

**硫铁矿区污染土壤镉铅高富集蓖麻品种筛选**

鲍广灵, 陶荣浩, 张慧敏, 叶文玲, 胡兆云, 周彩玲, 马友华

引用本文:

鲍广灵, 陶荣浩, 张慧敏, 等. 硫铁矿区污染土壤镉铅高富集蓖麻品种筛选[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(12): 2693–2703.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0449>

---

**您可能感兴趣的其他文章**

Articles you may be interested in

**不同玉米(Zeamays)品种对镉锌积累与转运的差异研究**

杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 胡万里, 付斌, 陈安强, 毛妍婷, 木霖, 王红华, 严婷婷, 段宗颜, 雷梅

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 16–23 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0872>

**不同玉米品种对土壤镉富集和转运的差异性**

邓婷, 吴家龙, 卢维盛, 官以战, 李贵杰, 张秋华, 俞方玉, 曾祖蕾

农业环境科学学报. 2019, 38(6): 1265–1271 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1291>

**小叶榕对土壤铅镉污染的抗性和修复潜力研究**

彭维新, 庄玉婷, 梁智淇, 俞政男, 吴道铭, 张学平, 曾曙才

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1707–1717 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0241>

**不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析**

蔡秋玲, 林大松, 王果, 王迪

农业环境科学学报. 2016, 35(6): 1028–1033 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.06.002>

**组配钝化剂对镉铅复合污染土壤修复效果研究**

张迪, 丁爱芳

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2718–2726 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0881>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

鲍广灵, 陶荣浩, 张慧敏, 等. 硫铁矿区污染土壤镉铅高富集蓖麻品种筛选[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2693–2703.

BAO G L, TAO R H, ZHANG H M, et al. Screening of castor beans with high cadmium and lead enrichment from contaminated soils in a pyrite mining area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(12): 2693–2703.



开放科学 OSID

## 硫铁矿区污染土壤镉铅高富集蓖麻品种筛选

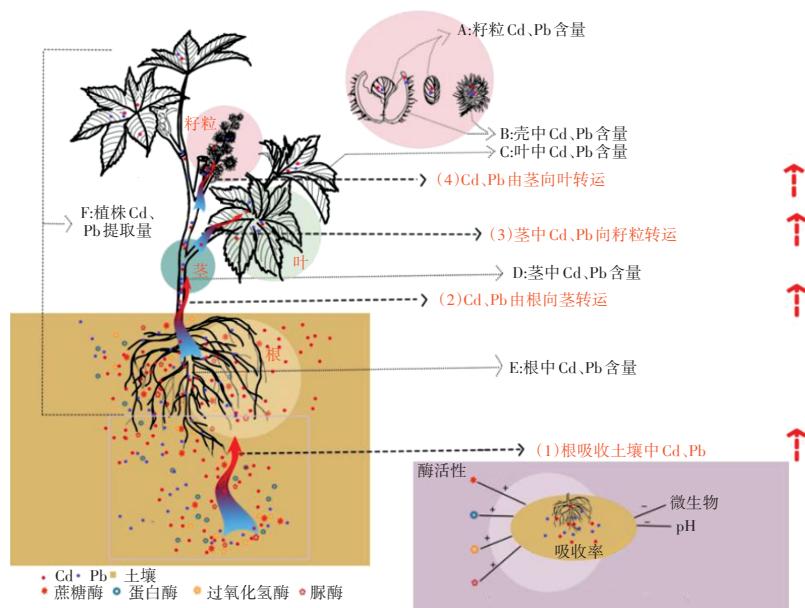
鲍广灵<sup>1</sup>, 陶荣浩<sup>1</sup>, 张慧敏<sup>1</sup>, 叶文玲<sup>1</sup>, 胡兆云<sup>2</sup>, 周彩玲<sup>2</sup>, 马友华<sup>1\*</sup>

(1. 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 铜陵市义安区农业技术推广中心, 安徽 铜陵 244000)

**摘要:** 蓖麻 (*Ricinus communis L.*) 是一种有价值的能源作物, 筛选适合在硫铁矿区严格管控类耕地上种植的 Cd、Pb 高富集蓖麻品种, 可以合理地利用污染农田且能生产生物能源。选取 18 个蓖麻品种, 通过大田试验, 研究 Cd、Pb 胁迫下蓖麻的生物量及产量、根际土壤 Cd、Pb 含量及不同蓖麻品种 Cd、Pb 的提取量、富集与转运差异、根际土壤重金属有效态等。结果表明, 不同蓖麻品种的全株生物量及果实的产量之间差异明显; 重金属 Cd、Pb 在蓖麻不同组织的分布情况均为根>茎>叶>壳>籽粒, 18 个品种蓖麻 Cd 的富集系数均大于 1, Pb 的富集系数均小于 1, 同一个品种茎叶 Cd 的转运系数均高于果实 Cd 转运系数, 茎叶 Pb 的转运系数除 BM-6 外, 均高于果实 Pb 的转运系数; Cd 的最大提取量为 42.67 mg·株<sup>-1</sup>, Pb 的最大提取量为 1 482.22 mg·株<sup>-1</sup>; 根际土壤有效态 Cd、Pb 含量均高于背景值, 有效态 Cd 含量为 1.25~2.82 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效态 Pb 含量为 72.20~108.79 mg·kg<sup>-1</sup>; 通过聚类分析, 品种 BM-6、BM-7、BM-11、BM-13、BM-15 和 BM-18 为蓖麻 Cd、Pb 高富集的品种。根据蓖麻生物量和产量, 植株 Cd、Pb 含量及提取量, 富集及转运系数, 根际土壤有效态及酶活性等指标进行综合评价, 认为 BM-2、BM-6、BM-7、BM-15 和 BM-18 共 5 个品种可作为 Cd、Pb 高富集蓖麻品种在严格管控类耕地上推广种植, 其中效果最好的品种是 BM-18。

**关键词:** 蓖麻; 土壤; Cd; Pb; 累积与转运; 品种筛选

中图分类号:X53; X173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)12-2693-11 doi:10.11654/jaes.2021-0449



收稿日期: 2021-04-15 录用日期: 2021-07-02

作者简介: 鲍广灵(1994—), 男, 安徽铜陵人, 硕士研究生, 从事土壤重金属治理修复研究。E-mail: 1071921583@qq.com

\*通信作者: 马友华 E-mail: yhma2020@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800203); 国家重点研发计划项目子课题(2016YFD0801104); 安徽省科技重大攻关项目(17030701053)

**Project supported:** The National Key Research and Development Program of China (2018YFD0800203); The National Key Research and Development Program Sub-projects(2016YFD0801104); The Key Research Projects of Science and Technology of Anhui Province, China(17030701053)

## Screening of castor beans with high cadmium and lead enrichment from contaminated soils in a pyrite mining area

BAO Guangling<sup>1</sup>, TAO Ronghao<sup>1</sup>, ZHANG Huimin<sup>1</sup>, YE Wenling<sup>1</sup>, HU Zhaoyun<sup>2</sup>, ZHOU Cailing<sup>2</sup>, MA Youhua<sup>1\*</sup>

(1. Anhui Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Control, College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Agricultural Technology Extension Center of Yi'an District, Tongling City, Anhui Province, Tongling 244000, China)

**Abstract:** Castor (*Ricinus communis* L.) is a valuable energy crop. Cd and Pb highly enriched castor varieties are suitable for planting on tightly controlled cultivated land in the pyrite mining area. The cultivation of this crop enables the resourceful use of polluted farmland to produce bio-energy. Eighteen castor-oil plant varieties were selected through field experiments to study the biomass and yield of castor-oil plants under the Cd and Pb stress. This was done by measuring the content of Cd and Pb in the soil rhizosphere and determining the difference in the extraction, enrichment and transportation of Cd and Pb in different castor varieties. We also evaluated the effective state of these heavy metals in the soil rhizosphere. The result showed clear differences in the entire plant biomass and fruit yield of different castor varieties. The distribution of Cd and Pb in different tissues of castor in descending order was: root > stem > leaf > husk > grain. Eighteen species of castor were rich in Cd and Pb; the accumulation coefficients of Cd were >1, and the enrichment coefficients of Pb were <1. The Cd transport coefficients for the stems and leaves of the same variety were greater than the Cd transport coefficients for the fruits. Similarly, the Pb transport coefficients for the stems and leaves were higher than that of fruit, with the exception of BM6. The maximum Cd extraction was  $42.67 \text{ mg} \cdot \text{plant}^{-1}$  and the maximum Pb extraction was  $1482.22 \text{ mg} \cdot \text{plant}^{-1}$ . The available Cd and Pb content in rhizosphere soil was higher than the background value; the available Cd and Pb contents were  $1.25\sim2.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $72.20\sim108.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. Cluster analysis showed that the BM-6, BM-7, BM-11, BM-13, BM-15, and BM-18 varieties had higher Cd and Pb enrichment. The plant biomass and yield, Cd and Pb content, extraction, enrichment and transport coefficients, soil rhizosphere available state, enzymatic activity, and other indicators were used to comprehensively evaluate the best plant varieties. The results showed that BM-2, BM-6, BM-7, BM-15, and BM-18 might be used as highly enriched Cd and Pb castor varieties to be popularized and planted on strictly controlled arable land; among these, the best variety was BM-18.

