

孙晓慧, 刘国庆, 唐莉. 山西省不同地貌类型的极端降水时空分布变化特征[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 46-60. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.004

SUN Xiaohui, LIUguoqing, TANG Li. Characteristics of temporal and spatial distribution changes of extreme rainfall in different geomorphic types in Shanxi Province [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 46-60. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.004

山西省不同地貌类型的极端降水时空分布变化特征

孙晓慧, 刘国庆, 唐莉

(太原理工大学, 山西太原 030032)

摘要:【目的】研究全球气候变化背景下极端降水规律, 有助于生态保护、气候变化应对、水资源管理和环境影响评估。【方法】根据1975—2020年山西省27个气象站的日降水数据, 对山西省46个极端降水事件进行筛选, 计算出ETCCDMI推荐的10个极端降水指标, 采用显著性水平(P _value)、趋势斜率(Slope)、平均值(Mean_value)及中位数(Median_value)等11个特征指标来分析数据的趋势和分布情况, 叠加地貌类型计算出相应的极端降水指数特征, 分析不同地貌类型下极端降雨事件的强度、分布及趋势变化规律, 探讨极端降雨与地貌类型的相关关系, 揭示极端降雨在各种地貌类型的分布特征。【结果】山西省站点CDD全部呈现降低趋势, 达到显著性的站点占比为81%; 除CWD以外, 其余8个极端降水指标都以正相关站点数较多, PRCPTOT、R10mm、Rx1day与Rx5day正相关站点比例分别达到了74%、74%、69%与67%, 但整体显著低; 山西省CDD空间分布上表现为自南向北, 自西向东减少趋势增加, CDD的平均值等6个指标具有相似的空间分布特征, 表现为自北向南梯度式逐渐减少。CV等三个指标具有相似的空间分布特征, 都以东南部阳泉与忻州交界处自北向南辐射减少, 山西省北部的干旱情况较南部缓解快; 山西省海拔与CDD、CWD、PRCPTOT、R10mm及Rx5day指数存在一定的显著相关性, 与CDD的Slope、CWD的Median、Ave_Year_Change、Q50值, 及RX5day的Min值都呈现显著的负相关关系(-0.44、-0.41、-0.42、-0.41、-0.45), 与PRCPTOT及R10mm的Slope值呈现显著的正相关关系(0.46, 0.45), 与SDII的6项指标都呈现显著的负相关关系, 对SDII的影响整体较为显著。【结论】山西省的地形起伏度与极端气候指标的特征值无显著相关性; 山西省不同地貌类型区极端降水指数特征指标分布特征不同, 低海拔丘陵台地区、小起伏中山、中海拔丘陵台地的各项指标都较为分散, 该地貌区内的极端气候指标需要考虑空间变异。

关键词: 极端降水; 特征指标; 地貌类型; 山西省; 气候变化; 生态保护; 水资源; 降雨

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.004

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

文章编号: 1000-0860(2025)03-0046-15



与作者互动
听语音 | 刷脸识别

收稿日期: 2024-06-20; 修回日期: 2024-07-25; 录用日期: 2024-07-29; 网络出版日期: 2024-08-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目“极端降雨工况下黄土梁峁采空区入渗产流规律与机理”(42307261); 江西省教育厅科学技术研究项目“气候变化对江西省主汛期降雨极值分布影响研究”(GJJ211945)

作者简介: 孙晓慧(1992—), 男, 讲师, 硕士研究生导师, 博士, 主要从事地质资源与地质工程研究。sunxh17@126.com

通信作者: 唐莉(1992—), 女, 讲师, 博士, 主要从事水文水资源及水文地质研究。E-mail: Li370336892@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Characteristics of temporal and spatial distribution changes of extreme rainfall in different geomorphic types in Shanxi Province

SUN Xiaohui, LIU Guoqing, TANG Li

(Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030032, Shanxi, China)

Abstract: [Objective] Investigating extreme rainfall patterns in the context of global climate change can aid in ecological protection, climate change response, water resource management, and environmental impact assessment. [Methods] Utilizing daily precipitation data from 27 meteorological stations in Shanxi Province from 1975 to 2020, extreme precipitation events over a span of 46 years were selected. Ten extreme precipitation indices recommended by ETCCDMI were calculated. Eleven characteristic indicators, including significance level (P _value), trend Slope (Slope), Mean value (Mean_value), and Median value (Median_value), were used to analyze the trends and distribution of the data. The corresponding extreme precipitation index characteristics were calculated by superimposing landform types, analyzing the intensity, distribution, and trend changes of extreme rainfall events across different landform types, exploring the correlation between extreme rainfall and landform types, and revealing the distribution characteristics of extreme rainfall in various landform types. [Results] All sites in Shanxi Province showed a decreasing trend in CDD, with 81% of the sites reaching significance. Except for CWD, the other eight extreme precipitation indices had more sites with positive correlations, with the proportions of sites positively correlated with PRCPTOT, R10mm, Rx1day, and Rx5day reaching 74%, 74%, 69%, and 67%, respectively, although the overall significance was low. The spatial distribution of CDD in Shanxi Province exhibited an increasing trend of reduction from south to north and west to east. Six indices, including the Mean value of CDD, showed similar spatial distribution characteristics, gradually decreasing in a gradient from north to south. Three indices, including CV, shared similar spatial distribution characteristics, with a radiating decrease from north to south at the junction of Yangquan and Xinzhou in the southeast. The drought situation in the northern part of Shanxi Province alleviated faster than in the southern part. There was a significant correlation between elevation in Shanxi Province and the indices CDD, CWD, PRCPTOT, R10mm, and Rx5day. CDDslope, the Median of CWD, Ave_Year_Change, Q50 value, and the Minimum value of Rx5day all showed significant negative correlations (-0.44 , -0.41 , -0.42 , -0.41 , -0.45), while the Slope values of PRCPTOT and R10mm showed significant positive correlations (0.46 , 0.45). All six indicators of SDII showed significant negative correlations, indicating a significant overall impact on SDII. [Conclusion] The relief amplitude of Shanxi Province had no significant correlation with the characteristic values of extreme climate indices. The distribution characteristics of extreme precipitation index characteristic indicators varied across different landform types in Shanxi Province. Indicators were more scattered in low-altitude hilly terraces, small undulating middle mountains, and mid-altitude hilly terraces, requiring consideration of spatial variation within these landform types regarding extreme climate indices.

Keywords: extreme rainfall; characteristic index; geomorphic type; Shanxi Province; climate change; ecological protection; water resources; rainfall

0 引言

随着社会的发展,气候变化对水文循环的过程的影响在不断的增大^[1-2],成为了造就极端气候情况和降雨不均匀现象的原因之一,这也使得极端降雨造成的风险不断加大^[3-5]。山西省地处黄土高原东部的黄河中游,境内多属山区丘陵、陡坡沟深,源短流急,大陆性季风气候较强,汛期降雨量集中,受气候变化降雨带北移影响,极端降雨频发,导致洪涝灾害风险加剧。例如,2021年“10·5”极端降雨导致山西省多地爆发洪涝、滑坡与泥石流等灾害,造成175.71万人受灾,15人死亡,直接经济损失达50.29亿元。气候变化背景下,防御极端降水造成的风险成为了山

西省的重要挑战。

现阶段,已有专家学者对不同地貌下的极端降雨展开了一系列研究。张强等^[6]运用K-S法确定降水指标最适概率分布函数,在这个基础上他们采用Copula非参数估计方法,通过Akaike Information Criterion(AIC)法确定两降水指标联合分布函数,系统分析极端降水单变量极值及降水极值二维联合概率分布特征,研究了地区降水极值概率变化的空间演变特征,解决了极端强、弱降雨量在平原与山区发生的概率问题。赵丽^[7]通过百分位法、M-K突变检验等现代统计诊断方法,研究了我国西北干旱区年、季节降水量和极端降水量的时空分布特征及长期变化,得出了西北地区的年降水量趋势在北疆、天山和南疆地

区呈上升和微弱趋势,河西-阿拉善东部地区呈微弱上升趋势,降水较多的地区主要分布在天山西部山区和祁连山北部,解决了极端强降水的频率和强度在不同地区有不同程度变化的问题。曹祥会等^[8]根据河北省142个气象站点1961—2010年逐日平均气温、最高气温、最低气温和降水量等基础资料,采用线性倾向估计法及Kriging插值法,研究了河北省极端气温事件的时空变化特征,得出了极端最高气温和夏季温暖日数自南向北增加,而霜冻日数减少,极端最低气温和寒冷期没有明显规律,降水指数较为分散,强度由东南向西北递减。这些研究表明,极端气候事件的发生具有显著的空间和时间特征,不同地区和地貌类型的气候事件存在明显的差异。

