

1960~2024年川渝地区极端降水变化特征分析

梅小艳¹, 罗依梦^{2*}, 祁诗童¹, 肖梓涵³, 刘显含⁴, 胡进⁵, 董怡¹, 肖祖国⁶, 任丽霞²

¹成都信息工程大学资源环境学院, 四川 成都

²射洪市气象局, 四川 遂宁

³成都信息工程大学光电工程学院(人工影响天气学院), 四川 成都

⁴垫江县气象局, 重庆

⁵青神县气象局, 四川 眉山

⁶定南县气象局, 江西 赣州

收稿日期: 2026年2月6日; 录用日期: 2026年3月6日; 发布日期: 2026年3月13日

摘要

本研究基于国家青藏高原科学数据中心CHM_PRE V2高分辨率格点降水数据集, 采用Theil-Sen斜率估计法、Mann-Kendall趋势检验法和Hurst指数, 系统分析了1960~2024年川渝地区8个极端降水指数的时空变化特征。结果表明: (1) 川渝地区极端降水空间分布呈显著区域差异, 四川盆地西部和东北部的极端降水强度与频率明显高于盆地东部及川西高原; 1991~2024年盆地西部极端降水呈增强趋势, 而盆地东部部分区域呈减弱趋势; (2) 1960~2024年间, 川渝地区极端降水总体呈增加趋势, Rx1day和Rx5day高值区集中于盆地西部和东北部, 最大值分别为122.43 mm和168.31 mm, 各极端降水指数在空间上呈现有升有降、趋势复杂的分布特征; (3) 极端降水变化具有明显的阶段性, Rx1day和SDII呈显著上升趋势, Prcptot、Rx5day、R10、R20、CWD、CDD均呈下降趋势, 1991~2024年各指数变化趋势较1960~1990年更为显著; (4) 川渝地区极端降水变化具有较强的持续性特征, 大部分极端降水指数的Hurst指数介于0.7~0.8之间, 时间序列记忆性较强, 未来极端降水事件可能继续呈增强态势。

关键词

极端降水, 川渝地区, 气候变化, Theil-Sen斜率, Mann-Kendall检验

Analysis of Extreme Precipitation Variation Characteristics in the Sichuan-Chongqing Region from 1960 to 2024

Xiaoyan Mei¹, Yimeng Luo^{2*}, Shitong Qi¹, Zihan Xiao³, Yuhan Liu⁴, Jin Hu⁵, Yi Dong¹, Ziguang Xiao⁶, Lixia Ren²

*通讯作者。

文章引用: 梅小艳, 罗依梦, 祁诗童, 肖梓涵, 刘显含, 胡进, 董怡, 肖祖国, 任丽霞. 1960~2024年川渝地区极端降水变化特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(2): 348-359. DOI: 10.12677/ccrl.2026.152040

¹College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

²Shehong Meteorological Bureau, Suining Sichuan

³College of Optoelectronic Engineering (College of Weather Modification), Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

⁴Dianjiang Meteorological Bureau, Chongqing

⁵Qingshen Meteorological Bureau, Meishan Sichuan

⁶Dingnan Meteorological Bureau, Ganzhou Jiangxi

Received: February 6, 2026; accepted: March 6, 2026; published: March 13, 2026

Abstract

Based on the CHM_PRE V2 high-resolution gridded precipitation dataset from the National Tibetan Plateau Data Center, this study employs the Theil-Sen slope estimator, Mann-Kendall trend test, and Hurst exponent to analyze the spatiotemporal variations of eight extreme precipitation indices in the Sichuan-Chongqing region during 1960~2024. The results indicate that: (1) Extreme precipitation exhibits significant spatial heterogeneity. Intensity and frequency are higher in the western and northeastern Sichuan Basin than in the eastern basin and western Sichuan Plateau. During 1991~2024, an increasing trend is observed in the western basin, while a decreasing trend appears in parts of the eastern basin. (2) Overall, extreme precipitation shows an increasing trend from 1960 to 2024. High-value areas of Rx1day and Rx5day are concentrated in the western and north-eastern basin, with maximum values of 122.43 mm and 168.31 mm, respectively. Spatial trends are complex, with both increases and decreases. (3) Phase changes are evident. Rx1day and SDII exhibit significant increasing trends, whereas Prcptot, Rx5day, R10, R20, CWD, and CDD show decreasing trends. Trends during 1991~2024 are more pronounced than those in 1960~1990. (4) Extreme precipitation variations demonstrate strong persistence, with Hurst indices mostly between 0.7 and 0.8, indicating high temporal memory and suggesting continued intensification in the future. This study provides a scientific basis for extreme precipitation risk assessment and disaster prevention in the Sichuan-Chongqing region.

Keywords

Extreme Precipitation, Sichuan-Chongqing Region, Climate Change, Theil-Sen Slope, Mann-Kendall Test

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

在全球气候变化加剧的背景下, 极端天气气候事件日益频发并表现出群发性、持续性等特点[1], 其对社会经济、生态环境及人类安全的威胁已成为国际关注的重点。IPCC 第六次评估报告明确指出, 全球气温已较工业化前升高 1.1℃, 气候系统不稳定性显著增强[1]。中国属于气候变化的敏感区, 《中国气候变化蓝皮书》数据显示极端天气事件发生强度与频率呈双增长趋势[2], 其中中国西南地区因其特殊地理环境成为气候变化研究的重点区域[3]。

川渝地区位于中国西南内陆地区, 地势起伏大, 地理环境复杂, 其南部与云贵高原接壤, 西部为青藏高原, 北部则被秦岭山脉环绕。特殊的地理位置使得川渝地区的气候同时受到东亚季风、印度季风以

