

# 太湖流域重大治污工程 水生态影响监测与评估

吴时强 吴修锋 戴江玉 陆海明 著



科学出版社

# 太湖流域重大治污工程水生态 影响监测与评估

吴时强 吴修锋 戴江玉 陆海明 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是“十二五”国家水体污染控制与治理科技重大专项子课题“太湖流域重大工程生态影响监控与评估”研究成果的系统总结。主要以“引江济太”工程与太湖生态清淤工程为研究对象,通过分析引水与生态清淤工程影响下太湖浮游植物、底栖生物、水生植物及其生境理化要素的动态响应,优化了重大工程生态影响跟踪监测技术,构建以单因子指数与综合指数为一体的重大工程生态影响评估指标体系,提出了太湖流域重大工程生态影响跟踪监测与评估技术方案,可为流域重大治污工程水生态监测与评估提供技术参考。

本书可供生态水利学、环境工程学、湖泊生态学、环境生物学及湖泊水生态环境保护等相关领域的科研技术人员、政府部门相关管理人员和高等院校师生阅读和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

太湖流域重大治污工程水生态影响监测与评估/吴时强等著. —北京:科学出版社, 2019.4

ISBN 978-7-03-061079-9

I. ①太… II. ①吴… III. ①太湖-流域-水环境-生态环境-环境监测②太湖-流域-水环境-环境生态评价 IV. ①X143

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第075040号

责任编辑:周丹 曾佳佳/责任校对:杜子昂

责任印制:师艳茹/封面设计:许瑞

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>

河北鹏润印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年4月第一版 开本:720×1000 1/16

2019年4月第一次印刷 印张:14 1/2 插页:4

字数:290 000

定价:128.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

地处北亚热带的长江中下游地区，是我国湖泊分布较为集中的区域之一。其中面积  $1 \text{ km}^2$  以上的湖泊超 600 个，约占我国淡水湖泊总面积的 60%，且这些湖泊大多是浅水湖泊。近年来，受人类活动和亚热带季风气候影响，该地区的众多浅水湖泊已呈富营养化，夏秋季节蓝藻水华频发，水质不断恶化，局部水域甚至发生湖泛黑臭现象，严重威胁湖泊流域经济发展和生态环境健康。以太湖流域较为典型，太湖流域位于长江中下游三角洲腹地，河网如织，湖泊星罗棋布，水面总面积约  $5551 \text{ km}^2$ ，水面面积在  $0.5 \text{ km}^2$  以上的大小湖泊共有 189 个，湖泊面积  $40 \text{ km}^2$  以上的有 6 个。太湖作为流域最大湖泊，承载着流域水资源调蓄与水生态维系的核心作用。太湖蓝藻水华防控问题一直是国内外焦点。

作为应对湖泊蓝藻水华灾害、改善富营养化状况的有效手段，引水、清淤等工程措施已广泛应用于国内外湖泊治理实践，并在太湖流域发挥了积极作用。如“引江济太”工程，在现有的望虞河引水、太浦河供排水为主的工程体系下，“十二五”期间“引江济太”累计通过常熟水利枢纽调引长江水  $100.1 \text{ 亿 m}^3$ ，通过望亭水利枢纽引水入湖  $48.8 \text{ 亿 m}^3$ ，通过太浦闸向下游地区增供水  $49.0 \text{ 亿 m}^3$ ，改善了太湖及周边河网水质，保障了太湖、太浦河及黄浦江上游水源地供水安全，有效应对了突发水污染事件，取得了显著的社会、经济、环境和生态效益。

根据《太湖流域水环境综合治理总体方案（2013 年修编）》要求，流域在结合水资源配置和防洪工程前提下，积极推进太嘉河、平湖塘延伸拓浚、新沟河延伸拓浚、新孟河延伸拓浚、望虞河西岸控制、扩大杭嘉湖南排、望虞河后续（拓宽）等引排工程项目的实施，目前多个工程正在实施或已竣工运行。对于生态清淤工程，流域也在推进东太湖、西太湖等生态清淤工程。同时，对洮湖、阳澄湖、长广溪等淤积比较严重的湖泊河网适度进行生态清淤，并妥善解决可能出现的底泥重金属或持久性有机污染物超标等问题。

