

网络优先数字出版时间:2015-05-25

网络优先数字出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/45.1075.N.20150525.1658.009.html>

# 红树白骨壤幼苗对水中重金属的吸附性能研究\*

## Removal of Heavy Metal Ions with *Avicennia marina* Seedling

王一兵<sup>1</sup>, 柯珂<sup>1</sup>, 陈奕君<sup>1,2</sup>, 张荣灿<sup>1</sup>, 雷富<sup>1</sup>

WANG Yi-bing<sup>1</sup>, KE Ke<sup>1</sup>, CHEN Yi-jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Rong-chan<sup>1</sup>, LEI Fu<sup>1</sup>

(1. 广西科学院 广西近海海洋环境科学重点实验室, 广西南宁 530007; 2. 广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004)

(1. Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Science, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

**摘要:**【目的】针对广西近岸海域重金属污染越来越严重的问题, 研究红树白骨壤幼苗对水中重金属(Cu, Pb, Zn, Cd)的吸附去除性能。【方法】红树白骨壤幼苗采用砂培法由胚轴栽培而得, 配制不同浓度混合重金属培养液对红树白骨壤幼苗胁迫培养 35 d 后采用原子吸收光谱法测定其体内的重金属含量。【结果】随着培养液中重金属浓度的升高, 红树白骨壤幼苗体内的重金属含量也逐渐增加, 最高含量分别达到 Cu 980.78  $\mu\text{g/g}$ , Pb 1623.03  $\mu\text{g/g}$ , Zn 446.21  $\mu\text{g/g}$ , Cd 69.41  $\mu\text{g/g}$ 。红树白骨壤幼苗不同部位对重金属的积累能力普遍是叶部最少, 茎部次之, 大部分都积累在根部。红树白骨壤幼苗的根、茎对 Zn 的输送能力最好, 其次是 Cu 和 Cd, 对 Pb 的输送能力最差。【结论】红树白骨壤幼苗对 4 种重金属都有较好的吸附能力, 尤其是对 Pb 和 Cu 的吸附去除效果更好, 是一种性能良好的近岸河口重金属污染修复植物。

**关键词:** 红树植物 重金属 胁迫培养 吸附

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2015)02-0097-06

**Abstract:**【Objective】The absorption capabilities of Cu, Pb, Zn and Cd by *Avicennia marina* seedling were investigated to reduce the severe pollution in the offshore marine areas of Guangxi. 【Methods】The *Avicennia marina* seedlings were obtained from the hypocotyls planted in sands with hoagland's fluid, and then were cultured in hoagland's fluid with different concentrations of heavy metals. After 35 day's cultivation, the contents of heavy metals in *Avicennia marina* seedlings were determined by microwave digestion and atomic absorption spectrometry. 【Results】The increase of heavy metals concentration in the culture fluids led to the increase of heavy metals in the seedlings. The highest amount of heavy metal is 980.78  $\mu\text{g/g}$  of Cu, 1623.03  $\mu\text{g/g}$  of Pb, 446.21  $\mu\text{g/g}$  of Zn and 69.41  $\mu\text{g/g}$  of Cd, respectively. The amounts of heavy metals in different part of seedlings is root > stem >

leaf. This result meant that the heavy metal contents mainly were accumulated in root. The transport capability for different kind of heavy metals in the root and stem of seedlings were different. The transportation from easy to difficult in seedling is Zn > Cu > Cd > Pb. 【Conclu-

收稿日期: 2015-04-10

作者简介: 王一兵 (1974-), 女, 研究员, 主要从事海洋资源开发及海洋天然产物方面的研究。

\* 广西自然科学基金项目 (2011GXNSFE018002, 2012GXNSFEA053001) 和广西近海海洋环境科学重点实验室开放基金项目 (GXKLHY13-05) 资助。

**sion】**The *Avicennia marina* seedlings showed good absorption capabilities to 4 kinds of heavy metals in aqueous solution, especially to Pb and Cu. The *Avicennia marina* is a prospective plant for restoring the heavy metal pollution in estuary and offshore marine areas.

