doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.22.006

石羊河流域极端气候变化特征与径流响应关系研究

赵炯昌[1,2]　付中皞[1,2]　杨书秋[1,2]　刘文丰[1,2]

(1.中国农业大学水利与智能工程学院,北京 100083;2.农业水资源高效利用全国重点实验室,北京 100083)

摘要:全球变暖背景下,区域气候变化加剧,高温、干旱和强降水等极端气候事件频发,改变了流域水文过程,并进一步增加径流变化的不确定性。揭示极端气候变化与径流响应之间的关系,对系统性认识内陆河流域水文响应机制具有重要意义。本研究以石羊河流域为研究对象,基于 1960—2021 年气象数据及 8 个水文站点径流资料,选取极端最高气温(TXx)、极端最低气温(TNx)、夏日日数(SU)、热夜日数(TR)、霜冻日数(FD)、连续有雨日数(CWD)、连续无雨日数(CDD)、日最大降水量(Rx1day)、强降水量(R95p)和降水强度(SDII)10 个极端气候指数,结合标准化径流指数(SRI),采用 M-K 趋势检验、Pettitt 突变检验和 Morlet 小波分析,系统分析极端气候变化特征、径流演变规律及其多时间尺度响应关系。试验结果表明,石羊河流域气温和降水量均呈极显著增加趋势,变化速率分别为 0.375℃/(10a)和 13.4 mm/(10a),流域整体表现出暖湿化特征。TXx、TNx、SU 和 TR 均显著增加,FD 显著减少;Rx1day、R95p 和 SDII 显著增加,而 CWD 和 CDD 变化不显著。不同水文站点 SRI 变化存在明显空间分异,西大河水库、金川峡和沙沟寺上游站点呈显著增加趋势,南营水库、杂木寺和黄羊河水库变化不显著,下游的蔡旗站点呈极显著下降趋势。突变检验结果表明,上游部分站点主要在 20 世纪 80 年代至 21 世纪初出现偏丰突变,而蔡旗站约在 1979 年发生显著减少突变。蔡旗站与气候因子的关系具有明显阶段性和尺度依赖性,主要集中在 2~8 a 和 8~16 a 周期尺度,其中,SRI 与降水及极端降水强度类指标的相干关系强于气温类指数。研究结果可为干旱内陆河流域水文变化认识及水资源适应性管理提供科学依据。

关键词:极端气候;标准化径流指数;小波分析;内陆河流域

中图分类号:P333.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)22-0070-12　　**OSID**:

Characteristics of Extreme Climate Change and Its Impacts on Runoff in Shiyang River Basin

Zhao Jiongchang[1,2]　Fu Zhonghao[1,2]　Yang Shuqiu[1,2]　Liu Wenfeng[1,2]

(1. *College of Water Resources and Intelligence Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Against the background of global warming, regional climate change has intensified, with increasingly frequent extreme climate events, including high temperatures, droughts, and heavy precipitation. These changes have altered watershed hydrological processes and further increased the uncertainty associated with runoff variations. Clarifying the relationship between extreme climate events and runoff responses is therefore essential for systematically understanding the hydrological response mechanisms of inland river basins. Taking the Shiyang River Basin as the study area, the meteorological data and runoff records from eight hydrological stations covering the period 1960—2021 were used. Ten extreme climate indices were selected, including the annual maximum value of daily maximum temperature (TXx), annual maximum value of daily minimum temperature (TNx), summer days (SU), tropical nights (TR), frost days (FD), consecutive wet days (CWD), consecutive dry days (CDD), maximum 1-day precipitation (Rx1day), very wet-day precipitation (R95p), and simple daily intensity index (SDII). In combination with the standardized runoff index (SRI), Mann-Kendall trend test, Pettitt change-point test, and Morlet wavelet analysis were employed to investigate the variation

收稿日期:2026-08-01　修回日期:2026-08-18

基金项目:国家重点研发计划青年科学家项目(2024YFC3213700)和国家自然科学基金项目(52679062)

作者简介:赵炯昌(1997—),男,博士后,主要从事气候变化下农业与水土资源供需关系研究,E-mail:jiongchangzhao@cau.edu.cn

通信作者:刘文丰(1988—),男,教授,主要从事气候变化与水文过程研究,E-mail:wenfeng.liu@cau.edu.cn

characteristics of extreme climate indices, runoff evolution patterns, and their response relationships at multiple temporal scales. The results showed that both temperature and precipitation in the Shiyang River Basin exhibited highly significant increasing trends, with rates of 0.375℃/(10a) and 13.4 mm/(10a), respectively, indicating an overall warming-wetting tendency. TXx, TNx, SU, and TR increased significantly, whereas FD decreased significantly. Rx1day, R95p, and SDII also exhibited significant increasing trends, while no significant changes were detected in CWD or CDD. Pronounced spatial differences were observed in SRI variations among the hydrological stations. Significant increasing trends occurred at upstream stations, including Xidahe Reservoir, Jinchuanxia, and Shagousi, whereas no significant trends were detected at Nanying reservoir, Zamusi, or Huangyanghe reservoir. In contrast, the downstream Caiqi station exhibited a highly significant decreasing trend. The change-point analysis indicated that several upstream stations experienced abrupt shifts toward wetter runoff conditions mainly from the 1980s to the early 2000s, whereas Caiqi station underwent a significant abrupt decrease around 1979. The relationships between SRI and climatic factors at Caiqi station exhibited clear stage-dependent characteristics and were primarily concentrated at periodic scales of 2 ~ 8 years and 8 ~ 16 years. The coherence between SRI and precipitation-related indices, particularly extreme precipitation intensity indices, was stronger than that between SRI and temperature-related indices. These findings can provide a scientific basis for hydrological drought identification, runoff variation prediction, and adaptive water-resource allocation in arid inland river basins.

Key words: extreme climate; standard runoff index; wavelet analysis; inland river basin

0　引言

在全球气候变化背景下,高温、干旱和强降水等极端气候事件的发生频率、强度和持续时间均呈不同程度变化,已成为影响区域水循环过程和水资源安全的重要外部驱动因素[1-2]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出,1950 年以来全球极端高温事件的频率和强度显著增加,强降水事件在多数陆地区域呈增加趋势[3];世界气象组织发布的《全球气候状况 2024》显示,2024 年全球平均近地表气温约较工业化前高(1.55 ±0.13)℃[4]。《中国气候变化蓝皮书(2025)》表明,1961—2024 年中国地表平均气温以 0.31℃/(10a)的速度上升[5]。未来 20 年内,全球地表平均气温升幅预计将达到或超过 1.5℃,由此引发的水热条件变化将进一步增加极端气候事件发生的频率和强度,从而对产汇流过程及水文干旱演变产生深刻影响[6-7]。一方面,极端高温通过增强蒸散发、改变积雪融化过程和加剧土壤水分亏缺等途径影响径流补给和消耗[8];另一方面,强降水事件和降水强度变化则会改变产流效率、径流年内分配及旱涝转换过程[9]。因此,系统分析极端气候变化特征及其对径流过程的影响,对于认识气候变化背景下区域水文响应机制和水资源安全风险具有重要意义。

西北干旱区是我国典型的气候敏感区和生态环境脆弱区,具有降水稀少、蒸发强烈、水资源时空分布不均等典型特征[10]。该区域内陆河流域多呈现“山区产流-绿洲利用-荒漠消耗”的空间格局,上游山区降水、冰川融水和地下水补给是流域径流的主要来源[11],而中下游绿洲农业生产、生态维持和生活用水则高度依赖上游来水过程[12]。在气候暖湿化和极端气候增加背景下,径流变化不仅受平均气温、降水等因子的影响,也对极端高温、极端降水及其持续性变化表现出更为复杂的响应[13-14]。石羊河流域位于河西走廊东部、祁连山北麓,是我国西北地区典型内陆河流域,具有山地-绿洲-荒漠复合生态系统特征[15]。流域上游为径流形成区;中游为灌溉农业集中区,水资源开发利用强度较高;下游民勤绿洲生态环境脆弱。近年来,在气候变化和人类活动共同作用下,石羊河流域径流过程、干旱风险及水资源供需关系发生显著变化,上中下游水文响应差异逐渐凸显[16]。因此,揭示石羊河流域极端气候及其对径流丰枯演变的影响,对于流域水资源优化配置、绿洲生态保护和气候变化适应具有重要现实意义。

