

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.04.005

黑麦草与丛枝菌根对番茄 Cd 质量分数及根际 Cd 形态的影响^①

陈永勤¹, 徐卫红¹, 江玲¹, 迟荪琳¹, 秦余丽¹,
陈序根¹, 赵婉伊¹, 张进忠¹, 熊治庭²

1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2. 武汉大学 资源与环境科学学院, 武汉 430079

摘要: 采用大田试验研究在重金属 Cd(5.943 mg/kg)污染下, 黑麦草和丛枝菌根对 2 个品种番茄(“德福 mm-8”和“洛贝琪”)产量, Cd 质量分数以及对根际 Cd 形态的影响. 结果表明, 黑麦草和丛枝菌根单一或复合处理使 2 个品种番茄果实、叶、茎、根及植株总干质量不同程度增加, 增幅达 2.67%~38.42%; 同时显著降低 2 个番茄品种的果实、叶、茎及根部的 Cd 质量分数, 降幅达 4.59%~42.45%. 番茄叶、根和茎为 Cd 主要积累部位, 果实中 Cd 积累较少. “洛贝琪”表现出 Cd 低积累特性, 其果实 Cd 质量分数、积累量及植株 Cd 总积累量均低于“德福 mm-8”. 在 Cd 污染土壤上, 种植番茄的同时套种黑麦草或接种丛枝菌根, 可减少土壤中可交换态(EXC-Cd), 碳酸盐态(CAB-Cd), 铁锰氧化态(Fe-Mn-Cd)及 Cd 全量, 其中土壤 Cd 全量降幅达 8.65%~23.21% (“德福 mm-8”)和 15.89%~27.52% (“洛贝琪”). 番茄果实 Cd 质量分数与土壤可交换态 Cd, 铁锰氧化态 Cd 质量分数之间呈显著正相关性关系($p < 0.05$). 接种丛枝菌根能促进黑麦草的生长及其对 Cd 的吸收, 黑麦草地上部及总生物量、黑麦草 Cd 质量分数及 Cd 积累量均显著增加, 分析番茄 Cd 质量分数与黑麦草 Cd 质量分数, 二者呈显著负相关性($p < 0.05$).

关键词: 黑麦草; 丛枝菌根; 番茄品种; Cd 吸收; 根际 Cd 形态

中图分类号: X171.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)04-0034-06

镉(cadmium, Cd)是一种剧毒元素, 在土壤中具有较强的移动性, 且对作物具有高毒害性, 被列为首位土壤重金属污染物^[1-3]. 2014 年 4 月环境保护部和国土资源部联合公布的全国土壤污染状况调查公告显示, 我国耕地土壤环境质量堪忧, 其点位超标率达 19.4%; Cd 污染点位超标率高达 7.0%, 位居 8 种无机污染物首位, 土壤 Cd 污染问题日趋严重. 相关研究表明在 Cd 污染土壤上种植作物, Cd 会通过食物链进入人体内富集, 危害人体健康^[2, 4]. 日本的骨痛病就是典型例证. 因此, 土壤 Cd 污染治理及修复问题备受环境科学领域国内外学者广泛关注.

植物修复技术作为一种新兴的绿色生物技术, 具有操作简单、经济及技术能够大面积实施等优点, 被认为是修复重金属污染土壤的最佳选择. 黑麦草(*Lolium multiflorum* L.)为一年生或多年生草本科植物, 生长速度快、分蘖力强、产量高. 其对土壤重金属具有较强的富集作用, 是一种理想的土壤重金属修复植物^[5]. 大量研究结果显示, 丛枝菌根(*Arbuscular mycorrhiza*, AM)真菌能显著提高宿主植物对重金属胁迫的耐受能力, 减轻重金属对植物生长的危害, 在土壤修复方面具有较好的应用前景^[6-9]. 而冯海艳等^[10]研究发现, 丛枝真菌能促进一些植物对 Cd, Zn 等重金属的吸收.

① 收稿日期: 2016-04-21

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(Nycytx-25); 国家自然科学基金项目(20477032, 31372141); 国家科技支撑计划项目(2007BAD87B10).

