

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.029.

董玉婷, 王双银, 穆兴民, 等. 基于 IHA-RVA 法的生态治理对径流演变情势的影响评估[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 193-200.

DONG Yuting, WANG Shuangyin, MU Xingmin, et al. Assessment on Impact of Ecological Management on Runoff Evolution Based on IHA-RVA Method[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 193-200.

基于 IHA-RVA 法的生态治理对径流演变情势的影响评估

董玉婷¹, 王双银¹, 穆兴民^{2,3}, 王哲¹

(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 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.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)

摘要: 研究流域径流演变情势及其对生态治理的响应, 可为流域水资源合理利用和水生态治理提供重要指导。该文依据北洛河上游 1964—2014 年逐日平均流量和年降水量资料, 采用双累积曲线法、双滑动平均法 (MASH) 和 Mann-Kendall 趋势检验法对径流过程变化进行了分析研究, 采用水文指标变化范围法 (IHA-RVA) 对 5 组 30 个径流指标及其改变度进行了评估, 对径流演变成因做了初步分析。结果表明: 研究期内年径流呈现减少趋势, 且以 1979 年和 2002 年为界可划分为基准期、水土保持治理期和生态恢复影响期; 汛期流量下降较非汛期明显, 减少幅度为 35.6%; 生态治理影响下径流指标整体水文改变度为 74.35%, 属于高度改变; 5 组 30 个径流指标中发生高度改变的指标占比增加, 其中年极端流量组变化度最大, 为 94.77%。人类活动使得流域河川径流显著减少且波动性减弱, 而水土保持、退耕还林(草)措施是核心驱动力。

关键词: 径流演变; 生态治理; IHA-RVA 法; 成因分析; 北洛河上游

中图分类号: P333; TV121.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)02-0193-08

Assessment on Impact of Ecological Management on Runoff Evolution Based on IHA-RVA Method

DONG Yuting¹, WANG Shuangyin¹, MU Xingmin^{2,3}, WANG Zhe¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the

Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water

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

Abstract: The evolution of runoff and its response to ecological management can provide paramount guidance for the reasonable use of water resources and the management of water ecological at basin scale. With the help of daily average streamflow and yearly precipitation data from 1964 to 2014 in the upper reaches of Beiluo River, we analyzed and investigated the processes of streamflow changes using the methods of double cumulative curve, double moving average (MASH), and Mann-Kendall trend test. Moreover, the 30 streamflow indicators of 5 groups and their change degrees were evaluated utilizing the range of hydrological indicators change method (IHA-RVA), and a preliminary analysis was done for the causal of streamflow evolution. The annual streamflow showed the decreasing trend during the study period. Taken the years of 1979 and 2002 as the time nodes, the study period could be divided into the baseline period, the conservation

收稿日期: 2021-12-03

修回日期: 2022-01-14

资助项目: 国家自然科学基金(42077075, 41671285)

第一作者: 董玉婷(1996—), 女, 甘肃和政人, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源研究。E-mail: yutingd@nwfau.edu.cn

通信作者: 王双银(1969—), 男, 甘肃镇原人, 副教授, 博士, 主要从事水文极值事件和水资源配置研究。E-mail: wshy0806@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

management of soil and water period, and the impact of ecological restoration period. Compared with the non-flood season, the streamflow decreased by 35.6% in the flood season. Under the influence of ecological management, the overall change degree of hydrology caused by the streamflow index was 74.35%. Among the 30 streamflow indexes in the 5 groups, the proportion of index with the pronounced changes increased. The mostly changed degree was the group of annual extreme streamflow that the proportion accounted for 94.77%. Significantly reduced streamflow and its fluctuation could be resulted from the human activities, in which the key drivers were the conservation of water and soil and returning farmland to forest or grassland.

Keywords: runoff evolution; ecological governance; IHA-RVA; cause analysis; upper reaches of Beiluo River

黄土高原地区生态环境脆弱,水土流失严重,为有效防治生态环境恶化与水土流失,区域内开展了水土保持综合治理与大规模退耕还林(草)工程^[1],经过系统治理,生态环境大幅改善,生态效应显现^[2],流域水沙情势发生显著变化^[3-4]。然而,由于气候变化与大范围生态治理工程的实施,流域水文过程和水资源供需关系也发生相应改变^[5-6],进而对流域生态恢复和经济发展造成一定影响^[7],因此,探讨变化环境下的径流演变情势及其驱动因素^[8]具有一定的现实意义。

目前,针对径流变化已有大量研究成果。出于对水利工程规划、设计与管理安全以及水资源合理开发利用的考虑,分析年、季、月尺度的径流过程变化规律及其变化成因^[9],同时从防洪减灾目的出发,分析典型暴雨洪水特性及其对下垫面变化的响应^[10],对日径流过程的相关研究也多从基流角度出发,探讨基流分割方法^[11]、基流时空演变规律及其对人类活动的响应^[12],对径流多指标演变情势的综合研究相对不足。Richter 等^[13-14]提出的水文变异指标体系(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)与变化范围法(Range of Variability Approach, RVA)可通过多指标分析更系统全面地评估径流演变情势。目前 IHA-RVA 法多用于评估水库、电站等水利工程对河流水文情势的影响^[15-16],在水土保持和退耕还林(草)等生态治理工程的径流演变情势影响方面研究较少^[17]。

