

基于IHA-RVA法的洮河流域水文情势变异研究

王毓森^{1,2}, 仲复捷²

(1. 甘肃省水文水资源中心, 兰州, 730000; 2. 甘肃省临洮水文水资源勘测中心, 甘肃 临洮 730500)

摘要: [目的] 探究气候变化与人类活动双重胁迫下河流水文情势的变异特征及驱动机制, 为寒旱区河流生态流量的动态管控提供科学依据, 进而支撑干旱区水资源韧性系统的构建。[方法] 以甘肃省洮河流域为研究区, 基于下巴沟站、岷县站、李家村站的1964—2023年逐日实测径流量数据, 采用M-K检验、累积距平法和生态水文指标变化范围法(IHA-RVA), 系统评价洮河流域水文情势改变程度。[结果] 洮河流域年均径流量以 $0.0691 \sim 0.2518$ 亿 m^3/a 减少, 相对上游, 下游变化更明显, 3个代表站径流量均于1986年发生显著性突变。突变后, 下游李家村站受梯级水库调蓄与灌区取水等影响, 夏季径流减少37.27%; 中上游岷县站和下巴沟站9月径流量锐减超40%, 而冬春季径流量无明显衰减。下巴沟站、岷县站和李家村站整体水文改变度分别为44%, 46%和40%(均属于中度改变), 极端流量事件频次下降(年最大7d流量分别削减57%, 35%和14%)、低流量历时增加(上游改变度最高, 为46%)及逆转次数显著增多(中下游改变度均为78%)。[结论] 1964—2023年洮河流域年均径流量整体呈显著减少趋势, 且1986年水文突变后, 该流域整体水文情势改变度为中等偏下, 生态环境处于良好状态。

关键词: 洮河流域; IHA-RVA法; 径流量突变; 水文改变度

中图分类号: TV121; P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0168-11

Study on hydrological regime variations in Taohe River Basin based on IHA-RVA method

Wang Yusen^{1,2}, Zhong Fujie²

(1. Gansu Provincial Hydrology and Water Resources Center, Lanzhou 730000, China;

2. Lintao Hydrological and Water Resources Survey Center of Gansu Province, Lintao, Gansu 730500, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the variation characteristics and driving mechanisms of river hydrological regimes under the dual pressures of climate change and human activities, providing a scientific basis for the dynamic management of ecological flow in rivers within cold and arid regions, and thereby supporting the construction of resilient water resource systems in arid regions. [Methods] The Taohe River Basin in Gansu Province was selected as the study area. Based on the daily measured runoff data from 1964 to 2023 at Xiabagou, Minxian, and Lijiacun stations, this study employed the M-K test, cumulative anomaly method, and indicators of hydrologic alteration-range of variability approach (IHA-RVA) to systematically evaluate the degree of hydrological alteration in the Taohe River Basin. [Results] The annual average runoff in the Taohe River Basin decreased at a rate of 6.91×10^6 to 2.518×10^7 m^3/a . The changes were more pronounced in the downstream compared to the upstream. The runoff at all three representative stations underwent significant abrupt changes in 1986. After the abrupt change, the runoff at the downstream Lijiacun station decreased by 37.27% in summer, influenced by the regulation and storage of cascade reservoirs and water withdrawal from irrigation areas. At the

收稿日期: 2025-07-27

修回日期: 2025-08-13

接受日期: 2025-09-08

资助项目: 甘肃省水利科学试验研究及技术推广计划(24GSLK039); 甘肃省水利科学试验研究及技术推广计划(24GSLK028)

第一作者: 王毓森(1981—), 男, 甘肃兰州人, 正高级工程师, 主要从事水文水资源勘测研究评价。E-mail: 1052593068@qq.com

通信作者: 仲复捷(1975—), 男, 甘肃临洮人, 高级工程师, 主要从事水文水资源勘测研究评价。E-mail: 827392969@qq.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

midstream and upstream Minxian and Xiabagou stations, the runoff in September dropped sharply by more than 40%, while no significant decline was observed in winter and spring runoff. The overall degrees of hydrological alteration at Xiabagou, Minxian, and Lijiacun stations were 44%, 46%, and 40%, respectively (all classified as moderate alteration). This was specifically manifested as a decrease in the frequency of extreme flow events (the annual maximum 7-day flow was reduced by 57%, 35%, and 14%, respectively), an increase in low-flow duration (the degree of alteration was the highest in the upstream, reaching 46%), and a significant increase in the number of flow reversals (the degree of alteration was 78% in the midstream and downstream). [Conclusion] From 1964 to 2023, the annual average runoff in the Taohe River Basin showed a significant decreasing trend. Following the hydrological abrupt change in 1986, the overall degree of hydrological alteration in this basin is moderate to low, and the ecological environment remains in a good state.

Keywords: Taohe River Basin; IHA-RVA method; abrupt change in runoff; degree of hydrological alteration

全球气候不稳定变化与高强度人类活动正深刻改变流域水文循环过程,并引发河流水文情势的时空变异,进而威胁水资源安全与水生态健康^[1]。已有报告指出,近50年全球地表温度升高速率较工业化前提高1.1℃,加速了冰川消融与降水格局重构,导致极端水文事件频发^{[2]-[3]}。同时,水利工程调蓄、农业灌溉扩张等人类活动正在进一步加剧天然径流的非稳态特征^[4]。洮河流域作为黄河上游第二大支流、青藏高原向黄土高原过渡的关键生态屏障,其径流动态直接影响黄河中下游水资源配置与生态屏障功能^[5]。揭示其水文节律演变规律及驱动因子,对协调流域生产-生态用水矛盾、保障水系统韧性具有实践指导和科学意义。

近年来,水文情势变异研究应用IHA-RVA法(Indicators of Hydrologic Alteration-Range of Variability Approach)分析最为广泛,该方法通过32项水文指标量化径流量在不同时间尺度(如月、季、年)的特征,并基于历史数据构建水文指标的自然变化范围,从而识别人类活动或气候变化对水文情势的干扰程度,已被应用于河流生态需水评估和人类活动对径流过程的影响效应解析等方面^[6]。如LIU等^[7]通过该方法与Tennant法等生态流量计算方法结合,分析了湟水河流域的水文条件变化,并评估了大通河和湟水河的生态流量保证率。CHEN等^[8]将IHA-RVA法与FDC生态水文指标相结合,对乌江流域水文进行评价,并分析计算了人类活动和气候变化对径流的影响。Yang等^[9]首先采用IHA-RVA法筛选出代表每条河流不同时期的敏感指标,确定研究区水文变化期,再通过构建“土壤-植物-大气”之间的水和能量转移(WetSpa)模型,定量确定气候变化和不同人类活动对流域径流的影响。Wang等^[10]采用该方法和生态指标法定量评估1960—2020年黄河流域水文变化程度和生态响应过程,以及降水、下垫面等

