

太湖流域水污染及富营养化 综合控制研究

余 辉 等◎著



科学出版社

太湖流域水污染及富营养化 综合控制研究

余 辉 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书针对太湖流域的生态环境问题,通过全面系统的多学科流域综合调查与研究,从流域层面系统地把握了流域社会经济、土地利用格局、污染源结构、太湖及其流域生态环境特征,解析了流域污染源从“排放量—入河量—入湖量”的水污染全过程及太湖水环境承载力,创新提出了涵盖“水源涵养林—湖荡湿地—河流水网—湖滨缓冲带—太湖湖体”的流域“一湖四圈”治理理念,研究形成了以流域“一湖四圈”为主线,包括流域产业结构调整优化、流域污染负荷削减、“一湖四圈”修复与保护及流域综合管理在内的太湖流域水污染及富营养化综合控制中长期方案,可为太湖流域综合治理与战略决策提供科学依据。

本书可供区域发展、生态、资源、环境、湖泊、水文等学科的科研人员、行业部门专业人员、政府部门决策人员、高等院校师生以及有兴趣的社会公众阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

太湖流域水污染及富营养化综合控制研究/余辉等著. —北京:科学出版社, 2014.5

ISBN 978-7-03-040609-5

I. ①太… II. ①余… III. ①太湖-流域-水污染-污染控制-研究 ②太湖-流域-富营养化-污染控制-研究 IV. ①X524

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 097388 号

责任编辑:李上男 朱海燕 李秋艳 / 责任校对:李 影

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:铭轩堂

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

*

2014年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年5月第一次印刷 印张:24 1/2

字数:587 000

定价:129.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书主要作者

余 辉 逢 勇 徐 军
牛 远 卢少勇 卢瑛莹
张 磊

序 言

近年来我国经济的加速发展导致的环境污染问题不断加剧。水体污染是其中影响最深刻的问题之一。湖泊水体富营养化与蓝藻水华暴发已成为全球性水体生态环境问题。太湖是我国第三大淡水湖泊，具有供水、防洪、灌溉、航运、养殖和旅游等多种功能，是太湖流域水生态系统的中枢。随着流域社会经济的高速发展，导致水环境问题也日益突出。2007年蓝藻水华的暴发，严重影响了无锡上百万群众的正常生活，引起社会的高度关注。由于太湖西北部湖区水体的污染与富营养化程度逐年加重，湖体的生态系统急剧退化，生物多样性下降，严重影响了供水质量和周边城市水体的水环境功能，已成为威胁和影响当地居民饮用水安全和流域社会经济持续发展的重大隐患，是国家迫切需要解决的主要水环境问题之一。如何在太湖治污过程中，处理好社会经济发展与流域和湖体生态平衡，最终实现水质改善目标，是目前亟需解决的首要问题。

国际湖泊环境委员会（ILEC）基于 GEF-LBMI 项目（GEF: Global Environment Facility 地球环境基金；LBMI: Lake Basin Management Initiative 湖泊流域管理计划）得出如下结论：湖泊的管理即是湖泊流域的管理；湖泊流域管理必须具有超越国境或行政界线的配合；许多湖泊的流域管理难有成效的原因之一是没有可操作的法规；流域管理必须实施基于科学研究的对策与技术；湖泊流域管理中基于国家政策的长期应对是不可或缺的；没有流域监测与环境问题的因果解析调查研究，也就谈不上湖泊流域管理；湖泊流域管理不是短期工程项目，而是长期计划；如果没有地域利害相关民众的参加与协作，流域管理无法成功。

我国湖泊水污染与富营养化防治工作已经有几十年的历史。湖泊水污染治理及富营养化防治理论不断完善，逐步从“区域”治理过渡到“流域”治理。尤其通过“十一五”国家水体污染控制与治理科技重大专项（以下称“水专项”）的顶层设计与全面实施，湖泊治理的流域理念得到不断发展与丰富，为我国湖泊流域综合整治奠定了坚实基础。

该书从太湖流域整体出发，开展了全流域多学科的综合调查与研究，在流域经济社会、土地利用格局、流域六大污染源（工业源、城镇生活源、农村生活源、种植业污染源、畜禽养殖源及大气沉降污染源）结构及其贡献率、太湖湖体及其流域生态环境特征等方面，获得了丰富而翔实的基础调查

数据及第一手重要资料。该书全面系统把握了太湖流域生态环境状况，认知诊断了太湖流域环境问题；详细分析了流域各生态景观单元在维持太湖流域生态健康过程中的重要地位、作用及其相互关系；创新提出了包括“水源涵养林—湖荡湿地—河流水网—湖滨缓冲带—太湖湖体”在内的太湖流域“一湖四圈”生态圈层理念。该书还重点研究了太湖水环境承载力，解析了流域污染源从“排放量—入河量—入湖量”的全过程特征，提出了流域污染源控制及生态修复的分区、分期、分级指标体系及方案目标；构建了以太湖承载力为核心的流域污染负荷总量控制技术体系，研究制定了以流域“一湖四圈”为主线的太湖流域水污染及富营养化综合控制中长期战略方案，明确了太湖流域控源减负、流域“一湖四圈”生态修复的近中远期“时间表—路线图”。这些创新性的学术观点，加深了对太湖流域全方位、多环节的生态环境问题的深入认知与诊断，为国家及地方“太湖流域水环境综合治理总体方案”“十二五”修编提供了决策依据，为国家水专项“十二五”太湖项目的顶层设计提供了理论与技术支撑。同时，该书对太湖流域水环境治理的多角度思考和深层次探索，丰富了我国湖泊流域综合治理的内涵与理论探索，对我国其他湖泊的水环境污染治理与生态修复具有重要借鉴意义。

