



## 黑藻、狐尾藻对重金属 铅、镉、铬、钒污染水体的修复

林 海<sup>1,2</sup>, 陈 思<sup>1,2</sup>, 董颖博<sup>1,2</sup>, 孙梦瑶<sup>1,2</sup>, 刘璐璐<sup>1,2</sup>

(1. 北京科技大学 能源与环境工程学院, 北京 100083;

2. 北京科技大学 工业典型污染物资源化处理北京市重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:** 在实验室条件下研究水生植物黑藻和狐尾藻对水体中重金属  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{6+}$  和  $\text{V}^{5+}$  的削减效果以及不同浓度重金属对植物生理的影响。结果表明: 狐尾藻和黑藻对  $\text{Pb}^{2+}$  均具有较好的削减效果, 当  $\text{Pb}^{2+}$  浓度为 15 mg/L 时, 二者的削减率分别达到 98.38%、94.35%; 黑藻对水体中  $\text{Cd}^{2+}$  (5 mg/L) 和  $\text{Cr}^{6+}$  (0.2 mg/L) 的削减率分别为 96.53% 和 69.23%, 远高于相同重金属浓度下狐尾藻对  $\text{Cd}^{2+}$  的削减率 (70.23%) 以及对  $\text{Cr}^{6+}$  的削减率 (26.73%); 但狐尾藻和黑藻对水体中  $\text{V}^{5+}$  的削减率均不高, 当水体中  $\text{V}^{5+}$  浓度为 2 mg/L 时, 二者的削减率分别为 16.71% 和 19.23%。叶绿素 a、相对细胞电导率测试结果表明: 随着金属浓度的升高、培养时间的延长, 叶绿素 a 含量呈下降趋势, 相对细胞电导率增大;  $\text{V}^{5+}$  对黑藻、狐尾藻的胁迫程度较小, 其次为  $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Cr}^{6+}$ , 且黑藻的受胁迫程度大于狐尾藻的, 而  $\text{Pb}^{2+}$  对两种藻类的胁迫程度相对较大。总之, 黑藻和狐尾藻对水体中重金属  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{6+}$  和  $\text{V}^{5+}$  的污染均有一定的修复能力, 且黑藻的效果优于狐尾藻的。

**关键词:** 重金属污染; 植物修复; 黑藻; 狐尾藻; 耐受性

**中图分类号:** X522

**文献标志码:** A

石煤钒矿在开采、选矿和冶炼过程中, 矿物的物理化学性状将发生改变, 特别是提钒过程中会产生大量高浓度的废水、废渣, 在土壤环境、大气环境及水环境中迁移<sup>[1]</sup>, 并且携带与石煤钒矿伴生的重金属铬、镉和铅等向外界环境释放, 污染水体和土壤, 甚至还会危害人类健康<sup>[2-5]</sup>。近年来, 由于采用物理方法和化学方法处理河道水体中的重金属存在处理效果差、投资成本大、易造成二次污染等问题, 利用微生物和大型水生植物对河道水体重金属进行修复的研究越来越多<sup>[4, 6-9]</sup>, 特别是大型水生植物, 具有对重金属富集效果佳、生长状态稳定、投资成本低等特点, 越来越引起人们的重视<sup>[10-12]</sup>。黑藻、狐尾藻是水体中常见的藻类植物, 其具有生长快, 生物量大等生理优势<sup>[13-14]</sup>。诸多研究发现, 重金属胁迫会抑制的植物叶绿素含量<sup>[15]</sup>。在不同重金属胁迫下, 植物光合作用和叶绿素含量的变化不同, 叶绿素含量可表征植物组织、器官的衰老状况<sup>[8, 16]</sup>。细胞通过细胞膜与外界环境进行信息交流和物质交换, 细胞膜控制和调节着细胞内外物质的交换和运输, 维持细胞的正常的代谢<sup>[15]</sup>。当植物

处于有害环境时, 细胞膜会被首先破坏, 从而导致细胞膜透性增大, 因此细胞膜透性也可作为评价污染物对植物生理影响的依据<sup>[17]</sup>。

植物修复技术是一种通过金属富集植物去除土壤或水体中有害金属的低成本的、有效的绿色环境净化技术。然而, 目前国内外植物修复的研究大多是关于单种重金属富集植物的筛选, 而关于钒矿加工带来重金属污染的植物修复研究鲜有报道。本文作者针对湖北省境内某钒矿区周边河段水体中重金属  $\text{V}^{5+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{6+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  均严重超过地表 II 类水标准的问题, 重点研究了黑藻、狐尾藻对重金属铅、镉、铬和钒污染水体的修复能力, 为水生植物修复钒矿加工带来的河流重金属复合污染问题后续研究提供基础依据。

## 1 实验

### 1.1 材料及装置

黑藻和狐尾藻均购于某苗圃基地, 生长环境无重

**基金项目:** 国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2015ZX07205003)

**收稿日期:** 2015-12-15; **修订日期:** 2016-08-23

**通信作者:** 董颖博, 副教授; 电话: 010-62333603; E-mail: ybdong@ustb.edu.cn

金属影响。试验前使用 1/4 霍格兰德营养液培养, 培养用水为经暴晒 3 天的自来水; 培养稳定一周后进行试验。试验前将植物用自来水反复冲洗, 再用去离子水冲洗。

以湖北某钒冶炼厂附近河流水体重金属  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{6+}$  和  $\text{V}^{5+}$  污染现状为依据, 分别配制含不同  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{6+}$  和  $\text{V}^{5+}$  浓度的水样, 所用化学药剂分别为硝酸铅、氯化镉、重铬酸钾、偏钒酸铵。

