

邹 茸, 王秀斌, 迟克宇, 等. 不同品种硫肥对苋菜镉累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2135–2141.

ZOU Rong, WANG Xiu-bin, CHI Ke-yu, et al. Effects of different sulfur fertilizers on cadmium accumulation in *Amaranthus mangostanus* L.[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2135–2141.

不同品种硫肥对苋菜镉累积的影响

邹 茸¹, 王秀斌¹, 迟克宇³, 霍文敏^{1,2}, 王 丽¹, 范洪黎^{1*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部植物营养与肥料重点开放实验室, 北京 100081; 2. 中国地质大学, 北京 100083; 3. 北京建工环境修复股份有限公司, 北京 100015)

摘 要:为选择适宜种类的硫肥来辅助苋菜修复土壤Cd污染, 采用盆栽试验, 以苋菜(*Amaranthus mangostanus* L.)为供试作物, 在两种酸性土壤(黄棕壤、赤红壤)上施用硫磺、硫酸钙、硫酸铵三种不同硫肥, 探究不同特性硫肥对酸性土壤上苋菜生长及其对硫和Cd的吸收以及累积的影响。结果显示, 两种酸性土壤中施用硫肥均促进了苋菜植株对硫的吸收, 且减轻了Cd对植株的毒害作用, 苋菜的生物量显著提高。此外, 三种不同特性硫肥施入两种Cd污染的土壤, 苋菜地上和地下部Cd含量均显著增加。两种酸性土壤施用不同硫肥后, 苋菜硫和Cd累积量增加, 其中以施加硫酸铵效果最佳; 黄棕壤和赤红壤中苋菜地上部Cd累积量分别比对照高1.45倍和2.39倍; 施加硫磺后苋菜根部Cd累积量最少。硫酸铵作为含氮硫肥在黄棕壤和赤红壤上施用, 可有效辅助苋菜修复土壤Cd污染。

关键词:硫肥; 苋菜; 镉; 累积

中图分类号: S143.7 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)10-2135-07 doi:10.11654/jaes.2018-0164

Effects of different sulfur fertilizers on cadmium accumulation in *Amaranthus mangostanus* L.

ZOU Rong¹, WANG Xiu-bin¹, CHI Ke-yu³, HUO Wen-min^{1,2}, WANG Li¹, FAN Hong-li^{1*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Beijing Construction Engineering Group Environmental Remediation CO., LTD., Beijing 100015, China)

Abstract: In this study, a pot experiment was conducted to investigate the effects of three kinds of sulfur fertilizer (sulfur, calcium sulfate, ammonium sulfate) on growth and Cd and S accumulation in *Amaranthus mangostanus* L. in two acidic soils (yellow-brown soil and lateritic red soil). The purpose was to select a suitable sulfur fertilizer to assist *Amaranthus mangostanus* L. in remedying Cd-contaminated soil. The results showed that the application of S fertilizers on the two acidic soils enhanced Cd tolerance by promoting S assimilation in *Amaranthus mangostanus* L. and improved plant growth significantly. In addition, the Cd contents in the shoots and roots of *Amaranthus mangostanus* L. increased when S fertilizers were supplied to the yellow-brown and lateritic red soils, respectively. The accumulation of S and Cd increased with application of the different S fertilizers to the two acidic soils. For the yellow-brown soil and lateritic red soil, ammonium sulfate treatment led to the greatest increase in cadmium accumulation in the shoot, i.e., 1.45 and 2.39 times higher than that of CK, respectively, whereas the sulfur treatment led to the lowest. Ammonium sulfate as the nitrogen-containing sulfur fertilizer, applied on the yellow-brown and red soils, can effectively assist *Amaranthus mangostanus* L. to remedy Cd-contaminated soil.

Keywords: sulfur fertilizer species; *Amaranthus mangostanus* L.; cadmium; accumulation

收稿日期: 2018-01-30 录用日期: 2018-05-17

作者简介: 邹 茸(1993—), 女, 贵州盘县人, 硕士研究生, 主要从事重金属污染修复研究。E-mail: 1355780787@qq.com

*通信作者: 范洪黎 E-mail: fanhongli@caas.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800806); 国家自然科学基金项目(31372134)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2016YFD0800806); The National Natural Science Foundation of China (31372134)

大量重金属随工业废水和废渣等进入土壤,导致农田土壤重金属污染呈日益严重的趋势^[1-2]。重金属在“土壤-植物”体系中富集、迁移和转化^[3],毒害农作物,造成植物生长受阻和减产;同时,植物中累积的重金属又通过食物链等在人体蓄积,危害人体健康^[4]。土壤Cd的移动性强、毒性高、污染面积大。近年来研究发现,我国湘江区域Cd的潜在生态风险很高^[5],农田土壤和农作物已普遍受到了一定程度的重金属污染^[6-7]。同时,植物修复由于具有对土壤理化性质影响小、成本低、效果好等优点,日益成为污染土壤修复的重要技术^[8-10]。施肥能提高作物生物量、影响作物根系和茎叶的代谢过程,可改变土壤pH值以及携带竞争离子等,影响土壤溶液中重金属的有效性,从而影响植物对重金属的吸收与累积^[11]。因此,施肥已成为提高植物修复效率的重要辅助措施之一。

