

植物-浮床触生藻类对富营养化水体氮磷去除的协同效果

胡绵好^{1,2}, 施练东³, 朱建坤³, 奥岩松², 向律成¹, 杨肖娥¹

(1. 污染环境修复与生态健康教育部重点实验室, 浙江大学环境与资源学院, 浙江 杭州 310029; 2. 上海交通大学农业与生物学院, 上海 201101; 3. 绍兴市汤浦水库管理局, 浙江 绍兴 312364)

摘要: 利用植物浮床系统, 通过室内静态模拟试验, 研究了在有光、避光条件下, 植物与浮床触生藻类协同作用对水体中氮、磷等营养盐的去除效果。结果表明, 试验后水体中的藻类减少, 但在浮床上的触生藻类增多, 且其主要以小球藻 (*Chlorella vulgaris*)、小球衣藻 (*Chamydomonas. microsphaera*) 等绿藻为主。植物和无植物在有光条件下对 TN、TP、COD_{mn}、BOD₅ 的去除率比在避光时要高, 且植物处理的水体中的 TN、TP 去除率明显高于无植物 (对照) 处理。处理 20 d, 植物在有光条件下对 TN 的去除率达 76.8% 以上, 对 TP 的去除率在 89.9% 以上; 而在遮光时对 TN 的去除率最高仅为 61.1%, 对 TP 的去除率最高为 85.4%。植物在有光条件下对 COD_{mn}、BOD₅ 的去除率达 94.0% 以上, 而在遮光时对 COD_{mn}、BOD₅ 的去除率最高为 89.5%。有植物和无植物在有光、遮光条件下处理, 水体中的 NH₄-N、NO₃-N、NO₂-N、DP、Chla 的浓度均随处理时间的延长而降低, 且有光处理下, NH₄-N、NO₂-N、DP 浓度下降明显低于比在遮光下和对照处理。然而, DO 浓度变化则相反, 即随着处理时间的延长而升高, 且在在有光条件下的比在遮光下和对照处理要高。本试验结果还表明, 遮光条件下, 水芹和豆瓣菜地上部分 N 的净积累量分别为 0.590 8 和 0.367 5 mg·plant⁻¹ (DW)·d⁻¹, P 的净积累量分别为 0.153 0 和 0.066 5 mg·plant⁻¹ (DW)·d⁻¹; 而无光条件下, 水芹和豆瓣菜地上部分 N 的净积累量为 0.256 6 和 0.116 2 mg·plant⁻¹ (DW)·d⁻¹, P 的净积累量为 0.054 8 和 0.018 1 mg·plant⁻¹ (DW)·d⁻¹。本试验结果为富营养化水体氮、磷等营养盐去除机理的研究提供重要的科学依据。

关键词: 富营养化水体; 植物; 水芹; 豆瓣菜; 藻类

中图分类号: X173; X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)03-1090-08

Synergistic Effects of Plant with Attached-algae on Floating-beds on Removal of Nitrogen and Phosphorus from Eutrophic Water

HU Mian-hao^{1,2}, SHI Lian-dong³, ZHU Jian-kun³, AO Yan-song², XIANG Lu-cheng¹, YANG Xiao-e¹

(1. MOE Key Laboratory, Environmental Remediation and Ecosystem Health, College of Environmental & Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 2. College of Agriculture and Biology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 201101, China; 3. Administration Ministry of Tangpu Reservoir, Shaoxing 312364, China)

Abstract: Removal efficiencies for nitrogen and phosphorus from eutrophic water by the synergistic effects of plant with periphyte on floating-beds were investigated under light and non-light conditions using floating culture system in the greenhouse. The results showed that the amount of green algae in the water body decreased, but the periphytes on floating beds increased with treatment of growing plants (cress and watercress) under light or without light conditions for 20 days. The dominant periphyte species were *Chlorella.vulgaris* and *Chamydomonas. Microsphaera* at the end of the experiment. The removal rate of TN, TP, COD_{mn}, BOD₅ under light were higher than that without light either in planted or unplanted (CK) conditions, and higher removal rates for TN and TP were noted in planted treatment than in unplanted treatment. After 20 days treatment, removal rates of TN and TP were above 76.8%, 89.9%, respectively, with plant treatment under light, they were only 61.1%, 85.4%, respectively, for the treatments without light. Removal rates of COD_{mn} and BOD₅ were above 94.0% with plant treatment under light, whereas they were only 89.5% without light. The concentrations of NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N, DP and Chla in the eutrophic water bodies

收稿日期: 2007-08-12

基金项目: 浙江生态省建设重大科技攻关项目(2005C13002); 浙江省重大专项 (2006C13059)

作者简介: 胡绵好 (1976—), 男, 博士, 研究方向为富营养化水体污染生物修复、植物生理生态、设施园艺工程等。E-mail: yankeu@gmail.com

通讯作者: 杨肖娥 E-mail: xyang@zju.edu.cn; xyang581@yahoo.com

decreased with increasing treatment time in all treatments, whereas the reduction of $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, DP and Chla concentrations with plant under light were markedly greater than those without light. However, the change of DO concentration was reverse, namely, its concentration increased with increasing treatment time, and higher DO concentration in the planted treatment under light was noted as compared to those of the control and without light treatment. The results also indicated that the nitrogen accumulation in the shoots of cress and watercress without light treatment were $0.590\ 8$ and $0.367\ 5\ \text{mg}\cdot\text{plant}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, and phosphorus accumulation were $0.153\ 0$ and $0.066\ 5\ \text{mg}\cdot\text{plant}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively. While the nitrogen accumulation were $0.256\ 6$ and $0.116\ 2\ \text{mg}\cdot\text{plant}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, and phosphorus accumulation were $0.054\ 8$ and $0.018\ 1\ \text{mg}\cdot\text{plant}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively, in the lighted treatment. The results demonstrated that the synergistic effects of plant with epiphyte on floating-beds could improve removal efficiency of nitrogen and phosphorus from the eutrophicated water body, which could provide important scientific bases for phytoremediation of water eutrophication using floating plant islands.

