

华西秋雨期极端降水事件及其环流特征*

唐红玉 吴 遥 董新宁 白莹莹 魏麟骁

(中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室, 重庆市气候中心, 重庆 401147)

提 要:利用 1961—2022 年华西地区 373 个气象观测台站秋季降水资料和欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供的 ERA5 逐日再分析资料, 分析了华西秋雨期持续性与非持续性两类极端降水事件的最新变化特征, 并从关键大气环流系统等角度, 对两类事件的环流特征及差异进行了分析。结果表明: 近 62 a 来, 华西秋雨期持续性极端降水事件呈降水量和频次增加、强度增强和对秋季总降水量贡献率增加的变化趋势; 而非持续性极端降水事件呈降水量减少, 强度、频次及对总降水量的贡献变化不明显的特征。两类极端降水事件发生时, 北半球欧亚中高纬度均为两槽一脊的环流型且槽脊的位置基本一致, 但强度有较大差异: 持续 (非持续) 性极端降水事件发生时, 黑海和里海以北槽、巴尔喀什湖和贝加尔湖以北脊及鄂霍次克海以东以北槽偏强 (弱), 低纬度地区印缅槽偏强 (相对稍弱)、西太平洋副热带高压位置更偏北偏西 (相对偏南偏东)。华西秋雨期内发生持续性极端降水事件过程中, 除对流层中低层大尺度环流背景极为有利外, 对流层高层南亚高压北界会提前南退东缩, 副热带西风急流建立发展, 故提前关注和监测南亚高压的移动路径和形态变化以及副热带西风急流的变化, 可以为提前预测持续性极端降水事件的发生提供前兆信息。

关键词: 华西秋雨, 极端降水, 事件, 环流特征

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.032001

Extreme Precipitation Events and Their Circulation Characteristics During the Autumn Rain Period in West China

TANG Hongyu WU Yao DONG Xinning BAI Yingying WEI Linxiao

CMA Key Open Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy,

Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

Abstract: Using autumn precipitation data from 373 meteorological observation stations in West China from 1961 to 2022 and ERA5 daily reanalysis data provided by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). This article analyzed the recent changes in the characteristics of both persistent and non-persistent types of extreme precipitation events during the autumn rain period in West China. This article also examined the circulation characteristics and differences of these two types of events from the perspective of the major atmospheric circulation systems. The results are as followed. The

*重庆市自然科学基金面上项目 (CSTB2022NSCQ-MSX0558) 和中国气象局创新发展专项 (CXFZ2021Z011、CXFZ2022J031) 共同资助

2024 年 3 月 18 日收稿; 2025 年 3 月 20 日收修定稿

第一作者: 唐红玉, 主要从事短期气候诊断预测业务和研究工作. Email:782378285@qq.com

persistent extreme precipitation event shows an increase in the precipitation and frequency, an intensification in intensity, and an increase in contribution to total autumn precipitation in West China over the past 62 years. In contrast, non-persistent extreme precipitation event shows a decrease in precipitation, with no significant change in intensity, frequency and contribution to total precipitation. During both types of extreme precipitation events, the circulation pattern over the northern hemisphere of Eurasia typically consists of two troughs and a ridge, with the positions of the troughs and ridge being essentially consistent, but with considerable differences in intensity. During persistent (non-persistent) extreme precipitation events, the troughs north of the Black and Caspian Seas, the ridge north of Lakes Balkhash and Baikal, and the trough north and east of the Sea of Okhotsk are stronger (weaker). The Indo-Burma trough is stronger (relatively weaker), and the position of the western Pacific subtropical high is more inclined to the north and west (relatively south and east) in the low-latitude regions. In the process of persistent extreme precipitation events during the autumn rain period in West China, in addition to the highly favorable background of large-scale circulation in the middle and lower troposphere, the northern boundary of the South Asian High retreats southward and shrinks earlier to the east, and the subtropical westerly jet stream establishes and develops. Therefore, early attention and monitoring of changes in the path and shape of the South Asian High, as well as changes in the subtropical westerly jet stream, can provide precursor information for early prediction of persistent extreme precipitation events.

Key words: West China autumn rain, extreme precipitation, event, circulation characteristics

引 言

近年来, 华西秋雨期秋汛灾害损失特别严重, 如 2020 年 9 月 16—17 日, 持续和极端性强降水天气造成贵州 9 个市(州)39 个县(市、区)遭受洪涝灾害(新华社, 2020); 2019 年 10 月, 陕西、四川、重庆、湖北、湖南、贵州等地降水日数达 15~25 d, 四川东北部、重庆北部等地累计降水量超过 300 mm, 较常年同期偏多 1 倍以上, 2 省(市)洪涝造成直接经济损失 6.3 亿元(应急管理部, 2019); 2017 年秋季 9 月中旬至 10 月, 华西地区出现持续降雨天气, 引起汉江发生流域性洪水, 秋汛灾害损失为近 5 年同期最高, 重庆 9 月至 10 月上旬出现 5 场区域性暴雨天气过程, 秋雨为有气象观测记录以来同期最多(重庆市气候中心, 2018)。以往的研究认为强降水极易导致洪涝等灾害性极端事件, 对人民群众生命财产安全及社会经济发展造成严重危害(翟盘茂等, 2017)。华西秋雨期内极端降水频发的现象也越来越常见, 其对人民群众生产生活和经济社会带来不利影响。

多年来, 诸多学者对华西秋雨变化特征方面进行了研究, 王春学等(2014)用建立的华西秋雨逐日监测指数, 分析发现华西秋雨的最强时段是 9 月上、中旬, 其强度在 9—10 月随时间减弱, 21 世纪以来在 9 月上旬、下旬至 10 月上旬和中旬前期有 3 个显著时段。蒋竹将等(2014)建立了一种新的华西秋雨指数, 并分析发现华西秋雨年代际变化特征明显, 1960 年代到 1970 年代初期、1980 年代到 1990 年代初期偏强, 1970 年代中后期和 1990 年代后期偏弱, 但进入 21 世纪, 呈现出明显弱转强趋势。综合来说, 主要研究结果认为华西秋雨在空间和时间上均有不同的分布特征, 具有明

显的年际及年代际变化，且进入 21 世纪后呈明显弱转强的变化特征（徐桂玉和林春育，1984；赵珊珊等，2006；袁旭和刘宣飞，2013；蒋竹将等，2014；王春学等，2014；Wei et al, 2018；Zhang et al, 2019）。

在影响华西秋雨的环流特征方面，诸多研究认为影响华西秋雨的主要大气环流系统包括巴尔喀什湖低压槽、欧亚环流型、东亚西风急流、西太平洋副热带高压（以下简称西太副高）、印缅槽、越赤道气流等（白虎志和董文杰，2004；鲍媛媛等，2003；贾小龙等，2008；柳艳菊等，2012；袁旭和刘宣飞，2013；李传浩等，2015；孙照渤等，2016；吴瑶和杜良敏，2016；徐金霞等，2017；王红军等，2018；喻乙耽等，2018；Wei et al, 2018；徐曼琳等，2020）。此外，李传浩等（2015）的讨论了同期和前期的异常环流特征，认为在华西地区气旋性距平环流或风切变形成低层风场辐合，产生强烈的上升运动，在华西秋雨区形成水汽辐合；副热带高压位置偏西、偏北使得华西地区西南暖湿气流偏强，冷暖空气交汇于华西地区从而易形成极端降水。在影响华西秋雨关键环流系统的研究中，对南亚高压、副热带西风急流的分析研究相对较小，因南亚高压与西太副高之间有相向而行、相背而斥的运动关系（陈永仁和李跃清，2008；王斌和李跃清，2011；岑思弦等，2021；雷显辉，2022），在高层大气的引导作用下，当南亚高压异常时，也易造成西太副高位置等的异常，从而使西太平洋地区对华西等地水汽输送异常，造成极端降水。

