

AM真菌和铅处理对镉胁迫下玉米生长和镉吸收的影响

郝利君, 潘亮, 郝百惠, 许静, 周昕南, 杨亮, 刁风伟, 郭伟

引用本文:

郝利君, 潘亮, 郝百惠, 等. AM真菌和铅处理对镉胁迫下玉米生长和镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1177-1184.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1379>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

丛枝菌根真菌对紫花苜蓿镉积累和抗氧化活性的影响

陈志鹏, 魏源, 赵冬安, 上官宇先, 侯红, 曾清如

农业环境科学学报. 2015(6): 1053-1059 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.06.006>

施用沼液和接种丛枝菌根真菌对甘草生长及重金属累积的影响

侯时季, 李涛, 蔺阁, 陈保冬

农业环境科学学报. 2016, 35(8): 1465-1472 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0117>

两种AMF对巨菌草根际土壤Cd生物可利用性以及Cd积累的影响

姬朋朋, 尹光彩, 陈志良, 周兵, 林亲铁, 刘千钧, 刘德玲

农业环境科学学报. 2016, 35(12): 2306-2313 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0878>

'夏日赞歌'景天(*Sedum spurium*'Summer Glory')对铅的耐性和富集特征研究

关海燕, 屈琦琦, 赵凡, 王若鹏, 阎尚博, 董丽

农业环境科学学报. 2019, 38(2): 290-296 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0457>

不同铜浓度下玉米间作豌豆对土壤铜的吸收效应研究

徐健程, 王晓维, 聂亚平, 罗杰, 杨潇一, 杨文亭

农业环境科学学报. 2015, 34(8): 1508-1514 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.08.011>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郝利君, 潘亮, 郝百惠, 等. AM真菌和铅处理对镧胁迫下玉米生长和镧吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1177–1184.

HAO Li-jun, PAN Liang, HAO Bai-hui, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and Pb on the growth and La uptake of maize grown in La-contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(6): 1177–1184.



开放科学 OSID

AM真菌和铅处理对镧胁迫下玉米生长和镧吸收的影响

郝利君, 潘亮, 郝百惠, 许静, 周昕南, 杨亮, 刁风伟, 郭伟*

(内蒙古大学生态与环境学院, 蒙古高原生态学与资源利用教育部重点实验室, 内蒙古自治区环境污染控制与废物资源化重点实验室, 呼和浩特 010021)

摘要:为探讨AM真菌和重金属Pb对稀土La胁迫下玉米生长及La吸收的影响,采用盆栽试验方法,在La胁迫下(500 mg·kg⁻¹)研究接种AM真菌*G. versiforme*和不同浓度Pb处理(0、50 mg·kg⁻¹和400 mg·kg⁻¹)对玉米菌根侵染率、生物量、营养元素吸收、稀土La和重金属Pb吸收、转运的影响。结果显示,在稀土La胁迫下,随着Pb浓度的增加(La500Pb0、La500Pb50、La500Pb400),接种*G. versiforme*的玉米根系平均菌根侵染率为20.8%~35.9%,400 mg·kg⁻¹Pb处理使菌根侵染率显著降低42%。不接种AM真菌时,La500Pb400处理与La500Pb0相比使总干质量、地上部La浓度和转运率分别降低24.4%、73.3%和83.5%,根部La浓度显著增加101.2%。接种AM真菌时,与La500Pb0相比,La500Pb50处理使总干质量和La转运率分别显著增加26.4%和55.5%,La500Pb400处理使总干质量显著降低26.1%。与不接种CK相比,接种AM真菌使3种处理玉米总干质量和营养元素含量分别显著增加70.7%~128.2%和30.2%~467.1%;接种AM真菌使La500Pb0处理地上部La浓度和转运率分别显著降低52.8%和59.2%,使La500Pb50处理La转运率显著降低28.6%,使La500Pb400处理地上部La浓度和转运率分别显著增加110.5%和147.2%,根部La浓度显著降低41.9%,地上部和根部Pb浓度分别显著降低42.6%和28.2%。AM真菌和Pb的交互作用对玉米总干质量、地上部和根部La浓度、地上部Pb浓度以及La的转运率有显著影响。结果表明,重金属Pb可显著影响玉米对稀土La的吸收、转运和La的植物毒性,并与Pb浓度和AM真菌共生有关。

关键词:丛枝菌根真菌;玉米;镧;铅;吸收;转运

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)06-1177-08 doi:10.11654/jaes.2019-1379

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and Pb on the growth and La uptake of maize grown in La-contaminated soil

HAO Li-jun, PAN Liang, HAO Bai-hui, XU Jing, ZHOU Xin-nan, YANG Liang, DIAO Feng-wei, GUO Wei*

(School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Ministry of Education Key Laboratory of Ecology and Resource Use of the Mongolian Plateau, Inner Mongolia Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Waste Resource Recycle, Hohhot 010021, China)

Abstract: Here, a greenhouse pot experiment was conducted to investigate the effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF; *G. versiforme*, genus *Glomus*, a species of AMF) and Pb(0, 50 mg·kg⁻¹ and 400 mg·kg⁻¹) on AMF colonization rate, biomass, nutrient uptake, and metal uptake and translocation in maize (*Zea mays* L.) grown in soil spiked with lanthanum (La) at a concentration of 500 mg·kg⁻¹. The results indicated that the average AMF colonization rate in maize inoculated with *G. versiforme* ranged from 20.8% to 35.9%, and it decreased with the increase in Pb concentration in soils under La stress. The root colonization rate was significantly decreased by 42% under La500Pb400

