

土壤重金属污染背景下的任豆修复试验

覃勇荣, 陈燕师, 刘旭辉, 严 军, 覃艳花

(河池学院化学与生命科学系, 广西 宜州 546300)

摘 要:为寻找适合矿业尾矿坝人工生态恢复的植物,以广西南丹长坡矿堆存 50 a 之久的尾矿坝为背景,通过盆栽模拟,运用室内土培和水培两种试验方法,研究了不同矿土比例(尾矿样与泥土比例分别为 5:0、4:1、3:2、2:3、1:4、0:5)以及不同浓度(0、2.5、5、10、25、50、100、150、200、250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 在任豆苗体内的吸收、积累和分布的动态变化规律。结果表明,任豆对 Pb、Cu、Zn 都具有一定的吸收能力,任豆幼苗可以在一定的重金属胁迫环境下存活,任豆对重金属 Pb 的耐性最大,在高浓度下依然可以存活。任豆对不同类型的重金属的吸收及转运能力存在较大差异,从任豆对 Pb、Cu、Zn 的转运能力来看,任豆并非这 3 种重金属的超累积植物。试验表明,任豆在矿业尾矿坝的人工生态恢复(植物修复)中有一定的应用价值,但能否大规模采用任豆作为尾矿坝的生态修复物种,尚需进一步研究验证。

关键词:任豆;尾矿坝;重金属污染;植物修复

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)02-0282-06

Repair Experiment of Heavy Metal Polluted Soil with *Zenia insignis*

QIN Yong-rong, CHEN Yan-shi, LIU Xu-hui, YAN Jun, QIN Yan-hua

(Department of Chemistry and Life Sciences, Hechi University, Yizhou 546300, China)

Abstract: In order to find plants of manual and ecological restoration and phytoremediation which is suitable to tailings mine dams so as to carry out the ecological restoration of vegetation effectively, this paper dealt with different proportions of mineral soil (the proportion of core sample and normal soil is 5:0, 4:1, 3:2, 2:3, 1:4 and 0:5 respectively) and the dynamic transformation disciplinarian of absorption, accumulation and distribution of different concentrations (0, 2.5, 5, 10, 25, 50, 100, 150, 200, 250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) Pb^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} in the body of *Zenia insignis* with the background of tailings mine dams which is piled-up for 50 years in Nandan, Guangxi. This experiment was carried out with the method of statuary simulation, and other two comparative method of hydroponics and soil culture indoors. The results indicated that: *Zenia insignis* had the capacity to absorb the heavy metals Pb, Cu, Zn, the amount of heavy metals accumulated in the body of *Zenia insignis* was related with the types and environment of heavy metals. *Zenia insignis* could survive in the environment of certain heavy metal stress. *Zenia insignis* had the best endurance to heavy metal Pb which could still survive in high concentration. There was significance difference in the ability to absorb and transfer different types of heavy metals. From the aspect of the transfer ability of the three heavy metals, *Zenia insignis* was not the hyper-accumulator of the three heavy metals, but *Zenia insignis* was of great significance in the manual and ecological restoration and phytoremediation of tailing mine dams. However, it should be further studied on whether it is possible to employ *Zenia insignis* as the species of ecological restoration of tailings mine dams in Nandan.

Keywords: *Zenia insignis*; tailings mine dam; heavy metals pollution; phytoremediation

矿产资源是重要的战略资源,全世界已发现的矿物有 3 300 多种,其中有工业开采意义的有 1 000 多种,每年开采总量达 150×10^8 t 以上^[1]。在矿产资源

开发过程中,由于管理不善以及环境保护工作滞后等原因,资源浪费和环境破坏问题十分严重^[2]。土壤重金属污染是金属矿区普遍存在的问题之一^[3-4]。特别是尾矿坝,由于重金属含量高,种类多,环境治理成本高,难度大。因此,矿业废弃地的综合治理是迫切需要解决的问题。