随着太湖流域引水与清淤等重大工程的持续运行或建设，对太湖乃至流域的水生态将会产生不可忽视的影响。对于引水工程，现阶段望虞河引水入湖水源的氮磷营养盐含量仍然高于湖泊水体，而引水在加速湖泊水体交换的同时对水生态影响及其程度如何也并未有科学论断；对于清淤工程，大规模的清淤对于沉积物及其上覆水体生物化学效应与恢复性也缺乏有效评估。同时，不同于传统的湖泊水生态监测与评估，引水与清淤等工程的湖泊水生态影响与工程动态调度运行情况密切相关，水生态要素的时空分布规律不同于未受工程影响的水域，传统的湖

泊水生态监测与评估方法并不完全适用。因此，引水与清淤等工程湖泊水生态效应亟须科学、系统的监测与评估。

本书在系统回顾国内外湖泊水生态监测、引水与清淤工程水生态效果评估研究进展的基础上，针对太湖流域典型引水工程及生态清淤工程，采用调研、监测等方法，针对水文、气象、生境、生物等多种耦联相关的生态要素，结合工程生态敏感因子，在流域生态监测网络体系构建的基础上，研究太湖流域引水工程、生态清淤等重大工程对湖区水生态影响监测体系建立的关键技术，完善工程水生态效应监控指标与点位布设体系，初步确定典型重大工程水生态环境影响评估的指标，提出太湖流域重大调水引流工程与生态恢复工程水生态影响的跟踪监测与评估程序和方法，开展典型引水、生态清淤工程等重大工程水生态影响的评估，形成重大工程湖区水生态影响监控与评估技术方案，为太湖流域水生态监控网络、技术方法体系及业务化运行模式建立提供科学和技术支撑。

全书共分为十章。各部分撰写人员如下：前言由吴时强撰写；第1章由吴时强、戴江玉、陆海明、沙海飞撰写；第2章由吴修锋、戴江玉、陆海明撰写；第3章由吴时强、吴修锋、薛万云撰写；第4章由戴江玉、吴修锋、吕学研撰写；第5章由戴江玉、吕学研、杨倩倩撰写；第6章由吴时强、戴江玉、杨倩倩撰写；第7章由陆海明、戴江玉撰写；第8章由陆海明、吴时强撰写；第9章由陆海明撰写；第10章由吴时强、戴江玉、陆海明撰写。全书由吴时强、戴江玉、陆海明等统稿、定稿。

本书的出版得到国家水体污染控制与治理科技重大专项（2012ZX07506-003）和国家自然科学基金面上项目（51479120，51679146）以及中国科协青年人才托举工程项目（2017QNRC001）的联合资助。撰写过程中还得到南京大学、河海大学、江苏省水利厅、生态环境部南京环境科学研究所、中国科学院南京地理与湖泊研究所、江苏省环境监测中心、常州市环境监测中心、苏州市环境监测中心等单位的帮助，在此一并致谢。工程水生态效应应当长期跟踪关注，本书受监测资料的限制，以及限于作者水平，难免有不妥之处，恳请读者批评指正，以便在今后的研究工作中加以改进。

作 者

2018年10月

# 目 录

## 前言

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 国内外湖泊水生态监测研究现状	2
1.2.1 湖泊水生态监测与评价技术研究现状	2
1.2.2 湖泊水生态修复效果监测方案制定和实施	5
1.2.3 湖泊水生态系统修复效果评价	10
1.3 引水工程水生态影响评估研究进展	12
1.3.1 国内外富营养化湖泊引水工程	12
1.3.2 引水工程对湖泊水文水动力条件的影响	14
1.3.3 引水工程对湖泊物理化学要素的影响	15
1.3.4 引水工程对湖泊生物的影响	18
1.3.5 引水工程对湖泊水环境与生态影响的评估方法	19
1.4 清淤工程对水生态修复效果评估研究进展	23
1.4.1 生态清淤工程实施关键技术	23
1.4.2 生态清淤工程水生态修复效果评估	27
1.5 研究目标与内容	29
2 太湖流域及其重大生态修复工程概况	31
2.1 流域自然环境与社会经济概况	31
2.1.1 流域自然环境	31
2.1.2 流域水资源	32
2.1.3 流域社会经济	32
2.2 太湖流域引水工程概况	32
2.2.1 引水工程现状格局	32
2.2.2 引水工程规划格局	33
2.2.3 引水工程调度运行状况	34
2.3 流域生态清淤工程概况	37
2.3.1 流域生态清淤工程实施背景	37
2.3.2 太湖生态清淤工程实施过程	38

