

开都河源区径流量演变规律及影响因素分析

郑灵巧^{1,2}, 邢坤^{1,2*}, 刘思海^{1,2}, 郭春红³

(1.新疆大学 地理与遥感科学学院, 乌鲁木齐 830017; 2.新疆大学 绿洲生态自治区重点实验室, 乌鲁木齐 830017; 3.新疆水利水电规划设计管理局, 乌鲁木齐 830000)

摘要:【目的】厘清气候变化下开都河源区的径流演变规律及其影响因素, 为流域水资源开发利用提供科学参考。【方法】基于开都河源区 1960—2019 年的水文气象数据, 采用 Mann-Kendall 检验法、R/S 分析法、有序聚类法、小波分析法, 分析开都河源区径流量演变规律, 并基于双累积曲线法、累积斜率变化率法、气候弹性系数法定量分析气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率。【结果】1960—2019 年, 开都河源区年径流量以 $1.714 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$ 的速率增加, Hurst 指数为 0.83, 径流量变化存在 3 个主周期, 分别为 36、21、9 a, 径流量突变点为 1995 年; 开都河源区气温和降水量分别以 $0.239 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 和 $7.670 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的速率增加, Hurst 指数分别为 0.85 和 0.83, 与径流量的相关系数分别为 0.560 和 0.598; 基于双累积曲线法、累积斜率变化率法、气候弹性系数法得出的气候变化对开都河源区径流量变化的贡献率分别为 89.9%、73.1%、43%, 人类活动对径流量变化的贡献率分别为 10.1%、26.9%、57%, 3 种方法对基准期径流量模拟的误差分别为 2.1%、0.2%、4.1%。【结论】开都河源区年径流量呈极显著增加趋势, 气候变化是导致径流量增加的主要原因。

关键词: 开都河; 径流量; 演变规律; 影响因素

中图分类号: P333

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022570

OSID:



郑灵巧, 邢坤, 刘思海, 等. 开都河源区径流量演变规律及影响因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(5): 100-107.

ZHENG Lingqiao, XING Kun, LIU Sihai, et al. Evolution of Runoff and Its Influencing Factors in the Source Area of the Kaidu River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(5): 100-107.

0 引言

【研究意义】近年来, 随着全球气候变暖, 各地气温持续升高, 气候变化加剧了陆地水循环。同时, 人类活动通过改变下垫面条件也对陆地水文循环产生一定影响, 导致地表径流量发生显著变化^[1]。我国西北干旱区处于亚欧大陆腹地, 地理位置特殊、气候条件多变, 该地区地表径流量对气候变化和人类活动的响应较为显著, 对干旱区地表径流量演变规律及影响因素的研究已成为热点问题^[2]。

【研究进展】目前, 国内外学者对径流量演变规律及其影响因素开展了大量研究。孙栋元等^[3]基于 Mann-Kendall 检验法分析了疏勒河流域径流量的变化趋势, 结果表明该地区径流量呈增加趋势; 黄晨璐等^[4]利用有序聚类法分析了渭河、泾河的径流量变化突变性, 发现径流量存在多个突变点。Arnell 等^[5]发现, 气候变化对东亚、南亚等地区径流量变化的影响

程度不同; 李秋菊等^[6]研究发现, 冰雪融水和降水量是导致黑河上游径流量增加的主要原因; Wang 等^[7]研究发现, 人类活动是导致海河流域径流量衰减的主要因素。目前, 水文模型、弹性系数法、经验统计法被广泛应用于径流量变化的影响因素研究。水文模型中的 SWAT 模型、SCS 模型的发展已较为成熟, 被广泛应用于定量研究径流量变化的影响因素^[8-10], 但此类模型所需数据量较大, 对数据精度要求较高^[11]。相比之下, 弹性系数法、经验统计法对数据量的需求相对较小, 计算简便且能得到较好的结果, 已被广泛应用。李虹彬等^[12]基于弹性系数法得出气候变化是引起阿克苏河径流量变化的主要原因; 王随继等^[13]通过累积量斜率变化率比较法得出人类活动是影响皇甫川流域径流量减少的主要因素。韩聪慧等^[14]基于双累积曲线法得出人类活动在不同阶段均是导致西拉木伦河径流量变化的主要因素。

【切入点】虽然当前对于径流量变化影响因素的研究较多^[15-16], 但围绕开都河流域的相关研究尚不多见, 开都河流域作为典型的干旱内陆河流域, 具有降水量稀少、蒸散发强烈的气候特征, 该地区径流量对气候变化和人类活动十分敏感, 该区域的径流量变化对流域中下游水资源的开发利用、社会经济发展及生

收稿日期: 2022-10-16

基金项目: 新疆财政厅《NJ 新增水资源战略研究》专项课题 (403-1005-YBN-FT61); 天池博士计划项目 (tcbs201822); 博士科研启动基金项目 (BS180244)

作者简介: 郑灵巧 (1996-), 女。硕士研究生, 主要从事干旱区水文水资源研究。E-mail: zllq668899@126.com

通信作者: 邢坤 (1988-), 女。讲师, 博士, 主要从事干旱内陆河融雪径流模拟研究。E-mail: xingkun@xju.edu.cn

态环境保护至关重要。【拟解决的关键问题】鉴于此，本研究通过一系列数理统计方法对开都河源区的径流量变化趋势性、周期性、突变性进行了全面分析，并基于不同方法量化气候变化和人类活动对开都河源区径流量变化的贡献率，以期气候变化背景下流域水资源合理规划与高效利用提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

