

4 种水生植物在冬季脱氮除磷效果的试验研究

黄蕾¹, 翟建平¹, 王传瑜¹, 聂荣¹, 袁东海²

(1. 南京大学环境学院环境工程系, 江苏 南京 210093; 2. 南京大学环境学院环境科学系, 江苏 南京 210093)

摘要: 在人工模拟太湖地区冬季的自然条件下, 对伊乐藻、菹草、石菖蒲和水芹菜这 4 种水生植物在不同营养浓度条件下去除氮磷的效果进行了试验研究。结果表明, 所选植物都能较好地吸收水中的营养物质。其中水芹菜(挺水植物)和伊乐藻(沉水植物)对环境适应性较强, 在相同条件下脱氮除磷的效果也更好, 可考虑构成双层次群落结构 FAMS 用以修复太湖地区富营养化水体。同时发现, 植物对氮磷的吸收量随着水中的营养浓度升高而增加, 但当浓度超过一定值后, 植物的生长受到抑制, 导致植物对营养成分吸收量下降, 甚至加速水质的恶化。

关键词: 水生植物; 脱氮除磷; 富营养化; 胁迫浓度

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2005)02-0366-05

Removals of Nitrogen and Phosphorus in Taihu Lake Water by Four Hydrophytes in Winter Season

HUANG Lei¹, ZHAI Jian-ping¹, WANG Chuan-yu¹, NIE Rong¹, YUAN Dong-hai²

(1. Environmental Engineering Department, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Environmental Science Department, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: We examined four hydrophytes including *Elodea Canadensis* Michx., *Potamogeton crispus* Linn., *Oenanthe javanica* (Bl.) DC. and *Acorus tatarinowii* Schott, capable of decontaminating total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ at the different nutritional levels during winter period in Taihu Lake. The nutritional levels in the lake were found to be classified as meso-, eutro-, hypertrophic and tolerant concentration, respectively. The results showed that all the hydrophytes studied in our test were capable of absorbing the nutrients substance effectively, but *Elodea Canadensis* Michx. was stronger than *Potamogeton crispus* Linn. in the submerged plants, and *Oenanthe javanica* (Bl.) DC. was better than *Potamogeton crispus* Linn. in the emerged plants. Adaptabilities of both *Oenanthe javanica* (Bl.) DC. and *Elodea Canadensis* Michx. towards environmental changes and the ability of removing nitrogen and phosphorus at a certain condition were very close. Therefore, the both may be used as the two-layer structured FAMS (Floating Aquatic Macrophyte-based Treatment System), able to renovate eutrophication water at Taihu areas and may improve renovated efficiency of hydrophytes at low temperature season. Meanwhile, the absorbing abilities of hydrophytes towards nitrogen and phosphorus increased with the enhanced nutrition concentrations. When the concentration exceeded a certain value, the growth of hydrophytes was restrained, resulting in a decrease of absorbing abilities to nutrient substance, and exacerbating water quality. So we should seek a correct concentration for different hydrophytes renovating eutrophication water more effectively.

Keywords: hydrophyte; nitrogen and phosphorus removal; eutrophication; tolerant concentration

当前, 水体富营养化问题正严重影响着人类的生存环境, 因此迫切需要采取有效措施净化污染水体。国内外已广泛开展利用高等水生植物修复技术净化富营养化水体的研究, 并取得了一定的成果^[1-3], 但是由于在温暖季节适宜植物生长的品种繁多、效果显

著, 所以大多文献的研究主要是在此温度条件下进行的, 而对于寒冷季节植物净化水体的研究较少。如何对比寒冷季节生长的水生植物品种去除氮磷的效果, 进一步提高在低温环境中植物修复效率, 从而解决植物修复的周年循环问题, 是污染水体植物修复过程中必须解决的重要问题。本文利用实验室人工模拟太湖地区自然条件的方法, 将菹草、伊乐藻、水芹菜和石菖蒲这 4 种能越冬的水生植物在不同营养浓度条件下(中营养、中富营养、重富营养、超富营养和胁迫浓度)

收稿日期: 2004-07-05

基金项目: 国家“863”计划课题(2002AA601012-4)

作者简介: 黄蕾(1980—), 女, 江苏常州人, 硕士研究生, 主要从事污水处理等方面的研究工作。

联系人: 翟建平, 教授。E-mail: huanglei@nju.org.cn

对比研究脱氮除磷的效果,探讨它们在冬季低温条件下净化水质能力的差异。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

