

丛枝菌根真菌接种对 Cd 胁迫下芹菜生长、生理及富集特征的影响

何红君

(宁夏葡萄酒与防沙治沙职业技术学院防沙治沙工程系, 银川 750199)

摘要: 为了探究丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)接种对镉(Cd)污染土壤中芹菜 Cd 耐受性及富集特征的影响并明确其作用机制, 本研究以美国西芹“皇后”为试验材料, 研究了 5 种不同的 AMF 地表皮囊霉(*Gv*, *Glomus versiforme*)、根内球囊霉(*Gi*, *Glomus intraradices*)、摩西球囊霉(*Gm*, *Glomus mosseae*)、聚丛球囊霉(*Ga*, *Glomus aggregatum*)和幼套球囊霉(*Ge*, *Glomus etunicatum*)对 Cd 胁迫下芹菜生长、叶绿素含量、MDA 含量、抗氧化酶活性及 Cd 富集与分配特征的影响。结果表明, Cd 胁迫条件下, 接种丛枝菌根真菌可显著促进芹菜生长($P<0.05$), 芹菜叶绿素含量、抗氧化酶活性(SOD、POD 及 CAT)显著提升($P<0.05$), MDA 含量显著降低($P<0.05$); 可明显促进芹菜 Cd 吸收, 根部 Cd 含量、Cd 滞留率及富集系数显著提升($P<0.05$), 茎叶部 Cd 含量、迁移率显著降低($P<0.05$)。以接种根内球囊霉效果最佳, 与未接种相比(CK), 株高、茎粗、干重、叶绿素含量、抗氧化酶(SOD、POD 及 CAT)活性、根部 Cd 含量、滞留率、富集系数分别提升 49.18%、50.74%、41.93%、18.63%、51.48%、48.19%、51.72%、117%、102.44% 和 117.78%, MDA 含量、茎部 Cd 含量、叶部 Cd 含量及迁移率分别降低 30.37%、36.42%、43.27% 和 71.19%。MDA 含量与 Cd 胁迫程度相关性最大。本研究可以为芹菜耐 Cd 栽培及 Cd 污染土壤的修复利用提供一定的参考。

关键词: 丛枝菌根真菌; 镉; 芹菜; 生理; 富集特征

中图分类号: S636.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2020)03-0070-06

Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Inoculation on the Growth, Physiology and Accumulation Characteristics of Celery (*Apium graveolens* L.) under Cadmium Stress

HE Hongjun

(Department of Desertification Prevention Engineering, Ningxia Technical College of Wine and Desertification Prevention, Yinchuan 750199, China)

Abstract: In order to study the effects of Arbuscular mycorrhizal Fungi (AMF) inoculation on the tolerance and accumulation characteristics of celery growing in the cadmium(Cd) pollution soil and clarify the mechanism, a celery cultivar ‘Huanghou’ was selected as experimental material and the effects of five different kinds of AMFs include *Glomus versiforme* (*Gv*), *Glomus intraradices* (*Gi*), *Glomus mosseae* (*Gm*), *Glomus aggregatum* (*Ga*) and *Glomus etunicatum* (*Ge*) on the plant growth, chlorophyll contents, MDA contents, activities of antioxidant enzyme, the accumulation and allocation pattern of Cd of celery plant under Cd stress were investigated. The results showed that under the Cd stress conditions, the growth of celery was significantly improved with AMF inoculation, the chlorophyll content and activities of antioxidant enzymes (SOD, POD, CAT) were significantly increased, but the MDA content was significantly decreased. Cd absorption of celery was significantly improved with AMF inoculation, the Cd content in root, retention rate (RR) and bioconcentration factor (BCF) were significantly increased, but the Cd content in stem and leaf, translocation factor (TF) were significantly decreased. The best effect of treatments was *Glomus intraradices* (*Gi*) inoculation, compared with CK. The plant height, stem diameter, dry weight, actives of antioxidant enzymes (SOD, POD, CAT), the Cd content in root, translocation factor (TF) and bioconcentration factor (BCF) were increased

收稿日期: 2019-02-18

基金项目: 2018 年高等学校科学研究项目宁夏教育厅服务地方经济社会发展专项(NGY2018271)

作者简介: 何红君(1972-), 女, 副教授, 硕士, 主要从事水土保持及生态修复技术研究。

by 49.18%, 50.74%, 41.93%, 18.63%, 51.48%, 48.19%, 51.72%, 117%, 102.44% and 117.78%, but the MDA content, Cd content in stem, Cd content in leaf and translocation factor (TF) were decreased by 30.37%, 36.42%, 43.27% and 71.19%. The MDA content had the greatest correlation with the degree of CD stress. The results can provide reference for Cd-tolerant cultivation of celery and remediation and utilization of Cd polluted soils.