硫是植物必需的营养元素之一,在植物的光合作用、呼吸以及碳水化合物代谢过程中起着重要的作用^[12]。前人大量研究表明,在常规施肥的基础上增施硫肥可增加小麦和油菜的产量^[13],也会促进植物体内植物螯合肽(Phytochaleitins, PCs)的合成;PCs与Cd结合可降低Cd的活性,从而减轻Cd的毒害作用^[14]。硫肥形态不同对植株从土壤中吸收重Cd金属离子影响也不同。硫酸铵可调节土壤pH,富含活性基团(氨基)配位体与重金属元素Zn、Cu、Fe等络合或螯合以减弱土壤中重金属的生物有效性^[15]。硫酸盐的存在可提高土壤中可变电荷,改变土壤中Zn、Cd等重金属的植物吸附^[16]。也有研究表明,在Pb和Zn污染土壤中添加硫磺,土壤中硫酸根含量增加,土壤pH值降低,醋酸铵浸提态的Pb和Zn含量也随施硫水平的增加而增加^[17]。另外,硫磺处理下油菜吸硫量高于硫酸钾处理^[18],相比单质硫,石膏硫可更好地降低土壤中Cd的生物有效性^[19]。因此,选择适宜形态的肥料来控制Cd污染在土壤-植物中的迁移和累积,对土壤质量的改良和农业安全生产具有重要的应用价值^[20]。Bo-brzecka等^[21]通过连续三年的田间试验,观察到苋菜(*Amaranthus mangostanus* L.)的总含硫量比谷类高。目前,尽管对一些植株体内硫与Cd吸收和累积的内

在联系已开展了一系列研究^[22-24],但苋菜体内硫与Cd关联的研究鲜见。本文以苋菜为研究对象,研究不同特性硫肥料对酸性土壤中苋菜生长及硫和Cd吸收的影响,并且探讨不同特性硫肥的肥效差异,为选择适宜形态的硫肥来控制Cd污染和提高苋菜对Cd富集提供科学依据,丰富和发展硫和Cd植物体吸收的科学认识。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自珠江三角洲地带的赤红壤和长江三角洲地带的黄棕壤,其理化性质见表1。苋菜为前期筛选的Cd超富集植物天星米(*Amaranthus mangostanus* L.)^[25]。

1.2 试验设计

采用温室盆栽试验,包括硫磺(升华硫,分析纯)、硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,分析纯)、硫酸铵(分析纯)三种不同的硫源及对照(CK)共4种处理。施肥处理硫含量一致,每1.00 kg土壤含硫量为50 mg。试验中Cd的添加浓度与基肥施用量以前期苋菜对Cd污染土壤修复潜力的土培试验为依据^[25],每盆装风干土0.75 kg,每1.00 kg土壤加Cd($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$,分析纯)15 mg。在播种之前,Cd以 CdCl_2 溶液形式加入,基础肥料以基肥形式加入,使用尿素(46%,每盆321.9 mg)、磷酸氢二钾(分析纯,每盆329.1 mg)与土壤充分混匀,随机设计,重复3次。放置2周后,播种,出苗一周后定植为4~5株,生长期定期浇去离子水,保持土壤相对含水量为田间持水量的70%左右。本试验未平衡施加硫酸铵带入土壤的氮肥,因此硫酸铵处理所产生的结果是硫、氮肥共同影响的结果。

1.3 收获与测定

植株生长45 d后收获,分地上部和根部用去离子水清洗干净、105 ℃杀青30 min、70 ℃烘干。植株硫含量的测定:称取0.300 0~0.400 0 g植物样品于消煮管中,加入玻璃珠2颗和浓硝酸3 mL且加盖小漏斗过夜,再加入 HClO_4 2 mL慢慢加热至235 ℃消煮2 h。取下漏斗,加入HCl 1 mL,在150 ℃下加热20 min,冷

表1 土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil

土壤类型 Soil type	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	水解氮 Hydrolytic N/mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/ mg·kg ⁻¹	全Cd Total Cd/ mg·kg ⁻¹	有效Cd Available Cd/ mg·kg ⁻¹	有效硫 Available S/ mg·kg ⁻¹	pH	阳离子交换量 Cation exchange capacity/cmole·kg ⁻¹
黄棕壤 Yellow brown soil	33.0	86.1	9.30	25.6	0.03	0.02	90.3	6.61	10.1
赤红壤 Lateritic red soil	45.6	140	142	118	0.08	0.06	99.1	5.09	16.1

