

黄河中游昕水河流域水沙变化及归因研究

夏露¹, 马耘秀¹, 宋孝玉², 秦扬芳¹, 毕如田¹, 吕春娟¹

(1.山西农业大学资源环境学院, 山西 太谷 030801;

2.西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: 为了探讨人类活动和气候变化对黄河流域水沙情势的影响, 选取黄河中游典型流域——昕水河流域为研究区域, 分析流域 1958—2015 年水文气象年际变化规律, 采用 Mann-Kendall 检验法和 Pettitt 检验法对流域径流量、输沙量及含沙量进行趋势分析和突变检验, 并分别利用双累积曲线法、回归分析法和弹性系数法对水沙变化的归因进行了对比评价。结果表明: (1) 流域多年平均径流量、输沙量和含沙量分别为 32.0 mm, 1 289.1 t/km² 和 33.7 kg/m³, 年径流量、输沙量和含沙量均呈现显著下降趋势, 且其突变时间均出现在 1980 年附近; (2) 在 1958—1980 年和 1981—2002 年期间, 流域年水沙关系表现出较好的线性关系, 但是 2003—2015 年期间流域年径流—输沙关系的相关性明显减弱, 水沙关系难以用确定的回归方程来表征, 其主要原因为流域内水土保持工程措施的实施特别是淤地坝的建设, 削弱了流域的水沙关系; (3) 双累积曲线法、回归分析法和弹性系数法的计算结果较为接近, 人类活动是引起昕水河流域水沙变化的主要驱动因素, 传统的经验统计法确实有一定的可靠性和适用性。研究成果可为黄河流域生态恢复及水沙调控提供科学依据。

关键词: 水沙变化; 归因分析; 水沙关系; 黄河中游; 人类活动

中图分类号: TV121.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0109-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.016

Study on the Variation and Attribution of Runoff and Sediment in Xinshui River Watershed of Middle Yellow River

XIA Lu¹, MA Yunxiu¹, SONG Xiaoyu², QIN Yangfang¹, BI Rutian¹, LÜ Chunjuan¹

(1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 2.State Key

Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: In order to explore the effects of human activities and climate changes on the runoff and sediment yield in the Yellow River, a typical watershed in the middle reaches of the Yellow River——Xinshui River watershed, was selected as the research area to analyze the annual variation of hydrometeorological factors from 1958 to 2015. The Mann-Kendall test and Pettitt test were used to analyze the trend and mutation of runoff, sediment discharge and sediment concentration. In addition, double cumulative curve method, regression analysis method and elastic coefficient method were used to evaluate the attribution of runoff and sediment yield. Results show that: (1) The annual average runoff, sediment discharge and sediment concentration were 32.0 mm, 1 289.1 t/km² and 33.7 kg/m³, respectively. They all exhibited a significant decreasing trend on the annual scale. The results of mutation test showed that the abrupt change in annual runoff, sediment discharge and sediment concentration all occurred in 1980. (2) Before 2002, the relationship between annual runoff and sediment yield showed a good linear relationship. However, the correlation between annual runoff and sediment yield was significantly weakened during 2003—2015, which was difficult to be represented by a definite regression equation. The main reason was that the implementation of soil and water conservation engineering measures, especially the construction of check-dam, weakened the runoff-sediment relationship. (3) The results of double cumulative curve method, regression analysis method and

收稿日期: 2021-07-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(41771259); 山西省应用基础研究计划面上青年基金项目(201901D211352); 山西省优秀博士来晋工作奖励基金项目(SXYBK Y2019043); 山西农业大学科技创新基金项目(2020BQ25)

第一作者: 夏露(1992—), 男, 博士, 讲师, 主要从事生态水文研究。E-mail: xialuxiaochen@163.com

通信作者: 夏露(1992—), 男, 博士, 讲师, 主要从事生态水文研究。E-mail: xialuxiaochen@163.com

elastic coefficient method were relatively close. Human activities were the main driving factors of runoff and sediment variations in the Xinshui River watershed. The traditional empirical statistical method does have certain reliability and applicability. This study can provide scientific basis for ecological restoration and regulation of runoff and sediment in the Yellow River watershed.

