

邹乐, 严少华, 王岩, 等. 水葫芦净化富营养化水体效果及对底泥养分释放的影响[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(6): 1318-1324.

水葫芦净化富营养化水体效果及对底泥养分释放的影响

邹乐¹, 严少华², 王岩², 朱华兵³, 张志勇²

(1. 南京农业大学资源与环境学院, 江苏 南京 210095; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 3. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 采用人工模拟方法, 研究了水葫芦种养对富营养化水体净化效果以及底泥养分释放的影响。结果表明, 水葫芦种养覆盖度为 60%、初始放养量为 4.0 kg/m² 时对 4 种富营养化水体中的营养盐去除效果最好, 出水中全氮、全磷浓度分别降至 0.15~5.69 mg/L 和 0.04~0.14 mg/L。水葫芦在修复水体过程中还促使了底泥中养分向上覆水的释放, 全氮、全磷的释放速率分别达到 1.03~2.83 mg/(kg·d)、0.16~0.51 mg/(kg·d)。

关键词: 水葫芦; 富营养化水体; 氮; 磷; 底泥

中图分类号: X52, X173 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2012)06-1318-07

Effect of water hyacinth on purification of eutrophic water and nutrients release from sediment

ZOU Le¹, YAN Shao-hua², WANG Yan², ZHU Hua-bing³, ZHANG Zhi-yong²

(1. College of Resources and Environment Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Agricultural Resource and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Institute of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The simulation experiments were carried out to study the effect of water hyacinth on purification of eutrophic water and nutrient release from sediment. When water hyacinth coverage was 60% and the initial fresh weigh was 4.0 kg/m², the removal rates of nutrients were the highest, with the concentrations of TN and TP in effluent reduced to 0.15~5.69 mg/L and 0.04~0.14 mg/L, respectively. Cultivating water hyacinth in eutrophic water facilitated the release of nutrients from sediment into overlying water, the release rates of TN and TP being 1.03~2.83 mg/(kg·d) and 0.16~0.51 mg/(kg·d), respectively.

Key words: water hyacinth; eutrophic water; nitrogen; phosphorus; sediment

随着工农业生产的迅速发展, 相应的环境保护和治理措施滞后, 中国许多大的江河湖泊正面临着

日趋严重的水污染问题, 工业废水、农田灌溉和生活污水的排放加快了水体的富营养化水平^[1-2]。水体的富营养化不仅会对水生生物的生长、繁殖、种群分布产生影响, 破坏水体的生态环境系统, 还直接影响了城市给水质量^[3-4]。

植物修复是富营养水体生态治理与水体生态恢复的最有效途径之一, 水葫芦作为水体氮磷生物富集的首选植物已得到共识^[5-6], 并已被大规模应用于太湖、滇池等富营养化湖泊的生物治理工程。但水

收稿日期: 2012-06-01

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX(10)429]

作者简介: 邹乐 (1985-), 男, 江西崇仁人, 硕士研究生, 研究方向为水体富营养化治理。(Tel) 025-84391231; (E-mail) zhuiqiu.yisheng@163.com

通讯作者: 张志勇, (Tel) 025-84391231; (E-mail) jaaszyzhang@yahoo.cn

水葫芦消减水体氮磷能力受诸多因素影响,不同条件下水体氮磷去除效果不同。为充分发挥水葫芦治污效果,有必要开展关于水葫芦净化效果影响因素的研究,以明确利用水葫芦消减水体氮磷的最佳条件。本试验试图在水葫芦覆盖度、初始放养量和水体富营养化程度3个因素下研究水葫芦对水体中氮磷的去除效果、吸收能力及对底泥养分释放的影响。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在江苏省农业科学院内试验基地进行,2010年7月初开始,试验期约90 d。水葫芦种苗来自江苏省农业科学院污水塘。底泥用太湖挖掘的鲜

表1 不同富营养化水体初始水质指标

Table 1 The quality of differently eutrophied water

| 富营养化水体 | 全氮(mg/L) | 全磷(mg/L) | NO ₃ ⁻ -N(mg/L) | NH ₄ ⁺ -N(mg/L) | DO(mg/L) | pH |
|--------|------------|-----------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------|---------|
| I | 2.50±0.17 | 0.25±0.02 | 1.62±0.09 | 0.73±0.03 | 3.6±0.2 | 8.2±0.4 |
| II | 4.50±0.27 | 0.45±0.06 | 3.09±0.16 | 1.36±0.07 | 3.8±0.4 | 8.5±0.3 |
| III | 9.00±0.28 | 0.90±0.02 | 6.48±0.27 | 2.45±0.12 | 4.2±0.5 | 8.5±0.6 |
| IV | 15.50±0.51 | 1.55±0.10 | 11.65±0.63 | 3.29±0.21 | 4.5±0.4 | 8.7±0.5 |

