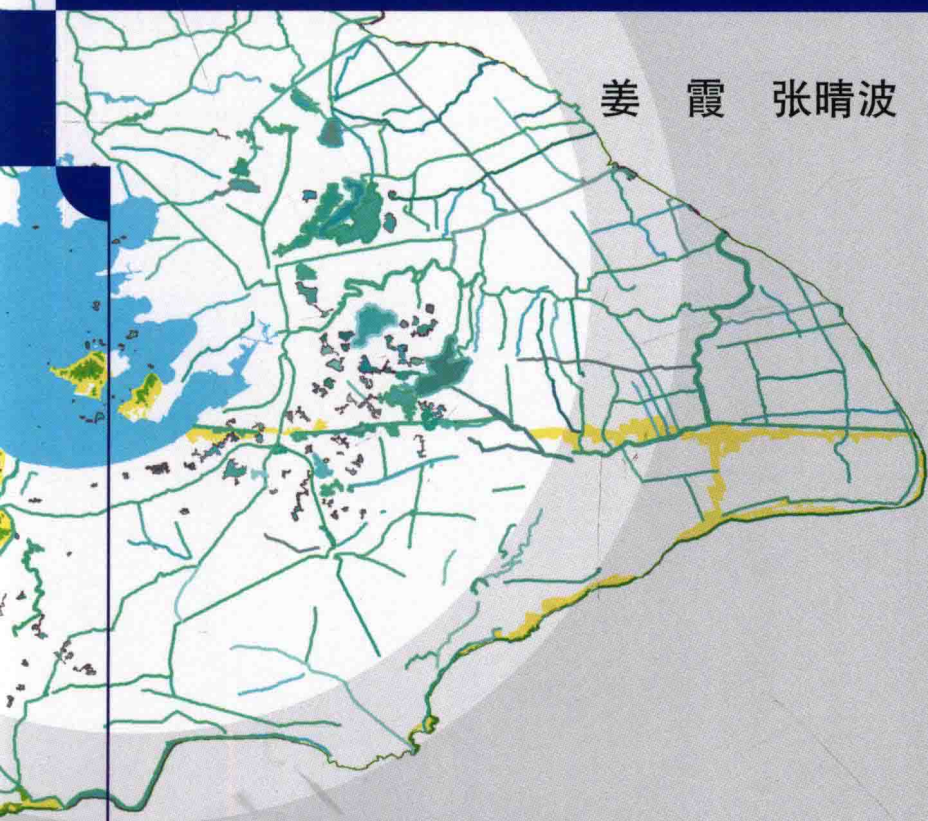


太湖有毒有害与高氮磷 污染底泥环保疏浚规划研究

姜 霞 张晴波 王书航 等◎著



科学出版社

太湖有毒有害与高氮磷 污染底泥环保疏浚规划研究

姜 霞 张晴波 王书航 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在对全太湖底泥详细调查基础上,确定太湖底泥淤积状况、污染程度与分布,绘制太湖有毒有害与高氮磷污染底泥空间分布图;通过对太湖污染底泥鉴别、勘测与生态风险评估,确定太湖有毒有害与高氮磷污染底泥环保疏浚的工程范围;通过工程勘测及室内分析,科学确定环保疏浚的有效深度,并计算疏浚工程量;结合有毒有害与高氮磷污染底泥环保疏浚的技术要求,编制了太湖有毒有害与高氮磷污染底泥环保疏浚总体规划,为污染底泥防治提供科学意见。

本书可供从事水环境保护、环境工程、水利和流域管理方面的科研人员、工程技术人员、管理人员,以及环境科学和环境工程等相关专业的大专院校师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

太湖有毒有害与高氮磷污染底泥环保疏浚规划研究/姜霞等著. —北京:科学出版社, 2014.3

ISBN 9 78-7-03-039351-9

I. ①太… II. ①姜… III. ①太湖—河流底泥—疏浚—研究 IV. ①X522

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第040463号

责任编辑:朱海燕 李秋艳/责任校对:桂伟利

责任印制:赵德静/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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年3月第一次印刷 印张:14 插页:6

字数:330 000

定价:89.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书作者

姜 霞 张晴波 王书航

张 晔 王雯雯 陈春霄 胡佳晨

张 博 李佳璐 赵 丽 王 岩

何圣兵 王费新 石泽敏 江 帅

李 川 胡保安 战玉柱 尼庆伟

王金枝 王 坤 韩金鑫 蔡 青

王苗苗

前 言

底泥常被称为湖泊环境的重要信息库，可以反映湖泊的污染程度及其演变过程。随着外源污染得到有效控制，污染底泥作为湖泊的内源负荷在污染源中的贡献愈加引起人们的关注。太湖作为典型的富营养和水体污染较为严重的浅水湖泊，平均水深只有 1.89 m。底泥受到风浪扰动极易发生再悬浮，导致其中的污染物向上覆水体释放，对水质产生直接影响。调查表明，太湖底泥蓄积量为 17.56 亿 m^3 ，其中受超过背景值的人为干扰底泥达到 6.1 亿 m^3 ，占 30% 以上。如此巨大的污染底泥中氮、磷的释放量占其流域氮、磷总污染负荷量的 20% 以上，占湖泊水环境容量的 40% 左右。同时，近年来太湖底泥中氮、磷、重金属含量增加显著，典型持久性有机污染物几乎都被检出。污染底泥，特别是受高氮磷和有毒有害物质污染的底泥，其含有的大量有机好氧物质，不仅易造成底泥长期处于厌氧状态、恶化水生生物的生存环境、对底栖生物和微生物产生毒副作用，并对供水安全产生直接的威胁。

