

张晓茹, 苏洋, 丁永红, 等, 2024. 多源观测资料在六盘山西侧一次强对流暴雨中的应用[J]. 气象, 50(8): 929-940. Zhang X R, Su Y, Ding Y H, et al, 2024. Application of multi-source observation data in a severe convective rainstorm on the west side of Liupan Mountains[J]. Meteor Mon, 50(8): 929-940 (in Chinese).

多源观测资料在六盘山西侧一次 强对流暴雨中的应用^{*}

张晓茹^{1,2,3} 苏 洋^{1,2,3} 丁永红^{1,2,3} 薛宏宇^{1,2,3} 贾 乐^{1,2} 孙艳桥^{1,2}

1 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 银川 750002

2 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 银川 750002

3 宁夏气象台, 银川 750002

提 要: 利用常规气象探测、ERA5 逐 1 h 再分析、区域气象站、X 波段双偏振、C 波段多普勒及风廓线雷达等多源资料, 对 2022 年 7 月 15 日六盘山西侧发生的一次被业务常用数值模式和预报员主观预报均漏报了的强对流暴雨进行综合分析。结果表明: 此次暴雨发生在西太平洋副热带高压西北侧, 主要落区为低层暖式切变线南侧及低空急流左前侧。在六盘山地形作用下, 中尺度地面辐合线、中尺度西南急流和中尺度涡旋可能是此次暴雨的重要触发、维持和增强系统。暴雨由两条中尺度回波带造成, 其上对流单体呈后向传播, 存在明显的列车效应。地面 5 min 降水量明显增强前 1~2 h, 有低空急流加强、垂直风切变增加、急流中风速向下脉动和干侵入等现象, 对暴雨预报预警有很好的参考意义。50 dBz 以上强度回波面积、垂直积分液态水含量、回波顶高、大范围的差分传播相移(K_{DP})和差分反射率因子(Z_{DR})的大值区对强降水落区有较好的指示意义, K_{DP} 能较好反映强降水强度。最大 K_{DP} 和 Z_{DR} 均较最强 5 min 降水提前 10 min 出现, Z_{DR} 弧和 Z_{DR} 柱也较最强 5 min 降水提前 10~20 min 出现。最强降水时段, K_{DP} 达 $3.0\sim 4.0^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$, 对应 Z_{DR} 为 $3.0\sim 3.3$ dB, 相关系数为 $0.90\sim 0.95$, 说明雨滴直径大且数浓度大, 增加了降水的极端性。

关键词: 对流性暴雨, 低空急流, 中尺度地面辐合线, X 波段双偏振雷达, 风廓线雷达

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.071002

Application of Multi-Source Observation Data in a Severe Convective Rainstorm on the West Side of Liupan Mountains

ZHANG Xiaoru^{1,2,3} SU Yang^{1,2,3} DING Yonghong^{1,2,3}
XUE Hongyu^{1,2,3} JIA Le^{1,2} SUN Yanqiao^{1,2}

1 Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management
of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750002

2 Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Yinchuan 750002

3 Ningxia Meteorological Observatory, Yinchuan 750002

Abstract: The severe convective rainstorm that occurred on the west side of Liupan Mountains on 15 July 2022, which is missed by both the numerical weather prediction models and the subjective forecast of forecasters, is analyzed based on the data from regional weather stations, X-band dual-polarization weather radar,

^{*} 宁夏回族自治区第五批青年科技人才托举工程项目(NXKJTJGC2021089)、中国气象局 2023 年复盘总结专项(FPZJ2023-147)、宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BBF02014)和宁夏自然科学基金项目(2022AAC03670、2023A0897)共同资助

2022 年 10 月 18 日收稿; 2024 年 2 月 17 日收修定稿

第一作者: 张晓茹, 主要从事短时天气预报和灾害性天气监测预警. E-mail: 1359194111@qq.com

通讯作者: 丁永红, 主要从事短期天气预报及灾害性天气预报方法研究. E-mail: dingyonghongnx@163.com

C-band Doppler weather radar, wind profiler radar, and the ERA5 hourly reanalysis and conventional observation data. The results show that the rainstorm occurred in the northwest side of the western Pacific subtropical high. The main area of severe rainfall was the south side of the low-level shear line and the left-front side of the low-level jet. Affected by the terrain of Liupan Mountains, the mesoscale ground convergence line, mesoscale low-level southwest jet and mesoscale vortex might be important systems of triggering, maintaining and enhancing of the process. The rainstorm was caused by two mesoscale echo bands, on which the convective cells propagated backward, forming obvious train effect. The strengthening low-level jet, the increasing vertical wind shear, the downward disturbance of wind speed in the jet, and the dry intrusion appeared 1–2 h ahead of the increase in 5 min precipitation, which has a certain reference value for rainstorm forecast and early warning. The center of severe rainfall has a better corresponding relationship with the echo area with intensity ≥ 50 dBz and the large value area of vertical integrated liquid water, the echo tops, the large ranges of differential phase shift (K_{DP}) and differential reflectivity (Z_{DR}). K_{DP} is a good indicator for intensity of severe rainfall. The maximum values of K_{DP} and Z_{DR} appeared 10 min earlier than the maximum rainfall in five minutes. The Z_{DR} arc and Z_{DR} column also appear 10–20 min earlier than the maximum rainfall. During the heaviest rainfall period, the K_{DP} was $3.0-4.0^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$, the Z_{DR} was $3.0-3.3$ dB, and the correlation coefficient was $0.90-0.95$, which suggests that the spectrum of rain particulates contained a large amount of relatively large-sized raindrops, increasing the extremity of precipitation.

Key words: convective rainstorm, low-level jet, mesoscale ground convergence line, X-band dual-polarization weather radar, wind profiler radar

引 言

六盘山地处西北地区东部,位于宁夏南部,为西北—东南走向(与南北方向夹角近 30°)的狭长山脉,山脊海拔超过 2500 m,最高峰米缸山海拔 2942 m,山地东坡陡峭西坡和缓。六盘山区属半湿润区到半干旱区的过渡带,是宁夏暴雨灾害多发地区,尤其短时强降水形成的暴雨,由于其历时短、强度大,极易引起山洪、滑坡和泥石流等地质灾害,加之地形地势复杂,次生灾害易造成严重的人员伤亡和经济损失,同时暴雨导致的水土流失给生态修复也带来严峻考验(胡倩等,2019)。近年来,众多模拟研究表明,六盘山地形对夏季降水有明显影响。地形产生的水汽通量辐合区走向和范围与山区一致(张沛等,2020)。地形强迫抬升作用使上升气流和水汽垂直输送进一步加强,强降水多集中在迎风坡一侧(马思敏等,2022)。受地形、东亚季风与天气系统间相互作用的影响,六盘山区年均降水量呈东坡高西坡低的分布特征(邓佩云等,2021;高亮书等,2021)。此外,六盘山两侧中尺度对流系统的发生、发展与中尺度地面辐合线密切相关,低层动力场的切变扰动在六盘山两侧形成东西向的辐合线,雷暴单体在辐合线附近

强烈发展造成短时强降水出现(赵庆云等,2018)。

我国现有业务预报体系在客观预报方面主要还是依赖全球数值模式(大多属于静力模式且采用对流参数化处理),对中小尺度对流过程描述明显不足,而且常规地面、高空资料也难以判断中小尺度系统的出现时间和强度(田付友等,2018;漆梁波和徐珺,2018)。因此,利用具有高时空分辨率的雷达资料可有效分析和判断中小尺度系统的发生、发展,对暴雨预报预警有重要参考价值。西北地区突发性暴雨过程的雷达回波分析指出,低质心的强回波和“S”型零速度线等均有利于强降水的发生(刘帆等,2019;张晓茹等,2022)。相较于常规天气雷达,双偏振雷达可发射水平和垂直两种偏振电磁波,得到差分反射率因子(Z_{DR})、差分传播相移(K_{DP})、相关系数(CC)等偏振参数,这些参数与降水粒子的相态、形状、空间取向和分布等密切相关。基于 S 波段双偏振雷达的强降水研究表明,回波超过 40 dBz 后 Z_{DR} 普遍可达 2 dB,CC 平均值超过 0.95。较大的 Z_{DR} 和 K_{DP} 表明降水粒子谱含有大量较大的水滴,是造成短时强降水的主要原因(张羽等,2017)。 Z_{DR} 柱的位置与强降水中心对应较好(潘佳文等,2020),大范围的 K_{DP} 可指示强降水的影响时间和降水强度(张红梅等,2021)。小时降水量 ≥ 40 mm 时,对应区域

