

基于分组泥沙冲淤规律的小浪底水库减淤调度研究

李小平^{1 2} 李 勇^{1 3} 田 勇¹ 申冠卿¹

(1. 黄河水利科学研究院 河南 郑州 450003 ; 2. 水利部黄河泥沙重点实验室 河南 郑州 450003 ;
3. 西安理工大学水电学院 陕西 西安 710048)

摘要 研究黄河下游河道的中、较粗泥沙冲淤效率与细泥沙含量和全沙含沙量的定量关系 , 据此得到不同细泥沙含量条件下 , 中、较粗泥沙在黄河下游河道不发生淤积的临界含沙量。同时 , 结合黄河干流水库的分组排沙比与全沙排沙比的关系 , 给出小浪底水库不同入库含沙量条件下 , 中、较粗泥沙在下游河道不发生淤积的水库排沙比。

关键词 水库调度 黄河下游河道 泥沙淤积 排沙比 小浪底水库

中图分类号 :TV62+2 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2010)03-0020-04

Sedimentation reduction and dispatching of Xiaolangdi Reservoir based on erosion and deposition laws of grouping sediment / LI Xiao-ping^{1, 2}, LI Yong^{1, 3}, TIAN Yong¹, SHEN Guan-qing¹ (1. Yellow River Institute of Hydraulic Research , Zhengzhou 450003 , China ; 2. Key Laboratory of Yellow River Sediment Research of Ministry of Water Resources , Zhengzhou 450003 , China ; 3. College of Hydraulic Engineering , Xi 'an University of Technology , Xi 'an 710048 , China)

Abstract : Owing to the main deposition of medium and coarse sediment in the lower waterway of Yellow River , a quantitative relationship among the erosion and deposit efficiency of medium and coarse sediment , the concentration of fine sediment and the concentration of entire sediment was obtained . On such a basis , the critical sediment concentration to avoid deposition of the medium and coarse sediment in the lower waterway of Yellow River under different fine sediment concentrations was yielded . Simultaneously , based on the relationship between grouping sediment releasing ratio and entire sediment releasing ratio , the sediment releasing ratio of Xiaolangdi Reservoir to avoid deposition of the medium and coarse sediment in the lower waterway of Yellow River under different inflow sediment concentrations was put forward .

Key words : reservoir dispatching ; lower waterway of Yellow River ; sedimentation ; sediment releasing ratio ; Xiaolangdi Reservoir

小浪底水利枢纽是黄河干流规划的七大骨干工程之一 , 坝址径流量占全河总量的 91.2% , 控制几乎 100% 的黄河泥沙 , 在黄河的治理开发和保证下游地区防洪安全方面起着重要的作用 , 也是控制和协调黄河水沙关系的关键工程。工程规划永久性拦沙库容为 72.50 亿 m³ , 截至 2008 年 10 月 , 小浪底库区累计淤积泥沙达 24.11 亿 m³ , 水库还具有 48.39 亿 m³ 的泥沙拦蓄库容。黄河泥沙淤积灾害突出表现在下游河段 , 已有研究表明^[1] 造成黄河下游河道淤积的主要是粒径大于 0.025 mm 的中、粗颗粒泥沙。由此可见 , 黄河泥沙研究的重要课题是研究分组泥沙特别是中、粗颗粒泥沙在黄河下游河道中的冲淤演变规律 , 以便为充分利用小浪底水库实现拦粗排细、减轻水库和下游河道泥沙淤积灾害提供理论基础。

1 黄河下游泥沙分组和洪水选取

进入黄河下游河道的泥沙按其粒径大小一般分为 3 组 : 细颗粒泥沙 ($d < 0.025\text{ mm}$, 简称细泥沙) 、中颗粒泥沙 ($0.025\text{ mm} < d < 0.05\text{ mm}$, 简称中泥沙) 、粗颗粒泥沙 ($d > 0.05\text{ mm}$, 简称粗泥沙) 。按照研究的需要 , 粗泥沙又可分为较粗颗粒泥沙 ($0.05\text{ mm} < d < 0.1\text{ mm}$, 简称较粗泥沙) 和特粗颗粒泥沙 ($d > 0.1\text{ mm}$, 简称特粗泥沙) , 即可将黄河下游泥沙分为 4 组。由于进入黄河下游的特粗泥沙很少 , 因此本文研究中采用第 2 种泥沙分组方法。

