

# 水体苯胺、N 和 P 生物修复研究

王忠全<sup>1,2</sup>, 温琰茂<sup>1</sup>

(1.中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275; 2.电子科技大学中山学院, 广东 中山 528402)

**摘要:** 利用水培试验研究了 6 种常见适于水栽植物和 EM 菌在处理含苯胺、N、P 废水的效果。结果表明对水体苯胺修复效率为 50.7%~97.3%。植物对苯胺、N、P 的修复能力因植物不同而异。植物修复苯胺的能力排序为蕹菜>水葫芦>水浮莲>美人蕉>水花生>香蒲, 而植物修复 N 的能力排序为水花生>水葫芦>蕹菜>香蒲>美人蕉>水浮莲。美人蕉和蕹菜对 P 修复能力高于其他植物。抗生素抑菌试验表明, 水体中原有微生物在苯胺修复中起了显著作用。EM 菌的加入增加对水体 N 的去除能力。EM 菌对水体 P 修复无直接作用, EM 菌促进水浮莲和水葫芦吸收 P。

**关键词:** 水栽植物; 苯胺; N; P; EM 菌

**中图分类号:** X52    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-2043(2009)03-0570-05

## The Removal of Aniline, Nitrate and Phosphate Driven by 6 Kinds of Aquaculture Plants

WANG Zhong-quan<sup>1,2</sup>, WEN Yan-mao<sup>1</sup>

(1.School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2.Zhongshan Institute, University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan 528402, China)

**Abstract:** The removal of aniline, nitrate and phosphate driven by 6 kinds of aquaculture plants and effective microorganisms was investigated by means of pot hydroponics. The results showed that the contribution for the removal of aniline was up to 50.7%~97.3%. The removal of aniline, nitrate and phosphate significantly depended on different plants. The ability of 6 plants for the removal of aniline followed the order as *Ipbmoea aqualica*>*Eichhornia crassipes*>*Pistia stratiotes*>*Canna india*>*Alternanthera philoxeroides*>*Typha latifolia*, while that for nitrate removal followed the order as *Alternanthera philoxeroides*>*Eichhornia crassipes*>*Ipbmoea aqualica*>*Typha latifolia*>*Canna india*>*Pistia stratiotes*. The ability of *Canna india* and *Ipbmoea aqualica* for phosphate removal was higher than that of other plants. The results of antibiotic test showed that native rhizosphere microorganism played very important role in aniline removal. Effective microorganisms could significantly enhance the removal of nitrate. Effective microorganisms could enhance phosphorus removal by *Pistia stratiotes* and *Eichhornia crassipes*.

**Keywords:** aquaculture plant; aniline; nitrogen; phosphorus; effective microorganisms

苯胺是水体的优先控制污染物,是严重污染环境 and 危害人体健康的有害物质,可导致溶血性贫血,中毒性肝炎和致癌(如膀胱癌等)。苯胺是广泛应用的化工原料,主要用于印染、塑料、农药和医药工业等。苯胺废水处理可用吸附、催化降解、微生物处理等。植物修复废水成本低,无次生污染,适合于原位修复。植物对有机污染物修复多数报道为同一植物对不同污染物作用研究,不同植物对有机污染物修复能力差异比较研究报道较少<sup>[1-5]</sup>,且已有研究基本集中在农药

修复。不同植物对水体苯胺修复能力差异及影响因素的研究难见到报道,值得研究。

人工湿地对 N、P 的修复能力强,不同植物对 N、P 修复能力比较研究不多。EM(effective microorganisms)菌液可用于水体 N、P 修复<sup>[6]</sup>,EM 菌与植物间有无交互作用,交互作用对水体有机污染物、N 和 P 修复有何影响,难见到报道。

## 1 材料与方法

修复试验在夏天于温室中采用  $\phi$  20 cm、h 21 cm 塑料桶,盛装 5 L 混入 30 mg·L<sup>-1</sup> 苯胺自来水栽培植物处理 72 h 进行模拟。所有试验中植物处理为:无植物,水葫芦(*Eichhornia crassipes*),水花生(*Alternanthera philoxeroides*),美人蕉(*Canna india*),水浮莲(*Pis-*

