

昆仑山北麓内陆河径流对不对称升温的滞后响应特征

杨 鹏¹, 邢 坤^{1,2}, 赵万强³, 刘思海^{1,2}, 李 玲¹

(1. 新疆大学地理与遥感科学学院, 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830017;

3. 塔城水利设计研究院有限公司, 新疆 塔城 834700)

摘 要: [目的] 为阐明在气候变暖背景下冰雪补给型内陆河径流的变化规律及其成因, 以保障西北干旱区水安全。[方法] 以昆仑山北麓克里雅河为研究对象, 基于 1961—2019 年水文气象数据, 集成 Mann-Kendall 趋势检验、Pettitt 突变检测、小波周期图分析和偏相关分析等方法, 系统评估径流变化特征及其气候驱动机制, 并从水库建设的视角对比分析 2016 年前后的水文情势变化。[结果] 1) 克里雅河径流呈极显著上升趋势 ($p < 0.001$), 受 28 a、18 a 和 6 a 主周期共同调控, 未检测到结构性突变。2) 流域气候呈不对称增温特征, 最低气温升温速率 ($0.055\text{ }^{\circ}\text{C/a}$) 为最高气温 ($0.025\text{ }^{\circ}\text{C/a}$) 的 2.2 倍, 降水以 23 a 稳定周期增长。3) 径流变化遵循“温度主导、降水辅助、滞后响应”模式, 最低气温是核心驱动因子, 且存在 1 a 滞后效应。4) 水库建成后初步呈现“削峰填谷”的调节作用, 径流变异系数降低 48.91%, 非汛期径流增幅显著大于汛期。[结论] 克里雅河径流增长主要由夜间升温导致的冰雪消融主导, 目前仍处于冰川融水“增益期”; 水库运行已对天然水文过程产生“削峰填谷”的调节作用, 但未改变气候驱动下的长期增长趋势。研究结果为高寒内陆河流域应对气候变化的水资源管理提供科学依据。

关键词: 克里雅河; 气候变化; 水文过程; 小波分析; 滞后响应; 水资源管理

中图分类号: P339.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)04-0185-11

Lagged Response Characteristics of Inland River Runoff to Asymmetric Warming on Northern Foot of Kunlun Mountains

Yang Peng¹, Xing Kun^{1,2}, Zhao Wanqiang³, Liu Sihai^{1,2}, Li Ling¹

(1. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

3. Tacheng Water Conservancy Design and Research Institute Co., Ltd., Tacheng, Xinjiang 834700, China)

Abstract: [Objective] This study investigates the variation patterns of runoff in glacier-fed inland rivers and their underlying mechanisms under climate warming, aiming to support water security in arid regions of Northwest China. [Methods] The Keriya River on the northern foot of the Kunlun Mountains was selected as the study object. Based on hydrological and meteorological data from 1961 to 2019, this study systematically assessed runoff variation characteristics and the driving mechanisms of climate change using the Mann-Kendall trend test, Pettitt method for abrupt change detection, wavelet period analysis, and partial correlation analysis. Hydrological regime changes before and after 2016 were compared from the perspective of reservoir construction. [Results] 1) Runoff of the Keriya River showed a highly significant increasing trend ($p < 0.001$), jointly regulated by dominant cycles of 28, 18, and 6 years, with no detectable abrupt structural change. 2) The climate in the basin exhibited asymmetric warming characteristics, with the warming rate of minimum temperature ($0.055\text{ }^{\circ}\text{C/year}$) being 2.2 times that of maximum temperature ($0.025\text{ }^{\circ}\text{C/year}$), and precipitation increased following a stable 23-year cycle.

收稿日期: 2026-01-15

修回日期: 2026-03-24

录用日期: 2026-04-02

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-04-14

资助项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金青年项目 (2022D01C675); 国家自然科学基金项目 (U1703237)

第一作者: 杨鹏 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事干旱区水文过程研究。E-mail: 107552303786@stu.xju.edu.cn

通信作者: 邢坤 (1988—), 女, 博士, 讲师, 主要从事干旱区水资源开发利用研究。E-mail: xingkun@xju.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

3) Runoff variation followed a "temperature-dominated, precipitation-assisted, lagged response" pattern, with minimum temperature as the core driving factor and showing a 1-year lag effect. 4) After a reservoir was constructed, a preliminary peak-shaving and valley-filling regulatory effect was observed, with the runoff coefficient of variation decreasing by 48.91%. The increase in runoff during the non-flood season was significantly greater than in the flood season. [Conclusion] Runoff increase of the Keriya River is primarily dominated by snow and glacier melt induced by nighttime warming, and the basin is currently in a gain period of glacial meltwater. Reservoir operation has already produced a peak-shaving and valley-filling regulatory effect on natural hydrological processes, but it has not altered the long-term increasing trend driven by climate. The findings provide a scientific basis for water resources management in alpine inland river basins under climate change.

Keywords: Keriya River; climate change; hydrological process; wavelet analysis; lagged response; water resources management

Received: 2026-01-15

Revised: 2026-03-24

Accepted: 2026-04-02

Online(www.cnki.net): 2026-04-14

水资源是维系干旱区生态与社会系统的命脉,其安全是区域可持续发展的根本保障^[1]。在全球持续变暖的背景下,北半球中纬度地区的气候正在经历深刻转型,对当地本已脆弱的水资源系统构成严峻挑战^[2]。气候变化深刻影响着全球及区域水循环,导致水资源在时空上发生重新分配,加剧部分区域的水资源性缺水风险。近年来,以中国西北干旱区为代表的区域呈“暖湿化”趋势,表现为气温显著升高、降水格局改变。该趋势对以冰雪融水补给为主的河川径流过程产生深远影响^[3]。因此,作为水资源管理、生态保护与规划的核心依据,河川径流演变规律的精准识别与未来趋势预测,已成为制定适应性策略、实现可持续发展的基础。同时,径流是气候系统的敏感指示因子,深入揭示其对气候变化的响应机理,对提升区域应对气候变化能力具有重要科学价值。

全球范围内,在干旱区内陆河径流对气候变化的响应研究方面,已发展出系统的方法论。非参数趋势检验、突变点检测、小波分析和归因定量辨识等方法,为揭示水文过程对气候强迫的响应机制提供技术支撑^[4-6]。针对干旱区与半干旱区的研究,已深入揭示径流变化的地域分异规律、冰川退缩与水文过程的耦合机制,以及大气环流与地形的协同调控作用^[7-8]。然而,现有研究^[9-11]对地处塔克拉玛干沙漠南缘的昆仑山北麓内陆河流域关注仍显不足。该区域环境封闭、气候极端,其水文过程受局地气候与全球变化的复合影响,机制独特。认识的不足,既限制了对西北干旱区水文气候规律的全局理解,也制约了面向该区域的水资源精准管理与风险防控。

克里雅河发源于昆仑山北麓乌什滕塔格峰,是支撑于田绿洲和下游达里雅布依绿洲生存的生命线,历史上曾滋养古绿洲文明,生态与文化价值重要^[12]。该

河流径流以冰雪融水补给为主,属于典型的冰川融雪补给型河流,对气候变化响应极为敏感^[13]。近年来,特丰水年事件频发,进一步凸显在气候变暖背景下,水文极值事件风险加剧的严峻现实,也反映出深化该流域气候-水文响应机制研究的紧迫性与重要性^[14]。尽管已有研究对克里雅河流域开展探讨,李静^[15]分析其近年径流特征及影响因素;魏宣等^[16]定量评估气候变化与人类活动的贡献率;凌红波等^[17]识别径流的多尺度周期特征。然而仍存在不足:一方面,多数研究侧重于长期统计规律,对突变点内在成因,特别是气温不对称升温(如夜间最低气温增幅更显著)的差异化水文响应探讨不足;另一方面,对水文要素间滞后效应(如径流对气温变化的年际滞后响应)的量化不够精确,对人类活动干扰的评估尚不充分,难以揭示流域“削丰补枯”的自然调节机制。

