

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20220620.010.

李欢玮, 赵广举, 穆兴民, 等渭河水文情势变化评估及归因分析[J].水土保持研究, 2023, 30(1): 91-96.
LI Huanwei, ZHAO Guangju, MU Xingmin, et al. Alteration of Hydrologic Regime and Analysis on Its Diving Factors of the Weihe River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 91-96.

渭河水文情势变化评估及归因分析

李欢玮¹, 赵广举^{1,2}, 穆兴民^{1,2}, 田 鹏³, 张舒羽¹

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 河流水文情势关系着河流生态健康, 对河流生态系统的完整性和稳定性具有重要影响。采用线性回归法、Mann-Kendall 法、累积距平法及双累积曲线法分析了渭河流域咸阳、华县与状头 3 个水文站径流变化特征(1965—2018 年), 结合 IHA-RVA 法综合评估河川径流水文指标改变程度, 揭示了人类活动对水文情势的影响。结果表明: 1965—2018 年渭河主干及子流域北洛河流域年径流量呈显著减少趋势($p < 0.05$), 干流咸阳和华县站年径流减少速率分别为 $5.5 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $6.8 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$, 北洛河状头站年径流减少速率为 $8.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$; 咸阳和华县站年径流量突变年份均为 1993 年, 状头站年径流量突变年份为 1994 年。对比突变前后水文指标变化程度, 咸阳、华县与状头站水文整体改变度分别为 48%, 46% 和 50%, 为中度改变。流量变化改变率及频率改变最为显著, 水利工程与水土保持措施是河川水文情势变化的主因。研究结果可为流域水资源可持续利用与水土保持措施合理规划提供理论基础。

关键词: 渭河流域; RVA 法; 水文情势; 归因分析

中图分类号: TV121.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)01-0091-06

Alteration of Hydrologic Regime and Analysis on Its Diving Factors of the Weihe River Basin

LI Huanwei¹, ZHAO Guangju^{1,2}, MU Xingmin^{1,2}, TIAN Peng³, ZHANG Shuyu¹

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of

Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Hydrological regime is related to river ecological health and has an important influence on the integrity and stability of river ecosystem. Linear regression method, Mann-Kendall method, cumulative anomaly method and double cumulative curve method were used to analyze the runoff change characteristics of Xianyang, Huaxian and Zhuangtou hydrological stations in the Weihe River Basin from 1965 to 2018. IHA-RVA method was used to comprehensively evaluate the change degree of runoff hydrological indicators and reveal the impact of human activities on hydrological regime. The results show that the annual runoff of the main and sub-basins of the Weihe River showed a significant decreasing trend from 1965 to 2018 ($p < 0.05$). The annual runoff reduction rates of Xianyang and Huaxian stations were $5.5 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ and $6.8 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$, respectively, and the annual runoff reduction rate of Beiluo River head station was $8.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$. The abrupt change year of the annual runoff at Xianyang and Huaxian stations was the year of 1993, and the abrupt change year of the annual runoff at Fangtou station was the year of 1994. Compared with the changes of

化受降雨与人类活动的影响程度。由于上述方法均较常见,本文不再赘述,具体计算步骤参见相关文献^[11-14]。

2.2.1 水文改变指标法 水文改变指标(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)是由 Richter 提

表 1 IHA 流量指标

组别	内容	IHA 指标
组 1(G ₁)	各月中值流量	1—12 月流量的中值
组 2(G ₂)	年极端流量	年最大(小)1,3,7,30,90 d 径流量,断流天数,基流指数
组 3(G ₃)	年极端流量发生时间	年最大(小)1 日流量发生时间
组 4(G ₄)	高(低)流量的频率及历时	高(低)流量的次数与流量平均历时
组 5(G ₅)	流量变化改变率及频率	流量平均增加(减少)率,每年流量逆转次数