Keywords: eutrophic waterbodies; plant; *Oenanthe javanica* (Bl.) DC; *Nasturtium officinale* R. Br; algae

目前,由氮、磷等营养盐所引起的湖泊富营养化已成为世界性的环境问题。利用藻类和水生植物富集氮、磷是治理、调节和抑制湖泊富营养化的有效途径。绿球藻是一种很好的耐 N 微藻,对 N 的吸收率达 70% 以上^[1]。芦苇能使废水中的总氮和总磷含量分别下降 84%、65%^[2,3]。无土栽培水芹、水蕹菜和多花黑麦草对富营养化水体中的 TN、TP 的去除率也可达 80% 以上^[4]。然而,尽管利用植物浮床技术栽培湿生植物、陆生植物治理富营养化水体研究在国内外屡见报道^[5-7],但有关植物和浮床系统触生藻类的协同作用对富营养化水体中氮磷等营养盐的去除效果却报道较少。本文作者利用浮床植物系统对富营养化水体氮磷去除机理的前期试验发现不管是室内静态试验,还是室外动态试验,虽水体中的藻类(以叶绿素 a 含量为参考)减少,但试验所用的容器壁上(器壁效应)和浮床上都触生着一层藻类,随着植物生长速度的减慢,在植物根系上也有藻类触生的现象。因此,本文拟从这些触生藻类出发,进一步研究植物及其浮床触生藻类协同作用对富营养化水体中氮、磷等营养盐的去除效果,以便为富营养化水体氮、磷等营养盐去除机理的研究提供重要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及试验用水

2007 年 3 月 10 日在温室里对已筛选出的水生经济植物水芹和豆瓣菜进行培养,当苗长到一定大小(视不同植物的生长情况),再用自来水培养一段时间(约 27 d),使植物长出新根,以便更好地适应水环境生长。

试验所用的载体(PVC 泡沫板)接近水面的一面用黑软片粘上,再用打孔工具根据植物的大小打规则、大小一致的小孔。用粘黑软片的 PVC 板作载体种植植物(抑制藻类的生长),设为植物地下部分遮光

(尽量做到遮光),即为植物遮光;而直接在 PVC 板上种植的植物(试验和工程正常应用),设为植物地下部分不遮光,即为植物有光。无植物(对照)也采用相同的处理方式。试验所用的玻璃缸侧面和底部也用黑软片粘上(减少器壁效应)。

试验所用的富营养化水直接取自浙江大学华家池。水质如表 1 所示,表 1 中的 pH 值和碱度数据表明,该水样 pH 值较高,呈弱碱性。试验用水采自浙江大学华家池水表面下 20 cm 处,注入 18 个试验箱中,每箱放水 20 L。试验开始前,试验水在箱中静置平衡 1 d。

表 1 华家池水质调查(2007/01—2007/05)
Table 1 The research of water quality in Huajia Pool
(2007/01—2007/05)

项目	范围	均值
水温/℃	13.5~23.8	19.8
照度/10 ⁴ lx	0.3~1.0	0.5
酸碱度 pH	7.59~8.84	7.95
氨态氮 $\text{NH}_4\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.26~3.57	1.79
硝态氮 $\text{NO}_3\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.12~0.36	0.18
总氮 $\text{TN}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.85~5.35	3.65
总磷 $\text{TP}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.05~0.21	0.14

1.2 试验方法

试验于 2007 年 4 月 10 日至 5 月 2 日在浙江大学华家池校区玻璃温室中进行。称取培养好的各植物(20 ± 2)g,放在有 15 个孔($\phi 32$)的 PVC 泡沫板上(植物的覆盖度达 85%以上),最后分别放在盛 20 L 富营养化水的玻璃缸培养,玻璃缸上方用遮阳网遮光,水面平均照度为 6 000 lx ($120\ \mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),光/暗周期为 12 h/12 h。水温控制在 18~22 ℃。每个处理设置 3 个重复。整个试验过程中,观察藻类生长状况。每 4 d 采样一次,采样时间为上午的 9:00 点。试验开始和结束采集植物样,以便分析其体内的氮、磷含量。

1.3 测定项目及分析

为了使试验水中的净化效果与自然状态更符合,

因此,本试验不添加水量,而是通过称水重来换算所观测指标的总量,由此计算去除率。这样就克服了添加水对植物吸收营养的影响。参照葛滢等^[8]的方法计算去除率,即:

去除率(%)=(C₀·V₀-C_i·V_i)÷(C₀·V₀)×100%

式中:C₀为初始时的浓度,V₀为初始时的体积,C_i为第*i*天的浓度,V_i为第*i*天的水体积。水样分析项目为TN、NH₄-N、NO₃-N、TP、可溶性磷(DP)、化学需氧量(COD_{Mn})、生化需氧量(BOD₅)、溶解氧(DO)、pH等。测定方法为^[9]:TN采用K₂S₂O₈氧化紫外消解比色法;NH₄-N采用纳氏比色法;NO₃-N采用酚二磺酸光度法;NO₂-N采用N-(1-萘基)-乙二胺光度法;TP采用紫外消解钼锑抗分光光度法;DP采用钼蓝比色法。藻类生物量(叶绿素a含量)的测定^[9]。水体中的藻类组成用显微镜观察。收获时测定植物的生物量及叶片中N、P含量,N、P含量先用浓H₂SO₄-H₂O₂消煮后再分别采用奈氏比色法和钒钼黄比色法测定^[10]。

