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

甘肃榆中2025年“8·7”暴雨事件极端性特征和环境条件研究

魏栋 马莉 刘丽伟 陈涵 王一丞 杨岳光

Study on the extreme characteristics and environmental conditions of the heavy rainfall event in Yuzhong, Gansu on August 7, 2025

WEI Dong，MA Li，LIU Liwei，CHEN Han，WANG Yicheng，YANG Yueguang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-230

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

2020年7月4—8日长江中游极端暴雨特征分析

Characteristics analysis of an extreme heavy rain event in the middle reaches of the Yangtse River from July 4 to 8 in 2020

暴雨灾害. 2021, 40(4): 333-341 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.001

甘肃“7·22”区域性特大暴雨特征及中尺度成因初探

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

暴雨灾害. 2025, 44(3): 289-299 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-188

内蒙古东北部“21.7”罕见极端暴雨特征及成因分析

Analysis of the characteristics and causes of the July 2021 rare extreme rainstorm in northeastern Inner Mongolia

暴雨灾害. 2025, 44(2): 177-185 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-096

2025年7月下旬华北特大暴雨基本特征及成因初探

Basic characteristics and preliminary causes of the extreme rainstorm over North China in late July 2025

暴雨灾害. 2026, 45(1): 1-14 https://doi.org/10.12406/byzh.2025-196

大气边界层高度的确定及其在数值天气预报模式中的应用

Determining of atmospheric boundary layer heights and its applications to numerical weather prediction models

暴雨灾害. 2022, 41(5): 515-524 https://doi.org/10.12406/byzh.2021-078

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

关注微信公众号，获得更多资讯信息

魏栋,马莉,刘丽伟,等.2026.甘肃榆中 2025 年“8·7”暴雨事件极端性特征和环境条件研究[J].暴雨灾害,45(4):457−467. WEI Dong, MA Li, LIU Liwei, et al. 2026. Study on the extreme characteristics and environmental conditions of the heavy rainfall event in Yuzhong, Gansu on August 7, 2025 [J]. Torrential Rain and Disasters,45(4):457−467 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−230

甘肃榆中 2025 年“8·7”暴雨事件极端性特征和环境条件研究

魏栋[1], 马莉[1], 刘丽伟[2], 陈涵[1], 王一丞[1], 杨岳光[3]

(1. 甘肃省气象台, 兰州 730020; 2. 甘肃省气候中心, 兰州 730020; 3. 甘肃省天水市气象局, 天水 741000)

摘　要: 2025 年 8 月 7—8 日, 甘肃榆中县遭遇历史罕见极端降水, 榆中兴隆山气象观测站 15 h 降水量达 220.2 mm, 达该站年平均降水量的 56%, 极端降水诱发严重山洪, 造成严重的人员伤亡和经济损失。基于气象观测站降水、探空、ERA5 再分析和 GIIRS 卫星数据, 利用诊断分析、降水极端性指标和热力参数, 分析“8·7”事件的降水实况、动力和水汽条件、降水极端性特征及关键热力参数演变。结果表明: (1) “8·7”事件持续时间长、累计降水量大、短时雨强大、局地性强。榆中县共出现 15 站次短时强降水, 其中兴隆山站出现连续 6 h 的短时强降水; 甘肃省内 16 个降水量达 100 mm 以上的大暴雨站点有 4 个出现在榆中县。(2) 500 hPa “两槽一脊”型与西北太平洋副热带高压 (以下简称副高) 边缘共同维持高能高湿环境; 700 hPa 切变线是主要的动力抬升系统, 配合充沛的水汽输送与马衔山地形抬升, 是“8·7”事件的有利条件。(3) 甘肃省中部 78 站过程降水量、37 站小时雨强及 79 站短时强降水频次均突破建站以来 8 月历史极值, 且空间分布不均。榆中县和临夏回族自治州东部为“8·7”事件强中心, 兴隆山等站日降水量超 100 mm, 达日雨量历史极值 2 倍。(4) 事件发生前多个强对流参数均突破近 10 a 95% 的极端阈值, 说明大气存在极端不稳定能量; 同时, 可降水量在多个时次持续超过近 10 a 年 95% 分位数, 且副高边缘的西南急流与地形抬升形成了稳定的“水汽-能量”输送带, 这种“高位势不稳定”与“异常充沛水汽”的时空耦合, 加之地形对切变线的阻挡和辐合作用加强, 是降水突破历史极值的核心成因。(5) 基于 GIIRS 卫星数据, 提出了副高边缘型环流背景下局地突发性极端降水的关键预报判据: 当卫星反演的关键热力参数 (如 CAPE、SI) 突破历史极端阈值, 且地形辐合作用显著时, 可有效指示极端降水的发生。该判据为西北复杂地形区局地突发性极端降水的预报提供了更为精细的量化依据。

关键词: 极端暴雨; 甘肃榆中; 小时雨强; 强对流参数; 卫星遥感

中图法分类号: P467　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−230

Study on the extreme characteristics and environmental conditions of the heavy rainfall event in Yuzhong, Gansu on August 7, 2025

WEI Dong[1], MA Li[1], LIU Liwei[2], CHEN Han[1], WANG Yicheng[1], YANG Yueguang[3]

(1. *Gansu Meteorological Observatory*, *Lanzhou* 730020; 2. *Gansu Climate Center*, *Lanzhou* 730020; 3. *Tianshui Meteorological Bureau of Gansu Province*, *Tianshui* 741000)

Abstract: On August 7-8, 2025, Yuzhong County of Gansu Province suffered historically rare extreme precipitation. A cumulative rainfall of 220.2 mm was recorded at the Xinglong Mountain meteorological station in Yuzhong within 15 hours, accounting for 56% of the local annual average precipitation. The extreme torrential rain triggered severe flash floods, resulting in heavy casualties and substantial economic losses. Based on precipitation observations, radiosonde data from Yuzhong, ERA5 reanalysis datasets and GIIRS satellite retrievals, this study adopts diagnostic analysis, precipitation extremity indices and thermodynamic parameters to investigate the observed rainfall characteristics, dynamic and water vapor conditions, extreme precipitation signatures, and evolutionary features of key

收稿日期: 2025−11−05; **定稿日期**: 2026−02−14

资助项目: 国家自然科学青年基金项目 (42205083); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2025Q012); 甘肃省科技重点研发计划 (26YFFA040); 中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2025-136, FPZJ2025-140); 甘肃省气象局人才专项 (2627rczx-B-JCRC-01, 2425rczx-B-QNBJRC-07); 甘肃省科技计划项目 (22JR5RA753, 25JRRA1108, 23JRRA1329); 甘肃省气象局创新团队 (GSQXCXTD-2024-01)

第一作者: 魏栋, 主要从事中尺度数值模式和强对流天气预报技术研究。E-mail: weid19@lzu.edu.cn

通信作者: 刘丽伟, 主要从事气候变化与气候预测研究。E-mail: 120220900870@lzu.edu.cn

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

thermodynamic parameters associated with this event. The main conclusions are as follows. (1) This extreme rainfall event was characterized by long duration, enormous cumulative precipitation, intense short-duration rainfall rates and prominent local concentration. A total of 15 hourly extreme rainfall records were observed across Yuzhong County, with continuous short-duration heavy rainfall lasting 6 consecutive hours at Xinglong Mountain station. Among the 16 meteorological stations across Gansu Province that recorded total rainfall exceeding 100 mm (heavy torrential rain), four stations were located within Yuzhong County. (2) A two-trough-one-ridge circulation pattern at 500 hPa combined with the periphery of the Western Pacific Subtropical High (WPSH) sustained an environment with high convective available potential energy and abundant moisture. The shear line at 700 hPa served as the primary dynamic lifting trigger. Favourable synoptic conditions for this extreme rainfall were jointly established by ample water vapor transport and orographic lifting induced by the Maxian Mountain terrain. (3) For central Gansu, the total event rainfall at 78 stations, hourly rainfall intensity at 37 stations, and frequency of short-duration heavy rainfall at 79 stations all broke the all-time August records since station establishment, accompanied by highly heterogeneous spatial distribution. The core heavy rainfall centers were situated in Yuzhong County and eastern Linxia Hui Autonomous Prefecture. Daily rainfall at stations including Xinglong Mountain surpassed 100 mm, twice their historical maximum values. (4) Multiple severe convective parameters exceeded the 95th percentile extreme threshold of the past decade prior to the event, indicating extremely unstable atmospheric energy. Meanwhile, atmospheric precipitable water persistently exceeded the 95th percentile of the past decade at multiple hours. The southwest jet stream along the edge of the WPSH, coupled with orographic lifting, formed a steady transport channel for integrated water vapor and convective energy. The spatiotemporal coupling of extremely high potential instability and abnormally abundant moisture, further intensified by terrain-induced blocking and convergence acting on the shear line, constituted the core physical mechanism driving record-breaking precipitation. (5) Based on GIIRS satellite retrievals, this study proposes quantitative key forecasting criteria for localized sudden extreme precipitation under the circulation regime along the WPSH periphery: extreme precipitation is highly likely to occur when satellite-retrieved key thermodynamic parameters (e.g., CAPE, Showalter Index) exceed historical extreme thresholds and pronounced terrain convergence exists. The proposed criteria provide refined quantitative references for forecasting localized sudden extreme precipitation over complex terrain in Northwest China.

