

丛枝菌根真菌对紫花苜蓿吸收菲和芘的影响

孙艳娣, 凌婉婷*, 刘娟, 宗炯

(南京农业大学土壤有机污染控制与修复研究所, 南京 210095)

摘要:采用横式三隔室盆栽试验方法,研究了丛枝菌根真菌(AMF)根内球囊霉(*Glomus intraradices*, G.i)对紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)吸收土壤中菲和芘的影响。结果表明:G.i可与紫花苜蓿形成良好的共生体,侵染率平均达61.20%,不同强度菲和芘污染对G.i菌根侵染率的影响差异不显著;接种G.i的植株根系干重增加59.08%。接种G.i增加了根系和茎叶中菲和芘的含量及积累量,根系和茎叶中菲积累量与其生物量(干重计)间呈显著正相关;与菲相比,接种G.i处理后植株芘含量和积累量的增幅更大。G.i限制了菲和芘从植株根系向茎叶的传输,对芘尤为明显,接种G.i植株根系向茎叶转运芘的比例比不接种对照降低了13.85%~37.47%。

关键词:丛枝菌根真菌;多环芳烃;植物吸收;土壤

中图分类号:X172 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)10-1920-07

Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Uptake of Phenanthrene and Pyrene by Alfalfa

SUN Yan-di, LING Wan-ting*, LIU Juan, ZONG Jiong

(Institute of Organic Contaminant Control and Soil Remediation, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)-mediated uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by alfalfa (*Medicago sativa* L.) was investigated using horizontal three-compartment microcosm systems. *Glomus intraradices* (G.i) was selected, and phenanthrene and pyrene were experimented as representative PAHs. The alfalfa roots were clearly colonized by G.i in soils contaminated by test PAHs, and the mycorrhizal colonization rate amounted to 61.20%. The concentrations and accumulation amounts of phenanthrene and pyrene in plant root and shoot increased with the G.i inoculation, and more significant enhancement was shown for pyrene. Significant positive correlations were observed between the accumulation of phenanthrene in plant (root or shoot) and the plant biomass. The G.i inoculation limited the translocation of PAHs from root to shoot, especially for pyrene. Compared with the control treatment without AMF inoculation, the ratio of pyrene translocated from mycorrhiza-colonized root to shoot decreased 13.85%~37.47%. The higher concentrations and accumulation amounts of phenanthrene and pyrene in mycorrhiza-colonized versus nonmycorrhiza-colonized plants indicated that the extended hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi into PAH-spiked soil might absorb and transport PAHs to roots, resulting in enhanced residue of PAHs in roots.

Keywords: arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); plant uptake; soil

因工农业生产导致的土壤有机污染问题广受关注^[1-2]。多环芳烃(PAHs)是普遍存在的一类土壤有机污染物,具有致畸、致癌、致突变等“三致”效应,在土壤中易持留,危害大。调查结果^[3-5]显示,我国部分土壤

多环芳烃含量可达0.1~10 mg·kg⁻¹,在交通干线、厂矿附近甚至高达10⁵ μg·kg⁻¹。PAHs进入土壤后,可被植物吸收积累、并通过食物链传递,严重威胁农产品安全和人群健康^[6]。明确植物对PAHs的吸收作用,对于指导农业生产、保障农产品安全等具有重要意义。

丛枝菌根真菌(AMF)可与绝大多数陆生植物共生,其延伸出的根外菌丝可形成密集的菌丝网,促进植物吸收氮、磷等营养元素,从而改善植物生长状况^[7],赵昕等^[8]研究了AMF对喜树幼苗生长和氮、磷吸收的影响,发现接种AMF显著提高了喜树的生物量,并促进了幼苗吸收氮、磷。AMF也可提高植物

收稿日期:2012-04-20

基金项目:国家自然科学基金(21077056, 41171380, 41171193);江苏省科技支撑计划项目(BE2011780);中央高校基本科研业务费(KYZ201109)

作者简介:孙艳娣(1987—),女,河北衡水人,硕士研究生,主要从事土壤污染控制与修复方向研究。

E-mail:2010103050@njau.edu.cn

* 通信作者:凌婉婷 E-mail:lingwanting@njau.edu.cn

抗逆能力,在水分/盐分胁迫、重金属污染和农药污染胁迫等方面也有诸多报道^[9-13],Leyval 等^[12]研究表明,土壤中含有 5 g·kg⁻¹PAHs 时只有接种 AMF 的黑麦草才能存活。近年来,一些报道揭示,接种 AMF 影响土壤中酶活性,进而促进 PAHs 降解^[14-15],我们前期研究的结果初步证实^[16],AMF 可以促进植物根系吸收积累PAHs,但其影响机理仍很不清楚。因此,根外 AMF 菌丝对植物吸收 PAHs 有何影响,仍需进一步探索。

