文章编号: 1672 - 3317 (2021) 04 - 0088 - 09

# 新疆和田河径流演变特征及其影响因素分析

黄星<sup>1</sup>,陈伏龙<sup>1\*</sup>,赵琪<sup>2</sup>,何朝飞<sup>1</sup>,龙爱华<sup>1,3</sup>

(1.石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000;

2.新疆维吾尔自治区水文局, 乌鲁木齐 830000;

3.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘 要:【目的】研究和田河径流演变特征及其影响因素。【方法】采用 M-K 检验、Pettitt 突变检验、Morlet 小波分 析等方法,分析径流及影响因素的变化趋势、突变特征及周期规律。在确定影响因素与径流的相关性基础上,建立 了影响因素与径流的多元线性方程及神经网络模型,定量分析了气候因素与人类活动对径流变化的贡献水平。【结果】 玉龙喀什河径流表现出增加趋势,喀拉喀什河径流呈减少趋势,突变年份为2009、2004年,在40~55a尺度下的玉 龙喀什河与 33~55 a 尺度下的喀拉喀什河都经历 2 个枯-丰变换周期。玉龙喀什河、喀拉喀什河降水量都呈显著增加 趋势,突变年份均为 2001 年,两河降水同时展现出 3 次偏多-偏少交替。年均气温呈显著性增加,在 1984 年发生突 变,气温经过2个冷-暖变换周期。玉龙喀什河与喀拉喀什河径流变化的主要影响因素为气候变化,人类活动影响较 小, 气候变化对径流的贡献率分别为 84.06%和 72.51%, 而人类活动的贡献率为 15.94%和 27.49%。【结论】玉龙喀 什河和喀拉喀什河在40~55、33~55 a 尺度下由丰水期转为枯水期,五龙喀什河和喀拉喀什河流域降水未来为少水期, 和田河流域气温在40~50a尺度下处于偏暖阶段。喀拉喀什河突变点与乌鲁瓦提水库的修建有关,降水和气温发生突变 时间于西北地区气候转变相一致。气温因素是径流补给的主要影响成分,气候变化为径流变化的主要因素。 关键词:径流;影响因素;贡献率;周期性;和田河 OSID: 中图分类号:P333 文献标志码:A doi:10.13522/j.cnki.ggps.2020508

黄星, 陈伏龙, 赵琪, 等. 新疆和田河径流演变特征及其影响因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 88-96. HUANG Xing, CHEN Fulong, ZHAO Qi, et al. Change in Runoff in Hotan River in Xinjiang and Its Determinants[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 88-96.

## 0 引 言

【研究意义】随着全球气候变化与人类活动影响 日益显著,造成了水循环过程的加速,河川径流作为 水循环的基本环节,有着促进水资源更新、维持全球 水动态平衡的重要作用<sup>[1-2]</sup>。近年来,河川径流演变 特征与其在影响因素作用下的响应成为研究的热点 问题。地处干旱区的和田河作为典型的以冰川融雪为 主的河流,其径流演变对该地区农业灌溉、畜牧养殖 及水生态保护等方面都至关重要。同时,径流是受气 候变化影响最大的环节,这使得干旱、半干旱地区以 冰川融雪为补给的河流更为敏感<sup>[3]</sup>。为此研究和田地 区夏季径流与影响因素的变化规律成为水资源与经 济协调发展的重要环节<sup>[4]</sup>。【研究进展】在气候变化下 和田河径流演变的分析中,学者们通过不同尺度、方 法开展了相关研究。分别从降水或蒸发对径流演变的 影响<sup>[5-7]</sup>,气候因素变化的趋势及周期规律<sup>[8-10]</sup>,不同 尺度间接分析和田河流域水循环过程[11-12]等方面进 行了研究。由研究结果可知,和田河径流及气候因素 存在多维度的变化。在年尺度研究中,径流与气候因 素同时表现出上升趋势,而年径流序列发生突变时间 滞后于气候因素突变时间。年内分析表明,径流量较 多时期集中在夏季,且气温和降水是补给径流的主要 因素。以上成果具有一定意义,但对数据利用不足, 使得和田河流域时序变化规律分析不够充分。【切入 点】国内外学者早期的研究主要针对和田河径流的趋 势性和周期性, 且多为定性分析, 缺少气候因素与人 类活动对径流影响的定量分析,在全球气候变暖和人 类活动日益加剧的背景下,研究气候变化和人类活动 对和田河径流演变的影响就显得十分必要。【拟解决 的关键问题】为此,基于 1960—2016 年的水文气象 数据,采用 M-K 趋势检验, Pettitt 检验及 Morlet 小 波分析等方法对径流演变及气候要素的趋势性、突变 点和周期性进行诊断,分析径流与影响要素的相关性, 在此基础上建立多元线性方程进行归因分析,并构建 神经网络模型,定量分析气候变化与人类活动对径流 变化的贡献程度,为水资源管理规划与可持续利用提 供科学的参考依据。

收稿日期: 2020-09-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51769029);国家重点研发计划项目(2017YFC0404301);石河子大学高层次人才科研启动资金项目(RCZK2018C23);自治区研究生科研创新项目(XJ2019G113)

