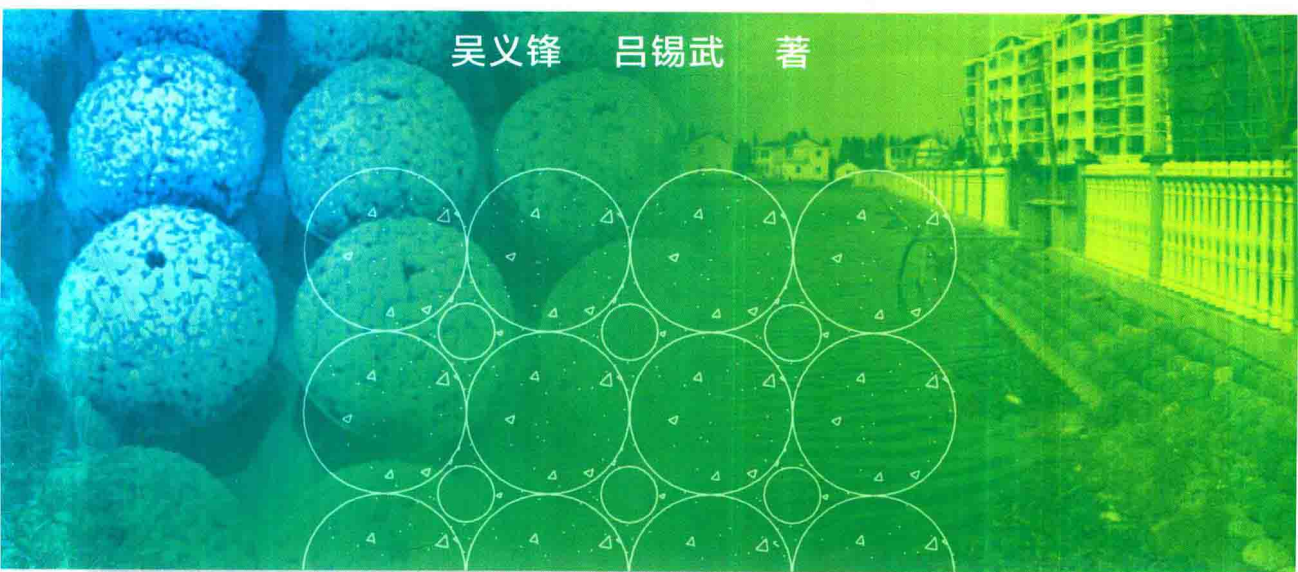


HEHU ANXIAN DUOKONG HUNNINGTU
TINGYING SHENGTAI XIUFU
YU SHIJIAN

河湖岸线多孔混凝土 特定生境生态修复 技术与实践

吴义锋 吕锡武 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

河湖岸线多孔混凝土 特定生境生态修复 技术与实践

吴义锋 吕锡武 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是一本关于水体岸线生态修复关键技术原理与实践应用的图书。本书紧紧围绕当前被广泛关注的河湖岸线水土保持与生态修复的热点问题，基于河湖岸线生态功能及生境修复的理论基础分析，全面介绍河湖岸线生态修复型多孔混凝土材料配比及构型优化设计技术，阐述河湖多孔混凝土生态岸线水质净化效应、微生物富集效应、生态化岸线水土界面的物质交换机制，系统研究多孔混凝土制备与构型优化设计、河湖岸线多孔混凝土特定生境生态修复关键技术，展示多孔混凝土载体联合植物群落应用于环境改善和生态修复的成功案例，提供多孔混凝土制备工艺与构型优化设计技术、河湖岸线多孔混凝土生态建设技术及应用两部技术指南。

本书可供环境工程、环境科学、水利工程、市政工程等学科的科研人员、大学教师及其相关专业的本科生、研究生，以及从事环境保护、水土保持及水生态、水资源等领域的工程技术和管理人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

河湖岸线多孔混凝土特定生境生态修复技术与实践 /
吴义锋, 吕锡武著. — 北京：中国水利水电出版社,
2016. 12
ISBN 978-7-5170-5043-8

I. ①河… II. ①吴… ②吕… III. ①多孔板—混凝土板—应用—生态环境—生态恢复—研究 IV. ①X171.4

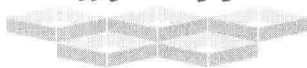
中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第316036号

书 名	河湖岸线多孔混凝土特定生境生态修复技术与实践 HEHU ANXIAN DUOKONG HUNNINGTU TEDING SHENGJING SHENGTAI XIUFU JISHU YU SHIJIAN
作 者	吴义锋 吕锡武 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10.5印张 249千字
版 次	2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	48.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言