选用太湖地区常见的水生植物进行研究。伊乐藻 (*Elodea Canadensis* Michx.): 沉水植物,营养繁殖,能忍受 0℃ 甚至冰点以下的寒冷,在人工栽培管理条件下能在一年四季正常生长^[4];菹草 (*Potamogeton crispus* Linn.): 沉水植物,较为耐寒,其生长节律与伊乐藻较为相似,夏季死亡,以营养繁殖为主^[4];水芹菜 (*Oenanthe javanica* (Bl.) DC.): 挺水植物,对环境条件的适应性较广,抗逆性强,喜冷凉,较耐寒,适于冷凉、短日照季节生长^[5]; (4) 石菖蒲 (*Acorus tatarinowii* Schott): 挺水植物,四季生长,根系发达,生命力强,能分泌克藻物质,抑制藻类生长^[6]。

伊乐藻和菹草均采自江苏太湖,水芹菜来自南京郊区菜田、石菖蒲取自南京中山植物园。

1.2 试验设计

试验在南京大学通风宽敞的实验室内进行,不采用任何保暖措施,试验期间温度与太湖地区冬季室外温度相同,气温 -2℃ ~ 15℃,水温 5℃ ~ 12℃,并用光照强度约为 5 000lx 的日光色镝灯模拟日照。试验中盛放植物的容器为 5 L 塑料圆筒,试验水体体积为 3 L,试验水体是在 Hoagland 营养液的基础上配置了 5 种不同营养条件而成的^[7],见表 1。

表 1 试验水体营养成分分配比浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Table 1 Distribution of nutrient components in the experimental solution ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

营养等级	中	中富	富	超富	胁迫
总磷(TP)	0.025	0.05	0.1	0.5	5
总氮(TN)	0.2	0.4	0.8	4	40
硝氮($\text{NO}_3 - \text{N}$)	0.175	0.35	0.7	3.5	35
氨氮($\text{NH}_4 - \text{N}$)	0.025	0.05	0.1	0.5	5

2 种沉水植物分别在中营养、中富营养、富营养、超富营养浓度下培养,2 种挺水植物分别在中营养、重富营养、超富营养和胁迫浓度下培养,同浓度下每个植物样做一组平行样。另外,在 5 个营养浓度下不放置任何植物样而(只放石英砂)作为空白样。

植物从产地取来后分别在实验室人工模拟的自然环境中驯养 5 ~ 10 d。于 2003 年 12 月 8 日称取相同质量(约 10 g)的植物样,分别栽入桶中。试验开始后每隔 7 d 取 1 次水样分别测 pH、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮($\text{NH}_4 - \text{N}$)和硝氮($\text{NO}_3 - \text{N}$)值,试验周期

为 29 d。试验溶液中的 TN 采用紫外分光光度法测定,TP 采用钼锑抗分光光度法测定, $\text{NO}_3 - \text{N}$ 用紫外分光光度法测定, $\text{NH}_4 - \text{N}$ 用纳氏试剂光度法测定^[9]。

2 结果和讨论

2.1 生长状况

本研究表明,在冬季低温条件下,所选 4 种水生植物生长情况有所差异:水芹菜最好,新芽生长速度很快,叶片色泽鲜亮饱满,生物量增值大;其次为伊乐藻,不断有新芽冒出,生长速度较快;再次为石菖蒲,有少量新芽冒出,生长速度较慢;最差为菹草,开始 7 d 里有少量枯叶,鲜有新芽,生长速度慢。

2.2 对 TN 的吸收

文中各图均为扣除空白背景值后,仅植物对营养物的吸收情况,在计算各类植物对营养物的吸收率和总的吸收量时,也都已减去空白水样的值。由图 1A ~ 1C 可见,4 种水生植物在同种营养浓度下对 TN 的吸收都有一定的效果,但存在较明显的差异,如 2 种沉水植物中伊乐藻对 TN 的吸收效果比菹草的好,挺水植物则水芹菜的吸收效果较石菖蒲的好,而沉水植物与挺水植物相比,则后者的除 N 效果好。29 d 后中营养浓度条件下的种植水芹菜水样中的 TN 含量只有 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,植物纯吸收率达到 70.85%,相比而言沉水植物对 TN 的去除较差,如菹草在同浓度下的吸收率仅为 30.65%,其他营养浓度下的吸收也较类似。总的看来,4 种植物对 TN 的吸收效果依次为:水芹菜 > 石菖蒲 > 伊乐藻 > 菹草。