驱动因素对黄河径流变化的相对贡献。

目前,众多研究主要聚焦长江、黄河等流域水库建设、灌溉取水等人类活动对径流过程的影响,且主要关注寒旱区河流径流趋势预测,针对洮河流域多个水文特点的整体分析和水文情势多维(量、时序、频率、历时及变率)特征的系统评价研究较缺乏^[11]。因此,本研究基于累积距平法、M-K检验法和IHA-RVA法对1964年以来洮河流域的下巴沟站、岷县站和李家村站的径流量变化趋势、水文情势突变等展开系统评估,以揭示极端水文事件的演变规律,为洮河流域等寒旱区河流生态流量的动态管控提供科学依据,进而支撑干旱区水资源韧性系统的构建。

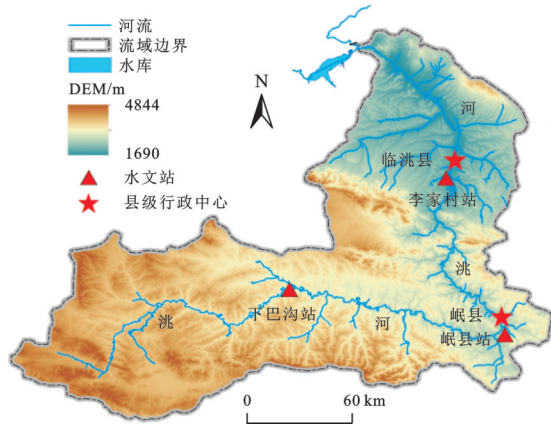
1 材料与方法

1.1 研究区概况

洮河流域处于青藏高原东北缘与黄土高原西部过渡带,位于101°36′—104°20′E,34°03′—36°07′N,洮河干流长约673 km,流域面积约2.55万 km²(图1)。多年平均降水量500~600 mm,夏季6—8月降水集中,占全年的60%~70%;平均蒸发1 200~1 400 mm,水面蒸发强烈;降雨是径流形成的主要因素,多年平均径流量49.2亿 m³^[12]。整个流域为150万人口供水,灌溉耕地面积超过20万 hm²,保障70%左右工农业用水,且全流域已建成海甸峡、莲麓、九甸峡水电站等十余座装机超50 MW的梯级中、小型水电站^[13]。

1.2 数据来源

本研究使用洮河流域控制型水文站下巴沟站、岷县站和李家村站作为代表水文站,基于代表站1964—2023年实测逐日径流数据,对洮河流域水文节律变化特征进行分析。研究中涉及的数据由甘肃省下巴沟水文站、岷县水文站和李家村水文站的水文水资源勘测中心提供。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2022)4305号的标准地图制作,底图未做修改

图 1 洮河流域控制型水文站概况

Fig. 1 Overview of control-type hydrological stations in Taohe River Basin

1.3 研究方法

1.3.1 Mann-Kendall 检验法和累计距平法

(1) Mann-Kendall 检验法。M-K 法是一种基于数据秩次的非参数统计检验方法,该方法对数据分布无要求,适用于非正态数据,且有抗干扰能力强、受异常值影响小的特点,被广泛用于水文时间序列趋势变化检验。对于时间序列的变量 (x_1, x_2, \dots, x_n) , $n(n \geq 10)$ 为时间序列长度, M-K 法的具体计算步骤如下^[14]。

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

式中: S_n 为秩序列,反映序列中“后项大于前项”的样本对数量; $i, j=1, 2, \dots, n$; x_i 和 x_j 分别为 i, j 时刻对应的样本值。

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & x_i - x_j > 0 \\ 0 & x_i - x_j = 0 \\ -1 & x_i - x_j < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$UF_k = \frac{[S_n - E(S_k)]}{[\text{var}(S_k)]^{1/2}} \quad (3)$$

$$UF_k = -UB_k \quad (4)$$

式中: UF_k 为正向序列统计量; UB_k 为反向序列统计量; $k=2, 3, \dots, n$; $E(S_k)$ 为均值; $\text{var}(S_k)$ 为方差。

$$E(S_k) = k(k-1)/4 \quad (5)$$

$$\text{var}(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad (6)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S_n - 1}{\sqrt{\text{var}(S_n)}} & S_n > 0 \\ 0 & S_n = 0 \\ \frac{S_n + 1}{\sqrt{\text{var}(S_n)}} & S_n < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: Z 为标准化检验统计量。

(2) 累计距平法。累计距平法通过计算水文数据与多年均值的距平值并累积,以累积曲线直观展示变化趋势与突变点,曲线上升或下降反映数据与均值关系,斜率变化暗示突变,为水文情势变异分析提供线索。序列 x 在 j 时刻的累计距平 \hat{x}_j 的具体计算步骤如下^[15]。

$$\hat{x}_j = \sum_{i=1}^j (x_i - \bar{x}) \quad (8)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (9)$$

式中: x_j 为第 j 时刻的值; \bar{x} 为序列的算术平均值。

1.3.2 IHA-RVA 法 变化范围法(Range of Variability Approach, RVA)是 Richter 等^[16]基于 32 个水文改变指标(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)对河流水文情势的变化进行评估的方法,该方法中 IHA 指标被分为流量年内变化情况、极端水文事件发生的时间、历时、频率和变化率共 5 类,以定量分析人类活动在流域水文环境变化过程中的影响程度^[17]。由于本研究涉及的 3 个控制型水文站(下巴沟、岷县和李家村)在 1964—2023 年未出现日流量指标为零的情况,因此本文不考虑零流量天数的指标, IHA 参数指标见表 1。

表 1 IHA 参数指标

Table 1 IHA parameter indicators

组别(IHA 参数)	指标内容
第一组	每月流量的平均值
第二组	年极端水文状况:年最大(小)1 d, 3 d, 7 d, 30 d, 90 d 流量,基流指数
第三组	年极端水文事件发生时间:年最大(小)流量发生时间
第四组	高低流量脉冲时间及历时:年高(低)脉冲次数以及脉冲持续时间的均值
第五组	流量变化改变率及频率:日流量上升(下降)率中位数,每年流量逆转次数

(1) 对上述 5 类参数进行单个指标的改变化度计算,其计算公式如下:

$$D_i = \left| \frac{N_i - N_e}{N_e} \right| \times 100\% \quad (10)$$

式中: D_i 为第 i 个 IHA 指标的改变化度; N_i 为第 i 个 IHA 指标落入 RVA 目标范围内(阈值)的实际观测年数; N_e 为第 i 个 IHA 指标落入 RVA 目标范围内(阈值)的预测年数; N_e 的计算公式如下:

$$N_e = rN_T \quad (11)$$

式中: r 为水文变异前IHA落入RVA阈值内的比例,也称比例系数,常取0.5; N_T 为水文变异受影响后的总年数。

(2)对上述5类参数进行综合指标的改变度计算,其计算公式如下:

$$D_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{32} D_i^2} \quad (12)$$

式中: D_0 为整个流域的整体改变度,当 D_0 介于0~33%时,属于低度改变或未改变;当 D_0 介于33%~67%时,属于中度改变;当 D_0 介于67%~100%时,属于高度改变^[18]。

