

引文格式: 王召娣, MASIXONXAY Kuwait, 王俊乐, 等. 土壤灭菌和杀真菌剂对大豆生长和重金属累积的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(5): 151–159. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202309018](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202309018)

土壤灭菌和杀真菌剂对大豆生长和 重金属累积的影响*

王召娣, MASIXONXAY Kuwait, 王俊乐, 李明锐, 秦 丽, 湛方栋, 杨志新**
(云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 【目的】研究土壤灭菌和杀真菌剂(苯菌灵)对大豆生长和重金属累积的影响。【方法】以污染农田土壤为基质开展室内盆栽试验,在土壤灭菌和施用苯菌灵条件下,测定大豆的生长指标、叶绿素含量、抗氧化生理指标、重金属(铅、锌、镉和铜)含量与累积量以及土壤重金属有效态含量。【结果】与原状土壤相比,土壤灭菌处理导致大豆株高、茎叶和果实生物量分别降低21.00%、43.92%和44.47%,但可以使根系生物量增加56.57%。土壤灭菌和施用苯菌灵处理均可显著增加土壤有效态铅含量,增幅分别为160.62%和179.00%;均可显著降低土壤有效态锌含量,降幅分别为33.82%和17.37%。土壤灭菌还可显著增加大豆根系中的锌、镉含量以及铅、锌、镉、铜累积量,显著降低大豆茎叶和果实中的铅、铜累积量,增加铅、锌和镉的富集系数。施用苯菌灵可显著增加类胡萝卜素以及茎叶和根系中的铅含量,增幅分别为77.00%、36.87%和12.43%;显著增加大豆茎叶中的铅累积量;显著增加铅的富集系数和转运系数;但对大豆生长、抗氧化生理及其他重金属累积无显著影响。【结论】完全消除土壤微生物抑制了大豆的生长,并显著降低了大豆对重金属的耐性与累积能力,说明土壤微生物在大豆生长和重金属耐性方面有重要作用。

关键词: 土壤灭菌; 土壤微生物; 生长生理; 重金属含量; 土壤重金属有效态

中图分类号: S565.101

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X(2024)05-0151-09

Effects of Soil Sterilization and Fungicide Application on Growth and Heavy Metal Accumulation in Soybean

WANG Zhaodi, MASIXONXAY Kuwait, WANG Junle, LI Mingrui,
QIN Li, ZHAN Fangdong, YANG Zhixin

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

Abstract: [Purpose] To study the effects of soil sterilization and the fungicide benomyl on soybean growth and heavy metal accumulation. [Methods] Taking polluted farmland soil as the substrate, indoor pot experiments were carried out to determine the growth indexes, chlorophyll content, antioxidant physiological indicators, content and accumulation of heavy metals lead (Pb), zinc (Zn), cadmium (Cd), cuprum (Cu) of soybean, and the available content of heavy metals in soil under the conditions of soil sterilization and benomyl application. [Results] Compared with original soil, under soil sterilization treatment, the plant height, stem and leaf biomass, and fruit biomass of soybeans

收稿日期: 2023-09-15

修回日期: 2024-09-11

网络首发日期: 2024-10-08

*基金项目: 国家自然科学基金项目(42177381, 42267002); 云南省吴龙华专家工作站(202305AF150042)。

作者简介: 王召娣(1998—), 女, 云南曲靖人, 在读硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染修复研究。

E-mail: q13769831504w@163.com

**通信作者 Corresponding author: 杨志新(1969—), 男, 云南大理人, 硕士, 副教授, 主要从事烟草栽培、

烟叶复烤工艺和卷烟工艺研究。E-mail: 1213594226@163.com

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20241008.0915.002>



decreased by 21.00%, 43.92%, and 44.47%, respectively; but the root biomass increased by 56.57%. Soil sterilization and benomyl treatments significantly increased the soil available Pb content, by 160.62% and 179.00%, respectively; and significantly reduced soil available Zn content by 33.82% and 17.37%, respectively. Soil sterilization also significantly increased the contents of Zn and Cd, and the accumulation of Pb, Zn, Cd, and Cu in soybean roots, and significantly decreased the accumulation of Pb and Cu in soybean stems, leaves and fruits, and also increased the enrichment coefficient of Pb, Zn, and Cd. The application of benomyl significantly increased carotenoid and Pb content in stems, leaves, and roots, by 77.00%, 36.87%, and 12.43%, respectively; and significantly increased the accumulation of Pb in soybean stems and leaves; the enrichment coefficient and transport coefficient of Pb were increased significantly; but there was no significant effect on the soybean growth, antioxidant physiology, and other heavy metal accumulation. [**Conclusion**] The complete elimination of soil microbes inhibits soybean growth and significantly reduce the plant's ability to tolerate and accumulate heavy metals, indicating that soil microorganisms play a crucial role in soybean growth and heavy metal tolerance.

Keywords: soil sterilization; soil microorganisms; growth physiology; heavy metal content; available heavy metals in soil

由于矿区不合理开采、工业“三废”排放、农药和化肥不合理使用等导致土壤中的重金属大量累积^[1], 土壤重金属污染已被公认为农业生态系统可持续发展的严重危害之一。重金属是指密度大于 5 g/cm³ 的金属元素, 植物在吸收重金属后会在其体内累积, 影响其抗氧化生理活性^[2], 抑制生长^[3]。植物大豆 (*Glycine max* L.) 生长迅速, 具有耐旱、抗寒、耐盐碱等优良特性, 且其籽粒对部分重金属的累积量低^[4], 可作为土壤重金属污染地区的经济作物之一。

在重金属胁迫下, 土壤微生物对促进植物生长和重金属耐性方面具有重要作用。土壤微生物是土壤的重要组成部分, 且具有多种功能, 如改善土壤质量、促进植物生长、解毒和从土壤中去除重金属^[5]。土壤微生物, 特别是根际微生物在吸收和利用植物提供的营养物质 (包括有机酸、氨基酸等) 的同时, 可以代谢这些营养物质以促进植物生长; 利用根际微生物的代谢物、氧化/还原反应等来改变土壤中重金属的生物有效性, 可以增强植物根系对重金属的吸收^[6]。已有研究表明: 根瘤菌^[7-8]、丛枝菌根真菌 (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)^[9-10]等微生物对植物耐重金属胁迫具有重要作用。此外, 重金属污染土壤中还存在其他有益微生物, 长期适应重金属胁迫并进化的土壤微生物也对重金属具有很强的耐受性, 其对植物生长与重金属耐受的影响^[11-12]已引起极大

