

DOI: 10.20103/j.stxb.202410102456

曲芷程, 黄绍普, 刘司博, 王立新, 刘东伟. 1963—2020 年蒙古锡林河流域极端气候及其对水文干旱的影响. 生态学报, 2025, 45(11): 5386-5397.
Qu Z C, Huang S P, Liu S B, Wang L X, Liu D W. Extreme climate and its impact on hydrological drought in the Xilin River Basin of Inner Mongolia over the past 60 years. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5386-5397.

1963—2020 年蒙古锡林河流域极端气候及其对水文干旱的影响

曲芷程, 黄绍普, 刘司博, 王立新, 刘东伟*

内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010021

摘要: 全球变暖导致区域气候变化加剧、极端气候事件频发, 改变流域水文过程, 并进一步加剧径流的不确定性。阐明长时间尺度极端气候与径流变化的相互关系, 对于生态环境脆弱的半干旱区具有重要意义。基于 1963—2020 年间的高分辨率气候和径流实测数据, 采用 Mann-kendall 检验、Pettitt 检验和小波分析等方法, 探究了锡林河流域极端气候变化特征及其对水文干旱的影响。研究表明: (1) 降水量呈现 $-0.2\text{mm}/10\text{a}$ 的波动下降趋势, 而气温和潜在蒸散发则分别以 $0.4^\circ\text{C}/10\text{a}$ 和 $8.2\text{mm}/10\text{a}$ 的速率显著上升。(2) 标准化径流指数 (SRI) 以 $-0.2/10\text{a}$ 的速率呈显著下降趋势, 且在 2001 年发生突变, 水文干旱趋势增强。(3) 极端气温强度和频率指数均显著上升, 月最高气温极大值、年最大日最低气温、夏季日数、热夜日数的气候倾向率分别为 $0.4^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.5^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $4.4\text{d}/10\text{a}$ 、 $1.0\text{d}/10\text{a}$; 而极端降水指数则呈不显著下降趋势, 强降水总量、普通日降水强度、持续湿润指数、强降水日数 (R10mm) 的气候倾向率分别为 $-0.2\text{mm}/10\text{a}$ 、 $-0.1\text{mm}/10\text{a}$ 、 $-0.2\text{d}/10\text{a}$ 、 $-0.1\text{d}/10\text{a}$ 。(4) SRI 与降水、极端降水的强度和频率之间呈正相关, 与温度、潜在蒸散发及极端温度的强度、频率呈负相关。(5) SRI 与降水、气温和潜在蒸散发之间主要存在 6—10a 的显著共振周期, 而与极端气候之间的显著共振周期则为 2—3a。研究发现, 锡林河流域的气候变化呈现暖干化趋势, 极端气温事件显著增多而极端降水事件未能同步增加导致水文干旱风险加剧, 其中降水和 R10mm 是影响径流变化的关键因素。研究结果可为干旱半干旱地区在极端气候影响下的流域水资源管理提供参考。

关键词: 径流; 气候变化; 极端气候; 小波分析; 干旱半干旱区

Extreme climate and its impact on hydrological drought in the Xilin River Basin of Inner Mongolia over the past 60 years

QU Zhicheng, HUANG Shaopu, LIU Sibao, WANG Lixin, LIU Dongwei*

School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

Abstract: Global warming has intensified regional climate change and increased the frequency of extreme climate events, altering watershed hydrological processes and further amplifying runoff uncertainty. Understanding the relationship between extreme climate events and runoff changes over long timescales is of great significance, particularly for ecologically fragile semi-arid regions. This study, based on high-resolution climate and runoff observational data from 1963 to 2020, employs methods such as the Mann-Kendall (MK) test, Pettitt test, and wavelet analysis to explore the characteristics of extreme climate change and its impact on hydrological drought in the Xilin River Basin. The results show that: (1) Precipitation exhibits a decreasing trend of $-0.2\text{mm}/10\text{a}$, while temperature and potential evapotranspiration significantly increase at rates of $0.4^\circ\text{C}/10\text{a}$ and $8.2\text{mm}/10\text{a}$, respectively. (2) The standardized runoff index (SRI) significantly decreases at a rate of

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目 (2022ZY0153); 国家自然科学基金项目 (32160279); 内蒙古自治区重点研发和成果转化项目 (2022YFHH0017)

收稿日期: 2024-10-10; 网络出版日期: 2025-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liudw@imu.edu.cn

-0.2/10a, with a noticeable change point in 2001, indicating an intensified hydrological drought trend. (3) The intensity and frequency of extreme temperature indices have significantly increased. The climatic trends for the monthly maximum temperature (TXx), annual maximum daily minimum temperature (TNx), summer days (SU), and hot nights (TR) are 0.4°C/10a, 0.5°C/10a, 4.4 d/10a, and 1.0 d/10a, respectively. In contrast, the extreme precipitation indices show insignificant decreasing trends. The climatic trends for heavy precipitation total (R95pTOT), simple daily precipitation intensity (SDII), consecutive wet days (CWD), and the number of heavy precipitation days (R10mm) are -0.2mm/10a, -0.1mm/10a, -0.2d/10a, and -0.1d/10a, respectively. (4) The SRI is positively correlated with precipitation and the intensity and frequency of extreme precipitation, and negatively correlated with temperature, potential evapotranspiration, and the intensity and frequency of extreme temperature events. (5) Significant resonance periods of 6—10a exist between SRI and precipitation, temperature, and potential evapotranspiration, while the significant resonance period with extreme climate events is 2—3a. The study found that climate change in the Xilin River Basin is characterized by a trend of warming and aridification. Extreme temperature events have significantly increased, while extreme precipitation events have not shown a corresponding rise, which has led to an exacerbation of hydrological drought risks. Among the various factors influencing this trend, precipitation and the R10mm index, which represents the number of days with heavy precipitation, are key drivers of runoff variability. The findings of this research provide valuable insights that can aid in the management of watershed water resources in arid and semi-arid regions, particularly under the influence of extreme climatic events. These results can inform strategies for coping with the challenges posed by the changing climate in such vulnerable areas.

Key Words: runoff; climate change; extreme climate; wavelet analysis; arid and semi-arid regions

在全球地表平均气温加速升高的背景下,高温、强降水等极端气候以及干旱事件的活动特征显著变化,对人类社会发展和生态环境保护带来了严峻挑战。据《中国气候变化蓝皮书(2022)》统计^[1],1951年到2021年我国地表平均气温以0.26°C/10a的速度上升,极端高温和强降水事件的发生频率显著增加,极端低温事件则有所减少。预计在未来二十年内,全球地表平均气温的升高幅度将达到或超过1.5°C^[2],届时全球许多地区将面临前所未有的气候变化影响。

全球变暖对水循环的影响主要体现在蒸发和降水速率的增加。随着温度升高,大气中可容纳水汽容量增加,这不仅加速了地表水体的蒸发速率,还导致降水模式和强度发生变化^[3]。这些变化进一步影响了地表径流的水文过程,最终改变水资源的时空分布。全球变暖会导致中国大部分地区,尤其是北方流域将经历更严重、更频繁且持续时间更长的干旱^[4]。如果全球温度相较于工业化前期水平上升1.5°C至4.0°C,那么干旱与洪水复合事件的发生概率将显著增加^[5]。此外,气候变化引起的气温升高和降水模式不稳定,进一步加剧了极端天气事件频发,包括强降水、持续高温、气象干旱和水文干旱频发,从而显著提升了自然灾害的风险。在其对人类健康构成威胁的同时,给社会发展和生态系统的稳定性带来了极大挑战,引发科研界的广泛关注^[6]。