试验在温室大棚内进行, 温度范围为 27~35 °C, 相对湿度范围为 70%~90%。装置采用尺寸为 400 mm×300 mm×200 mm 透明整理箱。

## 1.2 实验方法

湖北某钒冶炼厂附近河道水体中重金属  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{6+}$  和  $\text{V}^{5+}$  的浓度分别为 5~15 mg/L、5~15 mg/L、0.2~2 mg/L 和 2~20 mg/L, 以此为依据, 配制了含不同重金属浓度的水样,  $\text{V}^{5+}$  浓度分别为 2、10 和 20 mg/L,  $\text{Cd}^{2+}$  浓度分别为 5、10 和 15 mg/L,  $\text{Cr}^{6+}$  浓度分别为 0.2、1 和 2 mg/L,  $\text{Pb}^{2+}$  浓度分别为 5、10 和 15 mg/L。分别将含不同浓度  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{6+}$  和  $\text{V}^{5+}$  的水样放入整理箱中, 并在各组水样中添加一定量霍格兰德营养液, 每箱水样均为 10 L。然后分别放入黑藻和狐尾藻进行培养, 每箱植物质量均为(40±5) g, 植株使用固植篮进行固定, 每组试验设置 3 个平行样品。同时设置未加重金属的植物培养组作为对照。试验周期为 14 天, 分别于培养 7 天、14 天采集植物样品, 每次取得新鲜植物样品质量约为 0.5 g, 置于冰箱保鲜层保存(4 °C), 保存时间不超过 24 h, 用于测定植物细胞电导率及叶绿素含量。并于试验周期结束时测试水中重金属浓度, 并依照公式(1)计算重金属削减量。

$$M = (\rho_1 - \rho_2) \times V \quad (1)$$

式中:  $M$  为重金属削减量, mg;  $\rho_1$  为周期开始时水中重金属浓度, mg/L;  $\rho_2$  为周期结束时水中重金属浓度, mg/L。  $V$  为水样的体积, L。

## 1.3 检测方法

### 1.3.1 叶绿素 a 含量测试

采用浸提法用紫外分光光度计测定叶片单位鲜重的叶绿素 a 含量, 用于叶绿素提取的叶片作为测定光合指标的叶片。

### 1.3.2 植物细胞电导率测试

选取植株生长情况正常的叶片若干, 将叶片先用自来水轻轻冲洗除去表面的污物, 再用去离子水冲洗, 用滤纸轻轻吸干叶片表面的水分。对照 3 组, 每组设 3 个重复, 各取 0.1 g; 称样后剪成长约 0.2 cm 的小

段放入 100 mL 烧杯中, 注入 10 mL 蒸馏水浸没叶片。将烧杯放入真空干燥器中, 用真空泵抽气 10 min 以除去水与叶表面之间和细胞间隙的空气, 使叶片组织内电解质更易渗出; 从真空干燥器中取出后振荡 10 min, 之后在室温(25 °C)中放置 1 h, 使之进一步渗透。用电导率仪测电导率  $R_1$ 。将烧杯再放入 100 °C 沸水浴中 15 min, 将组织全部杀死, 使原生质膜完全破坏; 取出放入自来水冷却至室内温度。用电导仪测得电导率  $R_2$ , 以相对电导率( $C_e$ )表征原生质膜受胁迫伤害程度。其计算公式如下:

$$C_e = \frac{R_1}{R_2} \times 100\% \quad (2)$$

### 1.3.3 水体中重金属测试

使用 0.45 μm 的滤膜滤过水样后采用 ICP-MS (Agilent 7700)测试其重金属含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 狐尾藻、黑藻对水体中重金属的削减效果

图 1 和图 2 所示分别为狐尾藻和黑藻对水体中不同种类和浓度重金属削减的试验结果。

由图 1 可知, 随着重金属浓度增加, 狐尾藻对水样中重金属的削减量逐渐增加, 但是对水样中  $\text{V}^{5+}$  和  $\text{Cr}^{6+}$  的削减率逐渐减小。狐尾藻对水体中铅的削减率最高, 当水体中  $\text{Pb}^{2+}$  浓度为 5、10 和 15 mg/L 时, 重金属的削减率分别达到了 97.22%、96.74%和 98.38%。 $\text{Cd}^{2+}$  的浓度为 5、10 和 15 mg/L 时, 削减率分别为 70.23%、52.08%和 50.95%。狐尾藻对  $\text{V}^{5+}$  和  $\text{Cr}^{6+}$  的削减量相对不高;  $\text{V}^{5+}$  浓度为 20 mg/L、 $\text{Cr}^{6+}$  浓度为 2 mg/L 时, 重金属削减率分别为 5.97%和 18.26%。综上, 狐尾藻对重金属  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  削减效果好, 而对  $\text{V}^{5+}$  和  $\text{Cr}^{6+}$  的削减效果较差。

由图 2 可知, 随着重金属  $\text{V}^{5+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  浓度增加, 黑藻对水样中的重金属削减量增加。而随着  $\text{Cr}^{6+}$  浓度增加, 黑藻的削减量先增大后减小; 说明  $\text{Cr}^{6+}$  浓度为 2 mg/L 时, 黑藻对  $\text{Cr}^{6+}$  的削减能力已经达到极限。黑藻对  $\text{Pb}^{2+}$  对削减率随浓度增加而增大,  $\text{Pb}^{2+}$  浓度为 5、10 和 15 mg/L 时的削减率分别为 89.63%、92.27%和 94.35%。黑藻对  $\text{Cd}^{2+}$  的削减效果也较好,  $\text{Cd}^{2+}$  浓度为 5 mg/L 时的削减率高达 96.53%。黑藻对水体中  $\text{V}^{5+}$  的削减率不高, 均都低于 20%。

综合分析得出: 狐尾藻和黑藻对水体中  $\text{Pb}^{2+}$  均具有较好削减效果, 当  $\text{Pb}^{2+}$  浓度为 15 mg/L 时, 二者对水体中  $\text{Pb}^{2+}$  的削减率分别达到 98.38%和 94.35%。黑