**Key words:** mangrove plants, heavy metals, stress culture, adsorption

## 0 引言

**【研究意义】**近年来,随着临海重工业的建设和投产,大量排放的污染物汇集于河口、海湾,使得广西近岸海域重金属污染日趋严重<sup>[1]</sup>,北海、钦州、防城港的年度水质报告中均报道重金属超标。这些重金属污染物可以通过食物链不断富集于生物体内,对水生生物及人类健康具有极大的危害。据报道,广西近岸海域中鱼类体内的 Hg、软体类体内的 Cu、Cd 和 Hg、甲壳类体内 Cu、Pb、Cd 和 Hg 等重金属积累严重。

红树是一类生长在热带、亚热带海岸潮间带的木本植物,主要分布在海湾及入海口的冲积淤泥中。红树林是湿地特有的生态类型,不但有较高的经济价值,还有强大的生态效益功能,对维护和改善海湾、河口地区生态环境,抵御海潮、风浪等自然灾害,防治沿海海洋污染以及保护沿海湿地生物多样性等方面具有不可替代的作用。其中最受研究人员关注的是其净化水体、改善近海岸生态环境方面的作用<sup>[2~4]</sup>。**【前人研究进展】**红树植物具有发达的根系,不仅对重金属污染物具有沉淀和吸附作用,而且对重金属具有较高的耐受性。自 1980 年以来,红树植物对重金属污染的抗性已引起国内外生态学者的极大关注<sup>[5,6]</sup>,而且红树对重金属的耐受性,重金属胁迫培养后红树植物生理特性变化,以及调节红树植物应对物理损伤和非生物胁迫的响应等不同方面已有相关的研究报道<sup>[7~11]</sup>。**【本研究切入点】**广西沿海拥有丰富的红树林资源,主要分布于茅尾海、铁山港、大风江、珍珠港、廉州湾、防城港东湾和丹兜海等沿海 14 个海湾中。目前尚未有红树吸附重金属方面的研究报道。**【拟解决的关键问题】**以红树白骨壤胚轴培养而来的幼苗为吸附材料,研究其对典型重金属污染物铜、铅、锌和镉的吸附去除性能,为了解红树植物对重金属的抗性和利用红树植物生物净化河口、海湾的重金属污染提供技术数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

红树白骨壤幼苗由本实验室从红树胚轴培养获

得。红树白骨壤胚轴采自广西防城港石角红树林保护区;去离子水、高纯水均为实验室自制;Hoagland's 营养液为实验室按标准配方自制;重金属盐(分析纯,国药集团),铜、铅、锌、镉单元素标准溶液(1000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ,中国计量科学院)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 幼苗栽培

将河砂用自来水洗净后放入塑料方盒,沙基的高度保持在 20~25 cm。沙基中倒入 Hoagland's 营养液,营养液的高度没过沙基约 3~5 cm。选择生命力强、无病虫害且质量和大小相近的胚轴整齐插入沙基中。培养过程中每周加一次营养液,培养期为 12 个月。选择长势良好,叶片数量和株高相近的红树白骨壤幼苗开展重金属吸附实验。

#### 1.2.2 重金属溶液配制

分别称取一定量的  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{PbCl}_2$ ,  $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CdCl}_2 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$  加高纯水配制混合重金属贮备液。然后取一定量的贮备液加入到 Hoagland's 营养液中配制 6 个浓度梯度的混合重金属培养液用于吸附实验,每个梯度培养液中各种重金属浓度见表 1。

表 1 各梯度培养液中重金属离子浓度(mg/L)

Table 1 The concentration of heavy metals in mixed culture fluids(mg/L)