1.4 数据统计及分析

利用SPSS和SigmaPlot 9.0等软件对分析结果进行处理。

2 结果与分析

2.1 藻类的种类组成变化

显微镜下观察发现,试验前富营养化水体中的优

势藻类主要是微囊藻属(*Microcystis*)中的铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)和水华微囊藻(*Microcystis flos-aquae*);硅藻门的库氏小环藻(*Cyclotella.Kutzingiana*);绿藻门的二形栅藻(*Scenedesmus.dimorphus*)、四尾栅藻(*Scenedesmus.quadricauda*)、小球藻(*Chlorella.vulgaris*)和镰形纤维藻(*A.falcatus*);蓝藻门的固氮鱼腥藻(*Anabaena. azotica*)。试验后水体中的藻类虽减少,但在浮床上触生藻类主要是绿藻门的小球藻(*Chlorella.vulgaris*)、小球衣藻(*Chamydomonas. microspheara*)、多形丝藻(*Ulothrix. variabilis*),韦丝藻(*Westella botryoides*)等。

2.2 植物-浮床触生藻类净化富营养化水体的协同效果

2.2.1 TN、TP的去除

有光条件下,水芹、豆瓣菜和无植物处理对富营养化水体中TN、TP的去除率比在避光时要高,且水芹、豆瓣菜处理的水体中的TN、TP去除率比无植物的高(图1)。处理12 d后,有光条件下,有植物和无植物处理对水体中的TN、TP的去除率明显比在遮光下处理的要高(图1)。处理20 d,有光下,水芹、豆瓣菜和无植物对TN的去除率分别达76.8%、78.3%、55.9%(图1A);对TP的去除率分别达90.4%、89.9%、55.6%(图1B)。而在遮光下,水芹、豆瓣菜和无植物对TN的去除率分别为61.1%、56.8%、48.9%(图1A);对

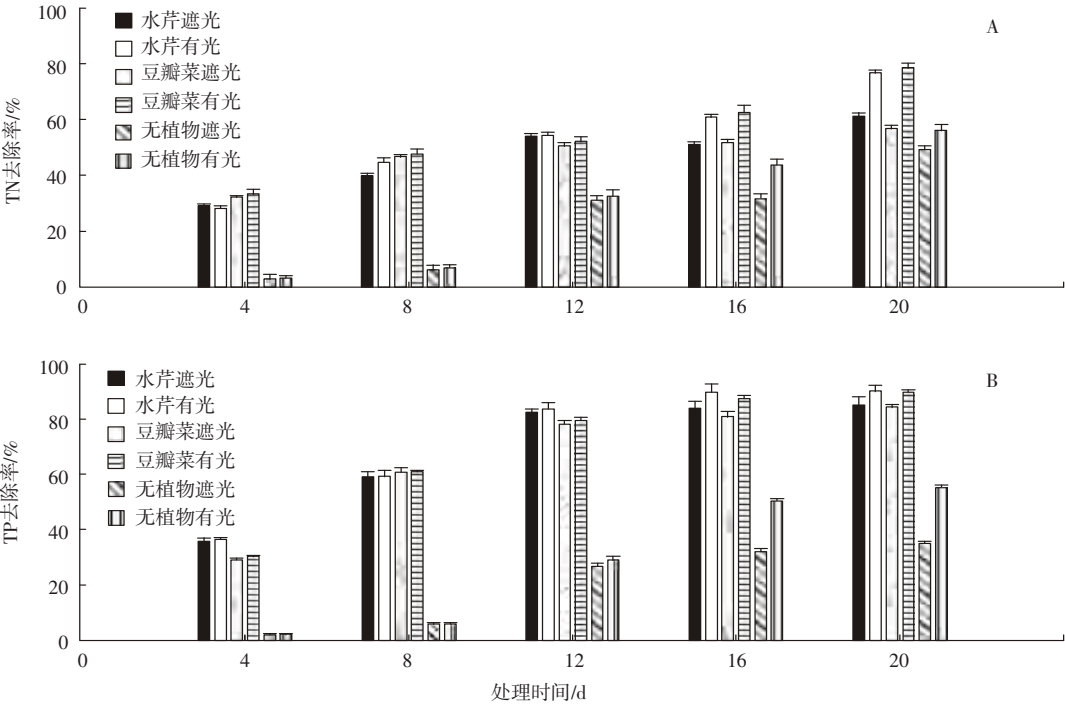


图1 植物-浮床触生藻类协同作用对水体中TN、TP的去除率

Figure 1 Removal rate of TN and TP in eutrophic water bodies by the interaction between plant and attached-algae on floating-beds

TP 的去除率分别为 85.4%、84.5%、35.2% (图 1B)。这说明除植物吸收和微生物作用外,藻类特别是浮床上的触生藻类对水体中 TN、TP 的去除起到一定的作用。

2.2.2 对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DP 的影响

有光、遮光条件下,有植物和无植物处理的水体中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DP 浓度均随处理时间的延长而降低,且在有光的植物处理下水体中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DP 浓度下降比在遮光的要明显 (图 2)。处理 16 d 后,有光条件下生长的水芹系统中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DP 的浓度分别下降到 1.48、0.24、0.010、0.16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率分别达 58.4%、32.0%、87.9%、88.8%; 而遮光下系统中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DP 的浓度则分别下降到 1.76、0.29、0.011、0.25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率则分别为 50.2%、18.8%、87.6%、82.5%。有光条件下生长的豆瓣菜系统中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DP 的浓