2 结果与分析

2.1 洮河流域年均径流量变化特征

2.1.1 年均径流量趋势性检验 采用M-K趋势检验

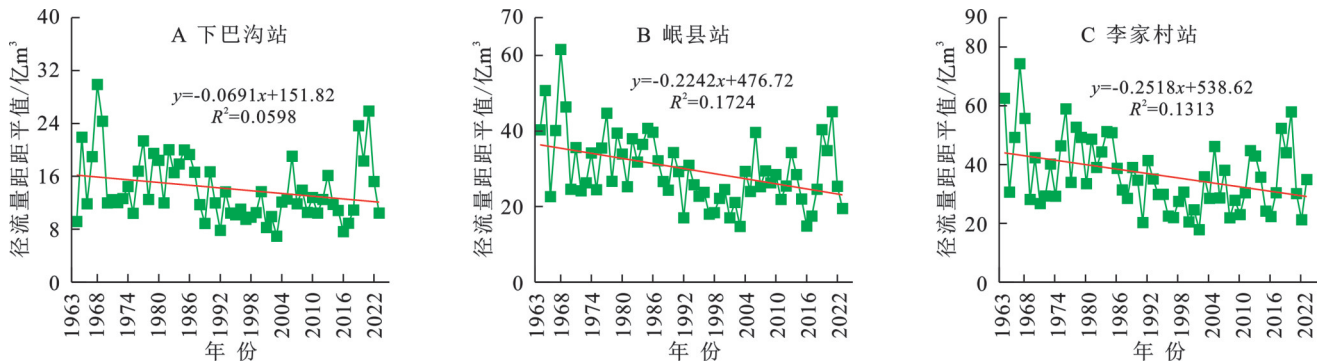


图2 代表站年均径流量变化趋势

Fig. 2 Variation trends of annual average runoff at representative stations

2.1.2 年均径流量突变性检验 图3和图4分别为运用累积距平法和Mann-Kendall检验法对洮河流域3个控制型水文站1964—2023年的年均径流量进行突变检验。由图3可知,3个水文站年均径流量累积距平曲线

均在1986年出现最大峰值,此时年均径流量发生突变;经M-K突变检验计算获得UF和UB统计值的曲线同样在1986年处发生交叉点。因此,通过两种方法计算确定洮河流域年均径流量理论突变年份为1986年。

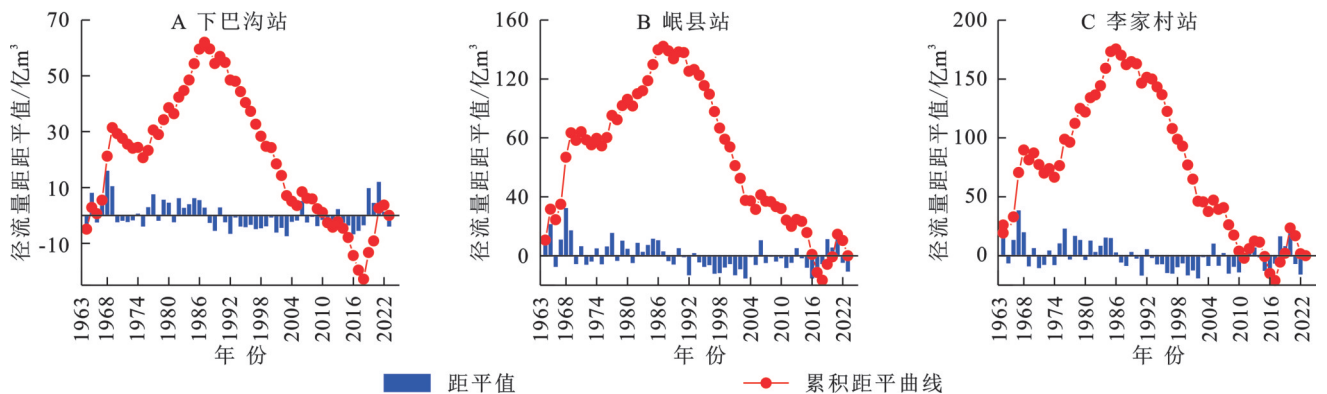


图3 代表站年均径流量累积距平

Fig. 3 Cumulative anomaly of annual average runoff at representative stations

2.2 洮河流域水文突变前后水文改变度

综合突变性检验结果,以1986年为分界点,将代表站长序列日尺度径流数据划分为1964—1986年(天然基准期)与1987—2023年(扰动变异期)两个时

段。采用水文学变异性阈值界定方法,以天然基准期各IHA指标序列的均值±标准差或者以频率75%和25%表征生态水文目标的阈值域边界,据此解译3个代表站突变前后月均径流动态特征及RVA目标区

间^[20]。基于 IHA-RVA 耦合模型定量表征洮河流域 3 个代表水文站水文情势变异程度,具体计算结果见表 2。由表可知,洮河流域下巴沟站、岷县站和李家村站

径流突变前后 IHA 指标水文改变度以中、低度为主,仅最小值流量、年均 1 d 最大径流量和年均 3 d 最大径流量等 IHA 指标出现高度改变,具体分析如下。

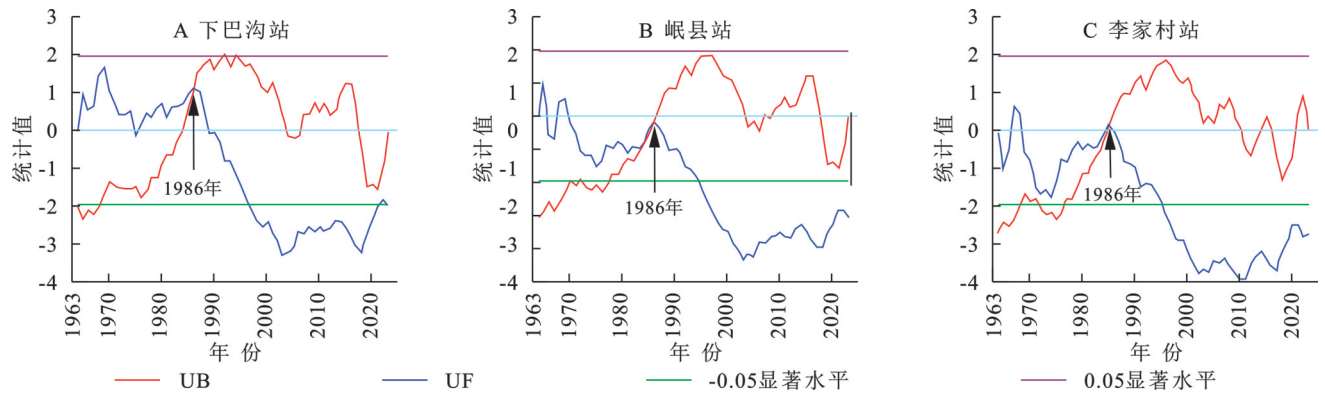


图 4 代表站年均径流量 M-K 突变检验曲线

Fig. 4 M-K abrupt change test curves of annual average runoff at representative stations

表 2 代表站突变前后 IHA 指标水文改变度

Table 2 Degree of hydrological alteration of IHA indicators before and after abrupt change at representative stations

