



全国中文核心期刊  
中国科技核心期刊

# 环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering



第9卷 第9期

Vol.9 No.9

中国科学院 主办  
生态环境研究中心  
科学出版社 出版

9  
2015

## 目 次

### 水 污 染 防 治

紫外线消毒对3种大肠杆菌的灭活效果和耐药性影响 .....	张崇森	庄凯	巨欣	王晓昌(4097)
强化除磷型 A/O-MBR 工艺运行稳定性 .....	任金柱	李军	王朝朝	刘彬 高金华 常江(4102)
超声波紫外线一体化推流式反应器中试装置用于污水消毒 .....				
.....	郭浩	周瑛	周晓琴	李子富 闫圆圆 靳昕(4107)
Ca <sup>2+</sup> 强化短程硝化颗粒污泥培养 .....	吕永涛	贾燕妮	鞠恺	赵洁 苗瑞 王磊(4112)
猪场废水厌氧自电解处理过程中关键参数优化 .....	王云	朱能武	沈伟航	李小虎 吴平霄(4117)
碳纳米管稳定纳米 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 的制备及降解染料橙 II .....		邓景衡	李佳喜	余侃萍 谢建国(4125)
湿式过氧化氢氧化活性艳蓝 KN-R .....	贺玲	刘红玉	杨春平	彭艳蓉 曾光明 王鹏 刘芬(4131)
草皮缓冲带对洱海流域面源污染的削减效果 .....			胡威	王毅力 储昭升(4138)
共培养条件下黄菖蒲和狭叶香蒲对铜绿微囊藻光合系统的影响 .....	陈国元	李青松	谢莆尧	陈燕虹(4145)
Fenton 试剂协同 TiO <sub>2</sub> 光催化降解三氯乙酸及协同机理 .....	王芬	赵宝秀	李想	李伟江 杨龙(4153)
城市大型缓流景观水体流场模拟及人工循环水动力优化 .....		贾泽宇	郑剑锋	孙力平 于静洁(4159)
短程硝化反硝化工艺处理低 C/N 餐厨废水 .....	张周	赵明星	阮文权	缪恒锋 任洪艳 黄振兴(4165)
改性天然菱铁矿去除水中六价铬 .....			周晓倩	郭华明 赵凯(4171)
2种载体对厌氧同步消化、反硝化的影响 .....	冉春秋	邹学军	范立明	崔玉波 周集体(4178)
基于有效去除铅(II)的中孔炭乙二胺改性及影响因素分析 .....				
.....	杨美蓉	李坤权	徐恩兵	乔小朵 潘根兴 郑正(4185)
城市污水处理过程中不同形态氮类营养物的转化特性 .....			金鹏康	宋利 任武昂(4193)
曝气对潜流人工湿地中木本植物的影响 .....	陈永华	吴晓芙	纪智慧	马群 陈明利(4199)
变权组合模型在景观水体水质模拟中的应用 .....			赵加斌	赵新华 彭森(4206)
鱼菜共生系统氮素迁移转化的研究与优化 .....	邹艺娜	胡振	张建	谢慧君 梁爽(4211)
基于虚拟治理成本法的生态环境损害量化评估 .....	蔡锋	陈刚才	彭枫	杨清玲 赵士波 鲜思淑 吴飞(4217)
漂浮型可见光催化剂 Fe-N-TiO <sub>2</sub> /FP-CTS 的制备及其对溶解性柴油的降解 .....				
.....	黄嘉瑜	王学江	卜云洁	张晶 马荣荣 赵建夫(4223)
非晶态 Co <sub>0.5</sub> Ni <sub>0.5</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 的制备及对水中五氯苯酚的吸附 .....			孙梦圆	崔春月 吴娟 宋姿蓉(4228)
pH 对同步硝化反硝化生物膜内溶解氧分布的影响 .....			黄胜娟	荣宏伟 林孟霞(4233)
稻壳制备介孔状二氧化硅的光催化性 .....			穆浩荣	张玲玲 白淑琴(4239)
玉米秆碳源去除地下水硝酸盐 .....		李同燕	李文奇	胡伟武 冯传平(4245)
提高低 C/N 值农村生活污水中 TN 的去除效果 .....	匡武	王翔宇	周其胤	杨远盛(4252)
油田聚驱采出液乳化特性及其破乳-絮凝 .....	翁艺斌	阎光绪	李敏	翟星月 郭绍辉 张佩佩(4259)
西安某人工湖水质时空分布特征及其荧光特性 .....		于佳真	王晓昌	薛涛 陈荣(4265)
改性钙基蒙脱土酸性条件下吸附油酸钠 .....	任瑞晨	张乾伟	石倩倩	李彩霞 王秀兰 孟媛媛(4273)
天然沸石对海水中氨氮的吸附特性 .....	王文华	赵瑾	张晓青	成玉 王静 张雨山 李陆杨(4281)
微孔曝气器脉冲式充氧效果 .....		徐鹏	单继宏	金晓航 于江忠 孙毅 张建中(4287)
厌氧、好氧、厌氧/好氧交替状态对活性污泥性质的影响 .....		杨波	单晓明	田晴 李方 马春燕(4293)
城市人工湖的生态治理 .....		徐后涛	赵凤斌	张玮 王丽卿 郑小燕(4300)
载钴催化剂的制备及对染料降解 .....	李洁冰	李玉龙	Asif Hussain	王瑾 李登新(4309)
低温季大型表流湿地对微污染水体脱氮效果及优化运行 .....				
.....	左倬	仓基俊	朱雪诞	成必新 胡伟 商志清 卿杰(4314)
沸石负载高锰酸钾去除低浓度氨氮 .....	郭华	王军林	张小燕	王娜 刘俊良(4321)
2-乙基蒽醌修饰石墨毡催化电极电化学降解土霉素废水二级出水 .....				
.....	李贵霞	岳琳	潘贵芳	刘艳芳 李伟 李再兴(4326)
抗菌剂三氯卡班在水溶液中的光降解 .....		冯振涛	刘海津	汪应灵 冯家豪(4333)
磁性水滑石快速吸附水体中 Cu(II) 离子 .....	张琪	罗琳	张嘉超	刘武嫦 胡伟斌(4339)
零价铁对水中六价铬还原性能及沉淀污泥中铬的固定化 .....	陈忠林	李金春子	沈吉敏	王斌远 樊磊涛(4345)
椰壳活性炭对水中 N-DBP 前体物的吸附 .....			张一凡	金腊华 周元(4353)