**Keywords:** castor oil plant; soil; cadmium; lead; accumulation and transportation; varieties screening

我国硫铁矿产资源丰富,其开采会使周围生态环境受到破坏,采矿过程中排放的废水、废气和废渣等重金属污染物会通过大气沉降、污水灌溉以及地表径流等方式进入矿区周边农田<sup>[1]</sup>。现阶段国内对硫铁矿区土壤重金属污染研究主要体现在重金属含量、空间分布等方面,而有关硫铁矿区对周边农田土壤质量的影响、筛选高富集植物的系统性研究报道较少<sup>[2-3]</sup>。针对污染物含量高于农用地土壤污染风险筛选值(管制值)的土壤,2018年8月国家生态环境部发布的《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管理标准(试行)》(GB 15618—2018)中提及了替代种植、退耕还林等严格管控措施<sup>[4]</sup>,高富集植物的筛选和种植适用于重度污染矿区周边农田的修复利用<sup>[5]</sup>。

蓖麻被认为是一种潜在的修复土壤重金属污染的植物,其根系较广、生物量大、生长势强,能够充分适应广泛的环境条件<sup>[6-7]</sup>。同时,蓖麻是一种非食用的经济作物,是生物燃料和生物柴油生产所需的能源作物。因此,蓖麻在解决日益增加的能源需求和Cd污染农田的修复这两个全球难题方面具有很好的研究价值<sup>[8-9]</sup>。不同品种的蓖麻对重金属的累积存在较

大的差异,因此,筛选具有实际应用价值的Cd、Pb超富集植物具有非常重要的意义<sup>[10-11]</sup>。研究发现,不同蓖麻品种对Cd的富集能力也存在巨大差异。王沛琦等<sup>[12]</sup>的研究结果表明,在Cd污染农田中不同蓖麻品种农艺性状表现各异,生物量不同,蓖麻吸收的Cd主要集中在地上部分,不同品种均有一定的Cd富集和转移能力。尹明等<sup>[13]</sup>的研究结果表明,7种红麻在重度污染耕地中的Cd移除量为 $72.49\sim149.17 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,在轻微污染耕地中的Cd移除量为 $25.95\sim49.91 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,红麻各部位Cd的富集能力为叶>根>茎,转移能力为叶>茎。目前全国各区域均开展了重金属高富集植物品种修复筛选工作,明确当地主要重金属累积的品种差异、阐明制约重金属累积的关键过程和因素是筛选适配区域条件的高富集植物品种的重要基础<sup>[14]</sup>。另外,目前的品种筛选通常是以特定污染元素为目标,缺乏针对多种污染元素的多目标筛选<sup>[15]</sup>。

本研究在安徽省铜陵市义安区某大型硫铁矿区周边农田建立试验小区,以18个蓖麻品种为材料,筛选Cd、Pb高富集蓖麻品种。周边耕地土壤普遍遭受到Cd、Pb复合污染,大部分农产品中Cd、Pb含量超过

食品安全国家标准。本研究旨在探讨Cd、Pb胁迫对重金属的累积转运及蓖麻生长情况的影响,以期筛选出适宜推广种植的Cd、Pb高富集蓖麻品种,为我国矿区Cd、Pb复合污染农田土壤安全利用提供有效的参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地为安徽省铜陵市义安区东部某严格管控类耕地,距铜陵市区约30 km。当地属于北亚热带季风过渡区,四季分明,年平均气温16.1 °C,雨量适中,湿度较大,日照充足,无霜期长,季风气候显著。铜陵是我国重要的产矿地区之一,试验地周围有1个大型硫铁矿,矿区周边农田已遭受不同程度的Cd、Pb复合污染,其中农田土壤Cd存在重度污染,Pb存在中度污染的情况。

### 1.2 材料

#### 1.2.1 土壤

试验前期采用五点取样法采集蓖麻相应生长土壤表层土样(0~20 cm)约500 g,混合均匀装入样品袋,用于土壤本底值检测。土壤基本性状:Cd全量为1.64 mg·kg<sup>-1</sup>,有效态Cd为0.828 mg·kg<sup>-1</sup>,Cd含量高于农用地土壤污染风险管制值,属于重度污染;Pb全量为208 mg·kg<sup>-1</sup>,有效态Pb为55.2 mg·kg<sup>-1</sup>,Pb含量高于农用地土壤污染风险筛选值,低于农用地土壤污染风险管制值,属于轻度污染。试验小区土壤pH为4.89,有机质含量为32.81 g·kg<sup>-1</sup>,有效磷含量为43.17 mg·kg<sup>-1</sup>,全氮含量为1.16 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮含量为189.21 mg·kg<sup>-1</sup>。

#### 1.2.2 蓖麻品种

供试蓖麻(*Ricinus communis* L.)共有18个品种,分别用BM-1~BM-18表示,均由淄博市相关试验站提供,在试验地生长良好。

### 1.3 试验设计

试验采取随机区组的方式进行,18个蓖麻品种为18个不同处理,每个处理3个重复,共54个小区,小区面积为24 m<sup>2</sup>,每个品种每个小区栽种3行,每行3穴,每穴一粒,栽种9粒,共栽种27粒。蓖麻使用中等种植密度(15万株·hm<sup>-2</sup>),行距100 cm,株距60 cm。本试验于2020年5月份在安徽省铜陵市义安区某严格管控类耕地上进行大田试验,在蓖麻播种前一周进行基肥的播撒(50 kg·hm<sup>-2</sup>的氮磷钾三元素复合肥),播种1个月后进行田间除草,及时进行田间排水和除

虫等工作,3个月后再次进行除草后及时补肥(15 kg·hm<sup>-2</sup>的氮肥)。2020年10月19日(生长周期大约5个月后)进行采样,测定各小区产量,并采集各试验小区的根际土样<sup>[16]</sup>及蓖麻品种种植株样。

### 1.4 样品处理与分析

采集的蓖麻样品分为根、茎、叶、壳和籽粒5个部分。植株先清洗干净,再用去离子水清洗;根部使用10 mmol·L<sup>-1</sup>的乙二胺四乙酸溶液清除Cd离子,最后用去离子水清洗。对样品进行称量,得到其相关部分的鲜质量。将样品放入105 °C烘箱中进行杀青,30 min后再调至80 °C的烘箱内烘干并称质量,最后利用不锈钢粉碎机进行粉碎。土壤、植株干样品经微波消解后,用原子吸收分光光度计测定,得出Cd和Pb含量。

参照相关标准(GB 23739—2009)测定土壤有效态Cd(DTPA-Cd)、有效态Pb(DTPA-Pb),用德国耶拿Z700P原子吸收分光光度计火焰法测定<sup>[17]</sup>。蓖麻不同组织中Cd、Pb的测定参照标准GB/T 500915—2003,用德国耶拿Z700P原子吸收分光光度计石墨炉法测定<sup>[18]</sup>。土壤常规指标按照国标方法和《土壤农化分析》<sup>[19]</sup>进行测定,土壤蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定,过氧化氢酶活性采用重铬酸钾滴定法测定,脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定<sup>[20]</sup>,土壤蛋白酶活性采用加勒斯江法测定<sup>[21]</sup>。土壤pH用去CO<sub>2</sub>蒸馏水浸提(土水比1:2.5),而后用精密pH计(TARTER2100)测定。以国家标准参比物质土壤样品(GBW07461)和植物样品(GBW10045)进行质量控制,国标样分析结果均在允许误差范围内。根据以下公式计算相关指标:

$$\text{转运系数(TF)} = \frac{\text{植株地上部重金属含量(mg} \cdot \text{kg}^{-1})}{\text{植株地下部重金属含量(mg} \cdot \text{kg}^{-1})}^{[22]}$$

$$\text{富集系数(BCF)} = \frac{\text{植株重金属含量(mg} \cdot \text{kg}^{-1})}{\text{土壤重金属含量(mg} \cdot \text{kg}^{-1})}^{[23]}$$

