



· 生态学研究 ·

湖泊生态系统健康 ——浅水湖泊疏浚的生态环境效应

刘剑彤 景连东 等 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

生态学研究

湖泊生态系统健康

——浅水湖泊疏浚的生态环境效应

刘剑彤 景连东 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书内容源自著者从事相关研究工作多年的成果。书中介绍了东钱湖疏浚工程的实施情况,阐述了疏浚工程对湖泊无机环境的作用、对生物群落的生态效应及对湖泊生态系统健康的影响,并对今后的研究进行了展望。其中无机环境的研究包括沉积物、水中氮磷营养盐循环,溶解氧、pH等理化参数的改变;生物群落的研究涉及浮游植物、浮游动物、底栖动物、鱼类等主要水生生物类群。

本书系统性强,数据丰富,兼具学术性和实用性。适合于水环境生物监测、湖泊修复工程、水生态环境质量评价等领域的科研工作者和高等院校学生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

湖泊生态系统健康:浅水湖泊疏浚的生态环境效应/刘剑彤等著.
—北京:科学出版社,2017.1

ISBN 978-7-03-050633-7

I. ①湖… II. ①刘… III. ①湖泊—生态系统—研究 IV. ①X832

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第272915号

责任编辑:罗静 田明霞 / 责任校对:郑金红

责任印制:张伟 / 封面设计:刘新新

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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2017年1月第一次印刷 印张:11 5/8

字数:220 000

定价:80.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

著者名单

(按姓氏汉语拼音排序)

景连东 李光良 李仁辉 刘国祥
刘剑彤 缪荣丽 沈 炯 唐海伦
向贤芬 谢志才 熊 晶 虞功亮
朱 欢

前 言

湖泊是散落在地球陆地上的珍珠，有着水产养殖、提供饮用水源、发展娱乐和旅游等众多经济服务功能，还有调节气候、为野生动植物提供生存场所等众多生态服务功能。然而地球上的湖泊生态系统，尤其是人类聚居地的湖泊，目前面临着众多的环境问题。湖泊生态系统的健康面临着重大威胁。

湖泊人为富营养化是威胁全球众多湖泊生态系统健康的一个普遍且棘手的环境问题。湖泊富营养化可能导致初级生产者（藻类、水生植物）的大量生长，并最终导致湖泊生态系统的退化。归根结底，湖泊人为富营养化是因为人类向环境中排放了大量的氮和磷营养盐。因此有效控制湖泊中的氮和磷营养盐是当前湖泊富营养化治理过程的出发点，而恢复湖泊生态系统的健康是最终落脚点。其中，营养盐的控制主要包括外源截污和内源控制两个方面。外源截污后，湖泊的内源污染（尤其是浅水湖泊）可能会拖后湖泊修复的进程，也是当前湖泊富营养化治理过程中的瓶颈。而湖泊修复能否达到恢复生态系统健康的目的，需要根据湖泊的实际情况，选择合适的方法综合无机环境和生物群落特征进行整体评价。

沉积物疏浚可以达到永久性去除沉积物中内源污染物的目的，避免原位再次污染，其被越来越多地运用到湖泊修复中。但是工程实践表明，湖泊疏浚的生态环境效应具有湖泊点位特异性和不确定性，该技术用于湖泊修复还存在一定的争议。而研究清楚湖泊疏浚的生态环境效应及其产生机制将有助于疏浚工程设计，以及决策是否需要在某湖泊修复过程中采用疏浚技术。

本书主要内容来源于著者多年从事相关研究的成果。本书主体以东钱湖生态疏浚工程为依托，通过室内模拟实验和长达 5 年的工程现场监测，研究了疏浚对湖泊生态系统理化环境、生源要素、生物群落、富营养化程度、生态系统健康等产生的生态环境效应及其产生机制，并在此基础上对生态疏浚工程的实施提出了建议。