混凝和活性炭吸附深度处理制药废水中有机物去除特征 .....	崔凤国	杨 鹏	张伟军	王东升(4359)
Fenton 试剂氧化处理火炸药污染土壤淋洗液 .....	薛江鹏	王建中	赵泉林	王中友 叶正芳(4365)
微波法对吸附扑热息痛废水活性炭的再生 .....	吴 坚	夏洪应	彭金辉	张利波 郑照强 张声洲(4371)
ES 稳定重金属污染底泥效果 .....	蒋玉广	袁珊珊	杨 伟	梁静波 巢军委(4376)
<i>Halothiobacillus neapolitanus</i> 脱硫性能及限制性因素影响 .....			冯守帅	陈金才 杨海麟(4385)
曝气速率对附加微通道湍流促进器 SMBR 流体动力学性能的影响 .....			解 芳	王建敏 刘进荣(4391)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>0</sup> 、H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>2+</sup> 、H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>3+</sup> 3种体系处理印染废水 .....			姚 兴	颜幼平 冯 霞(4398)
以游泳馆污水为处理对象的 SBR 中不同污泥负荷下氨氧化菌群落的演变 .....				
.....	薛士琼	孙宝盛	于凤庆	王明圆 李 恺 薛圆圆(4403)
环糊精改性蛭石对水中 Cr(VI) 的吸附 .....			张太亮	吴 凤 阳 萍 欧阳斌(4409)
滤材的表面改性对淤泥脱水过程中渗透性能的影响 .....			浩 婷	王 曦 周 颜 吴 燕(4415)
不同混凝剂处理低温低浊水 .....				洪 云 徐 慧(4421)
SMBBR 工艺不同填料处理生活污水 .....	李卫平	李 杰	朱浩君	杨文焕 敬双怡 殷震育 刘 燕(4427)

## 大气污染防治

煤矿井下高压喷雾雾化特性研究 .....	王鹏飞	刘荣华	汤 梦	张 文	桂 哲(4433)
露天堆场防风抑尘网遮蔽效果的数值模拟 .....			潘武轩	宋翀芳	何鸿展(4440)
TEPA/TETA 改性 SBA-15 对 CO <sub>2</sub> 吸附性能的影响 .....			魏建文	和凯凯	孟令硕 廖 雷(4447)
改性粉煤灰基吸附剂烟气脱汞 .....			郑慧敏	刘清才	王 铸 孟 飞 牛德良(4453)
改性 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 脱硫剂脱除 H <sub>2</sub> S 反应特性 .....	沈洪波	张 辉	刘应书	李皓琰	张 贺 郝智天(4458)
一株鱼粉加工硫化氢恶臭气体脱除菌株的分离与鉴定 .....			孙佩璇	娄永江	庄荣玉 严小军(4465)
北京市近 12 年空气污染变化特征及其与气象要素的相关性分析 .....	谢志英	刘 浩	唐新明	李腾腾	张文君(4471)
循环灰加湿量对密相塔半干法脱硫效率的影响 .....			韩剑宏	黄永海	卢熙宁 童震松(4479)
折流式反应器空气净化效果 .....			刘 鹏	郑 洁	宋雪瑞 王小艳(4483)

## 固体废物处置

市政污泥干化动力学研究 .....	范海宏	武亚磊	李斌斌	马 增(4488)	
响应曲面法优化 CO <sub>2</sub> 活化制备夏威夷坚果壳基活性炭 .....	程 松	张利波	夏洪应	彭金辉	张声洲 周朝金(4495)
胞外聚合物对生物浸出线路板金属粉末中铜的作用 .....			杨 崇	朱能武	崔佳莹 吴平霄(4503)
微波超声协同处理废弃印刷线路板中非金属 .....			蔡丽楠	殷 进	张 桐 孔晓露(4509)
水淬钢渣碳化固定 CO <sub>2</sub> .....	涂茂霞	雷 泽	吕晓芳	赵宏欣	王丽娜 张军玲 陈德胜 宋文婉 齐 涛(4514)
O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> 气氛下市政污泥混煤燃烧及动力学特性 .....			邵志伟	黄亚继	严玉朋 刘长奇(4519)
提高硅钙渣胶凝活性的热活化实验 .....			杨志杰	孙俊民	张战军 苗瑞平(4526)
医疗废物处理中生物指示剂湿热灭菌动力学方程 .....			靳登超	李 阳	鲍振博 刘 娜(4531)
三七渣固态发酵生产康宁木霉生防菌 .....	谭显东	王君君	王 浪	羊依金	郭俊元 彭 兰 覃璐琳(4535)
3 种畜禽粪便产气特性差异分析 .....			陈 芬	李 伟	刘奋武 张吴平 李筱梅 卜玉山(4540)
黑曲霉固态发酵三七渣产纤维素酶 .....			黄 凡	谭显东	胡 伟 羊依金 林巧玉 任晓霞(4547)
常温下好氧颗粒污泥的形成过程及除污性能 .....			姚 力	信 欣	郭 毅 宋 幻 李 姣(4553)
垃圾填埋场 HDPE 膜漏洞密度及其影响因素的统计分析 .....			徐 亚	能昌信	刘玉强 刘景财 董 路(4558)
富集同型产乙酸菌污泥厌氧产酸 .....			王 晋	李习伟	符 波 杨 彦 刘 和(4565)

## 土壤污染防治

海泡石及其复配原位修复镉污染稻田 .....	梁学峰	韩 君	徐应明	谭适娟	雷 勇 罗文军(4571)
水泥固封镉污染土离子释放规律与微观结构 .....				董祯琴	陆海军 李继祥(4578)

## 环境生物技术

嗜酸氧化亚铁硫杆菌脱煤矸石中硫影响因素的筛选及条件优化 .....					
.....	赵尚明	何 环	于忠琦	黄冠华	冷云伟 陶秀祥(4585)
高岭土固定 GY2B 优化其降解性能 .....			李跃武	吴平霄	李丽萍 党 志(4591)

## 环境 监 测

成都市道路细颗粒物污染特征 .....	袁小燕	叶芝祥	杨怀金	张 菊(4598)
基于远程图像色度的点源水质监测方法 .....			李 文	杨守波 罗学科(4603)
海洋石油工程新型溢油监测系统研究 .....	隋迎光	彭吉友	刘志明	任 华(4609)

# 城市人工湖的生态治理

徐后涛<sup>1</sup> 赵风斌<sup>1</sup> 张玮<sup>1,2</sup> 王丽卿<sup>1\*</sup> 郑小燕<sup>2</sup>

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 2. 上海水生环境工程有限公司, 上海 200090)

**摘要** 为探究城市人工湖生态治理方式,依据水生生物食物链及生物操纵理论,人为对成都锦城湖2号湖进行水生生态系统构建;对建成后2号湖的水质及水生植物群落演替进行跟踪监测和分析,评价生态治理效果。结果表明,采用以人为构建各营养级的水生态修复技术,对人工湖水净化具有良好的效果,运行第1年(2013年)去除氮磷量分别达到7.28 t和0.25 t,水体透明度一直维持在较高的水平,未出现藻类水华现象;运行第2年1—7月削减氮、磷量也分别达到5.6 t和0.29 t,但由于人为因素及高污染负荷的影响,水质出现恶化现象。锦城湖2号湖水体生态建设对于类似人工水体的水质改善和生态工程建设有重要的参考意义。

**关键词** 城市人工湖 生态治理 食物链 处理方式

**中图分类号** X524 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2015)09-4300-09

## Ecological management of urban artificial lake

Xu Houtao<sup>1</sup> Zhao Fengbin<sup>1</sup> Zhang Wei<sup>1,2</sup> Wang Liqing<sup>1</sup> Zheng Xiaoyan<sup>2</sup>

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Aquatic Environmental Engineering Co. Ltd., Shanghai 200090, China)

**Abstract** To supervise the optimal ecological management mode of urban artificial lakes, aquatic ecosystem among artificial Lake Jincheng No. 2 of Chengdu City is constituted on the basis of biological manipulation theory. Subsequently, water quality and the succession of aquatic macrophytes community in Lake Jincheng No. 2 were tracked and investigated to assess the effort of ecological management. The results illustrated that, this ecological restoration technique, building the various aquatic-trophic levels artificially, was an effective treatment process for improving water quality in Lake Jincheng No. 2. The amount of nitrogen and phosphorus removed by the water treatment process were reached up to 7.28 t and 0.25 t, respectively, in the duration of the first year management. The Secchi disc depth was maintained at a high level. No water-bloom was observed during the first year. The amount of nitrogen and phosphorus were removed 5.6 t and 0.29 t, respectively during January to July in the following year. Nevertheless, the relentlessly deteriorated water quality and aquatic ecosystem attribute to highly polluting water drains into the lake and remaining man-made impacts. Overall, our research enlarges the horizon of related studies as the reference of the similar ecological management project.

