

湟水河径流演变特征及其归因分析

祁文燕^{1,2}, 石喜², 梁小青¹, 王淑红², 赫兵²

(1. 甘肃民族师范学院 能源与动力工程学院,

甘肃 合作 747000; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: [目的] 探究人类活动与气候变化背景下湟水河干流区非平稳水文序列与降雨—径流关系, 并定量评估气候变化与人类活动对径流变化的贡献, 为该流域生态保护、高质量发展及水资源优化配置提供科学依据。[方法] 基于 1970—2022 年逐日水文气象数据, 采用 Mann-Kendall 趋势检验、Pettitt 突变点检测及小波分析等方法, 系统分析水文气象要素的趋势性、突变性和周期性特征。在此基础上, 采用 Simple HYDROLOG (SIMHYD) 模型模拟流域日流量过程, 构建径流演变归因量化方案, 评估不同时期气候变化与人类活动对径流变化的贡献。[结果] 湟水河年径流量序列呈明显阶段性波动, 整体趋势不显著 ($p > 0.05$)。西宁站年径流量在 3 个时段 (1991—2000 年, 2001—2010 年, 2011—2022 年) 较基准期 (1970—1990 年) 分别减少 11.95%, 12.41% 和 12.09%, 其中人类活动贡献率分别为 32.0%, 198.4% 和 328.6%; 民和站年径流量在相同时段变化幅度为 -16.99%, -9.48% 和 +18.77%, 人类活动贡献率分别为 67.13%, -136.37% 和 177.96%。[结论] 人类活动对湟水河径流变化的平均贡献率超过 65%, 尤其在 2000 年之后普遍超过 100%, 已成为径流变化的主要驱动因素; 气候变化在部分时段对径流恢复呈正向作用, 但整体影响次于人类活动。

关键词: 人类活动; 气候变化; 径流演变; 水文模型; 归因分析; 湟水河

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0141-12

中图分类号: TV121, P333

文献参数: 祁文燕, 石喜, 梁小青, 等. 湟水河径流演变特征及其归因分析[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 141-152. Qi Wenyan, Shi Xi, Liang Xiaoqing, et al. Runoff evolution characteristics and its attribution analysis of Huangshui River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 141-152.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.021

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.021

Runoff evolution characteristics and its attribution analysis of Huangshui River

Qi Wenyan^{1,2}, Shi Xi², Liang Xiaoqing¹, Wang Shuhong², He Bing²

(1. School of Energy and Power Engineering, Gansu Minzu Normal University, Hezuo, Gansu

747000, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] The non-stationary hydrological series and rainfall-runoff relationship in the main stream area of the Huangshui River under the background of human activities and climate change were investigated, and the contributions of climate change and human activities to runoff variation were quantitatively assessed, in order to provide a scientific basis for ecological protection, high-quality development, and optimal allocation of water resources in the river basin. [Methods] Based on daily hydro-meteorological data from 1970 to 2022, the trend, abrupt change, and periodic characteristics of hydro-meteorological elements were systematically analyzed using methods such as the Mann-Kendall trend test, Pettitt change-point test, and wavelet analysis. On this basis, the Simple HYDROLOG (SIMHYD) model was used to simulate daily runoff process in the river basin, and a runoff evolution attribution quantification scheme was constructed to evaluate the contributions of climate change and human activities to runoff variation in different periods. [Results] The annual runoff series of the Huangshui River showed distinct phased fluctuations, and the overall trend was not significant ($p > 0.05$). The annual runoff at Xining station decreased by 11.95%, 12.41%, and 12.09% in three periods (1991—2000, 2001—2010, and

收稿日期: 2025-08-10

修回日期: 2025-10-22

采用日期: 2025-10-24

资助项目: 甘肃省科技厅项目“气候变化背景下小流域山洪响应机理及模拟研究”(22JR11RA143); 兰州交通大学“天佑青年托举人才计划”青年基金项目(1200061160)

第一作者: 祁文燕(1993—), 女(汉族), 甘肃省兰州市人, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源方面的研究。Email: qwydwyyx@163.com。

通信作者: 石喜(1985—), 男(汉族), 甘肃省定西市人, 博士, 副教授, 主要从事水利工程方面的研究。Email: shixi103@163.com。

2011—2022) compared with the baseline period (1970—1990), among which the contribution rates of human activities were 32.0%, 198.4%, and 328.6%, respectively. The annual runoff at Minhe station changed by -16.99%, -9.48%, and +18.77% in the same periods, and the contribution rates of human activities were 67.13%, -136.37%, and 177.96%, respectively. [Conclusion] The average contribution rate of human activities to runoff variation of the Huangshui River exceeds 65%, and notably surpasses 100% after 2000, indicating that human activities have become the primary driving factor of runoff variation. Climate change has a positive effect on runoff recovery in some periods, but its overall influence is secondary to that of human activities.

Keywords: human activities; climate change; runoff evolution; hydrological model; attribution analysis; Huangshui River

气候变化和人类活动是影响流域水循环的主要因素。在全球变暖主导的气候变化直接影响下,降水格局发生改变,蒸散发能力增强,土壤湿度受到影响,使得水资源在时间和空间上的配置发生重组。另一方面,取用水资源、改变下垫面属性、水库调蓄及跨流域引水等人类活动,干扰和重塑流域天然的水文循环过程。两者共同改变了水循环的强度、路径和动态特性,加剧了流域水循环要素变率的不确定性,并深刻改变了陆地水文情势的时空格局与演变过程^[1-2]。因此,研究流域尺度上降水径流演变特征并对其进行归因分析,对于水资源高效利用及可持续规划管理具有重要的理论与现实意义。

目前,在流域尺度上,径流变化的归因分析方法主要有统计回归分析法^[3-5]、定量评估法(如基于Budyko假说的气候弹性系数法、降水—径流双累积曲线法等、敏感性分析法等)^[6-9]以及水文模型法^[10]。其中,基于Budyko假说的气候弹性系数法以其对历史数据的低依赖性,高计算效率,清晰的物理机制以及可靠的评估结果被广泛采用,并在中国黄河流域、青藏高原、黄土高原等区域验证有效^[11]。但该方法存在一定的局限性。比如,气候弹性法通常仅适用于年尺度归因分析,难以应用于更精细的时空尺度。同时,多数研究假设Budyko方程的参数在基准期和扰动期保持不变,未考虑时变参数带来的影响。利用水文模型,可以实现复杂变化条件下径流响应机制的定量研究。由于物理机制明确、能完整刻画径流过程且适用于多时空尺度,水文模拟法是量化径流变化归因的有效工具^[12-13]。例如,刘酌希等^[14]应用Soil and Water Assessment Tool (SWAT)模型对黄河上游洮河径流衰减开展了归因分析,揭示气候变化主导贡献(58.9%),人类活动次之(41.1%)。Ma Zhenmei等^[3]基于(geomorphology-based hydrological model, GBHM)模型解析了密云水库入库径流衰减因素,得出气候变化贡献最大(55%),人类直接取水(23%)与下垫面改变(18%)共同构成显著人为影响。蔺彬彬等^[15]采用Variable Infiltration Capacity

(VIC)模型解析了山西省典型流域气候变化和人类活动对径流衰减的贡献。然而,水文模型的有效性有时会受到模型时空一致性挑战和模型本身固有不确定性的制约。

湟水流域作为黄河上游最大支流,地处青藏高原与黄土高原过渡带,是甘青两省交界区域重要的生态与经济廊道。在气候变化与人类活动双重压力下,该流域水资源短缺与水环境压力持续加剧,供需矛盾突出,已严重制约区域可持续发展和水生态安全^[16-17]。为实现西部大开发和黄河流域高质量发展目标,亟需系统研究湟水干流水循环要素的时空演变、径流响应机制及驱动归因,为流域水资源管理和生态文明建设提供科学支撑。湟水流域现有研究多集中于径流模拟与预测^[18-21]、演变趋势分析等^[22-23]方面,从变化环境视角系统量化气候与人类活动对径流变化贡献率的研究仍相对有限。张调风等^[8]使用累积量斜率变化率法分析了1966—2010年气候变化和人类活动对湟水径流减少的贡献率。马俊清等^[24]采用累积量斜率变化率比较方法定量识别了气候变化和人类活动对水沙情势变化的贡献。杜嘉妮等^[25]采用基于Budyko假设的敏感性方法,量化了气候变化和人类活动对径流的影响。然而,上述研究多依赖于统计回归分析及经验性定量评估方法,虽能在一定程度上揭示径流变化的总体趋势并区分不同驱动因子的贡献,但这些方法在表征水文过程响应及处理非线性相互作用方面存在局限。因此,针对变化环境下的湟水流域,本研究基于湟水干流水文站及气象站日尺度气象水文资料,解析水循环要素的时空演变规律。通过SIMHYD模型径流模拟,定量分析径流变化的气候变化与人类活动驱动分量。研究结果可为制定流域水资源适应性策略提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湟水流域位于青海东部及甘青交界,地处黄土高原向青藏高原过渡地带,是黄河上游最大的一级

