第6期	水利	亅水	运	I.	程	学	报	No.6
2015年12月	HYDRO	-SCIEN	NCE A	AND	ENGI	NEER	ING	Dec. 2015

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.06.016

王敏,程文,施练东,等. 汤浦水库泥沙冲淤分布数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2015(6): 107-111. (WANG Min, CHENG Wen, SHI Lian-dong, et al. Numerical simulation of sediment scouring-silting distribution in Tangpu reservoir[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(6): 107-111.)

# 汤浦水库泥沙冲淤分布数值模拟

王 敏<sup>1</sup>,程 文<sup>1</sup>,施练东<sup>2</sup>,黄 晶<sup>1</sup>,闵 亮<sup>3</sup>,郑建刚<sup>4</sup> (1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地,陕西 西安 710048; 2. 绍兴市汤浦水库 有限公司,浙江 上虞 312364; 3. 长庆油田公司第七采油厂,陕西 延安 716000; 4. 长庆油田分公司超低 渗透油藏第一项目部,陕西 西安 710000)

**摘要:** 泥沙淤积不仅影响水库库容,其中大量污染物还会影响水库水质。运用 MIKE21 软件对汤浦水库泥沙 分布进行模拟研究。结果表明:泥沙在库区分布不均,河流入库位置淤积较少,局部甚至有冲刷;库区中部是泥 沙淤积主要地带,模拟最大淤积厚度约 30 cm;坝前位置淤积最小,厚度约为 12 cm。模拟结果与沉积物淤积厚 度采样结果一致,说明该模型能合理模拟汤浦水库沉积物分布状况。模型提供的沉积物分布状况对控制汤浦 水库内源污染有一定参考价值。

关 键 词:水库;沉积物;泥沙分布;污染防治;数值模拟
中图分类号:TV145
文献标志码:A
文章编号:1009-640X(2015)06-0107-05

据统计,迄今为止我国共建成库容 10 万 m<sup>3</sup>以上水库 98 002 座,总库容 9 323.12 亿 m<sup>3[1]</sup>。水库蓄水后,由于过水断面增加,水流速度降低,挟沙能力随之降低,入库泥沙逐步在库区沉积,使库容不断减小<sup>[2]</sup>。此外,近年来研究发现水库(湖泊)的污染日趋严重。2013 年全国重点湖泊与水库中水质为优良、轻度污染、中度污染和重度污染的国控重点湖泊(水库)比例分别为 60.7%,26.2%,1.6%和 11.5%<sup>[3]</sup>。有研究表明湖 泊、水库中存在的大量泥沙(沉积物)往往含有氮、磷及金属等污染物,这些污染物在水-沉积物界面具有存储和传输功能,在适当条件下底部沉积物成为污染物的来源,造成水体的二次污染<sup>[4]</sup>。本文采用 MIKE21 软件,对作为水源地的汤浦水库的泥沙分布状况进行模拟研究,确定库区主要淤积地带,为水库管理和内源污染控制提供依据。

1 研究区域概况

汤浦水库建成于 2002 年,是绍兴平原专有供水水 库,位于浙江上虞市汤浦镇南,曹娥江支流小舜江上,是 典型的河道型水库。双江溪、王化溪和万宝溪 3 条河流 入库,其中双江溪年入库流量占总流量的 75%以上,王 化溪约占 20%,万宝溪流量最小,约占 5%。水库流域 面积 460 km<sup>2</sup>,水面面积 14 km<sup>2</sup>,总库容 2.35 亿 m<sup>3</sup>,设 计日供水规模达 100 万 t,水库库形见图 1。水库流域 地处会稽山脉东南部,属浙东低山丘陵区,北亚热带南



图 1 汤浦水库及采样点 Fig. 1 Shape and sampling sites of Tangpu reservoir

收稿日期: 2015-03-02

**作者简介:**王 敏(1984—),男,陕西宝鸡人,博士研究生,主要从事水污染处理与生态修复研究。 E-mail:271781310@qq.com 通信作者:程文(E-mail:wencheng@xaut.edu.cn) 缘。全年温暖湿润,多年平均气温 16.5 ℃,流域多年平均降水量 1 564.4 mm,多年平均流量 11.6 m<sup>3</sup>/s。

# 2 模型的建立

#### 2.1 理论基础

本次研究只采用 MIKE 21 中的水动力(HD)和泥沙传输(MT 和 ST)模块。水动力模块的控制方程由质量守恒方程及沿垂向积分的动量守恒方程组成<sup>[5-7]</sup>。模型采用交替方向隐式(ADI)技术对质量守恒方程及动量方程分别进行时空上的积分。每个方向及每个单独网格线产生的方程矩阵采用双扫描法(Double Sweep)求解。MT 模块(黏性泥沙模块)结合了水动力模型(HD)和对流扩散模型(AD 模型)。水动力模型 计算水流和紊流扩散,对流扩散模型计算输运过程,输沙模型计算河床的冲淤过程。

