

土壤灭菌和杀真菌剂对蚕豆生长与镉、铅累积的影响*

曾文增, 李 博, 蒋 明, 秦 丽, 李明锐, 湛方栋, 何永美, 李天国**

(云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

摘要:【目的】研究重金属污染农田中的土壤微生物对蚕豆重金属累积的影响。【方法】以云南会泽铅锌矿周边重金属污染的农田土壤为基质, 开展室内盆栽试验, 在土壤灭菌和施杀真菌剂(苯菌灵)条件下, 测定蚕豆的生长、矿质养分、镉、铅含量与累积量。【结果】杀真菌剂处理显著增加土壤碱解氮和蚕豆地上部氮的含量, 降低蚕豆地下部磷和钾的含量, 但对蚕豆株高和生物量影响不显著; 导致蚕豆地上部的镉含量和植株镉累积量降低, 降低蚕豆对镉的富集系数和转运系数。土壤灭菌处理显著降低土壤速效钾和蚕豆地下部钾的含量, 降低蚕豆株高和生物量; 导致蚕豆植株镉、铅含量、地下部铅累积量增加, 而地下部镉累积量、地上部铅累积量下降; 增加蚕豆对镉、铅的富集系数与镉转运系数, 但减小铅的转运系数与生物转运因子。【结论】清除土壤微生物和抑制真菌均改变蚕豆植株的矿质养分、镉、铅含量与累积特征, 影响蚕豆的生长, 表明土壤微生物在蚕豆重金属耐性与累积中起着重要作用。

关键词: 重金属污染; 土壤微生物; 生物量; 矿质营养; 累积特征

中图分类号: S 154.39

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2020) 01-0164-08

Effects of Soil Sterilization and Fungicide on the Growth, Cadmium and Lead Accumulation of *Vicia faba*

ZENG Wenzeng, LI Bo, JIANG Ming, QIN Li, LI Mingrui, ZHAN Fangdong, HE Yongmei, LI Tianguo

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] To investigate the effects of soil microorganisms on the heavy metals accumulation of *Vicia faba* grown on the heavy metals polluted farmland. [Method] The *V. faba* was cultivated on the heavy metals-polluted soils from a farmland in a lead-zinc mining area of Huize County, Yunnan Province under a greenhouse condition. The growth, mineral nutrient, cadmium (Cd) and lead (Pb) content and accumulation of *V. faba* were investigated under treatments of soil sterilization and fungicide (benomyl). [Result] The fungicide treatment significantly increased the contents of alkaline hydrolysis nitrogen (N) in soils and N in shoots, decreased the phosphorus (P) and potassium (K) content in roots, but had no significant effects on the plant height and biomass of *V. faba*; reduced the Cd content in shoots, Cd accumulation in plant, and the enrichment coefficient and trans-

收稿日期: 2018-11-05

修回日期: 2019-11-24

网络首发时间: 2020-01-14 09:38:39

*基金项目: 国家自然科学基金(41661056); 云南省中青年学术和技术带头人后备人才培养项目(2018HB043); 云南省重点研发项目(2018BB017)。

作者简介: 曾文增(1994—)男, 黑龙江绥化人, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染修复研究。

E-mail: zengwenzeng23@163.com

**通信作者 Corresponding author: 李天国(1987—)男, 云南腾冲人, 博士, 讲师, 主要从事农业环境科学研究。E-mail: litianguo1987@sina.com

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20200113.1623.003.html>



port coefficient of Cd in *V. faba*. The soil sterilization significantly decreased the contents of available K in soils and K in roots, the plant height and biomass of *V. faba*; increased the Cd and Pb content in plant and the Pb accumulation in roots, but reduced the Cd accumulation in roots and Pb accumulation in shoots; increased the enrichment coefficient of Cd and Pb and transport coefficient of Cd, while decreased the transport coefficient and biological transport factor of Pb. [**Conclusion**] The elimination of microorganisms and fungi resulted in changes on the mineral nutrition, content and accumulation characteristics of Cd and Pb in *V. faba*, and influenced the plant growth. These results indicated that soil microorganisms played an important role in the tolerance and accumulation of heavy metals in *V. faba*.

Keywords: heavy metal pollution; soil microorganism; biomass; mineral nutrition; cumulative characteristics

土壤作为环境的重要组成部分, 是人类生产生活的基石, 但近年来土壤污染问题日益严峻^[1]。其中, 重金属污染作为一种严重的环境污染类型, 不能被微生物降解, 通过生物富集危害人体健康^[2], 受到人们的广泛关注。重金属污染在金属矿产周边的农田土壤体现尤为严重^[3], 所以修复被污染农田已成为目前面临的紧迫任务之一^[4-5]。

目前, 生物法是重金属污染农田土壤行之有效且成本较低的修复方法之一^[6-7], 但由于重金属污染的特性, 绝大多数植物在重金属污染土壤上的生长状况较差^[8], 限制了修复的效果^[9]。其中土壤微生物对重金属污染土壤中植物的生长和抗逆性起到重要作用^[10], 而灭菌和抑制微生物活性可以从侧面反映土壤微生物在协助植株抵御重金属胁迫中的作用^[11]。研究表明: 土壤灭菌会导致植株光合色素含量减少, 对磷的吸收能力下降, 从而导致植株生物量显著降低, 降低其对重金属的耐受性及累积能力^[12-13]; 灭菌处理显著减少了黑麦草对铬的吸收和苜蓿对镉铅的累积^[14-15]; 原状土壤中的丛枝菌根真菌 (AMF) 则可以将重金属截留在紫罗兰的根和叶中, 提升紫罗兰的重金属耐受性^[16]。