本试验采用三隔室装置,以紫花苜蓿为宿主植物,研究了AMF 对紫花苜蓿吸收菲和芘的影响,证实了根外 AMF 菌丝可吸收污染室中菲和芘,并将其转运至植物体内。研究结果可为揭示 PAHs 的植物吸收作用、减低作物污染风险和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

菲和芘购于德国 Fluka 公司,纯度>98%,菲和芘的分子量、纯水中溶解度、辛醇-水分配系数(lgK_{ow})分别为 178.23 g·mol⁻¹ 和 202.26 g·mol⁻¹、1.18 mg·L⁻¹ 和 0.12 mg·L⁻¹、4.57 和 5.18^[17]。二氯甲烷、正己烷、丙酮和层析用硅胶(200~300 目)均为分析纯,甲醇为色谱纯。

供试土样采自南京市江宁区旱作水稻土表层(0~20 cm),土壤类型为黄棕壤,pH 值为 6.02,有机质含量为 24.1 g·kg⁻¹,砂粒、粉粒和粘粒含量分别为 13.4%、61.9%和 24.7%,土样中未检出供试 PAHs。土样采集后风干、过 2 mm 筛,备用。河砂采集后酸泡、水洗、过 2 mm 筛,然后风干、备用。

AM 菌剂(*Glomus intraradice*, G.i. AM 菌剂菌种编号 BGCBJ09, 国家自然科技共享平台资源号: 1511C001BGCAM0042)为孢子、菌丝、根段及沙土的混合物,由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)”提供。

供试植物为紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)。

制备菲和芘污染土样。供试土样与河砂按 1:1 混合均匀,121 ℃高温灭菌 2 h,将一定量系列浓度的菲

和芘的丙酮溶液喷洒在土壤表层,待丙酮挥发后,多次搅拌,过筛,混合均匀后放置 7 d,然后将各土样再次过 2 mm 筛,制得 6 个污染水平的菲和芘污染土样^[18],检测其菲和芘的含量(表 1)。

1.2 试验方法

温室盆栽试验采用横式三隔室装置(图 1),从左到右依次分为 A、B、C(隔室的大小为 10 cm×12 cm×5 cm)。A 室填充未污染土样、接种 G.i 并种植紫花苜蓿;B 室为菌丝室,填充玻璃珠(直径为 0.8~1.2 mm);C 室为污染室,填充污染土壤,菌丝穿越尼龙网进入 C 室吸收菲和芘,并传输到植物体内。A 和 B 室之间用 30 μm 的隔网隔开,菌丝可穿过,根不能进入 B 室;B 和 C 室之间是一空气隔层^[19-20],即一块 2 mm 厚的玻璃隔板,板上每间隔 10 mm 打直径为 5 mm 的孔,隔板两侧附有 30 μm 的尼龙网。

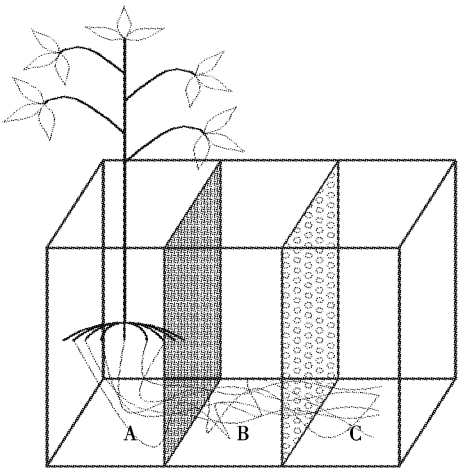


图 1 横式三隔室装置示意图

Figure 1 The diagram of the three-compartment cultivation system

为保证供试植物能获得充足的养分,装盆前将 NH₄NO₃、KH₂PO₄ 和 K₂SO₄ 按 N 200 mg·kg⁻¹、P150 mg·kg⁻¹、K 150 mg·kg⁻¹ 的用量混入 A 室土样中。对于接种 AMF 处理,A 室装 480 g 灭菌土样和 20 g 菌剂;对于不接种 AMF 处理,A 室装 480 g 灭菌土和 20 g 灭菌菌剂。C 隔室装 500 g 上述制备的污染土样。每个处

表 1 污染室(C 室)土中菲和芘初始浓度

Table 1 The initial concentrations of phenanthrene and pyrene in soils of contaminated C compartment

多环芳烃 (Polycyclic aromatic hydrocarbons)	污染水平/mg·kg ⁻¹					
	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
菲(Phenanthrene)	ND	32.31	57.59	72.34	151.5	292.6
芘(Pyrene)	ND	16.91	36.70	51.51	108.6	194.9

