

利用自排沙廊道排沙降低潼关高程的论证

陈 琛, 程 文, 秦 毅, 曹如轩, 钱善琪

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 简要阐明了方案提出背景, 寻找替代“小浪底蓄清排浑”运用方案, 降低潼关高程解除渭洛河下游洪涝灾害根源。潼关河段低温期上段冲刷河床高程抬升, 高温期上段淤积河床高程下降, 都给下游输送大量泥沙。根据三门峡水库由太安站溯源冲刷向上发展降低潼关高程的实例, 以及东雷抽黄站自排沙廊道降低局部侵蚀基准面产生溯源冲刷使渠道淤积面高程下降的实例, 选择在三门峡水库布设自排沙廊道降低局部侵蚀基准面产生溯源冲刷降低潼关高程方案, 该方案可使粗沙不入小浪底水库, 潼关高程得以下降, 三门峡水库增加库容, 兴利效益得以提高, 三方受益。

关 键 词: 自排沙廊道; 侵蚀基准面; 潼关高程; 溯源冲刷

中图分类号: TV14

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2011)04-0115-06

1 方案提出背景

黄河小浪底水库 1999 年 9 月建成, 采用“初期拦沙和调水调沙”运用。经实施 9 次调水调沙实验, 利用异重流排沙把 7 亿 t 泥沙输入渤海。下游河槽全面冲刷, 河槽过洪能力由 $1\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 提高到 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。但这时的水库几乎拦截了全部来沙中的粗沙, 当水库调沙库容淤满, 转为后期“蓄清排浑和调水调沙”运用, 粗泥沙将下泄, 下游河槽将回淤。这是由下游河道输沙特性决定的^[1]。目前, 水库淤积泥沙已达 30 亿 m^3 , 三角洲已推进至坝前, 水库即将转入“蓄清排浑”运用, 下游河道又面临着回淤^[2]。因此迫切需要找到一种替代小浪底“蓄清排浑”运用的方案, 使得水库减淤与下游不淤兼得。

潼关高程是小北干流的节点, 是渭洛河的局部侵蚀基准面, 它的抬升是潼关以上库区洪涝灾害的根源。三门峡水库修建前, 潼关高程 323.4 m, 建库后最高曾达 328.8 m, 近年维持在 327.7 $\text{m}^{[3]}$ 。但渭河临潼(距潼关 130.5 km)以下大堤临背差仍有 2.0~4.4 m, 主槽平滩流量由原来的 $4\,500\sim5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 减小至目前不足 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。在这种情况下, 一般洪水大堤即偎水, 甚至决堤, 若发生稀遇洪水, 安全堪忧。因此, 降低潼关高程, 使之恢复到天然状态, 是解决渭洛河下游防洪安全的关键, 社会意义重大。但另一方面, 降低潼关高程的方案要既有利于潼关高程的降低, 又不致使冲起的泥沙下泄进入小浪底水库威胁下游安全。

2 潼关站是向下游输送泥沙的“关口”

潼关以上的黄、渭、洛河有各自的来水来沙条件和演变规律。由于地理因素及纬度差异, 每年 10 月至翌年 5 月的低温期及 6~9 月的高温期, 龙门河段和潼关河段的冲淤规律不同。这是因为低温期龙门站水温较潼关站低, 最大温差超过 3°C , 必须考虑热力因素, 低温效应, 冻融效应等对河床演变的影响。

1950—1953 年龙华河状四站—潼关站—陕县站的冲淤量见表 1。可见: (1) 每年 10 月至翌年 5 月的低温期, 龙门河段冲刷, 潼关河段淤积, 但四站至陕县站总体呈冲刷, 陕县站的年均输沙量为 3.152 亿 t。该时段黄

收稿日期: 2011-08-15

作者简介: 陈 琛(1987-), 女, 陕西西安人, 硕士研究生。主要从事环境工程及流体力学方面的研究。

E-mail: qingbeizi@163.com

河流量不大,挟带的粗沙进入黄河下游造成淤积.6至9月高温期,龙门河段淤积,潼关河段冲刷,潼关至陕县河段冲刷,四站至陕县总体呈淤积,这同样对黄河下游不利.因为6至9月黄河流量大,挟带的泥沙却有相当部分淤在龙门河段;(2)潼关至陕县河段年均10至5月冲刷量0.607亿t,三门峡坝址基岩是该河段的侵蚀基准面.所以潼关河段不可能持续性淤积,也不可能持续性冲刷,因此该河段10至5月不会冲刷这么多的泥沙.分析认为泥沙产生量如此大的原因是区间的一条小支流产沙(仅占小部分)和潼关站漏测的推移质输沙量在陕县河段转化为悬移质输沙量(这应占大部分).黄河龙门站和潼关站1980—1990年平均悬沙 d_{50} 分布见表2.可见,两站低温期的 d_{50} 均大于高温期.1958,1959,1981年龙门,潼关站月平均水温变化见表3,反映出低温期两站水温的差异.