提取总量(EA)是评估蓖麻植株对Cd、Pb的提取能力的指标<sup>[24]</sup>,计算公式如下:

$$EA(\text{Cd}) = Q_{\text{Root}} \times C_{\text{Cd-Root}} + Q_{\text{Stem}} \times C_{\text{Cd-Stem}} + Q_{\text{Leaf}} \times C_{\text{Cd-Leaf}} + Q_{\text{Fruit}} \times C_{\text{Cd-Fruit}}$$

$$EA(\text{Pb}) = Q_{\text{Root}} \times C_{\text{Pb-Root}} + Q_{\text{Stem}} \times C_{\text{Pb-Stem}} + Q_{\text{Leaf}} \times C_{\text{Pb-Leaf}} + Q_{\text{Fruit}} \times C_{\text{Pb-Fruit}}$$

式中:Q<sub>Root</sub>为根的生物量,g;C<sub>Cd-Root</sub>、C<sub>Pb-Root</sub>为根中Cd、Pb的浓度,mg·kg<sup>-1</sup>;Q<sub>Stem</sub>为茎的生物量,g;C<sub>Cd-Stem</sub>、C<sub>Pb-Stem</sub>为茎中Cd、Pb的浓度,mg·kg<sup>-1</sup>;Q<sub>Leaf</sub>为叶的生物量,g;C<sub>Cd-Leaf</sub>、C<sub>Pb-Leaf</sub>为叶中Cd、Pb的浓度mg·kg<sup>-1</sup>;

$Q_{\text{Fruit}}$  为果实的生物量, g;  $C_{\text{Cd-Fruit}}$ 、 $C_{\text{Pb-Fruit}}$  为果实中 Cd、Pb 的浓度,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.5 数据分析

采用 Excel 和 SPSS 23.0 软件, 用方差分析和相关分析的方法进行统计分析。数据表示为平均值±标准差, 用 Duncan's 检验显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同品种蓖麻生物量及产量的差异性

生物量的变化程度可有效地反映植物对重金属 Cd、Pb 的耐性情况。由图 1 可知, 本研究中, 不同品种蓖麻植株生长受到不同程度的抑制作用, 对重金属胁迫具有一定的耐性。18 个蓖麻品种全株生物量为 166.75~1 267.30  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 平均值为 599.68  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 产量为 33.35~633.65  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 平均值为 143.28  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其中, BM-2、BM-3、BM-4、BM-12、BM-14、BM-17、BM-18 的生物量大于平均值; BM-2、BM-3、BM-4、BM-9、BM-11、BM-12、BM-14 的产量大于平均值。

### 2.2 不同品种蓖麻对 Cd、Pb 吸收、富集、转运及提取量

#### 2.2.1 不同品种蓖麻植株 Cd、Pb 含量的差异

由表 1 可以看出, Cd、Pb 在蓖麻不同组织的分布情况均为根>茎>叶>壳>籽粒。其中, 根、茎、叶、壳和籽粒中 Cd 质量分数变化范围分别是 1.05~1.50、0.66~0.97、0.51~0.93、0.23~0.90  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 0.18~0.63  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值分别为 1.29、0.80、0.68、0.59  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 0.47  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 变异系数分别为 11.97%、6.65%、19.05%、2.86% 和 30.86%; 品种 BM-1 和 BM-12 的指标均大于平均值。根、茎、叶、壳和籽粒中 Pb 质量分

数变化范围分别是 103.74~131.99、8.53~34.44、0.43~2.97、0.34~2.03  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 0.27~0.49  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值分别为 117.81、21.93、1.26、0.95  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 0.34  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 变异系数分别为 8.77%、34.76%、54.42%、52.98% 和 16.36%; BM-3 的各项指标均大于平均值。

#### 2.2.2 不同品种蓖麻对 Cd、Pb 的富集和转运系数的差异

富集系数 (BCF) 和转运系数 (TF) 是衡量植物对重金属积累转运能力的重要指标。由表 2 可知, 18 个蓖麻品种对 Cd 的富集系数均大于 1, 对 Pb 的富集系数均小于 1。其中对 Cd 的富集系数为 1.66~2.82, 对 Pb 富集系数为 0.61~0.77, 富集能力最强的品种是 BM-12, 最弱的品种是 BM-17; 18 个蓖麻品种茎叶 Cd 转运系数为 0.92~1.46, 穗粒 Cd 转运系数为 0.37~0.87, 茎叶 Pb 转运系数为 0.12~0.32, 穗粒 Pb 转运系数为 0.03~0.22。

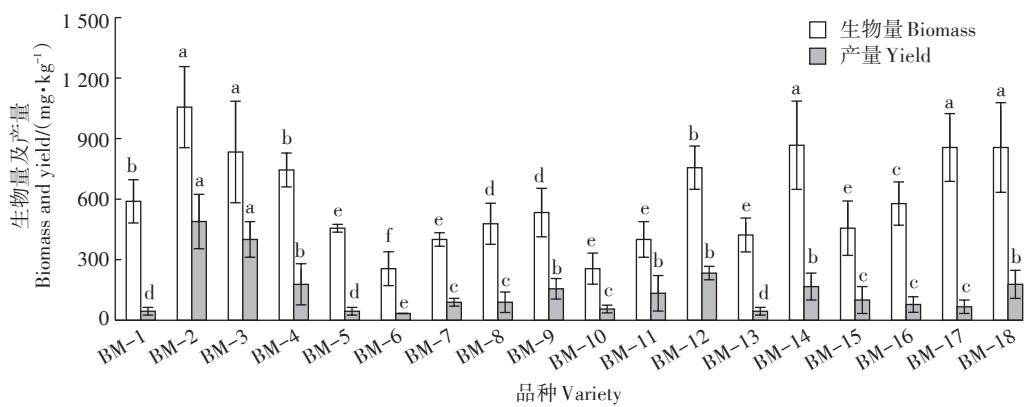
#### 2.2.3 不同品种蓖麻对 Cd、Pb 提取能力的差异

蓖麻植株 Cd、Pb 提取量受蓖麻品种的影响。由表 3 可知, 在农田 Cd、Pb 污染胁迫下, 18 个品种蓖麻 Cd 的提取量范围为 7.86~42.67  $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ , Pb 的提取量范围为 353.81~1 482.22  $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ , 平均值分别为 21.42  $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$  和 904.05  $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$ 。BM-2、BM-3、BM-12、BM-14 和 BM-18 具有较强的 Cd 提取能力, BM-2、BM-3、BM-12、BM-17 和 BM-18 具有较强的 Pb 提取能力。

### 2.3 不同品种蓖麻根际土壤酶及根际土壤有效态 Cd、Pb

#### 2.3.1 不同品种蓖麻对根际土壤酶活性变化的影响

由于蓖麻品种不同, 对土壤中酶活性的影响也不相同。从表 4 可以看出, 种植 18 个蓖麻品种的根际土



柱上的英文字母不同表示不同蓖麻品种生物量和产量差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different lowercase letters on the column indicate that the biomass and yield of different castor plants are significantly different ( $P < 0.05$ )

图 1 不同品种蓖麻生物量和产量

Figure 1 Biomass and yield of different castor bean varieties

表1 不同品种蓖麻植株Cd、Pb含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )Table 1 Contents of Cd and Pb in castor bean plants of different varieties ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