全书共分为四篇。第一篇，“研究背景”主要介绍了当前湖泊生态系统健康评价、疏浚的生态环境效应研究国内外进展，本书的整体思路及相关背景。第二篇，“各论——无机环境”主要介绍了疏浚对湖泊生态系统沉积物、水体及沉积物-水界面上理化参数、氮和磷营养盐含量及形态的时空分布特征的效应及其机制。第三篇，“各论——生物群落”主要介绍了疏浚对浮游植物、浮游动物、底栖动物、鱼类等类群的生物量及群落结构的生态效应及其机制。第四篇，“总论——生态系统健康”在上述三篇的基础之上，综合疏浚对湖泊生态系统无机环境及生物群落

的影响，评价了疏浚对湖泊生态系统健康的影响，对今后疏浚工程的实施提出了建议，为今后疏浚生态环境效应研究进行了展望。

书中第一篇、第二篇、第四篇由西南民族大学景连东和中国科学院水生生物研究所（以下简称水生所）刘剑彤撰写。第三篇中第六章由水生所朱欢、刘国祥、缪荣丽撰写，第七章由水生所向贤芬、虞功亮、李仁辉撰写，第八章由水生所熊晶、谢志才撰写，第九章由水生所虞功亮、向贤芬、李仁辉撰写。景连东和刘剑彤完成了最后的统稿工作。

本书中所涉及的科研成果得到“东钱湖疏浚工程生态风险评估”项目的资助，在此表示感谢！在项目实施过程中得到众多专家学者的帮助和指导，此处一并感谢！本书撰写及出版过程中得到了科学出版社罗静和田明霞等人员的大力支持和帮助，此处表示感谢！此外，衷心感谢国家科学技术学术著作出版基金和淡水生态与生物技术国家重点实验室资助此书的出版！

湖泊疏浚生态环境效应的不确定性，加之著者水平有限，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正！

著 者

2016年5月

目 录

第一篇 研究背景

1 引言	3
1.1 湖泊生态系统面临的威胁及其生态系统健康评价	3
1.2 湖泊内源污染及其治理	4
1.3 湖泊疏浚及其生态环境效应研究进展	6
1.3.1 疏浚目的	6
1.3.2 疏浚的方式	7
1.3.3 疏浚的潜在效应	8
1.3.4 影响湖泊疏浚生态环境效应的关键因素	11
1.3.5 目前研究中存在的不足	12
1.4 目的意义、内容及创新点	13
1.4.1 目的意义	13
1.4.2 研究的基本方法和内容	14
1.4.3 创新之处	14
参考文献	15
2 东钱湖水环境及疏浚工程概况	18
2.1 东钱湖湖区	18
2.1.1 东钱湖水环境质量	18
2.1.2 东钱湖沉积物及悬浮物矿物组成	20
2.2 东钱湖入湖溪流及外围水体水环境状况	23
2.3 东钱湖生态疏浚工程简介及环境监测	26
2.3.1 东钱湖生态疏浚工程简介	26
2.3.2 东钱湖生态疏浚工程生态环境效应监测方案	27
参考文献	28

第二篇 各论——无机环境

3 疏浚对湖泊生态系统理化环境的影响	33
3.1 疏浚对湖泊溶解氧的环境效应	33
3.1.1 概述	33

3.1.2	材料和方法	34
3.1.3	结果及讨论	35
3.1.4	小结	41
3.2	疏浚对湖泊 pH 的环境效应	41
3.2.1	概述	41
3.2.2	材料方法	42
3.2.3	结果及讨论	42
3.2.4	小结	46
	参考文献	47
4	疏浚对湖泊生态系统生源要素氮的影响	49
4.1	微宇宙研究疏浚对湖泊生态系统氮平衡的影响	49
4.1.1	概述	49
4.1.2	材料和方法	50
4.1.3	结果	53
4.1.4	讨论	55
4.1.5	小结	60
4.2	疏浚后湖泊氮时空变化	61
4.2.1	概述	61
4.2.2	材料和方法	61
4.2.3	结果及讨论	61
4.2.4	小结	63
	参考文献	64
5	疏浚对湖泊生态系统生源要素磷的影响	66
5.1	概述	66
5.2	材料和方法	67
5.2.1	样品采集	67
5.2.2	沉积物分析	68
5.2.3	统计分析	69
5.3	结果与讨论	69
5.3.1	沉积物理化环境	69
5.3.2	沉积物磷形态	70
5.3.3	水体中磷的变化	81
5.3.4	对疏浚工程实施的建议	82
5.4	小结	82

