



全国中文核心期刊
中国科技核心期刊

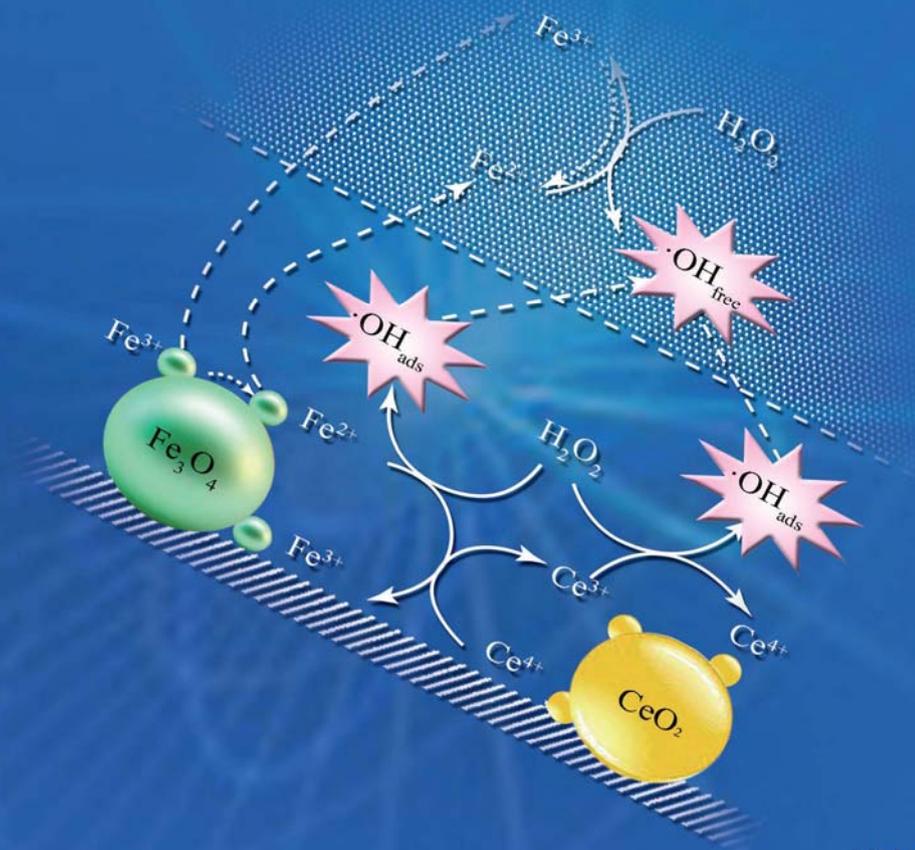
环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering

封面文章

磁性 Fe_3O_4 纳米颗粒的制备及在水处理中的应用

展思辉, 张宇, 朱丹丹, 等, 2016, 10(1): 1-11



中国科学院
生态环境研究中心

主办



科学出版社

出版

Vol. 10 No. 1

2016.1

目次

综 述

磁性 Fe₃O₄ 纳米颗粒的制备及在水处理中的应用 展思辉 张宇 朱丹丹 邱明英 于雯超 史强 (1)

水 污 染 防 治

人工湿地对水产养殖废水典型污染物的去除 黄翔峰 王坤 陈国鑫 陆丽君 刘佳 (12)

选矿废水中黄药的生化处理 夏丽娟 胡学伟 张雅琳 靳松望 王亚冰 (21)

增强型中空纤维膜生物反应器处理污水 赵微 肖长发 权全 胡晓宇 环国兰 (27)

TEMPO 氧化微晶纤维素和马来酸酐接枝微晶纤维素的制备及对 Cu²⁺ 的吸附 杨阳 王一宁 潘远凤 肖惠宁 (33)

利用活性氧分子消除污水中的 COD 白敏蔚 毛首蕾 李超群 周建纲 (38)

污水颗粒尺寸分布对深度过滤中雌激素去除的影响 胡碧波 阳春 刘达 (43)

于桥水库溶解性有机碳分布特征及三卤甲烷的生成势 牛志广 魏晓婷 张颖 (48)

不同 pH 下纳米级天然黄铁矿对水中 ReO₄⁻ 的去除规律 丁峰 钱天伟 丁庆伟 赵东叶 崔晋艳 王莉霄 (55)

聚酰胺小球负载 *Comamonas* sp. (bdq06) 生物降解水中的喹啉 蔺烧 陈瑜 郭树君 邵德武 耿直 霍明昕 刘志强 朱遂一 (60)

草酸改性柚子皮对废水中镉离子的吸附性能 毛艳丽 康海彦 吴俊峰 (65)

合肥城郊典型排水沟渠沉积物磷形态及其释放风险 唐文坤 李如忠 钱靖 金菊良 常笑 (73)

新型缓释碳源的制备及其性能 王润众 郝瑞霞 赵文莉 (81)

乳液电纺纤维膜固定化漆酶及其对水中酚类污染物的降解 袁钰 代云容 宋永会 于彩虹 (88)

螺蚌和沉水植物搭配对微污染水体的净化作用 李雪娟 和树庄 常学秀 谭福广 申意 陆福田 侯文通 (95)

HRT 和 SRT 对 AO 工艺去除四环素及耐药菌的影响 郑宇 黄满红 陈亮 徐奇 (103)

对乙酰氨基苯磺酰氯生产废水的 UASB 处理及硫酸盐的影响 李伟成 张红 戚伟康 牛启桂 刘宇宇 李玉友 高迎新 (110)

炼化污水的厌氧生物预处理技术 王宇 许双双 阎光绪 王庆宏 李敏 马文峰 马静园 郭绍辉 (115)

多胺改性 PGMA-DAAM 树脂的合成及对 Pb²⁺ 的吸附性能 杨迎霞 宋明超 陶子元 刘春萍 (121)

光催化剂磷酸钾的制备及结构表征 刘天成 黄家卫 王天丽 唐光阳 贾丽娟 王博涛 王红斌 (127)

重庆市加油站周边浅层地下水中石油烃污染调查与特征分析 赵丽 张韵 郭劲松 张丹 邓春光 (131)

太湖地区典型降雨水稻田径流污染物输出特点及相关性分析 陈育超 李阳 于海明 乔斌 孙井梅 (137)

铁屑耦合生物麦饭石的 PRB 系统修复含铬酸根与硝酸根地下水 狄军贞 朱志涛 戴男男 江富 (145)

山核桃加工废水的成分测定与分析 张贝贝 刘文洪 李俊峰 叶志青 (150)

煤基活性炭的改性及其对含铜废水的吸附性能 吕游 刘树根 谢容生 宁平 谷俊杰 (157)

以养殖固体废物发酵产物为碳源的 SND 系统的脱氮除磷效果 成小婷 罗国芝 李丽 谭洪新 (163)

石墨烯/TiO₂ 复合物的制备及其光催化性能 张宏忠 秦小青 王明花 (169)

剩余污泥对活性黑和酸性大红混合染料的吸附 王春英 黄平清 黄晓霞 刘茹 (175)

狭叶香蒲活性炭对 Cd²⁺ 与 Pb²⁺ 的吸附及机理分析 舒艳 李科林 宋金凤 李冰 汤春芳 (181)

