

3 种水生植物对富营养化水体净化研究

李妮娅¹, 梁玉婷², 赵乐康²

(1. 武汉中科瑞华生态科技股份有限公司, 湖北武汉 430000; 2. 武汉市园林科学研究所, 湖北武汉 430081)

摘要 [目的] 筛选吸收水体氮磷元素能力强的水生植物。[方法] 通过测定 3 种水生植物(石龙尾、三白草、翠芦莉)的生长指标(根长、根直茎、茎直径、叶绿素)及水体指标(浊度、溶解氧、TN、NO₃-N、TP、PO₄-P)。[结果] 3 种水生植物的相对生长速率和累积鲜重量显著高于试验前; 3 种水生植物对 TN、NO₃-N、TP、PO₄-P 去除效果明显, 但不同植物在没有底质的情况下, 从水体中吸收氮磷营养盐具有差异。[结论] 该研究为水生植物净化水质提供理论依据。

关键词 石龙尾; 三白草; 翠芦莉; 富营养化水体; 净化

中图分类号 X52 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)03-0073-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.03.021



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on Purification of Eutrophic Water by Three Aquatic Plants

LI Ni-ya¹, LIANG Yu-ting², ZHAO Le-kang² (1. Wuhan SINOECO Ecological Science & Technology Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430000; 2. Wuhan Institute of Landscape Architecture, Wuhan, Hubei 430081)

Abstract [Objective] The research aimed to select hydrophyte with strong ability to absorb nitrogen and phosphorus elements in water. [Method] By measuring three types of aquatic plants (*Limnophila sessiliflora* (Vahl) Blume, *Saururus chinensis* (Lour.) Baill. and *Ruellia brittoniana* Leonard) growth indexes (root length, root straight stem, stem diameter and chlorophyll) and water indexes (turbidity, dissolved oxygen (DO), TN, NO₃-N, TP, PO₄-P). [Result] The relative growth rate and accumulated fresh weight of the three aquatic plants were significantly higher than original value. The removal of TN, NO₃-N, TP and PO₄-P by the three aquatic plants was very obvious. However, different plants have differences in the absorption of nitrogen and phosphorus nutrients from water bodies without sediment. [Conclusion] The study provides the theoretical basis for the water quality purification by aquatic plants.

Key words *Limnophila sessiliflora* (Vahl) Blume; *Saururus chinensis* (Lour.) Bail; *Ruellia brittoniana* Leonard; Eutrophic water; Purification

水体富营养化是目前环境中最具挑战性的环境问题^[1-2], 据统计我国约有 66% 以上的湖泊(包括水库)受富营养化影响^[3]。富营养化是指水体中富含 N 营养盐和 P 营养盐, 而含 N、P 营养盐组合可能改变了水生态系统的营养结构、生物群落成分以及生物化学循环^[4-6], 由此引发的藻类和水生植物增加, 鱼类种类减少, 水质持续性恶化的过程。水生植物作为基本的生物因素, 可作为调节水体内部关系的纽带, 从水体中摄取氮磷元素维持自身的生长、繁殖。有研究指出, 生物因子(植物、微生物)通过吸收、代谢等生理过程富集 N、P, 最终大部分沉积至土壤中, 达到固定营养元素的效果^[7]。为了筛选吸收水体氮磷元素能力强的水生植物, 笔者采用石龙尾、三白草、翠芦莉作为试验材料, 对植物生长指标(根长、根直茎、茎直径、叶绿素)和水体指标(浊度、溶解氧、TN、NO₃-N、TP、PO₄-P)进行测定, 研究不同水生植物在没有底质的富营养化水体中对水体氮磷的吸收作用及其差异性。

1 材料与与方法

1.1 试验材料及设计 2018 年 7 月 3 日, 从武汉市园林科学研究所水生品种池采集石龙尾 *Limnophila sessiliflora* (Vahl) Blume、三白草 *Saururus chinensis* (Lour.) Baill.、翠芦莉 *Ruellia brittoniana* Leonard 3 种水生植物的茎段, 将其种植在大棚内培养生根后待用。2018 年 8 月 3 日, 分别选取预先栽植的 3 种植物的茎段苗 16 株, 所选取的片段长度均为 10 cm, 每个容器放 3 株植物茎段, 称量植物鲜重, 每组设置 4

