

# 西南地区的极端降水时空演变特征研究

董怡<sup>1</sup>, 徐滩溢<sup>2\*</sup>, 胡兴宇<sup>3</sup>, 李雨虹<sup>4</sup>, 刘显含<sup>5</sup>, 胡进<sup>6</sup>, 贾思源<sup>7</sup>

<sup>1</sup>成都信息工程大学资源环境学院, 四川 成都

<sup>2</sup>泸州市纳溪区气象局, 四川 泸州

<sup>3</sup>西和县气象局, 甘肃 陇南

<sup>4</sup>三台县气象局, 四川 绵阳

<sup>5</sup>垫江县气象局, 重庆

<sup>6</sup>青神县气象局, 四川 眉山

<sup>7</sup>乐东黎族自治县气象局, 海南 乐东

收稿日期: 2026年3月10日; 录用日期: 2026年4月16日; 发布日期: 2026年4月29日

## 摘要

基于西南地区1960~2023年高分辨率逐日降水格点数据, 选取最大1日降水量(Rx1day)、持续干燥日数(CDD)、持续湿润日数(CWD)和中雨日数(R10)等极端降水指数, 采用Theil-Sen斜率估计、Mann-Kendall趋势检验及Hurst指数等方法, 系统分析了西南地区极端降水的时空演变特征及未来趋势。结果表明: (1) 西南地区极端降水空间分布呈显著异质性, 整体呈现东南高、西北低的格局, Rx1day高值区集中在四川盆地西南部、贵州东部和广西北部; (2) 时间变化上, Rx1day呈显著上升趋势(0.071 mm/a,  $p < 0.05$ ), CDD波动上升(0.043 day/a), CWD呈显著下降趋势(-0.041 day/a,  $p < 0.05$ ), 降水过程趋于“碎片化”; (3) Hurst指数分析显示各指数均具有强持续性( $H = 0.71 \sim 0.75$ ), 表明极端降水增强与干旱延长的趋势难以逆转; (4) 西南地区极端降水呈现“强度增强、历时缩短、旱涝急转”的显著特征, 未来极端降水风险将进一步累积。研究结果可为区域水资源管理、极端气候事件风险评估及防灾减灾对策制定提供科学依据。

## 关键词

极端降水, 时空演变, ETCCDI指数, Hurst指数, 西南地区

# Study on the Spatiotemporal Evolution Characteristics of Extreme Precipitation in Southwest China

Yi Dong<sup>1</sup>, Weiyi Xu<sup>2\*</sup>, Xingyu Hu<sup>3</sup>, Yuhong Li<sup>4</sup>, Yuhan Liu<sup>5</sup>, Jin Hu<sup>6</sup>, Siyuan Jia<sup>7</sup>

<sup>1</sup>College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

\*通讯作者。

文章引用: 董怡, 徐滩溢, 胡兴宇, 李雨虹, 刘显含, 胡进, 贾思源. 西南地区的极端降水时空演变特征研究[J]. 地理科学研究, 2026, 15(2): 356-366. DOI: 10.12677/gser.2026.152034

<sup>2</sup>Naxi District Meteorological Bureau of Luzhou City, Luzhou Sichuan

<sup>3</sup>Xihe Meteorological Bureau, Longnan Gansu

<sup>4</sup>Santai Meteorological Bureau, Mianyang Sichuan

<sup>5</sup>Dianjiang Meteorological Bureau, Chongqing

<sup>6</sup>Qingshen Meteorological Bureau, Meishan Sichuan

<sup>7</sup>Ledong Li Autonomous County Meteorological Bureau, Ledong Hainan

Received: March 10, 2026; accepted: April 16, 2026; published: April 29, 2026

## Abstract

Based on high-resolution daily precipitation gridded data from 1960 to 2023 in Southwest China, this study selects extreme precipitation indices such as maximum 1-day precipitation (Rx1day), consecutive dry days (CDD), consecutive wet days (CWD), and the number of moderate precipitation days (R10). Methods including Theil-Sen slope estimation, Mann-Kendall trend test, and Hurst index are employed to systematically analyze the spatiotemporal evolution characteristics and future trends of extreme precipitation in the region. The results indicate that: (1) The spatial distribution of extreme precipitation in Southwest China exhibits significant heterogeneity, generally presenting a pattern of high in the southeast and low in the northwest. High-value areas of Rx1day are concentrated in Southwestern Sichuan Basin, Eastern Guizhou and Northern Guangxi; (2) Temporally, Rx1day shows a significant increasing trend (0.071 mm/a,  $p < 0.05$ ), CDD fluctuates upward (0.043 day/a), while CWD demonstrates a significant decreasing trend (-0.041 day/a,  $p < 0.05$ ), suggesting a trend towards more “fragmented” precipitation processes; (3) Hurst index analysis reveals strong persistence for all indices ( $H = 0.71\sim 0.75$ ), indicating that the trends of intensified extreme precipitation and prolonged drought are difficult to reverse; (4) Extreme precipitation in Southwest China exhibits notable characteristics of “intensifying intensity, shortening duration, and rapid transitions between drought and flood”, with future risks of extreme precipitation expected to accumulate further. The findings can provide a scientific basis for regional water resource management, risk assessment of extreme climate events, and the formulation of disaster prevention and mitigation strategies.