潘贤娣^[2]等统计了三门峡水库1975—1996年的26场洪水中潼关、三门峡至利津冲淤情况.潼关日均最大流量大于2000 m³/s的17场,大于4000 m³/s的2场,小于1000 m³/s的1场.洪水期间,潼关至三门峡均为冲刷,排沙比108%~632%,三门峡至利津25场淤积,冲刷仅1场.究其原因,应是低温期由潼关排入水库的泥沙淤在水库里,汛初水库排沙时,出库水流来沙系数 S/Q 增高,降低了下游河道的排沙能力.

表1 1950—1953时段龙华河状*四站—潼关—陕县冲淤量 W_s

Tab.1 Sediment scour-and-fill of Longmen, Huaxian, Hejin, Zhuangtuo and Tongguan-Shanxian during 1950—1953

单位: 10⁸ t

水文站	(10至5月)总 W_s	(10至5月)年均 W_s	(6至9月)总 W_s	(6至9月)年均 W_s	总 W_s	年均 W_s
龙华河状4站	5.017 3	1.672 4	34.046 2	11.348 7	39.063 5	13.021 2
潼 关	7.635 3	2.545 1	27.299 2	9.099 7	34.934 5	11.644 8
陕 县	9.455 9	3.152 0	28.829 9	9.610 0	38.285 8	12.761 9
4站—潼关	-2.621 6	-0.872 7	6.747 0	2.249 0	4.125 4	1.375 1
潼关—陕县	-1.820 6	-0.606 9	-1.530 7	-0.510 3	-3.351 3	-1.117 1

* 龙华河状分别指黄河龙门、渭河华县、汾河河津、洛河状头四个水文站.

表2 黄河龙门站、潼关站1980—1990年月均悬沙 d_{50} 分布

Tab.2 Monthly mean suspended load distribution of Longmen-Tongguan stations during 1980—1990 单位: mm

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
龙门站	0.081	0.073	0.051	0.038	0.037	0.020	0.021	0.024	0.029	0.036	0.042	0.054
潼关站	0.049	0.046	0.042	0.035	0.022	0.016	0.015	0.016	0.021	0.030	0.038	0.045

表3 龙潼两站月平均水温变化值

Tab.3 Monthly mean variations in water temperature of Longmen-Tongguan stations 单位: °C

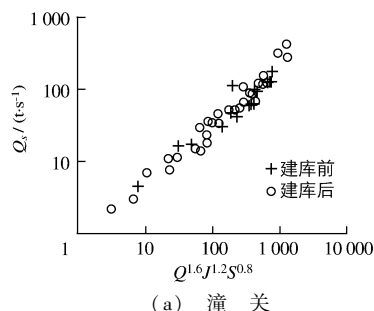
年 份	月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1958 年	龙门水温	0.30		5.20	13.30	18.90	23.50	25.50	23.20	20.60	12.40	4.90	0.50
	潼关水温	0.40	3.40	8.20	14.30	18.30	22.90	25.60	23.50	21.20	14.10	8.40	2.70
1959 年	龙门水温	0.30	1.10	6.40	11.90	18.00	23.00	25.70	24.00	19.30	14.80	4.70	0.70
	潼关水温	0.60	3.80	8.70	14.40	18.10	24.10	26.30	25.30	20.90	16.10	7.60	
1981 年	龙门水温	0.38	0.90	5.61	13.80	16.80	24.20	25.00	23.30	19.30	9.50	2.46	0.42
	潼关水温	0.44	1.92	8.70	14.40	19.60	25.80	26.10	24.10	19.70	11.50	5.04	1.37

