



# 长江上游梯级水库泥沙输移 与泥沙调度研究

黄仁勇 著



科学出版社

# 长江上游梯级水库泥沙输移 与泥沙调度研究

黄仁勇 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书以三峡水库及长江上游梯级水库泥沙问题为研究对象,研究了三峡水库蓄水运用后泥沙输移特性,建立了三峡水库汛期沙峰传播时间公式、沙峰出库率公式和场次洪水排沙比公式,建立了三峡水库干支流河道一维非恒定流水沙数学模型和长江上游梯级水库联合调度泥沙数学模型,开展了长江上游梯级水库泥沙冲淤长期预测计算,得到了各水库淤积初步平衡时间,研究提出了三峡水库和长江上游梯级水库汛期泥沙调度方案,研究成果可为长江上游梯级水库科学调度提供技术支撑。

本书资料翔实、内容丰富,可供水库调度管理人员、水库泥沙科技工作者、大专院校有关专业师生及广大关心长江治理与开发的社会各界人士阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

长江上游梯级水库泥沙输移与泥沙调度研究/黄仁勇著.—北京:科学出版社,2017.3

ISBN 978-7-03-052143-9

I. ①长… II. ①黄… III. ①长江流域—上游—梯级水库—水库泥沙—泥沙输移—研究 ②长江流域—上游—梯级水库—水库泥沙—水库调度—研究 IV. ①TV142 ②TV697.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第053461号

责任编辑:范运年 王晓丽/责任校对:郭瑞芝  
责任印制:徐晓晨/封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年3月第一次印刷 印张:13 1/2

字数:272 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

泥沙淤积问题是影响水库长期运用与效益发挥的关键因素之一，开展长江上游梯级水库泥沙问题研究，可为梯级水库科学调度提供技术支撑，具有重要的现实意义。

20 世纪 90 年代以来，长江上游来水来沙条件发生了较大变化，干支流水库建设也进展迅速，2015 年长江上游地区投入运用且总库容达 1 亿  $\text{m}^3$  以上的水库已经接近 80 座，长江上游干支流水库群已逐步形成。在来水来沙减少和干支流水库群兴建并优化调度的背景下，长江上游梯级水库的长期使用问题和泥沙调度问题已成为水库运行管理部门和水库调度部门及社会各界普遍关心的问题。

本书以三峡水库及长江上游梯级水库泥沙问题为研究对象，取得了以下几个方面的研究成果：①揭示了影响三峡水库汛期泥沙输移的主要影响因素，建立了三峡水库沙峰传播时间公式、沙峰出库率公式和场次洪水排沙比公式；②建立了三峡水库干支流河道一维非恒定流水沙数学模型，并在恢复饱和系数、区间流量、库容闭合等方面对模型进行了改进；③建立了长江上游梯级水库联合调度泥沙数学模型，实现了梯级水库泥沙冲淤同步联合计算及泥沙冲淤与水库调度的一体化同步模拟计算；④开展了长江上游梯级水库泥沙冲淤 500 年长期预测计算，得到了各水库长期淤积过程和水库淤积初步平衡时间；⑤提出了三峡水库和长江上游梯级水库基于沙峰调度和基于汛期“蓄清排浑”动态使用的泥沙调度方案。

本书是在作者博士论文的基础上编写完成的，首先感谢导师谈广鸣和范北林，在作者博士求学期间及博士论文撰写过程中给予的关心、帮助和指导。在作者博士求学及论文研究工作期间，工作单位长江水利委员会长江科学院的卢金友、张细兵等各位领导同事都给予了诸多的关心、支持、鼓励与帮助，在此一并表示衷心的感谢。作者参加工作十余年来一直在长江水利委员会长江科学院从事三峡水库和长江上游梯级水库泥沙问题研究工作，本书成果的取得得益于工作单位各类科研项目持续不断的支持，感谢长江水利委员会长江科学院为作者提供了这样一个成长的平台，让作者有机会在工作中不断的学习，不断的进步。在本书的论述中，引用了很多相关参考文献，在此谨向这些文献的作者表示深深的谢意。

长江上游梯级水库泥沙问题非常复杂，其研究过程也将是一个长期的过程。限于作者水平和现阶段的认识及研究条件，书中有些内容仍有待于在今后的工作中做进一步的完善和充实。对于书中的疏漏和欠妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2016年7月

