



**AMF对玉米生长、根系低分子有机酸分泌与Cd累积的影响**

陈嘉欣, 颜洁, 游义红, 李博, 和成忠, 涂春霖, 湛方栋

引用本文:

陈嘉欣, 颜洁, 游义红, 李博, 和成忠, 涂春霖, 湛方栋. AMF对玉米生长、根系低分子有机酸分泌与Cd累积的影响[J]. [农业资源与环境学报](#), 2023, 40(6): 1329–1338.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0658>

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

[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

[农业资源与环境学报](#). 2020, 37(5): 727–735 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0186>

[施加脱硫石膏对紫色土壤-水稻系统重金属累积的影响](#)

胡翔宇, 向秋洁, 罗伯林, 尚二凤, 木志坚

[农业资源与环境学报](#). 2018, 35(5): 459–466 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0044>

[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, 刁风伟, 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>

[膨润土对轻度镉污染土壤钝化修复效应研究](#)

徐奕, 赵丹, 徐应明, 孙约兵

[农业资源与环境学报](#). 2017, 34(1): 38–46 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0208>

[7种紫花苜蓿对云南某铅锌矿区土壤镉铅的累积特征及品种差异](#)

杨姝, 贾乐, 毕玉芬, 湛方栋, 陈建军, 李博, 祖艳群, 李元

[农业资源与环境学报](#). 2018, 35(3): 222–228 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0334>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈嘉欣, 颜洁, 游义红, 等. AMF对玉米生长、根系低分子有机酸分泌与Cd累积的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1329–1338.

CHEN J X, YAN J, YOU Y H, et al. Effects of AMF on growth, low-molecular-weight organic acids secreted by roots, and Cd uptake in maize[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(6): 1329–1338.

## AMF对玉米生长、根系低分子有机酸分泌与Cd累积的影响

陈嘉欣<sup>1</sup>, 颜洁<sup>1</sup>, 游义红<sup>1</sup>, 李博<sup>1</sup>, 和成忠<sup>2</sup>, 涂春霖<sup>2</sup>, 湛方栋<sup>1\*</sup>

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 昆明 650111)

**摘要:**为探讨铅锌矿区丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)的生态功能,采用云南会泽铅锌矿区周边镉(Cd)污染的农田土壤,开展根袋盆栽试验,研究接种AMF对玉米生长、矿质营养、根系低分子有机酸分泌和Cd累积的影响。结果表明:接种AMF促进玉米生长,显著提高光合速率、株高和生物量;增加植株对氮、磷、钾的吸收,增幅达14.2~19.1倍;并促进根系分泌酒石酸、苹果酸、草酸和琥珀酸,分泌量增幅为1.1~3.8倍。此外,接种AMF使玉米根际铁锰氧化态Cd含量显著增加22.5%,有机结合态Cd含量显著降低12.8%,但交换态和有效态Cd含量无显著变化。接种AMF使玉米地上部和根系Cd含量显著降低,降幅分别为32.7%和77.9%,但地上部和根系Cd累积量显著增加,分别增加了12.5倍和25.8%。相关性分析发现,玉米地上部Cd累积量与草酸、酒石酸、苹果酸、琥珀酸分泌量和铁锰氧化态Cd含量呈极显著正相关。可见,AMF能促进玉米养分吸收,调节根系低分子有机酸分泌与根际Cd形态,降低植株Cd含量,从而促进植株生长。

**关键词:**丛枝菌根真菌;玉米;根袋法;根系分泌物;Cd形态

中图分类号:X173;S513

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2023)06-1329-10

doi: 10.13254/j.jare.2022.0658

### Effects of AMF on growth, low-molecular-weight organic acids secreted by roots, and Cd uptake in maize

CHEN Jiabin<sup>1</sup>, YAN Jie<sup>1</sup>, YOU Yihong<sup>1</sup>, LI Bo<sup>1</sup>, HE Chengzhong<sup>2</sup>, TU Chunlin<sup>2</sup>, ZHAN Fangdong<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Kunming Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Kunming 650111, China)

**Abstract:** The ecological functions of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) were explored by investigating its effects on maize growth, mineral nutrition, low-molecular-weight organic acid secretion, and Cd uptake via a root-bag experiment in soil polluted with Cd in the Huize lead-zinc mining area of Yunnan Province. The results showed that AMF promoted maize growth and significantly increased photosynthetic rate, plant height, and biomass. The absorption of N, P, and K increased by 14.2–19.1-fold, and tartaric acid, malic acid, oxalic acid, and succinic acid secretion by roots increased by 1.1–3.8-fold. In addition, AMF resulted in a significant increase of 22.5% in iron- and manganese-oxidized Cd content and a significant decrease of 12.8% in organic-bound Cd content in the maize rhizosphere, but no significant change in exchangeable and available Cd content was observed. AMF significantly reduced maize shoot and root Cd content by 32.7% and 77.9%, respectively, but significantly increased Cd accumulation in maize shoot and root by 12.5-fold and 25.8%, respectively. Correlation analysis showed that shoot Cd accumulation presented extremely significant positive correlations with oxalic acid, tartaric acid, malic acid, and succinic acid secretion, and iron- and manganese-oxidized Cd content. Thus, these results showed that AMF can promote the absorption of nutrients in maize, regulate the secretion of low-molecular-weight organic acid and Cd form in the rhizosphere, and reduce maize Cd content, thereby promoting plant growth.

**Keywords:** arbuscular mycorrhizal fungi; maize; root-bag experiment; root exudates; cadmium form

收稿日期:2022-09-20 录用日期:2022-11-30

作者简介:陈嘉欣(1996—),女,重庆璧山人,硕士研究生,从事土壤重金属污染修复研究。E-mail:jiachinchen96@126.com

\*通信作者:湛方栋 E-mail:zfd97@ynau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42177381,42267002);云南省中青年学术和技术带头人后备人才培养项目(202005AC160038);云南省吴龙华专家工作站(202305AF150042)

**Project supported:** The National Natural Science Foundation of China(42177381, 42267002); The Reserve Talents Funds for Young and Middle-aged Academic and Technological Leaders in Yunnan Province(202005AC160038); The Expert Workstation of Longhua Wu in Yunnan Province(202305AF150042)

采矿、污灌、冶金以及农药化肥的大量施用,导致我国农田土壤镉(Cd)污染较为严重<sup>[1]</sup>。《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国土壤Cd点位超标率为7.0%,位于重金属之首<sup>[2]</sup>。Cd是毒性最强的重金属元素之一,有极强的迁移性,易被植物吸收积累,还会扰乱植物代谢并损害植物生长<sup>[3-4]</sup>。

丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)是广泛存在于土壤中的一种共生真菌,能与大多数植物形成共生关系<sup>[5]</sup>。重金属胁迫下AMF能侵染植物根系形成菌根共生体,尤其是AMF根外菌丝网络能改善植物对矿质养分的吸收,促进植物生长<sup>[6]</sup>。AMF也会使植物的根系分泌物发生变化,其中低分子有机酸可与土壤重金属螯合形成“重金属-低分子有机酸”复合物,从而降低土壤重金属生物有效性和迁移性,减轻重金属对植物的毒害<sup>[7]</sup>。研究表明,低分子有机酸对土壤重金属有效性的影响过程相对复杂,其不仅与有机酸种类和本身性质有关,还与土壤条件和种植模式等因素有关<sup>[8]</sup>。研究表明,Cd胁迫下接种AMF时,不同种类的低分子有机酸分泌量变化存在差异,导致土壤中重金属形态不同<sup>[9]</sup>。然而,从根系分泌物角度探讨AMF生态功能的研究相对较少。

受植物根系生长和代谢的影响,根际土和非根际土之间存在着较大的差别<sup>[10]</sup>。根际是指距离根表面1~4 mm甚至更小范围的微区土壤,是土壤与植物及微生物相互作用的重要场所<sup>[11]</sup>。自然栽种植物对根际土的获取有一定难度且不精准,本研究采用根袋盆栽法,能更准确研究AMF对根际和非根际土壤的影响。因此根袋盆栽试验下,研究Cd污染土壤中AMF的生态功能具有一定的理论意义。

本试验选取云南会泽铅锌矿区周边Cd污染的农田土壤为供试土壤,设置接种与不接种AMF处理,通过根袋盆栽试验,研究接种AMF对玉米生长、根系低分子有机酸分泌量与植株Cd累积的影响,旨在丰富对铅锌矿区AMF生态功能的认识,为重金属污染农田土壤的生态修复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤为山原红壤,采自云南省会泽县铅锌矿区周围农田土壤(北纬26°34′48″,东经103°38′38″),土壤自然风干后过2 mm孔径筛,经121℃高压蒸汽灭菌锅灭菌120 min,自然风干备用。土壤基本

理化性质:pH为6.4,碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为86.25、13.25 mg·kg<sup>-1</sup>和12.24 mg·kg<sup>-1</sup>,有机质含量为22.30 g·kg<sup>-1</sup>,Cd含量为6.73 mg·kg<sup>-1</sup>。

供试玉米品种为会单四号(*Zea mays* L.),是矿区周边主栽品种,于云南省昆明市小板桥种子市场采购。挑选大小一致且籽粒饱满的玉米种子,依次用75%乙醇和10%次氯酸钠表面消毒10 min,消毒后的玉米种子用无菌水漂洗干净至无色无味,放入垫有浸湿滤纸且已灭菌的培养皿中,在温度25℃下恒温培养3 d,待种子萌发露白时,挑选无污染且生长一致的幼苗备用。

供试AMF菌种为摩西管柄囊霉(*Funneliformis mosseae*, BGC YN05),原始菌剂由北京市农林科学院植物营养与资源研究所丛枝菌根真菌种质资源库提供。以玉米为宿主植物通过盆栽试验扩繁所得接种物(含孢子、菌丝体等),每克土壤含有25~30个孢子。

### 1.2 根袋试验设计

根袋盆栽试验在云南农业大学东校区温室大棚内进行。设置不接种(CK)与接种AMF(AMF)2个处理,每个处理设置4个重复。根袋是由400目尼龙网缝制而成,根袋直径为15 cm,高为20 cm。每个试验根袋内装入0.8 kg灭菌土壤,施加100 g菌剂平铺于萌芽的玉米种子下面,而CK组铺等量的灭菌菌剂(100 g菌剂在高温121℃下灭菌处理120 min),然后再铺上0.2 kg灭菌土壤将AMF菌剂和萌芽的玉米种子覆盖,再将根袋放入一个中号盆钵中(直径35 cm),花盆内装入2.5 kg灭菌土。在试验过程中,采用自然光照,浇灌去离子水控制土壤含水量为田间持水量的60%~70%。种植60 d后进行植物和土壤样品的采集与测定。

### 1.3 测定方法

#### 1.3.1 玉米叶片光合生理指标的测定

玉米收样前一周,选择玉米最顶端叶片测定光合参数,测定时间为上午9:00—11:00(阳光充足),使用LI-6400便携式光合仪测定净光合速率、蒸腾速率、胞间CO<sub>2</sub>浓度;叶绿素含量测定采用95%乙醇萃取法,在665 nm和649 nm波长下测定吸光值并计算叶绿素含量<sup>[12]</sup>。

#### 1.3.2 玉米株高、生物量、根系侵染率与土壤孢子数的测定

玉米种植60 d后,用卷尺测定株高并采集植物和土壤样品。植物经过自来水、去离子水漂洗干净晾干

后分为地上部和根系,105℃杀青30 min后,75℃烘干至恒质量并测定其生物量。采取部分新嫩细根,用酸性品红染色液染色,脱色后将其排列在载玻片上,在电子显微镜上观察菌丝侵染情况,采用交叉法计算AMF侵染率<sup>[13]</sup>;采用湿筛倾注-蔗糖离心法测定根际土壤孢子数<sup>[14]</sup>。

### 1.3.3 玉米地上部养分含量的测定

称取0.1 g烘干的粉末样品,置于100 mL凯氏瓶中,加入5 mL浓硫酸,摇匀过夜,并放弯颈漏斗,在消化炉上缓缓加热,浓硫酸分解后冒白烟逐渐升温,当溶液全部呈棕黑色时,取下凯氏瓶,冷却后加10滴30%过氧化氢,并不断摇匀,继续加热20 min,反复滴加10滴30%过氧化氢2~3次,直至溶液呈无色或清亮后,过滤至50 mL容量瓶中,并用蒸馏水定容至刻度线。滤液可测氮磷钾含量,分别采用蒸馏法、钼锑抗比色法和原子火焰分光光度计法测定氮磷钾含量<sup>[15]</sup>。

### 1.3.4 玉米根系低分子有机酸提取与测定

根系分泌物收集和浓缩采用水培法<sup>[16]</sup>。采集整株植物,用自来水和蒸馏水分别清洗根系3遍,将整株转入200 mL 5 mg·L<sup>-1</sup>的百里酚溶液中浸泡3 min,再将其转入盛有200 mL 0.005 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub>溶液的收集瓶中,用锡箔纸将收集瓶包裹,通气收集根系分泌物2 h。在45℃条件下将收集液旋转蒸发、浓缩至10 mL,过0.45 μm滤膜,-20℃冷冻保存、备用。有机酸含量的测定采用HPLC法,在选定的色谱条件下,得到5种有机酸(草酸、酒石酸、苹果酸、柠檬酸和琥珀酸)混合标准品的色谱图,从而测定其样品有机酸的含量。

