Purification Efficiency of Eutrophic Water by Several Aquatic Plants

Feng Su^{1,2}, Zhian Li¹, Yingwen Li¹, Yongxing Li¹, Faguo Wang^{1*}, Ping Zhuang^{1*}

¹South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing Email: *wangfg@scbg.ac.cn, *zhuangp@scbg.ac.cn

Received: Oct. 6th, 2018; accepted: Oct. 24th, 2018; published: Oct. 31st, 2018

Abstract

Eutrophication has been recognized as one of serious ecological problems in the world. Phytoremediation has gradually attracted the attention of the academic community with its low investment and environmentally friendly features. The tested aquatic plants in this experiment were *Salvinia natans, Ipomoea aquatica, Heleocharisplantagineiformis, Hydrocotyle vulgaris* and their combinations. The aim of this study was to study the effects of different aquatic plant combinations on concentrations of total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), ammonia nitrogen in the polluted water. The results showed that the removal rates of four tested plants were higher than those of the control group. The removal rates of TN and NH_4^+ -N by *Ipomoea aquatica* + *Heleocharisplantagineiformis* were 30.3% and 80.9%, and the removal rate of TP (35.4%) by *Salvinia natans* + *Heleocharisplantagineiformis* + *Hydrocotyle vulgaris* was the highest. Combination of *Salvinia natans* + *Heleocharisplantagineiformis* + *Hydrocotyle vulgaris* was found as an optimal model for the removal of TN and TP by aquatic plants. Harvest treatment of aquatic plants was an alternative measure to improve growth and removal of pollutants.

Keywords

Eutrophic Water, Aquatic Plant, Nitrogen, Phosphorus, Ammonia Nitrogen, Removal Rate

几种水生植物及其组合对模拟污水的净化效果

苏 丰^{1,2},李志安¹,李应文¹,李泳兴¹,王发国^{1*},庄 萍^{1*}

1中国科学院华南植物园,广东 广州

2中国科学院大学,北京

Email: *wangfg@scbg.ac.cn, *zhuangp@scbg.ac.cn

收稿日期: 2018年10月6日; 录用日期: 2018年10月24日; 发布日期: 2018年10月31日

文章引用: 苏丰, 李志安, 李应文, 李泳兴, 王发国, 庄萍. 几种水生植物及其组合对模拟污水的净化效果[J]. 环境保护前沿, 2018, 8(5): 436-446. DOI: 10.12677/aep.2018.85054

摘要

通过温室静态模拟试验研究了槐叶萍、野荸荠、铜钱草、空心菜等水生植物及其组合对富营养化水体TN、TP等的能力。结果显示,4种水生植物及其组合对模拟污水TN、TP、氨氮的去除率高于对照组;空心菜+野荸荠组合TN去除率和氨氮率、槐叶萍+野荸荠+铜钱草组合TP去除率达到最高,分别为30.3%、80.9%和35.4%,显著优于其他水生植物处理组。槐叶萍+野荸荠组合的吸收作用对污水TN的削减贡献率最高,为5.8%,槐叶萍+野荸荠+铜钱草组合对TP的削减贡献率达到最高,为33.67%。最终确定槐叶萍+野荸荠+铜钱草组合为高浓度富营养化水体TN、TP净化效果最优模式。另外,通过合理的收割措施既能转移去除污水中污染物,又有利于植物的恢复和再生,是一种可供选择的生态修复辅助措施。

关键词

富营养化水体,水生植物,氮,磷,氨氮,去除率

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).



1. 引言

随着社会经济的快速发展和人类活动日益增加,尤其是工农业生产大规模地迅速发展,工业化带来了"城市化"现象,使得大量含有氮、磷营养物质的生活污水排入附近水体,导致了水体富营养化[1]。水体富营养化现象会导致水体及水生生物健康受损,水体生态系统退化,生物多样性下降以及正常的营养流动和结构奔溃,以及水华现象,最终导致水体正常的农业、工业、饮用等功能受到影响[2]。据统计,我国 60%以上的湖泊处于富营养化状态,因此,如何有效控制并改善富营养化水体的水质已经成为当前城市或是农村水污染治理中最迫切的问题[3]。

富营养化水体的修复技术繁多,其主要目的就是利用各种方法去除水体中过量的磷元素与氮元素,其中植物修复净化污水被认为是近年来极受关注的有效治理措施之一[1],它具有成本低、管理简单、可获经济收益、改善生态景观、不引起二次污染等优点[4] [5]。近年来,国内外的相关研究集中在利用水生植物对污水中氮和磷等营养物质的吸收富集作用[6]、对有机或无机污染物的去除作用[7]等。我国水生植物种类丰富,目前用于净化水质的水生植物达数十种之多,类型多样,很多植物种类在净化污水中已经取得了不错的效果[8] [9]。