3	引水工程生态影响监测与评估技术方法	42
3.1	太湖流域引水工程监测方案	42
3.1.1	监测范围界定	42
3.1.2	初始监测断面与点位布设原则	42
3.1.3	监测时间与频次	43
3.1.4	水生态监测指标	43
3.1.5	样品采集与保存	44
3.1.6	监测指标检测方法	44
3.2	太湖流域引水工程水生态监测点位优化技术	44
3.2.1	敏感监测指标筛选	44
3.2.2	基于敏感监测指标的点位优化方法	46
3.3	太湖流域引水工程湖泊水生态效应评估方法	46
3.3.1	评估模式	46
3.3.2	评估程序	46
3.3.3	评估方法	46
3.3.4	评估指标	49
3.3.5	评估原则	49
3.3.6	评估结果	50
4	引水工程水生态影响监测点位优化	51
4.1	监测点位布设	51
4.2	采样时间	52
4.3	敏感理化指标筛选	52
4.4	监测点位优化	57
4.4.1	基于示范区敏感理化指标的点位优化	57
4.4.2	基于示范区浮游藻类群落指标的点位优化	61
4.4.3	示范区跟踪监测点位布设优化方案	65
4.5	本章小结	65
5	太湖流域引水工程水生态效应评估	67
5.1	引江济太工程引水概况	67
5.2	监测湖区气象与湖流概况	69
5.3	引水对湖泊水体理化参数影响	70
5.3.1	引水期监测区水体敏感理化参数的时空分异特征	70
5.3.2	季节性引水对受水湖区水环境影响的综合评估	74
5.4	引水对湖泊浮游藻类群落影响	78
5.4.1	浮游藻类细胞密度时空分布特征	78

5.4.2	引水期与非引水期浮游藻类细胞密度差异	82
5.4.3	浮游藻类种属多样性时空分布	83
5.4.4	浮游藻类群落组成时空分布特征	84
5.4.5	引水对浮游藻类功能群演替的影响	89
5.5	引水影响下水体理化参数与浮游藻类群落的耦联	90
5.5.1	引水期与非引水期监测样点水体理化环境差异	90
5.5.2	引水期与非引水期监测样点藻类群落结构相似性	92
5.5.3	不同季节贡湖湾浮游藻类群落结构与水体理化参数关系	94
5.5.4	不同季节浮游藻类细胞密度与水体理化参数定量耦联	96
5.6	本章小结	100
6	基于生态适宜的引水工程调度方式研究	102
6.1	研究方法	102
6.1.1	实验模型建立	102
6.1.2	实验方案设置	104
6.2	不同引水流量影响下实验生态系统要素的变化	104
6.2.1	不同引水流量影响下实验水体水质的变化	104
6.2.2	不同引水流量影响下藻类群落组成的变化	107
6.2.3	不同引水流量影响下藻类细胞密度的变化	112
6.2.4	引水藻类群落多样性和均匀度的变化	113
6.2.5	不同引水流量影响下藻类群落结构的动态	114
6.2.6	藻类群落变化与环境因子相关性分析	114
6.3	水体理化指标响应特征分析	116
6.4	浮游藻类群落结构的响应特征分析	118
6.5	基于水生态效应的引水调度策略分析	119
6.5.1	引水时节	119
6.5.2	引水流量与引水时长	120
6.5.3	基于水生态效应的引水调度策略建议	121
6.6	本章小结	122
7	清淤工程生态影响监测与评估技术方法	123
7.1	太湖流域清淤工程监测方案	123
7.1.1	点位布设	123
7.1.2	监测时间与频次	124
7.1.3	监测指标	124
7.1.4	样品采集与保存	125
7.1.5	监测指标检测	126

7.2	太湖流域清淤工程水生态监测点位优化技术	126
7.2.1	敏感指标筛选	126
7.2.2	太湖流域清淤工程水生态效应监测点位优化方法	127
7.3	太湖流域清淤工程湖泊水生态效应评估方法	127
7.3.1	评估模式	127
7.3.2	评估程序	128
7.3.3	评估方法	128
7.3.4	评估原则	129
7.3.5	评估结果	129
8	清淤工程生态影响监测点位优化	130
8.1	生态清淤工程的水生态影响监测点位布置	130
8.2	数据采集和统计分析方法	131
8.3	竺山湾清淤工程水生态影响监测点位布置研究	132
8.3.1	底泥理化性质和底栖动物群落基本情况	132
8.3.2	基于底泥理化指标的采样点聚类分析	133
8.3.3	基于底栖动物群落的采样点聚类分析	135
8.4	梅梁湾清淤工程水生态影响监测点位布置研究	138
8.4.1	底泥理化性质和底栖动物群落基本情况	138
8.4.2	基于底泥理化指标的采样点聚类分析	138
8.4.3	基于底栖动物群落的采样点聚类分析	140
8.5	生态清淤工程水生态影响监测时间和频率	142
8.5.1	数据采集和处理方法	143
8.5.2	太湖生态清淤工程水生态影响监测时间和频率确定	144
8.6	本章小结	148
9	太湖流域清淤工程水生态效应评估	149
9.1	水生态监测评价指标选择	149
9.1.1	底栖动物候选评价指标	149
9.1.2	评价指标筛选方法	151
9.1.3	基于底泥物理化学性状的水生态影响评价指标筛选	151
9.1.4	基于底栖动物生态学指标的水生态影响评价指标筛选	152
9.1.5	底栖动物指示生物筛选	157
9.2	太湖生态清淤工程实施前后水环境变化	158
9.2.1	采样地点分布	159
9.2.2	采样点水质变化趋势	160
9.2.3	生态清淤工程实施前后底泥理化性质变化	172

