

水生植物对污染水体氮磷的净化效果研究

方焰星¹, 何池全¹, 梁霞¹, 金海², 马志飞², 詹跃武¹, 张亚克¹, 张绚璇¹

(1. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444; 2. 浦东新区绿化管理署, 上海 201210)

摘要: 为了研究水生植物对污染水体的净化效果, 以金边石菖蒲 (*Acorus tatarinowii*)、香菇草 (*Hydrocotyle vulgaris*)、穗状狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*)、金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)、眼子菜 (*Potamogeton distinctus*) 共 5 种水生植物为研究对象, 在人工气候室中, 利用水培法研究了其对污染水体的净化效果。试验结果表明, 水生植物对污染水体具有很好的净化效果, 可以作为净水植物; 其中, 金边石菖蒲和香菇草的去氮效果较好, 金鱼藻、穗状狐尾藻和香菇草对磷的去除效果非常好; 经过 7 周的试验后, 金边石菖蒲、香菇草、穗状狐尾藻、金鱼藻和眼子菜对总氮的去除率分别为 86.22%、91.13%、79.69%、83.17% 和 65.51%; 对总磷的去除率分别为 87.94%、92.09%、92.61%、95.20% 和 85.87%; 水生植物对污染水体磷的去除效果比氮好, 速度也比较快, 可以把这几种水生植物作为人工湿地的首选植物, 本研究能为人工湿地植物选择和降低污染水体营养盐水平提供科学依据。

关键词: 水生植物; 总磷; 总氮; 净化效果

中图分类号: X171 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2010)06-0036-05

随着工业废水和生活污水的大量排放, 加之化肥施用量的逐步增加及肥料流失量加重, 致使水体富营养化日趋严重, 水体污染日益加剧(胡锦好等, 2008)。如何实现对水体富营养化的有效控制和修复, 以保障流域内社会经济的可持续发展和大众的身心健康已成为各方面所关注的焦点(徐晓锋等, 2006)。而过多氮、磷营养盐的输入可引起水体富营养化, 利用水生植物吸收营养物质, 并通过收获植物带走营养物质是一种简单、高效、代价低的修复富营养化水体的方法(方云英等, 2008); 该方法需要的技术支持少、容易维持, 水生植物根系可为微生物生长提供营养适合的生存环境并能吸收大量的悬浮物质, 从而提高水质, 近年来被广泛用于富营养化水体修复(孙刚和盛连喜, 2001; 全为民等, 2003)。试验证明, 水生植物对水体中的氮、磷具有明显的去除效果, 可用于控制湖泊、水库等富营养化水体(唐述虞等, 1994; 吴振斌等, 2001; 童昌华等, 2004)。本文在前人研究的基础上, 结合常见水生植物, 比较一些不常用的水生植物, 研究其对污染水体的净化效果, 旨在深入探究更适合用于污水修复的水生植物, 进

一步拓宽水生植物在人工湿地方面的应用, 提供更多的植物品种选择。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验的植物材料购于上海上房园艺有限公司, 沉水植物有金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)、眼子菜 (*Potamogeton distinctus*)、穗状狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*); 挺水植物有金边石菖蒲 (*Acorus tatarinowii*)、香菇草 (*Hydrocotyle vulgaris*)。试验开始前, 先将采集来的植物放在试验区栽培 10 d, 然后依次称鲜重后移入人工气候室。

1.2 试验设计

沉水植物每 50 g (鲜重) 植物为 1 组, 水槽进水 11 L, 该水槽内尺寸为 34 cm × 28 cm × 16 cm; 挺水植物每 100 g (鲜重) 植物为 1 组, 水槽进水 22 L, 该水槽对应的内尺寸为 46 cm × 35 cm × 16 cm。每组试验设计 3 个重复, 另设 1 组作为空白对照。以上均根据水槽内径尺寸测算, 并划出标准水位线。

在水槽中铺设一层卵石 (粒径 0.5 ~ 1.0 cm), 以使沉水植物扎根, 挺水植物均剪掉茎根, 使其茎部重新生根, 利用泡沫板固定, 根系不作其它处理 (当水位下降时, 酌情下调植物根系位置) (图 1)。

