

基于水沙模型的三峡水库库尾挖沙减淤研究

徐 涛¹, 曹 慧 群², 黄 仁 勇²

(1. 三峡水利枢纽梯级调度通信中心, 湖北 宜昌 443133; 2. 长江科学院 河流所, 湖北 武汉 443000)

摘要:三峡水库运行后,上游来沙中大部分粗沙淤积于库尾,不仅减少了水库的有效库容,对库尾回水段的通航也将产生影响。为减少三峡库尾泥沙淤积,提出了一种新的水库减淤方式,即固定河段挖粗沙方案。该方案通过持续疏浚将入库粗沙大部分截留挖除,控制粗沙向上游延伸,可有效实现水库减淤。根据三峡库尾河道地形和淤积特点,提出了 7 种挖沙减淤方案,并采用一维非恒定流水沙数学模型,计算分析了不同挖沙方案的减淤效果,并对比提出推荐挖沙方案。

关 键 词:一维非恒定流;库尾挖沙减淤;水沙模型;三峡水库

中图法分类号:TV149.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.07.002

三峡水库属于河道型水库,在水力分选作用下,粗沙主要淤积在库尾,并逐渐向深水区推进,影响水库最终冲淤平衡状态,危害很大。若在库尾选定河段持续挖除粗沙,可以拦截大部分入库粗沙,改善库区淤积形态,由下至上推动泥沙减淤演变过程而实现整个水库的减淤^[1-3]。

三峡水库泥沙淤积情况十分复杂,为确定最优的水库挖沙减淤方案,有必要对不同的库尾挖沙方案进行模型分析研究。

1 计算模型及模拟范围

1.1 模型基本情况

三峡水库库区支流众多,建立干流一维非恒定流水沙数学模型应同时考虑干流水沙运动。本研究将水库干支流河道均视为单一河道,河道汇流点视为汉点。水沙数学模型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。本研究主要针对三峡水库悬移质泥沙进行冲淤计算,所建模型为一维非恒定流悬移质不平衡输沙模型^[4-6]。

1.2 模拟范围和边界条件

(1) 计算范围。模型计算范围为干流朱沱-三峡

坝址,并考虑嘉陵江、乌江、小江、大宁河、香溪河等 14 条支流。

(2) 边界条件。模型河道地形资料采用 2012 年底三峡库区实测地形。上游边界条件主要参照干流朱沱站、嘉陵江北碛站、乌江武隆站 3 站 1991~2000 年逐日平均流量和含沙量,见表 1。

表 1 三峡水库 90 系列水沙过程

年份	朱沱		北碚		武隆		入库(朱+北+武)	
	年水量/ 亿 m ³	年输沙量/ 亿 t	年水量/ 亿 m ³	年输沙量/ 亿 t	年水量/ 亿 m ³	年输沙量/ 亿 t	年水量/ 亿 m ³	年输沙量/ 亿 t
1991	2867	4.07	495.9	0.484	492.5	0.26	3855.4	4.814
1992	2399	1.86	723.8	0.748	447.9	0.152	3570.7	2.76
1993	2707	3.18	739	0.626	509.1	0.205	3955.1	4.011
1994	2087	1.73	483.5	0.19	394.3	0.0751	2964.8	1.995
1995	2642	2.99	472.6	0.348	583.2	0.218	3697.8	3.556
1996	2504	2.49	420.9	0.135	657.5	0.358	3582.4	2.983
1997	2374	3.19	308.1	0.061	537.2	0.164	3219.3	3.415
1998	3170	4.84	709	0.99	574.5	0.317	4453.5	6.147
1999	3059	3.38	529.3	0.164	601.9	0.235	4190.2	3.779
2000	2882	2.77	593.1	0.363	579.7	0.225	4054.8	3.358
平均	2669	3.05	547.5	0.411	537.8	0.221	3754.3	3.682