收稿日期:2019-12-15 录用日期:2020-03-15

作者简介:郝利君(1993—),女,河南濮阳人,硕士研究生,主要研究方向为污染土壤的生物修复。E-mail:ndhaolijun@163.com

*通信作者:郭伟 E-mail:ndguowei@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41977113, 31860170, 41461071);内蒙古自治区科技重大专项(ZDZX2018054);内蒙古自然科学基金项目(2018MS04003)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41977113, 31860170, 41461071); The Special Fund for Key Program of Science and Technology of Inner Mongolia Autonomous Region, China(ZDZX2018054); The Natural Science Foundation of Inner Mongolia, China(2018MS04003)

(La500Pb400, the soil spiked with $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ La and $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Pb, the same below) compared with that under La500Pb0. Without AMF inoculation, La500Pb400 decreased the total dry weight, shoot La concentration, and La translocation rate in maize by 24.4%, 73.3%, and 83.5% compared with La500Pb0. The root La concentration in maize was significantly increased by 101.2% under La500Pb400 compared with that under La500Pb0. With AMF inoculation, La500Pb50 significantly increased the total dry weight and La translocation rate in maize by 26.4% and 55.5% compared with La500Pb0. The total dry weight of maize was significantly decreased by 26.1% under La500Pb400 compared with that under La500Pb0. Compared with no inoculation treatment, AMF significantly increased the total dry weight and mineral nutrient content in maize by 70.7%~128.2% and 30.2%~467.1% under the three treatments, respectively. Furthermore, AMF significantly decreased the shoot La concentration and La translocation rate in maize by 52.8% and 59.2% under La500Pb0, and significantly decreased the La translocation rate by 28.6% under La500Pb50 compared with no inoculation treatment. AMF also significantly increased the shoot La concentration and La translocation rate by 110.5% and 147.2% and significantly decreased the root La concentration, and shoot and root Pb concentration by 41.9%, 42.6%, and 28.2% under La500Pb400 compared with no inoculation treatment, respectively. The interaction between AMF and Pb had significant effects on the biomass, shoot and root La concentrations, shoot Pb concentrations, and La translocation rate from the root to shoot in maize. The results demonstrated that Pb could significantly influence the uptake and translocation of La (a rare earth element) by plants and its toxicity on plants; it was related to the concentration of heavy metals and AMF symbiosis with plants.

Keywords: arbuscular mycorrhizal fungi; maize; La; Pb; uptake; translocation

稀土被誉为“工业维生素”和“新材料之母”,广泛用于国内外高新技术领域,是我国的优势资源。然而,稀土开采过程浸出、酸沉等工序会产生大量重金属污染物,同时也活化了土壤中原有的重金属,导致了严重的稀土-重金属复合污染的土壤环境问题^[1]。调查显示,内蒙古白云鄂博稀土尾矿区土壤中稀土 La ($11\,145 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和重金属 Pb ($323 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的最大浓度分别为内蒙古土壤背景值的 340 倍和 22 倍^[2-3]。福建省长汀县稀土矿区土壤中稀土元素 ($242.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和重金属元素 Pb ($78.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 平均浓度均显著高于福建省土壤背景值^[4-5]。重金属和稀土在土壤中富集可导致耕地退化、粮食减产、饮用水污染、水体生态系统破坏,并可通过食物链、呼吸、皮肤等途径进入人体^[1]。稀土 La 会导致神经系统损伤,儿童智力低下,可致基因毒性遗传下一代^[6]; 重金属 Pb 会导致呼吸系统疾病、神经系统紊乱、心血管疾病等人体健康问题^[7]。研究表明,稀土矿区某些蔬菜对土壤中重金属与稀土具有较高的积累能力,可导致人体血液中稀土和重金属含量超标,产生严重的健康风险^[4-5]。因此,稀土-重金属复合污染土壤的修复是我国急需解决的土壤环境问题之一。

植物修复是一种应用前景广阔的污染土壤修复技术,在微生物的协助下效果更为显著。丛枝菌根 (Arbuscular mycorrhizal, AM) 真菌可与自然界 80% 以上的陆生植物形成互惠共生体^[8],可增加根的吸收面积和改变根的形态,提高矿质营养元素从外部环境向植物体内的转运,提高宿主植物对生物和非生物胁迫

的耐受性^[9]。研究表明,AM 真菌可影响植物对 La^[10] 或 Pb^[11] 的吸收,降低稀土或重金属的植物毒性,具有提高重金属-稀土复合污染土壤植物修复的潜在作用^[12]。此外,植物对于某种元素的吸收常会受到其他共存元素的影响。张玲等^[13]研究发现,根施 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ La 可使 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫下大蒜幼苗根和茎叶中 Pb 浓度分别降低 35.8% 和 51.4%。王起凡等^[14]研究表明, $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Pb 胁迫下,随着 La 浓度的增加 ($50, 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 玉米地上部和根部 Pb 浓度分别显著增加了 52.61%~99.01% 和 15.99%~44.34%。目前,相关研究主要集中于稀土对植物吸收重金属及缓解其毒害作用的影响,而重金属对植物吸收稀土元素及其毒害作用的影响研究却鲜见报道。复合污染元素间的交互作用可通过改变元素间的生物可利用性、植物毒性、根际微生物环境与植物生长等影响植物-微生物联合修复土壤的效果^[15-17]。因此,研究重金属-稀土复合污染条件下,AM 真菌在植物修复中的影响因素及作用机理有着十分重要的科学意义和实际应用价值。