环保疏浚作为去除湖体富含高氮磷污染底泥一种有效技术在我国被广泛使用，但在污染底泥的毒性鉴别、精确勘测、疏浚工艺和设备优化、污泥快速脱水干化、堆场科学设计和建设以及过程化的系统风险评估等方面仍存在诸多技术难点，在重金属及有毒有害污染底泥环保疏浚方面的研究和实践甚少，亟须建立一套完整的环保疏浚技术体系。并且，有毒有害污染底泥环保疏浚的关键在于尽可能减少疏浚扰动造成的水体二次污染及疏浚后有毒有害底泥的脱水干化与处理处置问题，这就对疏浚工艺、设备和处理技术等提出更高的要求，其经济成本也更高。因此在湖泊底泥污染治理上是否采用底泥环保疏浚工程一直存在争议。本书是在完成“十一五”“国家水体污染控制与治理科技重大专项”太湖项目“有毒有害与高氮磷污染底泥环保疏浚与处理处置技术及工程示范”课题（2008ZX07101-010）的实践过程中撰写而成。本书针对太湖底泥污染现状及国内现有环保疏浚技术瓶颈问题，研究和集成了有毒有害与高氮磷污染底泥鉴别、勘测与生态风险评估技术；对太湖有毒有害及高氮磷污染底泥进行了系统翔实的调查和研究，科学开展了污染底泥质量评估以确定环保疏浚范围、疏浚深度及其工程量；建立了重污染底泥环保疏浚、疏浚后底泥快速脱水干化及余水达标等成套技术体系；结合工艺可行性和效果可达性，形成了太湖有毒有害与高氮磷底泥环保疏浚规划方案，为地方政府规划、实施和管理太湖环保疏浚工程提供参考，同时为我国同类湖泊的有毒有害与高氮磷底泥污染控制提供技术支撑。

全书内容较为丰富，注重实用性，共分为十二章，由姜霞负责全书编写的总体设计、组织、审校和定稿工作。姜霞、张晴波、王书航、张晔、王雯雯、陈春霄、胡保安等各负责其中一章的撰写，胡佳晨、张博、王岩、李佳璐、赵丽、何圣兵、王费新、石泽敏、江帅、李川、尼庆伟、王金枝、王坤、韩金鑫、蔡青、王苗苗、战玉柱等参与书稿的审校工作。在本书出版之际，作者诚挚地感谢中央民族大学的刘英、金军、元学奎、马召辉和中交天津港航勘察设计研究院有限公司的程瑾、陈尚士等同志为完成本书有关章节的数据获得提供的帮助。感谢陈荷生先生为本书主要章节进行认真修改并提出意见。本书所涉及研究项目主要受助于“国家水体污染控制与治理科技重大专项”，并主要依托环境基准与风险评估国家重点实验室和国家环境保护湖泊污染控制重点实验室，在本书出版之际，作者一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和错误，诚恳地请有关专家和广大读者不吝赐教，并给出批评和建议。

作 者

2013年11月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外湖泊底泥疏浚案例及经验	4
1.3 主要内容	7
第 2 章 规划编制依据、原则和范围	10
2.1 编制依据	10
2.2 编制原则	14
2.3 规划范围	15
2.4 规划研究的目标	15
2.5 技术路线	15
第 3 章 太湖及其流域概况	17
3.1 自然地理概况	17
3.2 水环境现状	21
3.3 水生生物的群落结构及其特征	24
3.4 社会经济状况	26
3.5 太湖流域水资源开发利用现状	27
3.6 太湖底泥存在的主要问题	29
第 4 章 太湖底泥勘察与调查	31
4.1 勘察	31
4.2 底泥分布和蓄积量调查	34
第 5 章 太湖底泥污染特征分析	42
5.1 底泥采样点布设	42
5.2 样品的命名	42
5.3 底泥柱状样品的分层	43
5.4 分析测试项目	44
5.5 实验结果	45
第 6 章 太湖底泥与水体的相互作用	102
6.1 底泥内源释放通量	102
6.2 底泥中氮磷的吸附-解吸作用	103
第 7 章 太湖底泥污染等级划分	112
7.1 太湖底泥污染等级划分原则	112
7.2 太湖底泥氮磷污染等级划分	112
7.3 太湖底泥重金属污染等级划分	115