注:ND 表示未检出(ND means undetectable)。

理重复3次。选取饱满的紫花苜蓿种子,用10%过氧化氢处理10 min,无菌条件下催芽,在A室中播入30粒露白的种子,出苗7 d后定苗,每盆留苗6棵。称重法补充水分,使水分维持在20%左右;B和C室盖上黑色玻璃板。盆栽试验在南京农业大学智能温室进行(试验期间温度控制白天30℃,夜晚25℃),试验周期为8周。

1.3 分析方法

侵染率测定:采用改良的Phillips和Hayman^[21]的方法,从A室中随机挑选新鲜根段,剪成1 cm左右的小段(取样量小于2 g),装入5 mL eppendorf管中,加入10%KOH至浸没根段,90℃下水浴1 h,水洗后加2%HCl浸泡5 min,然后用0.05%Trypan Blue染色过夜,90℃下水浴30 min,水洗后,置于乳酸甘油溶液中脱色,选取30条根段放在载玻片上,利用显微镜测微尺计算感染长度,计算菌根侵染率,公式如下:

$$\text{菌根侵染率}(\%) = \frac{\text{VA菌根感染的毫米数}}{\text{检测根段的总长度}} \times 100\%$$

生物量测定:参照文献^[6],测定植株根和茎叶鲜重。冷冻干燥后,测定植株干重。

植物体内非和苳的提取与测定^[22]:植物冷冻干燥后,称取约0.2 g于25 mL玻璃离心管中,用10 mL丙酮和正己烷溶液(体积比1:1)超声萃取30 min,重复3次,合并萃取液,过无水硫酸钠柱,收集于旋转蒸发瓶中,40℃恒温浓缩至干,然后用2 mL正己烷定容,取1 mL过2 g硅胶柱净化,用11 mL二氯甲烷和正己烷溶液(体积比1:1)洗脱,洗脱液收集至旋转蒸发瓶后40℃下浓缩至干,用甲醇定容到2 mL,过0.22 μm孔径滤膜,用HPLC/UV检测分析。

HPLC分析条件:高效液相色谱仪为岛津LC-20AT,色谱柱为4.6 mm×150 mm 烷基C18反相柱;流动相为色谱纯甲醇,流速1 mL·min⁻¹;柱温40℃;进样量20 μL;岛津紫外检测器,检测波长为245 nm。

茎叶和根系中非和苳的积累量:

$$Ta(\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}) = Cp \times Mp$$

式中:Cp为植株体内非、苳含量,mg·kg⁻¹;Mp为生物量(以干重计),g·pot⁻¹。

1.4 数据分析

用Excel软件计算获取基本数据,用SPSS软件进行方差分析和相关分析,Duncan和LSD多重比较检验样本平均值的显著差异性。

2 结果与分析

2.1 真菌侵染率

供试条件下,G.i可与紫花苜蓿形成良好的菌根共生体,如表2所示,不接种G.i对照处理紫花苜蓿根系则没有被侵染,接种G.i处理植株根系均被显著侵染,侵染率平均达61.20%,无污染土样中,接种G.i处理的植株根系侵染率为54.33%;各非和苳污染土样中,G.i菌根侵染率达55.67%~65.67%,表明供试污染强度下,非和苳对菌根侵染率没有抑制作用;相反,对于S₄土样,其侵染率则比无污染对照略有提高,达到显著水平。

2.2 植株生物量

接种G.i显著增加了紫花苜蓿植株生物量,主要表现为促进了根系的生长。如图2所示,接种G.i的紫花苜蓿根系生物量显著高于不接种植株($P < 0.05$),根系干重比对照植株增加了59.08%,接种G.i的植株茎叶生物量则与不接种处理差异不显著($P > 0.05$)。对于非和苳污染处理,随污染强度增大,总体来看接种G.i的紫花苜蓿根系生物量呈先增加后降低的趋势,S₃处理下根系生物量最大,不接种G.i处理的紫花苜蓿根生物量呈递减趋势,但各污染处理间差异不显著。接种G.i的植株茎叶生物量也呈现先增加后降低趋势,但增幅不显著,S₄、S₅处理下茎叶生物量则显著低于S₀、S₁、S₂、S₃处理。非、苳污染下,接种G.i处理的植株生物量较不接种处理增幅达6.53%~57.05%。培养期间,除生物量有所差异外,接种和不接种G.i处理均未观察到植物的其他表观毒害效应。

2.3 植株PAHs含量

接种G.i处理显著影响植株茎叶和根系的非和苳含量。如表3所示,不同污染强度下,接种G.i的紫花苜蓿植株茎叶和根系的非、苳含量差异明显,随污染强度增大,根和茎叶中非和苳的含量先增大再减

