

三峡水库的工程泥沙与优化运行¹⁾

刘青泉 李家春 周济福

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)



刘青泉, 1965 年出生, 1985 年毕业于武汉水利电力大学河流工程系, 并分别于 1990 年和 1993 年在该校获得水力学及河流动力学专业工学硕士和博士学位, 1994 年~1996 年在中国科学院力学研究所做博士后研究工作, 现为力学研究所副研究员, 中级职称资格评定委员会委员, 中国力学学会水动力学专业组成员, 中国水利学会泥沙专业委员会委员, 《水动力学研究与进展》编委, 中国科学院水问题联合研究中心常务委员, 1996 年获得国家环保局颁发的“环境影响评价”资格证, 主要从事泥沙运动力学、水动力学、二相流体动力学、土壤侵蚀、河口海岸工程、水文水资源等环境流体力学领域的科研工作, 1994 年以来主持或参与承担了 10 余项重要课题的研究工作, 发表学术论文 30 篇, 获得 1997 年国家自然科学基金资助, 目前正在参加国家攀登计划 A 类预研、国家自然科学基金重点基金等项目的研究工作。

摘要 简要论述了长江三峡水库的形态和库区泥沙冲淤特点, 重点分析了三峡水利枢纽工程建成后水库蓄水运行过程对库区泥沙淤积的影响, 以及新形势下水库运行中需要进一步深入研究的重要问题, 为优化三峡水库运行方式提供依据。

关键词 三峡水库, 泥沙淤积, 水库运行方式, 蓄清排浑

1 引言

三峡工程从 1993 年开始修建, 1997 年大坝截流合拢, 2000 年开始浇灌兴利, 2004 年第一台发电机组开始发电, 到 2009 年全部完成, 因此, 合理优化三峡水库的运行调节方式已提上了重要的议事日程。

三峡工程事关社会可持续发展, 水库运行中各种利弊矛盾的协调处理关系到工程的最终成败, 水库的泥沙淤积及合理运行方式是其中保证水库寿命的关键问题之一, 长期以来, 科技工作者做了大量的研究工作^[1], 对工程中的主要泥沙问题有了较深刻认识, 认真总结过去的研究成果, 合理优化水库的运行方式, 对确保三峡工程长期发挥效益具有重要意义。

三峡水库建成后, 上游水位显著抬高, 从根本上打破了水流、泥沙及河床之间长期形成的相互适应的动态平衡关系, 库区河段将通过泥沙淤积的方式引起河床变形, 改变水流状态和输沙过程, 一般来讲, 水库的形态特征和运行方式是影响库区泥沙冲淤的两个主要因素, 水库的形态特征直接影响着库区宏观及局部地区的流动特性和输沙过程, 而水库运行方式主要是通过有计划地改变坝前控制蓄水位和泄流过程, 调节和影响库区水流结构、泥沙冲淤过程和最终平衡状态及淤积量, 针对一定自然条件的水库, 采用科学合理的运行方式是保持水库有效库容的关键所在。

1) 国家自然科学基金项目资助 (19602019)。

本文于 2000-01-31 收到。

2 水库运行中的主要矛盾

三峡坝址位于长江干流西陵峡内的宜昌三斗坪,距下游葛洲坝 38 km. 大坝为混凝土重力坝,坝长 1983 m,坝顶高程 185 m,最大坝高 175 m. 设计泄洪能力 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$,总装机 $1768 \times 10^4 \text{ kw}$,年发电量 $840 \times 10^8 \text{ kw/h}$. 水库控制流域面积近 $100 \times 10^4 \text{ km}^2$,占流域总面积的 55%. 水库库面面积约 1084 km^2 ,总库容约 $393 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中防洪库容 $V_{\text{防}}$ (图 1)约 $221 \times 10^8 \text{ m}^3$,兴利调节库容 $V_{\text{利}}$ 约 $160 \times 10^8 \text{ m}^3$.

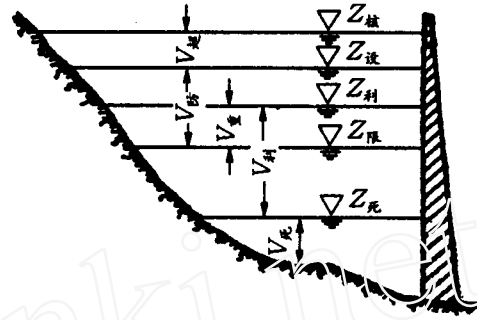


图 1 水库特征水位及库容示意图

三峡工程的主要功能包括防洪、航运、发电,但各自对水库运行方式的要求有一定差别.必须权衡利弊,加以协调,以达到优化运行之目的.

(1) 防洪. 防洪是三峡工程的最重要任务之一^[3]. 三峡水库的防洪库容 ($221 \times 10^8 \text{ m}^3$) 相对于进库年径流量 ($4050 \times 10^8 \text{ m}^3$) 是较小的,主要用于调节洪峰过程,即主要起拦洪削峰作用. 要充分发挥水库的防洪效益,则在汛期到来之前,希望水库尽量排空,腾留出较大的防洪库容,在遇到大洪水时能够拦蓄上游洪水,保证或减轻下游尤其是荆江河段的防洪压力,从整体上增强长江防大汛的能力. 同时,水库低蓄水位运行,也可避免上游水位抬高过大,造成上游的防洪困难.

