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

青海高原一次极端降水天气特征及环境条件分析

马琼 汪小康 马晓真 王振海 马秀梅

Analysis of the characteristics and environmental conditions of an extreme rainfall event on Qinghai Plateau

MA Qiong，WANG Xiaokang，MA Xiaozhen，WANG Zhenhai，MA Xiumei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-202

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

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

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

近10 a高原切变线研究进展综述
Review on the research advances of the Tibetan Plateau shear line in the last decade
暴雨灾害. 2021, 40(6): 569-576 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.001

梵净山东南侧夏季暖区暴雨中尺度系统演变与环境场特征个例分析
Analysis on mesoscale system evolution and environmental field characteristics of a warm-sector heavy rainfall event in summer in the southeast of Fanjing Mountains
暴雨灾害. 2021, 40(2): 125-135 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.003

青藏高原东坡两次暴雨的MCS演变及机理对比分析
MCS evolution and mechanism comparison in the two rainstorm events on the eastern slope of the Qinghai Tibet Plateau
暴雨灾害. 2024, 43(5): 509-520 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-225

桂林“5.22”极端强降雨过程的观测分析
Observation analysis of "5.22" extreme rainfall event in Guilin
暴雨灾害. 2024, 43(3): 313-321 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-141

关注微信公众号，获得更多资讯信息

马琼,汪小康,马晓真,等.2025.青海高原一次极端降水天气特征及环境条件分析[J].暴雨灾害,44(6):733−743. MA Qiong, WANG Xiaokang, MA Xiaozhen, et al. 2025. Analysis of the characteristics and environmental conditions of an extreme rainfall event on Qinghai Plateau [J]. Torrential Rain and Disasters,44(6):733−743 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−202

青海高原一次极端降水天气特征及环境条件分析

马琼[1], 汪小康[2], 马晓真[3], 王振海[4], 马秀梅[1]

(1. 青海省气象台, 西宁 810001; 2. 中国气象局武汉暴雨研究所, 中国气象局流域强降水重点开放实验室, 武汉 430205; 3. 青海省水文水资源测报中心, 西宁 810001; 4. 青海省气象局, 西宁 810001)

摘　要: 2022 年 8 月 13 日青海发生极端降水天气过程, 造成严重的洪涝和山体滑坡等灾害, 并间接导致“8·18”大通山洪灾害。基于高分辨率多源观测和 ERA5 再分析资料, 利用 HYSPLIT4 轨迹模式、百分位法和标准化异常度计算公式, 从此次过程的降水特征、天气系统及环境条件等方面结合地形作用进行了诊断分析。结果表明: 此次极端降水天气发生在青海东部河谷地区及拉脊山迎风坡, 该过程累计雨量大、小时雨强强、持续时间长、极端性显著、致灾严重。西太平洋副热带高压异常偏西偏北、南亚高压异常偏强是极端降水发生的天气尺度环流背景。假相当位温 (θ_{se}) 异常偏强 3~4 个标准差、对流不稳定层结深厚、对流有效位能大, 为中尺度对流系统和极端降水的发生发展提供了热力条件和不稳定条件; 低层中尺度切变线、风速辐合及锋区导致暴雨区 700 hPa 辐合异常偏强 3~4 个标准差, 充沛的水汽在暴雨区形成偏强 5 个标准差以上的水汽辐合中心, 低层强辐合产生强烈的垂直上升运动, 触发对流不稳定能量释放及水汽抬升凝结, 从而引发极端降水; 偏东气流到达拉脊山后受地形阻挡被迫抬升, 导致中尺度对流云团不断生成、发展、合并且移动缓慢, 使得此次极端降水维持时间较长, 累计雨量大。

关键词: 青海高原; 极端降水; 中尺度切变线; 地形作用

中图法分类号: P458.1+21.1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−202

Analysis of the characteristics and environmental conditions of an extreme rainfall event on Qinghai Plateau

MA Qiong[1], WANG Xiaokang[2], MA Xiaozhen[3], WANG Zhenhai[4], MA Xiumei[1]

(1. *Qinghai Meteorological Observatory*, *Xining* 810001; 2. *Institute of Heavy Rain*, *CMA/CMA Basin Heavy Rainfall Key Laboratory*, *Wuhan* 430205; 3. *Qinghai Hydrology and Water Resources Measurement and Reporting Center*, *Xining* 810001; 4. *Qinghai Meteorological Bureau*, *Xining* 810001)

Abstract: An extreme rainfall event occurred in Qinghai on August 13, 2022, causing severe floods and landslides. The extreme rainfall also indirectly triggered the deadly flash flood in Datong County on August 18. This study analyzed this rainfall event in terms of its rainfall characteristics, synoptic systems, environmental conditions, and topographic influences, using high-resolution multi-source observational data, the ERA5 reanalysis data, the HYSPLIT4 trajectory model, standardized anomaly method, and percentile method. The results show that the extreme rainfall occurred in the eastern valley regions of Qinghai and the windward slope of the Laji Mountain, featuring high cumulative rainfall, intense hourly rainfall, long duration, exceptional extremity, and severe disaster-causing impacts. The anomalous westward and northward positioning of the Western Pacific subtropical high and the unusually strong South Asian high provided the synoptic-scale circulation backgrounds conducive to the occurrence of extreme rainfall. Pseudo-equivalent potential temperature (θ_{se}) was anomalously high by more than 3~4 standard deviation, accompanied by a deep convective instability structure and strong convective available potential energy, providing thermal and instability conditions for the development of mesoscale convective systems and extreme rainfall. The low-level meso-γ-scale shear line, wind convergence, and frontal zone led to an anomalously strong

收稿日期: 2024−11−15; **定稿日期**: 2025−01−23

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42475018, 42230612); 湖北省自然科学基金联合基金项目 (2023AFD092, 2025AFD415); 中国气象局流域强降水重点开放实验室开放研究基金项目 (2023BHR-Y30); 青海省科技厅重点研发与转化项目 (2023-SF-111); 2024 年中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2024-141)

第一作者: 马琼, 主要从事高原极端降水预报方法及机理研究。E-mail: 505631232@qq.com

通信作者: 汪小康, 主要从事强天气分析和暴雨机理研究。E-mail: wxk816@163.com

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

convergence on 700 hPa (3~4 standard deviation), providing a strong moisture convergence center (5 standard deviation above normal) in the rainfall region. The low-level strong convergence generated intense upward motion, triggering the release of convective instability energy, lifting and condensation of moisture, which induced extreme rainfall. The eastward airflow was later forced to ascend the Laji Mountain barrier, resulting in the continuous generation, development, merging, and slow movement of mesoscale convective cloud clusters, which contributed to the long duration and large cumulative rainfall of this extreme event.

Key words: Qinghai plateau; extreme rainfall; mesoscale shear line; topographical action

引　言

近年来，在全球变暖的气候背景下，大气环流异常，极端降水频发，且极端降水强度增强，极端降水量增加 (杨金虎等, 2010; Qin et al, 2021)，如 2012 年北京“7·21”特大暴雨及 2021 年河南“7·20”极端暴雨等，均引发了严重的洪涝、城镇内涝及山洪、泥石流等次生灾害 (谌芸等, 2012; 杨浩等, 2022)。对极端降水进行研究对于防灾减灾具有重要意义。

众多学者关注了极端降水成因，通常围绕大尺度环流背景，中尺度系统发生发展，环境条件配置及地形影响等多维度展开综合分析。如“23·7”华北极端降水过程与副热带高压 (以下简称副高) 异常偏北、黄淮气旋持续发展密切相关，中尺度对流系统在有利环境条件下的组织化发展和停滞少动是导致极端小时雨强的重要原因，配合台风“杜苏芮”和“卡努”提供的充沛水汽输送与低空急流耦合形成了极端暴雨 (杨舒楠等, 2023; 杨晓亮等, 2024)。此外，特殊地形也是造成极端降水的重要因素 (谌芸等, 2012)，地形的动力、热力作用对对流性降水的激发和对流性天气系统发展有较大的影响 (谷国军等, 1994)，因此山脉迎风坡、喇叭口地形处易发生极端降水 (黄楚惠等, 2022; 黄燕玲等, 2024)。