己有的大量研究主要集中于单一水生植物对污水进行净化研究,但有研究表明,多种不同水生植物的合理配置产生的净化效果比单一植物净化率更为稳定[10]。Coleman 等[11]发现宽叶香蒲、灯芯草和水葱 3 种植物组合种植比单种对生活污水的净化效果更好。另有研究证明:不同混合群落对富营养化水体中 TN、TP 去除率表现较强的效果[12]。然而,Fraser 等[13]发现植物混合种植对去除水中氮、磷的效果与单一种植的效果并无显著差异。吴诗杰[14]等研究了几种植物对富营养化水体的净化效果,发现单种植物对 TP 去除率为 87%~91%,而植物组合对 TP 去除率为 63%~88%。由于不同水生植物具有不同的氮、磷吸收特性,以及水质条件的差别,对污水中污染物的去除效果各有差异,因此把不同水生植物进行生态配置能否有更强的净化效果,值得进一步研究。

Gubricht [15]指出,收割水生植物是一种从水体中去除营养物质的有效途径。王新刚等[16]报道:水生植物枯萎后如果不进行及时收割,植物体腐烂会使次年出水中磷的质量浓度增加 0.10~0.15 mg/L,而在自然干枯后,水生植物氮磷干重含量较其未枯萎时氮磷干重含量低 15%~25%。余红兵等[17]证明了合适的收割措施既能转移出水生植物中的污染物,又能利于植物的恢复和生长,提高底泥氮、磷的去除率。因此,利用水生植物吸收营养物质,并通过收获植物带走水中的营养物质是一种简单、高效、代价低的修复污染水体及防治二次污染的方法[18]。

考虑到不同水生植物或其组合对污水净化的稳定性,找到适合高浓度富营养化水体净化的最优水生植物组合模式具有重要的现实意义和工程价值。本研究选用槐叶萍、野荸荠、铜钱草、空心菜等 4 种水生植物,分别对单种植物和不同植物组合的富营养化水体的净化效果进行比较研究,以及评价适时收割管理的净化效果,旨在挖掘具有高效净化能力的水生植物或组合模式,为治理污水的植物选择提供理论参考。

2. 材料与方法

2.1. 植物材料和模拟污水

在前期预试验的 11 种水生植物中,根据其生长和适应情况,优选了如下 4 种水生植物,分别是槐叶萍(Salvinia natans)、空心菜(Ipomoea aquatica)、野荸荠(Heleocharisplantagineiformis)及铜钱草(Hydrocotyle vulgaris)。以上水生植物幼苗购回后在温室内置于尼龙网上进行预水培 2 周。实验前选择大小较一致的植株进行培养。人工模拟污水是使用硝酸钾和磷酸二氢钾等试剂进行配制,并用 NaOH 溶液调节 pH (见表1)。

2.2. 试验设计

试验时间为 2017 年 6 月~2017 年 10 月, 试验地点为华南植物园温室。试验设置的处理分别有: 1. 槐叶萍; 2. 铜钱草; 3. 空心菜; 4. 野荸荠; 5. 槐叶萍 + 野荸荠; 6. 铜钱草 + 野荸荠; 7. 空心菜 + 野荸荠; 8. 槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草; 9. 无植物的空白对照。实验采用 $50 \times 50 \times 40$ cm 的 PVC 培养箱。

试验前,除去植物根部的沉积物,检查叶片与根部有无损失,每种植物单独培养。使用自来水预培养 10 天。然后将其移到装有模拟污水的塑料培养箱(30 L 水)中,每个植物处理设置三个重复,每个重复选取生长势基本一致的植株 6~10 株,挂牌标记。药剂使用纯净水溶解浓缩营养液。在温室中进行培养,培养室内温度较高,高于 25℃,光源为自然光。

试验植物植株共采样 4 次,分别在水培前 1 天和水培后第 11、36 和 46 天采样。采样并称重后,用 去离子水清洗 3 次,立即杀青并烘干后测量植物氮和磷含量。水样采集分别在水培后第 1、6、11、16、36 和 46 天进行。使用聚乙烯容器提取,采集后放入 4℃冰箱中保存。试验过程中,所有植物处理组在试验后第 11 天和第 36 天进行茎叶收割,并且在试验结束后即试验后第 46 天,全株收割。测定 pH、TN、TP、氨氮、植物鲜重、植物磷含量、植物磷含量。生物量的测定方法是将水生植物从实验桶中取出,用 吸水纸吸干水分后称重。

Table 1. Basic physical and chemical properties of the simulated wastewater 表 1. 模拟污水的初始浓度

 指标	铵态氮 NH ₄ -N (mg/L)	总氮 TN (mg/L)	总磷 TP (mg/L)	рН
浓度	200	250	23	7.4

2.3. 测定方法与数据分析

水体总氮用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-1989)测定,总磷用钼酸铵分光光度法(GB11893-1989)测定;水体 pH 用 pH 测试仪进行测定。植株 TN 和 TP 含量采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消解法测定,测定方法详见《土壤农业化学分析方法》[19]。采用 Excel 2016 统计数据和绘图;采用 Duncan 法,利用 SPSS 18.0 软件,对数据进行统计分析和差异显著性检验。