K_{DP} 为 $1.7 \sim 2.4^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$; 小时降水量 $\geq 100 \text{ mm}$ 时, $K_{DP} \geq 3.1^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ 的回波连成片, 并持续 30 min 以上(喻谦花等, 2022)。与其他测风设备相比, 风廓线雷达可以连续获得测站上空每几分钟、每几十米层距的风场, 能较好地满足中小尺度暴雨分析需求。研究发现强降水发生前风廓线雷达会出现中尺度低空急流、地面风场辐合、向下的垂直速度极值增大及对应高度下降等特征, 高、低空急流及其向下脉动与降水的增强密切相关, 暴雨的产生主要由低空急流的下传和加强引起(金巍等, 2007; 王令等, 2014; 张京英等, 2005; 周芯玉等, 2015)。

2021年8月, 位于六盘山区的X波段双偏振多普勒雷达(714XDP型)和风廓线雷达(CFL-06型)正式试运行, 为进一步提高该地区强对流精细监测和预报预警能力提供了技术支撑。但目前针对六盘山区暴雨的研究多集中在数值模拟及常规资料分析等方面, 双偏振雷达和风廓线雷达等新型资料的应用研究仍较匮乏。2022年7月15日, 六盘山西侧出现暴雨天气, 西吉县杨茂村和什子村达大暴雨, 降水量均创建站以来日降水量极值, 导致个别乡镇受灾。但数值预报模式和预报员主观预报均漏报了此次过程。因此, 本文利用常规气象探测、ERA5逐1h再分析、区域气象站、X波段双偏振雷达、C波段多普勒雷达、风廓线雷达等多源资料, 对此次强对流暴雨预报失败案例的环境场、雷达回波特征及监测预警指标进行综合分析, 以期为提高六盘山区暴雨的预报准确率和预警发布提前量、优化定量降水估测等提供参考依据, 进一步丰富多源雷达资料在西北地区的业务应用, 提高对此类致灾强对流暴雨的认识。

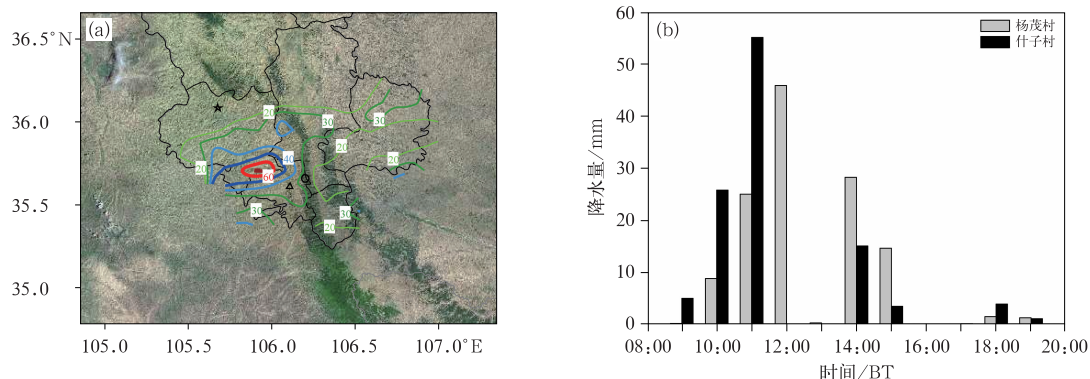
1 资料与方法

本文所用资料包括: (1) 国家气象信息中心下发的常规观测和探空资料; (2) 欧洲中期数值预报中心(ECMWF)提供的 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的 ERA5 逐1h再分析资料; (3) 宁夏气象信息中心提供的逐5min和1h区域自动站、逐6min固原C波段多普勒雷达(以下简称固原CD雷达)、逐4min西吉X波段双偏振雷达(以下简称西吉双偏振雷达)和逐6min隆德风廓线雷达等高分辨率观测资料。

需要说明的是, 六盘山区无探空站, 甘肃崆峒探空站与其毗邻接壤, 是距离暴雨区最近的站点, 所探测资料基本能代表暴雨区大气环境状况。如图1a所示, 西吉双偏振雷达和隆德风廓线雷达均处于六盘山西侧, 分别位于暴雨区西北部 and 东南部, 与大暴雨中心(西吉县杨茂村)直线距离分别约46.2km和21.2km; 固原CD雷达在六盘山站, 位于暴雨区东部, 与大暴雨中心直线距离约29.2km。雷达资料的可用性较好。

2 降水概况

2022年7月15日08:00—20:00(北京时, 下同), 六盘山区出现暴雨, 15个区域气象观测站降水量超过50mm, 其中西吉县杨茂村和什子村降水量分别达127.7mm和110.8mm, 均为创建站以来日降水量极值。从降水落区分布(图1a)来看, 本次暴雨过程与地形密切相关, 暴雨区主要位于六盘山脉西侧, 走向与山脉近乎垂直, 30mm以上的大降水带



注: 图 a 中☆、○、△分别为西吉双偏振雷达、固原 CD 雷达、隆德风廓线雷达位置。

图 1 2022 年 7 月 15 日 08:00—20:00(a)降水分布(等值线, 单位: mm)和(b)西吉县杨茂村、什子村逐时降水量

Fig. 1 (a) Distribution of rainfall (contour, unit: mm) and (b) hourly rainfall in Yangmao Village and Shizi Village of Xiji County from 08:00 BT to 20:00 BT 15 July 2022

呈近东西向带状分布。杨茂村和什子村逐小时降水时序图(图1b)显示,暴雨主要由短时强降水造成,强降水集中在09:00—15:00,占过程总降水量90.1%~96.7%,突发性强、强度大、局地性显著,具有间歇性(12:00—13:00无明显降水),且伴随明显的雷电天气,呈现典型的强对流天气特征。最大小时降水量出现在什子村,为55 mm(10:00—11:00),该站5 min最强降水10.1 mm(10:00—10:05),降水效率(1 h降水量与过程累计降水量之比)高达49.6%。根据俞小鼎(2013)对极端短时强降水(1 h降水量 ≥ 50 mm,或3 h降水量 ≥ 100 mm)的等级划分,本次过程属一次极端短时强降水过程。

3 强对流暴雨环境条件和触发机制

3.1 环境条件

此次强对流暴雨发生在西太平洋副热带高压(以下简称副高)西北侧。7月15日08:00副高较强盛,588 dagpm线北伸至35°N附近,西脊点位于100°E附近,宁夏处于584 dagpm与588 dagpm之间,副高外围持续的西南风有利于水汽输送及不稳定能量聚集。500 hPa上贝加尔湖西侧低涡(中心位于60°N、90°E)底部形成自西北向东南的阶梯槽,扩散冷空气沿阶梯槽底部下滑影响六盘山区(图2a)。

200 hPa宁夏位于高空西风急流分流区,六盘山区上空散度为 $30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (图2a),而700 hPa处于 $-10 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 的弱辐合区(图略),这种高层辐散强于低层辐合的配置利于高层抽吸作用的加强,促使上升运动发展和维持。此外,700 hPa上处于较大范围温度超过12℃、比湿为12~14 g·kg⁻¹的暖湿区,青藏高原东侧的暖式切变线伸至宁夏中部(图2b),表明低层有利于暖湿气流水平辐合。切变线南侧的西南急流中心风速为14 m·s⁻¹,对应水汽通量超过14 g·cm⁻¹·s⁻¹·hPa⁻¹(图2b),水汽供应充足。暴雨区恰好位于700 hPa切变线南侧及低空急流的左前侧。地面上暴雨区处在冷锋前部的低压倒槽内,槽中有中尺度辐合线发展,有利于对流系统的触发、发展。从大暴雨中心(杨茂村)假相当位温(θ_{se})的时空演变可知,15日00:00(图略),700 hPa以下为358 K的高能区,至08:00(图3a)低层 θ_{se} 增至360 K,且600 hPa以下 θ_{se} 均随高度减小,对流不稳定显著,此时崆峒站的对流有效位能(CAPE)虽仅为561 J·kg⁻¹,但相较于14日08:00的138.1 J·kg⁻¹,不稳定能量增加趋势明显,且自由对流高度(LFC)下降至779 m,十分有利于对流的触发。15日08:00抬升凝结高度(LCL)和0℃层高度分别为1532 m和5946 m,暖云层厚度约4400 m,按照Davis(2001)划分的标准(暖云厚度在4000 m以上则认为很深厚),属于深厚暖云层,且0~6 km风矢量差为9.3 m·s⁻¹,为较弱的垂直风切变,表

