

孙 鹏,崔康平,许为义,等. 3 种浮床植物对污染水体水质改善性能研究[J]. 江苏农业科学,2016,44(5):475-479.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.05.136

3 种浮床植物对污染水体水质改善性能研究

孙 鹏¹, 崔康平², 许为义², 王 郑², 陈鸿汉¹

(1. 中国地质大学水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要:选取美人蕉、石菖蒲和伞草 3 种湖北省十堰百二河流域常见的优势植物作为研究对象,构建百二河污染水体治理生态浮床,对 3 种植物在受农家乐生活污水污染的水体中的生长特性及水质净化能力和营养元素累积能力的差异进行比较研究。结果表明,3 种植物均能有效吸收和净化污染水体中的氮磷和有机质,但是性能差异显著,夏季 COD_{cr} 的去除率为 47.3%~75.6%,TN 的去除率为 36.7%~54.7%,TP 的去除率为 57.3%~83.4%,高低排序均为美人蕉>石菖蒲>伞草,冬季石菖蒲优于美人蕉;植物生物量的增长美人蕉最大,石菖蒲次之,伞草最小;营养累积率上看,生长期植物的地上组织部分氮含量较高,衰亡期则往根部转移,石菖蒲磷累积率不论冬夏地下部分都高于地上部分,可以定时收割不同组织转移水体中的营养盐。通过对比分析,认为美人蕉和石菖蒲作为该地区的浮床植物具有较大优势,进行混栽可提高生态多样性。

关键词:水生植物;生态浮床;氮磷吸收;污染水体;水质改善

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)05-0475-05

生态浮床技术是运用无土栽培技术,利用生态工学原理,人工将植物种植在载体上,通过植物根部的吸收和吸附作用,削减水体中的 COD、氮、磷等污染物质,达到净化水质的目的。该技术因造价低廉、运行简单、具有较好的景观效益等优点,已成为一种应用较广的生态处理技术^[1-6]。

当前关于生态浮床植物的遴选是很多学者的研究重点之一,不同植物种类生长所需的环境条件、营养盐的吸收及在生态系统中的地位是不同的,不同植物类型的浮床氮、磷去除效果会有较大差异^[7-9]。目前研究较多的是针对植物的适应能力和水质净化能力,而关于处理农家乐生活污水的植物的生长特性及植物自身对营养元素吸收规律探讨方面报道较少。本研究选取湖北省十堰百二河流域常见的 3 种浮床植物美人蕉、石菖蒲和伞草,通过研究 3 种植物在不同季节沿途受农家乐生活污水污染的河水中的生长特性及对水体中水质指标处

理能力的差异,并对冬夏两季营养元素累积能力进行分析,遴选出适合该地区的优势植物,为十堰百二河及周边地区的水质净化、植物生态浮床系统的构建和推广应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

用 40 cm(长)×28 cm(宽)×30 cm(高)的塑料收纳箱,试验时加入 20 L 水样。采用厚度约 1.5 cm 的聚乙烯塑料泡沫板为载体,打孔种植水生植物,植物覆盖率为 30% 左右。水箱放置在实验室的阳台上。

结合十堰当地气候条件并综合考虑植物筛选原则选取美人蕉、石菖蒲、伞草 3 种当地常见的并具有一定生长优势的植物作为研究对象。植物种类及生物学特性见表 1。

表 1 试验植物种类及生物学特性

植物种类	科名	生活环境	生长期	习性
美人蕉	美人蕉	喜温暖湿润气候,不耐霜冻	春秋	多年生草本
伞草	莎草	喜温暖湿润,耐半阴	春秋	多年生挺水植物
石菖蒲	天南星	喜冷凉湿润气候,耐寒	春秋	多年生草木

试验用水取自百二河河水,主要污染源有周边农家乐生活污水、居民生活污水、雨水径流污染及底泥中的营养物质释放。经测定试验水质 COD、TN、TP 浓度平均值分别为 107、15、3.7 mg/L。根据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中对 5 类水的上限规定,该水质为劣 V 类水。