试验用水取自上海大学附近河水。试验开始前, 对进水水质指标进行测定, 作为初始浓度。污水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 TN 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、 TP 分别为 11.51、2.33、14.01、0.38、0.55 mg/L。试验周期为 49 d, 每

收稿日期: 2010-01-29

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 40771203、40871243); 上海市能源作物育种及应用重点实验室资助项目 (08DZ2270800); 上海市重点学科 (第 3 期) 资助 (No. S30109)。

通讯作者: 何池全。E-mail: cqhe@shu.edu.cn

作者简介: 方焰星, 1986 年生, 男, 湖北通山人, 在读硕士, 主要从事水污染控制和人工湿地净化机理研究。E-mail: fangyanxing@yahoo.com.cn

1周取水样1次,不另添加蒸馏水(因人工气候室内湿度达70%,水槽内水分蒸发量可忽略不计)。人工气候室温设置为25℃,湿度为70%,二氧化碳浓度为589 mg/m³。试验结束后,重复上述试验过程,并作记录。

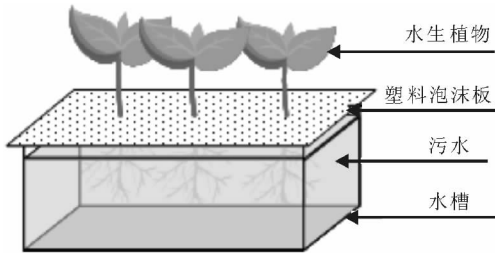


图1 水槽及植物种植示意

Fig.1 Schematic diagram of tank and planting cultivation

1.3 试验方法和数据处理

取好水样后,当天测定。为了避免试验误差,取样时间均在9:00左右进行。紫外分光光度法测定总氮(TN),钼锑抗比色法测定总磷(TP),氨氮(NH₄⁺-N)测定用纳氏试剂分光光度法,硝酸盐氮(NO₃⁻-N)用氨基磺酸紫外分光光度法,正磷酸盐(PO₄³⁻)采用钼锑抗分光光度法(国家环保总局,2002)。

采用Spss13.0统计软件计算各个指标的平均值和标准差,作图均采用Excel 2007软件处理。

2 结果与分析

2.1 生长情况

在人工气候室的试验中,金鱼藻的生长速度最快,增长率达到104%;穗状狐尾藻由于是冬春季生活型植物,植株出现少量的衰败死亡,导致植物的生物量变化最小;其余的试验水生植物的增长率都在35%左右。

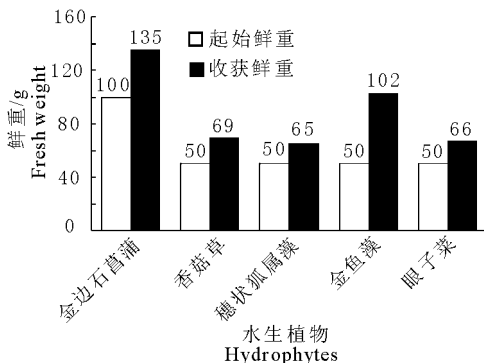


图2 水生植物生物量的变化

Fig.2 Changes of planting hydrophytes biomass

2.2 对氨氮(NH₄⁺-N)的净化效果

水生植物能有效地去除水体中的氨氮,在移入植物后14d,水体中的氨氮浓度急剧下降,之后趋于平缓(图3)。试验水体氨氮最后的浓度为1.37~2.62 mg/L;其中,以金鱼藻、眼子菜、香菇草的去除效果最好;6周之后,达到地表水II类水的氨氮标准(GB3838-2002),之后有些回升;穗状狐尾藻的去除效果相对最差,但在试验结束时,相对于原水去除率也达到77.24%。

水体中的氨氮除了可以通过植物吸收被去除外,还可以通过吸附和挥发,但最有效的途径是硝化和反硝化作用。李科德和胡正嘉(1995)研究认为,氨氮一部分通过植物吸收和挥发作用而去除,但大部分是通过硝化和反硝化作用的连续反应而去除,一旦这两个连续过程不能顺利进行,氨氮的去除效果就不理想。水生植物之所以能够有效地去除水体中的氨氮,一个重要的原因就是人工气候室的温度恒定在25℃,而氮去除的最适宜温度为20~25℃;温度不但影响微生物的活性,而且还影响人工湿地中氧气的扩散速率(Lee et al,2009;Phipps & Crumpton,1994);当温度低于15℃或者高于30℃时,硝化和反硝化细菌的活性下降,大部分去氮微生物所需的温度均要超过15℃(Kuschek et al,2003)。