Keywords: runoff and sediment variation; attribution analysis; runoff-sediment relationship; middle reaches of the Yellow River; human activity

黄土高原地区生态环境脆弱,水土流失严重。近年来,在全球气候波动和黄土高原实施退耕还林(草)等政策的背景下,黄河流域各支流水沙量大幅度减少,植被覆盖度明显增加,区域水文情势和生态条件发生显著变化^[1],黄河中游地区尤为明显。以河口镇—龙门区间为例,该区域 1956—1999 年多年平均降水量为 435.6 mm,年均入黄径流量和输沙量分别为 51.9 亿 m³和 6.9 亿 t,而 2000—2010 年期间在年均降水量略有减少(432.4 mm)的情况下,径流量却减少 37.4%,输沙量减少 76.2%^[2]。因此,分析变化环境对黄河流域水沙的影响已成为水科学的研究热点之一,同时对于新时期黄河水沙调控与流域生态环境保护建设也具有重要的意义^[3]。

目前,有关黄河水沙变化特征的研究已经开展大量的工作^[4-5]。例如,Zheng 等^[6]基于黄河流域 122 个水文站的数据分析了流域水沙变化特征,结果表明,多站 2008—2016 年平均径流和输沙量相比 1971—1987 年分别减少 22%和 74%;Zhao 等^[7]对黄河 58 个主要流域的年径流量和年输沙量进行分析表明,有 44 个流域的年径流量呈显著减少趋势,52 个流域的年输沙量呈显著降低趋势。众多学者对黄河水沙变化特征开展了大量的研究,但是目前大部分研究集中在分析径流量和输沙量的变化特征上,而对其他水沙特征如水沙关系的研究相对较少,因此需要考虑更多的特征指标来全面反映水沙变化特征。

黄河流域特别是中游地区的水沙变化显著已成为共识,其中最主要的影响因素包括人类活动和气候变化 2 个驱动因子,因此较多学者就这 2 个驱动因素对水沙变化的定量影响也做了大量的工作。例如,杨大文等^[8]基于流域水热耦合平衡模型对黄河流域 38 个典型流域 1961—2010 年间径流变化及其成因进行分析发现,黄河流域过去 50 年间绝大部分流域径流量呈减少趋势,且以黄河中游地区减少趋势尤为显著,降水、潜在蒸散发及下垫面变化对径流变化的平均贡献率分别为 49.3%,−3.5%和 72.0%;Zhang 等^[9]基于弹性系数法评价了黄河中游 10 个典型流域输沙变化的贡献率表明,与基准期(1950s—1979 年)相比,1980—1999 年与 2000—2014 年期间生态恢复

对输沙减少的平均贡献率从 63%增加到 81%;马耘秀等^[10]基于双累积曲线法定量评价人类活动和气候变化对岚河流域水沙变化的贡献率发现,人类活动是流域水沙变化的主导因素。目前,有关水沙变化的归因评价方法主要包括经验统计法、弹性系数法、水保法和水文模型法 4 类,大部分归因研究只采用一种方法进行定量评价,但是不同方法所得出的评价结果可能有所不同,因此有必要对不同归因评价方法进行对比和分析,而目前相关的方法对比研究却比较缺乏。

因此,本文以黄河中游典型流域——昕水河流域为研究对象,基于流域 1958—2015 年的水文气象资料,分析流域多年径流量、输沙量和含沙量(水沙关系表征量)的变化特征,并采用 3 种典型的归因方法(双累积曲线法、回归分析法和弹性系数法)分析流域水沙变化的贡献率,评价不同方法的差异性和适用性,以期为黄河流域生态保护和高质量发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

昕水河流域(110°30′—111°27′E,36°05′—36°55′N)地处山西省境内,系黄河中游右岸的一级支流。昕水河全长 134 km,流域总面积为 4 313 km²,海拔高度为 491~1 999 m(图 1)。该区属暖温带半湿润性大陆性季风气候,多年平均降水量为 526 mm,年平均气温为 9.4 ℃。流域上游为黄土高原土石山区,中下游属黄土高原残塬区和丘陵沟壑区,地形破碎,沟壑纵横,水土流失非常严重,因此是山西省以及黄河流域生态建设的重点流域,1978 年开始被纳入“三北防护林”体系建设工程。流域出口断面设有大宁水文站,其控制流域面积为 3 991 km²。

1.2 数据与方法

1.2.1 数据来源与处理 本研究所用观测数据主要包括流域水文和气象资料。

(1)水文资料:主要包括降水资料和径流泥沙资料,均来源于黄河水利委员会,数据年限为 1958—2015 年。其中,降水资料选用流域内系列连续的 13 个雨量站的降水数据,包括石口、午城、桑峨、窑渠、石家庄、岭上、克城、茹家坪、井上、黄土、化乐、安乐和大宁站(图 1),流域面降水量采用泰森多边形法求得;

