

# 硫营养对小花南芥(*Arabis alpina* Var.*parviflora* Franch) 累积铅锌的影响研究

王吉秀<sup>1</sup>, 太光聪<sup>2</sup>, 祖艳群<sup>1\*</sup>, 李 元<sup>1</sup>, 湛方栋<sup>1</sup>

(1.云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2.云南农业职业技术学院, 昆明 650201)

**摘 要:**采用盆栽试验方法,研究了硫营养对 Pb/Zn 富集植物——小花南芥(*Arabis alpina* Var.*parviflora* Franch)生长和铅锌累积能力的影响。结果表明:小花南芥地上部生物量随硫营养质量分数的增加而显著增加,增幅为 49.5%~118.6%;64 mg·kg<sup>-1</sup> 硫营养处理,小花南芥植株地下部生物量增加 114.5%;硫营养促进小花南芥对铅的累积,植株地上部铅累积量增加 1.74~2.92 倍,地下部增加 2.01~3.86 倍;8 mg·kg<sup>-1</sup> 和 24 mg·kg<sup>-1</sup> 硫营养处理促进小花南芥对锌的累积。试验揭示适当的硫营养能促进小花南芥生长和对铅锌的累积。

**关键词:**硫营养;小花南芥;铅;锌;富集植物

**中图分类号:**X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)06-1064-06

## Effects of Sulfur Application on Growth and Lead and Zinc Accumulation Contents in *Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch

WANG Ji-xiu<sup>1</sup>, TAI Guang-cong<sup>2</sup>, ZU Yan-qun<sup>1\*</sup>, LI Yuan<sup>1</sup>, ZHAN Fang-dong<sup>1</sup>

(1.College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2.Yunnan Agricultural Vocational-technical College, Kunming 650201, China)

**Abstract:** The effects of sulfur nutrition on growth and Pb/Zn accumulation in hyperaccumulator(*Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch) were investigated with pot experiments. The results showed that the shoot biomass of *Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch increased significantly with increase in sulfur contents by 49.5%~118.6%. The root biomass of *Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch increased by 114.5% with 64 mg·kg<sup>-1</sup> sulfur treatment. The accumulation content of lead in *Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch increased by sulfur. The accumulation contents in shoot and root increased by 1.74~2.92 times and 2.01~3.86 times, respectively. The accumulation content of zinc in *Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch increased with 8 mg·kg<sup>-1</sup> and 16 mg·kg<sup>-1</sup> sulfur treatments. It was suggested that the growth and Pb/Zn accumulation contents in *Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch could be enhanced by sulfur nutrition application.

**Keywords:** sulfur nutrition; *Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch; Pb; Zn; hyperaccumulator

植物修复土壤重金属污染由于经济、绿色、环保等特点而成为目前研究的热点,但由于大多数超富集植物存在生长慢、周期长、生物量小等不足,直接影响着超富集植物修复土壤重金属污染的效率,目前影响超累积植物吸收重金属的因素研究已有很多报道,如重金属浓度、重金属形态、土壤种类<sup>[1]</sup>、土壤性质、重金属之间复合污染<sup>[2]</sup>以及重金属与其他养分之间相互作用

用、化学生物措施(添加表面活性剂<sup>[3-4]</sup>、固定剂<sup>[5]</sup>、有机肥、添加螯合剂<sup>[6]</sup>、添加小分子有机酸<sup>[7-8]</sup>等)、物理措施(如套作制度<sup>[9]</sup>)等。然而,有关土壤 S 含量、形态及化学行为对超累积植物吸收重金属的影响程度与机理研究较少。

硫元素是甲硫氨酸(Met)、半胱氨酸(Cys)、谷胱甘肽(glutathion, GSH)、维生素等物质的组成成分,在植物的整个生命过程中均有作用,它是植物生长发育必需的矿质营养元素。有研究表明植物对硫的需要仅次于氮、磷、钾之后居第四位,在作物的生理活动中具有其他元素不可替代的作用,并且植物体内的有机硫化物在抵御环境污染物中具有重要作用<sup>[10]</sup>。S 素与土壤氧化还原体系关系密切,硫化物含量、化学形态