支流,主要由湟水干流及其支流大通河组成;其中湟水干流区是青海省政治、经济、文化和交通中心,也是青海省重要的工业、耕地集中区和农畜产品主要产区。湟水干流区多年平均降水量496.6 mm,多年平均水面蒸发量879.6 mm。湟水径流量年内分配不均,高度集中于7—9月(约占全年50%),1—3月所占比例最小(约10%)。历年最小流量多现于3—6月灌溉引水高峰期。

1.2 数据来源

依据水文站控制能力选取西宁站与民和站为代表站,采用的逐日降水量、气温及流量均为水文站实测数据,蒸发数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),数据长度为1970—2022年。

1.3 研究方法

1.3.1 径流演变特征分析方法

Mann-Kendall(M-K)趋势检验法作为经典非参数方法,不要求数据服从特定分布且对异常值稳健,适用于水文、气象等非正态分布的序列。该方法通过计算服从标准正态分布的统计量 Z 值来判定趋势方向(Z 为正表示上升,为负表示下降),并结合 p 值(如 $p < 0.05$)评估趋势的统计显著性。该方法还能通过前向序列(UF_k)与后向序列(UB_k)在显著性水平临界线(如 ± 1.96 ,对应 $\alpha = 0.05$)范围内出现交点,有效识别时间序列中的突变点。本研究采用该方法分析时间序列的变化趋势^[22,26]。Pettitt突变检验法的核心在于其能够检测时间序列中的突变,而不需要对数据的分布做出假设。这一特点使得它在水文、气象等领域得到广泛应用,特别是在处理具有复杂分布和自相关性的时间序列数据时表现出色^[22]。因此,本研究采用该方法开展水文气象长时间序列的突变分析。

双累积曲线法(double mass curve)是一种在水文气象数据分析中广泛应用的技术,主要用于检验两个变量间关系一致性及其变化趋势。该方法通过在直角坐标系中绘制同一时期内两个变量累积值之间的对应关系曲线,识别其协同变化中的阶段性特征,可用于水文气象要素一致性的检验、数据插补及料校正等^[9]。当双累积曲线的斜率发生明显变化时,表明变量间的统计关系发生了阶段性转折,而拐点所对应的时刻即为降水—径流关系产生显著变化的起始时间^[9,27]。因此,本研究采用该方法开展降雨径流关系的突变识别。

小波分析方法通过小波变换同步获取时间序列的时频信息,可有效识别序列中的局部间歇周期,即使在时间序列存在系统偏差的情况下仍可有效提取

局部的时间和频率特征。该过程通过前向变换生成一系列小波系数,以反映原始序列在时间和频率上的变化特征。小波变换根据母小波的变换性质可分为连续小波变换和离散小波变换。其中,连续小波变换克服了离散小波变换在分解尺度上限于二进制的局限性,可分解至任意尺度或频率,并具备非线性长时序提取与重建能力,被广泛应用于水文和气候领域^[28-29]。本研究采用连续小波分析水文气象长时间序列的变化特征。

1.3.2 水文模型及精度评价

SIMHYD模型由HYDROLOG模型简化所得,该模型结构简单,同时考虑超渗产流和蓄满产流两种产流机制,在众多模型中表现突出,目前在全球范围内广泛使用^[30]。SIMHYD模型主要包含3个部分:超渗地表径流、蓄满壤中产流和基流。本研究通过将CemaNeige融雪积雪模块与SIMHYD模型串联耦合,构建可模拟融雪积雪过程的11参数SIMHYD模型^[31]。

采用SCE-UA(shuffled complex evolution algorithm)全局优化算法率定模型参数^[32]。该算法基于复杂洗牌法和下降单纯形法,将样本划分为多个独立的种群分区进行并行寻优;在此过程中,各分区通过信息共享动态调整样本配置,实现所有参数的同步优化,找到全局最优解。率定水文模型参数时,需选取起始1 a作为模型的预热期,其目的是规避模型初始状态变量值对模拟结果的影响,将1970年划分为模型的预热期。

本研究将Kling Gupta系数(KGE)设定为单一的目标优化函数,以此来衡量模型模拟性能的优劣。同时,为了更全面地评估模拟结果,还引入了相对误差(R_e)作为辅助评价指标^[33]。KGE能够量化模型模拟结果与观测值之间的吻合程度,其值越趋近于1表示模拟性能越优。相对误差(R_e)则用于衡量模拟结果与观测值之间的百分比偏差,其值越接近于0代表精确度越高。具体计算公式为

$$KGE = 1 -$$

$$\sqrt{(R - 1)^2 + \left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{CV_{sim}}{CV_{obs}} - 1\right)^2} \quad (1)$$

$$R_e = \frac{|\sum(Q_{sim} - Q_{obs})|}{\sum(Q_{obs})} \times 100\% \quad (2)$$

式中 Q_{obs} , Q_{sim} 分别为实测和模拟的日流量(m^3/s); R 为实测与模拟值之间的皮尔逊相关系数; CV_{sim} , CV_{obs} 分别为实测和模拟的变异系数; \bar{Q}_{obs} , \bar{Q}_{sim} 分别为实测和模拟值的均值(m^3/s)。

1.3.3 基于水文模型的径流演变归因量化方案

根据湟水干流径流演变特征,将整个研究期(1970—2022年)划分为基准期与影响期,计算影响期年径流量相对于基准期的变化量。进而通过水文模拟,定量评估气候变化与人类活动对该变化的贡献率(图1)^[6,13]。

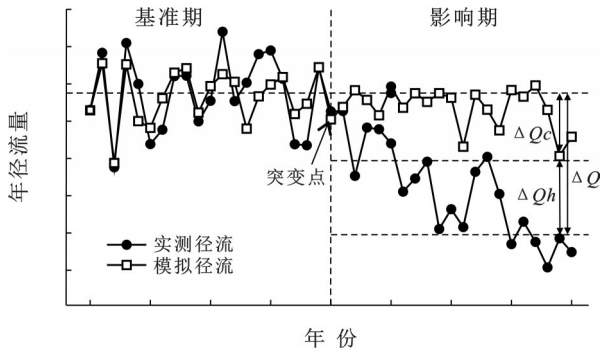


图1 基于水文模型的径流演变归因量化方案

Fig.1 Quantitative scheme for attribution of runoff evolution based on hydrological model

首先,定义基准期与影响期的实测年径流量分别为 Q_{on} 和 Q_{oi} (10^8 m^3),则径流变化量 ΔQ (10^8 m^3)可表示为:

$$\Delta Q = Q_{oi} - Q_{on} \quad (3)$$

该变化量由气候变化 (ΔQ_c , 10^8 m^3) 和人类活动 (ΔQ_h , 10^8 m^3) 共同影响,即:

$$\Delta Q = \Delta Q_c + \Delta Q_h \quad (4)$$

为分离两者贡献,本研究借助水文模型模拟近似自然情景下的径流过程。假定模型在基准期率定良好,能够合理反映无强烈人类干扰条件下的水文响应。基于此,将基准期模拟值 Q_{sm} 和影响期模拟值 Q_{si} 分别作为相应时期气候条件下天然径流的估计值。