催化湿式氧化法处理垃圾渗滤液 蔡光明 秦侠 张丽 崔红蕊 (189)

印染废水中氮硫形态转化和去除效率 王学华 李蕾 刁新星 王浩 (194)

反硝化生物滤池用于再生水脱氮效能及动力学研究 高建锋 杨碧印 赵建树 张金松 (199)

TiO₂ 光催化耦合 SO₄²⁻ 体系对硝基苯酚的降解性能及动力学 唐海 沙俊鹏 颜酉斌 蔡昌凤 王军刚 (205)

铁碳微电解/H₂O₂ 耦合类 Fenton 法预处理高浓度焦化废水 殷旭东 李德豪 毛玉凤 朱越平 刘正辉 (212)

生化-Fenton 氧化联合工艺处理石化净化水的回用 王泳超 李玉平 陈娟 (217)

模拟优化模型在地下水监测布井中的应用 熊锋 苏婧 翟秋敏 孙源媛 吴超 姜永海 席北斗 (223)

活性炭负载 CuO 催化过硫酸盐去除活性艳红 X-3B 染料 王宇轩 王应军 方明珠 (230)

生物接触氧化法应急处理原水突发性藻类污染 许骆 罗建中 邓俊强 刘敏强 (237)

次氯酸钠降解水中萘普生的效果 纪夏玲 吕文英 李富华 陈平 李若白 范斯娜 姚琨 张祥丹 刘国光 (243)

大 气 污 染 防 治

活性炭纤维负载功能化离子液体的脱硫性能 王建英 张丽喆 穆惠英 陈莹 胡永琪 (248)

滤袋式膜生物反应器净化二甲苯 徐孟孟 陈效 蒋轶锋 吴成强 (257)

电极配置对多针-板脉冲等离子体反应器放电特性的影响 董冰岩 周海金 施志勇 黄芸伟 丁奇岷 王晖 (262)

油茶果壳炭对油烟的吸附性能	刘 超 廖 雷 覃爱苗 周江喜 彭 娟(267)
防止中小型锅炉脱硫除尘一体化系统中引风机积灰振动的研究	吕 太 贺培叶(272)
程序升温脱附法测定活性炭上酯类有机物的脱附活化能	任爱玲 孟少左 田森 张丁超 韩梦非(277)
大流量低浓度 VOCs 气体二次吸附浓缩净化技术开发	苟志萌 李照海 何 娇 羌 宁 覃兰雪 徐素玮 曹 熠(283)
挥发性有机物生物增溶性能及效果	王国惠 许亚楠 李慧敏(289)
制备条件对锰氧化物 SCR 脱硝性能的影响	刘育松 高凤雨 唐晓龙 易红宏 赵顺征 曹雨萌(295)

固 体 废 物 处 置

水泥回转窑共处置含砷污泥	熊正为 朱 雷 杨博豪 魏清伟 陆 森(301)
进出料频率对牛粪两相厌氧发酵特性的影响	王光远 李文哲 李 雷 蔡康妮 王忠江(306)
城市污泥过热蒸汽薄层干燥初始段凝结特性	张绪坤 孙瑞晨 王学成 温祥东 吴 起 邢 普(311)
家电报废量预测模型与安徽省实例分析	刘志峰 张雅堃 黄海涛 薛亚琼 王 玲(317)
药渣与煤共热解动力学模型及逸出气红外特性分析	刘宝宣 蒋旭光 吕国钧 王 飞 池 涌 严建华(323)
温度对热水解预处理高含固污泥特性的影响	程 瑶 韩 芸 卓 杨 代 璐 彭党聪(330)
疏浚底泥固化改性资源化利用技术	王学涛 张兴宇 徐 斌 武博然 柴晓利(335)
利用旋转炉热解城市污泥的产物特性	王学涛 张兴宇 徐 斌 兰维娟(343)
次氯酸钠氧化废轮胎胶粉对改性沥青性能的影响	于 凯 张 琛 王 欢 张 楠 陆宇鹏 李彤彤 李沁宇 刘双喜(350)
聚乙烯醇/超细羽绒粒子共混膜的制备及其染料吸附动力学	陈凤翔 谢文雅 董兵海 王世敏 赵 丽 许祖勋 万 丽(355)
以粉煤灰为原料制备高纯度 NaP 型分子筛	周慧云 徐婷婷 陈彦广 解聪浩 宋 华(360)
核桃壳骨架构建剂对污泥脱水性能的影响	董凌霄 丁绍兰 谢林花 蔡 丽 杨慧佳(365)
巢湖蓝藻酸提取液提高玉米秸秆的酶解效率	吴玉杰 王 进 崔康平 洪天求 岳正波(370)
稻壳基高比表面积介孔活性炭的制备与表征	薛广钊 侯贵华 乔仁静 董鹏玉 张勤芳(375)
改性油菜秸秆对 Co(II) 的吸附	汪 洋 吴 纛(379)
化工污泥基轻质填料的制备及其应用	俞敏洁 胡 俊 孙 婧 李 溪 徐炎华(385)
不同碱剂对污泥与餐厨垃圾联合厌氧发酵产氢余物产甲烷的影响	郑育毅 林 鸿 林志龙 罗鸿信 刘常青(393)
废弃 LCD 面板金属铜的超声协同浸出	庄绪宁 李英顺 杨义晨 胡冰倩 赵颖璠(399)
脉冲电场在污泥处理中的应用	姜俊杰 梁美生 李 伟 裴旭倩(405)

土 壤 污 染 防 治

外源铅在不同类型土壤的形态转化	宋 波 曾炜铨(410)
荧光假单胞菌产铁载体对油菜吸收砂基和水基中镉的影响	晋银佳 刘 文 朱 跃 王丰吉(415)
再生水灌溉区土壤对头孢噻肟的吸附特征	虞敏达 张 媛 张 慧 檀文炳 高如泰 席北斗 杨津津(421)
化学氧化法治理焦化厂 PAHs 污染土壤	杨 勇 张蒋维 陈 恺 李忠博 李洪旺 牛 静 王瑜瑜(427)
循环流化床燃煤固硫灰改良云南红粘土	李勇辉 王群英 邓庆德 景文斌 张石华(432)

生 态 修 复 工 程

不同沉水植物组配对北大港水库水体净化效果的影响	常素云 吴 涛 赵静静(439)
生态修复工程对城市内河水体细菌多样性的影响	唐方园 张秋芳 周阳靖 陈力行 徐继荣 程军蕊(445)
组合型生态浮床处理农家乐污水	王 郑 崔康平 许为义 孟 蓉 孙 鹏 陈鸿汉(455)
微宇宙法研究环境因子对南方典型梯级水库群藻类生长的影响	周 利 朱嘉成 朱 佳 高静思(461)

