

三峡水库有效库容监测分析与长期保持 对策建议

胡春宏,方春明,关见朝

(中国水利水电科学研究院,100048,北京)

摘要:2003年三峡水库蓄水运用至今已逾20年,通过持续的水文泥沙监测和跟踪分析,三峡水库泥沙问题研究获得很多新认识和新成果。实测资料分析表明:2003—2023年三峡水库干流库区累积淤积泥沙量18.014亿 m^3 ;库区干、支流有效库容内淤积泥沙量1.6亿 m^3 ,占总有效库容的0.72%。三峡水库纵向淤积分布呈三角洲形态,2012年以后淤积三角洲进入稳定淤积发展阶段,在未来较长时间内,淤积三角洲段和三角洲以下至大坝段淤积量占比将维持在2/3和1/3左右。有效库容淤积主要发生在三角洲的上段,当边滩高程发展到高于汛限水位后,少量宽断面将带来较快的有效库容损失,应将其作为减少有效库容淤积的主要库段;洪水来沙量大时,应尽量控制三角洲滩面不被整体淹没,坝前水位150 m是控制水库有效库容淤积的关键约束指标。从2012年开始,三峡水库开展了汛期沙峰排沙调度试验和消落期库尾减淤调度试验,对减少有效库容淤积具有良好效果。研究表明,三峡水库采取优化调度措施,可以有效降低水库有效库容的淤积损失,这些措施主要包括:优化汛期水位动态变化、汛期沙峰排沙调度、消落期库尾减淤调度、减淤疏浚工程措施等。提出了三峡水库减淤目标库段和关键控制指标及措施建议,以期为三峡水库库容安全提供科技支撑。

关键词:三峡水库;水库泥沙淤积;有效库容;长期保持;减淤措施

Monitoring and evaluation of effective storage capacity of the Three Gorges Reservoir and strategic suggestions for its long-term maintenance//Hu Chunhong, Fang Chunming, Guan Jianchao

Abstract: The Three Gorges Reservoir has been in operation for over 20 years since its impoundment in 2003. Through continuous hydrological and sediment monitoring and tracking analysis, the study of sedimentation has achieved fruitful results. The actual measured data shows that the sediment accumulation in the mainstream reservoir area of the Three Gorges Reservoir had reached 1.8014 billion cubic meters from 2003 to 2023. The sediment accumulated in the effective storage capacity of the main and tributaries in the reservoir area was 160 million cubic meters, accounting for 0.72% of the total. The vertical sedimentation distribution of the reservoir was in the form of a delta. After 2012, the sedimentation delta entered a stable development stage. In the long term, the proportion of sedimentation in the delta section and below to the dam section will remain at around 2/3 and 1/3 respectively. Effective storage capacity siltation mainly occurs in the upper section of the delta. When the elevation of the beach reaches a level higher than the flood control water level, a small amount of wide cross-section will cause rapid loss of effective storage capacity, which should be regarded as the main reservoir section to reduce effective storage capacity. When the flood brings a large amount of sand, overall submergence of the delta beach surface should be avoided. The water level of 150 meters in front of the dam is a key constraint

收稿日期:2024-11-01

作者简介:胡春宏,中国工程院院士,主要从事泥沙运动理论与江河治理研究。

基金项目:中国长江三峡集团有限公司科研项目(0704229);三峡后续工作项目(12630100100023J046)。

indicator for controlling the effective storage capacity of the reservoir. Since 2012, the Three Gorges Reservoir has carried out flood season sediment peak discharge scheduling and drawdown period sediment reduction scheduling experiments at the tail of the reservoir, in order to reduce sediment. It shows that adopting optimized scheduling shall effectively reduce loss caused by sedimentation. These measures mainly include optimizing dynamic changes of water level and scheduling sand peak discharge during the flood season, reducing sedimentation at the tail of the reservoir during the drawdown period and dredging. Measures of target section and key control indicators are proposed to provide technical support for ensuring the safety of reservoir capacity.

Keywords: the Three Gorges Reservoir; reservoir sedimentation; effective storage capacity; long-term maintenance; measures to reduce sedimentation

中图分类号: TV697+TV145 文献标识码: B 文章编号: 1000-1123(2024)22-0017-09

三峡水利枢纽工程是开发和治理长江的关键性骨干工程,主要任务包括防洪、发电、航运和水资源利用等。泥沙问题是三峡工程的关键技术问题之一,涉及水库寿命、运行方式、库区淹没、航道变化和综合效益发挥等一系列重要问题。2003年三峡水库蓄水运用以来,针对库区泥沙淤积问题开展了持续观测和研究,掌握了入出库输沙量、排沙比、水库淤积分布等资料。水库减淤调度与长期有效库容保持是水库泥沙研究的重要方面,对于减少水库淤积、延长水库使用寿命、充分发挥水库综合效益有着至关重要的作用。为减少水库淤积和改善水库淤积形态,“十二五”和“十三五”期间,开展了三峡水库汛期沙峰排沙调度方式研究和汛前消落期库尾减淤调度研究等,后继众多学者在研究中取得丰富成果,并在三峡水库实施了汛期沙峰排沙调度和消落期库尾减淤调度实践,取得较好的效果。近年来随着三峡水库淤积的发展,水库有效库容淤积占比的逐渐增加引起了各方关注,因此,学者开展了水库有效库容减淤调度研究,并取得一些新的认识。

本文研究收集了三峡水库蓄水运用以来2003—2023年库区沿程水文站历年水流泥沙观测资料、库区不同年份固定断面观测资料等,分析了三峡水库纵向淤积特性,揭示水库淤积分布规律,预测了发展趋势,研究成果进一步深化了对三峡水库淤积分布规律的认识。由于三峡水库变动回水区和常年回水区上段断面经常受采砂、修路和航道整治等因素影响,在统计分析冲淤变化时,逐断面逐年对比,扣除了明显的人类干扰影响,以反映水库真实冲淤情况。本文提出了三峡水库减淤目标库段和关键控制指标及措施建议,以期为