2.2.2 水文情势变化程度 Richter 等^[6]在水文改变指标法(IHA)基础上提出了变化范围法(RVA),评估水文指标变化程度,并以各指标的平均值加减标准差或频率 75%和 25%作为各个指标的上下限,即为 RVA 的目标。

2.2.3 水文改变度

(1) 单个指标水文改变度 D_i 。为了量化 IHA 方法 33 个指标中单一指标受影响后的变异程度,采用水文改变度 D_i 进行计算:

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

式中: D_i 为第 i 个指标的水文改变程度; N_{oi} 为变异后的径流序列 IHA 值在 25%~75%分类范围内的年数; N_e 为相应的期望年数($N_e = R_i \times N_T$, R_i 为 50%, N_T 为变异后径流序列的总年数)。

(2) 整体水文改变度 D_0 。基于每个指标的水文改变度 D_i ,变异后整体水文改变度 D_0 计算如下:

出^[6],通过计算长时间序列日流量变化特征,反映河川径流水文情势变化,该方法包括 33 个水文指标,分别表征河流水文情势的流量、流量脉冲、发生时间、历时和改变率等 5 类特征,具体参数见表 1。

$$D_0 = \sqrt{\frac{1}{33} \sum_{i=1}^{33} D_i^2} \quad (2)$$

为了客观反映水文指标的变异程度,一般将 D_i 和 D_0 划分为 3 个等级进行量化评价,当 $|D_i|$ 和 $|D_0|$ 的值介于 0~33%为无改变或低改变度,用 L 表示;33%~67%为中改变度,用 M 表示;67%~100%为高改变度,用 H 表示。

3 结果与分析

3.1 年径流变化趋势特征

对渭河流域 3 个水文站 1965—2018 年径流数据序列进行线性趋势分析(图 2),各站年径流量呈明显下降趋势。其中,华县站流量的减少速率(0.678 6 亿 m^3/a)最大,显著高于其他两个站点。采用 M-K 趋势检验方法分析,渭河年径流呈现显著下降趋势($p < 0.05$),状头站的统计量-4.01,在 3 个站中年际变化最为明显,径流量显著减小,其次为华县站,咸阳站较前两者变化最小。

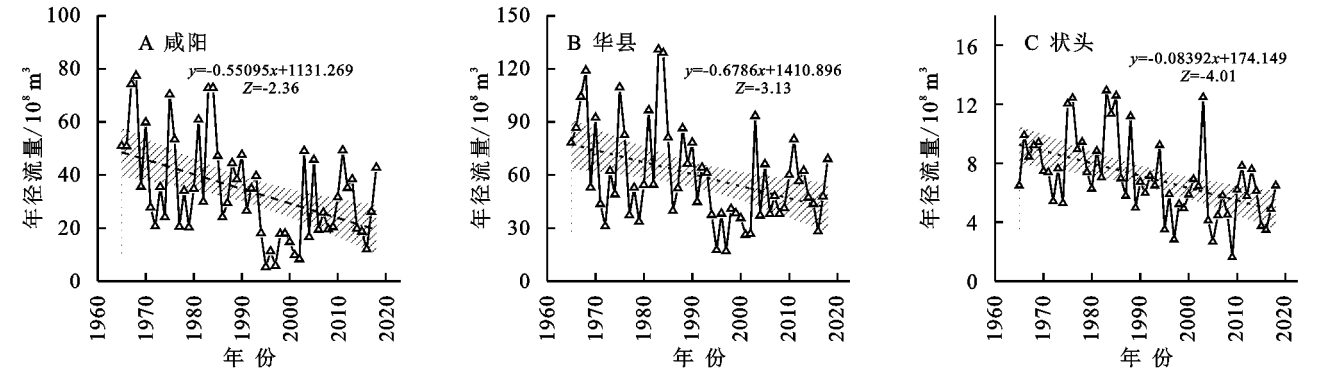


图 2 渭河流域 3 站年径流量变化及趋势

3.2 年径流突变特征

图 3 为咸阳、华县和状头水文站年径流量累积距平曲线。由图可知,各站年径流量累积距平曲线形状较为相似,咸阳和华县站年径流量在 1965—1993 年呈上升趋势,此后呈下降趋势,两站突变年份均为 1993 年。状头站年径流量在 1965—1994 年呈上升趋势,此后呈下降趋势,其突变年份为 1994 年。以突