品种 Variety	根 Root		茎 Stem		叶 Leaf		壳 Shell		籽粒 Grain	
	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb
BM-1	1.30±0.04a	109.89±11.82d	0.97±0.02a	16.41±2.92d	0.93±0.02a	1.07±0.05c	0.90±0.02a	0.35±0.05i	0.52±0.05b	0.36±0.02b
BM-2	1.38±0.18a	105.71±9.57f	0.80±0.02e	21.75±5.53c	0.64±0.08e	0.88±0.10d	0.55±0.02d	1.32±0.10c	0.37±0.06g	0.36±0.08b
BM-3	1.45±0.09a	124.77±5.56a	0.78±0.05e	31.04±8.45a	0.55±0.08h	1.96±0.72b	0.50±0.26d	1.55±0.38b	0.22±0.05h	0.37±0.02b
BM-4	1.32±0.08a	117.89±14.89b	0.84±0.02b	12.06±4.19g	0.57±0.08g	1.87±0.22b	0.45±0.11e	0.97±0.24e	0.18±0.03h	0.30±0.05b
BM-5	1.45±0.10a	123.25±5.78a	0.82±0.02c	34.44±2.45a	0.54±0.08h	1.35±0.08c	0.51±0.03d	0.64±0.05g	0.39±0.02f	0.35±0.04b
BM-6	1.20±0.06c	131.99±6.86a	0.70±0.04g	8.53±0.64h	0.72±0.05b	2.21±0.12b	0.59±0.08c	2.03±0.19a	0.54±0.01a	0.34±0.03b
BM-7	1.41±0.08a	118.31±4.65b	0.90±0.02b	23.46±2.07c	0.59±0.05f	1.03±0.07c	0.58±0.05c	0.34±0.03i	0.48±0.06c	0.27±0.03c
BM-8	1.50±0.06a	106.88±5.38f	0.82±0.03c	24.57±2.04b	0.66±0.02d	0.84±0.05d	0.63±0.05b	0.73±0.04f	0.56±0.07a	0.29±0.04b
BM-9	1.41±0.13a	103.74±6.37g	0.79±0.02e	31.02±1.09a	0.67±0.03d	2.10±0.11b	0.60±0.04c	1.66±0.13b	0.57±0.04a	0.32±0.03b
BM-10	1.19±0.07c	112.74±4.39c	0.66±0.02g	23.49±2.21c	0.86±0.02a	0.87±0.06d	0.56±0.04c	0.82±0.07e	0.54±0.08a	0.35±0.02b
BM-11	1.36±0.08a	132.41±3.23a	0.78±0.02f	22.12±1.97c	0.71±0.02c	0.81±0.05d	0.64±0.10b	0.71±0.04f	0.61±0.05a	0.33±0.03b
BM-12	1.33±0.04a	122.67±3.29a	0.81±0.02d	32.79±1.60a	0.74±0.05b	0.89±0.06d	0.66±0.08b	0.82±0.15e	0.63±0.05a	0.31±0.03b
BM-13	1.31±0.08a	120.91±2.58a	0.88±0.04b	13.61±1.38f	0.62±0.05e	0.48±0.07e	0.59±0.06c	0.38±0.03h	0.43±0.04e	0.36±0.04b
BM-14	1.20±0.10c	107.06±6.69e	0.81±0.02d	20.92±2.75c	0.83±0.01a	0.43±0.04f	0.72±0.02b	0.40±0.04h	0.63±0.01a	0.36±0.05b
BM-15	1.09±0.19d	120.51±2.64a	0.76±0.06f	21.69±3.42c	0.62±0.16e	1.02±0.06c	0.61±0.05b	0.97±0.08e	0.59±0.06a	0.35±0.04b
BM-16	1.05±0.10d	112.11±5.55c	0.87±0.03b	22.99±1.37c	0.63±0.06e	1.12±0.03c	0.60±0.06c	1.04±0.08d	0.45±0.03d	0.49±0.03a
BM-17	1.09±0.02d	128.02±2.76a	0.68±0.02g	14.23±1.00e	0.51±0.06i	2.97±0.06a	0.23±0.05f	1.59±0.17b	0.22±0.04h	0.29±0.04b
BM-18	1.25±0.14b	121.80±2.78a	0.82±0.05c	19.66±4.26c	0.80±0.14a	0.81±0.05d	0.77±0.02a	0.77±0.05e	0.52±0.03b	0.37±0.04b

注:不同小写字母代表品种间差异显著( $P<0.05$ )。下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences among varieties at  $P<0.05$ . The same below.

表2 不同品种蓖麻对Cd、Pb的富集系数和转运系数

Table 2 Enrichment coefficients and transport coefficients of Cd and Pb in different varieties of castor bean

品种 Variety	Cd			Pb		
	BCF	TF <sub>茎叶</sub>	TF <sub>籽粒</sub>	BCF	TF <sub>茎叶</sub>	TF <sub>籽粒</sub>
BM-1	2.82±0.04a	1.46±0.08a	0.75±0.05a	0.61±0.04e	0.16±0.05f	0.04±0.01e
BM-2	2.28±0.10c	1.06±0.21d	0.64±0.10d	0.62±0.08d	0.21±0.03c	0.08±0.02c
BM-3	2.13±0.23f	0.92±0.05g	0.54±0.20e	0.77±0.03a	0.26±0.08a	0.06±0.03d
BM-4	2.05±0.06g	1.07±0.13d	0.45±0.11f	0.64±0.06c	0.12±0.04h	0.10±0.03b
BM-5	2.26±0.10d	0.94±0.09f	0.66±0.02c	0.77±0.04a	0.29±0.01a	0.03±0.00g
BM-6	2.28±0.05c	1.19±0.01b	0.80±0.09a	0.70±0.04b	0.08±0.01i	0.22±0.04a
BM-7	2.42±0.13b	1.05±0.04d	0.71±0.05a	0.69±0.01b	0.21±0.03d	0.03±0.01h
BM-8	2.54±0.12b	0.99±0.03e	0.81±0.06a	0.64±0.02c	0.24±0.03b	0.04±0.00e
BM-9	2.47±0.13b	1.04±0.08e	0.81±0.05a	0.67±0.03c	0.32±0.03a	0.06±0.00d
BM-10	2.32±0.09c	1.28±0.08a	0.72±0.04a	0.67±0.03c	0.22±0.01c	0.05±0.00e
BM-11	2.50±0.13b	1.10±0.07c	0.84±0.10a	0.75±0.02a	0.17±0.01f	0.05±0.01e
BM-12	2.54±0.11b	1.17±0.05b	0.84±0.05a	0.76±0.02a	0.27±0.02a	0.03±0.01f
BM-13	2.33±0.04b	1.14±0.03b	0.69±0.09b	0.65±0.01c	0.12±0.01h	0.05±0.01d
BM-14	2.55±0.04b	1.38±0.15a	0.82±0.02a	0.62±0.04d	0.20±0.03d	0.04±0.01e
BM-15	2.24±0.14e	1.28±0.16a	0.87±0.14a	0.69±0.02b	0.19±0.03e	0.06±0.01d
BM-16	2.20±0.07f	1.44±0.14a	0.70±0.01a	0.66±0.03c	0.21±0.02c	0.06±0.01d
BM-17	1.66±0.07h	1.09±0.08c	0.37±0.02f	0.71±0.01a	0.13±0.01g	0.11±0.01b
BM-18	2.54±0.10b	1.32±0.27a	0.80±0.06a	0.69±0.02b	0.17±0.04f	0.06±0.02d

表3 不同品种蓖麻对Cd、Pb的提取量

Table 3 Extraction amount of Cd and Pb by different varieties of castor bean

品种 Variety	Cd 提取量 Cd extraction/(mg·株 <sup>-1</sup> )	Pb 提取量 Pb extraction/(mg·株 <sup>-1</sup> )
BM-1	21.65±3.63c	1 009.04±73.69b
BM-2	42.67±6.75a	1 276.19±86.65a
BM-3	33.08±11.84a	1 482.22±475.30a
BM-4	24.56±3.60b	1 040.12±110.95b
BM-5	16.42±0.99d	1 067.98±148.56b
BM-6	7.86±2.02e	386.26±77.76h
BM-7	15.81±0.41d	731.69±108.38e
BM-8	18.69±4.89d	804.54±145.80c
BM-9	21.20±5.05c	846.44±237.83c
BM-10	8.46±2.43e	353.81±96.03i
BM-11	17.22±4.78d	768.99±146.57d
BM-12	29.80±2.79b	1 082.61±168.87b
BM-13	13.51±2.80d	566.35±127.70g
BM-14	30.55±8.90b	1 000.30±180.92b
BM-15	14.60±4.74d	622.36±168.08f
BM-16	18.19±3.82d	881.25±91.53b
BM-17	20.64±4.39c	1 187.66±282.81a
BM-18	30.64±9.13b	1 165.18±349.50a
平均值	21.42±9.93	904.05±338.32