由于山西省地貌复杂多样,降水分布不均,已有不少专家学者开展了山西省不同地貌下的极端降水事件分布特征研究。刘焕才等^[9]基于1961—2018年降水观测资料,分析了山西夏季不同等级降水时空演变特征,表明中雨空间分布受地形影响显著,表现出海拔越高、雨量越多特点。张红英等^[10]分析了山西省东南部(长治市、晋城市)16个县市1976—2015年降水极值时空变化规律,表明1976—2015年极端降水量强度最大值呈明显上升趋势,存在一定的振荡周期,且具有明显的区域特征。袁瑞强等^[11]基于1957—2014年逐日降水资料,研究了山西降水集中度的时空变化和影响因素,结果表明盆地区域较高山高原区的降水集中指数值更大且下降趋势不显著,更易于发生极端降水事件。任健美等^[12]基于1958—2010年逐日降水量观测资料,分析了山西省50多年来极端降水事件的时空变化,表明极端强降水阈值有空间差异,山西东部山区最大,中部盆地最小。以上研究都表明山西省的降水事件尤其极端降雨在不同的地形地貌区其分区特征差异显著,而山西省境地形地貌多样,山地、丘陵、台地、平原等交错分布,现有对不同地貌特征下极端降水的分布特征尚不明确。且针对极端降水的指标选取过于单一,由ETCCDMI(Expert Team on Climate Change Detection and Indices)推荐的极端降水指标就有11个,现有研究未能全面考虑极端降水指标的多样性^[13-16]。而不同的极端降水指标反映的不同维度特征,短期效应指标代表强降水事件(如Rx1day、Rx5day、SDII、R10mm、R20mm),而长期效应指标,如持续湿润(CWD)代表长期过程。剧烈效应指标如极端降水事件(如R95p、R99p)代表的是极端情况降水的特征^[17-21]。只有通过综合分析这些多维度的极端降水指标特征,才能更

好地揭示不同地貌类型下的极端降水变化特征。综上,研究山西省不同地貌类型的极端降水时空分布变化特征,对适应和减缓气候变化具有十分重要的科学意义。

为此,本研究基于1975—2020年山西省27个气象站的日降水数据,运用RCLIMDEX软件对山西省46年极端降水事件进行筛选,计算出相应的极端降水指数及其特征因子,采用显著性水平、趋势斜率、平均值、中位数、变异系数、最大值、最小值、平均年度变化率、第10百分位数、第50百分位数及第90百分位数来分析数据的趋势和分布情况。利用GIS软件将各特征指标与地貌类型图层进行叠加运算,得到山西省极端降水指标变化特征,并叠加地貌类型分析不同地貌类型下极端降水事件的发生频率、强度及趋势变化规律,探讨极端降雨与地貌类型的相关关系,揭示极端降雨在各种地貌类型的分布特征,以此深入了解山西省不同地貌区的降水变化特征和规律性。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

研究区为位于北纬 $34^{\circ}34'$ — $40^{\circ}44'$,东经 $110^{\circ}14'$ — $114^{\circ}33'$ 的山西省,地处华北平原西部边缘与黄土高原东部交汇地带,东西跨度约 $4^{\circ}29'$,南北跨度约 $6^{\circ}10'$,是典型的季风影响区域,拥有独特的地形地貌及降雨特征(见图1)。山西省内地貌复杂多样,包括山地、丘陵、盆地和平原等多种类型,其中山地和丘陵占据较大比例,而盆地和平原则相对较少^[23]。山西省可划分为几个主要的地理气候分区:东部的太行山区和中西部的吕梁山区以山地为主,气候特征为冬季寒冷干燥、夏季温暖湿润;中部的晋中盆地和南部的运城盆地主要为平原和盆地地形,气候温和,四季分明,夏季降水较多,冬季干燥寒冷;北部的雁北高原则呈现出典型的温带大陆性气候,冬季寒冷漫长,夏季短促凉爽,降水量较少。这些地理气候分区的特征决定了山西地区的降雨呈现出明显的地域差异性,东部山地区降雨量相对丰沛,而西部高原区则相对干燥。且受到南来暖湿气流影响,尤其是在夏秋季节,来自海洋的水汽在特定条件下能够深入省内,使得部分地区降雨充沛,这一特点在时空分布上尤为明显,进一步加剧了省内降雨的复杂性和多样性。

1.2 数据与处理

山西省共有基本气象站108个,其中日值基准站有27个,本次选用山西省1951—2020年27个日值

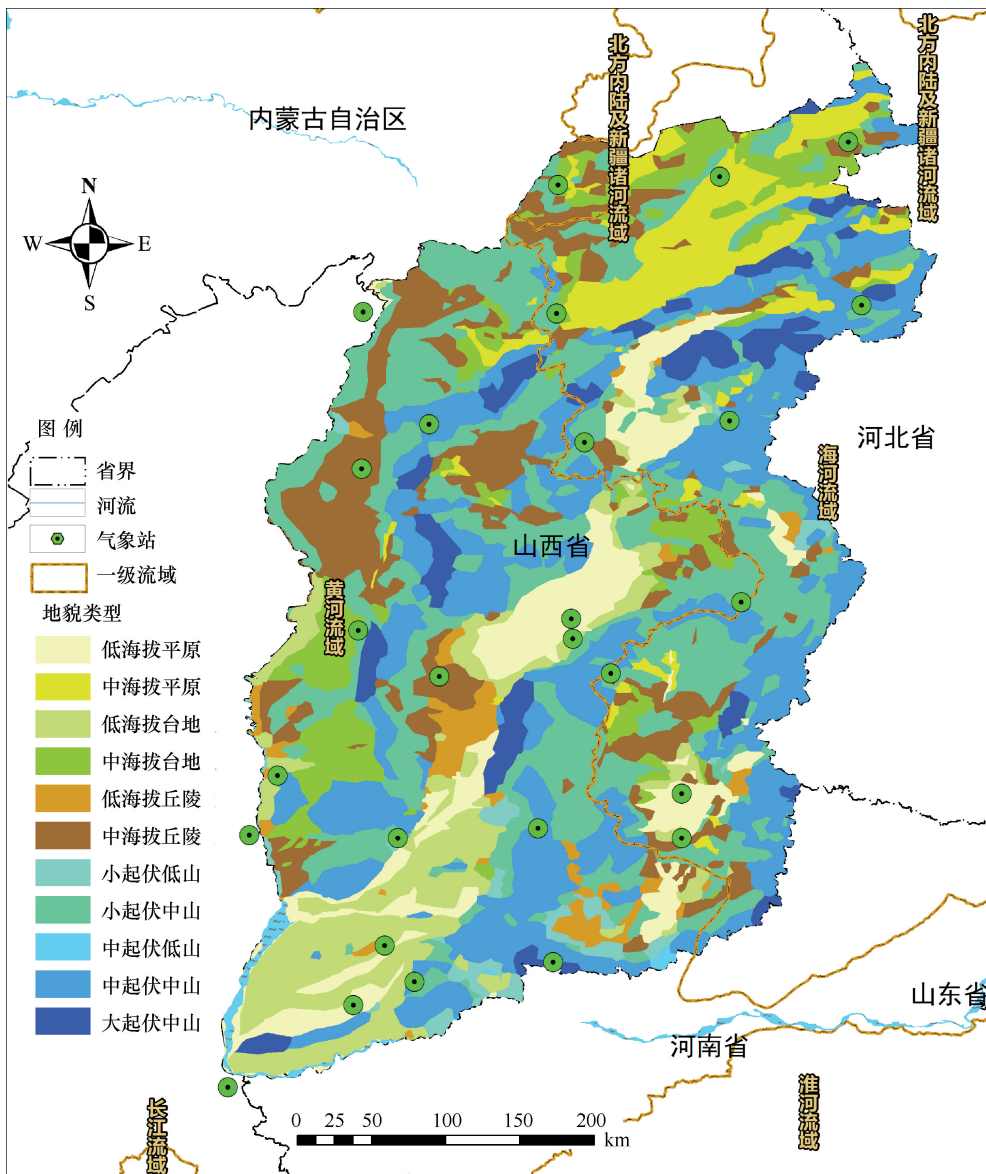


图 1 研究区概况

Fig. 1 Over view of the study area

基准气象站的日降水数据, 考虑数据时间的一致性, 根据 27 个日值基准站记录开始时间, 将研究时段定为 1975—2020 年, 数据来源于国家气象科学数据中心(见图 1)。在 RclimDex 软件中计算出了各个站点 46 年的极端降雨指标, 该指标是由 ETCCDMI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) 推荐的, 共 27 项, 选取 10 项降雨类指标, 指标和定义如表 1 所列。

山西省地形地貌数据基于山西省 DEM 结合《中华人民共和国地貌图集(1:100 万)》经 GIS 软件计算获取, 其中山西省 DEM 来源于哥白尼数字高程模型 (Copernicus DEM, COP-DEM), 由欧洲航天局 (European Space Agency, 简称 ESA 或欧空局) 发布,

