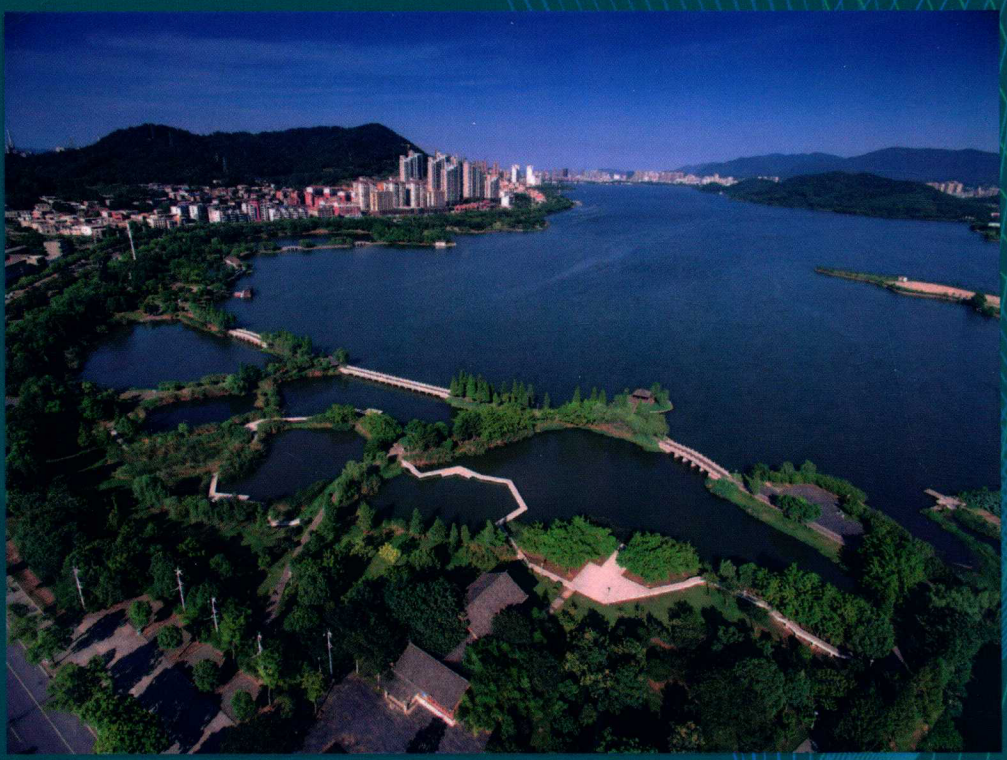
工业城市湖泊水污染控制理论与实践
——以黄石磁湖为例

Theory and Practice of Water Pollution Control of Lake in Industrial City
— Take Cihu Lake in Huangshi City as an example

肖文胜　陶敏　张家泉　等 / 著



中国环境出版集团

工业城市湖泊水污染控制理论与实践

——以黄石磁湖为例

Theory and practice of water pollution control of lake in industrial city

—— Take Cihu Lake in Huangshi City as an example

肖文胜　陶　敏　张家泉　等 著

中国环境出版集团 · 北京

图书在版编目（CIP）数据

工业城市湖泊水污染控制理论与实践：以黄石磁湖为例/肖文胜等著．—北京：中国环境出版集团，2019.11

ISBN 978-7-5111-4116-3

Ⅰ．①工… Ⅱ．①肖… Ⅲ．①工业城市—湖泊污染—污染控制—研究—黄石 Ⅳ．①X524.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 221250 号

出 版 人 武德凯
责任编辑 董蓓蓓
责任校对 任 丽
封面设计 彭 杉

出版发行 中国环境出版集团
（100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号）
网 址：http：//www.cesp.com.cn
电子邮箱：bjgl@cesp.com.cn
联系电话：010-67112765（编辑管理部）
010-67113412（第二分社）
发行热线：010-67125803，010-67113405（传真）
印 刷 北京建宏印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2019 年 11 月第 1 版
印 次 2019 年 11 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 10
字 数 216 千字
定 价 45.00 元

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题，请寄回本集团更换

中国环境出版集团郑重承诺：
中国环境出版集团合作的印刷单位、材料单位均具有中国环境标志产品认证；
中国环境出版集团所有图书“禁塑”。

本书由湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队项目“磁湖水污染控制与水体修复技术研究”（T200709）、湖北省水利厅重点科研项目“磁湖底泥污染控制与资源化技术”（200914）、湖北省自然科学基金重点项目“基于曝气生物滤池的亚硝酸型生物脱氮技术研究”（2010CDA064）、湖北省环境保护重点科研项目“湖北省典型区域主要重金属排放总量控制研究”（2013HB09）、湖北省水利厅重点科研项目“磁湖环保疏浚工程技术研究及环保效益预测与评估”（201311）共同资助。