收稿日期:2015-12-05

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(编号:2012ZX07205-002)。

作者简介:孙 鹏(1987—),男,博士研究生,研究方向为水污染控制。E-mail:piaofeixue_sp@163.com。

通信作者:崔康平,博士,教授,主要从事水污染控制方面研究。E-mail:cui kangping@163.com。

1.2 试验方法

试验于 2014 年 8 月 5 日至 9 月 22 日(夏季)和 11 月 10 日至 12 月 10 日(冬季)间进行。夏季试验共设 4 组处理,其中 3 个植物组和 1 个对照组,冬季试验则设置 3 组处理,2 个植物组和 1 个对照组,每组试验组设 3 次重复,试验前将生长情况良好、植株长势均匀的植物洗净后放在清水中饥饿培养后再于试验开始时移入试验箱固定在载体上。每组处理种植 1 株植物,并将美人蕉、伞草、石菖蒲和空白组分别编号,记为 1、2、3、4,对照组箱子内仅为河水。每隔 2 d 于第 3 天的上午 10:00 采集各组的水样,每次在箱子的上部、中部和下部取样,混合均匀以消除误差,每次取样约 50 mL,测定化学需氧量(COD_{cr})、总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、总磷(TP)、温度、溶

解氧(DO)等,并定期补充因蒸腾作用而蒸发的水分。在试验过程中观察植物的生长状况,并于开始和结束时测定植物的株高及根长等生长指标和植物体内营养元素的累积率,因冬季试验过程中植物出现枯萎落叶状况,因此植物生长状况只统计夏季。

1.3 样品处理和数据分析

植物处理:将试验前后的整株植物,连同地下部分洗净、晾干,将植物分为地上部分和地下部分,并称量鲜质量和干质量,研磨以分析植物体内营养元素含量,植物体内氮磷经过浓硫酸+过氧化氢消煮后测定。每个植物样品 3 次重复来校验误差。

水质测定:按照《水和废水监测分析方法》(国家环境保护总局,2002),总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,总磷采用钼酸铵分光光度法,氨氮采用纳氏试剂分光光度法,化学需氧量采用重铬酸钾法,用雷磁便携式多参数分析仪(DZB-718)测定溶解氧等。

累积率=(试验后植物氮磷含量-试验前植物氮磷含量)/试验前植物氮磷含量。

数据采用 SigmaPlot 12.5 和 Excel 2010 软件进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 植物的生长状况

在试验开始和结束时分别测定不同处理组内 3 种植株的株高、根长和总质量,计算出各个试验组的植株增长率、根长增长率和总质量的增长情况。

夏季试验期间,3 种植物均能正常生长,都有新叶长出、叶片增大、株高增高,植物根系增长明显,有白色新根长出,具体生长状况见表 2。由表 2 可知,试验期间,3 种植物株高、根长都有明显增加。其中,美人蕉长势明显好于其他 2 种植物,叶片增长较快,根系增长较多且新生大量幼根,株高增长率、根长增长率分别为 20.1% 和 62.2%,显示出了较强的生长能力;石菖蒲次之,2 项指标增长率分别为 14.9% 和 30.8%,其分蘖数最多,根系也较为发达;伞草在此次试验中生长情况一般,株高和植物量增加最小。

表 2 植物生长状况

植物	株高(cm)		株高增长率 (%)	最大根长(cm)		根长增长率 (%)
	开始	结束		开始	结束	
美人蕉	38.3 ± 1.70	46.0 ± 0.82	20.1	8.2 ± 0.22	13.3 ± 0.33	62.2
伞草	42.7 ± 1.25	45.7 ± 1.25	7.0	6.9 ± 0.16	8.3 ± 0.17	20.1
石菖蒲	38.3 ± 1.25	44.0 ± 1.63	14.9	9.4 ± 0.21	12.3 ± 0.05	30.8

2.2 水质指标去除效果

3 种浮床植物对污染水体起到了明显的净化效果。试验前后,水体变化明显;由试验前的浑浊并有明显的腥臭味逐渐变清,异色异味消失。其中,美人蕉和石菖蒲试验组内水体透明度增加较快,伞草在此期间效果一般。除了感官性状有明显改善外,各试验组内的各污染物质含量均有明显下降。