# 目 录

## 前言

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                        | 1  |
| 1.1 研究背景与意义                     | 1  |
| 1.2 研究现状                        | 3  |
| 1.2.1 水库泥沙输移规律                  | 3  |
| 1.2.2 水库泥沙冲淤数值模拟                | 4  |
| 1.2.3 水库泥沙调度                    | 5  |
| 1.3 主要研究内容                      | 8  |
| 参考文献                            | 10 |
| 第 2 章 三峡水库蓄水运用后泥沙输移特性研究         | 14 |
| 2.1 三峡水库河道概况                    | 14 |
| 2.1.1 三峡水库天然河道概况                | 14 |
| 2.1.2 三峡水库干流库区形态特征              | 15 |
| 2.1.3 三峡水库来水来沙特征                | 16 |
| 2.1.4 三峡水库蓄水后泥沙淤积               | 18 |
| 2.2 三峡水库沙峰输移特性研究                | 20 |
| 2.2.1 研究意义                      | 20 |
| 2.2.2 三峡水库蓄水运用后水沙输移特性变化分析       | 22 |
| 2.2.3 沙峰输移特性理论分析及三峡库区沙峰输移实测资料选取 | 26 |
| 2.2.4 三峡库区沙峰传播时间公式研究            | 30 |
| 2.2.5 三峡库区沙峰出库率公式研究             | 42 |
| 2.3 三峡水库汛期场次洪水排沙比研究             | 52 |
| 2.3.1 汛期场次洪水资料的选取               | 53 |
| 2.3.2 汛期场次洪水排沙比与主要影响因素关系研究      | 53 |
| 2.3.3 汛期场次洪水排沙比公式研究             | 56 |
| 2.3.4 考虑实时调度的汛期场次洪水排沙比公式        | 59 |
| 2.3.5 考虑实时调度的汛期场次洪水排沙比公式应用      | 61 |
| 2.4 三峡水库蓄水期及消落期排沙比研究            | 63 |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 2.4.1      | 三峡水库蓄水期排沙比分析                                 | 63         |
| 2.4.2      | 三峡水库消落期排沙比分析                                 | 68         |
| 2.5        | 本章小结   | 72         |
|            | 参考文献   | 72         |
| <b>第3章</b> | <b>三峡水库干支流河道一维非恒定流水沙数学模型研究</b>               | <b>74</b>  |
| 3.1        | 模型方程及求解                                      | 74         |
| 3.1.1      | 数学模型方程组                                      | 74         |
| 3.1.2      | 模型求解   | 75         |
| 3.2        | 模型中若干关键技术问题的处理                               | 77         |
| 3.2.1      | 床沙交换及级配调整                                    | 77         |
| 3.2.2      | 水流挟沙力计算                                      | 77         |
| 3.2.3      | 恢复饱和系数 $a$                                   | 78         |
| 3.2.4      | 糙率系数 $n$ 的确定                                 | 78         |
| 3.2.5      | 节点分沙   | 79         |
| 3.2.6      | 区间流量   | 79         |
| 3.3        | 模型验证   | 79         |
| 3.3.1      | 验证计算条件                                       | 79         |
| 3.3.2      | 验证时段内三峡水库运用情况概述                              | 80         |
| 3.3.3      | 水位流量验证                                       | 82         |
| 3.3.4      | 输沙量验证  | 84         |
| 3.3.5      | 淤积量及排沙比验证                                    | 86         |
| 3.4        | 模型改进对模拟结果影响                                  | 89         |
| 3.4.1      | 恢复饱和系数计算改进对提高库区冲淤模拟精度影响分析                    | 89         |
| 3.4.2      | 区间流量计算改进对提高库区冲淤模拟精度影响分析                      | 91         |
| 3.4.3      | 库容闭合计算改进对提高库区冲淤模拟精度影响分析                      | 93         |
| 3.4.4      | 综合考虑恢复饱和系数、库容闭合和区间流量计算改进后对提高库区<br>冲淤模拟精度影响分析 | 96         |
| 3.5        | 本章小结   | 98         |
|            | 参考文献   | 98         |
| <b>第4章</b> | <b>长江上游梯级水库联合调度泥沙数学模型研究</b>                  | <b>100</b> |
| 4.1        | 长江上游梯级水库概况                                   | 100        |
| 4.1.1      | 长江上游干支流防洪和开发规划简述                             | 100        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.1.2 主要控制性水库概况                              | 101        |
| 4.1.3 长江上游水库群联合调度方案简介                        | 103        |
| 4.2 长江上游梯级水库联合调度泥沙数学模型                       | 107        |
| 4.2.1 模型系统组成框架及原理                            | 108        |
| 4.2.2 模型功能                                   | 109        |
| 4.3 长江上游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝、三峡梯级水库联合调度泥沙数学模型边界条件 | 110        |
| 4.3.1 河床边界                                   | 110        |
| 4.3.2 进口水沙边界及干支流梯级拦沙计算                       | 111        |
| 4.4 本章小结                                     | 117        |
| 参考文献   | 117        |
| <b>第5章 长江上游梯级水库泥沙冲淤长期预测计算</b>                | <b>118</b> |
| 5.1 乌东德水库泥沙冲淤预测分析                            | 118        |
| 5.1.1 乌东德水库概况                                | 118        |
| 5.1.2 计算结果分析                                 | 119        |
| 5.2 白鹤滩水库泥沙冲淤预测分析                            | 124        |
| 5.2.1 白鹤滩水库概况                                | 124        |
| 5.2.2 计算结果分析                                 | 125        |
| 5.3 溪洛渡水库泥沙冲淤预测分析                            | 129        |
| 5.3.1 溪洛渡水库概况                                | 129        |
| 5.3.2 计算结果分析                                 | 130        |
| 5.4 向家坝水库泥沙冲淤预测分析                            | 135        |
| 5.4.1 向家坝水库概况                                | 135        |
| 5.4.2 计算结果分析                                 | 136        |
| 5.5 向家坝水库坝址至朱沱段干流泥沙冲淤预测分析                    | 141        |
| 5.5.1 河段概况                                   | 141        |
| 5.5.2 计算结果分析                                 | 141        |
| 5.6 三峡水库泥沙冲淤预测分析                             | 143        |
| 5.6.1 三峡水库概况                                 | 143        |
| 5.6.2 计算结果分析                                 | 144        |
| 5.7 本章小结                                     | 149        |
| 参考文献   | 149        |