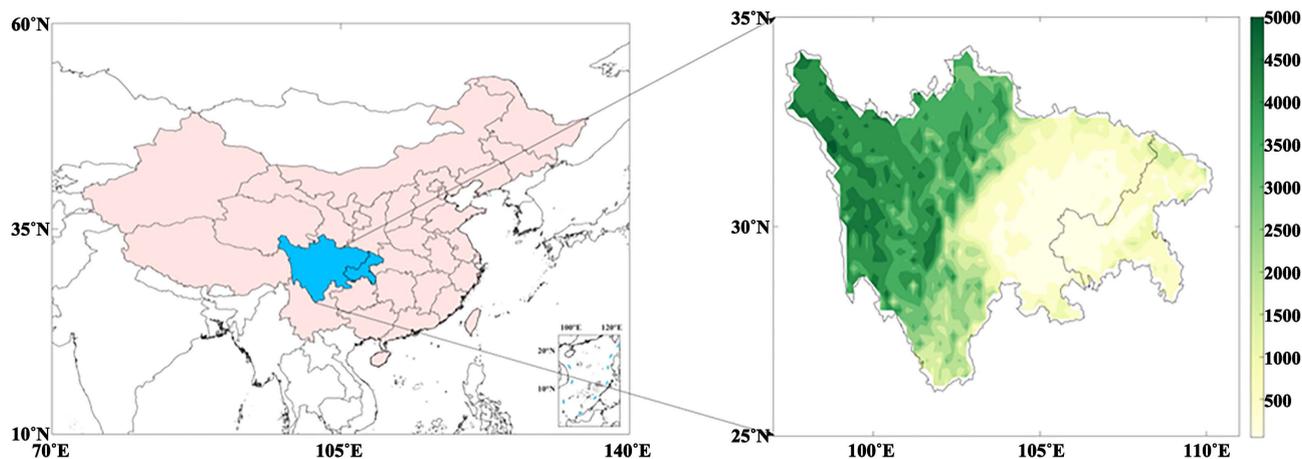
及青藏高原上气流系统的影响[4]。盛夏时节,四川盆地东部主要受西太平洋副热带高压控制,因而易出现高温干旱天气;而盆地西部则处于西太平洋副热带高压的边缘地带,属于降水量丰富的区域,常发生极端降水。此时盆地西部极端降水的频率与强度远高于东部[5]。

川渝地区的气候变化问题备受关注[4][6],其复杂性对经济与社会发展产生重大影响[7]。其地区的气候变化,尤其是极端降水的变化,具有显著的区域性与局部性特征[8]。在全球变暖背景下,该地区的水汽输送及相关气象要素将发生显著变化,进而导致极端降水出现异常[9]-[11]。而近年来的快速城市化发展对该区的极端气候事件造成了较多影响,使得暴雨洪涝灾害频发[12][13]。因此,有必要从区域角度研究极端降水气候变化的特征和趋势,这对于应对气候变化具有重要意义[14]。本研究分析了川渝地区极端降水的区域变化特征和趋势,为川渝地区极端降水的研究提供重要依据,并为理解区域对气候变化的响应机制带来新的认识。

2. 数据与方法

2.1. 研究区域

川渝地区(图 1)位于四川盆地及巫山山脉东部,涵盖四川省与重庆市,是“一带一路”倡议中的重要枢纽,同时也是长江上游地区的经济中心[15]。该地区东经范围为 97°21'至 110°11',北纬范围为 26°03'至 34°19',其面积约为 56.84 × 10⁴ 平方公里,地形呈西北高东南低的态势。川渝地区气候空间差异显著。东部以平原、丘陵为主,气候暖湿,夏季炎热、冬季温和,降水充沛,天气多云,日照较少,太阳辐射较弱;西部为高山高原区,气候干凉,夏季凉爽、冬季严寒,降水偏少且干湿季分明,日照充足,太阳辐射较强[16]。图 1 显示了川渝地区的海拔分布。



注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2923 号的标准地图制作,底图无修改。

Figure 1. Topographic map showing elevation in the Sichuan-Chongqing region (Unit: meters)

图 1. 川渝地区海拔高度地图(单位: m)

2.2. 数据来源

本文的降水资料来源于国家青藏高原科学数据中心的 CHM_PRE V2 数据集(<http://data.tpdc.ac.cn>),该降水数据集基于 1960 年至 2024 年期间中国及周边地区 3746 个气象站的每日观测数据制作而成,空间分辨率为 0.1° × 0.1° [17]。将 CHM_PRE V2 与 CHM_PRE V1、GSMaP、IMERG、PERSIANN-CDR 和 GLDAS 等五个主流格点降水数据集进行了全面对比。结果表明,CHM_PRE V2 在降水量估算精度上优于对比数

据集。其总体平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)和 Kling-Gupta Efficiency (KGE)分别达到 1.48 mm/day 和 0.79, 相较于 CHM_PRE V1, 精度分别提升了 12.84%和 12.86%。各验证站点 KGE 和相对标准偏差(Relative Standard Deviation, RSD)中位数分别达到 0.738 和 0.880, 相较于 CHM_PRE V1, 精度分别提升了 13.71%和 8.64% [17]。

2.3. 研究方法

2.3.1. Theil-Sen 斜率估计法

本研究采用 Theil-Sen Median 方法评价极端降水指数的演变趋势, 通过 Mann-Kendall 趋势分析法(MK 检验)判断变化趋势的显著性[18]。该方法通过计算时间序列中所有相邻数据点之间的斜率, 并对这些斜率进行统计处理, 可广泛应用于识别气象与水文等时间序列的线性趋势分析[19]。

对于时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n , Sens 斜率 β 的计算公式如下:

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

其中, $1 \leq i < j \leq n$, Median 表示取中位数操作。中位数的选取能够有效降低异常值对趋势估计的影响, 使得 β 更稳健地反映时间序列的整体趋势变化[20]。

在分析川渝地区极端降水时, Sen 斜率估计法可定量给出极端降水指数随时间的变化速率。若 $\beta > 0$, 表明极端降水指数呈上升趋势, 若 $\beta < 0$, 则表示呈下降趋势及相应下降速率, 与 MK 趋势检验结果相互补充, 共同揭示了川渝地区极端降水在长时间尺度上的变化趋势和变化速率。

