

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.03.010

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式: 杨梅焕, 王钰尧, 王涛, 李奇虎, 李扬. 西北干旱区极端降水时空变化特征及驱动因素[J]. 西安理工大学学报, 2023, 39(3): 393-403.

YANG Meihuan, WANG Yuyao, WANG Tao, LI Qihu, LI Yang. Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of extreme precipitation in arid region of northwest China[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(3): 393-403.

西北干旱区极端降水时空变化特征及驱动因素

杨梅焕¹, 王钰尧¹, 王涛^{1,2}, 李奇虎¹, 李扬¹

(1. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054;

2. 西安科技大学 国土空间研究所, 陕西 西安 710054)

摘要: 我国西北干旱区是对全球气候变化响应的敏感区域。为探究气候变化引起的该区域极端气候事件, 本文基于 91 个气象站点 1960—2018 年逐日降水数据, 选用 11 个极端降水指数, 通过趋势分析、M-K 检验和交叉小波变换, 探究了西北干旱区极端降水时空变化特征及其驱动因素。结果表明西北干旱区极端降水指数除持续干燥指数(CDD)表现为下降趋势外, 其它 10 个指数均表现为上升趋势。极端降水事件发生强度、持续时间和发生频率均表现出增加趋势。除持续干燥指数外, 极端降水指数与降水量呈显著正相关关系, 表明西北干旱区降水增加主要由极端降水增加所致。极端降水增加区域主要位于西北干旱区西北侧, 即额尔齐斯-乌伦古河流域、伊犁河流域和天山北坡。西北干旱区极端降水增加与太阳黑子周期变化关系密切, 其次为东亚夏季风和 ENSO。研究结论认为应加强我国西北干旱区灾害监测及防灾减灾能力建设, 科学认识极端降水与大尺度气候因素关系, 降低极端降水导致的气象灾害风险。

关键词: 极端降水; 降水指数; 时空变化; 交叉小波变换; 西北干旱区

中图分类号: K921/927

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2023)03-0393-11

Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of extreme precipitation in arid region of northwest China

YANG Meihuan¹, WANG Yuyao¹, WANG Tao^{1,2}, LI Qihu¹, LI Yang¹

(1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Institute of Territorial Space, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Arid Region of Northwest China is sensitive to global climate change, and to explore regional extreme climate events caused by climate change. Base on the daily precipitation data from 91 meteorological stations from 1960 to 2018, 11 extreme precipitation indices is selected to explore the spatiotemporal variation characteristics and driving factors of extreme precipitation in arid areas of Northwest China through trend analysis, M-K test and cross-wavelet transform. The results show that :1) Except for the continuous drying index (CDD), the other 10 extreme precipitation indices in arid regions of Northwest China show an upward trend; the intensity, duration and frequency of extreme precipitation events show an increasing trend. 2) In addition to the continuous drying index (CDD), the extreme precipitation index is significantly positively

收稿日期: 2022-07-15; **网络首发日期:** 2023-01-12

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20230112.1155.005.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFE0119200); 国家自然科学基金资助项目(41501571); 陕西省软科学研究计划资助项目(2022KRM034)

通信作者: 杨梅焕, 女, 博士, 副教授, 研究方向为沙漠化生态过程。E-mail: ymh8307024@163.com

correlated with precipitation, indicating that the increase in precipitation in arid areas of Northwest China is mainly caused by the increase in extreme precipitation. 3) The increase area of extreme precipitation is mainly located in the northwest side of the northwest arid region, namely the Irtysh-Ulungur River Basin, the Ili River Basin and the northern slope of the Tianshan Mountains. 4) The increase of extreme precipitation in the northwest arid region is closely related to the change of sunspot cycle, followed by the East Asian summer monsoon and ENSO. It is concluded that the construction of disaster monitoring and disaster prevention and mitigation capacity in arid areas of Northwest China should be strengthened, that the relationship between extreme precipitation and large-scale climatic factors should be scientifically understood, and that the meteorological disaster risk caused by extreme precipitation should be reduced.

Key words: extreme precipitation; precipitation index; spatio-temporal change; cross-wavelet transform; northwest arid region

IPCC 第六次评估报告第二工作组 (AR6 WGII) 指出,近年来气候变化影响程度远超过去 5 次(1990, 1995, 2001, 2007, 2014) 报告评估程度,气候风险显现的速度更快并变得更严重^[1-2]。全球气候变暖背景下,全球降水时空格局发生显著改变,极端降水事件发生频率增加,严重影响人类生产生活^[3-5]。我国气候公报指出,2021 年全国共出现 36 次区域性暴雨过程,河南等地暴雨灾害严重,华北和西北地区为 1961 年以来降水量最多的年份^[6]。极端降水事件增多,对经济社会发展、粮食生产、生态环境及人民生命财产安全等造成严重威胁。极端事件时空变化及其驱动因素研究已成为国内外学者关注的热点问题^[7-9]。

我国西北干旱区是全球气候变化响应的敏感区和脆弱区,气候变化对该地区生态环境等具有深远影响^[10-11]。已有研究表明,干旱、半干旱地区天气尺度极端降水对年降水量贡献日趋增大^[12-13]。刘梦洋等^[14]研究认为甘肃陇东地区夏季极端降水呈上升趋势,极端降水分布具有空间差异性。李双双等^[15]研究表明陕北地区强降水在增加,降水趋于极端化,厄尔尼诺与降水表现出明显正相关关系。温煜华等^[16]研究认为近 60 a 祁连山极端降水指数具有一致性,降水向降水日数更多、时间更集中方向发展。王澄海等^[17]研究表明,全球气候变暖背景下,我国西北地区降水主要以极端降水和短时强降水为主。

目前,气候变暖背景下我国西北干旱区降水变化研究已开展较多,但在极端降水与降水关系及其驱动因素研究方面仍略显不足。因此,本文选取我国西北干旱区 91 个气象站点 1960—2018 年逐日降水数据,开展极端降水时空变化特征及其驱动因素研究,以期科学认识极端降水时空变化特征及其与大尺度气候因素关系,为西北干旱区防灾减灾提供科学支撑。

