

漂浮栽培水生植物对入滇河流污水中磷的去除效果研究

杨 雁¹, 李永梅¹, 王自林¹, 张怀志², 张维理²

(1.云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要:利用水生植物净化富营养化水体是污染水体生物治理的途径之一,为了找出适宜在水体中生长并对磷的去除效果较好的植物,选择 5 个品种的水稻以及空心菜、茭白和水花生为供试水生植物,通过静态水培试验,研究了各植物在富营养化水体中的生长状况,以及对水体中磷的去除效果。结果表明,在不添加任何植物营养的条件下,植物在富营养化水体中均能正常生长;有植物处理系统对水体中总磷(TP)、水溶性总磷(DTP)的去除效果显著高于无植物对照;有植物处理系统 TP 的去除率为 53.28%~84.07%, DTP 的去除率为 44.99%~88.81%;无植物对照 TP 的去除率为 32.57%, DTP 的去除率为 37.51%。植物组织所累积的磷占各自系统去除量的 21.54%~75.32%,植物的吸收作用是磷去除的主要途径。水稻功米 1 号的经济产量最高,为 616.28 g·m⁻²,组织所累积的磷占系统去除量也是最大,为 75.32%。在所有供试植物中,水稻功米 1 号对富营养化水体既有较好的净化效果,又能获得一定的经济产量,是最优的净化植物,同时也是最适宜在水体中生长的水稻品种。

关键词:水生植物;富营养化;吸收量;磷素去除

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)09-1763-07

A Research on Phosphorus Removal in Float System with Different Aquatic Plants from Eutrophic Water of Into-Lake River for Dianchi Lake

YANG Yan¹, LI Yong-mei¹, WANG Zi-lin¹, ZHANG Huai-zhi², ZHANG Wei-li²

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China)

Abstract: Using aquatic plants to purify eutrophic water bodies is a biological improvement method which is attracting increasing attention. In this study, five varieties of *Oryzae*, *Ipomoea aquatic*, *Zizania aquatic* and *Alternanthera philoxeroides* were cultivated in eutrophic water with a solution culture in an attempt to find suitable plant varieties for water purification. The phosphorus content of plant tissue and the biological traits of plants were analysed to study the effect of phosphorus removal. The results showed that all plants grew well in eutrophic water without the addition of further nutrients. The aquatic plants removed both total phosphorus (TP) and total dissolved phosphorus (DTP). The treatments with aquatic plants removed 53.28%~84.07% of TP and 44.99%~88.81% of DTP. Treatments without aquatic plants had TP and DTP removal of 32.57% and 37.51%, respectively. Thus, bioaccumulation of phosphorus by the plants accounted for 21.54%~75.32% of total phosphorus removal, suggested that biological uptake was the main removal mechanism of phosphorus. The highest economic yield (616.28 g·m⁻²) was obtained with rice variety Function No.1, whose uptake accounted for 75.32% of TP removal of the system. The behaviour of Function 1 indicated a potentially positive multifunctional use (i.e. both purification of eutrophic water and high economic yield).

Keywords: aquatic plant; eutrophication; nutrient uptake; phosphorus removal

收稿日期:2010-03-23

基金项目:云南省省院省校合作项目(2006 YX35);昆明市科技局昆科计字(08S010201)

作者简介:杨 雁(1985—),女,云南曲靖人,硕士研究生,主要从事农业面源污染方面的研究。E-mail:yyan.qujing@163.com

通讯作者:李永梅 E-mail:youngmaylee@126.com

目前,我国主要湖泊 90%以上已处于中营养和富营养状态^[1]。云南省 9 大高原湖泊中有 6 大湖泊明显存在富营养化问题,其中滇池的污染最为严重。目前滇池水质基本保持稳定,外海水质呈好转趋势,草海保持劣 V 类不变,污染呈加重趋势。

众多研究表明,为了解决水体富营养化问题,必需至少在流域范围内,逐级控制营养盐向下游传递,并逐级将其尽可能地转化为生物资源带出水体。利用河道或河口区水面建设生态工程,过滤净化入湖河水,是控制湖泊污染的重要途径之一^[2]。其中,水生植物系统起着重要的作用,其本身不仅可以吸收同化水体中大量的污染物,而且它发达的根系还为微生物提供了优良的生存环境,改变了基质的通透性,增加了对污染物的吸收和沉淀^[3-5]。