环 境 生 物 技 术

水葫芦多环芳烃含量及其与脂肪含量的关系	杨海燕 郭金鹏 卢少勇 曲洁婷 贾九敏(467)
金鱼藻对不同扰动方式下悬浮物的生理响应	张翠英 王丽萍 万 蕾 张后虎(473)
以不同底物和苯胺为燃料的微生物燃料电池的产电特性	佟海龙 黄力群 何 燕 刘解答 刘承鸿 于 荆(480)
含固率和电极间距对牛粪发酵产电性能的影响	王成显 张艺臻 吴淑娜 张小梅 沈建国 丁仕林 辛言君(485)

工 程 实 例

城镇污水处理厂的综合绩效评价	魏 亮 陈 滢 刘 敏 翟宇超(490)
膜工艺在电镀废水处理工程中的应用	夏仙兵 蔡邦肖 缪 佳 林建平 倪 政(495)

环 境 监 测 与 评 价

SPE-HPLC 法检测环境水样中的痕量三氯卡班	朱开杭 曾庆玲 沈春花 周真明 李 飞(503)
--------------------------------	--------------------------

螺蚌和沉水植物搭配对微污染水体的净化作用

李雪娟¹ 和树庄² 常学秀² 谭福广² 申意² 陆福田¹ 侯文通¹

(1. 云南林业职业技术学院, 昆明 650224; 2. 云南大学生态学与环境学院, 昆明 650091)

摘要 通过开展单植不同种类沉水植物及“不同种类的沉水植物+螺蚌”组合搭配对微污染水体的净化能力对比研究, 寻求系统稳定性最好、水质净化最佳的组合。2013年8月至2014年3月间的水箱小试研究结果表明, “铜锈环棱螺+椭圆背角无齿蚌+轮叶黑藻+篦齿眼子菜”组合的水质净化作用最佳, 对COD、TN、TP去除率分别为58.79%、64.30%和88.57%, 对浮游生物的抑制效果最明显, 水箱里基本无水绵及浮萍生长, 轮叶黑藻长势较篦齿眼子菜好、生长逐渐占优势。2014年5月—8月的中试研究进一步验证水箱小试的结论, COD、TN和TP的平均去除率分别为57.93%、60.12%和49.28%, 轮叶黑藻长势更好。

关键词 铜锈环棱螺 椭圆背角无齿蚌 沉水植物 微污染水体 净化效果

中图分类号 X522 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2016)01-0095-08

Role of snails, mussels and submerged plants in purifying micro-polluted water

Li Xuejuan¹ He Shuzhuang² Chang Xuexiu² Tang Fuguang² Sheng Yi² Lu Futian¹ Hou Wentong¹

(1. Yunnan Forestry Technological College, Kunming 650224, China;

2. School of Ecology and Environmental, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract In this study, by using submerged plants and “different types of submerged plants + snails + mussels” combination, we compared their purification effect on the micro-polluted water. Different purification systems were tested to determine which combination is best. From August 2013 to March 2014, test results showed that a combination of “*Bellamya aeruginosa* + *Anodontawoodianaelliptica* + *Hydrilla verticillata* + *Potamogeton pectinatus*.” had the best removal rates of 58.79% of COD, 64.30% of TP, 88.57% of TP. This combination suppressed weed growth as well, limiting spirogyra and duckweed in the tank. *Hydrilla verticillata* grew better than *Potamogeton pectinatus*, and its growth was gradually dominant. A pilot study from May to August in 2014 further validated the conclusions of the small test tanks with average removal rates of 57.93% of COD, 60.12% of TN, 49.28% of TP, *Hydrilla verticillata* also grew better than *Potamogeton pectinatus* in field plots.

Key words *Bellamya aeruginosa*; *Anodontawoodianaelliptica*; submerged plants; micro-polluted water; purification effect

生物修复是指利用特定的生物吸收、转化、清除或降解环境污染物, 具有环境友好、生态节能的优点, 是最具发展前景的水体修复技术^[1]。

在我国微污染的水体, 如城市河道治理中, 往往只重视清淤、驳岸、绿化和截污等面上工程, 而忽视水体的生物修复, 以及生态体系的建立^[2], 所以尽管投入大量资金进行截污、建设城市污水处理厂, 但是河道水体生态状况仍不够理想, 难以满足水体环境保护的要求。针对这些情况, 如何改善微污染水环境, 促进水生生态系统恢复是类似城市共同面临的问题^[3-7]。

底栖动物作为水体生态系统的一个重要组成部分, 在水生生态系统物质循环中处于十分重要的地位, 它们种类多、分布广、食性广, 对污染水体具有明显的净化效应。底栖生物能摄取水域环境中的营养物质, 从而能有效降低水体中富营养物质的含量, 能明显改善水质, 同时水体发生的变化直接影响它们

基金项目: 国家“水体污染控制与治理”科技重大专项(2012ZX07102-003)

收稿日期: 2014-09-28; **修订日期:** 2014-12-29

作者简介: 李雪娟(1981—), 女, 理学硕士, 讲师, 主要从事水污染的生态修复研究工作。Email: 522959931@qq.com

的生长、繁殖和存活,是理想的天然监测者,对其在理论和应用上的研究都有着重要的意义^[2]。目前国内外已较多采用底栖软体动物进行生物监测,评价水污染状况,并取得了一定的效果^[8-13]。研究证实,底栖软体动物对污染水体中有机碎屑、N、P等具有较好的净化效果,如三角帆蚌、椭圆背角无齿蚌、铜锈环棱螺等^[14-20],蚌类还能通过过滤大量水体摄取浮游植物,在一定程度上能有效控制浮游植物过量生长,达到控制水华、改善水质的目的^[21-23],通过增加螺、河蚌放养量,能够完善食物链(网)、恢复水生生态系统、增强系统的稳定性,同时具有净化水质的作用,实现了水环境污染的防治结合,双管齐下。

在富营养湖泊的生态恢复与治理过程中,通过引进大型软体动物种群来延缓富营养化进程、促进湖泊生态恢复是较为常见的生态操纵措施之一^[24]。然而,一些大型软体动物的生长和繁殖又与水生植物的恢复情况密切相关,水生植物可以显著提高富营养水体的水质,对有毒的有机污染也有明显的净化作用,而沉水植物作为水体中的初级生产者,由于自身的新陈代谢作用,通过根系和植物体分别吸收底质和水体中的氮、磷,比浮水植物具有更强的富集氮、磷的能力,同时能够增加空间生态位,改善水体的光照和溶解氧条件,为微生物提供生存条件,部分植物还有克藻效应^[25-27],恢复以沉水植物为主的水生植被是合理有效的水质净化和生态系统恢复的重要措施^[28,29]。

目前,关于利用单要素沉水植物或螺类、蚌类对水体N、P的影响已有较多研究,而利用底栖动物和沉水植物结合的研究甚少^[30,31],其复合系统对水体的影响理论上不同于单要素对水体影响的代数和,故本研究通过模拟自然环境下微污染静水水体,以本地常见的沉水植物(轮叶黑藻、穗状狐尾藻、篦齿眼子菜、菹草、海菜花)和铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌以为实验材料,比较不同品种的沉水植物和螺、蚌的组合对水质的净化效果,筛选出处理效果最佳的组合,为科学利用沉水植物和底栖动物进行水体生态修复提供参考,也为探索普适性的微污染水体的生态防治措施提供理论依据。