IHA 指标		下巴沟水文站 水文改变度/%	岷县水文站 水文改变度/%	李家村水文站 水文改变度/%
第一组 (各月径流量)/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	1月	-30(L)	-19(L)	-14(L)
	2月	-35(M)	-41(M)	35(M)
	3月	-3(L)	-30(L)	-3(L)
	4月	-24(L)	-19(L)	24(L)
	5月	14(L)	19(L)	24(L)
	6月	-14(L)	-14(L)	3(L)
	7月	41(M)	8(L)	-24(L)
	8月	51(M)	46(M)	14(L)
	9月	30(L)	8(L)	-3(L)
	10月	-3(L)	-14(L)	-46(M)
	11月	-14(L)	-8(L)	-19(L)
	12月	-19(L)	-35(M)	-46(M)
第二组 (年极端水文状况)/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	年均 1 d 最小	-8(L)	8(L)	-68(H)
	年均 3 d 最小	-46(M)	-30(L)	-51(M)
	年均 7 d 最小	-51(M)	-30(L)	-30(L)
	年均 30 d 最小	-57(M)	-51(M)	-41(M)
	年均 90 d 最小	-35(M)	-41(M)	-30(L)
	年均 1 d 最大	73(H)	100(H)	-8(L)
	年均 3 d 最大	73(H)	78(H)	-8(L)
	年均 7 d 最大	57(M)	35(M)	-14(L)
	年均 30 d 最大	51(M)	19(L)	-3(L)
年均 90 d 最大	19(L)	-3(L)	-19(L)	
第三组	基流指数	68(H)	51(M)	51(M)
	年最小值出现时间/d	14(L)	30(L)	51(M)
	年最大值出现时间/d	41(M)	-24(L)	-14(L)
第四组	低流量次数/次	-46(M)	24(L)	-14(L)
	低流量历时/d	68(H)	89(H)	-78(H)
	高流量次数/次	41(M)	35(M)	-46(M)
第五组	高流量历时/d	95(H)	95(H)	-51(M)
	上升率/ $(m^3 \cdot s^{-1} \cdot d^{-1})$	24(L)	3(L)	-3(L)
	下降率/ $(m^3 \cdot s^{-1} \cdot d^{-1})$	-8(L)	-24(L)	3(L)
	逆转次数/次	-41(M)	-78(H)	-78(H)

注:H表示水文改变度为高度改变;M表示水文改变度为中度改变;L表示水文改变度为低度改变。下表同。

2.2.1 月均值流量变化 图 5 为突变前后代表站月均值径流量比较及差值图。由图可知,突变后 3 个代表站的年内各月径流量均值均较突变前有不同程度减少。整体来看,洮河流域中上游突变前后径流量

减少量在秋季(9月)最明显,冬春季(12—翌年4月)几乎无影响,而下游李家村站突变后夏季(6月)径流量减少量最明显,秋冬季径流量减少量最小(12—翌年1月)。

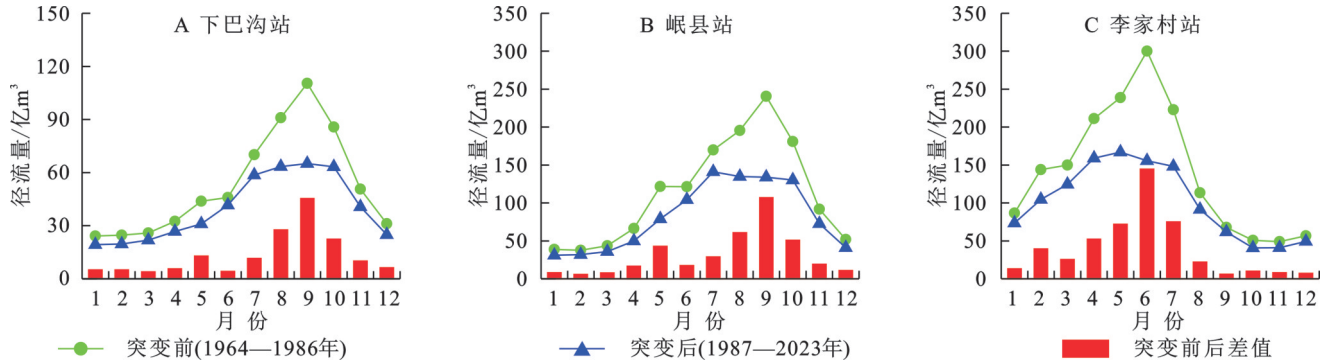


图 5 突变前后代表站月均值径流量比较及差值

Fig. 5 Comparison and difference of monthly average runoff at representative stations before and after abrupt change

2.2.2 年极值流量变化 图 6,7 分别为洮河流域 3 个代表站径流量整体变化较显著的最小、最大径流量变化图。由图 6 可知,3 个代表站年均 30 d 最小径流量在水文突变的影响下,呈明显的下降趋势,且绝大部分介于 RVA 阈值之间,这表明水文突变使得洮河流域枯水期径流量在 RVA 阈值范围内稳定减少。

大径流量的波动幅度在突变后明显缩紧,同时径流量也在减小,表明洮河流域水文突变使得极端流量事件趋于稳定。这可能是由于整个流域水资源管理制度逐步完善、蓄调水工程建设,以及农业等主要用水部门在水资源节约方面意识增强综合调控产生的结果。上述结果与洮河流域径流量整体呈显著减少趋势的结果相吻合。

由图 7 可知,洮河流域 3 个代表站的年均 7 d 最

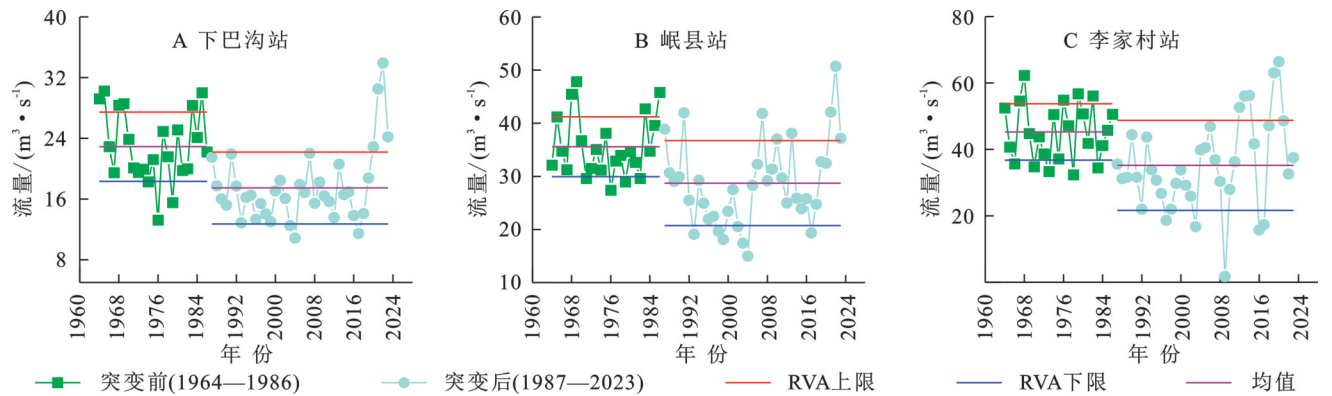


图 6 代表站年均最小 30 d 径流量变化

Fig. 6 Variations in annual average minimum 30 d runoff at representative stations