每个试验处理3个重复,同时设相应的空白对照。水样每1周采集1次,植物样和底泥样每3周采集1次,采集时将水葫芦净增长量移出后,保留试验初始放养生物量继续试验。植物样分地上部和地下部,于105℃下烘干,磨碎后测定组织内全氮、全磷含量。底泥样在常温(20~25℃)下风干,磨碎后测定底泥中的全氮、全磷含量,同时称取一定量的湿泥于105℃下烘干,计算底泥含水率。

1.2 指标测定

1.2.1 水样 全氮、全磷含量使用德国Seal公司的AA3流动分析仪测定。

1.2.2 植株 植株经过H₂O₂-H₂SO₄消煮后采用微量蒸馏定氮法^[7]测定全氮含量,经过H₂O₂-H₂SO₄消煮后采用钼蓝比色法^[7]测定全磷含量。单位面积植物吸收的氮、磷总量*m*(g)按下式计算: $m = (M_2 \times L_2 \times N_2 - M_1 \times L_1 \times N_1) / s$,式中*M*₂为收获期植株鲜重(kg),*L*₂为收获期植株含水率(%),*N*₂为收获期植株中氮、磷含量(g/kg),*M*₁为植物初始鲜重(kg),*L*₁为植物初始含水率(%),*N*₁为植物初始氮、磷含量(g/kg),*s*为上覆水水面面积(m²)。

泥,含水量53%,全氮1.74 g/kg,全磷0.39 g/kg。不同富营养化水体(不同氮磷浓度)均由江苏省农业科学院1号塘污水加入NH₄NO₃和KH₂PO₄配制而成。试验装置为39个体积为80 cm×60 cm×70 cm的混凝土水池。水池底部填充约140 kg的底泥,厚度约20 cm,水池有效容积240 L。试验设计3个因素:(1)水体氮磷浓度,在初始放养量4.0 kg/m²和覆盖度60%条件下,水体氮磷浓度设置见表1,分别为富营养化水体I、II、III、IV;(2)覆盖度,在水体II和初始放养量4.0 kg/m²条件下,覆盖度分别为40%、60%、80%、100%;(3)初始放养量,在水体II和覆盖度60%条件下,初始放养量分别为1.0 kg/m²、2.0 kg/m²、4.0 kg/m²、6.0 kg/m²。

1.2.3 底泥样 称取磨碎的底泥样Se-CuSO₄-K₂SO₄-H₂SO₄消化,凯式定氮法测定全氮含量。称取磨碎的底泥样经H₂SO₄-HClO₄消化后,通过钼锑抗比色法^[7]测定全磷含量。底泥中释放的氮或磷总量*m*(g)按下式计算: $m = C_1 \times M \times W_1 - C_0 \times M \times W_0$,式中*C*₁为试验结束时底泥中氮或磷的含量(g/kg),*C*₀为初始底泥中氮或磷的含量(g/kg),*W*₁为试验结束时底泥含水率(%),*W*₀为底泥初始含水率(%),*M*为试验所用底泥总鲜重(kg)。

2 结果

2.1 不同条件下水葫芦对富营养化水体中氮、磷的去除效果

由表2可知,在水体II和初始放养量4.0 kg/m²条件下,净化周期30 d(2010年7月6日至8月5日)内,不同水葫芦覆盖处理,水体中全氮、全磷浓度分别降至0.45~1.65 mg/L和0.04~0.12 mg/L,去除率分别为63.63%~90.00%和73.33%~91.11%,去除速率分别为0.084~0.119 mg/(L·d)、0.010~0.012 mg/(L·d)。方差分析

结果表明,水葫芦覆盖度为60%的处理对水体中全氮、全磷的去除速率均显著高于空白对照和其他覆盖度处理($P < 0.05$)。

从表3可以看出,在水体II和覆盖度60%条件下,水葫芦不同放养量处理,水体中全氮、全磷浓度分别降至0.45~0.91 mg/L和0.04~0.13 mg/L,全氮、全磷去除率分别为79.78%~90.00%和71%~91.11%,去除速率分别为0.106~0.119 mg/(L·d)