Key words: Arbuscular mycorrhizal fungi; Cadmium; Celery; Physiology; Accumulation characteristics

近年来,由于工业“三废”排放、燃料燃烧、污水灌溉及化肥农药的不合理施用等,致使我国大面积农田土壤遭受污染,其中以重金属污染尤为突出^[1]。与其他污染物相比,重金属污染具有难降解、隐蔽性、累积性等特点,不仅降低农作物产量和品质,还可通过食物链传递来危害人畜健康^[2-3]。因此,如何有效修复及利用大面积重金属污染土壤已成为当前急需解决的关键问题之一,其中镉(Cd)是污染性最强的重金属元素之一。

重金属污染土壤的治理方法主要有物理修复法(如:吸附法、客土法等)、化学修复法(化学淋洗法、溶剂浸提法及施入改良剂等)和生物修复法(如:植物修复法、微生物修复法及联合修复法等)^[4]。传统的物理修复法和化学修复法投资昂贵,且需要复杂的设备条件,同时可能带来二次污染,不适用于大规模污染土壤的治理;植物-微生物联合修复法是近年来新兴起的一种强化的植物修复技术,在一定程度上克服了重金属富集植物生物量低、修复速度慢的弱点,在重金属污染土壤修复中具有极大的应用潜力,已成为国内外研究的热点^[5]。芹菜(*Apium graveolens*)属伞形科芹属草本植物,具有抗逆性强、适应性广及生长速度快等优点,已在我国广泛种植^[6]。丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)是一类在土壤中广泛存在的有益真菌,可与植物根系形成互利共生体系,通过改善土壤根际微环境、提升植物吸收水分和养分的能力来促进植物生长发育和提高植物的抗逆性^[7]。重金属污染条件下,AMF 可以通过菌丝体固定、孢子固持及重金属螯合等途径来降低重金属迁移率,减轻对植物的危害^[5]。目前,关于重金属对芹菜生长发育、品质及生理生化等方面的研究较多,但关于AMF接种对重金属胁迫下芹菜生长、生理生化、重金属吸收、分布规律及富集特征方面的影响尚未见相关报道^[8-9]。

因此,本研究以芹菜为研究对象,分析了接种不同的AMF对Cd污染土壤中芹菜生长、生理生化、Cd吸收分配及富集特征的影响,以期为芹菜耐Cd栽培及Cd污染土壤的修复利用提供一定的

参考和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2018年3月在宁夏葡萄酒与防沙治沙职业技术学院试验基地进行。供试植物芹菜品种为美国西芹“皇后”,购自宁夏科丰种业有限公司;供试丛枝菌根真菌共有5种,分别为:地表球囊霉(Gv, *Glomus versiforme*)、根内球囊霉(Gi, *Glomus intraradices*)、摩西球囊霉(Gm, *Glomus mosseae*)、聚丛球囊霉(Ga, *Glomus aggregatum*)和幼套球囊霉(Ge, *Glomus etunicatum*),均由中国科学院微生物研究所提供;采用穴盘育苗方式育苗,于4叶1心期移栽至花盆进行试验,栽培基质为改良的草炭土,花盆规格为45 cm×50 cm,每盆装入3 kg栽培基质,每盆移栽幼苗1株,缓苗期进行正常的水肥管理及病虫害防治。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验共设置6个处理,即在定植前分别接种20 g 5种不同类型的丛枝菌根真菌和20 g经高温灭菌的5种菌根混合物(CK),每个处理20株,重复3次,共计360株,随机区组。2018年5月从移栽苗中选取大小、长势一致的芹菜植株进行Cd胁迫试验,即采用400 mg/L的CdCl₂溶液分2次对各处理栽培基质分别进行均匀浇灌,使栽培基质Cd浓度最终达到100 mg/kg,两次浇灌间隔时间为5 d。

1.2.2 测定指标及方法

Cd胁迫处理60 d时,进行各数据指标测定。菌根侵染率测定:采用Phillips等^[10]的方法进行,菌根侵染率=侵染菌根段数/检测菌根段数×100%;生物量测定:主要包括株高、茎粗、根干重、茎干重、叶干重及总干重,具体参照尹大川等^[11]方法进行;各器官Cd含量测定采用火焰原子吸收法,具体测定步骤参照陈良华等^[12]方法进行;Cd转移、分配和富集能力通过迁移率(translocation factor, TF)、滞留率(retention rate, RR)及富集系数(bioconcentration factor, BCF)进行衡量,具体计算方法如下:

TF=MCA/MCB(1)

RR=(MCB-MCA)/MCB.....(2)

BCF=MCB/MCS(3)

其中,MCA(metal concentration in above-ground organs)表示地上部重金属含量、MCB(metal concentration in below-ground organs)表示地下部重金属含量、MCS(metal concentration in soils)表示土壤中重金属含量。

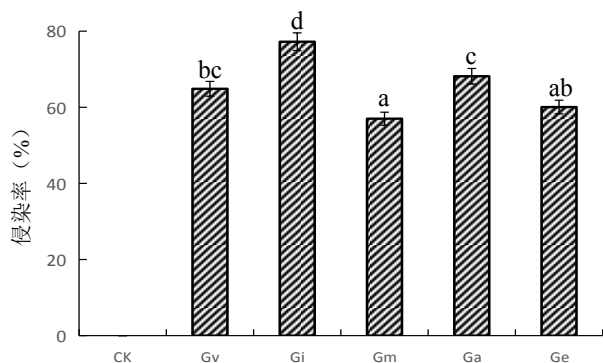
1.2.3 数据分析

采用 Excel 2010 软件进行数据处理及作图;采用 SPSS 18.0 进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同丛枝菌根真菌对芹菜根系的侵染率

如图 1 所示,Cd 胁迫处理 60 d 时,芹菜根际土壤中均有大量菌丝生成,而对照则无菌丝生成。侵染率测定结果表明,5 种丛枝菌根真菌对芹菜的侵染率从大到小依次为:Gi>Ga>Gv>Ge>Gm,侵染率分别为 77.23%、68.16%、64.86%、60.06% 和 57.01%,其中 Gi 侵染率较 Ga、Gv、Ge 及 Gm 均达到显著差异水平(P<0.05)。这说明 5 种不同丛枝菌根真菌均可与芹菜根系形成互利共生关系,且彼此侵染率存在明显差异,这可能是由于亲和性差异所致。



注:图中不同小写字母表示差异性达到显著水平(P<0.05),下同

图 1 不同丛枝菌根真菌接种对芹菜根系侵染率的影响

2.2 不同丛枝菌根真菌对 Cd 胁迫下芹菜生长的影响

由表 1 可知,Cd 胁迫条件下,接种丛枝菌根真菌可显著促进芹菜生长,且不同菌根的促生效果存在显著差异。Cd 胁迫处理 60 d 时,接种 Gv、Gi、Gm、Ga 和 Ge 的芹菜株高分别较 CK 提升 34.05%、49.18%、13.36%、41.43% 和 22.10%,均较对照达到显著差异水平(P<0.05);茎粗分别较 CK 提升 32.51%、50.74%、15.76%、40.39% 和 24.14%,均较

表 1 不同丛枝菌根真菌对 Cd 胁迫下芹菜生长的影响

不同处理	株高(cm)	茎粗(cm)	干重(g)
CK	41.68a	2.03a	15.48a
Gv	55.87cd	2.69cd	20.21c
Gi	62.18e	3.06e	21.97e
Gm	47.25b	2.35b	19.42b
Ga	58.95de	2.85d	21.05d
Ge	50.89bc	2.52bc	19.75bc

注:同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05),下同

对照达到显著差异水平(P<0.05);与 CK 相比,接种 Gv、Gi、Gm、Ga 和 Ge 的芹菜干重分别提升 30.56%、41.93%、25.45%、35.98% 和 27.58%,均较对照达到显著差异水平(P<0.05)。这说明接种丛枝菌根真菌可明显促进 Cd 胁迫下芹菜的生长,且促生效果与菌根种类密切相关,其原因可能是接种丛枝菌根真菌可以提升芹菜对 Cd 胁迫的忍耐能力,光合效率得到一定提升。

2.3 不同丛枝菌根真菌对 Cd 胁迫下芹菜叶片叶绿素含量的影响

由图 2 可知,接种丛枝菌根真菌可显著提升 Cd 胁迫条件下芹菜叶片叶绿素含量,且提升幅度因菌根种类不同而存在明显差异。与 CK 相比,Cd 胁迫处理 60 d 时,接种 Gv、Gi、Gm、Ga 和 Ge 的芹菜叶片叶绿素含量分别提升 10.13%、18.63%、5.88%、12.75% 和 8.07%,均较对照达到显著差异水平(P<0.05),同时,接种 Gi 的芹菜叶片叶绿素含量较接种 Gv、Gm、Ga 和 Ge 均达到显著差异水平。这说明接种丛枝菌根真菌可显著提升 Cd 胁迫条件下芹菜的叶绿素含量,从而增强其光合作用效率,其中以接种 Gi 处理效果最佳。