---

|  |     |
|--|-----|
| 第 6 章 三峡及长江上游梯级水库汛期泥沙调度初步研究 .....        | 150 |
| 6.1 三峡及长江上游梯级水库泥沙调度分析 .....              | 150 |
| 6.1.1 三峡水库泥沙调度分析 .....                   | 150 |
| 6.1.2 长江上游梯级水库泥沙调度分析 .....               | 154 |
| 6.2 三峡水库汛期泥沙调度方式初步研究 .....               | 162 |
| 6.2.1 兼顾排沙的三峡水库沙峰调度方式研究 .....            | 162 |
| 6.2.2 三峡水库汛期“蓄清排浑”动态使用的泥沙调度方式研究 .....    | 184 |
| 6.3 长江上游梯级水库汛期联合排沙调度方式初步研究 .....         | 195 |
| 6.3.1 溪洛渡、向家坝、三峡梯级水库汛期联合排沙调度方式探讨 .....   | 195 |
| 6.3.2 溪洛渡、向家坝、三峡梯级水库汛期联合排沙调度方式计算研究 ..... | 196 |
| 6.4 本章小结 .....                           | 203 |
| 参考文献 .....                               | 203 |
| 第 7 章 结论 .....                           | 205 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 研究背景与意义

长江是世界第三、中国第一大河，不仅是中华文明的发源地之一，更是当代中国经济社会发展的重要命脉。长江流域涉及我国 19 个省(自治区、直辖市)，约占国土面积的 1/5，生产了全国约 1/3 的粮食，创造了全国约 1/3 的 GDP，养育了全国约 1/3 的人口，蕴藏着我国 1/3 的水资源量和 3/5 的水能资源，拥有全国约 1/2 的内河航运里程，是全国水资源配置的战略水源地、实施能源战略的主要基地、珍稀水生生物的天然宝库、连接东中部的“黄金水道”和改善我国北方生态环境的重要支撑点，其战略地位十分突出。治理好、利用好、保护好长江，不仅是长江流域 4 亿多人民的福祉所系，也关系到全国经济社会可持续发展的大局，具有十分重要的战略意义<sup>[1]</sup>。

长江干流全长 6300 余千米<sup>[2]</sup>，流域集水总面积 180 万 km<sup>2</sup>。长江自江源至湖北宜昌称上游，长约 4500km，集水总面积约 100 万 km<sup>2</sup>；宜昌至江西鄱阳湖出口湖口称中游，长约 955km，集水总面积约 68 万 km<sup>2</sup>；湖口至入海口为下游，长约 938km，集水总面积约 12 万 km<sup>2</sup>。长江水沙资源丰富，多年平均径流量和输沙量分别约为 9052 亿 m<sup>3</sup> 和 4.27 亿 t<sup>[3]</sup>(大通站，2002 年前均值)，径流量和输沙量分别居世界第五位和第四位。长江流域水沙资源多集中于长江上游，上游干流控制站宜昌站 2002 年前多年平均年径流量为 4369 亿 m<sup>3</sup>，占河口控制站大通水文站 2002 年前多年平均年径流量的 48.3%；同时，长江上游还是长江流域重要的产沙区，宜昌站 2002 年前多年平均年输沙量为 4.92 亿 t，为大通站年均输沙量的 1.15 倍；长江上游径流主要来自金沙江、岷江、沱江、嘉陵江和乌江等河流，长江上游泥沙主要来自于金沙江和嘉陵江。