9.3 生态清淤工程实施前后底栖动物评价 .....	178
9.3.1 采样区域底栖动物总体情况 .....	178
9.3.2 生态清淤工程实施前后底栖动物群落指数变化分析 .....	179
9.3.3 生态清淤工程实施前后底栖动物种群数量变化分析 .....	185
9.4 生态清淤工程实施前后水生植物评价 .....	188
9.4.1 水生植物群落监测方法 .....	188
9.4.2 生态清淤工程实施前后水生植物变化分析 .....	191
<b>10 结论与建议 .....</b>	<b>195</b>
10.1 引水工程水生态影响监测与评估结论 .....	195
10.2 清淤工程水生态影响监测与评估结论 .....	197
10.3 引水工程水生态影响监测与评估建议 .....	200
10.4 清淤工程水生态影响监测与评估建议 .....	200
参考文献 .....	202
彩图 .....	

# 1 绪 论

## 1.1 概 述

湖泊生态修复工程是一项新兴的工程领域。界定什么是湖泊生态修复工程，需要制定湖泊生态修复成功与否的判别准则。由于缺乏这类准则，在很多湖泊生态修复工程实施过程中缺少相应的评估技术，因此很难对修复效果进行有效的监测、评估。再者，随着科技进步，各类水生态修复技术层出不穷，但是目前对于这些技术的实施效果缺乏有效的评价，从而使水生态修复工程陷于较为盲目的境地，迫切需要制定切实可行的标准或准则，指导水生态修复工程评价工作（Hobbs and Harris, 2001; Lake, 2001）。我国湖泊生态修复建设刚刚起步，有必要借鉴发达国家的经验，着手建立适应我国国情的湖泊生态修复综合评估准则，以此指导湖泊生态修复的规划、设计、施工和管理，为今后制定我国湖泊生态修复技术标准和指标体系奠定技术基础。

生态修复工程建设的重点有两项：一是生物栖息地建设；二是湖泊自然水情条件的改善。对于水情条件改善问题，近年来我国水利界开展了不少讨论并实施了若干示范项目，比如最小生态需水量问题、河湖治污、改善生态调水行动等。河湖生物栖息地建设问题，无论是对河流管理者还是研究者来说，都是一个新课题。所谓栖息地建设主要是恢复湖泊形态的多样性，在湖泊纵向和横向都保持多样性，防止渠道化。另外要保持河湖的纵向连续性和侧向连通，创造生态系统的物种流、能量流、营养物质循环以及生物竞争的条件。生态系统是否健康，需要建立完善的评估体系，评估工作的基础是长期、完整的水文、气象、生境和生物监测资料，因此生态修复工程建设的基础工作是建立生态要素监测系统。

目前国内重大工程的生态影响监测主要是通过生物采样、调查以及遥感方法，从点的采样到面的分布进行调查分析，但这些方法系统性、跟踪性不强，且尚缺乏一套完整的评价指标、程序和方法，对其他工程监测评价的借鉴性弱。目前太湖流域水生生态监测还相对薄弱，处于初步发展阶段，而针对引水、生态清淤等重大工程的水生态影响的监测更是几乎空白，难以满足对这些生态修复工程的生态效益进行有效的监测和评价。因此，亟须建立一套适合于太湖流域重大生态工程生态影响的评价指标和监测方法、手段及跟踪评价程序和方法。

