

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.03.011

复杂边界作用下三峡水库泥沙淤积特征与趋势

杨春瑞, 邓金运, 陈 立

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 受上游水沙条件和水库调度过程等影响, 三峡水库实际淤积过程较为复杂。本文基于一维泥沙数学模型, 分析上下游边界条件变化对三峡水库淤积特征的综合影响, 建立入库沙量和汛期坝前水位与库区淤积的经验关系, 讨论了其贡献及未来淤积趋势。结果表明: 上游干支流入库沙量和汛期坝前水位是影响三峡水库淤积的主要因素, 其变化均将造成库区淤积重心的偏移, 变动回水区下段及常年回水区上段的泥沙分选及冲淤情况受影响最为明显; 2013—2020年, 干流来沙对三峡库区淤积的贡献减小(由65%减小至42%), 支流来沙贡献逐步增大(由32%增大至56%); 汛期坝前水位变化对该时段库区淤积较2003—2012年期间的影响已经较小(1.6%~1.8%); 当遭遇平常水文年水沙过程, 未来三峡水库泥沙淤积量约在0.5亿 t/a 左右; 当遭遇不利洪水组合水文年, 尤其是支流发生大规模强降雨使岷江和嘉陵江洪峰流量大于30 000 m^3/s 时, 三峡水库泥沙淤积量约在1.6亿 t/a 左右。

关键词: 淤积; 来沙; 坝前水位; 数值模拟; 三峡水库

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1001-6791(2023)03-0442-12

泥沙淤积是制约水库使用寿命和综合效益发挥的关键因素之一。三峡水库蓄水后, 库区泥沙淤积在增大水库自身防洪、航运风险的同时, 还会打破水库下游河道水沙平衡, 将不可避免地引起防洪、航运、生态环境等一系列响应。在三峡工程可行性论证、初步设计以及后续规划等阶段, 泥沙淤积问题均是需解决的关键问题之一^[1]。

随着气候变化及人类活动的增强, 尤其是流域水利工程群体的建设, 河流水沙通量的变化一直倍受国际社会关注^[2-4]。三峡水库自2003年蓄水以来, 入库水沙条件发生了明显变化, 国内外学者就三峡水库水沙条件变化及其对淤积的影响进行了诸多研究, 涵盖了入库流量变化、入库沙量变化、入库泥沙粒径特征等多方面, 认为三峡水库蓄水以后, 入库径流量变化不大^[3], 向家坝、溪洛渡水库运行以后拦沙导致入库沙量明显减少^[5], 随着上游更多梯级水库的运用三峡入库泥沙会进一步减少^[6]。尽管三峡入库沙量整体上呈现减少趋势, 但2013年后仍然存在2018年、2020年等特殊年份入库沙量达到甚至超过2003—2012年的平均水平的情况^[7-8], 入库沙量的变化仍不稳定。与此同时, 三峡水库建设过程中坝前正常蓄水位不断调整, 先后经历了围堰蓄水期、初期蓄水期和试验性蓄水期运用阶段。而且在来沙减少的背景下, 为充分发挥水库防洪效益, 三峡水库对原调度方案进行了多次优化调整, 汛期平均坝前水位明显抬升^[9]。在上下游边界变化的综合影响下, 三峡水库库区淤积过程发生了明显调整, 来沙减少使得库区淤积减弱, 而汛期坝前水位抬升使得库区淤积增加, 库区冲淤分布规律与设计论证阶段成果也出现了明显差异^[4]。但由于入库水沙条件和坝前调度运用2种边界条件对水库淤积的影响是非线性的, 且2种因素的影响相互交织, 仅通过实测资料分析不易区分各自的贡献, 对于不同时期库区淤积的主控因素、复杂边界共同作用下的库区淤积特征的认识仍存在不足, 难以指导未来淤积趋势的长期预测, 亟需开展进一步的深入研究。

收稿日期: 2022-12-28; **网络出版日期:** 2023-03-30

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20230330.1111.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51779185)

作者简介: 杨春瑞(1996—), 男, 山东日照人, 博士研究生, 主要从事水力学及河流动力学方面研究。

E-mail: 1195169554@qq.com

通信作者: 邓金运, E-mail: dengjinyun@whu.edu.cn

本文基于三峡水库蓄水以来的实测资料分析, 采用数值模拟的方法, 通过设计不同工况研究复杂边界变化对水库泥沙淤积的影响, 探讨蓄水以来上游来沙变化和坝前水位调整对实际淤积的贡献, 并预测未来三峡库区泥沙淤积趋势, 以期对三峡水库的科学调度和管理提供参考。

1 研究区域与数据

三峡水库坝址位于宜昌以上约 40 km, 库区范围自重庆市江津至坝前, 长约 662 km(图 1), 属于较为典型的河道型水库。库区两岸支流众多, 其中 2 条最大的支流为嘉陵江和乌江, 分别在重庆和涪陵处汇入长江。三峡水库与上游长江干流向家坝(2012 年)、溪洛渡(2013 年)、白鹤滩(在建)、乌东德(在建)水库, 支流二滩水库(雅砻江, 2000 年)、锦屏(雅砻江, 2013 年)、紫坪铺(岷江, 2006 年)、草街(嘉陵江, 2010 年)水库等, 形成了长江上游联合调度水库群, 总库容达 1 673 亿 m^3 ^[9]。自 2003 年三峡水库运用以来, 先后经历了 135 ~ 139 m、145 ~ 156 m 和 145-155-175 m 运用阶段^[10], 回水末端逐步上延。145-155-175 m 运用阶段, 水库回水末端位于江津附近, 入库控制站为长江朱沱站、嘉陵江北碛站和乌江武隆站。受水库蓄清排浑调度影响, 以涪陵为界, 库区分为变动回水区及常年回水区 2 段; 以寸滩、万县站为界, 又可以大致将上述 2 段各分为上下子段。

