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

甘肃“7·22”区域性特大暴雨特征及中尺度成因初探

黄玉霞 沙宏娥 叶培龙 黄武斌 张君霞 谢鸿飞 董宏昌 马莉 秦豪君

Analysis on the characteristics and mesoscale causes of the "7·22" torrential rainfall event in Gansu Province

HUANG Yuxia，SHA Hong’e，YE Peilong，HUANG Wubin，ZHANG Junxia，XIE Hongfei，DONG Hongchang，MA Li，QIN Haojun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-188

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

2023年4月18日厦门暖区特大暴雨中尺度特征及低空急流的作用
Mesoscale characteristics and role of low-level jets in a warm-sector severe torrential rain event in Xiamen on 18 April 2023
暴雨灾害. 2024, 43(5): 521-531 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-107

“23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探
Analysis on the characteristics and causes of the "23·7" torrential rainfall event in North China
暴雨灾害. 2023, 42(5): 508-520 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-187

复杂山地下引发特大暴雨的准静止MCS观测分析
Analysis of quasi-stationary MCS causing extreme torrential rain event under complex mountains in Southwest Hubei
暴雨灾害. 2022, 41(3): 241-253 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.001

京津冀一次暖区大暴雨的成因分析
Analysis on causes of a warm-sector torrential rain event in the Beijing-Tianjin-Hebei region
暴雨灾害. 2021, 40(5): 455-465 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.002

“23.7”河北罕见特大暴雨过程降水演变与中尺度特征分析
Analysis of precipitation evolution and mesoscale characteristics for a severe torrential rain event in Hebei from 29 July to 2 August 2023
暴雨灾害. 2024, 43(1): 1-12 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-191

2017年7月25日陕北局地特大暴雨过程的β中尺度特征分析
Analysis of a continuous heavy rain event in Shaanxi produced by a low vortex
暴雨灾害. 2021, 40(4): 374-382 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.005

关注微信公众号，获得更多资讯信息

黄玉霞,沙宏娥,叶培龙,等.2025.甘肃“7·22”区域性特大暴雨特征及中尺度成因初探[J].暴雨灾害,44(3):289−299. HUANG Yuxia, SHA Hong’e, YE Peilong, et al. 2025. Analysis on the characteristics and mesoscale causes of the "7·22" torrential rainfall event in Gansu Province [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):289−299 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−188

甘肃“7·22”区域性特大暴雨特征及中尺度成因初探

黄玉霞[1], 沙宏娥[1], 叶培龙[1], 黄武斌[1], 张君霞[1], 谢鸿飞[1],
董宏昌[2], 马莉[1], 秦豪君[1]

(1. 兰州中心气象台, 兰州 730030; 2. 甘肃省定西市气象局, 定西 743099)

摘　要: 2024 年 7 月 22—24 日甘肃河东地区出现 1961 年以来最强区域性暴雨过程。利用地面自动气象观测站、探空、双偏振雷达等资料、融合降水产品和 ERA5 再分析资料对此次过程的降水实况、中尺度对流系统 (MCS) 的演变特征、环流形势和局地极端暴雨的中尺度成因进行了初步探讨。结果表明: (1) 此次过程强降雨范围广、持续时间长、累计降水量大, 有显著极端性。MCS 具有后向传播和列车效应, 生命史长, 雷达回波呈低质心、高效率的暖云降水特征。(2) 受较强且稳定的西太平洋副热带高压和台风“派比安”共同影响, 南海洋面至甘肃暴雨区形成一条强劲持久的水汽输送通道, 使该地区大气可降水量极端正异常, 标准化距平超过 4σ; 另外对流层低层中尺度低涡和高层南亚高压的强度异常形成了有利于上升运动发展的形势。(3) 位于陇山西、东两侧的定西通渭和平凉崇信两个特大暴雨中心因地形差异造成水汽输送、MCS 触发和维持机制不同。通渭特大暴雨主要由喇叭口地形和对流层低层低涡系统相叠加造成的水汽强烈辐合抬升所致, 水汽辐合集中在 800 hPa, 对流系统整体发展高度不高; 崇信特大暴雨出现在低空急流发展越过陇山后, 由低空急流左侧风速切变、急流轴风速脉动及低空急流与高低空系统耦合动力抬升共同作用形成的深厚对流系统维持造成, 水汽辐合集中在 700 hPa。在两个特大暴雨中心强降水过程中, 中等强度对流有效位能和对流不稳定为暴雨中尺度对流系统长时间维持提供有利的不稳定条件。

关键词: 特大暴雨; 台风“派比安”; 复杂地形区; 中尺度低涡; 低空急流; 列车效应

中图法分类号: P458.1+21.1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−188

Analysis on the characteristics and mesoscale causes of the "7·22" torrential rainfall event in Gansu Province

HUANG Yuxia[1], SHA Hong’e[1], YE Peilong[1], HUANG Wubin[1], ZHANG Junxia[1], XIE Hongfei[1],
DONG Hongchang[2], MA Li[1], QIN Haojun[1]

(*1. Lanzhou Central Meteorological Observatory*, *Lanzhou* 730030; 2. *Dingxi Meteorological Bureau of Gansu Province*, *Dingxi* 743099)

Abstract: The Hedong region of Gansu Province experienced the strongest regional rainstorm from 22 to 24 July 2024, since 1961. Based on observations from automatic weather stations, radiosondes, dual-polarization radar, merged precipitation products, and ERA5 reanalysis data, this study preliminarily investigates the precipitation characteristics, evolution of mesoscale convective systems (MCS), synoptic conditions, and mesoscale mechanisms of localized extreme rainstorm. The results are as follows. (1) The event featured extensive heavy rainfall, prolonged duration, and record-breaking accumulations, exhibiting remarkable extremity. The MCS displayed backward propagation and a "train effect" with a long lifespan. Radar echoes indicated warm-rain processes characterized by low centroid heights and high precipitation efficiency. (2) Under the combined influence of the strong and Stable Estern Acific Ubtropical High and Typhoon "Prapiroon", an intense and persistent moisture transport channel extended from the South China Sea to the southeastern Gansu rainstorm area. This led to extreme positive anomalies in precipitable water (standardized anomalies exceeding 4σ), serving as the primary factor. Additionally, anomalous intensification of a mesoscale low vortex in the lower troposphere and the South Asian High in the upper

收稿日期: 2024−10−18; **定稿日期:** 2025−01−13

资助项目: 甘肃省自然科学基金项目 (24JRRA716, 24JRRA1177); 甘肃省气象局创新团队项目 (GSQXCXTD-2024-01); 甘肃省科技厅青年基金项目 (24JRRA1179, 23JRRA1578); 甘肃省气象局科研项目 (Zd2025-B-2)

第一作者: 黄玉霞, 主要从事强对流预报技术研究。E-mail: hyx_gsma@163.com

通信作者: 沙宏娥, 主要从事强对流预报技术研究。E-mail: shahonge@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

troposphere created favorable conditions for sustained upward motion. (3) The Longshan Mountains induced distinct moisture transport pathways and convective triggering mechanisms at the two extreme rainfall centers (Dingxi Tongwei and Pingliang Chongxin) on its western and eastern flanks. The Tongwei rainstorm resulted from intense moisture convergence and uplift driven by the combined effects of a horn-shaped topography and a lower-tropospheric vortex, with moisture convergence concentrated at 800 hPa and limited vertical development of convection. In contrast, the Chongxin rainstorm was maintained by deep convective systems triggered by wind shear on the left side of a low-level jet (LLJ), pulsations of the LLJ axis, and dynamic coupling between the LLJ and upper-level systems after the LLJ traversed the Longshan Mountains, with moisture convergence focused at 700 hPa. Moderate CAPE and convective instability provided favorable conditions for the prolonged maintenance of MCSs at both rainfall centers.