开都河流域属于温带大陆性气候区，该地区蒸散发强烈、降水量稀少，年平均潜在蒸发量为 2 196 mm，年平均降水量为 53.14 mm，年平均气温为 3.9 °C，降水量主要集中在夏季，昼夜温差较大^[17]，该流域地表径流量对气候变化较为敏感，生态环境脆弱。

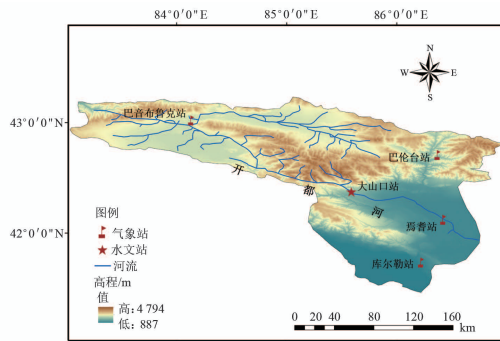


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 数据来源

流域内大山口水文站 1960—2019 年的逐年径流量数据来源于新疆塔里木河流域巴音郭楞管理局；气象数据主要包括流域内的巴音布鲁克站、巴伦台站、焉耆站、库尔勒站 1960—2019 年的逐年气温和降水量数据，来源于国家气象信息中心。由于巴音布鲁克站、焉耆站缺少 2 a 的气温和降水量数据，本文通过线性回归法将缺失数据补齐，以保证数据在时间序列上的连续性^[18]。

1.3 研究方法

1.3.1 水文气象要素演变规律研究

采用 Mann-Kendall 趋势检验法^[19-20]、R/S 法^[21]对开都河源区径流量、气温、降水量的趋势变化进行分析；借助 Morlet 小波分析^[21-22]对开都河源区径流量的周期演变规律进行分析，使用 Mann-Kendall 突变检验法^[19]、有序聚类法对开都河源区径流量的突变点进行识别。

1.3.2 径流量变化影响因素定量研究

1) 双累积曲线法

双累积曲线法的原理为建立基准期累积降水量和累积径流量的线性回归方程，通过线性回归方程模拟变化期的预测累积径流量，进而求得变化期的预测

径流量。基准期和变化期的实测径流量之差为径流量变化总量，变化期的实测径流量与预测径流量之差为人类活动引起的径流量变化量^[23]。

2) 累积斜率变化率法

该方法假设径流量在某 1 年发生突变，建立突变前、后的累积降水量与时间的线性回归方程，并计算其斜率的变化率，同时建立突变前、后的累积径流量与时间的线性回归方程，计算其斜率变化率，二者斜率变化率之比即为降水量对径流量变化的贡献率^[24]。

3) 气候弹性系数法

降水量的弹性系数定义如下^[25]：

$$\varepsilon = \frac{\delta Q/Q}{\delta P/P}, \quad (1)$$

式中： ε 为弹性系数； Q 为径流量； P 为降水量；非参数计算式为：

$$\varepsilon = \text{median} \left[\frac{(Q_i - \bar{Q})/\bar{Q}}{(P_i - \bar{P})/\bar{P}} \right], \quad (2)$$

式中： Q_i 、 P_i 分别为第 i 年的年径流量和年降水量； $\bar{Q}$ 、 $\bar{P}$ 分别为多年平均径流量和多年平均降水量。

降水量对径流量变化的贡献率为：

$$C_p = \varepsilon \times 100\%. \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 径流量的趋势性、周期性和突变性

基于线性趋势法对 1960—2019 年开都河年径流量变化趋势进行分析，结果见图 2。开都河年径流量呈增加趋势，以 $1.714 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$ 的速率增加，开都河多年平均径流量为 $35.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，年径流量最大值与最小值分别为 $57.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ (2002 年) 和 $24.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ (1986 年)，极值比为 2.32，变差系数 (C_v) 为 0.18，表明径流量年际变化波动较小，主要因为开都河起源于依连哈比尔尕山，径流量主要依靠山区冰雪融水的补给^[26]。

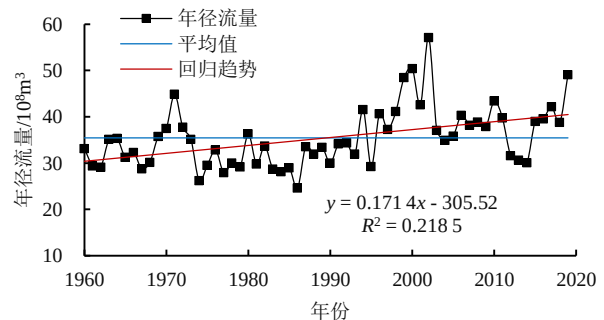


图 2 开都河年径流量变化趋势

Fig.2 Variation trend of annual runoff of Kaidu river

为进一步揭示开都河年径流量变化趋势，对年径流量序列进行 Mann-Kendall 趋势检验，结果见表 1。取 $p=0.01$ ， $Z_{\alpha/2} = \pm 2.58$ 进行显著性检验，结果表明，