表4 不同品种蓖麻对根际土壤酶活性的影响

Table 4 Effects of different varieties of castor bean on soil enzyme activities

品种 Variety	蔗糖酶 Sucrase/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	蛋白酶 Protease/ (μg·g <sup>-1</sup> )	过氧化氢酶 Catalase/ (mg·g <sup>-1</sup> )	脲酶 Urease/ (mg·g <sup>-1</sup> )
BM-1	17.38±0.91f	0.89±0.04h	3.01±0.13d	0.20±0.01b
BM-2	17.86±1.46e	0.95±0.04f	3.60±0.07b	0.19±0.01c
BM-3	30.57±1.70a	1.06±0.07d	3.14±0.07d	0.20±0.02b
BM-4	25.56±4.62b	1.68±0.07a	2.56±0.05g	0.16±0.01e
BM-5	30.07±1.44a	1.27±0.09b	3.51±0.11b	0.21±0.02b
BM-6	29.64±2.37a	1.63±0.07a	2.68±0.07f	0.15±0.02g
BM-7	20.64±2.24d	1.12±0.07c	2.47±0.15g	0.14±0.02g
BM-8	21.19±1.25d	1.00±0.08d	2.85±0.10e	0.20±0.02b
BM-9	20.90±1.60d	0.92±0.06g	2.64±0.08f	0.16±0.01f
BM-10	28.83±2.22a	0.85±0.08i	3.10±0.06d	0.18±0.02d
BM-11	18.34±1.52e	0.98±0.07e	3.08±0.05d	0.20±0.01b
BM-12	20.55±0.87d	1.01±0.05d	3.41±0.11b	0.19±0.01c
BM-13	20.55±2.18d	0.91±0.04g	2.85±0.09e	0.14±0.02g
BM-14	21.88±2.11c	1.00±0.06d	3.93±0.08a	0.12±0.01h
BM-15	21.62±0.82c	0.93±0.06g	3.40±0.25b	0.19±0.01c
BM-16	21.58±1.92c	0.91±0.06g	3.13±0.05d	0.23±0.02b
BM-17	22.69±1.12c	1.22±0.05b	1.97±0.09h	0.26±0.02a
BM-18	13.17±3.36g	1.09±0.04c	3.25±0.30c	0.19±0.01c

壤中所含的蔗糖酶、蛋白酶、过氧化氢酶和脲酶的含量分别在 13.17~30.57 mg·kg<sup>-1</sup>、0.85~1.68 μg·g<sup>-1</sup>、1.97~3.93 mg·g<sup>-1</sup> 和 0.12~0.26 mg·g<sup>-1</sup>, 平均值分别是 21.92 mg·kg<sup>-1</sup>、1.09 μg·g<sup>-1</sup>、3.03 mg·g<sup>-1</sup> 和 0.19 mg·g<sup>-1</sup>, 变异系数分别是 22.39%、22.06%、15.49% 和 19.46%。

### 2.3.2 不同品种蓖麻对根际土壤有效态 Cd、Pb 含量的影响

由表 5 可知, 有效态 Cd 含量变化范围为 1.25~2.82 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效态 Pb 含量变化范围为 72.20~108.79 mg·kg<sup>-1</sup>, 与背景土壤的相关数值相比, 土壤中有效态 Cd、Pb 均有明显的上升, 其中 BM-5、BM-6、BM-13、BM-16 和 BM-17 的土壤有效态 Cd 含量提升的幅度最为明显; BM-4、BM-7、BM-8、BM-11 和 BM-12 的土壤有效态 Pb 含量提升的幅度最为明显; BM-11、BM-12、BM-15 和 BM-16 的土壤 pH 酸化最为明显。

### 2.3.3 根际土壤酶活性与根际土壤有效态 Cd、Pb 的相关性

蓖麻土壤中有效态 Cd、Pb 与土壤中脲酶含量之间没有显著相关性, 与土壤中蔗糖酶含量呈显著正相关性, 与土壤蛋白酶含量呈现显著正相关性, 与土壤

表5 不同品种蓖麻对土壤有效态 Cd、Pb 含量和 pH 的影响

Table 5 Effects of different varieties of castor bean on soil available Cd, Pb content and pH

品种 Variety	有效态 Cd Available Cd/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效态 Pb Available Pb/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH
BM-1	2.00±0.12e	72.20±9.19g	4.62±0.12b
BM-2	1.25±0.07h	96.41±10.95a	4.55±0.08d
BM-3	2.32±0.22b	95.97±7.73a	4.68±0.04a
BM-4	1.95±0.25e	107.86±4.38a	4.73±0.05a
BM-5	2.82±0.13a	83.72±5.45e	4.56±0.03d
BM-6	2.49±0.17a	92.82±11.43b	4.63±0.05b
BM-7	1.96±0.08e	108.79±5.63a	4.52±0.03e
BM-8	2.08±0.17d	98.82±11.34a	4.71±0.04a
BM-9	2.11±0.24c	85.68±7.25d	4.74±0.04a
BM-10	1.73±0.22f	95.59±13.85a	4.59±0.06c
BM-11	1.89±0.26f	99.87±7.57a	4.47±0.06f
BM-12	2.08±0.33d	103.93±7.03a	4.48±0.05f
BM-13	2.69±0.25a	81.00±4.48f	4.68±0.03a
BM-14	1.91±0.21e	97.97±5.46a	4.74±0.10a
BM-15	2.08±0.14d	89.20±5.93c	4.40±0.04g
BM-16	2.51±0.22a	81.02±3.33f	4.37±0.06g
BM-17	2.69±0.17a	93.56±7.23a	4.52±0.08e
BM-18	1.54±0.27g	97.13±0.67a	4.77±0.05a

中过氧化氢酶含量呈显著负相关关系(表6)。

### 2.3.4 不同品种蓖麻植株Cd、Pb含量与土壤有效态Cd、Pb的相关性

蓖麻根中Cd含量与叶、壳、籽粒Cd含量和土壤有效态Cd含量之间没有显著相关性,与茎Cd含量之间呈显著正相关。蓖麻茎中Cd含量与叶、籽粒Cd含量和土壤有效态Cd含量之间没有相关性,与壳Cd含量之间呈极显著正相关。蓖麻叶中Cd含量和壳、籽粒Cd含量之间呈显著正相关关系,而与土壤有效态Cd含量之间呈显著负相关关系;蓖麻籽粒中Cd含量与土壤有效态Cd之间没有显著相关性(表7)。

蓖麻根中Pb含量与籽粒Pb含量之间没有显著相关性,与茎、叶、壳Pb含量和土壤有效态Pb含量之

间呈极显著正相关。蓖麻茎中Pb含量与叶、壳和籽粒Pb含量之间没有显著相关性,与土壤有效态Pb含量之间呈极显著正相关。蓖麻叶中Pb含量与籽粒Pb含量之间没有显著相关性,与壳Pb含量和土壤有效态Pb含量之间呈极显著正相关。蓖麻壳中Pb含量与籽粒Pb含量之间没有显著相关性,与土壤有效态Pb含量之间呈显著正相关。蓖麻籽粒中Pb含量与土壤有效态Pb含量之间没有显著相关性(表8)。

### 2.4 不同品种蓖麻植株Cd、Pb含量聚类分析

根据不同品种蓖麻植株中的Cd、Pb含量差异,采用系统聚类分析方法,将不同品种蓖麻分成3类来表示其对Cd、Pb的累积能力差异,具体分为I类(对Cd、Pb积累较低的蓖麻品种)、II类(对Cd、Pb积累中

表6 根际土壤酶活性与根际土壤有效态Cd、Pb的相关性

Table 6 Correlation between enzyme activities and available Cd and Pb in rhizosphere soil

指标 Index	蔗糖酶 Sucrase	蛋白酶 Protease	过氧化氢酶 Catalase	脲酶 Urease	有效态 Cd Available Cd	有效态 Pb Available Pb
蔗糖酶 Sucrase	1.000					
蛋白酶 Protease	0.404**	1.000				
过氧化氢酶 Catalase	-0.404**	-0.349**	1.000			
脲酶 Urease	0.091	-0.106	-0.212	1.000		
有效态 Cd Available Cd	0.621**	0.289*	-0.520**	0.244	1.000	
有效态 Pb Available Pb	0.574**	0.276*	-0.535**	0.033	0.446**	1.000

注:\*\*表示在0.01水平相关性极显著;\*表示在0.05水平相关性显著。下同。

Note: \*\* indicates the correlation is extremely significant at the level of 0.01; \* indicates the correlation is significant at the level of 0.05. The same below.

