



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.02.020

戴文鸿, 甘珑, 冯逸君, 等. 基于一维水沙模型的水库冲沙方式优化研究[J]. 2016, 14(2): 111-117.

DAI Wen hong, GAN Long, FENG Yi jun, et al. Optimization research of reservoir flushing scheme based on one dimensional numerical model[J]. 2016, 14(2): 111-117. (in Chinese)

# 基于一维水沙模型的水库冲沙方式优化研究

戴文鸿<sup>1,2,3</sup>, 甘 珑<sup>2</sup>, 冯逸君<sup>2</sup>, 陶国武<sup>2</sup>, 贾国新<sup>2</sup>

(1. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098;  
3. 河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098)

**摘要:** 在天然河流上修建水库, 破坏了河流水沙原本相对平衡的状态。泥沙进入库区后发生落淤, 从而导致水库淤积。在水库的实际运用中, 冲沙措施被广泛用于减缓水库的淤积速率。然而, 冲沙需要耗费水库较多的水量, 影响了水库的综合效益, 为此必须协调水库淤积与水库兴利效益之间的关系。在选定合理冲沙水位和冲沙流量范围的基础上, 应用一维非均匀流不平衡输沙模型, 结合某多沙水库现行调度规程, 对多种拟定冲沙方案下该水库的冲沙过程进行长期模拟, 计算各方案下水库多年平均淤积量和多年平均发电量等指标, 据此选取合适的冲沙方案。结果表明, 持续时间较长的低水位冲沙方式的冲沙效果相对较好, 能够在一定程度上减缓水库的淤积速率, 同时发电量的损失也相对较小。

**关键词:** 一维水沙模型; 多沙水库; 冲沙方案; 泥沙淤积; 兴利效益

中图分类号: TV 697.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2016)02-0111-07

## Optimization research of reservoir flushing scheme based on one dimensional numerical model

DAI Wen hong<sup>1,2,3</sup>, GAN Long<sup>2</sup>, FENG Yi jun<sup>2</sup>, TAO Guo wu<sup>2</sup>, JIA Guo xin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Building reservoirs on a river breaks the original balance of flow and sediment. Once the incoming sediment begins to deposit, a siltation will take place in the reservoir area. To slow down the siltation, reservoir flushing is widely used in the reservoir operation. However, reservoir flushing will inevitably waste too much water of a reservoir, damaging the comprehensive benefits of the reservoir. Therefore, the relationship between siltation and benefits must be balanced. As for a certain reservoir, on the condition that the current operation regulations was obeyed, a long term numerical simulation of flushing process was conducted for different flushing schemes, in which the reasonable ranges of water level and discharge of flushing were proposed, by adopting an one dimensional non uniform flow and non equilibrium sediment transport model, and the multi year average amount of siltation and electricity generation were calculated to be the indices of the selecting of appropriate flushing schemes. The results indicated that the flushing scheme of a lower water level and a longer duration had better effects on slowing down the siltation in the reservoir area, and lower loss of electricity generation.

**Key words:** one dimensional numerical model; reservoir with heavy siltation; flushing scheme; sediment deposition; economical benefits

收稿日期: 2015-10-30 修回日期: 2016-01-27 网络出版时间: 2016-04-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160414.1453.019.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51239003; 51479071); 江苏省自然科学基金面上项目(BK2012808); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(YS11001); 高等学校学科创新引智计划资助(B12032); 河海大学大学生创新训练计划项目(201510294003Y)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51239003; 51479071); The Jiangsu Natural Science Fund General Program (BK2012808); The Jiangsu Colleges and Universities Academic Building Engineering Project (YS11001); The "111 Project" (B12032); Innovative Training Program for College Students in Hohai University (201510294003Y)

作者简介: 戴文鸿(1966), 男, 江苏泰州人, 教授, 博士, 主要从事河流动力学及河流演变等方面研究。E-mail: wdai@hhu.edu.cn

通讯作者: 甘 珑(1993), 男, 江西萍乡人, 主要从事水库冲沙调度及其优化研究。E-mail: ganlong2009@yeah.net

泥沙淤积导致全世界 4000 座左右大型水库每年损失 0.5% ~ 1.0% 的总库容,淤积过程最终会破坏水库发挥效益的能力<sup>[1]</sup>,因此寻求合理的排沙方式是水库管理和研究中的关键问题。我国多沙水库如黄河三门峡水库大多采用蓄清排浑的运用方式,即在汛期降低库水位,使得挟带较多泥沙的洪水排出水库<sup>[2]</sup>,此外闹德海、红领巾等水库也对排沙特性进行过分析研究<sup>[3]</sup>。但是,对于前期淤积已经很严重的水库,为了维持长期使用的库容,仅排出汛期的泥沙是不够的,需要选取合理的时机泄降库水位进行水力冲沙,使已经沉积的泥沙重新掺进水流中,并且通过大坝冲沙底孔或者泄洪洞排泄挟沙水流<sup>[4]</sup>。

