

1965~2024年新疆地区极端降水变化特征分析

王自翔¹, 李 辉², 肖祖国^{3*}, 王玲娟⁴, 敖敏图雅⁴, 高派薇⁵

¹成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

²乌鲁木齐市气象局, 新疆 乌鲁木齐

³定南县气象局, 江西 赣州

⁴兰州资源环境职业技术大学气象学院, 甘肃 兰州

⁵昌吉州气象局, 新疆 昌吉

收稿日期: 2026年3月9日; 录用日期: 2026年4月23日; 发布日期: 2026年4月30日

摘 要

基于国家气象科学数据中心CHM_PRE数据集1965~2024年逐日降水资料, 选取ETCCDI定义的8个极端降水指数, 采用Mann-Kendall检验、Sen斜率估计法和Hurst指数等方法, 系统分析了新疆地区极端降水事件的时空变化特征及其未来趋势。结果表明: (1) 新疆极端降水空间分布呈“北疆 > 南疆、山区 > 盆地”格局, 天山山区、伊犁河谷及北疆西部为极端降水高值区, 1995~2024年天山以南地区出现大范围降水增加; (2) 1965~2024年间, 新疆地区PRCPTOT、Rx1day、Rx5day、SDII、R10、R20和CWD均呈上升趋势, CDD呈下降趋势, 其中PRCPTOT上升趋势最为显著(5.27 mm/10a), CDD下降趋势显著(-0.233 d/10a); (3) 分时段对比显示, 1995~2024年期间各极端降水指数变化幅度与显著性均远超1965~1994年, 表明天山北坡、伊犁河谷及南疆西部为极端降水变化最显著的核心区域; (4) Hurst指数分析表明, R10、CWD和PRCPTOT的H值分别为0.66、0.86和0.71, 预示未来新疆地区降水天数上升趋势将持续, 整体呈现湿润化趋势, 但CDD的H值为0.74, 表明部分地区干旱化情况趋势将持续。(5) 2020~2024年极端降水呈现增速加快、幅度增大的突变式增强特征, 南疆西部成为新增显著增湿区, 对长期趋势形成显著强化与局部调整。本研究可为新疆地区水资源管理与灾害防治提供科学依据。

关键词

极端降水, ETCCDI指数, Mann-Kendall检验, Hurst指数, 新疆

Analysis of Extreme Precipitation Changes in Xinjiang Region from 1965 to 2024

Zixiang Wang¹, Hui Li², Zuguo Xiao^{3*}, Lingjuan Wang⁴, Mintuoya Ao⁴, Paiwei Gao⁵

¹College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

²Dingnan County Meteorological Bureau, Ganzhou Jiangxi

³School of Meteorology, Lanzhou Institute of Resources and Environment Technology University, Lanzhou Gansu

文章引用: 王自翔, 李辉, 肖祖国, 王玲娟, 敖敏图雅, 高派薇. 1965~2024年新疆地区极端降水变化特征分析[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(4): 645-659. DOI: 10.12677/ag.2026.164059

⁴School of Meteorology, Lanzhou University of Resources and Environment, Lanzhou Gansu

⁵Changji Meteorological Bureau, Changji Xinjiang

Received: March 9, 2026; accepted: April 23, 2026; published: April 30, 2026

Abstract

Based on the daily precipitation data of the CHM_PRE dataset from 1965 to 2024 provided by the National Meteorological Science Data Center, eight extreme precipitation indices defined by ETCCDI were selected. Using methods such as the Mann-Kendall test, Sen slope estimation method, and Hurst index, a systematic analysis was conducted on the temporal and spatial variation characteristics and future trends of extreme precipitation events in Xinjiang. The results show: (1) The spatial distribution of extreme precipitation in Xinjiang follows the pattern of “North Xinjiang > South Xinjiang, mountainous areas > basins”, with the Tianshan mountainous area, the Ili River valley, and the western part of North Xinjiang being the high-value areas of extreme precipitation, and a large-scale increase in precipitation appeared south of the Tianshan Mountains from 1995 to 2024; (2) From 1965 to 2024, PRCPTOT, Rx1day, Rx5day, SDII, R10, R20, and CWD all showed an upward trend. Among them, the upward trend of PRCPTOT was the most significant (5.27 mm/10a), and the downward trend of CDD was significant (-0.233 d/10a); (3) Comparisons by time periods indicate that the changes and significance of each extreme precipitation index during 1995~2024 exceeded those from 1965~1994, suggesting that the northern slope of Tianshan Mountains, the Ili River valley, and the western part of South Xinjiang are the core areas with the most significant changes in extreme precipitation; (4) The H values of R10, CWD, and PRCPTOT are 0.66, 0.86, and 0.71 respectively, indicating that the upward trends of moderate rain days, consecutive wet days, and total precipitation will continue in the future, showing a trend of wetting, but the H value of CDD is 0.74, indicates that the trend of drought in some marginal areas will continue. (5) Extreme precipitation from 2020 to 2024 showed a sudden enhancement with accelerated growth rate and increased amplitude, and the western part of South Xinjiang became a new significant humidification area, which significantly strengthened and locally adjusted the long-term trend. This study can provide scientific basis for water resource management and disaster prevention in Xinjiang.

Keywords

Extreme Precipitation, ETCCDI Index, Mann-Kendall Test, Hurst Index, Xinjiang

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

自第二次工业革命(19世纪中期至1914年)以来,全球气温急剧上升,气候变暖成为一种对人类社会产生强烈影响的全球现象,尤其在近几十年来变得格外明显[1]。IPCC第六次评估报告(AR6)明确指出,全球平均地表温度在2011~2020年相比1850~1900年上升了约1.09℃,且人类活动对气候系统的影响已是毋庸置疑的事实[2]。在全球变暖背景下,全球水循环加剧,极端降水事件的频率、强度和持续时间均呈现显著增加趋势[3]-[5],这一趋势预计将在未来气候变暖的情景下持续增长[6]。极端降水作为影响最大的极端事件之一,在不同地区不同程度地影响着自然环境和人类社会[7][8],它会引发洪水、导致粮食减产、扰乱交

通服务, 从而影响人类健康[9]。《中国气候变化蓝皮书(2024)》指出, 2023 年全球和中国的气温均创下新高, 同时极端天气事件频发, 因此, 迫切需要深入研究极端降水事件的历史特征和未来趋势[10]。

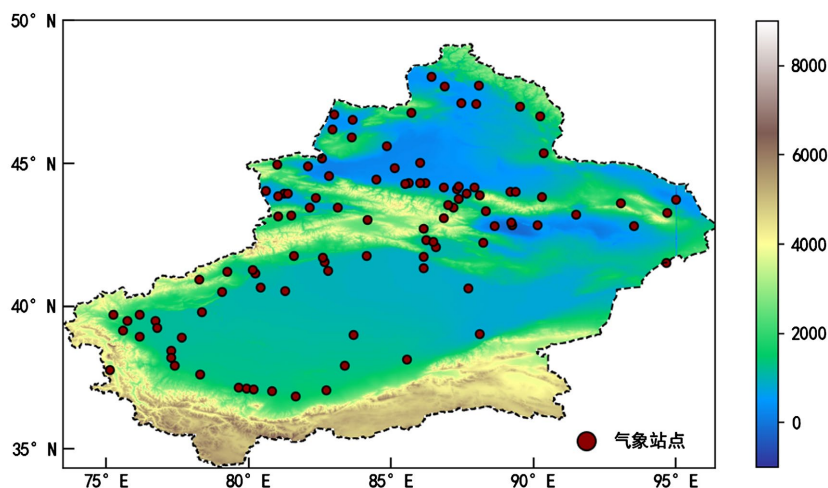
中国西北地区深居亚欧大陆腹地, 是典型的干旱半干旱气候区, 降水稀少且空间分布极不均匀[11]。新疆维吾尔自治区作为中国面积最大的省级行政区, 其降水时空分布具有显著的“北疆 > 南疆、山区 > 盆地”格局特征[12]。极端降水事件在该区域具有双重效应: 一方面, 它是区域水资源的重要补给来源, 对维持干旱区生态平衡具有重要意义; 另一方面, 极端降水也是引发山洪、泥石流等地质灾害的关键因素, 对区域防灾减灾构成严峻挑战[13] [14]。