三峡水库库容安全提供科技支撑。

一、三峡水库概况

1. 水库基本情况

三峡水库坝址位于湖北省宜昌市三斗坪镇,距下游已建成的葛洲坝水利枢纽约40 km。工程控制流域面积约100万 km^2 ,多年平均年径流量4510亿 m^3 ,多年平均年输沙量5.3亿t。三峡水库正常蓄水位为175 m,汛限水位为145 m,死水位为145 m。相应于正常蓄水位,水库全长660 km,水面平均宽度1.1 km,总面积1084 km^2 ,库容393亿 m^3 ,其中有效库容221.5亿 m^3 ,水库调节性能为季调节。水库回水长度约660 km,其中,大坝至涪陵库段为常年回水区,长约500 km,涪陵至江津库段为变动回水区,长约160 km。

2. 运行调度情况

2003年6月,三峡水库蓄水至135 m,进入围堰发电期;同年11月,水库蓄水至139 m。围堰发电期运行水位为135(汛限水位)~139 m(蓄水位),汛期平均水位137.22 m,水库平均排沙比37.0%。

2006年10月,三峡水库蓄水至156 m,较初步设计提前1年进入初期运行期,水库运行水位为144~156 m,汛期平均水位146.07 m,水库平均排沙比18.8%。

2008年汛末开始实施175 m试验性蓄水运用,较初步设计提前了5年。2003年三峡水库蓄水运用后,特别是试验性蓄水以来,入库泥沙大幅度减少,水库运行中根据实际条件和需要对初步设计规定的汛期水位和调度指标作了适当调整。2009年水库汛后蓄水时间由10月1日提前至9月15日,允许汛期水位上浮至146.5 m。2010年汛后蓄水时间进一步提前至9月

10日,汛期采取“中小洪水调度”运用方式,汛期水位浮动范围进一步增大。2020年三峡工程通过整体竣工验收,进入正常运行期。175 m试验性蓄水运用以来,水库汛期平均水位与初期运行期相比有大幅度提升,2009—2023年汛期平均水位151.31 m,水库平均排沙比18.7%。2009—2023年坝前水位日平均变化过程如图1所示。

二、近20年入库水沙变化与水库淤积

1. 入库水沙变化

2003年三峡水库蓄水运用以来,入库(朱沱站+北碚站+武隆站)水沙量变化过程如图2所示。2003—2023年入库年平均水量和年平均沙量分别为3706亿 m^3 和1.31亿t,与1991—2002年平均值相比,水量基本没变,沙量减少了63%。2013年以后,金沙江下游向家坝、溪洛渡水库相继蓄水运用,对三峡入库泥沙产生了重大影响。三峡入库悬移质沙量变化可分为3个时段:2003—2012年沙量较大,年平均为1.93亿t;2013—2017年沙量较小,年平均为0.582亿t;2018—2023年沙量居中,年平均为0.875亿t。三峡入库推移质沙量也持续减少,2003—2023年寸滩站砾卵石和沙质推移质年平均输沙量约4.6万t,对水库淤积影响小。

2. 水库淤积

据三峡水库实测入库、出库水沙量资料统计,2003年6月—2023年12月,三峡水库共淤积泥沙量20.80亿t,年平均淤积量1.011亿t,水库排沙比为23.4%。历年入出库泥沙量与水库淤积量变化过程如图3所示。

水库断面观测资料统计表明,2003—2023年三峡水库干流库区累积淤积泥沙量18.014亿 m^3 。其中,水库变动回水区总体冲刷,累计冲刷量0.7亿 m^3 (含河道采砂影响);淤积主要集中在涪陵以下的常年回水区,累积淤积量18.714亿 m^3 ,不同时期分库段淤积情况如表1所示。同期,三峡水库干、支流累积淤积在有效库容内的泥沙量为1.6亿 m^3 ,占175 m高程以下库区总淤积量的7.9%,占总有效库容的0.72%。

三、水库淤积分布变化过程

1. 水库淤积形态

(1) 水库淤积三角洲形成

三峡水库由于库沙比很大,且坝前水位变幅相对

于水深较小,符合形成三角洲淤积的条件。2003年三峡水库蓄水运用至2007年,淤积三角洲已初步形成。三角洲总长约250 km,尾端在清溪场下游不远处,坡脚在云阳下游,是水库主要淤积段(见图4)。由于三峡水库是峡谷型水库,至2021年库区深泓高程仍表现为锯齿状。三角洲以上库段,总体冲淤变化较小;三角洲以下库段,奉节局部淤积较大,与梅溪河入汇水沙影响有关;近坝段洲滩较多,有形成倒比降的趋势,与坝前出水口高程较高等有关。