2 种挺水植物在不同营养状态下对 TN 的吸收试验表明,随着浓度升高其吸收量加大,水芹菜在超富营养浓度下吸收量达最高。石菖蒲则在富营养浓度下吸收量达最高,但超过一定浓度后,则植物生长受到抑制,如水芹菜在胁迫营养浓度、石菖蒲在超富营养浓度下吸收量均下降,相比较而言,水芹菜对水体营养浓度适应能力较石菖蒲强。见图 1D。

2.3 对 $\text{NH}_4 - \text{N}$ 的吸收图

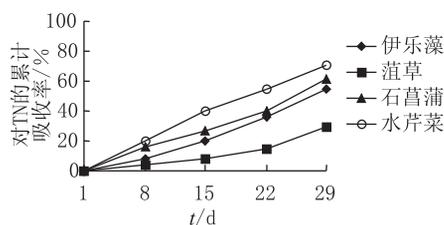


图 1A 中营养浓度下对 TN 的吸收

Figure 1A Uptake of TN by the plants at mesotrophic concentration

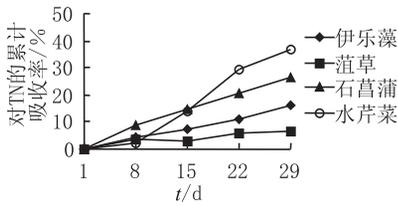


图 1B 富营养浓度下对 TN 的吸收

Figure 1B Uptake of TN by the plants at eutrophic concentration

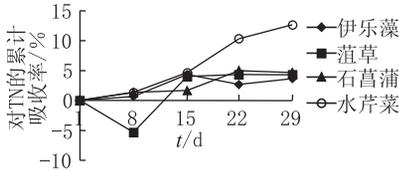


图 1C 超富营养浓度下对 TN 的吸收

Figure 1C Uptake of TN by the plants at hypertrophic Concentration

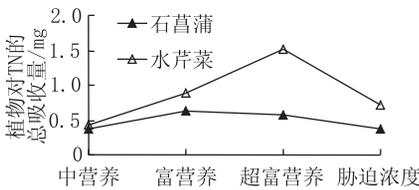


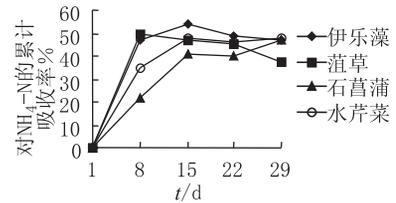
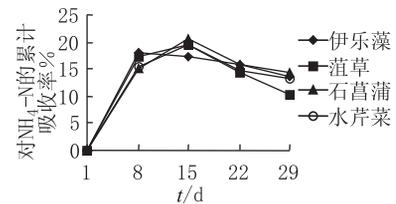
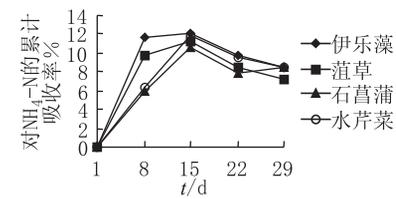
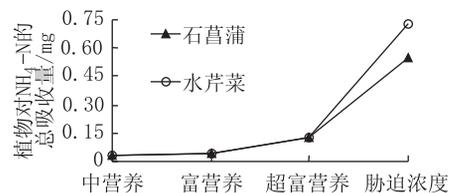
图 1D 挺水植物在不同浓度下对 TN 的总吸收量

Figure 1D Total uptake of TN by the emerging plants at different nutrient concentration

植物对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除效果比 TN 好, 在试验前 7 d 就使 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度大幅降低, 见图 2A ~ 2C。这主要是因为水体中的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 一部分通过植物吸收和挥发作用而去除, 大部分则是通过硝化作用和反硝化作用的连续反应而去除, 这种反应过程会增加水体中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的量, 从而使 TN 的降解幅度变小。但随着 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度下降并趋于稳定值后, 它对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的增量减少, 植物开始以吸收 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为主, 从而不断降低水体 TN 含量, 导致后期 TN 的去除率逐渐高于 $\text{NH}_4\text{-N}$ 。同时, N 元素的转化是一种可逆过程, 在试验前期植物处于贫营养状态下会大量吸收 $\text{NH}_4\text{-N}$, 但到后期, 水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度过低又会导致植物已吸收的部分 N 元素未来得及供其生长所需, 就重新转化成 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的形式释放到水中, 所以出现植物对氨氮的吸收率均有先上升到高峰, 又有略微下降的趋势。4 种植物对比发现, 菹草对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收较差, 甚至在试验后期种植菹草的水体中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 有明显上升趋势, 而其他 3 种植物的吸收效果都较好。另外, 植物生长对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的需求量较大, 在高浓度下仍有大量吸收, 水芹菜的吸收量比石菖蒲大, 见图 2D。