作者简介: 陈永勤(1992-), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染植物修复技术的研究.

通信作者: 徐卫红, 博士, 教授, 博士研究生导师.

Cd 易在蔬菜中积累,且不同种类及品种蔬菜对 Cd 的吸收积累能力均存在显著差异^[1, 11-14]. 番茄(*Lycopersicon esculintum* Mill.)富含丰富的维生素和矿物质,对人体健康具有多种功效,是我国栽培最为普遍的果菜之一. 相关研究显示,番茄对 Cd 毒害较敏感,在中低 Cd 污染水平土壤上种植番茄,其果实中 Cd 质量分数超标,对番茄的食用安全造在潜在威胁^[1, 15]. 目前,有关微生物强化植物对土壤 Cd 污染修复的报道较少,且不统一^[9, 10, 16]. 因此,笔者在前期土培试验基础上,采用大田试验探讨在中低浓度 Cd 污染的菜园土壤上,研究黑麦草和丛枝菌根真菌单一或复合处理对番茄产量、抗性、Cd 质量分数及积累量,以及其对番茄根际土壤 Cd 形态的影响,考察黑麦草能否修复土壤 Cd 污染以及减少番茄 Cd 吸收,同时明确丛枝菌根真菌对黑麦草修复 Cd 污染是否具有强化作用,以期对番茄无害化栽培和土壤 Cd 污染修复提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

黑麦草(*Lolium multiflorum* L.)品种为邦德. 番茄(*Lycopersicon esculintum* Mill.)品种为德福 mm-8 和洛贝琪,幼苗由重庆市农林科学院所提供. 丛枝菌根(*Arbuscular mycorrhiza*, AM)真菌为摩西球囊霉、幼套球囊霉、根内球囊霉,菌种由北京市农林科学院营养与资源研究所提供. 土壤为酸性紫色土,土壤理化性质参考文献[2].

1.2 试验设计

大田试验在重庆市潼南县双坝村 3 组进行(2014 年 3 月 20 日至 2014 年 7 月 15 日). 试验设置“Cd”(对照),“Cd+黑麦草”(在番茄幼苗移栽 15d 后,在两株番茄之间播黑麦草种子,40 粒/穴),“Cd+丛枝菌根”(在番茄植株根际接种供试的 3 种菌根各 1 g,共 3 g),“Cd+黑麦草+丛枝菌根”共 4 个处理. 每个处理设置 3 次重复,随机排列,小区面积为 8 m²,每个小区移栽番茄幼苗 16 株. 番茄基肥 60 kg 复合肥(17-17-17),第一次追肥(提苗期)10 kg 复合肥,第二次追肥(第一果膨大期)20 kg 复合肥,第三次追肥(盛果期)15 kg 复合肥,施肥量均为当地常规施肥量. 随机挑选 4 株番茄植株做标记,从第一次结果开始记产,2014 年 7 月 15 日收获,同时采收该番茄植株旁的黑麦草,并采用抖土法采集番茄根际土壤.

1.3 测定方法

1.3.1 土壤基本理化性质

土壤理化指标参照鲁如坤^[17]的方法测定.

1.3.2 植株 Cd 质量分数测定

植株各部位 Cd 质量分数采用 HNO₃-HClO₄(体积比 4:1)消煮,原子吸收分光光度计(Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA)测定^[2]. 采用植株标准物质(GBW#08513)对测定结果进行质量监控(国家标准与技术研究所提供). Cd 的检测限为 0.005 mg/kg. 所有植物样品的 Cd 回收率均高于 95%,相对标准偏差(RSD)的精度控制在 10%以内.

1.3.3 根际 Cd 质量分数及 Cd 形态测定

土壤 Cd 形态分级采用 Tessier 等提出的五步连续提取法^[18]. 根际 Cd 质量分数经 HCl-HNO₃-HClO₄消解后,用原子吸收分光光度计(Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA)测定. 采用土壤标准物质(GBW#08303)对测定结果进行质量监控(国家标准与技术研究所提供). Cd 的检测限为 0.005 mg/kg. 所有土壤样品的 Cd 回收率均高于 95%,相对标准偏差(RSD)的精度控制在 10%以内.