却,用蒸馏水与缓冲液定容^[26],同时做试剂空白试验。植株Cd含量测定参照食品安全国家标准GB 5009.15—2014《食品中镉的测定》:称取样品1.000 g左右,置于25 mL消煮管中,加入10 mL体积比4:1的优级纯HNO₃-HClO₄混合酸,冷消化过夜。第2 d,将消煮管置于砂浴上,在165~175 ℃下消化,直至溶液变为无色透明,稍冷却后,分别加两次约1 mL的蒸馏水排酸,蒸发浓缩消化液至2 mL左右,用5%的HCl转移并定容至10 mL比色管,同时做试剂空白试验^[27]。用ICP-AES测定其中的Cd和硫含量^[26]。根据国家标准物质测定标准GBW 10020(GSB-11)《柑橘叶成分分析标准物质》:柑橘叶Cd标准值为(0.17±0.02) mg·kg⁻¹,本试验中的柑橘叶Cd测定值为0.18 mg·kg⁻¹符合GBW 10020(GSB-11)要求。用SAS 9.4软件对试验数据进行方差分析和多重比较^[28]。根据生物富集系数和转运系数计算方法,计算植株生物富集系数和转运量系数来反映其吸收和累积重金属Cd的能力^[29]。

生物富集系数=植株地上部Cd含量(mg·kg⁻¹)/土壤中Cd含量(mg·kg⁻¹)

转运系数=植株地上部Cd含量(mg·kg⁻¹)/植株根部Cd含量(mg·kg⁻¹)

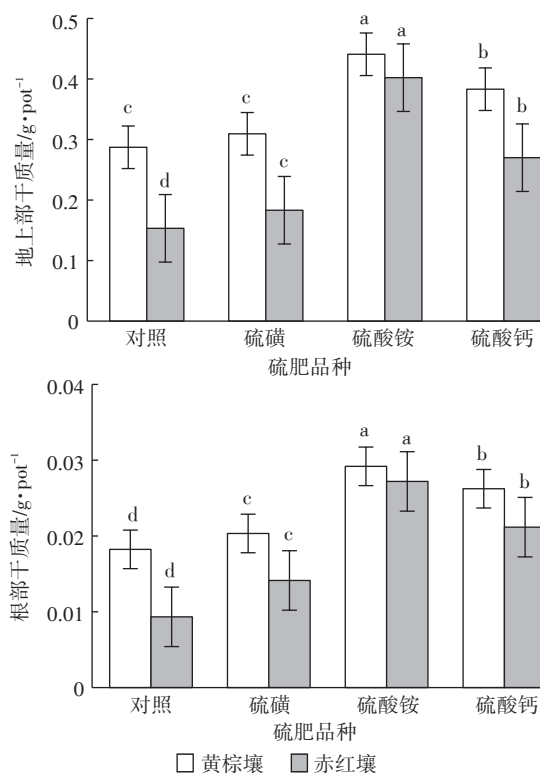
2 结果与分析

2.1 不同硫源对苋菜生物量的影响

在氮磷钾供应充足的基础上,硫供应水平提高可促进植株生长、增产,但增施硫肥的形态不同增产效果也不同。由图1可知,在黄棕壤中,硫酸铵、硫酸钙处理的地上部和根部生物量显著高于对照和硫磺处理的生物量,并且硫酸铵处理增幅最大;与对照相比,地上部、根部干质量分别增加了36.4%和37.5%,硫磺处理植株干质量增量最小且地上部干质量与对照无显著差异。在赤红壤中,不同种类的硫肥处理地上部、根部干质量差异显著,且硫肥处理后地上部与根部生物量变化趋势相同:硫酸铵处理>硫酸钙处理>硫磺处理>对照。同种硫肥在两种不同类型土壤中施用,皆表现为黄棕壤上苋菜的生物量较大。从结果可以看出,硫酸铵处理对于苋菜植株生长的促进作用最为明显,硫磺处理对于苋菜植株生长的促进作用最小。

2.2 不同硫源对苋菜吸收和累积Cd的影响

增施硫肥会促进植株的生长,也会影响土壤理化性质、改变土壤Cd的生物有效性,从而影响苋菜对



图中同一土壤类型不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

On the same type of soil, different letters on bar chart mean significant at 5% level. The same below

图1 不同硫肥品种对苋菜生物量的影响

Figure 1 Effects of different sulfuric fertilizers on the biomass of *Amaranthus mangostanus* L.

Cd的吸收和转移。由表2可见,Cd污染的两种土壤施加硫肥,各处理间苋菜植株Cd含量和Cd累积不同。黄棕壤中,不同硫肥皆促进了苋菜对土壤Cd的吸收和累积。硫酸铵处理的地上部、根部Cd含量最大,比对照分别高约60%、130%,与其他处理相比,硫酸铵处理苋菜地上部、根部Cd累积量最高,地上部和根部分别是对照的2.45、3.68倍。相对硫酸铵与硫酸钙处理,施用硫磺苋菜地上部、根部的Cd含量及其Cd累积量最小。比较苋菜植株对重金属Cd的吸收和转运能力,可发现生物富集系数大小为:硫磺>硫酸钙>对照>硫酸铵;植株转运量系数高低顺序为:硫磺>对照>硫酸钙>硫酸铵。硫磺处理下苋菜的富集、转运能力最高。

