

文章编号:1001-5485(2009)02-0009-05

# 三峡水库干支流河道一维非恒定水沙数学模型初步研究

黄仁勇,黄悦

(长江科学院 河流研究所,武汉 430010)

**摘要:**考虑水沙运动过程中的非恒定性及众多支流的影响,建立了三峡水库干支流河道一维非恒定水沙数学模型,并对水流方程组采用三级解法求解。采用三峡水库蓄水运用后2003年6月至2004年12月的水库实测水沙资料对模型进行了验证,验证结果有良好的一致性。本模型在使用1961—1970年系列年入库水沙条件及水库正常蓄水位调度方案下进行了水库冲淤100 a预测计算,计算结果较为合理,表明本模型可用于三峡水库水沙数值模拟。

**关键词:**一维;非恒定;三级解法;数学模型;三峡水库

**中图分类号:**TV145 **文献标识码:**A

## 1 概述

泥沙问题是三峡工程建设和运行中的关键技术问题之一,研究三峡水库泥沙淤积问题具有十分重要的意义。水沙数学模型作为除河工模型外最为常用的泥沙冲淤预报工具,在三峡水库设计方案中起着重要作用<sup>[1]</sup>,其中以中国水利水电科学研究院和长江科学院两家建立的一维不平衡输沙理论为基础三峡水库一维数学模型是目前比较成熟的数学模型。它们在三峡工程泥沙研究中发挥了基础和关键性作用。近年来,清华大学周建军教授和华北电力大学彭杨教授分别建立了一维水沙数学模型,对三峡水库的水沙输移进行了模拟研究。

在以往研究中,大部分的水沙数学模型还是以恒定水流和恒定输沙为主,这对长时段水库冲淤的计算是合理可靠的,但由于忽略了水沙输移过程中非恒定项的影响,不能真实反映库区河道内的水流运动和河床冲淤变化,特别是对河床冲淤幅度较大情况下的洪水计算问题,对短期洪峰、沙峰的模拟都会出现偏差。因此,在目前条件较为成熟的状况下,有必要利用非恒定流数学模型对三峡水库泥沙淤积进行计算研究。同时,三峡水库库长700余km,区间支流众多,其中具有2000万m<sup>3</sup>以上库容的支流就有十余条,显然,各支流在提供入库水量的同时也提供了相当大的库容,以往的研究往往不考虑支流

或只考虑嘉陵江和乌江这两条较大的支流。因此,为了提高水库调蓄计算的精度,就有必要将更多支流的水沙运动和支流库容纳入计算范围。

本文将以水沙运动基本理论为基础,考虑水沙输移过程中非恒定性和库区更多支流的影响,构建三峡水库干支流河道一维非恒定水沙数学模型,对三峡库区干支流河道的水沙运动和河床冲淤变形进行模拟,然后采用三峡水库蓄水后实测资料对计算结果进行验证,并对1961—1970年系列水库正常蓄水位调度方案下水库的冲淤情况进行初步计算研究。

## 2 数学模型的建立

三峡库区支流众多,建立三峡水库一维非恒定水沙数学模型应同时考虑干流水沙运动,将水库干支流河道分别视为单一河道,河道汇流点称为汉点,则水沙数学模型应包括单一河道水沙运动方程、汉点连接方程和边界条件3部分。

### 2.1 单一河道水沙运动方程

(1) 模型选用的描述单一河道水流与泥沙运动的基本方程为<sup>[2]</sup>:

水流连续方程

$$\frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{\partial Q_i}{\partial x} = 0; \tag{1}$$

水流运动方程

$$\frac{\partial Q_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_{1i} \frac{Q_i^2}{A_i}) + gA_i(\frac{\partial Z_{s_i}}{\partial x} + \frac{|Q_i| Q_i}{K_i^2}) = 0; \tag{2}$$

收稿日期:2008-02-13; 修回日期:2008-08-04  
基金项目:国家自然科学基金重大项目(30490235); 国家科技支撑计划研究项目(2006BAB05B02)  
作者简介:黄仁勇(1979-),男,湖北襄阳人,硕士,工程师,主要从事河流数值模拟研究,(电话)027-82829871(电子信箱)renyonghuang@tom.com。

