

## 4种改良剂对铅锌尾矿污染土壤中光叶紫花苕生长及重金属吸收特性的影响\*

李正强<sup>1</sup> 熊俊芬<sup>2\*\*</sup> 马琼芳<sup>2</sup> 张德闪<sup>2</sup> 何忠俊<sup>2</sup> 王吉秀<sup>2</sup>

(1. 丽江市土壤肥料工作站 丽江 674100; 2. 云南农业大学资源与环境学院 昆明 650201)

**摘要** 通过盆栽试验研究了铅锌尾矿污染土壤中施用有机肥、石灰、蛭石和白云石等4种改良剂对光叶紫花苕生长发育、叶绿素及重金属Cu、Cd、Pb、Zn积累特性的影响,并分析了施用改良剂后土壤pH和有效态重金属含量的变化。结果表明,与对照相比,不同改良剂及其不同施用水平均能不同程度地提高土壤pH,显著降低土壤各重金属有效态含量,并显著抑制了Cd、Pb向光叶紫花苕地上部转移,降低了重金属在光叶紫花苕植株地上部的积累,改善了光叶紫花苕的生长和发育,光叶紫花苕株高、地上部鲜重和地下部鲜重、叶绿素含量均有不同程度增加,其中株高和地上部鲜重增加达到显著水平。4种改良剂的不同处理水平对光叶紫花苕地下部重金属含量影响均达显著水平。

**关键词** 铅锌尾矿 污染土壤 改良剂 重金属 光叶紫花苕 生长发育 有效态重金属 土壤pH

**中图分类号:** S156.2; X131.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2010)01-0158-06

### Effect of different amendments on growth and heavy metal accumulation in *Vicia villosa* Roth *varglabrescens* cv Yunguangzao in soils polluted with lead/zinc mine tailings

LI Zheng-Qiang<sup>1</sup>, XIONG Jun-Fen<sup>2</sup>, MA Qiong-Fang<sup>2</sup>, ZHANG De-Shan<sup>2</sup>, HE Zhong-Jun<sup>2</sup>, WANG Ji-Xiu<sup>2</sup>

(1. Soil and Fertilizer Station of Lijiang City, Lijiang 674100, China; 2. Faculty of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract** A pot experiment was conducted to determine the effect of four amendment substances (organic manure, lime, vermiculite and dolomite) on growth and heavy metal (Cu, Cd, Pb and Zn) accumulation in *Vicia villosa* Roth *varglabrescens* cv Yunguangzao in soils contaminated with lead/zinc mine tailings. Changes in soil pH and available heavy metal content induced by the amendments were also analyzed. The results show that the four amendments significantly increase soil pH while reducing available heavy metal content in soil. Hence transportation of Cd and Pb from the root to shoot of *V. villosa* is limited, which reduces heavy metal accumulation in the shoot. The amendments significantly improve growth of *V. villosa*, while increasing plant height, shoot and root fresh weight and chlorophyll content of *V. villosa*. The induced changes in plant height and shoot fresh weight are significant ( $P < 0.05$ ) compared to CK. Amendments significantly affect heavy metal accumulation in the root of *V. villosa*. The effects of the four amendments on root heavy metals content in *V. villosa* are also significant.

**Key words** Lead/zinc mine tailing, Polluted soil, Amendent substances, Heavy metal, *Vicia villosa* Roth *varglabrescens* cv Yunguangzao, Growth and development, Available heavy metal, Soil pH

(Received March 24, 2009; accepted Sept. 3, 2009)

铅锌尾矿污染土壤受选矿废水和尾矿砂的直接影响,重金属含量极高,对植物生长造成毒害生境<sup>[1]</sup>。近年来,选用超累积植物修复重金属污染土壤成为植

物修复的热点,但超累积植物通常具有植株矮小、生长缓慢、生物量低、周期长且大多不具有较好经济效益等缺点,导致在植物修复工程中应用较少。

\* 云南农业大学基金项目(2006KY03)、云南省科技厅基金项目(2008CD127)、云南省教育厅科研基金项目(07C10715)资助

\*\* 通讯作者, E-mail: xjunfen@hotmail.com

李正强(1983-),男,在读硕士研究生,主要从事矿区植被恢复方面的研究。E-mail: y20020465@126.com

收稿日期: 2009-03-24 接受日期: 2009-09-03

诸多学者认为利用非食用且具有经济价值的普通植物,并结合向污染土壤中添加改良剂的方法来修复尾矿污染土壤是一条可行途径,并进行了高羊茅(*Festuca arundinacea*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、香根草(*Vetiveria zizanioides*)<sup>[1-2]</sup>等植物对金属的抗性及其吸收的研究。

