

黄河中游典型流域近 60 年水沙变化趋势及影响因素

曲绅豪¹, 周文婷¹, 张翔², 余冬立¹

(1.河海大学农业科学与工程学院, 南京 211100; 2.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为分析黄河水沙成因并预测未来水沙情势, 选取黄河中游多沙粗沙区昕水河和朱家川 2 条流域为研究对象, 依据水文站及雨量站 1956—2018 年降雨和径流泥沙实测数据, 采用 Mann-Kendall 趋势及突变检验、累积距平法和 Morlet 连续小波分析等方法探讨流域水沙变化趋势, 并利用双累积曲线法对水沙变化进行归因分析, 量化气候变化及人类活动对水沙变化的相对贡献。结果表明: 1956—2018 年, 昕水河和朱家川小流域年均径流量分别为 11.9×10^7 , $1.7 \times 10^7 \text{ m}^3$, 年均输沙量分别为 12.3×10^6 , $9.8 \times 10^6 \text{ t}$, 径流和输沙量均呈显著减少趋势; 2 条流域的径流量突变年分别为 1980 年和 1984 年, 输沙量突变年分别为 1980 年和 1972 年; 选取的 2 条流域水沙变化存在明显周期性, 径流变化的第 1 主周期分别为 45 年和 16 年, 输沙量变化的第 1 主周期分别为 9 年和 15 年; 降雨对昕水河和朱家川小流域径流量减少的贡献率分别为 19%, 8%, 对输沙量减少的贡献率分别为 25%, 35%, 远不及人类活动的贡献率, 人类活动是径流和输沙量锐减的主导因素。研究结果可为黄河水沙治理提供科学性建议。

关键词: 黄河中游; 水沙关系; 影响因素; 双累积曲线

中图分类号: TV882.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0035-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.03.005

Variation Trend and Influencing Factors of Water and Sediment in the Middle Reaches of the Yellow River in Recent 60 Years

QU Shenhao¹, ZHOU Wenting¹, ZHANG Xiang², SHE Dongli¹

(1.College of Agricultural Science and Engineering, HoHai University, Nanjing 211100;

2.Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to analyze the origin of water and sediment in the Yellow River and predict the future water and sediment situation, two typical watersheds (Xinshui River and Zhujiachuan watershed) in the middle reaches of the Yellow River were selected as the study area. Based on the measured data of water and sediment from 1956 to 2018 at the hydrological station and rainfall station, the Mann-Kendall trend, the change-point analysis, the cumulative anomaly method and the Morlet wavelet method were used to analyze the variation trend of water and sediment in typical watersheds. Furthermore, the attribution of water and sediment changes were analyzed by using the double mass curve method, and the relative contributions of climate change and human activities to water and sediment change were quantified. The results showed that from 1956 to 2018, the average annual runoff in the Xinshui River and Zhujiachuan watershed was 11.9×10^7 and $1.7 \times 10^7 \text{ m}^3$, respectively, and the average annual sediment discharge was 12.3×10^6 and $9.8 \times 10^6 \text{ t}$, respectively. The runoff and sediment discharge showed a significant decreasing trend. The abrupt change year of runoff in the Xinshui River and Zhujiachuan watershed was 1980 and 1984, respectively, and the abrupt change year of sediment discharge was 1980 and 1972, respectively. The changes of water and sediment in the watersheds had obvious periodicity, and the first main cycle of runoff change was 45 years and 16 years, and the first main cycle of sediment transport change was 9 years and 15 years, respectively. The contribution rate of rainfall to the reduction of runoff in Xinshui River and Zhujiachuan watershed was 19% and 8%, respectively, and the contribution rate of rainfall to the reduction of sediment discharge was

收稿日期: 2022-10-19

资助项目: 中国科学院“西部之光”计划项目

第一作者: 曲绅豪(1999—), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源保护研究。E-mail: 619267127@qq.com

通信作者: 余冬立(1980—), 男, 湖南长沙人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农田水土过程与侵蚀控制研究。E-mail: shedongli@hhu.edu.cn

25% and 35%, respectively. The Contribution rate of rainfall is far lower than that of human activities, which are the leading factor of the sharp decrease of runoff and sediment discharge. The research results can provide scientific suggestions for water and sediment control of the Yellow River.

Keywords: middle reaches of the Yellow River; relationship between water and sediment; influence factor; double mass curve method

黄河是中华民族母亲河,黄河流域生态保护和高质量发展是我国重大国家战略。黄河流域面积大,水资源时空分布不均衡,存在水少沙多、水沙异源等问题^[1-3]。黄河中游地带穿越生态系统脆弱的黄土高原,携带大量泥沙,成为黄河流域土壤侵蚀最为严重区域^[4-5]。分析黄河中游水沙变化趋势对于治理黄土高原水土流失,保护黄河流域生态具有重要意义。

