

## 生态浮岛植物在富营养化养殖水体中去磷途径的初步分析

吴湘<sup>1,2\*</sup>, 叶金云<sup>1</sup>, 杨肖娥<sup>2</sup>, 王趁义<sup>1</sup>, 张易祥<sup>1</sup>

(1. 湖州师范学院生命科学学院, 浙江 湖州 313000;

2. 浙江大学环境与资源学院, 污染环境修复与生态健康教育部重点实验室, 浙江 杭州 310029)

**摘要:** 植物修复富营养化养殖水体过程中磷(P)的去除途径主要包括植物吸收、植物根系吸附、底泥吸附和还原状态下的磷挥发。为了深入探讨植物修复去磷机理, 阐明植物修复富营养化养殖水体过程中磷的去向问题, 分别以夏秋季(高温)和冬春季(低温)的高效除磷植物大漂和冬牧70组成的生态浮岛为研究对象, 通过研究模拟条件下的富营养化养殖水体生态修复系统, 研究不同温度季节下生态浮岛植物在富营养化养殖水体中各去磷途径对水体总磷(TP)去除量的贡献率大小。结果表明: 经过20 d处理后, 生态浮岛植物大漂和冬牧70对富营养化养殖水体中总磷的去除效率都较高, 均达50%以上; 在生态浮岛植物修复富营养化养殖水体过程中最主要的磷去除途径都为植物吸收作用和底泥吸附作用, 分别占水体中总磷去除量的23%~58%和27%~51%; 其次是植物根系吸附作用, 占水体中总磷去除量的13%~28%; 贡献率最低的是还原状态下的磷挥发, 一般低于1.5%, 几乎可忽略不计。

**关键词:** 富营养化养殖水体; 磷; 生态浮岛植物; 去磷途径

**中图分类号:** X 524; S 949

**文献标志码:** A

富营养化是指水域生态系统中限制性营养盐(主要指氮和磷)的自然增加和人为增加而引起生态系统的相应变化<sup>[1]</sup>。引起养殖水体富营养化的一个主要原因就是在水产养殖过程中, 由于大量投喂饲料和施肥, 水体中的氮(N)、磷(P)营养物不断积累, 浓度不断上升, 当浓度达到一定的限值就会形成养殖水体的富营养化。养殖水体富营养化之后, 水中的浮游植物(特别是蓝藻等有害藻类)异常增殖, 消耗水中大量的氧气, 使水质恶化。一般水中的含氧量下降到4 mg/L以下时, 即可影响鱼类的正常生长; 降到2 mg/L以下时, 将影响大多数鱼类的生存。水质污染后养殖的水产品常有异味, 影响商品价值。某些有毒物质还可在鱼体内蓄积, 人类食用这些鱼后会影响身体健康。养殖水体富营养化在对养殖业产生负面影响的同时, 排放的养殖废水还可使周围水域水质变坏, 从而反过来影响养殖业本身(失去了安

全清洁的养殖用水), 形成恶性循环<sup>[2]</sup>。

磷作为一种极具生物活性的元素, 不仅是引起养殖水体富营养化的主要营养物, 同时也是水体富营养化现象能否发生的限制因子, 因此有效降低磷浓度是防治养殖水体富营养化的关键。研究发现, 在富营养水体中利用浮床栽培技术种植植物可以有效降低水体中磷的浓度。马立珊等<sup>[3]</sup>研究利用浮床香根草去除富营养化水体中磷的效率最高可达80%; 周晓红等<sup>[4]</sup>研究酸模浮床对污染水域中磷的去除率可达79%; 由文辉等<sup>[5]</sup>利用无土栽培经济植物净化污水时不仅可以有效除磷, 还能收获一定的经济效益。然而, 综合以上研究发现, 它们都未明确阐明在植物修复过程中磷的具体去除途径及各途径占总磷去除量的贡献率。

AL-NOZAILY等<sup>[6]</sup>认为, 植物修复去磷途径主要包括植物吸收(包括微生物降解强化植物吸收部分)、植物根系吸附、底泥吸附(絮凝沉淀)、