表 1 降雨类指标

Table 1 List of rain fall indicators

指标	名称	定义	单位
Rx1day	单日最大降水量	每月最大 1 日降水量	mm
Rx5day	5 日最大降水量	每月最大 5 日降水量	mm
SDII	降水强度	年内有效降水量与降水日数的比值	mm/d
R10	大降水量日	年日降水量>10mm 的天数	d
R20	强降水量日	年日降水量>20mm 的天数	d
CDD	持续干旱日数	日降水量≤1mm 连续日数	d
CWD	持续湿润日数	日降水量>1mm 连续日数	d
R95p	强降水量	95%分位值强降水量之和	mm
R99p	极端强降水量	99%分位值强降水量之和	mm
PRCPTOT	雨日降水总量	雨日(日降水量≥1mm)降水总量	mm

地形起伏度基于 DEM 采用 GIS 软件计算获取。

根据高程 (DEM), 山西省地形可以分为两类: (1) 低海拔 (海拔 < 1 000 m); (2) 中海拔 (1 000 m ≤ 海拔 < 3 500 m)。

根据地形起伏度, 地形可以分为五类: (1) 平原 (起伏度 < 30 m); (2) 台地/丘陵 (30 m ≤ 起伏度 < 200 m); (3) 小起伏山地 (200 m ≤ 起伏度 < 500 m); (4) 中起伏山地 (500 m ≤ 起伏度 < 1 000 m); (5) 大起伏山地 (1 000 m ≤ 起伏度 < 2 500 m)。

山西省综合地形地貌特征可以分为 11 类 (见图 1 及表 2)。

表 2 山西省地形地貌类型、高程范围、起伏度、面积及面积比率

Table 2 Types of Landforms, Elevation Ranges, Relief, Area, and Area Ratio in Shanxi Province

地貌类型	高程范围/m	起伏度/m	面积 /万 km ²	面积比率/%
大起伏中山	[1 000, 2 500)	[1 000, 2 500)	0.75	5
低海拔平原	[0, 1 000)	[0, 30)	1.32	8
低海拔丘陵	[0, 1 000)	[30, 200)	0.39	2
低海拔台地	[0, 1 000)	[30, 200)	1.43	9
小起伏低山	[0, 1 000)	[200, 500)	0.27	2
小起伏中山	[1 000, 3 500)	[200, 500)	3.88	25
中海拔平原	[1 000, 3 500)	[0, 30)	0.97	6
中海拔丘陵	[1 000, 3 500)	[30, 200)	1.93	12
中海拔台地	[1 000, 3 500)	[30, 200)	1.15	7
中起伏低山	[0, 1 000)	[500, 1 000)	0.02	0
中起伏中山	[1 000, 3 500)	[500, 1 000)	3.58	23
总计	—	—	15.67	1

1.3 研究方法

计算得出的山西省 1973—2020 年 10 个极端降雨指数年序列结果, 采用显著性水平 (P_value)、趋势斜率 (Slope)、平均值 (Mean_value)、中位数 (Median_value)、变异系数 (CV)、最大值 (Max_value)、最小值 (Min_value)、平均年度变化率 (Avg_year_change)、第 10 百分位数 (Q10)、第 50 百分位数 (Q50) 及第 90 百分位数 (Q90) 来分析数据的趋势和分布情况, 这些指标的综合使用能够全面解析数据的特征和趋势。利用 GIS 软件将各特征指标与地貌类型图层进行叠加运算, 分析地貌类型与各特征指标的相关性, 确定极端降雨事件在不同地貌单元上的分布特征。

2 结果与分析

2.1 极端降水指数变化特征

山西省 27 个站极端降水指数趋势变化特征计算结果如表 3 所列及图 2 所示。得到山西省站点 CDD 整体呈现显著的降低趋势, 负相关站点比例达到 100%, 显著性站点比例达到 81%; 除 CWD 以外, 其余 8 个极端降水指标都以正相关站点数较多, PRCP-TOT、R10mm、Rx1day 与 Rx5day 正相关站点比例分别达到了 74%、74%、69% 与 67%, 但显著正相关的站点比例不高, 分别为 11%、7%、7% 与 0。总体而言, 山西省极端降水指数显示干旱天数显著减少, 部分降水量和极端降水事件呈增加趋势, 但显著性不强。

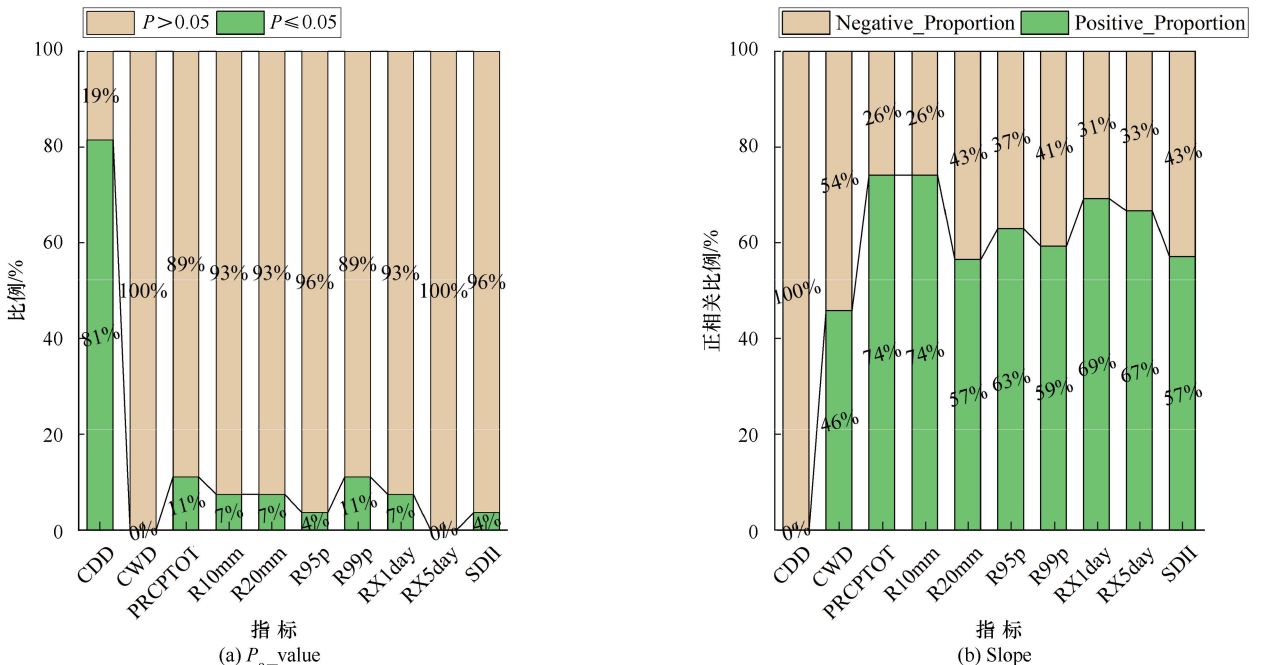


图 2 山西省站点各极端降水指标变化显著性比例

Fig. 2 Significant proportion of changes of extreme rainfall indicators in Shanxi Province

表3 山西省27个站点极端降水指数 Slope(P_value) 计算结果

Table 3 Calculation results of extreme precipitation indices for 27 Stations in Shanxi Province

