DOI ：10. 13292勺.1000 一4890. 2009. 0181

生态学杂志 Chinese Journal of Ecology 2009 28(6)： 1171-1177

菌根真菌对石油污染土壤修复作用的研究进展

陈梅梅宀 陈保冬2许 毓」田慧颖’邓 皓’

(1中国石油安全环保技术研究院，北京10008$ 2中国科学院生态环境研究中心，北京100085)

摘 要 生物修复技术是处理石油污染土壤最简单有效的方法之一。本文在系统概述土 壤石油污染的环境危害及多种土壤修复技术的基础上，着重介绍了菌根生物修复技术，论 述了菌根真菌对土壤中石油污染物的降解效果，探讨了菌根真菌降解污染物的可能机制： 酶作用、根际作用、共代谢作用、基因调控;讨论了石油污染土壤的菌根生物修复前景和发 展趋势。

关键词菌根真菌；石油；污染土壤；生物修复

中图分类号 &3文献标识码 A文章编号 100CH4890 (2009)06-1171—07

Mycorrhizal fungi in biormejiation of petroleum-contam JiateJ soil A revQv. CHEN

Meime、CHEN Bactdong^ XU Y虫 TIAN Huiyjng DENG Had) *J* Rematch Instimte of SaW and Enviiorment Techno]og^ Ch讥3 National pettoletm CoiPoiatiop Eeijjig 10008S Ch to 2 Research f3r Ecn\_Enviiomiental Sciences Chinese Acad^y of Sciences Beijjig

100085 China). Chinese Journal of Eulogy 2009 **28** (6 )： 1171-1177.

Abstract BiOIHnediation is one of most effective strategies *pr* 牡e ranediation of pettoleum\_ con tan jiatej soil This paper summarized !he enviiormen^l jnpacts of soil Petroleum contem jna\_ tion anj introduced several ranediation technologies wi旺 mphasis on mycorrhizal rme(£ia\_ tion technology Themechanims of petxoleim biodegradation 讥 soil bYmycorrhizal flingi jncjude enz^fne catajysjs myconhizospherc ccmie^boli™ and genetic control The perspectives jn mycorrhizal biorenediation of petroleum, conwm jiated soil were also discussed

Key worjs mycorrhizal flingi petioleuni contsm jiatej soil bioi^ediatjon

随着社会和区域经济的迅速发展，国家对石油 能源的需求不断增加，使得油田被大面积勘探和开 发，由石油开发造成的污染问题日益凸显、土壤污染 日趋严重。目前，世界石油总产量每年约有22亿，t 其中约有800万石油进入环境造成污染（任磊和 黄延林,2000X我国每年有近60万 石油进入环 境，污染了土壤、地下水、河流和海洋（陆秀君等， 2003 X在石油的大规模勘探开采、冶炼、储存、运 输、使用和处理过程中，偶然事故的发生可能都会导 致严重的土壤污染，能通过食物链在动植物体内富 集，从而对生态环境、食品安全和人身健康造成严重 威胁，成为重要的社会与环境问题。因此，加快石油 污染土壤的修复和治理，显得尤为迫切和重要。

石油污染土壤的修复技术有物理修复、化学修 复和生物修复 徹生物修复、植物修复、菌根修复X 物理修复和化学修复技术虽然行之有效，却具有明 显的缺陷:成本高，不能彻底降解污染物，易造成二 次污染等。生物修复技术具有成本低、操作简便、处 理效果好、对环境影响小、无二次污染、不破坏土壤 原有的结构和组成等优点，已经发展成为生态环境 保护领域最有价值和最具前途的新型技术，引起国 内外越来越多的关注和研究。目前，国内外的研究 者主要集中于微生物住洪君等，200Q宋玉芳等， 2004）和植物技术创\铁旨亍等，199$ Martinez et al? 200Q Schg der et a 1^ 2002 复环境中石油或多环 芳坯（IWs）污染的研究。阿根廷科学家利用土著 微生物通过施用肥料成功清除了 700轴罐的泄露; 科威特科学家也利用微生物技术成功修复了石油污 染土壤。尽管微生物和植物修复技术在石油污染环 境中的应用取得了一定的成效，但也存在着一些不 足，如处理时间长，作用单一，易受污染物特性的影

响等。菌根作为土壤中菌根真菌与植物根系形成的 共生体，对土壤的影响具有微生物和植物的双重特 性。菌根修复技术能有效结合微生物修复和植物修 复技术的长处，针对性地弥补其不足，综合利用植 物、土壤中的微生物、菌根际和菌 砂）际环境，有效 地降解土壤中的石油污染物（李秋玲等，2006）。

