

湖泊和湿地水环境

生态修复技术与管理指南

金相灿

〔日〕稻森悠平 等 编著

〔韩〕朴俊大



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

本书由中、日、韩三国国家级权威环境研究所——中国环境科学研究院(CRAES)、日本国立环境研究所(NIES)、韩国国立环境研究所(NIER)合作编写,汇集了三国近年来在湖泊富营养化治理方面的最新技术成果及宝贵经验,内容翔实,数据可靠。书中介绍了中、日、韩三国湖泊水体富营养化现状,并举例说明了三国主要富营养化湖泊的具体应对措施及效果。对湖泊富营养化的由来、现状及未来趋势做了系统深入的论述,重点描述了适用于亚太国家的湖泊水体、河流、沼泽的水域管理技术,以及防治富营养化的物理、化学、生物技术方法,如土壤渗透法、在线Johkasou废水处理系统、水生植物净化法、CNR工艺、KIDEA工艺等,并且大部分创新技术为首次在国内公开。同时,总结了中、日、韩以及欧美国家有效防止湖泊富营养化的行政措施,以期对今后湖沼富营养化的防治提供有效实用的技术及政策上的指导。另外,书中还提供了研究、调查湖沼水质状况的具体方法及富营养化评价手段。

本书系统全面、结构清晰,涉及内容广泛,写作细致深入,可作为湖沼研究人员及相关管理部门借鉴的指导性书籍。

图书在版编目(CIP)数据

湖泊和湿地水环境生态修复技术与管理指南/金相灿等编著. —北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-019249-3

I. 湖… II. 金… III. ①湖泊-富营养化-污染防治-指南②沼泽化地-富营养化-污染防治-指南 IV. X524-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 093316 号

责任编辑:杨震 朱丽 王国华/责任校对:鲁素

责任印制:钱玉芬/封面设计:王浩

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年7月第一版 开本:787×1092 1/16

2007年7月第一次印刷 印张:25 1/4

印数:1—2 500 字数:584 000

定价:86.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

主编：

金相灿
稻森悠平
朴俊大

中国环境科学研究院
日本国立环境研究所
韩国国立环境研究所

参加编写人员：

中国

金相灿
叶 春
孔海南
徐南妮
胡小贞
柳惠清
颜昌宙
李文朝
舒俭民
金丹越
杜宝汉
姜 霞
王圣瑞
许秋瑾
储昭升
荆一凤
沈 兵
李金秀
周北海
吕锡武
卢少勇

中国环境科学研究院
中国环境科学研究院
上海交通大学
中国环境科学研究院
中国环境科学研究院
天津航道勘察局
中国环境科学研究院
中国科学院南京地理与湖泊研究所
中国环境科学研究院
天津航道勘察设计研究院
大理白族自治州环境科学研究所
中国环境科学研究院
中国环境科学研究院
中国环境科学研究院
中国环境科学研究院
大理白族自治州环境保护局
大理白族自治州环境保护局
北京科技大学
东南大学
中国环境科学研究院

日本

稻森悠平
徐开钦
虻江美孝
大内山高广
林纪男
藤本尚志
村上和仁
稻森隆平
加藤善盛

Yuhei INAMORI
Kai-Qin XU
Yoshitaka EBIE
Takahiro OUCHIYAMA
Norio HAYASHI
Naoshi FUJIMOTO
Kazuhito MURAKAMI
Ryuhei INAMORI
Yoshimori KATO

日本国立环境研究所/福岛大学
日本国立环境研究所/中国武汉大学
日本国立环境研究所
日本环境创造株式会社
千叶县立中央博物馆
东京农业大学
千叶工业大学
福岛大学
日本水道咨询公司

千葉县船桥市役所
明星大学
东北大学
埼玉县环境科学国际中心
埼玉县环境科学国际中心

[illegible]

前 言

我国是一个多湖泊国家,大于 1km^2 的就有 2300 余个,总面积达 $70\,988\text{km}^2$ 。湖泊是我国最重要的水资源之一,是湖泊流域地区经济持续发展和人们赖以生存的基础,对我国国民经济发展具有极为重要的意义。然而,随着我国工农业的迅速发展和城市化进程的加快以及湖泊流域开发活动的加剧,加之人们对湖泊生态系统的脆弱性估计不足,大量污水及营养物质被排放入湖,造成了湖泊的水体污染,使湖泊的富营养化问题日趋严重,极大地影响了湖泊的使用功能及其生态系统的健康状态。

