

两株细菌与丛枝菌根真菌联合接种对红壤中 DEHP 降解的影响*

秦 华^{1,2,3} 林先贵^{1,2†} 尹 睿^{1,2} 张华勇^{1,2} 王俊华^{1,2}

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 中国科学院南京土壤研究所-香港浸会大学土壤与环境联合开放实验室, 南京 210008)

(3 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 采用绿豆为供试植物, 通过温室盆栽试验研究接种邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)降解菌与丛枝菌根(Arbuscular mycorrhiza, AM)真菌对 DEHP 污染土壤的修复作用以及对植物生长的影响。试验土壤中添加 DEHP 浓度为 100 mg kg^{-1} , 试验设 AM 真菌 *Acaulospora* 90034、降解菌 *Bacillus* sp. DW1 和 *Gordona* sp. DH3 单独接种以及互相组合的联合接种处理, 同时设置不接种的对照处理(CK)。苗后 60 d 收获植株。结果表明, AM 真菌能很好地侵染绿豆的根系。菌根侵染提高了绿豆植株的干重, 同时也促进了绿豆的磷营养, 但接种 DW1 与 DH3 对菌根侵染率与绿豆生长都没有显著影响。三种菌剂无论是单独或者联合接种都能显著促进土壤中 DEHP 的降解, 但三种菌剂同时接种对 DEHP 的降解能起到最好的协同作用。同时, 接种 AM 真菌也减少了 DEHP 在绿豆地上部分的累积, 这些都为 DEHP 污染农田土壤的生物修复提供了理论依据。

关键词 绿豆; 丛枝菌根真菌; 细菌; 邻苯二甲酸二异辛酯; 联合接种

中图分类号 X172 **文献标识码** A

邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)是一种工业上使用最广泛的酞酸酯, 因其稳定性、流动性、低挥发性的特点以及高分子量而被用作聚氯乙烯(PVC)等生产中的增塑剂, 在终产品中含量可达到 40% 左右。另外还被作为一种重要的添加剂广泛应用于化妆品、墨水以及驱虫剂等的制造中。已有研究表明^[1], DEHP 可以致癌并具有较强的生殖毒性, 尤其会导致雄性哺乳动物的睾丸受损, 另外还具有致畸性和胚胎毒性。由于 DEHP 的大量生产和广泛应用, 对环境的污染呈现出逐渐上升的趋势, 已经引起了世界各国的广泛关注。

DEHP 很难被水解而且几乎不被光解, 目前认为微生物的降解是其在环境中消失的主要途径^[2]。过去的几十年里已经进行了大量的对 DEHP 生物降解的相关研究^[3~5], 结果表明, 许多种类的微生物都能降解 DEHP 并生成中间产物, 甚至有些种类的微生物能够完全矿化 DEHP。但是研究结果也表明, 环境中 DEHP 的降解主要是依靠多种微生物的联合作用。

丛枝菌根(Arbuscular Mycorrhiza, AM)是植物与

丛枝菌根真菌形成的共生体, 其最显著的作用是可以改善植物的矿质营养^[6], 提高植物的抗病性, 并且可以增强植物对外界胁迫的抗性^[7]。AM 真菌广泛分布于各种污染土壤中, 并且可与绝大多数的植物共生, 王曙光等^[8]报道, 丛枝菌根真菌能够帮助植物在 DEHP 污染的土壤存活并促进植株生长, 同时也显著促进了土壤中 DEHP 的降解。

目前, 由于农膜的大面积使用, 其中的 DEHP 会从残膜中逐渐迁移进土壤, 从而对农田土壤造成污染^[9]; 同时 DEHP 能被植物吸收并进入食物链, 严重危害人类的健康。因此, 本试验的目的是研究 AM 真菌及 DEHP 降解菌联合接种对绿豆生长以及土壤中 DEHP 降解的影响, 为 DEHP 污染农田土壤的生物修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试土壤为红壤, 采自江西省鹰潭市中国科学院

* 国家自然科学基金青年基金项目(40101015)资助

† 通讯作者, E-mail: xglin@issas.ac.cn

作者简介: 秦 华(1981~), 男, 助教, 主要从事环境微生物研究

收稿日期: 2006-09-19; 收到修改稿日期: 2006-12-20

红壤实验站某蔬菜地的表层土(0~20 cm)。基本理化性质为:pH 4.4,有机碳 7.5 g kg^{-1} ,全氮 0.8 g kg^{-1} ,全磷 (P_2O_5) 0.53 g kg^{-1} ,有效磷 17.55 mg kg^{-1} ,全钾 (K_2O) 18.83 g kg^{-1} ,速效钾 198 mg kg^{-1} 。土壤过 2 mm 筛,风干后备用。