1.4 统计分析

采用 SPSS 21.0 统计软件进行数据方差分析和多重比较.

2 结果与分析

2.1 番茄生物量

各处理番茄生物量可依据陈永勤等^[2]研究结果. 番茄果实干质量和总干质量在 2 个品种间和各处理间差异有统计学意义. 与对照比较,黑麦草和丛枝菌根单一或复合处理使 2 个品种番茄果实、叶、茎、根及植株总干质量增加,分别增加 14.19%~38.42%,10.67%~16.81%,12.98%~16.80%,20.85%~31.49%

及14.28%~36.63% (“德福 mm-8”)和4.22%~18.30%,2.67%~7.62%,3.03%~9.49%,8.42%~10.26%及4.50%~16.85% (“洛贝琪”),以“Cd+黑麦草+丛枝菌根”处理效果最为显著.黑麦草和丛枝菌根单一或复合处理下,“德福 mm-8”果实干质量及植株总干质量均高于“洛贝琪”,与对照处理中“洛贝琪”果实干质量及植株总干质量较高不同.

2.2 黑麦草生物量

黑麦草生物量可反应黑麦草在Cd胁迫条件下的生长情况,从而明确Cd对其毒害程度.由表1可看出,在Cd胁迫下,除地下部外,黑麦草生物量的差异性在“Cd+黑麦草”和“Cd+黑麦草+丛枝菌根”处理间均达到显著水平.黑麦草地上部、地下部及总生物量均增加,分别增加8.32%,18.36%及11.78%(与德福 mm-8套作)和11.96%,15.34%及13.10%(与洛贝琪套作).

表1 丛枝菌根对黑麦草生物量的影响

处 理	地上部干质量/(g·穴 ⁻¹)		地下部干质量/(g·穴 ⁻¹)		总干质量/(g·穴 ⁻¹)	
	与德福 mm-8	与洛贝琪	与德福 mm-8	与洛贝琪	与德福 mm-8	与洛贝琪
	套作	套作	套作	套作	套作	套作
Cd+黑麦草	9.85±1.47b	10.12±0.68b	5.61±0.65b	5.15±1.04b	15.45±2.11b	15.27±1.71b
Cd+黑麦草+丛枝菌根	10.67±0.65a	11.33±1.44a	6.64±1.22a	5.94±0.54a	17.27±0.58a	17.27±1.97a

注:表中所列数据为平均值±标准差,同列数据后小写字母不同表示不同处理之间差异有统计学意义($p<0.05$).

2.3 番茄Cd质量分数及积累量

各处理番茄Cd质量分数及积累量可依据陈永勤等^[2]研究结果.番茄各部位Cd质量分数大小顺序依次为叶、根、茎、果实.“Cd+黑麦草或丛枝菌根”处理使番茄果实、叶、茎及根部Cd质量分数不同程度降低,分别降低6.90%~37.93%,5.69%~38.62%,5.63%~34.74%及9.80%~42.45% (“德福 mm-8”)和11.83%~40.86%,12.21%~40.08%,4.59%~32.65%及21.69%~41.37% (“洛贝琪”).其中,“Cd+黑麦草+丛枝菌根”处理对降低番茄叶、茎、根和果实Cd质量分数效果最明显,“Cd+丛枝菌根”处理效果次之.比较2个番茄品种,“德福 mm-8”根部Cd质量分数低于“洛贝琪”,而其果实Cd质量分数则高于“洛贝琪”.

2.4 黑麦草Cd质量分数及积累量

由表2可知,接种丛枝菌根能促进黑麦草对Cd的吸收,其Cd质量分数及Cd积累量均增加显著.黑麦草地上部和地下部Cd质量分数增加幅度分别为18.01%和27.20%(与德福 mm-8套作),63.46%和33.32%(与洛贝琪套作);黑麦草地上部、地下部Cd积累量及Cd全量分别增加26.09%,50.00%及36.59%(与德福 mm-8套作)和87.50%,61.54%及75.86%(与洛贝琪套作).与“德福 mm-8”及“洛贝琪”套作对黑麦草Cd质量分数有显著影响,其中与“德福 mm-8”套作的黑麦草各部位Cd质量分数及Cd积累量均明显高于与“洛贝琪”套作的黑麦草.黑麦草地下部Cd质量分数较高,而Cd积累量则为地上部较高.