实验组 Exp. No.	Cu	Pb	Zn	Cd
0#	0	0	0	0
1#	1.0	1.0	1.0	0.1
2#	5.0	5.0	5.0	0.5
3#	10.0	10.0	10.0	1.0
4#	15.0	15.0	15.0	1.5
5#	20.0	20.0	20.0	2.0

#### 1.2.3 重金属的吸附

将优选出的 24 株红树白骨壤幼苗根部残留的沙基洗净,每 4 株一组分别放入 0~5# 烧杯中,然后依次向烧杯中加入 1.2.2 节中制备的不同浓度混合重金属培养液 800 mL 进行重金属吸附实验。实验过程中温度保持在 25~30℃,每 3 d 补充一次培养液,培养 35 d 后测定重金属的吸附量。

### 1.2.4 重金属吸附量的测定

吸附实验结束后将红树白骨壤幼苗从培养液中取出,依次用自来水、去离子水和高纯水淋洗干净后将根、茎、叶分开,放入 50℃ 烘箱中恒温烘干,剪碎后待用。分别称取 0.2 mg 剪碎后的样品加入微波消解罐中,每罐加入 5 mL  $\text{HNO}_3$  进行微波消解。消解后的样品转移至 25 mL 比色管中,加高纯水至刻度。用原子吸收分光光度计法检测样品中重金属的浓度。

## 2 结果与分析

针对广西近岸海域重金属污染情况,选取 Cu、Pb、Zn、Cd 作为目标重金属,研究红树白骨壤幼苗对其吸附固定能力。图 1 是培养 35 d 后红树白骨壤幼苗体内不同部位中 Cu 含量随培养液中 Cu 离子浓度变化曲线图。由图 1 可以看出:由于培养过程中没有添加重金属,故对照组的红树白骨壤幼苗体内 Cu 含量最低,其叶、茎、根中的 Cu 含量分别为 3.61  $\mu\text{g/g}$ 、4.00  $\mu\text{g/g}$  和 4.42  $\mu\text{g/g}$ ;无论是叶、茎,还是根中的 Cu 含量都随着营养液中 Cu 离子浓度的升高而明显增大,随着营养液中 Cu 离子浓度由 0 mg/L 上升到 20.0 mg/L,叶中的 Cu 含量由 3.61  $\mu\text{g/g}$  增加到 19.86  $\mu\text{g/g}$ ,茎中的 Cu 含量由 4.00  $\mu\text{g/g}$  增加到 298.73  $\mu\text{g/g}$ ,而且根中的 Cu 含量几乎是直线上升,由 4.42  $\mu\text{g/g}$  增加到 820.69  $\mu\text{g/g}$ 。对照组中,虽然红树白骨壤幼苗叶、茎、根中的 Cu 含量依次增加,但是增幅不大。在 6# 实验组(培养液中 Cu 离子浓度为 20.0 mg/L)中经过 35 d 的培养,虽然红树白骨壤幼苗体内的 Cu 含量依然是叶最少,茎次之,根最多,但是含量差别变大,这说明红树白骨壤幼苗不同部位对 Cu 离子的吸附和固定能力不同。

图 2 是混合重金属胁迫培养 35 d 后红树白骨壤幼苗体内不同部位中 Pb 含量随培养液中 Pb 离子浓度变化的曲线。由图 2 可以看出:与 Cu 离子含量的变化趋势相似,6 组实验中 0# 对照组的红树白骨壤幼苗体内 Pb 含量最低,分别为叶 0.41  $\mu\text{g/g}$ 、茎 0.16  $\mu\text{g/g}$  和根 0.43  $\mu\text{g/g}$ ;各部位中 Pb 含量都随着营养液中的 Pb 离子浓度的升高而增大,当 Pb 离子浓度由 0 mg/L 上升到 20.0 mg/L,叶中 Pb 含量由 0.41  $\mu\text{g/g}$  增加到 1.02  $\mu\text{g/g}$ ;Pb 离子浓度在 1.0 mg/L~15 mg/L 阶段,茎中 Pb 含量缓慢增加,当 Pb 离子浓度为 20 mg/L 时,茎中 Pb 含量迅速增大到 18.58  $\mu\text{g/g}$ ;而根中 Pb 含量的变化与叶、

