

渭河典型支流水文情势演变分析

张志东^{1,2}, 康艳^{1,2}, 赵建勋^{1,2}, 赵祥焜^{1,2}, 武廉策^{1,2}, 陈佳琳^{1,2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院)

摘要:为揭示渭河水文情势的演变特征,选取典型支流(灞河、沔河、涝河)为研究对象,基于 1970—2019 年逐日径流资料,综合运用 Mann-Kendall 检验、滑动 t 检验、Pettitt 检验方法探究其突变特征和变化趋势;融合主成分分析(PCA)、中度干扰假说(IDH)、水文改变指标法(IHA)、变化范围法(RVA),提出了 PCA-IHA-RVA 法与高斯隶属度法,从水文改变度和径流情势贴合度的双重视角定量评估了水文情势变化。结果表明:3 条典型支流的年径流量均呈下降趋势,且于 20 世纪 90 年代发生一致性突变;3 条典型支流的水文改变度均属中度改变,其中沔河最为显著(59.64%),灞河次之(50.44%),涝河相对较小(45.12%);径流情势贴合度呈相反格局,沔河最低(0.608),灞河居中(0.635),涝河最高(0.712)。

关键词:水文情势;PCA-IHA-RVA 法;水文改变度;径流情势贴合度;渭河

Hydrological regime evolution analysis in typical tributaries of the Weihe River//Zhang Zhidong^{1,2}, Kang Yan^{1,2}, Zhao Jianxun^{1,2}, Zhao Xiangkun^{1,2}, Wu Liance^{1,2}, Chen Jialin^{1,2} (1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University; 2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northwest A&F University)

Abstract: To reveal the evolution characteristics of the hydrological regime of the Weihe River, typical tributaries (the Bahe River, the Fenghe River, and the Laohe River) were selected as study objects. Based on daily runoff data from 1970 to 2019, the Mann-Kendall test, sliding t test, and Pettitt test were comprehensively used to investigate their abrupt change characteristics and trends. By integrating principal component analysis (PCA), moderate disturbance hypothesis (IDH), hydrological change index method (IHA), and range of variation method (RVA), PCA-IHA-RVA method and Gaussian membership degree method were proposed to quantitatively evaluate hydrological changes from the dual perspectives of hydrological change degree and runoff situation fit. The results indicate that the annual runoff of the three typical tributaries all shows a declining trend, with a consistent abrupt change occurring in the 1990s. The degree of hydrologic alteration of three typical tributaries is moderate, with the Fenghe River being the most significant (59.64%), followed by the Bahe River (50.44%), and the Laohe River being relatively small (45.12%). The fit degree of runoff regime shows an opposite pattern, with the lowest in the Fenghe River (0.608), the middle in the Bahe River (0.635), and the highest in the Laohe River (0.712).

Key words: hydrological regimes; PCA-IHA-RVA method; degree of hydrologic alteration; fit degree of runoff regime; the Weihe River

河流是推动国民经济发展和人类文明进步的重要保障,同时还肩负着维护流域生态系统健康稳定的责任^[1-3]。近年来,随着对水资源的大量开发利用以及气候变化的加剧,河流水文情势及生态环境受到严峻的干扰和威胁^[4-7]。因此,定量探究与评价河流水文情势和生态健康状况一直是水文领域研究的热点问题^[8-10]。国内外学者为此开展了许多研究,

例如:Richter 等^[11-12]构建的将水文改变指标(IHA)法与变化范围(RVA)法相结合的 IHA-RVA 法逐渐成为定量评价水文情势变化程度的常用方法;Yang 等^[13]基于全球气候模式构建了极端情景并应用 SWAT 模型和 IHA 来量化预测期与基准期的水文状况,发现不同极端气候背景下山美水库流域的水文状况出现明显差异;张怡雅等^[14]定量评估了南水北

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52579022,52379026);内蒙古自治区水利科技专项(202501010505A);西北农林科技大学创新创业训练项目(X202310712684)

作者简介:张志东(2002—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:zhidongzhang@nwfau.edu.cn

通信作者:康艳(1977—),女,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:kangyan@nwfau.edu.cn

调中线工程对汉江中下游水文情势的影响,结果表明了大型水利设施的建设运行将对水文情势产生巨大影响;Chen 等^[15]将 IHA-RVA 法与流量历时曲线结合,探究了人类活动和气候变化对乌江径流的贡献,发现乌江径流变化的主导因素是人类活动。为了减小水文改变指标的维数,降低各水文指标之间的相关性,李继清等^[16]基于主成分分析(PCA)筛选最相关生态指标,定量评估了江西干流水文情势的变化,认为气候变化与人类活动均是其水文情势变化的重要驱动因素;Wang 等^[4]通过 PCA 和冗余分析对传统水文改变指标进行优化,量化了荆江出水口的生态水文条件变化,认为最相关生态指标能够有效缓解 IHA 指标的冗余,且保留了最关键的水文信息;肖睿等^[17]在抚河下游水文情势的演变趋势与变化特征分析中也结合 PCA 对水文改变指标进行了优选。此外,考虑到 RVA 法量化径流情势时存在仅能统计到各指标分布于特定阈值范围内的概率,忽略了超出阈值范围情况,在评价径流情势变化时考虑不够全面^[18-19]。为此,Suen 等^[20]基于中度干扰假说(IDH),引入高斯隶属度函数定量评估了河流径流情势改变程度;王钦等^[18]在考虑河道内生态需水与径流情势的水库群优化调度中也引入了 IDH,考虑了各指标在阈值外的情况,较好地避免了 RVA 法量化时的不足。综上所述,现有对于水文情势演变的研究多局限于水文改变度的单一维度评估量化,缺乏能将水文改变度与适宜性评价相耦合的评估框架。

渭河流域是关中地区及陕西省至关重要的水源命脉,对支撑区域经济社会可持续发展和维系生态安全具有核心作用^[21]。发源于秦岭北麓的灞河、沔河、涝河,作为渭河右岸的典型支流,不仅是渭河径流的关键补给来源,更是关中地区重要的水源涵养区与生态屏障^[21-23],其水文情势的稳定性与生态健康,直接关乎关中地区水安全保障与生态安全。鉴于此,本文以灞河、沔河、涝河为研究对象,提出融合