水生植物净化对富营养化水体的研究主要集中在芦苇(*Phragmites*)、菖蒲(*Acorus*)、石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)和美人蕉(*Canna indica*)等数种植物,对其他植物的研究不多^[6-13],而且多数研究主要集中于湖泊水体,对河道污水的研究还不多^[14-16]。滇池水体治理一般是种植水芹、菖蒲、蘆草等一些水生植物,这些水草的种植除生态效益外完全无经济收益。水葫芦、水白菜等一些水草还会疯长,又形成新的污染。宋祥甫^[17]自 1989 年起就着手研究一种开发利用水域表面的新型水稻种植技术,并于 1990 年在小型池塘中取得了水上种稻的成功。1991 年分别在浙江省境内的大型水库、小型水库、内荡、外荡、山塘和鱼塘等水域表面试种水稻,取得了较高的产量^[18]。水上种稻不怕旱、不怕涝,稻苗植株坚挺,病虫害危害较轻,结实率和千粒重普遍较高,且不易受不利气候因素的影响^[18]。基于我国人口不断增加,耕地面积日趋减少,可供开发利用的后备耕地资源又相对不足,而滇池湖滨自古就是鱼米之乡,水稻种植历史悠久,滇池水特别是滇池入湖河道水体具有高氮高磷的特点,应用这些水体作为水稻生长的营养来源,利用水稻吸收水体中过多的氮、磷,形成滇池富营养化污水-稻田-余水-补还滇池,这样的-一个生物工程治理互补的资源化水循环模式是加快推进滇池治理的有效途径。目前,滇池流域还没有利用水稻治理富营养化水体的研究,同时,国内外有关水稻对富营养化水体的研究主要涉及污水的净化效果,针对不同品种水稻的磷素累积特性及其对污水磷的吸收能力和去除作用的研究较少。

因此,本研究筛选滇池流域天然湿地中尚存的且

对水体污染物具有较强净化能力的水生植物,引入 5 种适合昆明栽种的水稻品种(功米 1 号、功米 2 号、功米 6 号、红谷、滇杂 35),通过水培试验,比较不同品种的水稻与其他水生植物对富营养化水体中磷的净化能力及其生长特性,以期为滇池入湖河道富营养化水体的治理提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验时间与地点

试验于 2009 年 4 月 17 日至 2009 年 10 月 9 日在云南农业大学玻璃温室内进行,试验时间共 174 d。

1.2 试验设计

试验设 8 种植物和对照共 9 个处理。对照不种植任何植物。每个处理 3 次重复。植株采用泡沫板浮床栽培,以 13 L 的塑料水桶为容器,每桶装水 10 L。每桶水面用有定植孔的塑料泡沫板作栽培定植板,在定植孔中用海绵固定水花生和茭白。按每种植物的常规栽种密度,每桶栽种 3 株茭白或 5 株水花生,在每个定植孔中放入 1 g 基质(蛭石)用以栽培水稻或空心菜,每孔撒入 1 颗种子,每桶共 10 颗作为一个处理。

试验期间未施用任何化肥和农药,植物营养完全来源于富营养化水体,通过加蒸馏水补充蒸发、蒸腾和采样所耗的水分,以保持桶中水位。每 3 d 补充 1 次蒸馏水,每次每个处理均补充 1 L。

1.3 供试植物

供试植物为:水稻功米 1 号、功米 2 号、功米 6 号、红谷、滇杂 35、空心菜、茭白、水花生。具体生长特性见表 1。试验开始时除水花生和茭白为幼苗外,5 个品种的水稻及空心菜均为种子育苗。试验前用自来水对所有植物进行 7 d 的预培养和育苗。

1.4 试验用水

试验用水为大清河水。大清河是滇池众多入湖河道中的一条典型河道,由于生活污水和城市、农村面源的影响,大清河水质污染严重,长期处于黑臭状态。由往年监测数据可知,其水质长期劣于地表水环境质量标准(GB 3838—2002) V 类。试验期间水体中的 TP、DTP、TN、NH₄-N、pH 状况见表 2。

1.5 样品采集与分析

1.5.1 水样的采集与分析

试验期间共换水 12 次,前 4 次的换水周期分别为 24、24、18、18 d,后 8 次均为 12 d。为了研究营养成分在换水周期内的动态变化,分别在换水后第 3、6、12、18、24 d(24 d 换水周期),第 3、6、12、18 d(18 d 换

