

DOI: 10.5846/stxb201809212067

元琳, 李艳玲, 向璐, 赵威, 王晓凌. 高粱和地球囊霉联合修复锶污染土壤研究. 生态学报, 2020, 40(2): 648–656.

Qi L, Li Y L, Xiang L, Zhao W, Wang X L. Study on sorghum-*Glomus geosporum* combined remediation of caesium-contaminated soils. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 648–656.

高粱和地球囊霉联合修复锶污染土壤研究

元琳^{1,2,*}, 李艳玲³, 向璐¹, 赵威¹, 王晓凌¹

1 河南科技大学农学院, 洛阳 471023

2 洛阳市共生微生物与绿色发展重点实验室, 洛阳 471023

3 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要:本研究选用高粱(*Sorghum bicolor* (L.) Moench)为修复植物用于治理土壤锶污染,接种地球囊霉(*Glomus geosporum*)比较不同锶浓度(0、75、725、975 mg/kg)处理下,地球囊霉对高粱修复锶污染土壤的调控作用。结果表明:在所有锶处理下,接种地球囊霉的侵染率都高于50%。与无菌根处理相比,在75、725 mg/kg 锶处理,接种地球囊霉的高粱的生物量、株高和根长都显著增加($P < 0.05$)。接种地球囊霉的高粱表现出显著的菌根依赖性($P < 0.05$)。其中最显著的是75 mg/kg 处理,菌根依赖性为136.92%,并且在0—975 mg/kg 锶处理中菌根依赖性都大于100%。地球囊霉侵染的高粱,叶片和根中的锶含量与无菌根处理组相比显著增加($P < 0.05$),接种菌根组的转运系数都高于与无菌根组。接种地球囊霉,土壤中的全磷含量和速效磷含量显著降低($P < 0.05$)。全磷减少了6.52%—18.77%,速效磷减少了12.38%—27.43%。接种AMF显著增加了土壤磷酸酶活性($P < 0.05$),与无菌根组相比,增加了19.67%—32.56%。综上所述,地球囊霉能够促进高粱对锶的富集能力和耐受性,在锶污染(75—725 mg/kg)时接种地球囊霉的效果最好。

关键词: 锶; 丛枝菌根真菌; 高粱; 植物修复

Study on sorghum-*Glomus geosporum* combined remediation of caesium-contaminated soils

QI Lin^{1,2,*}, LI Yanling³, XIANG Lu¹, ZHAO Wei¹, WANG Xiaoling¹

1 Agricultural College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China

2 Luoyang Key Laboratory of Symbiotic Microorganism and Green Development, Luoyang 471023, China

3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Centre for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: In this study, *Glomus geosporum* was inoculated under different strontium concentrations (0, 75, 725, and 975 mg/kg) to compare its regulatory effect on *Sorghum bicolor* (L.) Moench to repair strontium-polluted soil. The results showed the following: the mycorrhizal colonisation rates of *G. geosporum* were higher than 50% under all treatments. Compared with controls, the biomass, plant height, and root length of sorghum inoculated with *G. geosporum* significantly increased at 75 mg/kg ($P < 0.05$). Inoculated sorghum showed significant mycorrhizal dependency ($P < 0.05$). The mycorrhizal dependencies were the highest at 75 mg/kg (136.92%), and mycorrhizal dependence of 0—975 mg/kg was greater than 100%. Sorghum colonised by *G. geosporum* had significantly higher strontium content in the leaves and roots at 75 and 725 mg/kg, compared with that in the controls ($P < 0.05$), and the translocation factors of the AMF group were higher than that of the non-AMF group. The concentrations of strontium in sorghum aboveground structures and roots

基金项目:河南省科技攻关项目(182102110256);河南科技大学学科提升振兴A计划项目(13660001);国家自然科学基金青年基金(31601984)

收稿日期:2018-09-21; 网络出版日期:2019-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qilinchampion@126.com

<http://www.ecologica.cn>

7increased by 86.05% and 30.18% , respectively. Both the total and available phosphorus content in the soil decreased significantly ($P < 0.05$). Total phosphorus decreased by 6.52%—18.77% , and available phosphorus decreased by 12.38%—27.43%. Inoculation with *G. geosporum* significantly increased soil phosphatase activity ($P < 0.05$) , which increased by 19.67%—32.56% , compared with that in the non-AMF group. In summary , *G. geosporum* can promote the enrichment ability and tolerance of sorghum to strontium , and the effect of inoculation under strontium concentrations of 75—725 mg/kg is the most effective.