作者简介: 黄星(1995-),男,江苏盐城人。硕士研究生,主要从事水文 学及水资源问题的研究。E-mail:22091364@qq.com

通信作者: 陈伏龙(1978-),男,湖南东安人。教授,博士,主要从事水 文学及水资源问题的研究。E-mail:cf1103@shzu.edu.cn

## 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

和田流域位于新疆西南部,南抵昆仑山脉,北临 塔克拉玛干沙漠。地理位置介于东经77°25′—81°43′, 北纬 34°52′—40°28′,呈南高北低地势。和田河流域 面积约 48 870 km<sup>2</sup>,降水量小,蒸发量大,多年平均 气温 12.7 ℃。其流域涵盖和田县、和田市、墨玉县、 洛浦县以及皮山县、策勒县的部分区域,阿克苏地区 的阿瓦提县和阿拉尔市部分区域<sup>[13]</sup>。

和田河由东支流玉龙喀什河(简称"玉河"), 西支流喀拉喀什河(简称"喀河")构成<sup>[14]</sup>,是1条 高山融雪补给为主、降水补给为辅的西北内陆河流, 2支河流径流量在年内分配极不均衡,玉河、喀河夏 季径流量分别占全年径流量的80.7%和72.9%。玉河 发源于昆仑山,全长505 km,平均年径流量约 22.52×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,出山口设有同古孜洛克水文站;喀河 发源于喀喇昆仑山,全长808 km,平均年径流量约 22.21×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,出山口设有乌鲁瓦提水文站。2支河流 于阔什拉什汇聚形成和田河干流,干流总长319 km, 向北通过塔里木盆地,最终抵达塔里木河<sup>[15]</sup>,流域水 系如图1所示。



图1和田河流域水系图

#### Fig.1 Hotan river basin

选取出山口处同古孜洛克水文站、乌鲁瓦提水文 站 1960—2016 年实测径流和气象月值资料进行分析。 1.2 研究方法

# 1.2.1 趋势检验法

线性分析法是以一元函数形式作为表达,可直观 反映要素变化的趋势,且表达结果清晰明了。滑动平 均法能够降低数据序列的自由度,同时增强序列之间 的相关性,在滑动数的选择上具有多样性,当滑动数 越大,序列保留的信号越少,反之亦然。因此选择合 适的滑动数能明确趋势变化。

Mann-Kendall 非参数检验法(简称 M-K 检验), 常用于水文与气候方面的趋势性检验,优点为样本序 列无需服从特定分布,受少量的数据缺失及异常数据 影响小<sup>[16]</sup>。该方法先假设样本序列在显著水平 α 下 (本文取 α=0.05)无趋势变化,当 Z 值在 Z<sub>α</sub>为 1.96 和-1.96 之间满足原假设,说明无显著趋势变化;否 则拒绝原假设,表明序列发生显著变化。当 Z>0 说明 序列呈上升趋势, Z<0 表明序列为下降趋势, |Z|值 越大对应趋势越强。

1.2.2 突变检验法

1) Pettitt 检验

Pettitt 检验为非参数检验法,该方法结构简洁, 受异常值影响小<sup>[17]</sup>。利用该方法对研究区域的径流量、 平均气温、年降水量进行突变点检验分析。定义统计 量 *U<sub>t</sub>N*计算式为:

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{j=1}^{N} \operatorname{sgn}(x_i - x_j), \qquad (1)$$

式中: x<sub>i</sub>、x<sub>j</sub>为相同时间序列的2个样本值; t为样本的排列序号; N为样本总数,其统计量U的本质为前一个样本值大于后一个样本值的个数。

当统计量 $U_{t,N}$ 最大时,对应的时间点 $t_0$ 为突变点。 如式(2)所示:

$$k_{t0} = \max \left| U_{t,N} \right| \,. \tag{2}$$

构建统计量 P, 判断突变点的显著性:

$$P = 2\exp\left[-6U_{t,N}^2 / (N^2 + N^3)\right]$$
 (3)

当 *P*小于显著水平 α=0.05,则认为检测出来的 突变点在统计意义上发生显著变化。

2) 有序聚类法

有序聚类法为寻找最优分割点的统计方法,结合 水文思想来确定水文要素的突变点。其思想是对序列 拆分,再计算分割点前后的各子序列的离差平方和求 得最小值,当总离差平方和取最小时对应的点即为最 优分割点<sup>[18]</sup>。计算式为:

$$V_{\tau} = \sum_{t=1}^{\tau} \left( X_{t} - \overline{X}_{\tau} \right)^{2}, \qquad (4)$$

$$V_{n-\tau} = \sum_{t=\tau+1}^{n} \left( X_{t} - \overline{X}_{n-\tau} \right)^{2},$$
 (5)

$$S_{n} = V_{\tau} + V_{n-\tau}, \qquad (6)$$

式中:  $\tau$  为突变点;  $x_{\tau}$  为突变前序列均值;  $x_{n-\tau}$  突变 后序列均值;  $S_n$ 为总离差平方和。

3) 里海哈林法

里海哈林法(Lee-Heghinan)是设定水文序列 $X_t$ 服从正态分布, $\tau$ 为可能分割点,应当先检验分布服从均匀分布<sup>[19]</sup>,然后检验条件概率密度函数为:

$$f(\tau / x_1, x_2, ..., x_n) = k \left[ \frac{n}{\tau(n-\tau)} \right]^{\frac{1}{2}} \left[ R(\tau) \right]^{\frac{-(n-2)}{2}}, \quad (7)$$

式中:取 k=1 为比例系数; n 为序列长度。

由后验条件概率密度函数计算得到的最大值对 应的 τ,则为最可能分割点。

1.2.3 周期分析法

采用 Morlet 小波分析对 1960—2016 年径流量、 年均气温和年降水序列进行周期性检验。其中信号震 荡的强弱由颜色深浅表示。 1.2.4 径流变化定量分析法

