

张瑞斌. 不同水生植物对污水处理厂尾水的生态净化效果分析[J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(6): 504-508.

ZHANG R B. Ecological purification efficiency of several aquatic plants on tail water of sewage treatment plant[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2015, 5(6): 504-508.

# 不同水生植物对污水处理厂尾水的生态净化效果分析

张瑞斌<sup>1,2</sup>

1. 江苏龙腾工程设计有限公司, 江苏 宜兴 214206

2. 南京大学环境学院, 江苏 南京 210023

**摘 要:**通过构建小型水生生态系统,研究了旱伞草、美人蕉、伊乐藻、金鱼藻 4 种水生植物对太湖流域污水处理厂尾水中氮、磷等指标去除效能的差异。结果表明,4 种水生植物对污水中的氮、磷等均有明显的去除效果,其中,挺水植物旱伞草和沉水植物金鱼藻的综合净化效能较强,综合净化能力从强到弱依次为金鱼藻、旱伞草、伊乐藻、美人蕉。

**关键词:**水生植物;污水处理厂;尾水;生态净化;效果

中图分类号: X522 文章编号: 1674-991X(2015)06-0504-05 doi: 10.3969/j.issn.1674-991X.2015.06.079

## Ecological Purification Efficiency of Several Aquatic Plants on Tail Water of Sewage Treatment Plant

ZHANG Rui-bin<sup>1,2</sup>

1. Jiangsu Long-leaping Engineering Design Co., Ltd., Yixing 214206, China

2. School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China

**Abstract:** Based on building the small aquatic ecosystem, the removal efficiency of nitrogen and phosphorus in sewage treatment plant tail water of Taihu Lake Basin by *Cyperus alternifolius*, *Canna indica*, *Elodea Canadensis Michx.* and *Ceratophyllum demersum L.* was studied. The results showed that these four plants had good removal efficiency for nitrogen and phosphorus in wastewater. The comprehensive purification ability of emerged plants *Cyperus alternifolius* and submerged plants *Ceratophyllum demersum L.* was higher than that of the others. The order of comprehensive purification ability from strong to weak was *Ceratophyllum demersum L.*, *Cyperus alternifolius*, *Elodea Canadensis Michx.*, *Canna indica*.

**Key words:** aquatic plants; sewage treatment plant; tail water; ecological purification; efficiency

随着水污染的加剧,高效低耗的水污染处理技术日益受到人们的重视,水生植物以其特有的组织和生态功能及易于人工操纵等原因而在净化水体污染、防治富营养化方面发挥了重要作用<sup>[1-2]</sup>。利用水生植物净化污水的工作国内外已有大量报道<sup>[2-5]</sup>,但以往的研究主要针对挺水植物或挺水条件下进行,对沉水植物或沉水条件下净化污染物的

研究较少,且多数研究主要集中于湖泊与河道水体,对污水处理厂尾水的研究报道不多<sup>[6-11]</sup>。笔者以太湖流域官林镇污水处理厂尾水为对象,以在现场构建的小型水生生态系统为试验平台,研究了 4 种水生植物对氮、磷等水质指标的去除效能,以期以太湖流域生态处理技术优化提供基础,为污染防治与生态修复工程的实施提供技术支持。

收稿日期: 2015-07-14

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20140603);中央高校基本科研业务费专项资金资助(20620140486);太湖西岸(宜兴地区)水环境综合治理规划研究(太湖流域水环境综合治理专项)

作者简介: 张瑞斌(1985—),男,工程师,博士,主要从事水处理工程设计及水体污染治理方面的研究, zhangrb88@126.com

## 1 研究方法

### 1.1 试验地点

试验在太湖流域官林镇污水处理厂尾水出水河道岸边的实验基地开展。官林镇污水处理厂位于江苏省宜兴市官林镇积梅河北侧工业区,污水处理厂服务范围包括宜兴市官林镇镇区和官林镇工业园共 10.88 km<sup>2</sup> 范围内的企事业单位及居民区。污水处理厂设计规模为 1 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,主要采用循环式活性污泥(cyclic activated sludge system, CASS)工艺。出水水质达到 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准,尾水经 300 m 出水河道流入溇湖支流积梅河,该河按照地面水水域的功能类别划分为Ⅳ类水体。

