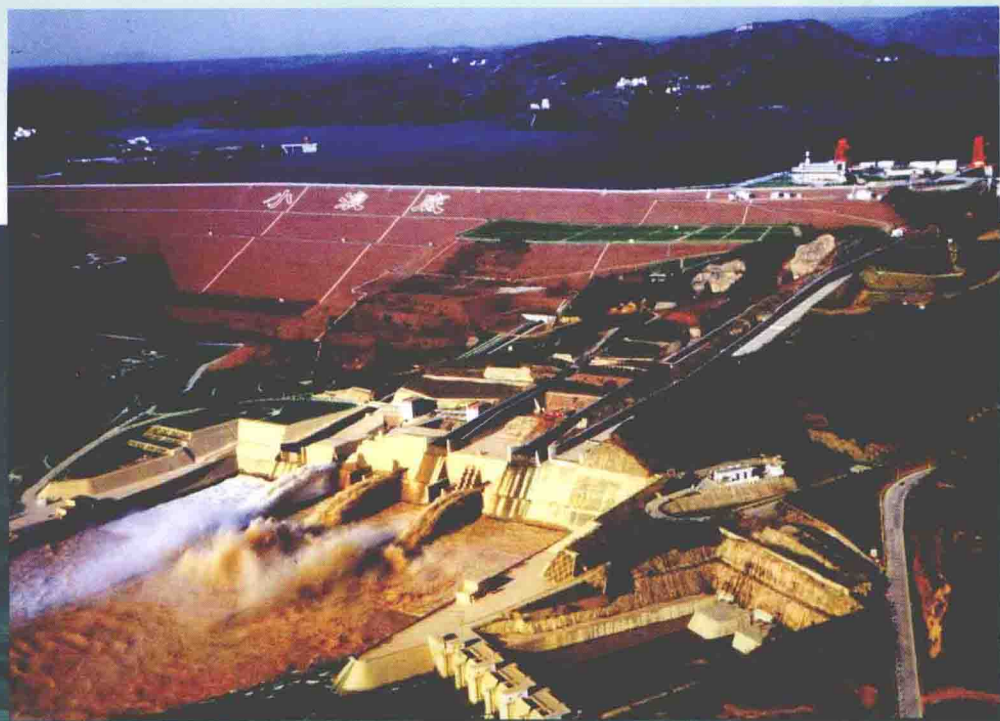



国家自然科学基金委员会资助项目 (51179072)、  
水利部公益性行业科研专项 (200901015及200801024) 资助出版

# 小浪底水库拦沙期 水库泥沙研究

王婷 李昆鹏 李书霞 丁易 朱子建 杨宁 等 编著



 黄河水利出版社

国家自然科学基金委员会资助项目(51179072)、  
水利部公益性行业科研专项(200901015 及 200801024)资助出版

# 小浪底水库拦沙期 水库泥沙研究

王 婷 李昆鹏 李书霞 等 编著  
丁 易 朱子建 杨 宁

黄河水利出版社  
· 郑州 ·

## 内 容 提 要

本书集成了在小浪底水库施工期及水库投入运用以来所进行的滚动研究成果,共分14章。第1~2章综合介绍了小浪底水库的概况及取得的研究成果;第3~5章介绍了多沙河流水库泥沙实体模型及数学模型,包括多沙河流水库泥沙模型相似律研究现状、异重流运动方程及相似条件推导、多沙河流水库泥沙模型相似律;第6~8章介绍了水库拦沙初期泥沙研究成果,包括实体模型的设计与验证、水库拦沙初期模型试验研究以及水库运用初期数值模拟研究;第9~10章介绍了水库拦沙后期运用方式试验研究;第11~13章介绍了小浪底水库实况分析及其对研究成果的验证,水库异重流的研究及应用,包括库区排沙特性,库区淤积形态及库容变化,异重流基本规律研究、塑造与利用,并对水库干支流倒灌问题进行了专题研究;第14章提出了一些认识及建议。

本书是一部涉及水力学、河流动力学、河流模拟技术等学科的专著,可供广大治黄工作者、河流泥沙研究人员及大专院校相关专业师生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

小浪底水库拦沙期水库泥沙研究/王婷等编著. —郑州:  
黄河水利出版社,2012.11

国家自然科学基金委员会资助项目(51179072)、水利部  
公益性行业科研专项(200901015及200801024)资助出版  
ISBN 978-7-5509-0371-5