变年份为分界点,可将水文序列划分为基准期与变化期,基准期代表水文序列受人为活动影响较小,而变化期则受人类活动影响显著。

3.3 流域水文指标变化

根据水文序列突变特征,采用水文改变指标法和变化范围法分别计算基准期和变化期的水文变异指标。表 2 展示了 5 组指标的具体变化特征。

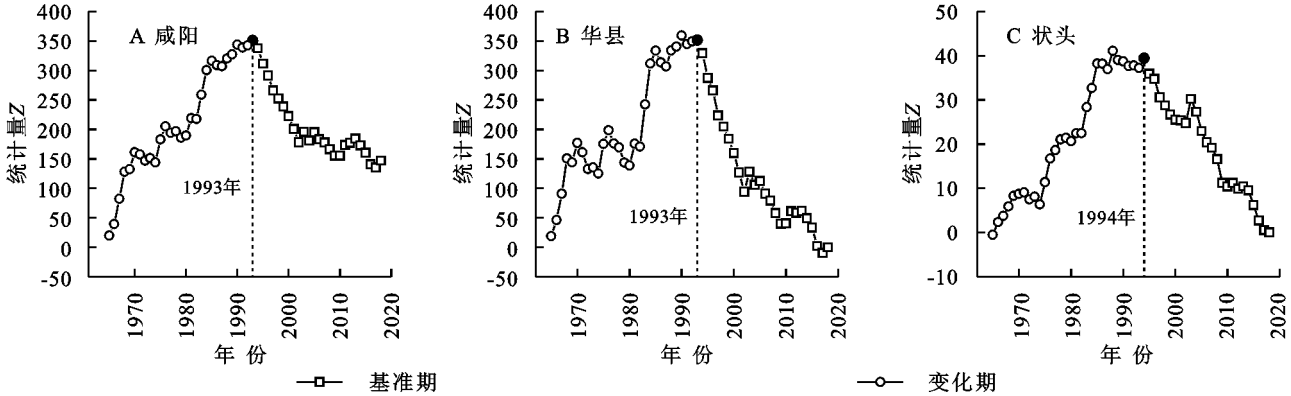


图 3 渭河流域 3 站径流量累积距平突变

表 2 渭河流域各站 33 个 IHA 指标改变度及变化率

组别	IHA 指标	改变度/%			改变率/%		
		咸阳	华县	状头	咸阳	华县	状头
组 1	1 月中值流量	-26	-16	-66	-39	2	-30
	2 月中值流量	-5	27	0	-54	-28	-32
	3 月中值流量	37	27	-63	-57	-45	-36
	4 月中值流量	-47	-26	-75	-52	-56	-37
	5 月中值流量	-47	5	-38	-56	-50	-31
	6 月中值流量	79	79	25	-39	-18	-23
	7 月中值流量	-79	5	-75	-65	-41	-43
	8 月中值流量	-26	16	-25	-34	-10	-40
	9 月中值流量	-58	-37	-38	-60	-56	-33
	10 月中值流量	-47	-5	-38	-57	-37	-31
	11 月中值流量	-68	-58	-63	-40	-26	-36
	12 月中值流量	-37	-37	-25	-18	52	-33
组 2	年均 1 d 最小流量	-37	-68	-13	-49	26	-72
	年均 3 d 最小流量	-37	-79	75	-16	26	-54
	年均 7 d 最小流量	-26	-68	100	-11	-8	-40
	年均 30 d 最小流量	-16	-16	63	-20	19	-34
	年均 90 d 最小流量	-26	16	-50	-44	-18	-38
	年均 1 d 最大流量	-79	-68	-25	-48	-47	-41
	年均 3 d 最大流量	-58	-71	-50	-47	-44	-32
	年均 7 d 最大流量	-58	-68	-38	-49	-38	-34
	年均 30 d 最大流量	-68	-47	-38	-45	-34	-36
	年均 90 d 最大流量	-58	-58	-38	-54	-43	-31
组 3	断流天数	0	-4	0	0	0	0
	基流指数	-5	-26	25	54	75	-22
	年最小流量出现时间	-5	-26	-38	-8	-2	2
组 4	年最大流量出现时间	-16	-5	2	0	3	2
	低流量脉冲次数	-25	2	-58	33	14	79
	低流量脉冲历时	-11	-9	75	-4	8	-7
	高流量脉冲次数	-32	-42	-13	-44	-22	-27
组 5	高流量脉冲历时	-32	-25	-44	-25	-33	-17
	流量上升率	-89	-61	6	-59	-35	-5
组 5	流量下降率	-81	-52	-6	-54	-30	-1
	逆转次数	-37	-89	-100	21	26	24

