

# 丛枝菌根真菌对旱稻生长、Cd 吸收累积和土壤酶活性的影响

罗方舟<sup>1</sup>, 向 垒<sup>1,2</sup>, 李 慧<sup>1,3\*</sup>, 张丽君<sup>1,2</sup>, 冯乃宪<sup>1,2</sup>, 李彦文<sup>1,2</sup>, 赵海明<sup>1,2</sup>, 蔡全英<sup>1</sup>, 莫测辉<sup>1\*</sup>

(1.暨南大学环境学院, 广东省高校水土环境毒害性污染防治与生物修复重点实验室, 广州 510632; 2.暨南大学生态学系, 广州 510632; 3.中山大学, 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室, 广州 510275)

**摘 要:**通过盆栽实验,研究了土壤不同 Cd 添加水平(0、2、10 mg·kg<sup>-1</sup>)下,接种丛枝菌根真菌摩西球囊霉(*Glomus mosseae*, GM)对旱稻(*Oryza Sativa* L.)生长、Cd 吸收累积和根际土壤酶(脲酶和蔗糖酶)活性的影响。结果表明,GM 菌可有效侵染旱稻根系,其侵染率为 37%~72%,随 Cd 污染程度增加而显著降低。接种 GM 菌使旱稻根际土壤脲酶及蔗糖酶活性显著提高,提高幅度为 9.6%~44.5%,从而促进根际土壤碳素和氮素循环,并显著提高旱稻根系、地上部和籽粒的生物量,提高幅度为 10.4%~57.1%;接种 GM 菌同时可降低旱稻对 Cd 的富集和转运能力,从而显著降低其各部分尤其是籽粒中的 Cd 含量,降幅为 26.8%~57.1%。

**关键词:**土壤污染;镉;旱稻;丛枝菌根真菌;土壤酶

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)06-1090-06 doi:10.11654/jaes.2015.06.011

## Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) on Growth and Cd accumulation of Upland Rice and Soil Enzyme Activities in Cadmium Contaminated Soil

LUO Fang-zhou<sup>1</sup>, XIANG Lei<sup>1,2</sup>, LI Hui<sup>1,3\*</sup>, ZHANG Li-jun<sup>1,2</sup>, FENG Nai-xian<sup>1,2</sup>, LI Yan-wen<sup>1,2</sup>, ZHAO Hai-ming<sup>1,2</sup>, CAI Quan-ying<sup>1</sup>, MO Ce-hui<sup>1\*</sup>

(1.Key Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation of Guangdong Higher Education Institutions, School of Environment, Jinan university, Guangzhou 510632, China; 2.Department of Ecology, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 3.Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) have showed to enhance plant resistance to environmental stresses. In this study, the effects of AMF (*Glomus mosseae*, GM) on growth and Cd accumulation and rhizospheric soil enzyme (urease and invertase) activities of upland rice were investigated under different Cd addition levels (0, 2, 10 mg·kg<sup>-1</sup>) in a pot trail. The colonization rates of upland rice roots by GM ranged from 37% to 72% and decreased with increasing soil Cd concentrations. The mycorrhizal colonization significantly enhanced soil enzyme (urease and sucrase) activities (ranging from 9.6%~44.5%), promoted carbon and nitrogen metabolisms in the rhizosphere, and increased upland rice biomass (ranging from 10.4%~57.1%), as compared with the non-mycorrhizal upland rice. The uptake and transfer of Cd in upland rice and Cd concentrations in rice grains (ranging from 26.8%~57.1%) were significantly decreased by GM inoculation.

