

三峡水库挖粗沙减淤研究

周建军, 曹慧群, 张 曼

清华大学水利水电工程系; 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084

摘要 针对三峡水库运行后期存在的泥沙问题, 提出在水库变动回水区固定河段进行较大规模挖粗沙减淤的方法, 冀以减少水库后期淤积, 保障三峡工程长远利用, 持续发挥综合效益。分析了当前的挖泥技术和建筑河砂的市场情况, 认为现在开始在三峡水库较大规模挖取粗沙已经比较经济, 具有相当的可行性和必要性。采用一维不恒定水流泥沙数学模型, 对 20 世纪 60 年代 (60s) 和 90 年代 (90s) 水沙系列方案进行计算。将 0.1mm 以上泥沙作商业粗沙, 按固定河段连续挖泥方式, 水库运行到 100 年时, 按三峡设计泥沙系列 (60s) 减淤量可达 37 亿 m^3 , 按三峡蓄水前最近泥沙系列 (90s) 可减淤 27 亿 m^3 。百年淤积总量可控制在 140 亿 m^3 (60s) 或 110 亿 m^3 (90s), 挖泥减淤效率达到 100%。这对保护三峡水库后期效益、特别是防洪库容长期利用具有很大作用。笔者认为三峡水库挖泥减淤途径基本可行, 值得深入研究。这一减淤方式也可为其他河道型水库淤积控制提供参考。

关键词 三峡工程; 淤积; 挖泥; 粗沙; 数学模型

中图分类号 TV147

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)09-0028-09

Reducing Deposition in TGP Reservoir by Dredging Coarse Sediment

ZHOU Jianjun, CAO Huiqun, ZHANG Man

State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract A scheme of deposition control for the reservoir of Three Gorges Project (TGP) by dredging the coarse sediment at fixed reaches in the fluctuating backwater reaches is studied this paper. With the increasing capacity of dredging promoted by fast development and commercial needs of dredgers and large scale dredging projects, and the market of river-sand along the Yangtze, in particular, in recent decades, it is shown that reservoir dredging is not as expensive and low efficient as it was previously believed and large scale dredging for reservoir de-siltation seems to be worthy of consideration. Applying a well-applied model of unsteady flow and sediment transport, the authors studied many cases with respect to different flow and sediment conditions. Computation results reveal that 100 years accumulated deposition after dredging is to be decreased by 20%, and dredging and intercepting coarse sands are proved to be highly effective. This scheme may become a sustainable way for TGP to keep a low level of deposition and to protect its flood control capacity. This scheme may also serve as a reference for de-siltation of other river shaped reservoirs.

Keywords Three Gorges Project; deposition; dredge; coarse sediment; modeling

0 引言

水库泥沙淤积是三峡工程论证所考虑的重要问题之一^[1]。三峡可行性论证充分考虑了泥沙问题, 采取“蓄清排浑”的方式控制水库淤积。根据长江科学院一维数学模型的计算结果^[2-3], 水库运行 30 年后, 总淤积量为 87.9 亿 m^3 , 80 年后为 162.0 亿 m^3 , 100 年后达 171.7 亿 m^3 。届时, 水库淤积将占据大量的调节和防洪库容, 对库尾重庆河段通航和库区移民防洪

安全造成一定影响。

当前, 三峡上游兴建大型水库, 使三峡入库泥沙较大减少, 在一定程度上缓解了三峡水库泥沙问题。有溪洛渡等大型水库拦沙后, 预计今后 50~70 年内三峡泥沙问题不会明显体现出来。但上游水库拦沙能力有限, 同时, 作为长江干流防洪、发电、通航和供水的综合枢纽, 三峡工程应是可长期利用的工程, 必须长期保护, 使其防洪等能力持续发挥效益。根据

收稿日期: 2010-03-15

作者简介: 周建军, 教授, 研究方向为水力学和河流动力学, 电子信箱: zhoujj@tsinghua.edu.cn

长江科学院计算结果^[2],在没有上游水库条件下,三峡运用 80 年,库区可初步达到冲淤平衡。但是结果同时显示,在库尾合江至重庆河段,60、80 和 100 年末淤积量分别为 0.656 亿、0.951 亿和 1.336 亿 m^3 ,可见库尾后期淤积呈加速增长趋势,100 年末淤积仍在向上游发展,水库没有达到真正冲淤平衡。后期泥沙淤积对三峡水库的防洪能力影响较大。按论证和初步设计的静库容方法计算,水库设计防洪库容 221.5 亿 m^3 ,淤积 100 年后仍能保留 86%^[2-3]。然而,三峡是典型河道型水库,主要防御大洪水,库区水流的强烈河道动力特性及对防洪能力的影响,静库容方法不能准确计算。防洪前的动态回水对水库有效防洪库容影响很大,泥沙淤积后影响更大。根据不恒定水流泥沙数学模型,初期三峡的动态防洪库容只有设计的 80%左右,淤积到原百年水平时保留比例将小于 50%,水库防洪能力明显降低^[4]。泥沙淤积对重庆洪水位、库尾航运、涪陵一带库区防洪和发电等也会造成影响^[4]。现在入库泥沙减少,问题有所缓解,但三峡蓄水到 2009 年底实测的水库排沙比只有 25.9%,2006—2009 年水位提高到 156m 以来,平均排沙比只有 16.4%,明显低于工程论证期预期的前 10 年排沙比 30%^[3]或 35.5%^[5]。因此,即使在上游建库、入库泥沙减少的条件下,尽量减少水库淤积也有重要的实用价值和理论意义。