2.3.2. Mann-Kendall 趋势分析法

Mann-Kendall 趋势分析法是世界气象组织推荐采用的一种非参数统计检验方法, 被广泛用于水文气象要素时间序列的趋势检验[21]。该方法结果可靠, 对数据分布形态无要求, 能有效揭示时间序列的突变点与整体趋势。

具体而言, 对于具有 n 个样本的时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 构造统计量:

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

其中, $\text{sgn}(x_j - x_i)$ 为符号函数:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{if } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{if } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

在零假设(即时间序列无趋势)下, S 的均值和方差可通过公式计算得到。通过标准化得到统计量 Z , 并与给定显著性水平下的临界值比较。在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下, 若 $|Z|$ 大于临界值 1.96, 则拒绝零假设, 判定时间序列存在显著趋势, 图中以打点表示; 反之, 则认为无显著趋势。

2.3.3. 极端降水指数

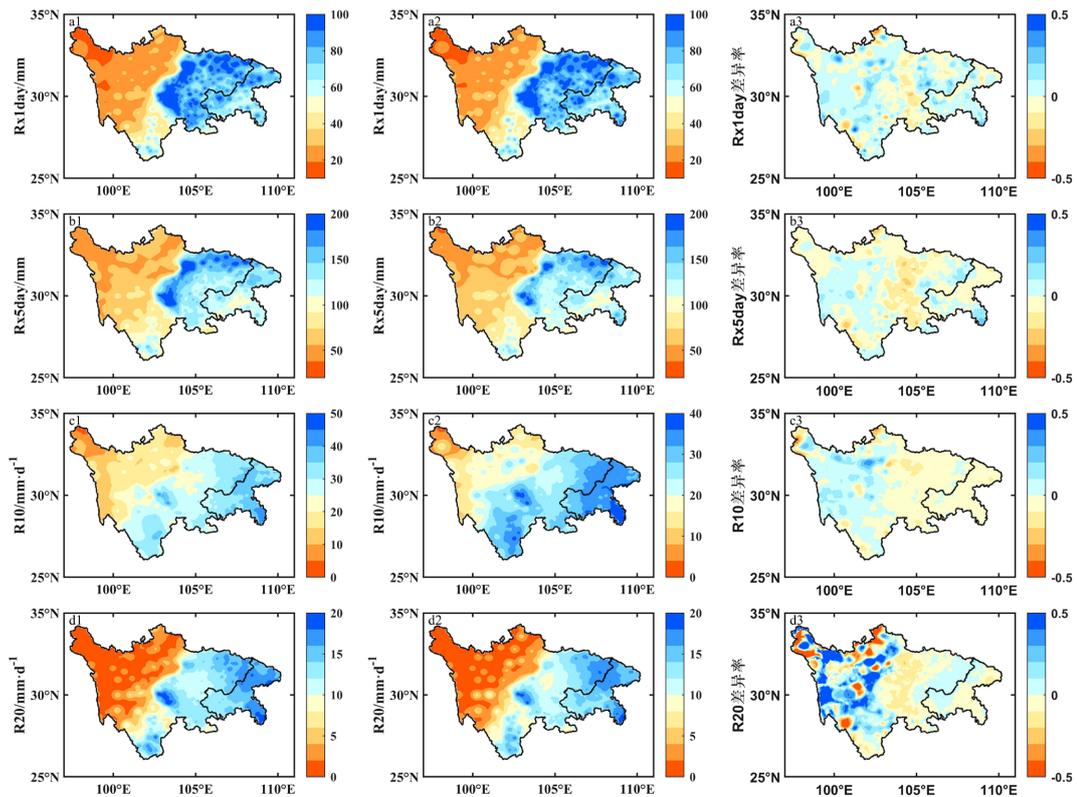
考虑到川渝地区的气候特征及自然地理环境, 并参考气候变化检测和指标专家组(ETCCDI)的定义, 本文选取了 8 个极端降水指数进行分析[22], 包括年降水总量(Prcptot)、最大 1 日降水量(Rx1day)、最大连续 5 日降水量(Rx5day)、中雨日数(R10)、大雨日数(R20)、持续湿润日数(CWD)、持续干燥日数(CDD)、日降水强度(SDII), 并将其分为强度、频率和持续性 3 种维度。8 个指数的相关定义见表 1。

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	Prcptot	年总降水量	年内降水量总和	mm
	Rx1day	最大 1 日降水量	年内单日最大降水量	mm
	Rx5day	最大连续 5 日降水量	年内连续五日最大降水量	mm
	SDII	日降水强度	年内降水量与降水日数的比值	mm/d
频率指标	R10	中雨日数	日降水量 ≥ 10 mm 的日数	d
	R20	大雨日数	日降水量 ≥ 20 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
	CDD	持续干燥日数	日降水量 < 1 mm 的最大持续日数	d

2.3.4. Hurst 指数

Hurst 指数是衡量时间序列长期相关性与趋势持续性的指标，通常采用重标极差法进行计算，其取值范围为 0 到 1。一般而言，Hurst 指数越接近 1，表明时间序列具有越强的持续性或长期记忆性，即历史趋势在未来更可能延续；Hurst 指数越接近 0.5，表明序列越接近随机游走，历史趋势预测价值较低；Hurst 指数越接近 0，则表明序列具有反持续性，即历史趋势在未来更可能发生逆转[23]。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2923 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 2. Climatological distribution and difference ratio of extreme precipitation indices (The first column represents the mean values for 1960~1990, the second column represents the mean values for 1991~2024, and the third column represents the difference ratio)