水库排沙是水库泥沙运动的结果,非均匀不平衡输沙规律是水库淤积过程中最普遍的规律,水库排沙规律也应该遵循不平衡输沙原理<sup>[5]</sup>。随着计算机技术的发展,数学模型<sup>[6-7]</sup>被广泛应用于水库泥沙计算中,如陈前海等<sup>[8]</sup>利用一维非恒定非均匀泥沙数学模型推求三门峡库区河底高程的变化规律;缪凤举等<sup>[9]</sup>根据三门峡水库的水沙和库区泥沙冲淤特性,制定了“洪水排沙、平水发电”的运用原则和方式,合理地处理了排沙和发电的关系。HR Wallingford 公司<sup>[10]</sup>采用一维数学模型(RESSASS)对位于巴基斯坦的 Tarbela 水库进行了 5 项模型试验来模拟水库冲沙的情况,并对不同的冲沙高程、冲沙期和冲沙开始日期进行模拟,得到了高程较低冲沙效果较好的结论;王汉岗等<sup>[11]</sup>采用一维不平衡输沙数学模型,对不同运行方式下决洛水电站首部枢纽库区泥沙冲淤进行计算,初步给出了库区合理的冲沙运行方式;Strfan Haun 等<sup>[12]</sup>三维数学模型(SSIM2)研究尼泊尔的 Kali Gandaki 水库冲沙过程,并和物理模型得到的数据进行比较,数模结果与物模试验结果吻合度较好。由于水库泥沙淤积问题的严重性,寻求合理的冲沙方式对于水库运行管理显得尤其重要。鉴于水沙数学模型越来越广泛的用于水库淤积计算中<sup>[13-16]</sup>,本文采用一维非均匀流不平衡输沙水沙模型,结合南方某多沙水库现行调度规程,对多种拟定冲沙方案下该水库的冲沙过程进行长期模拟,计算各方案下多年平均发电量和多年平均淤积量等指标,进而选取一种适合于该水库的冲沙方案。

## 1 数学模型建立

本文通过对 Navier-Stokes 方程、泥沙连续方程及泥沙扩散方程的进一步简化,得到一维非均匀不平衡输沙模型的基本方程。与其他各类水沙数学模型相比,主要区别在于水流挟沙力和恢复饱和系数选择的不同。此数学模型采用 FORTRAN 语言编制计算程序进行求解。

### 1.1 控制方程

一维河道和其他具有自由表面的浅水渐变非恒定水流运动规律可采用 Saint-Venant 方程组描述,它由反映质量守恒律的连续方程和反映动量守恒律的运动方程组成<sup>[17]</sup>:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{n^2 Q |Q|}{AR^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

式中: $x$  和  $t$  是空间和时间坐标; $Q$  为流量; $A$  为过流断面面积; $B$  为水面宽度; $g$  为重力加速度; $n$  为 Manning 系数; $R$  为水力半径; $Z$  为水面高程。

描述一维悬移质的不平衡输沙方程式如下:

$$\frac{\partial(QS)}{\partial x} + \frac{\partial(AS)}{\partial t} + \alpha \omega B(S - S^*) = 0 \quad (3)$$

式中: $S$  为断面平均含沙量; $S^*$  为水流挟沙力; $\alpha$  为恢复饱和系数; $\omega$  为泥沙沉速。

河床变形方程为:

$$\rho(1 - \lambda) \frac{\partial A_0}{\partial t} = \alpha \omega B(S - S^*) \quad (4)$$

式中: $\rho$  为泥沙密度; $\lambda$  为孔隙率; $A_0$  为河段冲淤面积。

### 1.2 辅助方程

(1) 恢复饱和系数。

窦国仁<sup>[18]</sup>基于扩散理论的基本概念得出,在重力和紊动的双重作用下,水中各个悬沙颗粒的沉降概率相等。其中,悬沙颗粒的沉降概率  $\alpha$  可表示为

$$\alpha = 0.5 + \phi(\omega/\sigma) \quad (5)$$

函数  $\phi(\omega/\sigma)$  根据正态分布,可由表 1 查得。其中,脉动流速的均方根  $\sigma$  可近似用下式来确定:

$$\sigma = 1.25u \sqrt{g/C} \quad (6)$$

式中: $C$  为 Chzy 系数; $g$  是重力加速度; $u$  为断面平均流速。

表 1 函数  $\phi(\omega/\sigma)$  取值

Tab. 1 The values of function  $\phi(\omega/\sigma)$

$\omega/\sigma$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\phi(\omega/\sigma)$	0.040	0.080	0.120	0.155	0.190	0.225	0.260	0.290	0.315	0.340