1 研究区概况

西北干旱区(73°E~107°E, 34°N~50°N)地处我国西北部,包括新疆维吾尔自治区全境,内蒙古自治区阿拉善高原,甘肃省河西走廊以及宁夏回族自治区贺兰山以西的地区^[18-19]。同时该地区联结中亚、蒙古、青藏高原以及西伯利亚,是中亚的主要干旱区,东亚季风、西风带环流、南亚季风以及青藏高原的热力变化引起的高原季风对西北干旱区气候形成和变化都会造成不同程度的影响^[20-22]。干旱少雨、沙尘天气较多、气温日较差较大是西北干旱区气候的主要特征^[23-24]。该区域高程介于-156~8 058 m 之间。由于地形因素的影响,气温和降水的空间差异极大,地表蒸散发剧烈,多年平均降水量小于 150 mm,属于极度干旱区和干旱区,生态环境脆弱,极端气候易发^[18, 25-26]。根据水资源、土地资源和环境条件,可将西北干旱区划分为银川平原区(I)、河西走廊区(II)、阿拉善-额济纳高原区(III)、东疆地区(IV)、塔里木河流域区(V)、伊犁河流域区(VI)、天山北坡区(VII)和额尔齐斯-乌伦古河流域区(VI-II)(见图 1)^[27]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

西北干旱区地理分区数据来源于全球变化科学研究数据出版系统(<http://www.geodoi.ac.cn>)中国农业资源环境分区数据集。气象数据来自国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)提供的中国地面气候资料日值数据集(V3.0),时间序列长度为 1960—2018 年,剔除存在数据缺失日期较长站点,选取 91 个站点逐日降水数据。太阳黑子数据来自于太阳影响数据分析中心(SIDC, <https://www.bis.sidc.be/silso/datafiles>)。东亚夏季风数据来自于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc>。

ac. cn)。大气环流异常因子厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)数据来自于美国国家海洋和大气管理局地球系统研究实验室(ESRL, [http://www.esrl.no-](http://www.esrl.no-aa.gov)

aa. gov)。太阳黑子、东亚季风和 ENSO 数据为 1960—2018 年逐年数据。

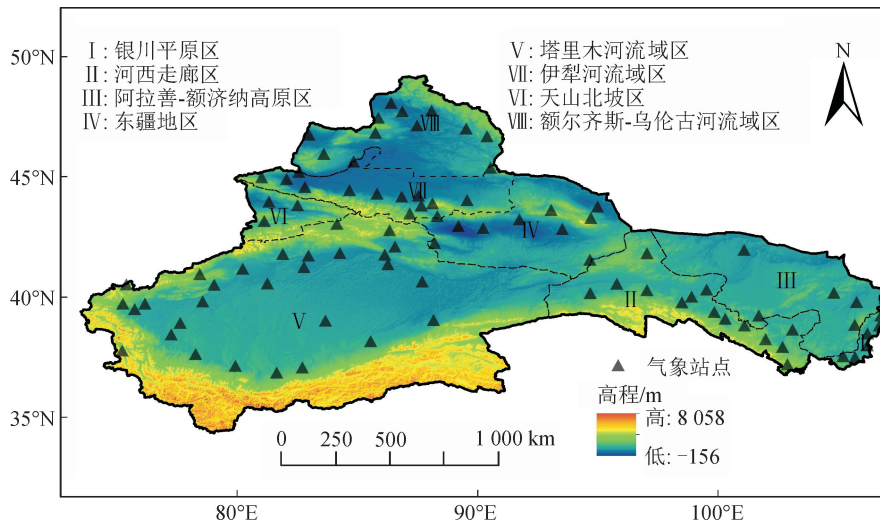


图1 研究区及气象站点分布

Fig. 1 Distribution of study area and meteorological stations

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2020)4619 的标准地图制作,底图无修改。

2.2 研究方法

2.2.1 RCLimDex 模型和极端降水指数选取

RCLimDex 模型^[28]主要是根据 R 语言进行气象数据处理,首先需要进行数据质量控制,无效值判断包括:日最低气温大于日最高气温,降水量小于

0,大于 3 倍标准差阈值,对于无效值较多的月份,设为缺测值,然后进行统计计算获得极端降水指数。极端降水指数采用世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)推荐的 11 个极端降水指数(见表 1)。

表 1 极端降水指数

Tab. 1 Extreme precipitation indices

指标分类	极端降水指数	名称	单位	意义
持续指标	CDD	持续干燥指数	d	最长连续无降水(<1 mm)日数
	CWD	持续湿润指数	d	最长连续降水(≥1 mm)日数
	PRCPTOT	湿日总降水量	mm	大于等于 1 mm 的日降水量的总和
绝对指标	R10MM	中雨日数	d	日降水量≥10 mm 的天数
	R20MM	大雨日数	d	日降水量≥20 mm 的天数
	R25MM	强降水日数	d	日降水量≥25 mm 的天数
相对指标	R95P	强降水量	mm	大于基准期内 95%分位点的日降水量的总和
	R99P	极端降水量	mm	大于基准期内 99%分位点的日降水量的总和
强度指标	RX1DAY	日最大降水量	mm	最大的日降水量
	RX5DAY	5 日最大降水量	mm	最大的连续 5 天降水量
	SDII	降水强度	mm · d ⁻¹	降水量(大于 1 mm)与降水日数的比值

2.2.2 Pearson 相关分析

Pearson 相关分析主要用来反映两个随机变量之间的线性相关程度^[29]。给定两个随机变量 X 和 Y, 其 Pearson 相关系数 r 的计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

式中:n 为样本数量; X_i 和 Y_i 分别是 X 和 Y 对应 i 的观测值; \bar{X} 和 \bar{Y} 为样本均值;r 取值在 -1 和 1 之间,其绝对值越大表示相关程度越高, r > 0 表示正相关, r < 0 表示负相关, r = 0 表示线性不相关。

2.2.3 Kriging 数据空间插值

Kriging 空间插值是用空间上所有已知点的数据加权求和来估计未知点的值,广泛应用于空间统计分析中,在估算过程中充分利用已知观测站的数据空间

结构,可有效规避系统误差^[30]。其计算公式为:

$$Z = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (2)$$

式中: Z 为未知点预测值; λ_i 为参与插值站点对预测值的权重; X_i 为实测气象站点的降水量。

2.2.4 Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall 趋势检验方法对于水文气象长时间序列数据分析具有优势,可分析极端降水指数的长期变化趋势及显著性特征^[31]。对于长时间序列的极端降水数据 $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$, n 表示数据样本的个数,零假设 H_0 表示数据独立且均匀分布,则 Mann-Kendall 趋势检验的统计量 S 计算如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_i 和 x_j 分别为第 i 年和第 j 年的数据值; S 为正态分布,方差 $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$; sgn 为符号函数。当 $n \geq 8$, 服从正态分布的统计量 Z 表示为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0, \\ 0, & S = 0, \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $Z > 0$ 和 $Z < 0$ 分别表示极端降水增加和减少趋势。如果 $|Z| > Z_{(1-\alpha/2)}$, 说明 H_0 假设不成立,即表示数据有显著变化趋势。显著水平 $\alpha = 0.05$ 和 $\alpha = 0.01$ 分别对应 $Z_{(1-\alpha/2)}$ 值为 1.96 和 2.58。