前 言

湖泊是我国饮用水的重要来源，兼有防洪、发电、航运及维系流域生态平衡等重要功能，关系着人民群众的生存与安全，关系着区域及全国经济社会发展大局。党中央、国务院高度重视生态文明建设，提出“绿水青山就是金山银山”，坚决打好污染防治攻坚战，着力推进重点流域和区域水污染防治。2008 年，国务院办公厅转发环境保护部等部门《关于加强重点湖泊水环境保护工作意见的通知》（国办发〔2008〕4 号），湖泊水环境保护工作取得了较大的进展。

湖北省湖泊众多，素有“千湖之省”美称，江河、湖泊、渠网互通，水系复杂。1950 年第一次统计数据显示，全省湖泊总数 1 332 个，面积 8 528 km^2。但 20 世纪 50 年代以粮为纲，大规模围湖造田、围湖养鱼，导致湖泊数量和面积迅速减少，以至于到 80 年代，全省湖泊减至 843 个，面积缩减至 2 984 km^2；90 年代以来，发展工业和城市建设造成湖泊数量和面积锐减、功能退化，一些城市湖泊迅速消失，到 2015 年，全省有大小湖泊 755 个，湖泊水域面积 2 706 km^2，60 多年来，湖泊的数量减少了 43.3%，面积减少了 68.3%。

针对近年来湖泊数量面积锐减、功能退化的问题，湖北省痛定思痛，积极采取应对措施，特别是 2012 年以来，先后颁布《湖北省湖泊保护条例》，成立了“湖北省湖泊局”，出台了《关于加强湖泊保护管理的实施意见》，编制重点湖泊保护规划。公布了全省第一批、第二批湖泊保护名录。名录共包括洪湖、梁子湖等面积 1 km^2 以上的湖泊和 1 km^2 以下的城中湖泊 308 个。湖泊保护工作进入一个法制化、精细化的良性、可持续发展的轨道。

磁湖位于湖北省黄石市、长江中游下段南岸，以杭州路为界，分为南、北两个半湖，如两叶“绿肺”镶嵌在黄石城区中央，被列入湖北省第一批湖泊保护名录。湖泊东临长江、北与花马湖相连、南以黄荆山分界、西由东方山与大冶湖相隔。承担着空气、水体净化的生态功能，是集防洪、排涝、养殖和游览于一体的多功能水资源地，对于维系黄石市生态平衡、促进黄石市社会和经济可持续发展具有极为重要的作用。磁湖流域沿岸分布大中型企业 50 多个，主要是建材、冶金、机械、煤炭、纺织、化工、食品等行业；导致磁湖水环境生态逐步恶化，水质变为Ⅴ类或劣Ⅴ类，水生生物

均遭到严重破坏，并还有继续恶化的大趋势，严重制约了黄石市经济和城市建设朝既定目标发展，这也与黄石市建设“生态宜居城市”相悖。

“十一五”以来，黄石市开始逐步实施磁湖水生态保护与修复工程；作为一项综合系统工程，无论是景区规划、景观设计，还是湖岸整治、生态引水、污染治理、生态修复，都始终遵循着“保护优先、发展有序”这一主线，实施了水力调度工程、水污染控制工程、水体生态修复工程、滨水区建设工程以及非工程措施等。湖北理工学院水污染控制与水体修复科研团队紧密围绕磁湖水生态保护与修复的实施过程，针对工业城市湖泊进行了水污染监测、水污染控制、底泥疏浚、生态修复、底泥资源化等系统研究和工程示范，取得了明显效果。

本书共分为 8 章。第 1 章介绍城市湖泊水污染现状及治理技术，同时简单介绍了工业城市湖泊水污染特点及存在的问题；第 2 章介绍磁湖自然地理概况（包括地形地貌、气候与气象条件、水文特点、生态资源）；第 3 章详细介绍湖泊现状调查与研究方法；第 4 章从水质、底泥、微型生物、鱼类等方面系统分析及评价磁湖污染现状；第 5 章阐述磁湖外源污染控制措施，包括点源污染控制和面源污染控制；第 6 章介绍磁湖底泥污染物的释放规律，并评估了磁湖底泥疏浚工程的环境影响及工程效果；第 7 章系统阐述磁湖水生态修复工作及相关经验，包括磁湖的形态控制、生态水网构建、水生植被恢复和水生态修复工程；第 8 章着重介绍磁湖底泥处置与资源化的探索实践。

