

水生植物对富营养化水体去除氮磷研究

刘建英,刘玉华,刘国华,马爱军

(江苏农林职业技术学院,江苏 镇江 212400)

摘要:选取5种典型水生植物菖蒲、千屈菜、旱伞草、水葫芦、黑藻,研究各单种植物单元对模拟富营养化水体生态系统的净化效果。结果表明:5种水生植物均能在富营养化水体中正常生长,对水体中的氮、磷均有一定的净化效果。5种植物去氮能力的大小依次为水葫芦>黑藻>旱伞草>菖蒲>千屈菜,5种植物去磷能力的大小依次为水葫芦>旱伞草>黑藻>菖蒲>千屈菜;5种植物对氮的累积率为10.49%—60.73%,对磷的累积率为13.45%—43.55%;5种植物对氮、磷的去除贡献率分别为61.65%—75.93%,45.66%—68.81%。试验证明,5种植物均可有效应用于城市富营养化水体中氮、磷的净化。

关键词:水生植物;净化;富营养化;菖蒲;千屈菜;旱伞草;水葫芦;黑藻

中图分类号:Q948.116;Q948.8;S688;X592

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2021.05.008

Purification of nitrogen and phosphorus in eutrophic water by aquatic plants

Liu Jianying, Liu Yuhua, Liu Guohua, Ma Aijun

(Jiangsu Polytechnic College of Agriculture and Forestry, Zhenjiang 212400, China)

Abstract: Five typical aquatic plants, *Acorus calamus*, *Lythrum salicaria*, *Cyperus involucratus*, *Eichhornia crassipes* and *Hydrilla verticillata*, were selected to study their purification effect on the simulated eutrophic water ecosystem. The results showed that all the five aquatic plants could grow normally in eutrophic water and had certain purification effect on nitrogen and phosphorus in water. Their nitrogen removal ability was shown in order, as *E. crassipes*, *H. verticillata*, *C. involucratus*, *A. calamus* and *L. salicaria*, and their phosphorus removal ability shown in order, as *E. crassipes*, *C. involucratus*, *H. verticillata*, *A. calamus* and *L. salicaria*. Their cumulative rates of nitrogen and phosphorus were 10.49%—60.73% and 19.3%—43.55%, respectively. Their contribution rates of nitrogen and phosphorus removal by these five plants were 61.65%—75.93% and 45.66%—68.81% respectively. It was concluded that these five plants could be effectively applied to the purification of nitrogen and phosphorus in urban eutrophic water.

Key words: Aquatic plants; Removal; Eutrophication; *Acorus calamus*; *Lythrum salicaria*; *Cyperus involucratus*; *Eichhornia crassipes*; *Hydrilla verticillata*

目前我国水体富营养化已成普遍现象^[1],水体富营养化不仅会严重破坏水环境的景观效果,还会带来藻类过度增长引起的水源污染^[2-3]。研究证明水生植物可以有效吸收、富集富营养化水体中的氮磷元素,具有克藻效应^[4],提高水体的自净能力^[5-9]。同时,水生植物还具有重要的景观意义^[10],具有环境友好、投资低、便于应用等

优点^[11]。虽然学者们进行了关于水生植物对水体氮磷的净化研究,但是水生植物种类和组合类型众多,目前尚没有选择菖蒲(*Acorus calamus*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、旱伞草(*Cyperus involucratus* Rottboll)、水葫芦(*Eichhornia crassipes*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)等5种植物进行富营养化水体中氮磷净化作用的对比研究。为了对它

收稿日期:2021-08-02;修回日期:2021-08-23

基金项目:江苏农林职业技术学院科技项目“苏南富营养化水体生态修复适栽水生植物研究”(2019kj021);江苏省林业科技创新与推广项目“彩叶林木育种与培育省级长期科研基地”(LYKJ[2020]26)