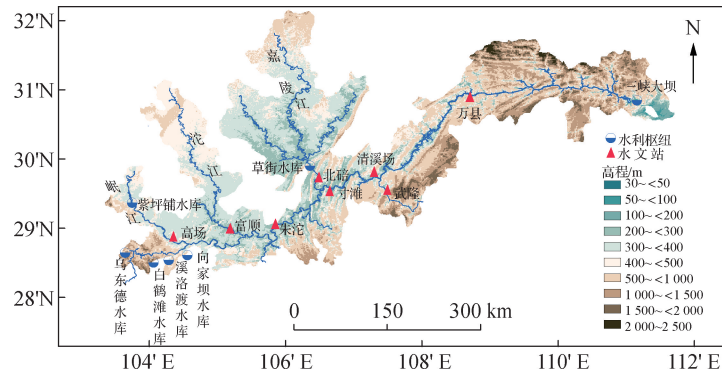


图 1 三峡水库库区
Fig. 1 Map of Three Gorges Reservoir area

2 研究方法

2.1 水库一维泥沙数学模型及验证

一维水沙数学模型理论基础及数值离散格式均比较成熟, 本文采用一维非恒定流非均匀沙模型, 模拟范围为三峡库区河道朱沱站至三峡大坝(不包括支流嘉陵江、乌江), 长约 760 km。模型基本控制方程、求解方法见文献[11], 以 2012 年实际水沙过程及库区淤积进行模型验证, 结果整理如表 1、表 2 所示, 模型计算水位误差均在 0.1 m 以内, 流量误差在 5% 以下, 泥沙淤积量误差在 10% 以内。

表 1 三峡库区主要测站水位、流量过程验证结果

Table 1 Verification results of water level and discharge of main monitoring stations in Three Gorges Reservoir area		
水文站	平均水位误差/m	平均流量误差/%
寸滩	-0.10	-3.00
清溪场	-0.06	-2.70
万县	0.10	-1.70

表 2 三峡水库泥沙淤积验证
Table 2 Siltation verification in Three Gorges Reservoir

河段	计算淤积量/亿 t	实际淤积量/亿 t	误差/%
寸滩—清溪场	0.30	0.29	3.45
清溪场—万县	3.11	3.45	-9.86
万县—大坝	2.40	2.60	-7.69
共计	5.81	6.35	-8.50

2.2 计算方案设置

2.2.1 三峡水库上下边界条件变化

统计三峡蓄水前后多年平均入库径流量、输沙量变化以及入库流量频率分布变化(图 2, 图 3), 可知: 三峡水库蓄水后, 入库径流量在年际没有明显趋势性变化, 径流年内分配略趋均匀, 枯水流量略有增加, 整体变化不大。入库泥沙呈现显著减小的特点, 以溪洛渡和向家坝水库开始运行的时间为界, 2013 年以前, 受水土保持工程和中小型水库建设的影响, 入库输沙量逐年减少, 但幅度不大; 2013 年以后, 受干流水库拦沙影响, 金沙江来沙量急剧下降。受汶川地震后下垫面变化和支流水库运用年限等因素影响^[7], 支流输沙量年际变化剧烈, 输沙主要集中在年内暴雨期, 岷江、嘉陵江 2020 年洪水过程期间最大含沙量分别达 7.12、8.19 kg/m³。与 2013 年前相比, 支流来沙占总入库泥沙的比重相对增大。支流来沙较少时, 三峡水库入库年均泥沙总量仅为 0.6 亿 t, 不足 20 世纪 90 年代年均入库沙量的 20%; 支流来沙较大时, 如 2020 年, 入库沙量达 1.9 亿 t^[8]。从朱沱站多年悬移质泥沙级配变化来看, 不同时段相比, 蓄水以来入库泥沙级配变化不大。

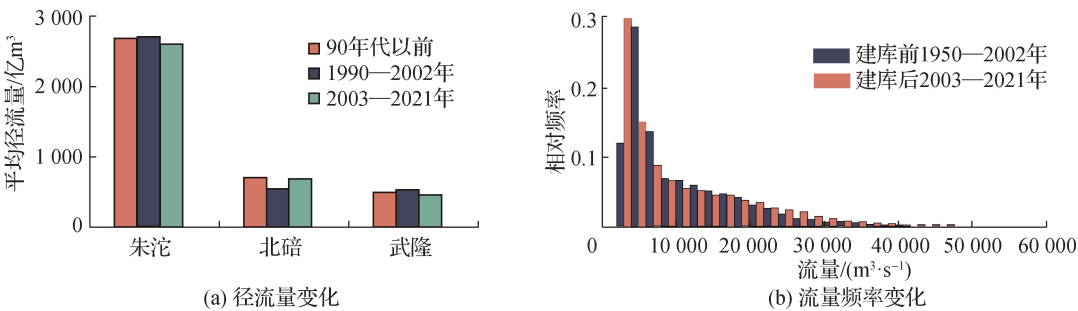


图 2 三峡水库入库径流变化

Fig. 2 Variation in runoff of the Three Gorges Reservoir

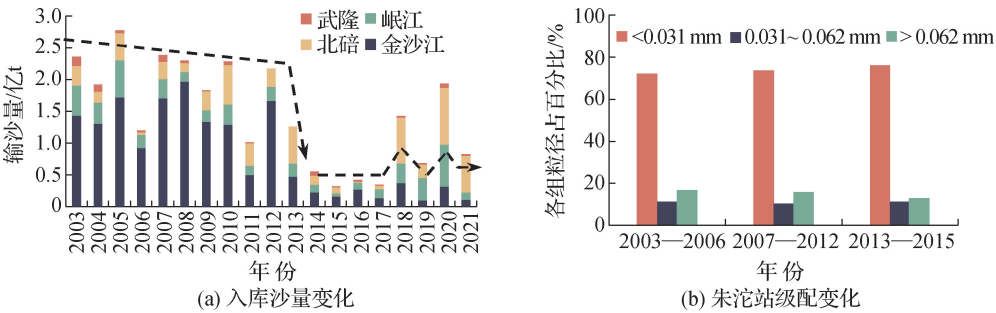


图 3 三峡水库入库泥沙变化

Fig. 3 Variation in incoming sediment of the Three Gorges Reservoir

三峡水库运用以来, 先后经历 135 ~ 139 m、144 ~ 156 m 和 145-155-175 m 运用阶段等阶段, 175 m 运用阶段还开展了汛期中小洪水调度试验、生态调度试验、排沙调度试验等试验性调度, 坝前水位变化频繁^[12]。汛期是来沙较多的时期, 也是水库淤积最为显著的时期^[4], 统计蓄水以来三峡水库汛期平均坝前水位变化如图 4 所示, 坝前水位变化的最显著特征是蓄水以来汛期坝前水位随着不同运用阶段而逐渐提升, 2010 年实施汛期中小洪水调度试验后, 汛期坝前水位进一步抬升, 且变化的波动性更加明显。

