

让湖泊休养生息  
全球挑战与中国创新

# 第十三届世界湖泊大会

## 论文集

下卷

中国环境科学学会 主编



中国农业大学出版社  
ZHONGGUONONGYEDAXUE CHUBANSHE

X 524-532

2011

3

风 光

# 第十三届世界湖泊大会论文集

## —让湖泊休养生息

### 下卷

中国环境科学学会 编



中国农业大学出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

第十三届世界湖泊大会论文集 / 中国环境科学学会  
编. —北京: 中国农业大学出版社, 2010. 5  
ISBN 978-7-81117-996-5

I. ①第… II. ①中… III. ①湖泊 - 环境保护 - 国际  
学术会议 - 文集 IV. X524-53

中国版权图书馆 CIP 数据核字(2010)第 065269 号

**书 名** 第十三届世界湖泊大会论文集

**作 者** 中国环境科学学会 编

**策划编辑** 吴 蕾 赵 中

**责任编辑** 王艳欣 洪重光 冯雪梅等

**封面设计** 郑 川

**出版发行** 中国农业大学出版社

**社 址** 北京市海淀区圆明园西路 2 号

**邮政编码** 100193

**电 话** 发行部 010-62731190, 2620

**读者服务部** 010-62732336

编辑部 010-62732617, 2618

**出 版 部** 010-62733440

**网 址** <http://www.cau.edu.cn/caup>

**e-mail** cbsszs@cau.edu.cn

**经 销** 新华书店

**印 刷** 北京市新华印刷厂

**版 次** 2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷

**规 格** 889×1194 16 开本 156 印张 4 580 千字

**印 数** 1~1300

**定 价** 780.00 元

图书如有质量问题本社发行部负责调换

582-122 X  
1100  
8

# 编 委 会

主 任 王玉庆

副 主 任 孟 伟 任官平 金相灿

编 委 杨经纬 侯雪松 赵以军 许振成 王金南 周 海

段昌群 刘永定 万金保 孔海南 巴雅尔 王雨春

孙红文 吴丰昌 吴海锁 宋祥甫 杨志峰 杨柳燕

俞汉青 胡洪营 徐开钦 秦伯强 郭怀成 黄民生

董利民 廖国良 潘 纲

编写人员 吴 蕾 张丽君 杨 昱 周 涛 赵 槟 姜 霞



吉林出版集团有限责任公司  
吉林

## 目 录(下卷)

- 沉水植物对水体的净化机制及生态因子影响分析 ..... 王立志,王国祥(1651)
- 沉水植物生长对浮床旱伞草净化水质效果的响应 .....  
..... 宋祥甫,邹国燕,付子轶,潘琦,刘福兴,范洁群,刘娅琴,刘长城(1656)
- 城市湖泊的功能及其保护 ..... 李党生,王振伟(1666)
- 典型古泻湖湿地生态需水量与水资源调控对策研究 ..... 彭士涛,张光玉,詹水芬,李野,张晓春(1670)
- 洱海水质分析及预测 ..... 唐建明(1675)
- 汾河水库冬季水温预测模型 ..... 闫慧荣,冯民权,范术芳,南朝(1683)
- 干旱半干旱区湖泊—呼伦湖萎缩与水环境变化原因及管理对策 ..... 贾克力,王志杰,李卫平,史小红(1689)
- 干旱区内陆湖泊演变及其生态服务评估——黑河流域居延海典型研究 ..... 肖洪浪,任娟,肖生春(1693)
- 高盐度湖泊风生流三维数值模拟分析 ..... 韩龙喜,陆东燕,潘翻番(1697)
- 构建武汉市湖泊公园体系初探 ..... 曾璇,汪家乐(1702)
- 贵州湖泊水库环境保护现状及休养生息设想 ..... 王家齐,张继彪,郑正(1712)
- 桂林会仙岩溶湿地水文过程初步研究 ..... 郭纯青(1716)
- 呼伦湖湿地使用价值货币化评价 ..... 包小庆,郝伟罡,张生,刘权,何宇光(1723)
- 湖北省水生维管植物区系研究 ..... 雷艳辉,葛继稳,吴兆俊(1729)
- 湖北省水生维管植物优先保护顺序研究 ..... 吴兆俊,葛继稳,雷艳辉(1736)
- 湖泊流域生态文明建设研究 ..... 胡义(1740)
- 湖水源热泵尾水排放对近水域的生态环境影响及其评价指标体系初探 ..... 姜文超,吴拓,周健,黄向阳(1744)
- 淮北矿区塌陷湿地水生态服务功能评价与规划研究 ..... 柏樱岚,王如松(1747)
- 基于3S技术的乌梁素海近150年来的变迁研究 ..... 孙标,李畅游,张生,杨志岩,张晓晶(1751)
- 基于富营养化控制的湖泊流域水生态功能区划理论 ..... 蔡佳亮,黄艺(1757)
- 基于生态旅游发展模式的青海湖开发与保护 ..... 林越英,王燕,王玉普(1761)
- 基于生态文明建设的湖泊状况评价指标体系——以山西省晋阳湖为例 .....  
..... 苟思,陈强,秦大庸,刘家宏,葛怀凤(1765)
- 基于水环境承载力的融合的产业结构和体系构造——以洱海流域为例 ..... 董利民,梅德平,叶桦,邓保同(1770)
- 基于水土保持效益的植物功能类型的划分 ..... 付登高,段昌群,侯秀丽(1777)
- 江苏太湖流域生态文明建设战略研究 ..... 王惠中,吴云波,黄娟,孙兆海(1782)
- 近30年来乌梁素海湿地演变趋势分析 ..... 吕昌伟,何江,王冰,孙惠民(1789)
- 景区规划中的旅游环境承载力分析——以喀纳斯湖为例 ..... 孙浩捷,李勇,胡江玲(1793)
- Analysis of Harm Caused by Heavy-metal Pollution in Soil of Liaocheng .....  
..... Liu guanfeng, Guo yuanjun, Guo yingdi, Xu zeying(1797)
- 临湖(海)橘园节氮施肥及其增产效应 ..... 刘俊松(1810)
- 内蒙古乌梁素海湿地生态系统恢复途径研究 ..... 岳继雄,庞立军(1814)
- 南昌市昌南城湖泊水环境生态修复与综合治理 ..... 罗蔚,张翔,刘小东,陈龙(1818)
- 浅层地下水对3种土地利用类型土壤氮、磷累积影响的初步研究 ..... 刘琳,张国盛,和树庄(1822)
- 青草沙水源地水库藻类水华监测指标体系建立的初步研究 ..... 吕卓,谢冰(1824)
- 清江水布垭水库水环境容量计算 ..... 王钊,曹俊,陈红兵,卢进登(1828)
- 区域尺度再生水资源调配及循环利用技术研究的构思 ..... 黄理辉,张波,王安德(1831)
- 人工干预状态下津市西湖生态因子与浮游植物量的灰关联模型{GM(I, N)} ..... 杨品红,王志陶,徐黎明(1834)
- 人工湖生态系统修复与重建技术探讨 ..... 都洁(1841)
- 三峡工程初期蓄水期水库水质与泥沙状况分析 ..... 陈敏,陈永柏(1844)
- 三峡水库156m蓄水后重点排污口污染带特性分析 ..... 黄程,邓春光,朱德军,任春坪,幸治国(1851)
- 沙漠生物结皮中一株高产胞外多糖细菌的分离、鉴定和优化 ..... 王正荣,生吉萍,申琳(1856)
- 山区乡镇湖库型饮用水源保护与经济发展模式研究 ..... 贺涛,许振成,彭晓春,曾思远(1860)
- 生物活性炭制备生物稳定饮用水的试验研究 ..... 王永浩,吕锡武,李先宁,刘武平,单国平,周克梅(1865)

湿地乡村复合地区一体化管理机制初探 ..... 楼琦峰, 姜建涛, 黄耀志(1872)

湿润区与干旱区典型湖泊湿地对比案例研究 ..... 白祥, 金海龙, 孙浩捷, 高翔, 陈丽华, 陈蜀江, 管梅(1879)

试论江汉湖群的生态形势及其综合整治 ..... 雷慰慈, 帕蒂, 张铁寒, 代松, 刘章勇, 代雄武, 要明天(1884)

