

铅锌尾矿重金属胁迫下秸秆对蓖麻生理特性和 重金属积累的影响

朱佳文^{1,2,3}, 邹冬生^{1*}, 向言词³, 王晖¹, 谭伟文¹

(1.湖南农业大学 生物科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南科技大学 资源环境与城乡规划管理系, 湖南 湘潭 411201; 3.煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 采用盆栽试验, 研究在铅锌尾矿重金属胁迫下, 秸秆对蓖麻幼苗生物量、叶片内丙二醛(MDA)含量和超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)活性以及重金属积累的影响。结果表明: 在铅锌尾矿砂中添加秸秆能显著增加蓖麻的株高、根长和生物量; 使蓖麻叶片中 MDA 含量和 SOD、CAT、POD 活性分别比对照降低了 48.08%、7.28%、28.60% 和 4.74%; 铅锌尾矿砂中有效态 Pb、Zn、Cd 含量显著降低, 且蓖麻对 Pb、Zn、Cd 的积累量也显著下降; 蓖麻叶片 POD、SOD 活性与叶片中 Pb、Zn、Cd 含量呈极显著正相关, 蓖麻积累的重金属含量与尾矿砂中有效态重金属含量呈显著或极显著正相关。

关 键 词: 秸秆; 蓖麻; 生理特性; 铅锌尾矿砂; 重金属胁迫

中图分类号: X53; Q89 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2012)03-0325-05

Effects of straw addition on physiological parameters and uptake of heavy metals in *Ricinus communis* under the stress of Pb/Zn mine tailing

ZHU Jia-wen^{1,2,3}, ZOU Dong-sheng^{1*}, XIANG Yan-ci³, WANG Hui¹, TAN Wei-wen¹

(1.Department of Biology Science and Technology, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China; 2. Department of Resource Environment & Planning Management County of Urban/Rural Areas, Hunan Science and Technology University, Xiangtan, Hunan 411201, China; 3.Hunan Province Key Laboratory of Clean Coal Resources Utilization and Mine Environment Protection, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: Pot experiments were carried out to investigate the effect of straw addition on biomass, contents of malonyldialdehyde (MDA), activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxide enzyme (POD) and the accumulation of heavy metals (Pb, Zn, Cd) in *Ricinus communis* under the stress of Pb/Zn mine tailing. The results indicated that straw addition significantly increased fresh weight, height and root length of *Ricinus communis*. The contents of MDA and the activities of SOD, POD, CAT in the leaves of *Ricinus communis* under the straw treatments were 48.08%, 7.28%, 28.60% and 4.74% lower than the control, respectively. DTPA-extractable contents of Pb, Zn and Cd in the Pb/Zn mine tailing decreased significantly. The contents of Pb, Zn and Cd in plant organs of *Ricinus communis* decreased significantly with straw addition. An extremely significant positive correlation were observed between the activities of POD, SOD and the contents of Pb, Zn and Cd in the leaves of *Ricinus communis*, and significant or extremely significant positive correlation were observed between the contents of Pb, Zn and Cd in plant organs of *Ricinus communis* and DTPA-extractable contents of Pb, Zn and Cd in Pb/Zn mine tailing.

Key words: straw; *Ricinus communis*; physiological parameters; Pb/Zn mine tailing; heavy metal stress

收稿日期: 2011-11-08

基金项目: 湖南省科学技术厅项目(2010NK3020); 湖南省教育厅重点项目(10A031); 湖南省自然科学基金市州联合基金项目(11JJ9007)

作者简介: 朱佳文(1975—), 男, 湖南溆浦人, 博士研究生, 主要从事矿区重金属污染地的植物修复研究, zhujiawen1975@yahoo.com.cn;

*通信作者, zoudongsheng2@sina.com

铅锌尾矿砂是持久而严重的重金属污染源^[1-2], 不仅占用大量的土地资源, 而且其中的重金属通过淋滤、风化、氧化等作用进入土壤、水体中, 危害周边环境。如何低成本、高效率地治理这类特殊的重金属污染源地, 建立矿冶区生态、经济、社会效益相统一的自维持生态系统是当前生态环境保护所面临的巨大挑战。作物秸秆成本低廉, 易获得, 且添加秸秆是增加土壤有机质的重要途径和措施。植物秸秆可作为重金属污染的原位钝化剂, 通过吸附、络合、改变土壤氧化还原性质来降低污染土壤中重金属离子的水溶态、交换态含量^[3-5], 弱化土壤中重金属的毒害。