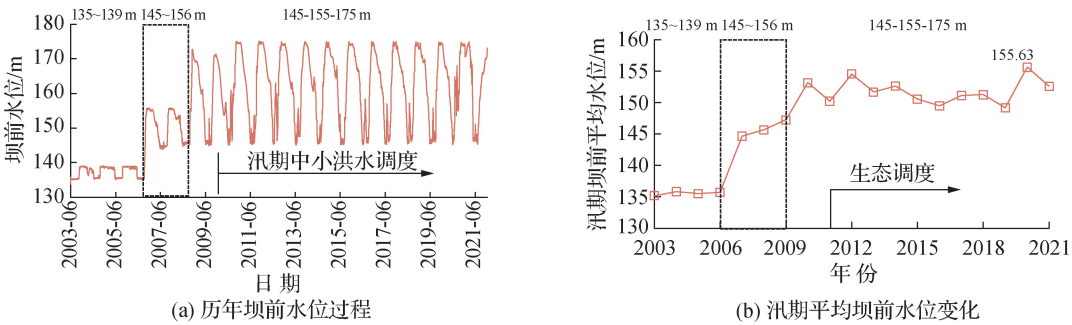


图 4 三峡水库坝前水位变化

Fig. 4 Variation in pre-dam water level of the Three Gorges Reservoir

2.2.2 计算方案

三峡水库实际蓄水以来上游边界条件变化突出表现为干流入库沙量大幅减少, 随着金沙江中下游梯级水库的陆续使用, 干流入库泥沙将在未来较长时间内保持低值; 下游边界条件的变化集中表现为汛期坝前水位的变化上, 随着水库调度方式的不断优化和调整, 未来水库坝前水位还将持续发生变化。为了探讨上下边界条件变化可能对三峡水库泥沙淤积的影响, 这里设置如下 2 种计算方案, 如表 3 所示。方案一为上游沙量过程变化, 具体处理方法为: 根据流量和含沙量呈幂指数关系的实际情况^[13], 采用 2012 年流量过程, 以 $S = \beta \alpha Q^\lambda$ 概化入库沙量的变化, 坝前水位汛期(6—9 月)控制为 145 m, 其他时段为实际水位过程; 方案二为汛期坝前控制水位变化, 具体处理方法为: 考虑目前汛期优化调度的实际情况, 在目前汛限水位 145 m 的基础上, 控制汛期坝前水位按一定数值浮动, 水位增量取为 0 ~ 8 m^[10], 上游来水来沙过程选取 2012 年实际入库水沙过程。

表 3 计算方案设置

Table 3 Calculation schemes for sediment siltation in the Three Gorges Reservoir			
方案	影响因素	处理方法	备注
方案一	沙量过程	$S = \beta \alpha Q^\lambda$	S 为入库含沙量; Q 为流量; β 为比例系数, 取值范围为 0.5 ~ 1.3; α 、 λ 分别为入库含沙量与流量幂函数关系的系数和指数
方案二	坝前水位过程	$Z = 145 + dz$	Z 为汛期坝前水位; dz 为坝前水位增量, 取值范围为 0 ~ 8 m

根据已有研究成果^[14-15], 2012 年为三峡水库蓄水后的丰水丰沙年, 朱沱站年输沙量为 1.89 亿 t, 与蓄水前后多年均值接近, 北碚站输沙量为 2 880 万 t, 武隆站输沙量为 120 万 t, 也接近多年平均水平, 选用该年作为典型年具有代表性。采用该年进口朱沱站流量—含沙量关系处理后得到不同的上边界沙量条件, β 间隔 0.1, 从 0.5 取至 1.3; 下游汛期平均坝前水位条件间隔 1 m, 从 145 m 取至 153 m。计算初始地形采用 2012 年地形, 计算时限为 10 a。

3 结果与分析

3.1 来沙变化的影响

图 5 为上游不同来沙条件下(方案一)三峡水库淤积计算结果,库区淤积和来沙量之间正相关性良好,随着入库沙量的增加,水库累积淤积量明显增大(图 5(a));随着入库沙量的减少,水库累积淤积量明显减小。从淤积重心变化来看,随着入库沙量增加,变动回水区淤积占比增加,而常年回水区淤积占比减小,表明库区泥沙淤积重心随来沙增大而向上游偏移(图 5(b))。变动回水区受上游来沙变化的影响最为显著,2012 年典型年来水条件下,入库沙量大于 1.5 亿 t/a 时,变动回水区淤积;入库沙量小于 1.5 亿 t/a 时,变动回水区冲刷(图 5(c));随着入库沙量的增加,常年回水区排沙比增大而变动回水区排沙比减小,使得水库总排沙比有所减小。相较于 2012 年实际情况 20.7%,计算排沙比略大,其主要原因是方案一计算坝前水位固定为 145 m,远小于实际情况汛期平均坝前水位 154 m,更有利于排沙。泥沙淤积集中于坝前段和宽谷、弯道河段,峡谷段泥沙淤积较少甚至表现为冲刷(图 5(d))。随着入库沙量的增加,常年回水区的宽谷河段、坝前河段淤积增加明显,峡谷河段淤积增加幅度小。

水库淤积特征的变化是泥沙在向坝前运动过程中分选沉降的结果,以 0.031 mm 和 0.062 mm 为界,将入库泥沙分为细沙、中沙和粗沙,点绘入库泥沙沿程分选过程如图 6 所示,分析表明:粗沙基本在变动回水区下段和常年回水区上段全部落淤,水流因粗沙落淤而“富余”出的挟沙能力转而引起中、细沙在变动回水区的冲刷,并由水流携至常年回水区后逐渐落淤,中沙淤积集中于常年回水区上段,细沙集中于常年回水区下段;冲泻质泥沙在变动回水区不参与河床塑造,进入常年回水区后有所淤积。不同入库沙量条件下,变动回水区的泥沙分选变化较常年回水区更为剧烈。