(2) 发电. 三峡大坝将长江拦腰锁住,使水位壅高 80 m(汛期)~110m(枯水期),蓄积了十分充沛的水能,是理想的能源基地. 建成后年发电量达 $840 \times 10^8 \text{ kw/h}$,将占 2015 年华东、华中两大电网全部容量的 10% 左右,保证三峡水库充分发电十分重要^[4]. 我们知道水电站的理论出力为 $9.81\eta QH$,其中 η 为效率, Q 为流量, H 为水头. 因此就电站发电要求来讲,希望水库尽量保持较高蓄水位,以满足电站充分出力. 但在低水位运行时,可安排维护检修.

(3) 航运. 长江航运具有巨大的经济意义,尤其对西南地区的资源开发和经济发展具有十分重要的战略意义^[5]. 三峡工程建成后,万吨船队可直达重庆,将大幅度提高长江的航运能力,保证长江航运同样具有重要意义. 就航运要求讲,在枯水期,一方面要求水库下泄流量大一些,增加下游水深和提高下游的枯季航运量. 另一方面,库区上游要求水位高一些,以保证上游库尾水深满足较大船舶航行要求. 而在汛期则又要防止上游水位过高,引起库尾大量泥沙淤积.

(4) 工程泥沙. 三峡水库具有巨大综合效益,但水库充分发挥效益的前提保证是水库的运行寿命. 水库蓄水位越高,库区水流越缓,越不利于水库排沙,容易导致大量泥沙在库区落淤,迅速减小水库的有效库容,这对于三峡这样投资巨大的大型水利枢纽是不允许的^[6]. 因此,对于泥沙输运来讲,在汛期需要尽量维持低水位,增大水流速度,以达到蓄清排浑之目的.

因此,在水库运行过程中,发电、防洪、航运与工程泥沙之间对库水位的要求均存在着一定的矛盾,我们认为,为了充分发挥水库效益,汛期应以防洪为主要目标,不致荆江地区造成洪水灾害,确保人民生命财产安全,但从全局看,为防止泥沙淤积,延长水库寿命又是头等重要的.

3 三峡水库形态与冲淤特性

3.1 水库的形态特征

水库形态是影响泥沙冲淤变化的主要自然因素,三峡水库的自然形态有如下特征:

(1) 水库为藕节状多峡口的河道型水库. 三峡河段为典型的山谷河道,水位落差达 130 m,河

段平均比降超过 1.5×10^{-4} , 河槽窄深, 断面多呈 V 型或 U 型. 即使建库后, 库区水面平均宽度也仅约 1100 m, 比天然情况增加约一倍, 库区仍保持了窄深狭长的山区条带河道形状. 同时, 三峡库区具有显著峡口特点的河段就有 8 处 (表 1), 河道呈现出宽窄相间的藕节状平面形态, 深泓线沿程起伏幅度由几米至八九十米不等. 单宽流量沿程变化由几平方米 / 秒到四五十平方米 / 秒不等. 峡谷段枯水河宽往往只有 200 m~300 m, 而上游河段往往是 1000 m~2000 m 宽的开阔河段. 洪水期狭窄河段常产生明显壅水, 洪水位可抬高 2 m~5 m, 致使峡口上游形成局部“滞洪小水库”.

表 1 三峡库区的峡谷特征

名称	西陵峡	巫峡	瞿塘峡	关刀峡	剪刀峡	黄草峡	明月峡	铜锣峡
距离宜昌 (km)	11~77	125~175	196~204	219~221	552~554	574~576	625~626	643~645
河段长度 (km)	66.0	45.0	6.0	2.0	2.0	2.0	1.5	2.0
枯水河宽 (m)	150~400	150~400	150~400	180~300	150~300	150~300	350~500	200~300
枯水水深 (m)	102.0	85.0	67.0	58.0	39.0	52.0	45.0	52.0

(2) 变动回水区范围长. 三峡水库总体上河道狭窄, 水库蓄水位变幅大, 回水变动区范围较长, 从石宝寨到重庆港区长约 300 km. 在如此长的回水变动区河段内, 分布了多处深潭和浅滩. 水流速度在空间和时间分布上差别都很大. 这些深潭河段洪水期流速大, 主槽流速超过 2 m/s, 而枯水期流速不足 1 m/s.

(3) 水库属季调节水库. 长江在三峡坝址处的多年平均径流量为 $4510 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占长江年径流量的 50%, 多年平均输沙量 $5.3 \times 10^8 \text{ t}$. 三峡水库总库容 $393 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中防洪库容 $221 \times 10^8 \text{ m}^3$, 调节库容 $160 \times 10^8 \text{ m}^3$, 仅约占年径流量的 3.7%, 因此, 相对于三峡坝址处的年径流量而言, 水库的调节能力十分有限, 且仅能够在年内进行季调节.