本书由湖北理工学院水污染控制与水体修复科研团队成员合作撰写，肖文胜教授统稿，主要人员分工如下：第 1 章，刘婷、刘红霞、汪瀚；第 2 章，刘红霞、王振；第 3 章，刘红霞、柳山、刘子国；第 4 章，刘婷、吕继良；第 5 章，肖文胜、赵旭德；第 6 章，陶敏、钟松、李于晓；第 7 章，陶敏、郭建林；第 8 章，张家泉、范方禄。书中图表由刘毛林、吴东辉等制作，照片由邹定家、陶敏等提供和整理，参考文献由廖泽远整理。本书还得到了湖北省水利水电规划勘测设计院年夫喜，黄石市水利和湖泊局盖希光，湖北理工学院孙清斌、尹春芹等同志的大力支持与帮助，在此表示诚挚的谢意！

湖泊水污染控制研究领域很广，存在较多不确定性，书中难免出现疏漏和不足之处，恳请广大读者批评指正。

著 者

2019 年 5 月

目 录

1 绪 论 1

1.1 城市湖泊水污染现状 1

1.2 城市湖泊水污染治理技术 6

1.3 工业城市湖泊水污染特点及存在的问题 7

2 磁湖自然地理概况 9

2.1 地形地貌 10

2.2 气候与气象条件 10

2.3 水文特征 10

2.4 生态资源 11

3 湖泊现状调查与研究方法 12

3.1 现状调查内容 12

3.2 调查过程与方法 13

3.3 调查记录与测试结果整理 18

3.4 评价标准与方法 18

4 磁湖污染现状与评价 23

4.1 水质分析与评价 23

4.2 底泥现状与评价 25

4.3 微型生物现状分析 29

4.4 鱼体内重金属的富集和风险评价 46

5 磁湖外源污染控制 51
5.1 概述 51
5.2 点源污染控制 52
5.3 面源污染控制 54

6 磁湖内源污染控制 77
6.1 概述 77
6.2 内源污染与底泥污染物释放 80
6.3 底泥疏浚基本理论研究 86
6.4 底泥疏浚工程 92
6.5 底泥疏浚工程环境影响评价与水质预测 97

7 磁湖水生态修复 105
7.1 概述 105
7.2 磁湖形态控制 106
7.3 磁湖生态水网构建 107
7.4 水生植被恢复 115
7.5 水生态修复工程 119

8 磁湖底泥处置与资源化 121
8.1 概述 121
8.2 底泥资源化——生产水泥 122
8.3 底泥资源化——制备人工湿地基质填料 126
8.4 底泥资源化——建筑填土 130

参考文献 132

附 图 149

1 绪 论

1.1 城市湖泊水污染现状

1.1.1 我国城市湖泊水污染现状

我国湖泊众多，面积大于 1 km^2 的自然湖泊有 2 693 个，总面积 81 414.6 km^2（马荣华等，2011），在青藏高原和长江中下游平原地区分布最为集中。按湖泊地理分布特点，全国可划分为 5 个主要的湖区，即东部平原湖区、东北平原及高地湖区、云贵高原湖区、蒙新高原湖区及青藏高原湖区（王苏民和窦鸿身，1998）。湖泊和水库具有多重功能，它们能够用于供应水源、调节气候、防洪蓄洪、净化水体、农业灌溉、旅游、运输和发电等。

城市湖泊是指位于城市内部或边缘的中小型湖泊（朱春阳，2013）。首先，城市湖泊与城市的发展和人们的生活息息相关，湖水能提供人们生产生活所需的水资源，而且为水产养殖等活动创造了天然条件；其次，城市湖泊作为一个完整的湿地生态系统，为水生生物种群提供了栖息地，保证了生物的多样性，对城市的发展具有重要的生态价值（韩忠峰，2006；孙宁涛等，2007）；再次，湖泊能够调节城市的局部微气候，净化空气质量，增强城市在暴雨过程中的蓄洪能力（李书严等，2008；毛献忠等，2010）；最后，城市湖泊作为湖泊景观，是重要的旅游资源，具有重要的社会价值。

近几十年，随着现代经济的发展、工农业技术的进步，工业点源污染、农业面源污染及生活污水的大量排放，使得污染湖泊水体的因素日益增多。根据《2016 年中国环境状况公报》，纳入我国重点监测范围的 112 个重要湖泊（水库）中，Ⅰ类水质的湖泊（水库）有 8 个，占 7.1%；Ⅱ类水质的湖泊有 28 个，占 25.0%；Ⅲ类水质的湖泊有 38 个，占 33.9%；Ⅳ类水质的湖泊有 23 个，占 20.5%；Ⅴ类水质的湖泊有 6 个，占 5.4%；劣Ⅴ类水质的湖泊有 9 个，占 8.0%。主要污染指标为总磷、化学需氧量和高锰酸盐指数。108 个监测营养状态的湖泊（水库）中，贫营养的 10 个、中营养的 73 个、轻度富营养的 20 个、中度富