的关注。高压灭菌和抑制微生物活性可以反映土壤微生物对植物生长及抵御重金属的重要作用。有研究表明: 土壤灭菌可减少植株的光合色素含量, 显著降低植株生物量, 降低植株对重金属的耐性及累积能力^[13]。为阐释土壤微生物对大豆耐重金属和累积能力的重要作用, 本研究以重金属污染土壤为基质, 分析土壤高温灭菌和施用苯菌灵对大豆生长、叶片抗逆性 (可溶性蛋白、丙二醛和非蛋白巯基含量以及总抗氧化力)、重金属 (Pb、Zn、Cd 和 Cu) 含量和累积量以及根际土壤有效态重金属含量的影响, 以期为重金属污染土壤地区的经济作物种植提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和植物

供试土壤为山原红壤, 取自云南省会泽铅锌冶炼厂周边污染的农田。在阴凉通风处自然风干, 去除植物残体, 过 8 目筛, 供盆栽试验使用。其基本理化性质为: pH 值为 6.91, 有机质含量 28.7 g/kg, 全氮含量 2.2 g/kg, 全磷含量 2.5 g/kg, 全钾含量 6.5 g/kg, 碱解氮含量 72.6 mg/kg, 速效磷含量 38.5 mg/kg, 速效钾含量 147.8 mg/kg, 铅 (Pb)、锌 (Zn)、镉 (Cd)、铜 (Cu) 全量分别为 684.8、371.7、6.3 和 118.3 mg/kg。

供试大豆品种为云黄 14。选择大小相同、籽粒饱满的种子, 用 10% 过氧化氢表面消毒 (用玻

璃棒搅拌 10 min) 后, 用蒸馏水洗净, 置于放有湿润滤纸的培养皿中, 再放入 25 ℃ 恒温培养箱中催芽 3 d, 种子出芽后进行移栽。

1.2 盆栽试验

盆栽试验在云南农业大学后山试验大棚内进行。试验设原状土壤(对照组)、施用苯菌灵和土壤灭菌 3 种处理, 选用直径 25 cm、高 20 cm 的花盆, 每盆装土样 3.0 kg。每个处理重复 4 次, 共 12 盆。施用苯菌灵处理: 于大豆出苗后的第 7 天开始在盆栽土壤中均匀喷洒 0.4 g/kg 苯菌灵溶液, 每 7 d 喷洒 50 mL。土壤灭菌处理: 将土壤放入高压蒸汽灭菌锅, 121 ℃ 高温灭菌 120 min, 之后于常温下放置 7 d, 备用。原状土壤和土壤灭菌处理每 7 d 喷洒蒸馏水 50 mL。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生长指标

种植 4 个月后收获大豆植株。收获时, 用直尺测定植株茎基部到主茎顶部的高度, 即为株高。将大豆植株分为茎叶、根系和果实, 用蒸馏水清洗, 于 105 ℃ 烘箱 (101 型, 北京市永光明仪器有限公司) 杀青 30 min, 然后在 75 ℃ 下烘干至恒质量, 用万分之一天平称量, 得到大豆植株茎叶、根系和果实的生物量。

1.3.2 光合色素含量

采用紫外分光光度法测定。取新鲜植物叶片 0.2 g, 加入 80% 丙醇研磨至充分磨碎, 用 25 mL 容量瓶过滤、定容; 再用紫外分光光度计 (Evolution 201 紫外—可见分光光度计, 赛默飞世尔科技有限公司, 美国) 分别于波长 663、646 和 470 nm 处测定叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的吸光值 (A), 并计算叶绿素含量, 计算公式为:

$$C_a = 12.21A_{663} - 2.81A_{646};$$

$$C_b = 20.13A_{646} - 5.03A_{663};$$

$$C_x = (1000A_{470} - 3.27C_a - 104C_b)/229;$$

$$C_T = C_a + C_b。$$

式中: C_a 为叶绿素 a 含量; C_b 为叶绿素 b 含量; C_x 为类胡萝卜素含量; C_T 为叶绿素含量。

1.3.3 抗逆性指标

称取大豆叶片鲜样 0.5 g, 在预冷的研钵中将样品研磨成匀浆, 采用 0.9% 的生理盐水 (10 mL) 将样品匀浆转移至离心管, 于 4 ℃、12000 r/min

离心 20 min, 取上清液, 置于冰上待测。采用分光光度法测定叶片可溶性蛋白、丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 和非蛋白巯基 (non-protein sulfhydryl group, NP-SH) 的含量以及总抗氧化力 (total antioxidant capacity, T-AOC)。试验所用试剂盒由南京建成生物工程研究所生产。

1.3.4 重金属含量和累积量

称取经烘干、粉碎、过 0.25 mm 筛的大豆植株干样 0.5 g, 用硝酸—高氯酸 (体积比为 4:1) 湿法消解, 过滤后定容至 50 mL 容量瓶中, 采用火焰原子吸收分光光度法 (北京普析通用 TAS-990) 测定大豆植株各部位重金属的浓度^[14], 并计算重金属含量及累积量。重金属累积量=重金属含量×生物量。

植物收获后, 采集植物根系周边土壤, 于室内自然风干后过 1 mm 筛, 采用乙基三胺五乙酸—三乙醇胺 (DTPA-TEA) 作为提取剂, 提取土壤中有效态 Pb、Zn、Cd、Cu 元素, 再采用火焰原子吸收分光光度法测定土壤有效态重金属的浓度^[14]。