为了对今后湖泊沼泽富营养化防治工作提供有效、实用和全面的技术及政策指导,中国、日本、韩国三国国家级权威环境研究所——中国环境科学研究院(CRAES)、日本国立环境研究所(NIES)、韩国国立环境研究所(NIER)合作编写了本书,中文版由中国环境科学研究院组织出版。全书内容包括:绪论;湖泊、沼泽和水库富营养化机制及环境影响;中国、日本、韩国的湖泊和沼泽的现状及富营养化控制对策;发展中国家湖泊与湿地富营养化状况及其控制;湖泊与湿地最新国际进展;日本富营养化控制对策的核心——霞浦湖水环境修复计划;日本污水处理技术的实用性及其评估;适于亚太国家的水处理技术;防治富营养化的管理对策;湖沼调查方法和注意事项;任务和远景。本书汇集了三个国家近年来在湖泊富营养化治理方面的最新技术成果及宝贵经验,内容翔实,数据可靠,是一本实用性技术指南。

本书中有关日本湖泊与相关章节的内容由日本专家 Yuhei INAMORI、Kai Qin XU、Takahiro OUCHIYAMA、Norio HAYASHI、Yoshitaka EBIE、Naoshi FUJIMOTO、Kazuhito MURAKAMI、Ryuhei INAMORI、Yoshimori KATO、Yasutoshi SHIMIZU 等完成。有关韩国湖泊与相关章节的内容由韩国专家 Jun Dae Park、Dong-Il Jung、Duck-Hee Rhew、Su-Woong Lee、Soo-Hyung Lee、Hyeong-Seok Kang、Dong-Seok Shin、Ju-Hyun Park、Dong-Soo Kong、Yeon-Taek Rim 等完成。有关中国部分的章节,工作内容与编写者为:底泥疏挖工艺与设备选型,金相灿、柳惠清、荆一凤等;与生态恢复和水生植物净化系统相关的内容,叶春、李文朝、胡小贞、杜宝汉等;中国湖泊和湿地的洱海部分,姜霞;巢湖部分,储昭升;太湖部分,许秋瑾;滇池部分,王圣瑞;其他参加编写与翻译的作者还有孔海南、徐南妮、舒俭民、颜昌宙、金丹越、沈兵、李金秀、周北海、吕锡武、卢少勇等。

本书是中、日、韩三国大批环境科学工作者多年实践的结晶,凝结了众多同行专家的智慧 and 汗水,因此我们在此向所有为本书付出努力、做出贡献的同行和专家表示深深的谢意,对支持和关心本书编写与出版的各位领导和同行表示真诚的感谢。

本书所编内容难免有疏漏、谬误和不足之处,恳请同行专家和广大读者予以批评指正。

作 者

2007 年 4 月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 指南编写背景	1
1.2 中、日、韩三国开展共同研究课题的考虑	1
1.3 研发基于生物-生态工程原理的水环境修复技术	2
1.4 促进淡水资源（湖泊和沼泽）的污染防治工作	2
2 湖泊、沼泽和水库富营养化机制及其环境影响	3
2.1 湖泊和沼泽的分类及其特征	3
2.2 富营养化引发有关供水、景观、渔业、农业等方面的问题	6
2.3 富营养化导致藻类异常增殖	7
2.4 富营养化机制	9
2.5 富营养化的污染源及控制措施	10
3 中国、日本、韩国的湖泊和沼泽的现状与富营养化控制对策	15
3.1 日本的湖泊和沼泽	15
3.2 中国的湖泊和湿地	40
3.3 韩国湖泊与湿地	56
4 发展中国家湖泊与湿地富营养化状况及其控制	76
4.1 农汉湖	76
4.2 Kwan Phayao 湖	78
4.3 Bung Boraped 湖	79
4.4 Laguna de 湾	81
4.5 Ypakarai 湖	83
5 湖泊与湿地最新国际进展	86
5.1 水华产生的微囊藻毒素导致动物死亡	86
5.2 鞭毛目生物导致鱼类死亡	87
5.3 肉毒杆菌导致鸟类死亡	88
5.4 漂浮植物异常增殖导致的危害	88
6 日本富营养化控制对策的核心——霞浦湖水环境修复计划	90
6.1 生物工程学方法控制污染源	91
6.2 应用生态工程法控制湖泊内源污染	96
6.3 水质修复效应的综合分析和评价	100
6.4 未来的挑战和展望	103
7 日本污水处理技术的实用性及其评估	104
7.1 中国红枫湖和百花湖修复项目（日本环境省）	104

