

# 丛枝菌根对有机污染土壤的修复作用及机理 \*

李秋玲 凌婉婷 高彦征\*\* 李福春 熊巍

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

**【摘要】** 丛枝菌根(AM)是丛枝菌根真菌(AMF)与植物根系相互作用的互惠共生体,能改良土壤结构,增强植物抗性。自然界中已知的AMF有170多种,分布广泛,且可与大多数植物共生。利用AM修复有机污染土壤正成为一个崭新的研究方向。本文综述了AM对多环芳烃、酞酸脂、石油和农药等一些典型有机污染物污染土壤的修复作用。AM修复有机污染土壤的机理主要包括:AMF代谢有机污染物;AM分泌酶,降解污染物;AM影响根系分泌作用,并促进根际微生物对有机污染物的降解;AMF宿主植物吸收积累污染物。AM修复研究中,高效AMF的筛选、复合菌种效应、土壤老化、AM作用下植物对有机污染物的吸收积累等几方面仍有待于深入研究。

**关键词** 丛枝菌根 菌根修复 有机污染物 土壤

**文章编号** 1001-9332(2006)11-2217-05 **中图分类号** X172 **文献标识码** A

**Arbuscular mycorrhizal bioremediation and its mechanisms of organic pollutants-contaminated soils.** LI Qiuling, LING Wanting, GAO Yanzheng, LI Fuchun, XIONG Wei (College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(11): 2217~2221.

Arbuscular mycorrhiza (AM), the symbiont of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and host plant root, has been proved to be able to improve soil structure and enhance the plant resistance to environmental stress. There are more than 170 kinds of AMF worldwide. Recently, the promoted degradation of organic pollutants in soils in the presence of AM was observed, and AM bioremediation (AMB) is becoming a promising and perspective remediation technique for organic pollutants-contaminated soils. This paper reviewed the research progress on the AMB of soils contaminated by typical organic pollutants such as polycyclic aromatic hydrocarbons, PAEs, petroleum, and pesticides. The mechanisms of AMB mainly include the metabolism of organic pollutants by AM fungi, the degradation of these pollutants by the enzymes derived from AM exudation and by the enhanced root exudation and rhizospheric microbial activity in the presence of AM, and the removal of the pollutants by plant uptake and accumulation. As a new approach for the remediation of contaminated soils, some aspects involved in AMB, e. g., the screening of high efficient AM fungi, efficacy of co-existing AM fungi, soil ageing, and plant uptake of organic pollutants from soils in the presence of AM, still need to be further investigated.

**Key words** Arbuscular mycorrhizae (AM), Mycorrhizal bioremediation, Organic pollutant, Soil.

## 1 引言

当前,国内外土壤污染问题严重,污染土壤环境的主要持久性有毒物质(persistent toxic substance, PTS),包括多环芳烃(PAHs)、多氯联苯(PCBs)、有机农药、重金属等。与其它污染物相比,土壤中有毒有机物的污染更为普遍,且这些污染物多具有“三致”效应,即在土壤中滞留期长、难分解,影响植物生长与农产品质量,危害人类健康及生态环境安全。如何修复有机污染土壤已成为国内外土壤与环境领域研究的热点之一<sup>[22,26,50]</sup>。

有机污染土壤的修复方法主要有物理修复、化学修复和生物修复(包括微生物修复、植物修复、菌根修复等)<sup>[15,48]</sup>。常用的物理与化学修复手段往往没有彻底降解污染物,一般只是将污染物转移,易造成其它环境介质的次生污染,且修复费用高,很难适用于面源污染土壤的治理<sup>[20,34]</sup>。生物修复是利用土壤中的微生物、植物、植物与微生物的综合体,吸

收、降解污染物。生物修复时引入的驯化微生物或基因工程菌会受到土著微生物的竞争,只有大量接种,才能形成优势,因此对土壤微生态环境也有一定的影响。另外,在国际上基因工程菌的环境安全问题仍存在很大争议,实际应用仍受到严格限制<sup>[6]</sup>。近年来,植物修复有机污染土壤成为国内外土壤环境领域的一个研究热点,已取得一些共识性的研究成果<sup>[12]</sup>:与微生物对照相比,植物修复效率高,主要是植物促进土壤微生物对污染物的降解;根际土体的比例、根际微生物的数量和活性将决定植物修复的效率。由此,菌根的外延菌丝能有效解决上述问题。