中国环境科学研究院 院士



2014年5月

前 言

一湖，泊天下。湖泊不仅是人类赖以生存的珍贵的水资源，也是人类精神寄托之所在，是地元文化的汇集地，承载一域一脉文明史。太湖是我国第三大淡水湖泊，其流域是我国经济最发达、人口最密集、城市化程度最高的地区之一。近年来，由于流域经济快速发展和不合理开发利用导致流域水生态状况急剧恶化，成为生态环境退化最为严重的地区之一。长期以来，对太湖流域的生态环境问题缺乏全面而深入的认知，对太湖流域的水污染与富营养化治理缺乏科学有序的中长期战略方案的指导等，成为影响近年来太湖流域综合治理成效的主要因素。

国家水体污染控制与治理科技重大专项（简称“水专项”）设置了“太湖流域环境综合调查及湖泊富营养化综合控制方案研究”课题（课题编号：2008ZX07101-001，实施年限：2008~2010年），以“调查-诊断-认知-方案”为技术路线，通过大规模全面系统的多学科全流域综合调查，全面把握了流域社会经济、土地利用格局、污染源结构、太湖及其流域生态环境特征，解析了流域污染源从“排放量—入河量—入湖量”的水污染全过程及太湖水环境承载力，提出了包括“水源涵养林—湖荡湿地—河流水网—湖滨缓冲带—太湖湖体”在内的“一湖四圈”流域治理新理念，构建了以太湖水环境承载力为核心的总量控制技术体系，制定了以流域“一湖四圈”为主线的太湖流域富营养化综合控制中长期战略方案，明确了太湖流域控源减负、流域“一湖四圈”生态修复的近中远期“时间表-路线图”。课题成果为环境保护部提出了重大科技建议，为国家及地方“太湖流域水环境综合治理总体方案”“十二五”修编提供了决策依据，为国家水专项“十二五”太湖项目的顶层设计提供了理论与技术支撑。

本书内容以课题组所开展的国家“水专项”课题研究成果为主，其特点体现在如下几方面：一是内容翔实，信息量庞大。涉及从现状调查、问题诊断、深入认知到中长期战略方案等诸多方面的内容。二是取得大量难得的基础数据及现状调查数据，课题组在“十一五”期间花费大量人力物力，开展了集物理、化学、生物为一体的大规模环境综合调查，获得了太湖流域全面而系统的第一手资料。三是通过对环境问题的诊断，形成了对太湖流域生态环境问题的新认知，尤其是关于太湖流域“一湖四圈”生态圈层结构构架、生态圈层生态定位、生态圈层对太湖流域生态健康的影响等方面形成了全新的认识。四是基于“一湖四圈”理论提出了太湖流域环境治理中长期战略方案。本书的研究成果可为太湖流域综合管理措施及流域决策的制订提供科学依据与理论支持，同时为广大科研工作者提供有用的基础数据信息。为使本书更具有参考价值，在第一章介绍了国内外湖泊流域水环境综合治理现状，列举了在国际上具有典型代表性的七大湖泊治理案例。

全书共分12章，由余辉、逢勇、徐军及牛远设计构思框架，经多次集体研究讨论拟定提纲，由余辉统稿。其中，各章节撰写人员如下：前言：余辉；第一章：余辉、牛

远；第二章：余辉、徐军、牛远、张萌、吴锋、卢少勇、李中强、逢勇；第三章：牛远、余辉、卢少勇、张磊、卢瑛莹、张明、颜润润；第四章：余辉、徐军；第五章：逢勇、王鹏、罗缙；第六章：逢勇、罗缙、王华、余辉、胡开明；第七章：逢勇、王华、余辉、罗缙、胡开明；第八章：卢瑛莹、张磊、张明、颜润润、黄冠中；第九章：余辉、张磊、卢瑛莹、王鹏、徐军、卢少勇；第十章：徐军、余辉、张萌、牛远；第十一章：余辉、徐军、逢勇；第十二章：余辉、逢勇。感谢刘倩、王琳杰、赵忠明对本书图表的编辑，刘倩、牛勇、姜岩、邹忠睿对初稿的校对，感谢牛勇、燕姝雯、王雪、张文斌、任德友、焦伟、蔡珉敏、姜岩、邹忠睿、程萌、王强、曲洁婷、薛巍、杜东、杨凡、胡洋等在课题实施期间对太湖流域大调查中所付出的辛劳与支持。太湖流域水资源保护局陈荷生教授为本书框架设计提出了宝贵建议，科学出版社为本书的出版给予了积极的协助。本书为国家重大科技专项“十一五”水专项太湖项目“太湖流域环境综合调查与湖泊富营养化综合控制方案研究”（2008ZX07101-001，2008~2010）的课题成果，本课题由中国环境科学研究院牵头，中国科学院水生生物研究所、河海大学、江苏省环境科学研究院及浙江省环境保护科学设计研究院协作完成，在此对课题组所有研究人员一并表示感谢！同时要特别感谢在课题实施过程中，中国环境科学研究院金相灿研究员对课题组的不遗余力的悉心指导，以及太湖流域水资源保护局陈荷生教授、环保部南京环境科学研究所张永春研究员、中国科学院水生生物研究所谢平研究员等一批著名专家的大力支持与指导！