广西南丹县有色金属储量丰富,且为多金属矿,素有“锡都”之美称。因为矿业废弃物的处理跟不上,

收稿日期:2009-09-12

基金项目:广西自然科学基金(0832273);广西高校重点建设学科(桂教科研[2007]20号);广西高校重点建设实验室(桂教科研[2006]4号)

作者简介:覃勇荣(1963—),男,在读博士,教授,主要研究方向为喀斯特地区资源环境保护及开发利用。E-mail:hcxyqyr@126.com

所以随着矿产资源的开发,尾矿堆积如山,全县尾矿库共有 61 个, 占用大量的土地并对周边的环境构成巨大威胁。任豆是我国特有物种,生长速度快,生命力特强,生物量大,生态效益高,经济开发价值大,所以在喀斯特地区造林绿化和石漠化生态恢复中得到广泛的应用。然而,关于南丹等地尾矿坝重金属污染治理的文献报道甚少,迄今为止,利用任豆进行有关土壤重金属污染植物修复的研究尚未见报道。为此,本文模拟广西南丹大厂长坡尾矿坝的重金属背景,利用任豆进行人工修复的试验,旨在了解重金属胁迫背景下任豆的重金属富集特性,以便为南丹尾矿坝等重金属异常区土壤修复提供理论依据及技术支持。

1 调查区域概况

长坡尾矿坝位于广西南丹县大厂矿区内。大厂矿属于多金属矿,锡矿储量大,含量高,已有 50 多年的开采历史^[5],伴生的矿物有铅、锌、铜、镉、锑、砷、钨、铟、银等。过去,因为技术条件的限制,再加上矿物资源相对富足,所以采富弃贫的现象比较普遍,矿物的开采和金属冶炼技术粗放,资源浪费比较严重,大量未经复选和回收处理的尾矿砂以及矿渣被人为废弃,堆积如山,总量约有几百万立方米。尾矿坝占地面积约有 $5 \times 10^4 \text{ m}^2$,表层结皮龟裂,析出白色的盐碱,酸性废水呈深紫红色,pH 值小于 2.0,电导率大于 $9\,000 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,尾矿砂的电导率平均也达到 $2\,000 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 以上。酸性废水及尾矿渗滤液对周围环境造成严重的影响,重金属污染十分严重,尾矿坝上几乎寸草不长,尘土弥漫,景观效果非常差^[6-8]。

2 材料与方法

2.1 试验仪器

MP200A 型电子分析天平(上海精密科学仪器有限公司);101-2-BS 型台式恒温干燥箱(上海跃进医疗器械厂);ZXL-2-5 型自动消煮炉(沈阳市节能电炉厂);AA-7020 型原子吸收光谱仪(北京东西分析仪器有限公司)。

2.2 试验材料

重金属异常区的土壤样品采自广西南丹大厂长坡尾矿坝,共采集粗、中、细 3 种不同规格(粒度)的土样。任豆种子由广西平果县林业局提供。

2.3 试验方案

2.3.1 任豆种子的发芽及土培试验

选取完好无损且饱满、大小均匀的任豆种子,用

65~75 ℃ 的热水进行催芽处理之后,转移到无重金属污染的沙床中培育。定期用去离子水喷洒,保持苗床湿度使种子发芽和幼苗存活,培育一段时间后留用。

土培试验采用盆栽模拟法,根据尾矿样品粒度的不同分成粗、中、细 3 组进行。试验采用小塑料盆作为载体,每盆装土 1.25 kg(风干重)。准确称取不同质量的尾矿样和泥土,将尾矿样与正常泥土按不同比例(5:0、4:1、3:2、2:3、1:4、0:5)混合均匀后,分别装入不同编号的塑料小花盆,并从苗床中选取生长状况及大小相同的任豆幼苗移栽其中,按常规方法进行栽培管理,定期用去离子水喷洒,保持泥土的湿润,每日进行观察记录。试验设两组平行试验,培育期共 62 d。

