

DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2020.05.006

## 黄河中游泥沙输移特性及机理研究

冯家豪<sup>1</sup> 赵广举<sup>1,2</sup> 穆兴民<sup>1,2</sup> 田鹏<sup>1,3</sup>

(1.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; 2.中国科学院-水利部  
水土保持研究所 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学 资源环境学院 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 基于黄河中游干流4个水文站及8条主要支流1957-2018年实测降雨输沙资料,采用Mann-Kendall检验、有序聚类分析法研究黄河中游区间输沙时空变化特性,结合双累积曲线法量化输沙变化驱动因素。研究表明:黄河中游干流各水文站年输沙量均呈显著减少趋势,各站减幅自上游至下游沿程不断增大。区间8条典型支流多年输沙模数自1970s后均呈减少趋势,头道拐-龙门区间对中游区间输沙占比下降明显,区域水土保持治理效益显著。研究显示人类活动是黄河中游输沙锐减的主要驱动因素,对头道拐-龙门区间平均输沙变化贡献率为85.84%,对龙门-潼关区间输沙变化贡献为88.68%。淤地坝、梯田和水库等水利水保工程措施是输沙锐减的主要原因。

**关键词:** 黄河中游; 输沙; 干支流; 驱动因素

**中图分类号:** TV143.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0468-155X(2020)05-0034-08

河流泥沙是地表水文过程物质循环与能量流动的重要载体,其输移过程与区域水土流失、下游河道演变、水库淤积等密切相关<sup>[1,2]</sup>。黄河是举世闻名的多沙河流,中游流经的黄土高原是黄河泥沙的主要来源。该区域生态环境脆弱,严重的水土流失导致河流携带大量泥沙淤积下游河床,由此形成“地上悬河”给下游带来巨大防洪安全隐患<sup>[3]</sup>。近期的气候变化与人类活动显著影响了全球水文循环过程,在此背景下黄河流域开展了一系列水利水保生态工程建设。黄河水沙情势发生剧烈变化<sup>[4]</sup>,其中潼关控制站年均输沙量由1919-1959年的16亿t减少至21世纪以来的1亿t左右,减幅达90%以上<sup>[5]</sup>。黄河输沙量变化反映了流域水沙过程对气候和下垫面环境变化的响应,深刻影响着区域社会经济可持续发展,因而研究黄河输沙变化及其影响因素对水沙关系调控、下游防洪安全、生态环境治理规划具有重要的指导意义。针对黄河输沙变化机理及其影响因素已经展开了大量的科学研究。刘成等<sup>[6]</sup>分析黄河干流水沙动态变化发现,上游输沙变化的主导驱动力是气候变化,但水利水保工程措施等人类活动是中下游输沙变化的主导因素。高照良等<sup>[7]</sup>选取黄河中游五条典型支流,对流域水沙时空变化及其对不同外界因素的响应机理进行了分析探究。以往研究聚焦于黄河干流或支流区间的泥沙变化,对干支流系统交互作用下的输沙变化机理研究较少,且不同空间尺度下的输沙变化归因分析还有待系统探究<sup>[8,9]</sup>。本文以黄河中游为研究范围(头道拐-花园口),基于1957-2018年中游干流4个水文站及8条典型支流实测降雨输沙资料,分析中游区间多年输沙时空变化特征,量化降水与人类活动对输沙变化的贡献,为流域水沙调控及水土保持措施优化配置提供科学参考。

### 1 研究区概况

研究范围包括黄河中游头道拐到下游花园口区间(图1),区间段干流全长1 235 km,流域面积约

收稿日期: 2020-03-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402401); 国家自然科学基金项目(41671279); 中国科学院“西部之光”(XAB2017A03)

作者简介: 冯家豪(1996-),男,陕西西安人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持方面研究。E-mail: fjh9642@163.com

通讯作者: 赵广举。E-mail: gjzhao@ms.iswe.ac.cn

©1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

36.3 万 km<sup>2</sup>, 占黄河流域总面积的 48%, 其间汇入的较大支流约 30 余条, 河段总落差约 890 m, 平均比降达 0.74%<sup>[1]</sup>。中游区间大部分干支流经过以黄土丘陵沟壑地貌为主的黄土高原地区, 地形支离破碎、沟壑遍布, 土质疏松且植被覆盖较差, 降水稀少, 多以暴雨形式集中于汛期, 地表蒸发剧烈。该区土壤侵蚀强烈, 水土流失严重, 区域侵蚀模数为 5 000~15 000 t/km<sup>2</sup>·a, 局地达 25 000 t/km<sup>2</sup>·a。区间内入黄径流量约占全流域 44%, 但来沙量约占黄河输沙量的 92%<sup>[5]</sup>, 因而该区间段具有水少沙多、水沙异源的特点, 为流域的主要泥沙源区。

