

蓖麻(*Ricinus communist* L.)对锰矿区土壤中 重金属累积特性的研究

易心钰, 刘 强, 罗明亮, 陈韵竹, 蒋丽娟*

(中南林业科技大学生命科学院, 湖南 长沙 410004)

摘 要:为探讨蓖麻(*Ricinus communist* L.)对锰矿区土壤生态修复及资源化利用潜力,将不同品种蓖麻湘蓖1号和淄蓖7号播种在锰尾矿库土壤上,进入生殖生长阶段时采收全株,测定栽植土壤及植株根、茎、叶中5种重金属元素含量。结果显示:土壤中Mn平均含量最高达7 884.96 mg·kg⁻¹,超过国家规定的土壤环境质量Ⅱ级标准6.5倍;湘蓖1号不同器官的Mn浓度从高至低为根>叶>茎,淄蓖7号不同器官Mn含量叶>茎>根,其叶中Mn平均浓度最高为765.43 mg·kg⁻¹,较湘蓖1号叶中的平均含量高出79.53%,Pb、Cu、Cr含量及叶/根比值均大于湘蓖1号;植株体内重金属含量与土壤中重金属浓度的相关分析表明,重金属的积累量和转移量,受到土壤中几种重金属元素的共同影响。结果说明:2个品种的蓖麻均可以作为锰矿区资源化修复利用,对重金属的吸收和转运在品种间存在差异,淄蓖7号地上部分对重金属的迁移能力强于湘蓖1号。

关键词:蓖麻;锰矿;耐受性;重金属积累

中图分类号:X173 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2014)01-0062-07 doi: 10.13254/j.jare.2013.0205

Accumulation of Heavy Metals in *Ricinus communis* L. from Mn Contaminated Area

YI Xin-yu, LIU Qiang, LUO Ming-liang, CHEN Yun-zhu, JIANG Li-juan*

(Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: Xiangbi No. 1 and Zibi No. 7 were planted in the Mn contaminated soils to explore its potential of ecological remediation and energy utilization in the areas of Mn contaminated site. The major nutrient elements and the concentrations of heavy metals (Mn, Pb, Zn, Cu and Cr) in different parts (root, branch and leaf) and topsoil samples were detected after entering into the period of reproductive growth. The results showed that the average content of Mn was as high as 7 884.96 mg·kg⁻¹, which exceeded 6.5 times of national soil environmental quality standard (level 2). The mean level of Mn in tissues of Xiangbi No. 1 was found to be in the sequence of root>leaf>branch, whereas, the mean level of Mn in different parts of Zibi No. 7 was found to be in the order of leaf>fruit>branch>root respectively. The average concentration of Mn in the leaf reached the peak value (765.43 mg·kg⁻¹), which was higher than Xiangbi No.1 about 79.53%. The leaf/root ratios of Pb, Cu, Cr contents in Zibi No. 7 were higher than those of Xiangbi No. 1 samples. The accumulation and translocation in plants was affected by different heavy metal elements in soils. The results demonstrated that Zibi No. 7 had a better uptake and translocation capacity of Mn, Pb, Cu and Cr, meanwhile, plants of two species had differences in accumulation and translocation ability and were proved to possess good Mn-tolerance ability for remediation of heavy metal contaminated soils.

Keywords: *Ricinus communist* L.; manganese mine; tolerance; heavy metal accumulation

收稿日期:2013-11-14

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划“废弃矿区植物生态修复与安全屏障建设关键技术试验与示范”(2012BAC09B03)