收稿日期: 2011-01-28 修回日期: 2011-03-15

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(20977027); 浙江省重大科技专项重大国际合作项目(2009C14019); 现代农业产业技术体系建设专项资金; 农业部948项目(2010-Z40); 湖州市科技计划攻关项目(2010GS01)

通讯作者: 吴湘, E-mail: wwx1981@126.com

还原态时少量磷的挥发( $\text{PH}_3$ )等作用。水体中磷的实际去除途径是比较复杂的,因此本文拟通过研究外源性磷在模拟富营养养殖水体生态修复系统(包括植物、养殖水和底泥的简单模拟水生生态系统)中磷变量的去向和分配问题,阐明利用生态浮岛植物去除富营养养殖水体中磷的各种不同去除途径及其对总磷去除量的贡献率,可对今后深入研究植物修复去磷机理提供科学参考。生态浮岛又称“生态浮床”,是指应用无土栽培技术将水生、湿生、陆生植物移植到水面上种植以达到水质净化和水面美化的效果。本试验的研究对象除了应充分考虑植物的净化效果,还综合考虑植物的生长季节特性,因此分别选用大漂(*Pistia stratiotes* L.)和冬牧70(*Secale cereale* L.)作为生态浮岛植物的代表进行去磷途径的研究,这两种植物既可利用生态浮岛进行无土栽培,又在各自适宜生长的季节夏秋季(高温)和冬春季(低温)具有较好的净化效果,从而可以确保利用生态浮岛植物达到常年净化效果的目的,具有一定的典型性和推广性。

## 1 材料与试验方法

### 1.1 试验材料与试验地点

试验植物分别为夏秋季和冬春季的生态浮岛植物大漂和冬牧70。植物选取方法:(1)大漂,

选择生长健壮大小一致的幼苗,先用自来水清洗,然后用蒸馏水清洗,再进行预培养;(2)冬牧70,通过种子浸湿、适温催芽、纱盘育苗等步骤直至幼苗地上部分长至10 cm、根系长达5 cm左右,再进行预培养。植物材料的移栽方法:冬牧70采用海绵固定法种植在带孔的塑料板上,使得其根系可以接触到培养液;大漂则直接移栽入培养液中。两组试验的地点都设在人工气候室(光照5 000 lx,相对湿度为70%~80%),由于植物生长季节性不同,人工气候室的室温分别设为( $25 \pm 1$ ) $^{\circ}\text{C}$ (大漂)和( $15 \pm 1$ ) $^{\circ}\text{C}$ (冬牧70)。

### 1.2 试验处理与设置

**富营养化养殖污水的配制** 试验所用的富营养化养殖污水主要配制方法如下:取市郊某天然养鱼塘的养殖废水(原水TN:1.55 mg/L,TP:0.22 mg/L),通过加入 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 使得废水中的TN升至5.0 mg/L左右、TP升至2.0 mg/L左右,达到超富营养标准。调节污水pH至7.0。各试验容器(10 L的塑料水桶)内放置约8 L配制好的养殖污水。泥水平衡后测定的污水水质初始值见表1。配制好的污水在加入试验容器之前还通过0.45  $\mu\text{m}$ 滤膜抽滤以除去大部分藻类,再通过添加少量(约0.5%)的除藻剂NaClO溶液(质量分数0.017 5%,pH 4.0)以完全消除藻类对试验结果的影响。

表1 处理养殖污水的初始值  
Tab.1 The initial water quality indexes of treated culture wastewater

	水质指标 water quality				
	总氮/(mg/L) TN	总磷/(mg/L) TP	氨氮/(mg/L) $\text{NH}_4^+-\text{N}$	可溶性磷/(mg/L) DP	pH
大漂 <i>P. stratiotes</i>	5.13 $\pm$ 0.25	2.14 $\pm$ 0.09	3.34 $\pm$ 0.12	1.85 $\pm$ 0.05	7.12 $\pm$ 0.01
冬牧70 <i>S. cereale</i>	5.09 $\pm$ 0.33	2.11 $\pm$ 0.11	3.19 $\pm$ 0.14	1.81 $\pm$ 0.04	7.09 $\pm$ 0.02