泥沙连续方程

$$\frac{\partial Q_i S_i}{\partial x} + \frac{\partial A_i S_i}{\partial t} + \alpha_i \omega_i B_i (S_i - S_{*i}) = 0; \quad (3)$$

河床变形方程

$$\frac{\partial Q_i S_i}{\partial x} + \frac{\partial A_i S_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial A_s}{\partial t} = 0。 \quad (4)$$

(2) 模型辅助方程为:

水流挟沙力公式

$$S_{*} = 0.03 \left( \frac{u^3}{h\omega} \right)^{0.92}; \quad (5)$$

泥沙沉速公式(张瑞瑾公式)<sup>[3]</sup>

$$\omega = \sqrt{(13.95 \frac{v}{d})^2 + 1.09 \frac{\gamma' - \gamma}{\gamma} gd} - 13.95 \frac{v}{d}。 \quad (6)$$

式(1)至(6)中:  $\omega$  为泥沙沉速,角标  $i$  为断面号;  $Q$  为流量;  $A$  为过水面积;  $t$  为时间;  $x$  为沿流程坐标;  $Z_s$  为水位;  $K$  为断面流量模数;  $\alpha_i$  为动量修正系数;  $S$  为含沙量;  $S_{*}$  为水流挟沙力;  $\rho$  为淤积物干密度;  $B$  为断面宽度;  $g$  为重力加速度。  $\gamma'$  为床沙干密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $\gamma$  为水的密度;  $u$  为平均流速;  $d$  为粒径;  $v$  为水流粘滞系数。

2.2 汉点连接方程

(1) 流量衔接条件:

进出每一汉点的流量必须与该汉点内实际水量的增减率相平衡,即

$$\sum Q_i = \frac{\partial \Omega}{\partial t}, \quad (7)$$

$\Omega$  为汉点的蓄水量。如将该点概化为一个几何点,则  $\Omega = 0$ 。

(2) 动力衔接条件:

如果汉点可以概化为一个几何点,出入各个汉道的水流平缓,不存在水位突变的情况,则各汉道断面的水位应相等,即

$$Z_{s_i} = Z_{s_j} = \cdots = \overline{Z_s}。 \quad (8)$$

2.3 边界条件

计算中不对某单一河道单独给边界条件,而是将纳入计算范围的三峡水库干支流河道作为一个整体给出边界条件,各干支流进口给流量和含沙量过程,模型出口给水位过程、流量过程或水位流量关系。

3 数学模型求解

3.1 水流方程求解

可采用三级解法对水流方程进行求解,首先对水流方程(1)和(2)采用普列斯曼的四点隐式差分格

式进行离散,可得差分方程如下:

$$B_{i1} Q_i^{n+1} + B_{i2} Q_{i+1}^{n+1} + B_{i3} Z_{s_i}^{n+1} + B_{i4} Z_{s_{i+1}}^{n+1} = B_{i5}; \quad (9)$$

$$A_{i1} Q_i^{n+1} + A_{i2} Q_{i+1}^{n+1} + A_{i3} Z_{s_i}^{n+1} + A_{i4} Z_{s_{i+1}}^{n+1} = A_{i5}。 \quad (10)$$

式中系数均按实际条件推导得出。

假设某河段中有  $M$  个断面,将该河段中通过差分得到的微段方程(9)和(10)依次进行自相消元,再通过递推关系式将未知数集中到汉点处,即可得到该河段首尾断面的水位流量关系:

$$Q_1 = \alpha_1 + \beta_1 Z_{s1} + \delta_1 Z_{sm}; \quad (11)$$

$$Q_m = \theta_m + \eta_m Z_{s1} + \gamma_m Z_{sm}。 \quad (12)$$

式中系数  $\alpha_1, \beta_1, \delta_1, \theta_m, \eta_m, \gamma_m$  由递推公式求解得出。

将边界条件和各河段首尾断面的水位流量关系代入汉点连接方程,就可以建立起以三峡水库干支流河道各汉点水位为未知量的代数方程组,求解此方程组得各汉点水位,逐步回代可得到河段端点流量以及各河段内部的水位流量。