绿肥植物一般适应性较强、生长迅速、生物量大,豆科绿肥还具有特殊的生物固氮能力。目前,研究绿肥植物对铅锌尾矿土壤中重金属的抗性和吸收特性的报道尚不多见,改良剂的施用对重金属的吸收和抗性产生何种影响亦不清楚。因此本文采用温室盆栽方法研究了绿肥植物光叶紫花苜蓿(*Vicia villosa* Roth var *glabrescens* cv. Yunguangzao)对云南某铅锌尾矿污染土壤重金属的抗性与吸收特性,探讨改良剂的施用对植物吸收重金属的影响,为利用绿肥植物修复铅锌尾矿土壤提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

供试光叶紫花苜蓿(学名为云光早光叶紫花苜蓿, *Vicia villosa* Roth var *glabrescens* cv. Yunguangzao)的种子购于昆明市绿盛种子有限公司。土壤为采自云南某铅锌矿开采区的(0~20 cm)混合土样,选用的土壤改良剂有机肥(猪粪)、石灰、蛭石和白云石均为市售。

### 1.2 盆栽试验

盆栽试验设对照组(不添加任何改良剂的铅锌尾矿污染土壤)和处理组,每组重复 3 次。供试土壤经自然风干、捣碎、剔除杂物后过 2 mm 筛,测定其基本理化性质及重金属含量背景值(表 1)。每盆装干土 3 kg,并向土壤中分别加入 10 g·kg<sup>-1</sup>、20 g·kg<sup>-1</sup>和 40 g·kg<sup>-1</sup>的有机肥、石灰、蛭石和白云石。同时分别在每盆加入尿素 1.38 g,磷酸二氢钾 1.19 g,硫酸钾 0.25 g。浇去离子水,平衡 1 周后播种,每盆播种 40 粒,出苗两周后定苗,每盆留苗 25 株。植物生长期间保持一定的土壤湿度,并定期观察记录生长情况。生长 90 d 后收获,沿土面剪取植株地上部

分,测量株高、地上部和地下部鲜重、叶绿素含量,同时洗出根系,105 杀青 0.5 h,70 烘干。

### 1.3 分析与测定方法

土壤理化性质测定参照参考文献[3]。叶绿素含量用 95%乙醇提取,722 分光光度计测定。Cd、Pb、Cu、Zn 含量的测定:土样经王水-高氯酸消化,植株分地上部和地下部浓硝酸-高氯酸消化,原子吸收光度法测定(TAS-990 原子吸收分光光度计,北京)。土壤有效态重金属含量以 0.1 mol·L<sup>-1</sup>盐酸提取,水土比为 1:10,原子吸收分光光度计测定。数据采用 DPS2005 数据统计软件进行方差分析和多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 铅锌尾矿污染土壤中施加不同改良剂对光叶紫花苜蓿生长的影响

由表 2 可知,在 4 种改良剂不同处理水平下,生长在铅锌尾矿污染土壤中的光叶紫花苜蓿株高、地上部鲜重和地下部鲜重均较对照有不同程度的增加,且株高和地上部鲜重的增加达显著水平。

向铅锌尾矿土壤中添加改良剂可显著提高光叶紫花苜蓿株高,与对照相比,其增加幅度为 24.23%~59.61%,不同改良剂间无显著差异。低浓度处理下,各改良剂对光叶紫花苜蓿株高增高的顺序为蛭石>白云石>有机肥和石灰,中等浓度处理下为白云石>有机肥>石灰>蛭石,高浓度处理下为白云石>蛭石>石灰>有机肥。从同种改良剂不同处理水平对光叶紫花苜蓿株高的促进程度看,有机肥为中>低>高,石灰为中>高>低,蛭石为低>中>高,白云石为高>中>低。