赤红壤中,各个硫肥处理地上部Cd含量显著高于对照,硫酸铵处理含量最高,比对照高29%;其中硫磺与硫酸钙处理间无显著差异,Cd累积量的变化次序大致为:硫酸铵>硫酸钙>硫磺>对照,硫酸铵处理的地上部Cd累积量是对照的3.40倍。硫酸铵处理的

根部含Cd量和累积Cd量最大,分别是对照的2.24倍和6.45倍,且与其他三个处理差异显著,而相对硫酸铵与硫酸钙处理,施用硫磺苋菜地上部、根部的Cd含量及其Cd累积量最小。其中,硫酸铵处理的生物富集系数最大,而硫磺处理的转运量系数最大。

结果显示,Cd污染的黄棕壤中,硫酸铵处理能使苋菜最大限度地吸收和累积土壤中的Cd;而硫磺处理利于苋菜植株根部更好地吸收和转移 Cd^{2+} ,减轻Cd对植株根系的毒害作用。在Cd污染的赤红壤中,硫

酸铵处理和硫磺处理均有利于Cd从苋菜植株根部向地上部转移。由苋菜地上部和根部Cd累积量可知,施加同一硫肥时,黄棕壤上苋菜Cd累积量大于赤红壤。因此,不同类型土壤的理化性状不同,其硫肥处理的效果也存在很大差异。

2.3 不同硫源对苋菜吸收和累积硫的影响

硫肥的增施可促进植株对硫的吸收和同化。由图2可知,黄棕壤中,各个硫肥处理苋菜地上部含硫量皆高于对照,且硫酸铵处理含量最高,为对照的

表2 不同硫肥对苋菜植株体内Cd浓度和累积量的影响

Table 2 Effects of different forms of sulphur on accumulation of Cd and content of Cd in *Amaranthus mangostanus* L.

土壤类型 Soil type	处理 treatments	Cd含量 Contents of Cd/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		Cd累积量 Accumulation amount of Cd/ $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$		生物富集系数 Bioaccumulation factor	转运系数 Translocation factor
		地上部	根部	地上部	根部		
黄棕壤	对照	14.13±0.10c	20.15±0.37d	4.06±0.03d	0.37±0.01d	1.08	0.60
	硫磺	21.54±0.09b	29.30±0.27c	6.66±0.01c	0.60±0.01c	1.39	0.67
	硫酸铵	22.53±0.39a	46.40±0.88a	9.93±0.28a	1.36±0.05a	0.91	0.29
	硫酸钙	21.77±0.20b	31.58±0.71b	8.24±0.20b	0.83±0.02b	1.38	0.40
赤红壤	对照	13.47±0.12c	21.13±0.43d	2.06±0.10d	0.20±0.00d	1.04	0.33
	硫磺	15.61±0.20b	29.17±0.36c	2.86±0.05c	0.41±0.00c	1.04	0.54
	硫酸铵	17.40±0.19a	47.41±0.65a	7.00±0.11a	1.29±0.04a	1.12	0.35
	硫酸钙	16.03±0.02b	38.15±0.98b	4.33±0.02b	0.81±0.02b	0.89	0.17

注:数值为平均值±标准误($n=3$)。同一土壤类型中,同列数据后不同字母表示差异达到显著水平($P<0.05$)。

Note: Values are means±SE ($n=3$). On the same type of soil, different letters within one category represent significant difference between treatments ($P<0.05$).