本书编撰过程中，作者力求做到科学性、前沿性和应用性的有机结合，但由于本书涉及太湖全流域的各个方面，又与多学科交叉，加之缺乏可以借鉴的经验，对于疏漏之处，恳请读者不吝赐教，予以指正。

著 者

2014年5月

目 录

序言

前言

第 1 章	国内外湖泊水环境治理现状与趋势	1
1.1	世界湖泊面临的六大环境问题	1
1.2	世界各国的湖泊水环境治理	5
1.3	我国湖泊水环境治理现状与发展	19
第 2 章	太湖流域水环境与生态特征	23
2.1	太湖及其流域环境分析	23
2.2	流域湖体与生态圈层特征	30
2.3	流域土地利用格局变化特征	55
第 3 章	太湖流域产业结构现状及污染源排放量特征解析	73
3.1	流域产业结构现状及问题诊断	73
3.2	流域污染源结构及区域特征解析	97
第 4 章	太湖流域“一湖四圈”富营养化综合控制总体理念	105
4.1	太湖流域“一湖四圈”生态环境问题诊断	105
4.2	“一湖四圈”综合治理理念及综合控制技术体系	108
4.3	流域综合控制分区	110
4.4	控制方案总体目标与阶段目标	117
4.5	流域控源重点区域与方向	118
4.6	流域“一湖四圈”生态修复重点区域	119
4.7	综合控制方案指标体系	119
4.8	太湖流域水污染治理与富营养化控制的时间表及路线图	122
第 5 章	太湖流域复合模型构建及污染物入河-入湖量全过程解析	125
5.1	太湖河网区水环境数学模型构建	125
5.2	污染物入河-入湖量全过程计算分析	135
5.3	太湖流域污染源排放量、入河量及入湖量汇总	145
第 6 章	太湖水环境承载力研究	147
6.1	太湖水环境承载力计算方法	147
6.2	太湖水环境数学模型构建	147
6.3	湖体水环境功能分区	150
6.4	设计水文条件选取	160
6.5	水质降解系数求取	161
6.6	水环境承载力计算结果及分析	166
第 7 章	太湖流域陆域-水域复合模型构建及总量分配技术体系	172
7.1	太湖流域陆域-水域复合模型构建	172

