水过程结束 (图 6c)。8 月 7 日 20:00—8 月 8 日 00:00 降水间歇期，新源站上空无降水回波出现 (图略)。在 01:00 新源站上空出现东西向的 β 中尺度降水回波带，在降水回波带内不断新生发展出 γ 中尺度的块状回波单体，在引导气流的作用下移过新源站，由于回波强度较弱，基本在 35 dBz 以下，对应该阶段降水强度较小在 3 mm 以下 (图 6d)。基于上述结果，与我国东部地区相比，新疆地区降水回波强度更小，东部地区降水回波强中心基本在 60 dBz 以上，且高值区范围更大 (于怀征等, 2020; 陈龙等, 2023)。以往的研究中发现新疆地区的降水粒子直径与我国中东部相比更小，粒子浓度甚至小一个量级，因此回波强度更小 (Zeng et al., 2022; Wen et al., 2019)。

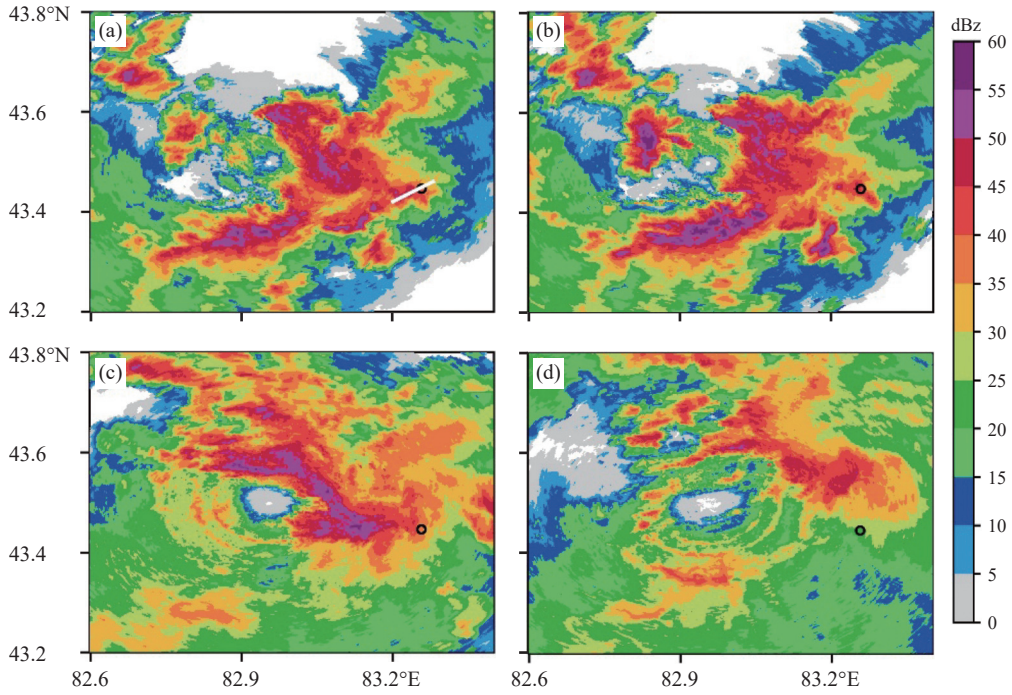


图 5 2023 年 6 月 11 日 23:16 (a)、23:22 (b)、00:02 (c) 和 00:30 (d) 新源站双偏振雷达组合反射率因子 (黑色圆圈为新源站点位置,下同, 图 5a 中白色实线为图 7a 和图 11a、c、e 垂直剖面沿线)

Fig. 5 The combined dual-polarized radar reflectivity factor at (a) 23:16 BT, (b) 23:22 BT, (c) 00:02 BT, and (d) 00:30 BT on June 11, 2023, at Xinyuan station (The black circle shows the location of the Xinyuan station, the sane hereinafter. The solid white line in panel (a) shows the location of the vertical profiles in Fig. 7a and Fig. 11a, Fig. 11c, Fig. 11e)