### 1.2 试验材料

试验用植物从太湖流域及周边地区分布的各类水生植物品种中选取,选取原则是适应性好、容易栽培、对氮磷富集效果好、美观且具有经济价值<sup>[12]</sup>。通过前期筛选,共选择挺水植物旱伞草、美人蕉和沉水植物伊乐藻、金鱼藻等 4 种水生植物。这些植物均栽植于长、宽、高分别为 1 m 的有机玻璃器皿中,模拟出水河道构建小型水生生态系统。

水生植物固定在塑料筛里,进行挺水或沉水培养,挺水培养以竹竿三角架固定塑料筛于水面,沉水培养将塑料筛固定在离水桶底部约 20 cm 处。各种植物栽种时的平均株距为 5 cm,以保持各单元的植物覆盖度约为 40%,且植物生物量大体相同<sup>[13-14]</sup>。

### 1.3 采样及分析方法

试验时间是 2015 年 4 月,此时植物生长旺盛。试验期间,每周采集水样 1 次,共采集 4 次。分别用 0、7、14 和 21 d 表示“初始、第 1 周、第 2 周、第 3 周”。

检测的水质指标及检测方法:COD<sub>Cr</sub>采用重铬酸钾消解法测定;TN 浓度采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定;TP 浓度采用钼锑抗分光光度法测定;NO<sub>3</sub>-N 浓度采用紫外分光光度法测定;NH<sub>3</sub>-N 浓度采用纳氏比色法进行测定<sup>[15]</sup>。每个指标重复测定 3 次,取平均值作为测试结果。

去除率 = (水样污染物初始值 - 水样污染物终值) / 水样污染物初始值

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同水生植物的理化指标变化

试验水体的透明度、DO 浓度初始值分别为 53 和 3.6 mg/L。3 周后,旱伞草、美人蕉、伊乐藻、金鱼藻 4 种水生植物长势均较好,称重后对比得到生物量增长情况。生物量增长率、水体透明度和 DO 浓度如表 1 所示。

表 1 试验水体理化性质变化

Table 1 The physical and chemical properties of experimental waterbody

植物	生物量增长率/%	水体透明度	DO 浓度/(mg/L)
旱伞草	127	72	6.13
美人蕉	139	71	5.81
伊乐藻	132	78	6.74
金鱼藻	154	76	7.29

由表 1 可见,金鱼藻生物量变化最大,已增至初始值的 1.54 倍。4 种水生植物的水体透明度差异不大,这是因为悬浮物大多已沉降或吸附在植物表面上,4 种水生植物水体透明度增加量基本相同。金鱼藻水体的 DO 浓度最高,是因为金鱼藻生物量最大,光合作用释放的氧含量相应最高,而且金鱼藻为沉水植物,光合作用产生的氧直接释放到水中,而旱伞草、美人蕉光合作用产生的氧大多数通过茎叶传送到外界环境中<sup>[11]</sup>。

### 2.2 不同水生植物对 COD<sub>Cr</sub> 的去除效能

图 1 显示试验期间 COD<sub>Cr</sub> 的变化。由图 1 可见,各种水生植物对污水中 COD<sub>Cr</sub> 去除效果比较明显,这是由于水生植物对水体中有机物的吸收利用以及对水体悬浮物的吸附作用,有效地降低了水体有机物浓度<sup>[16]</sup>。4 种水生植物前 2 周 COD<sub>Cr</sub> 下降速度较快,而第 3 周多数水生植物 COD<sub>Cr</sub> 不降反升,可能是这些水生植物的腐败和分解释放出有机物所致。伊乐藻处理系统中 COD<sub>Cr</sub> 上升较多,是因为上层伊乐藻对中下层的遮挡,使水体照度降低,进而对植物光合作用产生影响,光照不足,导致叶绿素浓度降低,致使细胞活性下降,植物腐败导致 COD<sub>Cr</sub> 上升<sup>[17]</sup>。因而可采取定期收割植株的方式来减少通过植物活体或死亡腐烂释放到水体中的有机物<sup>[18]</sup>。从 COD<sub>Cr</sub> 平均去除率来看,旱伞草最高,为 40.26%;金鱼藻次之,为 37.80%;虽然伊乐藻 COD<sub>Cr</sub> 的最高去除率为 46.25%,但由于其自身腐败和分解释放