菌根修复技术能针对性地克服微生物修复和植物修复有机污染土壤的不足,综合利用土壤中的微生物、植物、菌根

\* 国家自然科学基金项目(20507009)、江苏省青年科技创新人才学术带头人项目(BK2006518)、国际科学基金项目(C3985-1)和南京农业大学青年科技创新基金资助项目(Y200611, KJ05009)。

\*\* 通讯联系人, E-mail: gaoyanzheng@njau.edu.cn

2005-11-28 收稿, 2006-08-25 接受

真菌及其相互作用的根际和菌(丝)际环境,有效地降解土壤中的有机污染物。与其它生物修复方法相比,菌根修复的优点主要有:菌根通过外延菌丝大大增加了与土体的接触面积,外延菌丝与土体的接触面积可超过  $300 \text{ m}^2$ <sup>[2]</sup>;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,树木每克外生菌根能分别支持  $10^6$  个好氧细菌和  $10^2$  个酵母,菌根际微生物数量比周围土体高 1 000 倍<sup>[15]</sup>。菌根条件下,与土体接触面积的扩大和微生物数量的增多为菌根修复有机污染土壤提供了良好基础。

丛枝菌根(AM)真菌(F)是土壤微生物区系中生物量最大、最重要的成员之一,是菌根真菌的重要组成部分。与外生菌根相比,AMF 能与绝大多数速生草本植物形成共生体系。以往研究发现,AM 在改善植物营养状况、促进植物生长、增强植物抗逆能力等方面有显著作用<sup>[27]</sup>。但迄今有关 AM 修复有机污染土壤的研究还刚刚开始,仅涉及较少的 AMF 和有机污染物,其修复机理仍有待于深入系统地研究。本文在阐述 AM 及其有关环境意义的基础上,综述了 AM 对有机污染土壤的修复作用与机理,并分析了目前该研究领域中存在的问题。

## 2 AM 及其环境意义

### 2.1 AM 对土壤结构的改良作用

我国对真菌的研究始于 20 世纪 80 年代,AMF 种类具有多样性。到目前为止,全世界自然环境中已知的 AMF 有 170 多种,我国已经报道了 7 个属 99 种 AMF<sup>[43]</sup>。已发现,AMF 的寄主范围也十分广泛。无论是单子叶植物还是双子叶植物大多可以形成 AM<sup>[21]</sup>。

AM 对土壤结构有很大的影响。AM 含有丰富的菌丝体,是植物根系与土壤、土壤微生物联系的桥梁。Quinteroramos 等<sup>[35]</sup>发现,与未接种对照相比,接种 AMF 后植物可在较短时间内增加土壤有机质含量,从而改善土壤结构。Miller 等<sup>[32]</sup>和 Tisdall 等<sup>[40]</sup>的实验表明,AM 菌丝体对土壤结构的稳定性有着重要作用;AM 菌丝直径很小,能够延伸至土壤非根际区域的土块中吸收养分,同时能增加土壤的透气性。盆栽试验证明,菌丝体能使土壤团聚体的水稳定性提高;土壤微聚体变成团聚体是通过根系和菌丝体(特别是 AM 菌丝体)缠绕而形成的<sup>[40]</sup>。Wright 等<sup>[47]</sup>研究发现,AMF 菌丝体产生的糖蛋白可促进土壤水稳态结构的形成。

### 2.2 AM 对宿主植物抗性的影响

AM 产生的外延菌丝不仅能改良土壤结构,而且有利于植物对营养物质的吸收,促进植物生长,改善产品品质,增强植物的抗性。大量研究表明,接种 AMF 的植物,其抗病性、抗逆性(抗旱、耐盐,抗低温等)都优于未接种的植物。

林先贵等<sup>[24]</sup>研究表明,接种 AMF 的白三叶草(*Trifolium repens*)在水分胁迫状况下,虽然总生产量减少,但在整个生长期內其地上部分生产量仍然高于对照植物;在最适土壤含水量时,供试植株生长良好,接种 AMF 的植株干重比没接种的增加 47%。由此可见,丛枝菌根可通过菌丝影响植物吸收

水分,促进植物对水分及营养物质的利用,从而改善植物营养状况,提高植物的抗旱性。接种 AMF,有利于干旱与半干旱区植物的生长。

Chou 等<sup>[7]</sup>研究了 AMF 与根瘤菌和两种病原真菌[终极腐霉(*Pythium ultimum*)和大豆大雄疫霉(*Pythophthora megasperma*)]间的相互作用。结果发现,接种菌根真菌,明显地减少了由大豆大雄疫霉引起的植物死亡数量。大多数学者认为,AM 增强植物抗病性的机理是:AMF 提高了植物的营养(尤其是矿物营养,主要是 P 元素等)水平,使植株健壮,从而增强了植物对病原菌的抗性。