径流泥沙资料采用流域出口控制站—大宁水文站的多年观测数据。

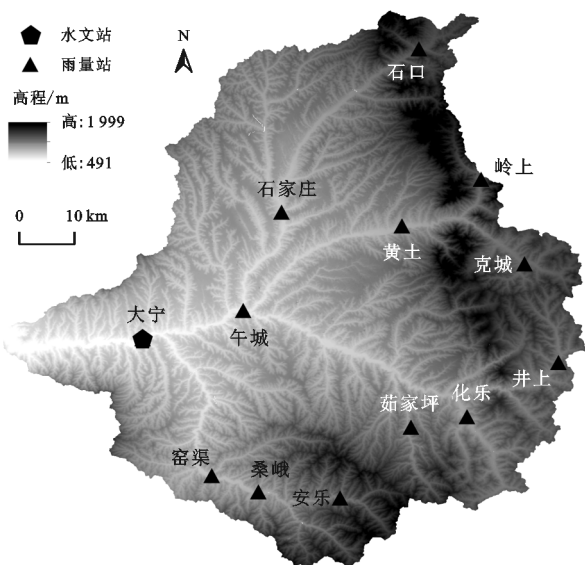


图1 昕水河流域 DEM 图及测站分布情况

(2)气象资料:采用昕水河流域内的隰县国家气象观测站 1958—2015 年的逐日资料,数据来源于国家气象数据网(<http://data.cma.cn/>),包括气温(最高气温、最低气温、平均气温)、相对湿度、太阳辐射、日照时间和风速等。基于隰县气象站多年逐日气象数据,采用世界粮农组织推荐的 Penman-Monteith 方法^[11]计算流域潜在蒸散发量。

1.2.2 研究方法

(1)水文气象变化趋势及突变检验。本研究采用 Mann-Kendall 非参数检验法进行水文气象要素的变化趋势检验,同时采用 Pettitt 非参数检验法对其进行突变检验。由于这 2 种方法在水文研究中已被广泛使用,因此有关方法原理在此并不详述,具体方法介绍见文献^[12]和文献^[13]。

(2)水沙变化的归因分析。目前,有关水沙变化的贡献率计算方法虽各具特色,但是大部分方法的研究思路完全一致,即着眼于基准期(人类活动影响较小)和变化期(人类活动影响较明显)的比较来定量评价驱动因素对水沙的影响^[14],其中,最常用的方法包括双累积曲线法、线性回归法和弹性系数法,因此本研究将采用这 3 种方法定量评价人类活动和气候变化对径流输沙变化的影响,并对比分析不同方法的适用性。

①双累积曲线法。通过对累计降水量—累积径流量(或累积输沙量)的曲线斜率进行判断,曲线斜率发生转折即认为人类活动明显改变了流域的产流产沙能力。通过对基准期的累积降水量与累积径流量(或累积输沙量)进行回归分析,推求两者的回归方程,然后将变化期的累积降水量值代入方程中,计算出还原后的累积径流量(或累积输沙量),再与同期实

测值比较,即可求出人类活动对径流(或输沙)变化的贡献率,从而推求出气候变化对径流(或输沙)变化的贡献率^[15]。

②回归分析法。通过对流域基准期的降水—径流(或降水—输沙)关系进行回归分析,寻找最优的回归方程,从而确定并建立起基准期的降水—径流(或降水—输沙)回归方程。之后将变化期历年的降水量值代入方程中,计算出还原后的天然径流量(天然输沙量),再与同期实测值比较,从而最终计算出人类活动和气候变化对水沙变化的贡献率^[16]。

③弹性系数法。弹性系数法是基于 Budyko 假设而发展起来的一种方法。前苏联学者 Budyko^[17]认为,年蒸散发量与年降水量的比值(ET_a/P)主要受流域水热条件的控制,它是干旱指数($\phi = ET_0/P$)的函数,计算公式为:

$$ET_a/P = F(ET_0/P) = F(\phi) \quad (1)$$

式中: P 为年降水量(mm); ET_a 为年实际蒸散发量(mm); ET_0 为年潜在蒸散发量(mm)。

许多学者就此提出一系列的 Budyko 假设解析公式,其中应用最为广泛的当属傅抱璞公式。我国气候学家傅抱璞^[18]根据流域水文气象的物理意义提出一组 Budyko 假设的解析表达式:

$$F(\phi) = \frac{ET_a}{P} = 1 + \frac{ET_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{ET_0}{P} \right)^\omega \right]^{1/\omega} \quad (2)$$

式中: ω 为水热耦合控制参数,其年值可通过水量平衡法反推求得。

根据傅抱璞公式,流域径流的全微分形式可表达为(忽略其泰勒展开式的高阶项):