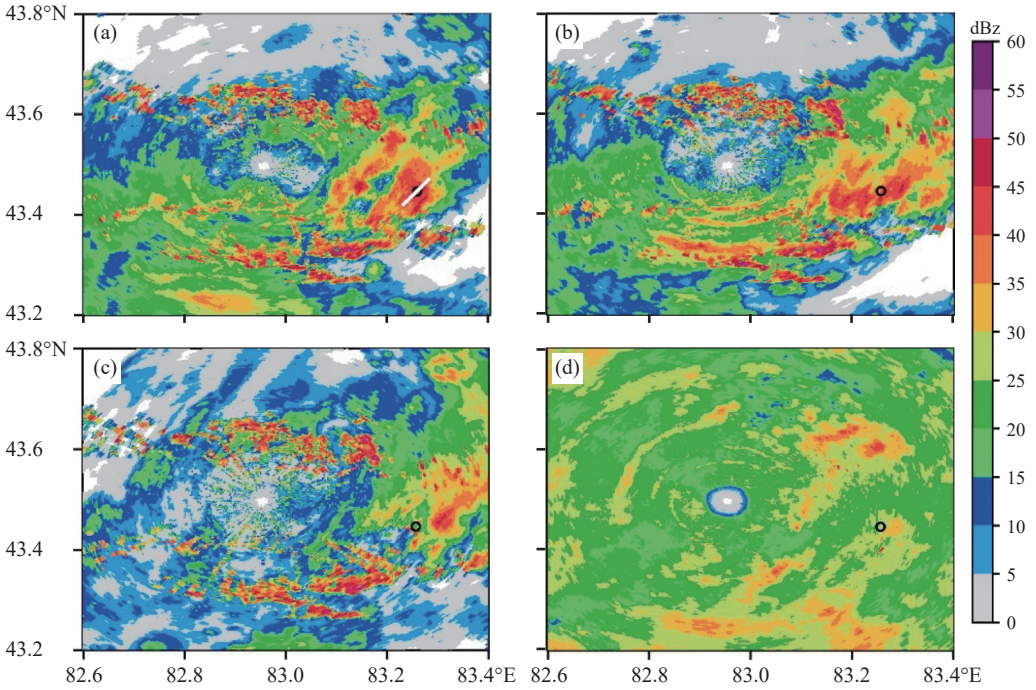


图 6 2023 年 8 月 7 日 17:12 (a)、17:35 (b)、18:21 (c) 和 8 日 05:01 (d) 新源站双偏振雷达组合反射率因子 (图 6a 中白色实线为图 7b 和图 11b、d、f 垂直剖面沿线)

Fig. 6 The combined dual-polarized radar reflectivity factor at (a) 17:12 BT, (b) 17:35 BT, (c) 18:21 BT on August 7, and (d) 05:01 BT on August 8, 2023, at Xinyuan station (The solid white line in panel (a) shows the location of the vertical profiles in Fig. 7b and Fig. 11b, Fig. 11d, Fig. 11f)

图 7 给出两次短时强降水过程分别沿图 5a 和图 6a 中白色实线的组合反射率垂直剖面图。可见两次短时强降水过程均出现了 γ 中尺度低质心强对流风暴, “6·12”过程对流风暴强度最强超过 50 dBz, 大于 50 dBz 的强回波均在 3 km 以下 (图 7a)。“8·7 过程”对流风暴最强达 48 dBz, 风暴强度中心低于 4 km

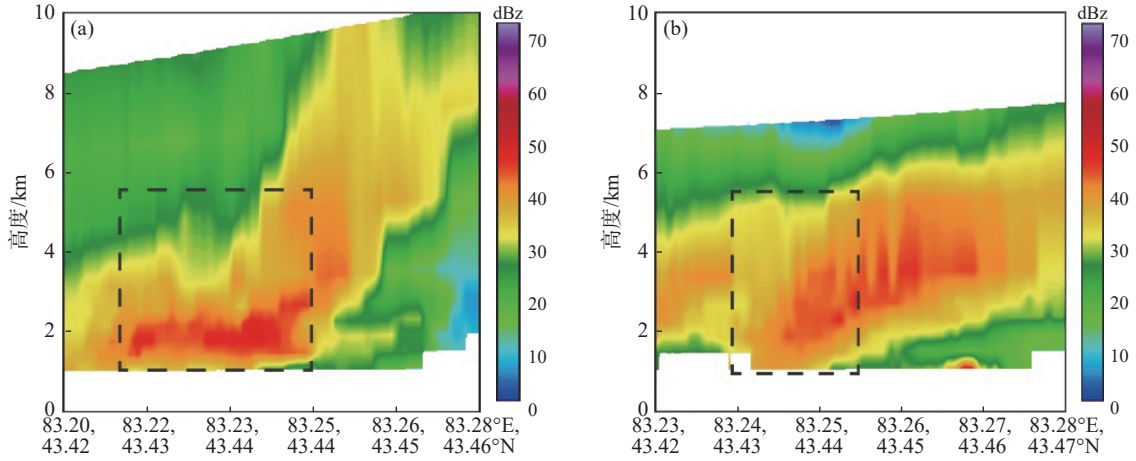


图 7 2023 年 6 月 11 日 23:11(a) 和 2023 年 8 月 7 日 17:30(b) 新源站分别沿图 5a 和图 6a 中白线所作的组合反射率因子垂直剖面图 (黑色方框为新源站降水区, 下同)

Fig. 7 Vertical profiles of the combined reflectivity factor taken along the white lines in Figures 5a and 6a at the Xinyuan station on (a) June 11, 2023, and (b) August 7, 2023 (black boxes are precipitation zones at Xinyuan station, the same hereinafter)

