

低温条件下陆生观叶植物红叶甜菜去除不同富营养化水体氮磷的效应

熊集兵^{1,4}, 刘春法², 杨肖娥¹, 常会庆^{1,3}, 何振立¹

(1.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.临安市污水处理有限公司, 临安市建设局, 浙江 临安 311300; 3.河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471003; 4.中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221008)

摘要:以陆生观叶植物红叶甜菜为材料研究其对不同富营养化水体氮磷的去除。在冬季低温条件下,采用浮床无土种植方法,以鱼塘、华家池和污水处理厂二级出水 3 种水体代表不同类型的富营养化水体,在其中种植红叶甜菜去除水体中 N、P,以实现在有景观效果的同时净化水体。结果表明,红叶甜菜对这 3 种污水中不同形式的氮磷都有较好的去除效果。在试验结束时,对鱼塘水体 TN、NH₄-N、NO₃-N、PO₄-P 和 TP 去除率分别达到了 85.72%、85.41%、93.70%、92.64%和 84.24%;对华家池水体相应氮磷化合物去除率达到了 87.42%、80.62%、87.73%、80.42%和 81.74%;对二级出水相应的氮磷去除率分别也达到了 49.93%、60.54%、48.45%、59.54%和 58.44%。红叶甜菜对各供试富营养化水体表现了良好的适应性。

关键词:观叶植物;花卉;红叶甜菜;氮;磷;富营养化水

中图分类号:X524 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)02-0736-05

Effects of Terraneous Ornamental Foliage Plant, Beet on Nitrogen and Phosphorus Removal from Different Eutrophicated Water Under Low Temperature

XIONG Ji-bing^{1,4}, LIU Chun-fa², YANG Xiao-e¹, CHANG Hui-qing^{1,3}, HE Zhen-li¹

(1.MOE Key Lab of Environmental Remediation and Ecological Health, College of Environment and Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 2. Company of Linan Sewage Water Treatment, Construction Bureau of Lin'an, Lin'an 311300, China; 3.College of Agriculture, Henan University for Science and Technology, Luoyang 471003, China; 4.School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The removal efficiency of nitrogen (N) and phosphorus (P) from three kinds of eutrophicated water by terraneous ornamental foliage plant-beet on floating-beds was researched under low temperature. The results showed that beet was effective in removing TN, NH₄-N, NO₃-N, PO₄-P and TP from fishy pond, Huajia pond and secondary effluent under low temperature in winter. The average removal rates were 85.72%, 85.41%, 93.70%, 92.64% and 84.24% respectively for TN, NH₄-N, NO₃-N, PO₄-P and TP from fishy pond, and were 87.42%, 80.62%, 87.73%, 80.42% and 81.74% respectively for TN, NH₄-N, NO₃-N, PO₄-P and TP by beet from Huajia pond. Even in secondary effluent with high concentration of N and P, the beet also showed high removal rate, and the average removal rate reached 49.93%, 60.54%, 48.45%, 59.54% and 58.44% respectively for TN, NH₄-N, NO₃-N, PO₄-P and TP. Moreover, the beet can grow well in the three types of eutrophicated water.

Keywords: ornamental foliage plant; floriculture; beet; nitrogen; phosphorus; eutrophicated water

目前,地表水富营养化的威胁已引起了全球性的关注,而营养盐的过量尤其是氮磷的过量进入水体是

引起富营养化的主要原因之一。因此,对地表水氮磷污染进行修复,控制地表水的进一步恶化已刻不容缓^[1-3]。由于地表水具有水量大、分布广等特点,传统的混凝沉淀、吸附、萃取、离子交换、膜分离等处理工艺和设备很难对其进行集中处理,这给地表水污染治理带来了很大的难度。而植物修复技术具有成本低(仅为传统物理和化学方法的 30%~50%)、处理效果好(去

收稿日期:2007-04-01

基金项目:教育部重大培育基金(705-824);浙江省科技厅重点攻关项目(2005C22020)