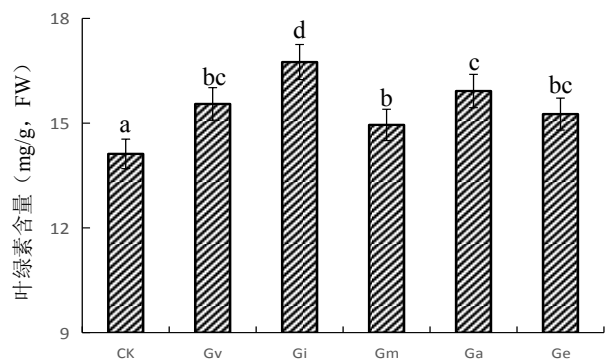


图 2 不同丛枝菌根真菌对 Cd 胁迫下芹菜叶片叶绿素含量的影响

2.4 不同丛枝菌根真菌对 Cd 胁迫下芹菜叶片 MDA 含量的影响

如图3所示,Cd胁迫条件下,接种丛枝菌根真菌可显著降低芹菜叶片的丙二醛含量,且不同种类菌根的降低幅度存在明显差异。Cd胁迫处理60 d时,接种Gv、Gi、Gm、Ga和Ge的芹菜叶片的丙二醛含量分别较CK降低18.65%、30.37%、10.3%、24.87%和15.99%,均较对照达到显著差异水平($P<0.05$),同时,接种Gi的芹菜叶片的丙二醛含量较接种Gv、Gm、Ga和Ge均达到显著差异水平($P<0.05$)。这说明接种丛枝菌根真菌可显著降低芹菜的MDA含量,减缓Cd胁迫对细胞膜造成的伤害,提高Cd忍耐性,其中以接种Gi处理效果最佳。

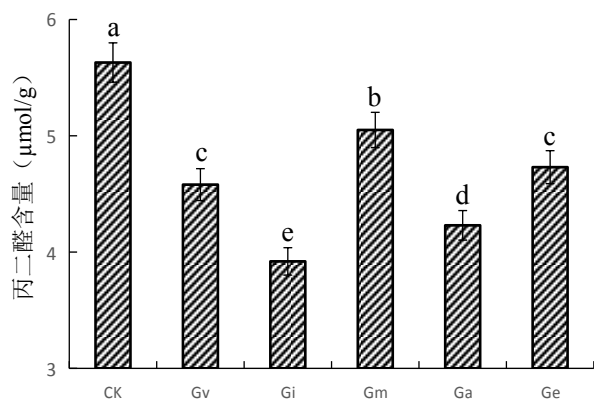


图3 不同丛枝菌根真菌对Cd胁迫下芹菜叶片丙二醛含量的影响

2.5 不同丛枝菌根真菌对Cd胁迫下芹菜叶片抗氧化酶活性的影响

由图4可知,Cd胁迫条件下,接种丛枝菌根真菌可显著提升芹菜叶片的SOD、POD及CAT活性,且提升效果因菌根种类不同而存在显著差异。Cd胁迫处理60 d时,接种Gv、Gi、Gm、Ga和Ge的芹菜叶片SOD活性分别较CK提升35.38%、54.18%、20.09%、43.72%和30.53%,均较对照达到

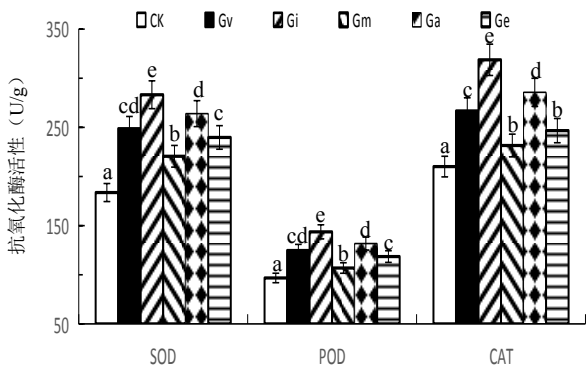


图4 不同丛枝菌根真菌对Cd胁迫下芹菜叶片抗氧化酶活性的影响

显著差异水平($P<0.05$);POD活性分别较CK提升28.88%、48.49%、10.47%、36.2%和22.51%,均较对照达到显著差异水平($P<0.05$);与CK相比,接种Gv、Gi、Gm、Ga和Ge的芹菜干重分别提升26.96%、51.72%、10.22%、35.98%和17.42%,均较对照达到显著差异水平($P<0.05$)。这说明接种丛枝菌根真菌可显著提升Cd胁迫下芹菜叶片的抗氧化酶活性,从而增强活性氧清除能力,减轻Cd胁迫伤害,提高Cd耐受性,且提升效果与菌根种类密切相关,以接种Gi处理效果最佳。