依据《太湖流域水环境综合治理总体方案（2013年修编）》，太湖流域水环境

治理工程主要包括引排工程、湖泊生态清淤工程、湿地保护与恢复工程以及河道(网)综合整治工程。引排工程与湖泊生态清淤工程主要针对太湖、淀山湖等湖泊,属于重大生态工程;湿地保护与恢复工程以及河道(网)综合整治工程针对部分河道与湿地,流域层面上在建工程规模有限。同时,作为缓解太湖蓝藻水华灾害的重要工程措施,引水工程对湖泊浮游植物的影响是工程生态效应关注的焦点,选取浮游植物作为引水工程的敏感指示生物可有效反映引水工程的生态影响。而底栖动物与水生植物则是生态清淤工程的敏感生物,常作为清淤工程生态影响的指示生物。因此,本书针对太湖流域引水、生态清淤重大工程对湖泊生物与生境的影响开展跟踪监测与评估,建立适用于太湖流域的重大工程生态影响跟踪监测与评估方案。

## 1.2 国内外湖泊水生态监测研究现状

### 1.2.1 湖泊水生态监测与评价技术研究现状

湖泊作为一种重要的淡水水体,与人类的生存和发展密切相关,在供水、防洪、航运、养殖和旅游以及维持区域生态系统平衡等方面发挥着巨大作用。湖泊水体、湖泊生物和湖泊沉积物构成完整的湖泊生态系统。通过对湖泊水量、水质、生物资源、沉积物底质等湖泊组成要素的调查监测获取第一手数据,掌握湖泊生态系统基础信息是了解湖泊水生态状况变化、减少和防止不合理的人类活动造成的干扰破坏的首要任务。

#### 1. 国外湖泊水生态监测与评价

水生态监测和评价是指通过对水生态系统中不同水生态指标(非生物和生物)的监测,以及通过数学方法处理形成综合指数,反映水生态系统完整性状况(张咏等,2012)。生物监测是水生态监测区别于传统的水质理化指标监测的主要内容,根据水生生物群落与水体水质变化过程密切相关的特点,通过测定水生生物的群落组成和结构等演化,直接或间接地反映水体状况及其发展趋势。生物监测评价可以分为指示生物监测评价和综合指数评价方法。

美国从2007年开始实施旨在了解全美水生资源的全国性调查评估项目(National Aquatic Resource Surveys, NARS),该项目由美国国家环境保护局、各州和聚居部落共同实施,主要拟回答以下4个问题:①全国有多少水能支撑健康的生态系统和娱乐活动?②最常见的水质问题是什么?③水质是在改善还是恶化?④改善水质的投资是否合适有效?该项目由全国沿海状况评估、全国湖泊评估、全国河流、溪流调查和全国湿地调查四种不同水体类型调查项目组成,该项

目计划每 5 年实施一次, 2007 年的调查结果和报告已陆续发布。2012 年开始的湖泊调查工作已进入汇总数据处理和向公众发布阶段。

2012 年美国国家环境保护局再次组织全国湖泊调查评价项目, 此次湖泊调查评价比 2007 年更为详细, 制定的方案也更加完善, 为此项目办公室组织编写了《候选调查湖泊筛选技术导则》《野外操作技术导则》《实验室分析操作手册》《数据质量保证方案》四个主要技术报告, 有力地保障了本次湖泊调查的数据质量。在筛选候选调查湖泊时, 采用了在医学研究、选举民意调查中广泛采用的基于统计方法原理的抽样调查法。最终本次调查确定了对 904 个湖泊开展调查, 其中 398 个湖泊在 2007 年曾经调查过。

2012 年湖泊调查指标的分类方法与 2007 年略有不同, 本次调查指标分为 4 类: ①水体营养状态和水化学指标, 主要包括叶绿素 a, 塞氏盘透明度, 水体纵剖面分层水质, pH、总氮、总磷等其他水化学指标; ②生态完整性指标, 主要包括大型底栖无脊椎动物群落、包括入侵植物在内的水生植物群落、生物栖息地特征、浮游植物群落、沉积物硅藻群落、沉积物汞含量和浮游动物群落等指标; ③人类利用指标, 包括藻毒素指标、阿托拉津农药含量等指标; ④其他类型指标, 包括湖泊形态学特征、湖泊水体溶解态氮含量等。

在《野外操作技术导则》中, 详细规定了采样时必需的采样表格、各种相关文件、采样装备和注意事项、每天采样时的安全和健康须知、联络通信、数据记录方式、采样方法、样品预处理方式、样品的保存运输等。在《实验室分析操作手册》中, 首先对于实验室人员的责任和义务, 包括实验室定期评估、实验室对比考核等在内的实验室质量控制等常规性事务做了原则性的规定, 然后分别给出了藻毒素、大型底栖无脊椎动物、浮游植物、沉积物定年、沉积物中硅藻含量、农药、水化学、叶绿素 a、浮游动物、沉积物中汞含量、溶解态碳等指标的测定分析方法。在《数据质量保证方案》中, 对数据质量控制目标、相关责任人员分工、数据格式和信息管理、项目实施的各个阶段数据误差分析、数据分析计划安排等都做了详细的说明。