Key words: extreme precipitation; Yuzhong County, Gansu; hourly rainfall intensity; convective parameters; satellite remote sensing

引　言

甘肃省地处西北内陆，地形复杂、气候类型多样。甘肃东南部位于夏季风边缘带，其夏季降水与西北太平洋副热带高压 (以下简称副高) 的强度和位置密切相关，副高偏强偏西时降水偏多，偏弱偏东时降水偏少 (杨庆怡等, 2024)。此外，省内复杂山区地形通过动力抬升作用，对来自东南方向的暖湿气流产生显著增幅效应，进一步影响降水的空间分布与极端性 (Wu et al., 2019; 石延召等, 2024)。近年来，气候变暖的加剧使得我国极端降水事件呈增多增强趋势 (Alexander et al., 2006; Zhou et al., 2017)，尤其是西北地区，极端降水的增加趋势更为突出 (Han et al., 2019; 黄玉霞等, 2019; 杨雪等, 2021)。例如：2022 年 7 月 15 日，甘肃庆阳发生极端降水，日降水量达 337.32 mm，最大雨强达 84.9 mm·h^{-1} (沙宏娥等, 2022; 张君霞等, 2024)；2024 年 7 月 22—24 日，甘肃河东地区遭遇 1961 年以来该区域最强特大暴雨，过程累计降水量最高达 367.7 mm，单日最大降水量为 297.7 mm，雨强峰值达 79.1 mm·h^{-1} (马莉等, 2024; 黄玉霞等, 2025)。可见西北地区极端降水事件已愈发频繁，因此准确认识其极端性特征和成因迫在眉睫。

榆中县地处甘肃中部、青藏高原东北侧，这一区域复杂的下垫面特征使得降水发生受到地形重力波的促进作用 (付超等, 2017)。此外，地形迎风侧的气流阻塞与回流效应，及背风侧涡旋系统的生成或加强，对降水过程同样存在突出影响 (马思敏等, 2022)。冷锋过境后，大气垂直层结逐步趋向稳定，但地形造成的阻塞效应会引发锋后冷空气持续堆积。在此过程中，锋面系统对暖湿气流的强迫作用，会推动其形成倾斜式上升运动并增强对流，使大气不稳定能量进一步积累，最终为极端降水天气的发生提供了必要条件 (郭大梅等, 2020)。近年来，榆中县极端降水事件频发，给当地农业生产、生态环境及人民生命财产安全带来严重威胁。例如，2022 年 8 月 13—14 日，榆中县日降水量达 130.6 mm，最大小时降水量为 36.6 mm，突破了该地区历史极值，造成了较大社会影响和巨大经济损失 (伏晶等, 2025)。然而，目前针对榆中县极端降水的专项研究相对匮乏，对其降水极端性特征、形成机制及热动力条件的分析不足，难以满足当地防灾减灾工作对精细化气象服务的需求。

2025 年 8 月 7—8 日，榆中县再次遭遇极端降水 (以下简称为“8·7”事件)，降水强度大、持续时间长且空间分布不均，多个气象观测站降水量突破历史纪

录, 诱发严重山洪, 造成多个乡镇受灾, 并有 15 人遇难、28 人失联。本文基于气象观测站、榆中探空站、ERA5 再分析和 GIIRS 卫星数据和 GF1、GF1D 观测图像, 利用天气动力学诊断分析方法, 并结合降水极端性指标和热力参数, 分析“8·7”事件的动力和水汽条件, 通过多种降水指标验证此次降水的极端性特征, 并通过 GIIRS 反演的热力参数剖析“8·7”事件的演变过程。以期为西北内陆类似地形区域极端降水的预报预警提供科学依据, 提升区域防灾减灾能力。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用的数据包括: (1) 甘肃省气象信息与技术装备保障中心质控后的甘肃中部地区 2025 年 8 月 7 日 08 时—8 日 08 时 (北京时, 下同) 国家和区域级气象观测站 (以下统称为观测站) 逐时和逐分钟降水数据和 2004 年以来各观测站逐时和逐日降水数据 (最早 2007 年, 最晚 2013 年), 用于分析“8·7”事件的降水实况; (2) 欧洲中期天气预报中心的 ERA5 再分析数据集, 时空分辨率分别为 1 h 和 0.25°×0.25°, 用于分析“8·7”事件的动力和水汽条件; (3) 2015—2025 年榆中探空站每日三次的探空数据, 用于分析“8·7”事件中强对流物理参数的极端性; (4) 来源于国家卫星气象中心 GIIRS 反演的热力参数, 分析本次天气过程的热力学特征。FY-4B 搭载了干涉式大气垂直探测仪 (GIIRS) 这一核心载荷。该仪器能够对大气与云层开展高频次观测, 并获取晴空或薄云条件下的大气垂直结构信息。已有研究对该新型探测资料在强对流天气分析中的潜力进行了评估, 认为该产品能较好地反映强对流过程中的热力演变过程 (官莉等, 2023; 魏栋等, 2025)。(5) 来源于高分辨率对地观测系统甘肃数据与应用中心提供的高分系列卫星 GF1、GF1D 观测图像, 用于分析受灾区受损情况。

1.2 研究方法

1.2.1 短时强降水过程提取和分档

利用甘肃中部观测站分钟级降水数据, 参考陆婷婷和崔晓鹏 (2022) 的研究方法筛选小时尺度短时降水事件并对其强度进行分级: 当某一观测站 5 min 降水量≥0.1 mm, 且随后 1 h 内累计降水量≥5 mm 时, 则该时刻为短时降水事件的起始时间, 随后每隔 5 min 对当前时刻起 1 h 内的降水量进行累计, 若累计降水量<5 mm, 则此次短时降水事件结束, 该时刻记为结束时间; 短时降水事件的持续时间由结束时间与起始时间的差值确定; 从起始到结束时间内的累计降水量为此次短时降水事件的总降水量。根据最大 1 h 累计降水量, 将短时降水事件划分为四个等级: 弱降水事件为[5, 10) mm; 中等强度降水事件为[10, 20) mm; 强降水事件为[20, 50) mm 和极强降水事件为≥50 mm。

1.2.2 极端小时降水判定及降水等级标准

为探究“8·7”事件的降水极端性特征, 基于 2004 年以来甘肃省中部地区各观测站的逐时降水数据, 采用百分位法界定极端小时降水阈值 (Bonsal et al., 2001)。本文参考马莉等 (2023) 的结论, 将第 98 百分位小时降水阈值作为 5—8 月极端小时降水的判定标准, 并根据 1990-—2019 共 30 a 间, 在 8 月某一小时降水序列中 98 分位数在各气象站中平均阈值 (7.8 mm) 和最大阈值 (12.7 mm) 开展后续分析。

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 6 h 降水量分别为[30, 70) mm、[70, 140) mm、≥140 mm。

2 降水实况与灾情

2025 年 8 月 7—8 日, 受冷空气和副高影响, 甘肃省出现大范围降水, 其中榆中县、东乡县、广河县等地共计 16 站累计降水量超 100 mm; 兰州、临夏等市州部分地方共 85 站 48 h 累计降水量超 50 mm。降水核心区主要位于榆中县兴隆山 (220.2 mm)、榆中县城关 (156.9 mm)、东乡县凤山 (149.3 mm)、榆中县上庄 (140.2 mm)、广河县阿里麻土 (140.0 mm) 及东乡县卡家 (130.1 mm) (图 1)。