Key words: torrential rain; Typhoon Prapiroon; complex terrain area; mesoscale low vortex; low-level jet; train effect

引　言

暴雨是我国最主要的气象灾害之一，伴随短时强降水的对流性暴雨具有空间尺度小、生命期短、突发性强的特点，易引发山体滑坡泥石流、城市内涝及流域洪水等灾害，已成为社会各界关注的热点问题。甘肃东部地处青藏高原、黄土高原、内蒙古高原交汇区，地形地貌复杂、生态环境脆弱，大部分区域处于亚洲夏季风边缘的半湿润过渡地带 (Huang et al., 2011; Zhang et al., 2016; Wu et al., 2019)。在全球气候变暖的背景下，我国极端降水近年来呈现频发、广发、重发趋势 (丁一汇等, 2019)，例如郑州“7·20”和华北“23·7”等特大暴雨过程 (苏爱芳等, 2021; 齐道日娜等, 2022; 杨舒楠等, 2023)，给当地带来了巨大的损失。然而，极端暴雨通常伴随局地热力不稳定和急流、地形等中小尺度动力过程的耦合 (Li et al., 2021; Li et al., 2024; Gao et al., 2024)，数值模式因分辨率和中小尺度触发机制模拟能力不足 (Fu et al., 2020)，暴雨精细化气象预报服务和防灾减灾面临着挑战。

近年来在西北地区暖湿化东扩的影响下 (张强等, 2021)，甘肃东部夏季极端降水屡屡打破分钟、小时及日降水量极值，如 2022 年 7 月 15 日，庆阳中部出现罕见特大暴雨，最大日降水量达 373.2 mm，多站降水量和小时降水量突破历史极值 (沙宏娥, 2022; 张君霞, 2022)；2023 年 7 月 26—30 日，受“杜苏芮”台风外围水汽输送影响，甘肃东部 213 站出现大暴雨，研究者从暴雨环流形势、时空分布特征及水汽输送等方面开展了研究 (何光碧等, 2019; 陈涛等, 2020; 傅朝等, 2022)。亦有学者利用数值模式及动力诊断等手段，探究西北地区复杂地形对暴雨的影响 (刘新伟等, 2017; 赵庆云等, 2018; 孔祥伟等, 2022)。西北地区暴雨主要由短时对流性降水主导，其对总降水量的贡献显著 (黄玉霞等, 2019)。覃皓等 (2023)、邓承之等 (2024)、竹利等 (2024) 利用诊断分析和数值模拟对对流性暴雨的触发维持机制进行了深入研究。赵庆云等 (2018) 总结出有利的热动力条件对六盘山东侧中尺度对流系统 (MCS) 加强和传播方向的改变起到重要作用。杨晓军等 (2022) 研究发现边界层的中尺度风速脉动、地面辐合线及特殊地形等是触发青藏高原东北侧边坡暴雨的主要因子。沙宏娥等 (2022) 对甘肃东部一次极端特大暴雨的触发和维持机制做了深入分析，研究表明地面辐合线和偏南低空急流触发对流系统初生，低空急流的发展和长时间维持使地面辐合线不断加强。以上研究虽然对西北地区暴雨的成因做了大量工作，但暴雨的落区和强度预报一直是预报的瓶颈与难点。

2024 年 7 月 22—24 日，甘肃河东地区发生了一次区域性特大暴雨，12 个国家和区域站过程累计降水量超过 300 mm，最大累计降水量达到 367.7 mm。基于持续日数、影响范围和平均强度等综合评估为特强等级，为 1961 年以来最强。受此次过程影响，甘肃东部出现了严重的洪涝、山体滑坡和城市内涝等次生灾害，对工农业生产、基础设施影响突出，多地出现公路受损、通讯中断、房屋倒塌等情况，造成了严重的人员伤亡和财产损失。此次过程持续时间长、降水分布极不均匀、地形作用机制复杂，精细化预报预警和灾害防御面临巨大挑战。因此，本文利用地面自动气象观测站、探空、双偏振雷达等观测资料、融合降水产品和 ERA5 再分析资料，对此次特大暴雨过程的降水实况、MCS 的演变特征、环流形势和局地极端暴雨的中尺度成因进行研究，以期为今后甘肃省此类特大暴雨的预警预报提供科学参考。

1　资料和方法

1.1　资料来源

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 2024 年 7 月 22 日 08:00—24 日 20:00 (北京时，下同) 国家和区域气象观测站 (以下简称为国家和区域站) 降水观测数据，用于分析此次过程的降水时空分布特征；(2) 同时段国家气象信息中心研发的三源融合降水分析产品 (CMPAS)，时空分辨率分别为 1 h、1 km×1 km，用于分析过程降水量极值；

(3) 中国气象局业务观测网提供的同期探空观测资料, 该资料每天有 08:00 和 20:00 两个时次, 物理要素包括温度、湿度、风, 用于分析强降雨发生的环境条件; (4) 国家气象信息中心天擎系统提供的 2024 年 7 月 22 日 08:00—23 日 08:00 定西、西峰 C 波段多普勒天气雷达基数据, 观测模式为 VCP21, 垂直方向共 9 个仰角, 体扫周期约为 6 min, 用于分析强降水阶段 MCS 的结构和演变特征。其中定西雷达是甘肃首部和目前唯一一部业务运行的双偏振雷达; (5) 2024 年 7 月 22 日 08 时—24 日 20 时和 1991—2020 年 7 月 21—31 日欧洲中期天气预报中心提供的第五代再分析资料 (ERA5), 物理量包括温度、比湿、风、位势高度、大气可降水量, 空间分辨率 0.25°×0.25°, 时间分辨率 1 h, 气压层数据垂直方向从 1 000—1 hPa, 共 37 层, 主要用于分析此次过程的环流形势和物理量气候态。

1.2 研究方法

为诊断甘肃“7·22”极端暴雨过程中物理量偏离气候平均值的程度, 根据世界气象组织推荐的 30 a 滚动气候态的气候业务标准, 本文采用 1991—2020 年为气候态年份, 用变量场偏离气候态的程度表示极端降水事件的环流形势和物理量要素的极端性, 即标准化异常 (D_S) (齐道日娜等, 2022), 计算公式如下

$$D_S = (F - M)/\sigma \tag{1}$$

其中, D_S 为距平大于标准差的倍数值, F 为变量场 2024 年 7 月 22—24 日平均, M 为变量场 7 月下旬的 30 a 平均, σ 为变量场的标准差。一般将 $D_S \geqslant 3$ 视为具有极端性。

2 降水实况及特征

2.1 暴雨范围和累计降水量

2024 年 7 月 22 日 08:00—24 日 20:00, 甘肃省河东地区发生持续暴雨过程, 降雨持续时间接近 60 h, 雨带呈东北—西南向带状分布 (图 1a), 累计降水量≥100 mm 的区域纵跨 4 个纬度超过 550 km, 共计 12 个国家和区域站累计降水量超过 300 mm; 特大暴雨集中出现在定西市东部通渭县和平凉市东部崇信县, 形成两个特大暴雨中心, 最大累计降水量分别为 317.8 mm 和 367.7 mm, 后者为此次过程最大累计降水量。同期共计出现 465 站次短时强降水 (图 1b), 最大雨强出现在通渭陇阳站, 为 79.1 mm·h^{-1}。

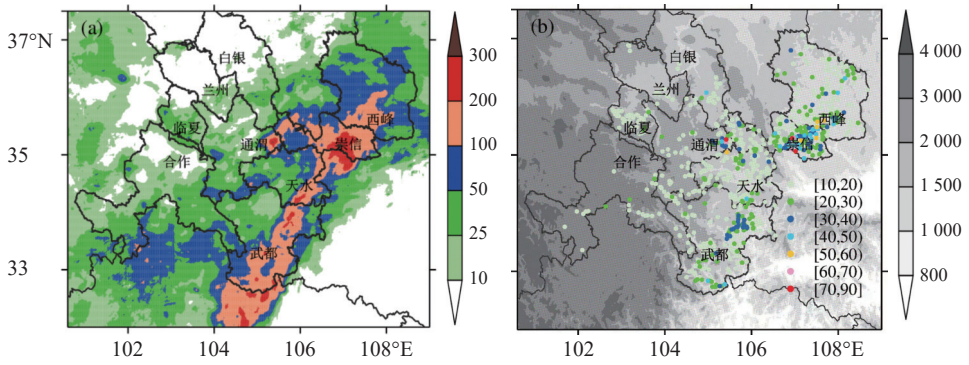


图 1 2024 年 7 月 22 日 08:00—24 日 20:00 甘肃河东地区累计降水量 (a, 单位:mm) 分布、同期最大雨强 (彩色圆点, 单位: mm·h^{-1}) 和地形高度 (阴影, 单位: m) (b) 空间分布

Fig. 1 The spatial distribution of (a) cumulative precipitation (unit: mm) from 08:00 BT on July 22 to 20:00 BT on July 24, 2024, (b) maximum rainfall intensity (colored dots, unit: mm·h^{-1}) during the same period and terrain elevation (shaded, unit: m) in Hedong region of Gansu Province

此次过程共 276 站过程累计降水量突破 7 月历史极值, 4 个国家站日降水量突破建站以来最大日降水量, 82 个区域站小时雨强超过 7 月历史极值, 91 个区域站短时强降水持续时间达到或超过 7 月历史持续时间, 其中 7 站短时强降水持续 4 h, 1 站达到 5 h。依据《区域性暴雨过程评估方法》(GB/T 42075-2022), 从暴雨持续日数、影响范围和平均强度等综合评估此次过程为 1961 年以来甘肃最强区域性暴雨过程 (表 1)。综上, 此次过程具有暴雨范围广、累计降水量大、持续时间长及降水强度大等特征。