3. 结果与分析

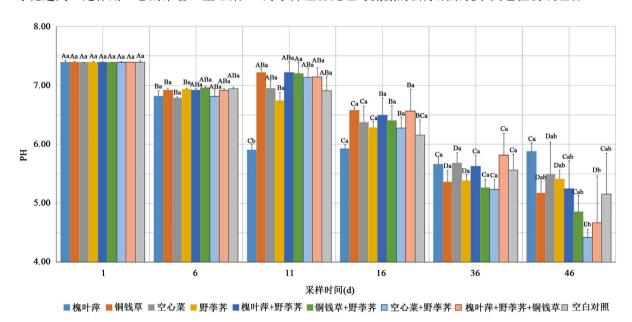
3.1. 水生植物及不同组合对水体 pH 的影响

随着试验时间的延长,所有处理水体 pH 呈下降趋势(图 1)。试验模拟污水初始 pH 为 7.39。槐叶萍处理组 pH 在第 11 天时急剧下降,但随后时间均无显著性差异(p > 0.05)。在第 46 天时,空心菜 + 野荸荠和槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草两组合处理 pH 的下降幅度最大,从初始的 7.39 分别降至 4.42 和 4.67。除了以上两组合外,其他处理在第 36 天时各处理水体 pH 均无显著差异,表明水体环境趋于稳定。

3.2. 水生植物及不同组合对水体污染物的去除效果

3.2.1. 水体中铵态氮和 TN 的去除效果

不同水生植物及组合处理后水体氨氮如图 2 所示。实验初期(第 6 天)水体氨氮含量受植物种类影响显著(p < 0.05)。 所有处理中氨氮浓度最低值出现在第 36 天时,其中空心菜 + 野荸荠组合处理的氨氮浓度从 140.85 mg/L 降低至 50 mg/L 左右,去除率为 64%,与其他处理相比呈现极显著差异(p < 0.01)。到了后期(46 d)不同种类植物对氨氮的净化效果无显著差异(除空心菜 + 野荸荠组合外),而空白对照处理的氨氮浓度又上升为 116.19 mg/L,显著高于植物处理组,表明通过植物的辅助修复可以对高浓度富营养水体的净化起到一定作用。总的来看,空心菜 + 野荸荠组合处理对氨氮的去除效果优于其它植物或组合。



注:图中小写字母表示同一采样时间不同处理间的差异显著性,大写字母表示同一处理不同时间上差异显著性(下同)。Bars with different lowercase letters in the same sampling date are significantly different at 0.05 level, and bars with different uppercase letters in the same treatment are significantly different at 0.05 level. (The same below)

Figure 1. Variation of pH in polluted water 图 1. 水样中 pH 的变化

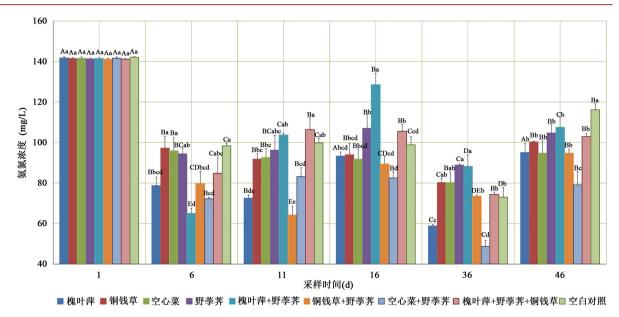


Figure 2. Ammonia nitrogen concentration in high concentration polluted water 图 2. 水体氨氮浓度的变化.

水体 TN 浓度变化如图 3 所示,各种植物处理第 6 天时水体中的 TN 浓度显著低于起始浓度,但随着试验时间的推进,不同植物处理的水体中 TN 浓度均趋于较为平稳的水平。植物处理组合中,随时试验时间的延长,空心菜 + 野荸荠组合水体中 TN 浓度一直呈现显著下降的趋势,在第 46 天收获时 TN 浓度达到最低,即从起始的 222 mg/L 降到 154.72 mg/L,去除率为 30.3%,与其他处理呈现极显著差异(p < 0.01)。在最后收割时,所有植物处理组中的 TN 均略低于对照组。铜钱草和空心菜单种或组合处理对 TN 的去除效果明显优于另两种植物或组合。

3.2.2. 水体中 TP 的去除效果

如图 4 所示,在试验前期(第 11 天时),除了铜钱草和空心菜以外,其他处理水体中 TP 浓度均显著下降。但在第 16 天时各个处理中 TP 浓度又有所回升。在第 46 天时,槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草组合处理的 TP 浓度最低,为 14.33 mg/L,去除率为 34.3%,并与其他处理或不同采样时间上呈现极显著差异(p < 0.01);野荸荠处理的 TP 含量是 18.65 mg/L,其去除率仅为 14.4%。而空白对照水体中的 TP 的浓度变化幅度平稳。综合比较几种处理的 TP 去除效果,发现槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草和空心菜 + 野荸荠组合处理优于其他处理。

