

# 黄河小浪底水库库区水流泥沙运动规律分析

洪大林<sup>1</sup>, 谢 瑞<sup>2</sup>, 曲少军<sup>3</sup>, 牛玉国<sup>4</sup>

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;

3. 黄河水利委员会水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 4. 黄河水利委员会水文水资源局, 河南 郑州 450004)

**摘要:**结合 1997~2001 年黄河小浪底水库库区水文泥沙测验资料, 采用水文分析的方法, 分析施工运用期、蓄水运用初期等不同时期库区各因子站的水流泥沙运动特征、库区泥沙淤积量及其淤积形态和水库初期运用的回水影响等, 并着重分析 2000 年洪水期含沙量变化过程以及库区泥沙淤积上延现象, 初步得出库区不同时期的水流泥沙运动基本规律。由于受当时设站规模的限制, 库区水文泥沙资料尚存在不足。今后需加强小浪底水库泥沙淤积状况的监测, 收集更广泛的库区水流泥沙资料, 为制定小浪底水库运行调度方式奠定基础。

**关键词:**水流泥沙; 库区淤积; 小浪底水库

**中图分类号:** TV145

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-7647(2004)01-0015-04

黄河小浪底枢纽工程位于三门峡下游 130 km 的黄河干流最后一段峡谷的出口处, 是黄河干流在三门峡水库以下唯一能够取得较大库容的控制性工程, 控制着黄河流域面积的 92.2% 及水量、沙量的 90.5% 和 98.15%, 是一座具有防洪、减淤、发电、灌溉和防凌等综合效益的大型水利工程。坝顶高程 281 m, 最大坝高 154 m, 总库容 126.5 亿  $m^3$ , 防洪库容 40.5 亿  $m^3$ , 电站装机容量 1800 MW。库区流域属土石山区, 沿黄河干流两岸山势陡峭, 沟壑纵横, 河道边界为石质河床。

1997~2001 年黄河水利委员会水文水资源局在小浪底库区进行了水库运行初期水文泥沙因子观测<sup>①</sup>, 为分析库区水流泥沙运动特征、库区泥沙淤积以及水库运行方式等提供了依据。本文即依据库区水文测验资料, 对库区水流泥沙运动特征进行分析研究。

## 1 施工运用期的水流泥沙运动

### 1.1 库区冲淤变化

自 1997 年汛后截流至 1999 年 10 月下闸蓄水前, 小浪底入库最大洪峰流量仅  $5170 m^3/s$  (1998 年 7 月), 洪水期在坝前局部河段存在短时段壅水现象, 库区绝大部分河段仍处于自然河道状态。据断面法测量结果计算, 1997 年 10 月~1999 年 9 月库区累积淤积  $0.1827$  亿  $m^3$ , 淤积主要集中在干流 15 断面(距坝 25 km)以下, 因此小浪底水库施工运用期三门峡

至小浪底河段除了坝前局部河段略有淤积外, 其余河段基本无冲淤变化, 河床仍保持稳定状态。三门峡水文站 1999 年的水位流量关系(图 1)单一, 也说明此段河床处于稳定状态。

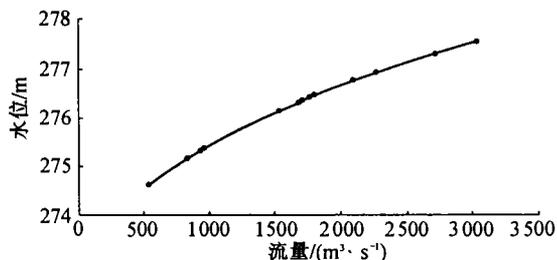


图 1 三门峡站 1999 年水位流量关系

### 1.2 洪水期调蓄作用分析

小浪底水利枢纽工程施工期遭遇的最大洪水发生在 1998 年 7 月, 这场洪水主要来自三门峡以上, 7 月 15 日 5 时三门峡最大出库流量为  $5170 m^3/s$ , 最大含沙量为  $341 kg/m^3$ 。经小浪底工程调蓄, 7 月 15 日 17 时小浪底站洪峰流量为  $4460 m^3/s$ , 最大含沙量为  $310 kg/m^3$ 。洪水期间小浪底度汛围堰最高水位达 158.40 m, 相应蓄水量为 1.1 亿  $m^3$ 。

本次洪水三门峡至小浪底的洪峰削减率为 13.7%, 洪峰传播时间为 12 h, 与前几年几场相近洪水相比(表 1), 洪峰削减率明显增加, 洪峰传播时间有所延长, 表明小浪底工程在施工期对洪水演进有一定的调蓄作用。

根据沙量平衡法计算, 小浪底库区洪水期(7 月

作者简介: 洪大林(1963—), 男, 江苏高淳人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事河流动力学及工程泥沙问题研究。

①张留柱, 程龙渊. 黄河小浪底水库水文泥沙观测成果初步分析. 2001.

