

5 种沉水植物对富营养化水体的净化能力研究

田 琦^{1,2}, 王沛芳^{1,2}, 欧阳萍^{1,2}, 王 超^{1,2}, 张文明^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为完善水生态修复技术, 研究了太湖流域常见的 5 种沉水植物对富营养化水体的净化能力。通过室内模拟、实验室测定, 分析了不同种类沉水植物对水环境质量的改善能力。结果表明 5 种沉水植物均有一定能力去除水体中总磷、总溶解态磷、总氮、叶绿素 a, 改善水体中溶解氧条件。本试验中, 综合多个指标, 金鱼藻在各方面表现能力均较强, 可作为太湖流域富营养化水体修复优先选用的物种。

关键词: 沉水植物; 富营养化; 净化能力; 氮; 磷; 叶绿素 a; 溶解氧

中图分类号: X17 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2009)01-0014-04

Purification of eutrophic water with five submerged hydrophytes

Tian Qi^{1,2}, Wang Pei-fang^{1,2}, OUYANG Ping^{1,2}, Wang Chao^{1,2}, Zhang Wen-ming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development of Shallow Lakes of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Five common submerged hydrophytes in the Taihu Basin were used to purify eutrophic water. Their abilities to improve the water environment were studied through laboratory experiments. The results indicate that all of the five species are highly efficient in removing total phosphorus (TP), total dissolved phosphorus (TDP), total nitrogen (TN), and chlorophyll a, and increasing dissolved oxygen in water. It is proven that *Ceratophyllum demersum* can best improve the water environment and is an optimal species for remedying eutrophic water in the Taihu Basin.

Key words: submerged hydrophytes; eutrophication; purified ability; nitrogen; phosphorus; chlorophyll a; dissolved oxygen

当前湖泊、水库水体的富营养化是全世界普遍存在的环境问题之一。利用水生植物简单、高效、低代价的特点修复富营养化水体已得到国内外广泛共识^[1], 对其研究和应用也日益增多^[2-3], 并取得大量成果^[3-6]。沉水植物在水生生态系统中发挥着重要作用。因此, 富营养化水体中沉水植物的恢复与重建已成为环境领域和水生态学研究的重点内容之一^[7]。

国内外多年来已经积累了一些利用沉水植物净化富营养化湖库水体的研究, 其研究结果多以水体的净化百分率或对污染物的去除率来表达。但这样

仅表达了水质的净化效果, 未能表明植物自身发挥净化作用时的效率, 即用多少量的植物才能在研究条件下达到某个去除效率。在利用水生植物修复污染水体的生态工程中, 植物的用量与水质净化效果是必须同时考虑的相互关联的 2 个因素。

本研究选择南京市乌龙潭富营养化水体, 选取太湖流域常见的 5 种沉水植物进行了室内试验, 以单位质量植物每天去除污染物质的量及改善水环境的能力作为比选依据, 分析了其对氮、磷的净化能力, 为太湖流域富营养化水体治理提供沉水植物选择的理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

野外采集我国太湖流域广泛分布和栽培的 5 种沉水植物作为研究对象,分别为:伊乐藻(*Elodea nuttalli*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* L.)、苦草(*Vallisneria spiralis*)、菹草(*Potamogeton crispus* Linn.)、马来眼子菜(*Potamogeton malaianus*)。试验容器为 50 cm × 30 cm × 50 cm 的玻璃缸,试验水位 35 cm。试验水体取自南京市乌龙潭,基本水质指标的质量浓度:总氮为 10.97 mg/L、总磷为 3.35 mg/L、氨氮为 3.86 mg/L、总溶解态磷为 1.07 mg/L、叶绿素 a 为 0.14 mg/L。