近年来，不少研究将上述因素与物理量异常度结合定量分析降水的极端性，指出极端降水形成是水汽、动力、热力及地形条件共同作用的结果。在大尺度环流方面，副高位置及强度的异常是关键前提，其高度场在极端降水期间常呈现超过 1 个标准差的显著正异常 (张萍萍等, 2018)，而在台风影响下，对流层中低层位势高度场甚至出现高达 4 个标准差的负异常 (杨舒楠和端义宏, 2020)；就热力条件而言，当 K 指数异常偏强 1.5 个标准差，850 hPa 的假相当位温 (θ_{se}) 偏强 2.5 个标准差以上时，大气不稳定性显著增强，有利于激发强盛的中尺度对流系统，从而直接导致极端降水发生 (张萍萍等, 2018; 苗青等, 2021; 蒋亚平等, 2025)。在水汽条件方面，关键物理量常表现出明显异常，例如在华中区域的极端降水个例中，925 hPa 水汽通量散度异常比例最高可达 74.1%，整层大气可降水量也普遍超过气候平均值 2 个标准差以上 (钟敏等, 2020; 苗青等, 2021; 汪小康等, 2022)；此外，充沛的水汽输送需配合强烈的动力抬升机制，当低层低涡、切变线与急流发展，并与高层辐散相耦合时，可形成较气候态偏强 3 个标准差的上升运动 (肖递祥等, 2017; 赵强等, 2022)。

青藏高原极端降水近年来也呈增加趋势(冯晓莉等, 2020)，尤其夏季增幅明显(赵雪雁等, 2015)。影响高原极端降水的天气系统主要包括南亚高压与西太平洋副高 (陶诗言和朱福康, 1964; 李强等, 2020)、高原上空特有的低涡 (Li and Zhang, 2023)、切变线 (Liu and Yao, 2022) 及局地生成的中小尺度对流系统 (朱平和俞小鼎, 2019) 等。青海极端降水常发生在副高边缘型、副高控制型和低涡切变型三种环流形势下 (李生辰等, 2022)。水汽是影响极端降水最重要的因素之一，和内陆地区相比，西北地区水汽含量显著低于同纬度华北地区，仅为后者的 30%~50%，因此极端降水的产生更需要依赖大量外来水汽的补充 (钱正安等, 2018)，水汽来源和输送路径决定着高原极端降水的位置、强度及持续时间 (王任若愚, 2022)。青海东部河湟谷地的喇叭口地形对极端降水的强度和空间分布也有显著影响(朱平和俞小鼎, 2019)。以往针对高原极端降水研究，主要聚焦其时空分布特征、演变趋势和天气背景等，而对降水过程的极端性及物理量异常特征分析较少。将极端降水程度和物理量的极端性相结合进行研究，有助于提升极端降水的预报能力。

青海地处青藏高原东北部，地貌类型复杂多样。青海东部的河湟谷地，是全省人口最为集中的地区，由于河谷沟壑纵横，短时暴雨极易汇集成山洪，引发泥石流及滑坡，如 2022 年 8 月 13 日青海东部出现当年最强降水天气 (以下简称“8.13”过程)，极端性强，导致大通 2022 年“8·18”山洪发生，造成人员伤亡、村庄冲毁、农田淹没等严重灾害。而 ECMWF 和 CMA-GFS 等数值模式对此次强降水预报量级偏小，落区偏西偏北，预报效果较差。本文基于高分辨率多源观测和 ERA5 再分析资料，利用 HYSPLIT4 轨迹模式、百分位法及标准化异常度计算公式，结合河谷地形，采用天气诊断方法细致分析了此次极端降水过程的降水特征、天气系统及环境条件特征，以期

加深对高原地区极端降水的认识, 提高极端降水的预报准确率, 为高原地区防灾减灾提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料说明

本文所用资料包括: (1) 源自国家气象信息中心天擎系统的 1960—2022 年青海省 50 个国家气象观测站 (以下简称国家站) 的日降水及月降水资料, 2009—2022 年青海省 302 个区域气象观测站 (以下简称区域站) 日降水资料, 2022 年 8 月 13 日 08 时 (北京时, 下同)—14 日 08 时青海省国家站和区域站小时降水资料, 均用于分析过程降水特征。(2) 由国家卫星气象中心提供的 2022 年 8 月 13 日 08 时—14 日 08 时 FY-4A 卫星黑体亮温 (Black-body Temperature, TBB) 资料, 用于分析中尺度对流系统 (Mesoscale Convective System, MCS) 的活动特征。(3) 2022 年 8 月 13 日 08 时—14 日 08 时欧洲中期数值预报中心第五代全球再分析资料 ERA5 数据集, 时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为 0.25°×0.25°, 包括从 850 hPa 到 100 hPa 共 11 层等压面上的位势高度、风场、温度、比湿、相对湿度、垂直速度、散度, 用于分析此次极端降水天气过程的环流背景及环境条件。其中计算标准化异常度时使用该数据集 1990—2021 年共 32 a 的 8 月 13 日多年平均值和标准差。(4) NCEP GDAS (National Centers for Environmental Prediction, Global Data Assimilation System) 全球再分析资料, 该资料已由美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 的空气资源实验室 (Air Resources Laboratory, ARL) 打包成 HYSPLIT 可用的数据格式, 空间分辨率 1°×1°。用于 HYSPLIT 水汽追踪模式背景场运行。

1.2 降水的相关定义

分析降水的极端性首先要确定极端降水阈值, 本文采用百分位法确定日极端降水阈值 (Bonsal et al., 2001)。具体方法是: 将某站 1990—2022 年日降水量≥0.1 mm 的子样本按从小到大的顺序排列, 取第 99 个百分位的值作为该站的日极端降水阈值, 当逐日降水量超过该阈值时, 认为该站该日出现了极端降水。为避免因数据序列短及站点少而导致的偏差, 计算区域站极端降水阈值时, 仅选取了青海省具备 10 a 以上降水资料的 302 个区域站。

日降水量等级及短时强降水标准均采用中央气象台定义标准, 即日降水量 25~49.9 mm 为大雨, 50~99.9 mm 为暴雨, 100~249.9 mm 为大暴雨。短时强降水为 1 h 降水量≥20 mm。

1.3 物理量异常度计算

利用标准化异常 (N) 分析物理量偏离气候态的程度 (Junker et al, 2008), 其计算公式如下

$$N = \frac{(X-\mu)}{\sigma} \tag{1}$$

其中, N表示物理量的异常度, X为变量在某一时刻的值, μ为该变量气候平均值, σ为该变量气候标准差, 其中气候平均和标准差为 1990—2021 年总共 32 a 在 8 月 13 日的平均值和标准差。Hart 和 Grumm (2001) 研究表明, N值越大, 表示偏离气候态程度越强, 当 N的绝对值达到 2.5σ 以上表明存在较明显的异常。

1.4 水汽来源追踪

利用美国国家海洋和大气研究中心 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 开发的 HYSPLIT 模式 (Draxler and Hess, 1998) 追踪极端降水区域中水汽的主要来源方向, 本文结合降水实况, 从降水中心 (102.39°E, 36.5°N) 8 月 13 日 20 时开始, 向后追踪 3 d 至 8 月 10 日 20 时, 轨迹后向积分的时间步长为 12 h。

2 降水特征

2022 年 8 月 13 日 08 时—14 日 08 时, 青海东部 (西宁、海东、黄南) 出现入汛以来最强降水天气, 出现 68 站次暴雨、1 站次大暴雨 (图 1), 最大日降水量出现在区域站海东市乐都区寿乐镇新堡子村站, 为 104.8 mm, 在青海省所有测站 1960 年有观测资料以来日降雨量排名中位列第六。

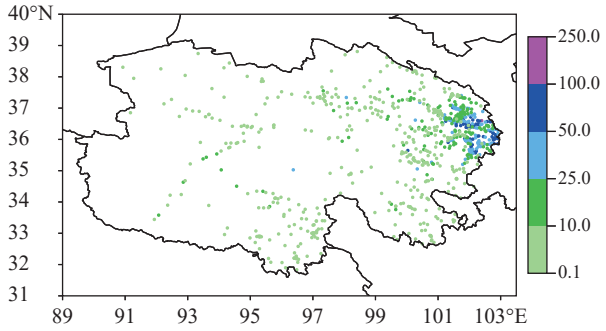


图 1 2022 年 8 月 13 日 08 时—14 日 08 时青海省降水量 (单位: mm) 分布图

Fig. 1 Precipitation (unit: mm) distribution map in Qinghai Province from 08:00 BT 13 to 08:00 BT 14 August in 2022