云南省号称“金属王国”, 铅锌矿储量巨大, 长期露天开采冶炼导致周边土壤污染严重^[17-18]。通过研究矿区农田土壤磁化率发现: 铅锌矿的开采导致矿区周边农田土壤达到重金属重度污染等级^[3]; 而通过连续提取法测定矿区土壤中镉、铅的形态含量, 发现环境有效态 (水溶态、离子交换态与碳酸盐态之和) 含量比较高^[19-20]; 而对部分铅锌矿周边农田作物安全评估结果表明: 作物均受到严重镉铅污染, 且可食用部分总转运因子镉

大于铅^[21-22], 对周边具有巨大的潜在危害。所以, 对矿区周边农田重金属污染开展治理与修复迫在眉睫。

因此, 以云南会泽铅锌矿周边农田重金属污染土壤开展盆栽试验, 测定灭菌及施用苯菌灵抑菌处理条件下蚕豆的株高、生物量、养分含量、镉铅含量及转运系数, 对研究土壤灭菌和施苯菌灵处理对蚕豆生长、养分、重金属累积特征的影响具有实际意义, 对分析重金属污染土壤中微生物对植物重金属耐受性有重要作用, 为重金属污染土壤的植被重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与植物

供试土壤取自云南省某铅锌矿周边重金属污染农田, 基本理化性质为: pH 值为 6.11, 有机质含量为 21.84 g/kg, 土壤全氮、全磷和全钾的含量分别为 1.54、1.75 和 7.44 g/kg, 碱解氮、速效磷和速效钾的含量分别为 38.1、71.4 和 614.3 mg/kg。土壤镉、铅含量分别为 2.75 和 398.18 mg/kg。

供试植物为蚕豆 (*Vicia faba* L.), 品种为云豆 147, 种子购于昆明市小板桥种子市场, 挑选大小相近且籽粒饱满的种子, 用 10% H₂O₂ 进行表面处理, 再用蒸馏水冲洗 3 次后, 于 25 ℃ 恒温培养箱中催芽 3 d 后播种。所施用苯菌灵产自江苏蓝丰生物化工股份有限公司, 镉铅均未检出。

1.2 试验处理

试验设置 3 个处理, 分别为原状土壤、施用苯菌灵和高温灭菌, 每个处理重复 4 次, 每盆装土 4.0 kg, 播种蚕豆种子 2 颗。灭菌处理采用高

压蒸汽灭菌法, 于 121 ℃ 高温高压 2 h; 灭菌后土壤在室内敞开放置 7 d 后用于盆栽试验。施加苯菌灵 (杀真菌剂) 抑制土壤真菌, 参照常河等^[23]的方法采用灌溉施加, 蚕豆出苗后 7 d 开始浇灌, 每 7 d 浇灌浓度为 0.4 g/kg 苯菌灵溶液 50 mL, 试验周期 3 个月; 原状土壤和土壤灭菌处理浇灌同等体积的蒸馏水代替。试验期间采用自然光照, 不施肥, 根据盆栽土壤含水状况浇灌蒸馏水, 以保持土壤湿润。

1.3 植株收获与指标测定

土壤 pH 的测定采用 pH 计 (PHS-3C, 上海精密仪器仪表有限公司), 按 2.5 : 1 加入无二氧化碳蒸馏水混合均匀后测定; 土壤镉铅含量测定处理采用王水-高氯酸消煮^[24]; 土壤碱解氮的测定采用碱解扩散法, 速效磷的测定采用碳酸氢钠提取法, 速效钾的测定采用醋酸铵提取法。

蚕豆生长 2 个月后测定各项指标。株高的测定采用钢卷尺测量; 100 ℃ 杀青 80 ℃ 烘干后称量干重; 蚕豆样品由于生物量较小, 试验将蚕豆生物量分为地上部和地下部测定, 养分的处理采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 全氮的测定采用加奈氏试剂比色法, 全磷的测定采用钼锑抗试剂比色法, 全钾以火焰分光光度计测定; 蚕豆镉铅含量的样品处理采用 HNO₃-HClO₄ 消煮, 火焰原子吸收分光光度测定^[24]; 叶片叶绿素 a、叶绿素 b 含量采用 80% 丙酮提取、分光光度法测定^[25]。

植物镉铅累积特征用富集系数、转运系数和生物转运因子表示^[26]。

富集系数 (EC)=植株体内重金属含量/土壤中重金属含量;

转运系数 (TF)=植株地上部重金属含量/地下部重金属含量;

生物转移因子 (BTF)=

$$\frac{\text{植株地上部重金属含量} \times \text{地上部生物量}}{\text{根部重金属含量} \times \text{根部生物量}}$$

