

## 水生植物对灌溉水中镉去除作用的筛选及机制研究

李智义<sup>1</sup>, 彭亮<sup>2</sup>, 宋慧娟<sup>2</sup>, 李冰玉<sup>2</sup>, 毕军平<sup>1,3</sup>

(1. 湖南省生态环境监测中心, 湖南长沙 410014; 2. 湖南农业大学资源环境学院, 湖南长沙 410128; 3. 国家环境保护重金属污染监测重点实验室, 湖南长沙 410019)

**摘要** 灌溉水中悬浮态的镉被认为是湖南省农田镉污染的主要来源, 通过比较紫背浮萍、美人蕉、狐尾藻和水葫芦 4 种典型南方水生植物对悬浮态镉去除的效果, 筛选出效果更好的水葫芦和狐尾藻, 进一步收集植物根部悬浮物、体系底泥, 分析其镉含量并开展机制研究。结果表明, 4 种水生植物中狐尾藻镉去除效果最佳, 去除效率为 94.42%。植物对镉的去除主要通过助沉降和吸附, 其中沉降部分所占比例最高, 根系复杂的水生生物在去除灌溉水中镉的方面显示出良好的性能, 狐尾藻沉降部分的镉含量占 81% 左右。

**关键词** 镉; 悬浮物; 水生植物; 去除作用; 筛选; 机制

中图分类号 X173 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)11-0077-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.11.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Screening and Mechanism Research of Aquatic Plants on the Removal of Cadmium from Irrigation Water

LI Zhi-yi<sup>1</sup>, PENG Liang<sup>2</sup>, SONG Hui-juan<sup>2</sup> et al (1. Hunan Ecological Environment Monitoring Center, Changsha, Hunan 410014; 2. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128)

**Abstract** Suspended cadmium in irrigation water is considered to be the main source of cadmium pollution in farmland in Hunan Province. By comparing the effects of four typical southern aquatic plants (*Spirodela polyrrhiza*, *Canna indica*, *Myriophyllum spicatum* and *Eichhornia crassipes*) on the removal of suspended cadmium, the *Eichhornia crassipes* and *Myriophyllum spicatum* with better effects were screened out, and the suspended solids in plant roots and system sediment were further collected, and the cadmium content was analyzed and the mechanism was studied. The results showed that among the four aquatic plants, the removal efficiency of cadmium from *Myriophyllum spicatum* was the best, and the removal efficiency was 94.42%. The removal of cadmium by plants was mainly through sedimentation and adsorption, in which the sedimentation part accounts for the highest proportion. Aquatic organisms with complex root systems showed good performance in removing cadmium from irrigation water. The cadmium content in the sedimentation part of *Myriophyllum spicatum* accounted for about 81%.

**Key words** Cadmium; Suspended solids; Aquatic plants; Removal; Screening; Mechanism

近 10 年来我国农田土壤污染备受关注, 2014 年由环境保护部和国土资源部牵头的全国范围土壤污染状况调查报告显示, 全国 19% 的农田土壤受到重金属污染, 其中受到镉污染的农田约有 2 600 万  $\text{hm}^2$  (超标点位率为 7%)<sup>[1]</sup>。Zhao 等<sup>[1]</sup>通过调查研究表明, 我国南方稻田中灌溉水的镉污染是农田镉污染的主要来源, 来自灌溉水的镉自农田环境输入水稻, 而富集至稻谷中输出。通过食物链的生物富集和放大效应进入人体, 镉中毒会导致人肾功能紊乱, 甚至死亡<sup>[2]</sup>。

镉在自然水体中的形态主要为悬浮态, 通常悬浮态镉含量比溶解态镉含量大  $10^3 \sim 10^6$  倍<sup>[3]</sup>。杨舒<sup>[4]</sup>认为 Cd 在自然水体悬浮态所占比例为 99%。Song 等<sup>[5]</sup>研究发现自然水体悬浮物中重金属地质累积指数很高, 悬浮物控制着整个水体环境中污染物的循环。关于水生植物对水体中悬浮物的助沉降作用和对水体重金属的富集作用长期以来亦有大量研究, 流动水体和静态水体悬浮物的再悬浮会明显受一些水生植物的抑制<sup>[6]</sup>。水生植物对重金属的去除机理主要有植物吸收<sup>[7-9]</sup>、根系微生物活动<sup>[8]</sup>、植物富集作用<sup>[10]</sup>。而水生植物通常是通过螯合和区室化等作用来耐受并吸收富集重金属<sup>[11]</sup>。该试验按照湖南省本地生长、易于繁殖培养、重金属富集系数高和根系发达的原则, 挑选了水葫芦、狐尾藻、紫背

