

黄花水龙对富营养化水体中氮磷去除效果的研究

王超, 张文明*, 王沛芳, 侯俊

(河海大学环境学院 教育部浅水湖泊综合治理与资源开发重点实验室, 南京 210098)

摘要:在太湖地区沟渠、池塘及河网中广泛分布着 1 种形态类似水花生的土著浮水植物——黄花水龙, 其生长习性表明黄花水龙是太湖地区水生态系统修复的潜在物种. 采用室内试验和现场观测相结合的方式, 进一步探讨了黄花水龙对富营养化水体中氮磷的去除效果. 室内试验结果显示, 夏季黄花水龙对总氮去除率约为 60%, 分别是水葫芦、水花生和对照的 2.6、2.9 和 3.8 倍, 对总磷去除率约为 25%, 分别是水葫芦、水花生和对照的 0.7、1.9 和 5 倍; 冬季黄花水龙对总氮和总磷去除率分别约为 23% 和 20%, 是对照的 3.3 和 2 倍; 夏季和冬季黄花水龙对氨氮和硝氮亦有良好的净化效果. 宜兴林庄港现场观测显示, 7~10 月引种黄花水龙的河段水体中总氮和总磷的去除率为 10.2%~19.6% 和 23.4%~41.6%, 而同期对照河段仅为 0.1%~1.6% 和 3.7%~5.6%. 室内试验和现场试验结果均表明黄花水龙对受损水体中氮磷具有良好的净化效果, 可作为太湖河网富营养化水体修复的植物之一.

关键词:黄花水龙; 富营养化水体; 氮; 磷; 植物修复; 室内试验; 现场观测

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)05-0975-07

Removal of Nitrogen and Phosphorus in Eutrophic Water by *Jussiaea stipulacea* Ohwi

WANG Chao, ZHANG Wen-ming, WANG Pei-fang, HOU Jun

(Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, HoHai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: *Jussiaea stipulacea* Ohwi, a native kind of floating vegetation resembling *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb., is widespread in ditches, ponds and rivers of Taihu Lake Basin. Its growth habits indicate its potential use in aquatic ecological restoration in Taihu Lake Basin. The removal effects of *Jussiaea stipulacea* Ohwi on nitrogen and phosphorus in eutrophic water were further studied in indoor experiment, as well as in field observation. The results of indoor experiment show that in summer, the removal rate for total nitrogen was 60%, which is 1.6, 1.9 and 2.8 times greater than that of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms., *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb., and control, respectively, and the removal rate for total phosphorus was about 25%, which is 0.3 times lower than that of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms., but 0.9 and 4 times higher than that of *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb., and control, in winter, the removal rates for total nitrogen and total phosphorus were 23% and 20%, 2.3 and 1 times higher than that of control; *Jussiaea stipulacea* Ohwi also has good removal effects for ammonia and nitrite. And the results of field observation in Linzhuanggang River, Yixing City, show that the removal rates of total nitrogen and total phosphorus in July to October were 10.2%~19.6% and 23.4%~41.6% in the reach with *Jussiaea stipulacea* Ohwi, while only 0.1%~1.6% and 3.7%~5.6% in control reach. Based on its good purifying effect on nitrogen and phosphorus in indoor experiment and field observation, the indigene *Jussiaea stipulacea* Ohwi is recommended as one species of aquatic vegetation in phytoremediation for eutrophic water in rivers of Tailu Lake Basin.

Key words: *Jussiaea stipulacea* Ohwi; eutrophic water; nitrogen; phosphorus; phytoremediation; indoor experiment; field observation

利用水生植物, 尤其是水生维管束植物和高等藻类, 对受损水体进行植物修复得到国内外的广泛共识^[1~3]. 我国水生植物种类繁多, 目前应用到水生生态修复工程的有四五十种, 并取得了丰硕的成果^[4~7], 但在研究和利用土著水生植物修复受损水体方面仍然存在较大的不足. 应用土著水生植物具有克服外来物种入侵、保护原生态系统、修复效果好等优点.