本研究选用 *Glomus versiforme* (*G. versiforme*) 和玉米 (*Zea mays* L.) 作为供试 AM 真菌及植物,采用温室盆栽试验的方法,模拟稀土 La 污染土壤 ($500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 同时添加不同浓度的重金属 Pb ($0, 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 研究接种 AM 真菌和不同浓度 Pb 处理对玉米生长、营养元素吸收、重金属 Pb 和稀土 La 吸收转运等的影响,探索在重金属-稀土复合污染土壤中,AM 真菌和重金属对植物吸收、转运稀土的影响,

为植物-微生物联合修复污染土壤提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 培养基质

采集内蒙古呼和浩特市无污染苗圃土作为供试土壤(40°48'N, 111°43'E),理化性质如表1所示,经自然风干过2 mm土壤筛后备用。根据我国稀土矿区周围土壤中稀土La和重金属Pb实际浓度范围,并结合《国家土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)和研究目的,设计试验中La和Pb的浓度^[2,18-19]。向土壤中添加硝酸镧[La(NO₃)₃·6H₂O]溶液和硝酸铅[Pb(NO₃)₂]溶液以模拟不同程度La-Pb复合污染土壤,使其稀土La浓度(以干土计)为500 mg·kg⁻¹,重金属Pb的浓度分别为0、50 mg·kg⁻¹和400 mg·kg⁻¹,并向其中加入相应量的硝酸铵(NH₄NO₃)溶液以平衡因Pb(NO₃)₂加入量不同所造成的处理间氮素背景差异。为保证植物生长期间的养分供给,向模拟复合污染土壤中加入基础肥料:30 mg·kg⁻¹ P、4.5 mg·kg⁻¹ Mg、0.009 35 mg·kg⁻¹ Mo、3.42 mg·kg⁻¹ Mn、1.23 mg·kg⁻¹ Zn、71.5 mg·kg⁻¹ K、0.54 mg·kg⁻¹ Cu、20.4 mg·kg⁻¹ Ca。将土壤基质混合均匀,在18~21℃、田间持水量为80%条件下老化两周后高压蒸汽灭菌(121℃, 2 h),以去除土著AM真菌和其他微生物的影响,室温风干后使用。

1.2 供试植物和菌种

选用菌根模式植物玉米(高优1号)作为供试植物(种子在内蒙古农牧科学研究院采购)。挑选颗粒饱满、大小均匀的种子,进行表面消毒,催芽露白后播种。选取地表球囊霉(*Glomus versiforme*, BGC GD01C, 1511C0001 BGCAM0031)作为供试AM真菌(购买于北京市农林科学院),以玉米和白三叶草(*Trifolium repens* L.)为宿主植物在砂土比为1:1的灭菌土壤中扩繁4个月获得的内含菌丝、真菌孢子以及植物根段等繁殖体的根际砂土混合物作为接种物,扩繁后菌剂*Glomus versiforme*孢子浓度为310个·10 g⁻¹。

1.3 试验设计

本试验在内蒙古大学玻璃温室内通过生物学盆

栽法实施完成。设置3种程度的La-Pb复合污染土壤基质:500 mg·kg⁻¹La+0 mg·kg⁻¹Pb(La500Pb0)、500 mg·kg⁻¹La+50 mg·kg⁻¹Pb(La500P50)、500 mg·kg⁻¹La+400 mg·kg⁻¹Pb(La500Pb400);每种土壤基质设不接种对照CK和接种丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)*G. versiforme*,共6个处理,每个处理6个重复,共计36盆,随机排列。每盆装2 kg老化灭菌后土壤,采用混接法接种AM真菌,每盆加菌剂50 g,对照处理采用相同方法加入等量的灭菌菌剂,混匀后装入内衬消毒封口袋的塑料花盆中,上口径为16.5 cm、下口径为10.5 cm、高度为13 cm。每盆播种催芽露白的玉米种子8颗,7 d后间苗,保留3株大小一致的幼苗。植物在温室生长期间自然采光,白天温度在20~35℃,夜间温度在10~20℃,相对湿度在20%~70%,每日定时浇去离子水使土壤含水量保持在田间最大持水量的80%,并定期随机更换花盆的位置。

1.4 样品制备及分析测定

玉米生长60 d后收获,植物样品用蒸馏水冲洗后于70℃烘箱中烘干,记录地上部和根部干质量。取新鲜根1.0 g左右,在乳酸甘油溶液中用0.05%台盼蓝染色后,使用根段频率法计算菌根侵染率。植物地上部和根部C和N元素含量使用元素分析仪(Vario ELIII, CHNOS Elemental Analyzer, Elementar Co Germany)测定。烘干植物样品采用优级纯浓HNO₃开放式消煮后,分别使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, DRCE, PerkinElmer USA)和电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Optima 7000DV, PerkinElmer USA)测定植物中La、Pb和P、K、Ca、Mg的浓度。

1.5 数据分析

所有数据利用Excel 2013计算平均值和标准误差,使用SPSS 17.0软件Duncan法分析不同处理间的差异显著性($P<0.05$),对非正态分布的菌根侵染率经过反正弦转换后再进行分析。利用双因素方差分析AM真菌、Pb浓度及二者的交互作用对测定指标的影响,利用OriginLab 2017软件绘制柱状图。

La或Pb转运率=地上部吸收La或Pb的总量/(地上部+根部吸收La或Pb的总量)

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of the soil

La/ mg·kg ⁻¹	Pb/ mg·kg ⁻¹	pH	有机质 Organic matter/%	全N Total N/%	全P Total P/%	全K Total K/%	碱解N Available N/mg·kg ⁻¹	有效P Available P/mg·kg ⁻¹	速效K Available K/mg·kg ⁻¹
26.49	8.65	7.44	1.39	0.08	0.07	1.83	40.50	3.93	76.00

