

不同磷肥水平下丛枝菌根菌对玉米修复芘污染土壤的影响

孔凡美¹, 史衍玺^{2*}, 林爱军³

(1 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018; 2 青岛农业大学资源与环境学院, 山东青岛 266109; 3 北京化工大学环境科学与工程系, 北京 100029)

摘要:盆栽试验研究了不同磷肥水平下接种丛枝菌根菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)对玉米修复芘污染土壤的影响。结果表明,在施磷水平为20和80 mg/kg条件下,50 mg/kg芘处理土壤中丛枝菌根菌能够正常侵染玉米根系,侵染率没有显著变化;土壤芘污染对玉米的生长有抑制作用,缺磷土壤中施磷能够缓解土壤芘对玉米生长的抑制作用。培养60 d后,高磷(80 mg/kg)和低磷(20 mg/kg)条件下,玉米接种AMF处理土壤芘残留浓度分别比相应的不接种处理降低了38%和35%,比相应无玉米的对照处理降低了53%和58%。表明玉米接种混合AMF能够显著降低土壤芘残留浓度,促进土壤芘的去除。与P 20 mg/kg处理相比,P 80 mg/kg处理玉米接种及不接种AMF的土壤芘残留浓度分别降低了16%和19%,表明缺磷土壤中施磷对玉米及菌根玉米去除土壤芘均有一定促进作用。土壤微生物碳量与土壤芘的去除率显著正相关,接种AMF和P 80 mg/kg处理均能够显著增加土壤微生物碳量,因此土壤微生物数量的增加可能是其促进土壤芘的去除的重要原因。

关键词:丛枝菌根菌;玉米;芘;磷;土壤

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1008-505X(2009)01-0127-06

Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on remediation of pyrene contaminated soil by corn with different phosphorus concentration

KONG Fan-mei¹, SHI Yan-xi^{2*}, LIN Ai-jun

(1 Resource and Environmental College of Shandong Agricultural University, Taian 271018, China;

2 Resource and Environmental College of Qingdao Agricultural University, Qingdao 265200, China;

3 Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Pot experiments were conducted to investigate the effects of arbuscular mycorrhiza fungus (AMF) on the removal of pyrene in soil by corn (*Zea Mays* L.) with different phosphorus concentration treatments. Results showed that AMF community successfully inoculated corn in the soil with 50 mg/kg pyrene plus 80 and 20 mg/kg phosphorus treatment. After 60 days of 80 and 20 mg/kg phosphorus treatment, pyrene residue decreased 38% and 35% comparing with AMF inoculated corn treatment, and 53% and 58% comparing with control, respectively. Results indicated that AMF inoculation significantly reduced pyrene residue in soil, increased the capacity of pyrene removal. Comparing with 20 mg/kg treatment, pyrene residue decreased 16% and 19%, respectively, with inoculation and control treatment under 80 mg/kg phosphorus application. It suggested that phosphorus had positive effect on the removal of pyrene in low phosphorus soil with corn AMF inoculation. Results also showed that microbial biomass C in soil had a significant positive relationship with pyrene removal rate in soil. Both corn inoculation by AM and 80 mg/kg phosphorus treatment significantly increased microbial biomass C in soil, thus, the increase of microbial number was most likely the reason to reduce the pyrene residue in soil.

