

黄河调水调沙试验对泥沙粒径变化影响分析

刘俊峰, 和瑞莉, 姚宝萍

(黄河水利委员会水文局, 河南 郑州 450004)

摘要: 2002~2004年, 黄河水利委员会相继开展了3次基于不同调度方式和不同空间尺度的调水调沙试验。本文中通过对试验期间小浪底水库及黄河下游河道悬移质、床沙质泥沙颗粒级配在时间和空间上的变化分析, 说明小浪底水库淤排粗排细有利于调整库区泥沙淤积形态和出库细颗粒泥沙向大海输移; 下游河道中悬移质泥沙平均中数粒径沿程变粗, 试验达到了全面冲刷河槽的目的。

关键词: 泥沙; 中数粒径; 调水调沙试验; 黄河

中图分类号: TV141*.1

文献标识码: A

文章编号: 1008-5548(2005)02-0040-04

Analysis on Impact of Yellow River Water and Sediment Regulating Experiment on Change of Grain Size

LIU Jun-feng, HE Rui-li, YAO Bao-ping

(Hydrology Bureau of Yellow River Conservancy Commission,
Zhengzhou 450004, China)

Abstract: During 2002~2004, the Yellow River Conservancy Commission carried out 3 times of water and sediment regulations based on different regulation mode and different spatial scale. Through analysing the time and spatial change of grain size of suspended sediment and bed sediment in the Xiaolangdi reservoir and the lower Yellow River channel during the experiments, the paper shows that discharging fine sediment and keeping coarse sediment silted in Xiaolangdi reservoir benefits regulating siltation in reservoir area and the transportation of fine sediment discharged out of the reservoir to the Bohai sea and the average of medium particle diameter of suspended sediment in the lower Yellow River is coarser and coarser along the channel. The experiment has achieved the goal of all-around scouring of the river channel.

Key words: sediment; medium particle diameter; water and sediment regulation experiment; the Yellow River

1 概述

1.1 调水调沙试验

调水调沙试验就是利用水库调水调沙, 将自然

或人造洪水中不协调的水沙关系调节为相协调的水沙关系, 一方面, 可以调整和改善水库河道泥沙淤积形态, 有利于输沙入海, 减缓水库河道淤积或冲刷下游河道; 另一方面, 通过试验, 寻求最优调度方案, 为大规模开展调水调沙生产实践提供技术支撑。

在2002年7月开展的黄河首次调水调沙试验中, 小浪底水库出库泥沙平均中数粒径0.006 mm, 粗颗粒泥沙($d > 0.05$ mm)占总输沙量的3.3%, 水沙演进至利津站, 泥沙平均中数粒径增大到0.027 mm, 粗颗粒泥沙占总输沙量的比例增至21.0%, 下游河道明显冲刷。其后开展的两次调水调沙试验也都实现了预期目标, 并于2004年8月成功进行了正式的调水调沙生产实践。

1.2 水库河道试验前期泥沙边界条件

1999年10月到2003年11月, 小浪底库区共淤积泥沙14.15亿 m^3 , 其中干流淤积12.96亿 m^3 , 占总淤积量的92%, 距坝50 km以下最低河底高程呈逐年抬高的趋势。库区淤积物粒径沿库长变化的基本规律为: 距坝越近, 断面平均中数粒径越小; 黄河10断面至坝前在0.006~0.008 mm之间, 黄河44断面以上大于0.030 mm, 回水末端附近的黄河52断面为0.080 mm, 黄河54断面为0.136 mm。

20世纪90年代以来, 持续枯水造成了黄河下游河道主河槽严重萎缩, 局部河段平滩流量从80年代的6 000 m^3/s 以上降低至3 000 m^3/s 左右, 个别卡口断面主槽过洪能力已不足1 800 m^3/s 。分析淤积物组成, 粒径大于0.05 mm的粗沙占全部淤积量的81%, 是下游河道淤积的主体。主河道淤积物粒径沿河长的分布情况是: 距河口越近, 粒径越细, 而在断面上沿垂向的分布则基本均匀。

收稿日期: 2004-11-12

第一作者简介: 刘俊峰(1970-), 女, 助理工程师。

2 悬移质泥沙粒径沿程变化分析

2.1 小浪底库区泥沙粒径沿程变化分析

泥沙在库区的运动主要是靠异重流的带动。异重流在向坝前稳定运行过程中,其垂线(断面主流线)平均含沙量、泥沙颗粒级配中的平均中数粒径,以及0.025 mm以下粒径所占体积分数等泥沙要素都基本保持稳定。需要指出的是,如果在异重流形成之后,因后续动能明显不足致使异重流不能顺利运行至坝前,或者在异重流发生期间,水库排沙孔洞处于关闭状态,均可导致异重流在库区的不同部位发生落淤现象,此时的异重流输沙特性将随之发生改变。2002年异重流发生期间,三门峡水库下泄泥沙平均中数粒径为0.033 mm,0.025 mm以下粒径体积分数为33.6%,小浪底水库相应的下泄泥沙平均中数粒径为0.006 mm,0.025 mm以下粒径体积分数为87.8%。表1是2002年异重流期间库区沿程各断面泥沙有关要素统计,自异重流潜入点至坝前断面,垂线平均泥沙中数粒径的上限明显减小,而0.025 mm以下粒径体积分数的下限则相应增加。