**底泥采集** 取同一养鱼塘的中心表层底泥,用彼得生底泥采集器采集,弃去其中石块、动植物残体、塑料等杂物,滤去水,风干后混匀,再进行高温灭菌(122  $^{\circ}\text{C}$ ),然后称取质量约为200 g的底泥均匀地洒在试验容器的底部,摊平后沿着容器壁缓慢加入待处理污水,加水过程中尽量不扰动底泥,待泥水平衡一段时间后(约3 d)正式开始试验。试验开始前取部分底泥测定其中的氮磷含量及pH初始值(TN:3.43 g/kg;TP:0.52 g/kg;pH 7.51)。

**试验设置** 称取相同鲜重(约100 g)的大漂和冬牧70的植物幼苗,用清水清洗干净后再用灭菌水清洗,在无磷的Hogland营养液中饥饿培

养48 h后移栽入已盛有处理污水的试验容器中。试验开始前取部分植物苗测定植物全株含磷量的初始值。另外设一个无植物处理作为对照。每个处理3次重复,20 d后试验结束。

### 1.3 测定项目和方法

分别于试验开始的第5、10、15、20天各取部分代表性(约占总量的1/20)的植物全株、底泥样品和水样,测定其中的全磷含量,测定方法参考《水质监测》<sup>[7]</sup>和《土壤农化分析》<sup>[8]</sup>,计算总磷含量前后的变化;同时记录每个取样时间的植物鲜重(FW,kg),并测定植物含水量(%)和计算植物干重(DW,kg)。最后通过单位换算计算出植物

吸收、底泥吸附(絮凝沉淀)占水样中磷变化总量的百分比,计算公式如下:

(1) 植物吸收占总磷去除量的百分比 = [植物全株总磷变化量(mg/kg) · 植物干重/水样磷浓度变量(mg/L) · 水样体积] × 100% ;

(2) 底泥吸附(絮凝沉淀)占总磷去除量的百分比 = [底泥全磷变化量(mg/kg) · 底泥重量/水样磷浓度变量(mg/L) · 水样体积] × 100% ;

(3) 再剪取少量植物代表性根系(约占植物全部根系的 1/20,由于每种植物一开始选取的植物苗都是个体大小、苗龄相近的,且移栽后的生长环境条件一致,根系亦全部没入水中,因此个体之间差异不大,取样误差可忽略不计),称重记录根系鲜重(FW, g)。加入 10 mL 0.1 mol/L 盐酸,振荡浸提 1 h,然后测定提取液中的总磷浓度,根据此浓度可以换算出:

植物根系吸附占总磷去除量的百分比 = [提取液总磷浓度(mg/L) · 提取液体积 · 20/水样磷浓度变量(mg/L) · 水样体积] × 100% ;

(4) 磷挥发(还原条件下)则可通过相减法计算

得到,即磷挥发占总磷去除量的百分比 = [(水样总磷变化量 - 植物吸收磷量 - 底泥吸附磷量 - 植物根系吸附磷量)/水样总磷去除量] × 100%。

#### 1.4 统计分析

所有数据的均用 3 次重复的平均值,利用 SigmaPlot 10.0 和 DPS 3.01 等软件对分析结果进行统计分析。

## 2 结果

### 2.1 生态浮岛植物生物量和植物体内磷含量的变化

表 2 反映的是在试验期间植物生物量(鲜重, FW)和植物体内磷含量的变化情况。结果表明,从试验开始至结束,生态浮岛植物大漂和冬牧 70 的生物量和体内的磷含量都有了明显增加,说明这两种生态浮岛植物都较适合在富营养化养殖水体中生长,且在各自适宜生长的季节下生长速度都较快,对营养物质的吸收积累能力也都较高,可以作为不同季节原位生态修复富营养化养殖水体的优选植物材料。