地处黄土丘陵沟壑区的北洛河流域,随着大规模生态环境治理工程的实施,植被覆盖度大幅提升,该流域生态治理对径流变化的影响研究具有良好典型性^[18]。本文选取其他人类活动相对较少的北洛河上游(吴旗水文站以上)为研究区,基于长序列实测水文资料,研究径流演变情势与生态治理响应关系,以期对流域水资源开发利用和黄河流域生态保护及高质量发展提供科学参考。

1 研究区概况

北洛河是渭河的一级支流、黄河的二级支流。发

源于陕西省定边县草梁山,流经陕、甘两省 5 地(市) 18 县(区),在陕西大荔县三河口汇入渭河,流域总面积 $2.69 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。研究区北洛河上游坐标 $107^\circ 32' 40'' - 108^\circ 32' 45'' \text{ E}$, $36^\circ 44' 53'' - 37^\circ 19' 28'' \text{ N}$,多数地区梁峁起伏,地形破碎、沟壑纵横,水土流失严重,是黄河重要的粗砂多砂区。流域地处暖温带,研究期内流域多年平均降水量 459.87 mm, $\text{CV} = 0.23$,最大值 780.81 mm(1964 年),最小值 261.50 mm(1987 年)(图 1)。上游水文站实测多年平均径流量 $9.444 7 \times 10^7 \text{ m}^3$, $\text{CV} = 0.47$,最大值 $2.292 \times 10^8 \text{ m}^3$ (1964 年),最小值 $4.079 \times 10^7 \text{ m}^3$ (2008 年)。为遏制严重的水土流失,20 世纪 60 年代以来,研究区采取了以修建梯田、淤地坝主的水土流失治理措施,20 世纪 90 年代末,实施以植被恢复为重点的林业生态建设工程^[18]。截至 2004 年底,共修建淤地坝 95 座,控制面积 244.2 km^2 ,占流域面积的 7.1%。同时累积退耕还林(草)面积 734.87 km^2 ,占流域面积的 21.6%,其中,退耕还林(草) 361.45 km^2 ,荒山造林 373.42 km^2 ,植被覆盖度由 1987 年的 18.4% 增加至 2010 年的 79.11%^[19],流域生态治理取得良好成效。

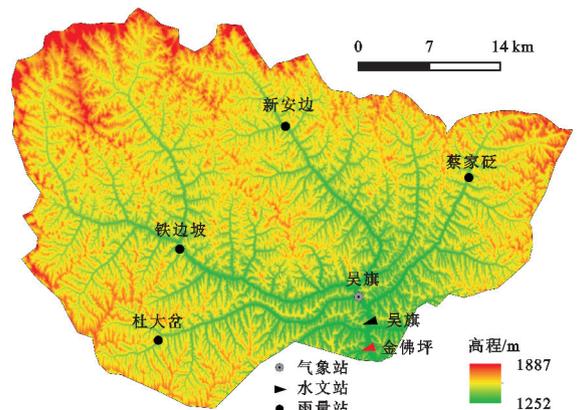


图 1 北洛河上游流域及水文与气象站位置

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

黄河流域水利委员会 1963 年在北洛河干流设立

了金佛坪水文站,控制流域面积 3 842 km²;1980 年迁至吴旗,更名为吴旗水文站,控制流域面积 3 408 km²。论文收集了《黄河流域水文年鉴》金佛坪水文站 1964—1979 年(1968 年 7—9 月缺测)及吴旗水文站 1980—2014 年逐日平均流量资料,按水文站控制流域面积将金佛坪站的径流量折算到吴旗站,缺测资料依据北洛河干流下游刘家河水文站实测径流按水文站控制流域面积折算到吴旗站,最终得到吴旗站 1964—2014 年逐日平均流量系列和年径流系列。

研究区内现共布设有 13 个雨量站,考虑到流域降水的空间分布及资料的完整性,本次仅涉及 5 个雨量站(图 1),论文收集了《黄河流域水文年鉴》1964—2014 年各站的逐日降水量,整理计算得到逐年降水量并采用泰森多边形法计算得到研究区面平均降水量系列。

2.2 研究方法

2.2.1 MASH 双滑动平均法 Anghileri 等^[20]提出的基于年际移动的双滑动平均方法(Moving Average over Shifting Horizon,MASH)可分析日径流时程变化趋势。该方法先对年内日径流数据做滑动平均,然后对平滑日径流数据组成的年序列再沿年方向做二次平滑处理,使年际变化趋势得以显现^[21]。为区别于日方向的滑动平均,将年方向的滑动平均称为水平移动。经 MASH 计算后,日径流过程可以整理成矩阵形式,如下:

$$\text{MASH} = \begin{bmatrix} \mu_{1,1} & \mu_{1,2} & \cdots & \mu_{1,N_s} \\ \mu_{2,1} & \mu_{2,2} & \cdots & \mu_{2,N_s} \\ \vdots & \vdots & \mu_{t,s} & \vdots \\ \mu_{365,1} & \mu_{365,2} & \cdots & \mu_{365,N_s} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mu_{t,s}$ 为在第 s 组水平移动下,第 t 日的滑动平均数据; N_s 为水平移动组个数,取值与水平移动组的年数 Y 有关, $N_s = N_y - Y + 1$,其中 N_y 为原始序列的总年数。 $\mu_{t,s}$ 的计算公式可具体表述为:

$$\mu_{t,s} = \text{mean}_{y \in [s, s+Y-1]} [\text{mean}_{d \in [t-w, t+w]}(x_{d,y})] \quad (2)$$