**Key words** urban artificial lake; ecological management; food chain; treatment

人工湖作为城市滨水空间的重要组成部分,具有调节小气候、净化水质、维持生物多样性等生态功能;此外,作为城市区域内开放空间,可为城市提供更为舒适、稳定可持续发展条件,亦可为民众提供了良好的游憩场所<sup>[1]</sup>。然而,一般城市人工湖泊面积较小(多数在10 hm<sup>2</sup>以下),生态系统极为脆弱,容易产生营养盐蓄积,湖区极易爆发藻类水华<sup>[2]</sup>。国外河湖生态修复相对较早,取得相对较为成熟的成果和工程经验<sup>[3-7]</sup>。国内对湖泊的生态修复主要针对太湖、滇池等大型湖泊,对城市小型湖泊尤其是城市人工湖泊的修复技术的研究仍处于起步阶段;长期以来,人工湖泊建设往往侧重于防洪、排涝、灌

溉等为人类直接服务的功能,护岸材料硬质化、生境条件差等现象比较普遍<sup>[8-11]</sup>。运用水生生物食物链的数量金字塔和能量金字塔原理,人为建立各个营养环节,实现水体营养物质间的有效转移,从而净化水质的研究目前还相对较少。

为建设“美丽成都”成都市2012年启动了“六

基金项目:上海市科技人才计划项目(15XD1522900)

收稿日期:2015-01-18; 修订日期:2015-04-06

作者简介:徐后涛(1985—),男,博士研究生,主要从事水域生态修复的研究。E-mail: saeexuht@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: lqwang@shou.edu.cn

湖八湿地”规划:新建大型湖泊湿地、造亲水宜人的大都市湿地生态景观。锦城湖位于成都市高新区境内,是成都市环城生态区“六湖八湿地”的重要组成部分,生态治理以锦城湖原有湖泊(1号湖)为基础,新开挖 3 个人工湖(2号、3号、4号湖),湖区总水面 66.8 hm<sup>2</sup>,平均水深 2 m,为成都地区最大的人工湖。本研究以成都锦城湖 2 号湖生态修复为例进行生态建设及运行研究,并对锦城湖 2 号湖生态治理成效进行科学评价,旨在研究适合城市人工湖生态修复的组合技术及运行管理注意事项,以期城市人工湖泊生态治理提供技术指导。

## 1 材料和方法

### 1.1 锦城湖 2 号湖概况

锦城湖新建设 3 个湖中,2 号湖湖区水域面积最大,面积为 21.54 hm<sup>2</sup>,平均水深为 2 m,最大水深 5 m(见图 1)。2 号湖为整个水系的前置库,承载着入湖水源的预处理功能(初期蓄水及后期补水,外河引入 2 号湖,再依次流入 3 号湖、4 号湖和 1 号湖),因此,采取科学的生态治理手段提升 2 号湖净化能力尤为重要。2013 年 3 月开始进行生态工程建设,2013 年 5 月底完成蓄水,进入水生态系统的维护与调控阶段。

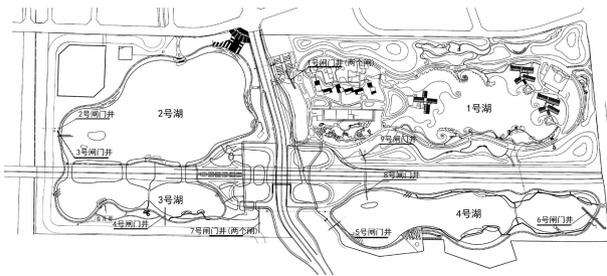


图 1 锦城湖平面图

Fig. 1 Jincheng Lake aerial view

### 1.2 生态修复方法

锦城湖生态修复的主要目标就是改善湖区的水质,在进水水源水质达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) IV 类的前提下,出水水质至少提高一个等级;透明度 ≥ 1.2 m;叶绿素 a ≤ 15 μg/L。

生态系统构建包括 2 个处理单元,即引水渠道临时处理单元(由于肖家河具有防洪功能,本临时处理单元仅在初次大量补水时使用)和入湖后的湖区水处理单元。其中引水渠道采用微生物附着基措施;湖区水处理单元利用水生生物食物链的数量金

字塔和能量金字塔模型,人为建立各个营养环节,实现水体营养物质间的有效转移,建立沉水植物群落、底栖动物群落、鱼类群落、微生物附着基、生态护岸等措施,锦城湖 2 号湖生态修复总体技术路线见图 2。

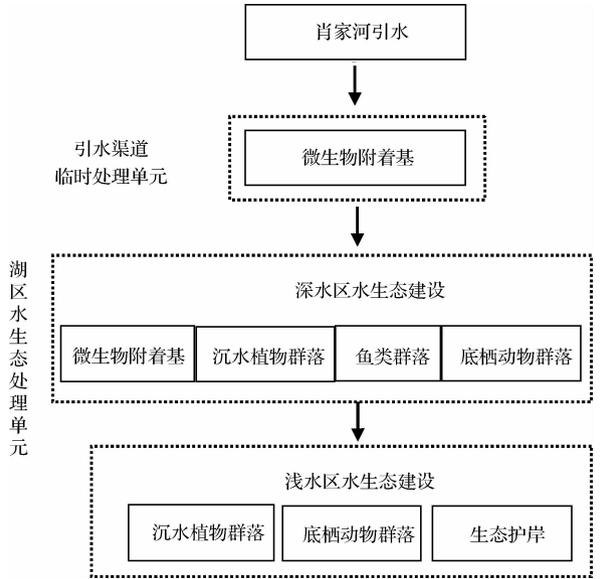


图 2 锦城湖 2 号湖生态修复总体技术图

Fig. 2 Overall technical chart of Jincheng No. 2 Lake ecological restoration

应急处理措施主要针对 2 号湖遇到突发性水污染时实施,具体包括:泼洒芽孢杆菌、光合细菌以及酵母菌等微生物净水剂,以降解水体中的有机污染负荷,调节水色。微生物修复具有见效快、效果好等优点,但由于其对水生态系统的影响不可预知,在本研究中仅作为应急处理措施。锦城湖 2 号湖各项生态处理技术措施(见图 3)。

