

种植不同植物及其组合的人工浮岛对水中氮、磷的去除效果比较

张泽西, 刘佳凯, 张振明, 张明祥*

(北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083)

摘要:于2017年6月1日~7月20日,选取水葱(*Scirpus validus*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、黄花鸢尾(*Iris wilsonii*)、小香蒲(*Typha minima*)和狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*),配置成10种植物组合,种植在北京林业大学八家实验室中,将其种植在10个人工浮岛上,监测这些植物的生长状况,测定并比较种植不同植物的人工浮岛对取自北京市昌平区东沙河的河水中硝态氮、总氮、磷酸盐和总磷的去除效果,最终筛选出最优的水生植物组合。研究表明,多种植物组合的人工浮岛对水中氮、磷污染物的去除效果都优于种植单一植物的人工浮岛。在实验结束时,种植各种植物及其组合的人工浮岛对水中的硝态氮的去除率都接近100%;种植水葱+狐尾藻的人工浮岛对水中磷酸盐的去除率最高,为94.07%;种植水葱+黄花鸢尾+狐尾藻的人工浮岛对水中总氮和总磷的去除率最高,分别为74.38%和89.73%;种植黄花鸢尾的浮岛上的其它植物生长较差,在其它浮岛上的植物都可以正常生长,根系长度增长幅度最大的是小香蒲+狐尾藻组合,其增长量为(10.15±1.98) cm;植株高度增加幅度最大的是水葱+狐尾藻组合,其增长量为(78.25±11.28) cm;在组合种植模式下,水葱和小香蒲根系和植株高度增长量都高于单一种植模式下的增长量。因此,在实际应用中,可以选择种植水葱+黄花鸢尾+狐尾藻的人工浮岛,来达到有效去除富营养化水中氮、磷的目的。

关键词:人工浮岛;植物组合;氮磷污染物;去除率

中图分类号:X522

文献标识码:A

文章编号:1672-5948(2018)02-273-06

水生植物可以通过自身的吸收,去除水体中的污染物质,其根系还能为微生物提供优良的生境,改良基质的通透性,进一步增强对水体中污染物质的去除能力^[1,2]。目前,国内外的相关研究主要是构建人工湿地,研究种植不同植物对污染物的去除效果,筛选出不同条件下能够高效去除氮、磷的植物^[3]。在中国北方地区,黄花鸢尾(*Iris wilsonii*)、水葱(*Scirpus validus*)、小香蒲(*Typha minima*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、菖蒲(*Acorus calamus*)和狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)等常被用来净化水体^[4-8]。除了考虑不同植物的去污效果外,为了构建景观效果,配置出不同水生植物组合,以达到既美化水体景观又修复水体的目的^[9]。

目前,对于选择既兼顾景观又有去污能力的

植物物种的研究存在以下几方面的问题。首先,人工湿地的运营和维护必须定期进行成本较高的植物收割,更换基质,否则会导致人工湿地去除率下降甚至是二次污染;其次,人工湿地技术不能应用于开阔水面,使得其不能应用于某些污染比较严重的河流和湖泊^[4,10-12]。为了克服上述不足,并增加人工湿地的适用范围,近年来国内有学者开始引入人工浮岛技术^[13,14]:将水生植物种植于人工浮岛上,用于去除开阔水体的污染物。研究表明,千屈菜对水中磷的去除率较高,而黄花鸢尾对水中氮的去除率较高^[6,15];然而,这些研究仍然仅局限于单一物种对水质的净化效果的对比,而忽略了多种植物组合种植带来的潜在增益效果^[8,16]。

本研究采用人工浮岛技术,选取水葱、千屈

收稿日期:2018-02-09; 修订日期:2018-03-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505903)资助。