根据《欧盟水框架指令》的要求, 欧盟内所有水体要在 2015 年前达到“优良生态状态”(good status), 水体生态状况的评估方法主要采用“生物质量组成”(biological quality elements)的评价方法, 该方法利用浮游动物、水生植物、底栖生物和鱼类等作为评价对象, 监测的水体主要包括河流、湖泊、沿海和过渡水体。2009 年, 在提交给欧盟理事会的报告中显示, 首次实施的流域管理计划没有实现预期目标, 在欧盟境内有 60% 的河流、50% 的湖泊和 70% 的过渡水体没有达到《欧盟水框架指令》确定的优良水体目标。为了弥补欧盟各成员在水生态监测评价方面的技术不足, 统一不同国家的采样方法, 完善生物数据库, 制定水体恢复方案, 2009 年欧盟资助其 10 个国家的 25 个研究机构共同实施了“欧盟水体: 综合系统

评价生物状况和恢复”(WISER, Water bodies in Europe: Integrative Systems to assess Ecological status and Recovery)研究计划,该项目已经于2012年完成(Hering et al., 2013)。

## 2. 国内湖泊水生态监测与评价

2007年太湖蓝藻水华暴发导致无锡市饮用水危机是我国湖泊监测由水量和水质等物理化学性状监测,开始关注包括藻类在内水生态监测的重要转折点。对于湖泊水量和水质调查监测,我国已有比较成熟的技术方法体系,制定了相应的具有法律效力的国家或者部门技术规程和操作规范,对于湖泊生物监测调查,近年来逐渐开始制定相应的国家或部门标准。20世纪80年代太湖、巢湖、于桥水库等湖泊开始出现水体富营养化现象,为了研究的方便,金相灿和屠清瑛(1990)在参考国外富营养化研究经验的基础上组织编写了《湖泊富营养化调查规范》。随着人们对湖泊水生态问题认识的逐渐深入,在21世纪初组织出版了《湖泊生态调查观测与分析》(黄祥飞,2000)和《湖泊生态系统观测方法》(陈伟民等,2005),对于促进我国湖泊水生态监测工作起到了重要指导作用。近年来,随着国家对生态环境保护工作日益重视,加上生物多样性保护工作需要,环境保护部在2014年发布了一系列生物多样性观测技术导则,其中包括《生物多样性观测技术导则淡水底栖大型无脊椎动物》和《生物多样性观测技术导则 内陆水域鱼类》等水生态监测内容。2015年中国科学院南京地理与湖泊研究所在国家科技基础性工作专项“中国湖泊水量、水质、生物资源调查”和“中国湖泊沉积物底质调查”工作基础上,组织编写了《湖泊调查技术规程》,就湖泊水质、水量、生物资源、沉积物量和质量等的野外调查、数据处理、报告编写进行了详细的说明。

2007年之前,我国湖泊生态监测工作主要集中在科研院所和高校科研活动中,由国家业务主管部门开展的生态监测很少。我国湖泊野外调查和监测台站总体偏少,缺乏必要的湖泊生态监测站网,过去累积的基础数据较少,不少湖泊的基础数据仍然处于空白状态。总体来说,我国水生态监测数据的科学性和可比性较差,观测人员和经费得不到有效保障,许多湖泊水生态监测往往是被动的应急或者临时监测,只是在出现重大生态环境问题之后才实施监测。从技术层面来看,虽然目前我国已经引入了水生态完整性的概念,但现有水生态系统和发达国家仍有一定的差距,主要存在以下几个方面不足:从指标来看,选择的常规水质评价指标仍以理化指标为主,缺乏对生物及其完整性的评价,不能综合反映水生态质量现状;从技术方法看,缺乏规范的生物监测方法和质量控制体系;从评价方法看,仍以单个指标或者某几个指标简单相加的分析为主,缺乏对水生态系统完整性的综合考虑等(张咏等,2012)。