I. ①小… II. ①王… III. ①水库泥沙-研究-洛阳市  
IV. ①TV145②TV632.613

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第253433号

组稿编辑:岳德军 电话:0371-66022217 E-mail:dejunyue@163.com

---

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:26.75

字数:620千字

印数:1—1 000

版次:2012年11月第1版

印次:2012年11月第1次印刷

---

定价:85.00元

## 小浪底水库拦沙期水库泥沙研究 编写人员一览表

章节	章节名称	编写人员
第1章	小浪底水库概况	李昆鹏
第2章	项目研究概况	王 婷
第3章	多沙河流水库泥沙模型相似律研究现状	朱子建
第4章	异重流运动方程及相似条件推导	杨 宁
第5章	多沙河流水库泥沙模型相似律	朱子建
第6章	水库拦沙初期模型设计及验证	李昆鹏 查天宇
第7章	水库拦沙初期模型试验研究	李书霞 万 强
第8章	水库运用初期数值模拟研究	查天宇
第9章	水库拦沙后期模型设计及验证	王宏巍
第10章	水库拦沙后期运用方式研究	王 婷 洪 建 杨 宁 王冬东 荆新爱 朱子建 马迎平 刘新鲜
第11章	水库实况分析及其对研究成果的验证	万 强 李书霞
第12章	水库异重流的研究及应用	丁 易 芦晓东
第13章	水库干支流倒灌问题研究	芦晓东 丁 易
第14章	认识及建议	杨 宁

# 前 言

黄河小浪底水利枢纽是一座以防洪(包括防凌)、减淤为主,兼顾供水、灌溉、发电,除害兴利,综合利用的枢纽工程,在黄河治理开发的总体布局中具有重要的战略地位,是黄河治理开发整体规划中的关键工程。

由于小浪底水库是修建于多沙河流上的大型水利枢纽,工程所面临的问题极为复杂。小浪底水库工程规划自1954年,至1994年工程开工,历时40余年。期间经历了从最初拟定的以发电为主的径流电站,至一级和二级开发方案的比较论证;进行了水库一次抬高水位蓄水拦沙运用和逐步抬高水位拦粗排细运用方案比较;完成了工程设计任务书的研究和初步设计至招标设计阶段的工程规划。

小浪底水库于1994年9月开工建设,1997年10月截流,1999年10月开始蓄水,截至2011年10月已运用了12年。在工程施工期,围绕工程建成后如何进行实际操作和运用进行了大量的研究工作。期间,项目组修建了小浪底库区整体河工动床模型,研究了在设计的水沙条件及拟定的水库调度方案下,库区泥沙运动规律、排沙特性、河床纵横剖面形态变化及库容变化过程;建立了库区准二维泥沙数学模型,并基于非恒定异重流运动方程等理论成果及小浪底水库物理模型反映出的物理图形进一步完善了数学模型;数学模型计算与物理模型试验研究相结合,互相补充,互为印证,为选择水库最优运用方式提供了重要的科学依据。水库投入运用以来,针对异重流输移规律进行了大量应用基础研究,提出可定量描述异重流排沙的临界指标及其阻力、传播时间、干支流倒灌、不同水沙组合条件下异重流运行速度与排沙效果的表达式;基于异重流研究成果,编制历年调水调沙人工塑造异重流预案,并应用于调水调沙实施过程,为成功塑造异重流奠定了基础。小浪底水库运用以来的不断跟踪研究,不仅检验了以往研究成果的正确性、合理性,而且进一步深化了水库泥沙输移规律的认识。

本书是项目组在小浪底水库施工期及水库投入运用以来所进行的滚动研究成果的集成。基础性研究成果如多沙河流水库模型相似律,使多沙河流水库模型相似律的理论更趋于合理化和规范化,并在三门峡、小浪底、东庄等多沙河流水库模型中得到了应用与检验。应用性研究成果直接服务于小浪底水库的优化调度,为水库充分发挥其综合利用效益作出了贡献,具有很大的社会效益与经济效益。

本书的出版得到了“国家自然科学基金委员会资助项目(51179072)、水利部公益性行业科研专项(200901015及200801024)”的资助,在此谨表谢意。

参加该项目研究的人员除本书作者外,张俊华、曹永涛、赵连军、张林忠、马怀宝、陈书奎、王岩、李涛、蒋思奇、李萍、张清、杨树寅、王合文、朱太海、马小留、衡运磊、朱大江、朱峰、王长河、姚文涛、张海发、马平安、王长运、高发安、李永杰、孟金城、张有才、王献林、王大龙、张董志、常西岭、王海龙、雷栋栋、高洁、马小群等也参加了相关的研究工作。