个重复。

试验开始时从已经富营养化的池塘中取水, 将水混匀, 分装于各个容器, 测定各个容器中富营养化水的初始总氮(TN)、总磷(TP)、硝态氮以及正磷酸盐含量。试验开始时, 每个容器内加入 11 L 富营养化溶液。整个试验在武汉市园林科学研究所的大棚中开展, 试验时间于 2018 年 8 月 3 日开始, 于 8 月 24 日结束。试验过程中, 每 7 d 补充蒸馏水至取样后高度, 以此补充由于蒸发而丧失的水分。

1.2 采样方法 每次从容器中取样时, 先将植物取出, 再将容器中的水混匀, 之后在水面以下 10 cm 处采集 1 L 水样; 依据地表水环境质量标准测定, TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、NO₃-N 采用紫外分光光度法, TP 和 PO₄-P 采用钼酸铵分光光度法, 用哈希便携式溶解氧仪测定溶解氧(DO)、哈希 1900 便携式浊度计测定浊度。

水体总氮或总磷去除率分别为: $WR = (WC_1 - WC_2) / WC_1 \times 100\%$ ^[8], 式中, WR 为水体的总(全)氮和总(全)磷去除率(%); WC₁ 为试验开始时水体总(全)氮和总(全)磷含量; WC₂ 为试验结束时水体总(全)氮或总(全)磷含量。

1.3 数据统计分析 所有试验数据采用 SPSS 20.0 进行统计分析, Sigmaplot 10.0 作图。

2 结果与分析

2.1 植物生长状况以及生物量变化 3 种水生植物石龙尾、三白草、翠芦莉在试验过程中生长状况良好。由表 1 可见, 石龙尾的鲜重变化率最大, 三白草和翠芦莉在鲜重变化率上差别不大; 根系长度变化率上, 石龙尾<翠芦莉<三白草; 茎直径变化率上, 石龙尾<三白草<翠芦莉; 3 种水生植物在鲜重、

鲜重变化率、根增长量、根系长度变化率、茎直径变化量、茎直径变化率均不显著;3种植物的叶绿素含量随着试验的进

行发生了变化,其中三白草的叶绿素值逐渐升高,石龙尾和翠芦莉的叶绿素值均呈现下降趋势,翠芦莉的值下降的更快。

表1 3种植物生长状况和生物量的变化

Table 1 Changes of growth conditions and biomass of three plants

植物种类 Plant species	鲜重变化量 Fresh weight variation//g	鲜重变化率 Fresh weight change rate//%	根增长量 Root growth amount//cm	根系长度变化率 Root length change rate//%	茎直径变化量 Stem diameter variation//mm	茎直径变化率 Stem diameter change rate//%	叶绿素变化量 (SPAD)
石龙尾 <i>Limnophila sessiliflora</i>	2.53	58	2.03	45.52	0.57	11.98	-6.66
三白草 <i>Saururus chinensis</i>	3.40	21	7.77	110.10	0.83	16.07	3.62
翠芦莉 <i>Ruellia brittoniana</i>	5.90	26	12.80	83.67	1.55	23.82	-13.84

2.2 水体中溶解氧、浊度变化 由图1可见,在试验过程中,栽植3种水生植物的试验组的DO基本保持在10 mg/L左右,对照组DO从原来的50 mg/L在第10天减少至20 mg/L,至试验结束时约为15 mg/L,对对照明显高于试验组。3种植物的DO值在3个时期几乎在同一值,差别不大,没有显著性,DO第1次和最后一次测定没有显著性差异,在第2次测定时有显著性差异($F=5.967, P=0.019<0.05$)。3种水生植物对浊度均有显著性的改变,石龙尾在第10天对浊

度的改变较大,后续则变化不大;三白草和翠芦莉从试验初始阶段直至试验结束浊度反而逐渐上升,对照组的浊度在第10天时下降较大,在最后一次测定时发现浊度略微降低。浊度在第1次测定时没有显著差异,在最后一次测定时与对照组有显著性差异($F=12.718, P=0.002<0.05$),3种植物对于浊度的改善具有显著作用,但是三者间并没有显著的差异,三白草和翠芦莉对浊度的改善相当,翠芦莉略高于三白草,二者均高于石龙尾。

