

近 20 年来三峡水库泥沙淤积及其对库区的影响*

袁 晶¹, 许全喜², 董炳江¹, 王 涛³, 杨成刚^{1**}

(1: 长江水利委员会水文局, 武汉 430010)

(2: 长江水利委员会规划局, 武汉 430010)

(3: 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401120)

摘要: 泥沙问题是三峡工程建设与运行中的关键技术问题之一, 只有妥善处理好泥沙问题, 才能保证三峡工程长期有效使用, 维持水库功能的全面发挥。本文首先结合实测水文、河道地形观测资料, 对三峡水库运行近 20 年来的泥沙淤积特性及水库排沙比进行了较为全面的分析研究, 并与已有研究成果进行了对比; 其次, 围绕防洪、航运以及坝前段的泥沙淤积等方面, 进一步分析了水库淤积产生的影响。结果表明: 三峡水库蓄水以来, 在不考虑区间来沙的情况下, 三峡水库共淤积泥沙 20.484 亿 t, 近似年均淤积 1.102 亿 t, 水库排沙比为 23.6%, 水库年均淤积量为原论证预测值的 33%。其中, 库区干流段累计淤积泥沙 17.835 亿 m³ (变动回水区冲刷 0.694 亿 m³; 常年回水区淤积 18.529 亿 m³), 淤积在水库防洪库容内的泥沙为 1.648 亿 m³ (干、支流分别淤积 1.517 亿 m³ 和 0.131 亿 m³), 占水库防洪库容的 0.74%, “十一五”攻关阶段研究得出的多年平均淤积量及排沙比较实测值均偏大, 变动回水区冲淤则出现反向的情况, 主要原因是研究采用的入库沙量偏大以及近期河道采砂和水库优化调度等影响。水库淤积对防洪库容和地下电厂的影响尚小, 对库区部分水道航道条件产生了一定的影响, 应加以关注。

关键词: 三峡水库; 水库淤积; 排沙比; 防洪库容; 航运

Sediment deposition of Three Gorges Reservoir and its impact on the reservoir area in recent 20 years*

Yuan Jing¹, Xu Quanxi², Dong Bingjiang¹, Wang Tao³ & Yang Chenggang^{1**}

(1: Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P.R.China)

(2: Planning Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P.R.China)

(3: Changjiang Chongqing Shipping Engineering Survey and Design Institute, Chongqing 401120, P.R.China)

Abstract: Sediment problem is one key technical issue in the construction and operation of the Three Gorges Project. Only by properly handling the sediment problem can we ensure the long-term effective use of the Three Gorges Project and maintain a full play of the reservoir function. In this paper, the characteristics of sediment deposition and the sediment discharge ratio of the Three Gorges Reservoir (TGR) in the past 20 years have been comprehensively analyzed and studied based on the observed hydrological and river topographic data, and compared with the existing research results; Secondly, the influence of reservoir sedimentation is further analyzed in terms of flood control, navigation and sediment deposition in front of the dam. The results show that since the TGR impoundment, the total sediment deposition of the TGR is 2.0484 billion tons, approximately 110.2 million tons per year, the sediment discharge ratio of the reservoir is 23.6%, and the average annual sediment deposition of the reservoir is 33% of the original demonstration prediction value without considering the sediment from the interval. Among them, the accumulated sediment deposition in the main stream section of the reservoir area is 1.7835 billion m³ (69.4 million m³ scoured by the fluctuating backwater area; 1.8529 billion m³ silted by the perennial backwater area), and the sediment deposition in the reservoir flood control storage capacity is 164.8 million m³ (151.7 million m³ silted by the main stream and 13.1 million m³ silted by the tributary respectively), ac-

* 2022-10-19 收稿; 2022-11-29 收修改稿。

国家自然科学基金项目(U2040218)、三峡后续项目(2136902)和三峡水库科学调度关键技术研究项目(0704198)联合资助。

** 通信作者; E-mail: 2474411087@qq.com。

counting for 0.74% of the reservoir flood control storage capacity. The average annual sediment deposition and sediment discharge measured during the 11th Five Year Plan period are relatively large, the scouring and silting in the fluctuating backwater area are reversed, mainly due to the influence of the large amount of sediment entering the reservoir, the recent sand mining in the river channel and the optimal operation of the reservoir. The influence of reservoir siltation on flood control storage capacity and underground power plant is still small, and it has a certain impact on some waterway conditions in the reservoir area, which should be paid attention to.

Keywords: Three Gorges Reservoir; reservoir siltation; sediment discharge ratio; storage capacity for flood control; shipping

三峡工程是国之重器,是治理和开发长江的关键性骨干工程,具有防洪、发电、航运、水资源利用和生态环境保护等巨大的综合效益。三峡水库已投运近 20 年,于 2008 年开始进行 175 m 试验性蓄水,2010 年 10 月,三峡水库试验性蓄水首次达到 175 m 水位,至 2020 年 10 月,三峡水库连续 11 年实现了 175 m 蓄水目标。2020 年 11 月 1 日,三峡工程转入正常运行期。

三峡水库在发挥防洪、发电、航运效益的同时,库区水沙运动特性较之于天然情况也发生了较大变化,随着库区水位抬升,流速减缓,水流挟沙力降低,库区泥沙逐渐淤积。泥沙淤积将侵占防洪库容,降低水库调节能力,影响发电,严重时可造成碍航。可见,泥沙问题是三峡工程建设与运行中的关键技术问题之一,只有妥善处理好泥沙问题,才能保证三峡工程长期使用,维持三峡水库功能的全面发挥,促进长江流域健康可持续发展^[1-2]。针对三峡工程的泥沙问题,早在工程论证及可行性研究期间,全国大专院校和科研设计等部门,投入了大量人力、物力,通过数学模型计算、实体模型试验、原型观测和国内外水库类比等方法,对三峡工程的泥沙问题进行了广泛研究。研究的重点是如何长期保持水库的有效库容不被淤废,预估泥沙淤积对重庆洪水位的影响,防止变动回水区泥沙淤积影响航运,以及坝区和下游的泥沙问题。通过研究,做出了一系列相关的预测,并探索了解决问题的途径和方法,从而为三峡工程建设的决策提供了科学依据^[3]。