在太湖地区沟渠、池塘及河网中广泛分布着 1 种形态类似水花生的土著浮水植物——黄花水龙 (*Jussiaea stipulacea* Ohwi) (图 1). 至今, 关于黄花水龙

的研究仅限于其结构和形态方面^[8,9], 对其净水效果则鲜见报道. 考察其生长习性后, 初步认为黄花水龙是太湖地区水生态系统修复的潜在材料, 原因是: ①黄花水龙已归化为太湖地区土著物种, 有其天敌, 易于控制; ②生长迅速; ③生命力顽强, 可湿生或沼生, 可以根状茎形式越冬; ④长有白色呼吸根, 可适应水深不同或变化大的生境; ⑤长有不定根, 可牢牢

收稿日期: 2006-08-07; 修订日期: 2006-10-10

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412303); 国家自然科学基金项目(50379012)

作者简介: 王超(1958~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水资源保护与修复.

* 通讯联系人, E-mail: wining@hhu.edu.cn

盘绕或扎根于水底介质,且生长茂密,适合做水生态修复的外围物种;⑥营养繁殖,极易成活,适合栽植;⑦花为黄色,直径约 3~4 cm,叶片嫩绿且在傍晚合拢宛如玫瑰,具有很高的景观价值,全株可入药,具有开发利用价值。



图 1 黄花水龙照片
Fig.1 Photo of *Jussiaea stipulacea* Ohwi

本研究采用了室内试验和现场观测相结合的方式,进一步探讨黄花水龙对富营养化水体中氮磷的去除效果.室内试验以水生态修复中研究较多的水葫芦和水花生作为参照,对比研究了黄花水龙在夏季对富营养化水体中氮磷的净化效果,并考察了低温季节黄花水龙的净化能力.现场试验对比了引种黄花水龙河段和对照河段对富营养化河水中氮磷的去除效果.本研究旨在为太湖地区河网富营养化水体修复提供植物选择的依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

黄花水龙、水葫芦和水花生均采自太湖地区河网.试验容器为 50 cm×30 cm×50 cm 的玻璃缸,每缸水位 35 cm.试验水体取自南京市乌龙潭,基本水质情况见表 1.从这些指标来看,该水体为富营养化水体^[10].

表 1 试验水体的基本水质/mg·L⁻¹

Table 1 Basic water quality in experiments/mg·L⁻¹

试验分类	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N
夏季试验	7.89	2.17	6.56	0.03	0.07
冬季试验	7.24	1.03	6.23	0.19	0.02

1.2 试验设计

试验在河海大学实验室大厅内进行.试验前用静置1 d的自来水将野外采回的植物冲洗干净,然后

用蒸馏水清洗,自然风干 10 min 后称重.夏季试验(2005-05-04~2005-06-05,共 32 d)水进缸前经 2 层纱布过滤以除去浮萍;冬季试验(2005-11-20~2006-01-13,共 54 d)则直接进水.夏季试验共设 8 个缸,其中黄花水龙、水葫芦、水花生和对照每组 2 个重复.冬季试验设 6 个缸,其中黄花水龙和对照分别设 4 和 2 个重复.试验初始生物量均为 65 g/缸,对照组未种水生植物.试验采用室内自然光照,并添加蒸馏水补充水分蒸发.试验开始后,每隔 2~3 d取 1 次水样,并分别测定总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、亚硝氮(NO₂⁻-N)、硝氮(NO₃⁻-N)以及溶解氧(DO)、水温(*t*)等,监测方法见表 2.对 TN 和 TP 绘制去除率与时间曲线,NH₄⁺-N 等由于去除率变幅巨大,对其绘制剩余浓度与时间曲线.此外为方便与夏季试验比较,冬季试验部分指标采用前 30 d 监测值.

