



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

AMF对铅锌矿区农田土壤部分理化性质、玉米生长和镉铅含量的影响

张金秀, 湛方栋, 王灿, 李博, 李明锐, 何永美, 李元

引用本文:

张金秀, 湛方栋, 王灿, 等. AMF对铅锌矿区农田土壤部分理化性质、玉米生长和镉铅含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 727–735.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0186>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

接种丛枝菌根真菌的种植紫花苜蓿土壤中球囊霉素含量与去除的关系

杨振亚, 宗炯, 朱雪竹, 凌婉婷

农业资源与环境学报. 2016, 33(4): 349–354 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0086>

生物炭和石灰对红壤理化性质及烟草苗期生长影响的差异

朱盼, 应介官, 彭抒昂, 姜存仓

农业资源与环境学报. 2015(6): 590–595 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0152>

接种AM真菌对不同盐度土壤中向日葵生长的影响

周昕南, 杨亮, 许静, 王亚男, 杨久扬, 郝利君, 刁凤伟, 郭伟

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 744–752 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0184>

土壤镉污染对小麦生长及镉吸收的影响

张婧, 李仁英, 徐向华, 谢晓金, ChambeEA

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 522–527 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0215>

生物炭与肥料复配对土壤重金属镉污染钝化修复效应

王期凯, 郭文娟, 孙国红, 林大松, 徐应明, 刘静茹, 于士雷

农业资源与环境学报. 2015(6): 583–589 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0149>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张金秀, 湛方栋, 王灿, 等. AMF对铅锌矿区农田土壤部分理化性质、玉米生长和镉铅含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 727-735.

ZHANG Jin-xiu, ZHAN Fang-dong, WANG Can, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on soil physical and chemical properties, maize growth, cadmium, and lead content of farmland from a lead-zinc mine area[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(5): 727-735.



开放科学 OSID

AMF对铅锌矿区农田土壤部分理化性质、玉米生长和镉铅含量的影响

张金秀¹, 湛方栋¹, 王灿², 李博¹, 李明锐¹, 何永美^{1*}, 李元¹

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 中国冶金地质总局昆明地质勘查院, 昆明 650203)

摘要:为研究重金属污染胁迫下丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)对土壤部分理化性质、玉米生长、光合生理、养分与镉铅含量的影响,以云南会泽、兰坪铅锌矿区周边重金属污染农田土壤为供试土壤,玉米为宿主植物,设置接种和不接种AMF处理,开展室内盆栽试验。结果表明:接种AMF显著增加土壤易提取球囊霉素相关蛋白(EE-GRSP)与总球囊霉素相关蛋白(T-GRSP)的含量;降低土壤有效态镉、铅含量,降幅为34.6%~79.5%;增加土壤中碱解氮和速效磷的含量,增幅为30.9%~206%。接种AMF显著增加玉米植株氮磷养分含量,增幅为17.6%~38.5%;增强叶片光合作用,提高植株生物量;降低植株镉铅含量,降幅达30.0%~68.7%。相关性分析发现,土壤T-GRSP与碱解氮、速效磷含量呈极显著正相关;EE-GRSP、T-GRSP与有效态铅含量呈显著负相关;玉米植株镉、铅含量与土壤有效态镉、铅含量呈显著正相关;玉米根系氮与土壤碱解氮含量、植株磷与土壤速效磷含量呈显著正相关。研究表明,接种AMF增加土壤球囊霉素相关蛋白含量,降低污染土壤镉、铅生物有效性,减少玉米植株镉、铅的含量;增加土壤速效养分含量,改善玉米矿质营养和光合生理,提高玉米植株生物量。

关键词:丛枝菌根真菌(AMF);球囊霉素相关蛋白;生物有效性;矿质营养;光合生理

中图分类号:X172

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)05-0727-09

doi: 10.13254/j.jare.2019.0186

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on soil physical and chemical properties, maize growth, cadmium, and lead content of farmland from a lead-zinc mine area

ZHANG Jin-xiu¹, ZHAN Fang-dong¹, WANG Can², LI Bo¹, LI Ming-rui¹, HE Yong-mei^{1*}, LI Yuan¹

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Kunming Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Kunming 650203, China)

Abstract: The present study aimed to investigate effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on soil physical and chemical properties, maize growth, photosynthetic physiology, nutrient content, and cadmium and lead content in maize under heavy metal stress. Heavy metal-contaminated farmland soil was sampled from lead-zinc mining areas in Huize and Lanping Counties, Yunnan Province. A pot experiment was carried out using maize as the host plant with AMF inoculation. Results showed that: Inoculation with AMF significantly increased the content of easily extractable glomalin related soil protein (EE-GRSP) and total glomalin related soil protein (T-GRSP). The available content of Cd and Pb in soil reduced by 34.6%~79.5%, and the content of available nitrogen and phosphorus in soil increased by 30.9%~

收稿日期:2019-04-12 录用日期:2019-06-28

作者简介:张金秀(1992—),女,硕士研究生,主要从事土壤重金属污染修复研究。E-mail:1498315925@qq.com

*通信作者:何永美 E-mail:heyongmei06@126.com

基金项目:国家自然科学基金(41661056);云南省重点研发项目(2018BB017);云南省自然科学基金(2016FB032);云南省中青年学术和技术带头人后备人才培养项目(2018HB043);云南省农田无公害生产科技创新团队项目(2017HC015)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41661056); Key Research Development Project in Yunnan Province (2018BB017); Natural Science Foundation of Yunnan Province (2016FB032); Reserve Talents Fund for Young and Middle-Aged Academic and Technological Leaders in Yunnan Province (2018HB043); Science and Technology Innovation Team Program of Yunnan Province(2017HC015)

206%。Under inoculation with AMF, the content of nitrogen and phosphorus in maize increased significantly by 17.6%~38.5%, photosynthesis of leaves and plant biomass were enhanced, and content of Cd and Pb in maize reduced by 30.0%~68.7%. Correlation analysis indicated that there was a very significant positive correlation between the T-GRSP content and the content of available nitrogen and phosphorus. A significant negative correlation between the content of EE-GRSP and T-GRSP and the available Pb content in soil, and a significant positive correlation between the content of Cd and Pb in maize and the available content of Cd and Pb in soil were observed. In addition, there were significant positive correlations between the nitrogen content in maize roots and the available nitrogen content in soil, and between the phosphorus content in maize and the available phosphorus content in soil. Results indicated that AMF inoculation reduced the content of Cd and Pb in maize by decreasing the bioavailability of Cd and Pb with an increase in the GRSP in the polluted soil, and enhanced maize biomass by increasing the available nutrient content in soil and improving the mineral nutrition and photosynthetic physiology of maize.