2.2 小时降水量和强降水持续时间

从两个特大暴雨中心各选取两个代表站分析小时降水量随时间的演变特征。由图 2 可见, 小时降水量总体呈现“少-多-少”的变化趋势, 强降水集中在 22 日 20:00—23 日 20:00, 持续约 24 h。其中, 通渭强降水时段为 22 日 20:00—23 日 06:00, 持续约 10 h, 以短时强降水为主, 最大小时降水量为 79.1 mm, 达到短时强降水时次占降水总时次的 40%~60%。23 日 08:00 后降水量快速减弱, 小量级稳定性降水持续至 24 日 02:00。而崇信降水开始时间较通渭晚

表 1 甘肃省综合强度历史前五的区域性暴雨过程

Table 1 The top five historical regional heavy rain events in Gansu Province by comprehensive intensity

过程编号	开始时间/(年-月-日)	结束时间/(年-月-日)	持续日数/d	影响总站数*	综合强度指数	等级划分	历史排序
1	2024-7-22	2024-7-24	3	15	416.87	特强	1
2	2005-6-30	2005-7-2	3	24	401.60	特强	2
3	2010-7-23	2010-7-23	1	8	343.83	特强	3
4	2023-7-27	2023-7-28	2	14	305.02	特强	4
5	1970-8-29	1970-8-29	1	19	305.01	特强	5

注: *影响总站数为国家站

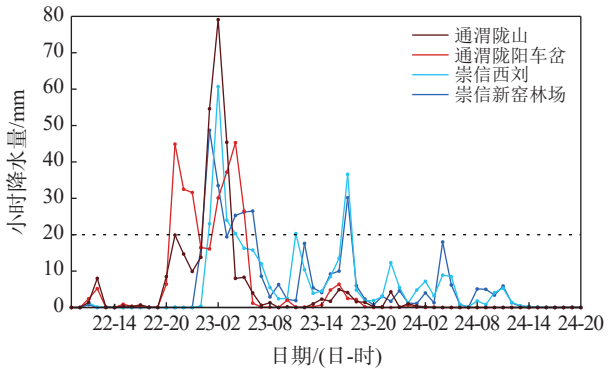


图 2 甘肃河东地区 2024 年 7 月 22 日 08:00—24 日 20:00 特大暴雨中心代表站小时降水量随时间变化

Fig. 2 The time series of hourly precipitation at the representative stations of the extreme rainstorm center from 08:00 BT on July 22 to 20:00 BT on July 24, 2024 in Hedong region of Gansu Province

4~5 h, 降水开始时强度强, 最大小时降水量达 60.7 mm, 随后降水量呈波动减小趋势, 24 日 02:00—04:00 降水量出现小幅增大后快速减小, 小量级降水持续至 24 日 14:00, 强降水持续约 17 h, 短时强降水时次约占降水总时次的 34%。

综上, 通渭和崇信两个特大暴雨中心均具有小时雨强大、强降雨持续时间长的特点, 但后者强降雨出现时间较晚, 持续时间更长, 短时强降水时次更多, 累计降水量更大。

3 大气环流与水汽异常特征

丁一汇等 (2020) 研究认为, 东亚夏季风水汽输送的强度、影响范围和持续性在极端强降水过程中起着关键作用, 环流的异常及其相伴随的季风水汽输送带的北推加强, 是造成北方持续性暴雨的重要原因。因此下文主要分析此次过程大气环流和水汽异常特征。

3.1 大气环流异常特征

图 3 给出 2024 年 7 月 23 日 02:00 对流层高、中、低层位势高度、风场以及暴雨过程平均位势高度相对气候态的标准化距平分布。

200 hPa 上, 南亚高压 1 256 dagpm 等高线东伸至海上, 控制我国 38 °N 以南大部分地区 (图 3a), 其东段脊线位于 32 °N, 较气候态偏强达到 3 σ 以上, 具有极端性; 而在高纬地区受低值系统影响, 新疆东部至蒙古国西部位势高度较气候态偏低, 其与南亚高压之间位势梯度异常偏大, 形成强盛的副热带西风急流。甘肃河东地区位于南亚高压东北侧、南亚高压脊线与高空急流之间, 风速水平切变和垂直切变大、水平辐散强, 对低层系统发展和上升运动增强十分有利。

500 hPa 上 (图 3b), 西太平洋副热带高压 (以下简称为副高) 较为强盛, 副高西脊点位于 105°E 附近, 四川盆地、江汉、黄淮西部位势高度较气候态偏高; 与此同时, 大陆高压 (青藏高压) 发展, 高压中心位于青海中部, 高压脊线呈西南—东北向, 其与副高之间切变线位于甘肃中部; 同时高原切变线东段位

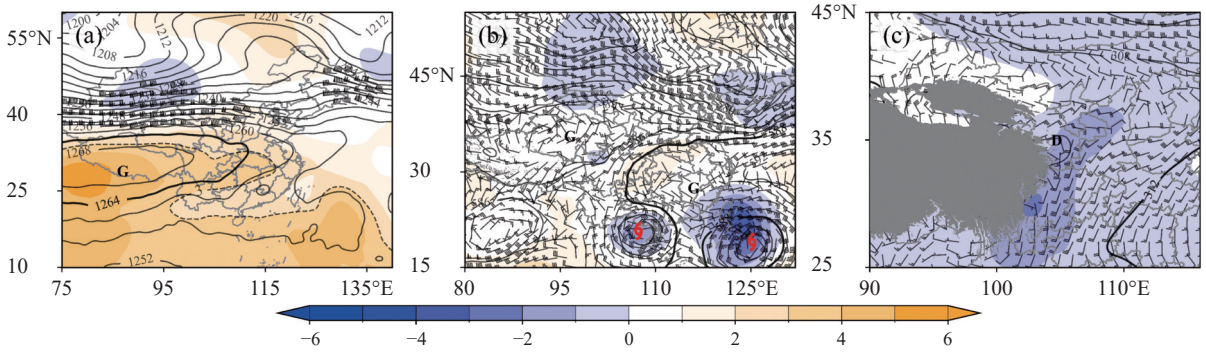


图 3 2024 年 7 月 23 日 02:00 200 hPa (a)、500 hPa (b) 和 700 hPa (c) 高度场 (实线等值线)、风场 (风向杆) 和平均位势高度标准化距平 (填色, 单位: σ) (图中虚线为 3 倍和 6 倍标准化距平等值线, 图 c 中灰色阴影为海拔>3 km 地形区, G (D) 为高 (低) 压中心, 台为台风, 下同)

Fig. 3 The (a) 200 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 700 hPa geopotential height (solid contours), wind field (wind barbs), and standardized anomalies (color-filled, unit: σ) of average potential height at 02:00 BT on July 23, 2024 (The dashed lines in the figure are 3-fold and 6-fold standardized anomaly contours, the gray shading in Fig. 3c indicates terrain elevation >3 km, G (D) marks high (low) pressure centers, the 台 is typhoon, the same below)

势高度较气候态偏低, 该切变与两高之间切变线打通, 形成了从青藏高原延伸至陕北的东西向切变线, 与 200 hPa 南亚高压东段脊线东北部分流区叠加, 对流层高层和中层天气系统形成较好的耦合。切变线右侧西南气流因位势梯度增大而不断发展加强, 一方面高原槽前正涡度平流向甘肃河东地区输送, 有利于低层减压低涡发展, 另一方面西南气流将暖湿气流沿副高外围源源不断地向甘肃河东地区输送, 水汽、热量在这一带积累。

特别地, 副高南侧有双台风活动 (4 号台风“派比安”和 3 号台风“格美”), 虽然与暴雨区相距较远, 台风对甘肃河东地区强降雨不易产生直接贡献, 但因台风逼近, 副高南侧气压梯度增大, 在一定时间和区域内使副高环流增强, 副高外围水汽输送因此加强, 另一方面东西带状副高南侧双台风的北推, 使副高北界稳定维持, 甘肃河东地区形势相对稳定, 有利于水汽辐合的增强和持续, 进而使得雨强增大、降水持续时间长。

700 hPa 上 (图 3c), 受对流层高层分流辐散、高原侧边界的摩擦作用和青藏高原热力作用共同影响, 甘肃河东有中尺度低涡发展, 位势高度场较气候态偏低 1~2 σ。从低涡切变与短时强降水的分布来看 (图略), 暴雨主要出现在低涡东南象限、低空急流轴左侧和前沿, 低涡切变和低空急流为暴雨提供了动力和热力条件, 是此次暴雨过程的直接组织者。

3.2 水汽异常特征

较为强盛的副高稳定维持, 其南侧位于南海的 4 号台风“派比安”移动缓慢, 上述环流共同影响下, 源自南海的水汽输送增强, 并以最短路径输送至甘肃河东地区, 由此形成一条强劲高效的水汽输送通道, 该水汽输送通道于 22 日 08:00 即已建立, 并逐渐增强, 23 日 18:00 随着副高东退西南气流减弱而减弱, 维持时间超过 24 h。由大气可降水量标准化距平 (图 4) 可见, 588 dagpm 等值线西北部边缘水汽条件呈现出异常偏多特征, 其中甘肃河东地区大气可降水量较气候态偏多 4 倍以上, 暴雨区达 5~6 σ, 平凉崇信达 6 σ 以上。

