

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.06.018

山区多沙水库干支流泥沙淤积数学模型及应用

陈 盍¹,舒彩文²,武 见³,梅志宏⁴,谈广鸣²

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098 ;
2.武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072 ;
3.黄河勘测规划设计有限公司,河南 郑州 450003 4.中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院,云南 昆明 650051)

摘要 :针对我国西部山区多沙河流存在急流、含沙量大的特点,建立了山区水库干支流一维非均匀非饱和输沙数学模型,模型采用一阶迎风格式对运动方程对流项进行离散,能够模拟山区河道急流.模型验证表明,计算水库淤积具有较好的精度.对戛洒江一级水电站运行后库区干支流泥沙淤积预测表明 水库呈现三角洲淤积态势,干流库区运行 100 a 总淤积量为 13.75 亿 t,未达到冲淤平衡,支流库区运行 80 a 总淤积量为 8.8 亿 t,达到冲淤平衡 ;水库运行 100 a 后总库容损失率为 57.53 % .

关键词 :山区河流 ;多沙水库 ;非饱和输沙 数学模型 ;戛洒江水电站

中图分类号 :TV145 **文献标志码** :A **文章编号** :1000-1980(2010)06-0693-05

我国西部地区水能资源丰富,大力开发水电资源实现西电东送,是我国西部大开发战略的重要组成部分.西部地区部分河流水土流失较为严重,含沙量较高,以元江为例,干流多年平均含沙量为 3.5 ~ 4.3 kg/m³,部分河段最大含沙量超过 15 kg/m³,在元江等多沙河道修建水库后泥沙问题将较为突出,因而预测建库后库区泥沙淤积对于工程的优化设计与运行具有重要的意义.目前预测水库泥沙淤积常采用一维水沙数学模型^[1-5],国外比较有影响的一维模型有 HEC-6 模型^[6]、FLUVIAL-12 模型^[7]、MIKE11 模型^[8]等,这些模型常用于低含沙冲积河流的冲淤计算,对于存在急流的山区多沙河流的冲淤计算不太适用.本文针对山区多沙河道水沙运动的特点,建立了适用于该类河流的一维非均匀非饱和输沙数学模型,将模型应用于元江上游戛洒江水电站库区泥沙淤积计算,计算结果可为水库设计与运行提供依据.

1 模 型 建 立

1.1 基本方程

一维非均匀非饱和输沙数学模型的基本方程如下 :

水流连续方程
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_1 \tag{1}$$

水流运动方程
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 Q |Q|}{AR^{4/3}} = q_1 (u_1 - u) \tag{2}$$

泥沙连续方程
$$\frac{\partial (QS)}{\partial x} + \frac{\partial (AS)}{\partial t} + \alpha B \omega (S - S_*) = S_1 q_1 \tag{3}$$

河床变形方程
$$\rho' \frac{\partial A_0}{\partial t} = \alpha B \omega (S - S_*) + \frac{\partial G_b}{\partial x} \tag{4}$$

式中 : x ——沿程距离 ; Q ——流量 ; Z ——水位 ; g ——重力加速度 ; B ——河宽 ; t ——时间 ; q_1, u_1, S_1 ——侧向入流的单宽流量、流速和含沙量 ; A ——过水断面面积 ; R ——断面水力半径 ; β ——动能修正系数 ; n ——

收稿日期 :2010-01-22

基金项目 :国家自然科学基金(50909037) ; 十一五'国家科技支撑计划(2008BAB29B08) ;河海大学自然基金(2008426611) ;河海大学引进人才科研基金(20080415) ;中央高校基本科研业务费(2010B01114)

作者简介 :陈盍(1981—),男,湖南新化人,讲师,博士,主要从事河流动力学研究. E-mail :chenjunhhu@hhu.edu.cn

糙率系数; S ——断面平均含沙量; S_* ——水流挟沙力; u ——断面平均流速; ω ——泥沙颗粒沉速; ρ ——泥沙干密度; α ——恢复饱和系数; G_b ——推移质输沙率.