2.2.5 交叉小波变换

交叉小波变换可以从时间尺度研究不同时间序列在时频域中的相互关系,同时体现时间段上一致性和相关性^[32]。设 $W_X(s)$ 、 $W_Y(s)$ 为两个时间序列 X 和 Y 的连续小波变换,则交叉小波谱为 $W_n^{XY}(s) = W_n^X(s) W_n^{Y*}(s)$, 其中 $|W_n^{XY}(s)|$ 值越大,表明 X 和 Y 相关程度越高。

2.3 数据处理与精度验证

本文插值数据主要使用 ArcGIS Arcpy 进行 Kriging 批处理插值得到,并进行 Kriging 插值精度分析。精度验证方法为交叉验证法,基本思想是站点实际观测值 $A(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n)$ 使用 (A_2, A_3, \dots, A_n) 进行插值,得到 A_1 对应位置 Kriging 预测值 B_1 , 以此类推得到 A 的映射 $B(B_1, B_2, B_3, \dots, B_n)$, n 表示检验站点个数。比较 A 和 B 的关系,其

中均方根误差 RMSE 和绝对均误差 MAE 越小,平均误差 ME 越接近于 0,相关系数越接近于 1 表示精度越高,准确度为累积绝对误差与累积预测值比值与 1 的偏离程度。分别选取 1980 年、1990 年、2000 年和 2010 年 4 期数据进行精度验证,选择 40 个站点进行检验。结果表明(见图 2 和表 2),不同年份 Kriging 插值预测的精度与实测值 RMSE 介于 25.82~38.03 之间,MAE 介于 21.62~30.30 之间,ME 介于 4.78~15.90 之间,相关系数为 0.82~0.93 之间,准确度为 0.69~0.81 之间。根据 4 期不同年份精度验证的均值,预测值与实测值之间相关系数为 0.89,准确度为 0.77,表明预测值与实测值之间一致性程度较高,Kriging 插值可用于研究西北干旱区降水空间上变化特征。

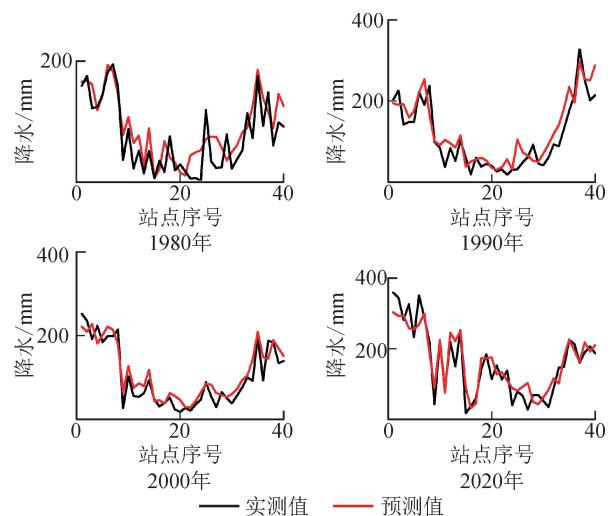


图 2 Kriging 插值精度验证

Fig. 2 Kriging interpolation precision verification

表 2 Kriging 插值取样年份精度分析

Tab. 2 Precision analysis of Kriging interpolation sampling year

取样年份	1980年	1990年	2000年	2010年	平均值
ME	15.03	15.90	11.72	4.78	11.857 5
RMSE	35.06	35.98	25.82	38.03	33.72
MAE	27.79	27.83	21.62	30.32	26.89
相关系数	0.82	0.91	0.93	0.92	0.89
准确度	0.69	0.78	0.81	0.81	0.77

3 结果与分析

3.1 极端降水时间变化特征

对西北干旱区极端降水时间变化特征分析表明(见图 3),图 3(a)~图 3(k)表示不同极端降水指标时间趋势特征,图 3(l)表示年降水量时间趋势特征。

结果表明,持续干燥指数(CDD)表现为下降趋势,下降速率4.382 d/10 a($P<0.05$)。除CDD外,其它指标——持续湿润指数(CWD)、湿日总降水量(PRCPTOT)、中雨日数(R10MM)、大雨日数(R20MM)、强降水日数(R25MM)、强降水量(R95P)、极端降水量(R99P)、日最大降水量(RX1DAY)、5日最大降水量(RX5DAY)和降水强度(SDII)均表现出不同程度上升趋势。其中CWD上升速率为0.0685 d/10a($P<0.01$),PRCPTOT

上升速率为5.691 mm/10 a($P<0.01$),R10MM上升速率为0.178 d/10 a($P<0.01$),R20MM上升速率为0.054 d/10 a($P<0.01$),R25MM上升速率为0.035 5 d/10 a($P<0.01$),R95P上升速率为2.762 mm/10 a($P<0.01$),R99P上升速率为0.961 mm/10 a($P<0.01$),RX1DAY上升速率为0.671 mm/10 a($P<0.01$),RX5DAY上升速率为0.934 mm/10 a($P<0.01$),SDII上升速率为0.0591 mm·d⁻¹/10 a($P<0.05$)。