2 结果与分析

2.1 AM 真菌和 Pb 处理对 La 胁迫下玉米菌根侵染率和生物量的影响

接种 AM 真菌和 Pb 处理对 La 胁迫下玉米菌根侵染率的影响如图 1 所示。不接种对照 CK 处理,玉米根系中未观察到菌根真菌的侵染,而接种 AM 真菌 *G. versiforme* 与玉米建立了良好的菌根共生关系,平均菌根侵染率为 20.8%~35.9%。与 La500Pb0 相比,La500Pb400 处理使得玉米根系菌根侵染率显著降低了 42% ($P<0.05$),La500Pb50 处理无显著性差异。双因素分析表明,接种 AM 真菌和 Pb 处理的交互作用对菌根侵染率无显著影响 ($P>0.05$)。

接种 AM 真菌和 Pb 处理对 La 胁迫下玉米生物量的影响如表 2 所示。不接种 AM 真菌处理组,与

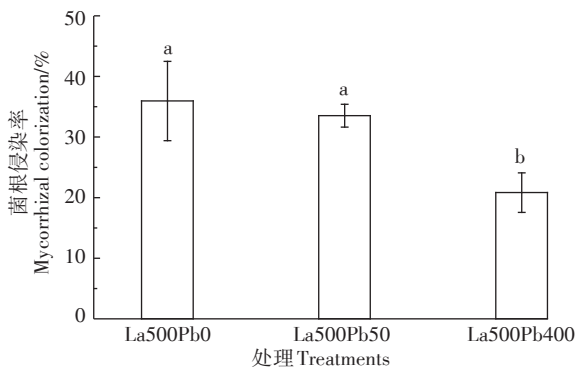


图1 Pb处理对La胁迫下玉米菌根侵染率影响

Figure 1 Effect of Pb treatments on mycorrhizal colonization of maize grown in La-contaminated soil

La500Pb0 相比,La500Pb400 处理使得玉米地上部、根部和总干质量分别降低了 25.8%、14.3% 和 24.4%,但没有达到显著性差异水平 ($P>0.05$) (表 2)。接种 AM 真菌处理组,与 La500Pb0 相比,La500Pb50 处理使得玉米地上部和总干质量分别显著增加了 27.5% 和 26.4%,La500Pb400 处理使得玉米地上部和总干质量分别显著降低了 27.9% 和 26.1% ($P<0.05$)。与不接种对照 CK 相比,接种 AM 真菌使 3 种处理玉米植株地上部干质量、根部干质量、总干质量分别显著增加了 61.7%~116.4%、127.8%~227.8% 和 70.7%~128.2% ($P<0.05$)。双因素分析表明,接种 AM 真菌和 Pb 处理的交互作用对玉米总干质量具有显著影响 ($P<0.01$)。

2.2 AM 真菌和 Pb 处理对 La 胁迫下玉米营养元素吸收的影响

接种 AM 真菌和 Pb 处理对 La 胁迫下玉米 N、P、K、Ca 和 Mg 吸收的影响如表 3 所示。不接种 AM 真菌处理组,与 La500Pb0 相比,La500Pb50 和 La500Pb400 处理对玉米地上部和根部 N、P、K、Ca 和 Mg 含量均无显著影响 ($P<0.05$)。接种 AM 真菌处理组,与 La500Pb0 相比,La500Pb400 处理使得玉米地上部 N 和 Mg 含量分别降低 32.4% 和 27.5%;与 La500Pb50 处理相比,La500Pb400 使得玉米地上部 N、P、K、Mg 含量降低了 37.3%~44.2%,玉米根部 N、K、Ca 和 Mg 含量降低了 27.3%~38.2% ($P<0.05$)。与不接种对照 CK 相比较,接种 AM 真菌使 3 种处理玉米地上部和根部 N、P、K、Ca 和 Mg 含量分别显著增加 30.2%~211.9% 和

表2 AM真菌和Pb处理对La胁迫下玉米生物量影响(g·pot⁻¹)

Table 2 Effect of AM fungi and Pb treatments on biomass of maize grown in La-contaminated soil (g·pot⁻¹)

镉铅处理 La and Pb treatments	接种 Inoculation	地上部干质量 Shoot dry weight	根部干质量 Root dry weight	总干质量 Total dry weight
La500Pb0	CK	1.55±0.14cd	0.21±0.01c	1.76±0.14cd
	AMF	2.58±0.33b	0.49±0.04ab	3.07±0.31b
La500Pb50	CK	1.52±0.30cd	0.18±0.05c	1.70±0.34cd
	AMF	3.29±0.19a	0.59±0.05a	3.88±0.22a
La500Pb400	CK	1.15±0.06d	0.18±0.01c	1.33±0.07d
	AMF	1.86±0.17c	0.41±0.05b	2.27±0.20c
显著性分析 Significance				
铅 Lead (Pb)		**	NS	**
接种 Inoculation (I)		***	***	***
Pb×I		NS	NS	**

注:表中数据为6次重复的平均值±标准误差,同一列中不同字母表示处理间5%差异显著水平。*为 $P<0.05$,**为 $P<0.01$,***为 $P<0.001$,NS表示无显著性差异。下同。

Note: Data are means ± SE of six replicates. Values within columns marked by the different letters mean significant difference according to Duncan's multiple range test at 0.05 level. * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$, NS, non-significant effect. The same below.