径流是水循环的关键组成部分,对于维护地区生态系统安全和多样性至关重要^[7]。然而,径流对气候变化的响应机制复杂且充满不确定性,这为区域水资源管理带来了巨大挑战。尽管水循环中水的总量保持不变,但有限的可利用淡水资源比例与不断增长的人口需求之间的矛盾日益凸显。尤其在干旱和半干旱地区,许多河流面临断流甚至干涸的风险,导致这些流域的可用水资源大幅减少^[8],气候变化对水资源产生的不利影响已然加剧。

在干旱半干旱区,水资源的匮乏和生态环境的脆弱性进一步加剧了气候变化对生态系统的威胁。全球超过41%的土地年降水量不足400mm,而这些地区不仅居住着超过40%的人口,同时还拥有约占全球35%的生物多样性^[9]。独特的生态、气候条件使得这些地区在全球气候变化背景下面临严峻挑战。以往研究^[10-12]多关注极端气候与气象干旱之间的联系,往往忽视了其对地表水文干旱的影响。随着研究的深入,水文与气候

的耦合关系已成为研究热点^[13]。锡林河流域位于中国北方半干旱地区,具有水资源短缺、气候变化敏感性强等特征,是全球变暖背景下受气候变化影响明显的典型区域。另外,该流域提供了近 60 年的高分辨率气象数据和实测径流数据,数据时间序列完整、可靠,为研究提供了坚实的数据支撑。基于此,通过对锡林河流域的分析,本研究旨在揭示极端气候与水文干旱之间的响应关系与变化规律,以为水资源短缺地区的水资源长期调控规划和气候变化应对策略的制定提供科学参考。

1 研究区概况

锡林河流域(43°26′—44°39′N, 115°05′—117°17′E)位于中国内蒙古自治区锡林郭勒盟中南部(图 1),覆盖面积 10786km²,平均海拔 988.5m,主河道全长 175km。流域具有明显的半干旱大陆性季风气候特征,对降雨变化响应迅速,夏季降雨量占全年总降雨量的一半以上。1963—2020 年,年均降雨量 305.3mm,年均气温 2.8℃,年均潜在蒸散发 838.9mm。流域内的主要植被由耐旱草本组成,生长季从 5 月持续到 9 月。主要土壤类型为栗钙土、红砂土和石灰性黑土^[14]。

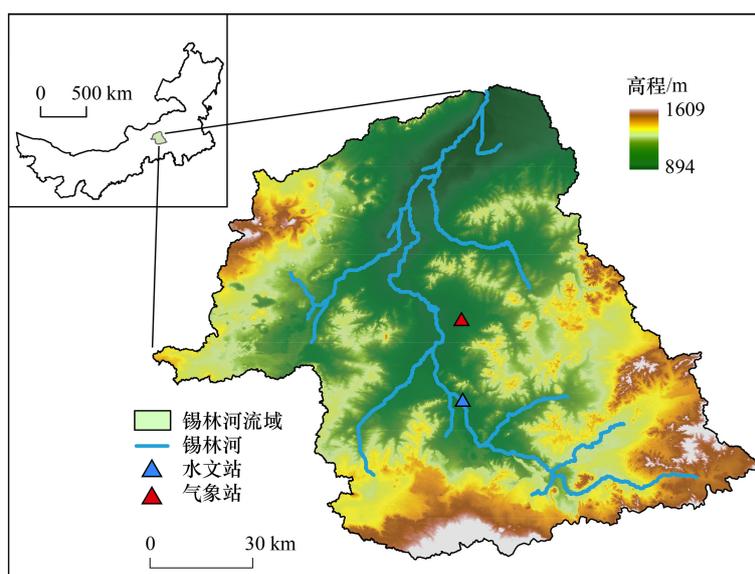


图 1 锡林河流域示意图

Fig.1 Diagram of the Xilin River Basin

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

为探究长时间尺度的极端气候和水文干旱变化规律,本研究选取 1963—2020 年的锡林河气象及径流数据进行分析(表 1)。由于研究区内仅有一个国家气象站——锡林浩特气象站,其数据仅可反映局部区域气候特征,难以表征整体流域的气候变化。因此,本研究选用了经实测气象数据验证的高分辨率气候数据,以更全面地探讨研究区的气候变化特征。其中,气温数据来源于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA5-LAND 大气再分析数据集。ERA5-LAND 是 ERA5 数据的陆面分量修正重构版本,具备更高的空间分辨率和更精确的模拟结果。降水数据来自气候变化研究中心(Climatic Change Research Center),该数据是基于中国 2400 多个气象观测站的实测数据进行插值获得^[15]。潜在蒸散发数据来源于国家青藏高原数据中心(<https://data.tpcd.ac.cn/home>)发布的“中国 1km 逐月潜在蒸散发数据集”,适用于半干旱地区的研究^[16]。水文数据来自研究区内的九曲湾水文站。

表 1 研究数据概述
Table 1 Overview of research data

数据类型 Data type	数据来源 Data source	数据集名称 Dataset name	空间分辨率 Spatial resolution	时间分辨率 Temporal resolution
气温 Temperature	欧洲中期天气预报中心	ERA5-LAND	0.1° × 0.1°	天
降水 Precipitation	气候变化研究中心	CN05 格点化观测数据集	0.25° × 0.25°	天
潜在蒸散发 Potential evapotranspiration	国家青藏高原数据中心	中国 1km 逐月潜在蒸散发数据集	约 1km	月
水文数据 Hydrological data	九曲湾水文站	实测径流数据	—	月
气象数据 Meteorological data	锡林浩特气象站	实测气象数据	—	天

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析和突变检验

通过 Mann-Kendall (MK) 检验方法对锡林河流域的径流、气候的变化趋势进行定量分析。为精确识别标准化径流指数 (Standard runoff index, SRI) 的突变年份, 结合 MK 突变检验和 Pettitt 检验两种方法进行分析。

(1) MK 突变检验法是在时间序列趋势分析中的非参数统计检验方法, 既不要求数据遵循正态分布, 也不受少量异常值影响, 计算较为简洁。对 1963—2020 年的 SRI 时间序列构造秩序列, 定义如下:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \quad j = 1, 2, \dots, i \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

式中, S_k 为从第 1 年至第 k 年中, 第 i 年数值大于第 j 年数值的累计样本数, 当 $k=1$ 时, $S_1=0$ 。在假设时间序列 x 中的观测值是随机且相互独立的条件下, 统计量 UF_k 定义为:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式中, $E(S_k)$ 、 $\text{Var}(S_k)$ 分别为累计数 S_k 的均值和方差。当 $x_1, x_2 \dots x_n$ 等变量相互独立且呈相同连续分布时, $E(S_k)$ 和 $\text{Var}(S_k)$ 可通过如下公式计算:

$$E(s_k) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (3)$$

$$\text{Var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (4)$$

式中, n 为样本数量。按照时间序列顺序计算 UF , 以时间序列的逆序求得 UB 。其中, 给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ 对应的临界值为 1.96。若统计量 UF, UB 的两条曲线的交点位于临界线内, 则交点即为突变开始时间。