河湖岸线是高低水位之间直到水面影响完全消失为止的生态过渡带，是陆源污染物进入水域前的最后一道生态屏障，是生态系统中水土界面物质与能量交换过程的重要枢纽。长期以来，人们对河湖岸线的治理仅侧重于水土保持、防洪、航运、景观等单方面的需求，岸线普遍采用硬质化的护坡方式，切断了生态系统中水体与陆地间的物质、能量和信息交换过程，从而导致地表水体水质恶化、自净功能丧失、物种多样性下降、生态系统破损等诸多严重后果。河湖硬质岸坡的生态化改造以及生态水体的构建已成为现代水利工程发展过程中不可或缺的重要内容之一。随着对生态岸线内涵及其功能研究的不断深入，河湖生态岸线构建及其生态效应评价迫切需要建立一套完整的技术与理论体系，从而实现地表水体生态治理的目的，对河湖环境保护也具有重要的理论和现实意义。

多孔混凝土是采用特殊级配的集料和胶凝材料，使其力学性能满足河湖岸线修复工程使用要求的同时，内部形成蜂窝状的结构，连续贯通多孔结构和巨大的比表面积使得其表面非常适宜富集微生物及生长绿色植物，兼具类似土壤的透水透气性和一定的抗压强度，将之作为河湖岸线生态的生境修复材料及其应用模式备受关注。在关于河湖岸线生境修复大量的实地调研、实验室研究和工程实践的基础上，形成了系列化、标准化的多孔混凝土制备成型工艺及河湖岸线生境修复的优化构型设计，提出了多孔混凝土应用于河湖岸线修复水力学关键参数及其岸线多孔混凝土生境的植物群落构建模式。

为科学评价河湖岸线多孔混凝土生态建设的环境效应，在综述分析国内外河湖工程治理研究动态的基础上，本书利用理论分析和实验模拟相结合的研究方法，从河流生态岸坡的构建技术及其功能研究的角度出发，提出了水体岸线的生态治理工程模式。采用新型生态环保材料——生态混凝土构建了生态护砌河道实验模型，并以大量实验研究和理论分析为基础，提出了一整套河流生态岸坡水质改善功能及生态效应评价的技术与理论体系，重点探讨了生态混凝土护坡构建技术及河流岸坡生物栖息地改替等生态修复的工程实践方法。

根据天然河流形态和运动特征，构建了仿天然河流自然弯曲特征的多孔

混凝土护砌河道实验模型,通过实验模型的运行调控,模拟并研究岸线特定生境在河道常水位和水位动态周期变化条件下的水质净化效果以及抗污染冲击负荷的能力,并取得了良好的水质改善效果。论文研究中提出的多孔混凝土生态岸线的植被覆盖率高,水质改善效果明显,相对“三面光”硬化模式岸线的河道中污染物去除率有很大的提高;在模拟河道水位动态周期性变化水质改善效果时,多孔混凝土生态岸线的水质改善效果全面优于模拟河道常水位运行时的水质改善效果;同时研究表明,具有生态岸线的河道抗污染冲击负荷的能力较强,实验河道中总氮浓度分别瞬时增加时,生态护砌河道水质恢复的时间较“三面光”河道有很大程度的缩减。针对地表水体地中阿特拉津、酞酸酯类等微量内分泌干扰物的检出频率和浓度均呈上升趋势的特性,通过大量实验分析重点研究了生态护砌河道对微量有机物的去除效果,最终得出多孔混凝土生态岸线能强化并有效去除水中阿特拉津、酞酸酯类、氯代苯类等微量有机污染物,而“三面光”硬化模式的水体中微量有机物的去除效果不稳定且去除率低的有利结论,为水源地的水质安全保障和生态修复提供了重要参考依据。

本书通过微生物学检测和坡面基质生化性质分析,探讨了岸线多孔混凝土生境基质微生物量、富集微生物的分布特性及岸线生境微生物栖息地改替等生态修复技术,提出了河道岸坡面的水生植物生长区是改善河流生态系统最活跃的功能区,也是河流生态修复的控制区。采用 PFU 法监测实验河道的微型生物群落结构,对比研究了多孔混凝土岸线生境修复模式、“三面光”硬化岸线模式等不同类型的河道中的微型生物群落的构成特征,多孔混凝土岸线修复模式能强化水中微型生物群集速率,在较短的时间内实现了微生物物种平衡,生态系统自我完善功能强大,微型生物群集速率、生物多样性指数明显高于“三面光”硬化岸线模式。在对多孔混凝土生态岸线实验模型水质演变理论分析的基础上,系统实验研究了多孔混凝土岸线修复对其水动力学特性的影响,确定了生态护砌河道的粗糙系数,为水工计算提供设计依据。

河湖岸线的生态混凝土生境修复可有效改善水体水质,提高水体自净能力,修复和完善水生生态系统,本书提供了《岸线修复型多孔混凝土制备与预制构型设计技术指南》和《河湖岸线生态建设技术指南》等两部实用的技术指南,为多孔混凝土及其生态构建模式在河湖岸线防护的应用提供设计、施工、验收、管养等成套的规程文件,本书成果可为不同类型的河湖等地表水体的生态修复和环境质量改善提供基础数据和技术支撑。