表7 蓖麻不同组织Cd含量与根际土壤有效态Cd含量的相关性

Table 7 Correlation between Cd content in different tissues of castor bean and available Cd in rhizosphere soil

组织 Tissue	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	壳 Shell	籽粒 Grain	有效态 Cd Available Cd
根 Root	1.000					
茎 Stem	0.272*	1.000				
叶 Leaf	0.003	0.170	1.000			
壳 Shell	0.101	0.350**	0.656**	1.000		
籽粒 Grain	0.037	0.084	0.541**	0.624**	1.000	
有效态 Cd Available Cd	-0.098	-0.242	-0.354**	-0.259*	-0.099	1.000

表8 蓖麻不同组织Pb含量与根际土壤有效态Pb含量的相关性

Table 8 Correlation between Pb content in different tissues of castor bean and available Pb in rhizosphere soil

组织 Tissue	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	壳 Shell	籽粒 Grain	有效态 Pb Available Pb
根 Root	1.000					
茎 Stem	0.579**	1.000				
叶 Leaf	0.414**	0.156	1.000			
壳 Shell	0.378**	0.173	0.771**	1.000		
籽粒 Grain	0.214	0.184	-0.088	0.151	1.000	
有效态 Pb Available Pb	0.878**	0.612**	0.330**	0.327*	0.062	1.000

等的蓖麻品种)和Ⅲ类(对Cd、Pb积累较高的蓖麻品种)。具体如图2所示,品种BM-2、BM-5、BM-6、BM-7、BM-8、BM-9、BM-10、BM-11、BM-12、BM-13、BM-14、BM-15、BM-16和BM-18为Cd积累较高的品种;品种BM-4、BM-6、BM-7、BM-11、BM-13、BM-15、BM-17和BM-18为Pb积累较高的品种。品种BM-6、BM-7、BM-11、BM-13、BM-15和BM-18为Cd、Pb积累均较高的品种。

### 3 讨论

#### 3.1 不同品种蓖麻植株对Cd、Pb的吸收、富集和转运

植物不同组织中重金属含量的不同与植物种类和重金属种类息息相关<sup>[25]</sup>。不同蓖麻品种由于遗传上的差异对重金属的积累存在差异,不同重金属在蓖麻不同部位的积累也存在一定差异<sup>[26]</sup>。前人对Cd、Pb在蓖麻不同器官分布的研究结果也略有差异,张惠<sup>[27]</sup>的研究表明,在Cd污染浓度为150 mg·kg<sup>-1</sup>、Pb污染浓度为1 000 mg·kg<sup>-1</sup>的最高污染土壤中,蓖麻各器官累积Cd、Pb的顺序均为:根>茎>叶。张晗芝等<sup>[7]</sup>通过盆栽试验表明,蓖麻不同部位Cd含量为茎>叶>果实,重金属大部分累积在蓖麻的根部,少量积累在茎叶中,果实中的含量相对较少。鄢小龙等<sup>[28]</sup>通过铅锌矿区周边农田42个Cd、Pb低累积玉米品种筛选的研究表明,34个玉米品种Cd在植株内的分配规律为根>叶>茎>籽粒,其余玉米品种的分配规律为叶>根>茎>籽粒,42个品种Pb在玉米植株内的分配规律为根>叶>茎>籽粒。谌金吾<sup>[29]</sup>的研究表明,Cd、Pb在植物各组织的分布基本上是:根>叶>枝>花>果实>籽粒,即吸收组织>同化组织和疏导组织>繁殖组织。本研究中,不同蓖麻品种各组织Cd、Pb含量的大小顺序均为:根>茎>叶>壳>籽粒,与前人研究结果相似,但与

王沛琦等<sup>[12]</sup>对蓖麻的研究结果不一致。蓖麻不同组织中Cd、Pb含量的高低可能与Cd、Pb在根细胞中的分布及向地上部分转运能力的高低有关,还可能与土壤中的根系分泌物有关<sup>[30]</sup>。

富集系数和转运系数的高低直接影响果实中重金属的含量,并反映出植物对重金属的富集和转运能力<sup>[31-32]</sup>。尹明等<sup>[13]</sup>的研究表明,重度Cd污染下,不同品种红麻根的富集系数平均值为3.33;不同品种红麻茎转运系数平均值为0.46,叶为2.43。符慧琴等<sup>[33]</sup>的研究表明,0.41 mg·kg<sup>-1</sup>(轻微污染)Cd浓度土壤中20种苎麻的富集系数为0.97~1.58,转运系数为0.66~1.41。杨珍平等<sup>[34]</sup>的研究表明,当土壤Cd浓度为5 mg·kg<sup>-1</sup>时,蓖麻对Cd的富集系数均大于1。杨惟薇等<sup>[35]</sup>的研究表明,不同玉米品种中重金属Cd、Pb的平均转运系数均低于1.00。本研究中,18个品种蓖麻Cd的富集系数为1.66~2.82,Pb富集系数为0.61~0.77,茎叶Cd转运系数为0.92~1.46,果实Cd转运系数为0.37~0.87,茎叶Pb转运系数为0.12~0.32,果实Pb转运系数为0.03~0.22;不同品种蓖麻对Cd、Pb的富集系数均大于1,且茎叶Cd转运系数多数大于1,茎叶Pb转运系数均小于1,Cd、Pb富集系数与前人对蓖麻研究结果相似,但转运系数不一致,推测可能与蓖麻不同品种间生理特性差异及Cd、Pb在蓖麻体内的转运速率等有关,Cd易与蛋白质结合成有机络合物,在蓖麻植株体内的迁移性比Pb强。

矿区种植的植物生活在重金属含量较高的环境中,对重金属污染产生了适应方式,不同品种蓖麻对重金属的吸收和积累机制存在一定差异<sup>[36-37]</sup>。张玉芬<sup>[38]</sup>将12个蓖麻品种划分为高耐性和低耐性两类,其中5个蓖麻品种是高耐性品种,7个蓖麻品种是低耐性品种;根据蓖麻地上部Cd累积量差异大小可分

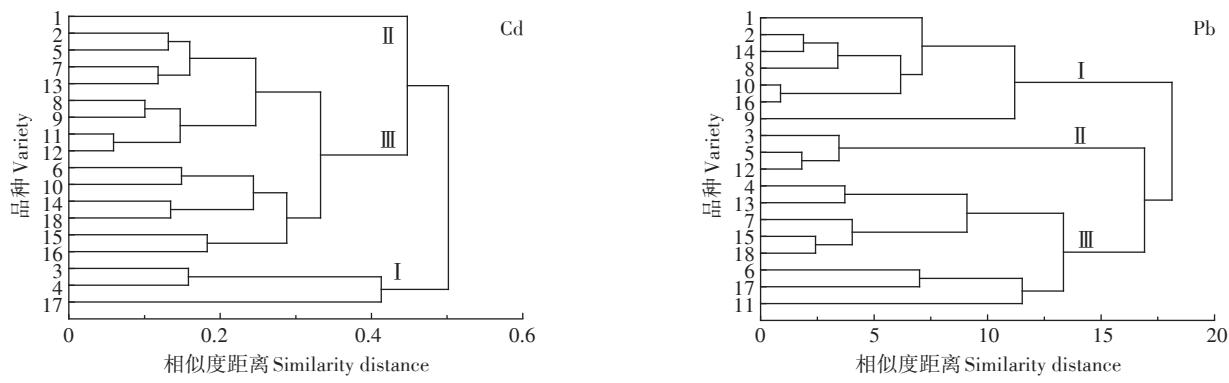


图2 不同品种蓖麻植株中Cd、Pb含量聚类分析

Figure 2 Cluster analysis of Cd and Pb contents in castor bean plants of different varieties