营养的5个。

近年来，我国政府和社会投入大量财力，对湖泊开展了大量保护工作，包括对重污染湖泊的治理及对水质较好湖泊的保护等，并取得了良好的成效，太湖、巢湖、滇池等重污染湖泊水质逐步改善，抚仙湖、太平湖、马踏湖、三峡库区等湖泊水质持续维持较好状态，但也有部分湖泊因为保护措施不到位，出现水质下降的情况（王坤，2018）。总体来看，我国湖泊存在几个主要的问题：水体富营养化、水体重金属污染、有毒有机物污染等（陈小锋，2012；何国勤，2013）。

（1）水体富营养化

由于近年来我国湖泊周边人口剧增、工业和农业飞速发展，大多数湖泊已经或正面临着富营养化问题，湖泊的生态安全受到了严重威胁，并在一定程度上制约了流域社会经济的可持续发展（王圣瑞等，2014）。

我国分为五大湖区，李娜等（2018）以全国五大湖区22个典型湖泊为研究对象，科学评估了其富营养化状态。2010—2011年，59.1%的调研湖泊处于不同程度的富营养化状态，其中云贵湖区的富营养化程度最为严重，蒙新湖区的富营养化呈两极分化状态，东北平原及高地湖区与东部湖区的湖泊基本均处于中营养—轻度富营养之间，青藏高原湖区的富营养化程度最低。

城市湖泊作为水体富营养化的重灾区，由于水浅、自身环境容量小，在受纳外源污染时，水质急剧恶化；而且，污染物进入湖体后沉积不稳定，底泥在风浪扰动时极易与湖水发生营养物质交换，造成水体二次污染（秦伯强，范成新，2002；秦伯强，2002）。污染源直接或间接来自工业废水、生活污水等；湖面上的游船、游客或市民的旅游活动也都可能成为污染源。《2011年中国环境状况公报》表明，在调查的5个城市湖泊中，杭州西湖、武汉东湖、济南大明湖的水质为Ⅴ类，北京昆明湖、南京玄武湖为Ⅳ类水体。其中玄武湖、东湖、大明湖处于中度富营养化状态，其余两个湖为轻度富营养化状态。城市湖泊水质恶化对当地工农业、旅游业等的发展带来了巨大冲击（马小雪，2014）。

有“千湖之省”之称的湖北地处长江中游平原地区，湖泊水质及富营养化状况一直是政府和社会关注的焦点。《湖北省2014年水资源公报》一共评价了29个湖泊，面积1 633 km^2，其中，中营养湖泊3个、轻度富营养湖泊14个、中度富营养湖泊12个，富营养化湖泊数量占89.7%；轻营养湖泊面积占60.9%，中营养湖泊面积占17.0%，富营养湖泊面积占22.1%。龙感湖、后湖、涨渡湖、保安湖、大冶湖等重要湖泊水质均出现了明显下降。湖泊主要超标指标为氨氮、总磷和高锰酸盐指数，农药化肥、畜禽养殖、生活污水、生活垃圾等是湖泊氮、磷的主要来源。工业废水很多未经处理直接大量排放，导致湖泊水体污染加剧，严重降低了水体的使用价值并导致湖泊生态系统的进一步退化，湖泊富营养化程度加重（熊昱等，2016）。

（2）水体重金属污染

随着采矿、冶炼、化工、电镀、电子、制革等行业的发展，以及民用固体废物不合理填埋和堆放，重金属污染物事故性排放以及大量化肥、农药的施用，各种重金属污染物进入湖泊水体中，使水体悬浮物和沉积物中的重金属含量急剧升高。进入湖泊的重金属物质，在水中通过机械迁移（水流搬运）、物理化学迁移（包括沉淀作用、吸附作用、絮凝作用和氧化还原作用等）、生物迁移（重金属随生物体的新陈代谢、生长和死亡等过程进行流动和迁移），被水中悬浮颗粒物吸附而沉积到底泥中，进而成为湖泊的次生污染内源，对水体环境造成长期影响。重金属污染范围较广、持续时间长，且具有相当高的稳定性、隐蔽性和难降解性，难以治理。水体重金属污染已经成为当今世界上最严重的环境问题之一（何国勤，2013）。