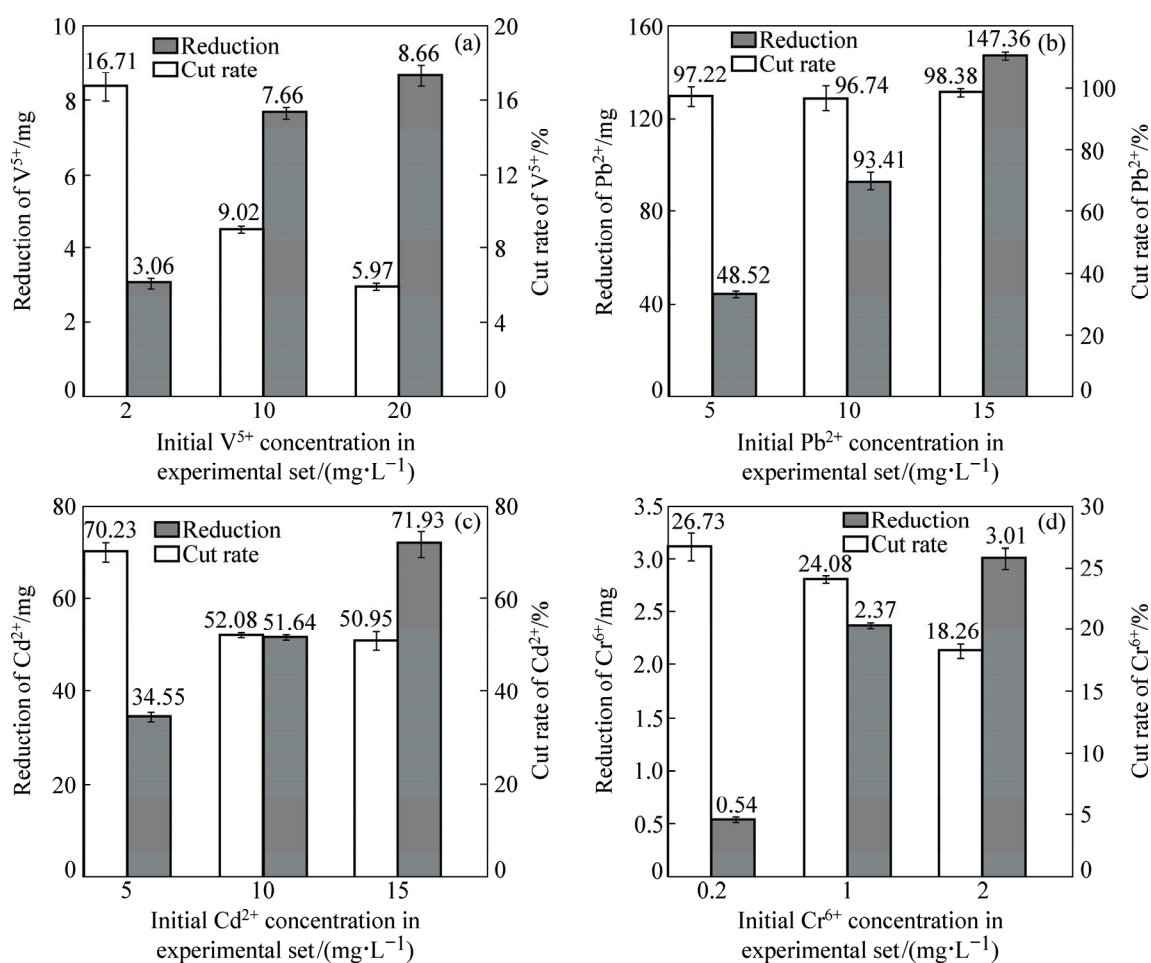


图1 狐尾藻对水样中重金属的削减效果

Fig. 1 Reduction effectiveness of heavy metal in water environment by *Myriophyllum verticillatum*: (a) V<sup>5+</sup>; (b) Pb<sup>2+</sup>; (c) Cd<sup>2+</sup>; (d) Cr<sup>6+</sup>

藻在 Cd<sup>2+</sup> 浓度为 5 mg/L 时削减率达到 96.53%, 在 Cr<sup>6+</sup> 浓度为 0.2 mg/L 时削减率为 69.23%; 在相同浓度下, 狐尾藻对 Cd<sup>2+</sup> 和 Cr<sup>6+</sup> 的削减率分别为 70.23% 和 26.73%, 削减效果远低于黑藻; 但狐尾藻和黑藻对水体中 V<sup>5+</sup> 的削减率均不高。当水体中 V<sup>5+</sup> 浓度为 2 mg/L 时, 二者对 V<sup>5+</sup> 的削减率分别为 16.71% 和 19.23%。狐尾藻和黑藻均可应用于修复 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>、Cr<sup>6+</sup> 和 V<sup>5+</sup> 污染水体, 且在低浓度时削减效果较好。

## 2.2 不同浓度 V<sup>5+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 和 Cr<sup>6+</sup> 胁迫下叶绿素 a 的变化

重金属胁迫会使叶绿素 a 的含量降低, 植物在不同重金属胁迫下其光合作用和叶绿素 a 含量的变化是不同的, 其含量可表征植物生理状况<sup>[15]</sup>。研究 4 种金属离子不同浓度培养过程中植物叶绿素 a 含量的变化, 了解植物的受胁迫程度, 可间接评价植物在 4 种金属不同浓度胁迫下的耐受性。

表 1~4 所列分别为狐尾藻在不同浓度 V<sup>5+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 和 Cr<sup>6+</sup> 胁迫下叶绿素 a 含量。结果表明, 未加重金属时狐尾藻叶绿素 a 含量在两个培养周期内保持稳定。如表 1 所示, V<sup>5+</sup> 浓度为 20 mg/L 时狐尾藻叶绿素 a 含量随着培养时间延长而减少, 培养 14 天后与空白样品相比下降了 28.5%; V<sup>5+</sup> 浓度低于 20 mg/L 时, 狐尾藻叶绿素 a 含量维持在正常水平。表 2~4 结果表明, 随着环境中 Cr<sup>6+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 和 Pb<sup>2+</sup> 浓度的增加, 狐尾藻叶绿素 a 含量逐渐降低, 并随着培养时间增加而减少; 在培养 14 天后, Cr<sup>6+</sup> 浓度为 2.0 mg/L 时狐尾藻叶绿素 a 含量下降了 56.5%; Cd<sup>2+</sup> 浓度为 15 mg/L 时狐尾藻叶绿素 a 含量下降了 56.6%; Pb<sup>2+</sup> 浓度为 15 mg/L 时的第 14 天, 狐尾藻叶绿素 a 含量下降了 65.1%, 下降幅度最大。

表 5~8 所列分别为黑藻在不同浓度 V<sup>5+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 和 Cr<sup>6+</sup> 胁迫下的叶绿素 a 含量。结果表明, 随着 V<sup>5+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 和 Cr<sup>6+</sup> 浓度升高, 黑藻叶绿素 a 含量