对流扩散模型(AD)中,悬移质的对流扩散方程<sup>[9-10]</sup>为:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left( h \varepsilon_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left( h \varepsilon_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + Q_{\rm L} C_{\rm L} \frac{1}{h} - S$$

其中: $\bar{c}$ 为垂向平均含沙量(kg/m<sup>3</sup>);u,v分别为x,y方向的垂向平均流速(m/s); $\varepsilon_x,\varepsilon_y$ 分别为x,y方向的泥 沙紊动扩散系数(m<sup>2</sup>/s);h为水深(m);S为冲淤项(kg/(m<sup>3</sup> · s)); $C_L$ 为源含沙量(kg/m<sup>3</sup>); $Q_L$ 为水平单位面 积的源量(m<sup>3</sup>/(s·m<sup>2</sup>));其他符号含义同水动力学模型。该对流扩散方程采用三阶有限差分显式格式(即 ULTIMATE 格式)直接求解<sup>[11-12]</sup>。

#### 2.2 基础数据及地形资料

2.2.1 水文、泥沙及边界条件 水文资料由汤浦水库管理部门提供,主要有逐日入库流量、出库流量及水位等。入库流量主要为双江溪、王化溪和万宝溪来水,考虑到万宝溪流量较小,为简化模型将万宝溪流量归入 王化溪。以双江溪入库流量作为入口端边界条件。出口边界设为取水口和泄洪口。出库流量为每天绍兴方 向取水量。泥沙资料采用双江溪水文站实测资料,该站已有 36 年悬移质泥沙观测资料(1957—1968 年和 1970—1993 年)。该站多年平均悬移质含沙量 0.348 kg/m<sup>3</sup>,推移质按悬移质含沙量的 20%计算,则总的含 沙量为 0.418 kg/m<sup>3</sup>,泥沙粒径小于 3 μm,3~12 μm,12~31 μm,31~62 μm,62~125 μm,大于 125 μm 所占 的比例分别为:17%,12.6%,21.2%,32.2%,16.1%和 0.9%。

2.2.2 地形资料 对汤浦水库建库前库区地形图(1:5 000)进行数字化处理,得到软件要求的地形数据图。 根据建库前纸质库区地形图信息,库区分布有 280 多个勘测桩号点的坐标和高程数据。由于已知的库区勘 测散点数据较少,为得到足够详细的库区原始地形数据,本研究中根据已知散点高程数据,在库区底部增加 高程数据信息,再采用克里克插值法,生成相对详细的库区高程数据资料,最后将散点图和边界图的数据文 件导入 MIKEZERO,利用软件自带的插值工具进行插值,生成需要的非结构地形文件。单位网格面积控制在 200~600 m<sup>2</sup>,对河流入库位置、浅水区及地形复杂区域网格进行加密,坝前深水区网格划分相对较疏,整个 库区共划分为 51 721 个网格。

#### 2.3 模型率定与验证

建好库区地形非结构网格并加载地形数据,建立非结构网格流场模型,然后在模型中分别设置水动力模型和泥沙输运模型的相关参数。利用 2004—2006 年日测水位数据率定水动力模块,2007—2008 年实测水位验证各模型参数。

根据悬移质实测值与模拟值,调整泥沙模块各参数直到满足计算要求。验证结果表明模型各参数基本 合理,最终确定的各项参数为:曼宁系数 32 m<sup>1/3</sup>/s,涡黏系数为 0.25,干水深 h<sub>d</sub> = 0.005 m,淹没水深 h<sub>f</sub> = 0.05,湿水深 h<sub>w</sub>=0.1 m,最小和最大时间步长为 0.01 s 和 60 s,每 2 天输出一次结果。参数设置完成后,加载汤浦水库 2002—2014 年数据资料,对泥沙分布进行数值模拟。

# 3 结果分析

## 3.1 模拟结果分析

从汤浦水库泥沙淤积模拟(图 2)可以看出,该水库 自 2002 年运行至 2014 年,其泥沙分布大致分为3 部分。 第1 部分为 A'-A 段,主要包括从双江溪入库开始到王化 溪入库段,泥沙淤积平均厚度小于 10 cm。A'-A 段为水 库变动回水区,因此有冲有淤。非汛期时水库高水位运 行,导致该段泥沙淤积;水库度汛期间,库区水位消落, 导致变动回水区水面比降增加,水体挟沙能力增强,引 起该段河床冲刷,前期淤积泥沙被携带入库区中部。第 2 部分 A-B 段为汤浦水库常年回水区上段,是泥沙淤积



deposition in Tangpu reservoir

主要地带,淤积厚度相对均匀,约18 cm。该段水深增加,水面开阔,流速降低,水体挟沙在此迅速沉积,此外 该段河道较弯曲,会形成一些缓冲区域,更有利于泥沙沉积,故此段是泥沙沉积主要地带。第3部分 B-B'段 为近坝段,该段泥沙淤积相对较少,厚度约12 cm。该段水深大,流速慢,水体含沙量很小,一般只有极细的 悬移质泥沙以静水沉降等方式均匀淤积。由此可见,B-B'段以及整个库区尚未达到或接近泥沙冲淤平衡,淤 积前缘可能在 A-B 段尾部靠近坝前一端。