(2) 水库淤积三角洲发展

2008年汛末175 m试验性蓄水后,由于7—8月主汛期平均水位上升约12 m,淤积三角洲尾部淤积范围上延约50 km,与回水上延距离基本相当。

2009年以来,虽然水库运行方式优化调整,但汛期平均水位总体变化不大,图5中分2008—2012年、2013—

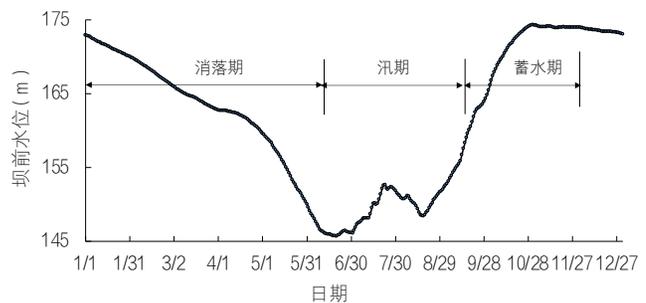


图1 2009—2023年三峡水库坝前水位日平均变化过程

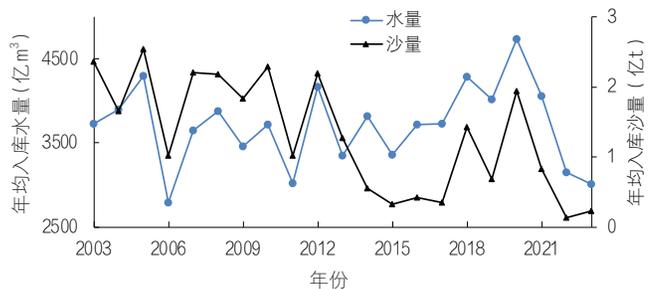


图2 2003年三峡水库蓄水运用以来年入库水沙量变化过程

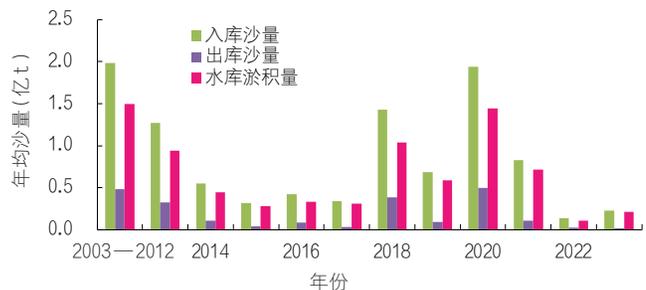


图3 三峡水库年入出库泥沙量与水库淤积量变化过程

2017年和2018—2021年3个时段比较了库区深泓变化。

由图5可见,2008—2012年期间,因入库沙量大,淤积三角洲坡面深泓淤积幅度较大,其他2个时段淤积幅度显著减小。2013年之后,三角洲坡面淤积显著减慢,但三角洲前坡段淤积速度较快,表明此时三角洲已进入向坝前稳定淤积推进阶段。

(3) 库区分段淤积特征

2003年三峡水库蓄水运用以来,重庆铜锣峡以上库段基本没有累积性淤积,河床仍为天然河道时的卵石河床。铜锣峡以下库段,受淤积影响断面的床沙级配发生了明显变化。2021年沿程断面淤积物中值粒径与纵向淤积形态对照如图6所示,符合水库三角洲淤积规律。

水库淤积三角洲尾部以上(S251~S292)约80 km库段是淤积物级配急剧变细段,应是库区推移质为主的淤积库段。由于三峡水库蓄水运用以来库区推移质输沙量很小,加之丰都以上库段是2012—2017年主要采砂库段,因此推移质淤积库段累积淤积量较小。

水库淤积三角洲尾部丰都至忠县(S218~S251)约70 km库段,淤积物级配沿程变细也很明显,应是推移质淤积与悬移质粗沙淤积过渡库段。

水库淤积三角洲中部以

表1 三峡水库干流库段冲淤量统计

时段	变动回水区(亿m ³)				常年回水区(亿m ³)				合计(亿m ³)
	江津—大渡口	大渡口—铜锣峡	铜锣峡—涪陵	小计	涪陵—丰都	丰都—奉节	奉节—大坝	小计	
长度(km)	26.5	35.5	111.4	173.4	55.1	274.5	156.9	486.5	659.9
2003.03—2006.10	/	/	-0.017	-0.017	0.020	2.698	2.735	5.453	5.436
2006.10—2008.10	/	/	0.107	0.107	-0.003	1.294	1.104	2.395	2.502
2008.10—2023.10	-0.418	-0.178	-0.194	-0.790	0.555	7.443	2.866	10.864	10.074
2003.03—2023.10	-0.418	-0.178	-0.104	-0.70	0.573	11.436	6.705	18.714	18.014