长江上游水能资源丰富，是我国水电能源开发的集中地区。据初步统计<sup>[1]</sup>，2015 年长江上游地区投入运用且总库容 1 亿 m<sup>3</sup> 以上的水库近 80 座，总兴利库容 600 多亿 m<sup>3</sup>，防洪库容约 380 亿 m<sup>3</sup>；预计在 2030 年前后，长江上游干支流水库总调节库容超过 1000 亿 m<sup>3</sup>。目前，长江流域已建成或具备运行条件的控制性水利枢纽(水电站)有：金沙江梨园、阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉、观音岩、溪洛渡、向家坝，雅砻江锦屏一级、二滩，岷江紫坪铺、大渡河瀑布沟，嘉陵江碧口、宝珠寺、亭子口、草街，乌江的乌江渡、构皮滩、思林、沙沱、彭水，长江

干流三峡，汉江的丹江口等。正在或即将建设的控制性水利枢纽(水电站)主要包括：金沙江的乌东德、白鹤滩；雅砻江的两河口；大渡河的双江口、金川、猴子岩、大岗山；岷江干流的十里铺等。远期规划建设的大型水电站主要包括：金沙江虎跳峡河段梯级等。这些已建、在建和拟建的控制性水库在长江流域防洪减灾、水资源综合利用、水生态环境保护等方面发挥了重要作用。

三峡枢纽 2003 年投入运行后，长江上游大型水电建设迅速展开，其中溪洛渡和向家坝这两座特大型水库已分别于 2013 年和 2012 年开始蓄水运用，这标志着长江上游特大型梯级水库群联合蓄水拦沙作用已经开始，溪洛渡和向家坝水库蓄水运用后将通过改变三峡水库入库水沙条件，进一步影响三峡水库的调度运用和库区淤积，并给长江中下游河道演变及治理带来深远影响<sup>[4]</sup>。泥沙淤积问题是影响水库长期运用与效益发挥的关键因素之一，梯级水库泥沙问题更加复杂。作为治理开发长江的特大型骨干工程，溪洛渡、向家坝、三峡等长江上游梯级水库综合效益的充分发挥意义重大，三峡、向家坝、溪洛渡蓄水运用以来，相继开展了汛末提前蓄水、汛期水位浮动、汛期中小洪水调度等优化调度实践，实际运用方式相对设计调度方式均有所突破，汛期平均水位也比设计调度方式有所抬高，造成水库泥沙落淤比例增大，水库实际排沙比相对设计成果均相应有所减小。目前，以提高综合效益为目的的水库优化调度方式与以水库长期使用为目的的“蓄清排浑”调度方式的矛盾正日益突出。长江上游梯级水库联合运用后，各水库入库泥沙都将变少变细，水库淤积平衡时间将进一步延长，各水库调度方式都将相应出现进一步优化的空间。在此背景下，水库运用后库区泥沙输移规律、梯级水库泥沙淤积对水库长期使用影响、水库调度方式优化背景下如何兼顾排沙减淤等都是迫切需要研究和回答的问题，这就需要及时开展以三峡水库为核心的长江上游梯级水库泥沙输移规律与泥沙调度研究，提出水库优化调度背景下的有利于排沙减淤的水库泥沙调度方案，为长江上游梯级水库综合效益的充分和可持续发挥提供技术支撑。

为此，本书以长江上游梯级水库为研究对象，开展了三峡水库蓄水后泥沙输移规律研究，建立了三峡水库干支流河道一维非恒定流水沙数学模型与长江上游梯级水库联合调度泥沙数学模型，在此基础上，进一步开展了以三峡水库为核心的长江上游梯级水库泥沙调度研究。本书研究内容涉及泥沙输移理论、泥沙模拟技术、泥沙调度技术等多个方面，研究成果可为长江上游梯级水库优化调度提供技术支撑。因此，本书具有重要的实践意义和科学价值。

## 1.2 研究现状

### 1.2.1 水库泥沙输移规律

开展水库泥沙输移规律研究,有助于研究入库水沙及水库调度对库区泥沙输移和泥沙淤积的影响,可为水库调度方式优化提供技术支撑。水库泥沙输移的一般规律是非均匀悬移质不平衡输沙规律,主要表现在含沙量的沿程变化,冲淤过程中悬移质泥沙级配的分选以及床沙级配的粗细化等<sup>[5]</sup>,水库泥沙输移规律还包括异重流输沙、溯源冲刷、干支流倒灌、泥沙絮凝、浑水静水沉降等特殊规律。悬移质不平衡输沙研究基本上是从20世纪60年代开始的<sup>[6-8]</sup>,国内窦国仁<sup>[9]</sup>较早提出非平衡输沙理论,并提出了初步的理论体系,其后,韩其为<sup>[10]</sup>进一步开展了非均匀沙一维不平衡输沙的研究,并给出了含沙量沿程变化方程。国内在水库泥沙输移规律研究方面的成果非常丰富,其中的典型代表是小浪底水库调度方式研究过程中关于小浪底水库泥沙输移规律的深入研究<sup>[11]</sup>,三峡水库蓄水运用后也开展了大量的水库泥沙输移规律研究。