第 8 章 疏浚区规划方案研究..... 118

8.1 疏浚范围的确定 118

8.2 环保疏浚控制深度确定 120

8.3 底泥环保疏浚施工规划 141

8.4 污染底泥处理处置及余水处理 154

第 9 章 环保疏浚环境监测方案..... 170

9.1 疏浚监测目的 170

9.2 疏浚监测方案设计原则 170

9.3 监测方案 170

第 10 章 环境影响评价和效益分析 176

10.1 评价依据和环境保护目标..... 176

10.2 环境影响分析..... 176

10.3 生态环境保护对策与措施..... 178

10.4 疏浚规划的生态风险分析与控制..... 179

10.5 环境效益分析..... 180

第 11 章 管理运行 181

11.1 管理机构..... 181

11.2 运行管理..... 181

第 12 章 建议 182

参考文献..... 184

附录 太湖各点位底泥勘察内容一览..... 189

图版

第1章 绪 论

本书紧密结合区域经济社会发展战略、太湖水污染控制目标和地方政府科技需求,以有效控制有毒有害与高氮磷底泥污染(重金属、有毒有害有机污染物与高氮磷污染物等)为目标,开展太湖有毒有害与高氮磷污染底泥的详细调查,确定太湖有毒有害与高氮磷污染底泥分布状况与污染程度,绘制太湖有毒有害与高氮磷污染底泥分布图;在调查和研究有毒有害与高氮磷污染底泥鉴别、勘测与生态风险评估的基础上,确定太湖有毒有害与高氮磷污染底泥疏浚的工程范围,通过工程勘测,确定有效疏浚深度并计算疏浚工程量,根据有毒有害与高氮磷污染底泥环保疏浚的技术要求,编制了太湖有毒有害与高氮磷污染底泥环保疏浚规划总体方案,为太湖有毒有害与高氮磷底泥污染的控制提供科学方案。

1.1 研究背景

太湖水面面积为 2338 km² (不包括五里湖及东太湖部分围垦区),是我国第三大淡水湖泊,平均水深 1.89 m,属于典型的平原型浅水湖泊,具有防洪、供水、养殖、旅游和生态等综合功能,是流域洪水调节和水资源配置的主要水体,也是流域社会发展的重要资源。但从 20 世纪 80 年代以来,太湖流域经济社会快速发展,水污染治理和生态环境保护进展相对缓慢,入湖污染负荷不断增加,加上湖内水产养殖、旅游等人类开发利用活动的影响,太湖底泥受到污染,局部湖区底泥有机污染严重。根据环太湖入湖河流污染负荷分析,高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总磷(TP)和总氮(TN)多年平均净入湖量分别为 2.08 万 t、0.11 万 t 和 2.55 万 t,大量污染物在湖流的作用下迁移、扩散,并通过沉积、底泥吸附等途径进入底泥,导致底泥氮磷污染严重。

随着太湖流域经济的高速发展、工业化和城市化进程的加快,太湖底泥的有毒有害污染问题也不容忽视,已经成为太湖水污染治理的重要内容。例如,太湖北部以及入湖河口区和竺山湖、梅梁湖等重点湖湾底泥的重金属和有毒有害有机物的复合污染较严重,其他局部区域底泥重金属含量也有不同程度超标现象。

太湖底泥中大多数重金属污染来自工业污染及沿岸排污。近年来,尽管国家和地方政府有效推进了清洁生产、节能减排和循环经济等政策,但流域污染遗留问题依然严重。2006 年,太湖流域印染企业约 1200 多家,其中 570 余家坐落在无锡、苏州和宜兴,废水中含有多种有机染料(如分散染料、直接染料、酸性染料、活性染料、还原染料等)、助剂、油剂、酸碱、纤维杂质等。太湖流域共有化工企业 8000 余家,其中多为精细化工企业,全国化工 500 强企业中有 35 家分布在太湖流域,其排放的废水中含有大量有毒有害污染物和重金属。另外,太湖流域目前使用的农药仍主要以杀虫剂为主,其中高毒农药品种仍然占有相当高的比例;90%以上的畜禽养殖场没有污水处理系统,畜禽粪便大多直接排入水体;大量使用的食品添加剂、有机洗涤剂、有机药物和塑料添

加剂也加重了有机毒物污染的程度。太湖北部湖区汞 (Hg) 和镉 (Cd) 超过背景值 2~5 倍, 表层 1~5 cm 底泥均处于中等生态风险。2006 年常州市河流底质重金属污染严重, 主要是总汞、总锌、铜和总镉超标, 其中总汞 100% 超标。梅梁湖底泥重金属含量为太湖之首, 生态风险水平是太湖平均值的 3 倍, 接近中等风险水平, 已经严重影响水生生态系统健康。