作者简介:刘建英(1985-),女,江苏南京人,讲师,硕士。现主要从事景观生态修复、风景园林设计等工作。E-mail:925047193@qq.com

们进行目的性筛选,相应研究就显得非常有意义。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

挺水植物:菖蒲、千屈菜、旱伞草;漂浮植物:水葫芦;沉水植物:黑藻。试验原水均取自江苏句容农博园附近水塘的生活污水。由于水塘水体的流动性差,水体缺乏治理,水体观感浑浊,呈富营养化状态。另外由于不同水塘的水体中,植物的生长状况及微生物的含量有所差异,为了能准确评估水体中总氮、总磷的含量,取水时从不同水塘进行多点选取,将所取水体搅拌均匀,并对原水质的富营养化水平进行检测分析。根据水体富营养水平评价标准,本试验的水体总氮、总磷质量浓度设定为中富营养的水平。

1.2 试验方法

1.2.1 试验方案 试验共设6个处理,包括5个植物种类的种植单元,以及1个空白对照单元,每个处理重复3次。其中1—3号为千屈菜,5—7号为旱伞草,9—11号为菖蒲,13—15号为水葫芦,17—19号为黑藻,4,8,12号为空白对照组。将每个处理设为独立的富营养化水体处理系统,分别测定水生植物及水体总氮、总磷质量浓度。

试验于2019年9月25日开始,持续30 d。在江苏农林职业技术学院农博园基地进行。试验培养塑料箱容器规格为60 cm×40 cm×38 cm,塑料箱处理水体体积为60 L,植物的盖度为33%左右。

试验开始前用自来水对供试植物进行7 d的预培养。经预培养后,选取长势良好、大小一致的植株,清洗干净,栽植于供试水体中,挺水植物用聚苯乙烯泡沫打孔栽植固定在供试水体中。试验每个处理中放入初始生物量(鲜质量)相等的水生植物。植物在自然光照、避雨的条件下生长。试验期间用蒸馏水补充蒸腾损失的水分。试验每隔10 d测定水体氮、磷质量浓度,在试验开始和结束时分别采取植物样品,试验末称量生物量(鲜质量),烘干后测定植株体内的N、P含量。

1.2.2 试验数据测定方法与仪器 水体总氮(TN)含量测定:采用连续流动-盐酸萘乙二胺分光光度法测定^[12]。

水体总磷(TP)含量测定:采用流动注射-钼酸铵分光光度法测定^[13]。

植物样品总氮(TN)含量测定:采用硫酸-双氧水溶解,微量凯氏定氮法测定植物氮含量^[14]。

植物样品总磷(TP)含量测定:用钼锑抗比色法测定植物全磷含量^[14]。

主要仪器:水样全氮、全磷主要用分光光度UV2700和流动分析San++;植物N测定主要用紫外分光光度计(T1910普析通用);植物P测定主要用自动定氮仪(瑞士步琦)。

1.2.3 试验数据分析与计算 试验主要分析3个指标,分别是水体中的氮磷去除率、植物的氮磷累积率、植物去除氮磷贡献率。具体计算方法如下。

$$(1) S(\%) = [(A_0 - A) / A_0] \times 100^{[15]}$$

式中, S 为氮磷去除率; A_0 为氮磷初始质量浓度; A 为氮磷终期质量浓度。

(2) 氮磷累积率($\%$) = $[(\text{试验后植物体内氮磷含量} - \text{试验前植物体内氮磷含量}) / \text{试验前植物体内氮磷含量}] \times 100^{[16]}$

$$(3) a(\%) = [(A_e - A_{ck}) / A_e] \times 100^{[15]}$$

式中, a 为植物去除氮磷贡献率; A_e 为试验组的去除率; A_{ck} 为对照组的去除率。

测定数据均用SPSS统计软件进行分析计算。

2 结果与分析

2.1 富营养化水体总氮(TN)的质量浓度变化

5种水生植物对模拟富营养化水体生态系统中总氮的质量浓度都有一定的降低作用(如图1),并且与对照组相比,5种植物系统最终氮含量均与对照组有极显著性差异($P < 0.01$)。其中千屈菜的去除率53.03%,旱伞草的去除率67.6%,菖蒲的去除率64.19%,水葫芦的去除率84.43%,黑藻的去除率74.49%,对照空白组的相应值为20.28%。5种水生植物对总氮的去除率依次为水葫芦>黑藻>旱伞草>菖蒲>千屈菜,水葫芦的去除效果最好,千屈菜的去除效果相对较差。旱伞草与菖蒲对总氮的去除率差异不显著,其余差异具有显著性(如表1)。5种植物均在试验前10 d去除总氮的速度较快,中间10 d去除总氮的速度逐渐变慢,最后10 d去除总氮的速度继续变慢,在试验结束时,5种植物均达到整体最大的总氮去除率。