姜会敏等（2018）对我国的鄱阳湖、洞庭湖、巢湖、博斯腾湖、滇池、洪泽湖、青海湖、太湖等 8 个湖泊的重金属污染状况进行了评估。博斯腾湖和青海湖的重金属污染程度较低，博斯腾湖中 Cu 和 Pb 含量远低于其他湖泊，而青海湖中的 Cu、Pb 和 Ni 含量也低于内地湖泊。博斯腾湖位于新疆内陆，该区域开发时间较晚，经济不发达，受人类干扰程度较小。青海湖是我国最大的咸水内陆湖，位于青藏高原，沿岸区域主要以农业和畜牧业为主，对环境干扰相对较小，污染程度较低。洞庭湖、鄱阳湖、太湖、巢湖、洪泽湖均处于长江中下游地区，该地区是我国经济最为发达，农业、工业发展程度最高的区域，人类活动对湖泊沉积物中重金属浓度产生了显著的影响，Cu、Pb、Zn、Cr 浓度明显高于博斯腾湖和青海湖。滇池由于水域面积较小，且污染物负荷较大，20 世纪 90 年代以前污染长期得不到治理，因此造成污染物堆积、重金属积累，重金属污染最为严重。

湖北省一些湖泊受工业污染较为严重，如大冶湖、保安湖、武山湖等。以大冶湖为例，除氮、磷等污染物超标外，As、Pb、氟化物等污染物也超标严重。据调查，大冶湖流域工业源排放水污染物种类多、排放量大，其 COD_{Cr} 排放量较大的企业有 19 家，占全市 COD_{Cr} 排放量的 51.7%；排放 As、Pb 和 Cd 等重金属的主要企业有 12 家，其排放总量占全市排放总量的 74.3%～98.2%；大冶湖流域工业固体废物主要有尾矿、冶炼废渣、炉渣、粉煤灰、煤矸石等 5 类，占大冶湖流域固体废物总量的 91.8%（熊昱等，2016）。

（3）有毒有机物污染

随着工农业生产的发展，许多新的化学物质不断产生，越来越多的有机污染物通过“三废”排放、地表径流、大气与水体交换、大气干湿沉降和地下水渗入等形式而进入湖泊，经过湖水的物理、化学及生物过程而发生迁移和转化，其中大部分沉积到湖底成为湖泊营养物质。这些物质具有疏水性，可以在生物脂肪中富集，即使在湖泊中含量很低，也可通过水生食物链造成持续性的毒性作用，甚至通过食物链危害人体健康（何国勤，2013）。

1.1.2 国外城市湖泊水污染现状

城市湖泊水污染是全球性的水环境难题，世界各国都曾出现或正在面临种种顽疾。随着经济迅猛发展、人口急剧增加，各国城市湖泊水污染问题突显，严重威胁城市居民饮水安全和身体健康，一方面降低了人们的生活水平，另一方面加剧了水资源短缺，引起了各国政府的重视。联合国环境规划署（UNEP）调查结果表明，全球范围内 30%～40%的湖泊和水库遭受到不同程度富营养化影响。西班牙全国 800 多个湖泊中，至少有 1/3 的湖泊处于重富营养化状态；南美、南非、墨西哥等国家均有水体重富营养化报道；加拿大湖泊众多，富营养化湖泊主要集中在南部人口稠密地区（马经安和李红清，2012）。

美国国家环境保护局在 1972—1974 年进行全国湖泊调查，结果表明富营养化水体占 77.8%、贫营养水体占 4.5%、中营养水体占 17.7%（李小平，2002）。该调查结果使美国政府对湖泊污染问题更加重视。位于美国和加拿大交界处的伊利湖，周边城市人口密集、经济繁荣，拥有发达的渔业、农业和工业。自 20 世纪 60 年代开始，洗涤工业迅速发展及含磷洗涤剂大量使用、工业废水无节制排放、生活污水增加以及化肥农药大量施用，导致湖泊环境问题持续恶化（汪秀丽，2005）。伊利湖环境问题的严峻形势促使美加两国政府全力协作，进行系列治理工作。一是制定相关协议（如《大湖区管理协议》），规定两国政府享有权利和承担责任，积极推行磷排放削减计划，禁止含磷洗涤剂生产、销售和使用。美国和加拿大立足于立法，限制去污剂中磷含量及净化污水中磷。二是制定规划进行经济发展，如制订大湖附近农业发展计划以降低农业面源污染危害；适当限制工业企业，鼓励休闲娱乐服务发展。三是大力投资兴建截污减排设施，企业依法自建污水处理系统；政府建造污水处理厂和污水截流沟，对入湖水源进行洁净处理。此外，为达到削减磷负荷目标，加拿大政府于 1989 年在北美五大湖周边采取了耕作保持以及合理施肥、草皮护坡水道以及缓冲带和牲畜污物管理等措施（窦明等，2007）。