表 1 几场相近洪水在三门峡至小浪底河段传播时间和洪峰削减率对比

年份	三门峡			小浪底			传播时间 /h	洪峰削减率 /%
	洪峰流量 /( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	出现时间	最大含沙量 /( $kg \cdot m^{-3}$ )	洪峰流量 /( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	出现时间	最大含沙量 /( $kg \cdot m^{-3}$ )		
1992	4610	8月15日8时	479	4570	8月15日16时	535	8	0.9
1996	5100	8月11日18.5时	355	5100	8月12日4时	309	9.5	0
1997	4120	8月2日14时	565	3980	8月3日2时	530	12	3.4
1998	5170	7月15日5时	341	4460	7月15日17时	310	12	13.7

5日~24日)淤积0.64亿t,洪水过后发生冲刷0.65亿t,整个汛期(7~10月)库区累积冲刷0.01亿t,冲淤基本平衡,基本反映了小浪底水利枢纽工程施工期滞洪时产生淤积、洪水过后发生冲刷或微冲微淤的演变特点。

## 2 蓄水运用初始回水影响范围分析

1999年10月25日小浪底水库下闸蓄水,由于入库流量不大,坝前水位上升较为缓慢。为了判断某一断面在何时开始受回水影响,选用河堤站为例加以说明。以坝前水位为横坐标,五福涧站水位(河堤站以上与其相邻)与河堤站水位之差为纵坐标,点绘两者变化关系(图2)。由于在水库蓄水前这两站均处于自然状态,河床较为稳定,从图2可以看出,1999年大部分时间里坝前水位很低,两站水位差在一个较窄范围内波动,当库水位升高至某一值以后,这一水位差开始脱离原先的变化范围,向减小的方向发展,表明河堤站已开始受回水影响,这一临界库水位大致为205m。即在天然河道状态下,当坝前水位升至205m左右时,河堤站开始受水库蓄水的影响。受回水影响期间,断面流速减小,相应水流挟沙力下降,河床开始由冲淤平衡转入淤积。其它控制站开始受回水影响的临界库水位可以此类推求出,如陈家岭、五福涧、白浪等站。

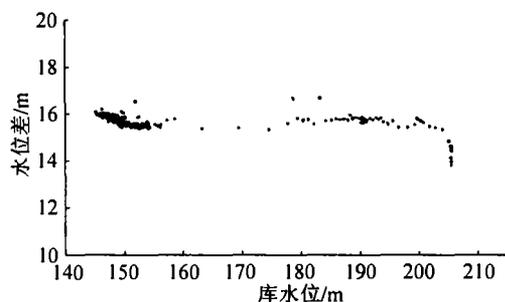


图 2 1999年五福涧与河堤站水位差随库水位变化过程

也可以较直观地判断库区各水位站受回水影响时的临界水位,建立库水位(桐树岭站水位)与库区各水位站水位相关关系<sup>[1]</sup>(图3)。由图3可以看出:库区水位站不受回水影响时,它的水位与桐树岭站水位相关线近似为垂直线,当某站受变动回水影响时,这一相关线开始弯曲,且凹向右,回水影响越严

重,相关线越趋向45°线,当相关线为45°线时,该站水位完全处在回水区之内。根据以上分析,各水位站受回水影响情况分述如下:

a. 陈家岭站。自开始蓄水1999年10月25日就在回水区。西庄自10月27日开始受回水影响。麻峪站于1999年11月1日受回水影响,三站2000年、2001年全年处在回水范围之内。

b. 河堤站。当坝前水位为200m时1999年11月开始受回水影响,这与前述分析结论基本一致。2000年1月1日~6月5日和7月20日至年底均处在回水影响范围内;6月10日~7月15日处于自然河道。2001年除7月10日~8月20日不受回水影响,其它时间均受回水影响。从图5可以看出,2001年汛前坝前水位在223~210m时,河堤站处在变动回水影响范围内,坝前水位在223m以上时,河堤站完全处在回水区,而最低水位出现在7月26日后;坝前水位在209m时,河堤站已完全处在回水范围之内,这主要是在汛前水位下降过程中河堤断面发生了冲刷,河床降低所致。可见库区回水变动范围不仅与坝前水位有关,而且受库区冲淤的影响。