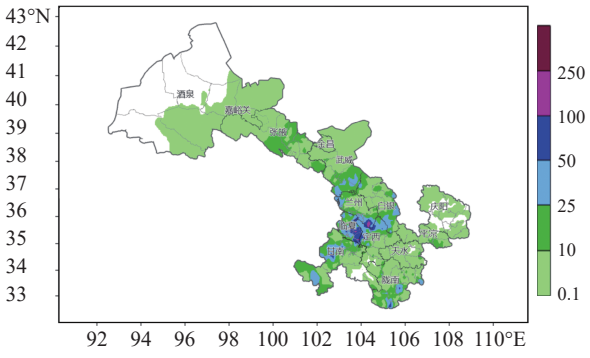


图 1 2025 年 8 月 7 日 08 时—09 日 08 时甘肃省 48 h 累计降水量 (单位: mm) 空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of 48 hour total precipitation (unit: mm) from 08:00 BT 7 August to 08:00 BT 9 August 2025 in Gansu Province

在空间分布上, 强降水表现出明显的不均匀性, 主要集中于榆中县城及以南地区。其中三个相邻观测站累计降水量超过 100 mm, 其余观测站降水量介

于 30~100 mm 之间。兴隆山站自 7 日 18 时—8 日 9 时连续降水 15 h, 累计降水量达 220.2 mm, 达该站年降水量 (382.6 mm) 的 56%; 城关站自 7 日 18 时—8 日 12 时持续降水 18 h, 累计降水量为 156.9 mm, 占年降水量的 41%。此外, 强降水时段集中、雨强突出, 主要表现在兴隆山站在 7 日 18 时—8 日 01 时的 6 h 内持续出现短时强降水, 最大小时降水量达 36.4 mm, 3 h 最大累计降水量为 93.4 mm (图 2), 超过榆中县 8 月平均降水量 (79.2 mm); 城关站出现 3 h 降水量超过 20 mm 的强降水, 最大小时降水量为 43.4 mm, 3 h 最大降水量达 82.3 mm。东乡县三个观测站同样记录到 3 h 短时强降水, 累计降水量均超过 100 mm。

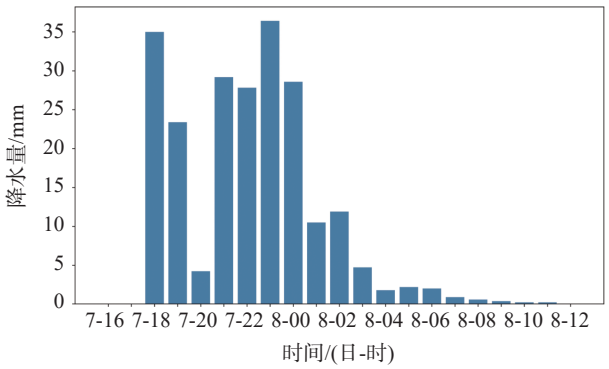


图 2 2025 年 8 月 7 日 16 时—8 日 12 时兴隆山站小时降水量时序图

Fig. 2 Hourly precipitation time series of the Xinglongshan station from 16:00 BT on 7 to 12:00 BT on 8 August 2025

榆中兴隆山站、城关站及小康营站的日降水量均突破建站以来历史极值, 说明“8·7”事件极端性显著, 具有极强的破坏性。此外, 本次极端降水事件诱发严重山洪, 榆中县马坡乡、城关镇、小康营乡、夏官营乡范围内, 受灾点位约 300 余处, 其中居民住宅用地、基础设施、公共服务设施等多处受损 (图 3)。以马坡、上庄两处观测气象站的观测记录为例 (图 3a、c), 马坡乡马莲滩村上游山体植被破坏严重, 上庄上游及南北两侧山体均存在明显山洪冲刷痕迹及设施损毁痕迹 (图 3b、d)。

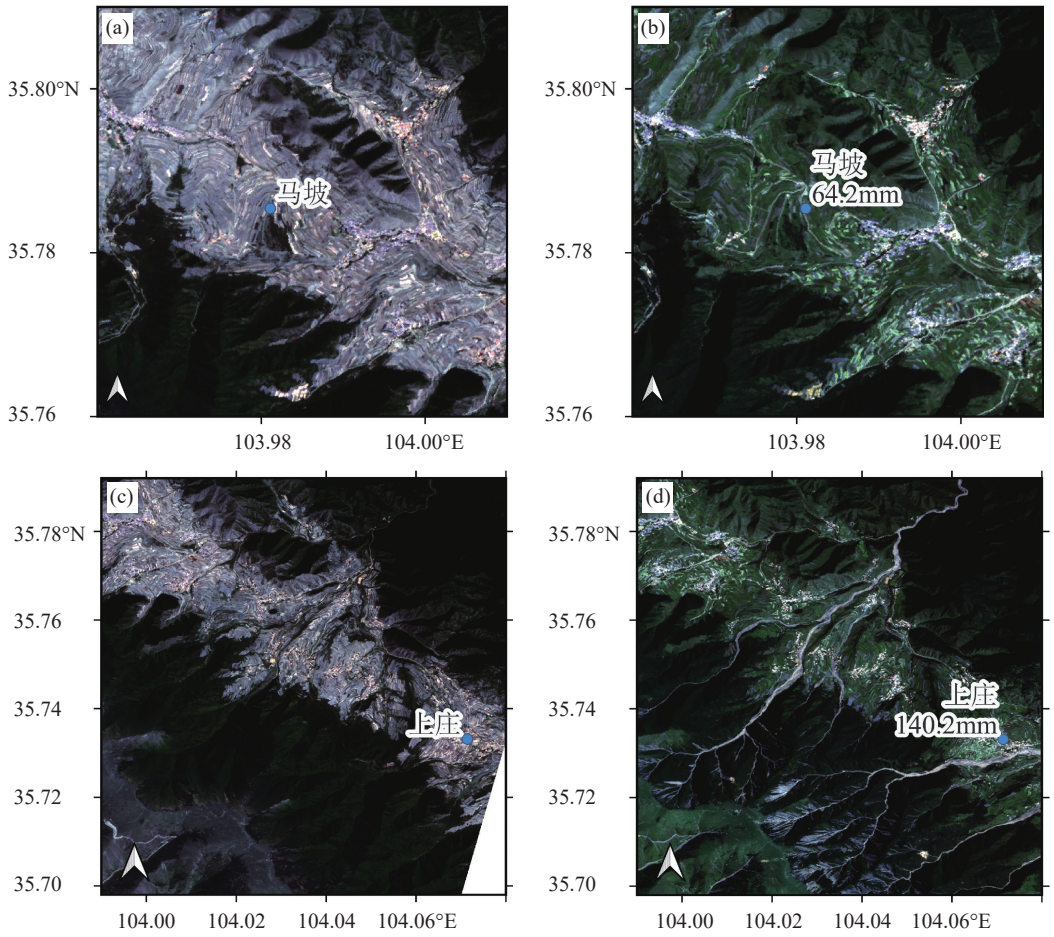


图 3 2025 年 6 月 13 日 (a、c) 和 8 月 11 日 (b、d) 马坡 (a、b)、上庄 (c、d) 站及周边高分辨率卫星影像 (蓝色圆点代表观测站位置, b 和 d 图中数字为“8·7”事件中马坡和上庄观测站累计降水量)

Fig. 3 High-resolution satellite imagery of (a, b) Mapo and (c, d) Shangzhuang station on (a, c) 13 June and (b, d) 11 August 2025 (The blue dots indicate the locations of the observation stations, as well as the cumulative precipitation recorded of the Mapo, Shangzhuang stations in Fig. 2b and Fig. 2d)