1.2 方程离散及求解

求解一维非恒定水流基本方程组采用有限体积法,此方法的特点是水量保持守恒.模型针对山区河道存在急流的特点,对运动方程的对流项采用一阶迎风格式进行离散,由于该格式求解非线性对流扩散方程时能获得相当高的精度^[9],能够较好地模拟山区河道为急流时的水流运动,离散后的方程为

水流连续方程
$$A_{i+1/2}^{(n+3)} = A_{i+1/2}^{(n+1)} - \frac{4\Delta t}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}}(Q_{i+1}^{(n+2)} - Q_i^{(n+2)}) + 2\Delta t q_{li}^{(n+2)} \tag{5}$$

水流运动方程
$$\frac{Q_i^{(n+2)} - Q_i^{(n)}}{2\Delta t} = - \frac{u_i^{(n)} Q_i^{(n)} - u_{i-1}^{(n)} Q_{i-1}^{(n)}}{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)/2} + q_{li}^{(n)}(u_{li}^{(n)} - u_i^{(n)}) - g \left(\frac{A_{i+1/2}^{(n+1)} + A_{i-1/2}^{(n+1)}}{2} \right) \frac{Z_{i+1/2}^{(n+1)} - Z_{i-1/2}^{(n+1)}}{\Delta x_i} - g \frac{n_i Q_i^{(n)} |Q_i^{(n)}|}{\frac{A_{i+1/2}^{(n+1)} + A_{i-1/2}^{(n+1)}}{2} \left(\frac{R_{i+1/2}^{(n+1)} + R_{i-1/2}^{(n+1)}}{2} \right)^{4/3}} \tag{6}$$

泥沙连续方程
$$S_{j,k} = \frac{\Delta t \alpha B_j \omega_k S_{*,j,k} + A_j^{(0)} S_{j,k}^{(0)} + \Delta t Q_{j-1} S_{j-1,k} / \Delta x_{j-1} + \Delta t S_{lj,k} q_{lj}}{A_j + \Delta t \alpha B_j \omega_k + \Delta t Q_j / \Delta x_{j-1}} \tag{7}$$

河床变形方程
$$\Delta A_j = \frac{\Delta t \alpha B_j \omega_{j,k} (S_{j,k} - S_{*,j,k})}{\rho'} + \frac{\Delta t (G_{bj} - G_{bj-1})}{\rho' \Delta x_{j-1}} \tag{8}$$

式中上角标为‘0’的量表示上时刻的值.

1.3 补充方程

1.3.1 水流挟沙力公式

采用张瑞瑾水流挟沙力公式^[10]:

$$S_* = K \left(\frac{U^3}{gh\omega} \right)^M \tag{9}$$

分组水流挟沙力 $S_{*,k}$ 采用窦国仁模式^[11]:

$$S_{*,k} = P_{*,k} S_* \tag{10}$$

其中

$$P_{*,k} = \frac{(P_k/\omega_k)^\beta}{\sum_{k=1}^N (P_k/\omega_k)^\beta} \tag{11}$$

式中: S_* ——水流挟沙力; $S_{*,k}$ ——第 k 组沙水流挟沙力; K, M ——水流挟沙力系数和指数; U ——断面平均流速; ω ——泥沙平均沉速; $P_{*,k}, P_k$ ——第 k 组沙水流挟沙力级配和悬沙级配; ω_k ——第 k 组沙对应的沉速; N ——非均匀沙粒径组数; β ——指数.

1.3.2 推移质输沙率

单宽推移质输沙率采用输沙经验关系式^[12]:

$$\frac{v_d}{\sqrt{gd}} \sim \frac{g_b}{d\sqrt{gd}} \tag{12}$$

其中

$$v_d = \frac{m+1}{m} \left(\frac{h}{d} \right)^{\frac{1}{m}} U \quad m = 4.7 \left(\frac{h}{d_{50}} \right)^{0.06}$$

式中: v_d ——近底流速; d, d_{50} ——单组床沙粒径和非均匀沙中值粒径; h ——平均水深.

