甘肃省白龙江引调水工程受水区渭河与泾河流域 年径流量演变情势

程玉菲^{1,2},刘德地^{2*},王军德^{1,2},高艺杰^{2*}

¹甘肃省水利科学研究院,甘肃 兰州 ²武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室,湖北 武汉

收稿日期: 2025年2月10日; 录用日期: 2025年3月11日; 发布日期: 2025年4月28日

摘要

随着人口增长和经济发展,干旱半干旱地区水资源供需矛盾日益突出,跨流域引调水工程被认为是解决这一问题最有效的解决手段之一,而引调水工程受水区的年径流量演变情势对规划引调水工程的规模与调度起着十分 重要的作用。本研究以甘肃省白龙江引调水工程受水区为研究对象,利用CWatM模型模拟年径流量,结合 1961~2020年实测年径流数据和未来SSP370气候情景,分析了研究区域内北道与杨家坪两个径流控制站的年 径流包括突变点、演变趋势及其周期性在内的演化情势。研究结果表明:1)CWatM模型在模拟受水区所在流域 的月尺度径流方面表现良好,率定期与验证期结果均可满足精度要求;2)通过实测数据分析,表明北道与杨家 坪站的年径流量在1992年和1985年分别发生突变,突变后径流量显著减少,通过趋势分析发现北道与杨家 坪站的年径流量在1992年和1985年分别发生突变,突变后径流量显著减少,通过趋势分析发现北道与杨家 坪站的年径流量在1992年和1985年分别发生突变,突变后北道站呈显著上升趋势,杨家坪站逐渐趋于稳定,尽管该区 域降水量有所增加,但蒸发量和耗水量的上升幅度更大,必导致水资源供需矛盾进一步加剧。周期性分析发现 年径流量在短周期(2~8年)内存在波动,主周期为5年,无明显长周期;3)在未来SSP370情景下,考虑人类取 用水影响后,两站点年径流量均呈下降趋势,北道与杨家坪站的多年平均径流量分别减少19.9%和46.0%,因 此,人类取用水显著影响径流总量与变化趋势,尤其是杨家坪站所在的泾河流域,亟需通过外流域调水缓解当 地水资源压力。

关键词

CWatM模型,突变分析,趋势分析,周期分析,未来气候情景,引调水工程

Evolution of Annual Runoff in the Wei and Jing River Watersheds in the Water-Receiving Areas of the Bailong River Water Diversion Project in Gansu Province

作者简介:程玉菲(1980年8月-),女,黑龙江克山人,硕士研究生,正高级工程师,主要从事干旱区水文水资源方面的工作,Email: 150152067@qq.com *通讯作者 Email: dediliu@whu.edu.cn, 2023282060132@whu.edu.cn

Yufei Cheng^{1,2}, Dedi Liu^{2*}, Junde Wang^{1,2}, Yijie Gao^{2*}

¹Gansu Research Institute for Water Conservancy, Lanzhou Gansu ²State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: Feb. 10th, 2025; accepted: Mar. 11th, 2025; published: Apr. 28th, 2025

Abstract

With population growth and economic development, the contradiction between water supply and demand in arid and semi-arid regions has become increasingly prominent. Inter-basin water diversion projects are considered to be one of the most effective solutions to this contradiction. The evolution of annual runoff in the receiving area of water diversion projects plays a crucial role in planning the scale and regulation of such projects. This study focuses on the evolution of annual runoff in the watersheds of the water-receiving areas of the Bailong River Water Diversion Project. Taken the receiving area of the Bailong River Water Diversion Project in Gansu Province as a case study, the measured annual runoff data from 1961~2020 was used to calibrate and verify the CWatM model. And the results by SSP370 future climate scenarios are from the CWatM model. Beidao and Yangjiaping are located in the Wei and Jing river watersheds, respectively. And the abrupt change points, evolution trends, and periodicity of the annual runoff are identified in these two stations. The results indicate that: 1) The CWatM demonstrates satisfactory performance in simulating monthly runoff within the water-receiving area, with both calibration and validation periods meeting prescribed accuracy criteria; 2) Abrupt changes in annual runoff were found in 1992 at Beidao station and in 1985 at Yangjiaping station. There were significant downward trends of the annual runoff at both Beidao and Yangijaping stations before the abrupt change while there was a significant upward trend at Beidao station and a stationary trend at Yangjiaping station. Although there was an increase in precipitation, there were more increases in evaporation and in water consumption. The contradiction between water supply and demand inevitably was exacerbating. There were short periodicities with 2~8 years and without significant long periodicities at the two stations; 3) Under the future SSP370 scenario, the annual runoffs at both stations show the decreasing trends, and the multi-year average runoff had been found to be decreased 19.9% and 46.0%. Our study demonstrates that water supply significantly affects the total runoff and its trends, especially in the Jinghe River Basin where Yangjiaping station is located, urgently requiring interbasin water transfer to alleviate local water resource pressure.