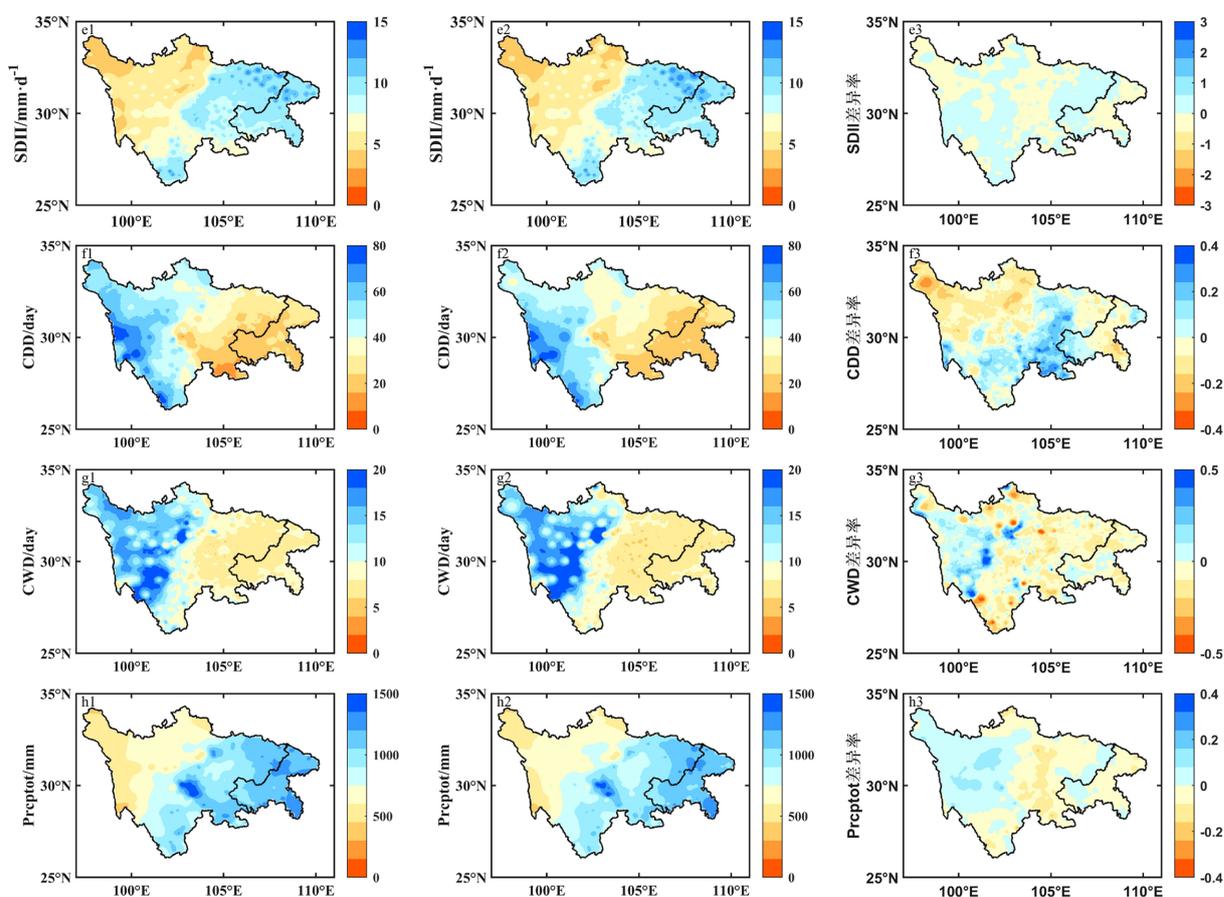
图 2. 极端降水指数的气候态分布及差异率(第一列为 1960~1990 年平均值，第二列为 1991~2024 年平均值，第三列为差异率)

3. 结果与分析

3.1 极端降水指数空间变化特征

3.1.1. 不同时期极端降水指数空间分布及差异率分析

图 2 和图 3 展示了川渝地区 8 个极端降水指数在 1960~1990 年和 1991~2024 年两个时期的气候态空间分布及其差异率。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2923 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 3. Climatological distribution and difference ratio of extreme precipitation indices (The first column represents the mean values for 1960~1990, the second column represents the mean values for 1991~2024, and the third column represents the difference ratio)

图 3. 极端降水指数的气候态分布及差异率(第一列为 1960~1990 年平均值, 第二列为 1991~2024 年平均值, 第三列为差异率)

从强度指标来看, Prectot 在四川盆地西部和东北部呈现高值区, 最高值达 1706.4 mm, 与川西高原形成明显对比, 最低值仅 343.58 mm, 这与川渝地区的地形分布特征密切相关。1991~2024 年相对于 1960~1990 年, 盆地西部 Prectot 有所增加, 而盆地东部部分地区略有减少。Rx1day 和 Rx5day 的空间分布与 Prectot 具有相似特征, 高值区主要集中在盆地西部和东北部, 最大值分别 122.43 mm 和 168.31 mm。SDII 的空间分布与 Prectot 类似, 四川盆地西部和北部的 SDII 呈增加趋势。分析极端降水的差异率(图 2(a3), 图 2(b3), 图 3(h3)), 其中 Prectot 在川西高原增长显著。