2.2.1 水中化学需氧量的浓度变化 污水中的污染物可通过微生物降解、植物根系截留、吸附等形式去除。COD 是衡量水体中有机物质量浓度的指标,浓度越高,表示污染越严重。不同季节各组对 COD 的去除效果如图 1 所示。夏季试验中,经过 40 多天的运行,3 种水生植物对水体中 COD 均有较好的去除效果且与空白对照差异显著。去除率分别为 75.6%、47.3%、65.9% 和 16.9%。美人蕉植物组的去除效果最好,石菖蒲次之,伞草较差,但均好于对照组。冬季试验

COD 的去除效率明显较夏季偏低,试验初期美人蕉的去除率最好,随着时间的推移,石菖蒲表现出更好的去除效率,这与温度降低对植物生长影响有关。

2.2.2 水中氨氮的浓度变化 不同试验组对氨氮的去除效果如图 2 所示,各试验组对氨氮的去除变化趋势总体都是下降的,前期下降较快,后期趋于平缓。植物组在试验结束时均对氨氮有较高的去除率,明显高于对照的空白试验组,去除效果为美人蕉>石菖蒲>伞草>空白,去除率分别为 92.2%、82.4%、66.7% 和 25.5%。污染水体中的氨氮一部分通过植物吸收和挥发作用去除,而大部分是通过根际微生物的硝化作用和反硝化作用去除的。试验过程期间的水温一般在 20℃ 左右,属于 N 最佳去除温度范围(20~25℃)内^[10-11],因此试验过程中氨氮的去除作用较显著,达到 80% 以上。

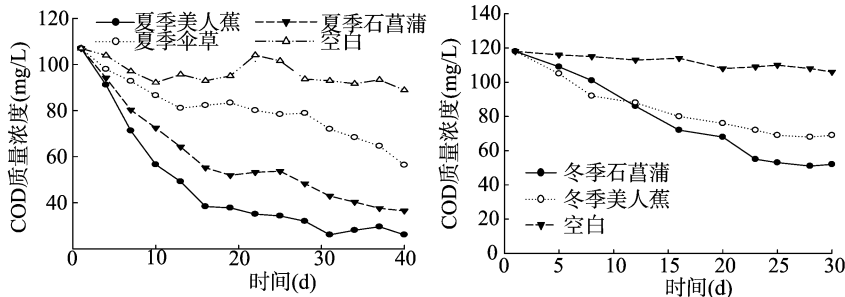


图1 化学需氧量的变化

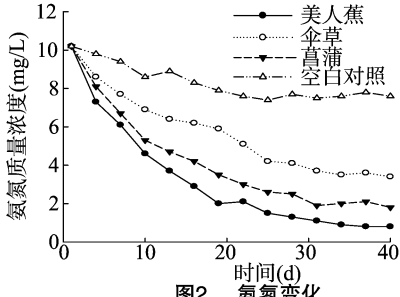


图2 氨氮变化

2.2.3 水中总氮的浓度变化 由图 3 可以看出,夏季 3 种植物对总氮的去除具有明显的效果。由于试验开始之前的适应性培养,植物在试验开始时并未表现出不适应性,表现出了较高的去除效率,随着时间的推移,去除速率逐渐下降,最后趋

于平稳。对比不同试验组可以看出,3 种水生植物对总氮的去除作用差异较为显著,美人蕉>石菖蒲>伞草>空白,去除率分别为 54.7%、46.7%、36.7%、20%。冬季试验温度较低,植物生长状态和微生物活性都不如夏季,以至对水体的去