Keywords

CWatM Model, Mutation Analysis, Trend Analysis, Periodic Analysis, Future Climate Scenarios, Water Diversion Project

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC ① Open Access

1. 引言

随着人口的增长与经济的快速发展,人类取用水增加的同时气候变化导致的地表径流时空分布更加不均,水资源供需矛盾不断加剧,尤其是在受气候变化影响最敏感的干旱半干旱地区[1][2]。为了解决水资源的供需矛盾,跨流域引调水工程被认为是最有效的解决手段之一[3][4]。引调水工程将来自于水源区的地表径流,增加或替代受水区的地表水源供给,从而改变受水区的供水格局。因此,引调水工程受水区的年径流量演变情势对规划引调水工程的规模与调度起着十分重要的作用[5]。

在现有针对年径流量演变分析与趋势预测研究中,主要有两种途径:一是建立水文模型模拟分析年径流量 动态变化过程。如杨桂莲等人应用 SWAT 模型模拟洛河流域基流并使用滤波技术对实测径流进行基流分割用以 评价模拟值[6],杜志毅等人耦合 SWAT 模型和 CA-Markov 模型,预估了未来"碳达峰"时期和"碳中和"时 期的流域径流变化趋势[7],Manqing Shao 等人利用分布式水文模型(DHSVM)与水资源模拟模型(WAM)得到美 国得克萨斯州未来情景下的水库水量[8],王建坤等人使用 Budyko 框架预测干旱半干旱地区未来不同气候情景 下的径流量[9];二是基于历史数据进行统计分析。黄草等人利用 1988~2018 年洞庭湖地区径流与水资源量资料 分析三峡工程蓄水前后地表水资源量变化[10];汪清旭根据青海省近 61 年长系列径流与水资源量资料,进行地 表水资源趋势分析[11],崔东文基于人工神经网络利用以新疆伊犁河雅马渡站径流资料,构建多隐层 BP 神经网 络径流预测模型[12]。虽然以上方法阐明了径流量的演变过程和发展趋势,但未能充分考虑人类取用水过程的影 响;而 CWatM (Community Water Model)水文模型[13]在产汇流过程中考虑了人类取用水过程的影响,并在其中 加入多部门需用水与回流过程,所以使用该模型分析年径流量的演变情势,可综合考虑自然与人类取用水活动 的共同影响。

甘肃省白龙江引调水工程从嘉陵江支流白龙江上游新建的代古寺水利枢纽自流引水,向天水、平凉、庆阳 3 市 20 县(区)以及陕西省延安市 4 县区供水,是国家水网重要组成部分之一。本研究以甘肃省白龙江引调水工 程受水区作为研究对象,利用 CWatM 模型,结合 1961~2020 年实测年径流数据和未来 SSP370 气候情景,分析 了研究区域内北道与杨家坪两个径流控制站的年径流包括突变点、演变趋势及其周期性在内的演化情势。

2. 研究区域及数据

2.1. 研究区域

甘肃省白龙江引调水工程受水区共包含3个地级市,共20个区县,其中天水市(武山县、秦州区、甘谷区、 麦积区、张家川县、清水县),平凉市(庄浪县、华亭市、崇信县、灵台县、崆峒区、泾川县)以及庆阳市(西峰区、 正宁县、镇原县、合水县、宁县、环县、华池县、庆城县)的行政区划分布与气象水文站分布如图1所示。