除重金属外, 太湖底泥的有毒有害与有机污染也亟须高度关注。据江苏省环境监测中心监测调查, 太湖共检出 176 种有机污染物, 主要为苯、二氯甲烷、甲苯、乙苯、萘、一溴二氯甲烷、氯仿、二溴一氯甲烷、溴仿等; 特别是在水厂, 也已经检出多种有机污染物, 而污染底泥是其重要来源。其中含量最高的为多氯联苯 52 (PCB52), 其最高值达到 195.3 ng/g, 平均值为 0.983 ng/g。表层底泥中, 检出率最高的为多氯联苯 101 (PCB101), 达 100%, 最低为多氯联苯 180 (PCB180), 也有 58.3%。太湖北部、中部和南部底泥中多环芳烃的含量有明显不同, 检测出的多环芳烃种类为北部>中部>南部, 其含量也是北部>中部>南部, 这种分布趋势与不同区域城镇的集中度、人类活动频繁程度等有明显关系。梅梁湖底泥中多氯联苯 (PCBs) 含量为太湖最高, 其最高值已经达到毒性效应的中值水平 (生态风险大于 75%)。在武进港和直湖港入太湖的梅梁湖区域, 其底泥中有多种多环芳烃超过毒性效应低值, 其中萘、苯并 [k] 荧蒽、二苯并 [a,h] 蒽 3 种芳烃达到毒性效应中值。梅梁湖底泥中有机氯农药六六六 (HCHs) 和滴滴涕 (DDTs) 总浓度为 1.78~64.74 ng/g, HCHs、DDTs 在几乎所有采样点都有检出, 含量分别为 0.23~1.81 ng/g 和 1.78~63.08 ng/g, 比我国其他江河湖泊底泥高, 其生态风险已经超过低值水平。而且梅梁湖表层底泥中的有毒有害有机污染物普遍具有遗传毒性, 主要是一类需要经过代谢活化的间接致突变物。在梅梁湖水生生物体内有毒有害与有机污染物积累也较为明显, 遗传毒性风险较大。因此, 太湖竺山湖、梅梁湖等重点湖区底泥中有毒有害污染物含量较高, 且普遍具有遗传毒性, 能在生物组织中富集, 并可通过食物链逐级传递, 因而引起的环境风险和潜在的生态危害不容忽视。如果不有效控制太湖, 特别是入湖河口区和竺山湖、梅梁湖等重点湖湾底泥的有机毒物污染, 必将对饮用水源地安全产生严重威胁, 影响水生生态系统健康。

在太湖北部梅梁湖和竺山湖等重点湖湾, 由于其特殊的地形条件、气候条件, 入湖水质的污染更严重地加剧了底泥的淤积和污染。底泥释放试验表明, 太湖梅梁湖和竺山湖等湖区底泥氮磷等污染物总体呈释放状态, 且随着温度的升高, 释放量呈加速趋势, 随着上覆水水质改善, 底泥释放量明显加强。另外污染底泥在风浪、湖流、温度、航运及生物扰动等作用下, 极易发生再悬浮, 从而加速其中污染物向上覆水体的释放, 对水质产生直接影响。因此, 由污染底泥释放产生的污染已成为太湖水污染的重要原因。目前, 随着国家与地方政府对太湖治理工作强有力的推进, 外源污染将逐步得到控制, 污染底泥对水环境的影响更加显著。另外, 太湖污染底泥分布最广的北部梅梁湖、贡湖水域, 是无锡市、苏州市的重要水源地, 是太湖饮用水源取水口分布最为密集的地区。底泥再悬浮和污染物释放对水环境质量、供水安全产生了直接的威胁。例如, 2007 年梅梁湖、贡湖蓝藻水华暴发造成无锡市充山水厂、小湾里水厂等沿湖多个自来水厂取水受到严重影响, 已经严重影响了当地居民的生产生活和经济社会可持续发展。因此, 治理底泥污染、改善水源地水质已是保障供水安全和人民生命健康的迫切要求, 污染底泥控

制已经成为太湖水污染防治的重点。

湖泊底泥、上覆水和生物是一个彼此依存又相互制约的复杂生态系统。底泥是太湖湖泊生态系统的重要组成部分，是水生植物生长所需营养的主要来源，也是湖中生物群落栖息和繁衍的重要场所。但是污染底泥，特别是受有毒有害物质污染的底泥，其含有的大量有机好氧物质，不仅易造成底泥长期处于厌氧状态、恶化水生生物的生存环境、对底栖生物、微生物产生毒副作用，而且底泥中的重金属和有毒有害有机物也可直接毒害底栖生物和微生物及其他水生生物。目前竺山湖、梅梁湖等湖区的水体浮游植物多为蓝藻门的微囊藻属，浮游动物多为萼花臂尾轮虫、针簇多肢轮虫、焰毛虫、节毛虫等，底栖无脊椎动物多以寡毛类和摇蚊幼虫等污染指示种群为主，沉水植物消失殆尽，生态系统严重退化，影响湖泊生态系统安全。其中，污染底泥目前所起的作用及未来在外源得到有效控制后对上覆水体营养盐和有毒有害物质浓度维持方面所起的作用都是不容忽视的。因此，在外源控制的前提下，加快有毒有害污染底泥治理理念的探讨、技术的开发和工程化的推广，对保障太湖乃至全国的饮用水源地安全供水和湖泊生态系统健康具有十分重要的作用。