供试植物为绿豆(*Vigna radiata* L.)。挑选饱满的绿豆种子,浸泡于 5% 的 NaClO 溶液中 3 min,灭菌蒸馏水冲洗 5 次,再浸泡 20 min,取出干燥备用。

供试 AM 真菌为光壁无梗囊霉(*Acaulospora laevis*),菌号 90034,宿主植物为苏丹草(*Sorghum sudanese* (Piper) Stapf.),基质为河沙。去除苏丹草地上部分,将根剪碎,以含有真菌孢子、菌丝、侵染根段等繁殖体和根际土壤的菌剂为接种物。对照菌剂(CK)不含 AM 真菌,其他均同于 AM 真菌菌剂。

两株 DEHP 高效降解菌为中国科学院南京土壤研究所生物与生化研究室从南京某化工厂污水处理车间的活性污泥中分离获得,分别命名为 DW1 和 DH3。摇瓶试验表明,在以 2000 mg L^{-1} DEHP 为唯一碳源的无机盐培养基中,3 d DEHP 降解率达 95% 以上。经过 16S rDNA 序列分析及生理生化试验,初步鉴定其分别为 *Bacillus* sp. (DW1) 和 *Gordona* sp. (DH3)。接种菌株 DW1 和 DH3 于 100 ml 富集培养基中(3 g L^{-1} 牛肉膏、 5 g L^{-1} 蛋白胨、 5 g L^{-1} NaCl、pH 7.0,121 湿热灭菌 30 min),30 振荡培养 48 h,离心(10000 r min^{-1} ,5 min)收集菌体, 0.1 mol L^{-1} 的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 洗涤菌体 3 次,最后用 0.1 mol L^{-1} 的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 将菌体悬浮,测定细菌悬液的光密度($\lambda = 600 \text{ nm}$)并调整至密度约为 10^{12} 个 ml^{-1} 。

1.2 试验设置

土壤中添加 DEHP 的浓度为 100 mg kg^{-1} ,将 DEHP 溶于石油醚施入风干土壤,过筛使其分布均匀,放置一周以使石油醚挥发完全。试验按接种不同分为 8 个处理:1) AM 真菌 90034;2) DW1;3) DH3;4) AM + DW1;5) AM + DH3;6) DW1 + DH3;7) AM + DW1 + DH3 和 8) 不接种的对照(CK),每个处理 3 个重复。试验采用 6 L 瓷盆,每盆装土 4 kg,AM 真菌以 5% 的量施入,细菌以 2% 的菌悬液浇入,不接种细菌的处理施以等量的 0.1 mol L^{-1} 的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 溶液,与土壤混匀。每盆播种绿豆种子 15 粒,出苗后留苗 5 棵,浇自来水,维持土壤含水量 20% 左右。所有盆钵随机排列于日光温室中,苗后 60 d 收获。

1.3 取样与分析

60 d 时植株豆荚、茎叶和根系分开收获,自来水

冲洗后去离子水清洗。地上部分 70℃ 烘干 48 h 称取干重。鲜根取样,曲利苯蓝-方格交叉法测定菌根侵染率^[10]。剩余根同样方法烘干,称取干重。植株地上部分和根系粉碎,过 100 目筛。土壤样品风干、磨碎,过 100 目筛。土壤及植株样品中 DEHP 含量的测定见文献[11],磷含量的测定采用钼锑抗比色法^[12]。

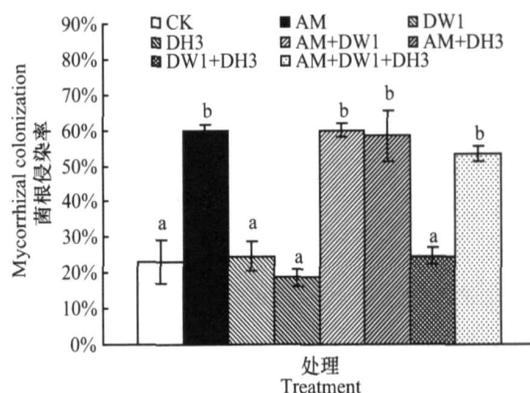
1.4 数据统计

用 SPSS10.0 软件处理试验数据,Duncan 单因素方差分析比较各处理之间的差异显著性($p < 0.05$)。

2 结果

2.1 接种菌剂对绿豆菌根侵染率的影响

在不接种任何菌剂的情况下,绿豆的根系只有较低的菌根侵染率。接种两株细菌 DW1 与 DH3 对绿豆的菌根侵染率没有产生影响。所有接种了 AM 真菌 34 号菌剂的处理,其菌根侵染率均显著增加($p < 0.05$)。与单独接种 AM 真菌的处理相比,同时接种细菌与 AM 真菌的处理,其菌根侵染率并没有显著差异(图 1)。



