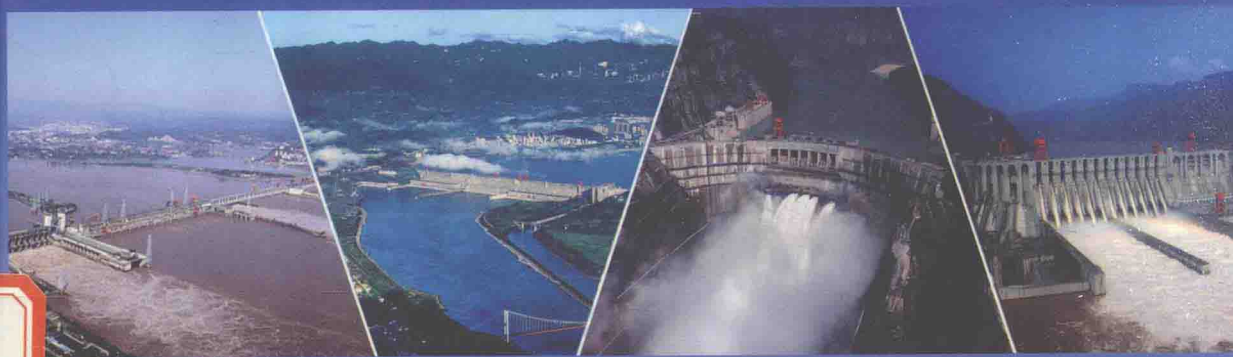


水利水电工程生态环境效应与 多维调控技术及应用

Multi-dimensional Regulation for Ecological and Environmental
Effects of Hydropower Engineering: Technique and Application

戴会超 毛劲乔 蒋定国 王煜 戴凌全 著



科学出版社

水利水电工程生态环境效应 与多维调控技术及应用

戴会超 毛劲乔 蒋定国 王 煜 戴凌全 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

水利水电工程在发挥巨大综合效益的同时,也会使上下游水文情势发生改变,引起库区支流富营养化、重要水生生物生境胁迫、通江湖泊江湖关系变化等生态环境问题,成为水利水电工程发展的瓶颈。本书紧密结合重大工程实践,通过多学科交叉研究,形成了水利水电工程生态环境效应与多维调控技术,研究成果包括:河道型水库富营养化及水华的模拟与调控、水利水电工程对重要水生生物的胁迫与调控、水利水电工程对通江湖泊生态环境的影响与调控。本书旨在阐述水利水电工程影响下典型水域生态环境变化机理,探讨适应于多时空维、多层次、多目标的多维调控技术,为水利工程影响下的流域生态环境保护提供科技支撑。

本书可作为水利工程、环境工程等学科的研究生教材,也可供科研人员、设计人员、工程管理人员和高等院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水利水电工程生态环境效应与多维调控技术及应用/戴会超等著. —北京:科学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-03-050418-0

I. ①水… II. ①戴… III. ①水利水电工程-区域生态环境-环境效应-研究-中国 IV. ①X321.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 262803 号

责任编辑: 胡 凯 李涪汁 曾佳佳 / 责任校对: 张怡君

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 许 瑞

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2016 年 11 月第一次印刷 印张: 19 1/4 插页: 2