收稿日期:2010-12-08

**基金项目:**国家自然科学基金项目(30560034);云南省学术带头人后备人才项目(2006PY01-34);国家留学基金“教育部留学回国人员科研启动基金”;云南省教育厅基金项目(2010C245)

**作者简介:**王吉秀(1975—),女,云南陆良人,在读硕士,讲师,主要从事土壤污染和环境生态学研究。

**\* 通讯作者:**祖艳群 E-mail: zuyanqun@yahoo.com.cn

及其相互之间的转化影响土壤性质,进而影响重金属在土壤中的化学形态、活性及其生物有效性<sup>[1]</sup>。在重金属胁迫下,从作用区域来讲,植物对硫的摄取主要是通过根系从土壤中吸收无机硫盐(主要是硫酸盐)实现的<sup>[2]</sup>,无机硫酸盐进入植物体后,先经过硫还原同化形成半胱氨酸,再经一系列转化生成甲硫氨酸等含硫化合物<sup>[13-16]</sup>,至于硫化合物是否通过影响根表和根际土壤来影响重金属的化学行为与活性?硫营养是否也在改善超累积植物累积重金属过程中发挥作用?尚有待进行深入的研究。为此,本研究拟通过室外模拟试验,探讨重金属胁迫下硫营养与超累积植物之间的关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试植物小花南芥(*Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch),属于十字花科,南芥属植物。分布于亚洲及欧洲,在我国主要分布于东北、西北、华北及西南等地。小花南芥种子采于云南省会泽县铅锌矿区,东经 103°58'23",北纬 27°38'46",海拔 2 500 m。试验用土采自会泽铅锌矿区的矿渣土和云南农业大学农场的清洁土混合(3:1)。混合后土样的基本理化性质见表 1。

### 1.2 试验设计

根据土壤有效硫丰缺指标进行划分:<16 mg·kg<sup>-1</sup>为缺乏,16~30 mg·kg<sup>-1</sup>为潜在性缺乏,30~50 mg·kg<sup>-1</sup>为丰富,>50 mg·kg<sup>-1</sup>为极丰富硫<sup>[17]</sup>。一般农业生产上施用的硫肥为硫酸铵,硫酸钾等,考虑植物吸收铵离子和钾离子对分析硫营养的影响,本试验加入了 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(硫含量以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>计),试验共设 5 个处理,分别为:0 mg·kg<sup>-1</sup>(CK),8 mg·kg<sup>-1</sup>(S0),24 mg·kg<sup>-1</sup>(S1),32 mg·kg<sup>-1</sup>(S2),64 mg·kg<sup>-1</sup>(S3)。

小花南芥种子用 10% 安替福民 20 倍液浸种 20 min 后,种入漂盘中繁育幼苗,幼苗长势高 2.3~3.1 cm 时移栽。盆栽试验每盆(30 cm×15 cm)装 2 kg 混合土,加入不同的硫质量分数平衡处理 1 周,然后从漂盘基质土中移取长势基本一致的小花南芥幼苗栽入盆中,每盆 2 株,常规管理,但不施加任何肥料,浇水保持土

壤润湿,待生长 3 个月后,收获植物。收获的植物样品先用自来水冲洗,后用去离子水浸泡,再用吸水纸吸干植株表面的水分,分地下部和地上部 2 个部位,在 105 ℃下杀青 30 min,55 ℃下烘至恒重,分别计算各部位的生物量。

### 1.3 测定方法

指标及测试方法:生物量采用常规方法测定;土壤用王水(浓硝酸:浓盐酸=1:3)-高氯酸消煮,植物样品采用 HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法微波消解,然后用火焰原子吸收分光光度法测定植株和土样中 Pb、Zn 含量<sup>[18]</sup>。

累积特征表示方法的计算公式分别为<sup>[19]</sup>:

富集系数=植物地上部 Pb、Zn 含量/土壤 Pb、Zn 含量<sup>[3]</sup>

转运系数=植物地上部 Pb、Zn 含量/植物根 Pb、Zn 含量<sup>[3]</sup>

转运量系数=(植物地上部 Pb、Zn 含量×植物地上部生物量)/(植物根 Pb、Zn 含量×植物根生物量)