式中: $x_{d,y}$ 为第 y 年第 d 日的原始日流量数据; w 取值与日方向的滑动平均数目($2w+1$)有关。为让 MASH 线趋向于收敛到相同的季节模式^[20],论文研究中取水平移动组的年数 $Y=30$,另取日方向的滑动平均数目 $2w+1=31$ (即 $w=15$),此时 $N_s=21$ 。

2.2.2 双累积曲线法 双累积曲线(Double Mass Curve,DMC)法是通过累积降水和累积径流关系线斜率的变化识别径流发生突变的时间,也可据此进行径流还原计算,具体计算方法参见文献^[22]。

2.2.3 Mann-Kendall 趋势检验法 Mann-Kendall (M-K)趋势检验法是一种对样本数据分布要求不高

且不受少数异常值干扰的非参数统计检验法,常用于分析水文序列在时间上的变化趋势,其统计量的具体计算与分析参见文献^[23]。

2.2.4 IHA-RVA 法 水文变异指标(IHA)体系^[13]基于日水文数据,构建了包括月流量、年极端流量、年极端流量发生时间、高低流量脉冲次数及历时和日流量变化率及频率 5 组要素的 33 项径流指标,变化范围(Range of Variability Approach,RVA)法^[14]给出了水文改变度评定阈值,可在统计分析关键指标参数变化的基础上综合评价流域径流情势变化。由于研究区流域面积较小,洪水历时较短,结合实测资料,论文剔除了零流量天数指标、且极端流量不考虑大于 30 d 的情况,构建径流指标体系(表 1)。

表 1 径流指标体系组成

组别	类别	名称
1	月平均流量	1—12 月各月的平均流量 年最小 1 d,3 d,7 d,15 d 流量
2	年极端流量	年最大 1 d,3 d,7 d,15 d 流量 基流指数
3	年极端流量发生时间	年最小 1 d 流量发生时间 年最大 1 d 流量发生时间 年发生低流量脉冲的次数 低流量脉冲历时
4	高、低流量脉冲次数及历时	年发生高流量脉冲的次数 高流量脉冲历时 流量平均增加率
5	流量变化率及频率	流量平均减少率 流量转换次数

注:高流量脉冲为改变前高于日径流 75%分位数的流量,低流量脉冲为低于日径流 25%分位数的流量。连续日流量从增大转变为减小时就发生了一次日流量的转换,反之亦然。

本文选取系列均值和变差系数两个统计特征值的偏离度 V 来定量反映两个时期各径流指标差异程度,计算公式如下:

$$V = \frac{S_{\text{post}} - S_{\text{pre}}}{S_{\text{pre}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: S_{pre} , S_{post} 分别为前后两个时期径流指标的均值或变差系数值。

RVA 法通常以改变前各指标的平均值加减标准差或以指标值 75%和 25%的分位数作为上下限阈值评估各径流指标的改变程度^[24]。RVA 评估计算公式如下:

$$D_i = \left| \frac{(N_{io} - N_{ie})}{N_{ie}} \right| \times 100\% \quad (4)$$

$$N_{ie} = rN_T \quad (5)$$

式中: D_i 为第 i 个径流指标的变化度; N_{io} 为第 i 个径流

指标变化后落在 RVA 阈值范围内的实际年数; N_i 为第 i 个径流指标变化后落在 RVA 阈值范围内的预期年数; r 为第 i 个径流指标变化前落在 RVA 阈值范围内的比例, $r=50\%$; N_T 为变化后序列的总年数。

整体改变度可用来评估径流受人类活动影响前后的水文变化程度。目前采用的整体水文改变度 D 计算方法是 Shiau 等^[25] 提出的三等级法:

$$D = \sqrt{\frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} D_i^2} \quad (6)$$

径流指标变化程度分为 3 级: $0 \leq |D| < 33\%$ 为低度改变; $33\% \leq |D| < 66\%$ 为中度改变; $66\% \leq |D| \leq 100\%$ 为高度改变。

3 结果与分析

3.1 径流年际变化

根据年降水和年径流过程线(图 2)分析降水和径流年际变化趋势,年径流过程直线趋势线斜率为 -0.445 , M-K 趋势检验统计量 $Z = -4.589$, 表明研究区年径流序列呈现显著下降趋势($p < 0.01$); 而年降水过程直线趋势线斜率仅为 -0.104 , M-K 趋势检

