

水源型水库富营养化自动监测 与控制技术研究

Automatic Monitoring and Control Technologies
for Eutrophication in a Water-source Reservoir

纪鸿飞 郑西来 © 著



中国海洋大学出版社
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

水源型水库富营养化 自动监测与控制技术研究

纪鸿飞 郑西来 著

中国海洋大学出版社

• 青岛 •

图书在版编目(CIP)数据

水源型水库富营养化自动监测与控制技术研究 / 纪
鸿飞, 郑西来著. —青岛: 中国海洋大学出版社,
2017. 8

ISBN 978-7-5670-1539-5

I. ①水… II. ①纪… ②郑… III. ①水库—富营养
化—水质监测 ②水库—富营养化—水质控制 IV. ①X524

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 204803 号

出版发行	中国海洋大学出版社	
社 址	青岛市香港东路 23 号	邮政编码 266071
出 版 人	杨立敏	
网 址	http://www.ouc-press.com	
电子信箱	1193406329@qq.com	
订购电话	0532-82032573 (传真)	
责任编辑	孙字菲	电 话 0532-85902342
印 制	青岛海大印务有限公司	
版 次	2017 年 11 月第 1 版	
印 次	2017 年 11 月第 1 次印刷	
成品尺寸	185 mm × 260 mm	
印 张	14.5	
字 数	335 千	
印 册	1~1000	
定 价	46.00 元	

发现印装质量问题, 请致电 17763319178, 由印刷厂负责调换。



前言

PREFACE

本书在区域自然环境概况调查的基础上,自主设计了环境监测数据采集器,并基于 Arc Engine 软件建立了水库水质自动监测及预警系统;根据系统的水质监测资料,对产芝水库及其支流的污染现状进行了综合评价;采用 AQUASEA 二维模型,预测了产芝水库的富营养化变化趋势;采用不同模拟试验,深入研究了两级垂直流土地系统处理入库河水的最佳工况和去除效果,建立了不同温度和不同扰动条件下底泥氮磷释放通量与释放时间之间关系,预测了多污染源共同影响下不同水文年水库的水质分布,优化了聚硅硫酸铝铁抑制底泥磷释放的内部配比和投加量,揭示了各因素对生态调度对底泥氮磷污染治理的影响机制。

本书共 11 章及附录。纪鸿飞博士撰写了大部分的章节,郑西来教授负责本书的整体构思和结构设计,并撰写了部分章节。具体分工如下:

第 1 章“绪论”,由郑西来撰写;

第 2 章“研究区环境概况”,由纪鸿飞、郑西来撰写;

第 3 章“产芝水库及其支流污染现状”,由纪鸿飞撰写;

第 4 章“原位水质自动监测系统设计”,由纪鸿飞撰写;

第 5 章“基于 GIS 的水质预警软件设计”,由纪鸿飞撰写;

第 6 章“地表水水质评价和预测方法”,由纪鸿飞撰写;

第 7 章“水库富营养化预测”,由纪鸿飞撰写;

第 8 章“入库河流污染垂直流处理技术研究”,由纪鸿飞撰写;

第 9 章“底泥氮磷释放规律试验研究”,由纪鸿飞撰写;

第 10 章“底泥中氮磷释放的控制技术研究”,由纪鸿飞撰写;

第 11 章“结论”,由郑西来、纪鸿飞撰写。

附录由纪鸿飞编写。

课题组的博士生张博、刘杰、宋帅、陈蕾参与了项目研究和资料整理工作,在此一并表示感谢。

本书适用于环境科学、环境工程、水文水资源、水利工程、地质工程等专业的广大科技人员、管理干部、大学生和研究生阅读和参考。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请专家和读者不吝指教。



目 录

CONTENTS

第 1 章	绪 论	1
1.1	水体富营养化及其危害	1
1.2	国内外研究进展	2
1.3	主要研究内容	8
第 2 章	研究区环境概况	10
2.1	地理位置	10
2.2	气象	11
2.3	水文	11
2.4	地形与地貌	12
2.5	环境背景	12
第 3 章	产芝水库及其支流污染现状	15
3.1	样品的采集与分析	15
3.2	水库水质变化特征	16
3.3	入库河流水质特征	21
3.4	水环境质量现状	24
第 4 章	原位水质自动监测系统设计	26
4.1	水质自动监测系统结构设计	26
4.2	嵌入式环境监测数据采集器设计	30
4.3	监测中心上位机软件设计	33
第 5 章	基于 GIS 的水质预警软件设计	38
5.1	系统开发应用环境	38
5.2	系统架构	38
5.3	基于 AE 的二次开发	39

