

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.03.011

# 水库拦沙对黄河下游河床演变的影响

申冠卿, 张原锋, 王平, 张广明

(黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 为充分认识水库拦沙对其下游河道河床演变及防洪的影响, 基于三门峡水库和小浪底水库拦沙期水沙及断面观测资料, 研究了黄河下游河槽冲淤、洪水冲刷效率、河槽几何特征、排洪能力等规律。结果表明: 水库拦沙期, 黄河下游沿程河槽均发生了不均衡冲刷; 河床粗化明显, 粗化后床沙中值粒径最大值为冲刷前的2.1~2.5倍; 高村以上河段同水位过洪能力增加明显, 冲刷后较大的河槽容积可为小浪底水库排沙提供暂时的滞沙; 河床粗化后细泥沙和中泥沙补给能力不足, 河槽冲刷效率随冲刷历时的增加衰减明显。由于水库多年调节水沙过程及下游相对完善的河道整治工程约束, 小浪底水库拦沙期黄河下游河槽冲刷重心下移, 河床粗化程度增加, 冲刷效率明显降低。研究成果可为水库水沙调控技术指标的选取提供科学依据。

**关键词:** 河床演变; 河床粗化; 冲刷效率; 泥沙调节; 水库拦沙期; 黄河下游

**中图分类号:** TV142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2024)03-0475-10

冲积河流上修建水库后, 出库水沙条件的变化将破坏其下游河流平衡, 引起河道冲刷、河床形态变化等再造床过程<sup>[1]</sup>, 并在中、大洪水时产生潜在的洪水风险放大效应<sup>[2]</sup>。三峡水库运用后, 受河道工程的约束, 其下游宜昌—城陵矶河段河槽发生单向冲刷, 15 a冲刷约 $1.6\text{ m}^3$ 。黄河下游不同河段河道特性及河道工程约束程度不同, 小浪底水库运用后, 黄河下游河道普遍冲刷、 $3\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 相应水位明显降低<sup>[4]</sup>, 游荡型、过渡及弯曲河段河槽分别冲刷3.0、2.5和2.3 m, 且前期5 a平均来沙系数是影响河槽冲淤的关键因子<sup>[5]</sup>。在河槽冲深的同时, 游荡段河槽宽度也有增加, 全下游河宽横向展宽速率明显小于河槽垂向冲深速率<sup>[6-7]</sup>, 当年及前7 a流量与含沙量对河槽几何形态调整的贡献率分别为30%、70%<sup>[8-9]</sup>。对于汛期和场次洪水, 水流冲刷强度、河相系数是影响排沙比的主要因素<sup>[10]</sup>。黄河调水调沙冲刷过程中, 水流输送的粗泥沙41%左右来自河床的补给, 随着床沙粗化及粗化保护层的形成, 黄河下游洪水冲刷效率已显著降低<sup>[11-12]</sup>, 累计冲刷量的空间分布在逐渐趋于均匀, 河床冲刷逐渐趋向平衡<sup>[13]</sup>。游荡河段河床冲刷效率降低幅度最大, 主要与床面形态发育、水流阻力增加有关<sup>[14-15]</sup>, 且细泥沙补给不足, 冲刷效率明显降低<sup>[16]</sup>。随着黄河下游泥沙减少、河床冲刷, 同样伴随着河槽摆动滩地塌滩等现象的发生, 河槽摆动宽度及强度小于小浪底建库前, 水沙条件也是影响河槽摆动的主要因素<sup>[17-19]</sup>。水库拦沙期河床演变涉及范围广、历时长。1961—1964年三门峡水库拦沙期, 下游河槽冲刷21.21亿 $\text{m}^3$ 。小浪底水库运用以来, 截至2022年汛后, 小浪底水库拦沙33.48亿 $\text{m}^3$ , 下游河槽冲刷22.05亿 $\text{m}^3$ , 最小平滩流量由2002年汛前的 $1\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ 增至 $4\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$ 。目前夹河滩以上河段河槽基本恢复到1969年或1960年以来最好水平, 夹河滩—高村河段恢复到1989年水平, 高村—利津河段恢复到1985年水平<sup>[4]</sup>, 其中花园口以上河段平滩流量超过 $9\ 900\ \text{m}^3/\text{s}$ , 具有显著的泥沙调节能力<sup>[20]</sup>。

三门峡水库拦沙期黄河下游游荡型河道除堤防外仅有少量护滩工程, 基本为天然河道, 70年代开始有计划河道整治, 小浪底水库拦沙期, 黄河下游河道工程相对完善, 对水流的约束作用明显增加。持续开展的

收稿日期: 2024-01-30; 网络出版日期: 2024-05-06

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20240506.1045.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2243218)

作者简介: 申冠卿(1964—), 男, 河南伊川人, 正高级工程师, 主要从事河流泥沙研究。E-mail: shenguanqing@sohu.com

调水调沙试验与生产运行,使下游河槽边界发生了很大变化。尽管已有不少学者从多方面开展了水库拦沙期等方面的研究,但边界条件的巨变及调水调沙对河床演变的影响研究还不够深入。因此,本文拟以三门峡、小浪底水库拦沙期的实测资料,系统类比研究黄河下游床沙补给能力、冲刷效率及排洪能力等方面的定量变化,提出水库拦沙对其下游河床演变的影响,为水库水沙调控提供技术支撑。