为高累积性和低累积性两类,再结合蓖麻的耐性分为低耐低累积、低耐高累积、高耐低累积和高耐高累积4种类型。本研究通过聚类分析把硫铁矿区对重金属有一定耐性的蓖麻品种划分为Cd和Pb高、中和低富集品种,比较不同蓖麻植株中重金属含量,筛选品种BM-6、BM-7、BM-11、BM-13、BM-15和BM-18为Cd、Pb积累富集较高的品种。蓖麻与一些生长快、抗性好、具有富集重金属能力的植物,如玉米、水稻、小麦等相比,不仅生物量大,且种子重金属含量低,可用于生产生物能源,不进入食物链,不会对人体产生危害。此外,蓖麻是多年生植物,可以种植在不适合粮食作物生长的贫瘠和重金属污染的土壤上,持续去除污染土壤中的重金属<sup>[39]</sup>。

### 3.2 不同品种蓖麻对根际土壤pH及有效态Cd、Pb含量的影响

当受到重金属胁迫时,蓖麻可能会通过改变根系分泌物的组成和数量来改变根际环境,根系分泌物会影响根际土壤重金属的生物有效性,通过改变土壤中重金属的形态,从而改变蓖麻对重金属的富集能力<sup>[40]</sup>。黄国勇<sup>[24]</sup>的研究表明,草酸、酒石酸、柠檬酸、琥珀酸和苹果酸是蓖麻根系分泌物中重要的有机酸。姚诗源<sup>[41]</sup>研究发现根系的分泌活动酸化了根际土壤,增加了酸交换性和可还原态Cu含量,而其他形态铜含量减少。曹雪莹<sup>[42]</sup>研究发现土壤重金属总量及pH等因素都对其重金属有效态含量有重要影响。大量研究表明,土壤有效态Cd含量与其总量呈显著或极显著正相关,与pH呈显著或极显著负相关<sup>[43]</sup>(酸性土壤)。在本试验中,土壤pH均有所下降,且重金属Cd、Pb的有效态含量有明显提高,不同品种蓖麻的土壤有效态Cd、Pb含量存在明显差异,与前人研究结果一致。根系分泌物可能通过降低土壤pH值及改变氧化还原电位使重金属在土壤中的移动性和有效性发生变化<sup>[44]</sup>,但分泌物的成分及作用仍待进一步研究。

## 4 结论

(1)在农田土壤Cd、Pb胁迫下,供试的18个蓖麻品种生长及产量差异显著,不同品种蓖麻对Cd、Pb的耐性不同;Cd、Pb的提取量范围分别为7.86~42.67 mg·株<sup>-1</sup>和353.81~1 482.22 mg·株<sup>-1</sup>,品种BM-2、BM-3、BM-12和BM-18具有较强的Cd、Pb提取能力。

(2)田间小区试验表明,土壤中有效态Cd、Pb均显著上升,BM-11、BM-12、BM-15和BM-16的土壤pH酸化显著。蓖麻不同部位Cd、Pb含量从大到小依

次为:根>茎>叶>壳>籽粒,根部是Cd、Pb累积的主要器官;不同品种蓖麻Cd、Pb的富集系数均大于1,且茎叶Cd转运系数多数大于1,茎叶Pb转运系数均小于1,不同蓖麻品种对Cd的富集和转运能力明显高于Pb。

(3)根据蓖麻产量、不同组织Cd、Pb含量、富集系数、转运系数及提取量等指标进行综合评价,BM-2、BM-6、BM-7、BM-15和BM-18共5个品种可作为Cd、Pb高富集蓖麻品种在严格管控类耕地上推广种植,其中效果最好的品种是BM-18。

## 参考文献:

- [1] 张鑫.安徽铜陵矿区重金属元素释放迁移地球化学特征及其环境效应研究[D].合肥:合肥工业大学,2005:12~14. ZHANG X. Geochemical characteristics of release and migration of heavy metal elements in Tongling mining area, Anhui Province and its environmental effects[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2005:12~14.
- [2] 何如海,薛中俊,刘娜,等.两种土地利用方式下土壤重金属污染特征与评价[J].长江流域资源与环境,2020,29(8):1858~1864. HE R H, XUE Z J, LIU N, et al. Characteristics and assessment of heavy metal pollution in soil under two land use[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(8):1858~1864.
- [3] 李志涛,王夏晖,何俊,等.四川省江安县某硫铁矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J].农业环境科学学报,2019,38(6):1272~1279. LI Z T, WANG X H, HE J, et al. Source identification and pollution assessment of heavy metals in farmland soils around a pyrite mining area in Jiang'an County, Sichuan Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(6):1272~1279.
- [4] 袁国军,卢绍辉,梅象信,等.农用地土壤污染风险管控标准延伸理解及其评价标准现状分析[J].中国农学通报,2020,36(2):84~89. YUAN G J, LU S H, MEI X X, et al. Extended understanding of soil pollution risk management standards for agricultural lands and the status of evaluation standards[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(2):84~89.
- [5] 王浣荷.轻中度镉污染农田土壤的修复及利用研究[D].杭州:浙江大学,2020:4~7. WANG H H. Remediation and utilization of slightly-moderately cadmium contaminated soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020:4~7.
- [6] ZHANG H Z, GUO Q J, YANG J X, et al. Cadmium accumulation and tolerance of two castor cultivars in relation to antioxidant systems[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(10):2048~2055.
- [7] 张哈芝,郭庆军,杨俊兴,等.不同品种蓖麻对镉的响应及修复能力评价[J].生态环境学报,2016,25(3):531~538. ZHANG H Z, GUO Q J, YANG J X, et al. Evaluation of cadmium tolerance and cadmium-phytoextraction ability of 30 castor bean cultivars[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(3):531~538.
- [8] ANDREAZZA R, BORTOLON L, PIENIZ S, et al. Use of high-yielding bioenergy plant castor bean (*Ricinus communis* L.) as a potential phytoremediator for copper-contaminated soils[J]. Pedosphere, 2013, 23

(5):651–661.