表 2 生态浮岛植物的生物量、植物体内磷含量的变化

Tab.2 Change of fresh biomass and P content of ecological floating culture plants

	植物鲜重/(g/盆) FW		含水率/% percentage of moisture		含磷量/% percentage of P	
	第 0 天	第 20 天	第 0 天	第 20 天	第 0 天	第 20 天
大漂 <i>P. stratiotes</i>	12.5 ± 1.1	33.6 ± 1.2	80.85 ± 1.14	83.17 ± 1.12	0.33 ± 0.02	0.75 ± 0.01
冬牧 70 <i>S. cereale</i>	10.1 ± 1.2	26.7 ± 1.1	75.92 ± 1.21	77.03 ± 1.11	0.29 ± 0.01	0.64 ± 0.03

### 2.2 生态浮岛植物对富营养化养殖水体中总磷的去除效率

由图 1 可知,虽然无植物对照处理中由于水体含磷颗粒的絮凝沉降导致磷浓度随着试验时间也在逐渐降低,但是其下降趋势明显不如有植物的处理。以大漂为例,经过 20 d 处理时间后,水体中总磷质量浓度由原来的 2.14 mg/L 迅速降低至 0.97 mg/L,除磷效率高达 55%;以冬牧 70 为例,经过 20 d 处理时间后,水体中总磷质量浓度由原来的 2.11 mg/L 迅速降低至 1.05 mg/L,除磷效率高达 50%。由此可见,在富营养化养殖水体中利用生态浮岛种植植物可以有效降低水体中磷含量,尤其是大漂和冬牧 70 这两种生物量大、生长迅速的大型高等植物,它们在各自相应的生长季节对富营养养殖水体中磷的去除效果十分显著,可作为不同季节内修复富营养养殖水体的优选植物材料。经比较发现,大漂的去磷效率略高于冬牧

70,这可能是由于大漂的根系较冬牧 70 发达,单位面积的生物量也大于冬牧 70,因此它对磷的需求量较大,去磷效果也较好。但是,如此高的除磷效率并不单单是由于植物吸收引起的,而是由多种不同的磷去除途径共同起作用的结果。

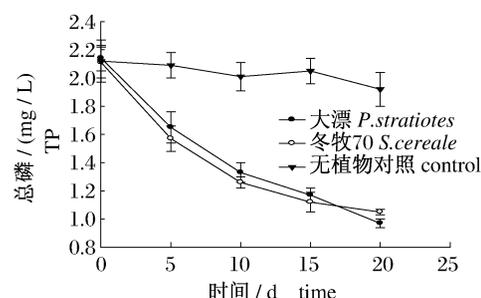


图 1 处理污水中总磷浓度随处理时间的变化

Fig. 1 Change of total phosphorus (TP) concentration in treated culture wastewater

### 2.3 生态浮岛植物修复富营养化养殖水体过程中不同去 P 途径的贡献率

生态浮岛植物大漂(图 2-a)和冬牧 70(图 2-b)在富营养化养殖水体中不同去磷途径占总磷去除量的贡献率随试验时间的变化趋势基本相同,在植物吸收、底泥吸附(絮凝沉淀)、植物根系吸附和还原态时磷挥发这 4 种不同的磷去除途径中,以植物吸收和底泥吸附的贡献率最高,分别占水体总磷去除量的 23%~58% 和 27%~51%;其次贡献率较大的是植物根系吸附作用,占水体总磷去除量的 13%~28%,植物根系吸附作用还会

随着试验时间逐渐增强,这是因为随着植物生长,根系也会越来越发达,对水体中不溶性含磷胶体的吸附面积也越来越大,吸附量自然也就逐渐增加,但是植物吸附所起到的磷去除作用始终要小于植物吸收和底泥吸附这两种最主要的磷去除途径;贡献率最低的是还原条件下磷的挥发,一般都低于 1.5%,这可能是因为在本次试验时间内,水体基本处于好氧状态,仅有植物根区的小部分还原态环境中的厌氧菌导致少量  $\text{PH}_3$  的挥发,所以这部分磷去除量占水体中总磷去除量很小很小,几乎可忽略不计。