3 动力与水汽条件

“8·7”事件是在副高边缘背景下, 由冷空气入侵触发的一次典型天气过程。从大尺度环流形势来看, 8 月 6—7 日, 500 hPa 亚欧中高纬地区呈“两槽一脊”型, 甘肃河西地区处于槽前脊后的西南气流控制下, 而甘肃东南部地区受副高影响, 形成了高能高湿的环境背景。7 日凌晨, 冷空气自河西走廊侵入, 700 hPa 切变线随之生成并东移南压。至当日 16 时左右, 该切变线移至甘肃中部并进入副高边缘区域, 导致冷暖空气在此交汇对峙, 系统移动速度显著减缓并维持少动, 为暴雨的发生和持续提供了关键的动力抬升条件。此外, 中尺度地形效应是“8·7”事件的重要增幅因子。通过分析 8 月 7 日 16 时—8 日 02 时的 700 hPa 风场与地形 (图 4), 发现在 7 日 16 时—8 日 00 时 (图 4a—e), 东南气流与偏东风在马衔山与兴隆山前沿地形爬升, 在山谷和迎风坡有辐合, 说明榆中县南部的马衔山 (主峰海拔 3 671 m) 对低空偏南暖湿气流形成了有效的地形强迫抬升。

进一步分析 8 月 7 日 15 时—8 日 09 时逐 6 h 的环流形势 (图 5), 可见在 7 日 15—21 时 (图 5a、b), 甘肃省位于副高北侧边缘处, 副高稳定维持并持续影响该区域, 甘肃中部和南部处于副高北侧西南气流与西风槽前气流的交汇带。同时, 700 hPa 风场 (图 4) 显示, 甘肃南部存在明显的气流辐合, 这种辐合运动一方面促进了低层水汽的聚集, 另一方面为空气的上升运动提供了动力。结合 700 hPa 比湿的高值分布分析可知, 充足的水汽在风场辐合和高空系统的共同作用下, 不断被输送至甘肃南部并伴随上升运动, 为降水的发生和维持提供了必要的水汽和动力条件。8 日 03—09 时 (图 5c、d), 588 dagpm 等值线位置发生调整, 对甘肃南部上空低压槽的支撑作用减弱, 高空系统开始减弱东移。700 hPa 风场从辐合逐渐转为弱辐合甚至辐散, 水汽输送的动力机制被破坏, 原本聚集的水汽开始分散, 比湿高值区范围缩小, 降水的“动力抬升”与“水汽供应”同步衰减。

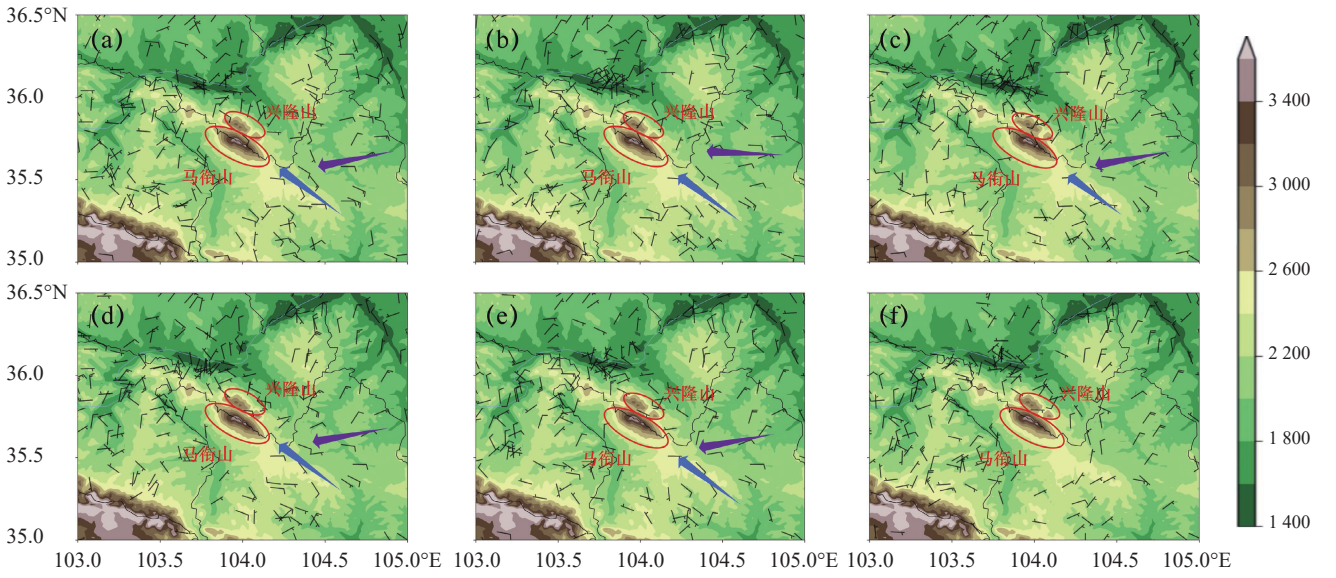


图 4 甘肃东南部 2025 年 8 月 7 日 16 时—8 日 02 时逐 2 h (a—f) 700 hPa 风场 (风向杆, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 与地形高度 (填色, 单位: m) (图中蓝色、紫色箭头分别表示东南气流和偏东风)

Fig. 4 The 700 hPa wind fields (wind shafts, unit: $m \cdot s^{-1}$) and terrain height (shaded, unit: m) at 2-hour intervals from (a-f) 16:00 BT on 7 August to 02:00 BT on 8 August 2025 in southeastern Gansu (The blue and purple arrows indicate the southeasterly and easterly winds, respectively)

综上, 副高调控了低压槽移动与水汽输送通道, 700 hPa 风场辐合强化中尺度动力抬升与水汽聚集, 两者通过垂直耦合和水平相互作用, 结合地形增幅共同塑造“8·7”事件的动力条件与水汽条件。

4 降水极端性特征

4.1 极端降水空间分布与局地性特征

“8·7”事件在甘肃中部产生了大范围的破纪录降水。共计 78 站的降水量突破了建站以来的 8 月历史极值, 这些观测站主要集中分布于临夏回族自治州东部及榆中县西部和南部 (图 6a)。

从短时强降水角度看, “8·7”事件的极端性同样显著。共有 37 站的 1 h 最大雨强达到或超过了各站建站以来 8 月历史极值 (图 6b)。此外, 79 个站的短时强降水频次也创下或追平了 8 月历史纪录。尤其是, 兴隆山站在 7 日 18 时—8 日 01 时期间, 累计 6 h 出现了短时强降水, 凸显了“8·7”事件持续的强对流特性。

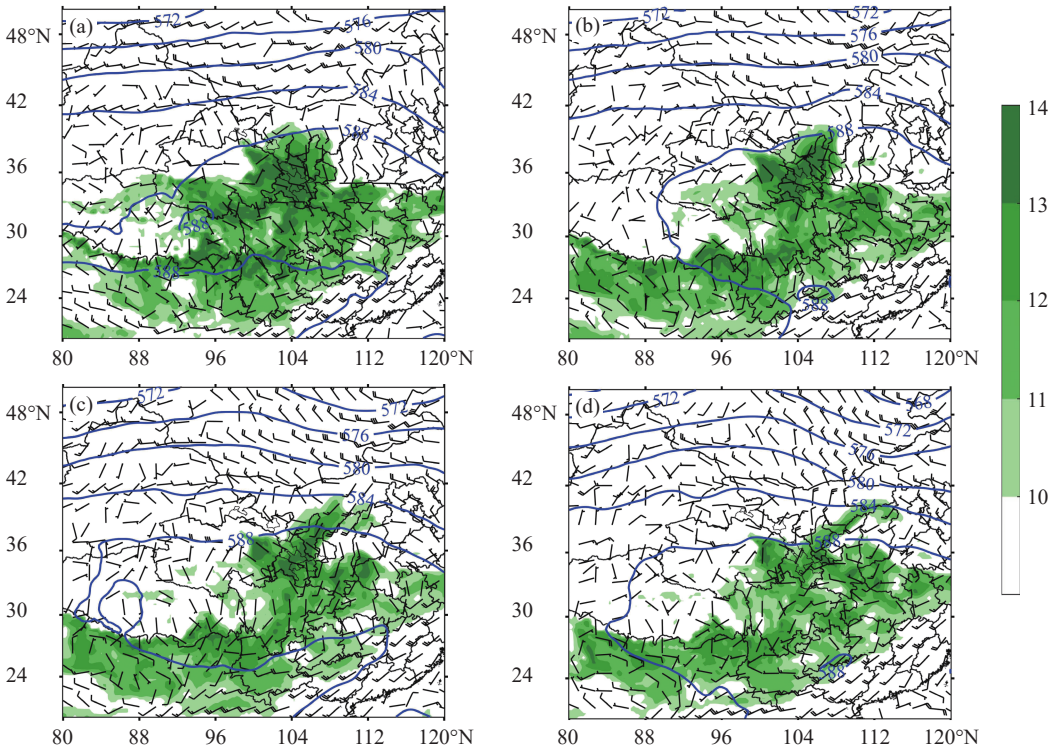


图 5 甘肃东南部 2025 年 8 月 7 日 15 时—8 日 09 时逐 6 h (a—d) 500 hPa 高度场 (等值线, 单位: dagpm)、700 hPa 风场 (风向杆, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 及 700 hPa 比湿 (填色, 单位: $g \cdot kg^{-1}$) 分布

