

# 铅胁迫下添加硫对小花南芥土壤微生物数量及植株铅累积特性的影响

李青<sup>1</sup>, 赵秋利<sup>1</sup>, 郭佩<sup>2</sup>, 王吉秀<sup>3</sup>

(1. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 广电计量监测(西安)股份有限公司, 陕西 西安 710100;

3. 云南农业大学, 云南 昆明 650100)

**摘要:**为探明在铅胁迫下, 外源添加不同硫浓度是否会影响小花南芥(*Arabis alpina* L. var. *parviflora* Franch)土壤微生物数量及植株铅累积特性, 采用盆栽试验种植野生小花南芥, 通过测定土壤 pH、S、Pb 含量, 土壤微生物数量以及植株铅含量, 揭示铅胁迫下, 外源添加不同硫浓度对超富集植物小花南芥土壤微生物数量及植株铅累积特性的影响。结果表明: 铅胁迫下, 外源添加不同硫浓度①使土壤 pH 从 6.87 下降到 6.17; ②对土壤 Pb 含量有极显著影响, 土壤铅含量可达 2 100.22 mg/kg; ③对细菌、真菌、放线菌无显著影响; ④显著增加了地上部和地下部对铅的吸收, 其中, 地上部铅含量可达 2 524.01 mg/kg, 地下部铅含量可达 1 672.94 mg/kg, 富集系数、转运系数和转运量系数最高分别可达 4.04、1.73 和 9.84。研究发现, 铅胁迫下, 外源添加不同硫浓度可促进小花南芥对铅的吸收, 土壤中微生物的数量也发生变化。

**关键词:**硫; 铅; 小花南芥; 土壤微生物

**中图分类号:** S154 **文献标识码:** A **文章编号:** 0488-5368(2022)08-0035-06

## Effect of Sulfur Addition on Soil Microbial Quantity and Lead Accumulation Characteristics of *Arabis alpina* L Plant under Lead Stress

LI Qing<sup>1</sup>, ZHAO Qiuli<sup>1</sup>, GUO Pei<sup>2</sup>, WANG Jixiu<sup>3</sup>

(1. Yangling Vocational and Technical College, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Radio and Television Metrology and Inspection(xian) Co., Ltd, Xian, Shaanxi 710100, China;

3. Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650100, China)

**Abstract:** In order to clarify the effect of addition of different concentrations of sulfur under lead stress on the quantity of soil microorganisms and lead accumulation characteristics of *Arabis alpina* L, a pot experiment was conducted to grow wild *Arabis alpina* L. The content of soil pH, S, Pb, the number of soil microorganisms and the content of lead in plants revealed the effects of different concentrations of sulfur on the soil microbial number and the characteristics of lead accumulation in the hyperaccumulator plant under lead stress. The results showed that under lead stress, ①the soil pH reduced from 6.87 to 6.17; ②there was a very significant effect on the soil Pb content, and the soil lead content could reach 2 100.22 mg/kg; ③the bacteria, fungi, and actinomycetes had no significant effect; ④the absorption of lead in above ground and underground parts significantly increased. Among them, the lead content in the ground part could reach 2 524.01 mg/kg, and the lead content in the underground part could reach 1 672.94 mg/kg, the highest enrichment coefficient, transport coefficient and transport volume coefficient could reach 4.04, 1.73 and 9.84, respectively. Under lead stress, the addition of different concentrations of sulfur from external sources could promote the absorption of lead by *Arabis alpina* L, and the

收稿日期: 2021-05-17 修回日期: 2021-06-20

基金项目: 杨凌职业技术学院自然科学基金(批准号: ZK20-71)资助的课题。

第一作者简介: 李青(1990-), 女, 陕西杨凌人, 主要从事重金属污染控制研究。

number of microorganisms in the soil also changed.