2.3.2 任豆幼苗的水培试验

水培试验同样采用盆栽模拟法。根据重金属种类的不同分为 Pb、Cu、Zn 3 组进行,设两组平行试验。分别以 Hoagland 营养液^[9]配制的 0、2.5、5、10、25、50、100、150、200、250 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 溶液(CuCl_2 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 和 ZnSO_4 用去离子水配制,浓度以纯金属离子计)配制而成^[10-11],每盆培养基溶液总体积为 4 L。分别从苗床中选取生长大小相同的任豆苗到事先配制好的培养基溶液中进行培养,用泡沫塑料板将任豆幼苗固定好并遮盖住培养基溶液表面。培养期间定期用充气机对任豆苗进行充氧,提供任豆苗根部呼吸所需的氧气,保证苗的存活。每日进行观察记录,当任豆苗在高浓度重金属含量的条件下出现完全死亡后进行收苗处理,培育期共 45 d。

2.3.3 样品处理及重金属测定

样品处理:用去离子水将采收后的任豆苗清洗干净,分别将每盆幼苗的茎叶与根分开,编号,置 60 ℃ 烘箱中烘干后,用研钵磨成粉末保存备用。土培培养基中土壤样品自然风干,碾碎,过 100 目土筛,干燥保存备用。

样品测试:土样及任豆样品中重金属含量的测定均采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消化-原子吸收光谱法^[12]。

2.3.4 数据处理

试验数据处理用 Microsoft Excel 2003 及 SPSS16.0 软件进行。

3 结果与分析

3.1 土培试验结果

表 1 为土培盆栽试验培养基质及相应的任豆苗重金属含量测定结果。从表 1 可以看出:①不同培养基质的重金属背景不同,但其差异并没有与尾矿砂-

表 1 土培试验中的重金属背景值及任豆幼苗中的重金属含量测定结果

尾矿 粒度		序号	pH 值	电导率 / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	$\text{Zn}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$				$\text{Cu}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$				$\text{Pb}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			
					土培基质	根	茎叶	迁移率	土培基质	根	茎叶	迁移率	土培基质	根	茎叶	迁移率
粗		1	5.15	585.00	544.91	358.57	245.51	0.41%	—	—	—	0.00%	26.95	21.91	14.94	0.41%
		2	6.55	930.00	826.35	564.74	255.98	0.31%	—	—	—	0.00%	82.83	1.00	1.00	0.50%
		3	6.86	1 393.35	1 425.00	1 103.79	475.00	0.30%	228.00	—	—	0.00%	433.00	33.93	9.00	0.21%
		4	6.87	1 171.65	1 719.00	1 086.00	383.23	0.26%	104.00	—	—	0.00%	1 584.00	23.00	2.00	0.08%
		5	6.72	1 135.00	1 864.27	572.85	353.00	0.38%	176.65	—	—	0.00%	2 078.84	13.27	1.00	0.07%
		6	6.86	1 206.70	1 925.00	1 585.66	1 046.91	0.40%	145.00	—	—	0.00%	1 070.00	168.33	10.98	0.06%
中		1	5.15	585.00	544.91	358.57	245.51	0.41%	—	—	—	0.00%	26.95	21.91	14.94	0.41%
		2	6.77	1 727.50	1 038.92	1 231.54	798.40	0.39%	—	—	—	0.00%	101.80	124.75	23.96	0.16%
		3	6.75	1 701.70	1 276.45	1 000.00	529.82	0.35%	—	—	—	0.00%	200.60	55.78	20.88	0.27%
		4	6.69	1 711.70	1 504.00	743.03	366.53	0.33%	35.00	—	—	0.00%	903.00	40.84	18.94	0.32%
		5	6.71	1 728.35	1 909.00	1 476.14	924.15	0.39%	11.00	—	—	0.00%	2 417.00	261.43	29.95	0.10%
		6	6.80	1 663.30	2 000.00	1 527.00	989.00	0.39%	310.00	—	—	0.00%	2 756.00	335.00	36.00	0.10%
细		1	5.15	585.00	544.91	358.57	245.51	0.41%	—	—	—	0.00%	26.95	21.91	14.94	0.41%
		2	6.68	1 666.70	1 696.61	560.00	317.00	0.36%	36.93	—	—	0.00%	976.05	47.00	18.75	0.29%
		3	6.62	1 748.30	1 871.00	812.38	379.44	0.32%	80.00	—	—	0.00%	1 559.00	114.77	21.95	0.16%
		4	6.60	1 756.70	1 978.00	1 157.69	426.15	0.27%	129.00	—	—	0.00%	1 983.00	189.62	26.97	0.12%
		5	6.65	1 658.30	2 025.95	1 300.40	722.56	0.36%	42.91	—	—	0.00%	2 287.43	297.41	35.93	0.11%
		6	6.67	1 723.30	2 057.00	3 625.70	1 154.08	0.24%	205.00	—	—	0.00%	2 677.00	832.40	82.51	0.09%