近年来,黄河流域水沙形势发生剧烈变化,整体呈下降趋势,直接影响流域水沙调控体系布局^[6]。陈康等^[7]以黄河干流近 65 年各水文站为研究对象,利用来沙系数分析发现,除唐乃亥、艾山和利津站呈增大趋势外,其他水文站均呈减小趋势。对比黄河上、中、下游发现,黄河中游平均输沙模数最大,为主要产沙区,选取中游多沙粗沙区进行小尺度分析可以更加深刻地探究水沙变化机理^[8-9]。贾昊等^[10]通过对黄河中游潼关站 69 年(1950—2018 年)实测径流量变化研究发现,径流量呈减少趋势,表现出丰枯特征且在 1985 年发生突变,减少 40.1%,并预测未来 20 年潼关站径流量会持续稳定减少。夏露等^[11]通过分析昕水河水沙变化关系发现,其径流和输沙量突变发生的时间均在 1980 年前后,突变年份前(1958—1980 年),水沙存在良好的线性关系,2003—2015 年相关性不显著。同时,利用水文分析和模型解析等分离气候、人类活动减水减沙效益的研究也在广泛开展。赵广举等^[12]通过构建水文站点的径流—降雨和输沙量—降雨的双累积曲线识别黄河中游水沙变化的主要影响因素。通过分析发现,黄河流域水沙变化存在明显周期性规律,分析水沙变化趋势及影响因素对小流域水土流失治理具有借鉴意义。

基于此,以黄河中游气候、地形地貌差异显著的 2 条流域为研究对象,采用 Mann-Kendall 趋势及突变点检验、累积距平法和 Morlet 连续小波分析等方法探讨流域水沙变化趋势,并通过构建双累积曲线分析水沙变化的影响因素,识别降雨和人类活动的减水减沙效益,以期因地制宜、针对性实施水土保持措施提供科学性建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与数据来源

选取昕水河和朱家川流域开展研究(图 1)。昕水河流域(36°06′20″—36°57′27″N,110°29′15″—111°23′33″E)位于黄河中游多沙粗沙区东岸,发源于吕梁山系,上游属

于土石质山区,中、下游属于黄土残塬沟壑区。流域属于暖温带半湿润大陆性季风气候,夏秋季雨水充沛,冬春季气候干燥^[13]。朱家川流域位于山西省西北部(38°42′51″—39°18′06″N,110°58′54″—112°13′32″E),流域地形平坦,地势从东到西依次降低,土质为砂壤土,西部靠近黄河沿岸易受到黄河下切侵蚀作用。流域处于我国北方生态脆弱的农牧交错带,全年受温带大陆性季风气候影响,全年降水少,属于干旱半干旱地区^[14]。水沙数据是 1956—2018 年的逐年数据,其中,径流泥沙数据和部分降雨数据来源于黄河水利委员会编著的黄河流域水文年鉴^[15],其余降雨数据来源于中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>)。

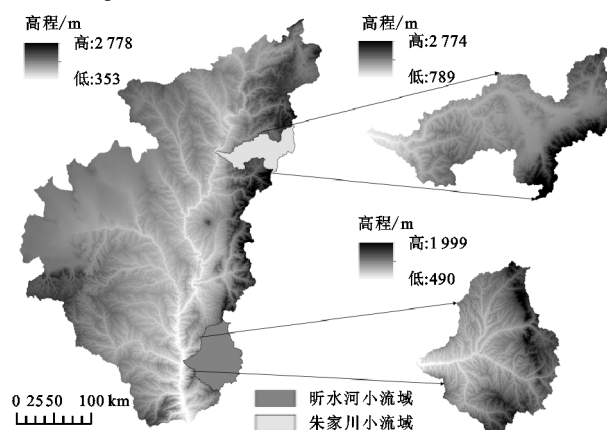


图 1 研究区地理位置分布

1.2 研究方法

选用 Mann-Kendall 对流域水沙数据进行趋势和突变检验^[16-17]。该统计方法属于非参数检验的范畴,其优点在于对数据整体趋势做分析,去除极大或极小等极端值对序列的影响,且不受主观因素干扰^[18]。其计算方法见公式(1)~公式(3):

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i (k=2,3,\dots,n) \quad (1)$$

式中: S_k 为第 i 个样本 $x_i > x_j (1 \leq j \leq x)$ 的累计数,当 $x_i > x_j$ 时, $r_i = 1$, 反之, $r_i = 0$ 。

在假定长时间序列随机独立的情况下, S_k 的均值与方差分别为:

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4}, \text{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (2)$$

将 S_k 标准化则为:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (3)$$

式中: $UF_1=0$,当给定显著性水平 $\alpha=0.05$ 时,临界值 $U_{0.01}=\pm 1.96$,若 $|UF|>U_\alpha$,表示长时间数据存在显著的趋势变化。然后将此方法再应用于反序列,反序列顺序为 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$,将反序列结果标准化后用 UB_k 进行表示。最后, UF_k 和 UB_k 可绘制成 2 条曲线,若 2 条曲线出现交点且交点在 2 条临界线内,则可判断该交点为长时间序列数据的突变点。

采用累积距平法来进一步判断突变点年份,计算方法为:

$$LP_i = \sum_i^n (P_i - \bar{P}) \tag{4}$$

式中: LP_i 为第*i*年累积距平值(t); P_i 为第*i*年的输沙量(t); $\bar{P}$ 为多年平均输沙量(t)。通过观察累积距平图中曲线的变化趋势及转折点来判断离散程度和突变点年份。

采用 Morlet 连续小波分析,对流域水沙数据的时间变化进行解析,进而识别出水沙变化隐含的周期^[19-20]。采用 Matlab 软件中的 Wavelet 工具包运算出径流量和输沙量小波系数后,采用 OriginLab OriginPro 2021b 软件绘制小波变换实部分布图和方差图。