$Z_c=3.78>2.58$, 可见 1960—2019 年开都河年径流量呈增加趋势; 同时 $P=0.000\ 2<0.01$, 说明该趋势通过了 99% 的显著性检验水平。为明确年径流量未来的变化

表 1 开都河年径流量演变趋势

Table 1 Trend characteristics of annual runoff series in Kaidu River

线性拟合		Mann-Kendall 检验				Hurst		
斜率	趋势	Z_c	$Z_{a/2}$	P	趋势	显著性	H 指数	趋势
0.171 4	增加	3.78	2.58	0.000 2	增加	极显著	0.83	持续

采用 Morlet 小波分析法对 1960—2019 年开都河年径流量周期演变规律进行分析, 结果见图 3。图中小波系数的正、负情况反映年径流量的丰、枯情况。开都河年径流量存在 3 种不同时间尺度的丰枯变化周期, 分别为 6~11、13~23、28~39 a。在 6~11 a 时间尺度上发生 6 次丰枯交替变化; 在 13~23 a 时间尺度上发生 3 次丰枯交替变化。1995 年后丰枯交替变化较弱, 说明在该尺度下径流量受到气候或人为因素干扰, 使其丰枯变化周期受到影响; 28~39 a 时间尺度上发生 2 次枯丰交替变化, 且这种变化在整个研究期内表现稳定。至 2019 年, 周期变化等值线还未完全闭合, 因此在 28~39 a 时间尺度下, 年径流量在未来一段时间内将持续处于丰水状况。

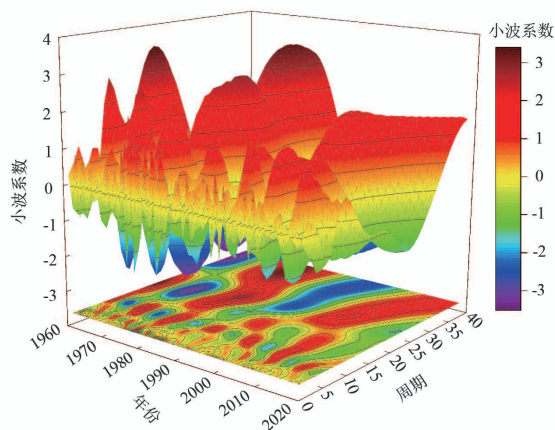


图 3 开都河年径流量小波系数分布

Fig.3 Real part of wavelet coefficient of annual runoff of Kaidu River

为进一步确定开都河年径流量的变化主周期, 计算了年径流量小波方差并绘制小波方差图, 如图 4 所示。小波方差的值越大, 对应的径流量变化周期越明显。开都河年径流量的小波方差存在 3 个峰值, 分别为 9、21、36 a 的周期尺度, 其中 36 a 周期尺度对应的小波方差值最大, 因此 36 a 为开都河年径流量变化的第一主周期, 此外, 26 a 为第二主周期, 9 a 为第三主周期。

利用 Mann-Kendall 突变检验对 1960—2019 年开都河年径流量的突变点进行识别, 结果见图 5。 UF 曲线从 1986 年开始呈上升趋势, 2001 年后超过了 0.05 显著性水平对应的临界值。可见, 2001 年后开

都河年径流量增加趋势明显。 UF 曲线和 UB 曲线出现 2 个交点, 分别为 1994 年和 1995 年, 交点均位于临界值之间, 因此 1994 年和 1995 年为开都河年径流量的突变点, 突变后开都河年径流量较突变前有明显增加趋势。

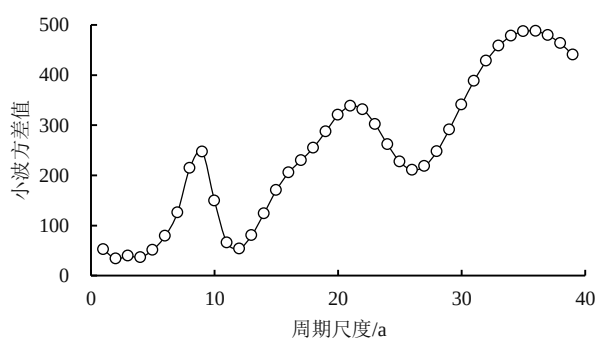


图 4 开都河年径流量的小波方差值

Fig.4 Wavelet square difference of annual runoff of Kaidu River

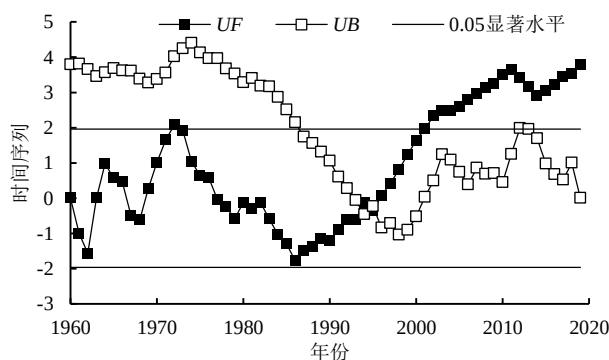


图 5 开都河径流量的 Mann-Kendall 突变检验

Fig.5 Mann-Kendall mutation test of Kaidu River runoff

使用有序聚类法进一步诊断开都河年径流量的突变点, 结果如图 6 所示。开都河年径流量的离差平方和在 1995 年达到最小, 为 1 571.2。综合以上 2 种方法的结果, 最终确定 1995 年为开都河年径流量的突变点。