字数: 456 000

定价: 99.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



序

FOREWORD

作为洪涝灾害频繁、水资源短缺的国家,加快具有水资源调配、防洪抗旱、能源保障、航运等综合效益的大型水利水电工程建设的步伐,是我国经济社会可持续发展的必然需求。水电作为技术最成熟、供应最稳定的可再生清洁能源,在改善电力结构、减少温室气体排放、应对气候变化等方面起到举足轻重的作用。水利水电工程在发挥巨大效益的同时,在生态环境保护等方面还存在一些亟须解决的问题。由于水利水电工程直接改变了河流水文、水动力、泥沙、水温条件,对地形地貌、水单元交互、水环境容量、栖息生境等不同方面产生深远影响。近年来,我国将生态环境保护放在十分重要的位置,加强生态文明建设成为“十三五”规划的重点议题,经济社会进入全新的发展阶段。生态文明建设正全面融入我国经济社会建设的各方面和全过程,人类不断反思水电开发给生态环境带来的不利影响,提出了减缓影响的多种改善措施。关注的焦点包括水库富营养化与水华问题、水库对重要水生生物栖息和繁殖的影响、江湖关系变化与通江湖泊生态环境问题、河口生态环境保护等。由于水利水电工程自身具有生态调控功能,在水利水电工程调度运行中融入生态因素,通过优化水库调度,最大限度地维护河流水文特征,有助于减轻水利水电工程对生态环境的不利影响。面对生态文明建设的新要求,在大规模水利建设的新局面下,如何保障流域水生态环境安全、维护河湖基本功能和健康,正面临巨大挑战。生态调控技术是今后很长一段时期水利水电工程发展的热点问题。

国外开展水利工程影响下的生态环境问题研究较早,欧美在 20 世纪 90 年代之前引领着这一技术领域的发展,以美国科罗拉多、田纳西、哥伦比亚等流域为代表开展了系列水库运行调控研究。西方发达国家在实施水库调度时,一般对河流的生态需求考虑较为充分,涉及河流形态、鱼类繁殖、水环境保护、湿地改良等许多方面,但在面对复杂多维约束和多效益目标耦合的水库群协同安全与调控方面仍存在不足。我国是世界水利水电工程建设的中心,在长江干流上建成的三峡、向家坝、溪洛渡等工程,在规模、难度、运行复杂程度上不断刷新着世界纪录,世界上无成熟经验可供遵循。我国近年来也开始结合重大工程,开展面向生态环境的优化调度研究与实践,但整体而言,尚缺乏针对水利工程影响下的河流水生态环境监测与调控技术储备。我国水电开发有其自身的特点和难度,在庞大人口与高速经济发展的多重压力下,水库生态调控必须从河流系统整体出发,充分考虑多类敏感水域、多时空尺度、多种生态环境效应的安全监测与优化调控需求,依靠自主创新突破技术瓶颈。

该书作者在 973 计划、国家杰出青年科学基金、教育部“长江学者和创新团队发展计划”、重大工程研究计划等项目的支持下,紧密结合重大工程实践,针对当前水利学科中的

热点问题和制约水电开发的关键科学问题开展了多学科交叉研究。该书成果主要针对水利水电工程影响下库区支流富营养化及水华、重要水生生物生境、江湖关系变化及调控等重要科学问题，形成了一整套水利水电工程生态环境效应与多维调控技术。书中介绍的水利水电工程影响下流域水文水质监控系统、大型水库多维多场耦合富营养化模拟系统、抑制支流库湾水华暴发调控方法等创新成果，解决了本领域若干关键技术难题。作者引入河流生态学、生态水文学的最新研究进展，借助大量第一手资料深入研究了重要水生生物生境对大坝建设运行的响应过程，提出的重要水生生物产卵场适合度模型及水库优化调度模型，丰富了基于水库生态调度改善水生生物产卵繁殖的理论与方法。传统水库生态调度研究范围大多限于单个水库的库区或坝下河段，而该书针对类似长江中游江湖河交汇复杂系统开展的工程优化调控研究，具有鲜明的特色，提出的有利于改善江湖关系的重大水利水电工程优化调度的原理与途径，对加深水库生态环境调控理论与方法研究起到了推动作用。该书作者在国内外高水平期刊发表了一批学术论文，受到国内外同行的广泛关注与引用评价。

大力实施创新驱动发展战略，推动转型升级，更加需要科技力量的支撑。该书是作者在水利水电工程生态环境效应与调控领域长期研究的成果结晶，在充分认识水利工程典型生态效应表征现象及其内在机理的基础上，建立了兼顾河流生态环境改善的多维调控理论与方法。这些原创成果服务于国家重大需求，全书内容涵盖了当前水利水电工程、水文学与水资源、水环境、水生态领域的主要研究热点。该书面向国家需求，基于过往的应用基础研究与技术攻关，较系统地介绍了自主研发的水利水电工程生态环境效应与多维调控技术，以期对相关水电工程管理提供一些技术性参考。相信该成果对目前较为关注的生态文明及长江经济带的建设也能起到一定的支撑作用。