收稿日期:2008-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目(40071074);中山市科技计划项目(2005A154)

作者简介:王忠全(1972—),男,博士生,副教授,主要从事水土环境污染修复研究。E-mail:wzq2008@21cn.com

*tia stratiotes*), 薤菜(*Ipbmoea aqualica*), 香蒲(*Typha latifolia*), 植物均采用已在水中生长半个月以上 100 g 均匀一致的材料。

### 1.1 不同植物及根际微生物对水体苯胺修复影响

试验采用随机区组设计, 两因素分别为植物处理和抑菌处理。抑菌处理的水平有: 抑菌和对照。采用  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  氨苄青霉素抑制微生物生长<sup>[2]</sup>, 以不加氨苄青霉素为对照。重复 3 次。处理 72 h 测定水体苯胺剩余量, 苯胺测定方法参照 GB 11889—89 采用 N-(1-萘基)乙二胺偶氮分光光度法<sup>[7]</sup>。处理 5 d 后对 3 个重复植株取样混合, 按 1:1 加入蒸馏水, 匀浆取滤液,  $1\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  离心 15 min, 取上清液, 参照 GB 11889—89 测定植物体残余苯胺含量。

### 1.2 EM 菌与植物对水体苯胺、N、P 联合修复

EM 菌液, 日本株式会社 EM 研究机构驻福建诏安办事处生产, 是从自然界筛选出各种有益微生物用特定的方法混合培养所形成的微生物复合体系, 其微生物组合以光合细菌、放线菌、酵母菌和乳酸菌为主。EM 菌液加入量为 1%。

#### 1.2.1 EM 菌、抑菌、蔗糖对水体苯胺的植物修复影响

试验采用两因素随机区组设计, 两因素分别为植物处理和外部因素处理。外部因素处理设  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  氨苄青霉素(抑菌)、1%EM 菌液、 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  蔗糖 3 个水平。其中蔗糖处理模拟 COD 的影响。

#### 1.2.2 EM 菌对水体 N、P 的植物修复影响

试验采用随机区组设计, 两因素分别为植物处理和菌液处理。菌液处理设对照和加 1%EM 菌两个水平, 重复 3 次。试验采用 1/4 剂量霍格兰营养液作为模拟水体, 即配方为  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$   $236.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{KNO}_3$   $151.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$   $28.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $123.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{FeNa}_2\text{EDTA}$   $3.276 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{H}_3\text{BO}_3$   $0.286$

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$   $0.213 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $0.022 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$   $0.008 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$   $0.002 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。处理结束后测定水体中剩余的溶解态 N、P 的量。N 测定方法为水过滤后稀释 25 倍采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法。P 测定方法为水过滤后稀释 20 倍钼蓝比色法。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植物及根际微生物对水体苯胺修复影响

含  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  苯胺模拟水体在植物处理及抑菌处理试验 72 h 后, 各小区剩余苯胺质量分数结果如表 1。

随机区组设计方差分析表明抑菌处理 ( $F=18.81^{**}$ ) 及植物处理 ( $F=32.34^{**}$ ) 均极显著影响苯胺修复效果, 而两者的交互作用 ( $F=1.32$ ) 对苯胺修复无显著影响。由于抑菌处理只有抑菌和对照两个水平, 即抑菌(苯胺剩余平均  $10.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 修复效果极显著低于对照(苯胺剩余平均  $6.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 即氨苄青霉素抑制了水中原有微生物的降解作用。

由于对应抑菌处理修复效果均低于对照, 因此分析抑菌条件下植物处理效果意义不大, 只分析对照(不抑菌)条件下差异, 采用单因素方差分析方法, 结果得到对照中植物处理对苯胺修复能力有极显著差异 ( $F=35.45^{**}$ )。平均数多重比较结果如表 1。与无植物比较, 各种植物对苯胺均有极显著的修复作用。6 种植物之间修复能力也存在极显著差异, 其中薤菜、水葫芦、水浮莲显著好于美人蕉、水花生、香蒲。修复能力可能与植物生长快慢有关。

从修复机理上看, 抑菌无植物处理苯胺剩余平均值比原处理量减少  $7.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (占 26.40%), 由于苯胺易挥发, 抑菌条件下的减少主要原因为挥发或光

