

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.002

变化环境下渭河流域生态水文情势演变归因研究

江善虎^{1,2}, 刘亚婷^{1,2}, 任立良^{1,2}, 王孟浩², 周乐², 任明明²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:采用生态最相关水文指标(ERHIs)评估渭河流域生态水文情势改变程度,通过主成分分析法筛选出7个指标作为渭河流域的ERHIs,并基于可变下渗容量模型的“观测-模拟”对比分析法对渭河流域生态水文情势演变进行定量归因。结果表明:咸阳水文站和华县水文站径流序列呈显著下降趋势,1990年是径流序列的突变点;咸阳站和华县站实测ERHIs综合改变度为41%和34%,模型模拟的两站ERHIs综合改变度均为18%;气候变化和人类活动导致渭河流域水文情势发生改变,两者对咸阳站ERHIs综合改变度的贡献率分别为44%和56%,对华县站的贡献率分别为53%和47%。

关键词:生态最相关水文指标;生态水文情势;VIC模型;变化环境;渭河流域

中图分类号:TV121 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)06-0009-06

Attribution analysis of eco-hydrological regime evolution in the Weihe River Basin under changing environment// JIANG Shanhu^{1,2}, LIU Yating^{1,2}, REN Liliang^{1,2}, WANG Menghao², ZHOU Le², REN Mingming² (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The variation extent of the eco-hydrological regime of the Weihe River Basin was assessed using the most ecologically relevant hydrologic indicators (ERHIs). Seven indicators were selected as the ERHIs of the Weihe River Basin using the principal component analysis method. The observation-simulation comparative analysis method based on the variable infiltration capacity model was used to quantitatively attribute the changes of the eco-hydrological regime of the Weihe River Basin. The results show that the runoff series at the Xianyang and Huaxian stations had a significant downward trend, and the change points of both runoff series appeared in 1990. The comprehensive alternation degrees of the ERHIs obtained from the measured runoff series were 41% and 34%, respectively, at the Xianyang and Huaxian stations, and those obtained from the simulated runoff series at the two stations were both 18%. Climate change and human activities caused the variations of eco-hydrological regime in the basin, and their contribution rates to the overall hydrological alternation degree of ERHIs were 44% and 56% at the Xianyang Station and 53% and 47% at the Huaxian Station.

Key words: most ecologically relevant hydrologic indicators (ERHIs); eco-hydrological regime; VIC model; changing environment; the Weihe River Basin

河流生态水文情势决定着河流生态系统的物质循环、能量传递、生境与生物之间的相互作用等,进而对河流生态系统健康产生影响^[1-3]。近几十年来,随着社会经济发展和人口增长,强烈的人类活动干扰改变了流域水文循环过程^[4-6],进而在不同程度上改变了河流生态水文情势^[7-9]。因此,剖析河流生态水文情势的变化程度,定量区分气候变化和人类活动对生态水文情势演变的影响,对适应环境

变化的河流健康管理具有重要的科学意义。

近年来,越来越多的学者关注到水文情势变化的量化及其生态效应。由Richter等^[10]提出的水文改变指标(indicators of hydrologic alteration, IHA)法与变动范围(range of variability approach, RVA)法相结合的方法是研究河流生态水文情势变化程度及其生态效应的常用方法。张文浩等^[11]使用IHA方法分析了泼水水库的水文情势变化;杜现增等^[12]将IHA的

基金项目:国家自然科学基金(U2243203, 51979069);中央高校基本科研业务费专项(B200204029)

作者简介:江善虎(1983—),男,教授,博士,主要从事变化环境下水文响应研究。E-mail:hik0216@163.com

通信作者:刘亚婷(1998—),女,硕士研究生,主要从事变化环境下水文响应研究。E-mail:lytinn@163.com

33 个水文指标引入到河流健康综合评价中;陈启慧等^[13]将 RVA 方法应用于生态需水计算;Yang 等^[14]基于 RVA 方法分析了黄河干流的生态水文指标特征,评价了其生态效益。但上述研究中所使用的 IHA 水文指标数目众多(33 个),不利于计算和分析。程俊翔等^[15]使用主成分分析(principal component analysis, PCA)法筛选出 7 个 IHA 水文指标作为洞庭湖出口的生态最相关水文指标(most ecologically relevant hydrologic indicators, ERHIs);Yang 等^[16]采用 PCA 等方法筛选出 6 个指标作为 Illinois 河的 ERHIs。用 ERHIs 来替代数目众多的 IHA 水文指标,既能尽量保留原始数据的关键信息,又能很大程度减少众多水文变量的信息冗余,给研究带来便利。“观测-模拟”对比分析法将自然条件与人为影响条件下的径流特征进行比较,被广泛用于量化环境变化对径流演变的影响^[17-19]。该方法对数据要求较低,可通过选择合适的水文模型来重建流域的自然径流过程。因此,综合 ERHIs 法和“观测-模拟”对比分析法可定量刻画气候变化和人类活动对河流生态水文情势演变的影响。