出有机物,最终去除率为 23.40%;美人蕉  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  下降速度最慢,去除率仅为 20.84%。综上,几种植物去除  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的效能由大到小依次为旱伞草、金鱼藻、伊乐藻、美人蕉,而短期(2 周内)伊乐藻的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率最高。

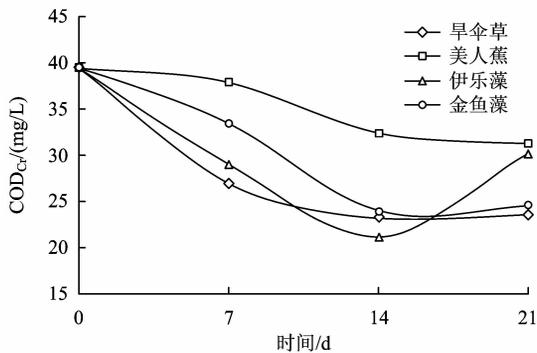


图 1 试验期间  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  变化

Fig. 1 The concentration changes of  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  during trial time

## 2.3 不同水生植物对氮的去除效能

### 2.3.1 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除

图 2 显示各水生植物处理试验中  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度的变化。由于试验初始水样中  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度较小,  $\text{NH}_3\text{-N}$  负荷较低,所以第 1 周植物去除  $\text{NH}_3\text{-N}$  的效果不明显,而在持续处理一段时间后,4 种水生植物水体的  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度均明显下降。在污水处理中,  $\text{NH}_3\text{-N}$  主要通过微生物硝化、生物同化吸收去除,而各去除机制的效率都直接或间接地受浮游藻类的影响<sup>[19]</sup>。在各水生植物生物量大体相同的情况下,旱伞草、美人蕉、伊乐藻、金鱼藻对  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除率分别为 46.25%、34.58%、50.83%、57.50%。综上,污水  $\text{NH}_3\text{-N}$  负荷和植物群落共同影响  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除,4 种水生植物净化  $\text{NH}_3\text{-N}$  的效能由大到小依

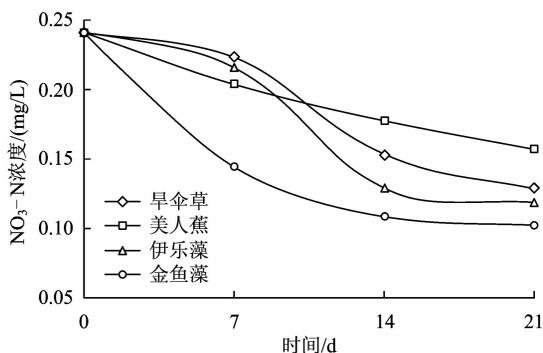


图 2 试验期间  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度变化

Fig. 2 The concentration changes of  $\text{NH}_3\text{-N}$  during trial time

次为金鱼藻、伊乐藻、旱伞草、美人蕉。

### 2.3.2 对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除

图 3 显示试验期间  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度变化。由图 3 可见,各水生植物处理试验中  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度变化主要出现在第 1 周,虽然第 1 周后仍有处理效果,但不十分明显。总体上 4 种水生植物对  $\text{NO}_3\text{-N}$  的去除效果明显。沉水植物伊乐藻、金鱼藻净化效果稍微强于挺水植物旱伞草、美人蕉,这与沉水植物与污水接触面积比挺水植物大有关,说明接触面积对植物吸收去除  $\text{NO}_3\text{-N}$  具有重要作用<sup>[20-21]</sup>。而在几种植物中,伊乐藻对  $\text{NO}_3\text{-N}$  的净化效果最好,去除率为 90.91%,金鱼藻次之,为 88.18%,旱伞草为 83.64%,美人蕉最低,去除率为 79.10%,因此对  $\text{NO}_3\text{-N}$  去除的效能由大到小依次为伊乐藻、金鱼藻、旱伞草、美人蕉。