3.2 泥沙方程求解

对泥沙连续方程(3)用显格式离散得

$$S_i^{j+1} = \frac{\Delta t \alpha_i^{j+1} B_i^{j+1} \omega_i^{j+1} S_{*i}^{j+1} + A_i^j S_i^j + \frac{\Delta t}{\Delta X_{i-1}} Q_{i-1}^{j+1} S_{i-1}^{j+1}}{A_i^{j+1} + \Delta t \alpha_i^{j+1} B_i^{j+1} \omega_i^{j+1} + \frac{\Delta t}{\Delta X_{i-1}} Q_i^{j+1}}。 \quad (13)$$

对河床变形方程(4)进行离散得

$$\Delta A_{s_i} = \frac{\Delta t (Q_{i-1}^{j+1} S_{i-1}^{j+1} - Q_i^{j+1} S_i^{j+1})}{\Delta x \rho} + \frac{A_i^j S_i^j - A_i^j S_i^j}{\rho'}。 \quad (14)$$

在求出干支流河道所有断面的水位流量后,即可根据式(13)自上而下依次推求各断面含沙量,汉点分沙计算采用分沙比等于分流比的模式,最后根据式(14)进行河床变形计算。

4 数学模型验证

4.1 计算条件

(1) 计算范围。计算范围为干流朱沱—三峡坝址(见图 1),长 700 多 km。考虑嘉陵江、乌江、木洞河、大洪河、龙溪河、渠溪河、龙河、小江(支流小江又包含南河、东河、普里河、彭河等支流)、梅溪河、大宁河、沿渡河、清港河、香溪河共 13 条支流。

(2) 起始计算地形。朱沱—李渡为 1996 年实测地形,李渡—三峡坝址为 2003 年蓄水前实测地形,计算断面总数为 618 个,其中干流计算断面 372

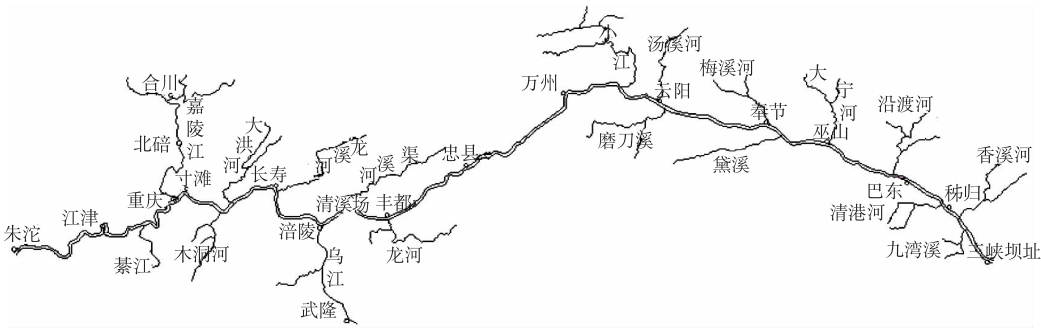


图 1 三峡水库库区干支流示意图  
Fig.1 Schematic diagram of the Three Gorges Reservoir

个,断面平均间距约 2 km。

(3) 计算边界条件。进口采用干流朱沱站、嘉陵江北碛站、乌江武隆站 3 站 2003 年 6 月 1 日至 2004 年 12 月 31 日逐日平均流量和含沙量。出口采用庙河站相应时段逐日平均水位。

4.2 水位及流量过程验证

为验证模型计算精度,选取干流寸滩、清溪场和万州站的水位流量过程计算值和实测值进行了对比(见图 2、图 3),干流各站水位流量过程计算值与实测值基本一致,水位误差一般在 20 cm 以内,流量误差一般在 10% 以内,验证结果与实测值符合较好。

