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”特大暴雨过程的降水特征分析

马莉 黄玉霞 黄武斌 马霞 唐国瑛 张君霞 谭丹 苟尚 陈晓燕 王有恒 冯晓宇

Analysis on the precipitation extremes of extremely heavy rainstorm event in Gansu Province of the "7·22"

MA Li，HUANG Yuxia，HUANG Wubin，MA Xia，TANG Guoying，ZHANG Junxia，TAN dan，GOU shang，CHEN Xiaoyan，WANG Youheng，FENG Xiaoyu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-189

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

北京地区两次极端特大暴雨过程中短时强降水环境条件对比分析

Comparison of short-duration heavy rainfall environmental conditions during two extreme torrential rainfall events over Beijing area

暴雨灾害. 2021, 40(1): 27-36 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.004

广西汛期极端短时强降水特征分析

Analysis of characteristics of the extreme short-time heavy rainfall in Guangxi in rain season

暴雨灾害. 2022, 41(3): 308-314 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.007

基于分钟雨量的浙江省汛期短时强降水特征研究

Investigating the characteristics of short-duration heavy rainfall during flood season in Zhejiang Province using the minute rain gauge data

暴雨灾害. 2025, 44(1): 60-70 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-062

一次极端短时强降水过程中FY-3微波湿度计观测特征分析

Analysis of observation characteristic of FY-3 microwave hygrometer during an extreme short-term heavy precipitation process

暴雨灾害. 2020, 39(3): 300-305 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.011

商洛金丝峡“6.26”极端短时强降水成因分析

Comprehensive analysis of the extreme short-time heavy rain event on 26 June 2022 in Jinsi Gorge, Shangluo

暴雨灾害. 2023, 42(6): 659-669 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-256

江淮梅雨期持续性暴雨和极端强降水事件的位涡比较分析

Comparative analysis of potential vorticity between persistent rainstorm and extreme intense rainfall events during the Yangtze-Huaihe Meiyu period

暴雨灾害. 2024, 43(2): 121-134 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-202

关注微信公众号，获得更多资讯信息

马莉,黄玉霞,黄武斌,等.2026.甘肃“7·22”特大暴雨过程的降水特征分析[J].暴雨灾害,45(2):171−181. MA Li, HUANG Yuxia, HUANG Wubin, et al. 2026. Analysis on the precipitation extremes of extremely heavy rainstorm event in Gansu Province of the "7·22" [J]. Torrential Rain and Disasters,45(2):171−181 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−189

甘肃“7·22”特大暴雨过程的降水特征分析

马莉[1],黄玉霞[1],黄武斌[1],马霞[2],唐国瑛[3],张君霞[1],谭丹[1],
苟尚[1],陈晓燕[4],王有恒[5],冯晓宇[6]

(1. 兰州中心气象台,兰州 730020; 2. 新疆维吾尔族自治区呼图壁县生态环境监测站,呼图壁 831200; 3. 中国气象局武汉暴雨研究所,武汉 430205; 4. 中国气象局兰州干旱气象研究所,兰州 730020; 5. 甘肃省气象局,兰州 730020; 6. 山东省临清市气象局,临清 252600)

摘　要: 2024 年 7 月 22—24 日甘肃省河东地区发生 1961 年以来最强区域性特大暴雨过程,本文利用国家和区域气象观测站降水资料及地面-雷达-卫星三源融合降水分析产品,从降水强度、持续时间、历史极端性及特大暴雨中心的时空演变等角度分析此次过程的特征。结果表明:(1) 此次过程具有明显的对流性,降水效率高、持续时间长且雨强大,累积降水量大、暴雨及以上量级降水落区集中等特征;有两个特大暴雨中心,分别位于崇信县新窑林场站和通渭县陇阳车岔站,最大累积降水量为 367.7 mm (新窑林场站);共 456 国家和区域气象观测站出现短时强降水,最长持续时间高达 5 h,对总降水贡献率≥50%,特大暴雨区域代表站 (陇阳车岔站和新窑林场站) 3 h 内逐分钟累积降水量约占过程累积降水量的 59.02%,逐分钟和逐小时最大雨强分别为 8.9 mm·min^{-1} 和 79.1 mm·h^{-1}。(2) 两个特大暴雨中心强降水分别开始于新窑林场站西北部和陇阳车岔站南部,结束于新窑林场站东北部和陇阳车岔站东南部。(3) 此次过程有 265 国家和区域气象观测站过程降水量、93 站短时强降水、91 站短时强降水持续时间超过 7 月历史极值,其中成县、崇信、静宁、通渭 4 站最大日降水量分别为 182.9、232、125.2 和 134.6 mm,均超过了建站以来最大值,约为历年 7 月平均降水量的 1.4 倍。此外,最大日降水量、过程累积降水量、区域平均暴雨量、日降水量破记录站数、短时强降水持续时间、最大 1 h 降水量、综合强度指数等指标均超过 1961 年以来其他区域性暴雨过程的最大值。

关键词: 区域性特大暴雨;极端降水;分钟降水;短时强降水
中图法分类号: P467　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−189

Analysis on the precipitation extremes of extremely heavy rainstorm event in Gansu Province of the "7·22"

MA Li[1], HUANG Yuxia[1], HUANG Wubin[1], MA Xia[2], TANG Guoying[3], ZHANG Junxia[1], TAN dan[1], GOU shang[1], CHEN Xiaoyan[4], WANG Youheng[5], FENG Xiaoyu[6]

(1. *Lanzhou Central Meteorological Observatory*, *Lanzhou* 730020; 2. *Hutubi County Ecological Environment Monitoring Station of Xinjiang Uygur Autonomous Region*, *Hutubi* 831200; 3. *Institute of Heavy Rain*, *CMA*, *Wuhan* 430205; 4. *Institute of Arid Meteorology*, *CMA*, *Lanzhou* 730020; 5. *Gansu Meteorological Bureau*, *Lanzhou* 730020; 6. *Linqing Meteorological Bureau of Shandong Province*, *Linqing* 252600)

Abstract: The Hedong region of Gansu Province experienced the most severe regional torrential rain event From July 22 to 24, 2024, since 1961. This study utilizes precipitation data from national and regional meteorological observation stations, as well as ground-radar-satellite three-source fusion precipitation analysis products, the precipitation characteristics and extremity of this regional torrential rain event were analyzed from perspectives such as precipitation intensity, duration, historical extremity, and the spatiotemporal evolution of heavy precipitation centers. The results are as follows. (1) This event exhibited significant convective characteristics, with high

收稿日期: 2024−10−16; **定稿日期**: 2024−12−18
资助项目: 甘肃省自然科学基金项目 (24JRRA716, 23JRRA1329, 22JR5RA753); 甘肃省气象局创新团队项目 (GSQXCXTD-2024-01); 国家自然科学基金项目 (42205083); 中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2024-139); 甘肃省科技基金计划项目 (24JRRA1182, 22JR5RA752, 23JRRA1324, 22JR5RA755, 24JRRA717, 23JRRA1578)
第一作者: 马莉,主要从事灾害性天气机理研究。E-mail: mali9311@163.com
通信作者: 黄玉霞,主要从事强对流天气预报预警技术研究。E-mail: hyx_gsma@163.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

precipitation efficiency, long duration, intense rainfall, large cumulative precipitation, and concentrated distribution of heavy rain and above. Two extreme rainstorm centers were identified, one at Xinyao Forest Farm station in Chongxin County and the other at Longyang Checha station in Tongwei County. The maximum cumulative precipitation reached 367.7 mm (Xinyao Forest Farm station). A total of 456 stations recorded short-duration heavy rainfall, with the longest duration reaching 5 hours, contributing to ⩾50% of the total precipitation. The representative stations (LongyangChecha station and Xinyao Forest Farm station) in the torrential rain area showed that the cumulative precipitation over 3 hours accounted for approximately 59.02% of the total process precipitation, with maximum rainfall intensities of 8.9 mm·min^{-1} and 79.1 mm·h^{-1} per minute and per hour, respectively. (2) The heavy precipitation at the two extreme rainstorm centers began in the northwestern part of Xinyao Forest Farm station and the southern part of Longyang Checha station, respectively, and ended in the northeastern part of Xinyao Forest Farm station and the southeastern part of Longyang Checha station. (3) During this event, 265 stations recorded process rainfall, 93 stations recorded short-duration heavy rainfall, and 91 stations recorded short-duration heavy rainfall durations exceeding the historical July extremes. The maximum daily precipitation at Chengxian, Chongxin, Jingning, and Tongwei stations were 182.9 mm, 232 mm, 125.2 mm, and 134.6 mm, respectively, all surpassing the maximum values since the establishment of the stations, approximately 1.4 times the average July precipitation. Additionally, indicators such as maximum daily precipitation, cumulative process precipitation, regional average heavy rainfall, number of stations with daily rainfall breaking records, duration of short-duration heavy rainfall, maximum 1-hour precipitation, and comprehensive intensity index all exceeded the maximum values of other regional torrential rain events since 1961.