表2 不同污染强度下AMF菌根侵染率

Table 2 Mycorrhizal colonization rate of alfalfa at different contamination levels

污染土样(Soil)	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
侵染率/(Mycorrhizal infection rate/%)	54.33(2.08)	63.33(5.77)	58.00(3.61)	63.33(2.89)	65.67*(6.16)	55.67(4.04)

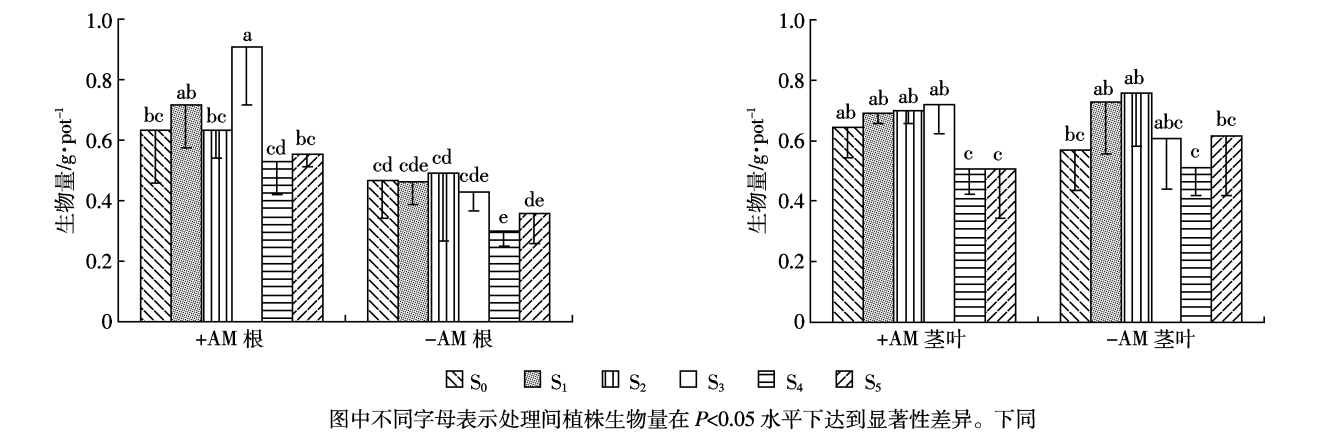
注:括号内的数字为标准偏差,*表示在 $P < 0.05$ 水平显著性差异。

Note: data in bracket are standard deviation, * denotes significant difference at $P < 0.05$.

小。对于各污染处理,接种 G.i 的根系菲含量为 79.70~127.68 mg·kg⁻¹,S₂ 污染强度下根系菲含量显著高于其他处理。接种 G.i 的植株根系菲含量均高于不接种处理,增加幅度为 16.95%~29.20%。接种 G.i 的植株茎叶菲含量为 65.18~91.19 mg·kg⁻¹,比不接种对照增加 36.12%~71.19%。与菲类似,接种 G.i 的紫花苜蓿根系和茎叶中芘含量为 3.63~27.00 mg·kg⁻¹ 和

1.77~3.63 mg·kg⁻¹,均显著高于不接种处理,增加幅度分别为 114.85%~216.95%和 39.62%~95.26%。

接种 G.i 影响了植株根系向茎叶转运菲和芘的能力。表 4 为不同污染强度处理下,接种 G.i 对紫花苜蓿根系向茎叶部位转运菲和芘能力的影响。与不接种 G.i 对照相比,接种 G.i 增加了菲从植株根系向茎叶部位的转移,增加幅度为 4.88%~25.82%,但仅在低



图中不同字母表示处理间植株生物量在 $P<0.05$ 水平下达到显著性差异。下同

图 2 接种 G.i 对紫花苜蓿生物量的影响

Figure 2 The effect of inoculation of G.i on the biomass of root and shoot of alfalfa

表 3 接种 G.i 的紫花苜蓿根系和茎叶的菲和芘含量

Table 3 Concentrations of phenanthrene and pyrene in root and shoot of alfalfa

处理 (Treatment)	菲含量/mg·kg ⁻¹				芘含量/ mg·kg ⁻¹			
	根系	变幅 W/%	茎叶	变幅 W/%	根系	变幅 W/%	茎叶	变幅 W/%
S ₁	79.70(7.28)b	17.91	66.94(3.05)b	71.79	3.62(0.95)c	202.34	1.79(0.57)b	83.52
S ₂	127.68(34.82)a	27.67	82.02(9.06)ab	42.28	5.02(1.71)bc	114.85	2.21(0.37)b	39.62
S ₃	112.99(5.26)ab	29.20	91.19(7.83)a	36.12	10.88(6.30)b	211.19	3.63(0.76)a	95.26
S ₄	90.69(18.97)b	16.95	61.24(17.15)b	54.56	27.00(4.06)a	216.95	3.43(0.39)a	55.70
S ₅	85.42(8.32)b	21.16	65.18(14.67)b	66.72	7.64(0.26)bc	211.01	1.77(0.21)b	43.33