7.2 太湖入湖污染物溯源研究 173

7.3 内源污染负荷研究 182

7.4 太湖氮磷营养盐大气湿沉降特征及入湖贡献率研究 218

7.5 太湖入湖污染物通量及物质平衡 225

7.6 总量分配技术体系及方案 233

第 8 章 流域产业结构优化调整方案..... 246

8.1 基于水环境综合治理的产业结构调整思路 246

8.2 第一产业内部结构优化调整方案 247

8.3 第二产业内部结构优化调整方案 253

8.4 第三产业内部结构优化调整方案 274

8.5 产业结构调整的保障措施 278

第 9 章 流域污染负荷削减方案..... 280

9.1 工业污染源削减与控制方案 280

9.2 城镇生活污染源削减与控制方案 288

9.3 农村生活污染源削减与控制方案 299

9.4 养殖污染源削减与控制方案 308

9.5 种植业污染源削减与控制方案 315

第 10 章 流域“一湖四圈”修复与保护方案 324

10.1 指导思想、分期目标与指标体系..... 324

10.2 流域水源涵养林修复与保护方案..... 325

10.3 流域湖荡湿地修复与保护方案..... 330

10.4 流域河网修复与保护方案..... 334

10.5 湖滨缓冲带修复与构建方案..... 337

10.6 太湖蓝藻水华控制方案..... 340

10.7 湖体生境中长期修复方案..... 346

第 11 章 流域综合管理方案 352

11.1 湖泊流域综合管理（ILBM）体系构建 352

11.2 太湖流域综合管理的大方向、大思路与大格局..... 353

11.3 太湖流域污染源监管方案..... 354

11.4 太湖流域“一湖四圈”生态环境监控方案..... 357

11.5 流域全民参与的环保事业推进方案..... 358

第 12 章 控源实施方案的可达性分析 362

12.1 太湖总量控制的可达性分析..... 362

12.2 太湖水质目标可达性分析..... 362

12.3 投资估算..... 367

12.4 工程规划..... 368

12.5 资金筹措机制..... 369

12.6 方案实施条件与保障措施..... 370

参考文献..... 374

第 1 章 国内外湖泊水环境治理现状与趋势

1.1 世界湖泊面临的六大环境问题

湖泊是地球表面的一种水体。按其科学的涵义，指的是陆地上的一类洼地，其内蓄积一定的水量，与海洋又不发生直接联系的一种天然水体。湖泊是地表特殊的自然综合体，同时又是重要的国土资源，它与河流、森林和土壤一样，是自然资源的重要组成部分。湖泊能调节河川径流、防洪减灾；湖水可用于农田灌溉、沟通、航运、进行发电、提供工农业生产以及饮用水源，还能繁衍水生动物、植物，发展水产品生产。湖泊水体的存在，可改善湖区生态环境，提高环境质量（中国科学院网络化科学传播平台，<http://www.lake.ac.cn>）。

湖泊对人类具有重要作用，但其结构和功能已经受到人类活动的严重干扰，并导致严重的负面影响。国际湖泊环境委员会（ILEC）对世界主要湖泊（包括水库形成的人工湖）所作的调查结果显示，湖泊普遍存在的环境问题有如下六个方面：泥沙淤积、水位下降、有毒物质及农药污染、富营养化、湖水酸化和土著生物及生态系统的破坏（图 1.1）。

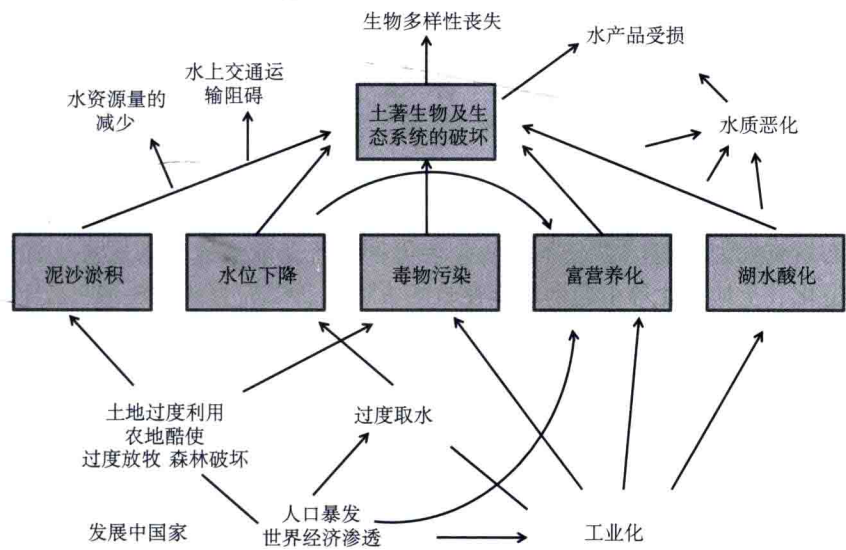


图 1.1 世界湖泊面临的六大环境问题

1.1.1 泥沙淤积

泥沙淤积主要是指河水挟带的泥沙在湖泊、水库的堆积。通常情况下水流进入湖泊、水库后,由于水深沿流程增加,水面坡度和流速流程减小,导致水流挟沙能力降低,进而出现泥沙淤积。湖泊、水库上游的人类活动和自然环境的变化,如农业活动引起的土壤表面侵蚀,亚洲、非洲、中美洲地区人口增加导致的森林破坏,原为牧场的农耕地荒废之后出现的土壤侵蚀等,使河流挟带大量泥沙注入湖泊和水库。

我国的鄱阳湖和洞庭湖就受到了泥沙淤积的严重影响。长江含沙量虽然不算高,仅 $0.54\text{kg}/\text{m}^3$,但由于水量丰沛,年沙量也近 5 亿 t (钱宁和万兆惠, 1983)。长江大量泥沙涌入洞庭湖,造成了湖盆迅速淤高,加之由此诱发的人类大规模湖泊垦殖活动,湖泊急剧萎缩。洞庭湖区多年平均淤积量为 $1.1427 \times 10^8 \text{t}$,由于受三峡工程等的影响,洞庭湖区泥沙淤积量呈逐期减少趋势,尽管如此,淤积量仍占入湖沙量的 70% 左右,近几十年来洞庭湖区始终处于淤积状态 (李景保等, 2008)。严重的泥沙淤积,造成了湖泊调蓄长江中游洪水的功能严重衰退,危及长江中下游地区的防洪安全 (姜加虎和黄群, 2004)。另外,它还会造成一系列生态环境问题,比如鱼类资源枯竭、生物多样性减少等,危害着洞庭湖的健康 (李景保等, 2008)。鄱阳湖也面临着类似的情况。鄱阳湖港汊及赣江三角洲区,湖泊淤积严重。其特征主要表现为:入湖口河流消失及改道,湖区尾部沼泽化,芦苇、杂草丛生,一片荒芜 (马逸麟等, 2003)。鄱阳湖的泥沙淤积也对湖区环境造成了一系列影响:①汛期抬高洪水水位,引起受灾面积扩大;②枯水期受风沙危害,并形成滨湖沙丘;③引起河床改道,阻碍航运交通;④湖区水产资源受到破坏,渔获量迅速减少 (左长清, 1989)。

