植物营养与肥料学报2008,14(6):1178-1185

Plant Nutrition and Fertilizer Science

丛枝菌根对茁污染土壤修复及植物吸收的影响

程兆霞1,凌婉婷V,高彦征“，王经洁1

(1南京农业大学资源与环境科学学院，南京210095;

2污染环境修复与生态健康教育部重点实验室，浙江大学环境与资源学院，杭州310029)

MK:采用温室盆栽试验方法，研究了两种丛枝菌根真菌*Glomus mosseae*和*Glomus etunicatum*对三叶草(*Trifolium subterraneum* L.)和辣椒(*Capsicum annuum* L.)修复花污染土壤的影响。供试土样中及初始浓度为0 ~75.18 mg/kgo 结果表明，接种AMF可促进供试植物对土壤中花的吸收，并且显著提高三叶草根的茁含量、根系富集系数、根和茎 叶的茁积累量，但对辣椒根和茎叶茁含量、根系富集系数的影响不显着,这主要与植物的菌根侵染率和“菌根依赖 度”不同有关。接种AMF 土壤中龙的削减率高于普通植物修复，但植物吸收积累对修复的贡献率小于0.2%;因此 推测，AM作用下良好的根际环境有利于土壤微生物数量和活性的提高，进而对土壤中茁降解的促进可能是菌根 修复的主要机理。

关・询：丛枝菌根；多环芳婭；植物吸收；土壤；菌根修复 中B■分类号：S154.3 文1«标识码：A 文章细号：1008-505X(2008)06・1178-08

Impacts of arbuscular mycorrhizae on plant uptake and  
phytoremediation of pyrene in soils

CHENG Zhao-xia1, UNG Wan-ting1[[1]](#footnote-2) [[2]](#footnote-3)2, GAO Yan-zheng1 \* , WANG Jing-jie1

*(1 College of Resource and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanking 210095, China ;*

*2 Ministry of Education Key Laboratory cf Environmental Remediation and Ecological Health/CoUege of Naturcd Resources  
and Environmental Science , Zhejiang Umversity, Hangzhou. 310029, China).*

Abstract: Uptake of pyrene from soils by clover ( *Trifolium subterraneum* L.) and capsicum (*Capsicum annuum* L.) in the presence of arbuscular mycorrhizae (AM) fungi was investigated using a greenhouse study. The impacts of AM on phytoremediation of soil pyrene contaminant were also elucidated. Two arbuscular myconhizal fungi (AMF) including *Glomus mosseae* and *Glomus etunicatum* were experimented. The initial concentrations of pyrene in soils were 0-75.18 mg/kg. In 60 days, inoculation of AMF significantly enhanced the uptake of pyrene by clover from soils basing on the root concentrations, root concentration factors, and accumulated amounts of pyrene in root and shoot. However, no sig­nificant influence was observed for the inoculation of AMF on the uptake of pyrene by capsicum. This would be the results from the weaker myconhizal infection rate and myconhizal dependence (MD) for capsicum. Compared with phytoremedi­ation ,arbuscular mycorrhizal remediation (AMR) was more efficiency on soil pyrene contaminant reduction. In 60 days, 67.80% -92.40% of pyrene was degraded for AMR process. However, the accumulated amounts of pyrene by tested plants contributed less than 0.2% to the total degradation of pyrene in soils. In contrast, the enhanced microbial activi­ties and consequently the increase of microbial degradation of pyrene in soils in the presence of AM should be the predom・ inant mechanisms of AM bioremediation for soil pyrene contamination.

Key words: arbuscular mycorrhizae (AM); polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); plant uptake; soil; mycorrhizal remediation

当前，土壤有机污染问题比较普遍。其中的多 环芳绘(PAHs)等有机污染物大多具有“三致”效应, 易在土壤中持留，严重威胁着农产品的安全和人类 健康。据知，在我国污灌土壤中以苯并［a］戈为代表 的PAHs含量可高达2444〜7000 ng/kg［1］0如何修 复PAHs等有机污染土壤已成为国内外环境科学领 域研究的一个热点［I】。

