



向家坝水利枢纽近坝段通航水域 近年冲淤特性分析*

董宇¹, 孙振勇¹, 秦蕾蕾², 马耀昌¹

(1. 长江水利委员会长江上游水文水资源勘测局, 重庆 400021; 2. 中国三峡建工(集团)有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 针对向家坝枢纽日益增加的通航需求, 为保障向家坝枢纽正常运行, 2019—2021 年对向家坝近坝通航水域持续性水沙监测, 采用 3 年的实测地形资料, 结合向家坝库区水沙特性对重点水域冲淤变化进行分析。结果表明: 坝上游翻坝码头逐年淤积, 但淤积量不大; 凉水井码头逐年冲刷, 冲刷区域主要位于深槽; 坝下游航道冲刷较为明显。须持续对加强翻坝码头和坝下通航水域监测和分析, 以保障涉水建筑物稳定、船只通航安全。

关键词: 向家坝水利枢纽; 通航水域; 冲淤量; 水沙特性

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0085-05

Erosion and deposition characteristics of navigable waters near Xiangjiaba Hydro-project in recent years

DONG Yu¹, SUN Zhenyong¹, QIN Leilei², MA Yaochang¹

(1. Upper Changjiang River Bureau of Hydrological and Water Resources Survey,
Changjiang Water Resources Commission, Chongqing 400021, China;

2. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610041, China)

Abstract: Aiming at the increasing navigation demand of the Xiangjiaba Hydro-project, to ensure the normal operation of the Xiangjiaba Hydro-project, we carry out continuous water and sediment monitoring in the navigable waters near Xiangjiaba from 2019 to 2021. Based on the 3-year measured topographic data and the characteristics of water and sediment in the Xiangjiaba reservoir area, we analyze the erosion and deposition changes in the navigable waters near Xiangjiaba. The results show that the Fanba wharf at the upstream of the dam is silted up, whereas the amount of siltation is not large. The Liangshuijing wharf is eroded year by year, and the erosion area is mainly located in the deep groove. The erosion in the downstream waterway of the dam is obvious. The monitoring and analysis of the port wharf and the navigable waters below the dam should be continuously strengthened to ensure the stability of wading structures and the navigation safety of vessels.

Keywords: Xiangjiaba Hydro-project; navigable water; erosion and deposition amount; water and sediment characteristic

向家坝枢纽位于金沙江下游, 是金沙江下游梯级电站最后一级, 距水富县城区 1.5 km、宜宾市区 33 km。向家坝枢纽工程由混凝土重力坝、右岸地下厂房及左岸坝后厂房、通航建筑物和两岸

灌溉取水口组成。左岸布置一级垂直升船机, 最大提升高度为 114.20 m, 可以通过 2×500 t 一顶两驳船队或者 1 000 吨级一顶一驳船队。向家坝水利枢纽的兴建, 改善了金沙江下游通航条件。2021 年,

收稿日期: 2022-11-08

*基金项目: 中国三峡建工(集团)有限公司项目(JGAJ0421004)

作者简介: 董宇(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事河道勘测及河道冲淤分析研究。

向家坝翻坝转运总量 529.52 万 t, 较 2020 年增长 25.8%^[14]。

由于向家坝枢纽航运频繁, 需要对近坝区通航水域冲淤变化情况进行分析, 为枢纽正常运行与维护提供依据, 也为枢纽的建设提供建议。本文分析范围包括坝上游区域左岸的凉水井码头、右岸的翻坝码头以及坝下游重点通航区域(坝址—安边铁路桥), 见图 1。翻坝码头分析区域长约 1 000 m、宽约 400 m, 位于大坝上游, 距坝轴线约 1 700 m; 凉水井码头分析区域长约 350 m、宽约 300 m, 距坝轴线约 470 m; 坝下游区域长约 3.2 km, 内有向家坝水文站, 位于坝轴线下游约 1.5 km。根据分析需求, 分别于 2019—2021 年汛前及汛后对分析区域进行了实地测量, 测图比例尺为 1:500。各测次及时间为: 2019-1、2019-2 测次完成时间分别为 2019 年 7、11 月, 2020-1、2020-2 测次完成时间分别为 2020 年 5、11 月, 2021-1、2021-2 测次完成时间分别为 2021 年 5、11 月。

