

三峡工程泥沙调度

林秉南¹, 周建军²

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2. 清华大学水利系, 北京 100084)

[摘要] 三峡水库建在径流丰沛的长江。对于这样的水库改善泥沙调度有可能减少水库淤积, 显著提高水库效益。文章对蓄清排浑和双汛限调度方案的良好效果做了简略说明。所使用的数学模型除与模型试验资料做过比较外, 还引用了黄河下游10年的不恒定输沙资料进行了率定和验证, 结果比较接近。鉴于三峡工程十分重要, 现阶段成果还只看成是初步的, 正安排进一步用模型试验及其他数模校核。

[关键词] 泥沙调度; 水库; 悬移质; 淤积; 洪水位

[中图分类号] TV14 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)04-0030-04

1 引言

三峡工程位于长江干流的三斗坪, 在宜昌上游约46 km处。它的主要任务是防洪、发电和通航。长江位于中国的湿润地区, 径流丰沛, 经常发生洪水。1870年洪水在宜昌流量达到 $105\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的惊人数字, 并在右岸冲开松滋河, 分流入洞庭湖。这一带洪水经常超过 $6 \times 10^4\text{ m}^3/\text{s}$ 。荆江有一段悬河尤为吃紧。三峡工程的首要任务是防长江中、下游, 特别是荆江河段的大洪水。

三峡工程最大坝高175 m, 总库容 $393 \times 10^8\text{ m}^3$ 。总装机 $1\,820 \times 10^4\text{ kW}$, 年发电量 $847 \times 10^8\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。近年又在右岸加建一座地下厂房。

每年9月至次年6月为枯水期, 万吨船队可使用左岸的5级船闸上溯过坝, 进入水库, 并在水库中远航至上游约500 km处的重庆。

显然, 要发挥上述三大效益, 就必须在三峡设计水平年(80年)内保持足够的库容。由于长江的输沙量相当大, 要长远维持足够的库容, 就必须妥善处理河流的泥沙, 利用长江丰沛的径流, 进行水库泥沙调度。对三峡泥沙问题曾进行过大量研究。1985年以后, 结合论证和设计又进行了大量

计算和试验研究。研究遵循计算、试验和原型三结合的原则进行, 已为原型观测拨出大量经费。2003年水位蓄至135~156 m后, 第一批验证工作即可开始。

2 径流量和输沙量

表1给出了一些主要测站的年径流量, 年输沙量和含沙量平均值。图1和图2给出了寸滩站的年径流量和年输沙量的过程线。宜昌站的情况相似。由图1和图2可见1991年以后来水来沙都出现较大波动。但因这仍可能是水文波动的一部分, 所以在研究中仍采用表中所列数字(相当于图1和图2中的粗横线), 使研究略偏于安全, 同时密切注意未来的变化。1953至1998年的年径流量和年输沙

表1 年输沙量和径流量

Table 1 Annual sediment load and runoff

测站	年径流量 $/10^8\text{ m}^3$	年输沙量 $/10^8\text{ t}$	含沙量 $/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	统计时段
宜昌	4 390	5.24	1.21	1950-1989
寸滩	3 510	4.60	1.30	1953-1989
武隆	490	0.304	0.64	1955-1989

量平均值分别为 $3\,475 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $4.44 \times 10^8 \text{ t}$ ，只略小一些。粗于 1mm 的推移质在本文研究的河段中每年只有几百万吨，可以忽略不计。

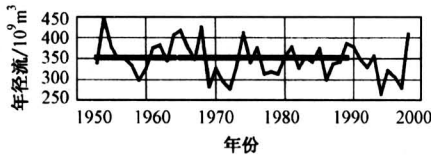


图 1 寸滩年径流量

Fig.1 Runoff past Cuntan

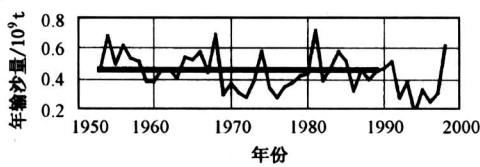


图 2 寸滩年输沙量

Fig.2 Sediment load past Cuntan

上文已说明，三峡水库的总库容为 $393 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。对比表 1，可知如不采取相应措施，库容将较快淤损。因此做好泥沙调度工作，减少水库淤积，对于保证三峡水库正常运转是十分重要的。

