

# 6种水生植物及其组合对模拟污水中磷的净化效果

陈小运, 胡友彪, 郑永红, 张治国, 余婷, 孙翔, 邓永强

(安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** [目的] 针对河流湖泊水体污染严重现状, 选择6种水生植物进行水质净化试验, 为污染水体的水生植物治理提供选择依据。[方法] 选择6种具观赏效果的水生植物菖蒲、美人蕉、大藻、凤眼莲、金鱼藻、穗花狐尾藻, 采用静态水培的方法, 研究6种水生植物及其组合对不同浓度模拟污水中总磷净化效果。[结果] 单一水生植物试验中, 凤眼莲在高(2 mg/L)、中浓度(0.5 mg/L)磷水体中总磷去除效果最好, 去除率分别为95.9%、93.4%。金鱼藻在低浓度磷(0.1 mg/L)水体中总磷去除效果最好, 去除率为91.1%。组合水生植物试验中, 高浓度磷水体中金鱼藻+菖蒲+凤眼莲的水生植物组合对水体中总磷去除效果最好, 去除率为96%。中浓度磷水体中穗花狐尾藻+菖蒲+凤眼莲水生植物组合总磷去除效果最好, 去除率为98.8%。低浓度磷水体中穗花狐尾藻+菖蒲+大藻水生植物组合总磷去除效果最好, 去除率为94.3%。[结论] 选择的6种水生植物对总磷均有一定的去除效果, 对水生植物的种植数量、面积、时间以及组合方式进行优化配置, 可用于污染水体水质净化。

**关键词:** 水生植物; 水质净化; 总磷; 去除效果

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)01-0099-09

中图分类号: X52, X173

**文献参数:** 陈小运, 胡友彪, 郑永红, 等. 6种水生植物及其组合对模拟污水中磷的净化效果[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 99-107. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.01.015; Chen Xiaoyun, Hu Youbiao, Zheng Yonghong, et al. Purification effects of six aquatic plants and their combinations on phosphorus in simulated sewage[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 99-107.

## Purification Effects of Six Aquatic Plants and Their Combinations on Phosphorus in Simulated Sewage

Chen Xiaoyun, Hu Youbiao, Zheng Yonghong, Zhang Zhiguo, Yu Ting, Sun Xiang, Deng Yongqiang

(School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract:** [Objective] According to serious water pollution in rivers and lakes, six species of aquatic plants were selected for treatment of polluted water and water purification testing, in order to provide a basis for aquatic plant treatment in polluted water. [Methods] Six kinds of ornamental aquatic plants were chosen: *Acorus calamus*, *Canna indica*, *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes*, *Ceratophyllum demersum*, and *Myriophyllum spicatum*. Static hydroponics were used for the plants, in combination with different concentrations of phosphorus to simulate the effects of total phosphorus in the sewage purification. [Results] *E. crassipes* was found to be the best for removal of high (2 mg/L) and medium (0.5 mg/L) concentrations of total phosphorus in the water, with removal rates of 95.9% and 93.4%, respectively. *C. demersum* demonstrated the highest removal efficiency in the water with a low concentration (0.1 mg/L) of phosphorus, with a removal rate of total phosphorus of 91.1%. The combination of aquatic plants that was best for the removal of total phosphorus with a high concentration of phosphorus was *C. demersum* + *A. calamus* + *E. crassipes*, with a removal rate of 96.0%. In water with a medium concentration of phosphorus, *A. calamus* + *E. crassipes* + *M. spicatum* was the best for the removal of total phosphorus, with a removal rate of 98.8%. In water with low concentrations of phosphorus the best combination for total phosphorus removal was *A. calamus* +

收稿日期: 2019-09-28

修回日期: 2019-10-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“外源溶解性有机碳对镉在复垦重构土壤中吸附机制研究”(51904014); 安徽省高校自然科学基金项目“DOC对煤矿复垦区土壤Cd的吸附动力学影响机制研究”(KJ2018A0072); 安徽省质量工程项目“土壤卫士”创客实验室(2016ckjh071)

第一作者: 陈小运(1990—), 女(汉族), 安徽省宿州市人, 硕士研究生, 研究方向为水污染治理。Email: cxyaust@foxmail.com。

通讯作者: 胡友彪(1963—), 男(汉族), 江苏省泰州市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水污染治理研究。Email: ybhu@aust.edu.cn。

*P. Stratiotes* + *M. spicatum*, with a removal rate of 94.3%. [Conclusion] All the six aquatic plants have a specific total phosphorus removal rates, and the optimal allocation of the number, area, time and combination of aquatic plants can be used for the purification of polluted water.

**Keywords:** aquatic plants; water purification; total phosphorus; removal efficiency

水环境质量是水环境保护和治理的重点问题及研究对象,随着人类活动的增加,生活污水和生产用水的排放量日益增加,其特点是含有大量的氮、磷等元素,随之而来的是水体富营养化问题<sup>[1]</sup>。在富营养化水体治理技术方法中,植物修复技术因其环境友好、太阳能驱动、成本低、可恢复水体自净化能力等优点,逐渐成为一种重要的生态治理方法<sup>[2]</sup>,因此水生植物对于净化污染水质和维持湖泊生态系统功能具有重要意义<sup>[3-5]</sup>。用于生态修复的水生植物需满足生物量大、生长快速、富集营养物质能力强等特点<sup>[6]</sup>,且根系长度对净化水体的深度有重要影响<sup>[7]</sup>。此外,依靠单一水生植物较难取得理想的生态环境治理效果<sup>[8]</sup>。因而,不同水生植物的组合与配置方式已成为更具应用价值的水体质量修复模式<sup>[9]</sup>。水生植物是水环境生态系统的重要组成部分,能够从水体中吸收氮磷等营养物质,调节水生态系统的物质循环速度,控制藻类的营养成分,改善水体环境,是调节、治理和抑制水体富营养化的有效途径<sup>[10-13]</sup>。在水生生态系统的环境净化过程中,水生植物的净化贡献巨大<sup>[14-16]</sup>。不同水生植物对氮、磷的去除效果有很大的差异,去除率的变化范围为 20%~98%,植物修复水体是一种经济、简单、可持续的水体修复方法,在富营养化水体环境治理中得到广泛应用<sup>[17]</sup>。利用植物对富营养化水体进行生态修复成为研究的热点问题,漂浮植物、浮叶植物、沉水和挺水植物等水生植被的恢复和重建能够有效分配富营养化水体中的营养盐,在生长期间可有效净化水体富营养化<sup>[18]</sup>。

本研究选择 6 种水生植物:菖蒲、美人蕉、大藻、凤眼莲、金鱼藻、穗花狐尾藻,进行室内静态模拟试验,对各水生植物净化受污染水体的效能及改善水环境的能力进行研究,分析水体磷元素的消减过程及动态变化规律,以期对污染水体的水生植物治理提供一定的选择依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料与模拟污水