**Key words:** Sulfur; Lead; *Arabis alpina* L; Soil microorganisms

土壤重金属污染已经成为制约土地发展的重要因素之一,也成为我国经济可持续发展的不可回避的重大问题<sup>[1]</sup>。工业的发展带动了采矿业的迅速发展,而由于采矿而带来的污染是不容忽视的。采矿企业的增多,影响了矿山周边的自然环境,植被破坏、土壤污染,周边农户在重金属污染的土壤上继续种植生产,从而影响了其自身的身体健康。矿区的生态环境已不允许承载更大的污染,更多的人意识到了采矿带来的环境污染以及环境保护的重要性<sup>[2]</sup>。

我国主要的铅消费领域有很多,但是在消耗的过程中,铅被回收再利用的百分比仅仅只有 25%<sup>[3]</sup>。铅通过三废等形式排放至环境中,导致了大面积的环境铅污染<sup>[4~7]</sup>。

铅在土壤中会影响植物的光合作用<sup>[8~9]</sup>、呼吸作用、细胞代谢<sup>[10]</sup>、产量及质量<sup>[11]</sup>。近年来,通过土壤—作物或土壤—动物系统进入食物链引起的 Pb 中毒比率呈逐年上升趋势<sup>[12]</sup>。因此,土壤质量的好坏决定着粮食是否安全<sup>[13]</sup>。

通过对云南省会泽铅锌矿区的植物及土壤进行采样调查发现小花南芥是重金属 Pb、Zn、Cd 的超富集植物<sup>[14]</sup>。而硫作为植物所需的中量元素之一,它虽不是植物细胞的结构性组成元素,但它却可以发挥极其重要的作用<sup>[15]</sup>。微生物因直接参与土壤物质循环和能量流动,具有维持动植物生长和净化环境污染等生态系统功能,因此,土壤微生物反映着土壤生态系统的健康状况<sup>[16]</sup>。本文通过对铅胁迫下,外源添加硫对小花南芥的土壤微生物数

量及植株铅累积特性的研究,探索在外援添加硫元素与铅胁迫下是否会产生对土壤微生物数量及植株铅累积特性的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

小花南芥幼苗采自云南省会泽铅锌矿区,采样区位于东经 103°03′~103°55′,北纬 25°48′~26°28′,海拔 2 263—2 516 m。2018 年 10 月在会泽铅锌矿区采集小花南芥幼苗,采回实验室进行盆栽实验。

### 1.2 试验设计

将长势一致的幼苗移栽到培养基质中,进行温室盆栽试验。每盆(D=25 cm)装 3 kg 土壤,种植 7 株植物。基质土壤采自云南农业大学后山农场玉米土,土壤自然风干后通过 2 mm 筛子,土样的基本理化性质见表 1。设置 Pb<sup>2+</sup> 胁迫浓度时参照土壤环境质量标准(GB15618—2018)和前期小花南芥 Pb 的累积特征,分别用 0 mg/kg、200 mg/kg、400 mg/kg、800 mg/kg 和 1 600 mg/kg 的 Pb<sup>2+</sup> (采用分析纯试剂 Pb(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub> 配置)。设置 S 素水平时参照前期硫素对小花南芥累积铅锌的影响,分别用 0 mg/kg、50 mg/kg 和 100 mg/kg 的 S (采用分析纯试剂 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 配置)。见表 2。试剂用蒸馏水溶解后均匀拌在土壤中,然后装在塑料盆平衡 30 d。试验共 15 个处理,每个处理 3 个重复,共计 45 盆,随机排列。培养期间进行常规的浇水管理。培养 60 d 收集制样。

表 1 盆栽土壤本底理化性质

| Pb(mg/kg) | pH   | 速效磷(mg/kg) | 速效钾(mg/kg) | 全氮(g/kg) | 有效硫(mg/kg) |
|-----------|------|------------|------------|----------|------------|
| 316.78    | 6.25 | 12.92      | 22.92      | 3.26     | 2.78       |