本书内容主要是作者在河湖岸线生态建设和水环境保护等领域长期的研

究成果的总结。全书共包含5个方面的内容,分为11章。第1章为文献综述、研究背景与研究意义;第2章和第9章主要阐述多孔混凝土材料制备成型工艺、多孔混凝土构型优化设计及河湖岸线生态构建关键技术与工程案例;第3~7章系统分析了水体岸线多孔混凝土生态修复的环境效应评价的实验研究成果,包括实验模型设计、水质净化过程与机理分析、微量有机物去除、多孔混凝土生境水土界面微生物富集特性、岸线构建模式对水生生态系统的影响等;第8章分析了多孔混凝土生态岸线与硬化岸线对水动力特征的影响;第10章和第11章为关键技术应用指南专辑,提供了两部关于河湖岸线生态建设的实用技术指南。

本书得到了国家十二五科技支撑计划课题“水网密集地区村镇宜居社区与工业化小康住宅建设关键技术与集成示范”(2013BAJ10B13)的资助,获得了国家水体污染控制与治理重大科技专项“竺山湾农村分散式生活污水处理技术集成研究与工程示范”(2011ZX07101-005)、江苏省自然科学基金课题“水体岸坡特定生境中氮磷营养盐的水土界面微生态过程及其生态修复潜力研究”(BK20161146)、浙江省水利科技项目“‘万里清水河道建设’生态堤岸适用技术研究”(RB0914)、国家自然科学基金“河渠岸坡特定生态系统水-土界面物质交换机理与功能强化”(50119027)等科研课题的支持;全书由吴义锋撰写和统稿,同时也凝聚了东南大学吕锡武教授的大量心血,在资料收集和本书编写过程中,得到了韩玉玲、高建明、刘劲松、岳春雷、徐晓东等专家学者的悉心指导和帮助,上海市黄浦江原水厂、浙江省河道管理总站、江苏省水利厅、中国水利水电出版社等单位领导和专家给予了大力支持;戴喆泰、代洪亮、殷志平、朱闻博、陈杨辉等均参加了河湖岸线环境构建关键技术等课题的部分研究工作;东南大学朱光灿研究员、河海大学薛联青教授也给予了帮助与支持。在本书出版之际,作者在此深表谢意!

同时对本书所引用的参考文献的作者及不慎疏漏的引文作者也一并致谢!

由于作者的专业水平和知识领域有限,在本书编写过程中难免存在不足、不妥及顾此失彼之处,敬请专家、同仁及各界读者给予批评指正!

作者

2016年10月于东南大学

目 录



前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 水环境现状	1
1.1.2 水环境生态修复	2
1.1.3 提出问题	4
1.2 河湖岸线生态化研究进展	5
1.2.1 河湖岸线生态水文过程的环境效应	6
1.2.2 岸线传统护坡方式	6
1.2.3 河湖岸线生态化构建	8
1.2.4 岸线水土界面的生态效应	8
1.3 河湖岸线多孔混凝土生境材料及应用	9
1.3.1 多孔混凝土修复材料	9
1.3.2 多孔混凝土的水质净化效应	10
1.3.3 多孔混凝土生态护坡	11
1.4 河湖岸线生态构建发展趋势	12
第 2 章 河湖岸线生境修复型多孔混凝土材料及构型设计	13
2.1 修复型多孔混凝土制备的配比设计	13
2.1.1 多孔混凝土制备原料	13
2.1.2 多孔混凝土的配合比设计	14
2.1.3 多孔混凝土参数设计	15
2.1.4 配合比设计计算方法	16
2.2 多孔混凝土制备工艺	17
2.2.1 拌和工艺	17
2.2.2 混合浆料性能	18
2.2.3 多孔成型工艺	19
2.2.4 养护模式	20
2.3 河湖多孔混凝土生态岸线构型设计	20
2.3.1 生态岸线护岸构型设计	21
2.3.2 预制单球组合	21
2.3.3 多球连体砌块组合	23

2.3.4	凹凸连锁具孔矩形砌块	24
2.3.5	方形组合自嵌式砌块	26
2.3.6	鱼巢式砌块	27
2.3.7	直立岸线预制扇形块体	28
2.3.8	直立岸线连锁砌块	29
2.4	多孔混凝土预制构型成型工艺	30
2.4.1	成型控制与养护	30
2.4.2	预制构型适用性	30
2.5	本章小结	31
第3章	河湖岸线多孔混凝土生态护坡效应评价实验模型	32
3.1	概述	32
3.2	实验材料	33
3.2.1	模型构建	33
3.2.2	多孔混凝土岸线生境植被	35
3.3	水质分析方法	36
3.3.1	常规水质分析	36
3.3.2	有机物分子量分析方法	37
3.3.3	微量有机物分析方法	37
3.4	多孔混凝土特定生境微生物分析	40
3.4.1	微生物生物量的测定	40
3.4.2	基质脱氢酶活性的测定	40
3.4.3	基质脲酶活性的测定	41
3.4.4	基质微生物活细菌测数	41
3.4.5	氮转化功能菌群分析方法	42
3.5	实验模型微型生物群落分析	44
3.5.1	微型生物群落分析方法	44
3.5.2	浮游生物监测方法	45
3.6	本章小结	46
第4章	多孔混凝土岸线修复实验模型的水质改善效应	47
4.1	实验期间原水水质	47
4.2	岸线生境模式对水质改善效果的影响与对比	48
4.2.1	氨氮的去除效果对比分析	48
4.2.2	高锰酸盐指数的去除效果对比分析	50
4.2.3	总氮的去除效果对比分析	52
4.2.4	其他污染物的去除效果对比分析	53
4.3	本章小结	56