1.1.2 水位下降

来水量减少,水位下降是由自然和人为活动共同造成的复合结果。人为活动在湖泊水位下降过程中的作用,直接耗水量并不是主要的,关键在于人为活动对生态系统的破坏,使生态系统失去平衡,生态环境日益恶化,从而逐渐形成生态灾害,诸如森林破坏、草场退化、土地沙化等引起的综合性自然灾害,所以人为活动在湖水水位下降过程中的作用既是间接因素,也是诱导因素。

由于人为原因导致水位下降的典型例子如咸海。咸海的来水量主要由阿姆河和锡尔河的径流组成,但在其上游大规模地开垦棉田和水田之后,这两条河流还没流到咸海便消失在沙漠之中。如今咸海水面已下降 13m,海岸线后退 100km,含盐量增加,引起严重的生态灾害。由于气候变化引起水位下降的典型例子如北非的乍得湖。自 1960 年以来,乍得湖在短短 40 多年间面积萎缩 90% 以上,除了大旱灾等自然因素,还要归因于乱砍滥伐、大规模灌溉以及在注入乍得湖的河流上修建水库等人为因素,使乍得湖来水量骤减,水位下降。湖区生态环境严重失调,干旱程度愈演愈烈,农业收成和渔业产出持续减少,湖区 2000 万人面临饥荒威胁。若不采取任何措施,乍得湖可能在 20 年后消失。近年来,由于气候变暖和人类不合理地开发利用,中国若干内陆湖泊濒临绝境,

甚至消亡,如罗布泊、玛纳斯湖等;有些湖泊面积锐减,如位于新疆的艾比湖,20世纪50年代湖泊面积为1100km²,至80年代末面积已减小一半。湖泊水位下降与面积收缩,致使湖滨地区大片沼泽干涸、森林消失,沙漠迅速发展(秦伯强和张运林,2001)。

1.1.3 有毒物质及农药污染

化学物质、农药等污染湖水、库水的现象,越来越频繁。第四届世界水论坛提供的联合国水资源世界评估报告显示,全世界每天约有数百万吨垃圾倒进河流、湖泊和小溪中,每升废水会污染8升淡水。仅城市地区一年排出的工业和生活废水就达500多立方千米,而每一滴污水将污染数倍乃至数十倍的水体。由于湖泊水交换周期长,与江河海洋相比对污染物的稀释能力较弱,是一种脆弱的生态系统,生态平衡容易遭到破坏且不容易恢复。

有毒物质污染较为典型的湖泊是俄罗斯境内的贝加尔湖。它是世界上最古老和最深的湖泊,位于西伯利亚南部,对于俄罗斯人而言,贝加尔湖象征着美与力量。然而,湖泊周边造纸厂的污染严重威胁着贝加尔湖及其周边的原始生态环境,污染扩散到200多平方千米的湖面,造纸厂排放的大量有害化学物质及污水威胁到湖泊的1500个物种。

目前,持久性有机污染物(POPs)的相关研究已成为世界研究的热点问题。它以环境持久性、生物蓄积性、半挥发性和高毒性特性对生态环境造成严重的影响和破坏。1962年,美国的雷切尔·卡逊在其《寂静的春天》中讲述,北美5大湖区由于DDT和PCBs等物质对白头雕的生殖发育产生严重影响,致使其蛋壳变薄、孵化率下降、雄鸟雌化种群数量急剧增加,引起了一场环境问题的轩然大波。我国对有机氯农药研究相对较多,不过主要集中于海湾及河口一带(张秀芳等,2000;吕景才和徐恒振,2002;杨清书等,2005),对湖泊的研究较少(龚香宜等,2009)。

1.1.4 富营养化

富营养化本是湖泊演化过程中的一种自然现象,这种演化是十分缓慢的,但由于人类经济活动的迅速发展,大大加速了湖泊的这一进程,它严重影响到湖泊的功能,破坏了湖泊的生态平衡,造成经济损失。

从20世纪30年代首次发现富营养化现象到现在,全世界已有30%~40%的湖泊和水库受到不同程度的富营养化的影响(朱育新等,2002)。湖泊富营养化、水库富营养化在自然条件下极为缓慢,但由于生活污水、工业废水、农牧业排水和雨水径流等携带的营养物质(氮、磷)流入湖泊、水库,富营养化过程便大大加速。当前,我国的湖泊富营养化状况十分严峻。根据《2010年中国环境状况公报》,我国26个国控重点湖泊(水库)中,满足Ⅱ类水质的1个,占3.8%;Ⅲ类的5个,占19.2%;Ⅳ类的4个,占15.4%;Ⅴ类的6个,占23.1%;劣Ⅴ类的1个,占38.5%。大型水库水质好于大型淡水湖泊和城市内湖。26个国控重点湖泊(水库)中,营养状态为重度富营养的1个,占3.8%;中度富营养的2个,占7.7%;轻度富营养的11个,占42.3%;其他均为中营养,占46.2%。