3 泥沙调度的基本方案

三峡的汛期是每年 6—9 月。在此期间，平均有 61% 的年径流和 88%~90% 的年输沙量进入三峡水库^[1]，这应是水库排沙的好时机。为此，制定了水库运行的基本方案。每年 6 月水库坝前水位控制在枯季限制水位 155 m，即枯限水位 (DCL)。当第一次洪水出现时，库区水深增大。此时坝前水位可降低至高程 145 m，即低于坝顶 40 m。该水位称为汛期限限制水位或汛限水位 (FCL)。当大坝在这个水位下泄流与下游区间洪水组合后、在枝城的流量不大于 $56\,700 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，该水位维持不变；否则水库开始调洪，水位应上升，借以维持枝城的流量不变。上升的幅度取决于调洪需要，一般不超过 175 m，视调洪方案而定^[2]。汛后约 9 月底至 10 月初，水库可蓄水到正常高水位 175 m；这时，电厂可以满发，万吨船队可以通航到重庆。随着发电、航运等方面持续用水，水库水位将消落。但要求在来年汛前不低于枯限水位，以便通航^[3]。

根据建设计划，2003 年三峡工程便可蓄水到

156 m 高程。由于库区高程 156 m 以上的移民工作十分繁重，起初估计须到 2013 年才能完成。另外泥沙研究方面，鉴于泥沙研究的误差较大，也希望有一段时间 (10 年) 留供室内研究 (图见封面) 和原型资料对比校核。所以，尽管在结构上，大坝在 2009 年末已具备蓄水到 175 m 的能力，泥沙专家组也同意最早要到 2013 年才将水库蓄到 175 m^[4]。

由于泥沙研究的误差较大，泥沙专家组建议作为一种备用的安全措施，当水库出现意外大淤积时，允许将水库短期降低到 130 m 冲沙。此时要求水库的泄水建筑物仍能泄放流量 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[4]。

以上条件给泄水建筑物的设计提出了很高的要求。表 2 说明这些要求都很好得到了满足。

表 2 泄水建筑物过流能力

Table 2 Discharge capacities of combined spillway and outlet works

水库水位/m	130	135	140	145	150
过流能力/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	51 780	56 230	59 900	60 900	64 040

4 水库长期保留库容及洪水位

在实行上述水库调度的条件下，水库运用 100 年后，保留的库容和重庆的洪水位见表 3。在表 3 中，中国水科院的洪水位相应于水库运用 109 年后、遇流量 $82\,800 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的情况。上文已说明与泥沙有关的研究精度较低，特别是关于回水曲线的计算。由于不易准确估计阻力系数，计算河段又长达 550 km 以上，阻力系数的误差会引起较大的水位误差。库区河床初始可能为裸露岩石或部分为粗颗粒覆盖的岩石，以后逐渐为细泥沙所覆盖。所以河床阻力系数不易确定，误差在所难免。因此泥沙专家组认为重庆洪水位的计算值可能有正负 3 m 的误差^[3]。由表 3 可见运用基本调度可使三峡水库

表 3 保留库容和重庆洪水位的计算值

Table 3 Computed reservoir capacities and flood stages

研究单位	长科院	中国水科院
145 m 以上库容 (占 $222 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的百分比) / %	85.8	90.5 (10^8 a)
155 m 以上库容 (占 $165 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的百分比) / %	91.5	96.4 (10^8 a)
1% 洪水下 ($88\,700 \text{ m}^3/\text{s}$) 的重庆水位 / m	199	199