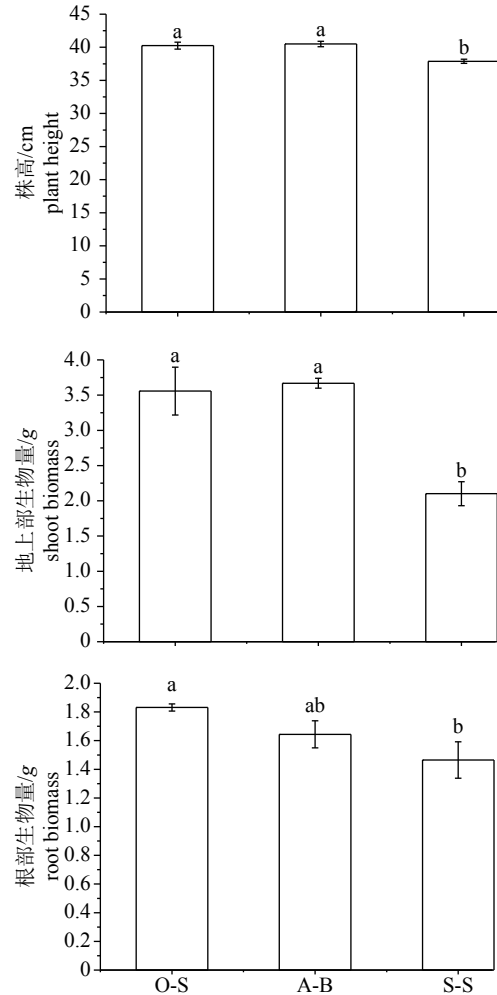
1.4 数据处理与统计分析

运用 Excel 2016 对数据进行处理, 用 SPSS 23 进行统计分析, 用 LSD 法检验处理间平均数在 0.05 水平的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 土壤灭菌和施苯菌灵对蚕豆生长的影响

由图 1 所示: 抑菌处理对蚕豆的株高和生物



注: O-S. 原状土壤; A-B. 施苯菌灵; S-S. 土壤灭菌。不同小写字母表示差异性显著 ($P < 0.05$); 下同。

Note: O-S. original soil; A-B. applying benomyl; S-S. soil sterilization. Different letters above the columns indicate significant differences at $P < 0.05$ level; the same as below.

图 1 土壤灭菌和施苯菌灵对蚕豆生长的影响

Fig. 1 Effects of sterilization and benomyl on the growth of *V. faba*

量无显著影响; 土壤灭菌处理则显著降低了蚕豆株高的 5.9%; 地上部和地下部生物量分别降低 40.9% 和 20.0%。

2.2 土壤灭菌和施苯菌灵对土壤—蚕豆体系养分含量的影响

由图 2 所示: 抑菌处理提升了土壤速效氮含量 250.5%; 土壤灭菌处理则降低了土壤速效钾含量的 14.1%。

由图 3 所示: 抑菌处理提升了蚕豆地上部氮含量的 100.7%, 分别降低根部磷和钾含量的 59.2% 和 26.8%; 土壤灭菌处理降低了蚕豆根部钾含量的 47.3%。