注:图中竖棒表示标准误差,不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平差异显著 Note: Bars show SE; Different letters show significant differences at $p < 0.05$ level

图 1 不同接种处理对绿豆菌根侵染率的影响

Fig. 1 Mycorrhizal colonization of mung bean roots in different inoculation treatments

2.2 接种菌剂对绿豆生长的影响

图 2a 为绿豆地上部分的干重。所有接种 AM 真菌的处理,其绿豆地上部分的干重都显著高于对照($p < 0.05$)。DW1、DH3 以及 DW1 + DH3 三种处理也能促进绿豆地上部分的干重,但差异并不显著。在不同的接种处理之间,AM 和 AM + DW1 + DH3 这两种处理效应最好,绿豆地上部分干重

最大。对于植株根系干重来说, DW1、DH3 和 DW1 + DH3 三种处理对绿豆根系干重没有影响, 所有接种 AM 真菌的处理地下部分干重都有所增加, 但是与对照以及其他处理相比差异不显著 (图 2 b)。

所有的接种处理均不同程度地增加了豆荚部分的干重 (图 2 c)。与对照相比, 处理 DW1、DH3 以及

DW1 + DH3 其绿豆豆荚部分的干重显著增加 ($p < 0.05$), 而接种 AM 真菌的处理 AM、AM + DW1、AM + DH3 和 AM + DW1 + DH3 其豆荚干重与对照相比达到了极显著差异 ($p < 0.01$), 同时也显著高于处理 DW1、DH3 以及 DW1 + DH3 ($p < 0.05$)。总体而言, 两株降解菌与 AM 真菌联合接种促进了绿豆的生长, 尤其是对于绿豆豆荚的生长具有明显的促进作用, 而单独接种细菌 DW1 和 DH3 对绿豆生长影响不显著 (图 2 a、b 和 c)。

2.3 接种菌剂对绿豆磷营养的影响

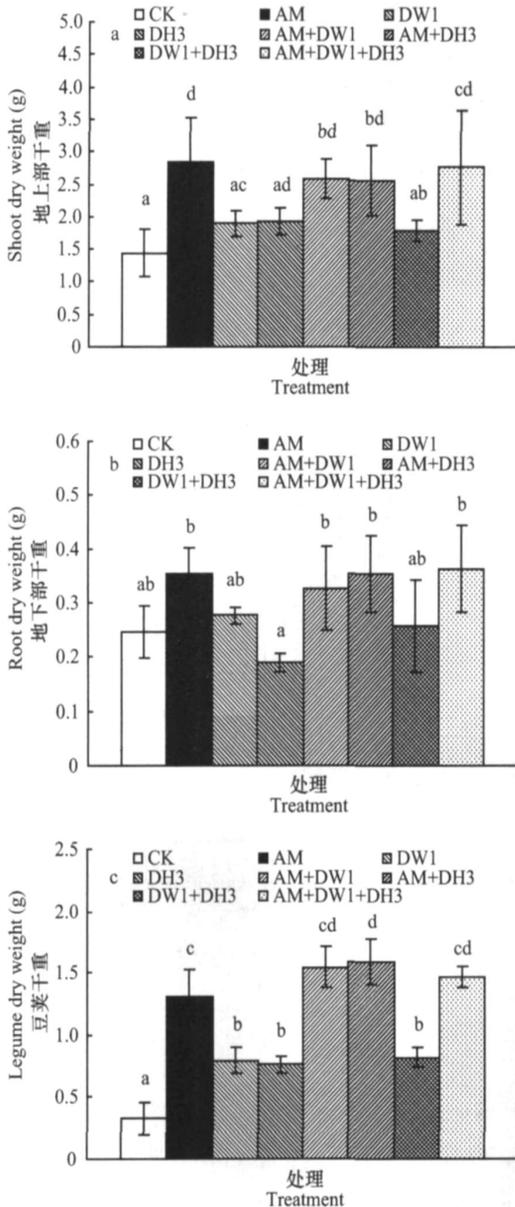
施加 DEHP 的土壤中, 接种 AM 真菌改善了绿豆的磷营养 (图 3)。接种 AM 真菌后, 绿豆的地上部分, 包括豆荚和茎叶中的磷含量与其他处理相比显著增加 ($p < 0.05$), 而接种细菌的处理 DW1、DH3 以及 DW1 + DH3 其绿豆地上部分的磷含量与对照相比并没有差异。从绿豆根系的磷含量结果可以看出, 与对照相比, 接种细菌对绿豆根系的磷含量没有影响。除了处理 AM + DW1, 其余所有接种 AM 真菌的处理其绿豆根系的磷含量与对照相比也没有显著差异。