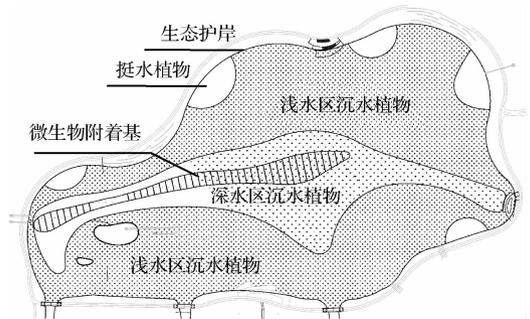


图 3 锦城湖 2 号湖水生态建设布置图

Fig. 3 Jincheng No. 2 Lake ecological construction layout

#### (1) 生态护岸

根据项目水体景观及生态要求,本工程选择自然经济、稳定性好的生态膜袋。环湖以坡比 1:2 至

岸顶,常水位以下生态袋内填充砂土比例为8:2,常水位以上生态袋内填充砂土比例为3:7,生态袋后回填土夯实度不低于0.9。近岸带种植挺水植物黄菖蒲、再力花、荷花等,种植面积4 300 m<sup>2</sup>。

## (2) 沉水植物群落

锦城湖2号湖种植沉水植物16种,种植面积达到90%,包括深水区沉水植物群落及浅水区沉水植物群落。深水区沉水植物有马来眼子菜 *Potamogeton malaianus*、微齿眼子菜 *P. maackianus*、菹草 *P. crispus*、篦齿眼子菜 *P. pectinatus*、穗花狐尾藻 *Myriophyllum verticillatum*、海菜花 *Ottelia acuminata* var. *acuminata*;浅水区沉水植物包括亚洲苦草 *Valisneria natans*、刺苦草 *V. spinulosa*、密刺苦草 *V. denseserrulata*、金鱼藻 *Ceratophyllum demersum*、石龙尾 *Limnophila sessiliflora*、大茨藻 *Najas marina*、轮藻 *Charophyta* sp.、轮叶黑藻 *Hydrilla verticillata*、伊乐藻 *Elodea nuttallii*、水蕴草 *E. densa*。

## (3) 底栖动物

锦城湖2号湖投放大型底栖软体动物(梨形环棱螺 *Bellamya purificata*、铜锈环棱螺 *B. aeruginosa*、褶纹冠蚌 *Cristaria plicata*、无齿蚌 *Anodonta woodiana*、三角帆蚌 *Hyriopsis cumingii*、河蚬 *Corbicula fluminea*)152 208 kg,虾类(青虾 *Macrobrachium nipponense*、罗氏沼虾 *M. rosenbergii*、细足米虾 *Caridina nilotica gracilipes*)142 kg。

## (4) 鱼类群落

投放滤食性鱼类(鲢 *Hypophthalmichthys molitrix*、鳙 *Aristichthys mobilis*)3 400 kg,肉食性鱼类(鳊 *Siniperca chuatsi*、乌鳢 *Channa argus*、黄颡鱼 *Pelteobagrus fulvidraco*、鲟鱼 *Acipenser sturio* Linnaeus、鲶)650 kg,刮食性鱼类匙吻鲟 *Polyodon spathula* 30 kg,刮食性鱼类鲃 *Plagiognathops microlepis* 450 kg。

## (5) 浮游动物

投放密度为  $2 \times 10^8$  ind/m<sup>3</sup> 浮游动物约50 t,浮游动物包括秀体溞属 *Diaphanosoma* spp.、象鼻溞属 *Bosmina* spp. 和大型溞 *Daphnia magna*。

## (6) 微生物附着基

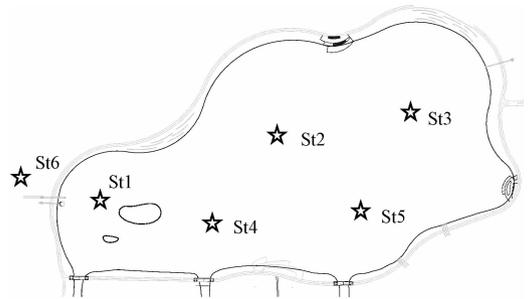
本研究引水渠道临时处理单元采用平面型微生物附着基,湖区内采用单株微生物附着基和平面型微生物附着基相结合的方式,单株型微生物附着基将立体基膜用聚乙烯绳串起,上纲系上浮球;平面型微生物附着基呈相互平行排列,相互间隔10 m;聚乙烯网高2 m,上纲利用直径0.3~0.5 cm的聚乙

烯绳与浮球连接,每隔0.5 m设置一个浮球。在适宜的区域布置了1 015 m平面形微生物附着基,10 800根单株微生物附着基,水中直立放置,拦截悬浮物,形成稳定的生物膜分解水层中的营养物质。

## 2 监测与数据处理

### 2.1 采样点和时间

本研究在锦城湖2号湖内设计5个采样点(St1~St5),进水口设计1个采样点(St6)(见图4),于生态建设开始时2013年4月起开始逐月监测至2014年7月,采样时间为每月15日。



☆ 水质监测位点

图4 水质监测位点图

Fig. 4 Water quality monitoring sites

### 2.2 理化因子测定

水中理化因子测定主要包括透明度、总氮、硝氮、亚硝氮、氨氮、总磷、叶绿素a,测定方法和标准参照《水与废水检测分析方法》<sup>[12]</sup>;同时参照《中华人民共和国地表水环境质量标准(GB3838-2002)》评判水质状况。

### 2.3 数据处理

采用SPSS 17.0软件进行相关统计分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 锦城湖2号湖入湖污染负荷

本次污染负荷仅计算初次进水及补水所产生的污染负荷,降雨及地表径流量相对较小,忽略不计。据测算,2013年4月至2014年7月,输入2号湖的氮总量约为14.93 t,磷总量约为1.33 t(见表1)。

### 3.2 湖区系统中水体理化指标的变化特征

#### 3.2.1 水体透明度及色泽变化

2号湖体于2013年4月中旬开始进水至2013年5月进水完成,水体清澈,随着水体生态系统的稳定,水体水色及透明度逐步改善。进入7、8月后,水

表 1 锦城湖 2 号湖入湖污染负荷

Table 1 Jincheng No. 2 Lake pollution load into the lake

内容	2013 年					2014 年		合计
	4 月	5 月	6 月	8 月	11 月	2 月	5 月	
入湖水量(万 m <sup>3</sup> )	39	51	29	29	29	62	93	333
出湖水量(万 m <sup>3</sup> )	20	25	15	15	15	36	36	193
输入氮量(t)	0.05	3.69	1.12	1.67	1.36	2.47	4.56	14.93
输入磷量(t)	0.05	0.46	0.06	0.09	0.25	0.21	0.21	1.33

注:2013 年补水为各月 20—25 日,2014 年补水为各月 1—10 日。

体透明度有所降低随后又逐步恢复,水体透明度最高时达到 2.5 m;至 2014 年 1 月(建成后 8 个月)水体透明度显著优于建设初期( $p < 0.05$ )和外河( $p < 0.01$ );但进入 2014 年 2 月后湖区透明度一直只维持在 0.7 m 左右。