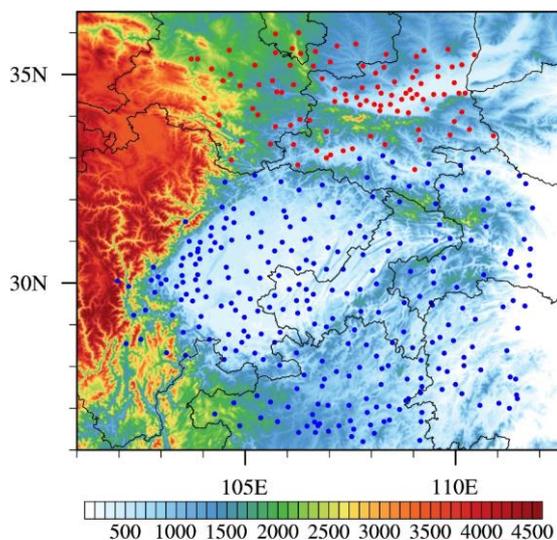
还有一些研究虽然也认为华西秋雨有降水持续时间长的特点（李莹等，2012，气象科技进展；齐冬梅等，2020，气象），但针对极端降水事件的分析相对较少。近年来，地方经济社会对气候异常尤其是极端降水过程的预测服务需求越来越多，业务服务要求越来越高，亟需了解和认识极端降水事件的变化规律和特征。本文利用 1961—2022 年华西地区 373 个气象观测台站秋季降水资料和欧洲中期天气预报中心（ECMWF）提供的 ERA5 逐日再分析资料，分析华西秋雨期持续性与非持续性两类极端降水事件的最新变化特征，并从关键大气环流系统等角度，对两类事件的环流特征及差异进行分析，从而理解和揭示造成极端降水事件的环流特征，寻找预测极端降水事件的前兆信息，对华西地区防灾减灾气象服务提供实际业务应用价值。

1 资料和方法

1.1 资料说明

华西秋雨期降水资料源于中国气象局提供的中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据，降水统计时段统一为 9—11 月。按照中华人民共和国气象行业标准《中国雨季监测指标 华西秋雨》（QX/T 496—2019）相关规定，华西地区范围为我国 $25^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$ 、 $100^{\circ}\text{E}\sim 111^{\circ}\text{E}$ 域内，包括湖北、湖南、重庆、四川、贵州、陕西、宁夏和甘肃 6 省 1 区 1 市。按该标准的规定，根据华西秋雨的区域气候特征，以秦岭为界划分为南北两个气候区（分别简称为南区、北区），其中南区主要包括湖北西部、湖南西部、重庆、四川东部以及贵州北部，北区主要包括陕西南部、宁夏南部和甘肃东南部。

本文选取 1961—2022 年的华西地区 373 个气象观测台站逐日降水观测资料，具体分布如图 1 所示。



注：红色（蓝色）圆点为北区（南区）气象观测台站位置。

图 1 华西秋雨监测区气象观测台站分布及其海拔高度（填色，单位：m）

Fig.1 Distribution and altitude (colored, unit:m) of the meteorological observation station in West China autumn rain monitoring area

环流场再分析资料选取 ECMWF 提供的 1961—2022 年 ERA5 逐日再分析资料，水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ，包括位势高度、风场和比湿场等气象要素，整层水汽输送为 1000~300 hPa 的积分结果。西太副高特征指数的计算采用刘芸芸等（2012）的指数定义。文中所有距平的统计均相较于最新气候态 1991—2020 年平均进行计算。

1.2 极端降水事件的统计标准

采用潘晓华和翟盘茂（2002）提出的百分位法确定极端降水阈值，即对每个台站，将 1961—2022 年秋季（9—11 月）所有日降水量（按有效降水日降水量 $\geq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ）按升序排列，得到逐日降水序列，取其第 95 个百分位值定义为极端降水阈值，作为确定极端降水事件的标准。对每个气象观测台站而言，当某日开始连续 n 天降水量大于该阈值，则认为出现 1 次持续 n 天的极端降水事件，以降水出现第 1 天作为开始时间，当 n 为 2 d 及以上时，定义为 1 次持续性极端降水事件，当 n 为 1 d 时，定义为 1 次非持续性极端降水事件，两类事件相互独立，不重复统计。区域内持续性极端降水事件的统计标准参考李纵横等（2015）的方法，考虑华西秋雨监测的实际情况，统计区域内有 10% 的站点在同一天的降水量超过其阈值，则认为该天该区域发生了极端降水事件，区域内持续（非持续）性极端降水事件则为出现 2 d 及以上（1 d）的极端降水事件。

1.3 相关降水指数的定义及统计说明

在华西秋雨期持续（非持续）性极端降水的统计中，利用近 62 a 来的逐日降水资料对华西秋雨区每个气象观测站建立对应的降水指数，其定义列于表 1。

表 1 华西秋雨期极端降水事件相关降水指数定义

Table 1 Definition of precipitation index related to autumn rain period in West China

降水指数	定义
极端降水事件	日降水量大于统计时段内第 95 个百分位阈值的事件
持续（非持续）性极端降水事件	持续 2 d 及以上（1 d）的极端降水事件
持续（非持续）性极端降水事件降水总量	统计时段内持续（非持续）性极端降水事件降水量合计值
持续（非持续）性极端降水事件日平均降水量	统计时段内持续（非持续）性极端降水事件降水量合计值与统计日数的比值
持续（非持续）性极端降水事件频次	统计时段内持续（非持续）性极端降水事件出现的次数
持续（非持续）性极端降水事件贡献率	统计时段内持续（非持续）性极端降水事件降水量与秋季总降水量比值的百分率

本文使用的其他统计方法有气候趋势、合成、差值分析和差值 t 检验方法等，具体计算方法详见参考文献吴洪宝和吴蕾（2005）和魏凤英（2007）。在持续性极端降水事件的环流统计分析中，事件所对应的环流场为持续天数的平均环流场。

2 极端降水事件变化特征

2.1 时间变化特征

图 2 为 1961—2022 年华西秋雨期持续和非持续性极端降水事件的降水总量、强度、贡献率和频次变化。可以看出，近 62 a 来，持续和非持续性两类极端事件的降水总量有较大差别，其中持续性极端降水事件除少数未出现过的年份外，大多为 12~185 mm，而非持续性极端降水事件的降水总量相对较小，大多为 7~70 mm，也有个别年份（1993 年和 2022 年）未出现过非持续性极端降水事件。二者的线性趋势呈相反变化，前者以 $5.5 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率明显增加，后者则以 $0.3 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率呈弱减少；两类事件有明显的年际和年代际变化特征，前者主要在 1970 年代至 1980 年代中期和 2000 年代中期至今呈明显增加，后者主要在 2010 年代以来出现明显的减少变化（图 2a）。

近 62 a 来，两类事件的强度变化差异较小，其中持续性极端降水事件强度除少数未出现该事件的年份外，大多为 $6.0 \sim 14.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ，非持续性极端降水事件强度为 $5.0 \sim 14.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ；从二者的线性变化趋势看，前者以 $0.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率增强，后者的强度无明显变化；两类事件强度的年际和年代际变化在不同阶段有一致或相反两种变化特征，在 1960 年代至 1970 年代初期和 1980 年代初期至中期，两类事件的强度呈相反的变化，其中持续性极端降水事件的强度呈增加趋势，非持续性极端降水事件的强度呈减小趋势，其余时段两类事件的强度则基本呈一致的变化特征，其中 1970 年代中期至 1980 年代初期和 2010 年代初期，两类事件强度均呈减弱变化，而在 1980 年代后期至 1990 年代初期和 1990 年代中期呈增强变化（图 2b）。

由图 2c 可看出，持续性极端降水事件的频次多数年份为 0~4 次，非持续性极端降水事件频次为 1~5 次；前者以 $0.1 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率呈弱增加的线性变化趋势，后者则变化不明显；前者在 1960 年代至 1970 年代初期、1970 年代中期至 1980 年代初期、1980 年代中期—2000 年代初期和 2000 年代

