

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.022; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.022.

韩超, 王飞, 戈文艳, 等. 近 70 年黄河潼关站以下河段冲淤特征分析[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 48-56.

Han Chao, Wang Fei, Ge Wenyan, et al. Analysis of erosion and sedimentation characteristics of the Yellow River below Tongguan in the past 70 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 48-56.

近 70 年黄河潼关站以下河段冲淤特征分析

韩超^{1,2}, 王飞^{1,2}, 戈文艳^{1,2}, 陈昊^{1,2}, 史尚渝^{1,2}, 刘元昊¹

(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 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)

摘要:[目的]揭示黄河潼关以下河段冲淤变化过程及分布特征,为未来黄河下游水土保持和调水调沙工作提供参考。[方法]对 1952—2022 年来潼关—花园口段、下游游荡型河段、过渡型河段、弯曲型河段输沙特征和冲淤过程进行分析,采用趋势分析、突变检验与回归分析等方法,确定了不同河段的输沙、冲淤变化特征及其相互影响。[结果]潼关以下河段年输沙量在显著减少($p<0.01$),1996 年后各站输沙量大幅降低,近 20 年来沙系数均低于 0.01,表现冲刷特征。各河段年淤积量呈下降趋势,潼关—花园口段和弯曲型河段仍在持续淤积,花园口—艾山段近 20 年淤积量则为负值。研究时段内,潼关以下河段累计淤积泥沙 186.84 亿 t,潼关—花园口段、游荡型河段、过渡型河段和弯曲型河段分别淤积了 86.75 亿 t,49.45 亿 t,17.14 亿 t,33.49 亿 t。另外,输沙量和来沙系数变化分别对潼关—花园口、游荡型河段和花园口以下河段淤积影响明显($p<0.01$)。[结论]小浪底水利枢纽运行及调水调沙实施后,潼关以下河段年淤积量大幅减少,潼关—花园口和弯曲型河段承载了更多泥沙,花园口—艾山段则已由淤转冲。

关键词:水沙变化;黄河下游;冲淤过程;淤积现状

中图分类号:P333.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2025)01-0048-09

Analysis of erosion and sedimentation characteristics of the Yellow River below Tongguan in the past 70 years

Han Chao¹, Wang Fei^{1,2}, Ge Wenyan^{1,2}, Chen Hao^{1,2}, Shi Shangyu^{1,2}, Liu Yuanhao¹

(1.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Water and Soil Conservation, ministry of

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

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the process and distribution characteristics of erosion and sedimentation in the lower reaches of the Yellow River below Tongguan, and to provided reference for future soil and water conservation and water and sediment regulation work in the lower reaches of the Yellow River. [Methods] An analysis was conducted on the sediment transport features and erosion-deposition processes in the Tongguan-Huayuankou section, the wandering river section, the transitional river section, and the meandering river section from 1952 to 2022. Trend analysis, mutation test, and regression analysis were used to determined the sediment transport, erosion-deposition characteristics, and their interactions in different river sections. [Results] The annual sediment discharge of the river section below Tongguan had significantly decreased ($p<0.01$), and the sediment discharge of each station had significantly decreased since 1996. In the past 20 years, the sediment coefficient had been below 0.01, indicating erosion characteristics. In the past 20 years, the sediment coefficient had been consistently below 0.01, indicating an

收稿日期:2024-03-05

修回日期:2024-04-13

资助项目:黄河水科学研究联合资助项目(U2243213);国家自然科学基金(42177344)

第一作者:韩超(1999—),男,山西省大同市人,硕士研究生,主要研究方向为流域管理。E-mail:1729161020@qq.com

通信作者:王飞(1971—),男,陕西省户县人,研究员,博士研究生导师,博士,主要从事区域水土保持环境效应研究。E-mail:wafe@ms.iswc.ac.cn

史尚渝(1993—),男,山西平遥人,助理研究员,博士,主要研究方向为干旱时空变化。E-mail:1546393093@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

erosive characteristic. The annual deposition volume in each river section was declining, with the Tongguan-Huayuankou section and the meandering river section continuing to accumulate sediment, while the Huayuankou-Aishan section had a negative deposition volume in the past 20 years. During the study period, the river sections below Tongguan accumulated a total of 18.684 billion tons of sediment, with the Tongguan-Huayuankou section, wandering river section, transitional river section, and meandering river section accumulating 8.675 billion tons, 4.945 billion tons, 1.714 billion tons, and 3.349 billion tons, respectively. Additionally, the changes in sediment load and sediment coefficient had a significant impact ($p < 0.01$) on the deposition in the Tongguan-Huayuankou, wandering river sections, and river sections below Huayuankou. [Conclusion] After the operation of the Xiaolangdi Water Control Project and the implementation of water and sediment regulation, the annual deposition volume in the river sections below Tongguan has significantly decreased, with the Tongguan-Huayuankou and meandering river sections bearing more sediment, while the Huayuankou-Aishan section has transitioned from deposition to erosion.

Keywords: water and sediment changes; lower reaches of Yellow River; process of erosion and sedimentation; current situation of sedimentation

黄河流域是中华民族的主要发源地,其流域面积广大且水资源丰富,但也长期存在水少沙多、水沙异源、含沙量巨大、泥沙淤积严重等多项水沙问题^[1-2]。黄河下游河道落差较小,是主要的淤沙河段,水流携沙能力的限制,及较长淤积时间,造就了该地区特殊的“地上悬河”景观^[3-5],随时有形成洪涝灾害的风险,为生态环境和人民生命财产安全带来巨大威胁^[5]。自 1946 年人民治黄至今,黄河水沙条件已发生巨大变化,径流量和输沙量均出现急剧减少^[6-7]。水沙关系的重大调整使得解决黄河下游河床冲刷、河道淤积等问题面临新的挑战,对流域防洪安全和生态经济高质量发展也提出了新的要求^[8]。