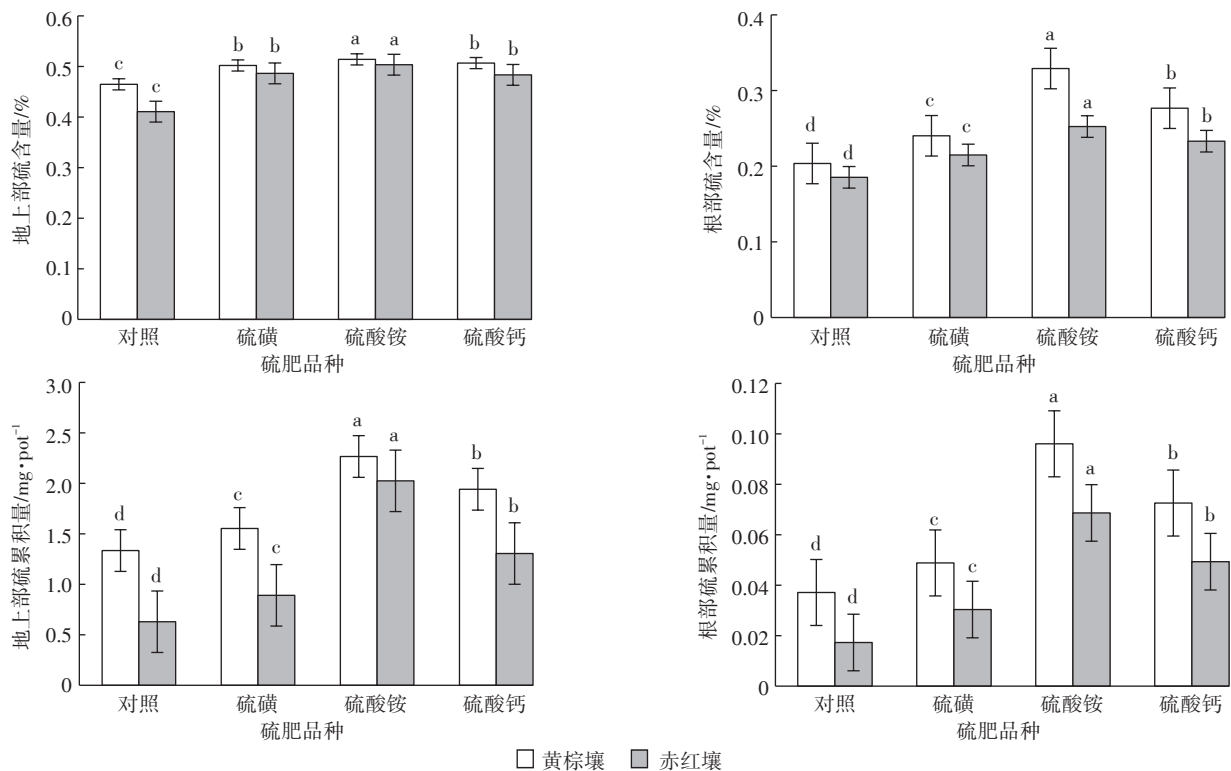


图2 不同硫肥对植株吸收和累积硫的影响

Figure 2 Effects of different forms of sulphur on uptake of S and content of S in *Amaranthus mangostanus* L.

1.11倍;根系含硫量,硫酸铵、硫酸钙和硫磺处理均高于对照,分别较对照高约18%、62%和36%。结果表明,施加不同种类的硫肥均促进了苋菜根部对硫的吸收与累积;由于硫在植物体内的移动性有限,地上部硫含量变化不及根部大。赤红壤中,硫酸铵、硫磺和硫酸钙处理的地上部硫含量分别是对照的1.18、1.23倍和1.09倍,根系硫含量各处理间存在显著差异,硫酸铵>硫酸钙>硫磺>对照。因此,施加硫肥皆可增加苋菜的硫含量,以硫酸铵效果最好。

图2可见,黄棕壤中,苋菜植株地上部总硫量为硫酸铵>硫酸钙>硫磺>对照,硫肥处理根部硫累积量皆显著高于对照,其中硫酸铵处理是对照的1.62倍;赤红壤中,硫酸钙、硫酸铵、硫磺三个处理地上部硫累积量显著高于对照,分别是对照的1.41、3.22倍和2.07倍。黄棕壤中,增施硫肥苋菜根部硫累积量增加且各处理大小顺序为:硫酸铵>硫酸钙>硫磺>对照;赤红壤中苋菜根部硫总量变化趋势与黄棕壤相同,且硫酸铵、硫酸钙和硫磺处理分别是对照的3.97、2.85倍和1.76倍。因此,在两种不同类型土壤上施加不同种类硫肥都能促进苋菜地上部对硫积累,且两种土壤上根系与地上部硫累积量变化趋势相同。结果表明,在三种硫肥处理中,硫酸铵促进植株吸收和累积硫的效果较好,而硫磺的效果较差。

3 讨论

3.1 不同硫肥对苋菜生物量及硫吸收和累积的影响

土壤中的硫主要是以硫酸根离子的形态,以质流的方式被植物主动吸收,增施适量硫肥可促进植株生长。赵玉霞等^[30]通过大田试验研究发现,增施硫肥冬小麦产量增加,全生育期内各器官的吸硫量随施硫量的增加而提高,有显著增产效果。外施硫肥也能明显缓解Cd胁迫对小白菜叶片光合作用的抑制,促进了小白菜的生长^[31]。植物在Cd污染的土壤中生长的能力与硫还原同化过程密切相关。Cd胁迫下高亲和与低亲和硫转运体基因在根中过量表达,增加植物体对 SO_4^{2-} 的吸收量,合成较多的含硫化合物用以抵抗Cd毒害^[32]。另外,增施硫肥硫素同化和谷胱甘肽代谢增强可降低Cd易位^[33],清除过量Cd引发的活性氧,同时促进植物体内非蛋白巯基(NPT)、GSH和PCs等含硫化合物合成^[34],Cd与PCs结合后,被运输至液泡,形成高分子量的复合物,从而使细胞处于无毒化状态^[35],抑制Cd向其他细胞器中转运,保证细胞器功能正常运转。也有研究发现,Cd对油菜叶片内活性氧清除酶