长江上游大型梯级水库蓄水运用后实测水沙资料,为开展三峡及长江上游大型梯级水库泥沙输移规律研究提供了良好的条件。三峡水库自2003年蓄水运用以来,长江水利委员会水文局持续不断地开展了库区原型资料观测,泥沙科技工作者依据这些资料相继开展了大量的研究工作,把对三峡水库泥沙输移规律的认识不断向前推进。董年虎等<sup>[12]</sup>对三峡水库2007年汛期泥沙输移资料进行了分析,研究认为大流量时库区沙峰传播时间大致为6天,比天然情况下增加2~3天,小流量时增加更多,并研究指出三峡水库存在泥沙絮凝现象,且絮凝作用是三峡水库细泥沙淤积比例较大的主要原因;清华大学周建军等<sup>[13]</sup>根据三峡水库2003年实测资料,分析认为三峡库区沙峰传播时间要比洪峰长3~4天或更长,并对沙峰传播滞后洪峰的原因进行了分析。毛红梅等<sup>[14]</sup>根据实测资料对三峡库区泥沙分布规律进行了研究,研究认为库区水体在大水深小含沙量情况下,泥沙横向分布趋于均匀,垂向底部区域泥沙输移占比较大。陈桂亚等<sup>[15]</sup>对三峡水库蓄水运用后排沙效果进行了研究,研究认为库区河道特性、入库水沙条件以及坝前水位的高低是水库排沙比变化的主要影响因素。王俊等<sup>[16]</sup>对三峡水库2003年首次蓄水对泥沙输移影响的研究成果认为,三峡水库输沙特性主要受库区地形、水面比降、流量、含沙量等因素的影响,全年约85%的泥沙输移是在两次洪水过程中完成的,来水来沙量大时,泥沙主要淤积在万县—大坝区间,来水来沙量小时,主要淤积在清溪场—万县区间。代文良等<sup>[17, 18]</sup>对三峡水库156m、175m蓄水期间库区不同水文站含沙量变化、输沙量变化、级配变化等进行了分析。黄仁勇等<sup>[19]</sup>对三峡水库

蓄水前后库区不同水文站年均输沙量变化进行了对比分析。陈绪坚等<sup>[20]</sup>采用随机统计理论对三峡水库泥沙运动规律进行了分析。

向家坝和溪洛渡分别于 2012 年和 2013 年开始蓄水运用, 水库运用时间相对较短, 关于溪洛渡和向家坝水库泥沙输移规律的研究成果也相对较少, 目前关于溪洛渡和向家坝水库 2013 年和 2014 年排沙比研究成果表明, 不考虑区间来沙, 2013 年溪洛渡和向家坝水库排沙比分别为 10.4% 和 36%, 两库作为一个整体的排沙比为 3.76%, 2014 年(1~9 月)两库作为一个整体的排沙比为 3.14%, 几乎所有的入库泥沙都被两库所拦截<sup>[21~23]</sup>。

已有的研究工作在三峡水库沙峰输移规律研究方面做出了有益的探索。但由于受到实测资料较短等因素的限制, 已有成果均未就三峡水库沙峰输移特性及其与影响因素之间的关系开展全面深入的研究, 所以有必要进一步深入开展三峡水库蓄水运用后泥沙输移规律研究, 为新的水沙条件和水库优化调度条件下的水库泥沙调度提供理论基础。

### 1.2.2 水库泥沙冲淤数值模拟

早在 20 世纪 50 年代初期, 苏联罗辛斯基和库兹明已经使用一维数学模型对大型水库的淤积进行冲淤模拟计算, 20 世纪 70 年代泥沙数学模型的研究得到快速发展, 许多数学模型开始运用于水库泥沙研究。国际上常用的一维泥沙数学模型包括: 丹麦水利所 MIKE11 模型<sup>[24]</sup>, 美国陆军土木工程师兵团的 HEC、RAS 模型<sup>[25]</sup>, 法国国家水利所 SEDICOU 模型<sup>[26]</sup>等。随着计算机技术和数值模拟方法的不断进步, 我国的水库泥沙冲淤数值模拟技术得到了快速发展, 并在实际工程中得到了广泛应用。国内应用较为广泛的模型包括: 韩其为等研制的水库淤积与河床演变数学模型<sup>[27]</sup>、杨国录 SUSBED 系列模型<sup>[28]</sup>、长江科学院水库冲淤计算模型<sup>[29]</sup>、黄委会黄河水库一维泥沙数学模型<sup>[30、31]</sup>等, 这些模型已成功应用于我国众多水库的设计及调度方式优化中。