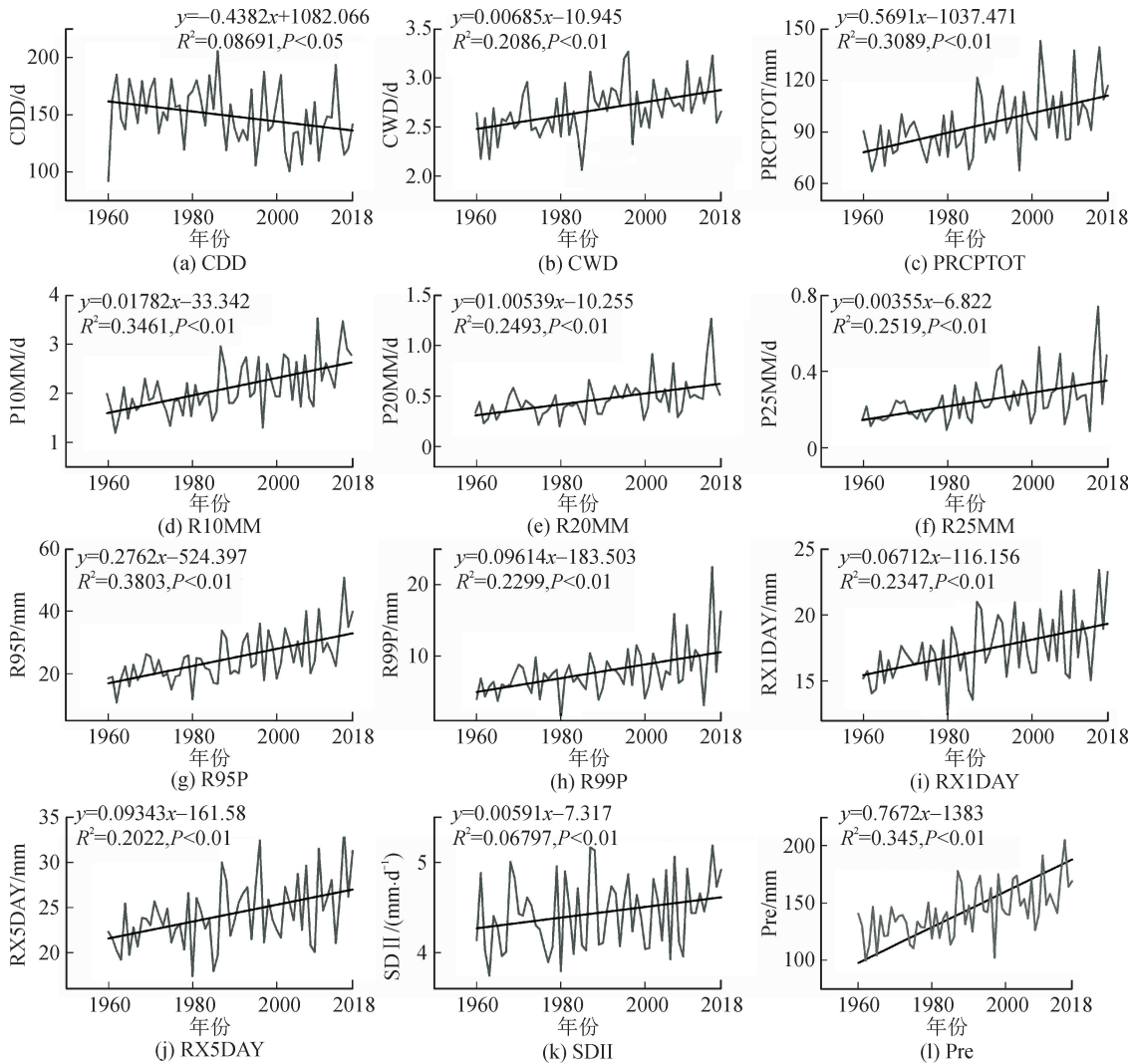


图3 西北干旱区1960—2018年极端降水指数变化趋势

Fig. 3 Trend of extreme precipitation index in northwest arid area from 1960 to 2018

CDD下降和CWD上升反映出西北干旱区1960—2018年表现为逐渐湿润的态势。R10MM、R20MM和R25MM指数上升反映出西北干旱区极端降水天数增加。R95P和R99P上升同样表明西北干旱区极端降水事件在增加。RX1DAY和RX5DAY指数增加,表明西北干旱区极端降水强度增加。

综合11个极端降水指数时间变化特征表明,西

北干旱区降水增加,极端降水增加,极端降水发生强度、持续时间和发生频率均增加。11个极端降水指数与年降水量相关性分析结果表明(见表3),年降水量与CDD呈负相关关系,与其它指数均表现为正相关关系,其中年降水量与PRCPTOT、R10MM、R95P、RX1DAY之间相关系数分别为0.95、0.95、0.91、0.82,且通过了0.01显著性水平检验,表现为显著正相关性,反映出西北干旱区年降水量增加与

极端降水增加存在密切关系。PRCPTOT 与 R10MM、R95P、RX1DAY 的相关系数存在显著正相关关系,表明极端降水增加主要是 R10MM、R95P 和 RX1DAY 增加引起的。

表 3 1960—2018 年西北干旱区极端降水相关系数
Tab. 3 Correlation coefficient of extreme precipitation in northwest arid area from 1960 to 2018

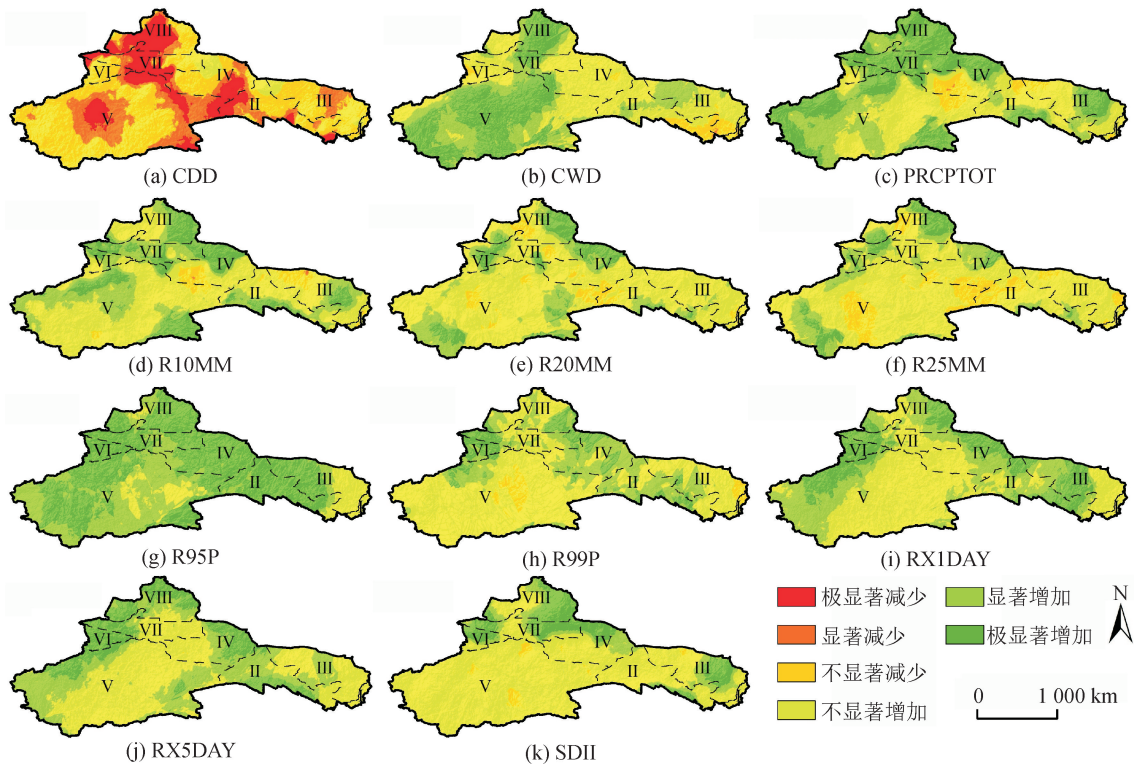
参数	Pre	CDD	CWD	PRCPTOT	R10MM	R20MM	R25MM	R95P	R99P	RX1DAY	RX5DAY
CDD	-0.52**										
CWD	0.71**	-0.43**									
PRCPTOT	0.95**	-0.52**	0.74**								
R10MM	0.95**	-0.51**	0.71**	0.96**							
R20MM	0.77**	-0.37**	0.54**	0.81**	0.80**						
R25MM	0.74**	-0.37**	0.49**	0.76**	0.74**	0.87**					
R95P	0.91**	-0.48**	0.62**	0.90**	0.93**	0.86**	0.86**				
R99P	0.71**	-0.35**	0.48**	0.72**	0.75**	0.79**	0.87**	0.87**			
RX1DAY	0.82**	-0.43**	0.65**	0.86**	0.86**	0.75**	0.81**	0.89**	0.85**		
RX5DAY	0.81**	-0.44**	0.76**	0.85**	0.87**	0.74**	0.74**	0.86**	0.80**	0.95**	
SDII	0.66**	-0.20	0.50**	0.71**	0.73**	0.71**	0.62**	0.72**	0.62**	0.79**	0.81**