(图 7b), 与“6·12”过程相比对流风暴强度和尺度都更小, 对应降水强度较小。

2.3 “6·12”过程和“8·7”过程的双偏振雷达偏振量特征

双偏振雷达除了可以提供常规单偏振雷达的参量外, 还能提供多个双偏振参量, 从而提高对降水粒子大小、形状和相态的识别, 在降水微物理研究中发挥越来越大的作用 (Gorgucci et al., 2000; Ryzhkov et al., 2005)。1976 年, Seliga 和 Bringi (1976) 基于雨滴的扁球性, 提出联合利用雷达的水平和垂直通道进行降水测量, 定义降水在两个通道的后向散射能量之比为 ZDR。它表示降水粒子在垂直和水平方向上的非球形程度, 其大小仅与降水粒子的形状和相态相关, 与粒子数量等无关。KDP 能很好地识别强降水区域, 其值大小与粒子数密度相关性非常好, 能很好地估算液态水含量, 通常用于强降水估算、冰雹识别、降水类型识别等 (孙丝雨等, 2013; 郑佳峰等, 2014)。Gorgucci 等 (2002) 基于瑞利散射推导出 KDP 与液态水含量和粒子质量加权平均直径的乘积相关。CC 是一个相似程度测量值, 表示在一个脉冲的有效照射体积内水平和垂直极化脉冲作用的相似性, 主要用于区分非气象回波、0°层识别、相位识别和冰雹识别 (李春飞和邹于琴, 2023)。图 8 给出了“6·12”过程双偏振参量分布图。双偏振量数值的变化与小时降水率变化对应, 即小时降水率减小对应双偏振量数值减小, 同时空间范围也变小。6 月 11 日 23:16, 新源站 ZDR 为 0~2.4 dB, 其南侧出现三个高值中心, ZDR 最大值为 3.2 dB。新源站 KDP 为 0°~3.0 °·km^{-1}, 其西侧出现最大值达 5.4 °·km^{-1}, CC 值大于 0.96 接近 1 (图 8a、c、e)。表明在该时刻主要是大雨滴、雨滴浓度大, 且降水相态均一性高, 为纯降雨过程, 对应时刻最大小时降水量 15.2 mm。在 12 日 00:24 (图 8b、d、f), 随着降水回波东北移强度减弱, 双偏振量也表现出同样的减小, 表明随着降水回波的移动减弱, 雨滴直径减小, 雨滴浓度减小, 粒子相态均一性也有所下降, 对应降水率减小。

在“8·7”过程的短时强降水阶段, 新源站附近出现 ZDR 高值, 范围在 2.4~4.0 dB (图 9a), KDP 高值区范围在 0.6°~1.8 °·km^{-1}, CC 接近 1 (图 9c、e)。说明在该时刻降水主要以小范围的高浓度大雨滴为主。在 18:21, 随着降水回波东北移动, 降水区的 ZDR、KDP 和 CC 均有减小, 即雨滴直径和粒子数浓度减小, 相态均一性降低 (图 9b、d、f)。与“6·12”过程相比, ZDR 最大值较大, KDP 较小, 说明“8·7”过程短时强降水阶段的雨滴直径更大, 而浓度较小, 对应最强小时降水率略小 (图 2b)。在“8·7”过程的非短时强降水阶段, 双偏振量数值在该阶段变化不大 (图 10)。新源站周围 ZDR 为 0~2.4 dB, KDP 为−0.6°~0.6 °·km^{-1}, CC 接近 1。与短时强降水阶段相比, ZDR 和 KDP 更小, CC 差异不大, 说明此阶段降水以小范围的高浓度小雨滴为主。与我国东部沿海地区 (如: 福建、浙江) 相比 (潘佳文等, 2020; 方桃妮等, 2022), 新疆伊犁河谷地区呈现出典型的大陆性降水特征, 即降水粒子直径大、浓度小, 而沿海地区则呈现出典型的热带海洋性降水特征, 即降水粒子直径小、浓度大; 但相同的是, 均表现为双偏振参量的高值区与降水强中心重叠, 表明强降水区降水粒子直径大、浓度高、降水效率最高。综上, 双偏振雷达参量与两次降水过程降水量特征对应很好, 可见新源的 C 波段双偏振雷达在短时强降水识别分析方面具有指示意义。