已有研究围绕石羊河流域气温降水变化[17]、径流演变、水资源利用[18]、生态环境响应[19]及干旱变化[20-21]等方面开展了较多探讨,为认识流域水文气候变化提供了重要基础。然而,现有研究主要关注年均温和年降水量等平均气候因子对径流变化的影响[22-23],对极端气温和极端降水指数的系统分析仍相对不足;同时,不同水文站点径流丰枯变化的空间差异、突变特征及其与极端气候之间的多时间尺度响应关系仍有待进一步揭示。基于此,本文以石羊河流域为研究对象,利用 1960—2021 年气象和径流资料,选取典型极端气温和极端降水指数,结合标准化径流指数(SRI),采用 Mann - Kendall 趋势检验和 Pettitt 突变检验识别极端气候与径流序列的变化趋

势与突变特征,并基于 Morlet 小波分析、交叉小波变换和小波相干分析,揭示径流变化及其与气候因子间的多时间尺度关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

如图 1(西大河水库站、金川峡站、沙沟寺站、九条岭站、南营水库站、杂木寺站、黄羊河水库站、蔡旗站分别位于西大河、金川河、东大河、西营河、金塔河、杂木河、黄羊河、石羊河。肃南县和天祝县全称分别为肃南裕固族自治县和天祝藏族自治县)所示,石羊河流域(36°29′ ~ 39°27′N, 101°16′ ~ 104°41′E)位于甘肃省河西走廊东部、祁连山北麓,流域面积约 4.16×10^4 km^2,是我国西北内陆河流域的重要组成部分。流域地势呈南高北低格局,上游祁连山高寒半干旱湿润区,植被以森林和草地为主;中游走廊平原干旱区是重要的灌溉农业区;下游温暖干旱区,主要是民勤绿洲和荒漠,生态环境脆弱,属于典型的山地-绿洲-荒漠复合生态系统。石羊河流域属于大陆温带干旱气候,太阳辐射强、温差大、降水少,多年年降水量为 50 ~ 700 mm。

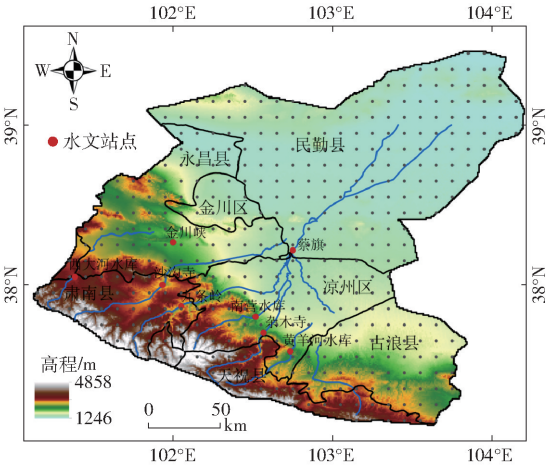


图 1 石羊河流域示意图

Fig. 1 Location map of Shiyang River Basin

1.2 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的变化规律,选取 1960—2021 年石羊河气象和径流数据进行分析。为检验 CMFD 数据在研究区的适用性与可靠性,选取石羊河流域 5 个气象站点(永昌、乌鞘岭、武威、古浪、民勤)1981—2021 年的实测数据为基准,从变化趋势、相关程度及误差等方面开展分析,定量评估 CMFD 数据对区域实际气象状况的表征能力,从而为后续数据的合理选取与应用提供可靠依据。

表 1 研究数据概述

Tab. 1 Overview of data

数据类型	数据来源	数据集	空间分辨率/((°)×(°))	时间分辨率
气温	国家青藏高原科学数据中心	中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD 2.0)	0.1×0.1	d
降水	国家青藏高原科学数据中心	中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD 2.0)	0.1×0.1	d
水文数据	水文站点	实测径流数据		月
气象数据	永昌、乌鞘岭、武威、古浪、民勤	实测气象数据		d

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析和突变检验

通过 Mann-Kendall(M-K)检验分析石羊河流域气候、径流的变化趋势。为精准识别标准化径流指数(Standard runoff index, SRI)的突变年份,结合 M-K 突变检验和 Pettitt 检验 2 种方法进行分析。

(1)M-K 趋势检验是时间序列趋势分析中的非参数统计检验方法,即不要求数据遵循正态分布,也不受异常值的影响,计算较为方便,能够稳健地判断序列是否存在显著变化趋势。设按时间顺序排列的观测序列为 x_1, x_2, …, x_n,其中 n 为序列总样本数。对于第 k 个观测值,基于前 k 个观测值构成的子序列构造统计量 S_k,计算公式为

$$S_k=\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{i-1}a_{ij} \tag{1}$$

其中

$$a_{ij}=\begin{cases}1 & (x_i>x_j)\\ 0 & (x_i\leqslant x_j)\end{cases} \tag{2}$$

式中,a_{ij}为指示变量,若后 1 个时刻的观测值 x_i大于前 1 个时刻的观测值 x_j,则记为 1;否则记为 0。在假设时间序列 x 中的观测值是随机且相互独立条件下,统计量 UF_k定义为

$$UF_k=\frac{S_k-E(S_k)}{\sqrt{Var(S_k)}} \tag{3}$$

式中,$E(S_k)$、$Var(S_k)$分别为 S_k的均值和方差。当 x_1, x_2, …, x_n等变量相互独立且相同连续分布时,$E(S_k)$和$Var(S_k)$计算公式为

$$E(S_k)=\frac{k(k-1)}{4} \tag{4}$$

$$Var(S_k)=\frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (5)$$

按照时间序列顺序计算 UF，以时间逆序计算 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 和 UB 2 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 检验法是一种基于秩统计量的非参数突变检验方法，适用于识别时间序列中的单一突变点[24]。通过比较任一时间点前后 2 段的分布差异，计算不同时间点对应的统计量，并以统计量绝对值最大的位置作为最可能的突变年份。当该统计量通过显著性检验时，表明序列在该年份前后发生显著突变。统计量 $U_{t,n}$ 表达式为

$$U_{t,n}=U_{t-1,n}+\sum_{m=1}^{n}\operatorname{sgn}(x_t-x_m) \quad (t=2,3,\cdots,n) \quad (6)$$

式中　t——样本点对应的时间序列

x_t、x_m——t 时刻和 m 时刻的观测值

可能发生的突变时间 K_n 为

$$K_n=\max|U_{t,n}| \quad (1\leqslant t\leqslant n) \quad (7)$$

显著性统计量 P 计算公式为

$$P=2e^{-6K_n^2/(n^3+n^2)} \quad (8)$$

式中　K_n——Pettitt 检验统计量，即不同候选时间位置对应的 $|U_{t,n}|$ 最大值

综上所述，$U_{t,n}$ 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。

1.3.2　极端气候指数

根据气候变化监测和指标专家组(ETCCDI)所提供的 27 个极端气候指数，选取 10 个常用的极端气候指标进行分析(表 2)。其中，TXx 和 TNx 表征极端气温强度，SU、TR 和 FD 表征极端气温频率，CWD 和 CDD 表征极端降水持续性，Rx1day、R95p 和 SDII 表征极端降水强度。

表 2　选取的极端气候指数

Tab. 2　Extreme climate indices selected

类型	极端气候指数	全称	定义	单位
极端气温指数	TXx	极端最高气温	年最大日最高气温	℃
	TNx	极端最低气温	年最大日最低气温	℃
	SU	夏日日数	日最高气温大于 25℃ 日数	d
	TR	热夜日数	日最低气温大于 20℃ 日数	d
	FD	霜冻日数	日最低气温小于 0℃ 日数	d
极端降水指数	CWD	连续有雨日数	最长连续降水日数	d
	CDD	连续无雨日数	最长连续无降水日数	d
	Rx1day	日最大降水量	日最大降水量	mm
	R95p	强降水量	日降水量大于 95% 分位数的年累计降水量	mm
	SDII	降水强度	年降水量不小于 1 mm 的总量与日数之比	mm/d