表 1 供试植物的生长特性
Table 1 Growth characteristics in the tested plants

供试品种	生长特性
功米 1 号	红米,对 N、P 的需求比较少,植株秆高
功米 2 号	黑米,对 N、P 的需求少,植株秆高,抗病性好
功米 6 号	白米,对 N、P 的需求较多,植株秆矮,抗病性好
红谷	具有抗逆性强、适应性广、米质优等特点,是红河州元阳地区的土著品种
滇杂 35	稳产高产、抗稻瘟病性强、耐瘠薄,适应性广
空心菜	学名蕹菜,须根系,喜温暖湿润,耐光耐肥,再生力强,耐涝抗高温,适应性广
茭白	多年生挺水型水生草本植物,具有根状茎,生长于浅水中,喜高温多湿
水花生	学名空心莲子草,多年生宿根草本,水生型植株无根毛,繁殖力强

表 2 供试水样的 TP、DTP、TN、NH₄-N 含量(mg·L⁻¹)及 pH
Table 2 Concentration of TP, DTP, TN, NH₄-N and pH in the tested water(mg·L⁻¹)

时间	4-24	5-18	6-5	6-23	7-5	7-17	7-29	8-10	8-22	9-3	9-15	9-27
TP	3.82	3.55	3.05	1.16	1.60	3.15	3.31	2.83	1.26	1.91	1.04	2.03
DTP	3.08	2.08	1.93	0.72	0.85	2.37	1.72	1.95	0.82	0.99	0.49	1.03
TN	33.51	33.97	33.62	12.62	18.06	17.36	13.45	21.22	23.12	22.10	10.03	21.87
NH ₄ -N	33.50	33.97	36.37	14.22	17.74	30.44	29.62	27.85	18.29	15.38	10.96	19.11
pH	7.21	8.01	7.18	6.38	6.85	7.5	7.25	7.16	6.92	6.23	7.22	7.14

水周期)或第 3、6、12 d(12 d 换水周期)进行采样。采样前,用蒸馏水将每只桶中的水量补足 10 L 后再进行采集以使得采样前后桶中水的体积均为 10 L;每次采样前用一根棍子将桶中的水搅匀,防止底泥的沉积以及使得所采水样均匀。每个换水周期结束时均将上一个换水周期桶中的水全部倒出,将桶洗干净,用蒸馏水润洗后换上重新取来的水,再将植物放入桶中继续栽培。

样品分析均采用水和废水监测分析标准方法^[19]。水样经 0.45 μm 滤膜过滤后,用过硫酸钾氧化,钼锑抗分光光度法测定 DTP;水样不过滤,直接加过硫酸钾氧化后,钼锑抗分光光度法测定 TP。

1.5.2 植株样品的采集与分析

供试植物均于 4 月 17 日播种和移栽。其中空心菜于 6 月 5 日收获;滇杂 35 于 9 月 3 日收获;功米 1 号和功米 6 号于 9 月 27 日收获,其余植物均于 10 月 9 日收获。

收获时将植株根、茎叶、籽粒分开,分别测定其生物量及 P 含量,P 含量采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,钒钼黄比色法^[20]。不同品种的水稻则分别测定其主要生物学产量及经济产量。

1.6 数据处理与分析

1.6.1 数据分析

(1)进水中磷的总量(mg)=进水体积(L)×进水磷

浓度(mg·L⁻¹)(式中进水体积为 10 L)

(2)出水中磷的总量(mg)=出水体积(L)×出水磷浓度(mg·L⁻¹)(式中出水体积为 10 L)

(3)植物系统去除率(%)=(进水中磷的总量-植物系统出水中磷的总量-空白对照出水中磷的总量)÷进水中磷的总量×100

(4)空白对照去除率(%)=(进水中磷的总量-空白对照出水中磷的总量)÷进水中磷的总量×100

(5)植物对磷的累积量(mg)=植物茎叶及根系磷含量×植物茎叶及根系生物量

(6)系统中总的磷去除量(mg)=(进水中磷的总量-出水中磷的总量)-(空白进水中磷的总量-空白出水中磷的总量)

(7)植物累积吸磷量占系统总磷去除量的比例(%)=植物对磷的累积量÷系统中总的磷去除量×100

注:由于是经常性换水操作,本试验测量了 1 次换水经过 1 个换水周期处理后的出水水质,计算每次的去除率,再把所有次数的去除率作平均统计。(2)式为在每次换水周期中采样测量,再计算每次换水周期去除率的平均值;(5)式中由于移栽前植株较小,使得由此产生的差异可忽略不计,可用植物体增重的磷含量来表示植物对磷的累积量。