浮萍和美人蕉这 4 种水生植物, 研究其对模拟灌溉水中镉的去除情况, 分别比较其对水体中悬浮态镉净化作用, 并筛选出去除作用较好的 2 个品种, 进一步开展分析试验, 探讨其去除机制, 以期为使用常见自然水生植物治理水环境镉污染技术提供科学依据。

## 1 材料与方法

**1.1 试剂与仪器** 四水硝酸镉、盐酸、硝酸, 纯度均为分析纯, 用水均为超纯水 (18M Milli-Q); 电子天平、数显恒温鼓风干燥箱、721 型可见分光光度计、pH 计、便携式电导率仪、ICP-OES。

## 1.2 试验方法

**1.2.1 模拟灌溉水的配制和水生植物培养。** 先从湖南省长沙市浏阳河采集自然水, 同时采集河滩泥和流域附近池塘底泥混合备用。随后按照每 10 L 水添加 50 g 河泥混合物配制并振荡均匀, 然后添加四水硝酸镉至体系镉浓度为 20  $\mu\text{g/L}$ , 静置 3 d 备用, 另备有不添加四水硝酸镉的模拟灌溉水用于无外源镉试验。野外取长势良好的植物水葫芦、狐尾藻、紫背浮萍、美人蕉, 加入采集的浏阳河自然水和河泥混合物, 于 50 L 塑料桶中在室外培养 7 d。

**1.2.2 沉降试验。** 将长势良好且植株完整的水生植物 150 g, 使用配制好的模拟灌溉水, 在带刻度的 5 L 烧杯中, 于气温为 25~29  $^{\circ}\text{C}$  的室内进行沉降试验, 并设平行试验组和对照试验组。分别于试验开始后 1、6、12、24、48、72 h 在 2 000 mL 刻度线处取样, 并用分光光度计于 660 nm 波长处分析, 了解悬浮物浓度随时间变化的情况。

**1.2.3 镉去除试验。** 取长势良好且植株完整的水生植物

**基金项目** 国家重点研究发展计划 (SQ2017YFNC060064); 湖南省自然科学基金项目 (2017JJ2112); 湖南省教育厅重点项目 (18A095); 国家环境保护重金属污染监测重点实验室基金项目 (SKLMHM202101, SKLMHM202116)。

**作者简介** 李智义 (1991—), 男, 湖南长沙人, 工程师, 硕士, 从事水环境污染与治理研究。

**收稿日期** 2021-08-19; **修回日期** 2021-08-31

150 g, 然后将其放入带刻度的 5 L 烧杯中, 加入提前配制好镉浓度为 20  $\mu\text{g/L}$  的模拟灌溉水, 混匀静置, 设 3 个平行试验和 1 个对照试验, 于气温为 25~29  $^{\circ}\text{C}$  的室内进行。分别于试验开始后 1、6、12、24、48、72 h 在 2 000 mL 刻度线处取样两组样品, 一组样品通过王水水浴消解后, 用石墨炉法测量其重金属镉的总浓度, 另一组样品先通过 0.45  $\mu\text{m}$  水性滤膜过滤, 之后添加硝酸酸化, 利用石墨炉法检测其离子态镉含量。取样同时使用便携式测试仪测量水体中的电导率和 pH。

**1.2.4 去除机制研究。** 为了确定悬浮物的去向, 选取在沉降试验和镉去除试验中效果较好的 2 种植物, 增加无外源镉的 2 号对照组 (CK2) 试验, 分别收集去除镉试验和无外源镉试验沉降 72 h 后的根部的悬浮物、底部底泥, 使用烘干称重法计算其含水率, 随后使用土样消解法制样, 利用 ICP-OES 检测样品的镉含量, 探究悬浮物和镉的主要去除机制以及镉的主要富集点位。