中期至今，频次呈减少-增加-减少-增加的变化，而后者年际变化明显但年代际变化不明显，但 2010 年代中期以来呈较明显减少的变化特征。

由图 2d 可看出，持续性极端降水事件对华西秋雨总降水量的贡献率高于非持续性极端降水事件，历年多为 4%~35%，非持续性极端降水的贡献率则为 2%~19%；前者以 $1.4\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率呈增加趋势，而后者无明显变化；两类事件贡献率的年际和年代际变化趋势与频次的变化趋势基本一致。

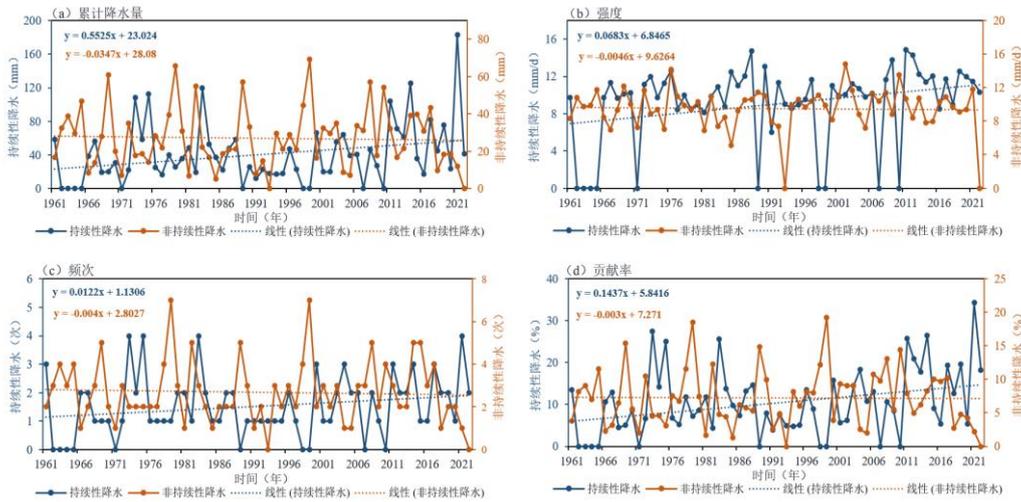
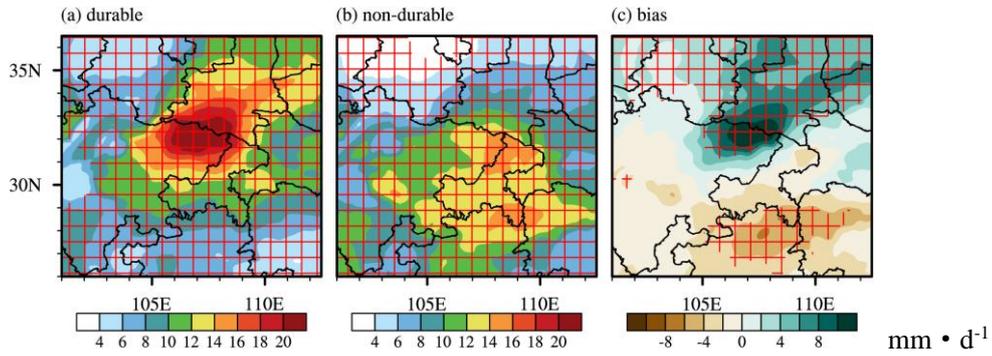


图 2 1961—2022 年华西秋雨期持续性和非持续性极端降水事件 (a) 降水总量、(b) 强度、(c) 频次和 (d) 贡献率的变化

Fig.2 Change of (a) Total precipitation, (b) intensity, (c) frequency and (d) contribution rate of persistent and non-persistent extreme precipitation events in West China in the autumn rain period from 1961 to 2022

2.2 空间变化特征

图 3 为 1961—2022 年华西秋雨期持续与非持续性极端降水事件日平均降水量的空间分布及二者的差值。可以看出，两类事件的日平均降水量空间分布差异较大的地区主要两个区域：一是四川东北部，二是与其相邻的陕西南部地区和重庆东部、贵州北部及湖南的西部地区，区域内两类事件日平均降水量的差值均通过了 90% 的信度检验（图 3c，“+”区域为通过信度检验），其中持续性极端降水事件的降水量主要集中在上述前一区域，降水量大值中心在四川与陕西交界处，中心最大值超过了 $20 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ （图 3a），而非持续性极端降水事件的降水量主要集中在后一区域，中心最大值相对于持续性极端降水事件要小，约为 $16 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ （图 3b）。持续性极端降水过程降水量主要集中在华西秋雨南北交界区，而非持续性极端降水事件的降水量则主要在华西南区，降水量中心在重庆东部地区。



注：图 c 中“+”区域为通过 90% 信度检验。

图 3 1961—2022 年华西秋雨期 (a) 持续与 (b) 非持续性极端降水事件日平均降水量空间分布及 (c) 二者的差值

Fig.3 (a,b) Spatial distribution of daily average precipitation of (a) persistent and (b) non-persistent precipitation events and (c) their difference in West China in the autumn rain period from 1961 to 2022

图 4 为 1961—2022 年华西秋雨期持续与非持续性极端降水事件频次空间分布，可看出，持续性极端降水事件在华西各地均有发生，四川盆地西部至陕西南部地区的西南—东北向的带状区域内发生频次最高，达 15~33 次，这可能与该地区特殊的地理位置有关；其他区域发生频次相对较少，为 4~20 次（图 4a）。非持续性极端降水事件则在华西各地均发生频繁，尤其在华西南区，达 70~152 次，华西北区相对较少，约 60~110 次（图 4b）。

进一步分析近 62 a 华西秋雨期持续和非持续性极端降水事件的日平均降水量和频次线性变化趋势的空间分布（图 5），可以看出，两类事件日平均降水量和频次在陕西南部地区均呈明显的增加趋势，其余地区变化则不一致，其中持续（非持续）性极端降水事件的日平均降水量在甘肃南部呈现增加（减少）趋势（图 5a），四川盆地中部和东南部、贵州北部和湖南湖北的交界地区则呈相反的变化趋势（图 5b）。从两类事件发生频次的线性变化趋势可看出，四川盆地中部和东南部、贵州北部、湖南西北部至与湖北交界处持续性极端降水事件增加趋势明显，而甘肃东南部为减少趋势（图 5c）。非持续性极端降水事件发生频次在陕西南部、四川盆地中部和北部增加趋势明显，其余大部地区则为明显的减少趋势（图 5d）。

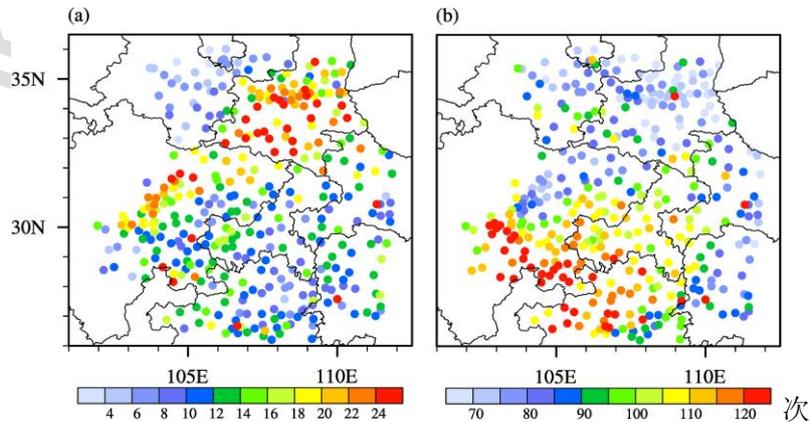


图 4 1961—2022 年华西秋雨期 (a) 持续与 (b) 非持续性极端降水事件频次空间分布

Fig.4 Spatial distribution of frequency of persistent (a) and non-persistent (b) extreme precipitation events in West China in the autumn rain period from 1961 to 2022