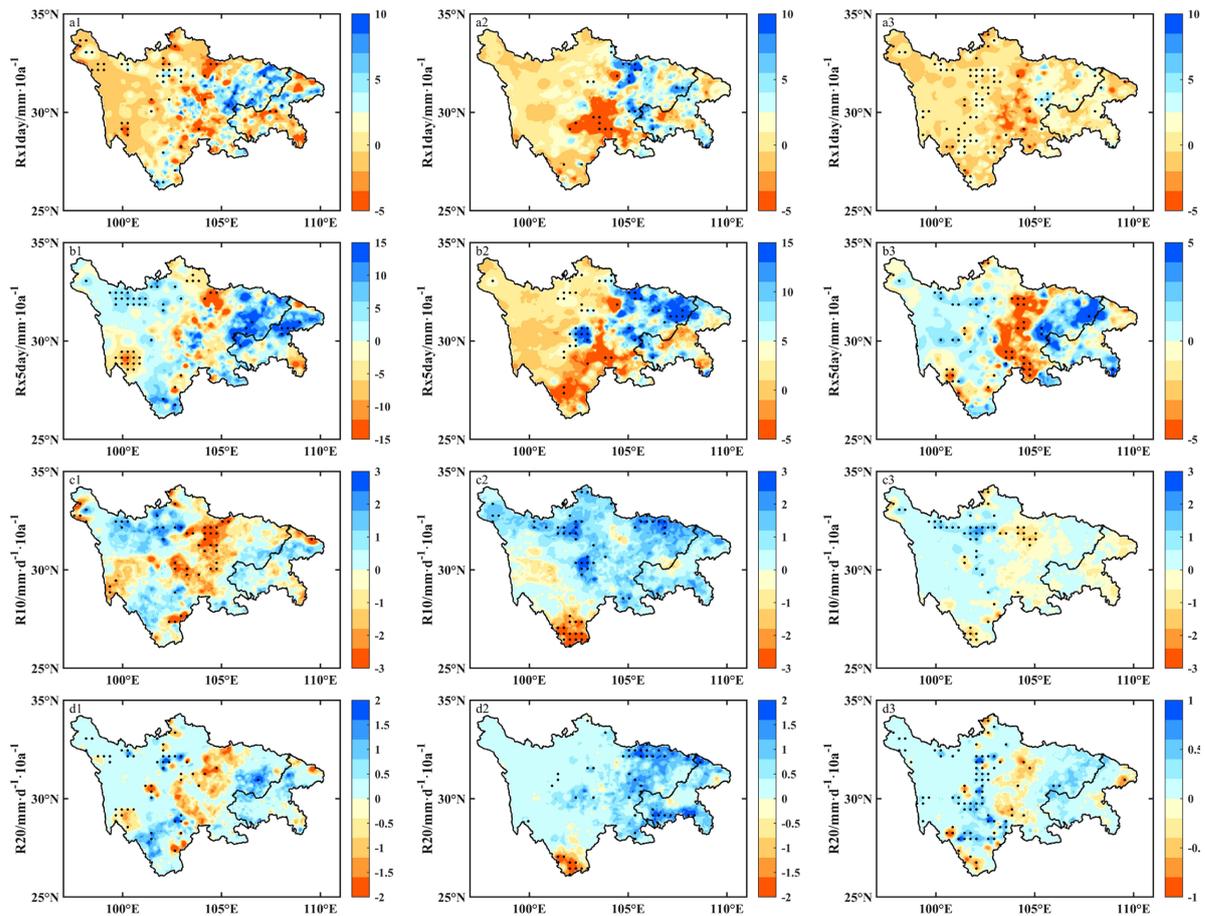
从频率指标来看, R10 和 R20 的空间分布呈现明显的东高西低格局。四川盆地东部和东北部的 R10

和 R20 的值明显高于西部高原地区, 最大值分别可达 44.6 d 和 21.06 d, 这与盆地东部的季风气候特征相符。分析极端降水的差异率(图 2(c3), 图 2(d3))显示, 川西高原和四川盆地东部 R10 和 R20 呈上升趋势。

从持续性指标来看, CWD 在川西高原南部较高, 最大值为 23.07 d, 在四川盆地较低, 持续在 7d 左右, 而 CDD 在川西高原西南部较高, 最大值为 80.53 d, 在四川盆地较低, 持续在 20d 左右。分析差异率(图 3(f3), 图 3(g3))表明, 四川盆地部分区域 CWD 有所增加, 而 CDD 在部分区域呈下降趋势, 说明该区域湿润期延长、干旱期缩短的趋势。

3.1.2. 极端降水指数趋势特征

图 4 和图 5 展示了川渝地区极端降水指数在 1960~1990 年、1991~2024 年和 1960~2024 年三个时段的倾向率空间分布。黑色圆点表示通过了 0.05 显著性检验的区域。



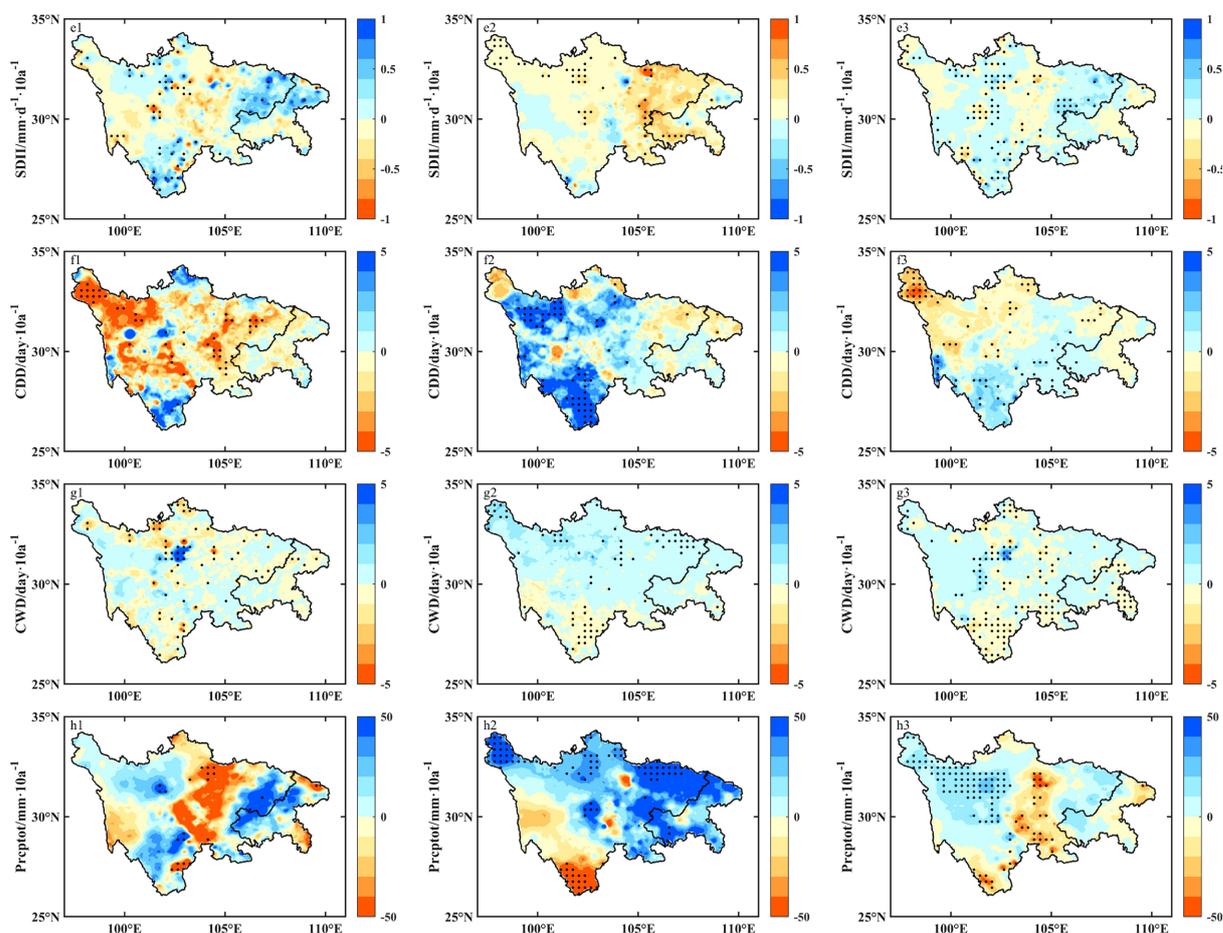
注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2923 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 4. Spatial distribution of trend slopes for extreme precipitation indices (The first column represents trend slopes for 1960~1990, the second column represents trend slopes for 1991~2024, and the third column represents trend slopes for 1960~2024; black dots indicate regions passing the 0.05 significance test)