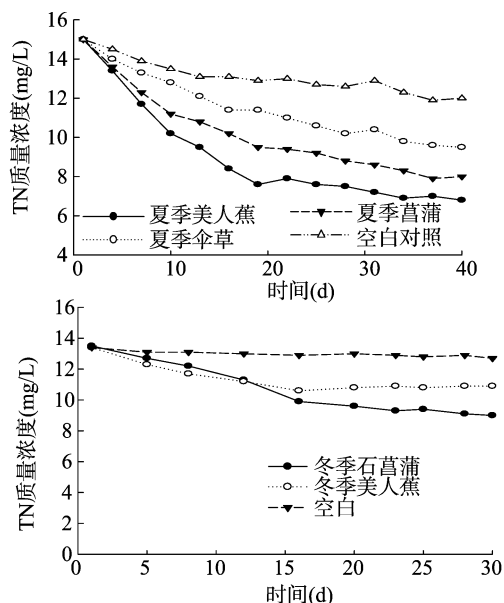


图3 总氮变化

除率都低于夏季,石菖蒲和美人蕉最终去除率为 33%、19%。

2.2.4 水中总磷的浓度变化 生态浮床对磷的去除途径包括植物根系对 SRP 的吸收利用和对颗粒态磷的滞留、根际微

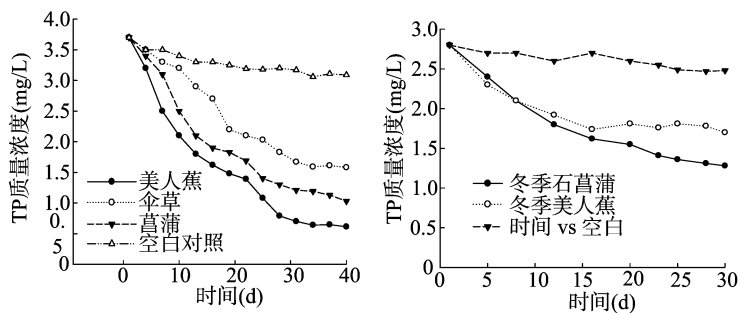


图4 总磷变化

图 6 显示,试验植物对水体中的氮磷均有不同程度的吸收,夏季试验的吸收累积率明显高于冬季试验。氮素的最高累积率为 46%,磷素的最高累积率为 36%。夏季试验,对氮素和磷素的累积能力,美人蕉均是茎叶高于根部;石菖蒲对氮的累积能力是茎叶大于根部,对磷的累积能力则相反;伞草在 3 种植物中累积率最低,茎叶对氮磷的累积均高于根部。美人蕉和菖蒲对氮、磷的季节累积能力差异显著,根部和茎叶部分的累积能力差异较明显,在冬季试验中,根部对氮磷的累积能力均大于茎叶。石菖蒲的累积能力则大于美人蕉,与夏季试验相反。

植物吸收对于富营养水体中氮素的去除具有十分重要的作用。夏季试验前后,美人蕉共计从水体富集氮素 61.4 mg,石菖蒲和伞草则分别为 46.6、30.3 mg,分别占系统去除率的 37.4%、33.3%、27.5%,其余部分则是由吸附沉降微生物等作用去除的;对于磷素,累积能力为美人蕉 > 石菖蒲 > 伞草,从水体中累积分别为 5.89、4.68、2.69 mg,对系统去除贡献率分别为 9.5%、8.8%、6.3%,表明磷素在水体降解过程中植物的吸收并不是占主导作用,污染水体中的 TP 主要是通过化学沉淀、藻菌细胞的合成、物理吸附等作用去除的。虽然植物体吸收作用对系统去除的直接作用有限,但是植物根系

生物对 SRP 的吸收和对有机磷的矿化^[12]。温度、气候、植物种类、水上与水下植物组织间磷素转移及释放等因素影响植物对磷的去除性能^[13-15]。

由图 4 可见,不同试验组对总磷均有较好的去除效果,不同试验组间去除效果差异显著,试验结束时美人蕉去除效果明显好于其余 3 个试验组,石菖蒲次之,伞草和空白效果较差。去除率分别为 83.4%、72.2%、57.3% 和 16.5%。冬季不论从净化效果还是植物生长状况都与夏季差距明显,石菖蒲和美人蕉的去除率分别为 54%、39%。

2.3 植物体内氮磷累积

在生态浮床的各种水质改善途径中,植物体对氮磷的吸收和根际微生物的反硝化脱氮作用能将氮磷移出水体,起到控制水体富营养化的作用。为了剖析植物吸收在水质改善中的贡献,对试验前后植物体内的氮磷累积率及生物量进行了检测,结果如图 5 和图 6 所示。