近年来，土壤中菌根的丰富度和多样性已经受 到越来越多的关注，成为环境中原位生物修复的热 点（Meha^2001X菌根可以通过根外菌丝向土壤 中延伸，扩大植物根系的吸收面积，提高根系对营养 元素 比其是磷元素）和水分的吸收做J润进和李晓 林，2000）增强植物的抗旱、抗病、抗逆境等能力， 在抗旱、抗盐、抗酸、抗重金属及退化生态系统的恢 复和重建中发挥着重要作用，这使得研究土壤污染 修复的科研工作者，开始关注菌根真菌在石油污染 土壤中的贡献、潜力和修复机理。这方面的研究目 前还不是很多，作为植物根系和土壤微生物之间的 桥梁，菌根在促进污染土壤中植物的生长、石油污染 物的降解和转化、石油污染土壤的生物修复等方面 具有积极的作用。然而，菌根作为生物修复载体的 应用研究才刚刚起步。本文在简单分析石油污染的 环境效应和多种修复技术的基础上，重点综述了菌 根真菌在石油污染土壤的生物修复作用及其机理， 以反映此领域的研究进展、存在的问题及其未来的 研究方向，从而促进菌根真菌在石油污染土壤的修 复应用。

1石油污染的环境效应

石油是由上千种化学性质不同的物质组成的复 杂混合物，主要包括多种坯类 規桂、环烷绘、芳香 桂）、硫化物、氮化物、环烷酸类、沥青质、树脂类等。 通常来说，饱和疑和芳香疑要是 啜姪,支链烷 息环烷绘单、双、多环芳香炷）占石油总量的75% （McGill etal? 1981； *Pot^r&* Simons !998 ）o 芳香 类物质的毒性比脂肪族物质大，且毒性与化合物大 小相关（McGill 杭町 1981； Edwards et Q丄 1998）。

酌相对分子量越高，致癌能力越强。

石油类物质主要是通过污水灌溉、机械作业、开 采或输送时的泄漏等方式进入土壤，对土壤造成污 染。石油类物质进入土壤会影响土壤的环境质量， 对土壤和植物生态系统造成危害：1）破坏土壤结 构，使土壤盐碱化、板结化，降低土壤的孔隙度、持水 能力、通透性和透水量。因为石油类物质脂溶性强， 不易溶于水，易被土壤吸附，因而会阻塞有效的导水 通路，阻碍土壤夫气间水分和气体的交换，使透水 性降低，透水量下降；2）增加土壤中的有机碳含量， 改变有机质组成（C/N和C/P比）；3）扰乱生态系 统，影响种群或群落结构。石油污染物对微生物的 毒性主要表现在它能进入细胞膜的疏水层，破坏细 胞膜的完整性捉高细胞膜的渗透性）（Robertson et aX 2007）； 4逓过植物吸收进入植物体内并在其体 内累积，之后通过食物链进入人体或其他生物体内， 引起生殖系统障碍和内分泌系统失调，进而对食品 安全和人类健康构成威胁詹云者等，2007 X

**2**菌根真菌在石油污染土壤修复中的作用

**2.1**外生菌根真菌对石油污染物的降解

在所有菌根种类中，外生菌根（ECM）主要存在 于树木根系，在植树造林中具有重要作用 侏教君 等,2003 X ECM真菌能在人工纯培养的条件下生 长，也可以脱离植物独立生存，因此可以实现纯培 养，这有助于研究其菌丝和子实体对污染物的吸收、 转化和降解。ECM真菌对不同类型的有机污染物 都具有一定程度的降解和矿化能力，其降解程度与 降解速率取决于菌根真菌的种类、污染物的组成和 存在状态（单一污染、复合污染）、土壤理化性状等 因素。

目前，关于ECW寸有机污染物降解的研究报道 较多（Me&igez丄 1997； Grcenetal9 1999）O 有研 究表明，菌根的存在能快速降低石油污染物的毒性

（Parrish et a 1? 2005 X Me&瞬口 Caimey（2000 合了 43种ECM真菌对有机污染物的降解状况，发 现33种ECM真菌能降解一种或多种有机污染物， 其中粘盖牛肝菌（SuiHus vari第3Uis）对菲（Ph°、蔥

（A叫荧蔥（Flu）、陀（卩丫1）、二蔡嵌苯（Pe疇都具 有降解能力。Grms零（1999）研究表明，在21种

ECM真菌中，只有1种不能降解程国铃等 （2003 W究了 4种ECM真菌，如毛边滑锈伞（H比巳 lanamesoph^eiim）、劣味孚L菇（Lac^rius jnailsns）、松 塔牛肝菌（Siiobilanyces f]ocoopus）、丝膜菌（Cortinarj\_ us msais^纯培养条件下对矿物油的降解能力，结 果表明这4种菌根真菌都可以以矿物油作为唯一碳 源和能源，对矿物油具有较强的降解能力，但在不同 的培养基中其生物量和降解率不同，以少量葡萄糖 作为碳源、有机氮为氮源将有助于提高菌根真菌的 生物量和矿物油的降解率。此外，有研究表明，菌根 真菌硫磺蜡蘑（Laccaria biool。臥紫晶蜡蘑（L 加巳 Mstea）、漆蜡蘑（L kcwta）等在一定石油浓度范 围内能被刺激生长仗1|世亮等，2004》这些研究为 应用菌根生物技术修复石油污染土壤及优化降解条 件提供了科学依据和技术支持。