水沙数学模型作为除河工模型最为常用的泥沙冲淤预测工具<sup>[32]</sup>, 在三峡水库论证与设计阶段发挥了重要作用, 其中长江科学院和中国水利水电科学研究院以一维不平衡输沙理论分别建立的三峡水库一维恒定流水沙数学模型是目前比较成熟的数学模型, 它们在三峡工程泥沙问题研究中发挥了基础和关键性作用。周建军等<sup>[33~36]</sup>建立了三峡水库一维不恒定流水沙数学模型, 并采用数学模型对三峡水库双(多)汛限水位调度方案、三峡水库挖粗沙减淤等问题开展了深入研究, 在“十五”三峡工程泥沙问题研究中, 周建军在挟沙力计算公式、考虑泥沙絮凝、考虑支流库容和区间来水等方面对数学模型进行了改进<sup>[13]</sup>。李义天等<sup>[37~39]</sup>建立了一维不恒定流泥沙数学模型, 并对三峡水库汛末提前蓄水方案、入库水沙条件变化对

三峡库区淤积影响等问题进行了研究。彭杨等<sup>[32]</sup>建立了三峡库区非恒定一维水沙数学模型,模型中采用了张红武提出的不平衡输沙理论,并在悬移质挟沙力公式及推移质输沙率公式采用上对现有三峡水库泥沙模型进行了改进。中国水利水电科学研究院毛继新、方春明等<sup>[40, 41]</sup>建立了三峡水库一维非恒定流水沙数学模型,模型在“十一五”和“十二五”的三峡工程泥沙问题研究中得到了应用,并在模型库容曲线、考虑区间来水来沙、考虑泥沙絮凝、挟沙能力计算、恢复饱和和系数计算等方面对泥沙数学模型进行了改进。黄仁勇等<sup>[42, 43]</sup>考虑水沙输移过程中的非恒定性及众多支流的影响,建立了基于树状河网的三峡水库干支流河道一维非恒定流水沙数学模型,并进行了模型应用。闫金波等<sup>[44]</sup>、陶冶等<sup>[45]</sup>、假冬冬等<sup>[46]</sup>也都采用水沙数学模型对三峡水库泥沙问题进行了模拟研究。

在长江上游梯级水库泥沙冲淤数值模拟研究方面,乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝、三峡等各大型梯级水库在可研阶段均开展了水库泥沙问题的数学模型模拟预测研究<sup>[47~51]</sup>。近年来,毛继新等<sup>[52, 53]</sup>建立了金沙江一维非恒定流水沙数学模型,针对不同的研究项目,相继开展了金沙江乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝梯级水库 100 年和 300 年的泥沙冲淤预测计算。童思陈<sup>[54]</sup>以溪洛渡和向家坝水库为例,对大型河道型水库泥沙淤积的时空分布规律进行了模拟计算,通过模型计算研究得到了很多有意义的研究结论。赵瑾琼<sup>[55]</sup>开展了长江上游梯级水库泥沙淤积规律研究,并采用一维水沙数学模型对溪洛渡、向家坝、三峡水库进行了泥沙冲淤数值模拟计算。

目前,已有的研究已经在长江上游梯级水库泥沙冲淤数值模拟研究方面做出了大量的工作。但随着长江上游干支流水库群的大量兴建和不断投入运用,水库群的拦沙作用进一步加大,各水库调度方式随着工程建设进度也在不断发生变化,而已有的长江上游梯级水库泥沙模拟研究存在没有考虑其他干支流水库拦沙影响、考虑的拦沙水库数量较少、研究时使用的水库调度方式已经过时、预测计算时间较短(一般为 100 年,少数为 300 年)等问题。因此,有必要根据目前的长江上游干支流水库群建设进度、实际来水来沙条件变化、水库调度方式优化等情况,进一步深入开展长江上游梯级水库泥沙冲淤长期模拟预测研究,为梯级水库优化调度提供技术支撑。

### 1.2.3 水库泥沙调度

河流上修建水库后,库区水深增加、流速减缓,必然引起库区泥沙淤积,泥沙淤积到一定程度会减小其有效库容,影响水库综合效益。水库淤积是世界级难题,如何有效控制水库淤积,长期保持一定有效库容,是水库泥沙淤积研究的重要课题。影响水库淤积的因素主要有上游来水来沙过程、库区边界条件和水库调

度方式,其中水库调度方式是可以主动控制和决定淤积的因素。泥沙调度是指:“为控制入库泥沙在库内的淤积部位和高程,达到排沙减淤目的所进行的水库运行水位调度<sup>[56]</sup>。”水库泥沙调度减淤是目前控制大型水库泥沙淤积行之有效的办法,也是主要的方法<sup>[57]</sup>。