表 2 不同浓度 Pb 胁迫下,施加 S 素介导调控试验设计方案 (mg/kg)

| Pb <sup>2+</sup> 浓度 | 0        | 50        | 100        |
|---------------------|----------|-----------|------------|
| 0                   | S0P0     | S50P0     | S100P0     |
| 200                 | S0P200   | S50P200   | S100P200   |
| 400                 | S0P400   | S50P400   | S100P400   |
| 800                 | S0P800   | S50P800   | S100P800   |
| 1 600               | S0P1 600 | S50P1 600 | S100P1 600 |

### 1.3 指标测定

1.3.1 土样的采集 采集非根际土用不锈钢铁锹采集土壤装入布袋,样品常温保存。

1.3.2 土壤 pH 的测定 称取 10g 风干土样,用雷磁 pH 计测定,每个土样测定 3 次,取其中平均值作为土壤 pH 值。

1.3.3 土壤中 Pb、S 测定 称取 0.1g 风干土样,通过 1 mm 筛孔于聚四氟乙烯坩埚中,加入 10 mL HNO<sub>3</sub>,盖上盖子用 110℃ 加热 30 min,加入 8 mL

HF 1.5 mL HClO<sub>4</sub> 加热 1.5 h,升温至 200℃ 加热 1 h,取下坩埚盖加热 1.5 h,升温至 380℃,待 HClO<sub>4</sub> 冒尽,加入 3ml HNO<sub>3</sub>(1+1)溶解盐类至溶解清亮,取下冷却,加入 30 mL 蒸馏水。

用火焰原子吸收分光光度计(北京,普析通用 TAS-990 原子吸收)测定 Pb 含量,用全谱直读等离子体发射光谱仪 ICAP 6300 测定 S 含量。

1.3.4 小花南芥根际土壤微生物培养基制备 细菌培养采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基。真菌采用马丁氏—孟加拉红氯霉素培养基。放线菌采用改良高氏一号培养基。

1.3.5 土壤微生物培养 倒置培养基在恒温培养箱中,培养温度为 28~30℃,细菌培养 2~3 d,真菌培养 3~5 d,放线菌培养 5~7 d。

涂布法结果计算:

$$\text{菌数} = \frac{\text{菌落平均数} \times \text{稀释倍数} \times 20 \times \text{鲜土重}}{\text{干土重}}$$

单位 CFU/g

#### 1.4 数据分析方法

使用 SPSS20.0、Origin 9.0,对数据进行处理、统计分析和图形绘制。图表中的所有数据用 3 个重复的平均值±标准差表示,采用 SPSS20.0 进行单因素方差分析( $P < 0.05$ )和多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 硫铅处理对小花南芥土壤 pH 的影响

由图 1 可知,小花南芥土壤 pH 呈现出随铅胁迫的增加先增大后减小以及随硫浓度的增加逐渐减小的趋势,但不同处理间无显著差异,在 400 mg/kgPb 胁迫,50 mg/kgS 添加下,pH 达到最大值 6.87。经双因素方差分析发现,Pb 胁迫和 S 处理都对土壤 pH 有极显著影响,二者之间的交互作用对土壤 pH 有极显著影响。