1 实验部分

1.1 小试实验材料

1.1.1 实验装置

实验采用半透明pp板制作水箱作为反应装置

21套(分为7组),规格为长120 cm、宽100 cm、高100 cm,有效容积为1 m³。螺、蚌自由放养在水箱中、沉水植物均匀斑块种植。

1.1.2 螺、蚌

选择滇池流域常见螺蚌种类:铜锈环棱螺 *Belamya aeruginosa*、椭圆背角无齿蚌 *Anodontawoodianaelliptica*,铜锈环棱螺重量约为2~4 g/只,椭圆背角无齿蚌重量约为500 g/只,螺蚌在放入水箱前先放入实验用水中驯化,逐只挑选健康的螺蚌个体,再进行静态实验。

1.1.3 沉水植物

根据对滇池流域沉水植物的物种调查结果^[32],选取4种常见的沉水植物——轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*),篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)、菹草(*Potamogeton crispus*)和1种恢复植物——海菜花(*Ottelia acuminata*)作为本研究的实验对象。

1.2 小试实验条件

静态实验用水来自云南大学呈贡校区中水处理站出水(难以保证达到一级A标排放标准,主要作为校园绿化回用水),各项指标的初始值分别是:pH为8.23,COD浓度为95.06 mg/L,TN浓度为6.89 mg/L,TP浓度为1.05 mg/L;底泥采用呈贡校区校园土与校园污水处理厂底泥混合样品(50%+50%)。

1.3 小试实验方法

1.3.1 群落配置

本实验设计单植不同种类沉水植物、“不同种类沉水植物+螺蚌”组合进行净化效果的比较,每个组合设置3个平行重复水箱,共21个水箱,具体内容见表1。

1.3.2 监测项目及频率

从植物定植、底栖动物放养成功之日起,每隔15 d采集水体,测定水质指标(TN、TP和COD),并定期测定浮游植物的叶绿素浓度变化,各项污染物指标均采用国家标准方法测定^[33]。

1.3.3 数据统计分析

每个指标均测定3个平行样,运用spss17.0软件对各项指标的平行样、7种群落配置组合(见表1)的平行处理样数据进行均值计算,并在此基础上对不同组合间的均值数据进行多重比较,判断不同群落配置对各项指标的影响差异是否显著。

表 1 群落配置方案
Table 1 Community collocation scheme

组合	配置方案	沉水植物种植密度	螺蚌放养密度
1	篦齿眼子菜 + 轮叶黑藻(3 个平行重复)	均匀斑块种植,10 cm × 10 cm, 每丛 2 ~ 3 株,株高 15 ~ 20 cm	不投放螺蚌
2	穗状狐尾藻 + 菹草(3 个平行重复)		
3	海菜花单优群落(3 个平行重复)		
4	螺 + 蚌 + 篦齿眼子菜 + 轮叶黑藻(3 个平行重复)	均匀斑块种植,10 cm × 10 cm, 每丛 2 ~ 3 株,株高 15 ~ 20 cm	参考笔者前期的研究结果 ^[2] , 椭圆背角无齿蚌 2 000 g/m ³ , 铜锈环棱螺 400 g/m ³
5	螺 + 蚌 + 穗状狐尾藻 + 菹草(3 个平行重复)		
6	螺 + 蚌 + 海菜花(3 个平行重复)		
7	对照(泥 + 水)(3 个平行重复)	不种植沉水植物、不投放动物	

1.4 中试实验材料

1.4.1 实验现场和装置

中试地点选择在昆明市嵩明县滇源镇滇源二小附近的项目实验基地,现场开挖水塘(长 10 m、宽 5 m,平均水深 1.0 ~ 1.2 m),容积约 50 m³,容积比小试水箱扩大 50 倍,于水塘岸边间隔 5 m 设置 3 个采样点。

1.4.2 螺蚌、沉水植物

根据小试初步研究结果,“螺 + 蚌 + 轮叶黑藻 + 篦齿眼子菜”组合的水质净化效果较好,中试开展该组合对水质净化效果的验证实验,故沉水植物选择篦齿眼子菜、轮叶黑藻,底栖动物选择铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌。

1.5 中试实验条件

处理目标为昆明市嵩明县滇源镇滇源二小实验基地的农田地表径流,底泥采用中试现场附近的鱼塘底泥与红土混合(1:1)。

1.6 中试实验方法

1.6.1 群落配置

水塘中螺蚌和沉水植物均采用自由放养状态,考虑到中试近自然状态,螺蚌放养密度比小试减半,即螺蚌混养密度 1 200 g/m²,其中铜锈环棱螺的放养密度在 200 g/m²,椭圆背角无齿蚌为 1 000 g/m²;两种沉水植物的种植密度比小试扩大 5 倍,即 50 × 50 cm 均匀斑块化种植、每丛 2 ~ 3 株、株高约为 40 ~ 50 cm。

1.6.2 监测项目及频率

参考小试的实验方法,从植物定植、底栖动物放养成功之日起,每隔 7 d 采集水体,测定指标有 COD、TN、TP 和透明度,各项污染物指标均采用国家标准方法测定^[33],每个采样点采集 1 个水样、每个指标平行测定 3 次,进一步验证小试的研究结论。

2 结果和讨论

2.1 小试的水质净化效果比较

2.1.1 COD 的净化效果比较

由图 1 可知,第 1 ~ 6 组 COD 的含量均比 7 组(对照)低,说明铜锈环棱螺、椭圆背角无齿蚌、沉水植物间的不同组合对 COD 均有去除效果,其中第 4 组“螺 + 蚌 + 轮叶黑藻 + 篦齿眼子菜”组合的去除率最高,为 58.79%;对照组的去除率最低,为 36.05%。

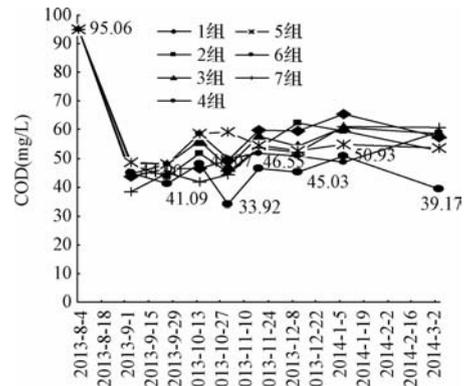


图 1 COD 的浓度比较

Fig. 1 Comparison of concentrations of COD

运用 SPSS17.0 对不同组合的 COD 的浓度进行单因素方差分析(单因素 ANOVA)可知:第 4 处理组(螺 + 蚌 + 轮叶黑藻 + 篦齿眼子菜)的 COD 平均浓度最低,与其他处理组差异均显著($P < 0.05$),说明其对 COD 的去除效果较好。

2.1.2 TN 的净化效果分析

由图 2 可知:第 1 组“轮叶黑藻 + 篦齿眼子菜”的组合对 TN 去除率最高,为 70.39%;其次是第 4 组“螺 + 蚌 + 轮叶黑藻 + 篦齿眼子菜”组合,去除率为 64.3%,轮叶黑藻组合的净化效果好也验证了已有的研究结果,轮叶黑藻对 TN 的去除效果优于苦