2.2 径流量与气温、降水量的相关性

1960—2019 年, 开都河源区的气温、降水量的线性变化趋势如图 7 所示。由图 7 (a) 可知, 开都河源区年平均气温呈上升趋势, 以 $0.239\ ^\circ\text{C}/10\ \text{a}$ 的速率增加, 多年平均气温为 $5.7\ ^\circ\text{C}$; 由图 7 (b) 可知, 开都河源区年降水量呈增加趋势, 以 $7.670\ \text{mm}/10\ \text{a}$ 的速率增加, 多年平均降水量为 $155.9\ \text{mm}$ 。

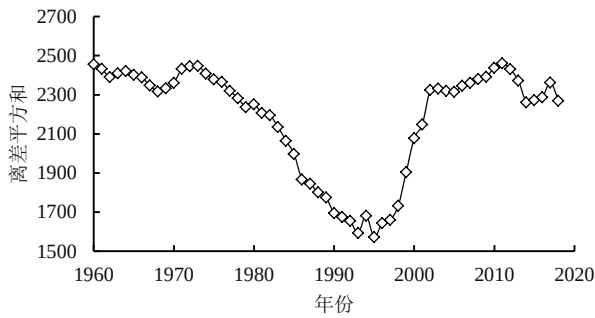
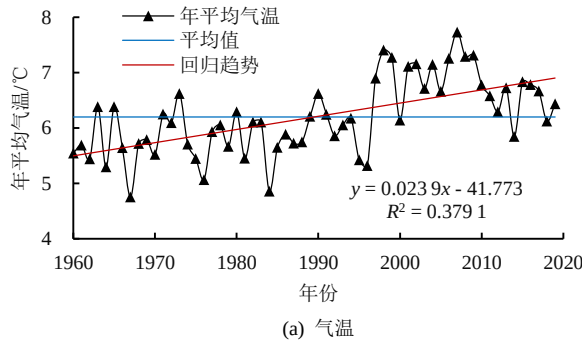
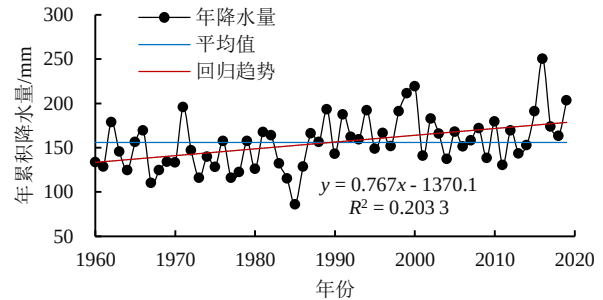


图6 开都河径流量有序聚类分析

Fig.6 Ordered cluster analysis of Kaidu River runoff



(a) 气温



(b) 降水量

图7 开都河源区气象要素的变化趋势

Fig.7 Variation trend of meteorological elements in the source region of Kaidu River

表2 开都河源区气象要素趋势特征

Table 2 Trend characteristics of meteorological elements in the source region of Kaidu River

要素	线性拟合		Mann-Kendall 检验				Hurst		
	斜率	趋势	Z_c	$Z_{a/2}$	P	趋势	显著性	H 指数	趋势
气温	0.023 9	升高	4.71	2.58	0.000 0	升高	非常显著	0.85	持续
降水量	0.767 0	增加	3.50	2.58	0.000 5	增加	非常显著	0.83	持续

由表3可知,径流量与气温、降水量的相关系数分别为0.560、0.598,相关性均通过了0.01显著性水平,且径流量与降水量的相关系数大于径流量与气温的相关系数,表明径流量与降水量的相关性更强。

表3 开都河源区气象要素与径流量相关性检验

Table 3 Correlation test between meteorological elements and runoff in the source region of Kaidu River

时段	因子	相关系数	p 值
1960—2019 年	气温	0.560**	0.000 0
	降水量	0.598**	0.000 0

注 **表示极显著相关 ($p < 0.01$)。

2.3 气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率

由上述结果可知,开都河年径流量的突变点为1995年,因此将1960—1995年作为基准期,1996—2019年作为变化期,采用双累积曲线法、累积斜率变化率法及气候弹性系数法定量研究气候变化和人类活动对开都河源区径流量变化的贡献率。图8为降水量-径流量的双累积曲线,突变前、后的累积降水量和累积径流量的线性拟合系数 R^2 分别为0.998 6、0.997 8,均大于0.99,说明二者之间存在极显著相关性。基准期与变化期的降水量-径流量双累积曲线的斜率变化不明显,可以判断人类活动对开都河源区径流

为进一步揭示开都河源区气温、降水量的变化趋势,分别对气温、降水量进行 Mann-Kendall 趋势检验,结果见表2。气温、降水量的 Z_c 分别为4.71、3.50,均大于2.58,说明开都河源区气温、降水量在0.01的显著性水平下呈上升趋势。气温、降水量的Hurst指数分别为0.85、0.83,均大于0.5,表明开都河源区气温和降水量在未来一段时间内将持续增加,且持续性较强。