在可行性研究阶段之后,三峡工程泥沙专家组会同国内 20 多个科研、设计、观测、管理等单位,组织、实施了“九五”、“十五”及“十一五”泥沙科研计划。随着工程的建设进程,先是配合设计,重点研究确定通航建筑物引航道的布置;蓄水前后,则是配合运行管理,重点研究在变化来水来沙条件下优化调度,以减少泥沙淤积带来的负面影响^[4-6]。

近十余年来,针对水库泥沙条件的变化和日益增长的社会需求,国内外众多专家学者持续开展水库泥沙淤积方面的研究,取得了很好的科研成果,主要表现在两大方面。一是基于实测的水文泥沙及河道地形资料,对水库来水来沙、水库淤积方面的研究^[7-10],另一方面是基于数理统计、类比分析、数学模型等手段,对水库优化调度方面的研究^[11-14],如中国长江三峡集团有限公司和长江水利委员会水文局通过持续的泥沙原型观测和系统研究,实现了泥沙实时监测与预报技术的创新,提出了三峡水库沙峰排沙调度、库尾减淤调度等“蓄清排浑”新技术,为三峡水库实施更为精细化的调度提供了支撑,推动了汛末提前蓄水、沙峰调度、减淤调度、中小洪水调度等一系列优化调度措施的实施。相关成果已经纳入三峡正常运行期调度规程,取得了较好的实践效果,为长期全面发挥三峡工程综合效益提供了重要技术支撑。以上研究成果极大丰富了三峡水库泥沙问题的相关认识,然而,三峡水库已投运近 20 年,蓄水位达到 175 m 也有 10 余年,并刚刚步入正常运行期,关于三峡水库蓄水以来的泥沙淤积及其影响方面的成果值得总结并供将来借鉴^[15]。

本文在已有研究成果的基础上,结合三峡水库蓄水运用以来的实测水文、河道地形观测资料,对近 20 年来三峡水库泥沙淤积特性及其对防洪、航运、地下电厂等的影响进行了较为全面的分析,研究成果可为三峡水库优化调度以及水库综合效益的全面发挥提供基础。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

研究区域为朱沱至三峡大坝的干流河段(河道长 723 km)以及支流嘉陵江(北碚站控制流域面积 15.7 万 km²)和乌江(武隆站控制流域面积 8.3 万 km²)(图 1)。关于泥沙淤积对防洪库容影响的研究范围为库区 145~175 m 高程范围内的库容,库区航道影响的研究范围主要是常年回水区涪陵一大坝段,坝前段是三峡大坝至上游 15.1 km 的河段范围。

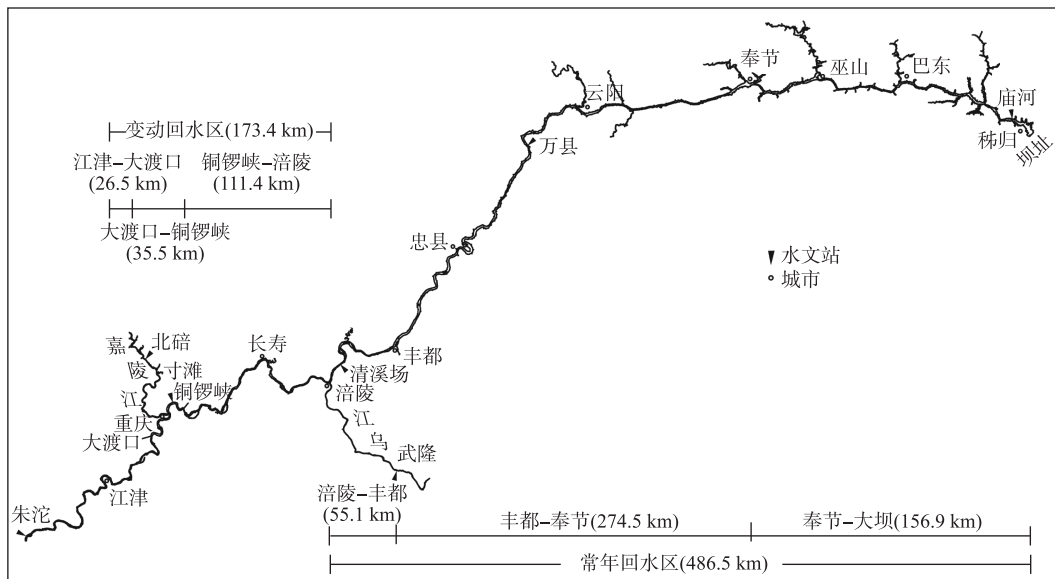


图1 研究区域示意图

Fig.1 Schematic diagram of study area

1.2 数据来源

所用数据为长江水利委员会所属三峡水库入、出库主要水文控制站朱沱、北碚、寸滩、武隆、清溪场、黄陵庙等站 1950—2021 年径流量、输沙量及泥沙级配等实测资料,以及三峡库区江津至三峡大坝 2003—2021 年固定断面观测资料。水库的淤积总量(2.1 节)采用输沙量法计算得到,即不考虑区间支流,根据入库控制站朱沱、北碚和武隆以及出库控制站黄陵庙站计算所得;水库的冲淤量分布则采用断面法计算得到。

