

三种水(湿)生植物对浑河水体氮去除能力研究

宋红^{1,2}, 陈玮¹, 何兴元¹, 刘周莉¹, 黄彦青¹, 于帅^{1,2}

(1. 森林与土壤生态国家重点实验室, 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110164;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:以黄菖蒲、菖蒲和溪荪鸢尾3种常见水生植物为材料,通过室内水培试验研究了在不同程度富营养化水体中氮的去除能力。根据浑河水体富营养化状态,设置了2种处理:W₀处理(低浓度)总氮15 mg/L、氨氮7.5 mg/L, W₁处理(高浓度)总氮60 mg/L、氨氮30 mg/L。结果表明:3种植物对总氮氨氮都有较好的去除效果。在高低浓度组中,黄菖蒲、菖蒲和溪荪鸢尾总氮去除率分别为71.17%、95.03%、46.69%、78.31%和51.98%、80.34%;氨氮去除率分别为93.33%、69.37%、58.61%、97.33%和73.03%、84.00%。在低浓度处理中,总氮去除效果为黄菖蒲>溪荪鸢尾>菖蒲,氨氮去除效果为菖蒲>溪荪鸢尾>黄菖蒲;在高浓度处理中,总氮和氨氮去除效果均为黄菖蒲>溪荪鸢尾>菖蒲。黄菖蒲较适用于氮污染形式主要为氨氮且浓度较高的富营养化水体,菖蒲适用于低浓度富营养水体中的氨氮去除。浑河水体富营养化问题中氨氮浓度较高,应优先选择黄菖蒲。3种水生植物都是在前2周就已经发挥了较大的去除作用,在后2周内去除效果并不明显。黄菖蒲和溪荪鸢尾2种植物的营养去除增效均在第17~23天达到最大值。

关键词:菖蒲;黄菖蒲;溪荪鸢尾;营养去除增效;氮

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2014)02-0014-06

我国湖泊富营养化程度已十分严重,且总氮含量都异常偏高是受污染的湖泊的特征之一(田永杰等,2006;方焰星等,2010)。据蔡龙炎等(2010)总结,我国湖泊总氮(TN)的变化范围为0.11~29.2 mg/L,虽然随着纬度的升高,TN含量有减少趋势,但工业化较发达的北方仍然存在较严重的富营养化现象。东北地区的辽河水系总体为重度污染,主要污染指标为氨氮(NH₄⁺-N)等(杨育红等,2010)。其中的浑河因流经抚顺、沈阳2个重工业城市,水体中NH₄⁺-N浓度高,2004-2008年全河段NH₄⁺-N浓度均超过V类水质标准,浑河流域下游污染较重,水质属于V类甚至劣V类(>1.5 mg/L),个别样点水体中NH₄⁺-N高达21.55 mg/L(张鸿龄等,2011)。可见,对浑河流域水体富营养化的治理及恢复上游河岸带植被是目前亟需完成的任务之一(于帅等,2012)。目前,控制和修复富营养化水体

的生态工程(张爱菊等,2011)有很多,如人工湿地、植物缓冲带、生态浮岛等,而在这些生态工程中水生植物是不可缺少的一部分(Howard,1981;Gao et al,2009;汪秀芳等,2013)。不同植物的生长速率、对营养物质的需求和吸收能力及对微生物生长的促进作用都存在差异,因而对水体的净化能力也就各不相同(彭婉婷等,2012;Lee et al,2009;Fraser et al,2004)。付晓云(2012)研究了浑河上游相关水生植物净化水质能力,但并没有考虑到其主要污染物NH₄⁺-N方面的监测。大部分针对利用水生植物对水体富营养化治理的研究中,都普遍更侧重于各植物所能达到的去除效果的差异性,未能对修复过程中去除效率进行观测和讨论,且目前针对浑河流域利用水生植物对水体富营养化治理的研究仍然较欠缺。本文选择菖蒲(*Acorus calamus*)、黄菖蒲(*Iris pseudacorus*)和溪荪鸢尾(*Iris sanguinea*)3种耐寒性较强且兼具景观和经济价值的水生植物,在高、低2种试验浓度下观察对总氮和氨氮的去除效果,以期为浑河以及其他湖泊选取水生植物控制水体富营养化的工作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