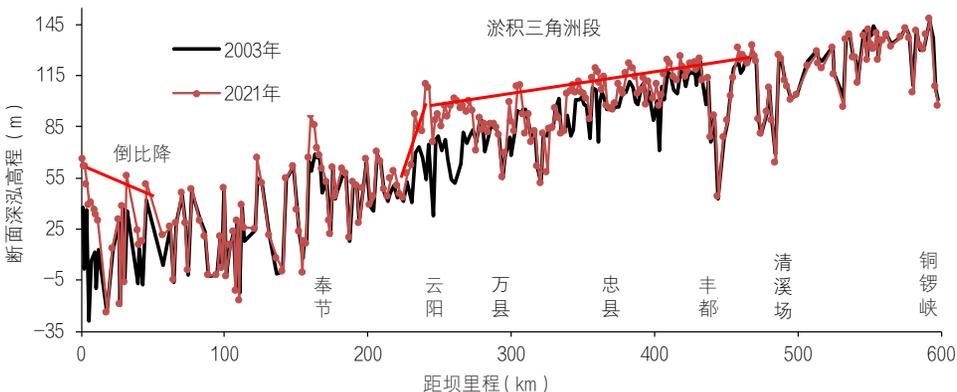


图4 三峡库区沿程断面深泓高程变化

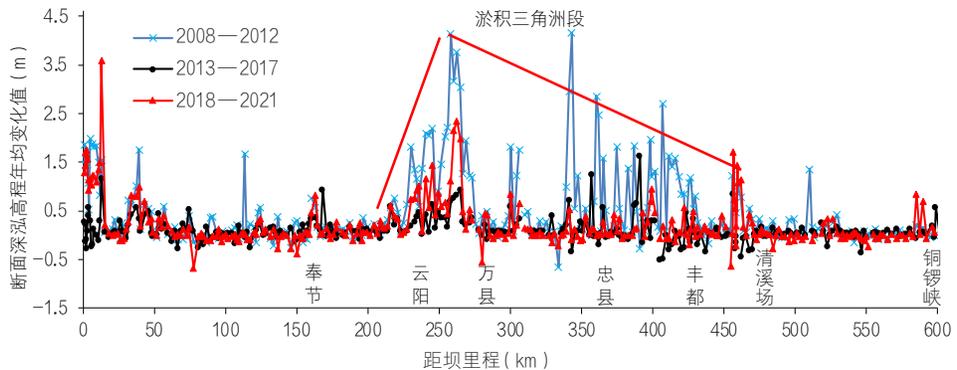


图5 三峡水库175 m试验性蓄水运用后不同时段库区断面深泓高程年均变化幅度

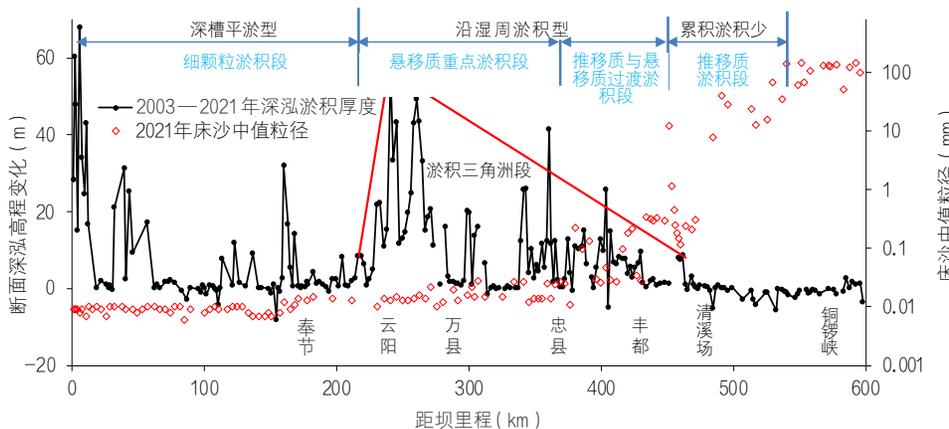


图6 三峡水库沿程淤积物中值粒径与纵向淤积形态对比

下即忠县至奉节(S112~S218)约220 km库段,淤积物级配总体表现为沿程变细趋势,应是悬移质沿程淤积分选库段,其中淤积三角洲中部至三角洲前坡脚段(忠县至云阳)是悬移质重点淤积库段。

奉节至大坝(S112以下)约160 km库段,淤积物级配很细,中值粒径基本在0.009 mm左右,且沿程变化不明显,为细颗粒淤积段。

2. 水库淤积量分布变化过程与趋势

三峡水库175 m试验性蓄水运用后,对比分析2008—2012年、2013—2017年和2018—2021年3个时段水库淤积分布变化,可反映水库淤积量分布变化过程。

(1) 水库淤积分布变化

图7给出了3个时段沿程断面年均冲淤面积对比,断面淤积主要集中在近坝段、奉节局部库段和水库三角洲淤积库段,其中三角洲淤积库段是最主要淤积段。2008—2012年淤积三角洲上段淤积比其他2个时段明显要大,其他库段分布差别不显著。原因是2008年汛末175 m试验性蓄水后水库淤积上延,2008—2012年三角洲上段淤积较大。就多年年平均年淤积量而言,与入库泥沙相一致,2008—2012年淤积最快,为12 341万m³;2013—2017年最慢,为4845万m³;2018—2021年居中,为7702万m³。

(2) 水库淤积分布发展趋势

3个时段分库段淤积在总淤积量中的占比变化如表2所示。各时段,铜锣峡至清溪场淤积占比很小,因而变化不大。水库淤积三角洲上段占比由30.7%大幅减小到16.1%,淤积三角洲中部黄华城分段占比由14.8%小幅减小到13.8%。淤积三角洲下段、三角洲以下至大坝段占比明显增大,分别由28.5%增大到36.5%、由23.6%增大到31.2%。可见3个时段库区淤积分布变化总体表现为上游占比减小,下游占比增

大,呈现向坝前稳步发展趋势(见图8)。

由时段②-①与③-②比较可见,各库段淤积占比变化幅度基本都呈减小趋势。说明175 m试验性蓄水运用后经过2008—2012年淤积,水库淤积三角洲进入稳定淤积发展阶段,各库段淤积占比调整速度明显减慢。可以预期,未来较长时段内,整个三角洲段淤积占比和三角洲以下至大坝段淤积占比将保持在2/3和1/3左右。

