

滇池河口前置库污染物 削减机理及示范工程

李彬 宁平 吕锡武 杜劲松 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

滇池河口前置库污染物 削减机理及示范工程

李 彬 宁 平 吕锡武 杜劲松 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2013

内 容 简 介

本书借鉴物理、化学和生物等多学科技术在水环境治理中的研究成果,提出了滇池入湖河口前置库生态系统,并从实验室试验选择吸附剂、河流泥沙吸附氮磷、生态防护墙设计等方面对前置库净水功能进行强化,建立了流场动力学模型和水质综合模型,对前置库改善水质效果、除污机理、净化强化技术及数值模拟等方面进行了探索性研究,并将研究成果运用在滇池入湖河流——东大河进行示范工程的跟踪研究,运行经验数据表明河口前置库因地制宜地解决了行洪和污染控制,对于指导河口前置库的设计和运行有借鉴意义。

本书可供从事水污染控制的技术人员及管理人员参考使用,也是水处理方向研究的较好参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

滇池河口前置库污染物削减机理及示范工程/李彬等著. —北京:冶金工业出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-5024-6313-7

I. ①滇… II. ①李… III. ①滇池—湖泊污染—污染防治 IV. ①X524

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 269829 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 吕欣童 版式设计 杨 帆

责任校对 郑 娟 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-6313-7

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京慧美印刷有限公司印刷

2013 年 11 月第 1 版, 2013 年 11 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 11.75 印张; 225 千字; 172 页

39.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010) 64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100010) 电话: (010) 65289081 (兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

云南省九大高原湖泊流域是全省社会经济发展的重要区域，流域GDP约占全省的30%，也是水污染防治和水环境保护的重点区域，流域内70%~80%的污染物主要通过众多的河流进入湖泊。以滇池为例，通过35条河道年均输入COD、TN、TP分别占滇池流域污染物负荷量的72%、78%、80%。而其中有近75%的污染负荷主要集中在雨季入湖，污染负荷呈现出时间和空间上的巨大差异。另外，近年来，随着点源的有效治理，入湖污染负荷以面源、污水厂尾水等低污染水为主，具有点多、面广、分散、量大等特点，突发性、爆发性、冲击性极强。入湖污染的这些特征为湖泊污染治理提出了新的挑战。

本书针对入湖污染负荷的输移规律，以高原湖泊河—湖复合生态系统为研究对象，以入河入湖污染负荷削减和水环境改善为目标，依托云南省科技厅专项、云南省环保厅专项及工程示范项目，逐步积累、开发形成了滇池河口前置库污染物控制技术。针对源近流短、冲击负荷大的河流，于河流下段、河口及湖湾设置前置库塘系统，包括人工构建的前置库，有效调蓄沉淀拦截入湖污染物，人工适度干预构建河口湿地，实现入湖污染的最后拦截，并逐步恢复河口良性生态系统。所谓前置库，是指利用水库存在的从上游到下游水质浓度变化梯度特点，根据水库形态，将水库分为一个或者若干个子库与主库相连，通过延长水力停留时间，促进水中泥沙及营养盐的沉降，同时利用子库中大型水生植物、藻类等进一步吸收、吸附、拦截营养盐，从而降低进入下一级子库或者主库水中的营养盐含量，抑制主库中藻类过度繁殖，减缓富营养化进程，改善水质。在典型的前置库内，河水首先进入初沉池，由于挡板和溢流板的作用，泥沙和颗粒物在初沉池中得以