和0.009~0.012 mg/(L·d)。随着水葫芦初始放养量的增加,水体中全氮、全磷的去除率明显升高,当放养量达到6.0 kg/m²时,去除效果相对有所下降,可能是因为生物量过大,水葫芦生长空间受限,水葫芦繁殖速度受到一定的影响^[8]。方差分析结果表明,水葫芦初始放养量为4.0 kg/m²的处理对全氮、全磷的去除速率显著高于对照和其他初始放养量处理($P < 0.05$)。

表2 水葫芦不同覆盖度对水体中全氮、全磷的去除效果

Table 2 Removal of total nitrogen and total phosphorus of eutrophic water by water hyacinth at different coverage levels

| 覆盖度(%) | 全氮 | | | 全磷 | | |
|--------|------------------|------------|--------------------|------------------|-------------|--------------------|
| | 净化后浓度值 (mg/L) | 去除率 (%) | 去除速率 [mg/(L·d)] | 净化后浓度值 (mg/L) | 去除率 (%) | 去除速率 [mg/(L·d)] |
| 40 | 1.65±0.09 | 63.63±6.49 | 0.084±0.020b | 0.12±0.01 | 73.33±6.39 | 0.010±0.004b |
| 60 | 0.45±0.07 | 90.00±4.34 | 0.119±0.010d | 0.04±0.01 | 91.11±4.56 | 0.012±0.002c |
| 80 | 0.56±0.02 | 87.63±5.86 | 0.116±0.030c | 0.06±0.02 | 86.67±5.97 | 0.011±0.003b |
| 100 | 0.54±0.02 | 87.95±6.79 | 0.116±0.030c | 0.08±0.02 | 82.22±7.69 | 0.011±0.004b |
| 0(CK) | 2.12±0.11 | 52.92±8.32 | 0.070±0.010a | 0.28±0.04 | 60.01±10.27 | 0.005±0.002a |

同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

表3 水葫芦不同初始放养量对水体中全氮、全磷的去除效果

Table 3 Removal of total nitrogen and total phosphorus of eutrophic water by water hyacinth at different initial amounts

| 覆盖度(%) | 全氮 | | | 全磷 | | |
|--------|------------------|-------------|--------------------|------------------|-------------|--------------------|
| | 净化后浓度值 (mg/L) | 去除率 (%) | 去除速率 [mg/(L·d)] | 净化后浓度值 (mg/L) | 去除率 (%) | 去除速率 [mg/(L·d)] |
| 1.0 | 0.91±0.06 | 79.78±16.50 | 0.106±0.020b | 0.13±0.03 | 71.11±13.60 | 0.009±0.002b |
| 2.0 | 0.65±0.10 | 85.56±14.70 | 0.113±0.020c | 0.09±0.02 | 80.00±15.80 | 0.011±0.003b |
| 4.0 | 0.45±0.06 | 90.00±4.34 | 0.119±0.010d | 0.04±0.01 | 91.11±4.56 | 0.012±0.002c |
| 6.0 | 0.83±0.25 | 81.56±18.90 | 0.108±0.030b | 0.07±0.05 | 84.44±17.60 | 0.011±0.004b |
| 0(CK) | 2.12±0.11 | 52.92±8.32 | 0.070±0.010a | 0.28±0.04 | 60.01±10.27 | 0.005±0.002a |

同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

由表4可知,在初始放养量4.0 kg/m²和覆盖度60%条件下,水葫芦对4种富营养化水体中全氮、全磷均表现出良好的去除效果,在全氮、全磷初始浓度分别为2.50~15.50 mg/L和0.25~1.55 mg/L的条件下,种养水葫芦使水体中全氮、全磷浓度分别降至0.15~5.69 mg/L和0.04~0.14 mg/L,全氮、全磷去除率分别为63.29%~93.96%和72.00%~93.33%,去除速率分别为0.069~0.289 mg/(L·d)和0.005~0.041 mg/(L·d)。水葫芦对水体全氮、全磷的去除速率随水体初始浓度升高而升高。方差分析结果表明,4种富营养化水体中全氮、全磷的去除速率间存在显著差异($P < 0.05$)。