图 11 给出两次短时强降水过程的双偏振量垂直

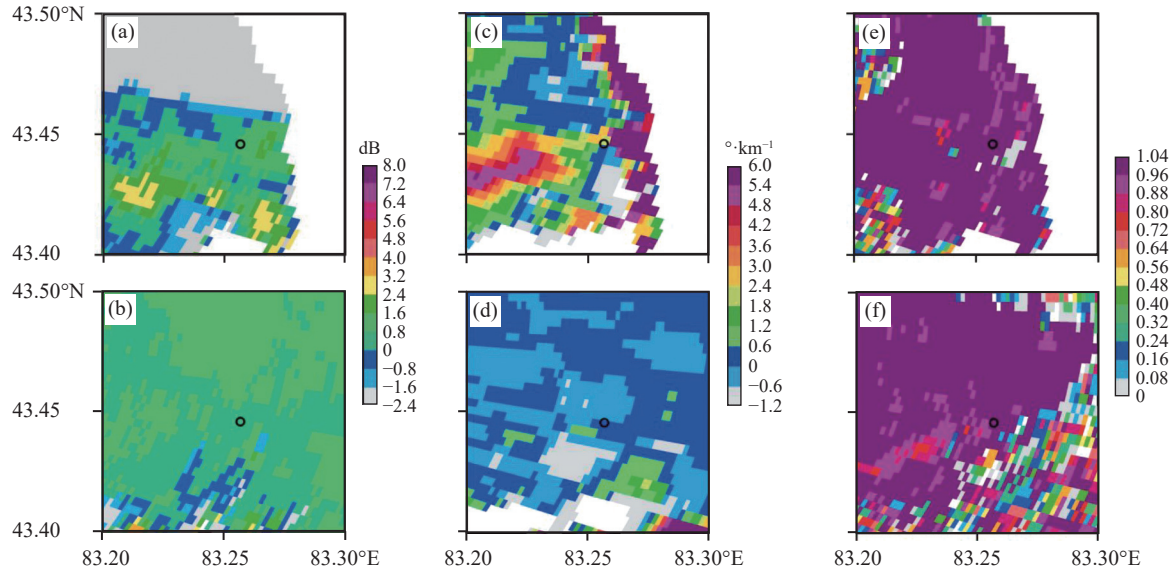


图 8 2023 年 6 月 11 日 23:16 (a、c、e) 和 12 日 00:24 (b、d、f) 新源站 1.5°仰角 ZDR (a、b)、KDP (c、d) 及 CC (e、f) 空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of (a, b) ZDR, (c, d) KDP, and (e, f) CC from the radar observations at 1.5° elevation of Xinyuan station at (a, c, e) 23:16 BT on June 11, 2023 and (b, d, f) 00:24 BT on June 12, 2023

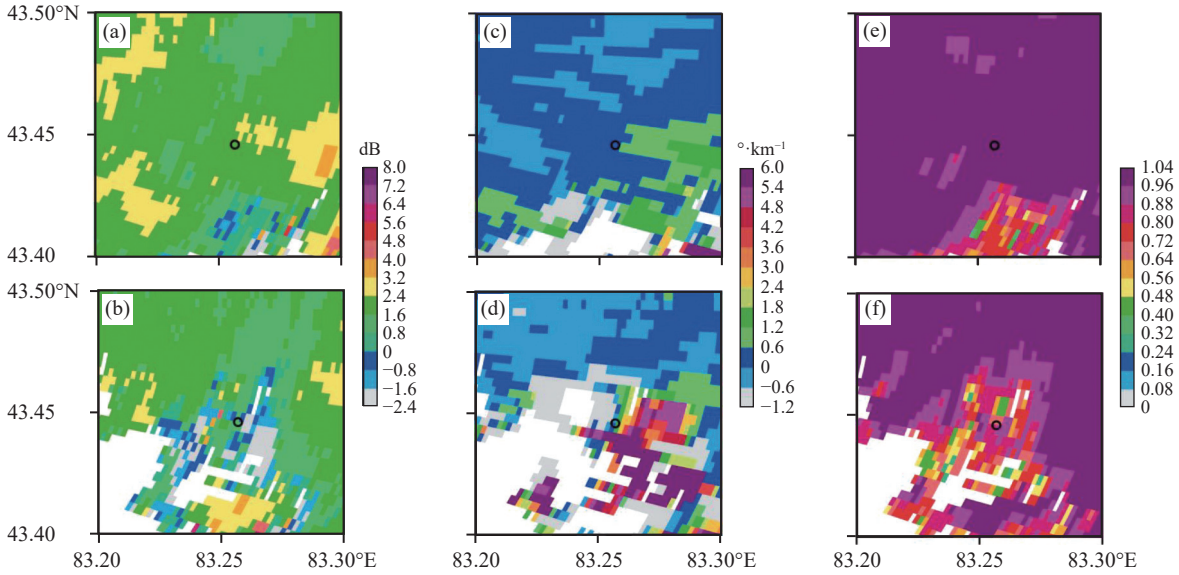


图 9 2023 年 8 月 7 日 17:35 (a、c、e) 和 18:21 (b、d、f) 新源站 1.5°仰角 ZDR (a、b)、KDP (c、d) 及 CC (e、f) 空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of (a, b) ZDR, (c, d) KDP, and (e, f) CC from the radar observations at 1.5° elevation of Xinyuan station at (a, c, e) 17:35 BT and (b, d, f) 18:21 BT on August 7, 2023

剖面。6 月 11 日 23:11, 降水区在该时刻 5 km 以上高度处, ZDR 为负值, 且 KDP 值较小, CC 值较低, 小于 0.85, 即在该高度层存在冰相粒子, 且粒子浓度和均一性较低 (图 11a、c、e)。随着高度的降低, 5 km 以下高度双偏振量的值都增大, 高值区出现在 1—3 km 之间, 说明在降水粒子下落过程中, 冰晶等固态降水粒子逐渐融化, 雨滴不断凝结和碰并增长 (申高航等, 2021)。与“6·12”过程不同, 8 月 7 日 17:30 在降水区上空 ZDR 均为正值, 且随高度的降低而增大, 即高空无冰相粒子; KDP 的值更小, CC 的值在降水区上空都接近 1。说明在“8·7”过程中, 小雨滴在下落过程中不断碰并增长为高浓度的大雨滴。