笔者等^[2]在研究中发现 , 黄河下游洪水冲淤效率 (单位水量的冲淤量 , 即冲淤量与来水量的比值) 与洪水平均含沙量 (质量浓度 , 下同) 关系最密切 , 同时受洪水平均流量和来沙组成影响也较大。但是 ,

当洪水的平均流量大于 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 后,洪水冲淤效率受流量的影响很小。本文分析的场次洪水均为平均流量大于 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水。

2 黄河下游河道分组泥沙冲淤规律

黄河下游河道的洪水冲淤效率(负值为冲刷,正值为淤积)与洪水平均含沙量密切相关,具有多来、多排、多淤的特点,即含沙量越大,排沙效率越高,淤积量也越大。图 1 为黄河下游 370 多场洪水冲淤效率与全沙平均含沙量的关系,可以看出,洪水期全沙平均含沙量对洪水过程中河道的冲淤起着决定性的作用。全沙平均含沙量越低,单位水量的冲刷量越大,含沙量越高,单位水量的淤积量越大。

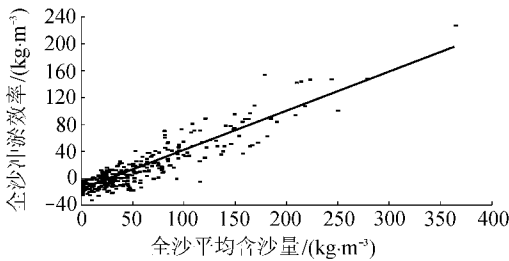
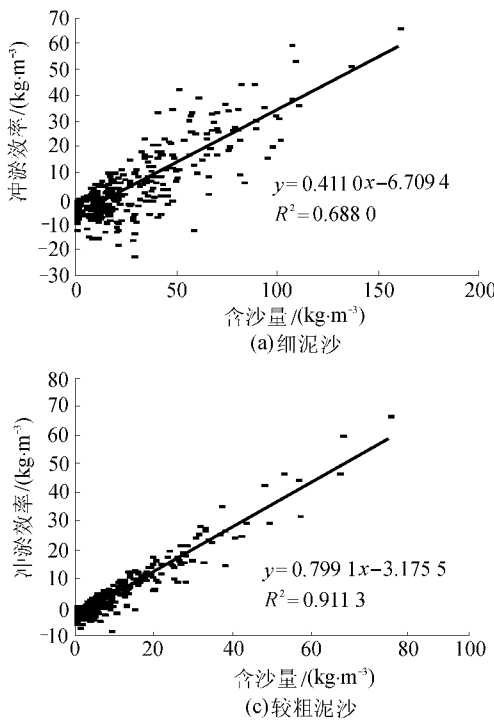


图 1 黄河下游洪水冲淤效率与全沙平均含沙量的关系

分析洪水过程中分组泥沙的冲淤效率与来沙中各粒径组泥沙的含沙量关系(图 2)发现,细泥沙、中泥沙、较粗泥沙和特粗泥沙在下游河道中的冲淤效率与各自含沙量关系均密切,且泥沙粒径越粗,其相关性越好。细、中、较粗和特粗泥沙的冲淤效率与各自含沙量呈线性关系,相关系数分别为 0.688 0,



0.840 3, 0.911 3 和 0.980 8。

根据图 2 可以回归出冲淤效率与各粒径组泥沙平均含沙量的关系为

$$\Delta S = kS - m \tag{1}$$

式中 ΔS 为场次洪水的各粒径组泥沙的冲淤效率; S 为场次洪水来沙中各粒径组泥沙的平均含沙量; k 为系数; m 为常数。不同粒径组泥沙的 k 和 m 值见表 1。

表 1 各粒径组泥沙冲淤效率回归关系式的系数和常数项

粒径组	k	m
$d < 0.025\text{ mm}$	0.441 0	6.709 4
$0.025\text{ mm} < d < 0.05\text{ mm}$	0.696 0	4.928 7
$0.05\text{ mm} < d < 0.1\text{ mm}$	0.779 1	3.175 5
$d > 0.1\text{ mm}$	0.876 2	0.190 8
全 沙	0.580 6	15.550 0

用冲淤效率与平均含沙量的比值表示场次洪水的淤积比 Y_s :

$$Y_s = \frac{\Delta S}{S} \times 100\% = \left(k - \frac{m}{S}\right) \times 100\% \tag{2}$$