**Keywords:** soil pollution; Cd; upland rice; arbuscular mycorrhizal fungi; soil enzyme

收稿日期:2015-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(41303083);广东省部产学研项目(2013B090600143);广东省环境污染控制与修复技术重点实验室开放研究基金资助项目(2013K0004)

作者简介:罗方舟(1991—),女,硕士生,研究方向为土壤污染与修复,E-mail:469098252@qq.com

\*通信作者:李 慧 E-mail:lihuizsu@126.com

莫测辉 E-mail:tchmo@jnu.edu.cn

社会经济的快速发展造成土壤重金属污染日益严重,尤其以Cd污染最为突出<sup>[1]</sup>。稻类作物是我国第一大粮食作物,其安全性受到广泛关注<sup>[2]</sup>。由于稻类作物易于吸收积累Cd,严重威胁人体健康<sup>[3]</sup>,深入探讨控制作物吸收积累Cd的理论和手段已迫在眉睫<sup>[4]</sup>。

丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)可与高等植物根系形成互惠共生体,促进高等植物对氮素等营养物质的吸收利用<sup>[5-6]</sup>,提高其对盐碱、洪涝、干旱等逆境胁迫的抗性<sup>[6-7]</sup>,并显著影响其对重金属的吸收积累<sup>[8-9]</sup>。土壤酶是土壤生物化学反应的催化剂,其活性高低是表征土壤代谢程度、土壤肥力及土壤环境质量的重要指标<sup>[10]</sup>。土壤酶活性(如脲酶、蔗糖酶等)对于重金属污染也有重要的指示作用<sup>[11-12]</sup>。

早稻是水稻的变异型品种,适于旱地种植栽培<sup>[13]</sup>。为适应我国水资源紧张的现状,早稻种植面积正日益扩大,其安全性问题不容忽视<sup>[14]</sup>。为此,本文以典型丛枝菌根真菌摩西球囊霉(*Glomus mosseae*, GM)为研究对象,通过盆栽实验,研究其对早稻生长、吸收积累Cd及土壤酶活性的影响,以期对控制稻类作物Cd吸收积累提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

#### 1.1.1 土壤

供试土壤采自华南农业大学水稻试验基地表层0~20 cm,风干后,磨碎过2 mm筛备用,其总Cd、pH值、总氮、总磷、总钾及有机质分别为0.10 mg·kg<sup>-1</sup>、5.83、1.13 g·kg<sup>-1</sup>、0.72 g·kg<sup>-1</sup>、28.72 g·kg<sup>-1</sup>及2.24 g·kg<sup>-1</sup>。

#### 1.1.2 早稻

供试早稻(*Oryza Sativa* L.)品种为广泛种植于华南地区的早优8号,种子购自广东省农业科学院水稻研究所,发芽率在95%以上。

#### 1.1.3 菌种

供试丛枝菌根真菌为摩西球囊霉 *Glomus mosseae* (GM, 菌种编号: BGC NM03D), 购自北京市农林科学院植物营养与资源研究所。前期实验表明,该菌种存在于土壤时,可有效侵染供试早稻。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 污染土壤制备及菌剂添加

将CdCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O溶液加入土壤,制备不同Cd添加浓度包括0、2、10 mg·kg<sup>-1</sup>的污染土壤,平衡3个月后备用。为消除土著微生物对接种丛枝菌根真菌的影

响,供试土壤于121℃下蒸汽灭菌2 h<sup>[15]</sup>。将丛枝菌根真菌GM菌剂加入供试土壤中,每千克土壤添加11.8 g菌剂并搅拌均匀,记作GM处理,同时以加入经灭菌处理(121℃下蒸汽灭菌2 h)的GM菌剂作为对照CK(11.8 g·kg<sup>-1</sup>土壤)。

#### 1.2.2 盆栽实验

选取籽粒饱满的早稻种子于10%(V/V)H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>中消毒10 min,洗净后用饱和硫酸钙溶液于恒温培养箱(25℃)浸种。种子根伸长至20 mm时,用1/4霍格兰氏(Hoagland)营养液<sup>[15]</sup>水培育苗,每3 d更换1次营养液。待早稻幼苗长至约15 cm高时,移栽到盛有供试土壤的塑料盆(内径16 cm,高14 cm)中开始盆栽实验,每处理设置3个重复。每个塑料盆装土量为1.7 kg,种植2株早稻幼苗。盆栽周期为180 d,其间采用称重-浇水法维持土壤水分含量为田间最大持水量的70%。每周施加1次霍格兰氏(Hoagland)完全营养液(400 mL·盆<sup>-1</sup>),以保证早稻营养供应充足。盆栽实验在暨南大学环境学院玻璃温室中完成,实验期间温度为25±3℃。