注:括号内的数字为标准偏差。同一列中不同字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。“变幅”是指与不接种处理相比,接种处理的根或茎叶中菲和芘含量增加的幅度。

Note: data in brackets are standard deviation. Values with different letters within the same column are significantly different at $P<0.05$. Enhancement means the enhancement of the concentrations of phenanthrene and pyrene in G.i-inoculated versus nonmycorrhiza-inoculated treatment.

表 4 不同污染强度下紫花苜蓿茎叶中菲和芘含量与根中含量的比值

Table 4 The ratios of the concentration of phenanthrene and pyrene in shoot to those in root

处理(Treatment)	菲(Phenanthrene)			芘(Pyrene)		
	+AM	-AM	变幅 W/%	+AM	-AM	变幅 W/%
S ₁	0.84(0.09)*	0.58(0.09)	25.82	0.50(0.12)	0.51(0.18)	0.08
S ₂	0.64(0.13)	0.57(0.07)	7.04	0.47(0.16)	0.69(0.18)	-23.92
S ₃	0.81(0.09)	0.75(0.15)	4.88	0.38(0.11)	0.56(0.23)	-17.94
S ₄	0.86(0.19)	0.68(0.06)	18.48	0.13(0.03)	0.27(0.04)*	-13.85
S ₅	0.76(0.22)	0.63(0.16)	13.00	0.23(0.02)	0.58(0.34)*	-37.47

注:括号内的数字为标准偏差,*表示在 $P<0.05$ 水平显著性差异。“变幅”是指与不接种处理相比,接种处理茎叶中菲和芘含量与根中含量的比值的增加幅度。Note: data in brackets are standard deviation,* denotes significant difference at $P<0.05$. Enhancement means the enhancement of the ratios of the PAH concentrations in shoot to those in root.

污染强度(如 S_1 处理)下,呈显著水平($P<0.05$);而接种 $G.i$ 限制了芘从植物根系向茎叶部位的转移,降低幅度为 13.85%~37.47%,在 S_4 、 S_5 处理下,接种 $G.i$ 处理茎叶中芘含量与根中芘含量的比值与不接种对照相比,在 $P<0.05$ 水平下差异显著。

2.4 植物 PAHs 积累量

接种 $G.i$ 的紫花苜蓿植株根系中菲、芘积累量显著高于不接种对照植株。如图 3 所示,各处理植株根系和茎叶对菲、芘积累量的变化规律相似,随污染强度增加,植株中的菲、芘积累量均先增大后减小,菲在茎叶和根系中的积累量均在 S_3 处理时达最大,茎叶和根系中芘的积累量在 S_3 、 S_4 处理下显著增大。从 S_1 到 S_5 ,未接种 $G.i$ 的紫花苜蓿根系中菲积累量分别为 30.98、49.99、38.39、24.94、26.90 $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$,接种 $G.i$ 的植株根系菲积累量提高了 59.41%~168.35%;类似的,未接种 $G.i$ 的紫花苜蓿根系芘积累量分别为 0.55、1.16、1.55、2.52、0.92 $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$,接种 $G.i$ 处理则比对照提高了 176.72%~509.68%。接种 $G.i$ 的植株茎叶中菲、芘的积累量与对照植株相比,分别提高了 16.74%~65.41%和 29.41%~129.41%,但除 S_3 外差异没有达到显著水平。

接种 $G.i$ 处理的植株根系干重与植株根内菲积

累量间有很好的正相关性,相关系数 $r=0.787$,达极显著($P<0.01$)水平。茎叶干重和茎叶菲积累量间也具有很好的正相关性, $r=0.877$,达极显著($P<0.01$)水平。但植株根系的芘积累量只在低污染强度(S_1 、 S_2 、 S_3)时与干重显著正相关,茎叶中芘积累量与干重则没有显著相关关系。

3 讨论

土壤中环境污染物可影响 AMF 的生长和活性^[23]。一些研究表明,土壤中 PAHs 的存在使得 AMF 菌根侵染率受到强烈抑制^[24-25],然而,Jonar 等^[26]研究了不同 PAHs 浓度的工业土壤,发现 PAHs 污染强度对 AMF 菌根侵染率没有显著影响。本试验结果表明,菌种 $G.i$ 对紫花苜蓿有很好的侵染能力,可以与紫花苜蓿形成良好的菌根共生体,表明供试 PAHs 种类和污染条件下,PAHs 未影响 AMF 对植物根系的侵染能力。另一方面,本研究发现,与不接种 AMF 相比,供试 PAHs 胁迫下接种 AMF 的紫花苜蓿植株生物量增大,AMF 有明显地促进根系生长作用;表明供试 $G.i$ 提高了紫花苜蓿抗 PAHs 污染胁迫能力。

