

国家自然科学基金委员会、水利部黄河水利委员会黄河联合研究基金项目(50339020)

小浪底水库拦沙初期 水库泥沙研究

张俊华 陈书奎 李书霞 王艳平 马怀宝 著



国家自然科学基金委员会、水利部黄河水利委员会黄河联合研究基金项目(50339020)

小浪底水库拦沙初期 水库泥沙研究

张俊华 陈书奎 李书霞 著
王艳平 马怀宝

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书集成与凝练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7章。第1章,综合介绍了小浪底水库的概况及取得的研究成果;第2~5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、实体模型的设计与验证、2000年水库运用方式试验研究、水库运用方式试验研究、小浪底水库运用初期数值模拟研究;第6、7章介绍了小浪底水库实况分析及其对研究成果的验证和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。

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科技专著,可供广大治黄工作者、河流泥沙研究人员及大专院校有关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

小浪底水库拦沙初期水库泥沙研究 / 张俊华等著. — 郑州: 黄河水利出版社, 2007.12

国家自然科学基金委员会、水利部黄河水利委员会黄河联合研究基金项目(50339020)

ISBN 978-7-80734-342-4

I.小… II.张… III.水库泥沙-泥沙控制处理-研究-洛阳市 IV.TV145

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第188752号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路11号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940 传真:0371-66022620

E-mail: hhs1cbs@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:12.75

字数:294千字

印数:1—1 000

版次:2007年12月第1版

印次:2007年12月第1次印刷

书号:ISBN 978-7-80734-342-4 / TV · 540

定价:35.00元

国家自然科学基金委员会、水利部黄河水利委员会
黄河联合研究基金项目(50339020)课题研究组

项 目 编 号：50339020

项 目 名 称：小浪底水库拦沙初期水库泥沙研究

项 目 负 责 人：张俊华 陈书奎 李书霞 马怀宝

专 著 执 笔 人：张俊华 陈书奎 李书霞 王艳平 马怀宝

主 要 完 成 人：张俊华 陈书奎 李书霞 马怀宝 王艳平

石标钦 王 岩 田 凯 和瑞勇 陈孝田

蒋思奇 李 涛 李昆鹏 怀 宏 马 涛

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流枢纽,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2006年10月已运用了7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,以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不断跟踪研究,不仅检验了以往研究成果的正确合理性,而且进一步深化了水库泥沙输移规律的认识。

该成果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与凝练。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做出了贡献,具有很大的社会效益与经济效益。

作 者

2007年6月

目 录

第 1 章 概 述	(1)
1.1 工程概况	(1)
1.2 工程规划主要研究成果综述	(2)
1.3 项目背景及意义	(4)
1.4 项目主要内容	(5)
1.5 取得的主要研究成果	(6)
第 2 章 多沙河流水库泥沙模型相似律	(8)
2.1 多沙河流水库泥沙模型相似律研究现状	(8)
2.2 异重流运动方程及相似条件推导	(13)
2.3 多沙河流水库泥沙模型相似律	(20)
2.4 小 结	(27)
第 3 章 小浪底水库模型设计及验证	(28)
3.1 模型设计	(28)
3.2 模型验证	(32)
3.3 小 结	(59)
第 4 章 小浪底水库拦沙初期模型试验研究	(61)
4.1 2000 年水库运用方式试验研究	(61)
4.2 水库运用方式试验研究	(75)
4.3 小 结	(106)
第 5 章 小浪底水库运用初期数值模拟研究	(108)
5.1 基本方程	(108)
5.2 关键问题研究及处理	(111)
5.3 数值方法	(117)
5.4 模型验证	(118)
5.5 小浪底水库初期运用方式模拟	(120)
5.6 小 结	(122)
第 6 章 小浪底水库实况分析及其对研究成果的验证	(123)
6.1 库区的排沙特性	(123)
6.2 库区淤积形态及库容变化	(140)
6.3 预测研究成果合理性分析	(145)
6.4 小 结	(147)

第 7 章 水库异重流的研究及应用	(148)
7.1 异重流基本规律研究	(148)
7.2 异重流的塑造与利用	(159)
7.3 小 结	(192)
参考文献	(194)

第1章 概述

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 km²，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 m³，其中防洪库容约 40.5 亿 m³，拦沙库容约 75 亿 m³，可以长期保持有效库容 51 亿 m³，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[#]~4[#]发电洞进口高程为 195 m，5[#]~6[#]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 800~1 400 m，其中距坝 25 km 至 29 km 之间的八里胡同库段，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、亳清河等 15 条，集中分布在距坝 60 余 km 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。