水文改变度与径流情势贴合度的双重视角评估框架。首先,利用基于 PCA 的 IHA-RVA 法构建水文改变度评价体系;其次,引入 IDH,将受人类活动较小的历史天然状态设为基准(理想序列),利用高斯隶属度函数构建径流情势贴合度指标;最后,实现对水文改变程度的统计识别,从生态学理论层面评价河流情势与理想状态的贴合程度,以期为河流水文情势评估提供参考。

1 研究区概况与数据资料

1.1 研究区概况

灞河、沔河、涝河流域均属大陆性气候,四季分明,降水分配不均,集中在夏季汛期,多年平均降水量为 600~800 mm。其中,灞河发源于秦岭北坡蓝田县灞源镇,河长 109 km,流域面积 2 581 km²^[24];沔河发源于秦岭北鸡窝子,河长 78 km,流域面积约 1 460 km²,多年平均径流量 4.8 亿 m³^[22];涝河发源于静峪脑和秦岭梁,河长 86 km,流域总面积 663 km²,多年平均径流量 1.18 亿 m³^[23]。研究区概况见图 1。

1.2 数据资料

收集整理了秦岭北麓渭河典型支流灞河(马渡王站)、沔河(秦渡镇站)、涝河(涝峪口站)1970—2019 年逐日径流资料以及渭河流域分辨率为 90 m 的 DEM 数据。

2 研究方法

2.1 突变点检验与趋势分析

Mann-Kendall(M-K)检验法是非参数趋势检验方法,无需数据服从正态分布,用来判断时间序列整体是上升、下降还是无显著趋势^[25]。滑动 t 检验通过分段均值 t 检验逐窗口计算统计量,识别时间序列均值发生突变的年份^[26]。Pettitt 检验方法是非参数突变点检验,不受异常值干扰,可定位序列唯一显

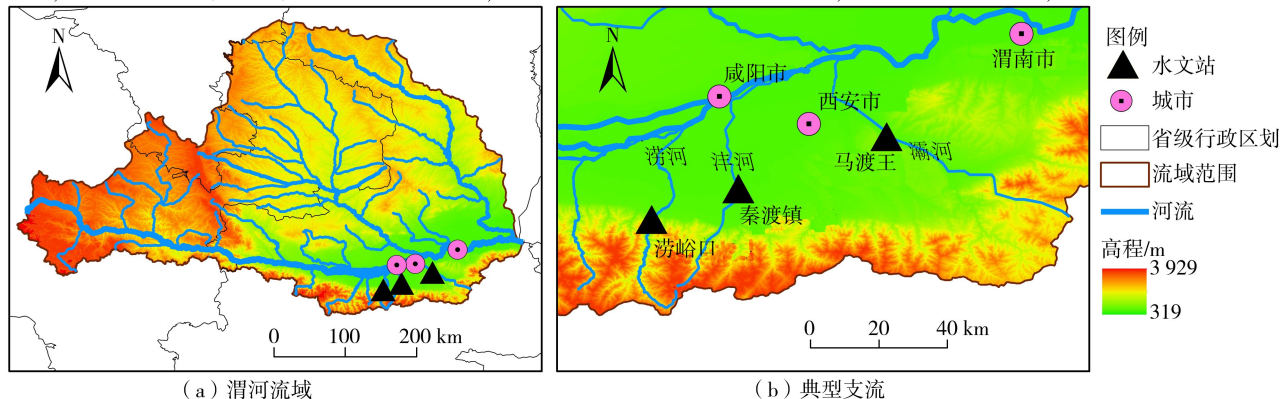


图1 渭河流域及典型支流概况

Fig.1 Overview of the Weihe River Basin and typical tributaries

著性突变位置并给出突变显著性^[27]。利用这 3 种检验方法对灞河、沔河、涝河的径流序列进行突变点检验与趋势分析。

2.2 IHA-RVA 法

IHA 法依据长时间序列的日径流数据计算各水文改变指标的变化特征,反映水文情势变化。指标分为 5 个组别,33 个具体指标,包括各月均值流量、极值流量、极值流量出现时间、流量脉冲和流量变化率,具体见表 1,由于 3 条支流均无断流发生,本文不考虑断流天数。IHA-RVA 法通过水文改变指标变化特征评估水文情势的变化程度,各指标的上下限即 RVA 阈值,为其频率的第 75 百分位数和第 25 百分位数或平均值加减标准差。

为量化各水文改变指标的变化程度,Richter 等^[12]提出以水文改变度来定量评估水文变异前后指标所受影响的程度,单个指标的计算公式见式(1),进而计算整体水文改变度(式(2))。

$$D_i = \frac{N_{oi} - N_e}{N_e} \times 100\%$$
 (1)

$$D_o = \sqrt{\frac{1}{33} \sum_{i=1}^{33} D_i^2}$$
 (2)

其中 $N_e = R_i N_T$
式中: D_i 为第 i 个指标的水文改变度; N_{oi} 为第 i 个指标变异后的径流序列 IHA 值在变化范围内的年数; N_e 为对应的期望年数; D_o 为整体水文改变度; R_i 为第 i 个指标的系数,本文取 50%; N_T 为突变后的径流序列的总年数。

为了更加客观地反映水文情势的改变程度,根据水文改变度进行等级划分,规定当 $|D_i|$ 和 D_o 为 0~第 33 百分位数、>第 33~第 67 百分位数、>第 67~第 100 百分位数时,单个指标和系统整体分别属于低、中、高等级程度的改变^[12,28]。

2.3 PCA-IHA-RVA 法

PCA 法是一种通过正交变换,把相互关联的变量,转化为相互正交且不相关的变量的多元统计方法^[29-30]。主成分数量根据指标特征值大于或等于 1 且累积贡献率大于或等于 80%确定。水文改变指标数量多达 32,指标之间存在自相关性,为降低指

标间的相关性,将 PCA 法与 IHA-RVA 法结合,减小数据维数和数据冗余。借助 SPSS 统计工具,运用 PCA 从 32 个水文改变指标中筛选出能够全面概括水文情势变化特征的水文改变指标,进而评价流域水文情势的变化程度。