则气候变化引起的径流变化 ΔQ_c 通过模拟结果计算:

$$\Delta Q_c = Q_{si} - Q_{sm} \quad (5)$$

人类活动引起的径流变化 ΔQ_h 通过总变化减去气候贡献得出:

$$\Delta Q_h = \Delta Q - \Delta Q_c \quad (6)$$

气候变化对径流变化的贡献率 η_c 与人类活动对径流变化的贡献率 η_h 。即可根据下式计算得到:

$$\eta_c = \frac{\Delta Q_c}{\Delta Q} \times 100\%, \quad \eta_h = \frac{\Delta Q_h}{\Delta Q} \times 100\% \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 湟水干流历史时期气候与径流变化特征

2.1.1 降水、气温和径流变化趋势分析

由 Mann-Kendall 趋势检验图(图2)可以得到

1970—2022年湟水河干流区西宁站和民和站的年降水量、年平均气温和年径流量的变化趋势。结果表明,西宁站年降水量自20世纪90年代左右有增加的趋势,特别是在2005年以后,UF线显著上升至95%显著线水平区域,UB线也持续上升,标志着近期年降水量相比早期有显著的增加趋势。民和站年降水量自20世纪90年代初有增加的趋势,自2000年之后,趋势线接近水平。民和站年降水量UF和UB线均未超过 ± 1.96 的显著性阈值,因此在统计上无显著长期变化趋势。西宁站年平均气温自20世纪80年代初有增加的趋势,特别是在90年代以后,UF线超过上临界线,表明气温有较为显著的增加趋势。民和站平均气温自20世纪90年代初有增加的趋势,自2000年后,气温呈现统计显著上升趋势(UF线 $> +1.96$)。UB线自1980年后持续上升,并于2000年前后与UF线交叉,表明区域内气候变暖的明显趋势。西宁站年径流量在90年代左右有增加的趋势,2000—2010年有减小的趋势,自2010年以后有上升的趋势,但整体变化未达到统计显著性水平;民和站年径流量在1985年以后有增加的趋势,到21世纪初,有减少的趋势,自2010年以后有增加的趋势,但趋势变化在统计意义上不显著。此外,对水文气象因子进行M-K趋势检验得到西宁站年降水量的Z值为4.07 ($p < 0.01$),民和站年降水量的Z值为0.023 ($p < 0.05$);西宁站年均气温的Z值为2.03 ($p < 0.05$),民和站年均气温的Z值为3.70 ($p < 0.01$);西宁站年径流量的Z值为-0.74 ($p > 0.05$),民和站年径流量的Z值为1.97 ($p < 0.05$)。可以看出,湟水河干流区径流量对降水这一主要补给源的响应较弱,降水量变化并非径流量显著变化的主因。

2.1.2 降水、气温和径流突变性分析

通过 Pettitt 突变检验法,识别湟水河干流区西宁站和民和站年降水量、年平均气温和年径流量序列的突变点:选取统计量K值前3个峰值年份作为可能突变年份,然后利用检验值P评估序列变异程度,如图3所示。由图3可知,在 $\alpha=0.05$ 显著性水平(临界值为0.5)下,西宁站年降水量序列在2019年达到显著突变 ($p=0.00325$);民和站年降水量序列未检测到显著突变点。西宁站年平均气温序列在1988年 ($p=0.103$) 和2022年 ($p=0.122$) 均表现为显著突变;民和站平均气温序列在1998年 ($p=0.0067$) 和2020年 ($p=0.0049$) 亦呈现显著突变。西宁站年径流量序列未检测到显著突变点;而民和站年径流量序列在2018年 ($p=0.128$) 表现为显著突变。

为识别降水径流关系的变化,建立1970—2022年

的降水量—径流深双累积曲线, 结果如图 4 所示。由图 4 可以看出, 西宁站双累积曲线在 2016 年前后发生明显偏转, 该站降水径流关系拟合直线斜率由突变前的 0.232 4 降至突变后的 0.087 8, 降幅达 62.22%, 反映出区域产流能力显著减弱。民和站则在 2018 年呈现明显转折, 降水径流关系拟合直线斜

率由 0.291 1 上升至 0.437 1, 增幅为 50.17%, 表明突变点前后降水和径流关系发生了明显的变化。结合突变点统计检验与双累积曲线的拐点识别结果, 可综合判定湟水河西宁站和民和站降水—径流关系发生明显变化, 这一变化可能受到气候变化与人类活动共同影响, 需进一步开展径流变化归因分析。

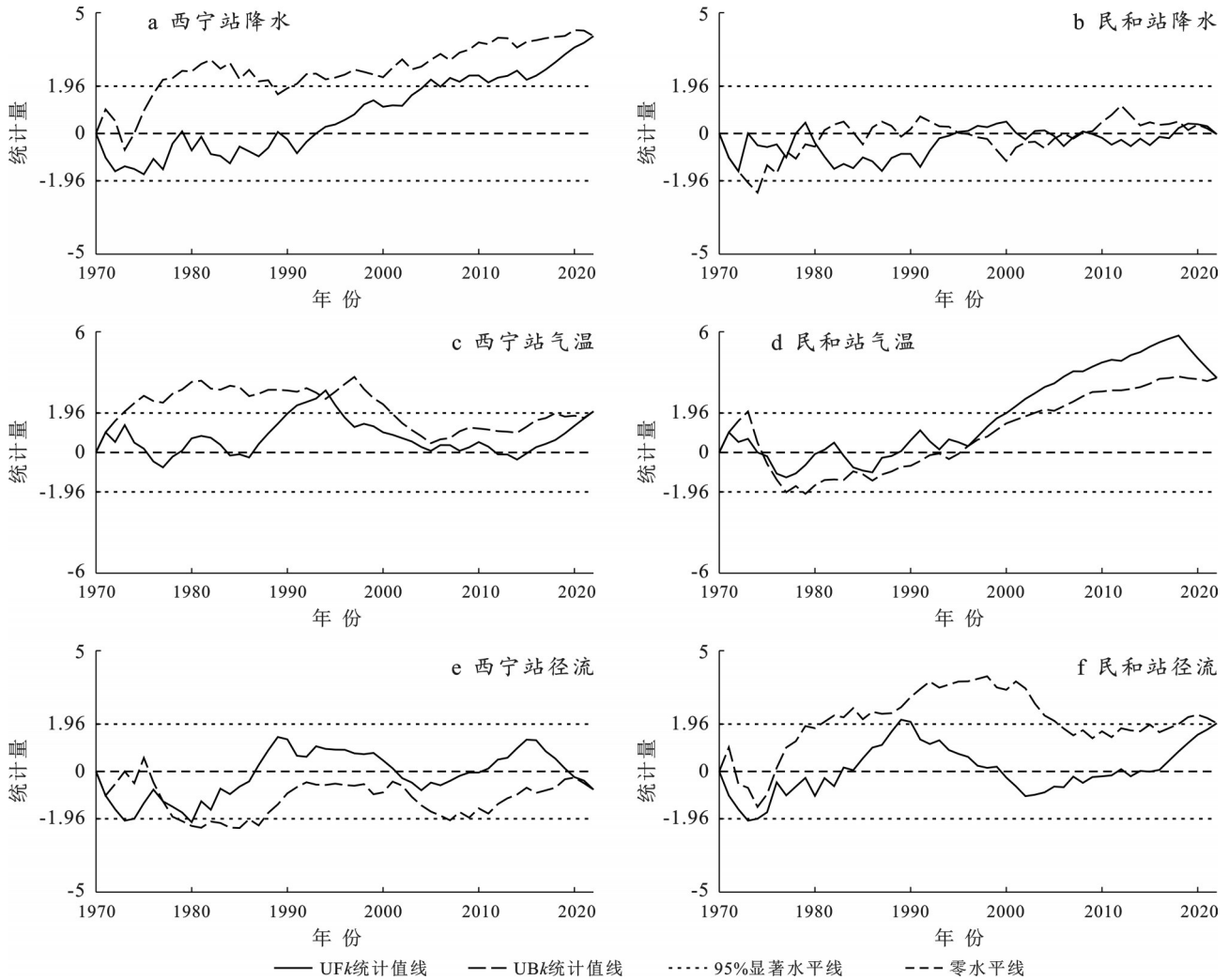


图 2 湟水河流域干流区水文气象要素 M-K 趋势检验曲线

Fig.2 M-K trend test curves of hydro-meteorological elements in main stream area of Huangshui River basin