滞留率(%)=[(植物根 Pb、Zn 浓度-植物地上部 Pb、Zn 浓度)/植物根 Pb、Zn 浓度]×100

净化率(%)=(植物地上部 Pb、Zn 累积量/土壤 Pb、Zn 处理总量)×100

### 1.4 统计分析

数据统计采用 Excel2000 软件进行分析,差异显著性分析采用 Duncan's 新复极差法多重比较(DPS 软件)。

## 2 结果与分析

### 2.1 硫营养对小花南芥生物量的影响

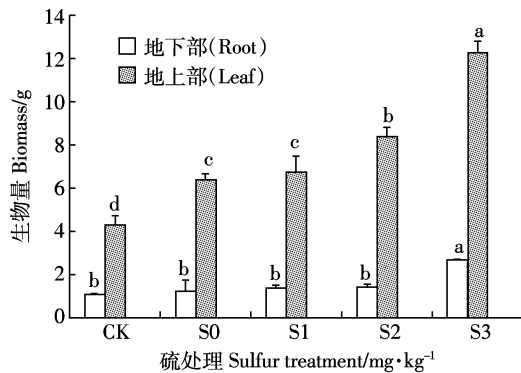
从图 1 可知,通过不同硫质量分数处理,小花南芥地上部分生物量随着硫质量分数的增加而增加,不同处理差异较显著,4 个浓度处理与对照分别增加了 49.5%,57.9%,96.5%,118.6%。仅当硫质量分数为 8 mg·kg<sup>-1</sup> 和 24 mg·kg<sup>-1</sup> 处理时,地上部分生物量差异不显著,但这两个处理与对照相比差异显著。小花南芥地下部分生物量当硫质量分数达到 32 mg·kg<sup>-1</sup> 时,它的生物量与对照相比差异不显著,只有土壤中硫质量分数极为丰富时,硫质量分数达到 64 mg·kg<sup>-1</sup> 时,

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of slag and clean soil tested

| 重金属含量/mg·kg <sup>-1</sup> |               | pH        | 有效硫/mg·kg <sup>-1</sup> | 速效磷/mg·kg <sup>-1</sup> | 速效钾/mg·kg <sup>-1</sup> | 全氮/%      | 有机质/%     |
|---------------------------|---------------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|-----------|
| Pb                        | Zn            |           |                         |                         |                         |           |           |
| 749.08±3.41               | 1 138.36±2.15 | 6.68±0.67 | 4.87±0.24               | 1.97±0.34               | 14.23±2.54              | 1.25±1.35 | 2.18±1.03 |

与对照存在显著差异,生物量增加了 114.5%。总的来说,不同硫质量分数处理,对小花南芥地上部分生物量的影响大于地下部分生物量。



相同部位中不同字母表示有显著性差异( $P < 0.05$ )。下同。

图 1 不同硫质量分数对小花南芥生物量的影响

Figure 1 Effect of sulfur on biomass of different parts in *Arabis alpinal* Var. *parviflora* Franch

## 2.2 硫营养对小花南芥吸收铅及铅累积特征的影响

### 2.2.1 硫营养对小花南芥吸收铅含量的影响

从图 2 可知,不同质量分数硫处理后,小花南芥地上部分和地下部分铅含量随着硫质量分数的增加而增加,不同处理间差异较显著,小花南芥地上部分铅含量与对照相比分别增加了 2.01、2.416、2.809、3.864 倍,地下部分铅含量与对照相比分别增加了 1.74、1.81、2.42、2.92 倍,小花南芥地上部分和地下部分铅含量的变化与生物量存在一定的关系,随着硫质量分数处理的升高,地上部分生物量和铅含量都呈现逐渐上升的趋势,只是地下部分的生物量在低浓度处理差异不显著,但地下部分吸收铅的含量差异比较显著,除了  $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  硫处理时差异不显著。

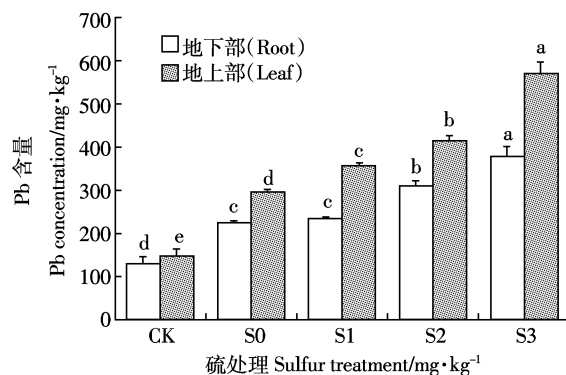


图 2 不同硫质量分数对小花南芥吸收铅含量的影响

Figure 2 Effect of sulfur on uptake of Pb of different parts in *Arabis alpinal* Var. *parviflora* Franch