作者简介:张泽西(1992-),男,北京人,硕士研究生,从事湿地生态学研究。E-mail: zhangzexi2018@126.com

*通讯作者:张明祥,教授。E-mail: zhangmingxiang@bjfu.edu.cn

菜、黄花鸢尾、小香蒲和狐尾藻做为研究对象,比较单一植物和多种植物组合配置的人工浮岛对污水的净化效果,旨在为开阔水体污染的治理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用水葱、千屈菜、黄花鸢尾、小香蒲和狐尾藻为生长旺盛期植物,在北京绿化苗圃基地购买,每种植物各购买300株。植物购回后,于2017年5月22日栽种在室内,进行培养,待植物生长10 d稳定后,开始实验。

2017年5月30日,在北京市昌平区东沙河,采集实验所用的水。

实验所用的浮岛为聚苯乙烯纤维编织的无边框多孔浮岛^[14,17]。该浮岛购置于三和美(北京)生态科技研究院。人工浮岛具有成本低、稳定性强和利于植物生长等特点,在已有研究中被广泛的应用^[6,8,15,16,18]。

1.2 实验设置

实验在北京林业大学八家实验室中开展。为了比较种植单一物种和不同植物组合的人工浮岛对污染物的去除能力,设置了种植不同植物的10种人工浮岛(A~J)和1个无植物浮岛作为对照(K)(表1)。每种人工浮岛设置5个重复。将每种植物或组合种植在直径为0.5 m、厚度为0.2 m的圆形人工浮岛上(图1),并将浮岛置入半径为1 m、高为1.2 m的圆柱形水缸中,向水缸中注入采集的河水,水面高度为0.8 m。

表1 种植在各人工浮岛上的植物组合
Table 1 Plants in various artificial floating islands

人工浮岛	植物组合	重复次数
A	水葱	5
B	千屈菜	5
C	黄花鸢尾	5
D	小香蒲	5
E	水葱+黄花鸢尾	5
F	小香蒲+黄花鸢尾	5
G	水葱+狐尾藻	5
H	小香蒲+狐尾藻	5
I	水葱+黄花鸢尾+狐尾藻	5
J	小香蒲+黄花鸢尾+狐尾藻	5
K	无植物	3

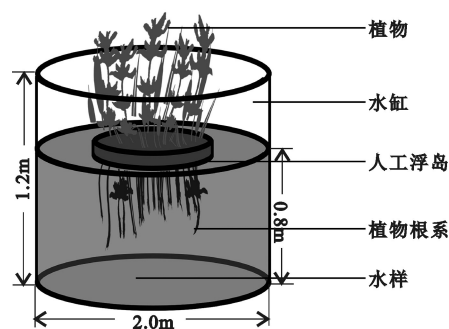


图1 实验装置图

Fig.1 The chart of experimental installation

1.3 样品采集与测定

实验开始前,将所有水生植物修剪成0.3 m高度,在室内培养10 d,测定根系长度和生物量。实验结束后,再次测定其植株高度、根系长度和生物量。

于2017年6月1日~2017年7月20日,开展实验,实验天数为50 d。实验开始前,采集初始水样,并在实验开始后,每10 d采集水缸中的水样。在水位线下0.2 m处,用水样采集器,采集水样,每个水样为20 mL,每组采样4次,每次共取212个水样。

采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法,测定水样中的总氮含量;采用酚二磺酸分光光度法,测定硝态氮含量;采用钼酸铵分光光度法,测定总磷含量;采用钼锑抗分光光度法,测定磷酸盐含量^[24-26]。

1.4 数据处理

采用单因素方差分析方法,利用R软件,分析不同组之间污水处理效果的差异。利用Sigma-Plot 12.5软件,进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 水中初始的氮和磷含量

实验开始前,水中初始的总氮质量浓度为2.87 mg/L,硝态氮质量浓度为1.31 mg/L,总磷质量浓度为1.31 mg/L,磷酸盐质量浓度为0.50 mg/L。

2.2 各种污染物含量和人工浮岛对其的去除率

2.2.1 硝态氮含量及其去除率

在放置了单一种植千屈菜、黄花鸢尾和小香蒲的人工浮岛的水缸中,实验0~50 d期间,水的硝态氮含量都为单峰型变化,硝态氮含量在第20天最大;在放置单一种植水葱的人工浮岛的水缸中,水中硝态氮含量逐渐减小(图2)。在实验前10 d,放置种植复合植物组合的人工浮岛的水缸中,