水库消落带生态环境研究进展 ..... 夏婷婷, 雷波, 张晟, 杨三明, 王飞, 唐燕秋(1887)

水体微生物宏基因组学研究进展及应用 ..... 程凡升, 生吉萍, 申琳(1892)

水源地农村公众生活污染环境意识调查研究 ..... 冯庆, 王晓燕, 张雅帆(1897)

水资源承载力在城镇群区域规划中的应用——以长株潭城镇群“两型社会”区域规划为例 ..... 陈利群, 孔彦鸿, 袁少军(1902)

外来物种沙筛贝对厦门筲筍湖生态系统的影响 ..... 蔡立哲, 林和山, 黄昆, 王雯, 傅素晶, 周细平(1906)

微生物分子生态学技术在湖泊微生物多样性研究中的应用 ..... 武婷婷, 生吉萍, 申琳(1913)

我国北方缺水城市景观湖泊规划研究 ..... 闫大鹏, 蔡明, 李华伟, 王培森(1917)

我国流域生态补偿现状及存在的问题 ..... 杨晓航(1921)

无锡饮水危机事件中水中致嗅物质的检测 ..... 丁建清, 苏晓燕, 张晓健, 陈超, 许燕娟, 袁荣根, 陈静(1926)

五里湖水环境演变及其趋势分析 ..... 丁建清, 张虎军, 魏轲, 庄严(1930)

厦门筲筍湖浮游动物生态学研究 ..... 黄彬彬, 郭东晖, 李少菁(1936)

厦门筲筍湖修复植物海马齿根际细菌和碱性磷酸酶活性的初步研究 ..... 李凯, 朱小明, 黄凌风(1940)

小型复合人工湿地中不同处理单元净化生活污水性能及微生物分析 ..... 王泉, 鲁冬梅, 郭红, 吴斌, 吴献花(1944)

雅砻江干热河谷区水电站弃渣场植被恢复研究 ..... 陈敏, 李绍才, 孙海龙, 田甜(1948)

盐碱地区再生水景观河道磷沉积影响因素研究 ..... 唐运平, 袁敏, 张志扬, 刘红磊(1953)

养殖业排泄物对洞庭湖生态环境的影响 ..... 彭瑛, 李丽立, 张彬, 印遇龙(1957)

遥感技术在呼伦湖区域生态退化研究中的应用 ..... 娜日苏, 都瓦拉, 格根图(1963)

引沁入汾工程水量水质研究 ..... 南朝, 冯民权, 闫慧荣, 范术芳(1967)

哲学思维看我国的湖泊文化和生态文明 ..... 蔡明, 张磊, 张英霞(1971)

Stormwater runoff pollution loads from an old urban district with rainy climate in China ..... Li liqing, Wang jinjin, Yin chengqing(1975)

### 议题五: 湖泊可持续利用的文化及公众参与

Analyze on the variation tendency of eutrophication in Western Chaohu Lake, China ..... Shang guangping, Xu zhenyu, Zhang liangpu, Liu li(1982)

Cloud point extraction for speciation of Chromium (III) and Chromium (VI) in sediment samples from Chaohu Lake by high-performance liquid chromatography ..... Wang leilei, Wang jiaquan, Xiao pu, Zheng zhixia(1990)

Effects of External Sediment Capping on Sediment Nitrogen and Phosphorus Release in Fubao Bay of Dianchi Lake, China ..... Li bao, Guo feng, Fan chengxin(1995)

Nitrate Loads of Agricultural Drainage in “Boston Bay”—a Mississippi River Backwater Area and Potential Reducing Strategies ..... WANG Peifang, SCHNOEBELEN Douglas J., QUARDERER Nathan A., WEBER Larry J. (2002)

Pearl River pollution situation and key ecological restoration techniques ..... Dai qin, Luo jianzhong(2008)

Purification of Artificial Floating Island System on Creek Flowing into Dian-Chi Lake ..... Gao yangjun, Cao yong, Zhao zhen, Sun congjun(2013)

Research on the mechanism and control of multi-media pollution in Taihu basin ..... Chen xing, Cui guangbai, Yu zhongbo, Gu baohe(2020)

Simulation of Flow Field in Pre-dams and Phosphorus Elimination during Rainstorm ..... Lu xiwu, Li bin, Ning ping, Zhang renfeng(2025)

太湖黑臭现象机制初步研究与探索 ..... 孙飞飞, 范成新, 崔广柏, 盛东(2033)

Temporal and Spatial Characteristics of the Cyanobacterial Bloom in Lake Dianchi Indicated by MODIS-NDVI ..... Wang chongyun, Zou huoyan, Kong bing, Peng mingchun, Duan hexiang, Qian lintong(2041)

Trace Elements in Soils of Dianchi Lake Watershed in Yunnan Province: Controlling Factors and Environmental Implication ..... ZU Yanqun, BOCK L., SCHVARTZ C., COLINET G., LI Yuan(2049)

Water Environment Treatment and Ecosystem Restoration Experiments in the Tai Lake and Wuli Lake, China ..... Song xiangfu, Zou guoyan, Ye chun, Fu zishi, Liu fuxing, Shi longxin, Chen jun(2059)

巢湖流域岩源磷赋存形态研究 ..... 汪家权, 沈燕华, 马玉萍(2069)

- 巢湖周围池塘水体污染现状及肇因 ..... 马秀玲, 孙庆业, 许建, 阳贵德, 陈政, 宣淮翔, 伍红琳(2073)
- 城市湖泊水环境安全评价及保障对策研究——以武汉市为例 ..... 彭晶倩, 曹雯, 熊玉(2077)
- 怎样才能从根本上遏止太湖环境状况恶化的步伐 ..... 袁铎(2081)
- 滇池北部重点水域蓝绿藻季节性变动下水体 N/P 比值变化研究 ..... 何锋, 段昌群, 杜劲松, 韩亚平, 郭艳英, 潘珉, 宋任彬(2083)
- 滇池湖滨湿地保护与管理对策研究 ..... 郭艳英(2088)
- 滇池机械除藻成效评估及蓝藻综合防治措施建议 ..... 易雯, 岑世柏, 曾武涛, 钱萌(2093)
- 滇池流域面源污染源数据的分类描述 ..... 和树庄, 段昌群(2098)
- 滇池流域农村污水收集处理工艺研究 ..... 甄晓云, 丘道健, 陶磅, 苏一江, 李煜(2102)
- 滇池流域种植业土壤 COD<sub>cr</sub>、TP、TN 隐匿流失模拟试验结果 ..... 范亦农, 孔德平(2109)
- 抚仙湖入湖污染负荷量调查 ..... 王林, 吴献花, 李红梅, 郭红, 伍贤学(2114)
- 河湖需要生态化, 应当全源综合治理 ..... 颜宏亮, 刘巍, 赵坤, 徐国东, 王建民, 颜天龙, 李慧(2117)
- 基于 ECOMSED 模式的太湖风生流三维数值模拟 ..... 汤露露, 王鹏, 姚琪(2121)
- 基于 GIS 的太湖沉积物和营养盐空间分布规律研究 ..... 尤本胜, 范成新, 蒋英姿(2126)
- 基于 MODIS 的太湖蓝藻水华发生时序研究 ..... 张咏, 金焰, 姜晟(2131)
- 基于水环境承载力的洱海流域社会经济结构调整与支持体系构建 ..... 龚琦, 董利民, 王雅鹏(2135)
- 健康太湖评价指标研究 ..... 周小平, 杨利芝, 徐雪红, 翟淑华(2139)
- 喀斯特高原湖泊红枫湖水污染问题及防治对策 ..... 王密, 何谋军, 江玮, 曲明昕(2145)
- Erhai Lake Protection and Ecological Civilization Construction ..... Ke gaofeng, Dong limin(2149)
- Economic Growth and Erhai Water Quality Evolution ..... Ding lieyun, Ke gaofeng(2156)
- 南方水网区小城镇地表水现状初步研究——以太湖流域雪堰镇为例 ..... 朱乾德, 孙金华, 王会容, 陆海明, 颜志俊(2163)
- 南宁市南湖水质状况分析及治理对策初探 ..... 刘传, 陈家宝, 陈宗永(2171)
- 南宁市市区湖泊污染防治和对策研究 ..... 黄红红, 杨小平, 陈红路(2175)
- 气象条件对滇池蓝藻水华爆发的影响分析 ..... 盛虎, 詹歆晔, 郭怀成(2179)
- 浅水湖泊纳污能力计算研究——以太湖为例 ..... 张红举, 禹雪中, 马巍, 翟淑华(2185)
- 溶藻菌的分离及强化生物膜反应器控藻效果的初步研究 ..... 李超, 冯菁, 吴为中(2189)
- 生物复合酶对黑臭水底泥原位修复的理论和实践 ..... 奚健, 施怀荣(2194)
- 水质生物调控理论探讨及巢湖水质改善运用思考 ..... 刘恩生, 陈开宁(2197)
- 太湖春季水体磷形态的空间分布 ..... 张润宇, 王立英, 吴丰昌, 张远(2201)
- 太湖湖泛成因研究 ..... 张咏, 张宁红, 厉以强(2204)
- 太湖近年富营养化程度及趋势分析 ..... 石亚东, 秦忠, 王何轶, 莫李娟, 顾苏莉(2208)
- 太湖重污染区缓冲区生态建设模式构想——以宜兴市周铁镇为例 ..... 吴磊, 吕锡武, 李先宁(2213)
- 汤逊湖水体叶绿素浓度遥感估测研究 ..... 黄耀欢, 肖伟华, 王浩, 秦大庸, 柴增凯(2217)
- 我国陆域水污染物总量控制对污染物排海总量控制的启示 ..... 陈克亮, 王金坑, 朱晓东, 杨潇, 赵艳(2220)
- 五里湖环境综合整治对周边居民购房意愿的影响评估 ..... 黄和平, 万群, 毕军(2224)
- 武汉市水资源供需系统仿真模拟及调控 ..... 叶晶, 于书霞, 赵劲松, 刘杰, 杨婉, 郭怀成(2227)
- 阳宗河流域环境保护管理对策措施研究 ..... 陈云进(2233)
- 用环境教育“透析”辽河源 ..... 李美娟, 安志伟(2237)
- 云南省抚仙湖生态需水探讨 ..... 李枫, 王美华(2242)
- 组合人工湿地对环太湖城镇污水处理厂尾水深度处理研究与实践 ..... 杨长明, 华伟, 马锐, 刘晋(2245)