**2.2**丛枝菌根真菌对石油污染物的降解

丛枝菌根真菌（AMF）是土壤微生物区系中生 物量最大、最重要的成员之一，能与近85%的植物 种类形成丛枝菌根（AM）其在自然生态系统和农 业生产实践中有着重要作用。AMF是专性活体微 生物，不能进行纯培养，因此直接研究AMF对石油 污染物降解的影响比较困难，主要是通过菌根侵染 率、抱子数量、植物生长状况、植物生理等间接指标 进行表征。耿春女等（2002 M究发现，AMF的抱子 不仅能在石油污染土壤中存活，而且当石油污染物 浓度达到 10000 mg。时，Globus constricum对 三叶草根系的侵染率还能达到82. 86%o耿春女等 （2003 W究表明，接种G geoW辺G mow彊及 混接AM坯口细菌能显著提高柴油的降解率。石油 污染土壤中接种不同AMF也可以降低玉米（Z^ m^ys）与黄豆（Glycinem^x）中石油污染物的含量， 其石油类污染物降解率为53%〜78% （何翊等， 20041 Volant^（2005 W道接种不同 AMFM韭 葱（Alliim Ponun冲苯、甲苯、乙苯、二甲苯（EIEX） 的影响，结果表明，Giga^om maxgari^染显著降 低了根系培养基中苯和二甲苯浓度，G ^冋和G mosse弓侵染的根系培养基中甲苯和乙苯的浓度最 低。

AMF除了能降低土壤中上述污染物的浓度外， 还能促进土壤中RVHs的降解。Leyva^ Binet （1998）认为，AMF不仅能提高韭葱、玉米、黑麦草 （21呦 Perenne）和三叶草 （Trillium subtenaneim） 等植物在RVHs土壤中的成活率，而且还能增加 讪酌生物有效性，提高植物对其的吸收效率及 矿化率;在PAH恢度为500 mg。殳旷时只有菌根 植物可以生存。接种AMF还可以显著降低植物根 际土壤中的 度（Jonei& Leyval2003 1

觸等（2000）研究也发现了类似结果。Gaspa^ （2002 M究表明，菲对玉米的生长和土壤微生物具 有抑制作用，即玉米的根系变短，AMF侵染率和 Rhodoiomla glutin嗷量都降低;双接种可以减少玉 米根和AMIW子中的菲浓度，并且在抱子中也没有 测出菲的中间降解产物。刘世亮等（2004）研究表 明，苯并陀起始浓度分别为1、10和100 mg。 时，接种菌根真菌（GKmus w恢loniim艇高了紫花 苜蓿（MMcago沁冋对土壤中苯并梵的降解率，90 垢土壤中苯并梵的降解率分别为86. 2%、86.6% 和57.0%。上述研究结果证实，AMIM土壤中石油 污染物的降解有促进作用，但相关机理有待于深入 探讨。

**3**菌根真菌降解石油污染物的机制

**31**降解作用

**3.1.1**直接降解作用1）自身代谢作用。菌根真 菌是异养微生物，需要从植物体内获取碳水化合物 或者吸收外界的营养物质作为其生长和繁殖的物质 与能量来源，而石油污染物以碳为主要构成元素，可 以作为菌根真菌的碳源（李秋玲等，20061菌根真 菌能通过自身的代谢途径或者其他途径将石油污染 物分解为简单的有机物、碳水化合物、水和盐等，从 而降低有毒污染物的环境风险，减轻对人类安全、健 康的威胁（黄艺等，2002）。Nicolott和 ESli（i998 ） 研究表明，森林污染土壤中的一些菌能代谢 降解原油中的化合物，从而降低土壤中的原油污染。

2酒每的作用。酶作为土壤的重要组成部分，是 土壤生物化学过程的直接参与者，在土壤物质转化、 能量代谢、污染物降解等方面发挥着重要的作用 （NanniPieri& Boll導1991 ）。菌根真菌在污染物的 诱导下能产生多种独特的酶（如蛋白酶、酯酶、多酚 氧化酶、过氧化物酶等丄这些酶能以不同的方式作 用于有机污染物，将其转化为易于降解的物质加以 降解（Mehaig& Caime^ 2000 i同时它们也可以利 用该污染物作为碳源和能源进行生长和繁殖。Gkl m3s等（1999 M究表明，真菌好氧酶的存在能促进 真菌对土壤中有机物的降解，而一些研究者认为菌 根真菌也可能是通过分泌好氧酶直接降解土壤有机 污染物张锡辉和BaiPai200Q郑金来等，2000）他 们认为菌根真菌利用好氧酶将有机污染物代谢为容 易降解的中间产物，进而矿化为二氧化碳、水和无 机盐。

在纯培养条件下，多种外生菌根（ECM）和石楠 类菌根（ERM）真菌能产生多酚氧化酶（漆酶、儿茶 酚酶和络氨酸酶）这几种酶能与芳香类化合物发 生氧化耦合反应，使其分解失去活性隆焕成等， 20021在接种ECM真菌的土壤中，非特异性的过 氧化物酶和猛过氧化物酶对R扫喲转化也有着一 定的作用（Lindema|i 1992 Gnmss 1997i 但很少 有证据证明EM口 ERM真菌能产生胞外过氧化物 酶（木质素过氧化物酶（LiP）和猛过氧化物酶