表 1 不同植物及根际微生物对水体苯胺修复影响( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )

Table 1 The removal of aniline driven by 6 kinds of plants and their rhizosphere microorganisms( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )

|                | 无植物     | 水葫芦     | 水花生    | 美人蕉      | 水浮莲      | 薤菜     | 香蒲     | 平均    |
|----------------|---------|---------|--------|----------|----------|--------|--------|-------|
| 对照             | 16.98   | 0.72    | 8.39   | 5.35     | 2.62     | 0.78   | 6.89   | 6.86  |
|                | 24.56   | 1.23    | 7.64   | 4.42     | 4.05     | 0.24   | 10.68  |       |
|                | 18.25   | 0.48    | 10.56  | 7.56     | 2.06     | 1.38   | 9.32   |       |
| 处理平均           | 19.93Aa | 0.81CDd | 8.86Bb | 5.78BCbc | 2.91CDcd | 0.80Dd | 8.96Bb |       |
| 抑菌             | 17.59   | 1.96    | 19.92  | 14.45    | 6.53     | 3.32   | 9.36   | 10.79 |
|                | 20.66   | 1.26    | 16.66  | 10.24    | 7.02     | 4.47   | 12.28  |       |
|                | 27.98   | 0.84    | 7.82   | 19.06    | 8.86     | 2.94   | 13.45  |       |
| 处理平均           | 22.08   | 1.35    | 14.80  | 14.58    | 7.47     | 3.58   | 11.70  |       |
| 对照 5 d 植株苯胺剩余量 |         | 0.10    | 0.11   | 0.08     | 0.11     | 0.09   | 0.10   |       |

注: 平均数后字母为新复极差法多重比较结果, 以下各表同。

解。对照无植物处理比抑菌无植物处理多去除  $2.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 即原有微生物修复占 7.17%。在不抑菌处理(对照)中有植物处理比无植物处理多去除苯胺  $10.97 \sim 19.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 即植物起的作用占 36.57%~63.77%。通过测定表明对照 5 d 后处理植株体苯胺剩余量少,推算剩余量低于处理量的 0.04%,即苯胺不会在植物体内长期残留,已通过植物挥发、植物降解或植物固定去除。

## 2.2 EM 菌与植物对水体苯胺、N、P 联合修复

### 2.2.1 EM 菌等外部条件对水体苯胺的植物修复影响

模拟研究外部条件:抑菌、加 EM 菌、加蔗糖对植物修复水体苯胺的影响,试验结果剩余苯胺数据如表 2。

方差分析结果表明不同植物对苯胺修复效果有极显著差异( $F=16.93^{**}$ ),且对照处理系列数据与前一试验相近。

外部条件处理显著影响植物对水体苯胺的修复( $F=3.61^{*}$ ),多重比较如表 2。抑菌降低苯胺修复能力,与前一试验结果相似。EM 菌处理虽然降低苯胺修复效果,但是与对照比较未达到显著水平。蔗糖(COD)也抑制水体苯胺的植物修复。

### 2.2.2 EM 菌对水体 N 的植物修复影响

1/4 剂量霍格兰营养液含  $232.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NO}_3^{-}$ , 7.55

表 2 抑菌、EM 菌与蔗糖对植物修复水体苯胺影响( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )  
Table 2 The effect of disinfect, EM and sugar on the removal of aniline driven by 6 kinds of plants( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )

|     | 对照    | 抑菌     | EM 菌   | 蔗糖     | 平均        |
|-----|-------|--------|--------|--------|-----------|
| 无植物 | 20.60 | 20.02  | 22.00  | 20.51  | 20.78Aa   |
| 水葫芦 | 0.42  | 0.79   | 1.50   | 1.07   | 0.95De    |
| 水花生 | 7.37  | 18.92  | 15.67  | 17.95  | 14.98Bb   |
| 美人蕉 | 6.34  | 13.82  | 4.92   | 12.47  | 9.39BCc   |
| 水浮莲 | 2.50  | 4.13   | 0.85   | 2.71   | 2.55Cdde  |
| 薹菜  | 0.36  | 2.35   | 9.05   | 15.67  | 6.86CDcd  |
| 香蒲  | 10.90 | 21.86  | 13.18  | 19.02  | 16.24ABab |
| 平均  | 6.93b | 11.70a | 9.60ab | 12.77a |           |