## 议题六: 中国湖泊污染控制研究

- Multi-objective Optimization about Functions of the East Lake in Wuhan ..... Li xinmin, Li rong(2253)
- A Solution to Future Water Management in Taihu Basin ..... Hu yan(2257)
- Evaluation on CDM project of Ming-Hong Biogas Engineering in ChuXiong city ..... Li yun, Zhang wudi, Li jianchang, Yin fang, Xu rui, Chen yubao, Liu shiqing(2261)
- Growth and Development of Potamogeton crispus L. in Different Sediments of Lake Taihu ..... Mi weijie, Yang tewu, Zhu duanwei, Zhou yiyong, Zhou huaidong(2265)
- Perpendicularity pollution of heavy metal in the sediments of Poyang Lake ..... Liu xiaozhen, Zhou wenbin, Hu lina, Liang yue(2273)

POPs pollution in the sediments of Poyang Lake ..... Liang yue, Liu xiaozhen, Wang yuehua, Zhou lifeng(2279)

Preliminary investigation on water quality parameters in different area of Taihu Lake based on in-situ measurements .....  
 ..... Xi hongyan, Zhang yuanzhi, Duan hongtao(2284)

Research of Integrated Management of Eutrophication in Poyang Lake Basin ..... Wan jinbao, Mo lei, Gu ping(2288)

Research on the structure composition of ecosystem and the ecological water level of lake .....  
 ..... Guo lidan, Xia ziqiang, Yu lanlan, Zhao en(2293)

The Main Aquatic Environment Problems and Countermeasures for Poyang Lake ..... Zhou wenbin, Wang maolan(2300)

TMDL ASSESSMENT FOR TIAOXI RIVER IN TAI LAKE WATERSHED .....  
 ..... Zhang jianying, Luo yang, Qi jianguo, STEVENSON R. Jan(2304)

草海生态保护与村民生产生活方式调适研究 ..... 姜胜霞, 龙茂兴, 杨昌鹏, 郭爱民, 陈冲, 冯斌, 钱哲思(2313)

巢湖流域麦稻轮作农田养分径流流失特征初探 ..... 王桂苓, 马友华, 孙兴旺, 宋法龙, 张丽娟, 吴春蕾(2317)

巢湖双桥河底泥的沉积特征及清淤工程设计初探 ..... 黄显怀, 张海平, 陈良杰, 方涛(2325)

创新与发展——湖泊流域水环境综合治理生态基技术战略规划 ..... 袁伟刚(2329)

磁湖环境综合治理的研究 ..... 刘瑞, 汪晓露, 胡涵, 童钦(2333)

滇池福保湾水体无机碳与叶绿素 a 的关系研究 ..... 张彦辉, 杨劲, 李堃, 陈云峰, 巫建光(2337)

东太湖综合整治的效果研究 ..... 纪洪艳, 魏清福, 盛根明, 马振坤(2342)

洞庭湖与鄱阳湖比较研究 ..... 郭辉东, 邓润平(2347)

洱海立法的实践与探索 ..... 尚榆民(2351)

湖北大冶湖水污染防治研究 ..... 李兆华, 赵丽娅, 康群, 王新生, 熊欣, 赵泉, 朱联东(2355)

基于熵权法的洞庭湖水域生态健康状态评估 ..... 陈灿, 刘益贵, 钟振宇(2362)

跨省界湖泊纳污能力研究——以太湖流域淀山湖为例 ..... 张红举, 汪传刚, 陈祖军, 杨利芝(2366)

两级高效藻类塘处理太湖地区农村污水及磷的迁移转化 ..... 黄翔峰, 陆丽君, 刘佳, 闻岳, 何少林, 周琪(2370)

论以滇池流域生态环境改善为重点的城乡生态园林建设——以昆明市西山区为例 ..... 熊晶, 钱春萍(2377)

鄱阳湖流域生态补偿机制构建的设想 ..... 陈美球, 吕添贵, 朱再显, 蔡海生(2381)

鄱阳湖生态环境保护与开发利用研究综合报告——I. 研究概况 .....  
 ..... 黄国勤, 石庆华, 王淑彬, 欧一智, 蒋海燕, 孙卫民(2386)

鄱阳湖生态环境保护与开发利用研究综合报告——II. 研究成果 .....  
 ..... 黄国勤, 石庆华, 王淑彬, 欧一智, 蒋海燕, 孙卫民(2392)

鄱阳湖生态环境变化趋势分析 ..... 万金保, 莫蕾(2402)

鄱阳湖生态经济区保护与发展互动协调研究 ..... 李志萌, 李志茹(2406)

鄱阳湖水环境特征研究 ..... 胡春华, 周文斌, 肖化云, 王毛兰, 李博, 徐丹(2410)

三峡工程运用后鄱阳湖水沙情势变化及其影响初步分析 ..... 张细兵, 王敏, 黄悦, 胡德超, 李迎喜(2415)

三峡水库运用后对洞庭湖区城市公共安全的影响 ..... 郭辉东, 邓润平(2419)

太湖沉积物重金属在不同水动力条件下的迁移规律研究 ..... 王超, 石瑞娟, 王沛芳, 钱进, 侯俊, 李娜(2422)

太湖蓝藻中微量元素与微囊藻毒素含量的测定 ..... 何恩奇, 钮伟民, 宋振威, 虞锐鹏(2427)

太湖流域农村生活污水与固体废弃物共处置技术 ..... 张后虎, 张毅敏, 张永春, 孔祥吉, 高月香, 王伟民(2431)

太湖流域水利形势与综合治理 ..... 林泽新(2434)

武汉月湖水体和表层沉积物中 25 种半挥发性有机污染物分布特性研究 .....  
 ..... 宋慧婷, 贺锋, 成水平, 梁威, 张丽萍, 吴振斌(2438)