97.9%~467.1% ($P<0.05$)。双因素分析表明,接种AM真菌和Pb处理的交互作用对玉米地上部和根部矿质营养元素的吸收无显著性影响 ($P>0.05$)。

2.3 AM真菌和Pb处理对La胁迫下玉米植株Pb和La吸收、转运的影响

接种AM真菌和Pb处理对La胁迫下玉米地上部、根部Pb和La浓度、转运率的影响如图2和表4所示。无论是否接种AM真菌,随着土壤中Pb浓度的增加玉米地上部和根部Pb浓度逐渐增加,仅La500Pb400和La500Pb0处理相比有显著性差异;不接种AM真菌处理组,La500Pb50与La500Pb0处理相比Pb由根部向地上部的转运率显著增加了56.6%。与不接种对照CK相比,接种AM真菌使La500Pb400处理玉米地上部和根部Pb浓度分别显著降低了42.6%和28.2% ($P<0.05$)。

不接种AM真菌处理组,与La500Pb0相比,La500Pb400处理使得玉米的地上部La浓度显著降低73.3%,根部La浓度显著增加101.2%,La由根部向地上部的转运率显著降低83.5% ($P<0.05$)。接种AM真菌处理组,不同处理间玉米地上部和根部La浓度均无显著性差异,La500Pb50与La500Pb0处理相比显著增加了La的转运率 ($P<0.05$)。与不接种CK相比,接种AM真菌使La500Pb0处理玉米植株地上部La浓度显著降低52.8%;使La500Pb400处理地上部La浓度显著增加110.5%,根部La浓度显著降低41.9%;使La500Pb0和La500Pb50处理玉米植株La的转运率分别显著降低了59.2%和28.6%,使La500Pb400处理La的转运率显著增加了147.2% ($P<0.05$)。双因素分析表明,接种AM真菌和Pb处理的交互作用对玉米地上部和根部La浓度、地上部Pb浓度以及La、Pb的转运

表3 AM真菌和Pb处理对La胁迫下玉米地上部和根部N、P、K、Ca和Mg含量的影响($\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$)

Table 3 Effect of AM fungi and Pb treatments on shoot and root N, P, K, Ca and Mg contents of maize grown in La-contaminated soil ($\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$)

镉铅处理 La and Pb treatments	接种 Inoculation	地上部 Shoot					根部 Root				
		N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
La500Pb0	CK	56.89±3.94b	1.29±0.26bc	48.11±10.30cd	31.28±3.66bc	7.70±0.84bc	5.48±0.64c	0.08±0.00b	1.58±0.40c	3.11±0.41c	0.59±0.10c
	AMF	82.46±6.52a	1.68±0.23ab	105.91±17.07ab	42.63±3.44a	12.55±1.71a	12.50±1.04ab	0.26±0.04a	4.81±0.62ab	6.71±0.33ab	1.52±0.19ab
La500Pb50	CK	56.39±8.87b	1.07±0.36bc	41.50±13.12cd	29.01±4.12bc	7.32±1.53bc	4.88±1.37c	0.10±0.05b	1.63±0.74c	2.71±0.49c	0.53±0.18c
	AMF	88.88±5.01a	2.08±0.12a	129.43±9.32a	42.15±2.29a	15.70±1.00a	14.21±0.93a	0.28±0.02a	5.93±0.66a	7.68±0.63a	1.91±0.26a
La500Pb400	CK	42.52±2.87b	0.62±0.05c	24.73±4.67d	22.54±1.13c	5.14±0.35c	4.39±0.64c	0.06±0.01b	0.73±0.22c	2.82±0.37c	0.41±0.07c
	AMF	55.71±2.19b	1.16±0.06bc	74.55±8.18bc	33.48±2.11ab	9.10±0.85b	9.84±0.81b	0.23±0.04a	4.14±0.55b	5.58±0.20b	1.18±0.13b
显著性分析 Significance											
铅 Lead (Pb)		***	**	*	*	**	*	NS	NS	NS	NS
接种 Inoculation (I)		***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Pb×I		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

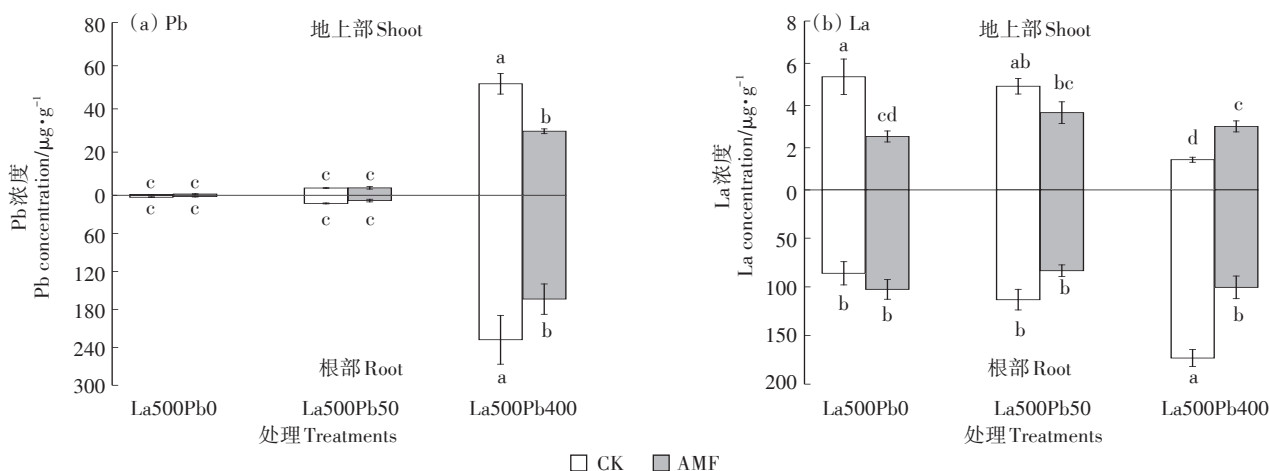


图2 AM真菌和Pb处理对La胁迫下玉米植株地上部和根部Pb和La浓度的影响

Figure 2 Effects of AM fungi and Pb treatments on shoot and root Pb and La concentrations of maize grown in La-contaminated soils