草、微齿眼子菜、菹草,对水中总氮去除率的大小顺序是轮叶黑藻 > 苦草 > 微齿眼子菜 > 菹草^[26]。第7组对照的TN去除率为37.74%,其净化效果比第3组“海菜花”、第6组“螺+蚌+海菜花”组合对TN去除还要好,一方面是由于海菜花对生长环境的水质要求较高,并且有一定的水质净化能力,其在20世纪80年代以前是滇池常见的沉水植物,但随着滇池水质的恶化,数量急剧减少,20世纪80年代以后便从湖中消失,故本次实验也想尝试海菜花的引种恢复,但在定植初期就出现大批死亡现象,这可能和实验水体的污染负荷高有关,后续虽进行了补种,但随着实验的推进仍出现死亡现象,现场有部分水箱基本看不到正常生长的植株,而且水体发绿浑浊;另一方面是随着实验的开展,各个组合都不同程度地长出水绵,特别是第7组对照的3个水箱长出大量水绵。有研究表明大型丝状绿藻,如水绵、刚毛藻、水网藻等能在污水中正常生长代谢,并对水体中的N、P养分具有较高的转化率和去除率^[34,35],故对照组有一定的净化效果,但水绵的大量存在会对沉水植物的产生化感作用、物理缠绕、营养竞争和遮光等影响沉水植物的正常生长^[36]。

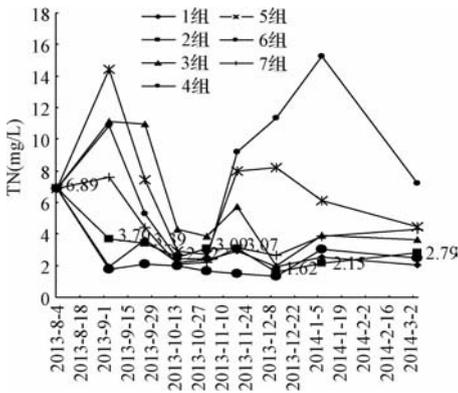


图2 TN的浓度比较

Fig. 2 Comparison of concentrations of TN

运用SPSS17.0对不同组合的TN的浓度进行单因素方差分析(单因素ANOVA)可知:第4处理组(螺+蚌+轮叶黑藻+篔齿眼子菜)的TN平均浓度最低,与第1和2组差异均不显著($P > 0.05$),特别是与第1组(轮叶黑藻+篔齿眼子菜)的差异不显著,与第3、5、6和7处理组差异均为显著($P < 0.05$),综合去除率考虑,第1处理组(轮叶黑藻+篔齿眼子菜)对TN净化效果较好。

2.1.3 TP的净化效果比较

由图3可知,第4组“螺+蚌+轮叶黑藻+篔齿

眼子菜”的组合的TP去除率最高,能达到88.57%;其次是第5组“螺+蚌+穗状狐尾藻+菹草”,该组合的去除率为70.48%,轮叶黑藻组合的净化效果好也验证了已有的研究结果,轮叶黑藻对TP的去除效果优于苦草、微齿眼子菜、菹草,对水中TP去除率的大小顺序是轮叶黑藻 > 微齿眼子菜 > 苦草 > 菹草^[26];第3组“海菜花”、第6组“螺+蚌+海菜花”组合TP去除率还没有第7组对照(该组TP去除率为54.29%)的高,主要是由于海菜花在实验期内陆续出现死亡现象,虽进行了补种,但其生长没有其余4种沉水植物的好,现场有部分水箱基本看不到正常生长的植株,而且水体发绿浑浊,加之对照水箱里大量生长的水绵对水体有一定的净化效果,故这两组的TP去除效果不佳,这也说明海菜花对本次实验水质的不适应,引种恢复有一定难度。

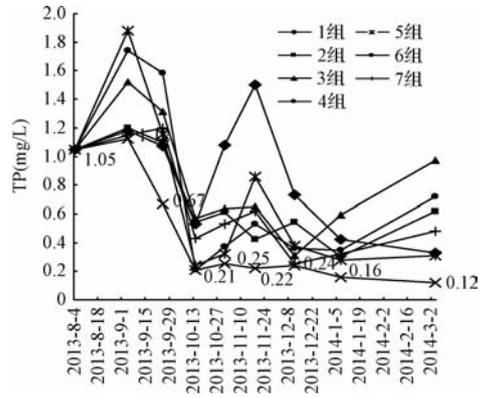


图3 TP的浓度比较

Fig. 3 Comparison of concentrations of TP

运用SPSS17.0对不同组合的TP的浓度进行单因素方差分析(单因素ANOVA)可知:第4处理组(螺+蚌+轮叶黑藻+篔齿眼子菜)的TP平均浓度最低,与第1、3和6处理组差异均为显著($P < 0.05$),特别是与第1组(轮叶黑藻+篔齿眼子菜)差异显著,说明“沉水植物+螺蚌”组和对TP的净化效果要优于单独种植沉水植物;与第2和5组的差异均不显著($P > 0.05$),说明其对TP的实际净化效果有待继续研究;综合不同处理对TP的去除率比较,优先考虑第4组“螺+蚌+轮叶黑藻+篔齿眼子菜”组合。

2.2 小试的浮游植物抑制情况

2013年11月—2014年5月,采用浮游植物叶绿素荧光仪,测定了小试静水条件时沉水植物、底栖动物及鱼类不同配置处理水体中蓝藻、绿藻及硅藻随时间的变化特征,由表2可知,1~6组水箱里蓝

表 2 不同配置条件下藻类叶绿素浓度比较

Table 2 Comparison of concentrations of algal chlorophyll under different conditions

($\mu\text{g/L}$)

时间 组号	2013-11-26			2014-03-18			2014-05-16		
	蓝藻	绿藻	硅藻	蓝藻	绿藻	硅藻	蓝藻	绿藻	硅藻
1	0	6.32	10.14	0	15.57	11.57	0	21.57	94.10
2	0	5.63	8.30	0	5.49	24.74	0	0	17.95
3	0	12.90	12.65	0	58.38	40.00	0	77.08	86.40
4	0	4.93	7.81	0	0	8.4	0	0	9.34
5	0	434.00	170.24	0	471.9	325.5	48.64	324.4	13.30
6	0	11.4	8.18	0	865.5	159	0	410.3	157.03

藻的生物量基本为 0,这也证实了种植沉水植物和放养螺、蚌对水中浮游植物有一定抑制作用,特别是第 4 组“螺 + 蚌 + 轮叶黑藻 + 篦齿眼子菜”的抑藻效果更明显,蓝藻、绿藻生物量为 0,硅藻的生物量也较其他组合低,硅藻和蓝藻的生长存在互相的竞争^[37],硅藻在水生生态系统的动态平衡中起重要的调节作用,很多属种是富营养化的重要指示种^[38-40],数量增加到一定程度会爆发硅藻水华^[41],这些都与“螺 + 蚌 + 轮叶黑藻 + 篦齿眼子菜”组合水质净化效果较其他组合好相呼应。