表1 小浪底水库2002年异重流实测泥沙要素统计

断面号	平均含沙量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	垂线平均 d_{50} / mm	0.025 mm以下粒 径体积分数 / %
37	18.0 ~ 197	0.005 ~ 0.021	63.1 ~ 91.7
29	18.8 ~ 90.6	0.005 ~ 0.016	70.8 ~ 92.2
21	35.9 ~ 84.7	0.006 ~ 0.015	73.5 ~ 87.6
17	34.5 ~ 143	0.007 ~ 0.012	76.9 ~ 88.5
09	44.3 ~ 131	0.006 ~ 0.010	82.4 ~ 91.2
05	35.5 ~ 96.1	0.006 ~ 0.008	85.6 ~ 91.5
01(坝前)	30.6 ~ 84.2	0.006 ~ 0.008	84.4 ~ 91.3

2.2 下游河道悬移质泥沙粒径沿程变化分析

2002年首次调水调沙试验期间,下游河道泥沙时段平均中数粒径从小浪底站的0.006 mm增大到利津站的0.027 mm,泥沙中粒径大于0.050 mm的粗沙占总输沙量的比例则由3.3%增大到21.0%,其中艾山水文站粗沙比例最高,为26.5%。泥沙沿程粗化现象明显。

第二次调水调沙试验期间,小浪底出库泥沙中粒径小于0.016 mm的部分体积分数约为82%,利津

站粒径小于0.016 mm的泥沙体积分数约为51%(2004年异重流排沙期情况与此类似)。整个试验过程,小浪底出库泥沙0.74亿t,利津站入海泥沙1.2亿t,据此估算,粒径小于0.016 mm的泥沙沿程几乎没有发生沉积。

2004年第三次调水调沙试验期间冲刷最严重的河段为小浪底—花园口区间和冻口—利津区间,但其泥沙粒径变化却各不相同。小浪底水库清水下泄时,河道沿程冲刷,但在孙口断面以下,粗细颗粒泥沙基本达到一种平衡状态,泥沙粗化现象已不明显。有异重流出库时,河道依然是沿程冲刷,但泥沙粗化现象较清水下泄时持续得更远,这是细沙在里面进行比例调整的表现。另外,在水量相同时,小浪底清水下泄和异重流排沙出库在利津断面产生的输沙量也基本相同,说明出库细沙大多能够顺利入海。

3 悬移质泥沙粒径在代表断面上的变化分析

3.1 中数粒径变化

图1给出了花园口和利津两水文站第二次调水调沙试验期间逐日平均泥沙中数粒径变化过程,利津站泥沙颗粒明显粗化。事实上,小浪底水文站受小浪底水库“淤粗排细”运用方式的影响,泥沙中数粒径在0.006~0.007 mm之间变化,泥沙颗粒较细且均匀。花园口水文站泥沙中数粒径在0.006~0.010 mm之间变化,泥沙粒径变化范围稍大且略有变粗。艾山水文站泥沙中数粒径在0.009~0.042 mm之间变化,粒径变化范围很宽,这与该站断面窄深、冲淤变化敏感有关。利津站泥沙中数粒径在0.009~0.025 mm之间变化,粒径变幅也较大,是艾山站输送泥沙的结果。

图2给出了花园口、艾山和丁字路口水文站2004年调水调沙试验期间的泥沙中数粒径变化过程,花园口泥沙粒径比艾山稍微偏粗,这是因为小浪底水库库大部分时间清水下泄,通过花园口和艾山两水文站断面的泥沙主要由区间河道河床质冲刷而来。7月8日小浪底始有异重流排沙出库,图中明