### 1.3.5 土壤速效养分含量与Cd形态的测定

土壤速效养分含量的测定参照鲍士坦《土壤农化分析》<sup>[15]</sup>。碱解氮含量采用碱解-扩散法测定;速效磷含量采用浸提剂-钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用NH<sub>4</sub>OAc浸提-火焰光度法测定;采用Tisser分级提取法测定土壤Cd各形态含量<sup>[17]</sup>。

### 1.3.6 植株Cd含量的测定

植株Cd含量测定采用HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消解法<sup>[15]</sup>:称取0.5 g粉末样品于消解罐中,加5 mL硝酸浸泡过夜,再加3 mL 30%过氧化氢溶液,盖好内盖,旋紧不锈钢外套,放入恒温干燥箱,160℃消解4 h,使消化液消解至完全透明,在箱内自然冷却至室温,打开后用蒸馏水将消化液洗入50 mL容量瓶中,并洗涤内罐和内盖3次,用蒸馏水定容至刻度线,混匀后,用火焰原子吸收分光光度法测定植株Cd含量。

Cd累积量(μg·株<sup>-1</sup>)=Cd含量(μg·g<sup>-1</sup>)×植株生物量(g·株<sup>-1</sup>);转移系数(TF)=植株地上部Cd含量(mg·kg<sup>-1</sup>)/植株根系Cd含量(mg·kg<sup>-1</sup>);生物转移因子(BTF)=植物地上部Cd含量(mg·kg<sup>-1</sup>)×地上部生物量(g)/[根系Cd含量(mg·kg<sup>-1</sup>)×根系生物量(g)]<sup>[18]</sup>。

## 1.4 数据处理与统计分析

数据采用Microsoft Excel 2013进行统计,利用IBM SPSS Statistics 19.0软件进行方差分析和差异显著性检验(LSD法,显著性水平 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ )以及相关性分析(Pearson法,显著性水平 $\alpha=0.05$ ),并采用Origin 9.1进行数据制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 接种AMF对玉米根系侵染、株高与生物量的影响

如表1所示,玉米根系侵染率为36.80%,每克根际土壤孢子数为64个,说明AMF对玉米根系形成有效侵染。接种AMF导致玉米株高、地上部和根系生物量分别显著增加3.0、18.9倍和4.7倍。可见,接种AMF能显著增加玉米株高和生物量,从而促进玉米生长。

### 2.2 接种AMF对玉米光合生理指标的影响

由图1可知,接种AMF显著增加玉米叶片叶绿素含量、净光合速率和蒸腾速率,分别增加1.1、2.3倍和39.4%,但显著降低玉米叶片胞间CO<sub>2</sub>浓度,降幅为30.7%。可知,接种AMF能不同程度影响玉米光合生理指标。

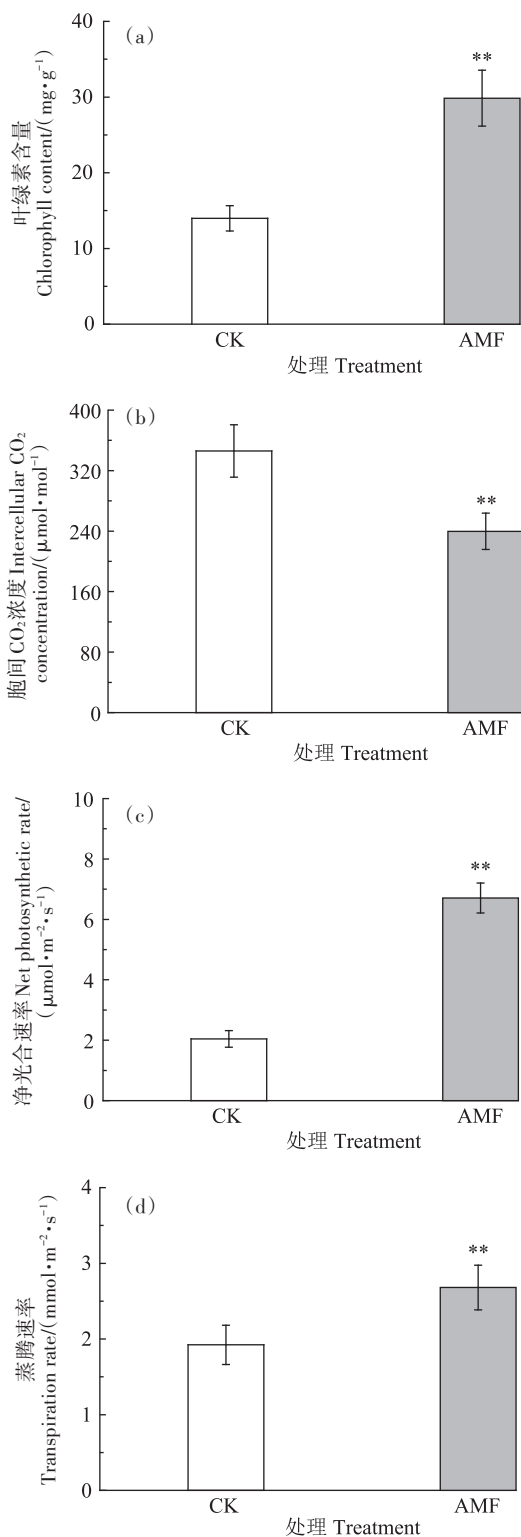
表1 接种AMF对玉米根系侵染、株高与生物量的影响

Table 1 Effects of AMF on root infection, height and biomass of maize

处理 Treatment	侵染率 Colonization rate/%	每克根际土壤孢子数 Spore number per gram	株高 Height/cm	生物量/(g·株 <sup>-1</sup> )Biomass/(g·plant <sup>-1</sup> )	
				地上部Shoot	根系Root
CK			13.13±0.91	0.57±0.08	0.40±0.04
AMF	36.80±0.28	64±1	52.60±4.00**	11.35±0.38**	2.29±0.19**

注:“\*\*”表示处理间差异极显著( $P<0.01$ )。下同。

Note:“\*\*” means the difference between treatments is extremely significant ( $P<0.01$ ). The same below.