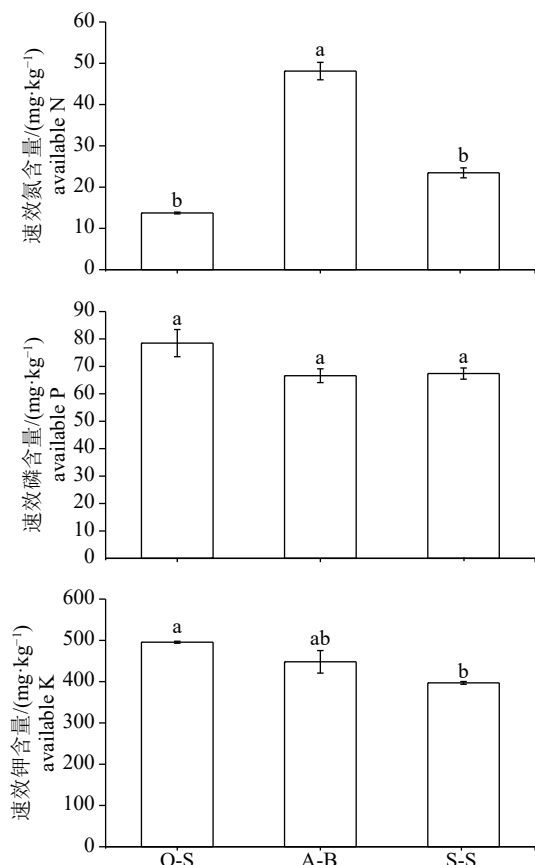


图 2 土壤灭菌和施苯菌灵对土壤速效养分含量的影响

Fig. 2 Effects of sterilization and benomyl on the soil available nutrients

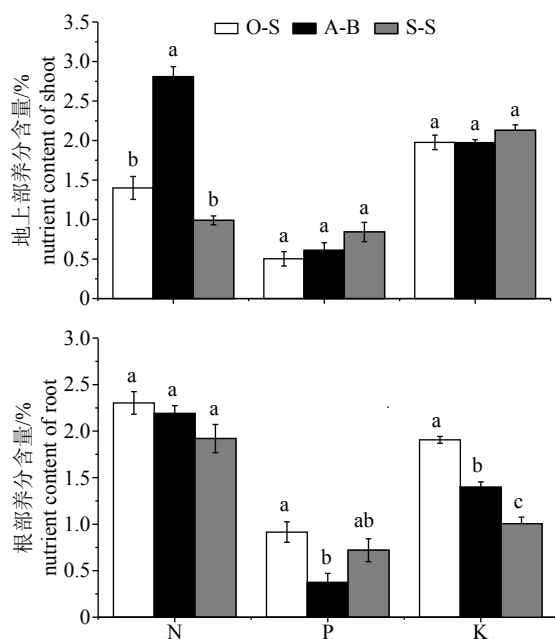


图 3 土壤灭菌和施苯菌灵对蚕豆养分含量的影响

Fig. 3 Effects of sterilization and benomyl on the nutrient content of *V. faba*

2.3 土壤灭菌和施苯菌灵对土壤 pH 和蚕豆重金属含量的影响

抑菌处理和灭菌处理均没有显著改变土壤 pH 值, pH 值为 5.92~6.02。由图 4 所示: 抑菌处理降低了蚕豆地上部镉含量的 40.2%; 土壤灭菌处理则分别提高蚕豆地上部和根部镉含量的 72.2% 和 123.9%; 地上部与根部的铅含量分别提高 39.2% 和 120.5%。

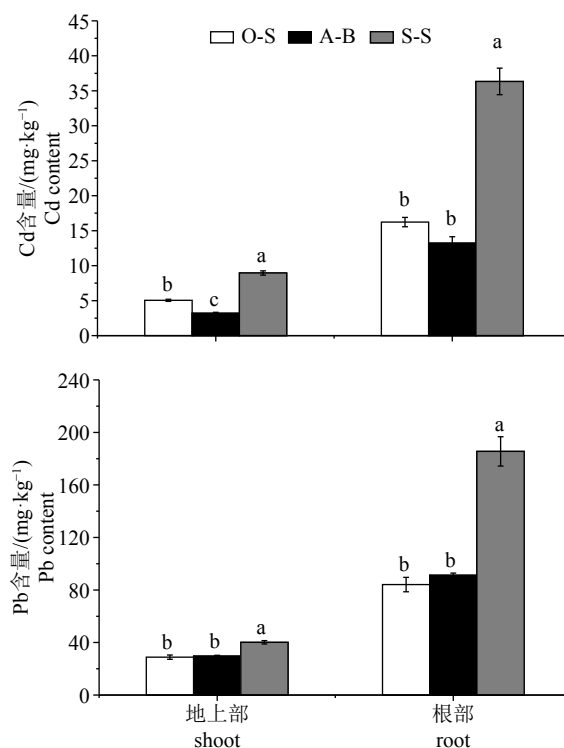


图 4 土壤灭菌和施苯菌灵对蚕豆镉、铅含量的影响

Fig. 4 Effects of sterilization and benomyl on the contents of Cd and Pb in *V. faba*

2.4 土壤灭菌和施苯菌灵对蚕豆镉、铅累积量和累积特征的影响

由图 5 所示: 抑菌处理分别降低镉在蚕豆地上部和根部累积量的 38.8% 和 14.0%; 土壤灭菌处理则分别降低蚕豆根部镉和地上部铅累积量的 15.9% 和 23.5%, 提升了根部铅累积量的 85.0%。

由表 1 所示: 抑菌处理分别降低蚕豆镉的富集系数 (EC) 和转运系数 (TF) 的 27.1% 和 32.3%; 而土壤灭菌处理分别提高蚕豆镉的 EC、TF 及铅的 EC 和生物转运因子 (BTF) 的 31.4%、74.2%、108.3% 和 54.8%, 降低了铅 TF 的 33.3%。

表 1 蚕豆的镉铅累积特征

Tab. 1 Accumulation characteristics of Cd and Pb in *Vicia faba*

处理 treatment	EC _{Cd}	TF _{Cd}	BTF _{Cd}	EC _{Pb}	TF _{Pb}	BTF _{Pb}
原状土壤 original soil	3.25±0.20 b	0.31±0.01 b	0.60±0.08 a	0.12±0.004 b	0.33±0.04 a	0.62±0.02 a
施苯菌灵 applying benomyl	2.37±0.15 c	0.21±0.02 c	0.48±0.05 a	0.12±0.001 b	0.32±0.00 a	0.73±0.04 a
土壤灭菌 soil sterilization	4.27±0.13 a	0.54±0.20 a	0.69±0.06 a	0.25±0.016 a	0.22±0.01 b	0.28±0.03 b

注：不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different letters indicate significant differences at $P<0.05$ level.