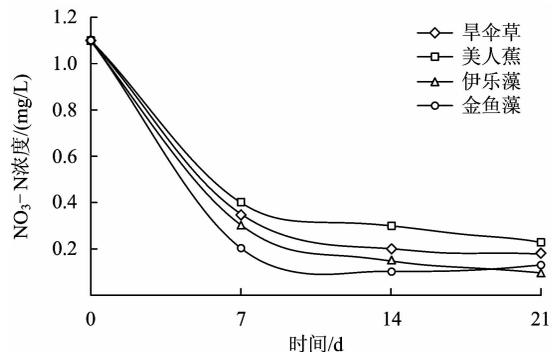


图 3 试验期间  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度变化

Fig. 3 The concentration changes of  $\text{NO}_3\text{-N}$  during trial time

### 2.3.3 对 TN 的去除

图 4 显示试验期间 TN 浓度变化。从图 4 可以看出,试验期间 TN 浓度变化主要在第 1 周,第 2 周后呈缓慢下降趋势或几乎没有效果。这说明初始 TN 中有一部分位于悬浮固体中,第 1 周 TN 浓度急剧降低主要原因是污水中悬浮固体的下沉与生物降解。在生态系统中, TN 不仅来源于原水中的有机物,系统内部大量生长的微生物及其释放产物也是重要来源<sup>[22]</sup>。植物依靠根系的截滤作用能去除大部分悬浮有机物,从而去除水中的氮素,同时藻类的自沉降作用促进 TN 浓度进一步缓慢减小<sup>[23]</sup>。由于悬浮固体的存在,以第 1 周的 TN 浓度作为初始浓度进行 TN 去除率计算,几种植物净化 TN 的效能由大到小依次为美人蕉 (38.36%)、旱伞草 (30.39%)、金鱼藻 (8.75%),伊乐藻的 TN 去除率

为负值,说明伊乐藻本身腐烂释放到水体中的 TN 多于吸收的 TN。可见,挺水植物对 TN 的平均去除率要高于沉水植物。

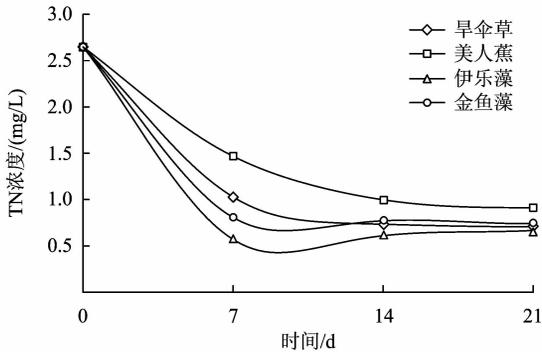


图4 试验期间 TN 浓度变化

Fig.4 The concentration changes of TN during trial time

### 2.4 不同水生植物对 TP 的去除效能

一般认为,TP 主要通过化学沉淀、藻类细菌的合成代谢、水生植物的吸收去除,有研究发现,微生物同化作用对 TP 的去除率为 50% ~ 60%,植物吸收为 1% ~ 3%,其余为物理作用、化学吸附和沉淀作用<sup>[24-25]</sup>。在该试验中,尽管植物对 TP 去除的直接贡献不大,但是植物表面附着的微生物对磷的同化作用间接来自植物的贡献<sup>[26]</sup>。从图 5 可知,试验期间 TP 浓度变化趋势与 TN 基本相同,说明 TP 浓度的变化也与污水中悬浮固体的下沉有关。与 TN 的计算方法相同,以第 1 周的 TP 浓度作为初始浓度计算 TP 去除率,则金鱼藻对 TP 的净化效果最好,去除率为 59.38%;伊乐藻次之,为 54.17%;旱伞草为 31.25%;美人蕉为 12.07%。