湖泊富营养化破坏了湖泊原有的生态系统的平衡,导致水生植物的生长被抑制,生物多样性下降,甚至引起沉水植物的急剧消失和大规模的水华暴发,对周围的环境产生极大的危害。主要体现在以下几个方面:①影响水质。处于富营养化的水体中,常常蓝藻大量繁殖,水体色度增加,透明度大大降低,水质变坏,并散发出腥臭味,污染居住环境。②影响渔业等生物资源利用,水体经济价值降低。虽然一定程度的水体富营养化可能导致渔业产量的增加,但严重的富营养化的水体会因为藻类释放的毒素和溶解氧的短缺,导致鱼类种类和数量减少,并直接影响鱼类质量,导致经济效益大大降低。③严重影响湖泊水体的生态环境。处于富营养化污染的水体,正常的生态平衡遭到破坏,导致水生生物的稳定性和多样性降低。异常增殖的藻类还会分泌一些能够使人体致癌的毒素(如微囊藻毒素等),不仅威胁水生生物的生存,还会直接或间接地影响人类健康(中国科学院网络化科学传播平台, http://www.lake.ac.cn/topics_con_1431.html)。

1.1.5 湖水酸化

天然水体中含有碳酸氢根离子,因此它们有中和酸的能力,即碱度。水体碱度数值上为碳酸氢根离子浓度,加上两倍的碳酸根离子的浓度,再加上氢氧根离子浓度。当酸性物质进入碳酸氢盐水体,首先中和氢氧根离子,然后中和碳酸根离子形成碳酸氢根离子,最后中和碳酸氢根离子形成碳酸,再增加氢离子,水体的酸性将明显提高。因此,水体碱度大,酸中和能力大,其对酸性的缓冲能力大,可容纳更多额外增加的酸。据碱度定义,湖泊完全失去碱性叫酸化。当某水体接受氢离子量超过其本身中和离子量(通常是碳酸氢盐),便发生了酸化。

湖泊的酸化主要是酸雨而致,酸雨是通过以下途径进入湖泊,造成湖泊酸化的:干湿酸沉降可直接降入湖水内;降入河内再流入湖内;落到植被上,雨水冲刷形成径流,注入河湖;渗入土壤,进入地下水,流入湖内。欧美国家等地由于酸雨长年不断,20世纪70年代,数以千计的湖泊被酸化。瑞典近4000个湖泊,其pH下降到0.5以下,导致湖中生物大量死亡。投放石灰之后,pH有所上升。在日本,高山地区的湖泊和水库由于周围没有森林,挡不住酸雨的袭击而发生酸化现象。美国东北部及加拿大东南部地区的湖泊水质酸化,pH一度低到1.4,污染程度较弱的湖泊pH仍有3.5,依然带有较强的酸性。

湖泊酸化使得沉积物中的碱金属、碱土金属和重金属阳离子很快地被溶解和流失,毒害鱼类,使其繁殖和发育受到严重影响(朱育新等,2002)。酸化环境中铝含量的增加被普遍认为是生物受水体酸化危害的重要原因之一(Myllynen et al., 1997)。一般认为有机整合铝没有毒性,而无机铝有毒(Driscoll et al., 1980)。随着pH的降低,加上水体酸化引起底部淤泥对铝的释放,导致水体中的 Al^{3+} 浓度升高,毒性变大(彭金良等,2001)。研究表明,湖泊酸化可改变微生物的组成和代谢活性、毒害藻类、水生维管植物、浮游动物、软体动物、鱼和两栖动物等。从酸化的湖泊中摄取食物和水的鸟类与哺乳动物可能也会遭受食物短缺和有毒金属的危害(杜宇国,1992)。随着水体pH降低,细菌总数减少,各种生物作用减缓,加速了水体的贫营养化过程(王云飞等,2001)。另外,水体酸化会使水生生物的多样性下降,结构简单化,食物链和种间

关系遭到破坏。一般当 $\text{pH} < 6.5$ 时, 水体酸化对生物的影响开始显现, 随着水体酸化程度的进一步加大, 对水生态系统的影响也越明显 (彭金良等, 2001)。

1.1.6 土著生物及生态系统的破坏

湖泊生态系统是一个复杂的综合体系, 它是盆地和流域及其水体、沉积物、各种有机和无机物质之间相互作用、迁移、转化的综合反映 (濮培民等, 2001)。上述 5 种环境变化, 或单独、或组合起来引起生态系统的变化和破坏。

至今规模最大的湖泊生态破坏发生在威海。20 世纪 60 年代初, 威海湖面海拔 53m, 面积 6.45 万 km^2 , 为世界第四大湖。此后, 由于阿姆河和锡尔河的河水大量用于农业和工业, 加之 70 年代以来气候持续干旱, 导致湖面水位下降、湖面积急剧下降和湖水盐度增高, 鱼产量减少, 多种鱼类灭绝, 湖盆附近地区有大量干盐堆积, 植物受到破坏, 沿岸居民的健康受到威胁。由于湖泊生态的脆弱性, 加上人们不合理地利用湖泊资源, 我国绝大多数湖泊的良性生态系统, 也遭受到不同程度的破坏, 乃至整个湖泊的消亡 (张兴奇等, 2006)。这其中最为突出的就是湖泊的富营养化导致湖泊生态系统的退化问题: 沉水植物的衰退和大规模蓝藻水华的暴发。