- [9] 郭贵凤. 不同品种水稻和蓖麻对镉的吸收、转运及累积特征研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019: 3–8. GUO G F. Characteristics of cadmium absorption, transport and accumulation in different rice and castor[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019: 3–8.
- [10] MUHAMMAD A C. Effect of chelates and biochar on Cd uptake by castor (*Ricinus communis* L.) in Cd polluted soil and the mechanisms [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016: 2–4.
- [11] 易心钰. 蓖麻对铅锌胁迫的响应及其机制研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018: 7–9. YI X Y. Study on the responses of *Ricinus communis* L. to lead and zinc stress and their mechanisms[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2018: 7–9.
- [12] 王沛琦, 高梅, 刘旭云, 等. 5个蓖麻品种对土壤中镉富集的差异[J]. 核农学报, 2021, 35(6): 1433–1439. WANG P Q, GAO M, LIU X Y, et al. Evaluation of cadmium enrichment capacity of five castor varieties in Cd-polluted soil[J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 2021, 35(6): 1433–1439.
- [13] 尹明, 唐慧娟, 杨大为, 等. 不同品种红麻在重度与轻微镉污染耕地的修复试验[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2267–2276. YIN M, TANG H J, YANG D W, et al. Comparative repair test of different varieties of kenaf in heavily and lightly cadmium contaminated farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2267–2276.
- [14] 冯爱煊. 镉污染紫色稻田土壤的植物间作修复与安全利用技术研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020: 9–11. FENG A X. Study on phytoremediation and safe utilization of cadmium-contaminated purple paddy soil[D]. Chongqing: Southwest University, 2020: 9–11.
- [15] 冯爱煊, 贺红周, 李娜, 等. 基于多目标元素的重金属低累积水稻品种筛选及其吸收转运特征[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 988–1000. FENG A X, HE H Z, LI N, et al. Screening of rice varieties with low accumulation of heavy metals based on multiple target elements and their absorption and transport characteristics in rice plants[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(6): 988–1000.
- [16] 王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 等. 重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 5133–5141. WANG T J, SU N N, LEI P, et al. Community structure of heavy metal immobilized bacteria in the lettuce (*Lactuca sativa* L.) rhizosphere in soil polluted by heavy metals and its effects on reducing heavy metal accumulation in lettuce[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(11): 5133–5141.
- [17] 杨梦丽, 崔俊义, 马友华, 等. 原位钝化对轻度镉污染农田小麦修复研究[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(2): 233–238. YANG M L, CUI J Y, MA Y H, et al. Study on rehabilitation of wheat with mild cadmium pollution by *in-situ* passivation[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(2): 233–238.
- [18] 杨茹, 陈馨睿, 张颖, 等. 干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交籼稻籽粒Cd累积及产量的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 368–377. YANG R, CHEN X R, ZHANG Y, et al. Effects of nano material on cadmium accumulation capacity and grain yield of indica hybrid rice under wetting-drying alternation irrigation[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1): 368–377.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2005: 30–34, 56–58, 81–83, 106–108. BAO S D. Soil agrochemical analysis [M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 30–34, 56–58, 81–83, 106–108.
- [20] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 522–528. LU W T, JIA Z K, ZHANG P, et al. Effects of returning straw to field on soil active organic carbon and enzyme activity in dry farmland in southern Ningxia[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 522–528.
- [21] 曹承绵, 张志明, 周礼恺. 几种土壤蛋白酶活性测定方法的比较[J]. 土壤通报, 1982(2): 39–40. CAO C M, ZHANG Z M, ZHOU L K. Comparison of several methods for determination of soil protease activity[J]. *Soil Bulletin*, 1982(2): 39–40.
- [22] 黄明煜. 三种入侵植物对土壤重金属Cd/Pb污染的耐性和修复效应研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017: 8–10. HUANG M Y. Tolerance and remediation potential of three invasive plants to soil heavy metal pollution of Cd and Pb[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017: 8–10.
- [23] 李俊凯, 张丹, 周培, 等. 南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征[J]. 环境科学, 2018, 39(8): 3845–3853. LI J K, ZHANG D, ZHOU P, et al. Assessment of heavy metal pollution in soil and its bioaccumulation by dominant plants in a lead-zinc mining area, Nanjing[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 39(8): 3845–3853.
- [24] 黄国勇. 蓖麻(*Ricinus communis* L.)富集铜的机制及其对铜污染土壤的修复[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 12–14. HUANG G Y. Mechanism of copper accumulation in castor (*Ricinus communis* L.) and its application on remediation of copper contaminated soil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018: 12–14.
- [25] 林海, 张海丽, 董颖博, 等. 重金属复合污染下草本植物两两组合水培的富集特性[J]. 环境科学研究, 2016, 29(8): 1154–1162. LIN H, ZHANG H L, DONG Y B, et al. Enrichment characteristics of various heavy metals by four herbaceous plants in pair combination under hydroponic culture[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(8): 1154–1162.
- [26] 王沛琦, 刘旭云, 胡学礼, 等. 蓖麻对重金属污染土壤治理的研究进展[J]. 分子植物育种, 2019, 17(6): 2048–2054. WANG P Q, LIU X Y, HU X L, et al. Advances and the effects of castor for curing heavy metal contamination in soil[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(6): 2048–2054.
- [27] 张惠. 柠檬酸和外源丛枝菌根真菌强化蓖麻修复Cd和Pb污染土壤的效果研究[D]. 上海: 上海大学, 2014: 39–41. ZHANG H. Use of *Ricinus communis* L. for phytoremediation of Cd and Pb assisted with citric acid and arbuscular mycorrhizal fungi[D]. Shanghai: Shanghai University, 2014: 39–41.
- [28] 鄢小龙, 马宏朕, 李元, 等. 铅锌矿区周边农田Cd/Pb低累积玉米品种筛选[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(6): 1076–1083. YAN X L, MA H Z, LI Y, et al. Screening zea mays cultivars based upon accumulation of Cd and Pb in the farmland around the

- [28] 铅-锌矿带[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2019, 34(6):1076–1083.
- [29] 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, 2013:84–86. CHEN J W. Study on response and potential phytoremediation of *Bidens pilosa* L. in cadmium and lead stress[D]. Chongqing: Southwest University, 2013:84–86.
- [30] 史刚荣. 耐重金属胁迫的能源植物筛选及其适应性研究[D]. 南京:南京农业大学, 2009:88–92. SHI G R. Screening of heavy metal-tolerant energy plants and their adaptability to metal stress[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009:88–92.
- [31] 赵雅曼, 陈顺钰, 李宗勋, 等. 铅锌矿集区7种草本植物对重金属的富集效果[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(3):232–240. ZHAO Y M, CHEN S Y, LI Z X, et al. Absorption and enrichment effects of herbaceous species on soil heavy metals in the Youxi lead-zinc mining area[J]. *Journal of Forests and Environment*, 2019, 39(3):232–240.
- [32] 刘克, 和文祥, 张红, 等. 镉在小麦各部位的富集和转运及籽粒镉含量的预测模型[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8):1441–1448. LIU K, HE W X, ZHANG H, et al. Cadmium accumulation and translocation in wheat and grain Cd prediction[J]. *Journal of Agro-Environment Sciences*, 2015, 34(8):1441–1448.
- [33] 符慧琴, 揭红东, 揭雨成, 等. 不同纤维细度苎麻种质镉富集与转运和积累能力比较[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(4):359–365. FU H Q, JIE H D, JIE Y C, et al. Comparison of accumulation, transfer and enrichment to cadmium of ramie germplasm with different fiber fineness[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2017, 43(4):359–365.
- [34] 杨珍平, 郝教敏, 卜玉山, 等. Cd胁迫对5种植物体体内Cd积累及根际土壤特性的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6):186–192. YANG Z P, HAO J M, BU Y S, et al. Effects of Cd stress on Cd accumulation and rhizosphere soil characteristics with five plants[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6):186–192.
- [35] 杨惟薇, 刘敏, 曹美珠, 等. 不同玉米品种对重金属铅镉的富集和转运能力[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(6):774–779. YANG W W, LIU M, CAO M Z, et al. Accumulation and transfer of lead(Pb) and cadmium(Cd) on different species of maize[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(6):774–779.
- [36] 黄化刚. 镉-锌/滴滴涕复合污染土壤植物修复的农艺强化过程及机理[D]. 杭州:浙江大学, 2012:77–82. HUANG H G. Processes and mechanisms of agronomic factors for enhancing phytoremediation of Cd-Zn/DDTs co-contaminated soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012:77–82.
- [37] 王红新. 融合剂对铅锌尾矿废弃地植物富集铅锌的诱导作用[D]. 南京:南京农业大学, 2011:57–58. WANG H X. Chelating agents-induced bioaccumulation of Pb/Zn by plants of tailings waste lands [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011:57–58.
- [38] 张玉芬. 蓖麻对镉的耐性机制及有机酸对镉积累调控作用[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2016:31–32. ZHANG Y F. Study on the tolerance mechanism of castor cultivars to Cd and accumulation to Cd by the addition of organic acids[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016:31–32.
- [39] 江春玉. 植物促生细菌提高植物对铅、镉的耐受性及富集效应研究[D]. 南京:南京农业大学, 2008:19–22. JIANG C Y. The effects of plant-growth promoting bacter on promoting lead and cadmium tolerance and accumulation of plants[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008:19–22.
- [40] 秦丽. 间作系统中续断菊与作物Cd、Pb累积特征和根系分泌低分子有机酸机理[D]. 昆明:云南农业大学, 2017:101–103. QIN L. Accumulation characteristics of Cd, Pb and root secretion mechanism of low molecular organic acids in *Sonchus asper* and crop intercropping system[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2017:101–103.
- [41] 姚诗源. 磷铁肥配施对蓖麻(*Ricinus communis* L.)生长和富集铜的影响及机制[D]. 武汉:华中农业大学, 2019:16–18. YAO S Y. Effect and mechanism of phosphorus and iron fertilizers application on the growth and accumulation of copper by castor (*Ricinus communis* L. )[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019:16–18.
- [42] 曹雪莹. 污染农田休耕修复中土壤镉有效性及肥力变化研究[D]. 长沙:湖南师范大学, 2019:50–53. CAO X Y. Study on the cadmium availability and fertility of soils in fallow system integrated with soil remediation of contaminated farmland[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2019:50–53.
- [43] 韩张雄. 钼矿区污染特征及伴生Pb、Cd的稳定化研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2020:43–45. HAN Z X. Study on the pollution characteristics and the immobilization of associated Pb, Cd in molybdenum mine[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020:43–45.
- [44] 廉梅花. 根际土壤中重金属的活化因素及作用机理研究[D]. 沈阳:东北大学, 2016:36–39. LIAN M H. Study on the activation factors and mechanism of heavy metals in rhizosphere soil[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016:36–39.