5.4	水质评价及预测	41
第6章	地表水水质评价和预测方法	44
6.1	支持向量机在地表水水质评价中的应用	44
6.2	模糊综合评价法在地表水水质评价中的应用	50
6.3	BP人工神经网络在水质预测中的应用	54
6.4	小结	58
第7章	水库富营养化预测	61
7.1	模型原理	61
7.2	模型的建立	62
7.3	不同特征水文年水质预测	66
7.4	富营养化预测	81
7.5	小结	81
第8章	入库河流污染垂直流处理技术研究	83
8.1	试验材料	83
8.2	试验方法	85
8.3	启动试验	85
8.4	各因素对污染物去除效果的影响	88
8.5	优化条件下系统对污染物的去除效果	96
8.6	小结	98
第9章	底泥氮磷释放规律试验研究	99
9.1	水库底泥污染特征	99
9.2	底泥氮磷释放规律的研究	103
9.3	小结	108
第10章	底泥中氮磷释放的控制技术研究	110
10.1	聚硅硫酸铝铁抑制磷释放的技术研究	110
10.2	生态调度治理底泥氮磷污染的技术研究	114
10.3	小结	123
第11章	结 论	124
附 录		126
	附录一 地表水环境质量标准 GB 3838—2002	126
	附录二 《水环境监测规范》(SL 219—2013)	136
参考文献		216

1.1 水体富营养化及其危害

1.1.1 水体富营养化

“富营养化”一词来自于希腊文,意即“富裕”。只从字面上来看,“富营养化”的意思是“喂养状态变好的过程”。本书中“富营养化”衍用于湖泊水库分类与演化的概念,基本含义是湖泊、水库等相对封闭,水流缓慢的水体中氮、磷等植物性营养元素的严重超标(氮的含量超过 $0.2 \sim 0.3 \text{ mg/L}$, 磷的含量大于 $0.01 \sim 0.02 \text{ mg/L}$)^[1],从而引起水体植物,如藻类及大型植物的大量生长,使得大面积的水域被藻类覆盖,严重阻碍了水体与大气的正常接触,导致水中溶解氧含量大大降低,而藻类的代谢死亡、微生物分解藻体及其他有机物也要耗去水中大量的溶解氧。

我国是一个多水库湖泊国家,天然水库湖泊遍布全国,面积为 $70\,988 \text{ km}^2$ 。水库湖泊在防洪、供水、航运、旅游及维系区域生态平衡方面发挥着巨大作用。近20年来,我国的水库湖泊富营养化日益严重。从全国范围来看,城市的湖泊水库目前已处于中富营养或异常营养状态,绝大部分的大中型水库湖泊已具备发生富营养化的条件或处于富营养化状态。随着湖泊水库富营养化的加剧,水华爆发频繁发生,将成为制约我国社会和国民经济持续发展的重大环境问题^[2]。

1.1.2 水体富营养化的危害

水体富营养化的危害主要表现在以下几个方面:① 破坏水体生态平衡;② 水体透明度降低;③ 影响水体的溶解氧;④ 向水体释放有毒物质;⑤ 散发腥臭异味;⑥ 增加供水成本;⑦ 影响水产养殖;⑧ 影响旅游和航运。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 水库富营养化评价

(1) 评价指标。选择正确的评价指标是对富营养化现象进行确切、快速评价的必要条件。与水质富营养化有密切关系的指标很多,主要分为物理、化学和生物学指标。

透明度是物理指标中最为常用的一种,它能够体现水体中光的辐射强度。化学指标中最常用的是 COD、TN 和 TP。藻类的生物量与 COD 的相关性较为显著,因此, COD 是比较方便有效的评价指标。不过,在水体中真正限制藻类生长的是氮磷,只有准确测定水体中的氮磷含量才能正确反映出水体中生物的生产力水平,才能对水体的富营养化状态做出正确的判断,进而为富营养化的防治起到很好的预警作用。

生物学指标主要是指由于富营养化而出现的优势生物的种类和数量,根据浮游藻类优势种群的变化可以评价富营养化的状态,常采用叶绿素-a (Chl-a)作为表征藻类生长的指标。

(2) 评价标准。富营养化评价的标准很多,国外比较成熟的有捷尔吉森判别标准、沃伦威德负荷量标准等。表 1-1 为 1996 年 Nurnberg 研制的湖泊水库富营养化标准和 1994 年 Hakanson 研制的海洋富营养化标准^[3,4]。国内有滇池的评价标准、太湖的评价标准、巢湖的评价标准、武汉东湖的评价标准和杭州西湖的评价标准等,各个标准相差不大。表 1-2 为我国滇池的富营养化评价标准。