此书引用了许多相关文献,在此谨向这些文献的作者表示感谢。

鉴于多沙河流水沙输移与模拟技术的复杂性,书中有些内容有待在今后的工作中进一步完善或补充。同时,由于作者学识水平和文笔能力有限,错漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2012年6月

# 目 录

## 前 言

### 第1篇 概 况

第1章 小浪底水库概况 .....	(1)
1.1 工程概况 .....	(1)
1.2 工程规划主要研究成果综述 .....	(3)
第2章 项目研究概况 .....	(6)
2.1 项目背景及意义 .....	(6)
2.2 取得的主要研究成果 .....	(7)

### 第2篇 多沙河流水库泥沙模型研究

第3章 多沙河流水库泥沙模型相似律研究现状 .....	(9)
3.1 水库泥沙模型一般相似条件研究回顾 .....	(9)
3.2 异重流运动相似条件的研究现状 .....	(13)
第4章 异重流运动方程及相似条件推导 .....	(15)
4.1 非恒定异重流的运动方程 .....	(15)
4.2 异重流潜入相似条件 .....	(18)
4.3 异重流挟沙相似及连续相似条件 .....	(19)
第5章 多沙河流水库泥沙模型相似律 .....	(22)
5.1 模型基本相似条件 .....	(22)
5.2 异重流挟沙力公式 .....	(23)
5.3 水库模型时间比尺的讨论 .....	(25)
5.4 模型沙特性研究 .....	(26)
5.5 小 结 .....	(29)

### 第3篇 小浪底水库拦沙初期水库泥沙研究

第6章 水库拦沙初期模型设计及验证 .....	(30)
6.1 模型设计 .....	(30)
6.2 模型验证 .....	(34)
6.3 小 结 .....	(61)
第7章 水库拦沙初期模型试验研究 .....	(63)
7.1 2000年水库运用方式试验研究 .....	(63)
7.2 水库运用方式试验研究 .....	(76)
7.3 小 结 .....	(107)

14.2	黄河水沙调控体系 .....	(413)
14.3	支流库容综合利用 .....	(414)
14.4	降水冲刷运用 .....	(414)
14.5	存在问题 .....	(415)
参考文献	.....	(416)



# 第 1 篇 概 况

## 第 1 章 小浪底水库概况

### 1.1 工程概况

小浪底水库大坝位于河南省洛阳市以北 40 km 的黄河干流上,上距三门峡水库 130 km,下距京广铁桥 115 km,处在承上启下控制黄河水沙的关键部位。其控制流域面积 69.4 万 km<sup>2</sup>,占黄河流域面积的 92.3%,控制黄河流域近 100% 的泥沙。库区原始库容 128.8 亿 m<sup>3</sup>,其中防洪库容约 40.5 亿 m<sup>3</sup>,拦沙库容约 75 亿 m<sup>3</sup>,可以长期保持有效库容 51 亿 m<sup>3</sup>,是黄河干流三门峡水库以下唯一能够取得较大库容的控制性工程。小浪底与三门峡、陆浑、故县等干支流水库联合运用,可以在一定时期很大程度上缓解黄河下游洪水威胁、泥沙淤积、供水矛盾等主要问题。它可大幅度提高黄河下游防洪标准并可减轻三门峡水库的防洪负担,使黄河下游河床在相当长的时期内不淤积抬升。

水库主要建筑物包括拦河坝、泄洪排沙系统和发电引水系统。水库泄洪、排沙、引水建筑物均集中布置在北岸,3 条排沙洞和 3 条孔板泄洪洞进口高程为 175 m,3 条明流泄洪洞进口高程分别为 195 m、209 m 和 225 m,溢洪道高程为 258 m,1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>发电洞进口高程为 195 m,5<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>发电洞进口高程为 190 m,泄水建筑物形成了一个低位排沙、高位排漂、中间引水发电的布局。