7.2	韩国水质修复系统发展项目 (日本 JICA)	113
7.3	中国太湖水环境修复示范项目	117
7.4	巴拉圭的 Ypakarai 湖水水质修复项目 (日本 JICA)	120
8	适于亚太国家的水处理技术	126
8.1	富营养化的修复及管理	126
8.2	高级分散家庭排水处理净化槽 (Johkasou)	141
8.3	无动力厌氧土壤沟槽	150
8.4	生态公园水培净化	155
8.5	利用水生植物进行净化的方法	165
8.6	曝气循环净化系统	172
8.7	氧化塘净化系统	181
8.8	沉水植物净化系统	184
8.9	居民参与的厨房污水处理方法	190
8.10	CNR 工艺	195
8.11	贫营养生物吸着工艺	200
8.12	KIDEA 工艺	205
8.13	DNR 工艺	210
8.14	HANT 工艺	214
8.15	引入大型水生植物净化系统	219
8.16	底泥疏挖工艺与设备选型	238
9	防治富营养化的管理对策	253
9.1	中国富营养化防治措施	253
9.2	日本富营养化防治措施	262
9.3	韩国富营养化防治措施	269
9.4	美国富营养化防治策略	283
9.5	欧洲富营养化防治策略	288
10	湖沼调查方法和注意事项	294
10.1	富营养化和评定	294
10.2	流域环境调查	307
10.3	湖沼环境调查	319
10.4	生物学研究方法和注意要点	355
10.5	氮、磷分析方法和注意事项	359
10.6	藻类生长潜力 (AGP) 分析方法及注意事项	364
10.7	微囊藻毒素和其他次要化学物质的分析及注意事项	366
10.8	简易分析和注意事项	369
10.9	结果评价和注意事项	370
10.10	流域与水质模型	373
11	任务和远景	393

1 绪论

1.1 指南编写背景

21 世纪是环境的世纪,污染治理和资源保护,尤其是有关水生生态方面的治理和保护,对建立健康的生态环境有非常重要的意义。环境保护是一个全球性事务,因此需要建立一个国际性的工作网络。目前,中、日、韩三国都从各自环保项目中总结了丰富的经验。因此,非常有必要编制一本包含水环境安全、水资源保护、水华发生机理和控制措施,并适用于热带、亚热带、温带和寒带地区的富营养化防治通用的指南,以起到向亚太国家和地区环境保护提供借鉴和帮助的作用。鉴于此,其他国家和地方政府、企业及组织,在环境治理和保护方面进行跨国培训和技术交流时,也可以从中得到一些借鉴:①人为富营养化的出现、现状与趋势;②富营养化相关的管理、控制措施、监测技术与标准的确定;③湖泊富营养化控制的相关理念、流域管理与公众参与。

目前,全球大量湖泊都面临严重的富营养化及水华问题,部分湖泊出现有毒藻类,其藻毒素的毒性超过氰化钾。世界卫生组织已经在饮用水质量指南中将其列为一项重要指标。这充分表明控制湖泊富营养化十分重要,迫在眉睫。

在此背景下,中、日、韩三国学者编制了《湖泊和湿地水环境生态修复技术与管理指南》,内容十分丰富。本指南涵盖诸多方面:①湖泊富营养化发生机理及其对环境的影响;②中、日、韩及亚太国家的湖泊富营养化现状与控制措施;③全球湖泊面临的新挑战;④中国太湖、日本霞浦湖、韩国八堂湖等富营养化控制案例;⑤亚太国家水环境修复、富营养化管理对策与行政措施、湖泊调查与治理技术以及未来面临的挑战与展望。

1.2 中、日、韩三国开展共同研究课题的考虑

三国环境部长会议(以下简称 TEMM 项目)倡议开展中、日、韩三国有关湖泊富营养化控制与管理的合作研究课题,其目的旨在发展适合于不同国家国情的湖泊富营养化控制与管理技术。研究包括生活污水高度处理系统、低污染水处理的生态工程技术、适合于国情的排放与维护和管理系统。中、日、韩三国(如日本霞浦湖、中国杭州西湖与太湖、韩国八堂湖等)都面临着由富营养化引起的水环境问题。湖泊水体富营养化及其引起的藻毒素问题已成为上述湖区社会各界十分关注的焦点,因此,三国环境部长就此问题开展共同研究并达成了共识,合作研究主要集中在:①基于生物-生态原理的生活污水高度处理系统;②基于生物-生态原理处理低污染水的净化技术;③基于土壤处理的技术系统和其他生态工程适用技术等研发。

1.3 研发基于生物-生态工程原理的水环境修复技术

TEMM 项目的主要研究内容包括以下 8 方面：

- (1) 开发适用于不同国情的去除有机物、氮和磷的生物-生态工程技术。
- (2) 开发适用于不同国情的生物-生态工程水循环使用技术。
- (3) 开发与生态工程技术结合的生物-生态工程系统。
- (4) 开发一体化净化槽污泥循环利用系统。
- (5) 利用生物-生态工程系统建立适用于水环境修复工作的维持、实施和管理系统。
- (6) 采用流域模型对不同纬度地区（热带、亚热带、温带）浅水湖与深水湖进行技术效率评估和分析。

(7) 以中国太湖、西湖为对象，通过搜集湖泊的污染源及其相关数据，对两个湖泊进行数据模拟计算（由韩国完成），开发新型生物-生态工程适用技术（由日本完成），并制定富营养化防治对策。

(8) 本合作项目每年在三国轮流举行国际会议，制定了淡水湖泊污染防治的纲领，实施了由 JICA-KOICA（日本国际协力机构-韩国国际协力团）支持的合作培训计划，合作项目取得了丰硕的成果。