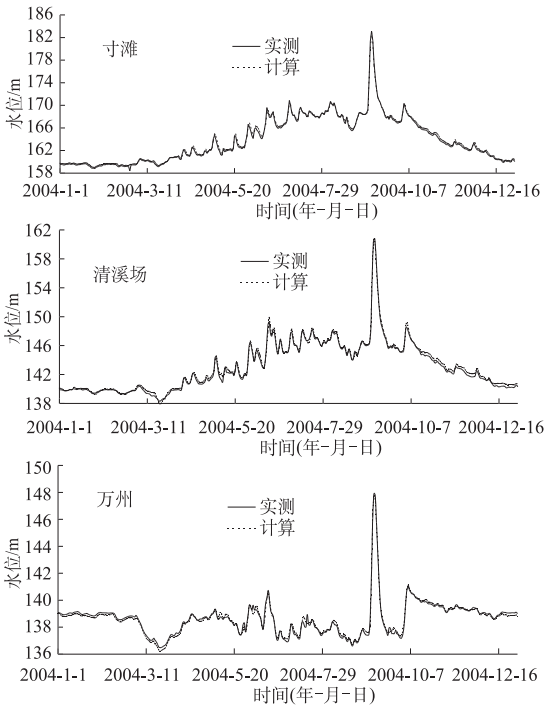


图 2 部分测站水位过程验证图  
Fig.2 Validation of water level processes

4.3 沿程水面线及流量验证

选取万州站最高水位时三峡水库沿程部分测站水位流量计算值与实测值进行了比较,计算结果见表 1,各站水位误差一般在 20 cm 以内,流量最大误差为 3.9%,沿程水面线及流量计算值和实测值比较接近。

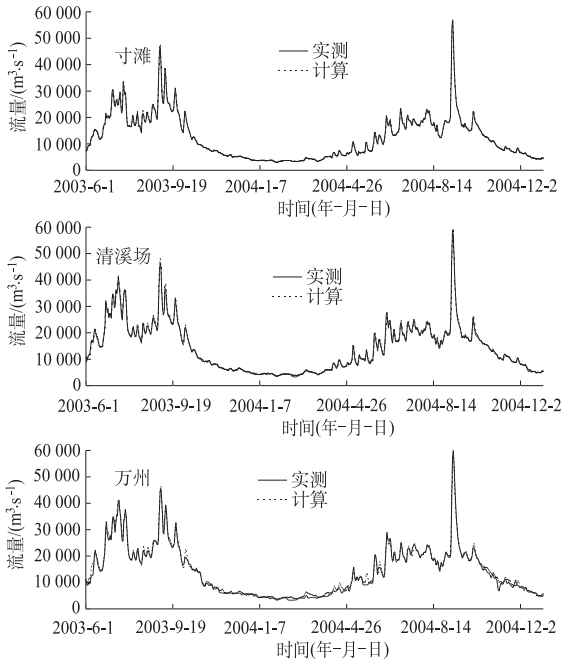


图 3 部分测站流量过程验证图  
Fig.3 Validation of discharge processes

表 1 干流沿程水面线验证表

站名	流量/(m³·s <sup>-1</sup> )		误差 /%	水位/m		误差 /%
	实测值	计算值		实测值	计算值	
寸滩	48 900	48 952	0.1	181.48	181.16	-0.32
羊角背		50 341		173.53	173.72	0.19
扇沱		51 725		170.61	170.43	-0.18
北拱		53 015		163.92	163.65	-0.27
清溪场	56 700	58 916	3.9	160.81	160.77	-0.04
白沙沱		59 247		153.44	153.40	-0.04
万州	60 000	59 194	-1.3	147.92	147.74	-0.18
培石		58 739		137.44	137.44	0.00
黄陵庙	58 100	58 266	0.3			

4.4 干流水文站输沙量验证

表 2 为三峡库区水文站累计输沙量验证结果,其中寸滩站输沙量计算值比实测值偏大5.0%,清溪场站偏大2.9%,万州站偏大2.5%,出库控制站黄陵庙站偏小4.1%。计算时段内各水文站输沙量计算值与实测值符合较好。