## Keywords

Extreme Precipitation, Spatiotemporal Evolution, ETCCDI Indices, Hurst Exponent, Southwest China

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

全球气候变暖是 21 世纪人类面临的最严峻挑战之一。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出, 2011~2020 年全球平均地表温度较工业化前水平上升了约 1.09℃, 且升温速度呈加快趋势[1]。在全球变暖背景下, 水汽蒸发加快, 大气持水能力增强(约 7%/℃), 水循环过程加剧, 导致极端降水事件的发生频率和强度显著增加[2]-[4]。Pfleiderer 等[5]研究表明, 在 2℃升温情景下, 持续一周的极端降水事件平均可能性将增加 26% (15%~37%)。极端降水事件的增多增强对自然生态系统和人类社会经济造成严重影响, 已成为全球气候变化研究的热点问题[6] [7]。

中国地处东亚季风区,地形复杂多样,气候类型丰富,是全球极端降水事件频发的区域之一[8] [9]。近年来,中国极端降水事件呈显著增多增强趋势,年累计暴雨(日降水量  $\geq 50$  mm)站日数每 10 年增加 4.1% [10]。2023 年发布的《中国气候变化蓝皮书》显示,中国区域平均极端最高温度上升  $1.7^{\circ}\text{C}\sim 2.8^{\circ}\text{C}$ ,高温热浪天数增加 7~15 天,极端降水增加的幅度大于总降水量,降水更趋于极端化[11]。极端降水引发的洪涝、滑坡、泥石流等灾害给人民生命财产安全和区域可持续发展带来巨大威胁[12] [13]。

西南地区( $97^{\circ}21'\text{E}\sim 112^{\circ}04'\text{E}$ ,  $20^{\circ}54'\text{N}\sim 34^{\circ}19'\text{N}$ )是中国七大自然地理分区之一,涵盖广西壮族自治区、贵州省、云南省、重庆市、四川省五个省级行政区[14]。该区域地势复杂,是中国地形地貌最复杂的区域之一,包括四川盆地、云贵高原、横断山脉等主要地貌单元,具有高原、山地、丘陵、盆地、平原等多种地形类型[15]。西南地区地处热带、亚热带季风气候区,受西南季风、东亚季风和高原季风的共同影响,水汽来源复杂,降水时空分布极不均匀[16] [17]。区域内地质构造复杂,碳酸盐岩大面积出露,石漠化问题突出,生态环境脆弱,极端降水事件极易诱发山洪、滑坡、泥石流等次生地质灾害[18] [19]。

近年来,西南地区极端降水事件呈增多增强趋势,重大灾害性事件频发。2012 年四川“7·21”特大暴雨造成全省 19 个市(州)114 个县(市、区)受灾,直接经济损失超过 200 亿元[20];2020 年贵州“6·12”洪涝灾害导致全省 40 余万人受灾,农作物受灾面积达 2.4 万公顷[21];2021 年河南“7·20”极端暴雨事件虽然发生在华中地区,但其成灾机理与西南地区的地形抬升效应具有相似性[22]。这些极端事件的发生,凸显了深入研究西南地区极端降水演变规律的紧迫性和重要性。

当前,国内外学者对极端降水开展了大量研究。Alexander 等[23]基于 ETCCDI 指数分析了全球近 50 年极端降水变化趋势,发现世界各地的极端降水事件呈显著增加趋势;Moberg 等[24]研究表明自 20 世纪 50 年代以来欧洲中部和西部地区极端降水表现为增加趋势;杨金虎等[25]和王志福等[26]对中国年极端降水事件特征进行了研究,结果表明极端降水在长江中下游、华南、西北西部等地呈增加趋势,而在东北和华北等地呈减少趋势。针对西南地区,罗玉等[27]基于 1970~2010 年气象站资料研究表明强降水、降水强度及强降水比呈上升趋势;袁文德等[28]分析了 1962~2019 年西南地区极端降水事件的时空变化特征;李航等[29]研究了西南地区极端降水的概率分布特征,发现 Gamma 函数分布拟合效果最优。

然而,现有研究仍存在一些不足:一是部分研究时段较短,难以揭示极端降水的长期演变规律;二是使用的降水数据分辨率较低,难以精细刻画复杂地形区的降水空间分布特征;三是对极端降水未来趋势的研究相对薄弱。基于此,本研究利用最新发布的  $0.1^{\circ}$  高分辨率逐日降水格点数据集(CHM\_PRE V2),选取世界气象组织气候委员会推荐的 ETCCDI 极端降水指数,采用 Theil-Sen 斜率估计、Mann-Kendall 趋势检验及 Hurst 指数等方法,系统开展 1960~2023 年西南地区极端降水的时空演变特征研究,并基于 Hurst 指数分析其未来趋势,以期为区域水资源管理、极端气候事件风险评估及防灾减灾对策制定提供科学依据。