## 1 河道边界条件及水沙条件

### 1.1 河道边界条件

黄河下游游荡性河段指河南孟津白鹤镇至山东东明高村段,河道长 299 km。1948 年前河段共有坝垛 1 065 道,其中险工和控导工程分别为 1 050 道和 15 道。1948—1960 年共修坝垛 310 道,至 1960 年三门峡水库拦沙时,共有坝垛 1 375 道,其中险工和控导工程分别为 1 205 道和 170 道,控导工程占 12.4%。游荡性河段从 20 世纪 70 年代有计划逐步开始河道整治,至 2001 年共有坝垛 3 608 道。1971—2001 年新修坝垛 2 233 道,其中险工和控导工程分别为 318 道和 1 915 道,控导工程占 85.8%,河道控导工程对约束水流、控制河势发挥了重要作用。

### 1.2 水沙条件

三门峡水库位于黄河中游下段,1960 年 9 月开始蓄水,至 1962 年 3 月下泄清水,1962 年 3 月后改为滞洪排沙,到 1964 年 10 月下游河道仍冲刷故合为蓄水运用。小浪底坝址位于黄河中游最后一段峡谷的出口,距三门峡枢纽下游 130 km,小浪底水库是控制进入黄河下游水沙的关键工程,水库于 1999 年 10 月下旬开始蓄水,经历了拦沙、调水调沙及排沙运用。

三门峡水库拦沙期,1960—1964 年三门峡+黑石关+武陟(三黑武站)控制站各流量级水沙量及天数分布见表 1,该时期总水量为 2 262.5 亿  $m^3$ ,总沙量为 23.40 亿 t,其中 1964 年水沙量最大,水量、沙量分别为 774.4 亿  $m^3$  和 11.99 亿 t。从表 1 流量级水沙分布看,水沙主要集中在 1 000~4 000  $m^3/s$  流量级内,该量级水量、沙量各占总水沙量的 62.7% 和 61.5%,水沙量基本同步。该时期来水丰,日均流量大于 5 000  $m^3/s$  的天数为 45 d。

表 1 水库拦沙期黄河下游控制站水沙量分布

Table 1 Distribution of water volume and sediment load during the period of reservoir sediment retention

流量/( $m^3/s$ )	三门峡水库拦沙期						小浪底水库拦沙期					
	水量/ 亿 $m^3$	水量占 比/%	沙量/ 亿 t	沙量占 比/%	天数/d	天数占 比/%	水量/ 亿 $m^3$	水量占 比/%	沙量/ 亿 t	沙量占 比/%	天数/d	天数占 比/%
≤1 000	266.7	11.8	2.462	10.5	557	36.9	2 990.7	44.2	1.264	4.8	6 060	71.6
1 000 ~ <2 000	626.5	27.7	5.383	23.0	486	32.2	1 977.4	29.2	2.263	8.6	1 720	20.3
2 000 ~ <3 000	454.0	20.1	4.704	20.1	216	14.3	832.6	12.3	12.880	48.9	390	4.6
3 000 ~ <4 000	338.0	14.9	4.300	18.4	112	7.4	572.4	8.5	9.097	34.5	188	2.2
4 000 ~ <4 500	132.3	5.8	2.724	11.6	36	2.4	249.2	3.7	0.695	2.6	69	0.8
4 500 ~ <5 000	231.9	10.2	1.864	8.0	56	3.7	131.7	1.9	0.146	0.6	32	0.4
5 000 ~ <5 500	149.2	6.6	1.549	6.6	33	2.2	13.4	0.2	0	0	3	0.04
5 500 ~ <6 000	39.8	1.8	0.221	0.9	8	0.5						
≥6 000	24.1	1.1	0.194	0.8	4	0.3						

小浪底水库运用以来, 2000—2022年小浪底+黑石关+武陟(小黑武站)控制站总水量为6 767.4亿 $\text{m}^3$ , 总沙量为26.35亿t, 年均水量、沙量分别为294.2亿 $\text{m}^3$ 和1.15亿t, 其中2020年来水最丰, 水量为487.2亿 $\text{m}^3$ , 2018—2020年及2022年小浪底水库排沙, 排沙量分别为4.46亿、5.45亿、3.28亿和1.89亿t, 2019年排沙最多。从表1看, 2 000  $\text{m}^3/\text{s}$ 流量以下水量占73.4%, 其中小于1 000  $\text{m}^3/\text{s}$ 流量级水量占44.2%; 来沙主要集中于2 000~4 000  $\text{m}^3/\text{s}$ 流量级, 占83.4%。小浪底水库运用23 a来, 2002年进行了水库运用后黄河首次调水调沙, 除来水较枯年份(如2016—2017年)外, 共有18 a开展了水库调水调沙, 泥沙集中于大流量下泄, 水沙关系趋于协调。该时期多数年份来水枯, 日均流量大于5 000  $\text{m}^3/\text{s}$ 的天数仅有3 d。

## 2 河槽冲淤演变

### 2.1 河槽冲淤量时空变化

据黄河下游实测断面资料, 划分河槽并计算相应的河槽冲淤量(断面法), 点绘水库拦沙期黄河下游河槽冲淤量时空分布, 见图1。三门峡水库拦沙期(1960年9月至1964年10月)利津以上下游河槽共计冲刷21.21亿 $\text{m}^3$ , 小浪底水库拦沙期(1999年11月至2022年10月)下游河槽总冲刷22.05亿 $\text{m}^3$ , 除2019年和2022年(分别淤积0.65亿和0.23亿 $\text{m}^3$ )河槽淤积外其余年份均为冲刷, 见图1(a)。从图1(b)冲刷空间分布看, 两时期河槽冲刷沿程不均匀发展, 但冲刷分布极为相似, 冲刷强度以高村为分界点, 冲刷强度上段大、下段小。小浪底水库拦沙期, 受水流条件及控导工程约束水流的影响, 小浪底水库调水运用及后期天然较大洪水使河槽冲刷重心随时间推移有向下游河段发展的趋势, 高村—艾山排洪瓶颈河段冲刷强度大于三门峡水库拦沙期。受泥沙沿程调整的影响, 流量较小时, 还存在“上冲下淤”现象, 2000—2014年非汛期孙口以上河段冲刷6.984亿 $\text{m}^3$ , 艾山—利津段淤积1.094亿 $\text{m}^3$ 。两时期河槽冲刷的不同点是: 三门峡水库拦沙期高村以上河道控导工程少约束水流能力差, 河槽横向塌滩展宽、冲刷范围广; 小浪底水库拦沙期纵向冲刷深度大且高强度冲刷河段长。