### 3. 湖泊水生态监测与评价发展趋势

水生态系统状态的变化是通过若干个具体评价指标来表征的,水生态系统状态评价指标可以是表征水生态系统组分特征,也可以是表征水生态系统结构或功能特征,如何准确地评价水生态系统状态是当前的研究热点,也是不同学者争论的焦点。当前对于水生态评价指标由描述单个性质的评价指标转向描述水生态系统的综合性质,提出了“生态完整性”“生态系统健康”等概念,并据此提出相应的评价方法和指标体系。最为著名的是1981年Karr提出的基于鱼类种群的生物完整性评价指数,此方法后来在美国评价水生态系统状况时得到广泛应用(Karr, 1981, 1991, 1993)。在此之后,世界各地学者又发展了基于大型底栖无脊椎动物、周丛生物、藻类、浮游生物、大型水生植物等不同生物群落的生物完整性指数,其中以基于大型底栖无脊椎动物的完整性指数(B-IBI)相关研究为最多(Karr, 1981, 1991; Kerans and Karr, 1994; Silow and In-Hye, 2004; Griffith et al., 2005; Astin, 2007; Vondracek et al., 2014; 张浩等, 2015)。国内学者对水生态系统健康也开展了大量的研究,开始建立基于我国数据资料的生物完整性评价指数(沈韞芬和蔡庆华, 2003; 王备新等, 2003; 吴阿娜等, 2005; 王备新等, 2006; 曹艳霞等, 2010; 邵卫伟等, 2012; 殷旭旺等, 2012)。

#### 1.2.2 湖泊水生态修复效果监测方案制定和实施

开展实施水生态修复效果监测之前需要制定详细的水生态修复监测方案(Wohl et al., 2005),监测方案应包含监测实验方案设计、监测区域和点位、监测内容、监测时间和频率、野外样品采集和室内分析,质量保证和数据统计处理等。为了得到工程实施之前的水生态状态,在实施生态工程之前即需要开展水生态监测,并应持续一段时间,避免季节性、降雨等自然条件或其他偶然性因素影响,充分掌握水生态状态特征。

##### 1. 实验设计

水生态系统修复效果评价的实验设计方法包括修复前后对照对比分析法(BACI法, before-after control-impact)、修复前后对比分析法(BA法, before-after)、对照区对比分析(CI法, control-impact)、时间序列分析法和其他方法(Verdonschot et al., 2013)。采用生态修复前后的控制组和修复组系列对比(before-after control-impact paired series, BACI-PS)实验设计是生态修复过程监测的相对较优的方法(Smith et al., 1993),因为该方法能够将修复措施的效果从其他干扰因素中较好地区分开来。例如,王敏等在对天津大沽河排污河道开展原位生态修复工程效果监测分析时,分别设立对照区和修复区,并分别采集清洁水体和污染水体

作为对照(王敏等, 2012); 在评价贵州红枫湖植物浮岛围隔水生态修复实验示范研究时, 监测了工程实施区域前后和内外的群落结构、丰度、生物量等, 并进行了比较(濮培民等, 2001, 2012)。由于水生态系统在一定程度上受空间属性的影响较大、水生态系统受损情况具有特殊性, 即使未受干扰的水生态系统在不同的空间表现出来的组成和结构也有所差异, 采用空白对照和采取措施处理相比较的方法说明生态修复措施的影响会受到一定程度的限制。通过比较水生态系统的生态修复措施实施前后状态变化情况, 或者没有很好的条件单独设定空白对照区时, 采用 BA 法 (before-after) 实验设计, 也是评价水生态修复效果最常用的方法之一(屠清瑛等, 2004; 吴芝瑛和陈鋈, 2008; 吴迪等, 2011; May and Spears, 2011; 张皓等, 2015)。秦伯强等在太湖北部梅梁湾开展的水源地水质净化的生态工程试验监测评价时, 采用的是试验区内水质与试验区外参照点水质相比较的方法(秦伯强等, 2007)。在五里湖开展的水生态修复试验研究, 利用大型围隔实验, 综合采用鱼类种群结构生态调控、岸边带修复、水生植物恢复、大型底栖动物放养等措施改善水生态, 对比围隔实验区内外水生态状况说明水生态修复效果(Chen et al., 2009)。在竺山湾进行的大水面放养凤眼莲修复水体试验中, 采用的是种养区和非种养区比较(刘国锋等, 2010a)。在制订试验设计方案时需考虑到水生态监测数据的统计处理方法。水生态修复试验是在特定区域范围内针对特定目的的试验, 水生态监测点位也不完全属于随机采样, 因此在试验设计时需考虑获取相应的水生态数据后如何进行统计分析处理。