1.6.2 数据处理

采用 Excel 2007 制图,用 DPS 软件进行 Duncan's

多重比较检验。

2 结果与分析

2.1 水生植物系统对富营养化水体中 TP、DTP 的去除率

本试验所测试的不同水生植物系统对水体中 TP、DTP 的去除率存在差异(图 1)。植物对 TP 的去除率均存在显著差异,5 个水稻品种中红谷的去除率最高,功米 1 号次之,功米 6 号最低,从高到低依次为红谷>功米 1 号>功米 2 号>滇杂 35>功米 6 号;茭白和空心菜相比较,茭白的去除率高,为 80.04%,而空心菜的仅为 59.34%;水花生的去除率高于 5 个品种的水稻以及茭白和空心菜。在整个试验中,水花生的去除率最高,功米 6 号最低,从高到低依次为水花生>茭白>红谷>功米 1 号>功米 2 号>空心菜>滇杂 35>功米 6 号。植物对 DTP 的去除率除功米 2 号和空心菜之间无差异外,其他植物的去除率均有显著差异。依旧是水花生的去除率最高,茭白次之,功米 6 号最低。有植物处理系统对水体中总磷(TP)、水溶性总磷(DTP)的去除效果显著高于无植物对照;有植物

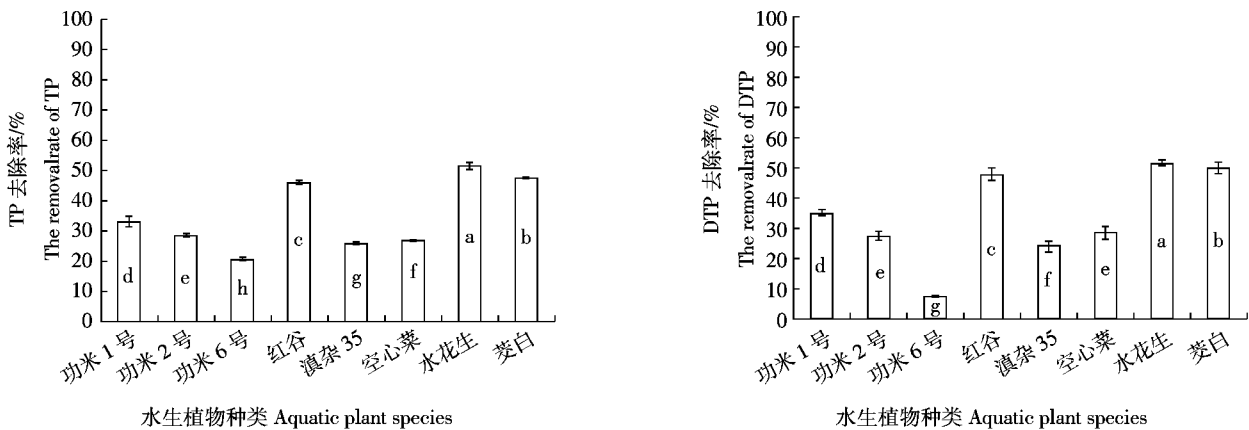
处理系统 TP 的去除率为 53.28%~84.07%,DTP 的去除率为 44.99%~88.81%;无植物对照 TP 的去除率为 32.57%,DTP 的去除率为 37.51%。图 1 中数据为植物处理系统的数据减去空白对照系统的数据所做的图。

2.2 水生植物的生长状况及其 P 素累积

2.2.1 不同水生植物的生物量及 5 个品种水稻的经济产量

植物在净化系统中生长至成熟收获时,各种植物(表 3)的总生物量(干重)在 456.69~1 981.60 g·m⁻²之间,其中水花生的最高,为 1 981.60 g·m⁻²,空心菜最低,为 456.69 g·m⁻²;水花生的总生物量除与功米 1 号和红谷差异不显著外,与其他水生植物差异显著;空心菜除与功米 6 号和茭白差异不显著外,与其他水生植物差异显著;各种植物的地上地下生物量之比在 1.45~8.63 之间,其中茭白为 1.45,滇杂 35 为 8.63,即滇杂 35 的地上地下生物量差异最大。

试验结果表明(表 4),供试 5 个品种的水稻均能正常生育并收获,经济产量在 2 224.48~4 361.48 g·m⁻²之间,功米 1 号的产量最高,为 4 361.48 g·m⁻²,功米 6



注:采用邓肯氏新复极差检验,图中数据为同一处理 3 次重复的平均值±标准差;图中不同小写字母表示 TP、DTP 差异显著(P<0.05)。

图 1 不同水生植物系统对水体中 TP、DTP 的平均去除率

Figure 1 The average removal rate of different aquatic plants system on TP and DTP