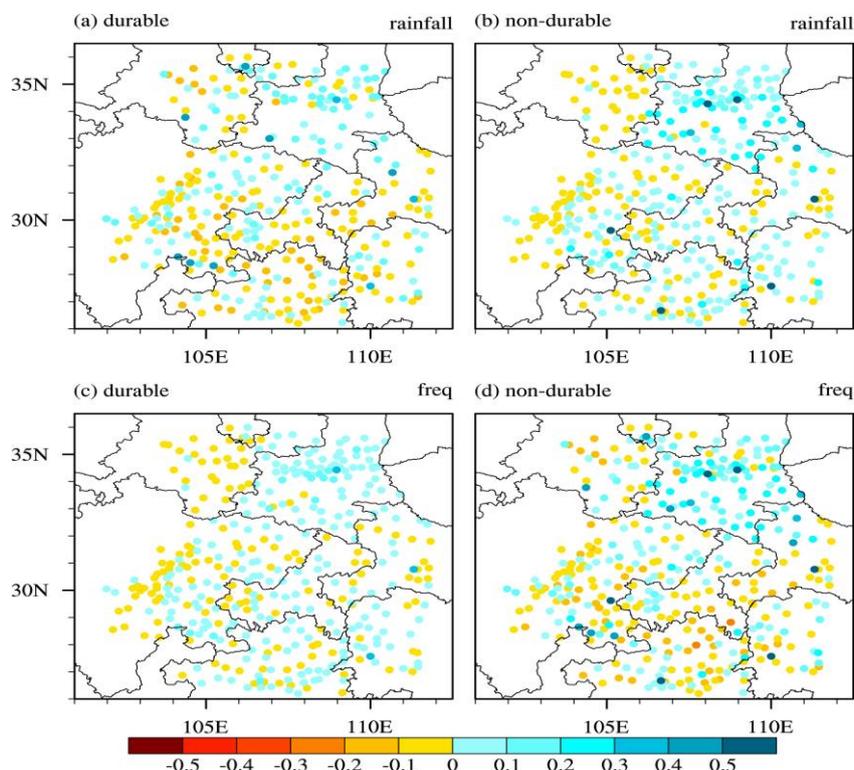


图5 1961—2022年华西秋雨期(a, c)持续与(b, d)非持续性极端降水事件(a, b)日平均降水量线性变化趋势(填色, 单位: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)和(c, d)频次线性变化趋势(填色, 单位: $\text{次}\cdot\text{a}^{-1}$)空间分布

Fig.5 Spatial distribution of (a,b) linear trend of daily mean precipitation (colored, unit: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) and (c,d) linear trend of frequency (colored, unit: $\text{time}\cdot\text{a}^{-1}$) of (a,c) persistent and (b,d) non-persistent extreme precipitation events in West China in the autumn rain period from 1961—2022

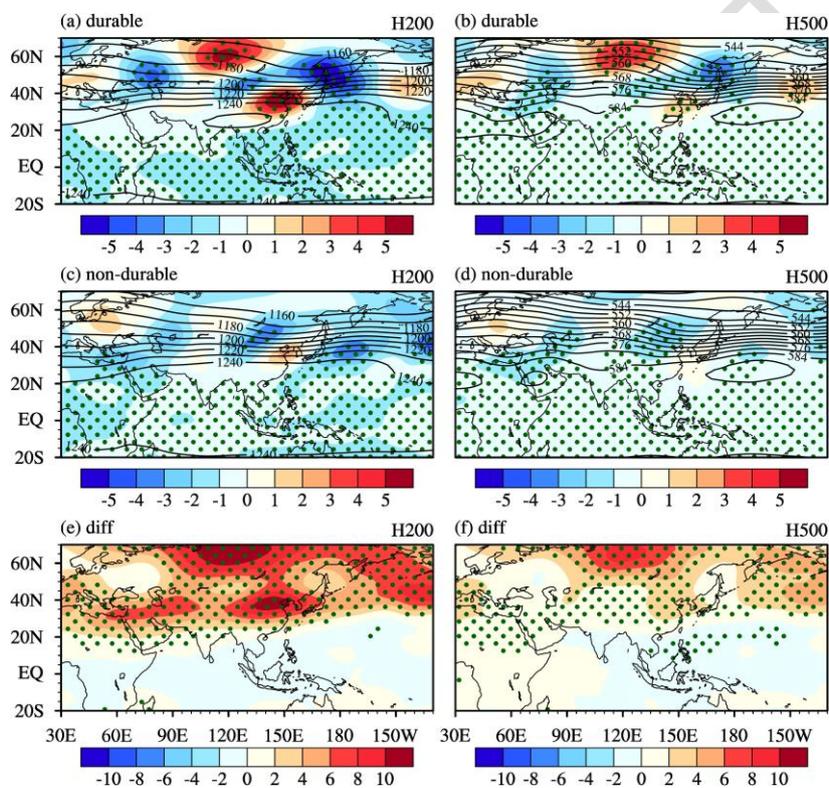
3 华西秋雨期极端降水事件的环流特征

3.1 大气环流特征

统计 1961—2022 年华西秋雨期持续与非持续性极端降水事件, 两类事件分别出现 94 次和 166 次。用合成分析法分别对两类事件发生时对流层中高层 500 hPa 和 200 hPa 高度场环流形势、距平及其差值进行分析(图 6), 可以看出, 发生持续性极端降水事件时, 北半球中高纬度地区为两槽一脊的单阻环流型, 黑海和里海附近高空槽异常加深, 巴尔喀什湖和贝加尔湖之间及以北地区有高压脊异常发展, 东亚沿岸有东亚槽发展, 为明显的两槽一脊中阻型环流(图 6a, 6b), 且上述关键区环流均通过了 90% 的信度检验。此种环流型下我国西部及其上游 30°N 附近有短波槽活跃和发展, 华西地区处在北高南低的环流控制下, 有利于北方冷空气的南下和持续维持, 华西地区易出现持续性极端降水。非持续性极端降水事件发生时, 欧亚中高纬度仍为两槽一脊的环流型, 虽槽脊位置基本与持续性极端降水事件时相同, 但强度明显偏弱, 且未通过信度检验(图 6c, 6d), 说明中高纬度

环流的影响相对较小。从二者的差值（图 6e,f）可以看出，最大差异在黑海和里海以北、巴尔喀什湖和贝加尔湖以北及鄂霍次克海以东以北地区，发生持续性极端降水事件时，主要影响系统的位势高度较发生非持续性极端降水事件时偏高 20~60 gpm。

相对于中高纬度地区，低纬度地区环流系统的显著性特征更加明显，30°N 以南的大部区域均通过了 90% 的信度检验。持续性极端降水事件发生时，印缅槽加强发展，西太副高和南亚高压北抬（图 6a,b），有利于将孟加拉湾和西太平洋地区的南方暖湿气流向北输送，华西地区极易出现极端降水事件。非持续性极端降水事件发生时，上述状况同样存在，但印缅槽、西太副高及南亚高压北抬程度略弱（图 6c,d）。从二者的差值（6e,f）可看出，持续性极端降水事件发生时印缅槽区域位势高度较非持续性极端降水事件时偏低 20 gpm，即印缅槽相对更加偏强，同时，西太副高的位置更加偏北偏西。