2.3 中试的水质净化效果比较

通过 4 个多月连续观测表明:“螺 + 蚌 + 轮叶黑藻 + 篦齿眼子菜”组合对水体透明度有持续稳定作用,与李雪娟等^[2]的研究结果相似。

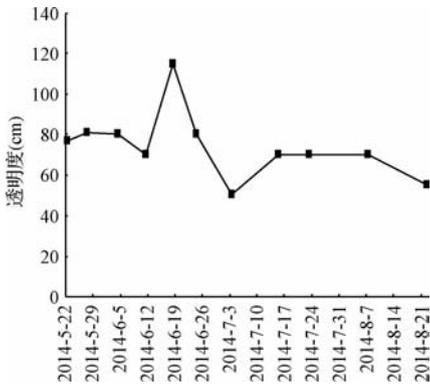


图 4 透明度的变化

Fig. 4 Changes of transparency

由图 5~7 可知:2014 年 5 月—8 月中试实验期间,水中的 COD、TN 和 TP 的浓度均有降低,3 个取样点 COD 的去除率分别为 53.44%、55.58% 和 64.77%;TN 的去除率分别为 63.28%、55.00% 和 62.04%;TP 的去除率分别为 49.44%、55.88% 和 42.53%;COD、TN、TP 平均去除率分别为 57.93%、

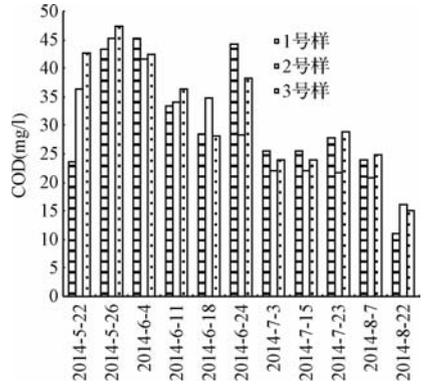


图 5 COD 的浓度比较

Fig. 5 Comparison of concentrations of COD

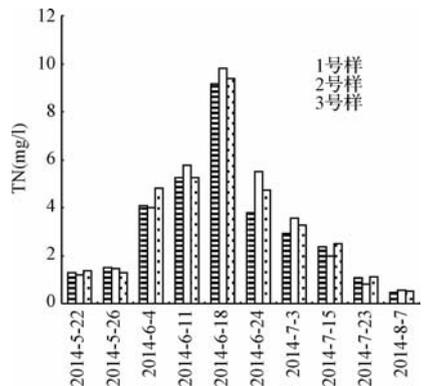


图 6 TN 的浓度比较

Fig. 6 Comparison of concentrations of TN

60.12% 和 49.28%,说明在中试环境下“螺 + 蚌 + 轮叶黑藻 + 篦齿眼子菜”对水体有一定的净化作用,这也验证了前期小试实验的结果(COD、TN 和 TP 去除率分别为 58.79%、64.30% 和 88.57%),通过比较可知,中试对 COD、TN 的去除效果与小试接近,而对 TP 的去除效果没有小试的好,这可能是由于中试池塘的近自然状态,塘底未做防渗处理,与外

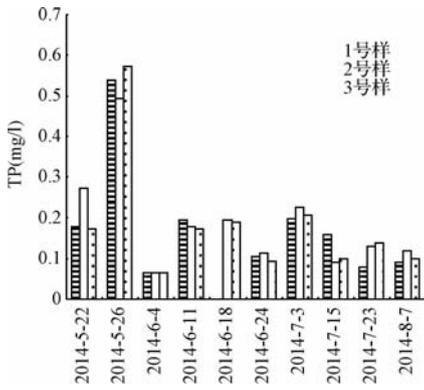


图7 TP的浓度比较

Fig. 7 Comparison of concentration of TP

界地下水联通,干扰因素较多,容易受到农田生产地表、地下径流的影响,在现场也连续监测到塘中水位变化大,特别是在连续晴天或者降雨后水位变化较快,但各指标的去除效果均达到50%以上,并且“螺+蚌+轮叶黑藻+篦齿眼子菜”组合植物长势很好,水绵和浮萍少,水很清,对不同季节的适应性较强,轮叶黑藻生长逐渐占优势。以上这些都说明在无人干预的微污染水体中,运用“螺+蚌+轮叶黑藻+篦齿眼子菜”进行生态修复有一定的可行性。

2.4 螺蚌-沉水植物系统适宜处理的污染指标范围

小试静态实验用水来自云南大学呈贡校区中水处理站出水,各项指标的初始值分别是:pH为8.23,COD浓度为95.06 mg/L,TN浓度为6.89 mg/L,TP浓度为1.05 mg/L,难以达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)一级A标,主要作为校园绿化用水;中试现场实验用水昆明市嵩明县滇源镇滇源二小实验基地的农田地表径流,各项指标初始值分别为:COD为23.67~42.72 mg/L,TN为1.2~1.37 mg/L,TP为0.174~0.272 mg/L,介于《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅲ-V类水之间;参考笔者的2012年研究成果,静态实验用水来自昆明市第五污水处理厂的出水,各项指标的初始值分别是:pH为8.23,COD浓度为52.8 mg/L,NH₃-N浓度为0.756 mg/L,TP浓度为0.144 mg/L^[2],达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)一级A标。由以上分析可知,螺蚌-沉水植物系统适宜处理的污染指标范围较广,对Ⅲ-V类地表水及达一级A标的再生水都有一定的净化能力。

3 结论

2013年8月—2014年3月的小试水箱实验结果表明:第4组“螺+蚌+轮叶黑藻+篦齿眼子菜”组合对水质的净化效果最佳,对COD、TN和TP去除率分别为58.79%、64.30%和88.57%,对浮游生物的抑制效果最明显;“螺+蚌+轮叶黑藻+篦齿眼子菜”处理植物长势较好,基本无水绵及浮萍,对不同季节的适应性较强,轮叶黑藻生长逐渐占优势。

2014年5月—8月的中试结果表明:COD、TN和TP的平均去除率分别为57.93%、60.12%和49.28%,说明中试环境下“螺+蚌+轮叶黑藻+篦齿眼子菜”对水体有一定的净化作用,这也验证了小试研究的结果,并且轮叶黑藻长势比篦齿眼子菜好,这也与小试结论一致。

综上所述,“螺+蚌+轮叶黑藻+篦齿眼子菜”对微污染水体有一定的净化和改善稳定作用,也对长停留时间的水体生态修复有重要意义。

参考文献

- [1] 陈晓强,刘若鹏,王鹤立.景观水体型生态屏障对微污染水体净化效果的现场试验研究.水处理技术,2011,37(9):80-83
Chen Xiaoqiang, Liu Ruopeng, Wang Heli. Study on a landscape-designed ecological barrier for remediation of micro-polluted water. Technology of Water Treatment, 2011, 37(9):80-83 (in Chinese)
- [2] 李雪娟,和树庄,李军,等.螺、蚌对污水处理厂再生水环境的改善稳定作用.环境工程学报,2012,6(10):3485-3492
Li Xuejuan, He Shuzhuang, Li Jun, et al. Role of snails and mussels in improving and stabilizing reclaimed water environment of sewage treatment plants. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(10):3485-3492 (in Chinese)
- [3] 王英才,刘永定,郝宗杰,等.上海市几条黑臭河道治理效果的比较与分析.水生生物学报,2009,33(2):355-359
Wang Yingcai, Liu Yongding, Hao Zongjie, et al. Comparing and analysing the control effect of several black and stinking rivers in Shanghai. Acta Hydrobiologica Sinica, 2009, 33(2):355-359 (in Chinese)
- [4] 顾俊,刘德启,陆璐露,等.城市内河生物修复及其对底泥氮素转化影响的实验研究.环境工程学报,2008,2(6):733-736
Gu Jun, Liu Deqi, Lu Lulu, et al. Experimental study on bioremediation of city river and its effects on transformation of nitrogen in sediments. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, 2(6):733-736 (in Chinese)