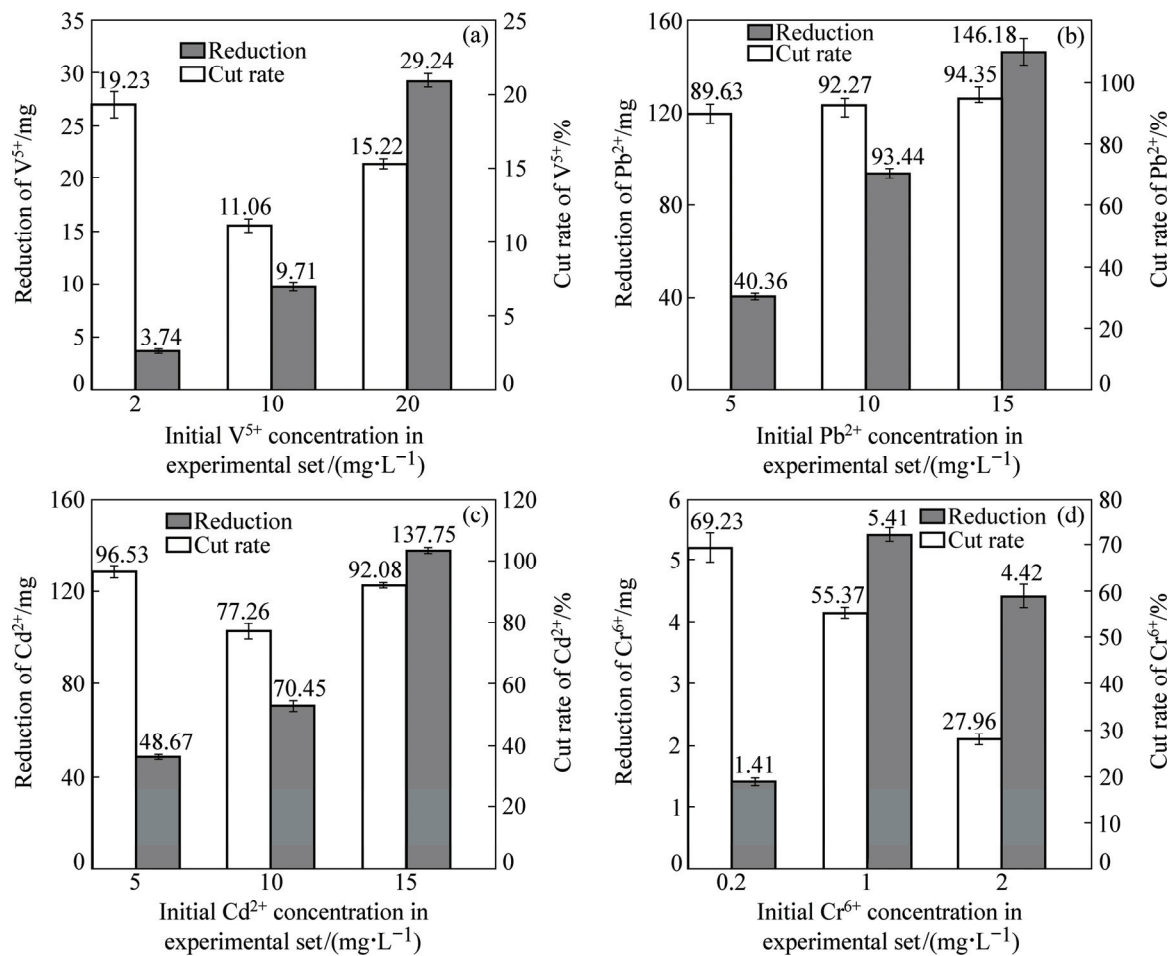


图 2 黑藻对水样中重金属的削减效果

**Fig. 2** Reduction effectiveness of heavy metal in water environment by *Hydrilla verticillata*: (a) V<sup>5+</sup>; (b) Pb<sup>2+</sup>; (c) Cd<sup>2+</sup>; (d) Cr<sup>6+</sup>

降低; 培养 14 天后, V<sup>5+</sup>浓度为 20 mg/L 时黑藻叶绿素 a 含量下降了 55.4%, Pb<sup>2+</sup>浓度为 15 mg/L 时黑藻叶绿素 a 含量下降了 66.5%, Cd<sup>2+</sup>浓度为 15 mg/L 时黑藻叶绿素 a 含量下降了 69.4%; 其中 Cr<sup>6+</sup>对黑藻叶绿素 a 含量的影响最大, Cr<sup>6+</sup>浓度为 2 mg/L 时黑藻叶绿素 a 含量下降了 52.0%。

表 1 不同浓度 V<sup>5+</sup>胁迫下狐尾藻的叶绿素 a 含量

**Table 1** Chla content of *Myriophyllum verticillatum* stressed under different V<sup>5+</sup> concentrations

| V <sup>5+</sup> concentration/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | Chla content/(mg·g <sup>-1</sup> ) |            |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------|------------|
|                                                         | 7 days                             | 14 days    |
| 0                                                       | 1.15±0.028                         | 1.15±0.041 |
| 2                                                       | 0.96±0.043                         | 0.95±0.075 |
| 10                                                      | 0.93±0.094                         | 1.07±0.042 |
| 20                                                      | 0.87±0.018                         | 0.82±0.062 |

Note: average value ± standard deviation, n=3.

V<sup>5+</sup>浓度低于 20 mg/L 时, 两种藻类的叶绿素 a 含量维持正常水平, V<sup>5+</sup>浓度为 20 mg/L 时狐尾藻叶绿素 a 含量下降比小于黑藻的。Pb<sup>2+</sup>对两种藻类的胁迫程度最大, Pb<sup>2+</sup>浓度为 15 mg/L 时, 狐尾藻和黑藻的叶绿素 a 分别下降了 65.1%和 66.5%。在 Cd<sup>2+</sup>和 Cr<sup>6+</sup>胁迫下狐尾藻叶绿素 a 含量下降比小于黑藻的。

表 2 不同浓度 Pb<sup>2+</sup>胁迫下狐尾藻的叶绿素 a 含量

**Table 2** Chla content of *Myriophyllum verticillatum* stressed under different Pb<sup>2+</sup> concentrations

| Pb <sup>2+</sup> concentration/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | Chla content/(mg·g <sup>-1</sup> ) |            |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------|------------|
|                                                          | 7 days                             | 14 days    |
| 0                                                        | 1.15±0.028                         | 1.15±0.041 |
| 5                                                        | 0.93±0.110                         | 0.94±0.080 |
| 10                                                       | 0.78±0.061                         | 0.80±0.018 |
| 15                                                       | 0.57±0.053                         | 0.40±0.034 |

Note: average value ± standard deviation, n=3.