另外生物入侵也是湖泊生态系统面临的一个很严峻的问题。当某种动物、植物或微生物进入新的生态群落后, 有可能破坏其原有的物种平衡关系形成优势种群, 导致生态群落的物种组成和构成发生改变, 最终彻底破坏整个生态系统。外来种往往具有生长迅速、抗逆性强、食物广谱和繁殖率高的优点, 它们的引入会对当地生物种群间的关系, 如捕食、竞争、牧食、寄生和互惠等产生影响, 会与土著生物争夺水、肥、光能等, 侵占湖泊地下和地上空间, 影响光合作用, 干扰湖泊土著生物的正常生长 (Javier et al., 2005)。

1.2 世界各国的湖泊水环境治理

随着人口的大量增长、城市化进程的加剧及工农业生产的大力发展, 湖泊生态系统的健康也相应地受到威胁, 出现了严重的湖泊富营养化、水体萎缩、生态功能下降等现象, 严重威胁着湖泊的生态环境。湖泊富营养化已经持续了 60 余年, 日本和欧美的一些发达国家, 围绕湖泊富营养化发生的机制, 生态学和生物地球化学多年来进行的一些基础研究, 也取得了一些研究成果, 在治理方面做了很多的探讨和实践, 为大型湖泊富营养化的研究积累了许多的经验。发展中国家目前都面临相似的社会经济发展困难和挑战。最严峻的问题是发展中国家日益增长的人口及其城市和工业化对资源与环境的需求, 特别是对水资源的需求大量增加, 导致水资源供需矛盾突出以及与之相关的生态环境恶化。

湖泊治理是全球性的水环境难题, 世界各国都曾出现或都正在面临着种种顽疾, 如何借鉴国外的研究治理经验为中国湖泊的治理保驾护航, 成为湖泊领域一些专家学者们讨论的热点话题。

1.2.1 日本琵琶湖 (Lake Biwa)——完善的污水处理系统

1. 湖泊概况

琵琶湖位于日本本州岛中部滋贺县（日本行政区划中县相当于我国的省）境内（图 1.2），有 400 多万年历史，是世界上第三大古老的湖泊。琵琶湖流域面积占该滋贺县行政区总面积的 93%，琵琶湖面积约占滋贺县面积的 1/6，为 670km²，分为南北相连的两湖。北湖最大水深达 104m，平均水深 43m，是典型的大中型深水湖，而南湖平均水深仅 4m，具有浅水湖泊特征。北湖与南湖的面积比为 11:1，贮水量差异巨大，分别为 273×10⁸m³和 2×10⁸m³。由于南北湖盆不同，南湖和北湖在水质和水生物等方面差异甚大。琵琶湖四面环山，集水域约有 460 条大小河流汇入琵琶湖，而出口只有唯一