站 点	CDD	CWD	PRCPTOT	R10mm	R20mm
右 玉	-1.18(0)	-0.01(0.28)	1.70(0.05)	0.10(0.01)	0.03(0.1)
大 同	-1.00(0.01)	0.01(0.59)	1.60(0.06)	0.07(0.08)	0.04(0.02)
天 镇	-0.78(0.02)	-0.02(0.18)	-0.02(0.99)	0.01(0.71)	-0.02(0.48)
河 曲	-0.37(0.20)	0.01(0.46)	0.91(0.45)	0.04(0.31)	0.02(0.36)
朔 州	-1.05(0)	0.01(0.69)	1.78(0.05)	0.09(0.01)	0.03(0.19)
五台山	-1.85(0)	0.01(0.75)	1.19(0.45)	0.03(0.64)	0.04(0.36)
灵 丘	-0.76(0.07)	0.01(0.4)	0.51(0.57)	0.06(0.09)	0.00(0.82)
五 寨	-1.45(0)	0.01(0.55)	2.17(0.03)	0.06(0.21)	0.04(0.14)
兴 县	-0.56(0.10)	-0.01(0.44)	1.58(0.17)	0.08(0.07)	0.03(0.28)
原 平	-0.69(0.05)	-0.01(0.74)	0.56(0.61)	0.04(0.42)	0.00(0.86)
平 定	-1.30(0)	0.00(0.85)	1.00(0.46)	0.06(0.26)	0.02(0.64)
离 石	-0.86(0.01)	0.01(0.71)	1.79(0.17)	0.04(0.44)	0.00(0.97)
太 原	-1.08(0.01)	0.01(0.61)	0.41(0.69)	0.01(0.83)	0.05(0.07)
太 谷	-1.19(0)	-0.01(0.35)	1.49(0.21)	0.03(0.47)	0.05(0.05)
榆 社	-1.22(0)	-0.02(0.14)	-0.32(0.79)	-0.02(0.69)	-0.03(0.25)
隰 县	-1.24(0)	0.02(0.29)	0.05(0.97)	0.04(0.39)	-0.04(0.10)
吉 县	-1.02(0)	0.01(0.63)	0.15(0.90)	-0.01(0.74)	-0.03(0.32)
介 休	-0.95(0)	0.00(0.93)	-0.01(1.00)	0.01(0.76)	-0.01(0.77)
临 汾	-0.78(0.02)	-0.03(0.08)	-0.02(0.98)	-0.07(0.1)	0.01(0.64)
安 泽	-1.07(0)	-0.03(0.21)	0.19(0.88)	-0.04(0.35)	-0.02(0.53)
长 治	-0.94(0)	-0.01(0.45)	1.37(0.27)	0.08(0.12)	0.00(0.96)
襄 垣	-0.97(0)	-0.02(0.17)	1.01(0.36)	0.02(0.70)	-0.02(0.40)
盐 湖	-0.53(0.07)	0.00(0.85)	-0.92(0.48)	0.01(0.89)	-0.01(0.71)
侯 马	-0.62(0.07)	-0.02(0.30)	0.70(0.55)	-0.02(0.71)	0.03(0.25)
垣 曲	-0.84(0)	-0.03(0.13)	1.60(0.33)	0.02(0.76)	0.01(0.80)
阳 城	-1.12(0)	-0.01(0.49)	-0.03(0.98)	-0.01(0.80)	-0.02(0.57)
永 济	-0.61(0.05)	0.02(0.35)	-0.61(0.62)	-0.03(0.58)	-0.03(0.24)
站 点	R95p	R99p	RX1day	RX5day	SDII
右 玉	0.59(0.32)	0.13(0.74)	0.05(0.71)	0.37(0.11)	0.01(0.42)
大 同	-0.17(0.78)	-0.59(0.13)	-0.15(0.27)	0.11(0.61)	0.01(0.46)
天 镇	0.12(0.87)	-0.29(0.57)	-0.10(0.55)	-0.12(0.62)	0.01(0.75)
河 曲	-0.83(0.29)	-0.36(0.54)	-0.09(0.72)	-0.23(0.51)	0.00(0.98)
朔 州	0.37(0.6)	0.23(0.64)	0.16(0.42)	0.29(0.31)	0.02(0.21)
五台山	1.00(0.41)	0.58(0.55)	0.11(0.66)	-0.05(0.9)	-0.01(0.75)
灵 丘	-0.67(0.33)	-0.37(0.36)	-0.26(0.06)	-0.36(0.18)	0.00(0.94)
五 寨	0.83(0.28)	0.09(0.88)	0.10(0.63)	0.26(0.38)	0.01(0.48)
兴 县	0.91(0.33)	0.70(0.24)	0.02(0.93)	0.34(0.32)	0.02(0.33)
原 平	0.51(0.54)	-0.86(0.19)	-0.1(0.62)	-0.27(0.35)	0.01(0.68)
平 定	-0.40(0.7)	0.36(0.63)	0.14(0.62)	0.24(0.63)	0.00(0.97)
离 石	1.61(0.1)	1.12(0.09)	0.20(0.39)	0.35(0.36)	0.01(0.63)
太 原	0.35(0.61)	-0.17(0.73)	0.00(0.98)	0.26(0.42)	0.02(0.32)
太 谷	1.75(0.05)	1.42(0.01)	0.46(0.02)	0.63(0.06)	0.04(0.04)
榆 社	-0.19(0.83)	-0.01(0.98)	0.03(0.91)	0.02(0.95)	-0.03(0.15)
隰 县	-0.78(0.37)	-0.32(0.63)	-0.18(0.53)	-0.34(0.35)	-0.03(0.15)
吉 县	-0.12(0.87)	1.23(0.03)	0.32(0.13)	0.29(0.32)	-0.03(0.06)
介 休	0.04(0.96)	-0.21(0.7)	-0.18(0.32)	0.15(0.62)	-0.01(0.63)
临 汾	0.20(0.75)	0.68(0.14)	0.28(0.17)	0.06(0.86)	0.00(0.97)
安 泽	1.05(0.31)	1.67(0.01)	0.46(0.2)	0.10(0.84)	0.00(0.95)
长 治	-0.49(0.58)	-0.46(0.51)	0.04(0.88)	0.06(0.88)	-0.01(0.58)
襄 垣	0.45(0.61)	0.54(0.39)	0.13(0.6)	0.26(0.59)	0.01(0.71)
盐 湖	-0.59(0.54)	-1.03(0.11)	-0.43(0.05)	-0.41(0.32)	-0.02(0.21)
侯 马	0.84(0.34)	0.94(0.13)	0.17(0.59)	0.08(0.87)	0.01(0.51)
垣 曲	1.67(0.19)	0.77(0.52)	0.15(0.75)	0.09(0.89)	0.00(0.94)
阳 城	0.31(0.77)	0.20(0.82)	0.19(0.59)	-0.37(0.52)	-0.01(0.56)
永 济	-0.41(0.58)	0.49(0.26)	0.03(0.84)	-0.11(0.73)	-0.02(0.15)

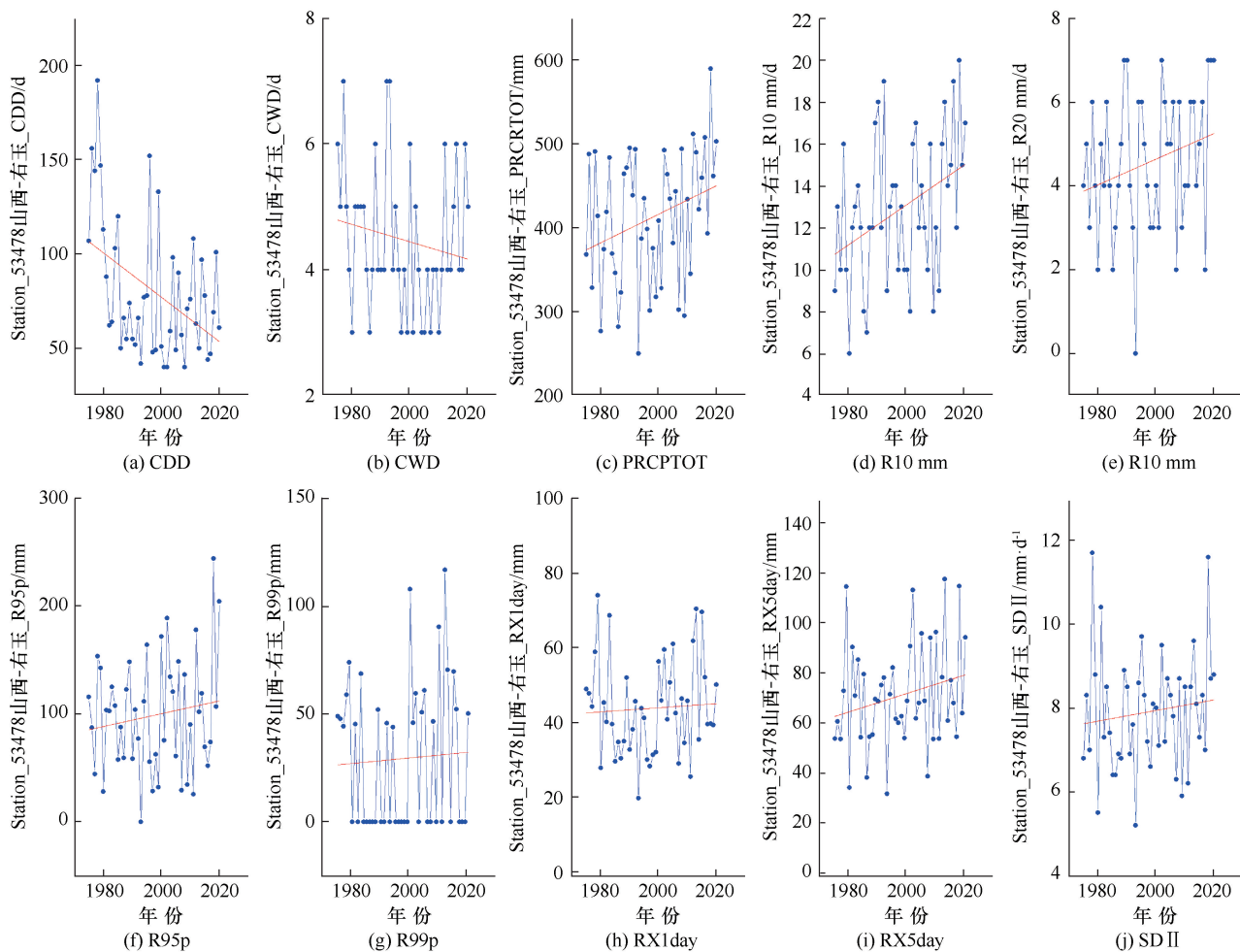


图3 极端降水指标年际计算结果示例

Fig. 3 Examples of interannual calculation results of extreme rainfall indicators