水库拦沙期冲刷主要集中于高村以上, 两时期高村以上河槽冲刷量分别为14.8亿和15.5亿 $\text{m}^3$ , 分别占下游相应冲刷量的69.6%和70.2%, 长距离河槽冲刷形成的较大河槽容积, 可为后期小浪底水库排沙提供暂时的滞沙, 改善沿程水沙不协调关系。

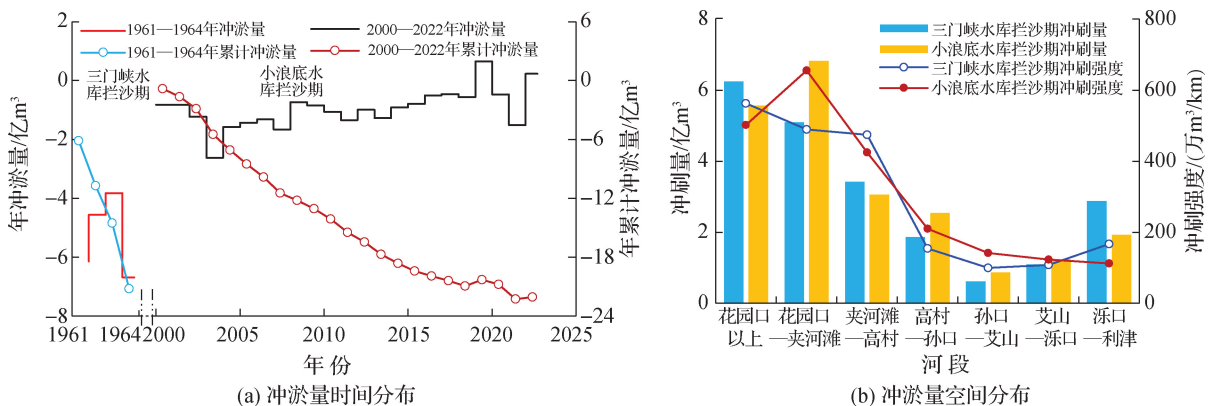


图1 水库拦沙期黄河下游河槽冲淤量时空分布

Fig. 1 Distribution of erosion and deposition in the main channel of the Lower Yellow River during the period of reservoir sediment retention

## 2.2 河槽深泓点时空变化

根据实测断面资料,摘录横断面深泓点高程,点绘水库拦沙期河槽深泓点时空变化如图2。从深泓点沿程变化看,1999年深泓点高程最高,反映出20世纪90年代末黄河下游河槽淤积萎缩严重。两时期相比,小浪底水库拦沙期黄河下游河槽深泓点高程降低幅度大,高村以下深泓点沿程起伏变化明显;三门峡水库拦沙期高村以上河槽深泓点降低明显,高村以下降低不明显。从深泓点随时间变化看,小浪底水库拦沙期,多数断面深泓点最低值出现在2014年,且孙口以上河段多数断面深泓点高程低于1964年,2014—2022年深泓点高程变化较小,只有局部断面发生调整,深泓点随时间的变化与河槽冲刷量随时间变化趋势(图1(a))基本一致。

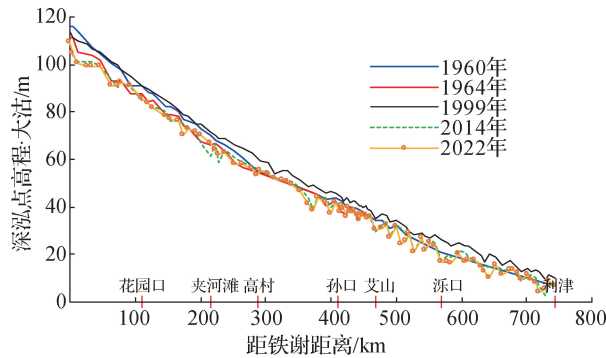


图2 水库拦沙期黄河下游河槽深泓点时空变化

Fig. 2 Spatial-temporal variation of deep point in the Lower Yellow River during the period of reservoir sediment retention

## 3 洪水单位水量冲刷效率及影响因素分析

### 3.1 单位水量冲刷效率

根据下游洪水过程考虑到洪峰和沙峰相位、区间水量平衡等因素划分场次洪水,并统计相应洪水的水沙及河道冲淤特征值。这里定义洪水单位水量冲刷效率为场次洪水利津以上河道冲淤量与花园口水量之比。图3为洪水期单位水量冲刷效率与流量的关系。