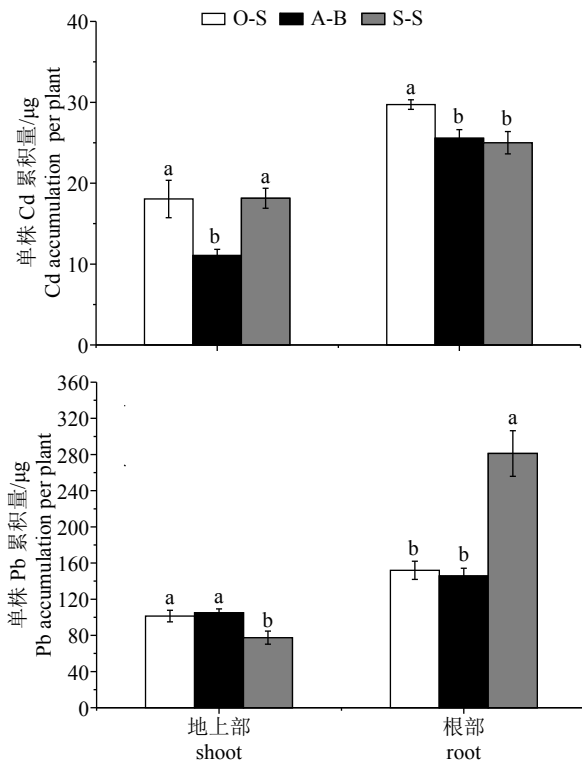


图 5 土壤灭菌和施苯菌灵对蚕豆单株镉、铅累积量的影响

Fig. 5 Effects of sterilization and benomyl on the Cd and Pb accumulation per plant of *V. faba*

3 讨论

土壤微生物可以促进植物根系发育、营养吸收、作物生长和重金属吸收,这些改变可以协助植物抵御重金属胁迫,在较高含量重金属污染条件下正常生长。研究表明:土壤微生物对植物的生长具有促进作用^[27-28]。本试验中,灭菌处理显著降低了蚕豆的株高及地上和根部生物量,而蚕豆地上部生物量与地上部镉($r=-0.817$, $n=12$, $P<0.01$)、铅含量($r=-0.803$, $P<0.01$)之间均存在极显著负相关;蚕豆根部生物量与根部铅含量之间存在显著负相关($r=-0.595$, $P<0.05$)。重金属对植物的可用性和毒害取决于植物—土壤复杂的根

际环境的交换过程。微生物在其中起到了一种类似于中枢的调节作用,其中既包括对植物生长的促进作用,也包括在协助宿主抵御重金属胁迫。

作物生长离不开土壤微生物的协助^[29],有益微生物可以与植物根系形成共生作用,促进植物对养分的吸收,微生物数量在很大程度上影响土壤养分的释放量^[30]。蚕豆作为一种豆科植物可以与根瘤菌形成共生固氮,加强植物对氮的利用^[31]。本试验中,土壤中速效氮含量与蚕豆地上部氮含量之间呈极显著正相关性($r=0.8749$, $P<0.01$)。而施苯菌灵处理土壤速效氮和蚕豆地上部氮含量较高可能原因为施用了大量苯菌灵,苯菌灵作为杀菌剂本身含氮量高,在潮湿土壤中易分解,分解产物可以被植物吸收富集^[32-33]。而土壤 AMF 有益于宿主植物吸收磷元素及其在宿主植物体内的累积,施苯菌灵抑制 AMF 导致原状土壤中根部的磷含量比施苯菌灵处理高。除此之外,还可能由于施苯菌灵刺激了菌根的抗性,致使菌根需要更多的营养发育自身,与蚕豆产生竞争作用,减少了蚕豆可利用的养分含量^[34]。微生物对重金属的固定作用很大程度依赖磷的含量^[15],施苯菌灵处理的蚕豆地上部的镉含量显著低于原状土壤也从侧面印证了这一猜想。钾对植株体内的部分酶可以起到激活作用,同时参与合成蛋白质、输送叶片糖分以及提高植株抗逆性。但由于钾主要是通过扩散向根际运动,扩散效率低将不利于植物吸收利用,而土壤微生物可以在根系周边形成菌根际,扩大根的吸收面积,也可以促进根系低分子量有机酸的分泌,有效提高植物吸收土壤中难溶性钾^[35]。在本试验中,由于灭菌处理限制了菌丝的活化吸收功能,对于土壤中钾的活化作用减弱,导致灭菌土壤中的速效钾降低,致使根部可吸收利用的钾含量减少,而施苯菌灵也限制了 AMF 菌丝生长,影响了 AMF 对钾的吸收利用,同样降低了根系中的钾含量。土壤微生物除了通

过改善植物的营养,还可以影响叶绿素的合成、分泌植物生长促进物质^[36]。因此,本试验中土壤灭菌消除土壤微生物,影响了微生物对植物养分的吸收,可能是其导致蚕豆生长显著下降的原因之一。