本试验选择 6 种水生植物,分别是挺水植物菖蒲、美人蕉,浮水植物大藻、凤眼莲,沉水植物金鱼藻、穗花狐尾藻(表 1)。用蒸馏水仔细清洗植物根部,对沉水植物用蒸馏水进行整体清洗,清洗过程中避免植

物根须和茎秆受损<sup>[19-20]</sup>。洗净后在自然光照无雨条件下进行预培养一周。人工模拟污水是使用磷酸二氢钾进行配制。

表 1 6 种供试水生植物名录

种 名	拉丁学名	科 名	类 型
菖 蒲	<i>Acorus calamus</i>	天南星科	挺水植物
美人蕉	<i>Canna indica</i>	美人蕉科	挺水植物
大 藻	<i>Pistia stratiotes</i>	天南星科	浮水植物
凤眼莲	<i>Eichhornia crassipes</i>	凤眼蓝科	浮水植物
金鱼藻	<i>Ceratophyllum demersum</i>	金鱼藻科	沉水植物
穗花狐尾藻	<i>Myriophyllum spicatum</i>	小兒仙草科	沉水植物

### 1.2 试验设计

试验容器的选择高为 30 cm,直径为 34 cm 的 PVC 水桶,实验处理的水样体积为 15 L,试验培养桶中所取水样来自实验室蒸馏水。基本水质指标的质量浓度为总磷高浓度 2 mg/L,总磷中浓度 0.5 mg/L,总磷低浓度 0.1 mg/L。总磷高浓度 2 mg/L 参照城镇污水处理厂污染物排放标准设置,总磷中浓度 0.5 mg/L 和总磷低浓度 0.1 mg/L 参照湖泊富营养化分级评价标准的严重富营养化和中度富营养化标准设置。

选择长势良好、长度接近的金鱼藻、美人蕉、菖蒲、大藻、穗花狐尾藻、凤眼莲 6 种水生植物的幼苗作为供试植物,洗净后放入供试水体中。在 45 个 PVC 水桶中倒入各自所需的水体材料,将水生植物根据试验要求放入 42 个水桶内,每组分别放入 3 个浓度梯度的污水。单一水生植物试验组每桶放 6 株水生植物,组合水生植物试验组每种植物放 3 株,共 9 株。另设 3 个水桶作为空白对照组,桶中不放任何水生植物,其余条件同试验组(表 2)。每隔 20 d 进行一次采样。试验期间定期用蒸馏水补充蒸发和蒸腾所消耗的水分,以保持容器中的水位。试验持续时间 80 d,从 2019 年 6 月 1 日至 8 月 20 日,每次是当天上午 9:00—10:00 取样。

### 1.3 分析测定内容与方 法

本次试验主要是针对水质总磷进行测定,其采用的方法是钼酸铵分光光度法(GB11893-89)。采用北京普析 TU-1901 双光束紫外可见分光光度计测定。并对水质的溶解氧和 pH 值进行测定,分别采用溶解氧仪和 pH 计进行测定。

表 2 试验设计类型

试验设计	空白对照组	单一试验组	组合试验组
组合方式	K	A <sub>1</sub> : 金鱼藻; A <sub>2</sub> : 穗花狐尾藻; A <sub>3</sub> : 美人蕉; A <sub>4</sub> : 菖蒲; A <sub>5</sub> : 大藻; A <sub>6</sub> : 凤眼莲	B <sub>1</sub> : 金鱼藻+美人蕉+大藻; B <sub>2</sub> : 金鱼藻+美人蕉+凤眼莲; B <sub>3</sub> : 金鱼藻+菖蒲+大藻; B <sub>4</sub> : 金鱼藻+菖蒲+凤眼莲; B <sub>5</sub> : 穗花狐尾藻+美人蕉+大藻; B <sub>6</sub> : 穗花狐尾藻+美人蕉+凤眼莲; B <sub>7</sub> : 穗花狐尾藻+菖蒲+大藻; B <sub>8</sub> : 穗花狐尾藻+菖蒲+凤眼莲

## 2 结果与分析

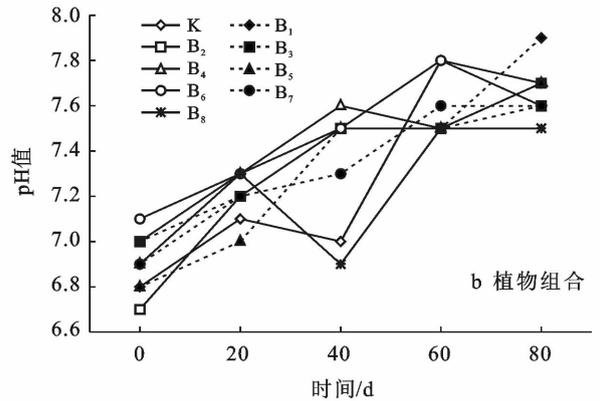
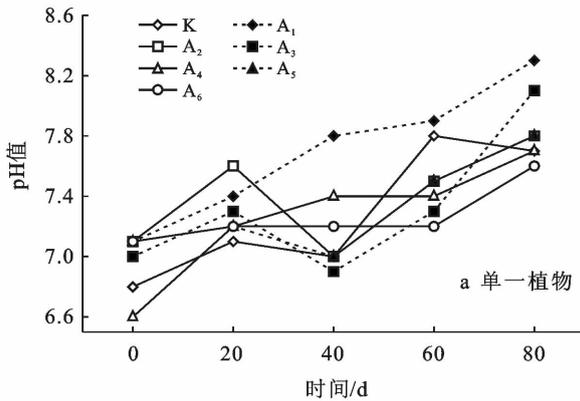
### 2.1 水生植物生长情况

在本试验条件下, 金鱼藻在全过程试验期间长势良好, 衰败迹象不明显, 穗花狐尾藻长势良好, 40 d 后有些许衰败迹象, 而菖蒲、美人蕉、大藻、凤眼莲在初期生长旺盛, 而 40 d 后衰败迹象明显。

### 2.2 水生植物及不同组合对水体 pH 值的影响

随着试验时间的延长, 所有处理水体 pH 值呈上升趋势(见图 1—3)。试验模拟污水初始 pH 值呈现中性或弱酸性, 随着试验的进行, 试验后期水体 pH

值呈现弱碱性。高浓度磷水体中, 美人蕉在 60~80 d 水体 pH 值上升幅度最大, 从 7.3 上升至 8.1, 其他试验处理组水体 pH 值均无显著差异, 表明水体环境趋于稳定。中浓度磷水体中, 金鱼藻、美人蕉、金鱼藻+美人蕉+大藻在 60~80 d 水体 pH 值相对于其他试验处理组上升幅度较大, 分别从 7.5, 7.3, 7.0 上升至 8.4, 7.9, 7.8。其他水体 pH 值趋于稳定。低浓度磷水体中, 金鱼藻、金鱼藻+美人蕉+大藻在 60~80 d 水体 pH 值相对于其他试验处理组上升幅度较大, 分别从 7.9, 7.1 上升至 8.5, 7.7。其他水体 pH 值上升幅度不大, 趋于稳定。