茎有所不同,Pb 离子浓度在 15 mg/L 之前,根中 Pb 含量直线上升并达到最大值 1616.55  $\mu\text{g/g}$ ,之后开始逐渐下降,当 Pb 离子浓度为 20 mg/L 时,Pb 含量下降到 969.71  $\mu\text{g/g}$ 。这可能是由于红树白骨壤幼苗对 Pb 离子的吸附是一个可逆过程,当植株体内 Pb 离子含量过高之后就会向培养液中释放,最终在植物体内和培养液体系内达到一个动态平衡状态。

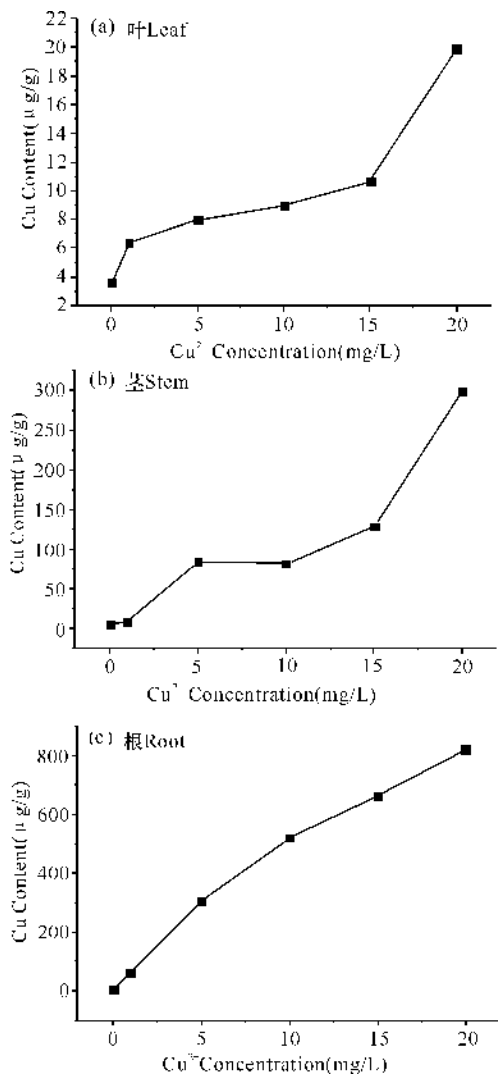


图 1 培养液中  $\text{Cu}^{2+}$  浓度对红树白骨壤幼苗不同部位中 Cu 含量的影响

Fig. 1 Effect of different  $\text{Cu}^{2+}$  concentration in the media on Cu content in leaf (a), stem (b) and root (c) of *Avicennia marina* seedling

图 3 是混合重金属胁迫培养 35 d 后红树白骨壤幼苗体内不同部位中 Zn 含量随培养液中 Zn 离子浓度变化曲线。由图 3 可以看出:与 Cu、Pb 的吸附情况相似,对照组的红树白骨壤幼苗体内 Zn 含量最低,但是含量比 Cu、Pb 的含量都高,叶、茎、根中 Zn 含量分别为 27.76  $\mu\text{g/g}$ 、14.53  $\mu\text{g/g}$  和 30.16

$\mu\text{g/g}$ 。随着营养液中的 Zn 离子浓度的升高,红树白骨壤幼苗体内各部位中 Zn 含量有所增加,但是增幅较小,在培养液中 Zn 离子浓度为  $20.0 \text{ mg/L}$  时达到最大,叶部为  $44.49 \mu\text{g/g}$ ,增幅为  $16.73 \mu\text{g/g}$ ,茎部为  $137.79 \mu\text{g/g}$ ,增幅为  $123.26 \mu\text{g/g}$ ,根部为  $263.93 \mu\text{g/g}$ ,增幅为  $233.77 \mu\text{g/g}$ 。说明实验所用红树白骨壤幼苗对 Zn 离子的吸附和固定性能相对较差。