## 2. 采样区域和点位

采样区域设置应该根据水生态修复工程实施范围确定, 采样点主要集中在工程实施区域内, 在可能和必要的情况下在工程实施区域外也布置对照采样点。在采样区域内采样时, 确定采样点数量和位置以能够代表该采样区域为宜, 采样点位宜采用随机抽样方法确定, 避免系统性误差过大导致评价结果不准确(Peterson et al., 1999)。采样点过多则耗费的人力、物力太大, 采样点过少则不能代表采样区域的水生态状况。在保证达到必要的精度和满足统计学样品数量的前提下, 布设的采样点位应尽量减少, 以降低监测成本, 在某些特殊地点应该尽量布点。在同时采集水质、底质、生物样品时, 应尽量考虑不同监测内容采样点之间的重合性, 底质和生物样品采样点可以在水样采样点基础上适当减少。

在开展水生态调查监测之前, 对待采样区首先进行现场查勘, 需调查和搜集待调查和监测区范围内河流、湖库的有关基础资料, 主要应包括以下基本内容: ①水文气象、水下地形等河流、河段和水域基本信息; ②河滩地(缓冲带)随水位交替变化的宽度和面积、支流汇入与流出的水量, 以及人工调控下河流、河段或水域的水文情势; ③待调查区域周边工农业生产布局、土地利用、水土流失与

植被分布状况；④待调查区域水生生物群落基本情况；⑤水体水深、流速、水温和沉积物分布情况等。若缺乏对待采样区域的基本了解，可以采取先密集布设采样点，然后根据已经获得的数据适当撤并采样点。

采样点位确定时需先在较大的采样范围内进行详尽的预调查，在获得足够信息的基础上应用统计技术合理确定。采样点布设需充分考虑如下因素：①湖泊水体的水动力条件；②湖泊面积及形态；③出入湖条件；④可能排污位置及其他可能影响水生态状况的因素；⑤污染物在水体中的迁移转化规律。某些湖泊形态或水质分层对水质可能有影响时，应该分地点和层次采集不同的水样。

监测采样点因监测对象不同而不同。在开展湖泊生物资源调查时，对于浮游植物、浮游动物和底栖动物，采样点的设定要根据湖泊面积和形态确定，原则上 $1000\text{km}^2$ 以上平均 $100\sim 200\text{km}^2$ 布置1个采样点， $500\sim 1000\text{km}^2$ 选点以每 $100\text{km}^2$ 为1个点， $100\sim 500\text{km}^2$ 为3~5个点， $10\sim 100\text{km}^2$ 至少为2个采样点，每个点采平行样3个（中国科学院南京地理与湖泊研究所，2015）。水生植物采样点位需根据其分布进行点位布设，同时需进行环湖分布调查。

### 3. 监测内容和评价指标

水生态修复效果监测内容取决于生态修复目标，主要内容包括水文地貌、水质、沉积物、水生生物监测、河岸带（湖滨带）调查、生物栖息地调查等。在评价某个具体的生态修复工程时不一定监测以上所有内容，应重点围绕生态修复工程可能对水生生态系统造成的影响选择监测内容。

恢复或种植水生植物是当前许多湖泊水体的修复措施，透明度、水体氮磷含量、湖泊底泥含量、底泥再悬浮量、水体藻类含量、浮游动植物含量、底栖动物种群和密度等均可被用于评价水体修复效果（Xu et al., 1999; Jin et al., 2006; Jeppesen et al., 2007a）。美国 Apopka 湖采用生态修复减轻磷素负荷，采用水体透明度、总磷和叶绿素 a 含量评价生态修复工程效果（Coveney et al., 2005）。德国 Tiefwarensee 湖在采取钙铝盐化学处理方法和渔业活动管理等生态修复措施 5 年后，湖泊水体磷素浓度降低 80%，水体透明度、浮游植物生物量、叶绿素 a 浓度均相应地有所下降（Mehner et al., 2008）。在欧盟实施的生物操控水生态修复项目中，透明度和叶绿素 a 含量在开始几年下降 50%；某些浅水型湖泊由于滞留能力或者反硝化增强，水体总氮和总磷水平下降显著，在对底泥扰动较强的底层鱼类去除后的 4~6 年，修复效果开始显现（Søndergaard et al., 2007）。

北京什刹海水体修复工程试验效果监测采用的指标主要是水质、底质营养物质和水体生物（屠清瑛等，2004）。上海大莲湖湿地修复示范工程监测指标为植被群落组成、鸟类和两栖、爬行类种类生物多样性和均匀性指数、水质指标（吴迪等，2011）。中国环境科学研究院叶春等针对环太湖湖滨带生态修复工程措施，分