中国水利水电科学研究院

中国工程院院士



2016年8月

前言

PREFACE

我国水能资源丰富,但也面临着洪涝灾害频发、水资源短缺等问题。大型水利水电工程具有能源保障、水资源调配、防洪抗旱、交通运输等巨大的综合效益,是我国经济社会可持续发展的基础支撑。我国水电装机容量已突破 3 亿 kW,建成和在建的有多座世界级大型水利水电工程,如三峡、溪洛渡、向家坝等。大型水利水电工程会显著改变自然河流的水文节律与水动力条件,易造成库区富营养化及水华、重要水生生物生境胁迫、通江湖泊江湖关系变化等生态环境问题,是当前国际水资源与水生态领域的热点问题,已引起全社会的广泛关注。在过往的很长一段时间里,我国水利水电工程建设运行主要侧重于防洪、发电、供水、航运等功能,对生态环境问题关注不够,成为制约水利水电工程可持续发展与流域水生态环境安全机制建设的瓶颈。

十八大提出了“五位一体”建设的总体布局,形成了“将生态文明建设全面融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设各方面和全过程”的发展新理念。推动长江经济带发展已成为国家重大发展战略,长江流域生态环境和调控备受关注。如何在“创新、协调、绿色、开放、共享”的理念指导下,提升长江防洪、发电、供水、航运及生态效益,是推动长江经济带发展的关键,事关经济社会发展全局。因此,如何充分认知水利水电工程对流域生态环境的影响,对流域生境现状与演变趋势做出科学评价和预测,形成科学可行的生态调控方法和技术,既兼顾工程综合效益发挥,又满足多类敏感水域、多时空尺度、多种生态环境效应的安全监测与优化调控需求,将对当前生态文明建设以及未来水利事业发展具有重要意义。近年来,国家高度重视水利水电工程生态环境效应与多维调控技术,在国家中长期科学和技术发展规划纲要、国家“十二五”科学和技术发展规划以及水污染防治行动计划中,均将相关问题列入重点研究领域。

作者面向上述国家需求,围绕水利水电工程开发过程中的水库富营养化及水华、重要水生生物生境胁迫、通江湖泊生态环境变化等制约水利水电发展的瓶颈问题,通过多学科交叉,运用原型观测、理论分析、模型开发、系统集成等手段,开展了多年研究。本书旨在结合上述创新研究成果,阐述水利水电工程影响下不同水域生态环境变化机理,探讨适应于多时间维、多空间维、多层次、多目标的多维调控技术,以期为我国水利工程影响下的河流生态环境保护提供科技支撑和参考。

水体富营养化与水华灾害是当今世界面临的重大环境问题,国内外围绕湖泊水体开展了大量理论与应用研究,但针对河道型水库的研究成果相对较少。在强人为干扰下,水库富营养化与水华问题具有复杂性与随机性等特征。本书较系统地介绍了水利工程影响下流域水文水质监控系统,阐述了适宜于河道型水库的水生态环境监测与预警方法;主要以三峡水

库典型支流库湾为实例,详述了大型河道型水库多维、多场耦合富营养化模拟系统的建立与应用;在上述基础上,探讨了水库调度运行对库区支流库湾水华的可调控性与适宜方法。

水利水电工程会阻隔鱼类洄游通道,改变河流水文及水动力环境,胁迫生物栖息地生境,对重要水生生物的生存和繁殖造成直接影响。我国多个流域面临着生物资源更替与衰退的严峻形势。本书主要聚焦长江等大型河流,评述了重大水电工程影响下四大家鱼、中华鲟等重要水生生物的生存现状与变化趋势;在阐述重大水利水电工程建设与运行对重要水生生物生境胁迫效应的基础上,借助产卵场适合度模型及水库优化调度模型,探讨了重要水生生物自然繁殖的可调控性与实现途径;结合重大水利水电工程生态调控实践,系统论述了促进重要水生生物自然繁殖的水利工程优化调控关键技术及其适用性。