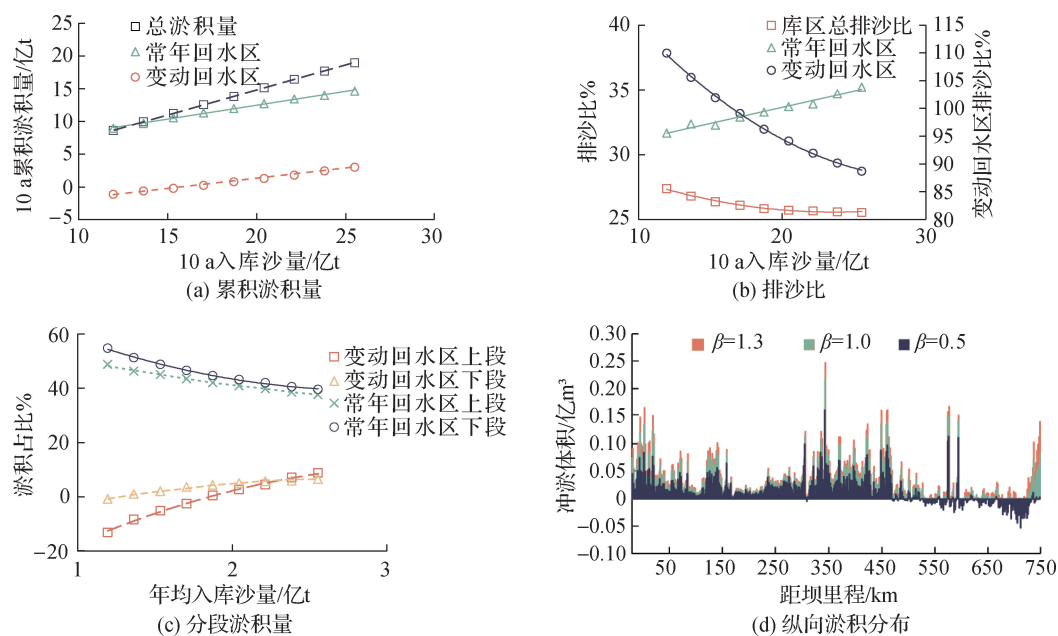


图 5 上游来沙变化对三峡水库淤积的影响

Fig. 5 Influence of upstream sediment inflow on siltation in the Three Gorges Reservoir

3.2 坝前水位变化的影响

图 7 为不同汛期坝前水位条件下三峡水库泥沙淤积计算结果,分析表明:汛期坝前水位与库区淤积量正

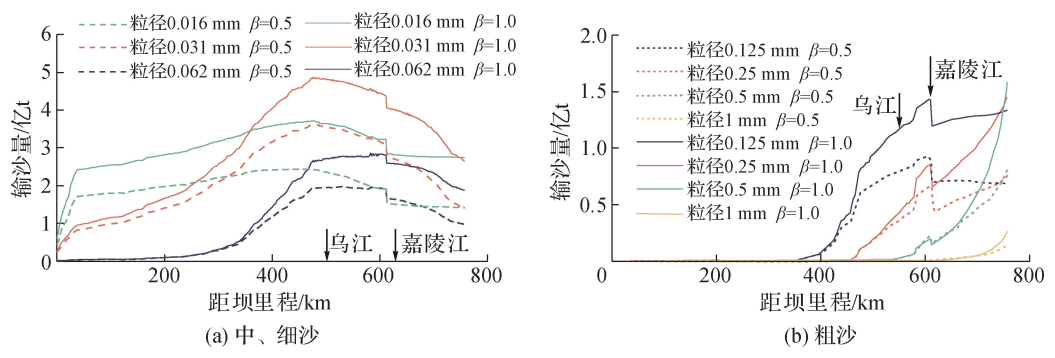


图6 泥沙沿程分选变化

Fig.6 Sorting process of inflow sediment (fine, medium, and coarse sand) along the Three Gorges Reservoir

相关,与排沙比负相关(图7(a),图7(b));2012年典型年水沙条件下,汛期平均坝前水位由145 m升至153 m,水库运行10 a泥沙淤积量由13亿t增至13.8亿t,平均每抬升1 m,累积淤积量增加0.1亿t;水库整体和分段排沙比均有减小,常年回水区由38%减小至35%,变动回水区由96%减小至95%;从分段淤积占比变化来看(图7(c)),汛期坝前水位抬升,常年回水区上段和变动回水区下段泥沙淤积占比不断增大,淤积重心上移(图7(d));从影响部位来看,常年回水区上段和变动回水区下段受坝前水位变化影响最为明显,常年回水区下段淤积强度随坝前水位略有增强,变动回水区上段影响较小。

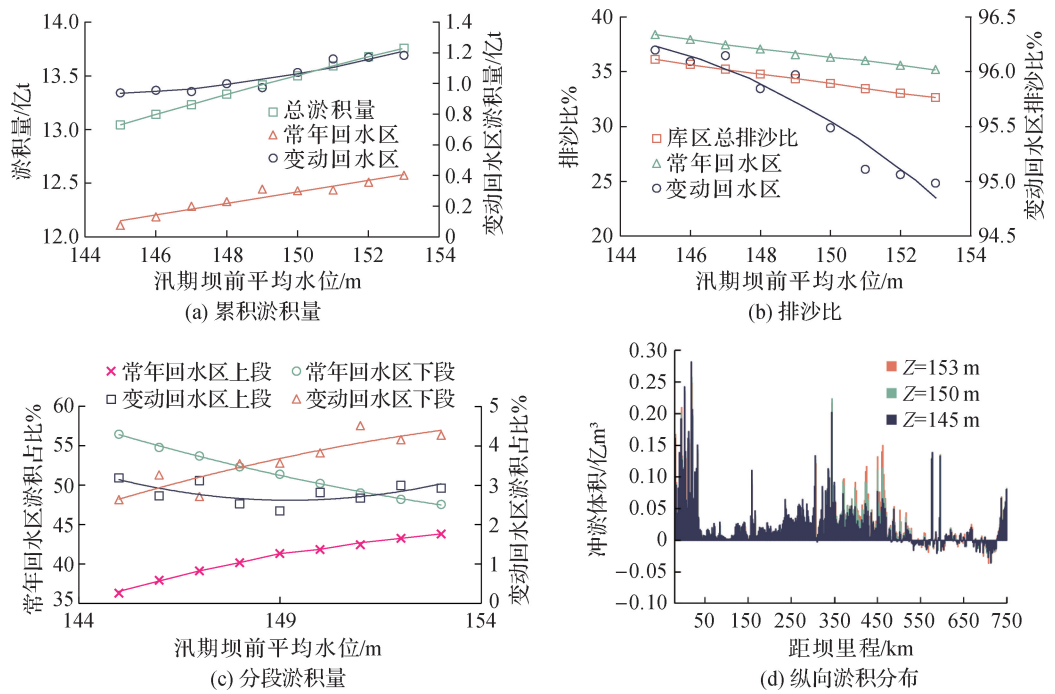


图7 汛期坝前水位变化对三峡水库淤积的影响

Fig.7 Effect of pre-dam water level variation during the flood season on the sediment deposition in the Three Gorges Reservoir