以山西省右玉站极端降水指标计算为例, 极端降水指标年际变化如图3所示。基于极端降水年际变化, 得到27个站10个指标的其余9个指标特征, 如图4所示。

Mean值分析显示, CDD_Mean和PRCPTOT_Mean的振幅(最大值与最小值之差)较大, 分别为32.239 d和310.013 mm, 强调了区域间干旱和降水量的显著差异。极端降水事件(R95p_Mean和R99p_Mean)的振幅也较大, 分别为88.293 mm和33.387 mm, RX1day_Mean和RX5day_Mean的振幅分别为31.313 mm和50.546 mm, 表明极端降水事件在不同区域差异明显。然而, CWD_Mean和SDII_Mean的振幅相对较小, 显示湿润日数和降水强度在各站点间较为一致。Median值进一步支持Mean值分析结果, 具体来讲, CDD_Median的振幅为42.5 d, 而CWD_Median的振幅仅为1 d, 显示干旱情况在不同区域存在较大差异, 而湿润日数较为一致。PRCPTOT_Median的振幅为291.65 mm, R95p_Median的

振幅为69.95 mm, 而R99p_Median在所有站点的中位数均为0, 表明极端高降水事件分布不均, 且极端高降水事件在这些站点中是相当罕见。RX1day_Median和RX5day_Median的振幅分别为21.35 mm和40.35 mm, 进一步强调了极端降水事件的区域差异。SDII_Median的变异性较小, 区间为2.6 mm, 指示降水强度在各站点间较为一致。

从Max值分析看, 不同站点间的极端天气事件差异显著。CDD_Max振幅高达140 d, 相较之下, CWD_Max区间仅为9 d, 进一步表明山西省更容易经历干旱事件, 而潮湿事件的持续时间相对较短。整体来看, 极端降水指标(PRCPTOT_Max、R95p_Max、R99p_Max、RX1day_Max、RX5day_Max)振幅都较大, 分别可达497.9 mm、291.3 mm、377.3 mm、178.6 mm、270.2 mm, 进一步印证了山西省极端降水的分布不均匀性。从Min值分析看, 各站点气候特征差异较小, CDD_Min振幅为21 d, CWD_Min振幅为1 d, PRCPTOT_Min振幅为114.3 mm。降水天数

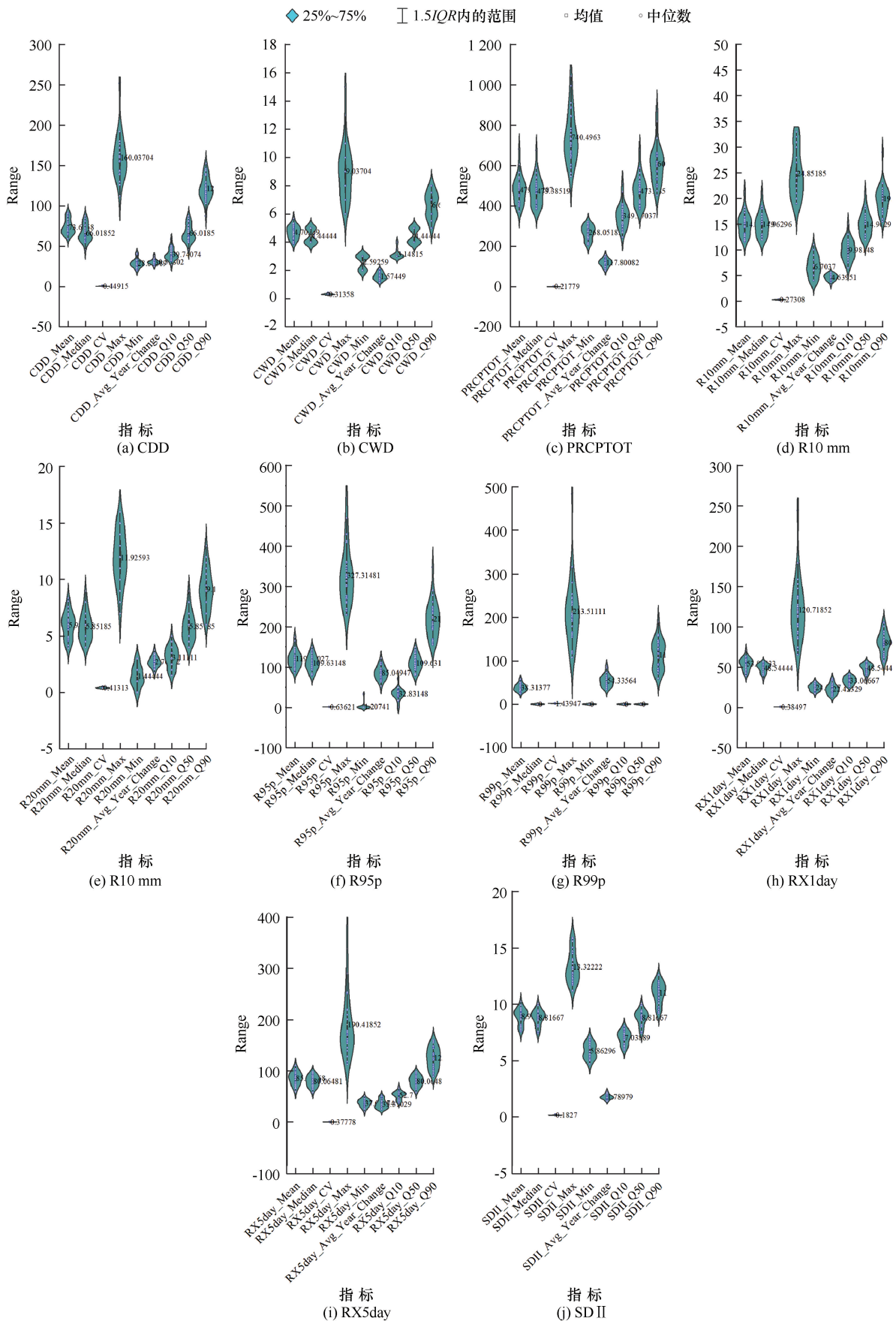


图4 极端降水特征指标计算结果

Fig. 4 Examples of calculation results of extreme precipitation characteristic indicators

(R10mm_Min 和 R20mm_Min) 振幅分别为 7 d 和 3 d, R95p_Min 振幅为 32.6 mm, 而 R99p_Min 均为 0。RX1day_Min 和 RX5day_Min 振幅分别为 15.5 mm 和 31 mm, SDII_Min 振幅为 2.4 mm, 表明这些气候特征的区域差异较小。对比极端降水指标的最值分析, 可以看出极端降水事件的波动性在最大值方面更为显著, 为进一步深入研究山西省气候特征和应对气候变化提供了重要线索和指导。

此外, CV 值的分析结果进一步验证了极端降水事件在不同站点间的显著差异。尤其是 R99p_CV, 最高达 1.85, 平均值为 0.70。从年际波动分析看, PRCPTOT_Avg_Year_Change 波动较大, 振幅为 78.742 mm。极端降水量(R95p_Avg_Year_Change 和 R99p_Avg_Year_Change) 波动显著, 分别为 70.058 mm 和 53.829 mm。RX1day_Avg_Year_Change 和 RX5day_Avg_Year_Change 波动也较大, 分别为 21.658 mm 和 26.756 mm, 不同站点间年际变化幅度差异明显, 表明部分站点面临更大的气候波动风险。

从 Q10 到 Q90 的分析显示, 各站点在气候特征上存在显著差异。首先都显示出干旱和湿润天数之间的明显差异。在 Q10 方面, CDD_Q10 振幅为 32 d, 而 CWD_Q10 振幅仅为 1 d; 在 Q50 方面, CDD_Q50 的振幅为 42.5 d, 而 CWD_Q50 的振幅只有 1 d; 在 Q90 方面, CDD_Q90 的振幅为 65 d, 而 CWD_Q90 的振幅只有 3 d。此外, 在极端降水方面, 除展现出空间差异外, R99p_Q10 与 R99p_Q50 都为 0, 而 R99p_Q90 的振幅为 130.95 mm, 意味着山西省的降水事件中可能经历了较为剧烈的、高强度的极端降水, 这可能对山西省的水资源管理、防洪措施和城市规划等方面产生重要影响。需要进一步研究和监测这些极端降水事件, 以更好地了解气候变化的影响。

综上所述, 不同站点之间在气候特征上存在着显著的差异。干旱和极端降水事件在不同区域的分布不均衡, 而湿润日数和降水强度则相对一致。极端降水事件区域差异较大, 且在最大值方面波动更为显著。降水强度在山西省的波动则相对稳定。

根据图 2 分析结果, 可以得出 CDD 是最具有显著变化的极端降水指标。以 CDD 为代表, 展示山西省极端降水指标特征值的空间分布。得到山西省极端降水指标 CDD 特征值的空间分布, 如图 5 所示。可以看到, 山西省 CDD 空间分布上表现为自南向北, 自西向东减少趋势增加, CDD 的 Mean、Median、Max、Min、Q10 及 Q50 具有相似的空间分布特征,

表现为自北向南梯度式逐渐减少。CDD 的 CV、Ave_Year_Change 及 Q90 具有相似的空间分布特征, 都以东南部阳泉与忻州交界处自北向南辐射减少。CDD 的特征指标空间变化十分显著, 揭示了山西省持续干旱日数的显著减少趋势。