江湖交汇复杂水系具有多维度耦合、强人为干扰的特点,长江中游江湖关系特指长江与通江湖泊洞庭、鄱阳两湖的交互关系。上游水库群的建设运行改变了江湖交汇水系的水文情势,对江湖关系产生巨大影响,引起一系列水环境和水生态效应。本书系统论述了两湖水情变化的主要驱动因素和两湖生态需水适宜范围的研究成果;基于江湖一体化水情动态模拟分析研究,介绍了三峡水库及两湖流域水库群特定时段联合优化调度研究成果,重点论述了满足通江湖泊最小生态需水、维护湖泊生态健康的水库群优化调控方法,为制定重大水利水电工程综合调度方案提供参考。

本研究得到国家科技支撑计划、国家重点基础研究发展计划(973计划)、教育部“长江学者和创新团队发展计划”、国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金面上项目的资助。相关的水利水电工程生态环境效应与调控研究成果,已应用于长江中游、金沙江下游、雅砻江等流域,以及三峡、向家坝、溪洛渡、乌东德、白鹤滩等重大工程中,产生了显著的经济、社会和生态效益。

全书共分为三篇,第1篇为河道型水库富营养化及水华的模拟与调控,第2篇为水利水电工程对重要水生生物的胁迫与调控,第3篇为水利水电工程对通江湖泊生态环境的影响与调控。本书在研究与撰写过程中,得到多家单位相关专家的帮助与指导,在此一并致谢。