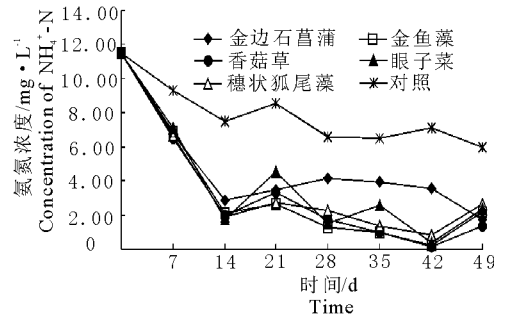


图3 水生植物对污染水体氨氮的去除效果

Fig.3 Removal effect of NH₄⁺-N in polluted water by planting hydrophytes

2.3 对硝酸盐氮(NO₃⁻-N)的净化效果

金鱼藻和眼子菜对硝酸盐氮的去除效果非常好,在试验的第5周,水体中硝酸盐氮的浓度几乎为零(图4)。究其原因,一方面可能是硝态氮可以被沉水植物直接吸收利用,也可以通过反硝化的过程被去除(王晓蓉,2001);另一方面,硝态氮是氮循环中微生物等作用的直接底物,是最活跃氮的形态(童昌华等,2004);而挺水植物金边石菖蒲去除效果不尽人意。对于试验的几种水生植物,从整体上看,硝酸盐氮的去除率高低是沉水植物>挺水植物。

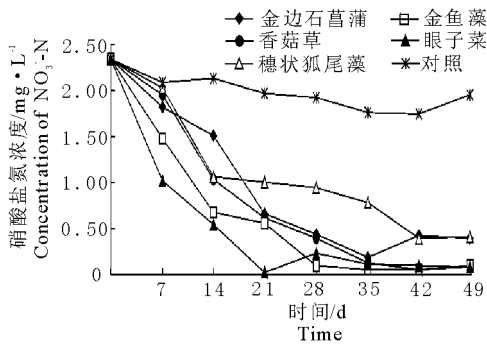


图4 水生植物对污染水体硝酸盐氮的去除效果

Fig. 4 Removal effect of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in polluted water by planting hydrophytes

2.4 对总氮(TN)的净化效果

水生植物对总氮的去除整体趋势与硝酸盐氮类似,且去除效果均很好(图5)。不同的水生植物对水中氮的去除效果有差别,并且随着时间的推移而逐渐显现(童昌华等,2004)。在经过7周处理后,金鱼藻、穗状狐尾藻和金边石菖蒲试验组的总氮浓度均在 1.85 mg/L 左右,相比之下眼子菜对总氮的去除效果最差。

在厌氧或者缺氧的情况下,总氮中有 $60\% \sim 95\%$ 是通过反硝化去除的,而植物和藻类的吸收只有 $1\% \sim 34\%$ (Lee et al, 2009)。JAMES(2000)通过大量的物质平衡计算指出,在氮的去除机制上,细菌的降解作用也可占主导地位。

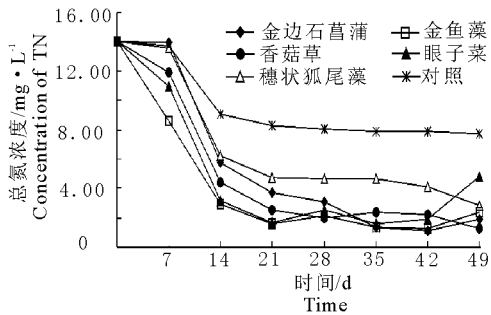


图5 水生植物对水体总氮的去除效果

Fig. 5 Removal effect of TN in polluted water by planting hydrophytes

2.5 对正磷酸盐(PO_4^{3-})的净化效果

各种水生植物对正磷酸盐的去除效果最为显著,去除速率也非常快。到试验结束时,除了香菇草组正磷酸盐的浓度是 0.04 mg/L 之外,其余组均在 0.01 mg/L 左右;其中,以金鱼藻的去除效果最佳,其处理后水体的正磷酸盐浓度几乎为零,且到第3周之后,试验水体的浓度就一直在 0.02 mg/L 左右(图6)。与无机氮一样,正磷酸盐一样也是水生植物生长所必需的营养,且微生物也可以通过正常同

