

丛枝菌根真菌(AMF)对 ^{137}Cs 污染土壤下宿根高粱生长、根际磷酸酶和富集核素的影响

黄仁华^{1,2}, 陆云梅^{1,2}, 黄 炜^{1,2}

(1.西南科技大学生命科学与工程学院, 四川 绵阳 621010; 2.西南科技大学核废物与环境安全国防重点学科实验室, 四川 绵阳 621000)

摘 要:通过盆栽试验研究了 *Glomus geosporum* (G.g), *Glomus mosseae* (G.m), *Glomus versiforme* (G.v), *Glomus etunicatum* (G.e) 和 *Glomus diaphanum* (G.d) 5 种丛枝菌根真菌(AMF)对 ^{137}Cs 污染土壤下宿根高粱生长特性、根际磷酸酶活性和核素富集系数的影响。结果表明:G.g, G.m 和 G.e 处理显著提高了宿根高粱茎粗、株高、叶干重和地下部干重等生长指标($P<0.05$),均以 G.m 处理增加最大,较对照分别增加了 25.63%、23.25%、26.07% 和 16.73%;5 种 AMF 处理显著提高了根茎 N 和 K 含量($P<0.05$),增幅范围分别为 6.63%~10.84% 和 24.28%~29.70%;接种 G.m 后酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性分别增加了 0.31、0.07 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,但显著降低了宿根高粱根际微域土壤有效磷含量($P<0.05$),降低值为 3.95 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;另一方面,接种 G.m、G.e 和 G.d 处理显著提高了宿根高粱对 ^{137}Cs 的富集能力($P<0.05$),富集系数分别是对照的 2.79、1.77 倍和 1.36 倍。线性回归分析表明,宿根高粱富集核素 ^{137}Cs 系数与酸性和碱性磷酸酶活性呈极显著正相关($P<0.01$),与土壤有效磷呈极显著负相关($P<0.01$)。

关键词: ^{137}Cs ; 丛枝菌根真菌(AMF); 生长特性; 宿根高粱; 磷酸酶; 富集系数

中图分类号: X172 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)05-0953-07 doi:10.11654/jaes.2013.05.011

Influences of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) on the Growth, Phosphatase Activities and Radioactive Nuclide Bioconcentration of *sorghum haipense* at Soil Contaminated with ^{137}Cs

HUANG Ren-hua^{1,2}, LU Yun-mei^{1,2}, HUANG Wei^{1,2}

(1.College of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2.State Defense Key Laboratory of the Nuclear Waste and Environmental Security, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to investigate the effects of *Glomus geosporum* (G.g), *Glomus mosseae* (G.m), *Glomus versiforme* (G.v), *Glomus etunicatum* (G.e) and *Glomus diaphanum* (G.d) on the growth, phosphatase activities and bioconcentration factor of ^{137}Cs in *sorghum haipense* at soil contaminated with ^{137}Cs . The results showed that G.g, G.m and G.e treatment significantly improved the growth indexes ($P<0.05$), including stem diameter, plant height, leaf and root dry weight. Meanwhile, the increase of these growth indexes in G.m treatment was the most significant and the corresponding indexes increased by 25.63%, 23.25%, 26.07% and 16.73% compared with the control, respectively. The five AMF significantly increased N and K concentration in rhizomes of *sorghum haipense* and the increase range of the two element concentration was 6.63%~10.84% and 24.28%~29.70%, respectively. The treatment inoculated with G.m significantly increased acid phosphatase (0.31 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) and alkaline phosphatase activities (0.07 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), but reduced the available P concentration of by 3.95 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. In addition, the bioconcentration factor of ^{137}Cs in *sorghum haipense* treated with G.m, G.e and G.d was 2.79 times, 1.77 times and 1.36 times than that of the control, respectively. Moreover, there was a positive significant correlativity ($P<0.01$) between bioconcentration factor on ^{137}Cs and acid or alkaline phosphatase activities, but bioconcentration factor of ^{137}Cs exhibited a significant negative correlativity with available P concentration ($P<0.01$). Based on our results, the means to repair radionuclide pollution soil by AMF-plant symbiont is very effective in the future.