## 3.2 特征断面淤积分析

为了更准确了解水库不同位置典型断面的淤积状况,在汤浦水库入库、库中及坝前位置选取3个断面, 分别是1-1′断面、2-2′断面和3-3′断面(图2)。对各断面高程变化和逐年淤积加以分析,见图3。



图 5 初曲水序 5 一 断面间性文化相优仍砍你

Fig. 3 Sediment deposition along three sections in Tangpu reservoir

由图 2 可见,1-1′断面形状为不规则"V"字型,左岸坡度较缓,右岸坡度大,断面最低点靠近右岸,该断面 从 2002—2014 年总的淤积厚度不明显,断面高程没有明显变化。此外,从断面逐年淤积状况可以看出,泥沙 淤积逐渐增加,主要在中间地带,最大淤积厚度达 12.8 cm,淤积厚度由中间向两侧岸边逐步减少,右岸一侧 2014 年的淤积厚度小于 2006 年淤积厚度,说明右岸可能存在一定程度的冲刷。2-2′断面形状为不规则碗 状,断面位置在汤浦水库中部,位于库区淤积较多地带,从 2002 年到 2014 年,断面最大淤积厚度近 20 cm,集

中在断面中部两个凹槽之间,左岸淤积较多,右岸淤积变化不大。位于坝前位置的 3-3'断面左岸坡度较大, 右岸坡度小。该断面最大淤积厚度超过 16 cm,右岸淤积大于左岸,由于断面底部地势相对较小,故淤积分 布相对均匀。

#### 3.3 淤积厚度实测结果分析

为进一步验证模型计算结果,本研究根据水库地 形,水流条件等在汤浦水库从入库到坝前共选取 10 个 采样点(图 1 所示),分别采集柱状沉积物样品,每个采 样点采集 3 次。各采样点底泥厚度如图 4 所示。从图 4 可见,底泥样品存在明显分层。表层为黑色淤泥,密 度小,颗粒构成细,含水量很高,带有臭味;往下层颜色 逐步变为青色或者灰色,含水量降低,颗粒变粗;再往 下层往往出现黄色沙粒或者沙粒和黄泥的混合物;底 泥最下层有时会有紧密而细腻的黄泥层或者紧密的小



块碎石。汤浦水库建库前,河道狭窄,河道两岸大多为耕地、居民点和山地,土壤类型比较复杂,结合以前地 图及调研资料对本次底泥样品加以分析,综合判断水库建成后淤积的起点暨各采样点的淤积厚度。认为黄 色泥、沙混合段是淤积部分与原状土的分界段,黄泥层以上为淤积部分;紧密碎石层以上也认为是淤积部分; 根植土和耕作层土之上也为淤积部分。

根据采样厚度,用 SURFER 软件绘制汤浦水库底泥采样厚度分布。可以看出,汤浦水库底泥实际厚度 表现出"中间大,两头小"的特点。底泥最厚的位置出现在水库中部,厚度超过 35 cm,集中在 *I*,*F*,*C* 和 *J* 采 样点附近。该段水面较入库开阔,且地形复杂,有连续弯道,其水力条件更有利于泥沙沉积。坝前位置沉积 物采样厚度较小,两个采样点淤积厚度都小于 10 cm,这比模型计算的淤积厚度小,可能存在的原因是:坝前 沉积物一般都是细小的松散沉积物,在用柱状采集器采样时会对这些沉积物产生压实效果,因此其实测的淤 积厚度会相对偏小。

4 结 语

MIKE21模型经过参数调整以后,可以合理模拟汤浦水库的泥沙分布状况。模拟结果表明,汤浦水库泥 沙等沉积物在库区底部分布不均。河流入库位置淤积较少,局部有冲刷;库区中部是泥沙淤积主要地带,模 拟最大淤积厚度约 30 cm;坝前位置淤积最小,厚度一般在 12 cm 左右。模拟结果与泥沙淤积厚度采样分析 结果基本一致。采样显示,汤浦水库泥沙分布从入库到库区中部逐渐增加,库区中部是主要淤积地带,由库 中向坝前,淤积厚度逐步减小。本研究结果首次揭示了汤浦水库的泥沙淤积分布状况,可为水库管理部门在 水库安全评估和内源污染防治方面提供科学依据。