文中涉及的地图基于青海省标准地图服务网站下载的审图号 GS(2017)3320 号的标准地图制作, 底图无修改。

2.1 降水的极端性

青海东部河湟谷地年平均降水量为 407.3 mm, 8 月平均降水量为 85.76 mm, 其中化隆、湟中、循化

3 个国家站 2022 年 8 月降水量历史排位均在前三，化隆站历史排位第一，为 30 a (1991—2020 年) 历史平均值 (98.15 mm)的两倍多 (表 1)。

表 1 2022 年青海“8·13”极端降水过程突破日极值的国家站降水量及排位

Table 1 Precipitation and rank of national stations breaking the daily precipitation record in “8·13” extreme precipitation event in Qinghai Province in 2022

站名	当年8月降水量(历史排位)/mm	日降水量(历史极值)/mm	日极端降水阈值/mm	最大小时降水量(历史极值)/mm
化隆	199.4 (1)	85.6 (58.5)	50.8	31.0 (29.1)
湟中	238.1 (2)	66.8 (57.5)	45.1	38.3 (22.3)
循化	123.3 (3)	46.2 (43.6)	42.1	17.9 (24.0)

13 日 08 时—14 日 08 时青海有 34 站次达到极端降水标准，其中 3 个国家站 (湟中、化隆、循化) 和 22 个区域站突破 1960 年以来或建站以来历史日极值，突破极值的站点数历史排位第一。青海省 1960—2022 年单日降水量在 90~100 mm 共 11 站，其中 7 站出现在此次过程，具有明显的极端性。

2.2 小时雨强演变

从小时雨强看，“8·13”过程出现 84 站次短时强降水，短时强降水站次及强度历史排位第一，其中化隆及湟中国家站小时雨强也突破历史极值 (表 1)。此次过程 6 站次雨强超过 40 mm·h^{-1}，最大小时雨强出现在 13 日 21 时，黄南尖扎县多加办事处站雨强达 54.4 mm·h^{-1}。13 日 22—23 时短时强降水站次达到最多，为 19 站次，可见小时雨强也具有一定的极端性。从 24 h 降水量排名前 10 站点 13 日 14 时至 14 日 08 时的逐时降水量变化可见 (图 2)，此次极端降水过程主要分为 3 个时段，即 13 日 17—19 时，22 时—14 日 01 时，14 日 04—06 时，阶段性明显，其中第二时段雨强及强降水范围均最强。

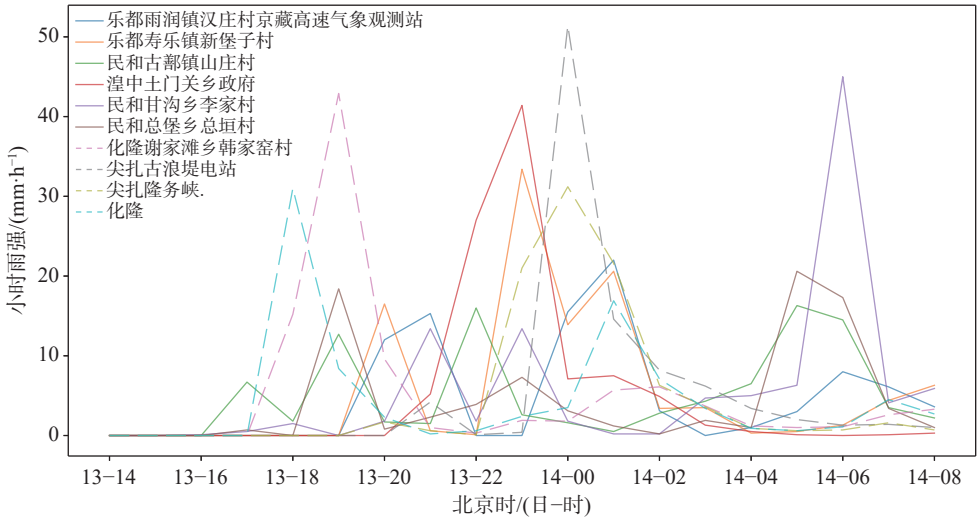


图 2 2022 年 8 月 13 日 14 时—14 日 08 时降水量排名前 10 站点的小时雨强 (单位: mm·h^{-1}) 演变图 (虚线表示站点位于黄河谷地，实线表示站点位于湟水河谷地及两河谷地交界处)

Fig. 2 Hourly precipitation (unit: mm·h^{-1}) of top 10 stations with precipitation ranking from 14:00 BT 13 to 08:00 BT 14 August in 2022 (The dashed lines indicate stations located in the Yellow River valley, and the solid lines indicate stations located in the Huangshui River valley and the junction of the two river valleys)

2.3 强降水与地形的关系

从 2022 年 8 月 13 日 08 时—14 日 08 时 50 mm 以上降水量分布与地形分布 (图 3) 可见，暴雨主要发生在东部河湟谷地，是青海暴雨三个集中区域之一 (李生辰，2022)。日降水量排名前 10 站点中有 4 站位于达坂山与拉脊山之间的湟水河谷地，2 个站位于湟水河谷地与黄河谷地交界处，因此下文重点分析湟水河谷地强降水形成原因并聚焦其中局地地形对降水的作用。

综上，此次降水过程具有累计雨量大、极端性明显、小时雨强强、持续时间长、阶段性明显的特征，且强降水分布与山脉迎风坡及河谷地形密切相关。

3 环流形势与中尺度系统演变特征

3.1 环流形势

此次极端降水发生在西太平洋副高异常偏西、偏北，南亚高压偏强的背景下。13 日 200 hPa 上南亚高压主体位于青海高原及西北地区东部，中心强度达 1 268 dagpm，较气候平均态偏强 2~3 倍，位势高度正异常创造了有利的高空辐散条件 (图 4a)。此时副

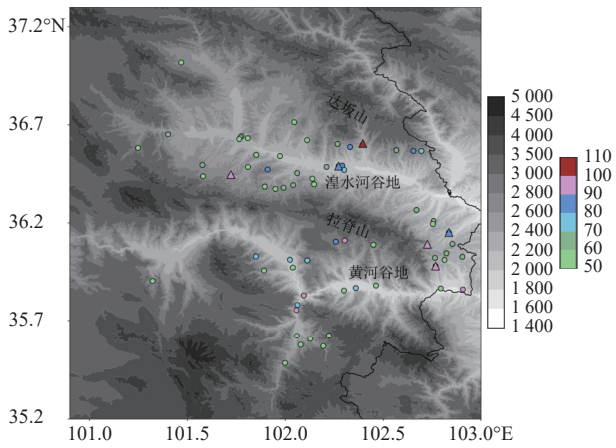


图 3 2022 年 8 月 13 日 08 时—14 日 08 时青海省日降水量≥50 mm 站点空间分布 (圆圈或三角, 单位: mm, 其中三角代表降水量排名前 10 站点中位于湟水河谷地及两河谷地交界处的站点) 及地形 (填色, 单位: m) 分布

Fig. 3 Spatial distribution of precipitation stations (circles or triangles, unit: mm, the triangles represent stations located in the Huangshui River valley and at the junction of two river valleys among the top ten stations in precipitation ranking) with daily rainfall greater than or equal to 50 mm from 08:00 BT 13 to 08:00 BT 14 August in 2022 and topographical altitude (shaded, unit: m) in Qinghai Province

高西脊点西伸至青海中部, 西北地区东部 500 hPa 位势高度也高于气候平均态 2~3 倍, 20 时青海东北部位于副高边缘不稳定区域 (图 4b)。600 hPa 青海东北部为东风风速辐合带 (图 4c), 20—21 时偏东风影响范围加大, 强度加强, 22 时达到最强, 为 6 m·s^{-1}, 23 时后转为偏南风, 辐合及降水减弱 (图略)。20 时 700 hPa 高原东北边坡一带存在东风显著风速区, (图 4d), 强度达 8 m·s^{-1}, 青海东北部东风风速辐合明显, 且该偏东风与其西北部较气候平均态偏强 2 倍的偏北风在青海东北部形成中尺度切变线, 即东风切变线 (朱乾根等, 2007), 该切变线一直维持至 14 日早上, 是后期降水持续的重要原因。东风风速辐合及东风切变线提供了强低层辐合抬升条件, 有利于触发不稳定能量释放及水汽辐合。副高偏西偏北为此次极端降水创造了有利的环流背景, 低层风速辐合及切变线配合异常偏强的南亚高压, 低层辐合、高层辐散, 有利于整层出现强烈上升运动 (图 8c、d)。

3.2 中尺度系统演变

有利的大尺度环流背景下中尺度对流系统 (MCS) 可快速发生发展, 并直接导致极端降水。黑体亮温 TBB 能直观展示出 MCS 的形成和演变过程, 13 日午后青海东部对流云团不断发展扩大、合并, 17 时与甘