量变化的影响较小。

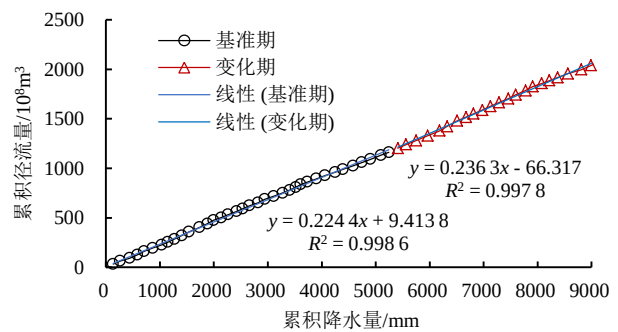


图8 降水量-径流量双累积曲线

Fig.8 Double accumulation curve of precipitation and runoff

使用双累积曲线法进一步计算气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率,结果见表4。将变化期累积降水量带入基准期的线性方程中,求得变化期的预测累积径流量,进而得出变化期的预测径流量为 $39.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,变化期预测径流量和变化期实测径流量之差为 $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,即由人类活动引起的径流量变化量为 $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,占径流量变化总量的10.1%。因此,人类活动对径流量变化的贡献率为10.1%,气候变化对径流量变化的贡献率为89.9%。

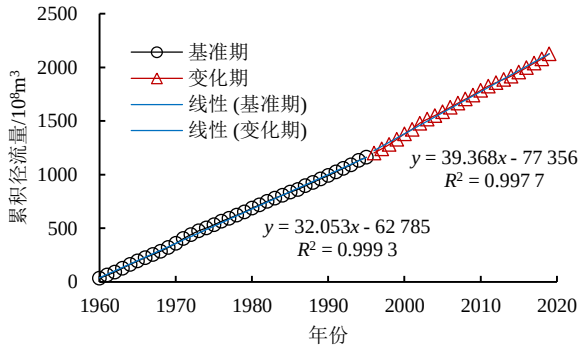
表 4 基于双累积曲线法量化气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率

Table 4 The double accumulation curve method quantifies the contribution of climate change and human activities to runoff change

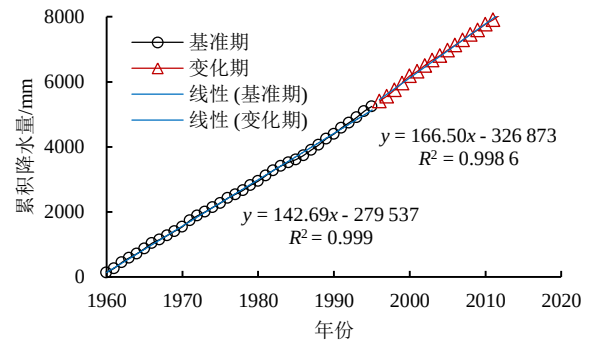
降水量/mm		径流量/ 10^8 m^3			影响径流量变化量/ 10^8 m^3		对径流量变化的贡献率/%	
基准期	变化期	基准期	变化期实测	变化期预测	气候变化	人类活动	气候变化	人类活动
145.7	171.2	32.3	40.2	39.4	7.1	0.8	89.9	10.1

根据前文对基准期（1960—1995 年）和变化期（1996—2019 年）的划分，使用累积斜率变化率法量化气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率，分别建立 2 个时段内累积径流量、累积降水量与年份之

间的线性回归方程，绘制不同时段累积径流量、累积降水量与年份之间的变化曲线，如图 9 所示。累积径流量、累积降水量在 2 个时段内与年份的拟合系数 R^2 均大于 0.99，二者与年份之间的相关性较高。



(a) 累积径流量变化曲线



(b) 累积降水量变化曲线

图 9 累积径流量、累积降水量变化曲线

Fig.9 Change curves of cumulative runoff and cumulative precipitation

进一步分析累积径流量和累积降水量在不同时段的斜率变化，结果见表 5。与基准期相比，变化期累积径流量的斜率增加了 7.315，其斜率变化率为 22.82%，累积降水量的斜率增加了 23.81，其斜率变化率为 16.69%，累积降水量的斜率变化率与累积径流量的斜率变化率的比值为 73.1%。因此，气候变化对径流量变化的贡献率为 73.1%，人类活动对径流量变化的贡献率为 26.9%。

基于气候弹性系数法量化开都河源区气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率，结果见表 6。降水量的弹性系数为 0.43，因此气候变化对径流量变化的贡献率为 43%，人类活动对径流量变化的贡献率为

57%。径流量变化总量为 $7.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，由气候变化引起的径流量变化量为 $3.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，由人类活动引起的径流量变化量为 $4.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

表 5 基于累积斜率变化率法量化气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率

Table 5 The cumulative rate of slope change method quantifies the contribution of climate change and human activities to runoff change

时段	累积径流量		累积降水量		对径流量变化的贡献率/%	
	斜率	变化率/%	斜率	变化率/%	气候变化	人类活动
基准期	32.053		142.69			
变化期	39.368	22.82	166.50	16.69	73.1	26.9

表 6 基于气候弹性系数法量化气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率

Table 6 The climate elastic coefficient method quantifies the contribution of climate change and human activities to runoff change

时段	多年平均径流量/ 10^8 m^3	径流量总变化量/ 10^8 m^3	降水量弹性系数	影响径流量变化量/ 10^8 m^3		径流量变化贡献率/%	
				气候变化	人类活动	气候变化	人类活动
基准期	32.3						
变化期	40.2	7.9	0.43	3.4	4.5	43	57