表 2 监测指标的分析方法

Table 2 Analytic methods of items measured in water

监测指标	监测方法	参考标准
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	GB 11894-89
TP	钼酸铵分光光度法	GB 11893-89
NH ₄ ⁺ -N	纳氏试剂比色法	GB 7479-87
NO ₂ ⁻ -N	分光光度法	GB 7493-87
NO ₃ ⁻ -N	酚二磺酸分光光度法	GB 7480-87
DO 和 <i>t</i>	雷磁便携式溶氧仪	

2 结果与讨论

2.1 植物生长态势

夏季试验期间室内平均光强为2 210 lx,气温和水温变化范围为 11~33℃和 18~26℃,3 种水生植物生长存在明显差异.黄花水龙生长最快,根、茎长度分别由试验初期的1 cm和25 cm左右增加到末期的2 cm和90 cm左右,植物鲜重增加了 104%(图 2);水葫芦生长较快,不断有色泽鲜嫩的水葫芦长出,个体数由原来的 15 个增加到 27 个,植物鲜重增加了 31%;水花生生长较为缓慢,根、茎长度分别由约 1 cm和 25 cm 增加到约 2~3 cm和 70 cm,植物鲜重仅增加了 23%.

冬季试验期间室内平均光强为1 240 lx,气温和水温变化范围为-5~19℃和 0~12℃.冬季试验期内,黄花水龙前 30 d 长势良好,随后由于气温下降,水上部分逐渐枯萎并逐渐沉入水下,整个试验期内黄花水龙鲜重下降约 5%.

从植物的生长态势来看,黄花水龙在温暖条件

下的生长迅速和低温条件下的较强生命力使之具备了修复富营养化水体的巨大潜力.此外,试验过程中观察到黄花水龙的自然天敌,因此克服了外来物种疯长而无法控制的弊端.

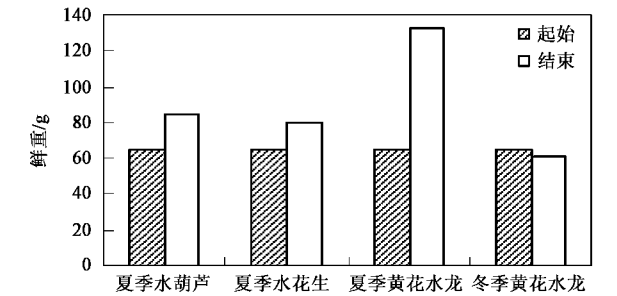
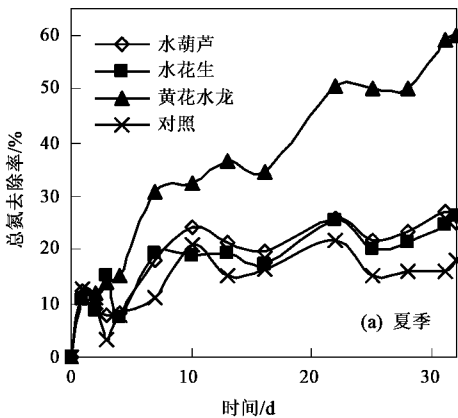


图2 夏季和冬季供试水生植物的生物量

Fig.2 Plant biomasses in summer and winter experiments

2.2 对总氮的去除效果

由图3(a)可以看出,3种水生植物在夏季对总氮均有明显的去除效果,且去除率存在明显差异,黄



花水龙对 TN 的去除率明显高于水葫芦、水花生和对照.有黄花水龙的水体中 TN 去除率为 60%,黄花水龙(鲜重)可去除 N 0.119 mg/(g·d).有水葫芦和水花生的水体中 TN 去除率分别约为 23%和 21%,对照水体中 TN 去除率仅为 16%左右.黄花水龙对 TN 的去除效果(去除率及单位时间单位鲜重植物的去除能力,下同)分别是水葫芦、水花生和对照的 2.6、2.9 和 3.8 倍.万志刚等^[11]对 10 种水生植物的研究发现水葫芦对 TN 的去除能力最强.本研究的结果表明,黄花水龙对 TN 的去除能力甚至高于水葫芦,可见黄花水龙是 1 种理想的植物材料用于净化富营养化水体中的氮素.

冬季低温条件下,有黄花水龙的水体中 TN 平均去除率可达 23%,黄花水龙(鲜重)去除 N 0.025 mg/(g·d);对照水体中 TN 平均去除率仅为 7%;冬季黄花水龙对 TN 的去除效果是对照的 3.3 倍,如图 3(b).可见低温条件下黄花水龙对氮素依然具有良好的净化效果.