### 2.3 AM 对植物吸收重金属的影响

污染土壤中除有机污染物以外,往往还包含重金属、放射性物质等多种污染物。在有机污染土壤 AM 修复过程中,也应考虑其他污染物的环境效应。

AM 菌丝是植物从土壤中吸收营养物质的重要通道之一。当土壤中污染物浓度过高时,AM 会抑制植物对重金属等污染物的吸收。陈保冬等<sup>[4]</sup>发现,接种 AMF 能改变植物的重金属吸附特性。在实验条件下,菌体能分别吸附相当于自身干物质重量 1.6% 的 Mn、2.8% 的 Zn 和 13.3% 的 Cd;吸附于菌丝上的  $\text{Cd}^{2+}$  绝大部分可以被  $\text{Ca}^{2+}$  交换吸附。冯海艳等<sup>[11]</sup>研究发现,接种 AMF (*Glomus mosseae* 和 *Glomus intraradices*)促进了黑麦草对重金属 Cd 的吸收,在  $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd 浓度水平时,2 种 AMF 对黑麦草吸收 Cd 的贡献率分别达到 68% 和 70%;菌根能强化根系对 Cd 的固持,减少 Cd 向地上部的迁移。

有些植物可吸收土壤中的放射性物质<sup>[13]</sup>。接种 AMF 能增加植物生物量,提高植物组织中放射性物质的含量。Entry 等<sup>[10]</sup>发现,巴哈雀稗(*Paspalum notatum*)、宿根高粱(*Sorghum vulgare*)和柳枝稷(*Panicum viginatum*)能吸收土壤中的 $^{137}\text{Cs}$  和 $^{90}\text{Sr}$ ,而接种 AMF 显著增加了上述植物地上部分的生物量,从而提高了放射性物质的吸收量。

## 3 AM 对有机污染土壤的修复作用

### 3.1 AM 对 PAHs 污染土壤的修复

由有机物不完全燃烧或高温裂解而产生的 PAHs 类化合物,是环境中多见的一类典型的有机烃类污染物,也是土壤中普遍存在的有代表性的有毒有机物,具有慢性毒性和“三致”作用,对人体与环境危害极大。我国污灌区普遍存在 PAHs 污染问题,在一些重污染区,土壤中 PAHs 含量可达上万  $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[12]</sup>。PAHs 污染土壤的修复已引起研究者的普遍关注。

初步研究表明,AM 可促进土壤 PAHs 的降解。Leyval 等<sup>[23]</sup>研究表明,接种菌根真菌(*Glomus mosseae*)提高了黑麦草(*Lolium multiflorum*)在 PAHs 污染土壤中的成活率,PAHs 浓度为  $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时只有菌根化植物可以生存。Binet 等<sup>[11]</sup>研究发现,根际土壤 PAHs 残留量明显低于非根际土壤;在蒽严重污染的土壤中,接种 AMF 的黑麦草明显比没有接种的存活率高,根际土壤中蒽的降解率也高于非根际土

壤。Joner 等<sup>[22]</sup>采用盆栽试验方法,在 2 种工业污染土壤(含 12 种 PAHs,浓度分别为 400 和 2 000 mg·kg<sup>-1</sup>)中种植三叶草(*Trifolium repens*)与黑麦草(*Lolium multiflorum*),定期测定根际周围的 PAHs 降解率,26 周后发现接种 AMF 的土壤 PAHs 浓度分别为 222 和 655 mg·kg<sup>-1</sup>,而没有接种的则为 275 和 1 149 mg·kg<sup>-1</sup>。国内一些学者研究了 AM 对土壤中高环 PAHs 的修复。刘世亮等<sup>[29]</sup>研究表明,苯并[a]芘(B[a]P)起始浓度为 1、10 和 100 mg·kg<sup>-1</sup>时,90 d 后在种植紫花苜蓿(*Medicago sativa*)并接种菌根真菌(*Glomus caledonium*)土壤中 B[a]P 的降解率分别达 86.2%、86.6%、57.0%,而不接种 AMF 的对照土壤中 B[a]P 降解率则为 75.9%、77.7%、53.4%。上述研究表明,AM 对土壤 PAHs 的降解有促进作用,但相关机理仍有待于深入系统的探讨。