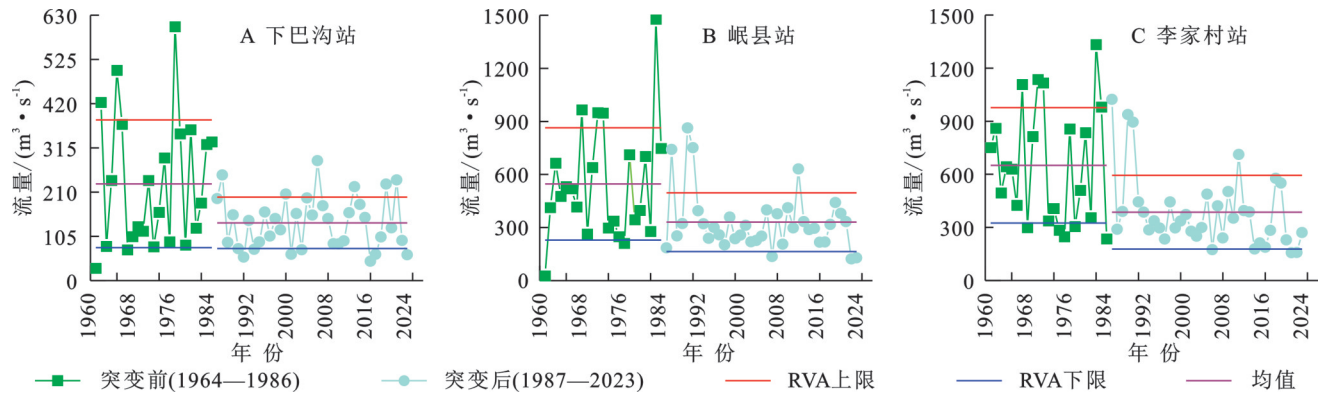


图 7 代表站年均最大 7 d 径流量变化

Fig. 7 Variations in annual average maximum 7 d runoff at representative stations

2.2.3 年极端流量出现时间 由图 8 可知,洮河流域水文突变后,最小径流量出现时间的均值较突变前发生滞后现象。下巴沟站和李家村站的最小径流量出现时

间阈值范围变化不明显,而岷县站的最小径流量出现时间阈值范围显著扩张,且均值明显增加,同时水文突变后高于 RVA 阈值的径流量出现频率较突变前增加。

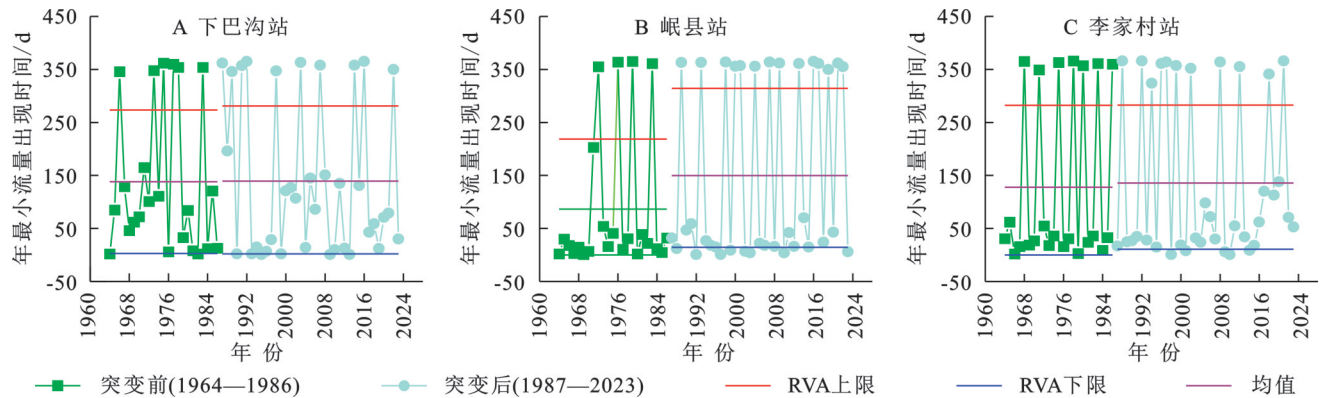


图 8 代表站最小流量出现时间

Fig. 8 Time of occurrence of minimum flow at representative stations

2.2.4 低流量频率及历时 图 9 为洮河流域 3 个代表站径流量突变前后低流量历时曲线。由图可知,突变后洮河流域代表站的低流量历时整体呈增加趋势,且超出 RVA 阈值的年份明显增加。下巴沟站、岷县站和

李家村站的水文改变度分别为 46%, 24% 和 14%, 下巴沟站的水文改变度最高。低径流量历时的增加使得洮河流域旱季的水量进一步减少,这一结果也与洮河流域 3 个代表站整体径流量的降低趋势一致。

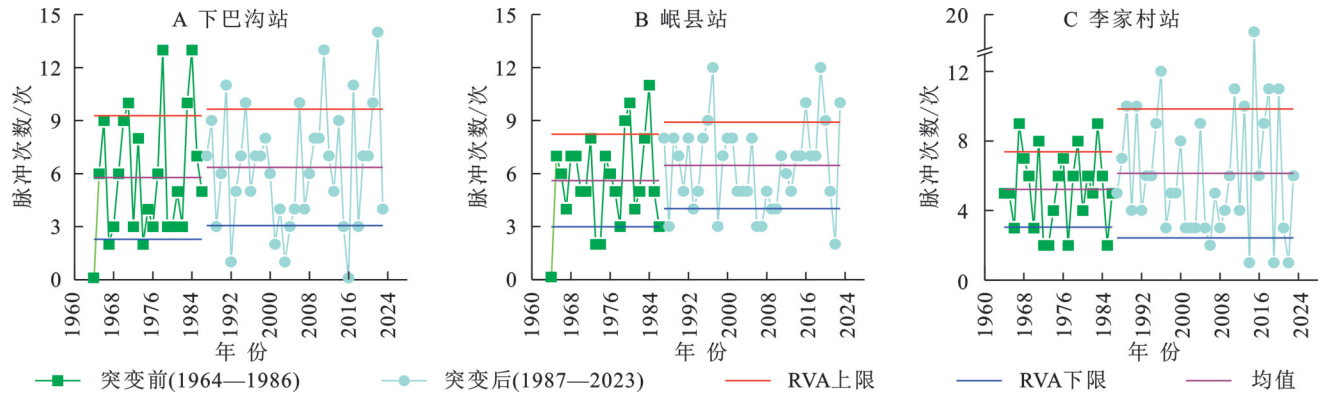


图 9 代表站低流量历时曲线

Fig. 9 Low-flow duration curves at representative stations

2.2.5 流量变化改变率及频率 图 10 为洮河流域 3 个代表站水文突变前后的逆转次数变化情况。由图可知,水文突变点后洮河流域的逆转次数均值明显增加,且超过 RVA 阈值的比例较突变前明显增加。下巴沟站逆转次数的水文改变度为 41%,属于中度改变;岷县站和李家村站逆转次数的水文改变度均为 78%,属于高度改变。洮河流域整体的径流量改变率和频率变化较强,这表明以 1986 年为突变点的水文突变过程对 3 个代表站的下泄流量产生了一定影响,进而对整个流域的生态系统稳定造成一定影响。