基于此,研究选取克里雅河源流区兰干水文站的径流、降水及气温观测数据,综合运用趋势分析、突变识别、多时间尺度周期探测与偏相关分析等方法,系统揭示克里雅河径流对气候变化的响应机制。重点在于解析 1961—2019 年来径流演变的趋势、周期与突变特征,阐明径流与降水、气温(尤其是昼夜不对称升温)间的关联及滞后响应规律,并量化不同气候因子的贡献度,从而构建气候变化驱动下的复合水文响应模式。研究旨在深化对高寒内陆河流域径流动态的认识,为克里雅河流域及类似区域的水资源优化配置、生态保护修复与极端水文事件预警提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

克里雅河(35°11′~39°29′N, 81°09′~82°51′E)发源于昆仑山北麓的乌什滕塔格峰,是塔里木盆地南缘重要的内陆河流,全长约 438 km,流域面积约

3.95万 km²(图1)。作为维系于田绿洲和下游达里雅布依绿洲生存的关键水源,其径流变化直接影响区域水资源安全、生态稳定和社会经济的可持续发展。近年来,人类活动的影响日益显著,特别是2016年开始修建的吉音水库,已成为调节流域水循环的关键工程,显著改变天然径流的年内分配与年际过程。流域地处西北干旱区,深受塔克拉玛干沙漠影响,降水稀少、蒸发强烈,属典型温带大陆性气候。在全球变暖背景下,该区域气候呈“暖湿化”转型趋势,气温上升、降水格局改变,导致冰川与积雪加速消融,河川径流的时空分布发生显著变化。克里雅河以冰雪融水补给为主,降雨和地下水为辅,属于典型的冰川融雪型河流,对气候变化响应极为敏感。本研究以克里雅河源流区(35°11′~36°27′N, 81°27′~82°50′E)的兰干水文站为控制站点,基于1961—2019年径流、克里雅河源流区降水和气温观测数据展开分析。

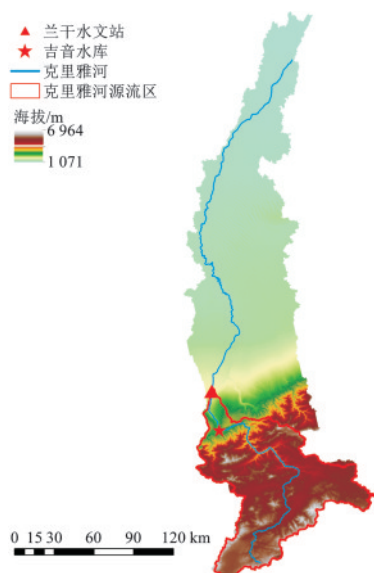


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

1.2 数据来源

克里雅河1961—2019年径流数据源于其出山口兰干水文站的实测记录。同期降水、最高温和最低温数据均取自中国气象局提供的CN05.1格点化观测数据集,空间分辨率为0.25°。需要指出的是,该数据集在站点稀疏的复杂山区可能存在一定局限性,其对地形引起的降水和温度空间异质性的捕捉能力相对有限,可能无法充分反映山区垂直气候带和地形遮蔽效应,从而在流域尺度气候驱动分析中引入不确定性。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析与显著性检验 Mann-Kendall趋势检验是一种基于秩的非参数检验方法,广泛应用于水文气象时间序列的趋势判断^[18]。其原假设(H_0)为

序列无趋势,备择假设(H_1)为序列存在单调上升或下降趋势。M-K检验统计量 S 的计算公式为:

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

式中: n 为序列长度; x_j 和 x_i 为序列数据点; sgn 为符号函数。通过标准化统计量 Z 值判断趋势的显著性水平, $p < 0.05$ 为显著, $p < 0.01$ 为极显著。

Sen's斜率估计适用于量化趋势变化的幅度,其结果对序列中的异常值不敏感,稳健性强^[19]。其估计值 β 是序列中所有相邻数据点斜率的中位数:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (2)$$

对于所有 $i < j$, $\beta > 0$ 表示上升趋势, $\beta < 0$ 表示下降趋势。本研究将结合M-K检验的显著性结果与Sen's斜率来共同判定变化的统计意义与实际速率。

1.3.2 突变点检测 研究结合2种具有不同原理的突变点检测方法,以提高结果的可靠性。

1) Pettitt 检验。该方法是一种非参数突变点检测技术,基于Mann-Whitney 2个样本检验原理,适用于识别时间序列中可能存在的单一突变点^[20]。其检验序列在某一位置 t 前后2段子序列 $(X_1, \dots, X_t)$ 和 $(X_{t+1}, \dots, X_n)$ 是否来自同一分布。通过计算所有可能分割点对应的秩和差异,得到检验统计量 K_t 及其显著性 p 值,从而有效识别平均值水平的突变。

2) 贝叶斯变点分析。该方法基于贝叶斯统计框架,通过计算后验概率来推断变点最可能发生的位置^[21]。在本研究中,我们假设时间序列中存在 K 个变点,将序列分割为 $K+1$ 个分段,每个分段内的数据服从独立的正态分布 $N(\mu_k, \sigma_k^2)$ 。采用惩罚似然方法,通过最小化下列目标函数来探测变点位置:

$$Q = \sum_{i=1}^{K+1} C[y_{(\tau_{i-1}+1): \tau_i}] + \beta K \quad (3)$$

式中: C 为成本函数(如负对数似然); τ_i 为第 i 个变点的位置; β 为惩罚系数,用于控制变点数量,防止过拟合。研究采用PELT(pruned exact linear time)算法进行高效求解。该算法在满足可加性的条件下,通过剪枝策略显著提高计算效率,能够探测多个变点并自动权衡模型复杂度和拟合效果。与仅能识别单一突变的Pettitt检验相比,PELT算法还可提供变点位置的后验概率与置信区间,并对变点前后的均值、方差等参数进行整体估计。

研究将贝叶斯变点分析作为Pettitt检验的补充与交叉验证。若2种方法均指示同一突变点,且Pettitt检验 $p < 0.05$,那么贝叶斯后验概率较高时,则认为该突变点具有较高的统计确信度。

1.3.3 多时间尺度周期性 已有研究^[22-23]采用离散正交小波变换与 Morlet 连续复小波变换 2 种小波分析方法。小波分析的基本原理是通过调整伸缩尺度参数(a),提取信号在不同频率范围内的信息,从而实现对时间序列多尺度特征的有效分离。该过程能够同时反映不同时间尺度下的周期变化及其时域分布特性,是分析非平稳水文气候序列的有力工具。其中,离散正交小波变换具有良好的能量集中性,可将原始信号集中的能量在小波域中表现为少数显著的系数,从而有效实现信号去噪,突出序列的真实变化趋势。Morlet 连续小波变换则因其在时域和频域上具备较高的分辨率,能够清晰识别序列中隐含的多层次周期结构,并刻画其随时间演变的规律。

1.3.4 关联机制与贡献度量化 研究采用偏相关分析以控制变量间的交互影响,从而揭示各气候因子对径流的直接净相关性;通过滞后相关性分析,辨识水文过程对气候强迫的延迟响应特征;并基于滑动窗口进行年代际演变分析,以揭示气候-水文关系在长时间尺度上的动态重组过程^[24-25]。