度下降分别为 1.42、0.27、0.010、0.015 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率分别达 60.3%、24.8%、88.2%、89.1%; 而遮光下系统中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DP 的浓度下降则分别 1.74、0.29、0.012 1、0.021 9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率则分别为 51.1%、18.3%、86.6%、84.7%。有光、遮光条件下,4 d 时, $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度在有、无植物处理时升高,但随着处理时间的延长,除在有光无植物处理外,其他处理其浓度呈下降趋势 (图 2C)。在有光、遮光的无植物 (CK) 处理下,水体中的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DP 浓度均比有植物处理的高 (图 2)。这可能是由于植物本身对水体中的营养盐的吸收利用所致。

2.2.3 对 COD_{Mn} 、 BOD_5 的去除作用

在有光下,水芹、豆瓣菜和无植物对 COD_{Mn} 、 BOD_5 的去除率比在避光时要高,且水芹、豆瓣菜处理的水体中的 COD_{Mn} 、 BOD_5 去除率比无植物的高 (图 3)。处理 12 d 后,有光下,有、无植物对水体中的 COD_{Mn} 、

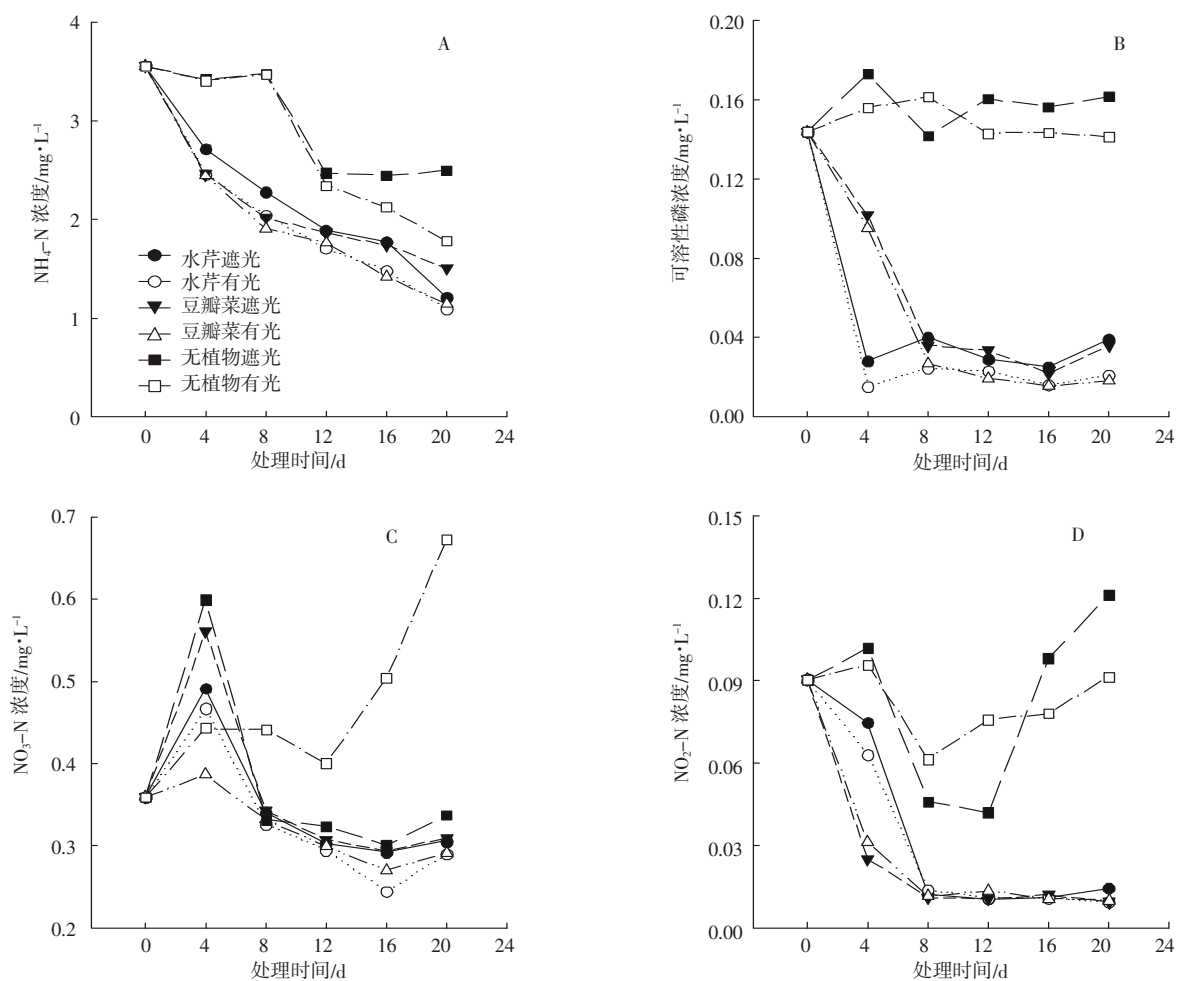


图 2 植物-浮床触生藻类协同作用下对水体中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DP 浓度的影响

Figure 2 Effect of the interaction between plant and attached-algae on floating-beds on $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ and DP concentration in eutrophic water bodies

BOD₅ 的去除率明显比遮光下要高(图3)。处理20 d,有光水芹、豆瓣菜和无植物对 COD_{Mn} 的去除率分别达 95.0%、95.4%、88.9%(图3A);对 BOD₅ 的去除率分别达 94.0%、94.9%、68.6%(图3B)。而遮光水芹、豆瓣菜和无植物对 COD_{Mn} 的去除率分别为 88.1%、89.5%、79.9%;对 BOD₅ 的去除率分别为 87.6%、88.5%、57.6%。这可能浮床上着生的藻类对水体中微生物的活动起到一定的作用。