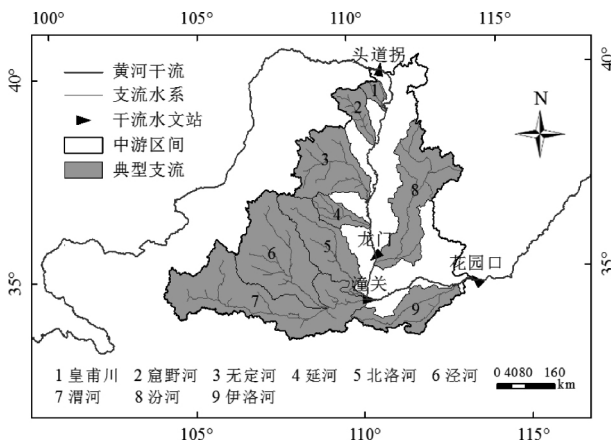


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

## 2 数据资料与研究方法

### 2.1 数据资料

收集的资料包括 1957-2018 年头道拐、龙门、潼关和花园口等 4 个干流水文站, 以及皇甫川、窟野河、无定河、延河、汾河、北洛河、渭河(含泾河)、伊洛河等在内的区间 8 条一级支流汇口水文站的实测年输沙数据; 选取中游区间内近 60 个国家气象站研究时段的降雨资料, 基于区域侵蚀性降雨标准(日降水量>12 mm), 并结合泰森多边形法得到中游干支流各区间流域面侵蚀雨量。中游各站水文数据采用《黄河流域水文资料》(1957-2009 年)与《黄河泥沙公报》(2010-2018 年), 区间降雨资料来自国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)。

### 2.2 研究方法

采用线性回归法与 Mann-Kendall 非参数检验法(M-K 法)<sup>[8]</sup>统计检验水文要素长期变化趋势, 并采用有序聚类分析法<sup>[10]</sup>定量判别确定水文时间序列可能存在的突变点, 同时结合双累积曲线法<sup>[11]</sup>分析水文序列的阶段性变化特征, 量化分析气候变化与人类活动对水文演变的影响。

## 3 结果与分析

### 3.1 干流输沙量年际变化趋势

#### 3.1.1 输沙变化线性趋势特征

如图 2 所示, 对黄河中游干流沿程 4 个水文站 1957-2018 年输沙数据序列进行线性趋势分析可知, 各站年输沙量均呈明显下降趋势。采用 M-K 检验法进行统计分析(表 1), 显示各水文站年输沙量均呈现出极显著减小趋势, 达到了 99.9% 的置信水平。潼关站年际变化最为显著, 其输沙量由 1970 年前的 16.12 亿 t 减少至 2000 年之后的 2.48 亿 t, 减幅达到 84.6%。其次为花园口和龙门站, 而头道拐站年输沙量较其余各站变化幅度最小。

#### 3.1.2 输沙阶段性突变分析

采用有序聚类法检验干流各站输沙数据序列突变年份(图 3)。基于总离差平方和  $S_n(\tau)$  最小原则以推求突变点, 结果显示头道拐站年输沙在 1985 年发生突变, 龙门和潼关站的输沙突变年份均为 1979 年, 而花园口站则在 1996 年发生突变, 检验结果均达到 0.05 置信水平。定义突变前后两时段分别为基准期与变化期, 统计分析不同阶段输沙特征值(表 2)。各站年输沙量均在变化期显著下降, 头道拐、龙门和潼关站变化期年均输沙量较基准期分别减少 69.49%、69.41% 与 64.69%, 而花园口站变化期输沙减幅则达到 86.03%, 高于其余各站。各站在突变年前后输沙量极值比与变差系数也变化明显, 头道拐站年输沙极值比由 14.24 下降至 7.35, 其余三站极值比显著上升。四站年输沙变差系数也均在变化期明显增大, 表明区间干流年输沙量变异程度显著上升, 年际变化波动剧烈。