根据现场情况分析,2013 年 7、8 月份水体浑浊主要由鲤鱼、乌龟(人为放生)等拱底性水生动物引起。鲤鱼属于底栖杂食性鱼类,饵料广泛,吻骨发达,常拱泥摄食,鲤鱼繁殖能力极强,随着气温升高,鱼的摄食量变大,湖区内种植的沉水植物成为鲤鱼主要的饵料来源<sup>[13]</sup>,此外 7、8 月温度较高,加之湖区营养盐含量较高,藻类的繁殖是影响水体透明度的另一方面因素。通过垂钓、拉网等方式将鲤鱼等拱底性鱼类清理后,水体透明度开始有明显提升。

2014 年 2 月由于蒸发及渗漏等方面原因,湖区水位下降严重,2 月份补水约  $2 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、5 月份补水约  $3 \times 10^5 \text{ m}^3$ (2 号湖常水位库容  $45 \times 10^4 \text{ m}^3$ ),外河道污染负荷极高的水体进入湖区后导致湖水浑浊,透明度急剧降低(见图 5:实线代表连续采样,虚线是补水,不连续采样,仅在进水时测水样,下同)。

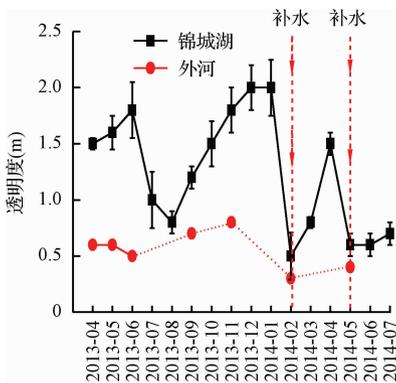


图 5 水体透明度变化情况  
Fig. 5 Changes in water clarity

### 3.2.2 总氮含量的变化

总氮含量波动较大,4 月份刚进水时,总氮含量

最高达到 10.42 mg/L,随着湖区生态系统的逐步稳定,其自净能力逐步增强,4 个月 后 2013 年 8 月总氮含量与进水相比削减了 89%,总氮含量达到 1.15 mg/L;建成 8 个月 后,水体总氮含量(1.14 mg/L)显著低于建设初期(10.42 mg/L) ( $p < 0.001$ );但之后由于补水原因(2014 年 2 月、4 月补水),引起总氮含量有急剧上升,基本维持在国家地表水 IV ~ V 类水水平(见图 6)。

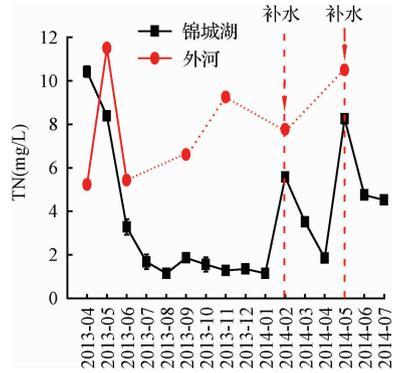


图 6 总氮含量的变化  
Fig. 6 Changes in total nitrogen content

### 3.2.3 硝氮含量变化

硝氮含量变化趋势与总氮基本一致,4 月初进水时硝氮含量最高,最高达 9.01 mg/L,8 月份最低为 0.16 mg/L;至补水前(2014 年 1 月,建成 8 个月),硝氮含量为 0.66 mg/L,显著低于建设初期( $p < 0.001$ )。由于大量补充外河水 2014 年 2 月、5 月硝氮含量再次升高(见图 7)。

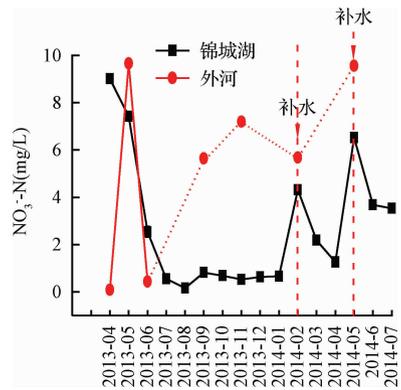


图 7 硝氮含量的变化  
Fig. 7 Changes in nitrate nitrogen content

### 3.2.4 氨氮含量变化

整体而言,2013 年氨氮含量相对较低,且变化不大,但 2014 年 2 月、5 月的补水中氨氮含量较高,导致湖区氨氮一直维持在相对较高的浓度(见图 8)。

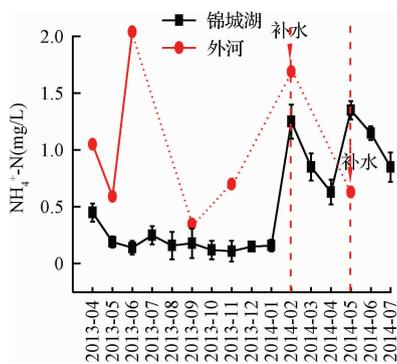


图8 氨氮含量的变化

Fig. 8 Changes in levels of ammonia

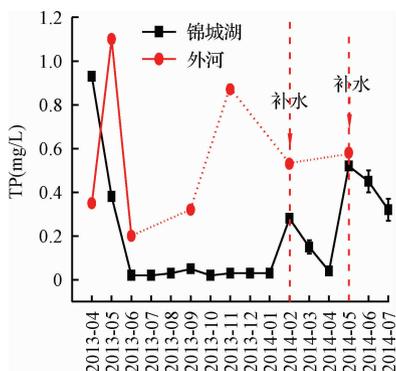


图10 总磷含量变化

Fig. 10 Changes in total phosphorus content

### 3.2.5 亚硝氮含量变化

锦城湖2号湖亚硝氮含量一直相对较低,最高出现在建设初期进水后一个月,含量为0.37 mg/L,随后一直维持在一个相对较低的值,2014年5月补水后亚硝氮含量出现较高的提升(见图9)。

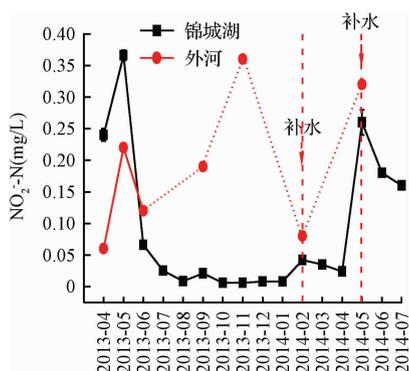


图9 亚硝氮含量变化

Fig. 9 Changes nitrite nitrogen content

### 3.2.6 总磷含量的变化

2号湖水生态系统对总磷的削减非常显著,湖区刚完成蓄水时总磷浓度最高,达到0.93 mg/L,2个月后,2013年6月总磷浓度降低至0.02 mg/L,降低了98%,此后至2014年2月补水前总磷浓度一直维持在I~II类水水平,2014年1月湖区总磷含量为0.03 mg/L,仅为建设初期的3.2% ( $p < 0.01$ ); 2014年2月第1次补水后总磷浓度升高至0.28 mg/L,4月降低至0.04 mg/L,2014年5月第2次补水后总磷浓度高达0.52 mg/L(见图10)。

### 3.2.7 叶绿素a含量变化

锦城湖2号湖建设完成的第1年湖中叶绿素a含量一直维持在比较低的水平,叶绿素a含量基本在20  $\mu\text{g/L}$ 以下,2014年2月以后叶绿素a含量呈