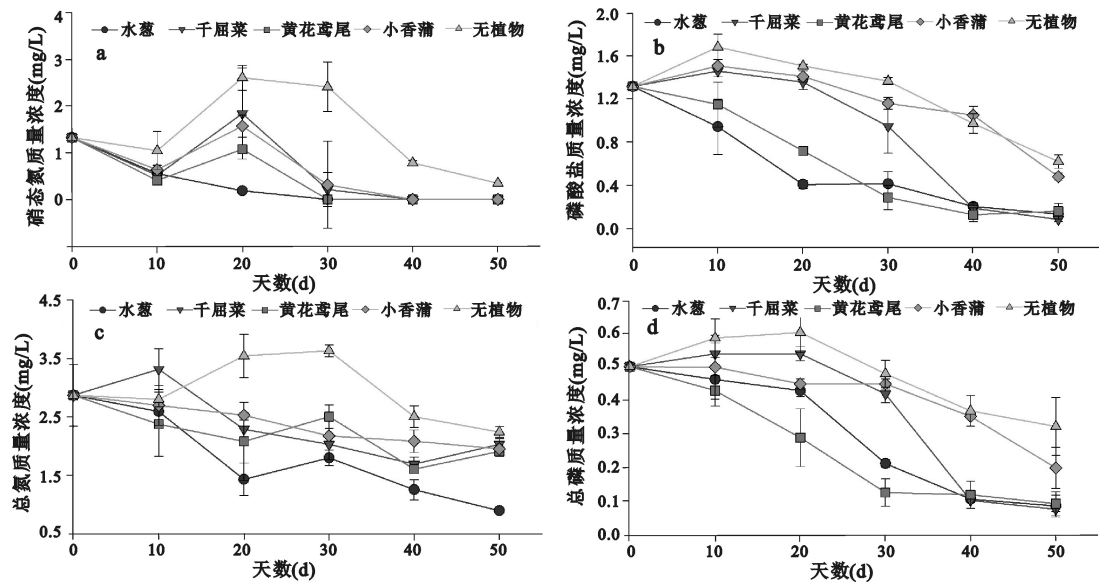


图2 放置了单一植物人工浮岛的水缸中水的硝态氮(a)、磷酸盐(b)、总氮(c)和总磷(d)含量

Fig.2 Contents of nitrate nitrogen (a), phosphate (b), total nitrogen (c) and total phosphorus (d) in water vats with single-species artificial floating islands