2.1.3 降水、气温和径流周期性分析

由水文气象要素的小波实部系数等值线图(图 5)可以看出, 湟水干流区西宁站和民和站年降水量存在 3, 9 和 25 a 的振荡周期。西宁站年降水量最大峰值均出现在 9 a 左右, 表明 9 a 左右的周期振荡最强, 为降水量序列第 1 主周期; 3 a 时间尺度为降水量变化第 2 主周期。民和站的最大峰值出现在 25 a 左右, 为降水量序列第 1 主周期; 3, 9 a 时间尺度为变化第 2, 3 主周期。在 9 a 时间尺度下, 西宁站经历 6 个“枯—丰”振荡。降水量等值线在 2022 年仍未封闭, 表明中上游降水量将继续增加。根据 9 a 主周期特

征推断, 此增加趋势将大约持续到 2026 年。在 25 a 时间尺度下, 民和站正负相位振荡变化最明显, 经历了“丰—枯—丰—枯—丰”3 次振荡, 降水等值线在 2022 年仍未封闭, 表明研究区下游降水量将继续增加。对于年均气温, 西宁站气温存在 9~15 a, 30~35 a 左右的振荡周期。其中, 在 30~35 a 尺度上出现“枯—丰”2 次振荡, 在 9~15 a 上存在 7 次振荡, 这两个尺度的周期性特征在整个研究时段内均表现出较高的稳定性。民和站年平均气温存在 9~15 a, 50~55 a 左右的振荡周期。其中, 在 9~15 a 时间尺度上存在准 7 次振荡。西宁站和民和站年径流量均存在 25~35 a

左右的振荡周期,在此时间尺度下,正负相位振荡变化最明显,为径流序列第一主周期。西宁站和民和站的周期性变化特征基本一致,在 25~35 a 时间尺度下,西宁站年径流量经历“丰-枯”3 次振荡交替。民和站年径流量经历“枯-丰”2 次振荡。该流域目前除西宁站外,均处于枯-丰周期中的丰水年周期。西宁与民和站的年径流量均存在 25~35 a 的主周期振荡,

该周期与年降水量及气温的长周期波动具有较高一致性,表明径流量变化在一定程度上受气候系统低频振荡的调制。然而,在更短时间尺度上(如 3 a, 9 a),径流量与降水量、气温的周期响应关系并不完全同步,反映了下垫面改变、水资源利用等人类活动对天然河川径流的扰动作用,尤其是对较短周期水文响应的显著影响。

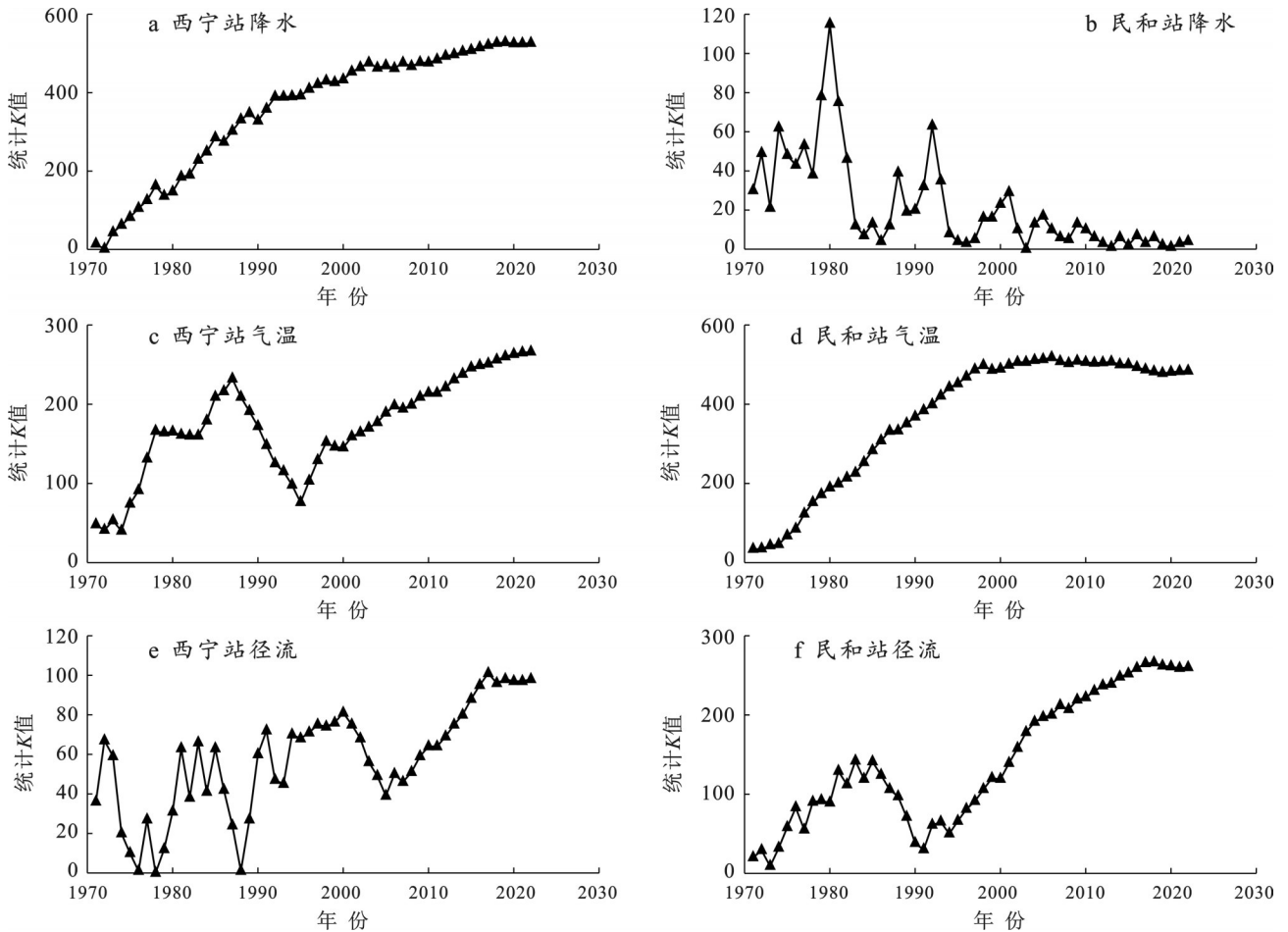


图 3 湟水河干流区水文气象要素 Pettitt 突变检验曲线

Fig.3 Pettitt change-point test curves of hydro-meteorological factors in main stream area of Huangshui River

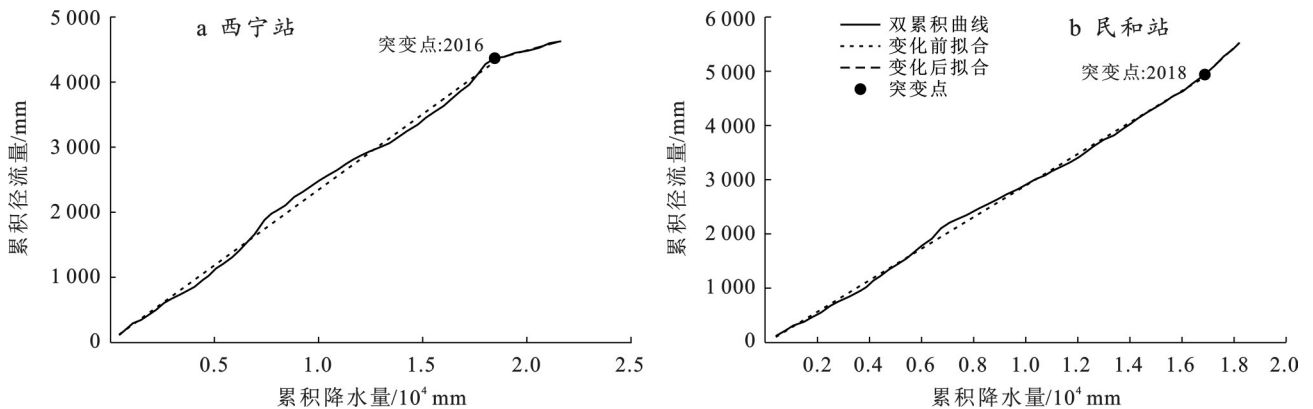


图 4 湟水河流域干流区降水量和径流深双累积曲线

Fig.4 Double mass curves of precipitation and runoff depth in main stream area of Huangshui River basin