对重金属污染严重的铅锌尾矿砂堆积地的生态进行恢复, 植物的选择是关键。蓖麻对重金属 Pb、Zn 和 Cd 均具有一定的耐受和富集能力^[6-8]。蓖麻生物量大, 是生产生物柴油的能源植物, 且能在尾矿周边地带生长^[9], 可用于对重金属污染地的植物修复。笔者研究在铅锌尾矿砂中添加不同秸秆对蓖麻生理特性和重金属积累的影响, 旨在为阐明蓖麻耐受铅锌尾矿重金属胁迫的机理和对铅锌尾矿砂污染区域进行植物修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

蓖麻中北 3 号种子购自山西经作蓖麻科技有限公司。铅锌尾矿砂取自湖南湘西花垣县, 其 pH 7.86, 全氮、全磷、全钾含量分别为 0.98、0.15、2.11 g/kg, 有机质含量 3.04 g/kg, Pb、Zn、Cd 含量分别为 4 686.51、4 037.07、28.70 mg/kg。

1.2 方法

试验于 2011 年 3—6 月在湖南农业大学耘园试验基地进行。将铅锌尾矿砂风干, 碾碎, 过孔径 0.83 mm 筛。分别取水稻、龙须草、芒草的秸秆, 剪成长 0.5 cm 左右, 以质量比 2% 添加到尾矿砂中, 混合均匀, 装于 20 cm×15 cm 塑料盆内, 每盆重 2.0 kg。以纯铅锌尾矿砂为对照。每个处理 3 次重复。土壤干湿平衡老化 6 周后, 每盆中播种 5 粒蓖麻种子。于种子发芽出苗后, 在每盆中留长势一致的苗 3 株, 定期浇水, 生长 55 d 后收获整株, 测定农艺性状指标, 同时取叶片测定生理指标。

1.3 测定指标及方法

土壤 pH 值采用电位法测定(土、水质量比 1:5, 用 pHs-3C 型精密 pH 计测定)。土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定。土壤全氮含量用半凯式法测定。土壤全磷含量用 HClO₄-H₂SO₄ 消化-钼锑抗比色法测定。土壤全钾含量用氢氟酸-高氯酸消煮-火焰光度法测定。参照文献[10]中的方法测定蓖麻叶片中 MDA 含量和 SOD、CAT、POD 活性。于尾矿砂中添加秸秆干湿平衡 6 周后, 用 DTPA 法提取有效态重金属, 采用 pH 5.1 (用 HCl 调节) 的 0.005 mol/L DTPA 提取剂+0.1 mol/L TEA (三乙醇胺)+0.01 mol/L CaCl₂ 溶液, 按 1:5 土液比浸提^[11]。用浓盐酸+浓硝酸+高氯酸消解尾矿砂中的重金属, 用浓硝酸+高氯酸消解植株中的重金属。采用原子吸收光谱仪(AAS ZEE nit 700, Germany)测定 Pb、Zn、Cd 含量。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003、SPSS 13.0 统计软件对试验数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 添加秸秆对蓖麻幼苗生物量的影响

蓖麻可以在纯铅锌尾矿砂中生长, 但长势迟缓。添加秸秆均显著促进了蓖麻在尾矿砂中的生长(表 1)。添加水稻秸秆、龙须草秸秆、芒草秸秆使蓖麻鲜重分别比对照增加了 43.08%、35.38%、28.52%; 使蓖麻根长分别比对照增加了 14.15%、11.27%、8.45%; 使蓖麻株高分别比对照增加了 49.15%、42.37%、31.36%。

表 1 各处理蓖麻的农艺性状指标

Table 1 Agronomic traits of *Ricinus communis* under different straw treatments

处理	单株鲜质量/g	根长/cm	株高/cm
水稻秸秆	(11.89±0.09)a	(16.21±0.20)a	(17.61±0.13)a
龙须草秸秆	(11.25±0.12)b	(15.80±0.15)b	(16.79±0.23)b
芒草秸秆	(10.68±0.08)c	(15.43±0.16)c	(15.52±0.12)c
对照	(8.31±0.05)d	(14.20±0.11)d	(11.83±0.07)d