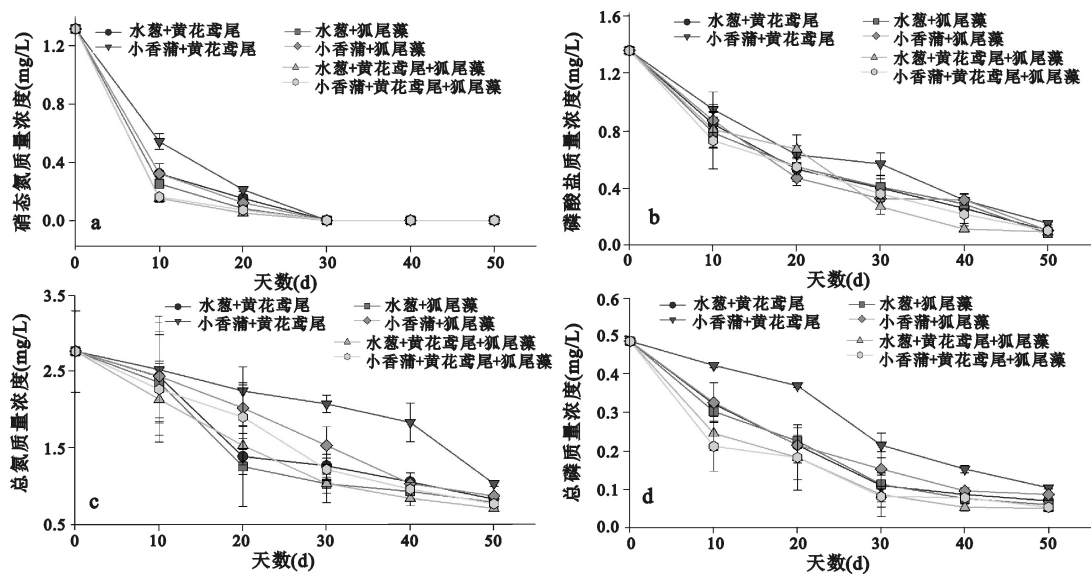


图3 放置了种植多种植物的人工浮岛水缸中水的硝态氮(a)、磷酸盐(b)、总氮(c)和总磷(d)含量

Fig. 3 Contents of nitrate nitrogen (a), phosphate (b), total nitrogen (c), and total phosphorus (d) in water vats with multi-species artificial floating islands

水中硝态氮含量迅速减小,后缓慢减小(图3)。实验40 d后,除了无植物浮岛,在种植单一植物和植物组合的人工浮岛的水缸中,水中硝态氮的含量都接近于0。由表2可以看出,无植物浮岛对水中硝态氮的去除率最小,说明种植植物有利于水中硝态氮的去除。种植各种植物组合的人工浮岛对水中的硝态氮的去除率都接近100%。

2.2.2 磷酸盐含量及其去除率

各人工浮岛对水中的磷酸盐都有一定的去除效果。在放置单一种植水葱、千屈菜、黄花鸢尾和小香蒲的人工浮岛的缸中,水中磷酸盐含量总体上都逐渐减小,只有在实验20~30 d期间,在放置单一种植水葱人工浮岛的缸中,水中磷酸盐含量增大(见图2)。在放置种植多种植物的人工浮

表2 种植不同植物的人工浮岛对水中硝态氮、总氮、总磷和磷酸盐的去除率

Table 2 The removal rates of nitrate nitrogen, total nitrogen, phosphate and total phosphorus by artificial floating islands with different plants

植物组合	去除率(%)			
	硝态氮	总氮	总磷	磷酸盐
水葱	99.92	68.60	82.70	90.11
千屈菜	99.93	29.17	84.70	93.91
黄花鸢尾	99.93	33.36	81.39	88.07
小香蒲	99.91	31.85	60.10	63.72
水葱+黄花鸢尾	99.97	70.04	85.79	92.59
小香蒲+黄花鸢尾	99.92	62.73	78.76	88.89
水葱+狐尾藻	99.96	71.49	87.92	94.07
小香蒲+狐尾藻	99.95	68.51	82.39	92.52
水葱+黄花鸢尾+狐尾藻	99.93	74.38	89.73	93.33
小香蒲+黄花鸢尾+狐尾藻	99.93	72.22	89.22	92.59
无植物浮岛	73.87	21.84	35.51	53.07

岛的缸中,水中的磷酸盐含量逐渐减小(见图3)。由表2可知,种植水葱+狐尾藻的人工浮岛对水中磷酸盐的去除效果最佳,去除率为94.07%;种植小香蒲的人工浮岛对磷酸盐的去除效果最差,去除率为63.72%。种植多种植物的人工浮岛对水中磷酸盐的去除率都高于种植单一植物的人工浮岛。

2.2.3 总氮含量及其去除率

在实验前10 d,在放置种植单一植物千屈菜的人工浮岛的缸中,水中总氮含量增大,到第10天增大至3.31 mg/L,后逐渐减小;在放置单一种植水葱、黄花鸢尾和小香蒲人工浮岛的缸中,水中总氮含量在实验0~20 d都减小,在20~30 d都有所增大,在第30天达到峰值后,总氮含量逐渐减小

(见图2)。放置种植了多种植物的人工浮岛的缸中水的总氮含量都逐渐减小(见图3)。由表2可知,种植水葱+黄花鸢尾+狐尾藻的人工浮岛对水中总氮的去除效果最佳,去除率为74.38%。种植多种植物的人工浮岛对水中总氮的去除率都高于种植单一植物的人工浮岛。