近年来，植物修复有机污染土壤很受重视，已取 得一些共识性研究结果4刃。与无植物对照相比，植 物修复效率高，主要是植物促进了土壤微生物等对 污染物的降解作用；根际土体的比例以及根际微生 物的数量和活性将决定植物修复的效率&⑴。近些 年来,研究者为解决植物修复中存在的一些问题，将 菌根应用到修复之中。菌根修复技术能针对性地克 服植物修复土壤有机污染的不足，它综合利用土壤 中的微生物、植物和菌根真菌及其相互作用的根际 和菌(丝)际环境，来有效降解土壤中的有机污染 物⑸。一方面，菌根通过外延菌丝大大提高了与土 体的接触。据报道，外延菌丝与土体的接触面积可 超过300 it?® ,松树幼苗接种菌根真菌后，菌丝的长 度甚至超过根长的8000倍。另一方面，菌根和菌丝 周围特殊的土体条件为微生物生长和繁殖提供了良 好环境。据知，树木每克外生菌根(鲜重)能分别支 持106和102的好氧细菌和酵母，菌根根际微生物 的数量要比周围土体高1000倍⑸。菌根条件下，扩 大的与土体的接触面积和数量众多的微生物，为菌 根修复土壤有机污染提供了良好基础。作为土壤修 复中一个新的生长点，菌根修复有望成为面源有机 污染土壤治理的一种最有前途的修复途径。近几年 来，该研究领域开始受到关注，但从国内外已有的资 料来看，菌根修复的研究多集中于外生菌根及重金 属类污染物［⑵。

相对于外生菌根,利用丛枝菌根(AM)来修复土 壤有机污染的研究还很少。丛枝菌根真菌(AMF)能 与绝大多数植物共生，在自然界中分布广泛［⑶；它 的根外菌丝能向土壤中广泛伸缩，形成根外菌丝网， 有利于吸收土壤中的矿质养分，并在根际生态系统 中起着多种作用。许多研究表明，AM在促进植物 吸收水分、磷和其他营养元素，改善土壤质地，提高 土壤结构性等方面作用显著［1VI5］O应用AM修复重 金属污染土壤的研究已有报道〔2⑹；但能否利用 AM来修复土壤PAHs等有机物污染，仍需要大量试 验证实。

本文以芷为PAHs代表物，采用温室盆栽试验 方法，研究丛枝菌根对植物吸收及修复PAHs污染 土壤的影响，试图为经济高效的AM修复技术的确 立、保障农产品安全等提供基础依据。

**1材料与方法**

1.1试验材料

戈购自北京化学试剂公司，纯度〉98%;二氯 甲烷、正己烷、丙酮、无水硫酸钠、层析用硅胶(200 〜300目)均为分析纯；甲醇为色谱纯。主要仪器： KQ-300DE医用数控超声波清洗器、旋转浓缩蒸发 仪、台式高速冷冻离心机、超低温冰箱、高效液相色 谱仪等。

供试植物：三叶草(*Trifolium subterraneum* L.)、 辣椒(*Capsicum annuum* L.) 0

供试丛枝菌根真菌：摩西球**囊霉菌***Glomus mosseae* ( AMF1)、幼套球**囊霉菌** *Glomus etunicatum* (AMF2),购自北京市农林科学院植物营养与资源研 究所“中国丛枝菌根真菌种质资源库(BGC)”。

供试土样：采自南京市江宁，为旱作水稻土表 层，其pH值为6.02,有机质含量24.1 g/kg,砂粒、粉 粒和粘粒含量分别为13.4%、61.9%和24.7%。土 样采集后风干，过2 mm筛,备用。

试验用沙为河砂,水洗后过2 rrnn筛，晾干后备 用。

1.2试验方法

配制不同浓度瓦的丙酮溶液，均匀加入一系列 上述土样中。待丙酮完全挥发后，用未污染土壤稀 释，多次搅拌，充分混匀，制得花含量不同的污染土 样。将该土样与河砂按3：1充分混匀，待装盆备用。 测得最后各土样中苗**的含量**分别为6.02.20.91. 39.31,52.64,75.18 mg/kg,分别标号为 S5,未加戈的土样设为对照,标号为Soo

称取最后制备的土样250 g于盆钵中，然后称 取菌剂20 g均匀覆于上面，最后再覆100 g制备好 的土样，加水至50%最大持水量，静置过夜。供试 植物催芽后播于盆钵中，出苗一周左右进行间苗，留 苗6株/盆，同时做不加菌对照，各处理3个重复。 定期浇水，土壤水分维持在最大持水量的50%o 60 天后采样，植物根和茎叶采集后，用蒸懈水充分淋 洗，再用滤纸吸干植物表面的水分后，放入-20尤低 温冰箱中保存；植物采集后，将土样充分混匀，过 0.85mm筛后装入密封袋，放入-20P低温冰箱保 存，待分析。