2.2 地貌与极端降水指数的相关性分析

链接山西省气象站点的地貌起伏与海拔数据, 构建山西省极端降水指标、地形起伏与海拔的数据库, 进行山西省极端降水指标与地貌的单因素相关性分析。得到山西省地形起伏度、海拔与 CDD、CWD、PRCPTOT、R10mm 及 Rx5day 指数存在一定的显著相关性, 如图 6 所示。海拔与 CDD 的 Slope 值呈现显著的负相关关系(-0.44), 表明海拔越低 CDD Slope 越高, 即低海拔地区的 CDD 变化更为剧烈; 海拔与 CWD 的 Median、Ave_Year_Change 及 Q50 值都呈现显著的负相关关系(-0.41、-0.42、-0.41), 表明海拔越低 CWD 的 Median、Ave_Year_Change 及 Q50 值越高, 即低海拔地区的 CWD 分布较高海拔区偏高, 但波动也大; 海拔与 PRCPTOT 及 R10mm 的 Slope 值呈现显著的正相关关系(0.46、0.45), 表明海拔越高 PRCPTOT 与 R10mm 的 Slope 越高, 即高海拔地区的 PRCPTOT 及 R10mm 变化更为剧烈; 海拔与 RX5day 的 Min 值具有显著的负相关关系(-0.45), 表明海拔越低 RX5day 的 Min 值越高, 即低海拔地区的 RX5day 的最小值较高海拔区偏高; 海拔与 SDII 的 6 项指标都呈现显著的负相关关系, 表明海拔对 SDII 的影响整体较为显著, 低海拔区的 SDII 相对于高海拔区高。

2.3 不同地貌类型极端降水指数分布特征

结合图 1 和表 2, 可以观察到山西省的丘陵和台地在海拔和地形起伏度上呈现一致性。在台地的面积占比为 16% 的情况下, 范围内的气象站相对较少。鉴于丘陵和台地在高程和起伏度上的相似性, 将山西省 11 类地貌中的丘陵和台地整合, 划分为 7 种地貌类型。选取前述分析得到的显著相关指标 CDD、CWD、PRCPTOT、R10mm 及 Rx5day 有关的共计 13 项, 进行不同地貌类型极端降水指数分布特征分析, 部分分类分布特征如图 7 所示。研究得到, 低海拔平原区的 CDD 的 Slope、CWD 的 Ave_Year_Change、RX5day 的 Min、SDII 的 6 项指标都变化幅度小, 可不考虑这些指标在低海拔平原区的空间变异性; 小起伏低山区的 PRCPTOT 的 Slope 极为集中, SDII 的 Q90 与 Min 较为集中, 可不考虑这些指标在小起伏低山区的空间变异性; 中起伏中山的 CDD 的 Slope 与