注: 图中 K 为空白对照, A 为单一植物, B 为植物组合, 详见表 2。下同。

图 1 水生植物及其组合高浓度磷处理下水体 pH 值变化

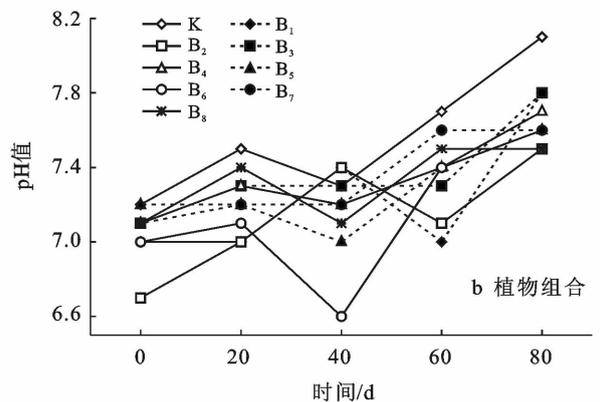
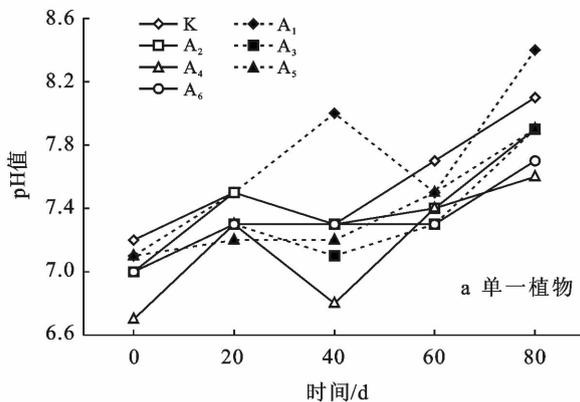


图 2 水生植物及其组合中浓度磷处理下水体 pH 值变化

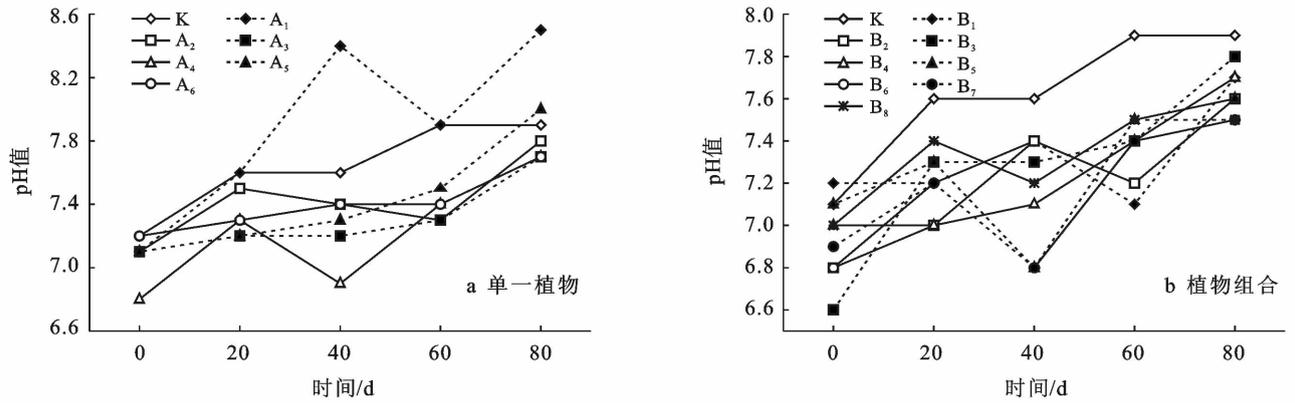


图 3 水生植物及其组合低浓度磷处理下水体 pH 值变化

### 2.3 水生植物及其不同组合对水体 DO 的影响

试验初期 0~20 d, 所有处理水体溶解氧(DO)急剧上升, 20~40 d, 所有处理水体 DO 上升缓慢, 上升幅度不大, 40~80 d, 所有处理水体 DO 趋于稳定, 部分呈现下降趋势(见图 4—6)。分析此现象的原因,

是因为在试验初期, DO 上升是由于水生植物生长旺盛, 向水体释放大量氧气, 在试验中期 DO 上升缓慢是由于水生植物生长缓慢, 向水体释放氧气较少, 试验后期 DO 趋于稳定或者下降, 是由于水生植物生长停滞, 趋于衰败造成的。