Key Words: strontium; arbuscular mycorrhizal fungi; *Sorghum bicolor* (L.) Moench; phytoremediation

放射性核素锶(strontium ,Sr) 为典型的长寿命核素 ,半衰期为 28.79 年^[1]。已发现锶有 19 个放射性同位素 ,其中长半衰期的锶-90 和锶-89 分别属于高毒性和中毒性核素^[2]。锶-90 为铀在核试验中产生的裂变产物 ,存在于核爆炸的辐射微尘中 ,以粉尘的形式或者随着食物链的富集最终进入人体 ,作为 β 射线的放射源对人体产生放射危害。研究发现 ,锶与钙在人体内的代谢具有很高的相似性 ,锶为亲骨性元素 ,沉积于人体内富含钙的器官 ,骨骼和牙齿是锶的主要储存库^[3]。锶在我国土壤中的背景浓度 ,呈现地区分布不均匀性。甘肃、青海、新疆和西藏地区的锶污染最为严重 ,土壤锶浓度最高可达到 1120—2112 mg/kg^[4]。青海地区平均锶浓度为 334 mg/kg^[5]。新疆是典型的内陆干旱地区 ,新疆污水库的使用使其周边的土壤盐渍化加剧 ,增加了一些稀有金属元素 ,如锶对土壤的污染 ,周边土壤的平均锶浓度达到 333 mg/kg^[4,6]。大连地区表土中锶浓度最高达到 763 mg/kg ,平均锶浓度为 236 mg/kg^[4]。目前 ,我国面临的土壤污染趋势不容乐观 ,放射性核素导致大范围的土壤遭到污染 ,开展修复⁹⁰Sr 污染土壤的研究很有必要。研究表明放射性核素在环境中与其稳定性同位素在环境中的行为相似^[7]。于是 ,观察稳定态锶-88 在土壤和植物中的行为 ,是一个预测其放射性同位素锶-90 行为的方法。

植物修复技术是指利用植物从环境中吸收富集重金属和放射性核素等物质 ,具有成本低且绿色环保的优点^[8] ,该技术被用于缓解或去除土壤重金属、核素污染。长期的实践不断证明 ,通过该技术修复污染土壤是行之有效的^[9]。修复的成效则关键取决于修复植物自身的生物学特性。放射性核素通过土壤在植物体内进行富集 ,对植物造成了双重伤害 ,其一是核素发出的辐射射线会对植物造成严重的辐射伤害 ,其二核素本身在植物体内具有累积效应 ,当累积达到一定程度后会对植物生长代谢造成严重影响。由于不同植物生物学特性不同 ,对核素的吸附效果以及响应机制也相差很大^[10]。因此 ,植物修复技术的关键就是筛选出合适的植物^[11]。长期以来 ,超累积植物是人们普遍关注的修复植物。研究表明超累积植物具有三大特征 ,包括富集重金属量高、具有解毒机制以及对不同重金属的富集有差异 ,生物富集系数(bioconcentration factor ,BCF) 和转运系数(translocation factor ,TLF) 大于 1 是判定超富集植物的重要标准^[12]。先前研究所关注的超累积植物主要是芸苔属(*Brassica*) 如印度芥菜(*Brassica juncea*) ,庭芥属(*Alyssum*) 如南庭芥(*Aubrieta cultorum*)、遏蓝菜属(*Thlaspi*) 如天蓝遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*) 等 ,但它们存在很多不足之处 ,比如生物量较低且难以大规模种植 ,因而其在实际修复中的应用受到限制 ,较高的地上生物量可以弥补这些缺陷。最理想的超累积植物 ,理想的超累积植物往往是 BCF>1 ,TLF>1 ,且生物量较大。因此 ,一些生长速率快、生物量大、可富集重金属的植物类型被应用于植物修复^[13]。

能源作物在我国资源丰富 ,且是生物质能源的原料 ,将能源作物运用到植物修复技术前景广阔。高粱(*Sorghum bicolor* (L.) Moench) ,禾本科 ,一年生草本植物 ,其生物量大、根系发达、生长速度快等优点有利于对土壤中污染物的富集 ,是目前最具修复潜力的能源作物之一^[14]。能源作物高粱的秸秆可用于生产乙醇 ,将高粱用于植物修复具有两个优势 ,其一治理了土壤重金属污染;其二可用于生产工业酒精。由此 ,高粱作为修复植物解决了富含重金属的植物难以处理的问题^[15]。高粱具有庞大的根系对土壤中重金属有很强的吸收能力^[16]。然而 ,高粱转运重金属至地上部分的能力与超富集植物相比较弱 ,难以快速修复重金属污染土壤 ,这

一缺陷极大的限制了植物修复效率^[17]。研究者们提出了许多强化植物修复效率的方法,如通过添加植物激素或接种微生物促进植物生长的等方法以增强重金属在植物中富集^[18-19]。其中,利用微生物与植物形成微生物-超累积植物共生体来加强植物修复效率成为目前植物修复领域的重要研究方向^[20]。丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)用于植物修复的四大优点分别是:分布广;可与陆地上多数(80%)植物互利共生;可以提高共生植物的抗逆性;能够加强植物对重金属的吸收。AMF在植物抗病、抗盐碱、抗旱方面作用效果明显,在土壤修复中的作用也很突出^[21]。AMF-超累积植物共生体可以提高植物对矿质营养的吸收效率,提高植物的抗逆性,增强植物对重金属的耐受力以及调节植物对重金属的吸收和转运,加强植物修复技术在土壤污染中的作用^[22]。