采用双累积曲线分析流域水沙变化的影响因素,计算突变年份前的累积降雨量—径流量(输沙量)的

回归方程,并将突变年后的累积降水量代入方程得到理论和实际累积径流量(输沙量)变化情况,进而解析降雨和人类活动对水沙变化的贡献率^[21]。

2 结果与分析

2.1 流域水沙变化趋势

由图 2 可知,2 条流域年径流量和输沙量变化趋势。昕水河和朱家川小流域年均径流量分别为 $1.2 \times 10^8, 0.17 \times 10^8 \text{ m}^3$,总体呈降低趋势。水文站实测数据显示,2 个流域年径流量在 1956—1970 年变化较剧烈,而后趋于相对稳定,尤其近 10 年,年径流量分别降至 1950—1970 年平均流量的 20%。与朱家川小流域相比,昕水河小流域径流量降低更为明显,从 1956—1970 年平均径流量 $2.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少为 2000—2018 年平均径流量 $0.68 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。昕水河和朱家川小流域年均输沙量分别为 $1.23 \times 10^7, 0.98 \times 10^7 \text{ t}$,输沙量与径流量变化一致,均呈显著减少趋势。朱家川小流域输沙量降低较为明显,其输沙量 1967 年出现峰值($1.22 \times 10^8 \text{ t}$),1975 年后稳步减少。至 2018 年,2 条流域输沙量均减少超过 90%。采用 M-K 趋势检验法对昕水河和朱家川小流域年径流和输沙量进行趋势检验表明,2 条流域径流量和输沙量均呈显著的减少趋势($p<0.01$)。

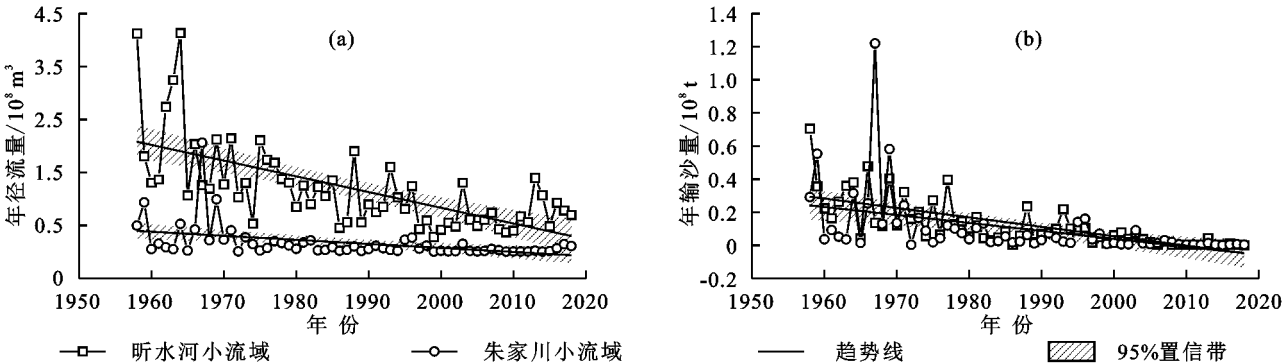


图 2 昕水河和朱家川小流域径流量和输沙量的年际变化过程

2.2 流域水沙突变及周期性变化

由图 3 可知,流域水沙动态数据突变年检验结果。昕水河和朱家川小流域年径流量突变年份分别为 1980 年和 1984 年,年输沙量在 M-K 检验中不存

在明显突变点,引用累积距平法对输沙量进行突变检验(图 4),昕水河和朱家川小流域输沙量突变年份分别为 1980 年和 1972 年。

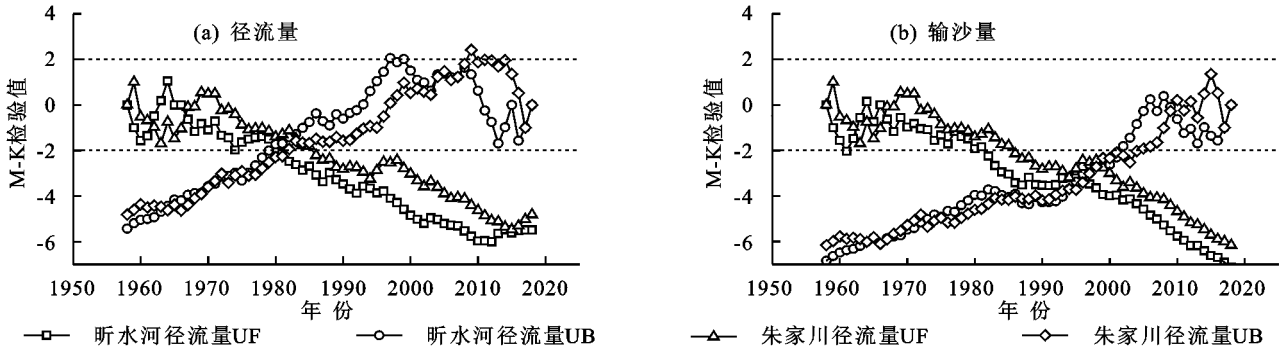


图 3 昕水河和朱家川小流域径流量和输沙量突变检验

2 条流域水沙变化呈现显著的周期性规律(图 5)。听水河小流域径流量主要表现为 6~12, 13~24, 37~52 年 3 类尺度变化周期, 6~12 年变化周期在 1980 年前比较明显, 13~24 年变化周期在 1995 年前明显, 37~52 年的周期变化具有全域性。由图 6 可知, 听水河径流量存在 3 个较为明显的尺度, 依次对应 9 年、18 年和 45 年尺度, 其中, 45 年时间尺度对应最大峰值, 为第 1 主周期, 9 年和 18 年时间尺度分别对应第 2 和第 3 主周期。朱家川小流域径流量存在 2~7, 11~20, 23~43 年 3 类尺度周期变化规律, 2~7 年变化周期在 1990 年前比较明显, 11~20 年变化周期在 1975 年前明显, 23~43 年的周期变化在 1985 年前较为明显。朱家川径流量存