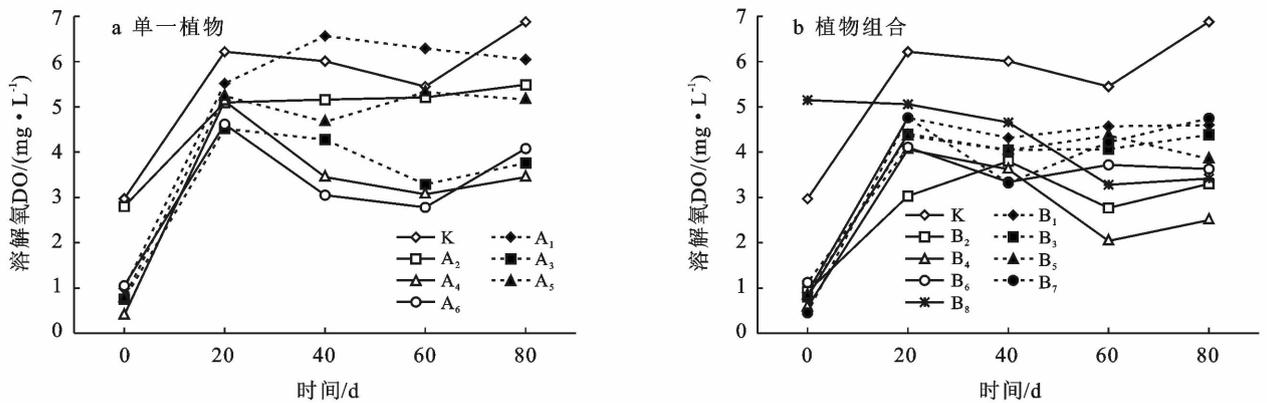


图 4 水生植物及其组合高浓度磷处理下水体溶解氧 DO 变化

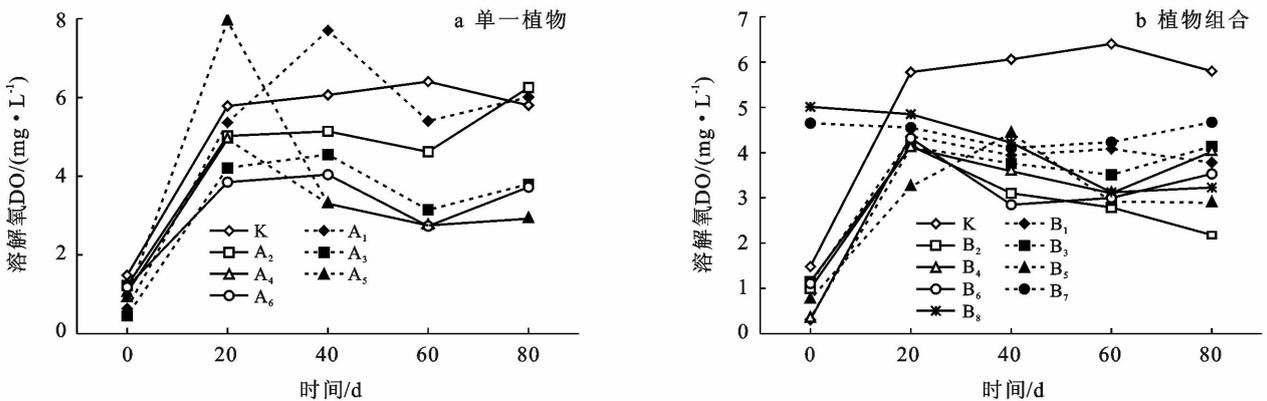


图 5 水生植物及其组合中浓度磷处理下水体溶解氧 DO 变化

### 2.4 单一水生植物对水质总磷去除效果研究

2.4.1 单一水生植物对高浓度总磷去除效果 从图 7 可知, 6 种单一水生植物在高浓度磷处理下水样中

总磷含量随处理时间的延长呈波动变化, 试验第 1 d, 所有水样总磷浓度配置为 2.0 mg/L, 处理 80 d, 6 种单一水生植物水样总磷均下降, 均比空白水样低。试

验前 20 d, 金鱼藻、大藻、凤眼莲水样中去除总磷速度较快, 总磷去除率分别为 82.4%, 78.6%, 94.4%。20~40 d, 除金鱼藻外, 其他水生植物水样中总磷含量仍然下降, 40 d 后, 穗花狐尾藻、美人蕉、菖蒲、大藻、凤眼莲总磷去除率分别为 27.5%, 60%, 49.3%, 94%, 95.9%。

40~80 d, 除金鱼藻、穗花狐尾藻两种水生植物水样总磷含量些许下降, 其他水生植物水样总磷含量

均上升。80 d 后, 金鱼藻和穗花狐尾藻的总磷去除率分别是 85%, 38.5%。说明 6 种水生植物在前 20 d 处理含磷水样效果最好, 而后水样总磷含量上升是由于水生植物衰败腐烂分解, 释放磷元素。6 种单一水生植物在高浓度磷处理下, 总磷吸收能力由强至弱排列顺序为: 凤眼莲 > 大藻 > 金鱼藻 > 美人蕉 > 菖蒲 > 穗花狐尾藻。其中凤眼莲、大藻、金鱼藻适应能力较强, 去除总磷速度较快。

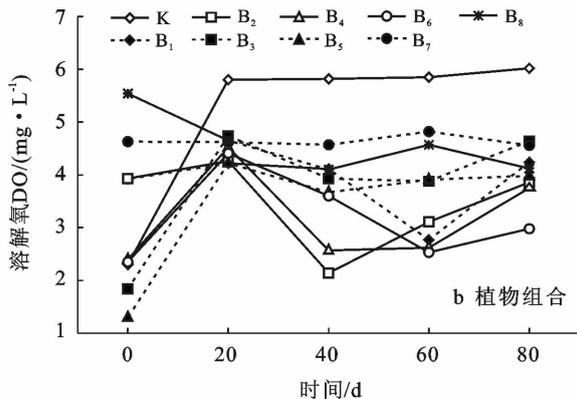
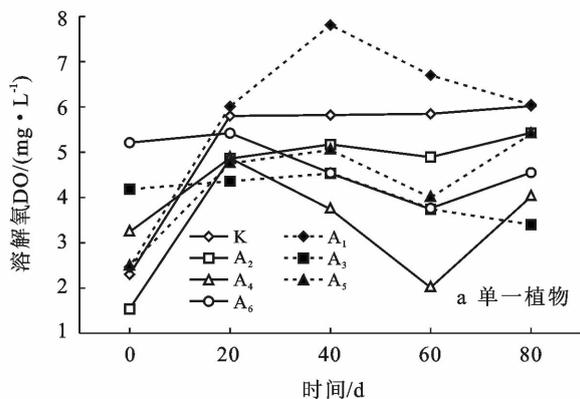


图 6 水生植物及其组合低浓度磷处理下水体溶解氧 DO 变化

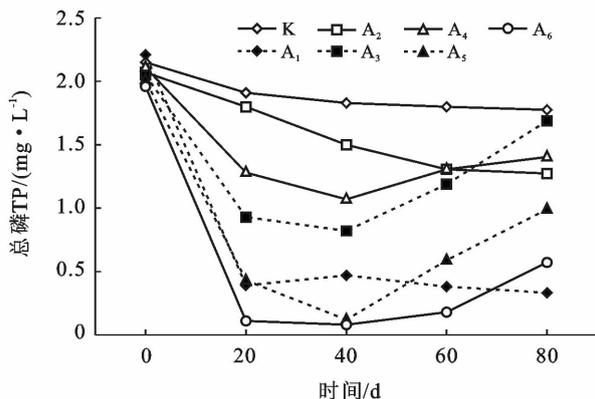


图 7 单一水生植物高浓度磷处理下对 TP 的去除效果

2.4.2 单一水生植物对中浓度总磷去除效果 从图 8 可知, 6 种单一水生植物在中浓度磷处理下水样中总磷含量随处理时间的延长呈波动变化, 试验第 1 d, 所有水样总磷浓度配置为 0.5 mg/L, 处理 80 d, 6 种单一水生植物水样总磷均下降, 均比空白水样低。试验前 20 d, 金鱼藻、大藻水样中去除总磷速度较快, 总磷去除率分别为 80.4%, 90.4%。20~40 d, 除金鱼藻外, 其他水生植物水样中总磷含量仍然下降, 40 d 后, 穗花狐尾藻、美人蕉、菖蒲、大藻、凤眼莲总磷去除率分别为 34.2%, 57.4%, 71.4%, 91.2%, 93.4%。40~80 d, 除金鱼藻水样总磷含量些许下降, 其他水生植物水样总磷含量均上升, 80 d 后, 金鱼藻总磷去