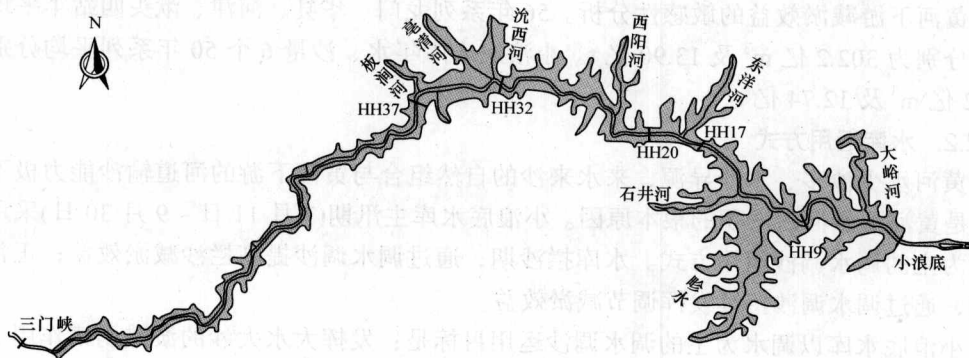


图 1.1 小浪底库区平面图

水库原始库容分布特点是：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%。

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 年进行了三门峡至小浪底之间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，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~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；正常运行期，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。

调水调沙调度方式可概括为：增大来流小于 $400 \text{ m}^3/\text{s}$ 的枯水，保证发电，改善水质及水环境；泄放 $400 \sim 800 \text{ m}^3/\text{s}$ 的小水，满足下游用水；调蓄 $800 \sim 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的平水，避免河道上冲下淤；泄放 $2000 \sim 8000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的大水，有利于河槽冲刷或淤滩刷槽；调节 $400 \text{ kg}/\text{m}^3$ 以上的高含沙水流；滞蓄 $8000 \text{ m}^3/\text{s}$ 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 1.1。

表 1.1 小浪底水库主汛期调节方式

入库流量(m^3/s)	出库流量(m^3/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 ~ 2000	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^3 ，若大于 3 亿 m^3 ，按 $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ 或 $8000 \text{ m}^3/\text{s}$ 造峰至蓄水量 1 亿 m^3
2000 ~ 8000	2000 ~ 8000	较大流量敞泄，使全下游河道冲刷
>8000	8000	大洪水滞洪运用

10 月 ~ 次年 7 月上旬为水库调节期。其中 10 月 1 ~ 15 日预留 25 亿 m^3 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^3 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^3 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 1.2。

表 1.2 水库各阶段淤积量(各设计系列年平均)

阶段	坝前淤积面高程(m)		年序	累积淤积量 (亿 m^3)
	槽	滩		
蓄水拦沙	≤ 205		1 ~ 3 年	17
逐步抬高水位拦沙	205 ~ 245		4 ~ 15 年	76
形成滩槽	226.3 ~ 245	245 ~ 254	16 ~ 28 年	76 ~ 81
正常运用	226.3 ~ 248	254	29 ~ 50 年	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, 调水调沙的作用, 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, 把泥沙调到大流量洪水期输送, 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 ~ 2 500 m³/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 m³、来水流量大于 2 300 m³/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磧口、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。

1.3 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 2006 年 10 月已运用了 7 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。

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2006年汛后,库区淤积泥沙21.58亿 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 m^3)。这就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。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。系统归纳总结以往的研究成果,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。

1.4 项目主要内容

1.4.1 多沙河流水库模型相似律及模型设计

(1)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。

(2)对模型时间比尺及模型沙特性进行进一步研究。

(3)在以上基础上,开展三门峡水库及小浪底水库模型设计及验证试验。

1.4.2 小浪底水库拦沙初期运用方式研究

利用小浪底水库模型,对拟定的小浪底水库运用初期1~5年2种调节方式进行模型试验。研究小浪底水库运用初期库区泥沙运动规律、排沙特征、河床纵横剖面形态及库容变化,为制定小浪底水库运用初期运行方式提供科学依据。

1.4.3 水库数学模型研究

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,建立多沙河流水库准二维数学模型,与小浪底水库实体模型试验平行进行方案计算,通过不同的手段和途径论证小浪底水库初期运用方式。

1.4.4 小浪底水库异重流研究及应用

通过对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,提出可定量描述小浪底水库异重流

运动规律的表达式,配合调水调沙进行水库异重流塑造调度方案研究。

水库运用以来库区水沙运动规律及淤积形态与库容变化研究。

1.5 取得的主要研究成果

1.5.1 多沙水库泥沙动床模型相似理论及模型设计

本书系统地分析总结了水库模型相似理论和设计方法,广泛地吸取国内模型相似理论和设计方法的原理和经验,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(明流、异重流等),提出了比较完善的小浪底库区泥沙动床模型设计方法;针对多沙河流水库异重流相似问题研究有所突破与进展。