Key words: arbuscular mycorrhiza fungus (AMF); corn; pyrene; phosphorus; soil

收稿日期:2007-12-26

接受日期:2008-05-19

作者简介:孔凡美(1978—),女,山东新泰人,博士研究生,讲师,主要研究土壤生态环境与植物营养。E-mail: fmkong@sdau.edu.cn

* 通讯作者 E-mail: yanxiy@sina.com.cn

多环芳烃是一类普遍存在于环境中的有机污染物,美国 EPA 已经将芘在内的 16 种多环芳烃列入优先控制有机污染物黑名单^[1]。土壤环境中多环芳烃污染的控制与修复是当前环境科学的研究热点之一,在土壤多环芳烃污染修复的途径中,微生物和植物修复是土壤多环芳烃生物修复的重要途径^[2-4]。徐圣友等^[4]研究表明,利用玉米修复芘污染土壤是一种可行的生物修复方法。菌根是植物和真菌的共生体,对土壤多环芳烃去除的影响具有真菌和植物的双重特性,对有机污染的修复具有独特的优势^[5-6]。初步研究表明,菌根能够促进土壤中多环芳烃的去除^[7-9],因此其对土壤有机污染的修复受到了广泛关注。以往的研究表明,利用植物及微生物去除多环芳烃通常都需要一定的矿质营养^[10],但对于菌根,过高的磷营养通常会降低菌根菌的侵染率,影响菌根作用的发挥^[11]。为此,试验设计了低磷和高磷两个处理,选择在生物降解过程中常作为模型的芘为目标污染物^[12],以玉米为宿主植物,探讨了接种混合丛枝菌根菌菌群在强化玉米去除土壤芘过程中的作用,以及土壤磷营养对土壤芘去除效应的影响,以期对土壤多环芳烃污染的菌根修复提供理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自山东省泰安市郊区农田 0—20 cm 表层土壤,棕壤,多年种植玉米和小麦,无明显污染源。土壤 pH 值 6.7(土:水=1:2.5),有效氮 35.31 mg/kg,速效磷 7.33 mg/kg,速效钾 75.15 mg/kg。土壤经风干、除杂、过 2 mm 筛,混匀后于电热压力蒸气灭菌器中 121℃ 灭菌 2 h,晾干后备用。

芘购于 Fluka 公司,纯度大于 97%。芘标准物质购于北京康林科技有限责任公司。

菌根接种剂:从山东省东营市黄河三角洲孤东油田采集石油污染的芦苇根际土壤,用湿筛倾注法将其中的丛枝菌根菌孢子筛出,接入灭菌土壤中,种植高粱、玉米、苜蓿为混合宿主,培养 120 d 收获,获得混合接种剂。该混合菌剂中 *G. mossea* 和 *A. tuberculata* 为优势种,两种 AMF 孢子数量比例为 2:1,孢子密度为每百克土 150~200 个。

供试宿主植物为玉米(*Zea mays* L.),品种为农大 108 号。试验前选取饱满玉米种子,用 10% 的 H₂O₂ 浸泡 5 min,并分别用自来水和蒸馏水充分冲洗,以蒸馏水浸泡 24 h 后在 25℃ 下黑暗中催芽,待

种子发芽后选择发芽一致的种子播种于育苗盘中,育苗基质用灭菌蛭石和土壤混合(V:V=1:1),在育苗盘中每穴基质中加入 20 g 接种剂,培养一定时间后获得菌根化种苗;不接种种苗基质的处理是在基质中加入 20 g 灭菌接种剂后再加菌种滤液,以保证除菌根菌外的土壤微生物种群一致,所有种苗在育苗盘中培养 2 周。

1.2 试验设计

试验于 2004 年 4 月至 6 月在山东农业大学日光温室进行。设:施 P 20、80 mg/kg,芘 0、50 mg/kg 各 2 个水平,并分别设接种 AMF(+M)和不接种 AMF(-M)2 个处理,完全试验方案,共 8 个处理;同时试验还设置了 50 mg/kg 芘水平下不种植玉米的 P 20 和 80 mg/kg 处理作对照,共计 10 个处理,重复 3 次。

试验采用容积为 5 L 的塑料盆,土壤的芘处理先用三氯甲烷将芘溶解后混匀于少量灭菌土中,充分挥发三氯甲烷以后获得含量为 7.89 g/kg 的含芘土,然后根据设计浓度称取一定量的含芘土加入盆中,同时混入底肥 N 300 mg/kg、K 200 mg/kg,无植物的对照处理用灭菌土壤加菌种滤液、底肥和相应量的芘。每盆装土 4.5 kg,放置老化 10 d。然后将育苗盘中的种苗连同育苗基质一同移入盆中,每盆移苗 2 株,一周后留苗 1 株,移苗后常规培养 60 d 收获。