国内外学者对新疆地区极端降水事件已开展了大量研究工作。杨莲梅[15]研究发现, 新疆极端降水空间上天山山区极端降水贡献率最高(41.9%), 1961 年以来极端降水整体呈上升趋势, 1980 年出现气候突变。李剑锋等[16]研究表明, 伊犁河谷、阿尔泰山及天山中段是极端降水高发区, 且短日数频次减少、长日数降水量增加, 极端化特征凸显。近年来, 陈亚宁团队[17] [18]基于地理探测器模型研究发现, 海表面温度异常是导致西北干旱区极端降水增加的主要因素, 大西洋、印度洋和太平洋的温度异常引发了一系列环流异常, 增强了向中国西北地区的水汽输送。然而, 已有研究多集中于 1961~2020 年期间, 对最新时段(2020~2024 年)极端降水变化特征关注不足, 且对极端降水未来持续性的预测研究相对薄弱。

基于此, 本文利用国家气象科学数据中心最新发布的 CHM_PRE V2 数据集(1965~2024 年), 从气候变化探测与指数专家组(ETCCDI/CRD)提出的 27 个气候指数中选取 8 个极端降水指数, 采用 Mann-Kendall 非参数检验、Sen 斜率估计法和 Hurst 指数等方法, 系统分析新疆地区极端降水事件的时空变化特征, 并预测其未来变化趋势。本研究的主要目的是: (1) 分析新疆地区极端降水事件的空间分布格局及变化趋势; (2) 利用 Sen 斜率和 Mann-Kendall 检验量化极端降水事件的统计显著性; (3) 采用 Hurst 指数预测新疆地区未来极端降水时间变化趋势, (4) 揭示 2020~2024 年最新时段极端降水对长期趋势的强化与调整作用, 为新疆地区水资源优化管理、洪涝灾害预警及生态保护策略制定提供科学依据。

2. 数据与方法

2.1. 研究区域



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 1. Topographic map showing elevation in Xinjiang region (Unit: meters)

图 1. 新疆地区海拔高度地图(单位: m)

新疆维吾尔自治区位于中国西北部(73.3°~96.2°E, 34.4°~49.1°N), 总面积 166 万平方公里, 占中国国土面积的六分之一。地势呈现“三山夹两盆”的独特格局: 北部为阿尔泰山, 南部为昆仑山及喀喇昆仑山, 天山横亘中部将其划分为北疆与南疆, 北部为准噶尔盆地, 南部为塔里木盆地[19]。见图 1, 该地区属典型温带大陆性气候, 北疆以中温带半干旱-干旱气候为主, 南疆为暖温带干旱-极端干旱气候, 昆仑山区兼具高原气候特征。降水空间分异极为显著, 全区多年平均降水量约 140 mm, 北疆降水显著多于南疆, 其中北疆西部及山区降水充沛, 南疆塔克拉玛干沙漠地区年降水量不足 100 mm, 为极端干旱核心区[20]。

2.2. 数据来源

本文中的实测降水资料来源于国家气象科学数据中心的 CHM_PRE V2 数据集(<-URL->), 其空间覆盖完整、质量控制严格、缺测率低。该数据集基于 1965 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, 采用知识引导的机器学习插值方法, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间序列为 1965~2024 年(共 60 a), 满足气候趋势检验的样本要求, 可与国内主流研究时段衔接, 保证结果可比性。该数据集在中国区域与站点观测结果高度一致, 系统偏差接近于 0, 对站点降水过程还原准确[21]。逐日资料使用前进行数据质量控制、异常值处理和缺测值插补。

本文选取 ETCCDI 定义的与极端降水紧密相关的 8 个极端降水指数来分析极端降水变化特征[22][23], 这些指数可分为极端降水量指数、极端降水日数指数和极端降水强度指数三大类, 具体定义见表 1。选取年际尺度来研究新疆地区极端降水的变化, 从而综合反映极端降水的时空变化特征。

Table 1. Definition of ETCCDI extreme precipitation index

表 1. ETCCDI 极端降水指数定义

维度	英文缩写	指数名称	指数定义	单位
极端降水量指数	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
极端降水强度指数	SDII	日降水强度	年内降水量与降水日数的比值	mm/d
极端降水日数指数	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
	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. 研究方法

2.3.1. Sen 斜率估计法和 Mann-Kendall 检验

本研究采用 Theil-Sen 中位斜率估计方法[24]分析极端降水事件的时间序列变化趋势, 采用 Mann-Kendall (M-K)方法确定趋势的显著性。这是一种非参数统计检验方法, 其主要优点是不要求趋势是线性的, 也不要求数据服从正态分布, 且不受缺失值和异常值的影响[25]。

假设平稳序列 $X_t (t = 1, 2, \dots, n)$, 序列长度为 n 。S 统计量定义为:

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

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{if } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{if } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

当 $n \geq 10$ 时, 统计量近似服从正态分布, 其平均值为 $E(S) = 0$, 方差为

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n-5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i-5)}{18} \quad (3)$$

式中: t 为任意给定结点的范围, 当 $n > 10$ 时, Z_c 收敛于标准正态分布, 并通过下式计算:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{[\text{Var}(S)]^{\frac{1}{2}}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{[\text{Var}(S)]^{\frac{1}{2}}}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

双边的趋势检验中, 在给定的 α 置信水平上, 若 $|Z_c| \geq Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$, 拒绝原假设 H_0 , 即在 α 置信水平上, 时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。 Z_c 为正值时表示增加趋势, 负值表示减少趋势。 $\pm Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ 为标准正态分布的 $(1-\alpha/2)$ 分位数, α 为检验的置信水平。在 $|Z_c| \geq 1.64$ 、1.96、2.58 时则表示分别通过了置信度 $\alpha = 0.1$ 、0.05、0.01 的显著性检验。变化趋势的大小可用 Kendall 倾斜度 β 来表示, 其计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left[\frac{x_i - x_j}{i - j} \right], \forall j < i, 1 < j < i < n \quad (5)$$

其中 x_i 和 x_j 是时间序列中第 i 和第 j 个观测值 ($i < j$), 分母为时间间隔, 该方法不依赖数据服从正态分布, 对异常值不敏感, 通过中位数消除极端值影响, 结果稳健, 同时反映了时间序列的趋势方向和强度, 其符号表示趋势方向, 正值表示变量随时间呈上升趋势, 负值表示变量随时间呈下降趋势, 结合 Mann-Kendall 检验, 绝对值大小反映出趋势的显著程度, 绝对值越大趋势越明显, 接近 0 的值表示趋势微弱或无明显趋势[26]。

2.3.2. Hurst 指数

Hurst 指数用于在气象研究中定量表征时间序列的持续性和长期相关性[27]。见表 2, 当 $0 < H < 0.5$ 时, 时间序列未来变化趋势与过去相反, 且 H 值越接近 0, 反持续性越强; 当 $0.5 < H < 1$ 时, 时间序列未来变化趋势与过去一致, H 值越接近 1, 持续性越强; 当 $H = 0.5$ 时, 时间序列为随机序列, 其前后变化无关。本研究采用重标极差(R/S)分析法计算 Hurst 指数, 该方法在水文气象时间序列长期持续性研究中应用广泛[28]。