（MnP） ）o不同菌根真菌种类产生的酶活性不同， 如Ldcwius和Russia种类的胞外酶活性高，而

Suillus H4）elcma Leccjiim和 THgolcma种类的胞 内酶活性高（Gmiss et al? 1998 1 等

（1998 M究表明，在与欧洲赤松（Pinussylvestris腰 种条件下，外生菌根真菌Suillus granulaui^p Paxit lus inwlutu能提高菌根的过氧化物酶活性。Bnmrr 坨Honanr等（1999册究了 16种纯培养ECM真菌 对 斷诽、花、屈、苯并花）的降解能力，结果证明 大多数菌根真菌对这4种RKH淇有不同程度的降 解能力，说明菌根真菌可能被 讪诱导产生了降 解酶。此外，许多ECM真菌还能产生液化酶、木聚 糖酶、纤维素酶、月尿酶等，这些酶能氧化降解有机污 染物。以上的研究结果是基于纯培养的基础，很少 有研究考虑菌根真菌植物共生体在有机污染物降 解中的作用。Mehax^ （1997 M究了接种ECM真 菌（S gmnulatu^n £ invD]utus）对欧洲赤松 14 记的2 4二氯酚的降解率，结果表明，与对照相比， 接种ECM真菌使2 4二氯酚的降解率分别增加了 50%和 250%。

AM电可以分泌氧化酶等酶类物质，影响植物 或微生物体内氧化酶等含量，进而影响土壤中降解 酶的活性（李秋玲等，2006 X接种AMF提高了土 壤中多酚氧化酶的活性，从而促进了土壤中苯并芜 的降解做」世亮等，20041某些豆科植物在受到内 生菌根真菌侵染后，过氧化物酶活性增加，而通常胞 外过氧化物酶的活性与R扫喲氧化有关（Salzer et di，1999）。

**3.1.2**间接作用 菌根的存在有利于土壤中多种 菌落的形成，共同降解污染物。菌根可以通过菌根 际效应为微生物提供微生态位和分泌物，改善微生 物的生活环境，提高微生物数量和生理活性;还可以 为微生物提供生活空间和氧气，使具有降解活性的 微生物得以快速增殖，或者改变微生物群落的功能 和组成，从而促进微生物对污染物的降解（Siciliano etaA 20031菌根的存在也能改变根际 旧氧化 还原电位、有机污染物的浓度和种类，进而调控土壤 组成对污染物的吸附与解吸。室内试验表明，菌根 根际土壤中的细菌群落比非菌根根际高looo倍a 春女等，2000每克外生菌根鮮质量）能分别支持 1（）6和l（f的好氧细菌和酵母菌（G^ibdye& Bcwen 19891另据研究报道，接种AMF提高了棉花 （Anmone vififD血）根际的细菌、放线菌和固氮菌数 量，降低了真菌数量 额向阳和胡正嘉，1994 2进而 影响对污染物的降解能力。Samnd等（1998）研究 发现，在石油污染土壤中，欧洲赤松与粘盖牛杆菌或 卷边桩菇共生形成菌根，菌丝能在土壤中延伸形成 密集的活性菌丝团，该菌丝团在土壤真菌界面间形 成一层薄膜，支持了形态多样的桂降解菌群落，这些 菌群会对石油污染物的分解和转化起到很大作用。 因此，菌根的降解作用很可能是间接的，其菌根根际 支持的微生物才是降解石油污染物的主体。

石油污染物的降解也与其他代谢产物有关系。 AM形成后，能利用植物的分泌物，加上自身的代谢 作用，会影响根系的代谢产物变化，降低植物根系的 分泌物含量咪玉凤等，2003》从而改变土壤微生 物的降解活性或功能，影响对污染物的降解。紫花 苜蓿根系被AMF（内球囊霉属很染的初期，发现根 内有黄酮类物质积累，苯丙氨酸解氨酶（叫、查尔 酮异构酶（chQlcone i^Bierase CHI）和几丁质酶的活 性增强（VolPin毗町，1995）。作物大麦（Hoideim vu]gare）^小麦（Tritium destivurn）、黑麦（Secale cera 3吟和燕麦（Avoid扭urn）接种内球囊霉（Glcmus 口 说担小廉北〜8周后，测定根内次生代谢产物的变 化，结果发现这4种作物的根中都存在菇类糖貳物 质，且含量与菌根真菌侵染程度呈正比（M/er et dl，1995）。

有研究者认为，菌根真菌主要是通过菌根际的 作用来实现对石油污染物的降解。Heinonsdjo^ （2000）曾提出菌根际假说，认为在木质素丰富的腐 殖土或石油污染土壤中，植物将容易利用的有机碳 源分泌到菌根根际，提高了微生物群落的代谢活性， 使细菌群落利用碳源的能力加强，驱动了微生物对 石油污染物的降解。有研究表明，菌根真菌可以通 过菌根际效应，间接降解污染物，并通过它们在土壤 中的菌丝网络系统影响微生物群落的结构与活性 （Snilh& Re阳1997）。然而，不同的菌根真菌和不 同植物形成的菌根共生体所产生的菌根根际效应不 一样，如I Glcmus 扭scicukum与马铃薯（Solanum wl 成的菌根可刺激根际土壤中放线菌的生 长（Bagy^ra^ Menge 1978 但与甜玉米和三叶草 共生时却没有这种效应（Meyer& Lindeman 19861可见，菌根真菌植物形成的共生体产生的 菌根根际效应有其特异性。