作者简介:易心钰(1989—),女,湖南株洲人,主要从事资源植物的开发与利用研究。E-mail:yixinyu1108@163.com

*通信作者:蒋丽娟 E-mail:znljing2542@163.com

矿藏开采给人类带来财富的同时,也引发了一系列的生态环境问题,如土壤基质污染、生物多样性丧失、生态系统遭到破坏等。废弃矿区及重金属污染土壤的治理一直以来都是我国研究的热点和难点,低成本、可大范围推广、环境友好的植物修复技术成为倍受关注的研发领域^[1],相关报道日益增多,但大多数研究集中在对超富集景观植物的筛选,对植物在重金属污染土壤中的适应和耐受机理、经济植物对矿区修复的潜力及其利用评价报道较少^[2]。能源植物是一类重要的生物质原料,其资源培育与规模化种植是生物质能源产业发展的基础之一^[3]。蓖麻是世界十大油料作物之一,适应性广,广泛分布于热带、亚热带和温带,比产量高的向日葵、大豆经济价值更高^[4]。蓖麻根系发达,入土深,能起到固土的作用,对多种金属复合污染和贫瘠的土壤具有较高的耐性。有研究表明,蓖麻每年对土壤汞的净化率达41%,土壤的自净年限缩短8.5倍^[5]。郑进等^[6]实验结果证明蓖麻在积累较高浓度Cd的同时对Pb、Zn也具有一定的吸收能力。康薇等^[7]首次证明了蓖麻为Cu的超累积植物,因此蓖麻可作为尾矿污染植物修复较理想的材料。有关蓖麻对矿区尾矿中重金属的累积研究已有很多报道,但对锰矿区土壤中Mn的累积情况还鲜见报道。本文对种植在锰矿区及正常生境中不同品种蓖麻的重金属积累特性展开了研究,以期蓖麻应用于尾矿土壤修复的生产利用、矿区污染土壤的生态资源化利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

湘潭锰矿位于湖南省湘潭市北郊,东经112°45′~112°55′,北纬27°53′~28°03′,北接长沙,东与株洲相邻。矿区所在地属丘陵地貌,海拔62~165 m,典型亚热带季风气候,气候温润,四季分明。日气温-8~42.2℃,年均气温14.7℃,年均降水量1431.4 mm,年均蒸发量1321.7 mm。

1.2 材料

不同品种的蓖麻种子:2012年春季(4月初),将湘蓖1号、淄蓖7号的蓖麻种子于重金属含量不均匀的锰矿尾库分3个试验区种下,采用随机区组设计,每个品种栽种15粒,每个试验区栽种5粒,平均1~2行,5个为一重复,共计3个重复。2012年11月采收全株,分析根际土壤及植物组织中重金属含量。

尾矿库土壤:采集蓖麻相应生长土壤表层土样及邻近裸露土壤,采样深度为0~20 cm;同时测量其土

壤理化性质及几种主要的重金属含量。对照土壤来自湖南省林业科学研究院试验林场0~20 cm表层土。

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理

土壤样品室内风干;植物样品按根、茎、叶分开,去除附着在植物表面的土壤颗粒及其他杂物,去离子水洗净,晾干,分别称量其鲜重后将蓖麻样品转入105℃烘箱中杀青30 min,70℃烘至恒重,测定不同部位干重;然后,土壤及植物样品经玛瑙研钵粉碎后过80 mm筛,样品采用HNO₃-HClO₄法消解。

1.3.2 测定分析方法

基本理化性质采用常规分析方法测定^[8]:土壤pH值测定采用电位法;土壤全氮测定采用半微量凯氏法;土壤全磷测定采用氢氧化钠碱溶-钼锑抗比色法;土壤全钾测定采用NaOH熔融-火焰光度计法测定。

植物样品消解:采用微波消解仪,准确称取0.3 g样品于微波消解仪MDS消解罐中,加入试剂(植物:V_{HNO₃}:V_{H₂O₂}:V_{HF}=6:2:0.5,土壤:V_{HNO₃}:V_{HF}:V_{HCl}=6:2:1)按消解程序消解完全,结束后开盖赶酸,用超纯水将消解液转入50 mL容量瓶中定容,过滤除杂。

重金属含量测定:待测溶液采用火焰连续法(AA-7000原子吸收光谱仪)测定。

数据方差分析、绘图工作采用SPSS 16.0和Excel软件完成。

2 结果与分析

2.1 湘潭锰尾矿区土壤pH值及重金属含量

土壤pH值、养分及重金属含量如表1所示。由表1可见该区尾矿土壤的pH值呈弱碱性,全氮、全磷、全钾可满足蓖麻生长所需的基本条件。Mn在3个试验区土壤中的含量均超过湖南省土壤背景值和全国土壤平均水平,Mn平均质量浓度为6703.11 mg·kg⁻¹,分别是湖南省和全国背景值的14倍和11倍(湖南省背景值459 mg·kg⁻¹,全国平均值583 mg·kg⁻¹)。土壤中的其他几种重金属元素除Cd平均含量(7.88 mg·kg⁻¹)超过国家规定的土壤环境质量Ⅱ级标准外,Pb、Zn、Cu、Cr含量均低于国家土壤环境质量(GB 15618—1995)二级标准^[9]。