(2) Pettitt 检验法也属于非参数的突变检验方法, 其通过构造统计量特征来分析水文要素序列的突变点。其中, 统计量 $U_{t,n}$ 的表达式为:

$$U_{t,n} = U_{t-1,n} + \sum_{i=1}^n \text{sgn}(x_t - x_i) \quad t = 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

式中, t 为样本点对应的时序; x_t, x_i 为随机变量。可能发生的突变时间 K_n 为:

$$K_n = \text{Max-Kend}_{1 \leq t \leq n} | U_{t,n} | \quad (6)$$

显著性统计量 P 的计算公式为:

$$P = 2 e^{-6K_n^2 / (n^3 + n^2)} \quad (7)$$

综上, $U_{t,n}$ 绝对值的最大值 K_n 即为突变点, 当 P 小于显著性水平 α 时, 则存在显著突变点。

2.2.2 极端气候指数

根据气候变化检测和指数专家组 (ETCCDI) 所定义的 27 个极端气候指数, 本文选取了其中 8 个常用的极端气候指数进行分析 (表 2)。其中, TXx、TNx 为极端气温强度指数, SU、TR 表征极端气温频率; R95pTOT、SDII 为极端降水强度指数, CWD、R10mm 表征极端降水频率。

表 2 本文选取的极端气候指数

Table 2 Extreme climate indices selected in this study

类型 Type	极端气候指数 Climate extreme index	全称 Full Name	定义 Definition	单位 Unit
极端气温指数 Extreme temperature indices	TXx	月最高气温极大值	每月中日最高气温的最大值	℃
	TNx	年最大日最低气温	年内日最低气温的最大值	℃
	SU	夏季日数	日最高气温>25℃的日数	d
	TR	热夜日数	日最低气温>20℃的日数	d
极端降水指标 Extreme precipitation indices	R95pTOT	强降水总量	雨日降水量>95%分位置的年累计降水量	mm
	SDII	普通日降水强度	降水量≥1mm的总量与日数之比	mm/d
	CWD	持续湿润指数	日降水量≥1mm的最大持续日数	d
	R10mm	强降水日数	每年日降水量≥10mm的总日数	d

TXx:月最高气温极大值, Monthly maximum value of daily maximum temperature; TNx:年最大日最低气温, Monthly maximum value of daily minimum temperature; SU:夏季日数, Number of summer days; TR:热夜日数, Number of tropical nights; R95pTOT:强降水总量, Total precipitation from very wet Days; SDII:普通日降水强度, Simple pricipitation intensity index; CWD:持续湿润指数, Maximum length of wet spell; R10mm:强降水日数, Number of heavy precipitation days

2.2.3 标准化径流指数

本研究基于锡林河水文站实测径流数据,通过标准化径流指数来表征锡林河流域的水文干旱状况。SRI通过 Gamma 分布概率来表征流量数据的变化,并基于径流量累积概率的正态标准化结果来划分干旱等级。其计算过程如下:

$$SRI = W \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{((d_3 t + d_2) t + d_1) t + 1.0} \quad (8)$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{F(r)^2} \right]} \quad (9)$$

式中, W 为拟合参数,当 $0.5 < F \leq 1$ 时, $S = 1$; 当 $0 < F \leq 0.5$ 时, $S = -1$; c_0 、 c_1 、 c_2 、 d_1 、 d_2 、 d_3 为计算参数,取值分别为 2.515517、0.802853、0.3010328、1.432788、0.189269、0.001308; r 为某时段的径流量; $F(r)$ 为某时段径流量的累积概率值。另外将干旱等级规定为, $0.5 \leq SRI$ 为无旱, $-1.0 < SRI < -0.5$ 为轻旱, $-1.5 < SRI \leq -1.0$ 为中旱, $-2.0 < SRI \leq -1.5$ 为重旱, $SRI \leq -2.0$ 为特旱。SRI 不仅可以反映不同时期的流量变化情况,还充分考虑了气候变化对径流的滞后影响。另外,较长的周期更能准确捕捉径流旱涝的长期演变规律^[17-18]。因此,本文采用 12 个月时间尺度的 SRI 指数来分析锡林河流域的水文变化特征。

2.2.4 周期分析

小波相干 (Wavelet coherence, WTC) 方法可用于描述两个序列在不同时间尺度上变化的一致性,特别是它们的振幅和相位信息^[19]。小波相干性能够揭示不同时间尺度上两变量之间的相关性和显著性^[20],但其在高能量区的解析能力有限。为此,本文采用交叉小波 (Cross wavelet transform, XWT) 方法,来进一步分析 SRI 和气候变量在高能量区不同时期域的相关性特征。两种方法意义明确、计算方便,均已被广泛应用于气候变化和径流模式的研究中^[21-22]。

3 结果与分析

3.1 流域气候变化特征

3.1.1 气温、降水、潜在蒸散发的变化趋势

1963—2020 年锡林河流域的气候变化情况如图 2 所示。图中表明,锡林河流域年降水量在 207.25—457.09mm 之间波动,平均降水量为 305.32mm。最高降水量出现在 1998 年,最低值则发生在 2005 年,整体以 $-0.2\text{mm}/10\text{a}$ 的变化速率呈不显著 ($|Z| = 0.15$, 远小于 1.96) 的下降趋势。气温变化则表现出极显著的上升趋势

势($|Z| \geq 2.58$),倾向率为 $0.4^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。最低年均温出现在 1969 年,为 0.22°C ;最高年均温为 5.18°C 发生在 2007 年。潜在蒸散发同样表现出极显著的上升趋势($|Z| \geq 2.58$),倾向率为 $8.2\text{mm}/10\text{a}$,最低值为 1976 年的 783.91mm ,最高值出现在 2007 年,为 913.98mm 。