AMF 菌丝影响植物对 PAHs 等污染物的吸收作用。本研究结果表明,接种 $G.i$ 增加了紫花苜蓿植株

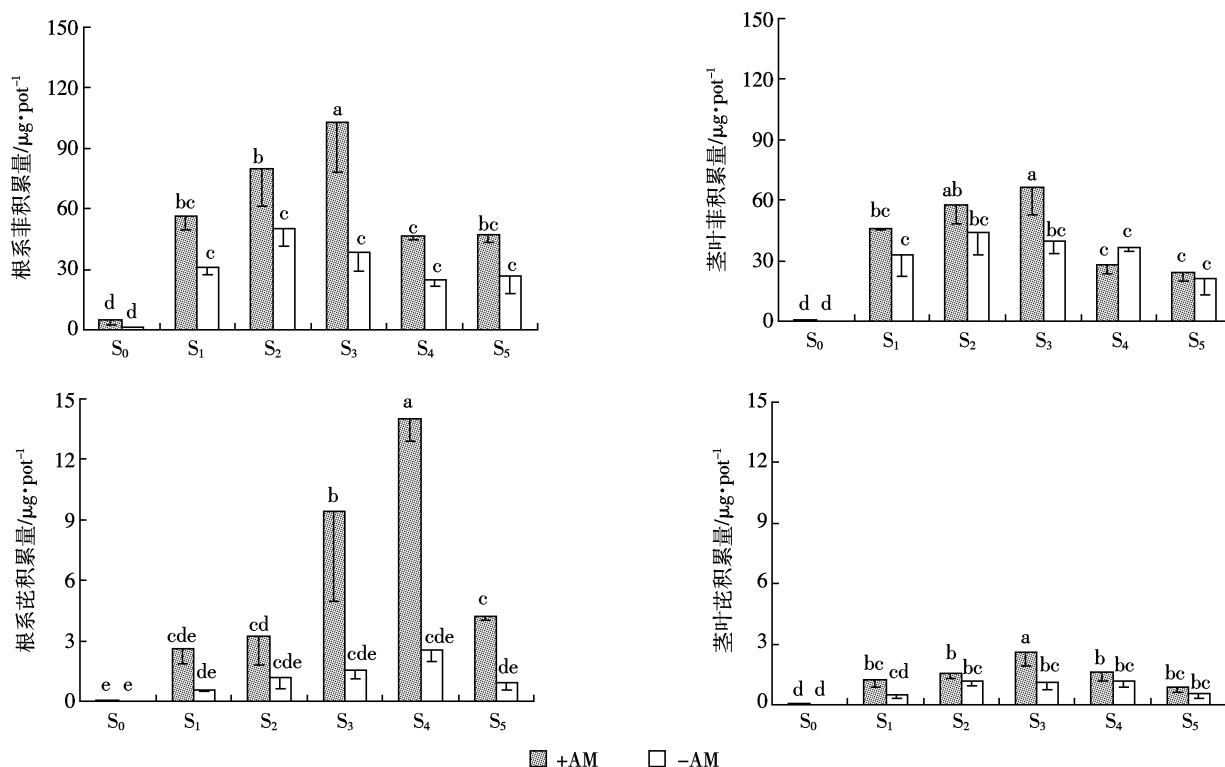


图3 接种 $G.i$ 对紫花苜蓿体内菲和芘积累量的影响

Figure 3 The effect of inoculation of $G.i$ on the accumulation of phenanthrene and pyrene in alfalfa

体内菲和芘含量,主要体现根中菲和芘含量增加。供试体系下,生成的AM根外菌丝从A室进入C室吸收土壤中的菲和芘,并将其转运至植物根中;另一方面,A室中分布的AMF菌丝也可直接吸收来自A室中PAHs(由C室扩散、迁移而来),从而提高了根中菲和芘的含量。不同菲和芘污染强度对菌丝室中AMF的生长也有影响,Verdin等^[27]研究了高、低浓度蒽对AMF生长的影响,结果显示高浓度蒽培养的AM产孢子量和菌丝生长量显著低于低浓度蒽条件下的孢子数和菌丝生长量。本试验中,随着污染强度的增大,根和茎叶中菲和芘的含量先增大后减小,是在低浓度S₁、S₂、S₃处理时,PAHs污染强度对AMF活性没有显著影响,在S₄、S₅处理下,AMF生长活性受到抑制,导致菌丝转运PAHs的能力降低。