作者简介:熊集兵(1976—),男,在读博士,主要从事污水处理研究。
E-mail:xiongjib108@163.com

通讯作者:杨肖娥 E-mail:xyang581@yahoo.com

除率可达 99% 以上)、对环境扰动小、操作简便等优点,并且在处理设备和规模上基本没有限制,这一特点尤其适合大面积地表水污染的修复治理^[4]。

国内外对水生植物净化水体的研究很多,效果显著。但水葫芦浮萍等水生植物由于容易过度繁殖,因此老化死亡的植物残体的腐败与分解,会增加系统的有机负荷,且管理不善也会造成不良后果^[5]。有关学者研究在富营养化水域表面以浮床技术种植粮油、蔬菜、花卉等各种适宜的陆生植物,在收获农产品、美化水域景观的同时,通过其吸收利用和吸附作用,富集去除水体中过多的氮、磷元素,以达到变害为宝、化害为利、净化水质且使水体产生良性循环的目的^[6-10]。然而,这些植物往往不耐低温在冬季容易死亡,达不到连续净化水质的目的。本实验室经过多年的筛选发现陆生的冬季观赏植物红叶甜菜可以很好地生长在富营养化水体里,该植物的生长于第一年 9 月到第二年 4 月。因此该研究选用红叶甜菜为材料,对不同富营养状况的水体进行了冬季水体中氮磷的去除效果研究,目的是为在低温条件下进行污染水体的修复提供植物材料。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验在浙江大学华家池校区进行。红叶甜菜由杭州花卉市场购得,为生长一致的一个月的幼苗,污水为杭州浙江大学华家池校区内鱼塘、华家池水和杭州污水处理厂二级出水。各水体氮磷的浓度见表 1,鱼塘、华家池水属于富营养化水体,二级出水为胁迫氮磷浓度水体。

试验设在有玻璃棚顶的网室里,相当于露天条件下的光照和温度,试验容器采用 100 L 的蓝色水桶,装水有效体积为 75 L。桶的外面被漆上黑漆以避免光照的影响。每桶种植红叶甜菜 6 株,以塑料泡沫为载体,植物均匀固定于载体上面,每隔 2~3 d 用重蒸馏水添至一定的刻度以弥补由于蒸发而丧失的水分,在整个试验期内不添加或更换任何污水。每个处理 3 个

重复。试验在 12 至 1 月份进行,试验期间,温度为-2~10 ℃,每隔 7 d 取一次水样并进行指标测定,试验周期为 35 d。

1.2 生物量和检测方法

1.2.1 生物量测定

红叶甜菜的生物量采用鲜重称量法。初始时,经自来水清洗过的红叶甜菜再用重蒸水清洗 3~4 遍,吸干,每桶种植 6 株红叶甜菜,共重 (40.23 ± 1.24) g,试验结束后,再次称重,植物生长量=试验结束时植物鲜重-实验开始前的植物鲜重。

1.2.2. 水体的水质指标的测定

NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P 用氮磷自动分析仪进行测定(AQ2+, Seal Analytical Ltd, UK); TN 和 TP 分别采用紫外分光光度法以及钼锑抗法进行测定;植物体的全氮用水杨酸-锌还原,再用自动定氮仪进行测定(BüCHI Distillation Unit 126, Germany);植物体的全磷先用 H_2SO_4 - H_2O_2 消煮,再用钒钼黄法进行测定^[11]。