#### 1.2.3 样品采集

盆栽实验结束后,分别收获早稻的根系、地上部及籽粒。收获根系时,取粘附于根系表面的土壤(即根际土壤<sup>[16]</sup>,自然风干后磨碎过1 mm筛)用于脲酶和蔗糖酶活性的测定,然后依次用自来水和去离子水洗净,并将其放入Na<sub>2</sub>-EDTA液(20 mmol·L<sup>-1</sup>)中浸泡15 min,以去除其表面粘附的Cd离子,再用去离子水冲洗干净后,拭干水分。取1 g新鲜根样,用曲利苯蓝-直线截获法测定菌根侵染率<sup>[17]</sup>。植物各部分烘干至恒重后,测定Cd含量。

#### 1.2.4 Cd含量测定

称取0.2 g植物干样,以硝酸为消解液,于微波消解仪(MARS型,美国CEM)中消解至澄清液后定容,并用原子吸收分光光度计(AA7700型,日本岛津)测定Cd含量。为控制测定质量,每隔10个样品分别测定1次空白加标样和1次样品加标样,实验过程中二者的回收率均大于95%。

#### 1.2.5 土壤酶活性测定

土壤脲酶和蔗糖酶的活性分别采用靛酚蓝比色法和3,5-二硝基水杨酸比色法测定<sup>[18]</sup>,前者以氨态氮含量(NH<sub>3</sub>-N, mg·g<sup>-1</sup>)表示其活性,后者以3-氨基-5-硝基水杨酸含量(mg·g<sup>-1</sup>)表示其活性。

### 1.3 数据分析

采用Excel 2010进行统计数据及绘制图表,采用

SPSS 17.0 进行方差分析和相关性分析。实验结果以平均值±标准偏差表示,差异显著水平为  $P<0.05$ 。早稻 Cd 富集系数、根系-地上部转运系数及地上部-籽粒转运系数分别为根系 Cd 含量与土壤 Cd 含量之比<sup>[15]</sup>、地上部 Cd 含量与根系 Cd 含量之比、籽粒中 Cd 含量与地上部 Cd 含量之比。

## 2 实验结果

### 2.1 早稻丛枝菌根真菌(GM)侵染率及其对生物量的影响

未接种 GM 菌处理均未观测到早稻根系菌根侵染(表 1)。接种 GM 菌处理早稻根系菌根侵染率为 37%~72%。添加 Cd 显著降低早稻根系菌根菌侵染( $P<0.05$ ),在其添加浓度为 2、10  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  时,早稻根系菌根侵染率分别为 37%和 59%(表 1)。未接种处理,早稻各部分生物量分别为根系 3.7~7.0  $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 、地上部 11.5~17.5  $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$  和籽粒 1.1~2.2  $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 。接种 GM 菌后,早稻生物量显著提高( $P<0.05$ ),各部分提高幅度大小为籽粒(1.31~2.22 倍)>根系(1.41~1.66 倍)>地上部(1.14~1.42 倍),而且各部分生物量提高幅度均呈现随 Cd 添加浓度增加而增加的特征。

表 1 不同浓度 Cd 处理下,接种和未接种条件下早稻的菌根侵染率和生物量( $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ )

Table 1 Effects of AMF inoculation on mycorrhizal root colonization rates(%) and biomass( $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$ ) of upland rice in soils with different Cd levels

| Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 接种处理 | 侵染率/%   | 根系        | 地上部       | 籽粒        |
|------------------------------------|------|---------|-----------|-----------|-----------|
| 0                                  | CK   | 未检出     | 7.0±0.3c  | 17.5±1.7b | 2.2±0.2bc |
|                                    | GM   | 72±9.4a | 10.2±1.0a | 24.9±2.5a | 5.0±0.5a  |
| 2                                  | CK   | 未检出     | 6.1±0.3c  | 15.1±1.1c | 1.9±0.1c  |
|                                    | GM   | 59±5.9b | 8.6±1.0b  | 17.3±0.7b | 2.5±0.3b  |
| 10                                 | CK   | 未检出     | 3.7±0.8d  | 11.5±1.1d | 1.1±0.2d  |
|                                    | GM   | 37±5.0c | 6.2±0.4c  | 13.8±1.0c | 2.0±0.2c  |

注:CK 为未接种处理;GM 为接种处理;同一列数据中含相同字母者差异不显著( $P<0.05$ )。下同。

### 2.2 接种 GM 菌对早稻吸收转运 Cd 的影响

未接种 GM 菌时,各处理早稻根系、地上部、籽粒中 Cd 量分别为 1.06~27.82、0.20~5.39、0.021~0.82  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (表 2)。接种 GM 菌有利于降低早稻各部分 Cd 含量,降低幅度的大小顺序为籽粒(26.8%~57.1%)>地上部(29.2%~41.6%)>根系(10.4%~24.3%),在 Cd 添加浓度较高(10  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )时,降低幅度更为显著( $P$

表 2 不同浓度 Cd 处理下,接种和未接种条件下早稻体内各组织 Cd 的含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Table 2 Effects of AMF inoculation on Cd concentrations in grains, straws and roots of upland rice grown in soils with different Cd levels( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 接种处理 | 根系          | 地上部        | 籽粒           |
|------------------------------------|------|-------------|------------|--------------|
| 0                                  | CK   | 1.06±0.18d  | 0.20±0.03d | 0.021±0.001e |
|                                    | GM   | 0.95±0.15d  | 0.13±0.01d | 0.009±0.002e |
| 2                                  | CK   | 6.77±1.11c  | 1.37±0.21c | 0.36±0.04c   |
|                                    | GM   | 5.15±0.27c  | 0.97±0.14c | 0.16±0.02d   |
| 10                                 | CK   | 27.82±2.06a | 5.39±0.70a | 0.82±0.14a   |
|                                    | GM   | 21.07±2.59b | 3.15±0.28b | 0.60±0.08b   |

<0.05)。接种 GM 菌处理后,早稻对 Cd 的富集、转运系数也均有不同程度下降(表 3),根系富集系数、根系-地上部转运系数及地上部-籽粒转运系数分别为 2.11~8.95、0.14~0.19 及 0.07~0.19,较未接种处理分别下降 10.6%~24.2%、5.0%~26.3%和 15.8~38.5%。

表 3 接种和未接种条件下早稻吸收转运 Cd 的富集系数和转运系数

Table 3 Effects of AMF inoculation on Cd bioconcentration factor and translocation factor in upland rice grown in soils with different Cd levels

| 指标         | 接种处理 | Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ |            |            |
|------------|------|------------------------------------|------------|------------|
|            |      | 0                                  | 2          | 10         |
| 根系富集系数     | CK   | 10.01±1.66a                        | 3.39±0.55a | 2.78±0.21a |
|            | GM   | 8.95±1.45a                         | 2.57±0.13a | 2.11±0.26b |
| 根系-地上部转运系数 | CK   | 0.19±0.01a                         | 0.20±0.01a | 0.19±0.01a |
|            | GM   | 0.14±0.02b                         | 0.19±0.04a | 0.15±0.01b |
| 地上部-籽粒转运系数 | CK   | 0.10±0.02a                         | 0.26±0.01a | 0.19±0.03a |
|            | GM   | 0.07±0.01b                         | 0.16±0.02b | 0.16±0.05a |