从图 5 中可以看出,3 种植物经过 40 多天的培养,植株生物量有了明显增加,美人蕉由 63 g 增长到 82 g,增长率达到 30%;石菖蒲次之,由 57.7 g 增长到 72.3 g,增长率为 25.4%;伞草则由 63 g 增长到 73 g,增长率为 15.9%,表明在处理百二河污水过程中,伞草对于富营养化水体的适应性及去除效率均低于石菖蒲及美人蕉。

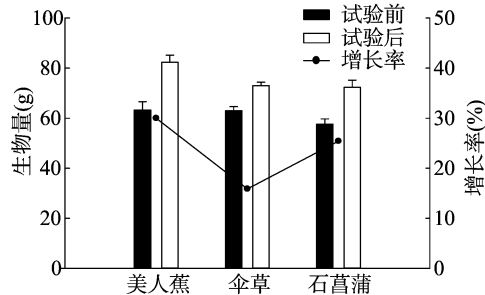


图5 植物试验前后质量变化

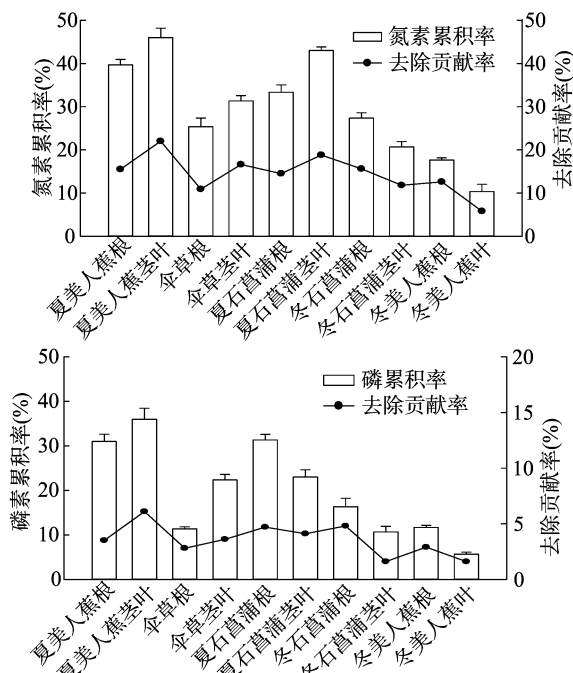


图6 植物对氮磷累积率及去除贡献率

聚集的微生物是同化吸收磷素的主要因素,因此植物在系统中的作用十分关键。

通过对植物体内氮、磷累积率的分析,可知所选植物的不同组织在不同季节富集氮磷的能力不同,对整个系统的净化效率产生重要影响,因此在后续的运用生态浮岛治理富营养化水体植物管理过程中,可采取定时收割不同植物组织的方法,既能将植物吸收转化的营养盐从水体中转移出来,又能保持植物再生能力。

2.4 试验组的 DO 特性

DO 作为一个表征水环境的重要指标,反映了水环境的物理、化学和生物特征。DO 对于水体中亚硝酸盐氮的去除、水体中氨氮的转化和支持微生物的新陈代谢具有重要作用。尽管到目前为止,水生植物的曝氧能力还没有统一的范围,但是有研究指出,一些挺水植物的根系释氧速率为 0.25 ~ 9.6 mg/(m² · d),沉水植物的释氧速率为 0.5 ~ 5.2 mg/(m² · d)^[16-17]。由表 3 可以看出,试验期间不同试验组内的 DO 水平差异显著。由于植物移栽到新的环境中时需要一个适应阶段,输氧作用暂时较弱,随着时间推移植物适应新环境,DO 含量开始升高。美人蕉试验组的 DO 含量最高,在水体中的泌氧略高于石菖蒲,伞草最低。这是由于美人蕉和石菖蒲均具有较发达和粗壮的根系向水中泌氧及水体与空气交换的结果。较高的 DO 有利于硝化反应的发生,而且还有利于生物好氧吸磷作用和抑制底泥磷的释放。从这一侧面也可反映出不同试验组对污染物的去除效果,与实际试验结果吻合。