### 2.2.2 硫营养处理对小花南芥吸收累积铅的特征

从表 2 可知,土壤中加硫平衡后增加了小花南芥地上部分和地下部分累积铅的含量,富集系数和位移系数都随着硫的质量分数的增加而增加,富集系数分别是对照的 1.89、2.15、2.66、3.46 倍;位移系数分别是对照的 1.15、1.34、1.01、1.32 倍。滞留率都是负值,转运量系数都大于 1,说明硫营养促进铅元素从小花南芥地下部向地上部迁移,滞留率分别是对照的 2.2、3.6、2.3、3.5 倍,转运量系数分别是对照 1.5、1.6、1.7、1.5 倍。随着硫的质量分数增加,小花南芥从土壤中提取铅的质量分数也在增加,最大的净化效率达到 49%。这说明硫元素的加入对小花南芥累积铅有促进作用。

表 2 硫营养处理对小花南芥吸收累积铅的特征

Table 2 Accumulation characteristics of *Arabis alpinal* Var. *parviflora* Franch to Pb by sulfur treatment

| 处理 | 富集系数 | 转运系数 | 滞留率/% | 转运量系数 | 净化效率/% |
|----|------|------|-------|-------|--------|
| CK | 0.47 | 1.15 | -0.15 | 4.55  | 1.70   |
| S0 | 0.89 | 1.33 | -0.33 | 6.80  | 3.40   |
| S1 | 1.01 | 1.54 | -0.54 | 7.42  | 4.10   |
| S2 | 1.25 | 1.34 | -0.34 | 7.68  | 4.76   |
| S3 | 1.63 | 1.52 | -0.52 | 6.99  | 6.55   |

## 2.3 硫营养对小花南芥吸收锌及锌累积特征的影响

### 2.3.1 硫营养对小花南芥吸收锌含量的影响

从图 3 可知,当土壤中硫的质量分数为  $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理时,小花南芥地下部分吸收锌的含量最高,与对照相比增加了 11.7%,当硫的处理浓度为  $32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,小花南芥吸收锌的含量呈现下降趋势,硫的质量分数最高时与硫的质量分数为  $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  对比下降了 0.87 倍,并且这 3 种浓度处理差异不显著。对照土壤中硫的背景值为  $4.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  与  $24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  硫的质量分数处理差异不显著,并且小花南芥累积锌的含量与最大值相比下降了 0.96 倍左右。

当土壤中硫的质量分数处理为  $24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,小花南芥地上部分吸收锌的含量最高,与对照相比增加了 1.32 倍,并且与对照、 $8$ 、 $32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  硫处理时差异显著,但这 4 种硫的质量分数处理后,小花南芥吸收锌的含量差异都不显著。

总而言之,不同硫的质量分数处理土壤后,高硫和低硫对小花南芥吸收锌的含量差异都不显著,并且都有下降的趋势。从图 2 和图 3 知,硫营养对小花南芥吸收铅锌含量的影响不同,可能与铅锌的吸收机理有关。铅是植物非必需元素,外界条件改变到适应它

吸收的能力,可能就会促进它的迁移和累积,但锌是植物的必需元素,外界对它的影响不是很大。

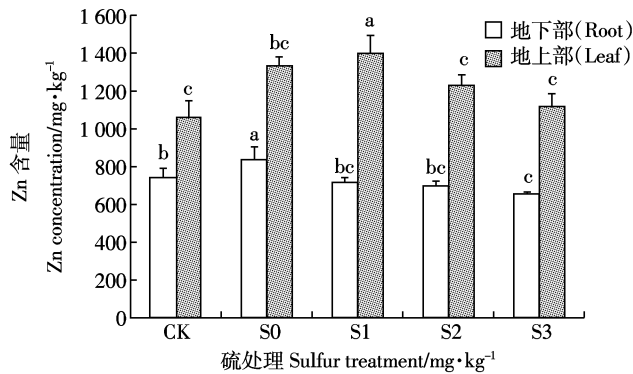


图 3 不同硫质量分数对小花南芥吸收锌含量的影响

Figure 3 Effect of sulfur on uptake of Zn of different parts in *Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch

### 2.3.2 硫营养处理对小花南芥吸收累积锌的特征

从表 3 可知,硫营养处理对小花南芥吸收累积锌的影响并不随着硫的质量分数增加而增加,当硫的质量分数为  $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,对富集系数影响差异不大,但在 5 个处理中富集系数最大,与对照相比增加了 1.19 倍,而当硫的质量分数增加为  $64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,富集系数反而与对照相比下降了 0.97 倍;当硫的质量分数为  $16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,位移系数最大,与对照相比增加了 1.37 倍;当硫的质量分数为  $24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,净化效率最高达到 46.65%,与对照相比增加了 1.3 倍,而当硫的质量分数增加为  $64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,净化效率降低到 37.09%,与对照相比下降了 1.04 倍。

从表 3 数据分析知,高硫和低硫处理,抑制小花南芥对锌的吸收和累积,并且不同硫质量分数的处理,小花南芥地上部转运锌的能力并不随着地下部吸收能力的增加。因此,硫的质量分数为  $8 \sim 24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理时,有利于小花南芥对锌的富集和转运。

## 3 讨论

硫在植物生长中发挥着不可替代的作用,一方

表 3 硫营养处理对小花南芥吸收累积锌的特征

Table 3 Accumulation characteristics of *Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch to Zn by sulfur treatment

| 不同处理 | 富集系数 | 转运系数 | 滞留率/% | 转运量系数 | 净化效率/% |
|------|------|------|-------|-------|--------|
| CK   | 1.21 | 1.43 | -0.43 | 5.66  | 9.87   |
| S0   | 1.44 | 1.60 | -0.60 | 8.22  | 12.36  |
| S1   | 1.41 | 1.96 | -0.96 | 9.42  | 12.97  |
| S2   | 1.28 | 1.76 | -0.76 | 10.08 | 11.37  |
| S3   | 1.17 | 1.71 | -0.71 | 7.88  | 10.31  |

面,它参与植物的光合作用、呼吸作用、氮素和碳水化合物的代谢,另一方面,硫也是蛋白质分子不可缺少的组成部分,还原态的蛋氨酸、胱氨酸、半胱氨酸等 3 种含硫氨基酸参与构成到蛋白质中去,硫还参与叶绿素、胡萝卜素、许多维生素、酶和酯的形成<sup>[20]</sup>。研究发现缺硫导致脐橙净光合速率( $P_n$ )、光合色素含量、电子传递速率( $ETR$ )、叶绿素的合成显著下降<sup>[21]</sup>;但也有研究高硫和低硫降低了烟草叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间  $\text{CO}_2$  浓度。叶片的有效量子产量( $EQY$ )、光合电子传递速率( $ETR$ )、光化学淬灭( $qP$ ),同时使烟草叶片的非光化学淬灭( $NPQ$ )的值升高<sup>[21]</sup>。

已有研究发现十字花科作物,如卷心菜、油菜等缺硫时,最初会在叶片背面出现淡红色。油菜的叶片也向内弯曲成杯状。随着缺硫加剧,卷心菜叶片正反面都发红紫,杯状叶反折过来,叶片正面显现凹凸不平<sup>[22]</sup>,缺硫还抑制植株及其叶面积的生长和扩展<sup>[23]</sup>。本试验中的小花南芥也属于十字花科植物,当硫的质量分数低于  $24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  以下处理,新叶片形状有卷缩趋势,新叶颜色变成淡淡的黄色,新叶片正面也与卷心菜缺硫一样显露出凹凸不平,但老叶颜色和形状在高质量分数处理下没有变化,这可能是硫在植物体内的移动性不大,很少从幼嫩器官向衰老组织运转,所以植物缺硫症状多从新叶开始,首先表现在幼嫩叶片和生长点上,并逐步向老叶扩展,最后延及全株。研究表明,施硫可显著提高水稻、小麦、玉米、马铃薯、大豆、花生、油菜、棉花、烟草、茶叶、甘蔗及甜菜等大多数作物的产量<sup>[24]</sup>,可能是这些作物含有大量含硫氨基酸和特殊油分,因对硫的需求量大,需要较多的硫来合成半胱氨酸和甲硫氨酸。本研究也证实,随着硫的质量分数增加,小花南芥的生物量也在不断增加。