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ P}$ 。经测定试验中 EM 菌加入的同时带入  $10.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NO}_3^{-}$  和  $1.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ P}$ 。不同植物及 EM 菌处理后,水体剩余溶解态  $\text{NO}_3^{-}$  质量分数如表 3。随机区组设计方差分析表明,不同植物对 N 修复能力存在极显著差异( $F=29.19^{**}$ )。采用交互作用对平均数进行多重比较如表 3。修复效果水花生>水葫芦>薹菜>香蒲>美人蕉>水浮莲>无植物。其中水浮莲、水花生修复效果不显著,其他植物处理效果显著或极显著。EM 菌极显著提高水体中 N 的修复( $F=729.17^{**}$ ),EM 菌处理剩余  $\text{NO}_3^{-}$  平均值为  $41.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,而对照为  $168.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,大幅度减少,原因为 EM 菌中含有反硝化细菌可以还原脱氮,另外也可能有一部分 N 形成了微生物菌体。加菌处理与植物处理交互作用极显著影响水体 N 的修复( $F=17.75^{**}$ )。美人蕉加 EM 菌处理及水花生加 EM 菌处理对水体 N 的修复效果最好。

### 2.2.3 EM 菌对水体 P 的植物修复影响

EM 菌对水体 P 植物修复效果表达为水体剩余 P 质量分数如表 4。

方差分析显示加菌处理( $F=8.75^{**}$ )、植物处理( $F=8.09^{**}$ )和它们的交互作用( $F=7.14^{**}$ )均对水体 P 修复有极显著作用。采用交互作用进行平均数多重比较如表 4。植物能降低水体 P 含量,只有美人蕉对水体 P 修复效果显著好于其他植物处理,薹菜好于无植物处理,剩余处理间无显著差异,效果均未达到显著。植物加 1%EM 菌处理极显著增加水体 P 剩余量,这部分 P 主要是来自于 EM 菌原液。在所有处理中水葫芦加 EM 菌或美人蕉不加 EM 菌对水体 P 修复效果最好,显著好于其他处理。

## 3 讨论

### 3.1 不同植物及根际微生物对水体苯胺修复影响

本研究植物对水体苯胺修复起的作用占 36.57%~63.77%。夏会龙等报道水葫芦清除水中马拉硫磷起

表 3 EM 菌对水体  $\text{NO}_3^{-}$  的植物修复影响( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )

Table 3 The effect of EM on the removal of nitrate driven by 6 kinds of plants( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )

|        | 无植物       | 水葫芦       | 水花生       | 美人蕉        | 水浮莲        | 薹菜         | 香蒲         | 平均     |
|--------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|--------|
| 对照     | 225.1     | 180.6     | 56.3      | 201.9      | 214.1      | 175.2      | 189.5      | 168.60 |
|        | 229.3     | 139.6     | 43.9      | 179.6      | 213.7      | 164.3      | 186.4      |        |
|        | 218.7     | 127.4     | 51.5      | 212.3      | 201.1      | 153.8      | 176.2      |        |
| 处理平均   | 224.37Aa  | 149.20Cd  | 50.57DEef | 197.93ABab | 209.63ABab | 164.43BCcd | 184.03BCbc |        |
| 加 EM 菌 | 56.3      | 61.1      | 18.4      | 14.4       | 83.1       | 76.2       | 36.8       | 41.20  |
|        | 37.2      | 14.6      | 24.6      | 16.4       | 59.3       | 16.8       | 52.3       |        |
|        | 41.5      | 57.7      | 28.4      | 19         | 63.9       | 38.6       | 48.6       |        |
| 处理平均   | 45.00DEef | 44.47DEef | 23.80Efg  | 16.60Eg    | 68.77De    | 43.87DEef  | 45.90DEef  |        |