注:表中**表示通过 0.01 显著性水平检验。

3.2 极端降水空间变化特征

本文首先对西北干旱区极端降水指数进行空间

插值,然后通过 Mann-Kendall 显著性检验极端降水空间分布和显著性分布结果(见图 4)。



图中 I 区表示银川平原区, II 区表示河西走廊区, III 区表示阿拉善-额济纳高原区, IV 区表示东疆地区, V 区表示塔里木河流域区, VI 区表示伊犁河流域区, VII 区表示天山北坡区, VIII 区表示额尔齐斯-乌伦古河流域区。

图 4 西北干旱区 1965—2018 年极端降水变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of extreme precipitation change trend in northwest arid region from 1965 to 2018
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2020)4619 的标准地图制作,底图无修改。

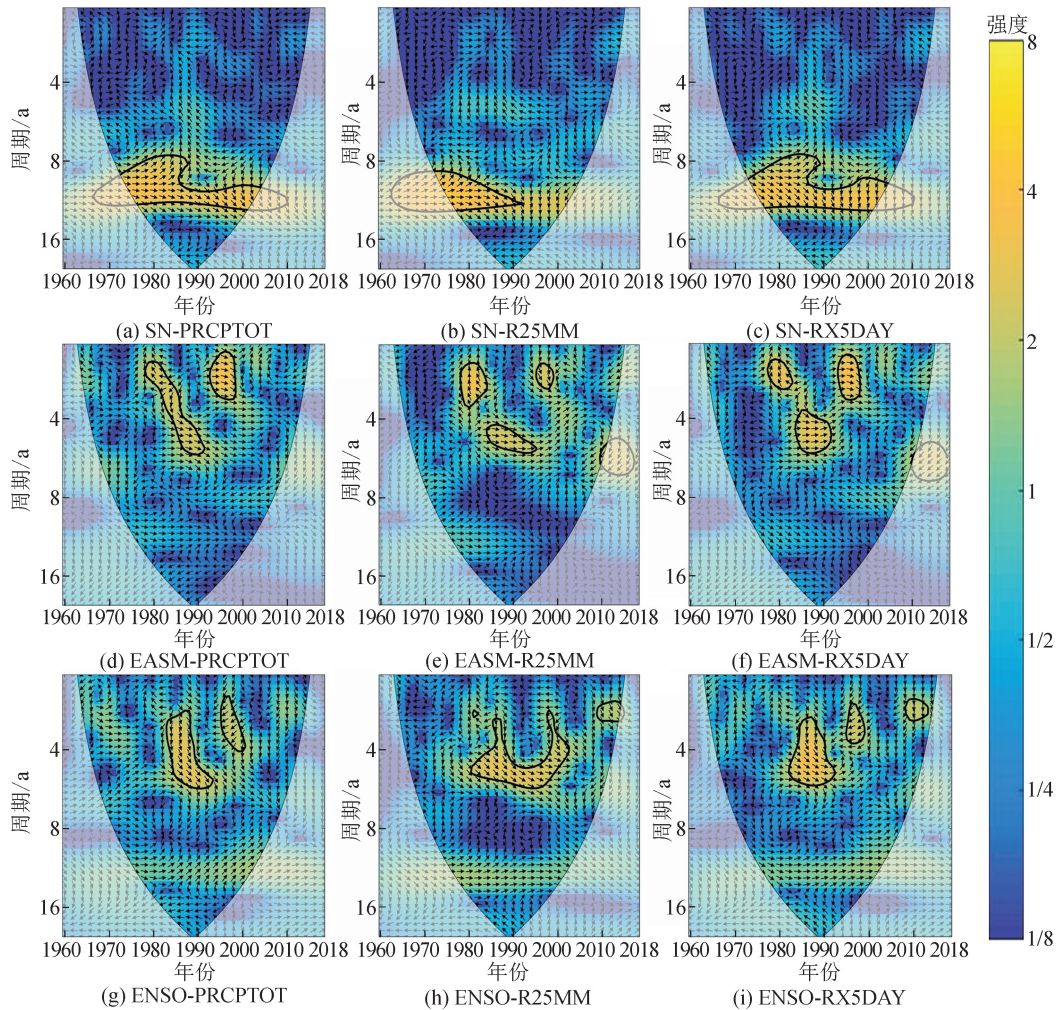
西北干旱区 1960—2018 年极端降水主要发生在区域西北侧,其中以额尔齐斯-乌伦古河流域区、天山北坡区、伊犁河流域区增加趋势显著。银川平原区整体上极端降水变现为不显著增加趋势($0 < Z < 1.96$)。河西走廊区极端降水持续指标 PRCPTOT 和绝对指标 R10MM 主要于南侧祁连山脉区域表现为极显著增加趋势($Z > 2.58$)。同时,相对指标 R95P、R99P 和强度指标 RX1DAY 和 RX5DAY 在河西走廊整体表现为显著增加($1.93 < Z < 2.58$)和极显著增加趋势($Z > 2.58$)。阿拉善-额济纳高原区极端降水主要表现为 PRCPTOT 和 R10MM 的增加,总体极端降水增加趋势不显著。新疆地区极端降水增加趋势显著,主要体现在东疆北部、额尔齐斯-乌伦