c. 五福涧站。2000年汛前当坝前水位为216m附近,开始受回水影响,220m是完全处在回水区。8月5日至年底处于回水影响范围,其它时段均为自然河道。2001年汛前坝前水位在230m以上时,处在回水区,而汛后坝前水位在220m时,即完全处在回水区。

d. 白浪站。2000年11月25日与桐树岭水位差为5.12m,应基本不受回水影响。从图4可看出白浪站水位基本不受坝前水位影响,2000年白浪站处于回水末端位置。2001年9月前回水尚未影响到白浪站。

最大回水长度发生在2000年11月底,最大回水影响到49~50断面之间,距坝里程为93km左右。

## 3 2000年洪水期含沙量沿程变化

2000年为小浪底水库下闸蓄水后第一个运用年,该年度黄河为枯水枯沙年,三门峡站年径流量为163.1亿 $m^3$ ,汛期为67.2亿 $m^3$ 。汛期三门峡站有3次洪水过程,其中最大洪峰流量为2840 $m^3/s$ 。三门

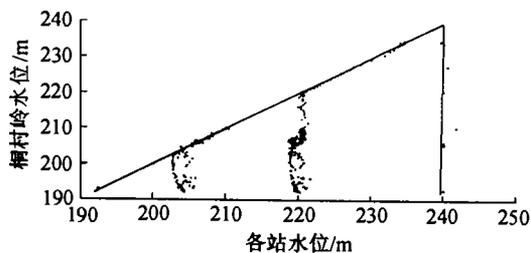


图3 2000年桐树岭站与库区水位站水位关系

峡站、河堤站三次洪水过程相应含沙量变化过程如下:

2000年7月8~13日,库水位195~197m,河堤站处于自然河道状态,该站日均含沙量与三门峡站相比减小不多,说明入库泥沙绝大部分通过河堤断面向下输移。

2000年8月15~24日,库水位208~214m,河堤站已受回水影响,该断面日均含沙量比三门峡站递减60%左右,表明三门峡站来沙量大部分已淤积在河堤站以上。

2000年10月9~16日,库水位227~233m,回水范围在距坝80km以上,洪水期河堤站含沙量很小,反映出本次洪水三门峡来沙的绝大部分淤积在河堤断面以上。

受小浪底水库蓄水的影响,2000年出库沙量仅0.044亿t,仅占来沙量3.57亿t的1.2%,且全部集中在汛期。

#### 4 2000年水库淤积上延现象初析

水流进入回水区后,流速减小,泥沙落淤,落淤又促使水流条件改变,使回水区以上一定范围内普遍淤积抬高,这种淤积自回水末端向上游发展的现象,称为水库淤积上延现象<sup>[2]</sup>。

三门峡水库2000年10月22日以后泄放清水,小浪底坝前水位为233.20m,平交于1999年6月实测纵剖面图上的47断面,距坝里程为88.54km,称 $L_0$ 。淤积末端位于51断面, $L \approx 101.61$ km,则淤积上延系数 $K = L/L_0 = 1.15$ 。与蒲河巴家嘴水库 $K$ 值1.10值接近;较青铜峡水库 $K$ 值(1.06)略大;较三门峡水库的黄河小北干流的 $K$ 值(1.46)<sup>[3]</sup>小0.31。三门峡到小浪底截流前平均河床比降为0.108%,龙门到潼关河底比降为0.0424%。因此小浪底水库淤积上延范围即 $K$ 值较三门峡水库小是合理的。

#### 5 2001年水库对水沙过程的调节

小浪底水库对来水来沙过程改变十分明显。图4,图5分别为小浪底水库2001年10月之前的进、出库水沙过程,可以看出,三门峡站汛期日均流量大

于 $1000\text{ m}^3/\text{s}$ 共有11天,日均流量大于 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 仅2天,最大流量发生在8月21日,日均流量 $2200\text{ m}^3/\text{s}$ (相应最大洪峰流量出现在8月22日0时30分,流量为 $2890\text{ m}^3/\text{s}$ ),最大含沙量出现在8月22日,日均值为 $449\text{ kg}/\text{m}^3$ (相应最大含沙量瞬时值出现在8月22日12时,为 $492\text{ kg}/\text{m}^3$ )。由于小浪底水库的调控,使出库流量明显调平,整个汛期出库流量均小于 $900\text{ m}^3/\text{s}$ ,流量小于 $600\text{ m}^3/\text{s}$ 的时间达3个月。