2.2 不同品种蓖麻对重金属的积累与转运特性

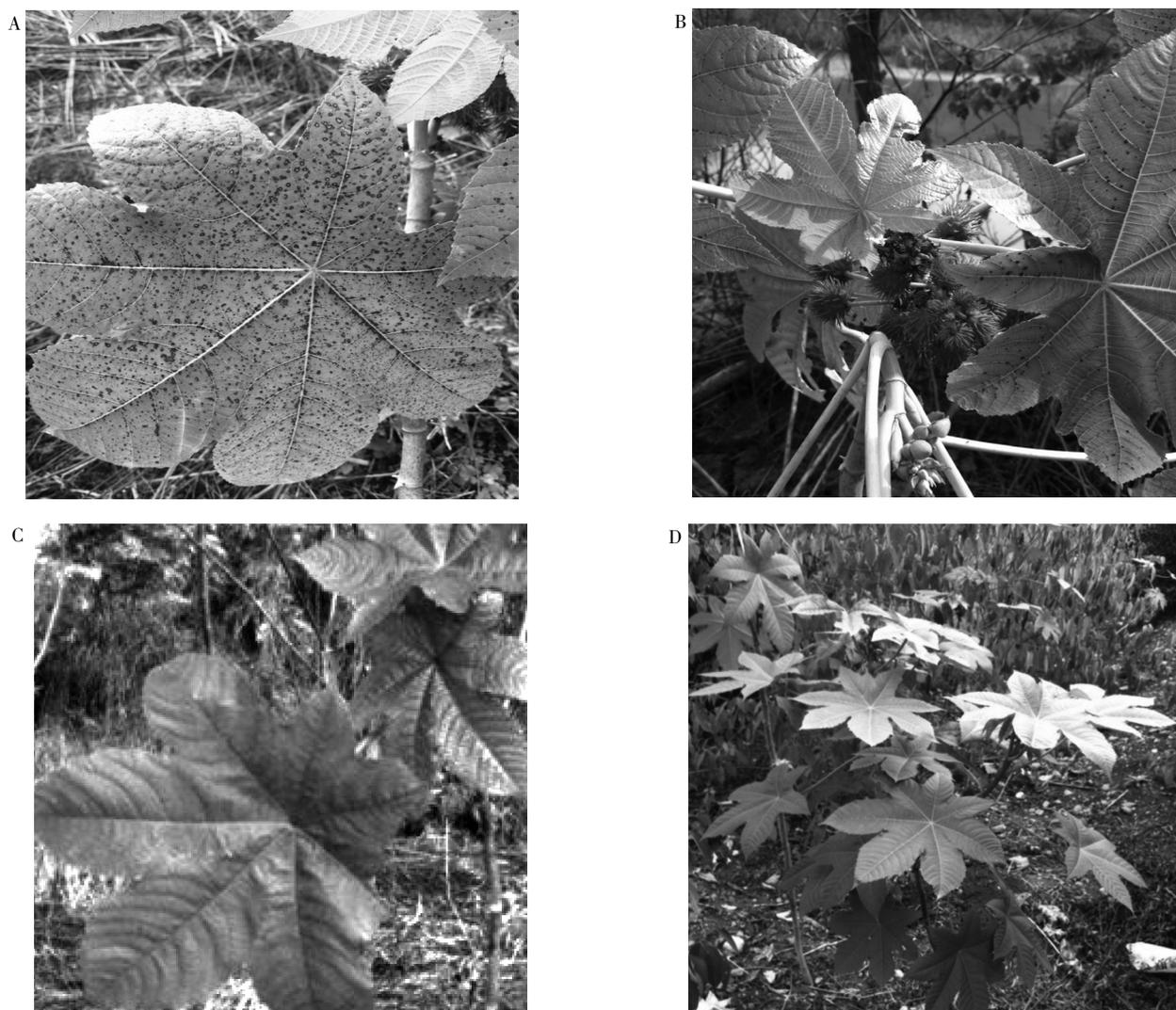
2.2.1 不同品种蓖麻对重金属的积累特性

2个蓖麻品种的种子在锰污染土壤上均能萌发、生长,淄蓖7号少数植株叶片出现重金属毒害特征(见图1),且湘蓖1号植株不能正常开花结实。从表2

表 1 不同试验区土壤层(0~20 cm)元素含量

Table 1 pH, nutrient elements and content of heavy metals in top soils (0~20 cm) of Mn mine area