化(将磷纳入其分子组织)和过量积累将磷去除(吴晓磊,1995)。这也说明了空白去除率很高的原因。

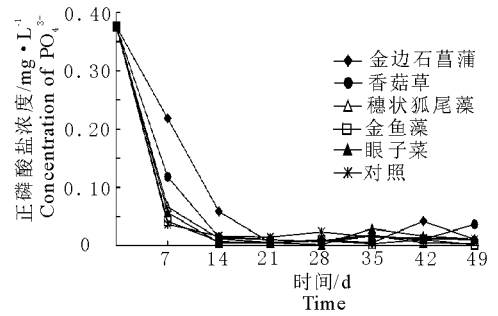


图6 水生植物对水体正磷酸盐的去除效果

Fig. 6 Removal effect of PO_4^{3-} in polluted water by planting hydrophytes

2.6 对TP的净化效果

水生植物对总磷的去除效果比较明显,在试验后第3周,其总磷的浓度均达到 0.04 mg/L 左右(图7)。到试验结束,水生植物水体总磷的浓度为 $0.03 \sim 0.07 \text{ mg/L}$,且试验水生植物对总磷的去除率均达到地表水II类水的总磷标准(GB3838-2002)。相对正磷酸盐而言,总磷去除的作用时间更长,去除效果也没有正磷酸盐好,其原因可能是植物可以直接吸收利用正磷酸盐,而总磷的变化还要取决于其他磷的形态。

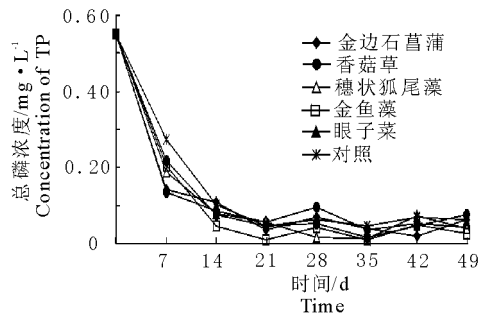


图7 水生植物对水体总磷的去除效果

Fig. 7 Removal effect of TP in polluted water by planting hydrophytes

2.7 不同水生植物对污染水体净化效果比较

根据7周的试验数据,计算试验结束后水生植物的去除率(表1)。结果表明,金边石菖蒲、金鱼藻和香菇草对水体氮磷有很好的去除效果;在氨氮去除方面,其去除率均很高,且相差不大;对硝酸盐氮的去除率都比较好,达到 80% 以上;而在总氮的去除率方面,眼子菜对总氮的去除率明显低于其他植物。试验水生植物对磷也有很好的去除效果。吴振斌等(2003)研究表明,水生植物可以显著降低水体营养水平,一般使总磷等营养物质浓度维持在 0.1 mg/L 。

表1 不同水生植物的去除率比较

%

Tab.1 Comparison of removal effect of different aquatic plants

水生植物	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	TN	PO_4^{3-}	TP
金边石菖蒲	85.19 ± 4.92	82.78 ± 6.18	86.22 ± 2.17	96.93 ± 3.49	87.94 ± 1.30
香菇草	88.07 ± 5.46	96.20 ± 1.62	91.13 ± 1.72	90.05 ± 15.36	92.09 ± 1.56
穗状狐尾藻	77.19 ± 6.17	82.35 ± 9.48	79.69 ± 12.04	99.10 ± 0.63	92.61 ± 3.27
金鱼藻	81.03 ± 2.00	95.77 ± 0.99	83.17 ± 2.34	99.46 ± 0.00	95.20 ± 2.16
眼子菜	79.43 ± 4.33	95.99 ± 2.35	65.51 ± 8.25	97.29 ± 1.88	85.87 ± 4.99