2.2.4 对水体中 Chla、DO 的影响

水体中 Chla 含量随着处理时间的延长而降低,且遮光处理的明显比有光处理的要低;DO 浓度变化则相反,即随着处理时间的延长而升高,且有光处理的明显高于遮光处理(图4)。处理16 d,遮光条件下,水芹、豆瓣菜、对照(无植物)系统中 Chla 的浓度分别下降到 0.001 2、0.001 5、0.000 02 mg·L⁻¹,去除率也分别达到 98%、97.6%、99.9%;而有光下系统中 Chla 的浓度则分别下降到 0.007 4、0.007 1、0.023 8 mg·L⁻¹,去除率则分别达到 88.2%、88.7%、62.2%。这可能一方面是由于遮光处理抑制了藻类的生长,另一方面是植物分泌一些杀藻物质,抑制蓝藻生长,致使水体中的 Chla 含量降低。处理12 d,有光条件下,水芹、豆瓣菜、对照(无植物)处理的水体中的 DO 浓度分别达 3.59、3.16、1.69 mg·L⁻¹;而遮光下则分别为 3.47、2.85、1.25 mg·L⁻¹。这可能由于植物光合作用产生的氧向

根系输送和藻类自身的光合作用放出氧所致。

2.3 浮床植物系统中不同植物氮磷积累量

遮光条件下,水芹和豆瓣菜地上部分 N 的净积累量分别为 0.590 8 和 0.367 5 mg·plant⁻¹ (DW)·d⁻¹,P 的净积累量分别为 0.153 0 和 0.066 5 mg·plant⁻¹ (DW)·d⁻¹;而有光条件下,水芹和豆瓣菜地上部分 N 的净积累量为 0.256 6 和 0.116 2 mg·plant⁻¹ (DW)·d⁻¹,P 的净积累量为 0.054 8 和 0.018 1 mg·plant⁻¹ (DW)·d⁻¹(图5)。前期试验中发现用黑软片处理(完全遮光)的条件下,藻类在 7~13 d 基本死亡,而在不用黑软片处理中,浮床上着生大量的触生藻类。由此可见,由于浮床上触生藻类的大量繁殖,对氮磷的去除有一定的贡献。试验还表明,各植物的氮磷积累量分别与生物量和氮磷浓度显示了显著的线性关系(数据没有给出)。

3 讨论

3.1 藻类的种类组成变化

社会经济的发展影响着城市水体中营养结构的时空变化,继而又能改变水体中的藻类群落。藻类对氮磷营养的吸收利用状况。氮磷营养比例不同的水体中总会存在与之适应的藻类群落。本试验研究发现在应用浮床植物系统处理富营养化水体时,试验前富营养化水体中的优势藻类主要以微囊藻属(*Microcystis*)

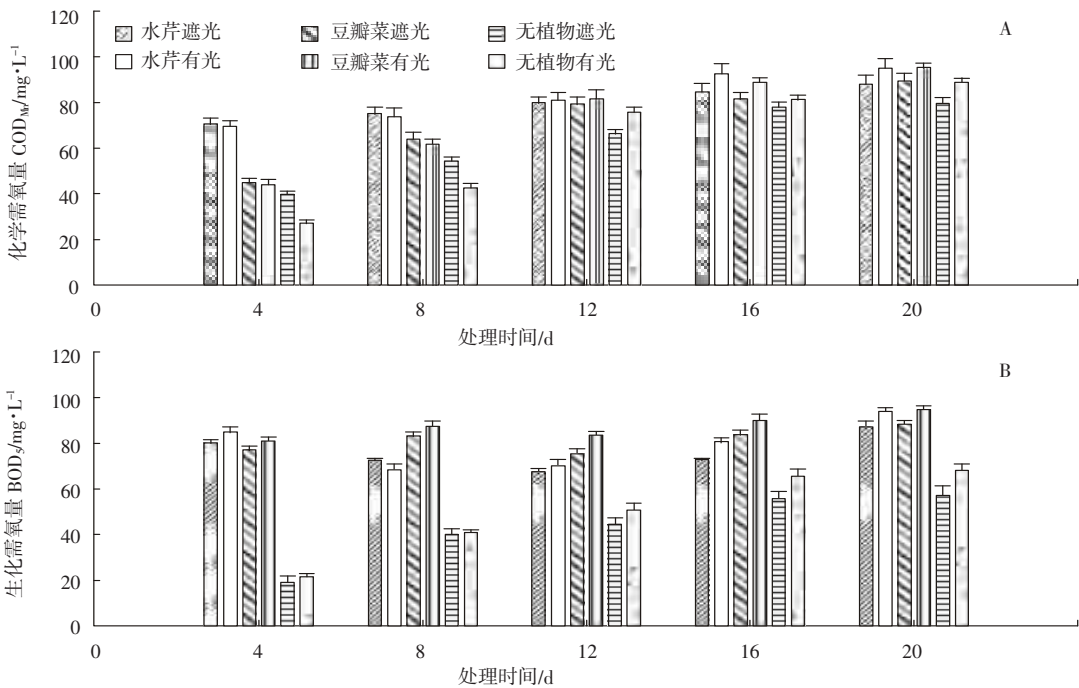


图3 植物-浮床触生藻类协同作用对水体中 COD_{Mn}、BOD₅ 的去除

Figure 3 Removal rates of COD_{Mn} and BOD₅ in eutrophic water bodies by the interaction between plant and attached-algae on floating-beds