Keywords: arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); glomalin related soil protein; bioavailability; mineral nutrition; photosynthetic physiology

工业的迅速发展与金属矿产的开采和冶炼,导致矿区周边农田土壤重金属严重污染^[1]。据报道,我国受重金属污染耕地面积占耕地总面积20%^[2]。重金属污染的农田土壤肥力降低,农作物产量和品质下降^[3-4],严重影响农业的可持续发展。然而,一些植物在高浓度重金属胁迫下依然能存活,这引起研究学者格外关注。有研究表明,耐性植物能在重金属胁迫下存活主要与根际微生物有关^[5-6]。微生物对寄主植物与土壤具有至关重要的作用。

丛枝菌根真菌 (Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 是在自然界中广泛存在的一种微生物,与90%以上的高等陆生植物根系形成丛枝菌根共生体^[7-8]。AMF除了能改善植物根际土壤的理化性质外,还能对宿主植物的营养、水分吸收和植物生长产生促进效应。在重金属的胁迫下,AMF菌丝分泌一类特殊的糖蛋白——球囊霉素相关蛋白 (Glomalin related soil protein, GRSP),能大量结合土壤中的重金属离子,改变土壤中重金属的生物有效性^[9-10]。GRSP和根外菌丝的协同作用可促进土壤团粒的形成。土壤团粒是土壤养分的储存库和各种微生物的生境^[11],是土壤中有有机碳、氮的一个主要来源,对不稳定性碳、氮具有保护作用^[12-13]。土壤团聚体的特殊结构能间接吸附土壤中有有效态重金属,对有效态重金属具有固定作用^[14],也能固定土壤中矿质养分和水分^[15-16],改善根际土的理化性质。根际环境的状况直接影响重金属在土壤-植物系统中的迁移与转化^[17],调节植物对重金属的吸收和转运过程,抑制植物体内重金属转移^[18],降低重金属的毒害作用。AMF侵染植物根系后改变根表面的理化性质和根系的形态,增强植物对矿质养分的吸收,从而促进植物的生长^[19]。目前AMF协助宿主植物直接对抗重金属的毒害机制已有大量文献报道,但AMF间接影响宿主植物对重金属的耐性机

理研究极为少见。AMF间接作用在其中发挥的重要作用不容忽视,因此利用AMF改善重金属污染的农田土壤、提高农作物抗性、改良农作物品质和提高产量具有重要的科研价值。

云南省会泽县位于云南省东部,是我国重要的铅锌矿产地之一,是我国铅锌矿区的典型代表^[20]。兰坪县位于云南省西北部,是亚洲最大的铅锌矿床,也是世界特大型铅锌矿床之一^[21]。两大矿区的生产与冶炼对矿区周边农田土壤造成不同程度的重金属污染^[22],而农田土壤是人类赖以生存的重要基质,改善农田土壤性质、提升农作物品质和产量是近年来重要的任务^[23]。本文选取会泽县、兰坪县矿区周边废弃农田土壤为基质,探讨接种AMF对玉米的生长、矿质营养和重金属(镉、铅)累积的影响,旨在为农产品的增产、品质的改善以及矿区重金属污染农田土壤的修复机理研究提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试玉米 (*Zea mays* L.) 为会单4号,于云南省昆明市小板桥种子市场购得,所选种子籽粒饱满且大小一致。

供试土壤为山原红壤,采自云南省会泽某铅锌矿 (26°34'21.1"N, 103°38'12.9"E)、兰坪某铅锌矿 (26°22'30.0"N, 99°22'27.6"E) 周边污染农田土壤,基本理化指标见表1。

供试菌种AMF为摩西球囊霉菌,由北京市农林科学院植物营养与资源研究所提供。扩繁AMF,土壤来自会泽县者海镇玛色卡村,以玉米为宿主植物,AMF定殖于植物根系后,形成典型的特征结构,并大量增殖,使AMF菌群不断扩增。扩繁后每克土壤含20~28个孢子。

表1 土壤基本理化性质

Table 1 The basic physical and chemical properties of soil

土壤 Soil	pH	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable N/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	镉 Cd/(mg·kg ⁻¹)	铅 Pb/(mg·kg ⁻¹)
会泽	5.54	28.12	1.36	0.52	28.06	17.52	10.21	175.48
兰坪	6.11	32.12	2.87	1.58	72.54	58.03	4.27	68.29

1.2 试验设计

将玉米种子放入1%次氯酸钠(NaClO)溶液中处理1 min,取出洗净后,放入75%的乙醇溶液中处理3 min,洗净后,放入垫有浸湿滤纸已灭菌的培养皿中,在25℃恒温培养箱中培养4 d,待种子萌发冒白芽,挑选无污染且生长一致的幼苗,备用。

土壤采回后,经自然风干,剔除杂物,捣碎研磨后过2 mm尼龙筛混匀,将土壤放入蒸汽高压灭菌锅,设置121℃高温灭菌120 min后^[24],常温条件放置3 d待用。