2.4 基于 PCA 和 IDH 理论的高斯隶属度法

为弥补 RVA 评价径流情势时的缺陷,综合反映河流水文情势的变化,本文引入径流情势贴合度。中度干扰假说(IDH)理论认为中等程度的干扰最有利于维持物种多样性^[31]。为此,本文将 IDH 理论中的“中等干扰状态”定义为水文情势管理的理想状态,具体而言:①采用受人类扰动最小的历史天然状态作为基准,即理想序列,现状状态作为变化序列;②引入模糊集理论,量化变化序列对各 IHA 指标理想状态的满足程度,并选用高斯隶属度函数进行表征,当水文指标处于理想状态时模糊函数值为 1,当偏离理想状态,满足度降低时,模糊函数值减小;③对各水文改变指标进行权重分配并计算径流情势贴合度,进而从生态理论层面实现对河流水文情势的评估。径流情势贴合度计算公式为:

$$S = \sum_{j=1}^N w_j \mu_j$$
 (3)

其中
$$\mu_j = \exp \left[\frac{-(x_j - c_j)^2}{2\sigma_j^2} \right]$$

式中: S 为径流情势贴合度; w_j 为第 j 个水文改变指标的权重; μ_j 为第 j 个水文改变指标的高斯隶属度; x_j 为待评价径流的第 j 个水文改变指标值; c_j 为理想情势的第 j 个水文改变指标均值; σ_j 为理想情势的第 j 个水文改变指标标准差; N 为水文改变指标数。

3 结果与分析

3.1 突变检验和趋势分析

选取研究区控制范围较大且序列完整性好的马渡王、秦渡镇、涝峪口 3 个典型水文站,采用 M-K、滑动 t 和 Pettitt 检验法分别对 3 个水文站的年径流序列进行突变点检验,结果如图 2 所示。通过不同方法的交叉验证,最终判定灞河、沔河、涝河的突变年

表 1 水文改变指标信息

Table 1 Information of hydrological change indicators

组别	内容	水文改变指标
1	各月均值流量	1~12 月流量($A_1 \sim A_{12}$)
2	年极端流量及历时	年最小 1、3、7、30、90 d 流量($B_1 \sim B_5$),年最大 1、3、7、30、90 d 流量($B_6 \sim B_{10}$),基流指数(B_{11}),断流天数(B_{12})
3	年极端流量出现时间	年最小流量出现时间(C_1),年最大流量出现时间(C_2)
4	高低流量发生频率与历时	年低流量发生次数与平均历时($D_1、D_2$),年高流量发生次数与平均历时($D_3、D_4$)
5	流量改变率与频率	上升率(E_1),下降率(E_2),流量逆转次数(E_3)

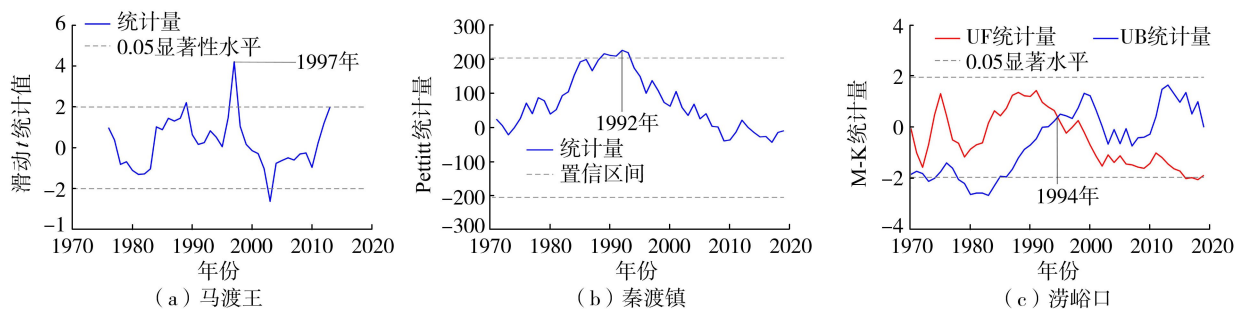


图2 3个水文站突变点检验结果

Fig. 2 Test results of mutation points of three hydrological stations

份分别为1997年、1992年、1994年。

为探究3条典型支流径流序列的趋势演变特征,采用M-K检验法对该3个水文站的径流变化趋势进行统计学检验。结果显示,3条典型支流的统计量 Z 值均为负,其中灞河为 -2.309 (显著),沔河为 -1.146 (不显著),涝河为 -1.857 (不显著),可见除灞河达到95%的显著性水平,表现出显著的下降趋势外,其余两条支流呈不显著下降趋势。

3.2 IHA-RVA 法评价结果

基于马渡王、秦渡镇、涝峪口水文站的径流资料,利用IHA-RVA法评价不同指标的变化情况,结果见图3。由图3(a)可见,除 A_6 、 A_8 、 A_{11} 、 B_5 、 E_2 之外,灞河马渡王的其他指标均呈中低度改变,其中低、中、高度改变度指标占比分别为28%、56%、16%。由图3(c)可见,涝河涝峪口水文指标的变化情况与灞河类似,主要呈中低度改变,低、中、高的指标占比分别为41%、44%、15%。至于沔河,由图3(b)可明显观察到,秦渡镇水文指标呈现出更为显著的情势变化,其中高度改变指标的占比高达50%,可见沔河的水文情势相较于灞河和涝河发生了更大程度的改变。

基于单个指标的改变情况,计算3个水文站的整体水文改变度。其中,秦渡镇整体水文改变度最

大,达69.20%,马渡王和涝峪口整体改变度较为相近,分别为51.89%、51.30%,可见,沔河受人类活动和气候变化的影响较为显著。尽管如此,3条典型支流的水文改变程度均属于中度改变。