## 2. 数据与方法

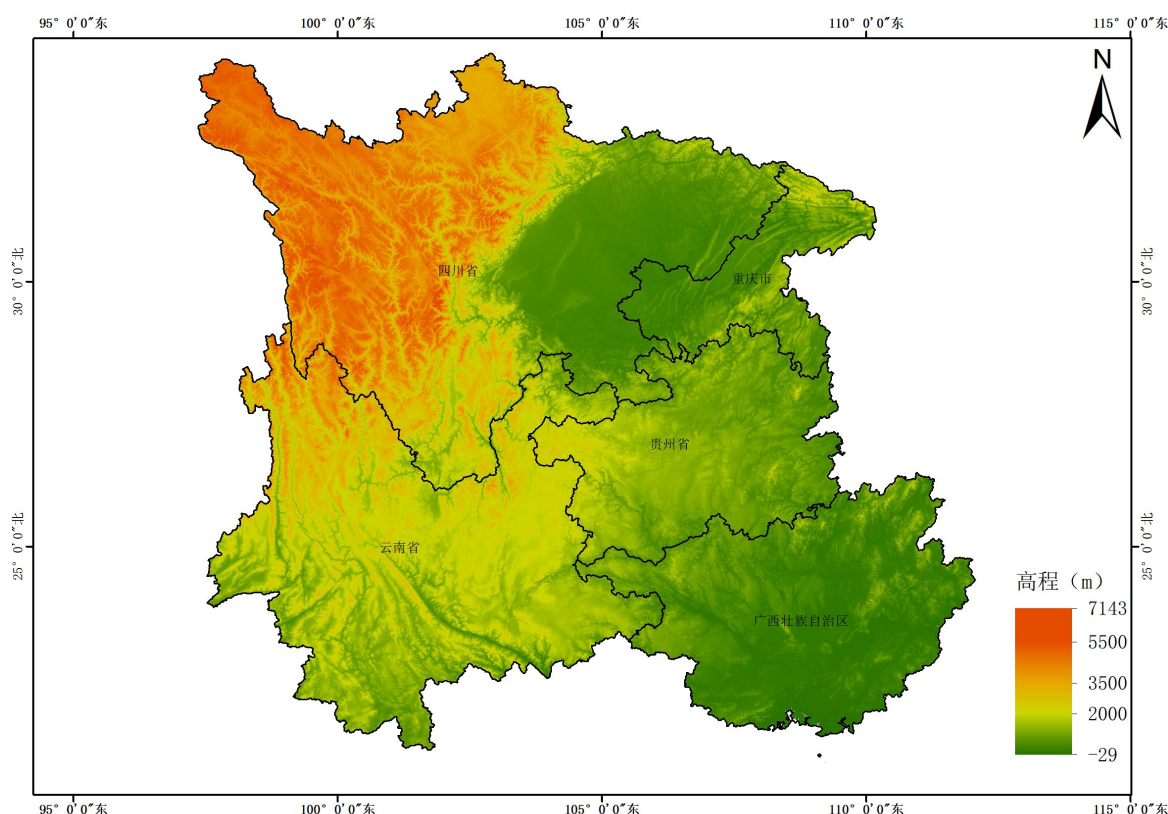
### 2.1. 研究区域

西南地区位于中国西南部,地理坐标为  $97^{\circ}21'\text{E}\sim 112^{\circ}04'\text{E}$ ,  $20^{\circ}54'\text{N}\sim 34^{\circ}19'\text{N}$ ,是中国七大自然地理分区之一。该区域涵盖广西壮族自治区、贵州省、云南省、重庆市、四川省五个省级行政区,总面积约 233.4 万  $\text{km}^2$ ,占中国陆地面积的 24.3% [14]。研究区东接华中与华南地区,南与越南、老挝、缅甸相邻,西靠青藏高原,北连青海、甘肃和陕西等省,是中国面向南亚、东南亚开放的重要门户。

西南地区地势由西北向东南降低,自然条件具有明显的过渡性。地貌类型丰富多样,跨越了横断山区、云贵高原、四川盆地和广西喀斯特丘陵山地等主要地貌单元[15]。横断山脉位于区域西部,山高谷深,地形起伏剧烈,海拔多在 3000 m 以上;云贵高原位于区域中南部,喀斯特地貌广布,地势西高东低,海拔 1000~2000 m;四川盆地位于区域东北部,是中国四大盆地之一,四周环山,盆地地势低平,海拔 300~700 m;广西丘

陵山地位于区域东南部，以喀斯特地貌为主，地势西北高东南低，海拔 200~1500 m，如图 1 所示。

西南地区气候类型多样，地处热带、亚热带季风气候区，受西南季风、东亚季风和高原季风的共同影响[16]。夏季普遍高温多雨，冬季相对温和干燥。年平均气温 8℃~22℃，年降水量 500~2000 mm，降水时空分布极不均匀，总体呈东南多、西北少的格局[17]。区域内植被类型丰富，从南向北依次分布有热带雨林、季雨林、亚热带常绿阔叶林、针阔混交林和高山草甸等。由于碳酸盐岩大面积出露，石漠化问题突出，生态环境脆弱，对气候变化和人类活动响应敏感[18][19]。



注：该图基于国家地理中心公共服务平台下载的审图号为：GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图无修改。

**Figure 1.** Topographic map showing elevation in the Southwest China (Unit: m)

**图 1.** 西南地区海拔高度地图(单位: m)

## 2.2. 数据来源

本文所使用的降水数据来自国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpc.ac.cn>)发布的中国逐日格点降水数据集 V2.0 (CHM\_PRE V2.0: An upgraded high-precision gridded precipitation dataset for the Chinese mainland considering spatial autocorrelation and covariates) [30]。该数据集由胡金龙等基于全国 2400 余个气象站点的逐日降水观测资料，采用考虑空间自相关和协变量的插值方法研制而成。数据集的空间分辨率为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ，时间分辨率为日尺度，时间跨度为 1960~2024 年，并提供了月值和年值产品。该数据集在构建过程中纳入了 11 个与降水相关的协变量(包括地形高度、坡度、坡向、纬度、经度、距海距离等)，能够较为准确地反映降水的空间分布特征。

根据评估结果，CHM\_PRE V2.0 数据集与站点观测数据的相关系数中位数为 0.78，均方根误差(RMSE)中位数为 8.8 mm/d，Kling-Gupta 效率系数(KGE)中位数为 0.69，表明该数据集在降水监测中具有较高的

准确性[30]。此外,与当前常用的降水数据集(如 CGDPA、CN05.1 和 CMA V2.0)相比,CHM\_PRE V2.0 数据集表现出良好的一致性,进一步验证了其在降水监测中的可靠性。本研究选取 1960~2023 年共 64 年的逐日降水数据进行分析。