变点后的改变度以低度改变为主,该水文站的径流量改变程度较小;下巴沟站整体水文改变度以中度改变(40.63%)和低度改变(43.75%)占比较多,高流量历时的水文改变度最高(95%)。低度改变(占比分别为 59.38% 和 62.50%)主导岷县站和李家村站的 32 个 IHA 指标水文改变程度,两个水文站水文改变度最高的 IHA 指标分别为年均 1 d 最大值(100%)和低流量历时(78%)。

2.2.6 整体水文改变度分析 图 11 为洮河流域 3 个代表站整体水文情势变化情况,即各站水文突变前后的 32 个 IHA 指标改变度(取绝对值)。由图可知,突变前后洮河流域中上游两个控制型水文站的整体水文改变度相对较高,而下游李家村站径流量在突

表 3 为依据公式(3)计算获得的 5 类 IHA 参数综合指标改变度和整体水文改变情况。由表可知,洮河流域 3 个代表站仅岷县站第 4 组指标属于高度改变,且 3 个代表站的第一组指标均为低度改变;第二组指标均属于中度改变,其他 3 组指标分别为中度和低度改变。整体来看,洮河流域水文情势整体改变度处于中度改变。

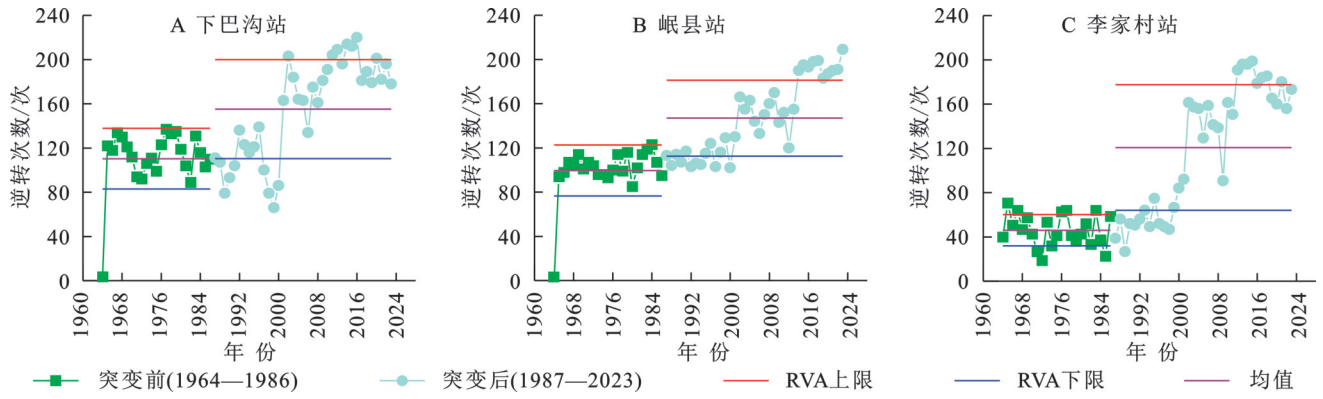


图 10 代表站逆转次数变化

Fig. 10 Variations in number of reversals at representative stations

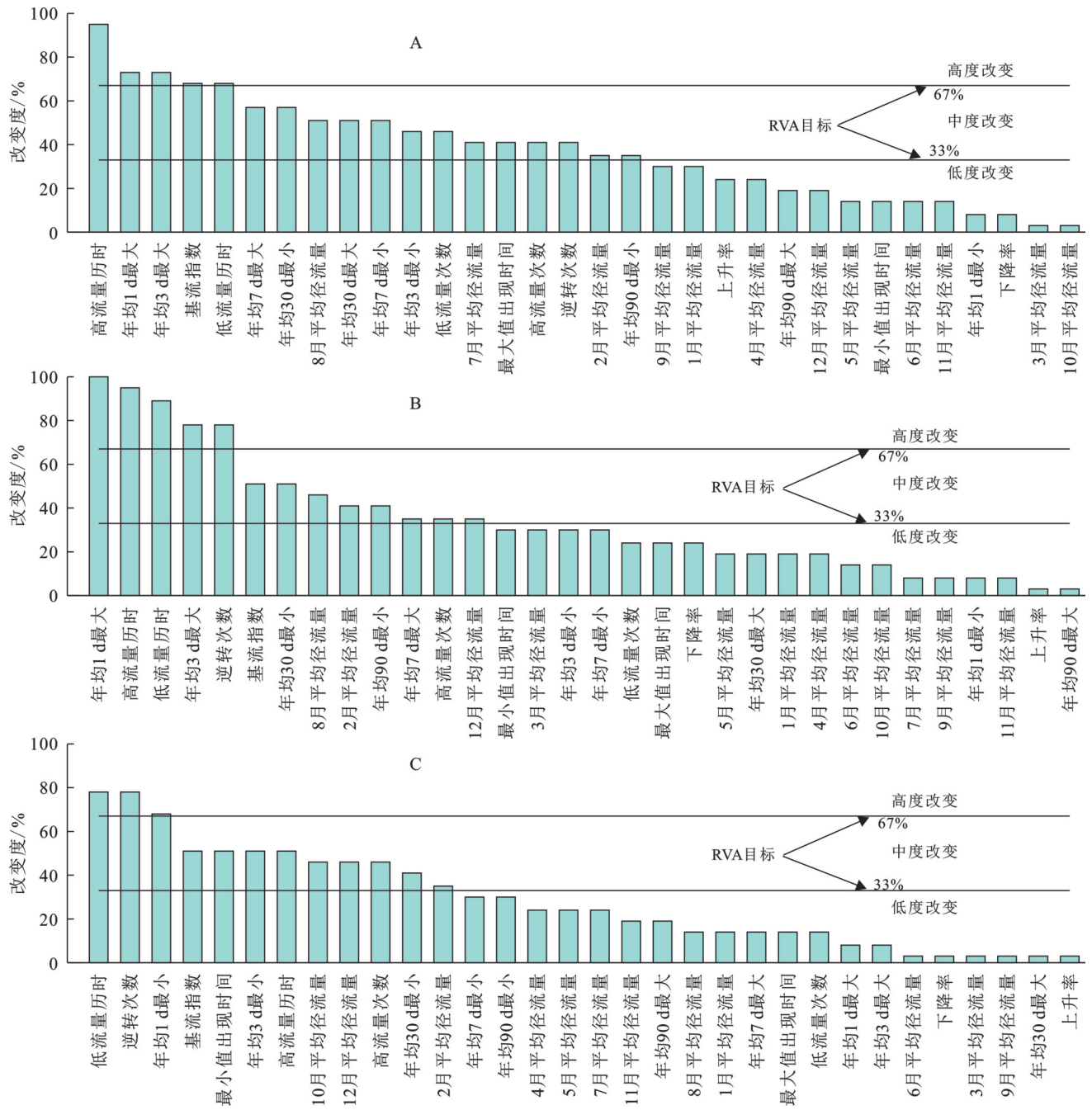


图 11 代表站整体水文改变度

Fig. 11 Overall degree of hydrological alteration at representative stations

表 3 代表站整体水文改变度
Table 3 Overall degree of hydrological alteration at representative stations