3.3 基于PCA-IHA-RVA法的评价结果

3.3.1 水文指标优选

运用SPSS分析计算了马渡王、秦渡镇、涝峪口水文站各水文改变指标之间的相关性,结果显示多数指标之间存在显著的相关性,部分指标之间的相关性甚至超过0.9,3个水文站指标间的相关系数绝对值的平均值分别达0.25、0.30、0.27,可见原始变量之间存在多重共线性问题,并且过多的指标也将带来数据冗余。以马渡王站为例展示水文改变指标统计值之间的相关性,如图4所示。为了消除指标之间的共线性,并降低数据维数,采用PCA进行降维处理,计算3个水文站32个指标的特征值与累计贡献率,以马渡王为例展示PCA分析结果,如图5所示。基于PCA所计算的荷载矩阵,依据荷载值选取代表性指标,确定马渡王选取主成分1~8、秦渡镇选取主成分1~7、涝峪口选取主成分1~8为代表性主成分,具体为:马渡王优选指标为 B_4 、 B_{10} 、 D_3 、 A_6 、 E_3 、 A_{10} 、 D_4 、 D_2 ,秦渡镇优选指标为 B_{11} 、 D_1 、 A_5 、 B_6 、 D_3 、 C_2 、 A_8 ,涝峪口优选指标为 B_4 、 B_{10} 、 A_4 、 E_1 、 A_8 、 A_3 、 E_3 、 D_3 。

低度改变 中度改变 高度改变

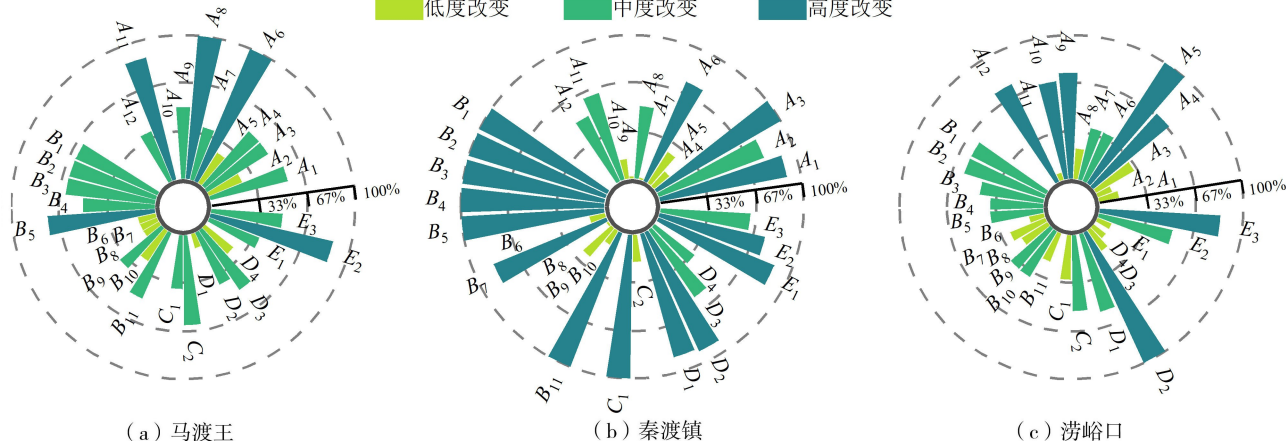


图3 3个水文站的水文指标改变情况

Fig. 3 Changes in hydrological indicators at three hydrological stations

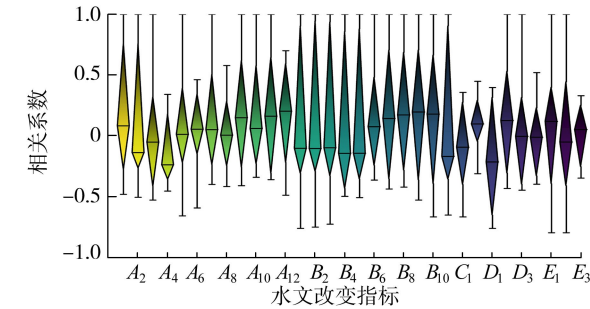


图 4 马渡王水文改变指标的相关性分析结果

Fig. 4 Correlation analysis results of IHA indicators of Maduwang Station

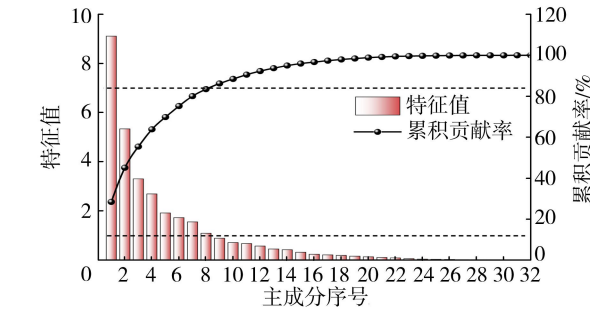


图 5 马渡王 PCA 分析结果

Fig. 5 PCA analysis results of Maduwang Station

3.3.2 优选指标合理性分析

为验证 PCA 优选指标的合理性,计算马渡王、秦渡镇、涝峪口优选指标之间的相关性,结果显示,降维效果显著,相较于原始的 32 个指标各站优选指标间的相关性显著减小,相关性系数在 25%~75% 区间的分布更为集中。以马渡王为例,其优选指标相关系数绝对值的平均值降至 0.18,并且各指标间的相关系数均小于 0.5(图 6、图 7)。秦渡镇和涝峪口的相关系数绝对值的平均值分别降至 0.21 和 0.18。可见,PCA 优选过程有效减少了指标间的共线性,达到了降维和数据去冗余的目的。