通过对4种AMF,包括地球囊霉(*Glomus geosporum*)、地表球囊霉(*Glomus versiforme*)、摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)、透光球囊霉(*Glomus diaphanum*)的比较研究,其中,地球囊霉对增强高粱对镉耐受能力的效果最好。本研究在高粱修复镉污染土壤体系中加入地球囊霉,在不同镉浓度污染中,通过地球囊霉对高粱富集和转运镉能力的影响以及对土壤酶活性和土壤养分状况的影响,评价接种地球囊霉对高粱根际土壤微生态环境的影响,评估地球囊霉在强化高粱修复核素镉污染土壤的应用价值,从而为地球囊霉-植物共生体修复镉污染土壤提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试菌种:丛枝菌根真菌选择地球囊霉。选择花生(*Arachis hypogaea*)作为地球囊霉的宿主,在土壤中进行菌种繁育80d,清除植物地上部分和表层土,将孢子、菌丝和侵染的根段混合物作为接种剂。

供试植物:本试验采用的供试植物为高粱。用酒精(75%)浸泡种子5 min后,用H₂O₂(3%)灭菌10 min,之后用灭菌水冲洗3次。

供试土壤:在河南科技大学周山校区农场土采集试验土壤。土壤基本理化性质按常规方法测定^[23]。土壤pH值为8.05,有机质含量为12.85 g/kg、全氮含量为0.96 g/kg、速效磷含量为12.52 mg/kg、速效钾含量为155 mg/kg、铵态氮含量为2.01 mg/kg,阳离子交换量为19.23 cmol/kg,镉含量为25.06 mg/kg。

1.2 试验设计

将实验用土充分混匀,放入袋子中,采用湿热灭菌方法用高压灭菌锅在121℃下处理24 h^[24],冷却后备用。在每个塑料盆(高=16 cm,底径=12 cm,口径=22 cm)中装入风干土8 kg。每盆中播入20粒种子,出苗后定苗为每盆10株。将试剂SrCl₂·6H₂O(分析纯)溶于超纯水中制成溶液,设置Sr²⁺浓度为0、75、725、975 mg/kg,充分混匀,平衡3周。采用双层接种法在每盆中均匀加入40 g接种剂至盆钵2/3处,以灭菌接种剂作为对照组(non-AMF)。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 菌根侵染率

在镉处理60 d后,取整株高粱,每盆6株。用直尺和游标卡尺测量幼苗的株高和根长。丛枝菌根染色方法参考Phillips和Hayman^[25]。菌根侵染率(%)=(根段中被菌根侵染的长度/检测根段的长度)×100%。

1.3.2 菌根依赖性

取不同镉浓度处理的整株高粱,每盆6株。杀青温度为105℃,持续杀青30 min,在烘箱中55℃持续烘干至恒重,用万分之一天平称重。菌根依赖性(%)=(接种丛枝菌根真菌的植株干重/未接种的植株干重)×100%。

1.3.3 株高、根长、生物量的测定

取不同镉浓度处理的整株高粱,每盆6株。分别用直尺和游标卡尺测量,对幼苗的株高、根长进行测量。杀青温度为105℃,持续杀青30 min,在烘箱中55℃持续烘干至恒重,用万分之一天平称重。

1.3.4 镉富集浓度的测定和计算

植物样品烘干后,被分成根、茎、叶 3 个部分。分别取根、茎、叶 2.0 g 样品,250℃ 下灰化,持续增温至 500℃,之后灰化 2 h。将 1 g 灰化样品混入 6 mL 的 HCl-HNO₃-H₂O₂(体积比为 1:1:1)。采用 ICP-AES(电感耦合等离子体原子发射光谱法)测定植物样品中镉浓度^[26]。

生物富集系数(bioconcentration factor, BCF) = 植物地上部分镉浓度 / (处理镉浓度 + 土壤本底值)。

转运系数(translocation factor, TLF) = 地上部分镉富集浓度 / 根中镉富集浓度。通常,富集植物的 TLF 大于 1,而非富集植物的 TLF 小于 1^[27]。

1.3.5 土壤营养成分的测定

土壤有机质含量的测定方法为重铬酸钾外加热法,土壤全氮含量的测定方法为凯氏蒸馏法,土壤全磷含量的测定方法为浓硫酸高氯酸消解-钼锑抗比色法,土壤速效磷含量的测定方法为碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,土壤速效钾含量的测定方法为乙酸铵浸提-原子吸收光谱法^[23]。

1.3.6 土壤酶的测定

转化酶测定方法为 3,5-二硝基水杨酸比色法,磷酸酶活性测定方法为对硝基苯磷酸二钠(PNPP)比色法测定,蛋白酶活性测定方法为茚三酮比色法测定,脲酶活性测定方法为尿素-凯氏定氮法,脱氢酶活性测定方法为 TTC 法^[28]。

1.4 数据处理

用 SPSS 软件(version 13.0; SPSS Institute Chicago, IL, USA)来进行统计分析,用最小显著性差异(LSD)判定处理之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫下高粱的菌根侵染率