河道淤积是黄河流域治理面临的难题,众多学者通过研究来水来沙特征确定水流冲淤能力的变化,以说明水沙关系变化对河道冲淤过程造成的影响^[9-10]。但流量、流速、含沙量及沙物质组成等来水来沙条件对冲淤的影响是一复杂过程,且几十年来大坝和水库的修建使得黄河水沙变化越来越多地受控于人类活动,冲淤变化也更加复杂^[9,11]。有学者认为,小浪底水利枢纽的运行使得黄河下游已从淤积状态转变为冲刷状态,调水调沙是造就这一现象的关键^[12-13]。也有人分析发现,黄河下游河道整体表现出“冲久必淤、淤久必冲”的周期性特征,小浪底水库的运行对冲淤过程起重要作用^[14]。由此看来,近 20 年的调水调沙已明显改变了黄河下游的冲淤格局。鉴于此,对冲淤特征的变化进行深入分析总结,以准确评估当前黄河淤积河段的冲淤状态,显得尤为重要。

针对以上问题,本研究以黄河干流潼关站以下河段为研究对象,基于 1952—2022 年黄河干流长时间序列水沙数据,结合 Mann-Kendall 非参数检验、Pet-

titt 突变检验和回归分析等方法,对 70 多年来潼关以下河道冲淤变化,及输沙特征变化对淤积量的影响进行研究。从而揭示黄河潼关以下河道冲淤变化特征和现状,为未来黄河流域水沙调控策略优化和水土流失治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河干流全长 5 464 km,流域面积 79.50 万 km²,潼关站是监测黄河水沙的关键水文站,其处在黄河流域黄土高原区域的末端,控制着黄河 91% 的流域面积和 90% 的径流量,以及几乎全部的入黄泥沙^[15]。潼关站—利津段属黄河中下游,该部分流域面积 6.97 万 km²,河道落差小,水流挟沙能力较差,为黄河泥沙主要淤积区,同时也是黄河调水调沙的主要河段。因此,本研究以黄河潼关站以下至利津站河段为主要研究区,选择了潼关、花园口、高村、艾山和利津 5 个干流关键水文站,对河段 1952—2022 年的输沙和冲淤过程,及相互影响进行系统分析。

1.2 数据来源

研究主要收集了黄河中下游潼关、花园口、高村、艾山、利津 5 个干流水文站 1952—2022 年的实测径流与泥沙数据。其中 1952—1999 年数据取自黄河水利委员会《黄河流域水文泥沙整编资料》,2000—2022 年数据,通过整理《中国河流泥沙公报:2000—2022 年》获得。

1.3 数据处理

(1) 淤积量计算。河段内泥沙淤积量主要通过上游水文站输沙和下游水文站输沙的差值确定,累计淤积量则通过逐年累加求得。具体公式为:

冲淤量:

$$S_n = S_u - S_d \quad (1)$$

累计冲淤量:

$$S_c = \sum_{n=1952}^{2022} S_n \quad (2)$$

式中: S_n 表示河段该年淤积量(10^8 t), n 取 1952—2022 年, $S_n < 0$ 表示河道冲刷, $S_n > 0$ 则为河道淤积; S_u 为河段上游水文站年输沙量; S_d 为河段下游水文站年输沙量; S_c 则为多年累计冲淤量(10^8 t)。

(2) 来沙系数计算。来沙系数反映了输沙量和径流量的相对关系, 可以从一定程度上判断冲淤平衡程度^[16], 来沙系数公式为:

$$\xi = S/Q \quad (3)$$

式中: S 表示站点水流含沙量(kg/m^3); Q 表示站点流量(m^3/s); 胡春宏等^[17]针对黄河下游淤积特征进行试验分析和总结, 最终认定当 $\xi < 0.01$ 时下游河道发生冲刷, $0.01 \leq \xi \leq 0.015$ 时冲淤平衡, $\xi > 0.015$ 时则发生淤积。

(3) 趋势变化分析。研究采用 Mann-Kendall 非参数趋势检验法, 该方法主要用于对气候和水文要素等的时间序列变化进行趋势检验, 其对样本要求小,

且不受少量异常值干扰, 可以较为客观地反映趋势变化特征^[18-19]。

(4) Pettitt 突变检验。主要是针对具有趋势变化性的时间序列, 对其均值变化时间进行检验, 以确定该序列的突变时间, 本研究主要对各水文站输沙量和来沙系数进行了突变检验^[20], 用以分析趋势变化发生突变的年份。

2 结果与分析

2.1 潼关以下河段基本输沙状况

对黄河干流潼关以下 5 个水文站 1952—2022 年的输沙量进行汇总分析, 如图 1 所示, 70 多年来各站点年输沙量均在持续减少, 结合 Mann-Kendall 趋势分析可以看到(表 1), 自 1952—2022 年, 潼关站年输沙量以每年 0.26 亿 t 速率趋势性减少, 花园口、高村、艾山和利津变化趋势依次减小, 输沙量分别以每年 0.24 亿 t/a, 0.21 亿 t/a, 0.20 亿 t/a 和 0.20 亿 t/a 速率减少。对各站点年输沙量趋势检验后的 Z 值分别达 -8.13 , -7.40 , -7.79 , -7.43 和 -7.32 , 即年输沙量均呈极显著减少趋势($p < 0.01$)。