注:①培养基为尾矿与泥土按不同比例均匀混合而成的培养基质;②迁移率=茎叶中重金属含量/(根中重金属含量+茎叶中重金属含量)×100%;③“—”表示重金属的含量极低,超出了所用仪器的监测范围,无法检出。下同。

正常土的配比呈正相关;②任豆幼苗对不同重金属元素的吸收能力有差异,表现出不同的吸收规律和特点;③任豆幼苗地上部分(茎叶)和地下部分(根)重金属含量有一定的相关性,并且,通常与土培基质的重金属含量有较明显的相关(正相关);④任豆幼苗对不同重金属的转运能力和耐性有明显差异,重金属毒害的致死浓度和效应也各有不同(见图 1~图 6)。需要说明的是,因为部分任豆幼苗吸收的铜数量极少,所以

在仪器的检测范围内无法检出。

3.2 水培试验结果

表 2 为任豆对水培液中不同浓度重金属离子吸收情况的测定结果。由表 2 和图 7、图 8 可以看出,在相同的处理条件下,在一定重金属浓度范围内,随着重金属浓度的增大,任豆幼苗中 Pb 的含量逐渐增高。在浓度为 $250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溶液达到最大值,说明任豆幼苗对 Pb 的吸收与培养液浓度呈正相关;任豆根部

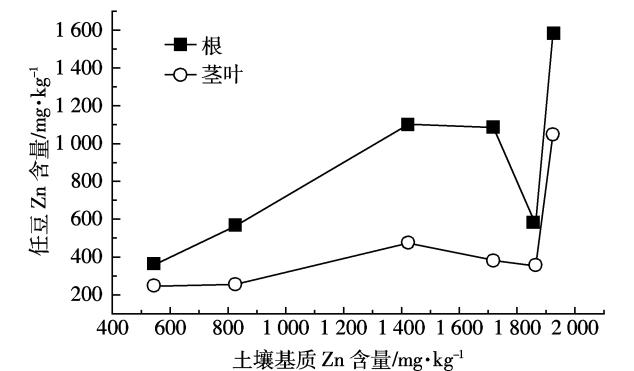


图 1 粗粒尾矿培养基中任豆幼苗对 Zn 的吸收
Figure 1 Absorption of Zn by *Zenia insignis* seedlings
in coarse culture matrix

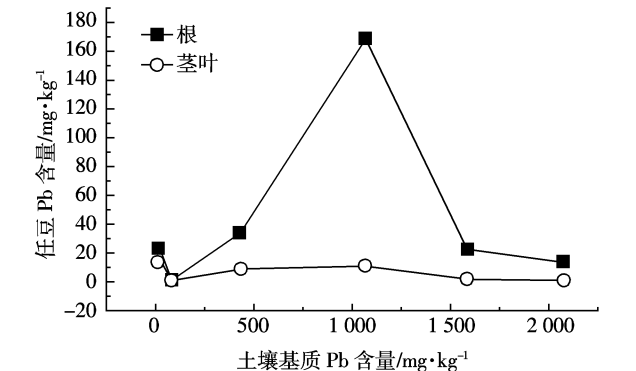


图 2 粗粒尾矿培养基中任豆幼苗对 Pb 的吸收
Figure 2 Absorption of Pb by *Zenia insignis* seedlings
in coarse culture matrix