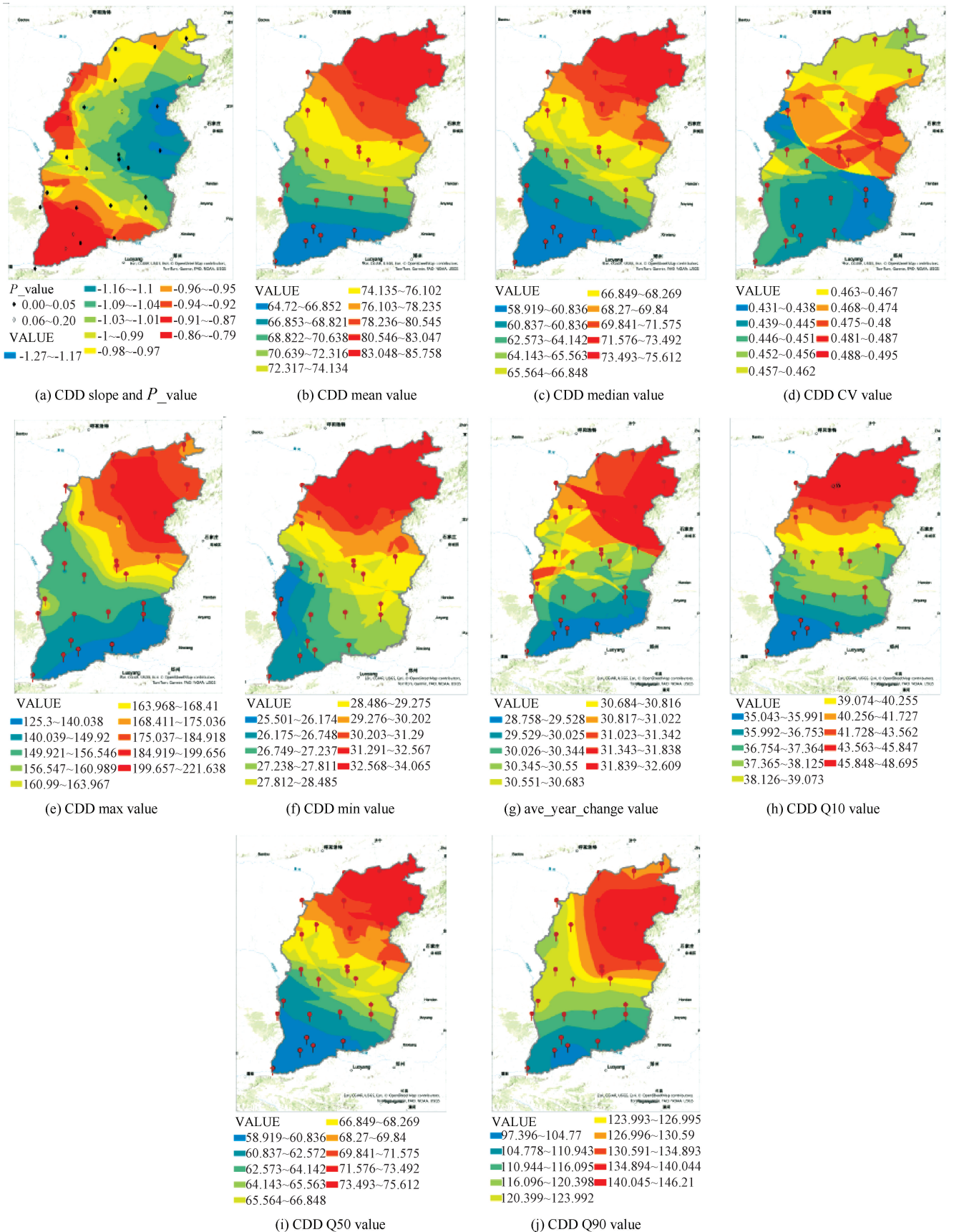


图 5 CDD 特征指标分布

Fig. 5 CDD characteristic index distribution

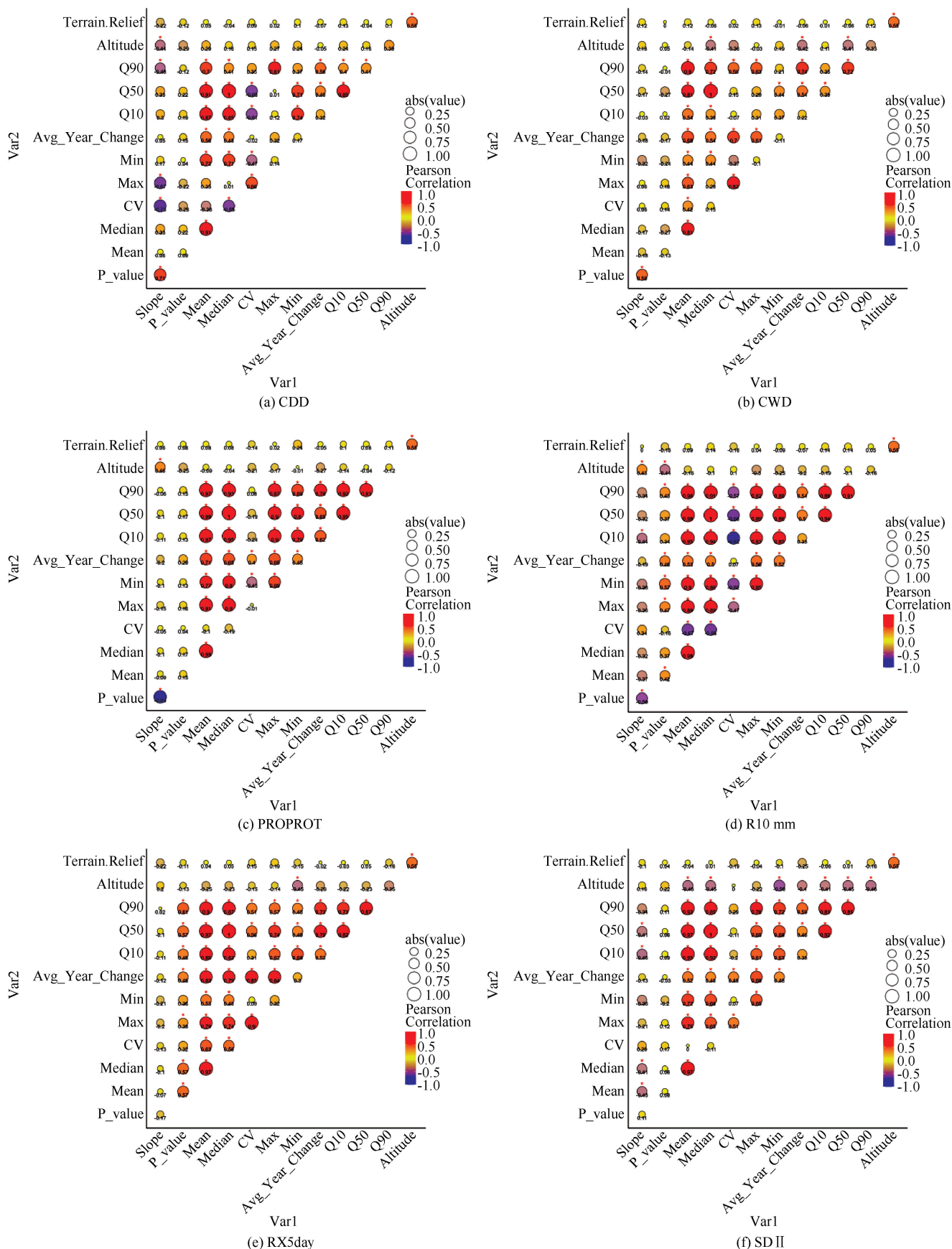


图6 相关系数计算结果

Fig. 6 Results of correlation coefficient calculation

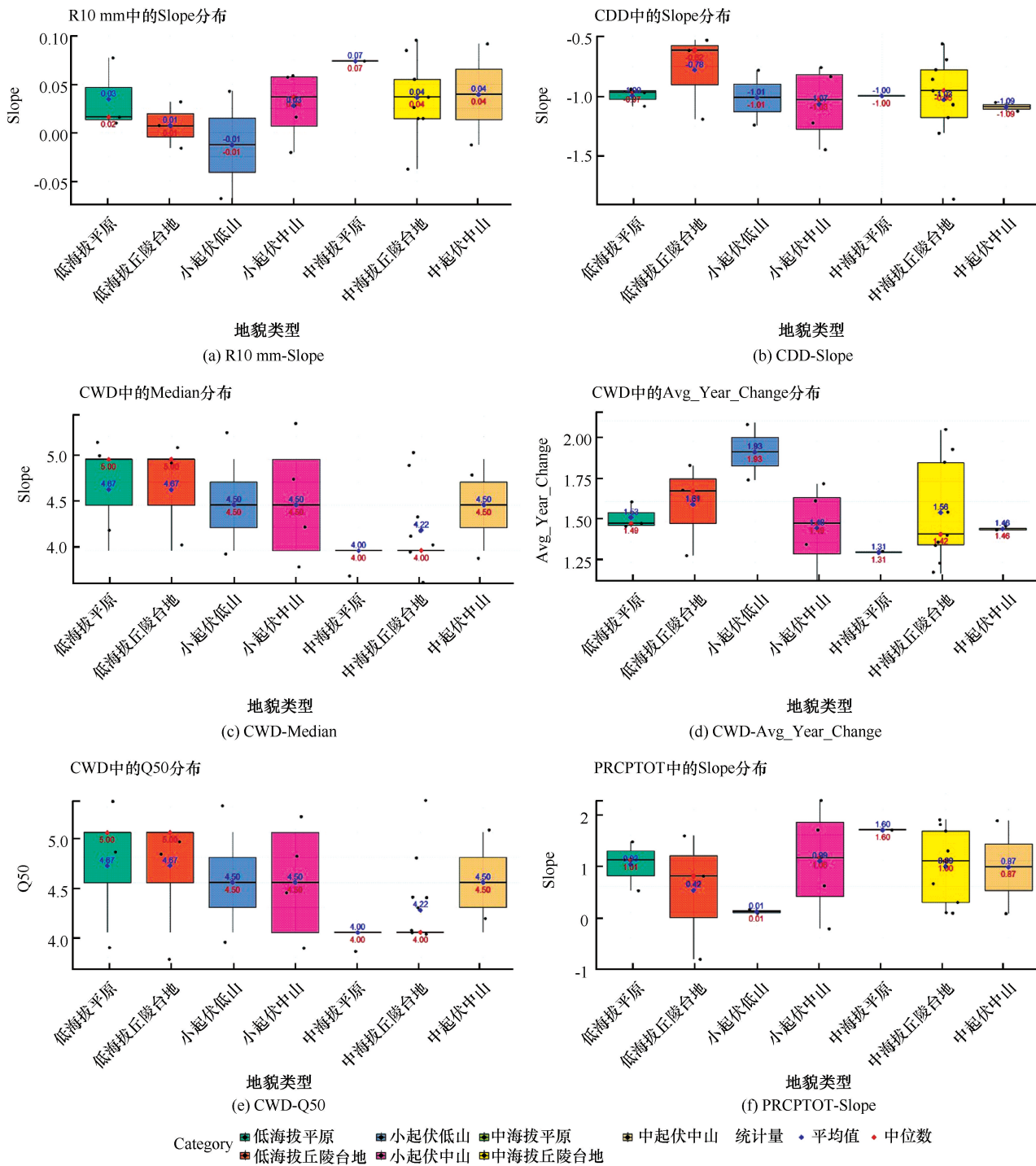


图7 不同地貌类型极端降水指数分布

Fig. 7 Extreme rainfall index distribution of different geomorphic types

CWD的 Ave_Year_Change 较为集中, 可不考虑这些指标在中起伏低中山区的空间变异性; 低海拔丘陵台地地区、小起伏中山、中海拔丘陵台地的各项指标都较为分散, 该地貌区内的极端气候指标需要考虑空间变异; 中海拔平原的站点较少, 有限的数量无法就数据的分布情况进行描述。

3 讨论

从研究结果可以看出, 山西省极端降水指标的空间分布和时间变化具有显著的区域差异性。特别是CDD指标的显著降低趋势和空间分布的南北、西东梯度变化, 反映了区域干旱状况的显著改善, 与

CDD 主要在黄河流域呈现下降趋势的研究成果一致^[24]。尽管山西省大部分极端降水指标(如 PRCP-TOT、R10mm、Rx1day 和 Rx5day)呈现正相关趋势,但显著性较低,表明降水事件的极端性在整体上没有显著增强。

此外,海拔对 CDD、CWD、PRCPTOT 等极端降水指标的影响显著,尤其是与 CDD 的 Slope、CWD 的 Median、Ave_Year_Change、Q50 值及 Rx5day 的 Min 值呈现显著负相关关系。表明低海拔地区的 CDD 变化更为剧烈,这可能是由于这些地区蒸发量较大,导致干旱期更为明显^[25]。低海拔地区的 CWD 分布较高海拔区偏高,但波动也大,可能与当地的气候条件和地理特征有关^[26]。海拔与 Rx5day Min 值具有显著的负相关关系,表明海拔越低,Rx5day 的最小值越高。这意味着低海拔地区在极端降水事件期间更容易出现高强度的短期降水^[27]。而 PRCPTOT 和 R10mm 的 Slope 值与海拔的正相关关系进一步表明,高海拔地区的降水强度和频率可能有所增加,可能是因为这些地区更容易受到大气环流和地形抬升效应的影响^[28]。值得注意的是,SDII 的 6 项指标均与海拔呈显著负相关关系,表明日降水强度在高海拔地区相对较低,可能是因为低海拔地区更容易受强对流天气影响^[29]。

最后,不同地貌类型区的极端降水指标分布特征差异明显,在低海拔平原区,CDD 的 Slope、CWD 的 Ave_Year_Change、RX5day 的 Min、SDII 的 6 项指标变化幅度小。根据我们的研究结果,这些指标在低海拔平原区内的空间变异性不显著,因此在进行相关防灾减灾规划时,可以不考虑这些指标的空间变异性。这一结论与 SMITH^[30](1979)的研究一致,他们也发现低海拔平原区的降水模式相对稳定。对于小起伏低山区,PRCPTOT 的 Slope 极为集中,SDII 的 Q90 与 Min 较为集中。这表明这些指标在小起伏低山区的空间变异性较小,可以不考虑这些指标的空间变异性。在中起伏中山地区,CDD 的 Slope 与 CWD 的 Ave_Year_Change 较为集中,表明这些指标在中起伏中山地区空间变异性较小。这与 MINDER 等^[31](2010)的发现相符,他们指出中起伏中山地区的降水模式受地形影响较大,但变化相对集中。在低海拔丘陵台地、小起伏中山和中海拔丘陵台地,各项指标都较为分散。这表明这些地区的极端气候指标存在显著的空间变异性,需要在防灾减灾规划中重点考虑。LIASAT 等^[32](2010)的研究也支持这一结论,他们指出这些地貌类型区的降水模式复杂多变,受