2.2 富营养化水体总磷(TP)的质量浓度变化

5种水生植物对模拟富营养化水体生态系统中总磷的质量浓度都有一定的降低作用(如图2),并且与对照组相比,5种植物系统最终磷含量均与对

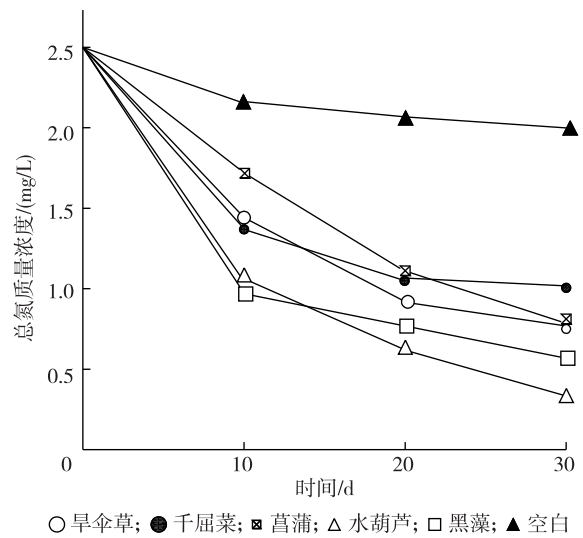


图 1 富营养化水体总氮变化

照组有极显著性差异($P<0.01$)。其中千屈菜的去除率 52.27%,旱伞草的去除率 80.8%,菖蒲的去除率 61.64%,水葫芦的去除率 91.07%,黑藻的去除率 66%,对照空白组的相应值为 28.4%。5 种水生植物对总磷的去除率水葫芦与旱伞草的去除效果较好,并且水葫芦与旱伞草之间的差异不显著,千屈菜的去除效果相对较差,黑藻的去除效果居中,菖蒲与黑藻和千屈菜比较都没有显著性差异(如表 1)。5 种植物均在试验前 10 d 去除总磷的速度较快,中间 10 d 去除总磷的速度逐渐变慢,最后 10 d 去除总磷的速度继续变慢,在试验结束时,5 种植物均达到整体最大的总磷去除率。

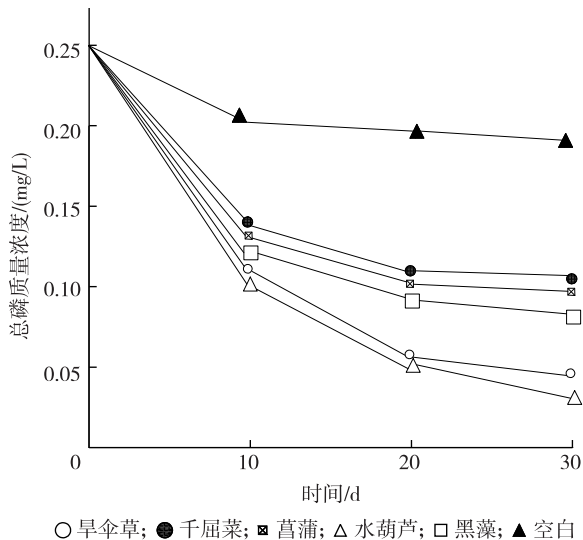


图 2 富营养化水体总磷变化

表 1 不同水生植物的氮磷去除率 %

植物	总氮去除率	总磷去除率
千屈菜	53.03±3.26 d	52.27±0.61 c
旱伞草	67.60±1.86 c	80.80±7.34 a
菖蒲	64.19±4.54 c	61.64±6.68 bc
水葫芦	84.43±4.63 a	91.07±1.22 a
黑藻	74.49±2.73 b	66.00±5.25 b

注:表中数据为 3 次重复的平均值±标准差,同列数据不同小写字母之间表示差异显著($P<0.05$)