### 3.2 AM 对酞酸脂类污染土壤的修复

随着工农业的发展,含酞酸脂类(PAEs)产品的使用越来越普遍。大气、水体、土壤等环境介质都含有一定量的 PAEs。土壤中 PAEs 会影响农产品的产量与质量,还可通过植物富集和食物链传递等威胁人类健康。Giuseppa 等<sup>[8]</sup>在数十种柠檬油、橙子油和桔子油中均检测出不同浓度的 PAEs。

目前,利用丛枝菌根修复 PAEs 污染土壤的研究还很少见。近来,王曙光等<sup>[44-46]</sup>在菌根际(A)、菌丝际(B)和常规土(C)中,以邻苯二甲酸二酯(DEHP)为研究对象,以豇豆(*Pisum sativum*)为宿主植物,分别接种 AMF 光壁无梗球囊霉(*Acaulospora lavis*)和苏格兰球囊霉(*Glomus caledonium*),研究了 AM 对不同浓度 DEHP(4、20 和 100 mg·kg<sup>-1</sup>)降解的影响,发现 60 d 后 AMF 促进了 DEHP 在 A、B、C 土层中的降解,尤其是接种光壁无梗球囊霉后 DEHP 的降解效果更为显著,A、B 土层中 DEHP 的残留浓度分别比不接种时下降 25.1% 和 10.1%。这些结果说明 AM 能促进土壤中酞酸脂类污染物的降解,可用修复酞酸脂类污染土壤。

### 3.3 AM 对石油污染土壤的修复

石油中的大部分成分为有机烃,且 PAHs 在石油中普遍存在,所以石油污染土壤的修复问题也备受关注。耿春女等<sup>[14]</sup>研究发现,AMF 的孢子不仅能存在于石油污染土壤,而且当石油浓度达到 10 000 mg·kg<sup>-1</sup> 时,菌根侵染率高达 82.86%。Sarand 等<sup>[38]</sup>研究表明,在石油污染土壤中,乳牛肝菌(*Suillus bovinus*)和卷边柱蘑菇(*Paxillus involutus*)能够生存于植物根际,16 周后遍布土壤表面;乳牛肝菌在土壤中形成活性较强的菌丝团;菌丝团在石油污染的土壤-真菌界面形成微生物薄膜,支持多种细菌群落,可以增加污染土壤的微生物种类,并提高其活性,从而促进污染物降解。何翊等<sup>[18]</sup>研究表明,在污染土壤中种植玉米(*Zea mays*)与大豆(*Glycine max*),并施加不同的 AMF 菌剂,一个生长季节后,土壤中石油类污染物降解率可达 53%~78%。

### 3.4 AM 对农药污染土壤的修复

对于农药污染土壤,目前研究较多的还是生物修复,其中 AM 修复正受到关注。王曙光等<sup>[45]</sup>表明,菌根化植物对农药有很强的耐受性,可把一些污染物有机成分转化为菌根真

菌和植株的养分源,降低农药对土壤的污染程度。Menendez 等<sup>[31]</sup>指出,大豆被丛枝菌根真菌侵染后,生长不但没有受到杀虫剂乐果的影响,当乐果浓度为 0.5 mg·L<sup>-1</sup> 时反而促进了丛枝菌根真菌孢子的萌发。林先贵等<sup>[25]</sup>研究发现,施用绿麦隆、二甲四氯和氟乐灵的土壤中接种 AMF 后,白三叶草植株的菌根侵染率、生长量以及氮、磷的吸收都显著高于不接种植株。

## 4 AM 修复有机污染土壤的机理

### 4.1 AMF 的自身代谢作用

AMF 是异养微生物,需要以外界吸收的营养物质为其生长与繁殖的能量,而有机污染物以碳为其主要的构成元素,可以作为真菌的碳源。AMF 通过自身的代谢作用和其它途径将污染物分解为简单的有机物,或分解为二氧化碳和水,并获得自身所需的能源,达到降解有机污染物或降低其毒性目的<sup>[28]</sup>。许多研究结果表明,真菌能代谢土壤中的 PAHs,并利用其中的碳作为唯一的碳源和能源<sup>[9,16,33,36]</sup>,也有实验证明,用菌根修复农药污染土壤时,AMF 可以把农药中的有机成分转化为自身和植株的养分源,从而去除土壤污染物<sup>[42]</sup>。