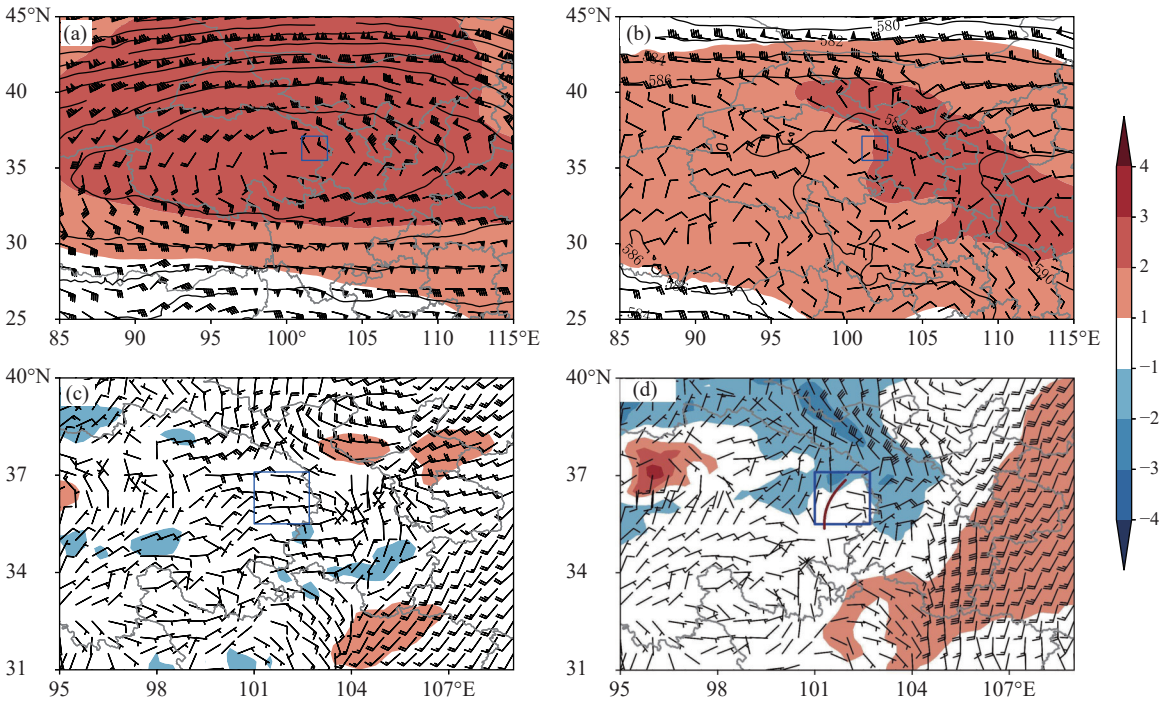


图 4 2022 年 8 月 13 日 20 时 200 (a)、500 (b) hPa 位势高度场 (黑色等值线, 单位: dagpm) 及其标准化异常 (填色) 分布, 600 hPa 风场 (风向杆, 单位: m·s^{-1}) 及纬向风场标准化异常 (填色) 分布 (c)、700 hPa 风场 (风向杆, 单位: m·s^{-1}) 及经向风场标准化异常 (填色) 分布 (d) (棕色实线代表东风切变线, 蓝色方框表示暴雨区, 下同)

Fig. 4 Distribution of (a) 200 hPa, (b) 500 hPa geopotential height (black contours, unit: dagpm) and standardized anomaly (shaded), (c) 600 hPa wind (wind barbs, unit: m·s^{-1}) and standardized anomaly of zonal wind (shaded), (d) 700 hPa wind (wind barbs, unit: m·s^{-1}) and standardized anomaly of meridional wind (shaded) at 20:00 BT 13 August in 2022 (The brown solid line represents the easterly wind shear line, the blue box indicates the scope of the rainstorm area, same hereinafter)

肃中部对流云团合并成 MCS (图 5a), 该 MCS 西部不断有对流云团生成发展合并, 使 MCS 强度更强, 范围更大, 19 时 TBB<−73 ℃ 的冷云盖面积达 13 000 km^2 (图 5b), 20 时 30 分 MCS分别在湟水河谷地和黄河谷地分裂为两个 β 中尺度对流云团 A、B, 两个云团迅速发展并呈现组织化, 伴有明显的冷核 (TBB<−70 ℃), 且结构密实, 21—23 时 (图 5c、d、e) 云团 A、B 稳定维持在河谷地区, 且冷核面积不断扩大, 强度加强, TBB 最低可达−82 ℃, 以致产生多站次极端短时强降水, 强降水主要分布在云团冷核区及 TBB 梯度大值区。23 时后湟水河谷地对流云团 A 逐渐减弱, 冷云盖面积减小, 但仍有小尺度对流云系维持至 14 日 02 时, 而黄河谷地对流云团 B 从 14 日 01 时快速减弱, 降水结束(图 5f)。故中尺度对流云团在河谷地区发展迅速、强度强且持续时间长、移动速度慢是此次极端强降水形成的重要原因。

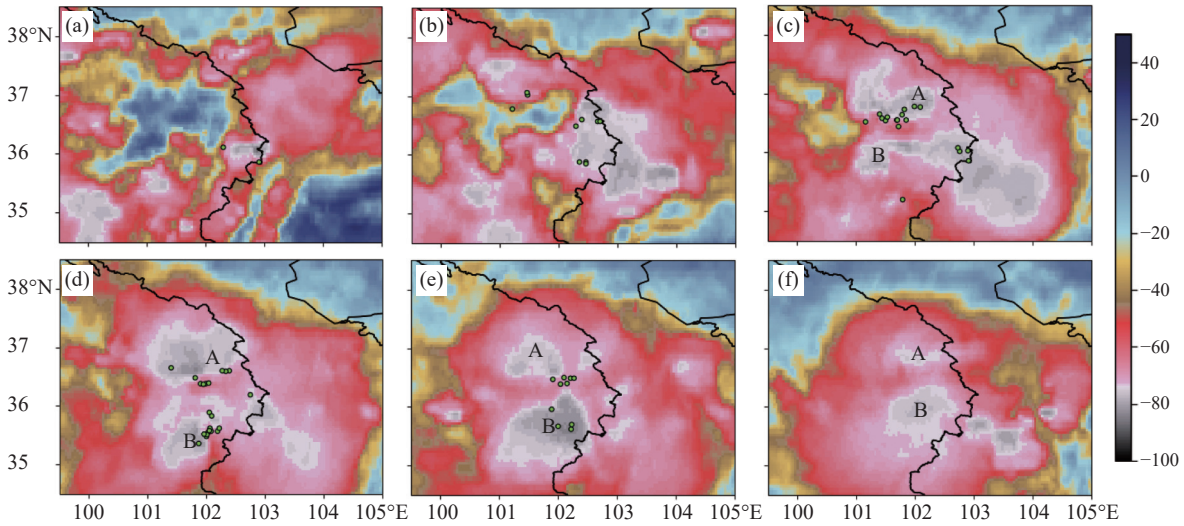


图 5 2022 年 8 月 13 日 17 时 (a)、19 时 (b)、21 时 (c)、22 时 (d)、23 时 (e)、14 日 01 时 (f) FY-4 卫星云顶亮温 (填色, 单位: ℃) 及其后 1 h 降水量≥15 mm 站点 (绿色圆点) 空间分布 (A 表示湟水河谷地对流云团, B 表示黄河谷地对流云团)

Fig. 5 Distribution of TBB (shaded, unit: ℃) of FY-4 satellite and precipitation stations (green dots) with rainfall greater than or equal to 15 mm at next hour at (a) 17:00 BT 13, (b) 19:00 BT 13, (c) 21:00 BT 13, (d) 22:00 BT 13, (e) 23:00 BT 13, (f) 01:00 BT 14 August in 2022 (A represent convective cloud clusters in the Huangshui River valley and B represent convective cloud clusters in the Yellow River valley)