表4 AM真菌和Pb处理对La胁迫下玉米植株中La和Pb转运率的影响(%)

Table 4 Effects of AM fungi and Pb treatments on La and Pb transport rate of maize grown in La-contaminated soils(%)

镧铅处理 La and Pb treatments	接种 Inoculation	La 转运率 La transport rate	Pb 转运率 Pb transport rate
La500Pb0	CK	30.82±2.01a	49.30±8.53b
	AMF	12.58±2.86c	68.51±9.77ab
La500Pb50	CK	27.38±2.04a	77.22±7.49a
	AMF	19.56±1.36b	56.44±3.58ab
La500Pb400	CK	5.09±0.35d	63.45±1.51ab
	AMF	12.58±1.89c	46.46±6.97b
显著性分析 Significance			
铅 Lead(Pb)		***	NS
接种 Inoculation(I)		***	NS
Pb×I		***	*

率均有显著的影响($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 菌根侵染率

研究表明,AM真菌具有适应不同环境条件的生理和遗传特征,但高浓度污染物对AM真菌仍有抑制作用^[20],可通过抑制丛枝菌根真菌孢子萌发和菌丝伸长、阻碍丛枝菌根真菌侵染合适的根系和阻断丛枝菌根的定植过程等降低菌根侵染率^[21]。本研究结果显示,在不同程度的La-Pb复合胁迫下,接种AM真菌*G. versiforme*的玉米根系平均菌根侵染率为20.8%~35.9%,说明*G. versiforme*对重金属Pb和稀土La均具有一定的耐受性和适应性。已有研究显示100 mg·kg⁻¹La胁迫下接种*C. etunicatum*玉米的菌根侵染率为26.48%,和本研究结果相类似^[12]。另外,结果显示随着Pb浓度的增加菌根侵染率显著降低,表明在La胁迫下更高浓度的Pb抑制了*G. versiforme*对玉米根系的侵染。研究已证实,重金属Pb可抑制孢子萌发和菌丝生长,在3 456.2 mg·dm⁻³和4 157.6 mg·dm⁻³Pb污染的土壤中,AM真菌的孢子密度和丰富度显著低于自然土壤(70.9 mg·dm⁻³Pb)^[22]。

3.2 生物量

研究表明,低浓度的稀土可减轻重金属对植物的毒害作用,而高浓度的稀土则和重金属产生协同毒害作用^[17]。然而,重金属对稀土胁迫下植物生长及毒害作用的影响研究还很少。本研究结果显示,在La胁迫下不接种时低浓度Pb处理对玉米的生长无显著影响,而接种AM真菌时低浓度Pb处理显著改善了玉米

的生长,缓解了La对玉米的毒害作用。结果表明,AM真菌的共生改变了低浓度Pb对稀土La植物毒性的影响,可能与接种AM真菌时La500Pb50与La500Pb0相比具有更高的La转运率,而不接种时具有更高Pb的转运率有关。研究显示,稀土La可通过促进重金属转运蛋白的表达、促进植物抗氧化酶(如SOD、CAT、AsA-POD)的合成以及激活Ca²⁺通道或更多酶参与解毒过程等减轻重金属胁迫,促进植物的生长^[17,23]。另外,本研究结果显示高浓度重金属Pb加剧了稀土La对植物生长的毒害作用,可能主要是因为La500Pb400与La500Pb0处理相比,显著增加了玉米对Pb的吸收积累。研究显示,Pb胁迫可抑制根尖细胞的分裂,影响根系生长;降低植株叶绿素含量,影响植物的光合作用;诱导产生活性氧(ROS)导致蛋白质、核酸和脂类的氧化损伤^[24]。在不同程度的La-Pb复合胁迫下,接种AM真菌均显著促进了玉米的生长,缓解了La和Pb复合胁迫对植物的毒害作用,可能与AM真菌改善了玉米矿质营养状况,降低了对La和Pb的吸收积累有关。常青等^[25]研究发现,接种AM真菌*C. etunicatum*和*R. intraradices*显著地促进了La-Pb复合污染(La200Pb200、La800Pb800)土壤中玉米的生长,认为与AM真菌显著增加P的吸收,降低植株C:P和N:P有关。已有研究表明,AM真菌可通过促进植物养分吸收,影响重金属的吸收和解毒作用,调节抗氧化系统相关基因的表达,来帮助寄主植物抵抗重金属胁迫的毒害^[26]。

3.3 矿质营养吸收

矿质元素是植物体组成成分,也是植物维持正常生理活动所必需的营养元素,如N、P、K、Ca和Mg元素^[27]。然而,过量的重金属离子会通过竞争载体结合位点的方式影响植物对矿质元素的吸收与转运,对植物的生长产生毒害作用^[28]。本研究显示,La胁迫下随着Pb浓度的增加使玉米矿质营养元素含量降低,但未达显著性水平。接种AM真菌使得玉米植株营养元素N、P、K、Ca、Mg含量显著提高,表明AM真菌可显著改善不同程度La-Pb复合胁迫下玉米的营养状况。在逆境环境中,AM真菌可促进宿主植物对矿质营养元素的吸收,从而提高植物的抗逆性已被众多研究所证实^[29],其机制主要是通过增加矿质元素吸收面积或者活化、开发新磷源的方式增加养分供应^[30-31]。