计算起止年份为 2013~2042 年共 30 a。利用边界条件时,应考虑上游溪洛渡、向家坝水库 2013 年开

始蓄水拦沙的影响,其中朱沱站 2013 ~ 2042 年的水沙条件见表 2,北碚站和武隆站为 1991 ~ 2000 年水沙系列。模型计算的下游边界为三峡水库坝前水位过程或下泄流量过程,三峡水库调度方式为汛期控制库水位在 145 ~ 146.5 m 之间运行,汛末 9 月 10 日开始蓄水,9 月底蓄至最高水位 162 m,10 月底蓄至 175 m,9 月控制最小下泄流量为 10 000 m³/s,10 月控制最小下泄流量 8 000 m³/s,1 ~ 4 月控制下泄流量不小于 6 000 m³/s,6 月 10 日消落至汛期运行水位。

溪洛渡、向家坝两电站运行后,干流朱沱站入库沙量有所减小,北碚站和武隆站水沙数据不变,仍可以采用表 1 的数据,朱沱站年输沙量统计见表 2。

表 2 上游溪洛渡、向家坝建库后朱沱水沙量

年份	年水量/ 亿 m ³	年输沙量/ 亿 t	年份	年水量/ 亿 m ³	年输沙量/ 亿 t	年份	年水量/ 亿 m ³	年输沙量/ 亿 t
2013	2867	1.48	2023	2867	1.43	2033	2867	1.48
2014	2399	0.88	2024	2399	0.89	2034	2399	0.90
2015	2707	1.08	2025	2707	1.10	2035	2707	1.14
2016	2087	0.50	2026	2087	0.52	2036	2087	0.53
2017	2642	1.08	2027	2642	1.10	2037	2642	1.13
2018	2504	0.85	2028	2504	0.88	2038	2504	0.91
2019	2374	1.14	2029	2374	1.18	2039	2374	1.23
2020	3170	1.78	2030	3170	1.84	2040	3170	1.92
2021	3059	1.31	2031	3059	1.36	2041	3059	1.40
2022	2882	0.90	2032	2882	0.94	2042	2882	0.97
平均	2669	1.10	平均	2669	1.12	平均	2669	1.16

1.3 模型验证

糙率是反映水流条件与河床形态的综合系数,其值的大小主要与河岸、主槽、滩地、泥沙粒径、沙波以及人工建筑物等有关,河道发生冲淤变化时,床沙级配和糙率都会发生相应的变化。当河道发生冲刷时,河床床沙粗化,糙率增大;反之,河道发生淤积,河床床沙细化,糙率减小。对于长系列计算,需要对初始糙率 *n* 进行修正。本研究根据各主要水文站 2008 ~ 2012 年实测水位流量资料,分若干个流量级对各河段糙率进行率定。然后,利用率定成果,推算了三峡水库库区主要水文站寸滩和万县的水沙过程,见图 1。由图 1 可见,模型计算的两站的水位流量过程与实测情况基本一致。

2 挖沙减淤方案拟定

2.1 基本方案

本研究将不考虑挖沙减淤影响的三峡水库淤积计算方案称为基础方案。为便于与库尾挖沙方案比较,对考虑上游建库影响的基础方案第 1 ~ 30 a(2013 ~ 2042 年)的水库冲淤过程进行了计算。结果见表 3。