硫营养能影响根系 ATP 硫酸化酶和腺苷酰硫酸磺基转化酶的活性,进而影响植物螯合素(phytochelatins)的形成,这种物质在调控植物 Cd 吸收方面具有重要作用<sup>[25]</sup>。据报道,S 还会与 Se 竞争同化酶,使硒代氨基酸减少,尤其是硒蛋氨酸减少,从而使水稻植株产生的挥发性 Se 降低<sup>[26-27]</sup>。本文通过铅锌胁迫实验发现,随着硫质量分数的增加,小花南芥地下部和地上部累积铅的质量分数显著增加,但对于锌的胁迫,高硫和低硫处理则抑制小花南芥对锌的吸收和累积,并且不同硫质量分数的处理,小花南芥地上部转运锌的能力并不随着地下部吸收能力相应增加,只有当硫的质量分数为  $8 \sim 24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理时,才有利于小

花南芥对锌的富集和转运。施硫处理小花南芥显著提高它对铅的富集和位移系数,推测原因,可能施硫促进半胱氨酸的合成,金属硫蛋白(MTS)和植物螯合肽(PCS)都是富含半胱氨酸残基的结合蛋白,其巯基含量高,对重金属的亲合力大,因而对多种重金属,如Cu、Zn、Pb、Ag、Hg、Cd有螯合作用<sup>[28]</sup>。小花南芥对铅锌吸收累积能力不同,可能锌是植物必需的矿质元素,铅是有害的元素,小花南芥生长代谢过程中受到铅的胁迫,金属硫蛋白和植物螯合肽的解毒作用对铅的耐性大于锌,导致小花南芥能吸收累积不必要的铅元素。

本试验硫处理促进小花南芥对铅锌的吸收转运,也可能与铅锌和土壤中胱氨酸和半胱氨酸甲基化后活性和移动性增强有关,已有报道土壤中胱氨酸和半胱氨酸参与重金属的甲基化,甲基化的As、Hg、Cd活性和移动性增强<sup>[29]</sup>;土壤中含S硫化化合物能与Hg、Cd结合,影响重金属离子在土壤中迁移;含S氨基酸与Cd络合显著提高Cd在砂壤土中的移动性<sup>[30]</sup>。安志装等证实施硫能显著地提高植物非蛋白巯基(NPT)的含量<sup>[31]</sup>,有效地提高植物对耐Cd胁迫的能力。

#### 4 结论

(1)本试验设置的硫营养质量分数处理下,小花南芥地上部分和地下部分生物量随着硫营养质量分数的增加而增加,不同处理与对照相比增加了49.5%~118.6%,且地上部分生物量不同处理间差异较显著,地下部分生物量除了硫营养质量分数为64 mg·kg<sup>-1</sup>时,其他处理差异不显著。

(2)施加硫营养能促进小花南芥地上部分和地下部分累积铅含量,随着硫质量分数的增加,小花南芥地上部分累积铅含量与对照相比增加了1.74~2.92倍,地下部分增加了2.01~3.864倍,且不同处理间差异较显著。

(3)对于锌的累积,高硫和低硫抑制小花南芥富集和转运锌,当硫的质量分数为8~24 mg·kg<sup>-1</sup>时,有利于小花南芥对锌的富集和转运。

总而言之,适当施硫对小花南芥修复重金属铅和锌污染的土壤有促进作用。

#### 参考文献:

- [1] 李光德,张中文,敬佩,等.茶皂素对潮土重金属污染的淋洗修复作用[J].农业工程学报,2009,25(10):231-235.
- LI Guang-de, ZHANG Zhong-wen, JING Pei, et al. Leaching remedia-