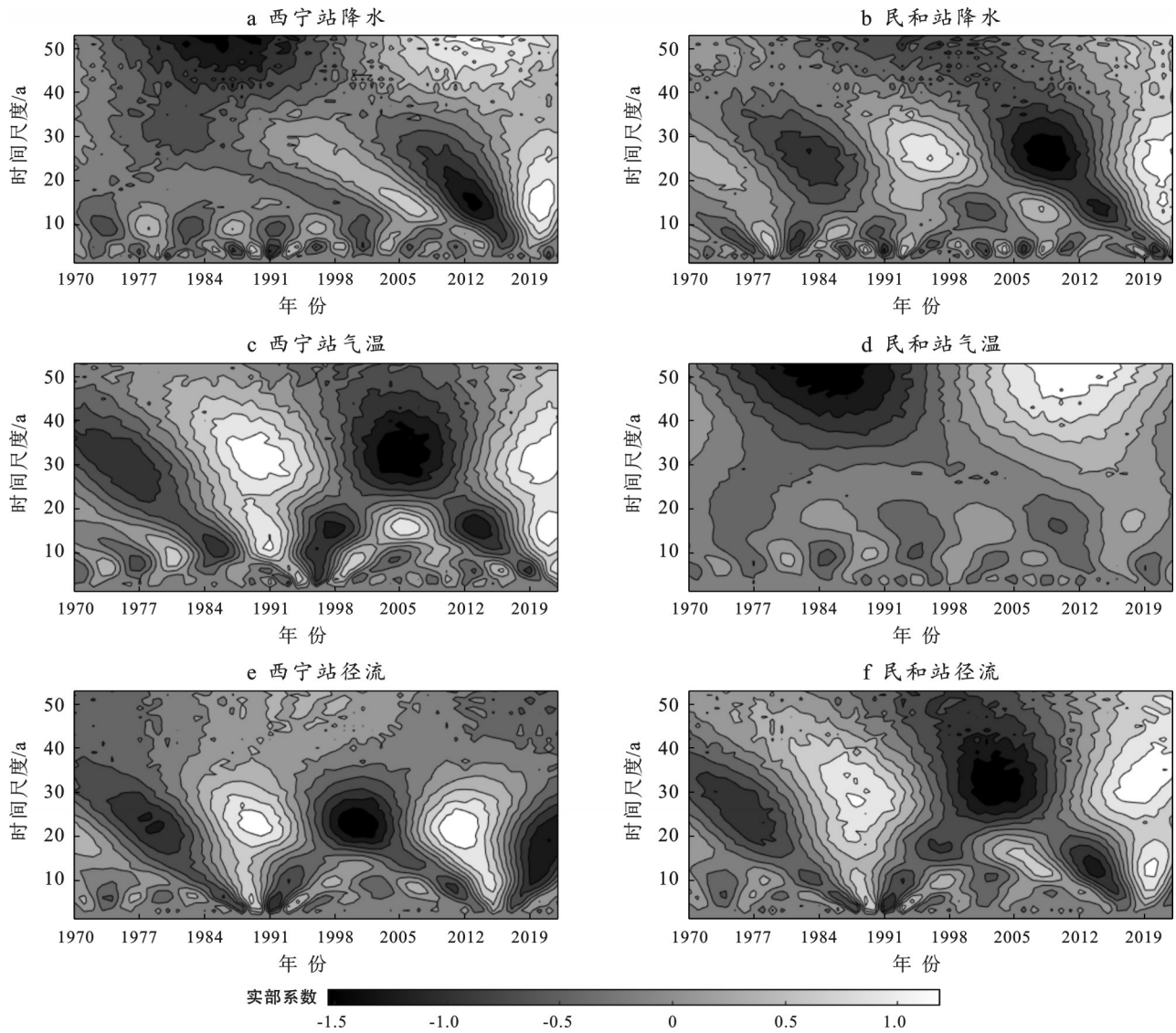


图5 湟水河流域干流区水文气象要素小波分析实部系数等值线图
 Fig.5 Contour maps of real part coefficients from wavelet analysis of hydro-meteorological factors in main stream area of Huangshui River basin

2.2 基于水文模型的日径流模拟

考虑到1990年前人类活动对流域自然水文过程影响较小,而1990年后经济社会快速发展显著增强了这种影响。本研究选用湟水干流区西宁站和民和站1990年之前的日流量实测数据(1970—1990年)进行模型参数率定。其中,将1970年设置为预热期,1971—1980年设为率定期,1981—1990年设为验证期。在率定期,以水文站观测的日流量序列为基准,通过参数迭代优化,使模拟日流量过程达到最优(目标为KGE趋近于1, R_a 趋近于0)。在验证期,使用固定参数进行模拟。模型参数率定结果详见表1。西宁站、民和站观测、模拟日流量过程线如图6所示。率定期(1971—1980年)和验证期(1981—1990年)的水文模型评估指标(表2)。流域KGE效率系数均大

于0.5,相对误差在25%以内,模拟值与观测值的变化过程基本一致,表明SIMHYD模型在湟水干流区表现较好,可用于进一步开展径流演变归因研究。

2.3 径流变化归因

依据径流序列突变点识别结果,并考虑不同时期驱动因素的可能差异,将研究期划分为基准期(1970—1990年)、影响期1(1991—2000年)、影响期2(2001—2010年)和影响期3(2011—2022年)。表3为影响期相对于基准期的多年平均径流量变化统计结果。分析表明,西宁站3个影响期相较于基准期均发生显著衰减,衰减程度较为一致。民和站影响期1和影响期2的多年平均径流量相较于基准期均发生显著衰减,影响期3多年平均径流量相较于基准期明显增加。

表 1 SIMHYD 模型参数率定结果
Table 1 Calibration results of SIMHYD model parameters

参数	取值范围	率定结果	
		西宁站	民和站
融雪因子(Kf)	0~10	1.33	0.48
积雪热状态因子(CTg)	0~1	0.65	0.66
植被截流储藏能力(INSC)	0.01~10 mm	0.10	0.01
流域最大入渗损失(COEFF)	0~500 mm	367.91	425.49
入渗损失指数(SQ)	0~10	9.98	5.05
土壤持水能力(SMSC)	0~1 000 mm	781.83	848.73
壤中流方程比例系数(SUB)	0~1	0.40	0.83
地下水方程比例系数(CARK)	0~1	0.94	0.98
基流系数(Base flow Coef.)	0~1	0.03	0.01
纳西瞬时单位线参数,反映流域调蓄能力(N)	1~15	1.00	1.00
纳西瞬时单位线参数相当于流域汇流时间(K)	1~5	1.84	5.00