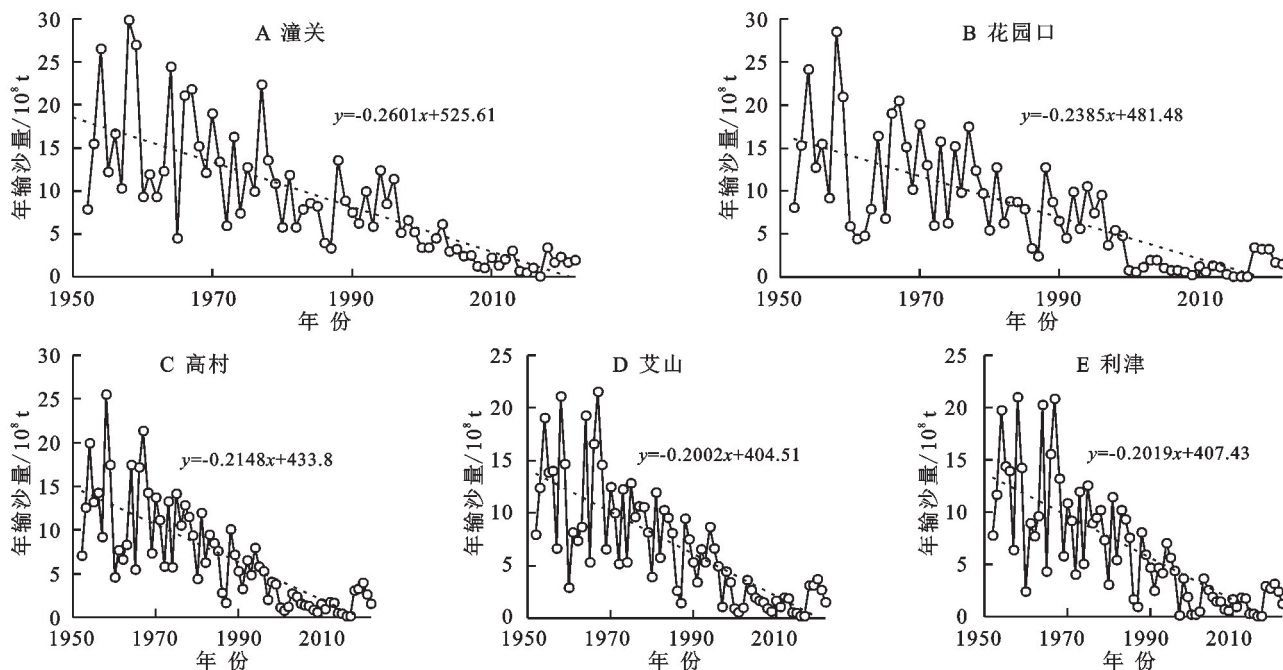


图 1 各水文站输沙量年际变化

Fig. 1 Inter-annual variation of sediment transport at various hydrological stations

进行 Pettitt 突变检验后发现, 不同站点突变年份基本相同, 潼关和花园口年输沙量减少趋势均在 1979 年和 1996 年发生突变, 高村、艾山和利津的首次突变在 1985 年, 之后在 1995 年或 1996 年再次突变。

以突变年份为界, 将突变年以前视为基准期(P1, P2), 其后定为变化期(P2, P3), 分析各时段输沙变化特征。如表 2 所示, 各站点在输沙量持续减少

的同时, 时段间差别明显。相较于基准期, 潼关站年输沙量变化期分别减少 45.15% 和 66.99%, 花园口站则分别减少 41.25% 和 78.91%。而高村站 P2, P3 较 P1, P2 减少量在 52.10%~59.02%, 艾山站为 46.26%~64.21%, 利津站减少量分别达 56.48% 和 67.33%。总体来看, 各站点在 P3 时期的输沙量减少程度均大于 P2 时期。

表 1 输沙量趋势变化特征

Table 1 Trend variation characteristics of sediment transport

站点	年变化率/ (亿 t·a ⁻¹)	Z 值	显著性	突变年份
潼关	-0.26	-8.13	$p<0.01$	1979,1996
花园口	-0.24	-7.40	$p<0.01$	1979,1996
高村	-0.21	-7.79	$p<0.01$	1985,1996(1995)
艾山	-0.20	-7.43	$p<0.01$	1985,1996(1995)
利津	-0.20	-7.32	$p<0.01$	1985,1996

表 2 不同阶段输沙量变化特征

Table 2 Sediment transport variation at different stages

站点	时段(起止年)	年均输沙量/亿 t	变化比例/%
潼关	P1(1952—1978)	15.01	
	P2(1979—1995)	8.23	45.15
	P3(1996—2022)	2.72	66.99
花园口	P1(1952—1978)	13.20	
	P2(1979—1995)	7.75	41.25
	P3(1996—2022)	1.64	78.91
高村	P1(1952—1984)	11.50	
	P2(1985—1995)	5.77	49.85
	P3(1996—2022)	1.91	66.86
艾山	P1(1952—1984)	10.91	
	P2(1985—1995)	5.93	45.62
	P3(1996—2022)	1.93	64.47
利津	P1(1952—1984)	10.45	
	P2(1985—1995)	4.84	54.09
	P3(1996—2022)	1.59	67.07