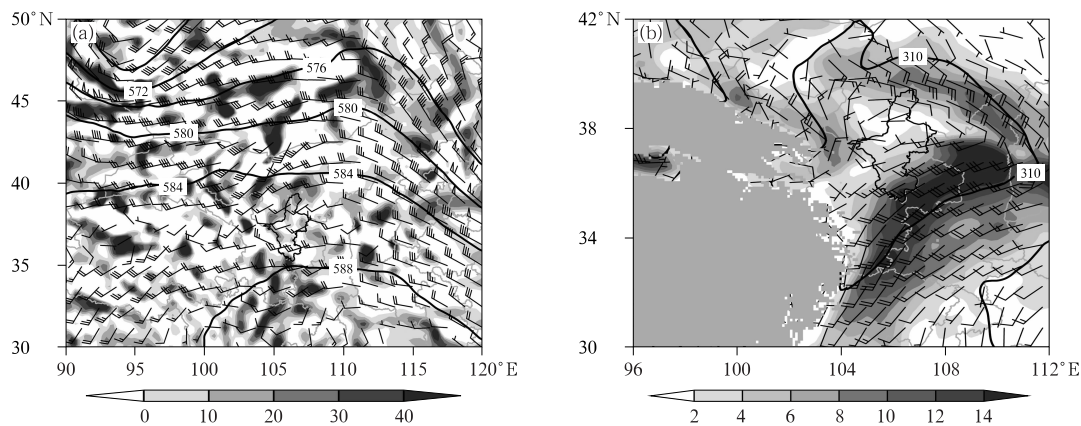


图2 2022年7月15日08:00(a)500 hPa位势高度(黑线,单位:dagpm)、风场(风羽)及200 hPa散度(阴影,单位: 10^{-6} s^{-1}), (b)700 hPa位势高度(黑线,单位:dagpm)、风场(风羽)及水汽通量(阴影,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)分布

Fig. 2 Distribution of (a) geopotential height (black line, unit: dagpm) and wind field (barb) at 500 hPa and divergence (shaded, unit: 10^{-6} s^{-1}) at 200 hPa, (b) geopotential height (black line, unit: dagpm), wind field (barb) and water vapor flux (shaded, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) at 700 hPa at 08:00 BT 15 July 2022

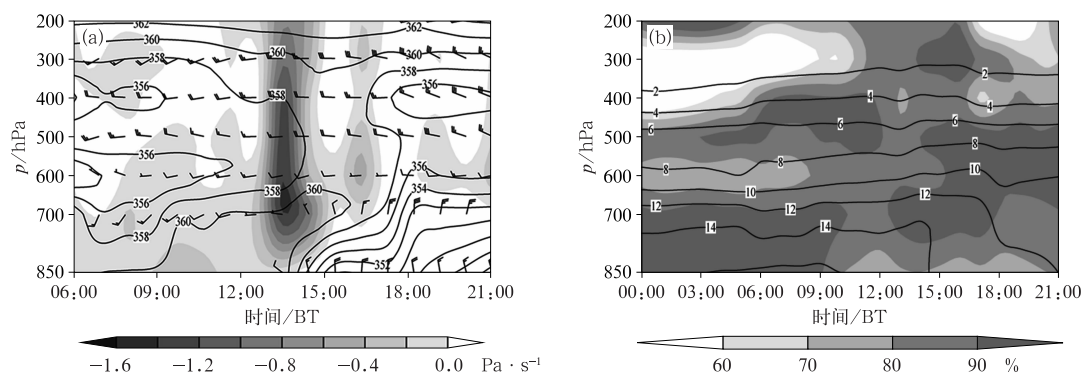


图3 2022年7月15日00:00—21:00大暴雨中心(a)假相当位温(黑线,单位:K)、上升速度(阴影)及风场(风羽),(b)相对湿度(阴影, $\geq 60\%$)和比湿(黑线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的时间-高度变化
Fig. 3 Spatio-temporal variation of (a) θ_{se} (black line, unit: K), updraft speed (shaded) and wind field (barb), (b) relative humidity (shaded, $\geq 60\%$) and specific humidity (black line, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) along the center of rainstorm from 00:00 BT to 21:00 BT 15 July 2022

明该环境下雨滴不容易蒸发,有利于产生高效率降水。大暴雨中心水汽分布(图3b)显示,15日00:00低层水汽已近饱和(相对湿度 $\geq 90\%$),至08:00 400 hPa以下相对湿度均 $\geq 80\%$,700 hPa以下比湿 $\geq 14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,为强降水产生提供了充足的水汽条件。由此可知,在有利的环流背景下,六盘山区高温、高湿、高能,大气层结不稳定,非常有利于暴雨天气的发生。

3.2 触发条件

在水汽和不稳定条件具备的情况下,抬升强迫对强对流天气的触发至关重要。通过ERA5逐1 h再分析资料分析发现,此次强对流暴雨的发生、发展与700 hPa偏南急流密切相关。7月14日19:00,700 hPa上甘肃和四川交界处建立了中心风速为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏南急流,较过程提前13 h出现;15日00:00偏南急流增强北抬,风速为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流中心位于甘肃南部,为暴雨区不断输送水汽和不稳定能量,造成低层进一步增温增湿;04:00,偏南风顺转为西南风,风速进一步增强至 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,急流中心仍位于甘肃南部,但暴雨区由位于急流轴前端转为急流轴左前侧;08:00,西南急流风速减弱至 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中心略东移,降水逐渐开始。研究表明,低空急流左前侧往往存在很强的气旋性切变和湿斜压强迫作用,从而产生强上升运动(孙继松等,2014)。因此,该过程中低空偏南急流的维持不仅有利于暖湿水汽的输送,还能产生启动不稳定能量释放的抬升运动。由大暴雨中心的垂直运动随时间演变(图3a)也可加以印证,04:00前(图略),上升运动很弱,约 $-0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,之后受急流左前侧动力作

用影响,700 hPa出现垂直速度为 $-0.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的上升运动中心(07:00)。08:00—10:00,上升运动中心降至近地层,表明天气尺度强迫抬升运动较弱,但低层动力抬升仍为降水的发生、发展起了重要作用。值得注意的是,最强上升运动出现在12:00—14:00,达 $-1.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,中心位于700 hPa附近,较杨茂村的最大小时降水量(45.8 mm)出现时间(11:00—12:00)晚1 h,表明还存在中尺度抬升机制,是该地区产生大暴雨天气的关键作用。

六盘山区地形复杂,位于六盘山西侧的暴雨区海拔高度在1700~2200 m,暴雨点平均海拔约1928 m,地势高低起伏,和六盘山最高峰海拔相差约1000 m。已有研究表明(俞小鼎等,2012;张晓茹等,2022),中尺度地面辐合线可通过提供带状辐合上升运动,为中尺度对流系统的触发、组织和维持提供有利条件。从逐5 min地面加密自动站风场可发现,降水开始前110 min,即15日06:10,六盘山西侧的西吉县西南部出现的一条偏北风和西南风形成的东北—西南向的中尺度辐合线明显发展,迎风坡辐合作用,该辐合线维持至10:50,持续近4.5 h(图4)。期间受西北—东南向的地形阻挡,辐合线始终位于六盘山西侧,北段位置稳定少动,南段有小幅度东西向摆动。09:50辐合线发展加强,偏北风由 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,西南风由 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,什子村(过程最大小时降水点)位于辐合线东侧的西南气流里,受六盘山地形对偏南暖湿气流的强迫抬升作用,此后降水明显增强(09:50—09:55降水量为6.3 mm,此前逐5 min降水量均低于3 mm,因此09:50为强降水开始时间)。10:00辐合线北段形成 β 中尺度辐合环流(图4),促使地面辐合进