### 4.2 AM 促进根际微生物对有机污染物的降解

AMF 与宿主植物建立共生关系后,不仅显著影响植物生长,而且引起根系分泌物的变化。未形成共生体时,根分泌物直接释放到土壤;AM 形成后,AMF 可过滤分泌物,部分分泌物被 AMF 作为营养而利用。由于 AMF 对分泌物的利用及菌根的代谢作用,进入土壤的分泌物数量和组成变化很大。张玉凤等<sup>[48]</sup>发现,AMF 侵染对三叶草(*Trifolium pratense*)根系分泌的有机酸组分和含量都有一定的影响,用洗根法和琼脂膜法收集到的分泌物都表现出菌根化三叶草分泌的有机酸总量低于非菌根化三叶草的趋势。也有研究表明,禾谷类作物大麦(*Hordeum vulgare*)、小麦(*Triticum aestivum*)、黑麦(*Secale cereale*)和燕麦(*Avena fatua*)接种根内球囊霉(*Glomus intraradices*)6~8 周后,用高效液相色谱测定根内可溶性次生代谢产物的变化,4 种作物都明显有萜类糖甙积累,其含量与菌根侵染程度呈正比<sup>[30]</sup>。

植物根系分泌物和其它细胞分泌液构成植物的渗出液,可作为根围微生物的营养物质。AM 对根际特殊降解微生物种群具有选择性,并可改善微生物的生活环境,提高微生物活性,促进微生物对有机污染物的降解。研究表明,接种过 AMF 的棉花(*Anemone vifolia*)菌根根际的细菌、放线菌和固氮菌数量在花期以后明显高于对照植株,真菌数量则低于对照<sup>[17]</sup>。Heinonsalo 等<sup>[19]</sup>曾提出菌根际假说,即在自然界木质素较多的腐殖土或石油碳氢化合物污染土壤中,富碳基质分泌到根际尤其是菌根际,使细菌群利用碳源的能力加强,促进了微生物对石油类污染物的降解。

### 4.3 AMF 分泌酶降解污染物

AMF 可分泌氧化酶等酶类物质,并能影响植物或微生物体内氧化酶等的含量水平,进而影响土壤中降解酶的活

性,促进土壤中有机污染物的降解.Gramass 等<sup>[16]</sup>试验证明,接触污染物以后,AMF 能产生多种具有降解功能的诱导酶而降解污染物,并可以利用该污染物作为其生长、繁殖的碳源和能量.紫花苜蓿根系被 AMF 内球囊霉侵染的早期,有黄酮类物质积累,PAL、查尔酮异构酶(chalcone isomerase, CHI) 和几丁质酶表现活跃<sup>[41]</sup>. AM 修复 B[a]P 污染土壤的研究结果表明,丛枝菌根真菌促进了土壤中 B[a]P 的降解,这主要是由于 AMF 提高了土壤中多酚氧化酶的活性<sup>[29]</sup>.某些豆科植物接种 AMF 后,过氧化酶活性增加,进而促进有机污染物的氧化降解<sup>[37]</sup>.从许多有机污染物分解机理的研究结果来看,只要土壤中有可促进真菌好氧酶,真菌就能降解更多的有机污染物<sup>[16]</sup>.

#### 4.4 植物吸收积累去除污染物

接种 AMF 增强了植物对污染物的耐受性,当土壤中污染物含量过高时可抑制植物对污染物的吸收.初步研究表明,接种 AMF 一方面能促进土壤中有机污染物的降解;另一方面可影响植物对有机污染物的吸收积累.王曙光等<sup>[44]</sup>研究了接种 AMF 光壁无梗球囊霉(*Acaulospora lavis*)和苏格兰球囊霉(*Glomus caledonium*)后豇豆(*Pigna sinensis*)对邻苯二甲酸二丁酯(DBP)的吸收作用.结果表明,接种 AMF 明显抑制了植物对 DBP 的吸收,降低了植物体的 DBP 含量;接种 AMF 还抑制了 DBP 由植物根系向地上部分的迁移,减轻了 DBP 对植物的污染,这些研究结果为在污染土壤地区生产安全农产品提供了思路和依据.

有关植物对土壤有机污染物的吸收作用已有较多报道.通过植物吸收积累可部分去除土壤污染物<sup>[12,13,39]</sup>.接种 AM 菌后,能促进植物生长,促进植物对土壤养分的吸收,同时可影响植物对有机污染物的吸收积累.但迄今为止,一方面有关 AM 作用下植物对土壤有机污染物吸收的研究报道很少,仅涉及了极少种类的污染物和 AMF;另一方面,植物吸收积累对 AM 修复有机污染土壤的相对贡献还有待于探讨.