2.6 不同丛枝菌根真菌对Cd胁迫下芹菜各器官Cd含量的影响

由表2可知,Cd胁迫条件下,接种丛枝菌根真菌可显著提升芹菜的Cd含量,其中,根系Cd含量显著提升,地上部茎、叶的Cd含量显著降低。接种Gv、Gi、Gm、Ga和Ge的芹菜Cd含量分别较CK提升29.91%、59.01%、9.9%、45.2%和20.67%,均较对照达到显著差异水平($P<0.05$);与CK相比,接种Gv、Gi、Gm、Ga和Ge的芹菜根系的Cd含量分别提升61.23%、117%、24.27%、88.16%和43.98%,均较对照达到显著差异水平($P<0.05$);接种Gv、Gi、Gm、Ga和Ge的芹菜茎部Cd含量分别较CK降低19.75%、36.42%、11.33%、24.93%和15.19%,均较对照达到显著差异水平($P<0.05$);接种Gv、Gi、Gm、Ga和Ge的芹菜叶片Cd含量分别较CK降低29.81%、43.27%、21.26%、31.95%和26.42%,均较对照达到显著差异水平($P<0.05$)。这说明接种丛枝菌根真菌可显著提升芹菜的Cd含量,根系Cd含量显著提升,地上部的Cd含量显著降低,其中以接种Gi对芹菜的Cd含量及分配影响最大,其原因可能是接种丛枝菌根真菌影响了芹菜对Cd的滞留和迁移能力。

表2 不同丛枝菌根真菌对Cd胁迫下芹菜各器官Cd含量的影响

不同处理	Cd含量 (mg/kg)		
	根	茎	叶
CK	45.11a	18.89a	7.95a
Gv	72.73c	15.16cd	5.58c
Gi	97.89e	12.01e	4.51d
Gm	56.06b	16.75b	6.26b
Ga	84.88d	14.18d	5.41c
Ge	64.95bc	16.02bc	5.85bc

2.7 不同丛枝菌根真菌对Cd胁迫下芹菜Cd富集特征的影响

如图5所示,接种丛枝菌根真菌可显著降低Cd胁迫条件下芹菜的Cd迁移率、显著提升Cd滞留率和富集系数。与CK相比,接种Gv、Gi、Gm、Ga和Ge的芹菜的Cd迁移率分别降低50.85%、

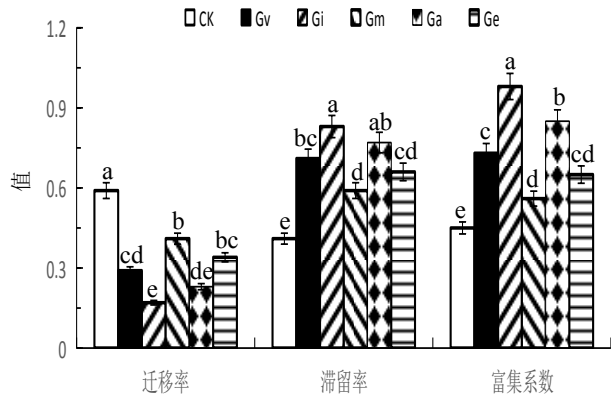


图5 不同丛枝菌根真菌对Cd胁迫下芹菜叶片Cd富集特征的影响

71.19%、30.51%、61.02%和42.37%;Cd滞留率分别提升73.17%、102.44%、43.9%、87.8%和60.98%;富集系数分别较CK提升62.22%、117.78%、24.44%、88.89%和44.44%,Cd迁移率、滞留率及富集系数均较对照达到显著差异水平($P<0.05$)。这说明接种丛枝菌根真菌可显著提升芹菜的Cd富集系数和Cd滞留率,显著降低Cd迁移率,其中以接种Gi富集系数及滞留率最高、迁移率最低。

2.8 Cd胁迫下芹菜各生理生化指标的相关性分析

由表3可知,芹菜株高与干重及根部Cd含量呈显著正相关;叶绿素含量与SOD、POD、CAT活性及Cd滞留率呈正相关,而与叶部及茎部Cd含量呈显著负相关;MDA含量与SOD及POD活性呈极显著负相关,与CAT活性及Cd滞留率呈显著负相关,与叶部和茎部Cd含量及迁移率呈显著正相关。