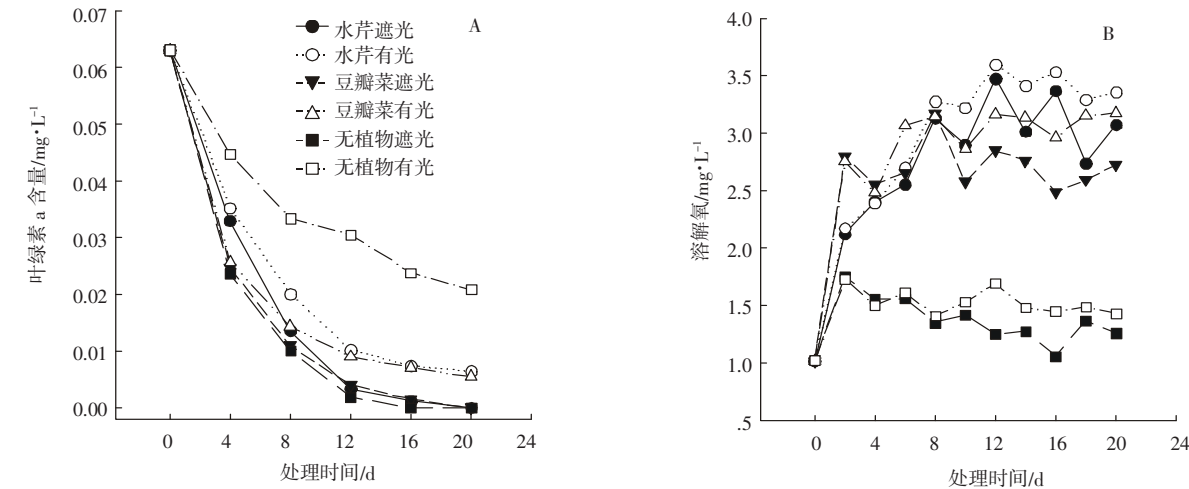


图 4 植物-浮床触生藻类协同作用对水体中 Chla、DO 的影响

Figure 4 Effect of the interaction between plant and attached-algae on floating-beds on Chla and DO concentration in eutrophic water bodies

中的铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 和水华微囊藻 (*Microcystis flos-aquae*) 为主。试验后水体中的藻类虽减少,但在浮床上触生藻类增多,主要以绿藻门的小球藻 (*Chlorella vulgaris*)、小球衣藻 (*Chamydomonas. microspheara*) 等为主。这一方面可能由于植物对水体中氮磷的吸收,降低了水体中氮磷的浓度,改变了氮磷的营养比例,从而影响了藻类的种群结构的变化。加之植物分泌的一些物质 (酚、生物碱等) 抑制水体中藻类的生长或杀死藻类。富营养化的水体中,当氮磷比例较低时,会出现绿藻类的高峰现象^[1]。另一方面光是影响单细胞藻类生长的最重要的条件之一,成为藻类生长的限制因子。本试验对试验容器及植物载体进行避光处理,这也可能是藻类种群结构的变化的原因之一。光质、光强和光照时间都影响藻类的生长及其生化组成^[12]。总之,水生高等植物一方面可通过分泌他感物质等直接抑制藻类生长繁殖,另一方面可通过吸收水体和沉积物中的营养盐、减少沉积物及其中

的营养盐再悬浮释放、为摄食藻类的大型浮游动物提供躲避鱼类捕食的庇护等控制藻类生长繁殖,从而降低浅水湖泊的浊度、改善水体透明度及水质^[13]。

3.2 植物-载体触生藻类净化富营养化水体的协同效果

水面种植高等植物是净化水体富营养化和修复水体的有效途径之一。本试验研究发现,有光条件下,水芹、豆瓣菜和无植物对 TN、TP 的去除率比在避光条件下要高,且水芹、豆瓣菜对水体中的 TN、TP 去除率比无植物处理的高。处理 20 d,有光条件下,水芹、豆瓣菜和无植物对 TN 的去除率分别达 76.8%、78.3%、55.9%;对 TP 的去除率分别达 90.4%、89.9%、55.6%。这结果比宋祥甫等^[7]利用浮床技术种植水稻去除富营养化水体中氮磷的效果要好。本文预试验表明,在完全遮光的条件下 (与不遮光的比较),富营养化水体的藻类在 7~13 d 之内基本死亡。因此,在有光条件下,水体中及浮床上触生的藻类对水体中氮磷

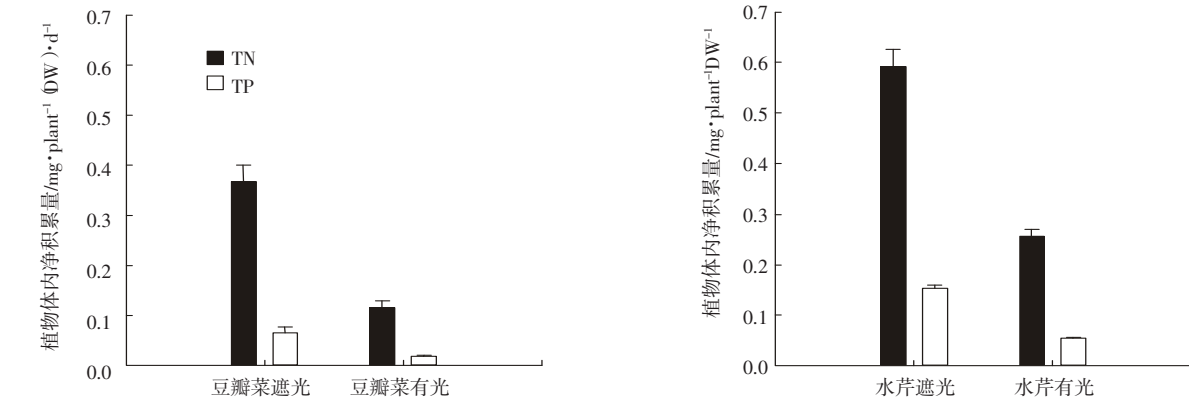


图 5 遮光、有光条件下浮床植物系统中不同植物氮磷积累量

Figure 5 Nitrogen and phosphorus accumulation of different plants on floating beds system under light and aphotic treatment