玉溪“三湖”污染状况和控制策略 ..... 吴献花, 胡小贞, 王泉, 高卫国, 金相灿(2443)

中国重点湖泊水污染防治战略思考 ..... 王金南, 吴悦颖, 李云生(2447)

新沟河延伸拓浚工程改善梅梁湖水环境的必要性探讨 ..... 魏清福, 朱桂娥, 朱勇, 盛根明, 展永兴(2454)



# 沉水植物对水体的净化机制及生态因子影响分析

王立志, 王国祥\* (南京师范大学地理科学学院, 江苏省环境演变及生态建设重点实验室, 江苏南京, 210046)

**摘要:**沉水植物对水质净化的机制, 主要是通过植物体的吸收、富集、对颗粒物质的吸附, 对藻类的抑制, 以及促进微生物降解和植物酶的作用等方面得以实现。回顾分析了影响沉水植物对水体净化的生态因子主要有: ①非生物因子: 光照强度, 营养盐, 底质, 悬浮物和温度; ②生物因子: 着生藻类和人为收获及鱼类的放养等。各因子对沉水植物的影响都存在一定的区间, 植物的不同生长时期和不同的植物都有各自不同的最佳取值区间。

**关键词:**沉水植物, 净化, 生态因子

**Studies on Water Purification mechanism of Submerged Macrophytes and Ecological Factors** Wang Lizhi Wang, Guoxiang (College of Geographical Science, Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Nanjing Normal University, Nanjing, 210046, China).

**Abstract:** The main mechanism of water purification by submerged macrophytes is through absorption, enrichment, absorption of granule materials, restraining alga, accelerating microorganism decompose and enzyme. The main ecological factors of water purification by submerged macrophytes are abiological factors: light intensity, nutrition, sediments, suspender and temperature; Biological factors: alga and gain and fish herd. There is a area of all factors, different period of plants and different plants need different areas.

**Key words:** submerged plants, purification, ecological factors

## 1 引言

沉水植物是草型湖泊的重要组成部分, 占据了水和底质的主要界面, 作为水生生态系统的初级生产者, 对整个水体生态系统的结构与功能及系统稳定性有决定性的影响。沉水植物在整个湖泊生态系统中作用非常重要, 它吸收底泥和水体中的营养盐, 吸附水体非生物性悬浮物, 向外释放氧气, 改善水下光照和水体溶解氧条件, 为水生动物提供活动和保护场所, 是水体生物多样性赖以维持的基础<sup>[1]</sup>。作为湖泊生态系统结构和功能的重要组成部分, 沉水植物是保持水生生态系统良性运行的关键类群, 是良性湖泊生态系统的必要组成部分。

然而, 经济的快速发展和人口的不断增加使大量的营养物质不断地流入湖泊, 致使湖泊富营养化现象日趋严重, 已成为一个世界性的生态环境问题, 沉水植物衰退和消失的现象在世界范围内普遍出现。

因此, 开展富营养化水体生态系统退化机制及其控制技术的研究具有非常重要的理论与实际意义。利用沉水植物富集氮磷是治理、调节和抑制水体富营养化的有效途径之一。然而, 实施水生态修复工程时常受到许多因子的影响, 这些因子的影响程度又未必等价, 只有系统掌握并区分影响沉水植

物生长的主导因素与非主导因素, 结合野外实际条件, 选择合适的先锋物种, 才能确保沉水植物的有效恢复。

## 2 沉水植物对水质净化机制

### 2.1 沉水植物吸收和富集作用

沉水植物在生长过程中会从水层和底泥吸收营养物质同化为自身的结构组成物质, 从而将水体中的营养盐固定下来。水体中有机氮被微生物分解转化, 而无机氮(氨氮)作为植物生长过程中不可缺少的物质被植物直接摄取, 合成蛋白质与有机氮, 构成植物自身的物质, 再通过植物的收割而从水体系统中除去<sup>[2]</sup>。

水体中磷也是植物必需的营养元素, 水体中的无机磷在植物吸收及同化作用下可转化成植物的ATP、DNA、RNA等有机成分, 然后通过植物的收割而移去<sup>[3]</sup>。

沉水植物能有效去除富营养化水体中的TN, 相对原水的去除率高达52.63%~93.99%, 作用时间可持续约30天; 对水体中N的去除过程中, 细菌的降解作用占主导地位。沉水植物对水中氨

**基金项目:**国家自然科学基金(40873057), 江苏省重大科技支撑项目(892008077)

\* 通讯作者: E-mail: wangguoxiang@sina.edu.cn.

氮的去除效果也十分明显,去除率高达 73.33% ~ 81.25%;对硝态氮的去除率均在 95% 以上,而且作用时间较长。沉水植物系统对总磷和活性磷的去除效果十分明显,去除率分别在 80% 和 96% 以上<sup>[4]</sup>。

王丽卿等采用轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)、梅花藻(*Batrachium trichophyllum*)、苦草(*Vallisneria spiralis*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、马来眼子菜(*Potamogeton malainus*)、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*) 6 种沉水植物对淀山湖 N、P 去除进行研究,发现金鱼藻对 TN 的去除能力最好,30d 后实验水体 TN 只有对照组的 6.03%;对总磷的去除率,苦草和马来眼子菜最高(均为 91.05%)、金鱼藻最低(83.38%)。对活性磷的去除率,金鱼藻几乎达 100%,而且净化速率大于总磷,这主要与沉水植物生长时直接吸收正磷酸盐有关<sup>[5]</sup>。

沉水植物对环境中的重金属同样具有一定的富集能力,水生植物对重金属的吸收富集能力为:沉水植物 > 漂浮植物 > 挺水植物,不同部位浓缩作用也不同,一般为根 > 茎 > 叶,各器官的累积系数随污水浓度的上升而下降<sup>[11,12]</sup>。沉水植物的存在降低了水中营养盐的平衡浓度,改变水体和底泥中的物理化学环境,抑制藻类生长,改善水体生态环境。

## 2.2 沉水植物吸附颗粒作用

沉水植物密集的枝叶与水有着庞大的接触面积,能够吸附沉降水中的悬浮颗粒物质,一些种类还可以分泌助凝物质,促进水中小的颗粒絮凝沉降。除此之外,沉水植物好氧的根基环境也可以起到固持底泥,减少或抑制底泥中氮、磷等污染物质溶解释放的功能。

对悬浮颗粒物的吸附作用以叶片细小而繁多、表面粗糙、与悬浮颗粒物接触面积相对较大的植物吸附能力较大如黑藻等;苦草类植物则由于带状叶片及叶片表面相对光滑,不利于吸附,所以效果较差。沉水植物对悬浮物的吸附作用主要发生在粒径为 2.5 $\mu\text{m}$  以下的悬浮物上,对于较大粒径的悬浮颗粒物效果比较差<sup>[13,14]</sup>。

沉水植物同样对重金属具有吸附、吸收和净化的作用,金属不同于有机物,它不能被微生物降解,只有通过生物吸收从环境中除去。Thaer<sup>[15]</sup> 发现水生植物对受污染河水中的 Mn 和 Zn 具有较高的富集能力。

黄亮等<sup>[16]</sup> 发现,苦草、黑藻、微齿眼子菜、菹齿眼子菜、金鱼藻,以及浮叶植物菱(*Trapabicornis*),对重金属 Zn、Cr、Pb、Cd、Co、Ni 和 Cu 有很强的吸收积累能力,而一些重金属元素,比如 Cd 含量增加的同时也会减少必需元素(如 Zn)的含量。此外,水生植物会控制重金属在植物体内的分布,使得更多的重金属积累在根部。

## 2.3 沉水植物抑制藻类作用

沉水植物和藻类都是水体生态系统中的初级生产者,在营养元素、光照、水深等环境因子上存在极大的竞争。此外,水生植物能分泌针对藻类的化感物质,这种物质能杀死藻类或抑制其生长。研究发现沉水植物能向水中分泌某种有机物质(助凝物质),这种物质不影响浮游藻类的正常代谢和繁殖,却能改变其表面特性,促使其沉降。而且水生植被能为大型浮游动物提供庞大的栖息表面积,从而抚育出高密度的浮游动物群落,大量捕食浮游藻类,也可以间接地控制藻类的群体数量。因此,如果水体具有发育良好的水生植被就能强烈地抑制藻类的生长<sup>[18]</sup>。