表3 Cd胁迫下芹菜各生理生化指标的相关系数

指标	株高	茎粗	干重	叶绿素含量	MDA含量	SOD活性	POD活性	CAT活性	根部Cd含量	叶部Cd含量	茎部Cd含量	迁移率	滞留率	富集系数
株高	1													
茎粗	0.763	1												
干重	0.852*	0.848	1											
叶绿素含量	0.513	0.483	0.622	1										
MDA含量	0.425	0.388	0.565	0.541	1									
SOD活性	0.786	0.731	0.815	0.952*	-0.995**	1								
POD活性	0.811	0.765	0.783	0.934*	-0.993**	0.997**	1							
CAT活性	0.735	0.706	0.711	0.966*	-0.945*	0.821	0.806	1						
根部Cd含量	0.865*	0.811	0.735	0.785	-0.789	0.767	0.821	0.693	1					
叶部Cd含量	-0.454	-0.601	-0.565	-0.969*	0.978*	-0.731	-0.526	-0.663	-0.865*	1				
茎部Cd含量	-0.502	-0.615	-0.533	-0.865*	0.896*	-0.743	-0.626	-0.711	-0.801	-0.785	1			
迁移率	-0.663	-0.656	-0.575	-0.938*	0.965*	-0.738	-0.602	-0.689	-0.998**	0.996**	0.998**	1		
滞留率	0.663	0.656	0.575	0.938*	0.965*	0.738	0.602	0.689	0.998**	-0.996**	-0.998**	-1**	1	
富集系数	-0.552	-0.489	-0.533	-0.666	0.785	0.861	0.802	0.601	0.922	0.961*	0.935*	0.858*	0.889*	1

注:*代表显著相关($P<0.05$),**代表极显著相关($P<0.01$)

3 结论与讨论

植物根系菌根化程度常用侵染率来表示,是AMF发挥生理效应的基础。本研究结果表明,5种丛枝菌根真菌接种后,芹菜的侵染率存在显著差异,其中,Gi侵染率最高,达到77.23%。本结果与黄晶等^[13]研究结果较为一致,其原因可能是不同丛枝菌根真菌与同一植物的亲和性存在明显差异,进而导致侵染率不同。

重金属胁迫条件下,植物细胞的结构和功能

遭到破坏,生长发育受到显著抑制,生物量积累明显下降,而接种AMF对植物则具有明显的缓解作用^[14]。本研究结果表明,接种AMF可显著促进Cd胁迫下芹菜生长,以Gi促生效果最强,株高、茎粗及干重分别较CK提升49.18%、50.74%和41.93%,均较对照达到显著差异水平($P<0.05$)。本结果与黄晶等^[13]、王凯渊等^[15]研究结果较为一致,其原因可能是由于:首先,接种AMF可以丰富Cd污染土壤中微生物种类并提高其活性,进而使得土壤环境更适宜芹菜生长;其次,AMF可以与

芹菜根系形成互利共生体系,扩大根系吸收面积,增强植物对水分、养分的吸收能力,从而促进芹菜生长。

叶绿素是植物进行光合作用的重要色素,其含量高低与光合效率密切相关。本研究结果表明,接种AMF可显著提升Cd胁迫下芹菜叶片的叶绿素含量,接种Gi处理效果最佳,较对照提升18.63%,达到显著差异水平($P<0.05$)。本结果与尹大川等^[12]研究结果较为一致,其原因可能是接种AMF可以降低叶片重金属含量,叶片受胁迫程度降低,从而减缓叶绿素降解。

大量研究表明,重金属胁迫会导致植物体内产生大量的活性氧自由基(ROS),引起细胞膜膜质过氧化,造成植物代谢紊乱,其中,MDA含量是衡量膜质过氧化程度的重要指标^[16]。为了适应胁迫环境,植物常通过提高自身的保护酶(POD、SOD和CAT)活性来清除体内过量的活性氧,从而减轻活性氧对自身的伤害,维持代谢平衡^[17-18]。本研究结果表明,接种AMF可显著提升芹菜叶片的抗氧化酶活性,降低MDA含量,以接种Gi处理效果最佳,POD、SOD及CAT活性较对照分别提升51.48%、48.19%和51.72%,MDA含量较对照降低30.37%,达到显著差异水平($P<0.05$)。本结果与ZHANG等^[17]、杨国等^[18]及江玲等^[19]研究结果较为一致,这说明接种AMF可提升Cd胁迫下芹菜的抗氧化酶活性,显著降低膜质过氧化程度,减缓了Cd胁迫造成的伤害,提高了芹菜对Cd胁迫的耐受性。