关于三峡等大型水库减淤增容,已有大量研究,但这些研究主要在流域拦沙、降低汛限水位“蓄清排浑”、优化调度和通过工程措施局部疏浚等方面,与经济社会关联很大,改变水库调度更涉及各方利益,在持续性方面难以得到保证。控制三峡后期淤积、长期保证工程综合效益的办法还有待进一步研究。挖泥减淤过去一直被认为是昂贵、小规模,目前还没有针对类似三峡的大型水库进行过挖泥减淤的研究或实践。随着挖泥在交通等商业领域的飞速发展,挖泥船技术和规模在近 20 年已得到很大提高,挖泥单价和成本也更趋于合理。同时,由于建设需要,长江沿岸商业用砂需求很大,长江中下游每年河道挖沙 5000 万~8000 万 t。三峡蓄水后,长

江下游的粗沙来源已被截断,下游挖沙将对长江构成威胁。为了避免长江建筑砂源短缺,三峡水库有必要、有义务,同时也有能力成为今后长江沿岸建材用砂的供应来源。为此,本研究采用水库泥沙数学模型,在水库变动回水区适当的固定河段连续较大规模挖沙,控制进入水库深水段粗沙数量,通过减缓水库淤积三角洲,缓解回水抬高和后期不断增加的淤积趋势,实现整体减淤,为三峡水库长期利用寻求更多的途径和选择。

1 水库挖泥减淤原理和基本考虑

水库挖泥减淤方案可行性分析主要基于方案的挖泥代价和减淤效率,挖泥技术与规模的支撑条件、长江沿岸河砂需求、市场和三峡挖泥方案的投入产出等也是重要的方面。同时,三峡水库良好的通航条件也是决定方案可在库区大规模推行的先决条件。

1.1 挖泥减淤原理

水库淤积量很大,一般认为挖泥只能缓解局部淤积,效率很低。本研究不是任意挖泥,而是在库区特定位置挖取粗沙。对具有河道形态的三峡水库而言,库尾变动回水区有相当长河段具有相当大的输沙能力,只有很少部分粗泥沙可在此淤积,是粗细泥沙集中分选河段。天然情况下,只有粒径大于 0.1mm 的泥沙才参与长江中上游和重庆河段的冲淤,水库蓄水后这种泥沙必将优先淤积在变动回水区上段。图 1 是三峡蓄水后 2005 年的实测淤积物中值粒径沿程分布情况,变动回水区的汛后淤积泥沙至少 50%以上都明显超过 0.1mm。这种粗沙数量较少,但几乎全部淤积在水库回水上段,影响航道,抬高库尾水位,导致淤积上延,危害很大。因此,本研究拟利用水库自然分选特性,在变动回水区挖泥、清除粗沙。拟在变动回水区布置一个“固定河段挖泥”(Fixed Dredging Basin, FDB),如图 2 所示,随时可用大型挖泥船将淤积粗沙清除、细沙返回水流。FDB 在回水上端,水流流速较大,淤积泥沙数量较少、较粗。因此,FDB 可望成为粗沙集中淤积区域,采集和

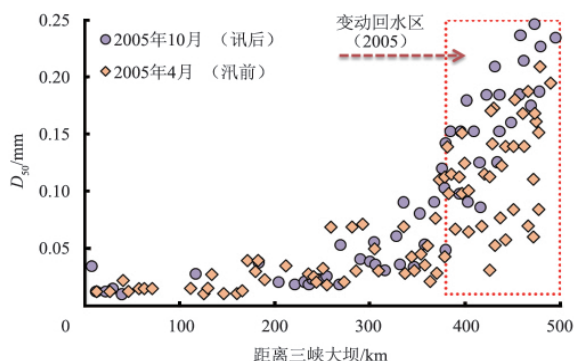


图 1 三峡水库 2005 年汛前、汛后实测淤积物中值粒径 (D_{50}) 沿程变化

Fig. 1 Measured median size of the silts from TGP reservoir before and after flood season in 2005

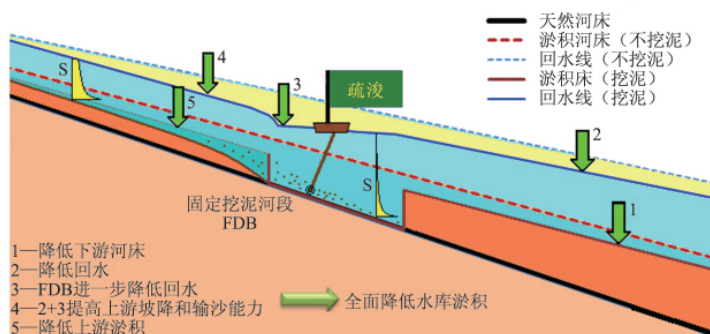


图 2 在变动回水区设置固定河段挖泥的减淤作用示意图

Fig. 2 Illustration of the proposed scheme of fixed dredging basin (FDB) and its possible impacts

拦截粗沙进入深水库段。

根据三峡入库泥沙资料,按 20 世纪 60 年代资料粒径大于 0.1mm 粗沙约 7170 万 t/a,90 年代 5320 万 t/a。根据泥沙数学模型计算成果^[2-3],大于 0.1mm 的粗沙可排出水库的比例在 100 年都远低于天然情况,这部分粗沙是构成今后水库淤积三角洲的主体,影响水库防洪和库尾通航。