1.3 测定方法与计算

土壤有效氮采用碱解扩散法进行测定;土壤速效磷用 NaHCO₃ 浸提后,采用钼锑抗比色法测定;土壤速效钾以 NH₄OAc 浸提,火焰光度法进行测定;土壤 pH 值采用电位法(土:水为 1:2.5)测定^[13]。

土壤微生物量碳、氮测定:根据 Vance 等^[14]的方法,采用 CHCl₃ 熏蒸—K₂SO₄ 浸提, K₂Cr₂O₇ 氧化, FeSO₄ 滴定。

土壤中芘的测定:参考宋玉芳等^[15]的研究方法,采用石油醚超声萃取后,以液相色谱测定(岛津 10Avp)。

植物根系菌根真菌侵染率用酸性品红染色镜检法测定^[11]。

采用下列公式分别计算土壤芘去除率(%)以及芘去除的菌根贡献率(%)、植物贡献率(%)、微生物贡献率(%)、微生物去除提高率(%):

土壤芘去除率%=(土壤芘加入含量-土壤剩余芘含量)×100/土壤芘加入含量;

菌根贡献率%=(接种处理土壤芘去除率-不

接种处理) × 100 / 接种处理;

植物贡献率 % = (不接种处理土壤芘去除率 - 对照) × 100 / 接种处理;

微生物贡献率 % = 对照处理土壤芘去除率 × 100 / 接种处理。

试验数据采用 DPS 数据处理软件进行分析和分析, 通过 LSD 多重比较法进行差异显著性检验。

2 结果分析

2.1 土壤磷水平及芘处理对玉米丛枝菌根侵染率的影响

图 1 看出, 所有不接种 AMF 处理均没有观测到丛枝菌根菌侵染, 各接种处理玉米的菌根侵染率均达到 20% 以上, 不同磷处理之间以及 50 mg/kg 芘处理与无芘对照处理之间差异均不显著, 表明 80 和 20 mg/kg 磷水平下, 50 mg/kg 芘处理土壤中丛枝菌根能够正常侵染玉米根系, 侵染率没有显著变化。

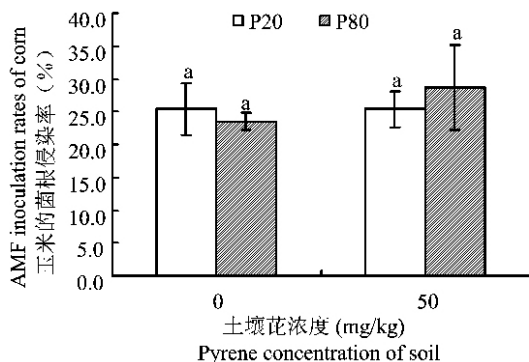


图 1 不同处理的菌根侵染率

Fig. 1 AMF inoculation rates of different treatments

[注 (Note): 标有相同字母的处理在 $P < 0.05$ 水平差异不显著 Treatments marked with the same letter are not significantly different at the $P < 0.05$ level. 下同 The same below.]

2.2 土壤磷水平及丛枝菌根对玉米生物量的影响

各处理玉米的生物量如图 2 所示。由图 2 可以看出, P 20 mg/kg 和芘 50 mg/kg 条件下, 接种 AMF 处理的玉米生物量为 3.58 g/pot, 比相应的不接种处理提高了 1 倍, 而 P 80 mg/kg 和芘 50 mg/kg 条件下, 接种 AMF 处理的玉米生物量为 10.15 g/pot, 与相应的不接种处理差异不显著 (图 2)。表明接种 AMF 在低磷土壤中对玉米的生长有显著促进作用, 在高磷条件下接种处理对玉米生长的促进作用不明显。