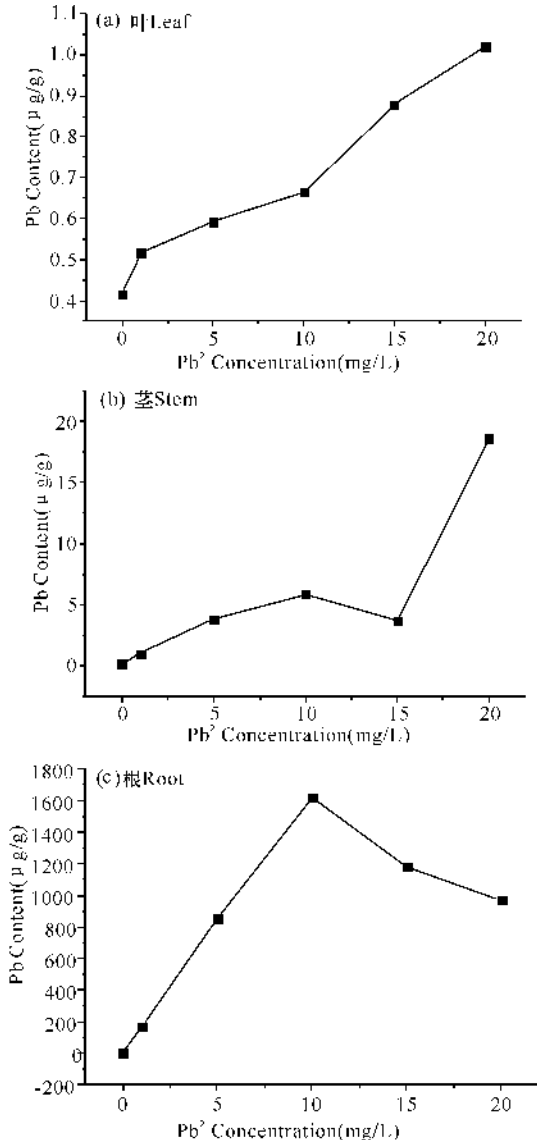


图2 培养液中  $\text{Pb}^{2+}$  浓度对红树白骨壤幼苗不同部位中 Pb 含量的影响

Fig. 2 Effect of different  $\text{Pb}^{2+}$  concentration in the media on Pb content in leaf (a), stem (b) and root (c) of *Avicennia marina* seedling

Cd 是常见的重金属污染物之一,在天然水体中只要有微量 Cd 即可产生毒性效应,其产生毒性的质量浓度范围在  $0.01 \sim 0.001 \text{ mg/L}$ ,属于强毒性重金属。因此本研究中配置的重金属培养液中 Cd 离

子浓度仅为其他重金属离子浓度的  $1/10$ 。图 4 是混合重金属胁迫培养 35 d 后红树白骨壤幼苗体内不同部位中 Cd 含量随培养液中 Cd 离子浓度变化曲线。图 4 显示,随着培养液中 Cd 离子浓度的增加,红树白骨壤幼苗体内不同部位中 Cd 含量都逐渐增加,且均未出现先增加后降低的过饱和和吸附现象,增幅依次为根  $>$  茎  $>$  叶,具体增量分别为  $59.57 \mu\text{g/g}$ 、 $9.76 \mu\text{g/g}$  和  $0.08 \mu\text{g/g}$ 。