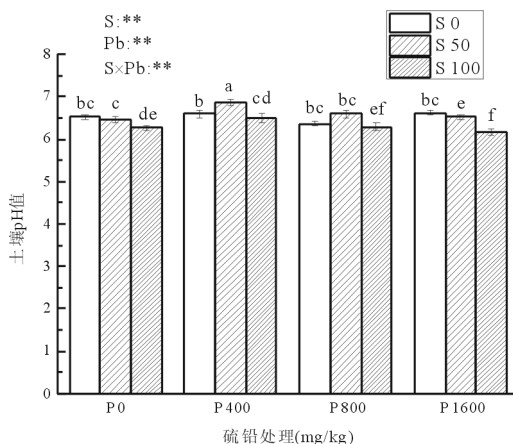


图 1 不同浓度硫铅处理对小花南芥土壤 pH 的影响

注:不同字母表示处理间差异显著

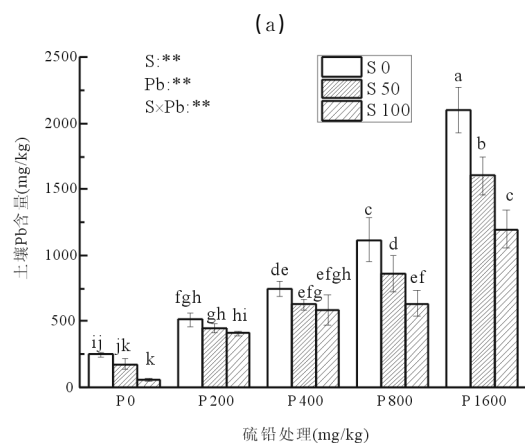
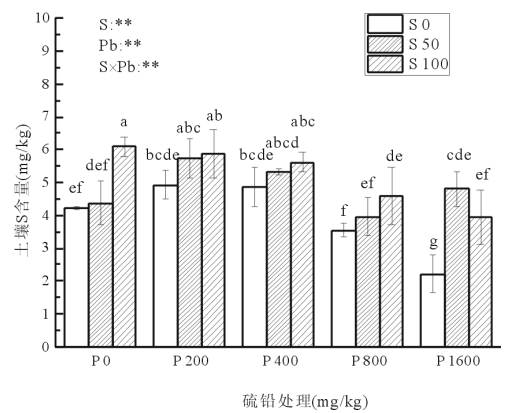
(\* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ ),下同。

### 2.2 硫铅处理对小花南芥土壤中 S 和 Pb 含量的影响

由图 2(a)可知,随着铅胁迫的增大,小花南芥土壤 S 含量先增大后减小;随着硫浓度的增大,小花南芥土壤 S 含量逐渐增大。其中,在 0 mg/kgPb 胁迫时,100 mg/kg S 添加下,土壤硫含量最高,达 5.87 mg/kg。经双因素方差分析发现,S 处理和 Pb 处理都对土壤 S 含量有极显著影响,二者之间的交互作用对土壤 S 含量有极显著影响。

由图 2(b)可知,不同铅胁迫、硫处理下小花南芥土壤中的铅含量显著高于对照( $P < 0.05$ ),随着铅胁迫的增大,小花南芥土壤 Pb 含量逐渐增大;随着硫浓度的增大,小花南芥土壤 Pb 含量逐渐减小。其中,在 1600 mg/kgPb 胁迫时,0 mg/kgS 添加下,土壤铅含量最高,达 2100.22 mg/kg。经双因素方差分析发现,Pb 胁迫和 S 处理都对土壤 Pb 含量有极显著影响,二者之间的交互作用对土壤 Pb 含量有极显著影响。

总的来说,在土壤中添加硫使得土壤中的 Pb 含量增加,从而影响了小花南芥对铅的累积。



(b)

图 2 土壤中铅、硫含量

2.3 硫铅处理对小花南芥土壤中细菌数量的影响

由图 3 表明,在 0 mg/kg、200 mg/kg、400 mg/kg Pb 处理下,随着硫浓度的增加,细菌菌数增加;在 0 mg/kg、50 mg/kg S 处理下,随着铅胁迫的增加,细菌菌数减少。经双因素方差分析发现,Pb 胁迫和 S 处理都对土壤中细菌数量无显著影响,二者之间无交互作用。总的来说,在低硫处理下,土壤中的细菌数量随铅胁迫逐渐减少,高硫处理使得土壤中细菌数量增大。