试验于2012年在中国科学院大学沈阳应用生态研究所新园区试验室进行,直射及散射光照,保持

收稿日期:2013-05-04

基金项目:国家水体污染控制科技重大专项课题“浑河上游水环境修复与生态水维持技术集成与示范”(2012ZX07202-008)和国家科技支撑计划课题“城市绿地生态服务功能提升技术及示范”(2012BAC05B05)。

通讯作者:陈玮,1965年生,研究员,主要从事城市森林生态研究。E-mail: chenwei5711@163.com

作者简介:宋红,1989年生,硕士,主要从事植物生态学实验。E-mail: jdsonghong@163.com

良好通风。试验期间气温 15 ~ 23℃。将野外采集的菖蒲、黄菖蒲和溪荪鸢尾放入曝气处理后的自来水中培养进行缓苗以修复运移过程中受损的根系,之后选取生物量较为接近的水生植物在 1/2 水稻标准营养液(Yoshida et al, 1971)内进行适应性培养。经过 1 周的适应性培养后,选择长势较好的植物作为研究对象。本试验采用静态水培方法,用水洗净植物的根系后将其培养在盛有水稻营养液的水桶内,同时设不种植植物的空白对照。定期向桶中补充蒸馏水,以保证营养液体积及植物生长对水分的需求。为更好的模拟植物根系黑暗的生长环境,同时防止由于阳光照射引起的藻类过量繁殖而影响后期水中氮磷等指标的测定,在水桶外侧覆一层黑色的塑料纸,桶上方用有孔不透光的塑料板加以遮盖。

浑河主要水质污染指标为 TN(总氮),全流域 TN 含量平均为 9.69 mg/L,最高含量为 21.39 mg/L,有河段 NH_4^+ -N 达到 6.00 mg/L(张鸿龄等, 2011, 胥学鹏等, 2011)。本试验氮浓度有 2 种处理(W_0 、 W_1)。 W_0 处理 TN 浓度 15 mg/L、 NH_4^+ -N 浓度 7.5 mg/L,较符合浑河水质状况; W_1 处理 TN 浓度 60 mg/L、 NH_4^+ -N 浓度 30 mg/L,是为加深对植物去污能力的研究进行的扩大化处理。试验中氮的浓度通过添加 NH_4NO_3 (化学纯)来实现。每种植物每个处理下设 3 个重复。在水稻标准营养液的基础上按照试验设计每 1 L 水样分别中加入 42.88、171.52 mg 的 NH_4NO_3 。

1.2 研究方法

试验时间 28 d,每隔 7 d 取 1 次水样测定 TN、 NH_4^+ -N 浓度和 pH。试验前测植物初始生物量,试验结束时收获植物并测得生物量终值。

1.2.1 水样中污染物去除率的测定 TN 测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB11894-89), NH_4^+ -N 测定采用纳氏试剂比色法(GB7479-87)。去除率参照葛滢等(2000)的方法计算。

$$\text{去除率}(\%) = (C_0 \times V_0 - C_i \times V_i) / (C_0 \times V_0) \times 100\%$$

式中: C_0 为初始时的浓度, V_0 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。

1.2.2 水体中 TN、 NH_4^+ -N 去除增效 随着时间的变化,各处理不同植物系统中总氮和氨氮的浓度变化显然是存在差异的,且无植物系统的空白对照中的 2 种营养物的浓度变化幅度也不同。为了更直观的表现各植物所起到的对营养物的去除作用,采用营养去除增效(NRE)来体现植物系统起到的去除

作用。

$$\text{NRE} = [(C_0 \times V_0 - C_i \times V_i) - (C_{C_0} \times V_0 - C_{C_i} \times V_{C_i})] / (C_0 \times V_0) \times 100\% = C_{C_i} - C_i / C_0$$