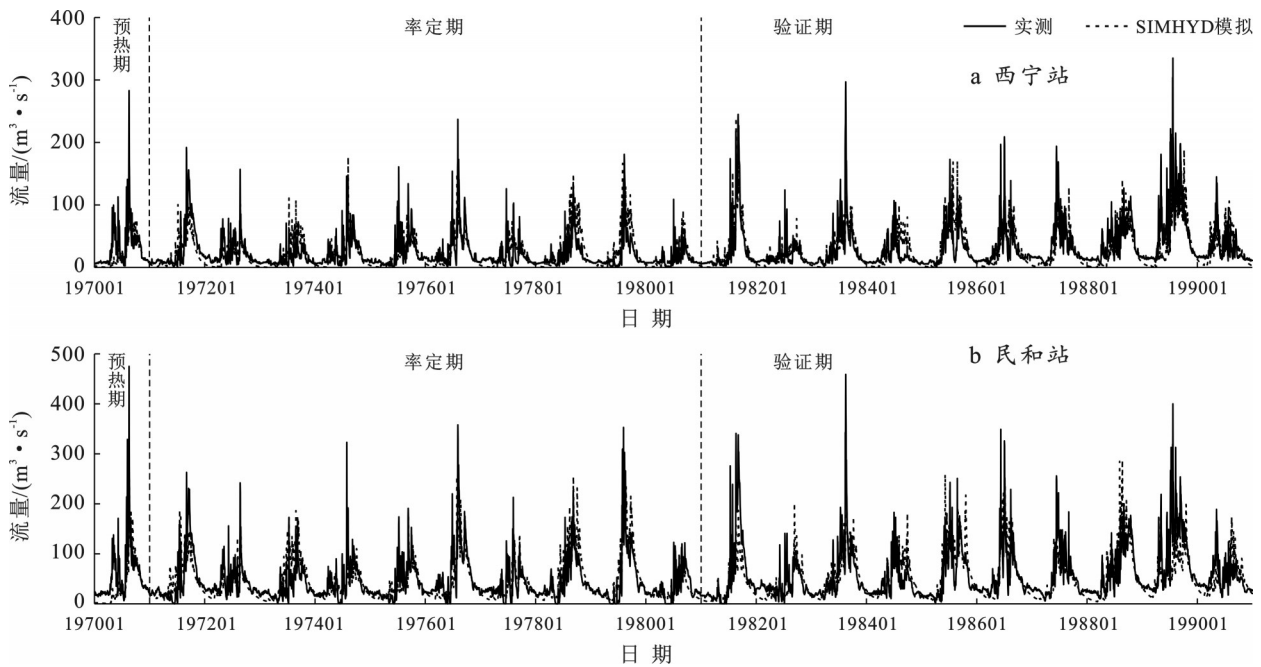


图 6 湟水河干流区日流量实测值与模拟结果对比图

Fig.6 Comparison between observed and simulated daily runoff in main stream area of Huangshui River

表 2 湟水河流域干流区水文模型评价结果
Table 2 Evaluation results of hydrological model in main stream area of Huangshui River basin

水文站	率定期 (1971—1980年)		验证期 (1981—1990年)	
	KGE	R_e /%	KGE	R_e /%
西宁站	0.73	1.5	0.71	9.2
民和站	0.77	2.7	0.72	6.3

注:KGE为Kling Gupta系数; R_e 为相对误差。

基于水文模型的径流演变归因量化方案,计算气候变化与人类活动对径流量变化的贡献率(表4),结果表明西宁站除影响期1人类活动的贡献率为32.0%外,其余时期气候变化和人类活动的贡献率均

超过50%,且气候变化和人类活动的贡献率均表现为:影响期3>影响期2>影响期1。1990—2000年气候变化对径流量变化的贡献率高于人类活动;2000年后,人类活动的影响占据主导。尽管降水增加对径流量增加产生正向效应,但人类活动(如取用水等)的强烈负向作用更为显著,最终导致径流量呈现下降趋势。以影响期2为例,降水量增加促使年径流量增加了约 $1.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ (贡献率为-98.43%),但人类活动却导致年径流量减少了约 $2.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ (贡献率达198.43%)。由于两者效应相反,人类活动的负效应远超气候带来的正效应,最终表现为年径流量减少了约 $1.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这表明该时期径流的减少是人类活动主导所致,其强度抵消了气候变化带

来的增益并进一步导致径流衰减。民和站除影响期 1 气候变化的贡献率为 32.8% 外, 其余时期气候变化和人类活动的贡献率均超过 50%。其中, 气候变化的贡献率表现为: 影响期 2 > 影响期 3 > 影响期 1, 人类活动的贡献率表现为: 影响期 3 > 影响期 2 > 影响

期 1。1990—2000 年民和站气候变化的贡献率小于人类活动的贡献率; 2000—2010 年气候变化的贡献率大于人类活动的贡献率; 2010 年以后, 人类活动的贡献率大于气候变化的贡献率, 说明此阶段人类活动的影响是径流量增加的主要因素。

表 3 湟水河流域干流区不同时期多年平均径流量统计

Table 3 Statistics of annual average runoff in different periods in main stream area of Huangshui River basin

研究期	西宁站			民和站		
	多年平均/ 10^8 m^3	变化量/ 10^8 m^3	比例/%	多年平均/ 10^8 m^3	变化量/ 10^8 m^3	比例/%
基准期	8.50			16.12		
影响期 1	7.49	-1.02	-11.95	13.38	-2.74	-16.99
影响期 2	7.45	-1.06	-12.41	14.59	-1.53	-9.48
影响期 3	7.47	-1.03	-12.09	19.15	3.03	18.77

表 4 湟水河流域干流区基于水文模拟的径流变化归因

Table 4 Attribution of runoff changes based on hydrological simulation in main stream area of Huangshui River basin

水文站	研究期	气候变化		人类活动	
		影响量/ 10^8 m^3	比例/%	影响量/ 10^8 m^3	比例/%
西宁站	影响期 1	-0.69	67.97	-0.33	32.03
	影响期 2	1.04	-98.43	-2.09	198.43
	影响期 3	2.35	-228.61	-3.38	328.61
民和站	影响期 1	-0.90	32.87	-1.84	67.13
	影响期 2	-3.61	236.37	2.08	-136.37
	影响期 3	-2.36	-77.96	5.39	177.96

2.3.1 气候要素变化及影响分析

表 5 为不同时期湟水河干流区多年平均气温和多年平均降水量的情况。图 7 为年降水量和年均气

温的年际变化情况, 与 M-K 趋势检验结果一致。西宁站各影响期多年平均降水量较基准期均呈增加趋势, 其中影响期 3 增幅最大, 达 101.42 mm, 气温则波动较小。民和站多年平均降水量变化不显著, 但多年平均气温持续上升, 影响期 3 增温达 1.52 °C。尽管西宁站降水量显著增加, 径流量并未相应增长, 表明气温升高可能加剧了蒸散发过程, 同时人类用水活动(如工农业与生活取水)对径流量的削减作用日益凸显。气温上升则通常加剧蒸散发, 减少土壤水分和径流有效补给。民和站在降水量变异较小而气温明显上升的背景下, 呈现径流量增加趋势, 进一步印证人类活动对径流变化的主导作用。需要指出的是, 尽管作为径流根本来源的降水和调控蒸散发的温度, 其任何变动均会直接影响流域水文过程, 但在高强度人类活动干扰下, 自然气候要素与径流之间的传统响应关系已被显著改变。

表 5 湟水河流域干流区不同研究期多年平均降水量和气温

Table 5 Annual average precipitation and temperature in different periods in main stream area of Huangshui River basin

水文站	西宁站		民和站		西宁站		民和站	
	多年平均 降水量/mm	变化量/ mm	多年平均 降水量/mm	变化量/ mm	多年平均 气温/°C	变化量/ °C	多年平均 气温/°C	变化量/ °C
基准期	368.56		336.63		6.07		7.79	
影响期 1	391.36	22.80	366.93	30.30	6.05	-0.02	8.17	0.38
影响期 2	435.51	66.95	328.41	-8.22	6.03	-0.04	8.88	1.08
影响期 3	469.98	101.42	348.99	12.36	6.49	0.41	9.31	1.52

2.3.2 人类活动变化及影响分析

湟水上游以牧业为主, 中、下游河谷以农业为主; 中游青海省西宁市和下游兰州市海石湾是重要工农业区。西宁市既是湟水流域经济发展的主要承载区, 也是水资源的主要消耗区。图 8 为 1990—2022 年湟水流域中游西宁地区国内生产总值(GDP)和人口的

演变过程。区域人口经济的快速增长大幅提升了工农业及生活用水需求, 加剧了水资源消耗, 致使径流量衰减。

此外, 水利工程的调节作用极大地改变了径流的天然时空分布。截至 2015 年底, 湟水干流区建有 91 处蓄水工程, 其中中型以上水库 4 座。从 20 世纪

50年代末至21世纪10年代末,湟水干流累积库容由仅 $7.30 \times 10^5 \text{ m}^3$ 大幅增长至 $4.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。水库蓄水及工农业供水行为显著改变了天然水文一致性,导致河道径流过程发生明显变异。比如,“引大济湟”工程2018年试通水后,将大通河较丰沛的水资源调入湟水干流,使下游民和站影响期3多年平均径流量在降水量没有明显变化的情况下,较基准期增加