## (2) 挟沙能力公式。

窦国仁<sup>[18]</sup>通过对泥沙起动机率等统计概念的讨论,得到了挟沙能力公式:

$$S_* = ku^3 / (ghv_{0s}) \quad (7)$$

其中,

$$k = 0.055 \gamma_s \eta \sqrt{g/C} \quad (8)$$

$$v_{0s} = 2.24 \sqrt{(\gamma_s - \gamma)gd/\gamma} \quad (9)$$

式中: $k$ 为计算参数; $v_{0s}$ 为泥沙止动流速; $h$ 为平均水深; $\gamma_s$ 为泥沙容重; $\gamma$ 为浑水容重, $d$ 为泥沙中值粒径; $\eta$ 为河床流速与平均流速的比值(其值可查文献<sup>[18]</sup>中的图2曲线); $\sqrt{g/C}$ 为饱和状态下平均含沙量与河底含沙量的比值(其值可查文献<sup>[18]</sup>中的图3曲线)。

## 1.3 方程离散

Saint-Venant 方程组采用 Preissmann 四点线性隐式差分格式<sup>[19]</sup>进行离散求解,这种方法的数值稳定性较好,精度能够满足工程计算的需要。对于任意函数 $f$ ,设 $f_i^{n+1} = f_i^n + \Delta f_i$ ( $f$ 为 $Z, Q, S$ ),将 Preissmann 隐式格式中因变量 $f(x, t)$ 及其导函数 $\partial f/\partial x$ 和 $\partial f/\partial t$ 的差分形式带入 Saint-Venant 方程组,得到连续方程和运动方程的差分形式后,对差分形式的方程组进行线性化,略去增量的乘积项,例如 $\Delta A \Delta Q, \dots$ 等,得到线性化后的差分方程组为式(10)、式(11)。水流模型的求解采用张二骏<sup>[20]</sup>河网非恒定流的三级联合解法。

$$a_{1i} \Delta Z_i + b_{1i} \Delta Q_i + c_{1i} \Delta Z_{i+1} + d_{1i} \Delta Q_{i+1} = e_{1i} \quad (10)$$

$$a_{2i} \Delta Z_i + b_{2i} \Delta Q_i + c_{2i} \Delta Z_{i+1} + d_{2i} \Delta Q_{i+1} = e_{2i} \quad (11)$$

为了求解方便,编程时采用的泥沙离散格式与水流一致,得到输沙方程的差分格式如下:

$$a_{3i} + \Delta S_{i+1} + b_{3i} \Delta S_i = c_{3i} \quad (12)$$

式中: $a_{1i}$ 至 $e_{1i}, a_{2i}$ 至 $e_{2i}, a_{3i}$ 至 $e_{3i}$ 均为与水力参数、地形、含沙量和时间有关的系数; $\Delta Z, \Delta Q, \Delta S$ 分别为水位、流量、含沙量的变化量。

## 2 模型应用

### 2.1 水库概况

某多沙水库坝址以上集水面积为 2 816 km<sup>2</sup>, 水库正常蓄水位 425 m, 相应库容 2 605 3 亿 m<sup>3</sup>, 死水位 389 m, 死库容 0. 760 2 亿 m<sup>3</sup>, 为不完全年调节水库。主流回水长约 30 km, 支流汇流口距坝址约 7. 6 km, 支流集水面积为 708. 4 km<sup>2</sup>。水电站坝址多年平均流量 115 m<sup>3</sup>/s, 多年平均悬移质沙量 402. 16 万 t, 多年平均含沙量 1. 108 kg/m<sup>3</sup>, 多年平均推移质沙量 60 32 万 t; 汛期(6- 10 月)平均流量 203. 12 m<sup>3</sup>/s, 平均含沙量 1. 285 kg/m<sup>3</sup>, 汛期来沙量占全年来沙量的 85. 78%, 泥沙年内分配特征值见表 2。库区 1999 年总共测量了 42 个断面, 2013 年测量时加密了 14 个断面, 共计 56 个断面, 其中水库主流总计 37 个, 从上游至下分别为 N37~ N01, 支流共有 18 个, 从上游至下分别为 C18~ C01, I- I 为坝轴线。具体布置见图 1。