2.2.4 总磷含量及其去除率

各人工浮岛对水中的总磷都有一定的去除效果。单一种植水葱、千屈菜、黄花鸢尾和小香蒲的人工浮岛,对水中总磷的净化效果较差,缸中水的总磷含量都缓慢减小(见图2)。种植多种植物的人工浮岛对水中总磷的去除效果明显优于种植单一植物的人工浮岛,缸中水的总磷含量迅速减小(见图3)。由表2可知,种植水葱+黄花鸢尾+狐尾藻的人工浮岛对总磷的去除效果最好,去除率为89.73%。

2.3 实验前、后植物生长状况

由表3可知,千屈菜地上生物量增长量最大,小香蒲地下生物量增长量最大,说明千屈菜和小香蒲在被污染水中的适应性较强。小香蒲+狐尾藻组合根系长度增长量最大,为(10.15±1.98) cm;水葱+狐尾藻组合植株高度增长量最大,为(78.25±11.28) cm。水葱和小香蒲在组合种植模式下,根系和植株高度增长量都大于单一种植模式下的增长量。在有黄花鸢尾的组合种植模式下,植株高度增长量和根系长度增长量都小于水葱或小香蒲的单一种植模式,这可能是物种之间存在竞争关系,黄花鸢尾为优势物种,抑制了其它植物的生长。

3 讨论

在本实验中,种植多种植物的人工浮岛对水

表3 不同植物组合中植物的生长状况

Table 3 The growth condition of plants in different plants groups

植物组合	地上生物量增长量(g/m ²)	地下生物量增长量(g/m ²)	根系长度增长量(cm)	植株高度增长量(cm)
水葱	4.40±1.92	0.80±0.34	7.20±1.60	71.40±13.54
千屈菜	61.80±30.23	5.40±2.21	5.60±1.12	57.07±10.65
黄花鸢尾	7.40±3.10	5.20±2.09	1.83±0.87	29.93±11.87
小香蒲	3.60±1.17	7.80±3.16	9.63±1.93	41.27±10.43
水葱+黄花鸢尾	7.37±2.87	2.08±0.95	4.94±1.01	59.25±10.15
小香蒲+黄花鸢尾	6.23±2.26	6.76±3.41	6.18±1.20	38.38±10.22
水葱+狐尾藻	5.40±2.11	1.02±0.47	8.78±1.62	78.25±11.28
小香蒲+狐尾藻	4.25±1.79	7.75±3.23	10.15±1.98	49.46±10.33
水葱+黄花鸢尾+狐尾藻	9.07±4.16	0.71±0.29	4.15±0.79	60.15±10.39
小香蒲+黄花鸢尾+狐尾藻	6.94±3.05	7.06±3.00	3.69±0.50	40.28±11.29

中硝态氮、总氮、总磷和磷酸盐的去除率都高于种植单一植物的人工浮岛。在以往的研究中,研究者采用了相同的物种和相近的生物量的植物进行实验,忽略了对植物组合的研究^[15]。在人工和天然湿地的植物景观构建和植被恢复工程中,种植植物的人工浮岛已经被越来越广泛的应用。本研究中,种植各种水生植物的人工浮岛对水中硝态氮的去除效果最明显,这主要与水生植物优先吸收硝态氮有关。同时,由于硝态氮是氮循环中微生物等作用的直接底物,是最活跃的氮形态。

与无植物浮岛相比,种植了植物的浮岛更利于水中氮的去除,因为植物本身对氮有吸收作用,而且植物的根和茎,以及浮岛的特殊结构能为微生物提供良好的载体,更利于微生物的生长和存活。植物主要通过依靠附着在基质和植物根系上的微生物的降解作用去除水中的氮^[19]。植物吸收的氮元素主要以铵态氮和硝态氮的形态存在,人工修复水体时,应选用生长快、单位面积产量高的水生植物作为净化水体的植物^[20]。