参考文献	82
------	----

第三篇 各论——生物群落

6 疏浚对浮游植物群落的影响	87
6.1 概述	87
6.2 浮游植物群落结构监测方法	88
6.2.1 样点布设与采样时间	88
6.2.2 样品采集	89
6.2.3 固定和浓缩	89
6.2.4 计数和估算生物量	89
6.2.5 叶绿素 a 含量的测定	89
6.3 结果与分析	89
6.3.1 东钱湖疏浚施工前后浮游藻类群落组成及生物量概况	89
6.3.2 东钱湖疏浚施工前后浮游藻类群落组成特征分析	95
6.4 结论	98
参考文献	99
7 疏浚对浮游动物群落的影响	100
7.1 概述	100
7.2 材料和方法	100
7.2.1 定性和定量标本采集	100
7.2.2 种类鉴定和计数	101
7.2.3 数据分析方法	101
7.3 结果与讨论	102
7.3.1 种类组成	102
7.3.2 密度和生物量	110
7.3.3 群落多样性	114
7.3.4 浮游动物在水层中的分布	116
7.3.5 浮游动物与水环境因子的对应关系	117
7.4 小结	118
参考文献	119
8 疏浚对底栖动物群落的影响	120
8.1 概述	120
8.2 材料和方法	121
8.2.1 样品采集及处理	121

8.2.2	水质生物学评价	121
8.3	结果及分析	122
8.3.1	物种组成动态	122
8.3.2	现存量及动态	126
8.3.3	优势类群、优势种及其动态	127
8.3.4	生物多样性动态	128
8.3.5	底栖动物群落空间分布	128
8.3.6	疏浚区底栖动物群落结构动态	128
8.3.7	水质生物学评价	132
8.4	小结	133
	参考文献	134
9	疏浚对鱼类群落的影响	135
9.1	概述	135
9.2	材料和方法	136
9.2.1	渔具渔法调查	136
9.2.2	渔获物组成调查	136
9.2.3	鱼类生长速率和年龄组成调查	136
9.3	结果与讨论	136
9.3.1	东钱湖主要渔具渔法	136
9.3.2	东钱湖渔获物组成	139
9.3.3	主要经济鱼类生长评估	140
9.3.4	疏浚施工对东钱湖鱼类的影响	150
9.4	小结	151
	参考文献	151

第四篇 总论——生态系统健康

10	疏浚对湖泊生态系统健康的影响	155
10.1	概述	155
10.2	材料方法	156
10.2.1	采样调查	156
10.2.2	生态系统健康评价方法	156
10.3	结果与讨论	159
10.3.1	疏浚对湖泊生态系统系统能 (E_x)、结构系统能 (E_{xst})、生态缓冲容量 ($\beta_{(phyto)(TP)}$)、综合营养状态指数 (TLI) 的影响	159
10.3.2	疏浚对湖泊生态系统健康综合评价	165

10.3.3 对湖泊生态修复的建议	166
10.3.4 评价不足和展望	167
10.4 小结	167
参考文献	168
11 结论与研究展望	170
11.1 主要结论	170
11.2 湖泊疏浚的生态环境效应研究展望	172

第一篇

研究背景

1 引言

1.1 湖泊生态系统面临的威胁及其生态系统健康评价

人类可直接利用的淡水资源少之又少，而液态地表淡水资源的 90% 存在于湖泊中 (ILEC, 2007)。这一部分宝贵的水资源有着巨大的价值。湖泊在其进行物质循环、能量流动及信息传递等基本生态功能的基础之上，对人类具有提供资源、文化服务、调节环境等重要的服务价值 (图 1.1) (ILEC, 2007; Ohimain et al., 2008)。湖泊的这些功能，一部分可以量化出价值，但是大部分功能的价值均无法量化或者无法用物质观念进行量化。