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial Q}{\partial ET_0} \Delta ET_0 + \frac{\partial Q}{\partial \omega} \Delta \omega \quad (3)$$

式中: Q 为年径流深(mm); ΔQ 、 ΔP 、 ΔET_0 及 $\Delta \omega$ 为变化期与基准期各参数的差值。

基于水量平衡方程,则径流对各影响因子的偏导结果为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial P} &= \left[1 + \left(\frac{ET_0}{P} \right)^\omega \right]^{\frac{1}{\omega}-1} \\ \frac{\partial Q}{\partial ET_0} &= (ET_0^\omega + P^\omega)^{\frac{1}{\omega}-1} \cdot ET_0^{\omega-1} - 1 \\ \frac{\partial Q}{\partial \omega} &= (ET_0^\omega + P^\omega)^{\frac{1}{\omega}} \cdot \left[-\frac{\ln(ET_0^\omega + P^\omega)}{\omega^2} + \frac{1}{\omega} \cdot \frac{ET_0^\omega \ln ET_0 + P^\omega \ln P}{ET_0^\omega + P^\omega} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

根据偏导结果,再求出变化期与基准期的 ΔP 、 ΔET_0 及 $\Delta \omega$,代入公式(3)即可推求由于 ΔP 、 ΔET_0 及 $\Delta \omega$ 引起的径流变化,从而得到各因素对径流变化的贡献率 $\varphi(P)$ 、 $\varphi(ET_0)$ 和 $\varphi(\omega)$ 。

对于输沙变化贡献率,首先拟合流域多年径流深

(Q)和输沙量(S)的回归方程,将该方程代入水量平衡方程,从而推求出输沙对各因子的偏导结果,最终推求出各影响因素对输沙变化的贡献率。

2 结果与分析

2.1 水文气象变化趋势及突变分析

根据流域 1958—2015 年水文气象要素统计(图 2)结果,流域多年平均降水量、潜在蒸散发量和径流量分别为 526.0、983.2、32.0 mm,其中年降水量整体表现出微弱的下降趋势,年潜在蒸散发量整体表现出微弱的上升趋势,而年径流量下降趋势明显。流域多年平均输沙量和含沙量分别为 1 289.1 t/km²和

33.7 kg/m³,两者均呈现明显的下降趋势,特别是在 2000 年以后,年输沙量基本保持在一个非常低的水平。另外,M—K 统计检验结果(表 1)显示,年降水量和年潜在蒸散发量分别呈现不显著的减少趋势($Z=-0.275$)和不显著的增加趋势($Z=0.074$),而年径流量、年输沙量和年含沙量均呈现极显著的减少趋势($p<0.01$)。由此可见,降水和潜在蒸散发的变化对于水沙减少的趋势应该起到一定的作用,但是这种驱动作用不足以使水沙在年际上发生如此显著的变化,还应该受到人类活动强烈的影响,从而显著地降低流域内的产流产沙量。

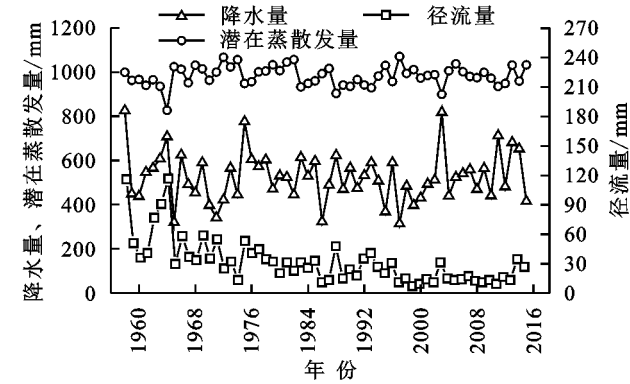


图 2 昕水河流域 1958—2015 年水文气象要素年际变化规律

水文气象要素	M—K 统计检验		Pettitt 检验	
	统计量	显著性	突变年份	显著性
降水量	-0.275	NS	—	—
潜在蒸散发量	0.074	NS	—	—
径流量	-5.628	**	1979	**
输沙量	-6.299	**	1981	**
含沙量	-4.823	**	1981	**

注: NS 代表不显著; * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$; — 表示未检测到突变年份。