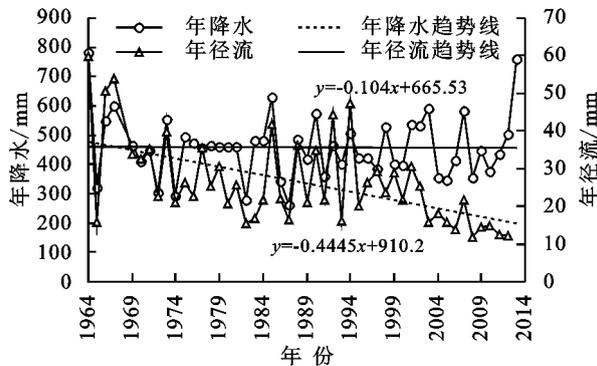


图 2 北洛河上游年降水径流过程

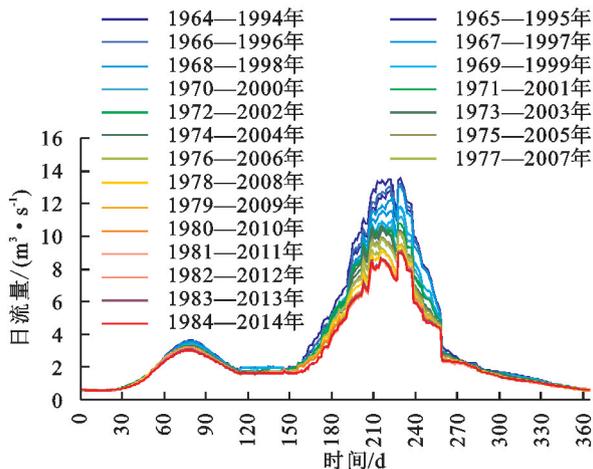


图 4 北洛河上游水文站年内日径流过程 MASH 图

3.3 径流指标变化

3.3.1 月平均流量 基于 IHA 法统计 3 个时期月平

验统计量 $Z = -0.034$, 表明年降水序列存在不显著的下降趋势。流域内降雨-径流双累积曲线斜率分别在 1979 年和 2002 年左右发生变化(图 3), 这种变化特性与黄土高原水土流失区生态治理的阶段基本一致^[18]。据此, 将整个研究期划分为基准期 P_1 (1964—1979 年)、水土保持治理期 P_2 (1980—2002 年) 和生态恢复影响期 P_3 (2003—2014 年)。

3.2 径流年内变化

采用 MASH 双滑动平均法对 1964—2014 年内日径流数据进行滑动平均处理, 绘制年内日径流过程线(图 4), 发现研究期内从较早时间范围向较近时间范围移动时, 日径流过程总体呈持续的下降趋势, 日平均流量从 20 世纪 60 年代的 $3.68 \text{ m}^3/\text{s}$ 减少到 20 世纪 90 年代的 $3.05 \text{ m}^3/\text{s}$, 再到 21 世纪初的 $2.66 \text{ m}^3/\text{s}$, 减少幅度为 27.72%。年内日径流过程在枯期(12—次年 2 月)变化不大, 各曲线重合度高; 3 月、4 月冰雪融水补给期以及汛前、汛后期(5—6 月、9 月中旬—11 月)日径流略有减少; 而在汛期(7—9 月中旬)日平均流量大幅减少, 由 $10.08 \text{ m}^3/\text{s}$ 减少到 $6.49 \text{ m}^3/\text{s}$, 减少幅度为 35.6%。

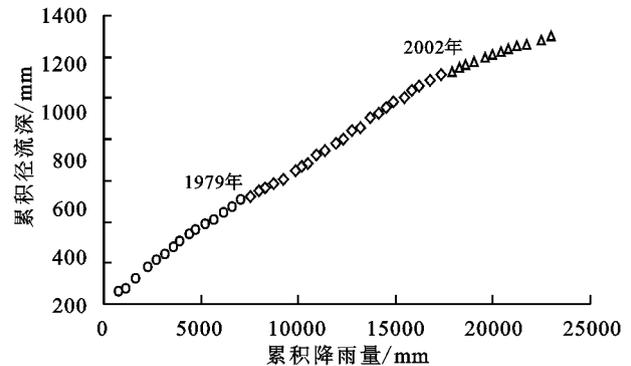


图 3 降雨-径流双累积曲线

均流量相对偏离度及其变差系数相对偏离度(表 2)。绝大多数月份的月均流量呈负偏离状态, 相较于 P_1 期, P_2 期除 1 月和 5 月外, 其余月份的月均流量均存在不同程度的减少, 其中 7—9 月的流量降幅较大, 在 40% 左右; P_3 期 6—8 月流量降幅较大, 且 7 月、8 月流量降幅超 75%。相较于 P_2 期, P_3 期 6—8 月流量降幅较大, 在 60% 左右。各月平均流量在年际间变化程度不同, 相较于 P_1 期, P_2 期除 1 月、2 月、6 月、12 月月均流量年际变化程度减小外, 其余各月年际变化程度增大且 5 月变化最大; 相较于 P_1 、 P_2 期, P_3 期月均流量年际变化程度减小的月份增多。整体来看, 流域内流量呈现减少趋势且汛期径流消减程度明显, 各月流量年际变化在汛期以减小为主, 而在 2—4 月以及 10—11 月则有不同程度的增大。