充分沉淀,然后进入主反应区,在主反应区发生物理化学及生物作用,从而加快氮磷、有机物的去除速率。前置库因其具有费用较低、管理方便等优点,正成为控制湖库面源污染的有效手段之一,但从国内外研究现状来看,仍存在一些不足,如对前置库的研究面上不够广,点上不够深;学者多把研究重点放在除磷上,对氮、有机物和悬浮颗粒去除机理研究较少;对于前置库区的植物选配报道较少。本书借鉴物理、化学和生物等多学科技术在水环境治理中的研究成果,提出了滇池入湖河流前置库综合处理生态系统。从实验室静态试验选择吸附剂、河流泥沙吸附氮磷、生态防护墙设计等方面对前置库净水功能进行强化,并在滇池流域入湖河流——东大河进行河口前置库示范工程的跟踪研究,对前置库改善水质效果、污染物去除机理、水体净化效果强化技术及数值模拟等方面进行了探索性研究。根据前置库示范区的水流特征,本书建立了流场动力学模型,并对前置库一次暴雨过程前后25h进行流场变化的跟踪模拟,模拟结果与现场监测结果吻合较好。同时,综合考虑 Monod 方程、化学动力学和 Fick 扩散定律,建立了前置库水质综合模型,采用模型计算的 TN、TP、COD 浓度,与实测数据相关性较好,模型可以用来解释前置库内污染物的去除机制和途径。在前置库净化机理及数值模拟研究的基础上,以河口、湖湾为处理空间,研发了前置库生态防护墙技术(专利号:ZL 2008 2 0081535.6)、柱状沉积物采集技术(专利号:ZL 2010 2 0619582.9)、湖泊等深线测绘技术(专利号:2011 10298290.9)、柔性导流墙技术、植物浮岛技术等。通过专利技术的组合运用,开发形成了集调蓄、沉淀、植物净化于一体的“湖中湖”前置库技术。工程应用实践证明,前置库能在雨季有效调蓄滞洪、沉淀净化初期雨水。该技术具有投资省、成本低、不占用土地、便于施工等优点。水处理表面负荷 $0.04 \sim 0.06 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, COD、TN、TP 去除率达 10%~20%,每立方米投资 100 元,每立方米运行成本低于 0.02~0.03 元。该技术在滇池大清河、南岸东大河等地

进行了工程应用。

示范工程运行结果表明,采用投加吸附剂、增设生态防护墙、合理的植物搭配及对流场人工干预等强化手段,可以有效提高前置库净化低浓度微污染河水的能力,前置库库区构成的河流末端小型生态系统较为稳定。本书为前置库技术在高原地区面源污染控制方面的推广应用提供了理论支撑,同时建立了示范工程,因此具有一定的现实意义。

本书共分两部分,第一部分为理论研究,第二部分为示范工程建设及运行情况。本书共分为 10 章,由李彬负责统稿,其中宁平参与了第 1 章、第 2 章、第 4 章、第 6 章的编写;吕锡武参与了第 3 章、第 5 章的编写;杜劲松参与了第 7 章、第 8 章、第 9 章和第 10 章的编写。

本书作者得到了国家科技重大专项湖泊大规模蓝藻去除与处理处置技术及工程示范(2009ZX07101-011)、云南省环境保护发展项目(YN2007244)、昆明市政府“十一五”入湖河道治理重大示范项目(KM20060217)等资金的支持。在入滇池河道末端开展前置库示范工程强化措施研究,示范工程的建设对于缓解滇池的污染趋势,改善进入滇池的河流水质,修复水生生态等,都具有一定的现实意义。

由于作者水平有限,写作过程中难免有一些疏漏和不当之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2013 年 7 月于昆明

目 录

第一篇 理论研究

1 绪论	3
1.1 写作背景	3
1.1.1 国内外湖泊污染现状	3
1.1.2 湖泊生态修复技术	4
1.1.3 生态修复的局限性探讨	7
1.1.4 前置库理论提出	7
1.2 前置库技术概况	8
1.2.1 前置库净水的理论基础	8
1.2.2 国外前置库研究进展	10
1.2.3 国内前置库研究进展	11
1.2.4 前置库研究存在的问题	14
1.3 本技术领域国内外发展现状	14
1.3.1 河道原位旁路净化技术	14
1.3.2 多塘系统净化技术	17
1.3.3 河口前置库技术	17
1.3.4 河口湿地净化技术	19
1.4 本技术发展趋势	20
1.5 写作的目的意义	21
1.6 研究的主要内容	22