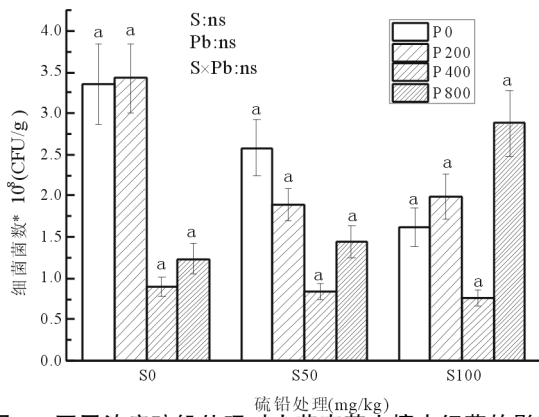


图 3 不同浓度硫铅处理对小花南芥土壤中细菌的影响

2.4 硫铅处理对小花南芥土壤中的真菌数量影响

由图 4 表明,在 200 mg/kg Pb 处理下,随着硫浓度的增加,真菌菌数增加;在 0 mg/kg、400 mg/kg Pb 处理下,随着硫浓度的增加,真菌菌数先增加后减少;而在 800 mg/kg Pb 处理下,随着硫浓度的增加,真菌菌数先减少后增加。经双因素方差分析发现,Pb 胁迫和 S 处理都对土壤中真菌数量无显著影响,二者之间无交互作用。总的来说,在铅胁迫与硫处理下,真菌数量的变化没有找到相应规律。

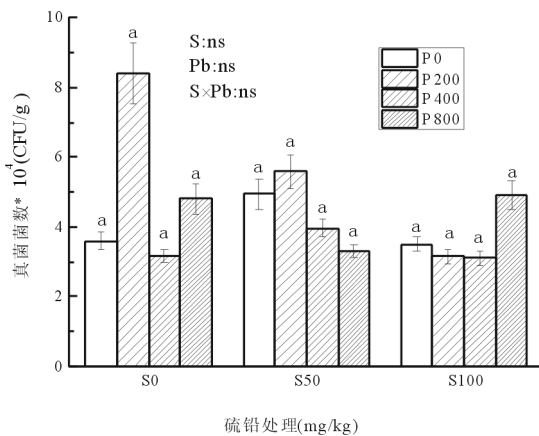


图 4 不同浓度硫铅处理对小花南芥土壤中真菌的影响

2.5 硫铅处理对小花南芥土壤中放线菌数量的影响

由图 5 可知,在 0 mg/kg、200 mg/kg、400 mg/kg Pb 处理下,随着硫浓度的增加,放线菌菌数增加;在 0 mg/kg、50 mg/kg S 处理下,随着铅浓度的增加,放线菌菌数减少。经双因素方差分析发现,Pb 胁迫和 S 处理都对土壤中放线菌数量无显著影响,二者之间无交互作用。总的来说,硫处理使得放线菌数量逐渐增加。

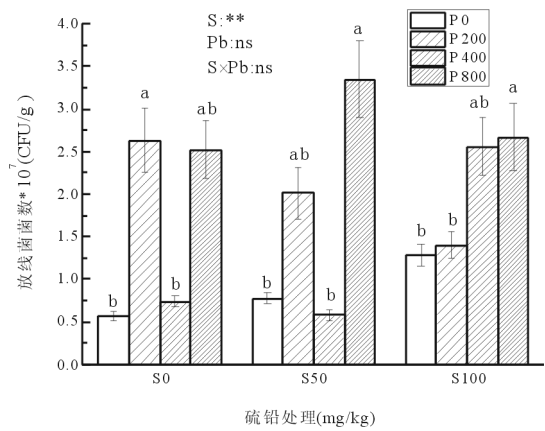


图 5 不同浓度硫铅处理对小花南芥土壤中放线菌的影响

2.6 硫铅处理下小花南芥根际土壤中微生物数量与 pH 值的相关分析

由表 3 可以看出,不同浓度硫铅处理下小花南芥根际土壤中细菌、真菌和放线菌数量都与 pH 无显著关系;细菌与真菌和放线菌呈显著相关( $P < 0.01$ ),真菌与放线菌呈显著相关( $P < 0.01$ )。