4 中尺度系统演变的环境条件

4.1 水汽输送和辐合

强而持续的水汽输送是产生极端降水的必要条件之一。利用基于拉格朗日方法的 HYSPLIT 模型, 对暴雨区的水汽质点进行轨迹追踪 (图 6a) 可知, 本次过程主要有西北路和东南路两条水汽通道, 西北路水汽从对流层中高层出发, 向东输入到高原边坡河谷地带时水汽质点下降, 以 700 hPa 高度向西倒灌至暴雨区 (红色路径), 而东南路水汽质点 (蓝色路径) 从对流层低层出发, 北上高原后水汽质点抬升, 最后以对流层中低层的高度输送到暴雨区。水汽通量分布显示 700 hPa 水汽输送明显强于 600 hPa (图略), 13 日 20 时 700 hPa 河西走廊建立了异常强的偏北风 (图 6b), 将来自蒙古西部至甘肃中部的水汽向南输送至青海偏东地区后灌入河湟谷地, 形成较气候态异常偏强 4~5σ 的水汽输送, 成为重要的水汽通道, 水汽输送最强可达到 20 g·s^{-1}·cm^{-1}·hPa^{-1}。

水汽输送至河谷地区后受低层切变线及风速辐合影响快速集中, 并在 101.75°E 拉脊山的迎风坡堆积, 表明地形对水汽输送有阻挡作用, 在 700 hPa 形成水汽辐合中心 (图 6c、d), 超气候平均态 5σ, 强度最强可达到 (−24~−28)×10^{-7} g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}, 700 hPa 东部河谷地区水汽通量辐合在此次降水过程中最为异常, 是本次极端降水形成的关键因子。在强水汽输送与辐合下, 暴雨区长时间维持充沛的水汽条件, 13 日 700 hPa 比湿偏强 3~4σ (图略), 地面比湿维持在 14~20 g·kg^{-1}, 从全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 信号和地面气压、气温计算的大气可降水量 (图略) 可见, 21 时东部河谷地区大气可降水量均超过 35 mm, 民和站高达 52 mm, 地面露点温度可达 20 ℃, 由此可见低层切变线及风速辐合叠加地形的影响, 对源源不断的水汽产生阻挡、汇聚, 为此次极端降水提供异常充足的水汽条件。

4.2 不稳定条件

假相当位温 (θ_{se}) 能综合表征大气的温湿特性和不稳定层结状况。受副高持续控制, 13 日青海东部

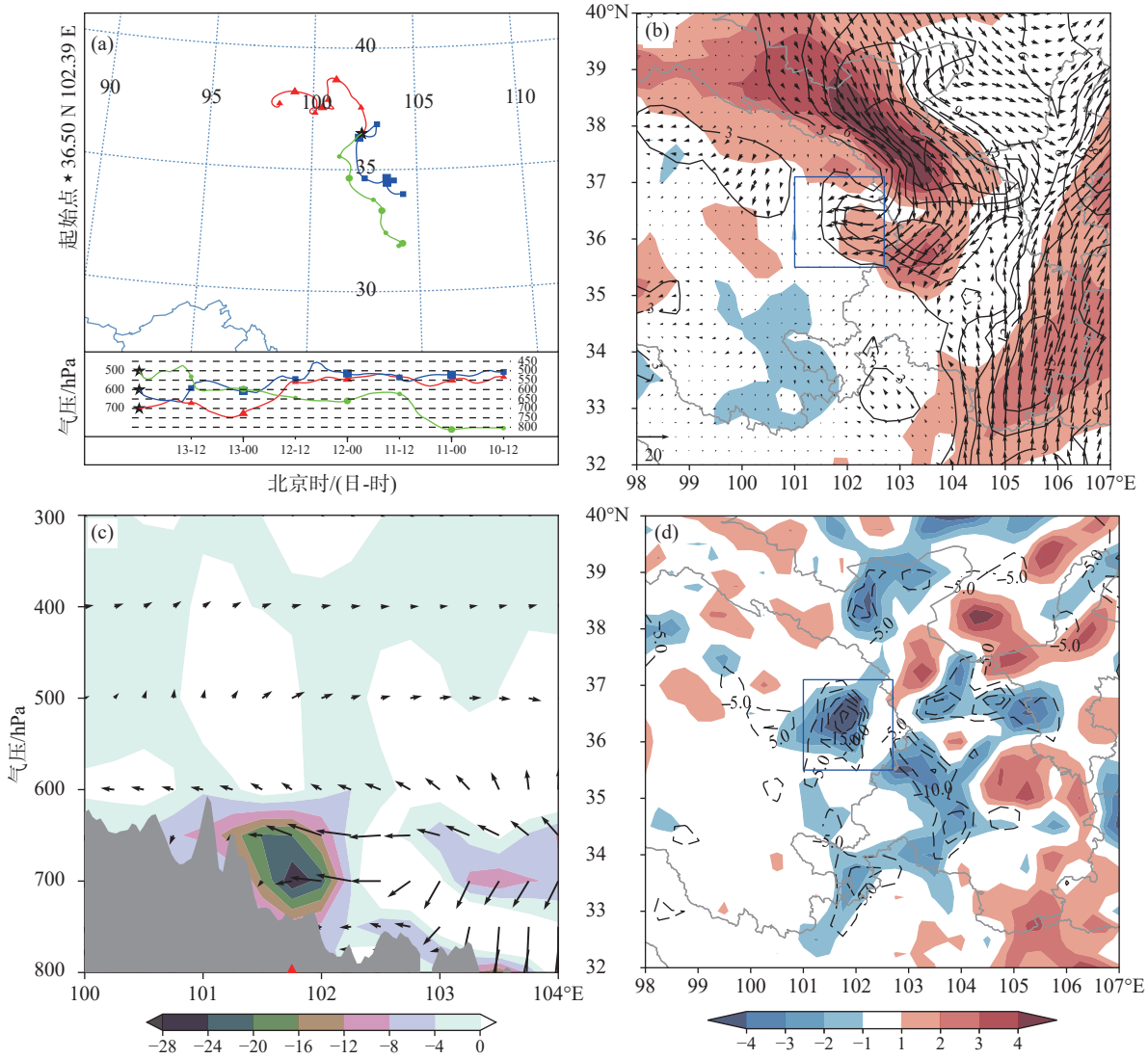


图 6 2022 年 8 月 10 日 20 时—14 日 08 时不同高度目标气块后向运动轨迹 (a, 彩色曲线)、13 日 20 时 700 hPa 水汽通量 (箭头, 单位: g·s^{-1}·cm^{-1}·hPa^{-1}) 及标准化异常 (填色) 分布 (b)、13 日 21 时沿 36.5°N 经强降水中心的水汽通量 (箭头, 单位: g·s^{-1}·cm^{-1}·hPa^{-1}) 及水汽通量散度 (填色, 单位: g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}) 的纬向垂直剖面 (c, 红色三角为强降水中心位置, 灰色阴影为地形, 下同) 、13 日 21 时 700 hPa 水汽通量散度 (黑色虚线, 单位: g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}) 及标准化异常 (填色) 分布 (d)

Fig. 6 (a) Backward trajectories (colored curves) of target air parcels on different heights from 20:00 BT 10 to 08:00 BT 14 August, (b) 700 hPa water vapor flux (wind barbs, unit: g·s^{-1}·cm^{-1}·hPa^{-1}) and standardized anomaly distribution (shaded) at 20:00 BT 13 August, (c) zonal vertical cross-section of water vapor flux (arrows, unit: g·s^{-1}·cm^{-1}·hPa^{-1}) and water vapor flux divergence (shaded, unit: g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}) along 36.5°N passing through the heavy precipitation center at 21:00 BT 13 August (the red triangle indicates the location of the heavy precipitation center, gray shading represents terrain, same hereinafter), (d) 700 hPa water vapor flux divergence (black dashed lines, unit: g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}) and standardized anomaly distribution (shaded) at 21:00 BT 13 August in 2022

700 hPa θ_{se} 最大值超过 370 K, 较气候平均态异常偏强 3~4σ (图 7a), 暴雨前低层 θ_{se} 出现大值中心, 且 θ_{se} 值随高度的升高而减小, 垂直梯度也较大, 说明中低层大气为对流不稳定状态 (图 7b)。西宁站 20 时探空资料显示对流有效位能 (CAPE) 值高达 2 040 J·kg^{-1} (图 7c), 700 hPa 与 500 hPa 温差可达 20.1 ℃, 沙氏指数 (SI) 为−0.44 ℃, 抬升指数 (LI) 为−4.26 ℃, 可见副高控制下暴雨区上空积累了异常强的不稳定能量, 为中小尺度对流系统发生发展创造了有利的不稳定条件。21 时 θ_{se} 等值线密集带进入青海东北部湟水河谷地 (图 7a), 锋区动力强迫是触发对流性强降水的主要动力机制, 21—23 时湟水河谷地出现成片短时强降水。沿强降水中心 101.75°E 的经向剖面图 (图 7d), 37°N 以北干冷气流与南部的暖湿气流对峙, θ_{se} 能量锋区近乎垂直, 暴雨区上升运动发展强盛。