于2018年6月9日在云南农业大学实验大棚内开始试验,试验分别选取会泽、兰坪两个地方土壤,每个地方土壤设两组处理(对照、接种AMF),每组处理4个平行,共16份盆栽。对照组(CK):灭菌土4 kg+灭菌土40 g;接种AMF组(AMF):灭菌土4 kg+AMF菌种40 g。每盆播种玉米苗2株,实验过程中不施用化肥和农药,采用自然光照,期间根据盆栽土壤水分状况浇灌去离子水,保持土壤湿润,培育60 d后采样。

将玉米整株取出,抖去根部附着比较疏松的土壤,采集与根系紧密结合的根际土壤(厚度约为1 mm),自然风干捣碎研磨后装袋备用。将玉米植株分为地上部茎叶和地下部根系,用无菌水漂洗干净,晾干,于105℃杀青30 min,再经75℃烘干72 h至恒质量,碾磨粉碎备用^[22]。

1.3 测定方法

植物根系侵染率测定:根系洗净后取长1 cm根段样品,将其在100℃、10%KOH溶液中脱色30 min至透明,用无菌水冲洗3次,将根段放入2% HCl 3~5 min后,用无菌水冲洗3~5次,用90℃酸性品红染色液染色30 min,挑选出较完整的根段,将其排列在载玻片上,盖上盖玻片后在电子显微镜上观察^[25]。菌丝密度的测定按照Abbott等^[26]的方法进行。

采用湿筛-倾析法测定孢子数,取土样5 g于烧杯中,加100 mL蒸馏水,顺时针搅拌2 min,静置10 min,悬浮液倒入离心管,转速2000 r·min⁻¹离心5 min,取上清液,加入45%蔗糖溶液,继续离心30 s,将上清液过0.45 μm滤膜,在显微镜下观察计数^[27]。

用直尺测量株高,地上部和地下部干质量用电子秤称量。采用便携式叶绿素测定仪HM-YD测定叶绿素,英国PP-System公司CIRAS-1型全自动便携式光合测定仪测定光合作用指标参数^[28]。

分别采用碱解扩散比色法、0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定土壤碱解氮、速效磷的含量^[29]。

H₂SO₄-H₂O₂消煮后,分别采用凯氏定氮法和钒钼黄比色法测定植株全氮和全磷的含量。HNO₃-HClO₄消煮后,采用火焰原子吸收分光光度法测定植物镉和铅的含量。0.1 mol·L⁻¹ HCl浸提后,采用火焰原子分光光度法测定土壤有效态镉和铅的含量^[30]。

土壤总球囊霉素相关蛋白(Total glomalin related soil protein, T-GRSP)和易提取球囊霉素相关蛋白(Easily extractive glomalin related soil protein, EE-GRSP)含量测定方法:取1.0 g风干土样,分别用20 mmol·L⁻¹柠檬酸缓冲液(pH 7.0)提取30 min或者50 mmol·L⁻¹柠檬酸钠缓冲液(pH 8.0)提取60 min,提取条件为0.11 MPa、121℃,然后10 000 r·min⁻¹离心5 min,分别得到EE-GRSP和T-GRSP的待测液,采用Bradford法测定上清液中GRSP的含量^[31]。

1.4 统计分析

试验数据运用Microsoft Excel 2013对数据进行处理,计算平均值和标准差,用IBM SPSS Statistics V21.0数据处理软件进行统计分析,用Duncan法检验各处理平均值在0.05水平的差异性,用OriginPro 9.0进行绘图。

2 结果与分析

2.1 接种AMF菌根侵染特征

经检测,接种AMF处理的会泽和兰坪土壤中玉米根系侵染率分别为35.23%和25.42%,菌丝密度分别为40.16 cm·g⁻¹和28.36 cm·g⁻¹,孢子数分别为26.72个·g⁻¹和18.82个·g⁻¹。

由图1可知,两种土壤接种AMF后土壤球囊霉素相关蛋白含量显著增加,会泽和兰坪土壤易提取球囊霉素相关蛋白含量分别增加77.9%和45.2%,总球囊

霉素相关蛋白含量分别增加75.1%和88.8%。说明接种AMF能增加土壤球囊霉素相关蛋白含量。

2.2 接种AMF对玉米植株光合生理和生长的影响

由表2可见,会泽和兰坪两种土壤接种AMF后玉米叶片光合生理均显著增加,增加的幅度各有差异,其中会泽土壤玉米叶片叶绿素含量、光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间CO₂浓度分别增加60.8%、1.55倍、4.00倍、89.1%和33.9%;兰坪土壤玉米叶片叶绿素含量、光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间CO₂浓度增幅分别为12.1%、69.8%、1.00倍、24.3%和1.34倍。说明接种AMF能不同程度增加玉米叶片光合生理指标。

由表3可见,会泽土壤接种AMF处理玉米地上部、地下部的生物量和株高均显著提高,地上部分别增加1.17倍和39.1%;地下部分别增加1.15倍和61.9%。兰坪土壤接种AMF处理玉米地上部生物量和株高显著增加,增幅分别为36.2%和12.8%,但对地下部生物量和株高没有显著影响($P>0.05$)。说明接