综上, 两次短时强降水过程在影响系统和双偏振量特征上存在差异。“6·12”过程主要是中亚短波槽东移造成的, 西南气流持续的水汽供应配合低层中尺度辐合切变线, 引发短时强降水。“8·7”过程是由中亚长波槽缓慢移动导致的, 其中低层中尺度辐合切变线是触发期间短时强降水的直接影响系统。两次短时强降水过程均出现低质心强风暴, “6·12”过程和“8·7”过程均由 γ 中尺度块状对流风暴所造成, 移过站点的风暴强度最大值分别为 50 dBz 和 45 dBz。“8·7”过程中的非短时强降水阶段, 出现 γ 中尺度块

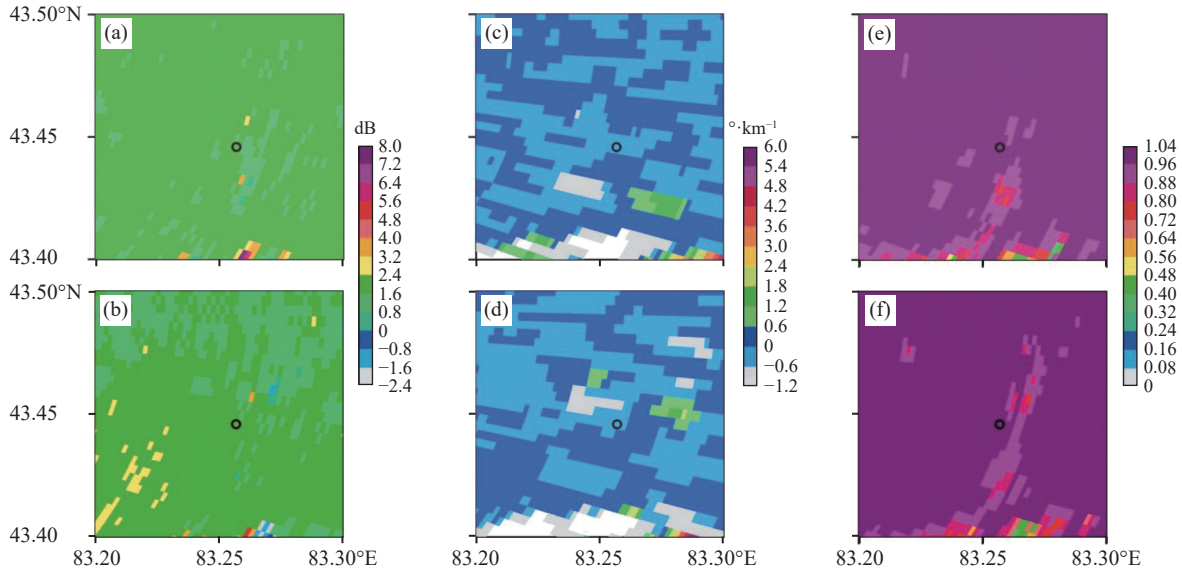


图 10 2023 年 8 月 8 日 04:55 (a、c、e) 和 07:58 (b、d、f) 新源站 1.5°仰角 ZDR (a、b)、KDP (c、d) 及 CC (e、f) 空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of (a, b) ZDR, (c, d) KDP, and (e, f) CC from the radar observations at 1.5° elevation of Xinyuan station at (a, c, e) 04:55 BT and (b, d, f) 07:58 BT on August 8, 2023 (black circle shows the position of Xinyuan station)