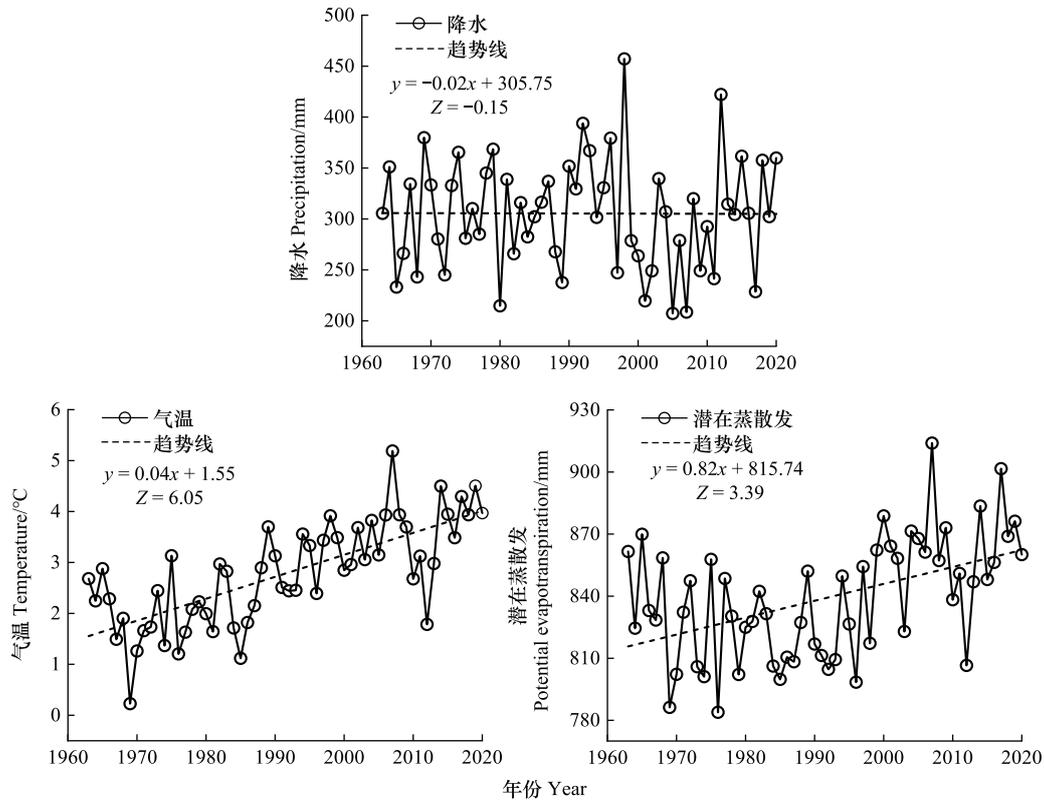


图 2 锡林河流域降水、气温和潜在蒸散发的变化情况

Fig.2 Changes in precipitation, temperature, and potential evapotranspiration in the Xilin River Basin

3.1.2 极端气候的发生频率和强度

分析 1963—2020 年锡林河流域的极端气候变化趋势(图 3)可以看出,极端气温指数均呈显著升高趋势,而极端降水指数则呈不显著的下降趋势。表征极端气温强度的 TX_x 、 TN_x 均显著升高($|Z| \geq 1.96$),倾向率分别为 $0.4^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.5^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。另外,极端降水强度指数 R95pTOT 、 SDII 虽然呈下降趋势,但变化并不显著($|Z| < 1.96$),倾向率分别为 $-0.2\text{mm}/10\text{a}$ 、 $-0.1\text{mm}/10\text{a}$ 。在极端气温发生频率方面, SU 、 TR 分别以 $4.4\text{d}/10\text{a}$ 、 $1.0\text{d}/10\text{a}$ 的速率呈极显著上升趋势($|Z| \geq 2.58$)。从极端降水发生频率来看, CWD 和 R10mm 分别以 $-0.2\text{d}/10\text{a}$ 、 $-0.1\text{d}/10\text{a}$ 的速率呈下降趋势,且均不显著($|Z| < 1.96$)。

3.2 水文干旱变化特征分析

1963—2020 年锡林河流域标准化径流指数和径流量变化趋势如图 4 所示。其中, SRI 在近 60a 内呈极显著下降趋势($|Z| \geq 2.58$),倾向率为 $-0.2/10\text{a}$ 。 SRI 最高达到 1993 年的 3.33,最低值为 2009 年的 -1.77 。从多年平均月径流量的变化规律来看,年内径流分布不均,呈现“双峰特征”。4 月多年平均径流量最高,占全年总径流量的 36.24%,之后逐渐降低,并在 7、8 月份再次达到峰值。9 月至次年 3 月的径流量较低,尤其在 12 月至次年 2 月,径流量接近为 0。

从基于 MK 方法的 SRI 突变检验结果来看, UF 和 UB 曲线在 2001 年存在交点,且交点位于置信区间内。另外,基于 Pettitt 方法的结果显示,极大值同样出现在 2001 年,且通过了显著性检验。综合两种方法的突变检验结果可以推断, SRI 的突变年份为 2001 年,即从 2001 年开始, SRI 从增加趋势转变为下降趋势。

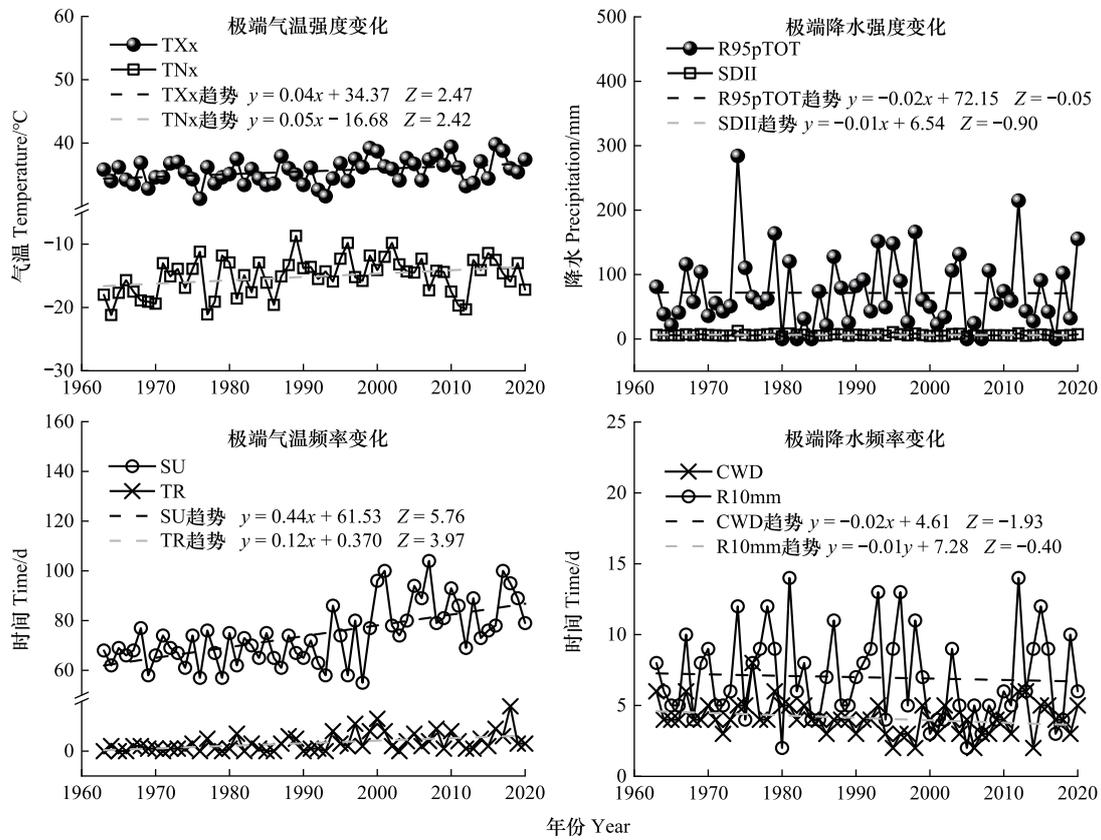


图3 极端气候的发生频率和强度

Fig.3 Frequency and intensity of extreme climate events

TXx:月最高气温极大值, Monthly maximum value of daily maximum temperature; TNx:年最大日最低气温, Monthly maximum value of daily minimum temperature; SU:夏季日数, Number of summer days; TR:热夜日数, Number of tropical nights; R95pTOT:强降水总量, Total precipitation from very wet Days; SDII:普通日降水强度, Simple pricipitation intensity index; CWD:持续湿润指数, Maximum length of wet spell; R10mm:强降水日数, Number of heavy precipitation days

