

# 黄河河龙区间输沙变化特征及归因分析

宁 珍<sup>1,2</sup>, 高光耀<sup>1,2</sup>, 傅伯杰<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院 生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**黄河中游河口镇—龙门区间(河龙区间)是黄河泥沙的主要来源区。近年来黄河输沙量急剧变化,为了识别黄河输沙量变化的原因,基于河龙区间 15 个流域 1961—2017 年的输沙和降雨数据,分析了研究时段内输沙模数的变化趋势和突变时间,定量区分气候变化和人类活动对输沙减少的贡献率。结果表明:研究区内 15 个流域的输沙模数均呈现显著的下降趋势,突变时间集中在 80、90 年代。降雨减少和水土保持措施的增加共同导致了输沙模数的下降,在多数流域,人类活动是导致输沙模数减少的主要因素,80 年代后急剧增加的水土保持措施有效减缓了流域产沙。研究成果可为黄河流域生态恢复及水沙调控提供决策支持。

**关键词:**河龙区间; 输沙模数; 降水变化; 归因分析

**中图分类号:**S157.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2022)03-0038-05

## Characteristics and Attribution Analysis of Sediment Yield Changes in Helong Region of the Yellow River

NING Zhen<sup>1,2</sup>, GAO Guangyao<sup>1,2</sup>, FU Bojie<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Sediment discharge of the Yellow River has changed rapidly in recent years. It is of great significance to identify the causes of the variation of sediment discharge in the Yellow River for the formulation of watershed management strategies. Hekouzhen-Longmen region (Helong region) in the middle reaches of the Yellow River is the main source area of sediment yield. Based on the sediment yield and precipitation data of 15 basins in the Helong region during 1961—2017, we analyzed the variation trend and abrupt change time of specific sediment yield during the study period, and quantitatively identified the contribution rates of climate change and human activities to sediment transport reduction. The results show that the specific sediment yield of the 15 basins in the study area presented a significant downward trend, and the abrupt change time concentrated in the 1980s and 1990s. The decrease of precipitation and the increase of soil and water conservation measures led to the decrease of specific sediment yield. Human activities in most basins are the main factor leading to the decrease of specific sediment yield. The sharp increase of soil and water conservation measures after the 1980s had effectively slowed down the sediment yield. This study attempts to provide decision-making support for ecological restoration and water and sediment regulation in the Yellow River basin.

**Keywords:** Helong region; specific sediment yield; precipitation change; attribution analysis

河口—龙门区间(简称河龙区间)位于黄河中游晋陕峡谷段,区间内植被稀疏、暴雨密集、土壤质地疏松,导致了严重的水土流失问题<sup>[1]</sup>。河龙区间面积占黄河流域总面积的 15%,贡献了三门峡以上黄河泥沙量的 90%<sup>[2]</sup>。流域产沙量主要取决于降雨和人类

活动的影响<sup>[3]</sup>。自 20 世纪 50 年代以来,为了控制水土流失和土地退化,黄河中游实施了大规模的梯田、造林、坝地等水土保持措施,1999 年更是启动了退耕还林还草大型生态修复工程<sup>[4]</sup>。此外,20 世纪 50 年代以来,河龙地区气候呈现暖干化趋势(即潜在蒸散

收稿日期:2020-03-29

修回日期:2020-05-17

资助项目:国家自然科学基金资助项目“黄土丘陵区典型流域水沙变化的时空尺度特征与驱动机制研究”(41471094);国家优秀青年科学资助项目“半干旱区土壤—水文—植被相互作用”(41822103)