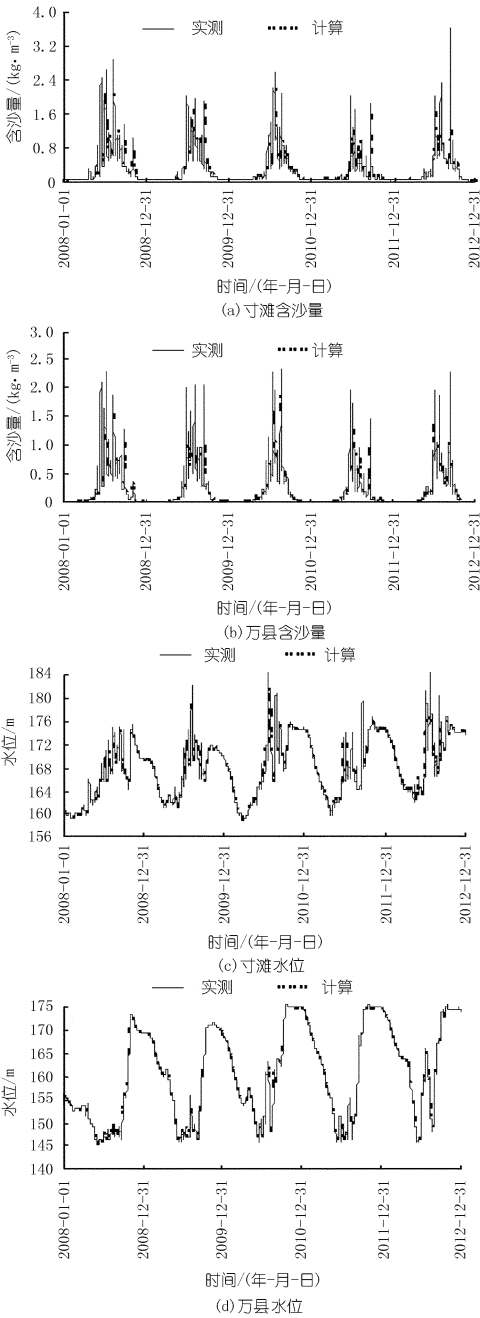


图 1 三峡水库水沙模型验证结果(2008 ~ 2012 年)

表 3 基础方案三峡水库冲淤统计 亿 m³

时间	朱沱 ~ 涪陵	涪陵 ~ 坝址	重庆主城区	全库区
10 a 末	0.357	12.38	0.062	12.86
20 a 末	0.483	23.56	0.057	24.21
30 a 末	0.532	33.61	0.056	34.36

从淤积总量及过程看,前 30 a 三峡水库处于持续淤积状态,10 a 末上游建库条件下库区淤积体积为 12.86 亿 m³,30 a 末上游建库条件下库区淤积体积为 34.36 亿 m³。

2.2 挖沙方案拟定

挖沙方案主要参数包括挖沙段地理位置、挖沙尺

寸、挖沙方式等。

挖沙段宜选在泥沙淤积较多、宽度较大的顺直河段,为施工机械提供足够空间,且不影响正常通航,同时应避免流态不稳定的峡谷段。在研究范围大渡口 - 涪陵河段内,综合考虑河道地形特征、河床演变趋势、文物保护工程分布位置等因素,将挖沙河段选在三峡水库库尾泥沙淤积河段,具体见图 2 和表 4。本研究在研究范围内选取 7 段河道作为 7 种方案,分别进行计算比选。

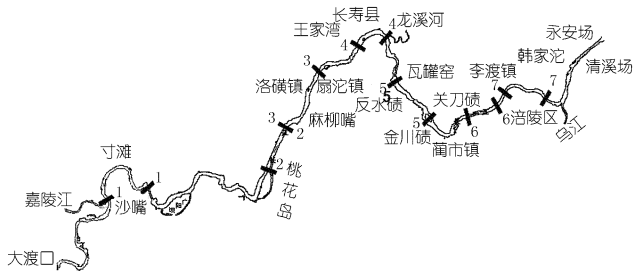


图 2 三峡水库库尾大渡口 - 涪陵河段平面示意

表 4 三峡水库库尾设计的挖沙计算方案

挖沙方案	河段位置	起止断面	挖沙段长度/km
①	沙嘴 - 铜锣峡	CY15 ~ CY01	14.4
②	桃花岛左汊出口 - 上洛碛	S308 + 1 ~ S305	7.8
③	上洛碛 - 扇沱	S305 ~ S297	13.4
④	王家滩 - 龙溪河口	S294 ~ S290	6.6
⑤	反水碛 - 金川碛	S286 ~ S282	8.8
⑥	关刀碛 - 李渡镇	S277 ~ S274 + 1	6
⑦	李渡镇 - 涪陵	S273 ~ S270	8.4