## 2.4 沉水植物促进微生物降解作用

沉水植物不但为微生物提供栖息地,而且提供微生物降解污染物质所需的氧,有研究表明,沉水植物的输氧功能对降解污染物好氧的补充量远大于由空气扩散所得氧量<sup>[19]</sup>。植物输氧是植物将光合作用产生的氧气通过气道输送至根区,在植物根区的还原态介质中形成氧化态的微环境<sup>[20]</sup>。使根毛周围形成一个好氧区域,通过硝化、反硝化作用及微生物对磷的过量积累作用使氮、磷从水体中去除。因此,沉水植物在去除铵、亚硝酸盐、硝酸盐、磷酸盐、SS 和 BOD 等方面间接或直接地起着重要作用<sup>[21]</sup>。

## 2.5 沉水植物酶的作用

植物会释放促进生物化学反应的酶。与植物酶有关的有机物降解非常快,致使化学污染物从水体中的解吸和质量转移成为限速步骤。植物死亡后,酶释放到环境中还可以继续发挥降解作用<sup>[22]</sup>。

## 3 影响生态因子

### 3.1 非生物因子

#### 3.1.1 光照强度

光合作用是沉水植物最重要的代谢活动,水下光照条件也是影响水生植物生长的主要因素之一,一般用真光层深度(水下某深度处的光照强度为

水面处的1%时的水深,此处的水生植物均难以维持正的净光合作用)来表征水体透明度。太湖真光层的深度取值范一般为0.8~2.0m。但由于浅水湖泊中悬浮物浓度较高,因此透明度很低,加上风浪的影响,恢复水生植物仍然很困难。因此提高水体透明度以解决水下光照不足问题,是解决问题的关键。既可以通过消浪措施来降低水体悬浮物浓度的办法,也可以通过降低湖水位,即降低水深来为水生植物生长创造有利的光照条件<sup>[23]</sup>。

### 3.1.2 营养盐

由于水体富营养化的不断加剧,沉水植物群落正在普遍地退化消失,这已经是一个不争的事实,但是关于营养盐对沉水植物生长的影响机理研究却一直存在分歧。其中一些研究认为营养盐的高低对沉水植物并没有显著的影响,如高健<sup>[27]</sup>认为氮、磷水平对菹草冬芽萌发和生长的影响并不显著。Beklioglu与Moss<sup>[28]</sup>认为沉水植物对水体营养盐浓度具有较宽的耐受范围,并能有效降低水体污染负荷。乔建荣<sup>[29]</sup>、宋福<sup>[30]</sup>发现狐尾藻、菹草、苦草、伊乐藻、金鱼藻、篦齿眼子菜及轮藻在污水环境中生长良好,并对污水具有显著的净化作用。

还有一些学者认为沉水植物对水体富营养化的生理反应是由于氮、磷浓度变化间接影响到植物的生理活动所致,如Chamber与Kalff等<sup>[31,32]</sup>认为沉水植物对富营养化的敏感性主要受水体透明度下降引起的光衰减(包括与藻类的光竞争)和植物生长型的影响。

另外也有较多的学者认为较高的N、P浓度对沉水植物而言是一种逆境胁迫,影响其正常生理活动,是富营养化过程中影响沉水植物退化的机制之一。Mulligan<sup>[33]</sup>及Ozimek, Best<sup>[34]</sup>伊乐藻,金鱼藻在较高的氨氮(大于5mg/L)环境下开始抑制生长,颜昌宇<sup>[35]</sup>认为低浓度的氨氮(0.5、1.2mg/L)对轮叶黑藻的生长稍有促进作用,但氨氮浓度超过4mg/L时,黑藻的相对生长率明显下降,当浓度达到16mg/L时,黑藻在20多天内全部死亡。

### 3.1.3 底质

底质是有机碎屑微生物降解和营养物质生物地球化学循环的主要场所,含有多种有机物和无机营养物质。底质除了具有固持作用外,还可以为沉水植物提供各类营养元素以及微量元素。不同底质的物理、生化性质有所差异,对沉水植物生根、繁殖与生长也会产生不同程度的影响。

雷泽湘<sup>[41]</sup>、Thai<sup>[42]</sup>、陈开宁<sup>[43]</sup>等学者研究了

湖泊高营养和低营养底泥对沉水植物的生长影响,发现苦草更适合在高营养、浅水区生长;而马来眼子菜则可能更适合在低营养、深水域生长;黑藻在两种沉积物中生长情况都较好。很好地解释了野外条件下,高营养水平基质上生长的苦草和黑藻种群间产生竞争,往往以黑藻取胜的原因。在沉水植物野外恢复的实践中,一定要综合考虑沉水植物自身生理特性与底质特征,选择合适的先锋物种。

### 3.1.4 悬浮物

水体悬浮物能降低水体的透明度,从而减少了水体内部太阳辐射总量及有效光能,使得沉水植物正常光合作用受到影响;另外,悬浮物可直接粘附在植物叶片表面,从而直接影响植物的光合能力,并可能导致植株与水体间气体交换和营养物质交换的受阻,从而影响沉水植物生长。

王文林、李强、曹昀、马婷<sup>[44,45,46]</sup>等研究发现亚洲枯草、菹草、金鱼藻三种植物中菹草较苦草、金鱼藻对悬浮物浓度较高的浑浊水体有更高的耐受能力;但当水体浊度大于120NTU时,菹草幼苗生长发育开始受到明显抑制,达到180NTU时,水体中的菹草幼苗开始大量死亡。谢贻发<sup>[47]</sup>通过对苦草和马来眼子菜两种植物的研究,发现悬浮物对苦草的分蘖和块茎数产生了明显的影响;同样,马来眼子菜的生物量和分蘖数同样受到了悬浮物的影响,但影响程度小于苦草。

### 3.1.5 温度

水体环境中温度变化较为缓慢,温度对沉水植物的影响较小,但是温度对沉水植物季节生长的影响较大。陈洪达<sup>[48]</sup>通过测量菹草计算光合作用和呼吸作用,认为菹草在生长过程中产氧量随着温度的升高而升高,但是当水温增加到35℃与40℃时,表现出呼吸消耗的氧大于释放的。就不同沉水植物而言,由于其生理生态学特性的差异,温度对其影响特征也有所区别。Barko与Smart<sup>[49]</sup>研究发现:从抽条生物量、抽条长度及抽条数目看,黑藻在32℃时比狐尾藻表现出较大的生长反应。因此,沉水植物最佳生长状态总对应着某一合适的温度范围,而过低或过高都会对其生长过程产生一定不利的影响。

## 3.2 生物因子

### 3.2.1 着生藻类对沉水植物的影响

着生藻类常与周丛动物、细菌及有机碎屑一同组成水草表面的覆盖物,对水草的生长、发育产生影响。着生藻类不仅大大削弱了到达植物表面的

光照和营养物浓度,其代谢产物还对水生植物的光合作用具有抑制作用。因此有观点认为,导致富营养化湖泊水生植被衰亡的原因,不是浮游藻类生物量的增加,而是由于水生植被表面着生藻类生物量的增加<sup>[50]</sup>。

对着生藻造成机体损伤的氧化迫来自两个方面,一是在着生藻类胁迫作用下在沉植物体内会产生大量的活性氧;二是在叶体表面由叶绿素光敏化过程产生大量的活性氧。这将会引起沉水植物的生长不良与叶绿素量的降低,甚至产生白化现象,导致死亡。

### 3.2.2 人为收获和鱼类放养对沉水植物的影响

收获沉水植物与放养草食性鱼类对沉水植物所产生的后果有许多相似之处,对植株都是机械性破坏行为,都能导致顶枝丧失,迅速造成植物生物量、资源储存量、光合作用组织、植物繁殖器官和生长点的损伤。在植物生物量处于低水平时,收获造成的生理胁迫最为严重,而在生长季节的后期影响最小。

## 4 结语

沉水植物作为污染水体修复过程中一个重要的参与者,已经广泛运用于研究和实践领域。水生植物不仅自身能吸收一部分污染物质,还向水体中提供大量的氧气,为微生物的存在和分解污染物质起到了关键的作用。