第一作者:宁珍(1991—),女,北京人,博士研究生,主要研究方向为土壤侵蚀。E-mail:ningzhen1991@foxmail.com

通信作者:高光耀(1984—),男,湖北仙桃人,研究员,博士,主要研究方向为生态水文。E-mail:gygao@rcees.ac.cn

发增加,降水量减少)<sup>[5]</sup>。在降雨减少和人类活动的共同作用下,近 60 a 来河龙区间产沙量发生了显著变化,平均每年减少 3.3%<sup>[6]</sup>。Zhang 等<sup>[7]</sup>指出,气候干旱、工程措施和植被增加共同作用导致了 1950—2008 年黄土高原的产沙量显著减少。高海东等<sup>[8]</sup>以河龙区间为研究对象,认为植被恢复是 2000—2017 年输沙量减少的主要原因。胡春宏等<sup>[9]</sup>以黄河中游为研究区域,发现在极端降雨事件中,实施水土保持措施的地区比未实施地区的输沙模数减少了 75%。王飞等<sup>[10]</sup>发现在不同时期,人类活动对延河流域水沙变化的影响程度有一定差异。

分析黄河中游河龙区间泥沙变化的特征和原因,不仅对黄河可持续管理至关重要,也可以为多沙粗沙区水土流失的治理提供参考<sup>[11]</sup>。目前的研究对黄河泥沙变化规律和影响因素等方面已有全面的阐述,但对各因素作用大小仍缺乏定量的研究<sup>[12]</sup>。另外,多数研究以河龙区整体为研究对象,忽略了不同子流域间的对比分析。因此,本文选取河龙区间的 15 个流域,分析 1961—2017 年输沙模数的变化趋势和突变时间,定量区分气候变化和人类活动对输沙模数的影响,为黄河治理提供参考。

## 1 研究区概况

河龙区间位于黄河中游上段(图 1),地处北洛河以东,吕梁山以西,在东经 108°02′—112°44′,北纬 35°40′—40°34′之间,集水面积约 11.2 万 km<sup>2</sup>。区域内地势北高南低,地貌类型以黄土丘陵沟壑区、风沙区和基岩出露区为主,其中黄土丘陵沟壑区占流域总面积的 60% 以上。河龙区间属于温带大陆性季风气候,年均气温 2.2°~15℃,年均降水量 310~610 mm。区域内降雨时空分布极不均匀,空间上由东南向西北递减,东南部年平均降雨量达 590 mm,西北部年平均降雨量仅为 300 mm<sup>[13]</sup>,年内降雨集中在 6—9 月,占全年总降雨的 60% 以上。作为国家水土保持工作的重点地区,截至 2006 年底,河龙区间水保措施累计治理面积达 418 万 hm<sup>2</sup>,为 1959 年的 18 倍<sup>[14]</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