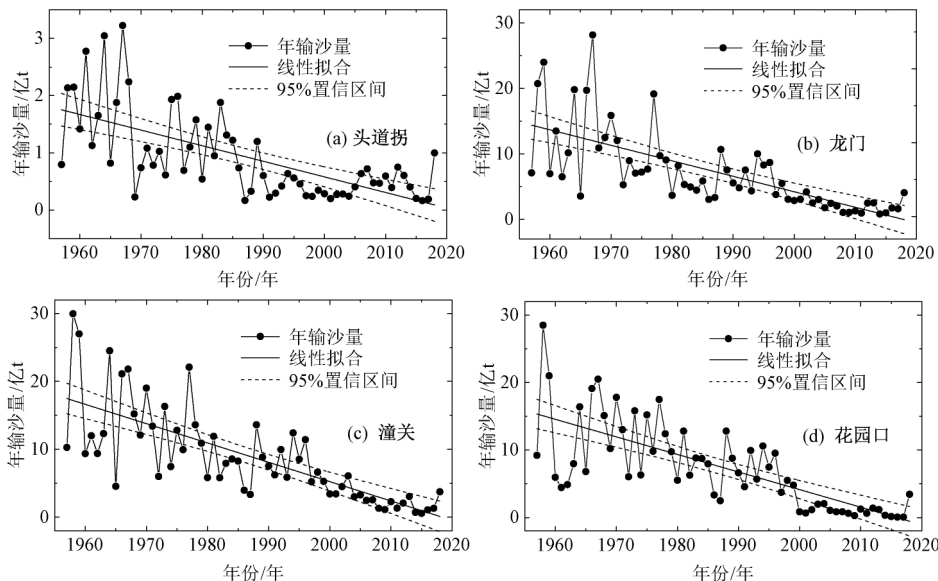


图 2 黄河中游干流四站 1957-2018 年输沙量年际变化过程

Fig.2 Sediment discharges at main stream hydrological stations in the Middle Yellow River from 1957 to 2018

3.2 区间输沙模数时空演变特征

3.2.1 水土流失地区的输沙时空变化特征分析

针对黄河中游区间的 8 条典型支流,分析各支流输沙模数的时空变化。图 4 显示,中游各支流输沙模数由南到北显著增加,这表明北部各支流土壤侵蚀程度显著高于南部,区域侵蚀产沙剧烈。同时,1957-2018 年间各支流输沙模数整体呈显著减少趋势,其中头道拐-龙门区间变化最为明显,区间内皇甫川、窟野河流域输沙模数在 1960s 至 1970s 高于 15 000 t/km<sup>2</sup>·a,至 2000s 减少到 3 000 t/km<sup>2</sup>·a 以下。各支流近 60 年间输沙模数的显著减少表明研究区域侵蚀产沙强度明显减弱,这与多沙粗沙区水土保持措施实施及水利工程

建设密切相关。此外,皇甫川与窟野河的高输沙模数时段均出现在 1980s 前,表明强降水应该是引起流域内发生剧烈侵蚀产沙的重要原因,输沙量较大的时期与降雨径流深较大的时间相对应。

3.2.2 区间干支流输沙收支平衡分析

黄河中游流域沿程区间干支流多年输沙收支变化统计分析显示,潼关断面以上多年输沙量占全流域的 90% 以上,而潼关-花园口区间内由于河道平坦宽浅、比降小等特点及水利枢纽工程建设影响,河段泥沙多被拦蓄淤积。由图 5 可知,中游区间各干流站与支流在 2000 年前后多年输沙量发生显著减少,其减幅介于 60.3%~96.8% 范围。流域沿程各区间对中游区间输沙占比变化显著,头道拐-龙门区间对潼关断面以上输沙占比由 2000 年前的 65.4% 减至 2000 后的 52.8%,而龙门-潼关区间输沙占比由

表 1 干流四站 1957-2018 年输沙量变化 M-K 检验

Table 1 M-K tests of annual sediment load at four mainstream stations in 1957-2018

站点	Mk( Z value)	显著性水平	年均变化率/亿 t
头道拐	-5.57	<0.001	-0.027 3
龙门	-7.19	<0.001	-0.209 7
潼关	-7.32	<0.001	-0.284 7
花园口	-6.92	<0.001	-0.260 5

表 2 黄河中游干流区间多年输沙量阶段性变化特征分析

Table 2 Periodic variation characteristic analysis of sediment discharges in the Middle Yellow River

水文站点	时段/年	年平均输沙量/亿 t	极值比	变差系数
头道拐	1957-1985	1.46	14.24	0.52
	1986-2018	0.45	7.35	0.55
龙门	1957-1979	10.64	8.79	0.55
	1980-2018	3.26	24.07	0.72
潼关	1957-1979	14.83	6.60	0.46
	1980-2018	5.23	24.73	0.67
花园口	1957-1996	10.64	11.49	0.53
	1997-2018	1.49	94.66	1.03