1.3.3　标准化径流指数

基于石羊河流域多个水文站实测径流数据，通过 SRI 表征石羊河流域的水文干旱情况。SRI 通过 Gamma 分布对径流序列的概率特征进行拟合，以反映流量变化状况，并将径流累计概率转换为标准正态分布值，据此确定不同程度的干旱等级。计算公式为

$$SRI=\begin{cases}-\left(t-\dfrac{c_0+c_1t+c_2t^2}{1+d_1t+d_2t+d_3t^3}\right) & (0<F(r)\leqslant 0.5)\\ t-\dfrac{c_0+c_1t+c_2t^2}{1+d_1t+d_2t+d_3t^3} & (0.5<F(r)<1)\end{cases} \quad (9)$$

其中

$$t=\begin{cases}\sqrt{\ln\dfrac{1}{F(r)^2}} & (0<F(r)\leqslant 0.5)\\ \sqrt{\ln\dfrac{1}{(1-F(r))^2}} & (0.5<F(r)<1)\end{cases} \quad (10)$$

式中　r——某时段径流量

$F(r)$——某时段径流量累计概率

c_0取 2.515 517、c_1取 0.802 853、c_2取 0.010 328、d_1取 1.432 788、d_2取 0.189 269、d_3取 0.001 308。根据 SRI 对旱涝等级进行划分，SRI ≤ −2.0 为特旱、−2.0 < SRI ≤ −1.5 为重旱、−1.5 < SRI ≤ −1.0 为中旱、−1.0 < SRI ≤ −0.5 为轻旱、−0.5 < SRI < 0.5 为正常、0.5 ≤ SRI < 1.0 为轻涝、1.0 ≤ SRI < 1.5 为中涝、1.5 ≤ SRI < 2 为重涝、SRI ≥ 2.0 为特涝。SRI 不仅能够反映不同时期流量变化情况，还充分考虑气候变化对径流的滞后影响。采用月尺度的 SRI 指数分析石羊河流域水文变化特征。

1.3.4　周期分析

Morlet 小波分析能够同时刻画非平稳时间序列在时域和频域上变化特征，不仅可识别 SRI 序列的多时间尺度周期，还能揭示不同周期出现的具体时段，因而适用于分析石羊河流域径流的阶段性周期

演变[25]。为进一步揭示石羊河流域径流变化与气候因子的协同演变关系,引出小波相干分析(Wavelet coherence, WTC)和交叉小波变换(Cross wavelet transform, XWT)。WTC 用于描述 SRI 和时间变量在不同时间尺度上变化的一致性,特别是振幅和相位信息;XWT 则用于刻画二者在高能量区不同时域的相关性特征[26]。

2 结果

2.1 气温与降水年际变化

以石羊河流域实测气象数据为基准,对气象数据进行一致性分析(图 2)。由图 2 可知,CMFD 气

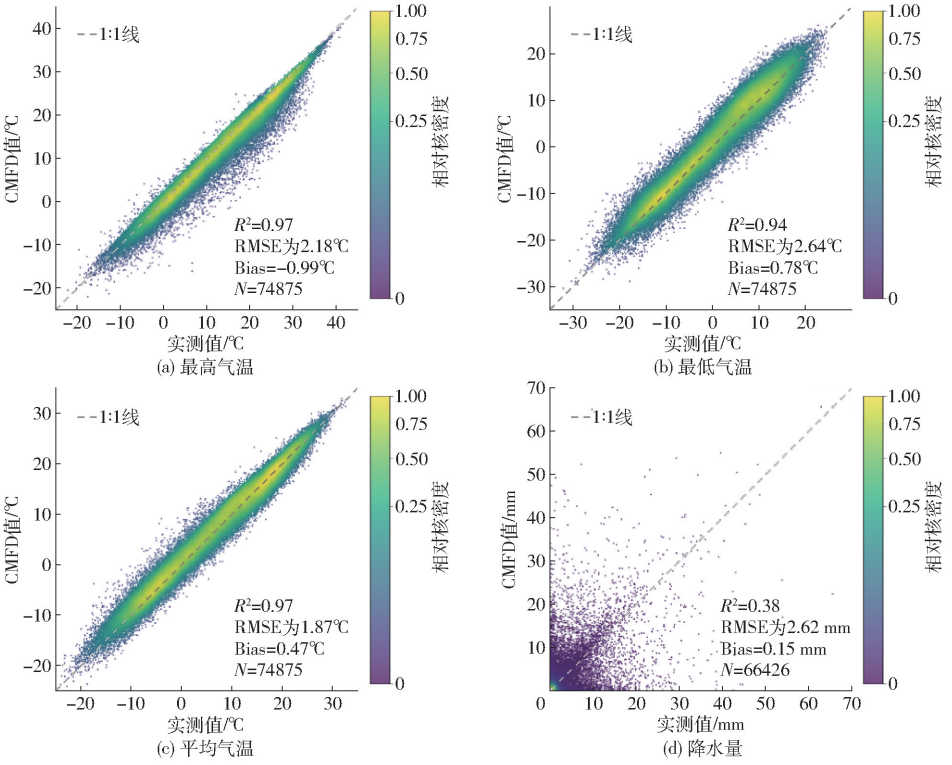


图 2 石羊河流域地面气象站实测值与 CMFD 数据的一致性检验

Fig. 2 Consistency test between observations from ground meteorological stations and CMFD data in Shiyang River Basin

温数据与实测值具有较高一致性,最高气温、最低气温和平均气温 R^2 分别为 0.97、0.94、0.97,RMSE 分别为 2.18、2.64、1.87℃。相比之下,降水量拟合效果相对较弱,R^2 和 RMSE 分别为 0.38、2.62 mm。

1960—2021 年石羊河流域的气候变化情况如图 3 所示。气温呈极显著上升趋势(Z = 6.79),增加趋势为 0.375℃/(10a)。流域平均气温为 5.84℃,最高年均温为 7.41℃,出现在 2013 年,最低年均温为 4.15℃,出现在 1967 年。降水量以 13.4 mm/(10a)的变化速率呈极显著增加趋势(Z = 4.30),流域年降水量为 174.39 ~ 383.55 mm,平均降水量为 282.53 mm,最高降水量出现在 2019 年,最低降水量出现在 1965 年。

2.2 极端气候指数年际变化

如图 4 所示,1960—2021 年石羊河流域极端气温指数整体表现出显著增暖特征。极端最高气温(TXx)和极端最低气温(TNx)均呈极显著上升趋势($|Z|$ > 2.58),线性倾向率分别为 0.41℃/(10a)和 0.46℃/(10a)。空间上,TXx 和 TNx 均呈由西南向东北逐渐升高的分布格局,高值区主要集中在流域中北部和东北部低海拔区域,低值区主要分布在西南部山区。夏日日数(SU)和热夜日数(TR)分别以 1.53 d/(10a)和 0.97 d/(10a)的速率极显著增加,Z 分别为 5.72 和 5.35,尤其是 20 世纪 90 年代以后增加趋势更加明显。SU 空间分布与 TXx、TNx 较为一致,TR 则在北部局地和东北部较高,西南部及部分中部区域较低。霜冻日数(FD)呈极显著减少趋势($|Z|$ > 2.58),线性倾向率为 -2.32 d/(10a),空间分布与 TXx 和 TNx 基本相反。

如图 5 所示,1961—2020 年石羊河流域极端降水指数整体呈降水强度增强、强降水时间增多的变化特征,但不同指标变化幅度和显著性存在差异。连续有雨日数(CWD)年际波动较大,长期变化趋势不明显,线性倾向率仅为 3.03×10^{-4} d/(10a)。CWD 表现为西南部相对较高、北部和东北部相对降低的空间分布格局。连续无雨日数(CDD)呈弱增加趋势,但并不显著($|Z|$ < 1.96),线性倾向率仅为 0.70 d/(10a),其空间格局与 CWD 基本相反。与