1.3样品提取及分析方法

1） 侵染率测定采用曲利苯蓝染色法〔用。

2） 土壤样品中茁的提取：取2 g 土壤于25 mL 玻璃离心管中，加入2 g无水硫酸钠，充分混匀；加 入10 mL -氯甲烷溶液，盖紧后，超声萃取1 h ; 2000 r/min下离心10 min,取3 mL上清液过2 g硅胶 柱，用11 mLl：l的二氯甲烷和正己烷溶液洗脱；洗 脱液收集后40七下浓缩至干，用甲醇定容至2 mL, 过0.22 pm孔径滤膜后进行HPLC分析。

3） 植物样品中戈的提取：植物样品粉碎后、混 匀。取一定量上述制备的植物样品于25 mL玻璃离 心管中，用30 mLl：l的二氯甲烷和正己烷溶液分3 次，每次10 tnL超声萃取30 min;将萃取液收集于 50 mL圆底烧瓶中；40T下浓缩至干,用正己烷定容 至2mL;取1 mL过2g硅胶柱，用11 mLl：l的二氯 甲烷和正己烷溶液洗脱,洗脱液收集后40兀下浓缩 至干,用甲醇定容至2 mL,过0.22 pm孔径滤膜后进 行HPLC分析。

4） 根系富集系数（Root concentration factors, RCFs）：是植物根中污染物含量（C植韌）与土壤中污 染物浓度（C 土壊）的比值，计算公式为：

RCF二C植物/C土壤

数据处理：采用Excel.SPSS统计软件对试验结 果进行统计分析。

**2**结果与分析

2.1 AMF« 染率

在琵污染土壤中，AMF对三叶草的侵染状况良 好。除个别处理外，随土壤施戈量的增加，接种处理 的菌根侵染率并未显著降低（图1）。60 d后，在无 茁污染的对照土样（S0）中，AMF1和AMF2对三叶草 根的侵染率分别为（62.82 ± 0.14）%和（57.70 ± 0.12）%0污染土样（SI -S5）中，两种AMF对三叶 草的侵染率分别为45.21%〜61.89%和52.20%〜 56.41 %□

与三叶草相比,AMF1和AMF2对辣椒的侵染率 略低（图1）。在S4和S5 土样中，AMF1对辣椒的侵 染率分别为48.12%和24.80%,AMF2的侵染率则 分别为42.82%和34.70%。这可能是由于三叶草 的根系比辣椒发达,且两种AMF均与三叶草的亲合 能力强。丛枝菌根真菌和宿主植物之间存在双向选 择关系，在相同的条件下不同宿主植物对同一 AMF 的依赖性存在差异。

□ S0 □ S1 □ S2 □ S3 ■ S4 «S5

**60**

**S5** 口

**S4**

■

**S3**

□

**S2**

□

**S1**

□ so

□

**5040302010**

AMF2

AMF1

辣椒 *Capsicum annuum* L.

^oooowoooo

**987654321**

(％)M琛吧

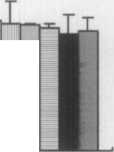
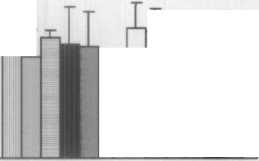
aBJ U.21 也.sIBZPPJOaAs

AMF1

匚叶草 *Trifolium subterraneum* L.

**1**

AMF2



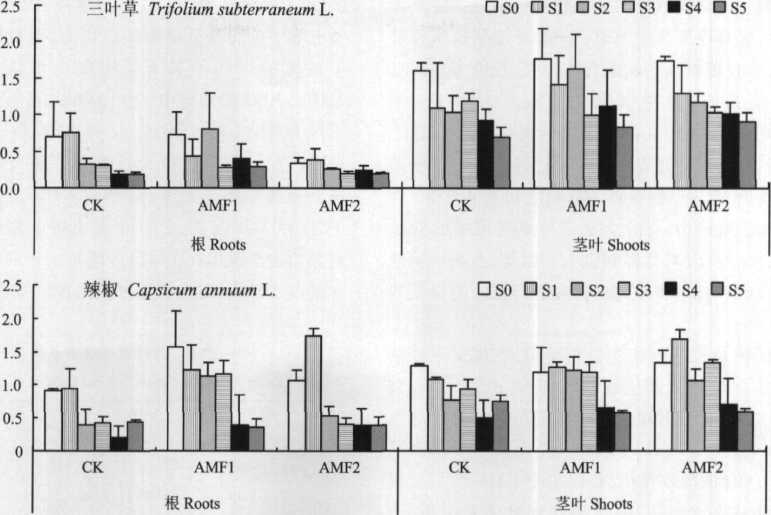


ffli 60（1后两种植输在不同处理下的率

Mycorrhizal infection rate of *TrifbHum subierrmeum* L. and *Cmsicum annuum* L.after 60 days