在 3 个时间尺度, 分别为 4, 16, 33 年, 特别是 16 年震荡最强烈, 对应第 1 主周期, 33 年和 4 年时间尺度分别对应第 2 和第 3 主周期。

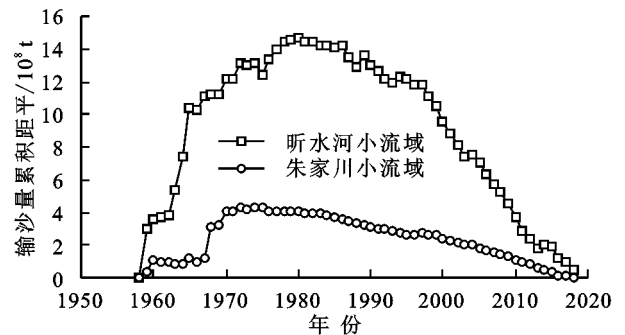


图 4 听水河和朱家川小流域输沙量累积距平曲线

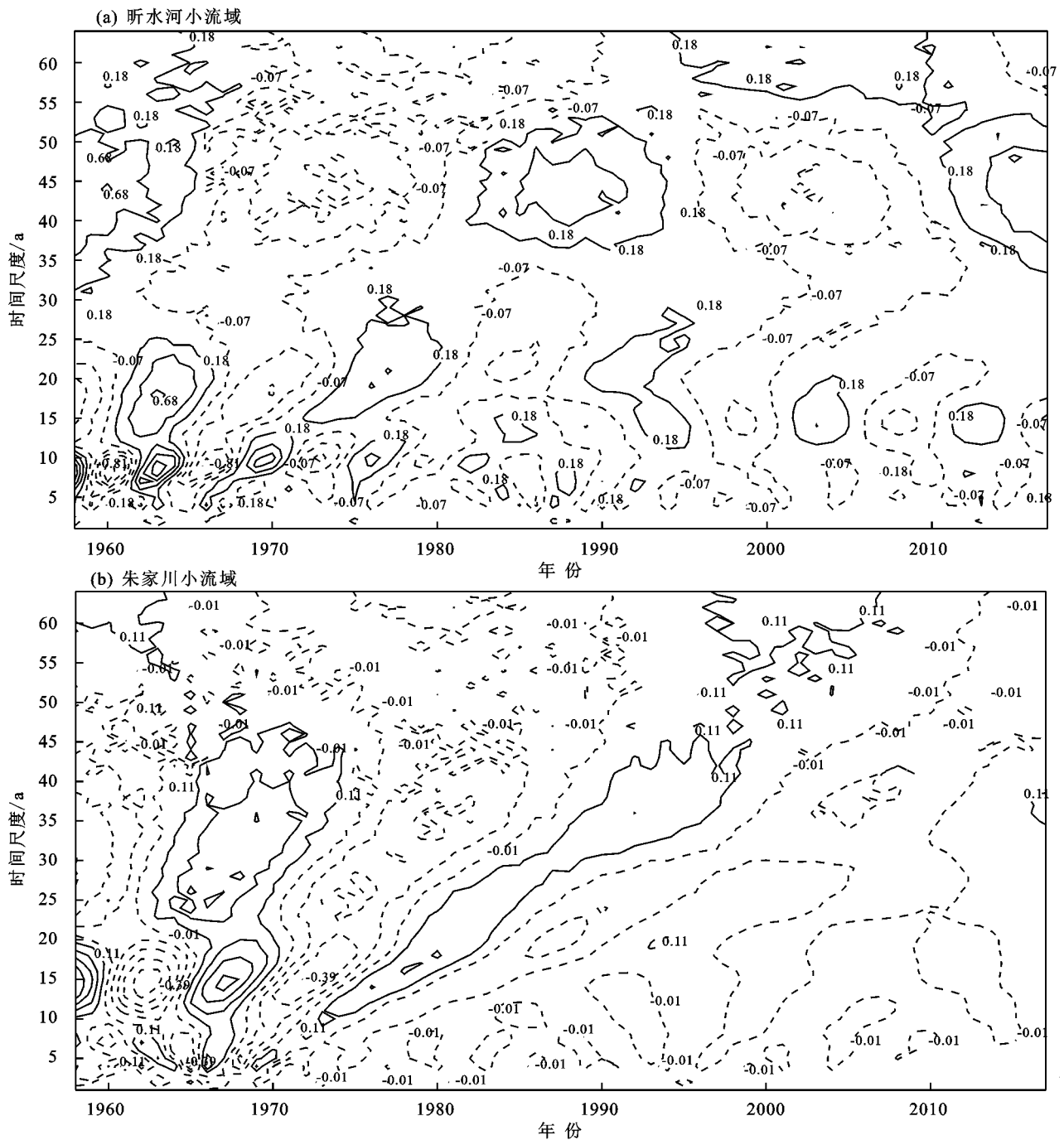


图 5 听水河和朱家川小流域径流量小波实际分布

由图 7 可知,昕水河和朱家川小流域输沙量变化的
小波分析结果。昕水河小流域输沙量呈现 3~
5,6~11,13~20,22~32 年 4 类时间尺度周期变化,
其中,3~5 年在 1970 年前比较明显,6~11 年在
1965 年较明显,13~20,22~32 年持续到 2000 年前
后。小波方差(图 8)中显示 4 个周期的中心尺度分
别在 4,9,17,27 年,9 年尺度震荡程度较为强烈,为
第 1 主周期,4,27,9 年时间尺度分别为第 2、第 3
和第 4 主周期;朱家川小流域泥沙量周期变化存在
2~5,10~20,22~44 年 3 类尺度,2~5 年在 1975 年
比较明显,10~20 年在 1980 年较明显,22~44 年在
1995 年前较为明显。各周期中心尺度分别在 3,15,