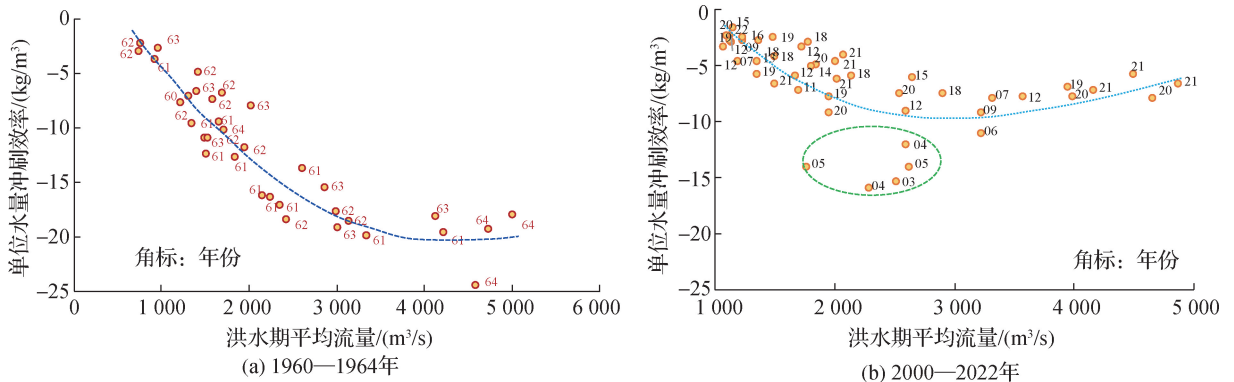


图3 洪水单位水量冲刷效率与流量的关系

Fig. 3 Relationship between erosion efficiency and the average flood discharge

从图3单位水量冲刷效率随流量变化过程看,两时期变化趋势基本一致,即随流量的增大(大于4 000 m<sup>3</sup>/s)单位水量冲刷效率增幅趋于平稳,图3(b)由于2021年汛期6—9月河槽冲刷,使得10月份大流量冲刷效率小,导致有轻微的“翘尾巴”现象。两时期冲刷效率相比,三门峡水库拦沙期冲刷效率大于小浪底水库拦沙期;小浪底水库拦沙初期(2006年以前)冲刷效率较大,此后随着时间的推移冲刷效率降低,流量大于4 000 m<sup>3</sup>/s时冲刷效率仅有7 kg/m<sup>3</sup>左右。

### 3.2 单位水量冲刷效率影响因素分析

河道冲淤调整与河道边界条件及水沙条件有关,河道边界条件包括河道整治工程、河槽宽度、断面几何形态、河床质组成等,水沙条件则是泥沙输移的驱动力。

(1) 水动力条件。三门峡水库拦沙期水量较丰,除1962年外其余年份水量均超过510亿m<sup>3</sup>,1961—1964年汛期、非汛期平均流量分别为3 010和1 140 m<sup>3</sup>/s,日均流量大于5 000 m<sup>3</sup>/s的天数为45 d,最大日均流量为7 330 m<sup>3</sup>/s。小浪底水库拦沙期,2000—2017年来水较枯,年均水量为252.4亿m<sup>3</sup>,汛期、非汛期平均流量分别为965和669 m<sup>3</sup>/s;2018—2021年来水较丰,年均水量为469.9亿m<sup>3</sup>,汛期、非汛期平均流量分别为2 200和971 m<sup>3</sup>/s,2000—2022年日均流量大于5 000 m<sup>3</sup>/s的天数为3 d,最大日均流量为5 130 m<sup>3</sup>/s。可见,三门峡水库拦沙期,水量丰、流量大、历时长为河槽冲刷提供了较强的动力。

(2) 河槽宽度及横断面变化。河槽横断面调整与水沙条件和河槽约束边界有关。图4给出了水库拦沙前后典型断面变化,从断面调整看,高村以上河段横断面河槽侵蚀,滩岸蚀退,冲深与展宽并举,如图4(a);高村以下河段横断面以下切冲深为主,河槽展宽幅度相对较小,如图4(b)。根据利津以上92个测验断面(考虑资料的一致性,小浪底水库运用后加测断面未选)进行断面套绘,分割河槽提取相应河槽宽度,距离加权求得相应时段各河段河槽宽度,如表2。由表2知,三门峡水库拦沙期,7—10月年均水量为320.2亿m<sup>3</sup>,相应平均流量为3 010 m<sup>3</sup>/s,该时期黄河下游河道整治工程很不完善且拦沙期水量丰、流量大,高村以上河槽宽度明显增加,1964年汛后高村以上河槽宽度为3 425~3 615 m,比1960年汛后增加了900~1 250 m。小浪底水库拦沙期,6—10月年均水量为158.2亿m<sup>3</sup>,相应平均流量为1 190 m<sup>3</sup>/s,该时期黄河下游河道整治工程逐步完善,同时为改善河槽萎缩现象及避免洪水漫滩带来的灾害,水库对天然水沙过程进行科学调控,高村以上河槽伴随下切的同时也有展宽,但展宽幅度明显小于三门峡水库拦沙期,河槽宽度2022年汛后与1999年汛后相比增加200~280 m,孙口以下河槽主要以冲深下切为主,如孙口断面河槽宽度基本维持在540 m,2022年与1999年相比河槽明显刷深,平均冲深约3.5 m,见图4(b)。