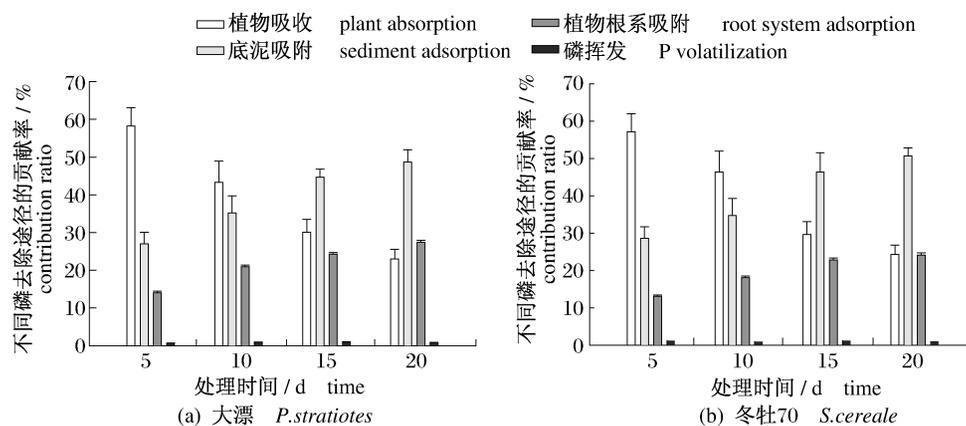


图 2 不同磷去除途径对富营养化养殖水体中磷总去除量的贡献率

Fig. 2 The contribution ratio of different P removal ways in total phosphorus removal from eutrophic cultivated water

### 3 讨论

试验表明,不同季节的生态浮岛植物大漂(夏秋季)和冬牧 70(冬春季)修复富营养化养殖水体过程中最主要的磷去除途径都是植物吸收和底泥吸附,试验前期(1~10 d)以植物吸收为主,试验后期(11~20 d)以底泥吸附为主,造成试验前期和后期区别的主要原因在于,由于植物在移栽入待处理的养殖污水前已在缺磷的营养液中磷饥饿培养 48 h,因此在试验前期,植物吸收水体中的磷素极其迅速且吸收量大,占总磷去除量的 43%~58% 左右,此时水体中磷的去除主要依靠植物吸收作用。植物对磷的吸收作用一般分为两个阶段:一是植物在磷饥饿培养后的快速物理吸收磷的过程;二是植物稳定生长后对磷的慢速生物化学吸收过程<sup>[9-10]</sup>。其具体的吸收机制可以认为是:在外界溶解性磷酸盐过高的时候,植物主要采用自由扩散的方式吸收磷<sup>[11]</sup>。本实验的植物一开始处于磷饥饿状态,因此在试验前期植物对水体中的磷具有快速的吸收能力;而当外界

磷酸盐浓度逐渐降低至某个临界水平时,植物则主要采用主动运输的方式吸收磷,此过程需要生物化学反应的参与<sup>[12]</sup>,因此植物对磷的吸收速率也会逐渐减慢。随着时间推移,植物吸收达到一定饱和度时,植物对磷的吸收作用会逐渐减慢,此后水体中磷的去除主要依靠底泥吸附(絮凝沉淀)作用<sup>[13-14]</sup>。

在试验前期,底泥吸附(絮凝沉淀)作用占总磷去除量的 27%~35%,低于植物吸收作用,这期间水体中磷的迁移与外界环境无关,属于一种快速的物理沉降作用,随着水中磷酸盐浓度的逐渐降低,植物吸收作用逐渐减弱,水体中的磷大部分开始慢慢形成絮凝体沉降到底泥表面。这部分磷主要是同底泥中的金属离子进行化学反应或通过吸附而进入底泥并被固定的<sup>[15]</sup>,因此试验后期底泥吸附(絮凝沉淀)作用占总磷去除量的贡献率也逐渐提高,呈上升趋势,随着时间推移逐渐达到平衡,最后底泥吸附的磷几乎占了总磷去除量的一半。同时在试验过程中,可能有部分吸收磷后的植物残体或碎屑也会通过沉降作用进入底泥