式中: C_0 为试验水体初始时的浓度, V_0 为初始时的水体积, C_i 为试验水体第 i 天的浓度, V_i 为试验水体第 i 天的水体积, C_{C_i} 为对照水体第 i 天的浓度, V_{C_i} 为对照水体第 i 天的水体积。

1.2.3 pH 的测定 pH 采用精密 pH 计直接测定并记录。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据初步处理和绘图,运用 SPSS 18.0 统计分析软件单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Duncan 法多重比较进行方差分析和差异显著性检验。运用简单相关分析(Bivariate)对各水生植物对各个污染指标去除率与生物量变化之间做相关分析。

2 结果与分析

2.1 3 种植物对水样中总氮、氨氮的去除效果

由图 1 可以看出,3 种水生植物都能有效去除水中的氮,对 TN 和 NH_4^+ -N 的去除效果均显著优于无植物系统的空白对照组($P < 0.05$)。 W_1 处理中,28 d 后对 TN 和 NH_4^+ -N 的去除率,黄菖蒲组分别为 71.17%、93.33%,溪荪鸢尾组分别为 51.98%、73.03%,菖蒲组分别为 46.69%、58.61%。3 种植物在 TN 和 NH_4^+ -N 去除率方面均表现为:黄菖蒲 > 溪荪鸢尾 > 菖蒲。方差分析表明,黄菖蒲对 2 种氮的去除率均显著高于另外 2 种植物,菖蒲与溪荪鸢尾的 TN 去除率之间的差异并不显著($P > 0.05$),但溪荪鸢尾对 NH_4^+ -N 的去除率显著高于菖蒲($P < 0.05$)。 W_0 处理中,28 d 后对 TN 和 NH_4^+ -N 的去除率,黄菖蒲分别为 95.03%、69.37%,菖蒲分别为 78.31%、97.33%,溪荪鸢尾分别为 80.34%、84%。3 种植物在 TN 去除率方面表现为:黄菖蒲 > 溪荪鸢尾 > 菖蒲;在 NH_4^+ -N 去除率方面表现为:菖蒲 > 溪荪鸢尾 > 黄菖蒲,但三者之间的差异并不显著($P > 0.05$),去除效果都较好。

2.2 3 种植物 TN 及 NH_4^+ -N 去除增效

图 2 是根据各植物 NRE 随试验处理时间的变化曲线拟合结果。2 种处理中黄菖蒲和溪荪鸢尾对 TN 和 NH_4^+ -N 的 NRE 随时间的变化几乎是一致的,即在试验前期都较大而后逐渐减小。可见,随着试验水体中营养物质的减少,2 种植物对 TN 和 NH_4^+ -N 的去除强度也由强变弱。虽然,至试验结束

时菖蒲对氮的去除率是最低的,但在2种处理下几乎都没有表现出NRE明显减小的趋势,可能限于试验周期较短未能观察到其后期趋势,所以不能较准确的估计其NRE最大值出现的时间点。各植物对氮去除强度最大值估计出现时间见表1。黄菖蒲

和溪荪鸞尾对TN和NH₄⁺-N NRE最大值分布在试验期间第17~23天,且第21、22和23天出现次数最多。可见,随时间的变化,植物对水体中氮的去除强度还是存在较一致且可估计的趋势。