表 2 水库坝址处水沙特征值

Tab. 2 The characteristic values of water and sediment in the reservoir dam site

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	44.9	37.1	30.7	34	69.7	169	295	262	172	116	89.8	60.5
输沙率/(kg·s <sup>-1</sup> )	17.0	7.94	3.66	6.70	56.6	207	403	352	213	126	85.4	39.9
沙量/万 t	4.55	1.94	0.98	1.74	15.2	53.8	108	94.4	55.3	33.7	22.1	10.7
含沙量/(kg·m <sup>-3</sup> )	0.378	0.214	0.119	0.197	0.812	1.23	1.37	1.35	1.24	1.09	0.950	0.659

### 2.2 泥沙级配

悬移质颗粒级配资料和床沙颗粒级配资料均采用现场实测资料,测量的泥沙颗粒级配曲线见图 2。库区没有实测推移质颗粒级配资料,因此用床沙颗粒级配来代替。

### 2.3 关键参数选用

模型计算使用的初始糙率根据实地查勘情况并参照其他类似水库的资料综合选用:悬移质淤积为主的库段 $n$ 取值为 0.04~ 0.055;推移质淤积为主的库段 $n$ 取值为 0.055~ 0.07,个别断面达 0.095。然后根据水面线计算结果率定糙率参数,反复调试

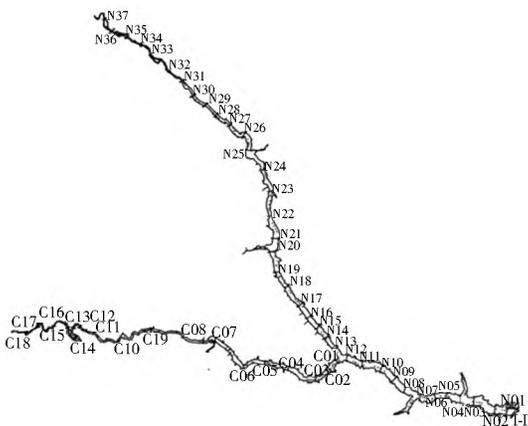


图 1 水库库区断面布置

Fig. 1 Distribution map of cross sections in reservoir

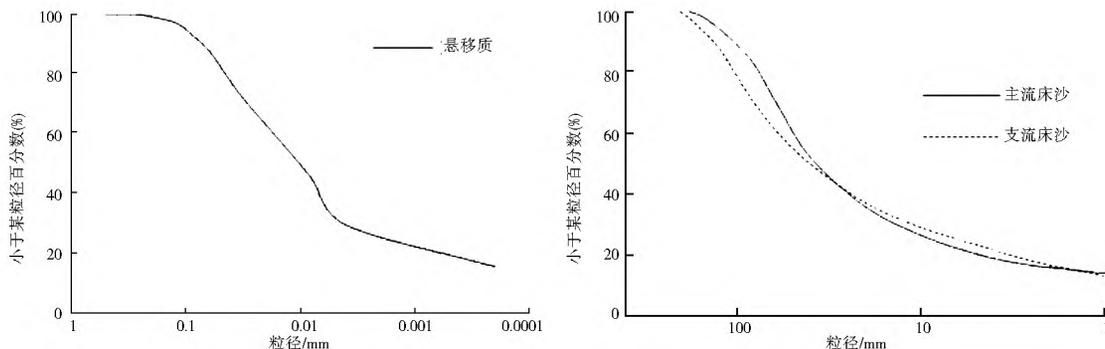


图 2 泥沙颗粒级配曲线

Fig. 2 Gradation curves of sediment

直至计算结果与实测结果相吻合时, 选取此时糙率值进行计算。

## 2.4 模型验证

该多沙水库的水位资料为 1999 年 3 月份和 2013 年 10 月测量断面地形同时所测的水位, 计算时采用测量时间段内平均流量和水位, 然后对比实测值和计算值。水面线实测值和计算值对比结果见

图 3, 可见 1999 年水面线实测值与计算值吻合较好, 而 2013 年水面线实测值与计算值存在差异。对其原因分析如下: 1999 年测量的是枯水期天然河道水位, 由于月内流量变化不大, 所以结果吻合度较好; 2013 年测量的是汛期库区水位, 汛期内水库入库流量和坝前水位变化较大, 因此计算值和实测值存在一定差异, 但对模型之后的模拟计算影响较小。