注：加点区域为通过 90% 信度检验。

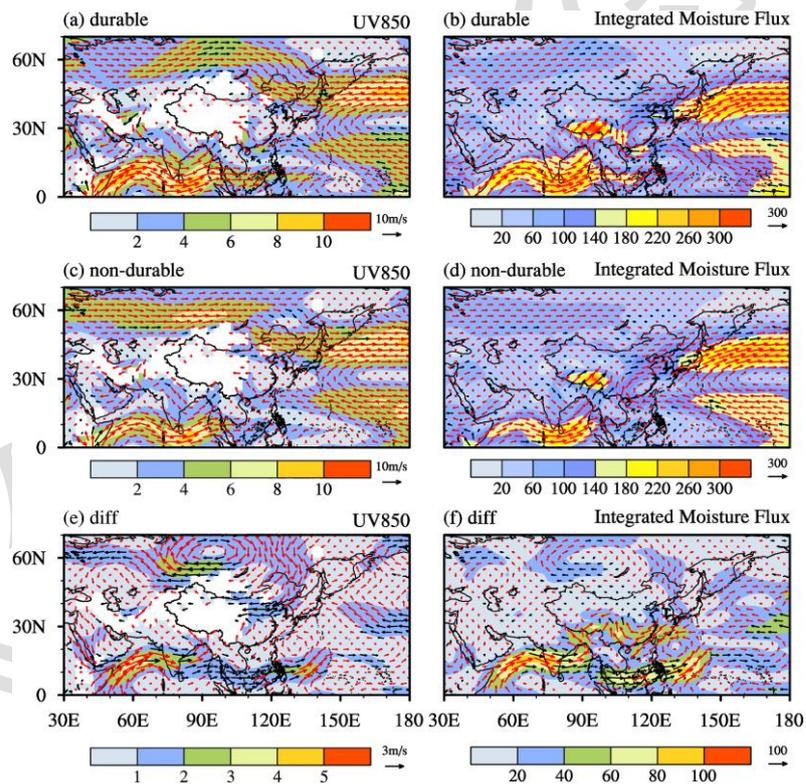
图 6 1961—2022 年华西秋雨期 (a, b) 持续和 (c, d) 非持续性极端降水事件的 (a, c, e) 200 hPa 和 (b, d, f) 500 hPa 高度场 (等值线, 单位: dagpm) 及其距平场 (填色, 单位: dagpm) 和 (e, f) 差值场 (填色, 单位: dagpm)

Fig.6 200 hPa (a,c,e) and 500 hPa (b,d,f) height field (contour, dagpm) and its anomaly(color, unit: dagpm) and (e,f) differences color, unit: dagpm) of (a,b) persistent and (c,d) non-persistent extreme precipitation events in West China in the autumn rain period from 1961—2022

3.2 低层风场和水汽特征

进一步分析两类事件合成的低层风场和整层水汽可知，北半球大部地区通过了 90% 的信度检验（图 7）。其中，持续性极端降水事件发生时，低层 850 hPa 风场上西西伯利亚至我国西北部地区

处在反气旋环流控制下，华西地区上空处在反气旋底部的偏东气流中，西太平洋地区的偏东风和孟加拉湾地区的西南风明显，菲律宾附近地区有明显的气旋性环流（图 7a）；而非持续性极端降水事件发生时，上述特征也同样存在，但强度明显偏弱（图 7c），从两类极端降水事件的差值也可以看出，相对于非持续性极端降水事件，发生持续性极端降水事件时，西西伯利亚地区的反气旋明显偏强，同时，西太平洋地区的偏东风和孟加拉湾地区的西南风明显偏强，菲律宾附近地区气旋性环流进一步加强且位置明显偏北（图 7e）。在这种风场环流形势下，受北方反气旋低部和西太平洋偏东气流以及孟加拉湾地区西南向输送的暖湿气流影响，不断有强盛的水汽输至华西地区上空，极易造成该地区极端降水事件的发生，当这种环流特征强度明显偏强且菲律宾附近地区气旋性环流位置明显偏北时，则易发生持续性极端降水事件。从 1000~300 hPa 整层水汽可以看出（图 7b, 7d, 7f），持续性极端降水事件发生时，华西大部及其上游地区均处于水汽高值区，中心值超过 $300 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ，孟加拉湾地区为较强盛的西南向水汽输送次大值中心，中心值约为 $260 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ （图 7b），水汽输送非常有利于华西地区持续性极端降水事件发生。而发生非持续性极端降水事件时，上述两个水汽中心范围相对较小，中心强度也明显较弱（图 7d），二者的中心差值最大可达到 $60 \times 10^{-5} \sim 80 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ （图 7c）。



注：红色风矢为通过 90% 信度检验。

图 7 1961—2022 年华西秋雨期 (a, b) 持续和 (c, d) 非持续性极端降水事件的 (a, c, e) 850 hPa 风场 (风矢, 填色) 和 (b, d, f) 1000~300 hPa 整层积分水汽输送场 (箭矢, 填色, 单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) 及其 (e, f) 差值空间分布

Fig.7 (a,c,e) 850 hPa wind field (arrow, colored) and (b,d,f) 1000—300 hPa whole layer(vector, colored, unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) of (a,b) persistent extreme precipitation event, (c,d) non-persistent extreme precipitation event and (e,f) their difference in West China in the autumn rain period from 1961—2022

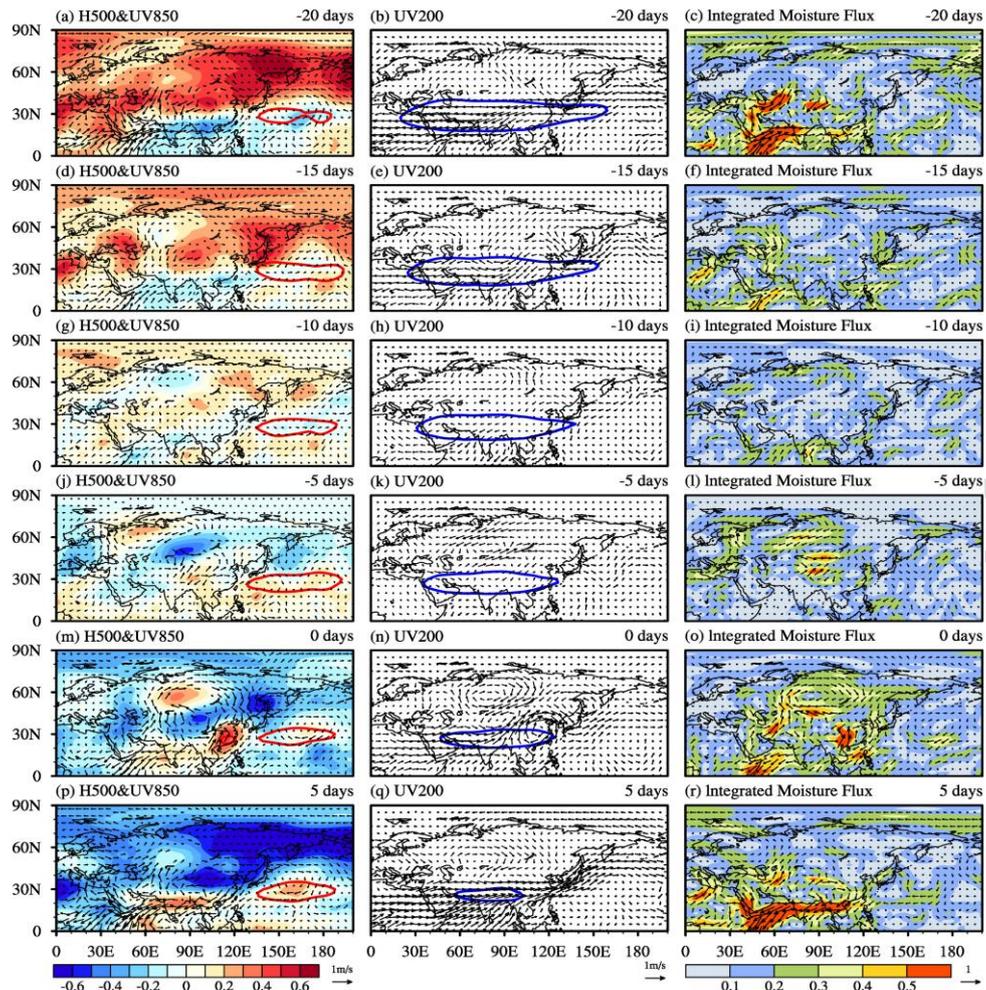
4 持续性极端降水事件发生前后环流特征

持续性极端降水事件影响时间相对较长，往往易造成区域性的洪涝灾害。为进一步了解造成华西秋雨期持续性极端降水事件的异常大气环流特征及其在孕酿发展过程中环流的演变特征，寻找环流的前兆信号，分析统计时段内持续性极端降水事件个例 94 次发生前 20、15、10、5、0 d 和发生后 5 d 高、中、低环流场和整层水汽输送，进行标准化距平成特征（图 8）。