GRNN 具备较好的映射能力,对样本要求低,一般不必了解研究对象的参数、结构等知识,只需提供被建模对象的输入、输出数据,通过网络本身即可完

成输入、输出相符合的要求<sup>[20]</sup>。 在 GRNN 中,以气温、降水整体序列代入神经 网络模型输入层中,经过模式层与求和层的训练并保 存训练矢量于隐含层的神经元中,得到输出层的径流 量模拟值,当输入新的矢量进入输入层中,可合理利 用储藏于隐含层的神经元,求出新的模拟值。

结合 GRNN 定量估计和田河流域气候变化与人 类活动下径流的响应程度。以降水和气温的基准期序 列作为网络输入项,基准期径流为输出项,对模型进 行训练校核,获取基准期下的径流模拟值。在模型不 变状态下,以变化时期的气候要素和径流作为输入、 输出项,模拟出突变后的径流值。气候因素与人类作 用下径流响应的估算式<sup>[21]</sup>为:

$$\Delta Q_{\rm th} = Q_{\rm po} - Q_{\rm pr} = \Delta Q_{\rm t} + \Delta Q_{\rm h} , \qquad (8)$$

$$\Delta Q_{\rm t} = Q_{\rm to} - Q_{\rm tr} , \qquad (9)$$

$$\eta_{\rm t} = \Delta Q_{\rm t} \,/\, \Delta Q_{\rm th} \,\times 100\% \,, \qquad (10)$$

$$\eta_{\rm h} = \Delta Q_{\rm h} / \Delta Q_{\rm th} \times 100\% = 1 - \eta_{\rm t} , \qquad (11)$$

式中:  $\Delta Q_{\rm th}$  为实测径流突变前后均值差 (10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>);  $Q_{\rm po}$ 



(a) 玉河径流量变化趋势

表 1 径流量 M-K 统计检验值

Table 1	Runoff M-K	inspection	value
Table 1	Kunon M-K	inspection	value

	1			
	年径流量/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>			
位短力法	玉河	喀河	-	
Ζ	0.612 7	-0.013 8		
$Z_{lpha}$	1.96	1.96		
趋势性	增加	减少		
显著性	不显著	不显著		

喀河线性斜率(图 2 (b))达到-0.001,从总体 观察,径流量为轻微下降趋势。1960—1980 年振荡 波动较大,滑动过程线由下降转为上升。径流时序从 20世纪 90 年代初至 90 年代末,趋势下降,该阶段 平均径流量为 15.99×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。1990—2016 年喀河线性 斜率达到 0.13,呈波动性增加趋势,最大径流量差值 代表径流变化期实际平均径流量( $10^8m^3$ );  $Q_{pr}$ 为径流 基准期实际平均径流量( $10^8m^3$ );  $\Delta Q_t$ 为气候变化作用 下径流变化量( $10^8m^3$ );  $\Delta Q_h$ 为人类活动引起的径流 变化量( $10^8m^3$ );  $Q_{tr}$ 为基准期径流模拟平均值( $10^8m^3$ );  $Q_{to}$ 为变化期径流模拟平均值( $10^8m^3$ );  $\eta_t 和 \eta_h$ 分别代 表气候变化与人类活动对径流变化的贡献率。

## 2 结果与分析

## 2.1 径流特征分析

2.1.1 径流趋势分析

和田河两支河流径流量变化特征,如图 2 所示。 M-K 统计检验结果见表 1。

由图 2 可知, 玉河的线性斜率为 0.280, 径流呈 现逐年递增的趋势,由于其斜率低则增长速度缓慢。 玉河在 1960—1970 年振幅变化较大。从滑动过程线 可以看出玉河 1971—1990 年左右(图 2 (a)),径流 序列呈减少趋势且在 1991 年趋势达到最低点,该阶 段均值为 17.61×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>。1991—2016 年玉河径流斜率 值为 0.264,波动幅值最大相差 17.73×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,该阶 段径流量逐步增多表现为增加趋势。在 1964—1968 年径流量出现短期显著变化,但未对整体趋势造成较 大影响,(0<Z=0.6127<Z<sub>a</sub>),且年径流量序列为增长 趋势,这与线性趋势结果相一致。





12.90×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。在显著水平 α=0.05 下,喀河径流量统 计值 Z=-0.013 8,但-1.96<Z<0 表示趋势不显著,该结 果与线性分析一致。

2.1.2 径流突变分析

在 Pettitt 检验下, 玉河径流量在 2009 年发生变异, 其变异年对应的  $k_{t0}$  值为-211,  $P_{max}=0.7654$ ; 有序聚类 分析得出, 玉河年径流量发生的变异年为 2009 年, 相 应离差平方和  $S_n=1$  242.13; 里海哈林法获得玉河年径 流量最大统计值为 9.77, 分割点年份确定在 2009 年。

喀河径流量在 Pettitt 检验中 2004 年为发生突变, 年份对应的统计值  $k_{t0}$ 为 90,  $P_{max}=1$ 。由于有序聚类与 里海哈林法的使用受条件假定和运用环境限制,致使 径流突变检验结果无显著突变,而 Pettitt 非参数检验不 受假设与使用环境限定<sup>[22]</sup>,因此以 Pettitt 检验为主。 玉河径流量的3种检验结果均一致,表明2009年 发生显著突变,喀河在Pettitt检验后得到2004年为突 变年。玉河在1960—2008年平均径流量为17.72× 10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,2010—2016年平均径流量为21.16×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,突 变前后变化率为19.45%,喀河突变前后变化率为 7.58%。