在 FDB 挖沙,首先减少了进入水库永久回水段粗沙。这种泥沙相对较粗,难以排出水库,连续不断挖取可使进入和淤积在 FDB 以下的粗沙减少,减淤并降低淤积三角洲纵向坡度和 FDB 处的回水高度。FDB 河段一般维持较大过水面积,水面比降较缓,其上游回水还可得到进一步降低。综合作用下,FDB 上游回水基面降低、比降加大,输沙能力得到加强。因此,挖泥也可减少 FDB 上游淤积。同时,FDB 疏浚反过来又促进更粗泥沙不断淤积在 FDB。由于上游比降加大,在高水位期间淤积的泥沙会在消落期或汛期冲刷(“走沙”)下移,较粗部分也能淤积到 FDB 内,FDB 可成为粗沙的“聚沙盆”。这里清除的粗沙实际上是其上游较长河段和 FDB 内直接淤积粗沙的累加。优选 FDB 位置可找到或逐步形成一个源源不断的高效粗沙采集场,长期运转下去。

根据河流动力学原理,在造床条件下水库最终建立冲淤平衡的坡降 J 为

$$J=\left(\frac{B}{Q}\right)^{0.5}(g\omega)^{\frac{5}{6}}\left(\frac{s}{k}\right)^{\frac{5}{6m}}n^2 \quad (1)$$

其中, n 为糙率, Q 为流量, B 为河宽, s 为含沙量, k 、 m 、 g 为常数。 $\omega=\sum_k(p_k\omega_k^m)^{1/m}$ 为入库泥沙平均沉速,其中 p_k 为分组泥沙比例, ω_k 为分组沙沉速。冲淤平衡坡降与入库泥沙颗粒的平均沉降速度几乎成正比。

$$\frac{J}{J_0}=\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{5/6} \quad (2)$$

其中, J_0 和 ω_0 为自然淤积平均坡降和入库泥沙沉速。若能部分拦截 0.1mm 以上粗沙,如拦截 50%,按三峡平均入库级配计算,平均沉速可从 0.0043m/s 降至 0.0030m/s。根据公式(2),平衡淤积坡降可降低 25%。据此涪陵附近后期淤积抬高幅度可降低 5~6m,减淤效果相当显著。

1.2 疏浚能力与规模

目前水库挖泥的规模很小,亚洲^[6-8]、欧洲^[9]和美国^[10]绝大多数工程在百万 m^3 量级。20 世纪 90 年代以来,全球范围大型填海造地和航道维护等工程大大刺激了挖泥船和挖泥业发展,挖泥船的能力成数量级增加,成本也有所降低。全球范围大型疏浚吹填工程是支撑挖泥业发展的主要动力。表 1 中的国内外几个大型工程,单项挖泥和吹填工程强度已达每年上亿 m^3 ,国内每年挖泥 5000 万 m^3 的工程也已很多。

根据倪福生总结^[15],90 年代以来挖泥船能力向超大型化发展。J. F. J. de Nul 集团建造的“Vasco da Gama”号超大型自航耙吸式挖泥船舱容达 33000 m^3 ,总动力 37060kW,最大挖深

表 1 国内外大型疏浚工程

Table 1 Some large dredging projects worldwide and in China

工程项目	工程量/亿 m^3	工程投资	施工年限	年疏浚量/亿 ($m^3\cdot a^{-1}$)
迪拜棕榈岛系列项目 ^[11]	24	140 亿\$	2001—2010 年	2.67
裕廊岛二期和大士景工程 ^[11]	10.2	6.7 亿€	1996—2000 年	2.55
长江口深水航道整治工程 ^[12]	3.0	43.75 亿¥	1998—2009 年	0.27
天津港 25 万 t 级航道二期疏浚工程 ^[13]	0.47	10.8 亿¥	2007 年	0.47
唐山曹妃甸填海造陆工程 ^[14]	0.55	13.87 亿¥	2005—2006 年	0.55

140m。荷兰 IHC 公司制造的“Mashour”号自航绞吸式挖泥船总功率 22795kW、挖深 35m;J. F. J. de Nul 集团的“J. F. J. de Nul”号自航绞吸式挖泥船总装机容量 27200kW,最大挖深 35m。据不完全统计,1994 至 2004 年,世界上大型、超大型耙吸船猛增 26 艘、新增舱容 42 万 m^3 、最大舱容达 35500 m^3 。这些挖泥船在舱容、功率、性能以及挖深等指标方面都有突破,适合于大型疏浚工程。

据中国航贸网报道^[16],2007 年中国年疏浚能力约 5.3 亿 m^3 ,居世界第三位。国内挖泥船情况^[17]如下:中港集团拥有舱容 4500 m^3 以上大型耙吸挖泥船 20 余艘;上海航道局改装“新海象”等舱容 13000 m^3 大型耙吸挖泥船,建造了舱容 13500 m^3 和 16888 m^3 、挖深 42m 的大型耙吸、绞吸挖泥船等;天津航道局拥有自航绞吸挖泥船“天狮”等(3000 m^3/h 、4500 m^3/h ,挖深 30m);目前在建的 3500 m^3/h 等系列大型绞吸挖泥船 10 余艘。中国已