## 2.3. 研究方法

### 2.3.1. 极端降水指数

为了定量评估研究区域内极端降水事件的时空演变特征,本研究选用世界气象组织气候委员会推荐的 ETCCDI 极端降水指数[31][32],并结合西南地区气候特征,选取了四个具有代表性的极端降水指数进行分析。这些指数涵盖了降水的强度、频率及持续性三个维度,能够全面反映极端降水的多维度特征(表 1)。

**Table 1.** The indexes and definitions of extreme precipitation

**表 1.** 极端降水指数及定义

| 维度    | 英文缩写   | 指数名称      | 指数定义                | 单位 |
|-------|--------|-----------|---------------------|----|
| 强度指标  | Rx1day | 最大 1 日降水量 | 年内单日最大降水量           | mm |
| 强度指标  | CDD    | 持续干燥日数    | 日降水量 < 1 mm 的最大持续日数 | d  |
| 频率指标  | R10    | 中雨日数      | 日降水量 ≥ 10 mm 的日数    | d  |
| 持续性指标 | CWD    | 持续湿润日数    | 日降水量 ≥ 1 mm 的最大持续日数 | d  |

### 2.3.2. Theil-Sen 斜率估计法

Theil-Sen 斜率估计方法是一种非参数统计的趋势计算方法,由 Theil 和 Sen 分别于 1950 年和 1968 年提出[33][34]。该方法计算效率高,对于测量误差和离群值数据不敏感,因此适用于长时间序列数据的趋势分析。对于时间序列  $x_i$ ,其 Sen 斜率估算公式如下:

$$\beta = \text{Median} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (1)$$

其中,  $\beta$  表示所有数据求得斜率的中值。当  $\beta > 0$  时,表示时间序列呈增加趋势;当  $\beta < 0$  时,表示时间序列呈减少趋势。Theil-Sen 方法对异常值不敏感,即使数据中存在高达 29% 的异常值,该方法仍能给出稳健的斜率估计[34]。

### 2.3.3. Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendall 检验法是世界气象组织(WMO)推荐并已广泛使用的非参数检验方法,被广泛应用于分析降水量、径流量等水文气象要素时间序列的趋势检验[35][36]。其优点是 unlimited 样本服从特定分布,同时对异常值不敏感,能够有效识别时间序列的整体突变特征与趋势变化。

对于具有  $n$  个样本量的时间序列  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 统计量  $S$  定义为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (2)$$

其中  $\text{sgn}$  为符号函数。 $S$  呈正态分布,均值为 0,方差公式为:

$$\frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^m \frac{t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18}}{18} \quad (3)$$

将  $S$  标准化后,得到标准正态分布变量  $Z$ ,计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

将 $|Z|$ 与给定显著性水平  $Z_{1-\alpha/2}$  比较(对应信度水平为  $\alpha$ )，若 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ ，则判定时间序列变化趋势显著；反之，则认为无显著趋势。

### 2.3.4. Hurst 指数

Hurst 指数( $H$ )由英国水文学家 Hurst 于 1951 年提出，用于分析尼罗河径流的时间序列特征[37]。该指数能够揭示时间序列中的趋势性成分，并能通过  $H$  值的大小来判断趋势性成分的持续性或者反持续性强度的大小。本研究采用重标极差(R/S)分析方法计算 Hurst 指数[38]。

根据  $H$  值的大小，可以判断该时间序列是完全随机或存在趋势性成分：(1)  $0 < H < 0.5$ ，表明时间序列具有长期的反持续性，即未来气候变化趋势与历史气候变化趋势存在显著差异，且  $H$  值越接近 0，反持续性越强；(2)  $H = 0.5$ ，表明时间序列趋于随机游走，各项气象要素之间独立，气候变化趋于随机；(3)  $0.5 < H < 1$ ，表明时间序列具有长期的正向持续性，即未来气候变化趋势与历史气候变化趋势一致性较高，且  $H$  越接近 1，持续性越强[37] [38]。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 极端降水指数的空间分布特征

#### 3.1.1. 极端降水指数气候态空间分布

1960~2023 年研究区域四个极端降水指数的气候态空间分布表现出明显的空间异质性，降水量整体呈现东南高、西北低的分布格局，与西南地区地形和季风影响的空间差异密切相关。

Rx1day 的空间分布显示，高值区主要集中在东南部，均值可达 160 mm 以上，其中四川盆地西南部、贵州东部和广西北部是 Rx1day 的高值中心；而西北部区域均值表现为较低水平，青藏高原东缘和川西高原大部分地区 Rx1day 低于 60 mm。这种分布格局主要受西南季风和东南季风的影响，东南部地区水汽充足，对流活动旺盛，易形成短时强降水。