古河流域区、伊犁河流域区、天山北坡和塔里木河流域区西北侧。

除 CDD 外,其它 10 个极端降水指数总体表现为增加趋势,分布在西北干旱区北侧和西侧。R95P 表现为显著增加趋势。

3.3 极端降水驱动因素分析

极端降水驱动因子主要参照国内外对于我国极端降水影响因子研究现状,选择太阳黑子(sunspot number, SN)、东亚夏季风(East Asian summer monsoon, EASM)和大气环流异常因子厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-southern oscillation, ENSO)三种,使用交叉小波变换探究出对西北干旱区极端降水影响较强的影响因子(见图 5)。



细弧线为小波影响锥曲线;黑粗线为 95%置信区间;箭头表示相对位相差,“→”表示两者变化位相相同,“←”表示两者变化位相反。

图 5 西北干旱区 1965—2018 年极端降水指数与 SN、EASM 和 ENSO 之间的交叉小波功率谱
Fig. 5 Cross wavelet power spectrum of extreme precipitation index with SN, EASM and ENSO from 1965 to 2018 in arid northwest China

极端降水指数选择代表极端性更强的极端指数 PRCPTOT、R25MM 和 RX5DAY。结果显示,太阳

黑子与 PRCPTOT 在 1965—2010 年间存在 8~12 年显著共振周期,与 R25MM 在 1962—1990 年间存

在 10~13 年显著共振周期,与 RX5DAY 在 1965—2010 年间存在 7~12 年显著共振周期。东亚夏季风与 PRCPTOT 在 1978—1992 年间存在 2~6 年显著共振周期,在 1993—1998 年间存在 1~3 年显著共振周期。东亚夏季风与 R25MM 在 1976—1984 年间存在 1~3 年显著共振周期,在 1985—1996 年间存在 5~6 年显著共振周期,在 1997—2000 年间存在 1~2 年显著共振周期,在 2009—2018 年间存在 5~7 年显著共振周期。东亚夏季风与 RX5DAY 在 1976—1982 年间存在 1~3 年显著共振周期,在 1983—1992 年间存在 4~6 年显著共振周期,在 1994—1998 年间存在 1~3 年显著共振周期,在 2010—2018 年间存在 5~8 年显著共振周期。ENSO 与 PRCPTOT 在 1982—1993 年间存在 2~6 年显著共振周期,在 1995—2001 年间存在 1~5 年显著共振周期。ENSO 与 R25MM 在 1980—2002 年间存在 2~6 年显著共振周期,2009—2017 年间存在 1~3 年显著共振周期。ENSO 与 RX5DAY 在 1981—1992 年间存在 3~6 年显著共振周期,1994—1999 年间存在 2~4 年显著共振周期,2008—2014 年间存在 2~3 年显著共振周期。太阳黑子、东亚夏季风和 ENSO 对 PRCPTOT、R25MM 和 RX5DAY 呈正相关关系,同时交叉小波能量波谱显示太阳黑子相比东亚夏季风和 ENSO 对极端降水因子间能量更强,对于极端降水影响更强。

从不同因子对极端降水的交叉小波分析结果看,太阳黑子、东亚夏季风和 ENSO 对极端降水分别有不同程度影响,太阳黑子对于西北干旱区极端降水影响最强,东亚夏季风和 ENSO 次之。

4 讨论

本文主要研究了西北干旱区 1960—2018 年极端降水时空变化特征及其驱动因素。已有研究表明,受全球变暖导致的全球及区域水循环加快进而导致极端降水呈增加趋势^[33-34]。本研究认为西北干旱区极端降水增加,主要表现为 R10MM、R95P 和 RX1DAY 的增加,且集中在区域西北侧,即额尔齐斯-乌伦古河流域区、伊犁河流域区和天山北坡区,这与杨霞等^[35]研究结论一致。西北干旱区位于大陆内部,研究时段内前 40 年平均降水量仅为 134.18 mm,后 20 年平均降水量为 158.03 mm,年降水量增加趋势显著,加上全球温度不断升高,整体表现为“暖湿化”,与王玉洁等^[36]研究结论相一致,但西北干旱区年降水量仍较少,对气候格局无法造

成影响。毕超等^[37]认为降水增加对于西北干旱区部分区域气候条件会有所改善,部分地区生态环境会向好发展,一些敏感脆弱区生态退化趋势会有所遏制。但是极端降水属于短时强降水,对农业生产和生态建设会产生不利的影

响。本文针对西北干旱区极端降水增加进行驱动因子分析,太阳黑子、东亚夏季风和 ENSO 对极端降水都有着显著影响。邹磊等^[38]认为太阳黑子增加表明太阳活动加强,进而改变大气环流的平均状态,导致区域降水发生变化。陈发虎等^[39]认为东亚夏季风减弱会诱发我国西北干旱区降水增加,全球变暖诱发西太平洋副热带高压极端西伸时在青藏高原东部形成高压中心,有利于印度洋-太平洋水汽向西北干旱区输送。王婷等^[40]也认为大气环流在厄尔尼诺主导下,会诱导西太平洋副热带高压极端西伸,增加对青藏高原地区水汽输送,进而造成西北干旱区降水增加。不同驱动因素对于西北干旱区极端降水影响更多是通过间接影响加快陆地海洋水循环,影响区域极端降水。同时区域极端降水增多,是多尺度气候影响共同作用产生的结果,不同区域极端降水分布存在差异性,西北干旱区不同季节对于极端降水形式也会具有差异性,冬季更多为极端降雪,在今后的研究中,需要结合地理特征和不同时间尺度进行更深入的研究。

5 结论

本文基于 91 个气象站点 1960—2018 年逐日降水数据,选用 11 个极端降水指数,通过趋势分析、M-K 检验和交叉小波变换,探究了西北干旱区极端降水时空变化特征及驱动因素。

1) 西北干旱区 1960—2018 年极端降水指数 CDD 表现为下降趋势,其它 10 个指数均表现为上升趋势。极端降水事件发生强度、持续时间和发生频率均表现为增加趋势。极端降水指数与年降水量表现为显著正相关关系。