综上所述, 此次极端降水前低层为高能区, 层结极不稳定, 同时存在能量锋区, 有利于 MCS 的触发和发展。

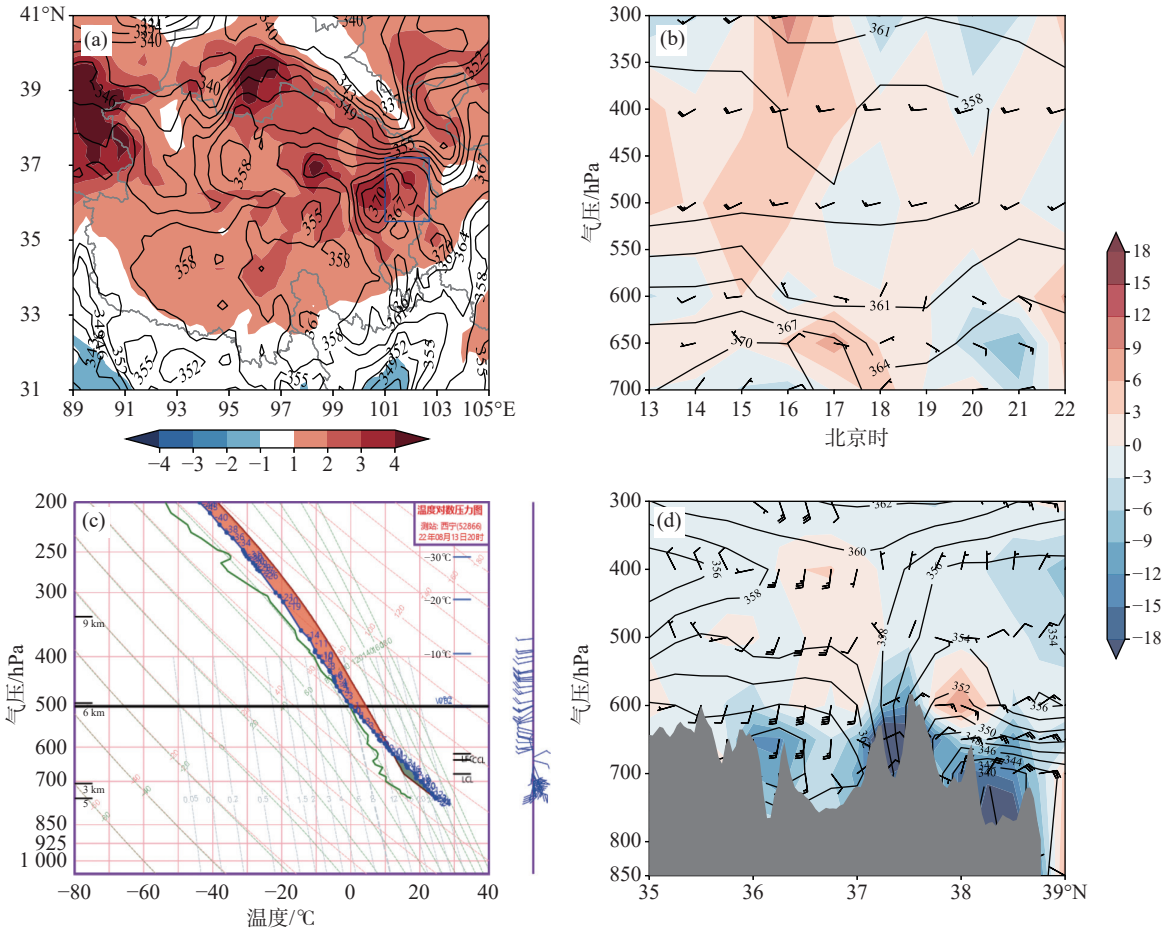


图 7 2022 年 8 月 13 日 21 时 700 hPa θ_{se} (黑色等值线,单位:K) 及标准化异常 (填色) 分布 (a)、强降水中心 (101.75°E, 36.5°N) 13—22 时 θ_{se} (黑色等值线, 单位: K) 及温度平流 (填色, 单位: 10^{-5} K·s^{-1}) 时间-高度剖面 (b)、西宁站 20 时探空 (c)、21 时沿 101.75°E θ_{se} (黑色等值线, 单位: K)、温度平流 (填色, 单位: 10^{-5} K·s^{-1}) 与 v-ω (风向杆, ω 乘以-10) 经向剖面 (d)

Fig. 7 (a) Distribution of 700 hPa pseudo-equivalent potential temperature (black contours, unit: K) and standardized anomaly (shaded) at 21:00 BT 13 August, (b) time-height cross-section of pseudo-equivalent potential temperature (black contours, unit: K) and temperature advection (shaded, unit:10^{-5} K·s^{-1}) at the center of heavy precipitation (101.75°E, 36.5°N), (c) sounding data at Xining at 20:00 BT 13 August, (d) meridional cross section of pseudo-equivalent potential temperature (black contours, unit: K), temperature advection (shaded, unit: 10^{-5} K·s^{-1}) and v-ω (arrow, ω multiplied by -10) along 101.75°E at 21:00 BT 13 August in 2022

4.3 动力条件及地形作用

极端降水往往由不同尺度天气系统提供强的动力抬升机制, 由图 8a 可见, 13 日暴雨区 700 hPa 辐合普遍偏强 1~2σ, 最大偏强超过 3σ, 辐合中心强度达−15×10^{-5} s^{-1}, 21—22 时湟水河谷地出现 12 站次短时强降水, 强辐合区与短时强降水分布对应较好。

从 101.75°E 700 hPa 散度及垂直速度的纬向垂直剖面 (图 8b) 可见, 河西走廊强盛的西北气流携带冷空气倒灌入偏暖的湟水河谷地, 形成 θ_{se} 密集带, 同时倒灌气流形成东风风速辐合, 且该偏东风与其西北部的偏北风在湟水河谷地形成东风切变线, 三者共同作用下低层辐合显著加强, 21 时达到最强。沿 36.5°N 散度、垂直速度及风场的垂直分布 (图 8c) 可见, 650 hPa 的偏东风到达 101.75°E 拉脊山后在山前集中并迎山坡被迫抬升, 导致降水云团不断生成和稳定维持, 另一方面暖湿气流在迎风坡形成了强的辐合, 促进了上升运动的发展, 暴雨区上空上升运动几乎贯穿整个对流层, 为极端降水的产生提供了强有力的动力条件。从暴雨区涡度、散度及垂直速度的时间高度剖面图 (图 8d) 可见, 21—22 时强降水时低层为较强正涡度及辐合, 整层为强上升运动, 对应切变线、风速辐合、锋区及地形作用提供的强辐合抬升。

综上所述, 本次极端降水天气过程的中尺度切变线、偏东风风速辐合及锋区相互作用, 以及地形辐合和抬升作用, 使大气垂直运动得以强盛发展和维持, 为 MCS 触发和维持提供了强大的动力条件, 使得极端降水天气发生。