综上, 极端充沛的水汽条件和对流层高、中、低层天气系统耦合抬升, 尤其是对流层低层低涡切变的组织抬升为这次区域性特大暴雨提供了有利的热力和动力条件。

4 局地特大暴雨中尺度成因

复杂地形区极端暴雨的落区与地形有较高的相关性 (Li et al., 2024; Gao et al., 2024)。陇山是陕北黄

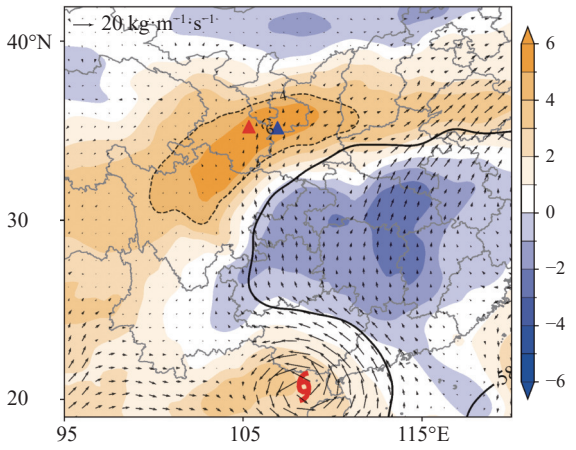


图 4 大气可降水量标准化距平 (填色, 单位: σ) 和整层水汽通量 (风矢, 单位: kg·m^{-1}·s^{-1}) 分布 (图中三角为特大暴雨中心代表站, 红 (蓝) 色为通渭陇阳车岔 (崇信新窑林场) 站, 黑色虚线为 4 倍和 6 倍标准化距平等值线, 黑色实线为 588 dagpm 等值线)

Fig. 4 The distribution of standardized anomalies (color-filled, unit: σ) of precipitable water and vertically integrated water vapor flux (wind vectors, unit: kg·m^{-1}·s^{-1}) (The triangles denote representative stations of the extreme rainstorm center: red (blue) for Tongwei Longyang Che Cha station (Chongxin Xinyao Forest Farm station), the black dashed lines indicate 4-fold and 6-fold standardized anomaly contours; the black solid lines mark the 588 dagpm contour)

土高原与陇西黄土高原的界山, 山脉东西两侧的平凉崇信和定西通渭相距不足 150 km, 但地形差异显著, 导致强降雨开始时间、持续时长和降水演变特征有明显不同, 下面将聚焦于不同地形与低空急流、低涡切变等天气系统的耦合过程和不稳定条件对这两个特大暴雨中心的影响进行重点分析。

4.1 地形对水汽辐合的影响

定西通渭县位于青藏高原东缘边坡, 海拔 1.95 km, 其西侧海拔超过 3 km, 北倚华家岭海拔接近 2.5 km, 东侧为西北东南向连绵分布的祁连山东延余脉屈吴山、六盘山和陇山, 海拔 2.5~3.0 km, 以上地形分布在通渭以南形成开口向南的喇叭口地形。800 hPa 上 (图 5a), 水汽通量和水汽通量散度显示边界层南风急流水汽输送从甘肃南部进入甘肃后, 在喇叭口地形辐合作用下出现明显水汽通量散度辐合, 22 日 20:00 形成以喇叭口地形为边界的水汽辐合区, 暴雨中心接近喇叭口顶端最窄区域, 地形辐合达到最强。由水汽通量散度时间-高度演变 (图 5b) 可见, 特大暴雨中心水汽通量辐合主要集中在 800 hPa, 600 hPa 为水汽通量辐散, 持续时间为 22 日 20:00—23 日 02:00, 与强降水持续时间一致。垂直速度显示, 较强上升运动位于 800—600 hPa, 与对流层低层浅薄的低涡系统厚度一致, 对流发展总体高度不高。由此可见, 通渭的强降水是喇叭口地形对水汽的辐合

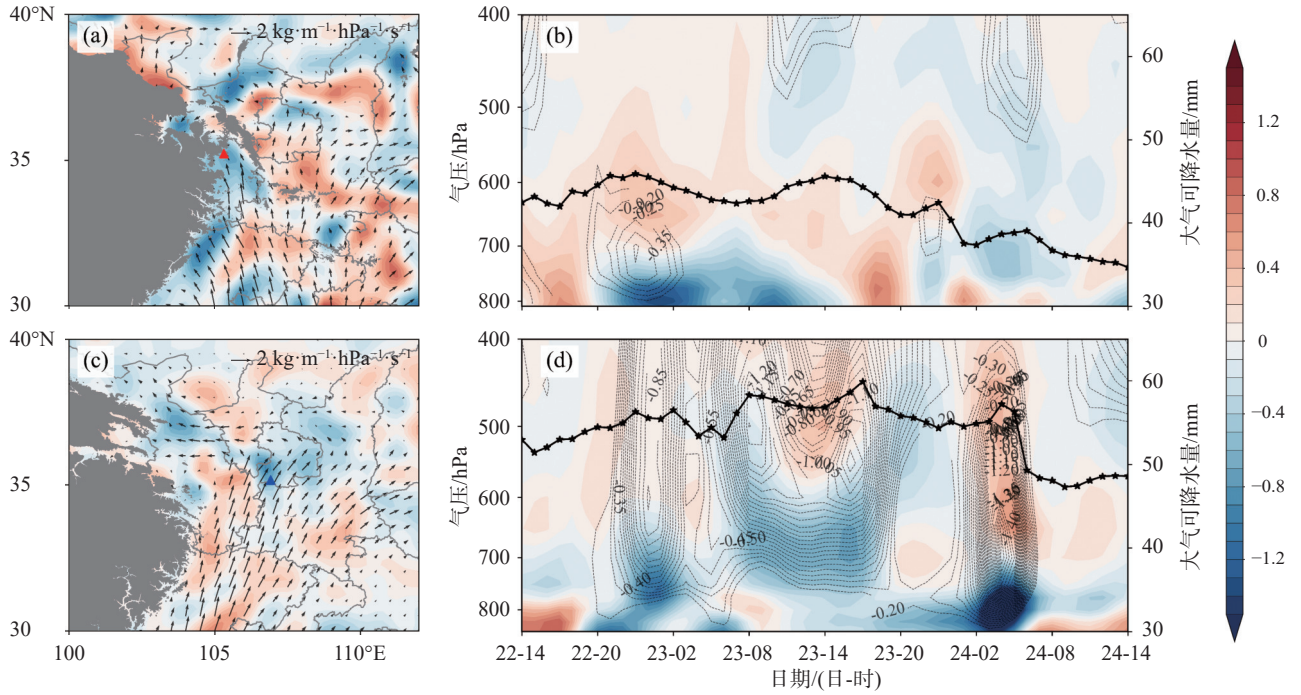


图 5 2024 年 7 月 22 日 20:00 800 hPa (a)、23 日 01:00 700 hPa (c) 水汽通量散度 (填色, 单位: 10^{-5}·kg·m^{-2}·s^{-1}) 和水汽通量 (风矢, 单位: s^{2}·m^{-1}), 22 日 14:00—24 日 14:00 通渭陇阳车岔 (b) 和崇信新窑林场 (d) 水汽通量散度 (填色, 单位: 10^{-5}·kg·m^{-2}·s^{-1})、垂直速度 (虚线等值线, 单位: Pa·s^{-1}) 和大气可降水量 (黑色折线) 时间-高度分布 (图 a、c 中的灰色阴影分别代表海拔>2 km 和海拔>3 km 地形区)

Fig. 5 The (a) 800 hPa water vapor flux divergence (color-filled, unit: 10^{-5}·kg·m^{-2}·s^{-1}) and water vapor flux (wind vectors, unit: kg·m^{-1}·s^{-1}) at 20:00 BT on July 22, (c) 700 hPa counterparts at 01:00 BT on July 23, and time-height distributions of water vapor flux divergence (color-filled, unit: 10^{-5}·kg·m^{-2}·s^{-1}), vertical velocity (dashed contour, unit: Pa·s^{-1}), and precipitable water (black line) from 14:00 BT on July 22 to 14:00 BT on July 24 at (b) Longyang Che Cha station, Tongwei and (d) Xinyao Forest Farm station, Chongxin station (The gray shading in Fig. 5a, c indicates terrain elevation >2 km and >3 km, respectively)