经可以完全自行生产 3500 m^3/h 级和 7000 m^3/h 级的大型绞吸式挖泥船。国产 3500 m^3/h 级挖泥船的市场售价已降至 7000 万元左右。国产大型挖泥船相对比较便宜,单船年疏浚能力可超过 1500 万 m^3 。根据当前挖泥技术水平,发展大规模水库清淤,年疏浚 3000 万~5000 万 m^3 是完全现实的。

1.3 经济与市场分析

水库挖泥的主要环节是挖泥和堆放。对于三峡水库,场地、运输、堆放和抛掷等都不存在大问题,而且库区深水航道为疏浚和运输提供了方便。国内巨大的建筑用砂市场对三峡水库挖泥至关重要。

根据 Morris 和 Fan 的总结^[9],美国人工(干)挖泥成本一般在 10~30 美元/ m^3 ,但水下机械疏浚成本较低。Illinois 的 Springfield 水库两期挖泥 227 万 m^3 ,平均成本单价 3.02 美元/ m^3 ,扣除淤泥堆放等成本,挖泥单价仅 2 美元/ m^3 。台湾白河水库

水力疏浚的平均成本为 3.8 美元/ m^3 。图 3 为美国陆军工程兵团官方网站公布的疏浚成本情况^[18]。在过去几十年内,维护性疏浚(不新增设备)的单价大约在 2~4 美元/ m^3 。在美国,挖泥成本中泥沙处置与占地等费用占相当大比例。国内疏浚工程成本更低。根据长江口深水航道工程资料,二期和三期工程(2001—2005 年)共疏浚 2.068 亿 m^3 ,包括抛泥等工程总费用 25.96 亿元,平均单价 12.5 元/ m^3 。其他工程疏浚标价一般在 6~12.5 元/ m^3 ,实际成本只有 4~8 元/ m^3 。刘志等^[10]根据国内情况对比分析不同规模(舱容 4500~15000 m^3)挖泥船成本,认为挖泥的综合单价应该在 5~6 元/ m^3 ;2002—2006 年水利行业疏浚招标的中标单价都在 6~7 元/ m^3 ^[19];胡春宏等^[20]统计长江中下游海狸—3800 型等大型挖泥船的运营成本一般为 2.8~3.5 元/ m^3 ,国产 J3100 型为 3.8~4.2 元/ m^3 。

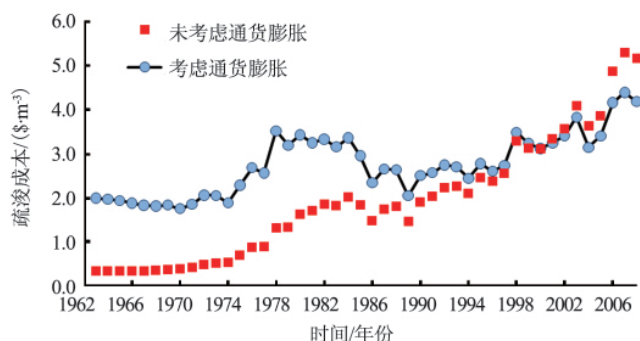


图 3 美国维护性疏浚成本变化趋势(1963—2008 年,通货膨胀因素以 2000 年为基准)

Fig. 3 Dredging cost in the US from 1963 to 2008 (Constant dollar is based on year 2000 value)

另一方面,根据王金生报道^[21],20 世纪 90 年代以来,随着长江经济带的建设,建筑沙石需求大量增加,河道采沙活动越来越频繁。批准的合法采沙总量超过 5300t/a,非法采沙数量更大;市场每年对长江粗沙的需求达数千万吨^[22]。根据长江中下游合法与非法采沙成本的调查^[21-22],一般合法采沙成本只有 4 元/t,河沙上船交易价格 10~18 元/t,采沙平均利润达 6 元/t 以上,非法采沙利润可达 9 元/t。以现有国产 3500 m^3/h 挖泥船、按 50%的工作效率计算,一年疏浚量可达 1500 万 m^3 。考虑运输成本,估算两年可收回购船成本。

三峡水库挖出细泥浆可直接返回水库,不存在堆放和环境问题。而且,由于三峡蓄水后已几乎不再下泄粗沙,下游河道粗沙补给严重短缺,持续采沙将对河道和堤防造成更大威胁,必须严格控制。因此,需要挖掘沙源、保证市场需求,否则控制中下游非法采沙难度更大。从这个意义上看,三峡水库作为今后的采沙目标应该是一个合理选择。如果合理布置、统一规划和管理,在三峡水库变动回水区形成一个高产采沙场,使疏浚带动形成一个采沙产业,既利于水库长期利用、又满足市场需求、符合环保要求。因此,考虑到工程实现性和经济成本等方面的条件,三峡水库挖泥减淤值得深入研究。

2 三峡水库挖泥减淤分析

本研究主要依据不恒定水流泥沙数学模型计算分析了固定河段挖泥方案的减淤效果,比较了多个 FDB 方案和多种情景,分析了 FDB 的拦沙效率、挖粗沙比例和挖泥工程量。

2.1 数学模型和计算方案

数学模型建立在不恒定水流泥沙运动基础上^[23],并在原初步检验的基础上,根据三峡蓄水以来的实测资料再次进行检验,该模型曾大量用于三峡减淤增容方案研究^[24]。模型上游从干流的朱沱、嘉陵江的北碚和乌江的武隆开始,下至三峡大坝。用 432 个断面分别模拟了三峡水库水流、泥沙过程,按 8 个分组模拟不同粒径泥沙运动,分组界限粒径分别为 0.01、0.025、0.05、0.075、0.10、0.15、0.25 和 0.50mm。分别计算了挖取粒径大于 0.1 和 0.15mm 粗沙的情景,剩余细沙在挖泥船机械分选后随泥浆返回水库。