(1) 各月中值流量变化:由表 2 可知,3 站各月中值流量变异程度存在一定差异,与基准期相比,咸阳站各月中值流量均呈减小趋势,尤其是雨季,如 7 月

份平均径流为 122 m³/s 减少至变化期的 43.1 m³/s;华县站除 1 月、12 月经流量分别增加 2%和 52%外,其余月份均减小,且 4 月、9 月流量减少量最大;状头站各月中值流量均呈减小趋势,6 月流量的变化率最小为 23%,其余各月流量变化率均在 30%~50%。咸阳站各月中值流量发生中改变度居多,而 6 月、7 月、11 月份改变度大于 67%,均属于高改变度;1 月、2 月、8 月份改变度小于 33%,均属于低改变度。华县站仅 6 月中值流量变化最为剧烈,属于高改变度。状头站仅 4 月、7 月份均为高改变度

(2) 年极端流量大小:咸阳站年极端流量中值在 1993 年后均有不同程度减小,年均 90 d 最大流量的减少量最多;仅年均 1 d,30 d 最大流量水文改变度为高改变度。华县站年均 1 d,3 d,30 d 最小流量中值呈增加趋势,其余指标均减小;年均最小、最大流量中值主要为高改变度。状头站自 1994 年后年极端流量中值均呈减小趋势;3 d,7 d 最小流量均为高改变度,且 7 d 最小流量改变度高达 100%。3 站中,仅华县站 1995 年 11 月 30 日发生断流,断流天数为低改变度(4%),咸阳和状头站无断流天数。相关研究表明,造成华县站断流的原因可能是进入 90 年代后渭河水沙偏枯,流量减少,高含沙小洪水增多且潼关高程居高不下,导致渭河下游河道发生明显萎缩^[15]。

(3) 年极端流量发生时间:在变化期,咸阳与华县站年最小流量出现时间分别提前了 15 d 和 3 d,而年最大流量出现时间分别推迟了 1 d 和 6 d。状头站每年极端流量出现时间均推迟。3 站年极端流量发生时间中仅状头站最小流量出现时间为 38%,属于中改变度,其余均为低改变度。3 站基流指数较突变前仅状头站呈减小趋势。

(4) 高、低流量的频率及历时:咸阳、华县和状头站的高流量脉冲次数与历时中值均减小,低流量脉冲次数均增加,而咸阳站和状头站的低流量脉冲历时中值减小,华县站的低流量脉冲历时中值增加。咸阳站

高、低流量脉冲次数与历时中值均为低改变度。华县站仅高流量脉冲次数为中改变度,其余均为低改变度。3 站中仅状头站低脉冲历时中值变化最为明显,水文改变度达 75%,为高改变度,低流量脉冲次数与高流量脉冲历时中值为中改变度。