图 1. 甘肃省白龙江引调水工程受水区行政区与气象水文站分布图

受水区涉及两个流域,一是宝鸡峡以上的渭河流域:天水市的武山县,甘谷县,秦州县,麦积区,清水县, 张家川县与平凉市庄浪县主要部分在渭河流域内;二是泾河流域:平凉市的华亭市,崆峒区,崇信县,泾川县, 灵台县与庆阳市的所有八个区县主要部分在泾河流域内。

2.2. 研究数据

2.2.1. 气象数据资料

气象数据来自中国地面气候资料日值数据集(V3.0),从中选取流域内外 20 个气象站自 1961 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日的逐日降雨数据,各站点信息如表 1 所示。对各个站点的数据使用克里金(Kriging)插值法进 行空间插值,计算得到受水区 30 min 的逐日面降雨数据。在 1961 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日时间段内,使用 GSWP3-W5E5 (Global Soil Wetness Project Phase 3-WFDE5 over 5 land points)逐日 GCM 数据集,空间尺度 为 30 min,模拟受水区历史年径流量演变形式;在未来阶段(2021 年 1 月 1 日至 2040 年 12 月 31 日)使用 IPSL-CM6A-LR (Institut Pierre-Simon Laplace-Climate Model version 6A-Low Resolution) SSP370 情景下的逐日 GCM 数据集,空间尺度 据集,空间尺度为 30 min,模拟受水区未来水资源演变趋势。

编号	站点名	编号	站点名
1	靖远	11	西峰镇
2	榆中	12	长武
3	华家岭	13	岷县
4	中卫	14	天水北道区
5	盐池	15	横山
6	同心	16	洛川
7	固原	17	泾河
8	环县	18	汉中
9	西吉	19	武都
10	平凉	20	临洮

表 1. 研究区所选气象站信息

2.2.2. 水文资料数据

根据甘肃省 1961 至 2020 年《水文统计年鉴》,收集整理北道水文站(渭河流域),杨家坪水文站(泾河流域) 1961 年至 2020 年年径流序列。站点资料如表 2 所示。

表 2.	研究区所选水文站信息
------	------------

	站点名	河名	所在水系	集水面积/km ²
1	北道	渭河干流	渭河水系	23,385
2	杨家坪	泾河干流	泾河水系	14,124

2.2.3. 需(用)水数据

需(用)水数据使用 WFaS 提供的历史与未来不同情境下的生活、工业、畜牧需(用)水栅格数据[14] [15],灌溉需水使用 Penman-Monteith 法进行计算。灌溉回流量中的 50%经蒸发损失后,剩余水量进入河道;畜牧用水 假定全部损失;生活回流量为实际需(用)水量的 90%,工业回流量为实际需(用)水量的 85%。

3. 研究方法

3.1. 基于 CWatM 模型的径流模拟及预测

3.1.1. CWatM 模型

CWatM (Community Water Model)是一款由国际应用系统分析研究所(International Institute for Applied System Analysis, IIASA)开发的分布式水文水资源模型,可在 30 min~30 s 的空间分辨率和日时间尺度下模拟区域水文过程。CWatM 不仅能够模拟自然界的水文循环,还考虑了需水、用水及回流等人类活动对水循环的影响,并集成了水资源综合管理措施,如水库调度、地下水开采和农业灌溉等,适用于评估气候变化和人类活动背景下的多尺度水资源供需关系,其模型结构图如图 2 所示。



图 2. CWatM 模型结构示意图[13]

一定流域或区域的地表水资源量,主要由降水补给,并能反映在河川径流量上。该模型的气象数据输入种 类中包含降雨、气温、风速、大气辐射等数据,根据各个气候因子对水资源量的影响,利用 GCM (Global Climate Model, GCM)全球尺度气象数据作为 CWatM 的气象部分的输入数据(降水除外)。历史降水数据根据受水区的站 点实测数据插值所得;未来时段则采用 GCM 数据。CWatM 模型内部的河道径流量通过计算各网格单元当日的 径流信息来确定。