本文以资源性缺水问题突出的渭河流域作为研究区域,通过 PCA 方法筛选出 7 个 IHA 水文指标作为渭河流域的 ERHIs,利用可变下渗容量(variable infiltration capacity, VIC)模型重建天然流量序列,采用“观测-模拟”对比分析法定量分离气候变化和人类活动对河流生态水文情势演变的影响,以期为适应环境变化的河流健康管理提供科学依据。

1 研究区概况

渭河是黄河的最大支流,属于降水补给性河流。渭河干流全长 818 km,两岸支流众多。渭河流域位于秦岭以北,处于我国湿润区和干旱区的过渡带,属于典型的干旱半干旱气候。渭河的水资源状况很大程度上影响着黄河水资源的丰枯变化、开发利用等。

选取咸阳和华县水文站作为渭河干流流量控制站,华县水文站(109°46'E, 34°35'N)控制区集水面积 10.6 万 km²,咸阳水文站(108°42'E, 34°19'N)控制区集水面积 4.7 万 km²,如图 1 所示。

渭河流域 1961—2017 年多年平均降水量为 564.5 mm,多年平均天然径流量为 63.31 亿 m³,相当于径流深 59.73 mm,多年平均径流系数为 0.11;最大年径流量为 1964 年的 187.60 亿 m³,最小年径流量为 1997 年的 16.83 亿 m³,两者相差约 10 倍。此外,径流年内分配不均匀,其中 1 月来水量最少,仅占全年的 2.5% 左右,9 月来水量最大,占全年的 19% 左右,汛期 7—10 月总来水量占全年的 60% 左右。

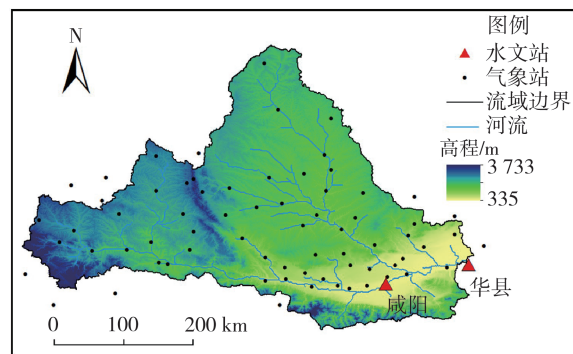


图 1 研究区气象站和水文站示意图

Fig. 1 Sketch of meteorological and hydrological stations in study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

收集了以下数据资料:①摘自水文年鉴的 1961—2017 年咸阳和华县水文站及 62 个雨量站的日降水量及日流量数据;②1961—2017 年渭河流域气象站的气温、风速以及日降水量等数据,均由国家气象局提供;③90 m DEM 数据,来源于中国科学院计算机网络信息中心。

2.2 研究方法

2.2.1 水文变异诊断及天然径流重建方法

采用 Mann-Kendall 趋势分析法对渭河流域咸阳和华县水文站径流序列的变化趋势进行检测,统计量 $Z < -1.96$ 或 $Z > 1.96$ 时,表示通过 95% 的显著性检验。径流序列的突变点通过 Pettitt 突变点检测法确定,并用降雨径流双累积曲线法进行验证。将整个研究期以突变点为界,划分为基准期和变化期,用受人类活动影响较弱的基准期资料来率定 VIC 模型参数,用变化期的水文气象资料驱动 VIC 模型,还原变化期河流的天然径流序列。

2.2.2 ERHIs 确定及生态水文情势改变度计算

RVA 方法是一种以 IHA 水文指标体系为基础的,可定量描述单个水文指标受影响后的变化程度,对比分析变异前后的水文数据,评估水文指标改变程度的方法。一般以突变前各指标的平均值加上或减去标准偏差,或以指标出现频率的 75% 和 25% 作为满足河流生态需求的上限和下限,即 RVA 阈值^[4]。通过估算突变点后年份的 IHA 水文指标以及单个水文指标和综合的水文改变度,来判断水文序列受影响的程度。

由于 IHA 水文指标的冗余性及指标之间的相关性,本文采用 PCA 方法对其简化,以此改进 RVA 方法。PCA 方法采用降维的思想,尽可能保留原始数据信息,以少丢失或不丢失信息为前提,将原有的