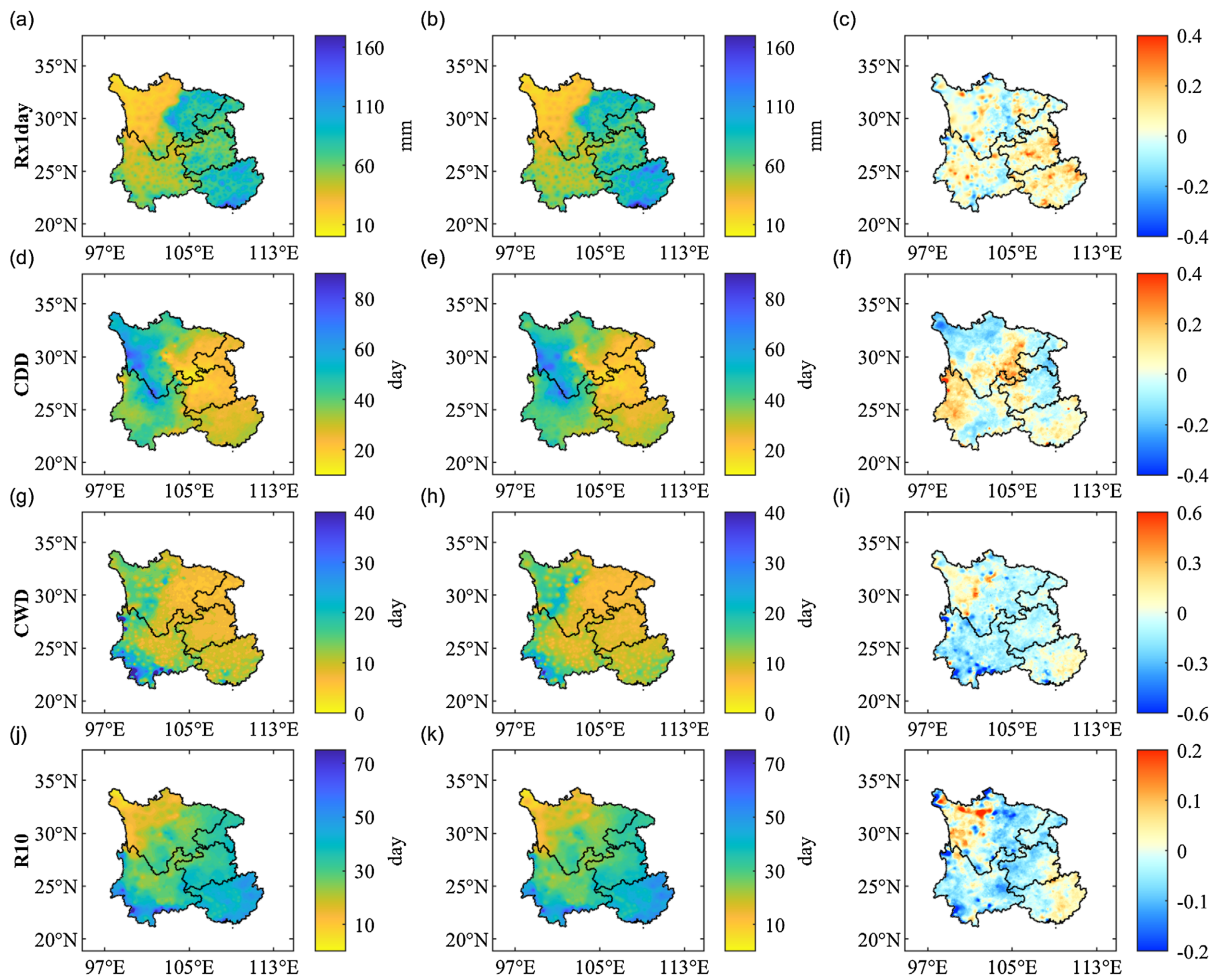
CDD 与 CWD 的变幅差异性显著，呈相反趋势。CDD 在区域内西北部均值较大，最大值超过 80 d，最小值约为 20 d，表明川西高原和横断山区干旱期较长；CWD 在区域东南部均值较大，最大值约为 40 d，而西北部最小值接近 0 d，反映了东南部降水过程持续时间较长、连续性较好的特征。

R10 均值自东南向西北呈递减趋势，东南部最大值可达 70 d，西北部则较少，部分高原地区年 R10 不足 10 d。这一分布特征与 Rx1day 基本一致，表明东南部不仅降水强度大，降水频率也较高。各指数在过渡带(约 25°N~30°N)的波动幅度较大，表明这些区域极端降水事件的年际变率更为剧烈，各指数气候态空间分布详见图 2。

#### 3.1.2. 极端降水指数趋势特征

研究区域极端降水指数 1960~2023 年的趋势空间分布显示，不同指数的变化趋势存在显著的空间差异。Rx1day 大部分地区无明显趋势变化且显著区域分散，其中显著上升的地区主要分布在北部部分区域，特别是四川盆地北部和重庆部分地区 Rx1day 呈显著增加趋势，倾向率最高在 0.3 mm/a 以上。

CDD 表现出显著上升趋势，其中显著性区域主要分布在西南地区中南部，倾向率最高达 0.8 d/a，



注：该图基于国家地理中心公共服务平台下载的审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作，底图无修改。

**Figure 2.** Climatological distribution and difference ratio of extreme precipitation indices

**图 2.** 极端降水指数的气候态分布及差异率

表明云南大部、贵州南部和广西北部干旱期延长趋势明显；而 CWD 表现显著下降趋势，显著性区域分布较为集中，特别是在西南部地区，倾向率低至 $-0.6 \text{ d/a}$ 。综合分析，西南地区集中降水短暂，且干湿交替更为频繁，“旱涝急转”特征明显。