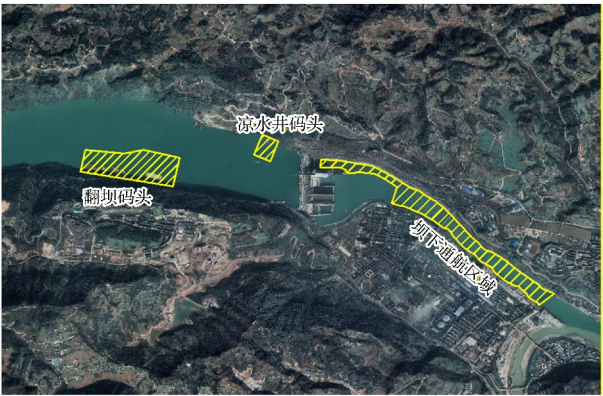


图 1 向家坝近坝通航水域冲淤分析区域

1 向家坝近坝段水沙特性

1.1 水位

向家坝库区干流主要有溪洛渡、屏山和向家坝水文站, 分别位于向家坝库尾、坝前和坝下。2019—2021 年向家坝库区各站水位特征值见表 1。可以看出, 屏山站水位变幅最小, 年内最大水位变幅在 9.18~9.57 m; 溪洛渡站水位变幅最大, 年内最大水位变幅在 12.03~17.07 m, 2020 年各站年内水位变幅均有最大值。

表 1 2019—2021 年向家坝库区主要水文站水位特征值

年份	站名	年均 水位/m	月均水位/m		年内水位特征值/m		最大水位 变幅/m
			最高(月份)	最低(月份)	最高(日期)	最低(日期)	
2019	溪洛渡	377.77	380.62(10)	374.61(6)	384.09(9月30日)	372.06(6月16日)	12.03
	屏山	378.26	381.01(10)	377.13(3)	382.19(10月9日)	372.71(6月25日)	9.48
	向家坝	268.77	271.49(8)	266.95(12)	274.15(8月7日)	266.03(1月29日)	8.12
2020	溪洛渡	378.99	382.54(9)	375.54(12)	388.78(8月22日)	371.71(6月11日)	17.07
	屏山	378.35	380.86(10)	377.34(12)	382.15(8月19日)	372.58(6月11日)	9.57
	向家坝	269.27	274.98(8)	266.32(1)	279.45(9月18日)	266.00(4月29日)	13.45
2021	溪洛渡	—	381.99(9)	375.23(6)	388.46(9月12日)	372.13(6月25日)	16.33
	屏山	—	380.65(3)	373.93(7)	381.63(3月16日)	372.45(7月4日)	9.18
	向家坝	—	272.10(9)	266.10(3)	276.39(9月13日)	265.91(3月17日)	10.48

注: 表中水位基面为冻结基面。

1.2 流量

2019 年为平水年, 总水量与多年均值相当, 但年内汛期流量偏枯, 非汛期流量偏丰, 且以汛前枯水期偏丰为主, 整体流量过程较为平缓, 洪峰流量 10 200 m³/s, 为 2019—2021 年最小值。2020 年为丰水年, 干流来水较多年平均值略偏丰, 较 2019 年偏丰较多, 年最大流量 18 800 m³/s, 为 2019—2021 年最大值。2021 年为平水年, 干流流