3.2 泥沙冲淤特点

由上述水库形态特征导致如下泥沙冲淤特性:

(1) 泥沙易冲易淤. 三峡水库库区沿程水位和流速变化受坝前蓄水位的影响显著. 水库蓄水抬高水位后, 沿程水位抬高较为明显, 当坝前蓄水到 175 m 时, 回水末端超过重庆, 水位变幅达 20~30 m. 水流速度自回水末端开始逐渐减小, 直至坝前近乎为静水 (大坝泄流时, 外泄水流也仅引起泄流口附近流速的明显增大, 而难以引起库区大范围水流速度增大). 水流携带泥沙的能力逐渐减弱, 泥沙沿程由粗到细不断落淤, 到坝前几乎为清水, 三峡坝址处的年输沙量约 $5.3 \times 10^8 \text{ t}$, 如维持高水位蓄水运行, 几乎可以全部淤积在库区, 当水库降低蓄水位时, 库区水流速度增长较大, 有利于库区泥沙冲刷和恢复水库的有效库容.

(2) 泥沙沿程分级均匀分布. 根据库区水流特点, 可将库区分为三段, 即回水变动区 (回水末端变动范围), 常年回水区行水段和常年回水区静水段. 一般情况下, 绝大部分推移质和悬移质中的较粗部分, 首先在回水末端开始逐渐沿程淤积. 当库水位较高时, 较粗泥沙便在上游回水末端落淤; 库水位下降后, 原来淤积之泥沙被冲刷, 在下游回水末端淤积. 泥沙在此段主要以三角洲形式淤积. 在常年回水区行水段, 水流仍具有一定流速, 除首段具有少量推移质淤积外, 主要是悬移质淤积. 而在常年回水区静水段, 水流几乎为静止, 此段全为悬移质中的细颗粒泥沙, 以静水沉降形式沉淀到库底河床, 淤积基本上沿湿周均匀分布. 因此, 泥沙淤积自坝前一直分布到正常高水位的回水末端.

(3) 峡口浅滩易于产生泥沙淤积. 三峡水库库区具有众多峡口, 河段宽窄相间, 在洪水期间,

洪峰流量较大,峡谷深窄河道束水壅高,致使峡口前的宽浅河段形成“滞洪小水库”,水流速度减小较快,水流挟沙能力较小,水流中携带的泥沙将会在宽阔段大量落淤.在自然河道情况下,洪水过后,河道冲刷,水深基本能够恢复.三峡水库修建后改变了这种冲淤平衡状态,这种“库中库”的地形特征将可能导致峡口前宽浅河段产生累积性淤积,对未来沿程泥沙冲淤与洪峰传播产生很大影响.

(4) 库尾泥沙淤积受坝前蓄水位影响大.三峡水库长达600 km,水流速度沿程迅速减小,水流中携带的悬移质泥沙将大量落淤.由于水库水位变幅达20 m~30 m,回水末端也上下变动,导致泥沙淤积变化复杂.且由于三峡水库的典型河道型特征,回水末端的位置和流速受坝前蓄水水位的影响十分明显,蓄水位抬高,回水末端上延距离显著增长,流速也显著减小,对库尾段的泥沙淤积影响很大.

同时,三峡水库蓄水运行后,水位抬高,流速显著减小,推移质泥沙几乎全部淤积在库区,在水库达到冲淤平衡前,推移质泥沙是很难运行到坝前排出水库的.部分沙质推移质将可能随着回水末端的变化,推移至常年回水区内,甚至运移到坝前排出库区.对于卵石推移质,则仅可能在变动回水区内运移,将全部淤积在变动回水区内.三峡水库的入库推移质泥沙量虽然相对输沙总量不大(表2)^[2],相对于三峡总库容更是一个小量,但主要淤积在变动回水区内,对该河段的航运和防洪均可能带来很大的影响.

表2 推移质情况表

站名	卵石推移质输沙量 (10^4 t)			沙质推移质输沙量 (10^4 t)		
	多年平均	实测最大	统计年份	多年平均	中值粒径 (mm)	统计年份
朱沱	50.9	236.6	1971~1984			
寸滩	28.2	58.9	1974~1984			
万县	29.9	62.5	1966~1984			
奉节	38.7	56.6	1974~1978, 1981~1984	81.7	0.390	1974~1977
宜昌	84.3	212.3	1974~1979, 1982~1983	877	0.217	1973~1978

4 水库运行方式对库区泥沙冲淤的影响

三峡水库总库容约为 $393 \times 10^8 \text{ m}^3$,三峡坝址处年输沙量约 $5.3 \times 10^8 \text{ t}$,如果水库长期高水位运行,进库泥沙绝大多数淤积在库区,水库将很快淤满报废.要保证水库长期发挥效益,一方面应尽量保证大部分泥沙能够通过水库泄流排出水库,另一方面应使水库达到淤积平衡状态时的泥沙淤积量尽量少,因此,水库的优化运行是十分重要的.