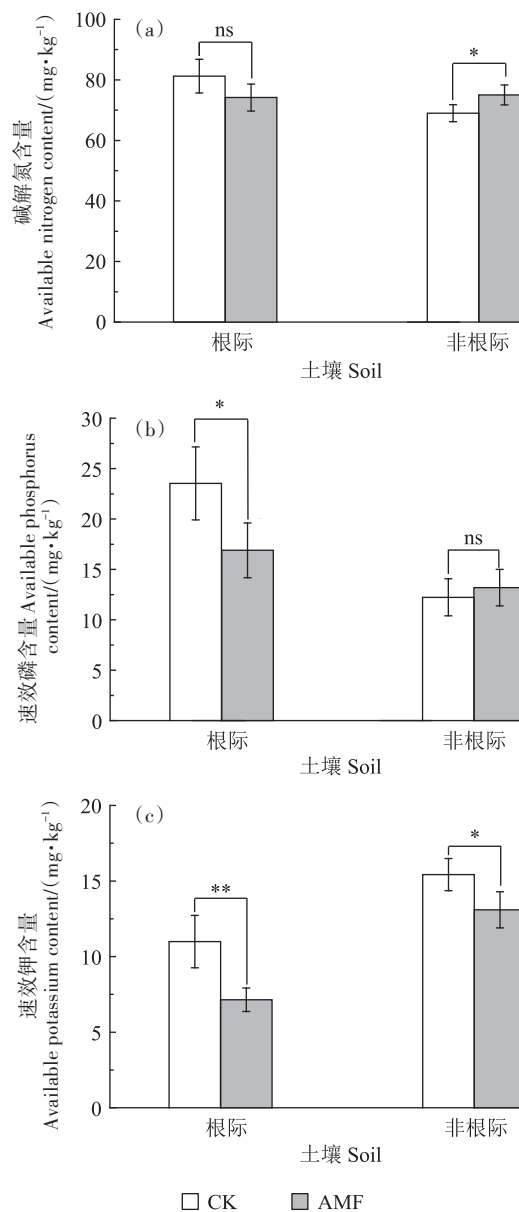


“\*\*”表示处理之间差异极显著( $P<0.01$ )。下同。  
 “\*\*\*” means the difference between treatments is extremely significant ( $P<0.01$ ). The same below.

图1 接种AMF对玉米叶片光合生理指标的影响  
 Figure 1 Effects of AMF on photosynthetic physiology of maize leaves

### 2.3 接种AMF对土壤速效养分含量与玉米养分吸收的影响

由图2可知,与CK相比,对根际土壤速效养分含量而言,接种AMF显著降低速效磷和速效钾含量,分别降低28.2%和35.0%;对非根际土壤速效养分含量而言,接种AMF显著增加碱解氮含量,增幅为8.8%,但显著降低速效钾含量,降幅为15.1%。可见,接种



“\*”表示处理之间差异显著( $P<0.05$ ),“ns”表示处理之间差异不显著。下同。

“\*” indicate significant ( $P<0.05$ ) differences between treatments; “ns” indicate no significant differences between treatments. The same below.

图2 接种AMF对土壤速效养分含量的影响  
 Figure 2 Effect of of AMF on the content of available nutrients in soil

AMF对根际和非根际土壤速效养分含量有不同程度的影响。

由图3可知,与CK相比,接种AMF后玉米植株地上部钾含量显著降低,降幅为21.4%,但植株地上部氮、磷含量无显著变化。接种AMF处理显著增加玉米植株地上部氮、磷、钾吸收量,分别增加了19.1、18.7倍和14.2倍。可见,接种AMF能促进植株对矿质养分氮、磷、钾的吸收。

#### 2.4 接种AMF对玉米根系低分子有机酸分泌量的影响

如图4所示,与CK相比,接种AMF后玉米根系草酸、酒石酸、苹果酸和琥珀酸分泌量均显著增加,分别增加1.6、3.8、1.3倍和1.1倍。可见,接种AMF能不同程度促进玉米根系草酸、酒石酸、苹果酸和琥珀酸的

分泌。

#### 2.5 接种AMF对根际土壤Cd形态与玉米Cd累积特征的影响

如表2所示,与CK相比,接种AMF显著增加根际土壤铁锰氧化态Cd含量,增幅为22.5%;显著降低有机结合态Cd含量,降幅为12.8%;但对根际土壤交换态和有效态Cd含量无显著影响。可见,AMF对根际土壤Cd形态有不同程度的影响。

如表3所示,接种AMF显著降低玉米地上部和根系Cd含量,分别降低32.7%、77.9%,但显著增加玉米地上部和根系Cd累积量,分别增加12.5倍和25.8%,导致转移系数显著增加了2.0倍,生物转移因子显著降低了58.7%。