- tion of heavy metal contaminated fluvio-aquatic soil with tea-saponin [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(10):231-235.
- [2] 李博文,杨志新,谢建治,等.土壤Cd Zn Pb复合污染对植物吸收重金属的影响[J].农业环境科学学报,2004,23(5):908-911.
- LI Bo-wen, YANG Zhi-xin, XIE Jian-zhi, et al. Effects of soil compound contamination with Cd, Zn and Pb on adsorption of the metals by rape[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5):908-911.
- [3] 周小勇,仇荣亮,胡鹏杰,等.表面活性剂对长柔毛委陵菜(*Potentilla griffithii* var.*velutina*)修复重金属污染的促进作用[J].生态学报,2009,29(1):283-290.
- ZHOU Xiao-yong, QIU Rong-liang, HU Peng-jie, et al. Surfactants enhance phytoremediation of heavy metal contamination by *Potentilla griffithii* var.*velutina*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1):283-290.
- [4] 孟佑婷,袁兴中,曾光明,等.生物表面活性剂修复重金属污染研究进展[J].生态学报,2005,24(6):677-680.
- MENG You-ting, YUAN Xing-zhong, ZENG Guang-ming, et al. Advances in research on remediation of heavy metal contamination by bio-surfactant[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(6):677-680.
- [5] 刘坤,李光德,张中文,等.EDTA及低分子量有机酸对土壤Cd活性的影响研究[J].农业环境科学学报,2008,27(3):894-897.
- LIU Kun, LI Guang-de, ZHANG Zhong-wen, et al. Effects of EDTA and low molecular weight organic acids(LMWOA) on availability of cadmium in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):894-897.
- [6] 胡浩,潘杰,曾清如,等.低分子有机酸淋溶对土壤中重金属Pb Cd Cu和Zn的影响[J].农业环境科学学报,2008,27(4):1611-1616.
- HU Hao, PAN Jie, ZENG Qing-ru, et al. The effects of soil leaching with low molecular weight organic acids on Pb, Cd, Cu and Zn [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1611-1616.
- [7] 可欣,李培军,张昀,等.利用乙二胺四乙酸淋洗修复重金属污染土壤及其动力学[J].应用生态学报,2007,18(3):601-606.
- KE Xin, LI Pei-jun, ZHANG Yun, et al. Heavy metals removal and its kinetics in contaminated soft under effects of EDTA washing[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(3):601-606.
- [8] 黑亮,胡月明,吴启堂,等.用固定剂减少污泥中重金属污染土壤的研究[J].农业工程学报,2007,23(8):205-209.
- HEI Liang, HU Yue-ming, WU Qi-tang, et al. Fixing heavy metals in sludge and reducing pollution to soil using heavy metal stabilizers[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(8):205-209.
- [9] 黑亮,吴启堂,龙新宪,等.东南景天和玉米套种对Zn污染污泥的处理效应[J].环境科学,2007,4(25):852-858.
- HEI Liang, WU Qi-tang, LONG Xin-xian, et al. Effect of Co-planting of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on Zn-contaminated sewage sludge[J]. *Environmental Science*, 2007, 4(25):852-858.
- [10] 张秋芳.作物硫营养的生理作用及其胁迫研究[J].江西农业大学学报,2001,23(5):136-139.
- ZHANG Qiu-fang. Advances in the research on sulphur nutritional physiology and deficient-S stress in crops [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2001, 23(5):136-139.
- [11] 胡正义,夏旭,吴丛杨慧,等.硫在稻根微域中化学行为及其对水稻吸收重金属的影响机理[J].土壤,2009,41(1):27-31.