施加改良剂后光叶紫花苜蓿地上部生物量有显著提高,相对于对照其增产幅度为 79.24%~240.12%。地上部生物量最高者为高量白云石处理,较对照增产 240.12%;产量最低者为高量有机肥,较对照增产 79.24%。不同改良剂对光叶紫花苜蓿地上部生物量促进程度顺序为白云石>蛭石>石灰>有机肥。与对照相比向污染土壤中添加有机肥和石灰可显著增加光叶紫花苜蓿地下部生物量,但添加蛭石和白云石未达显著水平;不同改良剂的增产顺序为有机肥>石灰>白云石>蛭石;有机肥和石灰不同处理水平的增产顺序均为高>中>低。

### 2.2 铅锌尾矿污染土壤中施加不同改良剂对光叶紫花苜蓿叶绿素的影响

从表 3 可以看出,向铅锌尾矿污染土壤中投加改良剂可使光叶紫花苜蓿叶绿素 a 和叶绿素 b 含量相对于对照有所增加,增加幅度分别为 28.57%~139.29%和 50%~329.17%,对照植物失绿症明显。添加改良剂能够显著提高植物叶绿素总含量,提高幅

表 1 供试土壤的理化性质  
Tab. 1 Physical and chemical properties of tested soils

指标 Index	数值 Value	指标 Index	数值 Value
pH	6.04	EC (ms·cm <sup>-1</sup> )	0.54
有机质 Organic matter (g·kg <sup>-1</sup> )	6.39	Cd (mg·kg <sup>-1</sup> )	8.68
碱解氮 Available N (mg·kg <sup>-1</sup> )	123.60	Pb (mg·kg <sup>-1</sup> )	1 148.62
全氮 Total N (g·kg <sup>-1</sup> )	3.13	Zn (mg·kg <sup>-1</sup> )	724.62
速效磷 Available P (mg·kg <sup>-1</sup> )	4.85	Cu (mg·kg <sup>-1</sup> )	146.45
速效钾 Available K (mg·kg <sup>-1</sup> )	23.62	As (mg·kg <sup>-1</sup> )	84.96

表 2 不同改良剂对铅锌尾矿污染土壤中光叶紫花苕地上部鲜重、地下部鲜重、株高的影响  
Tab. 2 Effects of different amendments on plant height, shoot and root fresh weight of *V. villosa* grown on soils polluted by lead/zinc mine tailings

改良剂 Amendment	处理水平 Treatment level ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	株高 Plant height (cm)	地上部鲜重		地下部鲜重
			Shoot fresh wight ( $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ )	Root fresh weight ( $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ )	
对照 CK	0	42.02±1.67cB	9.97±0.18eC	1.12±0.08dC	
有机肥 Organic fertilizer	10	52.53±0.27bA	19.93±2.89cdB	3.72±0.83abcA	
	20	59.40±3.54ab	19.40±1.78cd	4.13±0.68abc	
	40	52.20±0.46b	17.87±1.51d	5.38±1.06a	
石灰 Lime	10	52.53±5.67bA	18.77±1.21dB	2.29±0.19cdAB	
	20	58.20±2.90ab	19.78±3.10cd	3.28±0.38bcd	
	40	54.00±2.48b	24.14±3.36cd	5.00±1.47ab	
蛭石 Vermiculite	10	59.80±0.27abA	20.07±1.10cdB	2.09±0.17cdBC	
	20	55.27±4.85b	25.91±2.51bc	2.61±0.68cd	
	40	54.47±1.90b	20.22±2.55cd	2.21±0.47cd	
白云石 Dolomite	10	57.90±3.85abA	30.80±1.36abA	2.38±0.25cdBC	
	20	66.27±0.68a	32.50±0.85a	2.57±0.26cd	
	40	67.07±1.95a	33.91±1.45a	2.52±0.25cd	

同列不同小写字母代表各处理水平间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同; 不同大写字母代表各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。Different small letters within one column indicate significant difference at 5% level among levels of one treatment, the same below; different capital letters indicate significant difference at 5% level among different amendments (LSD test).