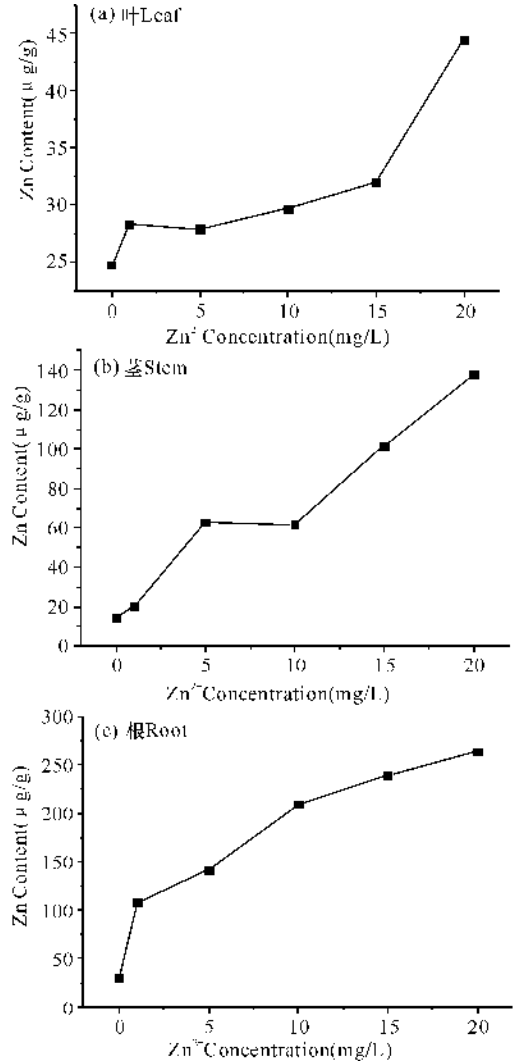


图3 培养液中  $\text{Zn}^{2+}$  浓度对红树白骨壤幼苗不同部位中 Zn 含量的影响

Fig. 3 Effect of different  $\text{Zn}^{2+}$  concentration in the media on Zn content in leaf (a), stem (b) and root (c) of *Avicennia marina* seedling

植物能吸收环境中的污染物并累积于植物体内,不同植物吸收有害物质的能力不同,同一植物不同器官、组织对有害物质的吸收亦不相同<sup>[5]</sup>。研究证实,红树植物吸收的重金属主要积累于根部,只有少量的重金属被转运至叶片中,从而保护了地上敏