Keywords: ^{137}Cs ; arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); growth; *sorghum haipense*; phosphatase; bioconcentration factor

收稿日期: 2012-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(31000259)

作者简介: 黄仁华(1979—), 男, 湖北钟祥人, 博士, 副教授。主要从事菌根在辐射生物效应中的应用工作。E-mail: huangrenhua@swust.edu.cn

自20世纪中叶以来,由于核技术的发展,放射性核素污染已经成为非常重要的环境问题。放射性核素存在土壤中不仅对环境产生辐射危害,而且通过生物圈进入食物链,危及生态系统的稳定,造成内照射,给人类的生命和健康带来较大的威胁^[1-2]。由于核素不像有机化合物那样普遍地可自然降解或生物降解,而且可以在土壤中长期存留并富集,一些长寿命放射性核素污染土壤的处理一直是一个棘手的问题。人们曾经想了很多办法如客土法、淋溶法、沉淀法、电化法、磁化法等^[3-5],然而这些技术至今仍然不太成熟,通常需要巨额的花费,容易破坏污染土壤场地结构和土壤理化性质,并且造成二次污染,目前难以开展大面积、低浓度放射性核素污染环境的净化。近年来,植物修复技术以其安全、廉价的特点,正成为重金属污染土壤的治理领域研究和开发的热点,不少科学工作者对植物改良和治理重金属污染土壤开展了一系列研究工作,并取得了一定成绩,为借鉴和改良治理放射性污染土壤开辟了一条新途径^[6-8]。

近期的研究表明,在土壤受放射性核素极端污染下大多数植物生长会受到限制甚至死亡,其生物量达不到修复土壤和富集核素的目的,原因就在于植物根际微环境受到了核素的破坏,导致修复植物不能正常生长^[9]。为解决植物修复中存在的一些问题,将丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungus, AMF)应用到土壤核素污染修复中,由于丛枝菌根(Arbuscular mycorrhiza, AM)的发达根外菌丝可以部分替代根毛起到吸收水、矿质营养元素等作用^[10],它对促进植物生长起到一定的作用^[11],外接菌根不仅提高了植物在土壤核素极端胁迫下的生长量,还对植物富集和转运核素提供了一定的帮助。AMF是一种和植物根系密切相关的益菌,能与根系形成丛枝菌根的互惠共生体,90%的陆生植物都可以观察到这个结构。Chen等发现菌根在显著提高中国凤尾蕨生长量的同时能增强铀核素的吸收,核素转移系数也得到了极大的提高,认为菌根菌丝能综合利用土壤中的微生物及根际微环境,有效转运土壤中的放射性核素^[12];在根器官培养条件下研究发现*Glomus lamellosum*的根外菌丝可吸收、积累并转运放射性核素¹³⁷Cs到植物根中^[13];Rufyikiri等发现AMF根外菌丝可以固持²³³U,植物根内组织可以积累³³P,同时减少其向菌根内转运^[14];de Boulois等也认为在放射性污染土壤的植物稳定过程中可以应用菌根真菌^[15],同时他们也认为AMF在富集土壤核素方面的作用目前还不确定且具有较大的争议^[16]。

本文在温室盆栽条件下,对¹³⁷Cs污染土壤中生长的宿根高粱进行接种AMF,研究外接AMF处理对生长在¹³⁷Cs污染土壤中的植物生长特性、养分吸收、根际磷酸酶活性和富集¹³⁷Cs系数的影响,分析外接AMF处理后植物根际环境的变化与植物富集核素能力之间的关系,探讨AMF在植物复垦核素污染土壤领域的应用前景,为经济高效的菌根-植物修复技术在治理放射性土壤污染中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤¹³⁷Cs污染处理

供试土壤取自西南科技大学菜园黄壤土,去除草根,掺入干净的河砂,按体积7:1比例混合,其pH值为5.81,全氮1.84 g·kg⁻¹,有效磷10.62 mg·kg⁻¹,有效钾25.65 mg·kg⁻¹,土壤的田间持水量25.4%,有机质含量8.4 g·kg⁻¹,将试验用土预先用高压灭菌炉灭菌24 h,在黑暗中保存1周后装盆。试验用塑料盆高330 mm,上口径320 mm,每盆装土8.0 kg(干重),按每千克土0.1 g硫酸铵和0.05 g磷酸二氢钾施入底肥,加水至田间持水量,平衡2周后,每盆(8.0 kg干土)采用浇灌方法施入¹³⁷Cs溶液,具体方法是将预先标定好的¹³⁷Cs溶液3.0 mL加入到30 mL水中(放射性活度为3.41×10⁵ Bq),然后浇入土壤中,模拟低放污染。再次加水至田间持水量的70%~80%,污染土壤避光存放在潮湿条件下,每星期做1次表面土和底层土比活度测定,待两者无显著差异后取土试验。

1.2 供试菌种

供试AMF为地球囊霉(*G. geosporum*, G.g),摩西球囊霉(*G. mosseae*, G.m),地球球囊霉(*G. versiforme*, G.v),幼套球囊霉(*G. etunicatum*, G.e)和透光球囊霉(*G. diaphanum*, G.d)。含有宿主植物根段、相应菌根真菌孢子及根外菌丝体的根际土壤(北京市农林科学院植物营养与资源研究所微生物室提供)。接种剂是以河砂和土壤的混合物作为扩繁基质,以三叶草盆栽将原种扩大繁殖获得试验所需接种剂,其孢子密度为40个·g⁻¹。