**3.2**共代谢作用

所谓共代谢，是指降解菌不能利用污染物获得 碳源和能量，需要从其他底物获得物质和能源以维 持生长繁殖，从而促进目标污染物的降解快B金来 等，2000\对于降解土壤中有机污染物的微生物 来说，优先选择利用易于获取的初级底物作为碳源 和能源，而有机污染物作为第二底物被加以利用和 降解快B金来等，2000X在陆地生态系统中，土壤 中的菌根真菌能与植物的根系形成共生体，是连接 植物与土壤及其他生物的纽带。这种共生关系表现 在菌根真菌能给植物提供矿质养分以促进植物生 长，同时需要从植物获取底物和能量，再通过共同代 谢的方式加速降解土壤中的有机污染物(黄艺等， 20021 Kanal^n琢讪％1999 )在研究其他真菌对 讪酌共代谢降解作用时也发现了相似的规律。 AlexandeK1969M为微生物之所以能代谢有机污 染物，不是将其作为底物和能量来源利用，而是一种 辅助代谢现象，即通过菌根真菌在利用基质的同时 会诱导相应的酶，将有机污染物分解。此外，菌根根 际的分泌物也可作为细菌的共代谢底物，促进石油 污染物的降解(Heinonsalo et g 2000 1目前，关 于菌根真菌通过共代谢作用降解石油污染物的研究 不多，缺乏足够的证据证明此作用机制，因此，还需 要进一步的研究与探讨。

**3.3**基因调控

菌根真菌能产生少量的胞外漆酶，芳香族化合 物等物质的存在能诱导和增强漆酶的表达(Bu4e& Caimey2002)o Colling Dobson(1997 )在分子水 平上证实了两种芳香类化合物的出现能诱导漆酶基 因的表达与转录。然而，漆酶的调控是个复杂的过 程，不同真菌种类中漆酶基因的表达和调控不相同。

对编码漆酶和过氧化物酶的基因扫描为ECM 和ERM真菌中酶活性的测定提供了一种可靠的手 段(Buike& Caimey2002)o现在，几种腐生真菌的 漆酶和过氧化物酶的基因序列都已知，因此，可以设 计分子探针或者引物来鉴定菌根真菌中的漆酶、过 氧化物酶基因和mRNA转录。Chen等(2003 )用漆 酶基因引物扩增出了 ECM担子菌类中(Ldctariu,s Russuja Pilodem^fj TyJospora)的类漆酶基因，而且 这些基因可以在转录水平上调控。Chanbers^ (1999闲J用基因扩增和测序手段，在培养的ECM 真菌Tyjo雪om fibrillo^中检测到了 MnF基因和过 氧化物酶活性。Tinone讶口 Sen(1998M究欧洲赤 松菌根功能组分的基因表达，发现ECM(PaxiHusirr vDlutu刑 SuiHusgvjieS)的菌丝端中同工酶(多酚氧 化酶、磷酸酶)的表达有所增加。Chen等(2001 )从 真菌中提取DNA然后用Phanerochaete chiyso^H 叫的LiE^n Mni基因引物对其进行扩增、测序， 尽管他们发现多数菌中存在L琨因，一些

ECM真菌(3个多孔菌目)中存在M叫因，然而 Oime琴(2003 )重复这些试验，没有在ECM真菌 中发现过氧化物酶基因的存在。

4展望

菌根真菌与植物根系形成的共生体，既能促进 植物生长、改善植物的生存环境，又能通过扩大根际 范围、提高植物的抗逆等能力，并能通过产生酶、提 高根际微生物的数量和活性等途径促进土壤石油污 染物的降解和污染土壤的修复。菌根生物修复技术 具有经济实用、安全、绿色环保等许多优点，有极大 的潜力和广阔的发展前景，尤其是在西北生态环境 脆弱的矿产资源开采和冶炼造成的土壤污染区域， 这种技术更显示出其明显的优势和适应性。虽然人 们开始关注菌根真菌在石油污染土壤修复中的作 用，但大部分还是集中在菌根真菌能促进土壤石油 污染物的降解现象研究上，尤其是集中在单一的菌 根真菌菌种或者誓单一污染因素研究上，对 于菌根真菌促进污染物降解机理的研究、复合菌种 的效应研究和应用研究还较少。因此，在石油污染 带来的土壤环境问题日益突出且必须大力治理的今 天，应进一步了解菌根真菌降解土壤石油污染物的 机理，尽早将实验室阶段的成果进行中试，为菌根修 复技术的应用与推广提供依据。对此，笔者认为应 该从以下几个方面作进一步的研究：