2.4 接种菌剂对植株中 DEHP 残留量的影响

与对照及只接种细菌的处理相比, 所有接种 AM 真菌的处理, 其地上部分 DEHP 含量都显著降低 ($p < 0.05$)。同时, 从绿豆根系的 DEHP 含量可以看出, 所有接种了 AM 真菌的处理, 其绿豆根系的 DEHP 浓度显著增加 (图 4)。图中可以看出, 绿豆将 DEHP 向地上部分转运后, DEHP 在茎叶和豆荚中的分配比例不同。无论是对照还是接种菌剂的处理, DEHP 转移到绿豆地上部分后, 主要分配在豆荚中。

2.5 接种菌剂对土壤中 DEHP 降解的影响

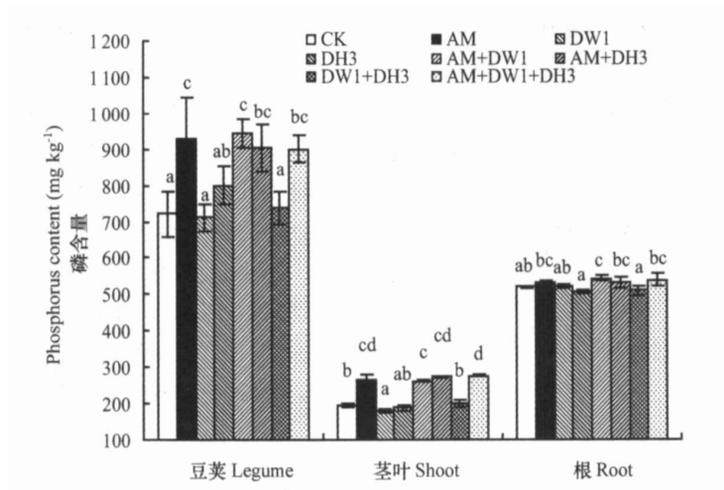
所有的接种处理, 无论是单独接种或是联合接种, 与对照相比, 均显著降低了土壤中的 DEHP 含量 ($p < 0.05$)。其中, AM 处理的土壤中 DEHP 降解率显著高于单独接种细菌的 DW1、DH3 处理, 但与两株细菌联合接种的 DW1 + DH3 处理之间没有明显差异 (图 5)。所有 AM 真菌与细菌联合接种的处理 AM + DW1、AM + DH3 以及 AM + DW1 + DH3, 其土壤中 DEHP 含量都显著低于对照以及其他处理。单因素方差分析结果显示, AM 真菌与细菌联合接种的处理 AM + DW1、AM + DH3 以及 AM + DW1 + DH3 与对照相比, 极显著地促进了土壤中 DEHP 的降解 ($p < 0.01$), 与单独接种 AM 真菌和细菌的处理相比也有显著的差异 ($p < 0.05$)。



注: 图中竖棒表示标准误差, 不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平差异显著 Note: Bars show SE; Different letters show significant differences at $p < 0.05$ level

图 2 不同接种处理对绿豆的地上部干重 (a), 地下部干重 (b) 和豆荚干重 (c) 的影响

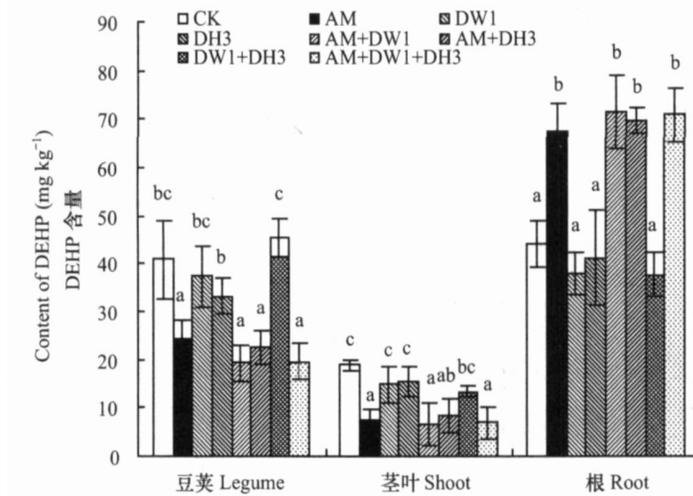
Fig. 2 Dry weight of shoots (a), roots (b) and legumes (c) of mung bean in different inoculation treatments