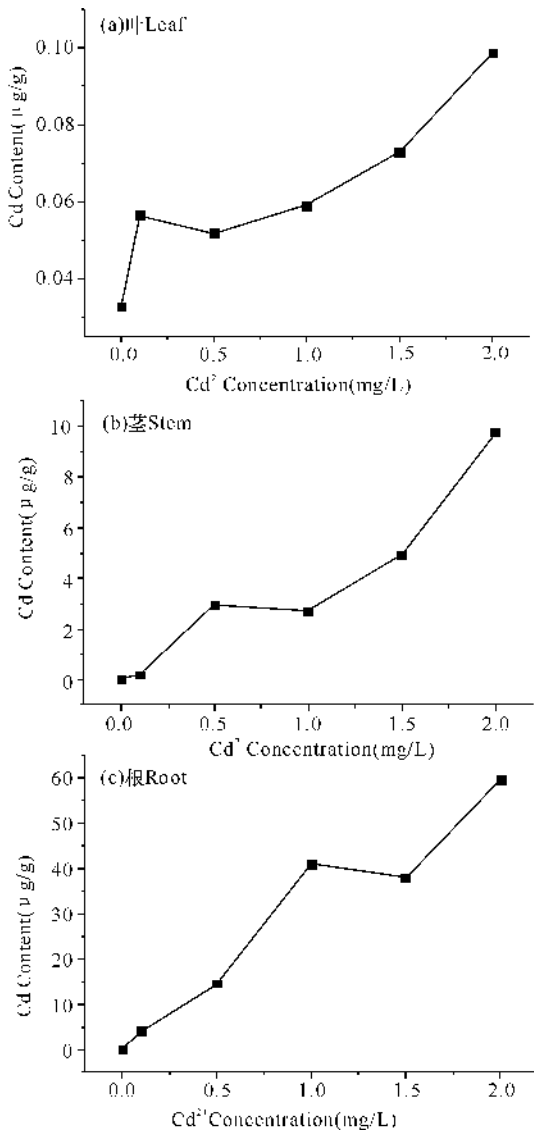


图4 培养液中 Cd<sup>2+</sup> 浓度对红树白骨壤幼苗不同部位中 Cd 含量的影响

Fig. 4 Effect of different Cd<sup>2+</sup> concentration in the media on Cd content in leaf (a), stem (b) and root (c) of *Avicennia marina* seedling

感部分,提高植物的重金属耐性<sup>[6]</sup>。为了研究红树白骨壤幼苗不同部位对重金属的吸收累积和转运能力,比较了对照组和最高浓度胁迫培养组中红树幼苗的根、茎、叶中重金属含量,并将结果以柱状图的形式展示在图5中。由图5可以看出,在对照组的红树白骨壤幼苗体内 Zn 含量最高,其次是 Cu 和 Pb, Cd 含量最少。Cu 和 Pb 在不同部位的含量均为根 > 茎 > 叶,叶、茎、根中 Cu 含量比例为 1 : 1.1 : 1.2, Zn 含量的比例为 1 : 1.9 : 2.1。经过高浓度重金属胁迫培养之后,红树白骨壤幼苗体内重金属含量最高的是 Pb 989.57 µg/g,其次是 Cu 820.69 µg/g, Zn 446.21 µg/g。不同部位的重金属

含量同样是根 > 茎 > 叶,但在叶、茎、根中的含量比与对照组的差别很大, Zn 为 1 : 3 : 6, Cu 为 1 : 15 : 41, 而 Pb 则基本都积累在根部,茎和叶含量非常低。说明白骨壤幼苗对 Zn 的转运能力最好,对 Pb 的转运能力最差,由此可以推断出白骨壤幼苗对 Pb 的耐受性最好,对 Zn 的耐受性最差。

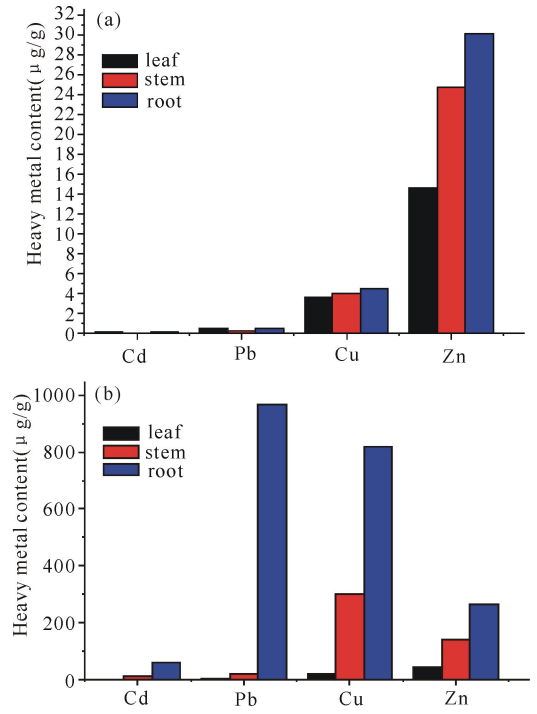


图5 对照组(a)和最高重金属浓度处理组(b)的红树白骨壤幼苗不同部位中 Cd、Pb、Cu、Zn 含量

Fig. 5 Cd、Pb、Cu、Zn contents in leaf, stem and root of *Avicennia marina* seedlings collected from the control group (a) and group treated with the highest concentration of heavy metal (b)