33 年,其中,15 年尺度显示出最强烈的震荡,为
第 1 主周期,33,3 年时间尺度分别为第 2 和第 3 主
周期。

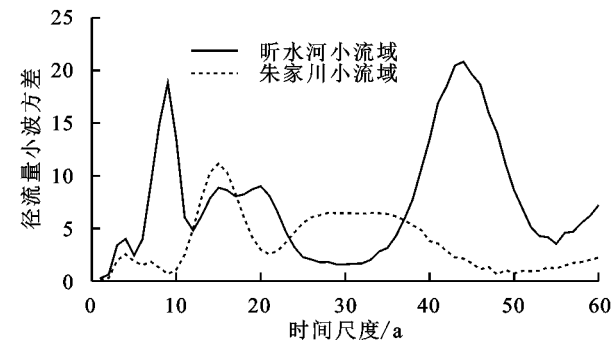


图 6 昕水河和朱家川小流域径流量小波方差

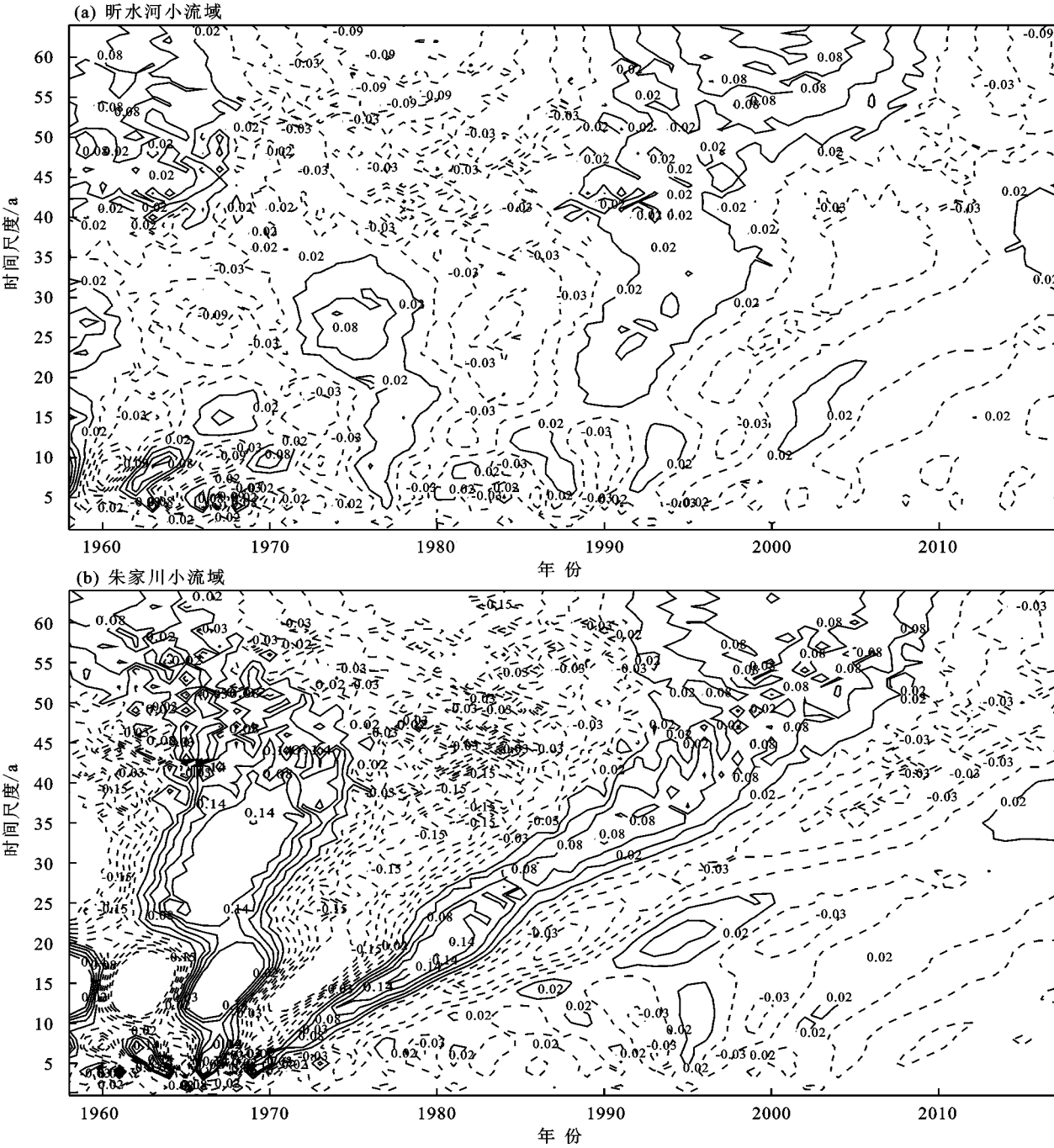


图 7 昕水河和朱家川小流域输沙量小波实际分布

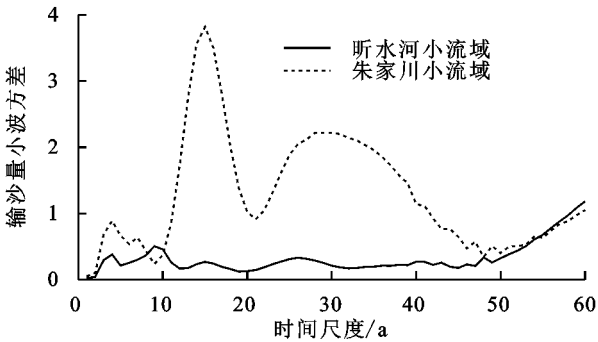


图 8 昕水河和朱家川小流域输沙量小波方差

2.3 水沙变化的影响因素

绘制降雨—径流双累积曲线(图 9),径流突变年份即双累积曲线斜率发生明显转折的年份。昕水河小流域和朱家川小流域每次转折曲线斜率均在变小,表明相同降雨量情况下,径流量在减少,降雨—径流的关系随之发生变化。

通过预测理论径流量和实测径流量计算人类活动对径流量减少的贡献率(表 1)。相较于突变年份前的时

期(1956—1979 年),昕水河小流域的径流量在 1980—2018 年期间减少 56%,降雨和人类活动的影响对径流量的减少均起到作用,贡献率分别为 19%,81%,人类活动起主导作用;对于朱家川小流域,1984—2018 年间径流量相较突变年份前的时期(1956—1983 年)减少 81%,降雨和人类活动对减水的贡献率约为 1:12,人类活动成为该流域径流量锐减的主导因素。