3 水库全年敞泄排沙降低潼关高程

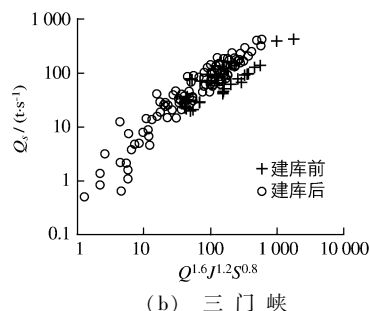
3.1 潼关至三门峡库区输沙特性

建库前三门峡库区各河段水位比降 J 与潼关流量 Q 的关系见图1.由图1可见,上段潼关—彩霞—太安的 J - Q 成正比变化,其值为0.26‰~0.3‰;中段潼关—老灵宝—北村的 J - Q 无明显相关关系,其值在0.3‰左右;下段潼关—陕县—三门峡上—三门峡下的 J - Q 成反比关系,其值为0.34‰~0.38‰.曹如轩^[5]用建库前后

资料点绘两站 $Q_s-Q^{1.6}J^{1.2}S^{0.8}$ 关系(见图2),发现潼关站建库前后点群是混杂的,而三门峡站建库前点群在建库后下方,表明潼关站无富余挟沙力,三门峡站有少许富余挟沙力.对此,还可用三门峡水库蓄清排浑期库区冲淤量来证明.张晓华等^[6]统计了水库1973年11月至2006年10月全库区淤积量11.16亿 m^3 (见表4),潼关至三门峡淤1.42亿 m^3 ,虽只占总淤积量的12.7%,但关键是淤积部位为潼关以下20 km范围,其下河段均为冲刷,这应是潼关河段无富余挟沙力的有力佐证.



(a) 潼关



(b) 三门峡

图2 潼关站、三门峡站建库前后汛期输沙率与水力因子之间的关系
Fig.2 Relationship between sediment discharge and hydraulic factor during flood period of Tongguan and Sanmenxia stations before and after construction of Sanmenxia reservoir

表4 三门峡水库库区不同运用时期的冲淤量

Tab.4 Sediment scour-and-fill during various operations of Sanmenxia reservoir

单位: 亿 m^3

时 间	河 段				累 计	运用方式
	潼关—三门峡	龙门—潼关	渭1—37	北洛1—23		
1960-09—1964-10	35.752	6.343	1.873	0.481	44.449	蓄水
1964-11—1973-10	-9.225	12.028	8.470	0.800	12.073	滞洪
1973-11—2006-10	1.421	5.228	2.817	1.696	11.162	蓄清排浑
1960-09—2006-10	27.948	23.599	13.160	2.977	67.684	

3.2 敞泄排沙方案的局限性

由于潼关—三门峡库区输沙特性的制约,敞泄排沙只能使潼关高程有所下降,而不能恢复到建库前的天然状态.这是因为三门峡水库虽经二次改建,但水库侵蚀基准面比建库前抬高的很多.

图3为建库前三门峡上口水文站水位流量关系与现泄流能力曲线比较,可见,同流量水位相差10~40 m.潼关高程不能降到建库前天然状态,就不能从根本上解决渭洛河下游的洪涝灾害,这是因为渭河下游纵比降已达最小比降,渭河华县以下河床高程是平行抬高的,曹如轩等^[7]对此作了详细的论证.

目前小浪底水库淤积三角洲顶点已抵达坝前,三门峡敞泄排沙方案把大量泥沙冲入小浪底水库,水库已难以承受,所以必须以科学创新思路另辟蹊径.

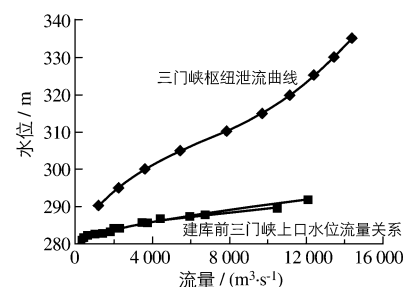


图3 三门峡上口水位流量关系和泄流曲线
Fig.3 Relationship between water level-discharge and discharge curves of Shangkou station

4 利用自排沙廊道工程降低潼关高程

4.1 自排沙廊道排沙特性分析

排沙廊道经历 3 个发展阶段:第一代廊道为顶部设置开敞式进水孔,廊道排沙时,进水孔产生立轴漩涡,起到阻水作用,故排沙效率低,耗水量大;第二代廊道是侧向进水,已于 20 世纪末在澜沧江大朝山水电站运用,解决了电站“门前清”问题,缺点是耗水量大;第三代廊道即自排沙廊道,为谭培根的专利发明成果,已在陕西省东雷抽黄灌区应用,解决了总干渠泥沙淤积问题,其特点为在第一代廊道上设“排沙帽”及异形进水、过流部件,使廊道中形成三向螺旋流,增加水流紊动能,同时排沙帽阻断水流底层以上清水进入廊道. 据沙玉清的研究,粒径 $d < 0.04 \text{ mm}$ 的泥沙不能作推移运动,一旦启动即上悬水中做悬移质运动,这是廊道排粗沙能力大的原因之一. 西安理工大学硕士生杨洪艳^[9]、韩海军^[10]对自排沙廊道(图 4)做了水槽概化模型试验得出廊道排出的泥沙均较进口泥沙粗 2~3 倍.