2.2 来沙系数变化

来沙系数可以判断水沙搭配特征,由图 2 可知各

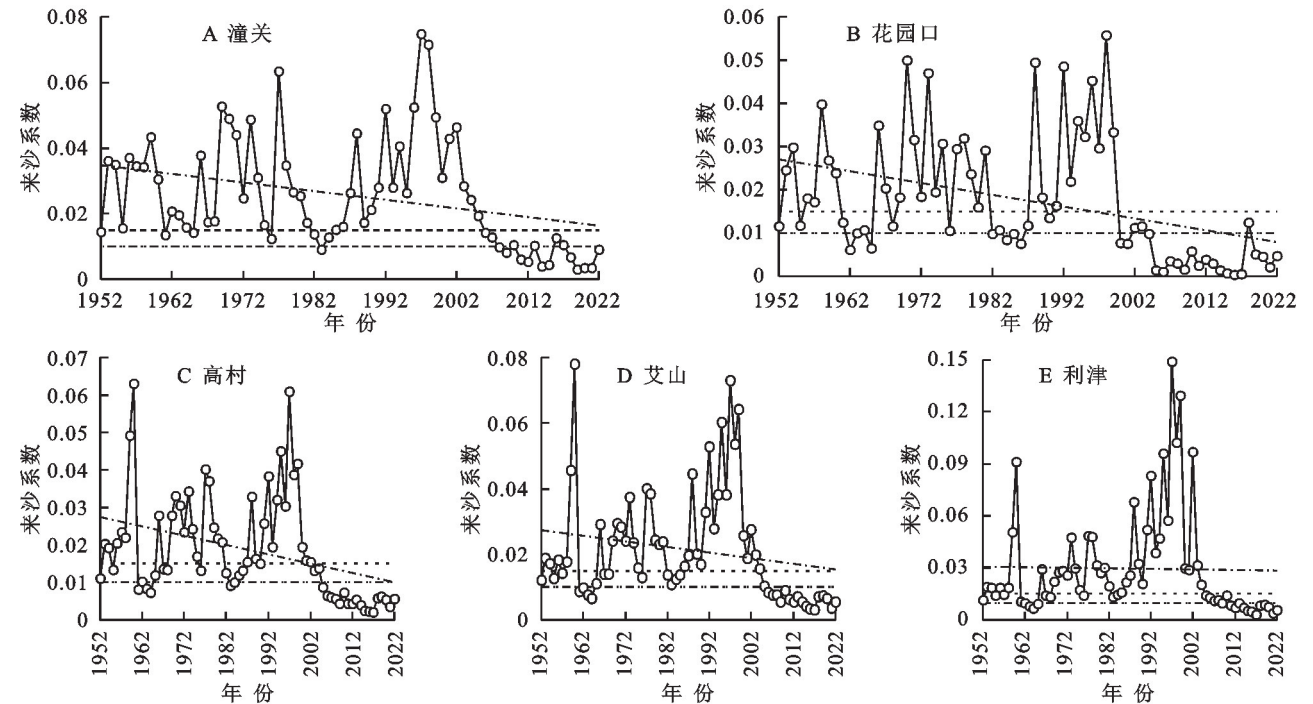


图 2 各水文站来沙系数年际变化

Fig. 2 Inter-annual variation of incoming sediment coefficient at various hydrological stations

站点来沙系数均表现出逐年减少现象。结合表 3 分析,5 个水文站来沙系数年变化率基本维持在 0.000 0~−0.000 3/a,趋势检验后的 Z 值分别达 −4.05,−4.57,−4.32,−3.30 和 −2.06,故各站点的来沙系数均呈显著减小趋势($p<0.05$)。

潼关站在 2006 年前基本表现为河道淤积($\xi>0.015$),2006—2008 年为冲淤平衡($0.01\leq\xi\leq0.015$),2009 年后开始呈现河道冲刷特征($\xi<0.01$)。花园口及其后的三站来沙系数在 2000 年前出现多次冲刷或冲淤平衡状态(1961—1966 年、1982—1987 年)、而在 2004 年后基本稳定在冲刷状态,其中花园口来沙系数维持在 0.000 5~0.012 5,高村站为 0.002 1~0.013 9,艾山为 0.003 3~0.015 7,利津站则为 0.003 0~0.020 6,且其在 2012 年后才开始表现冲刷现象。

总体来看,潼关以下来沙系数在显著减小的过程中,由河道淤积状态逐步变为河道冲刷,在 21 世纪前各站来沙系数基本 >0.015 ,而自 2000 年开始,各站来沙系数明显低于之前,并逐步下降到 <0.01 ,这与输沙变化特征有一定相似性。

表 3 来沙系数趋势变化特征

Table 3 Trend variation characteristics of incoming sediment coefficient

站点	年变化率	Z 值	显著性
潼关	−0.0003	−4.05	$p<0.01$
花园口	−0.0003	−4.57	$p<0.01$
高村	−0.0002	−4.32	$p<0.01$
艾山	−0.0002	−3.30	$p<0.01$
利津	0.0000	−2.06	$p<0.05$

2.3 河段冲淤特征分析

根据水文站位置及河道特征,将潼关以下河段划分为潼花段(潼关—花园口)、下游游荡型河段(花园口—高村)、过渡型河段(高村—艾山)及弯曲型河段(艾山—利津)4个区间,分别分析冲淤特征。如图 3

所示,黄河中下游各河段的年泥沙淤积量整体呈现出减少趋势。各河段年淤积变化均存在大范围波动,但自 1977 年开始,年淤积量大幅降低,且波动性减小,后在 1983 年跌至极低值,部分河段表现出冲刷现象。2003 年以后,各河段年淤积量波动进一步缩小。