表 3 不同改良剂对铅锌尾矿污染土壤中光叶紫花苕叶绿素含量的影响  
Tab. 3 Effects of different amendments on chlorophyll content of *V. villosa* grown on soils polluted by lead/zinc mine tailings

改良剂 Amendment	处理水平 Treatment level ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	叶绿素含量 Chlorophyll content ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )			叶绿素 a/b Chl. a/b
		叶绿素 a Chl. a	叶绿素 b Chl. b	总叶绿素 Total chl.	
对照 CK	0	0.84±0.02e	0.26±0.03c	1.10±0.02j	3.23
有机肥 Organic fertilizer	10	1.53±0.08abcd	0.42±0.03bc	1.97±0.02f	3.64
	20	1.82±0.15ab	0.44±0.01bc	2.26±0.01d	4.14
	40	1.08±0.16de	0.52±0.07bc	1.62±0.02i	2.08
石灰 Lime	10	1.38±0.13bcde	0.57±0.23bc	1.97±0.02f	2.42
	20	1.70±0.06abc	0.48±0.01bc	2.18±0.01e	3.54
	40	1.78±0.08ab	0.52±0.03bc	2.32±0.03c	3.42
蛭石 Vermiculite	10	1.27±0.20cde	0.36±0.06bc	1.64±0.01i	3.53
	20	1.68±0.23abc	1.03±0.30a	2.73±0.03a	1.63
	40	1.18±0.41cde	0.72±0.11ab	1.89±0.01g	1.64
白云石 Dolomite	10	1.77±0.02ab	0.48±0.02bc	2.25±0.01d	3.69
	20	2.01±0.02ab	0.59±0.03bc	2.62±0.02b	3.41
	40	1.32±0.13bcde	0.39±0.03bc	1.70±0.03h	3.38

度为 49.09%~138.18%。向铅锌尾矿污染土壤投加的不同改良剂大部分处理水平的叶绿素 a/b 高于对照。

### 2.3 铅锌尾矿污染土壤中施加不同改良剂对光叶紫花苕积累重金属的影响

由表 4 可以看出, 向铅锌尾矿污染土壤中添加改良剂能够不同程度地降低光叶紫花苕植株重金属含量, 其中对植株地上部 Cd、Pb、Zn 的降低效果达显著水平 ( $P < 0.05$ ), 降低幅度分别为 10.06%~48.60%、14.78%~74.20%、2.74%~16.57%; 但对 Cu 的降低效果不显著。不同改良剂对不同重金属的降低效果差异较大, Cd 的降低顺序为石灰>白云石>有

机肥>蛭石, Pb 的降低顺序为白云石>石灰>蛭石>有机肥, Cu 的降低顺序为白云石>蛭石>石灰>有机肥, Zn 的降低顺序为石灰>白云石>有机肥>蛭石, 不同改良剂对 Cd、Zn 的降低顺序一致。表 4 表明, 向铅锌尾矿污染土壤中添加改良剂可显著降低光叶紫花苕根系的 Cd 含量; 而除低量石灰处理和低量有机肥处理增加 Pb 含量、低量有机肥处理和中量石灰处理增加 Cu 含量、中量石灰处理增加 Zn 含量外, 其他处理的不同水平均显著降低了光叶紫花苕根系 Pb、Cu、Zn 含量; 白云石抑制光叶紫花苕根系吸收 Pb 的效果最为明显, 高量有机肥处理抑制光叶紫花苕

表 4 不同改良剂对各重金属在铅锌尾矿污染土壤中光叶紫花苜蓿体内积累和分布的影响  
Tab. 4 Effects of different amendments on accumulation and distribution of heavy metals in *V. villosa* grown on soils polluted by lead/zinc mine tailings