1.3.5 重金属富集系数和转运系数

富集系数 (enrichment coefficient, EC) 表示大豆植株对重金属的吸收能力; 转移系数 (transport coefficient, TF) 表示重金属在地上部分的占比。EC=大豆植株重金属含量/土壤重金属含量; TF=地上部重金属含量/根系重金属含量。

1.4 数据处理与统计分析

采用 SPSS 25.0 的最小显著性差异法 (LSD) 检测数据在 0.05 水平上的差异显著性; 采用 OriginPro 9.0 绘图。数据采用 4 次重复的平均值, 表示为“平均值±标准差”。

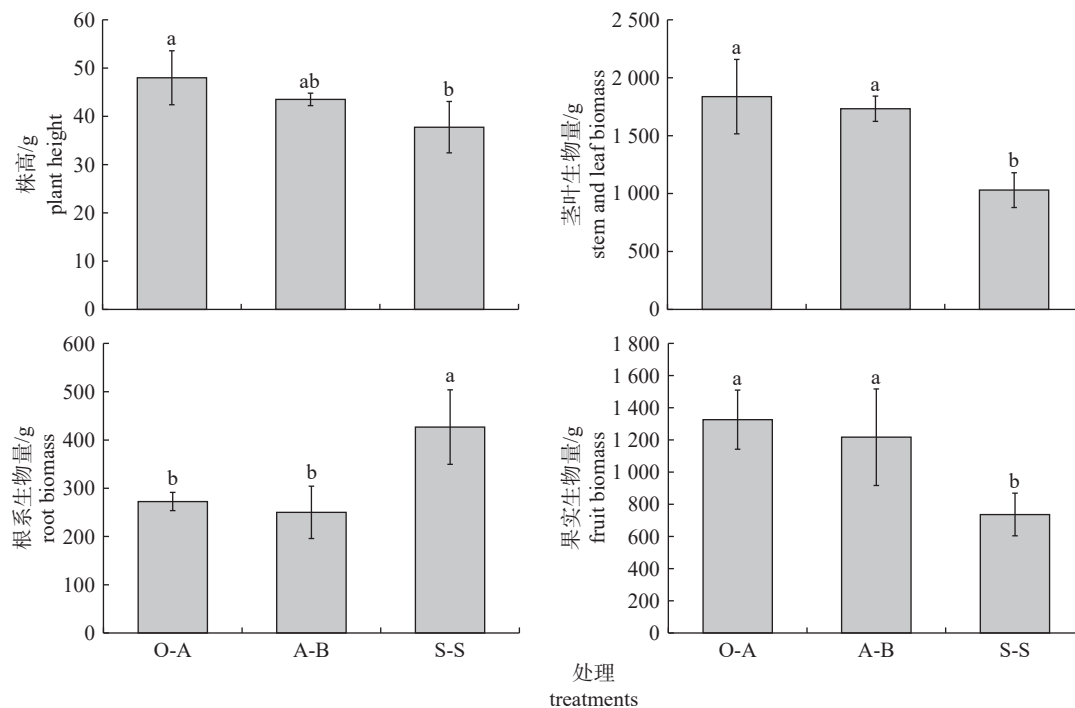
2 结果与分析

2.1 对大豆株高和生物量的影响

由图 1 可知: 与原状土壤相比, 土壤灭菌处理显著降低了大豆的株高、茎叶和果实生物量 ($P<0.05$), 降幅分别为 21.00%、43.92% 和 44.47%, 但显著增加了根系生物量, 增幅为 56.57% ($P<0.05$); 而施用苯菌灵处理的大豆株高以及茎叶、果实和根系生物量与原状土壤处理无显著差异。

2.2 对大豆光合色素含量的影响

由图 2 可知: 与原状土壤相比, 土壤灭菌和施用苯菌灵处理对大豆叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 含量无显著影响; 施用苯菌灵处理可显著增加类



注: O-A. 原状土壤, A-B. 施用苯菌灵, S-S. 土壤灭菌; 不同小写字母表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$); 下同。

Note: O-A. original soil, A-B. applying benomyl; S-S. soil sterilization; different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$); the same as below.

图 1 土壤灭菌和施用苯菌灵对大豆植株株高和生物量的影响

Fig. 1 Effects of soil sterilization and benomyl application on the plant height and biomass of soybeans

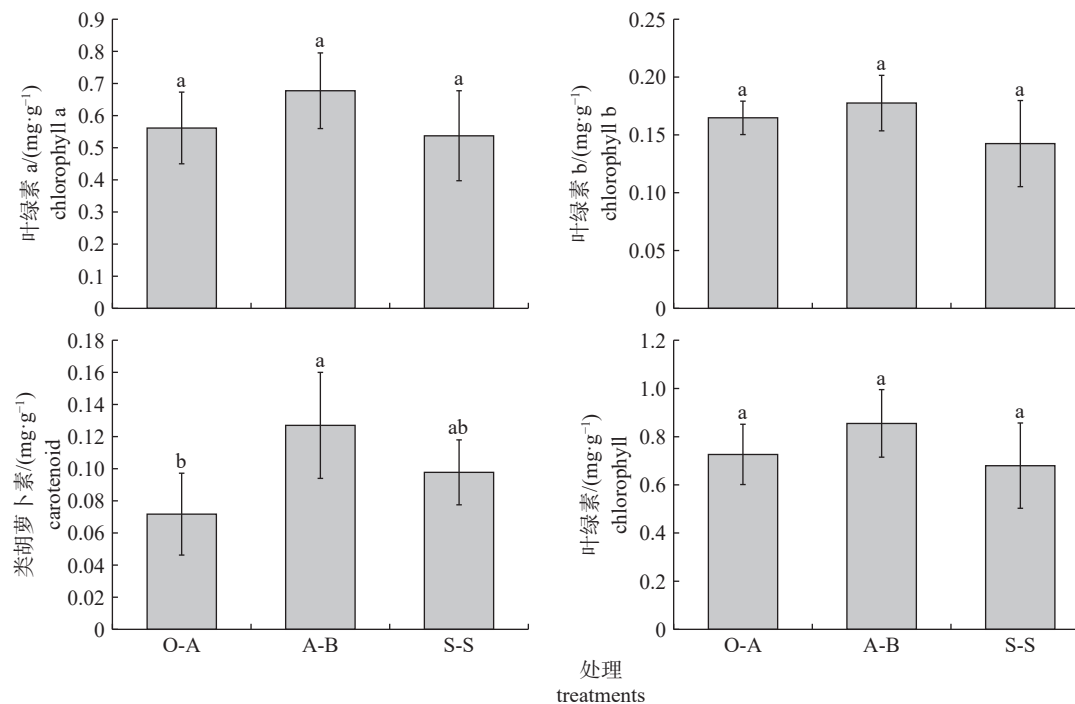


图 2 土壤灭菌和施用苯菌灵对大豆植株叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effects of soil sterilization and benomyl application on the chlorophyll content of soybeans