项目	Mn/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Cr/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹	pH 值	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	全钾/g·kg ⁻¹
试验区 1 土壤	7 884.96	44.59	159.08	53.20	54.46	6.54	7.49	0.67	0.62	7.62
试验区 2 土壤	4 844.08	36.01	79.27	36.87	35.98	11.42	7.53	0.78	0.61	7.60
试验区 3 土壤	7 380.30	174.20	135.75	47.58	54.72	5.69	7.21	0.91	0.79	8.64
试验区平均值	6 703.11	84.93	124.70	45.88	48.39	7.88	7.41	0.79	0.67	7.95
对照(四纪红壤)	552.60	24.70	134.55	56.95	31.95	3.57	5.05	0.58	0.30	12.87
水溶态	0.82	2.83	0.56	1.62	4.78	2.41	—	—	—	—
酸溶态	924.39	6.82	1.19	5.91	5.62	3.57	—	—	—	—
络合态	991.82	68.45	71.69	10.12	11.30	7.18	—	—	—	—
国家Ⅱ级标准	≤1 200	≤300	≤250	≤100	≤300	≤0.6	—	—	—	—
中国土壤平均值	583	26.0	74.2	22.6	53.9	0.097	—	—	—	—
湖南省土壤背景值	459	29.7	90	25	—	0.081	—	—	—	—



A: 淄蓖 7 号叶片受重金属毒害; B: 淄蓖 7 号部分植株开花结实; C: 湘蓖 1 号正常叶片; D: 湘蓖 1 号均无生殖生长

图 1 尾矿区不同品种幼苗植株的生长情况

Figure 1 Seedling growth of *Ricinus communist* L. plants growing in the mine area

表2 不同品种蓖麻单株生物量(干重)(g)

Table 2 The dry biomass of plants growing in the mine area(g)

品种	根	茎	叶
湘蓖1号	0.52±0.16a	3.24±1.27b	1.20±0.4a
淄蓖7号	1.38±1.10a	5.43±1.40a	2.17±1.04a

注:同一列不同字母表示植株不同组织内重金属含量差异显著($P<0.05$)。

可以看出,淄蓖7号在根干重、茎干重、叶干重方面均大于湘蓖1号,茎干重存在显著性差异,表明2个蓖麻品种对该重金属污染土壤具有一定的适应性和耐受性,但重金属对植株的生长发育和新陈代谢产生了影响^[10]。

植株体内重金属含量见表3。由表3可见5种重金属在2个品种植株中的质量浓度差异较显著,湘蓖1号全株Mn、Pb、Cu、Cr质量浓度(分别为635.9、55.85、40.34、20.11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)均低于淄蓖7号全株Mn、Pb、Cu、Cr质量浓度(分别为1 123.23、66.73、48.5、31.29 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。2个品种植株中检测到的5种重金属质量浓度均没达到超富集植物的临界值,但均高于一般植物体内Cu、Zn、Pb、Cr的正常含量(分别为:10、

100.5、0.2~8.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [11-12]),湘蓖1号中的含量是标准值的4、2、12、2.4倍,淄蓖7号超标4.9、1.4、13、19.5倍,表明蓖麻虽不是超富集植物,但对土壤中的重金属元素有一定的吸收能力,其中以对Pb吸收力最强。重金属去除量方面,湘蓖1号对Mn的去除量为2.8 mg,淄蓖7号去除量增长近5倍,对Mn的去除量达到10.09 mg,此外,植株对其他重金属元素均具有良好的去除能力。试验区土壤层中的Cd含量超过国家土壤环境质量标准值,但本试验中的2个蓖麻品种植株各器官中Cd的含量均低于仪器检测浓度,可能是在本试验区呈中性至弱碱性的土壤条件下,2个蓖麻品种对Cd有规避效果,其原因有待进一步研究。