2.1.3 径流周期分析

玉河、喀河流周期变化特征,如图 3 所示。由图 3 (a)可知,1960—2016 年存在 5~10、40~55 a 振荡 周期。在 50 a 尺度上经过 2 个枯水期 2 个丰水期,其中 1960—1974 年、1987—2004 年为枯水期。在 1960—1980 年存在 11~17 a 周期变化。1985—2016



年存在 5~10 a 小尺度周期变化,以8 a 为中心。由图 3 (b)可知,年径流量共有 3 个峰值对应时间尺度分 别是 5、8、13 a。其中 8 a 峰值最大,可认为径流以 8 a 为周期的变化最显著,认作第 1 主周期。5 a 作为 第 2 大峰值可作为第 2 主周期。13 a 尺度对应第 3 峰 值与第 1、第 2 周期峰值相比较小,可作为次要周期。

喀河(图3(c))存在 5~20、33~55 a 2 种周期, 在 33~55 a 尺度下,枯丰交替出现 2 次。在 5~20 a 尺 度下径流处于丰水期,主要以 8a 周期变化中心。在 小波方差分析下(图3(d))喀河径流呈现 4 种尺度 的峰值分别为 5、8、14、43 a, 8 a 对应值最大,可 作为第1主周期。









#### 2.2 径流影响因素分析

玉河和喀河径流大致由高山冰川融雪、降水及地 下水3方面混合补给形成,且中下游区域基本不产流, 冰川融水与降水的混合补给为玉河、喀河的形成提供 了85%以上的来水<sup>[21]</sup>。在补给过程中,由于冰川融雪 和降水在不同时期的互补作用,导致径流变差系数较 小,因此断定玉河、喀河为冰川融雪和降水混合补给 型河流,而气温是加速冰川融雪对径流补给的直接原 因,在非汛期内降水量多于汛期,可直接补给径流<sup>[23]</sup>。 因此只考虑降水、气温2项气候因素,分析其对和田 河径流的影响。和田河径流位于昆仑山出山口处形成, 而引水灌溉、工业取水等高频率、高耗水性质的活动 均发生在和田河中下游地区,这使得出山口处径流受 人类活动干扰较小,但乌鲁瓦提水库和玉龙喀什水利 枢纽的修建位于昆仑山中部,导致径流原始产流发生 改变,即上游受到人类活动影响。

## 2.2.1 降水特征分析

## 1) 降水趋势分析

玉河流域夏季累积降水量由同站测得,由图4(a)

可知,近57 a 内线性相关斜率为0.481,呈增长趋势, 多年降水均值为33.80 mm。整体存在较大幅度变化, 其中1992、2010、2012 年产生较大降水。以5 a 滑动 平均角度观察到降水经历了 5 个阶段,1960—1968 年降水量增加,1969—1981 降水量趋势缓慢降低, 在 1982—1990 年降水量呈现缓慢上升状态, 1991—1998 年为降水量减少时段,1999—2016 年为降 水趋势上升时段,此期间以线性斜率为 0.284 的速度 增长。玉河流域降水量 M-K 检验统计值 Z=2.368 0> Z<sub>a</sub>,表明夏季降水量逐渐增长,这与线性相关分析趋 势结果相同,且增加趋势显著。

(d) 喀河径流小波方差图

喀河流域夏季累积降水量(图4(b))由乌站测得,其线性斜率为0.754,表现出上升趋势,多年平均降水量为46.45 mm。1960—1967年,降水量逐年上升,在1968—1978年内出现波动向下的降水趋势。1979—2000年降水量趋势较平稳,此阶段内降水量均值为40.8 mm。2001—2010年降水量趋势呈急速增长状态,对应的线性斜率达到5.44。从滑动平均角度发现2011—2016年降水量转变为下降趋势,此期间

降水量均值为 63.54 mm。2001—2016 年内喀河流域 降水量以 2010 年为分界点经历了 2 个不同的降水时 段,其中 2010 年降水量为整体降水量的最大值。喀



(a) 玉河流域降水量变化趋势

河流域降水统计值 Z=2.905 0>Z<sub>α</sub> (表 2),降水量有 增加趋势,结果显著。



#### 图 4 隆水量变化特征

3) 降水周期分析



表 2 降水因素 M-K 检验值

Table 2	M-K test value of precipitation factor				
检验专注	降水量	±/mm			
11111111111111111111111111111111111111	玉河流域	喀河流域			
Z	2.368 0	2.905 0			
$Z_{\alpha}$	1.96	1.96			
趋势性	增加	增加			
显著性	显著	显著			

2) 降水突变分析

玉河流域降水量在 3 种检验下均为 2001 年为突 变年,突变前降水量均值为 29.6 mm,变异后降水量 均值为 45.7 mm,突变前后相差 16.1 mm。喀河流域 降水量在不同检验下变异点都是 2001 年,变异前降 水量均值 38.2 mm,变异后降水量均值 69.53 mm,变