表 7 为上述 3 种方法的对比分析结果，双累积曲线法、累积斜率变化率法、气候弹性系数法对基准期径流量模拟的误差分别为 2.1%、0.2%、4.1%，前 2 种方法的模拟精度高于气候弹性系数法，更适用于研究区。此外，前 2 种方法得出的气候变化对径流量变化的贡献率远大于人类活动，而气候弹性系数法得出气候变化对径流量变化的贡献率略低于人类活动，且气候变化与人类活动对径流量变化的贡献率差距较小，因此，通过上述 3 种方法对比得出气候变化是引

起开都河源区径流量变化的主要因素。

表 7 双累积曲线法、累积斜率变化率法、弹性系数法的结果对比

Table 7 Comparison of calculation results of double cumulative curve method, cumulative slope change rate method and elastic coefficient method

方法	基准期模拟径流量误差/%	对径流量变化的贡献率/%	
		气候变化	人类活动
双累积曲线法	2.1	89.9	10.1
累积斜率变化率法	0.2	73.1	26.9
弹性系数法	4.1	43	57

3 讨论

受全球气候变暖的影响,以新疆为代表的西北干旱区自 20 世纪 80 年代以来升温迅速,变暖强度高于全国平均水平,多地冰川加速消融,使内陆河流受到影响的径流量急剧增加^[26-27]。张玉娜等^[18]、刘志斌等^[26]研究表明,近年来开都河源区径流量呈显著增加趋势,这与本文研究结果一致。本研究表明,1960—2019 年开都河源区径流量呈极显著增加趋势,气候变化是导致径流量增加的主要原因。短期来看,径流量增加能够缓解该流域水资源短缺;长期来看,冰川的加速融化可能使流域山区冰川面积迅速缩小甚至消失,从而增加气候变化对径流量影响的不确定性。

气候变化是影响开都河源区径流量变化的主要因素,这与其他干旱内陆河流域的研究结果基本一致^[28-29]。近年来,开都河流域的降水量呈增加趋势,降水量增加会直接导致开都河径流量增加;同时,开都河流域山区升温明显^[18],气温升高导致山区冰雪加速融化,增加径流量补给。开都河径流量起源于山区,本研究中的大山水文站位于开都河径流量出山口,该站点位置更靠近上游山区,此处人类活动强度相对较弱,距中下游径流量耗散区相对较远,因此基于该站点观测获取的径流量对气候变化的响应较强。

本文使用双累积曲线法、累积斜率变化率法、气候弹性系数法对开都河源区径流量变化的影响因素进行了定量分析,结果表明前 2 种方法计算结果相似,对基准期径流量模拟的误差更小。就计算方法而言,前 2 种方法均对累积径流量与累积降水量的关系展开研究,弱化了长时间序列数据中的单值对累积值的影响,而气候弹性系数法则是计算逐年径流量、降水量变化幅度的比值,每年的比值均为单独个体,任一单值的改变均可能使结果发生变化。就研究区而言,本研究区位于干旱区,径流量受冰雪融水补给的影响,与降水量之间的关系较为复杂,这与 Zhang 等^[15]研究结果一致。

本研究分析气候变化与人类活动对径流量变化的贡献率是在假定气候变化和人类活动对径流量变化的影响相对独立的情况下开展的。然而,二者对径流量变化的影响也存在一定的耦合作用^[30],内在机理存在一定不确定性,还需在未来研究中进一步探讨。

4 结论

1) 1960—2019 年,开都河年径流量呈极显著增加趋势,增加速率为 $1.714 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$ 。径流量丰枯变化受 3 个主周期的影响,36 a 为第一主周期,21 a 为第二主周期,9 a 为第三主周期。开都河年径流量

在 1995 年发生突变,突变后年径流量相比突变前明显增加。

2) 1960—2019 年,气温、降水量均呈显著增加趋势,降水量对开都河源区径流量的影响比气温更显著。

3) 双累积曲线法和累积斜率变化率法比气候弹性系数法更适用于本研究区的径流量成因分析,气候变化是引起开都河源区径流量发生变化的主要因素。

参考文献:

- [1] CHEN Yaning, LI Zhili, FAN Yuting, et al. Progress and prospects of climate change impacts on hydrology in the arid region of northwest China[J]. *Environmental Research*, 2015, 139: 11-19.
- [2] KONG Dongxian, MIAO Chiyuan, WU Jingwen, et al. Impact assessment of climate change and human activities on net runoff in the Yellow River Basin from 1951 to 2012[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 566-573.
- [3] 孙栋元, 齐广平, 马彦麟, 等. 疏勒河干流径流变化特征研究[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(3): 557-567.
- [4] SUN Dongyuan, QI Guangping, MA Yanlin, et al. Variation characteristics of runoff in the mainstream of Shule River[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(3): 557-567.
- [5] 黄晨璐, 杨勤科. 渭河与泾河流域水沙变化规律及其差异性分析[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(2): 327-336.
- [6] HUANG Chenlu, YANG Qinke. Runoff and sediment variation rules and differences in Wei River and Jing River Basins[J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(2): 327-336.
- [7] ARNELL N W. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios[J]. *Global Environmental Change*, 2004, 14(1): 31-52.
- [8] 李秋菊, 李占玲, 王杰. 黑河流域上游径流变化及其归因分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(3): 31-39.
- [9] LI Qiuju, LI Zhanling, WANG Jie. Variation and attribution of runoff over the upper reaches of Heihe River Basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(3): 31-39.
- [10] WANG Weiguang, SHAO Quanxi, YANG Tao, et al. Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes: A case study in four catchments of the Haihe River Basin, China[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(8): 1 158-1 174.
- [11] 陈梓樾, 郭巧玲, 韩瑶瑶, 等. 降水与土地利用变化对窟野河流域径流的影响[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(7): 14-18.
- [12] CHEN Ziyang, GUO Qiaoling, HAN Yaoyao, et al. Effects of precipitation and land-use changes on runoff of the Kuye River Basin[J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(7): 14-18.
- [13] 王一然, 丁文峰, 张冠华. 基于 SWAT 模型的丹江流域土地利用变化对径流影响研究[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 62-67, 74.
- [14] WANG Yiran, DING Wenfeng, ZHANG Guanhua. Study on the impact of land use change on runoff in Danjiang watershed based on SWAT model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 62-67, 74.
- [15] 赵武成, 王琦, 王小赞, 等. 基于修正 SCS-CN 模型集雨垄径流预测[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 96-105.
- [16] ZHAO Wucheng, WANG Qi, WANG Xiaoyun, et al. Runoff prediction of rainwater harvesting ridge based on modified SCS-CN model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 96-105.
- [17] 刘金平, 任艳群, 张万昌, 等. 雅鲁藏布江流域气候和下垫面变化对径流的影响研究[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(1): 275-287.
- [18] LIU Jinping, REN Yanqun, ZHANG Wanchang, et al. Study on the influence of climate and underlying surface change on runoff in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,

- 2022, 44(1): 275-287.
- [12] 李虹彬, 刘亚婷, 王卫光, 等. 气候因素对阿克苏河径流变化影响的定量评估[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 115-122.
LI Hongbin, LIU Yating, WANG Weiguang, et al. Assessing the impact of meteorological factors on streamflow in Aksu River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(1): 115-122.
- [13] 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析——累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报, 2012, 67(3): 388-397.
WANG Suiji, YAN Yunxia, YAN Ming, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan drainage basin: Application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(3): 388-397.
- [14] 韩聪慧, 席小康, 朱永华. 气候变化和人类活动对西拉木伦河径流的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(9): 134-140.
HAN Conghui, XI Xiaokang, ZHU Yonghua. The impacts of climate change and anthropogenic activities on the runoff of Xilamulun River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(9): 134-140.
- [15] ZHANG Zengxin, CHEN Xi, XU Chongyu, et al. Evaluating the non-stationary relationship between precipitation and streamflow in nine major basins of China during the past 50 years[J]. Journal of Hydrology, 2011, 409(1): 81-93.
- [16] 杨晓高, 郝虎, 赵传燕, 等. 黑河上游天涝池流域生长季降雨和气温对河川径流的影响[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 263-269.
YANG Xiaogao, HAO Hu, ZHAO Chuanyan, et al. Effects of rainfall and temperature on river runoff during growing season in Tianlaonchi catchment in the upper reaches of Heihe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 263-269.
- [17] SUN J, LI Y P, HUANG G H, et al. Analysis of interactive effects of DEM resolution and basin subdivision level on runoff simulation in Kaidu River Basin, China[J]. Hydrology Research, 2017, 48(4): 1 100-1 117.
- [18] 张玉娜, 徐长春, 李卫红, 等. 开都河流域气候变化特征及其对径流的影响[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(1): 81-89.
ZHANG Yuna, XU Changchun, LI Weihong, et al. Climate change characteristics and impacts on surface runoff in the Kaidu River Basin[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2014, 12(1): 81-89.
- [19] XU Min, KANG Shichang, WANG Xiaoming, et al. Climate and hydrological changes in the Ob River Basin during 1936—2017[J]. Hydrological Processes, 2020, 34(8): 1 821-1 836.
- [20] ZHANG Yongyong, ZHANG Shifeng, ZHAI Xiaoyan, et al. Runoff variation and its response to climate change in the Three Rivers Source Region[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(5): 781-794.
- [21] 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.
- [22] 李乐, 吴喜军, 周孝德, 等. 基于 Morlet 小波理论的煤炭开采区河道径流演变特征分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(4): 37-40.
LI Le, WU Xijun, ZHOU Xiaode, et al. Evolution characteristics of river runoff in coal mining area based on morlet wavelet theory[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(4): 37-40.
- [23] 赵超, 刘光生, 杨金艳. 苏州市水资源变化与主要驱动因素分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(4): 289-293, 298.
ZHAO Chao, LIU Guangsheng, YANG Jinyan. Trend and main driving factors of water resources change in Suzhou City[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(4): 289-293, 298.
- [24] 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. Combined impact of climate change and human activities on runoff in the Kriya River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(8): 80-86.
- [25] 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): 1 460-1 471.
LIANG Pengfei, XIN Huijuan, LI Zongxing, et al. Runoff variation characteristics and influencing factors in the Heihe River Basin in the Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1 460-1 471.
- [26] 刘志斌, 黄粤, 刘铁, 等. 开都河源区径流变化的气候响应[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 418-427.
LIU Zhibin, HUANG Yue, LIU Tie, et al. Climate response of runoff variation in the source area of the Kaidu River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 418-427.
- [27] LI Baofu, CHEN Yaning, SHI Xun. Why does the temperature rise faster in the arid region of northwest China? [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D16): D16 115.
- [28] 张艳霞, 于瑞宏, 薛浩, 等. 锡林河流域径流量变化对气候变化与人类活动的响应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 67-76.
ZHANG Yanxia, YU Ruihong, XUE Hao, et al. Response of runoff volume change to climate change and human activities in the Xilin River Basin[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 67-76.
- [29] 陈伏龙, 王怡璇, 吴泽斌, 等. 气候变化和人类活动对干旱区内陆河径流量的影响: 以新疆玛纳斯河流域肯斯瓦特水文站为例[J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 692-697.
CHEN Fulong, WANG Yixuan, WU Zebin, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff of continental river in arid areas: Taking kensiwater hydrological station in Xinjiang manas river basin as an example[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(4): 692-697.
- [30] 王国庆, 张建云, 鲍振鑫, 等. 人类活动和气候变化对崑崙河流域河川径流的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(6): 113-118.
WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, BAO Zhenxin, et al. Change in runoff within the Lan River Basin due to climate change and human activities[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(6): 113-118.