Key words: regional extreme rainfall; extreme precipitation; minute precipitation; short-duration heavy rainfall

引　言

极端降水过程是指降水量显著超过气候平均态, 统计意义上属于不易发生的小概率事件, 具有罕见的降水量和极高的致灾性 (齐道日娜等, 2022; 汪小康等, 2024)。目前气候变暖正在加剧全球降水趋于极端化, 极端降水过程可能会随气候变暖发生的更加频繁、剧烈 (Donat et al., 2016; 景丞等, 2017; 赵林等, 2025)。我国极端降水过程的发生频率、持续时间、影响范围均呈现出明显的增加趋势 (江洁等, 2022; 刘远等, 2023)。研究表明, 1961 年以来, 我国西北、长江流域、华南、东南沿海和青藏高原极端降水过程呈增多增强趋势 (Zhou et al., 2017; 曹瑜等, 2019; 马莉等, 2023; 李若莹和姚秀萍, 2024), 其中西北地区极端降水过程的增加趋势更突出, 发生频率、强度的增长速率更快 (Han et al., 2019; 杨浩等, 2022; 艾克代·沙拉木等, 2024)。

我国北方地区每年暴雨总次数较南方地区偏少, 但单次降水强度大, 因地质条件复杂, 更易诱发致灾性强的洪涝、泥石流等灾害 (孙继松等, 2012; 徐祥德等, 2024; 张君霞等, 2024; 张智煜等, 2024)。近年来, 我国北方地区发生的几次高影响特大暴雨过程均具有显著的极端性, 例如 2012 年 7 月 21 日和 2016 年 7 月 20 日北京发生的两次特大暴雨过程最大 5 min 降水分别高达 20.4 mm 和 10.7 mm, 具有极强的致灾性 (田付友等, 2021; 陆婷婷和崔晓鹏, 2022); 2022 年 8 月 12 日发生在甘肃河西地区酒泉市金塔县的极端暴雨天气, 过程累积雨量 (88 mm) 超过近 62 a 汛期平均值的 58%, 小时雨强 (56.2 mm) 是 62 a 来 8 月平均总降水量的 3 倍, 累积降水量和小时雨强均突破历史极值 (傅朝等, 2022; 张君霞等, 2024), 两次极端暴雨均造成了重大经济损失。

甘肃河东地区地处青藏高原和黄土高原交汇地带, 地质条件脆弱, 地形地貌和气候类型复杂多样, 气候变化敏感, 生态环境脆弱, 夏季降水多受西南季风和东南季风的影响, 易发生强降水 (黄玉霞等, 2017; 刘新伟等, 2020)。例如, 2022 年 7 月 15 日甘肃省河东地区的庆阳市出现了极端暴雨天气, 最大日降水量为 337.32 mm, 最大小时雨量 84.9 mm, 多站日降水量和小时雨强、持续时间均突破了历史极值, 造成了巨大的经济损失 (沙宏娥等, 2022; 张君霞等, 2022)。2024 年 7 月 22—24 日甘肃河东地区出现了 1961 年以来最强区域性特大暴雨过程(黄玉霞等, 2025), 过程累积降水量 (367.7 mm) 和日降水量 (297.7 mm) 大、小时雨强大 (79.1 mm·h^{-1})、短时强降水 (以下简称为短强) 持续时间长 (5 h) 且发生频次高 (7 次)。本文利用国家和区域气象观测站 (以下分别简称为国家站和区域站) 降水资料及地面-雷达-卫星三源融合降水分析产品, 从降水强度、持续时间、历史极端性及特大暴雨中心的时空演变等角度分析此次区域性特大暴雨过程的降水特征及极端性, 以期提高对该地区极端降水演变特征的科学认识, 为极端降水预报预警提供更多参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用的资料包括: (1) 来源于甘肃省气象信息与技术装备保障中心经质控后的 2024 年 7 月

22 日 08:00—24 日 08:00 (北京时, 下同) 国家和区域站逐分钟和逐小时降水数据, 用于分析此次区域性特大暴雨的时空分布特征; (2) 1961—2023 年国家站逐日降水资料、2004—2023 年国家和区域站逐日、逐时降水资料, 用于分析此次过程的极端性; (3) 来源于国家气象信息中心研发的地面-雷达-卫星三源融合降水产品 (CMPAS) 2024 年 7 月 22 日 08:00—24 日 08:00 的格点资料, 空间分辨率为 0.01°×0.01°, 时间分辨率为 1 h, 用于分析此次过程强降水中心的时空演变特征; (4) 来源于欧洲中期天气预报中心 2024 年 7 月 22 日 08:00—24 日 08:00 的 ERA5 再分析数据, 空间分辨率 0.25°×0.25°, 时间分辨率 1 h, 共 37 层 (1 000—1 hPa), 主要包含高度场、经向风 (u)、纬向风 (v)、比湿等数据, 用于分析此次过程环流形势。

1.2 研究方法

降水量等级以国标 (GB/T 28592—2012) 的定义为标准, 暴雨、大暴雨及特大暴雨对应 24 h 降水量 (R) 分别为 50≤R<100 mm、100≤R<250 mm、R≥250 mm。另外, 将 1 h 降水量≥20 mm 的强降水定义为短强; 将短强贡献率定义为过程期间短强总和占过程降水量总和的百分比; 将短强持续时间定义为过程期间连续≥20 mm·h^{-1} 的降水时长; 将频次定义为固定时段内某一降水量出现的次数。

2 降水实况

2024 年 7 月 22—24 日, 甘肃省河东地区出现了一次区域性特大暴雨过程, 暴雨主要出现在陇东南地区及定西市东部, 过程最大累积降水量出现在崇信县新窑林场站 (以下简称为新窑林场), 为 367.7 mm, 最大小时降水量出现在通渭县陇山站 (以下简称为陇山), 23 日 02:00 的小时降水量达 79.1 mm。

根据强降水时段和环流特征可将此次过程分为两个阶段, 第一阶段为 22 日 17:00—23 日 20:00, 强降水持续时间长, 主要受副热带高压、中低层低涡切变和地面辐合线等高低空系统耦合作用, 强降水出现在低涡切变的东南象限, 低空急流的前端和左侧 (图 1); 第二阶段为 24 日 00:00—08:00, 此阶段强降水持续时间较短, 主要受西风槽和冷空气南下影响, 随着地面冷锋东移, 产生了较强的锋面降水, 强降水出现在冷暖空气交汇的陇东南区域。24 日 08:00 后, 西风槽移速加快并南压, 此次过程趋于结束。

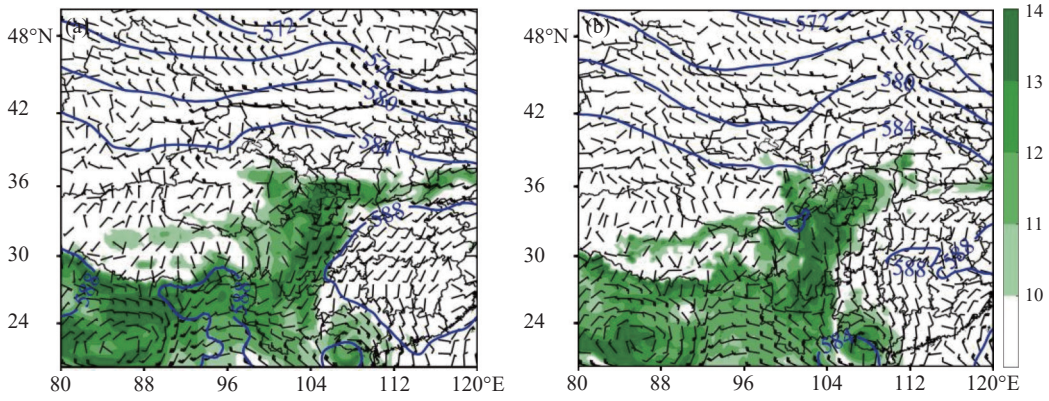


图 1 2024 年 7 月 23 日 02:00 (a) 和 14:00 (b) 500 hPa 高度场 (等值线, 单位: dagpm)、700 hPa 风场 (风向杆, 单位: m·s^{-1}) 及 700 hPa 比湿 (填色, 单位: g·kg^{-1}) 分布