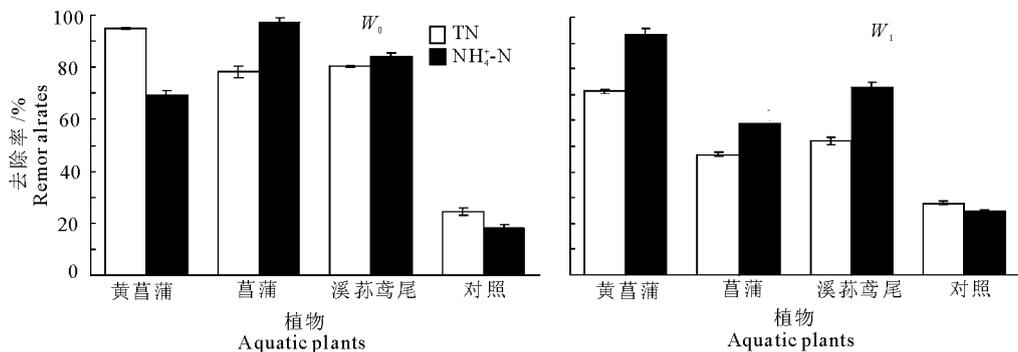


图1 3种植物对水体总氮及氨氮的去除效果

Fig. 1 TN and NH₄⁺-N removal rates of the three aquatic plants

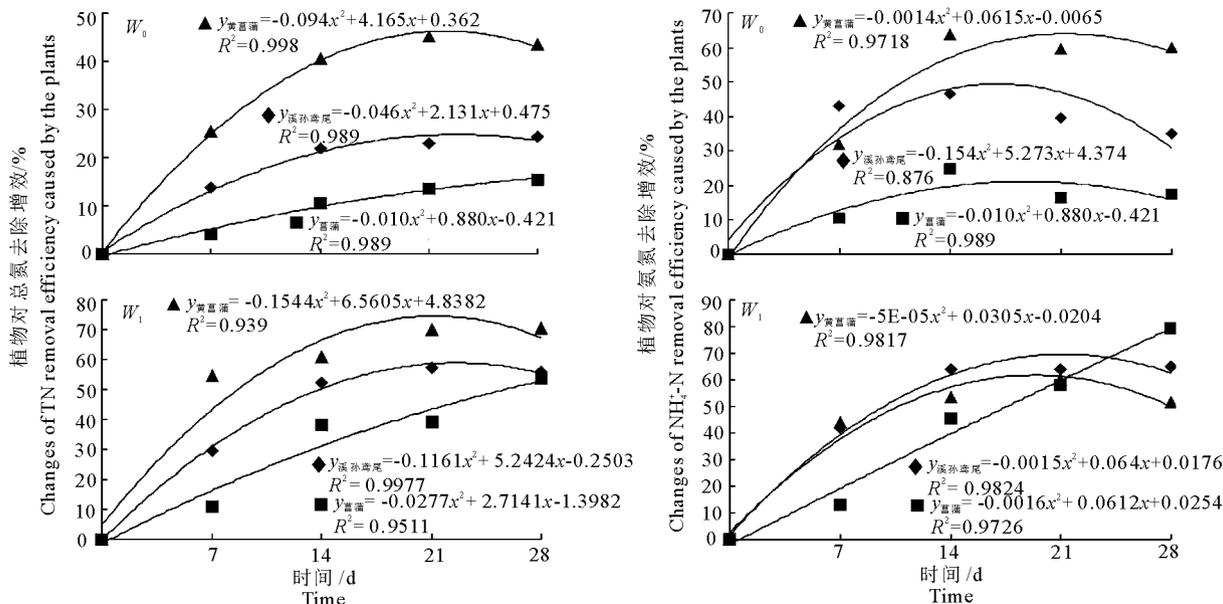


图2 3种水生植物对总氮和氨氮的去除增效

Fig. 2 Changes of TN and NH₄⁺-N removal efficiency caused by the three aquatic plants

表1 总氮及氨氮去除增效最大值出现时间估计

Tab. 1 Estimated time of maximum TN and NH₄⁺-N removal efficiency of the three aquatic plants

植物	TN		NH ₄ ⁺ -N	
	W ₀	W ₁	W ₀	W ₁
溪荪鸞尾	第23天	第23天	第22天	第17天
菖蒲	-	-	第19天	-
黄菖蒲	第21天	第22天	第19天	第22天

2.3 生物量变化

表3中数据为试验期间(28 d)各处理下3种植物的生物量变化。生物量变化与去除率之间在0.05水平上存在显著性相关关系,即植物生物量增长越多,其所能达到的去除效果越显著。黄菖蒲鲜重和