表 1-1 湖泊富营养化标准(Nurnberg)和海洋富营养化标准(Hakanson)

Table 1-1 Standards of lake eutrophication (Nurnberg) and standards of sea eutrophication (Hakanson)

	营养状态	TN (mg/m ³)	TP (mg/m ³)	Chl-a (mg/m ³)	SD (m)
湖泊 (水库)	贫营养	<350	<10	<3.5	>4.0
	中富营养	350~650	10~30	3.5~9.0	2.0~4.0
	富营养	650~1200	30~100	9.0~25.0	1.0~2.0
	超富营养	>1200	>100	>25.0	<1.0
海洋	贫营养	<260	<10	<1.0	>6.0
	中富营养	260~350	10~30	1.0~3.0	3.0~6.0
	富营养	350~400	30~40	3.0~5.0	1.5~3.0
	超富营养	>400	>40	>5.0	<1.5

表 1-2 中国滇池的富营养化评价标准

Table 1-2 Standards of eutrophication of Dianchi in China

营养状态	SD (m)	TP (mg/L)	TN (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)	BOD ₅ (mg/L)	COD _{Mn} (mg/L)
贫营养	2.0	0.010	0.12	5.0	1.5	2.0
中营养	1.5	0.025	0.30	10.0	2.0	3.0
中富营养	1.0	0.050	0.60	15.0	3.0	4.0

续表

营养状态	SD (m)	TP (mg/L)	TN (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)	BOD ₅ (mg/L)	COD _{Mn} (mg/L)
富营养	0.7	0.100	1.20	25.0	5.0	7.0
重富营养	0.4	0.500	6.00	100.0	15.0	20.0
异常富营养	<0.1	>0.500	>6.00	>100.0	>15.0	>20.0

本书根据产芝水库的水质特征,对富营养化的评价指标进行了深入分析,最后,决定以中国滇池的富营养化评价标准为基础建立一个适合产芝水库的富营养化评价标准。表1-3为本书提出的产芝水库富营养化状态评价标准。

表 1-3 产芝水库富营养化评价标准

Table 1-3 Evaluation standards of eutrophication in the Chanzhi Reservoir

营养状态	TN (mg/L)	TP (mg/L)	COD _{Mn} (mg/L)	叶绿素-a (mg/m ³)	SD (m)
贫营养	0.12	0.01	2.00	5.00	2.00
中营养	0.30	0.025	3.00	10.00	1.50
中-富营养	0.60	0.05	4.00	15.00	1.00
富营养	1.20	0.10	7.00	25.00	0.70
重富营养	6.00	0.50	20.00	100.00	0.40
异常富营养	9.00	1.23	27.00	400.00	0.10

(3) 评价方法。自从20世纪起,国内外学者对水体富营养化评价方法进行了深层次的研究,并且提出了很多切实可行、形式多样的方法。根据其理论不同,主要分为以下几种:特征法^[5]、参数法^[6]、营养状态指数法^[7]、生物指标评价法^[8]、数学分析法^[9]以及基于3S技术的评价方法^[10~12]等。最常用的方法有参数法、模糊数学评价法^[13~17]、灰色理论评价法^[18~21]、人工神经网络法^[22~23]等。

根据产芝水库具体情况的不同,在对其他同类型水库的评价方法进行了比较分析的基础上,经研究决定本书采用改良模糊综合评判法对产芝水库富营养化进行综合评价。

1.2.2 水质自动监测系统

水质自动监测在国外起步较早。1959年美国开始对俄亥俄河进行水质自动监测;1960年纽约州环保局开始着手对本州的水系建立自动监测系统;1966年安装了第一个水质监测自动电化学监测器;1973年全国水质监测系统有12个自动监测网,每个自动监测网由4~15个自动监测站组成;1975年在全国各州共有13000个监测站建成为水质自动监测网。在这些流域和各州(地区)分布设置的监测网中,由111150个站组成联邦水质监测站网——国家水质监测网。连续多参数水质测定仪是在20世纪80年代才开始使用的。在监测设备方面,广泛应用现代尖端的微电子技术、嵌入式微控制器技术,并做到智能化的数据采集、分析和运算,水质监测完全实现了自动化。目前,世界上已建成的自动监测系统,既有全自动联机系统,也有半自动脱机系统,例如澳大利亚GREENSPAN公司、德国GIMAr公司、美国ISOC HYDROLAB等公司、日本日立制作所和卡斯米国际株式会社