所有镉处理组的菌根侵染率都大于 50%。随着镉浓度的升高,菌根侵染率呈先上升后下降趋势(图 1)。侵染率最高的为 75 mg/kg (80%) 和 725 mg/kg (74.67%) 处理,显著高于无镉添加处理(0 mg/kg)。在 975 mg/kg 处理中菌根侵染率有所下降,但与无镉添加处理的侵染率无显著性差异($P > 0.05$)。在无镉添加处理和 975 mg/kg 处理中,菌根侵染率分别为 54.67% 和 53.67%。

2.2 接种丛枝菌根真菌对镉胁迫下高粱生长的影响

高粱的整株生物量以及株高随着处理中镉浓度的增加,呈先增加后降低的趋势。在接种菌根组中,在低浓度 75 mg/kg 镉处理中,地上生物量最高。在接种菌根组中,75 mg/kg 和 725 mg/kg 镉处理中高粱的地上生物量显著高于无菌根组中的对应浓度($P < 0.05$),分别增加了 33.23% 和 21.43%。在接种菌根组中,根生物量最高的为无镉添加处理和 75 mg/kg 处理,二者的根生物量均显著高于无菌根组,分别增加了 43.98% 和 56.09%。接种菌根组中 975 mg/kg 处理与无菌根组的对应浓度相比,根生物量没有显著差异($P > 0.05$)。株高的最高值出现在 75 mg/kg,而在 725 mg/kg 镉处理中下降,在无菌根组和接种菌根组之间差异不显著($P > 0.05$)。根长无菌根组和接种菌根组之间相比没有显著性差异($P > 0.05$) (表 1)。

以无菌根处理组中高粱的生物量为 100%,高粱对菌根的依赖性随着镉浓度的增高呈先升高后降低(图 2)。其中,在低浓度 75 mg/kg 镉处理,菌根依赖性最高为 136.92%。在接种菌种组中 0—975 mg/kg 处理时,

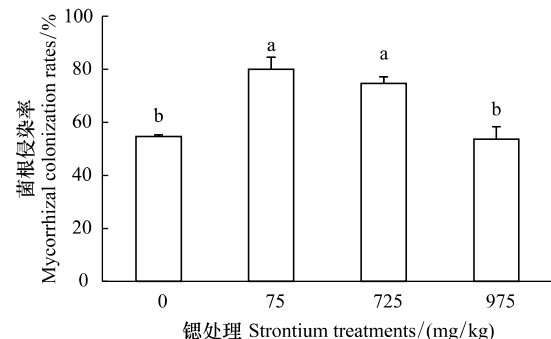


图 1 镉胁迫下高粱的菌根侵染率

Fig. 1 The mycorrhizal colonization rates of *Sorghum bicolor* under strontium stress

不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)

菌根依赖性都高于 100%。

表 1 镉胁迫下接种地球囊霉对高粱生长的影响

Table 1 Effects of *Glomus geosporum* inoculation on the growth of *Sorghum bicolor* under strontium stress

接种处理 Inoculation treatment	镉处理 Sr treatment/ (mg/kg)	地上生物量 Shoot biomass/g	根生物量 Root biomass/g	株高 Plant height/cm	根长 Root length/cm
未接种丛枝菌根真菌 Non-AMF	0	44.45±3.14Aa	8.05±2.10Ab	47.23±3.23Aab	11.12±2.45Aa
	75	42.21±1.98Ba	8.13±1.67Bb	51.32±1.23Aa	12.98±3.34Aa
	725	36.35±2.33Bb	8.28±8.21Bb	43.35±2.13Ab	9.53±1.21Aa
	975	34.24±1.45Ab	6.43±2.13Ab	42.13±3.45Ab	9.34±2.12Aa
接种丛枝菌根真菌 AMF	0	48.14±1.57Ab	11.59±2.13Aa	48.17±4.11Ab	12.13±1.13Aa
	75	56.24±0.62Aa	12.69±7.63Aa	56.67±6.12Aa	13.33±2.31Aa
	725	44.14±2.13Ab	8.98±3.11Ab	45.07±2.31Ab	10.58±2.15Aa
	975	35.35±2.43Ac	8.06±1.01Ab	44.35±1.13Ab	9.61±1.31Aa

同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) ; 同列不同大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 接种 AMF 对高粱镉富集能力的影响

与无菌根组相比, 经过 AMF 处理后, 高粱地上部分和根中的镉浓度显著增加 ($P < 0.05$)。高粱的地上部分和根部对金属镉的响应一致, 地上部分和根部镉浓度都随着土壤镉浓度的增加而增加 (表 2)。

AMF 接种处理中, 高粱对镉的转运系数和富集系数都显著高于无菌根组 ($P < 0.05$) (表 3)。无菌根组中高粱对镉的转移系数和富集系数都小于 1。AMF 种处理中, 转运系数在无镉添加处理和 975 mg/kg 镉处理中都小于 1 (但接近于 1), 而在 75 mg/kg 和 725 mg/kg 镉处理中都大于 1。富集系数仅在无镉添加处理中小于 1, 而在镉添加处理中都大于 1。AMF 处理显著增强了高粱对金属镉的富集能力。

2.4 接种 AMF 高粱对镉污染土壤中营养成分的影响

接种 AMF 对土壤有机质、全氮、全钾和速效钾并没有显著影响, 所有处理之间没有显著差异 ($P > 0.05$) (表 4)。土壤全磷和速效磷含量与无菌根组相比显著减少, 全磷减少了 6.52%—18.77%; 速效磷减少了 12.38%—27.43%。