- HU Zheng-yi, XIA Xu, WU Cong yang-hui, et al. Chemical behaviors of sulfur in the rhizosphere of rice and its impacts on heavy metals up take in rice[J]. *Soils*, 2009, 41(1): 27-31.
- [12] Saito K. Regulation of sulfate transport and synthesis of sulfur containing amino acids[J]. *Current Opinion Plant Bio*, 2000, 3: 188-195.
- [13] Saito K. Sulfur assimilatory metabolism. The long and smelling road[J]. *Plant Physiol*, 2004, 136: 2443-2450.
- [14] Leustek T, Saito K. Sulfate transport and assimilation in plants[J]. *Plant Physiol*, 1999, 120: 637-644.
- [15] Kopriva S, Rennenberg H. Control of sulphate assimilation and glutathione synthesis: Interaction with N and C metabolism[J]. *J Exp Bot*, 2004, 55: 1831-1842.
- [16] Rangkadilok N, Nicolas M E, Bennett R N, et al. The effect of sulfur fertilizer on glucoraphanin levels in *Broccoli oleracea* L. var. *italica* at different growth stages[J]. *J Agric Food Chem*, 2004, 52: 2632-2639.
- [17] 彭嘉桂, 章明清, 林 琼, 等. 福建耕地土壤硫库、形态及吸附特性研究[J]. 福建农业学报, 2005, 20(3): 163-167.
- PENG Jia-gui, ZHANG Ming-qing, LIN Qiong, et al. Study on soil sulphur pool, form and absorption character in arable land of Fujian[J]. *Fujian Journal of Agricultural Science*, 2005, 20(3): 163-167.
- [18] ZU Y Q, LI Y, Christians, et al. 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.
- [19] 方其仙, 祖艳群, 湛方栋, 等. 小花南芥(*Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch)对 Pb 和 Zn 的吸收累积特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 433-437.
- FANG Qi-xian, ZU Yan-qun, ZHAN Fang-dong, et al. Accumulation characteristic of *Arabis alpina* Var. *parviflora* Franch to Pb and Zn[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3): 433-437.
- [20] Leustek T, Martin M N, Bick J N, et al. Pathways and regulation of sulfur metabolism revealed through molecular and genetic studies[J]. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 2000, 51: 141-165.
- [21] 陈屏昭, 王 磊. 缺硫对脐橙叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(5): 505-506.
- CHEN Ping-zhao, WANG Lei. Effects of sulfur deficiency on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of *Citrus sinensis* Osbeck leaves[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(5): 503-506.
- [22] 朱英华, 屠乃美, 肖汉乾. 硫对烟草叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1000-1005.
- ZHU Ying-hua, TU Nai-mei, XIAO Han-qian. Effects of sulfur nutrition on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of tobacco leaves[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1000-1005.
- [23] 林 葆, 李书田, 周 卫. 土壤有效硫评价方法和临界指标的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 436-445.
- LIN Bao, LI Shu-tian, ZHOU Wei. Study on test methods for soil available S and Critical levels of S deficiency[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(4): 436-445.
- [24] Adams S N. The effect of sodium and potassium fertilizer on the mineral composition of sugar beet[J]. *Agr Sci*, 2009, 56: 383.
- [25] 安志装, 王校常, 严蔚东, 等. 植物螯合肽及其在重金属胁迫下的适应机制[J]. 植物生理学通讯, 2001, 37(5): 463-467.
- AN Zhi-zhuang, WANG Xiao-chang, YAN Wei-dong, et al. Phytochelatins and its adaptive mechanism under heavy metal stress[J]. *Plant Physiol Comm*, 2001, 37(5): 463-467.
- [26] Nussbaum S, Schmutz D, Brunold C. Regulation of assimilatory sulfate reduction by cadmium in *Zea mays* L[J]. *Plant Physiol*, 1988, 88: 1407-1410.
- [27] Alina K P, Pendias H. Trace elements in soils and plants[M]. Florida, USA: CRC Press, 2001.
- [28] 马友华, 丁瑞兴, 张继榛, 等. 植物体内硒和硫的相互作用[J]. 植物生理学通讯, 2001, 37(2): 161-166.
- MA You-hua, DING Rui-xing, ZHANG Ji-zhen, et al. Interaction of selenium and sulfur in plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 2001, 37(2): 161-166.
- [29] 全先庆, 张洪涛, 单 雷, 等. 植物金属硫蛋白及其重金属解毒机制研究进展[J]. 遗传, 2006, 28(3): 375-382.
- QUAN Xian-qing, ZHANG Hong-tao, SHAN Lei, et al. Advances in plant metallothionein and its heavy metal detoxification mechanisms[J]. *Hereditas*, 2006, 28(3): 375-382.
- [30] Craig P J. Organometallic compounds in the environment: Principle and reaction[M]. Harlow, Essex, 1986: 368.
- [31] 安志装, 王校常, 严蔚东, 等. 镉硫交互处理对水稻吸收累积镉及其蛋白巯基含量的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 728-734.
- AN Zhi-zhuang, WANG Xiao-chang, YAN Wei-dong, et al. Effects of sulfate and cadmium interaction on cadmium accumulation and content of nonprotein thiols in rice seedling[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5): 728-734.