除率为 93%。其中大藻去除总磷速度最快, 第 20 d 由总磷含量 0.5 mg/L 减少到 0.048 mg/L, 对总磷的去除率为 90.4%。其次去除总磷速度较快的水生植物是金鱼藻。在 20~40 d, 凤眼莲去除总磷效果较明显, 对总磷的去除率为 93.4%。6 种单一水生植物在中浓度磷处理下, 总磷吸收能力由强至弱排列顺序为: 凤眼莲 > 金鱼藻 > 大藻 > 菖蒲 > 美人蕉 > 穗花狐尾藻。水生植物水样中磷先升高后降低的现象可能与水中藻类的滋生和水生植物衰败分解有关。

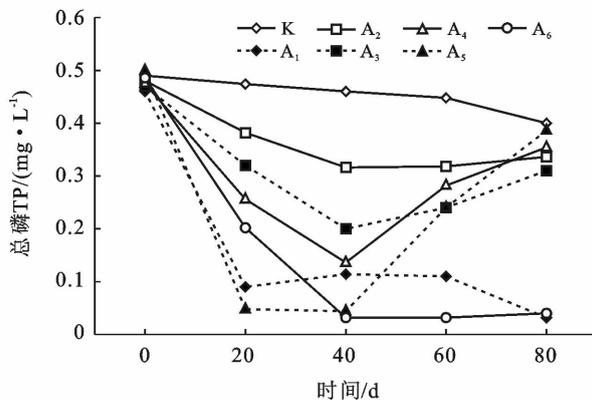


图 8 单一水生植物中浓度磷处理下对 TP 的去除效果

2.4.3 单一水生植物对低浓度总磷去除效果 从图 9 可知, 6 种单一水生植物在低浓度磷处理下水样中

总磷含量随处理时间的延长呈波动变化,试验第 1 d,所有水样总磷浓度配置为 0.1 mg/L,处理 80 d,6 种单一水生植物水样总磷部分下降,部分升高且高于空白水样。试验前 20 d,6 种水生植物水样总磷含量均下降,其中大藻水样中去除总磷速度最快,总磷去除率为 81.3%。20~40 d,除金鱼藻、穗花狐尾藻、凤眼莲外,其他水生植物水样中总磷含量都呈现上升趋势。40~80 d,除金鱼藻、凤眼莲外,其他水生植物水样中总磷含量都呈现上升趋势。第 80 d,金鱼藻水样总磷去除率达到最高为 91.1%。6 种单一水生植物在低浓度磷处理下,总磷吸收能力由强至弱排列顺序为:金鱼藻>凤眼莲>大藻>美人蕉>穗花狐尾藻>菖蒲。

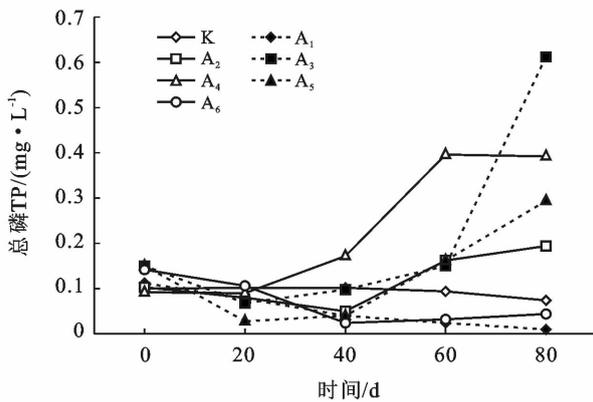


图 9 单一水生植物低浓度磷处理下对 TP 的去除效果

## 2.5 组合水生植物对水质总磷去除效果研究

2.5.1 组合水生植物对高浓度总磷去除效果 从图 10 可知,8 种组合水生植物在高浓度磷处理下水样中总磷含量随处理时间的延长呈波动变化,试验第 1 d,所有水样总磷浓度配置为 2.0 mg/L,处理第 80 d,除 B<sub>5</sub>:穗花狐尾藻+美人蕉+大藻和 B<sub>6</sub>:穗花狐尾藻+美人蕉+凤眼莲两种组合外,其余 6 种组合水生植物水样总磷含量均比空白水样低。试验前 20 d,B<sub>1</sub>:金鱼藻+美人蕉+大藻;B<sub>2</sub>:金鱼藻+美人蕉+凤眼莲;B<sub>3</sub>:金鱼藻+菖蒲+大藻;B<sub>4</sub>:金鱼藻+菖蒲+凤眼莲;B<sub>7</sub>:穗花狐尾藻+菖蒲+大藻;B<sub>8</sub>:穗花狐尾藻+菖蒲+凤眼莲等 6 种组合方式水样总磷含量下降速度较快,其他 2 种水生植物组合方式水样总磷含量下降缓慢。20 d 后,B<sub>1</sub>:金鱼藻+美人蕉+大藻总磷去除率达到最高为 92.8%,B<sub>5</sub>:穗花狐尾藻+美人蕉+大藻总磷去除率达到最高为 47.8%。20~40 d,除 B<sub>1</sub>:金鱼藻+美人蕉+大藻和 B<sub>5</sub>:穗花狐尾藻+美人蕉+大藻组合外,其他水生植物水样中总磷含量仍然下降,但下降速度缓慢。40 d 后,B<sub>2</sub>,B<sub>3</sub>,B<sub>4</sub>,B<sub>6</sub> 和 B<sub>8</sub>

总磷去除率分别为 93%,91.4%,96%,16.7%,95.9%。40~80 d,除 B<sub>7</sub>:穗花狐尾藻+菖蒲+大藻水样总磷含量些许下降,其他水生植物水样总磷含量均上升。80 d 后,B<sub>7</sub>:穗花狐尾藻+菖蒲+大藻总磷去除率为 94.2%。说明 8 种组合水生植物在前 20 d 处理含磷水样效果最好,而后水样总磷含量上升是由于水生植物衰败腐烂分解,释放磷元素。8 种组合水生植物在高浓度磷处理下,总磷吸收能力由强至弱排列顺序为:B<sub>4</sub>>B<sub>8</sub>>B<sub>7</sub>>B<sub>2</sub>>B<sub>1</sub>>B<sub>3</sub>>B<sub>5</sub>>B<sub>6</sub>。