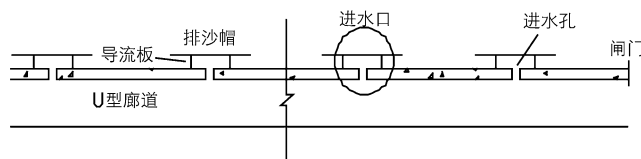


图 4 自排沙廊道结构道示意图

Fig.4 Structure layout of the flushing gallery

4.2 自排沙廊道产生溯源冲刷降低潼关高程分析

自排沙廊道由于高程低,廊道水流势能大,能量传递作用使廊道顶部以上水体最大流速位置下移,这更易于冲起粗沙,扩大冲刷范围,降低了廊道首部局部侵蚀基准面,形成自下而上的溯源冲刷及自上而下的沿程冲刷. 冲刷初期,廊道首部比降最大,随着冲刷发展,比降逐渐坦化,当比降平衡时冲刷停止. 三门峡水库 1962 年桃汛前库水位降落,由三角洲顶点产生的溯源冲刷见图 5.

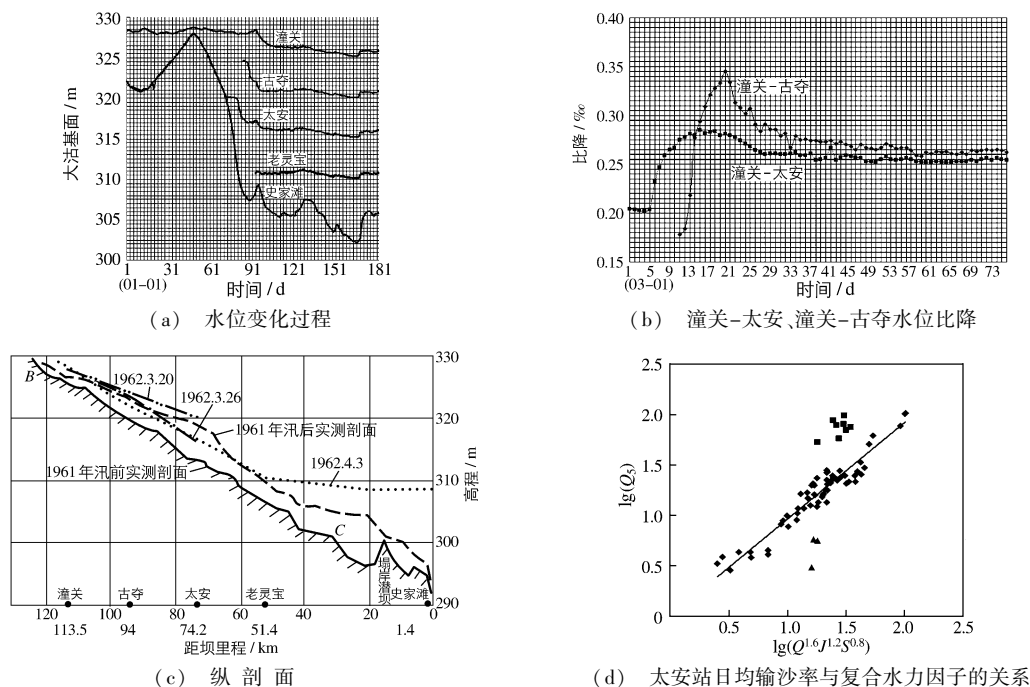


图 5 冲刷过程

Fig.5 Process of sediment scouring

由图看出,太安、古夺、潼关起冲日期(即水位急剧降落日)是自下而上传递的,1962年3月下旬,桃汛前随着库水位下降,3月20日太安站水位急剧下降0.06 m,至3月29日累计下降3.05 m,3月27日水位急剧下降日期向上传递至古夺站,4月4日传递到潼关站;图5(b)为冲刷过程中潼关-太安、潼关-古夺水位比降的变化过程,反映了比降逐渐减小的过程。