- [5] 钱嫦萍,王东启,陈振楼,等.生物修复技术在黑臭河道治理中的应用.水处理技术,2009,35(4):13-17
Qian Changping, Wang Dongqi, Chen Zhenlou, et al. Progress of bioremediation for controlling blackening and stink of rivers. Technology of Water Treatment, 2009, 35(4): 13-17 (in Chinese)
- [6] 谢丹平,李开明,江栋,等.底泥修复对城市污染河道水体污染修复的影响研究.环境工程学报,2009,3(8):1447-1453
Xie Danping, Li Kaiming, Jiang Dong, et al. Study on effect of polluted sediments bioremediation on water body remediation of polluted urban rivers. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(8): 1447-1453 (in Chinese)
- [7] 黎贞,卫晋波,任随周,等.生物制剂对城市黑臭河涌的原位修复技术.环境科学与技术,2010,33(12F):435-439
Li Zhen, Wei Jinbo, Ren Suizhou, et al. Recent progress of biological preparations for in situ remediation of urban black-odor river. Environmental Science & Technology, 2010, 33(12F): 435-439 (in Chinese)
- [8] 吴东浩,王备新,张咏,等.底栖动物生物指数水质评价进展及在中国的应用前景.南京农业大学学报,2011,34(2):129-134
Wu Donghao, Wang Beixin, Zhang Yong, et al. Advances in the use of biotic index for water quality bioassessment with benthic macroinvertebrate and its perspective in China. Journal of Nanjing Agricultural University, 2011, 34(2): 129-134 (in Chinese)
- [9] 段学花,王兆印,余国安.以底栖动物为指示物种对长江流域水生态进行评价.长江流域资源与环境,2009,18(3):241-247
Duan Xuehua, Wang Zhaoyin, Yu Guo'an. Ecological assessment of the Yangtze River eco-system with benthic invertebrate as indicator species. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(3): 241-247 (in Chinese)
- [10] Schmitt C., Vogt C., Van Ballaer B., et al. In situ cage experiments with *Potamopyrgus antipodarum*—a novel tool for real life exposure assessment in freshwater ecosystems. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2010, 73(7): 1574-1579
- [11] Mahmoud N., Dellali M., Bour M. E., et al. The use of *Fulvia fragilis* (mollusca: Cardiidae) in the biomonitoring of Bizerta lagoon; A mutimarkers approach. Ecological Indicators, 2010, 10(3): 696-702
- [12] Richman L. A., Hobson G., Williams D. J., et al. The Niagara River mussel biomonitoring program (*Elliptio complanata*): 1983-2009. Journal of Great Lakes Research, 2011, 37(2): 213-225
- [13] Gust M., Buronfosse T., Geffard O., et al. In situ biomonitoring of freshwater quality using the New Zealand mudsnail *Potamopyrgus antipodarum* (Gray) exposed to waste water treatment plant (WWTP) effluent discharges. Water Research, 2010, 44(15): 4517-4528
- [14] 陈玉霞,卢晓明,何岩,等.底栖软体动物水环境生态修复研究进展.净水技术,2010,29(1):5-8
Chen Yuxia, Lu Xiaoming, He Yan, et al. Research progress of benthic mollusks for water environmental ecological restoration. Water Purification Technology, 2010, 29(1): 5-8 (in Chinese)
- [15] 屈铭志,屈云芳,任文伟,等.铜锈环棱螺控制微囊藻水华的机理研究.复旦学报(自然科学版),2010,49(3):301-308
Qu Mingzhi, Qu Yunfang, Ren Wenwei, et al. The mechanism of controlling *Microcystis* bloom by *Bellamya aeruginosa*. Journal of Fudan University (Natural Science), 2010, 49(3): 301-308 (in Chinese)
- [16] Marinho-Soriano E., Azevedo C. A. A., Trigueiro T. G., et al. Bioremediation of aquaculture wastewater using macroalgae and *Artemia*. International Biodeterioration & Biodegradation, 2011, 65(1): 253-257
- [17] 孟顺龙,吴伟,胡庚东,等.底栖动物螺蛳对池塘底泥及水质的原位修复效果研究.环境污染与防治,2011,33(6):44-47
Meng Shunlong, Wu Wei, Hu Gengdong, et al. Preliminary study on the restoration effect of snail on the sediment and water of ponds. Environmental Pollution and Control, 2011, 33(6): 44-47 (in Chinese)
- [18] 朱苗骏,柏如法,张彤晴,等.不同密度铜锈环棱螺对水体环境影响效果的研究.淡水渔业,2004,34(6):31-33
Zhu Miaojun, Bai Rufa, Zhang Tongqing, et al. Effect of different density of *Bellamya aeruginosa* on water environment. Freshwater Fisheries, 2004, 34(6): 31-33 (in Chinese)
- [19] 杨建恒,张永.河蚌的水质净化试验.安徽农业科学,2003,31(4):680-681
Yang Jianheng, Zhang Yong. Experiment in the purity of water quality for clam growth. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2003, 31(4): 680-681 (in Chinese)
- [20] 赵沐子,费志良,郝忱,等.不同贝类对水质净化效果的比较.水产科学,2006,25(3):133-135
Zhao Muzi, Fei Zhiliang, Hao Chen, et al. Short-term purification of water by different mollusks. Fisheries Science, 2006, 25(3): 133-135 (in Chinese)
- [21] 潘建林,徐在宽,唐建清,等.湖泊大型贝类控藻与净化水质的研究.海洋湖沼通报,2007,(2):69-79
Pan Jianlin, Xu Zaikuan, Tang Jianqing, et al. Study on the effects of large mollusks on alge control and water quality at Meiliang gulf in Taihou lake. Transactions of Oceanology and Limnology, 2007, (2): 69-79 (in Chinese)
- [22] 廖日红,胡秀琳,吴晓辉,等.三角帆蚌对北京富营养化河湖水体的滤水效率和放养方式研究.环境工程学报,2012,6(5):1425-1429
Liao Rihong, Hu Xiulin, Wu Xiaohui, et al. Study on *Hyriopsis cumingii*'s filtration rates and stocking mode in eutrophic water of Beijing. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(5): 1425-1429 (in Chinese)
- [23] 徐海军,凌去非,杨彩根,等.3种淡水贝类对藻类消除作用的初步研究.水生态学杂志,2010,3(1):72-75
Xu Haijun, Ling Qufei, Yang Caigen, et al. Preliminary studies on the elimination effect of algae by three species