水库淤积防治的现实需求及防治经验的不断积累推动了水库泥沙调度技术的不断进步。最早的水库泥沙调度设想<sup>[58]</sup>由美国学者葛罗同等在 1946 年治理黄河初步报告中提出,其思想为在八里胡同建坝控制洪水并发电,坝底设排沙设备,每年放空排沙一次。Churchill<sup>[59]</sup>在 1947 年较早地开展了水库泥沙调节问题的研究分析,随后引发了许多学者<sup>[60-69]</sup>对水库泥沙调控问题的关注。李书霞等<sup>[70]</sup>开展了小浪底水库塑造异重流技术及调度方案研究,在研究异重流发生、运行及排沙等基本规律的基础上,根据水库的上下游实际条件制定了黄河调水调沙试验水库联合调度预案,在 2004 年成功塑造异重流并排沙出库,达到了减少水库淤积、优化出库水沙组合等多项预期目标。水库泥沙调度在黄河流域得到了广泛的应用与实践,其中利用小浪底水库和黄河干支流其他水库进行的黄河调水调沙,在推动泥沙调度实践和泥沙调度理论进步方面起到了积极的作用,总结出了基于小浪底水库单库调节为主的调水调沙、基于空间尺度水沙对接的调水调沙和基于干流水库群联合调度及人工异重流塑造的调水调沙三种泥沙调度模式<sup>[11]</sup>,并通过泥沙调度成功实现了小浪底库尾淤积形态优化、小浪底水库排沙减淤和黄河下游河道冲刷等多个泥沙调度目标。山西恒山水库采用定期泄空排沙的泥沙调度方式实现了水库的长期使用<sup>[71]</sup>。新疆头屯河水库通过采用低水位泄空冲刷、“高渠”拉沙、异重流排沙的泥沙调度方式,增加有效库容 828 万  $m^3$ ,防洪调蓄能力增加,延长了水库寿命也扩大了水库的兴利效益<sup>[72]</sup>。我国学者在探索三峡水库长期使用过程中,总结提出了“蓄清排浑”的泥沙调度方式,并在大量的水库调度实践中得到了成功应用,也赢得了国际同行的认可<sup>[73]</sup>。从 20 世纪 60 年代开始,林一山<sup>[74]</sup>、唐日长<sup>[75]</sup>提出了水库长期使用的设想和概念,韩其为<sup>[76]</sup>对长期使用水库的平衡形态及冲淤变形进行了详细的研究论证。论证与初步设计阶段的大量研究成果表明,三峡水库采用“蓄清排浑”的泥沙调度方式,可以保证水库的长期使用。林秉南等<sup>[77]</sup>1992 年针对减少重庆河段淤积,提出了三峡水库双汛限水位运行的设想,其后周建军等<sup>[34, 35]</sup>利用泥沙数学模型对方案进行了全面研究,先后提出了通过优化水库调度,减少淤积,增加防洪能力的双汛限和多汛限水位调度方案。长江上游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝等大型水库也都采用了“蓄清排浑”的泥沙调度方式<sup>[47-50]</sup>。

在水库水沙联合调度研究方面,张玉新等<sup>[78]</sup>运用多目标规划的方法,建立了水库水沙联调的多目标动态规划模型。杜殿勋等<sup>[79]</sup>采用系统分析的方法,建立了

水库水沙联调随机动态规划模型,并进行了三门峡水库水沙综合调节优化调度运用的研究。张金良<sup>[80]</sup>、胡明罡<sup>[81]</sup>、刘媛媛<sup>[82]</sup>等以三门峡水库为例,开展了水库泥沙冲淤计算和快速预测、基于改进的BP神经网络的水库多目标优化调度等问题的研究。刘素一<sup>[83]</sup>针对水库汛期降低水位排沙与电能损失情况,建立了研究水沙联调的动态规划模型,研究了水库排沙与发电的关系。万新宇<sup>[84]</sup>开展了基于相似性的三门峡水库水沙调度研究,对水库坝址附近的泥沙变化情况进行预测,据此进行水库水沙调度。万毅<sup>[85]</sup>开展了黄河梯级水库水电沙一体化调度研究,提出了实现一体化调度需要应用的多学科理论体系,研究了黄河梯级电站实行一体化调度的可行性和关键技术。陶春华等<sup>[86]</sup>开展了大渡河瀑布沟以下梯级水库水沙联合调度研究,提出了利用弃水造峰的梯级水库水沙联合调度方案,计算研究表明,瀑布沟、龚嘴和铜街子三座水库水位和流量的合理控制,可有效减少龚嘴和铜街子水库泥沙淤积。详细考虑三峡水库泥沙淤积与水库综合效益多目标优化的水沙联调的研究相对较少,彭杨<sup>[87]</sup>建立了水库水沙联合调度多目标决策模型,并将该模型应用于三峡水库汛末蓄水研究中,得出了一个能够满足水库防洪、发电及航运等要求的运行方案。纪昌明等<sup>[88]</sup>以三峡水库为例开展了基于鲶鱼效应粒子群算法的水库水沙调度模型研究,研究表明,在考虑水库汛期排沙的基础上,针对来水来沙情势有目的的提前蓄水可以很好地解决发电和泥沙淤积的矛盾。肖杨等<sup>[89]</sup>以三峡水库为例开展了基于遗传算法与神经网络的水库水沙联合优化调度模型研究,研究表明,利用加速遗传算法和自适应BP神经网络来计算模拟水沙联合优化调度是有效可行的。随着大量水库的修建,长江上游梯级水库水沙联合优化调度将是今后更重要的研究方向,甘富万<sup>[57]</sup>开展了基于遗传算法的三峡水库排沙调度与效益优化计算,同时还进一步开展了梯级水库排沙与效益联合优化调度算例研究。赵瑾琼<sup>[55]</sup>建立了梯级水库水沙联合优化调度模型,利用BP人工神经网络方法,研究提出了使溪洛渡、向家坝、三峡梯级水库长期发电效益最优的蓄水时间组合。