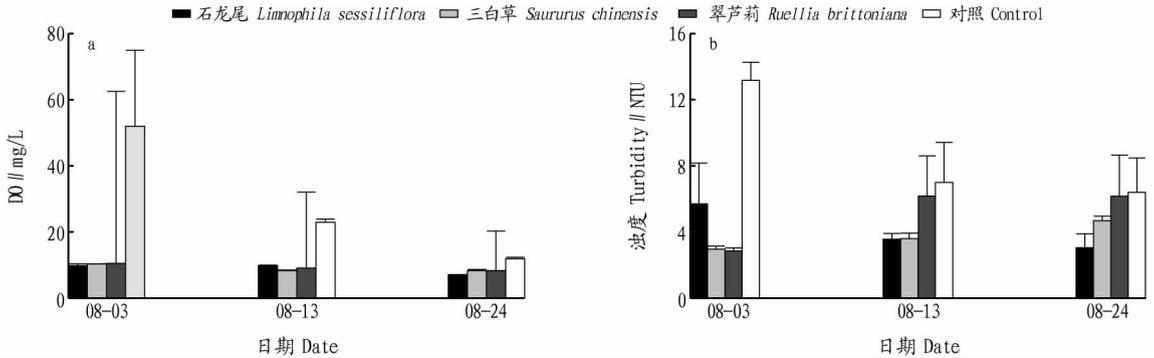


图1 不同水生植物在不同时期的DO(a)和浊度(b)变化

Fig. 1 Changes of DO(a) and turbidity(b) of different aquatic plants at different periods

2.3 水体中TN变化 由图2和表2可见,3种水生植物对TN均有明显的净化作用,TN去除率从大到小依次为石龙尾、三白草、翠芦莉,对照组的TN与试验前相比增多了29%。3种植物在试验阶段对TN去除效果显著高于对照组,其中石龙尾在第2次试验时对TN去除较多,三白草和翠芦莉在10 d时去除效果相当,在随后的时间TN总量略微上升但依然远低于初始TN的含量。对照组TN含量逐渐上升。石龙尾在去除TN上较翠芦莉和三白草强。

2.4 水体中硝态氮的变化 由图3和表2可见,硝态氮去除率对照高于3种植物,3种植物去除硝态氮的能力由强至弱依次为石龙尾、翠芦莉、三白草。在试验到第10天时,3种植物以及对照的硝态氮均呈现下降趋势,其中下降值最大的是三白草,其次是翠芦莉。但是试验结束时,三白草的硝态氮又呈现出上升趋势,石龙尾和翠芦莉以及对照都在继续下降,相比初始时水体中硝态氮的含量明显下降。

2.5 水体中TP变化 3种水生植物TP去除率由大至小依次为三白草、翠芦莉、对照、石龙尾。由图4和表2可见,三者TP去除上具有显著差异。对照组和试验组的石龙尾TP含量在第10天时均上升,但三白草和翠芦莉显著下降,在试验

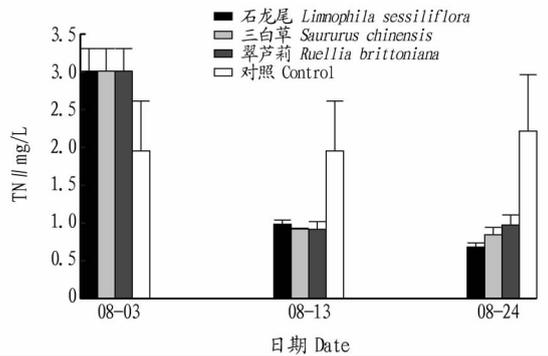


图2 不同水生植物在不同时期的TN变化

Fig. 2 Changes of TN of different aquatic plants at different periods

结束时石龙尾和对照组的TP均显著下降,三白草和翠芦莉均有上升趋势。3种植物中三白草对TP的净化率较高。

2.6 水体中正磷酸盐变化 由图5和表2可知,整个试验阶段,试验组和对照组对正磷酸盐(PO_4-P)的去除率均较高。3种水生植物在正磷酸盐去除上与对照无差别,翠芦莉与石龙尾在吸收正磷酸盐上具有差异($F=36.07, P=0.004$)。随着时间的推移正磷酸盐的含量均呈急速下降趋

势,在第 10 天时三白草对正磷酸盐的去除率高于石龙尾和翠芦莉,在试验结束时,对照组及试验组正磷酸盐的含量均非常低。3 种植物去除正磷酸盐的能力由强至弱依次是石龙尾、翠芦莉、三白草。