2.2.2 不同品种蓖麻对5种重金属元素的转运特点

2个蓖麻品种植株根、茎和叶重金属含量及根/土、叶/根比值(表3、表4)表明,植株不同部分的累积量在品种间存在差异。Mn在湘蓖1号不同器官的累积量由高至低依次为根>叶>茎,叶/根仅为0.48;淄蓖7号则为叶>茎>根,且叶/根达到4.83,说明淄蓖7号品种对Mn元素有极强的向上运输能力,能转移到地

表3 蓖麻植株内重金属含量

Table 3 The content of heavy metals in *Ricinus communist* L.plants

品种	重金属	全株平均质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	根中浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	茎中浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	叶中浓度/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	去除量/ $\text{mg}\cdot\text{株}^{-1}$
湘蓖1号	Mn	635.9	328.82±85.02a	150.37±29.08b	156.71±17.63ab	2.8±0.76
	Pb	55.85	23.17±11.81a	20.33±5.97a	12.35±3.4a	0.25±0.13
	Zn	198.46	70.74±10.86a	56.64±19.17a	71.08±26.22a	0.87±40.47
	Cu	40.34	17.28±14.64a	9.79±5.56a	13.27±5.37a	1.78±1.21
	Cr	20.11	9.43±7.92a	6.19±1.59a	4.49±6.00a	0.89±0.4
淄蓖7号	Mn	1 123.23	158.52±32.77b	199.28±36.01b	765.43±18.81a	10.09±0.36
	Pb	66.73	32.92±12.32a	18.48±10.21ab	15.33±10.22b	0.59±0.43
	Zn	143.22	55.30±14.70a	38.95±14.41a	48.97±18.37a	1.29±0.9
	Cu	48.5	18.56±5.39a	15.17±2.53a	14.77±6.78a	0.44±0.31
	Cr	31.29	10.97±3.04a	6.88±3.77b	13.44±4.93a	0.28±0.01

注:同一行不同字母表示植株不同组织内重金属含量差异显著($P<0.05$);去除量=整株干重(g)×全株平均质量浓度($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)× 10^{-3} 。

表4 蓖麻植株的富集系数和转运系数

Table 4 The bioaccumulation and translocation factors of plants growing in the mine area

品种	项目	Mn	Pb	Zn	Cu	Cr
湘蓖1号	根/土	0.04±0.01b	0.52±0.06a	0.44±0.02a	0.32±0.01a	0.17±0.03a
	叶/根	0.48±0.02a	0.53±0.07a	1±0.3a	0.77±0.25a	0.48±0.04a
淄蓖7号	根/土	0.03±0b	0.91±0.25a	0.70±0.6a	0.5±0.06a	0.3±0.01b
	叶/根	4.83±0.65a	0.47±0.04a	0.89±0.15a	0.8±0.24a	1.23±0.4a

注:同一列不同字母表示植株根/土和叶/根比值差异显著($P<0.05$)。

上部分解毒^[13],而 Mn 元素进入湘蓖 1 号植株后,迁移能力受到限制^[14]。湘蓖 1 号、淄蓖 7 号叶/根比分别为 0.48、4.83,根/土比分别为 0.04、0.03,对重金属 Mn 富集力较低。

Pb 在 2 个品种的根、茎叶的含量变化均是根>茎>叶。根/土比分别是 0.52 和 0.91,叶/根比分别为 0.53 和 0.47,表明植物吸收的 Pb 大部分保留在根部,试验的 2 个蓖麻品种对 Pb 的转运能力较低。

Zn 在 2 品种蓖麻植株的根和叶中含量基本相近,茎的含量相对较低,根/土比分别是 0.44 和 0.7,叶/根比分别是 1.00 和 0.89,表明 Zn 在蓖麻植株中的转运能力较强。

植株中 Cr 含量表现出和 Mn 相似的转运特性,淄蓖 7 号叶/根比高达 1.23,表明 Cr 在淄蓖 7 号的转运能力较强。

以上结果分析表明:湘蓖 1 号植株不同器官重金属含量均表现为地下部分>地上部分,与大多数植物对重金属的积累特性相似,淄蓖 7 号植株体内的 Mn、Cr 的积累量则表现为地上部分>地下部分,即对 Mn、Cr 有较强的转运能力。