挖沙方式与挖出泥沙的处理方式有关。考虑到不同粒径泥沙资源化处理的可行性及难易程度,选用两种泥沙处理方式:① 粗细沙全部挖出并进行资源化利用,其中,粗沙用作建筑材料,细沙用于岸堤的吹填加固;② 挖粗沙留细沙,即粗沙用作建筑材料,细沙则随泥浆直接流入水库。本次研究中将粒径大于 0.1 mm 泥沙作为粗沙。

挖沙方式可采用全断面挖沙方式和分滩槽挖沙方式。全断面挖沙指将主槽和滩地上的淤沙全部挖除;分滩槽挖沙包括挖槽留滩和挖滩留槽两种方式。

2.3 挖沙方案分析比较

针对 7 种挖沙方案,首先对粗细沙全挖和挖粗留细两种方式的减淤效果进行对比分析,确定最优方案后再进一步分析分滩、槽挖沙的减淤效果,并最终提出挖沙减淤方案。由于挖沙位置、挖沙方式、统计时间等的不同,不同挖沙方案每年的挖沙量不同,为反映挖沙量和减淤效果并考虑到篇幅限制,本文给出了不同挖沙方案 30 a 末的总挖沙量统计结果,见表 5 和表 6。

2.3.1 粗细沙全挖方式

针对粗细沙全断面全挖方式,开展了上游建库条件下不同挖沙方案三峡水库的冲淤分析。挖沙启动时间为第 1 年。具体分析成果见表 5。

表 5 粗细沙全挖方式下 30 a 末各挖沙方案水库

方案	减淤量及减淤比例					
	基础方案淤积量/亿 m ³	挖沙方案淤积量/亿 m ³	总减淤量/亿 m ³	挖沙量/亿 m ³	减淤比例/%	减淤效率
①	34.36	34.19	0.17	0.16	0.49	1.062
②	34.36	34.35	0.01	0	0.03	-
③	34.36	34.34	0.02	0.02	0.06	1
④	34.36	34.36	0	0	0.00	-
⑤	34.36	34.14	0.22	0.22	0.64	1
⑥	34.36	34.34	0.02	0.02	0.06	1
⑦	34.36	34.05	0.31	0.37	0.90	0.838

由表 5 可知,30 a 末各方案中总减淤量最大的是方案⑦,减淤 0.31 亿 m³,减淤比例为 0.90%;其次是方案⑤,30a 末减淤量为 0.22 亿 m³,减淤比例为 0.64%;然后是方案①,30 a 末减淤量为 0.17 亿 m³,减淤比例为 0.49%,其他方案减淤量均较小。

从总挖沙量来看,30 a 末总挖沙量最大的是方案⑦,总挖沙量为 0.37 亿 m³;其次是方案⑤,总挖沙量为 0.22 亿 m³;然后是方案①,总挖沙量为 0.16 亿 m³;其他方案总挖沙量均较小。从 30 a 末减淤效率看,各方案中总减淤效率最高的是方案①,减淤效率为 1.062,其次是方案③、方案⑤和方案⑥,减淤效率为 1.0,方案⑦的减淤效率为 0.838。

表 6 粗细沙全挖方式 30 a 末各方案粗沙减淤效果

方案	入库粗沙量/亿 m ³	粗沙减淤量/亿 m ³	粗沙拦截比例/%	粗沙减淤量占总减淤量比例/%
①	5.542	0.1	1.80	58.82
②	5.542	0	0.00	0.00
③	5.542	0	0.00	0.00
④	5.542	0	0.00	-
⑤	5.542	0.08	1.44	36.36
⑥	5.542	0	0.00	0.00
⑦	5.542	0.13	2.34	41.94