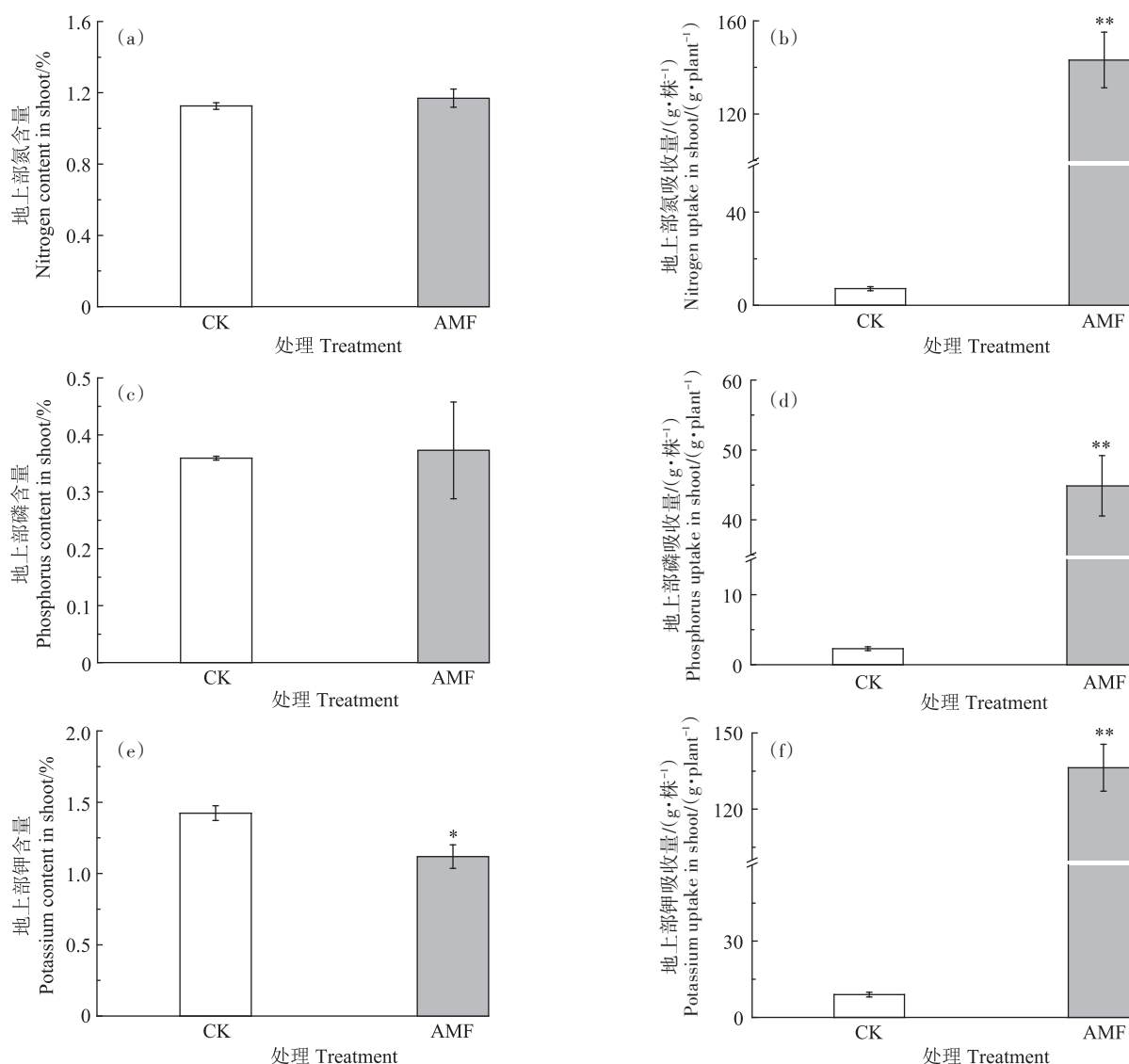


图3 接种AMF对玉米地上部养分含量及吸收量的影响

Figure 3 Effects of AMF on nutrient content and uptake in maize shoot

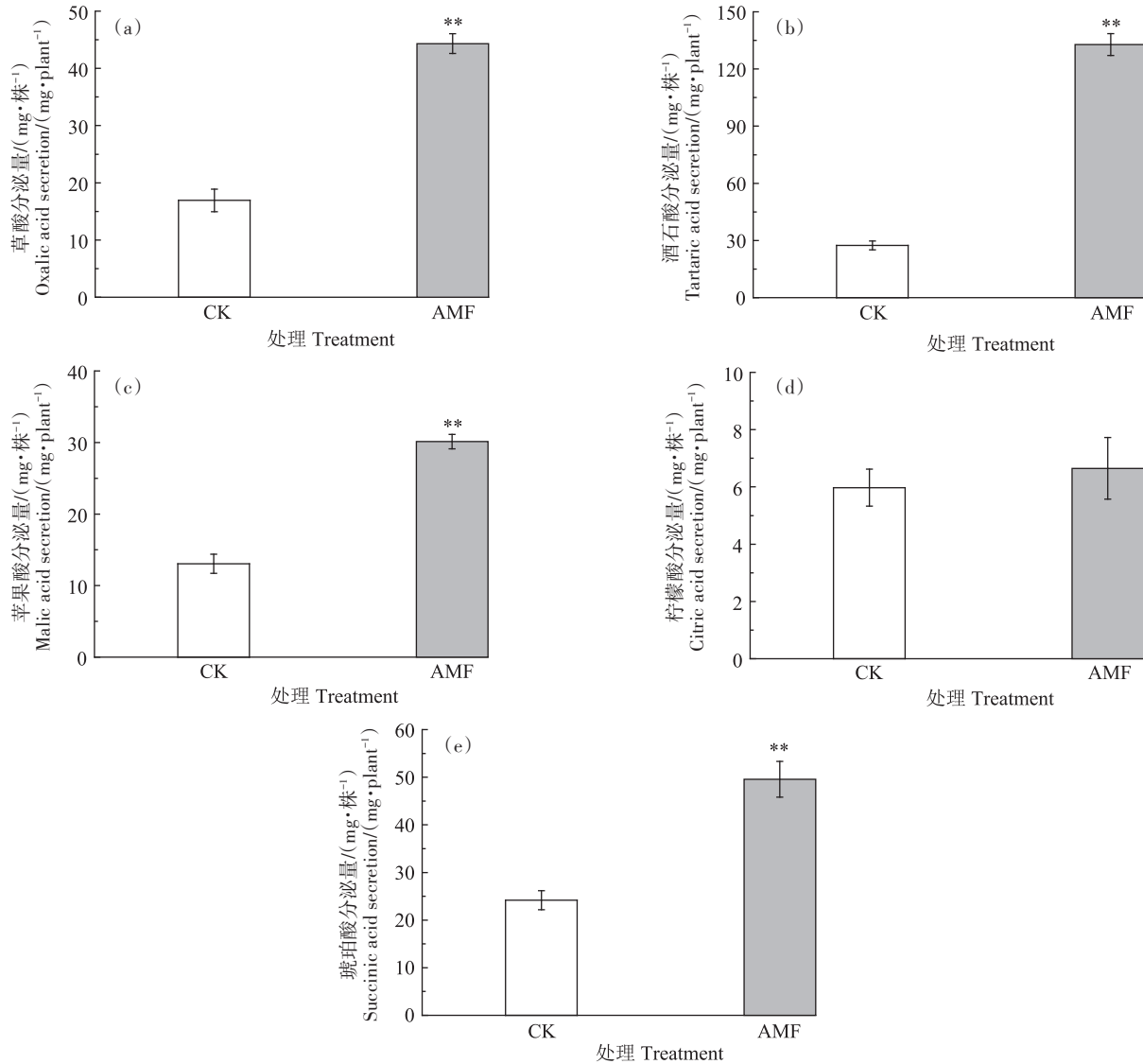


图4 接种AMF对玉米根系分泌物中低分子有机酸分泌量的影响

Figure 4 Effects of AMF on the secretion of low molecular weight organic acids in maize root exudates

表2 接种AMF对根际土壤Cd形态的影响(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 2 Effects of AMF on Cd speciation in rhizosphere soil(mg·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	交换态Cd含量 Exchangeable Cd content	铁锰氧化态Cd含量 Iron- and manganese-oxidized Cd content	有机结合态Cd含量 Organic-bound Cd content	有效态Cd含量 Available Cd content
CK	1.49±0.16	1.42±0.09	1.48±0.09	1.66±0.03
AMF	1.52±0.05	1.74±0.03**	1.29±0.07*	1.68±0.09

注：“\*”表示处理之间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: “\*” indicate significant(P<0.05) differences between treatments. The same below.