### 2.3 接种 GM 菌对早稻根际土壤脲酶及蔗糖酶活性的影响

土壤脲酶及蔗糖酶活性与土壤营养物质转化及土壤肥力密切相关,前者是土壤氮素循环的关键酶,后者是土壤碳素循环的关键酶<sup>[18]</sup>,二者均易受重金属污染的影响<sup>[19]</sup>。图 1 显示,各处理土壤根际脲酶及蔗糖酶活性均随土壤 Cd 污染程度增加而显著降低( $P<0.05$ ),即 Cd 对土壤脲酶及蔗糖酶活性有显著抑制作用,与前人研究结果一致<sup>[20-21]</sup>。除个别处理外,接种 GM 菌处理早稻根际脲酶及蔗糖酶活性显著高于对应未接种处理,且蔗糖酶活性的提高幅度(34.2%~44.5%)大于脲酶活性的提高幅度(9.6%~25.3%)。上

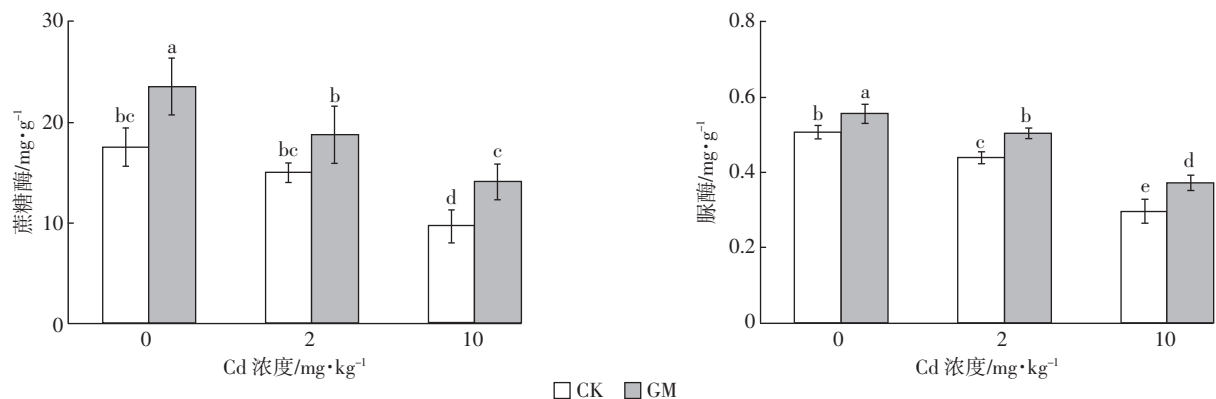


图 1 接种和未接种条件下早稻根际土壤酶的活性

Figure 1 Enzyme activities in rhizosphere of upland rice grown in soils with different Cd levels inoculated or uninoculated with GM

述结果表明接种 GM 菌有利于早稻根际营养物质(碳、氮)的循环,尤其利于碳素的代谢转化。

3 讨论

丛枝菌根真菌能够与稻类作物根系形成菌根共生体,从而有效促进作物对营养物质的吸收利用<sup>[22]</sup>,同时提高其对 Cd 胁迫的适应性<sup>[23]</sup>,并降低其对 Cd 的吸收累积<sup>[24]</sup>。本文研究发现,与未接种 GM 菌处理相比,接种处理早稻各部分生物量(根系、地上部和籽粒)及根际土壤脲酶和蔗糖酶活性均显著提高( $P<0.05$ ),早稻各部分 Cd 含量(尤其是籽粒中 Cd 含量)显著降低( $P<0.05$ )。相关性分析显示(表 4),GM 菌侵染率、早稻各部分生物量及根际土壤脲酶活性和蔗糖酶活性两两间均呈显著正相关关系( $P<0.05$ ),而这些指标均与早稻各部分 Cd 含量呈显著负相关关系( $P<0.05$ )。接种 GM 菌与早稻根系形成的菌根对重金属有较强的吸附能力<sup>[14-15]</sup>,可通过吸附作用将重金属 Cd