## 2 结果与分析

### 2.1 紫背浮萍和美人蕉对悬浮物及悬浮态镉的去除作用

从美人蕉和紫背浮萍对体系中悬浮物和镉的去除情况

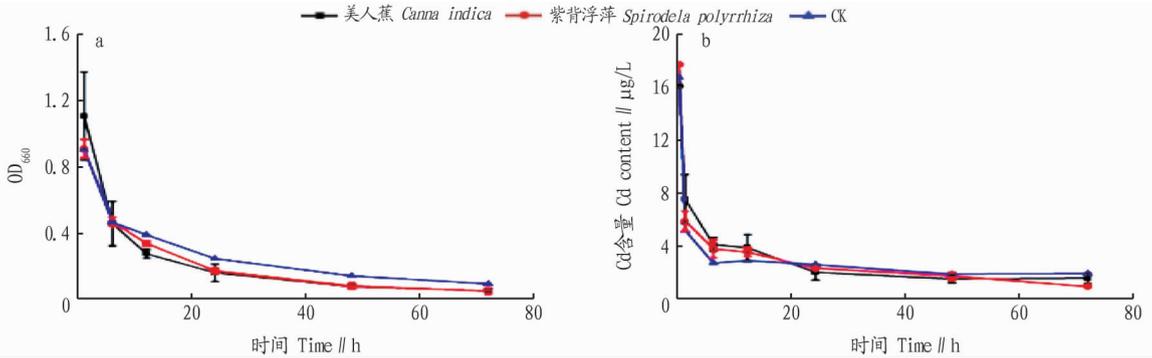


图 1 美人蕉和紫背浮萍对体系中悬浮物 (a) 和镉 (b) 的去除

Fig. 1 Removal of suspended solids (a) and cadmium (b) in the system by *Canna indica* and *Spirodela polyrrhiza*

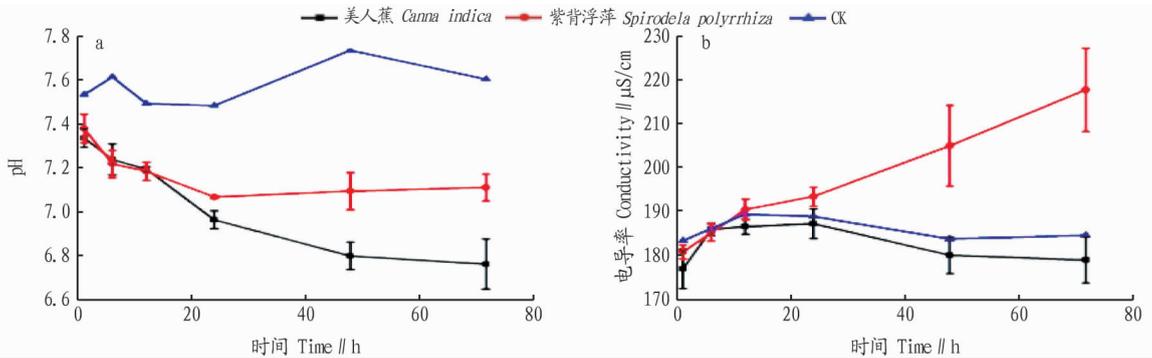


图 2 美人蕉和紫背浮萍对体系中 pH (a) 和电导率 (b) 的影响

Fig. 2 Effects of *Canna indica* and *Spirodela polyrrhiza* on pH (a) and conductivity (b) in the system

**2.2 狐尾藻和水葫芦对悬浮物及悬浮态镉的去除作用** 从狐尾藻和水葫芦对体系中悬浮物及悬浮态镉的去除情况 (图 3) 可以看出, 两者对体系中的悬浮物有明显的促沉降作用, 反应 1 h 后, 两者样品的吸光度分别为 0.73、0.72, 48 h 后整个反应基本达到平衡, 两者吸光度分别为 0.08、0.09; 两者通过助沉降作用对镉的去除均有较为明显的效果, 经过 24 h 水葫芦去除效率能够达到 88.25%, 狐尾藻去除效率为

(图 1) 可以看出, 试验开始 12 h 后, 美人蕉和紫背浮萍对体系中的悬浮物显示出微弱的促沉降作用; 美人蕉和紫背浮萍对悬浮态镉的去除没有明显作用; 重金属镉的去除趋势与悬浮物沉降趋势基本一致, 符合既往研究中灌溉水中的镉主要为悬浮态的结论<sup>[2]</sup>, 也说明通过沉降悬浮物的方法来去除镉的思路可行。