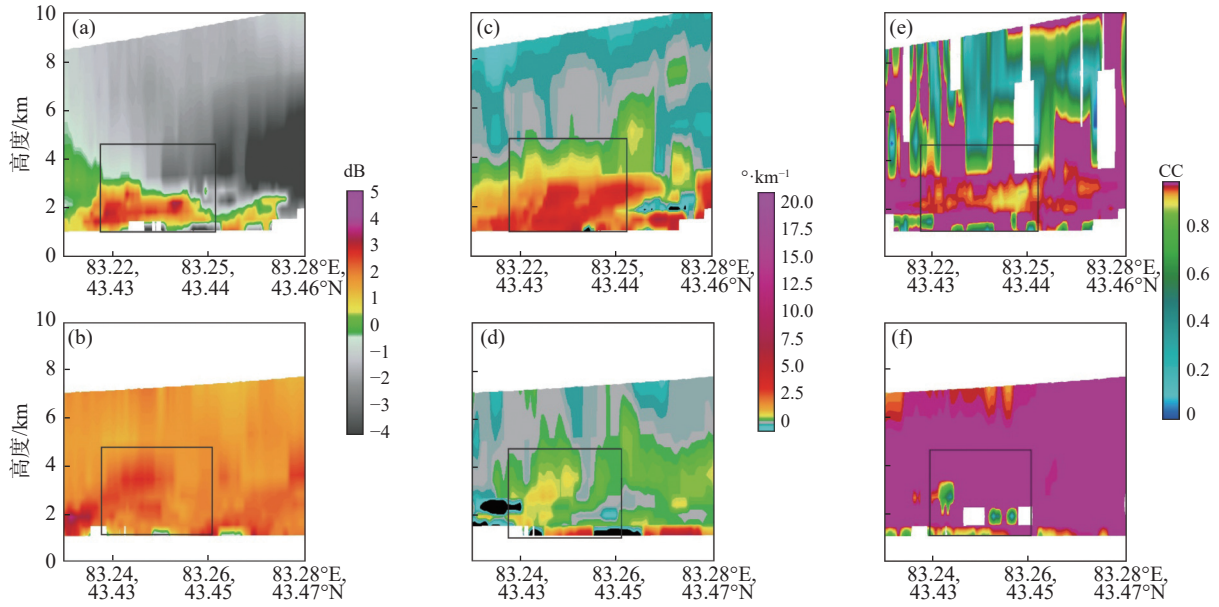


图 11 2023 年 6 月 11 日 23:11 (a、c、e) 和 2023 年 8 月 7 日 17:30 (b、d、f) 新源站 ZDR (a、b)、KDP (c、d) 和 CC (e、f) 垂直剖面图

Fig. 11 Vertical profiles of (a, b) ZDR, (c, d) KDP, and (e, f) CC at Xinyuan Station at (a, c, e) 23:11 BT on June 11 and (b, d, f) 17:30 BT on August 7, 2023

状回波单体, 强度低于 35 dBz。两个过程的双偏振量高值区均与降水中心重叠, “6·12”过程 5 km 以上高度层存在冰相粒子, 低层主要以高浓度和高粒子相态均一性的大雨滴为主, “8·7”过程中短时强降水过程高空无冰相粒子, 与“6·12”过程相比, 雨滴直径大浓度小。而“8·7”过程中的非短时强降水过程则主要以小范围高浓度和相态均一性的小雨滴为主。

3 结论与讨论

本文利用常规观测资料、新源 C 波段双偏振雷达资料和 ERA5 再分析资料, 针对伊犁河谷东段新源 2023 年“6·12”和“8·7”两次降水过程的实况、环流、双偏振雷达特征及微物理过程进行了分析和对比, 得到了如下的结论:

(1) 2023 年 6 月 12 日 00:00 在伊犁河谷东段新源发生短时强降水过程, 小时降水量为 15.2 mm。该过程是由中亚短波槽东移造成的, 槽前西南水汽输送带配合高层辐散低层中尺度辐合切变线共同提供有利动力和水汽条件。8 月 7 日 18:00—8 月 8 日 10:00, 发生混合型降水过程, 分别为短时强降水和非短时强降水, 最大小时降水量为 13.4 mm。该过程是由中亚长波槽缓慢移动导致的, 其中低层中尺度辐

合切变线是触发短时强降水的直接影响系统, 槽前西南风水汽输送带加偏南风水汽输送带共同为降水区提供充足的水汽条件。

(2) “6·12”过程中, β 中尺度线状对流带中的 γ 尺度风暴移过降水区, 降水区上空组合反射率因子最大为 50 dBz。“8·7”过程中, γ 中尺度块状对流风暴东移发展, 移过降水区, 造成短时强降水, 组合反射率因子最大为 45 dBz; 过程中的其他降水阶段, 在 β 中尺度的降水回波带中不断新生发展出 γ 中尺度块状回波单体, 组合反射率因子低于 35 dBz, 造成弱降水。两次短时强降水过程中的对流风暴均为低质心强风暴, 强回波中心均在 4 km 以下, “6·12”过程中的回波强度比“8·7”过程大。

(3) 双偏振参量高值区与两次过程强降水中心重合。在“6·12”过程中, 双偏振量 ZDR 为 0~2.4 dB、KDP 为 0~3.0 °·km^{-1}、CC 接近 1。本次降水活动主要以高浓度且粒子相态均一性强的大直径雨滴为主。在“8·7”过程中短时强降水阶段, 双偏振量高值 ZDR 为 2.4~4.0 dB、KDP 为 0.6°~1.8 °·km^{-1}、CC 接近 1。说明本次短时强降水过程也是以高浓度的大雨滴为主, 但浓度小于“6·12”过程, 雨滴直径大于“6·12”过程。在非短时强降水阶段, ZDR 为 0~2.4 dB, KDP 为 -0.6°~0.6 °·km^{-1}, 其中大于 0 °·km^{-1} 的范围远小于上一阶段, CC 基本在 0.96 以上。与上一阶段相比, 该阶段主要以小范围的高浓度小直径雨滴为主。“6·12”过程中, 5 km 以上高度层存在冰相粒子, 在下落过程中逐渐融化, 雨滴不断凝结和碰并增长; 在“8·7”过程中高空无冰相粒子, 小雨滴在下落过程中不断碰并增长为高浓度的大雨滴。