Table 2. Hurst index persistence level classification
表 2. Hurst 指数持续性等级划分

等级	H 取值范围	持续性强度	等级	H 取值范围	持续性强度
1	$0.50 < H \leq 0.55$	很弱	-1	$0.45 \leq H < 0.50$	很弱
2	$0.55 < H \leq 0.65$	较弱	-2	$0.35 \leq H < 0.45$	较弱
3	$0.65 < H \leq 0.75$	较强	-3	$0.25 \leq H < 0.35$	较强

续表

4	$0.75 < H \leq 0.80$	强	-4	$0.20 \leq H < 0.25$	强
5	$0.80 < H \leq 1.00$	很强	-5	$0 \leq H < 0.20$	很强

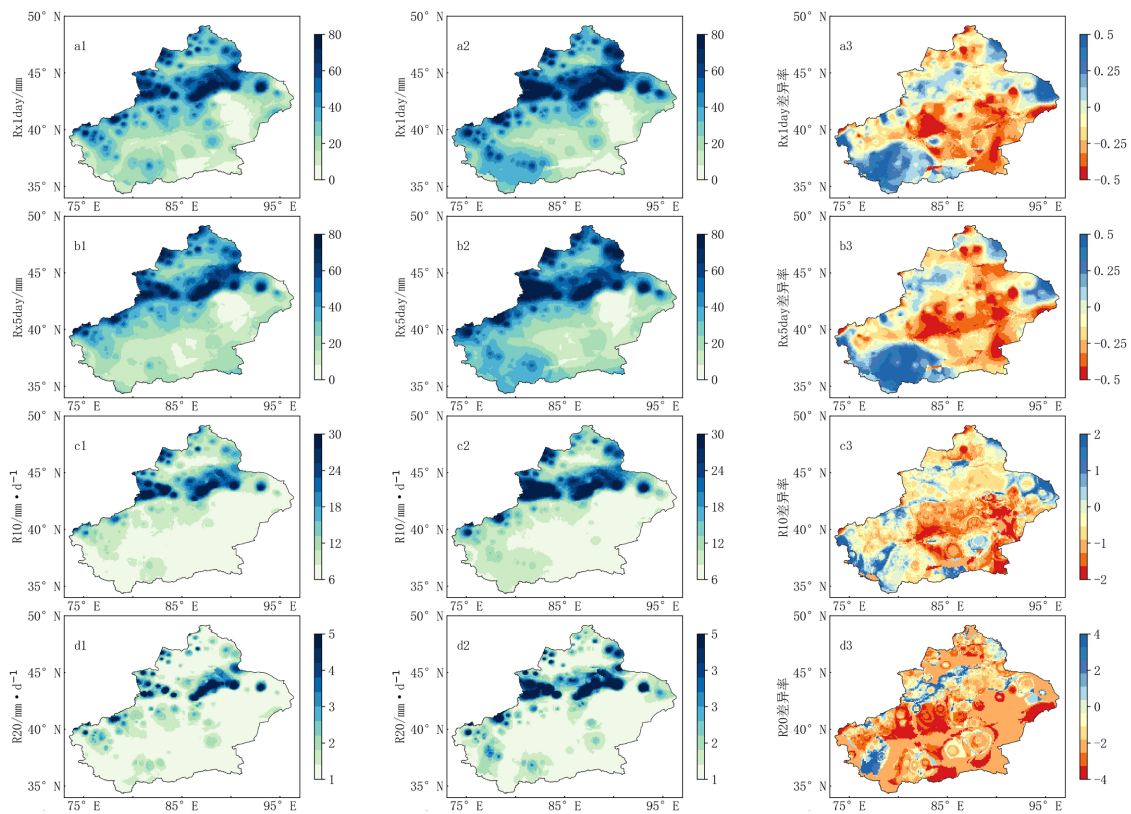
3. 结果与分析

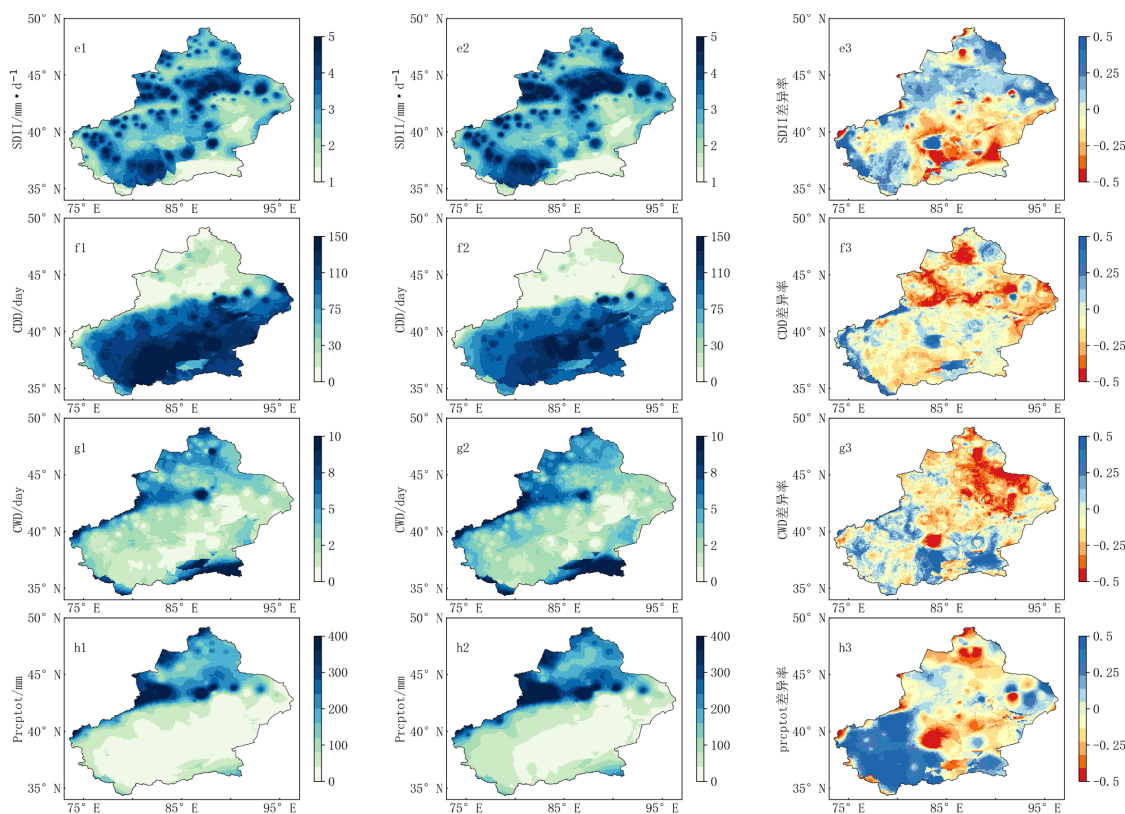
3.1. 极端降水指数空间变化特征

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 展示了新疆地区 8 个极端降水指数在 1965~1994 年与 1995~2024 年两个 30 年时期的气候态空间分布及其差异率。从强度指标来看, PRCPTOT 高值区主要集中在新疆西部、北部山区, 最高值达 3855.2 mm, 与南疆盆地、东部戈壁荒漠区形成显著低值对比, 最低值为 0 mm。结合差异率可见, PRCPTOT 在新疆西部、北部山区增长显著。Rx1day 和 Rx5day 的空间分布与 PRCPTOT 具有相似特征, 但是 1995~2024 年相对于 1965~1994 年在天山以南地区出现大范围的降水增加, 最高达 70%, 北部地区准噶尔盆地降水减少最大达 30%。1995~2024 年相对 1965~1994 年, SDII 在天山以及昆仑山一带呈增加趋势。