2.3 土壤重金属浓度与蓖麻植株累积量的相关性

分析根/土、叶/根的重金属含量比值与土壤中重金属含量的相关性,结果(表 5)表明:品种之间存在差异。湘蓖 1 号植株中 Pb、Cu 含量的叶/根比值与土壤 Pb 的含量成显著负相关(r 分别为-0.948、-0.921),即土壤中高 Pb 含量对 Pb 和 Cu 在植株中转运有抑制作用;植株中 Zn 含量根/土比值、Mn 叶/根与土壤 Zn 含量成显著和极显著负相关,蓖麻植株对 Zn 吸收的相对量随土壤中 Zn 浓度的升高而下降。植株叶/根的

Cr 含量与土壤中的 Mn 含量呈显著正相关。

淄蓖 7 号植株中 Mn、Cu 含量的根/土比值与土壤中 Mn、Cu 浓度呈极显著和显著负相关(r 分别为-0.979、-0.951),而且植株中 Cu 含量的根/土与土壤中 Mn 的含量也成显著负相关,说明土壤中的 Mn 浓度除影响根对 Mn 吸收外,亦影响根对 Cu 的吸收,但对重金属在植株内的转运影响不明显。此外土壤 Zn 的含量与植株 Cr 叶/根呈极显著正相关,表明植株体内重金属的积累和转移和土壤环境中重金属元素有相互作用,可开展单个重金属实验进一步验证其结果。结果分析表明植物对土壤中某种重金属的吸收、积累和转移,除受土壤中同种重金属元素质量浓度影响之外,还受到土壤中其他重金属含量的影响,其机理有待下一步研究。

3 讨论

植物的耐性是修复被重金属严重污染土壤的关键因素^[15]。本研究结果表明,土壤中主要污染元素 Mn 含量差异大,张有志等^[16]认为由于矿区的开采、搬运等人为活动引起了 Mn 元素的空间异质性,这可为尾矿区的逐级生态恢复提供条件。

湘潭锰矿尾矿库土壤对植物生长产生毒害的重金属元素主要是 Mn,它虽是植物生长的必需元素,但高含量的 Mn 污染土壤对植物的生长发育会产生抑制和毒害作用。种植在锰污染土壤不同品种的蓖麻都能吸收积累去除一定量的锰及其他重金属,植株的积累能力及去除量在种内存在差异,为淄蓖 7 号>湘蓖 1 号。此外,主要污染元素 Mn 在体内不同器官中的分布亦存在显著差异,湘蓖 1 号大部分重金属积累在植

表 5 土壤重金属浓度与蓖麻植株体内含量的相关性分析

Table 5 The correlation analysis between content of heavy metal in rhizospheric soils and plant

品种	项目	根/土					叶/根				
		Mn	Pb	Zn	Cu	Cr	Mn	Pb	Zn	Cu	Cr
湘蓖 1 号	SMn	0.282	-0.77	-0.307	-0.208	0.261	-0.616	-0.663	0.413	-0.609	0.956*
	SPb	0.161	-0.344	0.431	0.342	0.389	0.108	-0.948*	-0.573	-0.921*	0.439
	SZn	0.869	0.02	-0.879*	0.282	0.604	-0.966**	-0.292	0.633	-0.417	0.414
	SCu	0.913*	0.279	-0.321	-0.037	0.403	-0.501	-0.563	0.106	-0.686	0.127
	SCr	-0.572	-0.302	-0.12	0.457	-0.557	-0.333	-0.802	-0.479	0.091	0.24
淄蓖 7 号	SMn	-0.979**	-0.638	-0.748	-0.893*	0.2	0.539	0.257	0.622	0.439	0.562
	SPb	0.087	0.241	0.612	-0.345	-0.57	0.368	0.549	-0.005	-0.645	-0.683
	SZn	-0.649	-0.564	-0.787	-0.434	0.758	0.353	0.048	0.289	0.664	0.966**
	SCu	-0.742	-0.11	-0.182	-0.951*	0.114	0.83	0.475	0.174	-0.236	0.071
	SCr	-0.221	-0.586	-0.234	-0.142	-0.822	-0.349	0.068	0.838	0.393	-0.183

注:* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上相关性显著;S 代表土壤重金属含量。

物根部,对地上部分各器官的毒害作用相对较轻^[17]。与湘蓖1号相比,淄蓖7号具有较强的吸收、转移重金属的能力,叶片上已出现毒害特征,它对重金属耐性的对策可能是通过落叶将其排出体外^[18-19]。陈红琳等^[20]研究表明,Pb在土壤里大多以磷酸盐和碳酸盐的形式存在,可溶性、移动性差,一般植物吸收的大多数Pb都被限制在地下部分,只有少量积累在地上部分,但该种植区土壤中的Pb元素在蓖麻植株体内表现出了一定的迁移能力。Cu、Zn为植物生长所必需的营养元素,在蓖麻叶中的含量较高,尤其Zn在植株体内含量较高。Rose^[21]的研究认为,由于Cu、Zn移动较容易且生物活性较高,因此具有较强的转移能力。

蓖麻种仁含油量最高可达70%,有可再生“石油资源”之称。蓖麻的栽培、育种、加工利用方面,国内外技术应用的已较为成熟,但用于边际土壤修复方面却鲜有报道,它的积累能力虽无法与超积累植物相比,但耐受力强,生长迅速,且具有经济价值。该植株自然条件下生长期仅1年,因而它积累重金属的潜力较大,在尾矿库治理中具有应用潜力。已有的研究报道大多局限于实验试验研究,而鲜有应用研究报道,更缺乏不同品种之间吸收转运差异的报道。

本试验中2个蓖麻品种均能进行营养生长,淄蓖7号能进行生殖生长,说明该品种蓖麻对重金属毒害有一定的规避能力,可以在尾矿生态恢复中加以利用。淄蓖7号有较强的向上运输能力,果实中亦有一定的重金属累积,可根据油和饼粕中重金属含量高低分类集中处理,如果油中含重金属,可通过加氢处理脱金属后作为工业用油,饼粕则可作成型燃料。而湘蓖1号重金属向上转运较弱,推测果实含重金属量较低,更适宜于利用重金属污染土地规模种植,可节约加工成本,兼顾植被恢复和能源效应^[22]。

4 结论

该区域能为植物生长提供必需的养分,但土壤较贫瘠,Mn为主要的重金属污染元素,试验一区土壤中Mn平均质量浓度最高为7 884.96 mg·kg⁻¹,是湖南省和全国背景值的17倍和13倍,Pb、Zn、Cu、Cr属正常含量范围。2个品种的蓖麻对主要污染元素Mn表现出截然不同的吸收、转运特征。湘蓖1号为根>叶>茎,淄蓖7号为叶>茎>根。不同品种蓖麻各部分的干物质量存在差异,同一品种蓖麻对各重金属元素的吸收和转运量不同,不同品种对同一重金属元素的吸收、转运量及去除量不同,不同部位对同一种重金属

元素的富集也不同。

蓖麻重金属耐受力强,具备修复Mn污染土壤的潜力,但由于重金属吸收和转运受各种因素的影响,故可进一步进行水培和土培试验,验证其实际的积累和转移能力。

参考文献:

- [1] 韦朝阳,陈同斌.重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J].生态学报,2001,21(7):1196-1203.
WEI Chao-yang, CHEN Tong-bing. Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: A review of studies in China and abroad[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1196-1203. (in Chinese)
- [2] Linger P, Mussig J, Fiseher H, et al. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) growing on heavy metal contaminated soil: Fiber quality and phytoremediation potential[J]. *Industrial Crops and Products*, 2002, 16: 33-42.
- [3] 侯新村,范希峰,武菊英,等.草本能源植物修复重金属污染土壤的潜力[J].中国草地学报,2012,34(1):59-64.
HOU Xin-cun, FAN Xi-feng, WU Ju-ying, et al. The Herbaceous plant potential for soils contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(1): 59-64. (in Chinese)
- [4] Reddy K R, Matcha S K. Quantifying nitrogen effects on castor bean (*Ricinus communis* L.) development, growth, and photosynthesis[J]. *Ind Crop Prod*, 2010, 31(1): 185-191.
- [5] 李晓静,周晓阳.重金属污染与植物修复[J].北方园艺,2010(4): 214-217.
LI Xiao-jing, ZHOU Xiao-yang. The pollution of heavy metals and phytoremediation[J]. *Northern Horticulture*, 2010(4): 214-217. (in Chinese)
- [6] 郑进,康薇.蓖麻及其对重金属的积累特性[J].黄石理工学院学报,2008,24(6):26-28.
ZHENG Jin, KANG Wei. Advance on accumulation of heavy metal by *Ricinus Communis* L.[J]. *Journal of Huangshi Institute of Technology*, 2008, 24(6): 26-28. (in Chinese)
- [7] 康薇,郑进.超积累植物蓖麻对重金属铜的吸收[J].黄石理工学院学报,2011,27(5):10-13.
KANG Wei, ZHENG Jin. Absorption of hyperaccumulator *Ricinus Communis* L. to heavy metal copper[J]. *Journal of Huangshi Institute of Technology*, 2011, 27(5): 10-13. (in Chinese)
- [8] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
BAO Shi-dan. Soil analysis in agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)