1.4 支流入汇处理

考虑到支流入汇对干流的影响,方程(1),(2)和(3)均在等式右侧增加了侧向入流项的处理,而对于支流入汇后干流含沙量的计算,采用以下公式:

$$S_0 = \frac{Q_m S_m + Q_c S_c}{Q_0} \tag{13}$$

式中: Q_m, S_m, Q_c, S_c ——干、支流入汇前上游最近断面的流量和含沙量; Q_0, S_0 ——入汇后首个干流断面的流量和含沙量.

2 模型应用

2.1 戛洒江水电站简介

戛洒江一级水电站位于元江干流上游戛洒江河段,坝址流域面积为 1.81 万 km²,库区由上游石羊江段和支流绿汁江组成,干流石羊江库区平均比降约 0.298%,支流绿汁江库区平均比降约 0.3%,库区河道平面图见图 1.大坝为面板堆石坝,最大坝高 135 m,装机容量 200 MW. 水库总库容 14.79 亿 m³,有效库容为 6.72 亿 m³,正常蓄水位为 675 m,死水位为 660 m. 坝址处多年平均流量 135 m³/s,多年平均入库沙量为 2 840 万 t,多年平均含沙量为 6.06 kg/m³,历史最大含沙量超过 18.0 kg/m³. 戛洒江具有径流小、含沙量高的特点. 本文应用所建多沙水库干支流泥沙淤积数学模型,对戛洒江水电站的泥沙淤积问题进行研究.

2.2 计算范围及边界条件

2.2.1 计算范围与断面布置

计算范围包括干流石羊江长约 60 km 河段(进口断面 S1 到坝址处),以及支流绿汁江长约 50 km 河段(进口断面 L1 到支流入汇点),图 1 为水电站库区平面示意图. 其中石羊江共布置 47 个断面,平均间距 1.3 km,支流绿汁江共布置 41 个断面,平均间距 1.2 km.

2.2.2 边界条件

模型进口边界条件为水库干支流进口断面的流量和含沙量值,出口边界为坝址处水位. 由于模型进口断面处无水文站,其水沙过程通过坝址处元江水文站提供的水沙资料分配推算. 其中,进口采用 1988—1997 年共 10 a 的水文泥沙资料作为计算系列,年平均流量为 121.94 m³/s,年平均含沙量为 7.09 kg/m³,属于小水大沙的年份系列,入库悬沙中值粒径 0.028 mm. 出口坝址正常蓄水位为 675 m,6—8 月汛限水位为 655 m,9 月汛限水位为 665 m.

模拟水库 100 a 泥沙淤积过程时,选取 1988—1997 年的水沙系列为边界条件,前后连续计算 10 次共 1 200 个月,模型计算时间步长为 60 s.

2.3 有关计算参数的选取

由于缺乏实测资料对模型挟沙力系数率定,采用平衡输沙的方法,假定河道建库前多年平均含沙量和水流挟沙力基本相等来确定系数. 率定结果为 石羊江 K 平均值为 0.93 绿汁江 K 平均值为 1.16, M 平均值为 0.92. 干支流糙率值通过实测水面线资料率定,糙率范围为 0.035 ~ 0.060. 恢复饱和系数 α 在淤积时取为 0.25,冲刷时取为 1.0^[13].

2.4 模型验证

图 2 为 2006 年 6 月 25 日至 9 月 30 日石羊江干流 25 号断面(坝上游 33 km)实测水位和模型计算值对比图,从图中可见两者最大误差不超过 10 cm,满足工程要求. 由于缺乏水库泥沙冲淤验证资料,采用与戛洒江水电站相似的陡滩口水库泥沙淤积资料进行验证. 图 3 为陡滩口水库淤积平衡后的沿程计算冲淤量与模型试验模拟冲淤量对比图,两者误差较小. 所建一维非均匀非饱和输沙数学模型计算水库泥沙冲淤具有较好的精度.