为了解溯源冲刷过程中输沙率与水流泥沙因子的关系,采用联解以下公式:阻力公式 $v = \frac{1}{n} h^{2/3} J^{1/2}$; 连续方程 $Q = v h B$; 双值挟沙力公式 $\rho_* = k \frac{(v - v_0)^3}{g h \omega_{ms}}$ 。

$$\text{可得出断面输沙率为: } Q_s = \left(\frac{k'}{g n^{2.4} \omega_{ms} B^{0.6} \eta^3} \right) Q^{1.6} J^{1.2} \quad (1)$$

式中: n 为糙率; B 为河宽; ω_{ms} 为浑水中泥沙群体沉速; g 为重力加速度; k' 为系数; $\eta = \frac{v}{v - v_0}$; v 为流速; v_0 为挟动流速。由于实测的输沙率中包括了冲起泥沙及上站来沙,故公式中还应包括上站含沙量 S_i , 即

$$Q_s = \left(\frac{k'}{g n^{2.4} \omega_{ms} B^{0.6} \eta^3} \right) Q^{1.6} J^{1.2} S_i^{0.8} = k Q^{1.6} J^{1.2} S_i^{0.8} \quad (2)$$

图5(d)为冲刷过程中太安站日均输沙率与复合水力因子的关系,由图得出两者的关系为 $Q_s = 0.958 3 Q^{1.6} J^{1.2} S_i^{0.8}$, R^2 值高达0.92,图中偏离点群下方的3个点是冲刷前的资料,属于沿程淤积,偏离点群上方的点是溯源冲刷初期的,该时段比降很大,但无实测资料,比降是用潼关-太安段日平均水位计算而得,所以横坐标计算值偏小。本次冲刷历时29 d,潼关同流量水位下降1.94 m。

陕西东雷抽黄总干渠^[10]设计流量60~120 m³/s,实际引水流量仅1.5~40.0 m³/s,渠道比降0.29‰,泥沙粒径粗,导致淤积严重,淤积厚度2.0~4.0 m,最大4 m,采用冲沙闸清淤,仅能冲走3 m范围内淤沙,而建了44 m长的自排沙廊道排沙后,100 m范围淤沙冲净,1 310 m范围淤沙厚度减小0.5 m。

图6为三门峡自排沙廊道示意图,由图看出廊道底部高程低于原河床高程十余米,这使潼关-太安河床比降由建库前的不足0.3‰提高了近1倍,两站河床间距43.5 km。

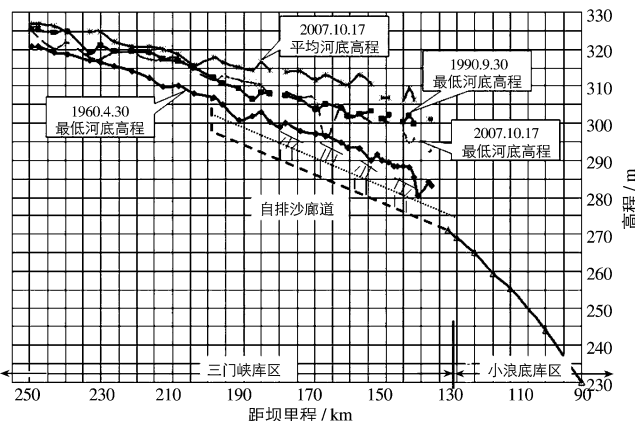


图6 三门峡水库自排沙廊道布设示意图

Fig. 6 Outline of the flushing gallery at Sanmenxia reservoir

5 结 语

(1) 由于地理、地质及三门峡天然大坝基岩的影响,潼关卡口成为向黄河下游水库、河道输送泥沙的“关口”,因而在三门峡水库布设自排沙廊道能有效拦截低温期和洪水期进入小浪底水库的粗沙。

(2) 自排沙廊道首部布设于潼关以下40 km原河床以下十余米处,可有效增加潼关至廊道首部的比降,廊道排沙时产生自下而上的溯源冲刷和自上而下的沿程冲刷相结合,可将潼关高程降低至建库前水平。

(3) 自排沙廊道方案有效的拦截了进入小浪底水库的粗沙,使小浪底水库可长期“蓄洪拦沙调水调沙”运用;又恢复并增加了三门峡水库的调节库容,使三门峡水库兴利效益得以提高;潼关高程恢复至建库前天然水平,可以从根本上解除渭河下游的洪涝灾害。