2 水库淤积及其分布特性

三峡水库蓄水运用以来,入库径流量略有偏少。2003—2021 年三峡入库年均径流量为 3744 亿 m^3 ,较蓄水之前 1956—1990 年均值偏多 3%,较 1991—2002 年均值基本持平。2003—2021 年,三峡年均入库沙量为 1.48 亿 t,较 1956—1990 年均值和 1991—2002 年均值分别偏少 70%、58%。

2.1 水库淤积量

三峡工程蓄水运用以来,由于入库泥沙较初步设计值大幅减小,三峡库区泥沙淤积大为减轻。根据三峡水库主要控制站水文泥沙观测资料统计分析,2003 年 6 月—2021 年 12 月,不考虑区间来沙(来沙量约占总入库沙量的 20%),三峡入库悬移质泥沙 26.807 亿 t,出库悬移质泥沙 6.323 亿 t,水库淤积泥沙 20.484 亿 t,近似年均淤积泥沙 1.102 亿 t,仅为论证阶段(数学模型采用 1961—1970 系列年预测成果)的 33%,水库排沙比为 23.6%。库区淤积物中以粒径 $d \leq 0.062 \text{ mm}$ 的泥沙为主,其淤积量为 17.797 亿 t,占总淤积量的 86.9%,对应水库排沙比为 25.4%, $0.062 \text{ mm} < d \leq 0.125 \text{ mm}$ 和 $d > 0.125 \text{ mm}$ 的泥沙淤积量分别为 1.453 亿和 1.227 亿 t,对应排沙比分别为 7.1% 和 11.7%。三峡水库入出库泥沙与水库淤积量见图 2。

2.2 冲淤量沿程分布

三峡水库 175 m 试验性蓄水后,回水末端上延至江津附近(距大坝约 660 km),变动回水区为江津至涪陵段,长约 174 km,占库区总长度的 26%;常年回水区为涪陵至大坝段,长约 486 km,占库区总长度的 74%。

三峡工程蓄水运用以来,主要受入库沙量大幅减小、河道采砂和水库调度等影响,水库变动回水区总体表现为冲刷,泥沙淤积主要集中在涪陵以下的常年回水区。根据三峡库区固定断面观测资料计算,2003 年 3 月至 2021 年 10 月库区干流累计淤积泥沙 17.835 亿 m^3 ,其中变动回水区累计冲刷泥沙 0.694 亿 m^3 ;常年

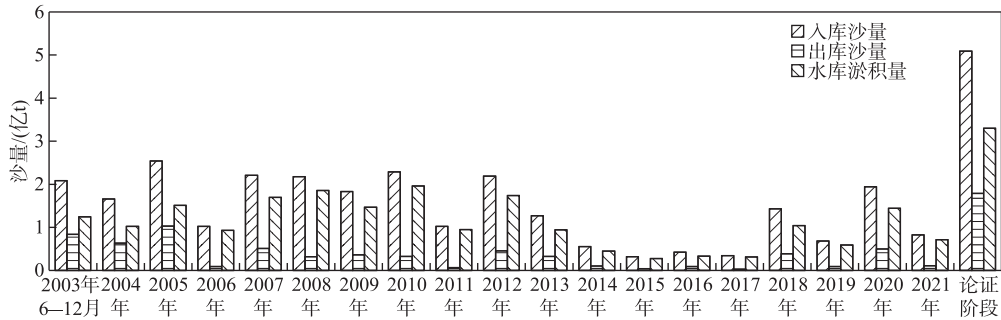


图 2 三峡水库入出库泥沙与水库淤积量

Fig.2 Sediment and siltation of Three Gorges Reservoir

回水区淤积量为 18.529 亿 m^3 。

从库区冲淤量沿时分布来看,三峡水库围堰发电期(2003-03-2006-10),库区淤积泥沙 5.436 亿 m^3 ,年均淤积量为 1.81 亿 m^3 ,泥沙主要淤积在丰都至奉节段和奉节至大坝段;初期运行期(2006-10-2008-10),库区累计淤积泥沙 2.502 亿 m^3 ,年均淤积量为 1.25 亿 m^3 ;进入 175 m 试验性蓄水后,2008 年 10 月-2021 年 10 月库区累计淤积泥沙 9.897 亿 m^3 ,年均淤积量为 0.76 亿 m^3 ,见表 1。

表 1 三峡库区冲淤量及分布(亿 m^3)

Tab.1 Distribution of erosion and deposition in the Three Gorges Reservoir area

| 时间 | 变动回水区 | | | | 常年回水区 | | | | 合计 |
|-----------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------|--------------------|---------------------|---------------------|--------|--------|
| | 江津—大渡口 (26.5 km) | 大渡口—铜锣峡 (35.5 km) | 铜锣峡—涪陵 (111.4 km) | 小计 | 涪陵—丰都 (55.1 km) | 丰都—奉节 (260.3 km) | 奉节—大坝 (171.1 km) | 小计 | |
| 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 | 2.396 | 2.502 |
| 2008-10-2021-10 | -0.414 | -0.177 | -0.193 | -0.784 | 0.536 | 7.426 | 2.718 | 10.682 | 9.897 |
| 2003-03-2021-10 | -0.414 | -0.177 | -0.103 | -0.694 | 0.553 | 11.419 | 6.557 | 18.529 | 17.835 |

与三峡水库蓄水前相比,库区大坝—李渡镇河段平均淤积抬高 8.5 m,最深点和最高点高程分别淤高 10.8 和 3.2 m。深泓抬高较大的断面多集中在近坝段、香溪宽谷段、臭盐碛河段、黄花城河段等淤积较大的区域。其中,近坝段河床淤积抬高最为明显(图 3),变化最大的深泓点淤高 67.9 m(位于坝上游 5.6 km),淤后高程为 38.9 m。库区变动回水区李渡以上河段深泓点冲淤变化不大,平均淤高 0.1 m。