现上升趋势,最高达到56.25  $\mu\text{g/L}$ ,水体呈现富营养化趋势(见图11)。

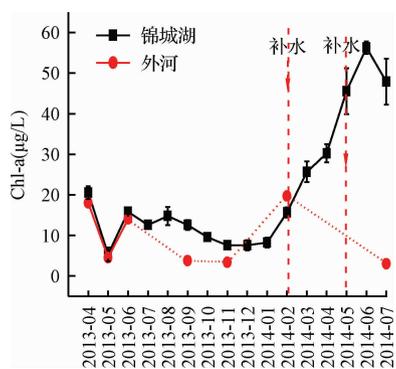


图11 叶绿素a含量变化

Fig. 11 Chlorophyll a content change

叶绿素a含量一定程度上反映浮游植物的生长状况,刘波等<sup>[14]</sup>通过对北京市城区地表水体叶绿素a与藻密度相关性研究发现,在叶绿素a浓度 $> 40 \mu\text{g/L}$ 时,叶绿素a与藻密度有较好的相关性。

### 3.3 锦城湖2号湖总氮削减量

2013年4—12月锦城湖2号湖共削减总氮7.28 t,2014年1—7月削减5.6 t,污染物的纳污能力和污染物质的排入量呈现一定的对应关系,即补水期间湖区的纳污能力也相应增加,可能是因为补水的同时,湖区的水量、水面积均有所增加。进入2014年后,由于连续2次大幅度的补水,尤其是5月份的补水对系统造成致命的打击,6月份总氮削减量受到补水的关系,削减量较大,但进入7月份其总氮的削减能力下降明显(见表2)。

### 3.4 锦城湖2号湖总磷削减量

2013年4—12月锦城湖2号湖共削减总磷0.65 t,2014年1—7月削减0.29 t,其中2013年8月

表2 总氮逐月削减量

Table 2 TN monthly reductions

	2013年						
	4—6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
削减量(t)	3.39	0.72	0.24	1.35	0.14	0.13	1.33
	2014年						
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月
削减量(t)	0.09	0.48	0.93	0.75	1.67	1.58	0.10

磷削减量为0可能是因为人为放生,鱼类拱底导致底泥中磷释放,冬季由于大部分沉水植物死亡,2号湖对总磷削减量亦有限,此外和总氮类似,由于2014年连续大量补水导致水体清水型沉水植物大面积死亡,2号湖对总磷的削减能力亦逐渐衰减(见表3)。

表3 总磷逐月削减量

Table 3 TP monthly reductions

	2013年						
	4—6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
削减量(t)	0.51	0.06	0	0.08	0.01	0	0
	2014年						
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月
削减量(t)	0	0.10	0.06	0.05	0	0.03	0.06

### 3.5 湖区水生植物群落演替

2号湖生态构建时,沉水植物种植面积20.04 hm<sup>2</sup>,占2号湖面积的93%,植物种类16种,分别隶属8科12属;挺水植物种植面积4 200 m<sup>2</sup>,种类包括黄菖蒲、再力花、水生美人蕉、湘莲一号。由于人为放生严重,2013年7—8月湖区内鱼类喜食的苦草、轮叶黑藻、微齿眼子菜、伊乐藻等被大量摄食,该类植物面积缩小,加之连续的高污染负荷补水入湖,初期设计光补偿点高、清水型沉水植物大面积死亡。2014年7月对2号湖沉水植物进行生态调研,调查发现,湖区内水生植物生物多样性较低、生物量减少严重,目前沉水植物仅存5种,以耐污性强的穗花狐尾藻占优势,分布面积达到57 600 m<sup>2</sup>,其次是刺苦草面积为19 450 m<sup>2</sup>、马来眼子菜4 320 m<sup>2</sup>、轮叶黑藻860 m<sup>2</sup>、金鱼藻600 m<sup>2</sup>。

## 4 讨论

### 4.1 食物链及生物操纵理论在城市人工湖生态治理中应用

生物操纵是利用生态系统食物链的原理,通过改变水体中生物群落结构,增强水体中物质循环和能达到流动,从而起改善水质、恢复水生态系统的平

衡的效果。挺水植物群落通过增加水流阻力、降低风浪扰动,促进悬浮物沉降,并通过与其共生的周丛生物落净化水质<sup>[15]</sup>。沉水植物群落是健康水生态系统重要组成部分,湖底沉水植物的存在可存储生物碎屑于植物根部,增加底泥表层溶氧,抑制底泥中磷释放,沉水植物还能释放化感物质抑制藻类生长<sup>[16]</sup>,淡水生态系统中,沉水植物占据水域生态系统的关键界面,是整个水生态生物群落的重要组成部分<sup>[17]</sup>。多样性的沉水植物群落对水域生态平衡的维持和功能的发挥有不可替代的重要作用<sup>[18-20]</sup>。研究表明,沉水植物系统对降低水体中营养盐效果明显,对磷的去除主要通过植物吸收,对氮的去除主要通过微生物的反硝化作用<sup>[21]</sup>,沉水植物全部淹没水中,茎叶可作为附着基为微生物和其他周丛生物提供生长平台<sup>[22,23]</sup>。

底栖动物是水生态系统的重要类群,众多研究表明,底栖动物可以加速水底碎屑的分解,促进泥水界面的物质交换和自净,在水域生态系统中的物质循环和能量流通中起着重要作用<sup>[24,25]</sup>。螺、蚌等底栖动物摄食有机碎屑,分泌物有絮凝作用,螺有刮食附着藻类的功能;虾、枝角类及部分鱼类可以摄食藻类、有机碎屑等均是水生态系统中重要组成部分。

鱼类是水域生态系统中重要的消费者,完整的食物网结构可促进水域生态系统结构的稳定<sup>[26]</sup>,刘建康和谢平1999年提出非经典生物操纵模型,通过凶猛鱼类及放养滤食性鱼类(鲢、鳙)直接牧食蓝藻水华的操纵,通过多年的实践验证,均取得良好的控制蓝藻水华的效果<sup>[27,28]</sup>。经典生物操纵理论指导下的研究表明,浮游动物数量的增加可有效降低水体中浮游植物的数量,增加水体透明度,改善水体水质目的<sup>[26]</sup>。同时浮游植物也是滤食性鱼类的饵料,是生态系统食物链的重要环节。Beklioglu等<sup>[29]</sup>在Eymir湖进行研究发现,控制浮游生物食性鱼类丁鲷(*Tincatinca* L.)和底栖食性鱼类鲤鱼(*Cyprinus carpio*)的数量,经过一年后,湖水透明度增加2.5倍,叶绿素a含量也有所降低;张喜勤等<sup>[30]</sup>采用直接投放摄食藻类的大型溞(*Daphnia magna*)和方形网溞(*Gerzoda daphnia gamaranaura*)治理富营养化湖泊也取得了一定的成果。闫玉华等<sup>[31]</sup>采用构建不同水生植物组合组成的生态系统,对富营养化水体进行修复研究发现,由狐尾藻、大藻等水生植物与鲢鱼、鲫鱼搭配组合的生态系统,能够