表 4 EM 菌对水体 P 植物修复的影响( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )  
Table 4 The effect of EM on the removal of P driven by 6 kinds of plants( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )

|        | 无植物       | 水葫芦       | 水花生       | 美人蕉        | 水浮莲        | 蕹菜        | 香蒲        | 平均   |
|--------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|------|
| 对照     | 5.87      | 5.57      | 5.32      | 2.22       | 5.87       | 3.28      | 4.77      | 5.01 |
|        | 6.06      | 5.32      | 4.56      | 3.66       | 6.24       | 4.89      | 4.62      |      |
|        | 7.92      | 6.16      | 6.24      | 2.42       | 5.62       | 5.36      | 6.32      |      |
| 处理平均   | 6.61ABCbc | 5.68BCbed | 5.37BCDcd | 2.77DEef   | 5.91BCbed  | 4.51CDEde | 5.24BCDcd |      |
| 加 EM 菌 | 8.34      | 2.03      | 7.76      | 7.64       | 4.53       | 6.02      | 7.68      | 6.16 |
|        | 8.65      | 3.21      | 6.96      | 3.26       | 4.38       | 4.56      | 6.35      |      |
|        | 9.48      | 1.98      | 8.04      | 8.64       | 5.96       | 5.27      | 8.56      |      |
| 处理平均   | 8.82Aa    | 2.41Ef    | 7.59ABab  | 6.51ABCbed | 4.96BCDEcd | 5.28BCDcd | 7.53ABab  |      |

了 9% 的作用<sup>[3]</sup>, 水葫芦清除水中甲基对硫磷植物贡献率为 67.28%, 微生物降解占 23.97%<sup>[2]</sup>, 本试验水葫芦和蕹菜所起的作用接近于前述报道水葫芦修复甲基对硫磷的结果。水葫芦对苯胺的修复能力也与刘建武等<sup>[8]</sup>报道水葫芦对苯胺的净化率相近。本试验去除效果变化范围也与傅以刚等<sup>[1]</sup>报道 3 种植物对水中乐果去除率 36.9%~59.8% 相近, 降解速率也与凌婉婷等<sup>[5]</sup>报道的毛茛对水中多环芳烃的降解半衰期为 58.7 h 相近。本试验处理 5 d 后植物体苯胺残留很少, 表明苯胺通过植物挥发、植物降解或植物固定去除, 由于苯胺易挥发, 估计植物挥发占主要作用<sup>[9]</sup>, 三者所占的具体比例, 待进一步研究。

氨苄青霉素抑制了水中原有微生物对苯胺的降解作用, 与夏会龙等<sup>[2-3]</sup>报道结果类似。本试验微生物作用接近于前述报道<sup>[3]</sup>水葫芦修复马拉硫磷的结果。Wang 等<sup>[10]</sup>也报道了微生物能降解苯胺, 分离出一株假单胞菌 PN1001, 能降解 89% 的苯胺。

## 3.2 EM 菌与植物对水体苯胺、N、P 联合修复

### 3.2.1 EM 菌对水体苯胺的植物修复影响

本研究结果 EM 菌处理虽然降低苯胺修复效果, 但是与对照比较未达到显著水平, 说明苯胺修复微生物为特定微生物, EM 菌液对苯胺的修复能力很差或无效果。降低苯胺修复可能原因为 EM 菌抑制原有微生物中降解苯胺微生物活性, 水花生、香蒲处理中可能存在这方面的原因。COD(蔗糖)处理显著降低苯胺修复能力, 原因可能为 COD 降低水体溶解氧, 抑制好氧菌对苯胺的降解或降解苯胺微生物以蔗糖作为替代碳源而不利用苯胺, 或者蔗糖的加入阻碍了苯胺被植物吸收, 蕹菜处理中可能在此方面原因。然而修复效率高的水葫芦、水浮莲影响较小, 可能这两者与水体接触面积大, 主要靠苯胺吸入植物体内, 且不象其他植物根系分布于整个水层使根上微生物易受 COD 影响。

### 3.2.2 EM 菌对水体 N 的植物修复影响

不同植物对水体 N 修复效果不同, 且与植物生长速度好像关系不大, 原因可能是植物体营养元素含量不同<sup>[11]</sup>。这种结果与以往报道类似, 如袁东海等<sup>[12]</sup>报道模拟人工湿地总 N 去除率石菖蒲>灯心草>蝴蝶花>无植物。Zhang 等<sup>[13]</sup>报道了观赏植物中黄花鸢尾和石菖蒲对包括 N 和 P 在内的复合污染城市废水处理效果好。朱夕珍等<sup>[14]</sup>报道模拟人工湿地总 N 去除能力水葫芦>万寿菊>剑兰>美人蕉>花叶芋, 其中水葫芦好于美人蕉的结果与本试验相同。本试验水葫芦对 N 的修复效率也与 Hu 等<sup>[15]</sup>报道的低值(41.5%)相近。