表 3 试验组 DO 变化情况

次数	试验组 DO 浓度 (mg/L)		
	美人蕉	石菖蒲	伞草
1	4.30	4.12	4.56
2	2.92	2.97	1.99
3	1.85	1.78	1.06
4	2.44	2.32	1.38
5	2.53	2.44	1.48
6	2.43	2.36	1.46
7	2.62	2.28	1.39

3 讨论

在试验期间,3 组水生植物对污染水体中化学需氧量、氨氮、总氮和总磷均表现出良好的去除效果,虽然最终试验过程中水质还没有达到 V 类水标准,但是水体中 COD_{Cr}、氨氮、TN 和 TP 的质量浓度明显下降,浊度降低,透明度增加,水质得到较好改善。试验采用的 3 种植物美人蕉和石菖蒲根系浓密,伞草相对稀疏。而植物根系对污染物的吸附、吸收作用是浮床植物净化污染水体的重要途径,浓密的根系不仅可以增加对水体悬浮物的吸附及有助于根际向水体中释氧,形成根际好氧-缺氧小环境,同时还可可为微生物提供良好的栖息场所,有助于增加微生物种类和数量,从而提高对污染河水的净化效率。

随着植物的生长及根系的增加,浮床植物对有机物的去除效率逐渐提高,这是因为有机物的去除主要是依靠植物的吸收及根际微生物的降解作用^[18]。石菖蒲和美人蕉的根系及水体中的发育状况好于伞草,可能原因是此浓度的富营养

化水体对伞草具有一定的抑制作用,有研究表明水体富营养化程度过高会抑制植物的生长,植物对 N、P 的去除能力也明显下降^[19];美人蕉的根系形态与石菖蒲的不同致使两者对污染物的吸收和输氧能力有差异,美人蕉的效率高于石菖蒲,这与卜发平等研究的结果^[20]一致。空白试验组中期的 COD_{Cr}起伏变化是由于较适宜的温度和较高的营养盐浓度为藻类的繁殖创造了良好的条件,试验中期水体中产生藻类所致。而石菖蒲和美人蕉由于较强的化感作用及茂盛的枝叶对阳光的遮挡,在这 2 组试验中并未出现藻类,具有很好的抑藻效果。COD_{Cr}在中期的小幅波动可能是由于生长过程中部分腐烂根部及吸附的固体有机颗粒分解向水体中释放有机物所致。冬季试验中,由于温度的降低,微生物活性减弱,植物生命活动也变得微弱。美人蕉中期叶片枯黄后期茎叶枯萎,而石菖蒲较为耐寒,在低温条件下仍能保持正常的生命活动,因此在冬季的去除效果美人蕉低于石菖蒲。从试验植物的生物量、根系发达程度及季节影响等综合分析,美人蕉和石菖蒲是较好的浮床植物。

浮床植物在生长过程中生物量逐渐增大,对污染水体中氮元素的吸收量逐渐增加,植物发达的根系对水中悬浮物的吸附量也不断增加。另外,发达的根系使得根际输氧能力提高,水中的溶解氧增多,为水体中的好氧微生物特别是根际好氧微生物的生长发育和繁殖创造了条件^[21]。植物组织及根际微生物吸收、根际微生物分解与转化有机氮,是去除污染水体中氮素的主要途径。试验期间氮素含量出现的动态变化是由于试验为静态模拟去除试验,因此某些固态颗粒容易在初期首先发生沉降吸附作用而使得水体内 TN 的含量快速降低;随着试验的进行,沉降作用已不占优势,沉积物中的氮含量已经高于上覆水中的氮素含量,原本以颗粒态存在的有机氮则会以溶解态的形式重新回到上覆水中去,使 TN 的去除呈现平缓及小波浪动态变化;试验后期,随着水体中底物浓度的不断降低、植物根基腐烂和部分微生物死亡生物膜脱落,有机氮又返回到水体中,TN 的去除速率更低,在呼吸作用占主导的夜晚甚至出现了回升的趋势。从冬季试验的变化曲线来看,美人蕉最后 TN 去除率上升,是由于受温度影响微生物活动微弱,而植物体生理机能退化,植物枯萎落叶及根基腐烂使有机氮分解返回水体中的缘故。