研究主要计算了 100 年的水库淤积过程,按初步设计确定的 175—155—145 方案^[1]运行。循环计算了设计泥沙系列 60s (1961—1970 年)^[2]和入库沙量减少后的 90s (1993—2002 年)系列。入库水沙资料的统计情况见表 2。60s 系列总入库沙量为 5.414 亿 t/a、90s 系列 3.459 亿 t/a,分别大于和小于多年平均值 4.53 亿 t/a。水流模型计算考虑了库区所有库容大于 2000 万 m^3 支流的调节作用,泥沙计算包括干流、嘉陵江和乌江,没有考虑区间沙量,干流进入小支流的泥沙假设全部淤积。库区模型计算范围如图 4 所示。

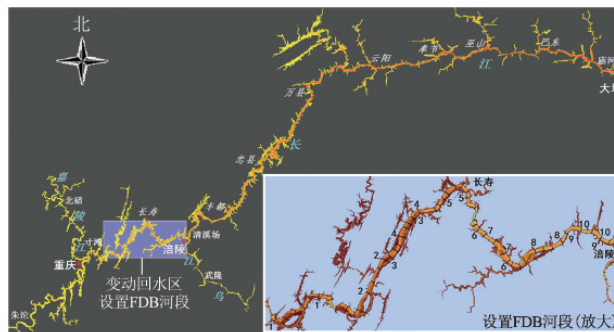


图 4 三峡库区、变动回水区及固定挖泥河段示意图

Fig. 4 Sketch of TGP reservoir and position of the FDBs considered

注:放大图数字表示研究方案编号及河段。

Note: Numbers in the enlarged part indicate reaches of the plans under investigation.

三峡水库变动回水区是水库最高水位与最低消落水位的回水末端之间的区间,大致在涪陵以上约 150km 范围。为考察不同位置设置 FDB 的挖泥减淤效果,重庆铜锣峡出口至涪陵的大约 100km 范围选取了图 4 所示的 10 个计算方案,各方案 FDB 的长度在 6.5~14km 不等。FDB 选择在比较顺直、具有较大宽度的河段,挖泥不影响正常通航。所有方案都计算了 100 年,原方案和推荐方案计算了 200 年。

水库冲淤平衡后的坡降可较大幅度降低。图 9 是几个计算方案百年时涪陵以下库区平均坡降计算结果比较 (在 60s 水沙条件下, 计算得到百年库区平均比降 0.0055%, 200 年 0.0059%, 略大于 60 年代末期长江上荆江平均比降 0.0053%^[25])。由于上荆江是天然情况下三峡出口泥沙冲淤平衡的产物, 同时考虑到库区峡谷边界的约束, 三峡水库平衡比降应该接近但略大于荆江。计算水库平衡比降合理)。60s 系列方案⑥比降减小 29.4%, 90s 系列方案⑨减小 27.4%。由于三峡水库长达 600~700km, 如此幅度比降减小, 可降低的库尾回水高度和淤积上延幅度将非常可观。

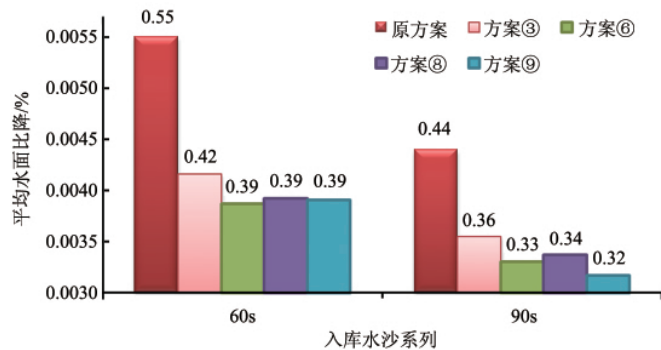


图 9 各挖泥方案 100 年库区坡降 (涪陵—大坝间 3 万 m³/s 流量平均坡降) 比较

Fig. 9 Comparison of predicted slopes of reservoir water surface after 100 years deposition

原方案和挖泥方案⑥泥沙的沿程分选情况 (图 10) 显示, 原方案表层淤积物中值粒径 D_{50} 一直不断从上向下发展, 200 年时近坝段泥沙还明显偏细。挖泥后淤积物粒径明显变细, 到 50 年左右上下粒径基本趋于一致。

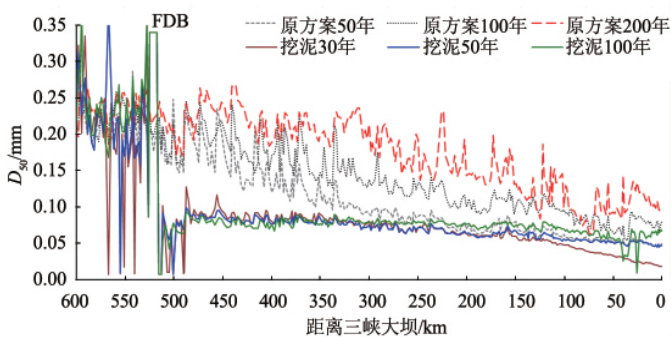


图 10 原方案和挖泥方案⑥表层淤积物中值粒径沿程分布情况
Fig. 10 Comparison of median size of particles of deposition in the top layer