等都生产技术成熟的在线水质自动监测系统,但大部分是以监测水质污染的综合指标为基础的,包括水温、混浊度、pH、电导率、溶解氧、化学需氧量、生化需氧量、总需氧量和总有机碳等。

在我国,水利系统的水质监测工作大概经历了三个阶段^[24]:第一阶段为1956~1970年,主要任务是收集江河天然水质资料,监测天然水化学成分;第二阶段为1970~1985年,这是我国水质监测工作步入全面发展的初期,水污染监测工作在水利部门开始全面展开,水利部增设了水质监测中心,1984年又成立了水利部水质试验研究中心,同年颁发了《水质监测规范》,为水质监测工作的规范化管理奠定了基础;第三阶段为1985年至今,这是水质监测工作相对快速发展的阶段,监测项目涵盖污染状况的绝大部分,实现了对水质的有效监测,同时,注重保证监测数据的可靠性。对于水质在线监测系统的研究,国内外都进行了较多的研究^[25~32]。卢文华等^[33]利用MCS-51系列89C51单片机组成单片机主机和数据采集从机,并在检测中心设有一台Pentium11的PC机,负责将所收集的数据进一步处理并以丰富的图表显示输出。李欣等^[34]开发出基于Labview的水质监测虚拟仪器,通过系统设置了采样点数、采样频率等,可以同时监测氟离子、氯离子、溶解氧、COD或BOD进行监测。郭小青等^[35]提出一种基于CAN总线的水质参数在线监测系统。该水质参数在线监测以PC机为主机,以具有CAN总线控制功能的80C592单片机及外围电路和各类参数监测仪表为分机,以CAN总线通信接口适配卡连接构成系统结论认为,该系统能够实时监测pH、氧化还原电势、浊度、电导率、溶解氧、余氯等水质参数。

1.2.3 水库富营养化预测

随着对水体富营养化形成机理认识的不断深入,富营养化模型无论在理论上还是实践上都取得了较大的发展,截至目前,建立了大量复杂程度不同的水库富营养化模型^[36],主要包括营养盐模型^[37~47]、浮游植物生态模型^[48~54]、生态-动力学模型^[55~60]等。

随着科学技术的发展,国外自20世纪60年代起,一些大型的综合模型已经开发成软件,现将部分列于表1-4中。

表 1-4 国外常用的富营养化模型及其特征
Table 1-4 Foreign eutrophication models and their characters

名 称	维 数	类 型	含生物组分	与水动力模型连接	与 GIS 连接
AESOP	1-3	物理	√	×	×
BATHUB	1	物理	√	×	×
CEQUALR1	1	物理	√	×	×
EFDC	1-3	物理	√	√	×
EUTROMOD	1	物理	√	×	×
HEM	1-3	物理	×	√	×
MIKE	1-3	物理	×	√	√
PHOSMOP	1	物理 + 经验	√	×	×
WASP	1-3	物理	√	√	×

续表

名 称	维 数	类 型	含生物组分	与水动力模型连接	与 GIS 连接
WQMAP	1-3	物理	√	√	×
WQRRS	1-3	物理	√	√	√
AQUASEA	2	物理+经验	√	√	×

注：“√”相关，“×”不相关。

结合产芝水库的自身特点,本研究采用 AQUASEA 模型对产芝水库的水质进行预测。AQVASEA 是用于解决水流和污染物运移问题的软件包,采用 Galerkin 有限元方法求解。开发始于 1983 年,用于求解二维的水流水质问题。从 1992 年起,软件不断地升级,并用世界范围最难问题来进行测试。模型包含水动力水流动模型和运移-扩散模型。前者能模拟湖泊、水库、河口、海湾和滨海地区,不同动力场作用下的水位变化和水流流动。软件用数值有限元法近似法,依据测深、基底阻力系数(Chezy 系数或曼宁数)和风力场的基础信息,计算水位和水流。模型单元可以随潮汐的变化,多次饱和或疏干。