第 5 章 岸线多孔混凝土特定生境实验模型中污染物去除过程	57
5.1 不同水动力条件下的水质净化效应	57
5.1.1 常水位模拟时污染物去除效应对比	57
5.1.2 动态水位模拟时污染物去除过程	61
5.1.3 实验河道的抗污染冲击效应	64
5.2 岸坡特定生境下的脱氮机理分析	66
5.2.1 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 和 TN 的去除效果	66
5.2.2 实验模型脱氮动力学模拟	67
5.2.3 脱氮的影响因素与机理讨论	68
5.2.4 实验渠中氮类污染物去除机制	69
5.3 生态修复条件下水体中微量有机物的去除效应	70
5.3.1 阿特拉津的去除效果	71
5.3.2 酞酸酯类化合物的去除效果	71
5.3.3 氯苯类化合物的去除效果	74
5.3.4 气相色谱有机物出峰图谱分析	75
5.4 本章小结	79
第 6 章 多孔混凝土岸线特定生境水土界面微生物富集特性	81
6.1 特定生境微生物采集	81
6.2 岸线特定生境微生物特定的时空规律	82
6.2.1 基质微生物量的动态特征	82
6.2.2 脱氢酶活性的动态特征	83
6.2.3 脲酶活性的动态特征	83
6.2.4 纤维素酶的动态特征	83
6.2.5 微生物量及细菌种群的时空规律	84
6.3 多孔混凝土岸坡基质生化特性	85
6.3.1 硝化潜力	85
6.3.2 反硝化作用强度	86
6.3.3 基质氮释放速率	86
6.4 本章小结	87
第 7 章 岸坡特定生境对水中微型生物群落结构功能的影响	88
7.1 水质化学综合污染指数	88
7.1.1 污染指数计算方法	88
7.1.2 水质化学综合污染指数变化	88
7.2 特定生境对微型生物群落的影响	89
7.2.1 微型生物群落结构与功能参数计算	89
7.2.2 微型生物群落种群结构特征	89
7.2.3 微型生物群落群集过程分析	90

7.2.4 PFU 微型生物多样性分析	91
7.3 特定生境对浮游生物动态变化的影响	92
7.3.1 浮游细菌动态变化	92
7.3.2 浮游植物动态变化	92
7.3.3 浮游动物动态变化	94
7.4 底栖生物动态变化	95
7.5 生态护砌河道污染物行为机制探讨	96
7.6 本章小结	97
第 8 章 岸线多孔混凝土生态护坡实验模型的流态分析	98
8.1 水力计算方法	98
8.1.1 断面流速测试	98
8.1.2 断面流速分布	98
8.2 护砌面粗糙系数计算	99
第 9 章 多孔混凝土河湖岸线生态修复技术与应用	101
9.1 岸线多孔混凝土生态修复	101
9.2 多孔混凝土岸线构建	101
9.2.1 坡面基础工程	101
9.2.2 反滤层	102
9.2.3 多孔混凝土预制构型与铺装	102
9.2.4 种植土回填	104
9.2.5 植物选配	104
9.2.6 养护与管理	104
9.2.7 施工及验收	105
9.3 特定生境植物群落构建	105
9.3.1 黏土质岸线修复后生境植物群落设计	105
9.3.2 砂土质岸线修复后生境植物群落设计	106
9.3.3 含盐砂质岸线修复后生境植物群落设计	107
9.3.4 岸线植物群落构建	108
9.4 岸线多孔混凝土生态建设工程案例	108
9.5 本章小结	112
第 10 章 岸线修复型多孔混凝土制备与预制构型设计技术指南	113
10.1 总则	113
10.2 术语、符号	113
10.2.1 术语	113
10.2.2 符号	114
10.3 制备原材料	114
10.3.1 一般要求	114