的去除也起到一定的作用。况琪军等^[14]和马沛明等^[15]的研究证明,藻类对污水中的 N、P 营养有明显的去除效果。本试验还发现,处理 16 d 后,有光下水芹对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DP 的去除率分别为 58.4%、32.0%、87.9%、88.8%;遮光下则分别为 50.2%、18.8%、87.6%、82.5%。有光下豆瓣菜对以上参数的去除率分别为 60.3%、24.8%、88.2%、89.1%;遮光下却分别为 51.1%、18.3%、86.6%、84.7%。这结果与刘淑媛等^[9]的研究结果一致。

植物根系对水中的悬浮物和胶体物存在着吸附力,在污染重和悬浮物多的水体中生长时,随着根系的不断生长壮大,不仅对水体悬浮物和胶体等的吸附不断增多,也给微生物提供一定的场所(加之浮床上的藻类),导致异养微生物大量繁殖,分解有机悬浮物和胶体的能力加强,最终水体的透明度提高,水质得到改善。本研究发现,有光下,水芹、豆瓣菜和无植物对 COD_{Mn} 、 BOD_5 的去除率比在避光时要高,且水芹、豆瓣菜处理的水体中 COD_{Mn} 、 BOD_5 去除率比无植物的高。处理 20 d,有光条件下,水芹、豆瓣菜和无植物对水体中 COD_{Mn} 、 BOD_5 的去除率均达 94.0% 以上。而遮光下各处理对 COD_{Mn} 、 BOD_5 的去除率在 57.6% 以上,最高仅为 89%。该结果与邵林广等^[16]对水浮莲研究的结果相似,但与童昌华等^[17]在低温季节对水生植物研究结果不一致。本试验用水中有机物的背景值并不高,在有光的条件下,许多低浓度的有机污染物还能刺激藻类生长^[18]。因此,在有光的处理下,由于植物和浮床触生藻类的协同作用对水体中的营养盐、有机物等的去除效果要好于遮光处理。

通常,叶绿素 a 含量可用来反映水体中藻类的生物量。本试验结果表明,水体中 Chla 含量随着处理时间的延长而降低,且遮光处理明显比有光处理的要低。遮光处理下,水体中的 Chla 去除率均达 97.6% 以上,而有光处理最高则为 88.7%。这是因为一方面遮光处理抑制了藻类的生长,另一方面是植物分泌一些杀藻物质,从而使水体中的 Chla 含量降低。DO 浓度随着处理时间的延长而升高,且有光处理的明显高于遮光处理。处理 12 d 后,有光有植物处理的水体中 DO 浓度均在 $3.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,而在遮光有植物处理下最高则为 $3.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这可能是由于在光下,植物和藻类(特别是绿藻)才能进行光合作用,植物光合作用产生的氧向根系输送和藻类自身的光合作用放出氧,从而使水体中的 DO 浓度升高。曾俊宁等^[19]在利用浮床种植观赏植物净化富营养化水体的研究中也

得出相似的结论。

3.3 浮床植物系统中不同植物氮磷积累量

植物体内的氮磷浓度能够反映出该种植物对氮磷的吸收能力。本试验结果表明,在遮光和有光条件下,水芹植物体内的氮磷积累量明显高于豆瓣菜。这说明水芹对氮、磷具有较高的吸收功能。生长在浮床系统相似条件下的试验植物,其生物量差异显著 ($P < 0.05$),这不仅是植物内在的生长特性表现,也是物种对这种环境的适应能力表现^[20]。本研究结果还表明,生物量与植物体内氮磷积累量的相关性好于体内浓度,因而可以直接通过生物量来评价它们对氮磷去除的作用(数据没给出)。水芹的生物量大,根系发达,无论在遮光和有光处理其对水体中的氮磷去除效果明显好于豆瓣菜;对浮床上的藻类生长也有一定的促进作用(地上部分茂盛的叶片也减少了强光对藻类的影响)。浮床植物及这些藻类都是水体氮磷去除的中间“汇”,但在本试验中藻类体内的氮磷含量有多少?它对水体中的氮磷去除的贡献是多大等问题需待进一步研究。周小平等^[21]也研究表明,水芹累积的 N、P 分别占浮床系统去除量的 40.32% 和 44.29%,说明植物的吸收同化作用是 N、P 去除的主要途径,植株体成为了富营养化水体 N、P 去除的一个中间“汇”,最后可以通过收获植株将其彻底移出系统。

4 结论

(1) 利用植物浮床系统净化富营养化水体的试验表明,试验后水体中的藻类减少,但在浮床上的触生藻类增多,且其主要以小球藻 (*Chlorella vulgaris*)、小球衣藻 (*Chlamydomonas microspheara*) 等绿藻为主。

(2) 植物和无植物在有光条件下对 TN、TP、 COD_{Mn} 、 BOD_5 的去除率比在避光时要高,且植物处理的水体中的 TN、TP 去除率明显高于无植物(对照)处理。有植物和无植物在有光、遮光条件下处理,水体中的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DP、Chla 的浓度均随处理时间的延长而降低,且有光处理下, $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DP 浓度下降明显低于在遮光下和对照处理。然而,DO 浓度变化则相反,即随着处理时间的延长而升高,且在有光条件下的比在遮光下和对照处理要高。

(3) 遮光条件下,水芹和豆瓣菜地上部分 N 的净积累量分别为 0.5908 和 $0.3675 \text{ mg} \cdot \text{plant}^{-1} (\text{DW}) \cdot \text{d}^{-1}$, P 的净积累量分别为 0.1530 和 $0.0665 \text{ mg} \cdot \text{plant}^{-1} (\text{DW}) \cdot \text{d}^{-1}$;而无光条件下,水芹和豆瓣菜地上部分 N 的净积累量为 0.2566 和 $0.1162 \text{ mg} \cdot \text{plant}^{-1} (\text{DW}) \cdot$

d^{-1} , P 的净积累量为 $0.054\ 8$ 和 $0.018\ 1\ \text{mg} \cdot \text{plant}^{-1} (\text{DW}) \cdot \text{d}^{-1}$ 。

参考文献:

[1] 邱昌恩, 况琪军, 刘国祥, 等. 不同氮浓度对绿球藻生长及生理特性的影响[J]. 中国环境科学, 2005, 25(4):408–411.
QIU Chang-en, KUANG Qi-jun, LIU Guo-xiang, et al. Influence of different nitrogen concentrations on the growth and physiological characteristics of *Chlorococcum* sp[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(4):408–411.