2) 西北干旱区年降水量增加且主要表现为极端降水增加,极端降水增加主要表现为 R10MM、R95P 和 RX1DAY 增加。

3) 西北干旱区 1960—2018 年极端降水主要发生在区域西北侧,即额尔齐斯-乌伦古河流域、伊犁河流域和天山北坡。

4) 太阳黑子、东亚夏季风和 ENSO 对极端降水分别有不同程度的影响,太阳黑子对极端降水影响最强,东亚夏季风和 ENSO 次之。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability[R]. 12th Session of Working Group II and 55th Session of the IPCC, 2022.
- [2] 匡舒雅,周泽宇,梁媚聪,等. IPCC第六次评估报告第二工作组报告解读[J]. 环境保护, 2022, 50(9):71-75. KUANG Shuya, ZHOU Zeyu, LIANG Meicong, et al. Interpretation of the main conclusions of IPCC AR6 Working Group II Report[J]. Environmental Protection, 2022, 50(9):71-75.
- [3] KHADGARAI S, KUMAR V, PRADHAN K P. The connection between extreme precipitation variability over monsoon Asia and large-scale circulation patterns[J]. Atmosphere, 2021, 12(11):1492-1512.
- [4] WANG Licheng, YANG Zhengnan, GU Xihui, et al. Linkages between tropical cyclones and extreme precipitation over china and the role of ENSO[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2020, 11(4): 538-553.
- [5] CARRÉRIC A, DEWITTE B, CAI W, et al. Change in strong Eastern Pacific El Niño events dynamics in the warming climate[J]. Climate Dynamics: Observational, Theoretical and Computational Research on the Climate System, 2020, 54(1/2):901-918.
- [6] 中国气象局. 中国气候公报 2021年[R]. 北京: 气象出版社, 2022.
- [7] OJARA M A, LOU Yunsheng, BABAOUSMAIL H, et al. Trends and zonal variability of extreme rainfall events over East Africa during 1960-2017[J]. Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, 2021, 109(1):33-61.
- [8] PEI Fengsong, ZHOU Yi, XIA Yan. Assessing the impacts of extreme precipitation change on vegetation activity[J]. Agriculture, 2021, 11(6):487.
- [9] NGUYEN T T, NAKATSUGAWA M, YAMADA T J, et al. Flood inundation assessment in the low-lying river basin considering extreme rainfall impacts and topographic vulnerability[J]. Water, 2021, 13(7):896.
- [10] PI Yuan Yue, YU Yang, ZHANG Yuqing, et al. Extreme temperature events during 1960 - 2017 in the arid region of Northwest China: spatiotemporal dynamics and associated large-scale atmospheric circulation[J]. Sustainability, 2020, 12(3):1198.
- [11] WANG Yujie, ZHOU Botao, QIN Dahe, et al. Changes in mean and extreme temperature and precipitation over the arid region of northwestern China: observation and projection[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2017, 34(3):289-305.
- [12] 杨昭明,张调风. 1961—2017年青藏高原东北部雨季降水量变化及其贡献度分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1):22-28. YANG Zhaoming, ZHANG Tiaofeng. Analysis of precipitation change and its contribution in the rainy season in the northeast Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2017[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 22-28.
- [13] 曾颖婷,陆尔. 1961—2010年我国夏季总降水和极端降水的变化[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(2): 79-85. ZENG Yingting, LU Er. Changes of summer rainfall and extreme precipitation during 1961-2010 in China[J]. Climate Change Research, 2015, 11(2):79-85.
- [14] 刘梦洋,王小军,柯杭,等. 甘肃省陇东地区夏季极端降水及典型年环流特征分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3):775-784. LIU Meiyang, WANG Xiaojun, KE Hang, et al. Analysis of extreme summer precipitation characteristics and typical years' circulation characteristics in Longdong Region[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 775-784.
- [15] 李双双,孔锋,韩鹭,等. 陕北黄土高原区极端降水时空变化特征及其影响因素[J]. 地理研究, 2020, 39(1):140-151. LI Shuangshuang, KONG Feng, HAN Lu, et al. Spatiotemporal variability of extreme precipitation and influencing factors on the Loess Plateau in northern Shaanxi province[J]. Geographical Research, 2020, 39(1):140-151.
- [16] 温煜华,吕越敏,李宗省. 近60a祁连山极端降水变化研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5):1199-1212. WEN Yuhua, LÜ Yuemin, LI Zongsheng. Changes of extreme precipitation in Qilian Mountains in recent 60 years[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1199-1212.
- [17] 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. WANG Chenghai, ZHANG Shengning, ZHANG Feimin, et al. On the increase of precipitation in the Northwestern China under the global warming[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(9):980-989.
- [18] 刘洋,于恩涛,杨建军,等. 西北干旱区1960-2019年实际蒸散发时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6):75-80, 89. LIU Yang, YU Entao, YANG Jianjun, et al. Characteristics of spatial and temporal variation of actual evapotranspiration in the arid region of Northwest China from 1960 to 2019[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6):75-80, 89.
- [19] 赵晶,周耀治,邓兴耀. 西北干旱区植被覆盖时空动态特征[J]. 林业资源管理, 2017(1):118-126. ZHAO Jing, ZHOU Yaoshi, DENG Xingyao. Temporal-spatial dynamic change characteristics of vegetation coverage in arid regions of Northwest China[J]. Forest Resources Management, 2017(1):118-126.
- [20] 荀学义,胡泽勇,崔桂凤,等. 青藏高原季风对我国西北干旱区气候的影响[J]. 气候与环境研究, 2018, 23(3):311-320.