由表 6 可知,30 a 末,不同方案中粗沙拦截比例最高的是方案⑦,达到 2.34%,然后是方案①,⑤,粗沙拦截比例分别为 1.8%, 1.44%。30 a 末不同方案中粗沙减淤量占总减淤量比例最高的是方案①,比例为 58.82%,然后是方案⑦,⑤,比例分别为 41.94%, 36.36%。

综合分析以上结果可知,粗沙拦截比例最高的是方案⑦,粗沙减淤比例最高的是方案①。因此,在粗细沙全挖方式下,方案⑦是相对较优的挖沙减淤方案,其次是方案①和方案⑤。

2.3.2 挖粗留细方式

对于挖粗留细方式,细沙重新进入水库的输移计算中,假定在指定挖沙河段的细沙淤积量为零,即进出挖沙河段的细沙总量保持不变。针对全断面挖沙方式,在前面粗细沙全挖方式研究的基础上,在挖沙减淤方式上进一步开展了挖粗留细方式的研究,即将挖沙河段中大于 0.1 mm 的粗沙挖除,细沙则随泥浆直接流入水库,各挖沙方案均从第 1 年就开始挖。

从粗沙挖沙量来看(表 7),30 a 末挖沙量最大的是方案⑦,为 0.13 亿 m³,其次是方案①,⑤,挖沙量分别为 0.10 亿 m³,0.08 亿 m³,其他方案挖沙量均较小。从减淤效率看,30 a 末各方案中总减淤效率最高的是方案①,减淤效率为 1.1,其次是方案⑦,⑤,减淤效率分别为 1.077,1。

综合分析以上计算结果可知,方案⑦相对较优,其次是方案⑤和方案①。

表 7 挖粗留细下 30 a 末各挖沙方案水库减淤量及减淤比例

方案	基础方案 淤积量/亿 m ³	挖沙方案 淤积量/亿 m ³	总减淤量/ 亿 m ³	挖沙量/ 亿 m ³	减淤比例/ %	减淤 效率
①	34.36	34.25	0.11	0.1	0.32	1.1
②	34.36	34.36	0	0	0.00	-
③	34.36	34.36	0	0	0.00	-
④	34.36	34.36	0	0	0.00	-
⑤	34.36	34.28	0.08	0.08	0.23	1
⑥	34.36	34.36	0	0	0.00	-
⑦	34.36	34.22	0.14	0.13	0.41	1.077

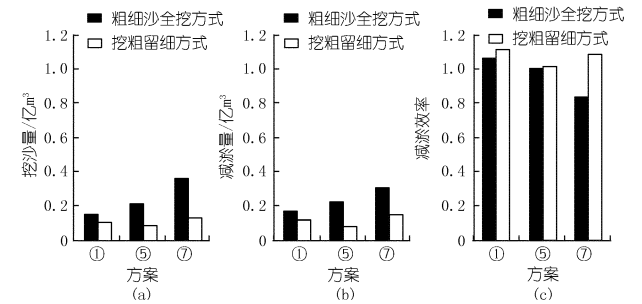


图 3 粗细沙全挖方式和挖粗留细方式减淤效果对比

由图 3 可知,粗细沙全挖方式下,方案⑦、方案①和方案⑤减淤效率在 0.838~1.062 之间;挖粗留细方式下,方案⑦、方案①和方案⑤减淤效率在 1.000~1.100。从减淤效率看,挖粗留细方式比粗细沙全挖方式高,但二者差距较小,且均在 1.0 左右,即减淤量与挖沙量基本相当。从总减淤量来看,粗细沙全挖方式减淤量更大,即粗细沙全挖方式比挖粗留细方式更有利于水库减淤。