种AMF能增加玉米地上部的生物量和株高。

2.3 接种AMF对土壤-玉米体系养分含量的影响

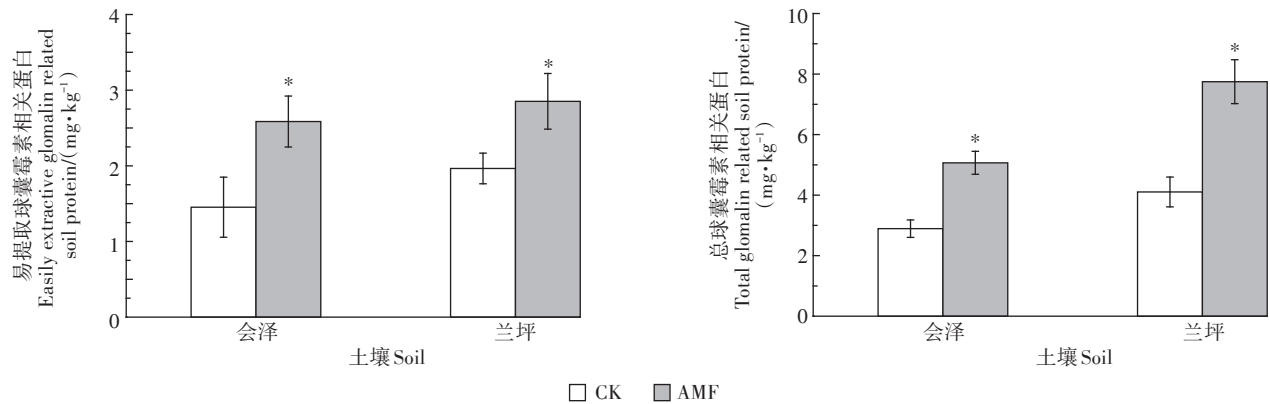
由表4可知,两种土壤接种AMF处理土壤碱解氮和速效磷含量均显著增加,会泽土壤碱解氮和速效磷含量分别增加63.8%和2.06倍,兰坪土壤碱解氮和速效磷含量分别增加30.9%和92.8%。说明土壤接种AMF能增加土壤速效养分含量。

两种土壤接种AMF处理玉米养分含量均显著升高,会泽玉米地上部、地下部的全氮和全磷含量分别

表3 接种AMF对玉米株高和生物量的影响

Table 3 Effect of AMF inoculation on plant height and biomass of

Zea mays L.					
土壤 Soil	处理 Treatments	生物量 Biomass/(g·pot ⁻¹)		株高 Plant height/cm	
		地上部 Shoots	地下部 Roots	地上部 Shoots	地下部 Roots
会泽	CK	1.10±0.20	0.60±0.05	37.75±1.40	25.63±1.60
	AMF	2.39±0.49*	1.29±0.10*	52.50±2.20*	41.50±1.20*
兰坪	CK	33.98±1.10	5.70±0.80	94.20±2.80	78.00±3.10
	AMF	46.31±2.10*	6.59±0.68	106.25±3.00*	81.67±1.54



*表示与CK差异达到 $P<0.05$ 显著水平。下同

* indicate significant differences compared with CK ($P<0.05$). The same below

图1 接种AMF对土壤球囊霉素相关蛋白含量的影响

Figure 1 Effect of AMF inoculation on the content of glomelin related protein in soil

表2 接种AMF对玉米叶片光合指标的影响

Table 2 Effect of AMF inoculation on the photosynthetic indicators of *Zea mays* L.

土壤 Soil	处理 Treatments	叶绿素 Chlorophyll/ (mg·g ⁻¹)	光合速率 Photosynthetic rate/ (mol·m ⁻² ·s ⁻¹)	气孔导度 Stomatal conductance/ (mol·m ⁻² ·s ⁻¹)	蒸腾速率 Transpiration rate/ (mol·m ⁻² ·s ⁻¹)	胞间CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration/ (mol·m ⁻² ·s ⁻¹)
会泽	CK	11.45±1.20	2.75±0.50	0.02±0.00	0.46±0.11	217.70±13.00
	AMF	18.41±0.90*	7.02±0.52*	0.10±0.03*	0.87±0.10*	291.5±11.00*
兰坪	CK	31.20±1.40	4.67±0.70	0.02±0.00	0.74±0.03	59.70±4.30
	AMF	34.97±2.50*	7.93±0.28*	0.04±0.01*	0.92±0.06*	139.70±9.55*

注:数值为平均值±标准差;*表示与CK差异达到 $P<0.05$ 显著水平。下同。

Notes: Data is average value ± standard deviation; * indicate significant differences compared with CK. The same below.

增加30.3%、34.6%和17.6%、35.7%;兰坪玉米地上部全氮含量增加33.3%,但地下部全氮含量无显著差异($P>0.05$),地上部和地下部全磷含量分别增加38.5%和32%(表4)。说明接种AMF能增加玉米植株养分含量。

2.4 接种AMF对土壤有效态镉、铅含量的影响

两种土壤接种AMF后土壤中有效态镉、铅含量均显著降低,会泽土壤有效态镉、铅含量分别降低79.5%和36.6%,兰坪土壤有效态镉、铅含量分别降低75.7%和34.6%(图2)。说明接种AMF能降低土壤中有效态重金属含量。

2.5 接种AMF对玉米植株镉、铅含量和累积量的影响

由表5可知,两种土壤接种AMF后玉米中镉、铅含量均显著降低,会泽土壤地上部和地下部镉、铅含

量分别降低32.9%和58.1%、30.0%和41.6%,兰坪土壤地上部和地下部镉、铅含量分别降低45%和40%、68.7%和62.6%。

会泽土壤接种AMF处理玉米镉、铅元素地下部向地上部的转运系数显著增加;兰坪土壤接种AMF处理玉米铅元素地下部向地上部的转运系数显著降低,但镉元素的转运系数没有显著差异($P>0.05$)。

由表6可知,两种土壤接种AMF后,会泽土壤玉米地上部镉和铅累积量显著增加,分别增加45.4%和52.1%。兰坪土壤地上部、地下部的镉和铅累积量显著降低,分别降低25%、30.6%和57.2%、56.9%。重金属污染土壤接种AMF对玉米地上部、地下部的镉、铅累积量会表现出抑制、无影响和促进等不同效应。

表4 接种AMF对土壤、玉米养分含量的影响
Table 4 Effects of AMF inoculation on soil and maize nutrient contents

土壤 Soil	处理 Treatments	土壤碱解氮 Alkali-hydrolyzable N/(mg·kg ⁻¹)	土壤速效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	玉米全氮 Maize total N/(mg·kg ⁻¹)		玉米全磷 Maize total P/(mg·kg ⁻¹)	
				地上部Shoots	地下部Roots	地上部Shoots	地下部Roots
会泽	CK	0.58±0.05	0.15±0.02	0.33±0.08	0.26±0.03	0.17±0.06	0.14±0.07
	AMF	0.95±0.08*	0.46±0.02*	0.43±0.08*	0.35±0.02*	0.20±0.05*	0.19±0.03*
兰坪	CK	8.32±0.19	2.23±0.87	0.30±0.09	0.29±0.03	0.26±0.07	0.25±0.05
	AMF	10.89±0.58*	4.30±0.47*	0.40±0.07*	0.31±0.01	0.36±0.02*	0.33±0.06*