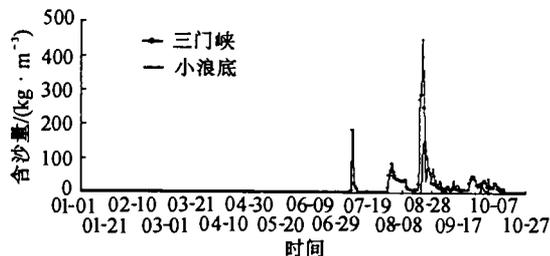


图4 2001年小浪底进出库含沙量过程

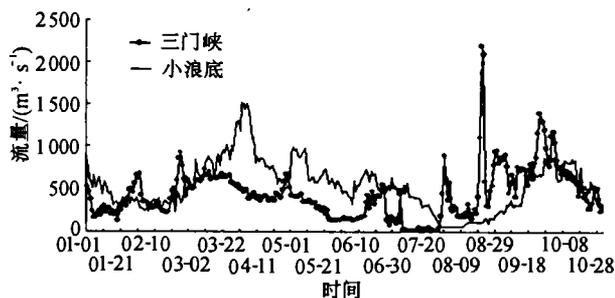


图5 2001年小浪底进出库流量过程

8月下旬的高含沙洪水入库后产生异重流,使得小浪底出库有一次异重流排沙过程,时间在8月21日~9月17日,最大日均含沙量为 $149\text{ kg}/\text{m}^3$ (瞬时最大含沙量为 $196\text{ kg}/\text{m}^3$ ),排沙量为0.1674亿t。小浪底水库在异重流排沙期间基本为蓄水运用,出库流量很小;之后,三门峡站出现一次最大日均流量为 $1180\text{ m}^3/\text{s}$ 的低含沙量小洪水(最大日均含沙量 $36.9\text{ kg}/\text{m}^3$ ),小浪底水库出库流量保持在 $600\sim 895\text{ m}^3/\text{s}$ ,致使小浪底水库发生本年度第二次排沙过程,时间在10月1日~10月10日,小浪底站最大日均含沙量为 $25.4\text{ kg}/\text{m}^3$ ,排沙量仅0.0491亿t。

图6为小浪底水库坝前水位年内的变化过程,可以看出,小浪底库水位全年有个明显的先降后升过程,降水期大致从3月5日开始,该日8时水位为 $234.74\text{ m}$ ,到7月28日8时库水位降至 $191.72\text{ m}$ ,为全年最低,在此时段内水库共补水 $40.41$ 亿 $\text{m}^3$ ,随后库水位不断上升,截至11月1日8时,库水位蓄至 $224.79\text{ m}$ 。从汛期库水位降到最低算起,到11月1日为止,共增加蓄水 $24.41$ 亿 $\text{m}^3$ 。小浪底水库在调控来水的同时,也拦蓄了来沙,汛期水库平均排沙比仅

7.8%。小浪底水库 2001 年汛期拦截三门峡站日均流量超过  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  的洪峰共 3 次,最大日均流量分别为  $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $1400 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $1180 \text{ m}^3/\text{s}$ ,使下泄流量过程明显调平,且排泄沙量很小。

通过对三门峡站、河堤站含沙量变化过程比较可见,2001 年 6 月 1 日~8 月 19 日,小浪底库水位较低,河堤以上库段发生冲刷,冲起的泥沙淤在了河堤断面以下,并未输移至坝前,呈现出泥沙搬家现象。8 月 20~31 日,高含沙洪水入库期间,库区发生淤积,其中河堤断面以上新增淤积量明显大于前一时段的冲刷量。

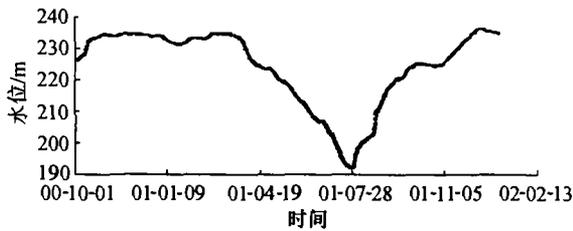


图 6 小浪底水库坝前水位变化过程

## 6 结 语

1997~2001 年小浪底库区水文泥沙测验是在水库初期运用期间进行的,对制定水库运行方式具有重要的参考价值。随着水库运用时间的推移,库区水流泥沙运动规律将发生较大调整。为了探寻水库调度运用的合理方式,实现水库调水调沙,达到下游塑造窄深河床的目的,仍然需要对库区水文泥沙运动做进一步的测验工作。

### 参考文献:

- [1] 程龙渊,刘拴明.三门峡库区水文泥沙实验研究[M].郑州:黄河水利出版社,1999.132~135.
- [2] 钱宁,张仁,周志德.河床演变学[M].北京:科学出版社,1987.435~438.
- [3] 杨庆安,龙毓睿.黄河三门峡水利枢纽运用与研究[M].郑州:河南人民出版社,1995.106~112.