表 3 不同浓度  $\text{Cd}^{2+}$  胁迫下狐尾藻的叶绿素 a 含量Table 3 Chla content of *Myriophyllum verticillatum* stressed under different  $\text{Cd}^{2+}$  concentrations

| $\text{Cd}^{2+}$ concentration/<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | Chla content/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) |                 |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------|
|                                                                      | 7 days                                         | 14 days         |
| 0                                                                    | $1.15\pm 0.028$                                | $1.15\pm 0.041$ |
| 5                                                                    | $0.95\pm 0.018$                                | $1.15\pm 0.088$ |
| 10                                                                   | $0.91\pm 0.097$                                | $0.82\pm 0.034$ |
| 15                                                                   | $0.79\pm 0.065$                                | $0.50\pm 0.016$ |

Note: average value  $\pm$  standard deviation,  $n=3$ .表 4 不同浓度  $\text{Cr}^{6+}$  胁迫下狐尾藻的叶绿素 a 含量Table 4 Chla content of *Myriophyllum verticillatum* stressed under different  $\text{Cr}^{6+}$  concentrations

| $\text{Cr}^{6+}$ concentration/<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | Chla content/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) |                 |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------|
|                                                                      | 7 days                                         | 14 days         |
| 0                                                                    | $1.15\pm 0.028$                                | $1.15\pm 0.041$ |
| 0.2                                                                  | $1.03\pm 0.018$                                | $1.13\pm 0.082$ |
| 1                                                                    | $0.97\pm 0.090$                                | $0.82\pm 0.034$ |
| 2                                                                    | $0.84\pm 0.065$                                | $0.51\pm 0.016$ |

Note: average value  $\pm$  standard deviation,  $n=3$ .表 5 不同浓度  $\text{V}^{5+}$  胁迫下黑藻的叶绿素 a 含量Table 5 Chla content of *Hydrilla verticillata* stressed under different  $\text{V}^{5+}$  concentrations

| $\text{V}^{5+}$ concentration/<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | Chla content/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) |                 |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------|
|                                                                     | 7 days                                         | 14 days         |
| 0                                                                   | $0.66\pm 0.084$                                | $0.65\pm 0.033$ |
| 2                                                                   | $0.60\pm 0.049$                                | $0.41\pm 0.074$ |
| 10                                                                  | $0.60\pm 0.083$                                | $0.39\pm 0.068$ |
| 20                                                                  | $0.59\pm 0.012$                                | $0.29\pm 0.009$ |

Note: average value  $\pm$  standard deviation,  $n=3$ .表 6 不同浓度  $\text{Pb}^{2+}$  胁迫下黑藻叶绿素 a 含量Table 6 Chla content of *Hydrilla verticillata* stressed under different  $\text{Pb}^{2+}$  concentrations

| $\text{Pb}^{2+}$ concentration/<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | Chla content/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) |                 |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------|
|                                                                      | 7 days                                         | 14 days         |
| 0                                                                    | $0.66\pm 0.054$                                | $0.65\pm 0.075$ |
| 5                                                                    | $0.42\pm 0.062$                                | $0.38\pm 0.042$ |
| 10                                                                   | $0.38\pm 0.067$                                | $0.24\pm 0.037$ |
| 15                                                                   | $0.31\pm 0.081$                                | $0.22\pm 0.048$ |

Note: average value  $\pm$  standard deviation,  $n=3$ .表 7 不同浓度  $\text{Cd}^{2+}$  胁迫下黑藻的叶绿素 a 含量Table 7 Chla content of *Hydrilla verticillata* stressed under different  $\text{Cd}^{2+}$  concentrations

| $\text{Cd}^{2+}$ concentration/<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | Chla content/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) |                 |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------|
|                                                                      | 7 days                                         | 14 days         |
| 0                                                                    | $0.66\pm 0.056$                                | $0.65\pm 0.033$ |
| 5                                                                    | $0.44\pm 0.095$                                | $0.35\pm 0.053$ |
| 10                                                                   | $0.37\pm 0.005$                                | $0.23\pm 0.006$ |
| 15                                                                   | $0.29\pm 0.010$                                | $0.20\pm 0.021$ |

Note: average value  $\pm$  standard deviation,  $n=3$ .表 8 不同浓度  $\text{Cr}^{6+}$  胁迫下黑藻的叶绿素 a 含量Table 8 Chla content of *Hydrilla verticillata* stressed under different  $\text{Cr}^{6+}$  concentrations

| $\text{Cr}^{6+}$ concentration/<br>( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | Chla content/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) |                 |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------|
|                                                                      | 7 days                                         | 14 days         |
| 0                                                                    | $0.66\pm 0.076$                                | $0.65\pm 0.050$ |
| 0.2                                                                  | $0.59\pm 0.091$                                | $0.42\pm 0.017$ |
| 1                                                                    | $0.57\pm 0.075$                                | $0.41\pm 0.071$ |
| 2                                                                    | $0.57\pm 0.064$                                | $0.31\pm 0.081$ |

Note: average value  $\pm$  standard deviation,  $n=3$ .

综上所述, 狐尾藻受重金属胁迫影响较小。湛金吾<sup>[18]</sup>的研究表明,  $\text{Cd}^{2+}$ 和  $\text{Pb}^{2+}$ 对植物光合作用有明显的抑制作用; 叶绿素 a 与  $\text{Cd}^{2+}$ 的浓度呈负相关; 而  $\text{Pb}^{2+}$ 对植物的影响表现为叶绿素 a 含量显著降低<sup>[19]</sup>, 这与本研究对两种藻类叶绿素 a 的测试结果一致。

### 2.3 不同浓度 $\text{V}^{5+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 和 $\text{Cr}^{6+}$ 对细胞膜透性的影响

植物细胞经重金属胁迫, 膜透性降低从而导致细胞电解液外渗, 细胞相对电导率升高; 细胞相对电导率越大, 表明植物受到的伤害越大<sup>[7]</sup>。植物膜透性和重金属离子一般呈负相关性, 然而不同植物的膜透性变化程度不同<sup>[18]</sup>。通过测试 4 种不同浓度金属离子培养下狐尾藻和黑藻的相对细胞电导率, 可分析两种藻类的细胞膜受胁迫程度, 总结出重金属离子影响下植物细胞膜的稳定性和细胞内金属离子流动规律。图 3 和 4 所示分别为狐尾藻和黑藻在不同浓度  $\text{V}^{5+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 和  $\text{Cr}^{6+}$ 胁迫下的细胞相对电导率。