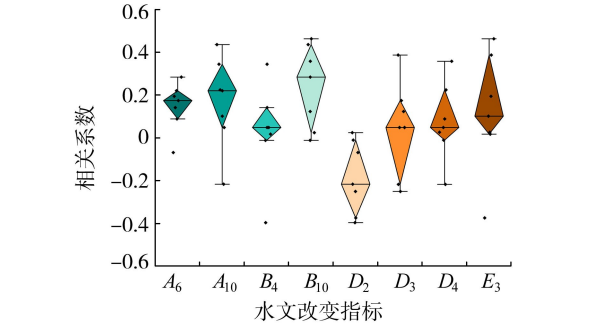


图 6 马渡王优选指标的相关性分布

Fig. 6 Correlation distribution of preferred indicators of Maduwang Station

3.3.3 水文情势分析

基于马渡王、秦渡镇、涝峪口水文站的优选指标,计算 3 个水文站的整体水文改变度,结果显示,

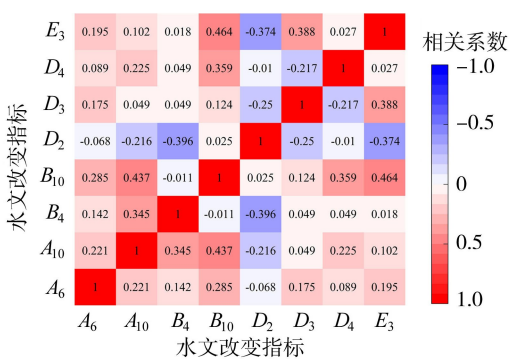


图 7 马渡王优选指标相关关系

Fig. 7 Correlation between preferred indicators of Maduwang Station

经 PCA 优选后的指标维度显著降低,但评价效能得到维持。马渡王水文情势分析结果见表 2。由表 2 可见,马渡王优选指标数仅为 8,其维度得到极大降低,其中除 A_6 呈高度改变(100%)外,其余指标均为中低度改变。优选后马渡王、秦渡镇、涝峪口的整体水文改变度分别为 50.44%、59.64%、45.12%,可见沔河的水文改变程度最大,灞河次之,涝河最小。与基于 32 个水文指标的传统 IHA-RVA 法的评价结果相比,3 个水文站的整体水文改变度虽分别降低了 1.45%、9.56%、6.18%,但两种评价方法的改变等级保持一致,均属于中等程度改变。这一结果表明,经 PCA 优选的指标能够有效保留传统 IHA 指标的信息,在减少数据冗余和降低指标间相关性影响方面表现出较高的效能,验证了该方法在水文情势变化分析中具有较高的可信度与应用价值。

表 2 马渡王水文情势分析结果

优选指标	均值		RVA 阈值		水文改变度/%	水文改变等级
	突变前	突变后	下限	上限		
A_6	4.96	4.31	2.46	9.91	100	高
A_{10}	12.04	8.30	8.37	16.49	0	低
B_4	2.36	3.16	1.84	2.68	-50	中
B_{10}	31.66	22.46	24.79	39.01	-25	低
D_2	4.50	6.50	3.50	6.54	-4	低
D_3	15.00	10.00	13.00	16.00	-50	中
D_4	4.00	3.00	3.00	4.07	-25	低
E_3	103.50	85.00	97.80	110.40	-50	中

3.4 基于高斯隶属度法的径流情势贴合度分析

依据 PCA 分析中各主成分对方差的贡献率,提取优选指标的原始贡献率,并对其归一化校正,得到校正贡献率和可用于综合计算的指标权重,以马渡王站为例,结果见表 3。进而基于构建的高斯隶属度法,以马渡王、秦渡镇、涝峪口水文站的突变点为分界将径流序列划分为天然序列与变化序列,认为在突变前这一时期的干扰为适度干扰^[18],对各指标

设定管理目标,利用模糊集量化变化序列对其的满足度,进而利用高斯函数进行表征,结果显示 3 个水文站的优选指标均呈现近似正态分布特征,各指标值在中等干扰水平下达到峰值,形成典型的“钟形”曲线。该分布模式表明中等程度的水文变异符合 IDH,证明将 IDH 引入水文情势评价的高度可行性。图 8 为马渡王优选指标的高斯分布。

表 3 马渡王优选指标权重与贡献率

Table 3 Weights and contribution rates of preferred indicators of Maduwang Station

优选指标	权重	原始贡献率/%	校正贡献率/%
A_6	0.341 1	28.48	34.11
A_{10}	0.199 8	16.69	19.98
B_4	0.123 6	10.32	12.36
B_{10}	0.100 7	8.41	10.07
D_2	0.071 6	5.98	7.16
D_3	0.064 5	5.38	6.45
D_4	0.058 1	4.85	5.81
E_3	0.040 6	3.39	4.06
总和	1	83.50	100

基于马渡王、秦渡镇、涝峪口水文站优选指标的权重,从径流情势贴合度的视角评估 3 条典型支流的水文情势变化状况。结果显示,灞河、沔河、涝河径流情势贴合度分别为 0.635、0.608、0.712,其中涝河的径流贴合度最高,表明突变后的径流序列与天然径流的贴合度最高(偏离最小),即其水文情势变化程度较小,受人类活动和气候变化的干扰较弱;沔河的贴合度最低,反映其水文情势变化最为显著,受外界干扰的影响最大;灞河则介于两者之间。该评价结果与传统 IHA-RVA 法和 PCA-IHA-RVA 法的评价所得出的“沔河水文改变度最高,涝河最低”