而增加底泥中的磷含量,可见水生植物对底泥中磷的积累也起到一定作用。据报道,高温厌氧有利于底泥释磷<sup>[16-17]</sup>,但是本实验中模拟的水生态系统是一个好氧系统,底泥的表面一直呈好氧状态,因此即使在水温为适温 25 ℃、水体中磷浓度也较低时也未发现底泥有释磷现象。

#### 4 结论

本研究分别以不同季节的高效除磷植物大漂和冬牧 70 组成的生态浮岛为研究对象,研究了生态浮岛植物在富营养养殖水体中各条去磷途径及其对水体总磷去除量的贡献率大小。结果表明:在生态浮岛植物修复富营养养殖水体过程中最主要的磷去除途径是植物吸收和底泥吸附作用,分别可占水体中总磷去除量的 23% ~ 58%、27% ~ 51%;其次是植物根系吸附作用,可占水体中总磷去除量的 13% ~ 28%;贡献率最低的是还原状态下的磷挥发,一般低于 1.5%,几乎可忽略不计。本试验研究成果可为今后深入研究植物修复的去磷机制提供科学参考,也为今后利用<sup>32</sup>P 同位素示踪法进一步仔细深入研究磷的去向问题奠定了初步的研究基础。

同时,根据本研究我们还发现,生态浮岛植物大漂和冬牧 70 在各自适应的生长季节夏秋(高温)季和冬春(低温)季都可以作为原位生态修复富营养化养殖水体的优选植物材料,从而使富营养化养殖水体可以常年获得较好的水质净化效果,且通过定时收割植物并加以资源化利用,不仅有助于水体净化效果,还能产生一定的经济效益,因此利用生态浮岛植物进行原位生态修复是一种值得借鉴和推广的水产富营养化养殖水体的净化模式。

#### 参考文献:

- [ 1 ] SMETACEK V, BATHMANN U, NÖTHING E M, et al. Coastal eutrophication: Causes and consequences [ M ] // MANTOURA R F C, MARTIN J M, WOLLAST R. eds. Ocean margin processes in global change. John Wiley, Chichester, 1991: 251 - 279.
- [ 2 ] 李春雁, 崔毅. 生物操纵法对养殖水体富营养化防治的探讨 [ J ]. 海洋水产研究, 2002, 23(1): 71 - 75.
- [ 3 ] 马立珊, 骆永明, 吴龙华, 等. 浮床香根草对富营养化水体氮磷去除动态及效率的初步研究 [ J ]. 土壤, 2000, 32(2): 99 - 101.
- [ 4 ] 周晓红, 王国祥, 杨飞, 等. 酸模浮床对污染水体净化效果及机理分析 [ J ]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 176 - 180.
- [ 5 ] 由文辉, 刘淑媛, 钱晓燕. 水生经济植物净化受污染水体的研究 [ J ]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2001(1): 99 - 102.
- [ 6 ] AL-NOZAILY F, ALAERTSM G, VEENSTRA S. Performance of duckweed-covered sewage lagoons—II. Nitrogen and phosphorus balance and plant productivity [ J ]. Water Research, 2000, 34(10): 2734 - 2741.
- [ 7 ] 中国国家环保总局和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法 [ M ]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243 - 246.
- [ 8 ] 鲍士旦. 土壤农化分析 [ M ]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 268 - 270.
- [ 9 ] 郭蔚华, 张智, 何冰, 等. 高等水生植物修复双龙湖水体叶绿素 a 变化实验研究 [ J ]. 重庆环境科学, 2002, 24(3): 45 - 48.
- [ 10 ] 成水平. 人工湿地废水处理系统的生物学基础研究进展 [ J ]. 湖泊科学, 1996, 8(3): 268 - 273.
- [ 11 ] ALAERTS G J, RAHMAN MAHBUBAR M D, KELDERMAN P. Performance analysis of a full-scale duckweed-covered sewage lagoon [ J ]. Water Research, 1996, 30(4): 843 - 852.
- [ 12 ] DEBUSK T A, PETERSON J E, RAMESH R K. Use of aquatic and terrestrial plants for removing phosphorus from dairy wastewater [ J ]. Ecological Engineering, 1995, 5(2-3): 371 - 390.
- [ 13 ] 梁威. 人工湿地对污水中氮磷的去除机制研究进展 [ J ]. 环境科学动态, 2000, 3: 32 - 37.
- [ 14 ] SUNDBY B, GOBEIL C, SILVERBERG N, et al. The phosphorus cycle in coastal marine sediments [ J ]. Limnology and Oceanography, 1992, 37(6): 1129 - 1145.
- [ 15 ] KÖRNER S, VERMAAT J E. The relative importance of *Lemna gibba* L., bacteria and algae for the nitrogen and phosphorus removal in duckweed-covered domestic wastewater [ J ]. Water Research, 1998, 32(12): 3651 - 3661.
- [ 16 ] KAISERLI A, VOUTSA D, SAMARA C. Phosphorus fractionation in lake sediments—Lakes Volvi and Koronia, N. Greece [ J ]. Chemosphere, 2002, 46(8): 1147 - 1155.
- [ 17 ] HOLMBOE N, KRISTENSEN E, ANDERSEN F Ø. Anoxic decomposition in sediments from a tropical mangrove forest and the temperate Wadden Sea: Implications of N and P addition experiments [ J ]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, 53(2): 125 - 140.