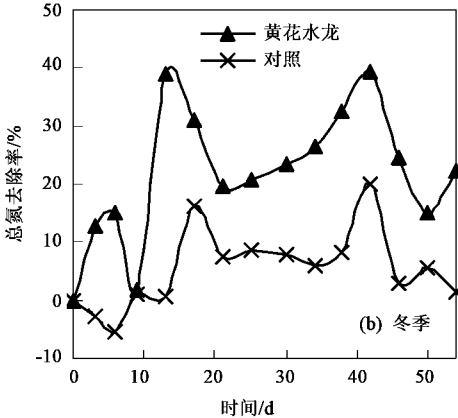


图3 试验水体中 TN 去除率

Fig.3 Removal rate of TN in summer and winter studied water body

2.3 对氨氮的去除效果

夏季试验第 3 ~ 10 d,各受试水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度由 6.56 mg/L 急降至 0.3 ~ 0.6 mg/L,去除率在 90% ~ 95% 左右,且有黄花水龙水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除速度明显快于有水葫芦和水花生水体,如图 4(a),后期有黄花水龙的水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度高于其它试验水体,原因可能是试验后期水面以下的黄花水龙植株衰败产生的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 重新释放到水体中.冬季试验前 30 d,有黄花水龙水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度由 6.23 mg/L 降至 0.14 mg/L,去除率达 98%,去除效果比对照高出 13% ~ 68%,如图 4(b).黄蕾等^[12]对冬季伊乐藻等 4 种水生植物对氨氮吸收效果的研究也

得到类似的结果.

已有的研究表明,水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除的主要途径有植物吸收、硝化反应和氨挥发等^[13].氨挥发的条件之一是水体 $\text{pH} > 8.0$,而监测结果显示各试验水体 $\text{pH} < 8.0$,因此氨挥发不是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除的主要原因.在夏季,有水生植物的水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除速度略快于对照,但去除效果相差不大,说明水生植物吸收对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除贡献较小.由图 4(a)和图 5(a)对比分析可以看出,水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度存在此消彼长的变化规律,因此夏季 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除可能主要是由水体中氨氧化菌的硝化作用将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$

氧化为 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N. 冬季有黄花水龙的水体中 NH_4^+ -N 的去除效果明显好于对照, 此外冬季早期水体中 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 浓度也存在明显的此消彼长

的变化规律[图 4(b)和图 5(b)], 结果暗示冬季植物吸收和硝化作用可能是 NH_4^+ -N 去除的主要原因.

2.4 对硝氮的去除效果

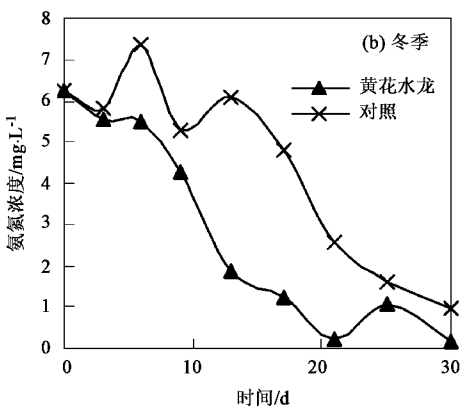
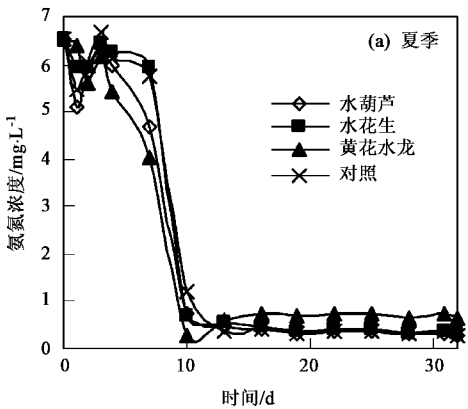