从汛期坝前水位145 m和150 m工况条件下库区泥沙沿程分选来看(图8),粗沙冲淤受汛期坝前水位的影响相对较小;随着汛期坝前水位的抬升,水库回水末端向上游延伸至变动回水区下段,河段平均水深增大,水流挟沙能力减弱,对中细沙冲刷强度减弱,因此变动回水区排沙比减小。常年回水区水位常年受坝前

水位控制, 受其变化影响更加明显, 坝前水位抬升后, 沿程水深增加, 水流挟沙能力减弱, 泥沙更早落淤, 淤积重心逐渐上移, 以中沙最为明显, 汛期平均坝前水位由 145 m 升至 153 m, 水库运用 10 a 后常年回水区上段淤积量由 3.8 亿 t 增长至 5.02 亿 t, 下段淤积量由 6.05 亿 t 减小为 5.05 亿 t。

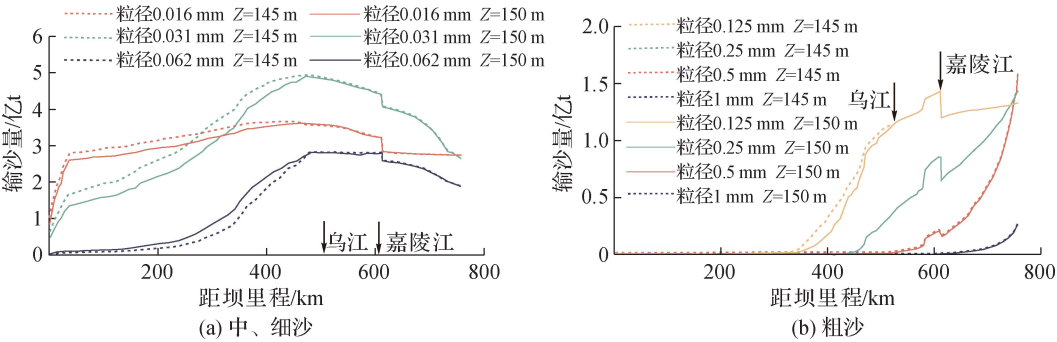


图 8 泥沙沿程分选变化
Fig.8 Changes in sediment sorting along the Three Gorges Reservoir

3.3 来沙与坝前水位的综合影响

入库沙量和汛期平均坝前水位均与水库泥沙淤积量变化正相关, 为分析两因素综合作用对库区淤积的影响, 点绘不同入库沙量和汛期平均坝前水位与三峡水库泥沙淤积量的关系, 如图 9 所示。水库泥沙淤积量与入库沙量、汛期平均坝前水位均具有良好的幂指数关系, 且坝前水位与水库淤积量的关系中, 幂指数系数变化与入库沙量呈正相关, 指数与入库沙量呈负相关; 入库沙量与水库淤积量的关系中, 幂指数系数与坝前水位呈正相关。因此, 以年入库沙量和汛期平均坝前水位作为变量, 建立库区淤积量与入库沙量和汛期平均坝前水位 2 个主控因子的经验公式如下:

$$W = aS^bH^{(cQ_s+d)}$$
 (1)

式中: W 为水库淤积量, 亿 t; Q_s 为入库沙量, 亿 t; H 为汛期平均坝前水位, m; a 为公式拟合系数; b 、 c 、 d 为公式拟合指数。

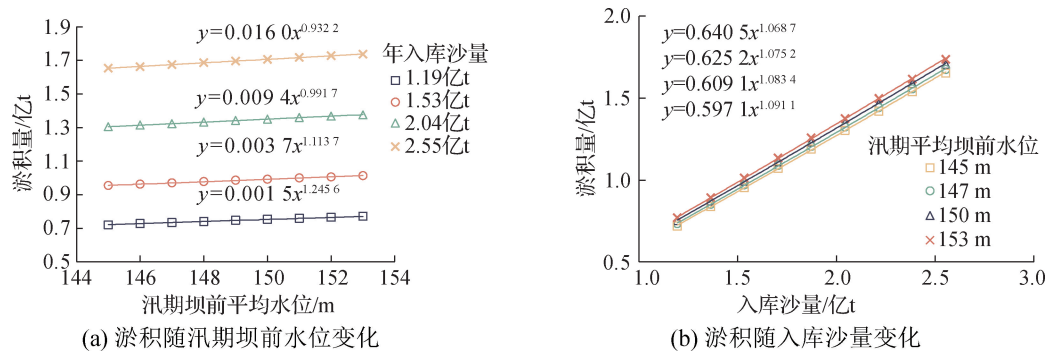


图 9 淤积量和坝前水位对水库泥沙淤积影响
Fig.9 Effects of incoming sediment and water level on sediment deposition in Three Gorges Reservoir

基于三峡水库实际运行以来入库沙量、汛期平均坝前水位以及库区泥沙淤积量数据, 率定式(1)中参数, $a=0.000\ 688$, $b=0.982\ 6$, $c=-0.012$, $d=1.432$ 。库区淤积量、汛期平均坝前水位及入库沙量联合关系良好, 相关系数可达 0.96(图 10)。

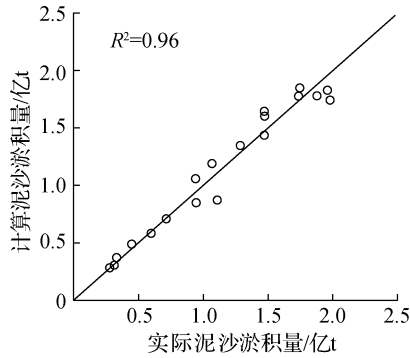


图10 计算泥沙淤积量与实际泥沙淤积量对比

Fig. 10 Comparison between the calculated and actual sediment deposition

4 讨论

4.1 三峡水库实际蓄水以来边界条件变化对淤积的影响贡献

2003年三峡水库蓄水运用以来,先后经历了135~139 m、144~156 m和145-155-175 m等不同的试验性蓄水阶段,而且上游溪洛渡和向家坝水库在2012—2013年开始蓄水运用,上下边界条件与设计论证阶段发生着较大变化。这里采用归因分析法^[16-17]对各不同阶段边界条件变化对库区泥沙淤积的贡献情况进行探讨。