注:图中竖棒表示标准误差,不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平差异显著 Note: Bars show SE; Different letters show significant differences at $p < 0.05$ level

图3 不同接种处理下绿豆不同部位的磷浓度

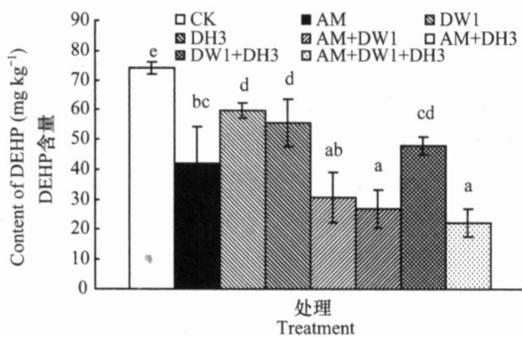
Fig. 3 Phosphorus contents in legume, shoot and root of mung bean in different inoculation treatments



注:图中竖棒表示标准误差,不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平差异显著 Note: Bars show SE; Different letters show significant differences at $p < 0.05$ level

图4 不同接种处理下绿豆不同部位的 DEHP 含量

Fig. 4 DEHP contents in legume, shoot and root of mung bean in different inoculation treatments



注:图中竖棒表示标准误差,不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平差异显著 Note: Bars show SE; Different letters show significant differences at $p < 0.05$ level

图5 不同接种处理对土壤中 DEHP 降解的影响

Fig. 5 Residual DEHP concentration in soils in different inoculation treatments

3 讨论

AM真菌与植物共生能够显著促进植物的生长,其作用主要是通过促进植物的矿质营养^[13,14]以及提高植物对生物^[15,16]及非生物^[7]胁迫的抗性。目前,有关丛枝菌根在有机物污染土壤中相关作用的研究结果表明,丛枝菌根在有机物污染的土壤中也能发挥很好的作用^[17]。

本试验结果表明,在营养条件相对贫乏的污染红壤中,AM真菌能够很好地侵染绿豆的根系,并显著促进了绿豆的生长,特别是绿豆的茎叶以及豆荚部分,对根系生长也有一定的促进作用。说明本试

验所采用的 90034 菌剂在贫营养条件下也能很好地侵染植株根系,对植株的生长有明显的促进作用。Liu 等^[18]认为,AM 真菌促进植物生长可能与菌根侵染改善了植物的磷营养有关。本试验表明,无论是单独接种 AM 真菌还是 AM 真菌与两株细菌联合接种,都显著促进了绿豆的磷营养,而接种细菌对绿豆磷营养没有影响。Camalero 等^[19]发现,当两株荧光假单胞菌与 AM 真菌同时接种时,与单独接种相比,能够显著地促进番茄根部生长以及植株的磷素营养。本试验中,同时接种细菌与 AM 真菌的处理,其菌根侵染率以及绿豆磷含量与单独接种 AM 真菌的处理相比并没有显著差异,表明这两株细菌对 AM 真菌 90034 没有影响。目前,对 AM 真菌与根际微生物联合作用于植物生长的研究结果不一,有研究认为它们能够促进植物的生长^[20,21],但也有证据表明它们对植物生长并没有显著的影响^[22,23]。目前只有很少的结果证明两者之间具有协同作用^[19,24]。本试验的绿豆生物量结果表明,除了豆荚外,接种两株细菌对绿豆生物量没有显著影响,也说明这两株细菌没有直接促进绿豆生长的作用。但是,由于其对土壤中 DEHP 的降解作用,可能在一定程度上减轻了 DEHP 对绿豆的毒害作用,因此接种这两株细菌可能对绿豆的生长会起到间接的促进作用。