由于本书涉及内容广泛,涵盖本领域诸多前沿问题,限于作者水平,书中难免存在疏漏或不当之处,敬请广大读者指正。

作 者

2016年8月

目 录

CONTENTS

序
前言

第 1 篇 河道型水库富营养化及水华的模拟与调控

第 1 章 引言 3

1.1 河道型水库富营养化及水华调控方法 3

1.2 河道型水库富营养化及水华调控新技术 4

1.2.1 水利工程影响下河道型水库水环境监测与评估 4

1.2.2 水利工程影响下河道型水库富营养化及水华模拟 6

1.2.3 抑制河道型水库水华暴发的水库调控 8

1.3 结论 9

参考文献 9

第 2 章 河道型水库水环境基本特征与富营养化问题 10

2.1 河道型水库库湾水华的水环境特征监测分析 10

2.2 影响河道型水库富营养化及水华的主因 12

参考文献 12

第 3 章 河道型水库库湾水华驱动因子的影响机制 14

3.1 典型库区支流库湾水动力特性模拟及其对水华的影响 14

3.1.1 典型支流香溪河水动力场主要影响因素研究 14

3.1.2 各典型时段库区支流二维水动力场数值模拟 27

3.1.3 库湾水华暴发期间典型区域三维水动力场数值模拟 36

3.1.4 不同区域水动力条件对水华暴发影响研究 49

3.2 典型库区支流库湾水温分布特性及其对水华的影响 54

3.2.1 温度对香溪河水动力场影响研究 54

3.2.2 不同特性区二维温度场对比分析 58

3.2.3 典型区域三维温度场数值模拟 60

3.2.4 水温对水华时空变化影响研究 67

参考文献 70

第 4 章 河道型水库库湾富营养化数学模型的建立与应用 72

4.1 河道型水库库湾富营养化模型的建立 72

4.2 河道型水库库湾富营养化模拟与预测	78
4.2.1 2005 年春季水华特征分析	78
4.2.2 控制磷输入对水华的影响	81
4.2.3 上游来流增加对水华的影响	83
参考文献	85
第 5 章 河道型水库富营养化与水华调控关键技术	86
5.1 水利工程影响下流域水文水质监控系统与方法	86
5.2 湖库营养状态综合判别方法	89
5.3 河道型水库富营养化及水华关键驱动因子监测及预警方法	91
5.3.1 适用于水库库湾的水流垂向紊动测量技术	91
5.3.2 河道型水库支流库湾水华的云体系架构预警系统及方法	92
5.4 针对水温分布特性的河道型水库水华调控方法	93
参考文献	94
第 6 章 结论	96
 第 2 篇 水利水电工程对重要水生生物的胁迫与调控	
第 7 章 引言	99
7.1 水利水电工程对重要水生生物的影响机理	99
7.1.1 物理阻隔作用	99
7.1.2 水文水质胁迫作用	100
7.2 重要水生生物自然繁殖的生态水文需求	101
7.3 面向重要水生生物栖息繁殖的调控方法及工程实践	102
7.3.1 生态调控技术与系统研究框架	102
7.3.2 重大水利水电工程生态调控实践	103
7.4 结语	104
参考文献	105
第 8 章 长江重要水生生物中华鲟产卵栖息地水环境需求研究	106
8.1 中华鲟自然繁殖水环境需求研究	106
8.1.1 “退水”需求	106
8.1.2 河床地形及水势需求	106
8.1.3 水质及水动力环境需求	107
8.1.4 影响中华鲟自然繁殖的环境因子主因子分析	113
8.2 葛洲坝修建前后中华鲟主要产卵场分布调查研究	114
参考文献	118
第 9 章 三峡蓄水后中华鲟产卵场水动力特性分析	120
9.1 中华鲟产卵场水动力学模型	120
9.1.1 基本方程	120
9.1.2 模型建立	122

9.1.3 模型验证	124
9.2 三峡蓄水后产卵日产卵场水动力数值模拟	127
9.2.1 工况拟定	127
9.2.2 各反演工况底层流速和水深分布	128
9.2.3 产卵区域流速分析	130
9.2.4 产卵区域水深分析	131
9.2.5 产卵区域紊动能分析	132
参考文献	132
第 10 章 中华鲟产卵场产卵适合度模型研究	134
10.1 河流内流量增量法	134
10.2 中华鲟产卵场产卵适合度模型	134
参考文献	137
第 11 章 水利水电工程运行对中华鲟胁迫问题研究	139
11.1 产卵场面积变化	139
11.2 产卵场水文及水动力条件变化	139
11.3 水库下泄水温对中华鲟自然繁殖的影响	143
11.4 溶解气体过饱和对产卵场水质的影响	145
11.5 水库富营养化对中华鲟产卵场水质的影响	149
11.6 葛洲坝河势调整对中华鲟产卵场的影响	149
11.7 大坝阻隔效应引起产卵群体结构变化	154
参考文献	155
第 12 章 葛洲坝水库调度与中华鲟产卵场产卵适合度相关性分析	156
12.1 葛洲坝出库流量与中华鲟产卵场产卵适合度相关性分析	157
12.2 大坝泄流方式与产卵场产卵适合度相关性分析	158
12.3 电站机组运行方式与产卵场产卵适合度相关性分析	161
12.4 水库调度与中华鲟产卵场适合度关系模型研究	162
12.4.1 葛洲坝水库调度与中华鲟产卵场适合度关系模型变量分析	162
12.4.2 BP 神经网络训练学习	163
参考文献	165
第 13 章 兼顾中华鲟繁殖需求的水库生态调度研究	167
13.1 水库生态调度概述	167
13.2 三峡—葛洲坝现行调度方式下中华鲟产卵场产卵适合度评价	168
13.2.1 中华鲟产卵期三峡—葛洲坝现行调度方式	168
13.2.2 现行调度方式下中华鲟产卵期产卵场适合度分析	168
13.3 兼顾中华鲟繁殖需求的生态调度	171
13.3.1 生态调度优化模型	171
13.3.2 生态调度优化模型求解	174
13.4 生态调度实例分析	176