4.1 汛期低水位运行是减少泥沙淤积的关键

长江来水来沙年内分配很不均匀,泥沙和径流主要来自汛期.三峡坝址处,汛期来沙一般占全年来沙的95%左右,主汛期占到70%以上(表3^[6]),如能将汛期来沙大部分排出水库,则可

表3 长江上游水沙年内分配统计(多年平均)

站名	类别	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	汛期	主汛期
宜昌	径流量 %	2.6	2.1	2.5	3.8	7.1	10.6	18.2	16.8	15.5	11.2	6.0	3.6	79.4	50.5
	输沙量 %	0.1	0.1	0.2	1.1	4.9	10.6	30.2	24.9	18.2	7.1	2.1	0.5	95.5	73.4
寸滩	径流量 %	2.6	2.1	2.4	3.3	5.9	9.9	18.9	18.1	16.4	11.2	5.7	3.5	80.4	53.3
	输沙量 %	0.1	0.1	0.1	0.5	3.0	10.5	31.8	26.8	19.6	6.2	1.2	0.3	97.8	78.2

大幅度地减少库区的泥沙淤积量。对于三峡河段这样的山区河道，比降陡，流速快，水深大，自然条件下三峡河段水流基本处于非饱和输沙状态。汛期三峡河段水量充沛（来水量约占年径流量的 80%），必须利用此时的有利条件充分排沙。

表 4 是三峡库区在不同蓄水位和流量条件下的流速情况^[1]。随着坝前蓄水位的降低，库区水流速度显著增大，同时随着洪水流量的增大，库区水流速度也显著增大。水流挟沙力与流速的 3 次方成正比，流速的增大使得水流输沙能力增大更为显著。而在汛期，三峡河段 30000 m³/s 流量以上的洪水较为普遍，可见，利用汛期降低坝前蓄水位，十分有利于水库排沙，不仅可以使汛期的大量来沙排入库，而且还将冲刷部分库区淤积泥沙。

表 4 水库不同流量及不同蓄水位的流速分布表 (单位: m/s)

站名	坝址 (km)	Q = 5683 m ³ /s		Q = 11890 m ³ /s		Q = 25640 m ³ /s		Q = 52150 m ³ /s	
		坝前水位 175 m		坝前水位 175 m		坝前水位 145 m		坝前水位 145 m	
寸滩	595.47	1.26	2.10	2.46	2.71				
长寿	529.08	0.62	1.83	2.24	2.27				
涪陵	482.77	0.49	1.50	1.91	2.38				
丰都	432.34	0.38	1.27	1.58	2.02				
忠县	370.07	0.44	1.03	1.64	2.30				
万县	288.00	0.45	0.84	1.51	2.40				
奉节	161.99	0.24	0.37	0.71	1.20				
巴东	66.63	0.27	0.41	0.91	1.37				

4.2 蓄清排浑——水库长期运行的基本模式

三峡水库要长期发挥防洪、发电和航运的综合功能，需要在有利于水库排沙，维持水库长期运行的前提下，根据问题的重要性，尽量协调好兴利与除害的关系。汛期应以防洪排沙为主，枯水期发电与航运对大坝上下游的不同要求之间也存在一些矛盾，也应全面考虑，统筹兼顾。

根据我国河流含沙量较高的特点，尤其是三门峡水库的运行经验，三峡水库应根据来水来沙的年内分配特点，兼顾防洪、发电、航运、水库寿命等多方面的因素，采用蓄水位年内调节（即根据不同时期来水来沙特点采用不同的蓄水位）的运行方式。在汛期，应降低水位运行，一方面利用汛期水量大流速快，且含沙量大的特点充分排沙，尽量将汛期大量泥沙排泄出库，同时，汛前逐渐降低水位运行，保证洪水到来之间保持较大的防洪库容。而在非汛期，由于水流含沙量小，进库泥沙量较少，宜采用高水位蓄水，以保证电站出力。即采用“蓄清排浑”的运行方式。具体地讲，即每年 5 月末至 6 月初，为汛期预留出防洪库容，将坝前蓄水位逐渐削落到汛限水位。汛期（6 月~9 月）泥沙含量较大，水库一般维持低水位运行，敞泄洪水，基本上来多少，排多少，水库下泄流量基本上与天然情况相同。汛末 10 月份开始，水流含沙量逐渐减小，水量相对仍较大，水库充水，下泄流量有所减小，水位蓄至正常水位，以保证发电和航运；在枯水年份，蓄水过程延续到 11 月份。12 月到第二年 4 月，水库尽量维持较高水位以保证发电。当入库流量小于电站保证出力流量时，动用调节库容，此时出库流量大于入库流量，库水位逐渐降低，但 4 月末以前水位最低不小于汛前削落水位，以保证发电水头和上游航运要求。

4.3 平衡比降与限制水位的确定

汛期降低水位运行十分有利于水库排沙。对于一定的平衡比降，汛期限制水位越低，库内淤积量就越小，淤积体末端向上游延伸的距离也越短，对库区末端洪水位的影响就越小；汛期限制水位越高，库内淤积量越多，淤积末端延伸距离离坝越远，库末的洪水位就越高。因此控制汛期

限制水位可从根本上控制库区末端的洪水位,同时可以控制库尾重庆港不发生累积性淤积.而汛限水位的确定取决于水库淤积平衡状态,需由水库的平衡比降来确定.