表 2 水文站输沙量验证表  
Table 2 Validation of sediment yields

测站	2003-06-01 至 2003-12-31			2004-01-01 至 2004-12-31			2003-06-01 至 2004-12-31		
	实测值/亿 t	计算值/亿 t	误差/%	实测值/亿 t	计算值/亿 t	误差/%	实测值/亿 t	计算值/亿 t	误差/%
寸滩	2.033	2.158	6.1	1.735	1.799	3.7	3.768	3.957	5.0
清溪场	2.080	2.101	1.0	1.660	1.746	5.2	3.740	3.847	2.9
万州	1.585	1.640	3.5	1.288	1.304	1.2	2.873	2.944	2.5
黄陵庙	0.841	0.795	-5.5	0.637	0.622	-2.3	1.478	1.417	-4.1

4.5 淤积量及排沙比验证

三峡水库 2003 年 6 月 1 日蓄水坝前水位按 135~139 m 运用,水库运用至 2004 年底,全库均处于淤积状态,库区总淤积量计算值为2.824 亿 t,与实测值2.765 亿 t 相比,计算结果偏大2.1%;针对三峡水库入库控制站总沙量进行了排沙比验证(表 3),排沙比计算值略低于实测值,考虑到模型计算中尚有区间入库沙量没有计入,因此,模型计算结果还是比较接近实际的。

表 3 排沙比计算值与实测值对比表

Table 3 Comparison between the calculated and observed data of discharging sediment ratio

时段	库区总来沙量/亿 t	排沙比= 出库沙量	
		实测值	计算值
2003-06-01 至 2003-12-31	2.322	36.22	34.24
2004-01-01 至 2004-12-31	1.921	33.16	32.38
2003-06-01 至 2004-12-31	4.243	34.83	33.40

5 水库淤积计算

应用模型对水库正常蓄水位调度方案下水库冲淤情况进行 100 a 预测计算,以 1961-1970 年系列年长江干流朱沱站、嘉陵江北碛站、乌江武隆站的水沙资料为入库水沙控制条件,水库按正常蓄水位 175-145-155 m 方式运用,出库流量及坝前水位采用三峡水库初步设计调度过程,区间来流量在计算河段内通过分配到入汇支流上加入。

图 4 是三峡水库运用 100 a 累积淤积过程,可以看到,淤积曲线明显分为两个阶段:第一阶段水库淤积很快,淤积曲线坡度较陡;第二阶段水库淤积强度大为减弱,淤积曲线的坡度很缓。图 5 是水库运用

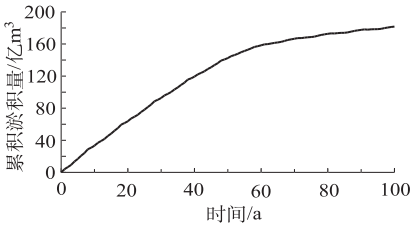


图 4 三峡水库运用 100 a 累积淤积过程

Fig. 4 Sedimentation process in the TGR in a 100-year period

100 a 深泓线推进过程,可以看到,纵向淤积呈三角洲形态向坝前推进<sup>[4]</sup>。图 6 和图 7 分别为朱沱-朝天门河段和坝区段淤积过程比较图,可以看到,水库运用初期朱沱-朝天门河段由于处于库尾变动回水区,年内有冲有淤,以淤为主,而坝区段则呈持续淤积态势,水库运用 80 a 以后由于水库淤积平衡,朱沱-朝天门河段和坝区段冲淤均基本相当。根据水库淤积一般规律并参考相关计算成果<sup>[5,6]</sup>,本模型计算成果定性上是正确的,定量上也基本合理。