**2.2**植输生

当土壤中茁浓度较低时（如S1.S2）,供试植物 根和茎叶的生物量与对照植物（生长于S0）相比没 有显著差异；但当污染强度较高时（如S3~S5）,根 和茎叶的生物量则显著低于对照（P<0.05）,且随 着污染强度的提高，生物量趋于减小（图2）。接种 AMF的植物长势好于未接种的植物,但除生物童有 所差异外，生长于污染土壤的植物长势良好，并未观 察到其他表观毒害或胁迫效应。

**2.3 AM**对植物吸收龙的影响

(lodzg)M^^US

图2 60 d后不同处理的两种植物的生物■

Fig.2 Roots and shoots biomass of *TrffoUum subterraneum* L. and *Capsicum annuum* L. after 60 days

**(lod/9)w^^SSBUIOm**

2.3.1植物的茂含量 总体来看，随着土壤中花浓 度的提高，植物根系的茁含量均趋于增大。由表1 可知，接种AMF使三叶草根系的茁含量明显提高， 高污染土样更为明显。S1~S5 土样中，未接种AMF 的三叶草根系的茁含量由0.42 mg/kg增至42.36 mg/kg,接种AMF1的根系戈含量由0.62 mg/kg增至 86.19 mg/kg,接种AMF2的根系戈含量由0.78 mg/kg增至90.86 mg/kg0在S4和S5两种高龙浓度 土壤中，接种AMF1后，三叶草根系的茁含量分别比 对照提高115.21%和103.47%;接种AMF2则分别 比对照提高133.31%和114.49%o

接种AMF对辣椒的影响不显著（表2）,在S4和 S5两种高戈浓度土样中，接种AMF1的辣椒根系的 戈含量分别为1.29 mg/kg和4.98 mg/kg,接种AMF2 的辣椒根系的戈含量则为2.23 mg/kg和6.32 mg/kgo接种AMF后，土样S5中辣椒根系的戈含量 略有提高，但并没有表现出显著的差异。

表1三叶草根和茎叶的乾含・(mg/kg)

Table 1 Concentrations of pyrene in root and shoot of *TrifbUum subtemneum* L. after 60 days

处理 土壤Soib

Treatments SI S2 S3 S4 S5

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | 根 Roots | | |
| CK | 0.52 (0.11) | 0.42 (0.20) | 0.43 (0.24) | 12.43 (2.60) | 42.36 (7.59) |
| AMF1 | 0.91 (0.50) | 0.64 (0.45) | 0.62 (037) | 26.75 (4.36) | 86.19 (2.02) |
| AMF2 | 1.51 (1.26) | 0.78 (0.04) | 1.24 (0.73) 茎叶Shoots | 29.00 (11.08) | 90.86 (29.66) |
| CK | 0.09 (0.09) | 0.06 (0.05) | — | 1.16 (0.98) | 0.72 (0.39) |
| AMF1 | 0.07 (0.06) | 0.11(0.08) | 0.08 (0.02) | 1.35 (1.15) | 1.13 (0.40) |
| AMF2 | 一 | 0.11(0.10) | 0.16 (0.14) | 1.09 (0.66) | 1.93 (1.47) |

造成三叶草和辣椒两种植物对根系花含量差异 的原因可能有以下两个方面：一是三叶草根系为须 根系，与丛枝菌根真菌的亲合能力强，侵染率高。二 是两种植物的"菌根依赖度”[Mycorrhizal Depen­dence, MD; MD（%） =菌根植株干重/非菌根植株干 重X 100]不同。研究表明，不同属、种植物对菌根的 依赖性不同【⑸。三叶草的MD最大可达400%;而 辣椒的MD则较小。MD大的三叶草对菌根的依赖 性强,菌根存在时对其影响也大。因此，在丛枝菌根 修复中，选取MD大的植物，有望达到更好的修复效 果。

不同植物根系的茁含量相差很大，供试三叶草 根系的花含量显著高于辣椒。如60d后，土样S5 中接种AMF2的三叶草和辣椒根系的花含量。分别 为90.86 mg/kg和6.32 mg/kgo高彦征等⑻研究了 植物对PAHs的吸收作用，得出根中PAHs含**量与根** 脂肪含**量显著**正相关，而与根含水量关系不**显著。** 本实验中，测定了辣椒和三叶草根的脂肪含量，分别 为0.155%和0.807%,与根的茁含量成正比。