图 4. 极端降水指数倾向率空间分布(第一列为 1960~1990 年倾向率, 第二列为 1991~2024 年倾向率, 第三列为 1960~2024 年倾向率; 黑色圆点表示通过了 0.05 的显著性检验)

从全时段(1960~2024 年)来看, 川渝地区大部分区域的 Preptot、Rx1day、Rx5day 和 SDII 呈上升趋势, 其中四川盆地西部和北部的上升趋势较为显著。R10 和 R20 在四川盆地西部呈增加趋势, 且通过显

著性检验。CWD 在大部分区域呈增加趋势，其中川西高原南部和盆地西部呈增加趋势，CDD 在大部分区域呈减少趋势，在盆地南部部分地区呈上升趋势。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2923 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 5. Spatial distribution of trend slopes for extreme precipitation indices (The first column represents trend slopes for 1960~1990, the second column represents trend slopes for 1991~2024, and the third column represents trend slopes for 1960~2024; black dots indicate regions passing the 0.05 significance test)

图 5. 极端降水指数倾向率空间分布(第一列为 1960~1990 年倾向率, 第二列为 1991~2024 年倾向率, 第三列为 1960~2024 年倾向率; 黑色圆点表示通过了 0.05 的显著性检验)

分时段分析表明, 1991~2024 年期间极端降水的变化趋势比 1960~1990 年更为显著。在 1991~2024 年期间, 盆地西部的 Preptot、Rx1day、Rx5day、SDII、R10、R20 和 CWD 的上升趋势更加突出, 且通过显著性检验的区域明显增多。相比之下, 1960~1990 年期间各指数的变化趋势相对较弱, 显著性检验通过的区域较少。

从空间分布来看, 盆地西部和北部是极端降水变化最为显著的区域, 这可能与该区域的地形特征和季风影响有关。盆地西部处于青藏高原东缘, 地形抬升作用使得该区域更容易受到西南季风的影响, 在全球变暖背景下, 水汽输送增强导致极端降水事件频发。

3.2. 极端降水指数时间变化特征

图 6 和图 7 展示了川渝地区 8 个极端降水指数在 1960~2024 年间的年际变化序列及线性趋势。

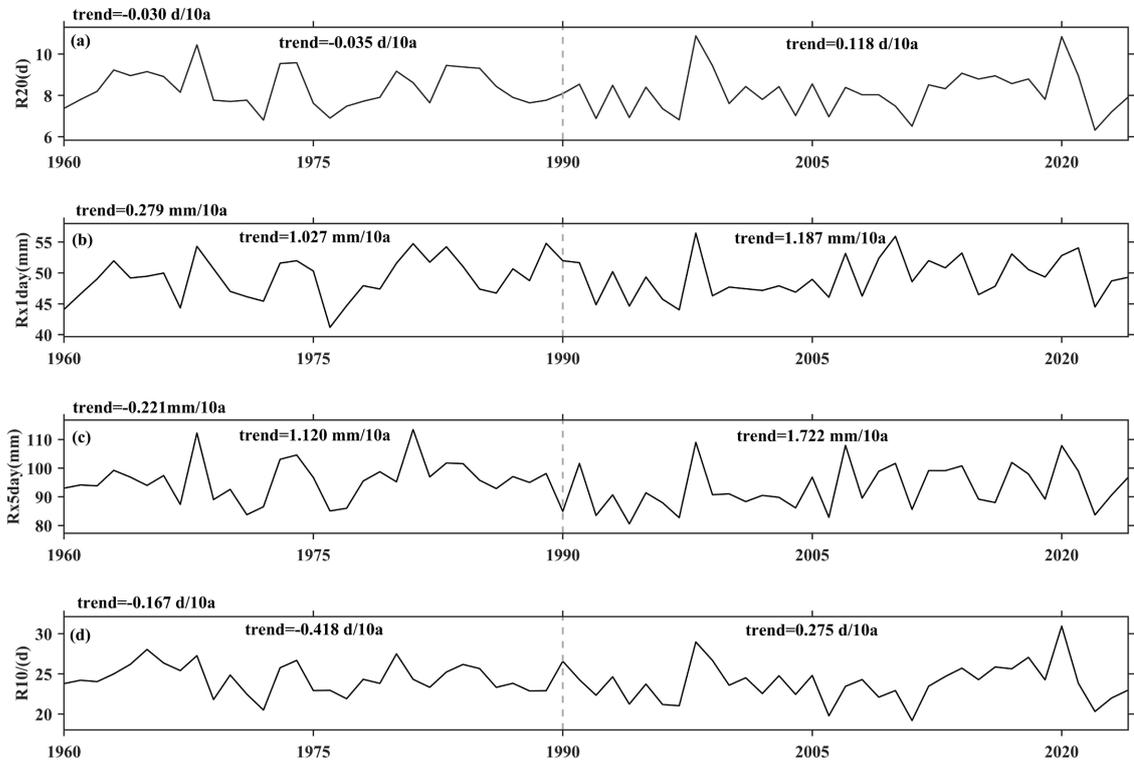


Figure 6. Interannual variations and trend tests of extreme precipitation indices in the Sichuan-Chongqing region
图 6. 川渝地区极端降水指数年际时间变化及趋势检验