空白对照系统中全氮、全磷浓度也有一定程度的降低,可能是由于净化期间藻类或水生生物的生长以及微生物的硝化、反硝化等作用^[9]。

2.2 水葫芦吸收作用对水体氮磷去除贡献

2.2.1 水葫芦在不同条件下对水体中氮磷的吸收量 依据水葫芦地上部、地下部生物量干重及其组织内的氮、磷养分含量,计算地上部、地下部的氮、磷累积总量。从表5可以看出,水葫芦对氮的累积主要集中在地上部,吸收总量为3.35~23.27 g/m²,是根部的3~4倍;而对磷的累积则表现为根部大于地上部,且随着水体氮磷浓度的升高,根部与地上部对磷的累积量差距增大。

水葫芦4个不同覆盖度水平下,氮、磷吸收总量分别为 6.51 ~ 14.11 g/m²和 0.95 ~ 1.74 g/m²,且均随覆盖度的增加而升高,各处理间大多呈显著性差异($P < 0.05$)。在不同初始放养量下,水葫芦植株对水体中氮、磷吸收总量均随初始放养量的增加而增加,分别为 5.55 ~ 12.46 g/m²和 0.79 ~ 1.30

g/m²,且初始放养量多(4.0 kg/m²、6.0 kg/m²)的处理与初始放养量较少(1.0 kg/m²、2.0 kg/m²)之间差异显著($P < 0.05$)。水葫芦在4种富营养化水体中的氮、磷吸收总量随水体富营养化程度的加深而升高,差异显著($P < 0.05$),分别为 4.21 ~ 30.47 g/m²和 0.44 ~ 4.39 g/m²。

表4 水葫芦对不同富营养化水体全氮、全磷的去除效果

Table 4 Removal of total nitrogen and total phosphorus of differently eutrophied waters by water hyacinth

| 富营养化水体 | 水葫芦初始放养量 (kg/m ²) | 全氮 | | | 全磷 | | |
|--------|-------------------------------|---------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-----------------|
| | | 净化后浓度值 (mg/L) | 去除率 (%) | 去除速率 [mg/(L·d)] | 净化后浓度值 (mg/L) | 去除率 (%) | 去除速率 [mg/(L·d)] |
| I | 4.0 | 0.15±0.08 | 93.96±12.45 | 0.069±0.02a | 0.07±0.03 | 72.00±18.67 | 0.005±0.002a |
| | 0 | 1.29±0.11 | 48.40±13.57 | 0.036±0.02 | 0.11±0.02 | 56.00±20.58 | 0.004±0.001 |
| II | 4.0 | 0.45±0.07 | 90.00±4.34 | 0.119±0.01b | 0.04±0.01 | 91.11±4.560 | 0.012±0.002b |
| | 0 | 2.12±0.11 | 52.92±8.32 | 0.070±0.01 | 0.18±0.04 | 60.78±10.27 | 0.005±0.002 |
| III | 4.0 | 2.76±0.72 | 69.33±11.79 | 0.184±0.04c | 0.06±0.01 | 93.33±11.46 | 0.025±0.004c |
| | 0 | 4.35±0.97 | 51.67±14.52 | 0.137±0.06 | 0.28±0.01 | 68.89±13.96 | 0.018±0.002 |
| IV | 4.0 | 5.69±1.02 | 63.29±13.87 | 0.289±0.08d | 0.14±0.05 | 90.97±9.290 | 0.041±0.002d |
| | 0 | 7.87±1.13 | 49.23±15.97 | 0.224±0.12 | 0.52±0.00 | 65.33±11.79 | 0.030±0.004 |

富营养化水体 I、II、III、IV 指标见表 1。同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

表5 水葫芦对富营养化水体中氮、磷吸收量

Table 5 Absorption of nitrogen and phosphorus by water hyacinth in differently eutrophied water