输沙量数据由水利部黄河水利委员会发布的黄河流域水文资料获得,输沙模数根据输沙量数据计算而得,数据时间为 1961—2017 年。

降水数据由中国气象科技数据中心(<http://data.cma.cn/>)获得,该数据基于国家级台站(基本、基准和一般站)的降水月值资料,由薄盘样条法进行空

间插值生成,空间分辨率为 0.5°×0.5°。各流域的数据使用 ArcGIS 软件进行剪裁和计算。

水土保持措施数据来自冉大川<sup>[15]</sup>和姚文艺等<sup>[16]</sup>文献。

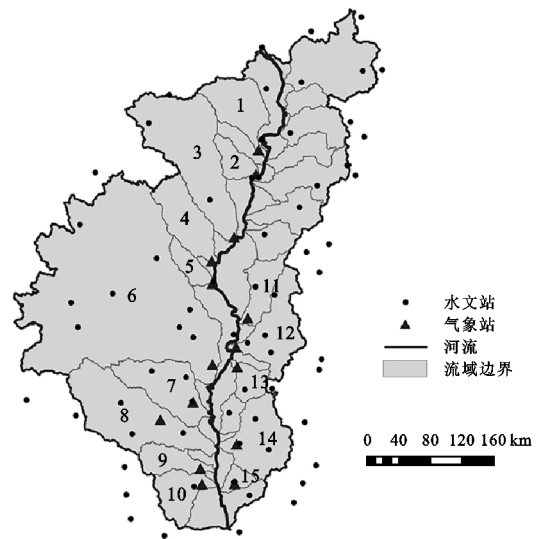


图 1 河龙区间流域、水文站及气象站点位置

### 2.2 方法

2.2.1 Mann-Kendal 非参数趋势检验法 Mann-Kendall 非参数检验法是判断时间序列数据趋势的重要方法<sup>[17]</sup>,现已广泛应用于水文、气象等时间序列的趋势性分析<sup>[18]</sup>。与参数法相比,该方法不考虑样本序列的分布特征,且检验结果不受序列中少数异常值和中断点的干扰,因而得到了广泛的应用<sup>[19]</sup>。对于给定的时间序列  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,统计量  $S$  定义如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

式中:  $x_j$  和  $x_i$  表示第  $j$  和  $i$  年的样本值,且  $j > i$ :

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j > x_i \\ 0 & x_j = x_i \\ -1 & x_j < x_i \end{cases} \quad (2)$$

统计量  $S$  近似正态分布,方差为:

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

标准化统计量为:

$$Z = \begin{cases} s - 1 / \sqrt{\text{var}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ s + 1 / \sqrt{\text{var}(S)} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

若  $|Z| > 1.96$ ,则在 0.05 显著性水平下拒绝无趋势的原假设。当  $Z$  为正值时,表示上升趋势,当  $Z$  为负值时,表示下降趋势。

趋势度  $\beta$  的公式为:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (5)$$

$\beta$  大于 0 时表示序列呈上升趋势, $\beta$  小于 0 时表示序列呈下降趋势。

2.2.2 Pettitt 突变点检验法 Pettitt 检验是目前广泛用于检测水文序列突变点的非参数方法<sup>[20]</sup>。对于给定的时间序列  $X(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ , 划分为  $x_1, x_2, \cdots, x_t$  和  $x_{t+1}, x_{t+2}, \cdots, x_n$  两部分, 统计量  $U_{t,n}$  计算如下:

$$U_{t,n}=U_{t-1,n}+V_{t,n} \tag{6}$$

$$V_{t,n}=\sum_{j=1}^n \operatorname{sgn}(x_t-x_j) \tag{7}$$

式中:  $t=2, \cdots, n$ ;  $\operatorname{sgn}()$  函数与 Mann-Kendall 检验中相同。突变点为  $|U_{t,n}|$  最大处:

$$K_n=\max |U_{t,n}| \tag{8}$$

判断显著性水平的统计量  $p$  定义为:

$$P=\exp\left(\frac{-6\left(K_n\right)^2}{n^3+n^2}\right) \tag{9}$$

2.2.3 输沙变化归因分析 使用“水文法”定量区分降雨减少和人类活动对输沙变化的贡献。该方法可以用于确定不同时期水文时间序列的差异。根据各个流域的突变时间, 将突变时间以前的输沙模数序列划分为基准期, 突变时间后的时段为受到人类活动影响较多的措施期。首先建立基准期内降雨与输沙之间的回归方程, 然后用此方程估计措施期的产沙量, 实测值与拟合值之间的差值代表人类活动造成的影响, 其余的部分由降雨变化造成。公式如下:

$$\operatorname{SSY}_1=f\left(P_1\right) \tag{10}$$

$$\operatorname{SSY}_2=f\left(P_2\right) \tag{11}$$

$$\Delta \operatorname{SSY}^{\text {LUCC }}=\overline{\operatorname{SSY}_2}-\overline{\operatorname{SSY}_2^{'}} \tag{12}$$

$$\Delta \operatorname{SSY}^{\text {Pre }}=\left(\overline{\operatorname{SSY}_2}-\overline{\operatorname{SSY}_1}\right)-\Delta \operatorname{SSY}^{\text {LUCC }} \tag{13}$$