13.4.1	葛洲坝水库基本资料	176
13.4.2	初始条件	177
13.4.3	约束条件	177
13.4.4	生态调度结果及分析	178
	参考文献	179
第 14 章	补偿四大家鱼自然繁殖条件水库生态调度研究	181
14.1	四大家鱼产卵栖息地水文水环境需求	181
14.2	水利水电工程运行对四大家鱼胁迫问题研究	183
14.2.1	产卵场规模减少	183
14.2.2	产卵场水文及水动力条件变化	183
14.2.3	水库下泄水温对四大家鱼自然繁殖的影响	183
14.2.4	溶解气体过饱和对产卵场水质的影响	185
14.2.5	大坝阻隔效应引起产卵群体结构及卵苗成色变化	185
14.3	补偿四大家鱼繁殖条件的生态调度模型	186
14.3.1	调度模型求解	186
14.3.2	典型丰平枯水年调度模拟结果	187
14.3.3	生态调度方案建议	187
	参考文献	188
第 15 章	结论	190
第 3 篇 水利水电工程对通江湖泊生态环境的影响与调控		
第 16 章	引言	195
16.1	通江湖泊水位变化趋势定性分析	196
16.1.1	洞庭湖水位变化趋势定性分析	196
16.1.2	鄱阳湖水位变化趋势定性分析	197
16.2	通江湖泊最低生态水位及最小生态需水量	198
16.2.1	生态需水内涵及评估方法	198
16.2.2	洞庭湖最低生态水位及最小生态需水量	201
16.2.3	鄱阳湖最低生态水位及最小生态需水量	202
16.3	改善通江湖泊生态环境的措施	204
16.3.1	工程措施	204
16.3.2	非工程措施	205
	参考文献	205
第 17 章	通江湖泊水情驱动因素变化及其对生态环境影响	207
17.1	通江湖泊水情及其驱动因素变化特征分析	207
17.1.1	Mann-Kendall 检验原理及其实现	207
17.1.2	通江湖泊水情驱动因素变化特征分析	209
17.1.3	通江湖泊水情变化特征分析	215

17.2 通江湖泊水情变化对生态环境影响	217
参考文献	218
第 18 章 通江湖泊水情特征动态模拟分析技术	220
18.1 基于数据驱动的通江湖泊水情动态模拟	220
18.1.1 多元线性回归技术在通江湖泊水位预测中的应用	220
18.1.2 基于支持向量机技术的通江湖泊水情动态模拟	225
18.2 基于数学模型的通江湖泊水情动态模拟	231
18.2.1 江湖一体化耦合水动力数值模型	232
18.2.2 模型率定和验证	238
18.3 三峡水库运行对通江湖泊水情及生态环境影响	242
18.3.1 三峡水库简介	242
18.3.2 三峡水库运行对长江中游水情的影响	242
18.3.3 三峡水库蓄水对通江湖泊水情及生态环境的影响分析	244
参考文献	246
第 19 章 水库群联合优化调度模型与方法	247
19.1 目标函数及约束条件	247
19.2 聚合水库的构建与分解	248
19.2.1 聚合水库的构建	248
19.2.2 聚合水库的分解	249
19.3 水库群优化调度的算法研究	250
19.3.1 传统的遗传算法的不足及改进	250
19.3.2 改进遗传算法在水库群优化调度中的应用	251
参考文献	254
第 20 章 改善通江湖泊生态环境的水库群优化调度	255
20.1 调度对象的选取与概化	255
20.1.1 长江干流控制性水库的选择	255
20.1.2 洞庭湖流域支流控制性水库的选择	256
20.1.3 鄱阳湖流域支流控制性水库的选择	257
20.1.4 调度水库的聚合	257
20.2 关键调度期和计算时段	258
20.2.1 关键调度期的确定	258
20.2.2 计算时段划分	258
20.3 情景及工况设置	259
20.4 面向洞庭湖生态需水的水库群蓄水期优化调度	260
20.4.1 调度目标	260
20.4.2 约束条件	260
20.4.3 调度结果及分析	261
20.5 面向鄱阳湖生态需水的水库群蓄水期优化调度	275