在 SRI 突变之前(1963—2000 年), 锡林河流域水文干旱事件的平均发生频率为 1.62 次/10a, 且干旱事件的强度较低, 均为轻度干旱; 而突变后(2001—2020 年), 水文干旱事件的平均发生频率增加至 7.50 次/10a, 干旱强度也有所增强。其中, 流域内共发生 9 次轻度干旱、5 次中度干旱和 1 次重度干旱事件。突变后水文干旱事件在时间分布上表现为频率和强度均增加, 流域水文发生显著变化。

3.3 水文干旱对各气候因素的响应

通过交叉小波和小波相干分析, 得到 1963—2020 年锡林河流域 SRI 在年时间尺度上对各气候要素的响应关系(图 5)。从图中可见, SRI 与降水、气温和潜在蒸散发在高/低能量区的显著共振主要分布在 1987—1995 年(周期约为 5—7a)和 1965—1997 年(周期约为 6—11a)。SRI 与降水在高/低能量区的对应频段均呈正相关, 而 SRI 与气温、潜在蒸散发的位相关系较为一致, 均表现为负相关。其中, SRI 与降水的小波谱中箭头主要偏向右上, 表明 SRI 滞后于降水的变化; 而 SRI 与气温、潜在蒸散发的小波谱中的箭头大多略微偏向左下, 表明 SRI 的变化超前于气温和潜在蒸散发的变化。

分析 SRI 与极端气温强度指数的关系可知, SRI 与 TXx 的关系在高/低能量谱中表现较弱; 而 SRI 与 TNx 的显著共振主要在 1974—1983 年(周期约为 3—6a)、1975—1980 年(周期约为 6—7a)等多时间尺度, 且均表现为负相关性。SRI 与极端气温频率指数之间存在约 2—3a、6—7a 的显著共振周期, 对应时域为 1985—1995 年; 从小波相干谱来看, 两者与 SRI 之间均呈负相关性。从 SRI 与 R95pTOT 之间的小波能量谱中可以看出,

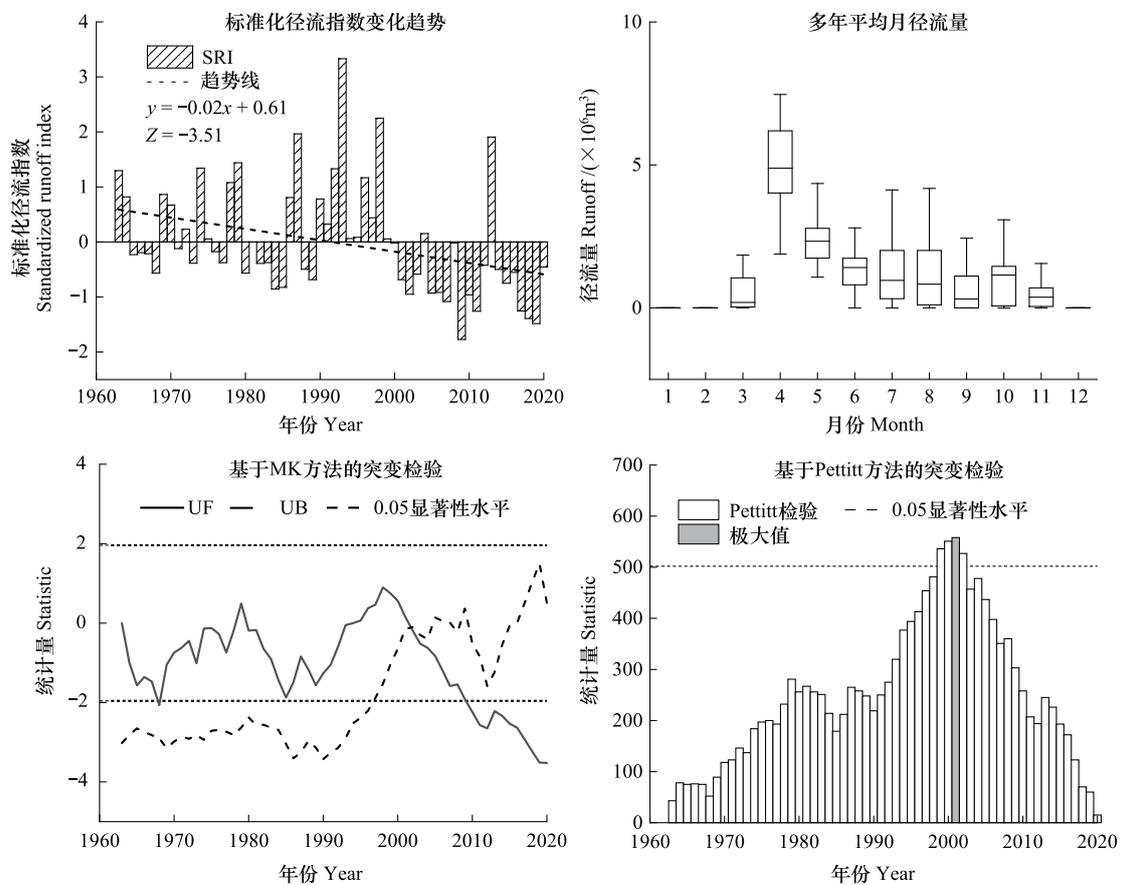


图 4 锡林河流域的水文变化趋势

Fig.4 Hydrological change trends in the Xilin River Basin

SRI:标准化径流指数 Standardized runoff index; UF:正向趋势统计量 Forward trend statistic; UB:反向趋势统计量 Backward trend statistic

高能量区主要在 1986—1999 年,存在 2—3a、17—18a 的显著共振周期。SRI 与 CWD 的小波交叉谱表明,二者仅在 2010—2014 年存在 2—4a 的显著共振。SRI 与 SDII、R10mm 的高能量区分布较为相似,主要呈现为 1975—1995 年的 2—3a、4—7a 的显著共振。从小波相干谱可见,SRI 与各极端降水指标之间的箭头主要偏右,说明 SRI 与极端降水之间呈正相关。

另外,由 SRI 与各影响因素的小波相干性分析统计结果(表 3)来看,相比于气温和潜在蒸散发,降水对水文干旱情况影响程度更高。而 SRI 对极端气候要素的响应程度从高到低依次为 R10mm、SU、R95pTOT、SDII、TR、TXx、CWD、TNx。

表 3 SRI 与各气候要素之间小波相干性分析的统计值

Table 3 Statistical values of wavelet coherence analysis between SRI and climate variables