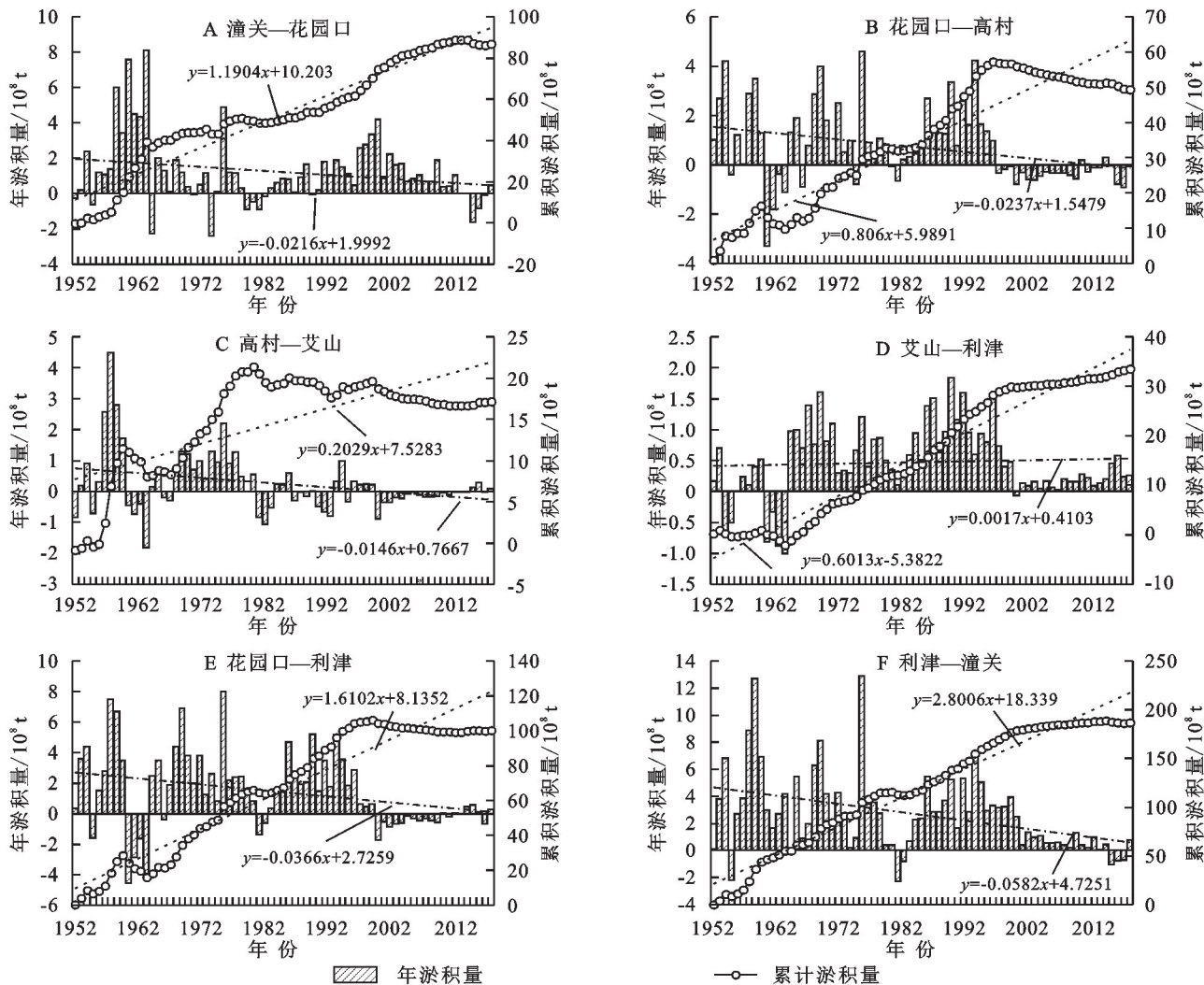


图 3 不同河段淤积量年际变化

Fig. 3 Interannual variation of sedimentation in different reaches

潼花段年均淤积量为 1.22 亿 t(表 4),且年淤积量以每年 0.02 亿 t 的速率减少,但变化不显著($p>0.05$),至 2003 年累计淤积 74.61 亿 t,2004 年开始年淤积量维持在-1.60~2.23 亿 t/a,到 2022 年总淤积达 86.75 亿 t。游荡型河段的年均淤积量为 0.70 亿 t,其年淤积量以 0.023 7 亿 t/a 速率显著减少($p<0.01$),并且从 2000 年开始年淤积维持在-0.91~0.29 亿 t/a,表现为持续冲刷状态,截至 1999 年该段累计淤积达 56.92 亿 t,到 2022 年已降至 49.45 亿 t。过渡型河段年淤积以 0.014 6 亿 t/a 的速率显著减少($p<0.05$),2002 年时累计淤积达 19.61 亿 t,后开始出现持续冲刷,到 2022 年总淤积为 17.14 亿 t。弯曲型河段的年淤积量以 0.001 7 亿 t/a 的速率增加,但

变化不显著($p>0.05$),在 2002 年累计淤积 29.87 亿 t,之后速率减缓,到 2022 年共淤积泥沙 33.49 亿 t。

表 4 年淤积量趋势变化特征

Table 4 Trend variation characteristics of annual sedimentation

河段	年变化率/ (亿 t · a ⁻¹)	Z 值	显著性	年均值/ 亿 t
潼关—花园口	-0.0216	-1.71	$p>0.05$	1.22
花园口—高村	-0.0237	-2.96	$p<0.01$	0.70
高村—艾山	-0.0146	-2.29	$p<0.05$	0.24
艾山—利津	0.0017	-0.67	$p>0.05$	0.47
花园口—利津	-0.0366	-3.31	$p<0.01$	1.41
潼关—利津	-0.0582	-4.16	$p<0.01$	2.63

研究时段内,黄河下游(花园口—利津)年均淤积量为1.41亿t,并以 -0.036 亿t/a的速率显著减少,2002年后的变化范围在 $-1.72\sim 0.57$ 亿t/a,截至2022年下游河段共淤积泥沙100.09亿t。对全河段(潼关—利津段)整体分析,年均淤积量为2.63亿t,2004年后年淤积量变化范围在 $-1.03\sim 1.37$ 亿t,整个潼关以下河段年淤积量表现出极显著的减少趋势($Z=-4.16, p<0.01$),变化速率达 -0.058 亿t/a。全河段在2002年时累计淤积已达176.54亿t,后增速放缓,在2022年时,潼关以下河段共淤积泥沙186.84亿t。

淤积占比可以了解河段输入泥沙与沉积泥沙的关系。由图4可知,潼花段的淤积占比以每年0.45%的

速度增加,说明潼关站向下游输入的沙物质更多淤积在潼花段。而下游游荡型和过渡型河段淤积占比分别以 $1.21\%/a$ 和 $0.21\%/a$ 的速率减少,并在2002年后表现为负值,即河段内的泥沙正持续向下部河段运动。与此相对的,弯曲型河段淤积占比正以 $0.41\%/a$ 的速率持续增加,在2002年后也维持了上升状态,故上段来沙更多淤积在了此段。总体上看,整个黄河下游的淤积占比以 $0.66\%/a$ 的速度减少,尤其在2003年开始表现为负值,故更多沙物质被冲刷输出河道。潼关以下河段淤积占比的整体增速为 $0.1\%/a$,且2017年后的比例在 $-61.31\%\sim 38.42\%$,故由潼关以上输入的泥沙要远少于河段冲刷输出的泥沙。