#### 5 问题与展望

利用丛枝菌根修复有机污染土壤,越来越引起人们的关注.由于该方法成本相对较低,修复效果好,对环境产生的次生污染小,而且 AMF 菌种资源丰富,可接种的宿主植物十分广泛.丛枝菌根生物修复技术在有机污染土壤修复中有着广阔的发展前景.但目前对 AM 修复有机污染土壤的研究报道还很少.在下述几方面需要进一步研究:1)高效 AMF 菌种的筛选. AMF 种类繁多,其修复效率不尽相同,对某些特定污染物来说应该有其相对高效的一些降解菌种.因此,高效菌种的筛选是 AM 生物修复中要解决的首要问题.目前 AMF 的纯培养技术尚待突破,但可利用常规培养技术和方法,通过菌根侵染率、孢子数量、植物生长情况、有机污染物降解率等指标来反映不同 AMF-植物体系对有机污染土壤修复的效果<sup>[5]</sup>.2)复合菌种效应.从现有资料来看,多数研究只是集中于单一 AMF 菌种对土壤有机污染物的修复,对复合菌种的效应研究还很少.事实上,土壤往往是多个菌种共存的复

合体系,研究多个菌种的复合效应,将为寻找更为高效、适应性更强的 AM 生物修复技术提供思路与途径.3)以往研究中,较少涉及到土壤含水量、N/P、土壤老化等环境因素对 AM 修复效率的调控作用.而实际上,环境因素可能直接影响 AM 修复的过程和效率.目前,在生物修复研究中,多是采用新鲜污染的土壤,尚很少涉及老化问题.4)AM 作用下植物对土壤有机污染物吸收积累的研究仍待深化.由于我国人多地少,污染土壤已占耕地面积的 1/6 以上,急需解决的问题是如何在土壤污染地区生产安全农产品.因此,搞清 AM 修复中植物对有机污染物的吸收积累,不仅有助于探讨 AM 修复的机制,而且有积极的现实意义.已有研究结果表明,某些情况下接种 AMF 可大大降低植物体内重金属含量.

#### 参考文献

- Binet P, Portal JM, Leyval C. 2000. Dissipation of 3 to 6-ring polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere of ryegrass. *Soil Biol Biochem*, **32**: 2011 ~ 2017
- Bonello P, Bruns TD, Gardes M. 1998. Genetic structure of a natural population of the ectomycorrhizal fungus *Suillus pungens*. *New Phytol*, **138**: 533 ~ 542
- Broadley MR, Willey NJ. 1997. Differences in root uptake of radionuclides by 30 plant taxa. *Environ Pollut*, **97**(1): 11 ~ 15
- Chen B-D (陈保冬), Li X-L (李晓林), Zhu Y-G (朱永官). 2005. Characters of metal adsorption by AM fungi mycelium. *Mycosistema* (菌物学报), **24**(2): 283 ~ 291 (in Chinese)
- Chen R-R (陈瑞蕊), Lin X-G (林先贵), Yin R (尹睿), et al. 2005. Effect of mycorrhizae on bioremediation of soils polluted by organic matters. *Chin J Ecol* (生态学杂志), **24**(2): 176 ~ 180 (in Chinese)
- Cheng G-L (程国玲), Li P-J (李培军), Wang F-Y (王凤友), et al. 2003. The progress of phytoremediation and microbial remediation on PAHs contaminated soil. *Tech Equip Environ Pollut Control* (环境污染治理技术与设备), **4**(6): 30 ~ 36 (in Chinese)
- Chou LG, Schmitthenner AF. 1974. Effect of *Rhizobium japonicum* and *Endogone mosseae* on soybean root rot caused by *Pythium ultimum* or *Phytophthora megasperma* var. *saprotrophica*. *Plant Dis Rep*, **58**: 221 ~ 225
- Di Bella G, Saitta M, Pellegrino M, et al. 1999. Contamination of Italian citrus essential oils: Presence of phthalate esters. *J Agric Food Chem*, **47**: 1009 ~ 1012
- Efroyson RA, Alexander M. 1991. Biodegradation by an Arthrobacter species of hydrocarbons partitioned into an organic solvent. *Appl Environ Microbiol*, **57**(5): 1441 ~ 1447
- Entry JA, Watrud LS, Reeves M. 1999. Accumulation of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr from contaminated soil by three grass species inoculated with mycorrhizal fungi. *Environ Pollut*, **104**: 449 ~ 457
- Feng H-Y (冯海艳), Liu Y (刘茵), Feng G (冯固). 2005. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on uptake and distribution of cadmium in *Lolium L*. *J Agro-Environ Sci* (农业环境科学报), **24**(3): 426 ~ 431 (in Chinese)
- Gao Y-Z (高彦征), Ling W-T (凌婉婷), Zhu L-Z (朱利中). 2005. Ryegrass accelerating degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils. *J Agro-Environ Sci* (农业环境科学报), **24**(3): 498 ~ 502 (in Chinese)
- Gao YZ, Zhu LZ. 2004. Plant uptake accumulation and translocation of phenanthrene and pyrene in soils. *Chemosphere*, **55**: 1169 ~ 1178
- Geng C-N (耿春女), Li P-J (李培军), Chen S-H (陈素华). 2002. Effects of different arbuscular mycorrhizal fungi on oil tolerance of *Trifolium subterraneum L*. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与