表 2 月均流量偏离度与变差系数偏离度

项目	均值/(m ³ ·s ⁻¹)			均值相对偏离度/%			Cv			Cv 相对偏离度/%		
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₁ -P ₂	P ₂ -P ₃	P ₁ -P ₃	P ₁	P ₂	P ₃	P ₁ -P ₂	P ₂ -P ₃	P ₁ -P ₃
1月流量	0.51	0.55	0.54	9.22	-2.26	6.75	0.74	0.39	0.17	-47.30	-56.81	-77.24
2月流量	1.46	1.26	0.88	-13.66	-30.34	-39.86	0.33	0.33	0.43	-0.70	30.75	29.83
3月流量	3.90	3.18	2.93	-18.48	-7.84	-24.87	0.16	0.17	0.31	4.54	84.57	92.96
4月流量	2.38	2.00	1.73	-15.88	-13.54	-27.27	0.17	0.27	0.24	59.68	-11.13	41.91
5月流量	1.71	1.82	1.25	6.64	-31.15	-26.58	0.39	0.74	0.30	88.87	-59.17	-22.88
6月流量	3.53	3.02	1.27	-14.52	-58.07	-64.16	1.02	0.87	0.47	-14.96	-46.49	-54.49
7月流量	12.44	7.50	2.86	-39.76	-61.79	-76.98	0.72	0.79	0.68	10.07	-13.58	-4.87
8月流量	14.28	8.60	3.22	-39.73	-62.55	-77.43	0.81	1.00	0.67	22.83	-33.43	-18.23
9月流量	4.12	2.56	2.17	-37.83	-15.20	-47.28	0.53	0.62	0.48	15.70	-22.55	-10.39
10月流量	2.06	1.66	1.63	-19.34	-1.69	-20.70	0.20	0.31	0.52	53.71	68.30	158.70
11月流量	1.59	1.16	1.06	-27.03	-8.74	-33.41	0.19	0.23	0.26	23.83	10.65	37.01
12月流量	0.81	0.70	0.74	-13.32	5.15	-8.86	0.55	0.35	0.27	-35.99	-23.89	-51.28

3.3.2 年极端流量及年极端流量发生时间变化 根据不同持续时间下的年极端流量及变差系数偏离度统计结果(表 3)可知,年最小流量均有不同程度的增加且随着持续时间的增加,增加幅度有所减小。年最大流量均减小,除 P₂时期最大 1 d 流量较 P₁时期减小幅度较小外,其余不同时期相对减小幅度差别不大。研究期内基流指数呈波动上升趋势(图 5),均值从 P₁期的 0.06 增加至 P₂期的 0.13,再增至 P₃期的 0.29,尤以 P₃期增加明显。整体来看,流域内年最小

流量和基流指数在不同时期内年际变化程度大幅减小,而年最大流量年际变幅除年最大 15 d 流量有小幅减小外,其余均有小幅增大。

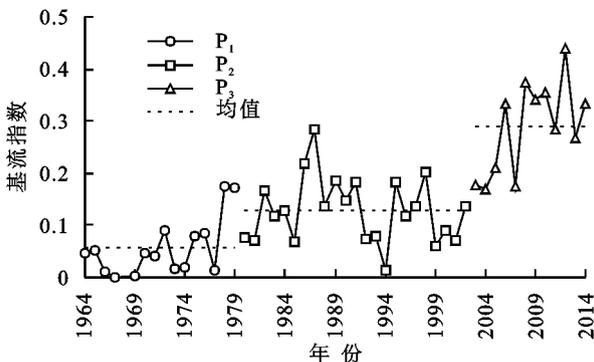
年最小 1 d 流量发生时间多发生于年初且有不同程度的推后,从 P₁期到 P₃期,最小 1 d 流量发生时间推后约 18 d,不同时期年际变化程度略有增大;年最大 1 d 流量发生时间变化不大,平均发生在 217 d 左右,不同时期年际变化程度相对较小(表 4)。整体而言生态治理措施对年极端流量发生时间影响不大。

表 3 不同历时的年极端流量偏离度与变差系数偏离度

径流指标	均值/(m ³ ·s ⁻¹)			均值相对偏离度/%			Cv			Cv 相对偏离度/%		
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₁ -P ₂	P ₂ -P ₃	P ₁ -P ₃	P ₁	P ₂	P ₃	P ₁ -P ₂	P ₂ -P ₃	P ₁ -P ₃
年最小 1 d 流量	0.17	0.31	0.45	81.23	47.33	167.00	0.98	0.47	0.21	-52.04	-55.64	-78.72
年最小 3 d 流量	0.18	0.32	0.46	74.79	44.38	152.36	0.99	0.45	0.21	-54.17	-52.96	-78.44
年最小 7 d 流量	0.20	0.34	0.47	65.56	39.19	130.44	0.92	0.40	0.21	-56.25	-48.68	-77.55
年最小 15 d 流量	0.33	0.42	0.51	26.47	23.28	55.92	0.79	0.36	0.17	-54.09	-52.24	-78.07
年最大 1 d 流量	250.77	229.87	54.19	-8.34	-76.42	-78.39	0.72	1.56	0.82	117.30	-47.48	14.12
年最大 3 d 流量	112.74	86.61	24.44	-23.18	-71.78	-78.32	0.67	1.40	0.74	107.96	-47.41	9.36
年最大 7 d 流量	60.98	42.16	12.16	-30.86	-71.16	-80.06	0.55	1.24	0.63	124.98	-49.74	13.09
年最大 15 d 流量	23.09	15.39	5.10	-33.36	-66.84	-77.90	0.58	1.01	0.43	75.24	-57.25	-25.08