表 2 接种地球囊霉对镉胁迫下高粱各部位镉富集浓度

Table 2 Effects of *Glomus geosporum* on strontium absorption of *Sorghum bicolor* under strontium stress

接种处理 Inoculation treatment	镉处理 Sr treatment/(mg/kg)	镉浓度 Sr concentration/(mg/kg)	
		地上 Shoot	根 Root
未接种丛枝菌根真菌 Non-AMF	0	8.23±0.24Bd	10.45±0.34Bd
	75	92.14±4.98Bc	103.65±5.89Bc
	725	464.43±21.45Bb	535.20±21.33Bb
	975	632.12±18.99Ba	732.35±35.78Ba
接种丛枝菌根真菌 AMF	0	21.07±0.06Ad	21.47±0.27Ad
	75	120.89±1.08Ac	118.86±0.71Ac
	725	864.07±23.10Ab	696.75±23.24Ab
	975	1101.31±10.28Aa	1224.05±16.77Aa

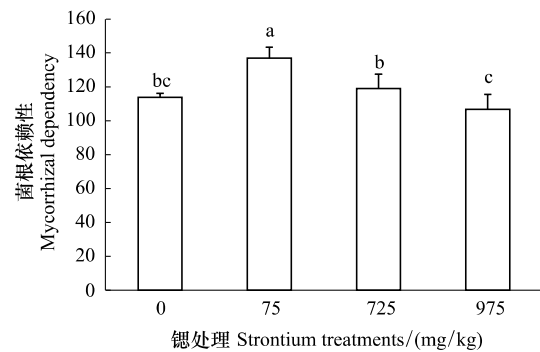


图 2 镉胁迫下高粱的菌根依赖性

Fig. 2 The mycorrhizal dependency of *Sorghum bicolor* under strontium stress

表 3 接种地球囊霉对高粱富集镉的转移系数和生物富集系数的影响

Table 3 Effects of *Glomus geosporum* on the translocation factor and bioconcentration factor of *Sorghum bicolor*

接种处理 Inoculation treatment	镉处理 Sr treatment / (mg/kg)	转运系数 Translocation factor	生物富集系数 Bioconcentration factor
未接种丛枝菌根真菌 Non-AMF	0	0.79±0.13Bb	0.33±0.03Bc
	75	0.89±0.03Ba	0.92±0.04Ba
	725	0.87±0.12Ba	0.62±0.08Bb
	975	0.86±0.03Bb	0.63±0.06Bb
接种丛枝菌根真菌 AMF	0	0.98±0.06Ab	0.84±0.05Ab
	75	1.02±0.05Ab	1.21±0.04Aa
	725	1.24±0.21Aa	1.15±0.11Aa
	975	0.90±0.11Ab	1.10±0.06Aa

表 4 接种地球囊霉对土壤营养成分的影响

Table 4 Effects of *Glomus geosporum* on soil nutrients

接种处理 Inoculation treatment	镉处理 Sr treatment / (mg/kg)	有机质 Organic matter / (g/kg)	全氮 Total N / (g/kg)	全磷 Total P / (g/kg)	全钾 Total K / (mg/kg)	速效磷 Available P / (mg/kg)	速效钾 Available K / (mg/kg)
未接种丛枝菌根真菌 Non-AMF	0	14.33±0.24Aa	1.13±0.03Aa	3.08±0.54Aa	9.47±1.12Aa	33.65±1.65Aa	88.76±5.76Aa
	75	14.56±0.21Aa	1.16±0.05Aa	3.09±0.45Aa	9.67±1.34Aa	32.78±3.34Aa	87.98±4.67Aa
	725	14.25±0.14Aa	1.16±0.01Aa	3.22±0.12Aa	9.95±0.87Aa	33.12±1.43Aa	89.55±2.25Aa
	975	14.22±0.23Aa	1.15±0.03Aa	2.98±0.56Aa	9.02±0.57Aa	31.02±3.43Aa	89.56±6.23Aa
接种丛枝菌根真菌 AMF	0	14.22±0.21Aa	1.12±0.04Aa	2.61±0.12Ba	9.53±0.32Aa	24.42±1.07Bb	86.15±2.23Aa
	75	14.24±0.12Aa	1.13±0.14Aa	2.51±0.23Ba	9.65±0.76Aa	25.42±2.15Bb	85.55±3.23Aa
	725	14.25±0.14Aa	1.15±0.08Aa	3.01±0.39Bb	9.82±0.34Aa	29.02±0.13Bb	88.55±1.25Aa
	975	14.21±0.11Aa	1.14±0.09Aa	2.52±0.16Bb	9.01±0.13Aa	24.71±1.02Bb	87.45±2.43Aa

2.5 接种 AMF 高粱对镉污染土壤中酶活性的影响

AMF 对不同土壤酶活性的影响有差异(表 5)。转化酶、蛋白酶、脲酶和脱氢酶在所有处理中没有差异 ($P > 0.05$)。其中,接种 AMF 显著增加了土壤磷酸酶活性 ($P < 0.05$),与无菌根组相比,增加了 19.67%—32.56%。