表3 接种AMF对玉米Cd累积特征的影响

Table 3 Effects of AMF on Cd accumulation characteristics of maize

处理 Treatment	Cd含量Cd content/(μg·g <sup>-1</sup> )		Cd累积量/(μg·株 <sup>-1</sup> )Cd accumulation/(μg·plant <sup>-1</sup> )		转移系数(TF) Transfer coefficient	生物转移因子(BTF) Biological transfer factor
	地上部Shoot	根系Root	地上部Shoot	根系Root		
CK	5.39±0.13	24.99±0.73	3.06±0.48	10.05±1.00	0.22±0.01	46.63±4.84
AMF	3.63±0.04**	5.52±0.13**	41.25±1.54**	12.64±1.33*	0.66±0.02**	19.27±2.71**

## 2.6 相关性分析

由表4可知,根系草酸、酒石酸、苹果酸和琥珀酸分泌量与土壤中铁锰氧化态Cd含量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),但与有机结合态Cd含量呈显著负相关( $P<0.05$ )。由表5可知,玉米地上部和根系Cd含量与草酸、酒石酸、苹果酸、琥珀酸分泌量和铁锰氧化态Cd含量呈极显著负相关( $P<0.01$ ),但与有机结合态Cd含量呈显著正相关( $P<0.05$ );玉米地上部Cd累积量与草酸、酒石酸、苹果酸、琥珀酸分泌量和铁锰氧化态Cd含量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),但与有机结合态Cd含量呈显著负相关( $P<0.05$ );根系Cd累积量与草酸、酒石酸、苹果酸和琥珀酸分泌量呈显著正相关( $P<0.05$ )。可见,AMF降低玉米植株Cd含量、增加Cd累积量与其改善低分子有机酸分泌量及根际土壤Cd形态密切相关。

## 3 讨论

重金属污染的土壤存在养分贫瘠和肥力低等问题,但AMF能有效地改善土壤系统中的养分状况,提高宿主植物吸收养分的能力<sup>[5]</sup>。本研究发现接种

AMF处理根际土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量减少,其原因可能是根袋培养条件下有限的土壤养分含量不能满足AMF接种处理玉米生长所需养分,所以需消耗土壤速效养分来满足玉米生长,从而导致土壤速效养分含量下降。研究表明,AMF与宿主植物形成的菌根能有效地促进植物对土壤磷的吸收,主要是由于AMF菌丝延伸可扩大植物对土壤中磷吸收的范围<sup>[19]</sup>;同时AMF也会参与调控土壤氮循环的过程,能直接吸收土壤中的氮素,并直接传递给植物<sup>[20]</sup>。有研究者开展了尾矿上生长的植物接种AMF试验,发现植物与菌根能建立共生关系,显著提高植物生物量,很大程度上促进磷的吸收,从而改善植物生长<sup>[21]</sup>,这与本研究结果一致。主要原因是AMF不仅能直接水解土壤无机磷和矿化有机磷,还能通过促进根系有机酸的分泌间接影响土壤中磷的活化,进而促进宿主植物对磷的摄取<sup>[22]</sup>。

AMF能与植物形成有益的共生关系,通过提高宿主植株对养分的吸收来促进植株生长<sup>[23-24]</sup>。本研究中接种AMF处理显著增加玉米植株地上部氮、磷、钾吸收量,AMF提高植株对矿质养分吸收主要有两

表4 土壤Cd形态与根系低分子有机酸分泌量之间的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between soil Cd speciation and the secretion of low molecular weight organic acids in the root

项目 Item	草酸分泌量 Oxalic acid secretion	酒石酸分泌量 Tartaric acid secretion	苹果酸分泌量 Malic acid secretion	柠檬酸分泌量 Citric acid secretion	琥珀酸分泌量 Succinic acid secretion
交换态Cd含量 Exchangeable Cd content	0.094	0.131	0.092	-0.128	0.152
铁锰氧化态Cd含量 Iron- and manganese-oxidized Cd content	0.926**	0.942**	0.937**	0.389	0.932**
有机结合态Cd含量 Organic-bound Cd content	-0.790*	-0.807*	-0.818*	-0.326	-0.782*
有效态Cd含量 Available Cd content	0.112	0.175	0.145	-0.359	0.083

注:“\*”表示显著相关( $P<0.05$ ),“\*\*”表示极显著相关( $P<0.01$ )。下同。

Note: “\*” indicates significant correlation at  $P<0.05$  level, “\*\*” indicates highly significant correlation at  $P<0.01$  level. The same below.

表5 植株Cd含量、累积量与低分子有机酸、土壤Cd形态之间的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of plant Cd content and accumulation with low molecular weight organic acids and soil Cd speciation

项目 Item	地上部Cd含量 Shoot Cd content	根系Cd含量 Root Cd content	地上部Cd累积量 Shoot Cd uptake	根系Cd累积量 Root Cd uptake
草酸分泌量 Oxalic acid secretion	-0.993**	-0.992**	0.995**	0.756*
酒石酸分泌量 Tartaric acid secretion	-0.996**	-0.997**	0.995**	0.805*
苹果酸分泌量 Malic acid secretion	-0.996**	-0.992**	0.994**	0.764*
柠檬酸分泌量 Citric acid secretion	-0.463	-0.468	0.494	0.007
琥珀酸分泌量 Succinic acid secretion	-0.974**	-0.987**	0.989**	0.717*
交换态Cd含量 Exchangeable Cd content	-0.082	-0.173	0.154	0.067
铁锰氧化态Cd含量 Iron- and manganese-oxidized Cd content	-0.926**	-0.956**	0.947**	0.655
有机结合态Cd含量 Organic-bound Cd content	0.798*	0.813*	-0.796*	-0.499
有效态Cd含量 Available Cd content	-0.147	-0.155	0.175	0.362



方面原因:一是AMF形成的根外菌丝网络能够扩大植物根系吸收养分的范围,使植物吸收更多的土壤养分<sup>[25]</sup>;二是菌根及根系分泌物具有活化作用,在其作用下土壤中难溶性矿质营养更容易分解,增加土壤养分的有效性,有利于植物对活化后的难溶矿质元素的吸收利用<sup>[26]</sup>。研究表明,AMF侵染根系后能分泌一种特殊糖蛋白——球囊霉素(Glomalin-Related Soil Protein, GRSP),GRSP可以提高植物对氮、磷和钾养分的吸收利用<sup>[27-28]</sup>,原因在于GRSP与土壤团聚体的水稳定性有密切关系。