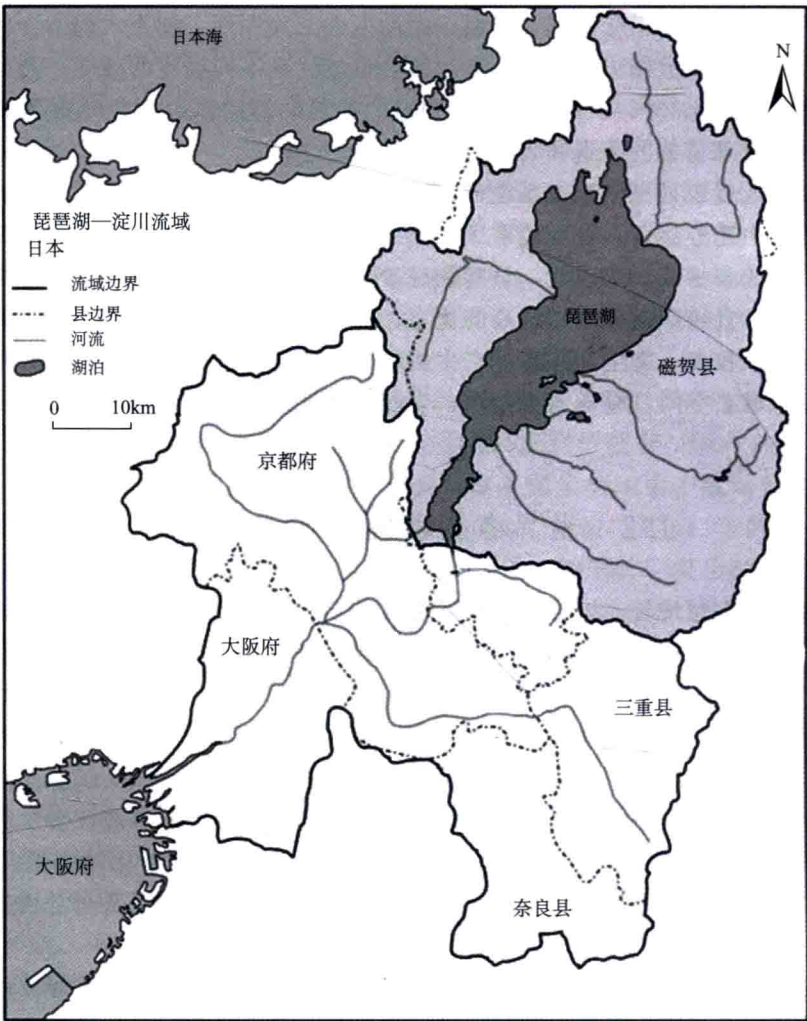


图 1.2 琵琶湖的地理位置

(修改自 http://www.worldlakes.org/uploads/LBMI_Main_Report.pdf)

的瀨田川，经由淀川最终流入大阪湾。琵琶湖因其独特的湖泊构造形态，在湖泊生态学、湖泊地形与地质学及陆地水文学研究领域有极高的研究价值而著称于世。

2. 治理历程

琵琶湖流域的治理始于 20 世纪 70 年代，经历了长期而艰巨的历程，从国家、地方政府到地域居民共同付出了 30 余年的艰辛努力，耗资 1800 亿元，使琵琶湖从 20 世纪 70~80 年代的富营养化、蓝藻水华暴发严重的水体修复到 21 世纪初的具有健康水生态系统的水体，取得了举世瞩目的成绩（余辉，2013）。

20 世纪 60 年代前，琵琶湖还处于贫营养化状态，但从 20 世纪 60 年代后的近 30~40 年间，湖周环境发生了极大变化，产业结构剧变，第一、二、三产业的从业人数由 20 世纪 60 年代的 51%、21% 和 28% 变为现在的 6%、32% 和 62%。20 世纪 70 年代随着工业废水及生活污水的排入，琵琶湖水质急剧恶化，南湖从中营养逐渐向富营养转变，北湖已处于中营养水平。1977~1985 年连续 9 年暴发淡水赤潮，从 4 月末持续到 6 月初，水温范围为 15~20℃，鞭毛藻大量暴发引起湖水变成红棕色，湖水透明度剧减，并伴有腐鱼气味。1983 年 9 月，在琵琶湖首次暴发蓝藻水华，之后蓝藻水华频发，水华蔓延水域及累积发生日数不断增加（图 1.3）（余辉，2013）。

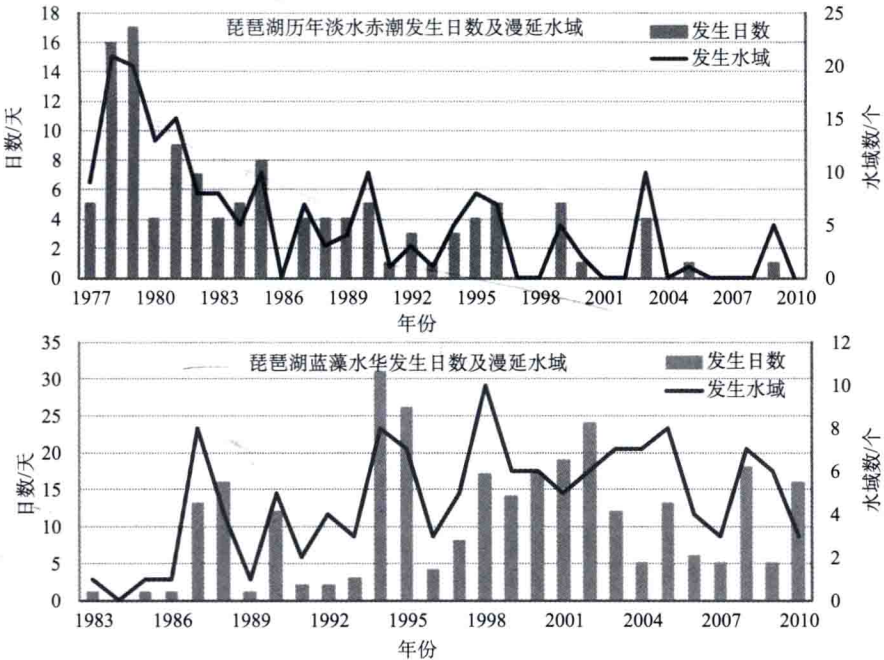


图 1.3 琵琶湖历年淡水赤潮与蓝藻水华发生日数及漫延水域

研究发现磷为琵琶湖浮游植物增殖的限制因子，是引起湖体富营养化的关键因素，提出了以控磷为主导的流域控源策略，在此时发动的著名的“洗涤剂禁磷运动”也是该策略的有力体现。流域磷污染负荷的削减主要得力于城市污水处理系统的完善，琵琶湖流域城市下水道普及率已达 85.8%（2010 年），高于全日本 73.7% 的平均水平。琵琶