1.2 试验设计

本试验于 2006 年 5 月在实验室温室内进行。试验开始前,将受试植物转接到培养箱内,用稀释 100 倍的 Hoagland 营养液驯化 7 d。试验水体采自常年富营养化的南京市乌龙潭。试验容器玻璃缸底部铺有 2.5 kg 粒径约为 1 cm 的卵砾石用于固定植物根部,每个容器放置 52 L 的乌龙潭原水,并移入植株大小均匀的沉水植物 25 g (±0.5 g)。试验设 3 个重复,6 个处理:①无植物(对照)样本;②伊乐藻;③金鱼藻;④苦草;⑤菹草;⑥马来眼子菜。试验开始后,每天中午 12:00 从玻璃缸采集水样 100 mL,测定总氮、总磷、氨氮、总溶解态磷、叶绿素 a、溶解氧、温度等指标,连续 3 d 采样并测定。用乌龙潭原水填补采样耗费的水量,用超纯水补给蒸发量。

1.3 测定方法

各指标测定方法均采用国际标准方法,见表 1。

表 1 监测指标的分析方法

监测指标	监测方法	参考标准
总氮	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	GB 11894—89
总磷	钼酸铵分光光度法	GB 11893—89
氨氮	纳氏试剂比色法	GB 7479—87
总溶解态磷	钼酸铵分光光度法	GB 11893—89
叶绿素 a	四波长比色法	吴叶玲改进 ^[8]
溶解氧	哈希 LDO™HQ10 溶氧仪	

1.4 计算公式

植物对污染物的去除能力用由单位质量植物在

表 2 不同沉水植物在净化富营养化水体过程中溶解氧质量浓度的昼夜变化

时间	$\alpha(\text{DO})$					
	对照样本	伊乐藻	金鱼藻	苦草	菹草	马来眼子菜
19:00	9.10 ± 2.11	16.27 ± 3.00	18.55 ± 0.21	14.25 ± 4.31	17.97 ± 2.76	11.90 ± 1.69
22:00	6.83 ± 0.73	10.53 ± 3.31	10.40 ± 1.41	8.20 ± 0.99	11.40 ± 3.51	6.75 ± 1.06
01:00	5.67 ± 0.35	7.30 ± 2.07	7.05 ± 0.64	5.80 ± 0.71	7.37 ± 1.67	4.45 ± 0.49
04:00	4.90 ± 0.17	4.33 ± 1.11	3.65 ± 1.06	3.10 ± 0.57	3.97 ± 1.96	2.60 ± 0
07:00	6.57 ± 2.25	5.90 ± 2.36	4.35 ± 0.49	4.40 ± 0.85	5.40 ± 2.44	3.45 ± 0.49
10:00	11.73 ± 6.38	16.43 ± 3.76	17.65 ± 3.32	15.30 ± 0.65	17.53 ± 2.85	13.05 ± 5.87
13:00	14.73 ± 4.80	18.63 ± 0.55	20.00 ± 0	18.60 ± 1.98	19.87 ± 0.23	16.40 ± 1.70
16:00	15.80 ± 2.55	20.00 ± 0	20.00 ± 0	20.00 ± 0	20.00 ± 0	19.10 ± 0.85

单位时间内导致的污染物质量的减少表示。

$$A = \frac{[(c' - c) - (c'_0 - c_0)]V \times 10^3}{WT} \quad (1)$$

$$B = \frac{(\bar{c} - \bar{c}_0)V}{W} \quad (2)$$

式中:A 为对污染物的去除能力, $\mu\text{g}/(\text{d} \cdot \text{g})$; B 为对溶解氧日均值的影响, $\text{mg}/(\text{d} \cdot \text{g})$; c' 为含有沉水植物的水体中污染物因子的初始值, mg/L ; c_0 为对照水体中污染物因子的监测值, mg/L ; c 为含有沉水植物的水体中污染物因子的监测值, mg/L ; c'_0 为对照水体中污染物因子的初始值, mg/L ; \bar{c} 为含有植物的水体中溶解氧日均值, mg/L ; \bar{c}_0 为对照水体中溶解氧日均值, mg/L ; V 为容器内水体体积, 本实验中为 52 L; W 为植物鲜重, g ; T 为时间间隔, d 。

1.5 数据分析

实验重复 3 次,试验数据均为平均数 ± 标准误差表示(Mean ± SD)表示,并用单因素方差分析方法和单侧 t 检验法对组间数据进行差异性显著分析, $P < 0.1$ 被认为差异显著, $P < 0.01$ 被认为差异极显著。