表 4 年最小、最大 1 d 流量发生时间及变差系数

径流指标	均值/d			变差系数(Cv)		
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₁	P ₂	P ₃
年最小 1 d 流量发生时间	19.00	27.00	47.00	0.99	1.06	1.16
年最大 1 d 流量发生时间	210.00	212.00	229.00	0.13	0.12	0.18



注: P₁代表基准期内基流指数, P₂代表水土保持治理期内基流指数, P₃代表生态恢复影响期基流指数。

图 5 不同时期基流指数变化情况

3.3.3 高、低流量脉冲次数及历时 高、低流量脉冲次数及历时是影响流域生态环境稳定性的重要参数。将基准期内所有年份的日流量值由小到大依次排序,分别选取位于 75% 和 25% 的流量值作为高、低流量脉冲的阈值,结果分别为 2.67 m³/s 和 0.94 m³/s。高、低流量脉冲出现次数均有所减少且不同时期年际间变化程度较小,从 P₁期至 P₃期,低流量脉冲次数降

幅为 32.58%，高流量脉冲次数降幅为 65.94%。低流量平均历时持续大幅增加，由 P₁ 期的 7.98 d 增至 P₂ 期的 12.01 d 再增至 P₃ 期的 22.13 d，整体平均历时约增加了 3 倍；高流量平均历时则先减小再增大，P₂

期较 P₁ 期下降 5.48%，P₃ 期较 P₂ 期增加 38.25%，从 P₁ 期至 P₃ 期，平均历时增加 30.68% (表 5)。高、低流量平均历时总体呈现增加趋势且不同时期年际间变化程度不大。

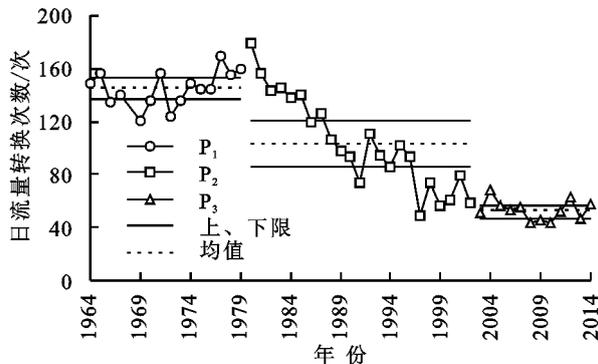
表 5 不同时期高低流量脉冲次数及历时与变差系数

项目	均值			均值相对偏离度/%			Cv			Cv 相对偏离度/%		
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₁ -P ₂	P ₂ -P ₃	P ₁ -P ₃	P ₁	P ₂	P ₃	P ₁ -P ₂	P ₂ -P ₃	P ₁ -P ₃
年低流量脉冲次数/次	11.87	11.52	8.00	-2.91	-30.57	-32.58	0.31	0.49	0.37	55.61	-23.44	19.13
低流量脉冲历时/d	7.98	12.01	22.13	50.54	84.25	177.36	0.34	0.45	0.40	29.51	-10.61	15.77
年高流量脉冲次数/次	21.53	17.09	7.33	-20.65	-57.08	-65.94	0.20	0.25	0.43	23.93	71.02	111.95
高流量脉冲历时/d	4.04	3.82	5.28	-5.48	38.25	30.68	0.21	0.24	0.34	14.73	40.45	61.14

3.3.4 流量变化率及频率 流量平均增加率先小幅上升后再下降，相较于 P₁ 期，P₂ 期年内流量平均增加率增加 7.85%，P₃ 期减小 34.60%；相较于 P₂ 期，P₃ 期年内流量平均增加率减小 39.36%。流量平均减少率持续下降，相较于 P₁ 期，P₂ 期年内流量平均减少率减小 28%，P₃ 期减小 61.59%；相较于 P₂ 期，P₃ 期流量平均减少率减小 46.65%。整体来看，流量平均增加率与平均减少率均有下降且年际变化程度较小 (表 6)。流量转换次数在 P₂ 期大幅减少且年际间变化程度较大，下降趋势随时间逐渐减缓且在 P₃ 期趋于稳定 (图 6)。

表 6 不同时期流量变化率及频率与变差系数

径流指标	均值			变差系数(Cv)		
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₁	P ₂	P ₃
流量平均增加率/%	0.22	0.24	0.14	0.38	1.14	0.72
流量平均减少率/%	-0.22	-0.16	-0.09	0.37	0.36	0.26
流量转换次数/次	145.13	103.70	53.00	0.14	0.34	0.09



注：P₁ 代表基准期内流量转换次数，P₂ 代表水土保持治理期内流量转换次数，P₃ 代表生态恢复影响期内流量转换次数。

图 6 流量转换次数变化情况

3.3.5 水文改变度 采用 RVA 法对各径流指标改变度进行评估 (表 7)，相较于 P₁ 期，P₂ 期各指标中，无高度改变指标，中度改变占比 43.33%，低度改变占比 56.67%；P₃ 期各指标中高度改变占比 63.33%，中度改变 23.33%，低度改变占比 13.33%。相较于 P₂ 期，P₃ 期各指标中，高度改变占比 33.33%，中度改变占比 30%，低度改变占比 36.67%。发生高度改变的径