在欧洲统计的 96 个湖泊水库中，仅有 19 个处于贫营养状态，80 个处于富营养化状态（马经安和李红清，2012）。欧洲博登湖横跨瑞士、德国和意大利，是周边居民重要的饮用水水源。“二战”后随着经济迅速发展、人口加快增加，工业废水和家庭新型含磷洗衣粉使用等系列污染造成湖泊富营养化（陈斌林，2001）。各国建立博登湖国际会议委员会，达成共识控制工业以及城市污染物排放，通过各国灵活执行各项协议进行湖泊水环境治理。瑞典是一个多湖国家，在 20 世纪 50 年代末很多湖泊呈现富营养化趋势。通过采取多项治理措施逐渐得到缓解，如建设污水处理设施、严格控制工业废水排放、限制含磷洗涤剂生产和使用、有效清除湖泊底泥并向底泥充气、采用絮凝法除磷等（Pers 和李四海，2005）。尽管瑞士是欧洲水质较好的国家之一，工农业发展也给湖泊水环境带来了污染，但是，瑞士先进的水处理技术及严格的水环境管理政策、法律和经济手段有效地保护了湖泊水环

境，重视从源头上防止污染物进入水体（马双丽等，2015）。瑞士有些湖泊出现溶解氧过低现象，通过以下措施进行有效控制：抽出底层低含氧湖水，增加湖底氧气或输送空气以混合湖水；改革洗涤剂为无磷洗涤剂；削减磷排放，控制畜禽粪尿污染；加强化肥施用量控制（马经安和李红清，2012）。为消除和防止湖泊富营养化，德国注重维持水体溶解氧（8 mg/L 左右），认为控制磷酸盐是行之有效的措施（沈百鑫，2014）。作为荷兰弗莱福兰省重要自然风光和娱乐场所，费吕沃湖在 1970 年暴发严重蓝绿藻污染，湖泊生态遭到严重破坏。通过换水和生物控制进行生态恢复，在湖周边建设两座污水处理厂以减少外源磷输入；同时在冬季进行引水稀释以减少内源磷释放（沃伦·沃克维等，1989；宋国君和王亚男，2003）。

亚洲湖泊污染相比欧洲湖泊严重，特别是东南亚发展中国家湖泊污染较重。亚洲大部分尤其是南部水体的氮、磷浓度偏高，受当地适宜气候条件影响，存在富营养化隐患（马经安和李红清，2012）。日本本州岛滋贺县琵琶湖是淡水养殖、航运、灌溉和工业用水的重要场所，同时为东京、大阪和神户大都市圈提供水源。从 20 世纪 60 年代开始，随着经济腾飞、人口剧增，湖泊周边工厂以及家庭排放废水流入湖泊，琵琶湖水质迅速恶化，在 1977 年以来十几年内频繁发生大规模赤潮和水华（顾岗和刘鸿志，2001）。琵琶湖突发性的恶劣环境问题震惊了日本社会，经过当地政府与居民共同努力，历经 30 年耗费 180 亿美元积极进行琵琶湖的保护和治理。作为目前世界上城市湖泊治理最成功的例子，琵琶湖治理经验主要包括以下几点：基于流域单元进行综合治理，制定法规保障治理工程（如《琵琶湖富营养化防止条例》等），治湖与治山紧密结合、严格控制污染源，大力普及环保知识、倡导全民参与（张兴奇等，2006）。日本茨城县和千叶县之间的霞浦湖，其周边工厂设施必须严格执行水质排放标准，对畜牧业废水排放也有严格规定，同时对霞浦湖流域进行有效疏浚（涂建峰等，2007）。

城市湖泊是重要的水资源，也是当地居民休闲游玩地，在降低城市热岛效应、防洪排涝以及为动植物提供栖息地并维持生物多样性等方面起着重要作用。随着经济快速发展和人为活动日趋频繁，城市湖泊面临日益严重的水质污染问题，势必对湖泊水体功能和城市景观造成严重影响。因此，城市湖泊水污染治理技术研究成为城市水环境保护研究领域的重要热点。通过分析西方各国湖泊污染治理经验，未来治理技术发展趋势可归纳为如下几个方面：①采用新型物理、化学以及生物技术进行城市湖泊水污染治理，尽量做到合理有效地综合运用；②适当探索产权确定、排污交易制度以及生态补偿机制等；③针对跨区域城市湖泊采取通力合作协调治理，类似于北美五大湖和欧洲博登湖的污染治理；④制定可操作性强、有效性高的水污染治理法律法规，依法严厉治理水污染；⑤进行管理体制改革，鼓励引入竞争机制。