(a) 玉河流域降水量小波变换实部图



(c) 喀河流域降水量小波变换实部图

图 5 为玉河、喀河流域降水周期变化特征。从玉 河流域降水量图 5 (a) 发现,24~36 a 尺度贯穿整个 周期变化。在 1960—1999 年以 5~10 a 尺度为明显周 期变化。但在 1990 年左右以 13~20 a 尺度为显著周 期变化。24~36 a 尺度下降水共经历 3 个多降水期与 3 个少降水期。降水量小波方差图(图 5 (b))出现 4 个峰值分别对应 3、7、11、30 a 的降水周期,其中 30 a 对应的方差值最大,说明降水量存在 30 a 尺度的 周期变化,并作为第 1 主周期。7 a 尺度的方差值对 应第 2 大峰值,即 7 a 可作为第 2 主周期,而 3 a 和 11 a,尺度的峰值相比较小,作为次要周期。



(b) 玉河流域降水量小波方差图



(d) 喀河流域降水量小波方差图

#### 图 5 降水周期变化特征

Fig.5 Characteristics of precipitation cycle

分析喀河流域降水量图 5(c)分别存在 4~20 a 和 26~36 a 2 个较为明显的尺度周期。小波方差图(图 5(d))出现 4 个峰值分别对应 4、7、12、30 a,4 个尺度的周期变化,以12 a 的峰值最大,说明喀河流域降水量周期变化以12 a 为第1 主周期,4、7、30 a 则作为次要周期。

2.2.2 气温特征分析

1) 气温趋势分析

图 6 为和田河流域气温趋势变化,和田河流域近 56 年平均气温线性斜率为 0.02,整体为上升趋势, 多年平均气温 24.50 ℃,气温最大相差 5.03 ℃。在 1960—1970 年时段线性相关斜率为-0.202,气温趋势 逐渐降低,该阶段无剧烈波动,此时段气温均值达到 24.11 ℃,在 1969 年出现气温最低值 22.96 ℃。 1970—1985 年气温产生明显增幅,1972 年和 1974 年 对应该阶段最低气温 22.56 ℃。1986—2016 年以线 性斜率 0.001 的缓慢增长,趋势性呈上升并伴随幅度 波动变化,但在 2000 年左右,波动性逐渐趋于稳定。 和田河流域平均气温统计值 Z=2.368 0>Z<sub>α</sub>,说明和 田河流域年平均气温逐渐升高,增加趋势明显。

2) 气温突变分析

和田河流域气温发生变异年为 1984 年, 对应  $k_{to}$  值为-343,  $P_{max}=1$ ; 在有序聚类法分析下, 认为年均



(a) 和田河流域气温小波变换实部图





图 6 和田河流域气温变化特征

Fig.6 Characteristics of temperature change in Hotan river basin

表 3 气温因素 M-K 检验值

Table	3 N	1-K test va	lue of temp	perature f	actor

检验方法	气温
Ζ	2.368 0
$Z_{\alpha}$	1.96
趋势性	增加
显著性	显著



图 7 和田河流域气温周期变化特征

Fig.7 Characteristics of periodic temperature changes in Hotan river basin

#### 3) 气温周期分析

图 7 (a)显示了和田河流域气温 1960—2016 年 不同时间尺度的周期性特征,整体上发生了 2 个冷-暖周期变换,1971、2006 年为偏冷期中心年份,1960 年,1990 年为偏暖期中心年份。在气温演变中存在 7~10、40~50 a 2 个振荡周期。图 7 (b)显示了 8 a 和 26 a 共 2 个尺度的峰值,以 26 a 的峰值最大,说 明 26 a 周期振荡最强,是气温变化的第 1 主周期。8 a 尺度峰值相比较小,作为次要周期。

#### 2.3 径流影响程度分析

#### 2.3.1 径流与气候因子的相关性分析

引发径流变化的因素众多,大致可分为人类活动 和气候影响因素,和田河产流区属于高山区,受人为 活动干扰较小,因此径流变化主要影响因素为气候变 化<sup>[23]</sup>。夏季为和田河径流量较多的时期,占全年径流 量的 72%以上,分析该时段影响因素与径流变化的关 系,更易凸显不同因素的影响程度。采用 Kendall、 Spearman 和 Pearson 法做相关性分析,识别该时段内 降水和气温对径流影响的主次。结果见表 4。

表 4 影响因素与径流相关性检验结果

Table 4	Correlation	test results	of inf	luencing	factors	and runoff
---------	-------------	--------------	--------	----------	---------	------------

检心亡计	玉	河	喀河		
亚亚力石	径流-气温	径流-降水	径流-气温	径流-降水	
Kendall 检验	0.277**	-0.058	0.362**	-0.052	
Spearman检验	0.391**	-0.091	0.259**	-0.164*	
Pearson 检验	0.383**	-0.003	0.366**	-0.244*	

注 \*\*表示在 0.01 水平上显著相关; \*表示在 0.05 水平下显著相关。

在 3 种相关性检验下, 径流量与平均气温呈正相 关且满足显著检验, 表明气温对径流有显著影响, 说 明气温在夏季时段内是影响径流的因素之一。夏季内 的降水与径流表现出负相关, 表明降水对径流的补给 在减少,但显著水平检验未通过 0.01,说明降水对径 流的影响不显著。

为分析气温和降水对径流的影响水平,建立线性 相关方程。将径流量作为因变量,以相关性较强的气 温作为自变量之一,同时考虑到冰川融雪的滞后性, 补给效果未能即时出现,而降水补给效果明显且速度 快,将降水作为自变量,建立回归方程。列出径流、 气温和降水之间的变化关系式:

$$Y_1 = 0.664 X_T + 0.002 X_S - 0.549, \tag{12}$$

$$Y_2 = 1.007X_{\rm T} + 0.16X_{\rm S} - 8.712, \tag{13}$$

式中: *Y*<sub>1</sub>、*Y*<sub>2</sub>分别为喀河、玉河径流量; *X*<sub>T</sub>为气温; *X*<sub>S</sub>为降水。