流指标增加而低改变度的径流指标减少，发生中度改变的径流指标占比也有一定的下降。

表 7 径流指标改变度 %

组别	径流指标	不同对比时期		
		P ₁ -P ₂	P ₂ -P ₃	P ₁ -P ₃
第 1 组	1 月平均流量	56.52	66.67	83.33
	2 月平均流量	4.35	83.33	50.00
	3 月平均流量	56.52	83.33	66.67
	4 月平均流量	47.83	16.67	50.00
	5 月平均流量	39.13	50.00	16.67
	6 月平均流量	4.35	0.00	0.00
	7 月平均流量	13.04	33.33	66.67
	8 月平均流量	4.35	33.33	50.00
	9 月平均流量	21.74	50.00	50.00
	10 月平均流量	47.83	16.67	50.00
	11 月平均流量	56.52	50.00	66.67
	12 月平均流量	4.35	66.67	66.67
第 2 组	年最小 1 d 流量	21.74	16.67	100.00
	年最小 3 d 流量	13.04	16.67	100.00
	年最小 7 d 流量	30.43	16.67	100.00
	年最小 15 d 流量	4.35	33.33	83.33
	年最大 1 d 流量	30.43	16.67	83.33
	年最大 3 d 流量	47.83	16.67	83.33
第 3 组	年最大 7 d 流量	47.83	16.67	100.00
	年最大 15 d 流量	30.43	66.67	100.00
	基流系数	30.43	66.67	100.00
	年最小 1 d 发生时间	13.04	50.00	100.00
	年最大 1 d 发生时间	39.13	16.67	100.00
	低流量次数	21.74	33.33	33.33
第 4 组	低流量平均历时	56.52	66.67	83.33
	高流量次数	4.35	83.33	66.67
第 5 组	高流量平均历时	13.04	33.33	100.00
	流量平均增加率	65.22	16.67	100.00
	流量平均减少率	56.52	83.33	33.33
	流量转换次数	65.22	100.00	83.33

由各组径流指标的水文改变度及整体水文改变度(表 8)可知:相较于 P_1 期, P_2 期整体水文改变度为 37.69%,各组指标中年极端流量和高、低流量脉冲次数及历时为低度改变,其余组为中度改变;相较于 P_2 期, P_3 期整体水文改变度为 51.10%,其中流量变化率及频率改变度最大,为高度改变,其余组为中度改变。从 P_1 期到 P_3 期,整体水文改变度为 74.35%,年极端流量、高、低流量脉冲次数及历时和流量变化率及频率为高改变,月平均流量和年极端流量发生时间为中度改变,其中年极端流量变化度最大为 94.77%。

3.4 成因分析

为对流域径流演变情势进行进一步归因分析,根据图 3 所示的线性关系,在前后两个时期分别对累积径流量与累积降水量进行线性回归分析。 P_2 和 P_3 期线性拟合方程斜率明显减小,径流实测值小于计算

值,相较于 P_1 、 P_2 期降水变化和人类活动对径流减小的贡献率分别为 25.29%、74.71%,相较于 P_2 、 P_3 期降水变化和人类活动对径流减小的贡献率分别为 20.21%、79.79%(表 9)。近百年来,研究区内无地震等活动,地形地貌并未有大的变化,径流变化主要是由于人类活动引起的地表覆盖变化引起的。北洛河上游人类活动主要为水土保持及退耕还林/草等生态治理措施^[26],因此可以说明在生态治理措施是流域径流情势发生变化的主要驱动力。

表 8 整体水文改变度 %

时期	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	
P_1-P_2	36.98	31.52	29.17	31.05	62.45	37.69(中)
P_2-P_3	52.48	36.00	37.27	58.33	75.77	51.10(中)
P_1-P_3	55.69	94.77	35.36	73.12	89.24	74.35(高)

表 9 北洛河上游各时期降水与人类活动对径流减少的贡献分析

时期	实测	计算	实测径流变化		降雨影响		人类活动影响	
	径流深/mm	径流深/mm	变化量/mm	比例/%	变化量/mm	比例/%	变化量/mm	比例/%
P_1	33.67	33.63						
P_2	26.41	31.80	7.26	21.56	1.84	25.29	5.42	74.71
P_3	15.60	29.61	10.81	40.93	2.18	20.21	8.63	79.79

4 讨论

本研究通过多径流指标对北洛河上游(吴旗水文站以上)流域径流演变情势进行分析并对其成因进行初步探讨,研究区径流情势变化突出表现在年内径流过程的变化和消减洪峰方面。不同历时的年极端流量相关变化说明生态治理措施起到了一定的蓄丰补枯、涵养水源的作用。流域内高、低流量脉冲次数的减少、平均历时的增加以及流量变化率及频率的降低,生态治理措施对年内径流过程产生了相对积极的影响,起着一定的削峰坦化作用。研究结果有助于认识水土保持与退耕还林(草)等生态治理工程对流域径流演变情势的影响。

虽然上述研究可通过分析流域径流演变及其对生态管理的响应,为流域水资源的合理利用和水生态治理提供一定的参考,但本研究仍存在不足之处。一方面,由于缺乏下垫面变化及生态治理工程具体统计数据,对径流指标与下垫面及生态治理响应关系的定量实证分析略显不足,另一方面,流域径流变化是气候因素和各种人类活动因素共同影响的结果,在做径流变化成因初步探讨时仅分析了降水与非降水要素对径流变化的贡献率,未考虑流域蒸散发的影响。后续研究应进一步搜集径流情势变化前后的气象、生态