表 3 不同浓度硫铅处理下小花南芥根际土壤中微生物数量与 PH 值的相关性分析

|     | pH | 真菌    | 放线菌     | 细菌      |
|-----|----|-------|---------|---------|
| pH  | 1  | 0.036 | -0.091  | 0.105   |
| 真菌  |    | 1     | 0.694** | 0.789** |
| 放线菌 |    |       | 1       | 0.635** |
| 细菌  |    |       |         | 1       |

注:\*表示显著相关( $P < 0.05$ ),\*\*表示极显著相关( $P < 0.01$ )。

2.7 硫铅处理对小花南芥体内铅含量的影响

由图 6 可知,不同铅胁迫、硫处理下小花南芥地上部和地下部分铅含量显著高于对照( $P < 0.05$ )。在相同铅胁迫下,随着硫浓度的增高,小花南芥地上和地下部分 Pb 含量随着硫浓度的增

加逐渐增加;在相同的硫处理下,小花南芥地上和地下部分 Pb 含量随着硫浓度的增加逐渐增加。其中,小花南芥地上部在 1 600 mg/kg Pb 处理时,100 mg/kg S 添加下,铅含量达 2 524.01 mg/kg,是 0 和 50 mg/kg S 添加的 1.55 和 1.15 倍;地下部分在 800 mg/kg Pb 处理时,100 mg/kg S 添加下,铅含量达 1 672.94 mg/kg,是 0 和 50 mg/kg S 添加的 2.38 和 1.22 倍,表现出较强的 Pb 富集能力。经双因素方差分析发现,Pb 胁迫和 S 处理都对地上部 Pb 含量和根系 Pb 含量有极显著影响,二者之间交互作用对地上部 Pb 含量和根系 Pb 含量有极显著影响。总的来说,外源添加硫促进了小花南芥地上部和地下部对 Pb 的吸收。

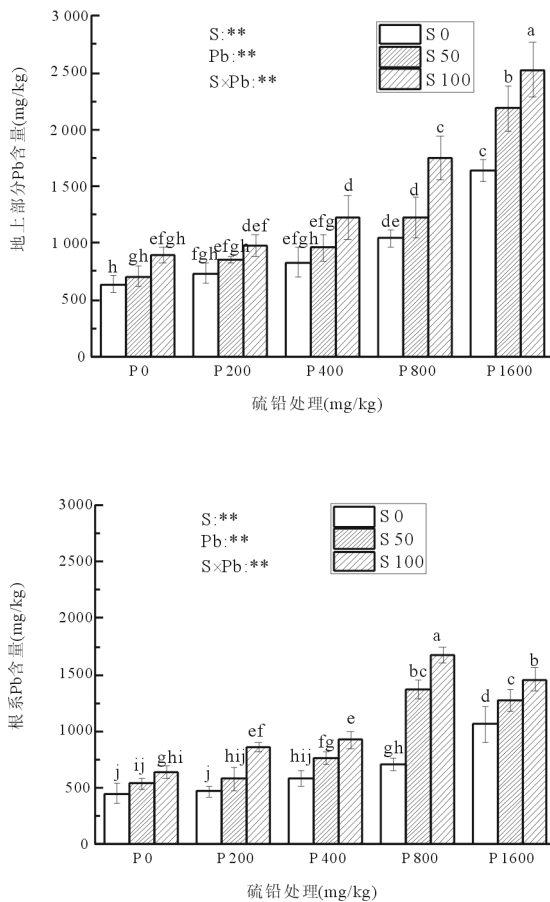


图 6 不同浓度硫铅处理对小花南芥体内铅含量的影响

## 2.8 硫铅处理对小花南芥植株铅累积特性的影响

由表 4 可知,不同铅胁迫、硫处理下,小花南芥富集系数在相同硫添加下,随着铅胁迫的增加而减小,转运系数和转运量系数基本随铅浓度的增加而增加。富集系数、转运系数和转运量系数最高分别可达 4.04、1.73 和 9.84。说明硫元素的加入对小花南芥累积铅有促进作用。