从频率指标来看, R10、R20 空间分布呈明显的北高南低、西高东低格局, 降水频率整体较少, 北疆西部、北部山区的 R10、R20 明显高于南疆盆地与东部区域, 与新疆西风环流降水特征相符。依据差异率, R10、R20 在北疆大部及西部山区呈上升趋势, 小部分地区降水成倍数增长。从持续性指标来看, CWD 高值区位于新疆西北部山区的边缘, 盆地地区 CWD 偏低; CDD 高值区集中在南疆盆地与东部荒漠区, 山区 CDD 整体偏低。结合差异率表明, 新疆北部、西部山区 CWD 有所增加, CDD 在部分区域呈下降趋势, 说明该区域湿润期延长、干早期缩短的变化趋势。





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。

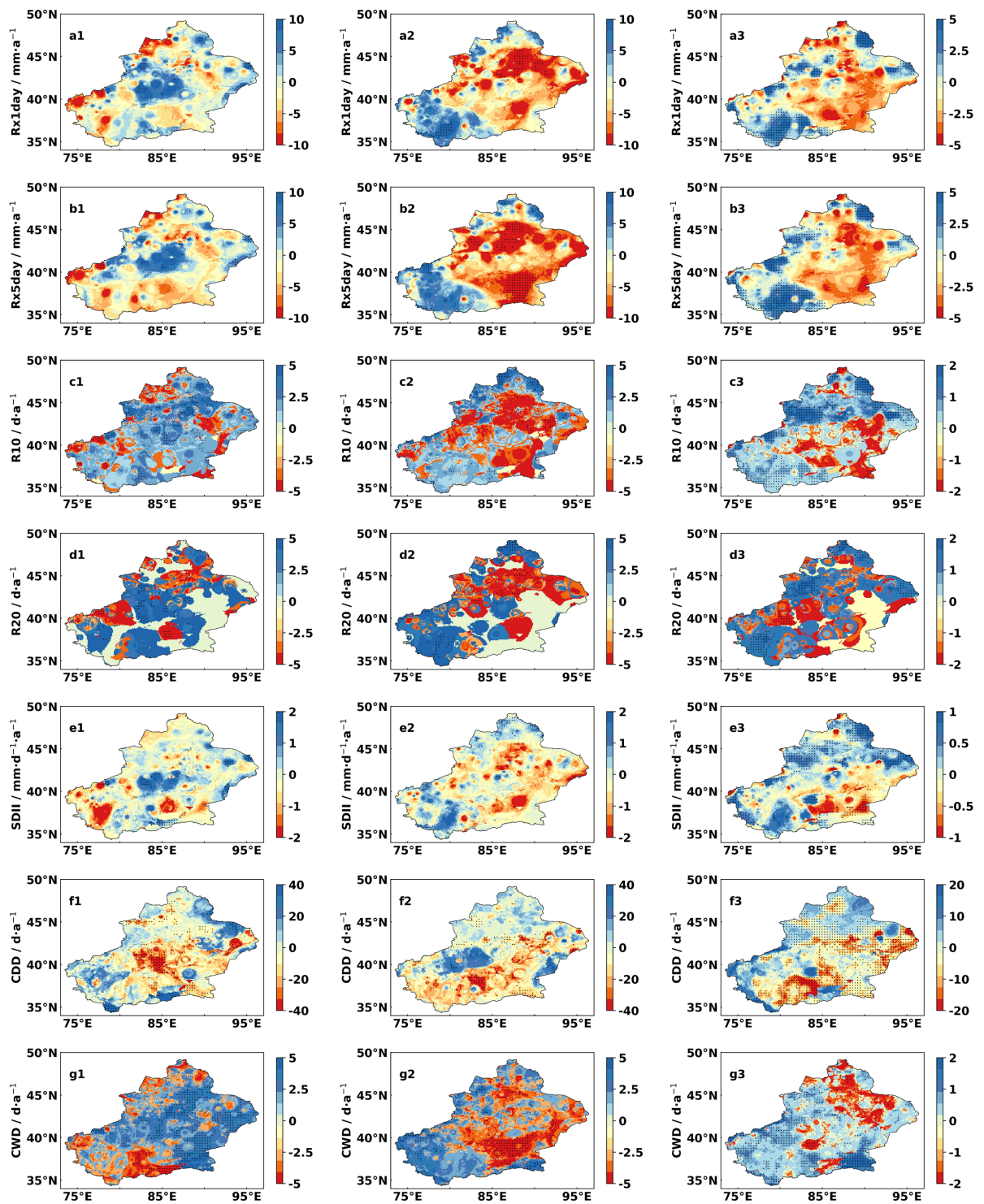
Figure 2. Climatological distribution and difference ratio of extreme precipitation indices (The first column represents the mean values for 1965~1994, the second column represents the mean values for 1995~2024, and the third column represents the difference ratio)

图 2. 极端降水指数的气候态分布及差异率(第一列为 1965~1994 年平均值，第二列为 1995~2024 年平均值，第三列为差异率)

3.1.2. 极端降水指数趋势特征

图 3 呈现了新疆地区极端降水指数在 1965~1994 年与 1995~2024 年两个 30 年时期的倾向率空间分布特征，图中黑色圆点代表通过 0.05 显著性检验的区域。从全时段(1965~2024 年)来看，新疆极端降水指数的变化趋势具有显著的区域分异特征。Rx1day、Rx5day、SDII、CWD 及 PRCPTOT 在新疆大部分区域呈上升趋势，其中天山北坡、伊犁河谷及南疆西部为核心显著上升区，该区域黑色圆点密集分布，趋势性通过显著性检验。R10 和 R20 的变化趋势集中体现为局地性增强，天山北坡与伊犁河谷地区呈显著增加趋势，且均通过 0.05 显著性检验。CDD 的变化趋势与上述湿润指数呈反向特征，北疆大部地区呈减少趋势，南疆盆地南部部分区域则表现为上升趋势，形成“北减南增”的空间格局。

分时段对比分析显示，新疆极端降水的变化趋势存在明显的年代际差异，1995~2024 年期间的变化幅度与显著性均远超 1965~1994 年。在 1995~2024 年时段，天山北坡、伊犁河谷及南疆西部的 PRCPTOT、Rx1day、Rx5day、SDII、R10、R20 和 CWD 上升趋势进一步凸显，数值增幅显著高于前期，且通过 0.05 显著性检验的区域范围大幅扩张，覆盖了上述区域的核心地带。而 1965~1994 年时段，各极端降水指数的变化趋势整体偏弱，仅在伊犁河谷局部区域有零星的显著性通过区域，大部分地区的趋势性未达到统计显著水平。从空间分布规律来看，天山北坡、伊犁河谷及南疆西部是新疆极端降水变化最显著的核心区域，天山山脉作为新疆的地形骨架，其北坡与伊犁河谷地处西风带水汽的主要通道，地形抬升作用显著，易促使水汽凝结形成降水[29]。



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. Spatial distribution of trend slopes for extreme precipitation indices (The first column represents trend slopes for 1965~1994, the second column represents trend slopes for 1995~2024, and the third column represents trend slopes for 1960~2024; black dots indicate regions passing the 0.05 significance test)

图 3. 极端降水指数倾向率空间分布(第一列为 1965~1994 年倾向率，第二列为 1995~2024 年倾向率，第三列为 1965~2024 年倾向率；黑色圆点表示通过了 0.05 的显著性检验)

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

图 4 展示了新疆地区 8 个极端降水指数在 1965~2024 年间的年际变化序列及线性趋势。从强度指标来看,新疆地区的 Rx1day 和 Rx5day 在 1965~2024 年间波动上升,其中 Rx1day 的上升速率约为 0.034 在 1965~2024 年间波动较小,呈缓慢上升趋势,速率为 $0.004 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}/10\text{a}$,降水日平均强度略有提升;PRCPTOT 则呈显著上升趋势,线性趋势约为 $5.27 \text{ mm}/10\text{a}$,年降水总量持续增加。