- 环境生物学报), 8(6):648~652 (in Chinese)
- 15 Geng C-N (耿春女), Li P-J (李培军), Han G-Y (韩桂云). 2001. New method of bioremediation-mycorrhizosphere bioremediation. *Tech Equip Environ Pollut Control* (环境污染治理技术与设备), 2:20~24 (in Chinese)
- 16 Gramass G, Voigt KD, Kirsche B. 1999. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons with three to seven aromatic rings by higher fungi in sterile and unsterile soils. *Biodegradation*, 10:51~62
- 17 Gu X-Y (顾向阳), Hu Z-J (胡正嘉). 1994. Effect of VAM fungus *Glomus mosseae* on microbial population and biomass in cotton root zone. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 13(2): 7~11 (in Chinese)
- 18 He Y (何 翊), Wei W (魏 薇), Wu H (吴 海). 2004. Research on mycorrhiza bioremediation technique in oil-contaminated soil. *Chem Eng Oil Gas* (石油与天然气化工), 33(3): 217~218
- 19 Heinonsalo J, Jorgensen KS, Haahtela K, et al. 2000. 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*, 46:451~464
- 20 Herkovits J, Perez-Coll C, Herkovits FD. 2002. Ecotoxicological studies of environmental samples from Buenos Aires area using a standardized amphibian embryo toxicity test (AMPHITOX). *Environ Pollut*, 116(1): 177~183
- 21 Huang J-H (黄京华), Luo S-M (骆世明), Zeng R-S (曾任森). 2003. Mechanisms of plant disease resistance induced by arbuscular mycorrhizal fungi. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 14(5): 819~822 (in Chinese)
- 22 Joner EJ, Leyval C. 2003. Rhizosphere gradients of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dissipation in two industrial soils and the impact of arbuscular mycorrhiza. *Environ Sci Technol*, 37: 2371~2375
- 23 Leyval C, Binet P. 1998. Effect of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil on arbuscular mycorrhizal plants. *J Environ Qual*, 27(2): 402~407
- 24 Lin X-G (林先贵), Hao W-Y (郝文英), Shi Y-Q (施亚琴). 1991. Effects of three herbicides on VA mycorrhizal infection and plant growth. *Acta Sci Circums* (环境科学学报), 11(4): 439~444 (in Chinese)
- 25 Lin X-G (林先贵), Hao W-Y (郝文英), Shi Y-Q (施亚琴). 1992. Effect of VA fungi on tolerance water and waterlogging of plant. *Soils* (土壤), 24(3): 142~145 (in Chinese)
- 26 Ling WT, Gao YZ. 2004. Promoted dissipation of phenanthrene and pyrene in soils by amaranth (*Amaranthus tricolor L.*). *Environ Geol*, 46: 553~560
- 27 Liu R-J (刘润进), Li X-L (李晓林). 2000. Arbuscular Mycorrhizal Fungi and the Application. Beijing: Science Press. 2~3 (in Chinese)
- 28 Liu S-L (刘世亮), Lou Y-M (骆永明), Ding K-Q (丁克强), et al. 2004. Bioremediation research of organic pollutants in soil by mycorrhizal fungi. *Adv Earth Sci* (地球科学进展), 19(2): 197~203
- 29 Liu S-L (刘世亮), Lou Y-M (骆永明), Ding K-Q (丁克强), et al. 2004. Enhanced phytoremediation of benzo[a]pyrene contaminated soil with arbuscular mycorrhizal fungi. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 41(3): 336~342
- 30 Maier W, Peipp H, Schmidt J, et al. 1995. Levels of a terpenoid glycoside (blumenin) and cell wall-bound phenolics in some cereal mycorrhizas. *Plant Physiol*, 109: 465~470
- 31 Menendez A, Martinez A, Chiochino V, et al. 1999. Influence of the insecticide dimethoate on arbuscular mycorrhizal colonization and growth in soybean plants. *Int Microbiol*, 2(1): 43~45
- 32 Miller RM, Jastrow JD. 1992. The role of mycorrhizal fungi in soil conservation. In: Bethlenfalvay GJ, ed. *Mycorrhizae in Sustainable Agriculture*. Madison: Special Publication. 54: 29~44