3.3. 水生植物生物量变化

在富营养化水体中,部分处理的植物的生长受到明显抑制,尤其是铜钱草和野荸荠。如表 2 所示,第一次收割时间为试验第 11 天,铜钱草处理和槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草组合生长较为缓慢。第二次收割时间为试验第 36 天,槐叶萍处理保持较好的生长状况,收割获得的生物量为 36.2 g 每盆。第三次收割时间为试验第 46 天,完全收获所有处理的植物。试验结束时,槐叶萍的生物量净增长率达到 125%,槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草组合的净增长率次之,只有 28%左右。

3.4. 不同水生植物体内氮、磷的含量及其吸收总量

不同水生植物有不同的生长特性, 4 种水生植物在水体净化过程中具有不同的氮、磷吸收能力。不同水生植物在种植 46 天后体内 TN 和 TP 含量见表 3。四种供试植物初始 TN 和 TP 的浓度均较低, 但

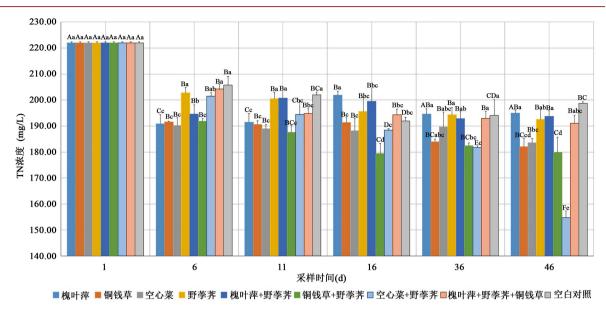


Figure 3. Concentration of TN in high concentration polluted water 图 3. 水体 TN 浓度的变化

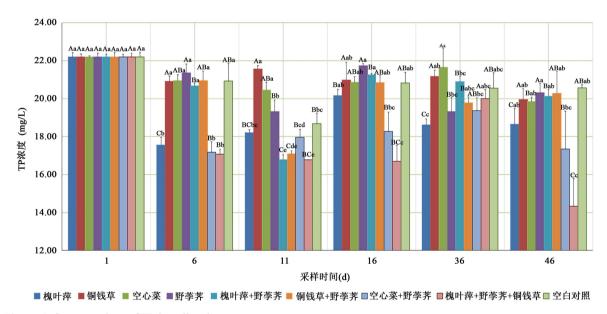


Figure 4. Concentrations of TP in polluted water 图 4. 水体中 TP 的变化

在高浓度的污水胁迫下,其茎叶部分的 TN 和 TP 含量均有所提高。槐叶萍、铜钱草和空心菜的茎叶部分 干物质 TN 含量大约 11.95~13.96 g/kg,而其 TP 含量大约是 7.11~7.93 g/kg。野荸荠氮和磷含量最低,地上部分氮和磷分别是 7.75~11.06 g/kg 和 3.1~5.4 g/kg,而根部氮和磷含量分别为 4.2~8.02 和 3.3~5.18 g/kg。总的来看,四种水生植物的地上部分氮磷含量均大于根部分,表明氮磷能从根系向茎叶转移,有利于通过收获植物去除水体中的氮和磷。虽然在短时间内对这 4 种植物进行 2 次收割,但植物体内 TN 和 TP 含量都维持在一个较稳定的水平,表明槐叶萍、野荸荠和空心菜等水生植物对于营养元素氮磷都有非常好的持续吸收能力。值得一提的是,槐叶萍 + 野荸荠组合处理中,两种植物共同种植时促进了其茎叶部分 TP 的浓度。

Table 2. Biomass of different plants after 46 days' treatment (g/pot) 表 2. 不同植物组合生物量在 46 天内的变化(g/pot, 鲜重)

处理	初始鲜重	收割 1	收割 2	收割3	收割总量	净增长率
槐叶萍	39.7	27.6	36.2	25.5	89.3	125%
铜钱草	71.1	3.21	30.5	26.2	59.9	-15.7%
空心菜	48.1	22.4	7.96	21.8	52.1	8.44%
野荸荠	67.2	10.2	-	52.4	62.5	-6.91%
槐叶萍 + 野荸荠	120	9.68	13.6	92.0	115	-4.20%
铜钱草 + 野荸荠	149	18.1	-	86.3	104	-25.1%
空心菜 + 野荸荠	128	20.8	14.7	113.9	149	16.4%
槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱	草 87.4	8.33	18.9	97.8	125	27.9%

注: 收割 1 为试验第 11 天收割,收割 2 为试验第 36 天收割,收割 3 为试验第 46 天收割。

Table 3. TN and TP content of plants in different plant combinations (g/kg, dw) 表 3. 不同植物组合 TN 和 TP 含量(g/kg, 干重)