表2 丛枝菌根对黑麦草Cd质量分数及积累量的影响

处 理	Cd质量分数/(mg·kg ⁻¹)				Cd积累量/(mg·穴 ⁻¹)				Cd全量/(mg·穴 ⁻¹)	
	地上部		地下部		地上部		地下部		与德福 mm-8	与洛贝琪
	与德福 mm-8	与洛贝琪	与德福 mm-8	与洛贝琪	与德福 mm-8	与洛贝琪	与德福 mm-8	与洛贝琪	套作	套作
Cd+黑麦草	2.288±0.02a	1.612±0.19b	3.224±0.32bc	2.614±0.16c	0.023±0.001ab	0.016±0.002b	0.018±0.001b	0.013±0.001c	0.041±0.002b	0.029±0.001c
Cd+黑麦草+丛枝菌根	2.700±0.28a	2.635±0.02a	4.101±0.25a	3.485±0.26ab	0.029±0.003a	0.030±0.004a	0.027±0.001a	0.021±0.001b	0.056±0.001a	0.051±0.002a

注:表中所列数据为平均值±标准差,同列数据后小写字母不同表示不同处理之间差异有统计学意义($p<0.05$).

2.5 番茄根际土壤Cd形态及质量分数

番茄根际土壤Cd形态及质量分数可依据陈永勤等^[2]研究结果.根际土壤中Cd形态质量分数由大到小为残渣态(RES-Cd),铁锰氧化态(Fe-Mn-Cd),碳酸盐态(CAB-Cd),可交换态(EXC-Cd),有机态(OM-Cd).土壤全Cd在黑麦草或丛枝菌根单一或复合处理条件下明显降低,降幅达8.65%~23.21% (“德福 mm-8”)和15.89%~27.52% (“洛贝琪”);土壤中可交换态Cd,铁锰氧化态Cd和碳酸盐态Cd质量分数也不同程度的减少,其中碳酸盐态Cd降低16.92%~37.76% (“德福 mm-8”)和31.25%~34.38% (“洛贝琪”),铁锰氧化态Cd降低20.58%~38.12% (“德福 mm-8”)和32.02%~38.63% (“洛贝琪”).除“Cd+丛枝菌根”处

理略微增加根际土壤中的残渣态 Cd 质量分数外,“Cd+黑麦草”和“Cd+黑麦草+丛枝菌根”处理均使根际土壤中残渣态 Cd 质量分数降低。

2.6 番茄 Cd 质量分数与根际土壤 Cd 质量分数的相关性分析

番茄 Cd 质量分数与根际土壤 Cd 质量分数相关性分析可依据陈永勤等^[2]研究结果.除果实与根、果实与叶外,Cd 质量分数在番茄各部位均呈显著正相关,其中根与叶、根与茎、叶与茎间呈极显著正相关(R 为 0.943,0.792,0.798, $p < 0.01$).土壤全 Cd,碳酸盐态 Cd,铁锰氧化态 Cd 和可交换态 Cd 质量分数之间存在极显著的相关性关系.番茄果实 Cd 质量分数与土壤可交换态 Cd,铁锰氧化态 Cd 质量分数间达到显著相关水平(R 为 0.594,0.509, $p < 0.05$);番茄根、茎、叶部 Cd 质量分数与土壤可交换态 Cd 质量分数间呈极显著正相关(R 为 0.785,0.777,0.747, $p < 0.01$).

2.7 番茄 Cd 质量分数与黑麦草 Cd 质量分数的相关性分析

番茄各部位 Cd 质量分数与黑麦草各部位 Cd 质量分数的相关性见表 3.黑麦草地上部与地下部之间 Cd 质量分数的相关性达到极显著水平,相关系数为 0.902.番茄各部位 Cd 质量分数与黑麦草地上部、地下部 Cd 质量分数呈负相关,仅番茄叶片 Cd 质量分数与黑麦草地上部 Cd 质量分数达到显著性水平,相关系数为 -0.722.