三峡水库自2008年汛后175m试验性蓄水运用以来,库尾河段出现了自然情况下的汛后走沙现象消失、走沙期后移至汛前消落期的新现象,同时,三峡水库开展了汛后提前蓄水和汛期中小洪水调度等优化调度实践,使汛期水位抬高运行的时间比初步设计方式有较大增加,也相应降低了水库输沙排沙能力和库尾走沙能力。针对库区泥沙冲淤规律新变化及水库优化调度中的泥沙问题,三峡水库在近年来的实际调度中成功开展了多次库尾消落期减淤调度试验<sup>[90]</sup>和汛期沙峰调度试验<sup>[91]</sup>,取得了较好的水库减淤效果。但已有研究主要是针对三峡水库的,没有考虑上游梯级水库的作用,水库排沙主要在汛期,已有的三峡水库汛期沙峰调度研究成果,主要是根据三峡入库洪峰、沙峰传播的时间差异性,提出了“洪峰



到来时拦洪削峰，沙峰临近时加大泄量排沙”的沙峰调度模式，但只是提出了一个调度模式，并没有归纳总结出具体的沙峰调度方案，也没有给出具体的入出库流量、含沙量等关键调度控制指标。

受水库河道地形、河床组成、入库水沙、泥沙组成、泥沙来源、水库壅水程度、水库运用方式、泄流规模、排沙设施、水库大小、水库上下游流域环境等众多因素的影响，不同的水库有着不同的泥沙淤积特性和不同的泥沙淤积问题，也有着不同的泥沙调度需求，众多的影响因素和约束条件增加了泥沙调度的复杂性，也构成了泥沙调度的技术难点。水库泥沙调度的技术难点之一是泥沙调度理论的建立，具体包括水库调度方式影响下的库区泥沙输移规律和泥沙淤积规律的揭示，泥沙调度目标的确定，泥沙调度过程中合理水沙关系的确定等。水库泥沙调度技术的难点还包括泥沙调度过程中合理水沙关系的塑造技术、泥沙调度过程中的水文监测和预报技术、泥沙调度模拟技术、梯级水库泥沙联合调度技术等。“蓄清排浑”的泥沙调度方式已被证明是有利于水库长期使用的行之有效的泥沙调度方式，但由于“蓄清排浑”要求水库汛期长时间保持较低的库水位，对提高水资源利用效率不利，如何在充分发挥水库综合效益的同时，通过适时开展泥沙调度，以兼顾水库排沙减淤，也是目前水库泥沙调度的一个难点。

“蓄清排浑”是保障长江上游大型梯级水库长期使用的泥沙调度原则，但在目前入库泥沙大幅减少背景下，如果不考虑水库淤积平衡时间大幅延长的实际情况，继续僵硬地执行“蓄清排浑”泥沙调度原则，则会失去充分发挥梯级水库综合效益的有利时机，造成资源的巨大浪费。这就需要在水库实时调度中，在“蓄清排浑”调度原则的具体执行中，结合水库调度方式优化，给“蓄清排浑”的泥沙调度原则赋予新的意义，创新“蓄清排浑”泥沙调度原则的使用方法，丰富“蓄清排浑”泥沙调度原则的具体内容，研究提出水库优化调度背景下适用于实时调度的三峡及长江上游大型梯级水库泥沙调度方式。

### 1.3 主要研究内容

本书主要研究内容包括三峡水库蓄水运用后泥沙输移特性研究、三峡水库干支流河道一维非恒定流水沙数学模型研究、长江上游梯级水库联合调度泥沙数学模型研究、长江上游梯级水库泥沙冲淤长期预测计算研究、三峡及长江上游梯级水库汛期泥沙调度方案研究。研究思路可概括为先研究泥沙输移理论，再研究泥沙模拟技术和泥沙调度技术，最后形成泥沙调度方案集，如图 1.1 所示。

按照上述思路，本书共分为 7 章，各章节主要内容如下。

(1) 第 1 章为绪论。首先简要叙述了本书研究的背景与意义，然后分析了三峡