1.3 实验方案

取平衡后的盆栽土6.0 kg于另一大小相同塑料盆中,然后均匀加入接种剂50 g和300 g平衡土混合物,播种预先准备好的宿根高粱(*Sorghum halpense* L.)种子(挑选好大小一致且籽粒饱满的用10% H₂O₂对种子进行表面消毒10 min,蒸馏水冲洗多次后于恒温培养箱25℃催芽),每盆均匀播种3~5粒,最后将

剩余平衡土加入盆中覆盖种子。不接种处理加等量的已灭菌的接种剂,每个处理采用单株小区,重复 7 次。隔天浇水至田间持水量 70%~80%,常规管理。

以上试验在西南科技大学西山校区玻璃温室中进行。

1.4 测定方法

植物生长 20 周后,将植株地上、地下部分分别收获,用自来水和去离子水冲洗干净,根样剪成 1 cm 根段,取出部分根样用曲利苯蓝-方格交叉法测定根系的菌根侵染率^[17],菌根侵染率(%)=100×菌根感染的根段长度/检查根段的总长度;植物叶干重、茎干重和地下部干重采用烘干称重法,株高和茎粗分别采用皮尺和游标卡尺测量,根茎中全氮、全磷和全钾用硫酸-双氧水消化,采用常规方法分析;土壤有效磷含量用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定^[18];按照赵兰坡等的方法测定土壤磷酸酶活性^[19],酸性磷酸酶、中性磷酸酶和碱性磷酸酶分别采用 pH5.0 的醋酸盐缓冲液、pH7.0 的柠檬酸-磷酸缓冲液、pH10.0 的硼酸缓冲液提取。

植物和土壤样品中 ^{137}Cs 核素活度测定采用 Fuhrmann 等的方法^[6]。植物烘干后称 2.0 g 研磨成粉末装于聚乙烯塑料瓶,土壤样品取 100 g,装入小环境源盒。核素活度在 HPGe γ 谱仪 (GWL-120230, OR-TEC) 上测量,测量时间 1~3 d 不等。对植物样品和土壤 ^{137}Cs 的 661 keV 峰进行净计数测量分析,计算植物灰样和土壤中 ^{137}Cs 核素比活度,并用于计算生物富集系数:

$$\text{BF}(\text{Bioconcentration factor}) = C_{\text{plant}} / C_{\text{soil}}$$

式中: C_{plant} 为植物地面部分的放射性核素的比活度, $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重; C_{soil} 为土壤中放射性核素的比活度, $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干重。

采用中国计量科学院校对的土壤标准物质,在相同重量及测量条件下进行自吸收和探测效率校正, GWL-120230 的 ^{137}Cs 核素探测效率为 7.97%。

1.5 统计分析

采用 SAS8.1 软件 ANOVA 过程进行差异显著性测验, LSD 法进行多重比较分析, 采用 CORR 过程作因子间的相关系数分析, REG 过程作一元线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 菌根侵染率

接种不同 AMF 对生长在核素 ^{137}Cs 污染土壤下宿

根高粱根系侵染率见图 1 所示。结果显示,未接种处理没有观察到 AMF 侵染的迹象,接种的 5 种 AMF 侵染率均超过 50%,其中 G.d 侵染率最高,达到 62.42%,与 G.v 无显著差异,但显著高于其他菌种 ($P < 0.05$)。接种不同 AMF 后对宿根高粱收获时根系侵染率的高低顺序为 $G.d > G.v > G.g > G.e > G.m > \text{Non-AMF}$ 。

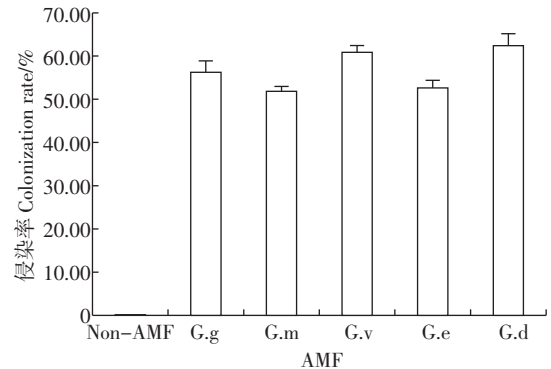


图 1 核素 ^{137}Cs 污染土壤下不同菌根对宿根高粱根系侵染率
Figure 1 Colonization rate of different arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on sorghum haipense at soil contaminated with ^{137}Cs