许多相关变量转化为新的少数几个不相关的变量,主成分即这些新的少数几个综合变量,每个主成分是原始变量的线性组合。由于渭河流域在 1961—2017 年没有出现断流,所以采用除去断流天数的 32 个 IHA 水文指标进行分析。通过 PCA 方法筛选出若干个 ERHIs 来代替原有的 32 个 IHA 水文指标,改进后的 RVA 方法计算公式如下:

$$S = \frac{P_{\text{post}} - P_{\text{pre}}}{P_{\text{pre}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$D_i = \left| \frac{N_{oi} - N_f}{N_f} \right| \times 100\% \quad (2)$$

$$D_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i^2} \quad (3)$$

式中: S 为 IHA 水文指标的偏移度; P_{post} 、 P_{pre} 分别为改变后和改变前的 IHA 水文指标参数; D_i 为第 i 个水文指标改变度(当 $67\% \leq D_i \leq 100\%$ 时,被认为是高程度改变;当 $33\% \leq D_i < 67\%$ 时,被认为是中等程度改变;当 $0 \leq D_i < 33\%$ 时,被认为是低程度改变); N_{oi} 为第 i 个水文指标在突变点后实际处于 RVA 阈值范围内的年数; N_f 为指标在突变点后预期处于 RVA 阈值内的年数; D_0 为水文指标综合改变度。

2.2.3 环境变化对生态水文情势演变影响的定量评估

利用实测的基准期流量序列得出生态水文指标的阈值,并构建流域生态水文情势演变归因的定量计算方法。分别计算出基准期和变化期的实测序列 ERHIs 综合改变度 D_{obs} 和模拟序列 ERHIs 综合改变度 D_{sim} 。假设气候变化和人类活动对生态水文情势演变的影响是相互独立的,则基于实测径流的综合改变度可表示为

$$D_{\text{obs}} = D_c + D_h \quad (4)$$

式中 D_c 、 D_h 分别为气候变化和人类活动引起的生态水文指标改变度。

由于 VIC 模型的结构和参数与基准期保持一致,因此重建径流仅反映了气候变化影响下的情况,所以基于模拟径流的综合改变度可表示为

$$D_{\text{sim}} = D_c \quad (5)$$

实测与模拟径流的综合改变度的差值可表示为

$$\Delta D = D_{\text{obs}} - D_{\text{sim}} = D_h \quad (6)$$

气候变化对生态水文情势的贡献率 I_c 和人类活动对生态水文情势的贡献率 I_h 分别为

$$I_c = \frac{D_{\text{sim}}}{D_{\text{obs}}} \times 100\% \quad (7)$$

$$I_h = \frac{D_{\text{obs}} - D_{\text{sim}}}{D_{\text{obs}}} \times 100\% \quad (8)$$

3 结果与分析

3.1 水文变异分析及天然径流重建

对 1961—2017 年渭河流域的年径流量和降水量序列进行 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验及 Pettitt 突变点检测的结果如表 1 所示。两站年径流量与降水量均呈下降趋势,咸阳和华县水文站径流量的 M-K 检验统计量 Z 值分别为 -4.1 和 -3.4 ; Pettitt 突变点检测结果显示径流量序列的突变发生在 1990 年附近,又用降雨径流双累积曲线(图 2)对其进行进一步验证,显示两站的径流序列的突变点也在 1990 年附近。因此,将整个研究期分为基准期(1961—1990 年)及变化期(1991—2017 年)。

表 1 渭河流域水文要素检验检测结果

Table 1 Test results of hydrological parameters in the Weihe River Basin

水文站	M-K 趋势检验 Z 值		Pettitt 突变点	
	年径流量	降水量	年径流量	降水量
咸阳	-4.1^*	-1.8	1990 年	—
华县	-3.4^*	-1.7	1990 年	—

注: * 表示显著性水平 $\alpha = 0.01$; — 表示序列无突变点。

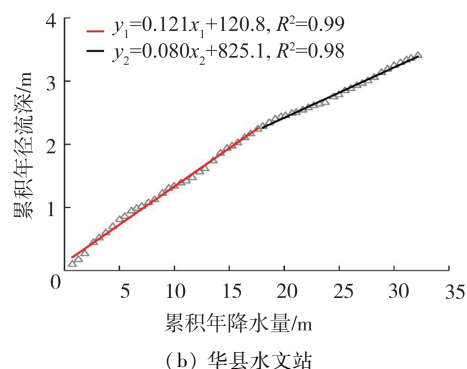
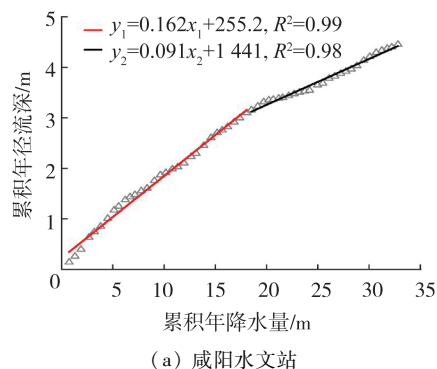