不同植物中,重金属在各器官的分布往往存在显著差异,是不同植物重金属耐受性及富集能力差异的主要原因^[20]。本研究中,接种5种AMF均可显著提升芹菜的Cd含量,降低Cd污染土壤中芹菜茎、叶的Cd含量,提升芹菜根部的Cd含量。其中,接种Gi变化幅度最大,芹菜总Cd含量较对照提升45.2%,茎、叶Cd含量较对照降低36.42%和43.27%,根部Cd含量较对照提升117%。接种5种AMF均可显著降低芹菜的Cd迁移率、提升Cd滞留率和富集系数,其中,接种根内球囊霉(Gi)变化幅度最大,迁移率较对照降低71.19%,滞留率和富集系数分别较对照提升102.44%和117.78%。这说明接种AMF不仅可以对Cd污染土壤起到一定的修复作用,而且可降低Cd污染土壤中芹菜食用器官的Cd含量,提高镉污染土壤的经济效益。本结果与陈良华等^[21]研究结果较为一致,其原因可能是:首先,AMF可能改变了植物根

际周围的Cd形态,提高了Cd的生物有效性,从而提高芹菜对Cd的吸收量;其次,AMF侵染可明显促进Cd污染下芹菜的生长,根系吸收面积的扩大促进了对Cd的吸收,富集系数增大;第三,AMF侵染可能增强了根系及菌丝本身对Cd的固持作用,滞留率增大;最后,AMF侵染可能促进芹菜根系合成了某种重金属螯合物,将植物根内的Cd结合在根部,抑制向上转运,迁移率降低、滞留率增大从而减轻Cd对芹菜地上部造成的伤害,提高Cd胁迫抗性。

综上所述,接种AMF可明显促进Cd胁迫下芹菜的生长,促进芹菜对Cd的吸收,同时,提升根部Cd含量、降低茎和叶的Cd含量,以此来提高芹菜对Cd胁迫的抗性。其中,以接种根内球囊霉(Gi)处理效果最佳。本结果可以为芹菜耐Cd栽培及Cd污染土壤的利用修复提供一定的参考和理论依据。

参考文献:

- [1] 林静,张健,杨万勤,等.岷江下游五通桥段小型集水区大气降水中pH值对重金属含量的影响[J].环境科学学报,2016,36(4):1419-1427.
- [2] 魏春雁,刘笑笑,宋志峰,等.不同产地中药材及其栽培土壤中重金属含量比较研究[J].东北农业科学,2017,42(4):39-43.
- [3] 罗成科,毕江涛,肖国举,等.宁东基地不同工业园区周边土壤重金属污染特征及其评价[J].生态环境学报,2017,26(7):1221-1227.
- [4] 张军,蒯亚青,胡方洁,等.土壤重金属污染联合修复技术研究进展[J].应用化工,2018,47(5):1038-1042,1047.
- [5] 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.
- [6] 李明,王怀栋,于翠玲,等.外源6-BA和GA₃复合处理对日光温室芹菜生长的影响[J].吉林农业科学,2010,35(1):47-48,56.
- [7] 湛诺君,李辉,赵子豪,等.丛枝菌根真菌提高植物抗性研究进展[J].河南农业科学,2014,43(10):1-5.
- [8] 何芳芳,张德刚,陈雅顺.重金属复合污染对芹菜生长的影响[J].北方园艺,2012(20):5-7.
- [9] 肖旭峰,解庆妮,蔡玲,等.芹菜对镉、铅胁迫的生理响应及抗氧化酶基因表达特性分析[J].核农学报,2017,31(9):1864-1871.
- [10] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. Transactions of the British Mycological Society, 1970(55): 158-160.
- [11] 尹大川,邓勋,宋小双,等.Cd胁迫下外生菌根菌对樟子松生理指标和根际土壤酶的影响[J].生态学杂志,2017,36(11):3077-3078.