1.6.1 实验室小试及植物选择	22
1.6.2 示范工程及效果强化研究	22
1.7 技术路线	23
1.8 本书主要创新点	23
参考文献	24
2 理论研究内容	28
2.1 试验内容安排	28
2.1.1 水生植物选择及净化效果	28
2.1.2 浮床的设计及植物栽培	28
2.1.3 生态防护墙设计	29
2.1.4 稀土吸附剂制备	30
2.1.5 东大河泥沙吸附试验	30
2.1.6 现场试验阶段的工作量	30
2.2 主要试验分析方法	30
2.2.1 常规水质指标分析方法	30
2.2.2 水质生物稳定性分析方法	31
2.2.3 有机物分子量测定方法	33
2.2.4 前置库内微生物及生化性质测定方法	34
2.2.5 微型生物群落监测方法	35
2.2.6 浮游生物监测方法	35
2.2.7 底栖动物监测方法	36
2.3 本章小结	36
参考文献	37
3 前置库区适宜的植物培养试验	40
3.1 滇池流域主要植物种类调查	40
3.1.1 前置库中水生植物功能	40
3.1.2 水生植物现状	41

3.2 静态栽培试验	41
3.2.1 室内无土栽培植物长势分析	41
3.2.2 水生植物对河水的净化效果	43
3.2.3 选择植物的综合评价	46
3.3 生物量与净化效果关系分析	47
3.4 本章小结	49
参考文献	49
4 泥沙及吸附剂基础试验	51
4.1 吸附等温线模型	51
4.1.1 Henry 吸附等温式	51
4.1.2 Freundlich 吸附等温式	52
4.1.3 Langmuir 吸附等温式	52
4.2 前置库区鲜泥吸附试验	52
4.2.1 试验鲜泥沙采集过程	52
4.2.2 氮磷标液及水样配制	52
4.2.3 试验过程分析	53
4.2.4 鲜泥吸附氮磷结果讨论	53
4.3 稀土吸附剂吸附试验	56
4.3.1 试验水样及吸附试验	56
4.3.2 吸附试验结果讨论	57
4.4 本章小结	59
参考文献	60
5 前置库现场研究	62
5.1 前置库系统的构建	62
5.1.1 工程示范区概况	62
5.1.2 前置库方案设计	64
5.1.3 东大河水质监测分析	66

5.2 前置库旱季净化河水研究	67
5.2.1 TN 的去除	68
5.2.2 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除	68
5.2.3 TP 的去除	69
5.2.4 COD 的去除	70
5.2.5 SS 的去除	71
5.3 前置库雨季净化河水研究	72
5.3.1 TN 的去除	72
5.3.2 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除	73
5.3.3 TP 的去除	74
5.3.4 COD 的去除	74
5.3.5 SS 的去除	75
5.4 旱季与雨季净化效果差异分析	76
5.5 全年污染物削减量	77
5.6 本章小结	77
参考文献	77
6 前置库去污特性及稳定性分析	81
6.1 典型污染物去除过程	82
6.1.1 TN 去除特性	82
6.1.2 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除特性	83
6.1.3 TP 去除特性	83
6.1.4 COD 去除特性	84
6.1.5 SS 去除特性	85
6.1.6 TP 与 TN 去除率相关性	85
6.2 前置库效果强化机理	86
6.2.1 稀土吸附剂净化水体及机理	86
6.2.2 稀土吸附剂技术经济分析	88
6.2.3 生态防护墙强化除磷机理	88