通过三门峡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。

1.5.2 小浪底水库初期不同运用方式的试验研究

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,得出以下重要结论。

(1)库区干流淤积形态。水库运用初期干流淤积为三角洲,随着水库运用时间的延长,三角洲不断向下游推进。三角洲洲面形成相对稳定的河槽,河槽宽一般为 400~500 m。在 HH32~HH36 断面之间,由于河谷较宽,加之非汛期的淤积,河势不稳定,一旦形成稳定的滩槽后,基本上不发生大的变化。

(2)水库排沙特性。水库运用初期基本上是异重流排沙,异重流潜入点一般位于三角洲顶点下游的前坡段,随入库流量的大小或库水位的升降而变动,其潜入条件基本符合一般规律。异重流潜入后有足够的能量,可运行至坝前,并排泄出库。异重流淤积段,基本上是等厚淤积,坝前段淤积纵剖面接近水平。

(3)库区支流淤积特点。库区支流主要为干流倒灌淤积,位于干流三角洲洲面上的支流,在口门处形成拦门沙,拦门沙顶部的高程与干流滩面衔接,向支流内形成倒坡。随着干流水位的下降或升高,支流沟口的拦门沙可被冲出小河槽或因干流浑水的倒灌而淤积。位于干流异重流淤积段的支流沟口,基本为水平淤积。

(4)库区淤积泥沙粒径分布特点。在三角洲淤积段,淤积泥沙粒径有沿程变细的趋势,沿垂向不存在趋势性的变化,在异重流淤积段及坝前淤积段无明显的分选现象。

(5)水库降水冲刷特性。概化试验结果表明,当入库流量较大、持续时间长、坝前水位骤降时,库区初期淤积形成的河槽会出现强烈的冲刷下切,随之滩地会出现滑塌现象,与野外观测现象一致。这表明,在水库运用过程中,利用大流量,降低库水位,可能恢复部分库容长期使用;但是模型库区淤积泥沙固结的抗冲强度是否与原型相似,还是有

待进一步研究的边缘学科问题。

模型试验得出的主要结论及认识，不仅为选择水库最优运用方式提供了必要的科学依据，而且被小浪底水库投入运用后的实测资料证明是正确的。原型实测资料表明，小浪底水库 2000 年投入运用后至 2005 年，洪水期库区均发生异重流排沙，库区淤积形态为三角洲，支流口均为异重流倒灌淤积。其表现与模型试验预报结果颇为一致。

1.5.3 小浪底水库数学模型

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。

1.5.4 水库异重流的研究及应用

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，异重流持续运行条件、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 2004~2006 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 3 次汛前调水调沙，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 章 多沙河流水库泥沙模型相似律

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式之上,而该方程本身又是通过一些假定及简化处理得到的。此外,这个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。

本章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。

2.1 多沙河流水库泥沙模型相似律研究现状

2.1.1 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,尽管其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院河渠所按该相似律,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也进行了试验验证,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式(2.1),并成为早期黄河模型相似律最突出的特点之一,即

$$\lambda_{\omega} = \lambda_u = \lambda_v \sqrt{\frac{\lambda_h}{\lambda_l}} \quad (2.1)$$

式中： λ_w 为沉速比尺； λ_u 为摩阻流速比尺； λ_v 为流速比尺； λ_h 为垂直比尺； λ_L 为水平比尺。

1958年冬至1960年底，黄河水利委员会(以下简称“黄委会”)在陕西省武功主持了三门峡水库淤积及渭河回水发展野外大模型试验工作，其由黄河水利科学研究所(以下简称“黄科所”)、西北水利科学研究所、北京水利科学研究院河渠所等具体负责，分别开展了整体大、小模型及渭河局部变态模型试验。由于当时河工模型相似律尚不完善，采用了浑水变态动床大比尺整体模型和系列延伸整体模型以及清水填土法渭河局部大比尺模型相结合的研究方法。整体大模型由钱宁设计，模型沙选自渭惠渠沉沙，粒径极细，黄河模型沙中径为0.0053 mm，渭河模型为0.0047 mm，显然泥沙起动相似难以满足。系列延伸整体模型，是按照沙玉清方法设计的。至于采用填土法开展渭河模型，是按照苏联专家A·哈尔杜林和K·И·罗辛斯基的建议进行的。亦即在渭河局部模型中施放清水测流速，根据原型实测资料建立的挟沙关系判断，若在来沙条件下可能出现淤积，即在模型中填土，再测流速，反复进行，最后求得淤积平衡时的地形和回水变化。采用填土法可从表面上回避当时动床模型选沙设计难以正确的困难，但也必须指出，自然河流的塑造过程、影响因素及其相互影响都极其复杂，且当时渭河下游的挟沙关系不易确切表示，因此依照填土法开展试验，很难给出正确的定量结果。