10.3.2	骨料	114
10.3.3	水泥	115
10.3.4	胶结材料	115
10.3.5	拌和用水	115
10.4	配合比设计	115
10.4.1	一般要求	115
10.4.2	配合比计算	116
10.4.3	配合比设计	116
10.4.4	配合比施工调整	117
10.5	多孔混凝土及拌和物性能指标	117
10.5.1	一般要求	117
10.5.2	混合料制备工艺	117
10.5.3	混合料性能指标	118
10.5.4	硬化多孔混凝土性能指标	118
10.6	多孔混凝土预制构型	119
10.6.1	一般要求	119
10.6.2	多孔混凝土预制单球组合	119
10.6.3	多孔混凝土预制球连体砌块	120
10.6.4	多孔混凝土凹凸连锁具孔矩形砌块	122
10.6.5	多孔混凝土预制方形组合自嵌式砌块	122
10.6.6	多孔混凝土鱼巢式砌块	123
10.6.7	多孔混凝土直立岸线预制扇形块体	124
10.6.8	多孔混凝土直立岸线连锁砌块	125
10.7	多孔混凝土预制构型养护	127
10.7.1	振动成型	127
10.7.2	养护模式	127
10.8	多孔混凝土检验规则	127
10.8.1	检验分类	127
10.8.2	取样与批号	128
10.8.3	判定与复检	128
10-附录 A	多孔混凝土抗压强度测试	128
10-附录 B	渗透系数测试	128
10-附录 C	孔隙率测试	129
10-引用标准名录		129
第 11 章	河湖岸线生态建设技术指南	131
11.1	总则	131
11.2	河湖岸线生态建设概述	131

11.2.1	河岸岸线生态与生境特征	131
11.2.2	河湖岸线生态建设解决的问题	132
11.2.3	河道堤岸生态建设技术要求	133
11.3	河道堤岸生境建设方法	133
11.3.1	土壤修复材料	134
11.3.2	河湖岸线多孔生境修复基材	136
11.3.3	河湖岸线多孔混凝土生态建设构型	137
11.3.4	河湖岸线多孔混凝土预制构型选用	138
11.3.5	多孔混凝土生态护坡构建	138
11.4	植物群落设计与重建	141
11.4.1	黏土质岸线修复后植物选择	141
11.4.2	砂土质岸线修复后植物选择	141
11.4.3	含盐砂质岸线修复后植物选择	142
11.4.4	植物群落配置与构建	142
11.4.5	河湖岸线多孔混凝土生境推荐植物群落	143
11.4.6	岸线多孔混凝土特定生境的植物效应	143
11.5	河湖岸线植物自然养护	145
11.6	施工与验收	145
11.6.1	施工期主要技术环节验收	145
11.6.2	竣工时主要技术验收环节	146
11.6.3	验收时质量检查	146
11	-引用标准名录	146
参考文献		147

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

1.1.1 水环境现状

“水环境形势依然十分严峻，老问题尚未解决，新问题又接踵而至，主要污染物排放总量明显超过水环境容量，群众对水污染事件的投诉越来越多……”，《水污染防治行动计划》（国发〔2015〕17号）描述了我国当前水环境形势和水污染防治情况，由此表明我国水环境形势十分严峻，水污染防治任重道远。

国家环境保护部提供的《2015 中国环境状况公报》显示，我国的水污染形势依然严峻，国家环境监测网监测的 423 条主要河流、62 座重点湖泊（水库）的 967 个断面中，Ⅰ～Ⅲ类、Ⅳ～Ⅴ类、劣Ⅴ类水质的断面比例分别为 64.5%、26.7%和 8.8%，后两者比例之和高达 35.5%。七大水系中，黄河、海河、淮河、辽河等重点流域中，劣Ⅴ类水质断面分别占 12.9%、9.6%、39.1%和 14.5%，主要污染指标为化学需氧量（COD）、五日生化需氧量（BOD₅）和总磷（TP）；2015 年全国 62 个重点湖泊（水库）中，富营养化问题依然突出，重度富营养湖泊（水库）5 个，中富营养湖泊（水库）4 个，主要污染物为总磷、化学需氧量和高锰酸盐指数（COD_{Mn}）等。另据新华网资料，我国重点流域 40%以上的断面水质没有达到治理规划的要求，一些地区出现“有河皆干、有水皆污”的恶性循环，全国大、中城市浅层地下水不同程度地遭到污染，约有一半的城市市区地下水污染较为严重，部分流域的水资源开发利用程度过高、水污染事故频发等问题，也严重影响着我国的水环境。世界各国也存在不同程度的水体污染问题。在非洲，各类河流被未处理的工业废水和生活污水污染，河流的纳污能力几乎丧失，生态功能受到严重损害；美国 50%以上的河流不能支持基本水生价值或不具备娱乐游泳的水体功能，英国 85%的地表水体受到不同程度的污染。联合国环境规划署的统计资料表明，美国境内有 76%的湖泊处于富营养化、23%的湖泊处于中营养化水平，欧洲范围内 96 个湖泊中有 80%的湖泊受到不同程度的氮磷污染，呈现较强的藻类生长能力。

人类社会的高速发展带来了一系列的环境问题，其中水问题给人们的生产、生活带来的负面影响较为严重。寻求解决水污染问题的方法，一方面是控制点源污染和面源污染；另一方面是对天然水体实施工程性或非工程性的措施，提高河流、湖泊等水体的自净能力，修复恶化的水生生态环境。对于前者，各地方主管部门均采取了强制性的措施，新建和扩建污水处理设施，对农田水利实施有效节水灌溉，从源头控制进入水体的污染负荷，对河湖等地表水体水质改善具有一定的作用，尽管如此，大多数河流、湖泊等地表水体所接纳的污染负荷仍然超过其纳污能力，水体长期处于污染状态，使得外源污染逐渐转化为