图 2 还看出, P 20 和 80 mg/kg 条件下, 芘处理土壤中接种 AMF 处理的玉米生物量分别比相应的无

芘对照处理降低了 64.24% 和 33.2%, 表明土壤芘污染能抑制玉米的生长; 同时也看出, P 80 mg/kg 处理, 土壤芘对玉米生物量的抑制作用显著小于 P 20 mg/kg 处理, 表明土壤磷营养有效缓解了土壤芘对玉米生长的抑制作用。这可能与增施磷肥减轻了由于缺磷引起的养分胁迫, 从而增强了玉米对芘不良影响的抵抗能力有关。

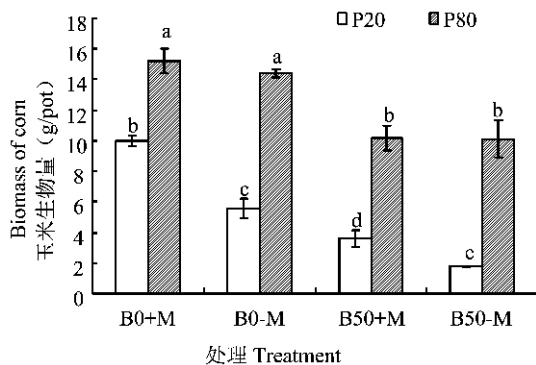


图 2 不同处理的玉米植株生物量(干重)

Fig. 2 Corn biomass (dry weight) of different treatments

[注 (Note): B0—芘 Pyrene 0 mg/kg; B50—芘 Pyrene 50 mg/kg; + M—接种菌根 Inoculation with AMF; - M—不接种菌根 un inoculation. 下同 The same below.]

2.3 不同磷水平下接种 AMF 处理对土壤芘的去除作用

在 50 mg/kg 芘污染条件下, 不同磷水平和接种 AMF 处理, 土壤芘的残留浓度 (图 3) 看出, 低磷 (20 mg/kg) 和高磷 (80 mg/kg) 条件下, 接种 AMF 处理土壤芘的残留浓度分别为 8.58 和 7.25 mg/kg, 比相应的不接种处理降低了 38% 和 35%, 比相应的不种植玉米的对照 (CK) 处理降低了 53% 和 58%; 相应的磷水平下, 接种处理的土壤芘去除率比不接种处理分别提高了 10.05% 和 14.37%, 比不种植玉米的 CK 处理分别提高了 31.25% 和 29.86%。表明两个磷水平下, 芘污染土壤中接种混合 AMF 均能显著降低土壤芘的残留浓度, 促进玉米对土壤芘的去除。

P 80 mg/kg 条件下, 玉米接种 AMF 处理和不接种处理, 土壤芘的残留浓度分别比相应的 P 20 mg/kg 处理降低了 16% 和 19%, 相应的土壤芘去除率提高了 3.2% 和 7.3%。施 P 80 mg/kg 并接种 AMF 对土壤芘的去除效果最佳。表明高磷处理明显降低了土壤芘残留浓度, 提高了土壤芘的去除率, 对玉米及菌根玉米去除土壤芘有一定的促进作用。

在不种植玉米的对照处理中, 两个磷水平之间

土壤芘的残留浓度及去除率没有显著差异。由于本试验条件下,无玉米的对照处理芘的去除主要以土壤微生物为主,因此,可以认为本试验条件下,无玉米的情况下土壤微生物对芘的去除作用对磷的供应不敏感。

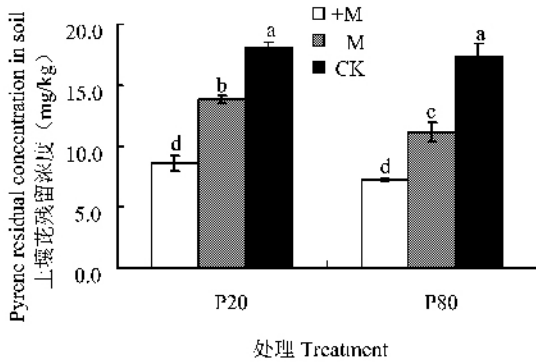


图3 不同处理土壤芘残留浓度

Fig.3 Residual concentration of pyrene in soils of different treatments

为了进一步探讨植物、菌根及微生物在土壤芘去除中的贡献,对各处理中玉米、菌根及微生物的贡献率进行计算,结果列于表1。以接种处理的芘去除率为100%计,不种植玉米的对照处理可认为是无玉米影响条件下单纯的土壤微生物的自然去除作用,该值与接种处理土壤芘去除率的比值可认为是接种AMF处理中除玉米和菌根带来的综合效应外土壤微生物自然去除对土壤芘去除的贡献率。