2 结果与讨论

2.1 对溶解氧环境的改善及叶绿素 a 的去除能力比较

水体中溶解氧是水生物生长繁殖必不可少的要素,也是水体中发生的各种化学过程中的主要参与者。沉水植物能抑制生物性和非生物性悬浮物,改善水下光照和溶解氧条件^[9-10]。试验监测发现,以 1 d 为周期,溶解氧的最高值出现在 16:00 时,植物光合作用对氧气的积累于此此时到达高峰,含有伊乐藻、金鱼藻、苦草、菹草的水体中 $\alpha(\text{DO})$ 在此时达到了溶氧仪的检出上限 20 mg/L; $\alpha(\text{DO})$ 最低值均出现在凌晨 4:00。由表 2 可知,较对照而言,5 种沉水植物均能很好地改善水体中溶解氧环境。对水体中溶解氧的贡献,马来眼子菜不及其他 4 种植物。

李文朝^[6]的研究表明,除了营养吸收之外水生植物的水质净化功能还表现在对浮游藻类的竞争抑制。这种竞争抑制可以通过对水中多种环境因子的影响综合表现出来,如溶解氧、pH 值、化感物质等。

因此利用沉水植物来控制富营养化水体的藻类暴发改善水环境质量正在成为生态抑藻研究的热点^[11-12]。叶绿素是藻类重要的组成成分之一,所有的藻类都含有叶绿素 a,其浓度的多寡是表征光能自生物量的重要指标^[13]。因此可通过测定水体中叶绿素 a 含量表明水体中的藻类现存量,评价富营养化程度^[14]。

依照式(1)计算不同沉水植物对叶绿素 a 的去除能力,与此同时,对不同处理水体中的溶解氧进行了昼夜监测,通过公式(2)计算 DO 均值,并绘制图 1。

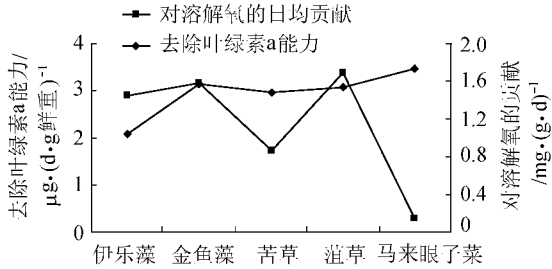


图 1 不同沉水植物对 Chla 的去除能力及对 DO 的日均贡献比较

本试验中,5种不同沉水植物在对叶绿素 a 的去除效果上,除伊乐藻外其他 4 种沉水植物(金鱼藻、菹草、苦草、马来眼子菜)都具有较理想的净化能力,效率均在 $2.97 \mu\text{g}(\text{d}\cdot\text{g鲜重})^{-1}$ 以上,其中以马来眼子菜的能力最强,为 $3.47 \mu\text{g}(\text{d}\cdot\text{g鲜重})^{-1}$ 。对溶解氧的贡献中,菹草贡献能力最大,为 $3.52 \text{mg}(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,金鱼藻次之,明显优于苦草和伊乐藻。其中尤以马来眼子菜对溶解氧的贡献能力最弱,为 $0.30 \text{mg}(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$ 。由图 1 可以看出,植物在对叶绿素 a 的去除能力及对溶解氧的日均贡献上,二者无直接相关关系。

2.2 对氮的去除能力比较

由图 2 可以看出,5种沉水植物均能发挥较强的去除总氮的能力。其中,金鱼藻和马来眼子菜效率分别为 $371.43 \mu\text{g}(\text{d}\cdot\text{g鲜重})^{-1}$ 和 $362.62 \mu\text{g}(\text{d}\cdot\text{g鲜重})^{-1}$,菹草和苦草次之。伊乐藻去除总氮的效率最低,为金鱼藻的 53%。通过统计分析,在去除总氮能力上,金鱼藻与伊乐藻之间差异极显著 ($P < 0.01$)。测定结果显示,5种沉水植物在去除氨氮的