2.4 挖泥工程量

表 3 列出了 100 年内的总挖沙量。实际上, 挖沙数量年际变化较大。图 11 是方案⑥在 80 年内完全维持 FDB 无淤积的理论疏浚量和粗沙数量。图 11 显示, 90s 系列前 30 年平均粗沙比例高达 64%。

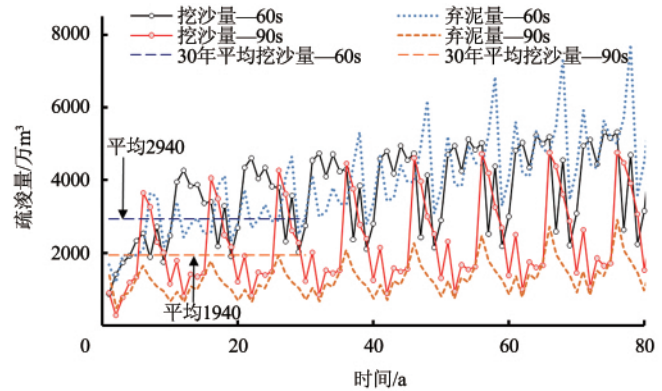


图 11 方案⑥前 80 年的理论挖沙量和弃泥数量
Fig. 11 Theoretical volume of dredging needed and corresponding fine sediment returned to reservoir as slurry in 80 years

总体上看, 前后疏浚量变化不大, 但受当年水文条件影响较大。60s 系列前 30 年平均挖沙工程量 2940 万 m³/a、弃泥 2840 万 m³/a; 90s 系列, 前 30 年平均挖沙 1940 万 m³/a、弃泥 1100 万 m³/a。随时间推移、淤积增加和回水上延, 后期原选定 FDB 淤积细沙比例逐渐增加, 特别是 60s 系列疏浚弃泥量增加相当明显, 但是 90s 系列因回水抬升幅度较小, 后期变化不大。对于这种情况, 可考虑在后期上移 FDB 位置以减少弃泥, 提高挖沙效率。另外, 根据计算结果, 多沙年 (如 90s 系列 1998 年) 及后续的 1~2 年挖沙数量较大, 这是淤积在上游的粗沙逐步下移的结果。可以预见, 在今后一定时期内受上游建库拦沙影响, 三峡水库实际挖沙工程量会更小。为了适应工程实际和水沙条件变化, 还需进一步结合实际情况进行设计研究, 以确定合适的挖沙方案和工程规模。

3 挖泥财务分析

在三峡水库变动回水区挖泥具有一定的经济收益。按照前面分析得到当前长江沿岸河砂的价格水平, 针对 60s 和 90s 系列前 30 年, 按方案⑥, 假设清淤 (包括弃泥方量) 成本按单价 5 元/t、粗沙离船价格按 12 元/t 计, 每年三峡按 FDB 方式清淤利润分别可达 $(2940 \times 12 - (2940 + 2840) \times 5) \times 1.3 = 0.8$ 亿元和 $(1940 \times 12 - (1940 + 1100) \times 5) \times 1.3 = 1.05$ 亿元。购置两艘国产 3500m³/h 绞吸式挖泥船, 两年可收回成本。

当然, 实际成本中影响价格的因素还更多, 包括水运成本等, 同时实际的河砂上市价格远高于 12 元/t, 因此还需要更复杂的核算。另外, 如何解决大量河沙在三峡和葛洲坝过坝等问题还需要深入研究。由初步分析可见, 在三峡水库变动回水区设置固定河段利用大型挖泥船清淤, 既利于水库长期利用, 同时也可为长江沿岸提供大量建筑用砂, 具有一定的经济效益。

4 讨论和结论

水库泥沙淤积是没有得到解决的重要问题, 长远上三峡

水库是存在泥沙淤积问题的。尽管当前入库泥沙减少和上游水库拦沙等措施使泥沙淤积对三峡工程影响得到推迟和缓解,但是从长远考虑,必须寻求能妥善解决之道,才能保证工程长期利用。考虑到后期水库淤积对防洪能力、库尾通航和库区洪水位存在的严重影响,在三峡工程已采用和预备采用的各种减淤方式的同时,研究高效、大规模的挖沙减淤方式是完全必要的。

传统上,水库挖泥一直被认为是昂贵的方式,规模大,效益难以大力发挥作用。但是,近年来随着挖泥船技术的快速发展和单船挖泥能力的迅速提高,以及市场对河砂需求的不断增加,水库挖泥工程的成本结构已发生很大变化。考虑到三峡水库变动回水区具有较强的泥沙分选能力,可造就出集中的粗沙堆积区,挖取粗沙可以具有较大的减淤效力。进一步考虑到水库拦截使下游河道粗沙迅速减少,若不及时寻求可靠沙源,长江中下游大量采沙将更难得到控制,会在一定程度上对长江河道演变及堤防安全构成威胁。未来三峡库区挖沙将是必然的选择。同时,三峡水库挖泥减淤也有较大的市场价值。因此应该尽快研究、合理规划,将水库减淤与库区泥沙利用结合起来,防止无序发展对库区通航和库岸稳定造成不良影响。