水体的内源污染；对于后者，世界各国在对河流、湖泊实施水利工程措施的时候，其目标仅仅局限于保障天然水体的航运、防洪等单方面的需求，建成了硬质性的岸坡护砌，然而对水体的生态系统造成了致命的伤害。岸坡是水生生态系统中生命体最活跃的区域，硬质化的护砌方式阻隔了水体与陆地生态系统中各要素之间的物质、能量和信息的交流，水体封闭在河道中，生物多样性降低，生态系统脆弱，自净能力下降，河流对外部污染负荷的抗冲击能力削弱甚至失去，一旦污染物进入水体即造成严重污染，若污染物进入硬质护砌的水源地，造成的水质风险则更为严重。因此，修复河流生态和改变岸坡护砌方式成为环境、水利、生态等学科共同关注的热点课题。

1.1.2 水环境生态修复

水体污染及其生态环境的破损，是由多种原因同时作用促成的。人们对水体施加了过多的环境压力，同时还为了水土保持、防洪、航运等自身安全和经济发展目的，对河湖等水体采取了大规模的人工改造，采用现代工程技术手段和非生态性的硬质化护砌技术加固堤坝，改变了水体的自然特征，水生生态系统封闭化、自然河流渠道化、几何形状规则化、护砌材料硬质化。近年来，随着环境、材料以及生态工程等学科的发展，以及对非生态性工程措施严重后果的认识进一步加深，生态水处理技术以及水体原位性生态修复工程逐渐成为人们关注的问题之一。

生态工程技术以仿生学为基本原理，在天然水体生态系统中引进工程的力量，从而提高水质净化能力，该技术体系是以生态系统为基础，以食物链为纽带，为细菌、藻类、原生动物、微小后生动物到鱼类、两栖类动物在水域、陆域等环境生态场所提供有机的链接功能，并用工程学的方法予以控制。生态工程技术的特点是强化自然净化机能，强化物质、能量和信息通过生物之间的相互转换，实现生态系统的功能健全，进而使包括人类在内的环境系统实现和谐统一。目前，生态工程技术已广泛应用于微污染水体的生态修复之中，常用的技术方法有植物修复、滨水湿地原位净化、河道滞留生态塘、生态浮岛与生态鱼礁等。

1.1.2.1 植物修复

绿色植物是水生生态系统的重要组成部分，是整个系统中的能量和物质基础，为微生物提供生境，对维护生态完整性具有重要作用。水生植物可以吸收并去除水中的营养物质，并可对有毒有害物质具有很强的吸收、分级和净化能力。植物修复对污染物的去除主要是通过植物萃取、降解、挥发、根际过滤、植物固定等作用共同完成的。

植物修复的效果在一定程度上取决于植物品种的选用，挺水植物、沉水植物、浮叶植物、浮游植物以及陆生的草本植被的生长状况和生活习性各不相同，在生态系统中占据着各自的生态位，在水质改善和生态修复中发挥的作用也不相同。相关学者已系统性地研究了多种植物对水体污染的吸收能力和吸收效果，植物的选择应根据水质状况、污染物种类来共同决定，目前应用最多的植物主要为美人蕉、香蒲、芦苇、水葱、苦草、菹草、浮萍、水花生以及水生蔬菜等。在植物的品种和数量选择上，一般应选择4~6种植物混种，以增加生态系统的容量，同时还应防止和控制外来物种对土著植物的生物入侵。植物的利用形式也成为相关学者研究的重要内容之一，近年来植物利用形式也呈现多样化趋势，如



水生植物滤床、植物浮岛、植物廊道、水生植物塘等相继被研究和应用。在污染水体水质和水生生态系统得到改善的同时,植物修复技术还可产生一定的经济效益。

1.1.2.2 滨水湿地原位净化

滨水湿地是利用基质、植物和微生物相互关联,通过物理、化学、生物过程的协同作用,改善水质和生态修复的生态工程。植物是人工湿地的核心部分,旺盛生长的绿色植物在吸收污染物的同时,供其生长的基质和根系微环境为微生物的富集、栖息和繁衍提供良好的生境,最终形成了结构稳定和功能完整的微型生态系统。人工湿地的水质净化机理除了通过植物和填料对悬浮性污染物的过滤、吸附及吸收作用外,植物根际微生物也对有机物、氮、磷等营养物的去除起到了关键作用。人工湿地应用范围广泛,可用于处理生活污水和废水,也可用于水体的原位生态修复,均能有效改善污染水体水质。无锡市在饮用水源地太湖湖湾处开辟了面积达 50hm^2 的水域,其中部分水域种植凤眼莲等水生植物,并投放了白鲢鱼、福寿鱼等,构成大片的人工湿地,有效抑制了浮游藻类的生长及密度,叶绿素浓度比场外降低了 $40\%\sim 90\%$,每年削减污染物相当于 25t 氮、 4t 磷。