(收稿日期:2003-08-22 编辑:傅伟群)

### ·小资料·

#### 我国正在建设中的大型水电站

工程名称	地点	河流	坝型	坝高/m	装机容量/万 kW	年发电量/亿 kW·h	库容/亿 $\text{m}^3$	开工年份
三峡水利枢纽	湖北宜昌	长江	重力坝	181	$26 \times 70 = 1820$	847	393	1994
大朝山	云南云景/景东	澜沧江	碾压混凝土重力坝	111	$6 \times 22.5 = 135$	59.3	9.4	1997
江口	重庆武隆	芙蓉江	双面拱坝	139	$3 \times 10 = 30$	10.7	4.97	1999
引子渡	贵州平江/织金	三岔河	面板堆石坝	130	$3 \times 12 = 36$	9.13	5.27	2000
乌江渡扩建	贵州遵义	乌江	拱形重力坝	165	$2 \times 25 = 50$		23	2000
洪家渡	贵州黔西/织金	六冲河	面板堆石坝	179.5	$3 \times 20 = 60$	15.94	49.2	2000
紫坪铺	四川都江堰	岷江	面板堆石坝	156	$4 \times 19 = 76$	34.17	11.12	2001
福堂	四川汶川	岷江	闸坝	24.5	$4 \times 9 = 36$	22.7	0.03	2001
龙滩	广西天峨	红水河	碾压混凝土重力坝	192	$6 \times 70 = 420$	156.7	162.1	2001
百色	广西百色	右江	碾压混凝土重力坝	130	$4 \times 13.5 = 54$	16.9	56.6	2001
公伯峡	青海循化/化隆	黄河	面板堆石坝	139	$5 \times 30 = 150$	51.4	6.2	2001
吉林台	新疆尼勒克	伊犁喀什河	面板堆石坝	157	$4 \times 11.5 = 46$	9.38	25.3	2001
尼尔基	内蒙莫力达瓦旗	嫩江	沥青混凝土心墙砂砾石坝	41.5	$4 \times 6.25 = 25$	6.14	86.1	2001
泰安抽水蓄能	山东泰安	汶河	面板堆石坝	100	$4 \times 25 = 100$	14		2002
桐柏抽水蓄能	浙江天台	信史河	面板堆石坝	65.6	$4 \times 30 = 120$	21.18	0.128	2002
小湾	云南南涧/凤庆	澜沧江	双面拱坝	292	$6 \times 70 = 420$	189.9	151	2002
周宁	福建周宁	穆溪	碾压混凝土重力坝	73.4	$2 \times 12.5 = 25$	6.58	0.47	2002
黄龙滩扩建	湖北郧县	堵河	重力坝	107	$2 \times 17 = 34$	10.29	12.28	2002
索风营	贵州黔西/修文	乌江	碾压混凝土重力坝	121.8	$3 \times 20 = 60$	20.11	2.012	2002
水布垭	湖北巴东	清江	面板堆石坝	233	$4 \times 40 = 160$	39.2	45.8	2002
琅琊山抽水蓄能	安徽滁州	小沙河	面板堆石坝	64	$4 \times 15 = 60$	8.56	0.174	2002
平班	贵州安龙 广西隆林	南盘江	重力坝	62.2	$3 \times 13.5 = 40.5$	16.03	2.78	2002
三板溪	贵州锦屏	清水江	面板堆石坝	183.5	$4 \times 25 = 100$	24.28	37.48	2003
乐滩	广西忻城	红水河	重力坝	63	$4 \times 15 = 60$	32	9.5	2003
长洲	广西苍梧	浔江	闸坝	45.8	$15 \times 4.142 = 62.13$	30.19	17	2003
宜兴抽水蓄能	江苏宜兴				$4 \times 25 = 100$	14.9		2003
西龙池抽水蓄能	山西五台	漳泥河	沥青混凝土面板堆石坝	97	$4 \times 30 = 120$	18	0.0494	2003

(吴冀高供稿)