2 结果与分析

2.1 气候变化特征

2.1.1 降水变化 在系统揭示径流变化的气候驱动

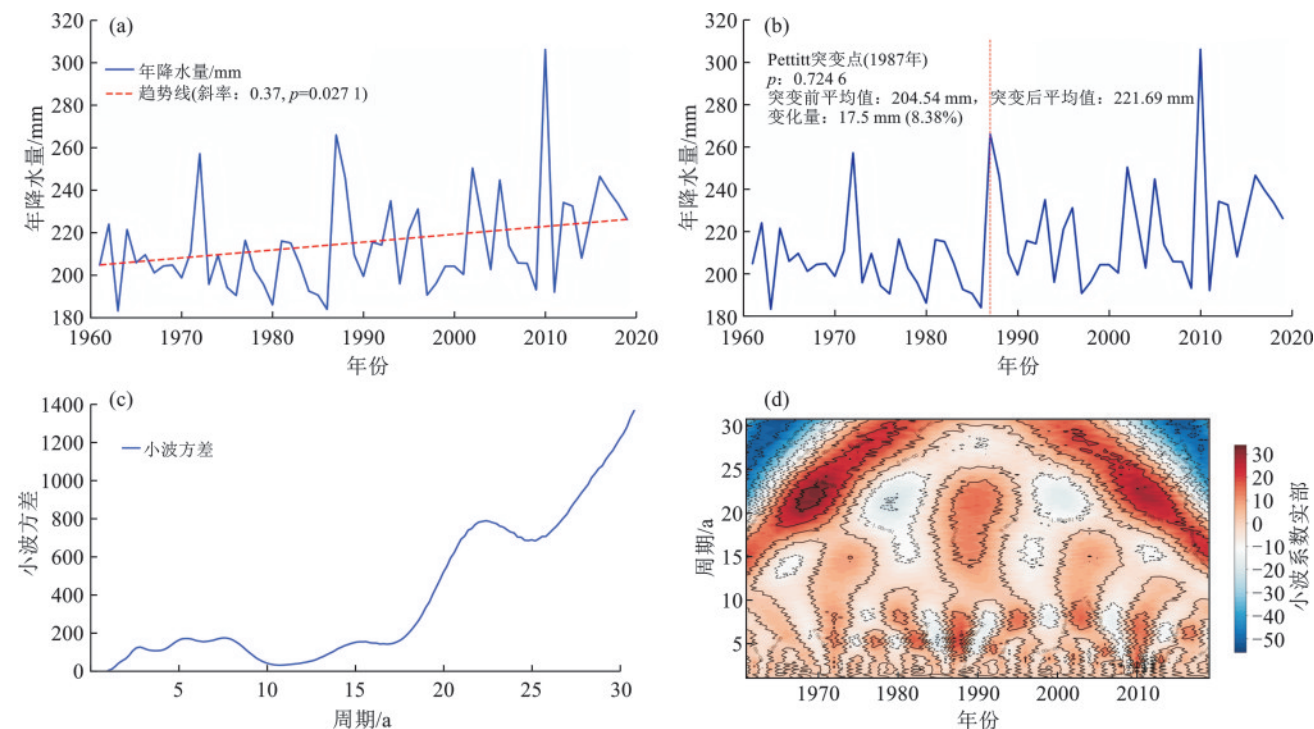


图 2 克里雅河源流区年降水变化特征

Fig.2 Annual precipitation variation characteristics in headwater region of Keriya River

2.1.2 温度变化特征及其不对称性 相较于降水的平稳变化,气温呈更复杂的转型特征。克里雅河源流区的气温在观测期内经历显著变暖过程(图 3)。

机制时,降水是首要考察的基础要素。对其序列演变规律的分析(图 2a)表明,克里雅河年降水量在观测期内呈显著上升趋势($p=0.0271$),上升速率为 0.37 mm/a 。然而,突变点识别结果(图 2b)表明, Pettitt 检验所提示的潜在突变年份(1987 年)并不具有统计显著性($p=0.7246$),贝叶斯变点分析亦未检测到结构性变点。综合表明,流域降水量的增加是显著但相对和缓的长期过程,其增长模式是平稳、渐进的,并未发生统计意义上的格局突变。进一步的周期性分析(图 2c 和图 2d)揭示降水变化的另一重要特征。小波方差显示,降水序列存在一个方差贡献占主导地位的 23 a 主周期,表明该时间尺度的震荡是调控降水量年代际波动的核心规律。小波系数实部等值线图进一步印证,强盛的 23 a 周期信号在 1961—2019 年整个分析时段内持续、稳定,未出现明显的断裂或位相突变。因此,克里雅河流域的降水量变化表现为“长期趋势性增长”与“稳定年代际周期振荡”的叠加。“无突变、有强周期”的变化特征,不仅与趋势分析中“未检测到统计显著突变点”的结论相互印证,也定量刻画其以规律性波动方式平稳增加的气候背景,为后续理解径流对降水变化的放大响应提供关键依据。

最高气温与最低气温均呈极显著上升趋势($p<0.01$),但增温表现出明显的不对称性。最低气温的升温速率($0.055 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$)约为最高气温($0.025 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$)的

2.2 倍, 表明夜间增温远快于白天, 气温日较差持续缩小。突变检测进一步显示, 最低气温在 1994—1995 年发生统计显著的突变, 而最高气温的突变信号 (1997—1998 年) 相对较弱。表明流域在 1990s 中期经历 1 次以夜间急剧增温为主导的气候转型。

从周期特征 (图 4) 来看, 最高气温与最低气温的变化模式存在根本差异。最高气温受 28 a 主周期及 8~9 a 次周期的显著调控, 小波等值线图中对应时段

存在强盛、连贯的震荡信号, 反映其受大尺度气候系统周期性波动的支配。与之形成鲜明对比的是, 最低气温未检测到显著的周期性结构, 其小波方差曲线平缓, 等值线图信号微弱且破碎。表明最低气温的剧烈上升更可能是单调的趋势性过程, 其内在周期性被强烈的增温趋势所掩盖。综上, 流域气温变化呈昼夜解耦的特征, 白天升温伴随显著的年代际周期波动, 而夜间升温则主要表现为持续、平稳的趋势性增长。

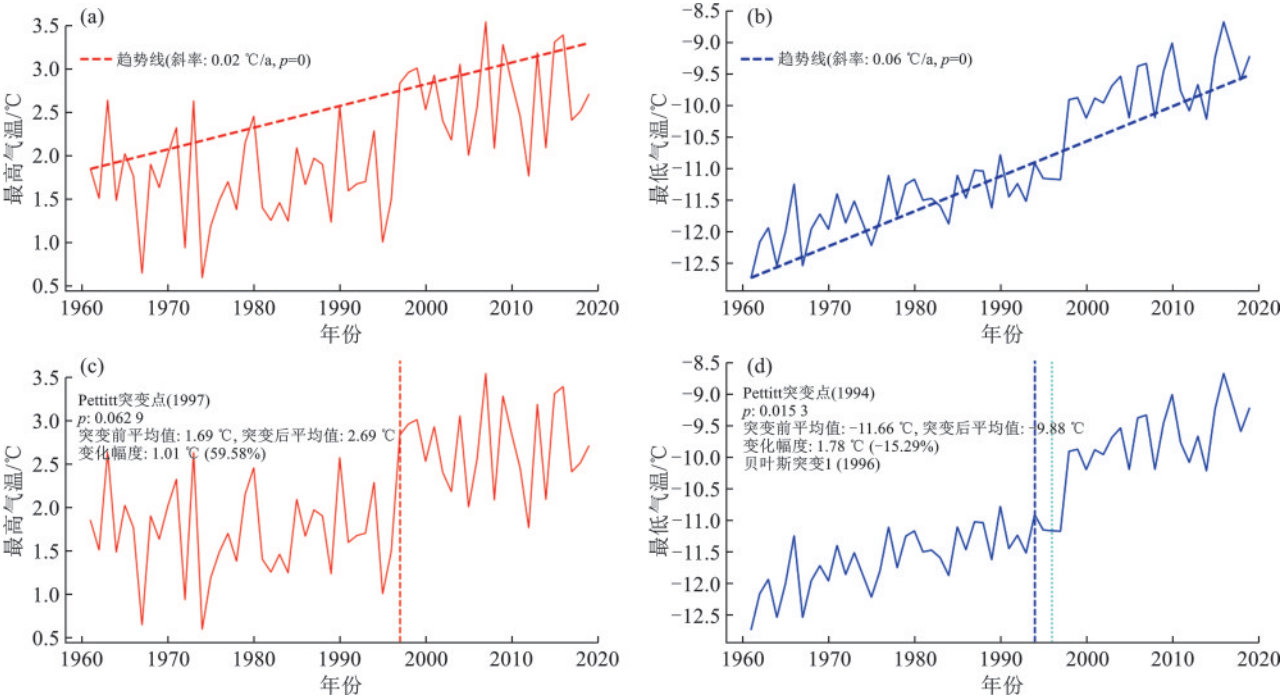


图 3 克里雅河源流区气温趋势和突变检验
Fig.3 Temperature trends and abrupt change detection in headwater region of Keriya River