1.1.2.3 河道滞留生态塘

滞留生态塘修复技术是以太阳能为初始能源,通过在塘中种植水生植物,并进行水产和水禽养殖,形成复合型的人工生态系统,物质、能量在生态塘中多条食物链中逐级传递、转化,水体的污染物得以降解,且水生植物和水产可作资源回收,实现了污水处理的资源化。目前,滞留生态塘系统也逐渐应用于河流等污染水体的综合治理之中,充分利用河流地形条件,建设滞留堰拦截河水以构建河道滞留塘,延长河水在单位长度的滞留时间,通过重力沉降、植物吸收和微生物降解,有效改善河水水质,而且能增加河流的景观功能。

1.1.2.4 人工介质(生态浮岛与生态鱼礁)

天然河道中因泥沙沉积而形成的岛(洲)对水生生态系统有着重要的影响,由于岛(洲)为绿色植物生长、微生物富集提供了生境,为鱼类等脊椎动物提供了栖息繁衍的场所,在岛上形成了微生物-动物-绿色植物的联合体,且四周与水体相连,对河流水质净化起着关键性的作用。但随着对河流的底泥疏浚、裁弯取直、硬质化等水利工程的实施,天然岛屿消失,水体自净能力因此下降,生态系统遭到破坏。人工生态浮岛是采用多孔性材质人为在水中设置构筑物,作为水生生物栖息、生长、繁衍的场所,营造适宜鱼类等动物生长的环境。生态浮岛是将绿化技术和漂浮技术相结合的水质净化措施,一般用聚氨酯涂装的发泡聚苯乙烯作为植物生长的浮体,下部用多孔性材料作骨架,作为鱼类和水生昆虫栖息环境。另外,生态浮岛可吸收水中的氮磷污染物,还有利于水产渔业的增收和生态环境的保护。

人工生态鱼礁是人为在水中设置构造物,为鱼类等水生生物栖息、生长、繁殖提供必要、安全的场所,营造一个适宜鱼类生长的环境,从而达到保护、增殖渔业资源的目的。生态鱼礁上所发生的化学过程、生物过程及其生态稳定性深刻影响着所属水体的物理化学变化过程,因此生态鱼礁技术可用来改善水体水质和修复生态环境。目前,生态鱼礁主要应用于近海海域的渔业场所,整修海洋渔场。近年来,日本在近海海域投放了大量的生态鱼礁,整修了沿岸渔场,海水水质得到很大改善,海水赤潮发生频率大大降低。我国浙江



省在近海海域 17 个站点投放了人工生态鱼礁, 投放海域的海洋生态环境和渔业资源得到有效改善。河湖等地表微污染水体投放生态鱼礁会影响其航运、泄洪等功能, 因而地表水体投放生态鱼礁的生态修复技术尚未得到广泛应用。

1.1.3 提出问题

随着环境工程学、材料工程学以及生态工程学等学科的发展, 微污染水体的生态修复技术已从单一性的修复技术发展到多学科交叉的综合性控制技术。总体而言, 现有的生态修复技术措施还存在以下问题值得商榷:

(1) 过分强调近期水质改善效果。河流、湖泊等地表水体的污染一般都是一个长期积累的过程, 也是外源污染逐渐转化为内源污染的过程, 长期以来, 原本健康的生态环境逐渐遭受破坏, 并且逐渐退化。要恢复破坏了的生态系统, 在施加人为的控制措施条件下, 还需要一个相对较长的时间过程, 而且水体水质受到河流地形条件、水动力学条件以及水体内源、外源污染负荷的共同影响, 因此仅强调水质恢复的治理措施只能起到治标不治本的结果。

(2) 生态修复整治过程限制了水体的局部使用功能。人们往往习惯于择水而居, 水体在满足饮水要求的同时, 也在运输、防洪等功能方面发挥着重要的作用。在对河流实施生态修复或水质改善的工程措施时, 向水体中填设人工载体或生物浮床等, 严重影响水体的行洪条件, 导致岸坡侵蚀, 妨碍船只通行。

(3) 应用范围相对较小, 可能对生态系统造成负面影响。大多数生态工程技术如人工湿地、生态浮床、滞留塘等技术, 往往只对局部水体实施修复整治, 而无法实现对整个水域产生影响, 尤其对平原水网地区来说, 水体交互强烈, 局部水体的生态修复工程一般不会产生太大的效果。另外, 局部水体生态条件的改变, 会牵制整个水体, 甚至流域的生态变动, 带来一定的负面影响。

(4) 过度强调植物作用。绿色植物是生态系统中最重要生产者, 然而, 生态系统是一个高度的复合体, 过度强调绿色植物的生态修复作用, 短期内可有效改善水体水质, 长期以来可能会导致水生生态系统失衡, 妨碍水体的航运、行洪功能, 同时产生大量的植物残体, 导致二次污染。