1.2 城市湖泊水污染治理技术

1.2.1 物理方法

湖泊水污染的物理处理技术一般有截污分流、引水冲污、底泥疏浚、曝气复氧等。

截污分流是通过建设雨水管网、污水管网、截污管道等，将污水收集、处理达标后再排入湖泊，可以从根本上解决城市湖泊水污染问题。然而，截污分流实施难度较大，涉及市政、水利、交通等多个部门，一般需通过行政手段辅助完成。

引水冲污是用清洁江河水置换湖泊的污染湖水，从而降低湖泊的污染负荷，提高湖泊的自净能力。2000—2003 年，通过“引江济太”工程有效地改善了太湖水质（张学勤和曹光杰，2005）。周俊等（2002）通过引水冲污工程治理东湖磷污染，结果表明有效减少了东湖中磷污染物总量，增强了东湖水体的自净能力。李共国等（2006）监测了引水和疏浚工程对杭州西湖浮游动物群落的影响，结果发现纤毛虫、轮虫的丰度和优势度显著增加，表明西湖水质得到明显改善。

底泥是湖泊水体中污染物的“汇”，也是污染物的“源”；通过底泥疏浚可有效减少内源污染，永久去除底泥中的污染物。陈荷生（2004）调查了太湖底泥的污染特性，提出疏浚范围为底泥厚且污染重的重点功能湖区，疏浚深度以 40～50 cm 为宜。吴芝瑛等（2008）研究了西湖实施底泥疏浚工程前后沉积物中营养物质含量、水质以及水生生物群落的变化，研究发现疏浚后西湖水体与富营养化相关的主要指标均有不同程度的改善，同时显著降低了沉积物表层中有机质、总氮和有机磷的含量。然而，底泥疏浚虽可在短期内快速削减内源污染负荷，但是不同疏浚方法对底泥内源控制效果会产生较大影响，因此应谨慎对待湖泊底泥疏浚（范成新等，2004）。另外，清淤底泥的安全处置也非常关键，一般被烧制成陶粒（周颜等，2017）、裹壳骨料（彭瑜洲等，2018）、路面砖（杨鹏乾等，2018）、水泥（肖文胜等，2014）等，实现清淤底泥中污染物的固结而防止二次污染。

1.2.2 化学方法

湖泊水污染的化学处理技术一般是利用化学药剂进行除藻、固定重金属离子等。化学除藻是通过投加化学药剂破坏水体中的胶原体，从而达到除藻的目的。根据化学药剂性质的不同，可分为化学氧化剂除藻（季丽，2015）、除藻剂除藻（高秀清等，2016；王红强等，2017）和混凝沉淀剂除藻（任刚等，2015；鲁梦江，2017）等。

另外，针对突发污染事件，通过投加一些碱性物质或螯合剂，湖泊水体中游离态的重金属离子会形成难溶性沉淀，而被固定在底泥中。常用的化学固定药剂有石灰（霄云，

1989)、炉渣（许虹，2006)、腐殖质（李雨清，2015）等。

1.2.3 生物生态方法

湖泊水污染的生物生态处理技术一般有植物修复、微生物修复、生物操纵、生态修复等。

植物通过吸附、固定、摄取、转移、挥发、降解等多种途径去除污染物，尤其在有机污染物和重金属污染治理中得到广泛的研究和应用（Chaudhery et al.，2002；Vila et al.，2007)。已有研究表明，凤眼莲、苜蓿、香蒲等植物能够有效地去除水体中的 PAHs、DDT、马拉硫磷、三唑磷等（Flocco et al.，2004；Amaya-Chávez et al.，2006；Cheng et al.，2007)。另外，植物可通过释放水解酶、过氧化物酶等胞外酶直接降解多氯联苯和酚类有机物（Mehmannavaz et al.，2002；González et al.，2006)，或通过分泌有机酸和酚类物质刺激微生物活性，间接促进有机物降解（Lee et al.，2008)。

微生物是湖泊水生态系统的重要组成部分，是湖泊水体自净作用的主要完成者。雷静等（2016）通过投加氮循环微生物，有效地促进了湖泊清淤后的反硝化作用，削减了湖泊底泥及上覆水中的氮素含量，达到了修复富营养化湖泊的目的。研究发现，假单胞菌、黄杆菌、微球菌、革兰氏阴性菌等都存在水解酶，对有机磷农药、多环芳烃等难降解有机物具有很好的降解作用（Screenivasulu & Aparna，2001；柏文琴等，2004；杨明忠等，2016)。