表1 不同因子对各处理土壤芘去除的贡献率(%)

Table 1 Contribution of different factors on pyrene removal of soil in different treatments

P水平 P levels	菌根 AMF	玉米 Corn	微生物 Microbes
P20	12.6	10.4	77.0
P80	9.1	14.7	76.2

表1看出,P20、P80的对照处理中,土壤微生物自然去除芘的贡献率均达到75%以上。种植玉米以后,土壤芘的去除率比无玉米的对照处理显著增加,两者的差值可以认为是由玉米带来的综合效应引起的,由此计算出的P20、P80处理中玉米对土壤芘去除的贡献率分别为10.4%和14.7%;玉米接种AMF以后,土壤芘的去除率与玉米不接种AMF处理的差值可以认为是由玉米接种AMF带来的综合效

应引起的,由此计算出的P20、P80处理中玉米接种AMF对土壤芘去除的贡献率分别为12.6%和9.1%。表明在P20、P80两个磷水平下,接种AMF对玉米去除土壤芘均有一定的贡献。

2.4 土壤磷水平及丛枝菌根对芘污染条件下土壤微生物碳总量的影响

在芘50 mg/kg的各处理中,由土壤微生物碳总量(表2)可以看出,P20、P80并接种AMF处理的土壤微生物总量分别为相应不接种处理的1.46和1.8倍,为无植物对照处理的2.58和3.05倍。接种和不接AMF处理、以及无植物对照处理三因素之间的土壤微生物碳总量间差异均达到0.05%显著水平,表明种植玉米和接种AMF均可以促进土壤中微生物数量的增加。与P20处理相比,P80处理的土壤微生物碳总量均有一定程度的增加。二因素多重比较结果表明,两个磷处理的土壤微生物碳总量之间差异也达到0.05%显著水平,表明高磷处理也能够显著增加土壤微生物的总量。相关分析结果表明,各芘处理中土壤微生物碳总量与土壤芘去除率的相关系数为0.94($n=18$),呈极显著相关。可见,土壤高磷处理下以及玉米接种AMF后土壤微生物总量的增加可能是其促进土壤芘去除的重要原因。

表2 不同处理土壤微生物碳总量(mg/kg)

Table 2 Microbial biomass C content in the soil of different treatments

处理 Treatments	土壤微生物碳总量 Microbial biomass C content
P20 + M	309.21 ± 29.63 b
P20 - M	211.84 ± 22.79 c
P20 CK	119.74 ± 17.80 d
P80 + M	410.53 ± 27.63 a
P80 - M	227.63 ± 38.34 c
P80 CK	134.61 ± 20.59 d

注(Note): 数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平。

Values followed by different letters are significant among treatments at 5% level. CK 不种玉米 No corn

3 讨论

许多研究表明,接种AMF能够促进多环芳烃的降解^[7-9,16]。在芘污染土壤中,接种AMF后植物根际微生物数量的显著增加,是菌根促进植物降解土壤多环芳烃的重要机制之一^[8,19]。这与本研究的结论相同。菌根形成以后,庞大的菌丝体系增加了植物与土体的接触面积^[18],而由植物向根际和菌丝