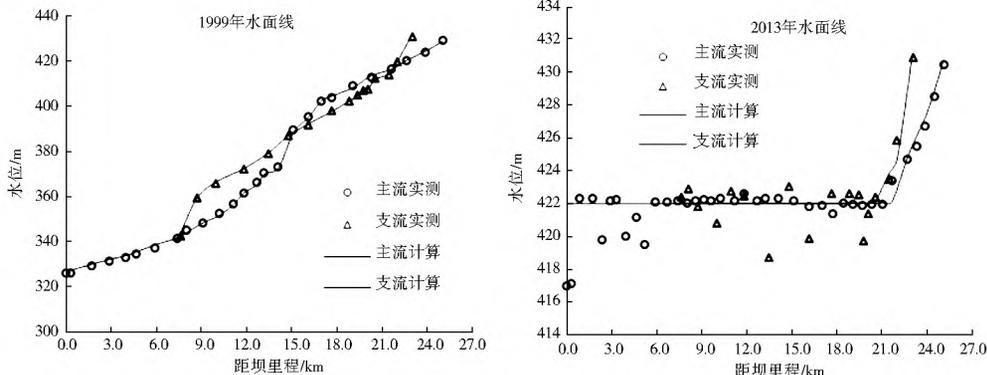


图 3 水位实测与计算值对比

Fig. 3 Comparison of water level between calculation and measurement

淤积量计算时, 计算初始条件采用 1999 年实测地形和床沙级配, 初始水位由恒定流计算给出, 进口边界给定流量过程和悬移质含沙量过程, 出口边界给定水位(坝前水位), 计算结果见图 4。由纵剖面计算结果可以得出, 模型计算结果中坝前段淤积量、支流入主流处淤积量、三角洲顶点高程均与实测数据存在一定差异。主要原因是 1999 年至 2013 年期

间, 上游大量泥石流涌入水库、修建公路时将大量弃渣倒入库中、库区多年来受洪水侵蚀和浪涌等影响导致库岸垮方, 以及两岸村民在库区开挖橡胶地等多种因素均对库区淤积产生影响。综上, 模型计算结果能够反映河流输沙淤积(不包括泥石流、塌岸、人类活动等导致的淤积)的实际情况, 能够用于水库的长期运行模拟计算。

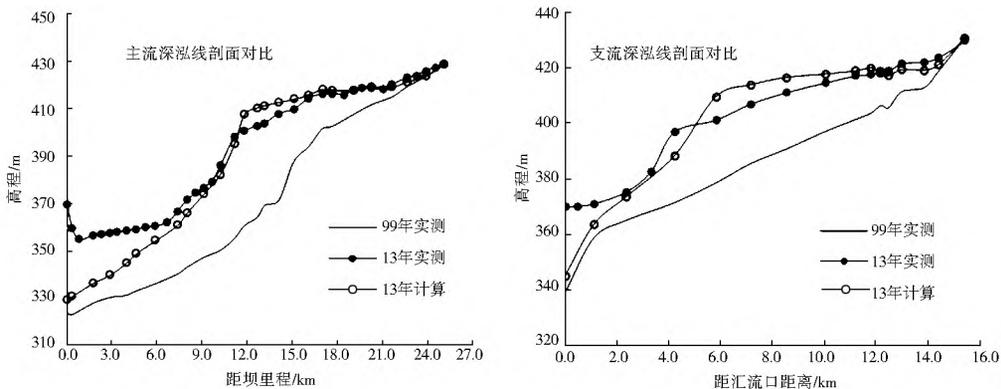


图 4 深泓线剖面实测与计算值对比

Fig. 4 Comparison of thalweg profile between calculation and measurement

### 3 冲沙方案研究

#### 3.1 冲沙时机

水库运行至今淤积情况已经十分严重,必须选择合适的时机进行水力冲沙将之前淤积在库区的泥沙冲起排出。该多沙水库汛期水沙十分集中,非汛期基流很小,水库宜采用汛期控制蓄洪运用方式,即对于汛期流量大、含沙量高的洪水,水库适当降低水位运行,以减缓水库的淤积速率;对含沙量较小的洪水,则适当拦蓄,以提高兴利效益。

考虑该水库工程布置的实际情况,溢流堰堰顶高程 415 m,当汛期洪水大于冲沙洞过流能力时,水库无法通过冲沙洞将水位降至 415 m 以下进行冲沙。因此,入库流量大且库水位较高的主汛期(7月-9月)不适宜冲沙。后汛期(10月)水库需以蓄水发电为主,也不适宜冲沙。结合 2009年-2013年间水库实际运行情况:11月至次年1月水库水位维持在正常蓄水位附近运行;2月水库水位开始消落,5月底水位消落至死水位附近。前汛期(6月)入库流量相对较大,库水位较低,多年日平均入库流量在 50~300 m<sup>3</sup>/s 之间,多年平均值为 145 m<sup>3</sup>/s,水库运行水位在 392~425 m 之间,平均水位在 410 m 左右,满足大流量低水位冲沙的要求;而且前汛期冲沙所耗费的水量可以很快得到补充,对水库发电效益影响较小。所以,前汛期是进行冲沙试验的最佳时机。