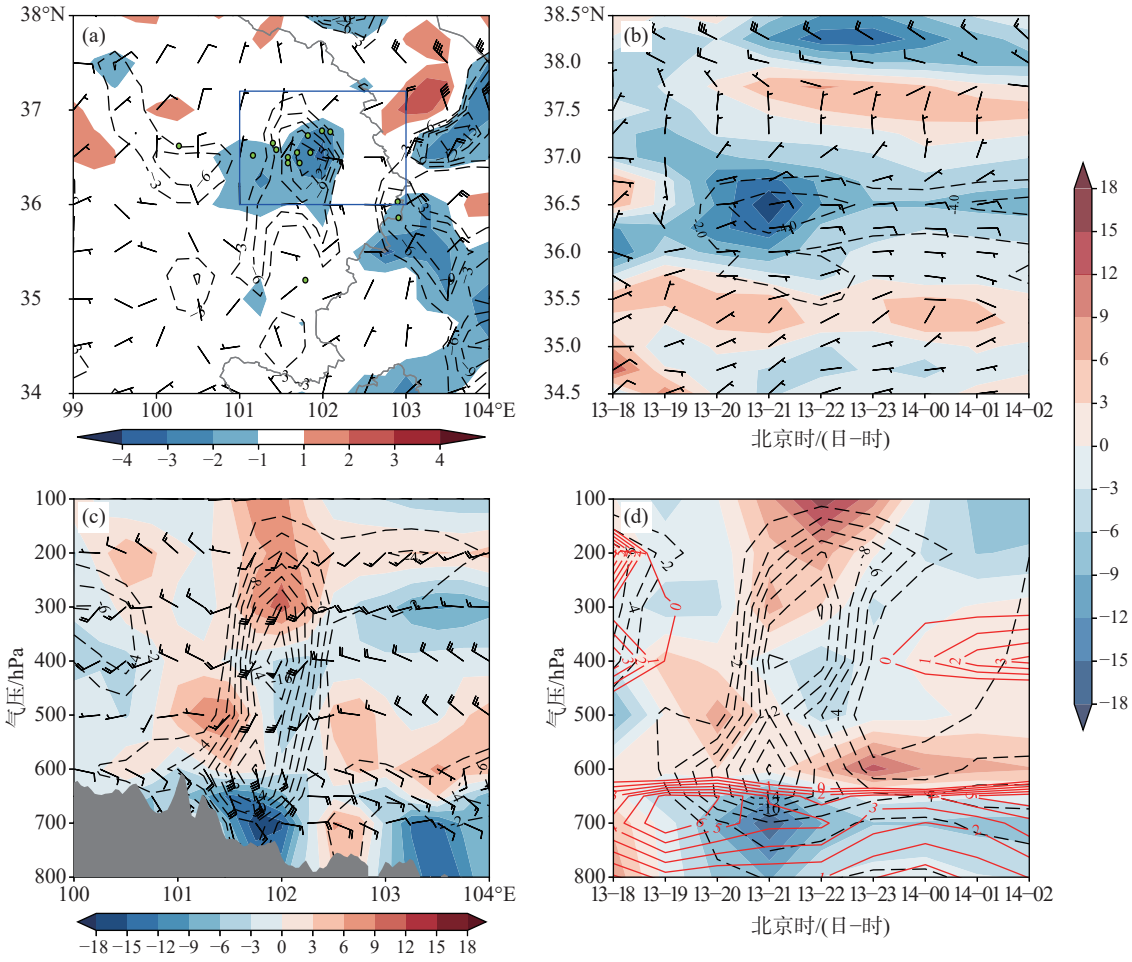


图 8 2022 年 8 月 13 日 21 时 700 hPa 散度 (黑色等值线, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 及其标准化异常 (填色) 分布、21—22 时短时强降水站点 (绿色圆点) 分布 (a, 矩形表示湟水河谷地范围), 13 日 18 时—14 日 02 时沿 101.75°E 700 hPa 散度 (填色, 单位: 10^{-5} s^{-1})、垂直速度 (黑色等值线, 单位: Pa·s^{-1}) 及风场 (风向杆, 单位: m·s^{-1}) 时间-纬度剖面 (b), 21 时沿 36.5°N 散度 (填色, 单位: 10^{-5} s^{-1})、垂直速度 (黑色等值线, 单位: Pa·s^{-1}) 及 u-ω (风向杆, ω 乘以-10) 纬向垂直剖面 (c), 13 日 18 时—14 日 02 时强降水中心 (101.75°E, 36.5°N) 散度 (填色,单位:10^{-5} s^{-1})、垂直速度 (黑色等值线, 单位: Pa·s^{-1}) 及涡度 (红色等值线, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 时间-高度剖面 (d)

Fig. 8 The (a) 700 hPa divergence (black contours, unit:10^{-5} s^{-1}) and standardized anomaly (shaded) at 21:00 BT, distribution of stations (green dots) with short-time heavy rainfall from 21:00 to 22:00 BT 13 August in 2022 (the rectangle indicates the range of the Huangshui River Valley), (b) time-latitude cross-section of divergence (shaded, unit:$10^{-5}$$s^{-1}$), 700 hPa vertical velocity (black contours, unit: Pa·s^{-1}), and wind field (wind barbs, unit: m·s^{-1}) along 101.75°E, (c) zonal-cross-section of divergence (shaded, unit:10^{-5} s^{-1}), vertical velocity (black contours, unit: Pa·s^{-1}), and u-ω (arrows, ω multiplied by -10) along 36.5°N at 21:00 BT 13 August in 2022, (d) time-height cross-section of divergence (shaded, unit:10^{-5} s^{-1}), vertical velocity (black contours, unit: Pa·s^{-1}), and vorticity (red contours, unit:10^{-5} s^{-1}) at the center of heavy precipitation (101.75°E, 36.5°N)

5 结论与讨论

2022 年 8 月 13 日青海高原出现罕见极端降水天气过程, 本文利用多源观测和 ERA5 再分析资料, 结合 HYSPLIT4 轨迹模式及百分位法和标准化异常度计算, 对降水特征、天气系统及环境条件结合地形作用进行了细致分析, 主要结论如下:

(1) 此次降水过程累计雨量大、小时雨强强, 持续时间长, 极端性突出, 致灾性强, 强降水的阶段性显著。

(2) 降水发生前, 副高的持续控制导致青海东部 700 hPa 假相当位温较气候平均态异常偏强 3~4σ, 并在 13 日形成对流不稳定区, 西宁站 SI 指数为−0.44 ℃, LI 指数为−4.26 ℃, CAPE 值高达 2 040 J·kg^{-1}, 为中小尺度对流系统创造了有利的不稳定条件。

(3) 在副高异常偏西偏北、南亚高压异常偏强的环流背景下, 河谷地区结构密实的中尺度对流云团发展迅速、强度强、移动速度慢、持续时间长, 引发了中尺度对流云团冷核及 TBB 梯度大值区的极端强降水。

(4) 河西走廊异常强的偏北风水汽输送和对流层低层异常强的比湿及大气可降水量为极端降水提供充沛的水汽, 水汽输送至东部河谷地区快速集中形

成超气候平均态 5σ 的水汽辐合，是此次极端降水形成的关键。

(5) 低层中尺度切变线、偏东风风速辐合区及锋区的强辐合抬升形成低层强动力辐合中心，700 hPa 辐合异常偏强 3~4σ，强辐合区与短时强降水分布对应较好。偏东气流在拉脊山山前被阻挡并强迫抬升，导致降水云团不断生成和“滞留”，另一方面暖湿气流在迎风坡形成强的辐合，加强了动力抬升条件，地形对此次极端降水增幅作用明显。

极端降水是灾害性天气预报的难点，尤其是高原极端降水，因其局地性、致灾性强且与复杂地形的热动力影响密不可分，所以预报难度更大。本文仅对一次典型暴雨个例的环流背景及水汽、不稳定及动力条件等的进行了诊断分析，并未对地形影响展开定量、详细的分析。在后续的研究中，要更加关注地形本身对暴雨以及中小尺度天气系统的影响，以便不断提高对高原复杂地形在极端降水过程中所起作用的认识。

参考文献 (References):

湛芸,孙军,徐珺,等.2012.北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (一) 观测分析及思考[J].气象,38(10):1255−1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al. 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part Ⅰ: observation and thinking [J]. Meteorological Monthly,38(10):1255−1266 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2012.10.012

冯晓莉, 申红艳, 李万志, 等.2020.1961—2017 年青藏高原暖湿季节极端降水时空变化特征[J].高原气象,39(4):694−705. Feng X L, Shen H Y, Li W Z, et al. 2020. Spatial-temporal changes for extreme precipitation in wet season over the Qinghai-Tibetan Plateau and the surroundings during 1961-2017 [J]. Plateau Meteorology,39(4):694−705 (in Chinese). doi:10.7522/ j.issn.1000−0534.2020.00029

谷国军, 王昂生, 许焕斌.1994.有地形存在对对流云发展的数值模拟研究[J].气象学报,52(1):90−98. Gu G J, Wang A S, Xu H B. 1994. Numerical simulation and study of the impact of terrain on the development of convective clouds [J]. Acta Meteorologica Sinica,52(1):90−98 (in Chinese). doi:10.11676/qxx1994.011

黄楚惠,李国平,牛金龙,等.2022. 2020 年 8 月 10 日四川芦山夜发特大暴雨的动热力结构及地形影响[J].大气科学,46(4):989−1001. Huang C H, Li G P, Niu J L, et al. 2022. Dynamic and thermal structure and topographic impact of the night torrential rainfall in Lushan, SichuanonAugust10,2020[J].ChineseJournalofAtmosphericSciences, 46(4):989−1001 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2205.21205