1)W究不同菌根真菌对石油污染物的修复作 用，筛选岀高效降解石油污染物的优良菌种。

2测究复合菌种对石油污染物的降解。事实 上，土壤是多种菌根真菌共存的复合体系，研究多种 菌根真菌的复合效应，将为寻找更为高效、适应性更 强的菌根生物修复技术提供思路与途径。

3测究菌根植物在石油污染胁迫环境下的生 长代谢，以及菌根植物降解石油污染物的分子调控 机制。

4测究不同环境条件下菌根真菌对石油污染 物的降解速率。在以前的研究中，较少涉及到土壤 含水量、施肥等环境因素对菌根真菌修复效果的调 控作用。而实际上，不同的环境因素会影响菌根真 菌对植物的侵染及污染土壤的修复作用。

5历发低成本、高质量、优性能的菌剂，实现菌 根修复技术的广泛应用。

参考文献

曹云者，施烈焰，李丽和，等.2007.石油炷污染场地环境 风险评价与风险管理•生态毒理学报，2(3 )： 265-272.

程国玲，李培军，王凤友，等.2003.几种纯培养外生菌根 真菌对矿物油的降解效果.中国环境科学，23(1)： 74-76.

耿春女，李培军，陈素华，等.2002.不同AM真菌对三叶 草耐油性的影响.应用与环境生物学报，**8** (6)： 648—652.

耿春女，李培军，陈素华，等.2003.不同丛枝菌根真菌对 万寿菊生长及柴油降解率的影响.应用生态学报， 14(10)： 1775-1779.

耿春女，李培军，韩桂云，等.2001.生物修复的新方法菌 根根际生物修复.环境污染治理技术与设备，2(5)： 20-26.

顾向阳，胡正嘉.1994. VAg根真菌Glmusmossea射棉花 根区微生物量和生物量的影响.生态学杂志，**13** (2)： 7

-11.

何翊，魏薇，吴海.2004.石油污染土壤菌根修复技 术研究.石油与天然气化工，33(3)： 217-218.

黄艺，姜学艳，陶澎.2002.菌根真菌对土壤有机污染 物的生物降解.土壤与环境，11(3 )： 221-226.

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

刘润进，李晓林.2000.丛枝菌根及其应用.北京：科学出 版社.

刘世亮，骆永明，丁克强，等.2004.苯并［勺花污染土壤的 丛枝菌根真菌强化植物修复作用研究.土壤学报，**41**

(3)： 336-342.

陆秀君，郭书海，孙 清，等.2003.石油污染土壤的修复 技术研究现状及展望•沈阳农业大学学报，34(1)： 63—67.

逢焕成，严慧峻，刘继芳，等.2002. 土壤有机氯污染的生 物修复和土壤酶活性的关系.土壤肥料，(1)： 30-33.

任磊，黄延林.2000. 土壤的石油污染.农业环境保护， 19(6)： 360-363.

宋玉芳，宋雪英，张 薇，等.2004.污染土壤生物修复中 存在问题的探讨.环境科学，25(2)： 131-135.

孙铁壬行，宋玉芳，许华夏，等.1999.植物法生物修复PAHs 和矿物油污染土壤的调控研究.应用生态学报， 10 (2 )： 225-229.

王洪君，吴任刚，王嘉麟.2000.生物处理技术冀东油田含 油土壤.环境科学研究，**13** (5 )： 20-23.

张锡辉，BaiPaiR 2000.以关键酶为基础共代谢模型的建 立：以甲烷细菌共代谢三氯乙烯为例.环境科学学报， 20(5)： 558-562.

张玉凤，冯 固，李晓林.2003.丛枝菌根真菌对三叶草根 系分泌的有机酸组分和含量的影响.生态学报，

23(1)： 30-37.

郑金来，李君文，晃福寰.2000.常见农药降解微生物研究 进展及展望•环境科学研究，14(2)： 6L64.

朱教君，徐慧，许美玲，等.2003.外生菌根菌与森林树 木的相互关系.生态学杂志，22 (6 )： 70\_76.

Alexander]^ 1969. Agriculture and 1he Qualiiy of Our Envj\_ jomient WashMton DC American Association fbr 飪e Advanconent of Sc ience

BagyarajDJ Menge 197& Interaction between a VA corihiza and azoiobacter and 1heir effects on ih(zospherem j\_ croflora and Plant N站 PhyQogi単 **8Q** 567—573.

Binetf portal jy[ Leyva 1*Q* 2000. Dissipation of3 105-ring pojycylic aranatic hydrocarbons 讥 lhe 止izosphere of ryegrass Soil B io logy and B ioch(m istry **32.** 2011—2017.

BraurrL^ Hanann *R* Huttemann *R* Majcherczyk A 1999. Screen讥g of ectcmyconhizal fungi 仇 degradation of po])L cyclic arcmatic hydrocarbons APPliedM icrobiology and Bi­otechnology **53.** 127-132.

Burke Caimey *y/Q* 2002. Laccases and o^er polyphenol oxidases 讥 ecto, and cricoid myconhizal flingi Myoomhi 罕 **12：** 105-116.