抬升和对流层低层低涡切变共同作用的结果。

平凉崇信县位于陇山东侧, 地势西高东低, 海拔较通渭低约 0.7 km, 受陇山阻挡, 边界层水汽输送难以翻越山脉到达该区域。22 日夜间随着低空急流逐渐增强 (Du et al., 2019), 700 hPa 水汽输送到达该区域, 在低空急流前沿风速辐合区出现水汽通量散度辐合 (图 5c), 该区域降雨随即增强。由水汽通量散度时间-高度演变 (图 5d) 可见, 22 日 22:00 开始, 700 hPa 高度附近出现水汽通量散度辐合, 辐合强度较通渭 800 hPa 辐合明显偏弱, 这与水汽垂直分布有关, 但从垂直速度呈现的上升运动发展高度 (图 5b、d) 来看, 该区域上升运动强烈, 上升运动发展高度高, 对流更为深厚, 由此可见对流层高层辐散、低层低涡切变辐合、以及低空急流前沿风速辐合在该区域形成了较好的高低空系统耦合, 进而产生更为强烈的上升运动, 这一特征持续至 23 日 18:00。在此期间, 该区域 700 hPa 多次出现水汽辐合中心, 逐小时降水量也呈现相应波动 (图 2), 这可能与低空急流风速脉动或者边界层地形重力波有关, 有待进一步深入研究。

综上, 崇信县水汽通量辐合强度较通渭县明显偏弱, 但其本身大气可降水量在 50~60 kg·m^{-2}, 较通渭县高 25%~30%, 具备更为充沛的水汽条件, 加之 700 hPa 水汽辐合和高低空系统耦合发展形成的深厚对流系统, 这是该区域强降水的主要成因。与通渭县明显不同的是, 24 日 02:00—04:00 该区域雨强再次增大 (图 2), 并且该时段 800 hPa 出现强的水汽通量散度辐合和更为强烈的上升运动 (图 5d), 但上升运动发展高度较第一阶段明显降低, 这与地面冷锋过境和边界层强烈辐合触发抬升有关, 持续时间较短。

4.2 不稳定条件对暴雨的影响

2024 年 7 月 22 日 20:00 588 dagpm 等值线西北侧的西北地区东部为对流有效位能 (CAPE) 高值区 (图 6a), 高能中心位于陕西关中和陕南, 最大对流有效位能 (CAPE) ≥2 500 J·kg^{-1}, 暴雨和特大暴雨出现在高能区西侧能量梯度区, CAPE 为 100~2 000 J·kg^{-1}。随着通渭和崇信短时强降水频次增多, 代表站通渭陇阳车岔和崇信新窑林场的 CAPE 快速减小 (图 6b、c), 强降雨水汽凝结迅速释放大量的潜热, 导致假相当位温 (θ_{se}) 的垂直分布出现显著变化。两站 500 hPa θ_{se} 明显减小, 边界层至 500 hPa 存在 θ_{se} 随高度减小的对流不稳定

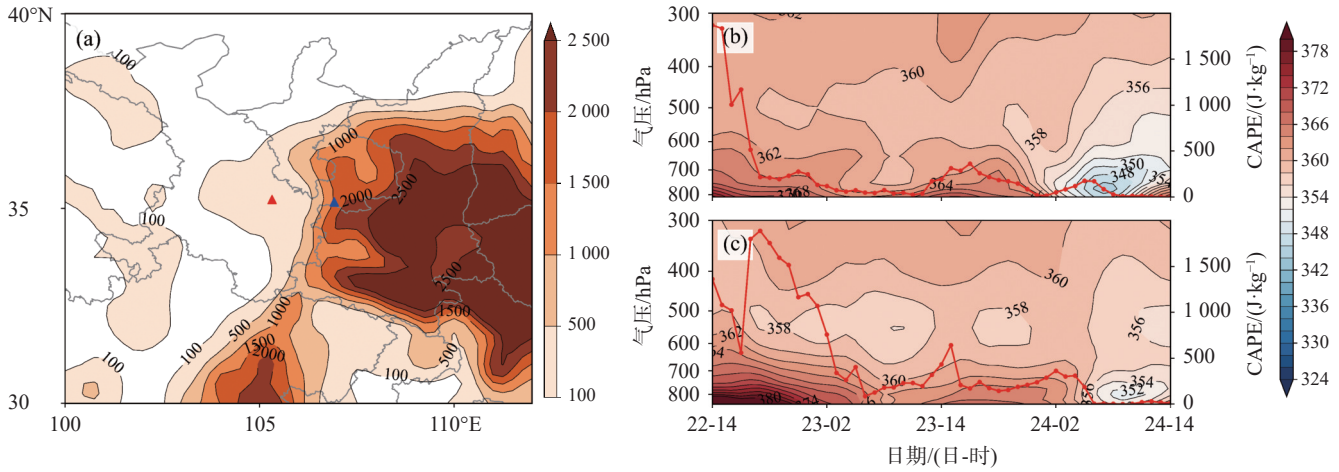


图 6 甘肃河东地区 2024 年 7 月 22 日 20:00 对流有效位能 (CAPE) (单位: J·kg^{-1}) (a), 代表站通渭陇阳车岔 (b) 和崇信新窑林场 (c) 假相当位温 (θ_{se}, 填色, 单位: K) 时间-高度分布和 CAPE (红色折线) 随时间变化

Fig. 6 The (a) CAPE (unit: J·kg^{-1}) at 20:00 BT on July 22 in Hedong region of Gansu Province, and time-height distributions of pseudo-equivalent potential temperature (θ_{se}, color-filled, unit: K) with CAPE (red lines) variations at (b) Longyang Che Cha station, Tongwei and (c) Xinyao Forest Farm station, Chongxin

层, 这种对流不稳定层结的建立与 CAPE 形成有利的接力互补, 暖湿气流沿西南低空急流整层抬升过程中, 强降水对流系统得以发展维持, 这一特征在以往甘肃河东地区极端降水事件中同样存在 (沙宏娥等, 2022)。

4.3 MCS 演变及其与降水的关系

4.3.1 MCS 与降水持续时间的关系

对流系统的移动速度、移动方向及强度决定了对流降水的大小, 对流系统的传播受到风暴内部结构以及与风暴相互作用的外部环境特征的影响。由图 7 可见, 22 日夜间极端强降水主要沿定西东部山区发展。16:00—20:00, 兰州东部、白银南部及定西西部地区即通渭上游区已出现了大范围的强降水, 地面辐合线及其附近的带状 MCS 维持在华家岭西部一带, 且在甘肃中东部形成明显的温度梯度区 (图略)。至 21:00 (图 7a$_1$、b$_1$), 地面辐合线发展移动至华家岭附近, 此时山前的偏东气流强度加强, 其在西进过程中与偏西风交汇形成地面辐合线, 雷达径向速度剖面显示 (图略), 在 2.4°仰角上仍可监测到边界层辐合线, 说明边界层辐合区有一定的厚度, 该边界层辐合线可能与东风加强造成的地形辐合抬升有关, 也可能与上游扩散的冷空气或降水形成的强温度梯度有关, 通渭东部在 20:00—21:00 局地出现了 40 mm·h^{-1} 以上的强降水。23:00, 华家岭以西的回波逐渐减弱 (图 7a$_2$、b$_2$), 地面辐合线略微东移发展, ≥40 dBz 的强回波在华家岭东侧继续维持, 对流回波呈准静止状态, 受边界层冷空气侵入, 通渭西南方向不断有新生回波发展, 对流系统后向传播特征明显, 降水强度维持在 30 mm·h^{-1} 左右, 且强降水范围扩大。从图 7a$_3$、b$_3$ 可知, 强回波维持在华家岭-六盘山一带, 强度达到 45 dBz, 造成通渭东部局地出现近 70 mm·h^{-1} 的强降水。同时, 从该时次定西雷达的各偏振量分布 (图 8) 及其演变 (图略) 来看, 通渭东部形成差分反射率 (Z_{DR}) 大值区, 并稳定在 2.0~3.0 dB 之间, 差分传播相移 (K_{DP}) 逐渐加强至2.4 °·km^{-1}, 随着雨强增大, Z_{DR} 和 K_{DP} 略微增强, 且 Z_{DR} 高值区先于反射率因子大值出现, K_{DP} 高值和反射率因子大值同时出现。

经过 2 h 的发展, 地面辐合线已东移至通渭东部, 厚度达 3 km 的偏东风在华家岭山前与偏西风形成气旋式辐合, 1.45°仰角为径向辐合, 3.4°以上仰角为辐散 (图略), 对流系统呈现出低层辐合、高层辐散的特征, 这种对流组织化发展特征更有利于其生命史延长, 配合局地强降水产生的地面辐合线西南侧不断有新生回波, 并在弱南风引导下经过通渭东部, 造成该区域雨强明显增强, 局地出现近 70 mm·h^{-1} 的强降水。至 23 日 03:00 (图 7a$_4$、b$_4$), 强回波逐渐减弱, 且其范围缩小, 地面辐合线已东移至通渭与天水交界区, 此时引导气流为偏西风, 系统表现为北传减弱的移动态势, 对流回波传播机制受阻, 雨强略减弱至 20~30 mm·h^{-1}。后期随着回波东移, 通渭东部的山前对流降水也转为层云降水。