及下垫面变化资料,深入分析其响应机制。同时在更小时间尺度上对流域径流演变趋势及其变化机理进行深入探究,以期为黄河流域生态保护和高质量发展提供更为完善的理论指导。

5 结论

(1) 流域内径流季节分配不均,具有双峰型特点,年际变化大且年径流序列存在显著的下降趋势。流域降水年际变化不大,降水序列存在不显著的弱下降趋势,流域内降雨-径流双累积曲线斜率分别在 1979 年和 2002 年左右发生了两次变化。

(2) 径流年内变化趋势与年际变化趋势一致且汛期径流较非汛期下降趋势显著。日平均流量下降幅度为 27.72%,汛期日平均流量下降幅度为 35.60%,年内日径流过程曲线逐渐坦化,生态治理措施的径流调节效应显著。

(3) 通过 IHA-RVA 法对径流指标进行偏离度分析与改变度评估,流域径流过程趋于稳定、均匀且年极端流量相对减少,不同历时的年最小流量增大而年最大流量减小。发生高度改变的径流指标增加而低、中度改变的径流指标减少。5 组径流指标中年极端流量变化最大(94.77%),流量变化率及频率与高、低流量脉冲次数及历时变化次之。

(4) 水土保持效应期相较于基准期整体水文改变度为中度(37.69%),退耕还林/草生态恢复影响期相较于基准期整体水文改变度为高度(74.35%),两影响期比较整体水文改变度为中度(51.10%)。

参考文献:

- [1] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.
- [2] 穆兴民,胡春宏,高鹏,等.黄河输沙量研究的几个关键问题与思考[J].人民黄河,2017,39(8):1-4,48.
- [3] 赵阳,胡春宏,张晓明,等.近70年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].农业工程学报,2018,34(21):112-119.
- [4] 康靖羚,丁文峰,韩昊宇,等.不同时间尺度岔巴沟流域水沙关系变化[J].水土保持研究,2021,28(5):81-87.
- [5] Shao R, Zhang B, Su T, et al. Estimating the increase in regional evaporative water consumption as a result of vegetation restoration over the Loess Plateau, China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(22):11783-11802.
- [6] Zhao G, Mu X, Tian P, et al. Climate changes and their impacts on water resources in semiarid regions: a case study of the Wei River basin, China[J]. Hydrological Processes, 2013,27(26):3852-3863.
- [7] 张宝庆,邵蕊,赵西宁,等.大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(3):594-606.
- [8] 夏岩,张姝琪,高文冰,等.黄土高原变绿对黄河中游延河流域径流演变的影响估算[J].地球科学与环境学报,2020,42(6):849-860.
- [9] 孔波,樊晶晶,黄强.北洛河流域分期径流变异诊断及成因分析[J].水资源保护,2019,35(6):52-57.
- [10] 田传冲,黄冬菁,马海波.下垫面变化对流域洪水特性的影响分析[J].人民黄河,2018,40(9):16-22,27.
- [11] 马晓婧,刘强,潘继花,等.基于数字滤波法的拒马河基流分割及演变规律研究[J].北京师范大学学报:自然科学版,2020,56(5):659-663.
- [12] 韩鹏,王艺璇,李岱峰.黄河中游河龙区间河川基流时空变化及其对水土保持响应[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(3):505-521.
- [13] Richter B, Baumgartner J, Powell J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. Conservation Biology, 1996,10(4):1163-1174.
- [14] Richter B, Baumgartner J, Wigington R, et al. How much water does a river need[J]. Freshwater biology, 1997,37(1):231-249.
- [15] 彭少明,尚文绣,王煜,等.黄河上游梯级水库运行的生态影响研究[J].水利学报,2018,49(10):1187-1198.
- [16] 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.
- [17] 穆兴民,贾昊,高鹏,等.水土保持生态建设对黄河中游水文情势影响研究[J].人民黄河,2021,43(10):44-50.
- [18] 刘二佳,张晓萍,谢名礼,等.生态恢复对流域水沙演变趋势的影响:以北洛河上游为例[J].生态学报,2015,35(3):622-629.
- [19] 蔺鹏飞.北洛河上游次洪水沙过程对生态恢复的响应研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2015.
- [20] Anghileri D, Pianosi F, Soncini-Sessa R. Trend detection in seasonal data: from hydrology to water resources[J]. Journal of Hydrology, 2014,511:171-179.
- [21] 刘波,陈刘强,周森,等.长江上游重庆段径流变化归因分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(6):1333-1341.
- [22] 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.
- [23] Burn D H, Elnur M A H. Detection of hydrologic trends and variability[J]. Journal of hydrology, 2002, 255(1/4):107-122.
- [24] 薛联青,张卉,张洛晨,等.基于改进RVA法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J].河海大学学报:自然科学版,2017,45(3):189-196.
- [25] Shiau J T, Wu F C. Feasible diversion and instream flow release using range of variability approach[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2004,130(5):395-404.
- [26] 陈政君,穆兴民,高鹏,等.北洛河上游径流变化特征及其驱动因素研究[J].中国水土保持科学,2018,16(6):1-8.