相比之下,三门峡水库拦沙期断面调整更为剧烈,高村以上初始河槽宽度大且拦沙前后河槽展宽多,为河槽沿程冲刷提供了有效的沙源补充,增大了河槽冲刷效率。

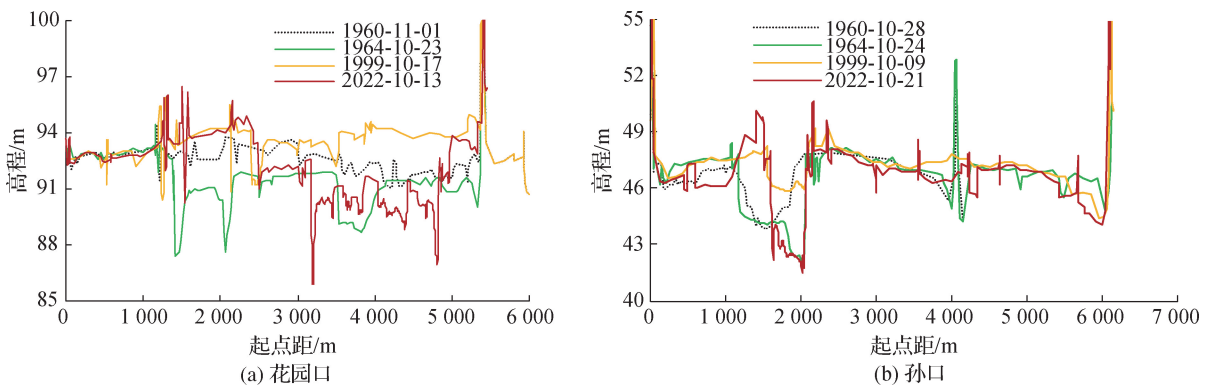


图4 黄河下游典型横断面变化

Fig. 4 Variations of typical cross sections in the Lower Yellow River

表2 黄河下游不同河段河槽宽度变化

Table 2 Variation of channel width in different reach of the Lower Yellow River

单位:m

河段	三门峡水库拦沙期			小浪底水库拦沙期		
	1960年汛后宽度	1964年汛后宽度	宽度增加	1999年汛后宽度	2022年汛后宽度	宽度增加
花园口以上	2 270	3 425	1 155	1 320	1 600	280
花园口—夹河滩	2 545	3 435	900	1 623	1 823	200
夹河滩—高村	2 365	3 615	1 250	800	1 075	275
高村—孙口	1 596	1 816	220	683	703	20
孙口—艾山	829	879	50	582	607	25
艾山—涑口	577	577	0	506	516	10
涑口—利津	626	626	0	457	472	15

(3) 水文站床沙中值粒径变化。水库拦沙期黄河下游床沙粗化, 床沙中值粒径( $D_{50}$ )上段粗下段细, 高村以上河段床沙粗化幅度大, 高村以下河段粗化幅度小, 如图5所示。

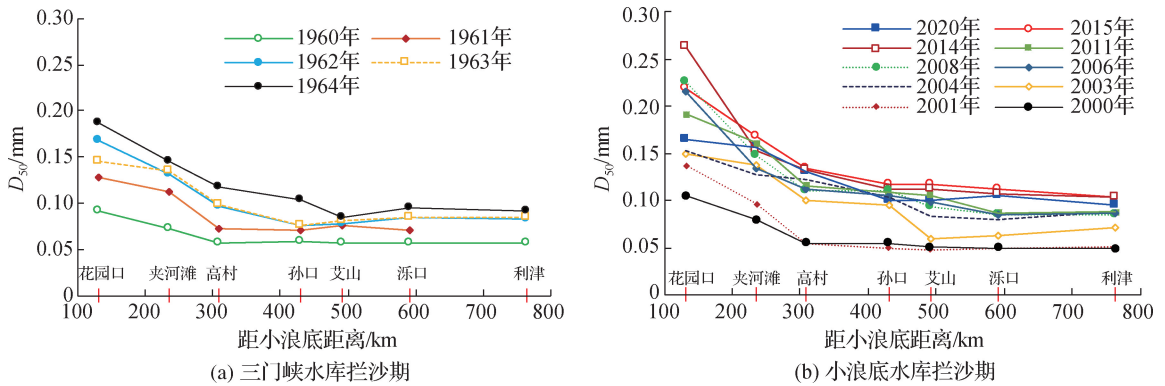


图5 黄河下游水文站床沙中值粒径时空变化

Fig. 5 Spatio-temporal variation of  $D_{50}$  for bed material in the Lower Yellow River

小浪底水库拦沙期床沙比三门峡拦沙期粗, 如花园口站、高村站 2014 年床沙中值粒径分别为 0.262 和 0.135 mm, 1964 年相应床沙中值粒径分别为 0.187 和 0.118 mm。从床沙中值粒径随时间变化看, 小浪底水库拦沙期床沙中值粒径随时间变化先增大后减小(花园口站减小幅度较大其余站减小幅度很小), 至 2014 年、2015 年各站中值粒径基本达最大值, 为冲刷前 2000 年中值粒径的 2.1~2.5 倍。2018—2020 年小浪底水库排沙, 年均排沙量为 4.4 亿 t, 高村以上局部河段河槽淤积后床沙细化, 花园口以上河段床沙细化最大。2020 年黄河下游各站床沙中值粒径为 2000 年的 1.6~2.4 倍。三门峡水库拦沙期床沙中值粒径随时间变化逐渐增大, 1964 年中值粒径为冲刷前 1960 年的 1.5~2.0 倍。小浪底水库拦沙期较三门峡水库拦沙期河床粗化更为明显, 床沙较粗导致河槽冲刷相对更加困难。

(4) 河段床沙组成变化。黄河下游床沙组成横向分布为主槽粗、滩地细。三门峡水库建库前, 主槽中粗泥沙( $D > 0.05$  mm)约占 80%、中泥沙( $0.025$  mm  $< D \leq 0.05$  mm)和细泥沙( $D \leq 0.025$  mm)各占约 10%; 由于漫滩洪水落淤, 滩地中泥沙和细泥沙含量高于主槽, 中泥沙和细泥沙所占比例分别为 21% 和 42%。三门峡水库拦沙期, 黄河下游河道整治工程很不完善, 伴随着河槽冲刷下切的同时展宽明显, 高村以上河槽平均展宽 1 100 m, 至 1964 年汛后河槽宽度约为 3 500 m, 该时期大流量持续时间长, 主流摆动幅度大, 陶城铺以上滩地坍塌严重, 滩地坍塌面积约 326.6 km<sup>2</sup>, 滩地坍塌及河槽摆动展宽为清水或低含沙水流提供了沙源。河槽冲刷效率与床沙粗细含量有关, 水文站床沙中值粒径反映了床沙颗粒大小沿程的变化, 但水文站点少、