	第一次收割 茎叶浓度		第二次收割 茎叶浓度		第三次收割			初始				
处理					茎叶浓度		根部浓度		茎叶浓度		根部浓度	
	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN
槐叶萍	7.13	12.6	11.2	13.0	14.7	8.76	-	-	1.43	6.08	-	-
铜钱草	7.11	13.0	7.73	9.39	8.17	12.7	5.42	6.64	0.81	7.51	1.91	4.95
空心菜	7.93	12.6	7.44	10.2	6.54	7.50	6.75	8.21	0.53	13.1	0.03	3.16
野荸荠	1.35	4.95	-	-	3.10	8.73	5.18	4.42	0.95	5.73	0.60	3.42
槐叶萍 + 野荸荠(槐叶萍)	11.2	13.7	7.44	13.6	14.7	22.2	-	-	-	-	-	-
槐叶萍 + 野荸荠(野荸荠)	2.24	6.70	-	-	5.20	11.1	3.30	5.73	-	-	-	-
铜钱草 + 野荸荠(铜钱草)	7.06	12.6	11.3	11.6	13.2	7.42			-	-	-	-
铜钱草 + 野荸荠(野荸荠)	1.79	5.84	-	-	5.40	9.21	4.84	4.20	-	-	-	-
空心菜 + 野荸荠(空心菜)	7.50	13.9	9.46		8.55	9.84	6.95	8.03	-	-	-	-
空心菜 + 野荸荠(野荸荠)	1.93	7.43	-	-	5.12	8.39	3.37	4.92	-	-	-	-
槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草(槐叶萍)	8.46	12.0	14.5	12.7	12.9	15.9	-	-	-	-	-	-
槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草(野荸荠)	1.14	5.84	-	-	4.47	7.75	4.44	8.02	-	-	-	-
槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草(铜钱草)	7.32	13.4	-	-	5.00	5.12	8.91	5.98	-	-	-	-

植物对污染物的吸收总量取决于体内污染物的含量和生物量。四种植物及其组合对污水中 TN、TP 的吸收能力见表 4 和表 5。在第一次收割(第 11 天)时,空心菜 + 野荸荠处理收割提取得到的 TN 量最高,为 22.4 mg/pot,与其他处理呈现极显著差异(p < 0.01)。其他植物组合如槐叶萍 + 野荸荠处理和空心菜 + 野荸荠处理所提取吸收的 TN 总量也相对较高。从表 6 中可以看到,第一次收割(第 11 天)时,菜心菜 + 野荸荠处理中收割提取得到 TP 总量最多,均为 22.1 mg/pot,与其他处理呈现差异极显著(p < 0.01)。第二次收割(第 36 天)时,槐叶萍处理收割得到 14.2 mg 的 TP 总量,与其他处理呈差异显著(p < 0.05)。第三次收割(第 46 天)时,空心菜 + 野荸荠处理收割得到最高的 TP 吸收总量,分别为 32.5 mg、37.7 mg 和 36.9 mg,与其他处理呈差异显著(p < 0.05)。空心菜 + 野荸荠处理中收割得到的 TP 的总量最高,达到 55.7 mg,与其他处理差异极显著(p < 0.01)。

Table 4. Total uptake of TN in different combinations of plants after 46 days' treatment (mg/pot) 表 4. 水生植物及其不同组合在 46 天内的总氮提取总量(mg/pot, 干重)

<u></u> 处理	第一次收割(11 d)	第二次收割(36 d)	第三次收割(46 d)	提取总量
槐叶萍	6.77 ± 1.45 cd	$16.6 \pm 2.98a$	10.6 ± 1.52 de	26.1 ± 1.61bc
铜钱草	$3.06 \pm 0.95 d$	$13.3 \pm 3.17a$	16.9 ± 10.0 de	-5.41 ± 12.4 d
空心菜	17.1 ± 1.99 ab	$3.80 \pm 0.99b$	$7.10 \pm 3.02e$	7.43 ± 3.89 cd
野荸荠	7.14 ± 2.21 bcd	-	49.2 ± 9.85 bc	$47.9 \pm 10.0a$
槐叶萍 + 野荸荠	$11.3 \pm 3.27bcd$	$5.80 \pm 1.43b$	$68.4 \pm 15.9a$	$54.6 \pm 15.5a$
铜钱草 + 野荸荠	$15.8 \pm 4.77b$	-	45.1 ± 3.89 bc	$10.7 \pm 4.59c$
空心菜 + 野荸荠	$22.4 \pm 3.23a$	$5.81 \pm 2.03b$	36.5 ± 12.9 cd	$24.0 \pm 10.1 bc$
槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草	10.1 ± 3.46 bc	$6.74 \pm 0.69b$	49.9 ± 8.97 bc	$39.3 \pm 12.7ab$

Table 5. Total uptake of TP in different combinations of plants after 46 days' treatment (mg/pot, dw) 表 5. 不同植物组合 46 天内 TP 提取总量(mg/pot, 干重)