#### 3.2 冲沙水位

降低水位、加大泄量是提高冲刷强度的主要措施。起冲水位的确定必须由建筑物的泄量(冲沙时的下泄流量)及产生的断面平均流速来确定。只有平均流速大于泥沙起动流速时才会产生冲刷,此时相应水位即为冲刷开始水位。经过计算分析,绘制 N01 断面(距坝 300 m 左右,断面数据使用 2013 年实测的断面资料)的水位-流量-断面平均流速关系曲线(图 5),作为确定冲沙开始水位的关系线。

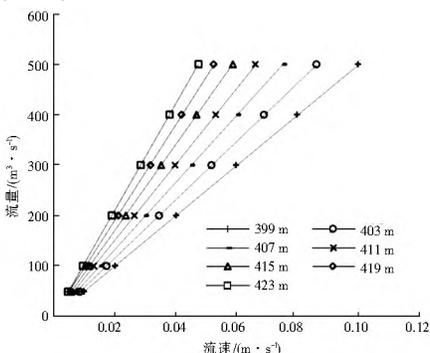


图 5 N01 断面水位-流量-断面平均流速关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between discharge and mean velocity under different water level in section N01

泥沙起动流速采用沙莫夫公式计算,可以得到不同水位下泥沙起动流速,见表 3。

表 3 不同水位下泥沙起动流速

水位 / m	399	403	407	411	415	419	423
流速 / (m·s <sup>-1</sup> )	0.0259	0.0263	0.0267	0.0271	0.0274	0.0278	0.0281

考虑到库区泥沙多为多年淤积所致,固结强度大,选取泥沙起动流速应大于实际计算流速,本次计算选取  $U_c$  为 0.03 m/s。水位低时对流量要求不高,但水位较高时要求冲沙流量大于一定值后泥沙才能起动。根据水库冲沙洞过流能力和图 5 中的断面水位-流量-断面平均流速关系曲线,选定起冲水位为 411~415 m,此时冲沙洞的过流能力在 243~249 m<sup>3</sup>/s 之间,而且能够满足泥沙起动所需的流速。为了使冲沙的效果明显,冲沙水位往往低于起冲水位。

#### 3.3 冲沙流量

开始冲沙时,水库开始由起冲水位下降到冲沙水位期间,冲沙流量应该大于入库流量。当库水位降到冲沙水位时,为了保持水库能够低水位排沙,流量应该保持在相应水位下冲沙洞下泄流量附近。2009年-2013年间前汛期(6月份)的日平均入库流量资料统计见表 4。

表 4 2009年-2013年前汛期(6月份)不同入库流量级天数统计

Tab. 4 Statistics of the number of days in different inflow grades in June during 2009-2013

入库流量 / (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	年份				
	2009	2010	2011	2012	2013
$Q \geq 120$	13	16	27	23	16
$Q \geq 150$	8	7	21	11	12
$Q \geq 210$	4	1	10	3	2
$Q \geq 240$	1	0	1	0	2
$Q \geq 270$	1	0	0	0	2

考虑到在起冲水位 411~415 m 时,水库冲沙洞下泄流量在 240~250 m<sup>3</sup>/s 左右,当入库流量大于 120~150 m<sup>3</sup>/s 时,且水库水位位于起冲水位间或者低于起冲水位,即可打开冲沙洞开始冲沙,使库水位开始下降,最后将冲沙流量维持在冲沙洞下泄流量 210~250 m<sup>3</sup>/s。所以确定冲沙流量相当于确定满足冲沙时的入库流量值。

#### 3.4 冲沙方案选择

结合之前冲沙水位、冲沙流量的范围分析,制定

多种冲沙方案。冲沙流量为冲沙水位下冲沙洞下泄流量,冲沙历时视水库当年满足入库流量条件而定。开始冲沙作业时需满足入库流量的要求,所以制定方案时重点在于确定满足冲沙开始时的合理入库流量条件(冲沙限制流量)和冲沙时水库运行水位。根据冲沙方案进行水库运行模拟时,主要根据水量平衡方程进行计算。

$$(Q_1 + Q_2) / 2 - (q_1 + q_2) / 2 = (V_1 - V_2) / \Delta t \quad (13)$$

式中:  $Q_1$ 、 $Q_2$  分别为计算时段初、末的入库流量;  $q_1$ 、 $q_2$  分别为计算时段初、末的出库(下泄)流量;  $V_1$ 、 $V_2$  分别为计算时段初、末的水库蓄水量;  $\Delta t$  为计算时段。