2.3 典型横断面变化

三峡库区多年岸线基本稳定,断面变化主要表现在河床的垂向冲淤变化(图 4)。自蓄水以来,三峡库区淤积形态主要有:

1) 主槽冲淤。此淤积方式主要出现在局部窄深型河段,如坝前段、臭盐碛河段、黄花城河段等。如位于坝前段的 S34 断面,是全河段抬升最大断面;位于臭盐碛河段的 S113 断面,蓄水以来,主槽最大淤积厚度达 35.3 m,主槽淤积后过水面积减少了 17.5%。

2) 沿湿周淤积。此淤积方式一般出现在宽浅型、滩槽差异较小的河段,主槽在前期很快淤平,之后淤积则沿湿周发展,如 S32+1 断面。

3) 以一侧淤积为主的不对称淤积。此淤积形态主要出现在弯曲分汊河段,以黄花城、土脑子河段为典型。黄花城河段上游分流段的 S207 断面左侧明显淤积,其最大淤积厚度为 62.6 m,淤后高程约 138.4 m。土脑子河段的 S253 断面右侧也出现累积性淤积,最大淤积厚度 30.6 m,淤后高程 154.1 m。

对于冲刷来讲,主要表现为主槽冲刷和沿湿周冲刷,一般出现在河道水面较窄的峡谷段和回水末端。

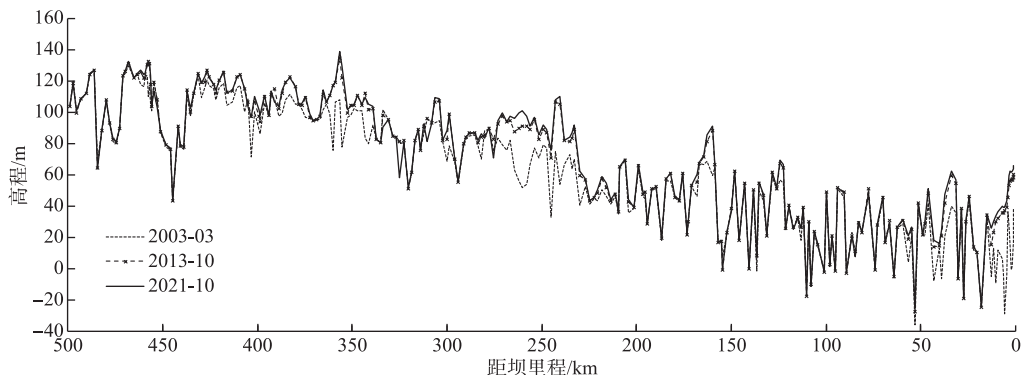


图3 三峡库区李渡至大坝干流段深泓纵剖面变化

Fig.3 Variation of deep longitudinal section from Lidu to the Dam in Three Gorges Reservoir area

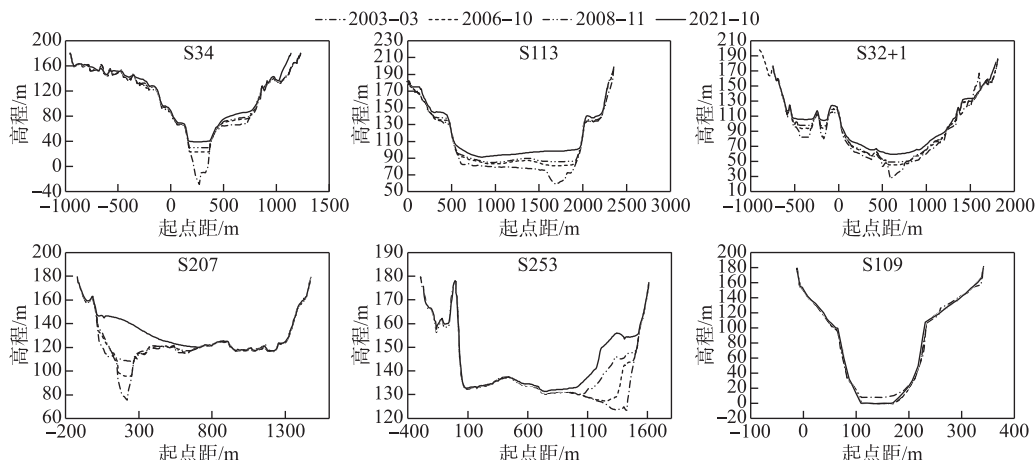


图4 三峡库区典型断面冲淤变化

Fig.4 Scour/silt changes of typical sections in the Three Gorges Reservoir area

如瞿塘峡 S109 断面,2003 年以来主槽累计刷深 8 m,为全河段刷深量最大的断面。

3 观测与研究成果对比

在三峡工程初步设计阶段和“九五”、“十五”、“十一五”攻关阶段^[3-6],国内多家科研院所采用数学模型对三峡库区泥沙淤积及排沙比进行了较为系统的研究和对比,计算采用的水沙条件和主要成果分别见图 5 和表 2。由于早期各阶段研究所采用的水沙条件等因素与实际情况存在一定的差别,计算结果与实测成果也存在差异。考虑到“十一五”攻关阶段,中国水利水电科学研究院和长江科学院对三峡水库的泥沙淤积进行了计算和预测,当时两家单位所采用的计算条件与现状条件较为接近,均考虑了金沙江下游溪洛渡、向家坝等水库蓄水运用给三峡水库入库水沙条件带来的影响^[14],本文将近 20 年三峡水库的泥沙淤积情况与其进行了对比分析。