(下转第102页)

传导机制分析结果表明,区域经济增长对耕地资源的依赖主要体现在对外开放程度的降低、技术创新水平的抑制、物质资本投入降低产生的劳动力与技术、资本的挤出效应;加强政府干预产生的制度缺失效应等形成对我国经济增长的阻碍作用。

3.2 对策建议

在城市化进程中,要对自然资源的开发利用加以控制以维持在一个适度的水平,同时要加大物质资本投入、技术创新投入以及完善的制度化管管理,才能最大限度地减少城市化进程中的负面效应。首先,资源丰裕地区必须放弃单纯以自然资源开发为主导的产业发展战略,适度减少其经济发展对资源型产业的依赖,积极实行以促进制造业发展为核心的产业多样化战略;其次,合理利用自然资源财富,加大物质资本积累和研发投入力度,重视和引导高技术产业发展,提高区域技术创新能力和效率;最后,适度减少政府对经济的干预,提高政府支出的效率和透明度。东部和中部地区应在发展经济的同时加强对耕地资源的利用进行动态、有效的监管,实施耕地资源节约型的城市理性增长政策,避免耕地资源过度非农化。对于生态环境比较脆弱的西部地区而言,无论是在短期内还是在长期内,保护耕地资源则显得更为重要。

参考文献:

- [1] 徐康宁,王 剑.自然资源丰裕程度与经济发展水平关系的研究[J].经济研究,2006(1):78-80.
- [2] 韩 健.我国西部地区经济增长是否存在“资源诅咒”的实证研究—基于索罗模型的分析[J].探索,2013(5):90-91.
- [3] Auty R M. Sustaining Development in Mineral Economies: The Resource Curse Thesis[M]. London: Routledge. 1993: 373-375.
- [4] 邵 帅.煤炭资源开发对中国煤炭城市经济增长的影响—基于资源诅咒学说的经验研究[J].财经研究,2010(3):90-92.
- [5] 胡援成,肖德勇.经济发展门槛与自然资源诅咒—基于我国省际层面的面板数据实证研究[J].管理世界,2007(4):15-18.
- [6] Gylfason T. Resources, Agriculture, and Economic Growth in Economies in Transition[J]. Kyklos, 2000,53(4): 545-579.
- [7] 李 婧,谭清美,白俊红.中国区域创新生产的空间计量分析—基于静态与动态空间面板模型的实证研究[J].管理世界,2010(7):43-55.
- [8] 胡 友,祁春节.基于空间计量的水果价格形成及传导研究—以苹果、柑橘和香蕉为例[J].农业现代化研究,2013(6):739-740.
- [9] 杨莉莉,邵 帅,曹建华.资源产业依赖对中国省域经济增长的影响及其传导机制研究—基于空间面板模型的实证考察[J].财经研究,2014(3):5-6.
- [10] 尚 丽.基于DEA模型的陕西省粮食生产效率评价及影响因素研究[J].东北农业科学,2018,43(5):47-54.
- [11] 刘 航,杨俊孝.基于TPB与SEM的农户耕地地力保护补贴响应机制分析—以新疆奇台县为例[J].东北农业科学,2019,44(2):81-85.
- [12] 刘文明.基于农户角度的吉林省耕地可持续利用分析[J].东北农业科学,2018,43(3):39-42.

(责任编辑:刘洪霞)

(上接第75页)

- [12] 陈明君,傅杨武,陈书鸿,等.Pb胁迫对双穗雀稗生长、抗氧化酶活性及Pb富集的影响[J].河南农业科学,2015,44(7):73-77.
- [13] 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.
- [14] Chen Y M, Chao Y Q, Li Y Y, et al. Survival strategies of the plant-associated bacterium *Enterobacter* sp. strain EG16 under cadmium stress[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2016,82(6): 1734-1744.
- [15] 王凯渊,蒋园园,宋文俊,等. AM真菌与镉互作影响桑生长和无机元素吸收转运[J].菌物学报,2017,36(7):996-1009.
- [16] 文 珂,郭晓玉,谭娜娜,等.锰胁迫对野大豆种子萌发及幼苗生理生化特征的影响[J].种子,2018,37(3):40-45.

- [17] Zhang X H, Wang L M, Zhang X, et al. Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Upland Rice Oxidative Stress Induced by Cu and Pb Contamination in Soil[J]. Agricultural Science & Technology, 2014, 15(1): 123-126, 131.
- [18] 杨 国,卢 可,朱高樑,等.丛枝菌根真菌摩西球囊霉对铜胁迫下白术幼苗光合特性及抗氧化酶活性的影响[J].植物生理学报,2018,54(4):618-626.
- [19] 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.
- [20] 朱守晶,史文娟,揭雨成.不同苧麻品种对土壤中镉、铅富集的差异[J].江苏农业学报,2018,34(2):320-326.
- [21] 陈良华,胡相伟,杨万勤,等.接种丛枝菌根真菌对雌雄美洲黑杨吸收铅镉的影响[J].环境科学学报,2017,37(1):308-317.

(责任编辑:王丝语)