图 4 试验水体中氨氮浓度的变化

Fig.4 NH_4^+ -N concentrations in summer and winter studied water body

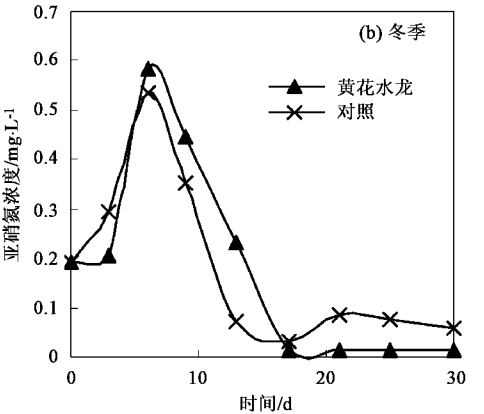
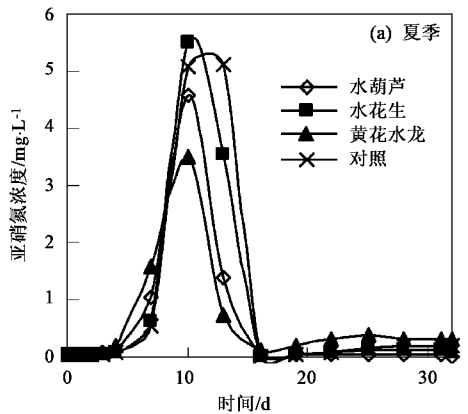


图 5 试验水体中亚硝氮浓度的变化

Fig.5 NO_2^- -N concentrations in summer and winter studied water body

对比图 5 和图 6, 水体中 NO_2^- -N 发生硝化反应, 使得夏季水体中 NO_3^- -N 从 0.07 mg/L 升至 1.70 ~ 3.15 mg/L, 冬季 NO_3^- -N 从 0.02 mg/L 升至 2.11 ~ 2.71 mg/L, 出现了 NO_3^- -N 累积现象, 但不管是夏季还是冬季随着培养时间的延长, 有水生植物的水体中 NO_3^- -N 浓度均有下降, 如图 6. 通过比较, 发现有黄花水龙的水体中 NO_3^- -N 的累积程度最轻, 即黄花水龙对 NO_3^- -N 的去除效果优于水葫芦和水花生, 另有水生植物水体的去除效果优于对照水体.

已有研究表明, 水体中 NO_3^- -N 去除的主要原因有反硝化作用和水生植物的吸收作用. 一般认为, 发生反硝化的条件之一是水中 DO 应在 0.5 mg/L 以

下, 而夏季和冬季试验水体 DO 分别在 1.4 ~ 6 mg/L 和 4 ~ 10 mg/L 之间, 较高的 DO 说明反硝化不是本试验中 NO_3^- -N 去除的主要原因, 进而表明水生植物吸收很可能是试验水体中 NO_3^- -N 降低的主要原因, 从本试验结果看黄花水龙有较强的吸收 NO_3^- -N 的潜力. NO_3^- -N 被植物吸收作为氮源, 在硝酸还原酶 (NR)、谷氨酸合酶 (GOGAT)、谷氨酰胺合酶 (GS) 等植物体内酶的作用下合成植物蛋白. 但是, 在某些微观环境下, 如水生植物表面附着的生物膜的内部, 则可能出现缺氧或厌氧条件, 从而为反硝化菌利用 NO_3^- -N 进行同化和异化反硝化创造了条件. 因此, 反硝化作用也不能完全排除, 有待进一步探讨.