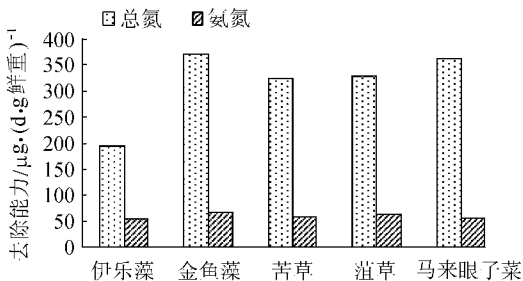


图 2 不同沉水植物对富营养化水体中总氮、氨氮的去除能力比较

能力上表现较为一致。这可能是由于在本试验中氨氮去除的主要途径为氨挥发,而非植物吸收和硝化反应。王超等^[15]对黄花水龙的研究中,得出结论:在夏季,有水生植物的水体中氨氮的去除速度略快于对照样本,但去除效果相差不大,说明水生植物吸收氨氮的去除贡献较小。本研究结论与其一致。统计分析发现,本试验中 5 种沉水植物在去除总氮能力(x)与去除水体中叶绿素 a 能力(y)之间存在良好的正相关的线性关系:

$$y = 0.007x + 0.7234, R^2 = 0.9277 \quad (3)$$

2.3 对磷的去除能力比较

通过实验室分析,测定试验水体中总磷、总溶解态磷浓度,依照公式计算不同沉水植物对总磷、总溶解态磷的去除能力。由图 3 可以看出,5种沉水植物对水体中磷均有一定去除能力,且各植物间的去除能力具有一定差异。其中,菹草对总磷的去除能力最强,金鱼藻次之。由菹草自身发挥的去除总磷的效率为 $93.11 \mu\text{g}(\text{d}\cdot\text{g鲜重})^{-1}$,分别是苦草和伊乐藻的 1.7 和 1.8 倍。对于去除总溶解态磷的能力,不同植物表现出与去除总磷能力相似的规律。由金鱼藻自身发挥的去除总溶解态磷的效率最高,为 $42.02 \mu\text{g}(\text{d}\cdot\text{g鲜重})^{-1}$,略强于菹草,是伊乐藻的 2.0 倍,苦草的 2.2 倍。

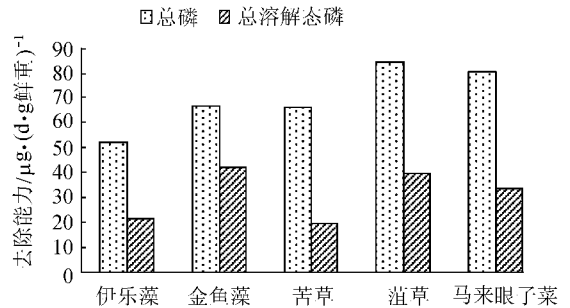


图 3 不同沉水植物对富营养化水体中总磷、总溶解态磷的去除能力比较

在天然富营养化条件下,磷元素多因其易于沉积而成为浮游植物生长的限制因子,也成为难以去除的营养物质^[16]。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。沉水植物的茎、叶和表皮都与根一样具有吸收作用,且皮层细胞含有叶绿素,有进行光合作用的功能。这种结构对水体中不同污染物,尤其是氮、磷等具有良好的吸收作用^[17]。刘佳等^[18]研究了几种沉水植物对总磷的去除效果,顺序依次为:金鱼藻 > 菹草 > 空心菜 > 浮萍 > 苦草;本研究针对富营养化的南京乌龙

潭水体进行净化实验,得出结论:5种沉水植物均具有一定能力去除水体中总磷及总溶解态磷。单因素方差分析表明,金鱼藻在去除总磷与溶解态磷上与伊乐藻、苦草存在显著差异($P < 0.1$)。在对总磷的去除效率上,金鱼藻与菹草能力明显较伊乐藻和苦草强,与文献[18]的结论一致。

3 结论

研究结果表明:5种沉水植物均具有一定改善水环境质量的能力。对溶解氧的日均贡献中,金鱼藻、菹草、苦草均表现良好,马来眼子菜对其贡献最小。对总氮的去除上,金鱼藻与马来眼子菜能力较强。对总磷、总溶解态磷的去除能力上,金鱼藻、菹草明显优于其他植物。比较分析发现:5种沉水植物在去除总氮与叶绿素a的能力上,有良好的正相关的线性关系。综合沉水植物去除多个污染因子的能力及对水环境质量的贡献,金鱼藻较其他沉水植物能力更强,可以更高效地修复太湖流域富营养化水体。