4.1 对流层中低层环流特征

从持续性极端降水事件发生前及发生过程中对流层中低层（图 8a~8p）可以看出，在对流层中层 500 hPa 高度场和低层 850 hPa 风场上，欧亚上空最明显的特征是高度距平南北位相的调整，贝加尔湖阻高即单阻型环流型的建立发展和西太副高由弱到强、由南向北推进的变化过程。在事件发生前的 20~15 d（图 8a~8d），高度距平场上主要为北高南低的环流特征，欧亚中高纬度地区均为高度场正距平控制，正距平中心在欧亚东部上空的鄂霍次克海附近地区，低纬度地区则为负距平控制，正负距平的分界线约在 20°N 附近，华西地区上空无明显南风 and 北风的交汇。此种环流距平形势说明鄂霍次克海地区阻高，即东阻型环流的发展和西太副高的偏南、偏弱。至事件发生前 10 d（图 8g），虽然欧亚上空北正南负的环流型仍然维持，但北部的正距平和南部的负距平已明显减弱，乌山附近有冷槽（负距平区）在酝酿和发展，西太副高区域有弱的正距平区出现，说明西太副高逐渐加强北抬，此时南北正负距平的分界线北推至 25°N 附近，华西上空处在正高度距平场的控制下且无南风的输送。事件发生前 5 d（图 8j）时，南部的正距平区继续向北推进，欧亚上空距平位相发生相反的调整，出现北低南高的环流距平异常，乌山附近的冷槽（负距平区）加深并东移南压到巴尔喀什湖至贝加尔湖以及我国西北部地区，乌山以西地区则有正高度距平发展，但偏北风（冷空气）还未南下至华西上空；西太副高区正距平加强并不断北扩，南北正负距平的分界线在 30°N 附近，一次持续性极端降水事件正在酝酿发展中。

至事件发生当天（0 d，图 8m），乌山地区为强正距平中心，说明有强高压脊发展，巴尔喀什湖至贝加尔湖冷槽（负距平区）进一步加强并南压到我国西北部及华西地区上空，西太副高的正距平区再次加强并北抬，其北界北推至 35°N 附近，我国西部及华西地区处在“+”、“-”、“+”的异常距平环流波列，此种异常环流型下，在乌山以东至巴尔喀什湖以北地区阻高的影响下，将北方冷空气南压至华西及其偏北地区，有明显的北风向华西地区输送；西太副高则北抬至华西 35°N 及以北地区，北风和南风（冷暖空气）在华西上空交汇，为华西地区发生持续性极端降水事件的发生提供了极为有利的大尺度环流背景，这与李传浩等（2015）的研究结论一致。在事件趋于结束，即事件发生后的第 5 d（图 8p），距平场转为与事件发生前完全相反的北负南正的分布型，巴尔喀什湖至贝加尔湖低槽进一步加深，北方冷空气继续加强并南压，在北方冷空气的强盛压制下，减弱的西太副高开始南撤，南北正负距平的分界线南退到 25°N 附近，华西地区上空则处于干冷的北风控制下，持续性极端降水事件结束。



注：红色粗实线为 5880 gpm 位势等值线；蓝色粗实线为 16700 gpm 位势等值线。

图 8 1961—2022 年华西秋雨期持续性极端降水事件(a~l)发生前 (a~c) 20 d、(d~f) 15 d、(g~i) 10 d、(j~l) 5 d, 发生时 (m~o) 0 d 和 (p~r) 5 d (a, d, g, j, m, p) 500 hPa 高度场距平 (填色, 单位: dagpm) 和 850 hPa 风场 (风矢)、(b, e, h, k, n, q) 200 hPa 风场 (风矢) 和 (c, f, i, l, o, r) 1000~300 hPa 整层水汽输送距平 (箭头, 填色, 单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

Fig.8 (a, d, g, j, m, p) 500 hPa geopotential height field anomaly (colored, unit: dagpm) and 850 hPa wind field (vector), (b, e, h, k, n, q) 200 hPa wind field (vector) and (c, f, i, l, o, r) 1000—300 hPa whole layer water vapor field anomaly (arrow, colored, unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) in (a—c) 20 d, (d—f) 15 d, (g—i) 10 d, (j—l) 5 d before persistent extreme precipitation events, and (m—o) 0 d and (p—r) 5 d during persistent extreme precipitation event in West China in the autumn rain period from 1961—2022

4.2 对流层高层环流及整层水汽特征

分析持续性极端降水事件发生前后对流层高层 200 hPa 风场及 1000~300 hPa 整层水汽输送距平 (图 8b~8r) 可知, 欧亚上空最明显的特征是华西上空偏东风和偏西风的反向变化、南亚高压强度、位置调整以及水汽的输送和辐合辐散。

在事件发生前的 20~15 d (图 8b~8e), 巴尔喀什湖附近弱气旋性异常环流逐渐消失, 其南侧伊朗至青藏高原上空为强盛的偏东气流, 说明副热带西风急流未建立或异常偏弱, 南亚高压偏大偏强

偏东，其东界位于东海以东地区；同时，整层水汽表现出自孟加拉湾往东向中南半岛及其以东地区输送，其西南向的水汽通道和来自西太平洋偏东的水汽输送通道没有建立，华西地区处在偏北微弱的水汽输送环境下（图 8c~8f）。事件发生前 10 d（图 8h），巴尔喀什湖附近的气旋性异常环流完全消失，伊朗至青藏高原上空偏东风明显减弱，南亚高压面积缩小，其北界往南收缩，东界往西收缩至我国东海附近地区；此时来自孟加拉湾地区的水汽有所加强，但主要输送方向是中南半岛西部地区，西南向的水汽通道和来自太平洋偏东的水汽输送通道仍未建立，华西地区还处在弱水汽环境下（图 8i），有利的降水背景还未形成。事件发生前 5 d（图 8k），巴尔喀什湖以北地区有气旋性异常环流重新建立，伊朗至青藏高原上空偏东风再次减弱，并逐渐有西风发展的迹象，南亚高压面积缩小、北界南移、东界往西收缩至我国东部沿海附近；从整层水汽情况（图 9l）可看出，华西上空出现明显的西南向水汽辐合区，但东部的水汽输送条件仍较弱，此时还不利于持续性强降水的发生。

在事件发生当天（0 d，图 8n），巴尔喀什湖以北的气旋性异常环流南下至巴尔喀什湖以南地区，伊朗至青藏高原上有强盛西风建立并发展，说明此时副热带西风急流建立、加强并发展，华西上空正好处在急流轴线附近，南亚高压面积更进一步缩小，北界南移至 30°N 附近，东界往西收缩至我国东南沿海附近；由图 8o 可知，来自西太平洋的东北转西南向水汽输送明显增强，华西上空出现较强的水汽辐合区，非常有利于华西地区出现持续性强降水。在事件趋于结束，即事件发生后的第 5 d（图 8q），巴尔喀什湖以南地区的气旋性异常环流完全消失转为弱偏北风，副热带西风急流建立明显减弱，南亚高压面积明显收缩，尤其是其东西边界收缩显著，其北界位置略有南移，东界往西收缩至我国西南西部地区；由图 8r 可知，东亚及东南亚地区偏南的水汽输送均消失，华西上空水汽辐合区亦完全消失，有利于华西地区出现降水的环流和水汽条件已不存在，至此持续性极端降水事件结束。