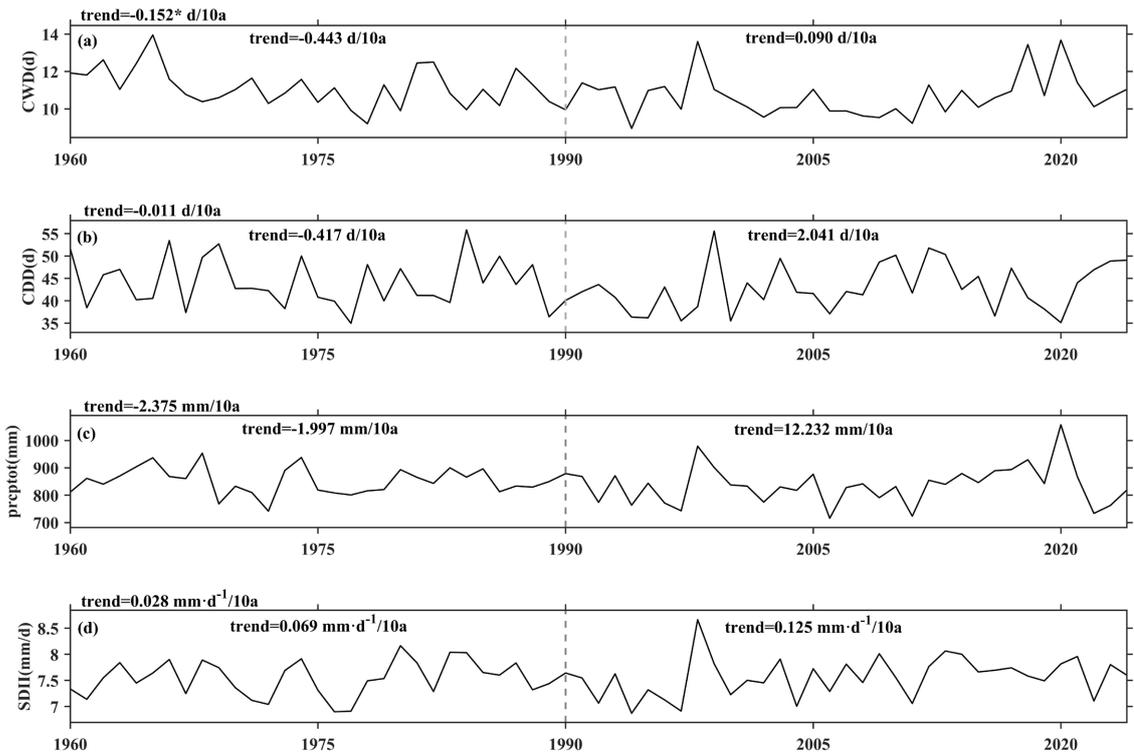


Figure 7. Interannual variations and trend tests of extreme precipitation indices in the Sichuan-Chongqing region
图 7. 川渝地区极端降水指数年际时间变化及趋势检验

从强度指标来看, Prcptot 在 1960~2024 年间呈下降趋势, 线性趋势约为 $-2.36 \text{ mm}/10 \text{ a}$, 其中 1990~2024 年间呈上升趋势为 $12.232 \text{ mm}/10 \text{ a}$, 其中 2020 年出现 1057.69 mm 的最大值。Rx1day 和 Rx5day 在 1960~2024 年间波动较大, 其中 Rx1day 的上升速率约为 $0.28 \text{ mm}/10 \text{ a}$, Rx5day 的下降速率约为 $-0.21 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。SDII 在 1960~2024 年间波动较小, 呈缓慢上升趋势为 $0.028 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}/10 \text{ a}$ 。

从频率指标来看, R10 和 R20 在 1960~2024 年间呈波动下降趋势。R10 的下降速率约为 $-0.17 \text{ d}/10 \text{ a}$, R20 的下降速率约为 $-0.03 \text{ d}/10 \text{ a}$, 表明中雨和大雨的发生频率低幅度减小。值得注意的是, R10 和 R20 在 2020 年分别出现 30.94 d 和 10.84 d 的高值。

从持续性指标来看, CWD 呈下降趋势, 下降速率约为 $-0.152 \text{ d}/10 \text{ a}$, 且通过了显著性检验, CDD 呈下降趋势, 下降速率约为 $-0.01 \text{ d}/10 \text{ a}$ 说明湿润期和干旱期的持续时间均有所缩短。综上可知, 川渝地区降水未来朝着短时、集中爆发的趋势发展。

3.3. Hurst 指数分析

Hurst 指数分析结果对于预测未来极端降水变化具有重要意义。见表 2, R20、R10、Rx1day、Rx5day、CWD、CDD、Prcptot、SDII 各极端降水指数的 Hurst 指数分别为 0.75、0.80、0.79、0.76、0.82、0.72、0.78、0.79, 均接近 1, 这表明未来川渝地区极端降水强度变化趋势具有持续性, 趋于短时、集中爆发的情况。

Table 2. Hurst indexes of extreme precipitation of the Sichuan-Chongqing region
表 2. 川渝地区极端降水 Hurst 指数

极端降水指数	Hurst
R20	0.7538
Rx1day	0.7867
Rx5day	0.7634
R10	0.8062
CWD	0.8279
CDD	0.7238
Prcptot	0.7840
SDII	0.7875