关于丛枝菌根真菌应用于重金属污染土壤的生物修复研究已经有 20 a 以上的时间,并且有大量的研究报道^[25],但只有近几年才开始有丛枝菌根真菌应用于有机污染土壤的生物修复的报道。有报道表明^[26],丛枝菌根真菌与细菌在共生条件下能够提高土壤中有机的降解率。本试验结果表明,菌株 DW1、DH3 以及 AM 真菌 90034,无论是单独还是联合接种,都显著促进了土壤中 DEHP 的降解。但在单独接种的处理中,处理 AM 的 DEHP 降解率要高于处理 DW1 和 DH3。推测由于红壤的矿质营养含量较低,不利于外源细菌的存活,因此接种细菌可能效果并不是很理想,同样的结果从两株细菌联合接种的处理 DW1 + DH3 也可以看出。另外,据陈瑞蕊等^[27]的报道,推测认为接种 AM 真菌可以通过刺激植物分泌更多的根系分泌物,促进土壤中土著微生物的活性,从而提高了 DEHP 的降解率。比较处理 AM 和 AM + DW1、AM + DH3 可以发现,当 AM 真菌与细菌联合接种时,AM 真菌的侵染在促进土壤土著微生物活性的同时,也促进了接种的降解菌在土壤中的存活,从而提高了土壤 DEHP 的降解率。其中,处理 AM + DH3 与 AM 达到了显著差异,可见菌

株 DH3 与 AM 真菌的共同接种效果更好。所有处理中,AM 真菌 90034 与细菌 DW1、DH3 同时接种的处理 AM + DW1 + DH3 其土壤中 DEHP 的降解率最高,与处理 AM + DW1、AM + DH3 相比可以看出,菌根侵染能够为这两株 DEHP 降解菌提供生存的良好环境,促使其很好地发挥降解作用。

通过菌根化植物-细菌修复系统可以很好地实行有机污染土壤的生物修复,但是植物能将有机污染物富集到根部或者地上部分,在有机污染的农田土壤中,可能会对食物的安全性造成影响。Yin 等^[11]报道,在 DEHP 污染土壤中,随着 DEHP 浓度的增加,辣椒中的 DEHP 含量也显著上升,而维生素 C 和辣椒素则显著降低,显示 DEHP 的污染影响了农作物的质量。本试验结果可以看出,在绿豆地上部分的 DEHP 含量,对照以及没有接种 AM 真菌的处理 DW1、DH3 和 DW1 + DH3 显著高于处理 AM、AM + DW1、AM + DH3 和 AM + DW1 + DH3,证明接种菌根抑制了绿豆将 DEHP 向地上部分转运,而在根系中这种情况正好相反。AM 真菌的侵染大大提高了植物根系对矿质营养的吸收能力,但是由于 DEHP 分子量较大,不容易被真菌菌丝吸收。另外,由于 AM 真菌促进了植物根系的扩展,发达的菌丝也扩大了吸收的范围,从而将土壤中的 DEHP 大量吸附在根系以及菌丝体表面而不转运进入植物体内,因此也导致了接种菌根真菌的处理其根系 DEHP 含量增加而地上部分 DEHP 含量较不接种菌根真菌的处理低,但是这些都有待于进一步的验证。绿豆地上部分中,豆荚中的含量较茎叶高,推测由于 DEHP 具有脂溶性,因此其更多地进入了油脂含量较高的豆荚。从所有的处理来看,在有机污染土壤的条件下,接种 AM 真菌对于食品安全性具有非常重要的意义。

4 结 论

- 1) 接种 AM 真菌显著促进了绿豆的生长,两株降解菌由于对 DEHP 的降解也间接促进了绿豆的生长。
- 2) 接种 AM 真菌减少了 DEHP 向绿豆地上部分的转运,将 DEHP 富集在植株根系。
- 3) 在红壤中,无论是单独接种三种菌剂或者是联合接种,与对照相比都能很好地促进土壤中 DEHP 的降解,但两种降解菌与菌根真菌同时接种时效果最佳,DEHP 在土壤中的降解率最高。