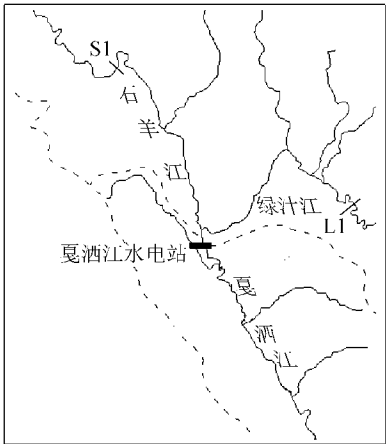


图 1 戛洒江一级水电站库区示意图
Fig. 1 Reservoir area of Jiashajiang Hydropower Station

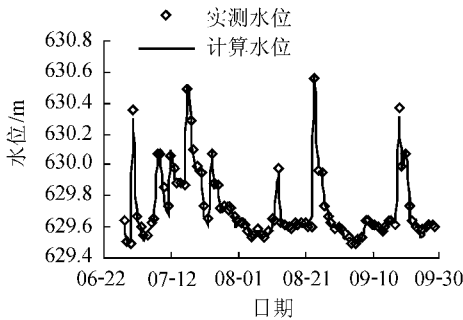


图 2 水位实测与计算结果对比

Fig. 2 Comparison between observed and simulated water levels

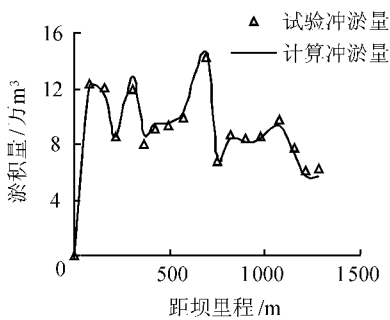


图 3 陡滩口水库沿程冲淤量验证

Fig. 3 Verification of deposition amount in Doutankou reservoir

2.5 水库淤积计算成果分析

2.5.1 河床纵横剖面变化

水电站运行 100 a 期间,库区河道干流和支流河床纵剖面变化过程见图 4。由图 4 可知,库区干支流泥沙均呈现三角洲淤积形态,三角洲淤积顶点随着水库运行年限的增加逐渐向坝前推移,但淤积速度逐渐变缓。由于干流库区泥沙淤积速度大于支流库区,当水库运行 40 a 后,干流库区泥沙淤积到支流入汇口附近,干流部分泥沙进入支流绿汁江库区发生淤积,使得绿汁江淤积加快,支流库区在运行 80 a 后达到冲淤平衡。

2.5.2 水库库区泥沙淤积及排沙比分析

表 1 为夏洒江库区干流、支流及整个库区泥沙累积淤积总量及排沙比计算结果。由表 1 可见,在计算年限 100 a 内,水库一直处于淤积状态,干流库区运行 100 a 后未达到冲淤平衡,总淤积量为 13.75 亿 t,排沙比达到 85.78%,支流库区运行 80 a 后达到冲淤平衡,总淤积量为 8.8 亿 t,排沙比达到 100%。

2.5.3 库容变化

水库初始运行时正常蓄水位 675 m,水库总库容、死库容和有效库容分别为 14.79 亿 m³、8.07 亿 m³ 和 6.72 亿 m³。水库运行后泥沙淤积导致库容损失,表 2 为夏洒江一级电站运行后库容变化情况及库容损失率情况。从表 2 可以看出,水库泥沙不断发生淤积,库容损失不断增加。水库运行 40 a 后,死库容损失率接近 50%,运行至 100 a,死库容损失率达到 100%,有效库容损失率为 6.53%,总库容损失率为 57.53%。

表 1 夏洒江库区泥沙累积淤积
总量及排沙比计算结果

Table 1 Simulated results of total sediment deposition amount and delivery rate in Jiashajiang reservoir area					
水库运行 时间段/a	淤积总量/万 t			排沙比/%	
	干流	支流	库区累计	干流	支流
0~10	17338	12333	29671	1.03	1.17
10~20	16572	12054	58297	5.40	3.40
20~30	15810	11588	85695	9.75	7.14
30~40	15694	11660	113049	10.41	6.56
40~50	16116	13229	142394	8.00	-6.01
50~60	14748	14572	171713	15.81	-16.77
60~70	15551	9102	196367	11.22	27.06
70~80	13057	3465	212889	25.46	72.23
80~90	10105	0	222994	42.32	100
90~100	2491	0	225485	85.78	100