Duarte等^[28]研究表明,植物对土壤中PAHs等有机污染物的吸收主要为被动吸收,有机污染物进入植物根部后,一部分被根部脂肪物质吸收固定,一部分沿木质部随蒸腾流向地上部传输。本试验结果显示,无论接种与不接种G.i处理,紫花苜蓿茎叶中均含有菲和芘,但接种AMF处理可影响菲和芘在植株根和茎叶间的分配,且对芘的作用尤为明显。这主要是因为菲和芘的理化性质不同,芘的水溶性较小,脂溶性较大,生物富集系数较大^[27],芘更易被AM侵染后的紫花苜蓿根系固持,从而限制了芘向茎叶的运输,但对菲的限制作用不明显。

菲和芘在植株体内累积程度不同,这可能与其理化性质有关。Topp等^[29]研究发现,植物对土壤中有机污染物的吸收与辛醇-水分配系数负相关,菲的lgK_{ow}为4.57小于芘(lgK_{ow}为5.18)。有机污染物的分子量也会影响植物的吸收行为,有研究指出,有机污染物的分子量越大,其在植物体内的含量越低^[30]。因此,菲和芘同时存在的土壤中,AM根外菌丝更易吸收K_{ow}和分子量小的菲。本试验还得出,植株根系和茎叶对菲的积累量与干重具有显著相关性,而芘积累与干重相关关系不显著。这主要是由于芘的生物富集系数较高^[27],接种AMF后改变了植株根系形态及组分,增强了植株根系对芘的富集能力。

4 结论

(1)G.i可与紫花苜蓿形成良好的共生体,侵染率达54.33%~65.67%。接种G.i紫花苜蓿根系生物量明显增加(比对照增加了59.08%)。接种G.i增强了紫花苜蓿抗土壤PAHs污染胁迫的能力,但污染强度过大

(如S₄和S₅处理),G.i侵染率和植物生物量降低。

(2)接种G.i显著增加了紫花苜蓿体内菲和芘的含量,且菲含量和积累量均高于芘,表明菲更易被AMF-植物共生体吸收;但接种G.i后植株体内芘含量和积累量的增加幅度高于菲,AMF-植株共生体提高了对芘的富集能力。

(3)G.i影响菲和芘在紫花苜蓿根和茎叶中的分配,根和茎叶中菲的积累量与其生物量(干重计)显著相关性;G.i限制了菲和芘从植株根系向茎叶的传输,接种G.i植株根系向茎叶转运芘的比例比不接种对照降低了13.85%~37.47%。

参考文献:

- [1] Wu N Y, Zhang S Z, Huang H J, et al. Enhanced dissipation of phenanthrene in spiked soil by arbuscular mycorrhizal alfalfa combined with a non-ionic surfactant amendment[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 394: 230-236.
- [2] Tao S, Xu F L, Liu W X, et al. A chemical extraction method for mimicking bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons to wheat grown in soils containing various amounts of organic matter[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40: 2219-2224.
- [3] Tao S, Cui Y H, Xu F L, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in agricultural soil and vegetables from Tianjin[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 320: 11-24.
- [4] 张天彬, 杨国义, 王洪富, 等. 东莞市土壤中多环芳烃的含量、代表物及其来源[J]. *土壤*, 2005, 37(3): 265-271.
ZHANG T B, YANG G Y, WANG H F, et al. Concentration, indicators, and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface soil in dongguan[J]. *Soils*, 2005, 37(3): 265-271.
- [5] Li X H, Ma L L, Liu X F, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon in urban soil from Beijing, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(5): 944-950.
- [6] Alcock R E, Sweetman A J, Juan C, et al. A generic model of human lifetime exposure to persistent organic contaminants: Development and application to PCB-101 [J]. *Environmental Pollution*, 2000, 110: 253-265.
- [7] Mahendra R, Deepak A, Singh A. Positive growth responses of the medicinal plants *Splianthes calva* and *Withania somnifera* to inoculation by *Piriformospora indica* in a field trial[J]. *Mycorrhiza*, 2001, 11: 123-128.
- [8] Zhao Xin, Yu Tao, Yan Xiu-feng, et al. Effect of arbuscular mycorrhiza on the growth of camptotheca acuminate seedlings[J]. *Journal of Forestry Research*, 2006, 17(2): 121-123.
- [9] 吴强胜, 邹英宁, 夏仁学. 水分胁迫下丛枝菌根真菌对红橘叶片活性氧代谢的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 825-830.
WU Qiang-sheng, ZOU Ying-ning, XIA Ren-xue. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on reactive oxygen metabolism of *Citrus tangerine* leaves under water stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4): 825-830.