位于崇信特大暴雨中心西北方向 90 km 处、六盘山西麓的隆德风廓线雷达水平风羽图上 (图略), 23 日 00:00, 1~3 km 高度西南风增强, 标志着低空急流逐渐发展增强越过陇山, 00:20 在 1.6 km 高度风速超过 10 m·s^{-1}, 00:50—01:00 ≥10 m·s^{-1} 大风核高度扩展至 3 km, 随后大风核风速减小、高度略有下降, 02:20 和 03:00 前后 1.5 km 高度处西南风速再次增大, 表现出风速脉动沿低空急流传播特征。西峰雷

达径向速度图 (图 9) 上, 23 日 00:41 平凉东部至庆阳南部多个仰角出现速度模糊 (图 9c、d), 急流轴呈东北—西南向; 受强降水、探测距离等因素影响, 崇信暴雨中尺度对流系统雷达回波衰减严重, 但从图 9a 可见, 急流轴左侧存在一条东北—西南向带状强回波, 该回波带由多个对流单体组成, 强降水冷池效应

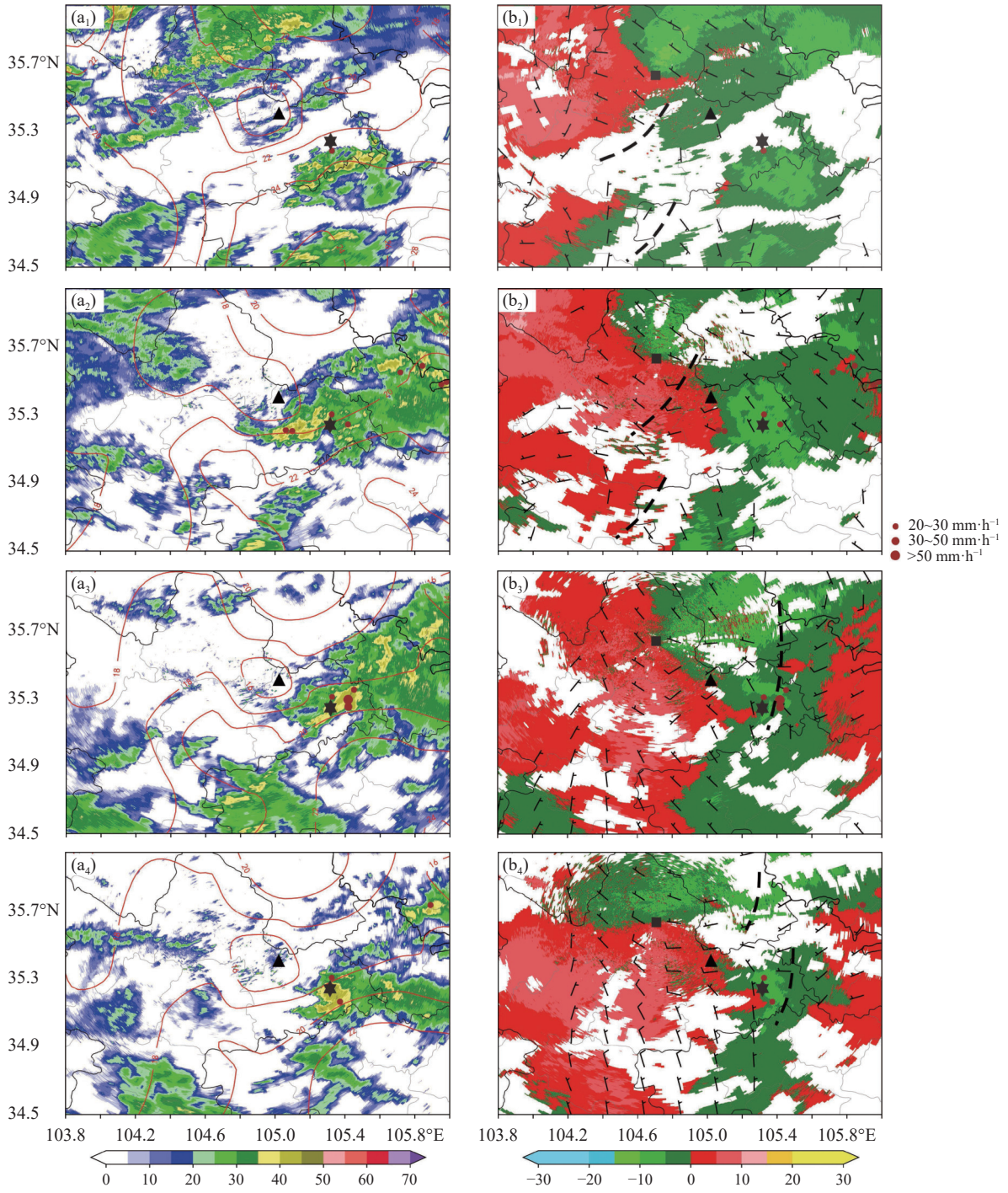


图 7 甘肃河东地区 2024 年 7 月 22 日 21:00 (a_1、b_1), 22 日 23:00 (a_2、b_2), 23 日 01:00 (a_3、b_3), 23 日 03:00 (a_4, b_4) 雷达组合反射率 (填色, 单位: dBz) 和地面温度 (红色等值线, 单位: ℃) (a_1—a_4), 1.5°仰角雷达径向速度 (填色, 单位: $m·s^{-1}$) 和地面风场 (黑色风向杆, 单位: $m·s^{-1}$)、1 h 降水量 (棕色圆点,单位: $mm·h^{-1}$) 和地面辐合线 (黑色虚线) 分布 (b_1—b_4) (黑色三角形代表华家岭气象站、黑色五角星代表陇阳车岔区域气象站、黑色方框代表定西雷达站, 下同)

Fig. 7 The (a_1-a_4) radar composite reflectivity (color-filled, unit: dBz) and surface temperature (red contours, unit: ℃), and (b_1-b_4) 1.5° elevation radar radial velocity (color-filled, unit: $m·s^{-1}$), wind field (black wind barbs, unit: $m·s^{-1}$), 1-h rainfall (brown dots, unit: $mm·h^{-1}$), and surface convergence lines (black dashed line) during the extreme heavy rainfall in Hedong region of Gansu Province at (a_1, b_1) 21:00 BT on July 22, (a_2, b_2) 23:00 BT on July 22, (a_3, b_3) 01:00 BT on July 23, and (a_4, b_4) 03:00 BT on July 23 (The black triangle, star, square marks Huajialing meteorological station, Longyang Checha regional station and dingxi radar station, respectively, the same below)

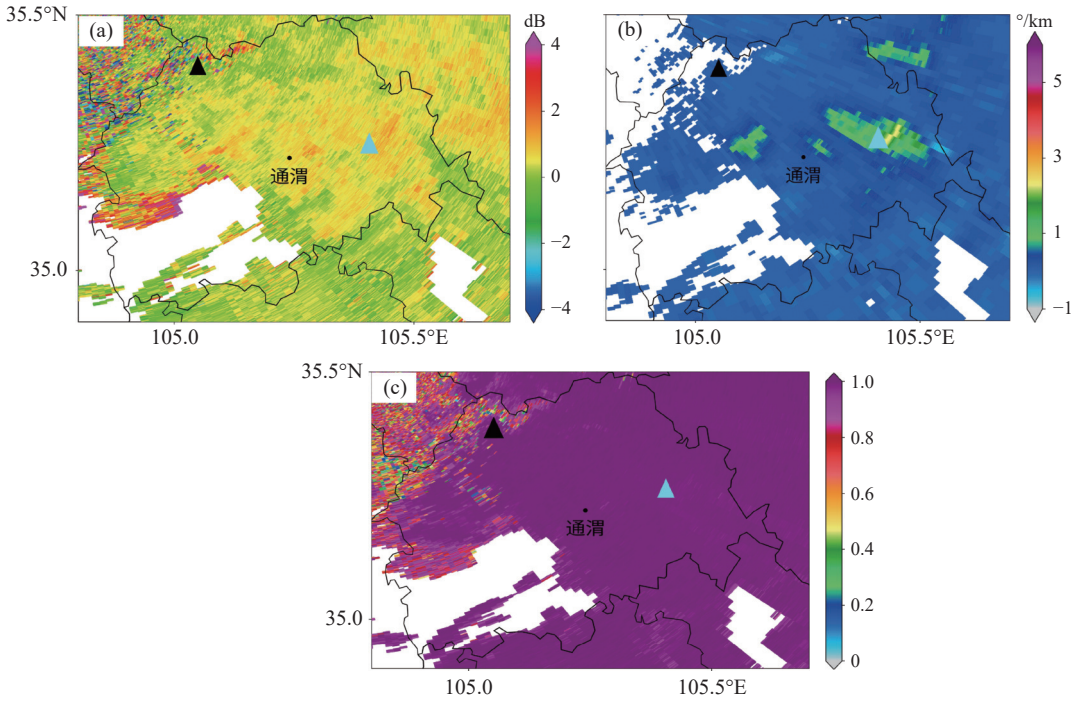


图 8 2024 年 7 月 23 日 00:16 定西 C 波段双偏振雷达 0.5°仰角 Z_{DR} (a, 单位: dB)、K_{DP} (b, 单位: °·km^{-1})、CC (c)