Fig. 1 Distribution of the 500 hPa geopotential height field (contours, unit: dagpm), 700 hPa wind field (wind shafts, unit: m·s^{-1}), and 700 hPa specific humidity (shaded, unit: g·kg^{-1}) at (a) 02:00 BT and (b) 14:00 BT on July 23, 2024

3 降水时空分布特征

3.1 降水量空间分布特征

图 2 给出甘肃河东地区 2024 年 7 月 22 日 08:00—24 日 08:00 累积降水量和累积降水量超过 200 mm 的站点分布, 可见累积降水量超过 100 mm 的降水主要集中在甘肃河东地区的平凉市大部、定西市东部、庆阳市南部、天水市东部、陇南市东部和南部, 主要呈东北—西南走向的带状分布特征。另外, 可看出此次过程有两个特大暴雨中心, 分别位于在平凉东部 (图 2 白色方框区域, 下文称为特大暴雨Ⅱ区) 和定西东部 (图 2 白色三角区域, 下文称为特大暴雨Ⅰ区)。据统计, 共有 73 个国家和区域站累积降水超过 200 mm (图 2 中的白色点), 其中有 12 站超过 300 mm, 过程累积最大降水量出现在新窑林场 367.7mm (图 2 中的白色方框区域)。

由于强降水主要出现在 22 日 20:00—24 日 08:00, 因此图 3 给出了该时段逐 12 h 降水量空间分布图。可见此时段受低涡切变影响, 在低空急流左侧和前端出现了局地特大暴雨 (图略), 强降水区主要位于定

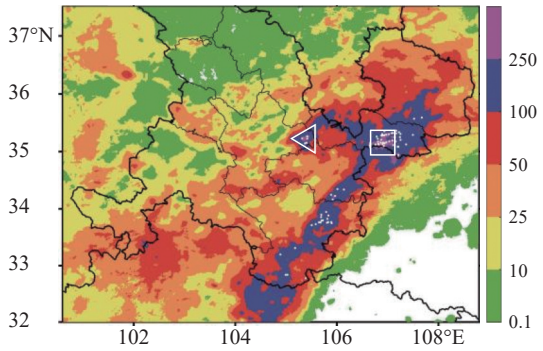


图 2 甘肃河东地区 2024 年 7 月 22 日 08:00—24 日 08:00 累积降水量 (填色, 单位: mm) 和累积降水量超过 200 mm 的站点 (白色点) 分布 (图中三角形和方框分别为特大暴雨Ⅰ区和Ⅱ区)

Fig. 2 Distribution of cumulative precipitation (shaded, unit: mm) and stations with cumulative precipitation exceeding 200 mm (white dots) in the Hedong region of Gansu Province from 08:00 BT on July 22 to 08:00 BT on July 24, 2024 (The triangles and squares are torrential rain area Ⅰ and Ⅱ, respectively)

西市东部、平凉市东部和西部、庆阳市西南部, 有 72 个国家站和区域站 12 h 降水量≥100 mm, 其中有 5 站超过 200 mm, 最大累积降水量出现在定西市通渭县陇阳车岔站 (图 3a 中的白色方框, 以下简称陇阳车岔), 为 282.1 mm。23 日 08:00—20:00, 在切变线右侧、低空急流左侧出现了带状暴雨, 强降水区主要位于平凉市东部、天水市东部、陇南市东部, 12 h 最大累积降水量出现在天水市秦州区长河站 (图 3b 中的白色方框), 为 163.6 mm; 23 日 20:00—24 日 08:00, 强降水区主要位于陇南市南部和东部、天水市东南部, 12 h 最大累积降水量出现在陇南市文县马家沟站 (图 3c 中的白色方框), 为 135 mm。

综上, 本次过程具有累积降水量大, 暴雨及以上量级降水落区集中等特征。

3.2 降水强度的时空分布特征

图 4 反映了短强累积量、短强对同期总降水量的贡献率、短强持续时长、逐分钟最大降水量分布特征, 可见短强累积量的空间分布特征与过程累积降水大值中心 (图 2 中≥100 mm 的降水) 重合, 主要位于平凉东部、定西东南部、天水东南部、陇南东北部 (图 4a)。据统计, 河东地区共 465 个国家和区域站出现了短强, 逐时和逐分钟最大雨强分别为 79.1mm·h^{-1} (陇山站)、8.9 mm·min^{-1} (熊北村站); 有 3 站短强累积量超过 200 mm, 28 站累积量大于100 mm。

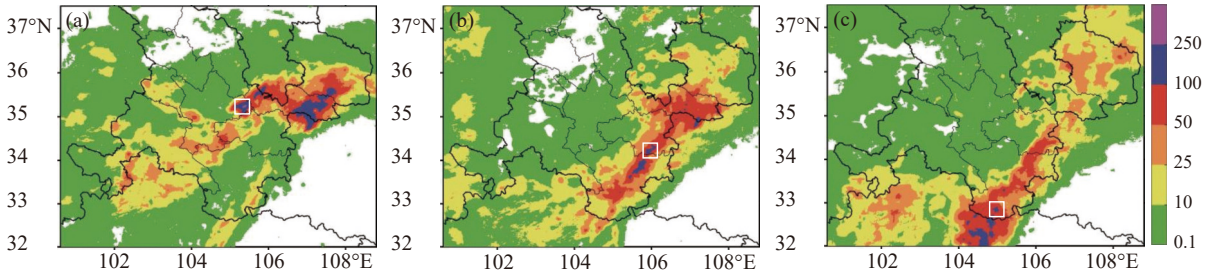


图 3 甘肃河东地区 2024 年 7 月 22 日 20:00—23 日 08:00 (a)、23 日 08:00—20:00 (b) 和 23 日 20:00—24 日 08:00 (c) 逐 12 h 降水量 (单位: mm) 空间分布 (图 a—c 中方框分别为陇阳车岔、长河站和马家沟站)

Fig. 3 Spatial distribution of 12-hour accumulated precipitation (unit: mm) in the Hedong region of Gansu Province from (a) 20:00 BT on July 22 to 08:00 BT on July 23, (b) 08:00 BT to 20:00 BT on July 23, and (c) 20:00 BT on July 23 to 08:00 BT on July 24, 2024 (The squares in Fig. 3a-c are Longyang Checha station, Changhe station and Majiagou station, respectively)

短强累积量对 48 h 累积降水量贡献率大值区与过程累积降水量大值区 (图 2) 基本一致, 短强对同期总降水量贡献率超过 50% 的站点主要分布在平凉东部、定西东部、天水东南部、陇南北部、庆阳东南部和北部等, 其中定西东部、平凉东部个别站点短强贡献率超过 70% (图 4b), 表明短强降水效率高, 高于华北地区, 甚至与华南地区的基本一致 (黄玉霞等, 2019)。

另外, 定西通渭县、平凉崇信县、天水秦州区南部及陇南徽成短强频次达到或超过 4 个时次, 短强持续时长≥3 h, 其中陇阳车岔站、铜城站短强频次达 7 个时次, 持续时间长达 5 h (图 4c), 具有频次高、持续时间长的特点。

从分钟级降水量的空间分布可看出 (图 4d), 平凉东部、庆阳南部和东北部、定西东部局地、天水北部局地、陇南东北部局地逐分钟最大雨强达到或超过 2 mm·min^{-1}, 个别站点超过 3 mm·min^{-1}, 这与图 2 中平凉东部和定西东部的特大暴雨区域高度重合。

综上, 本次过程的短强对过程累积降水贡献大, 降水具有强度大、持续时间长等特征。

图 5 给出 2024 年 7 月 22 日 08:00—24 日 08:00 出现短强的频次时间序列及两个特大暴雨区代表站逐时降水强度。由图 5a 可看出, 此次过程中有 2 个短强频次大值时段。第一个时段为 22 日 17:00—23 日 20:00, 其中 22 日 23:00—23 日 05:00、23 日

07:00—14:00 的出现短强的频次均高于 10 次, 最大值出现在 23 日 01:00, 为 52 站次; 第二个时段为 24 日 00:00—24 日 08:00 结束, 其中 24 日 02:00—03:00 出现短强的频次高于 10 站次, 最大值出现在