胡萝卜素含量,增幅为 77.00%;土壤灭菌处理对类胡萝卜素含量无显著影响。

2.3 对大豆叶片部分抗氧化生理指标的影响
由图 3 可知:与原状土壤相比,施用苯菌灵

处理对大豆的可溶性蛋白、MDA 和 NP-SH 含量以及 T-AOC 无显著影响; 土壤灭菌处理可显著增加 NP-SH 含量, 增幅为 163.94%, 但对可溶性蛋白和 MDA 含量以及 T-AOC 无显著影响。

2.4 对大豆根际土壤有效态重金属含量的影响

由图 4 可知: 与原状土壤相比, 土壤灭菌和施用苯菌灵处理均可显著增加大豆根际土壤中的有效态 Pb 含量, 增幅分别为 160.62% 和 179.00%;

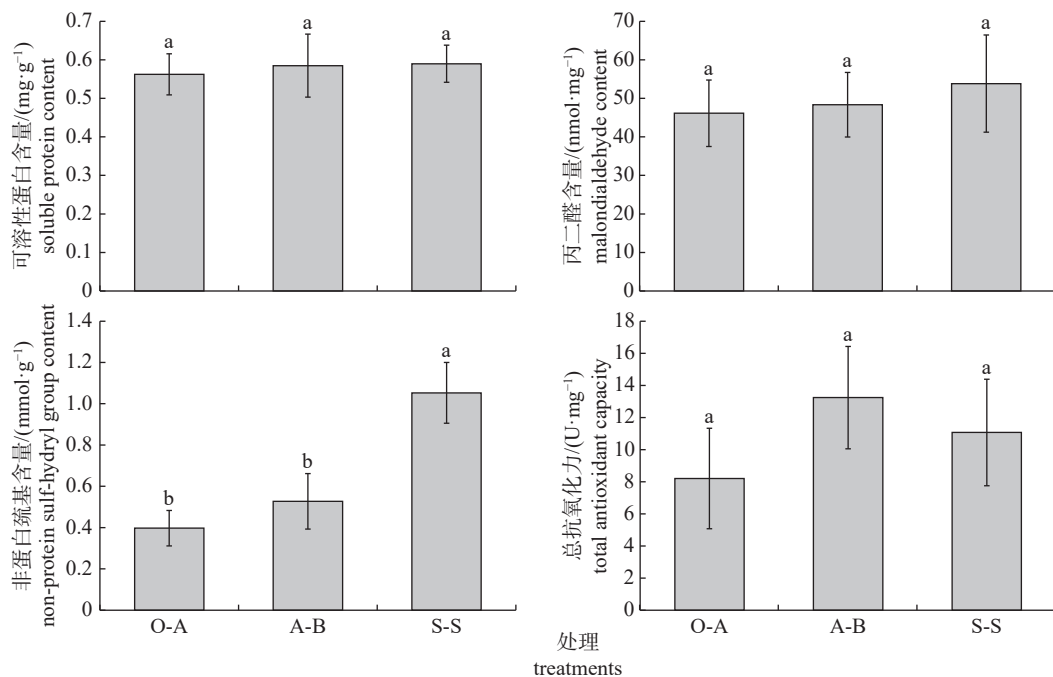


图 3 土壤灭菌和施用苯菌灵对大豆叶片抗氧化生理指标的影响

Fig. 3 Effects of soil sterilization and benomyl application on the antioxidant physiological indicators of soybeans

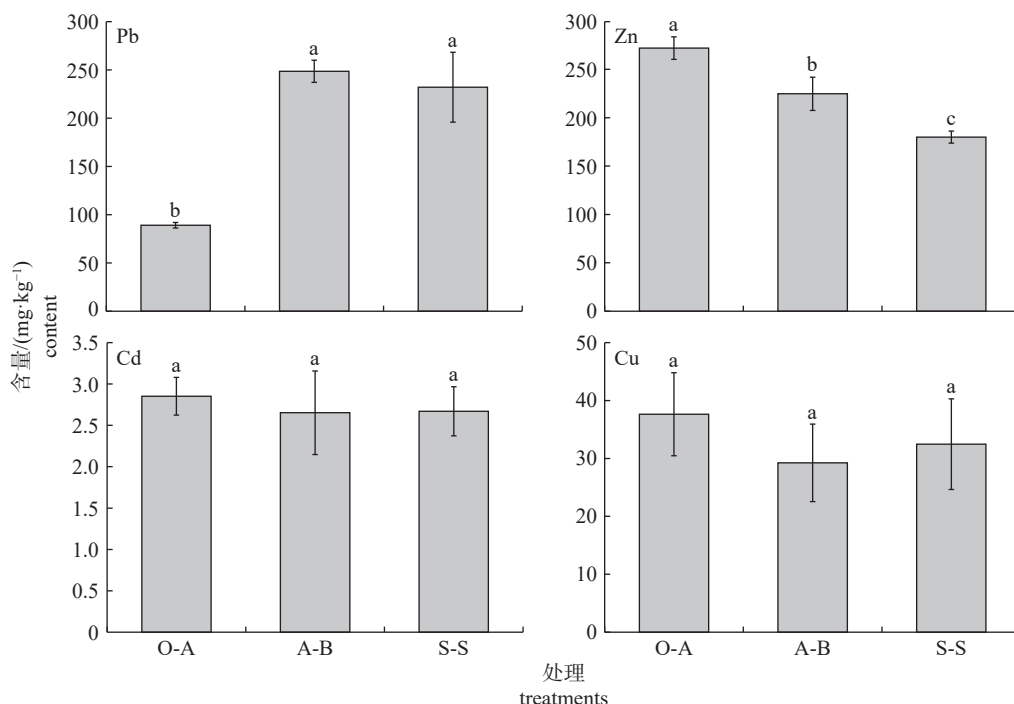


图 4 土壤灭菌和施用苯菌灵对大豆根际土壤有效态重金属含量的影响

Fig. 4 Effects of soil sterilization and benomyl application on the content of available heavy metals in soybean rhizosphere soil