积累部位 Part	改良剂 Amendment	处理水平 Treatment level (g · kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg · kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg · kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg · kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg · kg <sup>-1</sup> )	
地上部 Shoot	对照 CK	0	1.79±0.04a	163.20±1.70a	9.82±0.07a	87.85±1.60a	
		有机肥 Organic fertilizer	10	1.38±0.02c	139.08±4.28b	9.34±0.02bc	85.28±0.32b
			20	1.08±0.02e	122.26±0.96d	9.15±0.28cd	83.14±0.36c
	40		0.97±0.01f	104.34±4.47ef	8.88±0.1de	80.01±0.33d	
	石灰 Lime	10	0.99±0.02f	77.07±0.77h	8.20±0.06f	75.20±0.30ef	
		20	1.12±0.03e	64.75±0.15i	8.50±0.05ef	75.84±0.16e	
		40	0.97±0.01fg	96.51±0.75g	9.72±0.04ab	74.09±0.07ef	
	蛭石 Vermiculite	10	1.61±0.05b	131.08±2.22c	9.26±0.24cd	85.44±1.24b	
		20	1.57±0.03b	99.82±0.84fg	8.09±0.07fg	83.28±0.18c	
		40	1.32±0.03cd	123.42±0.64d	8.16±0.04f	83.07±0.29c	
	白云石 Dolomite	10	1.28±0.02d	107.00±1.00e	7.74±0.06g	80.97±0.19d	
		20	0.92±0.02f	42.10±0.55j	6.20±0.20h	73.29±0.31f	
40		1.12±0.02e	71.85±1.70h	8.40±0.06f	79.23±0.33d		
地下部 Root	对照 CK	0	15.38±0.08a	1 020.12±1.34c	39.00±0.60c	121.22±1.22b	
		有机肥 Organic fertilizer	10	14.31±0.05b	1 090.76±0.99a	41.21±0.35b	121.95±0.11ab
			20	9.79±0.04h	890.54±0.76f	25.92±0.14h	109.21±0.45d
	40		7.20±0.01i	572.71±6.84l	25.07±0.09h	90.90±0.26g	
	石灰 Lime	10	9.37±0.03i	1 049.80±2.16b	34.10±0.21d	113.23±0.37c	
		20	8.33±0.07j	919.22±2.54e	43.04±0.92a	123.09±0.31a	
		40	6.39±0.04m	1 015.33±2.57c	27.60±0.39g	82.92±0.18h	
	蛭石 Vermiculite	10	7.50±0.05k	662.35±3.46j	29.21±0.25f	102.71±0.09f	
		20	13.27±0.04c	766.04±0.17h	29.93±0.17f	109.21±0.45d	
		40	12.37±0.07d	929.67±5.89d	31.98±0.22e	110.47±1.04d	
	白云石 Dolomite	10	11.19±0.04e	641.41±0.54k	29.49±0.07f	103.04±0.06f	
		20	10.86±0.06f	721.12±2.14i	31.58±0.48e	106.27±0.38e	
40		10.27±0.07g	803.12±1.23g	44.17±0.33a	109.45±0.71d		

根系吸收 Cu 的效果最为明显, 而高量石灰处理抑制光叶紫花苜蓿根系吸收 Zn 的效果最明显。

#### 2.4 铅锌尾矿污染土壤中施加不同改良剂对光叶紫花苜蓿重金属转运系数、土壤 pH 和有效态重金属含量的影响

向铅锌尾矿污染土壤中添加改良剂能够显著降低土壤中各重金属的有效态含量(表 5)。不同改良剂降低土壤有效态重金属含量顺序排列: Cd 为石灰>蛭石>白云石>有机肥, Pb、Cu、Zn 均为石灰>白云石>蛭石>有机肥, 表明石灰降低土壤有效态重金属含量的效果最明显。由表 5 中转运系数可以看出, Cu、Cd、Pb 3 种重金属在光叶紫花苜蓿地上部所占比例的最小值所对应的均为中量白云石处理, 说明中量白云石处理抑制 Cu、Cd、Pb 向光叶紫花苜蓿地上部转移的效果最明显。各改良剂抑制 Cd 向光叶紫花苜蓿地上部转移作用的大小顺序为白云石>有机肥>石灰>蛭石, Pb 为石灰>白云石>有机肥>蛭石, Cu 为白云石>石灰>蛭石>有机肥, Zn 为石灰>白云石>蛭石