图 2 渭河流域年降雨径流双累积曲线

Fig. 2 Double mass curve of cumulative precipitation and runoff in the Weihe River Basin

将基准期(1961—1990 年)进一步划分,分为模型率定期(1961—1980 年)和验证期(1981—1990 年),VIC 模型的模拟精度结果见表 2,其中纳什效率系数(NSE)最小为 0.67,相对误差(RE)绝对值

最大为 7.7%, VIC 模型的精度达标,表明 VIC 模型基本可以客观地重建渭河流域的历史水文过程。

表 2 VIC 模型模拟精度评价

Table 2 Performance of simulation using VIC model					
水文站	模拟期	NSE		RE/%	
		日径流	月径流	日径流	月径流
咸阳	率定期	0.67	0.68	-7.4	-7.5
	验证期	0.80	0.85	7.7	7.6
华县	率定期	0.72	0.75	-1.5	-1.6
	验证期	0.84	0.89	5.0	4.9

3.2 ERHIs 的选取及趋势分析

基于 PCA 方法的咸阳站和华县站 32 个 IHA 水文指标的特征值及累积贡献率如图 3 所示。其中, 咸阳水文站的第 1 主成分(PC1)的贡献率为 45%, 特征值为 14.27;第 2 主成分(PC2)与 PC1 的累积贡献率为 61%, 特征值为 5.13;前 6 个主成分(PCs)的特征值都大于 1,且累积贡献率为 81%。根据提取原则,接受累积贡献率大于 80% 且特征值大于 1 的 PCs,所以将 PC1 ~ PC6 作为咸阳站所需的主成分。华县水文站的 PC1 的贡献率为 40%, 特征值为

12.77;PC2 与 PC1 的累积贡献率为 58%, 特征值为 5.7。前 7 个 PCs 的特征值大于 1, 累积贡献率为 83%。因此,将 PC1 ~ PC7 作为华县水文站所需的主成分。

以咸阳和华县水文站所选的 PCs 中载荷值的绝对值最高或相对较高的指标作为渭河流域的主成分,最后选择出现频率最高的 7 个指标:流量平均减少率、最大 7 d 平均流量、年最小日流量发生时间、年最大日流量发生时间、1 月平均流量、12 月平均流量和年高流量脉冲发生次数,作为渭河流域的 ERHIs。

利用式(1)(2)计算得出咸阳和华县水文站的 32 个 IHA 水文指标综合改变度分别为 40% 和 37%, 7 个 ERHIs 的综合改变度分别为 41% 和 34%, 可以看出两者计算结果相差不大,验证了 ERHIs 选取的合理性及其对渭河流域生态水文情势的代表性。

渭河流域咸阳和华县水文站 7 个 ERHIs 的时间变化特征分别见图 4 和图 5,图中红线条表示线

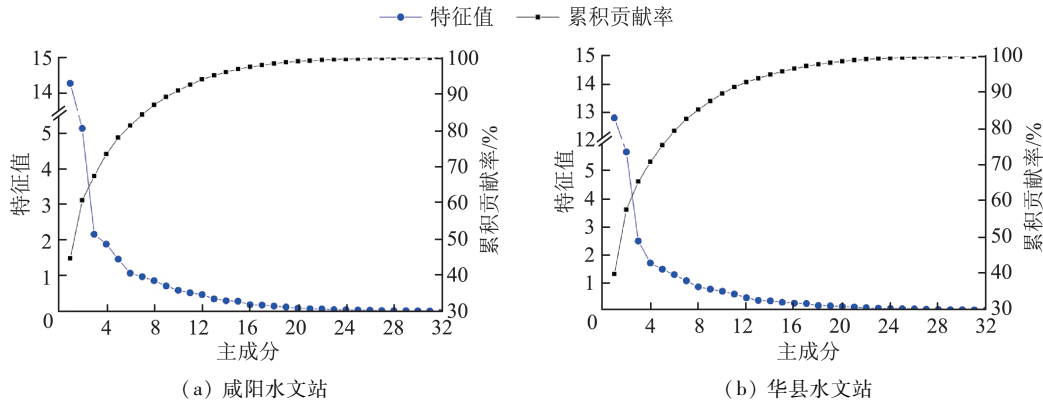


图 3 渭河流域特征值和累积贡献率变化

Fig.3 Variations of eigenvalue and cumulative contribution rate in the Weihe River Basin