在利用沉水植物进行水质净化或进行退化水体生态修复时,一定要考虑各种生态因子对沉水植物修复的影响。通过在室内模拟实验和野外现状调查,测定在不同条件下各种生态因子的影响强度、阈值等信息,并综合分析这些生态因子,从中找出对沉水植物生存构成威胁的主导性限制因素。从而形成稳定可持续利用的生态系统。

## 参考文献

- [1] Ellen van Donk, Wouter J van de Bund. Impact of submerged macrophytes including charophytes on phyto- and zooplankton communities: allelopathy versus other mechanisms [J]. *Aquatic Botany*, 2002, 72: 261 - 274.
- [2] 吴建强,阮晓红,王雪. 人工湿地中水生植物的作用和选择 [J]. *水资源保护*, 2005, 21(1): 1 - 6.
- [3] 张鸿,陈光荣. 两种人工湿地中氮、磷净化率与细菌分布关系的初步研究 [J]. *华中师范大学学报*, 1999, 33(4): 575 - 578.
- [4] 王丽卿,李燕,张瑞雷. 6种沉水植物系统对淀山湖水质净化效果的研究 [J]. *环境科学学报* 2008, 27(3): 1134 - 1139.
- [5] 雷泽湘,谢贻发,徐德兰,等. 大型水生植物对富营养化湖水净化效果的试验研究 [J]. *安徽农业科学*, 2006, 34(3): 553 - 554.
- [6] 廖绅裕,陈桂珠. 模拟秋茄湿地系统中镍、铜的发布积累与迁移 [J]. *环境科学学报*, 1999, 19(5): 545 - 549.
- [7] 戴全裕. 水生高等植物对太湖重金属的监测及其评价 [J]. *环境科学学报*, 1983, 3(3): 213 - 223.
- [8] 郭长城,江亭桂,潘国权,等. 静态条件下水生植物对悬浮颗粒物沉积的影响 [J]. *人民长江*, 2007, 38(1): 122 - 124.
- [9] 江亭桂,吕锡武,王国祥,等. 沉水植物在静止水体中对悬浮固体的作用 [J]. *中国科技信息*, 2006, 20: 78 - 80.
- [10] Thaer L. K. Heavy metal in water, suspended particles, sediments, and aquatic plants of the upper region of Euphrates river, Iraq. *Environ. Sci - Health*, 1997, 32(10): 2497 - 2506.
- [11] 黄亮,李伟,吴莹,等. 长江中游若干湖泊中水生植物体内重金属分布. *环境科学研究* [J]. 2002(15): 1 - 4.
- [12] 周婕,曾诚. 水生植物对湖泊生态系统的影响 [J]. *人民长江*. 2008, 39(6): 88 - 91.
- [13] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理 [J]. *环境科学*, 1994, 16(3): 83 - 86.
- [14] 吴晓磊. 污染物质在人工湿地中的流向 [J]. *中国给水排水*, 1994, 10(1): 40 - 43.
- [15] 吴建强,黄沈发,丁玲. 水生植物水体修复机理及其影响因素 [J]. *水资源保护*. 2007, 23(27): 18 - 22.
- [16] 刘弋潞,何宗健. 水生植物净化富营养化水质的机理探讨和研究进展 [J]. *江西化工*, 2006, 3: 27 - 31.
- [17] 秦伯强. 湖泊生态恢复的基本原理与实现 [J]. *生态学报*, 2007, 27(11): 1818 - 4857.
- [18] Gao J, Luo Q, Li G, et al. Effect of Dissolved Oxygen, Temperature, Nitrogen and Phosphorus on Germination of Turion and Seedling Growth of *Potamogeton crispus* L. *Journal of Ecology*, 2005, 51(4): 511 - 515.
- [19] Beklioglu M, Moss B. Existence of a macrophyte - dominated clearwater state over a very wide range of nutrient concentrations in a small Shallow Lake, *Hydrobiologia*, 1996, 337: 93 - 106.
- [20] Qiao J R, Ren J C, Chen Y Q, et al. Study on the Removal Rate to TP in Lake Caohai by Common Submerged Macrophytes. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1996, 32(6): 785 - 788.
- [21] Song F, Chen Y, Qiao J R, et al. Study on the Removal Rate to Total Nitrogen in Caohai Lake ( Including Sediments) by Common Submerged Macrophytes. *Research of Environmental Sciences*, 1997, 10(4): 47 - 49.
- [22] Chamber P A, Kalf J. Light and nutrients in the control of aquatic plant community structure I. in situ experiments. *Journal of Ecology*, 1987, 75: 611 - 619.
- [23] Chamber P A. Light and nutrients in the control of aquatic plant community structure II. in situ observations. *Journal of Ecology*, 1987, 75: 621 - 628.
- [24] Mulligan H F, Baranowski A, Johnson R. Nitrogen and phosphorus fertilization of aquatic vascular plants and algae in replica-

- ted ponds I. Initial response to fertilization. *Hydrobiologia*, 1976, 48: 109 - 116.
- [25] Best E PH. Effects of nitrogen on the growth and nitrogenous compounds of *Ceratophyllum demersum*. *Aquat. Bot.* 1980, 8: 197 - 206.
- [26] Yan C Y, Zeng A Y, Jin X C, et al. Physiological effects of ammonia - nitrogen concentrations on *Hydrilla verticillata*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1050 - 1055.
- [27] 李宽意, 刘正文, 杨宏伟, 等. 螺类牧食与沉积物类型对苦草生长的影响. *生态学报*, 2007, 27(11): 4907 - 4912.
- [28] 雷泽湘, 谢贻发, 刘正文. 太湖梅梁湾不同沉积物对3种沉水植物生长的影响. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 40(2): 260 - 263
- [29] Thai K V, Wheeler G S, Center T D. Competition between *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria americana* as influenced by soil fertility. *Aquat Bot.* 1999, 62: 225 - 23
- [30] 陈开宁, 陈小峰, 陈伟民, 等. 不同基质对四种沉水植物生长的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1511 - 1516.
- [31] 王文林, 王国祥, 李强, 等. 水体浊度对菹草(*Potamogeton crispus*)幼苗生长发育的影响. *生态学报*, 2006, 26(11): 3586 - 3593.
- [32] 李强, 王国祥, 潘国权, 等. 水体浊度对菹草萌发及萌发苗光合荧光特性的影响. *生态学报*, 2006, 26(11): 3594 - 3601
- [33] 马婷, 李强, 王国祥, 等. 悬浮泥沙溶液对金鱼藻快速光响应曲线的影响. *武汉植物学研究* 2006, 24(6): 531 - 535
- [34] Xie Y F, Hu Y H, Liu Z W, et al. Effects of sediment resuspension on the growth of submerged plants. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(1): 18 - 23.
- [35] Chen H D. Studies on productivity of *Potamogeton Crispus* L. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1989, 13 (2): 152 - 158
- [36] Barko J W, Smart R M. Comparative influences of light and temperature on the growth and metabolism of selected submerged freshwater macrophytes. *Ecology Monograph*, 1981, 51: 219 - 235.
- [37] Phillops G L, et al. A mechanism to account for macrophyte decline in progressively eutrophicated waters [J]. *Aquatic Bot.* 1978, 4: 103 - 125

# 沉水植物生长对浮床旱伞草净化水质效果的响应

宋祥甫\*, 邹国燕, 付子轼, 潘琦, 刘福兴, 范洁群, 刘娅琴, 刘长娥(上海市农业科学院生态环境保护研究所, 上海, 201106)

**摘要:**本研究在一定体积的人工模拟池内, 设计了天然池塘水体和太湖贡湖底泥共存的富营养化水体。利用生态浮床对水体 N、P、COD<sub>Mn</sub> 和 BOD<sub>5</sub> 削减的基础上, 开展了沉水植被的恢复研究。通过考察沉水植物的生长指标与生态浮床净化水质效果的响应规律, 为污染水体的水质净化和沉水植被的恢复提供技术参数。研究结果显示, 本实验条件下, 生态浮床覆盖率为 20% 的浮床旱伞草处理的水体最有利于沉水植物的生长与繁殖。供试三种沉水植物中, 苦草与黑藻的成活率较马来眼子菜高, 生长时间长。黑藻各项生长指标均最高, 苦草次之, 马来眼子菜最低。