指标 Metrics	气候要素 Climate variables										
	PRE	TEM	PET	TXx	TNx	SU	TR	R95pTOT	SDII	CWD	R10mm
平均小波相干值 AWC	0.66	0.37	0.55	0.42	0.37	0.62	0.45	0.54	0.49	0.38	0.63
显著相干性百分比 面积 PASC	45.10%	8.08%	25.89%	8.99%	10.95%	40.16%	13.21%	29.90%	24.70%	16.33%	40.44%

AWC:平均小波相干值,Average wavelet coherence;PASC:显著相干性百分比面积,Percentage area of significant coherence

4 讨论

4.1 锡林河径流干旱趋势及对气候的响应

过去近 60 年间,锡林河流域的气温以 0.4℃/10a 的速率显著上升,远高于同期全球升温趋势(0.2℃/10a)^[23]。

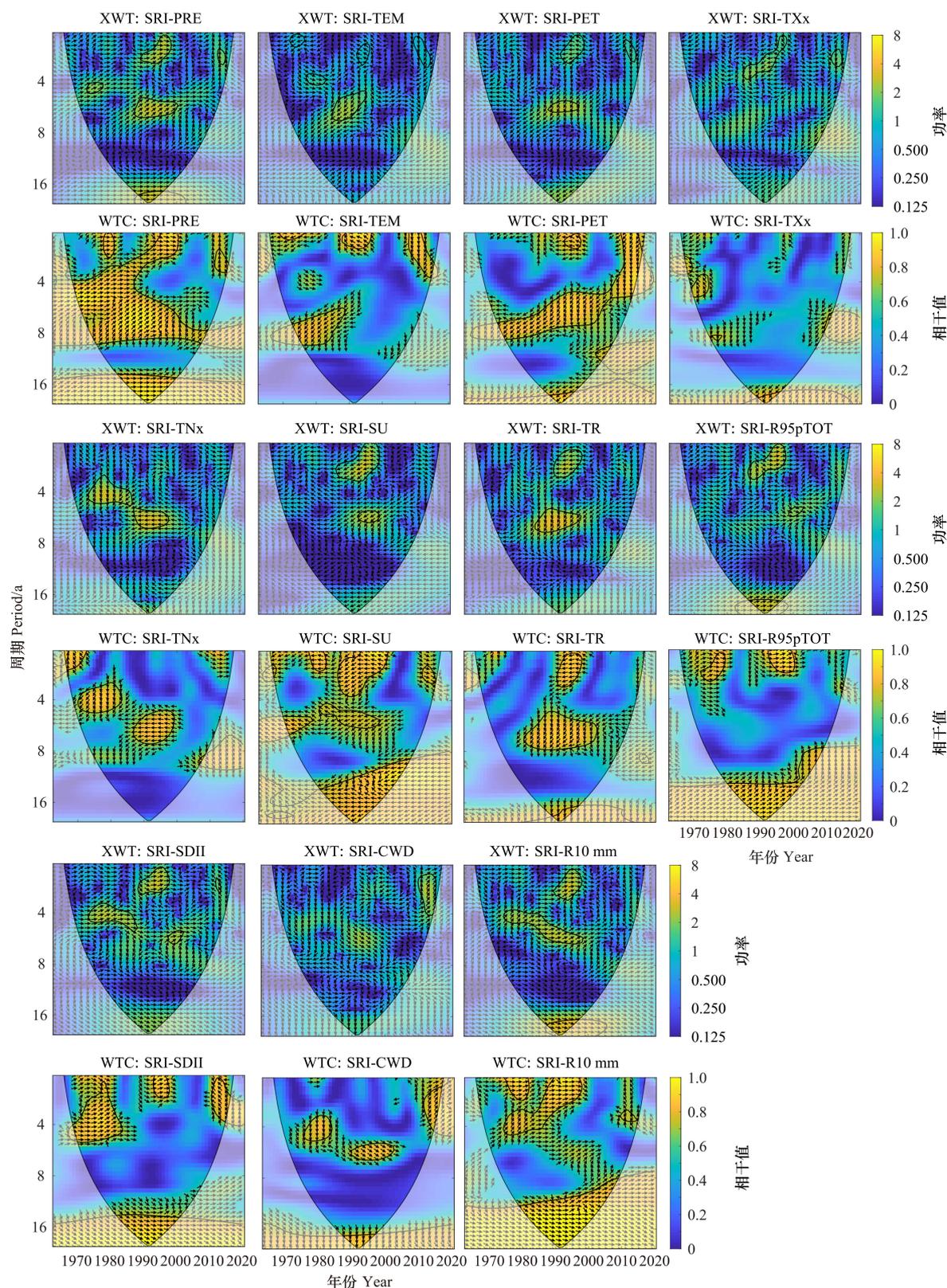


图5 SRI与各气候要素之间的小波交叉谱和小波相干谱

Fig.5 Wavelet cross-spectrum and wavelet coherence spectrum between the SRI and climate factors

U型细实线是小波边界效应影响锥,在该细实线外的灰色阴影区域的数值受边界效应影响不予分析;而粗黑实线内的区域代表已通过置信水平为95%的红噪声检验,两变量呈显著相关性;←表示两变量间相位相反,即SRI与气候因素呈负相关关系;→表示两变量间相位一致,即SRI与气候因素呈正相关关系;↑表示SRI滞后于气候因素变化1/4周期;↓表示SRI超前于气候因素变化1/4周期;XWT:交叉小波谱 Cross wavelet transform; WTC:小波相干谱 Wavelet coherence; PRE:降水 Precipitation; TEM:气温 Temperature; PET:潜在蒸散发 Potential evapotranspiration

降水、潜在蒸散发的倾向率分别为 -0.02mm/a 、 0.82mm/a ,相较于张璐等^[24]的研究结果分别低 0.16mm/a 、高 1.43mm/a ,这可能与研究时期和研究方法的差异有关。针对干旱半干旱区观测站点稀少的问题,张璐等采用1960—2018年研究区周边气象站点数据,并使用偏最小二乘回归插值法进行处理;而本研究所选取的高分辨率气象数据是基于1963—2000年全国气象站点数据,并通过距平逼近法得到。结合径流突变年份的分析,研究区气候干燥指数从1963—2000年的2.65上升至2001—2020年的2.94,气候整体呈暖干化趋势,这与杨立哲等^[25]研究结论一致。

极端气温强度和频率的显著升高趋势表明,气候变暖在锡林河流域的影响尤为明显,与此前研究发现的内蒙古地区极端高温事件呈显著上升趋势的结果相符^[26]。极端高温的增加直接导致更频繁、更强烈的热浪,加剧干旱和高温对农业生产和粮食安全的负面影响^[27]。此外,热浪会增加中暑、心血管疾病和呼吸问题的发生率,并可能引发野火、恶化空气质量,进而对公共健康产生更大的威胁^[28—29]。在全球大部分地区极端降水呈现增加趋势的背景下^[30],锡林河流域的极端降水强度和频率均表现出波动下降趋势。这可能会加剧该地区的水资源短缺问题,影响农业灌溉、工业用水和居民生活用水,同时进一步提升生态环境的脆弱性。