在不考虑各因素的单位干扰下,建立回归方程用 于定性分析。

表 5 径流与影响因素的多元回归方程拟合结果

 Table 5
 Multivariate regression equation fitting

results of runoff and influencing factor						
径流	影响因素	回归系数	常量	R	显著性	
喀河	气温	0.664	0.540	0.251	0.011	
	降水	0.002	-0.349	0.331	0.011	
玉河	气温	1.007	9 712	712 0.212	0.022	
	降水	0.160	-0./12	0.312	0.025	

由表 5 可知,喀河与影响因素的回归方程显著性为0.011,玉河与影响因素的回归方程显著性为0.023,显著性均在置信水平 0.05 下,式(13)均通过检验,说明方程构建合理,且径流与影响因素之间存在线性相关关系,气温的升高将致使径流量的持续增长。 2.3.2 影响因素对径流的贡献程度分析

将整体的降水、气温序列作为输入层,径流整体 序列为输出层进行训练,训练矢量保存在神经元中, 保持模型固定。依据玉河、喀河径流量突变分析结果, 将径流序列分为2个时段, 玉河以1960—2009年作 为基准期,2010—2016 年为变化期,同时计算出两 时期的实测径流量,分别为  $Q_{\rm pr}=17.717 \times 10^8 {\rm m}^3$ ,  $Q_{\rm po}=21.164 \times 10^8 {\rm m}^3$ ,以基准期与变化期气象数据代入 模型分别模拟出2个时期的径流期模拟值, 求平均值 得 Q<sub>tt</sub>=18.568×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>, Q<sub>to</sub>=21.466×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>。同理, 喀 河以 2004 年为分割点,将径流序列分为基准期 1960-2004 年和变化期 2005-2016 年, 求得  $Q_{\rm pr}=15.650\times10^8{\rm m}^3$ ,  $Q_{\rm po}=16.314\times10^8{\rm m}^3$ ,  $Q_{\rm tr}=15.344\times$  $10^8 \text{m}^3$ ,  $Q_{\text{to}}=15.826 \times 10^8 \text{m}^3$ , 通过均方误差检验, 玉 河径流模拟值与实测值相对误差为 13.74%, 喀河相 对误差为 8.32%, 两河对应的相对误差均小于 20%, 模拟结果可靠。将实测值、模拟值代入式(8)—式 (11),获得定量分析结果。气候变化对玉河的径流 变化贡献率  $\eta_{t}=84.06\%$ ,人类活动贡献率  $\eta_{h}=15.94\%$ ; 气候变化对喀河径流变化贡献率 n=72.51%, 人类活 动导致径流变化的贡献率 n=27.49%。结果见表 6。

表 6 气候变化与人类活动对径流变化的贡献率 Table 6 The contribution rate of climate change and

human activities to runoff change

numun der virtes to funori enange							
河流	时段	立测信	樟拟佰	气候变化	人类活动		
名称	-112	入仍臣	Кімш	贡献率/%	贡献率/%		
玉河	1960—2008年	17.717	18.568	-	-		
	2009—2016年	21.164	21.466	84.06	15.94		
喀河	1960—2003年	15.650	15.344	-	-		
	2004—2016年	16.314	15.826	72.51	27.49		

对比分析人类活动的贡献程度可知,喀河径流变 化受此因素影响要高于玉河,这与喀河上游水利枢纽 工程的修建密不可分,说明喀河受到了人类活动干扰 而导致其径流发生了变化。定量分析结果表明,气候 变化和人类活动的共同作用导致了和田河径流的变 化,但是气候变化是促使径流变化的主要影响因素, 而人类活动则为次要影响因素。

## 3 讨论

1) M-K 非参数法与线性分析等方法检验出玉河 径流增多和喀河径流减少的趋势;在3种诊断变异点 基础上,结合人类活动影响与气候变化分析成因,发 现喀河径流 2004 年产生的变异点可能原因是水利枢 纽的修建<sup>[15]</sup>,对径流时间序列造成了影响,同时与西 北地区气候的变化相关。

和田河流域气温表现为上升趋势,且趋势性显著, 发生突变年为 1984 年,在 40~50 a 尺度下和田河流 域的未来气温将由偏冷期转为偏暖期。降水、气温发 生变异的时间点与西北干旱区气候由"暖干"转向 "暖湿"具有一致性<sup>[3]</sup>。

2)由相关性分析可知,径流与气温为正向相关、 降水为负相关性,前人研究认为[12],气温升高促进冰 雪融化, 增大对径流的补给作用, 而同时期的降水作 用小于蒸发对径流的影响,从而造成气温---径流正向 相关、降水---径流负相关,这与本文研究结果相一致。 产生该结果原因与流域所在位置以及季节有关,和田 河流域位于昆仑山脉、喀喇昆仑山和天山之间,暖湿 气流受山脉阻挡难以进入该流域,削弱了降水对径流 的补给作用。其次,冰川融雪对气温变化更敏感,且 冰川融雪补给径流占25%以上时,气温对径流调节作 用高于降水的调节作用<sup>[21]</sup>,而夏季气温的累积加快了 冬季积雪的融化,促使地表径流形成。同时,夏季气 温上升引起的强烈蒸发作用抵消了降水对径流的补 给作用。因此认为气温对径流的影响大于降水对气温 的影响, 气温影响下的冰川融雪是径流补给的主要因 素,降水为次要因素,分析和田河径流变化时应着重 考虑气温原因。影响径流变化因素众多,重点分析气 温、降水与径流的相关性,未展开影响机制的讨论, 需深入研究影响机理及更多因素对径流的影响。