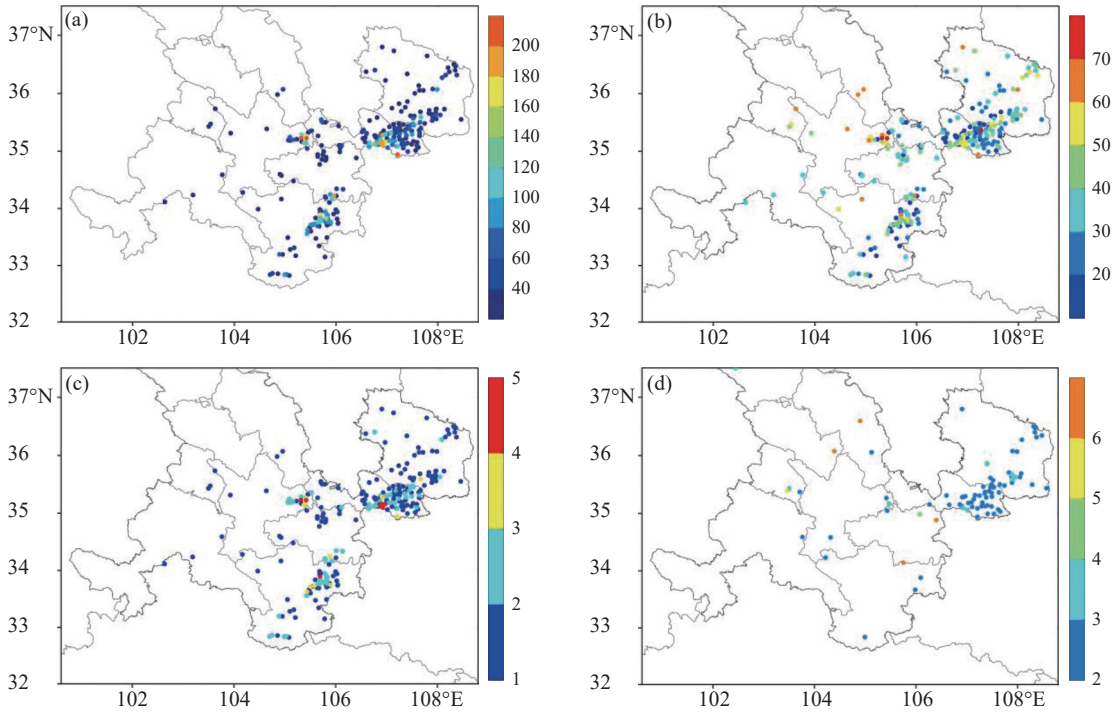


图 4 甘肃河东地区 2024 年 7 月 22 日 08:00—24 日 08:00 国家和区域站短强累积量 (a, 单位: mm)、对同期总降水量的贡献率 (b, 单位: %)、短强持续时长 (c, 单位: h)、逐分钟降水量≥2 mm (d, 单位: mm) 的站点空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of (a) accumulated short-duration heavy precipitation (unit: mm), (b) contribution rate (unit: %) to total precipitation during the same period, (c) duration (unit: h) of short-duration heavy precipitation, and (d) Minute-by-minute precipitation ⩾ 2 mm in Hedong region of Gansu Province from 08:00 BT on 22 to 08:00 BT on 24 July, 2024

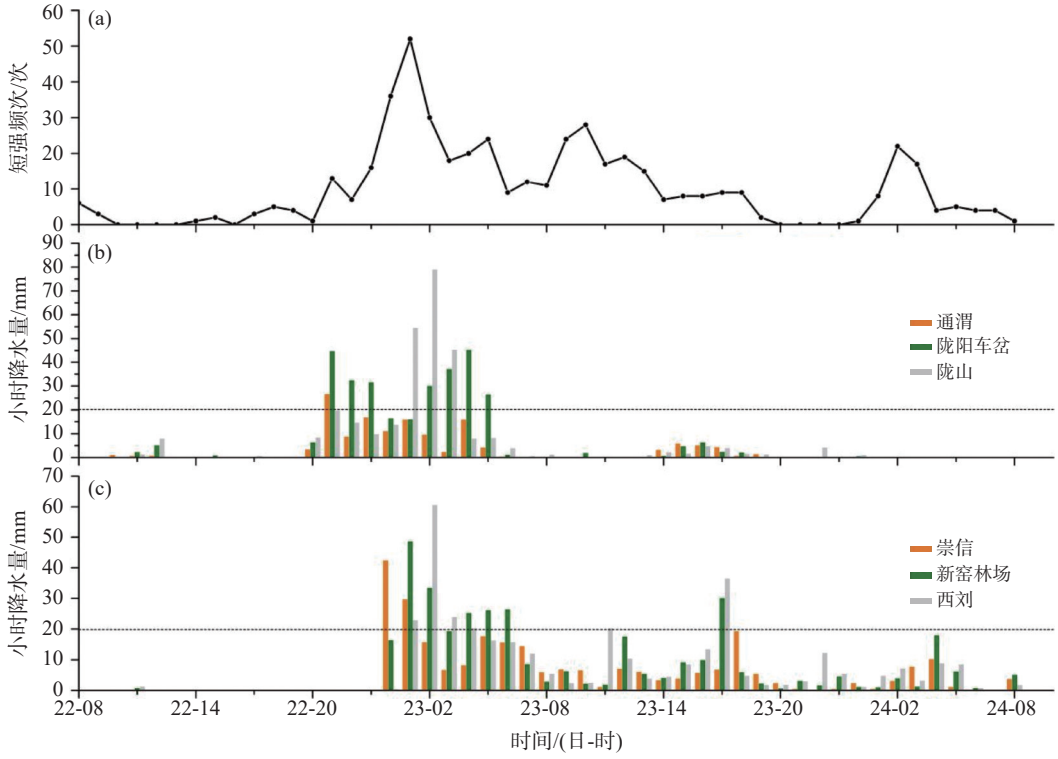


图 5 甘肃河东地区 2024 年 7 月 22—24 日出现短强的频次 (a)、特大暴雨区Ⅱ(b) 和Ⅰ(c) 代表站逐时降水量随时间变化

Fig. 5 Temporal variation of (a) the frequency of short-duration heavy rainfall and hourly precipitation variation over time at representative stations in (b) torrential rain area II and (c) torrential rain area I in the Hedong region of Gansu Province from July 22 to 24, 2024

24 日 02:00, 为 22 站次。

图 5b、c 为两个特大暴雨中心代表站逐时降水强度随时间的变化。此次降水主要发生在 22 日上午至 24 日清晨, 特大暴雨Ⅱ区 (代表站为通渭站、陇阳车岔站、陇山站) 的降水开始、结束时间均早于特大暴雨Ⅰ区 (代表站为崇信站、新窑林场站、西刘站)。特大暴雨Ⅱ区的降水开始于 22 日 10:00, 以≤5 mm·h^{-1} 的降水为主, ≥20 mm·h^{-1} 的强降水主要集中在 22 日 21:00—23 日 07:00, 之后降水减弱, 以<6 mm·h^{-1} 的降水为主, 持续至 24 日 02:00 结束 (图 5b)。特大暴雨Ⅰ区的降水开始于 23 日 00:00, 持续至 24 日 08:00 结束, ≥20 mm·h^{-1} 的降水主要集中在 23 日 01:00—06:00。代表站陇阳车岔、陇山和西刘三站均有 3 个及以上的时次出现≥20 mm·h^{-1} 的强降水, 其中, 陇阳车岔站出现的频次最高 (7 次), 西刘站出现的频次和 z 最大小时雨强次之 (6 次, 60.7 mm·h^{-1}), 陇山站小时雨强最大 (79.1 mm·h^{-1}), 且连续 3 h 出现>45 mm·h^{-1} 的强降水。通渭、崇信两站均出现≥20 mm·h^{-1} 的强降水 (图 5c)。

两个特大暴雨中心主要在定西市通渭县和平凉市崇信县, 其中通渭县陇山站的雨强最大 (79.1 mm·h^{-1}), 且连续 3 h 的雨强>45 mm·h^{-1}; 崇信县西刘站次之 (60.7 mm·h^{-1}), 且有 6 个时次小时降水>20 mm。下面以通渭、陇山站、崇信、西刘四个站为两个特大暴雨中心代表站进一步分析降水随时间精细化演变特征。

图 6 给出上述四个代表站主要降水时段内逐分钟降水及逐分钟累积降水时间序列, 可见通渭站 22 日 09:45—11:28, 以间歇性稳定弱降水为主 (图 6a), 最大分钟降水强度为 0.2 mm·min^{-1}, 持续时间<2 h; 22 日 19:41—23 日 04:36, 逐分钟累积降水急剧增加, 近 9 h 累积量达 115.5 mm, 占过程累积降水量的 81.22%, 占日降水量 (22 日 20:00—23 日 20:00, 下同) 的 85.81%, 具有一定的对流特征, 有 84 个时次的分钟降水强度≥0.5 mm·min^{-1}, 最长持续时间达 44 min, 其中, 最大分钟降水强度为 0.9 mm·min^{-1}; 23 日 13:05—18:14, 以弱稳定性降水为主, 最大分钟降水强度为 0.3 mm·min^{-1}, 持续时间>5 h。