2.2 添加秸秆对蓖麻生理指标的影响

在铅锌尾矿砂中添加秸秆均显著降低了蓖麻叶片中 MDA 含量(表 2), 蓖麻叶片 MDA 含量各处理从小到大依次为水稻秸秆、龙须草秸秆、芒草秸

秆、对照，这可能是秸秆的添加减缓了重金属胁迫下的膜脂过氧化效应。

表 2 各处理蓖麻的部分生理指标

Table 2 Physiological parameters of *Ricinus communis* under different straw treatments

处理	MDA 含量/($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	SOD 活性/($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$)	CAT 活性/($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$)	POD 活性/($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$)
水稻秸秆	(9.31±0.42)c	(1.91±0.05)b	(8.24±0.32)b	(11.05±0.16)b
龙须草秸秆	(9.49±0.31)c	(1.92±0.03)b	(8.57±0.13)b	(11.25±0.13)b
芒草秸秆	(10.54±0.32)b	(1.97±0.06)ab	(8.86±0.29)b	(11.36±0.12)ab
对照	(17.93±0.53)a	(2.06±0.08)a	(11.54±0.51)a	(11.60±0.24)a

在铅锌尾矿砂中添加水稻秸秆、龙须草秸秆、芒草秸秆，蓖麻叶片 SOD 活性分别比对照下降了 7.28%、6.80%、4.37%，CAT 活性分别比对照下降了 28.60%、25.74%、23.22%，POD 活性分别比对照下降了 4.74%、3.02%、2.07%。添加秸秆处理 SOD、CAT、POD 活性间的差异均不显著，但均显著低于对照，表明在铅锌尾矿砂中添加秸秆均显著降低了重金属对蓖麻的伤害，显著减少了蓖麻叶片中过氧化物的含量。

2.3 添加秸秆对蓖麻根、茎、叶中重金属含量的影响

添加水稻秸秆、龙须草秸秆、芒草秸秆均显著

降低了蓖麻根、茎、叶中 Pb 的含量(表 3)，其降幅分别为 4.21%~10.27%、11.50%~22.73%和 14.34%~26.70%。蓖麻根、茎、叶中 Pb 含量依次减小。转运系数为植物地上部某种元素含量与植物根部该元素含量的比值，用来评价植物将重金属从地下根部向地上部分运输和富集的能力^[12]。蓖麻对 Pb 的转运系数各处理由大到小依次为对照(0.20)、龙须草秸秆(0.19)、水稻秸秆(0.17)、芒草秸秆(0.16)，表明添加秸秆降低了蓖麻中 Pb 的转运系数，使吸收的 Pb 大部分储存在根部。

表 3 不同处理蓖麻根、茎、叶中重金属 Pb、Zn、Cd 的含量

Table 3 Contents of Pb, Zn, Cd in *Ricinus communis* under different straw treatments

处理	Pb 含量			Zn 含量			Cd 含量		
	根	茎	叶	根	茎	叶	根	茎	叶
水稻秸秆	(268.62±6.62)c	(25.63±0.69)b	(20.45±0.82)c	(230.52±5.24)b	(137.08±3.66)b	(85.50±4.03)c	(1.26±0.09)c	(0.30±0.01)c	(0.24±0.03)c
龙须草秸秆	(273.65±8.05)bc	(27.10±0.42)b	(23.90±1.01)b	(239.05±3.47)b	(140.02±3.45)b	(93.78±3.16)b	(1.45±0.12)c	(0.36±0.03)b	(0.56±0.01)b
芒草秸秆	(286.79±3.22)bc	(23.66±1.23)c	(20.83±0.85)c	(235.12±4.88)b	(122.80±2.24)c	(84.19±3.17)c	(1.74±0.11)b	(0.32±0.01)bc	(0.26±0.05)c
对照	(299.38±11.83)a	(30.62±0.89)a	(27.90±1.54)a	(254.21±5.15)a	(155.15±4.29)a	(101.92±3.02)a	(2.29±0.17)a	(0.43±0.05)a	(0.676±0.04)a