和有机肥。由表 5 可知, 石灰、蛭石和白云石的施用能够明显提高土壤 pH, 且石灰的提高效果与其施用量呈正比, 而有机肥对土壤 pH 的影响较小。

### 3 讨论

白云石是一种含 Ca、Mg 的碳酸盐非金属矿物, 农业领域主要用于改良土壤、降低土壤酸度<sup>[4]</sup>。酸性土壤施用天然沸石和白云石粉, 对提高土壤的保肥性能及养分的有效性、降低土壤酸度有良好作用<sup>[4-5]</sup>。白云石对光叶紫花苜蓿株高、生物量的促进作用可能与其提高土壤 pH, 使重金属与碳酸盐、磷酸盐等形成难溶化合物而降低生物有效性有关。有研究证明, 提高土壤 pH 的材料(如白云石、碳酸钙等)所含的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>对重金属离子有拮抗作用, 参与竞争植物根系上的吸收位点, 从而抑制植物对重金属的吸收<sup>[6]</sup>。也有研究表明, 土壤中多种重金属存在着化学沉淀平衡, 土壤环境条件的变化, 例如 pH、其他阴阳离子的存在都会影响重金属化学沉淀平

表 5 改良剂对铅锌尾矿污染土壤中光叶紫花苜蓿的各重金属转运系数、土壤 pH 及重金属有效态含量的影响  
Tab. 5 Effects of amendments on soil pH, available heavy metals contents and transfer of heavy metals in *V. villosa* grown on soils polluted by lead/zinc mine tailings

改良剂 Amendment	处理水平 Treatment level (g · kg <sup>-1</sup> )	转运系数 Transfer coefficient				有效态重金属含量 Available heavy metal content (mg · kg <sup>-1</sup> )				pH
		Cd	Pb	Cu	Zn	Cd	Pb	Cu	Zn	
对照 CK	0	0.12	0.16	0.25	0.72	2.62±0.01a	307.99±1.13a	2.54±0.05a	11.76±0.12a	6.04
有机肥	10	0.10	0.13	0.23	0.70	2.25±0.01b	227.78±1.10g	1.43±0.02c	11.23±0.04bcd	6.14
Organic fertilizer	20	0.11	0.14	0.35	0.76	2.02±0.01de	239.98±1.53e	1.46±0.04c	11.39±0.06b	6.27
	40	0.13	0.18	0.35	0.88	1.98±0.01e	256.36±1.18d	2.00±0.02b	11.28±0.06bc	6.19
石灰	10	0.11	0.07	0.24	0.66	1.54±0.02g	123.10±0.32k	0.16±0.01i	10.54±0.05e	7.62
Lime	20	0.13	0.07	0.20	0.62	0.20±0.01h	98.16±0.24l	0.29±0.02h	9.81±0.01f	7.89
	40	0.15	0.10	0.35	0.89	2.15±0.03c	97.17±0.71l	0.85±0.01e	8.69±0.04g	8.82
蛭石	10	0.21	0.20	0.32	0.83	2.19±0.01bc	261.80±0.60c	1.02±0.01d	11.13±0.06cd	7.07
Vermiculite	20	0.12	0.13	0.27	0.76	2.05±0.01d	235.82±0.02f	0.75±0.04f	11.28±0.04bc	7.03
	40	0.11	0.13	0.26	0.75	1.91±0.02f	221.33±0.44h	0.19±0.02i	11.11±0.02cd	7.05
白云石	10	0.11	0.17	0.26	0.79	2.16±0.01c	296.74±0.60b	0.57±0.03g	11.06±0.04d	6.98
Dolomite	20	0.08	0.06	0.20	0.69	2.18±0.06c	206.94±0.62i	0.53±0.03g	11.16±0.04cd	6.91
	40	0.11	0.09	0.21	0.72	1.90±0.02f	191.26±0.44j	0.22±0.01i	11.13±0.02cd	6.96

转运系数=地上部重金属含量/地下部重金属含量 Transfer coefficient=shoot heavy metal content / root heavy metal content.