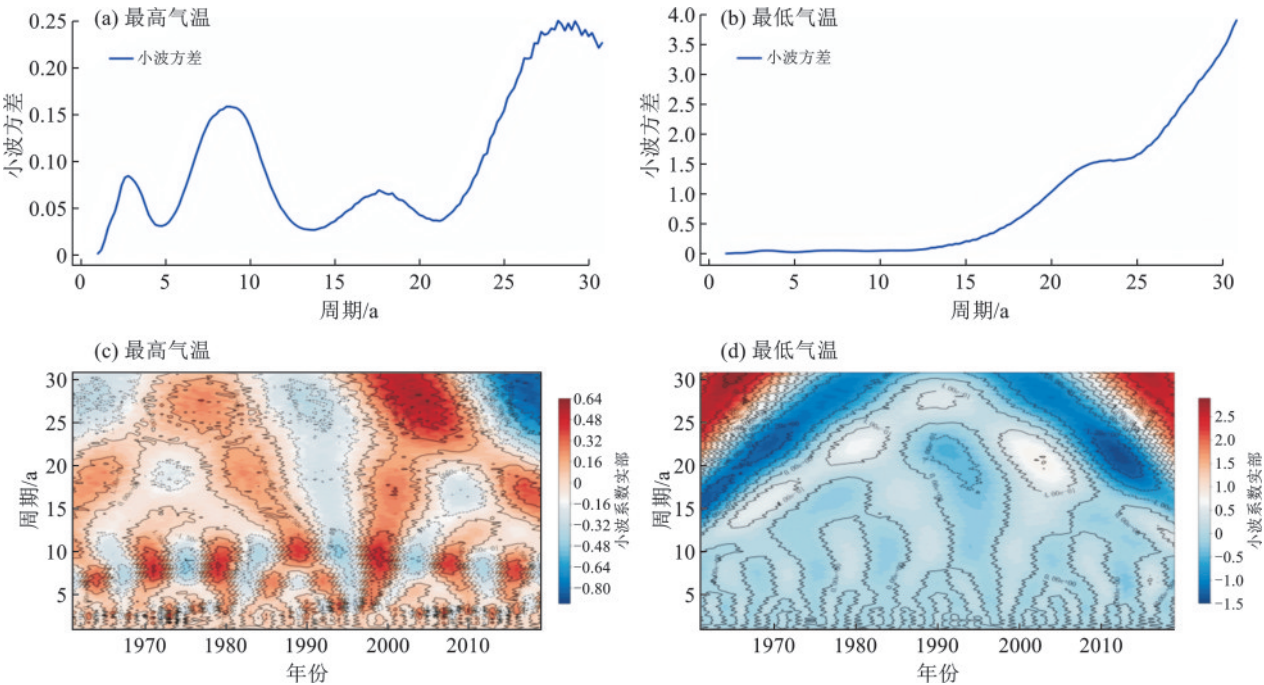


图 4 克里雅河源流区气温序列多时间尺度周期特征
Fig.4 Multi-time-scale periodic characteristics of temperature series in headwater region of Keriya River
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

2.2 径流变化

在明确气候背景的基础上,进一步解析径流自身演变规律。根据图 5a 的 Mann-Kendall 趋势检验结果,克里雅河年径流在 1961—2019 年呈极显著上升趋势($p=0.000\ 3$),Sen's 斜率估计显示其年增长速率为 $4.719 \times 10^6\text{ m}^3$,反映径流在观测期内持续而显著地增加。进一步通过突变点检测分析(图 5b),Pettitt 检验虽提示 1999 年可能为潜在突变年份,但其结果未达到统计显著性水平($p=0.111\ 5$),贝叶斯变点分析也未识别出任何突变点。表明克里雅河径流虽持续增长,但未发生结构性突变,其变化过程具有渐进性特征,与降水变化的平稳性形成呼应。值得

关注的是,径流增长速率高于降水增幅,揭示出径流对降水变化的显著放大效应,暗示流域内可能存在冰川积雪加速消融等其他水文过程的重要贡献。

为进一步揭示径流变化的内在节律,基于小波分析结果(图 5c、图 5d)显示,克里雅河年径流变化具有多时间尺度耦合的周期特征。小波方差识别出 28 a、18 a、6 a 3 个主周期,其中 28 a 周期方差贡献最大,表明其为调控径流长期波动的关键年代际尺度。小波系数实部等值线图进一步刻画各周期的时域结构,28 a 周期信号在整个时段内稳定存在;而 6 a 周期信号则表现出间歇性震荡特征,在 1975—1985 年与 1995—2005 年强度显著。

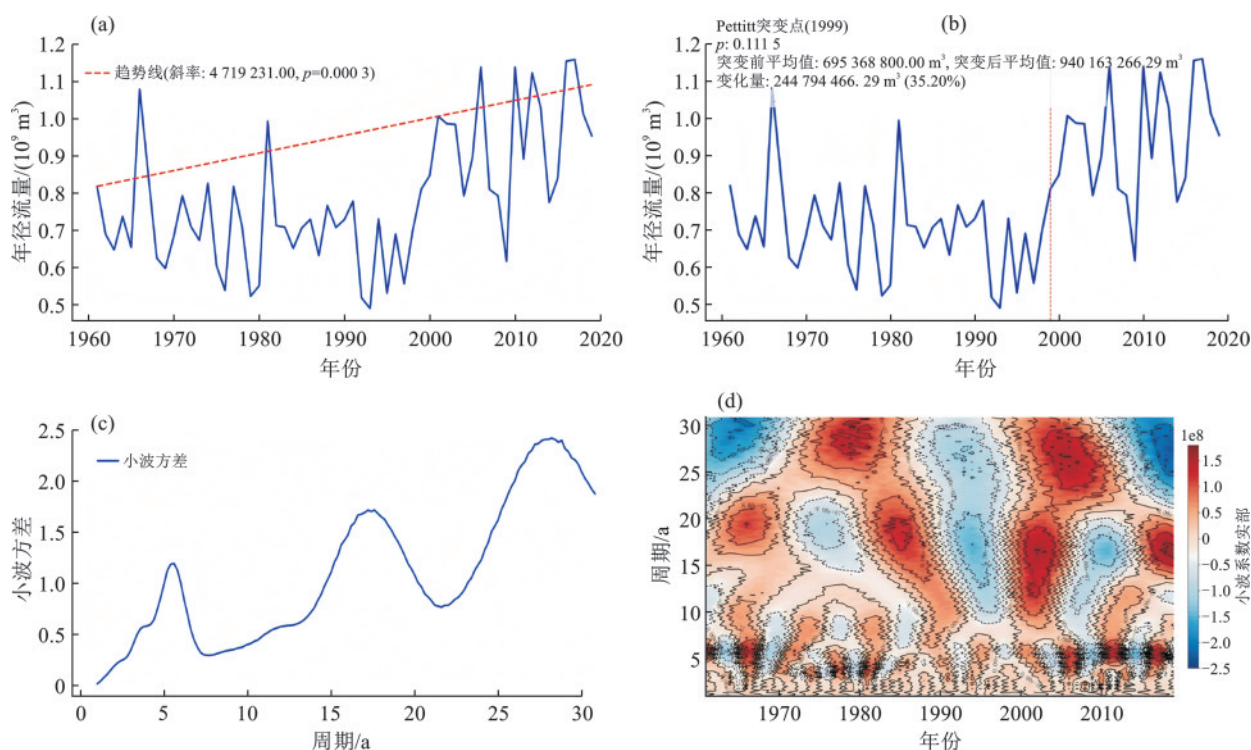


图 5 克里雅河源流区年径流变化特征

Fig.5 Analysis of annual runoff variation characteristics in headwater region of Keriya River