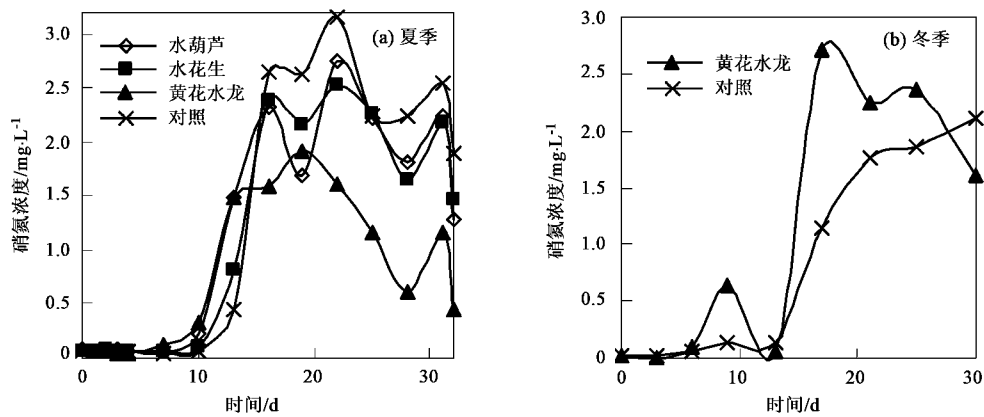


图 6 试验水体中硝氮浓度的变化

Fig.6 NO₃⁻-N concentrations in summer and winter studied water body

2.5 对总磷的去除效果

夏季试验结果显示 3 种水生植物对 TP 的去除效果亦存在较大差异,如图 7(a):有黄花水龙水体 TP 去除率为 25% 左右,黄花水龙(鲜重)可去除 P 0.014 mg/(g·d);有水葫芦和水花生 的水体 TP 去除率分别为 34% 和 13% 左右.对照水体中 TP 去除率为 5% 左右.可见黄花水龙对 TP 的去除效果分别是水葫芦的 0.7 倍,水花生的 1.9 倍和对照的 5 倍.因此,夏季黄花水龙对磷素的去除能力虽略小于水葫芦,但明显高于水花生和对照.

冬季试验有黄花水龙水体中 TP 平均去除率为

20%,如图 7(b),黄花水龙(鲜重)可去除 P 0.003 mg/(g·d).对照水体中 TP 平均去除率为 10%.因此,黄花水龙在冬季对 TP 仍有较好的去除作用,去除效果是对照水体的 2 倍.

水生植物对去除磷素发挥重要作用,一方面水生植物通过同化作用去除磷,即通过植物根系吸收可溶性活性磷(SRP),合成核酸、核苷酸、磷脂及糖磷酸酯等植物细胞组成;另一方面,水生植物表面为聚磷菌等微生物提供附着空间,聚磷菌在好氧条件下通过主动输送的方式将水体中的 H₃PO₄ 摄入体内合成 ATP 和聚磷酸盐.

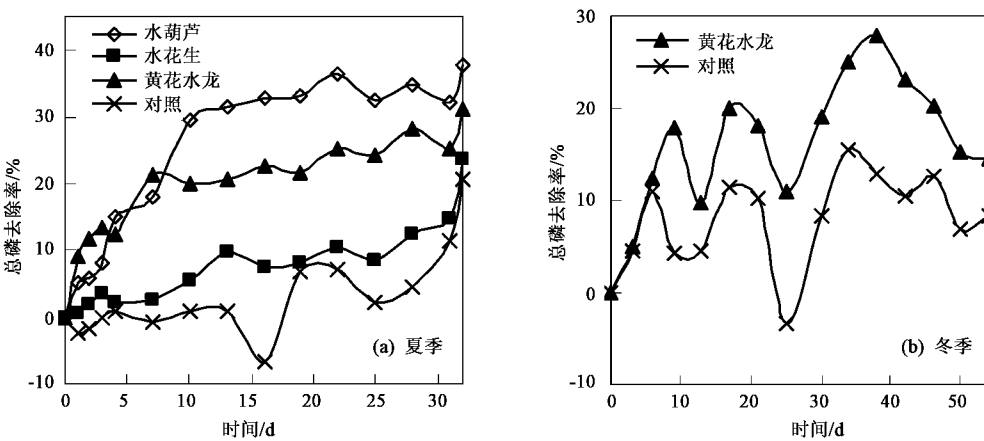


图 7 试验水体中 TP 去除率

Fig.7 Removal rate of TP in summer and winter studied water body

3 现场观测

现场观测在宜兴市大浦镇林庄港,观测河段长

400 m,宽 10~14 m,水深 1.1~2.3 m,河道水体为富营养化水体.在试验河段的前 200 m 引种黄花水龙,到监测开始时,黄花水龙已占据河道两侧各 1~

2 m;后 200 m 为对照河段.两段河段在河道形态、水流特性等其它方面均基本一致.监测点布设在各河

段的上、下游断面,监测指标为 TN 和 TP,监测结果见图 8 和图 9.