- [10] 冯 固, 李晓林, 张福锁. 盐胁迫下丛枝菌根真菌对玉米水分和养分状况的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4):595-598.
FENG Gu, LI Xiao-lin, ZHANG Fu-suo. Effect of AM fungi on water and nutrition status of corn plants under salt stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4):595-598.
- [11] Khan A G, Kuek T, Chaudhry T M, et al. Role of plants mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation[J]. *Chemosphere*, 2000, 41:197-207.
- [12] Leyval C, Binet P. Effect of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil on arbuscular mycorrhizal plants[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(2):402-407.
- [13] 孔凡美, 史衍玺, 冯 固, 等. AM 菌对三叶草吸收、累积重金属的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3):92-96.
KONG Fan-mei, SHI Yan-xi, FENG Gu, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on heavy metal tolerance of clover in contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(3):92-96.
- [14] 肖 敏, 凌婉婷, 高彦征, 等. 丛枝菌根对菲芘污染土壤中几种酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5):919-924.
XIAO Min, LING Wan-ting, GAO Yan-zheng, et al. Effects of arbuscular mycorrhizae on enzymes in contaminated soils by phenanthrene and pyrene[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(5):919-924.
- [15] Wu N Y, Huang H L, Zhang S Z, et al. Phenanthrene uptake by *Medicago sativa* L. under the influence of an arbuscular mycorrhizal fungus[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157:1613-1618.
- [16] Gao Y Z, Cheng Z X, Ling W T, et al. Arbuscular mycorrhizal fungal hyphae contribute to the uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons by plant roots[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101:6895-6901.
- [17] Yawa C L. Chemical properties handbook[M]. New York: McGraw-Hill Book, 1999:340-389.
- [18] Gao Y Z, Ling W T. Comparison for plant uptake of phenanthrene and pyrene from soil and water[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, 42(5):387-394.
- [19] 李 侠, 张俊伶. 丛枝菌根根外菌丝对不同形态氮素的吸收能力[J]. 核农学报, 2007, 21(2):195-200.
LI Xia, ZHANG Jun-ling. Uptake of different forms of nitrogen by hyphae of arbuscula mycorrhizal fungi[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2007, 21(2):195-200.
- [20] 李 侠, 张俊伶. 丛枝菌根根外菌丝对铵态氮和硝态氮吸收能力的比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3):683-689.
LI Xia, ZHANG Jun-ling. Uptake of ammonium and nitrate by external hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(3):683-689.
- [21] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. *Transaction of the British Mycological Society*, 1970, 55(1):158-161.
- [22] 高彦征, 朱利中, 凌婉婷, 等. 土壤和植物样品的多环芳烃分析方法研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5):1003-1006.
GAO Yan-zheng, ZHU Li-zhong, LING Wan-ting, et al. Analysis method for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in plant and soil samples[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(5):1003-1006.
- [23] 王曙光, 冯兆忠, 王效科. 环境污染对丛枝菌根(AM)形成及功能的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7):1321-1325.
WANG Shu-guang, FENG Zhao-zhong, WANG Xiao-ke. Effects of environmental pollutants on arbuscular mycorrhiza formation and function[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7):1321-1325.
- [24] Gaspar M L, Cabello M N, Cazau MC, et al. Effect of phenanthrene and *Rhodotorula glutinis* on arbuscular mycorrhizal fungus colonization of maize roots[J]. *Mycorrhiza*, 2002, 12:55-59.
- [25] Joner E J, Leyval C. Influence of arbuscular mycorrhiza on clover and ryegrass grown together in a soil spiked with polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Mycorrhiza*, 2001, 11:155-159.
- [26] Joner E J, Leyval C. Rhizosphere gradients of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dissipation in two industrial soils and the impact of arbuscular mycorrhiza[J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37:2371-2375.
- [27] Verdin A, Lounès H S, Fontaine J, et al. Effects of anthracene on development of an arbuscular mycorrhizal fungus and contribution of the symbiotic association to pollutant dissipation[J]. *Mycorrhiza*, 2006, 16:397-405.
- [28] Duarte D R, Jones K C. Screening the environmental fate of organic contaminants in sewage sludge applied to agriculture soils: II. The potential for transfer to plants and grazing animals[J]. *Science Total Environment*, 1996, 185:59-70.
- [29] Topp E, Scheunert I, Attar A, et al. Factors affecting the uptake of ^{14}C labeled organic chemicals by plants from soil[J]. *Ecotoxicol Environmental Safety*, 1986, 11:219-228.
- [30] Wild E, Dent J, et al. Direct observation of organic contaminant uptake, storage, and metabolism within plant roots[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39:3695-3702.