# 4 结 论

1)玉河径流为增加趋势但不显著,变异年为2009 年;喀河径流呈不显著减少趋势,在2004年发生变 异,其变异年份与上游水利枢纽工程的修建有关。和 田河流域气温为显著增加趋势,突变年份为1984年; 玉河、喀河流域降水均表现出显著增加趋势,变异年 均为2001年。

玉河和喀河径流分别在 40~55、33~55 a 尺度下 经历了 2 次丰枯变化,且未来近年内逐渐变为枯水期; 和田河流域气温在 40~50 a 尺度下遭遇 2 个冷-暖周期 变化,未来处于偏暖阶段;玉河、喀河流域降水分别 以 24~36、26~36 a 尺度贯穿整个周期,在对应尺度 下均经历了 3 个多水期和 3 个少水期,降水未来进入 少水期。

3)气温对径流的影响大于降水对径流的影响, 气温是径流补给的主要影响因素,气温影响导致的冰 雪融水是径流补给的重要来源,径流与各影响因素之间存在着线性相关。气候变化为导致径流变化的主要 原因,其次为人类活动。

#### 参考文献:

- 章杰,鱼京善,来文立.全球变暖背景下极端降水变化率与气温的 响应关系[J].北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(6): 722-726.
   ZHANG Jie, YU Jingshan, LAI Wenli. Response of global warming to extreme precipitation increase over China[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017, 53(6): 722-726.
- [2] 王军,李和平,鹿海员,等.典型草原地区降水-径流演变趋势分析
   [J].水文,2017,37(4):86-90.
   WANG Jun, LI Heping, LU Haiyuan, et al. Variation of precipitation and runoff in typical grassland area[J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(4):86-90.
- [3] 陈亚宁,李稚,范煜婷,等.西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J].地理学报,2014,69(9):1 295-1 304.
  CHEN Yaning, LI Zhi, FAN Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1 295-1 304.
  [4] 邓铭江.中国西北"水三线"空间格局与水资源配置方略[J].地理
- [4] 小阳仁, 中国四北 小三线 王问府周马尔员称昆直乃昭[J], 地连 学报, 2018, 73(7): 1 189-1 203. DENG Mingjiang. "Three Water Lines" strategy: Its spatial patterns and effects on water resources allocation in northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1 189-1 203.
- [5] 吴益,程维明,任立良,等.新疆和田河流域河川径流时序特征分析
  [J]. 自然资源学报,2006,21(3):375-381.
  WU Yi, CHENG Weiming, REN Liliang, et al. Analysis on the characteristics of annual runoff in Hotan catchment[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(3): 375-381.
- [6] 张晓伟, 沈冰, 黄领梅. 和田河年径流变化规律研究[J]. 自然资源 学报, 2007, 22(6): 974-979.
  ZHANG Xiaowei, SHEN Bing, HUANG Lingmei. Study on the variation law of the annual runoff in Hotan river[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(6): 974-979.
- [7] 吕继强,张晓伟,沈冰,等.和田河年径流序列变化特征及驱动因素 分析[J].水力发电学报,2010,29(5):165-169.
   LYU Jiqiang, ZHANG Xiaowei, SHEN Bing, et al. Variation trend and primary driving factors of the annual runoff in Hetian river[J]. Journal

of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(5): 165-169.

[8] 艾尔肯 买买提依明,阿地里江 奴尔买买提,缴锡云,等.和田河典型站点气象因子变化特征及其对径流的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(S2): 182-185.

AIERKEN Maimaitiyiming, ADILIJIANGNUR Mohammad, JIAO Xiyun, et al. Meteorological factor change characteristics and its effects on runoff at typical sites of Hetian River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(S2): 182-185.

 [9] 高云,郭维华.和田河典型站点径流及气象因子变化规律分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 87-92.
 GAO Yun, GUO Weihua. Analysis of variation of runoff and meteorological factors at typical site of Hetian River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 87-92.

[10] 董弟文,阿布都热合曼 哈力克,王大伟,等.近 60 年和田河源流区 径流特征及对气候变化的响应[J].中国水利水电科学研究院学报, 2018,16(6):536-543.

DONG Diwen, ABDIRAHMAN Halik, WANG Dawei, et al. Characteristics of runoff and response to climate change in the Hotan river source area in recent six decades[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(6): 536-543.

- [11] 刘静,龙爱华,李江,等.近 60 年塔里木河三源流径流演变规律与 趋势分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(12): 10-17.
   LIU Jing, LONG Aihua, LI Jiang, et al. Analysis on runoff evolution laws and trends of three source-streams of Tarim River in recent 60 years[J].
   Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(12): 10-17.
- [12] 唐小雨,高凡,孙晓懿,等. 基于滑动偏相关法的水文气象序列变异 诊断[J]. 人民黄河, 2020, 42(5): 13-18. TANG Xiaoyu, GAO Fan, SUN Xiaoyi, et al. Variation diagnosis of hydrological and meteorological joint sequences in tarim river based on sliding partial correlation coefficient method[J]. Yellow River, 2020, 42(5): 13-18.
- [13] 王杰,王俊,孙鑫.和田河流域水量沿程变化分析研究[J].水资源 与水工程学报, 2013, 24(3): 142-148.
   WANG Jie, WANG Jun, SUN Xin. Analysis of water change along Hotan river basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(3): 142-148.
- [14] 李卫红,黎枫,陈忠升,等.和田河流域平原耗水驱动力与适宜绿洲 规模分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5):1 161-1 168.
  LI Weihong, LI Feng, CHEN Zhongsheng, et al. Analysis of driving force of water consumption in plain and suitable scale of oasis in Hotan river basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(5): 1 161-1 168.
- [15] 王新. 乌鲁瓦提水库建设对和田河的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 191-194.