3.4 Pb和La的吸收、转运

植物对重金属的吸收和积累经常受到其他元素

的影响,研究已表明稀土可显著地影响植物对重金属的吸收和迁移富集,并受稀土浓度、种类、土壤环境因素和植物品种、生长状况等因素的影响^[17]。Wang等^[32]研究发现,低浓度的稀土Ce($20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)可使幼苗期的辣根(*Armoracia rusticana*)地上部和根部Pb浓度显著降低16.1%和25%,而高浓度稀土Ce($300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)则使辣根地上部和根部Pb浓度显著升高32.3%和75%,生殖生长阶段的辣根具有相同的趋势,而旺盛生长阶段Ce处理均使得辣根地上部和根部Pb浓度显著降低。熊双莲等^[33]采用溶液培养试验发现,溶液中La $<1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb处理使得雪菜(*Brassica juncea* var. *crispifolia*)中La从根部向地上部的转运率显著降低,溶液中La为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb处理使得雪菜根部La的浓度仅为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ La单独处理的21%,且La从根部向地上部的转运率升高266.7%,进一步的研究显示La和Pb在根细胞壁中可能存在竞争作用。Chang等^[12]研究发现,无论是否接种AM真菌, $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd均可使 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ La胁迫下玉米地上部和根部La浓度显著降低52.9%~91.2%,而仅在不接种AM真菌时使得La的转运率显著增加,由于Cd和La具有相似的离子半径,推测可能是Cd通过占据阳离子结合位点抑制La进入根细胞。本研究显示,不接种AM真菌时,高浓度Pb处理使玉米地上部La浓度显著降低73.3%,根部La浓度显著增加101.2%,La由根部向地上部的转运率显著降低,低浓度Pb处理对玉米植株La浓度和转运率均无显著影响;而接种AM真菌时,仅低浓度Pb处理使得玉米La的转运率显著增加,表明AM真菌的共生显著改变了Pb对植物吸收和转运La的影响。已有研究结果表明,重金属对于植物稀土元素吸收、转运的影响不仅与环境介质中重金属的浓度、种类有关,AM真菌和植物根系共生也是影响其作用的关键因素之一。目前,重金属对植物吸收、积累和转运稀土元素的影响因素和作用机制尚不明确,应进一步开展深入研究。

4 结论

(1)在 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ La胁迫下, $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb处理显著降低了玉米根系菌根侵染率;接种AM真菌时, $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb处理显著缓解了La胁迫对玉米的毒害作用,AM真菌共生改变了低浓度Pb对稀土La植物毒性的影响;无论是否接种AM真菌, $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb处理均增加了La胁迫对玉米的毒害作用。

(2)不接种AM真菌时, $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb处理显著降低了玉米地上部La浓度和转运率,显著增加了根部La浓度;接种AM真菌时, $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Pb处理显著增加了La的转运率,AM真菌共生显著改变了Pb对玉米吸收和转运La的影响。

(3)接种AM真菌显著改善了La胁迫下玉米植株的矿质营养元素含量,显著影响了玉米对于重金属Pb和稀土La的吸收、转运。

参考文献:

- [1] 高志强,周启星. 稀土矿露天开采过程的污染及对资源和生态环境的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2915-2922.
GAO Zhi-qiang, ZHOU Qi-xing. Contamination from rare earth ore strip mining and its impacts on resources and eco-environment[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(12): 2915-2922.
- [2] 郭伟,付瑞英,赵仁鑫. 内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1895-1900.
GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin. Distribution characteristic and current situation of soil rare earth contamination in the Bayan Obo mining area and Baotou tailing reservoir in Inner Mongolia[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(5): 1895-1900.
- [3] 郭伟,赵仁鑫,张君,等. 内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 3099-3105.
GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHANG Jun, et al. Distribution characteristic and assessment of soil heavy metal pollution in the iron mining of Baotou in Inner Mongolia[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(10): 3099-3105.
- [4] 李小飞,陈志彪,张永贺,等. 稀土矿区土壤和蔬菜稀土元素含量及其健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 835-843.
LI Xiao-fei, CHEN Zhi-biao, ZHANG Yong-he, et al. Concentrations and health risk assessment of rare earth elements in soil and vegetables from a mining area in Fujian Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(3): 835-843.
- [5] 李小飞,陈志彪,陈志强,等. 南方稀土采矿地土壤和蔬菜重金属含量及其健康风险评价[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 146-151.
LI Xiao-fei, CHEN Zhi-biao, CHEN Zhi-qiang, et al. Concentrations and health risk assessment of heavy metal in soil and vegetables from REEs mining area, Fujian Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(1): 146-151.
- [6] Gwenzi W, Mangori L, Danha C, et al. Sources, behaviour, and environmental and human health risks of high-technology rare earth elements as emerging contaminants[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 299-313.
- [7] Boskabady M, Marefati N, Farkhondeh T, et al. The effect of environmental lead exposure on human health and the contribution of inflammatory mechanisms: A review[J]. *Environment International*, 2018, 120: 404-420.
- [8] Smith S E, Smith F A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutri-