6.3 生物稳定性及有机物分子量分布特性	89
6.3.1 前置库 AOC 的去除效果	89
6.3.2 前置库 BDOC 的去除效果	90
6.3.3 前置库区有机物分子量分布特性	92
6.4 微生物群落分析及净水效应	94
6.4.1 生物群落特征及水质关联性	95
6.4.2 微生物动态变化分析	102
6.5 前置库净化水体的途径探讨	108
6.6 现场试验参数总结	109
6.7 本章小结	109
参考文献	111
7 暴雨过程流场及水质模型	114
7.1 前置库动力学研究	114
7.1.1 控制方程建立	114
7.1.2 数值方法	115
7.1.3 定解条件	116
7.1.4 模拟计算范围及网格划分	116
7.1.5 参数选取	116
7.1.6 流场模型验证	117
7.1.7 暴雨流场计算结果分析	118
7.2 前置库水质模型	124
7.2.1 常用水质模型分析	124
7.2.2 前置库净水过程建模	124
7.2.3 模型求解方法	127
7.3 模型现场验证试验	127
7.3.1 TN 模拟及验证	127
7.3.2 TP 模拟及验证	128
7.3.3 COD 模拟及验证	129

7.3.4 不同强化措施的贡献	130
7.4 流场动力学与水质模型的关联性	132
7.5 本章小结	133
参考文献	133
8 理论研究结论及建议	135
8.1 结论	135
8.2 建议	136
 第二篇 示范工程	
9 示范工程建设及经验	139
9.1 高原湖泊特征	139
9.2 入湖河道污染现状	141
9.3 入湖河道治理状况及存在的问题	144
9.3.1 入湖河道治理状况	144
9.3.2 入湖河道存在的问题	145
9.3.3 东大河概况	145
9.4 项目实施的必要性	146
9.5 项目实施的可行性	147
9.5.1 技术的可靠性	147
9.5.2 经济的合理性	147
9.5.3 工程实施的可操作性	147
9.6 前置库设计原则	148
9.6.1 前置库设计原则	148
9.6.2 植物区物种选择的原则	148
9.7 前置库方案比选	148
9.7.1 方案一	149

9.7.2 方案二	149
9.7.3 方案三	150
9.8 前置库方案设计	150
9.8.1 方案设计内容	150
9.8.2 工艺参数设定	151
9.8.3 前置库区设计工程量	152
9.8.4 河口湿地恢复设计工程量	156
9.9 工程区布局图	159
9.10 工程投资估算	165
9.11 示范工程效益分析	165
9.11.1 环境效益分析	165
9.11.2 生态效益分析	166
9.11.3 社会效益分析	166
10 工程后续管理模式探讨	167
10.1 前置库社区共管模式	167
10.1.1 社区共管模式的概念	167
10.1.2 社区共管模式的意义	167
10.1.3 社区共管模式	168
10.2 示范工程后续管理探讨	169
10.3 跟踪监测管理	170
10.3.1 主要研究内容	170
10.3.2 水质监测方案	170
10.3.3 费用测算	172

第一篇 理论研究



1 绪 论

1.1 写作背景

云南省九大高原湖泊流域是全省社会经济发展的重要区域,流域 GDP 约占全省的 30%,也是水污染防治和水环境保护的重点区域,流域内 70%~80% 的污染物主要通过众多的河流进入湖泊。以滇池为例,通过 35 条河道年均输入 COD、TN、TP 分别占滇池流域污染物负荷量的 72%、78%、80%。而其中有近 75% 的污染负荷主要在雨季入湖,污染负荷呈现出时间和空间上的巨大差异。另外,近年来,随着点源的有效治理,入湖污染负荷以面源、污水处理厂尾水等低污染水为主,具有点多、面广、分散、量大等特点,突发性、暴发性、冲击性极强。入湖污染的这些特征为湖泊污染治理提出了新的挑战。

“让江河湖泊休养生息是生态文明理念在水环境综合治理领域的集中体现、是生态文明建设的重要抓手、也是生态文明建设的一项重要任务”^[65],2009 年第十三届世界湖泊大会上国家环保部部长周生贤做了“让江河湖泊休养生息”的大会报告。由此表明我国水环境形势十分严峻,水污染防治工作需要加大投入。近年来,湖泊和水库的污染受到越来越多的重视,但大多数湖库换水周期较长,导致湖库水污染治理已成为世界性难题,也逐渐成为水污染技术研究的热点问题之一。然而,对湖泊水库的治理往往注重于湖库内源本身,常常忽略了对入湖进库河道的治理。实际上,湖库的污染常常是河道沿途携带的面源污染造成的^[1,2]。