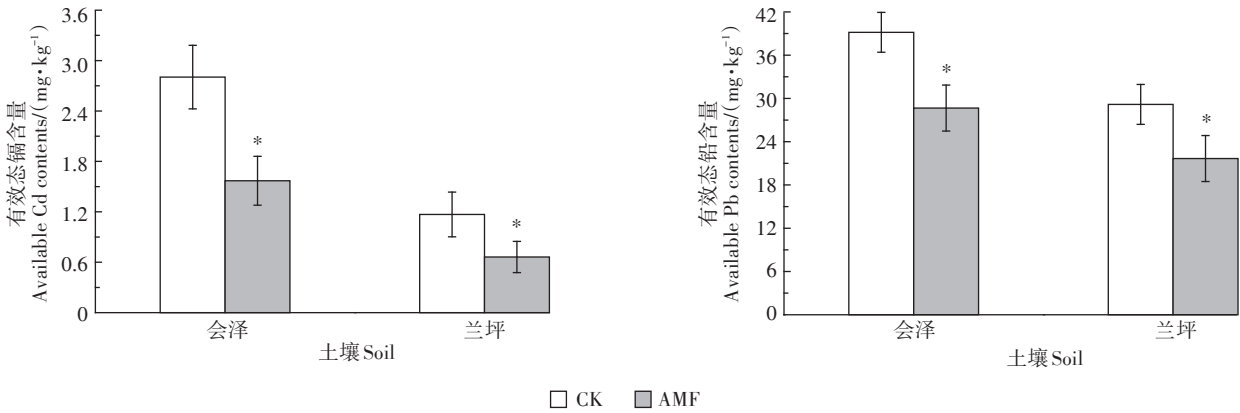


图2 接种AMF对土壤有效态镉、铅含量的影响
Figure 2 Effects of AMF inoculation on soil available Cd and Pb contents

表5 接种AMF对玉米植株镉、铅含量及转运系数的影响
Table 5 Effects of AMF inoculation on Cd and Pb content and transport coefficient of *Zea mays* L.

土壤 Soil	处理 Treatments	Cd含量 Cd contents/(mg·kg ⁻¹)		Pb含量 Pb contents/(mg·kg ⁻¹)		转运系数 Transport coefficient	
		地上部Shoots	地下部Roots	地上部Shoots	地下部Roots	Cd	Pb
会泽	CK	0.88±0.11	0.74±0.09	2.13±0.23	3.89±1.04	1.18±0.18	0.55±0.19
	AMF	0.59±0.08*	0.31±0.02*	1.49±0.42*	2.27±0.53*	1.90±0.28*	0.66±0.07*
兰坪	CK	0.31±0.05	1.35±0.61	1.50±0.60	1.93±0.38	0.23±0.17	0.78±0.32
	AMF	0.17±0.05*	0.81±0.17*	0.47±0.12*	0.72±0.19*	0.21±0.04	0.65±0.02*

表6 接种AMF对玉米植株镉、铅累积量的影响

Table 6 Effects of AMF inoculation on Cd and Pb accumulation of *Zea mays* L.

土壤 Soil	处理 Treatments	镉累积量 Cd accumulation/(mg·株 ⁻¹)		铅累积量 Pb accumulation/(mg·株 ⁻¹)	
		地上部 Shoots	地下部 Roots	地上部 Shoots	地下部 Roots
会泽	CK	0.97±0.10	0.44±0.05	2.34±0.31	2.33±0.29
	AMF	1.41±0.27*	0.39±0.12	3.56±0.94*	2.93±0.28
兰坪	CK	10.5±1.32	7.69±1.04	50.97±3.90	11.00±1.42
	AMF	7.87±1.53*	5.34±1.20*	21.8±2.02*	4.74±1.04*

2.6 相关性分析

由表7~表9可看出,EE-GRSP与土壤有效态铅呈显著负相关,T-GRSP与土壤有效态铅呈显著负相关,与土壤碱解氮、速效磷呈极显著正相关。玉米镉含量与土壤有效态镉呈显著正相关,玉米铅含量与土壤有效态铅呈显著正相关。玉米地下部全氮与土壤碱解氮呈显著正相关,与土壤速效磷呈显著正相关。玉米全磷含量与土壤速效磷呈显著正相关。

3 讨论

GRSP是AMF代谢分泌的一类糖蛋白^[32-33],能与土壤中重金属结合,改变重金属的生物有效性。目前

表7 GRSP与土壤有效态镉、铅和速效氮、磷养分的相关性

Table 7 Correlation between GRSP and soil available Cd, Pb and available N and P

项目 Items	有效态镉 Available Cd	有效态铅 Available Pb	碱解氮 Alkali-hydrolyzable N	速效磷 Available P
EE-GRSP	-0.455	-0.711*	0.246	0.291
T-GRSP	-0.342	-0.567*	0.929**	0.926**

注: *表示 $P<0.05$, **表示 $P<0.01$, $n=8$ 。下同。

Notes: * indicates $P<0.05$, ** indicates $P<0.01$, $n=8$. The same below.