各方案模拟计算时,时段末的下泄流量  $q_2$  一般

包括电站发电流量、溢洪道下泄流量、冲沙洞下泄流量,发电流量和溢洪道下泄流量可以根据水库调度规程约束条件得出,冲沙洞下泄流量由冲沙方案得到。结合一维水沙数学模型,利用 1968 年—1982 年共计 15 年的水沙资料对水库运行进行长期模拟,计算各方案下水库多年平均淤积量和多年平均发电量等指标,据此选取合适的冲沙方案。为了更好地反映冲沙的效果,对各方案上下游为清水入流的情况进行长期模拟,计算库区的多年平均冲刷量;同时设置不冲沙方案进行对比。不冲沙方案计算时水库不设置冲沙水位,只按照正常运行规则进行泄洪和发电。冲沙组合方案和计算结果见表 5。

表 5 水库冲沙方案及结果

Tab. 5 Flushing schemes and results in Reservoir

方案	冲沙水位 / m	冲沙需求的入库流量 / (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	冲沙流量 / (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	符合冲沙条件天数 / d	多年平均发电量 / (M W · h)	多年平均淤积量 / 万 m <sup>3</sup>	清水条件下多年平均冲刷量 / 万 m <sup>3</sup>
1	410	150	240	16	440 306	359.979 6	10.461 5
2	410	120	240	31	438 597	352.721 9	15.168 4
3	405	150	234	22	439 660	348.956 9	18.553 9
4	405	120	234	39	437 474	341.882 4	22.748 6
5	400	150	226	27	438 884	334.132 6	20.735 5
6	400	120	226	45	436 618	329.429 8	27.325 1
7	不冲沙				442 224	372.444 9	4.414 6

通过对比方案 1—方案 6 和方案 7 的多年平均发电量和多年平均淤积量结果可以得到,水库进行冲沙能够减少水库的淤积量,但在一定程度上也减少了水库的发电量。方案 1—方案 6 减少的发电量范围为不进行冲沙时的 0.43%~1.26%,但淤积量减少达到了 3.34%~12.08%,水库冲沙通过损失少量的发电量来换取水库的长期运行是具有重要意义的。通过对比方案 1、方案 3 和方案 5 或者方案 2、方案 4 和方案 6,可以得到,在相同的冲沙限制流量下,冲沙水位越低,多年平均淤积量越少,水库的冲沙效果越好,上游清水入流条件下水库冲刷结果对此结论进行了验证。通过对比方案 1 和方案 2、方案 3 和方案 4、方案 5 和方案 6 可以得出,在相同冲沙水位下,冲沙所需求的入库流量值(冲沙限制流量)越小,符合条件的冲沙时间就越长,计算得到的水库淤积量就越小,同时水库发电效益受到的影响就越大。方案 6 相对于不进行冲沙时,多年平均淤积量减少了 12.08%,发电量只减少了 1.26%。从水库长期使用和综合效益来看,方案 6 是最优方案,即在每年 6 月份,当入库流量大于 120 m<sup>3</sup>/s、坝前水位位于 400~415 m 时,即可根据水库运行情况

相机打开冲沙洞进行冲沙作业。

## 4 结论

本文在建立一维水沙数学模型的基础上,对不同冲沙方案下某多沙水库的发电和淤积情况进行了长期模拟。模拟结果表明:(1)水库冲沙后的淤积量相较于不冲沙时有所减少,且冲沙水位越低,冲沙天数越长,效果越好;(2)水库在前汛期进行冲沙对发电量影响较小;(3)冲沙方案的选择应考虑水库的实际情况,当现有冲沙设施的限制使得水库无法完全降低库水位进行冲沙时,选择在前汛期库水位较低时进行冲沙也能取得一定的效果。总体来看,本文模拟结果可为该多沙水库冲沙方案的选择提供一定的参考。

## 参考文献(References):

- [1] Palmieri A, Shah F, Annandale G W, et al. Reservoir conservation: The RESCON approach, Vol. I[R]. Washington D. C., USA: World Bank, 2003.
- [2] WANG Zhaoyin, HU Churong. Strategies for managing reservoir sedimentation[J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(4): 369-384.