考虑到金沙江干流和支流来沙的差异,这里将入库沙量变化进一步分为干流来沙(Q_{s1})和支流来沙(Q_{s2}),将式(1)转化为

$$W = a(Q_{s1} + Q_{s2})^b H^{c(Q_{s1} + Q_{s2}) + d} \quad (2)$$

将淤积量变化表示为全微分形式:

$$\frac{dW}{W} = \varepsilon_{Q_{s1}} \frac{dQ_{s1}}{Q_{s1}} + \varepsilon_{Q_{s2}} \frac{dQ_{s2}}{Q_{s2}} + \varepsilon_H \frac{dH}{H} \quad (3)$$

若2个研究时段1、时段2的库区淤积量分别为 W_1 和 W_2 ,则两时段间的淤积量变化表示为 $\Delta W = W_2 - W_1$ 。定义干流来沙弹性系数($\varepsilon_{Q_{s1}}$)为单位干流入库泥沙变化导致的库区泥沙淤积量的变化程度,即干流入库泥沙变化导致库区泥沙淤积相较于当前水库泥沙淤积变化的百分比(式(4))。同理可定义支流来沙弹性系数($\varepsilon_{Q_{s2}}$)和汛期坝前水位弹性系数(ε_H)。分别估算出干流来沙、支流来沙和汛期坝前水位变化引起的库区泥沙淤积量的变化(式(5)—式(7))。

$$\varepsilon_{Q_{s1}} = \frac{dW}{W} / \frac{dQ_{s1}}{dS} \quad (4)$$

$$\Delta W_{Q_{s1}} = \varepsilon_{Q_{s1}} \frac{W}{Q_{s1}} \Delta Q_{s1} \quad (5)$$

$$\Delta W_{Q_{s2}} = \varepsilon_{Q_{s2}} \frac{W}{Q_{s2}} \Delta Q_{s2} \quad (6)$$

$$\Delta W_H = \varepsilon_H \frac{W}{H} \Delta H \quad (7)$$

$\varepsilon_{Q_{s1}}$ 、 $\varepsilon_{Q_{s2}}$ 和 ε_H 本质是对 W 的偏导数,式(5)—式(7)是对式(3)的一阶泰勒展开,但 Q_{s1} 、 Q_{s2} 、 H 的任一变化会影响其他2个偏导数取值,即选择的逼近方式不同, Q_{s1} 、 Q_{s2} 、 H 的影响大小也存在差异,针对这

一问题，Zhou 等^[17]引入权重因子，将式(4)转化为：

$$\Delta W_{Q_{S1}} = \varphi \left(\frac{\partial W}{\partial Q_{S1}} \right)_1 \Delta Q_{S1} + (1 - \varphi) \left[\left(\frac{\partial W}{\partial Q_{S1}} \right)_2 \Delta Q_{S1} \right]$$

(8)

$$\Delta W_{Q_{S2}} = \varphi \left(\frac{\partial W}{\partial Q_{S2}} \right)_1 \Delta Q_{S1} + (1 - \varphi) \left[\left(\frac{\partial W}{\partial Q_{S2}} \right)_2 \Delta Q_{S2} \right]$$

(9)

$$\Delta W_H = \varphi \left(\frac{\partial W}{\partial H} \right)_1 \Delta H + (1 - \varphi) \left[\left(\frac{\partial W}{\partial H} \right)_2 \Delta H \right]$$

(10)

式中： ΔW 为库区淤积量的变化量，亿 t； φ 为权重因子($0 < \varphi < 1$)，表示各因素不同逼近路径对库区淤积的影响，本文取为 0.5； $\frac{\partial W}{\partial Q_{S1}}$ 、 $\frac{\partial W}{\partial Q_{S2}}$ 、 $\frac{\partial W}{\partial H}$ 分别为干流来沙量、支流来沙量和汛期坝前水位的敏感性系数，通过下式计算：

$$\frac{\partial W}{\partial Q_{S1}} = \frac{\partial W}{\partial Q_{S2}} = ab(Q_{S1} + Q_{S2})^{b-1} H^{c(Q_{S1}+Q_{S2})+d} + ac(Q_{S1} + Q_{S2})^b H^{c(Q_{S1}+Q_{S2})+d} \ln H$$

(11)

$$\frac{\partial W}{\partial H} = a[c(Q_{S1} + Q_{S2}) + d](Q_{S1} + Q_{S2})^b H^{c(Q_{S1}+Q_{S2})+d-1}$$

(12)

根据三峡水库实际运行过程中汛期平均坝前水位变化以及三峡入库泥沙变化情况，将三峡水库运行时段分为 2003—2006 年、2007—2009 年、2010—2012 年、2013—2017 年和 2018—2021 年共 5 个时段，计算每个时段相较于上个时段干流来沙变化、支流来沙变化以及汛期坝前水位变化对水库淤积的贡献(表 4)。由表 4 可知：

- (1) 不同时期干、支流来沙量和汛期坝前水位对水库泥沙淤积的影响程度不同。整体来看，干流入库沙量的变化对水库泥沙淤积起主导作用，其影响程度在 2010—2012 年达到最大，而后逐渐减小。支流入库沙量变化的影响随着干流入库沙量的持续减少而逐渐增大，尤其是 2018—2021 年，支流入库沙量取代干流入库沙量成为影响水库泥沙淤积量变化的最主要因素。
- (2) 水库运行前 10 a，汛期平均坝前水位变化剧烈，对泥沙淤积影响程度绝对值在 60% 以上，在 2007—2009 年其影响程度与干流来沙量变化的影响程度相当；随着汛期平均坝前水位变化幅度减小，调度方式变化对水库泥沙淤积的影响程度逐渐减弱，2013 年后，汛期坝前水位变化不是影响该时段库区淤积较前期变化的主要因素。

表 4 不同时段各因素变化对水库泥沙淤积贡献率

Table 4 Contribution rate of different parameters to reservoir sedimentation during different periods between 2003 to 2021