水生植物对水体中磷元素的去除途径包括植物体的直接吸收和根系间的微生物将有机磷转化为无机磷,更利于植物体吸收^[20-22]。水生植物组合种植对水中磷的净化效果总体比种植单一植物效果更佳^[23]。不同水生植物在不同时期对氮、磷等营养物质的吸收特性不同,可以形成物种间的优势互补,最大限度地发挥其吸收能力^[9]。本研究中,种植多种植物的人工浮岛对磷的净化效果总体优于种植单一植物的人工浮岛。

研究发现,在生境资源有限的条件下,不同植物组合种植时,会出现对光照和营养物质的竞争^[3]。本研究中,在有黄花鸢尾的人工浮岛上,其它植物的生长状况较差。这可能是由于黄花鸢尾遮挡了光照,或者是水中营养物质有限,使植物间产生了竞争关系。

4 结 论

种植多种植物的人工浮岛对氮、磷的净化效果总体优于种植单一植物的人工浮岛。其中,各人工浮岛对水中硝态氮的去除率接近100%;种植水葱+狐尾藻的人工浮岛对水中磷酸盐的去除率最高,为94.07%;种植水葱+黄花鸢尾+狐尾藻的人工浮岛对水中总氮和总磷的去除率最高,分别为74.38%和89.73%。水葱和狐尾藻混合种植的

人工浮岛适于处理氮元素含量较高的水体;黄花鸢尾和狐尾藻混合种植的人工浮岛适于处理磷元素含量较高的水体。

通过对水中氮、磷等营养物质的吸收,种植黄花鸢尾的浮岛上的其它植物生长较差,其它浮岛上的植物都可以正常生长。多种植物组合种植模式下植物根系和植株高度增长都大于单一植物种植模式下的增长量。植物生物量增长量越大、植株高度增长量越大,越有利于提高植物对氮、磷的去除效果。

参考文献

- [1]Lacoul P, Freedman B. Relationships between aquatic plants and environmental factors along a steep Himalayan altitudinal gradient [J]. *Aquatic Botany*, 2006, **84**(1): 3-16.
- [2]Johnson S. Effects of water level and phosphorus enrichment on seedling emergence from marsh seed banks collected from northern Belize[J]. *Aquatic Botany*, 2004, **79**(4): 311-323.
- [3]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.
- [4]刘春光, 王春生, 李贺, 等. 几种大型水生植物对富营养水体中氮和磷的去除效果[J]. *农业环境科学学报*, 2006, (S2): 635-638.
- [5]李胜男, 崔丽娟, 宋洪涛, 等. 不同湿地植物土壤氮、磷去除能力比较[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(11): 1870-1874.
- [6]张振明, 刘佳凯, 刘晶岚, 等. 不同挺水植物对水体净化效果及生长特性研究[J]. *灌溉排水学报*, 2013, **32**(1): 139-141.
- [7]刘建伟, 周晓, 吕臣, 等. 三种挺水植物对富营养化景观水体的净化效果[J]. *湿地科学*, 2015, **13**(1): 7-12.
- [8]Liu J, Liu J, Zhang R, *et al.* Impacts of aquatic macrophytes configuration modes on water quality[J]. *Water Science & Technology*, 2014, **69**(2): 253.
- [9]窦艳艳, 陈焱, 李春龙. 不同水生植物组合对富营养化水体净化的模拟研究[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(8): 223-227.
- [10]郭本华, 汤华崇, 宋志文, 等. 人工湿地的净化机理及对氮磷的去除效果[J]. *污染防治技术*, 2003, (Z1): 119-121.
- [11]罗团忠. 人工湿地的除污机理及进一步提高氮磷去除率的方法[J]. *广东水利电力职业技术学院学报*, 2003, **1**(2): 21-23.
- [12]王岩, 王建国, 李伟, 等. 生态沟渠对农田排水中氮磷的去除机理初探[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, **26**(6): 586-590.
- [13]李英杰, 金相灿, 年跃刚, 等. 人工浮岛技术及其应用[J]. *水处理技术*, 2007, **33**(10): 49-51.
- [14]方媛媛. 人工浮岛修复富营养化水体的试验研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2016.
- [15]Yao K. Vegetation characteristics and water purification by artificial floating island[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, **10**(82): 19119-19125.