入湖河流与湖泊是一个不可分割的“复合生态系统”,河流在流域水环境中具有特殊的地位和作用,是湖泊的命脉。一个“活”的系统,健康的河流生态系统必须保持其水力学、水化学、水生态学和水生生物学的功能^[3,4]。为探索滇池流域的面源污染控制新技术,我们考察了日本等国湖库面源污染控制的实际工程,多次进行技术比较并结合滇池流域的污染特征,首次在滇池入湖河道开展前置库系统的强化研究和示范工程研究,以期对滇池面源污染控制架起一座有效的屏障。

1.1.1 国内外湖泊污染现状

目前,在欧洲的 96 个湖泊当中仅有 19 个处于贫营养状态,其余 80% 都不同

程度地受到氮、磷的污染,呈现较旺盛的藻类生长能力。北美五大湖是世界重要湖泊群之一,五大湖中水质最好的为苏必利尔湖,属贫营养湖,休伦湖和密执安湖处于中营养状态,而伊利湖和安大略湖则水质略差,属于富营养化湖^[1,5]。

亚洲湖泊水质南北差异较大,北部如西伯利亚和俄远东地区的湖泊水体清澈,水生生物与湖中营养盐类保持着相对合理的比例,水质良好;南部地区部分湖水混浊,水中各种污染物浓度较高,水质较差^[16]。亚洲湖泊水质的主要特点是水中氮、磷含量较高^[2]。南部湖泊大部分水质属五类或劣五类,富营养化问题突出,适宜的自然条件和湖中营养盐类容易引起水华。除氮、磷以外,有机物污染也是亚洲湖泊中普遍存在的问题:大部分城市湖泊接纳生活污水较多,高锰酸盐指数和生化需氧量均超标严重,需要着重治理^[2]。

我国是一个多湖泊国家,面积在 1km^2 以上的湖泊共有 2300 余个,湖泊总面积约为 71787km^2 ,湖泊贮水总量约 7088 多亿立方米^[8]。根据我国对 37 个主要湖泊的调查资料,以及国内外评价湖泊富营养化的经验制定的指标,37 个湖泊的富营养状况为:具有中营养型和中—富营养型的占 55.8%,富营养型的占 14.7%,重富营养型的占 8.8%^[6]。近十几年来,我国湖泊富营养化的趋势发展很快,在 20 世纪末,大多数湖泊的富营养化都有加重趋势,因此对湖泊富营养化的防治已成为我国当今环境治理的重要任务之一,开展湖泊富营养化与水污染控制与治理意义重大。

云南的九大高原湖泊受到日益严重的生活和工业污水的污染,近 20 年来部分湖泊水质迅速恶化,有六个明显存在着富营养化的趋势,湖泊富营养化成了云南省最大的生态环境问题。尤其是滇池的污染已经影响到了昆明市民的饮水问题,滇池入湖河流调查表明:滇池的 29 条主要入湖河道水质均为 V 类水体^[1]。因此,对滇池的治理已经不能仅仅局限于湖泊本身的治理,对入湖河道进行治理将有利于减少入湖的污染负荷,有利于湖泊自净功能的充分发挥。鉴于此,对入湖库的河道治理已成为国内外学者共同关注的热点。

1.1.2 湖泊生态修复技术

目前,湖库污染及其生态环境的破坏,是由多种原因同时作用促成的。人们对湖库施加了过多的环境压力,同时还为了水土保持、防洪、航运等自身安全和经济发展的目的,对湖库等水体采取了大规模的人工改造,采用现代工程技术手段改变其堤岸形态,从而改变了水体的自然特征,水体生态越来越趋向于封闭化、几何形状规则化和堤岸渠道化等^[44]。从而,使湖库本身的自净功能部分或完全丧失。近年来,随着环境、材料以及生态工程等学科的发展,以及对非生态性工程措施的严重后果的认识进一步加深,生态水处理技术以及水体原位性生态修复工程逐渐成为人们关注的热点^[37~39]。