添加水稻秸秆、龙须草秸秆、芒草秸秆均显著降低蓖麻根、茎、叶中 Zn 的含量(表 3)，根、茎、叶中 Zn 含量的降幅分别为 5.96%~9.32%、9.75%~20.85%和 7.99%~17.40%。蓖麻对 Zn 的转运系数各处理由大到小依次为对照(1.01)、龙须草秸秆(0.98)、水稻秸秆(0.97)、芒草秸秆(0.88)，表明添加秸秆减少了蓖麻中 Zn 从根部向地上部的转运，使 Zn 主要分布在蓖麻根部。

添加水稻秸秆、龙须草秸秆、芒草秸秆显著降低了蓖麻根、茎、叶中 Cd 的含量(表 3)，根、茎、叶中 Cd 含量的降幅分别为 24.02%~44.98%、16.28%~30.23%和 16.42%~64.18%。蓖麻对 Cd 的

转运系数各处理由大到小依次为龙须草秸秆(0.63)、对照(0.48)、水稻秸秆(0.43)、芒草秸秆(0.33)，对照和龙须草秸秆处理蓖麻中 Cd 含量从大到小依次为根、叶、茎；水稻秸秆和芒草秸秆处理蓖麻中 Cd 含量从大到小依次为根、茎、叶。可见，添加水稻秸秆和龙须草秸秆降低了蓖麻体内 Cd 从根部向地上部的转运，而添加龙须草秸秆促进了 Cd 从根部向地上部的转运。

2.4 添加秸秆对尾矿砂中有效态 Pb、Zn、Cd 含量的影响

添加水稻秸秆、龙须草秸秆、芒草秸秆显著降

低了铅锌尾矿砂中有效态 Pb、Zn、Cd 的含量(表 4), 其降幅分别为 17.1% ~ 70.5%、24.0% ~ 67.6% 和 8.6% ~ 88.8%, 其中, 水稻秸秆处理铅锌尾矿砂中有效态 Pb、Zn、Cd 含量的降幅最大。

表 4 各处理铅锌尾矿砂中有效态 Pb、Zn、Cd 的含量

处理	有效态 Pb 含量	有效态 Zn 含量	有效态 Cd 含量
水稻秸秆	(61.08±1.56)d	(14.64±0.35)d	(0.26±0.03)c
龙须草秸秆	(72.04±2.13)c	(17.41±0.84)c	(0.38±0.02)c
芒草秸秆	(81.10±2.33)b	(16.75±0.92)b	(0.42±0.05)b
对照	(91.88±3.15)a	(44.35±1.41)a	(1.59±0.09)a

2.5 蓖麻叶片重金属含量与部分生理指标的相关性

由表 5 可见, 蓖麻叶片中 Pb、Zn、Cd 含量与 MDA 含量和 POD、SOD、CAT 活性均呈显著或极显著正相关, 表明蓖麻叶片中 Pb、Zn、Cd 含量高低直接影响 MDA 含量和 POD、SOD、CAT 活性的大小, 其中 POD、SOD 活性对重金属胁迫更敏感(表 5)。

表 6 蓖麻根、茎、叶中 Pb、Zn、Cd 含量与尾矿砂有效态 Pb、Zn、Cd 含量的相关系数

Table 6 Correlation coefficients between Pb, Zn, Cd contents in plant organs of *Ricinus communis* and contents of Pb, Zn, Cd extracted by DTPA from Pb/Zn mine tailing

有效态重金属含量	Pb 含量			Zn 含量			Cd 含量		
	根部	茎部	叶部	根部	茎部	叶部	根部	茎部	叶部
Pb 含量	0.99**	0.82**	0.75**	—	—	—	—	—	—
Zn 含量	—	—	—	0.83**	0.67*	0.70**	—	—	—
Cd 含量	—	—	—	—	—	—	0.89**	0.81**	0.83**

3 结论与讨论

在本研究中, 铅锌尾矿砂中添加水稻秸秆、龙须草秸秆、芒草秸秆均显著降低了尾矿砂中有效态 Pb、Zn、Cd 含量, 显著减少了 Pb、Zn、Cd 在蓖麻体内的积累, 同时降低了蓖麻叶片 MDA 含量和 SOD、POD、CAT 活性, 使蓖麻生物量增加。这可能是因为添加的秸秆在尾矿砂中干湿培养 6 周后腐化分解, 其分解物与重金属的螯合程度增加^[5], 弱化了尾矿砂中重金属的有效性, 降低了重金属对蓖麻的胁迫效应, 使蓖麻体内氧化胁迫和膜脂过氧化作用减弱^[13], 从而促进了蓖麻在铅锌尾矿砂中的生长, 其中以水稻秸秆对铅锌尾矿砂重金属有效性的弱化