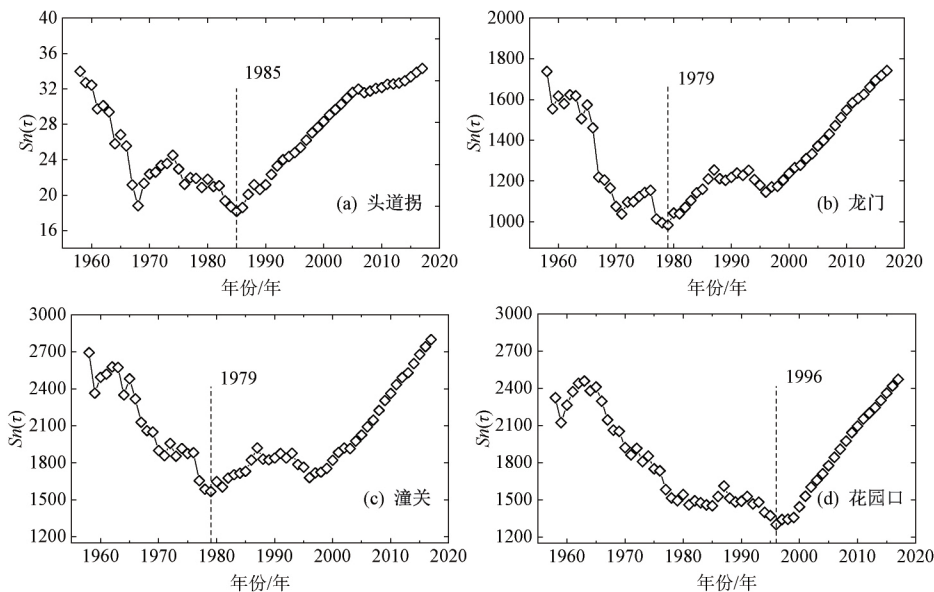


图 3 黄河中游干流区间各站 1957-2018 年输沙有序聚类突变

Fig.3 Abrupt changes of sediment load at four hydrological stations in the Middle Yellow River in 1957-2018

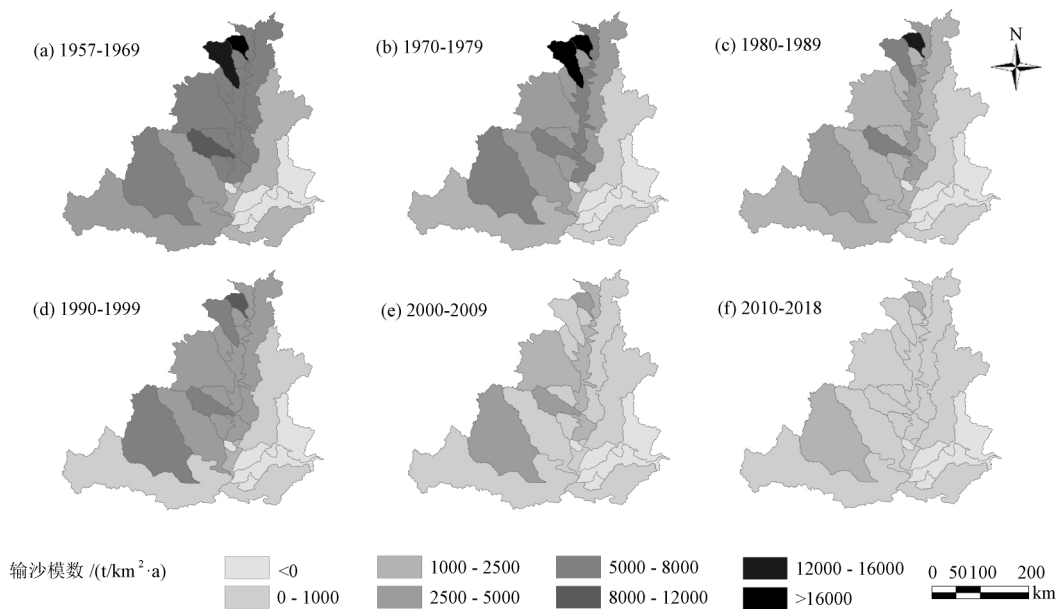
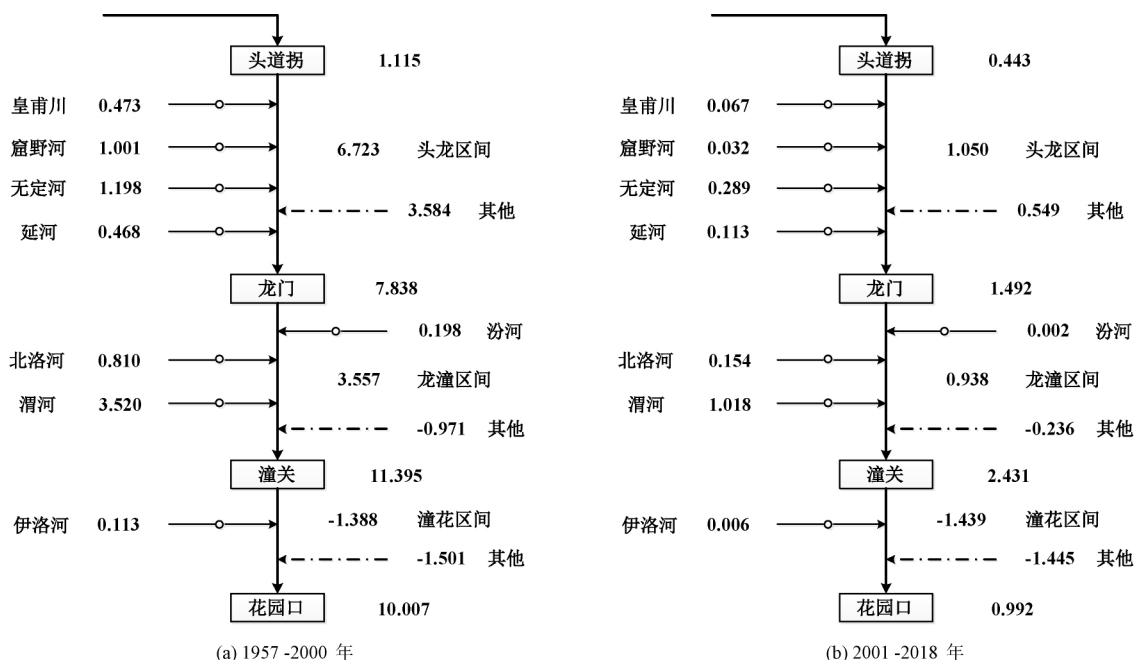