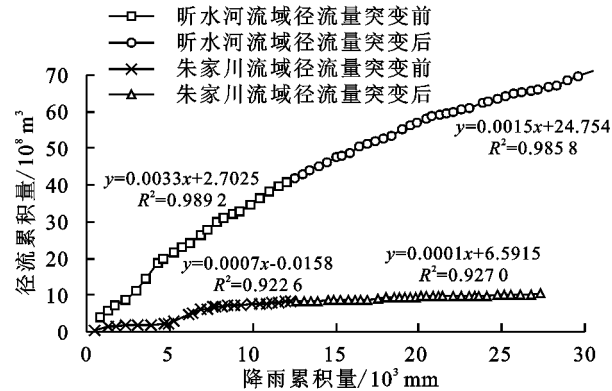


图 9 昕水河和朱家川小流域降雨—径流双累积曲线

表 1 昕水河和朱家川小流域各时间段降雨和人类活动对径流量的影响

流域	时间段	径流量/(10 ⁸ m ³ · a ⁻¹)			径流量减少贡献率/%		
		理论值	实测值	减少总量	人类活动	降雨	人类活动
昕水河	1956—1979	1.93	1.86	—			
	1980—2018	1.66	0.81	1.05	0.85	0.20	81
朱家川	1956—1971	0.33	0.32	—			
	1972—2018	0.30	0.06	0.26	0.24	0.02	92

同样,根据昕水河和朱家川小流域实测年降雨量和年输沙量,绘制降雨—输沙双累积曲线(图 10)。昕水河和朱家川小流域降雨—输沙双累积曲线斜率在输沙突变年份发生转折,转折均朝右偏,表明昕水河小流域和朱家川小流域降雨—输沙的关系分别在 1980 年和 1972 年后持续减弱。

计算昕水河和朱家川小流域降雨对输沙量变化的贡献率(表 2)。昕水河 1980—2018 年输沙量较突变年份前时期(1956—1979 年)减少 80%,朱家川 1972—2018 年输沙量较突变年份前时期(1956—1971 年)减少 87%。降雨对朱家川输沙量变化的贡献率(35%)高于对昕水河输沙量变化的贡献率(25%),相较于降雨对径流量的