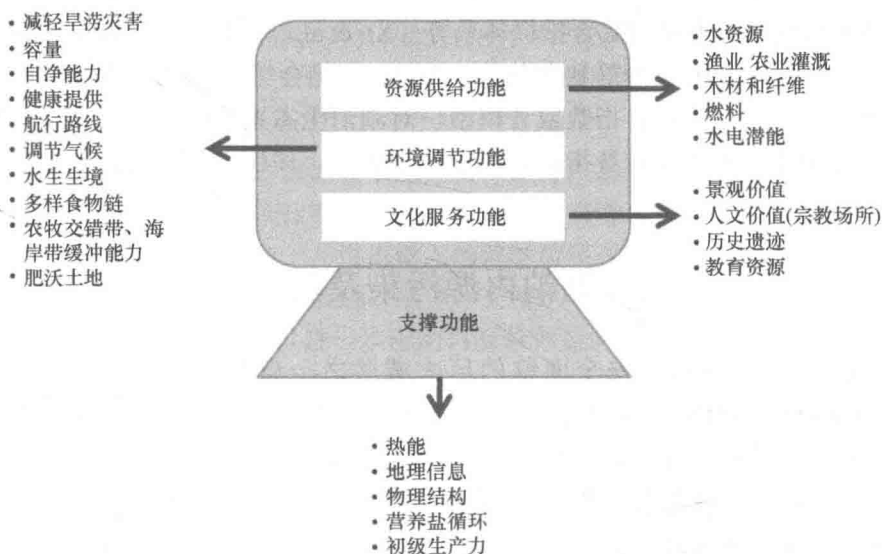


图 1.1 湖泊及水库的生态系统功能 (ILEC, 2007)

Fig.1.1 Ecosystem services provided by lakes and reservoirs (ILEC, 2007)

但是近几十年来，由于人类活动过多地干扰湖泊生态系统，严重威胁到了湖泊生态系统的生态安全，影响到了湖泊的可持续利用。和其他环境介质类似，湖泊所面临的环境威胁可归纳为两个大的方面。首先是污染问题。通过大气沉降、地表径流，以及养殖、娱乐等人为活动方式，大量污染物进入湖泊中。这些污染物包括无机的营养盐、重金属，有机的杀虫剂、个人护理品、微塑料、抗生素、

耗氧有机物等。其次是湖泊生态系统被破坏。由于环境污染、入侵物种的引入及全球性气候变化等，湖泊生态系统面临着稳态失衡、岸带湿地退化、物种多样性下降等一系列生态破坏问题。许多湖泊生态系统被破坏的问题是由环境污染引起的。环境污染的问题经过一定时间的积累，最终表现在了湖泊生态系统的破坏上。湖泊富营养化问题就是其中一个典型。湖泊生态系统健康是湖泊生态系统的综合状态，是湖泊生态环境问题的一个最终落脚点。对湖泊生态系统健康进行评价有助于认识湖泊生态系统的现状或者工程措施修复湖泊的效果。而本书的重要内容之一就是通过生态系统健康评价的手段，来评估湖泊环保疏浚对湖泊进行修复的最终效果。

湖泊生态系统的健康涉及无机环境、生物环境、物质循环、能量流动、服务功能等众多方面。该领域的研究是近些年来一个热点，也是衔接湖泊科学、生态学、生态修复、社会科学研究及湖泊管理的一个纽带。学者已经建立了众多的评价指标体系。除了本书重点关注的热力学指标体系外，还有毛生产力指标（GEP）、生态系统压力指标、生物完整性指数，以及包含生物、生态、社会经济和人口健康等方面的综合指标体系等（Xu et al., 1999; Silow and Mokry, 2010; Xu et al., 2011; 廖静秋和黄艺, 2013; 张艳会等, 2014）。在相应的指标体系上进一步构建成评价指数或者模型，对湖泊生态系统健康进行最终评价。但是现有的评价方法存在着指标体系选择不统一、评价方法主要为半定量评价等不足。