1.3 数据分析

处理的平均值之间的差异用单因素试验统计分析($P < 0.05$),分析软件为 DPS3.01。

2 结果和讨论

2.1 红叶甜菜在富营养化水体的生长状况

红叶甜菜在供试水体中的生长情况见表 2。红叶甜菜在 3 种供试水体中都能正常生长。经过一个多月的生长,其株高、根长、鲜重等都有较大程度增加。其各测定指标在不同供试水体中呈显著性差异($P < 0.05$)。在华家池水体较高的 pH 条件下表现了较好的耐污性。二级出水中尽管氮磷含量都较高,但是由于较高的氨氮以及其他矿质元素的缺乏,同时还存在汞、铬等重金属以及有机物污染,限制了植物的生长,尤其是植物的根受到抑制。而从红叶甜菜在污水处理厂二级出水的生长情况看,尽管与在鱼塘和华家池生长相比生长较差,由于二级出水氮磷的浓度属于胁迫浓度,一般植物是无法生存的,而红叶甜菜在冬季低温不利条件下,生长量却有一定程度的增加。因此,红叶

表 1 试验水体水质指标

Table 1 The quality parameters of experimental water

水体	pH	$\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{TN}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^--\text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{TP}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
鱼塘水	7.37	11.37	1.642	0.406	1.35	0.1988	0.258
华家池水	8.46	8.89	2.783	0.567	2.05	0.1316	0.378
二级出水	7.24	40.75	18.004	11.355	1.125	2.4052	0.886

甜菜对二级出水还是表现出了较好的耐污性。

2.2 不同富营养化水体植物体 TN、TP 浓度

由表 3 可知,红叶甜菜在不同供试水体中植物体内的 TN、TP 呈显著性差异 ($P<0.05$), 植物体内的 TN 和 TP 和各供试水体的初始 TN、TP 浓度呈正相关(表 1)。此外,鱼塘水的红叶甜菜生长最快(表 2), 而植物体内的 TN、TP 的浓度最低, 这表明植物体内的氮磷的浓度除了与供试水体的初始 TN、TP 的浓度有关外,还与植物的生长呈负相关。因为在一定初始浓度的氮磷的供试水体中,植物生长快相当于降低了植物体内的氮磷的浓度,这与实验结果也相符。

2.3 红叶甜菜对水体 TN 去除

由图 1 可知,红叶甜菜处理的鱼塘水、华家池水体中 TN 的去除率分别为 87.51%和 87.42%, 而二级出水这样胁迫氮磷浓度水体,红叶甜菜处理的 TN 的去除率也能达到 49.43%。一般植物在超富营养化水体就表现出较低的 TN 去除率,在胁迫氮磷浓度水体几乎无法生存。在 75 L 的水桶中红叶甜菜处理的鱼塘、华家池和二级出水中 TN 的绝对去除量分别为 70.91、133.54 和 371.55 mg, 可见红叶甜菜对不同营养状况水体中总氮的去除存在不同的去除效果。TN 绝对去除量与水体中的 TN 的初始浓度呈正相关。此外,TN 的绝对去除量与各供试水体的酸碱程度、有机物以及水体中重金属元素含量对红叶甜菜的影响也有关。由表 3 可知,在低浓度 TN 富营养化水体的条件下,水体的 TN 主要是通过植物直接吸收去除的。而在二级出水这样极度富营养化水体中,除了植物吸收较少部分外,水体中减少的总氮主要是以 NH_3 的挥发、硝化、反硝化作用与植物根系对颗粒物质的截