间距大, 不能完全代表河段床沙的粗细含量, 小浪底水库拦沙期, 据黄河下游测验断面泥沙取样资料, 按距离加权求得高村以上各河段床沙组成, 各河段床沙组成历年变化如图6。

由图6知, 床沙组成上段粗、下段细。水库下泄清水, 细泥沙和中泥沙是水流能够悬浮长距离输送的主要沙源, 随着时间的推移, 至2008年床沙已明显粗化, 高村以上河段床沙组成细泥沙含量由1999年的19.3%减为7.8%、中泥沙含量由31.9%减为18.4%; 2009—2014年床沙进一步粗化, 但粗化程度弱于2008年以前, 高村以上细泥沙含量从2008年的7.8%减为6.0%、中泥沙含量从2008年的18.4%减为14.5%, 减小幅度不明显; 2015—2018年河床粗化基本趋于弱化, 至2018年汛前高村以上河段床沙组成细泥沙和中泥沙含量分别为3.5%和13.1%。

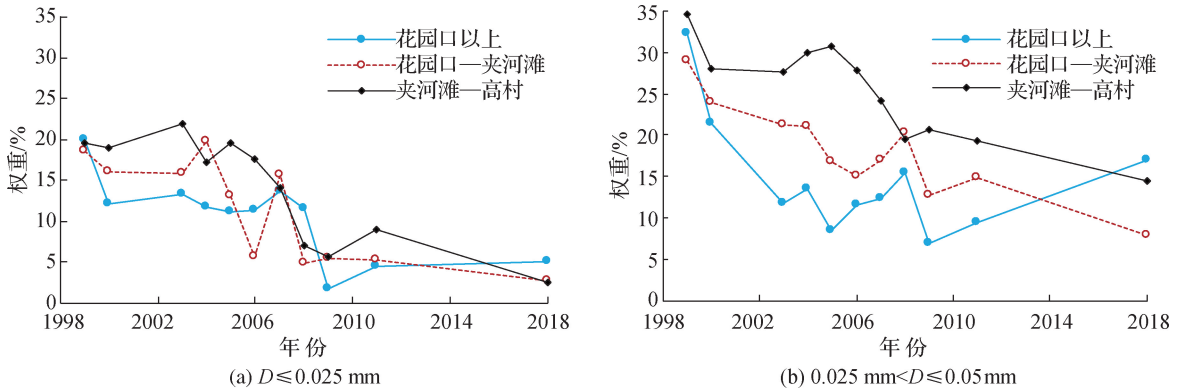


图6 小浪底水库拦沙期黄河下游床沙组成时空变化

Fig. 6 Variation of bed sediment composition in the Lower Yellow River during the storage period of Xiaolangdi Reservoir

水库拦沙期河床持续冲刷, 细泥沙和中泥沙含量补给不足造成河槽冲刷效率衰减。三门峡水库拦沙期, 滩地床沙组成细, 流量大、水动力条件强, 河槽摆动滩地坍塌给水流挟沙提供了沙源。小浪底水库拦沙期, 河势摆动幅度小, 河槽相对稳定, 床沙随时间变化粗化明显, 细泥沙和中泥沙量补给不足。

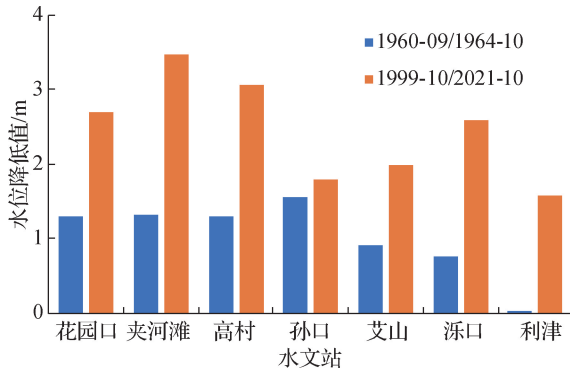
## 4 河槽排洪能力

### 4.1 3 000 m<sup>3</sup>/s 流量水位变化

3 000 m<sup>3</sup>/s 流量水位高低是反映黄河下游河槽排洪能力的重要指标。水位表现相对于河床冲淤演变更为复杂, 不仅与河槽冲淤量、河槽几何形态有关, 还与河床冲淤交替过程中河床的粗化程度有关, 甚至还受河床演变滞后效应的影响。采用黄河下游7个水文站水位资料, 点绘历年3 000 m<sup>3</sup>/s 流量的水位变化如图7。三门峡水库拦沙期, 利津水文站3 000 m<sup>3</sup>/s 水位降低值仅有0.03 m; 小浪底水库拦沙期水位降低值明显比三门峡拦沙期大, 利津水文站3 000 m<sup>3</sup>/s 水位降低1.56 m, 这主要与水库运用前河槽边界有关, 三门峡水库拦沙期, 前期河槽宽且期间河槽横向展宽幅度大; 小浪底水库拦沙期, 前期下游河槽萎缩, 河槽窄浅且受河道工程约束, 河槽刷深明显展宽幅度较小。