量为 3 年内最小值, 年均流量为 3 900 m³/s。向家坝站 2019—2021 年流量特征值见表 2。

表 2 向家坝站流量特征值

年份	年径流量/ 亿 m ³	最大流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	最小流量/ (m ³ ·s ⁻¹)
2019	1 344	10 200	1 840
2020	1 586	18 800	1 850
2021	1 229	15 500	1 670
多年平均	1 420	—	—

1.3 泥沙特性

向家坝站多年平均含沙量见表3。2006年以前,向家坝站多年平均含沙量为 1.68 kg/m^3 。2006年以后,向家坝枢纽开始兴建,向家坝站含沙量减小,2006—2012年平均含沙量为 1.01 kg/m^3 。2013年,溪洛渡水电站进行建设,受此影响,向家坝站含沙量大幅度减小,2013—2018年平均含沙量为 0.013 kg/m^3 。受乌东德、白鹤滩水利枢纽建设影响,近年向家坝站含沙量进一步减小,2019年向家坝站平均含沙量为 $0.005\ 4\text{ kg/m}^3$,2020年向家坝站平均含沙量为 $0.008\ 0\text{ kg/m}^3$,2021年向家坝站平均含沙量为 $0.008\ 8\text{ kg/m}^3$ 。近3年来沙量仅为2006—2012年平均值的5%~9%。

表3 向家坝站含沙量特征值

年份	年输沙量/万 t	年平均含沙量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
1956—2005	24 200	1.680 0
2006—2012	13 204	1.010 0
2013—2018	170	0.013 0
2019	72	0.005 4
2020	125	0.008 0
2021	109	0.008 8
多年平均	20 600	1.440 0

2 近坝通航水域冲分析

2.1 冲淤量计算

2.1.1 计算方法

根据实测地形资料,通过实测高程点构建数字高程模型(DEM),可计算出各测次间的冲淤量。计算时常用的插值方法有克里格插值法、反距离加权插值法、改进谢别德插值法等^[5]。吴敬文等^[6]、靳国栋等^[7]、Murphy等^[8]均认为克里格插值法具有更高的精度。克里格插值法以协方差函数和变异函数确定高程随空间变化的规律,其基本原理为^[9]:设研究区域为A,用 x 表示空间位置, $Z(x)$ 表示研究的变量,在采样点 $x_i(i=1,2,\cdots,n)$ 处的物理量为 $Z(x_i)$,则有未采样点 x_0 处的属性值是 n 个已知采样点的加权平均值,则有:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

式中: λ_i 为待求权系数。假设 $Z(x)$ 在整个区域内满足二阶平稳假设与本征假设,可得到求解权系数的方程组:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{cov}(x_i, x_j) - \mu = \text{cov}(x_0, x_j) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ 为拉格朗日乘子; $\text{cov}(x_i, x_j)$ 为 $Z(x)$ 的协方差。

2.1.2 计算结果

根据实测地形,分区域计算得出了各测次间冲淤量,见表4。其中翻坝和凉水井码头区域以向家坝枢纽正常蓄水位380 m进行计算,坝下游区域以多年平均水位275 m进行计算。由表4可知,翻坝码头除2020年汛前至汛后冲刷以外,其余测次均为淤积,累计平均淤积厚度为0.287 m;凉水井码头各测次间均为冲刷,累计平均冲刷厚度为0.578 m;坝下游近坝通航区域各测次间均为冲刷,累计平均冲刷厚度为0.471 m。造成大坝上游凉水井码头冲刷的原因为:1)凉水井码头距离坝址较近,距离大坝轴线不到500 m,受枢纽泄洪影响较大;2)上游各级水库陆续建成,泥沙被进一步拦蓄,近3年来沙量仅为2006—2012年平均值的5%~9%,向家坝入库泥沙减少,从而导致该区域内呈冲刷的趋势;3)向家坝枢纽上游河道略有弯曲,凉水井码头位于弯曲段的凹岸,受河道水流顶冲作用较为明显,而翻坝码头位于弯道凸岸,利于泥沙落淤。向家坝枢纽每年汛期冲水排沙,因此汛期凉水井码头区域有更大的冲刷量。翻坝码头和坝下游区域则表现出显著的水库修建后的冲淤变化情况,即库区内以淤积为主,大坝下游以冲刷为主。2020年汛期洪峰流量较大,高洪持续时间久,使得翻坝码头略有冲刷,坝下游冲刷量也较大。