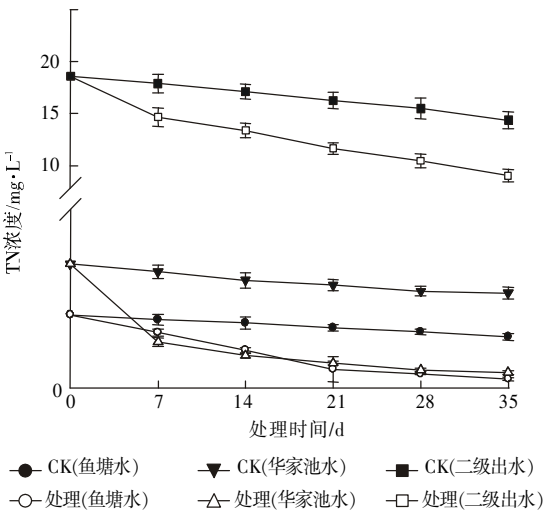


图 1 试验期间红叶甜菜对富营养化水体 TN 的去除
Figure 1 The removal of TN by beet in eutrophic water

获和沉淀等途径去除,而且,硝化和亚硝化菌可以附着在植物根系的表面,因为植物根系可以提供较大的用于微生物吸附点,这些条件都有利于总氮的降低。

2.4 红叶甜菜对水体 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的去除

由图 2、图 3 可知,红叶甜菜处理的鱼塘水、华家池水体中 NO_3^- -N 去除率分别达到 93.70%、87.73%; NH_4^+ -N 的去除率分别为 85.41%、80.62%; 红叶甜菜处理的二级出水水体中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的去除率也达到 60.54%和 48.45%。而在 75 L 水桶中,红叶甜菜处理的鱼塘水、华家池和二级出水中 NO_3^- -N 的绝对去除量分别为 64.54、86.81 和 170.48 mg; NH_4^+ -N 绝对去除量分别为 9.11、5.18 和 68.36 mg。这表明红叶甜菜对较高浓度的 NH_4^+ -N 良好的适应性。由于高浓

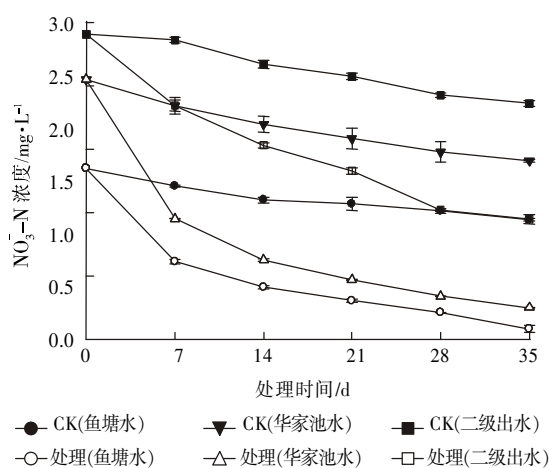
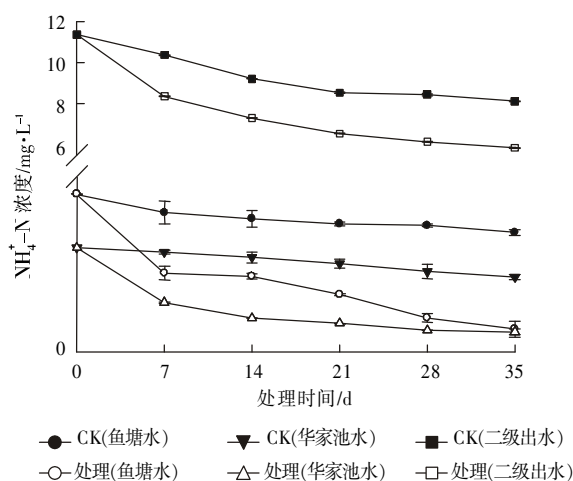
表 2 红叶甜菜在供试水体中的生长情况
Table 2 The growth of beet in eutrophicated water

水体	株高/cm · 桶 ⁻¹	根长/cm · 桶 ⁻¹	鲜重/g · 桶 ⁻¹	干重/g · 桶 ⁻¹
鱼塘水	26.35 ^a ± 2.12	26.12 ^a ± 2.97	140.11 ^a ± 9.24	22.58 ^a ± 2.24
华家池水	22.56 ^b ± 2.46	22.04 ^b ± 3.21	106.60 ^b ± 11.32	19.01 ^b ± 2.79
二级出水	15.35 ^c ± 1.87	15.07 ^c ± 1.28	80.27 ^c ± 6.35	14.26 ^c ± 1.26