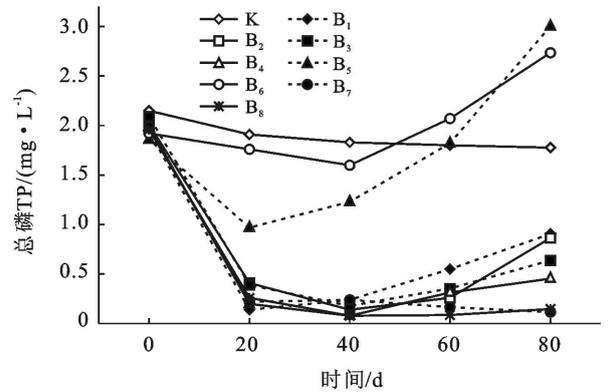


图 10 组合水生植物高浓度磷处理下对 TP 的去除效果

2.5.2 组合水生植物对中浓度总磷去除效果 从图 11 可知,8 种组合水生植物在中浓度磷处理下水样中总磷含量随处理时间的延长呈波动变化,试验第 1 d,所有水样总磷浓度配置为 0.5 mg/L,处理第 80 d,8 种组合水生植物水样总磷浓度部分低于 0.5 mg/L,部分高于 0.5 mg/L。试验前 20 d,除 B<sub>6</sub>:穗花狐尾藻+美人蕉+凤眼莲组合水生植物水样总磷含量下降速度较为缓慢外,其他组合水生植物水样总磷含量下降速度较快。20 d 后,B<sub>1</sub>,B<sub>3</sub> 和 B<sub>5</sub> 总磷去除率达到最高为 89.5%,91.1% 和 84.3%。20~40 d,除 B<sub>1</sub>:金鱼藻+美人蕉+大藻;B<sub>3</sub>:金鱼藻+菖蒲+大藻;B<sub>5</sub>:穗花狐尾藻+美人蕉+大藻 3 种组合水生植物水样总磷含量上升外,其他组合水生植物水样总磷含量仍持续下降,但下降速度缓慢。40 d 后,B<sub>2</sub>,B<sub>4</sub> 和 B<sub>6</sub> 总磷去除率达到最高为 86.2%,95.1% 和 35.7%。40~80 d,除 B<sub>7</sub>:穗花狐尾藻+菖蒲+大藻和 B<sub>8</sub>:穗花狐尾藻+菖蒲+凤眼莲两种组合水样总磷含量上下波动外,其余 6 种组合水生植物水样总磷含量都持续上升,且部分组合水生植物水样总磷含量超过 0.5 mg/L。80 d 后,B<sub>7</sub> 和 B<sub>8</sub> 总磷去除率分别是 96.2% 和 98.8%。8 种组合水生植物在中浓度磷处理下,总磷吸收能力由强至弱排列顺序为:B<sub>8</sub>>B<sub>7</sub>>B<sub>4</sub>>B<sub>3</sub>>B<sub>1</sub>>B<sub>2</sub>>B<sub>5</sub>>B<sub>6</sub>。

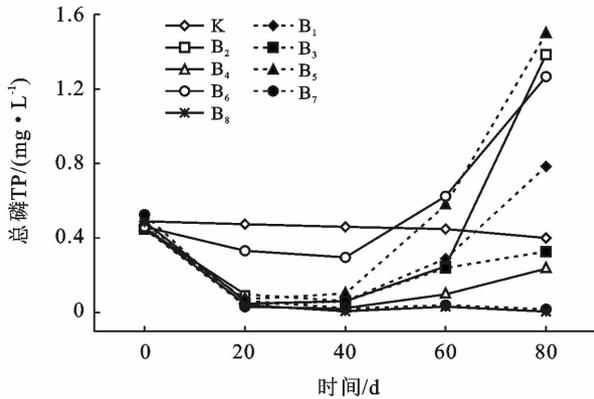


图 11 组合水生植物中浓度磷处理下对 TP 的去除效果

2.5.3 组合水生植物对低浓度总磷去除效果 从图 12 可知,8 种组合水生植物在低浓度磷处理下水样中总磷含量随处理时间的延长呈波动变化,试验第 1d,所有水样总磷浓度配置为  $0.1 \text{ mg/L}$ ,处理第 80 d,8 种组合水生植物水样总磷浓度部分低于  $0.1 \text{ mg/L}$ ,部分高于  $0.1 \text{ mg/L}$ 。试验前 20 d,8 种组合水生植物水样总磷含量均不同程度下降,下降速度快慢依次为:  $B_8 > B_7 > B_4 > B_3 > B_5 > B_6 > B_2 > B_1$ 。20 d 后,  $B_1, B_2$  和  $B_5$  总磷去除率达到最高为 3.5%, 5.8% 和 51.9%。20~40 d,  $B_3$ : 金鱼藻+菖蒲+大藻;  $B_4$ : 金鱼藻+菖蒲+凤眼莲;  $B_6$ : 穗花狐尾藻+美人蕉+凤眼莲;  $B_7$ : 穗花狐尾藻+菖蒲+大藻等组合水生植物水样总磷含量持续下降,其他组合水生植物水样总磷含量不同程度上升。40 d 后,  $B_3, B_4$  和  $B_6$  总磷去除率达到最高为 60.7%, 72.9% 和 67.9%。40~80 d,除  $B_7$ : 穗花狐尾藻+菖蒲+大藻和  $B_8$ : 穗花狐尾藻+菖蒲+凤眼莲两种组合水样总磷含量上下波动外,其余 6 种组合水生植物水样总磷含量都持续上升,且第 80 d 总磷含量都超过  $0.1 \text{ mg/L}$ 。80 d 后,  $B_7$  和  $B_8$  总磷去除率为 94.3% 和 81.7%。

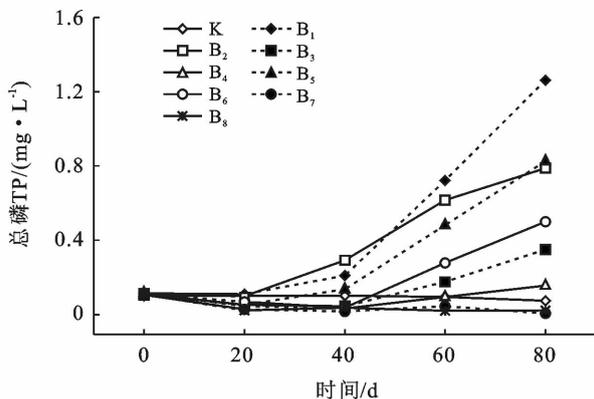


图 12 组合水生植物低浓度磷处理下对 TP 的去除效果

以上现象说明低浓度磷处理的水样后期水生植物对磷的吸收去除效果不明显,且水生植物衰败分解对水质影响明显,造成水质污染。整个过程中,  $B_7$ : 穗花狐尾藻+菖蒲+大藻水生植物组合对总磷的去除率最高为 94.3%。8 种组合水生植物在低浓度磷处理下,总磷吸收能力由强至弱排列顺序为:  $B_7 > B_8 > B_4 > B_6 > B_3 > B_5 > B_2 > B_1$ 。