| 处理 | 氮吸收量 (g/m ²) | | | 磷吸收量 (g/m ²) | | |
|----|--------------------------|-----------|-------------|--------------------------|-----------|------------|
| | 地上部 | 根部 | 总吸收量 | 地上部 | 根部 | 总吸收量 |
| 1 | 4.67±0.43 | 1.71±0.04 | 6.51±0.83a | 0.41±0.01 | 0.54±0.02 | 0.95±0.03a |
| 2 | 6.27±0.65 | 1.80±0.06 | 8.07±0.71b | 0.49±0.01 | 0.49±0.01 | 0.98±0.02a |
| 3 | 9.98±0.56 | 2.67±0.16 | 12.65±0.72c | 0.72±0.03 | 0.74±0.03 | 1.46±0.06b |
| 4 | 10.47±0.74 | 3.64±0.25 | 14.11±0.99d | 0.72±0.03 | 1.01±0.04 | 1.74±0.07c |
| 5 | 4.40±0.32 | 1.14±0.02 | 5.55±0.34a | 0.35±0.01 | 0.43±0.02 | 0.79±0.03a |
| 6 | 4.92±0.36 | 1.43±0.05 | 6.35±0.41a | 0.37±0.01 | 0.44±0.01 | 0.81±0.02a |
| 7 | 6.27±0.65 | 1.80±0.06 | 8.07±0.71b | 0.49±0.01 | 0.49±0.01 | 0.98±0.02b |
| 8 | 9.27±0.52 | 3.19±0.27 | 12.46±0.79c | 0.62±0.02 | 0.68±0.02 | 1.30±0.04c |
| 9 | 3.35±0.20 | 0.85±0.06 | 4.21±0.26a | 0.22±0.01 | 0.21±0.01 | 0.44±0.02a |
| 10 | 6.27±0.65 | 1.80±0.06 | 8.07±0.71b | 0.49±0.01 | 0.49±0.01 | 0.98±0.02b |
| 11 | 12.26±0.82 | 3.47±0.33 | 15.72±1.15c | 0.90±0.05 | 1.25±0.06 | 2.15±0.11c |
| 12 | 23.27±1.26 | 7.19±0.48 | 30.47±1.74d | 2.06±0.09 | 2.33±0.11 | 4.39±0.20d |

表中所有数据均为整个净化周期的净增长值。处理 1~4 表示在水体 II 和初始放养量 4.0 kg/m² 条件下,覆盖度分别为 40%、60%、80%、100%;处理 5~8 表示在水体 II 和覆盖度 60% 条件下,初始放养量分别为 1.0 kg/m²、2.0 kg/m²、4.0 kg/m²、6.0 kg/m²;处理 9~12 表示在初始放养量 4.0 kg/m² 和覆盖度 60% 条件下,水体分别为富营养化水体 I、II、III、IV。

2.2.2 水葫芦吸收作用对富营养化水体氮、磷去除的贡献 试验期间,富营养化水体的氮、磷去除总量分别为 1.27 ~ 7.86 g/m²和 0.13 ~ 0.81 g/m²,结

合水葫芦对氮、磷的吸收总量,可计算水葫芦通过吸收作用对水体氮、磷去除的贡献率。

由表 6 可知,水葫芦对水体中氮、磷去除的贡献

率均超过 100%，最大值分别达到 580.66% 和 665.43%，即水葫芦的氮、磷吸收总量高于水体自身输入的氮、磷总量，表明净化期间底泥向上覆水体中释放了一定数量的氮、磷^[10-11]，以满足水葫芦的正常生长。

在不同覆盖度下，水葫芦对水体氮、磷的去除贡献率分别为 248.47% ~ 580.66% 和 376.92% ~ 644.44%，并随覆盖度的增加而上升。这是由于覆盖度越大，植株的生长繁殖速率越快^[12]，从而促进植株对水体中氮、磷的吸收。从表 6 中也可明显看出，氮、磷的去除贡献率随水葫芦初始放养量的增加而升高，氮、磷的去除贡献率分别为 204.04% ~

514.88% 和 282.14% ~ 419.35%，说明初始放养量越多，水葫芦生物净增重越多^[8]，对水体中氮、磷营养盐的吸收量越多。

4 种富营养化水体中水葫芦对氮、磷的吸收总量随水体营养盐浓度的升高而增加，分别为 4.21 ~ 30.47 g/m² 和 0.44 ~ 4.39 g/m²，水葫芦对水体磷的去除贡献率随水体初始浓度的升高而升高，去除贡献率为 338.46% ~ 541.98%；而对氮的去除贡献率表现为水体 II < I < III < IV，且差异不显著，这与张志勇等^[13]研究结果不尽相同，可能是由于整个试验没有进行营养盐的补充，促使底泥释放氮、磷来提供水葫芦的生长。