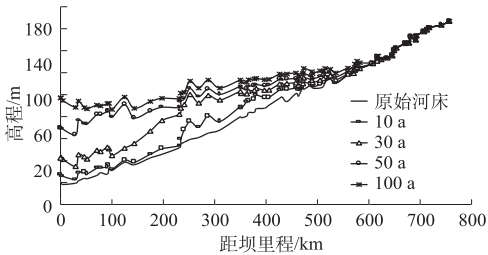


图 5 三峡水库运用 100 a 深泓线变化过程

Fig. 5 Thalweg processes in the TGR in a 100-year period

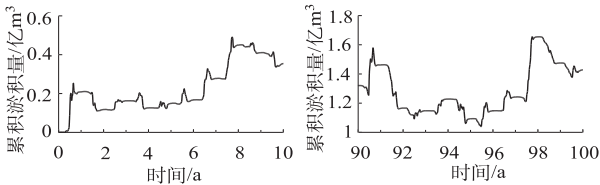


图 6 朱沱-朝天门河段淤积过程比较

Fig. 6 Sedimentation process in the Zhutuo-Chaotianmen reach

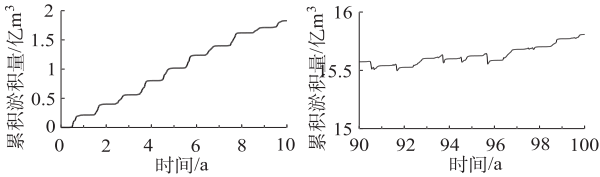


图 7 坝区段淤积过程比较

Fig. 7 Sedimentation process in the dam area

6 结 论

(1) 鉴于现有三峡水库水沙数学模型多为恒定流模型且对支流库容考虑不够的现状,本文考虑水沙输移过程中的非恒定性及库区更多支流库容的影响,基于三级解法的基本思想,建立了三峡水库干支

流河道一维非恒定水沙数学模型,提高了水沙计算精度。

(2) 采用三峡水库蓄水运用后 2003 年 6 月至 2004 年 12 月实测资料对模型进行了验证,结果表明,计算的水位流量过程、输沙量及排沙比等与实测值符合较好。这说明该模型对水库水沙输移及泥沙冲淤模拟计算基本合适。

(3) 本模型通过 1961 - 1970 年系列年入库水沙条件及三峡水库正常蓄水位调度方案的水库冲淤 100 a 预测计算,得到较为合理的计算结果。这说明该模型能够用于三峡水库水沙数值模拟,并为下一步建立长江上游干支流水库群联合运用一维非恒定水沙数学模型及长江上游流域水沙数学模型奠定了研究基础。

参考文献:

[1] 彭 杨,张红武. 三峡库区非恒定一维水沙数值模拟[J]. 水动力学研究与进展,2006,5(3):285 - 292.

[2] 谢鉴衡. 河流模拟[M]. 北京:中国水利水电出版社,1988.

[3] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,1983.

[4] 童思陈,周建军. “蓄清排浑”水库运用方式与淤积过程关系探讨[J]. 水力发电学报,2006,4(2):27 - 30.

[5] 黄 悦. 三峡水库蓄水位逐步上升方案水库淤积计算分析报告[R]. 武汉:长江科学院,2006.

[6] 周建军. 三峡水库泥沙淤积计算成果[R]. 北京:清华大学,2007.

(编辑:曾小汉)

Preliminary Study on 1-D Numerical Simulation of Unsteady flow and Sediment Transport in Mainstream and Tributaries of Three Gorges Reservoir Area

HUANG Ren-yong, HUANG Yue

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** A numerical model for simulating 1-D unsteady flow and sediment transport in the mainstream and its tributaries of the Three Gorges Reservoir (TGR) area was presented in this paper, and a three-gradation method was applied to solve the flow governing equation. The validity of the model was checked with the observed data of the TGR from June 2003 to December 2004. The calculated result was in good agreement with observed data. The model was further applied to predict the sedimentation process in the TGR in a 100-year period with the discharge and sediment data of 1961 to 1970 series and under the normal water level operation condition. And the calculation results are reasonable. The simulated results show that this model could be used to simulate the discharge and sediment transport at the TGR.

**Key words:**one dimension; unsteady flow; three-gradation method; numerical model; Three Gorges Reservoir

(上接第 8 页)

environment. Research result indicates that the construction of these works is favourable to the mutual fusion among the islet, water and city, and is easy to form a favorably regional ecology environment, but it will have negative effects on the flood control level nearby the river stretch, the diversion ratio of branching channels, and the local erosion of No. 1 Xiangjiang Bridge. In order to maintain the river’s health, the authors put forward the optimized improvement measures for regulated schemes according to the reasons caused by these negative effects, which provide the reference for the determination and design of works.

**Key words:**Juzizhou; integrated regulation; flood control and environment; healthy river

=====

欢迎网上投稿 本刊已开通作者在线投稿和查询系统

请登陆 <http://www.crsri.cn/ckyyb/index.asp>

=====