从频率指标来看, R10 和 R20 在 1965~2024 年间呈波动上升趋势, R10 的上升速率约为 $0.009 \text{ d}/10\text{a}$, R20 的上升速率约为 $0.001 \text{ d}/10\text{a}$,表明中等强度降水的增长比强降水的增长更为显著。从持续性指标来看, CDD 呈显著下降趋势,下降速率约为 $-0.233 \text{ d}/10\text{a}$,且通过了显著性检验, CWD 呈微弱上升趋势,上升速率约为 $0.007 \text{ d}/10\text{a}$,说明新疆地区干旱期持续时间有所缩短。综上可知,新疆地区降水未来朝着总量增加、极端性增强、持续时间缩短的趋势发展。

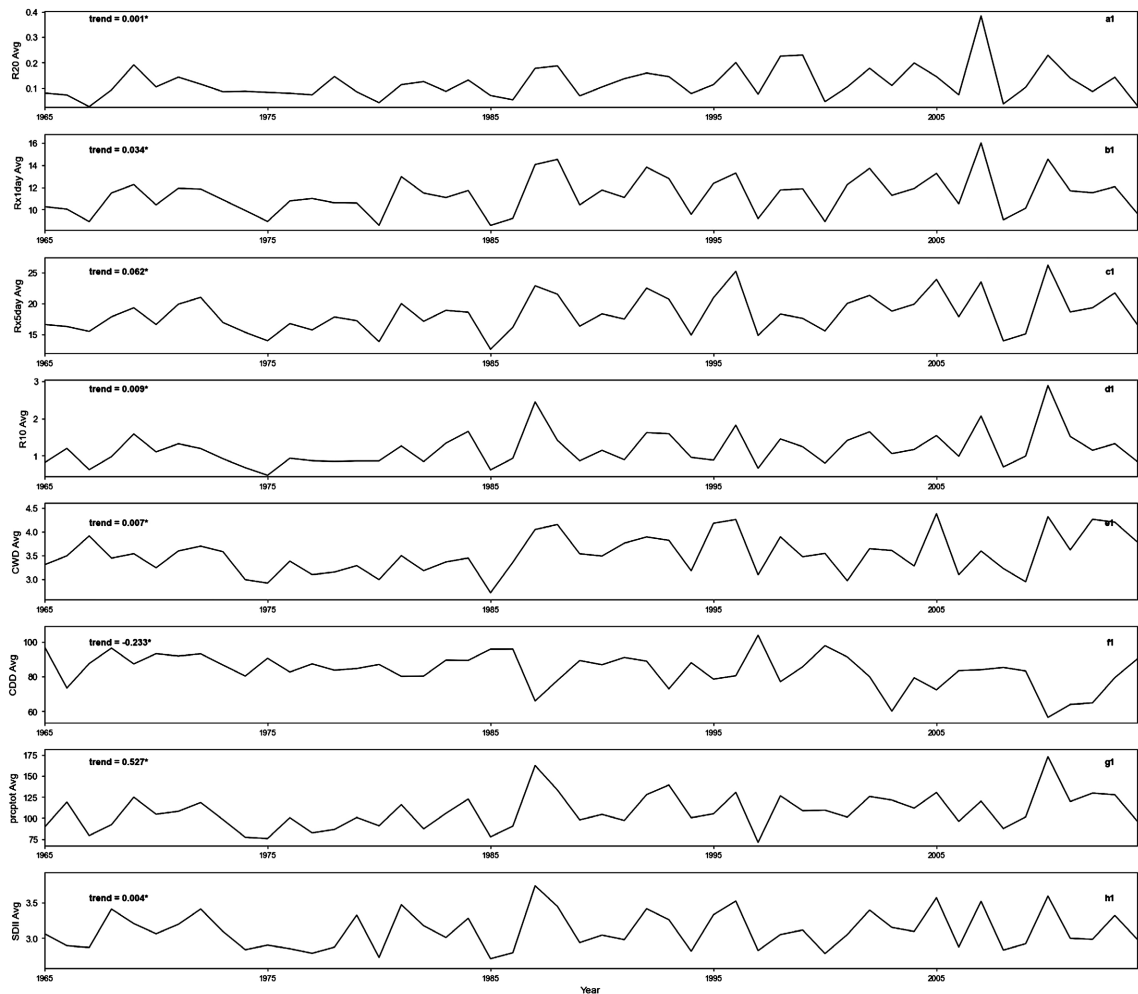


Figure 4. Interannual variations and trend tests of extreme precipitation indices in Xinjiang region

图 4. 新疆地区极端降水指数年际时间变化及趋势检验

3.2.2. 极端降水指数近 5 年的特征影响

为明确最新时段极端降水对长期趋势的贡献,将 2020~2024 年与 1965~2019 年气候态进行对比(见表

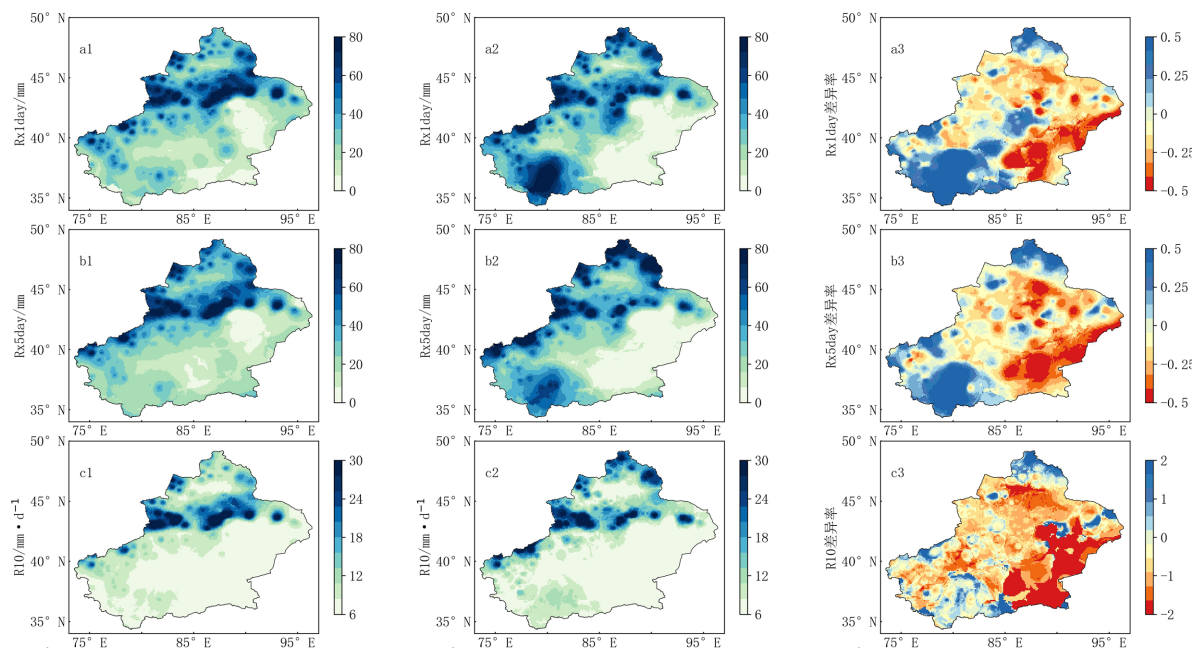
3、见图 5)。从趋势强化来看, 2020~2024 年 PRCPTOT 均值 121.37 mm, 较 1965~2019 年上升 10.47%, 上升速率远高于 5.27 mm/10a 的长期倾向率, 年降水总量呈非线性加速增长。Rx1day、Rx5day 分别上升 12.97%、10.68%, 极端降水极值强度提升显著, 表明长期以来极端降水强度增强的趋势在近期被进一步放大。R10、R20 分别上升 23.90%、53.81%, 大雨日数增幅接近中雨日数两倍, 极端降水向更高等级集中, 极端化特征持续强化。CDD 下降 10.62%, 干旱持续时间缩短速率显著高于长期均值, 区域湿润化进程加速。