影响,降雨对输沙量的影响更强烈,但不及人类活动的贡献率,人类活动仍是输沙量锐减的主导因素。

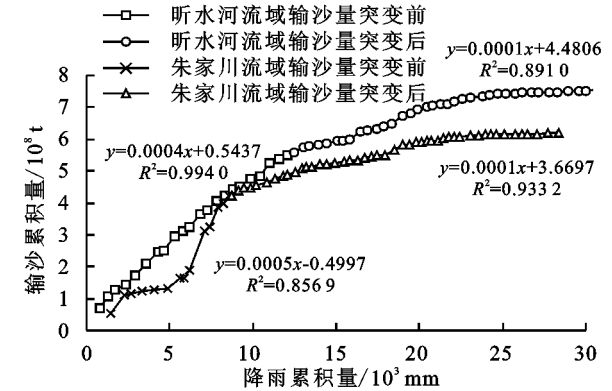


图 10 昕水河和朱家川小流域降雨—输沙双累积曲线

表 2 昕水河和朱家川小流域各时间段降雨和人类活动对输沙量的影响

流域	时间段	输沙量/(10 ⁸ t · a ⁻¹)			输沙量减少贡献率/%		
		理论值	实测值	减少总量	人类活动	降雨	人类活动
昕水河	1956—1979	0.24	0.25	—			
	1980—2018	0.20	0.05	0.20	0.15	0.05	75
朱家川	1956—1971	0.28	0.30	—			
	1972—2018	0.21	0.04	0.26	0.17	0.09	65

3 讨论

流域内水沙发生突变的主要原因是降雨时空分异和人为活动的影响。昕水河和朱家川2条气候条件不同的流域其径流量受降雨影响程度不同,昕水河流域较朱家川流域,气候更温润,降水条件更丰富,因此,突变年前后汛期降雨变化^[22]对昕水河流域径流量的影响(19%)大于对朱家川流域径流量的影响(8%)。朱家川流域由于植被覆盖率低,土质松散,土层更容易受到雨水的冲刷,产生更多的水土流失^[23],因此,降雨的变化对朱家川流域输沙量变化的影响(35%)高于对昕水河流域输沙量的影响(25%)。人类活动对黄河中游泥沙锐减占主导地位,输沙量大规模减少得益于人为水土保持措施的实施,大面积的退耕还林还草、兴建淤地坝和梯田等改变泥沙的输送过程,从根源上阻断坡面漫流、土壤侵蚀的发生,流域减水减沙效果明显^[24]。2000年后水库工程、河道采砂以及流域调水调沙等人类活动不断增多,系统性的水土保持工作使得流域下垫面变化更为明显,蓄水拦沙作用进一步增强,导致黄河泥沙骤减^[25]。然而,当前全球灾害性气候频发,局部地区一旦遭遇特大暴雨,所形成的洪水泥沙可能将过去水保措施所拦截的泥沙一并冲下,因此,近些年的黄河减水减沙工作必须高度重视大水大沙年份的出现及其引起的水沙灾害^[26]。同时,刘晓燕^[27]在关于未来黄河水沙形势的思考中提出,至2050年,黄河中游地区将存在严重的刚性缺水,绝大部分的淤地坝也将失去拦沙能力,林草植被覆盖度将达到饱和状态,黄河沙量反弹成为必然趋势。因此,在黄河水沙新常态背景下,需要在关于流域产汇流机制、水沙驱动因子、水保治理格局以及水沙调控阈值体系等关键问题科学筹划和精准实施^[28]。

4 结论

选取黄河中游多沙粗沙区气候、地形地貌差异显著的2条流域(昕水河和朱家川)为研究对象,分析2条流域1956—2018年小流域水沙变化趋势,量化气候变化及人类活动对径流和输沙量变化的相对贡献表明:

(1)昕水河和朱家川流域年均径流量分别为 11.9×10^7 , 1.7×10^7 m³,年均输沙量分别为 12.3×10^6 , 9.8×10^6 t,2条流域径流和输沙量均呈显著减少趋势($p < 0.01$)。

(2)昕水河和朱家川流域径流量的突变年分别为1980年和1984年,输沙量的突变年分别为1980年和1972年。2条流域水沙变化存在明显周期性,径流变化第1主周期分别为45,16年,输沙变化第1主

周期分别为9,15年。

(3)降雨对昕水河和朱家川小流域径流量减少的贡献率分别为19%,8%,对输沙量减少的贡献率分别为25%,35%,2条流域水沙量的减少受到降雨的影响明显但远不及人类活动,人类活动是水沙锐减的主导因素。

参考文献:

- [1] 胡春宏,张晓明.黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J].水利水电技术,2020,51(1):1-11.
- [2] Liu S Y, Huang S Z, Xie Y Y, et al. Spatial-temporal changes of rainfall erosivity in the loess plateau, China: Changing patterns, causes and implications[J]. Catena, 2018, 166: 279-289.
- [3] Han J Q, Gao J E, Luo H. Changes and implications of the relationship between rainfall, runoff and sediment load in the Wuding River basin on the Chinese Loess Plateau[J]. Catena, 2019, 175: 228-235.
- [4] 姚文艺,焦鹏.黄河水沙变化及研究展望[J].中国水土保持,2016(9):55-63,93.
- [5] 马文进,李鹏,任小凤,等.黄河中游府谷/吴堡区间水文特性分析[J].水文,2002,22(5):59-61,24.
- [6] 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.
- [7] 陈康,苏佳林,王延贵,等.黄河干流水沙关系变化及其成因分析[J].泥沙研究,2019,44(6):19-26.
- [8] Wang F, Zhao G L, Mu X M, et al. Regime shift identification of runoff and sediment loads in the Yellow River basin, China[J]. Water, 2014, 6(10): 3012-3032.
- [9] Miao C, Ni J, Borthwick A G L, et al. A preliminary estimate of human and natural contributions to the changes in water discharge and sediment load in the Yellow River[J]. Global and Planetary Change, 2011, 76(3): 196-205.
- [10] 贾昊,穆兴民,赵广举,等.不同频率黄河上中游径流量变化特征及其趋势预测[J].水土保持学报,2020,34(6):60-64,69.
- [11] 夏露,马耘秀,宋孝玉,等.黄河中游昕水河流域水沙变化及归因研究[J].水土保持学报,2021,35(6):109-115.
- [12] 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.
- [13] 亢小语,张志强,陈立欣,等.黄土高原中尺度流域基流变化驱动因素分析[J].自然资源学报,2019,34(3):563-572.
- [14] 胡磊,余冬立,杨震.晋西北黄土丘陵区小流域土壤团聚体稳定性及其分异特征[J].水土保持研究,2022,29(1):72-77.
- [15] 水利部黄河水利委员会.中华人民共和国水文年鉴:黄