1.4 促进淡水资源（湖泊和沼泽）的污染防治工作

本合作项目由中国环境科学研究院、日本国立环境研究所、韩国国立环境研究院三方承担，共同研究。JICA 是本合作研究项目的重要支持机构，JICA 日韩合作研究项目 [韩国八堂湖流域水环境修复系统开发（1993~1999 年）]、JICA 中日项目（太湖生活污水高度处理与水环境修复）、日韩环境合作委员会项目（对有害藻类生长监测及氮和磷影响的研究）、中日环境合作委员会项目（污水和水资源治理技术在中国的应用、污水高度处理技术在中国的应用、土壤系统污泥高级处理技术在中国的应用研究）等所取得的成果为本项目的实施提供了坚实的科学基础。

2 湖泊、沼泽和水库富营养化机制及其环境影响

本章重点介绍伴随湖泊、沼泽和水库富营养化发生而产生的问题，富营养化发生机理，污染源及其负荷，富营养化对湖泊生态及农业的影响。

2.1 湖泊和沼泽的分类及其特征

2.1.1 湖泊和沼泽的定义和分类

2.1.1.1 定义

《湿地保护法》(1999 年)第二章规定：湖泊(浅水)和沼泽是湿地的一个组成部分。湖泊和沼泽是指滞水区的总称。人工湖分为大坝水库和河渠水库，大坝水库是指在河道上修建大坝而形成的，河渠水库是河渠上的储水区域。

湖泊和沼泽与河流有显著的不同，但有时要区别它们比较困难。如果用水体流速来区分，湖泊和沼泽的水体基本上不流动或流动缓慢，而河流则以一定速度流动，但没有确定的流速和滞留时间标准来区分。

河流的平均滞留时间较短，而湖泊和沼泽则较长，如果滞留时间长于一个月，其特征就接近于湖泊和沼泽。另外，因为在韩国水流量季节变化很大，年均滞留时间就没有多大意义，一些水体在多雨季节表现出河流的特征，而在干旱季节表现出湖泊特征。

2.1.1.2 湖泊的分类

1) 按成因分类

天然湖泊：构造湖、火山湖、冰川湖、牛轭河流湖泊、岩溶湖泊等。

人工湖泊：水库。

天然湖泊与人工湖泊的区别在于人工湖泊可为三个区域，每一区域按其水流速度、光化学及生物特征可具有与河流和湖泊相似的结构和功能(见表 2-1-1，表 2-1-2，图 2-1-1)。

表 2-1-1 影响水库纵向分割的生产效率，藻类生长和水库富营养化状态的环境因子

区域 特点	河流区域	过渡区域	湖泊区域
形状	窄形	宽且深	宽且深，湖泊形
水流	快	速度下降	几乎停滞
悬浮物	多	少	很少且清澈
水下可用光	很低	低	高
营养物质	高，主要为外源性	外源性和内源性结合	主要为内源性
藻类的流失	沉淀	沉淀，捕食	浮游动物捕食
营养水平	富营养化	中营养化	贫营养化

表 2-1-2 自然湖泊与人工湖泊的特点区别

特 点	自然湖泊	人工湖泊
滞留时间	长	短
排水位置	表水层	变温层
涡流程度	低	高
流域表面积	小	大
平均深度	浅	深
温度递减率	由气候和天气来决定	
有机物质的主要来源	内源	外源
通过悬浮物沉淀的量	少	多
有机物的积累	慢	快

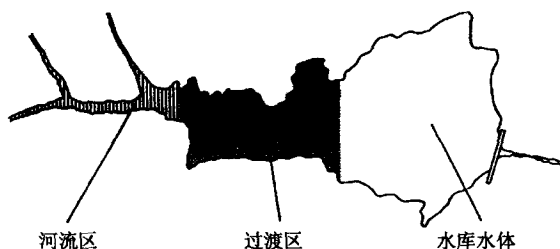


图 2-1-1 水库的纵向分割

2) 按用途分类

农用水库、多用水库、水力发电水库、城市及工业用水库、小型农用水库。

3) 按位置分类

大坝湖、火山湖、防洪湖、河口湖、高山湖等。

4) 按盐度分类

淡水湖、微咸湖、咸水湖。

5) 按营养化水平分类

贫营养化湖泊、中营养化湖泊、富营养化湖泊、超营养化湖泊。

6) 按生态特征分类

协调湖、失调湖（萎缩湖、酸化湖、碱化湖、咸化湖、泥炭化湖泊等）。

7) 按大小分类

大型大坝水库、小水库。

8) 按水闸分类

活动型闸、固定型闸。

9) 按溢流形式分类

溢流坝、非溢流坝。

10) 按建筑方式分类

弓形坝、填充坝。

2.1.2 湖泊的特征

湖泊是陆地上天然形成或人工形成的含水拓扑区域,或者说,湖泊是因拓扑结构变化具有临时形状的储水地。

人工湖泊是为了保证水资源的安全,控制洪涝灾害及发电等建坝而形成的,一般说来,其水域很宽且很长,长宽比大多大于 50。

2.1.2.1 湖泊物理、化学、地质水力学和生物特征

1) 影响湖泊环境的因素

影响湖泊环境的因素主要包括物理因素、化学因素、地质水文因素和生物因素(见表 2-1-3)