图 4 黄河中游区间不同时段内的输沙模数时空变化分布

Fig.4 distribution of spatial-temporal variation of sediment yield in the Middle Yellow River

34.6% 上升至 47.2% ,且两区间各时段多年输沙减幅分别达 84.4% 与 73.6% ,表明黄土高原实施的大规模水土保持措施在头道拐-龙门区间成效显著。

基于干支流尺度分析区间输沙收支平衡假定 ,在头道拐-龙门河段内 ,窟野河流域对其区间输沙占比由 2000 年前的 14.9% 锐减至之后的 3% ,无定河流域的区间输沙占比由 2000 年前的 17.8% 上升至之后的 27.5% ,其余支流占比变化不大 ,表明无定河流域是中游头道拐-龙门区间段内泥沙的主要来源 ,而窟野河流域在治理前后对区间输沙占比明显降低 ,水土保持治理效益显著。在龙门-潼关区间段内 ,2000 年前汾河、渭河、北洛河对该区间河段输沙占比分别为 5.6%、98.9%、22.8% ,2000 年后三条支流对区间段输沙占比分别为 0.2%、108.5%、16.4% ,其中渭河输沙占比明显上升 ,其余支流变化不大。



注：上图数字为头道拐-花园口区间沿程各支流多年平均输沙量，单位为亿t。

图 5 黄河中游区间干支流 2000 年前后不同时期输沙收支变化

Fig.5 Sediment budget analysis in the Middle Yellow River in different year periods

### 3.3 输沙量变化的驱动因素分析

#### 3.3.1 中游区间输沙量变化

黄河中游输沙量锐减是气候变化和人为活动综合作用的演变过程，区间多年输沙变化与干支流系统联系密切。中游流经土壤侵蚀活动剧烈的黄土高原地区，自然条件下的侵蚀性降雨是流域内侵蚀产沙的主要动力，因此采用双累积曲线法量化分析降水与人类活动对中游不同区间输沙演变的贡献。其中潼关-花园口区间河段内泥沙多被拦蓄淤积。如图 6 所示，头道拐-龙门区间双累积曲线在 1979 年与 1999 年发生两次偏移，龙门-潼关区间段曲线则在 1999 年发生偏移，这与区间内 1970s 末起所实施的大规模水利水保工程措施及 1990s 末推行的退耕还林还草工程密切相关。