2.2 接种 AMF 对宿根高粱富集核素 ^{137}Cs 系数的影响

外接 AMF 处理对宿根高粱富集 ^{137}Cs 系数的影响见图 2 所示。与未接种对照相比,接种 G.m、G.e 和 G.d 均显著提高了宿根高粱对 ^{137}Cs 的富集能力 ($P < 0.05$),其富集系数分别是对照的 2.79、1.77 倍和 1.36 倍。接种 G.g 和 G.v 处理与未接种处理之间无显著差异。

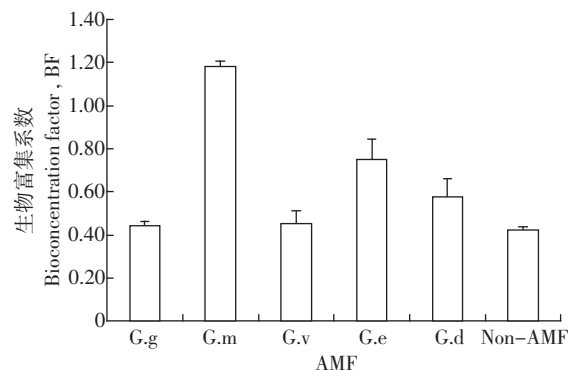


图 2 接种菌根对宿根高粱富集核素 ^{137}Cs 系数的影响
Figure 2 The effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on bioconcentration factor of ^{137}Cs by sorghum haipense

2.3 接种 AMF 对宿根高粱生长量的影响

接种不同 AMF 对宿根高粱叶干重、茎干重、地下部干重、株高和茎粗等生长指标影响不同(表 1)。与对照未接种相比,外接 5 种 AMF 处理均显著提高了宿根高粱的茎粗 ($P < 0.05$),其中以接种 G.m 和 G.d 效

表 1 ¹³⁷Cs 污染土壤下接种菌根对宿根高粱生长量的影响

Table 1 The effect of different arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on *sorghum haipense* growth at soil contaminated with ¹³⁷Cs

AMF	叶干重/g·pot ⁻¹	茎干重/g·pot ⁻¹	地下部干重/g·pot ⁻¹	株高/cm·plant ⁻¹	茎粗/mm·plant ⁻¹
<i>G. geosporum</i>	3.56±0.31ab	6.08±0.17b	5.38±0.15b	135.65±5.75bc	4.44±0.34b
<i>G. mosseae</i>	3.82±0.12a	6.93±0.24a	5.93±0.22a	153.65±4.83a	4.94±0.12a
<i>G. versiforme</i>	3.13±0.15cd	6.28±0.29b	5.35±0.27bc	139.63±6.18bc	4.55±0.05b
<i>G. etunicatum</i>	3.36±0.10bc	6.08±0.21b	5.67±0.24ab	130.50±5.48c	4.27±0.11b
<i>G. diaphanum</i>	3.19±0.14cd	6.90±0.39a	5.25±0.10c	144.28±4.20ab	4.86±0.13a
Non-AMF	3.03±0.07d	6.20±0.22b	5.08±0.10c	124.67±6.29d	3.94±0.14c

注:同列数据后不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。

果较好,增幅分别达到 25.63%和 23.35%;对株高进行统计分析发现,G.g、G.m、G.v 和 G.d 显著增加了宿根高粱的株高($P<0.05$),与对照相比分别增加了 10.98、28.98、14.96 cm 和 19.61 cm;接种 G.g、G.m 和 G.e 显著增加了叶干重和地下部干重,且均以接种 G.m 效果最好,增幅分别为 26.07%和 16.73%。

2.4 接种 AMF 对宿根高粱根茎 N、P、K 含量的影响

接种 AMF 使得生长在核素 ¹³⁷Cs 污染土壤条件下宿根高粱根茎 N 和 K 含量显著高于对照($P<0.05$),从表 2 可以看出,接种 5 种 AMF 处理之间对宿根高粱根茎 N 和 K 含量差异不明显,未达到显著水平。但对宿根高粱根茎 P 含量来说,不同 AMF 处理效果差异较大,与对照相比,G.g、G.m 和 G.e 显著提高了宿根高粱根茎 P 含量($P<0.05$),而 G.v 处理降低了宿根高粱根茎 P 含量,且达到显著水平($P<0.05$)。

表 2 ¹³⁷Cs 污染土壤下接种菌根对宿根高粱根茎 N、P、K 含量的影响

Table 2 The effect of different arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on N, P and K concentration in rhizomes of *sorghum haipense* at soil contaminated with ¹³⁷Cs

AMF	N/%	P/%	K/mg·g ⁻¹
<i>G. geosporum</i>	1.77±0.12a	0.38±0.01ab	16.77±0.67a
<i>G. mosseae</i>	1.84±0.01a	0.39±0.01a	16.66±1.04a
<i>G. versiforme</i>	1.82±0.02a	0.32±0.01d	16.64±0.74a
<i>G. etunicatum</i>	1.83±0.06a	0.39±0.01a	16.21±0.66a
<i>G. diaphanum</i>	1.81±0.05a	0.37±0.01bc	16.07±0.88a
Non-AMF	1.66±0.02b	0.35±0.01c	12.93±0.62b