干重在试验期间增重都是最大的,去除率也最高。

表2 3种植物试验期间生物量变化

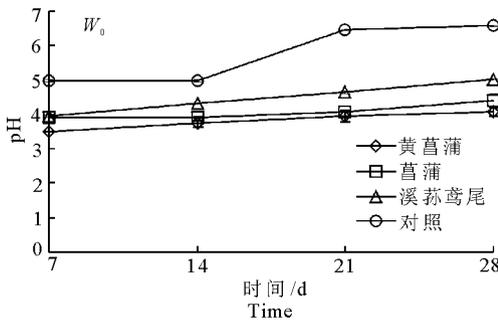
Tab. 2 Changes of biomass of the three aquatic plants during the whole experiment

植物	鲜重增重/g		干重增重/g	
	W ₀	W ₁	W ₀	W ₁
溪荪鸞尾	18.75 ± 0.80	17.67 ± 0.73	2.85 ± 0.09	2.78 ± 0.12
菖蒲	13.65 ± 0.46	16.30 ± 0.87	2.41 ± 0.14	2.67 ± 0.12
黄菖蒲	22.49 ± 0.94	24.38 ± 0.63	3.06 ± 0.02	3.11 ± 0.19

2.4 3种植物对水体pH的影响

由图3可以看出,有植物的水体与空白对照中水体的pH值的变化存在显著差异。2种处理中有植物系统的pH都趋于平缓,基本上维持在一个稳

定的水平,波动很小;而对照组中的 pH 则一直上升。说明植物系统在很大程度上对水体中的 pH 起



到了很好的调控作用。

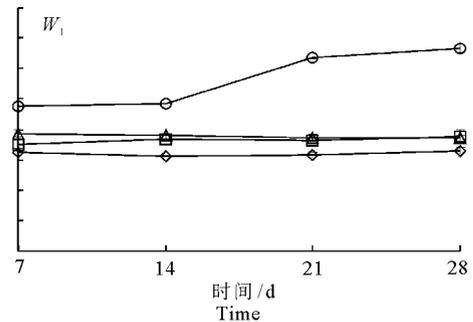


图3 不同处理中 pH 的变化

Fig. 3 Changes of pH under different treatments

3 讨论

高等植物对不同形式氮的吸收有一定的选择性,并会优先吸收 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ (金送笛等, 1994; 王国祥等, 1999)。黄菖蒲、溪荪鸢尾和菖蒲对 TN 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 都有一定的去除效果 (Vymazal, 2007; Zhang et al, 2007), 但仍表现出一定的差异性 (Fraser et al, 2004)。本研究中 3 种植物在高氮和低氮处理中对 TN 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除效果几乎表现出一致性, 且对低浓度处理中的去除率高于高浓度的处理, 与左小凤 (2010) 和宋超 (2011) 等的研究结果相同。本研究表明, 黄菖蒲较适用于氮污染形式主要为 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 且浓度较高的富营养化水体, 菖蒲适用于低浓度富营养水体中的氨氮去除; 溪荪鸢尾无论是对 TN 还是对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除, 效果都处于中间水平。浑河水体富营养化问题中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度较高 (胥学鹏等, 2011), 所以应优先选择黄菖蒲。另外 2 种植物也可根据河段不同污染情况来选择。

其中黄菖蒲在 2 种处理富营养水体中对 TN 的去除效果最好, 对高浓度氨氮的去除效果最好; 菖蒲对低浓度富营养水体中的氨氮去除效果最好, 并且没有出现 NRE 减小的趋势, 适宜较长期的利用。

NRE 最大值较多出现于第 22 天左右, 可能是因为试验后期随着试验水体中营养物质的减少, 植物的生长可能受到限制并且伴随着植物的衰落进而体现出 NRE 的减少趋势 (付晓云等, 2013)。3 种水生植物都是在前 2 周就已经发挥了较大的作用, 在后 2 周内对污物的去除效果并不明显。黄菖蒲和溪荪鸢尾在试验期间的第 17 到 23 天左右出现 NRE 最大值, 在此之后 NRE 呈现出下降趋势, 说明为在利用水生植物生态修复工程中获得更大的效率, 应注重植物收获的时期, 比如在本试验周期内若在第