基于上述分析可知, 新源 C 波段双偏振雷达对短时强降水过程预报订正和预警具有指示意义, 研究结果对进一步探讨双偏振雷达产品在短临监测预警方面的应用具有重要参考意义。接下来将继续使用该雷达资料进行多个典型个例分析及云降水微物理相关研究, 以期建立更精准的短时强降水识别和预警指标, 改进降水估测模型的精度。

参考文献 (References):

陈龙,唐明晖,唐佳,等.2023.湘东北一次降雹超级单体过程的双偏振雷达回波特征[J].暴雨灾害,42(2):211−222. Chen L, Tang M H, Tang J, et al. 2023. Dual-polarization radar echo characteristics of a hail supercell event in northeastern Hunan [J]. Torrential Rain and Disasters,42(2):211−222 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2021−235

方桃妮,叶延君,叶妍婷,等.2022.浙中一次短时大暴雨的双偏振雷达特征分析[J].浙江气象,43(4):1−6. Fang T N, Ye Y J, Ye Y T, et al. 2022. Dual polarimetric radar characterisation of a short duration heavy rainstorm in central Zhejiang Province [J]. Journal of Zhejiang Meteorology,43(4):1−6 (in Chinese). doi:10.16000/j.cnki.zjqx.2022.04.009

胡鹏宇,徐爽,杨磊,等.2024.副高边缘辽宁短时强降水过程的水汽特征分析[J].暴雨灾害,43(5):532-541. Hu P Y, Xu S,Yang L, et al. 2024. Analysis of water vapor during short-time heavy rainfall events at the edge of subtropical high in Liaoning Province[J]. Torrential Rain and Disasters,43(5):532-541(in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-116

黄琴.2018.双偏振雷达的回波分析和大气风温湿特征研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Huang Q. 2018. Analtsis of Dual-polarization Radar Echoes and the Atmospheric Wind, Temperature and Humidity Structure [D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese)

李春飞,邹于琴.2023.龙岩市南部一次大暴雨的双偏振雷达特征分析[J].海峡科学,12:7-11 Li C F, Zou Y Q. Dual polarimetric radar characterisation of a large rainstorm in southern Longyan City [J]. Straits Science,12:7-11 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−8683.2023.12.002

刘晶,周雅蔓,杨莲梅,等.2019.伊犁河谷“7.31”极端暴雨过程不稳定性及其触发机制研究[J].大气科学,43(6):1204−1218. Liu J, Zhou Y M, Yang L M, et al. 2019. The instability and its trigger mechanism of extreme precipitation event in the Yili river valley on 31 July 2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,43(6):1204−1218 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1901.18155

吕健,刘圣楠,王俊人,等.2023.一次秋季冰雹过程的环境场和双偏振雷达特征分析[J].沙漠与绿洲气象,17(4):53−60. Lyu J, Liu S N, Wang J R, et al. 2023. Environmental and dual-polarization radar characteristic analysis of an autumn hailstorm [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(4):53−60 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.04.008

潘佳文,蒋璐璐,魏鸣等.2020.一次强降水超级单体的双偏振雷达观测分析[J].气象学报,78(1):86−100. Pan J W, Jiang L L, Wei M, et al. 2020. Analysis of a high precipitation supercell based on dual polarization radar observations [J]. Acta Meteorologica Sinica,78(1):86−100 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.003

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, Gao A C, Li J. 2021. Application of raindrop spectrum and dual polarization radar data to a heavy rain process [J]. Meteorological Monthly,47(6):737−745 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.06.009

孙继松.2017.短时强降水和暴雨的区别与联系[J].暴雨灾害,36(6):498−506. Sun J S. 2017. Differences and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall [J]. Torrential Rain and Disasters,36(6):498−506. doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2017.06.002

孙丝雨,沈永海,霍苗,等.2013.双线偏振雷达在一次强降雹过程中的初步应用[J].暴雨灾害,32(3):249−255. Sun S Y, Shen Y H, Huo M, et al. 2013. Preliminary application of dual-polarization weather radar in a severe hail event [J]. Torrential Rain and Disasters,32(3):249−255 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2013.03.008

唐明晖,俞小鼎,王青霞,等.2023.湖南一次雨雪天气降水相变的环境条件与双偏振雷达特征分析[J].暴雨灾害,42(3):293−302. Tang M H, Yu X D, Wang Q X, et al. 2023. Analysis on environmental conditions and dual-polarization radar characteristics of the phase transformation of precipitation in a rain and snow event in Hunan [J].