2.4 对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的吸收

自然水体中硝氮占主要优势, 氨氮次之, 而亚硝态氮作为硝态氮和氨氮还原和氧化过程的中间产物, 含量相对较低。如图 3A ~ 3C 所示, 水体中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的降解趋势与 TN 很相似, 这与试验水体中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量在 TN 中占的比例高有关(约 80%), 吸收效果最好的为水芹菜, 29 d 后中营养水体中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度仅为 $0.002 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 植物纯吸收率可达到 75.04%, 相同营养浓度下菹草仍然最差, 吸收率仅为 34.90%。2 种挺水植物在不同营养状态下对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的吸收试验表明, 吸收规律同 TN, 但在高浓度下吸收量更低, 在胁迫浓度下吸收量甚至呈负值, 这说明此时植物反而开始恶化水质, 见图 3D。

图 2A 中营养浓度下对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收Figure 2A Uptake of $\text{NH}_4\text{-N}$ by the plants at mesotrophic concentration图 2B 富营养浓度下对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收Figure 2B Uptake of $\text{NH}_4\text{-N}$ by the plants at eutrophic concentration图 2C 超富营养浓度下对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收Figure 2C Uptake of $\text{NH}_4\text{-N}$ by the plants at hypertrophic concentration图 2D 挺水植物在不同浓度下对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的总吸收量Figure 2D Total uptake of $\text{NH}_4\text{-N}$ by the emerging plants at different nutrient concentration

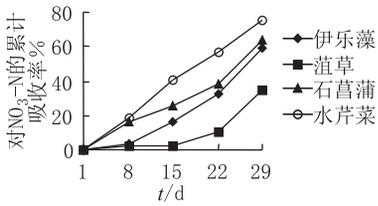


图 3A 中营养浓度下对 NO₃-N 的吸收

Figure 3A Uptake of NO₃-N by the plants at mesotrophic concentration

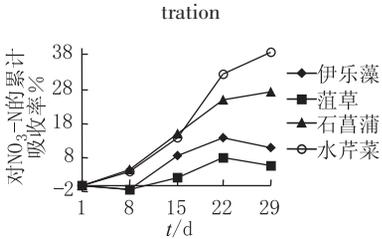


图 3B 富营养浓度下对 NO₃-N 的吸收

Figure 3B Uptake of NO₃-N by the plants at eutrophic concentration

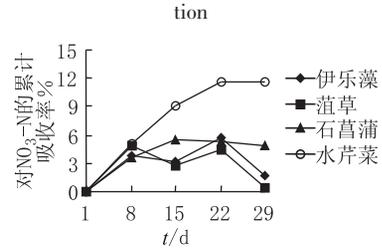


图 3C 超富营养浓度下对 NO₃-N 的吸收

Figure 3C Uptake of NO₃-N by the plants at hypertrophic concentration

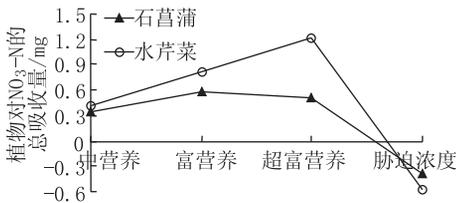


图 3D 挺水植物在不同浓度下对 NO₃-N 的总吸收量

Figure 3D Total uptake of NO₃-N by the emerging plants at different nutrient concentration

3.5 对 TP 的吸收

4 种植物对水体中磷的吸收规律与氮的吸收规律有很大差异。磷的去除一方面是以磷酸盐沉降并固结在基质上,另一方面是可给性磷被植物吸收。磷极易被底部基质吸附,所以试验开始几天磷立即被石英砂吸附而浓度大幅度降低,但也有部分磷会逐渐从石英砂中释放出来,因此有的水样,如菹草的水样中出现 TP 浓度增加的现象。尽管如此,15 d 左右磷就降到了较低水平,其中菹草和伊乐藻在超高营养浓度条件下可将水中 TP 浓度降到接近于零,效果相当显

著。在中营养和富营养浓度条件下 TP 的去除效果:菹草>伊乐藻>石菖蒲>水芹菜。超富营养浓度条件下 TP 的去除效果:菹草>伊乐藻>水芹菜>石菖蒲。见图 4A~图 4C。水芹菜和石菖蒲对磷的吸收量随着浓度增大而升高,可见植物对磷的需求较高,试验水体中的磷未达到限制其生长吸收的浓度,见图 4D。