1.2.4 水质预警系统

目前环境数学模型的研究和应用已经比较成熟,集成到系统中也已经有一些尝试。如广西桂江的水质预警预报系统,是由广西壮族自治区水文水资源局与广西壮族自治区水环境监测中心于 1996 年 8 月开始进行并于 1998 年 6 月结束,现在系统已投入运行。这个系统对桂江进行了水质监测和污染源调查及综合分析评价,查明主要的入河污染源及污染物,建立了以广西水环境监测中心为中心,桂林、梧州水环境监测中心为分中心,辐射桂江流域的水质、水量监测网及信息传输网络;建立了一维稳态、一维非稳态的防污水质预警预报模型及其管理系统;提出了污染物总量控制方案和动态水环境容量控制方法。这个系统模型库比较充实,但与信息数据量越来越大的实际情况不能很好地对接。没有应用 GIS 软件来处理海量数据及空间分析^[61~65]。在国外,基于 GIS 区域预测研究也做了大量工作^[66~68],例如基于 GIS 的水质系统有爱尔兰国立大学都柏林学院水资源研究中心研究开发的流域水管理决策支持系统,该系统采用 GIS 与各种信息和信息处理方式相结合,用于区域水环境管理的模式;在国内,朱振卿^[69]等开发的汉江流域水污染防治规划 GIS 系统实用性较广,但仍然限于信息管理的模式,在应用 GIS 与模型结合方面还需改进;侯国祥^[70~72]等利用组件 MapObjects 开发汉江水污染控制信息系统,该系统综合运用计算机信息技术,实现了汉江流域的水环境信息的集中、高效管理。

1.2.5 水库富营养化控制技术

水库富营养化已成为全球面临的主要环境难题之一。目前,治理水库富营养化,主要从两个方面来进行:一是控制外源性营养物质的输入,如截污分流和污水集中处理,主要用于控制点源污染;二是减少内源性营养物质的负荷,如微生物修复、底泥疏浚、化学法、人工湿地、水生植被恢复等,其目的是控制面源污染和加快湖泊水库的恢复速度^[73~76]。依据目前的技术条件,点源污染通过截污和污水的集中处理已经能够得到很好的治理;内源污染和面源污染成为水库富营养化控制的两大难题,这也是近年来水领域的研究热点。

(1) 面源污染治理技术。面源污染已成为水环境的最大污染源^[77], 而来自农田的氮、磷在面源污染中占有最大份额^[78], 研究表明, 水体中的 TP 与流域内农业用地的比例呈正相关关系^[79]。在众多入库污染途径中, 入库河流是水库的“咽喉”, 很多污染物从入库河道流入水库。经地表径流汇集后, 入库河流可以携带水库流域内的各种工业废水、居民生活污水、养殖废水和库区周围土壤中残留的化肥、农药、垃圾杂物等污染物形成入库污染^[80]。

截至目前, 国内外针对入库河流污染治理进行多方面研究, 主要有化学氧化法, 采用的氧化剂有高锰酸钾^[81]、氯气^[82]、臭氧^[83~85]、过氧化氢^[86]、过碳酸钙^[87]、氧化耦合絮凝剂^[88]等, 该方法对去除水中的污染物有很好的效果, 但运行费用昂贵; 生物氧化法, 是一种借助微生物群体的新陈代谢作用, 有效去除或者减少污染物的处理技术, 主要有生物接触氧化法^[89]、生物陶粒滤池法^[90]、生物流化床^[91]和粗滤慢滤去除氨氮工艺^[92]等, 虽然生物氧化法能够有效去除污染物, 运行费用低, 但是在工艺运行过程中影响因素较多, 操作管理难以规范; 吸附法, 是采用活性炭^[93]、沸石^[94]、活化硅藻土^[95]等吸附水中的污染物质, 进而净化水质, 此技术对水中有机物有良好的吸附效果, 但尚处于研发阶段; 另外生物活性炭法^[96]、混凝法^[97]等研究取得了良好的效果, 但是在实际应用中还存在一些问题, 需要进一步研究。湿地系统, 美国科学家很早就利用湿地生态系统作为水库周边流域和库区之间化学和水文的缓冲器, 提出了保护库区水质的湿地生态工程^[98]。但由于天然湿地净化容量的效率差, 现在不鼓励采用天然湿地处理入库河水。我国学者金相灿等提出了非点源前置库和非点源污染河流控制工程模式, 戴金裕^[99]等对太湖入湖河道污染物的控制做了生态工程动态模拟研究。刘文祥等^[100]用滇池边低洼弃耕地改建了 1 257 m² 的人工湿地, 该湿地正常运行时对 TN、TP 去除率分别为 60%、50%。