本试验中灭菌处理显著提高了蚕豆地上部和根部镉铅含量,施苯菌灵显著降低了蚕豆地上部镉含量。可能是因为土壤微生物增强了蚕豆对土壤中重金属胁迫的耐受性,协助宿主抵御重金属胁迫有关^[37]。土壤微生物细胞壁及表面黏液层可以直接吸附重金属,表面带有电负性的阴离子基团也有利于重金属的吸附^[38];而土壤微生物分泌的酶和低分子量有机酸可以改变重金属形态,起到固定或活化重金属的作用。例如微生物可以通过对重金属的氧化还原、配位络合、甲基化及去甲基化等作用,改变重金属离子的溶解性、迁移性,以减少毒害^[39-40];而微生物代谢的多种低分子量有机酸如甲酸、草酸、柠檬酸等,可以促进土壤中重金属的溶解,提高其生物有效性^[41],这些不同的表现与重金属自身性质、含量以及土壤微生物种类紧密相关。此外,土壤微生物还可以刺激植株激素分泌,调节植株的形态特征和生化功能^[42]。其中最具代表性的吡啶乙酸不仅能刺激根的生长、缓解各种植物症状,还可以促进植物侧根形成,通过增加根表面积,增大根部与土壤粒子之间的接触^[43],并将重金属截留在根部,阻止其进一步向上转运。重金属的富集系数是反应重金属从土壤中向植物体内转运的重要指标,反映了重金属向植物体内迁移的难易程度^[44]。本试验中,镉铅的富集系数体现为土壤灭菌最高,表现为土壤微生物可以协助植物减少对镉铅的吸收,而施苯菌灵处理镉的富集系数低于原状土壤可能原因是施苯菌灵提高了植物可利用的氮,刺激了植物的生长降低了植物体内重金属的浓度;转运系数可以用来评价重金属在植株内部的迁移能力,由于重金属的毒害性,植株一般会将其截留在根部阻止其进一步向上转运^[45]。本试验中,蚕豆的转运系数表现也与土壤微生物紧密相关,即微生物可以协助蚕豆将镉铅固定于根部,阻止其进一步向上转运;而生物转运因子则表现为土壤灭菌处理铅转运显著降低。蚕豆镉铅累积特征的不同可能是因为这两种重金属元素化学性质和含量的差异有关,植物修复在较低浓度胁迫的情

况下修复效果较好,一旦超过某个阈值土壤微生物的作用也很难体现出来。

4 结论

施苯菌灵显著降低了蚕豆根部的养分累积,降低了蚕豆地上部的镉含量和植株累积量及富集系数和转运系数;而灭菌处理降低蚕豆株高和生物量,提高了蚕豆植株镉、铅含量、地下部铅累积量,而地下部镉累积量、地上部铅累积量下降,同时增加蚕豆镉、铅的富集系数与镉转运系数,但减小铅的转运系数与生物转运因子。试验对验证土壤微生物对豆科植物重金属耐受性有重要作用。因此,我们在利用豆科作物修复重金属污染农田时,应着重考虑如何有效利用土壤微生物促进植物生长及耐受性方面的功能,以提高修复效率。

[参考文献]

- [1] 周建军,周桔,冯仁国.我国土壤重金属污染现状及治理战略[J].中国科学院院刊,2014,29(3):315.
- [2] 李静,俞天明,周洁,等.铅锌矿区及周边土壤铅、锌、镉、铜的污染健康风险评价[J].环境科学,2008,29(8):2327. DOI: 10.13227/j.hjxx.2008.08.043.
- [3] 周鸿斌,角媛梅,史正涛,等.云南泚江沿岸农田土壤磁测分析与重金属污染评价[J].农业环境科学学报,2008,27(4):1586. DOI: 10.3321/j.issn:1672-2043.2008.04.054.
- [4] 陆泗进,王业耀,何立环.会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属生态风险评价[J].生态环境学报,2014,23(11):1832. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2014.11.012.
- [5] 陆泗进,王业耀,何立环.会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属风险评价研究[J].中国环境监测,2015,31(6):77. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2015.06.014.
- [6] 聂亚平,王晓维,万进荣,等.几种重金属(Pb、Zn、Cd、Cu)的超富集植物种类及增强植物修复措施研究进展[J].生态科学,2016,35(2):174. DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2016.02.026.
- [7] 胡鹏杰,李柱,钟道旭,等.我国土壤重金属污染植物吸取修复研究进展[J].植物生理学报,2014,50(5):577. DOI: 10.13592/j.cnki.ppj.2014.1002.
- [8] NAGAJYOTI P C, LEE K D, SREEKANTH T V M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2010, 8(3): 199. DOI: 10.1007/s10311-010-0297-8.
- [9] SHEORAN V, SHEORN A S, POONIA P. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review[J]. International Journal of Soil, Sediment and Water, 2010, 3(2): 13.
- [10] SÁNCHEZ-PARDO B, ZORNOZA P. Mitigation of Cu