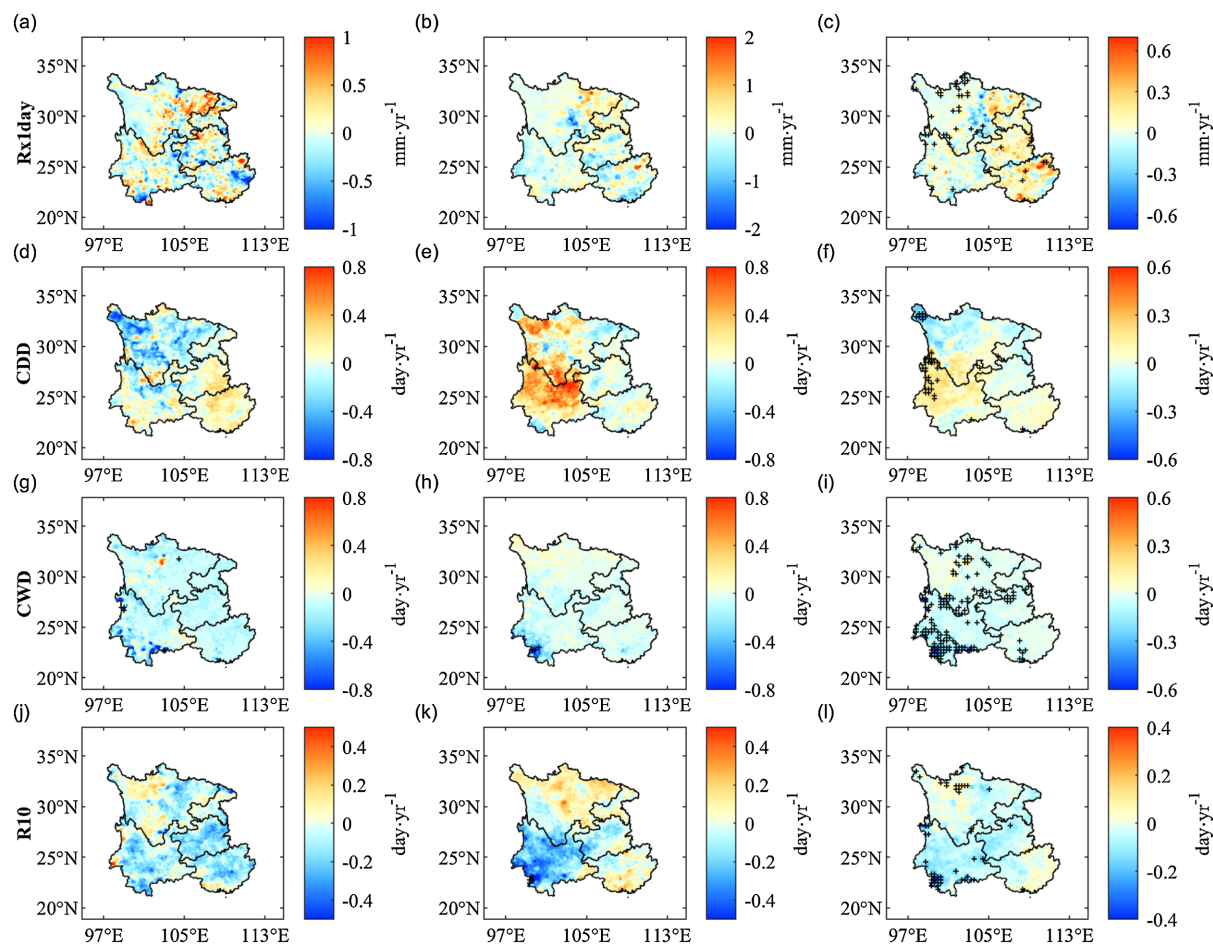
R10 变化趋势空间差异较大，北部有增加趋势，而南部呈现减少趋势，但大范围显著性区域较少。这种南北差异可能与区域气候背景的变化有关，北部地区受东亚季风影响增强，而南部地区受西南季风变异的影响更为显著。极端降水指数倾向率的空间分布特征如图 3 所示。

### 3.2. 极端降水指数时间变化特征

#### 3.2.1. 极端降水指数年际变化趋势检验

1960~2023 年各个极端降水指数年际时间变化及趋势分析表明，多个降水指数具有较强的年际变异性，但总体趋势特征明显。

Rx1day 呈现显著的上升趋势，倾向率为  $0.071 \text{ mm/a}$  ( $p < 0.05$ )，表明极端强降水强度在逐年增强。这一趋势与全球变暖背景下大气持水能力增强的物理机制相一致[39]。从年代际变化来看，Rx1day 在 20 世纪 90 年代后期至 21 世纪初达到峰值，之后有所回落，但 2010 年以来再次呈现上升态势。



注：该图基于国家地理中心公共服务平台下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图无修改。

**Figure 3.** Spatial distribution of trend slopes for extreme precipitation indices

**图 3.** 极端降水指数倾向率空间分布

CDD 呈现波动上升态势，倾向率为 0.043 d/a，虽然未通过 0.05 显著性水平检验，但结合空间分布可知，局部地区的干旱化趋势越来越显著。特别是在云南和贵州南部，CDD 的增加趋势明显，这与该区域近年来频繁出现的冬春连旱现象相吻合[21]。

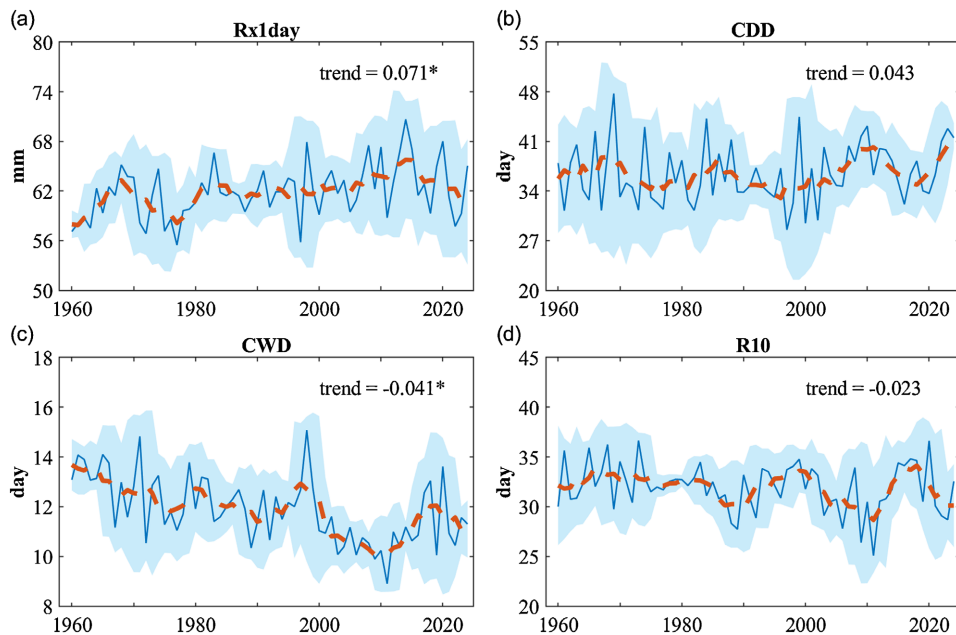
CWD 呈现显著的下降趋势，倾向率为  $-0.041 \text{ d/a}$  ( $p < 0.05$ )，说明连续降雨的过程正在变短。这一趋势与 CDD 的上升趋势相对应，共同反映了西南地区降水过程趋于“碎片化”的特征，即降水日数减少，但单次降水强度增加。