Pettitt 统计检验结果(表 1 和图 3)表明,年降水量和年潜在蒸散发量均未通过 0.05 的显著性水平检验,因此可认为两者在研究期间未发生突变。年径流量于 1979 年左右发生突变,年输沙量和年含沙量的突变时间出现在 1981 年附近,且都通过 0.01 的显著性水平检验。由此可见,水沙突变的时间较为一致。岚河流域于 1978 年被纳入“三北防护林体系建设工程”区域,大中型淤地坝建设也始于 1980 年,同时 1978 年也是改革开放的起始年份,流域内社会经济开始迅猛发展,对水资源的需求量骤增,因此,大面积的人工造林措施和工程措施以及取用水量的增加显著降低流域的径流输沙量,这也是水沙突变时间出现在 1980 年附近的原因。综合统计检验结果及流域实际情况,确定流域水沙突变时间为 1980 年附近。

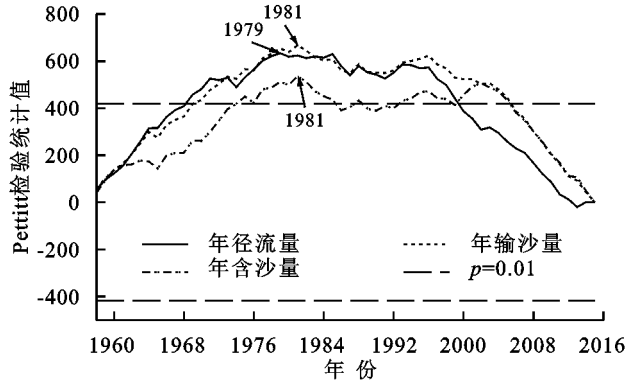
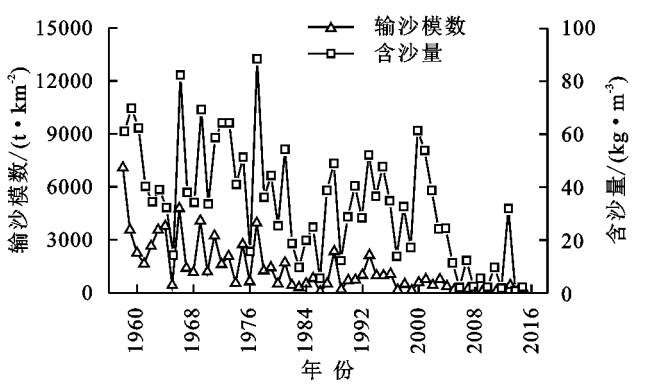


图 3 昕水河流域年径流量、输沙量和含沙量 Pettitt 检验结果

2.2 水文气象演变程度分析

基于对昕水河流域水沙的突变分析结果,本研究以 1980 年为突变年份,将水文序列分为 2 个时期:基准期(1958—1980 年)和变化期(1981—2015 年),分析水文气象要素演变程度。

对基准期和变化期的水文气象要素进行统计分析(表 2)表明,降水量、潜在蒸散发在 2 个时期的统计特征值(均值、极值比和变差系数)变化不大;基准期的年径流量、年输沙量和年含沙量均值分别为 49.2 mm、2 413.6 t/km²和 47.9 kg/m³,而变化期的年径流量、年输沙量和年含沙量均值分别为 20.6 mm、550.1 t/km²和 24.3 kg/m³,三者分别减少 58.0%, 77.2%, 49.2%, 减少幅度较大;径流量在基准期和变化期的极值比和变差系数差异不大,变化幅度较小,

而输沙量、含沙量在变化期的极值比和变差系数均远大于基准期,这是因为在变化期由于人类活动的影响,一般年份的输沙量和含沙量水平非常低,而个别

年份由于受到特大暴雨的影响,产生较大的数值,最终导致变化期输沙量和含沙量的极值比和变差系数产生较大的波动,使极值比和变差系数急剧增大。

表 2 昕水河流域水文气象要素在基准期和变化期的统计特征值

水文气象要素	基准期(1958—1980 年)			变化期(1981—2015 年)		
	均值	极值比	变差系数	均值	极值比	变差系数
降水量	536.8	2.6	0.24	519.0	2.6	0.20
潜在蒸散发量	986.5	1.3	0.05	981.0	1.2	0.04
径流量	49.2	8.8	0.56	20.6	6.8	0.50
输沙量	2 413.6	16.6	0.68	550.1	77.0	1.05
含沙量	47.9	6.2	0.42	24.3	69.7	0.74