1.2 湖泊内源污染及其治理

当前湖泊生态系统安全面临的巨大威胁之一就是湖泊富营养化（lake eutrophication）。湖泊富营养化是一个湖泊自然发展必经的阶段，湖泊最终会沼泽化。但是这一进程在自然状况下是非常缓慢的，加之生态系统本身具有一定的反馈调节机制，整个过程也会很缓和。但是人为的因素加快了这一进程，且导致了湖泊生态系统失衡的问题。本书中的湖泊富营养化均指湖泊生态系统在人为因素干扰下的富营养化。

湖泊富营养化会导致湖泊生态系统初级生产力急剧增加，如水生植物疯长、水华暴发（图 1.2）。在我国，尤其是在长江中下游，湖泊富营养化的结果或者基本特征之一就是蓝藻水华。由于初级生产者将无机物转换成有机物，这些有机物最终也会直接或者间接（经过循环）地通过分解者作用回归无机界。湖泊富营养化使得一些关键性物质在湖泊生态系统中的分布显得极不均匀。例如，富营养化湖泊中溶解氧水平总体偏低，而且日变异性会明显增大。

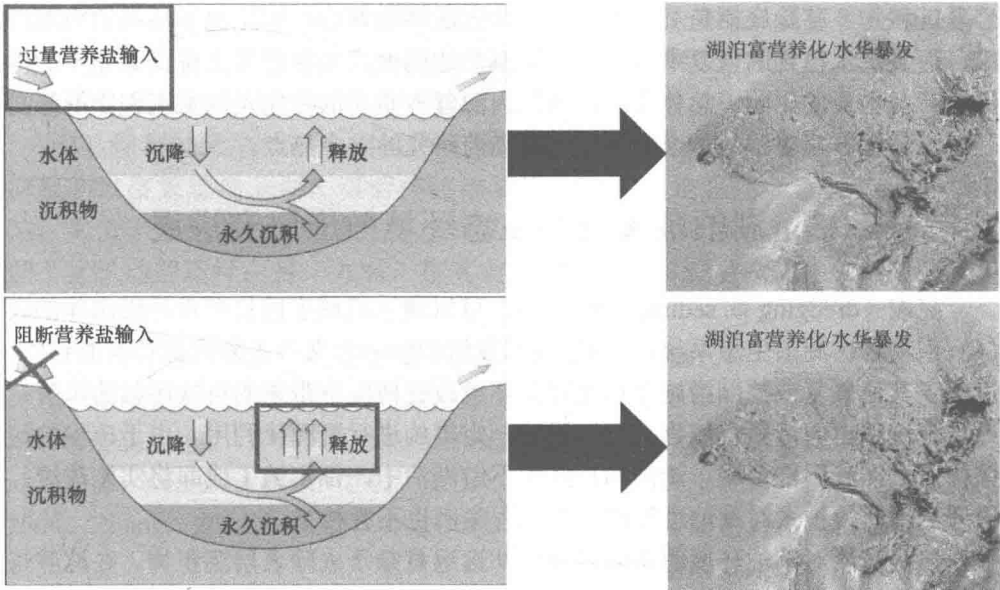


图 1.2 富营养化进程中内源营养负荷的重要作用 (图左改自 Søndergaard, 2001)

Fig.1.2 Crucial role of internal nutrient loadings in accelerating lake eutrophication (left, modified from Søndergaard, 2001)

湖泊富营养化,其根本原因在于过量营养盐排入湖泊。但是众多湖泊管理实践表明,当把外源入湖污染截断后,湖泊富营养化或者水华暴发的问题并不能得到有效解决。其根本原因在于,过去输入的营养盐储存于沉积物(表层沉积物)中成为内源营养负荷,此时释放进入水体,支持水华暴发,阻碍了湖泊生态系统修复的进程。而水华暴发可以进一步驱动内源营养盐向水体释放。在浅水湖泊中,沉积物所承载的内源负荷在支持湖泊富营养化或水华暴发中可能发挥着比深水湖泊中更强的作用(Søndergaard et al., 2003)。其原因包括,浅水湖泊有更高的沉积物表面积与水体体积比,浅水湖泊受风浪扰动更剧烈增加了泥水接触的机会。