<u></u> 处理	第一次收割(11 d)	第二次收割(36 d)	第三次收割(46 d)	提取总量
槐叶萍	4.17 ± 1.79 b	$14.2 \pm 2.98a$	$11.9 \pm 1.02b$	$28.4 \pm 1.29c$
铜钱草	$1.65 \pm 0.50c$	$11.6 \pm 3.17a$	$10.5 \pm 5.10b$	$25.9 \pm 8.00c$
空心菜	$10.7 \pm 1.42a$	$3.09 \pm 0.99b$	$6.60 \pm 2.84c$	$21.1 \pm 3.50c$
野荸荠	$1.94 \pm 0.58c$	-	$30.3 \pm 5.77ab$	$28.5 \pm 6.06c$
槐叶萍 + 野荸荠	6.24 ± 2.21 bc	$4.95 \pm 1.43b$	$32.5 \pm 3.19a$	$41.7 \pm 4.81b$
铜钱草 + 野荸荠	5.48 ± 2.48 bc	-	$30.8 \pm 8.68ab$	$28.1 \pm 7.37d$
空心菜 + 野荸荠	$10.2 \pm 1.97a$	$5.61 \pm 2.03b$	$36.9 \pm 11.0a$	$55.7 \pm 10.6a$
槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草	$4.27\pm1.98b$	$7.65 \pm 0.69ab$	$24.7 \pm 1.97ab$	$33.5 \pm 1.73 bc$

Table 6. Removal rates of pollutants after 46 days' treatment and reduction rates of plant absorption 表 6. 试验 46 天内污水中 TN、TP 和氨氮的去除率和植物吸收作用的削减贡献率

处理		削减贡献率			
处理	TN	氨氮	TP	TN	TP
槐叶萍	12.2%bc	48.9%b	16.0%bc	2.19%	14.2%
铜钱草	18.0%b	40.3%b	10.1%c	0.00%	8.30%
空心菜	17.3%b	49.9%b	10.6%c	0.62%	8.76%
野荸荠	13.2%bc	34.9%c	8.49%c	5.03%	6.70%
槐叶萍 + 野荸荠	12.7%bc	31.5%c	9.34%c	5.85%	7.55%
铜钱草 + 野荸荠	18.9%b	48.7%b	8.68%c	0.85%	6.88%
空心菜 + 野荸荠	30.3%a	80.9%a	21.9%b	1.55%	20.1%
槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草	14.0%bc	36.8%c	35.4%a	3.95%	33.7%
空白对照	10.5%c	21.3%b	7.33%c		

3.5. 水生植物及不同组合对水体污染物的去除率和削减贡献率

由表 6 可知, 4 种水生植物及其组合对模拟污水 TN、TP、氨氮的去除率高于对照组,空心菜 + 野荸荠组合 TN 去除率和氨氮率、槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草组合 TP 去除率,分别为 30.3%、80.9%和 35.4%,显著优于其他多种水生植物处理组。单一处理组中槐叶萍对水体 TN 的去除率最弱,野荸荠对水体总磷和氨氮的去除率最低。通过植物吸收作用对水体中污染物的削减贡献率见表 6。结果显示,槐叶萍 + 野荸荠组合的吸收作用对污水 TN 的削减贡献率最高,但仅为 5.8%;而对 TP 的削减贡献率最高的是槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草组合(33.67%)。水生植物对水体 TP 削减贡献率高于 TN 的削减贡献率。

4. 讨论

在利用水生植物净化富营养化水体过程中,可以通过植物同化将水体中的污染物转移到植物体内,植物吸收的氮磷元素再通过收获、处置和进一步利用,从而达到将一部分过量的氮磷从富营养化水体中去除的目的。本试验研究了 4 种水生植物及其组合对富营养化水体的净化效果,结果显示,空心菜 + 野荸荠组合对 TN、氨氮的净化能力最强,槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草组合对 TP 的净化能力最强。随着试验时间的延长,水体中的氨氮、TN、有效磷和 TP 等含量有时升高有时降低。本研究中植物组合处理的净化效果略优于比单种植物,但无显著差异。

在 46 天的实验过程中,槐叶萍和空心菜的生物量随时间有所增加,到实验中后期由于高浓度污染的胁迫,空心菜表现生长缓慢,铜钱草和野荸荠出现部分衰亡而生物量下降,可以说明铜钱草和野荸荠不具有较强的高浓度污水适应能力。pH 值是水体环境指示因子之一,多数研究表明植物的存在对水体酸碱度具有调节作用,但在本研究中,无植物的对照组水体 pH 变化趋势与有植物的较为接近,这说明植物的存在对调节水体 pH 值作用不大,另外可能水体中存在酸碱缓冲体系发挥了调节功能。