从美人蕉和紫背浮萍对镉的去除过程中整个体系的 pH 和电导率影响 (图 2) 可以看出, 存在水生生物的体系的 pH 相对对照组呈现下降趋势, 说明水生植物的根系分泌了促沉降的酸性物质<sup>[7]</sup>, 电导率相对对照组存在变化也说明 2 种水生植物在体系中表现出了生物活动。

吴红飞等<sup>[12]</sup>研究了苦草和伊乐藻悬浮物再悬浮的阻拦作用, 许晓伟等<sup>[13]</sup>研究了芦苇和伊乐藻对太湖悬浮物再悬浮的影响, 这些研究表明, 根系发达的植物能够阻拦大量的悬浮物, 同时分泌大量黏性的根系分泌物可以吸附悬浮物。而美人蕉和紫背浮萍的根系不够发达, 无法起到良好的助沉降作用。

94.42%, 2 个体系的水镉浓度均从 20.0  $\mu\text{g/L}$  分别下降至 2.4 和 1.1  $\mu\text{g/L}$ , 达到农田灌溉水质出水标准。

从狐尾藻和水葫芦对镉的去除过程中整个体系的电导率和 pH 影响 (图 4) 可以看出, 电导率随沉降时间呈现上升趋势, 48 h 后狐尾藻体系的电导率趋于稳定; 而 pH 随沉降时间呈现下降趋势, 与电导率趋势呈明显负相关, 48 h 后 2 个体系均趋于稳定。由此推测, 电导率的上升一方面是因为对

电流传导有阻隔作用的悬浮物被去除;另一方面是由于生物活动,如根系分泌有机酸和共生细菌硝化作用等<sup>[14]</sup>,导致 pH 的下降,阳离子浓度升高,故电导率提升。

植物根系环境复杂,植物根系的边界细胞分泌包括多

糖、蛋白质、胞外 DNA 等组成的黏液层,与植物根系本身构成了综合的根系环境,起到抵御污染物质和微生物侵害的主要作用<sup>[9]</sup>。这些高分子组分还对水体中的悬浮物具有桥连吸附<sup>[15]</sup>和电性中和作用<sup>[16]</sup>。

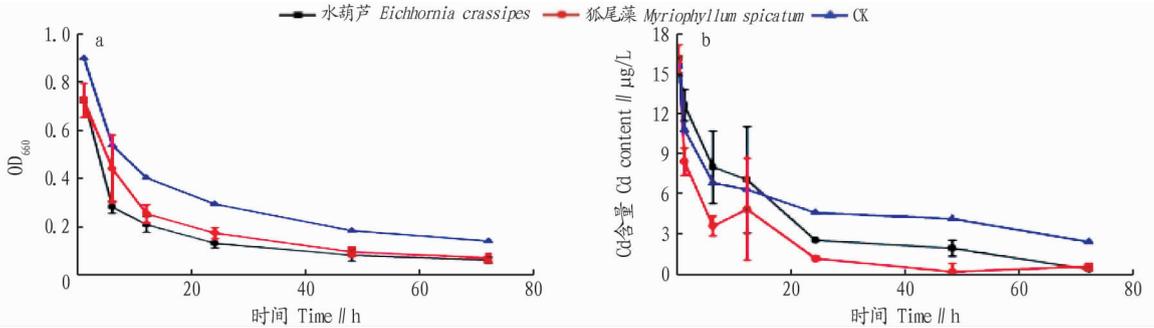


图 3 狐尾藻和水葫芦对体系中悬浮物 (a) 和镉 (b) 的去除

Fig. 3 Removal of suspended solids (a) and cadmium (b) in the system by *Myriophyllum spicatum* and *Eichhornia crassipes*