由式(2)可知, k 值越大, Y_s 越大; m 值越大,在含沙量变化量相同的条件下, Y_s 变化也越大。由于泥沙粒径越粗, k 值越大, m 值越小,因而粗泥沙的 Y_s 大,且变幅小。利用式(2)计算的淤积比与含沙量关系如图 3 所示。

由此可见,泥沙粒径越小淤积比越低,泥沙粒径越大淤积比越高。当下游发生低含沙洪水时,粒径小的细泥沙容易被冲刷,冲刷量大;粒径粗的中、粗泥沙不易被冲刷,冲刷量很小^[3]。因此,应该通过水库调节拦截粗泥沙,使得进入下游河道的泥沙以细

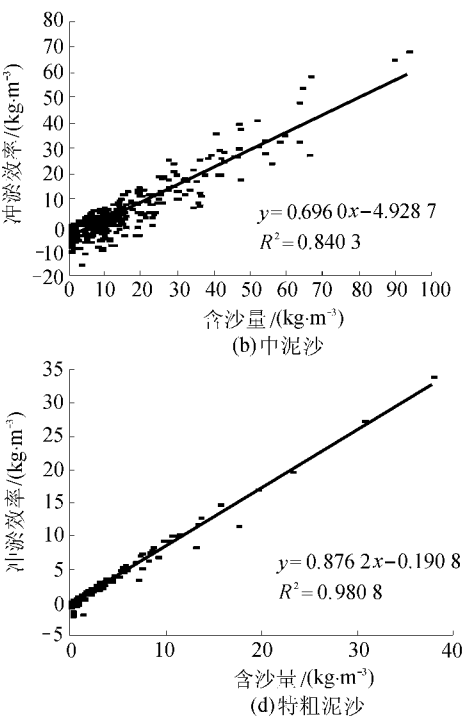


图 2 洪水期分组泥沙冲淤效率与平均含沙量的关系

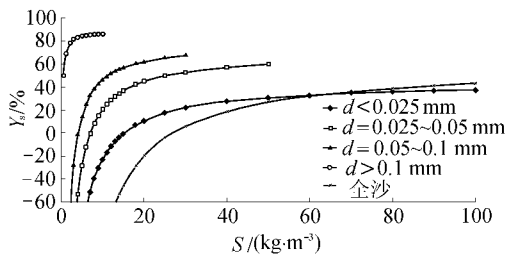


图3 分组泥沙淤积比与分组含沙量的关系
沙为主,减小中、粗泥沙的含沙量,从而有效减少中、粗泥沙在下游河道中的淤积,有效扼制下游河道的淤积萎缩。

3 黄河下游河道中、较粗泥沙淤积与含沙量和细泥沙质量分数的关系

黄河下游洪水期中、较粗泥沙的冲淤效率与洪水全沙平均含沙量、细泥沙质量分数之间的关系密切(图4)。可以看出,对于相同含沙量级的洪水,随着细泥沙质量分数的增大,中泥沙和较粗泥沙的冲淤效率均减小,且减小的幅度随着含沙量级的增大而增大。中泥沙和较粗泥沙的冲淤效率与洪水全沙平均含沙量和细泥沙质量分数的关系为

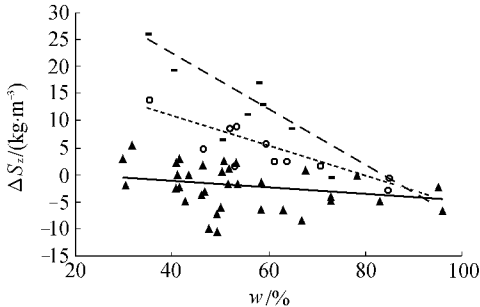
$$\Delta S_z = (-0.46S + 3.45)w + 0.427S_0 - 8.1 \quad (3)$$

$$\Delta S_c = (-0.6S + 5.07)w + 0.5S_0 - 7.7 \quad (4)$$

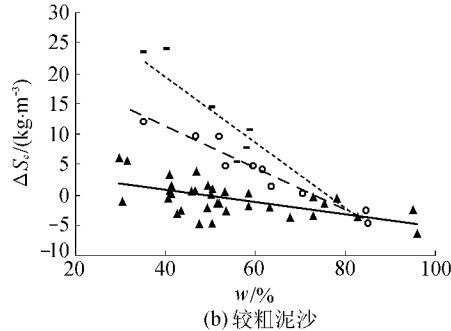
式中: ΔS_z 和 ΔS_c 分别为中泥沙和较粗泥沙的冲淤效率, kg/m^3 ; w 为细泥沙质量分数; S_0 为洪水全沙平均含沙量, m^3/s 。