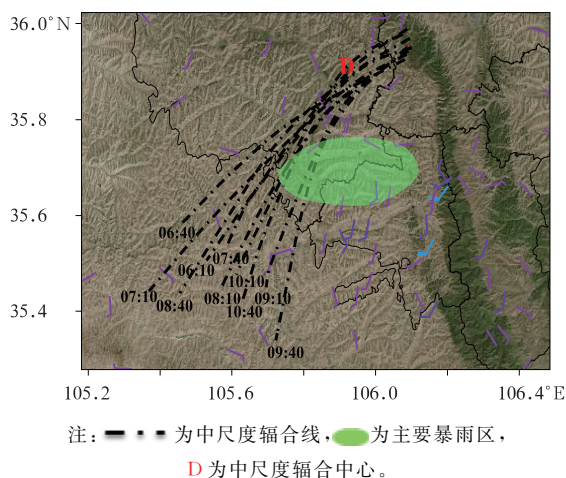


图4 2022年7月15日06:10—10:50中尺度地面辐合线演变、10:00地面加密风场(风羽)及暴雨主要落区

Fig. 4 Evolution of ground convergence line from 06:10 BT to 10:50 BT, wind field (barb) from automatic weather stations at 10:00 BT and main area of rainstorm on 15 July 2022

一步加强,导致之后1 h内什子村降水量达55 mm。表明在六盘山地形影响下,地面中尺度辐合系统不仅加强了该区域的动力辐合抬升,也使近地面的水汽聚集,为对流胚胎的组织 and 触发提供有利条件,而对流的发展又进一步造成地面辐合增强。因此,地面中尺度辐合系统的形成和加强可能是此次极端强对流暴雨的触发和增幅机制之一。这和慕建利等(2014)对陕西关中一次强暴雨分析的结果一致。另外,赵庆云等(2018)对发生在六盘山两侧强对流暴雨的分析也指出,地面辐合线对触发该区域中尺度对流系统、造成强降水起关键作用。

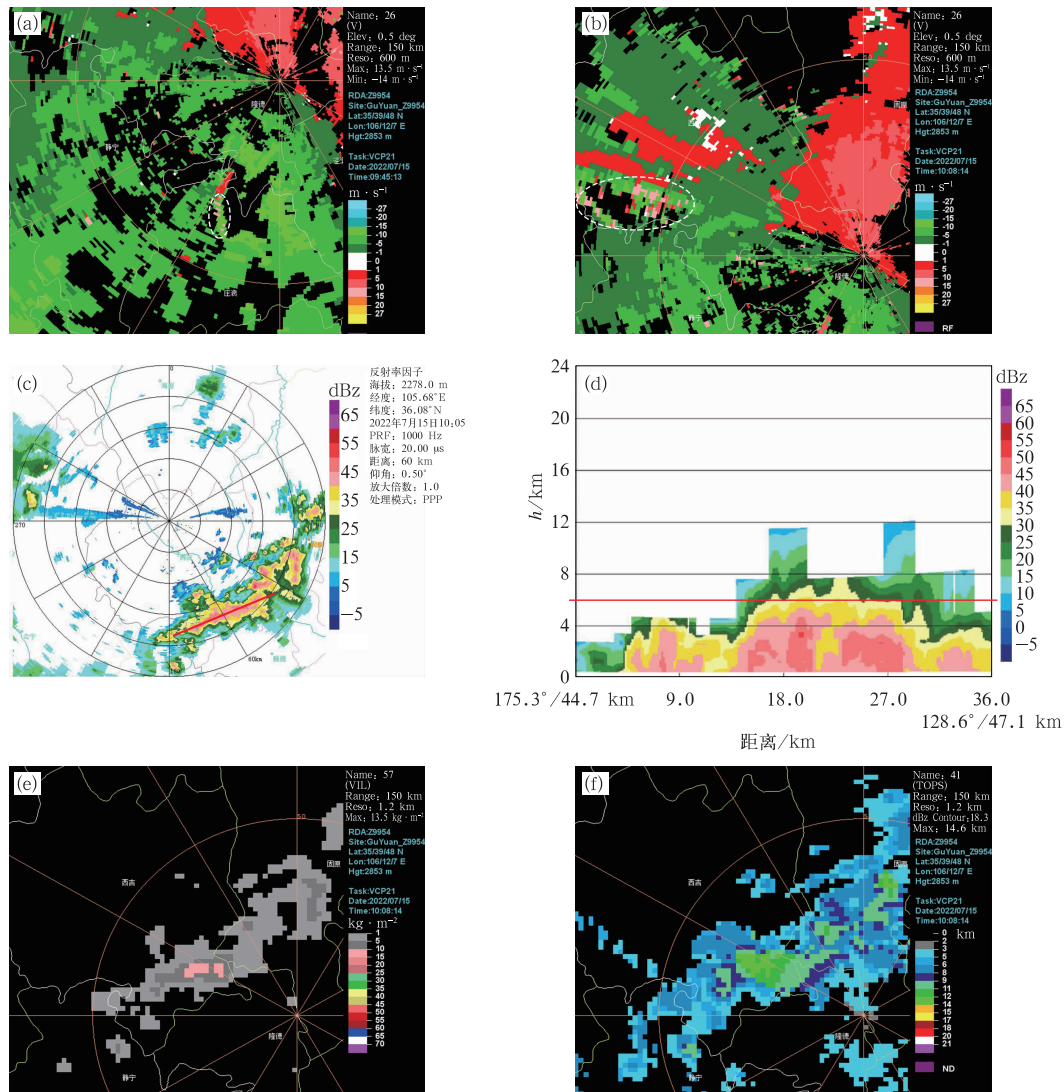
4 雷达特征分析

4.1 雷达反射率因子和径向速度演变分析

固原CD雷达组合反射率因子演变显示,受中尺度地面辐合线触发,7月15日07:32暴雨区西南侧开始有对流单体生成,初始回波较分散且强度仅为30~35 dBz,此后20 min内快速发展且向东北向移动,至08:47,对流单体在辐合线附近发展为一条长约100 km、强度普遍为35~40 dBz、东北—西南向分布的中尺度回波带,此时回波带前沿已伸至什子村附近,但降水很弱。08:53,回波强度迅速发展,

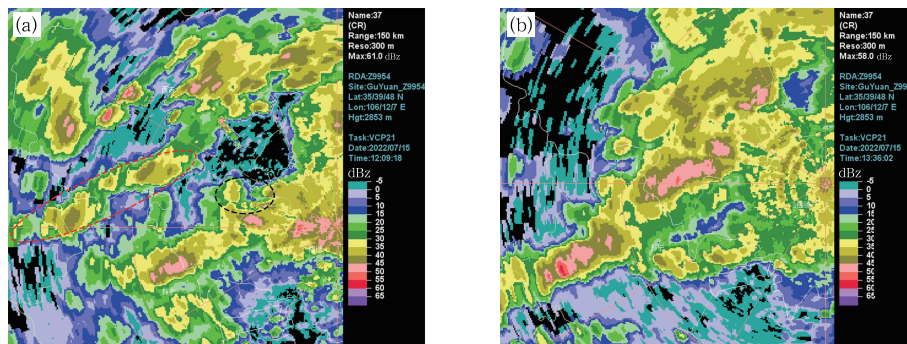
40 dBz以上回波范围明显扩大。受六盘山地形阻挡,此后强回波移速显著减小,上游又有单体不断发展加强,新单体的传播与移动方向相反,具有典型的后向传播特征。这主要是由于偏南气流持续输送低层暖湿气流及六盘山地形阻挡有利于对流系统稳定发展及维持。对应14日23:22至15日14:39径向速度 0.5° 仰角上,暴雨区南侧的偏南气流中持续存在风速超过 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的中尺度急流。如图5a白圈所示,15日09:45急流中心距暴雨区约40 km,风速约 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。六盘山地形的辐合及阻挡作用可能是这种从偏南气流中发展成的中尺度急流形成和维持的原因。至09:56,回波带已发展成熟,长、宽分别约40 km、10 km,强度普遍为45~50 dBz,其中镶嵌着多个50 dBz以上的强中心,对应什子村降水显著增强(图略)。10:02—10:54,强回波带向东北偏东向缓慢移动,其东段移过西吉县后就减弱,但西段不断有强回波单体移入合并,使得回波带整体移动方向与回波长轴方向基本平行,形成明显的列车效应(图5c)。对应10:05西吉双偏振雷达反射率因子剖面(图5d)显示,回波带上依次排列着多个40~50 dBz的强回波中心,且高度基本低于 0°C 层高度,低质心暖云降水特征显著。此外,什子村10:00—10:10降水最强(18.2 mm),可能原因是偏西风入流急流侵入导致垂直风切变增强,促使对流加强,对应 0.5° 仰角速度图上10:02—10:08可观察到退模糊后风速达 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏西急流(图5b白圈)。此时,50 dBz以上强回波面积(图5c)、垂直积分液态水含量(图5e)和回波顶高(图5f)均达最大,数值虽远低于冰雹、雷雨大风,但其大值区与强回波中心区对应,表明其峰值出现时间和落区对强降水有较好的指示意义。