四、水库优化调度与长期有效库容保持

把握三峡水库有效库容淤积规律与发展趋势,有

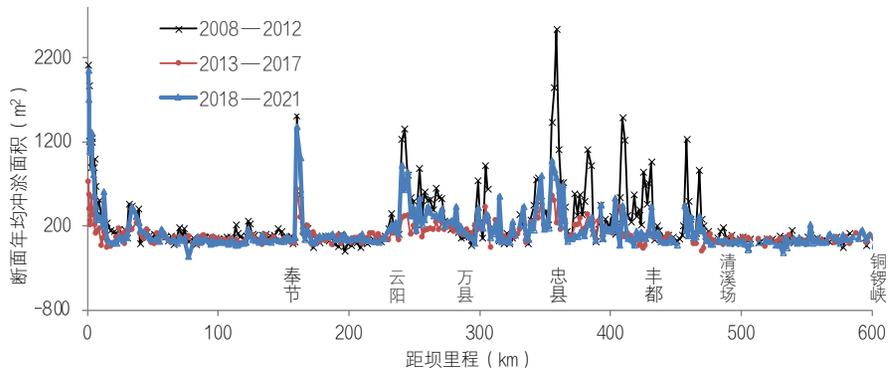
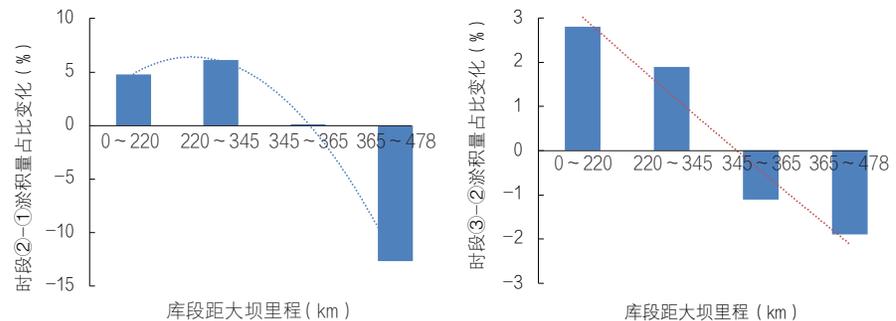


图7 三峡水库175 m试验性蓄水运用后不同时段库区沿程断面年均冲淤面积

表2 三峡水库175 m试验性蓄水运用后不同时段库区分段淤积量占比统计

断面范围	距坝里程 (km)	①2008—2012年	②2013—2017年	③2018—2021年	②-①	③-②	备注
S263~S323	478~598	2.4%	4.1%	2.6%	1.70%	-1.50%	铜锣峡至清溪场
S210~S263	365~478	30.7%	18.0%	16.1%	-12.70%	-1.90%	淤积三角洲上段
S198~S210	345~365	14.8%	14.9%	13.8%	0.10%	-1.10%	黄华城所在河段
S140~S198	220~345	28.5%	34.6%	36.5%	6.10%	1.90%	淤积三角洲下段
大坝~S140	0~220	23.6%	28.4%	31.2%	4.80%	2.80%	三角洲以下



(a) 2013—2017年对比2008—2012年

(b) 2018—2021年对比2013—2017年

图8 三峡水库175 m试验性蓄水运用后不同时期库区分段淤积量占比变化

针对性地提出减淤措施, 尽量保持较大的长期有效库容, 对三峡工程长期发挥综合效益具有十分重要作用。

1. 水库有效库容淤积变化

(1) 有效库容淤积分布特征

三峡水库初期运行期由于坝前水位较低, 145~175 m 水库干流库区有效库容高程范围累积性淤积较少。175 m 试验性蓄水运用后, 2008—2023 年干流库区有效库容共淤积泥沙量 1.06 亿 m³。分时段断面年均冲淤面积对比如 9 图所示, 有效库容内淤积主要出现在清溪场至万县库段, 即水库淤积三角洲中上段, 共淤积泥沙量 0.68 亿 m³; 三角洲以上至铜锣峡库段有效库容内淤积较少, 铜锣峡以上没有累积性淤积; 万县以下至大坝库段有效库容内淤积也较少。

从有效库容年均淤积量看, 2013—2017 年淤积最慢, 为 562 万 m³; 2018—2021 年淤积最快, 为 1092 万 m³; 2008—2012 年居中, 为 684 万 m³。表明有效库容内淤积与入库沙量并不完全对应, 虽然 2018—2021 年入库沙量不是很大, 但年均淤积量最大, 这与断面淤积形态发展有关。侵占有效库容的淤积主要发生在一些淤积较快的宽断面, 当淤积面累积发展到高于 145 m 后将带来较快的有效库容淤积损失 (见图 10)。

(2) 有效库容淤积变化过程

① 分库段有效库容淤积量在总淤积量中的占比变化

3 个时段分库段有效库容淤积量在各自总淤积量中的占比如表 3 所示。由表 3 可见, 呈现两个明显规律: 一是库段从上至下有效库容内淤积占比呈减小趋势。二是各库段有效库容内淤积占比都随时间呈增大趋势, 其中: 三角洲尾端以上至铜锣峡库段淤积占比增速缓慢; 淤积三角洲上段和淤积三角洲中部黄华城分汊段淤积占比快速增大, 分别由 9.8% 增大到 37.6% 和由

2.4% 增大至 17.3%; 淤积三角洲下段及淤积三角洲以下至大坝段淤积占比小幅增加。

从铜锣峡以下库区看, 有效库容内淤积在总淤积量中的占比由 5.5% 增大到 14.2%。虽然有效库容内淤积占比未来还会继续增大, 但增速呈明显减缓趋势 (见图 11)。

② 分库段有效库容淤积量在总有效库容淤积量中的占比变化

3 个时段分库段有效库容淤积量在总有效库容淤积量中的占比如表 4 所示, 表明有效库容淤积总体呈向坝前推进趋势。淤积三角洲尾端以上至铜锣峡库段占比由 24.1% 减小到 10.9%; 淤积三角洲上段淤积占比由 54.3% 减小到 42.7%, 仍是现阶段有效库容主要淤积