可显著降低土壤中的有效态 Zn 含量, 降幅分别为 33.82% 和 17.37%; 土壤中有有效态 Cd 和 Cu 的含量分别为 2.67~2.85 和 29.25~37.63 mg/kg, 且处理间无显著差异。

2.5 对大豆重金属含量和累积量的影响

由图 5 可知: 与原状土壤相比, 土壤灭菌处理可显著增加大豆茎叶中的 Pb、Zn 含量, 根系中的 Zn、Cd 含量以及果实中的 Pb、Cd 含量, 增幅分别为 10.24%、42.44%, 74.00%、190.43% 及 14.76%、89.39%; 可显著降低大豆茎叶中的 Cd 含量、果实中的 Cu 含量, 降幅分别为 38.02% 和 37.04%。施用苯菌灵可显著增加茎叶和根系中的 Pb 含量, 增幅分别为 36.87% 和 12.43%。

由图 6 可知: 与原状土壤相比, 土壤灭菌处理可显著增加大豆植株根系中的 Pb、Zn、Cd、Cu 累积量, 增幅分别为 68.69%、167.93%、332.67% 和 42.83%; 可显著降低茎叶中的 Pb、Cd、Cu 累积量以及果实中的 Pb、Zn、Cu 累积量, 降幅分别为 38.38%、65.81%、49.40% 和 36.60%、40.24%、65.00%。施用苯菌灵处理可显著增加大豆茎叶中的 Pb 累积量, 增幅为 28.63%; 而对其他重金属累积量无显著影响。土壤灭菌条件下, 植株对 Pb、Zn、Cu 的总累积量分别下降 21.07%、1.11% 和 41.14%, 对 Cd 的总累积量增加 18.43%; 施用苯菌灵条件下, 植株对 Pb 和 Zn 的总累积量有所增加, 但对 Cd 和 Cu 的总累积量分别降低了 14.35% 和 9.11%。

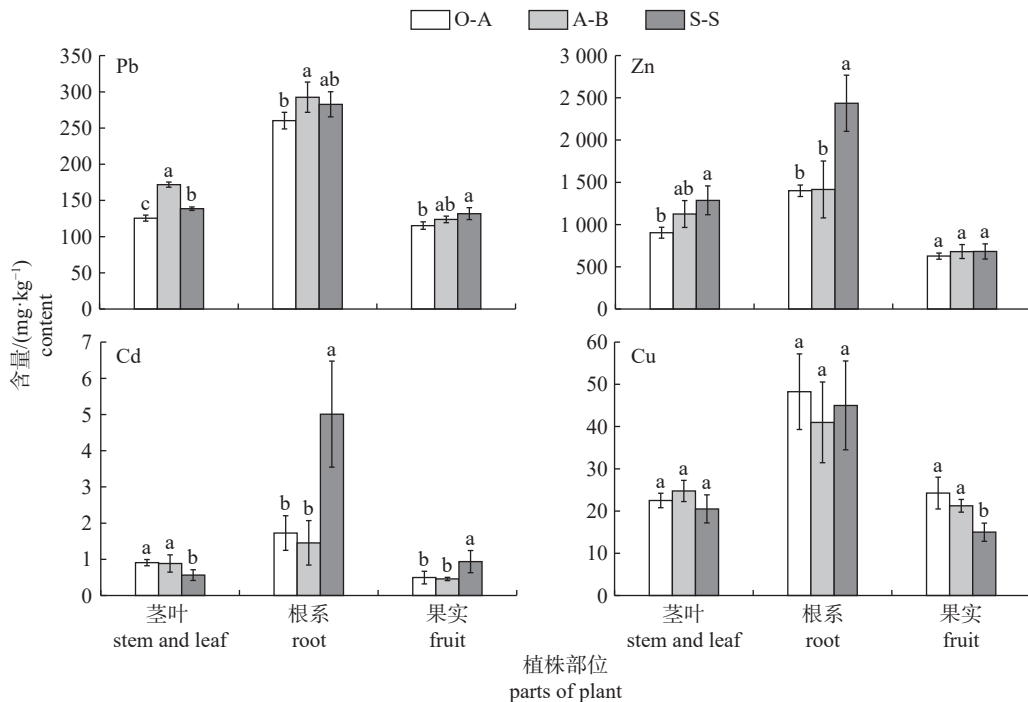


图 5 土壤灭菌和施用苯菌灵对大豆植株重金属含量的影响

Fig. 5 Effects of soil sterilization and benomyl application on the heavy metals content in soybean plants

2.6 大豆植株对重金属的富集及转运能力

由表 1 可知: 与原状土壤相比, 土壤灭菌处理下 Pb、Zn 和 Cd 的富集系数显著升高, 施用苯菌灵处理下 Pb 的富集系数显著升高; 土壤灭菌处理下 Cd 的转运系数显著降低, 施用苯菌灵处理下 Pb 的转运系数显著升高。