Fig. 5 Distribution of (a–d) 6-hourly 500 hPa geopotential height (contours, unit: dagpm), 700 hPa wind field (wind barbs, unit: $m \cdot s^{-1}$), and 700 hPa specific humidity (shaded, unit: $g \cdot kg^{-1}$) from 15:00 BT on 7 August to 09:00 BT on 8 August 2025 over southeastern Gansu

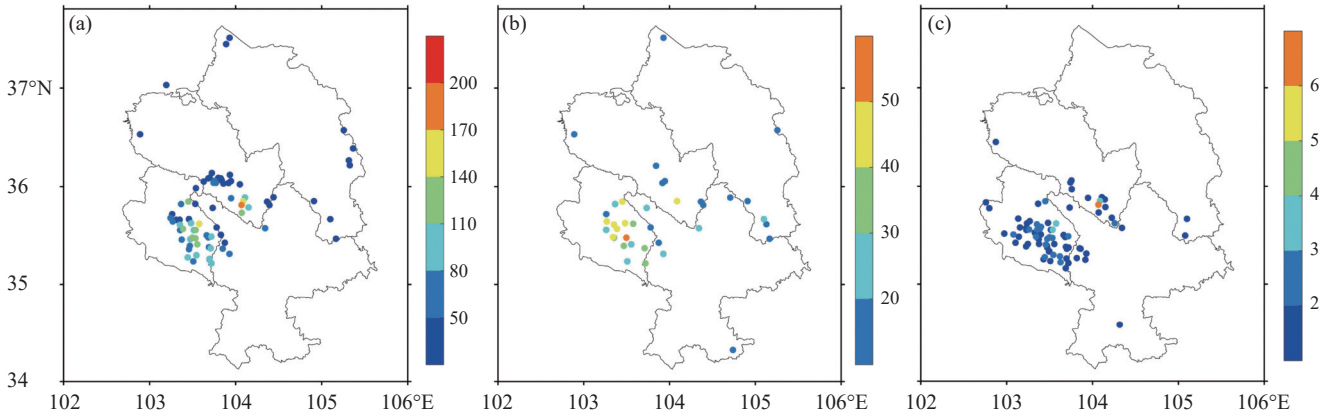


图 6 甘肃中部 2025 年 8 月 7—8 日降水量 (a, 单位: mm)、1 h 雨强 (b, 单位: $mm \cdot h^{-1}$)、短时强降水频次 (c, 单位: 次) 达到建站以来 8 月历史极值的观测站空间分布

Fig. 6 Distribution of stations where (a) total precipitation (unit: mm), (b) 1-hour rainfall intensity (unit: $mm \cdot h^{-1}$), and (c) short-duration heavy rainfall frequency (unit: times) during 7-8 August 2025 reached the historical August extremes since the establishment of meteorological stations, in central area of Gansu Province

综上, 无论从总降水量、1 h 最大雨强, 还是短时强降水频次来看, 打破历史极值的观测站均高度集中在榆中县及临夏州东部, 说明了“8·7”事件具有极强的局地性。

4.2 代表性观测站降水量极端性

为定量评估此次降水的极端程度, 选取“8·7”事件中榆中县降水量排名前 4 的观测站 (兴隆山、城关、上庄、小康营) 为代表, 将其与各站历史最大日降水量、历史 8 月平均降水量及榆中年降水量进行对比 (表 1), 可见兴隆山站的累计降水量 (220.2 mm) 高达其历史最大日降水量和 8 月平均降水量的 2 倍, 占榆中县年平均降水量的 56%; 城关站的累计降水量 (156.9 mm) 分别为其历史最大日降水量和 8 月平均降水量的 1.7 倍和 1.6 倍, 占榆中县年降水量的 41.01%; 上庄站与小康营站的累计降水量也与各自的历史最大日降水量持平或超过, 并远超其 8 月平均降水量。

表 1 “8·7”事件榆中县降水量达到建站以来历史极值前 4 的观测站与历年最大日降水量、8 月平均降水量及占榆中县年降水量比重

Table 1 Comparison of the top 4 stations in Yuzhong County with historically extreme total precipitation on 7-8 August 2025 against the maximum historical daily precipitation, average August precipitation, and the county's mean annual precipitation

站名	“8·7”事件降水量/mm	历年最大日降水量/mm	历年8月平均降水量/mm	占榆中县年降水量比重/%
兴隆山	220.2	101.9	112.1	57.5
城关	156.9	90.1	99.3	41.0
上庄	140.2	139.4	100.2	36.6
小康营	104.2	91.5	92.8	27.2

4.3 短时降水事件的强度和持续时间极端性

由表 2 “8·7”事件中不同强度等级的短时降水事件统计结果可见, 弱、中等强度、强和极强降水事件的发生频率分别为 64.03%、27.43%、8.54% 和 0.50%, 其中强降水事件的发生次数显著低于弱降水和中等强度事件。此外, 雨强 ⩾50 mm·h^{-1} 的短时极强降水事件占全部降水事件的 0.50%, 反映出此次降水具有显著的极端性特征。

表 2 “8·7”事件甘肃中部不同强度等级短时降水事件统计特征

Table 2 Short-duration precipitation events by intensity level in the central area of Gansu Province during the "8.7" event

不同降水强度等级	平均降水量/mm	最大降水量/mm	平均持续时间/min	最长持续时间/min
弱降水	9.36	32.1	84.52	295
中等强度降水	17.67	65.3	81.27	275
强降水	35.01	123.3	90.26	260
极强降水	56.46	63.7	71.27	80

还可看出, 短时降水事件的平均降水量、最大降水量、平均持续时间及最长持续时间均与其强度呈正相关关系, 即强度越大, 相应的降水量与持续时间也越长。具体而言, 短时强降水和极强降水事件的平均降水量分别为 35.01 mm 和 56.46 mm, 显著高于弱降水事件 (9.36 mm) 和中等强度事件 (16.67 mm)。这一结果揭示了降水强度与持续时间之间的协同增长规律。同时, 短时强降水事件的最大降水量 (123.3 mm) 约为弱降水事件 (32.1 mm) 和中等强度事件 (65.3 mm) 的 4 倍和 2 倍。然而, 除极强降水事件外, 其余等级短时降水事件在平均持续时间和最长持续时间上的差异相对较小。值得注意的是, “8·7”事件最大 1 h 降水量出现在榆中县兴隆山站, 达到 123.3 mm, 短时强降水持续时间长达 260 min, 其最大 5 min 降水量为 10.3 mm; 而最大小时降水则出现在东乡族自治县卡家站, 为 59 mm·h^{-1}, 对应最大 5 min 降水量为 7.7 mm, 进一步体现了此次降水的极端性。

4.4 极端性指标验证

由“8·7”事件中短时降水事件的累计降水量、持续时间、1 h 最大降水量及 5 min 最大降水量的箱线图 (图 7) 可见, 短时弱降水、中等强度降水与强降水事件在累计降水量和平均持续时间方面均存在显著异常值 (图 7a、b)。累计降水量的异常值随短时降水事件等级增强而增大, 而平均持续时间的异常值则随等级增强而缩短, 反映出在平均持续时间较短的情况下该区域仍出现高强度降水。在 1 h 和 5 min 最大降水量方面 (图 7c、d), 短时强降水事件的 1 h 最大降水量存在显著异常值, 最大值达 59 mm; 而短时弱降水、中等强度降水与强降水事件的 5 min 最大降水量也均表现出明显异常值, 最大值分别为 7.7 mm、9.0 mm 和 10.3 mm。参考马莉等 (2023) 的研究, 该区域 8 月平均阈值和最大阈值分别为 7.8 mm·h^{-1} 和 12.7 mm·h^{-1}, 上述异常值进一步佐证了此次降水的极端性。