生物操纵是通过人工控制浮游动物食性鱼类、投放滤食性鱼类而达到控藻的目的。郝保山等（2010）根据西北地区不同类型水库的水质状况和营养水平，有针对性地利用生物操纵技术治理水库的富营养化。王宇庭等（2017）系统归纳了在不同营养类型、不同水体形态和不同营养物质输入下湖泊水体的渔业操纵对策。可以发现，生物操纵技术应用中存在差异性问题，应根据富营养化湖泊的特性采用不同的组合生物修复技术（刘晶等，2005)。

生态修复是利用生态系统原理修复与重建受损的湖泊水生态系统，它是一项系统性工程，如日本琵琶湖流域生态系统的修复与重建，包括上游的森林建设、内湖重建、河流治理、湖滨带芦苇群落的保护等一系列的流域修复工作（余辉，2016)。城市湖泊常用的生态修复技术有人工湿地（徐栋等，2006；张翔凌等，2008)、人工浮岛（杨逢乐等，2008)、湖滨带生态修复（孔优佳等，2017)、水生植物恢复（张萌等，2014；邱东茹等，1997）等，其中恢复与重建以大型沉水植物为主的水生植被尤为重要（刘玉超等，2008)。

1.3 工业城市湖泊水污染特点及存在的问题

相比一般城市湖泊，工业城市湖泊一般污染成分更复杂、污染状况更严重，其水体污染特点主要表现为：①污染模式为结构性污染，普遍污染较重，部分水域污染非常严重；

②污染物以重金属为主，有毒有害物质的含量也较高，且水体富营养化严重；③湖泊相对闭塞，水体自净能力差；④底泥内源污染更严重，对湖泊水质的影响更大。

因此，工业城市湖泊水污染的治理相对更难，存在以下难题：①清淤污泥的安全处置问题。清淤污泥中含有大量的重金属、有毒有害物质，存在二次污染的问题；②重金属的胁迫问题。在重金属的胁迫下，如何安全有效地实施生物生态修复；③重金属、持久性有机物等污染物的二次释放问题。

2 磁湖自然地理概况

磁湖位于长江中游下段南岸、湖北省黄石市城区内，以杭州路为界，分为南、北两个半湖，如两叶“绿肺”镶嵌在黄石城区中央（图 2-1）。磁湖位于东经 114°57′～115°06′、北纬 30°10′～30°15′。磁湖径流面积 62.8 km^2，湖泊面积 8.2 km^2，平均水深 1.75 m，湖体容量 1 748 万 m^3。磁湖东临长江、北与花马湖相连、南以黄荆山分界、西由东方山与大冶湖相隔。湖水由胜阳港闸自排入江，主汛期主要靠胜阳港泵站抽排入江，现有排水能力为 31 m/s。磁湖承担着空气、水体净化的生态功能，是集防洪、排涝、养殖和游览于一体的多功能水资源地，对于维系黄石市的生态平衡、促进黄石市社会和经济可持续发展具有极为重要的作用。

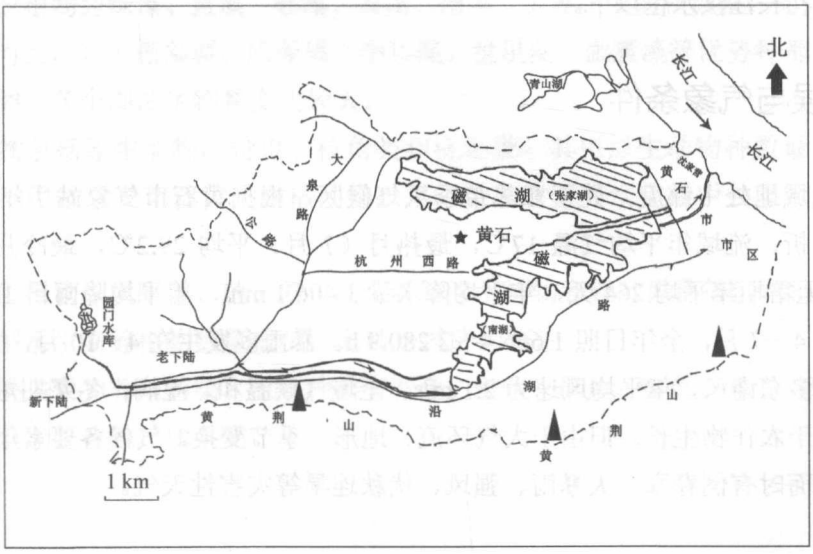


图 2-1　磁湖地理位置

磁湖是黄石市最重要的一个湖泊，在黄石市城区洪水调蓄、生态调节等方面起着重要的作用。磁湖区景色秀美，是镶嵌在黄石城区的一颗璀璨明珠，也是黄石市区最为重要的