2.3 植物净化水体氮磷的累积率

试验证明 5 种水生植物在模拟富营养化水体的生态系统中都能够正常生长。试验周期内,5 种植物的生物量(鲜质量)都有明显的增加,与试验初始生物量相比较,千屈菜增加了 150 g,旱伞草增加了 154 g,菖蒲增加了 126 g,水葫芦增加了 245 g,黑藻增加了 188 g。5 种植物对富营养化水体中的氮均有一定程度的吸收作用,千屈菜对氮的累积率为 19.94%,旱伞草对氮的累积率为 17.08%,菖蒲对氮的累积率为 10.49%;水葫芦对氮的累积率为 60.73%,黑藻对氮的累积率为 46.26%。5 种植物对氮的累积率依次为水葫芦>黑藻>千屈菜>旱伞草>菖蒲,水葫芦的累积率最高,菖蒲的累积率相对较差。千屈菜与旱伞草对氮的累积率差异不显著(如表 2)。

5 种植物对富营养化水体中的磷均有一定程度的吸收作用,千屈菜对磷的累积率为 19.3%,旱伞草对磷的累积率为 13.45%,菖蒲对磷的累积率为 40.5%;水葫芦对磷的累积率为 43.55%,黑藻对磷的累积率为 29.82%。5 种植物对磷的累积率依次为水葫芦>菖蒲>黑藻>千屈菜>旱伞草,水葫芦的累积率最高,旱伞草的累积率相对较差。5 种水生植物对磷的累积率差异显著(如表 2)。由相关性分析可知,水体氮的去除率和植物氮的吸收累积率呈极显著正相关的关系($r=0.831,P<0.01$);水体磷的去除率和植物磷的吸收累积率呈极显著正相关($r=0.249,P<0.01$)。

表 2 不同水生植物的氮磷累积率 %

植物	总氮累积率	总磷累积率
千屈菜	19.94±1.65 c	19.30±0.48 d
旱伞草	17.08±1.07 c	13.45±0.89 e
菖蒲	10.49±1.22 d	40.50±0.88 b
水葫芦	60.73±1.71 a	43.55±0.87 a
黑藻	46.26±0.19 b	29.82±0.91 c

注:表中数据为 3 次重复的平均值±标准差,同列数据不同小写字母之间表示差异显著($P<0.05$)

2.4 植物去除氮磷的贡献率

5种植物单元都对富营养化水体中的氮和磷具有较好的去除作用(贡献率如表3),5种植物对氮的去除贡献率最大的是水葫芦,最小的是千屈菜。5种植物对磷的去除贡献率最大的是水葫芦与旱伞草,最小的是千屈菜。

表3 不同水生植物的去除氮磷的贡献率 %		
植物	去除总氮贡献率	去除总磷贡献率
千屈菜	61.65±2.41 d	45.66±0.64 c
旱伞草	69.98±0.83 c	64.66±3.07 a
菖蒲	67.40±2.33 c	53.58±4.80 b
水葫芦	75.93±1.36 a	68.81±0.42 a
黑藻	72.75±1.01 b	56.79±3.39 b

注:表中数据为3次重复的平均值±标准差,同列数据不同小写字母之间表示差异显著($P<0.05$)

3 讨论与结论

3.1 讨论

通过对试验数据比较3种挺水植物的去除氮、磷的能力,总氮去除率为旱伞草>菖蒲>千屈菜,总磷去除率也是旱伞草>菖蒲>千屈菜,其中旱伞草对总磷的去除率高于对总氮的去除率;总氮累积率为千屈菜>旱伞草>菖蒲,总磷累积率菖蒲>千屈菜>旱伞草,其中菖蒲的总磷累积率高于总氮累积率;去除总氮和总磷的贡献率为旱伞草>菖蒲>千屈菜,3种植物的去除总氮的贡献率都高于去除总磷贡献率。