库区为峡谷型水库,平面形态上窄下宽。根据河道平面形态的不同,可将库区划分为两段。上段自三门峡水文站至板涧河口,长约 62.4 km,河谷底宽 200~400 m。下段自板涧河口至小浪底拦河坝,长约 61 km,河谷底宽 800~1400 m,其中距坝 25~29 km 的八里胡同库段,河谷宽仅 200~300 m。库区较大的支流有畛水、大峪河、石井河、东洋河、西阳河、毫清河等 15 条,集中分布在距坝 60 余千米的库段内,见图 1-1。库区原始河床为砂卵石和岩石覆盖河床,平均比降约 11‰,沿程有许多险滩,河床纵剖面起伏不平,局部形成跌水。

小浪底水库正常蓄水位 275 m,原始总库容约 127.5 亿 m<sup>3</sup>(1999 年汛后),长期有效库容 51 亿 m<sup>3</sup>。库容分布特点是:干流库容约占总库容的 64.3%;高程 230 m 以上库容约占总库容的 67.5%;距坝约 30 km 库段的库容约占总库容的 60.3%;八里胡同以下 4 条大支流(畛水、大峪河、石井河、东洋河)库容占支流总库容的 72%;距坝 67 km 以上(库段

长占总库长的 52%) 库容约占总库容的 6.8%。小浪底水库蓄水至 275 m 时, 形成东西长 130 km, 南北宽 300 ~ 3 000 m 的狭长水域。

小浪底水库入库站为三门峡水文站, 出库站为小浪底水文站, 距坝 63.82 km 及 1.51 km 处布设河堤水沙因子站和桐树岭水沙因子站; 另外, 分别在距坝 111.01 km、93.2 km、77.28 km、44.1 km 及 22.43 km 处布设了尖坪、白浪、五福涧、麻峪及陈家岭水位站; 各水文站、水位站及观测断面在库区的位置见表 1-1。

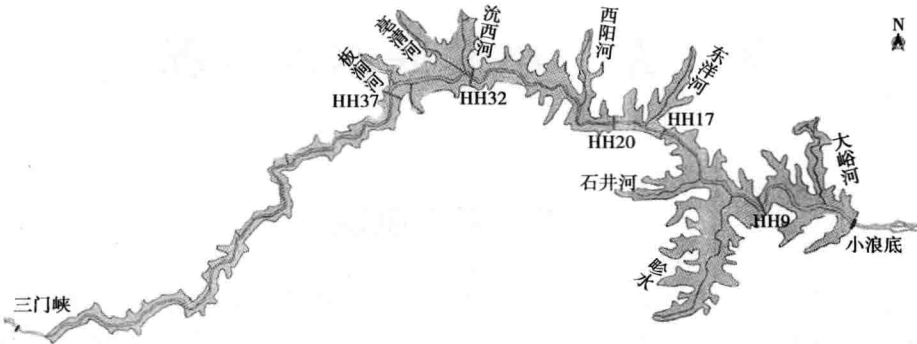


图 1-1 小浪底库区平面图

表 1-1 小浪底库区观测断面及各支流位置

测站或断面号	距坝里程 (km)	测站或断面号	距坝里程 (km)	测站或断面号	距坝里程 (km)	测站或断面号	距坝里程 (km)
HH1	1.32	HH15	24.43	HH30	50.19	HH44	80.23
桐树岭*	1.51	HH16	26.01	HH31	51.78	HH45	82.95
HH2	2.37	HH17	27.19	HH32	53.44	HH46	85.76
HH3	3.34	HH18	29.35	HH33	55.02	HH47	88.54
HH4	4.55	HH19	31.85	HH34	57.00	HH48	91.51
HH5	6.54	HH20	33.48	HH35	58.51	白浪 <sup>△</sup>	93.20
HH6	7.74	HH21	34.80	HH36	60.13	HH49	93.96
HH7	8.96	HH22	36.33	HH37	62.49	HH50	98.43
HH8	10.32	HH23	37.55	河堤*	63.82	HH51	101.61
HH9	11.42	HH24	39.49	HH38	64.83	HH52	105.85
HH10	13.99	HH25	41.10	HH39	67.99	HH53	110.27
HH11	16.39	HH26	42.96	HH40	69.39	尖坪 <sup>△</sup>	111.02
HH12	18.75	麻峪 <sup>△</sup>	44.10	HH41	72.06	HH54	115.13
HH13	20.39	HH27	44.53	HH42	74.38	HH55	118.84
HH14	22.10	HH28	46.20	HH43	77.28	HH56	123.41
陈家岭 <sup>△</sup>	22.43	HH29	48.00	五福涧 <sup>△</sup>	77.28	三门峡**	123.41