参考文献

- [1] Schmitzer J L, Scheunert I, Körte F. Fate of bis-(2-ethylhexyl) [¹⁴C] phthalate in laboratory and outdoor soil-plant systems. *J. Agric. Food Chem.*, 1988, 36 : 210 ~ 215
- [2] Charles A S, Dennis R P, Thomas F P, *et al.* The environmental fate of phthalate esters: A literature review. *Chemosphere*, 1997, 35 (4) : 667 ~ 749
- [3] Zeng F, Cui K, Fu J M, *et al.* Biodegradability of di-(2-ethylhexyl) phthalate by *Pseudomonas fluorescens* FS1. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 140 : 297 ~ 305
- [4] Scholz N, Diefenbach R, Rademacher I, *et al.* Biodegradation of DEHP, DBP, and DINP: Poorly water soluble and widely used phthalate plasticizers. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 1997, 58 : 527 ~ 534
- [5] Chang B V, Yang C M, Cheng C H, *et al.* Biodegradation of phthalate esters by two bacteria strains. *Chemosphere*, 2004, 55 : 533 ~ 538
- [6] Smith S E, Read D J. *Mycorrhizal Symbiosis*. London : Academic Press, 1997. 9 ~ 33
- [7] Ganinazzi S, Schuepp H. *Mycorrhizal Technology: From Genes to Bioproducts achievement and Hurdles in Arbuscular Mycorrhizal Research*. Basel : Birkhauser Verlag Publisher, 2002. 137 ~ 198
- [8] 王曙光, 林先贵, 尹睿. VA 菌根对土壤中 DEHP 降解的影响. *环境科学学报*, 2002, 22 (3) : 369 ~ 373. Wang S G, Lin X G, Yin R. Effect of VA mycorrhiza on degradation of DEHP in soil (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22 (3) : 369 ~ 373
- [9] 秦华, 林先贵, 陈瑞蕊, 等. DEHP 对土壤脱氢酶活性及微生物功能多样性的影响. *土壤学报*, 2005, 42 (5) : 829 ~ 834. Qin H, Lin X G, Chen R R, *et al.* Effects of DEHP on dehydrogenase activity and microbial functional diversity in soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (5) : 829 ~ 834
- [10] Giovannetti M, Mosse B. An evaluation of techniques for measuring vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytol.*, 1980, 84 : 489 ~ 500
- [11] Yin R, Lin X G, Wang S G, *et al.* Effect of DBP/DEHP in vegetable planted soil on the quality of capsicum fruit. *Chemosphere*, 2003, 50 : 801 ~ 805
- [12] 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, 314. Lu R K. *Analytical Methods of Soil and Agror-Chemistry* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000, 314
- [13] Ravnskov S, Jakobsen I. Functional compatibility in arbuscular mycorrhizas measured as hyphal P transport to the plant. *New Phytol.*, 1995, 129 : 611 ~ 618
- [14] Clark R B, Zeto S K. Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants. *J. Plant Nutr.*, 2000, 23 : 867 ~ 902
- [15] Cordier C, Ganinazzi S, Ganinazzi-Pearson V. Colonisation patterns of root tissues by *Phytophthora nicotianae* var. *parasitica* related to reduced disease in mycorrhizal tomato. *Plant Soil*, 1996, 185 : 223 ~ 232
- [16] Trotta A, Varese G C, Gnani E, *et al.* Interaction between the soil-borne pathogen *Phytophthora parasitica* var. *parasitica* and the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* in tomato plants. *Plant Soil*, 1996, 185 : 199 ~ 209
- [17] Heinonsalo J, Jorgensen K S, Hahtela K, *et al.* Effects of *Pinus sylvestris* root growth and mycorrhizosphere development on bacterial carbon source utilization and hydrocarbon oxidation in forest and petroleum-contaminated soils. *Can. J. Microbiol.*, 2000, 46 : 451 ~ 464
- [18] Liu Y, Zhu Y G, Chen B D, *et al.* Influence of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* on uptake of arsenate by the As hyperaccumulator fern *Pteris vittata* L.. *Mycorrhiza*, 2005, 15 : 187 ~ 192
- [19] Gamalero E, Trotta A, Massa N, *et al.* Impact of two fluorescent pseudomonads and an arbuscular mycorrhizal fungus on tomato plant growth, root architecture and P acquisition. *Mycorrhiza*, 2004, 14 : 185 ~ 192
- [20] Edwards S G, Young J P W, Fitter A H. Interactions between *Pseudomonas fluorescens* biocontrol agents and *Glomus mosseae*, an arbuscular mycorrhizal fungus, within the rhizosphere. *FEMS Microbiol Lett.*, 1998, 166 : 297 ~ 303
- [21] Galleguillos C, Aguirre C, Barea J M, *et al.* Growth promoting effect of two *Sinorhizobium meliloti* strains (a wild type and its genetically modified derivative) on a non-legume plant species in specific interaction with two arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Sci.*, 2000, 159 : 57 ~ 63
- [22] Andrade G, Mihara K L, Linderman R G, *et al.* Bacteria from rhizosphere and hyphosphere soils of different arbuscular-mycorrhizal fungi. *Plant Soil*, 1997, 192 : 71 ~ 79
- [23] Walley F L, Germida J J. Response of spring wheat (*Triticum aestivum*) to interactions between *Pseudomonas* species and *Glomus clarum* NT4. *Biol. Fertil. Soils*, 1997, 24 : 365 ~ 371
- [24] Ravnskov S, Jakobsen I. Effects of *Pseudomonas fluorescens* DF57 on growth and P uptake of two arbuscular mycorrhizal fungi in symbiosis with cucumber. *Mycorrhiza*, 1999, 8 : 329 ~ 334
- [25] Leyval C, Turnau K, Haselwandter K. Effect of heavy metal pollution on mycorrhizal colonization and function: Physiological, ecological and applied aspects. *Mycorrhiza*, 1997, 7 : 139 ~ 153
- [26] Sarand I, Timonen S, Koivula T, *et al.* Tolerance and biodegradation of m-toluate by Scots pine, a mycorrhizal fungus and fluorescent pseudomonads individually and under associative conditions. *J. Appl. Microbiol.*, 1999, 86 : 817 ~ 826
- [27] Chen R R, Yin R, Lin X G, *et al.* Effect of arbuscular mycorrhizal inoculation on plant growth and phthalic ester degradation in two contaminated soils. *Pedosphere*, 2005, 15 (2) : 263 ~ 269