图 6 系统展示克里雅河流域 1961—2019 年极端水文事件的时空分布与演变规律。本研究基于统计方法定义极端事件,高极端事件指年径流量超过多年平均值加一倍标准差,低极端事件指年径流量低于多年平均值减一半标准差。从图 6a 可知,径流序列年际波动显著,高极端事件在 2000 年之后发生频率明显增加,尤其在 2010—2019 年集中出现,如 2016—2018 年连续 3 a 均为极端丰水年份。该趋势与图 6d 中移动平均序列所揭示的极端高值事件在 2010 年后显著增多的态势相互印证,反映出流域在气候暖湿化背景下极端丰水事件频发的整体转向。统计结果显示,研究期内共有 21 a 发生极端水文事件(包括高、低 2 类),占总年数的 35.6%,其中高极端事件数量(14 a)明显多于

低极端事件(7 a),进一步印证流域水文情势向“丰事件频发、枯事件减少”的非对称演变。从年代际尺度看(图 6b),高极端事件在 2010—2019 年达到频率峰值,而低极端事件主要集中于 1970 年和 1990 年,2000 年后显著减少,表明极端事件的主导类型发生明显的年代际更替,流域水文极值结构经历阶段性转型。在强度特征方面(图 6c),高极端事件的强度变幅较大,最大值出现在 2017 年,显示出极强水文波动的存在;低极端事件的强度分布则相对集中,最小值出现在 1993 年。整体上,极端事件的发生频率、类型结构与强度分布共同表明,克里雅河流域在水文情势“暖湿化”转型的背景下,极端丰水事件的发生风险显著上升,水资源管理与防洪安全面临新的挑战。

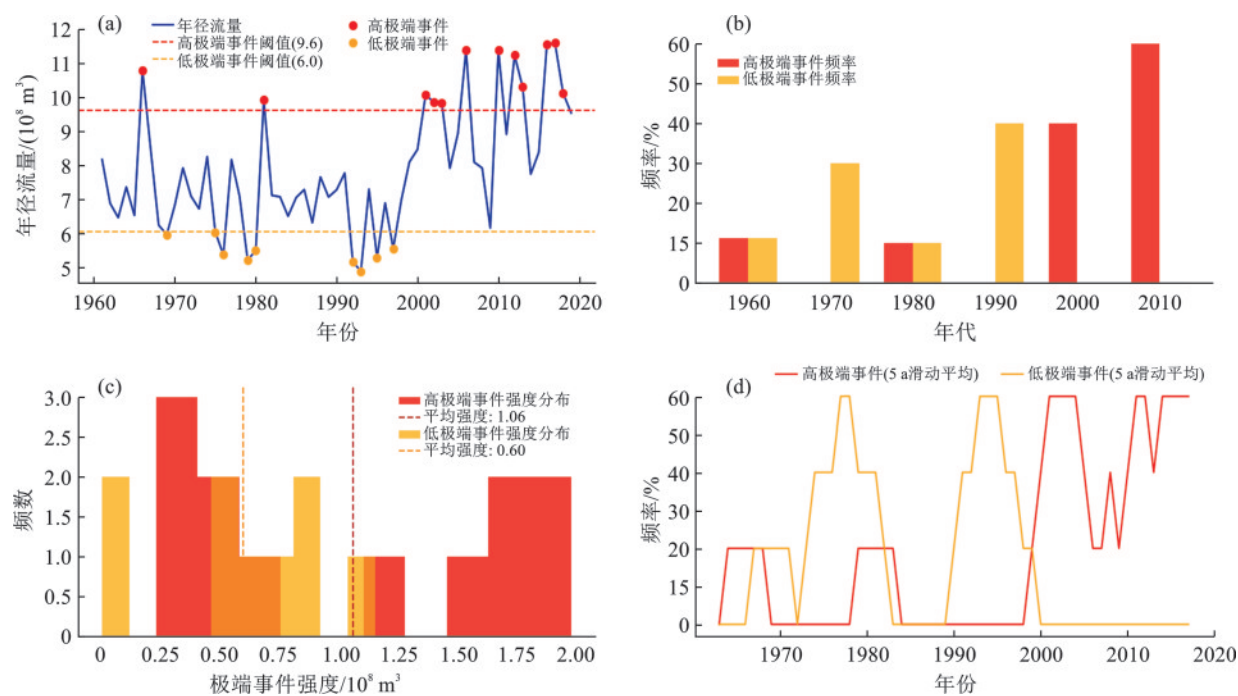


图6 1961—2019年克里雅河源流区年径流量变化及极端事件特征

Fig.6 Annual runoff variation and extreme event characteristics in headwater region of Keriya River from 1961 to 2019

2.3 水库建成前后水文情势对比

为辨析人类活动对水文情势的影响,本研究重点考察克里雅河流域关键水利工程-吉音水库建成前后的径流变化特征。该水库位于新疆和田地区于田县境内的克里雅河干流(图1),主要承担灌溉、防洪与发电等综合功能。其校核洪水位为2 510.76 m,设计洪水位2 509.12 m,正常蓄水位2 509.00 m,汛限水位2 506.50 m,死水位2 470.00 m;水库总库容为0.82亿 m^3 ,其中调节库容0.60亿 m^3 ,防洪库容0.06亿 m^3 ,死库容0.18亿 m^3 [26]。自2016年修建蓄水以来,水库运行对天然径流过程产生多方面的修饰作用,标志着流域水文情势进入自然与人为因素共同驱动的新阶段。

从年际变化来看,虽然水库运行尚未改变径流长期增长趋势,但对径流过程的均化作用显著。由图7a可见,建成后(2017—2019年)年平均径流量达10.41亿 m^3 ,较建成前近期(2006—2015年)的9.15亿 m^3 增加13.81%,表明在持续气候变暖背景下,水库运行未能扭转径流的增长态势,但对其过程产生重要影响。进一步分析发现,水库对径流过程的调节作用主要体现在稳定性和季节分配2个方面。图7b的统计特征对比显示,建成后径流变异系数大幅降低48.91%,标准差下降41.85%,表明水库运行显著增强径流过程的稳定性。“削峰”效应在季节尺度上表现更为明显。由图7c可知,虽然各季节径流量均有增加,但非汛期增幅显著大于汛期,其中春季(+78.8%)和秋季(+72.1%)增幅最为显著,而夏季

主汛期增幅相对缓和(+21.5%),体现水库“削峰填谷”的典型调节功能。

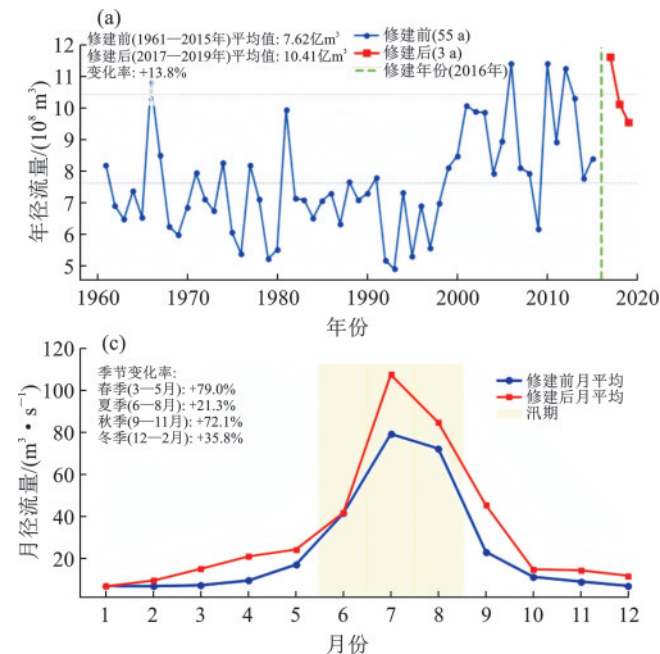
水库对极端水文事件的调控作用也初步显现。图7d的径流距平分析表明,建成后极端丰水事件的波动幅度有所缓和,与前述的变异系数降低结论相互印证。值得注意的是,该调节作用与气候因子的影响形成复杂的交互关系。综合分析表明,克里雅河流域水文过程已从自然气候主导转向“气候变化-水库调控”共同影响的新阶段。水库运行虽未改变径流长期增长趋势,但通过增强过程稳定性、优化季节分配和缓和极端波动,在提升水资源利用效率与防洪安全方面已显现初步工程效益。