综上，在华西秋雨期持续性极端降水事件发生前 15~20 d，欧亚对流层高层及整层水汽场上并没表现出明显有利于持续性降水的形势，从事件发生前 5 d 至开始当天，有利于事件发生的环流形势逐渐显现并不断加强，最主要特征表现在南亚高压的不断南退和其东界不断向西收缩、副热带西风急流轴线的建立和异常加强以及水汽辐合的不断加强。翟盘茂等（2016；2022）对江淮地区夏季持续性强降水发生机理的研究认为，从持续性强降水发生前至发生后，南亚高压是不断明显向东移动的过程。而本文的分析发现，对于华西秋雨期的持续性极端降水而言，南亚高压的变化则与上述结论相反，从事件发生前至发生后，南亚高压是一个不断往西收缩的过程，这与南亚高压的季节性变化和不同地区有利降水的环流型配置有关。在华西秋雨期，当南亚高压北界南退到 30°N、东界收缩至我国东南沿海附近、副热带西风急流建立发展且急流轴线维持在华西上空，且华西上空有水汽辐合时，华西地区则会发生持续性极端降水事件，故提前关注和监测南亚高压的移动路径和形态变化以及副热带西风急流的变化，尤其是急流轴位置的变化，可以为提前预测持续性极端降水事件的发生时间提供前兆信息。

5 结论与讨论

本文利用华西地区秋季降水资料和 ECMWF 提供的 ERA5 再分析资料,对华西秋雨期持续和非持续性极端降水事件的新特征等进行了分析,并对发生持续和非持续性极端降水事件时的大气环流特征对比分析和探讨,得到以下结论。

(1) 近 62 a 来,华西秋雨期持续性极端降水事件呈现降水量和频次增加、强度增强、对秋季总降水量的贡献率增加的变化趋势;而非持续性极端降水事件降水量呈弱的减少趋势,其强度、频次和对秋季总降水量的贡献率的变化则不明显。

(2) 持续和非持续性两类极端降水事件发生时,虽然欧亚中高纬度虽均为两槽一脊的环流型,但槽脊的强度有较大差异,北半球欧亚中高纬度地区的差异更加突出;在低纬度地区,与非持续性极端降水事件发生时相比,持续性极端降水事件发生时印缅槽相对更偏强、西太副高更偏北。

(3) 在低层风场上,持续性极端降水发生时,西西伯利亚至我国西北北部地区处在反气旋环流控制下,华西地区上空为反气旋底部的偏东气流,西太平洋地区的偏东风和孟加拉湾地区的西南风明显,菲律宾附近地区有明显的气旋性环流,而在非持续性极端降水发生时,这种特征也存在,但强度明显较前者偏弱。

(4) 在华西秋雨期内发生持续性极端降水事件时,我国西部及华西地区处在“+”、“-”、“+”的环流异常型下,北方冷空气南压至华西及其偏北地区,冷暖空气在华西上空交汇,为华西地区发生持续性极端降水事件的发生提供了极为有利的大尺度环流背景;当南亚高压北界南退到 30°N、东界收缩至我国东南沿海附近、副热带西风急流建立发展且急流轴线维持在华西上空,且华西上空有水汽辐合时,华西地区则会发生持续性极端降水事件。因此,提前关注和监测南亚高压的移动路径和形态变化以及副热带西风急流的变化,尤其是急流轴位置的变化,可以为提前预测持续性极端降水事件的发生时间提供前兆信息。

(5) 本文分析了华西秋雨全区极端降水事件的特征,从其空间变化特征看,华西南区与北区极端降水事件的变化并不相同,还需在以后的研究中对这种变化趋势及其成因做进一步探讨。

本文从华西秋雨期内的极端降水过程的诊断预测等实际气候业务服务工作的需求出发,分析了华西秋雨期持续和非持续性极端降水事件发生时的大气环流特征、主要关注的环流系统和前兆信号,但极端事件的形成机制和影响因素复杂多变,除了环流系统的影响,可能还受到地形、土壤湿度等更多外源信号的影响,还需开展更加深入细致的相关研究工作。

参考文献

- 白虎志,董文杰,2004. 华西秋雨的气候特征及成因分析[J]. 高原气象, 23(6): 884-889. Bai H Z, Dong W J, 2004. Climate features and formation causes of autumn rain over southwest China[J]. Plateau Meteor, 23(6): 884-889 (in Chinese).
- 鲍媛媛,阿布力米提,李峰,等,2003. 2001年华西秋雨时空分布特点及其成因分析[J]. 应用气象学报,

-
- 14(2): 215-222. Bao Y Y, Abulimiti, Li F, et al, 2003. Space-time distribution and physical mechanisms of autumn rains in West China in 2001[J]. *J Appl Meteor Sci*, 14(2): 215-222 (in Chinese).
- 岑思弦, 陈文, 胡鹏, 等, 2021. 南亚高压演变过程及其变异机制研究进展[J]. *高原气象*, 40(6): 1305-1317. Cen S X, Chen W, Hu P, et al, 2021. Progresses in understanding the seasonal evolution of the south Asian high and the mechanisms of its variations[J]. *Plateau Meteor*, 40(6): 1304-1317 (in Chinese).
- 陈永仁, 李跃清, 2008. 南亚高压活动特征及其天气气候影响研究进展[J]. *气象科技*, 36(2): 174-179. Chen Y R, Li Y Q, 2008. Advances in researches on activities and influences of South Asia high on weather and climate[J]. *Meteor Sci Technol*, 36(2): 174-179 (in Chinese).
- 重庆市气候中心, 2018. 重庆市 2017 年度气候公报[N]. 7-12. Chongqing Climate Center, 2018. Climate bulletin of Chongqing municipality for the year 2017[N]. 7-12 (in Chinese).
- 贾小龙, 张培群, 陈丽娟, 等, 2008. 2007 年我国秋季降水异常的成因分析[J]. *气象*, 34(4): 86-94. Jia X L, Zhang P Q, Chen L J, et al, 2008. Causality analysis of autumn rainfall anomalies in China in 2007[J]. *Meteor Mon*, 34(4): 86-94 (in Chinese).
- 蒋竹将, 马振峰, 刘佳, 等, 2014. 一种改进的华西秋雨指数及其气候特征[J]. *大气科学*, 38(1): 32-44. Jiang Z J, Ma Z F, Liu J, et al, 2014. Improved index and climatological characteristics of the autumn rain in western China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 38(1): 32-44 (in Chinese).
- 雷显辉, 宋敏红, 张少波, 2022. 夏季南亚高压和西太副高活动特征指数与中国东部降水分布的联系 [J] . *高原气象*, 41 (2) :489-501. Lei X H, Song M H, Zhang S B, 2022. Association between summer activity characteristic indices of the South Asia high and the West Pacific subtropical high and precipitation distribution in Eastern China [J] . *Plateau Meteor*, 41 (2) : 489-501(in Chinese).
- 李传浩, 刘宣飞, 李智, 等, 2015. 华西秋雨区域性极端降水的环流特征[J]. *热带气象学报*, 31(4): 526-535. Li C H, Liu X F, Li Z, et al, 2015. Circulation patterns of regional mean daily precipitation extremes of persistent autumn rain over western China[J]. *J Trop Meteor*, 31(4): 526-535 (in Chinese).
- 李莹, 李维京, 艾婉秀, 等, 2012. 2011 年华西秋雨特征及其成因分析[J]. *气象科技进展*, 2(3): 27-33. Li Y, Li W J, Ai W X, et al, 2012. Analysis of autumn rainfall characteristics and its causes in West China in 2011[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 2(3): 27-33 (in Chinese).
- 李纵横, 李崇银, 宋洁, 等, 2015. 1960—2011 年江淮地区夏季极端高温日数的特征及成因分析[J]. *气候与环境研究*, 20(5): 511-522. Li Z H, Li C Y, Song J, et al, 2015. An analysis of the characteristics and causes of extremely high temperature days in the Yangtze-Huaihe River Basins in summer 1960—2011[J]. *Climatic Environ Res*, 20(5): 511-522 (in Chinese).
- 柳艳菊, 孙冷, 孙丞虎, 等, 2012. 2011 年秋季华西秋雨异常及成因分析[J]. *气象*, 38(4): 456-463. Liu Y J, Sun L, Sun C H, et al, 2012. Analysis of anomalies of autumn rain in West China in 2011 and its