参 考 文 献:

[1] 费祥俊,傅旭东,张仁. 黄河下游河道排沙比、淤积率与输沙特性研究[J]. 人民黄河, 2009, 31(11): 6-11. (FEI Xiang-

- jun, FU Xu-dong, ZHANG Ren. Study on sediment delivery ratio, rate of silting and characteristic of sediment transport of the lower Yellow River channel[J]. Yellow River, 2009, 31(11): 6-11. (in Chinese))
- [2] 李国英. 河流伦理[J]. 人民黄河, 2009, 31(11): 3-5. (LI Guo-ying. River ethics[J]. Yellow River, 2009, 31(11): 3-5. (in Chinese))
- [3] 陕西省三门峡库区管理局. 陕西省三门峡库区志[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (Shaanxi Province Sanmenxia Reservoir Area Administration. Shaanxi Province Sanmenxia Reservoir area annals[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2007. (in Chinese))
- [4] 潘贤娣, 李勇, 张晓华, 等. 三门峡水库修建后黄河下游河床演变[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006. (PAN Xian-di, LI Yong, ZHANG Xiao-hua, et al. River bed evolution of the lower Yellow River after Sanmenxia Reservoir building[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2006. (in Chinese))
- [5] 曹如轩. 潼关高程抬升原因及其对渭河下游的影响[C]//中国水利学会. 黄河三门峡工程泥沙问题. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (CAO Ru-xuan. The reason of Tongguan elevation lifting and the influence to lower Weihe River[C]//CHES. The Sedimentation Problem of Sanmenxia Project on Yellow River. Beijing: China WaterPower Press, 2006. (in Chinese))
- [6] 张晓华, 尚红霞, 郑艳爽, 等. 黄河干流大型水库修建后上下游再造床过程[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2008. (ZHANG Xiao-hua, SHANG Hong-xia, ZHENG Yan-shuang, et al. The fluvial process of Yellow River's upper and lower reaches after large reservoir building on the main stream[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2008. (in Chinese))
- [7] 曹如轩, 雷福州, 冯普林, 等. 三门峡水库淤积上延机理的研究[J]. 泥沙研究, 2001(2): 37-40. (CAO Ru-xuan, LEI Fu-zhou, FENG Pu-lin, et al. Analysis on mechanism of backwater deposits extended upstream in Sanmenxia Reservoir[J]. Journal of Sediment Research, 2001(2): 37-40. (in Chinese))
- [8] 谭培根. “自排沙廊道”专利技术在东雷抽黄灌区的应用[J]. 中国水利, 2006(8): 39-40. (TAN Pei-gen. Patent technology of self sand relieving corridor applied in Donglei Pumping Irrigation District[J]. China Water Resources, 2006(8): 39-40. (in Chinese))
- [9] 杨洪艳. 自排沙廊道水力学特性及输沙特性试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008. (YANG Hong-yan. The test research of hydrolic and sediment transporting property for the auto-desilting gallery[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [10] 韩海军. 自排沙廊道的概化试验研究及其机理分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2011. (HAN Hai-jun. Generalized experimental study on the auto-desilting gallery and its mechanism analysis[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011. (in Chinese))

Tongguan elevation reduction by using flushing gallery

CHEN Chen, CHENG Wen, QIN Yi, CAO Ru-xuan, QIAN Shan-qi
(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: This paper expounds the project's background and seeks the measure to replace the original approach of storing clear water and releasing muddy flow in Xiaolangdi reservoir, so as to lower the Tongguan elevation and to reduce the flood disasters in the Weiluohé river's lower reaches. Analysis shows that in Tongguan reach, bed elevation increases when scouring occurs in the upper reach at low temperature, and bed elevation declines when silting occurs in the upper reach at high temperature. Both situations would transport a lot of silt to the lower reaches.

Authors deal with the layout and optimization of flushing gallery by analyzing two examples. One is the drop of Sanmenxia Reservoir level which causes headcut scour, and the other is drawing water from the Yellow River to Donglei to lower the bed elevation. The project of using the flushing gallery in Sanmenxia to lower the Tongguan elevation would intercept coarse sands before entering Xiaolangdi reservoir so as to lower the Tongguan elevation and increase Sanmenxia reservoir's total storage.

Key words: flushing gallery; base level of erosion; Tongguan elevation; headcut scour