式中:  $\operatorname{SSY}$  为实测输沙模数 ( $\text{t}/\text{km}^2$ );  $P$  为降雨量 ( $\text{mm}$ );  $\operatorname{SSY}'$  为拟合输沙模数, 下标 1, 2 分别表示基准期和措施期;  $\overline{\operatorname{SSY}_1}$  和  $\overline{\operatorname{SSY}_2}$  分别代表基准期和措施期的平均实测输沙模数;  $\overline{\operatorname{SSY}_2^{'}}$  代表措施期的平均拟合输沙模数;  $\Delta \operatorname{SSY}^{\text {LUCC }}$  和  $\Delta \operatorname{SSY}^{\text {Pre }}$  分别是措施期内土地利用/土地覆盖变化和降水变化导致的输沙模数变化量。

Rustomji 等发现黄土高原流域年输沙模数的平方根与年降水量呈线性相关<sup>[21]</sup>。本研究中用此来描述降雨—输沙的关系:

$$\sqrt{\operatorname{SSY}}=a P+b \tag{14}$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 输沙序列趋势分析

对 1961—2017 年 15 个流域的数据进行分析, 研究区内各流域的年平均输沙模数差异较大(表 1), 范围在  $730.84 \sim 11\,132.60 \text{ t}/\text{km}^2$  之间, 相差 15 倍以上, 15 个流域的平均值为  $6\,064.66 \text{ t}/\text{km}^2$ 。MK 分析结果显示 15 个流域的年平均输沙模数都存在显著的下降趋

势, 下降幅度在  $-20.74 \sim 347.26 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  之间。

表 1 1961—2017 年各流域输沙模数的年平均值及 MK 趋势分析

流域	观测站	年平均输沙模数/ ( $\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$ )	统计量 $Z$	趋势度 $\beta$ / ( $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )
皇甫川	皇甫	10788.43	-5.22 *	-286.89
孤山川	高石崖	11132.60	-6.01 *	-347.26
窟野河	温家川	8202.03	-6.19 *	-255.18
秃尾河	高家川	4134.06	-6.51 *	-114.26
佳芦河	申家湾	9594.87	-5.47 *	-212.29
无定河	白家川	3350.67	-4.61 *	-66.56
清涧河	延川	7923.09	-4.00 *	-147.90
延河	甘谷驿	6122.40	-4.07 *	-111.16
云岩河	新市河	1257.09	-5.80 *	-30.41
仕望川	大村	730.84	-6.56 *	-20.74
湫水河	林家坪	9196.48	-5.11 *	-222.44
三川河	后大成	3440.22	-5.78 *	-88.79
屈产河	裴沟	6877.29	-4.51 *	-132.14
昕水河	大宁	2760.88	-5.93 *	-89.11
州川河	吉县	4441.47	-7.70 *	-146.55
平均值	—	6064.66	-5.93 *	-179.78

注: \* 表示通过 99% 显著性检验。

#### 3.2 输沙序列突变点检验

使用 Pettitt 检验法对 15 个流域年输沙模数突变时间和显著性水平进行检验, 结果见表 2, 研究区各流域突变时间主要集中在 80, 90 年代。

表 2 输沙模数序列 Pettitt 突变点检验结果

流域	突变 年份	统计量 $p$	流域	突变 年份	统计量 $p$
皇甫川	1996	0.000	云岩河	1996	0.002
孤山川	1997	0.000	仕望川	1983	0.000
窟野河	1996	0.000	湫水河	1981	0.000
秃尾河	1998	0.000	三川河	1996	0.000
佳芦河	1978	0.001	屈产河	1998	0.004
无定河	1998	0.004	昕水河	1996	0.000
清涧河	2002	0.001	州川河	1982	0.000
延河	1996	0.000			

#### 3.3 气候变化和人类活动对输沙变化的贡献率

定量区分降雨变化和人类活动对输沙减少的贡献, 基准期各流域输沙模数的平方根和降雨量之间的线性回归方程见表 3, 回归方程的决定系数在 0.53~0.72 之间。降水变化和人类活动对输沙模数减少的贡献率见图 2。

平均来看, 降水和人类活动对输沙模数减少的贡献率分别为 37.92% 和 62.08%。在云岩河流域和湫水河流域, 降水对输沙模数减少的贡献率大于 50%, 在其余流域, 人类活动是导致输沙模数减少的主要因素。位于研究区中部的部分流域中, 人类活动对输沙