5 热力参数极端性

为研究分析“8·7”事件的热力参数时序变化, 分析了基于 FY-4B 卫星反演的 GIIRS 数据, 重点探讨热力参数的日变化特征、关键热力结构演变机制及其对强对流发生的指示意义。

5.1 关键热力参数的定量诊断

“8·7”事件的热力不稳定条件波动明显, 其增强时段集中在 13—19 时。该时段内, 热力参数的演变指示出显著增强并持续维持的不稳定层结, 为强对流提供了有效的对流潜势。具体表现为两个明显的对流触发窗口期: (1) 13—15 时, 热力参数不稳定; (2) 19 时前后, 热力参数再度增强, 为强对流的持续发展创造了条件 (表 3)

关键热力参数的定量分析进一步揭示了强对流发生的能量与稳定度条件: (1) 能量条件。CAPE 在 11—13 时剧烈上升, 18 时后持续维持在 1 500 J·kg^{-1} 以上, 并于 19 时达到峰值 2 038 J·kg^{-1}, 表明大气层结蕴含强烈的上升运动潜势, 为强对流发展提供了充足能量; (2) 稳定度条件。SI 与 LI 在 13 时后分别持续低于−4 ℃ 与−3 ℃, 极值分别达−5.2 ℃ 与−4.1 ℃, 指示大气处于极不稳定状态; *K* 指数全时段维持在 33 ℃ 以上 (平均 35.2 ℃), 反映湿层深厚, 强降水潜势显著; TT 在 13 时达到峰值 46.8 ℃, 午后平均值为

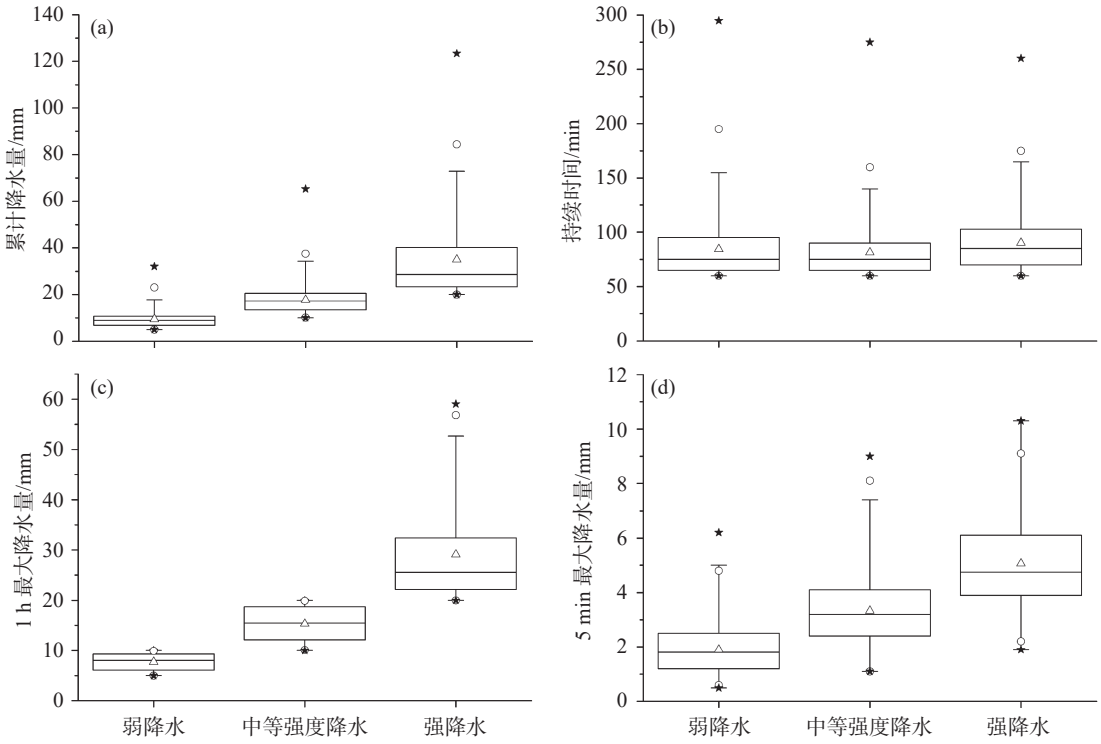


图 7 “8·7”事件中不同强度短时降水的累计降水量 (a)、持续时间 (b)、1 h 最大降水量 (c)、5 min 最大降水量 (d) 箱线图 (图中五角星、圆圈、三角形分别代表最大离散值、99% 分位数、平均值)

Fig. 7 Box plots for short-duration precipitation of (a) accumulated precipitation, (b) duration, (c) maximum 1h precipitation, and (d) maximum 5-min precipitation during the "8.7" event (The pentagram, circles, and triangles in the plot represent the maximum discrete value, the 99th/1st percentiles, and the mean, respectively)

表 3 基于 GIIRS 反演的榆中站 8 月 7 日 07—19 时的热力参数与大气整层可降水量时序表

Table 3 Time-series of physical quantities for severe convection on 7 August

时间	CAPE/(J·kg^{-1})	SI/℃	*K*指数/℃	LI/℃	TT/℃	PWV/mm
07时	1 096	−2.6	36.6	−2.6	36.8	50.59
09时	142	−0.7	29.0	−0.5	37.7	36.47
11时	259	−1.6	32.5	−1.1	39.2	37.11
13时	1 748	−6.4	38.3	−4.4	46.8	39.33
15时	1943	−4.0	33.8	−3.9	40.6	37.36
17时	1 010	−4.2	32.1	−3.0	40.7	40.47
19时	2038	−5.6	35.9	−5.6	42.1	45.94

42.3℃, 进一步印证热力参数持续有利于强对流发展 (图 8)。

5.2 热力与可降水参数的极端性

目前, 国际上研究气候极值变化时最常用的方法之一是百分位阈值法 (翟盘茂和潘晓华, 2003), 即将某一气象要素超过 (或低于) 特定百分位阈值的事件判定为极端事件, 常用的阈值包括 95%、5% 等。基于图 9 与表 3 的关键参数时序分析, “8·7”事件表现出显著大气不稳定特征与异常水汽条件。热力参数的极端性表现从 13 时起, 各对流参数陆续突破历

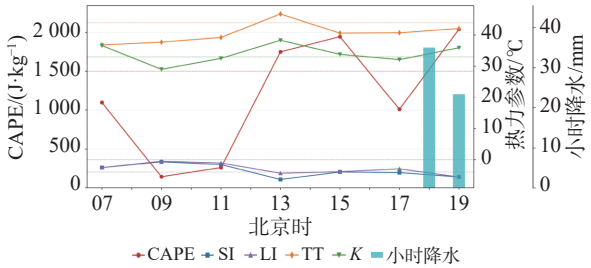


图 8 榆中 8 月 7 日 07 时—19 时强对流参数与降水变化图

Fig. 8 Variations in severe convective parameters and precipitation from 07:00 BT to 19:00 BT on 7 August in Yuzhong

史极端阈值, 指示强烈对流潜势。具体地, CAPE 值从 13 时起持续高于其 95% 分位数 (1 025.3 J·kg^{-1}), 于 19 时达到过程峰值 2 038 J·kg^{-1}, 反映大气层结蕴含极强的上升运动潜势。SI 自 07 时起即低于 5% 分位数, 13 时降至极端低值−6.4℃, 且在 15—19 时持续维持于低位; LI 在 13 时后同样稳定低于 5% 分位数 (−1.6 ℃), 于 19 时达到极小值−5.6 ℃, 二者共同表明大气处于极不稳定状态。*K* 指数在多数时次高于 95% 分位数 (33.8 ℃); TT 也在 13 时超过 95% 分位数 (45.9 ℃), 其余时段均高于 75% 分位数, 进一步印证热力参数有利于强对流发展。