### 3 讨论

通过对 6 种水生植物及其组合试验期间水体 pH 值的监测试验发现,随着试验时间的延长,所有处理水体 pH 值呈上升趋势。试验模拟污水初始 pH 值呈现中性或弱酸性,随着试验的进行,试验后期水体 pH 上升呈现弱碱性。pH 值是水体环境指示因子之一,多数研究表明,植物的存在对水体酸碱度具有调节作用,但在本研究中,无植物的对照组水体 pH 值变化趋势与有水生植物的较为接近,这说明水生植物的存在对调节水体 pH 值调节作用不大,另外可能是由于水体中存在酸碱缓冲体系发挥了酸碱调节功能。另外,通过对 6 种水生植物及其组合试验期间水体 DO 的监测试验发现,试验初期水体 DO 急剧上升,中期水体 DO 上升缓慢,上升幅度不大,后期水体 DO 趋于稳定,部分呈现下降趋势。试验初期 DO 上升是由于水生植物生长旺盛,向水体释放大量氧气,试验中期 DO 上升缓慢是由于水生植物生长缓慢,向水体释放氧气较少,试验后期 DO 趋于稳定或者下降,是由水生植物生长停滞,趋于衰败造成的。结果表明,水中 DO 的大小与水生植物的生长状况直接相关。

在利用水生植物净化污染水体的过程中,可以通过水生植物同化将水体中的污染物转移到水生植物体内,水生植物吸收的磷元素再通过收获、处置、进一步利用从而达到将一部分过量的磷从污水中去除的目的。

本试验研究发现,通过对 6 种单一水生植物和 8 种组合水生植物对总磷去除效果的比较,在高、中浓度磷水体中,组合水生植物对总磷的去除效果优于单一水生植物。在低浓度磷水体中单一水生植物对总磷的去除优于组合水生植物。大多数水生植物组合净化方法比单一水生植物净化污染水体的效果更佳,正如刘足根等<sup>[21]</sup>研究证实不同生活型的水生植物的合理组合配置比单一生活型的水生植物氮磷去除率更高,且净化效果更为稳定。说明本试验与刘足根等研究结果相一致。但是,本试验中的低浓度磷含量的水体中,组合水生植物 TP 净化效果相比较于单一水生植物,净化效果不甚理想且无显著性差异,这与王

春景等<sup>[22]</sup>的试验结果相似,他们研究发现菰+水菖蒲混合种植体系对富营养化水体的净化效果与单独种植体系也无显著性差异。因此,水生植物配置种植是否比单一种植更能有效地净化污水需要深入探讨和研究。

本试验结果发现,6种水生植物及其组合处理前期水体总磷含量均快速下降,这可能是由于试验前期水体养分充足,环境温度适宜,水生植物生长较快,对磷营养元素吸收较快,这与高岩等<sup>[23]</sup>研究的不同生长阶段的凤眼莲净化不同程度富营养化水体的结果相一致。同时也与郑足红等<sup>[24]</sup>研究的结果相一致,郑足红研究得出水生植物生长初期表现出较高的 TP 去除效果,生长后期 TP 去除率增幅逐渐缓慢,这与试验后期水生植物本身对氮磷需求量减少以及氮磷在植物体内再次分配有关联<sup>[25]</sup>。

通过试验研究发现,6种水生植物及其组合对污水 TP 的去除效果优于对照组,其中一部分是水生植物作为营养物质吸收来维持自身生长发育;另一部分可能是污水中微生物将其中有机物分解转化为无机物<sup>[26]</sup>。在对照组中,尽管不存在水生植物吸收作用,水体中 TP 浓度也有稍微下降,这可能是微生物作用导致下降,表明水体本身存在一定的自净能力<sup>[27]</sup>。

## 4 结论

经过 80 d 的静态水培模拟试验,结果表明,菖蒲、美人蕉、大藻、凤眼莲、金鱼藻、穗花狐尾藻等水生植物及其组合对污水中的 TP 具有一定的净化能力。

(1) 通过 6 种水生植物及其组合的高、中、低 3 种浓度的含磷污水的净化效果比较分析得出总磷浓度越高的水样水生植物净化效果越好。说明水生植物对总磷的吸收作用明显。供试的 6 种水生植物及其组合对污水中的 TP 的去除率高于对照组。

(2) 从 6 种水生植物及其组合总磷去除趋势的比较可以看出,去除污水中总磷较快的时间段是处理前期,处理后期总磷去除缓慢,最后衰败期总磷含量逐渐上升。

(3) 从单一水生植物对 TP 去除效果可以看出,6 种单一水生植物在 3 种浓度梯度磷含量的水样中去除 TP 效果大小顺序大致相同,局部差异。其中凤眼莲在高浓度和中浓度磷水体中 TP 去除效果最好,去除率分别为 95.9%,93.4%。金鱼藻在低浓度磷水体中 TP 去除效果最好,去除率为 91.1%。

(4) 从组合水生植物对 TP 去除效果可以看出,高浓度磷水体中 B<sub>4</sub>: 金鱼藻+菖蒲+凤眼莲的水生植物组合对水体中 TP 去除效果最好,去除率为

96.0%。中浓度磷水体中 B<sub>8</sub>: 穗花狐尾藻+菖蒲+凤眼莲水生植物组合 TP 去除效果最好,去除率为 98.8%。低浓度磷水体中 B<sub>7</sub>: 穗花狐尾藻+菖蒲+大藻水生植物组合 TP 去除效果最好,去除率为 94.3%。

单一种植处理时,凤眼莲对污水的 TP 的去除具有较大的应用潜力。而穗花狐尾藻+菖蒲+凤眼莲水生植物组合为中浓度污水 TP 净化效果最优组合模式。另外,生长衰亡期水生植物大量衰败分解,释放磷元素,致使水体总磷浓度上升,污染水体。建议在水生植物生长旺季将水生植物迁移出水体,以防造成水体二次污染。通过合理的掌握收割时间,有利于最大化去除污水中的污染物,是一种可供选择的生态修复辅助措施。