3 讨论

3.1 不同水生植物对氮磷的去除率

在试验开始后的第4周,水生植物生物量大量增加,水质变好;到试验结束时,氨氮、硝酸盐氮、总氮、正磷酸盐和总磷浓度都急剧降低。经过7周的试验后,金边石菖蒲、香菇草、穗状狐尾藻、金鱼藻和眼子菜对总氮的去除率分别为86.22%、91.13%、79.69%、83.17%和65.51%,对总磷的去除率分别为87.94%、92.09%、92.61%、95.20%和85.87%。试验结果表明,所选择的水生植物对污染水体均具有很好的净化效果。

3.2 水生植物对污染水体营养盐的去除途径

水生植物对污染水体营养盐的去除作用可通过多种途径实现。首先,植物体吸收大量的N、P等营养元素供生长繁殖所需(胡莲等,2006)。当水生植物被运出水生态系统时,被吸收的营养物质随之从水体中输出;其次,叶片、根系通过沉积、过滤、凝集作用,使水中悬浮性的有机碎屑和新陈代谢产物沉降下来,转移到底泥中(朱斌等,2002);再次,沉水植物通过根系向底泥输送氧气,调节底泥微环境的氧化还原状态,加强根区硝化菌和反硝化菌等微生物的生长繁殖,促进微生物对有机物的降解,从而进一步促进氮磷的释放和转化(Hans,1997; Wigand et al,1997)。沉水植物金鱼藻和眼子菜相对于别的水生植物在氨氮上有更好的去除效果。这可能是因为沉水植物在生长的过程中,可同时通过根系和茎叶吸收营养,而根系是主要的吸收器官(叶春等,2007)。

3.3 水生植物对氮磷去除效果的差异

试验表明,水生植物对磷的去除效果总体上比氮好,这可能是由于吸附作用对磷酸盐在水体中的归趋有重要影响;磷酸盐很快通过吸附沉降作用转移至底泥中,或者通过植物吸收去除水体的磷(伏彩中等,2006);童昌华等(2004)研究表明,即使在较低含磷量的水体中,水生植物也能较好地去除水中的总磷。而氮的去除方式有很多种不同的方式,

除了水生植物根系和叶子的吸附外,还有沉降、氨化、硝化和反硝化;而微生物对氮的分解是污水除氮的主要去除方式。水体中的氨氮除了可以通过植物吸收被去除外,还可以通过吸附和挥发。但相对于硝化和反硝化作用,这些去除途径都是有限的(Lee, 2009)。

由于受试验条件所限,本研究为在人工气候室培养水生植物净化水质的静态试验,与野外进行的水质净化试验还有一定的差距。因此,更进一步的研究是必要和必需的;另外,水生植物的净化效果可能会随着植物的生长而发生变化,因此本研究只是反映特定生长阶段的净化效果,其长期的净化效果还有待进一步研究。结合微生物技术研究水生植物对水体的净化原理也是我们今后的研究方向。

参考文献:

- 方云英,杨肖娥,常会庆,等. 2008. 利用水生植物原位修复污染水体[J]. 应用生态学报, 19(2):407-412.
- 伏彩中,肖瑜,高士祥. 2006. 模拟水生生态系统中沉水植物对水体营养物质消减的影响[J]. 环境污染与防治, 28(10):753-756.
- 国家环保总局. 2002. 水和废水监测分析方法(第4版)[M]. 北京:中国环境科学出版社:123-207.
- 胡锦涛,奥岩松,朱建坤,等. 2008. pH和曝气对水生植物去除富营养化水体中氮磷等物质的影响[J]. 水土保持学报, 22(4):168-173.
- 胡莲,万成炎,沈建忠,等. 2006. 沉水植物在富营养化水体生态恢复中的作用及前景[J]. 水利渔业, 26(5):69-71.
- 李科德,胡正嘉. 1995. 芦苇床系统净化污水的机理[J]. 中国环境科学, 15(2):140-144.
- 全为民,沈新强,严力蛟. 2003. 富营养化水体生物净化效应的研究进展[J]. 应用生态学报, 14(11):2057-2061.
- 孙刚,盛连喜. 2001. 湖泊富营养化治理的生态工程[J]. 应用生态学报, 12(4):590-592.
- 唐述虞,史建文,陈建国,等. 1994. 凤眼莲生态工程在炼油废水深度处理中的应用研究[J]. 环境科学学报, 14(1):98-104.
- 童昌华,杨肖娥,濮培民. 2004. 富营养化水体的水生植物净化试验研究[J]. 应用生态学报, 15(8):1448-1450.