具有不同特性的水生植物在不同水环境中可表现出不同的去污能力。研究报道铜钱草对高污染浓度 (TN 14.68 mg/L, TP 3.87 mg/L)的城市生活污水中 TN 的去除率可达 76.9%,而对 TP 的去除率达到 92.2% [20]。但在本研究中,由于铜钱草生长状况不是特别好,因此所取得的 TN 去除率(18%~52%)和 TP (10%~66%)较弱,这可能与本试验的供试水体富营养化程度(TN 250 mg/L, TP 17 mg/L)有关,实验过程铜钱草的生长确实在一定程度上受到胁迫。空心菜能够大量吸收 N、P 营养提供自身生长所需,对改善水质、修复水体具有重要作用,并能收获农产品、获得经济效益。范鹏宇等[21]报道过水培空心菜对污水TN 和 TP 的去除率分别为 11.2%~62.4%和 7.1%~71.8%,与之相比较,本研究中的空心菜通过吸收作用对TN、TP 和氨氮的去除率比较低,分别为 17.3%、10.6%和 49.9%。野荸荠本身吸收的 TN、TP 含量不高,但其生物量较大,对 TN 的吸收提取量是几种水生植物在最高的,具有作为净化水体植物的潜力,目前尚未有关于净化水体相关报道。槐叶萍是一种漂浮植物,生长速度较快,尽管 TN、TP 含量不算高,但通过多次收割可具有一定的净化污水的能力。本研究中模拟污水的浓度较高,多种植物的生长状况较差,植物脱氮除磷能力也一定程度上会受到抑制,这与张志勇等[22]的研究结果相一致。

尽管水生植物组合净化法被认为比单一物种净化富营养化水体的效果更佳,如刘足根等[23]证实不同生活型的水生植物物种的合理组合配置比单一生活型水生植物氮磷除去率更高,且净化效果更为稳定。但是,本研究中,虽然不同水生植物组合种植对去除水中氮、磷有显著效果,但与单一种植的效果并无显著差异。我们的结果与王春景等的结果相似,他们研究发现菰-水菖蒲混合种植体系对富营养化水体的净化效果与单独种植体系也无显著性差异[24]。因此,水生植物配置种植是否比单一种植更能有效地净化污水需要深入探讨和研究。

本试验结果发现 4 种植物处理前期水体氨氮、总磷等含量均快速下降,这可能是由于实验前期环境温度适宜,水体养分充足,植物生长较快,对氮、磷营养元素的吸收较快[25],植物组随时间变化 TN 浓

度呈下降后趋于稳定的趋势。有研究表明,水生植物生长初期对水体氮、磷的吸收作用高于生长后期,尤其是水生植物在生长初期通过主动吸收净化高浓度富营养化水体氮磷的效率最高[26]。四种水生植物对污水 TN、TP 的去除效果略优于对照组,其中一部分是水生植物作为营养物质吸收以维持自身生长发育;另一部分可能是高浓度污染水体中微生物将其中有机物分解转化为无机物[10]。因为在对照组中,尽管不存在植物吸收作用,TN 和 TP 的浓度也有一定程度的下降,这可能是氨态氮挥发、含有机氮颗粒物的沉降及微生物作用导致下降,表明水体本身存在一定的自净能力[27],也反映了植物的吸收可能不是氮、磷去除的主要途径。因此也可以反映另一现象,就是植物吸收作用对氮的削减贡献十分有限,正如李裕元等[28]发现植物吸收对 T N 的去除作用也是较小,仅占 TN 去除量的 0.6%~17.3%。李淑英[10]报道植物对氮、磷的同化吸收仅占全部去除量的 2%~5%,与本模拟试验的研究结果非常相似。同样地,在人工湿地系统中,Brix [29]和 Haberl 等[30]认为在人工湿地处理污水的整个过程中,植物的吸收并不重要。

在整个实验阶段中共收割了 3 次,第一次收割之前,水体中有效 P 和 TP 等含量有一定幅度的下降,但收割后发现水体中有效 P 和 TP 等含量均有所增加。出现这种现象的可能原因是,实验前期水体中磷一方面是以磷酸盐沉降并固结在基质上的形式去除,另一方面是可给性磷被植物吸收而去除,从而使得磷含量快速降低,但下降到一定值后可能有少量磷从基质中被释放出来。因此,合适的收割时间与强度有待于进一步深入探讨。收割作为一种农艺措施,在工程实践中值得进一步推广,既能提高水生植物地上部分的再生能力,又能循环可持续地吸收降低污水中污染物的净化作用,避免植物枯落物对水体产生二次污染。

5. 结论

经过 46 天的温室静态模拟试验,结果表明:槐叶萍、野荸荠、铜钱草、空心菜等水生植物及其组合对富营养化水体 TN、TP等具有一定的净化能力。供试的 4 种水生植物及其组合对富营养化水体中 TN、TP、氨氮的去除率高于对照组;其中,空心菜 + 野荸荠组合 TN 去除率和氨氮率、槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草组合 TP 去除率达到最高,分别为 30.3%、80.9%和 35.4%,显著优于其他水生植物处理组。同时,在处理了 46 天后,槐叶萍 + 野荸荠组合的吸收作用对污水 TN 的削减贡献率最高,为 5.8%,槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草组合对 TP 的削减贡献率达到最高,为 33.67%。单一种植处理时,槐叶萍对污水的 TN和 TP 的去除具有较大的应用潜力,而槐叶萍 + 野荸荠 + 铜钱草组合为高浓度富营养化水体 TN、TP净化效果最优组合模式。另外,通过合理的收割措施既能转移去除污水中污染物,又有利于植物的恢复和再生,是一种可供选择的生态修复辅助措施。