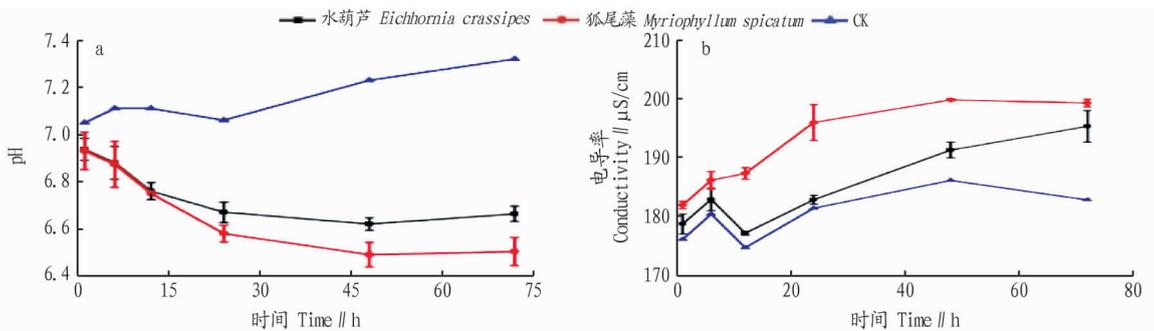


图 4 狐尾藻和水葫芦对体系中 pH (a) 和电导率 (b) 的影响

Fig. 4 Effects of *Myriophyllum spicatum* and *Eichhornia crassipes* on pH (a) and conductivity (b) in the system

**2.3 悬浮态镉的去除机制** 因为去除效果更优,筛选出水葫芦和狐尾藻进行悬浮态镉的去除机制分析,经过 72 h 沉降后,水葫芦和狐尾藻的根系与底部的悬浮物含水量在 44%~46%。比较两者根部悬浮物和底部底泥含量的干重和湿重(表 1)发现,狐尾藻均高于水葫芦。原因是水生植物依靠水下部分根系拦截水体悬浮物,狐尾藻拥有更复杂的根系<sup>[17]</sup>和更高的水下部分占比,因此狐尾藻对悬浮物的拦截作用更明显。

表 1 水葫芦和狐尾藻根部悬浮物和底泥重量

Table 1 Suspended solids and sediment weights at the roots of *Eichhornia crassipes* and *Myriophyllum spicatum*

植物 Plant	点位 Adsorption site	湿重 Wet weight//g	干重 Dry weight//g
狐尾藻 <i>Myriophyllum spicatum</i>	悬浮物	2.56	1.62
	底泥	10.69	6.91
水葫芦 <i>Eichhornia crassipes</i>	悬浮物	2.40	1.34
	底泥	8.82	6.08
CK		10.42	4.79

图 5 是水葫芦和狐尾藻的底泥镉含量,其中对照组 (CK) 为添加负载镉河泥的对照组,而 2 号对照组 (CK2) 为无外源镉对照组。由图 5 可知,CK、水葫芦、狐尾藻和 CK2 组的重金属镉含量分别为 5.83、5.90、5.39、2.12 mg/kg。结合表 1 中的底泥含量数据计算出环境本底样品的镉质量,同理,无外源镉试验中植物的组分中镉质量作为植物本底镉质量,结果见表 2。

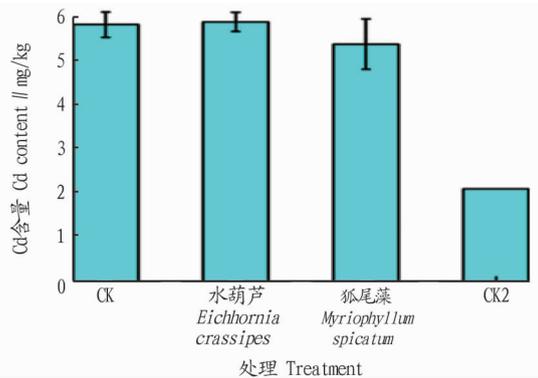


图 5 底泥镉含量

Fig. 5 The cadmium content in sediments

由表 2 可知,试验组的水葫芦和狐尾藻的悬浮物和底泥总镉质量分别为 40.68 和 45.98  $\mu\text{g}$ ,对照组为 27.93  $\mu\text{g}$ ,减去无外源组的镉质量,即排除植物富集点位本身含有的镉质量和底泥本底镉质量,水葫芦和狐尾藻的总富集镉质量分别为 24.99 和 27.94  $\mu\text{g}$ ,CK 为 17.80  $\mu\text{g}$ 。这说明水葫芦和狐尾藻助沉降去除镉效果明显,其中狐尾藻效果略强。

将水葫芦和狐尾藻悬浮物、底泥的镉质量分别减去对应无外源组中的镉质量,得到其悬浮物和底泥 2 个富集点位的镉质量,与去除镉总质量求比值,分别比较其通过吸附作用和助沉降作用去除镉的比例。结果发现,水葫芦和狐尾藻