注 水库运行 40~60 a 期间,干流库区泥沙进入支流库区,支流库区排沙比为负值。

积形态,三角洲淤积顶点随运行年限的增加逐渐向坝前推移,但淤积速度逐渐变缓。干流库区运行 100 a 后未达到冲淤平衡,支流库区运行 80 a 后达到冲淤平衡。干流库区运行 100 a 后总淤积量为 13.75 亿 t,排沙比达到 85.78%,支流库区运行 80 a 后总淤积量为 8.8 亿 t,排沙比达到 100%。水库运行 100 a 后,干支流累计有效库容损失率为 6.53%,死库容损失率为 100%,总库容损失率为 57.53%。

参考文献：

[1] 汤立群,陈界仁,陈国祥,等.白沙水库一维泥沙数学模型及电厂取水方案计算[J].河海大学学报,1998,26(5):34-38.
(TANG Li-qun, CHEN Jie-ren, CHEN Guo-xiang, et al. One dimensional model of reservoir sedimentation and its application in

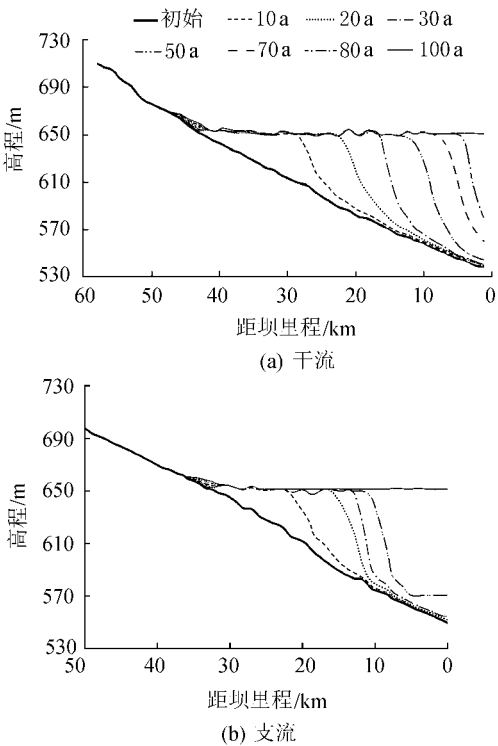


图 4 库区河道深泓线变化
Fig. 4 Evolution of talweg in reservoir area

表 2 建库后夏洒江水库库容损失特征值

Table 2 Values of loss rate of storage in Jiashajiang reservoir						
时间/a	有效库容/ 亿 m ³	有效库容 损失率/%	死库容/ 亿 m ³	死库容 损失率/%	总库容/ 亿 m ³	总库容 损失率/%
0	6.72	0	8.07	0	14.79	0
20	6.43	4.37	6.16	23.62	12.59	14.87
40	6.38	5.03	4.14	48.67	10.52	28.84
60	6.35	5.55	1.96	75.67	8.31	43.81
80	6.31	6.17	0.45	94.41	6.76	54.32
100	6.28	6.53	0	100	6.28	57.53

3 结 论

针对我国西南部山区多沙河流水沙运动的特点,建立了一维非恒定非饱和输沙数学模型用于水库泥沙淤积预测,模型对运动方程对流项采用一阶迎风格式进行离散,使得模型能够对山区河道急流流态进行模拟。最后将模型用于元江上游夏洒江水电站库区泥沙淤积计算,结果表明:干支流库区均呈三角洲淤

积形态,三角洲淤积顶点随运行年限的增加逐渐向坝前推移,但淤积速度逐渐变缓。干流库区运行 100 a 后未达到冲淤平衡,支流库区运行 80 a 后达到冲淤平衡。干流库区运行 100 a 后总淤积量为 13.75 亿 t,排沙比达到 85.78%,支流库区运行 80 a 后总淤积量为 8.8 亿 t,排沙比达到 100%。水库运行 100 a 后,干支流累计有效库容损失率为 6.53%,死库容损失率为 100%,总库容损失率为 57.53%。