水库建成后,大坝壅水,库区要经历一个以淤积为主的再造床过程.其间床面逐渐淤高,床沙组成变细,河床比降变缓,直到河道重新达到输沙平衡状态为止.床沙细化减小了河道阻力,加大了细颗粒供应,使输送同样沙量的水流只需要较小的平衡比降,因此,新的平衡比降 J 一般小于自然河床比降 J_0 ,其值则取决于河流及水库的自然条件.

水库淤积平衡后的稳定河宽与比降是相应于某一造床流量洪水,淤积河床所能塑造或经过多次水流摆动所形成的河宽与比降.根据大量经验关系总结,河床处于平衡条件下,有

$$B = \frac{k^{1/5} m \zeta^{0.8} Q^{0.6}}{S^{1/5} m \omega^{0.2} g^{0.2}}, \quad J = \frac{n^2 \zeta^{0.4} S^{0.73/m} \omega^{0.73} g^{0.73}}{K^{0.73/m} Q^{0.2}}$$

式中 Q 为造床流量,三峡库区的造床流量约为 $30000 \text{ m}^3/\text{s}$; S 为相应于造床流量下的悬移质含沙量,统计库区各站相应于造床流量下的含沙量为 $2 \text{ kg}/\text{m}^3$ 左右; B 为相应于造床流量下的稳定河宽, J 为相应于造床流量下的平衡比降.由此可估算三峡水库的平衡比降约为 $0.065\% \sim 0.07\%$,稳定河宽约为 $800 \text{ m} \sim 1000 \text{ m}$ [7].

钱宁利用输沙平衡的概念和长江中下游、黄河、汉江等天然河流和水库的实测资料,得到下列沙质河段的平衡比降关系式 [8]

$$J = 0.0062 D_{50}^{1.4} / (Q/B)^{0.02}$$

J 为平衡比降; D_{50} 为淤积平衡的床沙中值粒径 (mm); Q 为多年平均流量 (m^3/s); B 为河宽 (m). 类比荆江河段,取三峡库区稳定河宽为 1000 m ,多年平均流量 $12000 \text{ m}^3/\text{s}$,取中值粒径 0.20 mm 的平衡比降约 0.065% . 长科院和水科院的数学模型计算结果也表明,三峡水库达到淤积平衡状态时河床比降约为 0.07% . 因此三峡水库的淤积平衡比降应该在 0.07% 左右.

以 0.07% 作为三峡水库的平衡比降,以造床洪水流量 $30000 \text{ m}^3/\text{s}$ 为代表洪水流量,自然条件下, $30000 \text{ m}^3/\text{s}$ 洪水时,重庆港洪水位为 180 m ,因此可以估算重庆港洪水位不抬高,且不发生累积淤积,库区泥沙进出平衡的坝前汛限水位

$$Z = 180 \text{ m} - 604 \times 1000 \times \frac{0.07}{1000} \text{ m} = 138 \text{ m}$$

可见,利于汛期排沙的理想的坝前汛限水位应不超过 138 m . 考虑到水面比降的变形,坝前汛限水位以维持 140 m 左右为好.但实际上,为了改善上游航道,重庆港水位还可适当抬高,并通过工程整治,保证港区河段不发生累积性淤积 [1,7]. 即重庆河段通过合理的工程整治,在保证库尾重庆河段不发生累积性淤积的前提下,坝前汛限水位还可以适当抬高 (超过 140 m).

4.4 175 m—155 m—145 m 调度方案

毫无疑问,三峡水库宜采用汛期低水位排沙,非汛期蓄水保证发电和航运的“蓄清排浑”运行模式.目前确定的基本运行方案为 $175 \text{ m}—155 \text{ m}—145 \text{ m}$ (水库水位变化过程如图 2 中实线所示),即汛后正常蓄水位 175 m ,汛前削落水位 155 m ,汛限制水位 145 m . 具体地讲,汛期 (6 月~9 月),将坝前水位消落到汛限水位 145 m ,敞泄洪水,水库下泄流量基本上与天然情况相同 (有时也进行小幅度的滞洪削峰运行);汛末 10 月份开始水库下泄流量逐渐减小,水位逐渐蓄至正常蓄水位 175 m ,并保持到次年 4 月份尽量维持高水位以保证发电,当入库流量小于电站保证出力流量时,动用调节库容,此时出库流量大于入库流量,库水位逐渐降低,但 4 月末以前水位最低不小于汛前削落水位 155 m ,以保证发电水头和上游航运要求.