Fig. 8 The (a) Z_{DR} (unit: dB), (b) K_{DP} (unit: °·km^{-1}), and (c) CC from the Dingxi C-band dual-polarization radar at 0.5° elevation angle at 00:16 BT on July 23, 2024

和风速脉动沿急流传播不断在崇信极端暴雨中心上游触发对流单体发展 (图略), 并沿低空急流向东北方向移动, 依次经过暴雨中心形成列车效应, 造成该区域雨强快速增大, 局地超过 60 mm·h^{-1}。

4.3.2 MCS 与降水效率的关系

选取通渭特大暴雨中心陇阳车岔区域站逐小时降水资料与逐 6 min 反射率因子时间演变对比发现 (图 10), 雷达回波和小时降水具有相似的演变特征, 强度≥40 dBz 的强对流回波持续 8 h 以上, 强降水系统整体表现为<4 km 的低质心结构。22 日 19:00—23 日 04:00, 当反射率因子增强时, 降水强度也增加, 其中 22 日 20:00—21:00 及 23 日 02:00—03:00 出现的 50 dBz 回波造成该区域站 50 mm·h^{-1} 的最强降水, 最强阶段对应的强回波质心也略有增强, 达到 4~6 km, 可见强降水主要以低质心、高效率的热带海洋型降水为主。降水与反射率因子的同位相变化说明强对流单体对极端强降水区的影响频次高, 进一步证实了强回波自西南向东北移动, 显著的“列车效应”造成陇阳车岔站强降水持续达 8 h 以上的观测事实。崇信新窑林场强对流回波质心达到 6 km, 同样具有高效率的暖云降水特征, 对流发展高度高于通渭 (图略), 进一步证实了前文中崇信对流系统更为深厚的结论。

两个极端暴雨中心探空图上自由对流高度 (LFC) 低, 易触发对流系统发展; 抬升凝结高度 (LCL) 较低, 0 ℃ 层和−20 ℃ 层高度较高, 暖云层厚 (图略)。而且垂直风切变较弱, 强降水开始后 CAPE 逐渐减

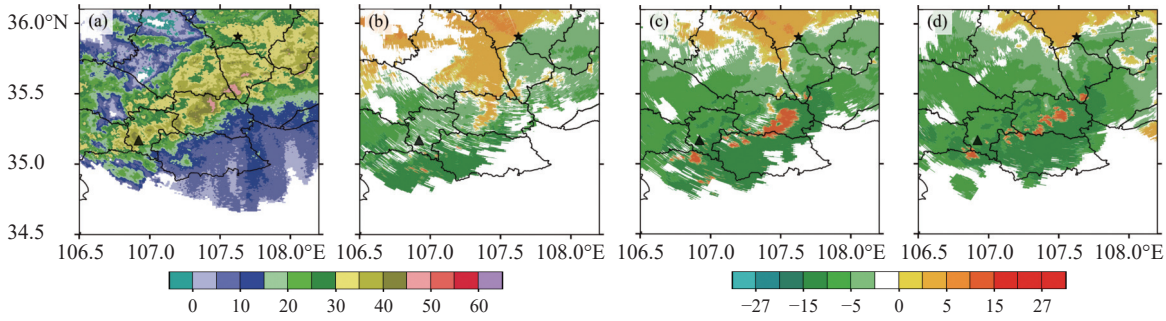


图 9 2024 年 7 月 23 日 00:41 西峰 C 波段雷达组合反射率 (a, 单位: dBz), 0.5° (b)、1.5° (c)、2.4° (d) 仰角径向速度 (单位: m·s^{-1}) (黑色三角 (五角星) 代表崇信新窑林场区域气象站 (西峰雷达站)

Fig. 9 The (a) radar composite reflectivity (unit: dBz) and radial velocity (unit: m·s^{-1}) at (b) 0.5°, (c) 1.5°, and (d) 2.4° elevation angles from the Xifeng C-band radar at 00:41 BT on July 23, 2024 (The black triangle marks Xinyao Forest Farm Regional station and black star marks Xifeng Radar station)

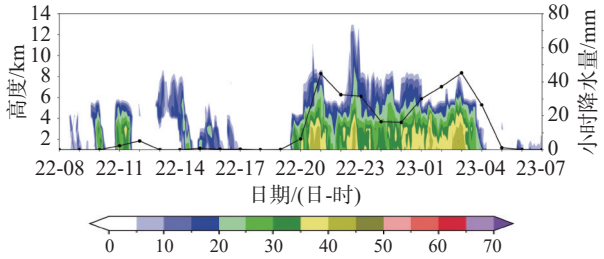


图 10 2024 年 7 月 22 日 08:00—23 日 07:00 陇阳车岔区域站上空雷达反射率因子 (填色, 单位: dBz) 和通渭陇阳车岔站小时降水量 (折线, 单位: mm) 随时间演变

Fig. 10 The vertical profile of radar reflectivity factor (color-filled, unit: dBz) over Longyang Checha Regional station and hourly precipitation (lines, unit: mm) at Longyang Checha station, Tongwei station from 08:00 BT on July 22 to 07:00 BT on July 23, 2024

小为中等强度, 与较强的 CAPE 相比, 有效延长了水汽辐合上升通过暖云层的时间, 大量水汽汇聚在暖云层, 降水效率高。

5 结论和讨论

本文利用地面自动气象观测站、融合降水产品、雷达和 ERA5 再分析资料, 对 2024 年 7 月 22—24 日甘肃河东地区特大暴雨过程的降水实况、中尺度对流系统演变特征、环流形势和局地极端暴雨的中尺度成因进行了分析, 得到主要结论如下:

(1) 此次过程累计降水量≥100 mm 的雨带超过 550 km, 过程最大累计降水量和最大小时雨强分别为 367.7 mm、79.1 mm·h^{-1}, 整体暴雨范围广、强降雨持续时间长、累计降水量大, 小时雨强大, 具有显著极端性, 为 1961 年以来甘肃最强区域性暴雨过程。

(2) 此次过程发生于稳定的大尺度天气形势下, 受较强的副高和台风“派比安”共同影响, 南海洋面至甘肃河东暴雨区形成一条强劲高效持久的水汽输送通道, 导致该地区大气可降水量极端正异常, 这是导致这次 1961 年以来甘肃最强区域性暴雨过程的主要因素。其次, 对流层低层中尺度低涡和低空急流是关键影响系统, 低涡与高层南亚高压的异常形成了有利于上升运动发展的形势。

(3) 陇山复杂地形对相距不远的两个极端暴雨中心的作用不同。位于陇山西侧的通渭特大暴雨主要由喇叭口地形和对流层低层低涡系统相叠加, 造成边界层南风急流输送水汽强烈辐合抬升所导致, 水汽辐合集中在 800 hPa, 对流系统整体发展高度不高; 位于陇山东侧的崇信特大暴雨是由西南低空急流前沿水汽辐合和高低空系统耦合形成深厚对流系统并维持造成, 水汽辐合集中在 700 hPa。两个特大暴雨中心强降水过程中, 中等强度 CAPE 和对流不稳定形成有利互补, 为暴雨中尺度对流系统长时间维持提供有利的不稳定条件。中尺度对流系统呈现出后向传播、列车效应和暖云降水特征, 生命史长、降水效率高。

此次特大暴雨过程因极端充沛的水汽条件和典型的副高边缘型暴雨形势, 落区具有较好的可预报性, 实际业务中预报服务也取得很好的成效, 但在暴雨过程极端性和极端暴雨精细化落区等方面仍有许多值得进一步研究的科学问题和预报难题。例如, 与暴雨相关的中小尺度对流系统的触发组织机制, 强降雨凝结潜热释放对暴雨中尺度对流系统的热力、动力作用, 不同尺度天气系统与西北地区复杂地形相互影响机制和远距离台风对极端降水贡献定量评估等科学问题, 均有待通过多元资料、数值模拟和敏感性试验等手段深入开展定量化研究, 相关研究成果将会对青藏高原东部复杂地形区极端暴雨事件的预报预警和防灾减灾有重要意义。

参考文献 (References):