陇山站的降水主要集中在 22 日 19:42—23 日 03:00 (图 6b)。22 日 19:42—23 日 00:00, 逐分钟累积降水逐步缓慢增加, 近 4 h 累积降水为 66.7 mm, 最大分钟降水强度 1.2 mm·min^{-1}; 23 日 00:00—03:00, 降水强度最强, 具有明显的对流性, 逐分钟累积降水急

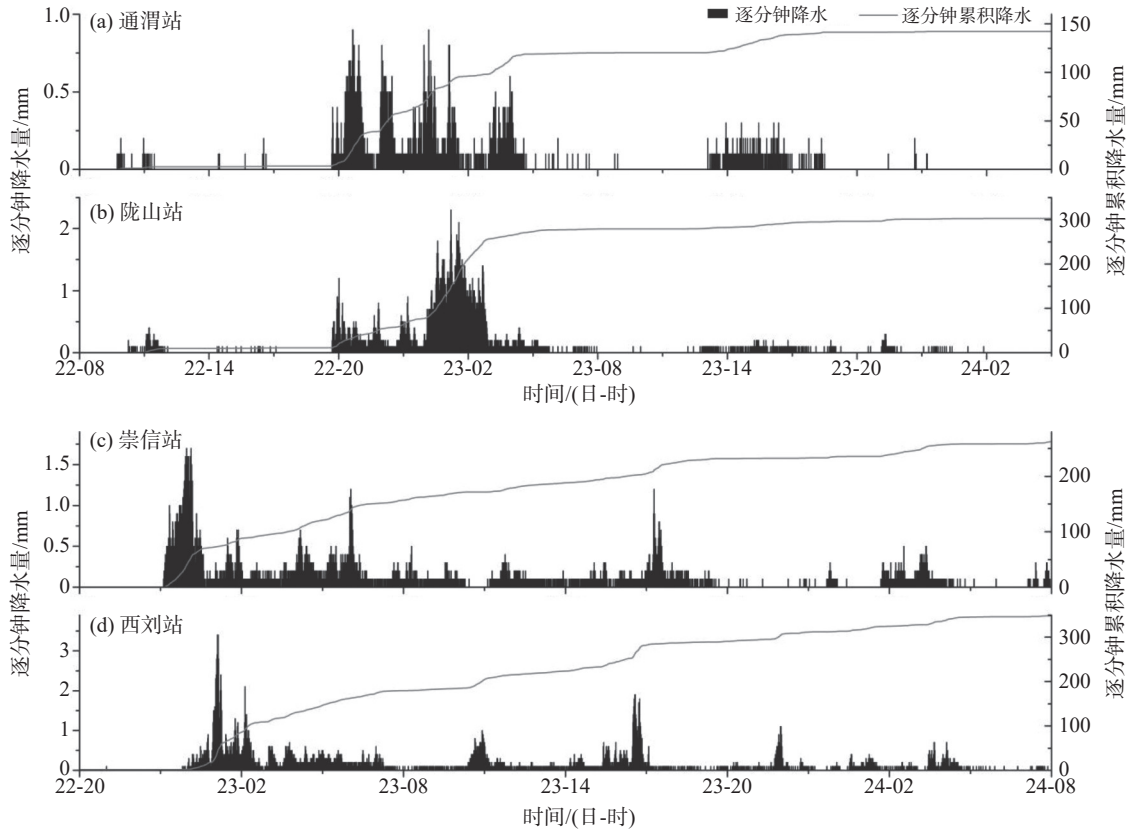


图 6 甘肃河东地区 2024 年 7 月 22—24 日两个特大暴雨区代表站通渭站 (a)、陇山站 (b)、崇信站 (c)、西刘站 (d) 逐分钟降水量及逐分钟累积降水量随时间变化

Fig. 6 Temporal variation of minute-by-minute precipitation and cumulative minute-by-minute precipitation at (a) Tongwei station, (b) Longshan station, (c) Chongxin station and (d) Xiliu station in the two torrential rain areas in the Hedong region of Gansu Province from July 22 to 24, 2024

剧上升, 3 h 累积降水达 179.2 mm, 占过程累积降水量的 59.20%, 占日降水量的 64.69%, ≥1.0 mm·min^{-1} 的降水达 97 min, 最长持续时间为 53 min, 其中≥1.5 mm·min^{-1} 的降水持续时间达 11 min, 最大分钟降水强度为 2.3 mm·min^{-1}。通渭站和陇山站的分钟降水分布特征主要受中低层低涡切变、地面辐合线及喇叭口地形影响。

崇信站有多个强降水时段 (图 6c), 在 22 日 23:07—23 日 00:36 时段内, 降水强度最强, 对流特征明显, 逐分钟累积降水急速增加, 近 90 min 的降水达 70.3 mm, 占过程累积降水量的 26.80%, 占日降水量的 38.92%, ≥0.5 mm·min^{-1} 的降水持续时间长达 58 min, 其中>1.0 mm·min^{-1} 的降水持续时间长达 22 min, 最大降水强度为 1.7 mm·min^{-1}; 23 日 00:36—08:29 降水强度逐渐减弱, 大部分时段的逐分钟降水强度<0.5 mm·min^{-1}, 最大分钟降水强度为 1.2 mm·min^{-1}, 由于降水持续时间长, 近 8 h 累积降水为 91.7 mm; 23 日 11:00—17:00, 以<0.4 mm·min^{-1} 的弱稳定性降水为主; 23 日 17:00—18:00 分钟降水增大, 最大为 1.2 mm·min^{-1}, ≥0.5mm·min^{-1} 的降水达 15 min; 23 日 18:00 之后, 大部分时段以≤0.3 mm·min^{-1} 的间歇性弱稳定性降水为主。

西刘站分钟及降水强度强于崇信站, 强降水主要出现在 23 日 00:30—2:30、16:00—17:00 (图 6d), 具有明显的对流特征。23 日 00:30—2:30 逐分钟降水累积量从 7.9 mm 急剧增加至 100.7 mm, 占过程累积降水量的 28.47%, 占日降水量的 34.82%, ≥1.2 mm·min^{-1} 的降水持续时间长达 20 min, 其中>2.0 mm·min^{-1} 的降水持续时间长达 7 min, 最大分钟降水强度为 3.4 mm·min^{-1}, 降水强度最大; 16:00—17:00 最大分钟降水强度为 1.9 mm·min^{-1}, >1.0 mm·min^{-1} 的降水持续时间达 22 min, 其中>1.5 mm·min^{-1} 的降水时间达 6 min。崇信站和西刘站的分钟降水特征, 主要受高低层低涡切变及低空急流影响。

综上, 此次过程对流性特征明显, 降水效率高且强度大。

3.3 特大暴雨中心时空演变特征

为进一步分析两个特大暴雨中心的降水时空变化特征, 沿特大暴雨Ⅰ区陇阳车岔站 (105.32°E, 35.23°N) 和特大暴雨Ⅱ区新窑林场站 (106.91°E, 35.16°N) 做逐小时降水量的经度-时间和时间-纬度剖面 (图 7)。从陇阳车岔站的经度-时间剖面 (图 7a) 可看出, 特大暴雨中心有两个强降水时段, 22 日 21:00—23 日 00:00, 特大暴雨中心及东西两侧突发≥20 mm·h^{-1} 的强降水, 最大小时雨强为 44.9 mm·h^{-1}, 特大暴雨中心>30 mm·h^{-1} 的强降水持续 3 h; 23 日 02:00, 强降水中心向特大暴雨中心东偏移, 最大小时雨强为 69.6 mm·h^{-1}; 23 日 05:00, 强降水向特大暴雨中心移动, >30 mm·h^{-1} 的强降水持续约 4 h。05:00 之后, 特大暴雨中心及附近两侧降水强度急剧减弱并趋于结束。

由图 7b 可知, 陇阳车岔站南北方向的特大暴雨中心偏移幅度较大。特大暴雨中心强降水发生前, 22 日 19:00 其南侧发生强降水。22 日 21:00—23 日 00:00, 特大暴雨中心及南北两侧均有明显的强降水, 其北侧降水强度强于南侧。23 日 01:00—05:00, 特大暴雨中心>30 mm·h^{-1} 的降水向南北两侧扩张。23 日 05:00 之后, 特大暴雨中心降水逐渐减弱趋于结束。