三门峡水库淤积与渭河回水发展野外模型试验是我国在国内最早开展的巨型水库泥沙模型试验。尽管在所给水沙条件下获得的试验结果在定性上还存在较大的争议，但对于在试验技术和方法等方面的探索，还是积累了宝贵的经验，在我国河工模型发展史上有着特定的位置。

清华大学的王桂仙、惠遇甲等在开展长江葛洲坝枢纽回水变动区泥沙问题试验研究的过程中，采用的主要相似条件包括：

(1)输沙量连续相似，有

$$\lambda_{t_2} = \frac{\lambda_{\gamma_0} \lambda_L}{\lambda_s \lambda_v} = \frac{\lambda_{\gamma_0}}{\lambda_s} \lambda_{t_1} \quad (2.2)$$

(2)泥沙沉降相似，有

$$\lambda_w = \lambda_v \frac{\lambda_h}{\lambda_L} \quad (2.3)$$

(3)泥沙悬浮相似，有

$$\lambda_w = \lambda_k \lambda_v \left(\frac{\lambda_h}{\lambda_L} \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

(4)异重流发生相似，有

$$\lambda_s = \lambda_{\gamma_s} / \lambda_{\gamma_s - \gamma} \quad (2.5)$$

式中： λ_s 为水流含沙量比尺； λ_{t_1} 为水流运动相似时间比尺； λ_{t_2} 为河床变形时间比尺； λ_{γ_0} 为淤积物干密度比尺； λ_{γ_s} 为泥沙容重比尺； $\lambda_{\gamma_s - \gamma}$ 为泥沙与水的容重差比尺； λ_k 为系数比尺，其值一般为1。

目前,清华大学正在进行的三峡库区泥沙模型试验,也采取了类似的设计方法。此外,对于采用轻质沙引起的时间变态问题的研究也颇具开创性。

长江科学院为检验三峡工程库尾变动回水区泥沙模型试验成果的可靠性,利用丹江口水库油房沟河段模型,间接开展了验证试验。该院在开展葛洲坝工程坝区泥沙模型试验时,取 $\lambda_L = \lambda_h = 150$, 选株洲精煤为模型沙,经过验证试验,确定的含沙量比尺 $\lambda_s = 1$ 。目前,长江科学院的三峡泥沙模型也采用了与上述葛洲坝枢纽坝区模型相同的设计方法和模型沙,取 $\lambda_s = 1$, 也取得了大量的试验结果。

1978年,屈孟浩提出的动床模型相似条件中,其主要内容除含有式(2.1)外,还包括如下两个相似条件:

(1)推移质运动相似条件,即

$$\lambda_D = \frac{\lambda_J \lambda_h}{\lambda_{v_s - v}} \quad (2.6)$$

(2)异重流运动相似条件,即

$$\lambda_{v_s} = (\lambda_{v_s - v} \lambda_s \lambda_h)^{0.5} \quad (2.7)$$

式中: λ_D 为推移质粒径比尺; λ_{v_s} 为异重流流速比尺; λ_J 为比降比尺。

屈孟浩的模型律在理论上的缺陷较大,不过他的设计方法曾在一些黄河动床模型试验中使用。长期实践中积累的丰富经验,为多沙河流模型的设计与试验操作提供了参考依据。

近期,屈孟浩、窦国仁在开展小浪底水利枢纽的泥沙模型试验时,分别对高含沙水流模型相似律进行了探讨,前者通过预备试验确定出含沙量比尺 λ_s , 然后列出如下形式的河床冲淤变化量与来沙量(输沙)变化的关系式,即

$$\gamma_0 B dz dx = dG_s dt - dG'_s dt \quad (2.8)$$

式中: γ_0 为淤积物干密度; B 为河宽; G'_s 、 G_s 为输沙率。

公式(2.8)左边项为河床冲淤变化值,右边第一项为河段进出口输沙量的差值,右边第二项为 dt 时段该河段水体内沙量的增减量。原作者采用如下假定,即

$$dG'_s \propto dG_s$$

引入比例系数 k , 该式又表示为

$$dG'_s = k dG_s \quad (2.9)$$

将式(2.9)代入式(2.8), 得

$$\gamma_0 B dz dx = (1-k) dG_s dt \quad (2.10)$$

从而导出河床冲淤时间比尺为

$$\lambda_{t_2} = \frac{1}{\lambda_{(1-k)}} \frac{\lambda_{\gamma_0}}{\lambda_s} \lambda_{t_1} \quad (2.11)$$

该试验取 $1/\lambda_{(1-k)} = 4$ 。