注:降水量、潜在蒸散发量、径流量单位为 mm;输沙量单位为(t/km²);含沙量单位为(kg/m³)。

相较于基准期,年含沙量在变化期的均值降低 49.2%,这说明气候变化和人类活动造成流域水沙关系的变化,降低单位径流的输沙能力。另外,年均含沙量的降低,也说明变化环境导致的减沙效应大于减水效应,与表 2 中所显示的减水减沙效益结果一致。为了进一步研究流域水沙关系的变化特征,本研究建立年输沙量—年径流量的回归曲线来分析不同时期的水沙关系,其中,基准期 1958—1980 年为 1 个时段,而将变化期 1981—2015 年分为 1981—2002 年和 2003—2015 年 2 个时段,这是因为 2002 年是 Pettitt 检验法对含沙量序列检测出来的第 2 个最有可能的突变点(图 3)。通过对 1958—1980 年、1981—2002 年和 2003—2015 年的年输

沙量—年径流量数据点进行回归拟合,最终 3 个时期的水沙关系曲线见图 4。结果表明,在 1958—1980 年和 1981—2002 年期间,流域年水沙关系均表现出较好的线性关系,2 个时期建立的年径流—输沙线性回归方程的决定系数 R^2 分别达到 0.627 和 0.654,但相较于第 1 个时期,第 2 个时期线性回归方程的斜率有所下降,说明这个时期单位径流输沙水平已经有所降低。第 3 个时期的年径流—输沙数据点分布的非常离散,用各种形式的曲线来拟合这些数据点,但是精度均较低,各个回归方程的决定系数均未超过 0.15,说明 2003—2015 年期间径流—输沙关系的相关性明显减弱,水沙关系难以用确定的回归方程来表示。

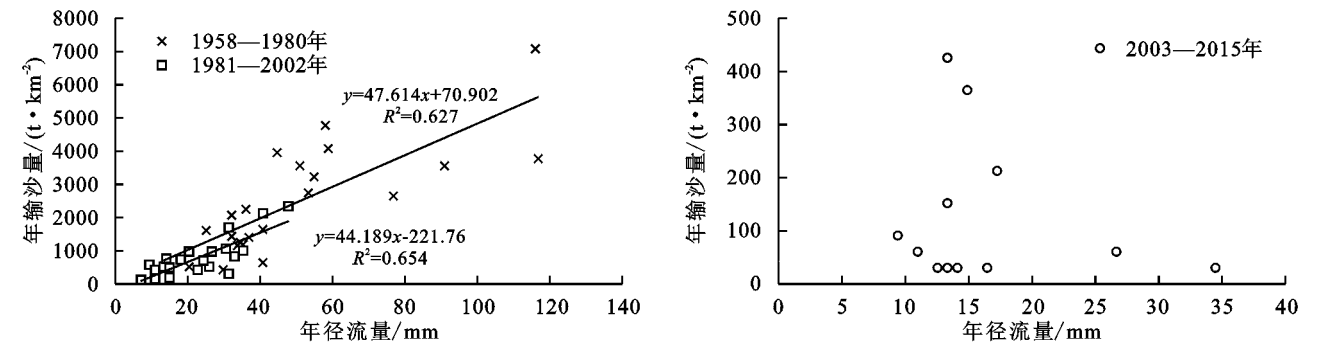


图 4 昕水河流域不同时期的年水沙关系

2.3 气候变化和人类活动对水沙变化的定量影响

利用双累积曲线法、线性回归法和弹性系数法定量评价驱动因素对径流量和输沙量变化的影响,结果见表 3。双累计曲线法的结果表明,流域气候变化和人类活动对径流变化的贡献率分别为 0.6%,99.4%,对输沙变化的贡献率分别为 4.1%,95.9%;线性回归法最终采用的回归方程均为一元线性回归方程,其中,基准期降水—径流线性回归方程为: $Q=0.141P-26.311(R^2=0.425, p<0.01)$,基准期降水—输沙线性回归方程为: $S=7.699P-1719.2(R^2=0.352, p<0.01)$,线性拟合效果均较好,最终的贡献率计算结果表明,流域气候变化和人类活动对径流变化的贡献率分别为 8.7%和 91.3%,对输沙变化的贡献率分

别为 7.3%,92.7%;弹性系数法的结果表明,流域降水变化、潜在蒸散发变化和人类活动对径流变化的贡献率分别为 13.6%,−1.6%,88.0%,对输沙变化的贡献率分别为 17.4%,−2.9%,85.5%。不同方法的计算结果有所差异,但总体结果较为一致,均表明人类活动对于昕水河流域水沙变化起到主导作用,这与其他学者^[19]在黄河中游其他流域的研究结论基本相同。

3 讨论

近年来,黄河流域特别是中游地区,水沙情势大多呈现下降趋势,因此有关黄河水沙变化特征及其驱动机制引起了众多学者的关注。本文除了分析常规的径流量和输沙量指标之外,还探讨流域水沙关系的