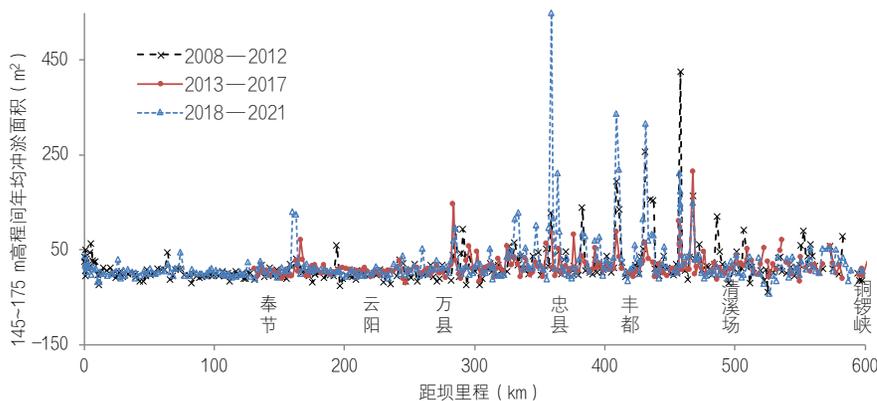


图 9 三峡水库 175 m 试验性蓄水运用后不同时期库区沿程断面 145~175 m 高程范围年均面积变化

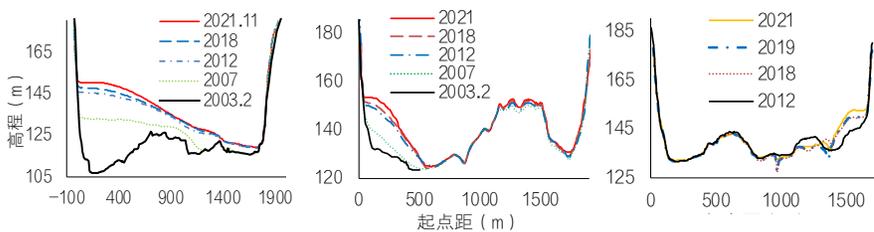


图 10 三峡水库有效库容高程范围淤积较快断面情况

表 3 三峡水库 175 m 试验性蓄水运用后不同时期不同库段 145~175 m 高程范围淤积量在各自总淤积量中的占比

库段	距坝里程 (km)	2008—2012 年	2013—2017 年	2018—2021 年	备注
S263~S323	478~598	56.0%	56.4%	59.7%	铜锣峡至三角洲
S210~S263	365~478	9.8%	23.5%	37.6%	三角洲上段
S198~S210	345~365	2.4%	4.7%	17.3%	黄华城所在河段
S140~S198	220~345	2.7%	7.9%	7.4%	三角洲下段
大坝~S140	0~220	0.3%	5.7%	4.9%	三角洲以下
S323~大坝	598	5.5%	11.6%	14.2%	铜锣峡至大坝

库段;淤积三角洲中部以下各库段淤积占比都总体呈增加趋势。

2. 减少有效库容淤积的优化调度措施研究

(1) 有效库容减淤调度目标库段与关键控制指标

① 有效库容减淤目标库段

图 12 为 2021 年库区沿程滩面高程变化情况,黄华城以上至清溪场库段大多断面已淤积形成明显边滩,且边滩比降较缓,淤积直接侵占有效库容;而黄华城以下至淤积三角洲坡脚边滩处于形成期,高程还较低,且比降大。因此,降低有效库容淤积的主要库段应是黄华城以上至清溪场库段,此库段是现阶段有效库容淤积的主要库段,也是减淤的目标库段。

② 有效库容减淤关键控制指标

“十三五”期间,在承担的三峡工程泥沙重大问题研究项目“三峡水库优化调度与长期有效库容研究”中,通过泥沙数学模型模拟表明:当坝前水位在 150 m 以下时,水库泥沙基本淤积在死库容内;当坝前水位在 155 m 以上时,典型洪水有效库容内都出现了淤积,占总淤积量的 6.9%~14.3%。从典型洪水过程计算库容损失情况来看,认为坝前水位 150 m 是控制有效库容损失的临界水位。

由图 12 可见,库区滩面淤积三角洲坡顶黄华城滩面高程为 85 高程 148 m(冻结基面 150 m);三角洲尾部清溪场滩面高程为 85 高程 157 m(冻结基面 159 m)。因此,当黄华城附近水位超过冻结基面 150 m 时,即开始引起淤积三角洲滩面过流;当清溪场附近水位超过 159 m 时,整个淤积三角洲滩面都处于过流状态。可见,控制坝前水位 150 m,对应于控制水库淤积三角洲滩面不被整体淹没,是减少有效库容淤积的关键控制指标。

(2) 减少有效库容淤积的优化调度措施

研究表明,三峡水库采取优化调度措施,可以有效减少水库有效库容的淤积损失。这些措施主要包括:优化汛期水位动态变化、汛期沙峰排沙调度、消落期库尾减淤调度、减淤疏浚工程措施等。

① 优化汛期水位动态变化

自 2010 年开始,三峡水库明确了汛期在确保防洪安全的前提下实施中小洪水调度,汛期水位高于汛限水位 6~8 m。中小洪水调度可以有效地利用洪水资源,减轻中下游防洪压力,提高水库的发电和航运效益,但中小洪水调度总体上抬高了水库的汛期水位,对泥沙淤积量有增加作用。相关研究表明,增加的淤积量在同期库区泥沙淤积量中的占比为 10% 左右。随着入库

水沙条件变化和库区淤积发展,中小洪水调度方式可在提高水库综合效益前提下继续优化,以减少有效库容的淤积。

② 汛期沙峰排沙调度

汛期沙峰排沙调度是利用汛期洪峰和沙峰传播时间差调节水库下泄流量过程,增加水库排沙量。研究提出了三峡水库开展沙峰排沙调度的入库水沙条件、控制指标和相应方案。三峡水库从 2012 年开始开展了汛期沙峰排沙调度试验,取得较好成效。如 2012 年 7 月实施的沙峰调度排沙比达到 67%,2013 年 7 月沙峰调度排沙比达到 31%,2018 年 7 月沙峰调度排沙比达到 29%,与往年场次洪水相比水库排沙能力均有明显提高。