本文并提出一种在变动回水区“固定河段挖泥”的连续清淤方法(FDB)。采用一维不恒定水沙数学模型计算表明,FDB能够使三峡设计水沙条件下的后期(100年)水库淤积量由177.4亿 m^3 降至140.4亿 m^3 ,90年代水沙100年水库淤积由134.4亿 m^3 降至106.8亿 m^3 。挖泥减淤效果较大,挖泥减淤系数大于0.9。FDB方式对入库粗沙的拦截比例达到50%~70%。挖泥中具有商业价值的粗沙,60s和90s系列分别是50%和60%,90s系列前30年粗沙比例高达64%。疏浚的细沙就地混泥浆返回水库,基本没有环境影响。对于当前的入库沙量,使用2艘大型挖泥船完全可以胜任挖泥工程。挖泥投入产出合理,具有经济效益。更重要的是,通过挖沙可基本抑制三峡水库后期淤积持续增长的势头,80~100年后水库在较低的淤积水平下达到冲淤平衡。这对三峡工程实现长期、可持续利用具有重大意义。

笔者认为,在通过优化调度等方式减淤的同时,开展在变动回水区挖泥减淤对保护三峡水库长远防洪能力、库尾航道安全和控制库区洪水位上升(包括控制重庆洪水位)都可发挥较大作用,也可有效降低库尾淤积三角洲高度,改善消落期航道。因此,三峡水库变动回水区进行大规模挖泥、挖沙具有相当的可行性和必要性。这一减淤方式在理论上也具有重要意义,对类似水库减淤方式安排具有参考价值。

但是,作为三峡工程的实用方案,这一方式还需要全面研究。比如,当前还存在商业沙过坝问题。有水库条件下,长江下水运输成本十分便宜,但由于挖泥会造成大量河沙运输过坝,明显增加三峡和葛洲坝下水方向货运总量。采用可行的过坝方式,如可否采用管道跨越两坝间直接输送到葛洲坝坝下等实际问题还需要研究。建议有关部门展开全面研究,

尽快展开库尾挖沙的作用和效益的原型试验,制定库区挖泥减淤和商业采沙规划等。

参考文献 (References)

- [1] 长江三峡工程论证泥沙专家组. 长江三峡工程泥沙专题论证报告[C]//三峡工程泥沙问题研究成果汇编(160~180米蓄水位方案). 北京: 水力电力部科学技术司, 1988: 1~9.
Panel of TGP Sediment. Report on the feasibility of TGP on sediment problems[C]//Compendium of Research Reports on Sediment Problems of the TGP (160~180m Impounding Scheme). Beijing: Chinese Ministry of Water Resources and Electric Power, 1988: 1~9.
- [2] 长江科学院. 三峡工程水库泥沙淤积计算综合分析报告[C]//三峡工程泥沙问题研究成果汇编(160~180米蓄水位方案). 北京: 水力电力部科学技术司, 1988: 94~123.
Changjiang River Scientific Research Institute. Comprehensive report on reservoir sedimentation of TGP by numerical modeling[C]//Compendium of Research Reports on Sediment Problems of the TGP (160~180m Impounding Scheme). Beijing: Chinese Ministry of Water Resources and Electric Power, 1988: 94~123.
- [3] 长江科学院. 三峡工程175米方案水库泥沙数学模型计算成果分析[C]//三峡工程泥沙问题研究成果汇编(160~180米蓄水位方案). 北京: 水力电力部科学技术司, 1988: 127~137.
Changjiang River Scientific Research Institute. Analysis of the computational result of the TGP reservoir sedimentation under the 175m scheme [C]//Compendium of Research Reports on Sediment Problems of the TGP (160~180m Impounding Scheme). Beijing: Chinese Ministry of Water Resources and Electric Power, 1988: 127~137.
- [4] 周建军. 三峡水库减少淤积、增大防洪库容优化调度方案研究[C]//长江三峡工程泥沙问题研究1996~2000第五卷. 北京: 知识产权出版社, 2002: 358~425.
Zhou Jianjun. Research on the schemes of optimal operation to reduce deposition and to increase flood control capacity for the TGP [C]//Sediment Research of the TGP 1996~2000, vol 5. Beijing: Intellect Property Publishing House, 2002: 358~425.
- [5] 韩其为, 何明民, 徐俭立. 三峡水库175方案补充计算结果[C]//长江三峡工程泥沙与航运关键技术研究——专题研究报告集. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1993: 539~550.
Han Qiwei, He Mingmin, Xu Jianli. Supplementary computation of deposition of the 175 scheme TGP [C]//Key Problems in Sediment and Navigation of TGP Project. Wuhan: Wuhan Polytechnic University Press, 1993: 539~550.
- [6] 黄根生. 论水槽子水库的清淤[J]. 华北水利水电学院学报, 2001, 22(3): 87~89.
Huang Gensheng. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2001, 22(3): 87~89.
- [7] 李善征. 水库深水清淤工程实例简介[J]. 北京水利, 2001(3): 29~31.
Li Shanzheng. Beijing Water Resources, 2001(3): 29~31.
- [8] 张启舜. 日本天龙川水库群的泥沙淤积及其处理 [J]. 水利水电快报, 1995(16): 20~24.
Zhang Qishun. Express Water Resources & Hydropower Information, 1995(16): 20~24.
- [9] Morris G L, Fan J H. Reservoir sedimentation Handbook—design and management of dams, reservoirs and watersheds for sustainable use[M]. Columbus, OH, US: McGraw-Hill, 1997.
- [10] 刘志, 倪福生. 基于疏浚成本选择耙吸式挖泥船的最优仓容[J]. 河海大学常州分校学报, 2007(3): 60~63.