变化特征,结果表明,流域含沙量呈现极显著的下降趋势,与基准期相比,变化期的年径流输沙能力降低49.2%。Rustomji 等^[20]通过分析黄河 11 个典型流域 1950s—2000 年间的含沙量发现,所有流域的含沙量也呈现下降趋势,其中,7 个流域呈现出显著下降趋势,这也印证本文的研究结论。另外,昕水河流域在不同时期的水沙关系也有所变化,在 1958—1980 年和 1981—2002 年期间,流域年水沙关系均表现出

表 3 昕水河流域水沙变化的归因分析结果 单位:%

研究方法	对径流变化的贡献率			对输沙变化的贡献率		
	降水	潜在蒸散发	人类活动	降水	潜在蒸散发	人类活动
双累计曲线法	0.6	—	99.4	4.1	—	95.9
线性回归法	8.7	—	91.3	7.3	—	92.7
弹性系数法	13.6	—1.6	88.0	17.4	—2.9	85.5

昕水河流域降水和潜在蒸散发在研究期间变化趋势均不明显,对水沙关系的影响较小,因此,人类活动应该是流域水沙关系发生显著变化的主要原因。研究区内大型水利工程较少,人类活动对水沙关系的影响主要体现在植被恢复措施、水土保持工程措施(淤地坝等)以及取用水等方面。相关研究^[21-22]表明,植被恢复措施可以显著地降低流域径流的输沙能力,从而改变流域水沙关系,但是郑明国等^[23]、晏清洪等^[24]通过对比流域研究发现,单纯的坡面植被措施并不会显著改变流域水沙关系。由于相关数据受限,本文未能对这一问题进行深入的研究,因此植被措施是否对昕水河流域的水沙关系产生影响还有待进一步研究。水土保持工程措施特别是淤地坝的建设,由于能够减少沟道侵蚀,其减沙效益大于减水效益,因此能够显著地降低流域径流输沙能力,这可以从含沙量的突变时间上得到印证:昕水河流域淤地坝建设始于 1980 年,这是第 1 波建设期,另外自 2003 年开始流域内又开始集中建设大量淤地坝^[25],而流域水沙关系(含沙量)发生突变的 2 个年份分别是 1981 年和 2002 年,突变年份与淤地坝建设高峰时间高度一致。另外,有关人类取用水对水沙关系的影响研究较少,笔者暂对地表水取水活动的影响进行简单的讨论:地表水取水这一人类活动主要在水域内完成,不涉及对坡地产汇流及输沙的影响,因此取用水的直接驱动作用体现在对径流量的减少效应上,从而应该增加含沙量;但是径流的减少又可能降低单位径流的输沙能力,这是对水沙关系的间接作用,即降低含沙量,最终人类取用水对含沙量的影响还得取决于这 2 种正负作用的博弈。综上所述,本研究区域内水沙关系变化的主要原因为水土保持工程措施特别是淤地坝的建设。

本文选取最常用的 3 种方法进行水沙变化的归因

较好的线性关系,但是在 2003—2015 年期间径流—输沙关系的相关性很弱,水沙关系难以用确定的回归方程来表示。Gao 等^[21]曾对黄河 14 个典型流域 1950s—2014 年的水沙关系进行回归拟合表明,在 2000 年以前大部分流域年水沙关系均能用线性回归方程来表示,但是在 2000 年之后,水沙关系明显减弱,无法用任何形式的回归方程来表征,这也与本文的研究结论较为一致。

对比分析,最终结果表明,弹性系数法计算出来的结果与 2 种经验统计法(双累计曲线法、回归分析法)的结果较为接近,人类活动是引起昕水河流域水沙变化的主要驱动因素,这说明经验统计法确实有一定的可靠性和适用性。Wu 等^[26]曾以延河流域为研究对象,对比分析经验统计法、弹性系数法和水文模型法在径流变化归因研究中的适用性,结果表明,弹性系数法和水文模型法计算的结果较为一致,但经验统计法与这两者的计算结果有一定的差距,这与本研究的结论有所不同,其中的原因主要为延河流域基准期的降水—径流、降水—输沙间的相关性不够强,这对评价结果就造成一定的不确定性,从而使评价结果不够理想。因此,在应用经验统计法时,必须注意所建立的回归方程能否较好地模拟降水—径流、降水—输沙间的关系。

4 结论

(1)昕水河流域年降水量和年潜在蒸散发量在 1958—2015 年间呈不显著减少趋势和不显著增加趋势,且未发生突变;年径流量、输沙量和含沙量 1958—2015 年间均呈现显著下降趋势,且突变时间均出现在 1980 年附近,这一突变时间与自 1978 年开始的大规模人工造林和工程措施及取水量的增加密切相关。