锡林河径流量呈显著下降趋势,近年来断流现象频发,这与气候变暖密切相关^[31]。随着全球气温的升高,锡林河流域的潜在蒸散发量显著增加,导致更多的水分从地表蒸发,从而减少了径流量。研究发现,1963—2020年期间,锡林河径流在2001年发生突变,这与张阿龙等^[32]的研究结果一致,而与Zhou等^[33](突变时间为2000年)和张璐等^[34](突变时间为1998年)在近40年锡林河径流时间序列分析中的结论相近。造成这一偏差的原因可能是本研究采用了更长时间尺度的径流数据。从径流的年内分布来看,4月径流占比最大,这与全球变暖导致的区域升温($0.4^\circ\text{C}/10\text{a}$)密切相关。升温加速了冰雪融化,促使更多的地表融水提前汇入河道,进而增强了融雪季初期的径流量^[35]。然而,径流量的短期增加也为水资源管理带来了新的挑战。随着气候持续变暖,未来的融雪可能会加剧,导致更频繁的极端水文、气候事件,如春季洪水和夏季干旱^[36]。

综合AWC和PASC(表3)的结果发现,锡林河径流对降水的敏感性最强,分别为0.66%和45.10%。这表明在不同时间尺度上,降水对径流变化具有持续且显著的影响,进一步揭示了降水作为流域内主导因素的长期稳定作用,这是因为降水是干旱和半干旱地区的重要限制因素。从极端气候角度分析,相比于极端高温、极端降水强度,径流与强降水日数和夏季日数的相关性最强(WTC分别为0.63、0.62;PASC分别为40.44%、40.16%)。

极端高温事件的增多会加剧土壤表层水分蒸发。同时,土壤含水量下降会通过影响土壤水力特性(如导水率)改变入渗过程,减少壤中流的形成,进而影响流域水文过程。虽然单日高温事件强度较大,但其持续时间较短,对径流的影响主要表现为短期内蒸发量增加,难以显著改变径流总量。而持续降水会导致土壤趋于饱和,减少土壤渗透能力,多余降水将增加地表径流量^[37]。单日强降水事件尽管能在短时间内迅速增加径流量,但若缺乏持续性,其对径流总量的贡献相对有限。相比之下,年降水日数的增多意味着更长时间的水量输入和更广泛的水文响应,因此径流量与年降水日数的相关性更为紧密。此外,SRI与R10mm的相关性(WTC为0.63,PASC为40.44%)要远高于CWD(WTC为0.38,PASC为16.33%),原因是CWD的降水强度较低,土壤通常能够逐渐吸收水分,增加渗透性,从而减少了直接汇入河道的地表径流量。

4.2 不确定性分析

鉴于径流和气候变化是一个持续且复杂的过程,分析二者在较长时间尺度上的变化特征及响应关系具有重要意义。本研究的时间跨度近60年,与自然宏观的水文-气候过程相比,该时间尺度仍显不足,可能导致研究结果存在一定的不确定性。一方面,自然因素如地下水波动^[38]、积雪融化^[39]以及地表植被覆盖变化^[40]等,通过改变流域下垫面特征和水文循环过程,影响径流的季节性和年际变化规律。另一方面,人类活动的干预作用日益显著^[41—43],主要表现为水利工程建设(如堤坝、水库、坑塘等)、土地利用方式改变(如农田灌溉、植树造林等)以及社会经济发展带来的用水需求增加(如工业生产和居民生活用水等)。然而,由于缺乏足够的实测数据,未能对这些因素进行更深入讨论。基于上述分析,我们为后续研究提出以下展望:通过构建

水文模型,模拟预测未来径流变化趋势,阐明径流对气候变化和人类活动的响应机制,为区域水资源管理和旱涝灾害预警提供科学决策支持。

5 结论

(1)流域气候呈现明显的暖干化趋势。降水虽呈下降趋势,但不显著;气温和潜在蒸散发则均呈显著升高趋势。

(2)锡林河流域的水文干旱趋势显著增强,水文干旱事件的平均发生频率从突变前的 1.62 次/10a,上升到突变后的 7.50 次/10a,且干旱强度也有所提升。径流的年内分布规律呈现“双峰型”特征,4 月径流量为全年最高。

(3)极端气温的强度和频率均显著上升,而极端降水的强度和频率呈不显著的下降趋势。降水和 R10mm 是影响径流变化的关键气候因素,且二者均与径流呈正相关。径流与各气候要素之间普遍存在 2—3a 的显著共振周期。

参考文献(References):

- [1] 万辛如,程超源,白德凤,张知彬. 气候变化的生态影响及适应对策. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 518-527.
- [2] Li J Z, Li Y P, Zhang T, Feng P. Research on the future climate change and runoff response in the mountainous area of Yongding watershed. *Journal of Hydrology*, 2023, 625: 130108.
- [3] Samuel S, Dosio A, Mphale K, Faka D N, Wiston M. Comparison of multi-model ensembles of global and regional climate model projections for daily characteristics of precipitation over four major river basins in southern Africa. Part II: Future changes under 1.5 °C, 2.0 °C and 3.0 °C warming levels. *Atmospheric Research*, 2023, 293: 106921.
- [4] Zeng P, Sun F Y, Liu Y Y, Wang Y K, Li G, Che Y. Mapping future droughts under global warming across China: a combined multi-timescale meteorological drought index and SOM-Kmeans approach. *Weather and Climate Extremes*, 2021, 31: 100304.
- [5] Rezvani R, RahimiMovaghar M, Na W, Najafi M R. Accelerated lagged compound floods and droughts in northwest North America under 1.5—4 °C global warming levels. *Journal of Hydrology*, 2023, 624: 129906.
- [6] Xu R B, Yu P, Liu Y M, Chen G B, Yang Z Y, Zhang Y W, Wu Y, Beggs P J, Zhang Y, Boocock J, Ji F, Hanigan I, Jay O, Bi P, Vargas N, Leder K, Green D, Quail K, Huxley R, Jalaludin B, Hu W B, Dennekamp M, Vardoulakis S, Bone A, Abrahams J, Johnston F H, Broome R, Capon T, Li S S, Guo Y M. Climate change, environmental extremes, and human health in Australia: challenges, adaptation strategies, and policy gaps. *The Lancet Regional Health-Western Pacific*, 2023, 40: 100936.
- [7] Bai X L, Zhao W Z. Impacts of climate change and anthropogenic stressors on runoff variations in major river basins in China since 1950. *Science of the Total Environment*, 2023, 898: 165349.
- [8] 孙金,王怡璇,杨璐,段利民,褚少杰,张桂馨,张波,刘廷玺. 锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系. *环境科学*, 2023, 44(12): 6754-6766.
- [9] Tripathi I M, Mahto S S, Kushwaha A P, Kumar R, Tiwari A D, Sahu B K, Jain V, Mohapatra P K. Dominance of soil moisture over aridity in explaining vegetation greenness across global drylands. *Science of the Total Environment*, 2024, 917: 170482.
- [10] Su B D, Huang J L, Mondal S K, Zhai J Q, Wang Y J, Wen S S, Gao M N, Lv Y R, Jiang S, Jiang T, Li A W. Insight from CMIP6 SSP-RCP scenarios for future drought characteristics in China. *Atmospheric Research*, 2021, 250: 105375.
- [11] Zhao C, Brissette F, Chen J. Projection of future extreme meteorological droughts using two large multi-member climate model ensembles. *Journal of Hydrology*, 2023, 618: 129155.
- [12] Mohammed S, Arshad S, Alsilibi F, Moazzam M F U, Bashir B, Prophan F A, Alsalman A, Vad A, Ratonyi T, Harsányi E. Utilizing machine learning and CMIP6 projections for short-term agricultural drought monitoring in central Europe (1900—2100). *Journal of Hydrology*, 2024, 633: 130968.
- [13] 雍斌,张建云,王国庆. 黄河源区水文预报的关键科学问题. *水科学进展*, 2023, 34(2): 159-171.
- [14] Cheng J W, Li F Y, Liu X M, Wang X Y, Zhao D, Feng X C, Baoyin T. Seasonal patterns of the abundance of ground-dwelling arthropod guilds and their responses to livestock grazing in a semi-arid steppe. *Pedobiologia*, 2021, 85: 150711.
- [15] 吴佳,高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1102-1111.
- [16] 杨斐,鹿化煜,吴会娟,王菁菁,杨康,杨龙,李一泉. 毛乌素沙地年均水蚀量估算. *地理学报*, 2024, 79(3): 635-653.
- [17] Laimighofer J, Laaha G. How standard are standardized drought indices? Uncertainty components for the SPI & SPEI case. *Journal of Hydrology*, 2022, 613: 128385.
- [18] Bunting E L, Munson S M, Villarreal M L. Climate legacy and lag effects on dryland plant communities in the southwestern U.S. *Ecological Indicators*, 2017, 74: 216-229.