从新窑林场站的经度-时间剖面 (图 7c) 可看出, 新窑林场站有 3 个强降水时段, ≥20 mm·h^{-1} 的强降水于 22 日 21:00 先从特大暴雨中心西侧开始; 22 日 23:00, 特大暴雨中心降水逐渐开始并增强, 于 23 日 01:00 降水强度达峰值 (48.7 mm·h^{-1}), 随后降水强度略减弱, 强降水中心向特大暴雨中心东侧偏移; 23 日 02:00 之后, 特大暴雨中心降水强度增强, ≥20 mm·h^{-1} 的降水持续至 05:00, 但强降水中心逐渐向西侧偏移; 23 日 14:00—18:00, 强降水中心由特大暴雨中心西侧逐渐向东侧偏移, 特大暴雨中心于 17:00 发生强降水; 23 日 18:00 之后, 特大暴雨中心及其东西两侧降水减弱。

由图 7d 可见, 新窑林场站南北向特大暴雨中心降水偏移程度较东西向小。≥20 mm·h^{-1} 强降水于 23 日 00:00 先从暴雨中心北侧开始, 01:00 强降水中心南移至特大暴雨中心并达到峰值, 06:00 强降水中心先移至特大暴雨中心南侧, 再北移至特大暴雨中心; 23 日 06:00—16:00, 特大暴雨中心及南北两侧降水呈先减弱后增强趋势, 于 17:00 特大暴雨中心及南北两侧出现强降水, 18:00 特大暴雨中心强降水断崖式减弱; 24 日 04:00 特大暴雨中心降水开始逐渐增大 (≥10 mm·h^{-1}), 并向南侧扩张; 04:00 之后特大暴雨中心降水逐渐减弱趋于结束。

综上, 特大暴雨Ⅰ区中心有 2 个强降水时段, 强降水开始于特大暴雨中心的东南象限。特大暴雨Ⅱ区强降水开始于特大暴雨中心的西北象限, 结束于特大暴雨中心东北部, 有 3 个强降水时段。两个特大暴雨中心强降水因强降水持续时间及降水强度具有明显差异, 特大暴雨Ⅱ区降水持续时间长于特大暴雨Ⅰ区, 但小时降水强度小于特大暴雨Ⅰ区。

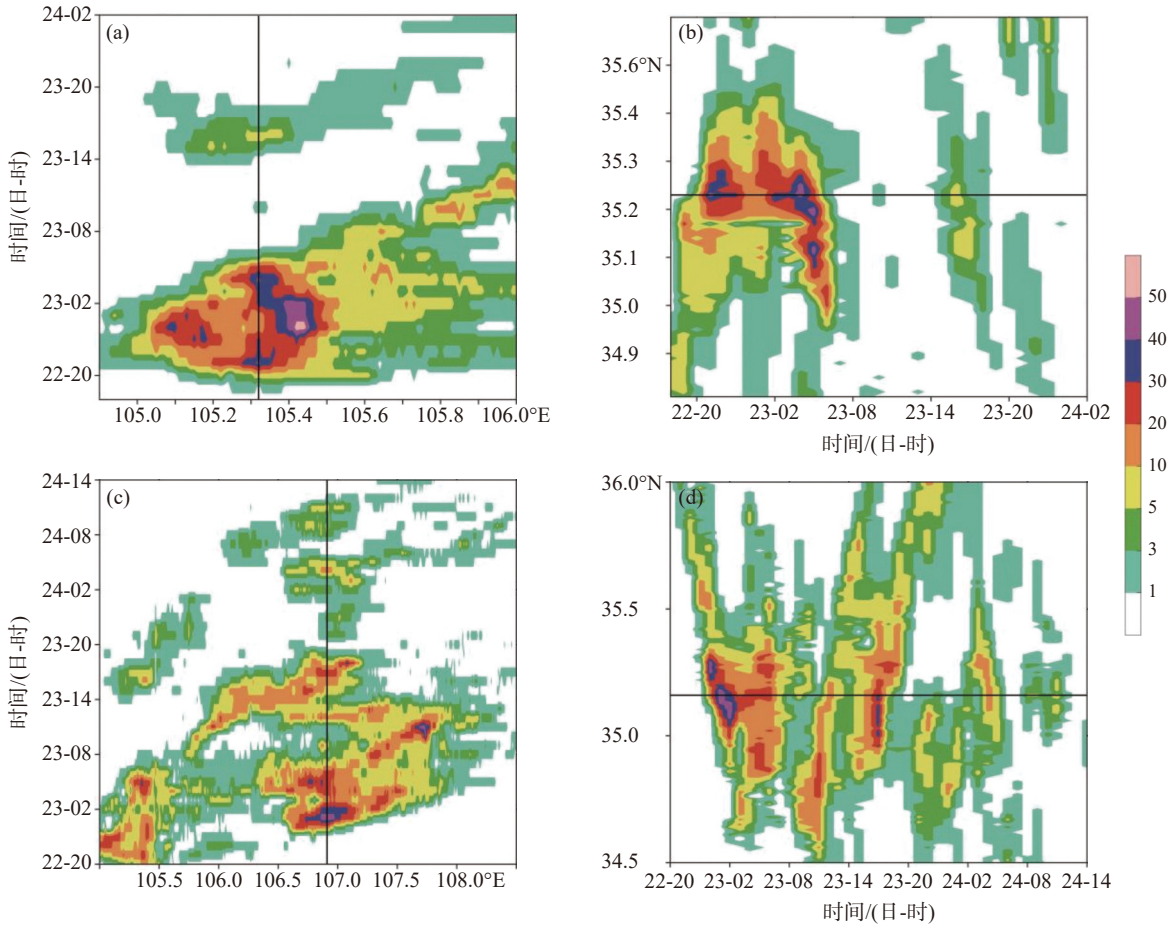


图 7 2024 年 7 月 22—24 日逐小时降水沿陇阳车岔 (105.32°E, 35.23°N) (a、b) 和新窑林场站 (106.91°E, 35.16°N) (c、d) 的经度-时间 (a、c)、时间-纬度 (b、d) 剖面图 (黑色直线为特大暴雨中心)

Fig. 7 Hourly precipitation along the (a, c) longitude-time and (b, d) time-latitude cross-sections at (a, b) Longyang Checha station (105.32°E, 35.23°N) and (c, d) Xinyao Linchang station (106.91°E, 35.16°N) from July 22 to 24, 2024 (The black straight line indicates the center of the extreme rainstorm).

4 降水极端性分析

据统计, 此次特大暴雨过程中平凉东部和西部、定西东部、庆阳南部、天水东部、陇南东部和南部共计 265 个站过程降水量超过各站 7 月历史极值 (图 8a), 其中成县、崇信、静宁、通渭 4 个国家站 24 h 累积降水量超过 1960 年以来的历史极值。平凉东部、定西东南部、天水东南部、陇南东北部和南部、庆阳南部共计 91 个区域站短强持续时间达到或超过各站 7 月历史持续时间 (图 8b)。平凉东部、定西东部、庆阳东部、天水南部、陇南南部共计 93 站次短时强降水强度超过各站 7 月历史极值 (图 8c)。

对比此次过程中 4 个国家站建站以来历年最大日降水量、历年 7 月最大日降水量、历年 7 月平均降水量 (表 1) 发现, 崇信和通渭站本次过程 08:00—次

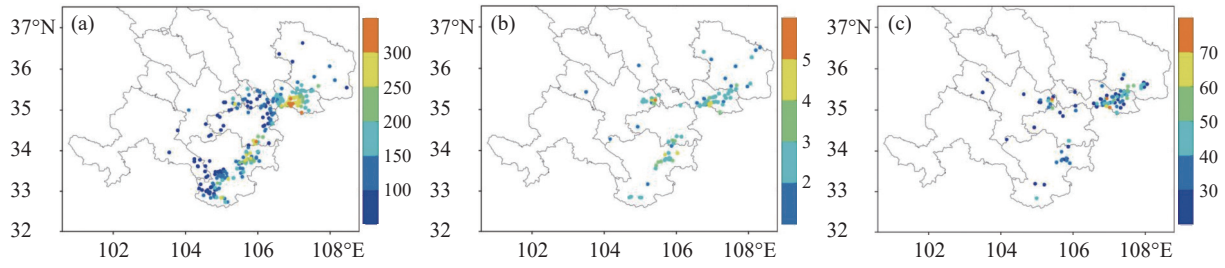


图 8 甘肃河东地区 2024 年 7 月 22—24 日过程降水量 (a, 单位: mm)、短强持续时间 (b, 单位: h)、短强强度 (c, 单位: mm·h^{-1}) 超过建站以来 7 月历史极值的站点分布