R10 呈现微弱的下降趋势 ( $-0.023 \text{ d/a}$ )，变化幅度较小，未通过显著性检验。综合以上分析可知，研究区域的降水强度整体上呈增加趋势，且降水过程趋于碎片化，这种“少雨但更强”的降水模式将增加极端降水事件的致灾风险。西南地区各个极端降水指数的年际变化及趋势检验结果见图 4。

### 3.2.2. 基于 Hurst 指数的极端降水未来持续性分析

为了进一步探究极端降水指数时间序列的长期依赖性，本文计算了各指数的 Hurst 指数(表 2)。所有指数的 Hurst 指数均显著大于 0.5 (介于 0.71~0.75 之间)，表明研究区域内极端降水事件的时间序列具有强持续性。

Rx1day 的 Hurst 指数为 0.7207，表明其增强趋势在未来仍可能持续，极端强降水风险将进一步累积。



**Figure 4.** Interannual variations and trend tests of extreme precipitation indices in the Southwest China  
**图 4.** 西南地区各个极端降水指数年际时间变化及趋势

**Table 2.** Hurst indexes of extreme precipitation in southwest China

**表 2.** 西南地区极端降水 Hurst 指数

| 指数     | 质量 Hurst 指数(H) |
|--------|----------------|
| Rx1day | 0.7207         |
| CDD    | 0.7132         |
| CWD    | 0.7528         |
| R10    | 0.7493         |

这意味着即使不考虑全球变暖的进一步加剧，仅基于历史变化的惯性，西南地区的极端强降水事件也将继续增多。CDD 的 Hurst 指数为 0.7132，其增加趋势也具有延续性，干旱期延长的问题或将加剧，对农业生产和生态环境的影响不容忽视。

CWD 和 R10 的 Hurst 指数分别为 0.7528 和 0.7493，虽然当前呈下降趋势，但由于  $H > 0.5$ ，这种“湿润日数减少”的状态也可能持续下去。这一结果从非线性动力学角度揭示了极端降水演变的内在稳定性——即使存在年际波动，其总体变化方向具有较强的惯性，不易发生逆转。

从区域对比来看，西南地区极端降水的 Hurst 指数(0.71~0.75)高于全国平均水平(0.66)[23]，也高于华南地区(0.49)[23]，表明西南地区极端降水的持续性更强，未来趋势更加确定。这一特征可能与西南地区的复杂地形和独特的环流背景有关，地形对降水的增幅作用使得极端降水一旦形成便具有较强的持续性。

#### 4. 讨论

本研究结果表明，1960~2023 年西南地区极端降水呈现“强度增强、历时缩短、旱涝急转”的显著特征，且未来趋势具有强持续性。这一特征的成因可以从热力作用和动力作用两个方面进行解释。

从热力作用来看，全球变暖导致大气持水能力增强，为极端降水提供了更充足的水汽条件。根据克劳修斯-克拉珀龙方程，气温每升高 1℃，大气持水能力约增加 7% [39]。西南地区 1960~2023 年平均气温

上升约 1.2℃, 大气持水能力相应增加约 8.4%。这意味着在相同的上升运动条件下, 可降水量增加, 从而导致降水强度增强。Rx1day 的显著上升趋势(0.071 mm/a)正是这一热力作用的直接体现。

从动力作用来看, 西南地区的复杂地形对极端降水的形成和增强具有重要作用[15][40]。横断山脉和云贵高原的地形抬升效应, 使得来自印度洋和南海的暖湿气流在爬升过程中冷却凝结, 形成地形雨。四川盆地的“喇叭口”地形, 使得偏南气流在盆地内辐合抬升, 易形成持续性暴雨。

水汽输送的变化也是影响西南地区极端降水的重要因素。邹用昌等[17]研究表明, 西南地区降水水汽主要来自西南季风区、西风带区、本地和东南季风区等四大源区, 其中西南季风区对西南地区降水的水汽贡献占支配地位。田立德等[41]基于稳定同位素分析揭示了怒江河谷作为印度季风水汽输送通道的重要作用。近年来, 受全球变暖影响, 南亚高压和西太平洋副热带高压的位置和强度发生变化, 导致西南季风水汽输送路径和强度发生改变, 进而影响西南地区的极端降水特征[42][43]。