表 3 不同水生植物的生物量(干重)及其分配(g·m⁻²)

Table 3 The biomass of different aquatic plants(dry weight) and distribution(g·m⁻²)

供试植物	功米 1 号	功米 2 号	功米 6 号	红谷	滇杂 35	空心菜	水花生	茭白
地上部生物量	1 479.17±32.10a	1 224.16±283.49ab	685.16±475.78cd	1 422.03±93.13a	881.29±203.45bc	313.02±38.04d	1 490.92±206.97a	372.26±31.24d
地下部生物量	176.93±18.72bc	174.57±43.24bc	117.95±58.93c	240.62±28.31b	103.80±32.69c	152.66±20.41bc	490.68±152.67a	264.21±43.24b
总生物量	1 656.10±25.61ab	1 398.73±324.74bc	803.11±533.47de	1 662.66±101.84ab	985.09±235.83cd	456.69±58.10e	1 981.60±112.06a	636.47±12.69de

注:表中数据为同一处理 3 次重复的平均值±标准差;同一行中有相同字母表示未达到 P=0.05 水平的显著差异。

号的产量最低,为 2 224.48 g·m⁻²,除功米 1 号与功米 6 号产量之间差异显著外,其余各品种水稻产量差异不显著;5 个品种水稻的生物产量在 803.11~1 662.66 g·m⁻²,红谷的生物产量最高,为 1 662.66 g·m⁻²,功米 6 号的生物产量最低,为 803.11 g·m⁻²,功米 6 号与功米 1 号、功米 2 号和红谷之间差异显著,滇杂 35 与功米 1 号、红谷差异显著。

2.2.2 不同水生植物对 P 的累积

依据植株不同部位的生物量干重和各组织内 P 的含量,计算得到植株各部分的 P 累积量,并相加求得植株的 P 累积总量(表 5)。由表 5 可以看出,空心菜和茭白除与功米 6 号差异不显著外,与其余 4 个品种的水稻和水花生之间有显著差异,功米 1 号 P 的累积量最大为 34.23 g·m⁻²,空心菜的最低为 9.49 g·m⁻²。其中,地上部平均累积量占累积总量的 74.28%,地下部占 25.72%,由此可见,供试植株对 P 的累积主要集中在地上部。

2.3 水生植物累积吸磷量与系统总磷去除量的关系

从图 2 可以看出,供试 8 种水生植物吸收作用对系统中总磷去除的贡献,5 个水稻品种中功米 1 号最大,红谷次之,功米 6 号最小,从高到低依次为功米 1 号>红谷>滇杂 35>功米 2 号>功米 6 号;空心菜和茭白相比,茭白去除量小。其中,功米 1 号与功米 6 号、空心菜以及茭白之间差异显著,其余差异不显著,有 5 种植物(功米 1 号、功米 2 号、红谷、滇杂 35、水花

生)的贡献率超过植株的平均贡献率(53.57%)。

3 讨论

3.1 水生植物系统对富营养化水体中 P 的去除作用

水生植物对 P 的去除途径包括植物吸收、沉淀、吸附作用和微生物固定等^[21]。本研究显示,有植物处理系统对 TP、DTP 均有明显的去除效果,去除效果显著高于无植物对照,这与王庆海等^[6,27-28]的研究结果相同。无植物对照 TP 去除也有一定程度降低是因为 TP 中包括了颗粒态的磷以及水培过程中沉降等作用的

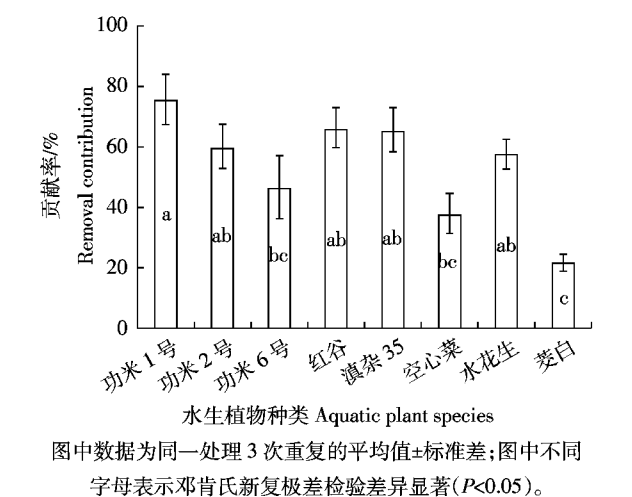


图 2 不同植物吸收作用对净化系统中 P 去除的贡献
Figure 2 The contribution to phosphorus removal by different plants absorbing in the purification system