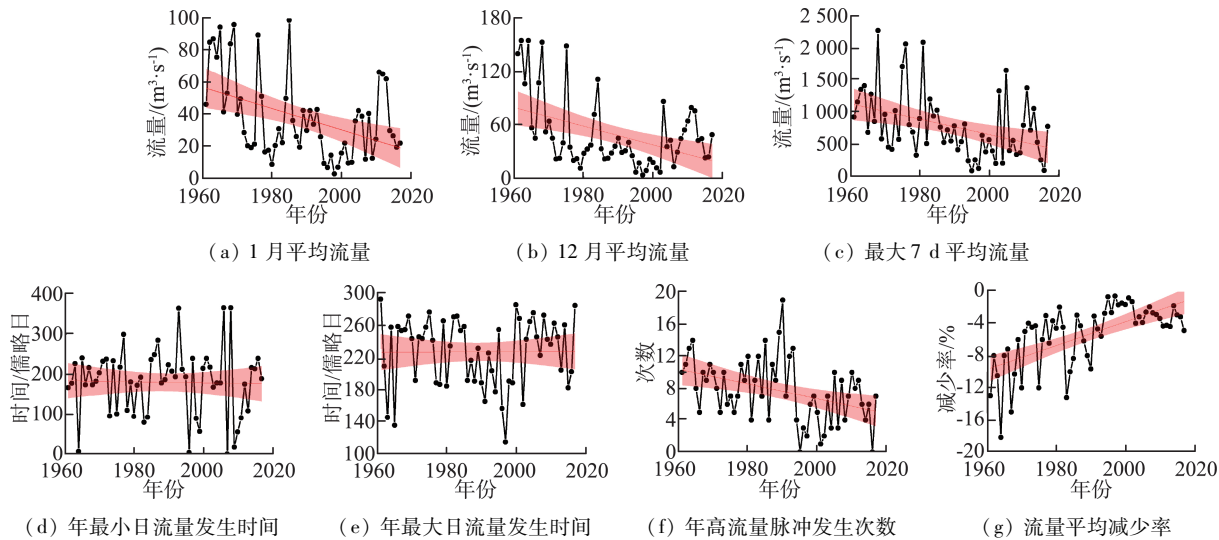


图 4 1961—2017 年咸阳水文站 ERHIs 的时间变化特征

Fig.4 Temporal variations of ERHIs at Xianyang Station from 1961 to 2017

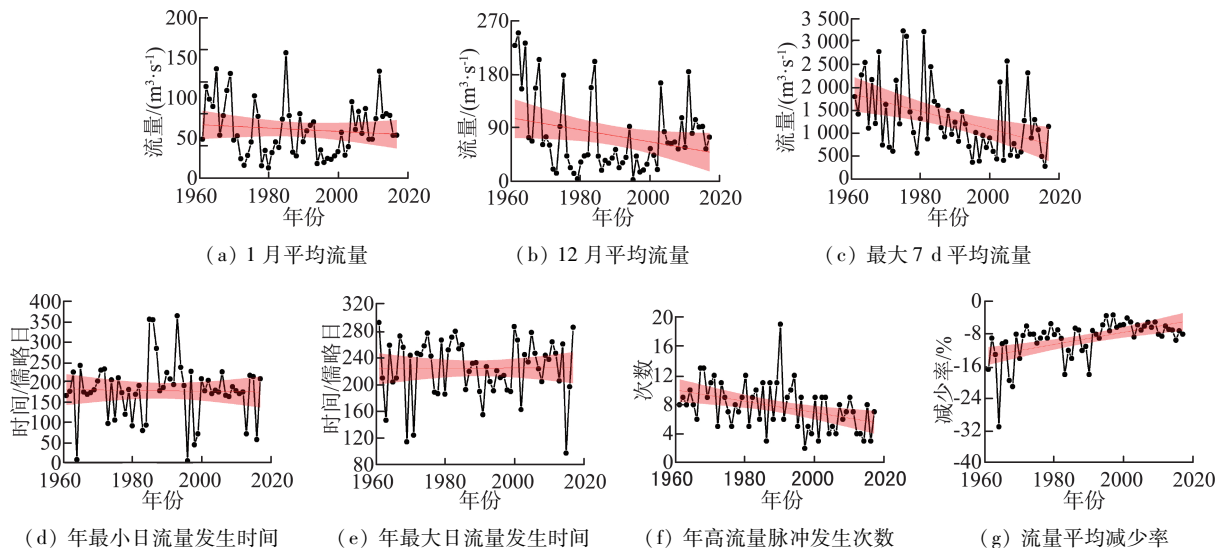


图5 1961—2017年华县水文站ERHIs的时间变化特征

Fig. 5 Temporal variations of ERHIs at Huaxian Station from 1961 to 2017

性趋势,浅红色区域表示置信度为95%的区间,可以看出咸阳站的1月平均流量、12月平均流量和最大7d平均流量分别以每年 $0.66\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $12\text{ m}^3/\text{s}$ 的速率明显下降,年高流量脉冲发生次数也呈逐渐下降趋势。流量平均减少率逐渐增大。而年最小和最大日流量发生时间整体上没有明显变化。华县水文站12月平均流量和最大7d平均流量分别以每年 $1\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $19\text{ m}^3/\text{s}$ 的速率明显下降。除1月平均流量无明显下降趋势,其他指标变化趋势与咸阳水文站一致。这种变化表明了渭河流域的洪峰流量被大大削弱,且径流总量减小。

3.3 生态水文情势演变的定量归因

通过“观测-模拟”对比分析法定量分离气候变化和人类活动对渭河生态水文情势演变的贡献率。表3是咸阳和华县水文站分别以实测径流及VIC模型输出的数据作为输入数据的ERHIs改变度,两站基于实测序列的ERHIs综合改变度分别为41%和34%,都为中度改变,基于模拟序列的ERHIs综合改变度都为18%,属于低度改变。分析结果显示:人类活动导致的咸阳和华县水文站ERHIs综合改变度的变化分别为23%和16%,人类活动对生态水文情势演变的贡献率分别为56%和47%,气候变化对生态水文情势演变的贡献率则分别为44%和53%,表明渭河流域生态水文情势的演变是两者共同作用的结果。