底泥镉质量占比分别为 79.67%、81.03%，这说明水生植物主要依靠植物助沉降作用去除水体中镉。占很小的一部分的镉被物理吸附到植物根部，根系发达的狐尾藻在沉降水体中镉的能力上更具优势。

表 2 富集点位镉质量

Table 2 The mass of cadmium in enrichment point  $\mu\text{g}$

处理 Treatment	悬浮物 Suspended solids	底泥 Sediment	总量 Total
水葫芦 <i>Eichhornia crassipes</i>	7.91	32.77	40.68
狐尾藻 <i>Myriophyllum spicatum</i>	8.73	37.25	45.98
CK	—	27.93	27.93
水葫芦 (无外源) <i>Eichhornia crassipes</i> (no external source)	2.83	12.86	15.69
狐尾藻 (无外源) <i>Myriophyllum spicatum</i> (no external source)	3.43	14.61	18.04
CK2	—	10.13	10.13

### 3 结论

通过研究狐尾藻、水葫芦、美人蕉和紫背浮萍 4 种南方常见水生植物对灌溉水中镉的去除能力，结果发现，水生植物能够通过根系环境主导对悬浮物的助沉降作用以及去除灌溉水中的镉，其机理以根系分泌物的吸附作用为主导。其中狐尾藻的去除效果最为明显，去除效率为 94.42%，通过分析根部悬浮物和底部底泥的质量和镉含量发现，原因在于狐尾藻具有四者中最为复杂的根系系统。根系复杂的水生生物在去除灌溉水中镉的方面显示出良好的性能，为选取治理农田灌溉水镉污染的水生植物提供了参考。

### 参考文献

[1] ZHAO F J, MA Y B, ZHU Y G, et al. Soil contamination in China: Current

(上接第 76 页)

### 4 结论

贡湖生态修复示范区中尺度模型内，春季水质由 V 类恢复到 II 类约需要 14 d，夏季约需要 17 d，秋季约需要 20 d，冬季模型内基本无净化能力。总结了适宜贡湖生态修复示范区的水动力调控模式为春低秋常冬高夏循环，即春季保持低水位，秋季保持常水位，冬季保持高水位，夏季使水体保持循环状态。在太湖流域贡湖生态修复示范区构建完整的生态系统，通过水动力调控机制，不仅能够为水生植物生态系统提供良好的生长环境，同时能够为太湖制造更多的清水。

### 参考文献

- [1] 方伟. 鼓楼区河西水环境治理与修复[D]. 南京: 淮海大学, 2008.
- [2] 张良平, 王珏, 徐骏. 调水改善武澄锡虞区河网水质效果评估[J]. 人民长江, 2009, 40(7): 30-32.
- [3] 庞翠超, 许军平, 汪德耀. 南京河西水系引江冲污改善水环境方案研究[J]. 人民长江, 2012, 43(5): 76-79.
- [4] 徐贵泉, 褚君达. 上海市引清调水改善水环境探讨[J]. 水资源保护, 2001(3): 26-30.
- [5] 陈昌才, 王化可, 唐红兵. 生态调水对巢湖水环境的改善效果研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(17): 10387-10390.
- [6] 孙娟, 阮晓红. 引调清水改善南京城市内河水环境效应研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(3): 29-31.
- [7] 周小平, 翟淑华, 袁粒. 2007—2008 年引江济太调水对太湖水质改善效果分析[J]. 水资源保护, 2010, 26(1): 40-43, 48.
- [8] COOPS H, BEKLIÖGLU M, CRISMAN T L, et al. The role of water-level