滞留于菌根<sup>[23-24]</sup>,以此降低早稻对 Cd 的富集和转运能力<sup>[25]</sup>,从而减少 Cd 在早稻体内尤其是籽粒中的积累,并缓解 Cd 污染造成的毒性,提高早稻对 Cd 污染的适应性。同时,接种 GM 菌与早稻根系形成的菌根还可促进多种营养元素(如无机离子、低分子量糖、有机酸等)的吸收利用<sup>[26-27]</sup>,为早稻根际提供丰富的物质源和能量源,促进其根际微生物的生长增殖和功能发挥,从而显著改善土壤脲酶和蔗糖酶的活性,并促进早稻根际土壤碳素及氮素循环,有利于早稻对营养物质的吸收代谢和生物量的提高。早稻生物量的增加,稀释了其体内 Cd 的含量,因此其生物量与各部分 Cd 含量呈显著负相关关系。

需要指出的是,目前关于丛枝菌根真菌对作物吸收积累重金属的影响还有不同认识。如张旭红等研究发现,高 Cu 污染土壤中接种丛枝菌根真菌可显著提高早稻根系中 Cu 的含量<sup>[14]</sup>,Aloui 等研究发现,低 Cd 污染土壤接种丛枝菌根真菌会提高苜蓿地上部对 Cd

表 4 早稻 GM 侵染率、生物量、Cd 含量以及根际酶活性的相关关系

Table 4 Correlations between mycorrhizal root colonization rates, rice growth, rice Cd accumulation and soil enzyme activity

|           | GM 侵染率  | 根 Cd 含量  | 地上部 Cd 含量 | 籽粒 Cd 含量 | 根重      | 地上部重    | 籽粒重    | 脲酶活性   | 蔗糖酶活性 |
|-----------|---------|----------|-----------|----------|---------|---------|--------|--------|-------|
| GM 侵染率    | 1       |          |           |          |         |         |        |        |       |
| 根 Cd 含量   | -0.893* | 1        |           |          |         |         |        |        |       |
| 地上部 Cd 含量 | -0.912* | 0.988**  | 1         |          |         |         |        |        |       |
| 籽粒 Cd 含量  | -0.921* | 0.964**  | 0.986**   | 1        |         |         |        |        |       |
| 根重        | 0.924*  | -0.892** | -0.898**  | -0.914** | 1       |         |        |        |       |
| 地上部重      | 0.837*  | -0.822** | -0.843**  | -0.824** | 0.845** | 1       |        |        |       |
| 籽粒重       | 0.804** | -0.758** | -0.801**  | -0.769*  | 0.833** | 0.934** | 1      |        |       |
| 脲酶活性      | 0.951*  | -0.952** | -0.963**  | -0.979** | 0.926** | 0.878** | 0.780* | 1      |       |
| 蔗糖酶活性     | 0.657*  | -0.836** | -0.845**  | -0.816** | 0.724*  | 0.843** | 0.790* | 0.795* | 1     |

注:“\*”为  $P<0.05$  相关,“\*\*”为  $P<0.01$  相关。

吸收积累<sup>[28]</sup>。不同研究结果之间出现差异性的原因是复杂的,总体而言,与供试作物品种、丛枝菌根真菌的品种及其不同组合以及土壤污染程度等因素有关,其机理需要进一步研究。

另外,随着 Cd 污染浓度的增加,GM 菌侵染率显著下降,即 Cd 污染抑制 GM 在旱稻根系的侵染。尽管接种 GM 菌显著降低了旱稻籽粒中 Cd 的含量,下降幅度为 26.8%~57.1%,但在 Cd 添加浓度为 10 mg·g<sup>-1</sup> 条件下,其籽粒 Cd 含量(0.60 mg·kg<sup>-1</sup>)仍超过我国食品卫生标准限值(0.2 mg·kg<sup>-1</sup>)。因此,需要配合水肥调控及其他技术进一步降低其籽粒 Cd 含量。