注: \*\* 为水文站, \* 为水沙因子站, <sup>△</sup> 为水位站, 其余为大断面。

## 1.2 工程规划主要研究成果综述

### 1.2.1 工程规划主要阶段

1954~1960年拟定小浪底水利枢纽为以发电为主的径流电站;1969~1974年进行了三门峡—小浪底的一级和二级开发方案的比较论证;1975~1981年,首次明确提出从黄河下游减淤出发,小浪底工程修建高坝,开发任务为防洪、防凌、减淤、灌溉、发电等综合利用,进行了水库一次抬高水位蓄水拦沙运用和逐步抬高水位拦粗排细运用方案比较;1982~1984年进行了小浪底水利枢纽工程可行性研究,开发任务明确为以防洪(包括防凌)、减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电,并进行了各项指标的论证;1985~1988年进行了小浪底水利枢纽工程设计任务书的研究和初步设计阶段的工程规划;1989~1996年进行了小浪底水利枢纽工程招标设计及世界银行贷款评估阶段的工程规划。此外,在国家“八五”科技攻关期间,围绕水库减淤问题进行了大量的研究,为工程顺利开工建设奠定了基础。

### 1.2.2 初步设计及招标设计阶段主要研究成果

#### 1.2.2.1 设计水沙系列

小浪底水库初步设计选择2000年设计水平,1950~1975年25年系列翻番组合50年代表系列,龙门、华县、河津、淤头四站年平均水、沙量分别为335.5亿 $m^3$ 及14.75亿t,经过四站至潼关及三门峡水库的调整,进入小浪底库区年平均水、沙量分别为315.0亿 $m^3$ 及13.35亿t。

招标设计阶段采用2000年水平1919~1975年56年系列,并从水库运用初期遭遇丰、平、枯水沙条件的角度考虑,从56年系列中组合6个不同的50年系列进行水库淤积及黄河下游减淤效益的敏感性分析。56年系列龙门、华县、河津、淤头四站年平均水量、沙量分别为302.2亿 $m^3$ 及13.90亿t。小浪底入库年水、沙量6个50年系列平均分别为289.2亿 $m^3$ 及12.74亿t。

#### 1.2.2.2 水库运用方式

黄河水少沙多、水沙异源,来水来沙的自然组合与黄河下游的河道输沙能力极不协调,是黄河下游河道淤积的根本原因。小浪底水库主汛期(7月11日至9月30日)采用以调水为主的调水调沙运用方式。水库拦沙期,通过调水调沙提高拦沙减淤效益;正常运用期,通过调水调沙持续发挥调节减淤效益。

小浪底水库以调水为主的调水调沙运用目标是:发挥大水大沙的淤滩刷槽作用,控制河道塌滩及上冲下淤,满足下游供水灌溉,提高发电效益,改善下游河道水质和生态环境等。

调水调沙方式可概括为:增大来流小于400 $m^3/s$ 的枯水,保证发电,改善水质及水环境;泄放400~800 $m^3/s$ 的小水,满足下游用水;调蓄800~2000 $m^3/s$ 的平水,避免河道上冲下淤;泄放2000~8000 $m^3/s$ 的大水,有利于河槽冲刷或淤滩刷槽;调节400 $kg/m^3$ 以上的高含沙水流;滞蓄8000 $m^3/s$ 以上的洪水。显然,水库调度下泄流量的基本原则是

两极分化,水库主汛期调节方式见表 1-2。

表 1-2 小浪底水库主汛期调节方式

入库流量(m <sup>3</sup> /s)	出库流量(m <sup>3</sup> /s)	调节目的
<400	400	①保证最小发电流量; ②维持下游河道基流,改善水质及水环境
400~800	400~800	①满足下游用水要求; ②下游淤积量较小
800~2 000	800	①消除平水流量,避免下游河道上冲下淤; ②控制蓄水量不大于 3 亿 m <sup>3</sup> ,若大于 3 亿 m <sup>3</sup> ,按 5 000 m <sup>3</sup> /s 或 8 000 m <sup>3</sup> /s 造峰至蓄水量 1 亿 m <sup>3</sup>
2 000~8 000	2 000~8 000	较大流量敞泄,使全下游河道冲刷
>8 000	8 000	大洪水滞洪运用