衡<sup>[7]</sup>。本试验中 20 g · kg<sup>-1</sup> 有机肥和石灰及 10 g · kg<sup>-1</sup> 蛭石对光叶紫花苜蓿株高的促进效果好于三者高量处理的现象,可能是由于不同处理水平改良剂的加入导致土壤环境条件的改变,提高了某些阴阳离子的拮抗作用;或者某些阴阳离子的存在影响到各重金属的化学沉淀平衡。具体机理有待进一步研究。蛭石属于黏土矿物,其促进光叶紫花苜蓿生长的原因可能是所含的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>对重金属离子具有拮抗作用,参与竞争植物根系上的吸收位点,从而抑制植物对重金属的吸收。具体的反应机理有待进一步研究。有研究表明,土壤施加石灰后,水溶态 Cd 随石灰用量增加而急剧减少;交换态 Cd、有机结合态 Cd 在 pH>5.5 时随石灰用量增加而急剧减少<sup>[8]</sup>。施用石灰可降低或显著降低土壤 Hg、Cd、Pb 的植物可利用性<sup>[9]</sup>。石灰促进光叶紫花苜蓿生长的原因可能是其降低了重金属离子的植物可利用性。本试验结果表明,有机肥能够提高光叶紫花苜蓿地下部生物量,减少重金属对作物根系的毒害作用,这与孙健等<sup>[10]</sup>的研究结果一致。

植物叶片叶绿素含量的高低反映了光合作用的强弱。严重玲等<sup>[11]</sup>认为叶绿素含量的减少是叶片衰老的重要标志。本试验结果表明,在施加改良剂的铅锌尾矿污染土壤上生长的光叶紫花苜蓿叶绿素总含量均显著高于对照,说明 4 种改良剂均能缓解土壤重金属对光叶紫花苜蓿叶片的毒害作用,有利于提高叶片光合作用能力,促进光叶紫花苜蓿生长,这与袁敏等<sup>[12]</sup>的研究结论一致。Woolhouse<sup>[13]</sup>认为:随着叶

片的衰老,植物叶绿素含量逐渐下降,叶绿素 a 比叶绿素 b 下降得更快,叶绿素 a/b 可作为叶片衰老的标志,同时也是衡量叶片感受重金属污染相对敏感的一个生理指标。本试验中,叶绿素 a/b 的变化同样表明向铅锌尾矿污染土壤中添加改良剂能够缓解土壤重金属对光叶紫花苜蓿的毒害作用,减缓光叶紫花苜蓿叶片的衰老。

综合分析不同改良剂对 4 种重金属在光叶紫花苜蓿植株地上部含量的影响,相对于蛭石和有机肥,白云石和石灰的重金属降低效果较好。光叶紫花苜蓿地上部各重金属含量降到最低值时所对应的均为 20 g · kg<sup>-1</sup> 白云石处理,具体机理需进一步研究。除 Cu 外,光叶紫花苜蓿地上部各重金属升到最高值时所对应的均是不同改良剂浓度的低剂量,这在一定程度上说明光叶紫花苜蓿地上部分重金属积累量与土壤中改良剂的施用量之间存在一定的相关性,这与孙健等<sup>[10]</sup>的研究结论一致。就光叶紫花苜蓿根系重金属含量而言,改良剂的添加对其影响表现出一定的差异,具体因改良剂种类、处理水平和重金属种类而异。

不同改良剂作用下,光叶紫花苜蓿对 Cu、Zn 转运系数总体上有所提高,这对利用光叶紫花苜蓿提取污染土壤中的 Cu、Zn 具有一定的参考价值。从转运系数看,各重金属均为根系中的浓度大于茎叶中的浓度,这与以往许多报道一致<sup>[14-15]</sup>。一般来说,植物吸收重金属的量在很大程度上取决于土壤中重金属存在的形态,土壤中以有效态存在的重金属易被植物吸收,易对植物的生长产生影响。有研究表明,土

壤 pH 的升高能够显著降低土壤有效态重金属含量, 从而减轻重金属对植物的毒害<sup>[16]</sup>, 石灰不仅可改善土壤的强酸性<sup>[17-18]</sup>, 还可降低重金属离子的生物有效性<sup>[18]</sup>, 本文支持这一观点。10 g · kg<sup>-1</sup> 蛭石处理土壤 pH 升高最明显, 这恰与其对光叶紫花苜蓿株高的影响趋势一致, 说明蛭石主要是通过提高土壤 pH 来抑制污染土壤中重金属活性, 从而促进光叶紫花苜蓿的生长。