3 讨论

3.1 土壤灭菌和施用苯菌灵对植物生长的影响

连续施用苯菌灵与高温灭菌可部分或完全抑

制土壤微生物对植物的侵染, 土壤微生物的减少会影响土壤的理化性质 (氮、磷、钾、pH 值、阳离子交换量等)^[15], 而土壤的理化性质 (pH、电导率、土壤结构、有机碳)^[16]又会对植物生长产生影响。土壤高压灭菌是在较高的温度和气压下进行的, 会影响土壤的理化性质, 进而影响植物生长。有研究发现: 采用经高压灭菌法灭菌 3 次的菜园土培养紫茎泽兰, 其株高和生物量明显低于未灭菌的原状土壤^[17]。对于酸性或有机质含量高的土壤而言, 高温灭菌对其 pH 值的影响较大^[18]。

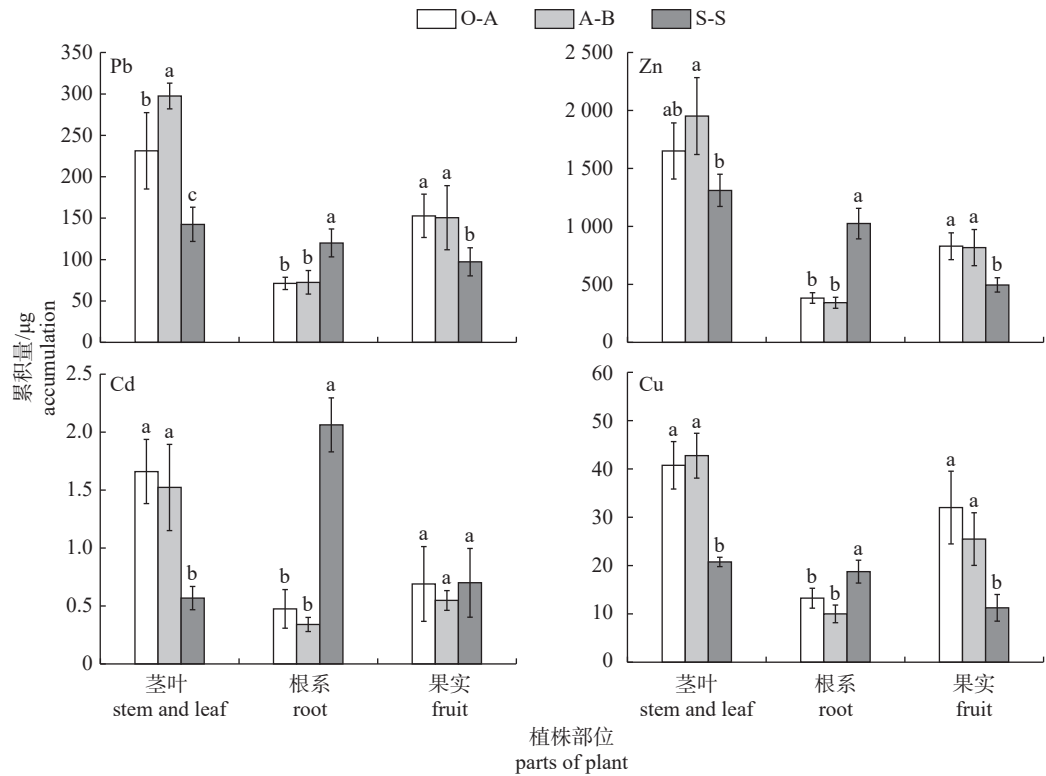


图 6 土壤灭菌和施用苯菌灵对大豆植株重金属累积量的影响 (以每盆计)

Fig. 6 Effects of soil sterilization and benomyl application on the heavy metals accumulation in soybean plants

表 1 大豆植株对重金属的富集及转运能力

Tab. 1 Enrichment and transport ability of soybean plant to heavy metals

处理 treatments	富集系数 enrichment coefficient				转运系数 transport coefficient			
	Pb	Zn	Cd	Cu	Pb	Zn	Cd	Cu
原状土壤 original soil	0.73±0.02 b	0.79±0.02 b	0.50±0.06 b	0.80±0.09 a	0.92±0.03 b	1.09±0.07 ab	0.87±0.27 a	0.98±0.17 ab
施用苯菌灵 applying benomyl	0.86±0.04 a	0.87±0.08 b	0.44±0.11 b	0.73±0.09 a	1.01±0.05 a	1.35±0.36 a	1.02±0.39 a	1.16±0.25 a
土壤灭菌 soil sterilization	0.81±0.04 a	1.18±0.13 a	1.03±0.26 a	0.68±0.11 a	0.96±0.04 ab	0.81±0.08 b	0.31±0.07 b	0.81±0.13 b

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

苯菌灵能够有效抑制土壤中 AMF 对植物的侵染, 从而间接影响土壤对植株的养分供应^[19]。此外, 杀真菌剂与高温灭菌具有易操作、成效明显等优点, 常被用于研究植物—土壤微生物的生态功能^[13]。本研究中, 与原状土壤相比, 施用苯菌灵与土壤灭菌后大豆株高、茎叶生物量和果实生物量均降低, 这是因为土壤微生物的减少可能会降低土壤速效氮、速效磷和速效钾的含量, 从而使大豆养分不足, 影响其生长。研究表明: 细菌定殖通常会促进营养吸收和增加植物生物量^[20-21], 但重金属干扰根系对铁、磷、镁、钙、锌等营养物质的吸收和必需营养物质的代谢功能, 影响植

物生长^[22-25]。施用苯菌灵与土壤灭菌可显著增加土壤有效态 Pb 含量, 这可能是因为重金属胁迫下, 高温灭菌和施用苯菌灵降低了土壤 pH 值, 促使土壤中 Pb 碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态 (生物有效性较低的形态) 向有效态 (可交换态和水溶态) 转化; 但土壤有效态 Cu、Cd 的含量无显著变化, 这可能是因为土壤 pH 值的变化对其影响较小; 而有效态 Zn 含量显著降低, 这可能是土壤 pH 值、阳离子交换量等多重作用的结果。