表8 土壤有效态镉、铅与玉米镉、铅含量的相关性

Table 8 Correlation between soil available Cd, Pb and maize Cd, Pb contents

项目 Items	Cd		Pb	
	地上部 Shoots	地下部 Roots	地上部 Shoots	地下部 Roots
土壤有效态镉	0.676*	0.720*	0.010	0.181
土壤有效态铅	0.026	0.043	0.786*	0.840**

表9 土壤速效氮、磷养分与玉米氮、磷全量的相关性

Table 9 Correlation between soil available N, P and total N, P in maize

项目 Items	全氮 Total N		全磷 Total P	
	地上部 Shoots	地下部 Roots	地上部 Shoots	地下部 Roots
土壤碱解氮	0.503	0.638*	0.543*	0.479
土壤速效磷	0.612*	0.667*	0.751*	0.634*

GRSP在土壤生态系统中的生态学功能以及生态学地位受到学者们的重视。有学者研究表明,GRSP能固定土壤中镉、铅等重金属离子,改变重金属离子在土壤中的生物有效性^[34],且固定量与总量成正相关,反之GRSP与土壤有效态重金属含量成负相关。与本研究在重金属胁迫下,接种AMF土壤T-GRSP和EE-GRSP含量高于对照处理的土壤,土壤有效态重金属镉、铅含量显著降低,土壤T-GRSP和EE-GRSP含量与土壤重金属镉、铅含量呈显著负相关的结果相对应。目前GRSP的结构还未完全确定,最初有学者研究发现可能由于GRSP含有芳香烃、羟基等不稳定活性官能团^[35],通过离子交换吸附-配合-共沉淀的作用,促使土壤中的重金属由离子态向残渣态转变,从而降低土壤中重金属的生物有效性;之后有学者研究表明可能由于GRSP中不稳定的金属阳离子被土壤中的活性重金属阳离子取代,从而被固定在土壤中^[36-37]。总之,GRSP能改变土壤中重金属生物有效性,且能将重金属固定在土壤中,具体原因还有待深入探讨。

在重金属的胁迫下,丛枝菌根结构不仅可以通过提高作物对磷元素的吸收增加作物体内叶绿素含量、促进光合作用、增强农作物抵抗重金属毒害的能力^[38],还可以通过固氮、溶磷作用增加植物氮营养以及对土壤中不溶性磷的转化与吸收,进而促进作物生长,提高生物量。作物生长离不开光合作用,叶绿素是作物进行光合作用的重要色素因子,光合速率、胞间CO₂浓度、蒸腾速率和气孔导度是影响光合作用的重要因素^[39]。叶片叶绿素的含量直接影响植物光合作用的强弱与生长状况,但重金属胁迫下,植物吸收大量的重金属会破坏叶绿素的结构,使光合作用受到抑制^[40-41],进而抑制植物生长。本研究结果表明,重金属胁迫下接种AMF能显著提高玉米叶片叶绿素的含量,增加光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间CO₂浓度。这可能由于丛枝菌根共生体扩大了寄主植物根吸收面积,加速根系生长,提高对移动性低的氮磷

元素的吸收^[42],从而提高光合速率,促进生物的生长,增加生物量^[15]。

AMF具有较强的重金属络合能力,能通过表面的吸附作用以及菌丝产生 GRSP 的结合作用降低重金属对植物的毒性。AMF 侵染可增加植物根细胞中的金属螯合态 PCs-多聚甘氨酸含量,能将植物中的重金属结合在根部,从而抑制重金属向植物地上部转运,进而降低重金属的生理毒害^[43]。AMF 可以通过菌丝对重金属的过滤以及真菌细胞壁分泌的黏液和组织中的聚磷酸盐、有机酸等络合作用^[44],避免重金属对植物组织造成伤害,此过程统称为过滤机制。接种 AMF 能降低植物中重金属含量,但对植物中重金属累积量的影响会表现出抑制、无影响和促进等不同效应,对翅荚木^[45]重金属的累积量表现促进效应,对紫花苜蓿^[46]地上部累积量表现抑制作用。本研究结果表明,重金属胁迫下,接种 AMF 玉米地上部和地下部镉、铅含量显著降低,会泽矿区土壤玉米地上部镉、铅累积量均显著增加,兰坪矿区玉米地上部和地下部镉、铅累积量均显著降低;会泽矿区土壤玉米地下部向地上部镉、铅转运系数均显著增加,且镉转运系数大于铅转运系数;兰坪矿区土壤玉米地下部向地上部铅转运系数显著降低,而镉转运系数小于铅转运系数。有学者对一些作物研究发现,AMF 能提高牡丹的叶绿素、可溶性蛋白质、矿质元素(氮、磷、钾)含量,提高生物量,促进牡丹生长^[47]。AMF 可以通过提高花生对磷元素的吸收来增加植株体内叶绿素含量及改善光合作用,增强花生抗 Cd 毒害的能力,进而促进花生生长,提高植株生物量^[38]。与本试验重金属胁迫下,接种 AMF 玉米养分(全氮、全磷)含量显著增加,生物量与产量上升,且 EE-GRSP 与玉米全氮呈显著正相关,T-GRSP 与玉米全磷呈显著正相关的结果相一致。本研究发现接种 AMF 后两个矿区土壤部分理化性质、玉米生长和镉铅含量、累积量等结果存在差异,可能由于两个矿区的土壤理化性质与重金属污染程度不同,具体原因还需深入研究。AMF 对不同类型的污染土壤作用效果也需大量的试验进行研究。

4 结论

重金属胁迫下,会泽、兰坪两种土壤接种 AMF 都能促进 AMF 分泌 GRSP 次生代谢产物,降低土壤中有效态镉、铅含量,减少玉米对重金属的吸收,促进玉米叶片的光合作用以及玉米对养分(氮、磷)的吸收,提高生物量。

参考文献:

- [1] 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估[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 1054-1063.
WU Jin-nan, LONG Jian, LIU Ling-fei, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of a lead-zinc mining area[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(3): 1054-1063.
- [2] 韦朝阳,陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1196-1203.
WEI Chao-yang, CHEN Tong-bin. Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: A review of studies in China and abroad[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1196-1203.
- [3] 陈卫平,杨阳,谢天,等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 261-272.
CHEN Wei-ping, YANG Yang, XIE Tian, et al. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2): 261-272.
- [4] 陈凤,董泽琴,王程程,等. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评估[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4360-4369.
CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, et al. Heavy metal contamination of soils and crops near a zinc smelter[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(10): 4360-4369.
- [5] 杨晔,陈英旭,孙振世. 重金属胁迫下根际效应的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2001, 20(1): 55-58.
YANG Ye, CHEN Ying-xu, SUN Zhen-shi, et al. Progress on effects of heavy metal pollution in rhizosphere[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2001, 20(1): 55-58.
- [6] 阮迪申,曾加会,晁元卿,等. 重金属胁迫下内生菌对宿主植物的解毒机制[J]. 微生物学通报, 2016, 43(12): 2700-2706.
RUAN Di-Shen, ZENG Jia-hui, CHAO Yuan-qing, et al. Role of endophytes in plant tolerance to heavy metal stress[J]. *Microbiology China*, 2016, 43(12): 2700-2706.
- [7] Luginbuehl L H, Menard G N, Kurup S, et al. Fatty acids in arbuscular mycorrhizal fungi are synthesized by the host plant[J]. *Science*, 2017, 356(6343): 1175-1178.
- [8] 祖艳群,卢鑫,湛方栋,等. 丛枝菌根真菌在土壤重金属污染植物修复中的作用及机理研究进展[J]. 植物生理学报, 2015(10): 1538-1548.
ZU Yan-qun, LU Xin, ZHAN Fang-dong, et al. A review on roles and mechanisms of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metals-polluted soils[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015(10): 1538-1548.
- [9] Glassman S I, Casper B B. Biotic contexts alter metal sequestration and AMF effects on plant growth in soils polluted with heavy metals[J]. *Ecology*, 2012, 93(7): 1550-1559.
- [10] 卢鑫,胡文友,黄标,等. 丛枝菌根真菌对玉米和续断菊间作镉吸收和累积的影响[J]. 土壤, 2017, 49(1): 111-117.
LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on Cd absorption and accumulation in maize and *Sonchus asper* L. hill using intercropping system[J]. *Soils*, 2017,

- 49(1):111-117.
- [11] Tecon R, Or D. Biophysical processes supporting the diversity of microbial life in soil[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2017, 41(5):599-623.
- [12] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4):1035-1041.
LIU En-ke, ZHAO Bing-qiang, MEI Xu-rong, et al. Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4):1035-1041.
- [13] Simansky V, Balashov E, Horak J. Water stability of soil aggregates and their ability to sequester carbon in soils of vineyards in Slovakia [J]. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 2016, 62(2):177-197.
- [14] Haynes R J, Swift R S. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 41(1):73-83.
- [15] 郭艳娥, 李芳, 李应德, 等. AM真菌促进植物吸收利用磷元素的机制[J]. 草业科学, 2016, 33(12):2379-2390.
GUO Yan-e, LI Fang, LI Ying-de, et al. Progress in the elucidation of the mechanisms of arbuscular mycorrhizal fungi in promotion of phosphorus uptake and utilization by plants[J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(12):2379-2390.
- [16] Pepe A, Giovannetti M, Sbrana C. Different levels of hyphal self-incompatibility modulate interconnectedness of mycorrhizal networks in three arbuscular mycorrhizal fungi within the Glomeraceae[J]. *Mycorrhiza*, 2016, 26(4):325-332.
- [17] 伍松林, 张莘, 陈保冬. 丛枝菌根对土壤-植物系统中重金属迁移转化的影响[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(6):847-856.
WU Song-lin, ZHANG Xin, CHEN Bao-dong. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on heavy metal translocation and transformation in the soil-plant continuum[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, 8(6):847-856.
- [18] Li T, Tao Q, Liang C, et al. Complexation with dissolved organic matter and mobility control of heavy metals in the rhizosphere of hyperaccumulator *Sedum alfredii*[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 182:248-255.
- [19] Sinclair G, Charest C, Yolande D, et al. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi and a root endophyte on the biomass and root morphology of selected strawberry cultivars under salt conditions[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2013, 93(6):997-999.
- [20] 李敬伟, 湛方栋, 何永美, 等. 云南会泽铅锌矿区土壤理化与生物学性质[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(5):906-912.
LI Jing-wei, ZHAN Fang-dong, HE Yong-mei, et al. Physicochemical and biological properties of soils from Huize lead-zinc mining area of Yunnan[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014, 20(5):906-912.
- [21] 曾普胜, 李红, 李延河, 等. 亚洲最大铅锌矿——三阶段叠加成矿的金顶巨型铅锌矿床[J]. 地质学报, 2016, 90(9):2384-2398.
ZENG Pu-sheng, LI Hong, LI Yan-he, et al. The largest lead-zinc deposit in Asia: Jinding giant lead-zinc deposit with three-stage superposition metallogenesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(9):2384-2398.
- [22] 湛方栋, 陈建军, 秦丽, 等. 镉铅污染的玉米秸秆还田对蚕豆生长、养分和镉铅含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4):661-668.
ZHAN Fang-dong, CHEN Jian-jun, QIN Li, et al. Effects of applying Cd/Pb contaminated maize stalks on growth and nutrient and Cd and Pb content of faba bean[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4):661-668.
- [23] 李晓莎, 武宁, 刘玲, 等. 不同秸秆还田和耕作方式对夏玉米农田土壤呼吸及微生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6):1765-1771.
LI Xiao-sha, WU Ning, LIU Ling, et al. Effects of different straw recycling and tillage methods on soil respiration and microbial activity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6):1765-1771.
- [24] 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):646-652.
HE Yong-mei, YANG Zhi-xin, QIN Li, et al. Effects of soil sterilization and fungicide application on growth and heavy metal accumulation of alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(4):646-652.
- [25] Koziol L, Bever J D. Mycorrhizal response trades off with plant growth rate and increases with plant successional status[J]. *Ecology*, 2015, 96(7):1768-1774.
- [26] Abbott L K, Robson A D, De Boer G. The effect of phosphorus on the formation of hyphae in soil by the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus fasciculatum*[J]. *New Phytologist*, 1984, 97:437-446.
- [27] 毕银丽, 吴王燕. 染色法——一种改进的丛枝菌根孢子密度快速测定方法[J]. 能源环境保护, 2007(2):9-11.
BI Yin-li, WU Wang-yan. Dyeing method: A kind of the method for mycorrhizal spore density quick improved measurement[J]. *Energy Environmental Protection*, 2007(2):9-11.
- [28] 陈良, 隆小华, 郑晓涛, 等. 镉胁迫下两种菊芋幼苗的光合作用特征及镉吸收转运差异的研究[J]. 草业学报, 2011, 20(6):60-67.
CHEN Liang, LONG Xiao-hua, ZHENG Xiao-tao, et al. Effect on the photosynthetic characteristics of Cd uptake and translocation in seedlings of two *Helianthus tuberosus* varieties[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(6):60-67.
- [29] 丛毓, 杨靖民, 刘丽娟, 等. 5年生五味子不同生育期叶片中N、P、K含量的变化[J]. 安徽农业科学, 2012(12):7055-7057.
CONG Yu, YANG Jing-min, LIU Li-juan, et al. Changes of nitrogen, phosphorus and potassium in 5-year-old *Schisandra chinensis* leaves at different growth stages[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012(12):7055-7057.
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Agricultural soil analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [31] Wright S F, Franke S M, Morton J B, et al. Time course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots[J]. *Plant and Soil*, 1996, 181:193-203.