实测结果表明:2003 年 6 月以来,三峡多年平均入库沙量为 1.481 亿 t,库区干流累计淤积泥沙 17.835 亿 m³,其中变动回水区累计冲刷泥沙 0.694 亿 m³;常年回水区淤积量为 18.529 亿 m³,水库排沙比为 23.6%。“十一五”攻关阶段研究表明:三峡水库运用的 20 年内^[6],考虑 2013 年金沙江下游溪洛渡、向家坝等水库蓄水运用,中国水利水电科学研究院采用年平均入库沙量为 1.722 亿 t,计算得到 2008—2027 年库区干流累计

淤积 27.156 亿 m³, 水库排沙比为 21.15%, 其中变动回水区淤积 0.788 亿 m³; 长江科学院采用年平均入库沙量为 1.993 亿 t, 计算得到淤积量为 25.42 亿 m³, 水库排沙比为 36.23%, 其中变动回水区淤积 1.005 亿 m³。对比库容变化的计算成果来看, 中国水利水电科学研究院计算得到水库运用 20 年 175 m 高程下库容损失约 27.1 亿 m³, 145~175 m 间防洪库容损失 1.4 亿 m³。长江科学院则计算得到防洪库容减少 1.46 亿 m³, 库容保留 99.4%, 与中国水利水电科学研究院计算结果基本一致, 较实测库容损失量 1.648 亿 m³ 略偏小, 但前者计算仅考虑了嘉陵江和乌江两条主要支流, 后者考虑了所有支流。

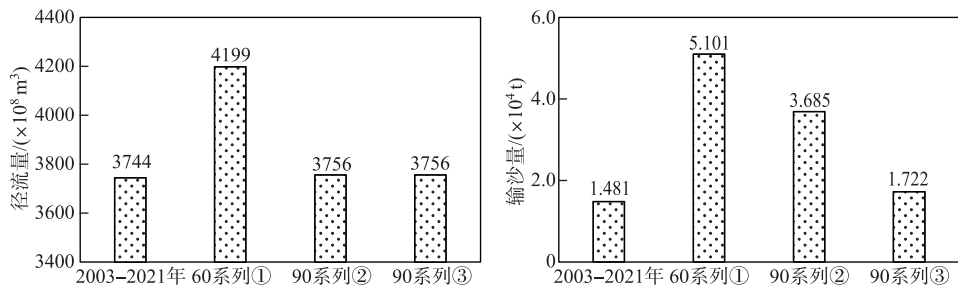


图 5 三峡水库入库控制站年水沙量统计(①表示“60 系列”采用寸滩+武隆;②表示“90 系列”采用朱沱+北碚+武隆;③表示“90 系列”采用朱沱+北碚+武隆,同时考虑溪洛渡、向家坝水库拦沙,下同)

Fig.5 The flow and sediment capacity of the control stations upstream the Three Gorges Reservoir

表 2 三峡水库蓄水后库区 2003—2021 年平均冲淤预测成果与实测值对比

Tab.2 Composition of the erosion and deposition capacity between the forecasted value and measured value after the impoundment of the Three Gorges Reservoir

| 河段 | 实测值 | 初步设计成果 | “九五”成果 | | “十五”成果 | | | | “十一五”成果 | | | |
|-------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
| | | | 长科院① | 水科院① | 长科院① | 水科院① | 长科院② | 水科院② | 长科院② | 水科院② | 长科院③ | 水科院③ |
| 重庆以上 | -0.045 | 0.015 | 0.019 | 0.009 | 0.027 | 0.013 | 0.002 | 0.006 | 0.012 | 0.003 | 0.004 | 0 |
| 重庆—长寿 | -0.003 | 0.023 | 0.068 | 0.092 | 0.143 | 0.097 | 0.055 | 0.041 | 0.060 | 0.055 | 0.030 | 0.010 |
| 长寿—涪陵 | -0.005 | 0.114 | 0.150 | 0.109 | 0.137 | 0.110 | 0.077 | 0.048 | 0.059 | 0.076 | 0.016 | 0.014 |
| 涪陵—丰都 | 0.031 | 0.230 | | | 0.195 | 0.236 | 0.114 | 0.137 | | | | |
| 丰都—坝址 | 0.999 | 2.583 | 2.725 | 3.012 | 2.440 | 2.514 | 1.770 | 1.508 | 2.156 | 2.224 | 1.221 | 1.318 |
| 库区干流 | 0.977 | 2.965 | 2.961 | 3.222 | 2.941 | 2.971 | 2.019 | 1.739 | 2.286 | 2.357 | 1.271 | 1.343 |

综上所述, 两家单位计算得出的水库多年平均淤积量及排沙比较实测值均有所偏大, 变动回水区冲淤则出现反向的情况, 主要原因是近年来河道采砂、入库沙量偏小以及开展沙峰排沙调度和消落期库尾减淤调度等影响。

1) 河道采砂的影响。根据《长江上游干流宜宾以下河道采砂规划(2015~2019 年)》, 宜宾以下干流河道规划可采区年度采砂总量控制在 1530 万 t 左右。长江委水文局 2017 年开展的采砂调查表明, 江津至涪陵段由采砂引起的地形变化量为 1232 万 m³(约合 1691 万 t)。

2) 入库泥沙边界条件的影响。长江上游径流量变化不大, 输沙量减少趋势明显。特别是进入 21 世纪后, 三峡上游来沙减小趋势仍在持续(图 6), 2003 年以来, 三峡平均年入库沙量为 1.481 亿 t, 较论证值减少了 71%, “十一五”期间, 中国水利水电科学研究院采用年平均入库沙量为 1.722 亿 t, 长江科学院采用年平均入库沙量为 1.993 亿 t, 分别较近 20 年来实测输沙量偏大 14% 和 26%。