3.2 土壤灭菌和施用苯菌灵对植物重金属耐性和重金属累积的影响

本研究表明: 与原状土壤相比, 土壤灭菌处

理可显著降低植物对重金属的耐性, 导致大豆株高和生物量下降, 而施用苯菌灵对大豆的生长并没有显著影响, 这表明土壤微生物对大豆耐受重金属有重要作用。土壤微生物能够改善植株的抗逆性, 促进植物生长, 是增强重金属耐性的机制之一。有研究发现: 重金属通过产生活性氧使植物细胞受到氧化损伤, 但植物通常具有保护自身免受氧化胁迫的机制^[26]。也有研究表明: 接种有益微生物可提高抗氧化酶的活性, 进而帮助植物减轻重金属的胁迫^[27]。如木豆接种 AMF 后, 可显著提高过氧化物酶、过氧化氢酶和过氧化物歧化酶的活性, 对重金属 Cd 和 Pb 的耐性也有所提高^[28]。土壤微生物除了可以促进植物的营养吸收和生长外, 还可以通过减少乙烯的产生来减轻重金属胁迫^[29]。某些抗重金属植物通过促生细菌固氮、矿物质溶解、植物激素、铁载体的产生以及营养元素的转化等多种机制促进寄主植物生长^[30-31], 如: 在缺磷条件下, 用解淀粉芽孢杆菌 FZB45 接种玉米, 可显著促进其幼苗生长, 这可能是由于 FZB45 能产生植酸酶, 促进植物吸收植酸磷^[32], 增强了植物对重金属的耐性。

土壤微生物通过影响植物的生长和生理, 进而影响植物对重金属的吸收与累积。本研究中, 减少土壤微生物可降低大豆茎叶和果实的生物量, 但可增加根系生物量, 间接说明土壤微生物通过改变大豆的生物量来改变其重金属累积量。PETRICCIONE 等^[33]研究发现: 接种荧光假单胞菌 (*Pseudomonas fluorescens*) 后, 除了能提高紫茉莉 (*Mirabilis jalapa*) 植株的生物量外, 还能显著增加其根系对 Cd、Cu 等重金属的累积; 而土壤灭菌后, 紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 的生物量显著降低, 其对 Pb、Zn、Cd、Cu 的累积量显著减少^[34]。

此外, 土壤微生物还可以通过酸化、络合、氧化还原等反应来改变重金属的生物有效性, 从而改变植物对重金属的吸收累积^[6, 35]。本研究发现: 土壤灭菌和施用苯菌灵处理可显著增加土壤有效态 Pb 含量, 显著降低有效态 Zn 含量, 有效态 Cd、Cu 含量则无显著变化。这一方面可能与重金属自身的化学特性和土壤环境化学行为差异有关; 另一方面可能在于 AMF 可通过菌丝体吸附重金属, 细胞壁及原生质膜等组分结合滞留固定重金属^[36-37], 从而抑制重金属从根系向地上部

分转移, 降低了土壤中重金属的生物有效性。

4 结论

土壤灭菌可显著降低大豆株高、茎叶和果实生物量, 并降低大豆对重金属 Pb、Zn、Cd 和 Cu 的耐性与累积能力, 抑制其生长; 施用苯菌灵对大豆生长和重金属总累积量均无显著影响, 间接验证了土壤微生物对大豆耐重金属和累积能力具有重要作用。因此, 采用豆科植物修复重金属污染土壤时, 应考虑土壤微生物的有益作用, 提高植物修复的效率。

[参考文献]

- [1] VELTMAN K, HUIJBREGTS M A, HENDRIKS A J. Cadmium bioaccumulation factors for terrestrial species: application of the mechanistic bioaccumulation model OMEGA to explain field data[J]. Science of the Total Environment, 2008, 406(3): 413. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2008.05.049](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.05.049).
- [2] 沈高峰. 重金属Pb对高羊茅生长及抗氧化生理特性的影响[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8(5): 248. DOI: [10.3969/j.issn.1673-1409.2011.05.120](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1409.2011.05.120).
- [3] CHATTERJEE J, CHATTERJEE C. Phytotoxicity of cobalt, chromium and copper in cauliflower[J]. Environmental Pollution, 2000, 109(1): 69. DOI: [10.1016/S0269-7491\(99\)00238-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00238-9).
- [4] 柴冠群, 王丽, 刘桂华, 等. 基于多目标重金属元素低积累大豆品种筛选[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(9): 57. DOI: [10.13718/j.cnki.xdzk.2023.09.006](https://doi.org/10.13718/j.cnki.xdzk.2023.09.006).
- [5] MISHRA J, SINGH R, ARORA N K. Alleviation of heavy metal stress in plants and remediation of soil by rhizosphere microorganisms[J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 1706. DOI: [10.3389/fmicb.2017.01706](https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01706).
- [6] RAJKUMAR M, SANDHYA S, PRASAD M N V, et al. Perspectives of plant-associated microbes in heavy metal phytoremediation[J]. Biotechnology Advances, 2012, 30(6): 1562. DOI: [10.1016/j.biotechadv.2012.04.011](https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.04.011).
- [7] BAGHERI A A, SAADATMAN S, NIKNAM V, et al. Effect of endophytic fungus, *Piriformospora indica*, on growth and activity of antioxidant enzymes of rice (*Oryza sativa* L.) under salinity stress[J]. International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research, 2013, 1(11): 1337.
- [8] 韦革宏, 马占强. 根瘤菌—豆科植物共生体系在重金属污染环境修复中的地位、应用及潜力[J]. 微生物学报, 2010, 50(11): 1421. DOI: [10.13343/j.cnki.wsxb.2010.11.013](https://doi.org/10.13343/j.cnki.wsxb.2010.11.013).
- [9] GOMES M P, ANDRADE M L, NASCENTES C C, et al. Arsenic root sequestration by a tropical woody legume as affected by arbuscular mycorrhizal fungi and organic matter: implications for land reclamation[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2014, 225(4): 1919. DOI: [10.1007/s11270-014-1919-8](https://doi.org/10.1007/s11270-014-1919-8).
- [10] 黄晶, 凌婉婷, 孙艳娣, 等. 丛枝菌根真菌对紫花苜蓿吸收土壤中镉和锌的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 99.