Caimey WG TaYlorAF^ Buike RN1 2003. No evidence *pr* lignp peroxidase genes 讥 econyconhizal flingi N站 Ph忆 心燧举 **16Q** 461-462

Chambers 帥 EmoRs p耳 et a 1 *1999.* Molecular

anj bioch011 ical evidence fbr manganese.dependent peroxy Jase active jn TYlo^Pora fibrillose MYcological Researc^ **103：** 1098-1102.

Chenny[ Bastias 34 Taylor AF^ et a 1 2003. Identification of laccase, like genes 讥 ectcmyconHizal b^sidicmycetes and transcriptional regulation by nitrogen 讥 p ijodema byssi nun) N^PhYlologist **157：** 547—554.

ChenD\^ Taylor AF^ Eurke 盹 et aj 2001. Identification of genes fbr ]jgn 讥 peroxidases and ni anganese peioxHases 讥 ectcmyconhizal fingi Phytologist **X52：** 151—15&

Colles pj Dobson *ADN,* 1997. Regulation of laccase gene transcription / T^netes versicojor MPlieJ and Environ. men^lMicrobiology 63; 3444^-3450.

Edwards DA AndriotMQ AmorusoM4 et aj 199& Deve], oftnent of fraction specific re^rence Joses( RFDs) and ref rence concentrations( RFCs) fbr 10tai petxoleun hyd^ caibons( TFH) // T。母 1 Petroleum Hydiocaibon Criteria Woik/S Gmup Seriep Massachusetts An he rst Scientific publishers

Gaibaye J EMenQQ 1989. Stinulation of ectonyconhizal fectjon of p 讥us raj {ate. by scme m {ciooigan{sn s associated wi1h 1he mantle of ectcmyconhizas N站 Phymlogipt **112：** 383-388.

GasparMJ^ Cabello Cazau MQ et a 1 2002. Ef杷ct of Phenanihrene and Rhojotoiula gjutffiis on aibuscu]ar con^izal fungus colonization of maize roote MYconhiza **12：** 55-59.

G ram ass Q VoigtKQ K irsche 3 1999. Degradation of pol5L cyclic arcmatic hydrocarbons wilh 1hree to seven arcmatic rpgs by higher flingi p sterile and unsterile soils Eiod匪 Ration iq 51-62

GramssQ QiniherT^ Fritsch^W 199& SPot tests oxj\_ dative enzymes 讥 ectcmyconhizal wooj\_ and litter(£eca\_ Ying fungi MYcolog ica 1 Researc^ 血 67—72.

QramssQ Kirsche 耳 VojgtKQ et aj 1999. Conversion rates of fjve po]ycyclic arcmatic hydrocarbons / liquid cultures 讥 fifty eight fiingi and concern itant production of oxidative enzymes MYcojogica 1 Researc^ 193. 1009-101 &

Qramss Q 1997. Actjvi级 of oxidative enz^nes / flingalmyce\_ lia frem grassland anj Qrest soils Journal of gasfcM {ckl bioW **37.** 407-423.

Green NA Mehaig A4 Till Q et aj 1999. Degradation of 4 - fluorobiPhenyl bYmycorrhizal fungi as detem 讥ed bY19 F nuclear magnetic resonance spectroscopy and14 C iadiola\_ belling analysis MPlieJ and Enviiormenfe 1M icrobiology **65：** 4021-4027.

GQniherT^ Pemer *Qrnnss Q* 199& Activities of Phenol oxH(zpg enz^ines of ectcmyconhizal fiingi 讥 axenje culture and 讥 s加ib iosis wilh Scots pffie( p 讥us $y]vestris J). Journal of BasicM iciobiology 3& 197—206.

Hejionsalo J Jorgensen HaahtelaJ^ et aj 2000. Ef^cts of p 讥us jyestris root grcwih anj mycon^ izosphere Jevej^

opnent on bacterial caibon source utilization and hydiocar bon oxidation 讥 fbrest and pettoleum ontam iiatej soils Canadian Journal of M icrob io logy **4$** 451—464.

Joner EJ Leyva 1 Q 2003. Rhizosphere gradients of polycyclic arcmatic hydrocarbon( PAH) dissipation / wo 讥dustrial soils and tie in pact of arbuscular mycorrhiza Envimnmen\_ tai Science and Technology **37：** 2371—2375.

Kana]y Bariha R 1999. Ccmetabolic m 讥eralization of

benzej 勺 pyrene caused by hydrocarbon additions to soil Envimmienta[Toxicology and Ch血istiy **1&** 2186—2190.

LeyvalQ Binetf 199& Ef^ct of polyaranatic hYdiocaibons p soil on arbuscular mycon^izal Plants Journal of Enviioir mental Qua li^ 27： 402-407.

L/deman RQ 1992. Vesicula匸 Qibuscular myconhizae and soil teraetjons// Mycorrhizae 讥 Sustaliable Agriculture Mad isonW iscons 旳 AS^

Maier^ PeiPPJ^ Schmidt J et a 1 ^95, Levels of a terp^ no id g]ycoside( bJumen/) and cell wal]\_ bound Phenolics 讥 sane cerealmyconHizas p lant Physiology **109.** 4^5— 470.