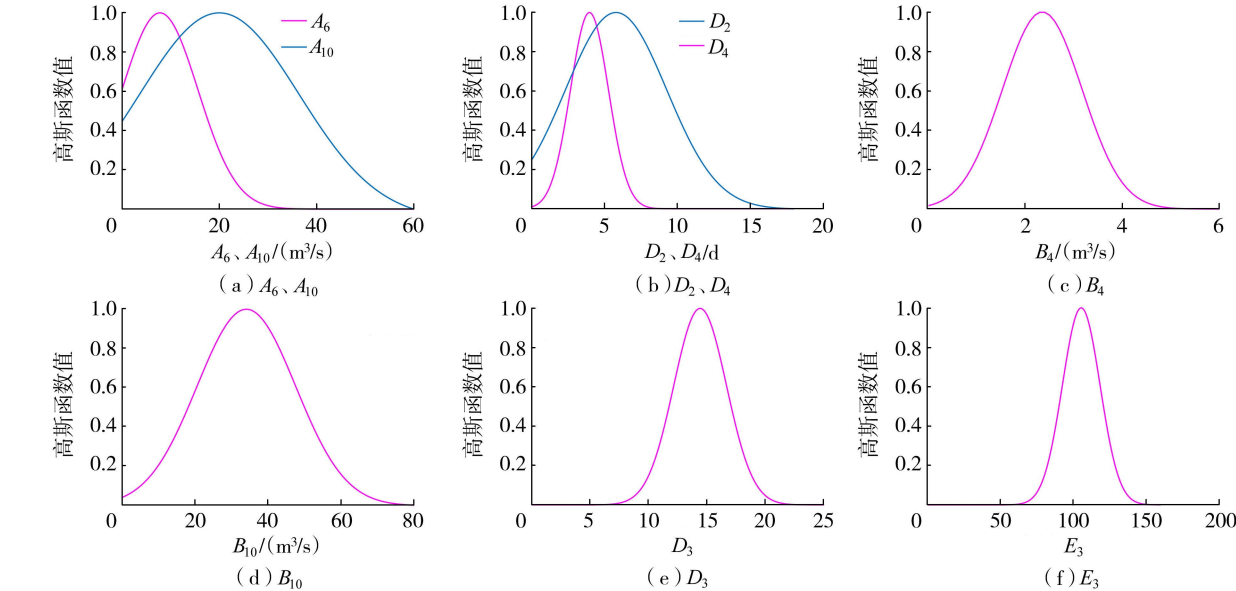


图 8 马渡王优选指标高斯分布

Fig. 8 Gaussian distribution of preferred indicators of Maduwang Station

的结论一致。一方面交叉验证了 3 种方法的可靠性,另一方面证实了本文构建的基于 IDH 的径流情势贴合度评估视角在评估河流生态水文情势变化方面的可行性。

4 讨论

研究结果显示,沔河的水文情势改变度最高,径流情势贴合度最低(0.608);涝河的水文改变度最低,径流情势贴合度最高(0.712);而灞河位于两者之间。尽管 3 条典型支流在水文改变度与径流情势贴合度的具体数值上存在一定的差异,但均属于中度改变的范畴,反映出秦岭北麓渭河典型支流在人类活动与气候变化共同作用下的系统性响应。3 条典型支流径流序列的突变点均位于 20 世纪 90 年代,与江善虎等^[8]关于渭河生态水文情势演变研究的结论一致,可见在区域尺度上存在共性驱动。从整体上看,3 条典型支流的径流量均呈现下降趋势,这与李学武等^[22,32-33]的研究结果一致。作为关中地区主要水源地,灞河、沔河、涝河承担着该地区生产、生活和生态用水的重任,其水文情势与生态过程受到气候变化与人类活动的耦合影响^[34]。

“十八大”以来关中地区经济快速发展,平原城市群发展迅速,城镇化率持续攀升^[35],关中各城市的供水需求呈增加趋势^[36],区域供水压力随之增大,这将直接造成河流径流的衰减。同时,农业灌溉引水工程与蓄水工程将在改变原有水流路径的同时减小河川径流量,近年来 3 条典型支流流域内建设的水利设施在为不同的灌区供水和城市供水的同时也将导致河川径流量的进一步衰减^[36-37]。另外,樊

丽京^[37]的研究表明,地下水的开采也是加剧研究区河川径流量衰减的重要因素。李慧等^[38]的对比研究指出,相较于土地利用变化,气候变化是灞河径流衰减的主导因素。此外,张豪等^[32]进一步研究发现,在气候与植被协同变化的背景下,秦岭北麓植被条件的改善降低了降水转化为径流的比例,削弱了径流对降水变化的响应,从而加剧了径流的衰减趋势。当然,西北干旱半干旱地区气候暖干化的总体背景也对水文变异产生了显著影响^[39-40]。综合来看,秦岭北麓渭河典型支流水文情势的变化是气候变化与人类活动共同作用的复合结果,二者在不同流域和时期的主次作用可能存在差异。

5 结 论

本文以逐日径流资料为基础,结合 IHA-RVA 法、PCA 与 IDH 提出了 PCA-IHA-RVA 法与高斯隶属度法,从水文改变度、径流情势贴合度双重视角系统评估了 3 条渭河典型支流水文情势的演变特征,主要结论如下:

- a. 1970—2019 年,秦岭北麓渭河典型支流——灞河、沔河、涝河的年径流量均呈下降趋势,并于 20 世纪 90 年代发生一致性突变。基于 IHA-RVA 法的评估结果显示,3 条典型支流的总体水文改变度中,沔河最大(69.20%),灞河次之(51.89%),涝河最小(51.30%),均属中度改变范畴。
- b. 采用 PCA 对水文指标筛选后,基于 PCA-IHA-RVA 法的评估结果显示,沔河的整体水文改变度最大(59.64%),涝河最小(45.12%),灞河介于两者之间(50.44%)。虽较传统 IHA-RVA 法的评估结果略有降低,但改变度等级保持一致。
- c. 基于 IDH 构建的高斯隶属度法从径流情势贴合度的视角进一步量化了其水文情势的变化特征。结果显示,涝河的径流情势贴合度最高(0.712),沔河最低(0.608),灞河居于其中(0.635)。该结果与水文改变度视角相互验证,共同揭示了沔河受气候变化与人类活动的影响最为显著,其水文情势的变化最为剧烈。

参考文献:

[1] 张金良,曹智伟,金鑫,等. 黄河流域发展质量综合评估研究[J]. 水利学报, 2021, 52(8): 917-926. (Zhang Jinliang, Cao Zhiwei, Jin Xin, et al. Research on comprehensive evaluation of the development quality of the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(8): 917-926. (in Chinese))

[2] 李宜扬. 公共价值创造视角下农村河流协同治理困境与优化路径[J]. 水利经济, 2024, 42(5): 82-86. (Li

Yiyang. Challenges and optimization paths of collaborative governance of rural rivers from perspective of public value creation[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(5): 82-86. (in Chinese))

[3] 徐保坤,杨晓霞,袁念念,等. 长江经济带农业用水量与农业经济发展脱钩关系[J]. 人民长江, 2024, 55(5): 1-6. (Xu Baokun, Yang Xiaoxia, Yuan Niannian, et al. Decoupling relationship between agricultural water consumption and agricultural economic development in Yangtze River Economic Belt[J]. Yangtze River, 2024, 55(5): 1-6. (in Chinese))

[4] Wang H X, Yan Y Y, Huang L T, et al. Ecological flow research and optimal selection of the most ecologically relevant hydrologic indicators at the Jingjiang River's three outlets[J]. Journal of Water and Climate Change, 2023, 14(11): 4099-4120.