表 3 番茄各部位 Cd 质量分数与黑麦草各部位 Cd 质量分数的相关系数

项目	番茄果实	番茄叶	番茄茎	番茄根	黑麦草地上部	黑麦草地下部
番茄果实	1					
番茄叶	0.340	1				
番茄茎	0.609*	0.798**	1			
番茄根	0.429	0.943**	0.792**	1		
黑麦草地上部	-0.335	-0.722*	-0.651	-0.592	1	
黑麦草地下部	-0.237	-0.673	-0.624	-0.595	0.902**	1

注: $n=8$; ** 表示 $p < 0.01$, * 表示 $p < 0.05$, 差异有统计学意义。

3 讨 论

在 Cd 污染(5.943 mg/kg)条件下,黑麦草和丛枝菌根单一或复合处理均增加 2 个番茄品种各部位生物量,且均以“Cd+黑麦草+丛枝菌根”处理效果最佳.该结果与江玲土培试验(模拟 Cd 污染为 20 mg/kg)一致^[1].2 个番茄品种均为叶、根和茎部位 Cd 质量分数较多,果实中较少.这结果与朱芳等^[14]和张薇等^[19]报道的番茄 Cd 主要集中在根部不同,但与谢文文等^[20]研究结果基本一致.各处理下 2 个番茄品种各部位 Cd 质量分数较对照均有不同程度降低.这说明黑麦草和丛枝菌根单一或复合处理能缓解 Cd 对番茄的生长胁迫,同时为土壤 Cd 污染修复利用及农产品安全种植提供一定理论依据^[2].比较 2 个番茄品种,“德福 mm-8”的果实 Cd 质量分数和积累量及植株全 Cd 质量分数普遍高于“洛贝琪”.可见,供试 2 个番茄品种在 Cd 吸收富集和 Cd 耐性方面存在基因型差异^[14, 19].

番茄根际土壤中 Cd 形态主要为残渣态,而可交换态、有机态 Cd 质量分数极低.该结果与徐卫红等^[21]研究结果不同,但与王友保等^[22]的研究结果基本一致,可能与土壤性质以及种植的植物种类不同,导致土壤 pH,微生态环境等的改变有关^[2, 23].与对照比较,各处理条件下根际土壤中 Cd 提取总量较对照均有所降低,以黑麦草和丛枝菌根复合处理效果最明显,黑麦草处理次之.这说明黑麦草对 Cd 有强富集能力,可吸收根际土壤中的部分 Cd 进而降低土壤中 Cd 质量分数^[2].番茄果实 Cd 质量分数与可交换态 Cd 呈显著正相关关系,说明土壤可交换态 Cd 质量分数是影响番茄果实部位 Cd 质量分数的重要因素。

Cd 胁迫条件下,接种丛枝菌根能减轻 Cd 对黑麦草的毒害,促进黑麦草生长,黑麦草的地上部生物量和总生物量均显著增加.此外,接种丛枝菌根使黑麦草中 Cd 质量分数及积累量显著增加,说明在低 Cd 浓度下接种丛枝菌根,可促进黑麦草对 Cd 的吸收和积累以及促进黑麦草生长.该结果与张晓松等^[24]和田野等^[25]报道一致.黑麦草地下部 Cd 质量分数较高,而 Cd 积累量则是地上部较高,可能是地上部生物量远大于地下部所致.大田试验中,番茄 Cd 质量分数与黑麦草 Cd 质量分数呈显著负相关性.可能与黑麦草根部

与番茄根部竞争吸收运输重金属 Cd, 导致 Cd 离子在番茄体内的浓度降低^[1, 2]有关. 相关研究结果表明黑麦草与番茄间套作可以显著降低番茄对 Cd 的吸收, 从而大大提高番茄的食用安全性, 这对在中低 Cd 污染土壤上的番茄安全生产具有重要意义.