图 3 的结果显示:  $\text{Pb}^{2+}$ 对狐尾藻的细胞膜透性影响最严重,  $\text{Pb}^{2+}$ 浓度为 15  $\text{mg/L}$  时, 狐尾藻的细胞相对电导率为 93.2%; 狐尾藻的细胞相对电导率随着  $\text{Cd}^{2+}$ 和  $\text{Cr}^{6+}$ 浓度增加而增大;  $\text{V}^{5+}$ 浓度小于 20  $\text{mg/L}$  时狐尾藻的细胞膜透性和没有重金属胁迫的植物相比并

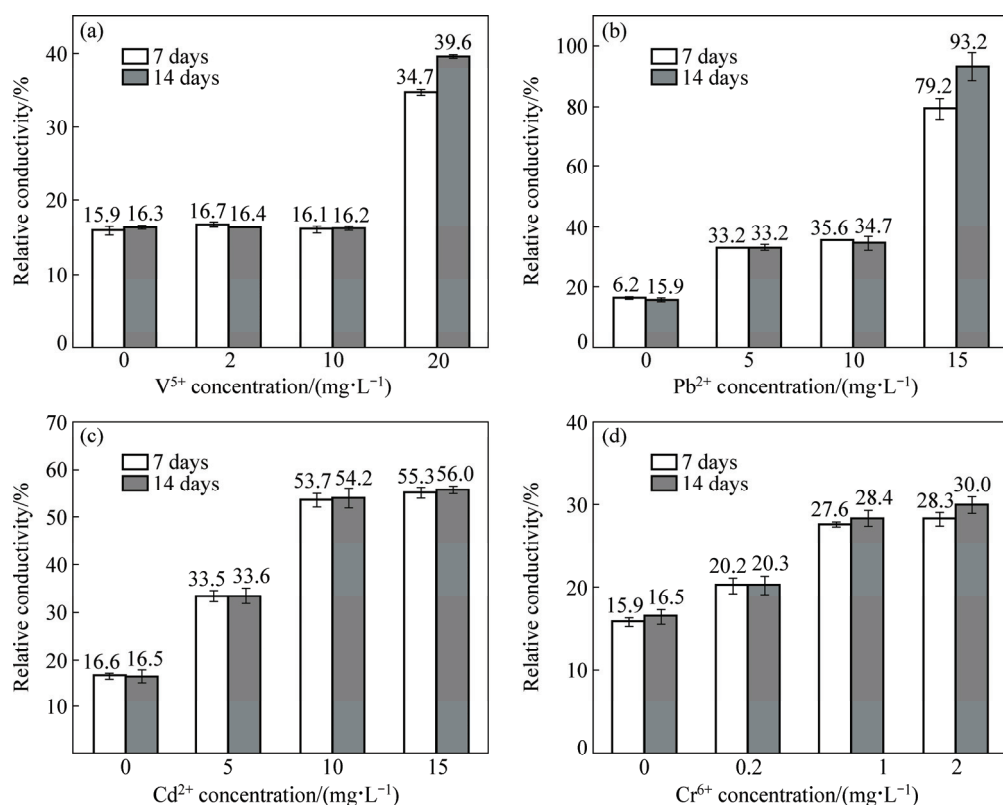


图 3 不同浓度  $V^{5+}$ 、 $Pb^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 和  $Cr^{6+}$ 胁迫下狐尾藻的相对电导率

Fig. 3 Relative conductivities of *Myriophyllum verticillatum* stressed under different concentrations of  $V^{5+}$  (a),  $Pb^{2+}$  (b),  $Cd^{2+}$  (c) and  $Cr^{6+}$  (d)

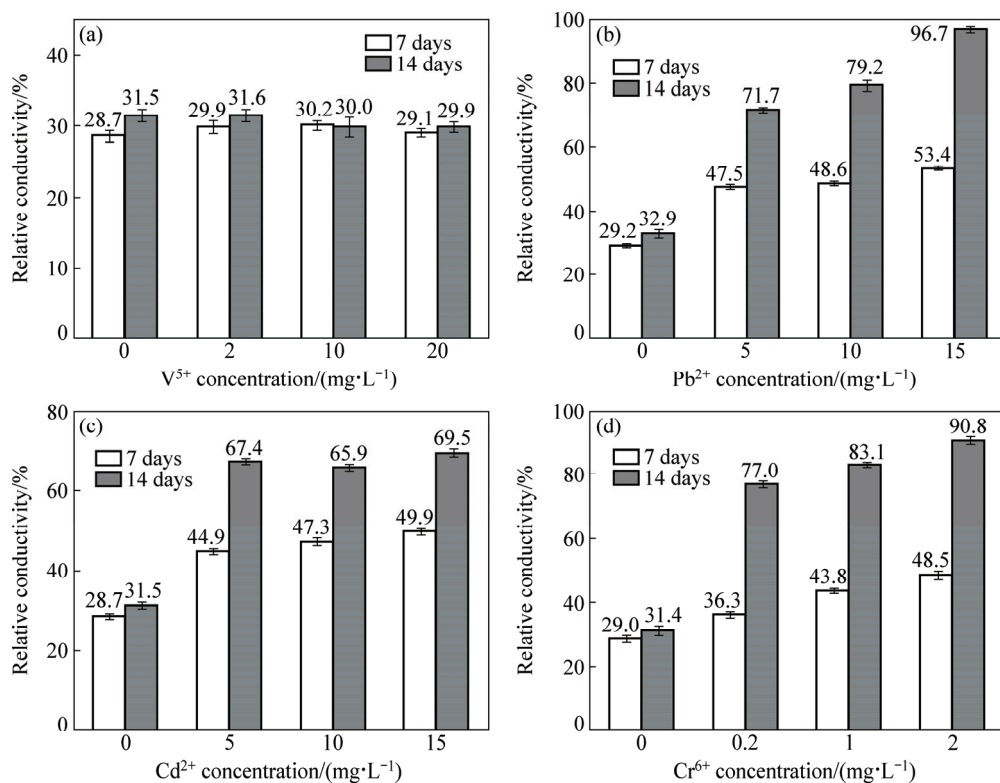


图 4 不同浓度  $V^{5+}$ 、 $Pb^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 和  $Cr^{6+}$ 胁迫下黑藻的相对电导率