15日11:00偏西风入流急流再度加强,中心风速为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,此后持续至12:03。受其影响,回波带东段以较快速度东南向移动,至12:09,回波带整体强度已减弱且移出大暴雨区(图6a黑圈),导致杨茂村和什子村出现降水间歇。同时,西吉县北部又有一条东北—西南向的较弱回波带形成(图6a红圈),并逐渐向暴雨区靠近。新回波带于13:02—13:36强烈发展,50 dBz以上回波面积明显扩大,且西南端不断有新生单体补充加强,使得带内强回波单体呈后向传播(图6b),造成杨茂村和什子村一带的第二阶段强降水。这主要是因为六盘山地形的辐合及阻挡作用,共同加强了偏南气流的辐合,对对流既有触发又有加强和维持作用。相对而言,新回波



注:图 a 和 b 中白圈代表中尺度急流,图 c 中红线为图 d 剖面位置,图 d 中红线为 0°C 层高度。

图 5 2022 年 7 月 15 日固原 CD 雷达(a)09:45 和(b)10:08 0.5°仰角径向速度,10:08(e)垂直积分液态水含量和(f)回波顶高,西吉双偏振雷达 0.5°仰角 10:05(c)反射率因子和(d)反射率因子剖面
Fig. 5 Radial velocity of Guyuan CD Radar at 0.5° elevation at (a) 09:45 BT and (b) 10:08 BT, and (e) vertical integrated liquid water and (f) echo tops of Guyuan CD Radar at 10:08 BT, (c) radar reflectivity and (d) radar reflectivity vertical profile of Xiji Dual-Polarization Doppler Radar at 0.5° elevation at 10:05 BT 15 July 2022



注:图 a 中红圈表示回波带,黑圈表示大暴雨区。

图 6 2022 年 7 月 15 日(a)12:09 和(b)13:36 固原 CD 雷达组合反射率
Fig. 6 Composite reflectivity of Guyuan CD Radar at (a) 12:09 BT and (b) 13:36 BT 15 July 2022

带东南移动速度较快,因此第二阶段降水强度没有第一阶段强。14:22 新回波带移出暴雨区,受层状云降水回波影响,降水强度明显减小。因此,此次强对流暴雨主要由两条中尺度回波带造成,其上强对流单体呈后向传播,有明显的列车效应。

4.2 风廓线雷达特征分析

由上文可知,过程期间暴雨区中低层以偏南气流为主(图 3a),受地形辐合和阻挡作用,其中发展起来的中尺度急流稳定少动,为降水的增强起了重要作用,其形成从隆德风廓线雷达观测也可得到证实。由图 7a 可知,15 日 04:36—09:12,西南风普遍超过 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且风速极值层基本在 1.5 km 以下,表明在降水前 4 h 中尺度低空西南急流已建立。

西南风在 08:12—09:12 明显加强,最大风速达 $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且极值层高度较 07:54 之前有较明显的下降,风速最大时刻(09:12)急流中心高度最低,仅距地 150 m。这说明在强降水出现前约 1.5 h,存在低空急流加强、风速向下脉动等现象,可能由于大风速的向下脉动包含了动量和能量的向下传递,有利于强降水的发生,这与已有研究相符(金巍等, 2007;周芯玉等,2015)。此外,水平风廓线(图 7c)显示,08:18—09:12 近地层西南风基本为 $12 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而中高层的偏西风为 $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,0~6 km 出现明显的风向和风速垂直切变,为对流风暴的维持、发展提供了有利条件。同时,6 km 以下风向始终随高度顺转,整层暖平流也有利于上升运动,促使强对流产生、维持(周志敏等,2010)。

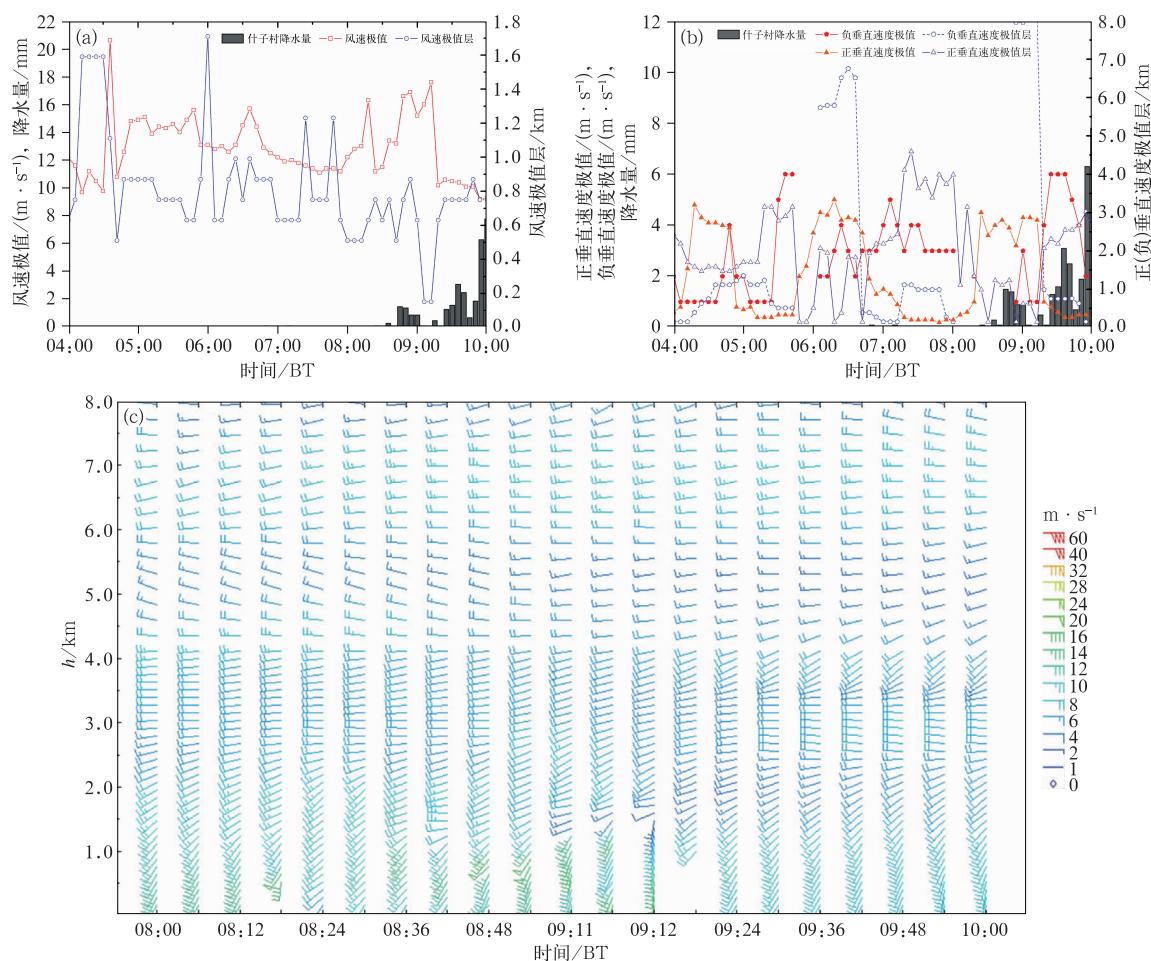


图7 2022年7月15日04:00—10:00隆德风廓线雷达(a)风速,(b)垂直速度与逐5 min 降水量时间演变,以及(c)08:00—10:00水平风廓线演变