AMF不仅对植物生长和养分吸收有显著促进作用,还能促进根系分泌低分子有机酸,低分子有机酸对土壤的理化性质和重金属的植物毒性具有重要影响<sup>[29]</sup>。研究表明,低分子有机酸在根际难溶性养分的活化和吸收过程中发挥积极作用,可以通过酸化等途径将难溶性物质转化为可利用的有效成分,从而促进植物生长<sup>[22]</sup>。本研究中,接种AMF处理显著促进根系草酸、酒石酸、苹果酸和琥珀酸的分泌,相关性分析表明根系草酸、酒石酸、苹果酸和琥珀酸分泌量与土壤中铁锰氧化态Cd含量呈极显著正相关,但与有机结合态Cd含量呈显著负相关。这说明Cd胁迫下低分子有机酸能改变重金属的赋存形态和生物有效性,从而影响玉米植株对Cd的吸收累积,这与前人研究结果<sup>[30]</sup>相似。

土壤中Cd的生物毒性主要取决于其存在形态,它以多种形态存在于土壤中,主要有交换态、铁锰氧化态和有机结合态等。有研究表明,接种AMF降低了交换态Cd含量,这可能是由于土壤微生物数量的改变改善了植物根系生长及其对养分的吸收,从而改变Cd形态<sup>[31]</sup>。根系分泌的低分子有机酸也是改变Cd形态的因素之一,其中柠檬酸和苹果酸能提高土壤中可交换态重金属含量,从而达到活化重金属的目的<sup>[32]</sup>;也能通过改变pH值来引起Cd形态的变化<sup>[33]</sup>。本研究发现,接种AMF处理土壤铁锰结合态Cd含量显著增加,其可能原因是根袋空间限制下有机酸被浓缩,更容易改变土壤pH值和氧化还原电位,从而促进铁锰结合态Cd的形成<sup>[34]</sup>;有机结合态Cd含量显著降低,其可能的原因是AMF为了提供更多养分给宿主,促使有机质分解成容易被宿主吸收的小分子物质,减少了有机质与Cd结合,导致有机结合态Cd含量降低。其具体影响机制还需进一步研究。

在重金属胁迫下,AMF能一定程度上缓解重金属对植物的毒害,增强植物对重金属的耐性<sup>[35]</sup>。本研

究中,接种AMF处理对土壤Cd有效态含量无显著影响,但能显著降低植株Cd含量、增加Cd累积量,说明AMF主要通过提高玉米对Cd的耐受性来促进玉米生长。其主要原因:一是AMF自身菌丝内有提供给重金属结合的位点,使重金属吸附结合固定在菌丝上,降低重金属对宿主植物的胁迫<sup>[36]</sup>;二是接种AMF显著提高玉米生物量且远高于对照,在生长稀释作用下间接导致植株Cd含量降低和Cd累积量增加。有学者应用玻璃珠分室培养法来研究AMF菌丝对Cd离子的吸附特征,结果表明菌丝对Cd的吸附能力显著<sup>[37]</sup>。这也充分证明了本研究采用根袋盆栽法研究AMF生态功能的必要性。本研究中根袋盆栽培养下,空间狭小的根袋限制了玉米根系生长,但充分发挥了AMF根外菌丝的作用,且浓缩了根系分泌的低分子有机酸,更好地促进有机酸与Cd发生络合和螯合反应,减少Cd对植株的毒害,从而提高玉米耐受性并促进其生长。

## 4 结论

(1)根袋盆栽培养条件下,接种AMF能改善土壤养分状况和Cd有效性,促进玉米对矿质养分的吸收和根系低分子有机酸的分泌,降低植株Cd含量,增加植株Cd累积量,从而提高玉米对Cd的抗性。

(2)玉米地上部Cd累积量与低分子有机酸(草酸、酒石酸、苹果酸、琥珀酸)分泌量和铁锰氧化态Cd含量呈极显著正相关,表明AMF通过调控玉米低分子有机酸分泌和根际Cd形态促进玉米植株Cd累积。

## 参考文献:

- [1] 刘彩凤, 史刚荣, 余如刚, 等. 硅缓解植物镉毒害的生理生态机制[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 7799-7810. LIU C F, SHI G R, YU R G, et al. Eco-physiological mechanisms of silicon-induced alleviation of cadmium toxicity in plants: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(23): 7799-7810.
- [2] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692. CHEN N C, ZHENG Y J, HE X F, et al. Analysis of the Report on the national general survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [3] WANG J C, CHEN X F, CHU S H, et al. Comparative cytology combined with transcriptomic and metabolomic analyses of *Solanum nigrum* L. in response to Cd toxicity[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423: 127168.
- [4] DOSTALEK T, PANKOVA H, MUNZBERGOVA Z, et al. The effect of AMF suppression on plant species composition in a nutrient-poor dry