-
- possible mechanism[J]. Meteor Mon, 38(4): 456-463 (in Chinese).
- 刘芸芸, 李维京, 艾秀, 等, 2012. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J]. 应用气象学报, 23(4): 414-423. Liu Y Y, Li W J, Ai W X, et al, 2012. Reconstruction and application of the monthly western pacific subtropical high indices[J]. J Appl Meteor Sci, 23(4): 414-423 (in Chinese).
- 潘晓华, 翟盘茂, 2002. 气温极端值的选取与分析[J]. 气象, 28(10): 28-31. Pan X H, Zhai P M, 2002. Analysis of surface air temperature extremum[J]. Meteor Mon, 28(10): 28-31 (in Chinese).
- 齐冬梅, 周长艳, 李跃清, 等, 2020. 2017年秋季四川阴雨寡照特征及成因分析[J]. 气象, 46(1): 37-49. Qi D M, Zhou C Y, Li Y Q, et al, 2020. Analysis of Autumn rainy and sunless characteristics and its mechanism in Sichuan in 2017[J]. Meteor Mon, 46(1): 37-49 (in Chinese).
- 孙照渤, 黄艳艳, 倪东鸿, 2016. 我国秋季连阴雨的气候特征及大气环流特征[J]. 大气科学学报, 39(4): 480-489. Sun Z B, Huang Y Y, Ni D H, 2016. Climate and circulation characteristics of continuous autumn rain in China[J]. Trans Atmos Sci, 39(4): 480-489 (in Chinese).
- 王斌, 李跃清, 2011. 近 10 多年南亚高压活动特征及其影响的研究进展[J]. 高原山地气象研究, 31(2): 75-80. Wang B, Li Y Q, 2011. Advances in researches of south Asia high activities and its influences on summer drought and flood in China in recent more than 10 years[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 31(2): 75-80 (in Chinese).
- 王春学, 马振峰, 张顺谦, 等, 2014. 华西秋雨逐日监测指数的建立及其分析[J]. 气象, 40(8): 957-964. Wang C X, Ma Z F, Zhang S Q, et al, 2014. Establishment and analysis of the daily monitoring index for Huaxi autumn rain[J]. Meteor Mon, 40(8): 957-964 (in Chinese).
- 王红军, 王子晨, 王可, 等, 2018. 2017 年华西秋雨的环流特征及成因[J]. 干旱气象, 36(5): 743-750. Wang H J, Wang Z C, Wang K, et al, 2018. Anomalous circulation characteristics of autumn rain and its cause over West China in 2017[J]. J Arid Meteor, 36(5): 743-750 (in Chinese).
- 魏凤英, 2007. 现代气候统计诊断与预测技术: 第 2 版[M]. 北京: 气象出版社: 160-169. Wei F Y, 2007. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press: 160-169 (in Chinese).
- 吴洪宝, 吴蕾, 2005. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京: 气象出版社: 104-131. Wu H B, Wu L, 2005. Methods for Diagnosing and Forecasting Climate Variability[M]. Beijing: China Meteorological Press: 104-131 (in Chinese).
- 吴瑶, 杜良敏, 2016. 副高脊线的月内振荡对汉江上游秋汛的影响[J]. 气象, 42(11): 1379-1386. Wu Y, Du L M, 2016. Impact of ridge line of the western pacific subtropical high on the upper reaches of Hanjiang River in autumn flood season[J]. Meteor Mon, 42(11): 1379-1386 (in Chinese).
- 新华社. (2020-09-18). 贵州将防汛应急响应提升至 III 级 [EB/OL]. https://www.gov.cn/xinwen/2020-09/18/content_5544366.htm. Xinhua News Agency. (2020-09-18). Guizhou raises flood emergency response to level III [EB/OL].

-
- https://www.gov.cn/xinwen/2020-09/18/content_5544366.htm (in Chinese).
- 徐桂玉, 林春育, 1994. 华西秋雨特征及成因探讨[J]. 气象科学, 14(2): 149-154. Xu G Y, Lin C Y, 1994. Survey on the causes and features of autumn rain in western China[J]. *Sci Meteor Sin*, 14(2): 149-154 (in Chinese).
- 徐金霞, 闫彩霞, 钟燕川, 等, 2017. 北半球秋季欧亚遥相关与华西秋雨的关系[J]. 气象科技, 45(3): 492-498. Xu J X, Yan C X, Zhong Y C, et al, 2017. Relationships between Eurasian teleconnection pattern in Northern Hemisphere autumn and autumn rainfall in West China[J]. *Meteor Sci Technol*, 45(3): 492-498 (in Chinese).
- 徐曼琳, 周波涛, 程志刚, 2020. 2010 年以来华西秋季降水年代际增多原因初探[J]. 大气科学学报, 43(3): 568-576. Xu M L, Zhou B T, Cheng Z G, 2020. Preliminary analysis on the interdecadal increase of autumn rainfall in western China since 2010[J]. *Trans Atmos Sci*, 43(3): 568-576 (in Chinese).
- 应急管理部. (2019-11-07). 应急管理部发布 2019 年 10 月全国自然灾害基本情况[EB/OL]. https://www.gov.cn/xinwen/2019-11/07/content_5449679.htm. Ministry of Emergency Management. (2019-11-07). Ministry of emergency management releases basic situation of national natural disasters in October 2019[EB/OL]. https://www.gov.cn/xinwen/2019-11/07/content_5449679.htm (in Chinese).
- 喻乙耽, 马振峰, 范广洲, 2018. 华西秋雨气候特征分析[J]. 成都信息工程大学学报, 33(2): 164-176. Yu Y D, Ma Z F, Fan G Z, 2018. The analysis of climatic feature of autumn rainfall in West China[J]. *J Chengdu Univ Inform Technol*, 33(2): 164-176 (in Chinese).
- 袁旭, 刘宣飞, 2013. 华西秋雨起止与秋冬季节大气环流转换[J]. 气象学报, 71(5): 913-924. Yuan X, Liu X F, 2013. Onset-withdrawal dates of autumn persistent rains over western China and the associated autumn to winter evolution of the atmospheric circulation[J]. *Acta Meteor Sin*, 71(5): 913-924 (in Chinese).
- 翟盘茂, 李蕾, 周佰铨, 等, 2016. 江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展[J]. 应用气象学报, 27(5): 631-640. Zhai P M, Li L, Zhou B Q, et al, 2016. Progress on mechanism and prediction methods for persistent extreme Precipitation in the Yangtze-Huai River valley[J]. *J Appl Meteor Sci*, 27(5): 631-640 (in Chinese).
- 翟盘茂, 廖圳, 陈阳, 等, 2017. 气候变暖背景下降水持续性与相态变化的研究综述[J]. 气象学报, 75(4): 527-538. Zhai P M, Liao Z, Chen Y, et al, 2017. A review on changes in precipitation persistence and phase under the background of global warming[J]. *Acta Meteor Sin*, 75(4): 527-538 (in Chinese).
- 翟盘茂, 2022. 中国持续性强降水形成机理与预报方法研究[M]. 北京: 气象出版社: 50-55. Zhai P M, 2022. Research on the Formation Mechanism and Forecasting Methods of Persistent Heavy Precipitation in China[M]. Beijing: China Meteorological Press: 50-55 (in Chinese).

-
- 赵珊珊, 张强, 陈峪, 等, 2006. 渭河、汉水流域秋季降水的变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2(4): 181-183. Zhao S S, Zhang Q, Chen Y, et al, 2006. Change in autumn precipitation in Weihe and Hanshui River basins[J]. Adv Climate Change Res, 2(4): 181-183 (in Chinese).
- Wei T, He S P, Yan Q, et al, 2018. Decadal shift in West China autumn precipitation and its association with sea surface temperature[J]. J Geophys Res, 123(2): 835-847.
- Zhang C, Wang Z Y, Zhou B T, et al, 2019. Trends in autumn rain of West China from 1961 to 2014[J]. Theor Appl Climatol, 135(1-2): 533-544.

气象学
季刊