Fig. 4 Relative conductivities of *Hydrilla verticillata* stressed under different concentrations of  $V^{5+}$  (a),  $Pb^{2+}$  (b),  $Cd^{2+}$  (c) and  $Cr^{6+}$  (d)

没有太大变化,  $V^{5+}$ 浓度为 20 mg/L 时细胞相对电导率增大, 为 39.6%。

由图 4 可知,  $V^{5+}$ 浓度为 2、10 和 20 mg/L 时, 黑藻的细胞相对电导率与空白黑藻样品差异不大, 都在 30%左右。黑藻的细胞相对电导率随着  $Pb^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 和  $Cr^{6+}$ 浓度的增加而增大, 并随着培养时间延长对细胞膜的损害程度也增大; 在  $Pb^{2+}$ 浓度为 15 mg/L、 $Cd^{2+}$ 浓度为 15 mg/L、 $Cr^{6+}$ 浓度为 2 mg/L 培养 14 天的环境下, 黑藻的细胞相对电导率分别为 96.7%、69.5%和 90.8%, 说明  $Pb^{2+}$ 和  $Cr^{6+}$ 对黑藻细胞膜的损害程度较大。

在 4 种重金属不同浓度胁迫下, 两种藻类的相对细胞电导率表明:  $V^{5+}$ 对狐尾藻和黑藻的细胞膜透性影响均不大;  $Pb^{2+}$ 对两种藻类细胞膜的损害程度最大。在  $Cd^{2+}$ 和  $Cr^{6+}$ 胁迫下, 黑藻的细胞膜损害程度较大, 导致金属离子更容易进入植物细胞, 这可能是黑藻的削减能力优于狐尾藻的原因。叶海波等<sup>[19]</sup>研究东南景天根细胞膜透性发现,  $Zn^{2+}$ 造成植物根部细胞原生质膜受损, 使金属离子更容易进入植物根部, 这与本研究的实验现象相符。

### 3 结论

1) 狐尾藻和黑藻均对  $Pb^{2+}$ 有较强的削减效果, 当  $Pb^{2+}$ 浓度为 15 mg/L 时, 二者对水体中  $Pb^{2+}$ 的削减率分别达到 98.38%和 94.35%; 黑藻在  $Cd^{2+}$ 浓度为 5 mg/L 时削减率达到 96.53%, 在  $Cr^{6+}$ 浓度为 0.2 mg/L 时削减率为 69.23%; 在相同浓度下, 狐尾藻对  $Cd^{2+}$ 和  $Cr^{6+}$ 的削减率分别为 70.23%和 26.73%, 削减效果远低于黑藻的; 狐尾藻和黑藻对水体中  $V^{5+}$ 的削减率均不高, 当水体中  $V^{5+}$ 浓度为 2 mg/L 时, 两种藻类对  $V^{5+}$ 的削减率最高, 分别为 16.71%和 19.23%。

2)  $V^{5+}$ 浓度低于 20 mg/L 时, 两种藻类的叶绿素 a 含量维持正常水平;  $V^{5+}$ 浓度为 20 mg/L 时, 狐尾藻叶绿素 a 含量下降比小于黑藻的。 $Pb^{2+}$ 对两种藻类的叶绿素 a 含量都有较强的影响作用;  $Pb^{2+}$ 浓度为 15 mg/L 时, 狐尾藻和黑藻的叶绿素 a 含量分别下降了 65.1%和 66.5%。在  $Cd^{2+}$ 和  $Cr^{6+}$ 胁迫下, 狐尾藻叶绿素 a 含量下降比小于黑藻的, 因此可认为狐尾藻叶绿素 a 受重金属胁迫影响较小。

3)  $V^{5+}$ 对狐尾藻和黑藻的细胞膜透性影响均不大;  $Pb^{2+}$ 对两种藻类的细胞膜损害程度最大。在  $Cd^{2+}$ 和  $Cr^{6+}$ 影响下, 狐尾藻的细胞膜受损程度小于黑藻的, 说明狐尾藻在  $Cd^{2+}$ 和  $Cr^{6+}$ 胁迫下的耐受性较好。

### REFERENCES

- [1] 熊威娜. 钒矿开发对水环境的影响及其治理[J]. 能源环境保护, 2008, 22(6): 39–41.  
XIONG Wei-na. The effect and treatment of the exploitation of navajoite on water circumstance[J]. Energy Environmental Protection, 2008, 22(6): 39–41.
- [2] 郭小芳, 王长征, 王兴峰. 重金属尾矿库的环境影响及防治措施[J]. 环境与发展, 2015, 27(3): 67–71.  
GUO Xiao-fang, Wang Chang-zheng, WANG Xing-feng. The environmental impact and preventive of heavy metals in tailing storage[J]. Journal of Environment and Development, 2015, 27(3): 67–71.
- [3] 耿雅妮. 河流重金属污染研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(11): 262–265.  
GENG Ya-ni. Research progress of heavy metal pollution in river[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(11): 262–265.
- [4] BASILE A, SORBO S, CONTE B, CASTALDO C R, TRINCHELLA E, CAPASSO C, CARGINALE V. Toxicity, accumulation, and removal of heavy metals by three aquatic macrophytes[J]. International Journal of Phytoremediation, 2012, 14(4): 374–387.
- [5] LIAO Ying-ping, WANG Zhen-xing, YANG Zhi-hui. Migration and transfer of chromium in soil-vegetable system and associated health risks in vicinity of Ferro-alloy manufactory[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(11): 2520–2527.
- [6] 潘义宏, 王宏锭, 谷兆萍, 熊国焕, 易 锋. 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.  
PAN Yi-hong, WANG Hong-bin, GU Zhao-ping, XIONG Guo-huan, YI Feng. Accumulation and translocation of heavy metals by macrophytes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6430–6441.
- [7] 燕傲蕾, 吴亭亭, 王友保, 张旭情. 三种观赏植物对重金属镉的耐性与积累特性[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2491–2498.  
YAN Ao-lei, Wu Ting-ting, WANG You-bao, ZHANG Xu-qing. The characteristic of cadmium tolerance and accumulation in three kinds of ornamental plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(9): 2491–2498.
- [8] 何翠屏, 王慧忠. 重金属镉、铅对草坪植物根系代谢和叶绿素水平的影响[J]. 湖北农业科学, 2003, 25(5): 60–63.  
HE Cui-ping, WANG Hui-zhong. Effect of cadmium and lead on the roots metabolism and chlorophyll of lawn plant[J]. Hubei Agricultural Science, 2003, 25(5): 60–63.
- [9] LONG Xin-xian, CHEN Xxue-mei, WONG J W, WEI Ze-bin, WU Qi-tang. Feasibility of enhanced phytoextraction of Zn contaminated soil with Zn mobilizing and plant growth promoting entophytic bacteria[J]. Transactions of Nonferrous