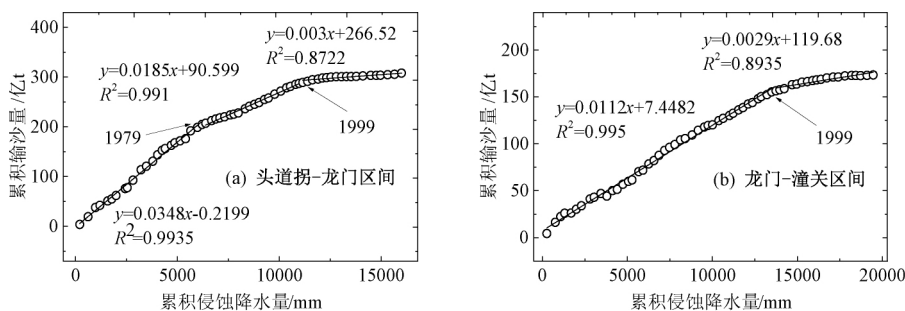


图 6 黄河中游各区间 1957-2018 年侵蚀性降雨-输沙双累积曲线

Fig.6 Double mass curves of precipitation-sediment load in the Middle Yellow River in 1957-2018

表 3 黄河中游各区间 1957-2018 年侵蚀性降雨-输沙双累积曲线分析

研究区间	回归方程	R <sup>2</sup>	计算累积值/亿 t	实测累积值/亿 t	累积减少量/亿 t	减少比/%
头道拐-龙门	$\Sigma S=0.0348 \Sigma P-0.2119$	0.994	557.04	314.72	242.32	43.50
龙门-潼关	$\Sigma S=0.0112 \Sigma P+7.4482$	0.995	225.57	173.39	52.18	23.13

通过表 3 成果, 进一步分析中游输沙锐减机理。基于突变前降雨泥沙关系, 计算突变后不同时段各区间不同因素减沙贡献(表 4)。头道拐-龙门区间段内, 1957-2018 年实测累积输沙量较计算值减少 43.50%, 其中人类活动对输沙变化贡献在 1980-1999 年为 76.78%, 1999 年后达到 97.01%, 表明人类活动对该区间输沙变化影响在 1999 年后迅速增加。龙门-潼关区间内, 1957-2018 年实测累积输沙量较计算值减少 23.13%, 人类活动对 1999 年前后输沙变化的影响高达 90.98%, 降水对区间减沙贡献较小。综上所述, 人类活动是中游各区间 1957-2018 年不同时段输沙锐减的主要原因。

表 4 黄河中游各区间降水量与人类活动对黄河中游输沙减少的影响

Table 4 Influence of precipitation and human activities on sediment load changes in the Middle Yellow River

研究区间	时段 /年	实测值 /亿 t	计算值 /亿 t	实测输沙变化		降水影响		人类活动影响	
				变化量 /亿 t	百分比 /%	变化量 /亿 t	百分比 /%	变化量 /亿 t	百分比 /%
头道拐-龙门	1957-1979	9.12	9.09						
	1980-1999	4.21	7.98	4.91	53.84	1.14	23.22	3.77	76.78
	2000-2018	1.09	8.88	8.03	88.05	0.24	2.99	7.79	97.01
龙门-潼关	1957-1999	3.61	3.45						
	2000-2018	0.95	3.38	2.66	73.68	0.24	9.02	2.42	90.98

### 3.3.2 流域输沙演变驱动力分析

流域内气候变化及人类活动影响导致黄河中游输沙量在过去六十年间发生显著变化, 不同区间干支流系统的输沙均呈锐减趋势。流域内降水减少直接作用于产流产沙过程, 径流挟沙能力降低, 进而减少河流输沙量。水利水保工程措施及土地利用变化是黄河中游输沙锐减的主要原因。梯田、淤地坝以及造林种草等措施均能够有效改善流域土壤侵蚀状况, 调节拦蓄坡面沟道径流泥沙, 显著减少入黄泥沙<sup>[5]</sup>。本文将人类活动作为流域输沙锐减的主要贡献来源, 与多数已有研究基本一致(表 5), 但在贡献比例方面不同研究存在一定差异, 这主要是源于研究区间以及输沙数据序列不一致, 同时水利水保工程与降水时空分布差异也会对计算结果产生影响。

表 5 人类活动与降雨影响对黄河输沙变化贡献率部分研究成果

Table 5 Results of influences by climate changes and human activities on sediment reduction in the Middle Yellow River