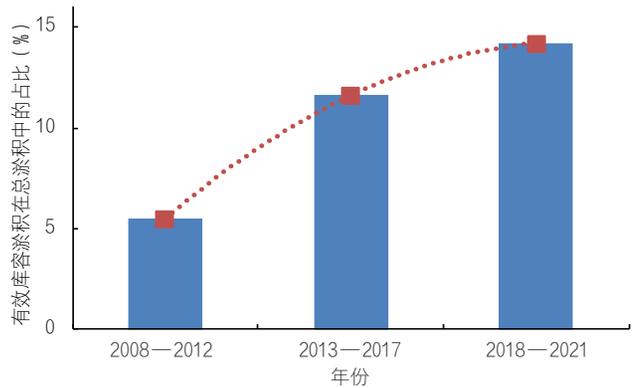


图 11 三峡水库 175 m 试验性蓄水运用后不同时期 145~175 m 高程范围淤积量在总淤积量中的占比变化

表 4 三峡水库 175 m 试验性蓄水运用后不同时期 145~175 m 高程范围分库段淤积量占比统计

库段断面	距坝里程 (km)	2008—2012 年	2013—2017 年	2018—2021 年	备注
S263~S323	478~598	24.1%	19.9%	10.9%	铜锣峡至三角洲
S210~S263	365~478	54.3%	36.4%	42.4%	三角洲上段
S198~S210	345~365	6.5%	6.1%	16.8%	黄华城所在河段
S140~S198	220~345	13.7%	23.6%	19.0%	三角洲下段
大坝~S140	0~220	1.4%	14.0%	10.9%	三角洲以下

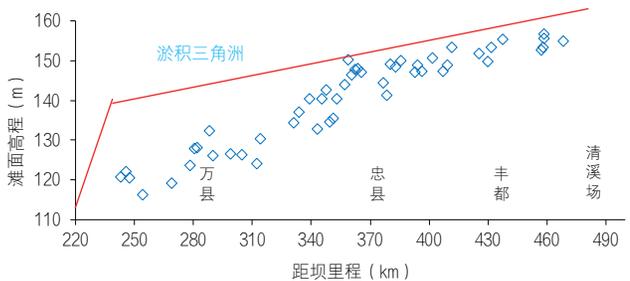


图 12 2021 年三峡库区沿程滩面高程变化

水库淤积三角洲是有效库容泥沙淤积的主要库段。数学模型模拟表明,如果以减少水库有效库容淤积量为目的,基本以沙峰主体进入水库淤积三角洲段时开始调控,有效库容减淤效果最好;如果以减少水库总淤积量为目标,沙峰排沙调度开始时间比有效库容减淤最大的排沙调度开始时间晚1~3天,流量越大相差越少,流量越小相差越多。其原因主要是从总淤积量分布看,水库淤积三角洲以下至大坝河段淤积较多,以减少水库总淤积量为目的的沙峰排沙调度开始时间要晚于以减少有效库容淤积为目的的排沙调度开始时间。

③消落期库尾减淤调度

水库消落期库尾减淤调度是结合来水来沙条件,调节库水位消落过程,使其有利于变动回水区冲刷,尽可能将前期淤积的泥沙冲刷到常年回水区,已有相关研究提出了开展库尾减淤调度的入库水沙条件和相应方案。从2012年开始,三峡水库开展了消落期库尾减淤调度试验,取得明显成效,历次涪陵以上库尾河段冲刷量如图13所示,其中以2022年减淤冲刷量最大,达843万m³。

随着库区淤积的累积,水库三角洲淤积体向下游推进发展。建议今后三峡水库消落期减淤调度目标库段由重庆至涪陵段转为清溪场以下淤积三角洲上段,更好地减少有效库容淤积损失。

④减淤疏浚工程措施

丰都至忠县是推移质淤积与悬移质粗沙淤积过渡段,其中清溪场至黄华城以上大多断面已淤积形成明显边滩。这是水库有效库容淤积损失的主要原因,也将引起航道条件改变。由于淤积泥沙相对较粗,已沉积泥沙冲刷难度较大,建议结合水沙调控,研究机械清淤、工程治理等综合措施,以恢复部分有效库容淤积损失。

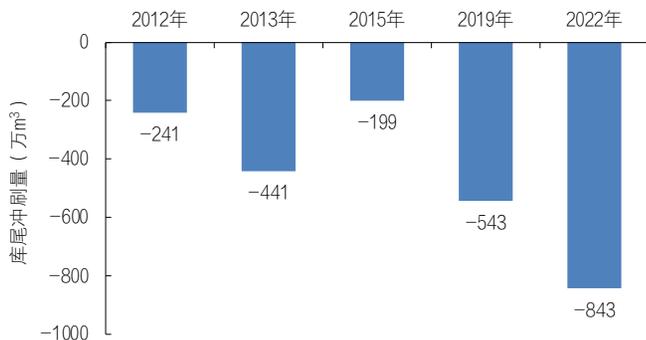


图13 三峡水库库尾减淤调度期间库尾河段冲刷量

五、结语

2003年三峡水库蓄水运用至今已逾20年,通过持续的水文泥沙监测和跟踪研究,对三峡水库有效库容长期保持取得如下认识:

①2003—2023年三峡水库干流库区累积淤积泥沙量18.014亿m³,水库变动回水区略有冲刷,淤积主要集中在涪陵以下的常年回水区。同期,三峡水库干、支流累积淤积在有效库容内的泥沙量为1.6亿m³,占库区总淤积量的7.9%,占总有效库容的0.72%。

②三峡水库纵向淤积分布呈三角洲形态,2012年以后淤积三角洲进入稳定淤积发展阶段,在未来较长时间内,淤积三角洲段和三角洲以下至大坝段淤积量占比将维持在2/3和1/3左右。

③三峡水库各库段有效库容淤积量在各自总淤积量中的占比均随时间呈增大趋势,2018—2021年期间,水库有效库容淤积在水库总淤积量中的占比为14.2%,未来还会继续增大。