目前, 人工湿地成为治理入库河流污染的主流技术, 人工湿地类型主要有表面流人工湿地、潜流人工湿地及组合人工湿地系统三类。其中潜流人工湿地根据水流形态又分为平流和垂直流两类。张冬青等人比较了国内表面流、水平潜流、垂直流和组合系统的人工湿地运行数据, 指出垂直流对于人工湿地的 TSS、BOD₅、COD 和 TP 的去除率最高。

垂直流土地系统根据水流方向分为下行垂直流和上行垂直流。如下行垂直流系统, 水流在填料床中基本呈由上向下的垂直流动, 水流经床体后被铺设在出水端底部集水管收集而排出。这种土地系统节约建设面积, 利于脱氮除磷, 而且处理效果稳定。但考虑到除污效率, 在以往的研究中, 很少单独采用上行或下行垂直流土地系统, 而采用复合垂直流的方式。近几年对于复合垂直流的研究日益兴起, 且应用于处理污水的研究很多, 本书将采用改进的复合垂直流土地系统(两级垂直流系统)对入库河水进行治理。两级垂直流土地系统由上行池和下行池组成, 中间设有隔板, 上行池和下行池中间有生物填料, 与普通复合垂直流的不同之处在于上行池和下行池之间通过集水管连通, 具体装置见第 6 章。

(2) 内源污染治理技术。当水库的点源性污染和面源性污染得到有效地控制后, 内源污染就成为水库污染治理的重点, 也是治理的难点。在生物、化学和物理的相互作用下, 沉积物在泥水界面之间互相转化迁移, 污染物质对上层水体继而构成严重威胁, 在富营养化程度越轻的水库, 这种现象越不明显, 在富营养化程度越重的水库, 这种现象越是显著^[101~104]。据南湖和滇池的相关报道可知, 当外源污染得到有效控制后, 沉积物中释放

的总磷可以使得库体或者湖体中磷的水平保持现状达几十年之久^[105]。

到目前为止,沉积物污染的治理技术已有了明显的分化,主要有原位处理和异位处理两种技术,实践表明,这两种技术均得到很好的发展。沉积物异位处理技术主要包括疏浚和疏浚后的处理,主要通过对水库沉积物进行机械挖除来转移或者减少沉积物中污染物的释放^[106]。国内采用疏浚技术的湖泊水库有滇池、巢湖、西湖等^[107]。

疏浚技术具有很多优点,也有很多的缺点,其最显著的缺点是转移以后的次生污染^[108~112]。

原位治理技术指运用物理、化学或者生物方法减少沉积物的迁移、释放,降低其对上覆水体的污染。按照治理技术的方法不同可以分为物理法、化学法、生物法和生态法。物理法一般都是采用曝气的方法来破坏水体的分层,加强水体上下层中温度和溶解氧的对流,使得水体中的污染物得到充分的降解,进而去除底泥污染。此技术治理效果较好,但其成本较高、对水体生态系统破坏严重,进而带来新的次生污染。

生物法是通过沉积物中生物的降解功能,使得沉积物中的污染物质改变其自身的结构和功能,进而降低其毒性、活性,阻止污染物在水泥界面的迁移和转化,从而使沉积物污染得到治理。在实际工程中,通常会根据需求不同选择不同的生物,如植物、动物、微生物和综合组合。由于生物的生长需要较长的周期和较适宜的环境,培养起来比较困难,现阶段,对植物和动物的研究还相对较少,只有少量关于芦苇、蚯蚓等对沉积物中重金属的处理的研究^[113,114]。生物法中处于主导地位的还是微生物,微生物的生长周期较短,对于水体来说也相对比较安全,而且比动物或者植物的成本都要低,这些优点使得其成为生物治理的一个热点。但是由于水库中泥水界面物质转换迁移相当复杂,在实际操作中具有很大的难度,实例很少,在发达国家中也是仅处于中试的阶段^[115]。化学法是通过投加抑制剂、覆盖剂或者其他化学药剂等方式,进而使得沉积物中的污染物质得到固定或者抑制,阻止其向水体中释放。到目前为止应用较多的是硝酸盐($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 和 NaNO_3)、铝盐($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 和 NaAlO_2)。硝酸盐能够把硫化氢迅速氧化,并且能被有机物利用,铝盐与磷的结合物比较稳定,即使在厌氧环境下磷也不会重新释放出来,另外磷铝絮凝剂还可以吸附胶体物质和水中的有机物质。美国学者 Welch 和 Cooke 研究了 21 个用铝盐治理沉积物污染的湖泊水库,研究表明,当水体中没有较大型的植物时,用铝盐治理水库底泥污染有效期达 10 年之久。运用化学方法治理沉积物污染,其优点是投资较少,能耗相对较低。但是其显著的缺点是化学物质的投加会对沉积物种的生物带来一定的影响,另外,化学药剂或多或少都会释放毒性,使水体的使用功能大大降低。因此,开发无毒、絮凝性好、凝聚力强、成本低、处理效果好的新型处理剂,成为当今原位处理的热点问题。