(5) 流量变化改变率及频率:突变后,各站流量变化率中值均减小,每年流量逆转次数中值均增加。咸阳站流量变化率中值水文改变度超过 80%,在 3 站中变化最为显著,属于高改变度;华县站和状头站流量的逆转次数增加幅度显著,改变度分别为 89% 和 100%,均属于高改变度。

3.4 整体水文改变度分析

对比 3 个站 33 个水文指标变化情况,状头站的水文改变程度较咸阳和华县站的水文改变程度更高。见图 4,受水文突变的影响,华县站发生高(低)度改变的水文指标所占比例最高,占 24%(52%),咸阳和状头站的高(低)度改变的指标所占比例次之,分别为 21%(43%)和 18%(36%);状头站中度改变的水文指标所占比例最高,为 46%,咸阳和华县站的中度改变依次降低,分别为 36%和 24%;3 个站点均高改变度水文指标占比最少。

表 3 为咸阳、华县和状头 3 个水文站各组指标的整体水文改变度,表中 H,M 和 L 分别表示高、中和低改变度。分析可知,咸阳和华县站第 3,4 组为均低改变度,第 1,2 组为中改变度,仅第 5 组为高改变度。状头站第 2,3 组为低改变度,其余各组均为中改变度,无高改变度组。采用 RVA 法计算的咸阳、华县和状头站的整体水文改变度 D_0 分别为 48%,46%和

50%,均属于中改变度。表明突变后,3 站的水文指标发生较为显著的改变。

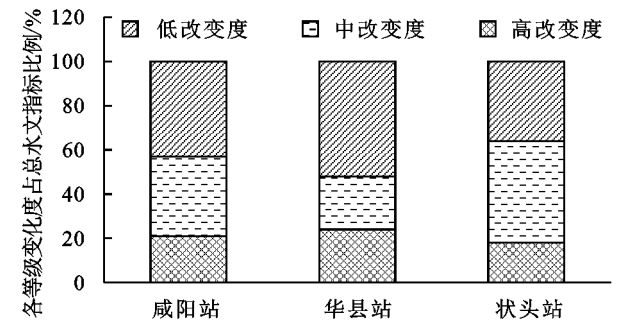


图 4 渭河流域 3 站不同等级变化度所占比例

表 3 各水文站流量序列整体水文改变度

水文站	各组平均改变度					整体水文改变度 D_0
	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	
咸阳	51(M)	46(M)	12(L)	24(L)	73(H)	48(M)
华县	35(M)	55(M)	19(L)	22(L)	69(H)	46(M)
状头	50(M)	13(L)	27(L)	53(M)	58(M)	50(M)

3.5 水文情势变化归因分析

采用双累积曲线法量化人类活动与降雨因素对渭河流域水文情势的影响程度。由图 5 可知,3 个站的径流—降雨关系曲线斜率发生偏移时间与累积距平计算结果一致。通过径流—降雨双累积曲线回归分析,计算得到突变前后两个时段内各站降雨与人类活动对径流变化的贡献(表 4)。咸阳、华县和状头站的径流计算值均远大于实测值,说明流域的径流量受人类活动的影响比气候变化更加显著。华县站,人类活动与降雨对径流减少的贡献率分别为 74.24%和 25.76%;而咸阳站和状头站,人类活动对径流减少的贡献率远远大于降雨的贡献率,分别为 90.32%和 96.41%。