模数减少的贡献率较高,如清涧河流域和三川河流域,人类活动的贡献率均大于80%。

表3 输沙模数的平方根与降雨量之间的线性回归方程

流域	时段	回归方程	$R^2$	$p$
皇甫川	1961—1996年	$\sqrt{SSY}=0.58P-4.14$	0.69	0.000
孤山川	1961—1997年	$\sqrt{SSY}=0.6P-5.65$	0.71	0.000
窟野河	1961—1996年	$\sqrt{SSY}=0.53P-2.38$	0.72	0.000
秃尾河	1961—1998年	$\sqrt{SSY}=0.31P+2.26$	0.62	0.000
佳芦河	1961—1978年	$\sqrt{SSY}=0.64P-4.83$	0.72	0.000
无定河	1961—1998年	$\sqrt{SSY}=0.28P+1.14$	0.67	0.000
清涧河	1961—2002年	$\sqrt{SSY}=0.38P-3.41$	0.56	0.000
延河	1961—1996年	$\sqrt{SSY}=0.37P-3.26$	0.61	0.000
云岩河	1961—1996年	$\sqrt{SSY}=0.16P-2.52$	0.60	0.000
仕望川	1961—1983年	$\sqrt{SSY}=0.13P-1.89$	0.53	0.000
湫水河	1961—1981年	$\sqrt{SSY}=0.50P-5.52$	0.65	0.000
三川河	1961—1996年	$\sqrt{SSY}=0.28P-4.35$	0.68	0.000
屈产河	1961—1998年	$\sqrt{SSY}=0.41P-5.04$	0.60	0.000
昕水河	1961—1996年	$\sqrt{SSY}=0.25P-3.72$	0.65	0.000
州川河	1961—1982年	$\sqrt{SSY}=0.37P-5.34$	0.57	0.000

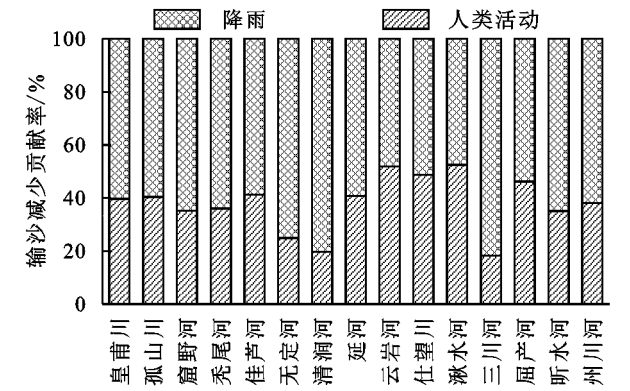


图2 降水和人类活动对输沙减少的贡献率

3.4 水土保持措施对输沙的影响

自20世纪50年代以来,黄土高原采取了一系列水土保持措施,包括梯田、坝地等工程措施和造林种草等生物措施<sup>[22]</sup>。淤地坝是黄土高原地区防治水土流失的主要工程措施,在蓄水拦沙方面发挥了显著作用,河龙区间部分流域淤地坝的多年平均减沙效益可达40%以上<sup>[23]</sup>。退耕还林还草工程实施后,黄土高原植被覆盖度从1999年的31.6%迅速增加到2013年的59.6%<sup>[24]</sup>,植被覆盖能削弱降水对地表的溅蚀和冲刷,被认为是减少侵蚀最有效的措施之一<sup>[25]</sup>。

图3为研究区60年代以来水土保持措施统计。20世纪80年代之前各项措施的实施速度较慢,但在80年代之后显著加快,水土保持措施的急剧增加可能是流域输沙减少的主要原因。1959—2006年,水土保持措施总面积占比由1.28%增加到42.4%,其中造林的增幅最高,由1959年的0.75%增至2006年的