- [19] Fattah M A, Hasan M M, Dola I A, Morshed S R, Chakraborty T, Al Kafy A, Alsulamy S, Khedher K M, Ali A Shohan A. Implications of rainfall variability on groundwater recharge and sustainable management in South Asian capitals: an in-depth analysis using Mann Kendall tests, continuous wavelet coherence, and innovative trend analysis. *Groundwater for Sustainable Development*, 2024, 24: 101060.
- [20] Nourani V, Tootoonchi R, Andaryani S. Investigation of climate, land cover and lake level pattern changes and interactions using remotely sensed data and wavelet analysis. *Ecological Informatics*, 2021, 64: 101330.
- [21] Gao S R, Jiang G L, Zhang Z Q, Xu X M, Wang L Y, Wu Q B. Permafrost temperature dynamics and its climate relations in various Tibetan alpine grasslands. *Catena*, 2024, 241: 108065.
- [22] Nayak P C, Venkatesh B, Krishna B, Jain S K. Rainfall-runoff modeling using conceptual, data driven, and wavelet based computing approach. *Journal of Hydrology*, 2013, 493: 57-67.
- [23] Wang Y R, Hessen D O, Samset B H, Stordal F. Evaluating global and regional land warming trends in the past decades with both MODIS and ERA5-Land land surface temperature data. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 280: 113181.
- [24] 张璐, 朱仲元, 张圣微, 王慧敏, 王飞, 席小康. 近 59a 锡林河流域潜在蒸散发及地表干湿状况变化趋势分析. *干旱区地理*, 2020, 43(4): 997-1003.
- [25] 杨立哲, 钱虹, 郝璐. 锡林河近 50 年径流变化特征及其影响因素分析. *草业科学*, 2015, 32(3): 303-310.
- [26] 雅茹, 丽娜, 银山, 包玉海. 1960—2015 年内蒙古极端气候事件的时空变化特征. *水土保持研究*, 2020, 27(3): 106-112.
- [27] Hassan W U, Ahmad Nayak M, Azam M F. Intensifying spatially compound heatwaves: Global implications to crop production and human population. *Science of the Total Environment*, 2024, 932: 172914.
- [28] Ascaso M S, Díaz J, López-Bueno J A, Navas M A, Mirón I J, Linares C. How heatwaves affect short-term emergency hospital admissions due to bacterial foodborne diseases. *Science of the Total Environment*, 2024, 946: 174209.
- [29] Zhao C, Huang Y S, Cheng Y B, Zhang R, Wang Y, Tong S L, He J, Guo J, Xia F, Li Y H, Yao X Y. Association between heatwaves and risk and economic burden of injury related hospitalizations in China. *Environmental Research*, 2024, 259: 119509.
- [30] Fischer E M, Knutti R. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change*, 2015, 5: 560-564.
- [31] Xing Z F, Li Z L, Duan S B, Liu X Y, Zheng X P, Leng P, Gao M F, Zhang X, Shang G F. Estimation of daily mean land surface temperature at global scale using pairs of daytime and nighttime MODIS instantaneous observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 178: 51-67.
- [32] 张阿龙, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 秦子元, 王喜喜. 高原内陆河流域气候水文突变与生态演变规律 ——以内蒙古锡林河和巴拉格尔河流域为例. *中国环境科学*, 2019, 39(12): 5254-5263.
- [33] Zhou Y J, Batelaan O, Guan H D, Duan L M, Liu T X, Wang Y X, Li X, Yang B. Evaluation of the contributions of climate change and overgrazing to runoff in a typical grassland inland river basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 52: 101725.
- [34] 张璐, 朱仲元, 王慧敏, 王飞. 锡林河流域水文干旱演变特征及影响因素分析. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 178-184.
- [35] 常启昕, 孙自永, 潘钊, 李兆峰. 高寒山区河道径流的形成与水文调节机制研究进展. *地球科学*, 2022, 47(11): 4196-4209.
- [36] Zhang S L, Zhou L M, Zhang L, Yang Y T, Wei Z W, Zhou S, Yang D W, Yang X F, Wu X C, Zhang Y Q, Li X Y, Dai Y J. Reconciling disagreement on global river flood changes in a warming climate. *Nature Climate Change*, 2022, 12: 1160-1167.
- [37] 黄桂锋, 孙赫, 姚檀栋. 雅鲁藏布江流域奴下水文站极端降水与极端径流的关系研究. *冰川冻土*, 2024, 46(4): 1099-1112.
- [38] 刘佳, 肖玉, 张昌顺, 黄孟冬. 基于地表水与地下水分割校正的漓江流域水供给服务时空格局研究. *生态学报*, 2023, 43(15): 6099-6116.
- [39] Cui G T, Anderson M, Bales R. Runoff response to the uncertainty from key water-budget variables in a seasonally snow-covered mountain basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2023, 50: 101601.
- [40] Mayou L A, Alamdari N, Ahmadisharaf E, Kamali M. Impacts of future climate and land use/land cover change on urban runoff using fine-scale hydrologic modeling. *Journal of Environmental Management*, 2024, 362: 121284.
- [41] 刘剑宇, 张强, 陈喜, 顾西辉. 气候变化和人类活动对中国地表水文过程影响定量研究. *地理学报*, 2016, 71(11): 1875-1885.
- [42] Sun Y, Tian F Q, Yang L, Hu H P. Exploring the spatial variability of contributions from climate variation and change in catchment properties to streamflow decrease in a mesoscale basin by three different methods. *Journal of Hydrology*, 2014, 508: 170-180.
- [43] 王晨杨, 闫铁柱, 翟丽梅, 华玲玲. 密云水库白河流域基流演变特征. *生态学报*, 2022, 42(8): 3181-3190.