注:表中同一列中不同小写字母表示差异显著,以下同。

表 3 红叶甜菜在供试水体中植物体内 TN、TP 的浓度及去除量
Table 3 The concentrations of TN and TP in beet and the removal amount of TN and TP from eutrophicated water

水体	TN /%	TP /%	TN 去除量/mg · 桶 ⁻¹	TP 去除量/mg · 桶 ⁻¹
鱼塘水	0.400 ^a	0.095 ^a	61.64 ^a	14.63 ^a
华家池水	0.875 ^b	0.135 ^b	103.95 ^b	16.34 ^b
二级出水	1.035 ^c	0.350 ^c	73.38 ^c	24.82 ^c

图 2 红叶甜菜对富营养化水体 NO_3^- -N 的去除Figure 2 The removal of NO_3^- -N by beet in eutrophicated water图 3 红叶甜菜对富营养化水体 NH_4^+ -N 的去除Figure 3 The removal of NH_4^+ -N by beet in eutrophicated water

度的 NH_4^+ -N 有一定的毒害性,一般植物不易存活。各供试水体中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 绝对去除量与各供试水体的初始浓度呈正相关。除了植物对 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的直接吸收外,各水体的 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 主要是分别通过反硝化和硝化作用去除的,此外,与一定程度 NH_3 的挥发也有关。

2.5 红叶甜菜对水体 TP 和 PO_4^{3-} -P 的去除

红叶甜菜对供试水体中的 TP、 PO_4^{3-} -P 的去除效果见图 4 和图 5,红叶甜菜处理的鱼塘水、华家池水、二级出水中 TP 减少 84.24%、81.74% 和 58.44%; PO_4^{3-} -P 分别去除 92.64%、80.42% 和 59.54%。在 75 L 水桶中,红叶甜菜对鱼塘水、华家池和二级出水 TP 的绝对去除量分别为 15.79、21.60 和 30.64 mg;

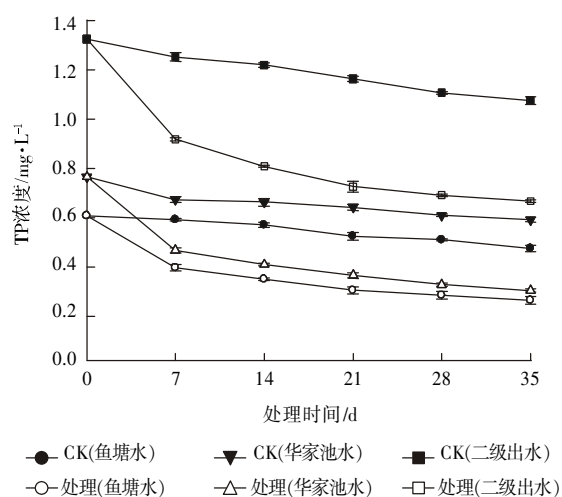
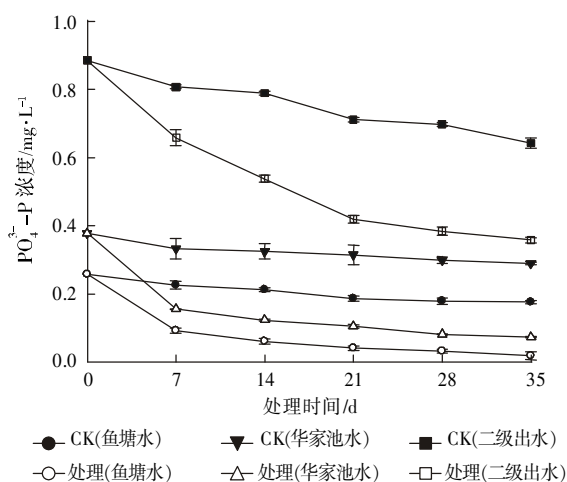


图 4 红叶甜菜对富营养化水体 TP 的去除

Figure 4 The removal of TP by beet in eutrophicated water

图 5 红叶甜菜对富营养化水体 PO_4^{3-} -P 的去除Figure 5 The removal of PO_4^{3-} -P by beet in eutrophicated water