$3.03 \times 10^8 \text{ m}^3$,致使下游民和站在影响期3(2011—2022年)的多年平均径流量,在降水量未显著变化的条件下,较基准期(1970—1990年)增加 $3.03 \times 10^8 \text{ m}^3$,证实了工程对径流时空再分配的调控强度。此外,流域内农业开发与城镇化等土地利用变化,也可能通过改变产汇流机制对径流过程产生影响,这也是后续研究中需要进一步量化分析的方向。

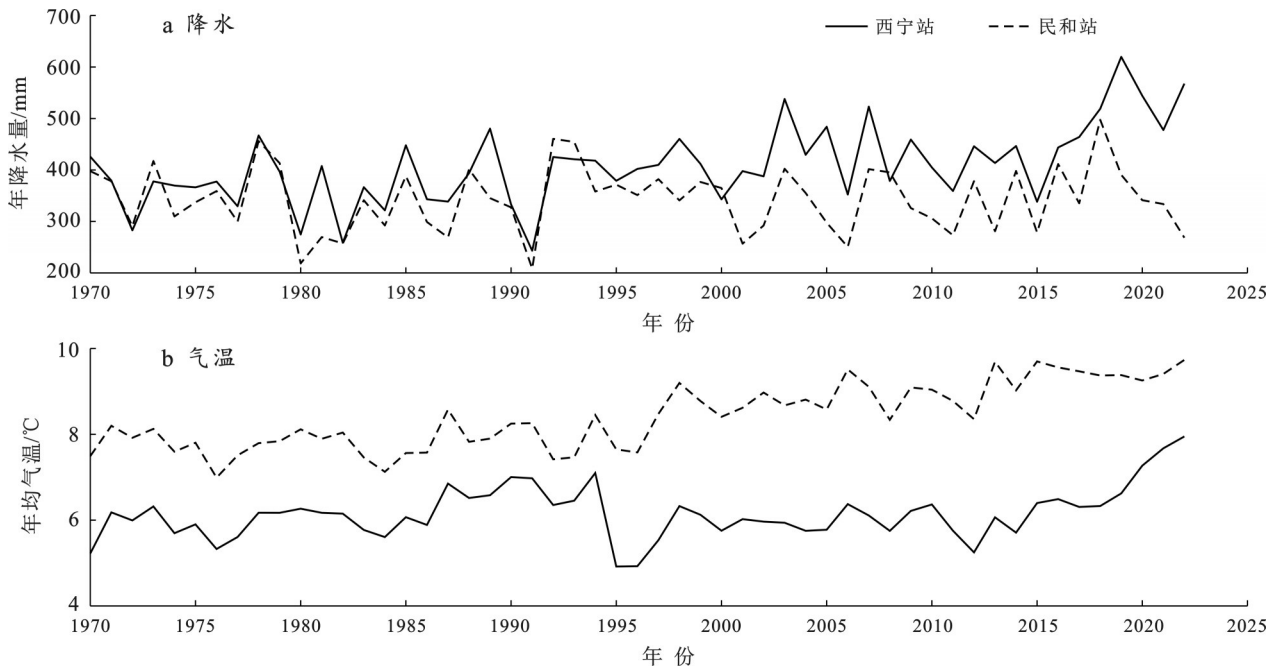


图7 湟水河干流区年降水量及年均气温年际变化

Fig.7 Interannual variability of annual precipitation and annual average temperature in main stream area of Huangshui River

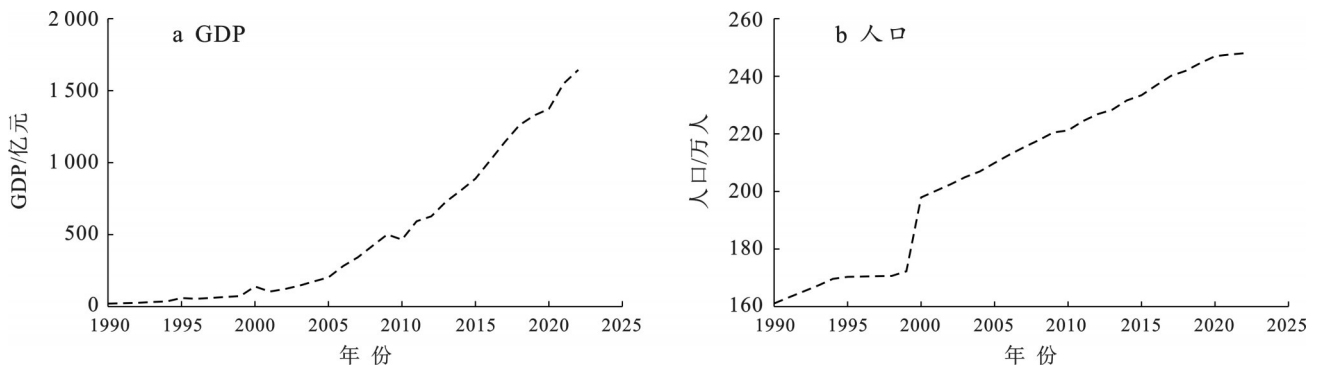


图8 西宁市GDP和人口历年变化情况

Fig.8 Annual changes of GDP and population in Xining City

3 结论

(1) 径流时序特征。西宁站年径流量在研究期内呈现阶段性波动特征,20世纪90年代初期表现为微弱上升趋势,2000—2010年转为衰减。2010年后再次回升,但整体变化趋势未通过显著性检验($p > 0.05$)。民和站径流量在1985年后出现短暂增加,21世纪初开始下降,2010年后又有所回升,同样未呈

现统计学上的显著趋势。基于径流量突变点识别结果及降雨径流关系的突变识别结果,将1970—2022年研究期划分为基准期(1970—1990年)、影响期1(1991—2000年)、影响期2(2001—2010年)和影响期3(2011—2022年)。

(2) 驱动因素贡献率。SIMHYD模型在湟水流域干流区具有较好的适用性,基于SIMHYD的径流演变归因量化分析结果表明:影响期1,影响期2和影

响期3西宁站多年平均径流量相较于基准期分别减少了11.95%, 12.41%和12.09%, 人类活动的贡献率分别为32.03%, 198.43%, 328.61%。民和站影响期1, 影响期2的多年平均径流量分别减少了16.99%, 9.48%, 影响期3增加了18.77%, 人类活动的贡献率分别为67.13%, -136.37%, 177.96%。这表明人类活动是径流变化的主要驱动因素, 其中经济社会取用水和水利工程建设对径流过程产生了显著影响。湟水流域干流区径流变化同时受自然波动与人类活动的双重作用, 且近30 a来人类活动已成为径流变化趋势的主导因子。因此, 在未来水资源可持续管理中, 需统筹考虑气候变化与人类用水行为的长期效应。

参考文献 (References)