- XUN Xueyi, HU Zeyong, CUI Guifeng, et al. The effect of Tibetan plateau monsoon on the climate in the arid area of Northwest China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2018, 23(3):311-320.
- [21] ZHANG Hao, SUN Meiping, YAO Xiaojun, et al. Spatial-temporal distribution of tropospheric specific humidity in the arid region of Northwest China[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(3):349.
- [22] 黄文君. 中国西北干旱区干旱时空演变及预估[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2021.
HUANG Wenjun. Spatiotemporal evolution and prediction of drought in arid region of Northwest China [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2021.
- [23] 张静, 魏伟, 庞素菲, 等. 基于 FY-3C 和 TRMM 数据的西北干旱区干旱监测与评估[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(2):690-702.
ZHANG Jing, WEI Wei, PANG Sufei, et al. Monitoring and assessment of drought in arid area in northwest China based on FY-3C and TRMM Data[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(2):690-702.
- [24] 颜楚睿, 刘浏, 黄冠华. 多模式多情景下西北内陆干旱区未来气候变化预估[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(11):1193-1199.
YANG Churui, LIU Liu, HUANG Guanhua. Multi-model projections of future climate change under different RCP scenarios in arid inland region of north China[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(11):1193-1199.
- [25] 徐荣璐, 李宝富, 廉丽妹. 1960-2015 年西北干旱区相对湿度时空变化与气候要素的定量关系[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(6):233-239, 246.
XU Ronglu, LI Baofu, LIANG Lishu. Quantitative relationship between the spatio-temporal change of relative humidity and climatic factors in arid area of Northwest China from 1960 to 2015[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(6):233-239, 246.
- [26] 张学渊, 魏伟, 周亮, 等. 西北干旱区生态脆弱性时空演变分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(12):4707-4719.
ZHANG Xueyuan, WEI Wei, ZHOU Liang, et al. Analysis on spatio-temporal evolution of ecological vulnerability in arid areas of Northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(12):4707-4719.
- [27] 王昊, 李栋梁, 王慧. 中国西北干旱区夏季地面加热场强度的气候特征[J]. *高原气象*, 2016, 35(2):363-374.
WANG Hao, LI Dongliang, WANG Hui. Climate characteristics of surface heating fields in arid region of Northwest China in summer[J]. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(2):363-374.
- [28] 陈昌春, 张余庆, 王腊春, 等. 基于 RCLimDex 模型的江西省极端降水时空变化研究[J]. *中国农村水利水电*, 2013, 11(2):41-45.
CHEN Changchun, ZHANG Yuqing, WANG Lachun, et al. Research on the change of extreme precipitation in Jiangxi Province based on RCLimDex model [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013, 11(2):41-45.
- [29] 束龙仓, 徐丽丽, 袁亚杰, 等. 三江平原典型区地下水流场变化及主要影响因素分析[J]. *水利学报*, 2022, 53(6):644-654.
SHU Longcang, XU Lili, YUAN Yajie, et al. Analysis on variation of groundwater flow field and its main influencing factors in the typical district of Sanjiang Plain[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(6):644-654.
- [30] 王国泰, 张守平, 杨清伟, 等. 基于空间插值方法的重庆降水信息展布[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(3):18-23.
WANG Guotai, ZHANG Shouping, YANG Qingwei, et al. Precipitation information distribution in Chongqing based on spatial interpolation method[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(3):18-23.
- [31] 褚荣浩, 李萌, 谢鹏飞, 等. 安徽省近 20 年地表蒸散和干旱变化特征及其影响因素分析[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(6):1229-1239.
CHU Ronghao, LI Meng, XIE Pengfei, et al. Characteristics and influencing factors of surface evapotranspiration and drought in Anhui Province during recent 20 years [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(6):1229-1239.
- [32] 洪梅, 刘科峰, 张栋, 等. 基于交叉小波分析方法的西太平洋副热带高压年际变率与热带海温及大气环流异常的相关性研究[J]. *热带气象学报*, 2020, 36(2):166-179.
HONG Mei, LIU Kefeng, ZHANG Dong, et al. The correlation of the western pacific subtropical high interannual variability with tropical SST and atmospheric circulation anomalies based on the cross-wavelet analysis[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2020, 36(2):166-179.
- [33] WANG Yujie, ZHOU Botao, QIN Dahe, et al. Changes in mean and extreme temperature and precipitation over the arid region of northwestern China: observation and projection[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(3):289-305.
- [34] 孔锋, 史培军, 方建, 等. 全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J]. *灾害学*, 2017, 32(2):165-174.
KONG Feng, SHI Peijun, FANG Jing, et al. Advances and prospects of spatiotemporal pattern variation of extreme precipitation and its affecting factors under the background of global climate change [J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(2):165-174.
- [35] 杨霞, 周鸿奎, 赵克明, 等. 1991-2018 年新疆夏季小时极端强降水特征[J]. *高原气象*, 2020, 39(4):762-773.
YANG Xia, ZHOU Hongkui, ZHAO Keming, et al. Variation features of hourly precipitation in Xinjiang

- Province during 1991-2018[J]. Plateau Meteorology, 2020,39(4):762-773.
- [36] 王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5):483-493.
WANG Yujie, QING Dahe. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: an overview[J]. Climate Change Research, 2017,13(5):483-493.
- [37] 毕超, 单楠, 毕华兴. 西北极端干旱区近 54 年降水量和温度变化趋势[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(3):90-96.
BI Chao, SHAN Nan, BI Huaxing. Variation trends of temperature and precipitation in extremely arid region of northwestern China in recent 54 years[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(3): 90-96.
- [38] 邹磊, 夏军, 张印, 等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J]. 水资源保护, 2021,37(1):53-60.
ZHOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin[J]. Water Resources Protection 2021,37(1):53-60.
- [39] 陈发虎, 陈婕, 黄伟. 东亚夏季风减弱诱发我国西北干旱区降水增加[J]. 中国科学:地球科学, 2021,51(5):824-826.
- [40] 王婷, 李双双, 延军平, 等. 基于 ENSO 发展过程的中国夏季降水时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2022,37(3):803-815.
WANG Ting, LI Shuangshuang, YAN Junping, et al. Spatio-temporal variation of summer precipitation in China based on ENSO development process[J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(3):803-815.
(责任编辑 王绪迪)

(上接第 316 页)

- [10] ROSCHILDT D H, KARINI R L, BAPTISTA S C A S D, et al. Influence of user behavior on energy consumption in a university building versus automation costs[J]. Energy and Buildings, 2022,256:111730.
- [11] DENG Yujing, GOU Zhonghua, GUI Xuechen, et al. Energy consumption characteristics and influential use behaviors in university dormitory buildings in China's hot summer-cold winter climate region[J]. Journal of Building Engineering, 2021,33:101870.
- [12] 陈淑琴, 徐方, 杜博文, 等. 高校校园办公建筑使用者用能行为特征分析[J]. 建筑热能通风空调, 2016,35(1):31-34.
CHEN Shuqin, XU Fang, DU Bowen, et al. The characteristics of energy use behavior in office buildings on campus [J]. Building Energy & Environment, 2016,35(1):31-34.
- [13] 李小冬, 朱辰. 我国建筑碳排放核算及影响因素研究综述[J]. 安全与环境学报, 2020,20(1):317-327.
LI Xiaodong, ZHU Chen. Summary of research on account of carbon emission in building industry and analysis of its influential factors[J]. Journal of Safety and Environment, 2020,20(1):317-327.
- [14] 白路恒. 公共建筑全生命周期碳排放预测模型研究——以天津市办公建筑为例[D]. 天津:天津大学, 2019.
BAI Luheng. Study on public building life cycle carbon emissions prediction model—taking office buildings in Tianjin as examples[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [15] 王闯. 有关建筑用能的人行为模拟研究[D]. 北京:清华大学, 2014.
WANG Chuang. Simulation research on occupant energy-related behaviors in building[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [16] 孙禹, 冷红, 蒋存妍. 基于人行为影响的住区建筑多主体集成能耗模型[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(1):38-50.
SUN Yu, LENG Hong, JIANG Cunyan. Multi-agent based energy model for domestic buildings based on occupant behavior[J]. Journal of Civil Architectural and Environmental Engineering, 2017,39(1):38-50.
(责任编辑 王卫勋)