20.5.1 调度目标·····	275
20.5.2 约束条件·····	275
20.5.3 调度结果及分析·····	275
20.6 水库生态调度对发电量的影响评估·····	290
参考文献·····	291
第 21 章 结论·····	293
彩图	

河道型水库富营养化及水华的 模拟与调控

第1章 引言

第2章 河道型水库水环境基本特征与富营养化问题

第3章 河道型水库库湾水华驱动因子的影响机制

第4章 河道型水库库湾富营养化数学模型的建立与应用

第5章 河道型水库富营养化与水华调控关键技术

第6章 结论

第1章 引言

我国水资源较为短缺,洪涝灾害又十分频繁,加快具有防洪、发电、供水、航运等综合效益的水利水电工程建设步伐是社会经济可持续发展的必然需求。经过多年大规模建设,我国各大流域已建成多座水利水电工程,发挥了巨大的综合效益。但与此同时,水电工程建设和运行过程中潜在的生态环境效应还有争论,成为我国水利事业进一步发展的瓶颈。水库建成运行后上下游水文情势及水动力条件发生改变,可能引发诸如库区富营养化及水华灾害等生态环境问题。水库水体一旦接受过量的营养物质,在适宜的水文、水动力和气象条件下易暴发水华,导致水生态系统的破坏,对流域水环境和水质造成威胁。如三峡水库蓄水后,在库区香溪河、大宁河、小江等支流库湾出现的水华问题,引起广泛关注^[1,2]。

国内外开展了大量的湖泊水体富营养化和水华问题研究,如太湖、巢湖、滇池、华盛顿湖(Lake Washington)等,但针对人为影响强烈、水位变幅大、水动力特征多变的河流及水库的相关机理研究较为有限,北美的圣劳伦斯河(Saint Lawrence River)与澳大利亚达令河(Darling River)是其中比较典型的研究案例。在河道型水库富营养化及水华治理方面,常见方法主要借鉴了湖泊的相关水环境治理经验,如污染源控制、化学方法、生物控藻等技术。水利工程影响下水库水域的水文、水动力过程有其自身的规律,上述处置方法在实际应用时,可能会出现适用性不强、处理效果不佳、运营成本过高等实际问题。水利工程对河流敏感水域生态环境的影响具有两面性,既有生态环境效应,也有生态调控功能。因此,重大水利工程建设运行对流域系统水生态环境的影响及调控机制,是当前国际水文学、水环境和水资源管理领域的研究热点。

水库生态调度是较有应用前景的工程改善手段,但目前国内外研究水平尚不能满足我国的实际需求^[3]:长期以来,我国水电开发和水库调度应用是以“技术经济优先”为导向,对水利工程生态环境效益及调控还缺少系统性的认识。分析国际上田纳西河流域(Tennessee River)、中央河谷工程(Central Valley Project)、科罗拉多河流域(Colorado River)等水库生态调度研究现状表明:一些发达国家在水利水电开发的过程中对生态环境问题关注较早,但多局限于水电工程下游生物栖息环境、水源地水质保护、生态流量等方面,对我国实施针对库区富营养化及水华调控管理的可借鉴性不足。因此,如何通过水库生态调控改善河道型水库库区内富营养化并进而抑制水华,是当前水库水环境管理所面临的一个重要课题。

1.1 河道型水库富营养化及水华调控方法

河道型水库富营养化及水华问题是水利水电工程生态环境效应在库区的直观体现,其本质原因是自然河流水文情势及水动力特征被人为改变后所引发的环境胁迫。在水利工程调度的影响下,河道型水库形成了较为独特的地理环境、水文情势及水动力变化特征:由于河道型水库的深宽尺寸远小于纵向长度,在上游来流流量与坝前蓄水位的周期性变化影响