- [3] 韩其为, 杨小庆. 我国水库泥沙淤积研究综述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(3): 169-178. (HAN Qi wei, YANG Xiaoqing. Review of research on reservoir sediment deposition in China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003, 1(3): 169-178. (in Chinese))
- [4] 彭润泽, 刘善钧, 王世江, 等. 东方红电站 1984 年冬季泄空冲刷分析[J]. 泥沙研究, 1985(4): 30-40. (PENG Runze, LIU Shanjun, WANG Shijiang, et al. Measurement of sediment and study on the draw-down flushing of the Dongfanghong hydroelectric power station[J]. Journal of Sediment Research, 1985(4): 30-40. (in Chinese))
- [5] 韩其为. 非均匀悬移质不平衡输沙的研究[J]. 科学通报, 1979, 24(17): 804-804. (HAN Qiwei. Study of non-equilibrium transportation of non-uniform suspended load[J]. Journal of Science Bulletin, 1979, 24(17): 804-804. (in Chinese))
- [6] FANG Hongwei, CHEN Minghong, CHEN Qianhai. One-dimensional numerical simulation of non-uniform sediment transport under unsteady flows[J]. International Journal of Sediment Research, 2008, 23(4): 316-328.
- [7] 梁国亭, 姜乃迁, 余欣, 等. 三门峡库区泥沙数学模型研究与验证[J]. 人民黄河, 2009, 31(5): 33-35. (LIANG Guoting, JIANG Naqian, YU Xin, et al. Research and verification of sediment mathematical model in Sanmenxia Reservoir[J]. Journal of Yellow River, 2009, 31(5): 33-35. (in Chinese))
- [8] 陈前海, 方红卫, 王光谦. 三门峡库区一维非恒定非均匀泥沙输移数学模型[J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 160-164. (CHEN Qianhai, FANG Hongwei, WANG Guangqian. 1-D numerical simulation of unsteady flow and non-uniform sediment transport at the Sanmenxia reservoir in the Yellow River[J]. Advance in Water Science, 2004, 15(2): 160-164. (in Chinese))
- [9] 缪凤举, 丁六逸, 钱意颖. “洪水排沙、平水发电”——三门峡水库汛期发电运用方式的研究[J]. 泥沙研究, 2001, (2): 17-20. (MIAO Fengju, DING Liuyi, QIAN Yiyin. Discharging sediment by flood and generation by normal flow study on an operation mode of generating in flood season in Sanmenxia Reservoir[J]. Journal of Sediment Research, 2001, (2): 17-20. (in Chinese))
- [10] 简汉敏, 倪锦初, 刘小峰. 水库清淤[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2004. (JIAN Hanmin, NI Jinchu, LIU Xiaofeng. Reservoir Desilting[M]. Zhengzhou, The Yellow River Water Conservancy Press, 2004. (in Chinese))
- [11] 王汉岗, 王新宏, 刘秀. 决洛水电站首部枢纽冲沙运行方式研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(6): 85-89. (WANG Hangan, WANG Xirong, LIU Xiu. Flushing operation mode of pivot head for Jueluo Hydropower Station[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(6): 85-89. (in Chinese))
- [12] S. Haun, N. R. B. Olsen. Three dimensional numerical modeling of the flushing process of the Kali Gandaki hydropower reservoir[J]. Lakes & Reservoirs: Research & Management, 2012, (17): 25-33.
- [13] Neena Isaac, Eldho T I, Gupta I D. Numerical and physical model studies for hydraulic flushing of sediment from Chamrath II reservoir, Himachal Pradesh, India[J]. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 20(1): 14-23.
- [14] Muhammad Asif Chaudhry, Mughal Habib ur Rehman, M. Naem Akhtar. Modeling Sediment Deposition and Sediment Flushing Through Reservoirs Using F D Numerical Model[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(2): 647-658.
- [15] Reza Hajabadi, Mahdi Zarghami. Multi-Objective Reservoir Operation with Sediment Flushing; Case Study of Sefidrud Reservoir[J]. Water Resources Management, 2014, 28(15): 5357-5376.
- [16] Sameh A Kantoush, Anton J Schleiss. Channel formation during flushing of large shallow reservoirs with different geometries[J]. Environmental Technology, 2009, 30(8): 855-863.
- [17] 胡庆云, 王船海. 圣维南方程组 4 点线性隐格式的稳定性分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(4): 397-401. (HU Qingyun, WANG Chuanhai. Stability analysis of four point linear implicit scheme of Saint Venant equations[J]. Journal of Hohai University: Natural Science Edition, 2011, 39(4): 397-401. (in Chinese))
- [18] 窦国仁. 潮汐水流中的悬沙运动及冲淤计算[J]. 水利学报, 1963(4): 13-24. (DOU Guoren. Calculation of suspended sediment movement and erosion in tidal current[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1963(4): 13-24. (in Chinese))
- [19] 杨国录. 四点时空偏心 Preissmann 格式的应用问题[J]. 泥沙研究, 1991(4): 88-98. (YANG Guolu. The application of space-time four point eccentric Preissmann format[J]. Journal of Sediment Research, 1991(4): 88-98. (in Chinese))
- [20] 张二骏, 张东生, 李挺. 河网非恒定流的三级联合解法[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1982(1): 1-13. (ZHANG Erjun, ZHANG Dongsheng, LI Ting. "Three steps method" to compute unsteady flow for river networks[J]. Journal of Hohai University: Natural Science Edition, 1982(1): 1-13. (in Chinese))