29.99%,尤其在90年代后,随着国家水土保持生态建设和退耕还林还草等政策的实施,区间内造林和种草的面积大幅提升。至2006年,研究区总水土保持治理度达39.75%,研究区内面积最大的水土保持措施为造林,面积为2.01万km<sup>2</sup>,占有措施总面积的70.92%,种草、梯田和坝地依次占16.14%,11.48%和1.82%。

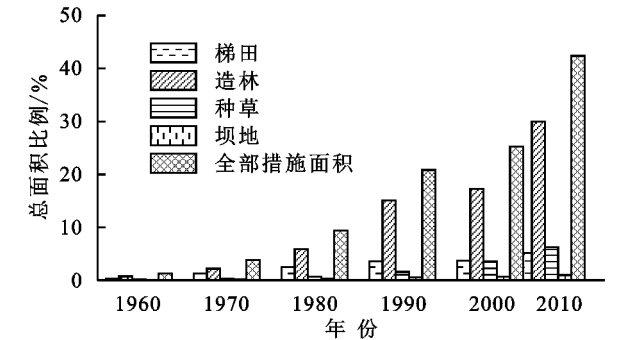


图3 水土保持措施面积比例变化

使用15个流域的年代际产沙系数与水土保持措施面积占流域总面积的百分比做线性回归分析,来分析水土保持措施对流域产沙的影响,公式如下:

$$\overline{SC}=-m A_c+n$$

(15)

式中: $\overline{SC}$ 为产沙系数( $SC=\frac{SSY}{P}$ )的平均值; $A_c$ 为水土保持措施面积占流域总面积的百分比。各流域的回归分析结果见表4。

表4 年代际产沙系数与水保措施总面积占流域总面积比值的回归分析

流域	回归方程	$R^2$	$p$
皇甫川	$\overline{SC}=-0.64A_c+48.81$	0.92	0.010**
孤山川	$\overline{SC}=-1.04A_c+54.24$	0.86	0.024*
窟野河	$\overline{SC}=-0.86A_c+40.42$	0.93	0.008**
秃尾河	$\overline{SC}=-0.50A_c+21.10$	0.99	0.000***
佳芦河	$\overline{SC}=-1.19A_c+54.34$	0.97	0.002**
无定河	$\overline{SC}=-0.37A_c+17.19$	0.98	0.001***
清涧河	$\overline{SC}=-0.20A_c+23.88$	0.28	0.361
延河	$\overline{SC}=-0.23A_c+18.33$	0.71	0.073
云岩河	$\overline{SC}=-0.03A_c+2.89$	0.23	0.417
仕望川	$\overline{SC}=-0.16A_c+3.14$	0.87	0.021*
湫水河	$\overline{SC}=-1.27A_c+46.90$	0.86	0.024*
三川河	$\overline{SC}=-0.28A_c+13.50$	0.78	0.048*
屈产河	$\overline{SC}=-0.21A_c+18.77$	0.43	0.228
昕水河	$\overline{SC}=-0.20A_c+8.93$	0.69	0.083
州川河	$\overline{SC}=-2.69A_c+79.92$	0.60	0.126

注:\*\*\*、\*\*和\*分别代表显著性水平0.001,0.01,0.05。

各流域年代际产沙系数随水土保持措施占比面积增大而下降,共有9个流域通过显著性检验( $p<0.05$ ),决定系数 $R^2$ 范围在0.78~0.99之间。共有5个流域(皇甫川、窟野河、秃尾河、佳芦河和无定河)的



决定系数大于 0.9, 这些流域集中在研究区西北侧。与东南侧流域相比, 研究区西北侧流域的产沙系数与水土保持措施面积占比的相关性更强, 水土保持措施在减缓流域产沙方面发挥了更大的作用。

## 4 结论

(1) 研究区不同流域间年平均输沙模数差异较大, 相差 15 倍以上。在 1961—2017 年, 所有流域的输沙模数都呈现显著的下降趋势, 下降幅度最高可达  $-347.26 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