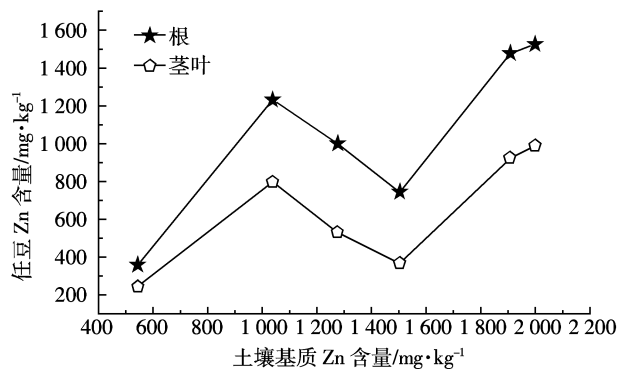


图3 中粒尾矿培养基中任豆幼苗对 Zn 的吸收

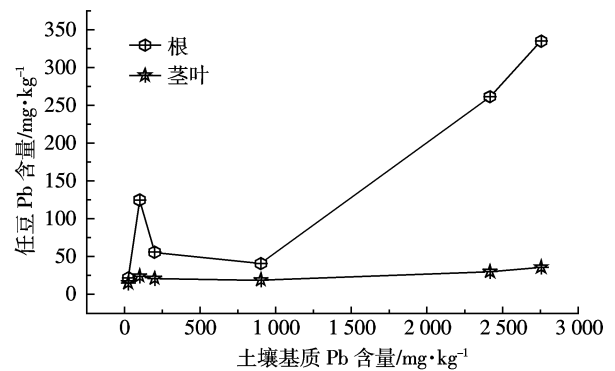
Figure 3 Absorption of Zn by *Zenia insignis* seedlings in medium-grained culture matrix

图4 中粒尾矿培养基中任豆幼苗对 Pb 的吸收

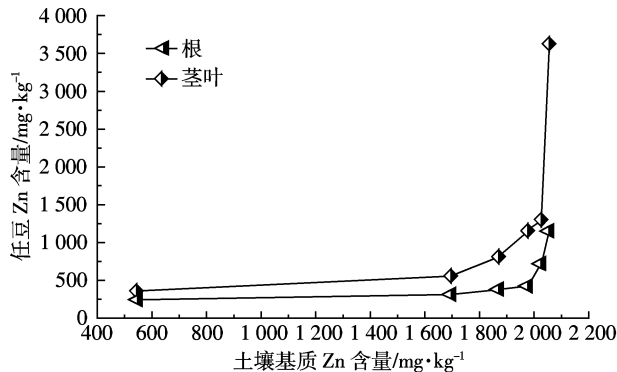
Figure 4 Absorption of Pb by *Zenia insignis* seedlings in medium-grained culture matrix

图5 细粒尾矿培养基中任豆幼苗对 Zn 的吸收

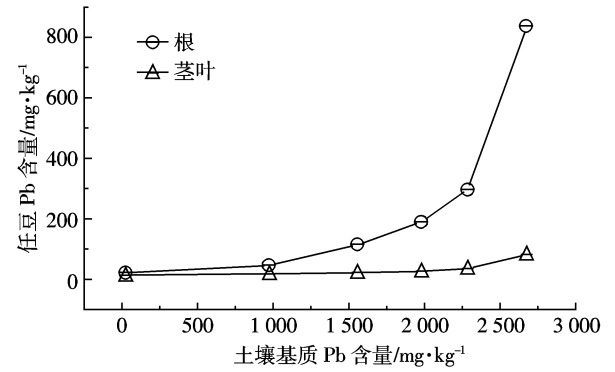
Figure 5 Absorption of Zn by *Zenia insignis* seedlings in fine culture matrix

图6 细粒尾矿培养基中任豆幼苗对 Pb 的吸收

Figure 6 Absorption of Pb by *Zenia insignis* seedlings in fine culture matrix

对 Cu 的吸收表现为先增后降,茎叶部分则随溶液中 Cu^{2+} 浓度的增高而逐渐增高,在水培液 Cu^{2+} 浓度为浓度 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到最大值,表明任豆幼苗地上部分对 Cu 的吸收与溶液浓度呈正相关。任豆幼苗根部和茎叶部分对 Zn 的吸收均表现为先增后降再升高。