#### 4 结论

4 种改良剂不同处理水平下, 生长在铅锌尾矿污染土壤中的光叶紫花苜蓿株高、地上部鲜重和地下部鲜重均较对照有不同程度的增加, 其中株高和地上部鲜重达显著水平。对于株高和地上部鲜重而言, 40 g · kg<sup>-1</sup> 白云石的增产效果最明显, 对于地下部鲜重, 40 g · kg<sup>-1</sup> 有机肥的增产效果最明显。

向铅锌尾矿污染土壤中投加改良剂均能够使光叶紫花苜蓿叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量增加, 其中叶绿素总含量显著高于对照。

与对照相比, 4 种改良剂均能显著降低光叶紫花苜蓿植株地上部重金属含量。就光叶紫花苜蓿根系重金属含量而言, 改良剂的添加对其影响表现出一定的差异, 具体因改良剂种类、处理水平和重金属种类而异。

不同改良剂的大部分处理水平能够抑制 Cd、Pb 向光叶紫花苜蓿地上部转移, 其中 20 g · kg<sup>-1</sup> 白云石的抑制效果最明显。不同改良剂作用下, 光叶紫花苜蓿对 Cu、Zn 转运系数总体来看有所提高, 且白云石和石灰的效果最明显。

向铅锌尾矿污染土壤中添加改良剂能够显著降低土壤各重金属的有效态含量, 且石灰降低土壤有效重金属含量效果最明显。石灰、蛭石和白云石的施用能够明显提高土壤 pH, 且石灰的提高效果与其施用量呈正比。

#### 参考文献

[1] 夏汉平, 束文圣. 香根草和百喜草对铅锌尾矿重金属的抗性和吸收差异研究[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1121-1122

- [2] 袁敏, 铁柏清, 唐美珍, 等. 四种草本植物对铅锌尾矿土壤重金属的抗性吸收特性研究[J]. 草业学报, 2005, 14 (6): 57-62
- [3] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 12
- [4] 马立峰. 重视茶园土壤的急速酸化和改良[J]. 中国茶叶, 2001, 23(4): 30, 31
- [5] 朱宏斌, 王文军, 武际, 等. 天然沸石和石灰混用对酸性黄红壤改良及增产效用的研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(1): 26-29
- [6] 汪洪, 周卫, 林葆. 钙对镉胁迫下玉米生长及生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(1): 78-87
- [7] Street J J, Lindsay W L, Sabey B R. Solubility and plant uptake of cadmium in soils amended with cadmium and sewage sludge[J]. J Environ Qual, 1997, 6: 72-77
- [8] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. 施加石灰降低不同母质土壤中镉毒性机理研究[J]. 农业环境保护, 1998, 17(3): 101-103
- [9] 陈宏, 陈玉成, 杨学春. 石灰对土壤中 Hg、Cd、Pb 的植物可利用性的调控研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 549-552
- [10] 孙健, 铁柏清, 周浩, 等. 不同改良剂对铅锌尾矿污染土壤中灯心草生长及重金属积累特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 637-643
- [11] 严重玲, 李瑞智, 钟章成. 模拟酸雨对绿豆、玉米生理生态特性的影响[J]. 应用生态学报, 1996, 7(增刊): 124-131
- [12] 袁敏, 铁柏清, 唐美珍. 改良剂对铅锌尾矿污染土壤上龙须草生长和叶片叶绿素含量的影响[J]. 农村生态环境, 2005, 21(4): 54-57
- [13] Woolhouse H W. Longevity and senescence in plant[J]. Sci Prog Oxford, 1974, 61: 23
- [14] 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 *Alyoum murale* and *Raphanus sativus* L.[J]. Plant and Soil, 1994, 166: 82-93
- [15] Ye Z H, Baker A J M, Wong M H, et al. Zinc, lead and cadmium tolerance, uptake and accumulation by *Typha lauffv-lia*[J]. New Phytologist, 1997, 136: 496-480
- [16] Brown S L, Chaney R L, Angle J S, et al. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and Bladder Champion for zinc- and cadmium-contaminated soil[J]. J Environ Qual, 1994, 23: 1151-1157
- [17] 储祥云, 黄昌勇. 磷肥和石灰对酸性土壤上一年生黑麦草生长的影响[J]. 浙江农业大学学报, 1999, 25(1): 19-22
- [18] 曾希柏. 红壤酸化及其防治[J]. 土壤通报, 2000, 31(3): 111-113