**关键词:**沉水植物, 生态浮床, 生长, 覆盖率

## 1 引言

沉水植物在水域生态系统中, 是保持系统良性循环、维持水体生态系统平衡的关键生态类群, 对水生生态系统的结构和功能起着重要的作用, 是健康湖泊生态系统的主要维持者<sup>[1-2]</sup>, 也是退化水生生态系统恢复的关键因子。近 20 年来, 随着水体富营养化的加剧, 水生植被特别是沉水植物的衰退和消失成为世界范围内的普遍现象。有研究认为沉水植物的生长受光照强度、营养盐含量、底质、悬浮物、水流、温度、重金属、pH 等因子的影响<sup>[3-8]</sup>。水体的富营养化致使沉水植物的生长环境恶化, 生长胁迫因子阈值超出其耐受限度, 逆境胁迫影响了沉水植物的正常生理活性, 使其生长、生存及繁殖不能顺利进行, 导致其逐渐死亡甚至消失, 沉水植物的逐步消亡打破了水生生态系统的原有生态平衡, 初级生产者种类数量下降, 食物链变短, 空间生态位减少, 生物多样性降低, 生态系统结构趋于简单, 生态功能失调, 系统严重退化, 导致湖泊水体自净能力下降, 进一步加剧了水体的污染程度。修复退化的水生态系统使其恢复健康状态是消除内源污染的根本, 进行沉水植物群落的恢复与重建, 是恢复健康水生态系统的重要内容。国内外许多学者<sup>[9-14]</sup>对沉水植物的恢复条件进行了研究, 然而却发现沉水植物难以形成稳定的种群或群落, 不良的环境条件限制了其生长与繁衍。营造一个良好的生长环境, 满足其生长繁衍条件是恢复沉水植被的关键。生态浮床技术近年来被广泛应用于富营养化水体的治理与退化水生生态系统的修复<sup>[15-20]</sup>, 生态浮床通过植物对水体中 N、P 等营养盐的吸收利用, 植物根系和浮床基质等对水体中悬

浮物的吸附作用, 微生物对有机污染物、营养物的进一步分解作用, 使污染的水环境得到改善。为了修复太湖退化的水生态系统, 使污染水体得到改善, 本研究利用与研究区水质污染相近的天然水体和研究区底泥, 在可控条件下模拟富营养化水体, 试图利用生态浮床的水质净化作用为沉水植物的恢复与生长创造一个良好的生境条件。通过分析沉水植物的生长对生态浮床净化水环境效应的响应, 寻找一个适宜沉水植物正常生长的浮床覆盖度前处理和合适的沉水植物种类, 为研究区及相似污染水域的生态恢复与健康系统的构建提供技术支持与理论依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 供试材料

#### 2.1.1 水体来源

供试用水取自于上海市青浦区徐泾鱼塘, 水体各主要水质指标如表 1 所示, 总氮和高锰酸盐指数超地表水 V 类水标准 3.1 倍和 1.5 倍, 其余水质指标为 IV-V 类水标准。供试用水与太湖贡湖水水质比较接近。

#### 2.1.2 植物材料

供试浮床植物为莎草科多年生草本植物旱伞草 (*Cyperus alternifolius*)。供试沉水植物为水鳖科的苦草 (*Vallisneria asiatica*)、黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 和眼子菜科的马来眼子菜 (*Potamogeton malayanus*)。

**基金项目:**国家科技支撑项目 2007BAC26B02; 国家水体污染控制与治理科技重大专项 2009ZX07101-009

\* 通讯作者: E-mail: songxfu@263.net

表1 强化净化实验始期供试水体主要水质指标

水质指标	含量(mg/L)
TN	6.22
TP	0.06
COD <sub>Mn</sub>	23.2
BOD <sub>5</sub>	9.80
DO	2.80
PH	8.10

### 2.1.3 植物的前培育

浮床植物于11月中旬,在塑料薄膜大棚内育苗,次年4月上旬,将植物幼苗采用浮床无土种植方法移栽于浮床种植穴(孔),种植穴直径13cm,行株距为50cm×30cm(折合6.67穴/m<sup>2</sup>),每穴1丛,置于河道水面进行前培育。沉水植物于次年5月上旬在塑料薄膜大棚内育苗。

### 2.1.4 底泥来源

实验用底泥取自贡湖。底泥的N、P和有有机质含量(本底值)分别为0.148%、0.095%和1.94%。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 实验设计

为了模拟太湖现场研究的实施步骤,本实验分生态浮床对水质的强化净化阶段和沉水植物重建两个阶段,并将这两个阶段的实验分别安排在与现场研究植物移栽相同的季节,分两年进行。第一年春-秋季是生态浮床对供试水体的强化净化阶段,第二年春-秋季开展沉水植被重建研究。

### 2.2.2 水质强化净化阶段

实验在上海市农业科学院实验场塑料薄膜大棚内的水泥人工模拟池中进行,模拟池规格为150cm×100cm×100cm,总容积为1.5m<sup>3</sup>。实验设置4种不同的生态浮床水面覆盖率,目的是研究不同面积的植物处理对水质的净化效果。为了保证实验处理间的可比性,浮床旱伞草挑选了生长指标基本一致的株作为实验材料,实验始期旱伞草平均丛高为64.6cm,浮床植物生物量平均干重为381g/m<sup>2</sup>,分别按空白对照(无植物)10%(1丛植物)、20%(2丛植物)和30%覆盖率(3丛植物)处理,每个处理均设3次重复,共计12个模拟池处理。实验开始前1天,用水车将供试用水(鱼塘水)运至塑料大棚内的大水泥池中,用潜水泵充分混匀后,分别注入指定的实验模拟池内,实际水深90cm,每池实验用水量为1.35m<sup>3</sup>。为了模拟湖泊近岸底泥情况,便于开展第二阶段的沉水植被恢复

工作。实验用水注入完毕后,在每个模拟池底部,用绳子均匀放置了6个装有15cm厚底泥,规格为30cm×30cm×20cm的塑料箱。静置1d后,将河道内完成前培育的供试浮床植物,裁制成各处理要求尺寸,连同浮床一起置于模拟池供试水面。实验始于7月初,结束于10月底。每隔15d调查1次各处理的TN、TP、COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub>、DO与pH值等水质指标。强化净化实验结束后,将生态浮床搬离各处理池。

### 2.2.3 沉水植物重建阶段

第二年6月初,将强化净化处理时置于各处理池内的6个带有底泥的塑料箱提至水面,采用扦插法,将前培育1个月的马来眼子菜、苦草和黑藻3种沉水植物,分别以1个品种2箱,每箱2丛移栽于塑料箱内,再度放入相应的处理池中。为了使移栽初期3个品种的植物在重复处理中保持相对一致的生物量,移栽时苦草为3株/丛,马来眼子菜和黑藻均为6株/丛。将沉水植物移栽并再次放入相应的池底静置1d后,测试了各处理的水质。虽然第一阶段的实验结束于前1年的10月底,池水在8个月的静置过程中,底泥释放、微生物活动以及上述沉水植被移栽过程对底泥扰动等原因,水质会产生一定的变化,但测试结果表明,各处理水质指标与强化净化实验结束时(表3)比较无显著差异。

沉水植被重建阶段的实验始于6月初,结束于10月初。实验期间,每隔30d调查1次不同处理池中相应的沉水植物生长状况。调查的主要植物指标有株高、分枝数、根长、根数以及单丛生物量(湿重与干重)。

两个阶段实验期间,均用自来水补充蒸发、蒸腾消耗的水分,使每个处理池始终保持相同的水量,并记录补充的水量。

## 2.3 数据处理与统计分析

采用Excel 2003制图,利用灰色关联与SAS统计软件中的One-way ANOVA进行相关的数据分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 生态浮床对水质的净化效果

生态浮床放置在供试水体一段时间(105d)后,经过浮床植物与水体中营养盐之间的相互响应,浮床植物的生物量与供试水体的水质均发生了改变,浮床植物生物量与N、P积累大幅度增加,水体污染指标急剧降低(表2、表3)。