- 河流域水文资料[M].郑州:水利部黄河水利委员会,1970.
- [16] 李二辉,穆兴民,赵广举.1919—2010 年黄河上中游区径流量变化分析[J].水科学进展,2014,25(2):155-163.
- [17] 王光辉.近 60 年黄河干流径流泥沙变异性分析[D].北京:清华大学,2019.
- [18] 高照良,付艳玲,张建军,等.近 50 年黄河中游流域水沙过程及对退耕的响应[J].农业工程学报,2013,29(6):99-105.
- [19] 李勃.黄河径流和输沙格局演变及其驱动因素研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [20] 杨坤,刘仲秋,雷坤,等.1957—2018 年永定河流域降雨时空演变规律研究[J/OL].中国农村水利水电:1-17 [2022-11-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1419.TV.20220913.1117.024.html>.
- [21] 冉大川,刘斌,付良勇,等.双累积曲线计算水土保持减水减沙效益方法探讨[J].人民黄河,1996(6):24-25.
- [22] 颜明,张守红,许炯心,等.风水两相变化对黄河中游支流粗泥沙的影响[J].水土保持学报,2010,24(2):25-29.
- [23] Zhang X, She D L. Quantifying the sediment reduction efficiency of key dams in the coarse sandy hilly catchments region of the yellow river basin, Chian[J].Journal of Hydrology,2021,602:e126721.
- [24] 高健翎,高燕,马红斌,等.黄土高原近 70 年水土流失治理特征研究[J].人民黄河,2019,41(11):65-69,84.
- [25] 高宗军,冯国平.黄河水沙变化趋势及成因分析[J].地下水,2020,42(1):147-151.
- [26] 史辅成,张冉.近期黄河水沙量锐减的原因分析及认识[J].人民黄河,2013,35(7):1-3.
- [27] 刘晓燕.关于黄河水沙形势及对策的思考[J].人民黄河,2020,42(9):34-40.
- [28] 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.
- (上接第 34 页)
- [14] Aksoy H, Kavvas M L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models [J].Catena,2005,64(2/3):247-271.
- [15] 蔺明华,杜靖澳,张瑞.黄河中游地区开发建设新增水土流失预测方法研究[J].水土保持通报,2006,26(1):61-67.
- [16] 苏彩秀,黄成敏,唐亚,等.工程建设中产生的水土流失评估研究进展[J].水土保持研究,2006,13(6):168-170,174.
- [17] 黄翌,汪云甲,王猛,等.黄土高原山地采煤沉陷对土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2014,30(1):228-235.
- [18] 程冬兵,张平仓,张长伟,等.工程开挖面土壤侵蚀模型的构建[J].农业工程学报,2014,30(10):106-112.
- [19] 马洪超,谢永生,赵暄,等.工程堆积体标准小区界定与可蚀性因子改进[J].水土保持学报,2016,30(3):59-64.
- [20] 谢云,林燕,张岩.通用土壤流失方程的发展与应用[J].地理科学进展,2003,22(3):279-287.
- [21] 黎四龙,蔡强国,吴淑安,等.坡长对径流及侵蚀的影响[J].干旱区资源与环境,1998,12(1):29-34.
- [22] Foster G R, Wischmerier W H. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction[J].Transactions of American Society of Agricultural,1974,17(2):305-309.
- [23] 汤国安,刘学军,闫国年.数字高程模型及地学分析的原理与方法[M].北京:科学出版社,2005.
- [24] 胡刚,宋慧,刘宝元,等.黑土区基准坡长和 LS 算法对地形因子的影响[J].农业工程学报,2015,31(3):166-173.
- [25] Zingg A W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff[J].Agricultural Engineering,1940,21:59-64.
- [26] Mc Cool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation [J].Transactions of ASAE,1987,30(5):1387-1396.
- [27] 江忠善,郑粉莉,武敏.中国坡面水蚀预报模型研究[J].泥沙研究,2005(4):1-6.
- [28] 吴普特,周佩华.地表坡度与薄层水流侵蚀关系的研究[J].水土保持通报,1993,13(3):1-5.
- [29] 牛耀彬,吴旭,高照良,等.降雨和上方来水条件下工程堆积体坡面土壤侵蚀特征[J].农业工程学报,2020,36(8):69-77.
- [30] 杨兴,张家喜,彭培好,等.模拟降雨条件下不同砾石含量工程边坡土壤侵蚀及水动力学特征[J].水土保持通报,2019,39(6):9-15.