4. 结论

本文基于 CHM_PRE V2 高分辨率格点降水数据集, 采用 Theil-Sen 斜率估计法、Mann-Kendall 趋势检验法和 Hurst 指数, 系统分析了 1960~2024 年川渝地区 8 个极端降水指数的时空变化特征, 主要结论如下:

(1) 川渝地区极端降水在空间分布上呈现显著的区域差异。四川盆地西部和东北部的极端降水强度、频率明显高于盆地东部和川西高原。1991~2024 年相对于 1960~1990 年, 盆地西部的极端降水强度呈增强趋势, 而盆地东部部分区域的极端降水呈减弱趋势。

(2) 从时间变化来看, 1960~2024 年间川渝地区极端降水总体呈增加趋势。Rx1day 和 Rx5day 的空间分布与 Prcptot 具有相似特征, 高值区主要集中在盆地西部和东北部, 最大值分别 122.43 mm 和 168.31 mm 。各降水指数整体在不同区域呈现有升有降、变化趋势复杂或具阶段性的发展态势。

(3) 极端降水的变化具有明显的阶段性特征。1960~2024 年间, Rx1day 和 SDII 呈显著上升趋势, 上

升速率分别为 0.28 mm/10 a、0.028 mm·d⁻¹/10 a。Prcptot、Rx5day、R10、R20、CWD、CDD 均呈下降趋势, 1991~2024 年期间各极端降水指数的变化趋势比 1960~1990 年更为显著, 这与 1990 年代以来全球变暖加速的时间节点相吻合。

(4) Hurst 指数分析表明, 川渝地区极端降水变化具有较强的持续性特征。大部分极端降水指数的 Hurst 指数介于 0.7~0.8 之间。可知该地区极端降水现象在时间上具备较强的连贯性与持续性。

基金项目

成都信息工程大学大学生创新创业训练计划项目(X202410621016)。

参考文献

- [1] 朱展鹏, 李忠木. 1959-2015 年云南省极端气候指数的时空变化特征分析[J]. 大理大学学报, 2023, 8(6): 52-60.
- [2] 王蕾, 张百超, 石英, 等. IPCCAR6 报告关于气候变化影响和风险主要结论的解读[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(4): 389-394.
- [3] 王昊. 西南地区极端气候指数时空变化及其对 NDVI 的影响特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [4] Qi, D., Li, Y., Zhou, C. and Chen, D. (2022) Climatic Change of Summer Rainstorms and the Water Vapor Budget in the Sichuan Basin. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **61**, 537-557. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-21-0100.1>
- [5] Zhu, Y. and Yu, R. (2003) Interannual Variation of Summer Precipitation in the West of Sichuan Basin and Its Relationship with Large-Scale Circulation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, **27**, 1045-1056.
- [6] 林文青, 陈活泼, 徐慧文, 等. 西南地区未来极端降水增加将导致其人口暴露风险加剧[J]. 大气科学学报, 2023, 46(4): 499-516.
- [7] Dong, X., Wu, Y., Huang, A., et al. (2023) Analysis of Diurnal Variation Characteristics of Summer Extreme Precipitation in Sichuan and Chongqing. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, **47**, 259-272.
- [8] 姚颖, 李谢辉, 王磊, 等. CMIP6 不同气候变化情景下川渝地区暴雨洪涝灾害风险未来预估[J]. 高原气象, 2025, 44(4): 943-960.
- [9] 冯安兰, 张强, 宋金帛, 等. 基于 CMIP6 的黄河流域极端降水时空特征分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2024, 60(2): 270-284.
- [10] Tabari, H. (2020) Climate Change Impact on Flood and Extreme Precipitation Increases with Water Availability. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 13768. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>
- [11] 王会军, 孙建奇, 陈活泼, 等. 全球变暖加速和气候极端化——2024 年中国气候研究重大进展速评[J]. 大气科学学报, 2025, 48(01): 1-7.
- [12] 郭蕾, 李谢辉, 刘雨亭. 城市化对川渝地区极端气候事件的影响[J]. 应用气象学报, 2023, 34(5): 574-585.
- [13] 杨静坤, 李谢辉, 雷沁雅, 等. 四川省极端气温事件与城镇化发展的关联影响[J]. 干旱气象, 2024, 42(5): 744-754.
- [14] 刘子堂, 李谢辉, 杨静坤. 四川盆地极端降水事件时空变化特征及未来趋势分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2022, 37(4): 456-463.
- [15] 徐新妍, 袁淑杰, 刘芷含, 等. 川西北生态示范区及周边地区极端气温指数时空变化分布特征[J]. 高原气象, 2025, 44(5): 1301-1315.
- [16] Yin, Z., Li, W., Chen, Z., Zhu, L. and Shui, P. (2024) Urban Vulnerability under the Extreme High Temperatures in the Chengdu-Chongqing Area, Western China. *Sustainability*, **16**, Article 4749. <https://doi.org/10.3390/su16114749>
- [17] Hu, J., Miao, C., Su, J., Zhang, Q., Gou, J. and Sun, Q. (2025) An Upgraded High-Precision Gridded Precipitation Dataset for the Chinese Mainland Considering Spatial Autocorrelation and Covariates. *Earth System Science Data*, **17**, 3987-4004. <https://doi.org/10.5194/essd-17-3987-2025>
- [18] 雷茜, 胡忠文, 王敬哲, 等. 1985-2015 年中国不同生态系统 NDVI 时空变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(15): 6378-6391.
- [19] 王远宁, 吴灏, 王盼盼, 等. 1960-2017 年江淮地区降水的时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 236-244+255.

-
- [20] 李加顺, 赵伟华, 刘丽, 等. 1960-2020 年滇中地区极端降水指标时空演变规律研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 1-14.
- [21] 陈中平, 徐强. Mann-Kendall 检验法分析降水量时程变化特征[J]. 科技通报, 2016, 32(6): 47-50.
- [22] 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. *WIREs Climate Change*, **2**, 851-870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>
- [23] 刘瞳, 黄河清, 闫慧敏, 等. 北方农牧交错区降水过程的持续性特征与干旱发生趋势[J]. 资源科学, 2012, 34(5): 940-947.