- [32] 杨振亚, 阙弘, 朱雪竹, 等. 几种丛枝菌根真菌对非污染土壤中球囊霉素含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1338-1343.
- YANG Zhen-ya, QUE Hong, ZHU Xue-zhu, et al. Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on glomalin content in soils contaminated with phenanthrene[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7): 1338-1343.
- [33] 王建, 周紫燕, 凌婉婷. 球囊霉素相关土壤蛋白的分布及环境功能研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 634-642.
- WANG Jian, ZHOU Zi-yan, LING Wan-ting. Distribution and environmental function of glomalin-related soil protein: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(2): 634-642.
- [34] Wu Z P, Kim M, Huang J D, et al. Decomposition and the contribution of glomalin-related soil protein (GRSP) in heavy metal sequestration: Field experiment[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 68(1): 283-290.
- [35] Gadkar V, Rillig M C. The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin is a putative homolog of heat shock protein 60[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2006, 263(1): 93-101.
- [36] Ban Y, Xu Z, Zhang H, et al. Soil chemistry properties, translocation of heavy metals, and mycorrhizal fungi associated with six plant species growing on lead-zinc mine tailings[J]. *Annals of Microbiology*, 2015, 65(1): 503-515.
- [37] Bedini S, Turrini A, Rigo C, et al. Molecular characterization and glomalin production of arbuscular mycorrhizal fungi colonizing a heavy metal polluted ash disposal island, downtown Venice[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(5): 758-765.
- [38] 李明亮, 李欢, 王凯荣, 等. Cd胁迫下丛枝菌根对花生生长、光合生理及Cd吸收的影响[J]. 环境化学, 2016, 35(11): 2344-2352.
- LI Ming-liang, LI Huan, WANG Kai-rong, et al. Effect of arbuscular mycorrhizae on the growth, photosynthetic characteristics and cadmium uptake of peanut plant under cadmium stress[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(11): 2344-2352.
- [39] Heyneke E, Fernie A R. Metabolic regulation of photosynthesis[J]. *Biochemical Society Transactions*, 2018, 46(2): 321-328.
- [40] 徐小逊, 董袁媛, 邓玉兰, 等. 镉胁迫对豨莶生长及光合作用相关参数的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1672-1679.
- XU Xiao-xun, DONG Yuan-yuan, DENG Yu-lan, et al. Effects of cadmium stress on growth and photosynthetic parameters of *Sibesbeckia orientalis* L.[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(9): 1672-1679.
- [41] Townsend A J, Retkute R, Chinnathambi K, et al. Suboptimal acclimation of photosynthesis to light in wheat canopies[J]. *Plant Physiology*, 2017, 176(2): 1233-1246.
- [42] 孙金华, 毕银丽, 裴浪, 等. 土壤中丛枝菌根真菌对宿主植物磷吸收作用机制综述[J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 499-504.
- SUN Jin-hua, BI Yin-li, QIU Lang, et al. A review about the effect of AMF on uptaking phosphorus by host plants in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(2): 499-504.
- [43] 李韵诗, 冯冲凌, 吴晓芙, 等. 重金属污染土壤植物修复中的微生物功能研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6881-6890.
- LI Yun-shi, FENG Chong-ling, WU Xiao-fu, et al. A review on the functions of microorganisms in the phytoremediation of heavy metal-contaminated soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20): 6881-6890.
- [44] 彭丽媛, 熊兴政, 李艳, 等. 锰对外生菌根真菌生长、养分吸收、有机酸分泌和菌丝体中锰分布的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 2819-2825.
- PENG Li-yuan, XIONG Xing-zheng, LI Yan, et al. Influence of manganese on growth, nutrient uptake, and organic acid efflux by ectomycorrhizal fungi and manganese distribution in hyphae acid efflux by ectomycorrhizal fungi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10): 2819-2825.
- [45] 李霞, 彭霞薇, 伍松林, 等. 丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 3142-3148.
- LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, et al. Effect of arbuscular mycorrhizae on growth, heavy metal uptake and accumulation of *Zenia insignis* chun seedlings[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(8): 3142-3148.
- [46] 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): 99-105.
- HUANG Jing, LING Wan-ting, SUN Yan-di, et al. Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on the uptake of cadmium and zinc by alfalfa in contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(1): 99-105.
- [47] 陈丹明, 郭娜, 郭绍霞. 丛枝菌根真菌对牡丹生长及相关生理指标的影响[J]. 西北植物学报, 2010, 30(1): 131-135.
- CHEN Dan-ming, GUO Na, GUO Shao-xia. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and some physiological indices of *Paeonia suffruticosa*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, 30(1): 131-135.