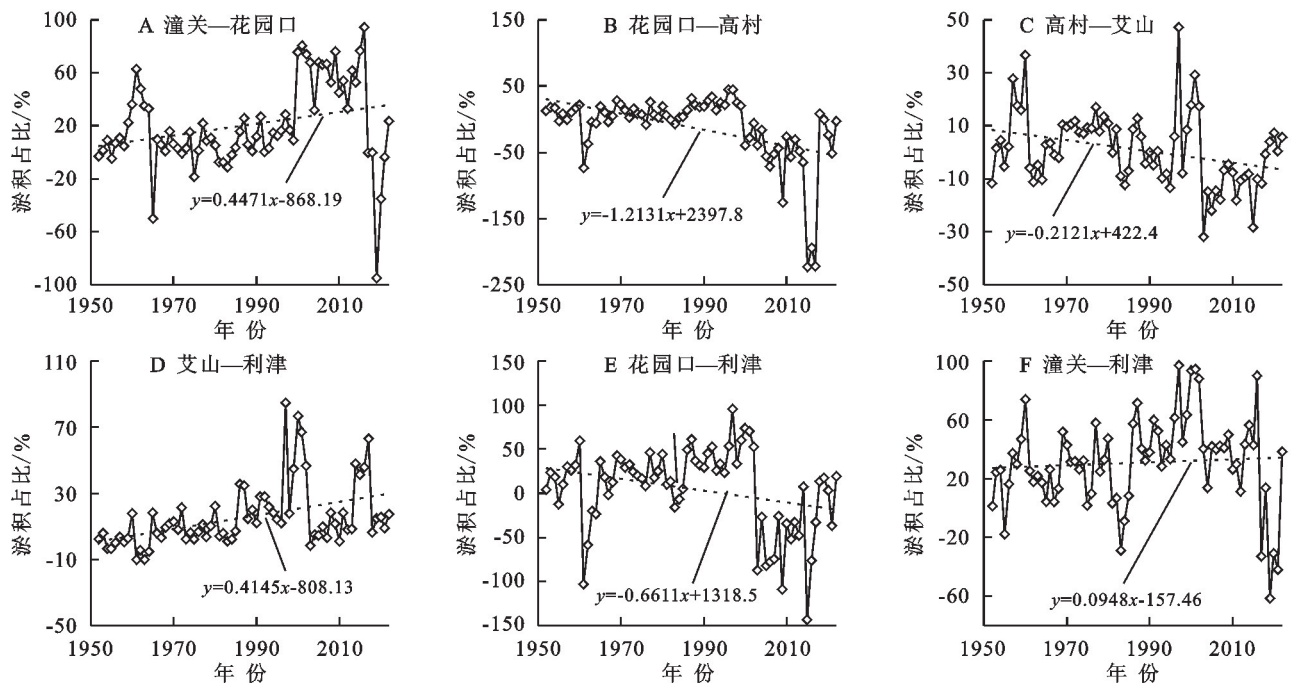


图4 不同河段淤积占比年际变化

Fig. 4 Interannual variation of sedimentation proportion in different reaches

根据黄河下游重要水利枢纽运行及调水调沙实施时间,将河段冲淤过程划分成三门峡建设前(Q1, 1952—1959年)、三门峡运行期(Q2, 1960—2001年)和小浪底运行及调水调沙实施期(Q3, 2002—2022年)3个不同时段分析。由表5可知,各河段淤积量持续减少的同时,在Q3时期的年均淤积量均达各时段最低,游荡型和弯曲型河段为负值。潼花段各阶段淤积量变化比例为所有河段最小,分别为7.3%和29.24%,游荡型和过渡型河段变化比例分别在47.44%~134.98%和81.12%~146.58%,弯曲型河段在Q2时期的淤积量较Q1时期出现大幅增加,变化比例达 $-1\,246.67\%$,Q3较Q2时期淤积减少比例达71.75%。同样的,潼花段和弯曲型河段在Q3时期年均淤积占比达最高值,游荡型和弯曲型河段则达最低值,潼花段淤积占比较上一阶段变化比例分

别为 -132.98% 和 -182.93% ,游荡型河段在Q3时期淤积占比大幅降低,较Q2变化比例为822.48%,Q2较Q1则为9.45%,过渡型河段的变化比例在27.05%~280.94%,弯曲型河段淤积占比在Q2时期同样出现大幅增加,变化比例达 $-1\,710.84\%$,Q3较Q2则为 -13.27% 。

针对整个下游和潼关以下全河段来看,2002年后的淤积量变化巨大,变化比例达113.54%和79.03%。而淤积占比则同时表现出先增大后减少的现象,Q2较Q1时期变化比例分别为 -51.18% 和 -72.50% ,Q3较Q2则为257.93%和27.07%。

2.4 输沙特征对冲淤过程的影响

河道冲淤过程直接受到水沙变化影响,采用回归分析以确定输沙量和来沙系数变化对淤积量的影响。由表6可知,潼花段和游荡型河段在P1、P3时期的输

沙量变化显著影响了河段淤积, R 值在 0.40~0.85, 而过渡型和弯曲型河段输沙量对淤积量没有明显影响 ($p>0.05$)。来沙系数变化对花园口以下河段淤积变化均造成了显著影响 ($p<0.01$), R 值达 0.55~0.75。

对黄河下游和潼关以下的全河段而言, 淤积量变化在 P1 和 P3 时期受输沙影响明显 ($p<0.01$, $R=0.54\sim 0.81$); 来沙系数则始终对全河段淤积变化有明显影响 ($p<0.01$, $R=0.73\sim 0.74$)。

表 5 不同阶段淤积特征

Table 5 Sedimentation Characteristics at Different Stages

河段	时段(起止年)	淤积量		淤积占比	
		年均值/亿 t	变化比例/%	年均值/%	变化比例/%
潼关—花园口	Q1(1952—1959)	1.430		5.863	
	Q2(1960—2001)	1.325	7.37	13.659	—132.98
	Q3(2002—2022)	0.937	29.24	38.646	—182.93
花园口—高村	Q1(1952—1959)	1.886		9.831	
	Q2(1960—2001)	0.991	47.44	8.902	9.45
	Q3(2002—2022)	—0.347	134.98	—64.317	822.48
高村—艾山	Q1(1952—1959)	1.218		6.579	
	Q2(1960—2001)	0.230	81.12	4.799	27.05
	Q3(2002—2022)	—0.107	146.58	—8.684	280.94
艾山—利津	Q1(1952—1959)	0.051		0.914	
	Q2(1960—2001)	0.690	—1246.67	16.551	—1710.84
	Q3(2002—2022)	0.195	71.75	18.747	—13.27
花园口—利津	Q1(1952—1959)	3.155		16.464	
	Q2(1960—2001)	1.911	39.42	24.890	—51.18
	Q3(2002—2022)	—0.259	113.54	—39.308	257.93
潼关—利津	Q1(1952—1959)	4.585		20.498	
	Q2(1960—2001)	3.236	29.42	35.359	—72.50
	Q3(2002—2022)	0.678	79.03	25.786	27.07

表 6 淤积量与不同参数的关系

Table 6 Correlation between sedimentation proportion and different parameters

河段	参数	R		
		P1	P2	P3
潼关—花园口	年输沙量	0.40 *	0.04	0.47 **
	来沙系数	0.27		
花园口—高村	年输沙量	0.59 **	0.36	0.85 **
	来沙系数	0.75 **		
高村—艾山	年输沙量	0.32	0.11	0.12
	来沙系数	0.47 **		
艾山—利津	年输沙量	0.19	0.53	0.34
	来沙系数	0.55 **		
花园口—利津	年输沙量	0.54 **	0.28	0.81 **
	来沙系数	0.73 **		
潼关—利津	年输沙量	0.65 **	0.34	0.85 **
	来沙系数	0.74 **		