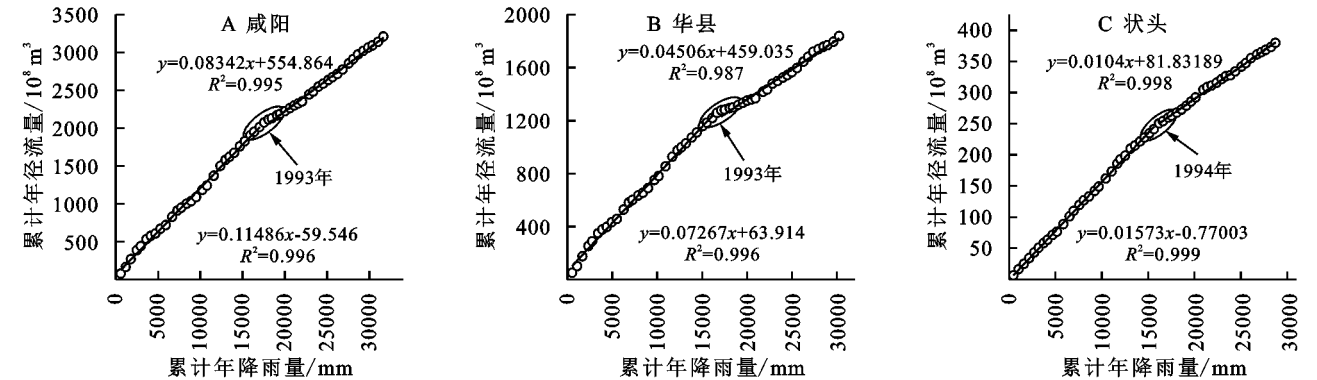


图 5 3 站 1965—2018 年降雨—径流双累积曲线

4 讨论

在气候变化与人类活动共同作用下,流域水文情势发生显著变化,干旱地区河川径流量锐减^[16]。研究发现,强烈的人类活动是导致渭河河川径流锐减的主要影响因素。20 世纪 70 年代以来渭河流域修建了大量的水利工程。截至 2000 年底,渭河流域已

修建大、中及小型水库 302 座,总库容达 27.3 亿 m^3 ,兴利库容为 15.5 亿 m^3 ^[17]。汛期通过坝库工程调蓄洪水,降低洪峰流量,延长泄洪滞时,非汛期通过水库调度,增加枯季流量,进而调整径流年内分配,对河流水文情势产生影响。渭河年径流量呈显著下降趋势,但 IHA 指标减小幅度不大,整体改变度为中度改变,月中值流量在汛期减少而非汛期略有增加,

同时一定程度上减少了高脉冲发生的次数,对枯水期的影响尤为明显^[18]。

同时,渭河中下游累积建成引水工程 2 600 余

处,有效灌溉面积达 121 万 hm^{2[17]},其中大型灌区 9 处,如宝鸡峡灌区、交口抽渭灌区等,因此农业灌溉是改变河川径流的主要因素之一。

表 4 不同时段降水与人类活动对各站的径流减少贡献分析

水文站	时段	实测值/ (10 ⁸ m ³)	计算值/ (10 ⁸ m ³)	实测径流变化		降雨影响		人类活动影响	
				变化量/(10 ⁸ m ³)	百分比/%	变化量/(10 ⁸ m ³)	百分比/%	变化量/(10 ⁸ m ³)	百分比/%
咸阳	1965—1993	43.42	—	—	—	—	—	—	—
	1994—2018	23.17	41.46	20.25	46.64	1.96	9.68	18.29	90.32
华县	1965—1993	71.57	—	—	—	—	—	—	—
	1994—2018	45.40	64.83	26.17	36.57	6.74	25.76	19.43	74.24
状头	1965—1994	8.35	—	—	—	—	—	—	—
	1995—2018	5.36	8.24	2.99	35.81	0.11	3.59	2.88	96.41

渭河是黄河泥沙主要贡献支流之一。1957—2000 年,多年平均输沙量为 3.52 亿 t,占龙门—潼关区间河段输沙高达 98.9%^[19]。为有效减少入黄泥沙,渭河流域实施了大规模的梯田^[20]、淤地坝建设^[21]、退耕还林(草)等^[22]水土保持措施,这些措施极大的改变了流域坡面与沟道的水文过程,进而改变了河川径流的水文情势。截至 2006 年,全流域兴修梯田 206 万 hm²,造林种草 325 万 hm²,淤地坝坝控面积 1.41 万 hm^{2[23]}。渭河上游分布大面积的梯田,其有效的改变了地表坡度,缩短坡长,拦蓄地表径流,增加地表入渗。退耕还林(草)措施使得渭河流域林草植被覆盖率显著提高,如北洛河上游林草植被覆盖率由 70 年代的 24.3%增加至 2013 年的 53%^[23]。植被盖度与丰富度的增加,显著提高了冠层降雨截留,减少达到地面的雨量^[24];林下枯枝落叶层增加土壤湿度和水分入渗量,同时增大了地表汇流阻力,降低流速,延长汇流时间,进而减少地表径流。