下,兼具河流与水库的双重特性,在不同时段会呈现出以湖泊形态或河流流态为主的周期性变化;同时,库区支流的子流域上游来水量通常较小,在大坝蓄水后受到库区主流高水位顶托的作用,所形成的半封闭式支流库湾是出现富营养化及水华灾害的主要区域^[4]。

针对河道型水库水华开展水利工程生态调控,需在机理研究的基础上建立一体化调控方法。作者经过长期的机理与工程相结合研究,提出了水利水电工程影响下的河道型水库富营养化及水华调控系统,包括“监测与评估”、“模拟方法”、“调控方法”三部分,分别对应监测评估、模拟预测、优化调控三个目标(图 1.1)。其中,针对河道型水库的水环境监测与评估技术研究,是在地理信息、水下地形、气象水文、污染源、调度工况等基础数据与背景资料的支撑下,用于分析水库富营养化演变及水华生消机理,为后续所建模型提供依据;针对河道型水库的富营养化及水华模拟技术研究,有助于加深理解河道型水库水生态系统的非线性与复杂性,也为优化调控提供预测分析手段;通过有机整合上述方法,在阐明水利工程影响下水动力、水温环境变化对支流库湾水华作用的基础上,进一步借助水库生态调度模型方法,可提出有利于抑制河道型水华暴发的针对性调控准则。

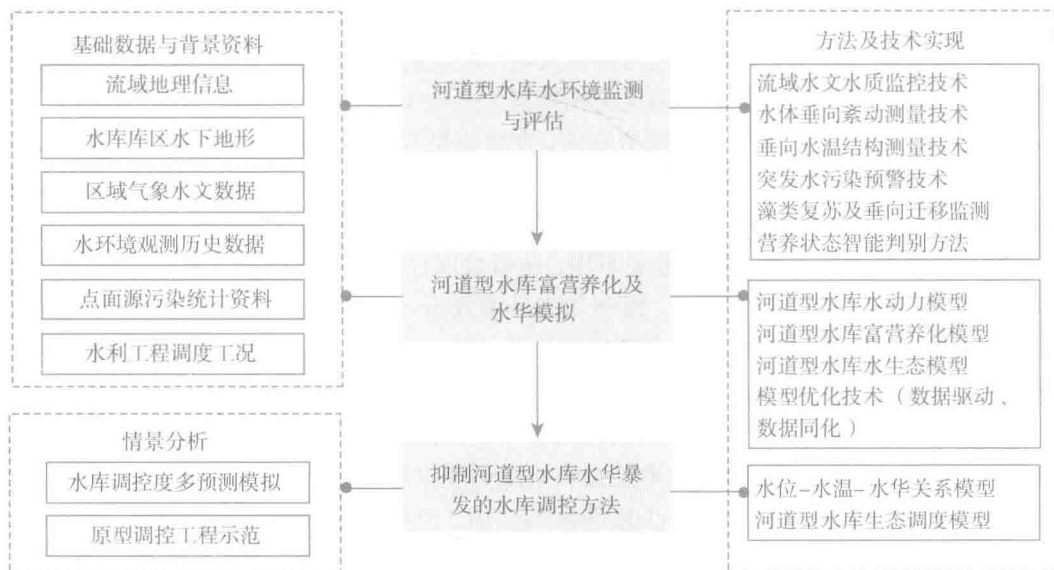


图 1.1 河道型水库富营养化及水华调控系统及研究方法

1.2 河道型水库富营养化及水华调控新技术

1.2.1 水利工程影响下河道型水库水环境监测与评估

河道型水库水华暴发与分布受到水利水电工程的强烈影响^[5]:一方面,水库水动力条件的周期性变化对藻类浓度施加对流作用,水流形态则通过影响营养盐浓度分布对藻类生长产生间接作用;另一方面,在频繁变化的水位涨落和水温垂向分布的背景作用下,水体微尺度垂向紊动强度也影响到藻类生长与沉降过程^[6]。因而,全面掌握流域水文水质的动态变化,是开展库区水华暴发驱动机制研究的基础,在构建河道型水库水环境监测与评估方法时,需