2.3.3 分滩槽挖沙方式分析

以方案⑦为例,对比分析全断面挖沙与分滩槽挖

沙方式的减淤效果,见图 4。30 a 末,方案⑦全断面挖沙方式挖沙量、减淤量和减淤效率分别为 0.37 亿 m³,0.31 亿 m³ 和 0.838,而挖槽留滩方式分别为 0.16 亿 m³,0.08 亿 m³ 和 0.50,挖滩留槽方式挖沙量、减淤量和减淤效率分别为 0.13 亿 m³,0.10 亿 m³ 和 0.769。对比可知,全断面挖沙方式库区的挖沙量、减淤量和减淤效率均高于分滩槽挖沙方式。因此,建议三峡水库库尾采用全断面挖沙方式。

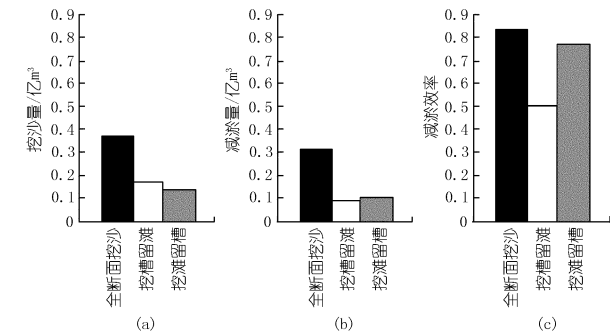


图 4 全断面挖沙和分滩槽挖沙方式 30 a 末方案⑦减淤效果对比

3 推荐挖沙方案的减淤效应

在前面研究成果的基础上,可初步确定三峡水库库尾挖沙减淤方案,即挖沙减淤推荐方案组为:挖沙河段为方案⑦,全断面挖沙,挖沙方式为粗细沙全挖,挖沙启动时间为第 1 年。下面在考虑上游建库的条件下,利用 1991~2000 年系列水沙资料对推荐方案的挖沙减淤效应进行进一步的分析和研究。

3.1 推荐挖沙方案库区挖沙量及淤积量变化

表 8 为三峡水库按推荐挖沙方案运行 30 a 库区累积挖沙量及淤积量变化过程。由表 8 可知,在上游建库条件下,总挖沙量和粗沙挖除量均随水库运用时间的延长而呈逐步增大趋势,1~10,11~20,21~30 a 库区泥沙淤积量分别为 12.77 亿,11.24 亿 m³ 和 10.04 亿 m³,重庆主城区河段淤积量分别为 0.06,0 亿 m³ 和 0 亿 m³,均随水库运用时间的延长而呈逐步减小趋势。

表 8 推荐方案库区累积挖沙量及淤积量变化过程

上游建库 时间/a	入库总沙量/ 亿 t	总挖沙量/ 亿 m ³	粗沙挖除量/ 亿 m ³	库区淤积量/ 亿 m ³	重庆主城区河段 淤积量/亿 m ³
10	17.35	0.11	0.03	12.77	0.06
20	34.92	0.23	0.08	24.01	0
30	52.84	0.37	0.13	34.05	0

3.2 减淤分析

将库区干流分为大渡口以上、大渡口-涪陵、涪陵

– 大坝 3 段,分别分析推荐挖沙方案下库区 3 段的泥沙减淤情况。表 9 为三峡水库按推荐挖沙方案运行的分段减淤量及减淤分析成果。在上游建库条件下,30 a 末大渡口以上淤积情况没有变化,大渡口 – 涪陵段减淤量为 0.09 亿 m³,减少 16.98%,涪陵 – 坝址段减淤量为 0.20 亿 m³,减少 0.60%。减淤量最大的是涪陵 – 坝址段,减淤比例最大的是大渡口 – 涪陵段。

表 9 上游建库条件下三峡水库库尾 30 a 末推荐方案库区分段减淤量及减淤比例

河段	原方案淤积	挖沙方案淤积	总减淤量/ 减淤比例/	
	量/亿 m ³	量/亿 m ³	亿 m ³	%
大渡口以上	0	0	0	/
大渡口 – 涪陵	0.53	0.44	0.09	16.98
涪陵 – 大坝	33.61	33.41	0.2	0.60