5 结论

本文利用渭河流域咸阳、华县及状头 3 个代表性水文站 1965—2018 年实测径流资料,采用线性回归法、Mann-Kendall 法、累积距平法及双累积曲线法对渭河流域径流变化特征及其驱动因素进行了分析,结合 IHA-RVA 法综合评估渭河流域 3 站突变前后水文指标改变程度,分析揭示水利工程建设、水土保持生态建设等人类活动对水文情势的影响。取得如下结论:

(1) 渭河主干和子流域北洛河流域年径流量呈显著减少趋势,干流咸阳站和华县站分别减少 5.5×10⁷ m³/a 和 6.8×10⁷ m³/a,北洛河流域减少速率为 8.0×10⁶ m³/a。咸阳和华县水文站年径流量变化突变年份为 1993 年,状头站年径流量变化突变年份为 1994 年。

(2) 咸阳、华县和状头站水文综合改变度分别为 48%,46%,56%,均属于中等改变度。较突变点前,

咸阳站流量变化改变率及频率为高度改变度,各月中值流量均呈下降趋势,4—7 月中值流量变化幅度较大;华县站 IHA 指标减少幅度不显著,月中值流量在汛期减少而非汛期增加,高脉冲发生的次数减少;状头站各月中值流量、年极端流量均不同程度减少,水文情势变化对 4 月、7 月中值流量与 3 d,7 d 最小流量、流量逆转次数为高改变度。

(3) 人类活动是引起河川径流变化的主要原因,水利工程可以有效调节径流年内分配,起到减洪补枯的作用;农业灌溉引水工程改变原有水流路径的同时显著减少河川径流量;退耕还林(草)措施等水土保持措施拦蓄地表径流,增加降雨入渗,对河道径流的影响主要以减水作用为主。

参考文献:

[1] 刘琳轲,梁流涛,高攀,等.黄河流域生态保护与高质量发展的耦合关系及交互响应[J].自然资源学报,2021,36(1):176-195.

[2] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].水科学进展,2013,24(5):607-616.

[3] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.近 60 年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J].资源科学,2012,34(6):1070-1078.

[4] 胡春宏,张晓明.论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J].水利学报,2018,49(9):1028-1039.

[5] 胡春宏,王延贵,张燕菁,等.中国江河水沙变化趋势与主要影响因素[J].水科学进展,2010,21(4):524-532.

[6] Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. Conservation Biology, 1996,10(4):1163-1174.

[7] 程俊翔,徐力刚,姜加虎.水文改变指标体系在生态水文研究中的应用综述[J].水资源保护,2018,34(6):24-32.

[8] Tian X J, Zhao G J, Mu X M, et al. Hydrologic alteration and possible underlying causes in the Wuding River, China[J]. the Science of the Total Environment, 2019,693:133556.

被指数(NDVI)变化特征及对气候变化的响应[J].生态与农村环境学报,2020,36(1):70-80.

[23] 刘少华,严登华,史晓亮,等.中国植被 NDVI 与气候因子的年际变化及相关性研究[J].干旱区地理,2014,37(3):480-489.

[24] 卢乔倩,江涛,柳丹丽,等.中国不同植被覆盖类型 NDVI 对气温和降水的响应特征[J].生态环境学报,2020,29(1):23-34.

[25] 周金霖,马明国,肖青,等.西南地区植被覆盖动态及其与气候因子的关系[J].遥感技术与应用,2017,32(5):966-972.

[26] 卓嘎,陈思蓉,周兵.青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J].生态学报,2018,38(9):3208-3218.