22 天左右将植物收获是最优的。另外, 也有学者提出利用水生植物修复富营养化水体的生态工程中, 应在植物成熟后及时进行收割, 防止植物吸收累积的氮素再释放, 避免引起二次污染 (汤显强等, 2007; 袁东海等, 2004)。所以在利用植物修复富营养化水体的生态工程中 (如湿地, 生态浮岛等), 应加强修复期间对水体和植物的实时监测, 避免错过最佳收获时期。

由于受试验条件所限, 本研究为在室内进行的水生植物净化水质的静态试验, 与实际生态修复工程仍有一定的差距, 如菖蒲营养去除增效最大值无法预计及如何更准确的预计等, 需更进一步的研究。另外, 本研究中观测到植物生物量净增长与去除效果的相关性, 与徐德福等 (2005) 研究结果一致。所以在相关的研究中应加强对植物相对生长速率的重视。

参考文献

- 蔡龙炎, 李颖, 郑子航. 2010. 我国湖泊系统氮磷时空变化及对富营养化影响研究 [J]. 地球与环境, 38(02): 235-241.
- 方焰星, 何池全, 梁霞, 等. 2010. 水生植物对污染水体氮磷的净化效果研究 [J]. 水生态学杂志, 3(6): 36-40.
- 付晓云, 梁茵, 黄彦青. 2013. 污染水体中水生植物的生理效应研究 [J]. 西北林学院学报, 28(1): 63-66.
- 付晓云. 2012. 浑河上游典型水(湿)生植物对河流水质净化能力的研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院.
- 葛滢, 常杰, 王晓月, 等. 2000. 两种程度富营养化水中不同植物生理生态特性与净化能力的关系 [J]. 生态学报, 20(06): 1050-1055.
- 金送笛, 李永函, 倪彩虹, 等. 1994. 菹草 (*Potamogeton crispus*) 对水中氮、磷的吸收及若干影响因素 [J]. 生态学报, 14(02): 168-173.

- 彭婉婷, 邹琳, 段维波, 等. 2012. 多种湿地植物组合对污水中氮和磷的去除效果[J]. 环境科学学报, 32(3): 612-617.
- 宋超, 刘盼, 朱华, 等. 2011. 水芹对富营养化水体的净化效果研究[J]. 水生态学杂志, 32(03): 145-148.
- 汤显强, 李金中, 李学菊, 等. 2007. 7种水生植物对富营养化水体中氮磷去除效果的比较研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2(02): 8-14.
- 田永杰, 唐志坚, 李世斌. 2006. 我国湖泊富营养化的现状和治理对策[J]. 环境科学与管理, 31(05): 119-121.
- 汪秀芳, 许开平, 叶碎高, 等. 2013. 四种冬季水生植物组合对富营养化水体的净化效果[J]. 生态学杂志, 32(2): 401-406.
- 王国祥, 濮培民, 张圣照, 等. 1999. 冬季水生高等植物对富营养化湖水的净化作用[J]. 中国环境科学, 19(02): 106-109.
- 徐德福, 徐建民, 王华胜, 等. 2005. 湿地植物对富营养化水体中氮、磷吸收能力研究[J]. 植物营养与肥料学报, 11(5): 597-601.
- 胥学鹏, 石敏, 张崢. 2011. 浑河主要污染物入河总量特征分析[J]. 环境保护与循环经济, (10): 60-62.
- 杨育红, 阎百兴. 2010. 中国东北地区非点源污染研究进展[J]. 应用生态学报, 21(03): 777-784.
- 于帅, 陈玮, 何兴元, 等. 2012. 浑河河岸带六种草本植物氮、磷含量特征[J]. 生态学杂志, 31(11): 2775-2780.
- 袁东海, 任全进, 高士祥, 等. 2004. 几种湿地植物净化生活污水 COD、总氮效果比较[J]. 应用生态学报, 15(12): 2337-2341.
- 张爱菊, 叶金云, 赵汉取, 等. 2011. 利用水生植物改善南太湖水质的研究[J]. 水生态学杂志, 32(6): 32-37.
- 张鸿龄, 孙丽娜, 罗庆, 等. 2011. 浑河流域水体污染的季节性变化及来源[J]. 生态学杂志, 30(01): 119-125.
- 左小凤. 2010. 4种水生植物对水体的富营养化物质的吸收净化效果研究[D]. 重庆: 西南大学.
- Fraser L H, Carty S M, Steer D. 2004. A test of four plant species to reduce total nitrogen and total phosphorus from soil leachate in subsurface wetland microcosms[J]. Bioresource Technology, 94(2): 185-192.
- Gao J, Xiong Z, Zhang J, et al. 2009. Phosphorus removal from water of eutrophic Lake Donghu by five submerged macrophytes[J]. Desalination, 242(1): 193-204.
- Howard-Williams C. 1981. Studies on the ability of a *Potamogeton pectinatus* community to remove dissolved nitrogen and phosphorus compounds from lake water[J]. Journal of Applied Ecology, 18: 619-637.
- Lee C g, Fletcher T D, Sun G. Nitrogen removal in constructed wetland systems[J]. Engineering in Life Sciences, 2009, 9(1): 11-22.
- Vymazal J. 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. Science of the total environment, 380(1): 48-65.
- Yoshida S, Forno D A, Cock J H. 1971. Laboratory manual for physiological studies of rice[M]. Laguna, Philippines: The International rice research institute.
- Zhang X-b, LIU P, Yang Y-s, et al. 2007. Phytoremediation of urban wastewater by model wetlands with ornamental hydrophytes[J]. Journal of Environmental Sciences, 19(8): 902-909.