表 5 接种地球囊霉对土壤酶活性的影响

Table 5 Effects of *Glomus geosporum* on soil enzyme activities

接种处理 Inoculation treatment	镉处理 Sr treatment / (mg/kg)	转化酶 Invertase / (mg g ⁻¹ h ⁻¹)	磷酸酶 Phosphatase / (μg g ⁻¹ h ⁻¹)	蛋白酶 Protease / (mg g ⁻¹ h ⁻¹)	脲酶 Urease / (mg g ⁻¹ h ⁻¹)	脱氢酶 Dehydrogenase / (mg g ⁻¹ h ⁻¹)
未接种丛枝菌根真菌 Non-AMF	0	1.21±0.09Aa	0.62±0.05Ba	0.53±0.05Aa	0.24±0.08Aa	1.33±0.15Aa
	75	1.23±0.12Aa	0.61±0.08Ba	0.52±0.04Aa	0.23±0.07Aa	1.34±0.32Aa
	725	0.97±0.12Ab	0.56±0.05Ba	0.54±0.06Aa	0.26±0.05Aa	1.32±0.12Aa
	975	0.95±0.10Ab	0.43±0.07Ba	0.51±0.09Aa	0.21±0.04Aa	1.28±0.23Aa
接种丛枝菌根真菌 AMF	0	1.26±0.02Aa	0.78±0.05Aa	0.55±0.12Aa	0.28±0.03Aa	1.31±0.08Aa
	75	1.25±0.11Aa	0.73±0.04Aa	0.57±0.12Aa	0.29±0.03Aa	1.34±0.09Aa
	725	1.03±0.09Aab	0.70±0.11Aa	0.63±0.06Aa	0.26±0.07Aa	1.31±0.03Aa
	975	0.99±0.13Ab	0.57±0.04Ab	0.51±0.06Aa	0.27±0.05Aa	1.29±0.12Aa

3 讨论

3.1 地球囊霉对高粱抗镉能力的影响

在所有镉浓度处理下地球囊霉对高粱的侵染率都超过了 50%。在低浓度 75 mg/kg 和中间浓度

725 mg/kg处理组时,地球囊霉的侵染率最高,显著高于其他无镉添加处理和高浓度 975 mg/kg 处理,这可能是由于地球囊霉在 75 mg/kg 和 725 mg/kg 镉处理下耐受能力较强。在所有镉处理中高梁都表现出显著的菌根依赖性($P < 0.05$) ,表明在镉处理中丛枝菌根有利于高粱生长。同时,接种地球囊霉显著增强了高粱耐受镉的能力。4个镉浓度梯度相比,在 75 mg/kg 和 725 mg/kg 镉处理时,高粱的菌根依赖性最强,与无镉添加处理相比,分别增加了 38.52%和 58.78%。接种地球囊霉显著增加了高粱的生物量($P < 0.05$)。75 mg/kg 和 725 mg/kg 镉处理组中高梁的地上生物量与对照相比分别增加了 33.23%和 21.43%,根生物量分别增加了 43.98%和 56.09%。高粱和地球囊霉互利共生,菌丝通过根的皮层细胞可以从植物体获得碳源,为菌丝生长提供了有利条件^[29]。地球囊霉侵染高粱后形成庞大的菌丝体和植物根系网络,能够促进植物对矿质元素和营养成分的吸收,从而显著增加高粱的生物量。有研究表明 AMF 通过增强植物光合效率,能够促进宿主高粱生长并增强其抗逆能力^[30]。在本研究中,地球囊霉有利于高粱生长,并提高了高粱对土壤镉污染的耐受能力。

3.2 地球囊霉对高粱富集转运镉能力的影响

菌根真菌能够影响土壤中重金属的生物有效性,比如 AMF 对重金属活化或钝化、吸收与固持的作用,从而影响植物对重金属的富集和分配。至今关于 AMF 对植物富集重金属能力的影响还没有一致的结论。接种地球囊霉能够增强万寿菊(*Tagetes erecta* L.)^[31]和翅荚木(*Zenia insignis* Chun)^[32]对重金属的富集能力。在本研究中,与无菌根处理组相比,接种地球囊霉处理显著增加了高粱地上部分和根的镉浓度($P < 0.05$)。这一结果表明地球囊霉增加了金属镉在土壤中的生物有效性,促进了镉向植物体内的转移。地球囊霉接种处理显著提高了高粱对镉的转运和富集能力,TLFs 和 BCFs 在接种 AMF 组显著高于无菌根组($P < 0.05$)。这一结果与先前的研究一致,AMF 通过调节重金属离子在植物体内的吸收和转运过程,促进了重金属从土壤向植物体的转移,从而增强植物修复的效果和效率^[33]。此外,在重金属污染条件下,由 AMF 和植物形成的共生体可以改善植物对营养元素的吸收,有效地增强了植物对重金属污染的抗逆性,缓解了植物本身所受到的重金属毒害作用,使植物修复效率增加^[34]。然而,由于 AMF 定殖于植物根系,进而强化了根系对重金属的吸收和固持作用,从而使重金属更多固定于土壤中。在高浓度 Cd 处理中,接种摩西球囊(*Glomus mosseae*)显著提高了 Cd 在玉米(*Zea mays* L.)根中的富集,减少玉米地上部分的富集浓度,表明接种 AMF 能够增强玉米对 Cd 的固持作用^[31]。接种地球囊霉显著增加了紫花苜蓿(*Medicago sativa*)根中 Cd 和 Zn 的富集浓度,而减少了地上部分的 Cd 和 Zn 富集浓度,表明地球囊霉增强了紫花苜蓿对 Cd 和 Zn 的固持作用,从而缓解重金属对植物的毒性作用^[35]。然而,由于接种 AMF 能够促进宿主生长,当植物富集重金属总量相同时,植物富集的重金属浓度(单位生物量中重金属的富集含量)则会相应减少。因此,AMF 对重金属的吸收和固持能力的增强效应,可能是 AMF 增加了植物的生物量而产生“稀释效应”^[36]。