环保疏浚作为去除含重金属和有毒有害有机污染物及高氮磷污染底泥的一种湖泊治理的有效技术已被国内外广泛应用，我国在高氮磷污染底泥的环保疏浚方面也已取得了很好的成效。但环保疏浚作为去除有毒有害及高氮磷污染底泥的一种湖泊治理技术在我国还处于探索阶段。通过环保疏浚，湖泊底泥中的有毒有害与高氮磷污染物被移出湖体，从而减轻这些具有毒性或潜在毒性的物质对湖泊水体和水生生物的毒性威胁。

据国务院《太湖流域水污染防治计划》(2006~2010年)，污染底泥清淤工作作为改善太湖水质的重要工程措施之一，已经被地方政府广泛采纳并实施。但是，太湖底泥环保疏浚面临许多科学问题和技术难点需要回答和解决，特别是针对有毒有害与高氮磷污染底泥的环保疏浚更是如此。有毒有害污染底泥环保疏浚的关键在于尽可能减小疏浚扰动造成的水体二次污染及浚后底泥的脱水干化与处理处置问题，这就对疏浚工艺、设备和处置技术等提出更高、更严格的要求，同时经济成本也较大。因此，在湖泊底泥污染的治理上，长期以来一直存在争议。究其原因在于湖泊底泥污染治理的理论和实践比较薄弱，对底泥的污染特征及其空间分布规律、污染底泥与水质相应关系和作用机制、疏浚和处理处置技术及其环境和生态效应等关键的科学问题，缺乏系统深入、全方位的研究和探讨。同时我国在该领域的关键技术欠缺，在污染底泥的有毒有害鉴别、精确勘测、疏浚工艺和设备优化、污泥快速脱水干化、堆场科学设计和建设，以及过程化的系统风险评估等方面都存在技术上的难点，更谈不上形成有毒有害污染底泥环保疏浚系统成套技术。

本书借鉴国内外已开展的环保疏浚实践，结合太湖底泥污染机理与治理技术方面已经开展的大量研究工作，对有毒有害污染及高氮磷污染底泥进行了系统翔实的调查和研究，科学开展了污染底泥质量评估，确定了环保疏浚范围、疏浚深度，结合工艺可行性和效果可达性，编制了施工实施方案，提出了底泥环保疏浚的生态风险评估方案及管理要求。太湖有毒有害与高氮磷污染底泥调查、鉴别、生态风险评估与环保疏浚规划方案将为太湖水污染防治和水土资源管理提供决策依据。

1.2 国内外湖泊底泥疏浚案例及经验

湖泊环保疏浚技术发展已有数十年的历史，是在航道、海港等工程疏浚的基础上发展起来的。工程目的也由增加库容、维持航行深度变为清除湖泊内源，为水生生态系统的恢复创造了条件。20 世纪 70 年代一些发达国家和地区开始致力于环保疏浚技术的开发和设备的研制 (Sebetich and Ferriero, 1997; Ellery and Mccarthy, 1998)。日本先后在手贺沼、諏访湖、印幡沼和霞浦湖等湖泊进行了局部或大规模的湖泊底泥疏浚工程；美国在伊利湖和安大略湖南部、荷兰在 Ketelmeer 湖和 Geerplas 湖、匈牙利在巴拉顿湖、瑞典在 Trummen 湖等湖泊也进行了较大规模的湖泊底泥疏浚。在其他工程治理措施的配合下，以上这些疏浚工程多数改善了疏浚水域的污染状况，具有明显的治理效果。

1.2.1 有毒有害与高氮磷污染底泥环保疏浚工程

国际上一些国家针对有毒有害与高氮磷污染底泥也开展了环保疏浚，并取得了较好的治理效果，比较典型的有如下工程案例：

1) 荷兰 Ketelmeer 湖。荷兰投资 1.1 亿美元治理 Keltmeer 湖，疏浚了 350 hm² 的污染底泥，是西欧目前来讲最大的环保疏浚工程，该工程是针对重金属、多环芳烃 (PAH)、多氯联苯 (PCB)、有机农药等有毒有害污染底泥，采取疏浚后异地处置的环保疏浚方案，在水中建设隔离处置场封闭处置疏浚底泥。该封闭处置设施同时还容纳了荷兰其他地区的污染底泥，其有毒有害与高氮磷污染底泥的治理效果较为理想。

2) 荷兰鹿特丹附近的 Papegaaiebek 围堰区。荷兰鹿特丹附近的 Papegaaiebek 围堰区是针对严重污染的疏浚底泥，采取疏浚后异地处置的环保疏浚方案，在近水的陆域建设封闭围堰处置疏浚底泥，该工程也取得了较为理想的治理效果。