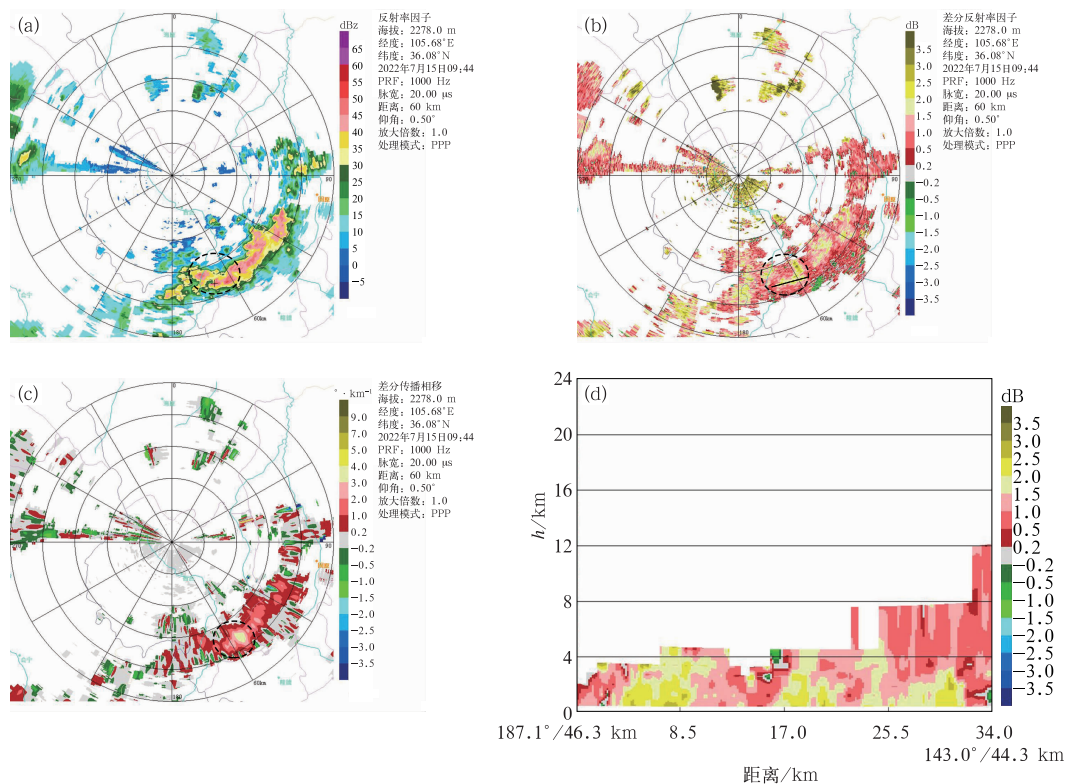
Fig. 7 Temporal evolution of (a) wind speed and (b) vertical velocity of Longde Wind Profiler Radar with 5 min rainfall from 04:00 BT to 10:00 BT, (c) horizontal wind profile of Longde Wind Profiler Radar from 08:00 BT to 10:00 BT 15 July 2022

垂直速度(向下为正,向上为负)的演变(图 7b)也显示,过程期间大气的上升气流较弱,负速度极值仅为 $-0.6 \sim -0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且极值层高度始终低于 1.5 km ,但其在 $06:00 \sim 07:00$ 有明显上升,在 $09:00$ 附近又降低至近地层,说明强降水前 2 h 存在上升气流中心向上伸展的现象。此外, $07:12$ 开始, $4 \sim 6 \text{ km}$ 的西风明显转为西北风(图 7c),配合正速度极值层上升至 4 km 附近(图 7b),此时下沉气流虽较弱(约 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),但意味着高空有干冷空气开始侵入,其可以通过垂直动量交换和增加雨水蒸发,既有利于上升的暖湿空气冷却致雨,又增强了对流不稳定,在暴雨的发生发展方面有很好的促进作用(刘会荣和李崇银,2010)。 $08:12 \sim 09:12$ 下沉气流显著增强,正速度极值达 $3.2 \sim 4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且极值层下降至 500 m 以下,此时上升气流趋于减弱消失,说明强降水的临近促使下沉气流占据主导地位,且下沉气流在增强的同时还向下渗透,有利于降水粒子从高层下传至低层,使低层的降水粒子增多、降

水增强(陈红玉等,2016)。综合而言,该过程西南急流加强、垂直风切变增加、风速向下脉动和干侵入等现象均较强降水提前出现约 $1 \sim 2 \text{ h}$,有较好的预报指示意义。

4.3 双偏振雷达参数特征分析

Z_{DR} 是水平与垂直偏振反射率因子之比,其大小与降水粒子的大小和形状密切相关,雨滴越大,形状越扁平, Z_{DR} 越高。过程期间回波带位于西吉双偏振雷达东南象限约 45 km 处,形态和强度与固原 CD 雷达较一致(图 8a),15 日 $09:36$ 之前,暴雨区上空 Z_{DR} 基本为 $1 \sim 2 \text{ dB}$,之后明显增强,出现强度 $\geq 2 \text{ dB}$ 的成片区域。 $09:36 \sim 09:49$, 0.5° 仰角上,杨茂村至什子村一带持续有强度普遍为 $2 \sim 3 \text{ dB}$ 的半圆弧, $09:44$ 的 Z_{DR} 弧最强,达 3.6 dB (图 8b),伸展高度超过 2.0 km ,对应区域为 K_{DP} 大值边沿的相对小值区,在 Z_{DR} 弧外侧则对应大的 K_{DP} 和强回波(图 8c, 8a),表明在风暴后侧流入区分布着少数大降水粒子,



注:图 a~c 黑圈表示特征标识区,图 b 黑线为图 d 剖面位置。

图 8 2022 年 7 月 15 日西吉双偏振雷达 0.5° 仰角(a~c)09:44(a)反射率因子, (b)差分反射率因子,(c)差分传播相移,(d)09:53 差分反射率因子剖面
Fig. 8 (a) Radar reflectivity, (b) differential reflectivity and (c) differential phase shift at 0.5° elevation at 09:44 BT, (d) vertical profile of differential reflectivity of Xiji Dual-Polarization Doppler Radar at 09:53 BT 15 July 2022

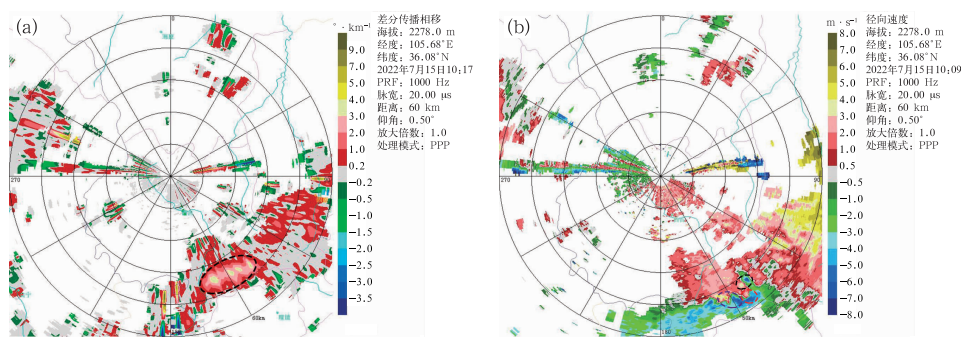
而更多的大粒子主要聚集在入流区的前侧。降水最强时段(什子村 10:00—10:05 降水为 10.1 mm, 因此 10:00 为最强降水发生时间) Z_{DR} 达 3.3 dB, 大值区与暴雨区对应。此外, 09:49—10:05 Z_{DR} 剖面显示(图 8d), 雷达东南象限 50 km 处存在大于 1.0 dB 的柱状回波, 最高伸展高度可达 8 km, 远在 0℃ 层以上, 满足对流风暴中最显著的偏振雷达特征之一, 即 Z_{DR} 柱的主要形态特征(Bringi et al, 1991)。研究表明, Z_{DR} 柱的存在说明存在与上升气流相关的正温度扰动, 常位于上升气流附近, 在 Z_{DR} 柱内有非常大的雨滴(直径达 8 mm), 这些降水粒子的可能来源是暖云降水的碰撞与合并过程(Ryzhkov et al, 1994)。 Z_{DR} 弧和 Z_{DR} 柱均较最强降水提前出现, 分别提前 24 min 和 10 min, 具有较好的预示性, 这与赖晨等(2020)的研究结果相符。