2.4 径流对水文要素变化的多尺度响应

基于图8与图9的分析结果,克里雅河径流对气象因子的响应呈清晰的驱动层级与时间尺度差异。在气候因子影响力方面,最低气温被识别为径流变化的核心驱动因子。1961—2019年整个时段的简单相关分析显示,径流与最低气温的相关系数为0.614,属强相关,显著高于降水($r=0.460$)和最高气温($r=0.314$)。在控制变量间交互作用后,偏相关分析进一步验证最低气温的主导地位,其偏相关系数为0.543,回归系数为1.267,均明显高于其他因子。上述结果一致表明,夜间最低气温的上升通过促进冰川与积雪消融,成为径流增加最主要的气候驱动因子,其贡献甚至超过降水本身的直接作用。相比之下,最高气温与径流的相关性较弱,可能反映白天升温伴随

的蒸散发增强部分抵消其对融雪径流的正向效应。

在响应时序特征上,不同气象因子表现出明显差异。由图 9 可知,降水对径流的影响表现为即时响应(最佳滞后期为 0 a),而温度因子则存在明显的年际滞后效应(最佳滞后期为 1 a),此差异反映冰雪积累-消融过程所具有的物理延迟特性。从年代际演变来看,各气候因子对径流的相对重要性也发生动态重组。



注:箱体下边界对应第一四分位数,上边界对应第三四分位数,箱体内部的横线为中位数,白色圆形为平均数,黑色菱形为异常值。

图 7 克里雅河源区水库调节下径流过程的多维响应特征

Fig.7 Multi-dimensional response characteristics of runoff processes under reservoir regulation in headwater region of Keriya River

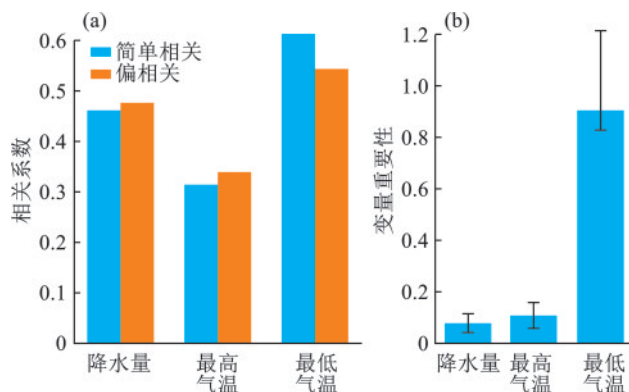


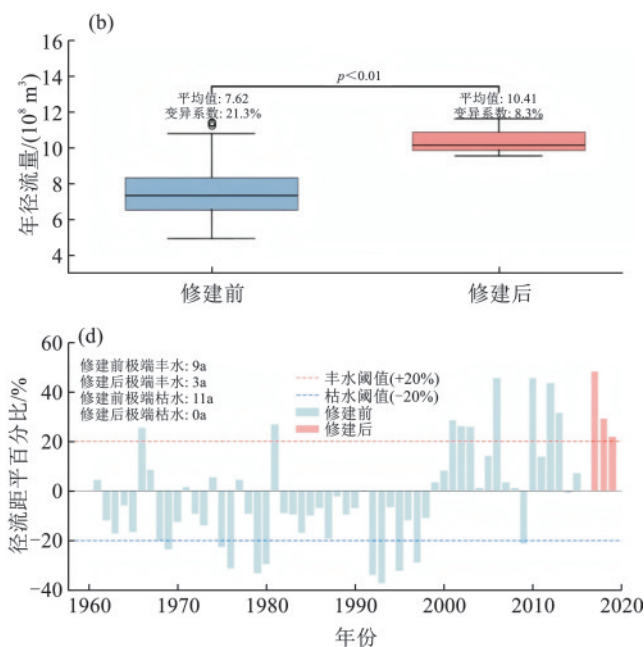
图 8 克里雅河源区径流与气象因子的相关性及其重要性

Fig.8 Correlation and importance of runoff and meteorological factors in headwater region of Keriya River

3 讨论

研究基于克里雅河流域长期观测,揭示高寒内陆区水文对气候变化的复合响应机制。与乌鲁木齐河等^[27]已进入衰减阶段的流域不同,研究流域因更高的冰川积雪覆盖率,仍处于气候变暖驱动的径流“增益期”。此差异表明,在全球变暖背景下,不同冰川补给与气候背景的内陆河流域,其水文演变阶段与轨迹可

1990年后温度效应显著增强,最低气温在1990年的相关性达到峰值($r=0.551$);而在2010年,降水的影响最为突出($r=0.660$),表明随着气候持续变暖,驱动径流变化的主导因子及其耦合关系也在不断调整。该发现共同揭示克里雅河流域存在“温度主导、降水辅助、滞后响应”的复合水文响应机制,为理解高寒流域水资源对气候变暖的响应提供重要科学依据。



能出现显著分异。冰川规模大、气候更干旱的流域,“增益期”可能维持更久,但也预示着未来拐点后的衰退或更为剧烈。径流变化受多时间尺度气候振荡的嵌套调制,小波分析识别出28 a、18 a与6 a 3类主周期,与祁连山部分流域常见周期存在差异,可能反映西风环流与昆仑山北坡地形相互作用的区域特异性^[28]。

研究基于长序列气温数据分析发现,流域气候变暖存在显著不对称性,最低气温升温速率($0.055\text{ }^{\circ}\text{C/a}$)显著高于最高气温($0.025\text{ }^{\circ}\text{C/a}$),且最低气温在1994—1995年发生统计突变。该种昼夜解耦增温技术在极端干旱背景下更为突出。降水则呈渐进增长,主周期稳定在23 a左右,体现昆仑山地形对水汽的筛选与再分配作用。气候要素的异步转型构成水文响应的背景。在此驱动下,流域形成“温度主导、降水辅助、滞后响应”的水文机制。偏相关分析表明,径流与最低气温关系最密切,且存在约1 a的滞后效应。可能源于冰雪区独特的能量平衡过程,夜间增温能抑制冰雪表面的夜间冷却效应,减少其能量释放,从而延长冰雪消融期,并加剧消融总量。同

时,夜间增温也加剧活动层冻融过程,影响春夏季径流形成。该物理机制使最低气温的作用超越最高气温。降水则为即时响应。从年代际变化看,1990年后温度效应增强,2010年以来降水作用日益突出,气