作者	研究时段	研究区间	减沙贡献比例 / %	
			降雨因素影响	人类活动影响
姚文艺等 <sup>[12]</sup>	1997-2006	黄河中游地区	20.04	79.96
		河口镇-龙门区间	50.00	50.00
		泾洛渭汾河流域	40.00	60.00
冉大川等 <sup>[13]</sup>	1969-2010	头道拐断面以上	16.00	84.00
许炯心等 <sup>[14]</sup>	1998-2006	河口镇-龙门区间	34.96	65.04
张胜利等 <sup>[15]</sup>	1980s	黄河多沙粗沙区	58.20	41.80
穆兴民等 <sup>[11]</sup>	1952-2000	河口镇-龙门区间	30.00	70.00
	1979-2008	黄河流域	19.00	81.00
王厚杰等 <sup>[16]</sup>	1950-2005	花园口断面以上	30.00	70.00
	1986-1989		5.30	94.70
高鹏等 <sup>[1]</sup>	1990-1999	头道拐-花园口区间	25.80	74.20
	2000-2008		8.60	91.40
岳晓丽等 <sup>[5]</sup>	1980-2006	头道拐-龙门区间	44.60	55.40
刘晓燕等 <sup>[9]</sup>	2010-2013	河口镇-龙门区间	11.40	88.60
赵阳等 <sup>[8]</sup>	1950-2016	兰州断面以上	12.50	87.50
	1950-2016	兰州-头道拐区间	8.48	91.52

黄河中游流经的黄土高原生态环境极其脆弱, 复杂的自然地理条件造成的剧烈土壤侵蚀使其成为流域主要泥沙来源。自 20 世纪 70 年代以来, 包括淤地坝、梯田、谷坊等在内的一系列水土保持措施在黄河多沙粗沙区逐步开展实施, 特别是 90 年代末推行的退耕还林还草工程进一步推动了区域生态恢复进程, 有效改善了地表下垫面状况, 黄土高原的水土流失状况得到有效控制。在此过程中, 早期淤地坝、

林草等单一措施治理逐渐转变为小流域综合治理。截至 2015 年,黄土高原水土流失治理面积已达到 2 184 万  $\text{hm}^2$ , 占全区水土流失面积的 47%, 其中梯田面积达 550 万  $\text{hm}^2$ , 较 1980 年前增加近 6 倍, 造林种草面积达 1 290 万  $\text{hm}^2$ , 封禁 344 万  $\text{hm}^2$ , 植被覆盖度由 20 世纪 80 年代的 28.3% 增加至 2018 年的 63%, 流域地表植被状况得到显著改善<sup>[4]</sup>。据研究统计, 截止 2015 年潼关以上地区已修建淤地坝 56 422 座, 其中骨干坝 5 658 座, 主要集中在头道拐-龙门区间内, 骨干坝多年平均拦沙量达到 1.71 亿 t, 中小型淤地坝年均拦沙量约 2.74 亿 t<sup>[17]</sup>。黄土高原实施的大规模水土保持措施显著改善了流域土壤侵蚀状况, 黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀强度由早期的 8 000  $\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$  减少至 1 800  $\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ , 全区中度以下水土流失面积约占 70%, 流域坡面地表水沙产汇过程发生改变, 坡面沟道侵蚀的有效防治显著减少了河流入黄泥沙。此外, 黄河流域在近几十年间开展实施了一系列水利工程建设, 到目前为止, 流域内已建成各类水库 3 000 余座, 其中大中型水库约 170 多座, 上游刘家峡、龙羊峡水库以及中游三门峡、小浪底水库等建设运行后的蓄水调沙过程对流域泥沙的拦截淤积作用显著, 同时工农业生产发展需要使各类引水引沙工程日益增加, 因而各类水利工程建设应用也是黄河中游输沙锐减的重要原因之一。

## 4 结论

通过对黄河中游区间干流 4 个水文站及 8 条典型支流 1957-2018 年长时间序列实测降雨输沙数据进行统计, 分析了干支流区间输沙变化时空规律, 对流域输沙变化驱动因素进行量化分析, 得到以下结论:

(1) 黄河中游干流各水文站年输沙量均呈显著减少趋势, 其减幅自上游至下游沿程不断增大, 其中龙门和潼关站输沙突变年份均为 1979 年, 头道拐和花园口站输沙突变年分别为 1985 年与 1996 年。

(2) 黄河中游区间内 8 条典型支流输沙 20 世纪 70 年代后均呈显著减少趋势。受水土保持治理措施显著影响, 头道拐-龙门区间对中游区间输沙占比由 2000 年前的 65.4% 减少至之后的 53.4%, 龙门-潼关区间的输沙占比明显增大。

(3) 人类活动是黄河中游各区间流域输沙锐减的主要原因。头道拐-龙门区间 1957-2018 年人类活动减沙量为 5.71 亿 t, 其贡献率达到 85.84%, 龙门-潼关区间人类活动多年减沙量为 2.36 亿 t, 其贡献率高达 88.68%, 淤地坝、梯田和水库等水利水保工程措施是输沙锐减的主要原因。