长期保留较大的兴利库容供发电和通航之用。

5 泥沙调度的优化

在上述基本调度方案的基础上,提出了优化调度方案,用以减少淤积,增加动库容。本优化调度方案简称为双汛限方案,由第一作者提出^[5],第二作者进行了详细分析^[6]。它适用于径流丰沛的河流。在三峡,本调度方案每年只应用一次。本方案的特点是:一方面减少向床面沉积泥沙量,同时也设法增大冲刷能力。因此在本方案中,重视断面边界和形状的改变。本方案要求当上游寸滩流量预报将超过 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,迅速增加大坝泄量至 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上(同时维持枝城流量不超过 $56700 \text{ m}^3/\text{s}$),将坝前水位迅速降低到 135 m。此后在来流增加的情况下,坝前水位将回升。当水位到达 143 m 时,船闸即可恢复通航。根据数学模型计算,坝前水位由 145 m 降至 135 m 约需 34 h;从 135 m 回升到 143 m 也需要相当的时间,每年水位停留在 135 m 的时间是 4 至 5 天。平均每年需要断航 1 周时间。在水位消落过程中,流速将增大,并将更多细泥沙输送到水库的下段。由于细泥沙不同程度地填平原来凹凸不平的河床,使阻力系数减少,流速增加,输沙能力加大,将更多泥沙输送到坝前,送入下游。又如每年都实行双汛限调度,在低水位强输沙能力水流的作用下,断面将变得更为窄深。这也有利于将更多的泥沙输至坝前,排入下游。

实行双汛限调度时,船闸每年在洪季须停航约 1 周。因洪水流量超过 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,两坝间及铜锣峡等多处都已不能通航万吨船队,所以对航运量的影响应较小。

实行双汛限调度时,最大的出库水流含沙量约为入库含沙量的 1.6 倍。由于持续时间较短,将被迅速稀释,对于下游航道和生态影响不会很大。

6 双汛限调度方案的优点

对本方案曾运用不恒定流输沙数学模型进行分析。该数学模型于 1988 年发表时^[7],曾用室内试验成果做了初步验证。最近又利用黄河下游 10 年的不恒定输沙观测资料,做了进一步的率定和验证。以第一年资料率定模型,其余 9 年资料作为验证之用。考虑到泥沙研究的误差一般较大,验证的结果应说是较好的^[8]。

根据数学模型的分析结果,双汛限调度方案应尽早投入使用。最好在三峡工程开始按 175—145—155 方案运用时,即行投入。在尽早投入的前提下,双汛限调度方案可带来以下好处:

1) 铜锣峡至大渡口之间 30 km 的重庆河段,淤积可大量减少。本河段淤积 100 年后呈加速发展趋势。200 年后的淤积量大于 100 年淤积量的 2 倍。用双汛限方案 200 年后,本河段的淤积量可减少一半以上(图 3)。

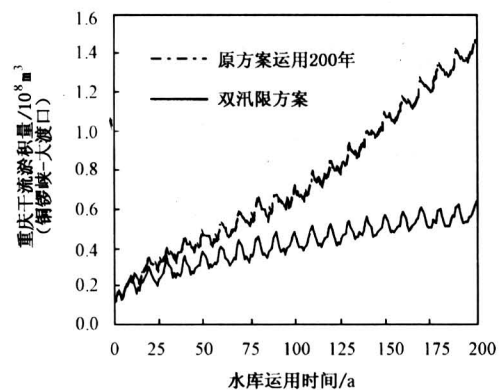


图3 原方案和双汛限调度方案下重庆的淤积过程

Fig.3 Deposition in Chongqing under different schemes

2) 运用双汛限调度方案后,初期可增加防洪库容约 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$,后期则增至 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3) 动回水区的洪水位可显著降低。例如,重庆淤积 100 年后,如遇 1% 频率的洪水,洪水位可降低约 2 m。