10 月至次年 7 月上旬为水库调节期。其中,10 月 1~15 日预留 25 亿 m<sup>3</sup> 库容防御后期洪水,1~2 月防凌运用,其他时间主要按灌溉要求调节径流,并保证沿程河道及河口有一定的基流,6 月底预留不大于 10 亿 m<sup>3</sup> 的蓄水供 7 月上旬补水灌溉。

### 1.2.2.3 水库运用阶段

为最大限度地发挥水库拦沙减淤效益并满足水库发电的需要,水库采取逐步抬高主汛期水位运用方式。

(1)蓄水拦沙阶段。起调水位为 205 m,进行蓄水拦沙调水调沙运用。

(2)逐步抬高阶段。当坝前淤积面高程达 205 m 以后,水库转为逐步抬高主汛期水位拦沙调水调沙运用。坝前淤积面高程由 205 m 逐步抬升至 245 m,主汛期运用水位亦随淤积面的抬高而逐渐升高。

(3)淤滩刷槽阶段。随着库区壅水淤积及敞泄冲刷,滩地逐步淤高而河槽逐步下切,最终形成坝前滩面高程为 254 m,河底高程为 226.3 m 的高滩深槽形态。

(4)正常运用期。水库正常运用期采用调水调沙多年调沙运用。在主汛期一般水沙条件下,利用滩面以下 10 亿 m<sup>3</sup> 库容进行调水调沙运用,遇大洪水进行防洪调度运用。水库各运用阶段坝前淤积面高程及淤积量见表 1-3。

表 1-3 水库各运用阶段坝前淤积面高程及淤积量(各设计系列年平均)

阶段	坝前淤积面高程(m)		年序 (年)	累计淤积量 (亿 m <sup>3</sup> )
	槽	滩		
蓄水拦沙	≤205	≤205	1~3	17
逐步抬高水位拦沙	205~245	205~245	4~15	76
形成滩槽	226.3~245	245~254	16~28	76~81
正常运用	226.3~248	254	29~50	76~81

#### 1.2.2.4 水库减淤效益

采用2000年设计水平6个50年代表系列进行水库淤积效益分析的结果表明,水库运用50年,各系列水库淤积99.9亿~104.3亿t,黄河下游的总减淤量为72.1亿~84.6亿t,全下游相当于不淤年数18.3~22.3年。

以设计的6个系列平均计算,水库拦沙101.7亿t,下游减淤78.7亿t,拦沙减淤比为1.3,全下游相当20年不淤积。其中,前20年水库拦沙100亿t,下游利津以上减淤约69亿t,进入河口段沙量减少31亿t;后30年小浪底库区为动态平衡,调水调沙,可使下游减淤9.2亿t。

#### 1.2.3 “八五”攻关期间主要研究成果

在国家“八五”重点攻关项目的研究过程中,平行研究了小浪底水库“控蓄速冲”、“高蓄速冲”、“分段抬高”、“逐步抬高”运用方式。

“控蓄速冲”运用方式的主导思想是增大调节库容,增强对水沙的调节能力,把泥沙调到大量洪水期输送,并强调调水作用,视水库汛期限制水位下调节库容大小决定造峰流量。水库逐步抬高水位运用,按汛限水位控制蓄水,避免下泄流量 $800 \sim 2\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。当库区淤积面抬高到一定高程后,相机降低水位冲刷库区淤沙,提高水库的调水调沙能力。为了研究调节库容大小对下游河道的减淤作用,还进行了最低冲刷水位180 m和190 m方案及两种泄流能力的比较。

“高蓄速冲”运用方式是水库按最大兴利效益调水,洪水期集中泄空冲刷,产生高含沙水流。水库按高水位蓄水拦沙运用,汛期蓄水位不超过254 m,按发电及供水要求泄水。当库区淤积量大于60亿 $\text{m}^3$ ,来水流量大于 $2\,300 \text{ m}^3/\text{s}$ 且继续上涨时泄空冲刷,形成高含沙水流冲刷排沙。

“分段抬高”运用方式是将水库淤积高程的抬升过程分三个阶段,在每一阶段均经历由逐渐淤积抬升至降水冲刷过程,最终达到设计的淤积形态。水库调节方式在其淤积及冲刷过程中略有不同。