[27] 陆晴,吴绍洪,赵东升.1982—2013 年青青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系[J].地理科学,2017,37(2):292-300.

[28] 张镱锂,李炳元,郑度.论青藏高原范围与面积[J].地理研究,2002,21(1):1-8.

[29] 徐新良.中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集[EB/OL].2018-06-06[2019-03-15].<http://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx>,2018.

[30] 刘静,温仲明,刚成诚.黄土高原不同植被覆盖类型 NDVI 对气候变化的响应[J].生态学报,2020,40(2):678-691.

[31] 杨艳萍,陈建军,覃巧婷,等.2000—2018 年广西植被时空变化及其对地形、气候和土地利用的响应[J].农业工程学报,2021,37(17):234-241.

[32] 韩炳宏,周秉荣,颜玉倩,等.2000—2018 年青青藏高原植被覆盖变化及其与气候因素的关系分析[J].草地学报,2019,27(6):1651-1658.

[33] 张戈丽,欧阳华,张宪洲,等.基于生态地理分区的青藏高原植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J].地理研究,2010,29(11):2004-2016.

[34] 杨达,易桂花,张廷斌,等.青藏高原植被生长季 NDVI 时空变化与影响因素[J].应用生态学报,2021,32(4):1361-1372.

[35] 王军,张骁,高岩.青藏高原植被动态与环境因子相互关系的研究现状与展望[J].地学前缘,2021,28(4):70-82.

[36] 柴立夫,田莉,奥勇,等.人类活动干扰对青藏高原植被覆盖变化的影响[J].水土保持研究,2021,28(6):382-388.

[37] 马海丽,林慧龙,熊潇雨,等.草原生态补奖政策对青藏高原草地植被状况的影响分析[J].草地学报,2021,29(3):545-554.



(上接第 96 页)

[9] 张洪波,顾磊,陈克宇,等.渭河生态水文联系变异分区研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2016,44(6):210-220.

[10] 赵静,黄强,刘登峰.渭河流域水沙演变规律分析[J].水力发电学报,2015,34(3):14-20.

[11] Woo M, Thorne R. Comment on 'Detection of hydrologic trends and variability' by Burn, D. H. and Hag Elnur, M. A.,2002. Journal of Hydrology 255,107-122 [J]. Journal of Hydrology, 2003,277(1):150-160.

[12] 周园园,师长兴,范小黎,等.国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J].地理科学进展,2011,30(11):1361-1369.

[13] 姜瑶,徐宗学,王静.基于年径流序列的 5 种趋势检测方法性能对比[J].水利学报,2020,51(7):845-857.

[14] 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.

[15] 陈建国,胡春宏,戴清.渭河下游近期河道萎缩特点及治理对策[J].泥沙研究,2002(6):45-52.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 郭文献,陈鼎新,李越,等.基于 IHA-RVA 法金沙江下游生态水文情势评价[J].水利水电技术,2018,49(8):155-162.

[19] 冯家豪,赵广举,穆兴民,等.黄河中游泥沙输移特性及机理研究[J].泥沙研究,2020,45(5):34-41.

[20] 刘晓燕,王富贵,杨胜天,等.黄土丘陵沟壑区水平梯田减沙作用研究[J].水利学报,2014,45(7):793-800.

[21] 鞠琴,王尧,王哲,等.淤地坝和植被变化对渭河流域水沙情势的影响[J].水力发电,2021,47(6):18-24.

[22] 蒋冲,王飞,穆兴民,等.退耕还林(草)背景下渭河流域植被覆盖时空变化分析[J].农业现代化研究,2012,33(4):470-474.

[23] 张丽梅,赵广举,穆兴民,等.基于 Budyko 假设的渭河径流变化归因识别[J].生态学报,2018,38(21):7607-7617.

[24] Van Dijk A, Bruijnzeel L A. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model: Part 1. Model description[J]. Journal of Hydrology (Amsterdam),2001,247(3):230-238.