- tion and growth; New paradigms from cellular to ecosystem scales[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2011, 62(1):227-250.
- [9] Begum N, Qin C, Ahanger M A, et al. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 1068.
- [10] Chen X H, Zhao B. Arbuscular mycorrhizal fungi mediated uptake of lanthanum in Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.)[J]. *Chemosphere*, 2007, 68:1548-1555.
- [11] Sarkar A, Asaeda T, Wang Q, et al. Arbuscular mycorrhiza confers lead tolerance and uptake in *Miscanthus sacchariflorus*[J]. *Chemistry and Ecology*, 2018, 34(5):454-469.
- [12] Chang Q, Diao F W, Wang Q F, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal symbiosis on growth, nutrient and metal uptake by maize seedlings (*Zea mays* L.) grown in soils spiked with lanthanum and cadmium[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 241:607-615.
- [13] 张玲, 谢晓梅, 张文龙, 等. 镧对大蒜幼苗吸收铅的影响[J]. 安徽中医学院学报, 2005, 24(6):40-41.
ZHANG Ling, XIE Xiao-mei, ZHANG Wen-long, et al. Effects of lanthanum on lead absorption in *Allium Sativum* L.[J]. *Journal of Anhui TCM College*, 2005, 24(6):40-41.
- [14] 王起凡, 郭伟, 常青, 等. 不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响[J]. 环境科学, 2018, 40(1):482-489.
WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, et al. Effects of different concentrations of lanthanum on the growth and uptake of Pb by maize grown under moderate lead stress[J]. *Environmental Science*, 2018, 40(1):482-489.
- [15] Cipullo S, Snapir B, Tardif S, et al. Insights into mixed contaminants interactions and its implication for heavy metals and metalloids mobility, bioavailability and risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645:662-673.
- [16] Boechat C L, Quadros P D D, Giovanella P, et al. Metal-resistant rhizobacteria change soluble-exchangeable fraction in multi-metal-contaminated soil samples[J]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2018, 42:1-11.
- [17] 赵文静, 郭伟, 赵仁鑫, 等. 稀土元素对土壤-植物系统中重金属行为的影响及其机理研究进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(2):508-512.
ZHAO Wen-jing, GUO Wei, ZHAO Ren-xin, et al. Effects of rare earth elements on heavy metal behavior and their action mechanisms in a soil-plant system[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(2):508-512.
- [18] 王学锋, 许春雪, 顾雪, 等. 典型稀土矿区周边土壤中稀土元素含量及赋存形态研究[J]. 岩矿测试, 2019, 38(2):137-146.
WANG Xue-feng, XU Chun-xue, GU Xue, et al. Concentration and fractionation of rare earth elements in soils surrounding rare earth ore area[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2019, 38(2):137-146.
- [19] 刘胜洪, 张雅君, 杨秒贤, 等. 稀土尾矿区土壤重金属污染与优势植物累积特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(6):1042-1045.
LIU Sheng-hong, ZHANG Ya-jun, YANG Miao-xian, et al. Heavy metal contamination of soil and concentration of dominant plants in rare earth mine tailing area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(6):1042-1045.
- [20] Lenoir I, Fontaine J, Sahraoui A L. Arbuscular mycorrhizal fungal responses to abiotic stresses: A review[J]. *Phytochemistry*, 2016, 123:4-15.
- [21] Debiane D, Garcon G, Verdin A, et al. Mycorrhization alleviates benzo[a]pyrene-induced oxidative stress in an in vitro chicory root model[J]. *Phytochemistry*, 2009, 69(11):1421-1427.
- [22] Schneider J, Bundschuh J, Nascimento C W. Arbuscular mycorrhizal fungi-assisted phytoremediation of a lead-contaminated site[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 572:86-97.
- [23] Kovarikova M, Tomaskova I, Soudek P. Rare earth elements in plants[J]. *Biologia Plantarum*, 2019, 63(1):20-32.
- [24] Rizwan M, Ali S, Rehman M Z U, et al. Lead toxicity in cereals and its management strategies: A critical review[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2018, 229(211):1-16.
- [25] 常青, 郭伟, 潘亮, 等. 镧-铅复合污染下AM真菌对玉米生长和镧、铅吸收的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(9):3915-3926.
CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and uptake of La and Pb by maize grown in La and Pb-contaminated soil[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(9):3915-3926.
- [26] Miransari M. Arbuscular mycorrhizal fungi and heavy metal tolerance in plants[M]//Wang Q S. Arbuscular mycorrhizas and stress tolerance of plants. Singapore:Springer, 2017:147-161.
- [27] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 7版. 北京:高等教育出版社, 2012:33-38.
PAN Rui-chi. Plant physiology[M]. 7th Edition. Beijing:Higher Education Press, 2012:33-38.
- [28] Kupper H, Andresen E. Mechanisms of metal toxicity in plants[J]. *Metallomics*, 2016, 8(3):269-285.
- [29] Ferrol N, Tamayo E, Vargas P. The heavy metal paradox in arbuscular mycorrhizas: From mechanisms to biotechnological applications[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2016, 67(22):6253-6265.
- [30] Ferrol N, Azconaguilar C, Pereztienda J. Review: Arbuscular mycorrhizas as key players in sustainable plant phosphorus acquisition: An overview on the mechanisms involved[J]. *Plant Science*, 2019, 280:441-447.
- [31] Hu J L, Tsang W, Wu F Y, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi optimize the acquisition and translocation of Cd and P by cucumber (*Cucumis sativus* L.) plant cultivated on a Cd-contaminated soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(9):2195-2202.
- [32] Wang L H, Huang X H, Zhou Q. Effects of rare earth elements on the distribution of mineral elements and heavy metals in horseradish[J]. *Chemosphere*, 2008, 73(3):314-319.
- [33] 熊双莲, 熊治廷. 镧和铅相互作用对雪菜生长及其镧铅累积的影响[J]. 华中农业大学学报, 2007, 26(02):199-202.
XIONG Shuang-lian, XIONG Zhi-ting. Interactive effects of La and Pb on plant growth and bioaccumulation of La and Pb in *Brassica juncea* var. *crispifolia*[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2007, 26(2):199-202.