WANG Xin. Study on influence of Wuluwati reservoir construction on Hotan river[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(1): 191-194.

- [16] 罗兰花、谢红霞、宁迈进、等. 1961—2012 年蒸水流域径流演变规律研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8): 42-48.
  LUO Lanhua, XIE Hongxia, NING Maijin, et al. Variation trend of runoff in Zhengshui river watershed from 1961 to 2012[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(8): 42-48.
- [17] 吴子怡,谢平,桑燕芳,等.水文序列跳跃变异点的滑动相关系数识别方法[J].水利学报,2017,48(12):1473-1481,1489.
  WU Ziyi, XIE Ping, SANG Yanfang, et al. Moving correlation coefficient-based method for the detection of change-points in hydrological time series[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12):1473-1481,1489.
- [18] 刘茜, 王延贵. 江河水沙变化突变性与周期性分析方法及比较[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(2): 17-23.
   LIU Xi, WANG Yangui. Comparison of analytical methods of runoff

and sediment load mutation and periodical variation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(2): 17-23.

- [19] 莫崇勋,刘朋,朱新荣,等.近 59 年广西气象要素时空变化特征分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):46-53,69.
  MO Chongxun, LIU Peng, ZHU Xinrong, et al. Spatial and temporal variation characteristics of meteorological factors in Guangxi in recent 59 years[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1):46-53, 69.
- [20] 郝丽娜, 粟晓玲, 黄巧玲. 基于小波广义回归神经网络耦合模型的 月径流预测[J]. 水力发电学报, 2016, 35(5): 47-54.
   HAO Lina, SU Xiaoling, HUANG Qiaoling. Monthly runoff prediction using wavelet transform and generalized regression neural network model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(5): 47-54.
- [21] 陈忠升. 中国西北干旱区河川径流变化及归因定量辨识[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.

CHEN Zhongsheng. Quantitative identification of river runoff change and its attribution in the arid region of northwest China[D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.

- [22] 雷红富,谢平,陈广才,等.水文序列变异点检验方法的性能比较分析[J].水电能源科学,2007,25(4):36-40.
  LEI Hongfu, XIE Ping, CHEN Guangcai, et al. Comparison and analysis on the performance of hydrological time series change-point testing methods[J]. Water Resources and Power, 2007, 25(4): 36-40.
- [23] 褚桂红, 史文娟, 王娟. 和田河上游径流变化特征及影响因子分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 83-87.
  CHU Guihong, SHI Wenjuan, WANG Juan. Runoff variation characteristics and influencing factors in the upper reaches of Hotan River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(11): 83-87.

# Change in Runoff in Hotan River in Xinjiang and Its Determinants

HUANG Xing<sup>1</sup>, CHEN Fulong<sup>1\*</sup>, ZHAO Qi<sup>2</sup>, HE Chaofei<sup>1</sup>, LONG Aihua<sup>1,3</sup>

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

2. Hydrology Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830000, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: [Background and objective] Global warming and anthropogenic activities have combined altering the runoff in the Hotan river in Xinjiang. The objective of this paper is to analyze the change in its runoff and the factors that affected it, and to predict how the runoff will trend in response to anthropogenic activities and environmental change respectively. [Method] Evolution in the runoff, its periodicity and abnormal changes, as well as their determinants were analyzed using the M-K test, Pettitt mutation test, Morlet wavelet analysis and other methods. The correlation between the runoff and its determinants was analyzed using the correlation test method; multiple linear equation and neural network models were established to link the runoff and its determinants to separate the contribution of climate factors and anthropogenic activities to the runoff. [Result] ①The runoff in Yulong Kashi river has been in increase, while it does not show noticeable change in Kara Kashi river. Abnormal runoff change occurred in 2009 and 2004. There were two dry-wet cycles in the period of 40~55 years for Yulong Kashi river and period of 33~55 year for Kara Kashi river. Precipitation in both Yulong Kashi and Kara Kashi rivers has been in increase and there have been three abundant-less cycles in each, with an abnormal change occurring in 2001. The average annual temperature in the two rivers has increased significantly, with an abnormal change in 1984. The temperature has seen two cold-warm cycles. 2) The main determinants of the runoff change in the two rivers are climate change, which contributed to 84.06% and 72.51% of the runoff change in the two rivers, compared to 15.94% and 27.49% caused by anthropogenic activities. 【Conclusion】 The periodicity of wet-dry cycles in Yulong Kashi and Kara Kashi river was 40~55 a and 33~55 a respectively; rainfall in the two rivers will decrease. The abrupt change in the runoff in Kara Kashi river is largely due to the construction of the Uluwati reservoir; the change in precipitation and temperature coincides with climate change in northwest China. Temperature affects recharge to the runoff, while climate change drives the change in runoff.

Key words: runoff; influence factors; contribution rate; periodic; Hotan river

责任编辑:赵宇龙