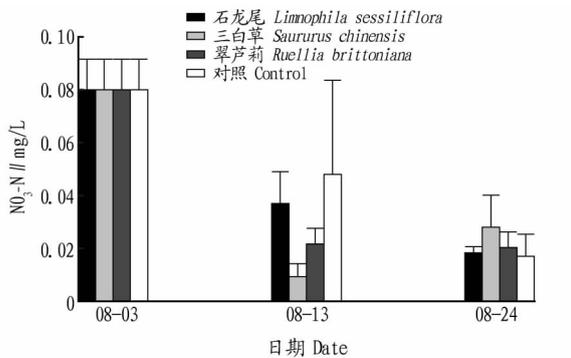


图 3 不同水生植物在不同时期的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 变化

Fig. 3 Changes of $\text{NO}_3\text{-N}$ of different aquatic plants at different periods

3 讨论

该研究中 3 种水生植物对 TN 和 TP 的积累对去除水体中 TN 和 TP 的贡献率分别为 76.7% 和 62.4%、72.0% 和 73.8%、66.3% 和 62.2%; 对照中 TN 较初始试验时增加了 29.0%, TP 较初始试验时减少了 63.1%; 显然水生植物对削减水体富营养化具有积极意义^[9]。不同植物类型的选择,可能会造成人工湿地对主要污染物 TN 和 TP 的净化效果产生很大差异,该试验结果 3 种植物的净化效果和抗性及生长势整体较高,可以考虑扩大其在工程中的应用。这也说明了植

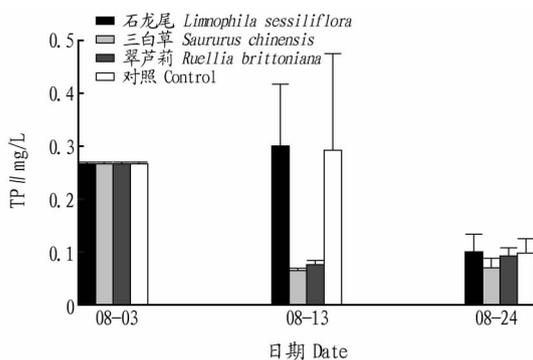


图 4 不同水生植物在不同时期的 TP 变化

Fig. 4 Changes of TP of different aquatic plants at different periods

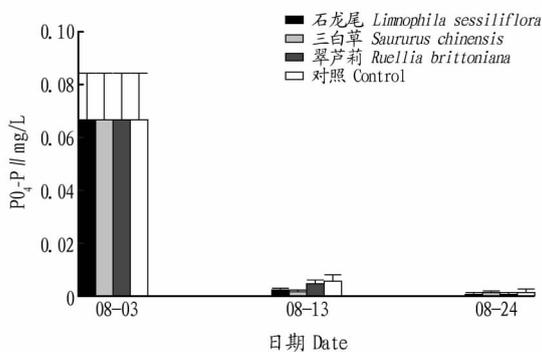


图 5 不同水生植物在不同时期的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 变化

Fig. 5 Changes of $\text{PO}_4\text{-P}$ of different aquatic plants at different periods

表 2 水体中 TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的变化

Table 2 Changes of TN, $\text{NO}_3\text{-N}$, TP and $\text{PO}_4\text{-P}$ in water

植物种类 Plant species	TN 变化率 Change rate of TN	$\text{NO}_3\text{-N}$ 变化率 Change rate of $\text{NO}_3\text{-N}$	TP 变化率 Change rate of TP	$\text{PO}_4\text{-P}$ 变化率 Change rate of $\text{PO}_4\text{-P}$
石龙尾 <i>Linnophila sessiliflora</i>	76.7	76.2	62.4	99.3
三白草 <i>Saururus chinensis</i>	72.0	58.9	73.8	97.7
翠芦莉 <i>Ruellia brittoniana</i>	66.3	73.4	65.2	98.9
对照 Control	-29.0	81.0	63.1	97.8

物吸收有机物和无机物的形式也是有区别的,吸收能力因生活型而有区别。植物吸收氮磷是以 NH_4^+ 和 NO_3^- 形式^[10-13],在此次试验中,3 种植物对 N、P 的吸收是有差别的,石龙尾对总氮的减少贡献最大,三白草对总磷减少的贡献率最大。在没有土壤的情况下,植物对总氮、总磷都具有一定的吸收能力,但是硝态氮和正磷酸盐会在水中微生物的作用下降低,这也说明在后续的水体净化中引入适量的微生物会对水体的氮磷减少起到很大作用。微生物反硝化作用强弱与进水中氮素存在形态有关,如果以氨氮为主,硝化作用的快慢是影响反硝化作用的主要因素;以硝态氮为主,反硝化作用会加强^[14]。该试验阶段在 8 月份,处于夏季中,试验中水体中氮素主要以硝态氮形态存在,夏季反硝化作用有所增强,可能是因为反硝化细菌受外界气温影响较大,随着气温的逐渐升高,反硝化细菌的数量逐渐上升^[15],导致对照中硝态氮含量也处于下降趋势。在试验的各阶段,对照组 DO 值含量