- [16]Liu J L, Liu J K, Anderson J T, *et al.* Potential of aquatic macrophytes and artificial floating island for removing contaminants [J]. *Giornale Botanico Italiano*, 2012, **150**(4): 702-709.
- [17]Nakamura K, Mueller G. Review of the Performance of the Artificial Floating Island as a Restoration Tool for Aquatic Environments[C]//World Environmental and Water Resources Congress, 2008: 1-10.
- [18]Liu M M, Liu J L, Zhang Z M, *et al.* Wastewater treatability potential of floating and submerged macrophytes[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2013, **11**(2): 1426-1431.
- [19]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.
- [20]付融冰, 杨海真, 顾国维, 等. 人工湿地基质微生物状况与净化效果相关分析[J]. *环境科学研究*, 2007, **18**(2): 44-49.
- [21]田立民, 王晓英. 芦苇和香蒲对富营养化水体的净化效果[J]. *江苏农业科学*, 2010, (4): 409-411.
- [22]梁威, 吴振斌, 詹发萃, 等. 人工湿地植物根区微生物与净化效果的季节变化[J]. *湖泊科学*, 2004, **16**(4): 312-317.
- [23]杨旻, 吴小刚, 张维昊, 等. 富营养化水体生态修复中水生植物的应用研究[J]. *环境科学与技术*, 2007, **30**(7): 98-102.
- [24]高蕊, 章光新, 李绪谦, 等. 扎龙湿地芦苇沼泽对农田排水中氮、磷净化效果的模拟研究[J]. *湿地科学*, 2011, **9**(4): 334-339.
- [25]张燕, 刘雪兰, 王月明, 等. 人工湿地系统不同流段中氮的去除效果研究[J]. *湿地科学*, 2017, **15**(1): 32-39.
- [26]李廷超, 王咏, 张刚, 等. 饮马河流域典型湿地植物净化河流水环境效果研究[J]. *湿地科学与管理*, 2016, **12**(2): 41-45.

Comparison of Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by Artificial Floating Islands with Different Plants

ZHANG Zexi, LIU Jiakai, ZHANG Zhenming, ZHANG Mingxiang

(College of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, P.R.China)

Abstract: Five kinds of plants including *Scirpus validus*, *Lythrum salicaria*, *Iris wilsonii*, *Typha minima* and *Myriophyllum verticillatum* were selected in the study. Ten kinds of arrangement of plants would be planted on the artificial floating islands to investigate the viability of different combinations of plants and the removal efficiencies on nitrate nitrogen, total nitrogen, phosphate and total phosphorus, which leads to screen the best configuration to construct the floating islands system from June 1 to July 30 of 2017. The results showed that removal efficiencies of multi-species planting mode could be better on nitrogen and phosphorus pollutants than the single-species planting mode. All artificial floating islands had the good purification effect on nitrate nitrogen, the removal rate was close to 100%. Additionally, the group of *Scirpus validus* and *Myriophyllum verticillatum* had the best purification effect on phosphate (the removal rate was 94.07%). The group of *Scirpus validus*, *Iris wilsonii* and *Myriophyllum verticillatum* had the best purification effect on total nitrogen and total phosphorus (the removal rates were 74.38% and 89.73%). The plants on the artificial floating islands could grow up normally except the groups with *Iris wilsonii*. The growth of root length of the group of *Typha minima* and *Myriophyllum verticillatum* was the highest, the growth was (10.15 ± 1.98) cm. The growth of height of the group of *Scirpus validus* and *Myriophyllum verticillatum* was the highest, the growth was (78.25 ± 11.28) cm. The growth of root length and height in the multi-species planting groups with *Scirpus validus* and *Typha minima*, were higher than that in the single-species planting groups. In the practical application, the system of *Scirpus validus*, *Iris wilsonii* and *Myriophyllum verticillatum* could be selected to purified the nitrogen and phosphorus pollutants in waters.

Keywords: artificial floating islands; plant combination; nitrogen and phosphorus pollutants; removal efficiency