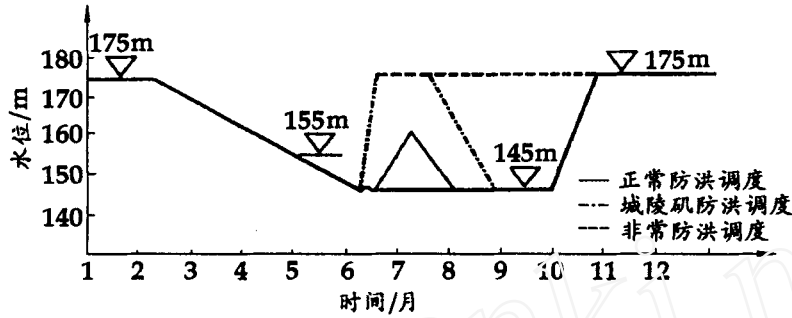


图 2 三峡水库运行水位变化过程示意图

根据长江科学院的数学模型计算结果^[9]，三峡水库采用 175 m—155 m—145 m 的调度运行方式，约 80 年后，淤积达到平衡状态，长江干流库区在 106 年末淤积 $166.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，防洪库容尚保留 83.7%，调节库容尚保留 89.1%。长江水量丰沛，含沙量相对不高，年际变幅较小，1953 年到 1984 年的统计资料（寸滩站），年输沙量最大变幅约 2.5 倍。因此，在正常情况下，采取合理的蓄清排浑运行方式，是有可能长期保持水库的有效库容的。

5 新形势下水库运行中的若干问题

三峡水库采用蓄清排浑运行方式，遵循了汛期大量排沙，减少库区淤积，非汛期蓄水兴利，协调各方矛盾的调度原则，是可能长期发挥水库效益的有效运行模式。尽管在设计阶段进行了论证，但自然条件下长江来水来沙量及年内分配复杂多变，建库后许多情况发生了变化，具体运行中仍有不少认识尚不清楚的问题，需要进一步做深入细致的分析和研究。

5.1 非正常调度

所谓非正常调度，即在遭遇特大洪水时，汛期采用蓄水拦洪削峰运行（图 2）。这种运行方式完全违背了汛期大水排沙的原则。在大洪水年，长时间维持高水位运行，改变了水流的水力条件，坡降变缓，过水面积增大，流速减缓，水流挟带泥沙的能力削弱，致使进库泥沙绝大部分淤积在库区，尤其是在库尾段。表 5 为长江科学院对不同调度方案，库区泥沙淤积分布的数学模型计算结果^[9]（计算时分别在 20 年，40 年，80 年后加入 1954 和 1955 年的洪水系列），可以看出 86 年内，只要加入 3 次 1954 年的洪水，三峡水库实施 3 次非正常调度，库尾的泥沙淤积量就显著增多达 43.4%。

表 5 三峡水库 175—145—155 方案淤积比较表 (单位 10^8 m^3)

运行年限	调度方案	干流库区总淤积量	分段淤积量				
			重庆以上	重庆~长寿	长寿~涪陵	涪陵~丰都	丰都~坝址
21 年~22 年	正常调度	62.39	0.300	0.704	2.340	4.449	54.60
	非正常调度	62.95	0.533	1.477	2.465	4.530	57.04
43 年~44 年	正常调度	115.7	0.489	2.186	3.265	6.633	103.1
	非正常调度	117.5	0.851	2.799	3.471	6.874	103.5
85 年~86 年	正常调度	157.3	1.122	4.463	4.525	9.349	137.9
	非正常调度	161.2	1.609	4.783	4.727	9.507	140.6

实际运行中，问题可能更为复杂。比如遭遇 1998 年的洪水时，整个汛期需要长时间蓄水拦洪，汛期来沙几乎全部淤积在库区，按多年平均来沙量的 90% 计算，约有 $4.7 \times 10^8 \text{ t}$ 泥沙淤积在库区，并且大部分集中淤积在库尾段，实际上一般大洪水年来沙量也远大于多年平均来沙量，也

就是说,淤积的泥沙更多.一般情况下,非正常运行淤积的泥沙,可通过汛末尤其是次年汛期低水位运行进行冲刷.但实际情况下往往并不能尽如人意,象1998年大洪水后,1999年继续出现大洪水,且近年来,由于下游河道不同程度淤积,同流量洪水位明显抬高,为保证下游防洪,三峡水库的防洪任务更为繁重,这样三峡水库连续采用非正常调度,汛期长时间维持高水位运行的概率和频率都会增大.因此非正常运行带来的泥沙淤积,尤其是库尾段累积性淤积仍是一个令人担忧的重大问题.