- stress by legume-*Rhizobium* symbiosis in white lupin and soybean plants[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 102: 1. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2014.01.016](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.01.016).
- [11] KRAUBE T, SCHÜTZE E, PHIELER R, et al. Changes in element availability induced by sterilization in heavy metal contaminated substrates: a comprehensive study[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 370: 70. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2017.11.008](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.11.008).
- [12] 何永美, 杨志新, 秦丽, 等. 土壤灭菌和杀真菌剂对紫花苜蓿生长和重金属累积的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(4): 646. DOI: [10.11654/jaes.2015.04.006](https://doi.org/10.11654/jaes.2015.04.006).
- [13] LIU H, YUAN M, TAN S Y, et al. Enhancement of arbuscular mycorrhizal fungus (*Glomus versiforme*) on the growth and Cd uptake by Cd-hyperaccumulator solanum nigrum[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 89: 44. DOI: [10.1016/j.apsoil.2015.01.006](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.01.006).
- [14] 吴泽鑫, 吴明作, 李庆云. 灭菌与非灭菌土壤中苗期黑麦草对 Cr(III) 污染的响应[J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(5): 59. DOI: [10.15985/j.cnki.1001-3865.2008.05.016](https://doi.org/10.15985/j.cnki.1001-3865.2008.05.016).
- [15] ZAEFARIAN F, REZVANI M, ARDAKANI M R, et al. Impact of mycorrhizae formation on the phosphorus and heavy-metal uptake of alfalfa[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(8): 1340. DOI: [10.1080/00103624.2012.756505](https://doi.org/10.1080/00103624.2012.756505).
- [16] SŁOMKA A, KUTA E, SZAREK-LUKASZEWSKA G, et al. Violets of the section *Melanium* their colonization by arbuscular mycorrhizal fungi and their occurrence on heavy metal heaps[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(11): 1191. DOI: [10.1016/j.jplph.2011.01.033](https://doi.org/10.1016/j.jplph.2011.01.033).
- [17] 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2884. DOI: [10.13227/j.hjxx.201707125](https://doi.org/10.13227/j.hjxx.201707125).
- [18] 吴劲楠, 龙健, 刘灵飞, 等. 某铅锌矿区农田重金属分布特征及其风险评价[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(3): 1054. DOI: [10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2018.0125](https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2018.0125).
- [19] 李瑞萍, 王安建, 曹殿华, 等. 兰坪金顶铅锌矿区土壤重金属 Zn、Cd 分布特征研究[J]. *地质论评*, 2009, 55(1): 126. DOI: [10.16509/j.georeview.2009.01.018](https://doi.org/10.16509/j.georeview.2009.01.018).
- [20] 李瑞萍, 王安建, 曹殿华, 等. 云南兰坪金顶铅锌矿区土壤中 Pb 分布特征[J]. *地球学报*, 2009, 30(1): 72. DOI: [10.3321/j.issn:1006-3021.2009.01.010](https://doi.org/10.3321/j.issn:1006-3021.2009.01.010).
- [21] 杨胜香, 易浪波, 刘佳, 等. 湘西花垣矿区蔬菜重金属污染现状及健康风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(1): 17.
- [22] 鲁荔, 杨金燕, 田丽燕, 等. 大邑铅锌矿区土壤和蔬菜重金属污染现状及评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(3): 374. DOI: [10.3969/j.issn.1673-4831.2014.03.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-4831.2014.03.018).
- [23] 常河, 朱红惠, 陈杰忠, 等. 土著 AM 真菌对荔枝实生苗生长和光合特性的影响[J]. *热带作物学报*, 2009, 30(7): 912. DOI: [10.3969/j.issn.1000-2561.2009.07.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2009.07.005).
- [24] 赵铁男. 农业化学分析[M]. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 1980.
- [25] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [26] ZU Y Q, YUAN L, CHEN J J, et al. Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in Yunnan, China[J]. *Environment International*, 2005, 31(5): 755. DOI: [10.1016/j.envint.2005.02.004](https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.02.004).
- [27] AJAY C, VIJAI K. Effect of graded levels of nitrogen and VAM on growth and flowering in calendula[J]. *Journal of Ornamental Horticulture*, 2007, 10(1): 61.
- [28] ZALLER J G, SACCANI F, FRANK T. Effects of earthworms and mycorrhizal fungi on the growth of the medicinal herb *Calendula officinalis* (Asteraceae)[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2011, 57(11): 499. DOI: [10.17221/189/2011-pse](https://doi.org/10.17221/189/2011-pse).
- [29] 薛高尚, 胡丽娟, 田云, 等. 微生物修复技术在重金属污染治理中的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(11): 266. DOI: [10.11924/j.issn.1000-6850.2011-3763](https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.2011-3763).
- [30] VAN DER HEIJDEN M G A, BARDGETT R D, VAN STRAALLEN N M. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2008, 11(3): 296. DOI: [10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x).
- [31] RICHARDSON A E, BAREA J M, MCNEILL A M, et al. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms[J]. *Plant and Soil*, 2009, 321(1/2): 305. DOI: [10.1007/s11104-009-9895-2](https://doi.org/10.1007/s11104-009-9895-2).
- [32] 王纪晶, 苗虹. 食品中苯并咪唑类农药残留检测方法研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2013, 4(3): 636.
- [33] 何强, 孔祥虹, 赵洁, 等. 固相萃取-离子交换色谱法测定浓缩苹果汁中残留的苯菌灵、多菌灵、噁菌灵[J]. *色谱*, 2008, 26(5): 563. DOI: [10.3321/j.issn:1000-8713.2008.05.008](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-8713.2008.05.008).
- [34] 沈仁芳, 赵学强. 土壤微生物在植物获得养分中的作用[J]. *生态学报*, 2015, 35(20): 6584.
- [35] 张亮, 袁玲, 黄建国. 自生固氮菌对土壤钾的活化作用[J]. *土壤学报*, 2015, 52(2): 399.
- [36] HAO X, TAGHAVI S, XIE P, et al. Phytoremediation of heavy and transition metals aided by legume-rhizobia symbiosis[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2014, 16(2): 179. DOI: [10.1080/15226514.2013.773273](https://doi.org/10.1080/15226514.2013.773273).
- [37] JOUTEY N T, SAYEL H, BAHAFID W, et al. Mechanisms of hexavalent chromium resistance and removal by microorganisms[M]// *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 233*. Cham: Springer International Publishing, 2014: 45. DOI: [10.1007/978-3-319-10479-9_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10479-9_2).
- [38] VELÁSQUEZ L, DUSSAN J. Biosorption and bioaccumulation of heavy metals on dead and living biomass of *Bacillus sphaericus*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1/2/3): 713. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2009.01.044](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.044).
- [39] 污染土壤的微生物修复原理与技术进展[J]. *土壤*, 2007, 39(4): 497. DOI: [10.13758/j.cnki.tr.2007.04.013](https://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2007.04.013).
- [40] SCHALK I J, HANNAUER M, BRAUD A. New roles for bacterial siderophores in metal transport and toler-