Fig. 8 Station distribution of (a) process precipitation (unit: mm), (b) short-duration heavy precipitation duration (unit: h) and (c) short-duration heavy precipitation intensity (unit: mm·h^{-1}), exceeded the historical extremes for July since the establishment of the stations in Hedong region of Gansu Province from July 22 to 24, 2024

日 08:00 和 20:00—次日 20:00 降水量、成县 08:00—次日 08:00 降水量、静宁 20:00—次日 20:00 降水量超过了建站以来历年最大日降水量、历年 7 月最大日降水量、历年 7 月平均降水量。其中, 崇信和通渭治站 20:00—次日 20:00 降水量分别为 232 mm、134.6 mm, 分别是历年最大日降水量的 1.7、1.5 倍, 静宁 20:00—次日 20:00 降水量 (125.2 mm)、成县 08:00—次日 08:00 降水量 (182.9 mm) 分别是历年最大日降水量的 1.1、1.4 倍。通渭站 20—20 时降水量是历年 7 月最大日降水量的 2 倍, 崇信和静宁 20:00—次日 20:00 降水量分别是历年 7 月最大日降水量的 1.7、1.9 倍, 成县站 08:00—次日 08:00 降水量是历年 7 月最大日降水量的 1.4 倍。崇信站 20—20 时降水量日降水量是历年 7 月平均降水量的 2 倍, 占汛期总降水量的 50% 以上, 成县站 08:00—次日 08:00 降水量、通渭站 20:00—次日 20:00 降水量分别是历年 7 月平均降水量的 1.5、1.7 倍, 静宁 20:00—次日 20:00 时降水量是历年 7 月平均降水量的 1.4 倍。上述结果表明, 此次特大暴雨过程国家站日降水累积量大, 极端性明显。

表 1 2024 年 7 月 22—24 日日降水量突破极值的 4 个国家站日降水量与甘肃省历年最大日降水量 (MDP)、历年 7 月最大日降水量 (MDPJ) 和平均降水量 (APJ) 对比

Table 1 Comparison of daily precipitation with the maximum daily precipitation over the years (MDP), the maximum daily precipitation (MDPJ) in July over the years and the average precipitation (APJ) at four national stations where the daily precipitation exceeded the extreme value on July 22-24, 2024 in Gansu

站名	MDP/mm	MDPJ/mm	APJ/mm	08:00—次日08:00降水量/mm	20:00—次日20:00降水量/mm
成县	135.2	135.2	121.6	182.9	99.1
崇信	139.4	134.8	113.2	157.0	232.0
通渭	91.0	64.7	78.4	120.2	134.6
静宁	112.5	66.5	89.6	105.7	125.2

根据《区域性暴雨过程评估方法》(GB/T 42075-2022), 基于区域性暴雨持续日数、影响范围和平均强度等综合评估结果表明, 7 月 22 日 08:00—24 日 08:00 的区域性暴雨过程综合强度为特强等级, 为 1961 年以来甘肃省最强区域性暴雨过程 (表 2), 降水过程累积降水量、日降水量、持续时间等表现出明显的极端性。

表 2 和图 9 给出截止 2024 年综合强度为历史前 4 的区域性暴雨过程资料对比, 除最大 1 h 降水量和短强持续时间外, 其余均为国家站数据。4 次区域性暴雨过程中“2005.6.30”过程持续时间最长, 为 3 d, 本次过程和“2023.7.27”持续时间均为 2 d, “2010.7.23”过程持续时间最短 (1 d)。本次过程中 08:00—次日 08:00 最大日降水量 (182.9 mm)、过程累积降水量 (262.4 mm)、区域平均暴雨量 (95.68 mm)、日降水量破记录站数 (4 站)、短强持续时间 (5 h)、最大 1 h 降水量 (79.1 mm)、综合强度指数 (416.8) 等指标均高于其他 3 次区域性暴雨过程; 其中, 过程最大累积降水量是“2023.7.27”、“2010.7.23”、“2005.6.30”三次区域性暴雨过程的 1.2、2.5、1.4 倍; 08:00—次日 08:00 最大日降水量是上述三次区域性暴雨过程的 1.2、1.7、1.3 倍; 短强持续时间是“2010.7.23”区域性暴雨过程的 2.5 倍, 是“2023.7.27”和“2005.6.30”两次区域性暴雨过程的 1.7 倍; 日降水量破记录站数是“2023.7.27”和“2010.7.23”两次区域性暴雨过程的 4 倍; 最大 1 h 降水量是上述三次区域性暴雨过程的 1.3、1.9、1.7 倍; 本次过程和“2005.6.30”两次区域性暴雨过程中出现的短强站数最多, 均为 13 站; 影响总站数“2005.6.30”区域性暴雨过程最多 (24 站), 本次过程次之 (15 站)。综上, 本次区域性暴雨过程的综合强度明显高于其他 3 次区域性暴雨过程。

表 2 甘肃省综合强度为历史前四的区域性暴雨过程

Table 2 Regional rainstorm events with comprehensive intensity of top 4 in history in Gansu

排序	过程	持续日数/d	影响总站数	综合强度指数
1	2024.7.22	2	15	416.87
2	2005.6.30	3	24	401.6
3	2010.7.23	1	8	343.83
4	2023.7.27	2	14	305.02

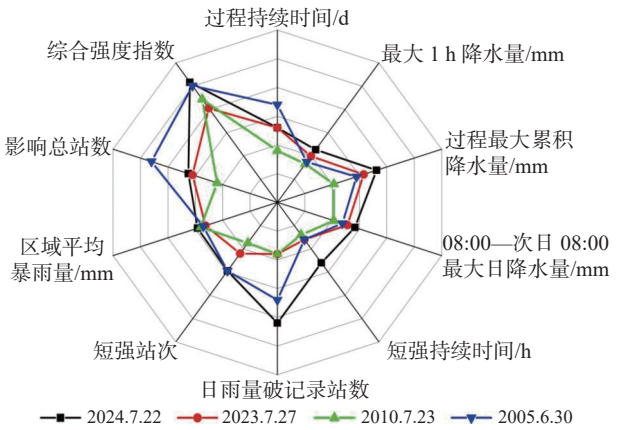


图 9 综合强度为历史前四的区域性暴雨过程对比图

Fig. 9 Comparison diagram of fegional rainstorm processes with comprehensive Intensity of top 4 in history

5 结 论

本文利用 2024 年 7 月 22 日 08:00—24 日 08:00 甘肃河东地区国家和区域站逐日、逐小时、逐分钟降水实况观测资料、三源融合 CMPAS 逐时网格降水资料及各站建站以来逐时和逐日降水资料，从降水强度、持续时间、历史极端性及特大暴雨中心的时空演变等角度分析此次区域性特大暴雨过程的降水特征，主要得到以下结论：

(1) 此次过程累积降水量大，2 个特大暴雨中心分别位于崇信县南部和通渭县东部。其中，12 个区域站过程累积降水量超过了 300 mm，新窑林场站过程累积降水量达 367.7 mm。其次，此次过程对流特征明显且降水效率高，共出现了 456 站次短时强降水，空间分布集中且局地性特征明显，其对总降水的贡献率超过 50%，个别站点超过 70%；特大暴雨区域代表站 3 h 内逐分钟累积降水约占过程累积降水量的 59.02%；降水持续时间长且强度强，短时强降水最多达 7 个时次，最长持续时间达 5 h，逐分钟和逐小时最大雨情分别为 8.9 $mm\cdot min^{-1}$ 和 79.1 $mm\cdot h^{-1}$。

(2) 两个特大暴雨中心的强降水持续时间及降水强度具有明显差异。特大暴雨Ⅰ区降水持续时间长于特大暴雨Ⅱ区，但小时降水强度小于特大暴雨Ⅱ区。特大暴雨Ⅱ区强降水开始于特大暴雨中心，然后向东北方向偏移，最后向东南方向移出；特大暴雨Ⅰ区强降水开始于特大暴雨中心西北部，结束于特大暴雨中心东北部，均经历了增强-减弱-增强-减弱趋于结束的演变过程。

(3) 此次过程是自甘肃省河东地区 1961 年以来最强区域性暴雨过程，具有明显的极端性。有 265 个区域站和国家站过程降水量、93 站次短时强降水强度、91 个区域站短时强降水持续时间超过了各站 7 月历史极值。其中，成县、崇信、静宁、通渭 4 个国家站最大日降水量均超过了建站以来最大日降水量，约为历年 7 月平均降水量的 1.4 倍。另外，此次区域性特大暴雨过程中国家站 08:00—次日 08:00 最大日降水量、过程累积降水量、区域平均暴雨量、日降水量破记录站数、短强持续时间、最大 1 h 降水量等指标均超过 1961 年以来其他区域性暴雨过程。