基于实测径流的流量平均减少率在咸阳和华县水文站均发生了中高程度的改变,而这个指标在基于模拟径流的计算结果中改变程度大幅降低,这表明人类活动对生态水文情势演变的影响主要体现在使河流流量减少。近年来,渭河流域耗水量呈较明

表3 渭河流域ERHIs的改变度

Table 3 Change degree of ERHIs in the Weihe River Basin

水文站	IHA 指标	改变度/%		改变程度	
		实测	模拟	实测	模拟
咸阳	1月平均流量	11	25	低	低
	12月平均流量	4	11	低	低
	最大7d平均流量	58	38	低	低
	最小日流量发生时间	10	4	低	低
	最大日流量发生时间	28	5	低	低
	年高流量脉冲发生次数	35	6	中	低
	流量平均减少率	79	3	高	低
综合改变度		41	18	中	低
华县	1月平均流量	32	32	低	低
	12月平均流量	25	24	低	低
	最大7d平均流量	44	3	中	低
	最小日流量发生时间	25	18	低	低
	最大日流量发生时间	4	2	低	低
	年高流量脉冲发生次数	26	17	低	低
	流量平均减少率	57	10	中	低
综合改变度		34	18	中	低

显的增长趋势,农业灌溉耗水量的增加^[20]、水土保持工程的建设、河流沿岸地下水的开采以及雨水集蓄工程等措施的兴建,均是导致渭河径流衰减的人为因素^[21]。此外,气候变化也是渭河流域生态水文情势改变的重要原因,降水的减少引起径流补给量的下降^[20],从而引起生态水文指标的改变。

4 结论

a. 1961—2017年渭河流域年降水量呈不显著下降趋势,咸阳和华县水文站年径流量呈显著减少趋势,于1990年出现突变。根据VIC模型重建了渭河流域历史水文过程,NSE最小为0.67,RE绝对值最大为7.7%。

b. 渭河流域ERHIs指标为流量平均减少率、最

大 7 d 平均流量、年最小日流量发生时间、年最大日流量发生时间、1 月平均流量、12 月平均流量和年高流量脉冲发生次数。流量平均减少率呈上升趋势,极端流量发生时间无明显变化,其余指标均呈下降趋势。

c. 咸阳和华县水文站实测 ERHIs 综合改变度为 41% 和 34%,模型模拟的两站 ERHIs 综合改变度为 18%。人类活动对咸阳和华县水文站 ERHIs 综合改变的贡献率分别为 56% 和 47%,渭河流域生态水文情势的改变由气候变化和人类活动共同作用所致。