3) 美国镜湖。美国镜湖采用了原位处理技术，对污染底泥在原位水下采用固化剂进行处理，该工程取得了较为理想的治理效果。

1.2.2 污染底泥治理中采用的主要疏浚技术

以控制底泥污染为目标的环保疏浚技术是水利工程、环境工程和疏浚工程的交叉边缘工程技术，近 30 年来得到了较大的发展。它利用机械疏浚方法清除江河湖库污染底泥，在挖泥、输送过程中和疏浚工程完成后对环境及周围水体的影响都较小。环保疏浚越来越受到业内人士的重视，围绕泥沙搅动、扩散和二次污染、疏浚精度及疏浚底泥处理处置等主要环节的研究成果不断涌现。北美、欧洲对这项技术的研究起步较早，掌握了比较先进的环保疏浚技术，并有许多成功的应用实例。其中比较常用的技术主要有以下几种：

- 1) 疏浚后在陆上异地处理处置；
- 2) 采用疏浚手段对污染底泥直接在水下原位覆盖或原位固化；
- 3) 在水中建设出水封闭处理设施，将疏浚后的污染底泥异地处置；
- 4) 在水下设置封闭处理设施，将疏浚后的污染底泥异地处置后覆盖封闭。

1.2.3 污染底泥疏浚技术和设备发展概况

世界各国结合开展的环保疏浚工程，开发了不同的疏浚技术和设备。

日本，在实施的污染底泥疏浚工程中，大多采用了疏浚后底泥异地处理处置方案。开发了疏浚和脱水一体化专用船以及挤压抓斗、螺旋挖泥、密闭旋转斗轮等环保疏浚专用设备和机具。

荷兰，结合 Ketelmeer 湖环保疏浚，开发和应用了立式圆盘绞刀、螺旋绞刀、封闭链斗等基于常规疏浚设备的改造环保疏浚机具。在该工程中，还结合封闭处置设施的论证和建设，对采用水中封闭处置设施处置污染底泥开展了系统评估，并开发和应用了水下隔堤、封闭层等通过采用疏浚手段实现的处置设施。

匈牙利巴拉顿湖的疏浚，则采用了带罩环保绞刀等环保疏浚机具。结合环保疏浚工程，世界各国还开发了扫吸头、水平剖面抓斗、遮盖铲斗、刮刀挖泥船等改造机具，意大利还开发了气动泵专用疏浚设备。针对覆盖处置方式，开发了扩散器和铺设覆盖层的设备等配套疏浚设备。

总结环保疏浚技术和设备在前些年已经实现的发展，主要体现在以下几个方面：

- 1) 专用环保疏浚设备开发和改造环保疏浚设备开发并重；
- 2) 开发疏浚监控系统提高疏浚精度；
- 3) 开发防扰动扩散技术措施防止疏浚过程的二次污染。

1.2.4 污染底泥疏浚技术和设备发展趋势

近年来，随着世界各国对环保疏浚技术研究的不断深入和对有毒有害与高氮磷物质危害的日益重视，国际疏浚界在环保疏浚发展方面又出现了一些新的趋势。

关于异地疏浚方式：除了防止扰动引起的扩散，还要注意处理好与堆场处理处置的衔接关系，从而出现了一些低扰动、高浓度疏浚和高浓度输送的初步研究成果。

关于水中封闭处理方式：随着陆上处置场地的日益紧张，以及最佳综合环境方案这一思想的提出，国际上开始探索在水中处置污染底泥，减少水域污染风险向陆上转移的可能，从而使与水中封闭处理相配套的技术得到长足发展。

关于水下覆盖方式：原先主要受覆盖土来源以及水体容积减少的困扰，但随着覆盖层下疏浚技术的提高和研究，上述问题得到解决，有关国家又重新考虑采用水下覆盖方式。

通过环保疏浚实现污染防治水域的水质改善，可能会导致陆上污染风险的增大。区分轻污染、重污染和有毒有害污染，考虑“最佳综合环境方案”，采用将水下处置、陆上处置、无害化处理、资源利用和补救性处置相结合的疏浚底泥综合治理技术体系。

随着对污染底泥鉴别、评估、疏浚和底泥处理处置认识的不断提高和技术的进步，资源化利用技术，特别是大批量处理污染底泥的资源化技术是目前各国努力的方向。

随着对环境安全的重视和污染物长期危害的认识，倾向于对含有重金属、有毒有机物等有害有毒污染底泥采取不同于常规的高含量营养物污染底泥的疏浚技术，并将其分离出来，专门作无害化处理，余水实现高标准达标排放。

1.2.5 国内外污染底泥疏浚经验教训总结

1. 外源治理是湖泊污染控制的关键和内源污染消除的前提

湖泊污染治理正反两方面经验表明，在湖泊外源污染控制的基础上展开内源污染负荷治理和生态修复等措施，才能有明显和持续的效果。荷兰 Geerplas 湖在外源输入磷负荷从 $0.38\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 减小到 $0.13\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的基础上，进行了污染底泥疏浚，取得了较好的水质改善效果。滇池分别于 1994 年 4 月和 2000 年 11 月进行了草海底泥疏浚工程，一期疏浚面积达 2.83 km^2 ，疏浚底泥达 430 万 m^3 ，二期疏浚面积达 1.95 km^2 ，疏浚底泥 210 万 m^3 ，但是由于入湖外源污染没有得到有效控制，滇池水质总体上仍无好转。