活力的诱导提高并非是抵抗Cd胁迫的关键途径,而与硫代谢有关的对Cd的络合及固定作用减轻对叶片的伤害才是其重要的抗Cd机制^[36]。本研究结果表明,增施硫肥皆促进了苋菜对硫的吸收和累积,提高了苋菜的生物量,不同硫肥效果不同。硫酸铵促进作用最为明显,硫酸铵不仅可被根系直接吸收,而且也为苋菜提供了一定量的氮肥,促进了苋菜对氮和硫的吸收;硫磺不能直接被植株吸收,施入土壤后需氧化为硫酸根才能被根系吸收,受到土壤微生物、通气状况、土壤温度、湿度等多种复杂因素的影响,因此,硫磺处理苋菜硫含量及累积量较少,苋菜生物量较小。另外,同种硫肥施在两种土壤上时黄棕壤苋菜生物量皆高于赤红壤,这可能是苋菜对硫的吸收和累积与土壤的物理化学性质有密切关系,还需要进一步的研究探索。

3.2 外源硫肥对苋菜吸收和累积Cd的影响

本试验中,在有效硫含量大约 $90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd污染的两种酸性土壤上,施入三种不同特性硫肥,苋菜的Cd累积量也随之增加。前人研究发现,缺硫阻碍了Cd向地上部运输,导致地上部Cd的含量明显降低^[37];李会合等^[38]研究表明,用含 $1.5 \sim 2.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫的营养液培养东南景天可显著提高其根、茎和叶的Cd含量、累积量及整株累积总量。土壤pH对Cd形态和有效性影响大,硫酸铵为生理酸性肥料,植物吸收 NH_4^+ 后,根际土壤的pH值降低;元素硫在土壤中被硫酸氧化细菌氧化成硫酸根离子且导致土壤pH下降^[39],Cd的有效性皆增加。也有前人研究发现腐植酸复合肥、硫酸铵和磷酸二铵配施以及硫酸铵、磷酸二铵和硫酸钾配施2种施肥措施的表层土壤有效Cd含量低于对照^[40],外源添加 K_2SO_4 会减少小麦(*Triticum aestivum* L.)对Cd的吸收^[41],这些研究与本试验结果有差异,可能是采用的施肥方式不同、肥料形态不一致,也可能是试验作物对Cd的吸收特性不同。从苋菜地上部、根部Cd累积量看,施加同一硫肥时,黄棕壤上苋菜Cd累积量大于赤红壤。因此可推断,不同类型土壤的理化性状不同,其硫肥处理的效果也存在很大的差异。

4 结论

在黄棕壤和赤红壤上施加不同种类的硫肥,减轻Cd对植株的毒害作用并显著提高了苋菜的生物量,促进了苋菜对硫的吸收和累积。施用不同种类的硫肥,苋菜对Cd的吸收和累积存在一定的差异。

以 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的纯硫量将不同特性硫肥施入黄

棕壤、赤红壤中,均能显著提高苋菜地上部和根部的Cd累积量,其中以施加硫酸铵效果最佳;在黄棕壤中施加硫磺,苋菜生物富集系数及转运系数最大,在赤红壤中施加硫酸铵,苋菜的富集系数最大,施加硫磺,苋菜的转运系数最大,施加硫磺更利于苋菜植株根部更好地吸收和转移Cd离子。在一定土壤Cd浓度范围内,施用硫酸铵可提高苋菜Cd累积量,且成本低、效果好、易操作,适宜推广应用。

参考文献:

- [1] 袁珊珊,肖细元,郭朝晖. 中国镉矿的区域分布及土壤镉污染风险分析[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(6): 51-56.
YUAN Shan-shan, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui. Regional distribution of cadmium minerals and risk assessment for potential cadmium pollution of soil in China[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2012, 34(6): 51-56.
- [2] 黄益宗,郝晓伟,雷 鸣,等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, 3(3): 409-417.
HUANG Yi-zong, HAO Xiao-wei, LEI Ming, et al. The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 3(3): 409-417.
- [3] 赵多勇,王 成,杨 莲,等. “环境-植物-人体”体系中重金属来源及迁移途径[J]. 农业工程学报, 2013, 3(3): 55-58.
ZHAO Duo-yong, WANG Cheng, YANG Lian, et al. Source identification and transfer route of heavy metal pollution in environment-plant-human system: A review[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 3(3): 55-58.
- [4] 安立会,王静波,付 青,等. 环境镉污染对生殖系统影响的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2011, 28(1): 89-92.
AN Li-hui, WANG Jing-bo, FU Qing, et al. Impacts of environmental cadmium pollution on reproduction system: A review of recent researches[J]. *Journal of Environment and Health*, 2011, 28(1): 89-92.
- [5] 许友泽,刘锦军,成应向,等. 湘江底泥重金属污染特征与生态风险评估[J]. 环境化学, 2016, 35(1): 189-198.
XU You-ze, LIU Jin-jun, CHENG Ying-xiang, et al. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metals contamination in sediments of the Xiangjiang River[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(1): 189-198.
- [6] 王 婷,王 静,孙红文,等. 天津农田土壤镉和汞污染及有效态提取剂筛选[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 119-124.
WANG Ting, WANG Jing, SUN Hong-wen, et al. Contamination of cadmium and mercury in farmland of Tianjin and extraction methods for predicting their bioavailability[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(1): 119-124.
- [7] 田效琴,李 卓,刘永红. 成都平原农田镉污染情况及油菜镉吸收特征[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 496-506.
TIAN Xiao-qin, LI Zhuo, LIU Yong-hong. Characteristics of cadmium uptake by rape (*B. junica*) grown in cadmium contaminated farmland on Chengdu Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3): 496-506.
- [8] 常青山,马祥庆. 重金属超富集植物筛选研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊 1): 330-335.
CHANG Qing-shan, MA Xiang-qing. Advances in the research of selecting hyperaccumulator[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Suppl 1): 330-335.
- [9] Rehman M Z U, Rizwan M, Ali S, et al. Remediation of heavy metal contaminated soils by using *Solanum nigrum*: A review[J]. *Ecotoxicol Environ Safety*, 2017, 143: 236-248.
- [10] 张继舟,王宏韬,袁 磊,等. 重金属污染土壤的植物修复技术研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(14): 134-139.
ZHANG Ji-zhou, WANG Hong-tao, YUAN Lei, et al. Research on phytoremediation of soil contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(14): 134-139.
- [11] 许杨贵,李 琦,刘 晖,等. 不同肥料对镉污染土壤中两种菜心生长与Cd吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11): 2059-2066.
XU Yang-gui, LI Qi, LIU Hui, et al. Effects of different fertilizers on two genotype Chinese flowering cabbage in Cd contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(11): 2059-2066.
- [12] 朱云集,郭天财,谢迎新,等. 施用不同种类硫肥对豫麦49产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(2): 293-297.
ZHU Yun-ji, GUO Tian-cai, XIE Ying-xin, et al. Effects of different sulphur fertilizers on yield and quality of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivar Yumai 49[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(2): 293-297.
- [13] 白灯莎·买买提艾力,徐 舫,黎育芝,等. 不同硫肥对小麦-油菜轮作体系作物产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2007, 44(3): 284-287.
BAIDENGSHA · Mai-mai-ti-ai-li, XU Fang, LU Yu-zhi, et al. Effects of sulphuric fertilizers on the yield of wheat-rape crops of rotation system[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2007, 44(3): 284-287.
- [14] Mera R, Torres E, Abalde J. Sulphate, more than a nutrient, protects the microalga *Chlamydomonas moewusii* from cadmium toxicity[J]. *Aquatic Toxicology*, 2014, 148: 92.
- [15] 吴烈善,曾东梅,莫小荣,等. 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 309-313.
WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, et al. Immobilization impact of different fixatives on heavy metals contaminated soil[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(1): 309-313.
- [16] Zhang G Y, Brummer G W, Zhang X N. Effect of sulfate on adsorption of zinc and cadmium by variable charge soils[J]. *Pedosphere*, 1998, 8(3): 245-250.
- [17] 崔岩山,王庆仁,董艺婷,等. 硫磺对土壤中Pb和Zn形态的影响[J]. 环境化学, 2004, 1(1): 46-50.
CUI Yan-shan, WANG Qing-ren, DONG Yi-ting, et al. Effect of element sulfur on speciation of Pb and Zn of contaminated soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2004, 1(1): 46-50.
- [18] 郑诗樟. 硫肥对土壤性质、重金属形态和作物生长的影响[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
ZHENG Shi-zhang. Effects of sulfur fertilizer on soil properties, speciation of heavy metals and crop growth[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [19] 王 丹,李 鑫,王代长,等. 硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收镉的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(5): 1877-1887.
WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, et al. Influence of sulfur on the formation of Fe-Mn plaque on root and uptake of Cd by rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(5): 1877-1887.