式(3)和式(4)的计算结果和实测值对比见

▲ $S_0 = 20 \sim 30 \text{ kg}/\text{m}^3$ ○ $S_0 = 50 \sim 60 \text{ kg}/\text{m}^3$ - $S_0 = 100 \sim 120 \text{ kg}/\text{m}^3$



(a) 中泥沙

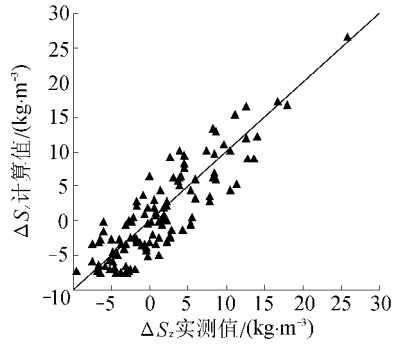


(b) 较粗泥沙

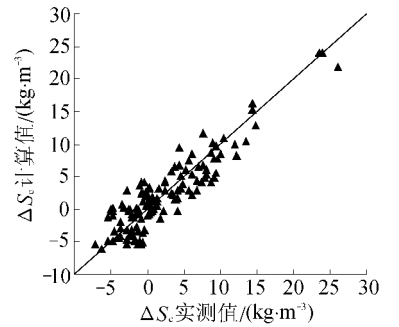
图4 洪水期中、较粗泥沙冲淤效率与全沙平均含沙量和细泥沙质量分数的关系

图5,可见计算值与实测值具有较好的一致性。

依据式(3)和式(4)绘出不同含沙量级洪水的中泥沙和较粗泥沙冲淤效率与全沙平均含沙量和细泥沙质量分数的关系(图6)。若已知进入下游的洪水平均含沙量,就可以依据图6查出中、较粗泥沙不发生淤积的临界细泥沙质量分数。还可以得出,在不同的细泥沙质量分数条件下,中、较粗泥沙在黄河下游河道不发生淤积的临界含沙量。

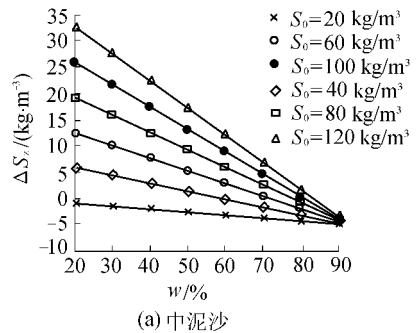


(a) 中泥沙

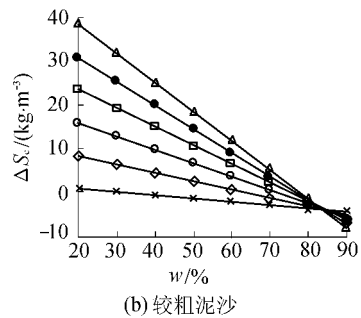


(b) 较粗泥沙

图5 洪水期中、较粗泥沙冲淤效率计算值与实测值比较



(a) 中泥沙



(b) 较粗泥沙

图6 洪水期中、较粗泥沙冲淤效率与全沙平均含沙量和细泥沙质量分数的关系

4 满足下游河道中、较粗泥沙不淤积的小浪底水库排沙比

在 1950~1960 年的天然条件和 1973 年以后三门峡水库“蓄清排浑”条件下进入下游河道的泥沙组成基本一致,细、中、粗泥沙的比例分别为 53% , 27% 和 20%。李国英^[4]根据三门峡水库和盐锅峡水库的实测资料,研究得出水库分组泥沙排沙比与全沙排沙比的关系,整理后如图 7 所示。假定小浪底水库拦沙后期和正常运用期的排沙规律与其相似,由此可以得到水库不同排沙比条件下进入下游河道的泥沙组成(图 8)。从图 7 可以看出,当全沙排沙比为 65% 时,相应的细泥沙、中泥沙和较粗泥沙的排沙比分别为 87.5% 43.8% 和 31.6%。此时,进入下游河道的细、中、较粗泥沙的比例分别为 72% ,18% 和 10%。