3) 水库优化调度的影响。近几年, 根据泥沙实时监测与预报成果, 三峡水库在进行防洪、航运调度的基础上, 消落期利用水库库尾的泥沙冲淤特性及走沙时机, 提出了消落期减淤调度方案, 在 2012、2013、2015、2019、2022 年消落期进行了减淤调度试验, 进一步减少了库尾特别是变动回水区的泥沙淤积; 汛期利用入库洪峰、沙峰在水库内传播时间的差异, 提出了沙峰排沙调度模式, 并在 2012、2013、2018、2020 年汛期进行了

初步试验;取得了较好的排沙和减淤效果,为水库有效库容的长期保留提供了有利的基础支撑。

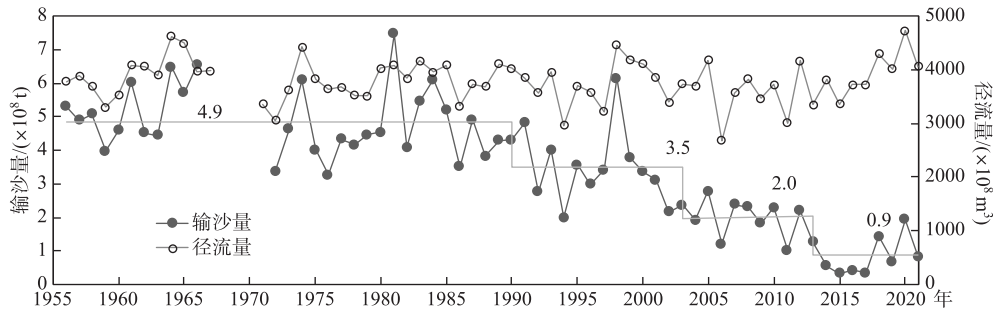


图6 三峡水库入库径流量和输沙量变化过程

Fig.6 The change process of runoff and sediment discharge of Three Gorges Reservoir

4 水库淤积影响研究

4.1 对防洪库容的影响

2003年3月—2021年10月,175 m高程下库区干、支流累计淤积泥沙20.004亿 m^3 ,其中145 m高程以下淤积泥沙18.356亿 m^3 ,淤积在水库防洪库容内的泥沙为1.648亿 m^3 ,占175 m高程下库区总淤积量的8%,占水库防洪库容(221.5亿 m^3)的0.74%;175 m高程下库区干流累计淤积泥沙17.440亿 m^3 ,145 m高程下累计淤积泥沙15.923亿 m^3 ,库区干流防洪库容内淤积泥沙1.517亿 m^3 。其中,江津至铜锣峡段防洪库容内冲刷0.693亿 m^3 ,铜锣峡至大坝段防洪库容内淤积2.210亿 m^3 。从淤积量的沿程分布来看,库区干流防洪库容内泥沙主要淤积在涪陵—云阳河段,占铜锣峡—大坝段防洪库容内总淤积量的75%(长度占33%)(图7)。

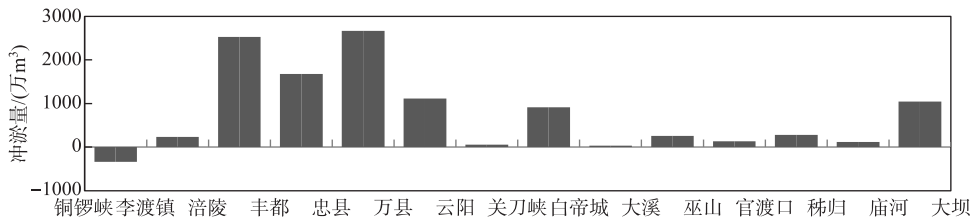


图7 2003—2021年三峡水库干流防洪库容内泥沙沿程淤积分布

Fig.7 Distribution of sediment deposition in flood control capacity of Three Gorges Reservoir main stream from 2003 to 2021

三峡水库防洪库容淤损与上游来水来沙、水库调度、人类活动等密切相关。上游来水来沙越多,防洪库容内泥沙淤积量也相对较多,汛期坝前水位上浮一定程度也增加了防洪库容内的泥沙淤积。如2020年长江上游发生大洪水,寸滩站洪峰流量达77400 m^3/s ,坝前最高调洪水位达到了167.65 m,坝前水位高于160 m的滞洪时间长达31天,干流防洪库容内淤积泥沙达2443万 m^3 ;2021年秋汛期三峡较大入库沙峰过程正处于水库蓄水期,干流防洪库容内淤积泥沙1124万 m^3 。

有必要指出,虽然2020年和2021年库区干流静防洪库容内淤积量较三峡水库蓄水以来年均值有所偏多,但从多年观测分析成果来看,该淤积量仍在正常范围内,仅占水库防洪库容(221.5亿 m^3)的0.068%,不会对防洪库容造成影响。而且,近几年,三峡水库实施了消落期库尾减淤调度,尽可能多地将库尾淤积的泥沙输移至常年回水区,对于减少防洪库容内泥沙淤积是有利的,2012、2013、2015、2019年分别实施了库尾减淤调度,汛前消落期,重庆主城区河段分别冲刷了302万、330万、251万、139万 m^3 ,铜锣峡至涪陵河段分别

冲刷了 540 万、867 万、1237 万、141 万 m^3 。另外三峡库尾河段河道采砂对于减少防洪库容内泥沙淤积也起到了一定的作用。

4.2 对航运的影响

三峡水库的蓄水大大改善了库区航运环境,促进了长江航道船舶大型化、标准化,提高了长江水路运输效率。在三峡工程发挥巨大效益的同时,在特定时段、局部区段出现泥沙淤积碍航的问题,主要表现为:常年回水区上段水深增加较大,航道水流条件变化明显,汛期流速明显减小,在三峡蓄水初期泥沙累积性淤积非常显著,部分重点水道短期内出现主航道出浅碍航的现象,其他重点淤沙水道泥沙淤积不断侵蚀和压缩主航道,可利用的航道尺度逐年缩窄;变动回水区中下段,由于汛期受坝前水位和上游来水交替影响,主要淤积颗粒较大的卵砾石,淤积速度相对常年回水区慢,但淤积物颗粒较大,汛后不易冲刷,且汛后蓄水提前,冲刷力度减弱,造成淤积不断发展,对航道尺度造成威胁;变动回水区上段,受三峡蓄水影响天然航道冲淤规律被打破,河道泥沙冲淤过程发生改变,由天然河道汛期淤积汛后冲刷改变成汛期淤积消落期冲刷,但消落期上游来流小,航道水深浅、流速小,冲刷强度弱,无法完全冲走淤积的泥沙,消落期主航槽流速和水深相对较大,输沙强度较大,造成枯水主航道成为泥沙主要输移通道,泥沙淤积和泥沙输移运动对航道条件影响很大,极易造成船舶出浅碍航。