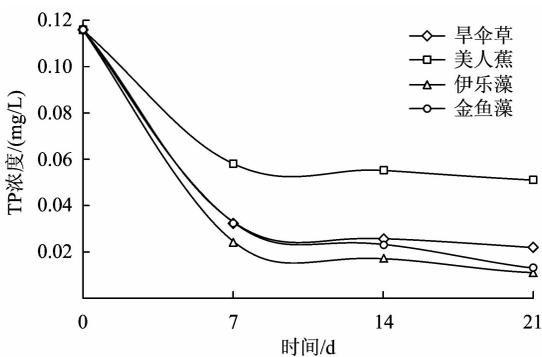


图5 试验期间 TP 浓度变化

Fig.5 The concentration changes of TP during trial time

### 2.5 水生植物综合净化效能

采用模糊综合评价法,得到与主要水质指标

COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、TN、TP 去除率对应的权重系数如表 2 所示<sup>[8,13]</sup>。根据权重系数对各指标去除率进行加权后得到各水生植物综合净化指数,结果见表 3。

表2 各水质指标去除率权重系数

水质指标	COD <sub>Cr</sub>	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	TN	TP
权重系数	0.25	0.15	0.15	0.20	0.25

表3 综合净化指数计算结果

水生植物	旱伞草	美人蕉	伊乐藻	金鱼藻
综合净化指数	43.44	32.95	40.65	47.90

由表 3 可知,4 种水生植物对污水的综合净化效能从强到弱依次为金鱼藻、旱伞草、伊乐藻、美人蕉。

### 3 结论

(1) 4 种水生植物对污水的综合净化指数为 32.95 ~ 47.90,净化能力均较强,其中挺水植物旱伞草和沉水植物金鱼藻的综合净化效能较强,综合净化能力从强到弱依次为金鱼藻、旱伞草、伊乐藻、美人蕉。

(2) 4 种水生植物中,虽然金鱼藻的综合净化能力最高,但其对 TN 的去除率却不足 10%。而旱伞草对污水中 COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、TN 和 TP 的去除率分别为 40.26%、46.25%、83.64%、30.39%、31.25%。

(3) 金鱼藻对 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的净化效果最好,旱伞草对 COD<sub>Cr</sub> 的净化效果最好,伊乐藻对 NO<sub>3</sub>-N 的净化效果最好,美人蕉对 TN 的净化效果最好。去除污水中特定污染因子可选择特定的水生植物,4 种水生植物各有优点,合理配置去除效果更佳。

综上所述,对污水厂尾水以及河道污水进行净化处理时,不应局限于传统的理化方法和工程手段,应用生态学方法特别是利用水生植物,通过合理选用和配置更能达到综合防治的目的。

### 参考文献

[1] CARPENTAR S R, CARACO N F, CORRELL D F, et al.