(2) 研究区各流域突变时间主要集中在 80, 90 年代, 以突变年份划分基准期和措施期, 降水变化和人类活动对输沙模数减少的平均贡献率分别为 37.92% 和 62.08%, 多数流域中人类活动起到主要作用。

(3) 1959—2006 年, 水土保持措施面积占比由 1.28% 增加到 42.4%。迅速增加的水土保持措施有效减缓了流域产沙, 尤其在研究区西北侧, 流域年代际产沙系数与水土保持措施面积占比相关性较强, 流域的产沙系数随水土保持措施占比的增加而下降。

### 参考文献:

- [1] 王飞, 穆兴民, 李锐, 等. 河口镇到龙门区间水土保持措施减沙水代价分析[J]. 水土保持通报, 2005, 25(6): 28-32.
- [2] 冉大川. 黄河中游河龙区间水沙变化研究综述[J]. 泥沙研究, 2000(3): 72-80.
- [3] 李摇敏, 朱清科. 20 世纪中期以来不同时段黄河年输沙量对水土保持的响应[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(5): 1-8.
- [4] 邓景成, 高鹏, 穆兴民, 等. 黄土高原退耕还林工程对生态环境的影响及对策建议[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 63-68.
- [5] Zhang L, Zhao F F, Chen Y, et al. Estimating effects of plantation expansion and climate variability on streamflow for catchments in Australia [J]. Water Resources Research, 2011, 47(12): W12539.
- [6] Gao G Y, Zhang J J, Liu Y, et al. Spatio-temporal patterns of the effects of precipitation variability and land use/cover changes on long-term changes in sediment yield in the Loess Plateau, China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(9): 4363-4378.
- [7] Zhang B Q, He C S, Burnham M, et al. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China [J]. Science of the Total Environment, 2016, 539: 436-449.
- [8] 高海东, 刘晗, 贾莲莲, 等. 2000—2017 年河龙区间输沙量锐减归因分析[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1745-1757.

- [9] 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): 725-732.
- [10] 王飞, 穆兴民, 焦菊英, 等. 基于含沙量分段的人类活动对延河水沙变化的影响分析[J]. 泥沙研究, 2007(4): 8-13.
- [11] 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.
- [12] 穆兴民, 巴桑赤烈, ZHANG L, 等. 黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的响应[J]. 泥沙研究, 2007(2): 36-41.
- [13] 付金霞, 张鹏, 郑粉莉, 等. 河龙区间近 55 a 降雨侵蚀力与河流输沙量动态变化分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 185-192.
- [14] 欧阳潮波, 王文龙, 田勇, 等. 60 年来黄河河龙区间水沙变化特征及人类活动影响评价[J]. 泥沙研究, 2016(4): 55-61.
- [15] 冉大川, 柳林旺, 赵力仪, 等. 黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000.
- [16] 姚文艺, 徐建华, 冉大川. 黄河流域水沙变化情势分析与评价 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2011.
- [17] Mann H B. Non-parametric test against trend [J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [18] Kahya E, Kalayc S. Trend analysis of streamflow in Turkey [J]. Journal of Hydrology, 2004, 289: 128-144.
- [19] Fu G B, Yu J J, Yu X B, et al. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961—2009 [J]. Journal of Hydrology, 2013, 487: 48-59.
- [20] Pettrrr A N. A Non-parametric approach to the change-point problem [J]. Applied Statistics, 1979, 28(2): 126-135.
- [21] 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, 2008, 44(7): 148-152.
- [22] Guangju Z, Tian P, Mu X M, et al. Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 387-398.
- [23] 焦菊英, 王万忠, 李靖, 等. 黄土高原丘陵沟壑区淤地坝的减水减沙效益分析[J]. 干旱区资源与环境, 2001, 15(1): 78-83.
- [24] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. Balancing green and grain trade [J]. Nature Geoscience, 2015, 8(10): 739-741.
- [25] Farley K A, Jobbagy E G, Jackson R B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy [J]. Global Change Biology, 2005, 11(10): 1565-1576.