## 4 结论

丛枝菌根真菌(摩西球囊霉 *Glomus mosseae*)可有效侵染旱稻根系,显著提高 Cd 污染土壤(2~10 mg·kg<sup>-1</sup>)中旱稻根际土壤脲酶及蔗糖酶活性,从而促进根际土壤碳素和氮素循环,并显著增加旱稻各部分(根系、地上部和籽粒)的生物量及其对 Cd 污染胁迫的适应性。同时,丛枝菌根真菌(GM)可显著降低旱稻各部分尤其是籽粒中的 Cd 含量,在控制稻类作物吸收积累 Cd 方面有良好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 刘侯俊,梁吉哲,韩晓日,等. 东北地区不同水稻品种对 Cd 的累积特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2):220-227.  
LIU Hou-jun, LIANG Ji-zhe, HAN Xiao-ri, et al. Accumulation and distribution of cadmium in different rice cultivars of Northeastern China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2):220-227.
- [2] 张良运,李恋卿,潘根兴. 南方典型产地大米 Cd、Zn、Se 含量变异及其健康风险探讨[J]. 环境科学, 2009, 30(9):2792-2797.  
ZHANG Liang-yun, LI Lian-qing, PAN Gen-xing. Variation of Cd, Zn and Se contents of polished rice and the potential health risk for subsistence-diet farmers from typical areas of South China[J]. *Environment Science*, 2009, 30(9):2792-2797.
- [3] 陈爱葵,王茂意,刘晓海,等. 水稻对重金属镉的吸收及耐性机理研究进展[J]. 生态科学, 2013, 32(4):514-522.  
CHEN Ai-kui, WANG Mao-yi, LIU Xiao-hai, et al. Research progress on the effect of cadmium on rice and its absorption and tolerance mechanisms[J]. *Ecological Science*, 2013, 32(4):514-522.
- [4] Li W C, Ouyang Y, Ye Z H. Accumulation of mercury and cadmium in rice from paddy soil near a mercury mine[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, 33(11):2438-2447.
- [5] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis[M]. Cambridge, UK: Academic Press, 2008.
- [6] Abbaspour H, Saeidi-Sar S, Afshari H, et al. Tolerance of mycorrhizal infected pistachio (*Pistacia vera* L.) seedling to drought stress under glasshouse conditions[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2012, 169(7):704-709.
- [7] Cicatelli A, Lingua G, Todeschini V, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi restore normal growth in a white poplar clone grown on heavy metal-contaminated soil, and this is associated with upregulation of foliar metal-allothionein and polyamine biosynthetic gene expression[J]. *Annals of Botany*, 2010, 106(5):791-802.
- [8] 刘灵芝,张玉龙,李培军,等. 丛枝菌根真菌(*Glomus mosseae*)对玉米吸镉的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3):568-572.  
LIU Ling-zhi, ZHANG Yu-long, LI Pei-jun, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus mosseae*) on Cd accumulation in maize plants[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3):568-572.
- [9] Shahabivand S, Maivan H Z, Goltapeh E M, et al. The effects of root endophyte and arbuscular mycorrhizal fungi on growth and cadmium accumulation in wheat under cadmium toxicity[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 60(7):53-58.
- [10] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京:科学出版社, 1987:118-159.  
ZHOU Li-kai. Soil enzymology[M]. Beijing:Science Press, 1987:118-159.
- [11] Garcia-Ruiz R, Ochoa V, Hinojosa M B, et al. Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9):2137-2145.
- [12] Malley C, Nair J, Ho G. Impact of heavy metals on enzymatic activity of substrate and on composting worms *Eiseniafetida*[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(13):1498-1502.
- [13] Zhang X H, Zhu Y G, Chen B D, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi contribute to resistance of upland rice to combined metal contamination of soil[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, 28(12):2065-2077.
- [14] 张旭红,林爱军,张 莘,等. Cu 污染土壤接种丛枝菌根真菌对旱稻生长的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(5):1677-1681.  
ZHANG Xu-hong, LIN Ai-jun, ZHANG Xin, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on growth of upland rice in soil contaminated by Cu[J]. *Chinese Journal Environmental Engineering*, 2012, 6(5):1677-1681.
- [15] 王 立,安广楠,马 放,等. AMF 对镉污染条件下水稻抗逆性及根际固定性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10):1882-1889.  
WANG Li, AN Guang-nan, MA Fang, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on cadmium tolerance and rhizospheric fixation of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10):1882-1889.
- [16] 刘素慧,刘世琦,张自坤,等. 大蒜连作对其根际土壤微生物和酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(5):1000-1006.  
LIU Su-hui, LIU Shi-qi, ZHANG Zi-kun, et al. Influence of garlic continuous cropping on rhizosphere soil microorganisms and enzyme activities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(5):1000-1006.
- [17] 刘润进,陈应龙. 菌根学[M]. 北京:科学出版社, 2007:376-388.  
LIU Run-jin, CHEN Ying-long. The Mycorrhizology[M]. Beijing:Science Press, 2007:376-388.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1986:35-46.  
GUAN Song-yin. Soil enzymes and their study method[M]. Beijing:China Agricultural Press, 1986:35-46.