有效提高水质,恢复良好的水体生态功能。

微生物附着基又称“人工水草”或“生态填料”,由超细纤维等材料编织的新型水处理材料,可以为水体中土著微生物提供适宜生长繁殖的栖息场所,从而起到净化水质的目的。有研究表明,生物基网附着的微生物膜种类非常丰富,包括了大量的好氧的异养菌、自氧菌及轮虫类等微型动物等,这些微生物可在生物基网上形成食物链结构,通过生物的共生机制,达到水质净化的效果<sup>[32-34]</sup>。生态护岸是“可渗透性”的人工护岸,以“保护、创造生物良好的生态环境和自然景观”为前提,能够使水体和土壤、水和生物相互涵养,适合生命栖息和繁衍的防自然状态的护岸<sup>[35]</sup>。

本研究中利用水生生物食物链及生物操纵理论,人为构建了不同类型的水生植物、水生动物群落并辅以物理手段(微生物附着基)及生态型护岸的建设进行景观湖生态治理,取得了良好效果,运行第1年2013年去除氮磷量分别达到7.28 t和0.25 t,水体透明度一直维持在较高的水平,未出现藻类水华现象;运行第2年1—7月削减氮、磷量也分别达到5.6 t和0.29 t,采用食物链及生物操纵理论进行城市湖泊生态治理是一种有效的建设手段。

#### 4.2 城市人工湖生态管理

马剑敏等<sup>[36]</sup>在武汉莲花湖采用水生植物修复水生态系统过程中,就曾遇到湖泊管理者私放鱼苗导致水生植物群落遭到严重破坏,湖泊原本受到控制的水质再次出现恶化。本工程建设亦遇到相似的问题,工程建设初期,由于市民随意放生,导致水体一度非常浑浊,食草性鱼类及其他水生动物通过直接牧食或者扰动水体使水体透明度低,降低有效光合辐射,影响水体中沉水植物生长。

有研究显示,生物操纵理论必须在一定营养负荷内才能获得良好的效果,否则很难成功<sup>[37]</sup>。本案设计进水水质达到地表水Ⅳ类,但由于各种因素的制约,实际运行过程中基本未能达到,2013年污染负荷进入相对较少时,湖区生态系统具有良好的净化能力,主要水质指标均能达到Ⅳ类水标准,但是进入2014年2次大规模的补水,严重破坏了湖泊的原有生态群落结构,清水型沉水植物大量死亡,植物耐污型品种演替。

总结锦城湖2号湖运行的经验教训,在城市湖泊生态治理时需充分全面考虑人为因素对湖泊生态系统的影响,并有针对性的做好应急处置措施,建设

部门需做好各部门的协调工作,确保生态修复工程运行的基础条件能够满足。

## 5 结论

(1)水生生物食物链及生物操纵理论在城市人工湖建设中具有较好的应用价值。2013年4月—2014年7月,锦城湖2号湖共削减总氮12.88 t,总磷0.94 t,由此可见,采用人为建立各个营养环节,可实现水体营养物质间的有效转移,达到水质净化的目的,2013年,食物链构建完成后,湖区水质多能维持在地表Ⅳ类水标准。

(2)外界干扰对城市人工湖泊水生态系统稳定性的影响较大。2013年7、8月份由于人为放生的影响,2号湖水水质出现短暂下降现象;2014年后,由于入湖污染负荷严重,造成湖区水生态系统致命性的破坏,水质严重恶化,水质处于劣Ⅴ类水平,沉水植物由建设时的清水型沉水植物苦草、轮叶黑藻群落为主演替为耐污能力更强的穗花狐尾藻、金鱼藻群落为主,水生植物的多样性降低。

(3)科学的运行管理维护在城市人工湖建设中起重要作用。在进行城市人工湖生态建设时,需充分考虑人为因素的影响,本案设计的进水水质达到Ⅳ类水标准,实际运行过程中,由于各部门衔接不畅,补水水源数倍于国家地表水Ⅴ类标准,是导致2号湖水生态系统破坏的重要因素。此外由于建设初期的人工水生态系统较为脆弱,任何一人为因素都可能导致水质的恶化,如人为放生等,在城市人工湖生态建设时亦需加以考虑。

## 参考文献

- [1] 张智,杨冬雪,王斌,等. 某人工湖成库初期水环境特征研究. 环境工程学报, 2010, 4(6): 1321-1326  
Zhang Zhi, Yang Dongxue, Wang Bin, et al. Study on water environment characteristics of an incipient artificial lake. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(6): 1321-1326(in Chinese)
- [2] 唐清华, 高强, 庞志研, 等. 广州市白云人工湖生态修复工程设计. 环境工程学报, 2014, 8(7): 3083-3088  
Tang Qinghua, Gao Qiang, Pang Zhiyan, et al. Engineering design of ecological rehabilitation for Baiyun artificial lake in Guangzhou. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(7): 3083-3088(in Chinese)
- [3] Mitsch W. J. Ecological Engineering: A New Paradigm for Engineers and Ecologists. Washington D. C.: National A-