参考文献:

[1] 方云英, 杨肖娥. 利用水生植物原位修复污染水体[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 407-412.
 [2] 宋海亮, 吕锡武, 稻森悠平. 水生植物床预处理富营养化水源水中试研究[J]. 给水排水, 2004, 30(8): 8-12.
 [3] 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的净化作用[J]. 中国环境科学, 1998, 18(5): 410-414.
 [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] 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.
 [6] 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.
 [7] EWEL J J. Restoration is the ultimate test of ecology theory in restoration ecology[M]. U.K: Cambridge University Press, 1987: 31-33.
 [8] 吴叶玲. 测定叶绿素方法的改进[J]. 福建分析测试, 2006, 15(2): 38-39.
 [9] 苏胜齐, 姚维志. 沉水植物与环境关系评述[J]. 农业环境保护, 2002, 21(6): 570-573.
 [10] 宋福, 陈艳卿. 常见沉水植物对草海水体(含底泥)总氮去除速率的研究[J]. 环境科学研究, 1997, 10(4): 299-303.
 [11] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 121.
 [12] SCHEFFER M, HOSPER H S, MEIJER M L, et al. Alternative equilibria in shallow lakes[J]. Trends Ecol Environ, 1993, 8: 275-279.
 [13] 刘冬燕. 苏州河叶绿素a动态特征及其与环境因子的关联分析[J]. 上海环境科学, 2003, 33(4): 261-264.
 [14] 李泽军. 从水体叶绿素含量评价于桥水库富营养化程度[J]. 河北水利水电技术, 2001(6): 44-45.
 [15] 王超, 张文明, 王沛芳, 等. 黄花水龙对富营养化水体中氮磷去除效果的研究[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 975-981.
 [16] PHILLIPS G L, EMINSON D, MOSS B. A mechanism to account for macrophyte decline in progressively eutrophicated fresh waters[J]. Aqua Bot, 1978, 4: 103-126.
 [17] 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[J]. 武汉植物学研究, 2001, 19(4): 299-303.
 [18] 刘佳, 刘永立, 叶庆富, 等. 水生植物对水体中氮、磷的吸收与抑藻效应的研究[J]. 核农学报, 2007, 21(4): 393-396. (收稿日期: 2008-07-01 编辑: 高渭文)

(上接第13页)

参考文献:

[1] 黄文钰, 吴延根, 舒金华. 中国主要湖泊水库的水环境问题与防治建议[J]. 湖泊科学, 1998, 10(3): 83-89.
 [2] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
 [3] 舒金华. 我国城市湖泊和环境问题与对策探讨[J]. 湖泊科学, 1991, 3(1): 61-66.
 [4] 杜晓舜, 王春树. 上海市引清调水工作研究[J]. 水资源保护, 2006, 22(3): 92-94.
 [5] 黄宣伟. 太湖调水工程对水环境改善的战略意义[J]. 水资源保护, 2003(3): 37-39.

[6] 张丹宁. 玄武湖引水工程的环境效益分析[J]. 环境监测管理与技术, 1995, 7(3): 17-25.
 [7] 俞建军. 引水对西湖水水质改善作用的回顾[J]. 水资源保护, 1998(2): 50-54.
 [8] 姜加虎, 黄群. 洪泽湖吞吐流二维数值模拟[J]. 湖泊科学, 1997, 9(1): 9-14.
 [9] ZHAO D H, SHEN H W, LAI J S, et al. Riemann solvers in FVM for 2D hydraulic shock wave modeling[J]. J Hydr Engrg, ASCE, 1996, 122(12): 692-702.
 [10] 赵棣华, 戚晨, 庚维德, 等. 平面二维水流-水质有限体积法及黎曼近似解模型[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 368-374. (收稿日期: 2007-12-03 编辑: 傅伟群)