2. 环保疏浚与一般疏浚工程应区别对待

环保疏浚与一般疏浚工程既有共性，又有差别，环保疏浚在疏挖污染底泥的同时，在疏挖过程中还非常重视防治污染物的扩散，从而使得浚后湖水透明度和光补偿点明显提高，为生态系统的恢复和重建创造了条件。环保疏浚与一般疏浚工程的区别主要表现在以下几个方面。

(1) 工程目标

一般疏浚工程是为某种工程需要而进行的，例如，在水利工程中为了防洪或蓄水对水库或河道进行的疏浚，在港航工程中为了挖掘或疏通航道进行的疏浚，其疏浚的对象是没有明显污染特征的泥砂土石等水底底泥。

环保疏浚的目的是疏挖湖泊水体中的污染底泥，清除污染水体的主要内源，为水生态系统的恢复创造条件。环保疏浚的对象是有明显污染特征的淤泥等水底底泥，其工程目标应最大限度地满足环境保护的需要。

(2) 边界要求与疏挖厚度

一般疏浚工程实施执行本行业的有关技术规定即可，例如，对河道、水库进行的疏浚执行水利部门的相关技术规定，为航道、港湾建设进行的疏浚执行交通部门的相关技术规定。

实施将污染底泥从水底移除的环保疏浚工程时，除了满足疏浚工程的一般技术要求外，由于疏浚的对象是污染底泥，在精度控制和二次污染的防范措施等很多方面均有特殊的技术要求。环保疏浚与一般疏浚工程比较，在施工边界、疏挖泥层厚度、对颗粒物扩散限制、施工精度、设备选型、底泥处置、工程监控等方面均有一定区别（刘鸿亮等，1999），其技术特点的比较见表 1.1。

表 1.1 环保疏浚工程与一般疏浚工程主要技术特点比较

项目	环保疏浚	一般疏浚
边界要求	按污染土层分布确定	底面平坦，断面规则
疏浚挖泥厚度	较薄，一般小于 1 m	较厚，一般在几米至几十米
对细颗粒扩散限制	尽量避免细颗粒扩散及再悬浮	一般不作限制

项目	环保疏浚	一般疏浚
施工精度	5~10 cm	30~50 cm
设备选型	专用设备或定型设备改造	通用定型设备
底泥处置	泥、水根据污染程度进行特殊处理	泥水分离后一般堆置
工程监控	以专项指标严格监控	一般控制

3. 开展疏浚试验工程非常必要

环保疏浚是一项投入相对较高的环境工程类项目，因此投入是否合理正确，即资金投入和环境产出是否得当，往往在投入之前需对与工程有关的工艺参数作认真研究和反复权衡。另一方面，底泥—水界面影响因素众多，疏浚过程中底泥再悬浮及疏浚前后生态系统中各种生物关系的改变，使得疏浚活动存在生态风险和不确定性。以日本为例，在对面积 146 km² 的霞浦湖其土浦湾（25 km²）的疏浚项目上，其地方政府论证了近 12 年，而对面积仅 13.3 km² 的諏访湖疏浚，自 1969 年第一期疏浚工程开始，也是随工程的进行不停地跟踪评价，直至 2000 年，疏浚工程仍在边施工边研究。具体做法多先在极小范围内试验，总结经验后再一步步推进，同时将相关研究也跟上，然后再总结经验，再改进方法和工艺。因此，在大规模底泥环保疏浚之前，一定要进行必要的工程示范。

1.3 主要内容

本书在国家“十一五”“国家水体污染控制与治理科技重大专项”太湖项目“有毒有害与高氮磷污染底泥环保疏浚与处理处置技术及工程示范”课题支持下，对太湖底泥污染现状进行了详尽调查，围绕底泥氮、磷及重金属质量评估、疏浚边界界定、疏浚深度确定、疏浚量确定及疏浚实施方面的关键技术问题开展规划研究，具体包括太湖底泥分布、不同污染层淤泥厚度、不同污染层淤泥量；上覆水体中营养盐的空间分布；底泥中氮磷、重金属及有毒有害有机物的空间赋存特征；氮磷的吸附-解吸实验研究、底泥重金属相平衡理论研究；疏浚范围、深度及规模确定；生态疏浚实施方案；疏浚的生态风险评估等方面。

1.3.1 太湖底泥淤泥量及其污染物含量调查

对太湖底泥及污染物含量较为详细的调查可追溯到 1997~1999 年，中国科学院南京地理与湖泊所和太湖流域水资源保护局开展了三次测定，但采样点数量限制难以达到可研水平。本次研究立足于底泥环保疏浚范围及深度确定等的关键技术要求，同时立足于底泥环保疏浚工程论证、组织实施需要，重点调查以下内容：