各处理组任豆幼苗的重金属含量,绝大部分为根部显著高于茎叶部,说明重金属被根吸收后,大部分积累在根部,只有少量转运到地上部分。3 种重金属比较显示,任豆体内 Cu 含量最少,Zn 含量最大,Pb 含量居中。任豆根部 3 种重金属含量的排序为 $\text{Zn} > \text{Pb} >$

表2 水培试验中任豆对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 的吸收及转运情况Table 2 Absorption and transportation situation of *Zenia insignis* seedlings for Pb^{2+} , Cu^{2+} and Zn^{2+} in the hydroponic experiments

溶液浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{Pb}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$			$\text{Cu}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$			$\text{Zn}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		
	根	茎叶	迁移率	根	茎叶	迁移率	根	茎叶	迁移率
250	1 871.26	335.33	0.15%	745.00	787.00	0.51%	7 357.14	1 985.00	0.21%
200	1 584.00	304.78	0.16%	876.25	751.50	0.46%	9 764.71	1 998.00	0.17%
150	1 728.63	130.00	0.07%	858.85	713.00	0.45%	9 831.17	1 799.21	0.15%
100	943.34	145.71	0.13%	850.00	668.33	0.44%	6 881.15	2 022.29	0.23%
50	275.90	108.78	0.28%	729.00	202.60	0.22%	3 703.70	1 313.37	0.26%
25	367.27	37.92	0.09%	701.60	83.83	0.11%	7 149.35	1 231.08	0.15%
10	212.15	27.89	0.12%	474.05	3.98	0.01%	3 836.96	966.14	0.20%
5	210.16	26.89	0.11%	330.34	—	0.00%	2 124.09	885.23	0.29%
2.5	239.04	2.99	0.01%	—	—	0.00%	1 583.33	739.04	0.32%
0	1.00	—	0.00%	—	—	0.00%	1 663.27	564.00	0.25%

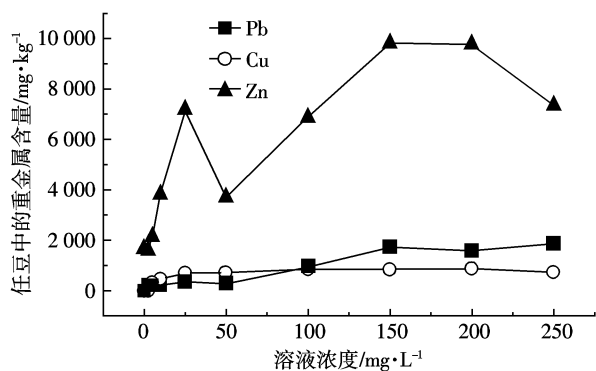


图7 水培试验中任豆根部对重金属的吸收

Figure 7 Absorption of heavy metal by the roots of *Zenia insignis* in hydroponic experiments

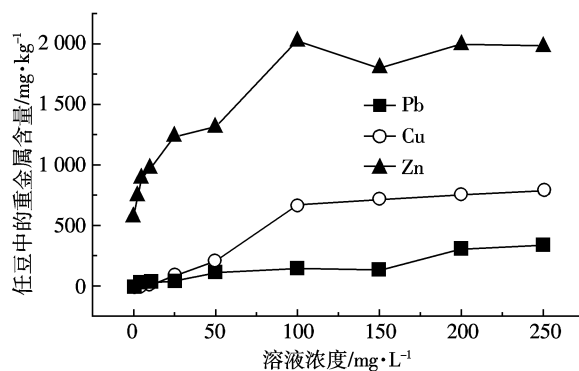


图8 水培试验中任豆茎叶对重金属的吸收

Figure 8 Absorption of heavy metal by the stems of *Zenia insignis* in hydroponic experiments