时段	$\overline{Q_{Si}}$	$\overline{Q_{S2i}}$	$\overline{H_i}$	$\Delta W_{Q_{S1}}$	$\Delta W_{Q_{S2}}$	ΔW_H	ΔW	$C_{Q_{S1}}$	$C_{Q_{S2}}$	C_H
2003—2006 年	1.35	0.72	135.49	—	—	—	—	—	—	—
2007—2009 年	1.67	0.50	145.60	0.21	-0.14	0.11	0.19	79.00	-52.24	73.24
2010—2012 年	1.16	0.68	150.55	-0.37	0.12	0.09	-0.15	240.77	-80.42	-60.35
2013—2017 年	0.23	0.21	148.92	-0.73	-0.37	-0.02	-1.12	65.46	32.92	1.62
2018—2021 年	0.65	0.99	150.48	0.33	0.46	0.01	0.80	41.58	56.62	1.80

注： $\overline{Q_{Si}}$ 、 $\overline{Q_{S2i}}$ 分别为 i 时段平均干流来沙量、支流来沙量，亿 t； $\overline{H_i}$ 为 i 时段汛期平均坝前水位，m； $C_x = \frac{\Delta W}{\Delta W_x} \times 100\%$ ， x 表示 Q_{S1} 、 Q_{S2} 或 H ， C_x 表示各因素对库区淤积的贡献率， $C_x > 0$ 表明因素变化对当前时段淤积量变化的促进程度， $C_x < 0$ 表明因素变化对当前时段淤积量变化的阻碍程度，%。

4.2 三峡水库未来泥沙淤积趋势

自三峡水库建成运用以来，向家坝、溪洛渡等金沙江梯级水库群发挥了巨大的拦沙作用，研究表明约 98% 以上的长江干流来沙均被拦截^[6]，而白鹤滩、乌东德等水库的运用将进一步增强梯级水库群的拦沙效

应,干流进入三峡水库的低沙量将持续较长时间。黄仁勇等^[18]基于1991—2000年系列水沙过程模拟计算了金沙江下游梯级水库群—三峡水库泥沙冲淤长期预测,认为乌东德水库运行前10 a排沙比约为92%,白鹤滩水库运行前10 a排沙比约为87%。以金沙江2014—2021年输沙量均值为基础,则未来三峡水库中金沙江来沙将由0.21亿t/a减少至0.17亿t/a。支流来沙方面,岷江和嘉陵江是三峡水库支流入库泥沙的主要来源,两江均处于强产沙带,虽然两江建设有紫坪铺、瀑布沟(岷江)、草街、亭子口(嘉陵江)等水利枢纽发挥拦沙作用,配合水土保持工程使两江输沙量自20世纪90年代起持续减少,但一方面随着运行年限的增加水库拦沙作用逐渐减弱,另一方面受2008年“汶川大地震”影响,两江流域内地貌剧变,山谷中储存大量松散砂石堆积物,经短历时强降雨冲刷至江中,使两江含沙量猛增^[7]。极端情况下,如2020年、2018年,当两江流域内均发生强降雨导致洪峰流量达到30 000 m³/s以上时,该年支流入库沙量可较多年支流入库沙量均值增加近1亿t,达1.5亿t左右;当支流流域汛期没有发生强降雨过程,如2014—2017年,此时支流入库沙量将显著小于多年平均水平,仅为0.1亿t/a左右。

坝前水位调度运用方面,2020年水利部通过了《三峡(正常运行期)-葛洲坝水利枢纽梯级调度规程(2019年修订版)》,对汛期运行水位进行了进一步优化^[19]。随着中小洪水调度研究和实践的深入,从梯级水库联合调度需求看,未来三峡水库汛期坝前水位将进一步浮动,汛期平均坝前水位较现状下可能还将提高1~2 m左右。

基于上述边界条件,采用经过三峡水库实际淤积率定后的参数,采用式(2)估算未来三峡水库泥沙淤积量可知,当遭遇平常水文年份,三峡水库泥沙淤积量约在0.5亿t/a左右;当遭遇不利洪水组合水文年,尤其是支流发生大规模强降雨时,三峡水库泥沙淤积量约在1.6亿t/a左右。

5 结 论

本文基于三峡水库蓄水以来的实测资料,采用数学模型计算分析了复杂边界变化对水库泥沙淤积的影响,探讨了蓄水以来上游来沙变化和坝前水位调整对实际淤积的贡献,并预测了未来三峡库区泥沙淤积趋势,主要结论如下:

(1) 入库沙量和汛期坝前水位是影响目前三峡水库淤积的主要因素,均与库区淤积量呈显著正相关关系,二者相互影响,其变化将造成库区淤积重心的偏移,变动回水区下段及常年回水区上段的泥沙分选及冲淤情况受影响最为明显。相比之下,上游沙量变化对变动回水区泥沙分选和冲淤的影响更大。

(2) 三峡水库蓄水以来,干支流入库沙量一直是库区淤积的主控因素,但金沙江梯级水库建成运用后,干流来沙对三峡库区淤积的贡献明显减小(由65%减小至42%),支流来沙的贡献逐步增大(由32%增大至56%)。在三峡水库运行初期,汛期坝前水位变化对库区淤积影响程度与干流来沙相当,但金沙江梯级水库建成运用后,其对该时段库区淤积较前期变化的影响较小(1.6%~1.8%)。

(3) 当遭遇平常水文年水沙过程,未来三峡水库泥沙淤积量约在0.5亿t/a左右;当遭遇不利洪水组合水文年,尤其是支流发生大规模强降雨使岷江和嘉陵江洪峰流量大于30 000 m³/s时,三峡水库泥沙淤积量约在1.6亿t/a左右。

参考文献:

- [1] 李文杰,杨胜发,付旭辉,等. 三峡水库运行初期的泥沙淤积特点[J]. 水科学进展, 2015, 26(5): 676-685. (LI W J, YANG S F, FU X H, et al. Sedimentation characteristics in the Three Gorges Reservoir during the initial operation stage[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(5): 676-685. (in Chinese))
- [2] TANG X Y, TONG S C, HUANG G X, et al. Characteristics of sedimentation and channel adjustment linked to the Three Gorges Reservoir[J]. International Journal of Sediment Research, 2021, 36(2): 177-189.