两种植物茎叶的茁含量明显低于根系（表1、表 2）o如60 d后，土样S5在不接种和接种AMF1、 AMF2时三叶草茎叶的茁含量分别为0.72、1.13和 1.93 mg/kg,远小于其对应根系的戈含量；辣椒茎叶 的茁含量为0.54.0.32和0.08 mg/kg,相应根系的戈 含量则为4.55,4.98和6.32 mg/kg。随着土壤茁浓 度的提高,三叶草茎叶中花含量的变化趋势不明显, 而辣椒茎叶的及含量则略有降低。接种AMF对三 叶草茎叶茁含量的影响不显著；但与不接种对照相 比，接种AMF的辣椒茎叶的戈含量则略有减小。

*»2* 和茎叶的苗含■（ mg/kg）

Table 2 Concentrations *of* pyrene in root and shoot of *Capsicum annuum* L・ after 60 days

处理 土样Soils

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Treatments | S4 | S5 |
|  | 根 Roots |  |
| CK | 2.64 (0.43) | 4.55 (1.55) |
| AMF1 | 1.29 (0.37) | 4.98 (1.49) |
| AMF2 | 2.23 (1.38) | 6.32 (4.00) |
|  | 茎叶Shoots | |
| CK | 1.30 (1.09) | 0.54 (0.01) |
| AMF1 | 0.22 (0.15) | 0.32 (0.28) |
| AMF2 | 0.20 (0.17) | 0.08 (0.00) |

2.3.2植物根系富集系数接种AMF使得三叶草 对土壤中茁的根系富集系数增大，但对辣椒根系富 集系数的影响不显著。从表3可以看出，接种 AMF1、AMF2的处理中，三叶草根系富集系数分别比 不接种对照高52.02%〜85.83%和58.89% - 131.85%。显然，接种AMF提高了三叶草对土壤中 戈的富集能力。另外，结果还表明，相同试验条件 下，接种AMF与否，三叶草对土壤中琵的根系富集 系数均大于辣椒；其原因可能是由于三叶草根脂肪 **含量高**于辣椒，对土壤茁的富集能力更强。

«3龙的根系

Table 3 Root concentration factors of pyrene

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 植物  Plants | 处理  Treat. | 土样 Soils | |
| S4 | S5 |
| 三叶草 | CK | 3.60 (1.49) | 2.48 (1.04) |
| *TrifbUum* | AMF1 | 6.69 (2.17) | 3.77 (0.96) |
| *subterraneum* L. | AMF2 | 5.72 (1.14) | 5.75 (2.73) |
| 辣椒 | CK | 0.43 (0.22) | 0.27 (0.11) |
| *Capsicum* | AMF1 | 0.19 (0.09) | 0.25 (0.05) |
| *annuum* L. | AMF2 | 0.41 (0.19) | 0.27 (0.08) |

2.3.3植物的茁积累量植物本身可吸收积累土 壤中的PAHso三叶草根系和茎叶对茁的积**累量随** 土壤污染强度的增大而提高（表4）。接种AMF可促 进供试植物对土壤中戈的积累。由表4可以看出， 接种AMF增加了三叶草根系和茎叶的戈积**累量。** 从土样S1到S5,未接种AMF时三叶草根系的茁积 **累量** 分别为 0.494、0.643、0.181、2.610、18.642 卩“盆；接种AMF1时根系的戈积累量比无AMF对 照提高了 66.48%〜309.96%;接种AMF2时根积累 **量**则提高了 95.00%〜435.02%。另外，AMF2对三 叶草根系和茎叶戈含量的影响强于AMFlo辣椒根 系对土壤中戈的积累量也随土壤中茁浓度的提高而 增大（表5）,但茎叶对茲的积累**量则略**有降低，这与 其茎叶茁含量的变化规律一致。接种两种AMF,辣 椒根系的茁积累量也有所增加，但对辣椒茎叶的茁 **积累量**影响不明显。

*2.4*樓物吸收对AM修复的贡献

接种AMF可降低污染土壤中龙的残留浓度。 由图3可见，土壤中戈起始浓度为6・02〜75.18 吨/kg时，接种AMF1、AMF2的处理中土壤茁残留浓 度均显著小于无AMF对照，分别比对照低5.30% 〜58.55%和 12.30%~61.04%o

ft 5辣椒对TE的积累■ gg/pot）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Table 5 | Accumulated amounts of pyrene by  *Capsicum annuum* L・ | |
| 处理 | 土样 Soils |  |
| Treatments | S4 | S5 |
|  | 根中积累量 Pyrene accum. in roots | |
| CK | 0.135(0.072) | 0.728(0.257) |
| AMF1 | 1.284(0 JOO) | 1.494(0.415) |
| AMF2 | 0.558(0.326) | 1.264(0.787) |