注: * 表示达到 95%置信度; ** 表示达到 99%置信度,下同。

3 讨论

泥沙淤积治理始终是黄河流域治理中面对的难题,它为黄河流域生态保护和高质量发展带来巨大威胁^[21]。研究发现,近 70 年来潼关以下河段输沙量正逐年减少,1996 年后,各站点输沙较上一阶段均减少 60% 以上。五站来沙系数同样呈逐年下降态势,在

2004 年后都逐步降至 <0.001 水平,表现出冲刷状态。输沙量和来沙系数的降低均受到源头产沙和人类活动的影响,其中黄土高原水土流失治理导致黄河来水来沙量骤减,河段水沙调控则缓解了水沙矛盾,输沙量和来沙系数变化主要受此影响^[15,22]。

就全河段而言,潼关以下始终处淤积状态,但年淤积量在逐步减少,且近些年出现冲刷过程。对于不同河段,淤积占比和总淤积量的增加,说明更多的泥沙留在了潼花段或运动到了下游弯曲型河段,游荡型和过渡型河段自 2002 年开始的淤积量和淤积占比则为负值,故表现为持续冲刷减淤现象。以三门峡水库、小浪底水利枢纽运行及调水调沙实施时间为节点分段分析发现,三门峡水库运行后黄河下游各河段淤积量均有大幅度变化,游荡型和过渡型河段年均淤积减少比例达 47.44% 和 81.12%,弯曲型河段变化更为剧烈,淤积量较水库建成前增长了 1 246.67%,即大量泥沙在上段被冲刷并沉积在了弯曲型河段。另外,潼花段在 1960 年后的淤积占比增加了 132.98%,游荡型和过渡型河段仅有 9.45%~27.05% 的减少,弯曲型河段则表现出 1 710.84% 的大幅增长。由此看来,三门峡水库建成后不仅使得潼关以下河段淤积量整体减少,还改变了泥沙的分布格局,距其较近的游荡型和过渡型河段出现缓慢冲刷过程,水库以上的潼花段和距离最远受影响小的弯曲型河段则承担起拦

截淤积更多泥沙的任务。小浪底水利枢纽运行及调水调沙实施后,其更加合理的水沙调度同样使得潼关以下各河段淤积量减少^[23],减少比例在29.24%~146.28%,且游荡型和弯曲型河段年均淤积占比呈现出822.48%和280.94%的大幅减少,弯曲型河段淤积增加量也大幅减少。故该时段内,潼关以下河段的冲淤特征出现了更明显的变化,主要表现为水沙调控过程使得淤积总量有所减少,花园口—艾山段冲刷强度增加明显,潼花段和弯曲型河段淤积强度则在减弱。学者判断水库建设和调水调沙对黄河冲淤过程有着明显影响,卢梦雯等^[24]研究认为,小浪底水库的存在显著改变了黄河下游的水文过程和泥沙特征,其蓄水拦沙作用,截留了上游大量泥沙,减少了下游泥沙的输送量,另外调水调沙的实施也人为改变了下游河道的冲淤规律。也有学者发现^[25],水库调水调沙作用使得下游泥沙运移距离更远,泥沙沉积位置也随之下移。故潼关—花园口段淤积多是水库拦沙的作用,弯曲型河段的淤积则是上段河道冲刷导致。

另外通过回归分析可以判定,潼花段和游荡型河段淤积量受输沙量影响明显,但过渡型和弯曲型河段受影响较小;而来沙系数直接反映着河段冲淤状态,其显著影响了花园口以下河段的淤积过程。但有研究认为,淤积量变化虽与水沙变化相关,但因年内水分分配、河道特征和人类活动等影响因素的差别,其影响过程也应是多因素复杂组合的结果^[26-27],故不能仅回归分析来确定输沙量和来沙系数变化对淤积量变化的影响。

4 结论

(1) 近70年来黄河潼关以下河段输沙量在持续减少,1996年后潼关、花园口、高村、艾山和利津站年输沙量分别减少了66.99%,78.91%,59.02%,64.21%和67.33%。同时来沙系数均以0.000 0~−0.000 3/a的速率减少,并在2004年后陆续表现为冲刷状态($\xi < 0.01$)。

(2) 近70年来各河段年淤积量均有不同程度减少,至2022年,潼关—花园口段、下游游荡型、过渡型和弯曲型河段分别淤积泥沙86.75亿t,49.45亿t,17.14亿t,33.49亿t,全下游河段在近20年表现出冲刷状态,累计淤积量外100.09亿t。在研究时段内,整个潼关以下的淤积型河段已累计淤积186.84亿t泥沙。

(3) 水库运行及调水调沙工程实施后河道冲淤变化明显,三门峡水库建成后艾山—利津段淤积量大幅增加1246.67%。小浪底水利枢纽运行及调水调沙实施后潼关以下河段淤积特征则发生明显改变,游荡型和过渡型河段出现持续冲刷,总淤积量减少的同时淤积在潼关—花园口段和弯曲型河段的泥沙相对增多。

(4) 花园口以下段来沙系数变化对淤积影响明

显($p < 0.01$),输沙变化对潼关—花园口段和游荡型河段淤积变化的明显影响则在近二十年内,但过渡型和弯曲型河道淤积变化受输沙影响较小,需结合其他水沙特征进一步分析。

参考文献(References):