本试验高、中、低浓度磷污水的设置参考城镇污水处理厂污染物排放和湖泊富营养化等级中总磷浓度,这对以后城市生活污水和湖泊富营养化的生物治理提供了一定的参考。本次试验研究的结果可以为湖泊和河道污染水体、城市黑臭水体的生物治理提供一定的选择依据,还可以为生态浮床的设计提供模型参考,对水生态环境的治理具有重要实践意义。但水生植物治理水体污染在实际应用中需要注意以下几点:①掌握水生植物生长阶段吸收营养盐时间节点,防止水生植物自身降解造成二次污染;②预防少数水生植物由于生长旺盛,大面积生长繁殖,超过水体负荷,影响其他水体动植物生长。然而通过对这 6 种水生植物的单一及组合试验,为后续设计生态浮床的设计形式以及水生植物组合方式的最优化提供模型参考,使生态浮床应用于湖泊和河道污染水体、城市黑臭水体治理,实现此项研究的实际价值。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 谢东升,朱文逸,陈劲鹏,等. 5 种华南地区水生植物对城市生活污水的净化效果[J]. 环境工程学报,2019,13(8): 1903-1908.
- [2] Batty L C, Dolan C. The potential use of phytoremediation for sites with mixed organic and inorganic contamination[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2013,43(3):217-259.
- [3] 高海龙,程寒飞,詹茂华,等. 太湖水生植物研究进展[J]. 湿地科学,2019,17(1):9-15.
- [4] 徐文义,常越亚,黄民生. 水生植物对水体中磷富集的影响因素[J]. 湿地科学,2018,16(1):67-72.
- [5] Gao Hailong, Qian Xin, Wu Hongfei, et al. Combined effects of submerged macrophytes and aquatic animals on the restoration of a eutrophic water body: A case study of Gonghu Bay, Lake Taihu[J]. Ecological Engineering, 2017,102:15-23.

- [6] Qin Hongjie, Zhang Zhiyong, Liu Minhui, et al. Site test of phytoremediation of an open pond contaminated with domestic sewage using water hyacinth and water lettuce[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95:753-762.
- [7] Putra R S, Cahyana F, Novarita D. Removal of lead and copper from contaminated water using EAPR system and uptake by water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) [J]. *Procedia Chemistry*, 2015, 14:381-386.
- [8] 胡长伟, 孙占东, 李建龙, 等. 凤眼莲在城市重污染河道修复中的应用[J]. *环境工程学报*, 2007, 1(12):51-56.
- [9] 秦红杰, 张志勇, 刘海琴, 等. 两种漂浮植物的生长特性及其水质净化作用[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(8):2470-2479.
- [10] 刘利华, 郭雪艳, 达良俊, 等. 不同富营养化水平对挺水植物生长及氮磷吸收能力的影响[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2012(6):39-45, 72.
- [11] 曹开银, 丁海涛, 邓超, 等. 湿地水生植物对富营养化水体的净化效果研究[J]. *生物学杂志*, 2019, 36(1):39-42.
- [12] 刘盼, 宋超, 朱华, 等. 3 种水生植物对富营养化水体的净化作用研究[J]. *水生态学杂志*, 2011, 32(2):69-74.
- [13] 宋玉芝, 朱广伟, 秦伯强. 太湖康山湾示范区水生植物对水体氮、磷控制的适用性分析[J]. *湖泊科学*, 2013, 25(2):259-265.
- [14] 吕金虎, 钟艳霞, 高鹏. 银川平原人工湿地水生植物去污能力研究[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(1):192-195.
- [15] 潘义宏, 王宏宾, 谷兆萍, 等. 大型水生植物对重金属的富集与转移[J]. *生态学报*, 2010, 30(23):6430-6441.
- [16] 方焰星, 何池全, 梁霞, 等. 水生植物对污染水体氮磷的净化效果研究[J]. *水生态学杂志*, 2010, 31(6):36-40.
- [17] Elshafai S, Elgohary F, Nasr F, et al. Nutrient recovery from domestic wastewater using a UASB-duckweed ponds system[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(4):798-807.
- [18] 相晨, 卢剑波, 刘芳, 等. 水生植物对富营养化水体净化效果的初步研究[J]. *环境科学导刊*, 2016, 35(5):32-37.
- [19] 李志刚, 李素丽, 梅利民, 等. 美人蕉 (*Canna indica* Linn.) 和芦苇 (*Phragmites australis* L.) 人工湿地对含铬生活污水的净化效果及植物的生理生态变化[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(2):358-365.
- [20] 刘晓娜, 丁爱中, 程莉蓉, 等. 潜流人工湿地除氮的生态动力学模拟[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(1):166-170.
- [21] 刘足根, 张萌, 李雄清, 等. 沉水-挺水植物镶嵌组合的水体氮磷去除效果研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(S1):171-181.
- [22] 王春景, 杨海军, 刘国经, 等. 菰和菖蒲对富营养化水体净化效率的比较[J]. *植物资源与环境学报*, 2007, 16(1):40-44.
- [23] 高岩, 马涛, 张振华, 等. 不同生长阶段凤眼莲净化不同程度富营养化水体的效果研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(12):2427-2435.
- [24] 郑足红, 胡超, 王华伟, 兰天翔, 王立华. 3 种水生植物对富营养化水质的净化性能比较[J]. *环境污染与防治*, 2018, 40(10):1147-1151.
- [25] 宗小香, 闵梦月, 孙广芳, 等. 铁-碳内电解质下 4 种水生植物的净水效果[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(07):2084-2090.
- [26] 李淑英, 周元清, 胡承, 等. 水生植物组合后根际微生物及水净化研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(3):148-153.
- [27] 邱敏. 太湖氮磷大气沉降及水体自净模拟实验研究[D]. 广州:暨南大学, 2017.

(上接第 98 页)

- [15] 田玲玲, 罗静, 董莹, 等. 湖北省生态足迹和生态承载力时空动态研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(2):316-325.
- [16] 潘洪义, 朱晚秋, 崔绿叶, 等. 成都市人均生态足迹和人均生态承载力空间分布差异[J]. *生态学报*, 2017, 37(19):6335-6345.
- [17] 闫峰, 吴波, 王艳姣. 2000—2011 年毛乌素沙地植被生长状况时空变化特征[J]. *地理科学*, 2013, 33(5):602-608.
- [18] 闫峰, 吴波. 近 40 a 毛乌素沙地荒漠化过程研究[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(6):987-996.
- [19] Wackernagel M, Monfreda C, Schulz N B, et al. Calculating national and global ecological footprint time series: Resolving conceptual challenges[J]. *Land Use Policy*, 2004, 21(3):271-278.
- [20] 王录仓, 高静. 高寒牧区村域生态足迹:以甘南州合作市为例[J]. *生态学报*, 2012, 32(12):3795-3805.
- [21] 顾康康, 刘景双. 基于生态足迹修正模型的矿业城市生态承载力研究[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(11):1314-1318.
- [22] Wackernagel M, Monfreda C, Erb K H, et al. Ecological footprint time series of Austria, the Philippines, and South Korea for 1961—1999: Comparing the conventional approach to an ‘actual land area’ approach[J]. *Land Use Policy*, 2004, 21(3):261-269.
- [23] 岳东霞, 马金辉, 巩杰, 等. 中国西北地区基于 GIS 的生态承载力定量评价与空间格局[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(6):68-75.