PO_4^{3-} -P 绝对去除量分别 11.81、16.20 和 21.34 mg。由于各供试水体中的 P 主要是以 PO_4^{3-} -P 存在的,所以 TP 的去除和 PO_4^{3-} -P 呈一定的正相关性。由表 3 可知,TP 和 PO_4^{3-} -P 的减少主要通过植物的直接吸收获得,除了与植物吸收有关外,微生物的吸收利用或许是一个因素,因为植物根际支持大量的微生物群落^[12],在植物根系的好氧区由于提高吸附反应可以增加磷的去除^[13]。水体中每日 pH 变化也对磷的有效性起着重要的作用^[14],高 pH 条件下可以与 Ca 离子发生沉淀反应。结果还表明植物的系统更有利于总磷的降低。

3 结论

红叶甜菜对供试的富营养化以及胁迫的氮磷浓

度水体中氮、磷都表现出了较好的去除效果。各种形态氮、磷的去除率基本与水体的初始浓度成负相关;去除总量则与水体初始浓度呈成正相关。在低氮、磷浓度下,水体氮、磷主要通过植物直接吸收获得,而在高浓度氮的水体中,微生物的硝化反硝化以及氨的挥发将起主要作用。此外,红叶甜菜是一种良好的陆生观赏性植物,同时,由于红叶甜菜又是一种集色素原料、蔬菜、观赏于一体的经济植物,在富营养化水面种植不仅能修复水生生态环境,而且能产生一定的经济价值。所以,红叶甜菜修复富营养化水体将具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Holas J, Holas M, Chour V. Pollution by phosphorus and nitrogen in water streams feeding the Zelivka drinking water reservoir [J]. *Water Sci Technol*, 1999, 39 (12): 207–214.
- [2] Probst J L. Nitrogen and phosphorus exportation in the Garonne Basin (France) [J]. *Journal of Hydrol*, 1985,76(3–4): 281–305.
- [3] Carpenter S R, Caraco N F. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. *Ecol Appl*, 1998,8(3): 559–568.
- [4] 唐志坚,张平,左社强,等. 植物修复技术在地表水处理中的应用[J]. 中国给水排水,2003,19(7):27–29.
- [5] 吴丹,望志方,冯利. 水葫芦繁殖过度的危害及其防治措施[J]. 环境科学与技术,2001, 24: 35–37.
- [6] 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(7): 489–494.
- [7] 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.
- [8] 马牧源,王兰,孙红文. 黄花鸢尾对富营养化水体净化的试验研究[J]. 农业环境科学学报,2006 25(2):448–452.
- [9] 司友斌,包军杰,曹德菊,等. 香根草对富营养化水体净化效果研究[J]. 应用生态学报,2003, 14(2): 277–279.
- [10] Moss B, Stersfield J, Irvine K. Development of daphnid communities in diatom and cyanophyte dominated lakes and their relevance to lake restoration by biomanipulation[J]. *Applied Ecology*, 1991, 28: 586–602.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业技术出版社,2005.264–266.
- [12] Hatano K, Trettin C C, House C H, et al. Microbial population and decomposition activity in three subsurface flow constructed wetlands[C]// Moshiri GA (ed) Constructed wetlands for water quality improvement. CRC Press, Boca Raton, FL, 1993. 541–547.
- [13] Wolstenholme R, Bayes C D. An evaluation of nutrient removal by the reed bed treatment system at Valleyfield, Fife, Scotland[C]//Cooper PF, Findlater BC (eds) Constructed wetlands in water pollution control. Pergamon Press, Oxford, 1990. 139–148.
- [14] Reddy K R. Fate of nitrogen and phosphorus in a waste water retention reservoir containing aquatic macrophytes[J]. *J Environ Qual*, 1983,12: 137–141.