- [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.
Hu C H, Zhang X M. Loess Plateau soil erosion governance and runoff-sediment variation of Yellow River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(1): 1-11.
- [2] 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.
Shi F C, Zhang R. Cause analysis and recognitions on the recent sharp decreasing of the Yellow River water and sediment amount[J]. Yellow River, 2013, 35(7): 1-3.
- [3] 张金良,刘继祥,万占伟,等.黄河下游河道形态变化及应对策略:“黄河下游滩区生态再造与治理研究”之一[J].人民黄河,2018,40(7):1-6,37.
Zhang J L, Liu J X, Wan Z W, et al. Channel morphology evolution and corresponding coping strategy in the lower Yellow River: “study on ecological reconstruction and management of the floodplains in the lower Yellow River”(I)[J]. Yellow River, 2018, 40(7): 1-6, 37.
- [4] 万强,张建煜,李军华.黄河下游陆集滩“二级悬河”治理模型试验研究[J].人民黄河,2019,41(6):26-28,48.
Wan Q, Zhang J Y, Li J H. Validation of the secondary suspended river management effect in LYR by the physical model examination[J]. Yellow River, 2019, 41(6): 26-28, 48.
- [5] Yu L S. The Huanghe(Yellow) River: recent changes and its countermeasures[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(17/18): 2281-2298.
- [7] 肖培青,吕锡芝,张攀.黄河流域水土保持科研进展及成效[J].中国水土保持,2020(10):6-9,82.
Xiao P Q, Lyu X Z, Zhang P. Research progress and effect of soil and water conservation of the Yellow River Basin[J]. Soil and Water Conservation in China, 2020 (10): 6-9, 82.
- [8] 胡春宏.黄河水沙变化与治理方略研究[J].水力发电学报,2016,35(10):1-11.
Hu C H. Changes in runoff and sediment loads of the Yellow River and its management strategies[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(10): 1-11.
- [9] 张茹,张志全,罗凯.近年黄河下游输沙功能的时空变化及其影响因素分析[J].水土保持研究,2022,29(4):95-99.
Zhang R, Zhang Z Q, Luo K. Study on the temporal-spatial variation of sediment transport function in the lower reaches of the Yellow River and its influencing factors in recent years[J]. Research of Soil and Water

- Conservation, 2022, 29(4): 95-99.
- [10] 王延召, 张耀哲, 叶瑞禄. 水流挟沙能力及其双值关系分析[J]. 泥沙研究, 2018, 43(5): 7-12.
Wang Y Z, Zhang Y Z, Ye R L. Study on sediment discharge with two-value relationship[J]. Journal of Sediment Research, 2018, 43(5): 7-12.
- [11] 燕慧婷, 王飞, 何毅, 等. 人类活动对黄河河源区水沙变化影响评价[J]. 泥沙研究, 2015(2): 40-46.
Yan H T, Wang F, He Y, et al. Impact assessment of human activities on runoff and sediment between paired years with similar weather condition in the source of the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2015(2): 40-46.
- [12] Kong D X, Miao C Y, Wu J W, et al. The hydro-environmental response on the lower Yellow River to the water-sediment regulation scheme[J]. Ecological Engineering, 2015, 79: 69-79.
- [13] Chu Z X. The dramatic changes and anthropogenic causes of erosion and deposition in the lower Yellow (Huanghe) River since 1952 [J]. Geomorphology, 2014, 216: 171-179.
- [14] 马子普, 吴保生, 沈逸, 等. 黄河下游河道冲淤分布模式及冲淤特征[J]. 水利学报, 2024, 55(4): 468-480.
Ma Z P, Wu B S, Shen Y, et al. Distribution pattern and characteristics of sedimentation in the Lower Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(4): 468-480.
- [15] 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.
Hu C H, Zhang X M, Zhao Y. Cause analysis of the centennial trend and recent fluctuation of the Yellow River sediment load[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 725-733.
- [16] 冯宗, 孙赞盈, 彭红, 等. 来沙系数对河道冲淤的影响研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(3): 44-48.
Feng Z, Sun Z Y, Peng H, et al. Study on the influence of the incoming sediment coefficient on the scour and sedimentation[J]. Yellow River, 2019, 41(3): 44-48.
- [17] 胡春宏, 郭庆超. 黄河下游河道泥沙数学模型及动力平衡临界阈值探讨[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2004, 34(S1): 133-143.
Hu C H, Guo Q C. Discussion on mathematical model of sediment and critical threshold of dynamic balance in the lower Yellow River[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2004, 34(S1): 133-143.
- [18] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [19] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1955, 25(1): 86-91.
- [20] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics, 1979, 28(2): 126-135.
- [21] 王兆印, 林秉南. 中国泥沙研究的几个问题[J]. 泥沙研究, 2003(4): 73-81.
Wang Z Y, Lin B N. Sedimentation studies in China: review and prospect[J]. Journal of Sediment Research, 2003(4): 73-81.
- [22] 李鹏, 陈沈良, 刘清兰, 等. 黄河尾间沙洲及河口形态对水沙变化的响应[J]. 泥沙研究, 2022, 47(2): 57-64.
Li P, Chen S L, Liu Q L, et al. Responses of the processes in the Yellow River lowermost channel sandbars and estuary to the variation of water and sediment[J]. Journal of Sediment Research, 2022, 47(2): 57-64.
- [23] 沈逸, 吴保生, 王彦君, 等. 小浪底水库运用以来黄河下游河道冲淤的时空规律与模拟[J]. 地理学报, 2023, 78(11): 2735-2749.
Shen Y, Wu B S, Wang Y J, et al. Temporal and spatial laws and simulations of erosion and deposition in the Lower Yellow River since the operation of the Xiaolangdi Reservoir[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(11): 2735-2749.
- [24] 卢梦雯. 小浪底调水调沙背景下黄河下游水沙变化及其对农业景观的影响研究[D]. 河南开封: 河南大学, 2022.
Lu M W. Study on the change of water-sediment characteristics and its impact on agricultural landscape under the water-sediment regulation scheme of Xiaolangdi dam in the lower Yellow River[D]. Kaifeng, Henan: Henan University, 2022.
- [25] 姚前前, 李新举, 王梅, 等. 小浪底运行对黄河三角洲水沙变化规律的影响机制[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 57-62.
Yao Q Q, Li X J, Wang M, et al. Influencing mechanism of the operation of Xiaolangdi Project on flow/sediment variation rules in Yellow River Delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(6): 57-62.
- [26] 郑钊, 郭庆超, 黄烈敏, 等. 黄河下游河道 11 月至次年 5 月时期输沙和冲淤规律研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(2): 95-103.
Zheng Z, Guo Q C, Huang L M, et al. Study on regularity of sediment transport and sedimentation in the Lower Yellow River during November to May next year[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(2): 95-103.
- [27] 刘清兰, 陈俊卿, 陈沈良. 调水调沙以来黄河尾间河道冲淤演变及其影响因素[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 139-152.
Liu Q L, Chen J Q, Chen S L. Spatiotemporal evolution of Yellow River estuarine channel and its influencing factors since the water-sediment regulation scheme[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(1): 139-152.