表 4 向家坝近坝通航区域冲淤量计算结果

区域	测次	槽蓄量/ 万 m ³	冲淤量/ 万 m ³	平均冲淤 厚度/m	累计冲淤 厚度/m
翻坝 码头	2019-1	1 172.26	-	-	-
	2019-2	1 166.62	5.64	0.169	0.169
	2020-1	1 159.82	6.80	0.204	0.373
	2020-2	1 164.41	-4.59	-0.138	0.236
	2021-1	1 163.37	1.04	0.031	0.267
	2021-2	1 162.71	0.65	0.020	0.287
凉水井 码头	2019-1	713.00	-	-	-
	2019-2	714.50	-1.49	-0.169	-0.169
	2020-1	715.64	-1.14	-0.130	-0.299
	2020-2	716.22	-0.58	-0.066	-0.365
	2021-1	716.98	-0.75	-0.085	-0.451
	2021-2	718.10	-1.12	-0.127	-0.578
坝下游 近坝通 航区域	2019-1	1 045.14	-	-	-
	2019-2	1 048.31	-3.16	-0.056	-0.056
	2020-1	1 050.84	-2.53	-0.044	-0.100
	2020-2	1 058.65	-7.81	-0.137	-0.237
	2021-1	1 068.53	-9.88	-0.173	-0.410
	2021-2	1 072.00	-3.47	-0.061	-0.471

注：“+”表示淤积，“-”表示冲刷。

2.2 冲淤分布情况

将不同测次的地形图进行套绘，从而获得该区域的冲淤分布情况^[10]，翻坝码头、凉水井码头和坝下区域的冲淤分布见图 2。可以看出，翻坝码头整体略有淤积，码头附近淤积约 2 m，局部细微区域冲淤变化较大；凉水井码头总体略微冲刷，河中心附近冲刷较为明显，河中心与近岸区的过渡带冲淤互现，码头附近略有淤积，局部细微区域冲淤变化较大；坝下游区域整体冲刷，向家坝水文站上游冲淤互现，且冲淤变化幅度不大，水文断面所在部位冲刷最明显，最大冲刷约 7 m，下游河道主槽平均冲刷 2~4 m，边滩冲淤互现，水文站下游处淤积约 3 m。翻坝码头附近淤积较为明显，须加强监测，杜绝因水深变化导致的行船危险；坝下游冲刷较为明显，且主要冲刷范围位于深槽，航道变化较大，须结合大坝运行情况对枯水期航深进行进一步论证；同时须加强对下游区域内重要涉水建筑物的监测，保证涉水建筑物的安全。