4 结 论

1) 在 Cd 污染土壤上, 黑麦草和丛枝菌根单一或复合处理对 2 个品种番茄的生长起到促进作用, 番茄果实、根、茎、叶及总干质量均不同程度提高. 同时各处理下, 2 个番茄品种各部位 Cd 质量分数均降低, “Cd+黑麦草+丛枝菌根”处理 Cd 质量分数降低最显著, “Cd+丛枝菌根”处理次之. 比较两个番茄品种, “洛贝琪”表现出一定的 Cd 低积累性, 果实 Cd 质量分数及 Cd 积累量均低于“德福 mm-8”.

2) 黑麦草和丛枝菌根单一或复合处理均降低根际土壤中 Cd 总量以及交换态、碳酸盐态和铁锰氧化态 Cd 质量分数. 番茄各部位 Cd 质量分数与土壤全 Cd 及铁锰氧化态 Cd, 碳酸盐态 Cd, 可交换态 Cd 质量分数之间达到显著相关性, 根际土壤可交换态 Cd, 铁锰氧化态 Cd 质量分数与番茄果实中 Cd 质量分数之间达到显著相关性.

3) 接种丛枝菌根对黑麦草生长, Cd 吸收积累有显著促进作用, 且套种黑麦草能有效缓解 Cd 对番茄的毒害作用.

参考文献:

- [1] 江 玲, 杨 芸, 徐卫红, 等. 黑麦草—丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响 [J]. 环境科学, 2014, 35(6): 2349—2357.
- [2] 陈永勤, 江 玲, 徐卫红, 等. 黑麦草、丛枝菌根对番茄 Cd 吸收、土壤 Cd 形态的影响 [J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4642—4650.
- [3] 熊仕娟, 徐卫红, 谢文文, 等. 纳米沸石对土壤 Cd 形态及大白菜 Cd 吸收的影响 [J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4630—4641.
- [4] 王守经, 胡 鹏, 杜方岭. 我国城郊地区农用地重金属污染与农产品质量安全 [J]. 中国食物与营养, 2010, 16(7): 8—10.
- [5] 徐卫红, 王宏信, 刘 怀, 等. Zn, Cd 单一及复合污染对黑麦草根分泌物及根际 Zn, Cd 形态的影响 [J]. 环境科学, 2007, 28(9): 2089—2095.
- [6] HILDEBRANDT U, REGVAR M, BOTHE H. *Arbuscular mycorrhiza* and Heavy Metal Tolerance. *Phytochemistry*, 2007, 68(1): 139—146.
- [7] FEDDERMANN N, FINLAY R, BOLLER T, et al. Functional Diversity in Arbuscular Mycorrhiza—the Role of Gene Expression, Phosphorous Nutrition and Symbiotic Efficiency [J]. *Fungal Ecology*, 2010, 3(1): 1—8.
- [8] MIRANSARI M. Hyperaccumulators, Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Stress of Heavy Metals [J]. *Biotechnology Advances*, 2011, 29(6): 645—653.
- [9] 罗鹏程, 李 航, 王曙光. 湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐 Cd 胁迫的影响 [J]. 环境科学, 2016, 37(2): 750—755.
- [10] 冯海艳, 刘 茵, 冯 固, 等. 接种 AM 真菌对黑麦草吸收和分配 Cd 的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(3): 426—431.
- [11] 熊仕娟, 刘 俊, 徐卫红, 等. 外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响 [J]. 环境科学, 2015, 36(1): 286—294.
- [12] LIU J G, LIANG J S, LI K Q, et al. Correlations Between Cadmium and Mineral Nutrients in Absorption and Accumulation in Various Genotypes of Rice Under Cadmium Stress [J]. *Chemosphere*, 2003, 52(9): 1467—1473.
- [13] 孙建云, 沈振国. 镉胁迫对不同甘蓝基因型光合特性和养分吸收的影响 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2605—2610.
- [14] 朱 芳, 方 炜, 杨中艺. 番茄吸收和积累 Cd 能力的品种间差异 [J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4071—4081.
- [15] 丁枫华, 刘术新, 罗 丹, 等. 23 种常见作物对镉毒害的敏感性差异 [J]. 环境科学, 2011, 32(1): 277—283.
- [16] 刘 茵, 孔凡美, 冯 固, 等. 丛枝菌根真菌对紫羊茅镉吸收与分配的影响 [J]. 环境科学学报, 2004, 24(6): 1122—1127.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [18] TESSIER A W, CAMPBELL P G C, BISSON M. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace

Metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844–851.