## 参考文献

- [1] IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.
- [2] Trenberth, K. (2011) Changes in Precipitation with Climate Change. *Climate Research*, **47**, 123-138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>
- [3] Allan, R.P. and Soden, B.J. (2008) Atmospheric Warming and the Amplification of Precipitation Extremes. *Science*, **321**, 1481-1484. <https://doi.org/10.1126/science.1160787>
- [4] Fischer, E.M. and Knutti, R. (2016) Observed Heavy Precipitation Increase Confirms Theory and Early Models. *Nature Climate Change*, **6**, 986-991. <https://doi.org/10.1038/nclimate3110>
- [5] Pfleiderer, P., Schleussner, C., Kornhuber, K. and Coumou, D. (2019) Summer Weather Becomes More Persistent in a 2 °C World. *Nature Climate Change*, **9**, 666-671. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0555-0>
- [6] 张强, 张良, 崔显成, 等. 中国春季区域极端降水事件及其与前期海温的关系[J]. 气象学报, 2019, 77(4): 684-700.
- [7] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(2): 133-144.
- [8] 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端天气变化事件变化检测研究进展[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 337-353.
- [9] Zhai, P., Zhang, X., Wan, H. and Pan, X. (2005) Trends in Total Precipitation and Frequency of Daily Precipitation Extremes over China. *Journal of Climate*, **18**, 1096-1108. <https://doi.org/10.1175/jcli-3318.1>
- [10] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2023) [R]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [11] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2024) [R]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [12] 黄建平, 冉津江, 季明霞. 干旱半干旱区气候变化研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(1): 31-38.
- [13] 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告发布[J]. 中国应急管理, 2015(3): 63-63.
- [14] 郑度, 杨勤业, 刘燕华, 等. 中国的地理区划[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [15] 李吉均. 中国地貌格局与演变[J]. 地理研究, 1990, 9(3): 1-10.
- [16] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [17] 邹用昌, 李国平, 范广洲. 西南地区降水的水汽来源分析[J]. 大气科学学报, 2012, 35(2): 217-227.
- [18] Xiong, Y.J., Qiu, G.Y., Mo, D.K., Lin, H., Sun, H., Wang, Q.X., et al. (2009) Rocky Desertification and Its Causes in Karst Areas: A Case Study in Yongshun County, Hunan Province, China. *Environmental Geology*, **57**, 1481-1488. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1425-7>
- [19] 丁文荣. 西南地区极端降水的时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 1071-1079.
- [20] 四川省气象局. 四川省气候影响评价(2012年) [R]. 成都: 四川省气象局, 2012.
- [21] 贵州省气象局. 贵州省气候影响评价(2020年) [R]. 贵阳: 贵州省气象局, 2020.
- [22] 苏爱芳, 吕晓娜, 崔丽曼, 等. “21·7”河南极端暴雨过程的基本观测分析[J]. 气象, 2022, 48(1): 1-15.
- [23] Alexander, L.V., Zhang, X., Peterson, T.C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A.M.G., et al. (2006) Global Observed Changes in Daily Climate Extremes of Temperature and Precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **111**, D05109. <https://doi.org/10.1029/2005jd006290>

- [24] Moberg, A., Jones, P.D., Lister, D., Walther, A., Brunet, M., Jacobeit, J., *et al.* (2006) Indices for Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe Analyzed for the Period 1901-2000. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **111**, D22106. <https://doi.org/10.1029/2006jd007103>
- [25] 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 中国年极端降水事件的时空分布特征[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(1): 75-83.
- [26] 王志福, 钱永甫. 中国极端降水事件的频数和强度特征[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 1-9.
- [27] 罗玉, 范广洲, 华维, 等. 西南地区极端强降水变化趋势[J]. 气象科技, 2014, 42(3): 464-471.
- [28] 袁文德, 郑江坤, 董奎. 1962-2019年西南地区极端降水事件的时空变化特征[J]. 资源科学, 2019, 36(4): 766-772.
- [29] 李航, 杨啊丽, 贾志军. 西南地区极端降水时空变化及概率分布特征研究[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(8): 1023-1035.
- [30] 胡金龙, 张强, 李栋梁, 等. CHM\_PRE V2.0: 考虑空间自相关和协变量的中国大陆高精度格点降水数据集[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(5): 1023-1038.
- [31] Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G.C., Jones, P., Tank, A.K., Peterson, T.C., *et al.* (2011) Indices for Monitoring Changes in Extremes Based on Daily Temperature and Precipitation Data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **2**, 851-870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>
- [32] ETCCDI (2023) Climate Change Indices: Definitions. [http://etccdi.pacificclimate.org/list\\_27\\_indices.shtml](http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml)
- [33] Theil, H. (1950) A Rank-Invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*, **53**, 386-392.
- [34] Sen, P.K. (1968) Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, **63**, 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- [35] Mann, H.B. (1945) Nonparametric Tests against Trend. *Econometrica*, **13**, 245. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- [36] Kendall, M.G. (1975) Rank Correlation Methods. Griffin.
- [37] Hurst, H.E. (1951) Long-Term Storage Capacity of Reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **116**, 770-799. <https://doi.org/10.1061/taceat.0006518>
- [38] 李毅, 周慧, 李秦. 基于 R/S 分析的参考作物腾发量时间序列分形特征[J]. 节水灌溉, 2008(4): 5-8.
- [39] Held, I.M. and Soden, B.J. (2006) Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming. *Journal of Climate*, **19**, 5686-5699. <https://doi.org/10.1175/jcli3990.1>
- [40] 杨明鑫, 肖天贵, 李勇, 等. CMIP6 模式对我国西南地区夏季气候变化的模拟和预估[J]. 高原气象, 2022, 41(6): 1557-1571.
- [41] 田立德, 马鹏飞, 张伟, 等. 中国西南地区夏季早期大气水汽和降水中氧-18 与过量氘的滞后及其驱动机制[J]. 水文学报, 2024, 36(5): 678-689.
- [42] 黄荣辉, 陈际龙, 周连童, 等. 关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 1-15.
- [43] 丁一汇, 司东. 中国汛期降水的年代际变化与季风系统[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(4): 405-415.