生态浮床利用植物的营养吸收机制,通过植物对 N、P 的吸收利用,降低了水体中的营养盐含量,使污染水体得到了净化。生态浮床对污染水体的净化效果取决于实验期间植物对 N、P 的吸收量,而吸收量则主要取决于植物干物质积累量和植物体内 N、P 含量。

表2 实验终期各处理区植物体的 N、P 净积累量

覆盖率 (%)	总干物质产量 (g/区)	植株体内元素含量 (%)		N 积累量 (g/区)			P 积累量 (g/区)		
		N	P	总积累量	基础量	净积累量	总积累量	基础量	净积累量
10	627	0.85	0.21	5.4	2.3	3.1	1.3	0.8	0.6
20	1135	0.66	0.19	7.5	4.5	3.0	2.2	1.5	0.6
30	1594	0.63	0.19	10.1	6.8	3.3	3.1	2.3	0.8
平均	1119	0.72	0.20	7.6	4.5	3.1	2.2	1.5	0.7

表3 强化净化实验结束时不同覆盖率生态浮床处理的主要水质指标

覆盖率 (%)	TN		TP		COD <sub>Mn</sub>		BOD <sub>5</sub>		DO	pH 值
	含量 (mg/L)	去除率 (%)	含量 (mg/L)	去除率 (%)	含量 (mg/L)	去除率 (%)	含量 (mg/L)	去除率 (%)	含量 (mg/L)	
0	5.96	13.9	0.05	31	20.8	12.5	7.29	26.4	5.2	8.1
10	1.84	74.5	0	100	7.3	69.5	3.47	64.1	3.9	7.5
20	1.31	82.2	0	100	5.3	77.8	0.98	90.2	3.6	7.4
30	0.57	92.4	0	100	2.5	89.5	0.71	92.8	3.5	7.3

研究结果显示覆盖率高的处理区植物的总干物质产量较高,植物中营养盐的积累量高,但由于高覆盖率处理植物中 N、P 浓度较低,因此各覆盖率处理之间植物体的 N、P 净积累量差异不显著(表2)。

生态浮床的强化净化实验结束后,各浮床处理水体 TN、TP、COD<sub>Mn</sub> 和 BOD<sub>5</sub> 浓度均较对照显著降低(表3)。各生态浮床处理从实验前 N、P 超出地表水 V 类标准若干倍,净化至 II 类 - V 类水标准。30% 覆盖率处理的水质甚至接近地表水 II 类标准。此外,各处理的 DO 均有所提高,pH 值由实验前的碱性降至中性。通过生态浮床对污染水体的强化净化作用,污染水环境得到大为改观,为后续沉水

植被的恢复创造了良好的水体理化环境。

### 3.2 沉水植物生长对强化净化水体的响应

#### 3.2.1 成活率

不同覆盖率生态浮床处理对水体的净化效果存在差异,因此,沉水植物的成活率对不同处理水体的响应也不同。实验初期,3 种植物在不同覆盖率处理中的成活率无差异。随着实验时间的延长,不同处理组间植物成活率的差异逐渐增大,除苦草外,其他两种植物均显示生态浮床处理水体植株成活率显著高于对照处理,以 20% 覆盖率表现突出(图1)。其中,苦草与黑藻的成活率较高,各时期的生长比较稳定,马来眼子菜不易存活,对水环境的要求较高。



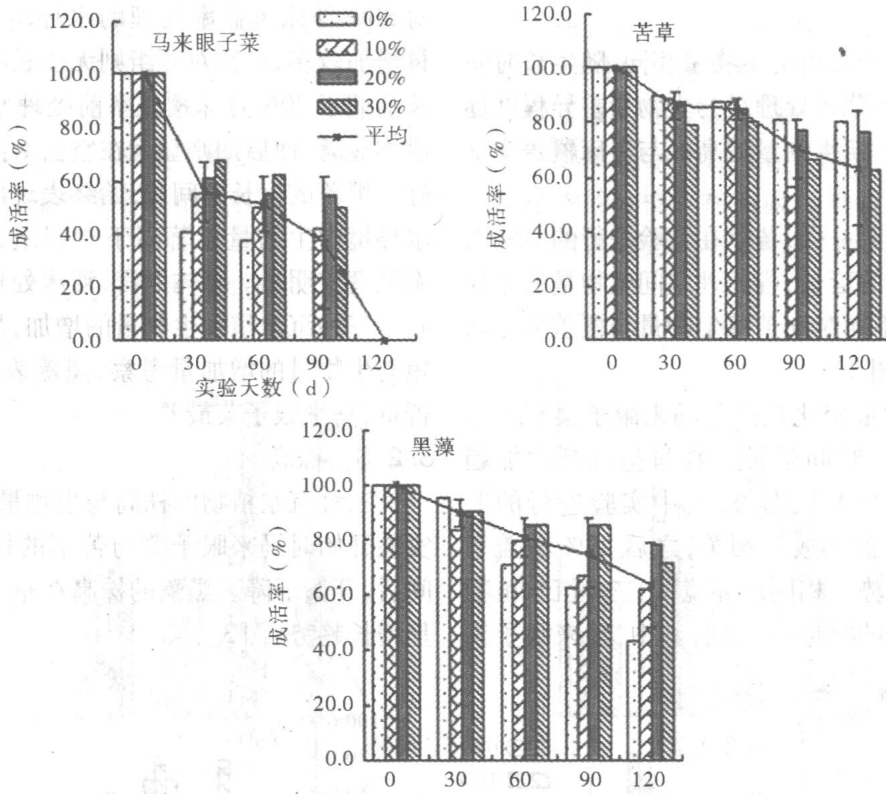


图1 沉水植物成活率对不同处理水环境的响应

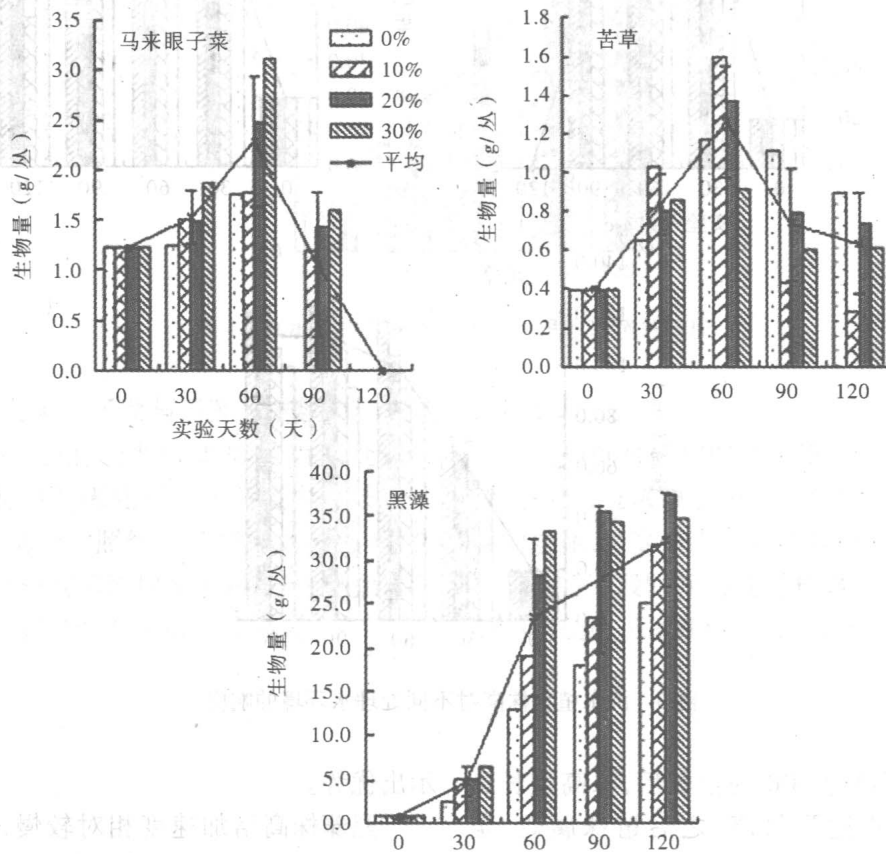


图2 沉水植物生物量对不同处理水环境的响应