Torrential Rain and Disasters,42(3):293−302 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−065

杨莲梅,张云惠,黄艳,等.2020.新疆短时强降水诊断分析暨预报手册[M].北京:气象出版社. Yang L M, Zhang Y H, Huang Y,et al. 2020. Xinjiang Short-term Heavy Precipitation Diagnostic Analysis and Forecasting Manual [M]. Beijing:Meteorological Press (in Chinese)

杨涛,杨莲梅,李建刚,等.2023.中国天山西部区域云降水物理野外观测科学试验研究若干进展[J].干旱区地理,46(10):1602−1611. Yang T, Yang L M, Li J G, et al. 2023. Progress of the scientific experimental for cloud and precipitation physical observation in the western Tianshan Mountains of China [J]. Arid Land Geography,46(10):1602−1611 (in Chinese). doi:10.12118/j.issn.1000−6060.2023.056

杨涛,张云惠,杨莲梅.2022.新疆短时强降水时空分布精细化特征[J].气象水文海洋仪器,39(3):34−37. Yang T, Zhang Y H, Yang L M. 2022. Fine-scale characteristics of temporal and spatial distribution of short-term heavy precipitation in Xinjiang [J]. Meteorological and Marine Instruments,39(3):34−37 (in Chinese). doi:10.19441/j.cnki.issn1006−009x.2022.03.017

于怀征,刁秀广,孟宪贵,等.2020.山东省一次罕见强对流天气的环境场及雷达特征分析[J].暴雨灾害,39(5):477−486. Yu H Z, Diao X G, Meng X G, et al. 2020. Analysis of radar echo features and environmental backgrounds of a rare severe convective weather in Shandong Province [J]. Torrential Rain and Disasters,39(5):477−486 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2020.05.006

俞小鼎,郑永光.2020.中国当代强对流天气研究与业务进展[J].气象学报,78(3):391−418. Yu X D, Zheng Y G. 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China [J]. Acta Meteorologica Sinica,78(3):391−418 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.035

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 method of flash heavy rain [J]. Torrential Rain and Disasters, 32(3): 202-209 (in Chinese). doi: doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2013.03.002

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 Y, et al. 2010. Analysis on the products and echo of dual-linear polarization doppler weather radar [J]. Plateau and Mountain in Meteorology Research, 30(2):36−41 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2010.02.008

张磊. 2017. C 波段双线偏振雷达数据处理及其在粒子分类和降水估测中的应用[D]. 南京:南京信息工程大学. Zhang L. 2017. C-band dual-polarization radar data processing and Its application to precipitation type classification and rainfall estimation [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese)

张培昌,魏鸣,黄兴友,等.2018.双线偏振多普勒天气雷达探测原理与应用[M]. 北京:气象出版社. Zhang P C, Wei M, Huang X Y, et al. 2018. Principles and Applications of Dual-line Polarimetric Doppler Weather Radar Detection [M]. Beijing:China Meteorological Press (in Chinese)

郑佳锋,张杰,朱克云,等.2014.双偏振天气雷达测雨误差及水凝物识别分析[J].气象科技,42(3):364−372. Zheng J F, Zhang J, Zhu K Y, et al. 2014. Analysis of dual polarization weather radar rainfall measuring errors and hydrometeor identification [J]. Meteorological Science and Technology,42(3):364−372 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671−6345.2014.03.002

Aydin K, Seliga T A, Balaji V. 1986. Remote sensing of hail with a dual linear polarization radar [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,25(10):1475−1484. doi:10.1175/1520−0450(1986)025<1475:RSOHWA>2.0.CO;2

Bringi V N, Keenan T D, Chandrasekar V. 2001. Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation: a self-consistent method with constraints [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(9):1906-1915. doi:10.1109/36.951081

Gorgucci E, Chandrasekar V, Bringi V N, et al. 2002. Estimation of raindrop size distribution parameters from polarimetric radar measurements [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,59(15):2373−2384. doi:10.1175/1520−0469(2002)059<2373:EORSDP>2.0.CO;2

Gorgucci E, Scarchilli G, Chandrasekar V, et al. 2000. Measurement of mean raindrop shape from polarimetric radar observations [J]. Journal of the atmospheric sciences,57(20):3406−3413. doi:10.1109/IGARSS.2010.5651008

Kumjian M R, Ryzhkov A V. 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47(7):1940−1961. doi:10.1175/2007JAMC1874.1

Kumjian M R. 2013. Principles and applications of Dual-Polarization weather radar. Part I: Description of the polarimetric radar variables [J]. Journal of Operational Meteorology,1(19):226-242. doi:10.15191/nwajom.2013.0119

Ryzhkov A V, Giangrande S E, Melnikov V M, et al. 2005. Calibration issues of dual-polarization radar measurements [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,22(8):1138−1155. doi:10.1175/JTECH1772.1

Seliga T A, Bringi V N. 1976. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 15(1):69−76.doi:10.1175/1520−0450(1976)015<0069:PUORDR>2.0.CO;2

Wen L, Zhao K, Wang M, et al. 2019. Seasonal variations of observed raindrop size distribution in East China [J]. Advances in Atmospheric Sciences,36(4):346−362. doi:10.1007/s00376−018−8107−5

Zeng Y, Tong Z, Jiang Y, et al. 2022. Microphysical characteristics of seasonal rainfall observed by a Parsivel disdrometer in the Tianshan Mountains, China [J]. Atmospheric Research,280:106459. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106459

(责任编辑 闵爱荣)