表 5 蓖麻叶片中 Pb、Zn、Cd 含量与 MDA 含量及 POD、SOD、CAT 活性的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between Pb, Zn, Cd contents and physiological parameters in the leaves of *Ricinus communis*

重金属含量	MDA 含量	POD 活性	SOD 活性	CAT 活性
Pb 含量	0.70**	0.71**	0.70**	0.74**
Zn 含量	0.65*	0.78**	0.73**	0.65*
Cd 含量	0.74**	0.84**	0.74**	0.76**

2.6 蓖麻中重金属含量与尾矿砂中有效态重金属含量的相关性

由表 6 可见, 蓖麻根、茎、叶中 Pb、Zn、Cd 含量与尾矿砂有效态 Pb、Zn、Cd 含量均呈显著或极显著正相关, 且根部重金属含量与有效态重金属含量的相关性最强。蓖麻根、茎、叶中 Pb、Zn、Cd 含量与尾矿砂 Pb、Zn、Cd 含量间的相关性不强(数据未列出), 所以, 蓖麻中重金属含量高低主要受尾矿砂中有效态重金属含量的影响。

效果最好。

湘西花垣铅锌尾矿砂重金属含量高, 氮、磷、钾及有机质含量低, 不利于植物修复技术的实施^[14-15]。本研究结果表明, 蓖麻能在纯铅锌尾矿砂中生长, 能耐受铅锌尾矿砂胁迫^[6-9], 可作为对铅锌尾矿砂进行修复的植物材料。

参考文献:

- [1] Wong M H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils[J]. Chemosphere, 2003, 50: 775-780.
- [2] Shu W S, Ye Z H, Zhang Z Q, et al. Natural colonization of plants on five Lead/Zinc mine tailings in Southern China[J]. Restoration Ecology, 2005, 13(1): 49-60.

- [3] Ibrahim M, Bocar A, Ming L, et al. Fractionation of copper and cadmium and their binding with soil organic matter in a contaminated soil amended with organic materials[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10: 973–982.
- [4] Sauve S, Manna S, Turmel M C, et al. Solid solution partitioning of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn in the organic horizons of a forest soil[J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37: 5191–5196.
- [5] Alvarenga P, Goncalves A P, Fernandes R M, et al. Organic residues as immobilizing agents in aided phytostabilization: Effects on soil chemical characteristics [J]. *Chemosphere*, 2009, 74(10): 1292–1300.
- [6] 陆晓怡, 何池全. 蓖麻对重金属 Cd 的耐性与吸收积累研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(4): 674–677.
- [7] 陆晓怡, 何池全. 蓖麻对重金属锌的耐性与吸收积累研究[J]. *环境污染与防治*, 2005, 27(6): 414–416.
- [8] Niu Z, Sun L, Sun T, et al. Evaluation of phytoextracting cadmium and lead by sunflower, ricinus, alfalfa and mustard in hydroponic culture[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19: 961–967.
- [9] 郑进, 康薇. 湖北铜绿山古铜矿野生蓖麻重金属含量研究[J]. *黄石理工学院学报*, 2009, 25(1): 36–40.
- [10] 张志良, 翟伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [11] 敖子强, 翟丽雅, 林文杰, 等. 土法炼锌区土壤-白菜系统中重金属的化学调控研究[J]. *地球与环境*, 2007, 35(2): 111–116.
- [12] 张乃明. 污水灌区土壤-植物系统重金属迁移累积与环境容量研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2000.
- [13] Mishra S, Srivastava S, Tripathi R D, et al. Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Bacopa monnieri* L.[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2006, 44: 25–37.
- [14] 秦普丰, 铁柏清, 周细红, 等. 铅与镉对棉花和水稻萌发及生长的影响[J]. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2000, 26(3): 205–207.
- [15] 刘素纯, 萧浪涛, 王惠群, 等. 植物对重金属的吸收机制与植物修复技术[J]. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2004, 30(5): 493–497.

责任编辑: 王赛群