- 33 Mueller JG, Chapman PJ, Pritchard PH. 1989. Creosote-contaminated sites: Their potential for bioremediation. *Environ Sci Technol*, 23: 1197~1201
- 34 Pezeshki SR, DeLaune RD, Jugsujinda A. 2001. The effects of crude oil and the effectiveness of cleaner application following oiling on US Gulf of Mexico coastal marsh plants. *Environ Pollut*, 112(3): 483~489
- 35 Quintero-Ramos M, Espinoza-Victoria D, Ferrera-Cerrato R, et al. 1993. Fitting plants to soil through mycorrhizal fungi: Mycorrhiza effects on plant growth and soil organic matter. *Biol Fertil Soils*, 15(2): 103~106
- 36 Romero MC, Salvioli ML, Cazau MC. 2002. Pyrene degradation by yeasts and filamentous fungi. *Environ Pollut*, 117(1): 159~163
- 37 Salzer P, Corbiere H, Boller T. 1999. Hydrogen peroxide accumulation in *Medicago truncatula* roots colonized by the arbuscular mycorrhiza-forming fungus *Glomus intraradices*. *Planta*, 208(3): 319~325
- 38 Sarand I, Timone S, Nuriaho-Lassila EL, et al. 1998. Microbial bio-films and catabolic plasmid harboring degradative fluorescent pseudomonads in Scots pine mycorrhizospheres developed on petroleum contaminated soil. *TEMS Microbiol Ecol*, 27(2): 115~126
- 39 Sun T-H (孙铁珩), Song Y-F (宋玉芳), Xu H-X (许华夏). 1999. Plant bioremediation of PAHs and mineral oil contaminated soil. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 10(2): 225~229 (in Chinese)
- 40 Tisdall JM, Oades JM. 1979. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. *Aust J Soil Res*, 17: 429~441
- 41 Volpin H, Phillips DA, Okon Y, et al. 1995. Suppression of an isoflavanoid phytoalexin defense response in mycorrhizal alfalfa roots. *Plant Physiol*, 108(4): 1449~1454
- 42 Wang F-Y (王发园), Lin X-G (林先贵), Zhou J-M (周健民). 2004. Arbuscular mycorrhizae and soil rehabilitation. *Soils* (土壤), 36(3): 251~257 (in Chinese)
- 43 Wang F-Y (王发园), Lin X-G (林先贵), Zhou J-M (周健民). 2004. Biodiversity of AM fungi in Chinese. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 23(6): 149~154 (in Chinese)
- 44 Wang S-G (王曙光), Lin X-G (林先贵). 2001. Effect of mycorrhiza on bioremediation of polluted soil. *Rural Eco-Environ* (农村生态环境), 17(1): 56~59
- 45 Wang S-G (王曙光), Lin X-G (林先贵), Yin R (尹 睿). 2002. Effect of VA mycorrhizal on degradation of DEHP in soil. *Acta Sci Circums* (环境科学学报), 22(3): 369~373 (in Chinese)
- 46 Wang S-G (王曙光), Lin X-G (林先贵), Yin R (尹 睿). 2003. Effect of inoculation with AM fungi on DBP pollution of plant. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 14(4): 589~592 (in Chinese)
- 47 Wright SF, Upadhyaya A. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil*, 198: 97~107
- 48 Zhang Y-F (张玉凤), Feng G (冯 固), Li X-L (李晓林). 2003. The effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the components and concentrations of organic acids in the exudates of mycorrhizal red clover. *Acta Ecol Sci* (生态学报), 23(1): 30~37
- 49 Zhou MF, Rhue RD. 2000. Screening commercial surfactants suitable for remediating DNAPL source zones by solubilization. *Environ Sci Technol*, 34(10): 1985~1990
- 50 Zhou Q-X (周启星). 2002. Technological reforger and prospect of contaminated soil remediation. *Tech Equip Environ Pollut Control* (环境污染治理技术与设备), 3(8): 36~40 (in Chinese)

**作者简介** 李秋玲,女,1983年生,硕士研究生。主要从事的研究方向为污染土壤生物修复。E-mail:liqiling2001@163.com

**责任编辑** 梁仁禄