基金项目

本研究由广东省自然科学基金重大基础培育项目(No. 2015A030308015), 国家自然科学基金 (31670513)和广东省科技计划(2016A020221023)等项目资助。

参考文献

- [1] 程丽巍, 许海, 陈铭达, 等. 水体富营养化成因及其防治措施研究进展[J]. 环境保护科学, 2007, 33(1): 18-21.
- [2] 金相灿. 中国湖泊富营养化[M]. 北京: 环境科学出版社, 1990.
- [3] 宋超, 刘盼, 朱华, 等. 水芹对富营养化水体的净化效果研究[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(3): 145-148.
- [4] 赵凤亮. 高效净化富营养化水体能源植物的筛选及其生理生态基础[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [5] 徐德兰,刘正文,雷泽湘,等.大型水生植物对湖泊生态修复的作用机制研究进展[J].长江大学学报(自然科学版),2005,2(2):14-18.
- [6] 周真明, 叶青, 沈春花, 等. 3 种浮床植物系统对富营养化水体净化效果研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(1):

91-95.

- [7] 渠烨. 水生植物对污染物的清除及其应用[J]. 环境保护与循环经济, 2013, 33(5): 41-43.
- [8] 马凡凡. 水生植物净化污水的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2013.
- [9] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 96-101.
- [10] 李淑英,周元清,胡承,等.水生植物组合后根际微生物及水净化研究[J].环境科学与技术,2010,33(3): 148-153.
- [11] Coleman, J., Hench, K., Garbutt, K., et al. (2001) Treatment of Domestic Wastewater by Three Plant Species in Constructed Wetlands. Water Air & Soil Pollution, 128, 283-295.
- [12] 李欢, 吴蔚, 罗芳丽, 等. 4 种挺水植物、4 种沉水植物及其组合群落去除模拟富营养化水体中总氮和总磷的作用比较[J]. 湿地科学, 2016, 14(2): 163-172.
- [13] Fraser, L.H., Carty, S.M. and Steer, D. (2004) A Test of Four Plant Species to Reduce Total Nitrogen and Total Phosphorus from Soil Leachate in Subsurface Wetland Microcosms. *Bioresource Technology*, **94**, 185-192.
- [14] 吴诗杰, 陈慧娟, 许小桃, 等. 美人蕉、鸢尾、黄菖蒲和千屈菜对富营养化水体净化效果研究[J]. 安徽大学学报 (自然科学版), 2016, 40(1): 98-108.
- [15] Gumbricht, T. (1993) Nutrient Removal Processes in Freshwater Submersed Macrophyte Systems. Ecological Engineering, 2, 1-30.
- [16] 王新刚, 吕锡武, 张圣菊, 等. 水生植物分解过程中生物质及氮磷释放规律研究[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(5): 82-85.
- [17] 余红兵, 杨知建, 肖润林, 等. 水生植物的氮磷吸收能力及收割管理研究[J]. 草业学报, 2013, 22(1): 294-299.
- [18] 方云英, 杨肖娥, 常会庆, 等. 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.
- [19] 鲍士旦. 土壤农业化学分析方法[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 147-149, 168-169.
- [20] 周遗品、刘雯、雷泽湘、等. 铜钱草对城市生活污水的净化效果[J]. 仲恺农业工程学院学报、2011、24(2): 9-12.
- [21] 范鹏宇, 高原, 杨俊, 等. 水培空心菜系统与水培莴笋系统去除污水中氮磷效果比较[J]. 西南科技大学学报, 2017, 32(4): 43-48.
- [22] 张志勇, 徐寸发, 闻学政, 等. 规模化控养水葫芦改善滇池外海水质效果研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 665-672.
- [23] 刘足根, 张萌, 李雄清, 等. 沉水一挺水植物镶嵌组合的水体氮磷去除效果研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(1): 171-181.
- [24] 王春景,杨海军,刘国经,等. 菰和菖蒲对富营养化水体净化效率的比较[J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(1): 40-44.
- [25] 高岩,马涛,张振华,等.不同生长阶段凤眼莲净化不同程度富营养化水体的效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12): 2427-2435.
- [26] Sooknah, R. (2000) A Review of the Mechanisms of Pollutant Removal in Water Hyacinth Systems. Science and Technology Research Journal, 6, 49-57.
- [27] 邱敏. 太湖氮磷大气沉降及水体自净模拟实验研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2017.
- [28] 李裕元. 坡地土壤磷素与水分迁移试验研究[D]: [博士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002.
- [29] Brix, H. (1994) Function of Macrophytes in Constructed Wetlands. Water Science & Technology, 29, 71-78. https://doi.org/10.2166/wst.1994.0160
- [30] Haberl, R. and Perfler, R. (1991) Nutrient Removal in the Reed Bed Systems. Water Science & Technology, 29, 15-27. https://doi.org/10.2166/wst.1991.0523



知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询

2. 打开知网首页 http://cnki.net/ 左侧"国际文献总库"进入,输入文章标题,即可查询

投稿请点击: http://www.hanspub.org/Submission.aspx

期刊邮箱: aep@hanspub.org