控制内源负荷的方法大致可分为化学法、物理法及生物和生态法。化学法是指通过添加铝盐、铁盐(Welch and Cooke, 1995)及硝酸盐(Boström and Pettersson, 1982)等达到控制内源负荷的目的。铝盐和铁盐可与磷酸盐结合达到控制沉积物磷释放的目的,而硝酸盐可以维持沉积物水界面处于相对氧化的状态。这些方法引入了外源的物质,改变了沉积物或水体本身的物质组成,如硝酸盐也是氮营养盐的一种存在形式。而且内源负荷只是暂时得到控制,其仍然存在湖泊中,当条件适宜时会继续释放。物理法,如通过曝气控制沉积物磷及氨氮等营养盐的释放。但是该方法一般适用于池塘等小水体,而且面临着时效性短、内源负荷可能再次释放等问题。有学者开始认为溶解氧在控制内源负荷方面的作用并没有想象中那么大(Hupfer and Lewandowski, 2008)。生物和生态法,包括利用沉水植被

修复沉积物、移除底栖鱼类等方法。这些方法环境友好，但是也不能根治内源污染，而且沉水植物的恢复本身需要有较高的透明度，某种意义上讲需要先控制内源负荷对水质的影响。总体来说，湖泊内源营养负荷的控制及湖泊沉积物的修复是湖泊富营养化防治的一个难点，也是当前研究的一个热点。

1.3 湖泊疏浚及其生态环境效应研究进展

疏浚 (dredging 或 sediment removal) 可以通过机械手段将严重污染水体的表层沉积物移出湖泊生态系统，进而达到修复沉积物和永久性去除内源负荷的目的。避免了其他修复或控制措施今后在理化环境改变情况下带来的再次污染的风险。而且疏浚移出的污染沉积物，可以通过一定措施进行资源化利用。由于疏浚的这些优点，在我国许多城市湖泊和长江中下游湖泊中，都实施了或即将实施疏浚。国外利用疏浚技术对湖泊进行修复的工程案例也不胜枚举。

但是疏浚对湖泊环境的实际效应，却远远复杂于去除表层沉积物。在这些工程实践中，有些取得了很好的效果，明显改善了水质环境长达数十年，如我国安徽巢湖、荷兰 Geerplas 湖；有些却是不明原因地失败了，在疏浚结束不久后，其水质恶化，水体营养盐甚至高于疏浚前数倍，如日本諏访湖、我国南京玄武湖。因此，疏浚能否运用于湖泊富营养化的防治还存在很大的争议。鉴于疏浚技术将越来越多地被用于湖泊生态修复实践，但是其生态环境效应不确定，极有必要从污染物质地化循环规律、生态系统物质循环等深层原因来研究其生态环境效应。中外学者对疏浚的生态环境效应展开了讨论，综述如下。

1.3.1 疏浚目的

1) 增加水深/库容，增强湖泊的蓄水、航运及娱乐等经济生态功能。为维持港口和航道通行的疏浚工作已经实施了多年。而一些湖泊中疏浚也是为了方便船只航行或靠岸停泊。在一些寒冷地区湖泊通过疏浚加深水深给鱼类提供顺利越冬的环境，避免冻害。湖泊水深加大，其相应蓄水功能也会得到加强。而加深水深并不是许多生态疏浚工程的最终目的，其只是该类疏浚的附加效应。在浅水湖泊中，加深水深所产生的生态效应并不一定都是有利的。例如，藻型湖泊通过疏浚加深水深后是否有利于疏浚区域沉水植被的恢复还有待研究。其原因在于水体透明度与水深的比例是沉水植物生长的重要影响因子 (王海军, 2007; 沈亚强等, 2010)。疏浚后新生界面的沉积物组成特征及理化环境是否有利于植物生长也需要进一步研究 (Stiers et al., 2011)。

2) 去除有毒沉积物 (Peterson, 1982)。泄漏事故或者工厂污染物排放等，可能使附近水体表层沉积物中聚集大量的有毒物质，如重金属、多氯联苯 (polychlo-