表 6 水葫芦吸收作用对富营养化水体氮、磷去除的贡献

Table 6 Contribution of water hyacinth to removal of nitrogen and phosphorus in eutrophic water

| 处理 | 总吸收量 (g/m ²) | | 总去除量 (g/m ²) | | 去除贡献率 (%) | |
|----|--------------------------|------|--------------------------|------|-----------|--------|
| | 氮 | 磷 | 氮 | 磷 | 氮 | 磷 |
| 1 | 6.51 | 0.95 | 2.62 | 0.25 | 248.47 | 380.00 |
| 2 | 8.07 | 0.98 | 2.57 | 0.26 | 314.01 | 376.92 |
| 3 | 12.65 | 1.46 | 2.62 | 0.23 | 482.82 | 634.78 |
| 4 | 14.11 | 1.74 | 2.43 | 0.27 | 580.66 | 644.44 |
| 5 | 5.55 | 0.79 | 2.72 | 0.28 | 204.04 | 282.14 |
| 6 | 6.35 | 0.81 | 2.53 | 0.25 | 250.99 | 324.00 |
| 7 | 8.07 | 0.98 | 2.57 | 0.26 | 314.01 | 376.92 |
| 8 | 12.46 | 1.30 | 2.42 | 0.31 | 514.88 | 419.35 |
| 9 | 4.21 | 0.44 | 1.27 | 0.13 | 331.50 | 338.46 |
| 10 | 8.07 | 0.98 | 2.57 | 0.26 | 314.01 | 376.92 |
| 11 | 15.72 | 2.15 | 4.65 | 0.53 | 338.06 | 405.66 |
| 12 | 30.47 | 4.39 | 7.86 | 0.81 | 387.66 | 541.98 |

处理 1 ~ 12 见表 5 注。

2.3 水葫芦种养对底泥养分释放的影响

底泥中氮、磷浓度越高，释放的氮、磷就越多，严重的能够导致水体富营养化^[14-19]。由于本试验周期相对较长，而且没有进行营养盐的补充，试验中、后期水葫芦生长繁殖需要吸收氮、磷营养，因此底泥中养分的释放是提供水葫芦植株生长的营养来源。由表 7 可知，试验结束后，各处理底泥中氮、磷含量均有一定程度的下降。

4 种不同水葫芦覆盖度处理中，从底泥中释放出氮、磷的总量分别为 13.04 ~ 32.01 g、3.26 ~ 6.38 g，氮、磷的释放速率分别为 1.03 ~ 2.54 mg/(kg·d)、0.26 ~ 0.51 mg/(kg·d)，并随覆盖度

的升高而增加。

当水葫芦初始放养量越多时，植株生物量增加越多，对氮、磷的需求量也越多。不同放养量处理，试验期间底泥中释放的氮、磷总量分别为 14.73 ~ 25.12 g、3.48 ~ 6.27 g，释放速率分别为 0.28 ~ 0.50 mg/(kg·d)。初始放养量达到 4.0 kg/m² 和 6.0 kg/m² 时，底泥中磷养分的释放量较多，分别为 11.14 g 和 12.87 g。

4 种富营养化水体中，底泥对氮、磷养分的释放量随着富营养化程度的加深而增加，分别为 17.50 ~ 35.64 g 和 2.03 ~ 6.32 g，释放速率分别为 1.39 ~ 2.83 mg/(kg·d)、0.16 ~ 0.50 mg/(kg·d)。这可

能是由于富营养化程度高的水体中水葫芦生物量增长快,待试验进行到中、后期,水体中氮、磷浓度下

降,为满足水葫芦植株生长所需,底泥中氮、磷养分大量释放出来。

表7 水葫芦控养对底泥养分释放的影响

Table 7 Effect of controlled water hyacinth cultivating on the nutrient release from sediment