(2)在 2002 年以前,流域年水沙关系表现出较好的线性关系,但 2003—2015 年期间年径流—输沙关系的相关性明显减弱,水沙关系难以用确定的回归方程来表示,这主要是由于水土保持工程措施导致的变化结果。

(3)双累计曲线法、线性回归法和弹性系数法的水沙变化归因计算结果较为一致,均表明人类活动对于昕水河流域的水沙变化起到主导作用。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 尚红霞,彭红,田世民,等.黄河河口镇—龙门区间近期水沙变化特点分析[J].人民黄河,2014,36(2):1-2.
- [3] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J].Nature Geoscience,2016,9(1):38-41.
- [4] 胡春宏,张晓明,赵阳.黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J].水科学进展,2020,31(5):725-733.
- [5] Liang W, Bai D, Wang F Y, et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau[J].Water Resources Research,2016,51(8):6500-6519.
- [6] Zheng H Y, Miao C Y, Wu J W, et al. Temporal and spatial variations in water discharge and sediment load on the Loess Plateau, China: A high-density study[J].Science of the Total Environment,2019,666:875-886.
- [7] Zhao G J, Mu X M, Jiao J Y, et al. Evidence and causes of spatiotemporal changes in runoff and sediment yield on the Chinese Loess Plateau[J].Land Degradation and Development,2017,28(2):579-590.
- [8] 杨大文,张树磊,徐翔宇.基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析[J].中国科学:技术科学,2015,45(10):1024-1034.
- [9] Zhang J J, Gao G Y, Fu B J, et al. Formulating an elasticity approach to quantify the effects of climate variability and ecological restoration on sediment discharge change in the Loess Plateau, China[J].Water Resources Research,2019,55(11):9604-9622.
- [10] 马耘秀,夏露,范毅,等.土地利用和气候变化对黄土区典型流域水沙变化的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):38-46.
- [11] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirement[R].Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Irrigation and Drainage Paper,56,1998.
- [12] Kendall M G. Rank correlation measures[M].London: Charles Griffin,1975.
- [13] Pettitt A N. A nonparametric approach to the change-point problem[J].Applied Statistic,1979,28:126-135.
- [14] Zhao G J, Mu X M, Jiao J Y, et al. Assessing response of sediment load variation to climate change and human activities with six different approaches[J].Science of the Total Environment,2018,639:773-784.
- [15] 夏露,宋孝玉,李怀有,等.砚瓦川流域水沙演变特征及其驱动因素分析[J].水土保持学报,2016,30(1):89-95.
- [16] 蒋凯鑫,于坤霞,曹文洪,等.黄土高原典型流域水沙变化归因对比分析[J].农业工程学报,2020,36(4):143-149.
- [17] Budyko M I. Climate and life[M].New York and London: Academic Press,1974.
- [18] 傅抱璞.论陆面蒸发的计算[J].大气科学,1981,5(1):23-31.
- [19] Gao G Y, Fu B J, Wang S, et al. Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budyko framework[J].Science of the Total Environment,2016,557/558:331-342.
- [20] Rustomji P, Zhang X P, Hairsine P B, et al. River sediment load and concentration responses to changes in hydrology and catchment management in the Loess Plateau region of China[J].Water Resources Research,2009,45(7):377-393.
- [21] Gao G Y, Fu B J, Zhang J J, et al. Multiscale temporal variability of flow-sediment relationships during the 1950s—2014 in the Loess Plateau, China[J].Journal of Hydrology,2018,563:609-619.
- [22] Zhang J J, Zhang X P, Li R, et al. Did stream flow or suspended sediment concentration changes reduce sediment load in the middle reaches of the Yellow River? [J].Journal of Hydrology,2017,546:357-369.
- [23] 郑明国,蔡强国,王彩峰,等.黄土丘陵沟壑区坡面水土保持措施及植被对流域尺度水沙关系的影响[J].水利学报,2007,38(1):47-53.
- [24] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.降水和水土保持对黄土区流域水沙关系的影响[J].中国水土保持科学,2013,11(4):9-16.
- [25] 张海博,张建军,张佳楠,等.昕水河流域“水文法”基准期降水输沙相关关系统计方法研究[J].北京林业大学学报,2020,42(11):91-104.
- [26] Wu J W, Miao C Y, Zhang X M, et al. Detecting the quantitative hydrological response to changes in climate and human activities[J].Science of the Total Environment,2017,586:328-337.