- Metals Society of China, 2013, 23(8): 2389–2396.
- [10] MISHRA V K, TRIPATHI P B. Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the three aquatic macrophytes[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(15): 7091–7097.
- [11] MANAL A F, NADIA E B, AHMED E K, AMANY A E K. Heavy metal biomonitoring and phytoremediation potentialities of aquatic macrophytes in River Nile[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(3): 1753–1771.
- [12] DENG H, YE Z H, WONG M H. Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China[J]. Environmental Pollution, 2004, 132(1): 29–40.
- [13] MISHRA S, MOHEMTY M, PRADHAM C, PATRA H K, DAS R, SAHOO S. Physico-chemical assessment of paper mill effluent and its heavy metal remediation using aquatic macrophytes-a case study at JK Paper mill, Rayagada, India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(5): 4347–4359.
- [14] ABDALLAH M A M. Phytoremediation of heavy metals from aqueous solutions by two aquatic macrophytes, *Ceratophyllum demersum* and *Lemna gibba* L[J]. Environmental Technology, 2012, 33(13/15): 1609–1614.
- [15] 殷姝媛. 两种菊科植物对铅胁迫的耐性生理及铅污染环境修复研究[D]. 江西财经大学, 2014: 12–16.
- YIN Shu-yuan. Studies on the physiologic and biochemical response to Pb stress and Pb contaminated environment phytoremediation of two species of Asteraceae[D]. Jiangxi University of Finance & Economics, 2014: 12–16.
- [16] 鲁先文, 余 林, 宋小龙, 王三应. 重金属铬对小麦叶绿素合成的影响[J]. 农业与技术, 2007, 27(4): 60–63.
- LU Xian-wen, YU Lin, SONG Xiao-long, WANG San-ying. Effect of heavy metal Cr chlorophyll synthesis in wheat[J]. Agriculture & Technology, 2007, 27(4): 60–63.
- [17] 惠非琼. 印度梨形孢对烟草耐盐、抗旱及重金属作用及机理的初步研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 11–18.
- HUI Fei-qiong. Study on effects and metals in salt and drought resistance and heavy metals in *Nicotiana tobacum* conferred by *Piriformospora*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 11–18.
- [18] 谌金吾. 三叶鬼针草(*Bidens pilosa* L.)对重金属 Cd、Pb 胁迫的响应与修复潜能研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013: 37–49.
- CHEN Jin-wu. Study on response and potential phytoremediation of *Bidens pilosa* L. in Cadmium and lead stress[D]. Chongqing, Southeast University, 2013: 37–49.
- [19] 唐东民, 伍 钧, 唐 勇, 宗贵仪, 曾 容. 重金属胁迫对植物的毒害及其抗性机理研究进展[J]. 四川环境, 2008, 27(5): 79–83.
- TANG Dong-min, WU Jun, TANG Yong, ZONG Gui-yi, ZENG Rong. The research advance in toxic hazard of heavy metal stress on plant and its resistance mechanism[J]. Sichuan Environment, 2008, 27(5): 79–83.

## Phytoremediation on heavy metal-polluted water of Pb, Cd, Cr and V by *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum verticillatum*

LIN Hai<sup>1,2</sup>, CHEN Si<sup>1,2</sup>, DONG Ying-bo<sup>1,2</sup>, SUN Meng-yao<sup>1,2</sup>, LIU Lu-lu<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Beijing Key Laboratory of Resource-oriented Treatment of Industrial Pollutants,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The reduction effect of heavy metal  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$  and  $\text{V}^{5+}$  in the contaminated water by *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum verticillatum* and the effects of these four heavy metals on the two macrophytes were studied under the experimental conditions. The results show that the reduction effect of  $\text{Pb}^{2+}$  by *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum verticillatum* are the highest. When the concentration of  $\text{Pb}^{2+}$  is 15 mg/L, the decrease rate reaches to 98.3% and 94.3%, respectively. Besides, the reduction effects of  $\text{Cd}^{2+}$  (5 mg/L) and  $\text{Cr}^{6+}$  (0.2 mg/L) by *Hydrilla verticillata* (96.5%, 69.2%) are higher than those by *Myriophyllum verticillatum* (70.2%, 26.7%). The reduction effects of  $\text{V}^{5+}$  by *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum verticillatum* are the lowest. When the concentration of  $\text{V}^{5+}$  is 2 mg/L, the reduction effects are only 16.7% and 19.2%, respectively. The test result indicates that the Chla content of *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum verticillatum* decline when the concentrations of  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$  and  $\text{V}^{5+}$  increase, while the relative electrical conductivity increases. And the influence degree becomes more obvious as the cultivate time goes by.  $\text{V}^{5+}$  has the least influence on the physiological characters of two macrophytes, followed by  $\text{Cr}^{6+}$  and  $\text{Cd}^{2+}$ . The Chla content and relative electrical conductivity of *Myriophyllum verticillatum* drops less than those of *Hydrilla verticillata* under  $\text{Cr}^{6+}$  and  $\text{Cd}^{2+}$  stress. The two macrophytes show a weak tolerance under  $\text{Pb}^{2+}$  stress. Both *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum verticillatum* can be recommended for removal of  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$  and  $\text{V}^{5+}$  from the contaminated water, and *Hydrilla verticillata* has a better removal ability of heavy metal.

**Key words:** heavy metal pollution; phytoremediation; *Myriophyllum verticillatum*; *Hydrilla verticillata*; tolerance

**Foundation item:** Project (2015ZX07205003) sported by the Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment of China

**Received date:** 2015-12-15; **Accepted date:** 2016-08-23

**Corresponding author:** Dong Ying-bo; Tel: +86-10-62333603; E-mail: ybdong@ustb.edu.cn

(编辑 何学锋)