表 2-1-3 影响湖泊和湿地环境的因素和因子

因 素	因 子
物理因素	温度,水色,水流,硬度,固体悬浮物
化学因素	DO,BOD,COD,pH,N、P 等营养盐,氧化还原电位,电导率,有机物质
地质水文因素	沉积土壤,基岩,深度,滞留时间,水面面积,流域面积等
生物因素	浮游生物(细菌,浮游动植物),附生细菌,原生动物,自游生物(鱼类),水生大型植物,底栖生物

2) 影响湖泊的复杂因素及其在环境中的相互作用

湖泊的水来源于陆地,因此,为了解湖泊的现状,有必要了解临近流域的生态系统特征,也需要了解与临流水力、水文及地球化学的关系。

为了改善湖水的水质,也必须了解湖泊生态、水体特征及水体污染源的状况。

2.1.2.2 影响湖泊水质的因素

1) 雨量

雨水及河流的水质水文特征,流域污染源的分配决定了湖泊的水质及生产力。由于具有季风气候,东亚地区每年 60% 的降雨发生在 6~8 月份,在此期间,流域中大量污染物随之进入湖泊。水质受非点源污染的影响往往大于点源污染,两类污染源的径流特征也不尽相同。受季风气候的影响,土壤流失导致了严重的水污染,但对其污染机制和对生态系统的影响仍不甚了解,因此,针对湖泊污染,急需提出解决的方案和策略。

2) 流域特征

流域特征包括流域面积、人口、坡度、土地利用、土壤特征等。它们往往与其他因素共同作用,影响湖水的水质。水质的影响程度与流域面积、人口、坡度、土壤侵蚀等成一定的比例关系。流域面积与湖泊水面面积之比称为“分水岭比”,其比例越大,入湖的污染物质所包含的营养物质就越多,富营养化现象就越严重。

3) 水文及水力因素

水文及水力因素包括平均水深、滞留时间等,当水很浅或水体的滞留时间较长时,水体发生富营养化的可能性往往会增大。

4) 生物因素

富营养化的直接结果就是藻类或大型水生植物的过度繁殖。所以,水生植物是重要的因素。湖泊中细菌、浮游动物、鱼类也影响藻类的生长。

2.2 富营养化引发有关供水、景观、渔业、农业等方面的问题

2.2.1 供水问题

2.2.1.1 阻碍混凝过程

在处理富营养化的水体时,需要混凝过程去除水体中的悬浮物质,混凝剂如硫酸铝的用量会随固体悬浮物的增加而增加;同时,藻类的过度增殖会导致水体 pH 的升高,也会阻碍混凝过程。也就是说,藻类的大量增殖不仅会使混凝剂的用量增加,而且,还会阻碍混凝过程。另外,水华蓝藻容易漂浮在水面上,不易沉淀。

2.2.1.2 产生三卤甲烷等致癌物质

为了避免藻类等物质阻碍混凝过滤,有时需要进行预氯化处理。在此过程中,次氯酸与藻类的有机物质反应生成了三卤甲烷(氯仿、一溴二氯甲烷、二溴一氯甲烷及三溴甲烷),这些物质均被认为是致癌物质。动物实验已经表明其中的氯仿、一溴二氯甲烷有致癌性,这也意味着它们对人类同样有致癌性。饮用水水质标准规定所有上述四种物质总含量不得高于 0.1mg/L。

2.2.1.3 堵塞过滤系统

水体富营养化产生的藻华容易堵塞过滤池和过滤筛。产生堵塞作用的不仅限于水华蓝藻,硅藻中杆藻以及直链藻也起同样的堵塞作用。

2.2.1.4 产生臭味物质

富营养化的藻类会对饮用水产生不良的气味,其中一部分是藻类直接产生的,还有些是因为死去的藻类分解产生的,臭味物质一般是二甲基异茨醇(2-MIB)和土臭素(geosmin),席藻、颤藻属、鱼腥藻等常产生这两种臭味物质。

2.2.1.5 铁和锰溶出问题

富营养化产生的大量藻类死亡之后沉降到湖底进行分解,结果使湖底层变为厌氧环境,引起底泥中铁和锰的释放。自来水中的铁和锰会沾污所洗的衣服,影响水的口感,因而在净化过程中需去除,日本供水法的饮用水水质标准规定了水中金属锰和铝的有关条款。另外,世界卫生组织饮用水水质标准分别设定了铝、铜、铁、锰的目标值。