茎叶中积累量 Pyrene accum. in shoots

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| CK | 1.196(0.981) | 0.378(0.173) |
| AMF1 | 0.249(0.035) | 0.158(0.229) |
| AMF2 | 0.102(0.080) | 0.073(0.064) |

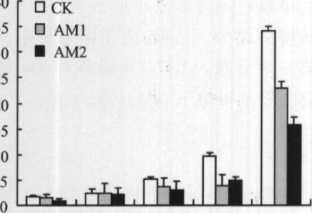
60 d后，接种AMF 土样中茁的降解率为 67.80%〜92.40%,AM可提高污染土壤中戈的降解 率。以种植三叶草的S4和S5 土样为例，由图3和 表6可见,60 d后接种AMF1的处理中戈的残留浓 度为 4.00 mg/kg 和 22.87mg/kg,降解率为 92.40% 和69.58%;接种AMF2的处理中戈的残留浓度为 5.07 mg/kg 和 15・81mg/kg,降解率为 90.36% 和 78.97%;而有植物但不接种AMF的对照土壤中茁 的残留浓度为9.65 mg/炖和34.11mg/kgo显然，接 种供试AMF促进了土壤中茁的降解，降解率提高了 8.69%〜24.34%。辣椒与三叶草具有相似的规律 性。

| 处理  Treatments | 土样 Soils | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| SI | S2 | S3 | S4 | S5 |
| CK | 0.494(0.270) | 0.643(0.084) | 根 Roots  0.181(0.125) | 2.610(0.700) | 18.642(4.310) |
| AMF1 | 1.120(0.615) | 0.723(0.141) | 5.142(0.546) | 10.701(1.990) | 31.033(14.521) |
| AMF2 | 2.645(1.233) | 0.651(0.173) | 0.516(0.200) | 11.617(5.831) | 36.345(19.413) |
| CK | 0.065(0.060) | 0.023(0.020) | 茎叶Shoots  0.047(0.024) | 0.005(0.003) | 0.327(0.163) |
| AMF1 | 0.051(0.020) | 0.098(0.050) | 0.060(0.015) | 0.026(0.018) | 0.655(0.193) |
| AMF2 | 0.051(0.020) | 0.118(0.095) | 0.120(0.080) | 0.427(0.099) | 1.158(0.543) |

農4三叶草根和茎叶对花的积JR«(|xg/pot)

Table 4 Accumulated amounts of pyrene by root and shoot of *Trifolium subterraneum* L.

3环以上高分子量的PAHs（如戈）一般在土壤 中难于降解、易持留，可长期危害农产品安全和人类 健康。如何强化这类PAHs在土壤中的降解一直受 到研究者的关注。Joner等⑷］采用三叶草和黑麦草 为宿主植物，研究了其对两种工业污染土壤的修复 作用，发现接种AMF后,PAHs降解率有较大提高。 本文研究结果表明，供试AMF可促进土壤中PAHs



uuvIxd jo SO^SSQeoQ 一 enp 一 SUH

SI S2 S3 S4 S5

土样 Soils

图3不同再染强度下接种与不接种AMF  
对土 41中花残留的影响

Fig.3 Effects of inoculation with AM fungi on the  
residual concentrations of pyrene in soils with  
different contamination levels

的降解，与植物修复相比，接种AM的修复效率更 高；但AM的修复机制有待阐释。

接种AMF1.AMF2后，三叶草积累龙的量对土 壤中吧降解的贡献率分别为0.063%~0・173%和 0.074%~0.180%,辣椒积累量对AM修复的贡献率 则小于0.01%。已有不少研究证实⑷，植物吸收积 累对修复土壤中PAHs的贡献率很小。本实验结果 表明，尽管AM可提高供试植物对土壤中茁的吸收 和积累作用，但植物积累量占土壤中茁总降解量的 比例均小于0.2%。显然，植物积累并不是AM修复 土壤茁污染的主导机制。

AM作用下良好的根际和菌际环境提高了土壤 微生物对污染物的降解作用，这可能是AM修复的 主要机理。另外，已证实，土壤中某些真菌（如白腐 真菌）自身可降解PAHs⑵。最近，也有资料表明， AMF也可将污染物作为自身的碳源进行吸收、代 谢、转化或固定，从而减低污染风险。Gaspar等卫］