- Liu Zhi, Ni Fusheng. *Journal of Hohai University Changzhou*, 2007(3): 60-63.
- [11] 游涛. 大型疏浚吹填项目工程特点[J]. 水道港口, 2007, 28(4): 245-249.
You Tao. *Journal of Waterway and Harbor*, 2007, 28(4): 245-249.
- [12] 俞为伟. 依托创新实施长江口二期疏浚工程 [J]. 水运工程, 2006(12): 130-133.
Yu Weiwei. *Port & Waterway Engineering*, 2006(12): 130-133.
- [13] 周献恩. 为了深水航道早日畅通[J]. 水运建设专刊, 2007(8): 1-2.
Zhou Xianen. *Waterway Construction Special*, 2007(8): 1-2.
- [14] 严六四. 国内外河道疏浚工程施工技术发展[J]. 水利水电施工, 2006(4): 33-39.
Yan Liusi. *Water Resources and Hydropower Construction*, 2006, (4): 33-39.
- [15] 倪福生. 国内外疏浚设备发展综述[J]. 河海大学常州分校学报, 2004, 18(1): 1-9.
Ni Fusheng. *Journal of Hohai University Changzhou*, 2004, 18(1): 1-9.
- [16] 中国航贸网. 疏浚强国之路继续延伸[OL]. [2007-01]. http://www.snet.com.cn/106/2007_2_1/1_106_155472_372_6_1170301911789.html.
China Shipping Gazette. The extension power of dredging in China [OL]. [2007-01]. http://www.snet.com.cn/106/2007_2_1/1_106_155472_372_6_1170301911789.html.
- [17] 赵虎. 振兴民族疏浚产业为国家重点工程献力 [N]. 中国水运报, 2007-06-25.
Zhao Hu. To promote the development of Chinese dredging industry[N]. *China Water Transportation*, 2007-06-25.
- [18] USACE Navigation Data Center[OL]. <http://www.iwr.usace.army.mil/NDC/dredge/ddcosts.htm>.

- [19] 苏冠群. “疏”出一个大市场[N]. 中国水利报, 2007-06-12.
Shu Guanqun. Promotion of large market by dredging [N]. *China Water Resources News*, 2007-06-12.
- [20] 胡春宏, 吉祖稳, 黄永健. 我国江河湖库清淤疏浚实践与分析 [J]. 泥沙研究, 1998(4): 47-55.
Hu Chunhong, Ji Zufen, Huang Yongjian. *Journal of Sediment Research*, 1998(4): 47-55.
- [21] 王金生. 浅析采砂船采砂能力对长江河道采砂管理的影响 [J]. 中国水利, 2005(4): 37-39.
Wang Jinsheng. *China Water Resources*, 2005(4): 37-39.
- [22] 吴志广, 李俊. 长江河道采砂管理实践与探索 [J]. 中国水利, 2003(5): 71-73.
Wu Zhiguang, Li Jun. *China Water Resources*, 2003(5): 71-73.
- [23] Zhou J, Lin B N. One-dimensional mathematical model for suspended sediment by lateral integration [J]. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 1998, 124(7): 712-717.
- [24] 周建军. 水流泥沙数学模型研究[C]//王光谦, 胡春宏. 泥沙研究进展. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 173-278.
Zhou Jianjun. Numerical modeling of river flow and sediment[C]//Wang Guangqian, Hu Chunhong. *Advances in Sediment Research*. Beijing: China Water Power Press, 2006: 173-278.
- [25] 杨怀仁, 唐日长. 长江中游荆江变迁研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
Yang Huaren, Tang Richang. *Research on river morphology variation of Jingjiang reach of the Yangtze River* [M]. Beijing: China Water Power Press, 1999.

(责任编辑 李慧政)

·学术动态·



“第十五届冶金及材料 分析测试学术 报告会及展览会”征文

“第十五届冶金及材料分析测试学术报告会及展览会”将于 2010 年 9 月在北京举行。会议由中国金属学会和中国机械工程学会主办。

征文范围包括但不限于: 材料分析和测试技术的发展; 材料的分析和测试方法研究; 产品过程控制的检测和监控技术; 取样和样品制备技术; 在线分析和控制技术; 表面和涂层分析; 健康和环境分析; 质量控制和实验室管理。

全文截止日期为 2010 年 6 月 30 日。

联系方式: 北京海淀区学院南路 76 号 14 信箱 (100081), 中国金属学会分析测试分会秘书处; 电话: 010-62182398; 传真: 010-62181163; 电子信箱: csm@analysis.org.cn。

·学术动态·



“中国园艺学会 2010 年年会”征文

由中国园艺学会主办的“中国园艺学会 2010 年年会”将于 2010 年 9 月在沈阳召开。

征文范围: 果树、蔬菜、西瓜甜瓜、观赏园艺植物及其他园艺植物的种质资源、遗传育种、生物技术、栽培技术与生理、采后技术与生理等。
摘要截止日期: 2010 年 5 月 31 日。

会议网站: <http://xy.scau.edu.cn/yyx/veg/html/xueshujiailiu/125.html>。

联系方式: 北京中关村南大街 12 号《园艺学报》编辑部 (100081), 年会秘书处; 电话: 010-62192388; 电子信箱: ivfyxb@mail.caas.net.cn。