通过对试验数据比较3种生活型植物去除氮、磷的能力,总氮去除率为漂浮植物>沉水植物>3种挺水植物,总磷去除率为漂浮植物>挺水植物(旱伞草)>沉水植物>挺水植物(千屈菜、菖蒲),水葫芦、旱伞草的总磷去除率高于总氮去除率;总氮累积率为漂浮植物>沉水植物>3种挺水植物,总磷累积率漂浮植物>挺水植物(菖蒲)>沉水植物>挺水植物(千屈菜、旱伞草),菖蒲的总磷累积率高于总氮累积率;去除总氮贡献率为漂浮植物>沉水植物>3种挺水植物,去除总磷贡献率为漂浮植物>挺水植物(旱伞草)>沉水植物>挺水植物(千屈菜、菖蒲),5种植物去除总氮贡献率都高于去除总磷贡献率。

本试验中5种植物都表现出一定的除氮去磷的能力,说明水生植物的栽植是影响富营养化水体氮、磷质量浓度的重要因素。同时水生植物对富营养化水体氮、磷的净化机制是多方面的,氮、磷质量

浓度的降低,除了植物的吸收作用,还受到植物的吸附作用、沉淀作用、以及微生物作用的影响^[17-18]。5种不同水生植物显示出不同的去氮除磷的能力,这是由于不同的植物种类对氮、磷的吸收作用不同,同时相应植物种类的微生物群落作用不同。本试验中,植物的氮、磷累积率和植物对水体的氮、磷去除率呈现出极显著正相关的状态。说明5种水生植物都能够通过吸收水体中的氮、磷元素实现自身的正常生长,植物氮、磷的累积率与植物自身生物量的增长量密切相关^[19]。

另外本试验开展时间为水生植物生长旺盛季节,对于其他时间段植物相关指标的试验还有待于进一步研究。

3.2 结论

富营养化水体氮的去除率区间为53.03%—84.43%,最大的是水葫芦,最小的是千屈菜;水体磷的去除率区间为52.27%—91.07%,最大的是水葫芦,最小的是千屈菜。3种挺水植物中,总氮和总磷去除率最高的是旱伞草。3种生活型的植物中,总氮和总磷去除率最高的是漂浮植物水葫芦,沉水植物黑藻总氮的去除率高于3种挺水植物,总磷的去除率高于2种挺水植物(菖蒲、千屈菜)。

5种植物对氮的累积率区间为10.2%—61.02%,最大的是水葫芦,最小的是菖蒲;5种植物对磷的累积率区间为19.3%—43.55%,最大的是水葫芦,最小的是旱伞草。3种挺水植物中,总氮累积率最高的是千屈菜,总磷累积率最高的是菖蒲。3种生活型的植物中,总氮和总磷的去除率最高的是漂浮植物水葫芦,沉水植物黑藻总氮的累积率高于3种挺水植物,总磷的累积率高于2种挺水植物(旱伞草、千屈菜)。

与对照组相比较,5种植物去除总氮贡献率为61.55%—75.93%,去除总磷贡献率为45.66%—68.81%。3种挺水植物中,去除总氮和总磷贡献率最高的是旱伞草,3种生活型的植物中,去除总氮和总磷贡献率最高的是漂浮植物水葫芦,沉水植物黑藻总氮去除贡献率高于3种挺水植物,总磷去除贡献率高于2种挺水植物(菖蒲、千屈菜)。

总之,5种水生植物的应用是降低富营养化水体中氮磷含量的关键因素。在这5种植物中,水葫芦的净化效果是最好的,但是由于水葫芦繁殖能力太强,如果不能有效控制,容易造成2次污染和水生态的破坏^[20],因此大面积种植需要慎重,同时水葫

芦可以进行无害化处理和利用,产生一定的经济效益^[21]。其余几种植物也都具有一定的净化能力,并且挺水植物具有很好的景观效应,在今后具体的应用中,可以综合植物的景观效应和生态净化能力以及经济效益,合理选择和搭配不同植物进行运用,可以综合运用挺水、浮水和沉水植物形成立体净化水体的层次,更好发挥水生植物在净化富营养水体领域的综合效益。

参考文献:

- [1] 张家铜,郎文博.探讨我国水污染的现状及其修复[J].山东工业技术,2018(24):62.
- [2] 张振兴.北方中小河流生态修复方法及案例研究[D].长春:东北师范大学,2012.
- [3] 黄慧慧,张舒,屈云芳.夏阳湖蓝藻水华生态治理初探[J].上海水务,2018,34(2):34-37,28.
- [4] 田如男,孙欣欣,魏勇.不同类型水生植物群落对铜绿微囊藻的化感作用[J].生态环境学报,2010,19(9):2149-2154.
- [5] 刘松岩,何涛,周本翔.水生植物净化受污染水体研究进展[J].安徽农业科学,2006,34(19):5019-5021.
- [6] 孙刚,盛连喜.湖泊富营养化治理的生态工程[J].应用生态学报,2001,12(4):590-592.
- [7] 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):26-30.
- [8] 许木启,黄玉瑶.受损水域生态系统恢复与重建研究[J].生态学报,1998,18(5):101-112.
- [9] 高吉喜,叶春,杜娟,等.水生植物对面源污水净化效率研究[J].中国环境科学,1997,17(3):247-251.
- [10] 田如男,朱敏,吴彤,等.南京城区水体水生植物调查[J].东北林业大学学报,2012,40(5):91-97.
- [11] 朱斌,陈飞星,陈增奇.利用水生植物净化富营养化水体的研究进展[J].上海环境科学,2002,21(9):564-567.
- [12] 环境保护部.中华人民共和国国家环境保护标准 HJ 667-2013[S].北京:中国环境科学出版社,2013.
- [13] 环境保护部.中华人民共和国国家环境保护标准 HJ 671-2013[S].北京:中国环境科学出版社,2013.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:264-268.
- [15] ZHANG X B, LIU P, YANG Y S, et al. Phytoremediation of urban wastewater by model wetlands with ornamental hydrophytes[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(8):902-909.
- [16] 田如男,朱敏,孙欣欣,等.不同水生植物组合对水体氮磷去除效果的模拟研究[J].北京林业大学学报,2011,33(6):191-195.
- [17] VYMAZAL J. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience[J]. Ecological Engineering, 2002, 18(5):633-646.
- [18] 张家洋,陈丽丽,李慧.水生植物对富营养化水体除磷去氮的研究概述[J].西北师范大学学报(自然科学版),2013,49(1):115-120.
- [19] 陈照方,陈凯,杨司嘉.水生植物对淡水生态系统的修复效果[J].分子植物育种,2019,17(13):4501-4506.
- [20] 张力,朱普平,高岩,等.水葫芦控制性种养安全围栏设计及抗风浪能力[J].江苏农业学报,2013,29(6):1360-1364.
- [21] 黄明意.水葫芦无害化处理及利用[D].福州:福州大学,2015.
- [32] PUCHOLT P, SJÄDIN P, WEIH M, et al. Genome-wide transcriptional and physiological responses to drought stress in leaves and roots of two willow genotypes[J]. BMC Plant Biology, 2015, 15(1):1-16.
- [33] ZHUANG J, CAI B, PENG R H, et al. Genome-wide analysis of the AP2/ERF gene family in *Populus trichocarpa*[J]. Biochemical & Biophysical Research Communications, 2008, 371(3):468-474.
- [34] RAO G D, SUI J K, ZENG Y F, et al. Genome-wide analysis of the AP2/ERF gene family in *Salix arbutifolia*[J]. FEBS Open Bio, 2015, 5(1):132-137.
- [35] LICAUSI F, GIORGI F M, ZENONI S, et al. Genomic and transcriptomic analysis of the AP2/ERF superfamily in *Vitis vinifera*[J]. BMC Genomics, 2010, 11(1):719.
- [36] LICAUSI F, OHME-TAKAGI M, PERATA P. APETALA2/Ethylene Responsive Factor (AP2/ERF) transcription factors: mediators of stress responses and developmental programs[J]. New Phytologist, 2013, 199(3):639-649.
- [37] KASUGA M, MIURA S, SHINOZAKI K, et al. A combination of the *Arabidopsis* DREB1A gene and stress-inducible rd29A promoter improved drought-and low-temperature stress tolerance in tobacco by gene transfer[J]. Plant & Cell Physiology, 2004, 45(3):346-50.
- [38] KRISHNASWAMY S, VERMA S, RAHMAN M H, et al. Functional characterization of four APETALA2-family genes (RAP2.6, RAP2.6L, DREB19 and DREB26) in *Arabidopsis*[J]. Plant Molecular Biology, 2011, 75(1-2):107-127.

(上接第12页)