3.1.2. 模拟结果评价指标

CWatM 模型使用 *KGE* 作为目标函数进行模型参数率定,选取 *R*²、*NSE* 与 *P_{bias}* 指标进行模型效果评价,关于详细评价指标见表 3 [16]。目标函数与评价指标计算公式分别为:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^{2} + (\beta - 1)^{2} + (\gamma - 1)^{2}}$$
(1)

$$R^{2} = \left[\frac{\sum_{t=1}^{T} \left(Q_{oi} - \overline{Q_{0}}\right) \left(Q_{si} - \overline{Q_{s}}\right)}{\sqrt{\sum_{t=1}^{T} \left(Q_{oi} - \overline{Q_{0}}\right)^{2}} \sqrt{\sum_{t=1}^{T} \left(Q_{si} - \overline{Q_{s}}\right)^{2}}}\right]^{2}$$
(2)

$$P_{bias} = \sum_{t=1}^{T} \frac{Q_{si} - Q_{oi}}{Q_{oi}} \times 100\%$$
(3)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T} (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{t=1}^{T} (Q_{oi} - \overline{Q_0})^2}$$
(4)

式(1)中, *KGE* 为克林 - 古普效率系数, *r* 为相关系数(无量纲); β 为偏离率(无量纲), $\beta = \overline{Q_s} / \overline{Q_0}$; *y* 为变异率(无 量纲), $\gamma = COV_s / COV_0 = \sigma_s \overline{Q_0} / \sigma_0 \overline{Q_s}$; *COV* 为变异系数; σ 为标准差。式(2)中, *R*² 为决定系数, *Q_si* 为模拟径 流量; *Q_oi* 为实测径流量; $\overline{Q_s}$ 为模拟径流量的平均值; $\overline{Q_0}$ 为实测径流量的平均值; *T* 为实测数据的长度。式(3) 中, *P_{bias}* 为偏差百分比; *Q_si* 为模拟径流量; *Q_oi* 为实测径流量。式(4)中, *NSE* 为纳什效率系数; *Q_si* 为模拟径流 量; *Q_oi* 为实测径流量; $\overline{Q_0}$ 为实测径流量的平均值。

表 3. 水文模型评价指标

性能等级	R ²	NSE	P _{bias} /%	
非常好	$0.7 < R^2 \le 1.00$	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$P_{bias} \leq \pm 10\%$	
良好	$0.6 < R^2 \le 0.70$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10\% \leq P_{bias} < \pm 15\%$	
满意	$0.5 < R^2 \le 0.60$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15\% \leq P_{bias} < \pm 25\%$	
不满意	$0 < R^2 \le 0.50$	$NSE \le 0.50$	$\pm 25\% \leq P_{bias}$	

3.2. Pettitt 突变检验

Pettitt 检验是一种非参数检验方法[17],用于检测时间序列中的单一突变点,其基于 Wilcoxon 秩和检验,适用于非正态分布的数据,公式如式(5)所示:

$$K_{t} = 2\sum_{i=1}^{t} R_{i} - t(n+1)$$
(5)

式(5)中, K_t 是时间点 t 的统计量, R_i 是第 i 个观测值的秩, n 是观测值的总数, $|K_t|$ 最大时对应的点即为突变点。

3.3. 趋势分析

3.3.1. 线性趋势法

线性趋势法通过线性回归模型来评估数据的长期趋势。计算趋势的斜率和截距,以及相关系数和显著性水平,公式如式(6)所示:

$$y = \beta_1 x + \beta_0 \tag{6}$$

式(6)中, β_1 为斜率,表示趋势的变化率; β_0 为截距,表示回归线与 y 轴的交点; x 是自变量(时间); y 是因变量 (年径流量)。

3.3.2. 滑动平均法

滑动平均法用于平滑时间序列数据,减少短期波动以更清晰地观察长期趋势。本研究中采用5年窗口的滑

动平均,公式如式(7)所示:

$$MA_{t} = \frac{\sum_{i=t-k}^{t+k} x_{i}}{2k+1}$$
(7)