磷素的去除主要通过根际微生物的同化作用及物理化学吸附作用,植物吸收的直接贡献相对较小。生长越旺盛、根系越发达,对水体的释氧效果越好,利于根际不同类型微生物的生长,越有利于磷的去除。试验初期磷的去除主要通过吸附沉淀作用使得水体中的磷快速减少,后期主要依靠好氧的聚磷菌进行转化去除,夏季试验过程中对不同试验组的植株及根系发育情况和对 DO 的检测显示美人蕉试验组优于其余 2 组植物试验组,因此美人蕉试验组的去除效果要优于其余试验组。冬季受到温度影响,低温条件下微生物活性受到抑制,美人蕉冬季枯萎,吸收效率降低,因此水质净化效果相对较差。

对植物体内营养元素累积率进行分析发现夏季试验中植物的地上部分氮素累积量高于地下部分。植物体内氮磷累积率不仅可以反映出植物不同部位对营养元素的积蓄能力差异同时也可以反映出营养元素在植物体内的转运规律^[22]。有研究表明营养物质会随着植物的生长状态在植物地上与地下部

分进行“回流”。营养转移是植物保持营养机制的方式之一,对竞争、营养吸收、生产力等过程产生重要影响^[23-24]。夏季试验期间的植物处于生长初期,分生组织发达,生长速度快,对氮磷等营养元素的需求量大,根部会将营养物质输送至地上部分的茎叶,促使其快速生长发育。因此在初期,植物根部的氮素含量比茎叶高,但在后期茎叶的氮含量则比根部累积得多。石菖蒲根部对磷素的累积能力强可能是由于其生长状态决定的,石菖蒲在茎叶生长到一定程度后根部的生长速率要高于其茎叶的生长速率,以至磷素在根部的累积超过茎叶部分。冬季试验发现植物衰亡期会使地下部分的营养元素累积能力较地上部分高。这为收割管理浮床植物以将营养盐从水体中转移提供了较好的理论基础。根据植物对营养盐需求吸收的阈值,合理选择收割方式及收割时间,更好地发挥植物对水质的净化作用。考虑到吸收效率及季节影响,可以将石菖蒲与美人蕉在百二河地区进行混合栽种,既可以保证全年浮床系统的正常运行又可以增加生态多样性和景观效应。

4 结论

本研究进行了湖北省十堰当地的美人蕉、石菖蒲和伞草作为生态浮床植物,用于百二河流域水质改善的试验。试验结果表明,美人蕉、石菖蒲和伞草3种植物均适应在当地受农家乐污水污染程度较重的水体中培植,都能有效地吸收富营养化水体中的氮、磷等污染物,恢复水生态环境,同时可美化水域环境,有较高的经济价值和景观效益。

综合植物的生长状况、水质的净化效果和植物的筛选原则,试验水体中污染物浓度与植物生长周期、根毛发达程度、温度等因素有关。夏季试验中,美人蕉对水体的综合净化效果要好于石菖蒲和伞草,COD_{cr}、氨氮、TN和TP的去除效率分别为75.6%、92.2%、54.7%、83.4%,石菖蒲组的为65.9%、82.4%、46.7%、72.2%,伞草试验组的最低,分别为47.2%、66.7%、36.7%、57.3%。冬季试验则相反,石菖蒲好于美人蕉。对试验组的植株及根系发育情况和对DO的检测发现,美人蕉和石菖蒲均可作为优选的浮床植物。

试验期间,不同植物组织的氮磷累积量和累积能力差异显著。夏季累积能力高于冬季。氮素的最高累积率为46%,磷素的最高累积率为36%,夏季美人蕉对氮磷的累积能力茎叶大于根部,冬季则相反;菖蒲对氮磷素累积能力根部大于茎叶。植物生长状态与营养元素之间的流动存在相关性。针对不同组织的累积特点可进行美人蕉与石菖蒲混栽,采取定时收割植物组织的方法将营养盐从水体中转移出来,提高了生物对氮磷的去除率,同时可增加生物多样性和提高景观效益。