- cademy Press, 1996
- [4] Blank T., Day J. The effects of varied hydraulic and nutrient loading rates on water quality and hydrologic distributions in a natural forested wetland. *Wetlands*, 2000, 20(1): 48-61
- [5] Tockner K., Stanford J. A. Riverine flood plains: Present state and future trends. *Environmental Conservation*, 2002, 29(3): 308-330
- [6] 吴保生, 陈红刚, 马吉明. 美国基西米河生态修复工程的经验. *水利学报*, 2005, 36(4): 473-477  
Wu Baosheng, Chen Honggang, Ma Jiming. Review of the ecosystem restoration of Kissimmee River in USA. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(4): 473-477 (in Chinese)
- [7] 左华. 桂林环城水系整治及生态修复: 生态护岸工程. *桂林工学院学报*, 2005, 25(4): 437-441  
Zuo Hua. Reconstruction of Guilin water system and its ecological remediation: Ecological embankment project. *Journal of Guilin University of Technology*, 2005, 25(4): 437-441 (in Chinese)
- [8] 钟建红, 黄廷林, 解岳. 城市河湖水质改善与保障技术研究. *西安建筑科技大学报(自然科学版)*, 2006, 38(6): 771-776  
Zhong Jianhong, Huang Tinglin, Xie Yue, et al. Study of water quality improvement and the protective technique of urban rivers and lakes. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 38(6): 771-776 (in Chinese)
- [9] 黄田, 周振兴, 张劲, 等. 富营养化水体的水芹菜浮床栽培试验. *污染防治技术*, 2007, 20(3): 17-19  
Huang Tian, Zhou Zhenxing, Zhang Jin, et al. Culture Test of *Oenanthe javanica* on floating-bed in eutrophic water body. *Pollution Control Technology*, 2007, 20(3): 17-19 (in Chinese)
- [10] 赵军, 张成刚. 水体富营养化的成因及污染沉积物的防控措施研究. *中国工程咨询*, 2007, (7): 31-33  
Zhao Jun, Zhang Chenggang. Measures of prevention and control of the causes of eutrophication and pollution of sediments. *Chinese Consulting Engineers*, 2007, (7): 31-33 (in Chinese)
- [11] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术. 北京: 化学工业出版社, 2001
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- [13] 钟大森, 王芳, 王春生, 等. 不同密度下的鲤鱼扰动作用对沉积物-水界面硝化、反硝化和氨化速率的影响. *水生生物学报*, 2013, 37(6): 1103-1111  
Zhong Dasen, Wang Fang, Wang Chunsheng, et al. Effect on the bioturbation of carps in different density on denitrification, nitrification and nitrate ammonification rates on sediment-water interface. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, 37(6): 1103-1111 (in Chinese)
- [14] 刘波, 崔莉凤, 刘载文. 北京市城区地表水体叶绿素 a 与藻密度相关性研究. *环境科学与技术*, 2008, 31(8): 29-33  
Liu Bo, Cui Lifeng, Liu Zaiwen. Correlation between *Chlorophyll a* and algal density of surface water in urban of Beijing). *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(8): 29-33 (in Chinese)
- [15] 濮培民, 王国祥, 李正魁, 等. 健康水生态系统的退化及其修复: 理论、技术及应用. *湖泊科学*, 2001, 13(3): 193-203  
Pu Peimin, Wang Guoxiang, Li Zhengkui, et al. Degradation of healthy aqua-ecosystem and its remediation: Theory, technology and application. *Journal of Lake Science*, 2001, 13(3): 193-203 (in Chinese)
- [16] 肖溪, 楼莉萍, 李华, 等. 沉水植物化感作用控藻能力评述. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 705-712  
Xiao Xi, Lou Liping, Li Hua, et al. Algal control ability of allelopathically active submerged macrophytes: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3): 705-712 (in Chinese)
- [17] Haslam S. M. *River Plants*. London: Cambridge University Press, 1978
- [18] Carpenter S. R., Lodge D. M. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes. *Aquatic Botany*. 1986, 26: 341-370
- [19] 王春景, 周守标, 杨海军, 等. 安徽水生维管植物的多样性. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2006, 30(5): 87-90  
Wang Chunjing, Zhou Shoubiao, Yang Haijun, et al. Diversity of aquatic vascular plants in Anhui province. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2006, 30(5): 87-90 (in Chinese)
- [20] 甘新华, 林清. 广西河池沉水植物多样性及分布初步调查. *广西师范学院学报(自然科学版)*, 2008, 25(3): 83-88  
Gan Xinhua, Lin Qing. Preliminary investigation on diversity and distribution of submerged macrophytes in Hechi area of Guangxi. *Journal of Guangxi Teachers Education University (Natural Science Edition)*, 2008, 25(3): 83-88 (in Chinese)
- [21] Gumbricht T. Nutrient removal processes in freshwater submersed macrophyte systems. *Ecological Engineering*,

- 1993, 2(1): 1-30
- [22] Paterson D. M., Wright S. J. L. The epiphyllous algal colonization of *Elodea canadensis* Michx: Community structure and development. *New phytologist*, **1986**, 103(4): 809-819
- [23] Özbay H. Testing growth of *Elodea nuttallii* (Palnch.) H. St. John with different culture media. *Journal of Experimental Botany*, **2001**, 25: 239-244
- [24] 蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖大型底栖动物群落结构及多样性. *生物多样性*, **2010**, 18(1): 50-59  
Cai Yongjiu, Gong Zhijun, Qin Boqiang. Community structure and diversity of macrozoobenthos in Lake Taihu, a large shallow eutrophic lake in China. *Biodiversity Science*, **2010**, 18(1): 50-59 (in Chinese)
- [25] Covich A. P., Palmer M. A., Crowl T. A. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems: Zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling. *BioScience*, **1999**, 49(2): 119-127
- [26] 朱滨, 郑海涛, 乔晔, 等. 长江流域淡水鱼类人工繁殖放流及其生态作用. *中国渔业经济*, **2009**, 27(2): 74-87  
Zhu Bin, Zheng Haitao, Qiao Ye, et al. Fish stocking program in the Yangtze River. *Chinese Fisheries Economics*, **2009**, 27(2): 74-87 (in Chinese)
- [27] 刘恩生. 生物操纵与非经典生物操纵的应用分析及对策探讨. *湖泊科学*, **2010**, 22(3): 307-314  
Liu Ensheng. Analysis on biomanipulation, non-traditional biomanipulation and discussion of the countermeasures of biomanipulation application in waters. *Journal of Lake Sciences*, **2010**, 22(3): 307-314
- [28] 此里能布, 毛建忠, 黄少峰. 经典与非经典生物操纵理论及其应用. *生态科学*, **2012**, 31(1): 86-90  
Cilinengbu, Mao Jianzhong, Huang Shaofeng. Theory and application of biomanipulation and non-traditional biomanipulation. *Ecological Science*, **2012**, 31(1): 86-90 (in Chinese)
- [29] Beklioglu M., Ince O., Tuzun I. Restoration of the eutrophic Lake Eymir, Turkey, by biomanipulation after a major external nutrient control I. *Hydrobiologia*, **2003**, 490(1-3): 93-105
- [30] 张喜勤, 徐锐贤, 许金玉, 等. 水蚤净化富营养化湖水试验研究. *水资源保护*, **1998**, (4): 32-36
- [31] 闫玉华, 钟成华, 邓春光. 水生动植物对富营养化水体联合修复研究. *科技信息*, **2008**, (11): 43-44
- [32] 童敏, 李真, 黄民生, 等. 多功能人工水草生物膜处理黑臭河水研究. *水处理技术*, **2011**, 37(8): 112-116  
Tong Min, Li Zhen, Huang Minsheng, et al. Study on treating malodorous black water by multi-functional eco-bio-film with artificial aquatic mat. *Technology of Water Treatment*, **2011**, 37(8): 112-116 (in Chinese)
- [33] 田伟君, 郝芳华, 翟金波. 弹性填料净化受污染入湖河流的现场试验研究. *环境科学*, **2008**, 29(5): 1308-1312  
Tian Weijun, Hao Fanghua, Zhai Jinbo. Elasticity plastic filler for purification of polluted streams *in situ* Entering Lake. *Environmental Science*, **2008**, 29(5): 1308-1312 (in Chinese)
- [34] 周晓红, 王旻, 吴春笃, 等. 仿生植物附着微生物膜对污染水体氮素迁移转化效能分析. *生态环境学报*, **2012**, 21(6): 1102-1108  
Zhou Xiaohong, Wang Min, Wu Chundu, et al. Nitrogen removal efficiency from wastewater by using biofilm attached onto the bionic macrophytes. *Ecology and Environment Sciences*, **2012**, 21(6): 1102-1108 (in Chinese)
- [35] 曲媛媛, 王爱杰, 何甜甜. 浅谈河道生态护岸. *水利科技与经济*, **2009**, 15(7): 619-620
- [36] 马剑敏, 贺锋, 成水平, 等. 武汉莲花湖水生植被重建的实践与启示. *武汉植物学研究*, **2007**, 25(5): 473-478  
Ma Jianmin, He Feng, Cheng Shuiping, et al. Practice of establishing aquatic vegetation in Lake Lianhuahu in Wuhan, China. *Journal of Wuhan Botanical Research*, **2007**, 25(5): 473-478 (in Chinese)
- [37] Mitsch W. J., J-brgensen S. E. *Ecological Engineering and Ecosystem Restoration*. Hoboken, New Jersey: Published by John Wiley & Sons, Inc., **2004**: 105-124