K_{DP} 是指在特定距离内水平与垂直偏振回波相位之间的差值, 其正值大小与强降水的扁平大水滴数量呈高正相关。09:24, 杨茂村至什子村一带开始出现大范围 K_{DP} 为 $2.0 \sim 3.0 \text{ } ^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 的回波。09:36 之后迅速发展, K_{DP} 为 $3.0 \sim 4.0 \text{ } ^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 的回波范围不断扩大, 09:49 最大值达 $4.5 \text{ } ^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, 该值较最强 5 min 降水提前 10 min 出现, 伸展高度达 2.0 km, 持续时间超过 10 min, 对应区域 Z_{DR} 为 2.7 dB, 说明雨滴直径大且数浓度高, 是造成短时强降水的主要原因。09:53 之后, 高强的 K_{DP} 范围减小并东移, 但其西部又不断有小块最大强度为 $3.5 \text{ } ^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 的回波生成, 此后面积不断扩大且缓慢东移。在 0.5° 仰角上, 10:01—10:25(图 9a)可明显观察到大范围 K_{DP} 为 $1.0 \sim 2.0 \text{ } ^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 的回波中镶嵌着若干个呈带状排列、强度为 $3.0 \sim 4.0 \text{ } ^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 且伸展至 1.5 km 附近的回波中心, 造成什子村在

10:00—11:00 小时降水量达 55 mm。11:00 后, 暴雨区上空的 K_{DP} 减小至 $2.0 \text{ } ^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ 以下, 对应小时降水量为 10~30 mm。表明 K_{DP} 对强降水更敏感, 对强降水落区和强度均有明显反映(冯晋勤等, 2018)。

CC 表示单个脉冲采样体内水平和垂直极化脉冲返回信号的相似程度, 反映了降水粒子对水平和垂直偏振波后向散射的相关性。在这个过程中, 强度 $< 40 \text{ dBz}$ 的回波区域中, CC 基本都在 0.98 以上, 而 $\geq 40 \text{ dBz}$ 的回波区域中, CC 数值波动较大, 很多低于 0.95, 且分布比较散乱, 说明该区域降水粒子相态不单一或具有较宽的雨滴谱。最强降水时, Z_{DR} 和 K_{DP} 大值区对应的 CC 为 0.90~0.95(图略), 这是由于该区域以大雨滴为主, 夹杂部分小雨滴, 造成水平和垂直偏振波后向散射的相关性较低。

此外, 该过程中双偏振雷达对中小尺度的识别有很好表现。15 日 08:28, 在雷达东南象限 50 km 附近, $0.5^\circ \sim 6.0^\circ$ 仰角径向速度图上均可观察到一条东北—西南向的辐合线, 持续时间超过 3 h, 强降水回波始终在该辐合线附近发展、传播(图略)。10:05—10:13(降水最强时段), 辐合线上维持 3 个中尺度涡旋, 在 10:09 表现最清晰(图 9b)。其中, $142^\circ/42 \text{ km}$ 处的涡旋(黑圈)呈纯气旋特征, 旋转速度达 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 根据 Andra(1997)对中气旋的判定标准, 该涡旋属于弱切变; $144^\circ/46 \text{ km}$ 处的涡旋(红圈)呈纯辐合特征; $150^\circ/44 \text{ km}$ 处的涡旋(紫圈)呈气旋式辐合特征, 旋转速度达 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 也为弱切变, 但在 3.4° 仰角上仍清晰可见, 伸展高度超过 3 km, 对流发展较深厚。中尺度涡旋等中小尺度系统往往具有较强的辐合上升运动, 能使周围水汽不断聚集抬升产生降水, 凝结潜热的释放又加强了低空正涡度区, 进而形成正反馈机制, 导致降水强度更



注: 圆圈表示特征标识区。

图 9 2022 年 7 月 15 日西吉双偏振雷达 0.5° 仰角 (a) 10:17 差分传播相移和 (b) 10:09 径向速度
Fig. 9 (a) Differential phase shift at 10:17 BT and (b) the radial velocity at 0.5° elevation of Xiji Dual-Polarization Doppler Radar at 10:09 BT 15 July 2022

大,因此,中尺度涡旋的存在表明对流系统具有较高的组织程度,是对流暴雨产生的重要指标(潘佳文等,2020)。此外,中尺度涡旋出现的时段和位置也与最强降水发生的时段和落区高度匹配,是促进降水增强的可能原因之一,可作为预报对流性暴雨的重要依据。

5 结 论

此次漏报暴雨是在副高西进北抬,阶梯槽引导冷空气东移南下,低层暖式切变线活跃,偏南气流持续背景下产生的,具有雨强大、局地性强、对流性降水特征明显并与地形密切相关的特点。在低空偏南急流作用下,低层高温高湿高能,配合高层辐散、低层辐合,为强降水的发生提供了充足的水汽、热力和动力条件。暴雨区主要在切变线南侧及低空急流左前侧。在六盘山地形辐合和阻挡作用下,中尺度地面辐合线、中尺度西南急流、中尺度涡旋可能是此次暴雨的重要触发、维持和增强系统。

雷达回波显示,此次强对流暴雨属于低质心暖云降水,由两条中尺度回波带造成,其上单体呈后向传播,存在明显的列车效应。过程期间暴雨区上空 Z_{DR} 普遍为 $1\sim 3\text{ dB}$, K_{DP} 为 $1.0\sim 4.0^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ 。 50 dBz 以上强度回波面积、垂直积分液态水含量、回波顶高、大范围的 K_{DP} 和 Z_{DR} 的大值区均对强降水落区有较好指示意义。 K_{DP} 对强降水强度有很好反映。最大 K_{DP} 和 Z_{DR} 值均较地面最强 5 min 降水提前 10 min 出现, Z_{DR} 弧和 Z_{DR} 柱也较最强 5 min 降水提前 $10\sim 20\text{ min}$ 出现。最强降水时段, K_{DP} 达 $3.0\sim 4.0^\circ\cdot\text{km}^{-1}$,对应 Z_{DR} 为 $3.0\sim 3.3\text{ dB}$,CC为 $0.90\sim 0.95$,说明雨滴直径大且数浓度大,增加了降水的极端性。

强降水(地面 5 min 降水量明显增强)发生前 $1\sim 2\text{ h}$,存在低空急流加强、垂直风切变增加、急流中风速向下脉动和干侵入等现象,对暴雨预报预警有很好的参考意义。风廓线雷达上,强降水前 2 h ,上升气流中心向高层伸展。强降水前 1 h ,上升气流减弱、下沉气流增强,且下沉气流在增强的同时还向下渗透。

本文利用多源观测资料对此次六盘山西侧发生的强对流暴雨的环境条件、触发机制、雷达回波特征及监测预警指标等进行了综合分析,发现该类暴雨具有一定的可预报性,但如果重新推演预报也很难保证在短期时段内作出较为准确的预报预警。此