### 参考文献:

- [1] 孙振刚, 张岚, 段中德. 我国水库工程数量及分布[J]. 中国水利, 2013(7): 10-11. (SUN Zheng-gang, ZHANG Lan, DUAN Zhong-de. Number and distribution of reservoirs in China[J]. China Water Resources, 2013(7): 10-11. (in Chinese))
- [2] 陈国祥, 徐和兴. 水库泥沙与防治[J]. 湖泊科学, 1992, 4(4): 86-96. (CHEN Guo-xiang, XU He-xing. Reservoir sedimentation and its prevention[J]. Journal of Lake Sciences, 1992, 4(4): 86-96. (in Chinese))
- [3] 中华人民共和国环境保护部. 2013 中国环境公报-淡水环境[EB/OL]. http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb/2013zkgb/ 201406/t20140605\_276490.htm,201-06-05. (Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. China Environmental State Bulletin: 2013-fresh water environment[EB/OL]. http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgb/2013zkgb/201406/ t20140605\_276490.htm,201-06-05. (in Chinese))
- [4] 刘臣炜, 汪德爟. 湖泊富营养化内源污染的机理和控制技术研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增1): 814-818.

(LIU Chen-wei, WANG De-guan. Principle and control of eutrophication for lakes pollution by internal origin [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006,25(Suppl1): 814-818. (in Chinese))

- [5] 王兴奎, 邵学军, 李丹勋. 河流动力学基础[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (WANG Xing-kui, SHAO Xue-jun, LI Dan-xun. Fundamental river dynamics[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2002. (in Chinese))
- [6] 钱宁, 王兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983. (QIAN Ning, WANG Zhao-hui. Sediment transport mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese))
- [7] 曹叔尤, 方铎. 河流动力学进展[J]. 水科学进展, 1992(4): 319-325. (CAO Shu-you, FANG Duo. Advance in river mechanics[J]. Advance in Water Science, 1992(4): 319-325. (in Chinese))
- [8] 王靖宇,方红卫,黄磊,等.重金属随泥沙迁移过程的数学模型[J].水科学进展,2014,25(2):225-232.(WANG Jingyu, FANG Hong-wei, HUANG Lei, et al. A transport model for heavy metals in sediments[J]. Advances in Water Science, 2014,25(2):225-232.(in Chinese))
- [9] ENGELUND F, FREDSØE J. A sediment transport model for straight alluvial channels [J]. Nordic Hydrology, 1976 (7): 293-306.
- [10] 潘存鸿,曾剑,唐子文,等. 钱塘江河口泥沙特性及河床冲淤研究[J]. 水利水运工程学报, 2013(1): 1-7. (PAN Cunhong, ZENG Jian, TANG Zi-wen, et al. A study of sediment characteristics and riverbed erosion/deposition in Qiantang estuary [J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(1): 1-7. (in Chinese))
- [11] WU W M, RODI W, WENKA T. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2000,126(1): 4-15.
- [12] 曹振轶, 胡克林. 长江口二维非均匀悬沙数值模拟[J]. 泥沙研究, 2002(6): 66-73. (CAO Zhen-yi, HU Ke-lin. 2-D mathematical model for nonuniform sediment transport in Yangtze estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2002(6): 66-73. (in Chinese))

# Numerical simulation of sediment scouring-silting distribution in Tangpu reservoir

WANG Min<sup>1</sup>, CHENG Wen<sup>1</sup>, SHI Lian-dong<sup>2</sup>, HUANG Jing<sup>1</sup>, MIN Liang<sup>3</sup>, ZHENG Jian-Gang<sup>4</sup> (1. State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaoxing Tangpu Reservoir Co., Ltd., Shangyu 312364, China; 3. The Seventh Oil Production Plant of Changqing Qilfield Company, Yan'an 716000, China; 4. The 1st Ultra-low Permeability Reservoir Project Department of Changqing Oilfield Company, Xi'an 710000, China)

**Abstract**: Sediment deposition not only occupies the storage capacity, but also releases pollutants into the water body. In this study, the sediment distribution in the Tangpu reservoir has been investigated based on MIKE 21 software. The research results show that the sediment distribution is uneven in the reservoir. At the zone of the reservoir entrance, sediment deposition is not severe, and sediment erosion even occurs at sone places. In the centre of the reservoir there is significant sediments deposition, and the maximum simulated thickness of sediment deposition is about 30 cm, and the minimum thickness is about 12 cm, which is close to that of the dam front. Sediment distribution along the Tangpu reservoir reasonably. The simulation results have some reference values for the control of internal source pollution in the Tangpu reservoir.

Key words: reservoir; sediments; sediment distribution; pollution prevention and control; numerical simulation