表 4 不同品种水稻的主要生物产量及经济产量比较
Table 4 The main biological yield and the economic yield of different varieties of rice

水稻品种	稻谷产量/g·m ⁻²	千粒重/g	生物产量(干重)/g·m ⁻²			
			茎叶	根	籽粒	总重
功米 1 号	4 361.48±602.07a	21.10±0.86a	934.18±114.02a	176.93±18.72ab	544.99±85.85a	1 656.10±25.61a
功米 2 号	3 384.47±540.90ab	19.02±0.77a	816.70±207.17a	174.57±43.24ab	407.45±76.43ab	1 398.73±324.74ab
功米 6 号	2 224.48±782.33b	17.35±9.86a	441.61±296.30b	117.95±58.93b	243.55±182.33b	803.11±533.47c
红谷	3 345.74±254.58ab	23.06±0.60a	1 024.77±101.32a	240.62±28.31a	397.26±29.90ab	1 662.66±101.84a
滇杂 35	3 505.68±560.50ab	23.14±1.29a	461.43±119.38b	103.80±32.69b	419.86±84.60ab	985.09±235.83bc

注:表中数据为同一处理 3 次重复的平均值±标准差;同一列中有相同字母表示未达到 P=0.05 水平的显著差异。表 5 同。

表 5 不同水生植物对 P 的累积量(g·m⁻²)
Table 5 The accumulation of phosphorus in different aquatic plants(g·m⁻²)

吸收部位	功米 1 号	功米 2 号	功米 6 号	红谷	滇杂 35	空心菜	水花生	茭白
茎叶	12.27±2.50bc	14.43±4.70ab	8.83±7.17bcd	13.86±2.70ab	6.54±2.25cd	6.37±1.30cd	19.43±4.34a	4.75±0.37d
根	4.99±1.48bcd	3.83±1.12cd	2.43±1.30d	5.87±1.54bc	3.68±1.29cd	3.12±0.36d	11.06±2.08a	6.55±0.95b
籽粒	16.97±6.14a	10.69±1.61ab	7.37±5.93b	14.04±0.67ab	15.77±5.01ab			
总量	34.23±5.01a	28.95±7.15ab	18.63±14.26bc	33.76±3.43a	25.99±8.21ab	9.49±1.42c	30.49±2.60ab	11.45±1.32c

关系。从本研究结果看,对于生长在相同条件下的 8 种水生植物,其生物量变化很大,这与植物内在特性有关,也反映了植物在富营养化水中的生长情况^[2]。有研究发现,根系对颗粒态磷的滞留、根际微生物对有机磷的矿化吸收对水生植物 TP 去除贡献较大^[2]。温度、气候、植物种类、地上与地下组织间 P 素转移及释放等因素影响 TP 去除性能^[22-23]。水生植物可强化根系对颗粒态 P 的滞留、根际微生物对有机磷的矿化吸收以及水生植物自身组织吸收对磷的吸附滞留等过程^[23-24],进而提高 TP 去除率。梁威等^[25]认为种植不同植物的湿地系统根区微生物数量不同,净化效果也不同。而且微生物的作用,一定程度上可以促进植物对 P 的吸收。本试验各种植物对水体中 TP 的去除率为 53.28%~84.07%,植物吸收作用所去除的 TP 占系统中 TP 去除的 21.54%~75.32%,平均占 53.57%,其他因素所去除的 TP 占系统中 TP 去除的 24.68%~78.46%。可见通过对植物的收割,就可以去除水体中大部分的 P。

3.2 水生植物 P 的分配与净化效果

在本试验条件下,整个生育期,供试的水生植物均能正常生长并收获。其中,水花生的总生物量最大,空心菜最低,这主要与植物的生长状况及植物本身的生理特性有关,植株均为同一时期栽种下去,但水花生生长较快,根系发达,因此具有最大的生物量。各种植物的地上地下生物量之比在 1.45~8.63 之间,即植物的地上部生物量均高于地下部生物量。植物的地上地下生物量之比表现了植物的生理特性,也为植物的收割方式提供了参考^[26]。同时,本试验植株地上部平均的 P 累积量占累积总量的 74.28%,地下部占 25.72%,由此可见,植物吸收作用所累积的 P 主要集中在地上部。