参考文献:

- [1] 郭文献,李越,王鸿翔,等. 基于 IHA-RVA 法三峡水库下游河流生态水文情势评价[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(9):2014-2021. (GUO Wenxian, LI Yue, WANG Hongxiang, et al. Assessment of eco-hydrological regime of lower reaches of Three Gorges Reservoir based on IHA-RVA [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(9):2014-2021. (in Chinese))
- [2] 江善虎,周乐,任立良,等. 基于生态流量阈值的河流水文健康演变定量归因[J]. 水科学进展,2021,32(3):356-365. (JIANG Shanhu,ZHOU Le,REN Liliang, et al. Quantifying attribution of the river hydrological health variation based on ecological-flow threshold method[J]. Advances in Water Science,2021,32(3):356-365. (in Chinese))
- [3] MCMILLAN H K. A review of hydrologic signatures and their applications[J]. WIREs Water,2021,8(1):e1499.
- [4] LIANG Xu,WOOD E F,LETTENMAIER D P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model:evaluation and modification[J]. Global and Planetary Change,1996,13(1/2/3/4):195-206.
- [5] OKI T,KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. Science,2006,313(5790):1068-1072.
- [6] 丁一汇. 人类活动与全球气候变化及其对水资源的影响[J]. 中国水利,2008(2):20-27. (DING Yihui. Human activity and the global climate change and its impact on water resources[J]. China Water Resources,2008(2):20-27. (in Chinese))
- [7] 董磊华,熊立华,于坤霞,等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. 水科学进展,2012,23(2):278-285. (DONG Leihua,XIONG Lihua,YU Kunxia, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology[J]. Advances in Water Science,2012,23(2):278-285. (in Chinese))
- [8] HOMA E S,BROWN C,MCGARIGAL K,et al. Estimating hydrologic alteration from basin characteristics in Massachusetts [J]. Journal of Hydrology,2013,503:196-208.
- [9] 班璇,师崇文,郭辉,等. 气候变化和水利工程对丹江口

- 大坝下游水文情势的影响[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):1-7. (BAN Xuan, SHI Chongwen, GUO Hui, et al. Effects of climate change and water conservancy projects on hydrological regime downstream of Danjiangkou Dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(4):1-7. (in Chinese))
- [10] 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.
- [11] 张文浩,瞿思敏,徐瑶,等. 泼水库对潢河径流过程及水文情势的影响[J]. 水资源保护,2021,37(3):61-65. (ZHANG Wenhao,QU Simin,XU Yao, et al. Influence of Pohe Reservoir on runoff process and hydrological regime of Huanghe River[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):61-65. (in Chinese))
- [12] 杜现增,袁榆梁,孟钰,等. 基于复合模糊物元-熵权组合模型的淮河干流健康综合评价[J]. 水资源保护,2021,37(3):145-151. (DU Xianzeng,YUAN Yuliang, MENG Yu, et al. Comprehensive health evaluation of Huaihe River mainstream based on compound fuzzy matter element-entropy weight combination model [J]. Water Resources Protection,2021,37(3):145-151. (in Chinese))
- [13] 陈启慧,夏自强,郝振纯,等. 计算生态需水的 RVA 法及其应用[J]. 水资源保护,2005,21(3):4-5. (CHEN Qihui,XIA Ziqiang,HAO Zhenchun, et al. RVA method for the computation of ecological water requirement and its application [J]. Water Resources Protection,2005,21(3):4-5. (in Chinese))
- [14] YANG Zhifeng,YAN Yan,LIU Qiang. Assessment of the flow regime alterations in the Lower Yellow River, China [J]. Ecological Informatics,2012,10:56-64.
- [15] 程俊翔,徐力刚,姜加虎. 生态最相关水文指标的优选及其在洞庭湖环境流量估算中的应用[J]. 湖泊科学,2018,30(5):1235-1245. (CHENG Junxiang,XU Ligang, JIANG Jiahu. Optimal selection of the most ecologically relevant hydrologic indicators and its application for environmental flow calculation in Lake Dongting[J]. Journal of Lake Sciences,2018,30(5):1235-1245. (in Chinese))
- [16] YANG Y C E, CAI Ximing, HERRICKS E E. Identification of hydrologic indicators related to fish diversity and abundance:a data mining approach for fish community analysis[J]. Water Resources Research,2008,44(4):W04412.
- [17] 江善虎,任立良,雍斌,等. 气候变化和人类活动对老哈河流域径流的影响[J]. 水资源保护,2010,26(6):1-4. (JIANG Shanhu,REN Liliang,YONG Bin, et al. The effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe River basin in Northern China [J]. Water Resources Protection,2010,26(6):1-4. (in Chinese))