- 王晓蓉. 2001. 环境化学[M]. 南京:南京大学出版社:147.
- 吴晓磊. 1995. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 16(3):83-86.
- 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 2001. 水生植物对富营养水体水质净化作用研究[J]. 武汉植物学研究, 19(4):299-303.
- 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 2003. 沉水植物重建对富营养化水体氮磷营养水平的影响[J]. 应用生态学报, 14(8):1351-1353.
- 徐晓锋, 史龙新, 许海, 等. 2006. 水培经济植物对污水中磷的吸收利用及去除效果[J]. 生态学杂志, 25(4):383-388.
- 叶春, 邹国燕, 付子轼, 等. 2007. 总氮浓度对3种沉水植物生长的影响[J]. 环境科学学报, 27(5):739-746.
- 朱斌, 陈飞星, 陈增奇. 2002. 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, 21(9):564-567.
- Hans B. 1997. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands[J]. Wat Sci Tech, 35(5):13-14.
- JAMES F R. 2000. Nitrate removal from a drinking water supply with large free - surface constructed wetlands prior to groundwater recharge[J]. Ecological Engineering, 14:33-47.
- Lee Chang-gyun, Fletcher T D, Sun Guang-zhi. 2009. Nitrogen removal in constructed wetland systems[J]. Engineering Life Science, 9(1):11-22.
- P Kuschik, A Wiessner, U Kappelmeyer, et al. 2003. Annual cycle of nitrogen removal by a pilot - scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate[J]. Water Res, 37:4236-4242.
- R G Phipps, W G Crumpton. 1994. Factors affecting nitrogen loss in experimental wetlands with different hydrologic loads[J]. Ecol Eng, (3)399-408.
- Wigand C, Stevenson J C, Cornwell J C. 1997. Effects of different submersed macrophytes on sediment biogeochemistry[J]. Aquatic Botany, 56:233-244.

(责任编辑 万月华)

The Purifying Effect of Polluted Water by the Aquatic Plants

FANG Yan-xing¹, HE Chi-quan¹, LIANG Xia¹, JIN Hai², MA Zhi-fei²,
ZHAN Yue-wu¹, ZHANG Ya-ke¹, ZHANG Xuan-xuan¹

(1. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
2. Pudong New District Landscaping Administration, Shanghai 201210, China)

Abstract: In order to study aquatic plants on the effects of polluted water purification, five kinds of aquatic plants as an object for study, including *Acorus tatarinowii*, *Hydrocotyle vulgaris*, *Myrtophllum spicatum*, *Ceratophyllum demersum* and *Potamogeton distinctus* were used by water culture method in the artificial climate chamber to study its purification effect. The experimental results show that: the experimental aquatic plants have a good cleaning effect on the polluted water, it can be used as water purification plants, which *Acorus tatarinowii* and *Hydrocotyle vulgaris* had a better effect on removing nitrogen, *Ceratophyllum demersum*, *Myrtophllum spicatum* and *Hydrocotyle vulgaris* had a good removal on phosphorus; after seven weeks growing the five the aquatic plants *Acorus tatarinowii*, *Hydrocotyle vulgaris*, *Myrtophllum spicatum*, *Ceratophyllum demersum* and *Potamogeton distinctus* for total nitrogen (TN) removal were 86.22%, 91.13%, 79.69%, 83.17% and 65.51% respectively, for total phosphorus (TP) removal were 87.94%, 92.09%, 92.61%, 95.20% and 85.87% apart; the removal of phosphorus in the polluted water was better than nitrogen, so the speed. Therefore, it can put these aquatic plants as the preferred plant on the constructed wetland, which supported scientific basis for selection the constructed wetland plants and decrease the level of nutrition in the sewage water.

Key words: Aquatic plant; Total phosphorus; Total nitrogen; Purifying effect