- [19] 黄云凤, 高 扬, 毛 亮, 等. Cd、Pb 单一及复合污染下土壤酶生态抑制效应及生态修复基准研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2258–2264.
- HUANG Yun-feng, GAO Yang, MAO Liang, et al. The ecological inhibition effect of soil enzyme activity and ecological restoration baseline under Cd and Pb single and combined pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2258–2264.
- [20] 高大翔, 郝建朝, 金建华, 等. 重金属汞、镉单一胁迫及复合胁迫对土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 903–908.
- GAO Da-xiang, HAO Jian-chao, JIN Jian-hua, et al. Effects of single stress and combined stress of Hg and Cd on soil enzyme activities[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3): 903–908.
- [21] 卢显芝, 金建华, 郝建朝, 等. 不同土层土壤酶活性对重金属汞和镉胁迫的响应[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1844–1848.
- LU Xian-zhi, JIN Jian-hua, HAO Jian-chao, et al. Responses of soil enzyme activities in different soil layers to single and combined stress of Hg and Cd[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1844–1848.
- [22] Gao X P, Akhter F, Tenuta M, et al. Mycorrhizal colonization and grain Cd concentration of field-grown durum wheat in response to tillage, preceding crop and phosphorus fertilization[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(5): 750–758.
- [23] Malekzadeh E, Alikhani H A, Savaghebi-Firoozabadi G R, et al. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi and an improving growth bacterium on Cd uptake and maize growth in Cd-polluted soils[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2011, 9(4): 1213–1223.
- [24] Shahabivand S, Maivan H Z, Goltapeh E M, et al. The effects of root endophyte and arbuscular mycorrhizal fungi on growth and cadmium accumulation in wheat under cadmium toxicity[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 60(7): 53–58.
- [25] Maiti D, Toppo N N, Variar M. Integration of crop rotation and arbuscular mycorrhiza(AM) inoculum application for enhancing AM activity to improve phosphorus nutrition and yield of upland rice(*Oryza sativa* L. )[J]. *Mycorrhiza*, 2011, 21(8): 659–667.
- [26] 宋福强, 孟剑侠, 周 宏, 等. 丛枝菌根真菌对紫穗槐固氮能力的影响[J]. 林业科技, 2009, 34(5): 25–28.
- SONG Fu-qiang, MENG Jian-xia, ZHOU Hong, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the ability of nitrogen fixation of *amorphia fruticosa*[J]. *Forestry Science and Technology*, 2009, 34(5): 25–28.
- [27] 谢 靖, 唐 明. 黄土高原紫穗槐丛枝菌根真菌与土壤因子和球囊霉素空间分布的关系[J]. 西北植物学报, 2012, 32(7): 1440–1447.
- XIE Jing, TANG Ming. Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi, soil factors and glomalin in the rhizosphere of *amorphia fruticosa* grown on the loess plateau[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32(7): 1440–1447.
- [28] Aloui A, Dumas-Gaudot E, Daher Z, et al. Influence of arbuscular mycorrhizal colonisation on cadmium induced *Medicago truncatula* root isoflavonoid accumulation[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 60(8): 233–239.