我们往往以三门峡水库和葛洲坝水库的运行经验来分析三峡水库.事实上,三峡水库与三门峡水库和葛洲坝水库是有较大差别的.三门峡水库经过两次改建,实行蓄清排浑运行,恢复了过去蓄水运行期间淤积的部分库容,但后来由于黄河流域多年较少出现大洪水,水库很少采用非正常调度,且实际上,三门峡水库现在的正常蓄水位也远低于原设计蓄水位,即三门峡水库较大幅度地损失了原来的设计利益.葛洲坝水库是采用蓄清排浑运行较好的范例之一,但由于葛洲坝水库为径流型水库,一方面,水库蓄水位较低,另一方面,库区范围较小,回水末端距离短,采用非正常运行后的淤积泥沙,在汛后和次年汛期比较容易冲刷.而三峡水库则不同,一方面,长江来大洪水的概率远大于黄河而不同于三门峡水库;另一方面,回水末端远长于葛洲坝水库,其汛期蓄水带来的库尾淤积比葛洲坝水库要严重的多,而冲刷又要困难的多.因此,需要对三峡水库连续遇到大洪水年,连续采用非正常调度时,库尾的泥沙淤积情况,河道演变趋势,以及是否可以通过以后的正常运行冲开等问题作出较明确的回答.同时,对三峡的防洪作用且不可盲目地夸大,而需要上下游协调,合理利用三峡水库的防洪作用.

水库非正常调度带来的另一个问题是峡口浅滩淤积.在天然情况下,遇到大洪水时就可能发生局部雍水,在峡口上游开阔段产生大量淤积,如处于葛洲坝变动回水区的峡口浅滩——扇子浅滩,1982年,由于巫山水位较高,峡口壅水显著,泥沙淤积严重,汛后也未能冲开,经较长期调整后恢复.三峡水库建成运行后,水位显著抬高,遇到大洪水时,峡口的雍水淤积将更加明显,尤其在水库进行非正常调度时,峡口雍水淤积是一个不容忽视的问题.到底雍水淤积会达到什么程度,洪水过后,峡口的冲开条件是一个非常关键的问题,在随后的调度中,尽量满足冲开条件,否则,就有可能产生累积性淤积致使滩地恶化,影响航运,并逐步影响到整个水库的淤积过程.

5.2 上游防洪

三峡水库正常调度方案的汛限水位为145m,超过了防止重庆洪水位不抬高的限制,因此上游洪水位必然有所抬高,重庆港有可能发生累积性淤积,危害到港口、航运及上游防洪.

根据数学模型计算结果(表6)遇到20年一遇的洪水,重庆水位约抬高6.77m.实际上,在遇到特大洪水时,水库需采用非正常调度,汛期坝前蓄水位达到175m甚至180m,则重庆水位就会有更大的抬高.同时,水库采用非正常调度,很可能引起库尾累积性淤积,产生“翘尾巴”现象,则上游洪水位将增高更多,这对三峡上游地区的防洪是十分不利的.过去对库尾水位变化幅度的研究结果,往往相差很大,更没有考虑库尾产生累积性淤积后的严重危害.说明对该问题

表6 三峡水库淤积后重庆洪水位

洪水频率 (%)	天然水位 (m)	淤积32年		淤积106年		寸滩流量 (m ³ /s)
		水位(m)	抬高值(m)	水位(m)	抬高值(m)	
1	194.3	196.04	1.74	199.17	4.87	88700
5	190.2	192.81	2.61	196.23	6.03	75300
10	185.9	188.93	3.03	192.67	6.77	61400

的认识还不十分清楚, 对其可能产生的危害性认识仍不够。

因此, 上游防洪形势仍是一个影响三峡工程有效运行的重要问题, 需要对此进行细致的分析和预测, 尤其是与水库实施非正常调度, 以及连续非正常调度产生库尾累积性淤积后的防洪方案进行综合考虑, 如何合理实施非正常调度, 以兼顾上下游防洪要求。

5.3 汛后蓄水和汛前削落过程

自然情况下, 汛期由于来沙量大, 河段内不可避免地存在泥沙淤积。汛期过后, 来沙量减小, 而水量相对还比较大, 往往是河段冲刷时期。建库后, 汛后走沙期需要开始蓄水, 破坏了建库前汛末走沙的规律, 进库泥沙绝大部分淤积在库内, 尤其是很多情况下, 汛末仍会有较大的来沙量, 大部分淤积泥沙需要在次年库水位削落后才能冲刷走沙。但由于库水位削落时正是枯水季节, 入库流量小, 有些年份库水位削落时间很短, 淤积泥沙很难全部冲走, 甚至能够冲走的泥沙仅占少量, 而产生累积性淤积。且实际运行中, 大多数年份削落水位的难以削落至 155 m, 更难以保证将蓄水期淤积的泥沙冲走。这样如何根据实际来水来沙变化进行汛后蓄水和汛前削落, 也成为关系三峡水库有效运行的重要问题之一。而过去对这一问题的研究是很不够的, 只有一些十分笼统的认识, 在三峡水库的适时运行中, 需要对该问题做进一步的细致研究, 合理规划和实施汛后蓄水和汛前削落调度过程。