- [20] 姚建武, 王艳红, 李盟军, 等. 施肥对铅镉污染土壤上芥菜铅镉含量及生理的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 659-662.
YAO Jian-wu, WANG Yan-hong, LI Meng-jun, et al. Effect of fertilization on Pb and Cd content, and on physiological property of mustard growing in soil polluted by Pb and Cd[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3): 659-662.
- [21] Bobrzecka D, Bowszys T, Wojciechowska B, et al. Content and uptake of sulphur by amaranth (*Amaranthus cruentus* L.) in relation to macro and micronutrient fertilizer application[J]. *Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis, Agricultura*, 2000(81): 143-147.
- [22] Harada E, Yamaguchi Y, Koizumi N, et al. Cadmium stress induces production of thiol compounds and transcripts for enzymes involved in sulfur assimilation pathways in *Arabidopsis*[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2002, 159(4): 445-448.
- [23] McLaughlin M J, Lambrechts R M, Smolders E, et al. Effects of sulfate on cadmium uptake by Swiss chard: II. Effects due to sulfate addition to soil[J]. *Plant & Soil*, 1998, 202(2): 217-222.
- [24] Rabêlo F H S, Jordão L T, Lavres J. A glimpse into the symplastic and apoplastic Cd uptake by Massai grass modulated by sulfur nutrition: Plants well-nourished with S as a strategy for phytoextraction[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 121: 48-57.
- [25] Fan H L, Zhou W. Screening of Amaranth cultivars (*Amaranthus mangostanus* L.) for cadmium hyperaccumulation[J]. *Agricultural Science in China*, 2009, 8(3): 342-351.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 322-324.
LU Ru-kun. The analysis methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 1999: 322-324.
- [27] 刘春梅, 罗盛国, 刘元英. 硒对镉胁迫下寒地水稻镉含量与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 190-199.
LIU Chun-mei, LUO Sheng-guo, LIU Yuan-ying. Effects of Se on Cd content and distribution in rice plant under Cd stress in cold climate [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(1): 190-199.
- [28] 阮桂海. SAS统计分析实用大全[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
RUAN Gui-hai. SAS statistical analysis of practical complete works [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [29] 刘戈宇, 柴团耀, 孙 涛. 超富集植物遏蓝菜对重金属吸收、运输和累积的机制[J]. 生物工程学报, 2010, 26(5): 561-568.
LIU Ge-yu, CHAI Tuan-yao, SUN Tao. Heavy metal absorption, transportation and accumulation mechanisms in hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2010, 26(5): 561-568.
- [30] 赵玉霞, 李 娜, 王文岩, 等. 施用硫肥对陕西关中地区冬小麦氮、硫吸收与转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1321-1328.
ZHAO Yu-xia, LI Na, WANG Wen-yan, et al. Effects of sulfur application rate on the absorption and translocation of nitrogen and sulfur and grain yield of winter wheat in Guanzhong Area of Shaanxi[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(6): 1321-1328.
- [31] 梁泰帅, 刘昌欣, 康靖全, 等. 硫对镉胁迫下小白菜镉富集、光合速率等生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1455-1463.
LIANG Tai-shuai, LIU Chang-xin, KANG Jing-quan, et al. Effects of sulfur on cadmium accumulation, photosynthesis and some other physiological characteristics of Pakchoi (*Brassica chinensis* L.) under cadmium stresses[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8): 1455-1463.
- [32] 孙雪梅, 杨志敏. 植物的硫同化及其相关酶活性在镉胁迫下的调节[J]. 植物生理与分子生物学报, 2006, 32(1): 9-16.
SUN Xue-mei, YANG Zhi-min. Plant sulfate assimilation and regulation of the activity of related enzymes under cadmium stress[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2006, 32(1): 9-16.
- [33] Liang T, Ding H, Wang G, et al. Sulfur decreases cadmium translocation and enhances cadmium tolerance by promoting sulfur assimilation and glutathione metabolism in *Brassica chinensis* L. [J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2016, 124: 129-137.
- [34] 孙惠莉, 吕金印, 贾少磊. 硫对镉胁迫下小白菜叶片 AsA-GSH 循环和植物络合素含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(7): 1294-1301.
SUN Hui-li, LÜ Jin-yin, JIA Shao-lei. Effects of sulfur on ascorbate-glutathione cycle and the content of phytochelatin in the leaves of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(7): 1294-1301.
- [35] 潘 瑶. 硫肥缓解水稻镉毒害的机理研究[D]. 天津: 天津师范大学, 2015.
PAN Yao. Mechanism of sulfur fertilizer on alleviating cadmium toxicity in rice[D]. Tianjing: Tianjing Normal University, 2015.
- [36] 孙 新, 杨志敏, 徐朗莱. 镉诱导油菜叶片氧化胁迫及硫化物的络合作用[J]. 西北植物学报, 2003, 23(9): 1506-1511.
SUN Xin, YANG Zhi-min, XU Lang-lai. Cadmium-induced peroxidation and production of sulfur-related complex in the leaf of oilseed rape[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(9): 1506-1511.
- [37] 孙 新, 杨志敏, 徐朗莱. 缺硫条件下油菜对镉毒害的敏感性[J]. 南京农业大学学报, 2003, 26(4): 56-59.
SUN Xin, YANG Zhi-min, XU Lang-lai. Sensitivity of oilseed rape to cadmium under the sulfur deficiency[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2003, 26(4): 56-59.
- [38] 李会合, 杨肖娥. 硫对超积累东南景天镉累积、亚细胞分布和化学形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 395-402.
LI Hui-he, YANG Xiao-e. Effects of sulfur on accumulation, subcellular distribution and chemical forms of cadmium in hyperaccumulator *Sedum alfredii* Hance[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2): 395-402.
- [39] Lin H R, Shi J Y, Fu X P, et al. Effects of sulfur on microbial activity and community structure in a lead-polluted paddy soil[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1829-1834.
- [40] 孙洪欣, 薛培英, 赵全利, 等. 配施硫基肥对夏玉米镉铅累积的阻控效应[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 182-189.
SUN Hong-xin, XUE Pei-ying, ZHAO Quan-li, et al. Inhibiting Cd and Pb accumulation in summer maize by sulphate-based fertilizers application[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(1): 182-189.
- [41] Chen S, Sun L, Sun T, et al. Interaction between cadmium, lead and potassium fertilizer (K_2SO_4) in a soil-plant system[J]. *Environmental Geochemistry & Health*, 2007, 29(5): 435-446.