- [9] GB 15618—1995 土壤质量标准[S]. 北京:中国标准出版社, 1995.
GB 15618—1995 Environmental quality standard for soils[S]. Beijing: China Standard Press, 1995.(in Chinese)
- [10] 束文圣, 蓝崇钰, 张志权. 凡口铅锌尾矿影响植物定居的主要因素分析[J]. 应用生态学报, 1997, 8(3): 314–318.
SHU Wen-sheng, LAN Chong-yu, ZHANG Zhi-quan. Analysis of major constraints on plant colonization at Fankou Pb/Zn mine tailing[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(3): 314–318.(in Chinese)
- [11] Zu YQ, Li Y, Christian S. Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China [J]. *Environment International*, 2004, 30: 567–576.
- [12] Gerber G B, Leonard A, Hantson Ph. Carcinogenicity, mutagenicity and teratogenicity of manganese compounds[J]. *Critical Reviews in Toxicology*, 2002, 42: 25–34.
- [13] 邓小鹏, 彭克俭, 陈亚华, 等. 4 种茄科植物对矿区污染土壤重金属的吸收和富集[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(1): 46–51.
DENG Xiao-peng, PENG Ke-jian, CHEN Ya-hua, et al. Absorption and accumulation of heavy metals by four solanaceae plants in mining contaminated soil[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2011, 33(1): 46–51.(in Chinese)
- [14] Reeves R D, Baker A J M. Metal-accumulating plants [M]/Raskin I, Ensley B D. Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment. New York: John Wiley & Sons, 2000: 193–229.
- [15] Chaney R L, Minnie M, Li Y M, et al. Phytoremediation of soil metals [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997(8): 279–284.
- [16] 张有志, 罗 佳, 张灿明, 等. 湘潭锰矿区植物资源调查及超富集植物筛选[J]. 生态学杂志, 2012, 31(1): 16–22.
ZHANG You-zhi, LUO Jia, ZHANG Can-ming, et al. Plant resources investigation and hyperaccumulator screening in Xiangtan manganese mine area of Hunan Province, central-south China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(1): 16–22.(in Chinese)
- [17] 施 翔, 陈益泰, 王树凤, 等. 废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 2021–2027.
SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, et al. Pb, Zn accumulation and nutrient uptake of 15 plant species grown in abandoned mine tailings[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(6): 2021–2027.(in Chinese)
- [18] Adriano D C. Trace elements in the terrestrial environment [M]. New York: Springer Verlag, 1986.
- [19] Baker A J M, Walker P L. Ecophysiology of metal uptake by tolerant plant[M]/Shaw A J. Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects. Boca Raton: CRC press Inc, 1989: 155–178.
- [20] 陈红琳, 张世熔, 李 婷, 等. 汉源铅锌矿区植物对 Pb 和 Zn 的积累及耐性研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 505–509.
CHEN Hong-lin, ZHANG Shi-rong, LI Ting, et al. Heavy metal accumulation and tolerance of plants at zinc-lead mine tailings in Hanyuan [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 505–509.(in Chinese)
- [21] Ross S M. Toxic metals: fate and distribution in contaminated ecosystem[M]/Ross S. Toxic metals in soil-plant system, Chichester: John Wiley & Sons, 1994: 189–244.
- [22] 余海波, 周守标, 宋 静, 等. 铜尾矿库能源植物稳定化修复过程中定居植物多样性研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(18): 341–346.
YU Hai-bo, ZHOU Shou-biao, SONG Jing, et al. Diversity of settled plants during energy crops phytostabilization on copper mine tailings reservoir[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(18): 341–346.(in Chinese)