2.5 AMF 对宿根高粱根际微域磷酸酶活性和土壤有效磷含量的影响

从表 3 可以看出,与对照相比,外接 5 种 AMF 处理均不同程度的增加了酸性磷酸酶活性,其中 G.m 处理效果最好,酶活性达到 1.53 mg·kg⁻¹·h⁻¹,且显著高于其他 4 种 AMF 处理($P<0.05$);而对碱性磷酸酶

和中性磷酸酶活性统计分析发现,接种 AMF 处理与对照之间酶活性差异不显著(除外接 G.m 对碱性磷酸酶活性的影响外);另外,接种不同 AMF 处理对土壤有效磷的影响存在着一定的差异,接种 AMF 后,土壤有效磷含量均表现为降低的趋势,其中接种 G.m、G.v 和 G.e 处理与对照达到显著差异($P<0.05$),降幅最大值出现在 G.e 处理上,达到 30.70%。

表 3 ¹³⁷Cs 污染土壤下接种菌根对宿根高粱根际微域磷酸酶活性和土壤有效磷含量的影响

Table 3 The effect of different arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on phosphatase activities and available P in rhizosphere microdomain of *sorghum haipense* at soil contaminated with ¹³⁷Cs

AMF	酸性磷酸酶/ mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹	碱性磷酸酶/ mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹	中性磷酸酶/ mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹	土壤有效磷/ mg·kg ⁻¹
<i>G. geosporum</i>	1.34±0.06bc	0.44±0.01b	0.39±0.03ab	12.92±0.39a
<i>G. mosseae</i>	1.53±0.06a	0.50±0.04a	0.42±0.06ab	9.08±0.41c
<i>G. versiforme</i>	1.33±0.07c	0.45±0.02b	0.35±0.04b	11.80±0.54b
<i>G. etunicatum</i>	1.42±0.02b	0.45±0.03b	0.44±0.01a	9.03±0.54c
<i>G. diaphanum</i>	1.32±0.04c	0.44±0.02b	0.36±0.04b	12.35±0.23ab
Non-AMF	1.22±0.03d	0.43±0.01b	0.37±0.05ab	13.03±0.07a

2.6 宿根高粱富集核素 ¹³⁷Cs 系数与根际微域磷酸酶活性和有效磷的回归分析

宿根高粱富集核素 ¹³⁷Cs 系数与根际微域磷酸酶活性和有效磷含量的相关回归分析见图 3 所示。图 3A 和图 3B 表明宿根高粱富集核素 ¹³⁷Cs 系数与酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别达到 0.913 9 和 0.918 7;从图 3C 可以看出宿根高粱富集核素 ¹³⁷Cs 系数与中性磷酸酶活性之间的相关系数较小,未达到显著水平,由此可以推断宿根高粱在富集土壤核素 ¹³⁷Cs 时可能与根域土壤酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性有关,图 3D 显示宿根高粱富集核素 ¹³⁷Cs 系数与土壤有效磷存在极显著的负相关($r=-0.851\ 9, P<0.01$)。