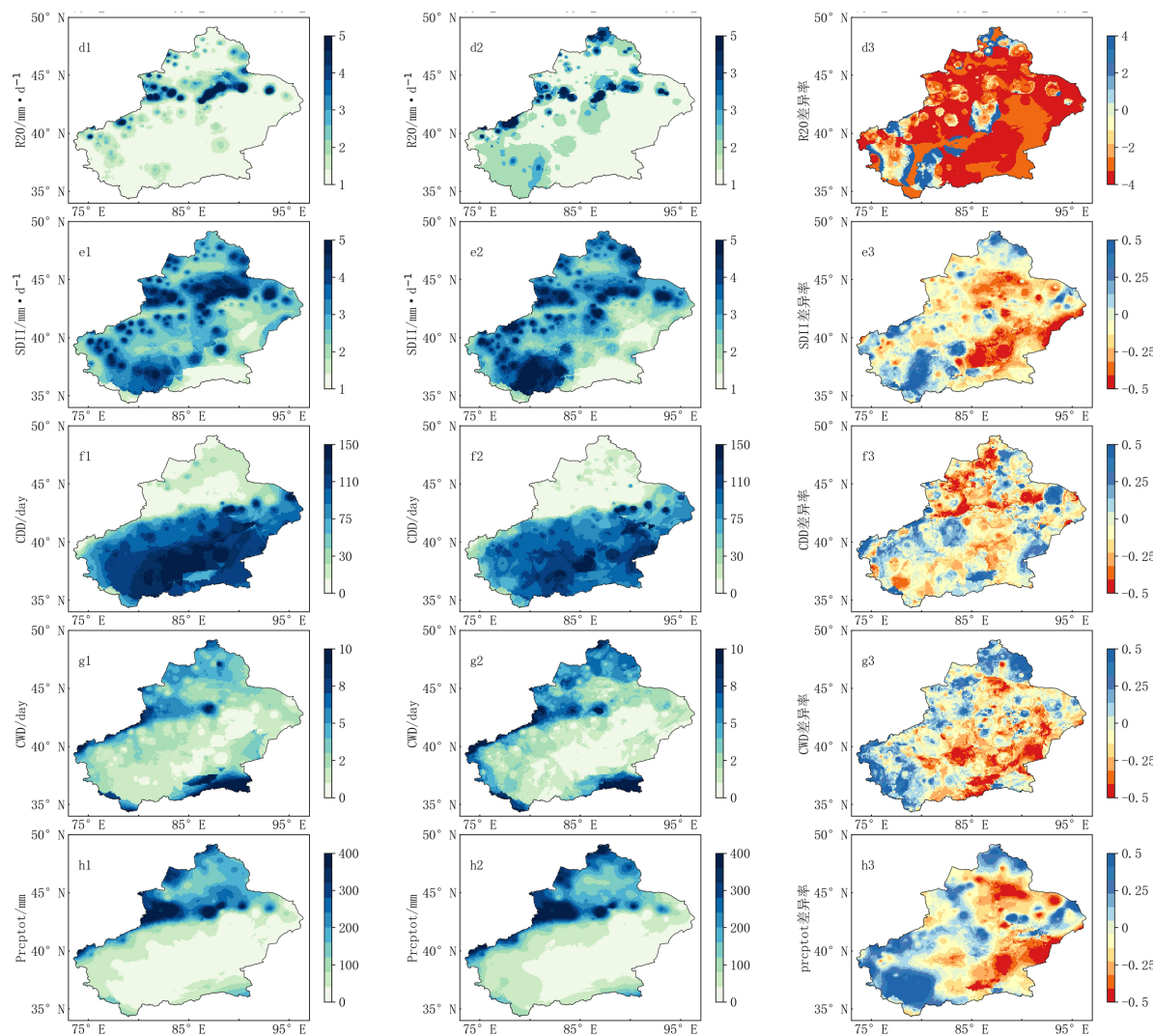
从趋势调整来看, 2020~2024 年南疆西部、天山南坡增幅显著扩大, 部分区域增幅达 70%, 打破了传统以北疆为主导的增湿格局, 表明西风带水汽输送与环流异常的影响范围向南扩展。与此同时, 南疆盆地东部、昆仑山区边缘 CDD 仍呈上升趋势, 提示在整体湿润化背景下, 局地干旱风险依然存在, 使长期趋势所揭示的空间异质性特征更趋复杂。

综上所述, 2020~2024 年极端降水变化以强化长期趋势为主、局部格局调整为辅, 整体上延续并加速了 1965 年以来的湿润化与极端化趋势, 提升了长期趋势结论的时效性。

Table 3. Annual mean and its rate of change
表 3. 逐年均值及其变化率

指数	1965~2024	1965~1994	1995~2024	相对变化率(%)	1965~2019	2020~2024	相对变化率(%)
R20 (d)	0.13	0.10	0.16	54.05	0.13	0.20	53.81
Rx1day (mm)	11.59	11.04	12.14	10.00	11.46	12.95	12.97
Rx5day (mm)	18.73	17.62	19.83	12.53	18.56	20.54	10.68
R10 (d)	1.25	1.10	1.41	28.33	1.23	1.52	23.90
CWD (d)	3.57	3.43	3.70	7.83	3.56	3.68	3.42
CDD (d)	82.60	86.45	78.75	-8.90	83.34	74.49	-10.62
PRCPTOT (mm)	110.83	103.52	118.14	14.12	109.87	121.37	10.47
SDII (mm/d)	3.14	3.09	3.19	3.32	3.13	3.26	4.20





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 and difference rate of extreme precipitation index (the first column is the average from 1965~2019, the second column is the average from 2020~2024, and the third column is the difference rate)

图 5. 极端降水指数的空间分布及差异率(第一列为 1965~2019 年平均值, 第二列为 2020~2024 年平均值, 第三列为差异率)

3.3. Hurst 指数分析

Table 4. Hurst indexes of extreme precipitation of Xinjiang region

表 4. 新疆地区极端降水 Hurst 指数

	Hurst 指数
R20	0.6026
Rx1day	0.6260
Rx5day	0.6419
R10	0.6647
CWD	0.8606

续表

CDD	0.7448
PRCPTOT	0.7068
SDII	0.6215

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。由表 4 可知, R20、R10、Rx1day、Rx5day、CWD、PRCPTOT、SDII 各极端降水指数的 Hurst 指数分别为 0.60、0.66、0.63、0.64、0.86、0.71、0.62, 均大于 0.5, 表明未来新疆地区降水量趋势具有持续性, 降水天数增加趋势将持续, 整体呈现湿润化趋势。其中 CWD 的 H 值高达 0.86, 表明持续湿润期的趋势具有很强的持续性。值得注意的是, CDD 指数的 H 值为 0.74, 表明未来部分地区干旱化情况将持续, 这与南疆盆地 CDD 呈上升趋势的空间分布特征相吻合。

4. 讨论

本研究基于 1965~2024 年长时间序列降水数据, 通过前后两个时效性较强的周期对比, 并补充 2020~2024 年最新时段分析, 系统分析了新疆地区极端降水事件的时空变化特征, 研究结果与国内外相关研究具有较好的一致性, 同时也揭示了一些新的特征和规律。

从数据可靠性来看, 本研究采用的 CHM_PRE V2 数据集以地面气象站点观测为基础制作, 并经过机器学习优化, 其与站点观测的直接检验效果较好, 在站点密集区与实测值一致性高、系统偏差小, 在昆仑山高山区、塔克拉玛干沙漠腹地等站点稀疏区域, 经过机器学习优化, 对极端降水的局地细节还原能力较好, 结论以区域平均趋势为主。