式(7)中, MA_t是时间点 t 的滑动平均值, x_i是第 i 个观测值, k 是窗口大小的一半,本研究中 k 为 2。

3.3.3. Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall 趋势检验是一种非参数统计检验方法[18],适用于检验非线性趋势,近年来广泛应用于分析降水、径流、气温及水质等要素时间序列的变化趋势。计算步骤如下:

1) 计算 S 统计量: 对所有可能的观测对 (x_i, x_i) 进行比较

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

$$sgn(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x > 0 \\ 0, & \text{if } x = 0 \\ -1, & \text{if } x < 0 \end{cases}$$
(8)

2) 计算方差 Var(S):

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$
(9)

3) 计算 Tau、Z 统计量:

$$Tau = \frac{S}{n(n-1)/2}$$
(10)
$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}, & \text{if } S > 0\\ 0, & \text{if } S = 0\\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}, & \text{if } S < 0 \end{cases}$$
(11)

式(10)中, n 为观测值的数量, Tau 为一种标准化指标,用于定量描述序列趋势强度与方向。式(11)中, Z 统计量用于评估趋势的显著性。Tau <0 表示存在下降趋势, Tau >0 表示存在上升趋势。在显著性水平 a 下,若|Z| > Za2 认为单调减或增趋势显著;若|Z| < Za2 则认为变化趋势不显著。显著性水平 0.1、0.05、0.01 对应的 Za2 分别为 1.64、1.96、2.58。

3.4. 小波分析

小波分析基于基小波函数的平移和伸缩,用一簇函数表示或逼近一个信号或函数[19]。小波系数实部图可以 反映不同时间尺度振荡周期的时频变化特点,用于分析年径流量周期变化特征。本研究使用连续小波变换来分 析年径流量演变形式周期性,选择复 Morlet 小波作为基小波函数,提取系数的实部并绘制小波实部图。小波变 换通过将信号投影到小波函数上,获得信号在不同尺度和位置的系数,公式如式(12)所示:

$$W_f(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$
(12)

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a,b)|^2 db$$
(13)

DOI: 10.12677/jwrr.2025.142015

式(12)中, $W_f(a,b)$; x(t)为原始信号; ψ 为基小波函数; a 为尺度参数, 控制小波的宽度; b 为平移参数, 控制小波的位置; ψ^* 为基小波函数的复共轭; 式(13)中, Var(a)为小波方差。

4. 结果与分析

4.1. CWatM 模型率定与检验

根据北道与杨家坪水文站 2011 至 2020 年实测月径流数据,将 CWatM 模型率定期设定为 2011 至 2015 年, 验证期设定为 2016 至 2020 年。经过参数率定后, CWatM 模型的模拟结果如图 3 所示。



图 3. CWatM 模型在率定期及验证期径流模拟结果

北道站与杨家坪站率定期的 NSE 均大于 0.65,性能评价为良好; R²均大于 0.7,性能等级为非常好; P_{bias}绝 对值均小于 10%,性能等级为非常好。验证期北道站的模拟结果相比率定期 NSE 指标为 0.47, R²为 0.57, P_{bias} 为 7.26%,除 NSE 外均在可接受范围内;杨家坪站验证期 NSE 为 0.46, R²为 0.64, P_{bias}为 12.97%,除 NSE 外 均在可接受范围内。CWatM 模型在模拟受水区所在流域的月尺度径流方面表现良好,率定期与验证期结果均可 满足精度要求。

4.2. 年径流量突变分析

为了确定变化趋势转变时间,利用 Pettitt 法对 1961 年至 2020 年的实测年径流序列进行突变检验,突变检验结果如图 4 所示,虚线处为突变时间点。Pettitt 检验法北道站年径流突变时间为 1992 年,杨家坪站为 1985 年。基于年径流序列突变时间点,对比分析突变时间点前后年径流量特征值见表 4。表 4 中,两站点在突变后年径流量多年平均值均大幅下降,北道站由 14.4 亿 m³下降至 6.8 亿 m³,降幅为 52.9%;杨家坪站由 8.8 亿 m³下降至 4.9 亿 m³,降幅为 44.4%。