本试验选择的水生植物若作为漂浮植物系统,则可以收获整株植物,那么可以带走植物组织累积的所有 P;若作为湿地植物,只收获水生植物的地上部分,那么植物组织中仍有 25.72%的 P 累积在土壤中,而这部分 P 最终并没有带出水体,由于植物的腐烂使得 P 释放出来,对水体也会造成二次污染。因此,本研究更倾向于利用水生植物做漂浮植物。

3.3 水生植物栽培的经济效益和环境效益

本试验收获的蔬菜和水稻籽粒能否食用,有待进一步测定其重金属、硝酸盐含量等卫生指标之后确定。但是,从环境效益的角度来考虑,植物对水体中 P 的去除率就可以作为筛选植物的指标,该试验水花生

的去除率最高,水花生是供试植物中最适宜的净化植物;但综合考虑环境和经济效益,植物吸收作用所累积的 P 量对水体中 P 去除的贡献才是筛选植物的重要指标,供试的 8 种水生植物中,5 个品种水稻的贡献率最高,水花生次之,茭白和空心菜最低。

4 结论

(1)水生植物系统对 TP、DTP 的去除效果显著高于无植物系统的处理对照。有植物处理系统 TP 的去除率为 53.28%~84.07%,DTP 的去除率为 44.99%~88.81%;无植物对照 TP 的去除率为 32.57%,DTP 的去除率为 37.51%。

(2)植物组织所累积的 P 量占系统去除量的 21.54%~75.32%,平均贡献率为 53.57%,植物的吸收作用是 P 去除的主要途径。

(3)供试的 5 个品种的水稻,功米 1 号的稻谷产量最高,同时吸收作用所累积的 P 量对净化系统中 P 去除的贡献率也最大,最终筛选出功米 1 号为最适宜在水体中栽种的水稻品种。

参考文献:

- [1] 孙 刚, 盛连喜. 湖泊富营养化治理的生态工程[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 590-592.
SUN Gang, SHENG Lian-xi. Ecological engineering for eutrophication control in lake[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2001, 12(4): 590-592.
- [2] 李海英, 李文朝, 冯慕华, 等. 微曝气生态浮床水芹吸收 N P 的特性及其对系统去除 N P 贡献的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1908-1913.
LI Hai-ying, LI Wen-chao, FENG Mu-hua, et al. Characteristics and contribution of oenanthe javanica uptake to nitrogen and phosphorus removal based on a micro-aerated ecological floating bed[J]. *Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1908-1913.
- [3] Sarah J. 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.
- [4] Nina C, Jens C S, Niels H S. Sensitivity of aquatic plant to the herbicide metsulfuron-methyl[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2004, 57(2): 153-161.
- [5] Paresh L, Bill F. Relationships between aquatic plants and environmental factors along a steep Himalayan altitudinal gradient[J]. *Aquatic Botany*, 2006, 84(1): 3-16.
- [6] 王庆海, 段留生, 李瑞华, 等. 几种水生植物净化能力比较[J]. 华北农学报, 2008, 23(2): 217-222.
WANG Qing-hai, DUAN Liu-sheng, LI Rui-hua, et al. Comparison of nutrient uptake from rural domestic sewage of aquatic plants[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(2): 217-222.
- [7] 卢进登, 陈红兵, 赵丽娅, 等. 人工浮床栽培 7 种植物在富营养化水