EFFECT OF COMBINED INCUBATION OF TWO BACTERIA STRAINS AND AN ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI ON DEHP DEGRADATION AND GROWTH OF MUNG BEAN IN RED SOIL

Qin Hua^{1,2,3} Lin Xiangui^{1,2†} Yin Rui^{1,2} Zhang Huayong^{1,2} Wang Junhua^{1,2}

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Joint Open Laboratory of Soil and the Environment, Institute of Soil Science and Hongkong Baptist University, Nanjing 210008, China)

(3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract A pot culture experiment was carried out to study effect of combined incubation of DEHP degrading bacteria and arbuscular mycorrhizal (AM) fungi on bioremediation of DEHP polluted soil and growth of mung bean. Two bacterial strains, i. e. *Bacillus* sp. DW1 and *Gordona* sp. DH3, and one strain of AM fungi, *Acaulospora laevis* 90034, were inoculated, alone or in combination, to the soil amended with 100 mg kg⁻¹ DEHP. A treatment of uninoculated soil was set as control (CK). The plants were harvested 60 days after seedling emergence. Results of the experiment show that AM fungi colonized well in the roots of mung bean. Dry mass of the plant was increased and P nutrition improved by AMF inocula. But inoculation of just DW1 and DH3 did not show any significant effect on mycorrhizal colonization and plant growth. However, the three strains of inoculants, whether inoculated alone or in combination, could obviously promote degradation of DEHP in the soil, but the best synergistic effect on DEHP degradation was found when strains DW1, DH3 and AM fungi were inoculated in combination. Besides, the inoculation of AMF decreased DEHP accumulation in the shoots of mung bean. The findings in the experiment may serve as scientific basis for bioremediation of DEHP-contaminated soils.

Key words Mung bean; Arbuscular mycorrhizal fungi; Bacteria; Di-(2-ethylhexyl) phthalate; Mixed inoculum

Soil Biology & Biochemistry 中国专刊征稿启事

Soil Biology & Biochemistry 是土壤学科和农学的国际权威杂志。为了反映中国土壤生态学科的发展和加强中国土壤生态学工作者与国际间的学术交流, Soil Biology & Biochemistry 正在组织一个中国专刊, 计划于 2009 年初发表, 以展现近年来中国土壤生物学和土壤生物化学的研究进展, 反映本领域中国的整体研究状况, 特别是青年科技工作者的研究成果。欢迎大家踊跃投稿。

稿件要求:

- 1) 主题: 必须以土壤和土壤生物(包括根系)为研究对象或与土壤生物直接相关的生物化学过程。
- 2) 稿件形式: 以原始创新的研究论文为主, 也可以是某一领域的综述。优先考虑基于野外实验平台的长期研究结果或通过野外重复控制实验所得的研究结果。
- 3) 格式: 严格按照 Soil Biology & Biochemistry 期刊论文的格式撰写。
- 4) 稿件截止日期: 2008 年 4 月 30 日。
- 5) 稿件投寄方式: 按正常形式将稿件投给 Soil Biology & Biochemistry 刊物, 但请注明为中国专刊 (China's special issue) 稿件; 同时以 E-mail 形式发送给: 傅声雷 (sfu@scbg.ac.cn) 和邹晓明 (xzou2000@yahoo.com)。