均高于试验组,说明除了有机物生化及污水中其他还原物质会消耗氧气外,水生植物呼吸作用也会消耗溶解氧^[16]。在整个试验阶段,不论是对照组还是试验组 TP 含量均呈下降趋势、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量下降较为明显,对照组 TP 含量先增加后下降, $\text{PO}_4\text{-P}$ 处于持续快速下降趋势,可能是因为正磷酸盐逐渐形成颗粒或沉淀物,吸附在容器底部。

4 结论

3 种水生植物在没有土壤基质的情况下,可以从水体中吸收营养物质完成生长过程。3 种植物对 TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 去除效果明显,相对于对照组 3 种植物对 TN 去除具有显著差异,去除 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 没有显著差异;3 种植物去除 TN 效果由强至弱依次为石龙尾、三白草、翠芦莉,去除 TP 效果由强至弱依次为三白草、翠芦莉、石龙尾;去除 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 效果由强至弱依次为石龙尾、翠芦莉、三白

(下转第 78 页)

2.2 室内试验与现场试验模拟结果对比 现场监测试验的污染物降解系数是根据公式 $3^{[1,2,9]}$ 计算而得:

$$k = 86.4(\ln C_1 - \ln C_2)U/L \quad (3)$$

式中, C_1 、 C_2 分别为河段上下断面的污染物浓度(mg/L); U 为河段平均流速; L 为河段上下断面间距(m)。

河流监测河段降解系数现场模拟与实验室模拟的结果对比如表4所示。COD、氨氮和总磷降解系数的实验室模拟结果都小于现场实测值,且相对偏差均在15%以内,说明室内模拟试验测算得到的降解系数是可靠的。相关研究表明,实验室模拟所得污染物降解系数的值一般小于现场监测的值 $^{[3,5,7,10]}$ 。这主要是由于实验室的环境与天然水环境存在较大差距。天然水环境是一个自然的开放系统,污染物的降解系数除了受水的流速、流量、pH和水温等自身因素影响外,还因光照、酸碱度、藻类、微生物、化学物质等因素的影响而改变,更利于污染物的降解。

表4 五沟营—塔桥乡河流监测河段降解系数现场模拟与实验室模拟结果对比

类型 Type	k_{COD}	k_{NH_3-N}	k_{TP}
现场模拟 Live simulation	0.16	0.10	0.14
试验模拟 Test simulation	0.139 6	0.086 9	0.123 5
相对偏差 Relative deviation/%	12.75	13.10	11.79

3 结论与讨论

(1)该研究通过开展降解系数室内测定试验,通过室内试验,利用一维水质模型测算得到淮河支流驻马店洪河五沟营—

塔桥乡河段降解系数的实验室结果:五沟营—塔桥乡河段的 k_{COD} 为0.139 6 d^{-1} 、 k_{NH_3-N} 为0.086 9 d^{-1} 、 k_{TP} 为0.123 5 d^{-1} 。

(2)与国内类似研究结果相比,淮河支流驻马店洪河河段水体的COD和氨氮降解系数处在平均水平之下,可见此流域水体对COD和氨氮的降解能力相对较弱,表现为环境承载力下降的趋势,因此应严格控制整个流域的COD和氨氮的排放总量。

(3)将现场模拟法测算得到的污染物降解系数与该研究中实验室测算结果进行对比可知,COD、氨氮和总磷降解系数的相对偏差分别为12.75%、13.10%和11.79%,均较为接近;现场模拟值均高于室内测算值,说明自然环境更有利于污染物的降解。