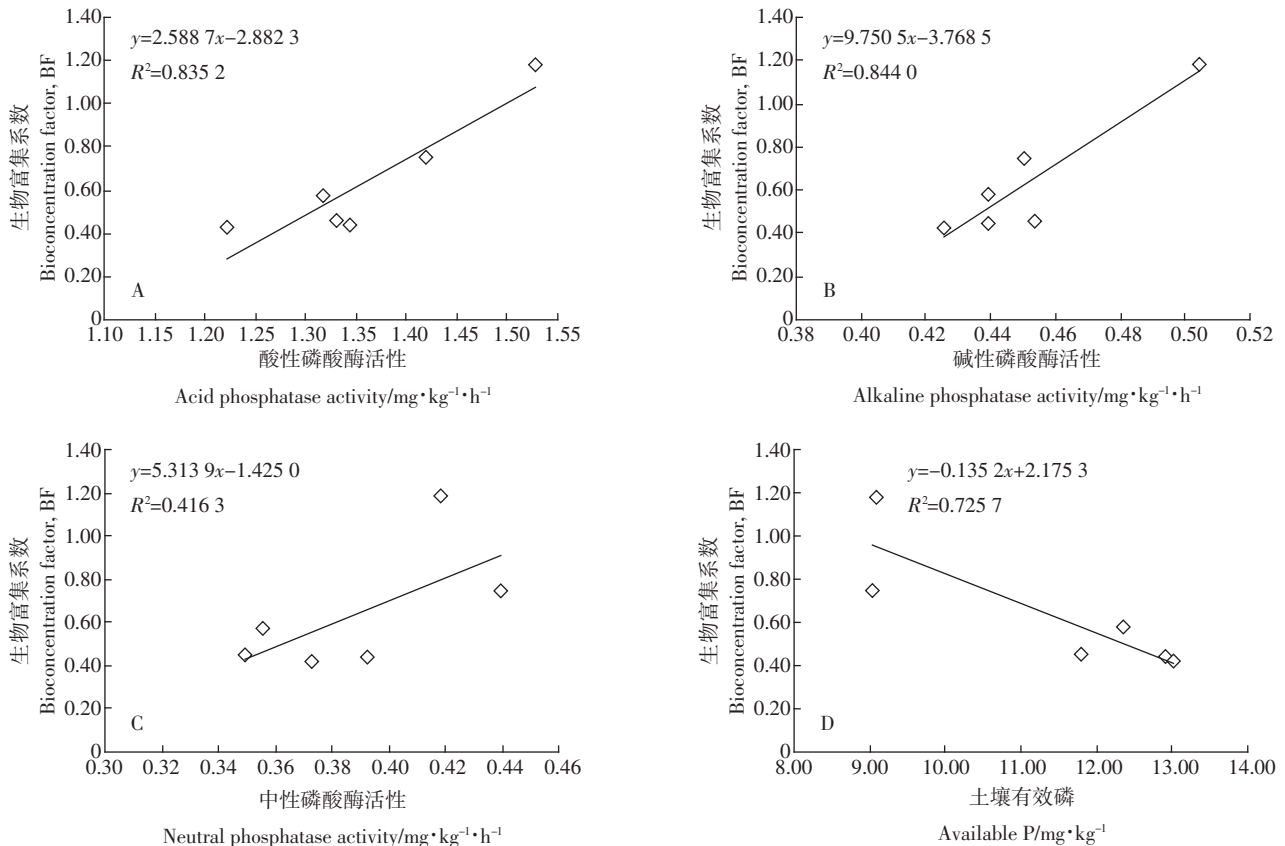


图3 宿根高粱富集核素 ^{137}Cs 系数与根际微域磷酸酶活性和有效磷的回归分析

Figure 3 The regression analysis of bioconcentration factor and phosphatase activities and available P in rhizosphere microdomain of *sorghum haipense* at soil contaminated with ^{137}Cs

3 讨论

近几年,国外有人利用植物吸收垃圾中低活度放射性核素,然后焚烧植物,集中处理含放射性核素的灰烬,已被证明是一个经济可行的修复放射性核素污染区域的方法^[20]。但是,生长在放射性核素污染土壤上的植物往往由于根系受到破坏而表现植株矮小、生物量小甚至死亡等缺点,不能满足植物修复的目的^[21]。本实验中未接种 AMF 的植物材料宿根高粱在株高、茎粗以及干物质重等方面均明显低于生长在正常土壤中的宿根高粱,接种 AMF 后,各生长指标与对照相比均有所增加,尤其以接种摩西球囊霉(G.m)效果最为明显(表 1),达到极显著水平($P < 0.01$),其结果与美国农业研究服务中心西北灌溉与土壤研究实验室的研究结果一致^[22]。另外,为了了解 AMF 侵染生长在 ^{137}Cs 污染土壤条件下的宿根高粱根系对营养元素的吸收情况,本实验测定了根茎中 N、P、K 含量,结果表明外接种 AMF 能显著提高根茎中 N 和 K 含量,说明接种 AMF 能促进宿根高粱对 N 和 K 的吸收,可能是

AMF 增加宿根高粱生物量的原因之一。但对 P 的影响依不同的 AMF 差别较大,其中 G.v 处理降低了宿根高粱根茎 P 含量,其原因可能与较低的土壤中性磷酸酶有关(表 3),有待进一步研究。

AMF 对宿主植物的侵染与根际土壤磷酸酶活性和有效磷含量有着密切的关系,有研究表明,当土壤有效磷低于 $34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,AMF 对宿主植物的侵染率与有效磷呈负相关^[23]。本研究采用的土壤有效磷含量为 $10.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,通过回归分析也证实了 AMF 侵染率与有效磷呈负相关($y = -0.3769x + 32.443, P < 0.01$),进一步说明土壤在缺磷的情况下,AMF 更能发挥作用。通过对宿根高粱根际微域磷酸酶活性分析可以看出,外接 5 种 AMF 处理能显著提高在核素 ^{137}Cs 污染条件下土壤酸性磷酸酶活性,并不同程度地增加了碱性磷酸酶活性。宋勇春等采用三室隔网研究三叶草根表区域土壤磷酸酶活性发现,接种 AMF 后的酶活性明显高于不接种处理,并认为结果的差异是由丛枝菌根真菌引起的^[24]。