由于污染水体水文条件的不确定性、环境条件的复杂性, 对水体实施生态修复工程技术时, 可能对其结构和使用功能估计不足, 从而导致水质改善效果和生态系统恢复不理想。因此, 有必要探索对水体扰动小、效率高、适用范围广的新型生态修复技术, 同时结合我国水体污染的自身特点, 并在应用过程中尽可能保持水体的原始面貌和使用功能, 确保生态工程技术的可行性、通用性, 改变传统仅注重水质改善效果的基本思想, 强化水体自身特点, 采取新型环保材料和工程技术加强水体自身生态条件的改变。

针对当前河湖等地表水体硬质化护砌的弊端和现有生态修复工程技术的某些不足, 改变现有的硬质化河渠为类似天然的生态型河渠成为河流治理的新的工程理念。然而, 我国的大多河渠均流经或靠近城市, 两岸的土地面积被高度利用, 要将现有的硬质化河渠恢复为自然弯曲, 有浅滩、深潭、岛屿的天然河渠缺乏可行性, 实施难度很大^[10]。因此需要以生态水工学原理为指导, 在河渠现状的基础上构建仿天然状态的透水性岸坡将是改善微



污染水体生态系统的重要措施。水体岸坡是生态系统的重要组成部分,其护砌方式必然会对生态系统产生重要影响,因此,水体岸坡的生态化建设及其功能探讨逐渐成为人们关注的热点问题。在可控条件下研究水体生态堤岸对整个水生生态系统的影响效果对于构建生态水体和开发生态堤岸构建技术非常重要,进而可推动生态水利工程学的快速发展。

目前,针对生态河渠及其生态护岸的报道大多集中于内涵、结构和功能的描述、讨论上,对于堤岸生态护砌的水生态效应尚缺乏定量性、系统性的研究报道,因此,在水利工程生态化思想的大背景下,提出以环保型的新型材料——多孔混凝土为河道岸坡生态护砌及生态修复材料,综合生态学、环境学、水利工程学等学科的理论研究成果,主要研究多孔混凝土护坡构建技术、水质改善效果、水质净化机制、多孔混凝土护砌面微生物富集效应理化特征分析以及生态护砌河道的生态效应评价。在国家十二五科技支撑计划课题“水网密集地区村镇宜居社区与工业化小康住宅建设关键技术研究集成示范”(2013BAJ10B13)、国家水体污染控制与治理重大科技专项“竺山湾农村分散式生活污水处理技术集成研究与工程示范”(2011ZX07101-005)和江苏省自然科学基金课题“水体岸坡特定生境中氮磷营养盐的水土界面微生态过程及其生态修复潜力研究”(BK20161146)等项目的资助下,通过构建多孔混凝土河渠岸坡护砌实验模型,以微污染水体的水质改善和岸线生态修复为研究对象,通过系统、连续、动态、量化的观测和测量,研究多孔混凝土护砌河道的生态系统建立及自我调节的机制,并建立综合水质数学模型,运用数学模拟方法,探讨生态堤岸的水质改善机制,评价生态护砌的生态效应。

1.2 河湖岸线生态化研究进展

河湖断面包括水体经常淹没的区域、水位变动区以及正常水位以上邻接部分的滩、壁、高地等。河湖岸线水土保持与安全防护的重点一般包括常水位以下至一定频率下高水位影响的区域,俗称水体岸线工程护坡。水体岸坡是高低水位之间直到水面影响完全消失为止的生态过渡带,是陆源污染物进入水域前的最后一道生态屏障。氮磷营养盐等伴随着地下水运移等过程参与了岸坡特定生态系统的整个水文过程,是岸线生境水土界面物质交换过程的重要参与者,同时也是水污染控制及环境质量改善重点关注的营养盐污染物。岸坡特定生境通过泥沙沉降、植物吸收、沉积吸附、微生物代谢等过程使之具有削减氮磷负荷或影响氮磷物质界面微生态过程的生态功能,同时也是水生生态系统中最易受人为干预的功能区域。以人工干预生态护岸为生命载体而构建的水体岸坡特定生态系统中,生物群落结构、功能格局以及岸坡生境特征与天然土质岸坡、河床、河岸外围缓冲带等区域相比均有较大的差异性,对稳定岸坡、提高生态系统生产力、改善水质等都具有重要意义和潜在价值。

从环境污染控制和生态功能的角度来说,河湖岸线是水生生态系统与陆生生态系统进行物质、能量、信息交换的一个重要过渡带和两者相互作用的重要纽带和桥梁,并受到地表水以及地下水的共同影响,成为一种生态交错带,具有明显的边缘效应。河湖岸线生物群落的组成、结构和分布格局以及生态环境因子与远离河流区域相比有着较大的差异。河湖岸线生态系统对增加动植物物种种源、提高生物多样性和生态系统生产力、治理水土