- 体中的生长特性研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(7): 58-61.
- LU Jin-deng, CHEN Hong-bing, ZHAO Li-ya, et al. Study on the growth characteristics of seven plants cultivated on artificial floating rafts in eutrophic water[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006, 7(7): 58-61.
- [8] 鲁敏, 曾庆福. 七种植物的人工湿地处理生活污水的研究[J]. 武汉科技学院学报, 2004, 17(2): 32-35.
- LU Min, ZENG Qing-fu. Study on treatment of domestic sewage by constructed wetland planted with seven wetland plants[J]. *Wuhan University of Science and Engineering*, 2004, 17(2): 32-35.
- [9] 鞠瑾, 张志扬, 唐运平, 等. 不同植物湿地系统对高盐再生水的除氮能力比较[J]. 中国给水排水, 2006, 22(19): 56-58.
- JU Jin, ZHANG Zhi-yang, TANG Yun-ping, et al. Nitrogen removal performance of different aquatic macrophytes wetland in reclaimed river channel[J]. *China Water and Wastewater*, 2006, 22(19): 56-58.
- [10] 吴建强, 黄沈发, 阮晓红, 等. 江苏新沂河河漫滩表面流人工湿地对污染河水的净化试验[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 238-242.
- WU Jian-qiang, HUANG Shen-fa, RUAN Xiao-hong, et al. Treatment of polluted river water using surface flow constructed wetlands in Xinyi river floodplain, Jiangsu Province[J]. *Journal of Lake Science*, 2006, 18(3): 238-242.
- [11] Coleman J, Hench K, Garbutt K, et al. Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetlands[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2001, 128: 283-295.
- [12] 周守标, 王春景, 杨海军, 等. 菖蒲和菹草在污水中的生长特性及其净化效果比较[J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13(4): 454-457.
- ZHOU Shou-biao, WANG Chun-jing, YANG Hai-jun, et al. Growth of *Zizania latifolia* and *Acorus calamus* in sewage and their effect on sewage purification[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2007, 13(4): 454-457.
- [13] 蒋跃平, 葛漾, 岳春雷, 等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1718-1723.
- JIANG Yue-ping, GE Yang, YUE Chun-lei, et al. Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1718-1723.
- [14] 杨曼, 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(7): 98-102.
- YANG Man, WU Xiao-gang, ZHANG Wei-hao, et al. Application of aquatic plant in ecological restoration of eutrophic water[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007(7): 98-102.
- [15] 李明传. 水环境生态修复国内外研究进展[J]. 中国水利, 2007(11): 25-27.
- LI Ming-zhuan. The domestic and oversea research development in ecological restoration of water environment[J]. *China Water Resources*, 2007(11): 25-27.
- [16] 王兴民, 许秋瑾, 邢晓丽, 等. 水生高等植物对湖泊生态系统的影响[J]. 山东科学, 2007(2): 29-32.
- WANG Xing-min, XU Qiu-jin, XING Xiao-li, et al. Effects of macrophyte on the lake ecosystem[J]. *Shandong Science*, 2007(2): 29-32.
- [17] 徐冠仁, 宋祥甫, 应火冬, 等. 水上种稻[J]. 中国水稻科学, 1990, 4(3): 132.
- XU Guan-ren, SONG Xiang-fu, YING Huo-dong, et al. Growing rice with floating bed on the water[J]. *Chi J Rice Sci*, 1990, 4(3): 132.
- [18] 宋祥甫, 应火冬, 朱敏. 自然水域无土栽培水稻的研究[J]. 中国农业科学, 1990, 24(4): 8-13.
- SONG Xiang-fu, YING Huo-dong, ZHU Min. Studies on the adaptability of growing rice with floating bed on the natural water[J]. *Agricultural Science in China*, 1990, 24(4): 8-13.
- [19] 国家环境保护总局. 《水和废水监测分析方法》[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- BAO Shi-dan. Methods of soil and agriculture chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [21] 周小平, 王建国, 薛利红, 等. 浮床植物系统对富营养化水体中氮、磷净化特征的初步研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2199-2203.
- ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-guo, XUE Li-hong, et al. N and P removal characters of eutrophic water body under planted float[M]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, 16(11): 2199-2203.
- [22] Tanner C C. Plants for constructed wetland treatment system: A comparison of growth and nutrient uptake of eight emergent species[J]. *Ecological Engineering*, 1996, 7(1): 59-83.
- [23] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1-3): 48-65.
- [24] Tang X Q, Huang S L. Mechanism of pollutant removal in constructed wetlands and their application both at home and abroad[J]. *Water Treatment Technology*, 2007, 33(2): 9-13.
- [25] 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.
- LIANG Wei, WU Zhen-bin, ZHAN Fa-cui, et al. Seasonal variation of macrophytes root-zone microorganisms and purification effect in constructed wetland system[J]. *J Lake Sci*, 2004, 16(4): 312-317.
- [26] 祝玉慧, 赵国智, 李灵香玉, 等. 湿地植物对模拟污水的净化能力研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 166-172.
- ZHU Yu-hui, ZHAO Guo-zhi, LI Ling-xiang-yu, et al. Purification ability of wetland plants for simulated wastewater[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 166-172.
- [27] 黄亮, 黎道丰, 蔡庆化, 等. 不同水生植物对滇池入湖河道污水净化效能的比较[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1385-1389.
- HUANG Liang, LI Dao-feng, CAI Qing-hua, et al. Purification efficiency of several macrophytes on polluted inflow river of Dianchi Lake[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4): 1385-1389.
- [28] 刘春光, 王春生, 李贺, 等. 几种大型水生植物对富营养化水体中氮和磷的去除效果[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 635-638.
- LIU Chun-guang, WANG Chun-sheng, LI He, et al. Removal efficiency for nitrogen and phosphorus in eutrophic waterbody by macrophytes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl): 635-638.