- [3] XU X B, TAN Y, YANG G S. Environmental impact assessments of the Three Gorges Project in China: issues and interventions [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 124: 115-125.
- [4] 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. (LI W J, LI N, YANG S F, et al. Analysis of the sedimentation in the Three Gorges Reservoir based on the sediment carrying capacity [J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(5): 726-734. (in Chinese))
- [5] YANG S L, MILLIMAN J D, XU K H, et al. Downstream sedimentary and geomorphic impacts of the Three Gorges Dam on the Yangtze River[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138: 469-486.
- [6] 黄仁勇, 王敏, 张细兵, 等. 溪洛渡、向家坝、三峡梯级水库汛期联合排沙调度方式初步研究[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(8): 6-10, 26. (HUANG R Y, WANG M, ZHANG X B, et al. Preliminary study on joint desilting dispatching mode of Xiluodu, Xiangjiaba and Three Gorges cascade reservoirs in flood season[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(8): 6-10, 26. (in Chinese))
- [7] 董炳江, 张欧阳, 许全喜, 等. 2018 年汛期三峡水库上游暴雨产沙特性研究[J]. *人民长江*, 2019, 50(12): 21-25. (DONG B J, ZHANG O Y, XU Q X, et al. Study on characteristics of sediment yield under heavy rainfall in upstream of Three Gorges Reservoir during flood season in 2018[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(12): 21-25. (in Chinese))
- [8] 许全喜, 袁晶. 2020 年三峡水库泥沙淤积特点及原因分析[J]. *人民长江*, 2022, 53(5): 7-13. (XU Q X, YUAN J. Study on characteristics and causes of sediment deposition in Three Gorges Reservoir in 2020[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(5): 7-13. (in Chinese))
- [9] 周新春, 许银山, 冯宝飞. 长江上游干流梯级水库群防洪库容互用性初探[J]. *水科学进展*, 2017, 28(3): 421-428. (ZHOU X C, XU Y S, FENG B F. An exploration on the interoperability of the flood control capacities of cascade reservoir groups in the upper reaches of Yangtze River[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(3): 421-428. (in Chinese))
- [10] 王俊, 郭生练. 三峡水库汛期控制水位及运用条件[J]. *水科学进展*, 2020, 31(4): 473-480. (WANG J, GUO S L. On Three Gorges Reservoir control water level and operating conditions in flood season[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(4): 473-480. (in Chinese))
- [11] 杨春瑞, 邓金运, 齐永铭, 等. 中小洪水调度对三峡水库泥沙淤积的长期影响[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(6): 34-37. (YANG C R, DENG J Y, QI Y M, et al. Study on long-term impact of small and medium-sized floods regulation on sedimentation of the Three Gorges Reservoir[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(6): 34-37. (in Chinese))
- [12] 张帮稳, 吴保生, 章若茵. 三峡库区汛期洪峰和沙峰异步运动特性的三维数值模拟[J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 408-417. (ZHANG B W, WU B S, ZHANG R Y. Three-dimensional numerical of the asynchronous movement characteristics of flood and sediment peaks in the Three Gorges Reservoir[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 408-417. (in Chinese))
- [13] NASH D B. Effective sediment-transporting discharge from magnitude-frequency analysis[J]. *The Journal of Geology*, 1994, 102(1): 79-95.
- [14] 周银军, 黄仁勇. 丰水年中小洪水调度对三峡水库库区泥沙淤积的影响分析[C]//中国水利学会 2016 学术年会论文集(上册). 南京: 河海大学出版社, 2016: 78-83. (ZHOU Y J, HUANG R Y. Deposition in Three Georges Reservoir during middle and small flood operation in the flood year[C]//Proceedings of the 2016 Annual Conference of the Chinese Hydraulic Engineering Society (Volume I). Nanjing: Hohai University Press, 2016: 78-83. (in Chinese))
- [15] 单敏尔, 李志晶, 周银军, 等. 三峡水库入库水沙变化规律及驱动因素分析[J]. *泥沙研究*, 2022, 47(2): 29-35. (SHAN M E, LI Z J, ZHOU Y J, et al. Variations and driving factors of water flow and sediment transport in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Sediment Research*, 2022, 47(2): 29-35. (in Chinese))
- [16] NING T T, LI Z, LIU W Z. Separating the impacts of climate change and land surface alteration on runoff reduction in the Jing River catchment of China[J]. *Catena*, 2016, 147: 80-86.
- [17] ZHOU S, YU B F, ZHANG L, et al. A new method to partition climate and catchment effect on the mean annual runoff based on the Budyko complementary relationship[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(9): 7163-7177.
- [18] 黄仁勇, 舒彩文, 谈广鸣. 长江上游梯级水库泥沙冲淤长期预测初步研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(4): 737-745. (HUANG R Y, SHU C W, TAN G M. Long-term sedimentation prediction of cascade reservoirs in the upper

- reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(4): 737-745. (in Chinese))
- [19] 李肖男, 傅巧萍, 张松, 等. 三峡水库汛期运行水位运用方式研究[J]. 人民长江, 2022, 53(2): 21-26, 40. (LI X N, FU Q P, ZHANG S, et al. Study on operating water level during flood season of Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River, 2022, 53(2): 21-26, 40. (in Chinese))

Sediment deposition trend in the Three Gorges Reservoir under the action of complex boundary conditions*

YANG Chunrui, DENG Jinyun, CHEN Li

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Sedimentation in the Three Gorges Reservoir (TGR) is relatively complicated owing to the upstream water and sediment conditions and the reservoir scheduling process. In this study, based on a one-dimensional mathematical model of sediment, we investigated the comprehensive impact of changes in upstream and downstream boundary conditions on the sedimentation characteristics of the TGR. An empirical relationship between sediment inflow, average flood-season water level of the dam, and reservoir sedimentation was established, and their contributions and future sedimentation trends are discussed. We found that sediment inflow from upstream tributaries and the average flood-season water level of the dam are the main factors affecting sedimentation in the reservoir, causing the center of gravity of the sedimentation area to shift. Changes in sediment sorting and erosion/sedimentation in the downstream backwater and upper part of the perennial backwater zones are the most affected. In recent years, the contribution of sediment from the main stem to reservoir sedimentation has decreased, and the contribution from tributaries has increased. The recent impact of changes in the average flood-season water level of the dam on reservoir sedimentation is relatively small compared to the period from 2003 to 2012. In a normal hydrological year, the estimated sedimentation volume in the Three Gorges Reservoir is approximately 50 million tons, whereas in an unfavorable flood-combined hydrological year, especially when heavy rainfall in the tributaries causes the peak flow of the Minjiang and Jialingjiang rivers to exceed $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$, the estimated sedimentation volume in the Three Gorges Reservoir is approximately 160 million tons.

Key words: sedimentation; sediment inflow; dam water level; numerical simulation; Three Gorges Reservoir

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51779185).