## Ways of phosphorus removal from eutrophic aquaculture water by ecological floating culture plants

WU Xiang<sup>1,2\*</sup>, YE Jin-yun<sup>1</sup>, YANG Xiao-e<sup>2</sup>, WANG Chen-yi<sup>1</sup>, ZHANG Yi-xiang<sup>1</sup>

(1. College of Life Sciences, Huzhou Teachers College, Huzhou 313000, China;

2. Ministry of Education Key Laboratory of Environmental Remediation and Environmental Remediation and Ecological Health, College of Environmental and Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

**Abstract:** The ways of P removal from eutrophic aquaculture water in the process of phytoremediation included plant absorption, root system adsorption, sediment adsorption (mainly including flocculation and deposition) and P volatilization ( $\text{PH}_3$ ) under reductive state. In order to further investigate the mechanism of P removal and clarify the ways of P removal from eutrophic aquaculture water by phytoremediation, we took *Pistia stratiotes* L. and *Secale cereale* L. which had higher P removal efficiency as experiment materials respectively in summer-autumn (high-temperature) seasons and winter-spring (low-temperature) seasons. The contribution ratios of these four ways of P removal in the total phosphorus (TP) removal from eutrophic aquaculture water were respectively studied through simulating ideal ecological phytoremediation system. The study results showed that both of the two ecological floating culture plants *P. stratiotes* L. and *S. cereale* L. have higher TP removal efficiency from eutrophic cultivated water, which both reach higher than 50%; And the two main ways of P removal by ecological floating culture plants are plant absorption and sediment adsorption whose contribution ratios respectively are 23%–58% and 27%–51% for TP removal; Second is root adsorption whose contribution ratio is 13%–28%; The lowest contribution ratio was observed in the track of P volatilization under reductive state whose contribution ratio is only lower than 1.5%, thus, this contribution in TP removal is very small and could be neglected. The results of this study can be considered as the preliminary research basis for using  $^{32}\text{P}$  isotope tracer method for further careful in-depth study of the movement of P in eutrophic aquaculture water.

**Key words:** eutrophic aquaculture water; phosphorus (P); ecological floating culture plants; ways of P removal

**Corresponding author:** WU Xiang. E-mail: wwx1981@126.com