参考文献

- [1] 夏青. 流域水污染物总量控制[M]. 北京:中国环境科学出版社,1996.
- [2] 李云生. 水环境容量计算方法[EB/OL]. (2004-05) [2019-04-05]. <http://www.doc88.com/p-9552797063188.html>.
- [3] 蔡金波, 济济明. 河流中有机物降解系数的室内模拟实验研究[J]. 山东科学, 1997, 10(2): 50-55.
- [4] 祖波, 周领, 李国权, 等. 三峡库区重庆段某排污口下游污染物降解研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(1): 134-141.
- [5] 陈晓燕, 何秉宇, 刘江, 等. 融冻期艾里克湖有机污染物降解系数测算与分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2018, 35(1): 80-85.
- [6] HWANG H M, HODSON R E, LEE R F. Degradation of aniline and chloroanilines by sunlight and microbes in estuarine water[J]. Water research, 1987, 21(3): 309-316.
- [7] 朱晓娟, 沈万斌, 高凯, 等. 吉林省松花江干流氨氮综合衰减系数分段研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(10): 2758-2761, 2773.
- [8] 王蓉, 黄寅寅, 吴玮. 典型城市河道氨、磷自净能力影响因素[J]. 湖泊科学, 2016, 28(1): 105-113.
- [9] 张亚丽, 申剑, 史淑娟, 等. 淮河支流污染物综合降解系数动态测算[J]. 中国环境监测, 2015, 31(2): 64-67.
- [10] WRIGHT R M, MCDONNELL A J. In-stream deoxygenation rate prediction[J]. Journal of the environmental engineering division, 1979, 105(4): 323-333.
- [11] SMITH V H, SCHINDLER D W. Eutrophication science: Where do we go from here? [J]. Trends Ecol Evol, 2009, 24(4): 201-207.
- [12] YANG L K, PENG S, ZHAO X H, et al. Development of a two-dimensional eutrophication model in an urban lake (China) and the application of uncertainty analysis[J]. Ecol Modell, 2017, 345: 63-74.
- [13] 金相灿, 胡小贞. 湖泊流域清水产流机制修复方法及其修复策略[J]. 中国环境科学, 2010, 30(3): 374-379.
- [14] RAST W, THORNTON J A. Trends in eutrophication research and control [J]. Hydrol Process, 1996, 10: 295-313.
- [15] YAN Z B, HAN W X, PEÑUELAS J, et al. Phosphorus accumulates faster than nitrogen globally in freshwater ecosystems under anthropogenic impacts[J]. Ecol Lett, 2016, 19(10): 1237-1246.
- [16] CHAFFIN J D, BRIDGEMAN T B, BADE D L, et al. Summer phytoplankton nutrient limitation in Maumee Bay of Lake Erie during high-flow and low-flow years[J]. J Great Lakes Res, 2014, 40(3): 524-531.
- [17] 刘存歧, 李昂, 李博, 等. 白洋淀湿地芦苇生物量及氮、磷储量动态特征[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6): 1503-1511.
- [18] 董教望, 叶和春, 吴新, 等. 新疆紫草细胞悬浮培养和发酵培养的研究[J]. 植物学报, 1993, 35(1): 57-61.
- [19] 黄秀勇. 东南沿海沙地2种人工林营养元素生物循环[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(2): 84-89, 147.
- [20] HERIKSEN G H, RAMAN D R, WALKER L P, et al. Measurement of net fluxes of ammonium and nitrate at the surface of barley roots using ion-sensitive microelectrodes. II. Patterns of uptake along the root axis and evaluation of the microelectrode flux estimation technique[J]. Plant Physiol, 1992, 99(2): 734-747.
- [21] REIDENBACH G, HORST W J. Nitrate-uptake capacity of different root zones of *Zea mays*(L.) in vitro and in situ[J]. Plant soil, 1997, 196(2): 295-300.
- [22] GESSLER A, SCHNEIDER S, VON SENGBUSCH D, et al. Field and laboratory experiments on net uptake of nitrate and ammonium by the roots of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) trees[J]. New Phytol, 1998, 138(2): 275-285.
- [23] CEDERGREEN, MADSEN T V. Nitrogen uptake by the floating macrophyte *Lemna minor*[J]. New Phytol, 2002, 155: 285-292.
- [24] 赵桂瑜, 杨永兴, 杨长明. 人工湿地污水处理系统脱氮机理研究进展[J]. 四川环境, 2005, 24(5): 64-67.
- [25] 熊飞, 李文朝, 潘继征, 等. 人工湿地脱氮除磷的效果与机理研究进展[J]. 湿地科学, 2005, 3(3): 228-234.
- [26] TANG W Z, ZHANG W Q, ZHAO Y, et al. Nitrogen removal from polluted river water in a novel ditch-wetland-pond system[J]. Ecological engineering, 2013, 60(11): 135-139.

(上接第75页)

草。综上所述,不同水生植物在没有底质的情况下,从水体中吸收氮磷营养盐具有差异。

参考文献