5.4 下游河道冲刷

三峡水库蓄水运行后, 上游泥沙大部分拦截在库区, 水库下泄清水, 破坏了过去形成的输沙平衡状态, 水流必然要不断从河床冲起泥沙, 直到逐步恢复到饱和挟沙状态, 将引起下游河段的长距离冲刷。由于河床的冲刷过程较淤积过程更为复杂, 目前对三峡水库运行引起的下游冲刷结果仍缺乏清楚的认识。而下游河道的严重冲刷将引起河道的剧烈演变和沿江水位的复杂变化, 这将对下游的防洪、抗旱、排涝、土地水渍化等产生较大的影响, 尤其是下游河段与主要支流及通江湖泊的调蓄关系将发生很大变化^[10], 同时也将对三峡水库的运行带来较大的影响。如何合理地预测水库运行后下游河道的演变过程、水位变化, 以及与支流和湖泊的调蓄关系, 适时优化三峡水库运行方式, 将成为当前急需解决的重要科学问题。

6 结 论

(1) 三峡水库是一宽窄相间、深潭和浅滩交替出现的典型河道型水库。泥沙淤积总体上呈条带状沿湿周均匀分布, 众多峡口壅水容易造成峡口前局部泥沙累积性淤积, 库尾段的泥沙淤积受水库调度的影响较大。

(2) 采用合理的水库运行方式是长期保持三峡水库有效库容的重要措施。三峡水库的形态特征和泥沙淤积特点决定了三峡水库易于冲刷恢复库容, 而减缓泥沙淤积, 减少水库达到平衡状态时总淤积量的关键是汛期降低水位运行。

(3) 水库运行中, 排沙、防洪、发电、航运等对水库的运行要求存在着一定的矛盾。原则上讲, 需要在保证水库排沙, 维持水库长期有效运行的前提下, 合理优化, 充分发挥防洪、发电及航运功能。蓄清排浑的基本运行方式, 是三峡水库可能长期保持较大的有效库容的有效运行方式。

(4) 在水库的实际调度过程中, 仍存在一些重要的具体问题需要细致研究, 主要包括非正常调度时的库尾泥沙淤积、峡口的冲开条件、重庆河段的防洪, 以及下游严重冲刷引起的防洪、江湖调蓄关系等, 为优化三峡水库运行提供科学依据。

参考文献

- 1 三峡工程论证泥沙专家组工作组编. 长江三峡工程泥沙研究文集. 北京: 科技出版社, 1990
- 2 国家科委三峡工程泥沙专家组办公室. 三峡水库考察报告
- 3 林秉南. 三峡工程丛书——工程泥沙. 北京: 水利电力出版社, 1992
- 4 徐乾清. 三峡工程丛书——防洪. 北京: 水利电力出版社, 1992
- 5 潘家铮. 三峡工程丛书——发电. 北京: 水利电力出版社, 1992
- 6 石衡. 三峡工程丛书——航运. 北京: 水利电力出版社, 1992
- 7 钱宁, 张仁, 陈雅聪. 长江三峡枢纽工程的几个泥沙问题. 人民长江, 1986 (11)
- 8 黄煜龄, 梁栖蓉. 三峡工程水库泥沙淤积计算敏感性分析. 长江科学院科研报告
- 9 曹文洪, 陈志轩, 张启舜. 三峡水库形态及其冲淤特性初步分析. 水利水电科学研究院科研报告
- 10 刘青泉. 三峡工程对下游及河口环境的影响分析. 力学与实践, 1998, 20(3)

SEDIMENTATION AND OPTIMAL OPERATION OF THREE GORGE RESERVOIR IN YANGTZE RIVER

LIU Qingquan LI Jiachun ZHOU Jifu

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract This paper has briefly summarized the basic characteristics of Three Gorges reservoir and the properties of sediment deposition in the reservoir area. And the main impacts of its operation mode on sediment deposition are analyzed. Some challenging issues in the future are addressed in detail in order to provide a reasonable scientific basis for the multiple-purpose utilization and reasonable operation of the reservoir.

Key word Three Gorges reservoir, sediment deposition, operation mode of the reservoir, storing clear water and draining turbid water

(上接第 76 页)

(18) 配重 C 的质量 M _____.

(a) 越大越好; (b) 越小越好; (c) 可为任意值;

(d) 条件不够不能确定.

(19) 配重 C 的位置范围 _____.

(20) 若已知 M 、 R 、 $|\overline{OC}| = d$, 则模型微摆动的周期 _____.

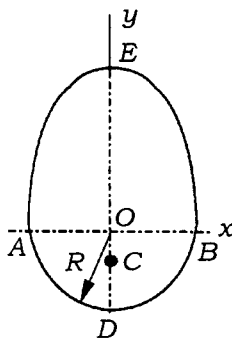


图 8

题九 (10 分)

设 $Oxyz$ 为参考坐标系, 矩形板 (三角形为其上的标志) 可绕 O 点作定点运动. 为了使矩形板从状态 1 (yz 平面内) 运动到状态 2 (xy 平面内), 根据欧拉转动定理, 该转动可绕某根轴的一次转动实现, 则在 $Oxyz$ 坐标系中

(21) 该转轴的单位矢量 _____.

(22) 转角为 _____.

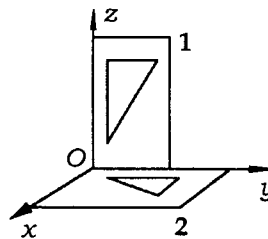


图 9