2.2.2 影响景观和娱乐

高度富营养化产生的藻类降低了水体透明度。蓝藻占据优势时,湖水呈绿色;硅藻占据优势时,湖水呈褐色。这严重破坏了水体景观。当水华爆发时,还会在湖表面形成

一层浮渣。各种休闲活动,如游泳、划船等都不适宜在湖面开展,最大的危险是在水下不能看清物体。另外,由蓝藻产生的毒素对暴露在其中的人群产生影响。如在英国,士兵们在严重微囊藻水华的水体中进行划船训练后,都生病了。水华所产生的气味破坏了人们散步和郊游的环境。另外,藻类的分解及底层厌氧呼吸产生的硫化氢不仅影响周围的休闲环境,也影响周围居民的生存环境。

2.2.3 渔业和农业方面的问题

虽然水体具有一定的肥度有利于提高鱼类的产量,因为藻类的大量繁殖可以引起鱼类饵料——浮游动物的增加,但是,高度富营养化使一些名贵的鱼类像鲑鱼、鳟鱼等大量减少,取而代之的是商业价值很低的鱼类,降低了渔业的盈利。另外,富营养化影响了水体捕食者和分解者的构成,使生物群落适应了富营养化的环境。在湖泊和近海海湾里,富营养化导致的缺氧环境影响了鱼类的繁殖,因为幼鱼不能像成年鱼那样忍受严重缺氧的环境,结果导致鱼群数量下降。

富营养化的湖水及河水用于灌溉时,对农作物的产量也有较坏的影响。尤其是氮,会导致过度生长、倒伏、低成熟率、害虫暴发等危害,严重降低了水稻的产量。一般认为,1mg/L的氮是会产生严重影响的,但是浓度超过5mg/L就会产生严重的危害。当家畜饮用了发生有毒蓝藻水华的水后,就会引起健康问题。澳大利亚和美国均报道过家畜(包括牛、羊、猪)和家禽因饮用含蓝藻的水而中毒的事件。

2.3 富营养化导致藻类异常增殖

2.3.1 微囊藻

在微囊藻(*Microcystis*)属中,铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*)、水华微囊藻(*M. flosaquae*)、绿色微囊藻(*M. viridis*)和惠氏微囊藻(*M. wesenbergii*)可在供水的湖泊和水库中生长。在严重污染的水域中,铜绿微囊藻水华和水华微囊藻水华容易暴发。

微囊藻中比较有代表性的是铜绿微囊藻(见图2-3-1)。它的细胞直径为3~7 μm ,具伪空胞,所以可以漂浮在水面上,它的特征是群体无定形,具有胶被。该属是全球富营养化水体中典型的水华蓝藻。夏天,微囊藻迅速繁殖,在水面形成水华并产生难闻的气味以及在水处理的中妨碍混凝过程。另外,微囊藻产生的肝毒素还会导致动物和人类的肝功能紊乱。因此,微囊藻应该在净化过程中去除。

2.3.2 鱼腥藻

在鱼腥藻(*Anabaena*)中,螺旋鱼腥藻(*A. spiroides*)、大孢鱼腥藻(*A. macrospora*)、卷曲鱼腥藻(*A. circinalis*)和水华鱼腥藻(*A. flos-aquae*)在供水的湖泊和水库中易发生。

鱼腥藻是典型的固氮属,其中代表性的螺旋鱼腥藻如图2-3-2所示,细胞直径为4.5~10 μm ,营养细胞连在一起形成链状。鱼腥藻的特点是:细胞链中间含有直径5~7 μm 的球状异形胞,具有伪空胞,呈规则的螺旋状。它们也常称为念珠藻(*nostac*),在各地污染湖泊中经常出现。

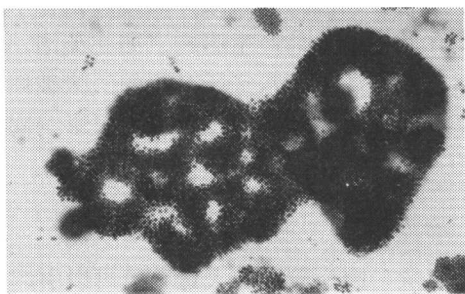


图 2-3-1 铜绿微囊藻的显微照片

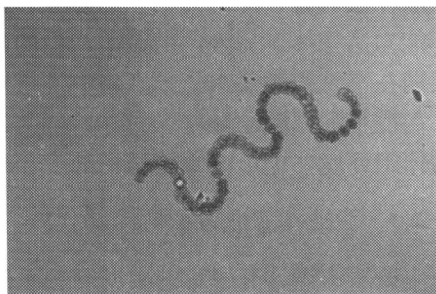


图 2-3-2 螺旋鱼腥藻的显微照片

作为悬浮蓝藻，它们经常形成水华。鱼腥藻细胞在水质净化的氯化过程中会被分散开，且易通过过滤池而对净化后的水质产生严重危害。一些鱼腥藻种会散发真菌气味；另外一些鱼腥藻会释放肝毒素和神经毒素。