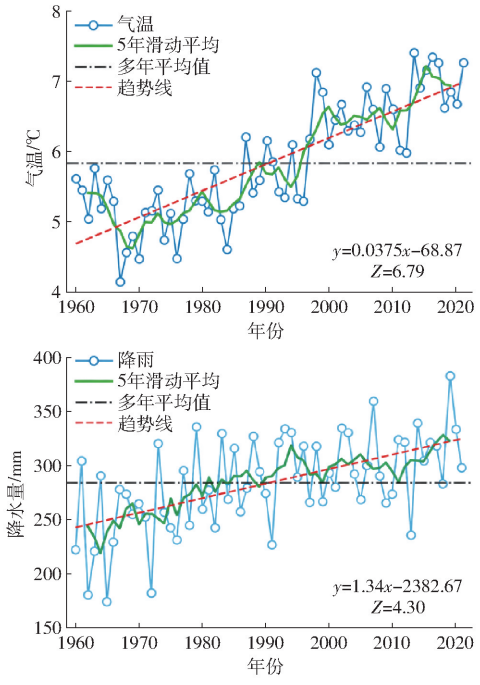


图 3　石羊河流域多年气温和降水变化

Fig. 3　Interannual variations in air temperature and precipitation in Shiyang River Basin

CWD 和 CDD 相比，降水强度类指标增加趋势更加明显。日最大降水量（Rx1day）、强降水量（R95p）和降水强度（SDII）均呈显著增加趋势，Z 分别为 2.39、4.30 和 3.80，线性倾向率分别为 0.89 mm/(10a)、3.92 mm/(10a) 和 0.14 mm/(d·10a)。

2.3　石羊河流域径流变化特征

由图 6 可见，1960—2021 年石羊河流域不同水文站标准化径流指数（SRI）变化趋势存在明显空间差异。西大河水库和金川峡 SRI 均呈极显著上升趋势，Z 分别为 5.58 和 6.24，线性倾向率分别为 0.34/(10a) 和 0.43/(10a)。沙沟寺 SRI 呈现显著上升趋势（Z 为 2.19），线性倾向率为 0.14/(10a)。九条岭 SRI 呈弱增加趋势，增加趋势不显著（Z 为 0.948），倾向率仅为 0.05/(10a)。南营水库、杂木寺和黄羊河水库 SRI 变化的 Z 分别为 −0.194、0.024 和 −1.06，其长期变化趋势不显著。蔡旗 SRI 呈极显著下降趋势（Z 为 −3.94），线性倾向率为 −0.239/(10a)。

从月尺度径流分配看，各水文站点均表现出明显的季节性变化特征。西大河水库、沙沟寺、九条岭、南营水库、杂木寺和黄羊河水库径流主要集中在夏季，6—9 月径流量较高，其中 7—8 月多为年内峰值期。金川峡月径流变化呈一定双峰特征，春季和夏季均存在较高径流量。蔡旗站月径流年内分配与上游站点有所不同，年内变化更为平缓。

由图 7 可见，石羊河流域不同水文站点 SRI 的

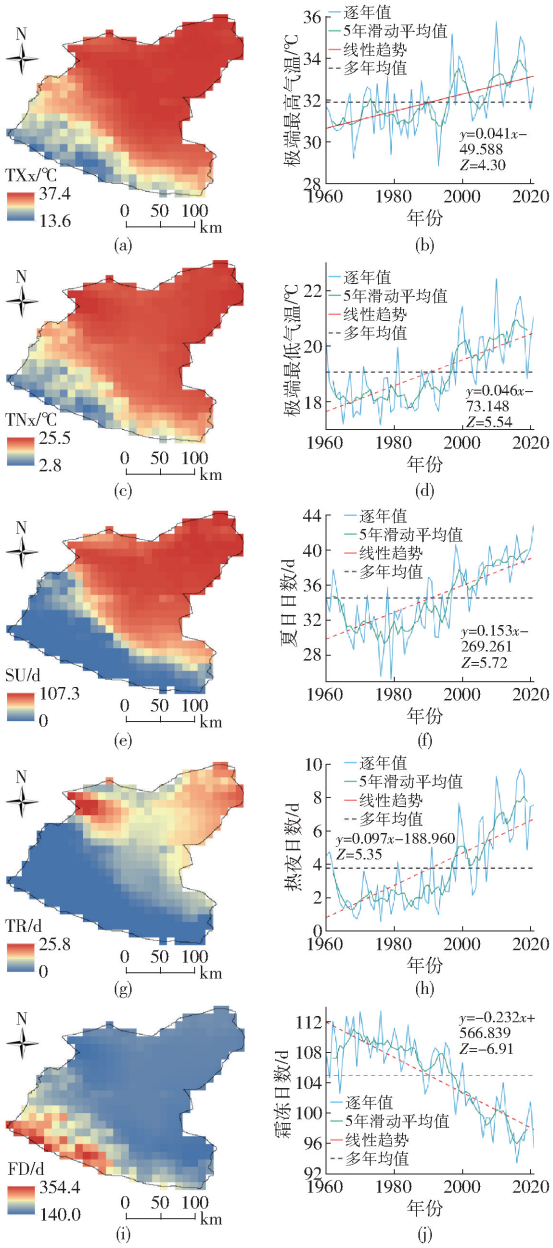


图 4　极端气温指数空间分布和变化趋势

Fig. 4　Spatial distribution and temporal trends of extreme temperature indices

突变特征存在明显差异。西大河水库和金川峡站突变信号较为显著，M－K 趋势检验中 UF 与 UB 曲线分别在 1982 年和 1988—1990 年前后交汇，随后 UF 曲线持续上升并超过 $\alpha=0.05$ 对应的显著性临界线，表明 2 站 SRI 均发生显著性突变；Pettitt 检验识别的突变年份分别约为 1982 年和 1988 年，与 M－K 检验结果基本一致。沙沟寺和九条岭 M－K 曲线波动较大，突变特征相对较弱，UF 与 UB 曲线主要在 2000 年前后出现交汇；Pettitt 检验识别的突变年份为 2001 年，说明 2 站在 21 世纪初均出现阶段性偏丰变化。南营水库、杂木寺和黄羊河水库 SRI 突变不明显，M－K 曲线多在显著性临界线以内波动，仅表现出阶段性变化；Pettitt 检验识别的突变年份分