水文站	各组水文改变度					整体水文改变度
	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	
下巴沟	27(L)	53(M)	31(L)	66(M)	28(L)	44(M)
岷县	25(L)	49(M)	27(L)	68(H)	47(M)	46(M)
李家村	26(L)	36(M)	37(M)	52(M)	45(M)	40(M)

3 讨论

采用 IHA-RVA 法揭示气候变化与人类扰动背景下寒旱区河流水文情势的变异特征是支撑河流生态稳健和可持续的重要方法。本研究识别出洮河流域径流量在 1986 年发生显著突变,这与我国西北地区气候暖干化转型及流域大规模水利工程建设高度吻合^[21]。20 世纪 80 年代后期,西北地区气温以 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速率显著升高,导致冰川融水补给占比下降,而同期九甸峡水利枢纽等梯级水库与引洮灌区的密集建设加剧了径流截留^[22]。这种双重胁迫使洮河流域年均径流量以 $(0.069\ 1\sim 0.251\ 8)$ 亿 m^3/a 的速率锐减,下游李家村站夏季径流减少 37.27%,远超自然波动范围 ($\pm 15\%$),印证了人类活动在突变后期的支配性作用。值得注意的是,流域内水文响应呈现显著空间异质性:下游李家村站因水库调蓄导致年最大 7 d 流量削减 57%、低流量历时增加(RVA 改变度 78%),与三峡库区的水文节律人工化特征相似^[23];而中上游岷县站 9 月径流锐减 40%,可能与水库“季末截流”蓄水策略直接相关,这种操作导致鱼类洄游关键期(9—10 月)生态流量不足风险升高,类似现象在汉江流域丹江口水库调度中亦有报道^[24]。造成洮河整个流域上、中、下游改变度情况不一致现象的原因源于自然与人为因子的空间耦合作用。首先,中上游是主要的产水区域,近 58 年平均降水量下降 $4.60\text{ mm}/10\text{ a}$,而秋季冰川融水减少,这与同期降水衰减共同导致径流锐减^[25];在冬春季,低温使降水多以固态形式累积,流域内积雪量增加,春季气温回升,积雪融化,补充河流水流量,缓解径流衰减。人为因素也是改变河道产汇流机制的重要因素。由于下游为该流域的农业主产区,夏季农作物生长旺盛,灌溉用水需求达峰值,大量河水用于灌溉,减少下游径流量;秋冬季,水库执行生态放水任务,保障下游生态用水,且农业灌溉需求降低,径流衰减因此趋缓;流域内村镇(尤其是中下游的岷县和临洮县)的城市化(1990—2018 年洮河流域城镇居民用地增加 50.64%)扩张导致不透水面增加,雨水下渗减少,地

表径流系数增加(由 0.3 增加至 0.5),加剧了城镇周边的内涝风险;同时,道路、渠道等线性工程切割地表,改变了自然汇流路径,使径流时空分布更复杂^[26]。

此外,水文突变点后洮河流域的逆转次数均值明显增加,这一现象或与人类活动存在紧密关联。人类活动包括流域内水库、水电站(673 km 的洮河遍布超过 60 座水电站)等水利工程建设和高频调蓄改变天然径流节律,枯水期补水、洪水期截留的运行模式,直接导致流量变化趋势发生反转^[27]。同时,城市化与农业活动的扩张加剧了水资源开发利用强度,大规模灌溉、工业取水及生活用水需求的激增,进一步扰乱了径流的自然演变过程。这不仅意味着流域生态系统原有的水文驱动机制发生改变,可能威胁水生生物栖息地与生态系统完整性,还对水资源的科学管理与合理配置提出挑战^[28]。尽管冬春季径流因水库补偿放流保持稳定,但可能掩盖了气候干旱化对基流补给的潜在威胁。此外,月径流量分布改变直接影响水生生物栖息地的连续性与土壤水文过程。如秋季径流量锐减,导致水生生物繁殖期栖息地水位下降,河床裸露面积增加,破坏底质稳定性并减少浮游生物附着空间^[29]。年最大洪峰流量减小,削弱了河道冲淤能力,导致泥沙淤积量增加,河床抬高加剧洪涝风险;而最小流量频次增加,可能引发河道断流风险,破坏水生生态系统连通性。

综上,建议基于 IHA 指标构建“气候弹性—生态目标—社会需求”三位一体的动态生态调度体系。明确划分丰、平、枯 3 类水文年型,分别设定冬春补偿放流、夏秋洪水调蓄的差异化流量阈值,尤其在 9 月鱼类繁殖与洄游关键期,需预留不低于多年平均流量 40% 的生态基流,并建立水库联合调度的实时监控平台;还需实施生态修复工程,针对水文改变导致的湿地退化区域,通过人工补水、植被恢复等措施,重建河滨缓冲带,提升生态系统韧性;在引入气候弹性指标优化 RVA 评估体系的同时,将水生生物多样性保护目标纳入调度目标,建立生态调度效果的实时反馈机制,定期开展流域生态健康评估,动态调整管理策略^[30]。未来研究需耦合 SWAT 模型与鱼类栖

息地模型等,量化水文变异对洮河流域特有水生物种的影响,同时加强梯级水利工程对沿河湿地水文关联的累积效应监测。洮河流域的水文情势变异是自然与人为因素非线性叠加的结果,亟需构建适应性管理框架,通过动态平衡水资源开发与生态完整性维护,降低或规避不可逆的生态拐点风险。

4 结论

(1) 采用Mann-Kendall法和累积距平法进行分析,结果表明,洮河流域1964—2023年的年均径流量波动较大,整体呈显著减少趋势。

(2) 洮河流域径流量序列的水文改变点在1986年,采用IHA-RVA法对32个IHA指标分析后可知:突变后代表站的月均径流量较突变前有不同程度减少,且最小径流量出现时间存在滞后现象,年均最小30 d径流量和年均最大7 d径流量呈显著下降趋势,低流量历时的均值整体呈增加趋势。

(3) 总体来看,洮河流域3个水文站的整体水文改变度分别为44%,46%和40%,均属于中度改变,洮河流域水文情势的整体改变度处于中等偏下,洮河的生态系统整体处于良好状态。

参考文献(References):