3 结束语

(1)在冬季低温条件下所选 4 种水生植物都能较好地吸收水中的营养物质。

(2)4 种植物对 TN 和 NO₃-N 的吸收差异较大:水芹菜>石菖蒲>伊乐藻>菹草。

(3)4 种植物对 NH₄-N 和 TP 的去除都比较明显,相对而言挺水植物对 NH₄-N 的吸收效果更好,

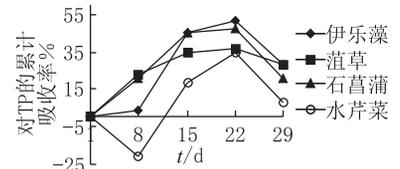


图 4A 中营养浓度下对 TP 的吸收

Figure 4A Uptake of TP by the plants at mesotrophic Concentration

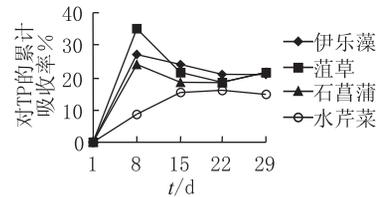


图 4B 富营养浓度下对 TP 的吸收

Figure 4B Uptake of TP by the plants at eutrophic concentration

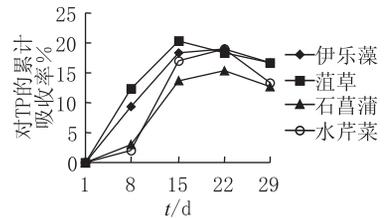


图 4C 超富营养浓度下对 TP 的吸收

Figure 4C Uptake of TP by the plants at hypertrophic concentration

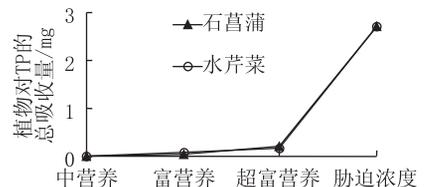


图 4D 挺水植物在不同浓度下对 TP 的吸收量

Figure 4D Total uptake of TP by the emerging plants at different nutrient concentration

而沉水植物对磷的吸收效果更佳。

(4)植物对氮磷的吸收量随着营养浓度的升高而升高,但浓度超过一定值后,则会抑制植物的生长,导致植物对营养成分吸收急剧下降,最后甚至加速水质的恶化。因此要控制好植物修复水体的氮磷浓度,否则将达不到期望的效果。

(5)对比 4 种水生植物发现,水芹菜(挺水植物)和伊乐藻(沉水植物)对环境适应性较强,脱氮除磷效果更突出,可以考虑将此 2 种植物构成多层次群落结构 FAMS^[10]用以修复江浙一带湖泊、河道、水库等富营养化水体,可提高冬季环境中植物修复效率,从而弥补植物修复在周年循环中的薄弱环节。

参考文献:

- [1] Jorgensen S E, Loffler H. Guidelines of lake management, Vol 3: Lake shore management[M]. Japan: ILEK&UNEP Press, 1990.
- [2] 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, 200/201: 367 - 377.

- [3] 李文朝. 线型富营养湖泊的生态恢复——五里湖水生植被重建实验[J]. 湖泊科学, 1996, 8(增刊): 1 - 10.
- [4] 连光年, 张圣照. 伊乐藻等水生高等植物的快速营养繁殖技术和栽培方法[J]. 湖泊科学, 1996, 8(6): 11 - 16.
- [5] 农业部全国农业技术推广总站主编. 水生蔬菜生产 200 问[M]. 北京: 农业出版社, 1995. 103 - 109.
- [6] 洪瑞川, 段小兰, 陈欣虹, 等. 石菖蒲对富营养化水体的净化效应[M]. 环境与开发, 1997, 12(1): 1 - 3.
- [7] 金菊良, 丁 晶, 魏一鸣, 等. 水质综合评价的插值模型[J]. 水利学报, 2002, (12): 91 - 95.
- [8] 张福锁, 等. 环境胁迫与植物营养[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1993.
- [9] 喻 林主编, 水质监测分析方法标准实务手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 135 - 137, 263 - 268, 852 - 858.
- [10] 杨琼芳. FAMS 对水体的净化率研究[J]. 云南环境科学, 2002, 21(4): 49 - 52.

致谢: 南京大学环境学院吕鹏博士生对本研究过程中植物采样和文章修改等方面提供了热情的帮助和支持。