- status and mitigation strategies[J]. Environmental science & technology, 2015, 49(2): 750-759.
- [2] FU F L, WANG Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review[J]. Journal of environmental management, 2011, 92(3): 407-418.
- [3] 朱英. 东平湖重金属污染物分布特征及其存在形态的研究[D]. 济南: 山东大学, 2005.
- [4] 杨舒. 重金属 Cu, Cd, Pb, Zn 在人工湿地中的形态分布与转化[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [5] SONG Y X, JI J F, MAO C P, et al. Heavy metal contamination in suspended solids of Changjiang River-environmental implications[J]. Geoderma, 2010, 159(3/4): 286-295.
- [6] 郭长城, 喻国华, 王国祥. 高等水生植物对悬浮颗粒物再悬浮的影响[J]. 人民黄河, 2007, 29(4): 37-38.
- [7] KIM Y, KIM W J. Roles 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.
- [8] CIESLINSKI G, VAN REES K C J, SZMIGIELSKA A M, et al. Low-molecular-weight organic acids in rhizosphere soils of durum wheat and their effect on cadmium bioaccumulation[J]. Plant and soil, 1998, 203(1): 109-117.
- [9] BLAKE R C, CHOATE D M, BARDHAN S, et al. Chemical transformation of toxic metals by a *Pseudomonas* strain from a toxic waste site[J]. Environmental toxicology and chemistry, 1993, 12(8): 1365-1376.
- [10] 方飞, 浦晨霞, 武帅, 等. 水分调控下 4 种水生植物对重金属的吸附与富集作用[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(14): 78-81, 160.
- [11] 张正庆, 鲍美娥, 陈嘉斌, 等. 植物对重金属的耐性机制[J]. 甘肃科技, 2013, 29(5): 69-71.
- [12] 吴红飞, 魏小飞, 关保华, 等. 沉水植物对鱼类扰动引起的沉积物再悬浮的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(4): 369-371.
- [13] 许晓伟, 陈昌仁, 万福绪, 等. 高等水生植物对太湖沉积物再悬浮特征的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(3): 1706-1709.
- [14] 翟龙波, 陈靖, 章熙峰, 等. 不同水生植物对大肠杆菌去除作用的比较研究[J]. 人民长江, 2019, 50(4): 42-47.
- [15] 曹健, 张白鸽, 陈琼贤, 等. 菜田地表灌溉水污染物净化处理技术研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(17): 277-283.
- [16] 杨小蛟. 基质与水生植物对生活污水处理效果的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
- [17] 杨登, 张昊, 邹慧玲, 等. 镉在水生植物中的富集与亚细胞分布及其化学形态特征[J]. 西北植物学报, 2018, 38(4): 682-689.

- fluctuations in shallow lake ecosystems-workshop conclusions[J]. Hydrobiologia, 2003, 506/507/508/509: 23-27.
- [9] DE DOMITROVIC Y Z. Effect of fluctuations in water level on phytoplankton development in three lakes of the Paran'a river floodplain (Argentina)[J]. Hydrobiologia, 2003, 510(1/2/3): 175-193.
- [10] COOPS H, VULINK J T, VAN NES E H. Managed water levels and the expansion of emergent vegetation along a lakeshore[J]. Limnologia, 2004, 34(1/2): 57-64.
- [11] 杨阳, 钱新, 叶端, 等. 引水放水方式对太湖贡湖示范区水质的影响[J]. 环境监测管理与技术, 2015, 27(4): 61-64.
- [12] 刘喆, 钱新, 高海龙, 等. 沉水植物群落配置对太湖贡湖生态修复区的调水效果[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(5): 480-483.
- [13] 赵海超, 赵海香, 王圣瑞, 等. 沉水植物对沉积物及土壤垂直向各形态无机磷的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 74-80.
- [14] TAGUCHI K, NAKATA K. Evaluation of biological water purification functions of inland lakes using an aquatic ecosystem model[J]. Ecological modelling, 2009, 220(18): 2255-2271.
- [15] 胡莲, 万成炎, 沈建忠, 等. 沉水植物在富营养化水体生态修复中的作用及前景[J]. 水利渔业, 2006, 26(5): 69-71.
- [16] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(2): 87-91.
- [17] 欧冬妮, 刘敏, 侯立军, 等. 长江口潮滩植物根际沉积物磷的累积及其生物有效性[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 290-294.
- [18] 刘兵钦, 王万贤, 宋春雷, 等. 菹草对湖泊沉积物磷状态的影响[J]. 武汉植物学杂志, 2004, 22(5): 394-399.
- [19] HEBB A J. Implementation of a GIS to assess the effects of water level fluctuations on the wetland complex at Long Point, Ontario[D]. Waterloo: University of Waterloo, 2003.
- [20] 刘永, 郭怀成, 周丰, 等. 湖泊水位变动对水生植被的影响机理及其调控方法[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 3117-3126.