站点	突变前(亿 m ³)		突变后(亿 m ³)			降幅			
	多年平均	最小值	最大值	多年平均	最小值	最大值	多年平均	最小值	最大值
北道	14.4	5.2	30.3	6.8	1.3	19.0	-52.9%	-75.4%	-59.9%
杨家坪	8.8	3.3	18.0	4.9	2.1	9.0	-44.4%	-35.7%	-99.6%

表 4. 北道与杨家坪站年径流量特征值



图 4. 北道与杨家坪站年径流量突变检验结果

4.3. 年径流量演变趋势分析

根据突变分析中得到的突变时间点,使用线性趋势法与滑动平均法(窗口大小为 5 年)对突变点前后年径流 量序列进行趋势分析,得到 1961 年至 2020 年实测年径流量趋势图,如图 5 所示。从图 5 中可知,突变前,北 道与杨家坪站年径流量整体呈现明显下降趋势;突变后,北道站呈现明显上升趋势,而杨家坪站趋势逐渐趋于 平稳。对北道与杨家坪站突变点前后年径流量序列进行 Mann-Kendall 趋势分析,其结果见表 5 与图 6。表 5 中, 突变前,北道站年径流量统计检验 Z 值为-2.32,呈现明显下降趋势,且通过 0.05 显著性水平(|Z|=1.96)的检验; 杨家坪站 Z 值为-1.85,呈下降趋势,通过 0.1 显著性水平(|Z|=1.64)的检验。突变后,北道站年径流量统计检验 Z 值为 2.67,呈现明显上升趋势,且通过 0.01 显著性水平(|Z|=2.58)的检验;杨家坪站 Z 值为-0.06,无显著趋势变化。

1961 至 1970 年渭河流域(北道)与泾河流域(杨家坪)的年均面降雨量分别为 474.8 mm 与 486.1 mm, 2011 至 2020 年为 557.3 mm 与 523.3 mm, 分别增加了 17.4%和 7.7%,因此该区域的耗水量(包括蒸发量)大幅度增加,增加的幅度超过了代表站点的年径流量下降的幅度,必将导致区域内水资源的供需矛盾进一步加剧。

4.4. 年径流量周期性分析

根据在突变分析与趋势分析中得到的突变点前后的线性趋势方程,采用连续 Morlet 小波变换对 1961~2020 年的年径流量序列进行周期性分析。为了消除长期趋势对周期性分析的影响,对原序列进行了去趋势处理,得 到北道与杨家坪站年径流小波系数实部图与小波函数方差图,如图 7、图 8 所示。北道与杨家坪的年径流量序列 在整个时域内无明显的周期性变化,见图 7(a₁)和图 7(b₁);从图 8(a)中可知,两个站点的小波方差均单调递增, 无主周期存在,故考虑去趋势化后进行周期性分析。经去趋势化处理后,从图 8(b)中可知,北道与杨家坪站均 存在 5 年的主周期:图 7(a₂)中北道站 2~8 年时间尺度变化较强,主要发生在 1965~1970 年;图 7(b₂)中杨家坪站 2~8 年时间尺度变化也较强,主要发生在 1960~1973 年。受水区两个流域的年径流量在经过去趋势化处理后, 均呈现相同的周期性,具有 2~8 年的短周期,主周期为 5 年,在长周期上原序列与去趋势化序列后均无明显周 期性。