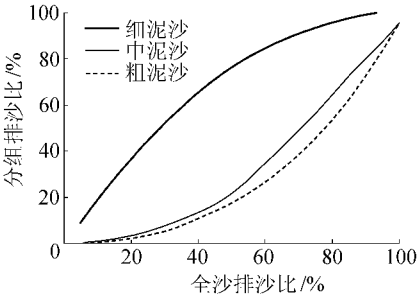


图 7 分组沙排沙比与全沙排沙比的关系

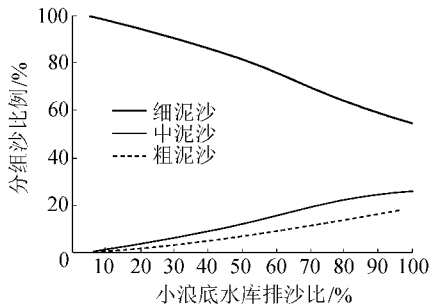


图 8 进入下游的泥沙组成与小浪底水库排沙比的关系

综合式(3)式(4)图 4~8,假定进出库流量相同,通过迭代计算可以求出不同入库含沙量条件下满足中、较粗泥沙在下游河道不发生淤积的小浪底水库排沙比,见表 2。

由表 2 可以得到不同入库含沙量条件下的水库排沙比调控指标。例如,在入库含沙量为 50 kg/m³ 时,满足中、较粗泥沙在下游不淤积的细泥沙质量分数分别为 62.17% 和 64.82%,相应地,小浪底水库排沙比分别为 84.46% 和 79.44%,由此可推求出中、较粗泥沙在下游均不发生淤积的小浪底水库排沙比为 79.44%。

表 2 满足黄河下游河道不发生淤积的小浪底水库排沙比

入库含沙量/ (kg·m ⁻³)	满足中泥沙不淤积			满足较粗泥沙不淤积		
	排沙比/ %	出库细泥沙质量 分数/%	出库含沙量/ (kg·m ⁻³)	排沙比/ %	出库细泥沙质量 分数/%	出库含沙量/ (kg·m ⁻³)
50	84.46	62.17	42.2	79.44	64.82	39.7
100	63.10	73.68	63.1	64.38	72.98	64.4
150	54.32	78.44	81.5	58.73	76.06	88.1
200	49.26	81.13	98.5	55.68	77.71	111.4
250	45.87	82.89	114.7	53.77	78.73	134.4
300	43.41	84.15	130.2	52.44	79.44	157.3

5 结 论

a. 分组泥沙的冲淤效率 ΔS 与分组泥沙的平均含沙量 S 呈线性关系: $\Delta S = kS - m$,且粒径越粗相关性越好。

b. 洪水来沙组成中、细泥沙含量越高,中、较粗、特粗泥沙和全沙的冲淤效率越小,这主要由于:①全沙平均含沙量一定的条件下,细泥沙含量增加,相应中、粗泥沙含量减小,含沙量降低,从而减小了中、粗泥沙的冲淤效率;②细泥沙含量提高,有助于增加水流的黏滞性,更有利于输送中、粗泥沙。

c. 造成黄河下游河道淤积的主要泥沙是粒径大于 0.025 mm 的中、较粗泥沙,小浪底水库“拦粗排细”是减轻水库和下游河道泥沙淤积灾害的重要途径。下游河道中、较粗颗粒泥沙的冲淤效率与全沙平均含沙量 S_0 及细泥沙质量分数 w 的关系分别为 $\Delta S_x = (-0.46S + 3.45)w + 0.427S_0 - 8.1$ 和 $\Delta S_c = (-0.6S + 5.07)w + 0.5S_0 - 7.7$ 。假定小浪底水库进出库流量相同,则进库含沙量越高,维持下游河道中、较粗泥沙不淤积的细泥沙含量越高,水库排沙比越小,据此得出不同入库含沙量条件下,维持中、较粗泥沙在下游河道中不发生淤积的水库排沙比和出库含沙量。

d. 在已知小浪底水库入库含沙量和假定进出库流量相同的条件下,为了实现下游河道中、较粗泥沙不淤积,给出了合适的水库排沙比。

参考文献:

[1] 赵业安,周文浩.黄河下游河道演变基本规律[M].郑州:黄河水利出版社,1998:16.
[2] 李小平,王平,侯素珍,等.黄河下游河道中粗泥沙不淤对小浪底水库排沙及相应级配的要求分析[R].郑州:黄河水利科学研究院,2007.
[3] 李小平,李文学,李勇,等.水库拦沙期黄河下游洪水冲刷效率调整分析[J].水科学进展,2007,18(1):44-51.
[4] 李国英.维持黄河健康生命[M].郑州:黄河水利出版社,2005:275.

(收稿日期 2009-01-09 编辑 骆超)