- ance[J]. Environmental Microbiology, 2011, 13(11): 2844. DOI: [10.1111/j.1462-2920.2011.02556.x](https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2011.02556.x).
- [41] 吴敏, 王锐, 关盼, 等. 土壤重金属污染的微生物修复机理研究进展[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2014, 30(3): 147. DOI: [10.3969/j.issn.1000-5617.2014.03.040](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-5617.2014.03.040).
- [42] GLICK B R. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications[J]. Scientifica, 2012, 2012: 1. DOI: [10.6064/2012/963401](https://doi.org/10.6064/2012/963401).
- [43] AHEMAD M, KIBRET M. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective[J]. Journal of King Saud University - Science, 2014, 26(1): 1. DOI: [10.1016/j.jksus.2013.05.001](https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.05.001).
- [44] 张家春, 曾宪平, 张珍明, 等. 不同功能区土壤-钩藤系统重金属累计特征及评价[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(20): 3746.
- [45] SARMA H, DEKA S, DEKA H M, et al. Accumulation of heavy metals in selected medicinal plants[M]//Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. New York: Springer, 2011. DOI: [10.1007/978-1-4614-0668-6_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0668-6_4).

责任编辑: 何承刚

(上接第 93 页)

- [20] 曾妮, 张建茹, 常朝阳. 中国蔷薇属植物叶表皮微形态特征及其系统学意义[J]. 广西植物, 2017, 37(2): 173. DOI: [10.11931/guihaia.gxzw201602005](https://doi.org/10.11931/guihaia.gxzw201602005).
- [21] 李芳兰, 包维楷. 植物叶片形态解剖结构对环境变化的响应与适应[J]. 植物学通报, 2005, 22(S1): 118.
- [22] 贺金生, 陈伟烈, 王勋陵. 高山栎叶的形态结构及其与生态环境的关系[J]. 植物生态学报, 1994, 18(3): 219. DOI: [10.3321/j.issn:1005-264X.1994.03.010](https://doi.org/10.3321/j.issn:1005-264X.1994.03.010).
- [23] 郑淑霞, 常朝阳, 上官周平. 辽东栎叶片气孔特征参数的时空变异[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(4): 412. DOI: [10.3321/j.issn:1006-687X.2004.04.004](https://doi.org/10.3321/j.issn:1006-687X.2004.04.004).
- [24] 张明明. 不同地区日本落叶松叶片解剖结构比较研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [25] 魏硕, 顾勇, 罗定棋, 等. K326 上部叶烘烤过程失水干燥特性研究[J]. 南方农业学报, 2017, 48(3): 146. DOI: [10.3969/j.issn.2095-1191.2017.03.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1191.2017.03.022).
- [26] 李婧婧, 黄俊华, 谢树成. 植物蜡质及其与环境的关系[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 565.
- [27] EGLINTON G, HAMILTON R J. Leaf epicuticular waxes[J]. Science, 1967, 156(3780): 1322. DOI: [10.1126/science.156.3780.1322](https://doi.org/10.1126/science.156.3780.1322).
- [28] JETTER R, SCHÄFFER S. Chemical composition of the *Prunus laurocerasus* leaf surface. Dynamic changes of the epicuticular wax film during leaf development[J]. Plant Physiology, 2001, 126(4): 1725. DOI: [10.1104/pp.126.4.1725](https://doi.org/10.1104/pp.126.4.1725).
- [29] 张海禄, 齐军仓, 韦鹏飞. 大麦叶片表皮蜡质含量的动态变化[J]. 西北农业学报, 2013, 22(4): 49. DOI: [10.7606/j.issn.1004-1389.2013.04.010](https://doi.org/10.7606/j.issn.1004-1389.2013.04.010).
- [30] BARREAR R, WRENSMAN E T. Density and distribution on the leaves of certain tobacco varieties and hybrids[J]. Tobacco Science, 1996(10): 157.
- [31] 杨铁钊, 李伟, 李钦奎, 等. 烤烟叶面腺毛密度及其分泌物变化动态的相关分析[J]. 中国烟草科学, 2005, 26(1): 43. DOI: [10.3969/j.issn.1007-5119.2005.01.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-5119.2005.01.014).
- [32] 史宏志, 官春云. 烟草腺毛分泌物的化学成分及遗传[J]. 作物研究, 1995(3): 46. DOI: [10.16848/j.cnki.issn.1001-5280.1995.03.015](https://doi.org/10.16848/j.cnki.issn.1001-5280.1995.03.015).

责任编辑: 何承刚