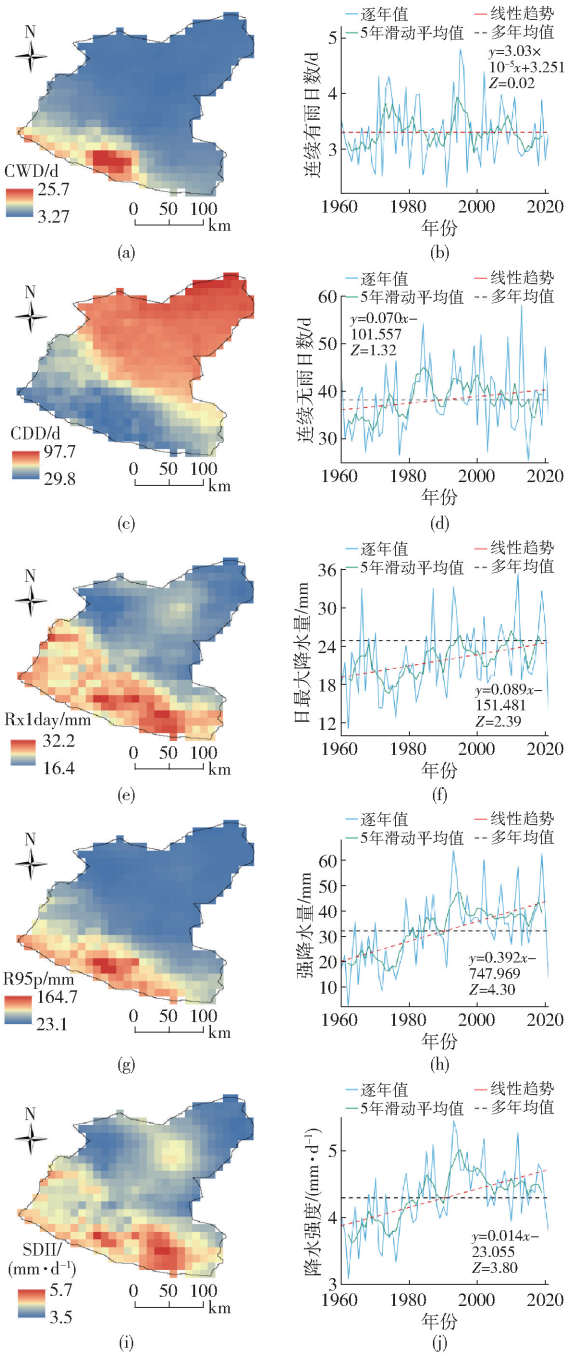


图 5 极端降水指数空间分布和变化趋势

Fig. 5 Spatial distribution and temporal trends of extreme precipitation indices

别约为 2011 年、2001 年和 1993 年。蔡旗站的 UF 曲线自 20 世纪 70 年代以后持续下降,并在 80 年代后长期低于显著性临界线,最低值接近 -8,表明该站发生显著减少突变;Pettitt 检验识别的突变年份约为 1979 年,与 M-K 检验结果较为一致。总体而言,石羊河流域 SRI 突变表现为上游站点趋丰、下游蔡旗站显著趋枯的空间分异特征。

2.4 蔡旗站 SRI 与气候因子的多时间尺度关系

由于各水文站点小波分析结果较多,全部展示易造成冗余,同时,蔡旗站作为石羊河流域下游控制断面,能够较好表征流域径流变化的综合响应过程,且前述分析表明该站 SRI 呈显著下降趋势并存在明显突变,因此本文仅选取蔡旗站作为典型站点展示小波分析结果,XWT 表示交叉小波变换,WTC 表示小波相干谱;SRI 为标准化径流指数,TEM、PRE 分别表示气温和降水量。黑色闭合曲线表示 95% 置信水平检验的显著区域;U 形曲线为小波影响锥边界,边界以外受边缘效应影响较大,结果不作重点解释。箭头表示两变量的相位关系,其中→表示同相位变化,←表示反相位变化,↑和↓分别表示 SRI 相对气候因子存在约 1/4 周期的超前或滞后关系。如图 8 所示,蔡旗站 SRI 和气候因子的多时间尺度关系具有明显的阶段性和周期差异。交叉小波结果表明,SRI 与气温及极端气温指数的共同能量区总体较为分散,主要集中在 2 ~ 8 a 短周期尺度,部分指标在8 ~ 16 a 周期上也存在阶段性响应。其中,极端气温变化对蔡旗站径流丰枯状态的影响具有一定阶段性,SRI 与 TXx、TNx、SU、TR 和 FD 之间的高能量区多出现在 20 世纪 80 年代以后。小波相干结果进一步显示,SRI 与气温类因子在 2 ~ 8 a 尺度上存在若干显著相干区,但显著区域相对分散。相比之下,SRI 与降水及极端降水指数的相干关系更为明显。SRI 与 PRE、Rx1day、R95p 和 SDII 在 20 世纪 80 年代至21 世纪初的4 ~ 16 a 周期尺度上存在较大范围的高相干区,并有部分区域通过 95% 置信水平检验。SRI 与 CWD、CDD 之间也存在一定相干关系,但显著区域相对较小,表明 CWD 和 CDD 对径流变化的影响弱于降水总量和降水强度类指标。总体来看,蔡旗站 SRI 与气候因子的关系主要集中在 2 ~ 8 a 和8 ~ 16 a 周期尺度上,其中降水及极端降水指数的相干性强于气温及极端气温指数,表明蔡旗站径流变化对降水过程,尤其是强降水和降水强度变化的响应更为敏感。

3 讨论

3.1 极端气候变化的区域分异特征

1960—2021 年,石羊河流域气温以 0.375℃/(10a) 的速率显著上升,远高于同期全球升温速率(0.2℃/(10a)),略高于同期全国升温速率(0.31℃/(10a)),与程倩等[18]研究结果较为一致(0.40℃/(10a))。石羊河流域降水量倾向率为 13.4 mm/(10a),高于程倩等[18](7.3 mm/(10a))和 Duan 等[27](7.4 mm/(10a))研究结果,这可能有研究时段据来源及空间统计方法等方面的差异有关。使用的 CMFD V2 降水数据融合了 ERA5 再分析数据、气象台站观测资料及 AI 降水产品,能够较好地

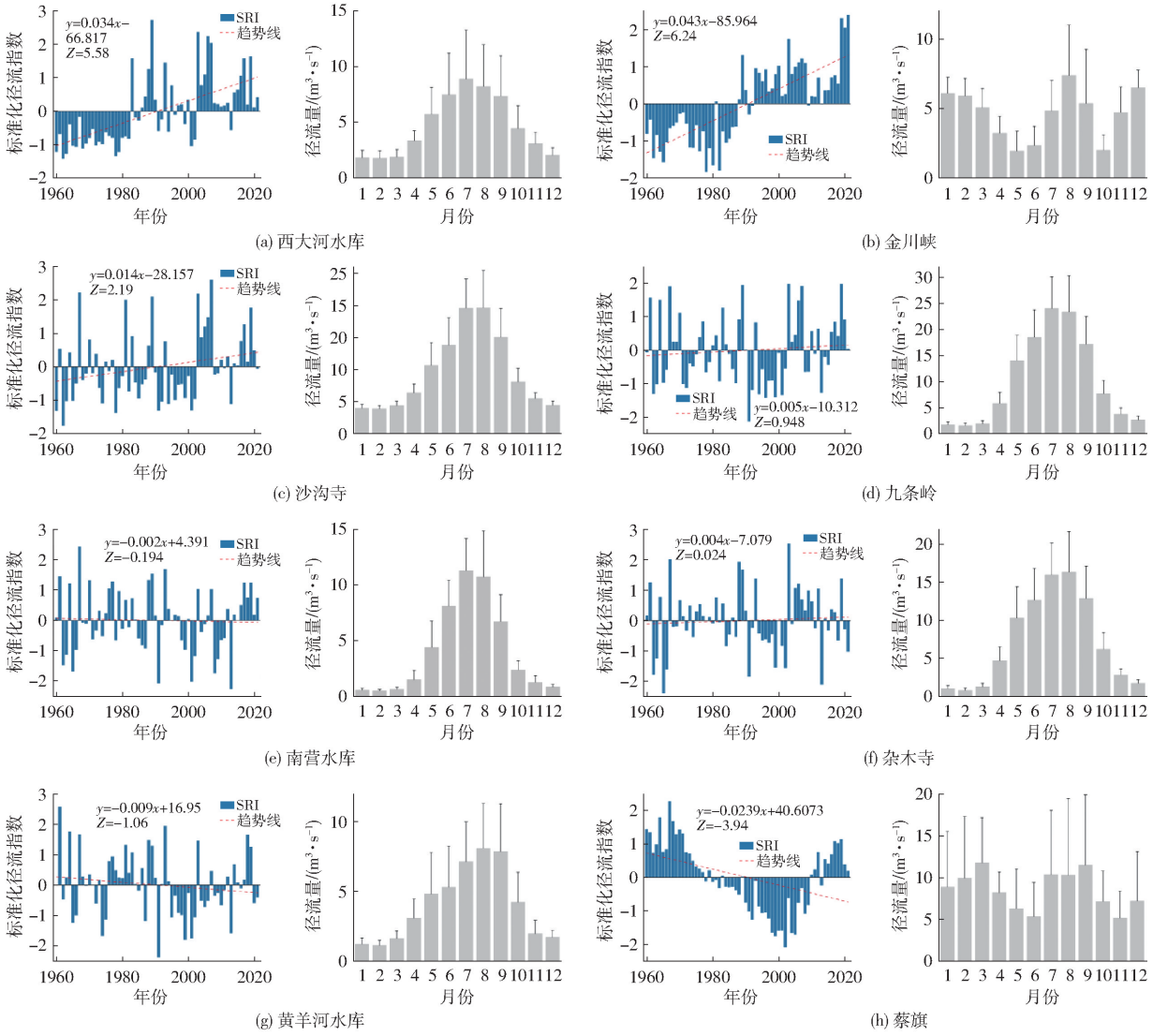


图 6　石羊河流域多年不同水文站标准化径流指数及月尺度分配特征

Fig. 6　Interannual variations in standardized runoff index and its monthly distribution characteristics at different hydrological stations in Shiyang River Basin