PSAFS 是以硅酸钠、硫酸铁和硫酸铝为原料制备的一种无机高分子絮凝剂。赵会明等^[116]进行 PSAFS 除磷研究表明,PSAFS 是一种理想的除磷絮凝剂,其性能优于聚合硫酸铝铁等絮凝剂。同时 PSAFS 本身无毒、不含氯、低铝、高铁,由于硅的引入使其具有较强的吸附力、凝聚力、沉降性好和在水介质中稳定性好等特点,近年来其在环保领域中的应用日渐受到关注。目前却少有关于 PSAFS 在控制底泥磷释放的应用报道,本书通过优化 PSAFS 的内部配比和投加剂量抑制底泥磷释放,为有效控制水体内源磷释放提供新思路。

(3) 生态调度技术。投加化学药剂抑制底泥污染,虽然可以快速解决底泥污染的问题,但是对于水源型水库的污染治理,人们多少带有抵触心理。因此,寻求一种能从根本上治理内源污染、易于操作且又能被人们接受的技术,成为本研究的另一个创新点。

最初水库调度方式以防洪调度和兴利调度为主,从保护生态系统的观点来看,没有涉及生态因素。生态调度是伴随水利工程对河流生态系统健康如何补偿而提出的一个新概念。从生态安全的角度来讲,生态调度概念的提出具有现实意义。董哲仁提出了水库多目标生态调度方法^[117],其定义为在实现防洪、发电、供水、灌溉、航运等社会经济多种目标的前提下,兼顾河流生态系统需求的水库调度方法。蔡其芬^[118]提出,在满足坝下游生态保护和库区水环境保护要求的基础上,充分发挥水库防洪、发电、灌溉、供水、航运、旅游等各项功能,使水库对坝下游生态和库区水环境造成的负面影响控制在可承受范围内,并逐步修复生态和环境系统。由此可见生态调度核心内容指将生态因素纳入水利调度中去,并将其提高到一定的高度,其自始至终贯穿着生态和环境问题。王远坤^[119]提出了生态调度的专项调度,他根据调度目的不同,分为生态需水量调度、生态洪水调度、泥沙调度、水质调度、生态因子调度和综合调度。自20世纪40年代以来,美国、苏联、日本、澳大利亚等国家均开始了生态需水量、生态洪水和泥沙调度的研究和应用,并取得了良好的效果^[120~127]。但是针对于水质和生态因子调度的研究和应用却极少。

水质调度是为防止或者减轻突发污染事故、水体富营养化和水华而进行的生态调度。为防止水库的富营养化,可以通过改变水库的调度运行方式^[128,129],在一定的时段降低水位,增大水体流速,从而破坏水体富营养化的条件。也可以考虑在一定时段内加大水库的下泄量和补给量,增强库区内水体流动和扰动强度,增大沉积物水界面的浓度梯度,进而增大内源污染物的释放量,有利于水库内源污染治理,缓解水库的富营养化现象。

生态因子调度是指对水温、流速、流量等生态因子调度。以水温为例,可根据水库水温的分布结构,结合水库的环境问题,通过在合适温度下加大水库的下泄量和补给量,从而能够更好地满足生态调度的要求。

本书创造性地将水质调度和生态因子调度相结合,通过室内模拟实验,研究了调水温度、调水周期和调水比例对治理底泥氮磷污染的影响,为有效控制内源氮磷污染提供新技术。

1.3 主要研究内容

(1) 产芝水库污染源调查和污染现状监测。调查水库流域周围的主要污染源(包括点源、面源和内源)以及污染物排放方式和排放规律等。调查入库和出库河流的水量水质变化特征、水库水位变化、水温分层情况、水团运动、水质时空变化特征,并根据现有水质监测资料,建立了模糊综合评判模型,对水库的富营养化现状进行了综合评价,进而识别出主要的污染因子。

(2) 水质自动监测系统的设计。自主设计环境监测数据采集器,该采集器能够链接RBR600XR系列和美国YSI600多系列多参数水质传感器,监测参数有温度、盐度、深度、

pH、浊度、DO、氨氮、硝酸盐氮、叶绿素-a。该设备通过移动 GPRS 无线传输网络将采集数据传输到服务器端自动监测数据库中;同时,服务器端可以控制各个点位的每个监测仪器参数。