“分段抬高”运用方式同时研究了三门峡、小浪底水库联合调度方案及碛口、三门峡及小浪底水库联合调度方案。

“逐步抬高”运用方式与初步设计研究阶段基本相同。

## 第 2 章 项目研究概况

### 2.1 项目背景及意义

小浪底水库于 1994 年 9 月开工建设,1999 年 10 月开始蓄水,至 2010 年 10 月已运用了 11 年。

由于黄河流域水沙条件、河床边界条件等是处在不断变化的过程中的,小浪底水库的调度指标应随之调整。因此,小浪底水库施工期,在工程规划设计阶段长期的宏观研究基础之上,围绕工程建成后针对水库投入运用以后短期的具体调度方案进行了深入研究。期间,利用小浪底库区动床模型,研究了水库不同运用方式库区泥沙运动规律、排沙特性、河床纵横剖面形态变化及库容变化过程,并与数学模型研究相结合,互相补充,互为印证,为选择水库最优运用方式提供了重要的科学依据。

水库投入运用以来,进行了连续的跟踪研究。异重流是水库的主要排沙方式。针对异重流输移规律进行了大量应用基础研究,提出了可定量描述异重流排沙的临界指标及其阻力、传播时间、干支流倒灌、不同水沙组合条件下异重流运行速度与排沙效果的表达式,并以此为基础,编制历次调水调沙塑造异重流调度预案,为黄河调水调沙塑造异重流奠定了基础。

对于水沙变幅显著、水库调度频繁、地形条件复杂、三维性更强的小浪底水库而言,河工模型试验是开展库区水动力学研究,检验水库运用方式的合理性与可行性的重要手段。因此,在小浪底水库拦沙初期与拦沙后期运用方式研究中,实体模型试验可作为重要研究途径之一。通过小浪底水库实体模型试验,重点检验水库在不同运用方式下,库区水沙输移规律、出库水沙过程、干支流淤积形态、库容变化等,对拟定的不同运用方式进行全面分析评估,为进一步优选并优化水库运用方式,进而为水库更好地发挥拦沙减淤效益提供重要的技术支持。

黄河调水调沙及小浪底水库生产运行,不仅将长期的研究成果付诸实施,而且进一步深化了对库区水沙运行规律的认识,同时也是对以往研究成果的检验。

至 2010 年汛后,库区淤积泥沙 28.225 亿  $\text{m}^3$ ,从淤积总量上看,已达到《小浪底水利枢纽拦沙初期运用调度规程》中拦沙初期与拦沙后期的界定值(21 亿 ~ 22 亿  $\text{m}^3$ )。这意味着小浪底水库拦沙初期即将结束,其步入拦沙后期或两者之间的过渡期。水库运用方式将由拦沙初期的“蓄水拦沙调水调沙”转为“多年调节泥沙,相机降水冲刷”为主导思想的运用方式。“相机降水冲刷”是指水库运用过程中,遭遇较大洪水过程时,适当降低水库运用水位,冲刷库区淤积物,恢复部分库容,以达到延长水库拦沙寿命的目的。同时,考虑为下游创造好的输沙条件,获得较大的减淤效益。该项成果正是对项目组在小浪底水库施工期及水库投入运用以来所进行的滚动研究成果的集成与凝练,对提升科学研究水

平,以及对小浪底水库下阶段的研究均具有重要意义。

## 2.2 取得的主要研究成果

### 2.2.1 多沙河流水库泥沙模型相似律

系统地分析和总结了水库泥沙动床模型的相似理论和设计方法,广泛吸收了国内外有关的先进原理和经验,以及泥沙运动力学和河床演变学的最新成果,针对黄河含沙量变幅大,河床冲淤变化迅速,以及水库排沙的多样性(如明流、异重流排沙等)等特点,提出了比较完善的多沙河流水库泥沙模型的设计方法,在理论上满足水流泥沙运动的相似、异重流潜入和挟沙连续相似、河床冲淤变形相似、水库明流排沙和异重流排沙相似。

### 2.2.2 水库模型设计及验证

在研究多沙河流水库模型相似律的基础上,对模型时间比尺及模型沙特性进行进一步研究。通过三门峡水库和小浪底水库的实测资料进行了系统、科学的验证试验,可以基本满足在不同含沙量条件下河床冲刷相似和淤积相似,同时满足水库明流排沙和异重流排沙相似,可以保证试验成果的可靠性。

### 2.2.3 水库拦沙初期运用方式研究

小浪底库区模型对小浪底水库初期运用和 2000 年水库不同运用方式的试验研究提出了水库不同运用方式下库区泥沙运动规律、排沙特征、河床纵横剖面形态及库容变化的影响,为制定小浪底水库运用初期运行方式提供了科学依据。