刻画石羊河流域复杂地形条件下降水的空间异质性；研究时段延迟至 2021 年也可能造成近年偏湿年份对长期趋势的影响更加明显。

近 60 年，石羊河流域整体表现为极端高温增强、暖夜增多和低温事件减少。该结果与 Zhou 等[28]对石羊河流域极端气温变化的研究结果总体一致，其基于 1960—2015 石羊河流域 4 个气象站资料发现，TXx、TNx、SU25 和 TR15 等暖指数整体增加，而 FD0 等冷指数呈下降趋势。Rx1day、R95p 和 SDII 均呈显著增加趋势，表明石羊河流域极端降水主要表现为降水强度和强降水贡献增加，而非降水持续性发生系统性改变。这一结果与全球陆地极端降水增强的总体认识相一致，已有研究表明，全球变暖正在显著增强极端降水事件发生的可能性[8]。贾文雄等[29]对祁连山及河西走廊研究也指出，近 50 年该区域极端降水日数呈显著增加趋势。Lin 等[30]基于祁连山地区 15 个气象站点资料，发现 CWD 呈不显著增加趋势，而 CDD 显著减少，而本研究 CWD 和 CDD 的变化趋势均不显著。这可能与干旱内陆河流域降水事件较少及降水空间分布不均有关。在此类区域，降水总量和强降水量的增加主要源自于少数强降水事件，而不是降水日数持续增加或湿润过程明显延长。

3.2　径流对极端气候的多时间尺度响应

在气候暖湿化和极端降水增强的背景下，石羊河流域径流演变并未表现为全流域一致趋丰，而是呈现明显的空间分异特征。本文结果显示，西大河水库、金川峡和沙沟寺等上游站点 SRI 呈显著增加趋势，而南营水库、杂木寺和黄羊河水库等站点变化趋势不显著，下游的蔡旗站则呈显著下降趋势。该结果说明，石羊河流域径流变化并不是对降水的简单线性响应，而是受到气候变化、流域空间结构和人

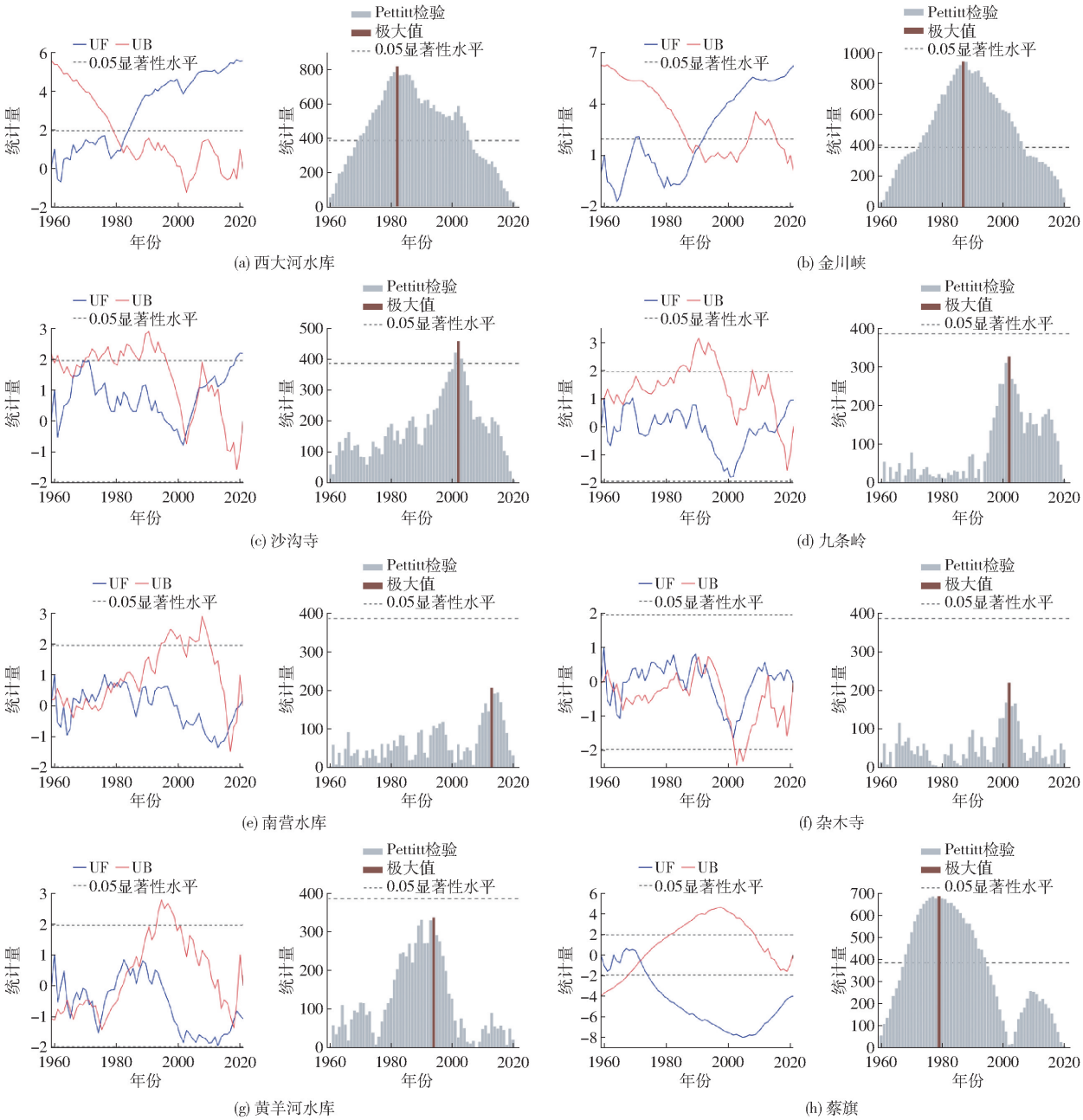


图 7 基于 M－K 和 Pettitt 方法的石羊河流域主要水文站点标准化径流指数突变检验

Fig. 7 Change-point detection of standardized runoff index at major hydrological stations in Shiyang River Basin using Mann－Kendall and Pettitt tests

类水资源开发利用的共同影响[31]。石羊河流域南部祁连山区为主要径流形成区,山区河流径流补给主要来自降水和冰川融雪,径流年内分配与降水年内分配基本一致,因此 SRI 增加可能与山区降水增加、极端降水强度增强以及融雪补给过程变化有关[32]。蔡旗作为下游站点,其径流变化不仅受上游来水影响,还综合反映了中游绿洲农业灌溉、水库调蓄和渠系引水等过程。Duan 等[27]对石羊河流域径流变化归因的研究表明,上游径流变化主要受气候变化影响,而中下游径流变化主要受人类活动控制,其中人类活动对中下游径流变化的贡献达到 84.17%。1960—2020 年石羊河流域自然径流呈显著下降趋势,综合多种模型结果表明,人类活动是石羊河流域径流变化的主导因素,其中 1972—2020 年取水对径流减少的贡献率为 50%,土地利用变化、潜在蒸发和气温贡献率分别为 20%、16% 和 8%[22]。

进一步从交叉小波和小波相干结果,蔡旗站 SRI 与气候因子的关系并非表现为长期稳定的线性响应,而是具有明显的阶段性和尺度依赖性,这与 Zhang 等[33]在青藏高原的研究结果较为一致。XWT 结果显示,多数气候因子与 SRI 的共同能量区并不连续,而 WTC 结果中部分指标在特定时段和周期尺度上存在显著相干区,说明下游径流丰枯变化更多体现为阶段性的气候-径流耦合关系。从不同