**»6** «««\*对**AM**修复土壇乾的贡**1K**率

Table 6 Contribution of plant acannulation of pyrene to AM-remediation

处理 Treatments

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 植物 Hants | 土样 Soils | AMF1 | | AMR | |
| 茁降解率(％)  Degradation ratio | T (%) | 花降解率(％)  Degradation ratio | T(%) |
| 三叶草 | S4 | 92.40 (0.03) | 0.063(0.012) | 90.36(0.04) | 0.074(0.035) |
| *Trifolium subterraneum* L. | S5 | 69.58(0.04) | 0.173(0.112) | 78.97(0.13) | 0.180(0.095) |
| 辣椒 | S4 | 86.84(0.09) | 0.010(0.005) | 89.57(0.02) | 0.004(0.002) |
| *Capsicum annuum* L. | S5 | 73.72(0.05) | 0.009(0.002) | 67.80(0.13) | 0.007(0.004) |

注(Note): T 为檀物积JR对土壤中茲降解的贡献率。T is the ratio <rf plant accumulated amounts of pyrene to the total degraded-pyrene in soils.

发现,AMF抱子可直接从土壤中吸收PAHs(菲)，并 通过生物固定将其累积在抱子里；但AMF对PAHs 的直接降解很少。目前，由于体系复杂、难于操作、 且分离技术受限,AMF直接降解对AM修复土壤有 机污染的贡献仍难于定量计算。

**3**结论

1. 接种AMF可促进供试植物对土壤中茁的吸 收。60 d 后，接种 AMF1( *Glomus mosseae* )和 AMF2 *(Glomus etunicatum*)的三叶草根的龙含量、根系富集 系数、根和茎叶的琵积累量均显著提高；但接种这 两种AMF对辣椒根和茎叶的茁含量、根系富集系数 的影响不显著。这主要与该两种作物的菌根侵染率 和“菌根依赖度”不同有关。
2. 与植物修复相比，AM修复戏污染土壤的效 率更高。60 d后，接种AMF的土样中戈的降解率达 67.80%-92.40%,比未接种AMF 土样中茁的降解 率提高了 8.69%~24.34%。但供试试验条件下，辣 椒和三叶草吸收积累对AM修复土壤戈污染的贡献 率小于0・2%。由此推测，AM作用下良好的根际和 菌际环境，提高了土壤微生物数量和活性，从而促进 土壤中茁的降解，这可能是AM修复的主要机理。

參考文町

[1 ] Ling W T, Gao Y Z. Promoted dissipation *aS* phenanthrene and pyrene in soils by amaranth ( *Amaranthiu tricolor* L. ) [ J]. Environ. Geol. t 2004 , 46 ： 553-560.

[2]周启星•污染土壤的修复技术再造与展望[J].环境污染治理 技术与设备,2002,(3)： 36-40.

Zhou *Q* X. Technological reforger and prospect of contaminated soil re- mendiation[ J]. Techn. Equip. Environ. Poll. Cont., 2002, (3): 36-40.

[3 ] Zhu L Z, Gao Y Z. Prediction of phenanthrene uptake by plants with a partitio-limited model]J]. Environ. Poll. t 2004, 131： 505-508.

[4]高彦征，凌覘婷,朱利中，等.黑麦草对多环芳炷污染土壤的修

复作用及机制[J].农业环境科学学报,2005,24(3)： 498-502.

Gao Y Z, Ling W T, Zhu *LZ el al.* Ryegrass-accelerated degradation M polycyclic anxiiatic hydrocarbons in soils [ J]. J. Agro-Environ. Sci., 2005 , 24(3)： 498-502.

1. 耿春女，李培军,韩桂云，等•生物修复的新方法一菌根根际生 物修复[J].环境污染治理技术与设备,2001,(2)： 20-24.

Geng C N, Li P Jt Han G Y. New method of bioremediatio-mycorrhi- zosphere bioremediation[ J]. Techn. Equip. Environ. Poll. Cont., 2001, (2)： 20-24.

1. Zhou M, Rhue R D. Screening cominencial surfactants suitable for re­mediating DNAPL source zones by solubilization [ J ]. Environ. Sci. Techn, 2000 , 4： 1985-1990.
2. Bonello P, Bruns T D, Gardes M. Genetic structure of a natural pt^Hi- lation erf the ecttHnycorrhizal fungus *Suillus pungeru* [ J ]. New Phytol., 1998, 138： 533-542.
3. 凌婉婷，朱利中，高彦征，等.植物根对土壤中PAHs的吸收作 用及预测研究〔J].生态学报,2005,25(9)： 2320-2325.