[5] 江善虎,任明明,章二子,等. 基于非平稳 GEV 模型的黄河源区枯季径流演变特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 1-7. (Jiang Shanhu, Ren Mingming, Zhang Erzi, et al. Study on evolution characteristics of dry season runoff using a non-stationary GEV model in Source Region of the Yellow River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 1-7. (in Chinese))

[6] 李铠峰,赵超,李文戔,等. 气候变化及人类活动影响下永安溪河流域水文健康响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 25-30. (Li Kaifeng, Zhao Chao, Li Wenyu, et al. Hydrological health response of climate change and human activities impact of the Yong'an River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 25-30. (in Chinese))

[7] 肖洋,刘扬扬,王中敏,等. 引调水工程对汉江中下游水文情势的累积影响[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 161-170. (Xiao Yang, Liu Yangyang, Wang Zhongmin, et al. Cumulative influence of water diversion projects on hydrological regime of middle and lower reaches of the Hanjiang River[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 161-170. (in Chinese))

[8] 江善虎,刘亚婷,任立良,等. 变化环境下渭河流域生态水文情势演变归因研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 9-14. (Jiang Shanhu, Liu Yating, Ren Liliang, et al. Attribution analysis of eco-hydrological regime evolution in the Weihe River Basin under changing environment[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 9-14. (in Chinese))

[9] 徐宗学,班春广,张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 1-8. (Xu Zongxue, Ban Chunguang, Zhang Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1): 1-8.

- (in Chinese))
- [10] 曹艳敏,王崇宇,黎小东. 湘资沅澧对洞庭湖 IHA 指标影响定量追溯研究[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版), 1-13 [2025-05-28]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1117.tv.20250528.0949.003>. (Cao Yanmin, Wang Chongyu, Li Xiaodong. Quantitative ascend study on the influence of Xiangziyuanli on IHA index of Dongting Lake [J/OL]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 1-13 [2025-05-28]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1117.tv.20250528.0949.003>. (in Chinese))
- [11] 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.
- [12] Richter B D, Baumgartner J, Wigington R, et al. How much water does a river need? [J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1): 231-249.
- [13] Yang Zimei, Chen Ying, Chen Xingwei, et al. Evaluating the hydrological regime alteration under extreme climate scenarios in Southeast China [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 54: 101860.
- [14] 张怡雅,袁飞,张利敏,等. 中线调水对汉江中下游区水文情势影响研究[J]. 水文, 2022, 42(3): 89-94. (Zhang Yiya, Yuan Fei, Zhang Limin, et al. Impacts of water diversion of middle-route project on hydrological regimes of middle and lower reaches of Hanjiang River [J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(3): 89-94. (in Chinese))
- [15] Chen Hao, Guo Wenxian, Ma Jianqin, et al. Evaluating ecohydrological driving factors controlling the hydrology of the Wuijiang River Basin, China [J]. Hydrology Research, 2023, 54(7): 818-839.
- [16] 李继清,刘佳利,邓世浪,等. 变化环境下西江干流水文情势演变及其驱动因素[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 9-18. (Li Jiqing, Liu Jiali, Deng Shilang, et al. Hydrological regime evolution and its driving factors in main stream of the Xijiang River under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 9-18. (in Chinese))
- [17] 肖睿,黄伟,李琴,等. 基于 PCA-RF 的抚河下游生态最相关水文指标优选及演变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(7): 1563-1575. (Xiao Rui, Huang Wei, Li Qin, et al. Optimization and change analysis of the ecological relevant hydrological indicators in the lower reaches of the Fu River based on PCA-RF [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(7): 1563-1575. (in Chinese))
- [18] 王钦,王银堂,胡庆芳,等. 考虑河道内生态需水与径流情势的水库群优化调度[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 109-117. (Wang Qin, Wang Yintang, Hu Qingfang, et al. Optimization of reservoir group operation considering instream ecological water demand and flow regime [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 109-117. (in Chinese))
- [19] Ren Liliang, Yuan Shanshui, Yang Xiaoli, et al. Initiatives to clarify mechanisms of hydrological evolution in human-influenced Yellow River Basin [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(2): 117-121.
- [20] Suen J P, Eheart J W. Reservoir management to balance ecosystem and human needs: incorporating the paradigm of the ecological flow regime [J]. Water Resources Research, 2006, 42(3): W03417.
- [21] 徐盼盼,申艳军,彭建兵,等. 基于生态-经济-社会协同发展理念的秦岭北麓峪道类型化架构思考[J]. 地球科学, 2024, 49(12): 4564-4575. (Xu Panpan, Shen Yanjun, Peng Jianbing, et al. Typed architecture of valley road in northern foothills of Qinling Mountains based on concept of ecological-economic-social collaborative development [J]. Earth Science, 2024, 49(12): 4564-4575. (in Chinese))
- [22] 李学武,黄领梅. 基于多种水文学方法的秦岭北麓典型河流生态流量分析[J]. 水电能源科学, 2024, 42(1): 10-13. (Li Xuewu, Huang Lingmei. Ecological flow analysis of typical rivers in the northern foothills of the Qinling Mountains based on multiple hydrological methods [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(1): 10-13. (in Chinese))
- [23] 王浩. 渭河流域河流-地下水转化及其生态效应[D]. 西安:长安大学, 2020.
- [24] 王可欣. 城市化背景下渭河流域水量转化规律研究[D]. 西安:长安大学, 2023.
- [25] Yang Yunrui, Dai Erfu, Yin Jun, et al. Spatial and temporal evolution patterns of droughts in China over the past 61 years based on the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Water, 2024, 16(7): 1012.
- [26] 张献志,汪向兰,王春青,等. 黄河源区气象水文序列突变点诊断[J]. 人民黄河, 2020, 42(11): 22-26. (Zhang Xianzhi, Wang Xianglan, Wang Chunqing, et al. Diagnosis of abrupt change point of the meteorological and hydrological series in the source area of the Yellow River [J]. Yellow River, 2020, 42(11): 22-26. (in Chinese))
- [27] Imani S, Dinpashoh Y, Asadi E, et al. Assessing the impact of climate change by using Mann-Kendall, Pettitt and statistical downscaling model (case study: Tabriz station) [J]. Acta Geophysica, 2025, 73(2): 2047-2079.
- [28] 董世杰,李英海,吴江,等. 近 60 年洞庭湖水位演变态势研究[J]. 湖泊科学, 2024, 36(2): 575-586. (Dong Shijie, Li Yinghai, Wu Jiang, et al. Water level changes of Lake Dongting in recent 60 years [J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(2): 575-586. (in Chinese))
- [29] 和艳,陆颖,邓丽仙,等. 基于 LSTM 模型的南果河流域日径流预测[J]. 水文, 2025, 45(3): 78-85. (He Yan, Lu Ying, Deng Lixian, et al. Daily runoff prediction in the