| 处理 | 全氮 | | | | 全磷 | | | |
|----|----------------|------------------|------------|---------------------|----------------|------------------|------------|---------------------|
| | 初始含量 (g/kg) | 试验结束含量 (g/kg) | 释放量 (g) | 释放速率 [mg/(kg·d)] | 初始含量 (g/kg) | 试验结束含量 (g/kg) | 释放量 (g) | 释放速率 [mg/(kg·d)] |
| 1 | 1.74 | 1.54 | 13.04 | 1.03 | 0.39 | 0.34 | 3.26 | 0.26 |
| 2 | 1.74 | 1.45 | 19.28 | 1.53 | 0.39 | 0.31 | 4.84 | 0.38 |
| 3 | 1.74 | 1.42 | 21.90 | 1.74 | 0.39 | 0.30 | 5.65 | 0.45 |
| 4 | 1.74 | 1.34 | 32.01 | 2.54 | 0.39 | 0.29 | 6.38 | 0.51 |
| 5 | 1.73 | 1.52 | 14.73 | 1.17 | 0.37 | 0.32 | 3.48 | 0.28 |
| 6 | 1.73 | 1.45 | 18.05 | 1.43 | 0.37 | 0.31 | 4.04 | 0.32 |
| 7 | 1.73 | 1.39 | 22.70 | 1.80 | 0.37 | 0.29 | 4.84 | 0.38 |
| 8 | 1.73 | 1.35 | 25.12 | 1.99 | 0.37 | 0.28 | 6.27 | 0.50 |
| 9 | 1.75 | 1.48 | 17.50 | 1.39 | 0.38 | 0.36 | 2.03 | 0.16 |
| 10 | 1.75 | 1.42 | 21.30 | 1.69 | 0.38 | 0.33 | 3.14 | 0.25 |
| 11 | 1.75 | 1.38 | 27.80 | 2.21 | 0.38 | 0.30 | 4.20 | 0.33 |
| 12 | 1.75 | 1.33 | 35.64 | 2.83 | 0.38 | 0.28 | 6.32 | 0.50 |

处理1~12见表5注。

3 讨论

由于水葫芦消减水体氮磷能力受诸多因素影响,不同条件下,水体氮磷去除效果不同。本试验结果表明,水葫芦覆盖度、初始放养量和水体富营养化程度等因素对水葫芦消减水体中氮磷效果有较大影响。严国安等^[20]研究表明,光照、温度等环境因子对水葫芦吸收富营养化水体中营养物质有很大的影响,光照强、温度高能大大提高水葫芦的光合作用、呼吸作用、蒸腾作用及根的吸收作用等,从而促进水葫芦对营养物质的吸收。本试验中,在水葫芦生物量和水体氮磷浓度相同情况下,水葫芦植株对水体中氮、磷吸收总量均随覆盖度的升高而升高,分别为6.51~14.11 g/m²和0.95~1.74 g/m²。陈玲玲等^[8]研究表明,在相同环境下水葫芦初始密度越大,净增长量越大。而水葫芦对氮、磷的吸收总量与生物量间有较好的正相关性^[13,21-22]。本试验中,水葫芦植株对水体中氮、磷吸收总量均随初始放养量的增加而增加,分别为5.55~12.46 g/m²和0.79~1.30 g/m²。许多研究表明,水葫芦生长速率很大程度上受水体氮、磷浓度的影响,在一定浓度范围内生长速率随水体中氮、磷浓度的升高而加

快^[13,20,23],且水葫芦的氮、磷含量均随水体氮、磷初始浓度的升高而增加^[22]。本研究中,水葫芦在4种富营养化水体中的氮、磷吸收总量随水体富营养化程度的加深而升高,分别为4.21~30.47 g/m²和0.44~4.39 g/m²。

童昌华等^[24]研究了水生植物(水葫芦与狐尾藻)控制湖泊底泥释放的效果与机理,认为水生植物的生长明显抑制了底泥中的氮、磷释放,尤其是沉水植物狐尾藻直接与底泥接触,不仅能吸收从底泥释放到水中的营养盐,还能直接吸收底泥中的营养,抑制作用更加明显。杨荣敏等^[25]研究了大型水生植物(芦苇、苦草与茭白)对太湖底泥磷释放的影响,认为水生植物对底泥磷释放有抑制作用。本试验结果证明漂浮植物水葫芦不仅吸收了上覆水中的氮、磷,还促进了底泥间隙水中氮、磷向上覆水的释放,在生长期能有效消减和控制上覆水中全氮、全磷的浓度,对控制内源污染有一定意义。

据江苏省农业科学院2007年9月6日至11月6日进行的水葫芦生长试验,水葫芦平均日生长量为4.95 t/hm²。太湖流域水葫芦生长期一般为4月25日至11月15日,生长期达200 d,以此推算,水葫芦鲜重可达990 t/hm²,干物质64.95 t/hm²。依

据江苏省农业科学院2007年对太湖流域5个不同观测点采样分析,水葫芦植株干物质中氮、磷、钾的平均含量分别为3.07%、0.46%、5.70%。由此推算,放养1 hm²水葫芦可分别吸收氮、磷、钾1 995 kg、299 kg、3 705 kg^[26],云南滇池放养试验也获得了几乎相同的结果^[27]。本试验结果也表明,水葫芦最高可吸收水体中氮、磷30.47 g/m²、4.39 g/m²。