外,本个例研究结论的普适性仍有待于更多天气个例分析验证,为今后精细化预报预警提供参考思路。

参考文献

- 陈红玉,高月忠,尹丽云,等,2016.强降水过程风廓线雷达资料的极值特征[J].气象科技,44(1):87-94. Chen H Y, Gao Y Z, Yin L Y, et al, 2016. Characteristics of extremes in WPR data during severe convective rainfall[J]. Meteor Sci Technol, 44(1): 87-94 (in Chinese).
- 邓佩云,桑建人,杨萌,等,2021.近30年六盘山东与西坡降水及空中水汽条件差异特征分析[J].气象科技,49(1):77-85. Deng P Y, Sang J R, Yang M, et al, 2021. Analysis of difference characteristics of precipitation and air water vapor conditions over east and west slopes of Liupan Mountain in recent 30 years[J]. Meteor Sci Technol, 49(1): 77-85 (in Chinese).
- 冯晋勤,张深寿,吴陈锋,等,2018.双偏振雷达产品在福建强对流天气过程中的应用分析[J].气象,44(12):1565-1574. Feng J Q, Zhang S S, Wu C F, et al, 2018. Application of dual polarization weather radar products to severe convective weather in Fujian [J]. Meteor Mon, 44(12): 1565-1574 (in Chinese).
- 高亮书,姚展予,贾烁,等,2021.六盘山地区一次低槽低涡云系结构及其降水机制的数值模拟研究[J].大气科学,45(2):257-272. Gao L S, Yao Z Y, Jia S, et al, 2021. A numerical study of cloud structure and precipitation mechanism of low-trough low-vortex weather process over the Liupan Mountain Area[J]. Chin J Atmos Sci, 45(2): 257-272 (in Chinese).
- 胡倩,岳大鹏,赵景波,等,2019.甘肃省近50年暴雨变化特征及其灾害效应[J].水土保持通报,39(4):68-75. Hu Q, Yue D P, Zhao J B, et al, 2019. Characteristics and disasters of rainstorms in Gansu Province in recent 50 years[J]. Bull Soil Water Conserv, 39(4): 68-75 (in Chinese).
- 金巍,曲岩,姚秀萍,等,2007.一次大暴雨过程中低空急流演变与强降水的关系[J].气象,33(12):31-38. Jin W, Qu Y, Yao X P, et al, 2007. Mesoscale structure and evolution of the low-level jet and its relationship with the heavy rainfall during a torrential rain process[J]. Meteor Mon, 33(12): 31-38 (in Chinese).
- 赖晨,支树林,李婕,等,2020.SC型双偏振雷达在江南南部一次对流性天气过程中的应用分析[J].气象,46(11):1427-1439. Lai C, Zhi S L, Li J, et al, 2020. Application of SC dual-polarization radar to a convective weather case in south to Yangtze River [J]. Meteor Mon, 46(11): 1427-1439 (in Chinese).
- 刘帆,高萌,谢逸雯,等,2019.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,13(2):48-54. Liu F, Gao M, Xie Y W, et al, 2019. Doppler radar echo features of abrupt heavy rain in Guanzhong Region of Shaanxi [J]. Desert Oasis Meteor, 13(2): 48-54 (in Chinese).
- 刘会荣,李崇银,2010.干侵入对济南“7.18”暴雨的作用[J].大气科学,34(2):374-386. Liu H R, Li C Y, 2010. Impacts of the dry intrusion on Ji'nan torrential rain occurring on 18 July 2007[J]. Chin J Atmos Sci, 34(2): 374-386 (in Chinese).
- 马思敏,穆建华,舒志亮,等,2022.六盘山区一次典型暴雨过程的地形敏感性模拟试验[J].干旱气象,40(3):457-468. Ma S M, Mu J H, Shu Z L, et al, 2022. Topography sensitivity simulation test

- of a typical rainstorm process in Liupan Mountain Region[J]. *J Arid Meteor*, 40(3):457-468(in Chinese).
- 慕建利, 李泽椿, 谌芸, 等, 2014. 一次陕西关中强暴雨中尺度系统特征分析[J]. *高原气象*, 33(1):148-161. Mu J L, Li Z C, Chen Y, et al, 2014. Feature analyses of mesoscale convective system of a heavy rainfall in the central Shaanxi Plain[J]. *Plateau Meteor*, 33(1):148-161(in Chinese).
- 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 Meteor Sin*, 78(1):86-100(in Chinese).
- 漆梁波, 徐珺, 2018. 豫北“7·9”特大暴雨的短期预报分析和反思[J]. *气象*, 44(1):1-14. Qi L B, Xu J, 2018. Rethink on short range forecast of the 9 July severe rainstorm in Northern Henan[J]. *Meteor Mon*, 44(1):1-14(in Chinese).
- 孙继松, 戴建华, 何立富, 等, 2014. 强对流天气预报的基本原理与技术方法: 中国强对流天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社, 28-31. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. Basic Principles and Technical Methods of Severe Convection Weather Forecasting: Handbook of Severe Convection Weather Forecasting in China [M]. Beijing: China Meteorological Press: 28-31(in Chinese).
- 田付友, 郑永光, 张小玲, 等, 2018. 2017年5月7日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J]. *气象*, 44(4):469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017[J]. *Meteor Mon*, 44(4):469-484(in Chinese).
- 王令, 王国荣, 古月, 等, 2014. 风廓线雷达垂直径向速度应用初探[J]. *气象*, 40(3):290-296. Wang L, Wang G R, Gu Y, et al, 2014. Application of wind profiler radar vertical radial velocity[J]. *Meteor Mon*, 40(3):290-296(in Chinese).
- 喻谦花, 吕哲源, 李姝霞, 等, 2022. 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*, 45(2):102-111. Yu Q H, Lü Z Y, Li S X, et al, 2022. Analysis of satellite cloud images and dual-polarization radar features of the 20 July, 2021 Zhengzhou extreme torrential rain[J]. *Meteor Environ Sci*, 45(2):102-111(in Chinese).
- 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]. *Torr Rain Dis*, 32(3):202-209(in Chinese).
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明, 等, 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. *气象学报*, 70(3):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. *Acta Meteor Sin*, 70(3):311-337(in Chinese).
- 张红梅, 张深寿, 连晨方, 2021. 福建西南部一次特大暴雨的双偏振雷达特征分析[J]. *气象与环境科学*, 44(2):16-24. Zhang H M, Zhang S S, Lian C F, 2021. Analysis of dual polarization weather radar characteristics during a heavy rainstorm in southwest Fujian[J]. *Meteor Environ Sci*, 44(2):16-24(in Chinese).
- 张京英, 漆梁波, 王庆华, 2005. 用雷达风廓线产品分析一次暴雨与高低空急流的关系[J]. *气象*, 31(12):41-45. Zhang J Y, Qi L B, Wang Q H, 2005. Analysis of relationship between heavy rain and jetstream with radar VWP product[J]. *Meteor Mon*, 31(12):41-45(in Chinese).
- 张沛, 姚展予, 贾烁, 等, 2020. 六盘山地区空中水资源特征及水凝物降水效率研究[J]. *大气科学*, 44(2):421-434. Zhang P, Yao Z Y, Jia S, et al, 2020. Study of the characteristics of atmospheric water resources and hydrometeor precipitation efficiency over the Liupan Shan area[J]. *Chin J Atmos Sci*, 44(2):421-434(in Chinese).
- 张晓茹, 陈豫英, 姚姗姗, 等, 2022. 贺兰山东麓一次局地强对流暴雨的中尺度特征[J]. *气象*, 48(7):801-812. Zhang X R, Chen Y Y, Yao S S, et al, 2022. Mesoscale characteristics of a local severe convective rainstorm at the eastern foot of Helan Mountains[J]. *Meteor Mon*, 48(7):801-812(in Chinese).
- 张羽, 胡东明, 李怀宇, 2017. 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*, 39(2):26-29. Zhang Y, Hu D M, Li H Y, 2017. Preliminary application of a dual polarization weather radar in Guangzhou during a short-range intensive rain[J]. *Guangdong Meteor*, 39(2):26-29(in Chinese).
- 赵庆云, 张武, 陈晓燕, 等, 2018. 一次六盘山两侧强对流暴雨中尺度对流系统的传播特征[J]. *高原气象*, 37(3):767-776. Zhao Q Y, Zhang W, Chen X Y, et al, 2018. Propagation characteristics of mesoscale convection system in an event of severe convection rainstorm over both sides of Liupanshan Mountains[J]. *Plateau Meteor*, 37(3):767-776(in Chinese).
- 周芯玉, 廖菲, 孙广凤, 2015. 广州两次暴雨期间风廓线雷达观测的低空风场特征[J]. *高原气象*, 34(2):526-533. Zhou X Y, Liao F, Sun G F, 2015. Study on the relationship between mesoscale wind field changes and rainstorm using windprofiler data[J]. *Plateau Meteor*, 34(2):526-533(in Chinese).
- 周志敏, 万蓉, 崔春光, 等, 2010. 风廓线雷达资料在一次冰雹过程分析中的应用[J]. *暴雨灾害*, 29(3):251-256. Zhou Z M, Wan R, Cui C G, et al, 2010. Application of wind profiler radar data in a hailfall process[J]. *Torr Rain Dis*, 29(3):251-256(in Chinese).
- Andra D L Jr, 1997. The origin and evolution of the WSR-88D mesocyclone recognition nomogram[C]//Preprints, 28th Conference on Radar Meteorology. Austin: Amer Meteor Soc:364-365.
- Bringi V N, Burrows D A, Menon S M, 1991. Multiparameter radar and aircraft study of raindrop spectral evolution in warm-based clouds[J]. *J Appl Meteor*, 30(6):853-880.
- Davis R S, 2001. Flash flood forecast and detection methods[C]//Doswell C A III. Severe Convective Storms. Boston: Amer Meteor Soc:481-525.
- Ryzhkov A V, Zhuravlyov V B, Rybakova N A, 1994. Preliminary results of X-band polarization radar studies of clouds and precipitation[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 11(1):132-139.

(本文责编:何晓欢 王婷波)