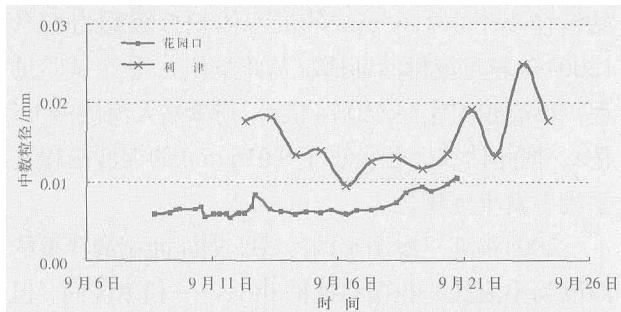


图1 2003年花园口、利津两站日平均中数粒径过程线

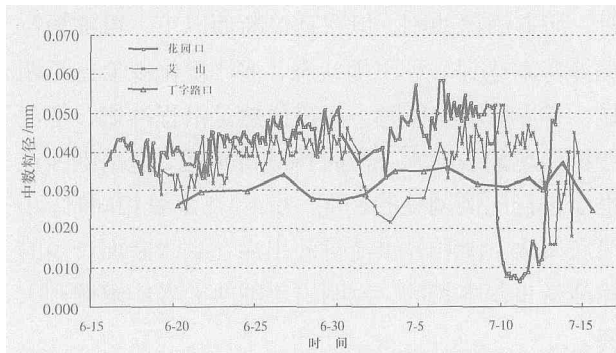


图2 2004年花园口、艾山、丁字路口三站中数粒径过程线

显看出,该部分泥沙到达花园口和艾山断面的时间分别为7月10日和7月13日,而艾山断面7月2日和3日的谷底正是2004年调水调沙试验两个阶段间隙流量减小的时段,也是流量与水流挟沙能力成正比关系的反映。丁字路口站泥沙中数粒径一直处于一个相对稳定且较上游站略细的粒径级,这是因为该站为近黄河口设置的最远端的测验断面,其上游区间冲刷起的泥沙已经分选,基本上处于相对饱和的稳定输移状态。

3.2 颗粒级配组成变化

2002年调水调沙试验期间,小浪底到河口悬沙粒径是逐渐粗化的。小浪底水文站输沙总量中,粗颗粒泥沙只占3.3%,到丁字路口水文站,粗泥沙占了总输沙量的23.8%,在其他各站中,艾山的比例最大,为26.5%。究其原因,试验期间孙口—艾山河段出现持续冲刷,且冲刷强度较其他河段剧烈,使悬移质颗粒发生粗化。泥沙粒径的变化与河床冲淤是相对应的:河床冲刷则泥沙颗粒粗化,河床淤积则泥沙颗粒细化。这也证实了试验使下游河道发生了全面冲刷。

在2003年调水调沙试验期间,在粒径小于0.004 mm这部分极细沙中,小浪底、花园口两站体积分

数各占35%~40%左右,艾山、利津两站各占20%~25%;在粒径大于0.062 mm这部分粗沙中,小浪底站体积分数约占2%,花园口站约占5%,艾山、利津站各占15%左右。小浪底、花园口两站细沙所占的比例较大,说明水流挟带的泥沙较细。艾山、利津两站恰好相反,水流挟带的泥沙较粗。表2给出了各站粒径小于0.004 mm的极细沙和粒径大于0.062 mm的粗沙在全沙中所占比例的分布情况。

表2 各断面粗细粒径体积分数沿程变化表 %

断面名称	< 0.004 mm	> 0.062 mm
小浪底	37.1	1.5
花园口	35.2	6
夹河滩	32.1	8.1
高村	29.2	8.7
孙口	29	9
艾山	24.6	15.9
冻口	25.3	12.2
利津	22.4	14.3

2004年调水调沙试验第一阶段,小浪底下泄清水,花园口水文站粒径小于0.004 mm的极细沙和粒径大于0.062 mm粗沙体积分数分别为小于10%和30%~40%,利津水文站则分别为10%左右和15%~20%。异重流出库后,小浪底水文站粒径小于0.004 mm的极细沙和粒径大于0.062 mm粗沙体积分数分别为25%~45%和小于5%,花园口水文站相应泥沙粒径体积分数分别为30%左右和10%~20%,利津水文站各占20%。

4 河床质泥沙粒径变化分析

表3是2002年调水调沙试验前后高村—冻口河段部分断面河床质泥沙中数粒径的具体情况。试验前各断面河床质泥沙中数粒径差别不大,试验后各断面河床质泥沙中数粒径均有所粗化,其中高村和十里堡断面粒径粗化较多,彭楼断面粒径粗化较轻。

表3 2002年高村—冻口河段部分断面床沙中数粒径一览表 mm

断面名称	高村	彭楼	杨集	孙口	十里堡	位山	王坡	艾山	朱圈	水牛赵
试验前	0.060	0.055	0.061	0.064	0.050	0.056	0.058	0.051	0.051	0.051
试验后	0.110	0.063	0.079	0.088	0.090	0.068	0.079	0.068	0.066	0.070

表4给出了花园口及以下7个水文站2003年调水调沙试验前后河床质泥沙中数粒径的具体情况。除夹河滩水文站中数粒径减小外,其他水文站中数粒径都有不同程度的增大,其中花园口、艾山两站增大最多,均增大了0.022 mm,冻口站增大最少,增大了0.005 mm。由于本次调水调沙试验开始之前,花园口水文站即有较大流量过程维持,对下游河道的较细颗粒泥沙起到了一定的清刷作用,由此造成整个试验期间河床质普遍较粗,且变化幅度不大。