4) 坝前河床将明显刷深,包括上引航道的口门区和连接段都将明显刷深。这将减少两处的疏浚量。由于水深加大,流速也减少,有利于航行。

5) 制约三峡水库满蓄到 175 m 水位的主要因素之一是变动回水区,特别是重庆主河道的淤积。如果蓄水到 175 m 高程会引起重庆严重淤积,便不应允许蓄水到 175 m 高程。可行性论证阶段进行的计算和模型试验大都说明重庆淤积不会很严重。但因泥沙研究的误差往往较大,泥沙专家组曾要求保留一个验证时间(参阅第 3 章第 2 段),以便与原型资料对比验证。因此,最早蓄至 175 m 高程的时间曾建议为 2013 年。应用双汛限调度方案后,重庆淤积将大幅度减少,减少的幅度已大大超出误差可能影响的范围。加以上游干流即将兴建大

型水电站, 进入三峡水库的泥沙将显著减少。因此如移民进度允许, 对2009年水库蓄水到175 m可持乐观态度。三峡年发电量达 $847 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。提前满发效益很大, 自不待言。

虽然在研究双汛限调度方案中使用了有一定可靠度的数学模型, 鉴于三峡工程的重要性, 上述成果仍待进一步用实物模型及其他数学模型进行验证。本文的报道提供了重要的线索和可能。

7 结语

在像长江这样径流丰沛的河流上兴建水库, 可以有较大余地进行泥沙和水库调度的优化工作, 借以减少淤积、延长水库寿命和增进水库的效益。为此需要相应规划设计泄水建筑物, 以满足排沙要求。水库调度除加大排沙量外, 还应有利于减少边界阻力和改善断面形态, 借以增进水流输沙能力。优化调度可带来可观的效益, 值得进一步深入研究。

参考文献

- [1] Lin Bingnan, et al. On some key sedimentation problems of the Three Gorges Project (TGP) [J]. *Sediment Research*, 1989, 4(1): 57~74
- [2] 防洪专家组. 防洪专题论证报告[R]. 三峡工程论证领导小组办公室, 1988. 47~70
- [3] 泥沙专家组. 长江三峡工程泥沙专题论证报告[R]. 三峡工程论证领导小组办公室, 1988, 14
- [4] 泥沙专家组. 1987泥沙专家组对三峡工程水位规划方案的初步意见[A]. 三峡工程泥沙问题研究成果汇编(160~180米蓄水水位方案)[C]. 北京: 水利电力部科学技术司, 1988, 14
- [5] 林秉南. 减免重庆港整治或增强三峡水库防洪能力的水库调度方式初议——双汛限水位调度方案[A]. 中国水利水电科学研究院及国际泥沙研究中心报告[C]. 1992
- [6] 周建军, 林秉南, 张仁. 三峡水库的双汛限水位调度方式研究[J]. 水利学报, 2000, (9):
- [7] Zhou Jianjun, Lin Bingnan. One dimensional mathematical model for suspended sediment by lateral integration [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 1998, 124(7): 712~717
- [8] Zhou Jianjun, Lin Bingnan. 2003, Verification of model for sediment transport by unsteady flow in the Lower Yellow River [J]. *Hydraulic Engineering*, ASCE

Sediment Management for TGP

Lin Bingnan¹, Zhou Jianjun²

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;*

2. *Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

[Abstract] In this preliminary study, it is shown that for a reservoir on a river of rich runoff, such as the Yangtze, elaborate scheme of sediment management may be devised to substantially reduce reservoir deposition. The mathematical model applied in this investigation has been fairly well verified with long-term field data of sediment transport by unsteady flow in the Lower Yellow River. In view of the importance of TGP, however, further investigation with physical models and mathematical model of other versions is planned. Great financial benefits are involved.

[Key words] sediment management; reservoir; suspended load; deposition; flood stage