黄燕玲,王亚兰,袁月.2024.鲁南一次暖区大暴雨触发与维持机制分析[J].沙漠与绿洲气象,18(4):43−50. Huang Y L, Wang Y L, Yuan Y. 2024. The trigger and maintenance mechanism of a warm-sector heavy rainfall in southern Shandong [J]. Desert and Oasis Meteorology, 18(4):43−50 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.04.007

蒋亚平,覃皓,黄妮,等.2025.广西西南部一次极端暴雨过程成因分析[J].高原山地气象研究,45(1):113−121. Jiang Y P, Qin H, Huang N, et al. 2025. Cause analysis of an extreme rainstorm in southwest Guangxi [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,45(1):113−121 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2025.01.013

李生辰,张青梅,沈晓燕,等.2022.青海高原暴雨的形成条件与基本特征分析[J].高原气象,41(2):526−540. Li S C, Zhang Q M, Sheng X Y, et al. 2022. Torrential rain in Qinghai Plateau: forming conditions and characteristics [J]. Plateau Meteorology,41(2):526−540 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.00009

李生辰. 2022. 青海省天气预报手册[M].北京:气象出版社:38-40. Li S C.2022.Qinghai province weather forecast manual [M]. Beijing: Meteorological Press:38-40 (in Chinese)

李强,王秀明,周国兵,等.2020.四川盆地西南低涡暴雨过程的短时强降水时空分布特征研究[J].高原气象,39(5):960−972. Li Q, Wang X M, Zhou G B, et al. 2020. Temporal and spatial distribution characteristics of short-time heavy rainfall during southwest vortex rainstorm in Sichuan Basin [J]. Plateau Meteorology,39(5):960−972 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2019.00096

苗青,白自斌,王洪霞,等.2021.山西秋季一次极端暴雨过程的异常特征分析[J].干旱气象,39(6):984−994. Miao Q, Bai Z B. Wang H X, et al. 2021. Abnormal characteristics of an extreme rainstorm process in autumn in Shanxi Province [J]. Joumal of Arid Meteorlogy,39(6):984−994 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2021)−06−0984

钱正安,蔡英,宋敏红,等.2018.中国西北旱区暴雨水汽输送研究进展[J].高原气象,37(3):577−590. Qian Z A, Cai Y, Song M H, et al. 2018. Review of advances in water vapor transport studies of rainstorm in Northwest China [J]. Plateau Meteorology,37(3):577−590 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2018.00032

陶诗言,朱福康.1964.夏季亚洲南部 100 毫巴流型的变化及其与西大平洋副热带高压进退的关系[J].气象学报,22(4):385−396. Tao S Y, Zhu F K. 1964. The 100-mb flow patterns in southern Asia in summer and its relation to the advance and retreat of the West-Pacific subtropical anticyclone over the far East [J]. Acta Meteorologica Sinica,22(4):385−396 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb1964.039

汪小康,崔春光,王婧羽,等.2022. “21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J].气象,48(5):533−544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al. 2022. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province [J]. Meteorological Monthly,48(5):533−544 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.122902

王任若愚.2022.青藏高原周边地区极端降水特征及发生机制[D]. 兰州:兰州大学. Wang R R Y. 2022. Characteristics and mechanism of extreme precipitation in the surrounding area of the Tibetan Plateau [D]. Lanzhou:Lanzhou University (in Chinese). doi:10.27204/d.cnki.gizhu. 2022.004132

肖递祥, 杨康权, 俞小鼎, 等.2017.四川盆地极端暴雨过程基本特征分析[J].气象,43(10):1165−1175. Xiao D X, Yang K Q, Yu X D, et al. 2017. Characteristics analyses of extreme rainstorm events in Sichuan basin [J]. Meteorological Monthly,43(10):1165−1175 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2017.10.001

杨金虎,江志红,王鹏祥,等.2010.太平洋 SSTA 同中国东部夏季极端降水事件变化关系的研究[J].海洋学报,32(1):23−32. Yang J H, Jiang

Z H, Wang P X, et al. 2010. Relation research on between SSTA of Pacfic and extreme precipitation events in the eastern China [J]. Journal of Oceanography,32(1):23−32 (in Chinese).

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/j.issn.1000−0526.2021.111201

杨舒楠,端义宏.2020.台风温比亚 (1818) 降水及环境场极端性分析[J].应用气象学报,31(3):290−302. Yang S N, Duan Y H. 2020. Extremity analysis on the precipitation and environmental field of typhoon Rumbia in 2018 [J]. Journal of Applied Meteorological Science,31(3):290−302 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20200304

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

杨晓亮, 杨敏, 金晓青, 等.2024.“23·7”河北罕见特大暴雨过程降水演变与中尺度特征分析[J].暴雨灾害,43(1):1−12. Yang X L. Yang M, Jin X Q, et al. 2024. Analysis of precipitation evolution and mesoscale characteristics for a severe torrential rain event in Hebei from 29 July to 2 August 2023 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):1−12 (in Chinese). doi:10.12406/ byzh.2023−191

张萍萍, 孙军, 车钦, 等.2018.2016 年湖北梅汛期一次极端强降雨的气象因子异常特征分析[J].气象,44(11):1424−1433. Zhang P P, Sun J, Che Q, et al. 2018. Analysis on abnormal characteristics of meteorological factors during an extremely heavy rainfall in 2016 [J]. Meteorological Monthly,44(11):1424−1433 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018. 11.005

朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.2007.天气学原理与方法:第 4 版[M].北京:气象出版社:96-103. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. 2007. Principles and Methods of Synoptic Meteorology:4th edition [M]. Beijing: China Meteorological Press:96-103 (in Chinese)

赵雪雁,王亚茹,张钦,等.2015.近 50 a 青藏高原东部夏半年强降水事件的气候特征[J].干旱区地理,38(4):675−683. Zhao X Y, Wang Y R, Zhang Q, et al. 2015. Climatic characteristics of heavy precipitation events in the eastern Tibetan Plateau during the summer half-year over the past 50 years [J]. Arid Land Geography,38(4):675−683 (in Chinese). doi:10.13826/j.cnki.cn65−1103/x.2015.04.004

赵强,彭力,李文耀,等.2022. 2021 年 4 月陕西一次极端暴雨过程的成因诊断[J].暴雨灾害,41(2):109−118. Zhao Q, Peng L, Li W Y, et al. 2022. Diagnosis of the causation of an extreme rainstorm in Shanxi in April 2021 [J]. Torrential Rain and Disasters,41(2):109−118 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.02.001

钟敏,车钦,张蒙蒙,等.2020.华中区域极端降水天气形势及物理量异常度特征[J].气象,46(4):503-516. Zhong M, Che Q, Zhang M M, et al. 2020. Characteristics of extreme precipitation weather situation and physical quantity anomaly in central China [J]. Meteorological Monthly,46(4):503-516 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2020.04.005

朱平,俞小鼎.2019.青藏高原东北部一次罕见强对流天气的中小尺度系统特征分析[J].高原气象,38(1):1−13. Zhu P, Yu X D. 2019. Analysis of meso-small scale system characteristics of a rare severe convective weather in the northeast part of Qinghai-Tibetan plateau [J]. Plateau Meteorology,38(1):1−13 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2018.00070

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

Draxler R R, Hess G D. 1998. An overview of the HYSPLIT-4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition [J]. Australian Meteorological Magazine,47(4):295−308

Hart R, Grumm R H. 2001. Using normalized climatological anomalies to rank synoptic-scale events objectively [J]. Monthly Weather Review, 129(9):2426−2442. doi:10.1175/1520−0493(2001)129<2426:UNCATR>2.0.CO;2

Junker N, Grumm R, Hart R, et al. 2008. Use of normalized anomaly fields to anticipate extreme rainfall in the mountains of Northern California [J]. Weather and Forecasting,23:336−356. doi:10.1175/2007WAF2007013.1

Li L, Zhang R H. 2023. Evolution mechanisms, impacts and variations of the vortices originated from the Tibetan Plateau [J]. Earth Science Reviews,242:104463. doi:10.1016/j.earscirev.2023.104463

Liu Q H, Yao X P. 2022. Diurnal variation mechanisms of the zonal shear line inducing anomalous heavy precipitation over the Tibetan Plateau in boreal summer [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 127(15):e2022JD036639. doi:10.1029/2022JD036639

Qin P H, Xie Z H, Zou J, et al. 2021. Future precipitation extremes in China under climate change and their physical quantification based on a regional climate model and CMIP5 model simulations [J]. Advances in Atmospheric Science,38(3):460−479. doi:10.1007/s00376−020−0141−4

(责任编辑　张　文)