对比近 10 a 榆中站强对流发生前的 PWV (图 9、表 3) 发现, 其水汽条件同样呈现显著异常。07 时、

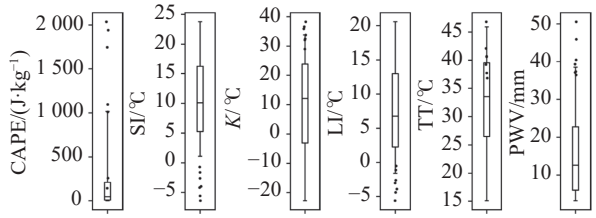


图 9 榆中站 2015—2025 年各强对流参数及 PWV 的箱线图 (箱线图上、下线为 95%、5% 分位数; 黑色散点为基于 GIIRS 反演的在“8·7”事件前 07—19 时逐 2 h 对应的各参数值)

Fig. 9 Boxplots of various severe convective parameters and precipitable water vapor (PWV) at Yuzhong station for 2015-2025 (The upper and lower bounds of each box denote the 95th and 5th percentiles, respectively. Black scatter points represent the values of each parameter retrieved from GIIRS at 2-hour intervals from 07:00 BT to 19:00 BT prior to this extreme precipitation event)

13 时、17—19 时的 PWV 均超过 95% 分位数, 而 09 时、11—15 时也高于 90% 分位数, 说明整个过程中大气柱水汽含量持续处于高位。值得注意的是, PWV 从 15 时起呈现明显上升趋势, 反映有持续的水汽输送至榆中县, 为极端降水的发生提供了充沛的水汽供应。

综上, “8·7”事件不仅具备极端的热力不稳定条件, 还伴随异常充沛的水汽供应。二者在时空上的相互作用, 共同构成了此次极端降水的关键环境背景。特别是 15 时后 PWV 的持续上升, 与热力参数的二次增强阶段相吻合, 进一步加剧了降水的极端性。

5.3 基于 FY-4B/GIIRS 反演探空的精细结构诊断

基于 FY-4B GIIRS 8 月 7 日 07—19 时逐 4 h 探空图 (图 10) 分析可知, “8·7”事件的热力结构演变呈显著的阶段性波动和关键热力参数的协同演化。SI 预报敏感性最强, 其极值出现可作为未来 6~12 h 强对流发生的关键指示; CAPE 值虽能有效反映能量条件, 但因对触发机制敏感, 预报时效相对较短 (约 3~6 h); LI、*K* 指数和 TT 则更多作为辅助判断依据, 用于验证整体热力不稳定状态的异常程度。

在事件发展初期 (图 10a), 大气已呈现初步不稳定结构, CAPE 为 1 096 J·kg^{-1}, SI 与 LI 均为−2.6 ℃, 配合 800 hPa 以下较高的比湿及 700—400 hPa 气块温度高于环境温度的配置, 显示具备一定的对流潜势。随后 09 时前后, 受晨间辐射冷却影响, 大气层结出现暂时稳定, CIN 上升至 19 J·kg^{-1}, CAPE 显著下降至 142 J·kg^{-1}, SI 与 LI 分别升至−0.7 ℃ 与−0.5 ℃, *K* 指数亦下降, 湿层厚度有所减小。

随着地面加热作用的增强, 热力参数自 11 时 (图 10b) 起再度转为有利于对流发展, CAPE 回升至 259 J·kg^{-1}, SI 与 LI 分别降至−1.6 ℃ 与−1.1 ℃, 低层

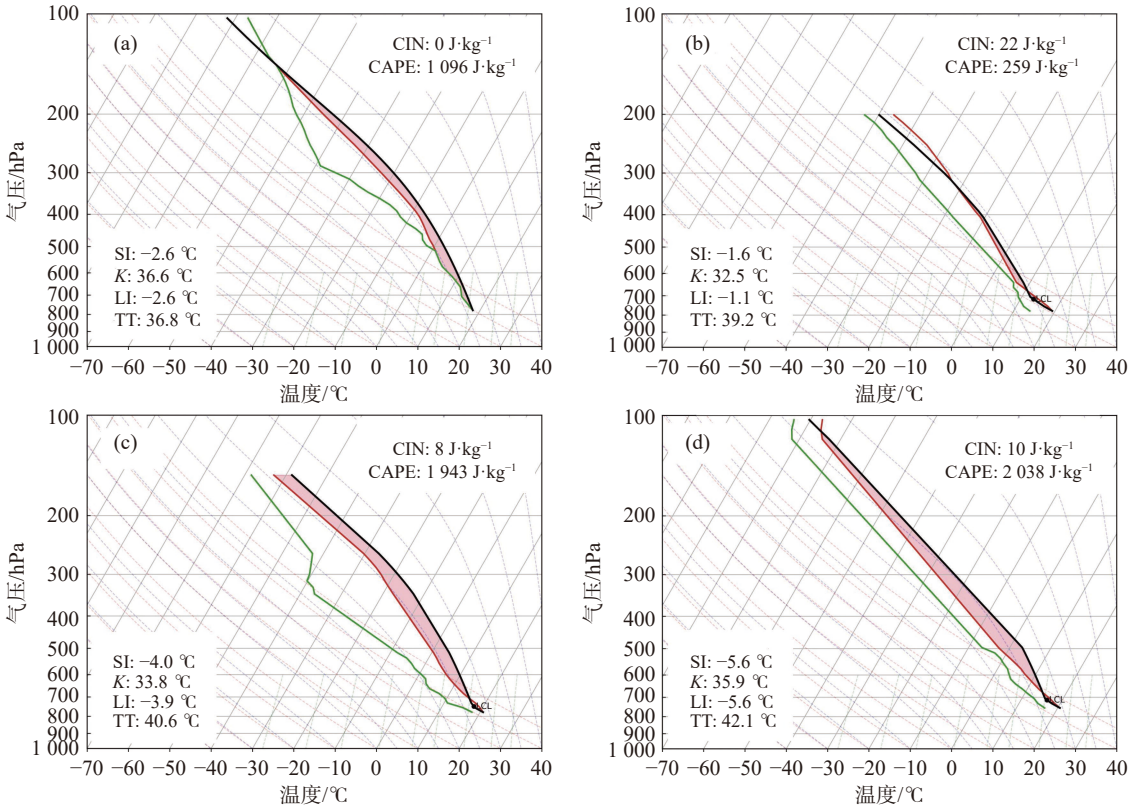


图 10 榆中站 2025 年 8 月 7 日 07 时 (a)、11 时 (b)、13 时 (c)、19 时 (d) FY-4B/GIIRS 反演的探空曲线

Fig. 10 FY-4B/GIIRS-retrieved sounding profiles at (a) 07:00 BT, (b) 11:00 BT, (c) 13:00 BT and (d) 19:00 BT on 7 August, 2025 at Yuzhong station

湿度显著上升, 温度露点差普遍低于 3 ℃, 显示湿层增厚与对流抑制减弱。至 13 时, 热力不稳定达到极端状态, CAPE 跃升至 1 748 J·kg^{-1}, 超过其 95% 历史分位数, SI 与 LI 分别达极值−6.4 ℃ 与−4.4 ℃, K 指数升至 38.3 ℃, 气块温度在 700—200 hPa 持续高于环境温度, CAPE 面积显著扩展。

15 时 (图 10c), CAPE 进一步增至 1 943 J·kg^{-1}, SI 与 LI 持续处于强不稳定区间, 800—500 hPa 相对湿度超过 90%, 温度与露点曲线近乎重合, 显示深厚湿层已完全建立, 为高效率降水提供了关键条件。尽管 17 时 CAPE 下降至 1 010 J·kg^{-1}, 可能与前期对流消耗能量有关, 但 SI 与 LI 仍分别保持在−4.2 ℃ 与−3.0 ℃, 气块廓线仍具显著正浮力区, 显示大气仍具备对流再度发展的潜势。

至 19 时 (图 10d), 热力参数出现二次增强, CAPE 达到峰值, SI 与 LI 负值分别增强至−5.6 ℃, TT 升至 42.1 ℃。结合图 3 与图 4 发现, 自 7 日 16 时起, 东南风与偏东气流在马衔山与兴隆山前交汇, 风力较强。受午后热力参数影响, 榆中县在 18 时和 19 时于兴隆山站出现短时强降水。7 日 17—19 时期间, 热力参数再次增强, 同时风力条件在 19—20 时略有减弱后, 于 7 日 22—8 日 00 时再度加强, 这为降水的发生提供了充足的热力与水汽条件。在地形抬升作用的配合下, 降水于 21 时再次爆发, 并持续至 8 日 01 时, 随后东南气流于 8 日 02 时逐渐消散。说明该时段的热力强化与地形驱动的山谷风环流夜间增强密切相关, 偏南风与地形辐合共同构成的抬升机制有效提升了不稳定能量的释放效率。