- [19] 张 微, 吕金印, 柳 玲. 不同基因型番茄幼苗对镉胁迫的生理响应及镉吸收差异 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1065–1071.
- [20] 谢文文, 周 坤, 徐卫红, 等. 外源锌对不同品种番茄光合特性、品质及镉积累的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(11): 22–29.
- [21] 徐卫红, 王宏信, 刘 怀, 等. Zn, Cd 单一及复合污染对黑麦草根分泌物及根际 Zn, Cd 形态的影响 [J]. 环境科学, 2007, 28(9): 2089–2095.
- [22] 王友保, 燕傲蕾, 张旭情, 等. 吊兰生长对土壤镉形态分布与含量的影响 [J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 163–172.
- [23] YANG H, WONG J W, YANG Z M, et al. Ability of *Agropyron elongatum* to Accumulate the Single Metal of Cadmium, Copper, Nickel and Lead and Root Exudation of Organic Acids [J]. Journal of Environmental Sciences, 2001, 13(3): 368–375.
- [24] 张晓松, 孟祥英, 王 薇, 等. 丛枝菌根真菌对镉污染土壤中黑麦草幼苗生长的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2015(6): 122–127.
- [25] 田 野, 张会慧, 孟祥英, 等. 镉(Cd)污染土壤接种丛枝菌根真菌(*Glomus mosseae*)对黑麦草生长和光合的影响 [J]. 草地学报, 2013, 21(1): 135–141.

Effects of Ryegrass and *Arbuscular mycorrhiza* on Cd Absorption by Tomato Varieties and on Cadmium Forms and Microbial Population in the Rhizosphere

CHEN Yong-qin¹, XU Wei-hong¹, JIANG Ling¹,
CHI Sun-ling¹, QIN Yu-li¹, CHEN Xu-gen¹,
ZHAO Wan-yi¹, ZHANG Jin-zhong¹, XIONG Zhi-ting²

1. School of Resources and Environments, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. School of Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: In a field trial, two tomato varieties (“Defu mm-8” and “Luobeiqi”) were grown in a Cd-polluted soil (Cd 5.943 mg/kg) and treated with ryegrass (*Lolium perenne* L.) and/or *Arbuscular mycorrhiza* to investigate the effects of ryegrass interplanting and *A. mycorrhiza* inoculation on the yield and Cd content of the tomato crop and on Cd forms in the rhizosphere. The results showed that either single or combined treatment of ryegrass and *A. mycorrhiza* increased, in different extent, the dry weight of the fruit and the roots, stem and leaves and the whole plant of both tomato varieties, by 2.67%~38.42%; and decreased the Cd concentrations in their fruit and roots, stem and leaves, by 4.59%~42.45%. Cd accumulation in tomato was in the order of leaf>stem>root>fruit. In all treatments of the trial, cv. Luobeiqi had lower Cd concentration and Cd accumulation in its fruit and Cd accumulation in the whole plant than cv. Defu mm-8. In tomato cultivation in a Cd-polluted soil, ryegrass interplanting and/or *A. mycorrhiza* inoculation decreased EXC-Cd, CAB-Cd, Fe-Mn-Cd and total Cd (by 8.65%~23.21% for Defu mm-8 and 15.89%~27.52% for Luobeiqi) in the soil. The concentration of Cd in the fruit showed a significant positive relationship with soil EXC-Cd and Fe-Mn-Cd ($p<0.05$). Inoculation of mycorrhizal fungi significantly increased the shoot and total biomass of ryegrass and its Cd concentration and Cd accumulation. Cd concentration of tomato was in a significant negative relationship with that of ryegrass ($p<0.05$).

Key words: ryegrass; *Arbuscular mycorrhiza*; tomato variety; Cd absorption; rhizosphere Cd form