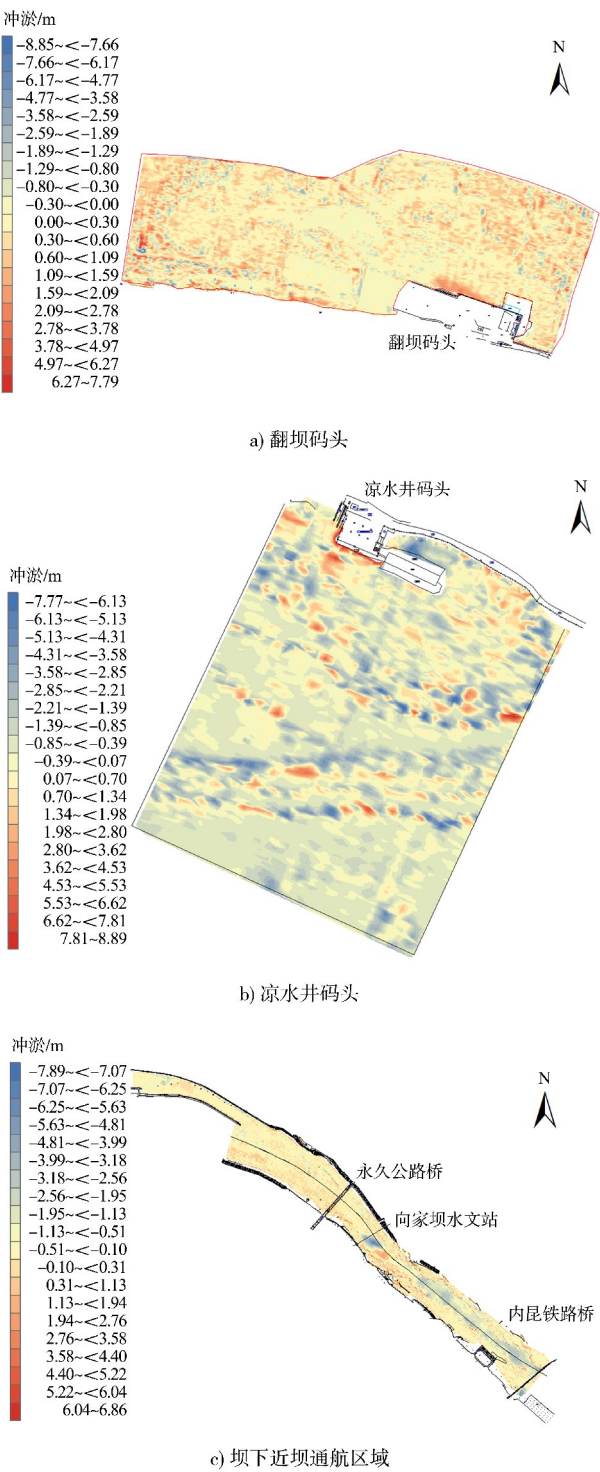


图 2 2019—2021 年各区域的冲淤分布

2.3 断面变化情况

在测区附近的固定测量断面分布见图 3。其中 JA001 断面位于凉水井码头和翻坝码头之间，JA002 断面位于翻坝码头上游约 200 m，J16 断面为向家坝站水文断面，位于坝下游区域内。自 2013 年以来各断面的变化情况见图 4，其中 2013-1、

2017-1、2019-0、2020-1、2021-0 测次完成时间分别为2013年4月、2017年5月、2019年5月、2020年5月、2021年5月。可以看出,各断面整体较为稳定,JA001断面深槽右侧冲刷明显,2013—2019年变化较大,最大冲深6 m,2019年后断面形态趋于稳定,冲刷程度较小,断面边坡较为稳定,无明显冲淤变化情况;JA002断面深泓处淤积,2013—2019年淤积较多,2019年后冲淤趋于稳定,最大淤积厚度累计2 m,断面边坡较为稳定,无明显冲淤变化情况;J16断面整体略冲刷,2013—2020年整体冲刷情况不明显,2020—2021年深槽右侧冲深明显,最大冲深6 m,断面边坡较为稳定,无明显冲淤变化情况。