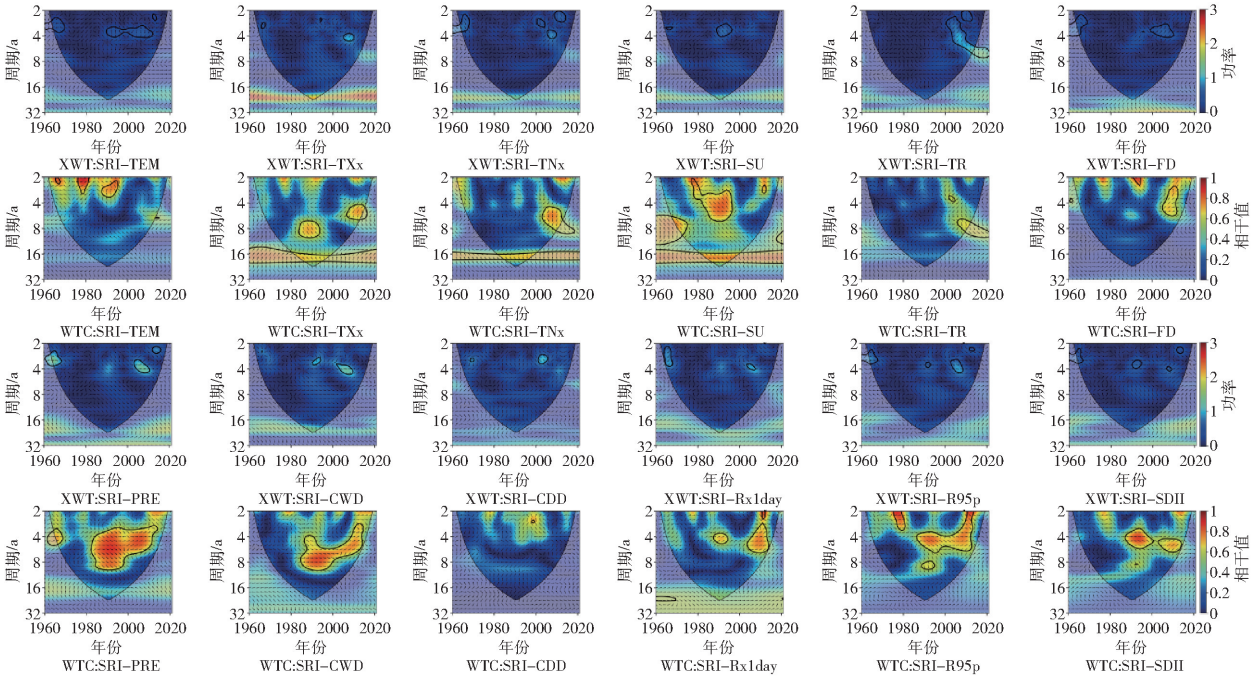


图 8　蔡旗站标准化径流指数(SRI)与气候因子的交叉小波变换与小波相干谱

Fig. 8　Cross-wavelet transform and wavelet coherence spectra between standardized runoff index (SRI) and climatic factors at Caiqi station

气候因子类型看,SRI 与降水相关指标的相干关系整体强于气温类指标,说明蔡旗站径流主要受水分输入过程调控,这是因为降水是干旱内陆地区的关键限制因素。曲芷程等[34]发现蒙古锡林河径流对降水的敏感性最强,揭示了降水作为流域内主导因素的长期稳定作用。相比于降水相关因子,蔡旗站 SRI 与气温和极端气温指数之间的显著相干区相对分散,说明热量条件对下游径流丰枯变化并非直接控制型,更多体现为过程调节作用。气温升高及极端高温增强一方面增强潜在蒸散发和植被耗水需求,加强土壤水分消耗,减少降水向地表径流和地下水补给的转化比例;另一方面,在上游山区,升温导致积雪和冰川消融的时间提前、速率加快,改变春夏季径流补给节律和年内分配过程[35]。与此同时,冻土活动层加深改变土壤入渗、壤中流和地下水补给路径,使得部分水分由快速径流转化为地下储存或基流补给。

3.3　研究不足与展望

径流演变是气候变化、下垫面条件和人类活动共同作用的结果,分析极端气候背景下石羊河流域径流变化及其多时间尺度响应关系,对于认识西北干旱区内陆河流域水文过程变化具有重要意义。然而,本研究仍存在一定不确定性。本文主要采用趋势检验、突变检验及小波分析等统计方法识别气候因子与径流变化之间的关联特征,虽能够反映二者在不同时间尺度上的协同变化特征,但难以直接揭示径流变化的机制。其次,石羊河流域径流过程受自然因素和人类活动共同影响[23],除降水和气温外,土地利用变化和土壤水分条件等因素也可能通过改变产汇流过程影响径流变化,同时,水库调蓄、农业灌溉取水、渠系引水、地下水开采和社会经济用水需求增加等人类活动也会显著影响径流过程[36]。本文尚未进一步量化不同驱动因素对径流变化的相对贡献。未来研究可在现有研究的基础上,构建适用于石羊河流域的分布式水文模型,定量识别气候变化和人类活动对上中下游径流变化的影响机制[37],并预测未来不同气候情景下极端气候事件和水文干旱风险变化,为干旱内陆河流域水资源管理和生态安全保障提供科学支撑。

4　结论

(1)1960—2021 年石羊河流域表现出显著暖湿化特征,气温和降水量分别以 0.375℃/(10a)和 13.4 mm/(10a)的速率极显著增加。极端气温变化表现为暖指数增加、冷指数减少,表明流域极端增暖特征明显;极端降水变化则主要表现为 Rx1day、R95p 和 SDII 增加,而 CDD 和 CWD 变化不显著,表明流域降水增强更偏向于强度变化,而非系统降水持续过程的改变。

(2)石羊河流域径流变化具有明显空间分异性和阶段性突变特征。上游及近山区站点 SRI 呈增加趋势,下游蔡旗站则呈极显著下降趋势。突变检验显示,上游部分站点主要在 20 世纪 80 年代至 21 世纪初出现偏丰突变,蔡旗站约在 1979 年发生显著减

少突变。

(3)蔡旗站 SRI 与气候因子的关系具有明显阶段性和尺度依赖性,主要集中在 2 ~ 8 a 和 8 ~ 16 a 周期尺度。与气温及极端气温指数相比,SRI 与降水及极端降水强度类指标的相干关系更为明显。整体来看,石羊河流域径流并非是对气候暖湿化的简单线性响应,而是“上游水分输入增强-中游用水调控-下游径流衰减”的复合水文过程。

参 考 文 献

[1] Madakumbura G D, Thackeray C W, Norris J, et al. Anthropogenic influence on extreme precipitation over global land areas seen in multiple observational datasets[J]. Nature Communications, 2021, 12: 3944.

[2] Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, et al. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions[J]. Nature Climate Change, 2016, 6: 508 - 513.

[3] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[4] WMO. State of the global climate 2024[R]. Geneva: WMO, 2025.

[5] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2025)[M]. 北京: 科学出版社, 2025.

[6] 姚宁, 蒋昆昊, 谢文馨, 等. 气候变化背景下山西省气象干旱时空演变特征[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 270 - 281.
Yao Ning, Jiang Kunhao, Xie Wenxin, et al. Temporal and spatial evolution of drought disasters in Shanxi Province under background of climate change[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 270 - 281. (in Chinese)

[7] 姜浩, 张寒博, 刘诚斌, 等. 基于温度-降水-植被综合干旱指数的长江流域干旱时空动态监测[J]. 农业机械学报, 2025, 56(8): 95 - 106, 119.
Jiang Hao, Zhang Hanbo, Liu Chengbin, et al. Spatiotemporal dynamics monitoring of drought in Yangtze River Basin using temperature - precipitation - vegetation integrated dryness index (TPVDI)[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8): 95 - 106, 119. (in Chinese)

[8] Bevacqua E, Rakovec O, Schumacher D L, et al. Direct and lagged climate change effects intensified the 2022 European drought[J]. Nature Geoscience, 2024, 17: 1100 - 1107.