当前,植物对放射性核素的吸收能力国内外学者

通常用土壤-植物放射性核素转移系数(Soil-to-plant transfer factor)来对其进行衡量。本文采取植物富集系数(Bioconcentration factor, BF)来反应宿根高粱对土壤核素的修复效果,结果显示,接种 G.m、G.e 和 G.d 均显著提高了宿根高粱对 ^{137}Cs 的富集能力,其富集系数分别是对照的 2.79、1.77 倍和 1.36 倍,说明外接 G.m、G.e 和 G.d 有利于土壤核素向植物地上部转移,其原因可能与外源 AMF 能改变植物根际磷酸酶活性和有效磷含量有关。回归分析显示,宿根高粱富集核素 ^{137}Cs 系数与 3 种磷酸酶活性呈显著或不显著正相关(图 3A-C),与土壤有效磷含量呈显著负相关,说明宿根高粱在富集土壤核素 ^{137}Cs 时可能与根域磷酸酶和有效磷含量有较大的关联。如何通过外接 AMF 合理改变植物根际微环境,刺激宿主植物富集土壤核素有待进一步深入研究。另一方面,朱永懿等的研究结果证明了施用钾盐可以降低 ^{137}Cs 由土壤向作物体内的转移和积累^[25],同时,由于 Cs 和 K 是化学类似物,具有相似的行为,核素 ^{137}Cs 从土壤中向植物体内转移又可能依赖于钾转运体^[26]。本试验中土壤有效钾含量为 $25.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,处于低水平状态,宿根高粱接种 AMF 后,根茎中钾含量显著高于对照,同时富集系数也有一定程度的增加,说明当土壤钾离子含量偏低时,AMF 能促进植物对钾元素及其相似性质的 ^{137}Cs 的吸收。

4 结论

农业土壤受到核素污染后往往会抑制作物的生长,具体表现为矮小、黄化甚至死亡,通过外接 AMF 增加了宿根高粱叶干重、茎干重、地下部干重、株高、茎粗等生长指标,说明外接 AMF 可以减缓放射性核素对植物的毒害,其原因可能是由于 AMF 与宿主植物形成共生体后,通过根外菌丝增加了植物对土壤营养元素和水分的吸收。因此,在核素污染较严重且植物生长困难的地区,利用 AMF 与植物形成共生体提高植物生长效率,进而提高植物富集核素的能力,是今后生物修复可行的方法。

外接 AMF 处理显著提高土壤酸性磷酸酶活性,并不同程度地增加了碱性磷酸酶活性,降低了根际土壤有效磷含量,说明 AMF 与宿主植物形成共生体后,通过自身的活动改变了根际土壤磷的形态与水平,而这种改变可能是促进宿主植物富集土壤核素的原因之一。因此,在核素污染严重地区,利用适宜的丛枝菌根真菌可以改变土壤磷酸酶活性,增加宿主植物对土

壤磷的利用。

参考文献:

- [1] 史薇,陆继根,王利华,等.田湾核电站周边土壤及植物中 ^{137}Cs 含量调查及人群内辐射风险评价[J].生态毒理学报,2008,3(5):451-456.
SHI Wei, LU Ji-gen, WANG Li-hua, et al. ^{137}Cs contents in soil and plants after Tianwan Nuclear Power Station (TNPS) operation and the inner radiation risk assessment[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2008, 3(5):451-456.
- [2] 唐秀欢,潘孝兵,万俊生,等.某放射性污染区盐生植物对 ^{137}Cs 的吸收研究[J].核农学报,2008,22(3):319-323.
TANG Xiu-huan, PAN Xiao-bing, WAN Jun-sheng, et al. Caesium-137 accumulation by halophytes at a radionuclide contaminated site[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2008, 22(3):319-323.
- [3] Elliott H A, Brown G A. Comparative evaluation of NTA and EDTA for extractive decontamination of Pb polluted soils[J]. *Water Air Soil Pollution*, 1989, 45:361-369.
- [4] 唐世荣.污染环境的植物修复的原理与方法[M].北京:科学出版社,2006.
TANG Shi-rong. The principle and methods of phytoremediation of contaminated environment[M]. Beijing:Scientific Press, 2006.
- [5] Valcke E, Elsen A, Cremers A. The use of zeolites as amendments in radiocaesium- and radiostrontium-contaminated soils: A soil-chemical approach. Part IV: A potted soil experiment to verify laboratory-based prediction[J]. *Zeolites*, 1997, 18:225-231.
- [6] Fuhrmann M, Lasat M M, Ebbs S D, et al. Uptake of cesium-137 and strontium-90 from contaminated soil by three plant species: Application to phytoremediation[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31, 904-909.
- [7] Rahman M M, Voigt G. Radiocaesium soil-to-plant transfer in tropical environments[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2004, 71: 127-138.
- [8] 郑洁敏,李红艳,牛天新,等.盆栽条件下三种植物对污染土壤中放射性铯的吸收试验[J].核农学报,2009,23(1):123-127.
ZHENG Jie-min, LI Hong-yan, NIU Tian-xin, et al. Uptake of radio-cesium by three plants grown in ^{134}Cs contaminated soil under pot experiment condition[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(1):123-127.
- [9] Berreck M, Haselwandter K. Effect of the arbuscular mycorrhizal symbiosis upon uptake of cesium and other cations by plants[J]. *Mycorrhiza*, 2001, 10:275-280.
- [10] 陈梅梅,陈保冬,王新军,等.不同磷水平土壤接种丛枝菌根真菌对植物生长和养分吸收的影响[J].生态学报,2009,29(4):1980-1986.
CHEN Mei-mei, CHEN Bao-dong, WANG Xin-jun, et al. Influences of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the growth and ecological stoichiometry of clover and ryegrass grown in monoculture or in mixture at different phosphorus (P) levels[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4):1980-1986.