Cu, 任豆茎叶中3种重金属含量的排序则为 $Zn > Cu > Pb$ 。

通过数据分析发现,任豆幼苗对 Cu^{2+} 的迁移率最大。在水培试验中,在 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} 浓度为 $150 \sim 250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的试验组中,任豆幼苗陆续全部受害致死,而添加不同浓度 Pb^{2+} 的试验组中,任豆幼苗均没有出现全部致死的现象。此结果表明,任豆幼苗对 Pb、Zn、Cu 3 种重金属的耐性及吸收转运能力是有明显差异的。

4 讨论

许多相关研究表明,重金属进入植物根细胞后,首先与蛋白质、多糖及核酸等结合,大部分累积在根部,只有少部分向地上部分迁移^[13]。作者通过土培和水培试验,研究了 Pb、Zn、Cu 3 种不同重金属在任豆幼苗体内的积累与分布,其结果与以往其他相关报道基本一致^[18]。值得注意的是,任豆对 Pb 的耐性相对较强,其原因有待研究。

陈燕等^[14]研究发现,玉米对土壤中不同重金属的富集顺序为 $Ni > Pb > Zn > Cr > Cu$ 。莫争等^[15]研究了重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 在水稻中的积累与分布情况,证明 5 种重金属在水稻植株迁移能力的大小依次为 $Cr > Cd > Zn > Cu > Pb$ 。本研究结果表明,土培试验中,由于基质中的 Cu^{2+} 含量很低,无法检出任豆幼苗体内的 Cu 含量,从而导致 Cu^{2+} 迁移率最小,重金属 Zn 的迁移率最大。在水培试验中,浓度为 $100 \sim 250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,重金属 Cu^{2+} 的迁移率最大, Pb^{2+} 的迁移率最小,在浓度为 $0 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, Zn^{2+} 的迁移率最大, Cu^{2+} 的迁移率最小。土培结果与陈燕等在玉米当中得到的结果相反,水培结果与莫争等在水稻中所得到的结果相近,表明不同重金属在不同植物体内的迁移能力不同,不

同植物对重金属的吸收及在体内的积累存在差异,同种植物在不同环境下对重金属的吸收及在体内的积累存在差异。由于任豆对 Pb、Zn、Cu 3 种重金属的转运系数均小于 1,所以不具备超累积植物的一些特征^[16]。

植物对各种不同重金属离子的吸收与累积,取决于环境中重金属离子的数量及有效态、土壤理化性质、植物种类等因素。Marschner^[17]认为,根际环境中的重金属含量、pH、Eh(氧化还原电位)、含水量、有机质和其他养分元素等是影响根际土壤中重金属的有效性,植物对重金属吸收的主要因素。植物体内锌的累积与土壤中锌的含量密切相关;铜的有效性随土壤的 pH 值的降低而增加^[18]。因此,有必要进一步研究重金属胁迫背景下任豆对重金属的吸收特性,以便筛选出最优化的试验条件,为南丹尾矿坝等重金属异常区的植物修复提供技术支持。

5 结论

(1)任豆幼苗具有较强的重金属耐性,但不是 Pb、Zn 和 Cu 的超累积植物。

(2)任豆幼苗对重金属吸收及转运能力与重金属的种类、有效浓度等诸多因素有关。

(3)利用任豆进行土壤重金属污染治理没有环境风险,其综合利用也是可以考虑的。

参考文献:

- [1] 甘永刚. 安徽某地硫酸烧渣的工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2006, 3: 32-36.
GAN Yong-gang. Study on process mineralogy of a pyrite cinder in Anhui[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2006, 3: 32-36.
- [2] 王亚平, 鲍征宇, 王苏明. 矿山固体废物的环境效应研究进展及大