(下转第 70 页)

- Response of Dali Lake area to climate factors in the past 45 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(2): 110-115. (in Chinese))
- [12] 曹国亮, 李天辰, 陆垂裕, 等. 干旱区季节性湖泊面积动态变化及蒸发量: 以艾丁湖为例[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1095-1104. (CAO Guoliang, LI Tianchen, LU Chuiyu, et al. Dynamic variation and evaporation of seasonal lakes in arid areas: a case study for the Aiding Lake[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1095-1104. (in Chinese))
- [13] 霍天赐, 颜伟, 马晓飞. 内陆河尾间湖泊水域面积变化及驱动因素研究: 以台特玛湖地区为例[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(3): 149-156. (HUO Tianci, YAN Wei, MA Xiaofei. A study of the variation and driving factors of the water area of the terminal lake of inland river: a case study of Taitema Lake region [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2020, 32(3): 149-156. (in Chinese))
- [14] 梁旭, 刘华民, 纪美辰, 等. 北方半干旱区土地利用/覆被变化对湖泊水质的影响: 以岱海流域为例(2000—2018年)[J]. 湖泊科学, 2021, 33(3): 727-738. (LIANG Xu, LIU Huamin, JI Meichen, et al. Effects of land use/cover change on lake water quality in the semi-arid region of Northern China: a case study in Lake Daihai basin (2000-2018) [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(3): 727-738. (in Chinese))
- [15] CAO Yang, FU Congsheng, WANG Xiao, et al. Decoding the dramatic hundred-year water level variations of a typical great lake in semi-arid region of northeastern Asia [J]. Science of the Total Environment, 2021, 770: 145353.
- [16] 王卫光, 陆文君, 邢万秋, 等. 黄河流域 Budyko 方程参数 n 演变规律及其归因研究[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 7-13. (WANG Weiguang, LU Wenjun, XING Wanqiu, et al. Analysis of change and attribution of Budyko equation parameter n in Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 7-13. (in Chinese))
- [17] 张姝琪, 张洪波, 辛琛, 等. 水文序列趋势及形态变化的表征方法[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 58-67. (ZHANG Shuqi, ZHANG Hongbo, XIN Chen, et al. A method for characterizing trends and morphological changes of hydrological series [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 58-67. (in Chinese))
- [18] 韩先明, 左德鹏, 李佩君, 等. 雅鲁藏布江流域植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 16-23. (HAN Xianming, ZUO Depeng, LI Peijun, et al. Spatiotemporal variability of vegetation cover and its response to climate change in Yarlung Zangbo River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 16-23. (in Chinese))
- [19] PEREZ S I, DINIZ-FILHO J A F, BERNAL V, et al. Alternatives to the partial Mantel test in the study of environmental factors shaping human morphological variation[J]. Journal of Human Evolution, 2010, 59(6): 698-703.
- [20] SCHUOL J, ABBASPOUR K C, SRINIVASAN R, et al. Estimation of freshwater availability in the west African sub-continent using the SWAT hydrologic model [J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(1/2): 30-49.
- [21] 刘柏君, 权锦, 杨超慧, 等. 基于 SWAT 模型的青海省主要流域径流模拟[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 39-44. (LIU Bojun, QUAN Jin, YANG Chaohui, et al. Simulation of runoff of major basins in Qinghai Province based on SWAT model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 39-44. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-10-26 编辑: 施业)

(上接第 14 页)

- [18] JIANG Shanhu, WANG Menghao, REN Liliang, et al. A framework for quantifying the impacts of climate change and human activities on hydrological drought in a semiarid basin of Northern China [J]. Hydrological Processes, 2019, 33(7): 1075-1088.
- [19] 王国庆, 张建云, 管晓祥, 等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 313-323. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, GUAN Xiaoxiang, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 313-323. (in Chinese))
- [20] 任立良, 沈鸿仁, 袁飞, 等. 变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 492-500. (REN Liliang, SHEN Hongren, YUAN Fei, et al. Hydrological drought characteristics in the Weihe catchment in a changing environment [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 492-500. (in Chinese))
- [21] 栗晓玲, 康绍忠, 魏晓妹, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 153-159. (SU Xiaoling, KANG Shaozhong, WEI Xiaomei, et al. Impact of climate change and human activity on the runoff of Wei River basin to the Yellow River [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2007, 35(2): 153-159. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-08-16 编辑: 俞云利)