多种因素影响。

4 结论

本研究分析了 1975—2020 年山西省 27 个气象站的极端降水指标,得到如下重要结论。

(1)CDD 显著降低趋势和其南北、西东梯度分布,显示区域干旱状况显著改善。其余 8 个极端降水指标虽呈正相关趋势,但显著性较低,表明整体降水事件的极端性未显著增强。

(2)海拔对极端降水指标有显著影响,尤其是 CDD 的 Slope、CWD 的 Median、Rx5day 的 Min 值等指标与海拔呈负相关,而 PRCPTOT 和 R10mm 的 Slope 值与海拔呈正相关。这些结果表明高海拔地区降水强度和频率有所增加。

(3)山西省不同地貌类型区的极端降水指标分布特征存在明显差异,低海拔丘陵台地、小起伏中山和中海拔丘陵台地的指标分散性较大。这表明在研究极端气候事件和制定防灾减灾规划时,需考虑空间变异性,以提高区域应对能力和适应性。

尽管我们的研究取得了一系列的成果,但仍存在以下不足与进一步的研究方向:(1)本研究范围较大,而气象站点分布相对稀疏,数据的空间分布可能产生不确定性。在后续研究中,建议增加气象站点的数量和分布密度,以提高数据的代表性和可靠性。(2)在进行极端降水指标的空间分析时,应更加全面地考虑地形因素的影响。除了海拔与地形起伏度之外,还应考虑坡度、朝向与植被覆盖等因素。可以采用更加精细的地形模型和数据分析方法,提高极端降水事件的空间分布和变化趋势的准确性。

参考文献(References):

- [1] LI T X, ZHOU Z Q, FU Q, et al. Analysis of precipitation changes and its possible reasons in Songhua River Basin of China[J]. Journal of Water and Climate Change, 2020, 11(3): 839-864.
- [2] 张殷钦, 康文健, 乔海娟, 等. 气候变化背景下流域生态需水预估: 以好溪流域为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(2): 313-323.
- [3] ZHANG Y Q, KANG W J, QIAO H J, et al. Estimation of watershed ecological water demand under the background of climate change: A case study of Haoxi Watershed[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2): 313-323.
- [3] ZEROUAL S, ZEROUAL S, HAMOUDA B, et al. Monthly extreme rainfall risk envelope graph method development and application in Algeria[J]. Journal of Water and Climate Change, 2021, 12(5):

- 1838-1853.
- [4] 唐莉, 杨冰冰, 魏希, 等. 气候变化对江西省主汛期降雨极值时空差异的影响研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(1): 53-63.
TANG Li, YANG Bingbing, WEI Xi, et al. Study on the impact of climate change on the extreme rainfall distribution in main flood season of Jiangxi Province[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(1): 53-63.
- [5] 刘洁, 黄本胜, 陈晓宏, 等. GPM 遥感降水产品在广东省的极端降水事件适用性分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 87-94.
LIU J, HUANG B S, CHEN X H, et al. Applicability analysis of GPM remote sensing precipitation products in extreme precipitation events in Guangdong Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1): 87-94.
- [6] 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 等. 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.
ZHANG Qiang, LI Jianfeng, CHEN Xiaohong, et al. Spatiotemporal variation characteristics of extreme precipitation probability in Xinjiang based on Copula function[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 3-12.
- [7] 赵丽. 西北干旱区极端强降水的时空分布及变化特征分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2014.
ZHAO Li. Analysis of the spatial and temporal distribution and variation characteristics of extreme heavy precipitation in the arid regions of northwest China[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2014.
- [8] 曹祥会, 龙怀玉, 张继宗, 等. 河北省主要极端气候指数的时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2015, 36(3): 245-253.
CAO Xianghui, LONG Huaiyu, ZHANG Jizong, et al. Spatiotemporal variation characteristics of major extreme climate indices in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(3): 245-253.
- [9] 刘焕才, 许芑, 李曼. 山西夏季不同等级降水时空演变特征及其影响要素研究[J]. 地理科学, 2021, 41(3): 544-552.
LIU Huancai, XU Peng, LI Man. Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of different levels of precipitation in summer in Shanxi[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(3): 544-552.
- [10] 张红英, 李毓富, 刘耀文, 等. 山西东南部气温和降水极值研究[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 589-596.
ZHANG Hongying, LI Yufu, LIU Yaowen, et al. Study on extreme temperature and precipitation in southeastern Shanxi[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(3): 589-596.
- [11] 袁瑞强, 王亚楠, 王鹏, 等. 降水集中度的变化特征及影响因素分析: 以山西为例[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(1): 11-20.
YUAN Ruiqiang, WANG Yanan, WANG Peng, et al. Analysis of changes and influencing factors of precipitation concentration: Taking Shanxi as an example[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2018, 14(1): 11-20.
- [12] 任健美, 李盈盈, 尤莉, 等. 近 53 年山西极端温度和降水变化趋势分析[J]. 地理与地理信息科学, 2014, 30(2): 120-126.
REN Jianmei, LI Yingying, YOU Li, et al. Analysis of trends in extreme temperature and precipitation changes in Shanxi over the past 53 years[J]. Geography and Geo-Information Science, 2014, 30(2): 120-126.
- [13] TONG S, LI X, ZHANG J, et al. Spatial and temporal variability in extreme temperature and precipitation events in Inner Mongolia (China) during 1960—2017[J]. Science of the Total Environment, 2019, 649: 75-89.
- [14] GUAN J, YAO J, LI M, et al. Historical changes and projected trends of extreme climate events in Xinjiang, China[J]. Climate Dynamics, 2022, 59: 1753-1774.
- [15] CHENG Q, ZHONG F, WANG P. Potential linkages of extreme climate events with vegetation and large-scale circulation indices in an endorheic river basin in northwest China[J]. Atmospheric Research, 2021, 247: 105256.
- [16] HUI H, DAOYI G. Extreme climate events over northern China during the last 50 years[J]. Journal of Geographical Sciences, 2003, 13: 469-479.
- [17] REDDY N M, SARAVANAN S. Extreme precipitation indices over India using CMIP6: a special emphasis on the SSP585 scenario[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30: 47119-47143.
- [18] YIN J, XU Z, YAN D, et al. Simulation and projection of extreme climate events in China under RCP4.5 scenario[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9: 89. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2022-1>.
- [19] ALI Z, HAMED M M, MUHAMMAD M K I, et al. Performance evaluation of CMIP6 GCMs for the projections of precipitation extremes in Pakistan[J]. Climate Dynamics, 2023, 61: 4717-4732.
- [20] RAMADHAN R, MARZUKI M, YUSNAINI H, et al. Capability of GPM IMERG products for extreme precipitation analysis over the Indonesian Maritime Continent[J]. Remote Sensing, 2022, 14(2): 412. <https://doi.org/10.3390/rs14020412>.
- [21] SONG X, SONG S, SUN W, et al. Recent changes in extreme precipitation and drought over the Songhua River Basin, China, during 1960—2013[J]. Atmospheric Research, 2015, 157: 137-152.
- [22] 张国宏, 张冬峰, 赵永强, 等. 气候变暖背景下山西区域地表干湿状况变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 281-289.
ZHANG Guohong, ZHANG Dongfeng, ZHAO Yongqiang, et al. Changes in surface wetness and dryness in Shanxi under the background of climate warMing[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 281-289.

- [23] 陈学兄, 毕如田, 刘正春, 等. 基于 ASTER GDEM 数据的山西地形起伏度分析研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(6): 417-421.
CHEN Xuexiong, BI Rutian, LIU Zhengchun, et al. Analysis of terrain ruggedness in Shanxi based on ASTER GDEM data[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 36(6): 417-421.
- [24] 刘慕嘉. 中国极端气候事件时空变化特征及未来预估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2024.
LIU Mujia. Spatiotemporal variation characteristics and future projections of extreme climate events in China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2024.
- [25] MINDER J R, MOTE P W, LUNDQUIST J D. Surface temperature lapse rates over complex terrain: Lessons from the Cascade Mountains [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115 (D14): D14122.
- [26] VIVIROLI D, DÜRR H H, MESSERLI B, et al. Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance[J]. Water Resources Research, 2007, 43(7): 7447.
- [27] LIU C, ALLAN R P, HUFFMAN G J. Co-variation of temperature and precipitation in CMIP5 models and satellite observations[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(13): L13803.
- [28] BARRY R G. Mountain Weather and Climate [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [29] TRENBERTH K E. Changes in precipitation with climate change[J]. Climate Research, 2011, 47(1/2): 123-138.
- [30] SMITH R B. The influence of mountains on the atmosphere[J]. Advances in Geophysics, 1979, 21: 87-230.
- [31] MINDER J R, MOTE P W, LUNDQUIST J D. Surface temperature lapse rates over complex terrain: Lessons from the Cascade Mountains [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115 (D14): D14122.
- [32] LLASAT M C, LLASAT-BOTIJA M, RODRÍGUEZ A. Flash floods in Catalonia: A recurrent situation [J]. Advances in Geosciences, 2010, 26: 105-111.

(责任编辑 王海锋)