[9] Zhang W, Zhou T, Wu P. Anthropogenic amplification of precipitation variability over the past century[J]. Science, 2024, 385(6707): 427 - 432.

[10] 王玉宝, 刘显, 史利洁, 等. 西北地区水资源与食物安全可持续发展研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(5): 38 - 44.
Wang Yubao, Liu Xian, Shi Lijie, et al. Sustainable development of water resources and food security in Northwest China[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(5): 38 - 44. (in Chinese)

[11] 常启昕, 孙自永, 潘钊, 等. 高寒山区河道径流的形成与水文调节机制研究进展[J]. 地球科学, 2022, 47(11): 4196 - 4209.
Chang Qixin, Sun Ziyong, Pan Zhao, et al. Stream runoff formation and hydrological regulation mechanism in mountainous alpine regions: a review[J]. Earth Science, 2022, 47(11): 4196 - 4209. (in Chinese)

[12] 陈亚宁, 李忠勤, 徐建华, 等. 中国西北干旱区水资源与生态环境变化及保护建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 385 - 393.
Chen Yaning, Li Zhongqin, Xu Jianhua, et al. Changes and protection suggestions in water resources and ecological environment in arid region of Northwest China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 385 - 393. (in Chinese)

[13] 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, Qin 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. (in Chinese)

[14] 梁鹏飞, 辛惠娟, 李宗省, 等. 祁连山黑河径流变化特征及影响因素研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1460 - 1471.
Liang Pengfei, Xin Huijuan, Li Zongsheng, et al. Runoff variation characteristics and influencing factors in the Heihe River Basin in the Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1460 - 1471. (in Chinese)

[15] 郭泽呈, 魏伟, 庞素菲, 等. 基于 SPCA 和遥感指数的干旱内陆河流域生态脆弱性时空演变及动因分析:以石羊河流域为例[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2558 - 2572.
Guo Zecheng, Wei Wei, Pang Sufei, et al. Spatio-temporal evolution and motivation analysis of ecological vulnerability in arid inland river basin based on SPCA and remote sensing index: a case study on the Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2558 - 2572. (in Chinese)

[16] 陈喜, 黄日超, 黄峰, 等. 西北内陆河流域水循环和生态演变与功能保障机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 12 - 21.
Chen Xi, Huang Richao, Huang Feng, et al. A comprehensive study of the maintaining mechanisms for hydrological cycle and ecological evolution and function in the northwest inland river basins of China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 12 - 21. (in Chinese)

[17] 周俊菊, 石培基, 师玮. 1960—2009 年石羊河流域气候变化及极端干湿事件演变特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(1): 143 - 153.

Zhou Junju, Shi Peiji, Shi Wei. Temporal and spatial characteristics of climate change and extreme dry and wet events in Shiyang River Basin from 1960 to 2009[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(1): 143 – 153. (in Chinese)

[18] 程倩, 齐月, 刘明春, 等. 气候变化及人类活动背景下石羊河流域生态与水资源变化特征[J]. 干旱区研究, 2024, 41(10): 1672 – 1684.
Cheng Qian, Qi Yue, Liu Mingchun, et al. Characteristics of ecology and water resource changes in the Shiyang River Basin under the background of climate change and human activities[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(10): 1672 – 1684. (in Chinese)

[19] 康丽芳, 赵锐锋, 陆海天, 等. 近 20 a 气候变化和人类活动对石羊河流域植被生态质量变化影响的定量甄别[J]. 环境科学, 2025, 46(4): 2439 – 2449.
Kang Lifang, Zhao Ruifeng, Lu Haitian, et al. Quantitative identification of impact of climate change and anthropogenic activities on the ecological quality of vegetation in the Shiyang River Basin over past 20 years[J]. Environmental Science, 2025, 46(4): 2439 – 2449. (in Chinese)

[20] 张调风, 张勃, 王有恒, 等. 基于综合气象干旱指数的石羊河流域近 50 年气象干旱特征分析[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 975 – 984.
Zhang Tiaofeng, Zhang Bo, Wang Youheng, et al. Drought characteristics in the Shiyang River Basin during the recent 50 years based on a composite index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 975 – 984. (in Chinese)

[21] 李玲萍, 卢泰山, 刘明春, 等. 基于标准化流量指数(SDI)的石羊河流域水文干旱特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(4): 24 – 33.
Li Lingping, Lu Taishan, Liu Mingchun, et al. Characteristics of hydrological drought based on standardized flow index in Shiyang River Basin of China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(4): 24 – 33. (in Chinese)

[22] Wang Q Z, Shao W Y, Guan Q Y, et al. The structural equation modeling constructed for runoff change attribution analysis outperforms traditional methods[J]. Journal of Hydrology, 2024, 636: 131317.

[23] 曹进军, 马海华. 气候和土地利用变化对石羊河流域自然径流的影响[J]. 中国农业气象, 2024, 45(11): 1290 – 1301.
Cao Jinjun, Ma Haihua. Climate and land use change effect on natural runoff in Shiyang River Basin[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2024, 45(11): 1290 – 1301. (in Chinese)

[24] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Applied Statistics, 1979, 28(2): 126 – 135.

[25] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61 – 78.

[26] Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2004, 11(5/6): 561 – 566.

[27] Duan R, Xin H J, Li Z J, et al. Quantitative analysis of the effects of climate change and human activities on the runoff in the Shiyang River Basin[J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 83: 172.

[28] Zhou J J, Huang J M, Zhao X, et al. Changes of extreme temperature and its influencing factors in Shiyang River Basin, Northwest China[J]. Atmosphere, 2020, 11(11): 1171.

[29] 贾文雄, 张禹舜, 李宗省. 近 50 年来祁连山及河西走廊地区极端降水的时空变化研究[J]. 地理科学, 2014, 34(8): 1002 – 1009.
Jia Wenxiong, Zhang Yushun, Li Zongsheng. Spatial and temporal change of precipitation extremes in Qilian Mountains and Hexi Corridor in recent fifty years[J]. Geographical Science, 2014, 34(8): 1002 – 1009. (in Chinese)

[30] Lin P, He Z B, Du J, et al. Recent changes in daily climate extremes in an arid mountain region, a case study in northwestern China's Qilian Mountains[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 2245.

[31] Li Z H, Wang Y M, Zhang H B, et al. Runoff response to changing environment in Loess Plateau, China: implications of the influence of climate, land use/land cover, and water withdrawal changes[J]. Journal of Hydrology, 2022, 613: 128458.

[32] Zhu R, Fang C S, Yin Z L, et al. Responses to future climate change in hydrological processes and hydrological drought in the upstream of Shiyang River Basin, Northwest China[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 58: 102310.

[33] Zhang Z X, Zhang L, Liu Y F, et al. Responses of annual streamflow variability to annual precipitation, extreme climate events and large-scale climate phenomena in the Qinghai – Tibet Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2024, 632: 130969.

[34] 曲芷程, 黄绍普, 刘司博, 等. 1963—2020 年蒙古锡林河流域极端气候及其对水文干旱的影响[J]. 生态学报, 2025, 45(11): 5386 – 5397.
Qu Zhicheng, Huang Shaopu, Liu Sibo, et al. Extreme climate and its impact on hydrological drought in the Xilin River Basin of Inner Mongolia over the past 60 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5386 – 5397. (in Chinese)

[35] Jin Z Z, Zhao Q D, Qin X, et al. The cryosphere change will intensify the summer drought in Qilian Mountains, northeastern of the Tibetan plateau[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 47: 101401.

[36] Sun D Y, Wang Y R, Wu L Z, et al. Runoff evolution characteristics and its response to climate change in the middle and lower reaches of Shule River Basin, Northwest China[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 59: 102436.

[37] Wang Q Z, Sun Y F, Guan Q Y, et al. Exploring future trends of precipitation and runoff in arid regions under different scenarios based on a bias-corrected CMIP6 model[J]. Journal of Hydrology, 2024, 630: 130666.