参考文献:

- [1]蒋跃,童琰,由文辉,等. 3种浮床植物生长特性及氮、磷吸收的优化配置研究[J]. 中国环境科学,2011,31(5):774-780.
- [2]章文贤,韩永和,卢文显,等. 植物生态浮床的制备及其对富营养化水体的净化效果[J]. 环境工程学报,2014,8(8):3253-3258.
- [3]Sun L E, Liu Y, Jin H. Nitrogen removal from polluted river by enhanced floating bed grown canna[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(1):135-140.
- [4]宋伟,周庆,王彦玲,等. 几种植物净化能力的比较及浮床应

- 用效果研究[J]. 江苏农业科学,2010(5):474-477.
- [5]Sooknab R D, Wilkie A C. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater[J]. Ecological Engineering, 2004, 22(1):27-42.
- [6]段金程,张毅敏,张红卫,等. 连片生态浮床对微污染河水的净化效果[J]. 环境工程学报,2013,7(4):1324-1330.
- [7]周楠楠,高芮,张择瑞. 浮床植物系统对富营养化水体的净化效果[J]. 江苏农业科学,2013,41(3):337-339.
- [8]李先宁,宋海亮,朱光灿,等. 组合型生态浮床的动态水质净化特性[J]. 环境科学,2007,28(11):2448-2452.
- [9]Sierp M T, Qin J G, Recknagel F. Biomanipulation: a review of biological control measures in eutrophic waters and the potential for murraycod *Maccullochella peelii peelii* to promote water quality in temperate Australia[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2009, 19(2):143-165.
- [10]Phipps R G, Crumpton W G. Factors affecting nitrogen loss in experimental wetlands with different hydrological loads[J]. Ecological Engineering, 1994(3):399-408.
- [11]Lee C G, Fletcher T D, Sun G Z. Nitrogen removal in constructed wetlands systems[J]. Engineering Life Science, 2009, 9(1):11-12.
- [12]Tanner C C. Plants for constructed wetland treatment systems - a comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species[J]. Ecological Engineering, 1996, 7(1):59-83.
- [13]王忠敏,梅凯. 氮磷生态拦截技术在治理太湖流域农业面源污染中的应用[J]. 江苏农业科学,2012,40(8):336-339.
- [14]Hadad H R, Maine M A, Bonetto C A. Macrophyte growth in a pilot-scale constructed wetland for industrial wastewater treatment[J]. Chemosphere, 2006, 63(10):1744-1753.
- [15]Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. Science of the Total Environment, 2007, 380(1/2/3):48-65.
- [16]Brix H. Do saprophytes play a role in constructed treatments[J]. Water Science and Technology, 1997, 35(5):11-17.
- [17]Ye Fen Xia, Li Ying. Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(7):1043-1050.
- [18]李文芬,刘沛芬,颜亨梅,等. 5种浮床植物在水环境恢复治理中的净化差异[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2012,48(2):173-176.
- [19]徐秀玲,陆欣欣,雷先德,等. 不同水生植物对富营养化水体中氮磷去除效果的比较[J]. 上海交通大学学报:农业科学版,2012,30(1):8-14.
- [20]卜发平,罗固源,许晓毅,等. 美人蕉和菖蒲生态浮床净化微污染源水的比较[J]. 中国给水排水,2010,26(3):14-17.
- [21]郑立国,杨仁斌,王海洋,等. 组合型生态浮床对水体修复及植物氮磷吸收能力研究[J]. 环境工程学报,2013,7(6):2153-2159.
- [22]郭长城,胡洪营,李锋民,等. 湿地植物香蒲体内氮、磷含量的季节变化及适宜收割期[J]. 生态环境学报,2009,18(3):1020-1025.
- [23]李志安,王伯荪,林永标,等. 植物营养转移研究进展[J]. 武汉植物学研究,2000,18(3):229-236.
- [24]Killingbeck K T. Nutrient in senesced leaves: keys to the search for potential resorption and resorption proficiency[J]. Ecology, 1996, 77:1716-1727.