### 4.2 同水位过洪能力变化

同水位过流量大小也是反映河道过洪能力的重要指标。水库拦沙期河槽以冲刷为主, 沿程冲刷不均, 一般表现为上段冲刷强度大, 下段冲刷强度小。表3给出了水库拦沙期黄河下游各水文站同水位过洪能力变化, 由于2002年黄河下游最小平滩流量为1 800 m<sup>3</sup>/s, 为反映同水位枯水河槽冲刷前后过洪能力的变化, 选取水库拦沙前1 000 m<sup>3</sup>/s 流量对应的水位作为过洪能力变化比较标准。从表3可知, 水库拦沙前后相比, 高村以上河段两时期过洪能力增加明显, 且增幅也基本相当; 高村以下河段小浪底水库拦沙期过洪能力增加

图 7 黄河下游水文站 3 000 m<sup>3</sup>/s 流量水位变化Fig. 7 Changes in water level of 3 000 m<sup>3</sup>/s flow at hydrological stations in the Lower Yellow River

值大于三门峡水库拦沙期，这主要与两时期拦沙前期下游河床边界有关，小浪底水库拦沙前下游河槽严重萎缩，随着水库拦沙，长时间清水下泄及水库调水调沙，河槽长时间冲刷，上游段河床粗化趋于弱化，使得冲刷重心有向下游发展的趋势，高村以下河道过洪能力也得到明显增加。

表 3 水库拦沙期黄河下游各水文站过洪能力变化

Table 3 Changes of flood discharge capacity at hydrological stations in the Lower Yellow River

水文站	三门峡水库拦沙期				小浪底水库拦沙期			
	水位/m	流量/(m <sup>3</sup> /s)		流量增值/ (m <sup>3</sup> /s)	水位/m	流量/(m <sup>3</sup> /s)		流量增值/ (m <sup>3</sup> /s)
		1960 年	1964 年			1999 年	2021 年	
花园口	92.31	1 000	7 800	6 800	93.08	1 000	8 220	7 220
夹河滩	73.00	1 000	9 000	8 000	76.16	1 000	8 300	7 300
高村	60.70	1 000	7 250	6 250	62.40	1 000	7 100	6 100
孙口	45.06	1 000	3 000	2 000	47.47	1 000	4 320	3 320
艾山	37.30	1 000	2 050	1 050	40.00	1 000	3 350	2 350
冻口	26.00	1 000	1 560	560	29.20	1 000	3 500	2 500
利津	10.90	1 000	1 230	230	12.48	1 000	2 910	1 910

注：1994 年后夹河滩水文站上移 10 km。

## 5 结 论

基于 1960—1964 年、2000—2022 年三门峡水库和小浪底水库蓄水拦沙期观测资料，对比分析了黄河下游河槽冲淤、洪水冲刷效率、河槽几何特征及排洪能力等。主要结论如下：

(1) 三门峡水库拦沙期，黄河下游河床下切和展宽并举，高村以上河槽横向展宽幅度大。小浪底水库拦沙期，河床冲刷主要以下切为主，高村以上深泓点高程降低明显，水库调水调沙大流量下泄使得河床冲刷重心随时间推移有逐渐向下游发展的趋势，高村以上较大的河槽容积可为小浪底水库排沙提供暂时的滞沙，改善沿程水沙不协调关系。

(2) 河槽几何形态及沿程冲刷量决定了河槽排洪能力变化。拦沙期断面冲深与展宽增大了河槽有效过洪面积，高村以上河槽过洪能力增加明显，沿程冲刷不均导致高村以下河槽过流能力增加幅度小。

(3) 下游河槽冲刷效率随流量增大而增大，当流量大于 4 000 m<sup>3</sup>/s 时增幅趋于稳定。河槽冲刷效率随冲刷历时的增加而衰减，小浪底水库拦沙期河槽冲刷效率低于三门峡水库拦沙期。

(4) 水量丰、流量大、历时长为三门峡水库拦沙期河槽冲刷提供了较强的动力;小浪底水库拦沙期,相对完善的河道整治工程在防御洪水的同时也约束了水流的摆动,床沙粗化明显,导致河槽冲刷困难,冲刷效率降低。