- of freshwater bivalve. *Journal of Hydroecology*, **2010**, 3 (1):72-75 (in Chinese)
- [24] 杨旻, 吴小刚, 张维昊, 等. 富营养化水体生态修复中水生植物的应用研究. *环境科学与技术*, **2007**, 30 (7): 98-102
Yang Min, Wu Xiaogang, Zhang Weihao, et al. Application of aquatic plant in ecological restoration of eutrophic water. *Environmental Science & Technology*, **2007**, 30 (7): 98-102 (in Chinese)
- [25] 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 水生植物对富营养水体水质净化作用研究. *武汉植物学研究*, **2001**, 19 (4): 299-303
Wu Zhenbin, Qiu Dongru, He Feng, et al. Studies on eutrophicated water quality improvement by means of aquatic macrophytes. *Journal of Wuhan Botanical Research*, **2001**, 19 (4): 299-303 (in Chinese)
- [26] 刘会, 朱丹婷, 李铭红, 等. 五种沉水植物对富营养化水体的净化效果. *生态科学*, **2011**, 30 (6): 596-601
Liu Hui, Zhu Danting, Li Minghong, et al. Effects of five submerged macrophytes on the purification of eutrophication water. *Ecological Science*, **2011**, 30 (6): 596-601 (in Chinese)
- [27] 李晶, 马云, 周浩, 等. 轮叶黑藻去除水体中氮磷能力研究. *环境科学与管理*, **2012**, 35 (8): 13-18
Li Jing, Ma Yun, Zhou Hao, et al. The removal ability research of *Hydrilla verticillata* on nitrogen and phosphorus from water. *Environmental Science and Management*, **2012**, 35 (8): 13-18 (in Chinese)
- [28] 张饮江, 刘晓培, 金晶, 等. 沉水植物对水体净化的研究进展. *科技导报*, **2012**, 30 (27): 72-79
Zhang Yinjiang, Liu Xiaopei, Jin Jing, et al. Research progress in submerged plant for purifying water quality. *Science & Technology Review*, **2012**, 30 (27): 72-79 (in Chinese)
- [29] 钟艳霞, 罗玲玲, 虎雪蛟, 等. 银川市天然湖泊湿地水生植物的水质净化能力分析. *安徽大学学报(自然科学版)*, **2013**, 37 (3): 104-108
Zhang Yanxia, Luo Lingling, Hu Xuejiao, et al. Analysis of ability of aquatic plants for water purification in natural wetlands of Yinchuan City. *Journal of Anhui University (Natural Sciences Edition)*, **2013**, 37 (3): 104-108 (in Chinese)
- [30] 兰策介, 王备新, 陈开宁, 等. 金鱼藻、环棱螺及其组合处理对水生附着生物含量和氮、磷浓度的影响. *生态学杂志*, **2009**, 28 (10): 2042-2047
Lan Cejie, Wang Beixin, Chen Kaining, et al. Effects of *Ceratophyllum demersum*, *Bellamyia purificata*, and their combination on water body's periphyton content and N and P concentrations. *Chinese Journal of Ecology*, **2009**, 28 (10): 2042-2047 (in Chinese)
- [31] 白秀玲, 谷孝鸿, 何俊, 等. 太湖环棱螺 (*Bellamyia* sp.) 及其与沉水植物的相互作用. *生态学报*, **2009**, 29 (2): 1032-1037
Bai Xiuling, Gu Xiaohong, He Jun, et al. *Bellamyia* sp. and its interaction with submerged macrophytes in Lake Taihu. *Acta Ecologica Sinica*, **2009**, 29 (2): 1032-1037 (in Chinese)
- [32] 沈亚强, 王海军, 刘学勤. 滇中五湖水生植物区系及沉水植物群落特征. *长江流域资源与环境*, **2010**, 19 (Z1): 111-119
Shen Yaqiang, Wang Haijun, Liu Xueqin. Aquatic flora and assemblage characteristics of submerged macrophytes in five lakes of the central Yunnan Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, **2010**, 19 (Z1): 111-119 (in Chinese)
- [33] 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**
- [34] 况琪军, 马沛明, 刘国祥, 等. 大型丝状绿藻对 N、P 去除效果研究. *水生生物学报*, **2004**, 28 (3): 323-326
Kuang Qijun, Ma Peiming, Liu Guoxiang, et al. Study on the removal efficiency of nitrogen and phosphorus by filamentous green algae. *Acta Hydrobiologica Sinica*, **2004**, 28 (3): 323-326 (in Chinese)
- [35] 马军, 雷国元. 水绵 (*Spirogyra*) 的除磷特性及其对微藻生长的抑制作用. *环境科学学报*, **2008**, 28 (3): 476-483
Ma Jun, Lei Guoyuan. Characteristics of phosphorus removal and growth inhibition of micro-algal species by *Spirogyra*. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **2008**, 28 (3): 476-483 (in Chinese)
- [36] 马剑敏, 马顷, 苏秀燕, 等. 水绵对3种沉水植物的化感作用研究. *河南农业科学*, **2011**, 40 (9): 70-73
Ma Jianmin, Ma Qing, Su Xiuyan, et al. Allelopathy of *Spirogyra communis* on three submerged plants. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, **2011**, 40 (9): 70-73 (in Chinese)
- [37] 刘霞, 陆晓华, 陈宇炜. 太湖浮游硅藻时空演化与环境因子的关系. *环境科学学报*, **2012**, 32 (4): 821-827
Liu Xia, Lu Xiaohua, Chen Yuwei. Long-term evolution of planktonic diatoms and their relationships with environmental factors in Lake Taihu. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **2012**, 32 (4): 821-827 (in Chinese)
- [38] 徐信, 支崇远, 陈玲, 等. 硅藻在水质监测和古环境重建中的应用. *安徽农业科学*, **2011**, 39 (9): 5216-5217, 5386
Xu Xin, Zhi Chongyuan, Chen Ling, et al. Application of diatoms in water quality monitoring and reconstruction of palaeoenvironment. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, **2011**, 39 (9): 5216-5217, 5386 (in Chinese)
- [39] 唐鑫, 蔡德所, 黎佛林, 等. 贝江硅藻生态群落特征及水质评价. *三峡大学学报(自然科学版)*, **2013**, 35 (6): 1-5
Tang Xin, Cai Desuo, Li Fulin, et al. Ecological characteristics of Diatom communities and water quality assessment in Beijiang River Basin. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, **2013**, 35 (6): 1-5 (in Chinese)
- [40] 郭蔚华, 李楠, 张智, 等. 嘉陵江出口段三类水体蓝绿硅藻优势种变化机理. *生态环境学报*, **2009**, 18 (1): 51-56
Guo Weihua, Li Nan, Zhang Zhi, et al. The changes and mechanisms in dominant algae of *Cyanophyta*, *Chlorophyta* and *Bacillariophyta* during the eutrophication vulnerable period in the outlet area of Jialing River in China. *Ecology and Environmental Sciences*, **2009**, 18 (1): 51-56 (in Chinese)
- [41] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类和生态. 北京: 科学出版社, **2006**