李雪梅等<sup>[6]</sup>使用 EM 菌浓度为  $187 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  修复水体 1 个月后 N 下降 60.2%, EM 菌能显著修复水体 N 污染与本试验结果一致, 不同之处为本研究 EM 菌使用浓度高, 对应 N 去除能力强。

### 3.2.3 EM 菌对水体 P 的植物修复影响

本试验结果植物对 P 去除能力有差异, 与以往报道类似。Fraser 等<sup>[16]</sup>也报道 4 种湿地植物(水葱、苔草、草芦和香蒲)在表面流湿地微宇宙中单独栽培, 使用低水平营养物( $\text{N } 56 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $\text{P } 31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )或高水平营养物( $\text{N } 112 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $\text{P } 62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 也证实栽培植物有利于渗漏液 N、P 的去除, 其中水葱和草芦分别为最好和最差。王超等<sup>[17]</sup>报道对水体 P 去除率水葫芦>黄花水龙>水花生, 水葫芦与水花生去除效果排序与本试验相同。不过本试验植物对 P 去除能力与 EM 菌交互作用明显, 应以交互作用效应比较选择最佳植物与 EM 菌组合。

李雪梅等<sup>[6]</sup>采用  $187 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  EM 菌处理水体间隔 15 d 测定水体中 P 持续下降, 1 月降幅达 58.1%, 与本试验结果不同, 可能与溶氧条件、植物处理、处理时间及加入 EM 菌原液多少有关。程晓如等<sup>[18]</sup>报道在 SBR 试验中, 好氧阶段 EM 菌可增加 P 去除量, 厌氧阶段微生物释放出 P。因此在栽培植物时, 由于植物

根系利用而降低水体中氧可能使 EM 菌中 P 释放出来。朱夕珍等<sup>[14]</sup>报道,植物可以把体内 P 分泌到人工湿地中,也可能在 EM 菌存在条件下溶氧降低,导致植物根系无能量维持膜的透性,而使更多 P 分泌出来。这与 Adler 等<sup>[19]</sup>报道的生菜在浅层营养液中(好氧条件下)能使稀营养液中 P 浓度由  $0.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  降低至小于  $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的结果不同。