表 4 不同浓度硫铅处理对小花南芥吸收累积铅的特征

| 硫铅处理      | 富集系数 | 转运系数 | 转运量系数 |
|-----------|------|------|-------|
| S0P0      | 2.58 | 1.43 | 3.71  |
| S0P200    | 1.43 | 1.57 | 4.06  |
| S0P400    | 1.11 | 1.42 | 3.65  |
| S0P800    | 0.93 | 1.48 | 4.66  |
| S0P1600   | 0.78 | 1.54 | 4.77  |
| S50P0     | 4.04 | 1.32 | 3.56  |
| S50P200   | 1.93 | 1.48 | 3.20  |
| S50P400   | 1.53 | 1.26 | 3.88  |
| S50P800   | 1.42 | 0.89 | 3.38  |
| S50P1600  | 1.37 | 1.72 | 5.92  |
| S100P0    | 1.76 | 1.39 | 3.35  |
| S100P200  | 2.39 | 1.14 | 9.84  |
| S100P400  | 2.08 | 1.32 | 4.27  |
| S100P800  | 2.76 | 1.05 | 2.54  |
| S100P1600 | 2.11 | 1.73 | 6.64  |

## 3 讨论

重金属在土壤中的不可生物降解的特性,会对生态系统产生持久性的伤害。它降低了土壤微生物的活性、微生物的酶活性、土壤微生物的 DNA 丰富度,也影响土壤微生物的 DNA 序列<sup>[17]</sup>。其中,土壤微生物对重金属非常敏感,可能会导致细胞功能的紊乱、蛋白质变性或细胞膜完整性的破坏<sup>[17]</sup>。重金属也可能导致根褐变、坏死、黄化、叶片卷曲等植物损伤,其毒性还会抑制植物细胞内的细胞质酶,因氧化应激而导致细胞结构受损,从而影响植物的生长和代谢<sup>[18]</sup>。

植物修复技术与其它重金属修复技术相比而言,因其经济环保等优势从其它修复技术中脱颖而出,成为当今重金属修复的不可或缺的重要修复手段。所以如何强化其修复效果,拓宽超富集植物的生态适应性需要更深入研究。对超富集植物超量富集重金属研究发现,超富集植物耐重金属的主要原因在于它的根系细胞吸收和转运重金属的蛋白差异。而硫作为植物所需的中量元素之一,它虽不是植物细胞的结构性组成元素,但它却可以发挥极其重要的作用<sup>[19]</sup>。硫素是氨基酸的组成成分和蛋白质合成的必须元素,有助于酶和维生素的形成。同时,硫素还会参与植物光合作用,是叶绿素合成所必需元素之一<sup>[20]</sup>。

笔者研究发现,硫的添加会改变土壤的理化性

质,pH 值从 6.87 下降到 6.17,从而影响植物对重金属的吸收。在铅胁迫下,外源添加硫对土壤中微生物细菌、真菌、放线菌的数量无显著影响,但显著增加了小花南芥地上部与地下部对于土壤中铅的吸收。不同铅胁迫、硫处理下,小花南芥富集系数在相同硫添加下,随着铅胁迫的增加而减小,转运系数和转运量系数基本随铅浓度的增加而增加。富集系数、转运系数和转运量系数最高分别可达 4.04、1.73 和 9.84。说明硫元素的加入对小花南芥累积铅有促进作用。

#### 4 结论

Pb<sup>2+</sup> 胁迫浓度 0、200、400、800 和 1600 mg/kg (采用分析纯试剂 Pb(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub> 配置)以及 S 浓度 0、50 和 100 mg/kg (采用分析纯试剂 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 配置)条件下进行种植野生小花南芥盆栽试验:

(1) 外源添加硫可使土壤的 pH 值降低到 6.17。

(2) 硫处理使得土壤中的铅含量逐渐减少,在本实验中硫的添加量未达到极限值,后续将继续进行试验研究。

(3) 硫处理增加了土壤中细菌和放线菌的数量,而真菌数量变化没有找到规律。细菌、真菌和放线菌与铅胁迫和硫处理无显著影响。

(4) 硫处理促进了小花南芥地上部与地下部对铅的累积,增强了小花南芥对 Pb<sup>2+</sup> 胁迫的耐性。

总而言之,铅胁迫下,外源添加硫促进了小花南芥对于土壤中铅的吸收,但对于土壤微生物数量的变化并不明显。

#### 参 考 文 献:

- [1] 周志方,刘珂,曾辉祥. 土壤重金属污染治理多方演化博弈研究[J]. 生态经济, 2021, 37(04): 183-193.
- [2] 王冠卓,刘大旭,孙聪,等. 采矿行业污染治理效果与成本控制关系建模[J]. 环境保护科学, 2019, 45(04): 20-24.
- [3] 黄泽梅,周强英,李凌. 木芙蓉对土壤铅离子的耐性及转移富集特性研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2020, 45(01): 108-112.
- [4] 张鹏帅,朱旭彬,苏雪玲,等. 福州市郊农田土壤与蔬菜重金属污染状况分析[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2018, 34(03): 85-94.
- [5] 徐晨茗,鲍立宁,张瑾,等. 凤尾蕨对铅污染土壤的修复机理研究[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(02): 260-266.
- [6] 范俊楠,郭丽,张明杰,等. 湖北省重点区域及周边表层土壤重金属污染现状及评价[J]. 中国环境监测, 2020, 36(01): 96-104.
- [7] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(09): 1 689-1 692.
- [8] 姚广,高辉远,王未未,等. 铅胁迫对玉米幼苗叶片光系统功能及光合作用的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(03): 1 162-1 169.
- [9] 原海燕,郭智,黄苏珍. Pb 污染对马蔺生长、体内重金属元素积累以及叶绿体超微结构的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3 350-3 357.
- [10] Parys E, Romanowska E, Siedlecka M, *et al.* The effect of lead on photosynthesis and respiration in detached leaves and in mesophyll protoplasts of *Pisum sativum* [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 1998, 20(03): 313-322.
- [11] 杨素勤,程海宽,张彪,等. 不同品种小麦 Pb 积累差异性研究[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(05): 646-651.
- [12] 郭婧娴,张利,贾艳艳. 张家口地区 2010-2012 年间儿童 Pb 中毒情况综合分析[J]. 国际检验医学杂志, 2013, 34(14): 2 279-2 280.
- [13] 王庆海,却晓娥. 治理环境污染的绿色植物修复技术[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(02): 261-266.
- [14] 唐世荣,黄昌勇,朱祖祥. 超积累植物与找矿[J]. 物探与化探, 1997, 21(04): 263-268.
- [15] Nedelkoska T V, Doran P M. Hyperaccumulation of cadmium by hairy roots of *Thlaspi - aerulescens* [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2000, 67(05): 607- 615.
- [16] 任露陆,蔡宗平,王固宁,等. 不同钝化机制矿物对土壤重金属的钝化效果及微生物响应[J]. 农业环境科学学报: 2021,40(07):1 470-1 480.
- [17] Tang J, Zhang J, Ren L, *et al.* Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 242: 121-130.
- [18] Khalid S, Shahid M, Niazi N K, *et al.* A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 182: 247-268.
- [19] 刘祥,朱成艳. 抗重金属离子的蛋白质家族研究进展[J]. 安徽农学通报, 2007(09): 32-34.
- [20] 吴宇,高蕾,曹民杰,等. 植物硫营养代谢、调控与生物学功能[J]. 植物学报, 2007, 24(06): 735-761.