从空间分布格局来看, 新疆极端降水呈现“北疆 > 南疆、山区 > 盆地”的特征, 这与区域地形地貌和水汽输送条件密切相关[30]。新疆的水汽来源主要依赖于西风带输送的大西洋和北冰洋水汽, 这些水汽通过北疆的伊犁河谷和额尔齐斯河谷进入新疆北部[31] [32]。本研究发现, 1995~2024 年相对于 1965~1994 年, 天山以南地区出现大范围的降水增加, 最高达 70%, 这可能与全球变暖背景下大气持水能力增强以及西风带北抬有关[33]。同时发现近 5 年南疆西部降水增幅显著扩大, 表明西风带与大洋水汽输送的影响范围向南扩展, 完善了新疆极端降水空间演变认知。

从时间变化趋势来看, 新疆地区极端降水整体呈上升趋势, 这与西北干旱区“暖湿化”的气候背景相一致[34] [35]。张强等[36]研究指出, 2000 年以来西北降水增速达 1961~2000 年的 8 倍, 近 20 年西北气候暖湿化趋势呈非线性增强新特征。本研究中 PRCPTOT 以 5.27 mm/10a 的速率显著增加, Rx1day 和 Rx5day 也呈波动上升趋势, 表明极端降水事件的强度在增强。这一结果与陈亚宁团队[37]基于 1961~2022 年数据的研究结论相同。值得注意的是, 本研究发现 CDD 呈显著下降趋势(-0.233 d/10a), 这与连续无降水日数(CDD)每年减少 0.65 天的研究结果[38]相呼应, 表明干旱区降水模式正在发生变化, 降水事件变得更加频繁但持续时间缩短。

Hurst 指数分析结果为新疆地区未来极端降水变化预测提供了重要参考。本研究中各极端降水指数的 H 值均大于 0.5, 表明未来新疆地区极端降水增加趋势具有较强的持续性, 这与全球变暖背景下极端降水事件频率和强度增加的大趋势相一致[39] [40]。然而, CDD 的 H 值高达 0.74, 表明部分地区干旱化情况将持续, 提示在整体暖湿化背景下, 南疆局部地区仍面临干旱加剧的风险[41]。

从驱动机制来看, 新疆极端降水变化受多因子协同影响。海表面温度异常是导致西北干旱区, 尤其是南疆沙漠地区极端降水增加的主要因素, 大西洋、印度洋和太平洋的温度异常引发了一系列环流异常, 增强了向中国西北地区的水汽输送[42] [43]。根据 Zhang 等和 Sun 等[44] [45]的研究, 1990 年代以来, 北

极增温导致西亚副热带西风急流(WASWJ)显著北移东扩, 导致伊朗高原-帕米尔高原上空形成异常高压, 增强了向塔里木盆地的水汽输送通道, 同时西太平洋副热带高压(WPSH)显著西伸, 增强了从西北太平洋经蒙古反气旋向中国西北的水汽输送, 引导孟加拉湾水汽进入南疆[46] [47]。因此, 南疆部分地区1995~2024年呈现显著增湿的趋势, 与北极增温导致西亚副热带西风急流北移, 水汽输送范围向南扩展; 天山地形抬升增强局地降水, 共同导致南疆西部成为新增增湿中心。

从CWD与CDD的非对称性变化来看, 降水频次增加和持续时间缩短这一现象符合全球变暖背景下干旱区降水的“高频次-短历时”转型特征, 根据Clausius-Clapeyron关系, 大气持水能力增强(约 $7\%/^{\circ}\text{C}$)导致降水效率提高, 但对流性降水比例上升, 使得单次降水事件的持续时间缩短, 过境型降水增多, 持续性降水减少[48]。同时新疆占地庞大, 盆地腹地水汽依旧匮乏, 干旱期仍较长, 形成“湿润区更湿、干旱区局部更干”的不对称格局[49]。这将导致CWD和CDD在不同区域出现非对称性, 北疆CWD在准噶尔盆地出现下降显著, 而南疆西部地区出现上升趋势。

5. 结论

本研究仍存在一些局限性。首先, CHM_PRE数据集虽然经过质量控制, 但在高山地区和沙漠腹地的站点稀疏区域, 插值结果可能存在一定的不确定性[50]。其次, Hurst指数基于历史数据的统计规律推断未来趋势, 未考虑未来气候变化情景下大尺度环流系统的可能转变[51]。未来研究可结合CMIP6模式数据, 开展不同排放情景下新疆极端降水的预估研究, 并深入分析极端降水变化对区域水资源和生态系统的影响。

本文基于1965~2024年CHM_PRE数据集, 采用ETCCDI极端降水指数、Mann-Kendall检验、Sen斜率估计法和Hurst指数等方法, 系统分析了新疆地区极端降水事件的时空变化特征及其未来趋势, 主要结论如下:

(1) 新疆极端降水空间分布呈显著的“北疆 > 南疆、山区 > 盆地”格局, 天山山区、伊犁河谷及北疆西部为极端降水高值区。1995~2024年相对于1965~1994年, 新疆西部、北部山区极端降水增长显著, 天山以南地区出现大范围的降水增加, 空间格局与新疆“山地-盆地”地形特征高度吻合。

(2) 1965~2024年间, 新疆地区PRCPTOT、Rx1day、Rx5day、SDII、R10、R20和CWD均呈上升趋势, CDD呈下降趋势。其中PRCPTOT上升趋势最为显著($5.27\text{ mm}/10\text{a}$), CDD呈显著下降趋势($-0.233\text{ d}/10\text{a}$)。分时段对比显示, 1995~2024年期间各极端降水指数变化幅度与显著性均远超1965~1994年, 天山北坡、伊犁河谷及南疆西部为极端降水变化最显著的核心区域。

(3) Hurst指数分析表明, R10、Rx1day、Rx5day、CWD、PRCPTOT、SDII和R20的 H 值分别为0.66、0.63、0.64、0.86、0.71、0.62和0.60, 均大于0.5, 预示未来新疆地区极端降水增加趋势具有持续性, 降水天数增加趋势将持续, 整体呈现湿润化趋势。但CDD的 H 值为0.74, 表明部分地区干旱化情况将持续增强, 区域气候变化呈现复杂的空间异质性特征。

(4) 2020~2024年最新数据显著强化并局部调整了长期趋势。近5年极端降水总量、强度、频次较历史均值大幅上升, 干旱期缩短, 湿润化与极端化呈非线性加速; 空间上南疆西部成为新增显著增湿区, 使传统“北高南低”格局发生调整, 整体增湿、局地干旱的空间分异更突出。

本研究结果为新疆地区水资源优化管理、洪涝灾害预警及生态保护策略制定提供了科学依据。在全球变暖持续背景下, 应加强对天山北坡、伊犁河谷等极端降水变化显著区域的监测预警, 同时关注南疆盆地干旱化风险的长期演变, 以实现区域水资源可持续利用和灾害风险有效防控。

参考文献

- [1] IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.

- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023) Climate Change 2021—The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- [3] Trenberth, K. (2011) Changes in Precipitation with Climate Change. *Climate Research*, **47**, 123-138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>
- [4] Myhre, G., Alterskjær, K., Stjern, C.W., Hodnebrog, Ø., Marelle, L., Samset, B.H., *et al.* (2019) Frequency of Extreme Precipitation Increases Extensively with Event Rareness under Global Warming. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 16063. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4>
- [5] 任福民, 李威, 孙秀荣, 等. 中国干旱、强降水、高温和低温区域性极端事件[M]. 北京: 气象出版社, 2018.
- [6] Seneviratne, S.I., Zhang, X., Adnan, M., *et al.* (2021) Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In: *Climate Change 2021—The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 1513-1766.
- [7] 王苗, 郭品文, 邬昀, 等. 我国极端降水事件研究进展[J]. 气象科技, 2012, 40(1): 79-86.
- [8] 智协飞, 张玲, 潘嘉露. 我国南方冬季气候变暖前后极端降水事件分析[J]. 热带气象学报, 2011, 27(2): 238-244.
- [9] 胡宜昌, 董文杰, 何勇. 21 世纪初极端天气气候事件研究进展[J]. 地球科学进展, 2007, 22(10): 1066-1075.
- [10] 中国气象局. 中国气候变化蓝皮书(2024) [M]. 北京: 科学出版社, 2024. <https://book.sciencereading.cn/shop/book/Booksimple/show.do?id=B1C7CD9DD539F9AE9E063020B0A0AAFC7000>
- [11] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.
- [12] 江远安, 刘精, 邵伟玲, 等. 1961-2013 年新疆不同时间尺度降水量的气候特征及其历史演变规律[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1363-1375.
- [13] 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 白云岗. 基于 Copula 函数的新疆极端降水概率时空变化特征[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 3-12.
- [14] 占龙飞, 董保华, 辛佳洁, 等. 2025. 1961-2020 年中国极端降水指数时空变化特征[J]. 气候与环境研究, 30(3): 359-372.
- [15] 杨莲梅. 新疆极端降水的气候变化[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 577-583.
- [16] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 王怀军, 方功焕. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1295-1304
- [17] Ding, Z.Y., Lu, R.J. and Wang, Y.Y. (2019) Spatiotemporal Variations in Extreme Precipitation and Their Potential Driving Factors in Non-Monsoon Regions of China during 1961-2017. *Environmental Research Letters*, **14**, Article 024005.
- [18] 董蕾, 张明军, 王圣杰, 等. 基于格点数据的西北干旱区极端降水事件分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(12): 2048-2057.
- [19] 程维明, 柴慧霞, 周成虎, 等. 新疆地貌空间分布格局分析 [J]. 地理研究, 2009, 28(5): 1157-1169.
- [20] 阿迪来·乌甫, 玉素甫江·如素力, 热伊莱·卡得尔, 等. 基于 MODIS 数据的新疆地表蒸散量时空分布及变化趋势分析[J]. 地理研究, 2017, 36(7): 1245-1256.
- [21] 郝志新, 高贻汶, 刘洋, 崔惠娟, 葛全胜. 新疆高分辨率降水变化数据集对比和分析[J]. 地理科学进展, 2025, 44(12): 2433-2447
- [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] ETCCDI (2024) Climate Change Indices: Definitions of the 27 Core Indices.
- [24] 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>
- [25] Kendall, M.G. (1975) Rank Correlation Methods. Griffin.
- [26] Mann, H.B. (1945) Nonparametric Tests against Trend. *Econometrica*, **13**, 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- [27] 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>
- [28] Mandelbrot, B.B. and Wallis, J.R. (1968) Noah, Joseph, and Operational Hydrology. *Water Resources Research*, **4**, 909-918. <https://doi.org/10.1029/wr004i005p00909>

- [29] 李学武, 张京朋, 赵天保, 等. 2024. 我国西北地区干湿变化特征及其未来预估[J]. 气候与环境研究, 29(1): 59-74.
- [30] Wang, G., Zhang, Q., Woolway, R.I., Xu, L., Ma, H. and Yang, Z. (2025) Warm-Wetting and/or Warm-Drying Tendency over Xinjiang, China? *Journal of Hydrology*, **660**, Article 133417. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133417>
- [31] 丁一汇, 柳艳菊, 徐影, 等. 全球气候变化的区域响应: 中国西北地区气候“暖湿化”趋势, 成因及预估研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2023, 38(6): 551-562.
- [32] 陈发虎, 董广辉, 陈建徽, 郜永祺, 黄伟, 王涛, 陈圣乾, 侯居峙. 亚洲中部干旱区气候变化与丝路文明变迁研究: 进展与问题[J]. 地球科学进展, 2019, 34(6): 561-572.
- [33] Gao, M., Yang, J., Wang, S., et al. (2025) Spatially Heterogeneous Wetting and Climatic Drivers of Precipitation Variability in Arid and Semi-Arid Northwest China Since 1960. *Atmospheric Research*, **309**, Article 107516.
- [34] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164.
- [35] 陈亚宁, 李稚, 范焯婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1295-1304.
- [36] 张存杰, 任玉玉, 曹丽娟, 张思齐, 胡川叶, 吴秀兰. 近 60 年中国干湿气候变化特征及其未来趋势预估[J]. 气候变化研究快报, 2021, 10(6): 728-741.
- [37] 郑孟林, 赵勇, 杨霞. 1961-2022 年中国西北干旱区夏季降水变化特征[J]. 干旱区地理, 2025, 48(3): 367-379.
- [38] Liang, Q., Chen, Y., Duan, W., Wang, C., Li, Y., Zhu, J., et al. (2025) Temporal and Spatial Changes of Extreme Precipitation and Its Related Large-Scale Climate Mechanisms in the Arid Region of Northwest China during 1961-2022. *Journal of Hydrology*, **658**, Article 133182. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133182>
- [39] Seneviratne, S.I., Donat, M.G., Pitman, A.J., Knutti, R. and Wilby, R.L. (2016) Allowable CO₂ Emissions Based on Regional and Impact-Related Climate Targets. *Nature*, **529**, 477-483. <https://doi.org/10.1038/nature16542>
- [40] 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>
- [41] Giorgi, F., Coppola, E. and Raffaele, F. (2014) A Consistent Picture of the Hydroclimatic Response to Global Warming from Multiple Indices: Models and Observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **119**, 11,695-11,708. <https://doi.org/10.1002/2014jd022238>
- [42] Chen, F., Xu, Q., Chen, J., Birks, H.J.B., Liu, J., Zhang, S., et al. (2015) East Asian Summer Monsoon Precipitation Variability since the Last Deglaciation. *Scientific Reports*, **5**, Article No. 11186. <https://doi.org/10.1038/srep11186>
- [43] 王澄海, 张晟宁, 张飞民, 等. 论全球变暖背景下中国西北地区降水增加问题[J]. 地球科学进展, 2021, 36(9): 980-989.
- [44] Lin, L., Hu, C., Wang, B., Wu, R., Wu, Z., Yang, S., et al. (2024) Atlantic Origin of the Increasing Asian Westerly Jet Interannual Variability. *Nature Communications*, **15**, Article No. 2155. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46543-x>
- [45] Sun, X., et al. (2023) Interdecadal Variation and Possible Causes of Summer Extreme Precipitation over Northern Xinjiang. *Environmental Research Communications*, **5**, e085001.
- [46] Ding, Y., Wu, P. and Liu, Y. (2021) Modulation of Sea Surface Temperature in Three Oceans on Precipitation Increase over Northwest China. *Frontiers in Climate*, **4**, e2022.
- [47] Zhou, G., Chen, Y. and Yao, J. (2022) Variations in Precipitation and Temperature in Xinjiang and their Connection to Atmospheric Circulation. *Frontiers in Environmental Science*, **10**.
- [48] Xu, Y., et al. (2024) Drying and Wetting Trend in Xinjiang and Related Circulations Background over the Past 60 Years. *Environmental Research Communications*, **6**, 095021.
- [49] Guan, X., Langhamer, L. and Schneider, C. (2022) Lagrangian Analysis of Moisture Sources of Precipitation in the Tianshan Mountains, Central Asia. *Earth and Space Science*, **9**, e2022EA002318. <https://doi.org/10.1029/2022ea002318>
- [50] Lu, S., Hu, Z., Yu, H., Fan, W., Fu, C. and Wu, D. (2021) Changes of Extreme Precipitation and Its Associated Mechanisms in Northwest China. *Advances in Atmospheric Sciences*, **38**, 1665-1681. <https://doi.org/10.1007/s00376-021-0409-3>
- [51] 张紫琦. 中国南方地区冬季低温事件季节内变化特征及机理研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.