[2] Headley T R, Huett D O, Davison L. The removal of nutrients from plant nursery irrigation runoff in subsurface horizontal-flow wetlands [J]. *Water Sci Technol*, 2001, 44:77–84.

[3] Huett D O, MorriSb S G, Smitha G, et al. Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands [J]. *Water Research*, 2005, 39:3259–3272.

[4] 由文辉, 刘淑媛. 利用人工基质无土栽培经济植物净化富营养化水体的研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1999, 35(4):518–522.
YOU Wen-hui, LIU Shu-yuan. A study on purification of the eutrophic water with economical plants cultured on artificial substratum[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1999, 35(4):518–522.

[5] James F Reilly, Alex J Horneb, Craig D Miller. Nitrate removal from a drinking water supply with large free surface constructed wetlands prior to groundwater recharge [J].*Ecological Engineering*, 2000, 14:33–47.

[6] Salmon C, Crabos J L, Sambuco J P, et al. Artificial wetland performances in the purification efficiency of hydrocarbon wastewater [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1998, 104:313–329.

[7] 宋祥甫, 邹国燕, 吴伟明, 等. 浮床水稻对富营养化水体中氮、磷的去除效果及规律研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(5):489–491.
SONG Xiang-pu, ZOU Guo-yan, WU Wei-ming, et al. Study on the removal effect and regulation of Rice plants on floating-beds to man nutrients N and P in eutrophicated water bodies[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 18(5):489–491.

[8] 葛 滢, 王晓月, 常 杰. 不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(6):690–692.
GE Ying, WANG Xiao-yue, CHANG Jie. Comparative studies on the purification ability of plants in different degree eutrophic water[J].*Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(6):690–692.

[9] 国家环保总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版).北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration of China committee. Analysis methods of water and wastewater (Fourth edition)[M]. Beijing: China Environmental Science Publishing Company, 2002.

[10] 鲍士旦.土壤农化分析[M]. (第三版).北京: 中国农业出版社, 2000.
PAO Shi-dan. Analysis of agri-chemical soil (Third edition) [M]. China Agricultural Publishing Company, 2000.

[11] Xu Y J, Li D s, WangW L, et al. Variations of the chemical factors in seawater ponds before and after *Prorocentrum micans* water-bloom [J]. *Trans Oceanol Limnol*, 2000, (1): 41–46 (in Chinese).

[12] Martínez M E, Jiménez J M, El Yousfi F. Photoautotrophic consumption of phosphorus by *Scenedesmus obliquus* in a continuous culture. Influence of light intensity [J]. *Process Biochemistry*, 1999, 34(8): 811–818.

[13] 王文林, 马 婷, 李 强, 等. 水生高等植物季相交替群落对富营养化水体净化效果调查[J]. 环境监测管理与技术, 2006, 18(1): 16–19.
WANG Wen-lin, MA Ting, LI Qiang, et al. Survey on the eutrophic water purification with the aquatic plant community in the turn[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2006, 18(1): 16–19.

[14] 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[J]. 水生生物学报, 2004, 28(3): 323–326.
KUANG Qi-jun, MA Pei-ming, LIU Guo-xiang, et al. Study on the removal efficiency of nitrogen and phosphorus by filamentous green algae[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, 28(3): 323–326.

[15] 马沛明, 况琪军, 刘国祥, 等. 底栖藻类对氮、磷去除效果研究[J]. 武汉植物学研究, 2005, 23(5): 465–469.
MA Pei-ming, KUANG Qi-jun, LIU Guo-xiang, et al. Study on removal efficiency of nitrogen and phosphorus by freshwater benthic algae[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2005, 23(5): 465–469.

[16] 邵林广. 水浮莲净化富营养化湖泊试验研究[J]. 环境与开发, 2001, 16(2): 28.
SHAO Lin-guang. Experiment research in purification on nutrient lakes by means of pistia stratiotes [J]. *Environment and Exploitation*, 2001, 16(2): 28.

[17] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1447–1450.
TONG Chang-hua, YANG Xiao-e, PU Pei-ming. Purification of eutrophicated water by aquatic plant [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1447–1450.

[18] 沈 宏, 周培疆. 环境有机污染物对藻类生长作用的研究进展[J]. 水生生物学报, 2002, 26(5): 529–535.
SHEN Hong, ZHOU Pei-jiang. Advance in the study on effect of environmental organic pollution the algae growth[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, 26(5): 529–535.

[19] 曾俊宁, 林东教, 李 莹. 浮床种植观赏植物净化富营养化水体的试验[J]. 广州环境科学, 2006, 21(2): 19–22.
ZENG Jun-ning, LIN Dong-jiao, LI ying. Treatment of eutrophicated water by floating culture plants [J]. *Guangzhou Environmental Sciences*, 2006, 21(2):19–22.

[20] Tanner C C. Plants for constructed wetland treatment systems—A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species [J]. *Ecological Engineering*, 1996, 7:59–83.

[21] 周小平, 王建国, 薛利红, 等. 浮床植物系统对富营养化水体中氮、磷净化特征的初步研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11):2199–2203.
ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-guo, XUE Li-hong, et al. N and P removal characters of eutrophic water body under planted float [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11):2199–2203.