- calculation for water intake of a power plant[J]. Journal of Hohai University, 1998, 26(5): 34-38. (in Chinese))
- [2] 杨国录, 吴卫民, 陈振虹, 等. SUSBED-1 动床恒定非均匀全沙模型[J]. 水利学报, 1994 (4): 1-10. (YANG Guo-lu, WU Wei-ming, CHEN Zhen-hong, et al. SUSBED-1 movable bed modeling of graded sediments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994 (4): 1-10. (in Chinese))
- [3] 张小峰, 谢葆玲, 许全喜. 三峡水库蓄水初期泥沙淤积预测模型研究[C]//中国水力发电工程学会水文泥沙专业委员会第六届学术讨论会论文集. 成都: 时代出版社, 2005.
- [4] 黄仁勇, 黄悦. 三峡水库干支流河道一维非恒定水沙数学模型初步研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(2): 9-13. (HUANG Ren-yong, HUANG Yue. Preliminary study on 1-D numerical simulation of unsteady flow and sediment transport in mainstream and tributaries of three gorges reservoir area[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(2): 9-13. (in Chinese))
- [5] 黄永健, 谈广鸣, 吕平, 等. 黏性泥沙数学模拟中几个关键问题的研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(3): 90-93. (HUANG Yong-jian, TAN Guang-ming, LV Ping, et al. Research advances of several key problems in the numerical simulation of cohesive sediment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(3): 90-93. (in Chinese))
- [6] FELDMAN A D. HEC models for water resources system simulation: theory and experience[J]. Advances in Hydrosceince, 1981(12): 297-423.
- [7] CHANG H H, HANISON L L, LEE W, et al. Numerical modeling for sediment-pass-through reservoirs[J]. Journal of Hydraulic Engineer, ASCE, 1996, 122(7): 381-388.
- [8] 王领元. 应用 MIKE 对河流一、二维的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [9] 张小峰, 中川一, 许全喜. 一阶迎风差分格式的精度问题[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2001, 34(1): 6-10. (ZHANG Xiao-feng, NAKAGAWA H, XU Quan-xi. On accuracy of first order upwind scheme[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2001, 34(1): 6-10. (in Chinese))
- [10] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1989.
- [11] 窦国仁, 赵士清, 黄亦芬. 河道二维全沙数学模型研究[J]. 水利水运工程学报, 1987(2): 1-12. (DOU Guo-ren, ZHAO Shi-qing, HUANG Yi-fen. Study on two-dimensional total sediment transport mathematic model[J]. Hydro-Science and Engineering, 1987(2): 1-12. (in Chinese))
- [12] 国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙专家组. 长江三峡泥沙问题研究: 第五卷: 1996—2000[M]. 北京: 知识产权出版社, 2002.
- [13] 韩其为. 水库淤积[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

Application of mathematical model of sediment deposition in mainstream and tributary of mountainous reservoirs with high sediment concentration

CHEN Jun¹, SHU Cai-wen², WU Jian³, MEI Zhi-hong⁴, TAN Guang-ming²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Yellow River Plan Survey and Design Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;

4. Kunming Hydroelectric Investigation, Design & Research Institute, CHECC, Kunming 650051, China)

Abstract: Based on the characteristics of supercritical flows and high sediment concentration in mountainous rivers of western China, a 1D non-uniform and unsaturated sediment transport mathematical model was established. In order to simulate the supercritical flows, the first order upwind difference scheme was used to discretize the movement equation in the model. The model verification achieved satisfactory accuracy of simulating sediment deposition in the reservoir. The predicted results of sediment deposition in Jiasajiang Hydropower Station after operation by use of the proposed model show that the sediment deposition in the reservoir has a tendency of delta deposition morphology. After 100 years' operation of the reservoir, the total sediment deposition amount in the mainstream is 1.375 billion t and the sediment erosion and deposition does not reach the equilibrium. After 80 years' operation of the reservoir, the total sediment deposition in the tributary is 0.88 billion t and the sediment erosion and deposition reaches the equilibrium. The loss rate of the total storage of the reservoir is 57.53% after 100 years' operation.

Key words: mountainous river; high sediment-concentration reservoir; unsaturated sediment transport; mathematical model; Jiasajiang Hydropower Station