从三峡水库蓄水初期库区淤积分布来看,三峡库区泥沙主要淤积在长寿以下库段内,以“点”淤积为主,泥沙间或性的淤积在弯曲段、宽谷段、分汉段以及支流入汇等河段。长寿以下库段内典型水道发生明显累积性淤积,其中黄花城、兰竹坝、凤尾坝、土脑子、青岩子—牛屎碛等水道最为明显(表 3),泥沙淤积已经对库区航道条件产生影响,部分水道在三峡坝前为 145 m 防洪限制水时航道尺度不够,随着蓄水过程的不断推进,这种影响将更加明显,目前解决泥沙淤积碍航的手段主要是实施维护性疏浚。

表 3 三峡水库蓄水后黄花城河段冲淤结果
Tab.3 Scour and silting results in Huanghuacheng Reach after impoundment of the Three Gorges Reservoir

| 统计时段 | 累积冲淤 | | 年均冲淤 | | 备注 |
|-----------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------------|---------------|
| | 冲淤量/ (万 m^3) | 单位河长冲淤量/ (万 m^3/km) | 冲淤量/ (万 m^3/a) | 单位河长冲淤量/ (万 $m^3/(km \cdot a)$) | |
| 2003-03-2006-10 | 3871 | 759.0 | 968 | 189.8 | 135~139 m 蓄水期 |
| 2006-10-2008-10 | 2525 | 495.1 | 1262 | 247.5 | 156 m 蓄水期 |
| 2008-10-2013-10 | 4083 | 800.6 | 816.6 | 160.1 | |
| 2013-10-2020-10 | 2215.5 | 434.4 | 316.5 | 62.1 | 175 m 试验性蓄水期 |
| 2020-10-2021-10 | 100.0 | 19.6 | 100.0 | 19.6 | 正常蓄水期 |
| 2003-03-2021-10 | 12794.5 | 2508.7 | 673.4 | 132.0 | 总蓄水期 |

4.3 对地下电厂取水口的影响

坝前河段(全长 15.1 km),2003 年 3 月至 2021 年 10 月累积淤积泥沙 1.929 亿 m^3 。坝前河段深泓平均累积淤厚 39.1 m,最大淤厚 67.9 m(距离大坝 5.6 km),见图 8 所示。

目前坝前泥沙淤积体低于电厂进水口的底高程,淤积物颗粒很细,对发电取水未造成影响。右岸地下电厂前沿引水区域,2006 年 3 月至 2021 年 10 月累积淤积泥沙 521 万 m^3 ,年均淤积 34 万 m^3/a 。从泥沙淤积空间分布上看,关门洞以上区域的泥沙淤积较为明显,而关门洞以下靠近大坝的区域淤积幅度相对较轻。目前地下电厂前沿 20~70 m 范围内河床淤积面平均高程为 104.5 m,高出地下电厂排沙洞进口底板高程(102 m)2.5 m,低于地下电厂进水口底板高程 8.5 m,虽然泥沙淤积目前尚没有影响地下电厂取水口,随着蓄水过程的不断推进,应持续加以关注。

5 结论

三峡水库蓄水至今近 20 年,为反映蓄水以来库区泥沙的淤积情况,本文采用原型观测资料,对库区泥

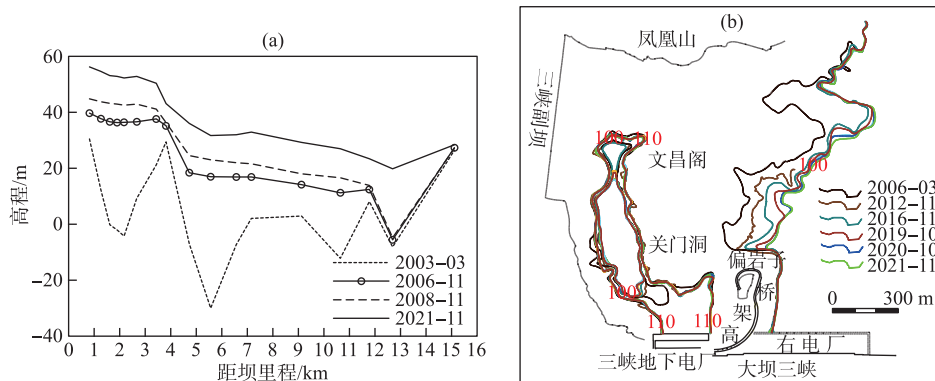


图8 三峡大坝坝前河段深泓纵剖面年际变化(a)和右岸地下电厂取水水域平面变化(b)

Fig.8 Ariation of thalweg profile in front of the Three Gorges Dam(a) and the plane change of intake water area of Underground power plant on the right bank(b)

沙淤积及其影响进行了研究,并与已有研究成果进行了对比,得出主要结论如下:

1) 三峡水库蓄水以来,三峡年均入库径流量和悬移质泥沙量分别为 3956 亿 m^3 和 1.489 亿 t。与三峡工程论证和初步设计阶段相比,径流量和输沙量分别减少 5.7% 和 70.7%。不考虑区间来沙,水库淤积泥沙 20.484 亿 t,近似年均淤积泥沙 1.102 亿 t,仅为论证阶段的 33%,水库排沙比为 23.6%。

2) 从淤积分布来看,库区干流段累计淤积泥沙 17.835 亿 m^3 ,其中变动回水区冲刷 0.694 亿 m^3 ,常年回水区淤积 18.529 亿 m^3 。常年回水区平均淤积抬高 8.5 m,近坝段河床淤积抬高最为明显,最大淤高 67.9 m,变动回水区河床则冲淤变形不大。“十一五”攻关阶段计算得出的多年平均淤积量及排沙比较实测值均有所偏大,变动回水区冲淤则出现反向的情况,主要原因是两家单位计算采用的入库沙量偏大、河道采砂以及水库优化调度等影响。

3) 三峡水库蓄水以来,淤积在高程 145~175 m 静防洪库容内的泥沙为 1.648 亿 m^3 ,占水库总防洪库容的 0.74%,水库淤积对防洪库容的影响尚小;地下电厂前沿 20~70 m 范围内河床淤积面积平均高程为 104.5 m,高出地下电厂排沙洞进口底板高程 2.5 m,低于地下电厂进水口底板高程 8.5 m,目前尚没有影响地下电厂取水。水库淤积对库区部分水道航道条件产生了一定的影响,目前解决泥沙淤积碍航的手段主要是实施维护性疏浚,应加以关注。

6 参考文献

- [1] Hu CH. Development and practice of the operation mode of “Storing Clear Water and Discharging Muddy Flow” in sediment-laden rivers in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 283-291. [胡春宏. 我国多沙河流水库“蓄清排浑”运用方式的发展与实践. 水利学报, 2016, 47(3): 283-291.]
- [2] Jin XP, Xu QX. Sediment issues in joint dispatch of reservoir group in Upper Yangtze River. *Yangtze River*, 2018, 49(3): 1-8, 31. [金兴平, 许全喜. 长江上游水库群联合调度中的泥沙问题. 人民长江, 2018, 49(3): 1-8, 31.]
- [3] 水利部长江水利委员会, 长江三峡水利枢纽初步设计报告. 1992 年 12 月.
- [4] 国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙课题专家组, 中国长江三峡工程开发总公司三峡工程泥沙专家组. 长江三峡工程坝下游泥沙问题—1. 北京: 知识产权出版社, 2002.
- [5] 国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙专家组, 中国长江三峡工程开发总公司三峡工程泥沙专家组. 长江三峡工程泥沙问题研究-第二卷-三峡水库泥沙淤积研究: 2001—2005. 北京: 知识产权出版社, 2008.
- [6] 国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙课题专家组、中国长江三峡集团公司三峡工程泥沙专家组. 三峡工程“十一五”泥沙研究综合分析//长江三峡工程泥沙问题研究: 2006—2010(第八卷). 北京: 中国科学技术出版社, 2013.
- [7] Xu QX, Yuan J. Study on characteristics and causes of sediment deposition in Three Gorges Reservoir in 2020. *Yangtze River*, 2022, 53(5): 7-13. [许全喜, 袁晶. 2020 年三峡水库泥沙淤积特点及原因分析. 人民长江, 2022, 53(5): 7-13.]
- [8] Liu SW, Zhang XF, Xu QX et al. Estimation of sediment amount from ungauged area and analysis of sediment delivery ratio of Three Gorges

- Reservoir. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 28-38. DOI:10.18307/2019.0103. [刘尚武, 张小峰, 许全喜等. 三峡水库区间来沙量估算及水库排沙效果分析. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 28-38.]
- [9] Li WJ, Yang SF, Fu XH *et al.* Sedimentation characteristics in the Three Gorges Reservoir during the initial operation stage. *Advances in Water Science*, 2015, **26**(5): 676-685. [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. 水科学进展, 2015, **26**(5): 676-685.]
- [10] Wang BY, Yan DC, Wen AB *et al.* Influencing factors of sediment deposition and their spatial variability in riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Journal of Mountain Science*, 2016, **13**(8): 1387-1396. DOI: 10.1007/s11629-015-3806-1.
- [11] 姚金忠, 程海云, 王海等. 三峡水库 175m 试验性蓄水以来水文泥沙观测与研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- [12] Chen GY, Dong BJ, Jiang LL *et al.* Sand peak discharge regulation of the Three Gorges Reservoir during the 2018 Yangtze River No. 2 Flood. *Yangtze River*, 2018, **49**(19): 6-10. [陈桂亚, 董炳江, 姜利玲等. 2018 长江 2 号洪水期间三峡水库沙峰排沙调度. 人民长江, 2018, **49**(19): 6-10.]
- [13] Yuan J, Xu QX, Dong BJ *et al.* Study on sediment erosion and deposition characteristics in fluctuating backwater area of Three Gorges Reservoir in the drawdown period. *Journal of Sediment Research*, 2015, (3): 15-20. [袁晶, 许全喜, 董炳江等. 消落期三峡水库库尾泥沙冲淤特性研究. 泥沙研究, 2015, (3): 15-20.]
- [14] Yang HF, Yang SL, Xu KH *et al.* Human impacts on sediment in the Yangtze River: A review and new perspectives. *Global and Planetary Change*, 2018, **162**: 8-17. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2018.01.001.
- [15] Xiao Y, Yang SF, Wang T *et al.* Analysis on navigation condition of the Three Gorges Reservoir at initial stage of water storage. *Port & Waterway Engineering*, 2019, (11): 92-99, 138. [肖毅, 杨胜发, 王涛等. 三峡水库蓄水初期库区航道条件分析. 水运工程, 2019, (11): 92-99, 138.]