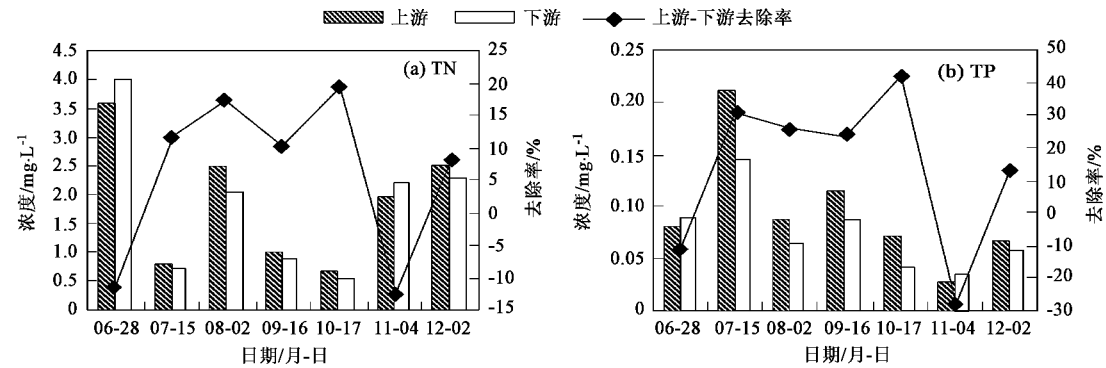


图 8 引种黄花水龙河段水体中 TN 和 TP 去除效果
Fig.8 Removal of TN and TP in studied reach with *Jussiaea stipulacea* Ohwi

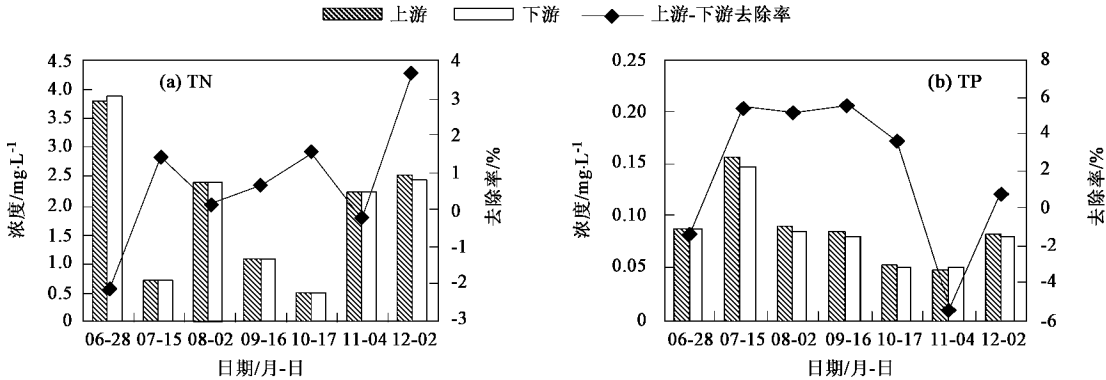


图 9 对照河段水体中 TN 和 TP 去除效果
Fig.9 Removal of TN and TP in control reach

根据观测,7~10月,黄花水龙生长旺盛,河段水体中 TN 和 TP 的去除率分别为 10.2%~19.6%和 23.4%~41.6%(图 8);同期对照河段水体中 TN 和 TP 的去除率则只有 0.1%~1.6%和 3.7%~5.6%(图 9).12 月份部分黄花水龙衰败,水体中 TN 和 TP 的去除率分别为 8.3%和 13.3%,此时对照河段去除率仅为 3.7%和 0.9%. 06-28 和 11-04 太湖水发生倒灌,因此去除率表现为负值.观测结果表明,黄花水龙是修复富营养化水体的理想材料,可在太湖河网水生态修复工程中应用.