表4 2003年各水文站断面床沙中数粒径一览表 mm

断面名称	花园口	夹河滩	高村	孙口	艾山	冻口	利津
试验前期	0.144	0.138	0.096	0.093	0.045	0.062	0.071
试验后期	0.166	0.124	0.102	0.108	0.067	0.067	0.079

图3为2004年调水调沙试验前后下游河道河床质中数粒径沿程变化过程对照图。图中显示,全下游河道河床质整体粗化,河南段粗化程度甚于山东段。其中,河南段以伊洛河口至东坝头区间河床质粗化现象严重,在秦厂断面附近河床质粒径变粗约0.100 mm,这与河道冲刷,粗颗粒泥沙自上而下输移的实际情况相符合。

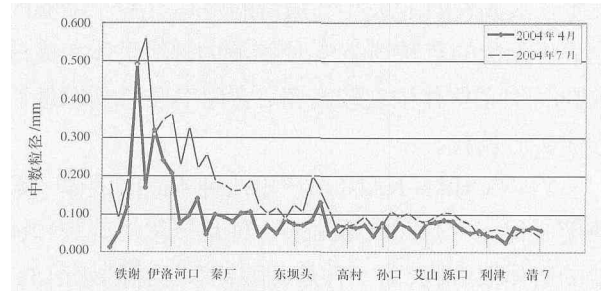


图3 2004年调水调沙试验前后下游河道河床质变化对照图

5 几点认识

- (1)小浪底水库淤粗排细的运用方式,有利于充分利用异重流调整库区泥沙淤积形态,有利于出库细颗粒泥沙向大海输移。
- (2)调水调沙试验过程中,下游河道中悬移质泥沙平均中数粒径沿程变粗,各断面悬移质泥沙中粗沙所占比例增加,细沙中的极细沙所占比例减少,

- 总体呈粗化趋势,调水调沙试验达到了冲刷下游河道的目的。
- (3)在试验过程中,花园口水文站以下各断面日平均悬移质泥沙中数粒径有较大的起伏变化,主要与来水来沙及河床边界等条件有关。
- (4)在试验过程中,花园口水文站以下各断面河床质泥沙中数粒径表现出粗化趋势,这是粗颗粒泥沙向下游沿程输移和沉降的结果。
- (5)人工扰动泥沙对于调整和改善河道形态效果明显,但由于被扰动起的泥沙极不稳定,其输移运动规律比较复杂,扰沙河段对其下游悬沙及床沙颗粒级配的影响需要继续研究。

参考文献:

[1] 水利部黄河水利委员会.黄河首次调水调沙试验[M].郑州:黄河水利出版社,2003.
[2] 李国英.治理黄河思辨与践行[M].北京:中国水利水电出版社;郑州:黄河水利出版社,2003.

(上接第36页)

符号说明:

- d —液滴平均粒径; v_g —空气流速 m^3/s ;
- d_i —第*i*个标准筛所对应的尺寸值,mm;
- X_i —粒径为 d_i 的粒子占所取样品总质量的百分数, %;
- d_p —颗粒的粒径,mm; σ —液体表面张力 dyn/cm^2 ;
- v —液体喷出速度 m/s ; ρ_l —液体密度 g/cm^3 ;
- v_{mf} —初始流化速度, m/s ; μ —液体的粘度, P ;
- V_l —液体流速 m^3/s .

参考文献:

[1] 潘永康.现代干燥技术[M].北京:化学工业出版社,1998.
[2] 齐涛.流化床喷雾造粒的研究[D].博士学位论文,大连理工大学,1995.
[3] 刘广文.论染料喷雾造粒技术[J].染料工业,1995,(5):93.
[4] 牛萍.多潘立酮片剂造粒后颗粒特性对压片质量影响因素研究[D].硕士学位论文,天津大学,2002.
[5] 奚念朱.药剂学[M].第三版.北京:人民卫生出版社,1980.
[6] Byung H Song, Geun S Lee, Sang D Kim. Particle growth characteristics indryingof orthophosphatesolutiminafluidized bed [J]. J of Chem Eng of Japan, 1990,23(2):148-155.
[7] Scott MW, Lieberman H A. Continuous production of tablet granulations in a fluidized bed: I theory and design considerations [J]. J Pharm Sci, 1964,451:314-320
[8] 张汝华.工业药剂学[M].北京:中国医药科技出版社,2001.
[9] 艾伦(英).颗粒大小测定[M].北京:中国建材工业出版社,1984.
[10] 董景山.流态化干燥工艺与设备[M].北京:科学出版社,1996.