综上, 各热力参数的极端程度与变化速率共同揭示了强对流潜势的关键发展阶段, 其中 SI 与 CAPE 在识别与预警中具有重要指示意义。

6 结论与讨论

本文综合利用地面观测、再分析资料、卫星反演热力参数与高分卫星影像, 从降水实况、动力和水汽条件、降水极端性特征和关键热力参数的时序变化等方面对“8.7”榆中极端降水事件进行诊断与研究。得到以下主要结论:

(1) “8·7”事件呈“长持续、大累计、高雨强、强局地”特征, 主要集中于榆中和临夏, 其中兴隆山站累计降水量 220.2 mm, 达该站年降水量 (382.6 mm) 的 56%; 城关站 156.9 mm, 占其年降水量的 41%, 两站持续降水时长分别达 15、18 h。强降水时段高度集中, 兴隆山站连续 6 h 雨强≥20 mm·h^{-1}, 3 h 最大累计降水量 93.4 mm, 远超榆中县 8 月平均降水量; 城关站最大小时降水量 43.4 mm。

(2) 500 hPa 亚欧中高纬呈“两槽一脊”型, 河西受槽前西南气流控制, 甘肃东南部地区处于副高边缘高能高湿环境; 700 hPa 切变线随冷空气东移南压至甘肃中部后, 与副高边缘暖湿气流交汇并停滞, 形成持续动力抬升。同时比湿≥12 g·kg^{-1}, 为降水提供充沛水汽; 榆中南部马衔山对低空偏南暖湿气流的地形强迫抬升, 进一步放大降水强度, 是极端降水的关键形成机制。

(3) 多种评估指标显示“8·7”事件极端性历史罕见。78 站累计降水量、37 站次的 1 h 最大雨强、79 站的短时强降水频次均突破建站以来 8 月历史极值, 其中兴隆山站降水量约为其历史最大日降水量 2 倍, 是其 8 月平均降水量的 2 倍, 且极值观测站榆中县西部、南部。且短时强降水在累计降水量、1 h 最大雨强、5 min 最大雨强这三种指标均存在显著异常值, 其中 5 min 最大雨强远超区域 8 月极端小时降水阈值。

(4) “8·7”事件热力与水汽条件均呈现显著异常。CAPE、SI、LI 等热力参数自 13 时起陆续突破历史极端阈值, 大气极不稳定。同时, PWV 在多个时次持续超过 95% 分位数, 15 时后水汽含量持续增加, 表明存在持续水汽输送。热力不稳定与异常充沛的水汽在时空上相互作用, 尤其午后时后二者共同增强, 构成了此次极端降水的关键环境背景。

本文定量评估了 GIIRS 反演的热力参数在西北极端降水中的指示意义, 阐明了多尺度系统耦合导致降水极端化的物理机制; 提出了基于卫星遥感数据的“热力-水汽”双阈值预警方案, 为预报员提供了明确的关注重点和量化指标, 有助于解决西北复杂地形区极端降水漏报率高、预警提前量不足的难题, 对提升区域防灾减灾能力具有现实意义。然而, 研究虽指出地形抬升与切变线的作用, 但对“8·7”事件中中尺度对流系统的生消机制未做深入分析, 且当前所用数据的时空分辨率仍不足以完全捕捉对流初生阶段的精细结构。下一步将利用区域气候模式开展高分辨率模拟, 深入揭示中尺度对流触发和组织机制, 并进一步优化预报指标, 例如: (1) 建立基于卫星反演热力参数的阈值预报方案, 当强对流参数持续大于其阈值时, 触发区域性极端降水信号; (2) 构建多尺度环流配置识别指标; (3) 利用高分辨率卫星数据, 研发基于 5 min 最大雨强突变, 如雨强增幅≥5 mm·(10 min^{-1}) 的短强临近预警算法, 提升对降水核心区域的捕捉能力。

参考文献 (References):

伏晶,段海霞,傅朝,等.2024.青藏高原东北侧一次锋后极端暴雨成因分析[J].高原气象,44(4):860−876. Fu J, Duan H X, Fu Z, et al. 2024. Cause analysis of a Post-frontal extreme rainstorm on the northeast side of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology,44(4):860−876 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2024.00117

付超,谌芸,单九生.2017.地形因子对降水的影响研究综述[J].气象与减灾研究,40(4):318−324. Fu C, Chen Y, Shan J S. 2017. A review of the effects of terrain factors on precipitation [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,40(4):318−324 (in Chinese). doi:10.12013/qxyjzyj2017−046

官莉,韩静,薛秋蒙,等.2023. FY-4A GIIRS 高时间分辨率温湿度廓线反演及其在台风中的应用[J].气象科学.43(4):561-568. Guan L, Han J, Xue Q M, et al. 2023. Temperature and humidity retrieval of FY-4A GIIRS with high temporal resolution and its application in typhoon[J]. Journal of the Meteorological Sciences,43(4):561-568 (in Chinese). doi:10.12306/2022jms.0083

郭大梅,潘留杰,史月琴,等.2020.西安地区一次罕见秋季冷锋后暴雨过程分析[J].高原气象,39(5):986−996. Guo D M, Pan L J, Shi Y Q, et al. 2020. Analysis of a rate autumn rainstorm behind cold front in Xi'an [J]. Plateau Meteorology,39(5):986−996 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2019.00097

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. Areview on rainstorm research in northwest China [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):515−525 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.04.013

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

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:1006−9895.2104.21007

马莉,黄玉霞,黄武斌,等.2024.甘肃 2024 年“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 L, Huang Y X, Huang W B, et al. 2024. 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

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. doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2022.00053

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]. Journal of Arid Meteorology,40(3):457−468 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2022)−03−0457

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/j.issn.1006−7639(2022)−06−0933

石延召,刘维成,傅朝,等.2024.甘肃陇南两次暴雨天气过程对比分析[J].干旱气象,42(1):107−116. Shi Y Z, Liu W C, Fu Z, et al. 2024. Comparative analysis of two rainstorm cases in Longnan of Gansu Province [J]. Journal of Arid Meteorology,42(1):107−116 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2024)−01−0107

魏栋.2025.多源卫星资料在高原边坡强对流和降水预报研究中的应用[D]. 兰州:兰州大学. Wei D. 2025. Application of multi-source satellite data in the study of severe convection and precipitation forecasting over the plateau slope region [D]. Lanzhou:Lanzhou University (in Chinese)

杨庆怡,朱姜韬,田韬.2024.甘肃东西区夏季不同强度降水事件天气成因分析[J].安徽农业科学,52(2):197−203. Yang Q Y, Zhu J T, Tian T, et al. 2024. Analysis of the weather causes of summer precipitation events with different intensities in the eastern and western regions of Gansu Province [J]. 安徽农业科学,52(2):197−203 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.0517−6611.2024.02.043

杨雪,张渝杰,孙俊,等.2021. 1981~2018 年青海夏季极端降水时空演变及成因分析[J].高原山地气象研究,41(3):33−41. Yang X, Zhang Yujie, Sun J, et al. 2021. Comprehensive analysis of summer extreme precipitation in Qinghai from 1981 to 2018 [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,41(3):33−41 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2021.03.005

翟盘茂,潘晓华.2003.中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J].地理学报,58(7s):1−10. Zhai P M, PAN X H. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. Acta Geographica Sinica,58(7s):1−10 (in Chinese). doi:10.11821/xb20037s001

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/j.issn.1000−0534.2023.00036

Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmosphere,111:D05109. doi:10.1029/2005JD006290

Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. 200l. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canad-a [J]. Journal of Climate, 14(9):1959-1976. doi:10.1175/1520−0442(2001)014<1959:CODAET>2.0.CO;2

Han J, Du H, Wu Z, et al. 2019. Changes in extreme precipitation over dryland wet regions of China during 1961-2014 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,124:5847−5859. doi:10.1029/2018JD029974

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]. Interna tional Journal of Climatology,39:5241−5255. doi:10.1002/joc.6136

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

(责任编辑　唐国瑛)