候-水文关系处于动态重组中。该模式揭示在高冰川补给与强干旱共同作用下,对能量平衡敏感的夜间增温通过调控冰雪冻融过程,成为主导径流长期变化的关键物理杠杆。

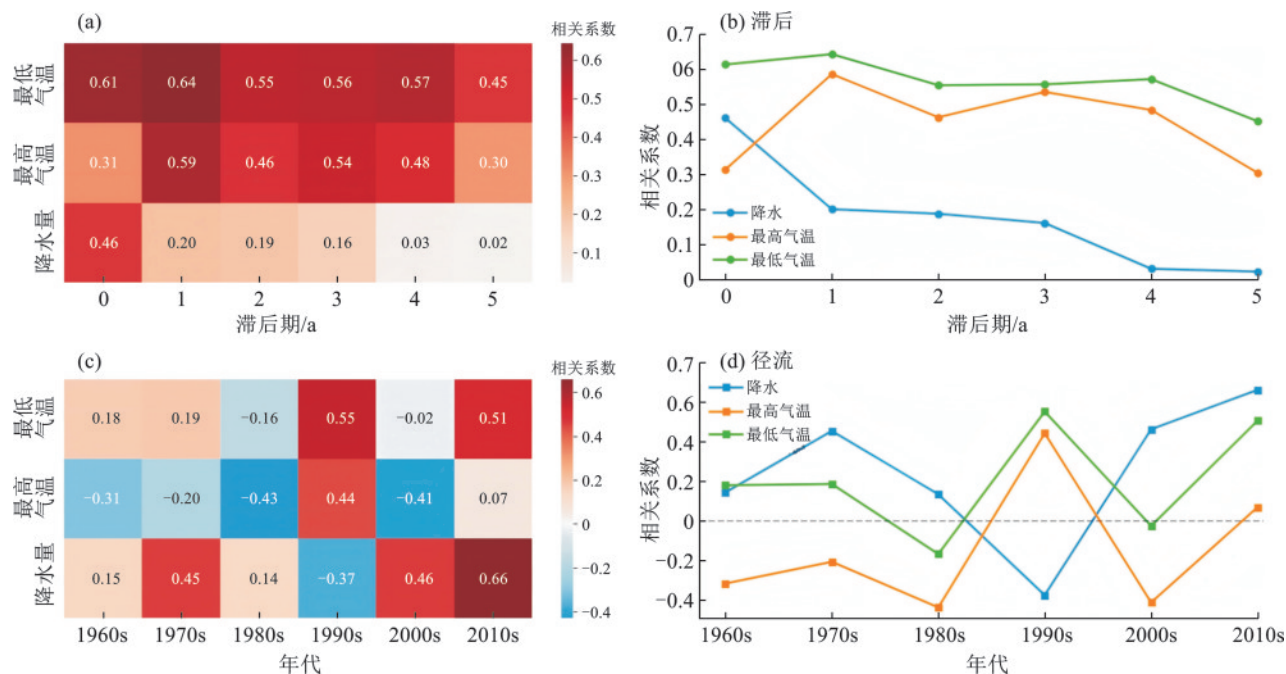


图9 1961—2019年克里雅河源区径流与气象因子关联的时序特征

Fig.9 Temporal characteristics of association between runoff and meteorological factors in headwater region of Keriya River from 1961 to 2019

研究结果支持高寒内陆河流域仍处于冰川融水“增益期”,与乌鲁木齐河等冰川规模较小或升温响应更快的流域已进入衰减阶段形成对比,表明全球变暖背景下不同冰川补给与气候背景的流域水文演变存在显著分异。冰川规模大、气候更干旱的流域,增益期可能维持更久,但也意味着未来拐点后的径流下降或更为剧烈。结合未来气候情景分析,增益期的持续年限与转折点主要取决于气候变暖速率、冰川初始储量及降水变化间的相互作用。在中低排放路径(如SSP1~2.6)下,增益期可能延续至21世纪中叶以后;而在高排放路径(如SSP5~8.5)下,加速消融或使其在2040—2050年左右结束。关键转折信号包括冰川面积损失超过30%~50%、夏季融水峰值持续下降及固态降水补偿不足等。尽管人类活动(如水库调节等)可改变径流年内分配,但难以逆转气候驱动的长期趋势拐点。

基于研究揭示的水文响应机制与演变趋势,对高寒内陆河流域的水资源管理提出方向,当前应把握径流增长窗口期,加强调控能力与战略储备;并依据“温度主导、滞后响应”的特征,升级监测预警体系,发展动态配置策略。同时,需前瞻规划不同气候情景下的适应性路径,构建流域综合治理框架,以提

升应对未来气候拐点风险的韧性。

同时,当前研究仍存在一定局限。数据方面,受限于站点数据与格点分辨率,可能低估高海拔地形效应与升温的空间异质性。机制解析上,尽管统计上识别出“温度主导”与不对称增温现象,但夜间增温经由能量平衡与冻融过程影响消融的具体路径,尚未实现量化归因。人类活动影响的评估仍不充分,中下游用水可能对径流产生趋势性影响,从而高估气候变化的净效应^[29]。相比已有研究^[30-32],在耦合分布式水文模型、高精度冰川物质平衡监测及系统跨流域对比等方面仍有提升空间。未来需融合多源遥感数据,发展耦合“气候-冰川-水文-人类用水”的模拟框架,以更精准量化各驱动因子的贡献、揭示不对称增温的水文路径,从而提升对区域水资源未来演变趋势的预测能力,支撑干旱区水资源的可持续管理。

4 结论

1) 1961—2019年,流域出山口径流呈显著增长趋势,未发生结构性突变,其变化主要受28 a等年代际气候周期的调控。

2) 流域气候呈不对称增温与稳定增湿的协同转型。增温表现为夜间最低气温升温速率远高于白天最

高气温的“不对称”模式,并于1990年发生显著突变;增湿则表现为具有稳定23 a主周期的趋势性平稳增长。

3) 径流变化呈温度主导、降水辅助、滞后响应的机制。夜间最低气温是驱动径流增长的核心气候因子,其影响存在约1 a的滞后效应;降水为即时响应,其作用在2010年以来日益凸显。气候-水文关系处于动态调整中。

4) 极端水文事件结构向“丰多枯少”转变,2010年以来高极端事件频次增加,2000年后低极端事件减少,流域洪旱风险同步加剧。

5) 2016年水库运行后径流过程呈“削峰填谷”的调节特征,径流变异系数显著下降,非汛期补给增强,标志着人类活动对水文的调控进入新阶段,但尚未改变径流长期增长趋势。

基于上述结论,建议未来研究加强对流域水资源系统脆弱性的综合评估,并构建耦合气候变化与人类调控的水资源预测-适应一体化管理体系,以应对日益突出的极端水文风险与水资源安全挑战。

参考文献:

- [1] Jain S, Srivastava A, Khadke L, et al. Global-scale water security and desertification management amidst climate change [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(49): 58720-58744.
- [2] Abu-Zeid M A, Abu-Zeid K M, Halim M K. Impact of climate change on water resources [M] // *Climate Changes Impacts on Aquatic Environment*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025: 121-157.
- [3] 林慧,王景才,黄金柏,等.气候变化情景下淮河流域气候干旱化研究[J]. *中国农村水利水电*, 2020(6): 21-26.
Lin Hui, Wang Jingcai, Huang Jinbai, et al. Climate drought in Huai River basin under climate change [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(6): 21-26.
- [4] 姬广兴,刘智培,高红凯,等.1961—2020年赣江流域月尺度实际蒸发模拟及归因分析[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(1): 195-202.
Ji Guangxing, Liu Zhipei, Gao Hongkai, et al. Monthly scale actual evaporation simulation and attribution analysis in Gan River basin from 1961 to 2020 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(1): 195-202.
- [5] Abeyasinghe U, Balkissoon S, Aloysius N. Assessment of hydroclimatic variability and aridity trends in the Mississippi River basin using parametric and non-parametric techniques [J]. *Frontiers in Climate*, 2025, 7: e1481926.
- [6] Daba M H, Ayele G T, You Songcai. Long-term homogeneity and trends of hydroclimatic variables in upper Awash River basin, Ethiopia [J]. *Advances in Meteorology*, 2020, 2020: e8861959.
- [7] Ni Yongxin, Yu Zhongbo, Lü Xizhi, et al. Spatial difference analysis of the runoff evolution attribution in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: e128149.
- [8] Chesnokova A, Baraër M, Laperrière-Robillard T, et al. Linking mountain glacier retreat and hydrological changes in southwestern Yukon [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56: e2019WR025706.
- [9] 郭泽呈,魏伟,石培基,等.中国西北干旱区土地沙漠化敏感性时空格局[J]. *地理学报*, 2020, 75(9): 1948-1965.
Guo Zecheng, Wei Wei, Shi Peiji, et al. Spatiotemporal changes of land desertification sensitivity in the arid region of Northwest China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(9): 1948-1965.
- [10] 达伟,王书峰,沈永平,等.1957—2019年昆仑山北麓车尔臣河流域水文情势及其对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(1): 46-55.
Da Wei, Wang Shufeng, Shen Yongping, et al. Hydrological response to the climatic changes in the Qarqan River basin at the northern slope of Kunlun Mountains during 1957—2019 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(1): 46-55.
- [11] 李海花,闵月,李桢李,等.昆仑山北麓两次极端暴雨水汽特征对比分析[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(3): 715-724.
Li Haihua, Min Yue, Li Anbei, et al. Comparative analysis of on water vapor characteristics of two extreme rainstorms in the north slope of Kunlun Mountains [J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(3): 715-724.
- [12] Xing Kun, Yang Peng, Liu Sihai, et al. A coupled SWAT-LSTM approach for climate-driven runoff dynamics in a snow and ice-fed arid basin [J]. *Sustainability*, 2025, 17(22): e10235.
- [13] Hu Keke, Ailihazi W, Danierhan S. Ecological base flow characteristics of typical rivers on the north slope of Kunlun Mountains under climate change [J]. *Atmosphere*, 2023, 14(5): e842.
- [14] 李进宝,何学敏,黄鹏程,等.克里雅河流域水系结构及连通性特征[J]. *中国水土保持科学*, 2025, 23(3): 232-240.
Li Jinbao, He Xuemin, Huang Pengcheng, et al. Characterization of water system structure and connectivity in the Kriya River basin [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(3): 232-240.
- [15] 李静.昆仑山北坡克里雅河2022年特丰水年径流特征及影响因素分析[J]. *地下水*, 2024, 46(3): 238-240.
Li Jing. Analysis on the annual runoff characteristics and influencing factors of Keliya River in the northern slope of Kunlun Mountain in 2022 [J]. *Ground Water*, 2024, 46(3): 238-240.
- [16] 魏宣,王宁,周明通,等.气候变化和人类活动对克里雅河径流变化影响定量研究[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(8): 80-86.
Wei Xuan, Wang Ning, Zhou Mingtong, et al. Com-

- bined impact of climate change and human activities on runoff in the Kriya River [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(8): 80-86.
- [17] 凌红波,徐海量,张青青.新疆克里雅河源流区径流变化与气候因子关系的非线性分析[J].*地理研究*, 2012, 31(5): 792-802.
Ling Hongbo, Xu Hailiang, Zhang Qingqing. Nonlinear analysis of runoff change and climate factors in the head-stream of Keriya River, Xinjiang [J]. *Geographical Research*, 2012, 31(5): 792-802.
- [18] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社, 1999.
Wei Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999.
- [19] 伍洋,金韩宇,程清平.1961—2019年大香格里拉地区极端气候事件时空演变特征[J].*人民珠江*, 2022, 43(10): 18-32.
Wu Yang, Jin Hanyu, Cheng Qingping. Temporal and spatial evolution characteristics of extreme climate events in Grand Shangri-La region from 1961 to 2019 [J]. *Pearl River*, 2022, 43(10): 18-32.
- [20] 王鹏全,李润杰.基于水文学法和SWAT模型的北川河流域生态需水量分析[J].*水资源保护*, 2024, 40(4): 118-127.
Wang Pengquan, Li Runjie. Ecological water demand analysis based on hydrological methods and SWAT model in the Beichuan River basin [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(4): 118-127.
- [21] 熊立华,周芬,肖义,等.水文时间序列变点分析的贝叶斯方法[J].*水电能源科学*, 2003, 21(4): 39-41.
Xiong Lihua, Zhou Fen, Xiao Yi, et al. Bayesian method for detecting change-points of hydrological time series [J]. *Hydroelectric Energy*, 2003, 21(4): 39-41.
- [22] 谢智博,穆兴民,高鹏,等.基于R/S和Morlet小波分析的北洛河上游径流变化特征[J].*水土保持研究*, 2022, 29(2): 139-144.
Xie Zhibo, Mu Xingmin, Gao Peng, et al. Variation characteristics of runoff in the upper reaches of Beiluo River based on R/S and morlet wavelet analysis [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(2): 139-144.
- [23] 轩党委,张献志,刘龙庆,等.黄河源区汛期降水径流序列多尺度小波分析[J].*人民黄河*, 2024, 46(4): 32-36.
Xuan Dangwei, Zhang Xianzhi, Liu Longqing, et al. Multi-scale wavelet analysis of precipitation and runoff series in flood season in the source region of the Yellow River [J]. *Yellow River*, 2024, 46(4): 32-36.
- [24] 巫晨煜,许帆帆,魏士博,等.渭河流域地表植被覆盖对气候变化的响应研究[J].*生态环境学报*, 2023, 32(5): 835-844.
Wu Chenyu, Xu Fanfan, Wei Shibo, et al. Study on response of surface vegetation cover to climate change in Weihe River basin [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2023, 32(5): 835-844.
- [25] Wang Huan, Yan Shijie, Ciais P, et al. Exploring complex water stress-gross primary production relationships: Impact of climatic drivers, main effects, and interactive effects [J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(13): 4110-4123.
- [26] 李丽珂,王荣勇,颜丽彬,等.新疆冰雪融水型水库排沙优化调度[J].*水电能源科学*, 2026, (4): 43-46.
Li Like, Wang Rongyong, Xie Libin, et al. Optimal sediment reduction operation of snowmelt-supplied reservoirs in Xinjiang [J]. *Water Resources and Power*, 2026(4): 43-46.
- [27] 折远洋,李忠勤,张明军,等.近51a来乌鲁木齐河源区径流特征及对气候变化的响应[J].*干旱区资源与环境*, 2012, 26(12): 113-118.
Zhe Yuanyang, Li Zhongqin, Zhang Mingjun, et al. Response of streamflow to climate change at the headwaters of Urumqi River in the Tianshan mountains over the recent 51 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(12): 113-118.
- [28] 程鹏,孔祥伟,罗汉,等.近60a以来祁连山中部气候变化及其径流响应研究[J].*干旱区地理*, 2020, 43(5): 1192-1201.
Cheng Peng, Kong Xiangwei, Luo Han, et al. Climate change and its runoff response in the middle section of the Qilian Mountains in the past 60 years [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(5): 1192-1201.
- [29] 张顾,黄亮,王加虎,等.秦淮河流域气象水文要素变化特征及径流变化归因分析[J].*干旱气象*, 2023, 41(1): 54-63.
Zhang Gu, Huang Liang, Wang Jiahu, et al. Variation characteristics of meteorological and hydrological factors and attribution analysis of runoff variation in Qinhuai River basin [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2023, 41(1): 54-63.
- [30] 何秋乐,匡星星,梁四海,等.1966—2015年长江源冰川融水变化及其对径流的影响:以冬克玛底河流域为例[J].*人民长江*, 2020, 51(2): 77-85.
He Qiule, Kuang Xingxing, Liang Sihai, et al. Glacial meltwater variation in Dongkemadi River basin of Yangtze River source from 1966 to 2015 and its influence on runoff [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(2): 77-85.
- [31] Karki P. Evaluating the impact of climate change on hydrological extremes using deep learning method [D]. Pulchowk Campus, 2025.
- [32] Zhang Feng, Yue Jiajia, Zhou Chun, et al. Long short-term memory (LSTM) based runoff simulation and short-term forecasting for Alpine regions: A case study in the upper Jinsha River basin [J]. *Water*, 2025, 17(21): e3117.