## 4 结论

(1)供试植物均极显著提高水体苯胺修复,修复能力薹菜>水葫芦>水浮莲>美人蕉>水花生>香蒲。

(2)植物修复水体 N 效果水花生>水葫芦>薹菜>香蒲>美人蕉>水浮莲>无植物。EM 菌对水体 N 有很好的修复能力。

(3)供试植物只有美人蕉、薹菜显著提高水体 P 修复效果,EM 菌加入平均提高水体剩余 P 水平,EM 菌与植物对水体 P 修复有极显著的交互作用。

## 参考文献:

- [1] 傅以钢, 黄 亚, 张亚雷, 等. 3 种水生植物对水溶液中乐果的降解作用研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 90-94.  
FU Y G, HUANG Y, ZHANG Y L, et al. Effects of three aquatic plants on the degradation of dimethoate in water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1): 90-94.
- [2] 夏会龙, 吴良欢, 陶勤南. 凤眼莲植物修复水溶液中甲基对硫磷的效果机理研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(3): 329-332.  
XIA H L, WU L H, TAO Q N. Phytoremediation of methyl parathion by water hyacinth (*Eichhornia crassipes* Solms) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(3): 329-332.
- [3] 夏会龙, 吴良欢, 陶勤南. 凤眼莲加速水溶液中马拉硫磷降解[J]. 中国环境科学, 2001, 21(6): 553-555  
XIA H L, WU L H, TAO Q N. Water hyacinth accelerating the degradation of malathion in aqueous solution [J]. *China Environmental Science*, 2001, 21(6): 553-555.
- [4] 夏会龙, 吴良欢, 陶勤南. 凤眼莲植物修复几种农药的效应[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2002, 28(2): 165-168.  
XIA H L, WU L H, TAO Q N. Phytoremediation of some pesticides by water hyacinth (*Eichhornia crassipes* Solms) [J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2002, 28(2): 165-168.
- [5] 凌婉婷, 任丽丽, 高彦征, 等. 毛茛对富营养化水中多环芳烃的修复作用及机理[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5): 1884-1888.  
LING W T, REN L L, GAO Y Z, et al. Phytoremediation of PAHs in eutrophic water by *Ranunculus japonicus* Thunb [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5): 1884-1888.
- [6] 李雪梅, 杨中艺, 简曙光, 等. 有效微生物群控制富营养化湖泊蓝藻的效应[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000, 39(1): 81-85.  
LI X M, YANG Z Y, JIAN S G, et al. Control of algae bloom in eutrophic water by effective microorganisms [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2000, 39(1): 81-85.
- [7] GB11889-89, 水质苯胺类化合物的测定 N-(1-萘基)乙二胺偶氮分光光度法[S].  
GB11889-89 Water quality determination of aniline compounds-spectrophotometric method with N-(1-naphthyl)ethylenediamine[S].
- [8] 刘建武, 林逢凯, 王 郁, 等. 水葫芦对萘的降解作用研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(6): 19-23.  
LIU J W, LIN F K, WANG Y, et al. Study on degradation of naphthalene by *Eichhornia crassipes* solms [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(6): 19-23.
- [9] Burken J G, Schnoor J L. Predictive relationships of uptake of organic contaminants by hybrid poplar trees [J]. *Environmental Science and Technology*, 1998(32): 3379-3385.
- [10] Wang L, Barrington S, Kim J W. Biodegradation of pentyl amine and aniline from petrochemical wastewater [J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 83(2): 191-197.
- [11] 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.  
JIANG Y P, GE Y, YUE C L, et al. Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1718-1723.
- [12] 袁东海, 任全进, 高士祥, 等. 几种湿地植物净化生活污水 COD、总氮效果比较[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2337-2341.  
YUANG D H, REN Q J, GAO S X, et al. Purification efficiency of several wetland macrophytes on COD and nitrogen removal from domestic sewage [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(12): 2337-2341.
- [13] Zhang X B, Liu P, Yang Y S, et al. Phytoremediation of urban wastewater by model wetlands with ornamental hydrophytes [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(8): 902-909.
- [14] 朱夕珍, 肖 乡, 刘 怡, 等. 植物在城市生活污水人工土快滤处理床的作用[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 582-584.  
ZHU X Z, XIAO X, LIU Y, et al. Role of plants in a rapid infiltration filter made of artificial soil for treating municipal sewage [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5): 582-584.
- [15] Hu M H, Ao Y S, Yang X E, et al. Treating eutrophic water for nutrient reduction using an aquatic macrophyte (*Ipomoea aquatica* Forsskal) in a deep flow technique system [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(5): 607-615.
- [16] Fraser L H, Carty S M, Steer D. A test of four plant species to reduce total nitrogen and total phosphorus from soil leachate in subsurface wetland microcosms [J]. *Chemosphere*, 2003, 52(9): 1553-1558.
- [17] 王 超, 张文明, 王沛芳, 等. 黄花水龙对富营养化水体中氮磷去除效果的研究[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 975-981.  
WANG C, ZHANG W M, WANG P F, et al. Removal of nitrogen and phosphorus in eutrophic water by *Jussiaea stipulacea* Ohwi [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(5): 975-981.
- [18] 程晓如, 陈永祥, 孙迎霞. EM 菌强化 SBR 脱氮除磷的试验研究[J]. 重庆环境科学, 2002, 24(5): 55-57.  
CHENG X R, CHEN Y X, SUN Y X. Experimental research on effect of effective microorganisms enhancing the removal of TP and N in SBR process [J]. *Chongqing Environmental Science*, 2002, 24(5): 55-57.
- [19] Adler P R, Summerfelt S T, D Glenn M, et al. Mechanistic approach to phytoremediation of water [J]. *Ecological Engineering*, 2003, 20(3): 251-264.