2.3.3 颤藻

在颤藻 (*Oscillatoria*) 属中 (见图 2-3-3)，小颤藻 (*O. tenuis*) 和阿氏颤藻 (*O. agardhii*) 在供水的湖泊和水库中容易发生。

颤藻属中有代表性的是小颤藻，它的细胞长 $2\sim 5\mu\text{m}$ ，宽 $2.5\sim 3\mu\text{m}$ ，长大约是宽的 2 倍。颤藻是一种典型丝状蓝藻，以单个藻丝聚集在一起，形成具有很强的竞争能力的藻类。在霞浦湖，从 1987 年开始，夏季优势种微囊藻被颤藻取代。甚至在冬天的湖泊中都可以发现颤藻。

颤藻的增殖破坏了水净化过程中的混凝过程，它们可以通过过滤池而对净化后的水产生严重的危害。一些颤藻还会释放霉味，也有一些会释放肝毒素。

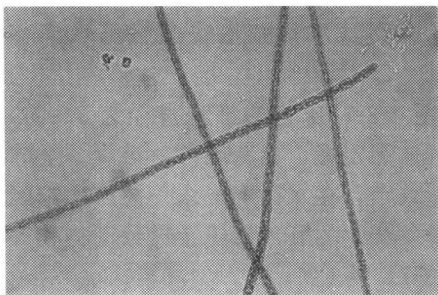


图 2-3-3 颤藻的显微照片

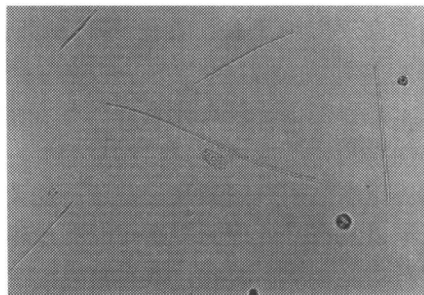


图 2-3-4 席藻的显微照片 (中央)

2.3.4 席藻

在席藻 (*Phormidium*) 属中，小席藻 (*P. tenue*) 和胶鞘席藻 (*P. mucicola*) 在供水的湖泊和水库中易出现。

代表性的小席藻如图 2-3-4 所示，其细胞长 $2.5\sim 5\mu\text{m}$ ，宽 $1\sim 2\mu\text{m}$ 。其特征是细胞有胶鞘，细胞间无收缢，细胞长是宽的 3~4 倍，细胞呈靛青色。席藻属尽管看起来和颤藻属很相似，但可以通过胶鞘来区别。

小席藻是一种腐生蓝藻，一般来说，它或吸附在水中的砾石上，或漂浮在水面上。这种藻类是饮用水中霉味的主要来源，因此是水净化过程中需要重点处理的目标物之一。

2.4 富营养化机制

氮和磷是水生生态系统中藻类、细菌、原生动物、后生动物和鱼类等的必需元素，但是氮、磷过量地进入湖泊和海洋，就会导致水体富营养化。在日本，水体有机污染防治主要集中在减轻生活和工业污水中的 BOD 上，并没有考虑氮和磷的去除，其结果虽然使有机污染得到缓解，但水体氮磷浓度仍然在增加，致使水华或赤潮经常发生（见图 2-4-1）。