- [1] Wang Pengquan, Li Runjie, Cao Shengkui. Attribution discernment of climate change and human interventions to runoff decline in Huangshui River basin, China [J]. *Hydrology Research*, 2024, 55(3): 301-318.
- [2] Huntington T G. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 319(1/2/3/4): 83-95.
- [3] Ma Zhenmei, Kang Shaozhong, Zhang Lu, et al. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(3/4): 239-249.
- [4] Xu Jiongxin. Variation in annual runoff of the Wudinghe River as influenced by climate change and human activity [J]. *Quaternary International*, 2011, 244(2): 230-237.
- [5] 李二辉, 穆兴民, 赵广举. 1919—2010年黄河上中游区径流量变化分析 [J]. *水科学进展*, 2014, 25(2): 155-163.
Li Erhui, Mu Xingmin, Zhao Guangju. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919—2010 [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 155-163.
- [6] Xu Xiangyu, Yang Dawen, Yang Hanbo, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 510: 530-540.
- [7] Wu Jingwen, Miao Chiyuan, Wang Yamei, et al. Contribution analysis of the long-term changes in seasonal runoff on the Loess Plateau, China, using eight Budyko-based methods [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 545: 263-275.
- [8] 张调风, 朱西德, 王永剑, 等. 气候变化和人类活动对湟水河流域径流量影响的定量评估 [J]. *资源科学*, 2014, 36(11): 2256-2262.
Zhang Tiaofeng, Zhu Xide, Wang Yongjian, et al. The impact of climate variability and human activity on runoff changes in the Huangshui River basin [J]. *Resources Science*, 2014, 36(11): 2256-2262.
- [9] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题 [J]. *水文*, 2010, 30(4): 47-51.
Mu Xingmin, Zhang Xiuqin, Gao Peng, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology [J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(4): 47-51.
- [10] Yuan Zhe, Yan Denghua, Yang Zhiyong, et al. Attribution assessment and projection of natural runoff change in the Yellow River basin of China [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2018, 23(1): 27-49.
- [11] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45(10): 1024-1034.
Yang Dawen, Zhang Shulei, Xu Xiangyu. Attribution analysis for runoff decline in Yellow River basin during past fifty years based on Budyko hypothesis [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2015, 45(10): 1024-1034.
- [12] Qi Wenyan, Chen Jie, Li Lu, et al. Regionalization of catchment hydrological model parameters for global water resources simulations [J]. *Hydrology Research*, 2022, 53(3): 441-466.
- [13] 许崇育, 陈华, 郭生练. 变化环境下水文模拟的几个关键问题和挑战 [J]. *水资源研究*, 2013, 2(2): 85-95.
Xu Chongyu, Chen Hua, Guo Shenglian. Hydrological modeling in a changing environment: Issues and challenges [J]. *Journal of Water Resources Research*, 2013, 2(2): 85-95.
- [14] 刘酌希, 陈鑫, 管晓祥, 等. 变化环境下洮河流域径流变化归因 [J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 87-92.
Liu Zhuoxi, Chen Xin, Guan Xiaoxiang, et al. Attribution of runoff change in the Taohe River basin under a changing environment [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5): 87-92.
- [15] 蔺彬彬, 祝雪萍, 张亚琼, 等. 变化环境下山西省典型流域径流演变及归因分析 [J]. *人民黄河*, 2025, 47(3): 30-36.
Lin Binbin, Zhu Xueping, Zhang Yaqiong, et al. Runoff evolution and attribution of typical watersheds in Shanxi Province under changing environment [J]. *Yellow River*, 2025, 47(3): 30-36.
- [16] 汪清旭, 时璐, 董胜虎. 近20年湟水流域地表水资源量及用水量变化规律与成因分析 [J]. *水利技术监督*, 2021, 29(2): 104-109.
Wang Qingxu, Shi Lu, Dong Shenghu. The change law and causes analysis of surface water resources and water consumption in Huangshui River basin in recent 20 years [J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2021, 29(2): 104-109.
- [17] 陈朝良, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于RUSLE模型的湟水

- 流域土壤侵蚀时空变化[J].水土保持学报,2021,35(4):73-79.
- Chen Chaoliang, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Spatial-temporal change of soil erosion in Huangshui watershed based on RUSLE model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(4):73-79.
- [18] 张艳娇,高小红,李其江,等.气候变化情景下青海湟水流域径流变化的 HIMS 模拟分析[J].地理科学进展,2013,32(1):59-67.
- Zhang Yanjiao, Gao Xiaohong, Li Qijiang, et al. Runoff simulation of climate change scenarios based on HIMS model in the Huangshui River basin [J]. Progress in Geography, 2013,32(1):59-67.
- [19] 俞文政,王珉焱,魏柱灯,等.湟水流域极端径流对极端气候的响应[J].地球科学进展,2024,39(12):1272-1284.
- Yu Wenzheng, Wang Minyan, Wei Zhudeng, et al. Extreme runoff and its response to extreme climate in the Huangshui River basin [J]. Advances in Earth Science, 2024,39(12):1272-1284.
- [20] 王亚军,周陈超,贾绍凤,等.基于 SWAT 模型的湟水流域径流模拟与评价[J].水土保持研究,2007,14(6):428-432.
- Wang Yajun, Zhou Chenchao, Jia Shaofeng, et al. Simulation and assessment of natural runoff in Huangshui River basin based on SWAT [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007,14(6):428-432.
- [21] 宿策.湟水流域径流演变规律与预测方法研究[D].青海 西宁:青海大学,2018.
- Su Ce. Study on the evolution of runoff and prediction method of Huangshui River basin [D]. Xining, Qinghai: Qinghai University, 2018.
- [22] 祁文燕,钱鞠,葛雷,等.湟水干流近 60 年径流变化特征分析[J].水资源与水工程学报,2018,29(3):45-49.
- Qi Wenyan, Qian Ju, Ge Lei, et al. Runoff variation analysis on main stream of Huangshui River in recent 60 years [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018,29(3):45-49.
- [23] 刘昌明,王恺文,王冠,等.1956—2016 年黄河流域径流及其影响因素的变化分析[J].人民黄河,2022,44(9):1-5.
- Liu Changming, Wang Kaiwen, Wang Guan, et al. Analyzing the changes of streamflow and associated influencing factors in the Yellow River basin from 1956 to 2016 [J]. Yellow River, 2022,44(9):1-5.
- [24] 马俊清,胡锴星,方祖堃.1956—2020 年湟水流域水沙情势变化定量评估及归因[J].水电能源科学,2025,43(1):43-46.
- Ma Junqing, Hu Kaixing, Fang Zukun. Quantitative assessment and attribution of streamflow and sediment regimes alteration in the Huangshui basin from 1956 to 2020 [J]. Water Resources and Power, 2025,43(1):43-46.
- [25] 杜嘉妮,蔡宜晴,刘希胜,等.基于 Budyko 假设的湟水径流变化归因识别[J].中国农村水利水电,2022(7):116-121.
- Du Jiani, Cai Yiqing, Liu Xisheng, et al. Attribution analysis of runoff in the Huangshui River based on the budyko hypothesis [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(7):116-121.
- [26] Zhang Qiang, Xu Chongyu, Tao Hui, et al. Climate changes and their impacts on water resources in the arid regions: A case study of the Tarim River basin, China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2010,24(3):349-358.
- [27] 胡彩虹,王艺璇,管新建,等.基于双累积曲线法的径流变化成因分析[J].水资源研究,2012,1(4):204-210.
- Hu Caihong, Wang Yixuan, Guan Xinjian, et al. The causes of runoff variation based on double cumulative curve analysis method [J]. Journal of Water Resources Research, 2012,1(4):204-210.
- [28] 刘笑彤,蔡运龙.基于小波分析的径流特性和影响因素多尺度分析:以通天河为例[J].北京大学学报(自然科学版),2014,50(3):549-556.
- Liu Xiaotong, Cai Yunlong. Research of runoff's feature and impact factors in multiple dimensions based on wavelet analysis: A case study on Tongtian River [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014,50(3):549-556.
- [29] 王文圣,丁晶,向红莲.水文时间序列多时间尺度分析的小波变换法[J].四川大学学报(工程科学版),2002,34(6):14-17.
- Wang Wensheng, Ding Jing, Xiang Honglian. Multiple time scales analysis of hydrological time series with wavelet transform [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2002,34(6):14-17.
- [30] Chiew F H, Peel M C, Western A W. Application and Testing of the Simple Rainfall-runoff Model SIMHYD [M]// Singh and Frevert (Eds): Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications, 2002.
- [31] 楼骏,崔激.改进的 SIMHYD 模型在黄河源区高寒气候的适应性研究[J].水电能源科学,2021,39(10):27-30.
- Lou Jun, Cui Wei. Study on adaptability of improved SIMHYD model in alpine climate region [J]. Water Resources and Power, 2021,39(10):27-30.
- [32] Gupta H V, Kling H, Yilmaz K K, et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling [J]. Journal of Hydrology, 2009,377(1/2):80-91.
- [33] Vis M, Knight R, Pool S, et al. Model calibration criteria for estimating ecological flow characteristics [J]. Water, 2015,7(5):2358-2381.