3.3 地球囊霉接种高粱对镉污染土壤中养分和土壤酶活性的影响

菌根真菌侵染植物根系后,影响植物根际的微生物群落结构和多样性,从而改变植物根际微生物的代谢活动。菌根真菌能够提高植物的营养水平,特别是磷素营养。一方面,AMF 增强微生物解磷活性,增加土壤有机磷含量。另一方面,AMF 可将难溶性元素转化为可吸收态,进而促进植物对元素的吸收。如通过促进植物分泌有机酸,将土壤中转化为磷酸盐,在磷酸酶的作用下,磷酸盐水解转化为易吸收态^[33]。在本研究中,与无菌根处理组相比,接种地球囊霉处理中的全磷减少了 6.52%—18.77%,速效磷减少了 12.38%—27.43%。土壤中这部分减少的磷素可能由地球囊霉介导而输送至宿主植物体内。研究表明接种地球囊霉的黑麦草(*Lolium perenne* L.)地上部分和根系中的磷含量相比于未接菌黑麦草都有显著提高^[37]。研究表明 AMF 会促进土壤酶的活性,包括酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、脲酶和蛋白酶的活性^[35]。在本研究中,接种地球囊霉显著增加了土壤磷酸酶活性($P < 0.05$) ,与对照相比,增加了 19.67%—32.56%。AMF 可能通过多种机制协同影响根际环境,提高土壤养分的可利用性,并缓解重金属对土壤酶的抑制作用,从而增强植物根际微生物的代谢活动。

4 结论

地球囊霉缓解了土壤铯污染对高粱生长的抑制作用, 增强了土壤磷酸酶和转化酶活性, 增强了高粱对铯的富集和转运能力。综上所述, 地球囊霉可增强高粱对铯的富集和耐受能力, 在铯污染(75—725 mg/kg)下接种地球囊霉的效果最好。丛枝菌根-高粱共生体具有良好的修复效果和应用前景。

参考文献(References):