- grassland[J]. *PLoS One*, 2013, 8(11):e80535.
- [5] 李少朋, 毕银丽, 陈咄圳, 等. 外源钙与丛枝菌根真菌协同对玉米生长的影响与土壤改良效应[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 109–116. LI S P, BI Y L, CHEN P Z, et al. Effects of AMF cooperating with exogenous calcium on maize growth and soil improvement[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1): 109–116
- [6] 单立文, 张强, 朱瑞芬, 等. 氮、磷添加下AMF对羊草和苜蓿生长与光合生理特性的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(8): 46–57. SHAN L W, ZHANG Q, ZHU R F, et al. Effects of AMF on the growth and photosynthetic physiological characteristics of *Leymus chinensis* and *Medicago sativa* with and without nitrogen and phosphorus application[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(8): 46–57.
- [7] CHEN Y T, WANG Y, YEH K C. Role of root exudates in metal acquisition and tolerance[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2017, 39: 66–72.
- [8] MONTIEL-ROZAS M M, MADEJON E, MADEJON P. Effect of heavy metals and organic matter on root exudates (low molecular weight organic acids) of herbaceous species: an assessment in sand and soil conditions under different levels of contamination[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216: 273–281.
- [9] CHEN J X, GUO J F, LI Z R, et al. Effects of an arbuscular mycorrhizal fungus on the growth of and cadmium uptake in maize grown on polluted wasteland, farmland and slopeland soils in a lead-zinc mining area [J]. *Toxics*, 2022, 10: 359–371.
- [10] 李从娟, 马健, 李彦. 五种沙生植物根际土壤的盐分状况[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4649–4655. LI C J, MA J, LI Y. Salt content in the rhizosphere of five psammophytes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4649–4655.
- [11] HAO L J, ZHANG Z C, HAO B H, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi alter microbiome structure of rhizosphere soil to enhance maize tolerance to La[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 212(9): 111996.
- [12] 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 L, LONG X H, ZHENG X T, et al. Effect on the photosynthetic characteristics and Cd uptake and translocation in seedlings of two *Helianthus tuberosus* varieties[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(6): 60–67.
- [13] MCGONIGLE T P, MILLER M H, EVANS D G, et al. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *New Phytologist*, 1990, 115(3): 495–501.
- [14] GERDEMANN J W, NICOLSON T H. Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving and decanting[J]. *Transactions of the British Mycological Society*, 1963, 46(2): 235–244.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [16] WIESHAMMER G, UNTERBRUNNER R, GARCIA T B, et al. Phyto-extraction of Cd and Zn from agricultural soils by *Salix* ssp. and intercropping of *Salix caprea* and *Arabidopsis halleri*[J]. *Plant & Soil*, 2007, 298(1): 255–264.
- [17] PENG X J, LIANG C, LI S. Immobilization of phosphorus, copper, zinc and arsenic in swine manure by activated red mud[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 71(5): 2005–2014.
- [18] 陈建军, 于蔚, 祖艳群, 等. 玉米(*Zea mays*)对镉积累与转运的品种差异研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(10): 1671–1676. CHEN J J, YU W, ZU Y Q, et al. Varietal difference of Cd accumulation and translocation in *Zea mays*[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2014, 23(10): 1671–1676.
- [19] RAVEN J A, LAMBERS H, SMITH S E, et al. Costs of acquiring phosphorus by vascular land plants: patterns and implications for plant coexistence[J]. *New Phytologist*, 2018, 217(4): 1420–1427.
- [20] 韦莉莉, 卢昌熠, 丁晶, 等. 丛枝菌根真菌参与下植物-土壤系统的养分交流及调控[J]. 生态学报, 2016, 36(14): 4233–4243. WEI L L, LU C Y, DING J, et al. Functional relationships between arbuscular mycorrhizal symbionts and nutrient dynamics in plant-soil-microbe system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(14): 4233–4243.
- [21] CHEN B D, ZHU Y G, DUAN J, et al. Effects of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* on growth and metal uptake by four plant species in copper mine tailings[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(2): 374–380.
- [22] 孙晨瑜, 曾燕红, 马俊卿, 等. 丛枝菌根真菌对黄花蒿生长和根系分泌物化学组成的影响[J]. 热带作物学报, 2020, 41(9): 1831–1837. SUN C Y, ZENG Y H, MA J Q, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on *Artemisia annua* L. growth and chemical composition of root exudates[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(9): 1831–1837.
- [23] 刘荣林, 葛菁萍. 丛枝菌根真菌和硫氧化细菌对土壤理化性质和植物生长影响的研究进展[J]. 生态学杂志, 2021, 40(10): 3355–3363. LIU R L, GE J P. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and sulfur oxidizing bacteria on soil physicochemical properties and plant growth: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(10): 3355–3363.
- [24] 李芳, 徐丽娇, 谢伟, 等. 菌根化育苗对玉米生长和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(1): 42–50. LI F, XU L J, XIE W, et al. Effects of seedling mycorrhization on the growth and nutrient uptake of maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(1): 42–50.
- [25] XIAO Y, LIU M, CHEN L, et al. Growth and elemental uptake of *Trifolium repens* in response to biochar addition, arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus fertilizer applications in low-Cd-polluted soils [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 260: 113761.
- [26] 张玉凤, 冯固, 李晓林. 丛枝菌根真菌对三叶草根分泌的有机酸组分和含量的影响[J]. 生态学报, 2003, 2(1): 30–37. ZHANG Y F, FENG G, LI X L. The effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the components and concentrations of organic acids in the exudates of mycorrhizal red clover[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 2(1): 30–37.
- [27] SINGH P K, SINGH M, TRIPATHI B N. Glomalin: an arbuscular mycorrhizal fungal soil protein[J]. *Protoplasma*, 2013, 250(3): 663–671.

- [28] WU Q S, LI Y, ZOU Y N, et al. Arbuscular mycorrhiza mediates glomalin-related soil protein production and soil enzyme activities in the rhizosphere of trifoliolate orange grown under different P levels[J]. *Mycorrhiza*, 2015, 25(2):121-130.
- [29] 王永壮, 陈欣, 史奕, 等. 低分子量有机酸对土壤磷活化及其机制研究进展[J]. 生态学杂志, 2018, 37(7):2189-2198. WANG Y Z, CHEN X, SHI Y, et al. Review on the effects of low-molecular-weight organic acids on soil phosphorus activation and mechanisms[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(7):2189-2198.
- [30] 秦丽, 何永美, 王吉秀, 等. 续断菊与玉米间作的铅累积及根系低分子量有机酸分泌特征研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6):867-875. QIN L, HE Y M, WANG J X, et al. Lead accumulation and low-molecular-weight organic acid secreted by roots in *Sonchus asper* L. - *Zea mays* L. intercropping system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(6):867-875.
- [31] 杨聪, 陈胜伦, 刘豫, 等. 纳米氢氧化镁、黑麦草套种和丛枝菌根对萝卜Cd含量和土壤Cd化学形态及微生物数量的影响[J]. 农学报, 2019, 9(7):37-43. YANG C, CHEN S L, LIU Y, et al. Effects of nano-magnesium hydroxide, ryegrass intercropping and arbuscular mycorrhizal on Cd concentration and soil Cd chemical forms and microbial populations[J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(7):37-43.
- [32] 韩洋, 乔冬梅, 齐学斌, 等. 草酸对镉污染土壤油葵生物量及土壤酶活性和镉形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9):1964-1973. HAN Y, QIAO D M, QI X B, et al. Effects of oxalic acid on oil sunflower biomass, enzyme activities and the Cd species in Cd-polluted soils[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2020, 39(9):1964-1973.
- [33] 钱翌, 刘莹, 彭晓丽. 低分子量有机酸对土壤中Pb形态的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4):261-264. QIAN Y, LIU Y, PENG X L. Effects of low molecular weight organic acids on speciation of Pb in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4):261-264.
- [34] FRANKS M, DUNCAN E, KING K, et al. Role of Fe- and Mn-(oxy) hydroxides on carbon and nutrient dynamics in agricultural soils: a chemical sequential extraction approach[J]. *Chemical Geology*, 2020, 561(4):120035.
- [35] 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):1214-1221. ZENG J H, LI Y Y, RUAN D S, et al. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils by plant growth-promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Microbiology China*, 2017, 44(5):1214-1221.
- [36] 王发园, 林先贵. 丛枝菌根在植物修复重金属污染土壤中的作用[J]. 生态学报, 2007(2):793-801. WANG F Y, LIN X G. Role of arbuscular mycorrhizae in phytoremediation of heavy metal-contaminated soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007(2):793-801.
- [37] 陈保冬, 李晓林, 朱永官. 丛枝菌根真菌菌丝体吸附重金属的潜力及特征[J]. 菌物学报, 2005(2):283-291. CHEN B D, LI X L, ZHU Y G. Characters of metal adsorption by AM fungal mycelium[J]. *Mycosystema*, 2005(2):283-291.