参考文献 (References):

艾克代·沙拉木,何清,阿力木·阿巴斯,等.2024.新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州暖季小时极端降水时空分布特征[J].沙漠与绿洲气象,18(2):20-26. Akida S, He Q, Alim A, et al. 2022. Spatial and temporal distribution characteristics of hourly extreme rainfall in warm season in Kizilsu Kirgiz Autonomous Prefecture of Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(2):20-26 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.02.003

曹瑜,游庆龙,马茜蓉.2019.青藏高原中东部夏季极端降水年代际变化特征[J].气象科学,39(4):437−445. Cao Y, You Q L, Ma X R. 2019. Interdecadal characteristics of the summer extreme precipitation in the central and eastern Tibetan Plateau [J]. Journal of the Meteorological Sciences,39(4):437−445 (in Chinese). doi:10.3969/2018jms.0077

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/i.issn.1006−7639(2022)−06−0909

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 research in northwest China [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):515−525 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.05.013

黄玉霞,王宝鉴,王研峰,等.2017.甘肃省夏季暴雨日数特征及其与大气环流关系[J].高原气象,36(1):183−194. Huang Y X, Wang B J, Wang Y F, et al. 2017. Spatiotemporal characteristics of summer rainstorm days in gansu province and their relationships with the atmospheric circulation [J]. Plateau Meteorology,36(1):183−194 (in Chinese). doi:10.7522/i.issn.1000−0534.2015.00118

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 Y X, Sha H E, Ye P L, 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

江洁,周天军,张文霞.2022.近 60 年来中国主要流域极端降水演变特征[J].大气科学,46(3):707−724. Jang J, Zhou T J, Zhang W X. 2022. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the main river basins of China in the past 60 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(3):707−724 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2111.21187

景丞,陶辉,王艳君,等.2017.基于区域气候模式 CCLM 的中国极端降水事件预估[J].自然资源学报,32(2):266−277. Jing C, Tao H, Wang Y J. et al. 2017. Projection of extreme precipitation events in China based on regional Climate Model CCLM [J]. Journal of Natural Resources,32(2):266−277 (in Chinese). doi:10.11849/zrzyxb.20160314

李若莹,姚秀萍.2024.青藏高原东南部-川西地区夏季小时极端降水事件特征研究[J].高原气象,43(5):1113−1124. Li R Y, Yao X P. 2024. Characteristics of summer hourly extreme rainfall events in the region of Southeastern Xizang Plateau-Western Sichuan Basin [J]. Plateau Meteorology,43(5):1113−1124 (in Chinese). doi:10.7522/i.issn.1000−0534.2024.00005

刘新伟,叶培龙,伏晶,等. 2020. 高原切变线形态演变对高原边坡一次降水过程的影响分析[J].高原气象,39(2):35-43. Liu X W, Ye P L, Fu J, et al. 2020. The influence of the morphological evolution of plateau shear Line on a precipitation weather process over Plateau Slope [J]. Plateau Meteorology,39(2):245-253 (in Chinese). doi:10.7522/i.issn.1000−0534.2019.00084

刘远,李莹,郭增元,等.2023. 2022 年全球重大天气气候事件[J].气象,49(9):1142−1148. Liu Y, Li Y, Guo Z Y, et al. 2023. Global significant weather and climate events in 2022 [J]. Meteorological Monthly, 49(9):1142−1148 (in Chinese). doi:10.7519/i.issn.1000−0526.2023.042002

陆婷婷,崔晓鹏.2022.北京两次特大暴雨过程观测对比[J].大气科学,46(1):111−132. Lu T T, Cui X P. 2022. Observational comparison of two torrential rainfall events in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(1):111−132 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2104.21007

马莉,杨晓军,王勇,等.2023. 1990—2019 年甘肃汛期极端小时降水特征[J].高原气象,42(4):993−1004. Ma L, Yang X J, Wang Y, et al. 2023. Characteristics of extreme hourly precipitation during flood season in Gansu Province from 1990 to 2019 [J]. Plateau Meteorology,42(4):993−1004 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2022.00053

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. Qi D R N, He L F, Wang X M, et al. 2022. Fine observation characteristics and thermodynamic mechanisms of 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

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 torrential rainin semi-arid region of eastern Northwest China [J]. Journal of Arid Meteorology,40(6):933−944 (in Chinese). doi:10.11755/i.issn.1006−7639(2022)−06−0933

孙继松,何娜,王国荣,等.2012. “21·7”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J].暴雨灾害,31(3):218−225. Sun J S, He N, Wang G R, et al. 2012. Prelimiary analysis on synoptic configuration evolvement and mechanism of a torental rain occurring in Beijing on 21 July 2012 [J]. Torrential Rain and Disasters,31(3):218−225 (in Chinese). doi:1004−9045(2012)03−0218−08

田付友,杨舒楠,郑永光,等.2021.北京地区两次极端特大暴雨过程中短时强降水环境条件对比分析[J].暴雨灾害,40(1):27−36. Tian F U, Yang S N, Zheng Y G, et al. 2021. Comparison of short-duration heavy rainfall environmental conditions during two extreme torrential rainfall events over Beijing area [J]. Torrential Rain and Disasters, 40(1):27−36 (in Chinese). doi:10.3969/i.issn.1004−9045.2021.01.004

汪小康,崔春光,刘柯,等.2024.中国主雨季极端小时降水时空分布和日变化特征[J].气象,50(4):393−406. Wang X K, Cui C G, Liu K, et al. 2024. Spatio-temperal distribution and diurnal variation of extreme hourly precipitation in China during the mainrainy season [J]. Meteorological Monthly,50(4):393−406 (in Chinese). doi:10.7519/i.issn.1000−0526.2023.123001

徐祥德,齐冬梅,李跃清,等.2024.多尺度地形背景下东亚夏季风推进过程与我国洪涝和滑坡泥石流灾害时空特征[J].高原山地气象研究,44(4):1−10. Xu X D, Qi D M, Li Y Q, et al. 2024. Advancement process of east Asian summer monsoon and the spatiotemporal characteristics of flood, landslide and debris flow disasters under multi-scale terrain in China [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(4):1−10 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.04.001

杨浩,周文,汪小康,等.2022. “21·7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J].气象,48(5):571−579. Yang H, Zhou W, Wang X K, et al. 2022. Analysis on extremity and characteristics of the “21·7” severe torrential rain in Henan Province [J]. Meteorological Monthly,48(5):571−579 (in Chinese). doi:10.7519/i.issn.1000−0526.2021.111201

赵林,陈滢,刘邱源,等.2025.基于文献计量的中国区域极端降水研究现状分析[J].暴雨灾害,44(4):431−442. Zhao L, Chen Y, Liu Q Y, et al. 2025. A bibliometric analysis of current research status on extreme precipitation in China [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4):431−442 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−178

张君霞,黄武斌,杨秀梅,等.2022.陇东半干旱区一次特大暴雨过程的降水极端性分析[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/i.issn.1006−7639(2022)−06−0922

张君霞,黄武斌,王一丞,等.2024.河西走廊西部一次暴雨过程降水特征及极端性分析[J].高原气象,43(1):156−165. Zhang J X, Huang W B, Wang Y C, et al. 2024. Analysis on precipitation extremes and characteristics of the rainstorm event in the West of Hexi Corredor [J]. Plateau Meteorology,43(1):156−165 (in Chinese). doi:10.7522/jissn.1000−05342023.00036

张智煜,黄安宁,黄丹青,等.2024.从气候学角度理解“21.7”河南特大暴雨的形成机理[J].大气科学学报,47(5):681−700. Zhang Z Y, Huang A N, Huang D Q, et al. 2024. Understanding the formation mechanism of the "21.7" extreme heavy rainfall event in Henan, China from a climatic perspective [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,47(5):681−700 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20240515001

Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, et al. 2016. More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions [J]. Nature Climate Change, 6(5):508−513. doi:10.1038/nclimate2941

Han J, Du H, Wu Z, et al. 2019. Changes in extreme precipitation over dry and wet regions of China during 1961-2014 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,124:5847−5859. doi:10.1029/2018jd029974

Zhou X, Bai Z, Yang Y, 2017. Linking trends in urban extreme rainfall to urban flooding in China [J]. International Journal of Climatology, 37(13): 4586-4593. doi:10.1002/joc.5107

(责任编辑　杨　浩)