- [11] Dupré de Boulois H, Delvaux B, Declercq S. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the root uptake and translocation of radiocaesium[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 134:515–524.
- [12] Chen B D, Zhu Y G, Smith F A. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on uranium and arsenic accumulation by Chinese brake fern (*Pteris vittata* L.) from a uranium mining-impacted soil [J]. *Chemosphere*, 2006, 62(9):1464–1473.
- [13] Declercq S, de Boulois H, Bivort C, et al. Extraradical mycelium of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus lamellosum* can take up, accumulate and translocate radiocaesium under root-organ culture conditions[J]. *Environmental Microbiology*, 2003, 5(6):510–516.
- [14] Rufyikiri G, Declercq S, Thiry Y. Comparison of ^{235}U and ^{33}P uptake and translocation by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* in root organ culture conditions[J]. *Mycorrhiza*, 2004, 14(3):203–207.
- [15] de Boulois H D, Leyval C, Joner E J, et al. Use of mycorrhizal fungi for the phytostabilisation of radio-contaminated environment (European project MYRRH): Overview on the scientific achievements[J]. *Radio-protection*, 2005, 40(Suppl 1):41–46.
- [16] de Boulois H D, Joner E J, Leyval C, et al. Role and influence of mycorrhizal fungi on radiocesium accumulation by plants[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, 99(5):785–800.
- [17] Giovannetti M, Mosse B. Evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots[J]. *New Phytologist*, 1980, 84:489–500.
- [18] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京:农业出版社, 1988.
YAN Chang-sheng. Research methods for soil fertility[M]. Beijing: Agriculture Press, 1988.
- [19] 赵兰坡, 姜岩. 土壤磷酸酶活性测定方法的探讨[J]. 土壤通报, 1986, 17(3):138–141.
ZHAO Lan-po, JIANG Yan. Discussion on measurements of soil phosphatase[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1986, 17(3):138–141.
- [20] Fawaris B H, Johanson K J. A comparative study on radiocaesium (^{137}Cs) uptake from coniferous forest soil[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 1995, 28(3):313–326.
- [21] Zhu Y G, Smolders E. Plant uptake of radiocaesium: A review of mechanisms regulation and application[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(351):1635–1645.
- [22] Entry J A, Watrud L S, Reeves M. Accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr from contaminated soil by three grass species inoculated with mycorrhizal fungi[J]. *Environmental Pollution*, 1999, 104:449–457.
- [23] Menge J A, Jarrell W M, Labanauskas C K, et al. Predicting mycorrhizal dependency of Troyer citrange on *Glomus fasciculatus* in California citrus soils and nursery mixes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 42:762–768.
- [24] 宋勇春, 冯固, 李晓林. 泡囊丛枝菌根对红三叶草根际土壤磷酸酶活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(2):171–175.
SONG Yong-chun, FENG Gu, LI Xiao-lin. Effect of *Vam Fungi* on phosphatase activity in the rhizosphere of clover[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2000, 6(2):171–175.
- [25] 朱永懿, 杨俊诚, 陈景坚, 等. 施用钾盐对降低 ^{137}Cs 从土壤-农作物转移率的效应[J]. 核农学报, 1999, 13(4):242–247.
ZHU Yong-yi, YANG Jun-cheng, CHEN Jing-jian, et al. Effect of potassium salts on the transfer of ^{137}Cs in soil-plant system[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 1999, 13(4):242–247.
- [26] Miguel A H, Rubén Z, Mari J, et al. Effect of calcium, sodium and pH on uptake and accumulation of radiocesium by *Riccia fluitans*[J]. *Aquatic Botany*, 2002, 74:245–256.