- [1] 王彪,夏春龙,宋峥,等.未来气候变化情景下嫩江流域极端水文演变特征[J].水利水电技术(中英文),2025,56(7):109-123.
Wang B, Xia C L, Song Z, et al. Characteristics of extreme hydrological evolution in Nenjiang River Basin under future climate change scenarios[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025,56(7):109-123.
- [2] Li F, Wang Z H, Hou J F, et al. The changes in soil organic carbon stock and quality across a subalpine forest successional series [J]. Forest Ecosystems, 2024, 11: 100203.
- [3] 蒋帅,张黎,景元书,等.1981-2015年中国区域极端气候事件的时空分布特征[J].水土保持研究,2023,30(06):295-306.
Jiang S, Zhang L, Jing Y S, et al. Spatial and Temporal Distribution (characteristics of Regional Extreme Climate Events in China from 1981 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):295-306.
- [4] 李杨千,何海,金双彦,等.基于Budyko假设的洛河流域径流变化归因分析[J].水文,2024,44(3):41-46.
Li Y Q, He H, Jin S Y, et al. Attribution analysis of runoff change in Luohe Basin based on budyko hypothesis [J]. Journal of China Hydrology, 2024,44(3):41-46.
- [5] 王士莹,谢保鹏,杨洁,等.基于生态韧性的国土空间生态保护修复分区研究:以洮河流域为例[J].生态学报,2024,43(6):1870-1880.
Wang S Y, Xie B P, Yang J, et al. Ecological protection and restoration zoning of national territorial space based on ecological resilience: a case study of the Taohe River Basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024,43(6):1870-1880.
- [6] Wang H X, Yuan W Q, Chen W X, et al. Response of hydrological regimes to land use change: a case study of the Han River Basin [J]. Journal of Water and Climate Change, 2023,14(12):4708-4728.
- [7] Liu L X, Fan L J, Hu J, et al. Human activities impacts on runoff and ecological flow in the Huangshui river of the Yellow River Basin, China[J]. Water, 2024,16(16):2331.
- [8] Chen H, Guo W X, Ma J Q, et al. Evaluating ecohydrological driving factors controlling the hydrology of the Wuijiang River Basin, China [J]. Hydrology Research, 2023,54(7):818-839.
- [9] Yang Y Y, Cai S Y, Sun X Y, et al. Quantifying the impacts of climate change and human activities on runoff in the upper Yongding river basin [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2025,30(2):05025001.
- [10] Wang B L, Wang H X, Jiao X Y, et al. Runoff change in the Yellow River Basin of China from 1960 to 2020 and its driving factors [J]. Journal of Arid Land, 2024, 16(2):168-194.
- [11] 黄草,黄梦迪,胡国华,等.梯级电站运行下拉萨河干流水文情势变异及归因分析[J].水资源与水工程学报,2020,31(5):62-69,79.
Huang C, Huang M D, Hu G H, et al. Influence and attribution of the cascade hydropower station operation on the hydrological regimes in Lhasa River [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(5):62-69,79.
- [12] 甘肃省水利厅.甘肃省水资源公报(2022年)[R].兰州:甘肃省水利厅,2023.
Gansu Provincial Department of Water Resources. Gansu provincial water resources bulletin (2022) [R]. Lanzhou: Gansu Provincial Department of Water Resources, 2023.
- [13] 马亚丽,牛最荣,张芮,等.洮河流域径流输沙演变与降雨及降雨侵蚀力的关系[J].水土保持研究,2023,30(4):90-97,109.
Ma Y L, Niu Z R, Zhang R, et al. Relationship between the evolution of runoff and sediment and rainfall and rainfall erosivity in the Taohe River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(4):90-97,109.
- [14] 王泉轩,左小清,杨泽楠,等.基于Mann-Kendall检验和信息熵的成都市1980—2016年降水时空变化[J].中国水土保持科学,2019,17(4):26-33.
Wang X X, Zuo X Q, Yang Z N, et al. Spatio-temporal changes of precipitation in Chengdu from 1980 to

- 2016 based on Mann-Kendall test and information entropy [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(4):26-33.
- [15] 高彦春,王金凤,封志明.白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(4):467-477.
- Gao Y C, Wang J F, Feng Z M. Variation trend and response relationship of temperature, precipitation and runoff in Baiyangdian Lake Basin[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(4):467-477.
- [16] Richter B D, Baumgartner J V, Braun D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1998, 14(4):329-340.
- [17] 杨梅,贺中华.基于 IHA-RVA 法的黔中喀斯特流域水文情势变化分析[J]. *水生态学杂志*, 2025, 46(2):91-102.
- Yang M, He Z H. Hydrological regime changes in the Qianzhong karst basin analyzed by IHA-RVA[J]. *Journal of Hydroecology*, 2025, 46(2):91-102.
- [18] 尚文绣,靖娟,尚弈.小浪底水库调度对黄河下游水文情势的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2022(10):91-95, 104.
- Shang W X, Jing J, Shang Y. The influence of Xiaolangdi Reservoir operation on flow regime in the lower Yellow River[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(10):91-95, 104.
- [19] 王保良,王鸿翔,张海涛,等.基于 IHA-RVA 法的黄河水文情势演变分析[J]. *人民黄河*, 2024, 46(5):33-39.
- Wang B L, Wang H X, Zhang H T, et al. Analysis of the evolution of hydrological regime of the Yellow River by IHA-RVA method[J]. *Yellow River*, 2024, 46(5):33-39.
- [20] 朱迪,崔福宁,卜慧,等.三峡水库蓄水 20 年以来宜昌水文站水文情势改变分析[J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(6):193-199, 206.
- Zhu D, Cui F N, Bu H, et al. Alteration of hydrological regimes at Yichang hydrological station of Three Gorges Reservoir since impoundment for two decades [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, 41(6):193-199, 206.
- [21] 王瑞旭.基于 Budyko 法的洮河流域径流变化归因分析[J]. *甘肃水利水电技术*, 2024, 60(4):18-22.
- Wang R X. Attribution analysis of runoff variation in the Tao River Basin based on the Budyko Method [J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2024, 60(4):18-22.
- [22] Yang H Y, Ma F, Yuan X. The role of human activities in the weakening of the propagation relationship between meteorological and hydrological droughts in the Heihe River Basin[J]. *Hydrological Processes*, 2023, 37(7):e14946.
- [23] Yang Z, Wang H, Saito Y, et al. Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) River sediment discharge to the sea: The past 55 years and after the Three Gorges Dam [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(4):2005WR003970.
- [24] Lu G B, Wang J, Li Q F, et al. Impacts of Danjiangkou reservoir on sediment regime of the Hanjiang River[J]. *Hydrology Research*, 2012, 43(1/2):64-72.
- [25] 段志勇,凡炳文.洮河流域降水量的多时间尺度特征及趋势分析[J]. *人民黄河*, 2015, 37(11):11-14.
- Duan Z Y, Fan B W. Analysis on long-time scale characteristics of precipitation and future trend of Taohe River Basin[J]. *Yellow River*, 2015, 37(11):11-14.
- [26] 袁腾港,张英,钱继坤,等.甘肃洮河流域水文气象动态及径流和水质驱动机制[J]. *冰川冻土*, 2024, 46(4):1329-1340.
- Yuan T G, Zhang Y, Qian J K, et al. Hydrometeorological dynamics and driving mechanism of runoff and water quality in the Taohe River basin, Gansu Province [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2024, 46(4):1329-1340.
- [27] 熊雅丽.洮河流域近 20 年径流量偏枯原因分析[J]. *地下水*, 2018, 40(5):192-195.
- Xiong Y L. Cause analysis of runoff in Taohe River basin in recent 20 years [J]. *Ground Water*, 2018, 40(5):192-195.
- [28] 刘雪飞,王晓莉,赵兴森,等.2000—2021 年山东省海河流域水资源情势分析及优化配置对策研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(S2):297-303.
- Liu X F, Wang X L, Zhao X M, et al. Analysis of the water resources situation in the Haihe River Basin of Shandong Province and research on water resources optimal distribution strategies [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(S2):297-303.
- [29] Wang Y J, Qin D H. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: an overview [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2017, 8(4):268-278.
- [30] Yang Z, Wang Y F, Song S B, et al. Multi-objective operation-decision-making-risk propagation analysis for cascade reservoirs affected by future streamflow process variations[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620:129518.