- 冶铜绿山尾矿的环境效应[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1998, 17(2): 97-100.
- WANG Ya-ping, BAO Zheng-yu, WANG Su-ming. Progress on study of environmental effects of mine solid wastes and environmental effects of tailings of Tonglushan Mine, Daye[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 1998, 17(2): 97-100.
- [3] 李永庚, 蒋高明. 矿山废弃地生态重建研究进展[J]. 生态学报, 2004, 21(1): 95-99.
- LI Yong-geng, JIANG Gao-ming. Ecological restoration of mining wasteland in both China and abroad: An over review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 21(1): 95-99.
- [4] Udkas, Adriano D C. Environmental impacts of metal or emining and processing: A review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26: 590-602.
- [5] 中国矿床发现史·广西卷编委会. 中国矿床发现史(广西卷)[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- Editorial Committee of Discovery History of Deposits of China. The discovery history of deposits of China (Guangxi Volumes)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [6] 周兴, 宋书巧, 吴欢. 广西刁江流域有色金属矿区尾砂库植物研究[J]. 热带地理, 2003, 23(3): 226-230.
- ZHOU Xing, SONG Shu-qiao, WU Huan. An investigation of plants on the tailings of abandoned nonferrous mines in the Diaojiang Basin of Guangxi[J]. *Tropical Geography*, 2003, 23(3): 226-230.
- [7] 刘海龙. 采矿废弃地的生态恢复与可持续景观设计[J]. 生态学报, 2004, 24(2): 323-329.
- LIU Hai-long. Ecological restoration and sustainable landscape design of mining wastelands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 323-329.
- [8] 刘旭辉, 曾艳兰, 覃勇荣, 等. 长坡尾矿坝植物修复过程中土壤脲酶活性变化[J]. 河南农业科学, 2009(5): 65-69.
- LIU Xu-hui, ZENG Yan-lan, QIN Yong-rong, et al. Research on changes of soil urease activity during the process of phytoremediation in heavy metal contaminated areas of Changpo Mine Tailing Dam of Nandan County[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2009(5): 65-69.
- [9] 中国科学院上海植物生理研究所, 上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南[J]. 北京: 科学出版社, 1999.
- Shanghai Institutes for Biological sciences, Chinese Academy of Sciences, The Shanghai Society for Plant Physiology. Experimental guide-line for modern plant physiology[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [10] 李向科, 张义贤. 重金属 $Cd^{2+}Pb^{2+}Cu^{2+}$ 在大麦幼苗体内积累与分布的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊): 484-488.
- LI Xiang-ke, ZHANG Yi-xian. Study of $Cd^{2+}Pb^{2+}Cu^{2+}$ on accumulation and distribution in *Hordeum vulgare* seedling[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(S2): 484-488.
- [11] 翁高艺, 孙小峰, 吴龙华, 等. 铜锌铅复合污染土壤上香薷植物的生长和重金属吸收动态[J]. 土壤, 2006, 38(5): 602-608.
- WONG Gao-yi, SUN Xiao-feng, WU Long-hua, et al. Growth and metal uptake dynamics of two elsholtzia plants on Cu, Pb and Zn mixed-contaminated soils[J]. *Soils*, 2006, 38(5): 602-608.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Analysis of soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [13] Bernal M P, McGrath S P. Effects of pH and heavy metal concentrations in solution culture on the proton release, growth and elemental composition of *Alyoummurate* and *Raphanus sazivus* L[J]. *Plant and Soil*, 1994, 166: 82-93.
- [14] 陈燕, 刘晚苟, 郑小林, 等. 玉米植株对重金属的富集和分布[J]. 玉米科学, 2006, 14(6): 93-95.
- CHEN Yan, LIU Wan-gou, ZHENG Xiao-lin, et al. Metallic accumulation and distribution in maize plant[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2006, 14(6): 93-95.
- [15] 莫争, 王春霞, 陈琴, 等. 重金属 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd 在水稻植株中的富集和分布[J]. 环境化学, 2002, 21(2): 110-116.
- MO Zheng, WANG Chun-xia, CHEN Qin, et al. Distribution and enrichment of heavy metals of Cu, Pb, Zn, Cr and Cd in paddy plant[J]. *Environmental Chemistry*, 2002, 21(2): 110-116.
- [16] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens*[J]. *New Phytol*, 1994, 127: 61-68.
- [17] Marschnerd, Besktim, Andersona, et al. Phytoremediation of contaminated soil[J]. *Biotechnology*, 1997, 10: 235-242.
- [18] 张辉. 土壤环境学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- ZHENG Hui. Science of soil environment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.