(责任编辑 张俊友)

Effect of Three Hydrophytes on Removal of Nitrogen in Hunhe River

SONG Hong^{1,2}, CHEN Wei¹, HE Xing-yuan¹, LIU Zhou-li¹, HUANG Yan-qing¹, YU Shuai^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110164, P. R. China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

Abstract: The removal capacity of three aquatic plants (*Iris pseudacorus*, *Acorus calamus* and *Iris sanguinea*) on nitrogen was investigated through indoor hydroponic experiment. The experiments were performed under controlled conditions wherein the plants were grown in two different nutrient concentrations according to the eutrophication status of Hunhe River (W_0 : TN = 15 mg/L, NH_4^+ -N = 7.5 mg/L and W_1 : TN = 60 mg/L, NH_4^+ -N = 30 mg/L). The results showed that three aquatic plants all displayed excellent removal capacity on total nitrogen and ammonia nitrogen in the two treatments. The removal rates of TN in W_1 and W_0 were 71.17%, 95.03% by *Iris pseudacorus*, 46.69%, 78.31% by *Acorus calamus*, 51.98%, 80.34% by *Iris sanguinea*, respectively. Meanwhile, the removal rates of NH_4^+ -N by *Iris pseudacorus*, *Acorus calamus* and *Iris sanguinea* were 93.33% and 69.37%, 58.61% and 97.33%, 73.03% and 84.00%, respectively. In the treatment of low concentration, the removal efficiency of TN was in the order of *Iris pseudacorus* > *Iris sanguinea* > *Acorus calamus*, and the order of removal efficiency of NH_4^+ -N was *Acorus calamus* > *Iris sanguinea* > *Iris pseudacorus*. While in the treatment of high concentration, the removal efficiencies of TN and NH_4^+ -N were both in the order of *Iris pseudacorus* > *Iris sanguinea* > *Acorus calamus*. In general, *Iris pseudacorus* was suitable for the purification of eutrophic water body with high concentration of NH_4^+ -N, *Acorus calamus* was suitable for the purification of eutrophic water body with low concentration of NH_4^+ -N. Therefore, *Iris pseudacorus* is suggested for the removal of nitrogen in Hunhe River because of the high concentration of NH_4^+ -N in its eutrophic water body. Removal effect of the three aquatic plants was obvious in the first two weeks and the maximum nutrient removal efficiency (NRE) of *Iris pseudacorus* and *Iris sanguinea* was observed from 17 d to 23 d in the experiment.

Key words: *Acorus calamus*; *Iris pseudacorus*; *Iris sanguinea*; nutrient removal efficiency; nitrogen