1) 太湖底泥空间特性调查。

为了摸清太湖底泥分布范围和厚度，确定太湖底泥蓄积量，将太湖分成 12 个区域，以网格布点为主，在入湖河口及北部湖湾适当加密采样点，进行污染底泥分层及厚度测

定,全湖测量点位 2035 个,湖心网格以 0.5 个/ km^2 密度布点,其余湖区网格以 1 个/ km^2 布点。

2) 太湖上覆水体营养盐及物理参数调查。

于 2009~2010 年对太湖上覆水体进行全面调查,共计采集水样 2035 个,测定水体中氨氮、硝氮、总氮、溶解性总氮、总磷、溶解性总磷、无机磷和水体中叶绿素 a 含量。

3) 太湖间隙水体营养盐调查。

于 2010 年 9 月至 11 月期间,对太湖底泥间隙水体进行全面调查,共计取得表层间隙水样 1300 个,垂直间隙水样 2700 个左右,测定样品中氨氮、硝氮、溶解性总氮、总磷、溶解性总磷、无机磷。

4) 太湖底泥氮、磷、重金属赋存特征调查。

分别于 2009 年 4 月、2009 年 10 月、2009 年 12 月、2010 年 5 月和 2010 年 7 月对太湖进行全面调查,测定底泥中氮磷、重金属、有毒有害有机物等指标。水平布点和垂直布点同时进行,共采集表层 10 cm 样品 2035 个,柱状垂直样品 6000 个左右。柱状底泥样品按污染层特征分为氧化层、污染层、过渡层、湖底健康层。底泥测定可交换态氮、可交换态硝氮、可交换态总氮、氨基酸态氮、氨基糖态氮、酸解态总氮、总氮、总磷、生物可利用性磷、无机磷、有机磷、铁磷、钙磷。重金属测定 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb。

5) 太湖底泥中有毒有害有机物调查。

有毒有害有机物多环芳烃 (PAHs) 测定 16 种优先控制污染物,有机氯农药 (OCPs) 测定六氯苯、 β -六六六、 γ -六六六、 α -氯丹、 g -氯丹、 p,p' -滴滴伊 (p,p' DDE)、灭蚊灵、 o,p' -滴滴涕 (o,p' DDT)、 p,p' -滴滴涕 (p,p' DDT),共测定样品 94 个。

6) 太湖底泥中营养盐、重金属及持久性有机物背景调查。

于 2010 年 5 月对太湖本底值进行全面细致调查,共布设采样点 49 个,每个采样点采集 6 层,深度共计为 5 m。分别测定样品中氨氮、硝氮、总氮、总磷、生物可利用性磷等营养盐指标;测定 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 共计 8 种重金属指标、部分样品测定 PAHs、PCBs、OCPs 等有毒有害有机物等指标。

7) 示范工程区调查。

根据全太湖底泥污染的分布现状,结合地方配套工程要求,选择竺山湖作为本规划的工程技术集中示范区,面积为 0.3 km^2 ,设置采样点 30 个,每个采样点的底泥分 6 层采集。

采集的样品需进行包括上覆水、间隙水、底泥中各理化指标的测定 [具体的指标同上述 1)~5)],同时对底泥中土工指标进行全面测定。

1.3.2 底泥中氮、磷和重金属的质量评估

科学建立底泥污染等级分类方法及相应标准,是对疏浚工程科学规划至关重要的技术支撑,也是太湖底泥质量评估的基础。本书通过吸附-解吸平衡法建立底泥中氮、磷

的污染等级划分标准；通过潜在生态风险指数法建立底泥中重金属的污染等级分类标准。

1.3.3 氮、磷的吸附-解吸实验

为建立太湖水体中营养盐含量与底泥中营养盐含量之间的定量关系，设计氨氮、无机磷浓度梯度实验各 100 组，每组 9 个浓度梯度，每组实验设定至少 3 组平行样品，得到数据 6000 余个。同时分别测定不同污染层对氮、磷吸附-解吸平衡点的影响，从而为疏浚深度的确定奠定理论基础。

1.3.4 重点污染区的湖底底泥测量

为进一步确定太湖重点污染区的竺山湖、梅梁湖部分湖区、太湖西岸区北段、陈东港以及东太湖的污染底泥的分布及蓄积量，将测量点密度提高到 $0.2\text{ km} \times 0.2\text{ km}$ ，采用更为先进的、高精度的 SiLas 走航式适航水深测定系统，对污染较为严重的区域进行更为详细的复测。

测量区域共分为 6 块，分布于太湖四周，其面积总计约为 230 km^2 ，主要分布在竺山湖、太湖西岸区、陈东港入湖口、太湖南部环渚漾入湖口、东太湖、梅梁湖的武进-直湖港入湖口和梁溪河出湖口附近。

1.3.5 底泥环保疏浚工程规划

根据太湖污染底泥环保疏浚的目的和要求，研究确定环保疏浚范围、深度、规模和疏浚实施方案，从工程技术角度制定切实可行的底泥环保疏浚规划方案，主要内容包括：

- 1) 不同类别污染底泥（氮、磷、重金属）疏浚范围的确定；
- 2) 不同类别污染底泥（氮、磷、重金属）疏浚深度的控制；
- 3) 环保疏浚的适宜技术、工艺和设备；
- 4) 污染底泥环保疏浚实施规划。