### 3 结论

本文研究红树白骨壤幼苗对水中重金属 Pb、Cu、Zn 和 Cd 的吸附性能,发现幼苗对 Pb 的吸附量最大,其次是 Cu 和 Zn,对 Cd 的吸附量最少,吸附的重金属主要积累在幼苗根部,其次是茎部,叶部最少。红树白骨壤幼苗的根、茎对不同重金属的输送能力也不尽相同,对 Zn 的转运能力最强,其次是 Cu 和 Cd,最差的是 Pb,且吸附的 Pb 几乎全部集中在根部。总之,红树白骨壤对 Cu、Pb、Zn 和 Cd 都有较好的吸附固定作用,是一种性能良好的近岸河口重金属污染修复植物。

#### 参考文献:

[1] 雷富,陈亮云,陈默,等. 广西茅尾海夏季海水和表层沉积物中重金属污染现状及评价[J]. 广西科学,2013,20

- (3):205-209.
- Lei F, Chen X Y, Chen M, et al. Pollution evaluation of heavy metals in the seawater and surface sediments of Maowei sea in summer[J]. Guangxi Sciences, 2013, 20(3):205-209.
- [2] 戴纪翠,倪晋仁. 红树林湿地环境污染地球化学的研究评述[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(6):779-784.
- Dai J C, Ni J R. Advances of studies on biogeochemistry of environmental pollution in mangrove wetlands [J]. Marine Environmental Science, 2009, 28(6):779-784.
- [3] 郑康振,陈耿,郑杏雯,等. 人工红树林湿地系统净化污水研究进展[J]. 生态学杂志, 2009, 28(1):138-145.
- Zheng K Z, Chen G, Zheng X W, et al. Wastewater treatment with constructed mangrove wetland system: A review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(1):138-145.
- [4] 黄灵玉,胡宝清,范航清. 白骨壤对关键环境因子的生态响应研究进展[J]. 广西科学院学报, 2014, 30(4):257-262.
- Huang L Y, Hu B Q, Fan H Q. Ecological responses of *Avicennia marina* to key environmental factors: A Review [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2014, 30(4):257-262.
- [5] 张凤琴,王友绍,殷建平,等. 红树植物抗重金属污染研究进展[J]. 云南植物研究, 2005, 27(3):225-231.
- Zhang F Q, Wang Y S, Yin J P, et al. Research advances on the resistance of the mangrove plants to heavy metal pollution [J]. Acta Botanica Yunnanica, 2005, 27(3):225-231.
- [6] 程皓,陈桂珠,叶志鸿. 红树林重金属污染生态学研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(7):3893-3899.
- Cheng H, Chen G Z, Ye Z H. Research progress of heavy metal pollution in mangrove wetlands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7):3893-3899.
- [7] 陈荣华,林鹏. 红树白骨壤幼苗对汞的吸收和净化[J]. 环境科学学报, 1989, 9(2):218-224.
- Chen R H, Lin P. Adsorption and removal of mercury by mangrove seedlings [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1989, 9(2):218-224.
- [8] Albeas J J, Price M T, Kania M. Metal concentration in tissues of *Spartina alterniflora* and sediments of Geo a Salt Marshes [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 1990, 30:47-58.
- [9] Macfarlane G R, Burchett M D. Toxicity, growth and accumulation relationships of copper, lead and zinc in the grey mangrove *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh [J]. Marine Environmental Research, 2002, 54:65-84.
- [10] 黄国勇,王友绍,孙翠慈,等. 秋茄叶对复合重金属的胁迫反应及其积累能力研究[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(6):104-109.
- Huang G Y, Wang Y S, Sun C C, et al. Study on stress responses and bioaccumulation of multiple heavy metals by the leaves of *Kandelia candel* [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010, 29(6):104-109.
- [11] 陈俊. 外源茉莉酸酮酯对红树幼苗重金属抗性的调控作用研究[D]. 上海:华东师范大学, 2014.
- Chen J. Regulatory Effect of Exogenous Jasmonates on Heavy Metal Resistance of Mangrove Seedling [D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.

(责任编辑:尹 闯)