Nanguo River Basin based on the LSTM model [J]. Journal of China Hydrology, 2025, 45 (3) : 78-85. (in Chinese))

[30] Santos C, Cetin B, Murillo M, et al. Novel approach to evaluate the effect of aggregate physical properties on the stiffness of pavement base layer [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2025, 26 (1) : 2532697.

[31] Imai N, Samejima H, Demies M, et al. Response of tree species diversity to disturbance in humid tropical forests of Borneo [J]. Journal of Vegetation Science, 2016, 27 (4) : 739-748.

[32] 张豪, 鲍振鑫, 王婕, 等. 气候与植被协同变化下的径流响应研究: 以秦岭北麓为例 [J]. 水科学进展, 2025, 36 (4) : 596-609. (Zhang Hao, Bao Zhenxin, Wang Jie, et al. The response of runoff to coordinated changes in climate and vegetation: a case study at northern foothills of Qinling Mountains [J]. Advances in Water Science, 2025, 36 (4) : 596-609. (in Chinese))

[33] 莫淑红, 王学风, 勾奎, 等. 气候变化和人类活动对灞河流域径流情势的影响分析 [J]. 水力发电学报, 2016, 35 (9) : 7-17. (Mo Shuhong, Wang Xuefeng, Gou Kui, et al. Impacts of climate changes and human activities on annual runoff of Bahe River basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35 (9) : 7-17. (in Chinese))

[34] 李发文, 陶仁杰. 变化环境下子牙河流域水文过程影响要素分析 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (5) : 9-17. (Li Fawen, Tao Renjie. Analysis of factors influencing hydrological processes in the Ziya River Basin under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (5) : 9-17. (in Chinese))

[35] 王金星. 渭河流域关中地区水资源承载力及优化提升研究 [D]. 西安: 长安大学, 2023.

[36] 张建. 秦岭北麓水系现状调查研究: 以辋川河水生态治理为例 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

[37] 樊丽京. 气候变化背景下渭河流域农业灌溉对河流量衰减的风险评估 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.

[38] 李慧, 邓佳伟, 李亚鑫, 等. 秦岭北麓典型流域径流对气候和土地利用变化的响应: 以灞河流域为例 [J]. 生态环境学报, 2024, 33 (5) : 802-811. (Li Hui, Deng Jiawei, Li Yaxin, et al. Impacts of climate and land use change on runoff in typical basin of northern foothills of Qinling Mountains: case study of Bahe River Basin [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33 (5) : 802-811. (in Chinese))

[39] 崔亮, 王进, 吕明侠. 干旱半干旱区流域水文变异下生态效应研究 [J]. 水电能源科学, 2023, 41 (7) : 72-74. (Cui Liang, Wang Jin, Lv Mingxia. Ecological effects of watershed hydrological variation in arid and semi-arid regions [J]. Water Resources and Power, 2023, 41 (7) : 72-74. (in Chinese))

[40] 胡胜, 邱海军, 宋进喜, 等. 气候变化对秦岭北坡径流过程的影响机制研究: 以灞河流域为例 [J]. 干旱区地理, 2017, 40 (5) : 967-978. (Hu Sheng, Qiu Haijun, Song Jinxi, et al. Influencing mechanisms of climate change on runoff process in the north slope of Qinling Mountains: a case of the Bahe River Basin [J]. Arid Land Geography, 2017, 40 (5) : 967-978. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 08 - 07 编辑: 王芳)

+++++

(上接第 76 页)

[42] 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 等. 长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析: 以秦淮河流域为例 [J]. 环境科学, 2021, 42 (7) : 3291-3303. (Ma Xiaoxue, Gong Chang, Guo Jiaxun, et al. Water pollution characteristics and source apportionment in rapid urbanization region of the lower Yangtze River: considering the Qinhuai River Catchment [J]. Environmental Science, 2021, 42 (7) : 3291-3303. (in Chinese))

[43] Yuan Fei, Bauer M E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 106 (3) : 375-386.

[44] 张建永, 李扬, 赵文智, 等. 河西走廊生态格局演变跟踪分析 [J]. 水资源保护, 2015, 31 (3) : 5-10. (Zhang Jianyong, Li Yang, Zhao Wenzhi, et al. Tracking analysis on changes of ecological patterns in Hexi Corridor Region [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (3) : 5-10. (in Chinese))

[45] 王洋, 冯卓亚, 许丽, 等. 塔里木河流域生境质量与土地利用变化响应及驱动力 [J]. 干旱区研究, 2024, 41 (12) : 2132-2142. (Wang Yang, Feng Zhuoya, Xu Li, et al. Response and influencing factors of habitat quality and land use change in the Tarim River Basin [J]. Arid Zone Research, 2024, 41 (12) : 2132-2142. (in Chinese))

[46] 隋露, 闫志明, 李开放, 等. 人类活动及气候变化影响下伊犁河谷生境质量预测研究 [J]. 干旱区地理, 2024, 47 (1) : 104-116. (Sui Lu, Yan Zhiming, Li Kaifang, et al. Prediction of habitat quality in the Ili River Valley under the influence of human activities and climate change [J]. Arid Land Geography, 2024, 47 (1) : 104-116. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 09 - 03 编辑: 王芳)