陈涛,张芳华,于超,等.2020. 2020 年 6-7 月长江中下游极端梅雨天气特征分析[J].气象,46(11):1415−1426. Chen T, Zhang F H, Yu C, et al. 2020. Synoptic analysis of extreme Meiyu precipitation over Yangtze River Basin during June-july 2020 [J]. Meteorlogical Monthly,46(11): 1415−1426 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2020.11.003

邓承之,曹洁,罗娟,等.2024.四川盆地一次暴雨过程中西南低涡非对称结构特征及其成因分析[J].暴雨灾害,43(6):627−636. Deng C Z, Cao J, Luo J, et al. 2024. Analysis on characteristics and causes of the Southwest Vortex asymmetric structure during one rainstorm in the Sichuan Basin [J]. Torrential Rain and Disasters,43(6):627−636 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−239

丁一汇.2019.中国暴雨理论的发展历程与重要进展[J].暴雨灾害,38(5): 395−406. Ding Y H. 2019. The major advances and development process of the theory of heavy rainfalls in China [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):395−406 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.05.001

丁一汇,柳艳菊,宋亚芳.2020.东亚夏季风水汽输送带及其对中国大暴雨与洪涝灾害的影响[J].水科学进展,31(5):629-643. Ding Y H, Liu Y J, Son Y F. 2020. East Asian summer monsoon moisture transport belt and its impact on heavy rainfalls and floods in China [J]. Advances in Water Science,31(5):629-643 (in Chinese). doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2020.05.001

傅朝,刘维成,宋兴宇,等.2022.西北干旱区一次极端暴雨局地性增强的对流环境特征[J].干旱气象,40(6):909−921. Fu Z, Liu W C, Song X Y, et al. 2022. Local enhanced convective environment characteristics of an extreme rainstorm event in arid region of Northwest China [J]. Journal of Arid Meteorology,40(6):909−921 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2022)−06−090

何光碧,肖玉华,师锐.2019.一次伴有高原低涡和热带气旋活动的持续性暴雨过程分析[J].高原气象,38(5):1004−1016. He G B, Xiao Y H, Shi R. 2019. Analysis of a sustained heavy rain aecompanied by a plateau vortex and a tropical cyelone [J]. Plateau Meteorlogy,38(5):

1004−1016 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2018.00131

黄玉霞,王宝鉴,黄武斌,等.2019.我国西北暴雨的研究进展[J].暴雨灾害,38(5):515−525. Huang Y X, Wang, B J, Huang W B, et al. 2019. A review on rainstorm researeh in northwest china [J]. Torential Rain and Disasters,38(5):515−525 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.05.013

孔祥伟,张君霞,杨晓军,等.2022.西北地区东部强降水大尺度数值模式预报空间偏差分析[J].高原气象,41(5):1109−1123. Kong X W, Zhang J X, Yang X J, et al. 2022. Spatial deviation analysis of heavy precipitation forcast of large scale numerical weather prediction in Eastern Northwest China [J]. Plateau Meteorology,41(5):1109−1123 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.00041

刘新伟,段海霞,杨晓军,等.2017.甘肃东部两次短时强降水天气过程对比分析[J].干旱气象,35(5):868−873. Liu X W, Duan H X, Yang X J, et al. 2017. Comprehensive analysis on two short-time strong rainall proceses in East Gansu ll [J]. Joumal of Arid Melteoroogy, 35(5):868−873 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2017)−05−0868

齐道日娜,何立富,王秀明,等.2022. “7·20”河南极端暴雨精细观测及热动力成因[J].应用气象学报,33(1):1−15. Chyi D R N, He L F, Wang X M, et al. 2022. Fine observation characteristics and thermodynamic mechanismsof extreme heavy rainfall in Henan on 20 July 2021 [J]. Journal of Applied Meteorological Science,33(1):1−15 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20220101

覃皓,刘乐,农孟松,等.2023.广西一次持续性暴雨过程中低空急流的作用及其特征[J].暴雨灾害,42(6):640−647 . Qin H, Liu L, Nong M S, et al. 2023. The role and characteristics of low-level jet during a persistent rainstorm in Guangxi [J]. Torrential Rain and Disasters, 42(6):640−647 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−097

沙宏娥,傅朝,刘维成,等.2022.西北东部半干旱区一次极端特大暴雨的触发和维持机制[J].干旱气象,40(6):933−944. Sha H E, Fu Z, Liu W C, et al. 2022. Mechanism of trigger and maintenance during an extremely torrenlial rain in semi-ard region of easten Norhwest China [J]. Journal of Arid Meteorology,40(6):933−944 (in Chinese). doi:10.11755/i.issn.1006−7639(2022)−06−0933

苏爱芳,吕晓娜,崔丽曼,等.2021.郑州 7·20 极端暴雨天气的基本观测分析[J].暴雨灾害,40(5):445−454. Su A F, Lv X N, Cui L M, et al. 2021. The basic observational analysis of 7 20 extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Torrential Rain and Disasters,40(5):445−454 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.05.001

杨舒楠,张芳华,胡艺,等.2023. “23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J].暴雨灾害,42(5):508-520. Yang S N, Zhang F H, Hu Y. et al. 2023. Analysis on the characteristics and causes of the "23·7" torrential rainfall event in North China [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):508-520 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−187

杨晓军,叶培龙,徐丽丽,等.2022.一次青藏高原东北侧边坡强对流暴雨的中尺度对流系统演变特征[J].高原气象,41(4):839−849. Yang X J, Ye P L, Xu L L, et al. 2022. The variation characteristics of Mesoscale Convection System in a severe convective torrential rain over the Northeast Slope of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology,41(4):839−849 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.00023

张君霞,黄武斌,杨秀梅,等.2022.陇东半干旱区一次特大暴雨事件的降水极端性分析[J].干旱气象,40(6):922−932. Zhang J X, Huang W B, Yang X M, et al. 2022. Analysis on precipitation extremity of a torrential rain event in semi-arid region of eastern Gansu [J]. Journal of Arid Meteorology,40(6):922−932 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2022)−06−0922

张强,朱飙,杨金虎,等.2021.西北地区气候湿化趋势的新特征[J].科学通报,66(Z2):3757−3771. Zhang Q, Zhu B, Yang J H, et al. 2021. New characteristics about the climate humidification trend in Northwest China [J]. Chinese Science Bulletin,66(Z2):3757−3771 (in Chinese). doi:10.1360/TB−2020−139

竹利,康岚,陈永仁,等.2024.青藏高原东坡两次暴雨的 MCS 演变及机理对比分析[J].暴雨灾害,43(5):509−520. Zhu L, Kang L, Chen Y R, et al. 2024. MCS evolution and mechanism comparison in the two rainstorm events on the eastern slope of the Qinghai Tibet Plateau [J]. Torrential Rain and Disasters,43(5):509−520 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−225

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 Meteorology,37(3):767−776 (in Chinese). doi:10.7522j.issn.1000−0534.2017.00068

Fu J, Zhang F, Hewson T D. 2020. Object-oriented composite analysis of warm-sector rainfall in North China [J]. Monthly Weather Review, 148(7):2719−2735. doi:10.1175/MWR−D−19−0038.1

Huang G, Liu Y, Huang R. 2011. The interannual variability of summer rainfall in the arid and semiarid regions of northern China and its association with the northern hemisphere circumglobal teleconnection [J]. Advances in Atmospheric Sciences,28(02):257−268. doi:10.1007/s00376−010−9225−x

Li X, Du Y. 2021. Statistical relationships between two types of heavy rainfall and Low-Level Jets in South China [J]. Journal of Climate, 34(21):8549−8566. doi:10.1175/JCLI−D−21−0121.1

Li M, Sun J, Li F, et al. 2024. Precipitation evolution from plain to mountains during the July 2023 extreme heavy rainfall event in North China [J]. Journal of Meteorological Research,38(4):635−651. doi:10.1007/s13351−024−3182−2

Wu P, Ding Y, Liu Y, et al. 2019. The characteristics of moisture recycling and its impact on regional precipitation against the background of climate warming over Northwest China [J]. International Journal of Climatology,39:5241−5255. doi:10.1002/joc.6136

Gao X, Sun J, Yin J, et al. 2024. The impact of Mountain-Plain thermal contrast on precipitation distributions during the “23·7” Record-Breaking heavy rainfall over North China [J]. Atmospheric Research,310,107582. doi:10.1016/j.atmosres.2024.107582

Du Y, Chen G. 2019. Heavy rainfall associated with double Low-Level Jets over Southern China. Part Ii: Convection Initiation [J], Monthly Weather Review, 147(2): 543-565. doi:10.1175/MWR−D−18−0102.1

Zhang H, Zhang Q, Yue P, et al. 2016 Aridity over a semiarid zone in northern China and responses to the East Asian summer monsoon [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,121,1-23. doi:10.1002/2016JD025261

(责任编辑　唐国瑛)