- [1] Kato M, Okada Y, Hirai S, Minai Y, Saito S, Shibukawa M. Comparative analysis of distributions of radioactive cesium and potassium and stable cesium, potassium, and strontium in brown rice grains contaminated with radioactive materials released by the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2016, 310(1): 247-252.
- [2] 于瑞莲, 胡恭任. 土壤中重金属污染源解析研究进展. *有色金属*, 2008, 60(4): 158-165.
- [3] 吴茂江. 铯与人体健康. *微量元素与健康研究*, 2012, 29(5): 66-67.
- [4] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值. 中国环境科学出版社, 1990, 400-401.
- [5] 李天才, 曹广民, 柳青海, 周国英, 张德罡. 青海湖北岸草地土壤和植物钠、铯、锂矿质元素含量与草地植被特征的关系. *草原与草坪*, 2012, 32(6): 17-22.
- [6] 吴丽, 王绍俊, 李玲. 新疆某石化污水库周边土壤对铯的吸附特征研究. *安全与环境学报*, 2012, 12(3): 12-16.
- [7] Tsukada H, Takeda A, Takahashi T, Hasegawa H, Hisamatsu S, Inaba J. Uptake and distribution of ^{90}Sr and stable Sr in rice plants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2005, 81(2/3): 221-231.
- [8] 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. *生态学报*, 2001, 21(7): 1196-1203.
- [9] 唐永金, 罗学刚, 曾峰, 江世杰. 不同植物对高浓度 Sr、Cs 胁迫的响应与修复植物筛选. *农业环境科学学报*, 2013, 32(5): 960-965.
- [10] Fuhrmann M, Lasat M M, Ebbs S D, Kochian L V, Cornish J. Uptake of cesium-137 and strontium-90 from contaminated soil by three plant species; application to phytoremediation. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(3): 904-909.
- [11] Prasad M N V, de Oliveira Freitas H. Metal hyperaccumulation in plants-biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2003, 6(3), doi: 10.4067/S0717-34582003000300012.
- [12] Reeves R D, Brooks R R. European species of *Thlaspi* L. (Cruciferae) as indicators of nickel and zinc. *Journal of Geochemical Exploration*, 1983, 18(3): 275-283.
- [13] 张晓雪, 王丹, 李卫锋, 徐长合, 钟钊芝. ^{133}Cs 和 ^{88}Sr 在蚕豆苗中的蓄积及其辐射损伤效应. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2010, 28(1): 48-52.
- [14] 陈保冬, 陈梅梅, 白刃. 丛枝菌根在治理铯污染环境中的潜在作用. *环境科学*, 2011, 32(3): 809-816.
- [15] Zhuang P, Shu W S, Li Z, Liao B, Li J T, Shao J S. Removal of metals by sorghum plants from contaminated land. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(10): 1432-1437.
- [16] Wang X, Chen C, Wang J L. Phytoremediation of strontium contaminated soil by *Sorghum bicolor* (L.) Moench and soil microbial community-level physiological profiles (CLPPs). *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(8): 7668-7678.
- [17] Galavi M, Jalali A, Ramroodi M, Mousavi S R, Galavi H. Effects of treated municipal wastewater on soil chemical properties and heavy metal uptake by sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Journal of Agricultural Science*, 2010, 2(3): 235-241.
- [18] 郭栋生, 席玉英, 王爱英. 植物激素类除草剂对玉米幼苗吸收重金属的影响. *农业环境保护*, 1999, 18(4): 182-184, 191-191.
- [19] 陈良华, 胡相伟, 杨万勤, 王小军, 谭灵杰, 张健. 接种丛枝菌根真菌对雌雄美洲黑杨吸收铅镉的影响. *环境科学学报*, 2017, 37(1): 308-317.
- [20] 杨会玲, 黄仁华, 陈珂, 陆云梅, 黄炜. 丛枝菌根真菌(AMF)对铯胁迫宿根高粱生长及根际土壤酶的影响. *环境化学*, 2015, 34(4): 712-717.
- [21] 侯时季, 李涛, 蔺阁, 伍松林, 陈保冬. 施用沼渣和接种丛枝菌根真菌对甘草生长及矿质营养的影响. *环境科学学报*, 2016, 36(12): 4453-4460.
- [22] 袁丽环, 闫桂琴. 丛枝菌根化翅果油树幼苗根际土壤微环境. *植物生态学报*, 2010, 34(6): 678-686.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [24] 谢越, 杨高文, 周翰舒, 张英俊. 丛枝菌根真菌研究中土壤灭菌方法综述. *草业科学*, 2012, 29(5): 724-732.
- [25] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 1970, 55(1): 158-161, IN16-IN18.

- [26] 刘珠丽,李洁,杨永强,陈繁荣,吴世军.微波消解-ICP-AES/ICP-MS测定沉积物中23种元素的方法研究及应用.环境化学,2013,32(12):2370-2377.
- [27] Soudek P, Valenová Š, Vavříková Z, Vaněk T. ^{137}Cs and ^{90}Sr uptake by sunflower cultivated under hydroponic conditions. Journal of Environmental Radioactivity, 2006, 88(3): 236-250.
- [28] 关松荫.土壤酶及其研究法.北京:农业出版社,1986.
- [29] 韦莉莉,卢昌熠,丁晶,俞慎.丛枝菌根真菌参与下植物-土壤系统的养分交流及调控.生态学报,2016,36(14):4233-4243.
- [30] 黄仁华,杨会玲,黄炜,陆云梅,陈珂.核素铯胁迫下接种摩西球囊霉对宿根高粱内源激素和光合的影响.应用生态学报,2015,26(7):2146-2150.
- [31] 刘灵芝,张玉龙,李培军,巩宗强.铅锌矿区分离丛枝菌根真菌对万寿菊生长与吸镉的影响.土壤学报,2012,49(1):43-49.
- [32] 李霞,彭霞薇,伍松林,李志茹,冯红梅,江泽平.丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响.环境科学,2014,35(8):3142-3148.
- [33] 孙金华,毕银丽,裘浪,江彬.土壤中丛枝菌根真菌对宿主植物磷吸收作用机制综述.土壤通报,2016,47(2):499-504.
- [34] 祖艳群,卢鑫,湛方栋,胡文友,李元.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.植物生理学报,2015,51(10):1538-1548.
- [35] 黄晶,凌婉婷,孙艳娣,刘娟.丛枝菌根真菌对紫花苜蓿吸收土壤中镉和锌的影响.农业环境科学学报,2012,31(1):99-105.
- [36] 王潇,谢丽坤,武慧斌,邹洪涛,宋正国.铜镉污染土壤上 CO_2 浓度升高对籼稻米品质的影响.生态学报,2015,35(17):5728-5737.
- [37] 郭艳娥,王晓瑜,高萍,段廷玉.磷添加条件下摩西球囊霉与禾草内生真菌对多年生黑麦草生长的影响.草业学报,2017,26(12):160-169.
- [38] 付晓峰,张桂萍,张小伟,任嘉红.溶磷细菌和丛枝菌根真菌接种对南方红豆杉生长及根际微生物和土壤酶活性的影响.西北植物学报,2016,36(2):353-360.