- Nonpoint pollution of surface waters with nitrogen and phosphorus [J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(3):559-568.
- [ 2 ] SMITH V H, SCHWARTZ G E, ALEXANDER R B. Regional interpretation of water quality monitoring data [J]. *Water Resource Resaerch*, 1997, 33(12):2781-2798.
- [ 3 ] 邓焕广, 陈振楼, 许世远, 等. 夏季潮滩对上海老港垃圾填埋场渗滤液氮、磷净化效果研究[J]. *环境污染与防治*, 2005, 27(6):401-406.
- [ 4 ] RAN N, AGAMI M, ORON G. A pilot study of constructed wetlands using duckweed (*Lemna gibba L.*) for treatment of domestic primary effluent in Israel [J]. *Water Research*, 2004, 38:224-2248.
- [ 5 ] 赵钰, 李多松, 栾晓丽, 等. 3 种挺水植物对生活污水主要污染物净化能力的研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(6):75-77.
- [ 6 ] 袁东海, 任全进, 高士祥, 等. 几种湿地植物净化生活污水 COD、总氮的比较 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(12):2337-2341.
- [ 7 ] BRAGATO C, BRIX H, MALAGOLI M. Accumulation of nutrients and heavy metals in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel and *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla in a constructed wetland of the Venice lagoon watershed [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144:967-975.
- [ 8 ] 刘春光, 王春生, 李贺, 等. 几种大型水生植物对富营养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.
- [ 9 ] NALBUR B, AKCA L, BAYHAN H. Nitrogen removal during secondary treatment by aquatic system [J]. *Water Science and Technology*, 2003, 48(11/12):355-361.
- [ 10 ] 李建娜, 胡曰利, 吴晓芙, 等. 人工湿地污水处理系统中的植物氮磷吸收富集能力研究 [J]. *环境污染与防治*, 2007, 19(7):505-509.
- [ 11 ] 杨旻, 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.
- [ 12 ] 时应征, 王晓, 强艳艳, 等. 人工湿地植物的选择驯化研究综述[J]. *技术与创新管理*, 2008, 29(1):90-94.
- [ 13 ] 常会庆, 寇太记, 乔鲜花, 等. 几种植物去除污染水体中养分效果研究[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(5):118-122.
- [ 14 ] CRISTINA S C C, ANTONIO O S S, PAULA M L C. Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater [J]. *Water Research*, 2007, 41:1790-1798.
- [ 15 ] 国家环境保护总局. 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.
- [ 16 ] ANDREW M, RICHARD S. Development of vegetation in a constructed wetland receiving irrigation return flows [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 121:401-406.
- [ 17 ] 刘嫦娥, 赵健艾, 易晓燕, 等. 静态条件下沉水植物净化污水厂尾水能力研究 [J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(12H):271-274.
- [ 18 ] 苏胜齐, 姚维志. 沉水植物与环境关系评述 [J]. *农业环境科学学报*, 2002, 21(6):570-573.
- [ 19 ] STOTTMEISTER U, WIENER A, KUSCHK P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment [J]. *Biotechnology Advances*, 2003, 22:93-117.
- [ 20 ] 李涛, 周律. 湿地植物对污水中氮、磷去除效果的试验研究 [J]. *环境工程*, 2009, 27(4):25-28.
- [ 21 ] KIM Y, KIM W. Role of water hyacinths and their roots for reducing algal concentration in the effluent from waste stabilization ponds [J]. *Water Research*, 2000, 34(13):3285-3294.
- [ 22 ] BURFORD M A, LORENZEN K. Modelling nitrogen dynamics in intensive shrimp ponds: the role of sediment remineralization [J]. *Aquaculture*, 2004, 229(1):129-145.
- [ 23 ] 沈根祥, 徐介乐, 胡双庆, 等. 浅水体浮萍污水净化系统的除氮途径 [J]. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(1):42-47.
- [ 24 ] JONE S T, JAMES J S, WILLIAM E W. Effects of vegetation management in constructed wetland treatment cells on water quality and mosquito production [J]. *Ecological Engineering*, 2002, 18:441-457.
- [ 25 ] 黄亚, 傅以钢, 赵建夫. 富营养化水体水生植物修复机理的研究进展 [J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(增刊):378-383.
- [ 26 ] 高镜清, 熊治廷, 张维昊, 等. 常见沉水植物对东湖重度富营养化水体磷的去除效果 [J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(6):796-800. ▷

## 声 明

本刊已被美国《乌利希期刊指南(网络版)》(Ulrichsw eb)、美国《化学文摘(网络版)》(CA)、英国《农业与生物科学研究中心文摘》(CAB Abstracts)收录,被《中国核心期刊(遴选)数据库》、《万方数据-数字化期刊群》、《中国学术期刊网络出版总库》及 CNKI 系列数据库、《中文科技期刊数据库》(维普)全文收录,作者的网络及电子版著作使用权使用费已与本刊稿酬一次性给付,特此声明。如作者不同意将文稿编入以上数据库,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理,否则视作同意。