3.3 粗沙和细沙淤积分析

对推荐方案库区 3 段和全库区的粗沙和细沙的淤积量变化过程进行了分析,结果见表 10。

表 10 上游建库条件下三峡水库库尾推荐方案库区分段粗沙和细沙淤积量变化情况 亿 m³

上游建库 时间/a	粗沙和细沙淤积量变化情况				亿 m ³			
	大渡口以上		大渡口 – 涪陵		涪陵 – 大坝		全库区	
	粗沙	细沙	粗沙	细沙	粗沙	细沙	粗沙	细沙
1 ~ 10	0	0	0.166	0.154	1.286	11.03	1.476	11.291
11 ~ 20	0	0	0.023	0.07	1.343	9.77	1.359	9.887
21 ~ 30	0	0	-0.011	0.033	1.345	8.64	1.332	8.709

在上游建库条件下,大渡口以上段粗沙和细沙的淤积量均基本为 0,且 10 a 后冲淤量也基本没有变化。

大渡口 – 涪陵段粗沙和细沙淤积量均呈减小趋势。涪陵 – 大坝段粗沙淤积量呈增大趋势,细沙呈减小趋势。全库区粗沙和细沙的淤积量均呈减小趋势。

4 结 论

本研究利用水库泥沙数学模型,对三峡水库库尾挖沙减淤方案进行了分析。在涉及的各方案中,李渡镇 – 涪陵河段挖沙方案为减淤效果最优方案,其次为沙嘴 – 铜锣峡河段挖沙方案和反水碛 – 金川碛河段挖沙方案,因此,推荐李渡镇 – 涪陵河段挖沙方案为三峡库尾挖沙方案,挖沙为全断面挖沙,粗细沙全挖。在考虑上游建库条件下,30 a 总挖沙量和减淤量分别为 0.37 亿 m³ 和 0.31 亿 m³。

参考文献:

[1] 周建军,曹慧群,张曼. 三峡水库挖粗沙减淤研究[J]. 科技导报, 2010,28(9):28-36.

[2] 周建军. 长江三峡工程泥沙问题研究 1996-2000 第五卷[M]. 北京:知识产权出版社,2002:358-425.

[3] 周建军. 泥沙研究进展[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006: 173-278.

[4] 长江科学院. 三峡工程泥沙问题研究成果汇编(160m~180 m 蓄水位方案)[R]. 北京:水力电力部科学技术司,1988:127-137.

[5] 姚文艺,王德昌,吉祖稳. 黄河下游河道挖河减淤机理及泥沙处理对环境的影响[M]. 郑州:黄河水利出版社,2003:1-8.

[6] 钱宁,张仁,周志德. 河床演变学[M]. 北京:科学出版社,1987.

(编辑:常汉生)

Study on sediment excavation and deposition reduction at tail area of Three Gorges Reservoir based on flow – sediment model

XU Tao¹, CAO Huiqun², HUANG Renyong²

(1. Three Gorges Water Conservancy Complex Cascade Dispatch and Communication Center, Yichang 443133, China; 2. Department of River Research, Changjiang Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: After the operation of Three Gorges Reservoir, most of the coarse sediment from upstream deposits in the tail area of the reservoir, reducing effective reservoir capacity and influencing the navigation. In order to reduce the deposition in the tail area of the reservoir, a new reservoir deposition reducing scheme is put forward, that is to dredge out the coarse sediment at fixed river reaches. By the continuously dredging, most of the in – coming coarse sediment can be trapped and excavated out, so as to control the siltation stretching to the upstream and effectively reduce the reservoir siltation. We propose seven schemes according to topographic characteristics at different sedimentation locations. By one – dimensional unsteady flow – sediment mathematical model, the sediment reducing effect of each scheme is analyzed and the optimal scheme is recommended.

Key words: one – dimensional unsteady flow; sediment dredging in reservoir tail; flow – sediment model; Three Gorges Reservoir