4.5. 未来年径流量趋势预测

利用耦合人类取用水活动过程的 CWatM 水文模型,在 SSP370 未来情景驱动下,得到北道与杨家坪站 2021

至 2040 年年径流量。由于 2037 年径流值异常偏大,可能由极端气候事件导致,故将其当作异常值处理,未来气候变化 SSP370 情景下年径流量变化趋势图(如图 9 所示)。对北道与杨家坪站未来年径流量序列进行 Mann-Kendall趋势分析,其结果见表 6。在自然状态下,北道站年径流量统计检验 Z 值为 1.48,存在不显著上升趋势;杨家坪站年径流量统计检验 Z 值为-2.34,通过 0.05 显著性水平(|Z|=1.96)的检验,存在显著下降趋势。考虑人类需用水过程后两站点的年径流量统计检验 Z 值均为-0.42,均未通过 0.05 显著性水平检验,年径流量存在不显著下降趋势。自然状态下北道站与杨家坪站 2021 至 2040 年年径流量多年平均值分别为 11.88 亿 m³ 与 3.35 亿 m³,



表 5. 北道与杨家坪站年径流量 M-K 趋势检验

图 6. 北道与杨家坪站年径流量 M-K 检验统计值变化图

甘肃省白龙江引调水工程受水区渭河与泾河流域年径流量演变情势







图 8. 北道与杨家坪站年径流小波函数方差图: (a) 原序列; (b) 去趋势化后序列

考虑人类取用水过程后多年平均值下降为 9.51 亿 m³ 与 1.81 亿 m³,降幅分别为 19.9% 与 46.0%。人类取用水过

程在改变年径流量变化趋势的同时,大幅减少了年径流量,导致了受水区供水能力下降。北道站与杨家坪站未 来 20 年内两流域年径流量均无显著上升趋势,且杨家坪站在自然状态下的年径流量呈现明显下降趋势,表明处 于泾河流域的受水区部分区县将面临严峻的水资源供需平衡矛盾,亟需外流域调水来解决日益增加的水资源供 需矛盾问题。

表 6. 北道与杨家坪站未来年径流量 M-K 趋势检验



图 9. 北道与杨家坪站年径流量未来变化趋势图: (a) 自然状态下; (b) 考虑人类取用水后

5. 结论

以北道站与杨家坪站 1961 年至 2020 年实测年径流量为对象,利用趋势分析、突变分析与周期性分析等方 法对受水区年径流量进行历史演变分析,并使用耦合人类取用水过程的 CWatM 模型研究气候变化 SSP370 情景 下未来受水区年径流量变化趋势,主要结论如下:

1) CWatM 模型可用来模拟渭河流域与泾河流域的月尺度径流,率定期表现良好,验证期除 NSE 指标略微 偏低外其余指标均在可接受范围内,可以满足流域径流模拟的需要。

2) 通过实测数据分析,发现了北道与杨家坪站的年径流量在 1992 年和 1985 年分别发生突变,且突变后径 流量显著减少,且通过趋势分析明确了北道与杨家坪站年径流量突变前均呈现显著下降趋势,而突变后北道站 呈显著上升趋势,杨家坪站逐渐趋于稳定,尽管该区域降水量有所增加,但蒸发量和耗水量的上升幅度更大, 必导致水资源供需矛盾进一步加剧,周期性分析发现年径流量在短周期(2~8年)内存在波动,主周期为5年,无 明显长周期。

3) 在未来 SSP370 情景下,自然状态下北道站与杨家坪站 2021 至 2040 年年径流量多年平均值分别为 11.88 亿 m³与 3.35 亿 m³,考虑人类取用水过程后为 9.51 亿 m³与 1.81 亿 m³,两站点年径流量均呈下降趋势,北道与 杨家坪站的多年平均径流量分别减少 19.9%和 46.0%,因此,人类取用水显著影响径流总量与变化趋势,尤其是 杨家坪站所在的泾河流域,亟需通过外流域调水缓解当地水资源压力。

基金项目

甘肃省重点人才项目(2025RCXM0050),甘肃省重点研发项目(23YFFA0017,23YFFA0018),甘肃省水利科 技推广计划项目(25GSLK011,25GSLK021)。