4 结论

(1)室内试验结果表明,①黄花水龙对 TN 具有极好地净化效果,其中夏季对 TN 去除率约为 60%,黄花水龙(鲜重)可去除 N 0.119 mg/(g·d),是水葫芦、水花生和对照的 2.6、2.9 和 3.8 倍;冬季低温条

件下,黄花水龙对 TN 仍有良好的去除效果,去除率约为 25%,黄花水龙(鲜重)去除 N 0.025 mg/(g·d),是对照的 5 倍.②黄花水龙对 TP 具有较好地净化效果,其中夏季对 TP 去除率约为 25%,黄花水龙(鲜重)可去除 P 0.014 mg/(g·d),分别是水葫芦、水花生和对照的 0.7 倍、1.9 倍和 5 倍;冬季低温条件下,黄花水龙对 TP 仍有较好地去除效果,去除率约为 20%,黄花水龙(鲜重)可去除 P 0.003 mg/(g·d),是对照的 2 倍.③黄花水龙在夏季对 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的去除效果优于水葫芦和水花生,更优于对照水体;黄花水龙在冬季对 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 亦有良好地去除效果.

(2)现场观测结果显示,7~10 月引种黄花水龙的河段水体中 TN 和 TP 的去除率分别为 10.2%~19.6%和 23.4%~41.6%,而同期对照河段水体中的去除率只有 0.1%~1.6%和 3.7%~5.6%,表明

黄花水龙对 TN 和 TP 的去除效果明显.

(3)室内试验和现场观测结果均表明,土著物种黄花水龙可有效去除富营养化水体中的氮磷营养盐,可用作太湖河网富营养化水体的修复植物.

参考文献:

[1] Qiu D R, Wu Z B, Liu B Y, *et al.* The restoration of aquatic macrophytes for improving water quality in a hypertrophic shallow lake in Hubei Province, China [J]. *Ecological Engineering*, 2001, **18**(2): 147 ~ 156.

[2] Jukkrit M, Saburo I. Modelling of environmental phytoremediation in eutrophic river-the case of water hyacinth harvest in Tha-chin River [J]. *Thailand. Ecological Modelling*, 2001, **142** (1 ~ 2): 121 ~ 134.

[3] Moss B. Engineering and biological approaches to the restoration from eutrophication of shallow lakes in which aquatic plant communities are important components [J]. *Hydrobiologia*, 1990, **200**: 367 ~ 377.

[4] 李睿华,管运涛,何苗,等.河岸芦苇、茭白和香蒲植物带处理受污染河水中试研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(3): 493 ~ 497.

[5] 王国祥,濮培民,张圣照,等.人工复合生态系统对太湖局部水域水质净化作用[J]. *中国环境科学*, 1998, **18**(5): 410 ~ 414.

[6] 张荣社,李广贺,周琪,等.潜流湿地中植物对脱氮除磷效果的影响中试研究[J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 83 ~ 86.

[7] 李文朝.富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究[J]. *中国环境科学*, 1997, **17**(1): 53 ~ 57.

[8] 颜素珠,范允平.黄花水龙与水龙形态结构及结构的比较观察[J]. *广西植物*, 1997, **17**(2): 152 ~ 157.

[9] 常福辰,施国新,丁小余,等.水龙营养器官的形态结构生态适应[J]. *南京师范大学学报(自然科学版)*, 2003, **26**(1): 101 ~ 105.

[10] 金相灿,屠清英.湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[11] 万志刚,沈颂东,顾福根,等.几种水生维管束植物对水中氮、磷吸收率的比较[J]. *淡水渔业*, 2004, **34**(5): 6 ~ 8.

[12] 黄蕾,翟建平,王传瑜,等.4 种水生植物在冬季脱氮除磷效果的试验研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(2): 366 ~ 370.

[13] Zimmo O R, van der Steen N P, Gijzen H J. Nitrogen mass balance across pilot-scale algae and duckweed-based wastewater stablisation ponds [J]. *Water Research*, 2004, **38**(4): 913 ~ 920.