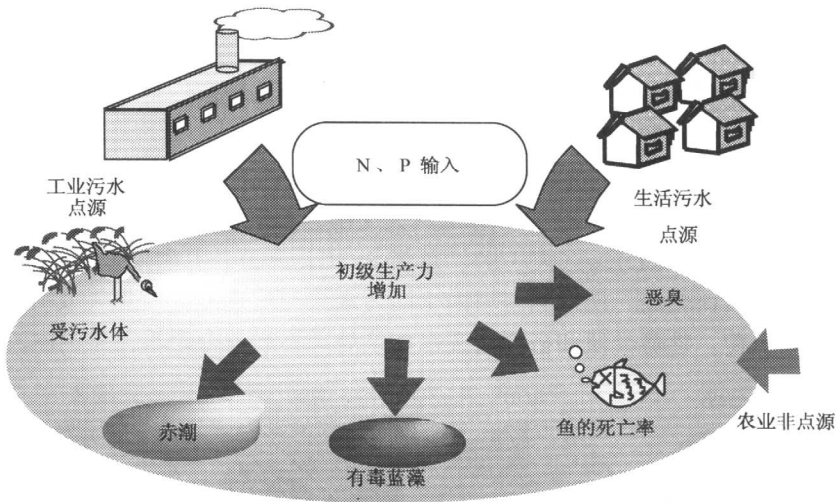


图 2-4-1 富营养化的过程

水华在富营养化湖泊和水库中较多发生，尤其在夏天，如日本的霞浦湖、手贺沼和諏訪湖等发生的水华主要都是蓝藻水华，其主要优势种是微囊藻、鱼腥藻和颤藻。在适宜的温度和光照条件下，这些藻类通过吸收硝酸态或氨态氮以及磷酸盐态磷而大量增殖。藻类营养盐的主要来源有河流的输入、底层细菌分解动植物残体及排泄物以及底层沉积物的释放。藻类的增殖率主要取决于光照强度、水温、氮和磷的浓度等。在超富营养化的湖泊和水库中，大量生长的是蓝藻、绿藻以及硅藻等，其优势种也会随季节的变化而变化，因为每种藻类有不同的繁殖条件，环境条件的变化决定了优势种的不同。在贫营养化环境中，优势种一般不是蓝藻，因为在贫营养化的环境条件下，它们的繁殖能力很低甚至是可以忽略的。据报道，当总氮和总磷的浓度分别超过 0.5mg/L 和 0.08mg/L 时，湖泊中的优势种会变为典型蓝藻微囊藻。

在调查的 211 个日本湖泊中，以氮、磷浓度为指标，来对决定优势种的因素进行分类。研究结果表明，很多湖泊在总氮和总磷分别超过 0.39mg/L 和 0.035mg/L 时，优势种成为蓝藻。温度也是影响藻类繁殖的重要环境因子，在高温的夏季，蓝藻中有代表性的微囊藻成为了优势种。群体形态也是一个重要决定因素，如微囊藻呈群体、颤藻呈丝状，使得其不易被浮游动物捕食。另外，因蓝藻具有伪空胞，可以漂浮在水面上，从

而可以加剧其在湖泊中的优势，并极大地降低水底的光照强度，抑制其他藻类的生长和光合作用。

2.5 富营养化的污染源及控制措施

2.5.1 点源和非点源

湖泊、海洋和河流等公用水体中氮和磷的主要来源是工业、生活、畜禽养殖场和渔场的污水或处理后的污水，像这类位置可以确定的污染源称为点源。除此之外，位置无法确定的污染源，如城镇汇流、工业废物处理场的溢流、非法倾倒废物的渗漏、牧场的排泄物以及森林、农田、高尔夫球场和其他区域的汇流，统称为非点源。

2.5.2 点源的控制

因为点源的位置容易确定，所以它可以从源头上加以控制。各个国家对工业废水及污水处理厂出水都有排放标准。

点源中，生活污水的污染负荷最高，生活污水（不包括粪便）中有机物质、氮、磷的基本量分别是 BOD2.7g/(人·d)、总氮 2g/(人·d)、总磷 0.4g/(人·d)（见图 2-5-1）。而粪便中的基本量为 BOD13g/(人·d)、总氮 8g/(人·d)、总磷 0.6g/(人·d)，显然粪便中氮和磷的负荷较高，所以当区域内生活污水未经处理就流入沟渠或河流，就会产生很高的污染负荷。牲畜粪便和畜栏清洗水如果处理不当就会严重污染河水。

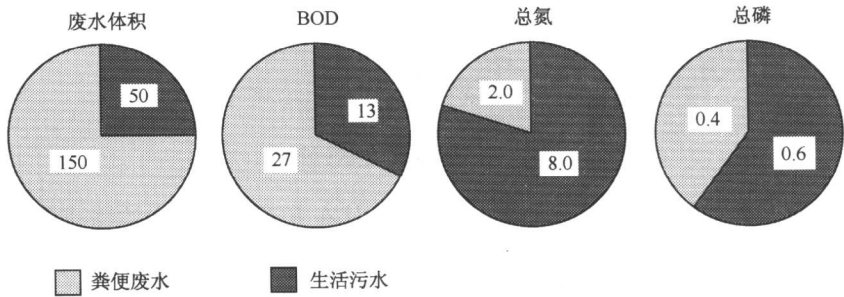


图 2-5-1 生活污染源
单位：废水体积 L/(人·d)，其他 g/(人·d)

畜禽排放的污水中主要含有有机碎屑、氮、磷。每只成年动物的基本负荷见表 2-5-1。每头猪的排泄物是 5.41kg、牛是 50kg，比人的 1.5kg 大得多。牲畜废水的特点是高污染负荷，高污染物浓度，生物可处理性好，有较强的气味。对畜禽养殖场中粪渣进行预处理可在很大程度上降低废水中污染物的浓度。一些水域也遭受了渔业中养殖业的高污染物负荷，鱼类养殖产生的污染物主要是有机物质、氮和磷。在霞浦湖鲤鱼养殖区的污

表 2-5-1 牲畜污染负荷的基本量			
牲畜	BOD/(g/L)	N/(g/L)	P/(g/L)
猪	130	37	14.7
牛	800	290	54

染物负荷中，COD 占 7.4%，N 占 8.3%，P 占 20.3%，其中 P 的比例较大。在该湖的污染负荷中，点源污染物负荷的 COD 占 55%，N 占 58%，P 占 77%，同样，P 的污染物负荷较大（见图 2-5-2）。