参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2021—The physical science basis: Working group I contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2023. <u>https://doi.org/10.1017/9781009157896</u>
- [2] VÖRÖSMARTY, C. J., GREEN, P., SALISBURY, J. and LAMMERS, R. B. Global Water resources: Vulnerability from climate Change and population growth. Science, 2000, 289: 284-288. <u>https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284</u>
- [3] YI, S., KONDOLF, G. M. Environmental planning and the evolution of inter-basin water transfers in the United States. Frontiers in Environmental Science, 2024, 12: 1489917. <u>https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1489917</u>
- [4] ROLLASON, E., SINHA, P. and BRACKEN, L. J. Interbasin water transfer in a changing world: A new conceptual model. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2021, 46(3): 371-397. <u>https://doi.org/10.1177/03091333211065004</u>
- [5] WU, L., SU, X. and ZHANG, T. Challenges of typical inter-basin water transfer projects in China: Anticipated impacts of climate change on streamflow and hydrological drought under CMIP6. Journal of Hydrology, 2023, 627: 130437. <u>https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130437</u>
- [6] 杨桂莲,郝芳华,刘昌明,等. 基于 SWAT 模型的基流估算及评价——以洛河流域为例[J]. 地理科学进展, 2003(5): 463-471.
- [7] 杜智毅,何素飞,陈歆怡,等."双碳"和"高碳"情景下金沙江中上游流域未来径流模拟[J].水资源与水工程学报,2024, 35(3):111-119.
- [8] SHAO, M., FERNANDO, N., ZHU, J., ZHAO, G., KAO, S., ZHAO, B., et al. Estimating future surface water availability through an integrated climate-hydrology-management modeling framework at a basin scale under CMIP6 scenarios. Water Resources Research, 2023, 59(7): e2022WR034099. <u>https://doi.org/10.1029/2022wr034099</u>
- [9] WANG, J., CUI, C., JIA, Z., LIU, M., PANG, S. and ZHAI, K. Analysis of the responses of surface water resources to climate change in arid and semi-arid area. Agricultural Water Management, 2024, 295: 108751. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108751
- [10] 黄草,姜万,冯迪子,等. 1988-2018 年洞庭湖北部地区地表水资源量演变分析[J].水资源与水工程学报, 2021, 32(3): 37-43.
- [11] 汪清旭. 青海省近 61 年来地表水资源现状及演变趋势分析[J]. 水利规划与设计, 2020(3): 67-70, 170.
- [12] 崔东文. 多隐层 BP 神经网络模型在径流预测中的应用[J]. 水文, 2013, 33(1): 68-73.
- [13] BUREK, P., SATOH, Y., KAHIL, T., TANG, T., GREVE, P., SMILOVIC, M., et al. Development of the community water model (CWatM v1.04)—A high-resolution hydrological model for global and regional assessment of integrated water resources management. Geoscientific Model Development, 2020, 13(7): 3267-3298. <u>https://doi.org/10.5194/gmd-13-3267-2020</u>
- [14] WADA, Y., FLÖRKE, M., HANASAKI, N., EISNER, S., FISCHER, G., TRAMBEREND, S., et al. Modeling global water use for the 21st century: The water futures and solutions (WFaS) initiative and its approaches. Geoscientific Model Development, 2016, 9(1): 175-222. <u>https://doi.org/10.5194/gmd-9-175-2016</u>
- [15] WADA, Y., WISSER, D. and BIERKENS, M. F. P. Global modeling of withdrawal, allocation and consumptive use of surface water and groundwater resources. Earth System Dynamics, 2014, 5(1): 15-40. <u>https://doi.org/10.5194/esd-5-15-2014</u>
- [16] MORIASI, D. N., ARNOLD, J. G., VAN LIEW, M. W., et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900. <u>https://doi.org/10.13031/2013.23153</u>
- [17] PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. Applied Statistics, 1979, 28(2): 126-135. <u>https://doi.org/10.2307/2346729</u>
- [18] Mann, H. B. Nonparametric tests against trend. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259. https://doi.org/10.2307/1907187
- [19] HUDGINS, L., FRIEHE, C. A. and MAYER, M. E. Wavelet transforms and atmopsheric turbulence. Physical Review Letters, 1993, 71(20): 3279-3282. <u>https://doi.org/10.1103/physrevlett.71.3279</u>