#### 参考文献:

- [1] 张为,吴美琴,李思璇,等. 三峡水库蓄水后城陵矶至九江段河道冲淤调整机理[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 162-171. (ZHANG W, WU M Q, LI S X, et al. Mechanism of adjustment of scouring and silting of Chenglingji—Jiujiang reach in the middle reaches of the Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Dam[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(2): 162-171. (in Chinese))
- [2] MA H B, NITTROUER J A, FU X D, et al. Amplification of downstream flood stage due to damming of fine-grained rivers[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 3054.
- [3] LYU Y W, ZHENG S, TAN G M, et al. Morphodynamic adjustments in the Yichang—Chenglingji reach of the Middle Yangtze River since the operation of the Three Gorges Project[J]. Catena, 2019, 172: 274-284.
- [4] 申冠卿,王平,张原锋. 黄河下游河道泥沙不均衡调整及其对水沙条件的响应[J]. 泥沙研究, 2023, 48(6): 30-37. (SHEN G Q, WANG P, ZHANG Y F. Imbalance adjustment of sediment in the Lower Yellow River and its response to water and sediment conditions[J]. Journal of Sediment Research, 2023, 48(6): 30-37. (in Chinese))
- [5] LI J, XIA J Q, JI Q F. Rapid and long-distance channel incision in the Lower Yellow River owing to upstream damming[J]. Catena, 2021, 196: 104943.
- [6] 夏军强,李洁,张诗媛. 小浪底水库运用后黄河下游河床调整规律[J]. 人民黄河, 2016, 38(10): 49-55. (XIA J Q, LI J, ZHANG S Y. Channel adjustments in the Lower Yellow River after the operation of Xiaolangdi Reservoir[J]. Yellow River, 2016, 38(10): 49-55. (in Chinese))
- [7] WANG Y J, WU B S, ZHONG D Y. Adjustment in the main-channel geometry of the Lower Yellow River before and after the operation of the Xiaolangdi Reservoir from 1986 to 2015[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(3): 468-487.
- [8] WANG Y J, WU B S, ZHONG D Y. Simulating cross-sectional geometry of the main channel in response to changes in water and sediment in Lower Yellow River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(12): 2033-2052.
- [9] 王彦君,吴保生,钟德钰. 黄河下游主槽断面形态对水沙变化响应过程的模拟[J]. 地理学报, 2020, 75(7): 1494-1511. (WANG Y J, WU B S, ZHONG D Y. Simulation of the main-channel cross-section geometry of the Lower Yellow River in response to water and sediment changes[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(7): 1494-1511. (in Chinese))
- [10] 程亦菲,夏军强,周美蓉,等. 黄河下游游荡段排沙比对水沙条件与断面形态的响应[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 127-138. (CHENG Y F, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Response of sediment delivery ratio to the incoming flow-sediment regime and channel geometry in the braided reach of the Lower Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(1): 127-138. (in Chinese))
- [11] WANG J J, SHI B, YUAN Q Y, et al. Hydro-geomorphological regime of the Lower Yellow River and delta in response to the water-sediment regulation scheme: process, mechanism and implication[J]. Catena, 2022, 219: 106646.
- [12] BI N S, SUN Z Q, WANG H J, et al. Response of channel scouring and deposition to the regulation of large reservoirs: a case study of the lower reaches of the Yellow River (Huanghe)[J]. Journal of Hydrology, 2019, 568: 972-984.
- [13] 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. (in Chinese))
- [14] 张原锋,王平,申冠卿,等. 小浪底水库运用对黄河下游河道水流阻力的影响[J]. 水科学进展, 2023, 34(6): 858-866. (ZHANG Y F, WANG P, SHEN G Q, et al. Impact of Xiaolangdi Reservoir operations on flow resistance in the Lower Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(6): 858-866. (in Chinese))
- [15] ZHANG Y F, WANG P, SHEN G Q. Characterizing and identifying bedforms in the wandering reach of the Lower Yellow River[J]. International Journal of Sediment Research, 2022, 37(1): 110-121.
- [16] 申冠卿,张原锋,张敏. 小浪底水库运用后黄河下游河道洪水与泥沙输移特性[J]. 泥沙研究, 2020, 45(6): 59-66.

- (SHEN G Q, ZHANG Y F, ZHANG M. Characteristics on floods and sediment transport in the Lower Yellow River since the Xiaolangdi Reservoir impoundment[J]. Journal of Sediment Research, 2020, 45(6): 59-66. (in Chinese))
- [17] 王英珍, 夏军强, 周美蓉, 等. 小浪底水库运用后黄河下游游荡段主槽摆动特点[J]. 水科学进展, 2019, 30(2): 198-209. (WANG Y Z, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Characteristics of main channel migration in the braided reach of the Lower Yellow River after the Xiaolangdi Reservoir operation[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(2): 198-209. (in Chinese))
- [18] 夏军强, 程亦菲, 周美蓉, 等. 黄河下游游荡段河势演变及模拟技术[J]. 中国水利, 2023(20): 20-25. (XIA J Q, CHENG Y F, ZHOU M R, et al. River regime evolution and simulation technique in wandering section of the Lower Yellow River [J]. China Water Resources, 2023(20): 20-25. (in Chinese))
- [19] 林诺菲, 夏军强, 周美蓉, 等. 黄河下游游荡河段典型断面主槽与深泓横向摆动特点[J]. 泥沙研究, 2023, 48(5): 61-69. (LIN N F, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Characteristics of section-scale lateral channel migration in the wandering reach of the Lower Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2023, 48(5): 61-69. (in Chinese))
- [20] 申冠卿, 王平, 张武欣. 黄河下游花园口以上河段滞沙能力分析[J]. 泥沙研究, 2024, 49(2): 48-55, 47. (SHEN G Q, WANG P, ZHANG W X. Analysis on sediment detention capacity in the reach upstream of Huanyuankou of the Lower Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2024, 49(2): 48-55, 47. (in Chinese))

## Impact of sediment retention by reservoirs on the fluvial process in the Lower Yellow River\*

SHEN Guanqing, ZHANG Yuanfeng, WANG Ping, ZHANG Guangming

(Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, china)

**Abstract:** To comprehensively assess the impact of sediment retention by reservoirs on downstream fluvial processes and flood control, this study analyzed sediment and cross-sectional data collected during the sediment retention periods at the Sanmenxia (SMX) and Xiaolangdi (XLD) reservoirs. The research explored patterns of channel aggradation and degradation, flood scouring efficiency, channel geometric characteristics, and flood discharge capacity in the Lower Yellow River (LYR). The results revealed uneven scouring throughout the LYR, with notable riverbed coarsening—the median grain size of the bed sediment increased by 2.1 to 2.5 times that before scouring. Above Gaocun, enhanced flood discharge capacity at equivalent water levels was observed, and the larger channel storage can temporarily detain sediment from the XLD Reservoir. However, following riverbed coarsening, the depletion of fine and medium silt led to a significant decline in channel scouring efficiency over time. The long-term sediment and water management by the reservoirs, coupled with advanced river engineering in the LYR, shifted the focal area of channel scouring downstream during the XLD Reservoir's sediment retention period compared to that during the SMX period. This shift was accompanied by an increase in riverbed coarsening and a marked decrease in scouring efficiency. These findings provide a scientific foundation for defining technical parameters for reservoir sediment and water regulation.

**Key words:** fluvial process; riverbed coarsening; scouring efficiency; sediment regulation; sediment retention period of reservoirs; Lower Yellow River

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2243218).