MartffiezPvJ Santos^ C^z V et aJ 2000. Diagnostic and 圮 su]t 讥g approaches 10 restore petroleum- con tan plated soil 讥 a Mexican tropical svamp ^ater Science and Technology **42：** 37严-384.

McQillW^ R^vellMJ WestlaReEW^ 198I. Biochsnistry ecojog^ and ni icrc)bio]ogy of petroleun canponents 初 soi]// paul E4 Ladd 閱 eds Soil B iochsn istry New York MarcelDekke.r 229—296.

Mehaig A4 Caimey J Maguire^ *1997.* Mineralization of^

4 -dichloropheno 1 by ectemyconhiza] flingi 讥 axenic culture and P sMnbiosiswilh Pffie Ch<niog)he甲 **34** 2495—2504.

Mehaig A4 Caimey J 2000. Ectonyconhizas extending capabilities of i^izosPhere ranediation Soil Biology and Biochemist^ **32.** 1475-1484.

Mehaig AA 2001. The potential £3r utiliz^gmycorrhiza 1 assoc ations 讥 soil bioranediation// Gadd 帥 旬 Fungi 讥 Bioranediation UK Cambridge Universe *presp* 445—

455.

Meyer Lindeman RQ 1986. Selective pfluence on popula\_ tjons of rhizosphere or rhizoplane bacteria and act^icmycet ed by mycorrhizas Qmed by Globus 但 sc icu S°il Bi­

ology and B iochon istry **i&** 19 j—j 95

Nannjpieri p Bollag JVI 1991. Use of enzMnes to Jetoxi^ pes\_ ticHe\_ contam plated soils and waters Jouma 1 of Enviion\_ men很lQualiy **20：** 510-517.

NicolottiQ ESli$ 199& Soil continuation bY crude oil Jir pact on lhe myconh izosphere and on lhe revegetation poten\_ tial of fbrest trees Enviroimenta 1 poIJutjon **99** 37—43.

Parrish ZQ BanksMI^ Schwab Af 2005. Assesanent of con\_ tan jiant lability dur讥g Phytormediation of pojycyclic aro\_ ma tic hydrocarbon fnpacted soy Environmental pollution **137：** 187-197.

potter Cl^ Sigmons KE 199& CcmPosition of petroleum mpc Hires// T。母lHydmcamon Criteria Woiking Group Series Massachusett^ Amherst Sc ientific pub lisherp

Robertson SJ MoGillW^ MassicotteH^ et a 1 2007. *Pewa* leum hydrocarbon contm Elation 讥 boreal Qrest soip A mycorrhizal ecosystms perspective Biological Reviews **82：** 213-240.

Salzer Coibiere^ Boiler J 1999. Hydrogen peroxide acL cumulation 讥 Medixgo truncamla roots cojonizej by tie arbuscular mycon^ iza flingus Q ]cmus ptra raj ices

PRn却 **20&** 319-325.

Sarand J Ttnonen 5 NumiahQLass迪 EJ et aj 199& Ml crobial biofitns and catabolic Plasnid haibour/g degrade tjve fluorescent pseudcmonajs Sc°ts pffiemyconhizosph-

eres developed on petroleum con tan jnated soil FEVtSM i- crobiology Ecology **27：** 115—126.

Schgderf Haivey pj Sc^witzg込2002. P^spects *pr* PhY IO ran ej iation of oiganic pol]u tents Ji Europe Env] romiental Scimce and Pollution Researc^ **9.** [—3.

Siciliano Qeinida JJ EanRs 耳 et aj 2003. Changes in m iciobial ccmmuniiy ccmposition and ftmetion JurJig a po] yarcmatic hYdiocaibon Phytormediation field trial APPlied and Environments IMicrob io logy **69：** 483—489.

Sniti 驾 Read DJ 1997. MYconhizal SM^biosis London England AcaJon ic press

Tinonen SenR 199& Hetemgeneiiy of flm列 and Plant en\_ zyne expression 讥 讥tact Scots Pffie SuilJus bov讥us and paxiljus 初vojuuis mycorrhizospheres developed 讥 natural Qresthumup N站 PhyKWi単 **13&** 355—366.

Volante^ LMuaQ Cesamf etaj 2005. J^fluence of ihree species of aibuscularmycorrhizal ^Lingi on i^e persistence of arcmatic hydrocarbons 讥 contam plated substrates *^/[ycor.* 止国 **16** 43-50.

Vopinf^ Philips D4 Okon y et a 1 1995. Suppression of an iso flavonoid Phy lex 讥 defense response p myconHizal loots Plant Physiology **10&** 1449-1454.

作者简介 陈梅梅，女，1982年生，博士研究生。主要从事 生态环境保护方面研究，发表论文5篇。

me辺04@i26. con

责任编辑魏中青

決中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发资助项目 （2008D470441

\* \* \*通讯作者 Ema" cherme亜o4@126. can 收稿日期：2008-11-11 接受日期：200902々4