Ling W T, Zhu L Z, Gao *N Zet al,* A novel study on root uptake and its prediction model of PAHb from soils] j]. Acta Ecol. Sin. , 2005, 25(9)： 2320-2325.

1. Gao Y Zt Zhu L Z. Phytoremediation and its models fw organic con­taminated aoihEj]. J. Environ. Sci., 2003, 15 ： 302-310.
2. Reilly K A, Banks M K, Schwab A P. Dissipation of polycyclic aro­matic hydrocarbons in the rhizoephere[ j]. J. Envinm. Qual. , 1996, 25： 212-219.
3. 刘世亮，骆永明，丁克强，等.黑麦草对苯并[a]茁污染土壤的 根际修复及其81学机理研究[J].农业环境科学学报,2007,26 (2)： 526-532.

Liu S L, Luo Y M, Ding K Q et a/. Rhizoephere remediation and its mechanism (rf benzo [ a ] pyrene-contaminated Boil by growing ryegrasB [J]. J. Agro-Environ. Sci., 2007 , 26(2)： 526-532.

1. 陈保冬，李晓林，朱永官.丛枝菌根真菌菌丝体吸附重金属的 潜力及特征[J].菌物学报,2005,24(2)： 283-291.

Chen B Df Li X L, Zhu Y G. CharacterB of metal adsorption by AM fungi mycelium[ j]. Mycoaystema, 2005 , 24(2): 283-291.

1. 李秋玲，凌婉婷，高彦征，等.丛枝菌根对有机污染土壤的修 复作用及机理[J] 一应用生态学报,2006,17(11)： 2217-2221.

Li Q Lt Ling W T, Gao Y *Z et al.* Arbuacular mycorrhizal bicMrme- diation and its mechanisms of organic pollutants\*contaminated soils

[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2006, 17(11)： 2217-2221.

1. 高彦征，朱利中，凌婉婷，等.土壤和植物样品的多环芳轻分 析方法研究[J].农业环境科学学报,2005,24(5)： 1003-1006.

Gao Y Z, Zhu L Z, Ling W T et aZ. A novel analysis method of poly­cyclic aromatic hydrocaibons (PAHs) for plant and soil sample^]・ J. Agro-Environ.Sci., 2005 , 24(5): 1003-1006.

1. 刘润进，李晓林.丛枝菌根及其应用[M].北京：科学出版社， 2000.

Liu R J, Li X L. Aibuscular mycorrhizal fungi and the application [M]. Beijing： Science Press, 2000.

1. 王发园，林先贵，尹睿，等•不同施铜水平下接种AM真菌对 海州香壽根际pH的影响[J].植物营养与肥料学报，2006, 12

(6)： 922-925 .

Wang F Y, Lin X G, Yin R. Effect of arbuscular mycorrhizal inocu­lation on rhizosphere pH of El&holtzia splendens under different Cu levels[J]. Plant Nutr.Fert. Sci., 2006, 12(6)： 922-925.

1. Joner E J, Leyval C. Rhizosphere gradients of polycyclic aromatic hy- drocarbon(PAH) dissipation in two industrial soils and the impact of arbuscular mycorrhiza] J ]. Environ. Sci. Technol., 2003, 37: 2371 -2375.
2. Gaspar M L, Cabello M N, Cazau *M C et al.* Effect of phenanthrene and Rhodotorula glutinis on arbuscular mycorrhizal fungus colonization of maize roots[j]. Mycorriiiza, 2002, 12 ： 55-59.

1. 收2007-10-30 ttSB期：2008-05-14

   萬金璃目：国家自然科学基金(40701073 , 20777036 , 20507009);教育部新世纪优秀人才支持计划项0 (NCET-06-0491)苏省青年科技创新人 才基金(BK2006518,BK2007580)；教育部重点实验室开放课题(EREHO7O3)资助。

   作介：程兆«(1979—),女，河北张家口人，硕士研究生，研究方向为污染土壤修复。Tel: 025・84396208, E-mail： [yizi20062006@163.com](mailto:yizi20062006@163.com) [↑](#footnote-ref-2)
2. 通讯作者 Tel: 025-84395238, E-mail： [gaoyanzheng@njau.edu.cn](mailto:gaoyanzheng@njau.edu.cn) [↑](#footnote-ref-3)