### 2.2.4 水库拦沙初期数学模型研究

基于非恒定异重流运动方程等理论成果,以及模型试验观测成果,建立了小浪底水库准二维数学模型,进行小浪底水库运用初期 1~5 年两种调节方案计算,在库区淤积形态及过程、水库排沙特性等方面,取得了与小浪底水库物理模型试验相近的结果,两者起到了相互印证、相互补充的作用。

### 2.2.5 水库拦沙后期运用方式研究

利用小浪底水库模型,对拟定的小浪底水库运用后期不同运用方式进行模型试验。研究了小浪底水库拦沙后期各运用方式下的水库调控效果,包括库区干支流淤积量及淤积形态历年变化过程、干支流库容变化过程、库区河势调整过程、水库拦沙期运用年限及其库区相应特征值、库区泥沙运动规律、排沙特征,为制定小浪底水库拦沙后期运用方式提供了科学依据。

### 2.2.6 水库实况分析及其对研究成果的验证

对小浪底水库运用 11 年以来的水沙过程、水库运用、库区冲淤特性及形态、异重流排

沙、库容变化等进行了研究,并对预测研究成果进行了合理性分析。

### 2.2.7 水库异重流研究及应用

根据小浪底水库异重流实测资料整理、二次加工及分析,水槽试验及物理模型相关试验成果,结合对前人提出的计算公式的验证等,提出了可定量描述小浪底水库天然来水来沙条件及现状边界条件下,异重流持续运行、干支流倒灌、不同水沙组合条件下异重流运行速度及排沙效果的表达式。

利用上述异重流研究成果,并依据当时的水沙条件及边界条件,制订 2004 ~ 2011 年的调水调沙异重流塑造及排沙方案,并在调水调沙实施过程中得到应用与检验。黄河汛前调水调沙,通过万家寨、三门峡与小浪底水库联合调度,成功地塑造出异重流并排沙出库,实现了水库排沙及调整库尾段淤积形态的目的。



## 第 2 篇 多沙河流水库泥沙模型研究

河工模型的主要优点在于可重现历史状况、弥补和扩充测验资料、多方案比选、局部问题细化、未来问题预测等,是研究边界条件复杂、三维性较强的问题的重要手段。然而,河工模型的相似律又建立在对泥沙运动基本规律认识的基础之上,模型所得到的成果的可靠性取决于它所依据的水沙运动基本理论的可靠程度。

目前所采用的异重流运动相似条件建立在二维恒定异重流运动方程之上,而该方程本身又是通过一些假定及简化处理得到的。此外,二维恒定异重流运动方程不适用于描述工程中真实出现的非恒定异重流运动规律。因此,基于该方程推导出的异重流运动相似条件也由于先天不足而显示出明显的缺陷。

本篇在分析相关研究成果的基础上,从研究异重流运动图形入手,通过分析异重流的压力分布,根据受力状况,运用动力学原理,推导非恒定异重流运动方程,进而导出异重流潜入相似条件;基于非恒定二维非均匀条件下的扩散方程导出异重流挟沙相似及连续相似条件;将异重流潜入相似条件、异重流挟沙相似条件及连续相似条件与河道模型相似条件相结合,构成完整的多沙河流水库模型相似律。

## 第 3 章 多沙河流水库泥沙模型相似律 研究现状

### 3.1 水库泥沙模型一般相似条件研究回顾

利用库区动床模型进行水库水沙运动及排沙规律的研究由来已久。20 世纪 50 年代初,在苏联列宁格勒开展了黄河三门峡水库淤积及排沙模型试验,这可以说是第一座黄河水库泥沙模型试验,尽管它给出的结果已被实践证明是错误的,但毕竟为我国河流水库实体模型试验方法积累了经验。

Einstein 及钱宁提出的模型相似律是最早有系统理论基础的模型相似律。1956 年北京水利科学研究所河渠所按该相似律,开展了三门峡水库淤积模型的设计与试验,获得的研究结果与后来的工程运行状况相差较多,但为当时三门峡枢纽的排沙设置提供了参考依据。屈孟浩对从西方引入或改进的河工模型相似条件,特别是对郑兆珍的动床模型相似律进行了试验验证,认为还不能适应于黄河。不过,屈孟浩在 20 世纪 70 年代的模型相似条件研究中引入了郑兆珍提出的公式(3-1),并成为早期黄河模型相似律最突出的特点之一,即