Evolution of Runoff and Its Influencing Factors in the Source Area of the Kaidu River

ZHENG Lingqiao^{1,2}, XING Kun^{1,2*}, LIU Sihai^{1,2}, GUO Chunhong³

(1. School of Geography and Remote Sensing Science, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

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

3. Xinjiang Water Resources and Hydropower Planning and Design Administration Bureau, Urumqi 830000, China)

Abstract: 【Objective】 The Kaidu River is a tributary of the Tarim River, located in northwestern China. This paper analyzes the evolution of runoff in its source area as well as its determinants. **【Method】** The study is based on

meteorological and hydrological data measured over the past 60 years from the area. The evolution of the runoff is analyzed using the Mann - Kendall examination, R/S method, order clustering method, and the method of wavelet analysis. The impact of climate change and anthropogenic activities on the runoff is calculated using the double accumulation curve method, the cumulative slope change rate method, and the climate elastic coefficient method.

【Results】 ①From 1960 to 2019, the annual runoff in the area had been increasing at an average rate of $1.714 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$, with the Hurst index being 0.83. The runoff is found to have three identified periods of 36 years, 21 years, and 9 years; additionally, an abrupt change in the runoff is also identified in 1995. ②Over the past 60 years, temperature and precipitation in the area had increased at a rate of $0.239 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ and $7.670 \text{ mm}/10 \text{ a}$, respectively, with their associated Hurst index being 0.85 and 0.83, and the correlation coefficients being 0.560 and 0.598, respectively. ③The contribution of climate to the change in the runoff calculated by the double cumulative curve method, the cumulative slope change rate method and the climate elasticity coefficient method is 89.9%, 73.1% and 43%, respectively, while the associated contribution of anthropogenic activities calculated by the three methods to the change is 10.1%, 26.9% and 57%, respectively; their associated errors for the base runoff are 2.1%, 0.2% and 4.1%, respectively. **【Conclusion】** The annual runoff in the source area of the Kaidu River over the past 60 years has increased significantly and the contribution to this change is mainly from climate change.

Key words: Kaidu River; runoff; law of evolution; influencing factors

责任编辑：韩 洋

(上接第 89 页)

Evaluating Irrigation Water Efficiency Using Entropy Weight-TOPSIS Method: A Case Study

XUE Bao^{1,2}, TANG Hua^{1,2*}, CHENG Quan³, YU Jing⁴, LIU Hongguang^{1,2}, ZHANG Zhiyuan³

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi 832000, China;

3. Second Division Hydrology & Water Resources Management Center, Xinjiang Production & Construction Corps, Tiemenguan 841000, China; 4. Qitai County Water Conservancy Management Station, Changji 831800, China)

Abstract: 【Objective】 Improving irrigation water use efficiency is critical to developing water-saving agriculture. The aim of this paper is to present and validate a model to comprehensively evaluate irrigation water use efficiency.

【Method】 The model is based on the entropy-weighted technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS), using the evaluation indexes constructed from irrigation water efficiency. We then applied it to evaluate water use efficiency from 2017 to 2020 in six irrigation areas in the Second Division of Xinjiang Production and Construction Corps. **【Result】** The results calculated from the model are consistent with the ground-truth data.

The rank of the results calculated from the model is closely correlated with the rank of the effective utilization coefficient of the irrigation water and the rank of the results calculated from the AHP-fuzzy comprehensive evaluation ($P < 0.01$). The coefficient of variation of the entropy-weighted TOPSIS method is larger than that of the AHP-fuzzy evaluation, and the former is hence more reliable for calculating irrigation water efficiency. The factors influencing irrigation water efficiency in each area can be determined based on the difference between the evaluation indexing grade and the comprehensive evaluation grade of the irrigation water efficiency. **【Conclusion】** The entropy-weighted TOPSIS method is reliable for evaluating irrigation water efficiency. It has potential for helping develop water-saving irrigation systems for the studied region and regions with similar conditions.

Key words: irrigation; water efficiency; index system; entropy weight method; technique for order preference by similarity to an ideal solution

责任编辑：韩 洋