(3) 水库富营养化预测。在水质监测及现有资料的基础上,建立了内源释放耦合平面二维水流-水质模型,对不同水文年的水质进行了预测。

(4) 基于 GIS 组件和 DOTNET 平台开发水质预警系统。该系统以信息技术为基础,综合运用水库水质、生物和水流监测资料,对产芝水库水文、水质等各种信息进行数字化存储、分析、评价、预报、查询和展示,为流域地表水体水质管理提供便利。

(5) 底泥的污染特征分析。针对产芝水库独特的环境背景,选择了四个监测点,采集了底泥柱状样,分析了底泥中含水率 WC、有机质中 LOI 含量的变化,底泥和间隙水中氮磷的分布特征及底泥和间隙水中氮磷含量的相关性。

(6) 底泥中氮磷释放规律研究。通过室内柱状试验,研究了不同温度和不同水动力扰动条件下沉积物的氮磷释放通量和释放规律,并建立了氮磷释放通量与释放时间的定量表达式,然后结合产芝水库的实际情况,对氮磷释放量进行了估算。

(7) 入库河流污染垂直流处理技术研究。研究了两级垂直流土地系统在不同填料、不同水力负荷和不同停留时间下对入库河流污染物的去除效果。

(8) 聚硅硫酸铝铁抑制底泥磷释放的技术研究。选取无机高分子絮凝剂 PSAFS 作为水库底泥原位治理的抑制剂,研究了抑制剂内部配比和投加量对底泥磷释放的影响,并验证了在优化条件下抑制剂对底泥磷释放非常有效且具有较稳定的抑制效果。

(9) 生态调度治理底泥氮磷污染的技术研究。通过室内试验,研究了不同培养温度、不同调水周期和不同调水比例对生态调度治理底泥氮磷污染的影响,验证了生态调度技术的可行性,并优化了运行参数,为水库富营养化治理提供新技术。

第2章

研究区环境概况

2.1 地理位置

产芝水库,又名莱西湖,地处东经 $120^{\circ}23' \sim 120^{\circ}28'$, 北纬 $36^{\circ}56' \sim 37^{\circ}01'$, 位于大沽河干流的中上游, 距莱西市市区西北 10 km 处, 是一座集防洪、灌溉、城市供水、养殖、旅游为一体的综合性水利枢纽工程。它是胶东半岛最大的水库, 控制流域面积 879 km^2 , 流域内有招远市的东庄、齐山、毕郭、勾山四处镇, 莱西市的南墅、日庄、马连庄、河头店四处镇, 如图 2-1 所示。最大水面积 56 km^2 , 总库容 4.02 亿立方米, 兴利库容 2.15 亿立方米。

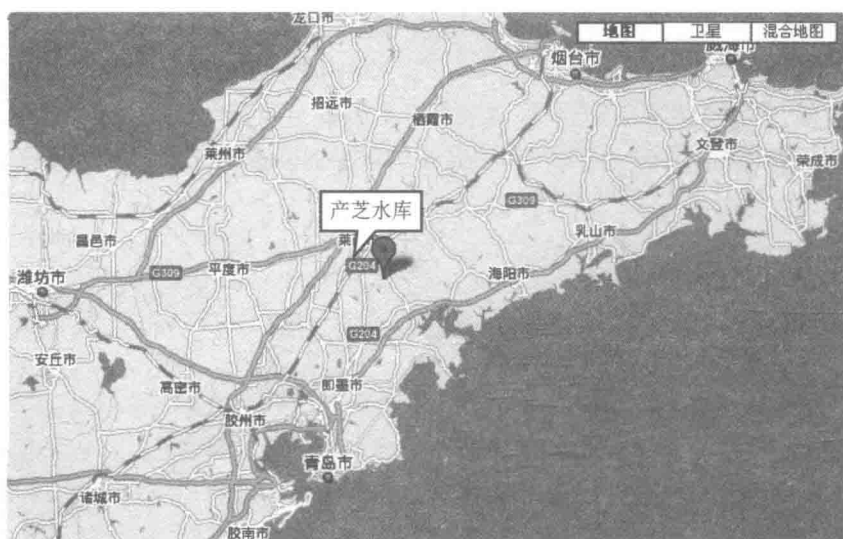


图 2-1 产芝水库地理位置(据宋帅等, 2009)

Fig. 2-1 Location of Chanzhi reservoir