参考文献:

- [1] 张艳艳. 实论太湖富营养化的发展、现状及治理[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(5): 126-129.
- [2] 胡正峰, 张磊, 邱勤, 等. 温度条件对澎溪河藻类生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2010(2): 384-386.
- [3] 高世荣等. 利用水生生物评价水质及环境污染[J]. 中国环境卫生, 2005, 8(2): 1-8.
- [4] 薛连海. 建立科学的水体评价方法保障生态环境的可持续发展[J]. 中国环境管理, 2001(6): 31-32.
- [5] MALIK A. Environmental challenge vis a vis opportunity: The case of water hyacinth [J]. Environment International, 2007, 33: 122-138.
- [6] TCHOBANOGLOUS G, MAITSKI F K, THOMSON K, et al. Evolution and performance of city of San Diego pilot scale aquatic waste water treatment system using water hyacinth [J]. JWPCF, 1989, 61: 11-12.
- [7] 鲁如坤. 土壤农化分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [8] 陈玲玲, 林振山, 濮培民, 等. 重富营养化水体内水葫芦生长特性的研究[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(8): 1390-1392.
- [9] FRANKOWSKI L, BOLALEK J, SZOSTCK A. Phosphorus in bottom sediments of Pomeranian bay (Southern Baltic-Poland) Estuarine [J]. Coastal and Shelf Science, 2002, 54(6): 1027-1038.
- [10] 周劲风, 温琰茂, 李耀初. 养殖池塘底泥水界面营养盐扩散的室内模拟研究 I. 氮的扩散[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 786-791.
- [11] 周劲风, 温琰茂, 李耀初. 养殖池塘底泥水界面营养盐扩散的室内模拟研究 II. 磷的扩散[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 792-796.
- [12] 李卫国, 建波. 光照和氮素对外来植物水葫芦生长和生理特性的影响[J]. 武汉大学学报: 理学版, 2007, 53(4): 457-462.
- [13] 张志勇, 郑建初, 刘海琴, 等. 水葫芦对不同程度富营养化水体氮磷的去除贡献研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 152-157.
- [14] RYDNI F, BURNBEGR A. Seasonal dynamics of phosphorus in lake Erken surface sediment [J]. Arch Hydrobiology Spec Issues Advance Limnos, 1998, 51: 167-167.
- [15] 曲久辉. 我国水体复合污染与控制[J]. 科学对社会的影响, 2000(1): 36-40.
- [16] 余源盛. 太湖底质与湖泊富营养化关系[C]//中国科学院地理与湖泊研究所. 中国科学院地理与湖泊研究所集刊(第九号). 北京: 科学出版社, 1993: 48-62.
- [17] 高光. 水-沉积物界面氮、磷迁移转化研究[D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 1993.
- [18] GARBER K J, HARTMAN R T. Internal phosphorus loading to shallow Edinbro Lake in northwestern Pennsylvania [J]. Hydrobiologia, 1985, 122(1): 45-52.
- [19] LAMBERTUS L. Phosphorus accumulation in sediment and internal loading [J]. Hydrobiologia Bull, 1986, 20(1-2): 213-214.
- [20] 严国安, 任南, 李益健. 环境因素对水葫芦生长及净化作用的影响[J]. 环境科学与技术, 1994(1): 2-5, 27.
- [21] 蒋跃平, 葛滢, 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.
- [22] DEBUSK T A, PETERSON J E, REDDY K R. Use of aquatic and terrestrial plants for removing phosphorus from dairy wastewaters [J]. Ecological Engineering, 1995, 5: 371-390.
- [23] 张雁秋. 水葫芦的容量对净化、利用的影响[J]. 农村生态环境, 1989(1): 40-43.
- [24] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 水生植物控制湖泊底泥营养盐释放的效果与机理[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 673-676.
- [25] 杨荣敏, 李宽意, 王传海, 等. 大型水生植物对太湖底泥磷释放的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊): 274-278.
- [26] 常志州, 郑建初. 水葫芦放养的生态风险及控制对策[J]. 江苏农业科学, 2008(3): 251-253.
- [27] 杨绘. 水葫芦对滇池富营养化水体中氮磷的吸收性能研究[D]. 昆明: 云南大学, 2007.

(责任编辑: 汪恒英)