④水库有效库容淤积主要发生在淤积三角洲上段,淤积较快的宽阔断面形成明显边滩,带来较快的有效库容淤积损失,应作为减少有效库容淤积的主要库段。洪水来沙量大时尽量控制三角洲滩面不被整体淹没,坝前水位150m是控制有效库容淤积的关键约束指标。

⑤三峡水库从2012年开始开展了汛期沙峰排沙调度试验和消落期库尾减淤调度试验,对减少有效库容淤积具有良好效果。为更好地减少水库有效库容淤积,今后三峡水库减淤调度应转为以减少淤积三角洲上段淤积为重点,建议结合水沙调控,研究机械清淤、工程治理等综合措施,以部分恢复边滩淤积带来的有效库容淤积损失。

参考文献:

- [1] 胡春宏,方春明.三峡工程泥沙问题解决途径与运行效果研究[J].中国科学:技术科学,2017,47(8):832-844.
- [2] 方春明,董耀华.三峡工程水库泥沙淤积及其影响与对策研究[M].武汉:长江出版社,2011.
- [3] 陈建,李义天,邓金运,等.水沙条件变化对三峡水库泥沙淤积的影响[J].水力发电学报,2008(2):97-102.
- [4] 袁晶,许全喜,董炳江,等.近20年来三峡水库泥沙淤积及其对库区的影响[J].湖泊科学,2023,35(2):

- 632-641.
- [5] WENJIE LI, SHENGFA YANG, YI XIAO, et al. Rate and Distribution of Sedimentation in the Three Gorges Reservoir, Upper Yangtze River[J]. JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING, 2018, 144(8): 05018006.
- [6] 胡春宏, 李丹勋, 方春明, 等. 三峡工程泥沙模拟与调控[M]. 北京: 水利水电出版社, 2017.
- [7] 朱玲玲, 葛华, 董炳江, 等. 三峡水库175 m蓄水后库尾河段减淤调度控制指标研究[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 114-126.
- [8] SHI REN, BANGWEN ZHANG, WEIJIE WANG, et al. Sedimentation and its response to management strategies of the Three Gorges Reservoir, Yangtze River, China[J]. Catena, 2021(199): 105096.
- [9] 高宇, 任实, 王海, 等. 三峡水库场次洪水排沙规律及影响因素[J]. 水科学进展, 2024, 35(1): 112-122.
- [10] 张为, 朱敬一, 薛居理, 等. 三峡水库1990—2021年洪峰沙峰异步特性分析[J]. 水科学进展, 2023, 34(6): 850-857.
- [11] 周曼, 黄仁勇, 徐涛. 三峡水库库尾泥沙减淤调度研究与实践[J]. 水力发电学报, 2015, 34(4): 98-104.
- [12] 胡春宏, 方春明, 许全喜. 论三峡水库“蓄清排浑”运用方式及其优化[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 2-11.
- [13] 胡挺, 王海, 胡兴娥, 等. 三峡水库近十年调度方式控制运用分析[J]. 人民长江, 2014, 45(9): 24-29.
- [14] 三峡工程泥沙专家组. 三峡工程运行后泥沙冲淤与调控[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [15] 赵汗青, 任实, 闫静, 等. 汛期洪水资源化利用对三峡水库淤积影响研究[J]. 湖泊科学, 2024, 36(2): 634-644.
- [16] 胡春宏, 方春明, 陈绪坚, 等. 三峡工程泥沙运动规律与模拟技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [17] 三峡工程泥沙专家组. 三峡工程泥沙年度报告(2022)[R]. 2023.
- [18] 三峡工程泥沙专家组. 三峡工程运行后泥沙冲淤与调控[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [19] 张成潇, 米博宇, 吕超楠, 等. 高洪水期运行水位对三峡水库泥沙淤积的影响[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(6): 10-17+35.
- [20] 夏楠, 肖毅, 胡祥语, 等. 三峡水库变动回水区采砂分布研究[J]. 水运工程, 2023(7): 151-156.
- [21] 郑守仁. 三峡工程利用洪水资源与发挥综合效益问题探讨[J]. 人民长江, 2013, 44(15): 1-6.
- [22] 潘庆燊. 三峡工程泥沙问题研究60年回顾[J]. 人民长江, 2017, 48(21): 18-22.
- [23] 徐涛, 周曼, 李长春. 三峡水库区间侵蚀产沙变化分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(5): 51-56.
- [24] 陈建, 李义天, 邓金运. 汛限水位优化调度对三峡水库泥沙淤积的影响[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1): 183-188.
- [25] 陆永军, 左利钦, 季荣耀, 等. 水沙调节后三峡工程变动回水区泥沙冲淤变化[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 318-324.
- [26] 董占地, 胡海华, 吉祖稳, 等. 三峡水库排沙比对来水来沙的响应[J]. 泥沙研究, 2017, 42(6): 16-21.
- [27] WANG BY, YAN DC, An-bang Wen, et al. Influencing factors of sediment deposition and their spatial variability in riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(8): 1387-1396.
- [28] 李文杰, 李娜, 杨胜发, 等. 基于挟沙力的三峡水库泥沙淤积形态分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(5): 726-734.
- [29] 金中武, 任实, 吴华莉, 等. 三峡水库淤积排沙及河型转化规律[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(10): 9-15+27.
- [30] 杨胜发, 李文杰, 胡小庆, 等. 三峡水库航道泥沙淤积模式及航道通过能力提升研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(S1): 41-48.
- [31] 黄仁勇, 王敏, 张细兵, 等. 三峡水库汛期“蓄清排浑”动态运用方式初探[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(7): 9-13.

责任编辑 张瑜洪