- [11] ADAMS G O, TAWARI-FUFEYIN P, IGELNYAH E, et al. Assessment of heavy metals bioremediation potential of microbial consortia from poultry litter and spent oil contaminated site[J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2014, 2(2): 84. DOI: 10.12691/ijebb-2-2-6.
- [12] KHAN M S, ZAIDI A, WANI P A, et al. Role of plant growth promoting rhizobacteria in the remediation of metal contaminated soils[J]. Environmental Chemistry Letters, 2009, 7: 1. DOI: 10.1007/s10311-008-0155-0.
- [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.
- [14] 鲍士旦. 土壤农业化学分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 李忠徽, 王旭东. 灌施木醋液对土壤性质和植物生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 510. DOI: 10.11674/zwyf.2014.0229.
- [16] 冯书华, 李红梅, 吴炯, 等. 元阳梯田两种森林群落土壤微生物数量与养分特征[J]. 西部林业科学, 2018, 47(4): 108. DOI: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2018.04.020.
- [17] 李会娜, 刘万学, 万方浩. 土壤灭菌对紫茎泽兰和番茄的反馈作用[J]. 中国农学通报, 2011, 27(16): 186.
- [18] 张辉, 张佳宝, 赵炳梓, 等. 高温高压间歇灭菌对中国典型土壤性质的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 540.
- [19] SMITH M D, HARTNETT D C, RICE C W. Effects of long-term fungicide applications on microbial properties in tallgrass prairie soil[J]. Soil Biology Biochemistry, 2000, 32(7): 935. DOI: 10.1016/S0038-0717(99)00223-0.
- [20] DE MARIA S, RIVELLI A R, KUFFNER M, et al. Interactions between accumulation of trace elements and macronutrients in *Salix caprea* after inoculation with rhizosphere microorganisms[J]. Chemosphere, 2011, 84(9): 1256. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.05.002.
- [21] LUO S L, CHEN L, CHEN J L, et al. Analysis and characterization of cultivable heavy metal-resistant bacterial endophytes isolated from Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and their potential use for phytoremediation[J]. Chemosphere, 2011, 85(7): 1130. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.07.053.
- [22] OUZOUNIDOU G, MOUSTAKAS M, SYMEONIDIS L, et al. Response of wheat seedlings to Ni stress: effects of supplemental calcium[J]. Archives of Environmental Contamination Toxicology, 2006, 50(3): 346. DOI: 10.1007/s00244-005-5076-3.
- [23] RODRIGUEZ H, GONZALEZ T, GOIRE I, et al. Gluconic acid production and phosphate solubilization by the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* spp.[J]. Naturwissenschaften, 2004, 91(11): 552. DOI: 10.1007/s00114-004-0566-0.
- [24] SARAVANAN V S, MADHAIYAN M, THANGARAJU M. Solubilization of zinc compounds by the diazotrophic, plant growth promoting bacterium *Gluconacetobacter diazotrophicus*[J]. Chemosphere, 2007, 66(9): 1794. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.07.067.
- [25] 王艳霞, 郑武扬, 侯磊, 等. 滇杨幼苗对镉、锌胁迫的生理响应与耐受性研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2024, 44(1): 31. DOI: 10.11929/j.swfu.202211070.
- [26] YAMANE K, RAHMAN S, KAWASAKI M, et al. Pre-treatment with a low concentration of methyl viologen decreases the effects of salt stress on chloroplast ultrastructure in rice leaves (*Oryza sativa* L.)[J]. Plant Production Science, 2004, 7(4): 435. DOI: 10.1626/pps.7.435.
- [27] WANG Q, XIONG D, ZHAO P, et al. Effect of applying an arsenic-resistant and plant growth-promoting rhizobacterium to enhance soil arsenic phytoremediation by *Populus deltoides* LH05-17[J]. Journal of Applied Microbiology, 2011, 111(5): 1065. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2011.05142.x.
- [28] GARG N, AGGARWAL N. Effect of mycorrhizal inoculations on heavy metal uptake and stress alleviation of *Cajanus cajan* (L.) Millsp. genotypes grown in cadmium and lead contaminated soils[J]. Plant Growth Regulation, 2012, 66(1): 9. DOI: 10.1007/s10725-011-9624-8.
- [29] ZHANG Y F, HE L Y, CHEN Z J, et al. Characterization of lead-resistant and ACC deaminase-producing endophytic bacteria and their potential in promoting lead accumulation of rape[J]. Journal of Hazardous Material, 2011, 186(2/3): 1720. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.12.069.
- [30] RAJKUMAR M, A, FREITAS H. Endophytic bacteria and their potential to enhance heavy metal phytoextraction[J]. Chemosphere, 2009, 77(2): 153. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2009.06.047.
- [31] PEREIRA S I A, CASTRO P M L. Diversity and characterization of culturable bacterial endophytes from *Zea mays* and their potential as plant growth-promoting agents in metal-degraded soils[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(24): 14110. DOI: 10.1007/s11356-014-3309-6.
- [32] IDRIS E E, MAKAREWICZ O, FAROUK A, et al. Extracellular phytase activity of *Bacillus amyloliquefaciens* FZB45 contributes to its plant-growth-promoting effect[J]. Microbiology, 2002, 148(7): 2097. DOI: 10.1099/00221287-148-7-2097.
- [33] PETRICCIONE M, DI PATRE D, FERRANTE P, et al. Effects of *Pseudomonas fluorescens* seed bioinoculation on heavy metal accumulation for *Mirabilis jalapa* phytoextraction in smelter-contaminated soil[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2013, 224(8): 1645. DOI: 10.1007/s11270-013-1645-7.
- [34] 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.
- [35] MA Y, PRASAD M N V, RAJKUMAR M, et al. Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils[J]. Biotechnology Advances, 2011, 29(2): 248. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2010.12.001.
- [36] GAUR A, ADHOLEYA A. Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils[J]. Current Science, 2004, 86(4): 528.
- [37] 曾加会, 李元媛, 阮迪申, 等. 植物根际促生菌及丛枝菌根真菌协助植物修复重金属污染土壤的机制[J]. 微生物学通报, 2017, 44(5): 1214. DOI: 10.13344/j.microbiol.china.160507.

责任编辑: 何馨成