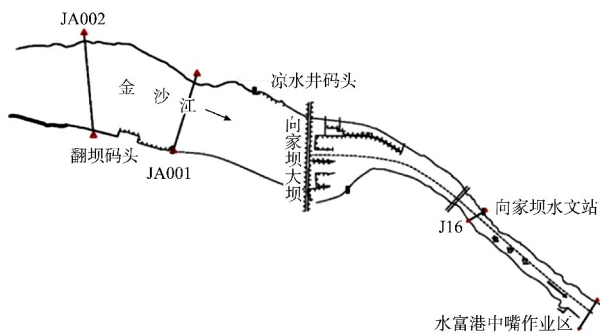
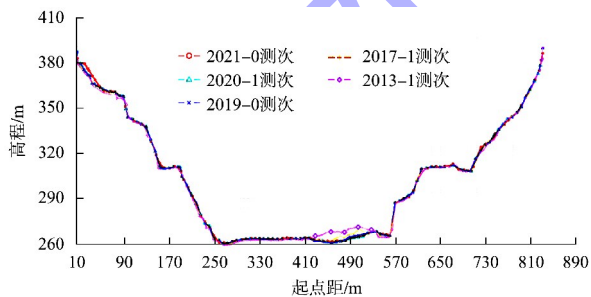
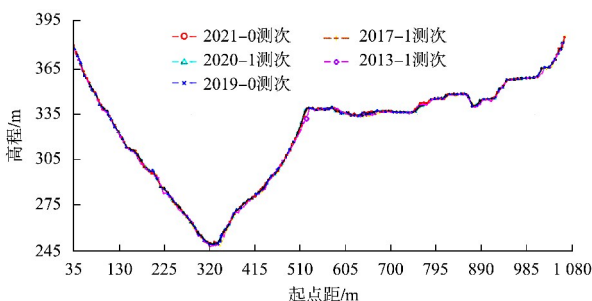


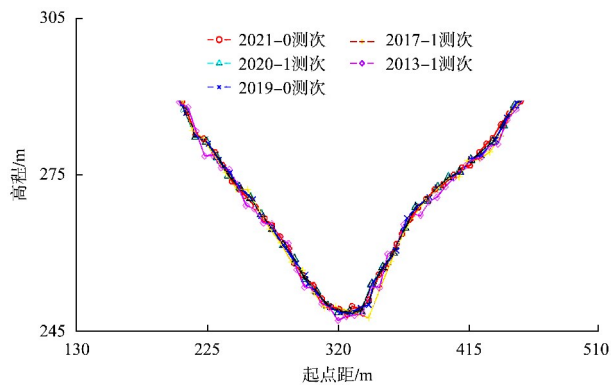
图3 固定断面布置



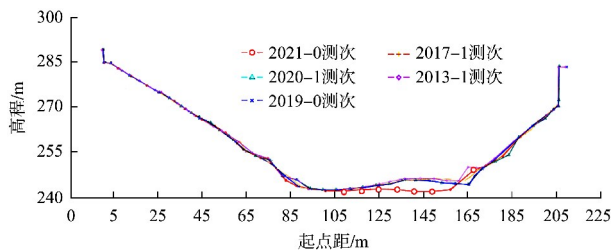
a) JA001断面



b) JA002断面



c) JA002断面深泓



d) J16断面

图4 2013年以来各断面变化

3 结语

1) 根据实测资料,翻坝码头常年淤积,总淤积量不大,但码头附近淤积较大,须加强观测,保证船只的航行安全。

2) 凉水井码头由于靠近坝轴线,受大坝泄洪影响而常年冲刷。冲刷主要以河槽为主,码头附近略有淤积。

3) 坝下游通航区域常年冲刷,部分航道冲刷2~4 m,最大冲刷7 m。下游区域须加强观测,关注河道下切对航道通航条件的影响;同时须加强对坝下游涉水建筑物的监测,保证建筑物稳定。

参考文献:

- [1] 四川省交通运输厅. 川滇两省与三峡集团共同促进金沙江向家坝枢纽通航能力提升. [EB/OL]. (2022-01-06) [2022-01-06]. <http://jtt.sc.gov.cn/jtt/c101585/2022/1/6/3809b589bc3f4765928d676d70ed1c2b.shtml>.
- [2] 胡艳芬,吴卫民,陈振红. 向家坝水电站泥沙淤积计算[J]. 人民长江, 2003, 34(4): 36-38, 48.
- [3] 曾雄辉,程浩,李延农. 向家坝水电站泄洪消能方案构思与初步研究[J]. 水力发电, 2004, 30(4): 21-23.

(下转第175页)