(4) 近几十年来, 黄河输沙锐减是气候变化与人类活动的综合反映, 深刻影响着下游河道水库冲淤, 与河岸三角洲的扩张萎缩密切相关。在未来黄河泥沙治理规划中, 应以协调水沙关系为前提, 针对不同区间流域侵蚀产沙特性, 合理配置水土保持措施, 有效改善多沙粗沙区下垫面环境; 同时充分利用水库群调节水沙关系, 合理配置和优化调度水沙资源, 推动黄河流域高质量可持续发展。

## 参考文献:

- [1] 高鹏, 穆兴民, 王飞, 等. 黄河中游河口镇-花园口区间水沙变化及其对人类活动的响应[J]. 泥沙研究, 2013(5): 75-80.
- [2] Nyssen J, Branden V J, Spalevic V, et al. Twentieth century land resilience in Montenegro and consequent hydrological response [J]. Land Degradation and Development, 2014, 25(4): 336-349.
- [3] 刘晓燕, 马思远, 党素珍. 黄河流域近百年产沙情势变化[J]. 泥沙研究, 2017, 42(5): 1-6.
- [4] 姚文艺. 新时代黄河流域水土保持发展机遇与科学定位[J]. 人民黄河, 2019, 41(12): 1-7.
- [5] Yue X L, Mu X M, Zhao G J, et al. Dynamic changes of sediment load in the middle reaches of the Yellow River Basin, China and implications for eco-restoration [J]. Ecological Engineering, 2014, 73: 64-72.
- [6] 刘成, 王兆印, 隋觉义. 黄河干流沿程水沙变化及其影响因素分析[J]. 水利水电科技进展, 2008(3): 1-7.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 刘晓燕, 杨胜天, 王富贵, 等. 黄土高原现状梯田和林草植被的减沙作用分析[J]. 水利学报, 2014, 45(11): 1293-

- 1300.
- [10] 田小靖, 赵广举, 穆兴民, 等. 水文序列突变点识别方法比较研究 [J]. 泥沙研究, 2019, 44(2): 33–40.
- [11] Mu X M, Zhang X Q, Shao H B, et al. Dynamic changes of sediment discharge and the influencing factors in the Yellow River, China, for the recent 90 years [J]. Clean-Soil, Air, Water, 2012, 40(3): 303–309.
- [12] 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.
- [13] 冉大川, 姚文艺, 申震洲, 等. 黄河头道拐水沙变化多元驱动因子贡献率分析 [J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 769–778.
- [14] 许炳心. 黄河中游多沙粗沙区 1997–2007 年的水沙变化趋势及其成因 [J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 1–7.
- [15] 张胜利, 李倬, 赵文林. 黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因及发展趋势 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998: 142–191.
- [16] Wang H, Yang Z, Saito Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950–2005): Impacts of climate change and human activities [J]. Global and Planetary Change, 2007, 57(3–4): 331–354.
- [17] 李景宗, 刘立斌. 近期黄河潼关以上地区淤地坝拦沙量初步分析 [J]. 人民黄河, 2018, 40(1): 1–6.

## Characteristics and mechanism of sediment transport in the Middle Yellow River

FENG Jia-hao<sup>1</sup>, ZHAO Guang-ju<sup>1,2</sup>, MU Xing-min<sup>1,2</sup>, TIAN Peng<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

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

**Abstract:** Based on the hydrological time series of four mainstream stations and eight main tributaries in the Toudaoguai-Huayankou Reach in 1957–2018, the spatial-temporal variations of sediment load in the Middle Yellow River with driving factors were analyzed by Mann-Kendall test, serial cluster analysis and double mass curve method. The results show that there were significant decreasing trends in the annual sediment load at the mainstream stations of Middle Yellow River, and the decreasing extents has increased from the upstream to the downstream. Since the 1970s, the sediment transport modulus of eight typical tributaries showed significant inter-decadal decreasing trends. The proportion of sediment to the entire midstream in the Toudaoguai-Longmen Reach decreased from 65.4% to 53.4% around the year 2000. Human activities were the primary causes of sediment reduction in the Middle Yellow River, and its contribution to sediment load in the Toudaoguai-Longmen Reach was 85.84%, which was 88.68% to the Longmen-Tongguan Reach. The effects of soil and water conservation measures, such as check dams, terraces, reservoirs on the sediment reduction are significant.

**Key words:** Middle Yellow River; sediment discharge; main-branched stream; driving factors

(责任编辑: 陈绪坚)