际土壤中输入的大量碳在其周围形成了特殊的土体环境,从而支撑了数量庞大的土壤微生物,为有机污染物的降解提供了良好基础^[18]。本试验芘污染土壤中种植玉米并接种 AMF 后,其土壤芘去除率比无玉米的对照处理有显著提高,其中微生物自然去除效应、植物去除效应和接种 AMF 去除效应对土壤芘去除的贡献分别占一定的比重,而土壤微生物的贡献率都达到 75% 以上,对土壤芘的去除起主导作用。本试验计算的土壤微生物去除效应的贡献率不包括种植玉米和接种 AMF 引起的土壤微生物数量增加引起的去除效应,因此微生物在土壤芘去除中的实际贡献还应该更高。说明土壤微生物是去除土壤芘的最重要因素,而土壤施磷、种植玉米以及玉米接种 AMF 均可以进一步增强该效应,从而促进了土壤芘的去除。

以往的研究表明,矿质营养是影响土壤有机污染物生物降解的重要因素之一^[10,20]。Joner 等^[21]通过添加根分泌物模拟根际降解,结果表明,3 至 4 环多环芳烃的降解主要受矿质营养限制。本试验采用的基础土壤养分含量很低,P 含量仅为 7.33 mg/kg,属于低磷土壤。在保证 N、K 养分的充足供应条件下,本试验无玉米对照处理中土壤芘的去除对高磷处理并不敏感,但种植玉米后,高磷处理极显著地促进了玉米生物量的增加,表明玉米需要从土壤中吸收大量的养分,从而促进了土壤芘的去除。而种植玉米后,80 mg/kg 磷处理对土壤芘的去除也均有一定促进作用。可见,土壤芘的去除需要一定的矿质营养,特别是在有植物竞争养分时,补充足够的矿质营养对植物及菌根促进土壤芘的去除具有明显促进作用。虽然过高的土壤矿质营养供应可能会降低菌根菌对植物的侵染率,从而影响菌根作用的发挥^[11],但本试验结果看出,高磷处理和芘污染处理对丛枝菌根菌对玉米的侵染率均没有显著影响,这为菌根修复在土壤芘修复中的应用提供了基础。在 50 mg/kg 芘污染土壤中,80 mg/kg 磷处理的菌根侵染率反而略高于 20 mg/kg 磷处理,这与以往的研究结果不一致,可能与丛枝菌根菌的类型以及土壤环境条件有关。可见,在土壤磷含量较低的情况下,补充磷营养对菌根促进玉米去除土壤芘仍具有积极作用。

参考文献:

[1] Jian Y, Wang L, Peter P *et al.* Photomutagenicity of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons from the US EPA priority pollutant list Mutation

Research[J]. *Muta. Re.*, 2004, 557: 99-108.

- [2] 刘世亮, 骆永明, 曹志洪, 等. 多环芳烃污染土壤的微生物与植物联合修复研究进展[J]. *土壤*, 2002, 34(5): 257-265.
Liu S L, Luo Y M, Cao Z H *et al.* A Review of bioremediation of contaminated soil with microorganism and plants[J]. *Soil*, 2002, 34(5): 257-265.
- [3] 林道辉, 朱利中, 高严征. 土壤有机污染植物修复的机理与影响因素[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1799-1803.
Lin D H, Zhu L Z, Gao Y Z. Main mechanism and affecting factors of phytoremediation of organic contaminated soil[J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2003, 14(10): 1799-1803.
- [4] 徐圣友, 陈英旭, 林琦, 等. 玉米对土壤中菲芘修复作用的初步研究[J]. *土壤*, 2006, 43(2): 226-232.
Xu S Y, Chen Y X, Lin Q *et al.* Remediation of phenanthrene and pyrene contaminated soil by growing maize[J]. *Soil*, 2006, 43(2): 226-232.
- [5] 黄艺, 姜学艳, 陶澍. 菌根真菌对土壤有机污染物的生物降解[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(3): 221-226.
Huang Y, Jiang X Y, Tao S. Contribution of mycorrhizal fungi to biodegradation of POPs in soil: A review[J]. *Soil Environ. Sci.*, 2002, 11(3): 221-226.
- [6] 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]. *应用生态学报*, 2006, 17(11): 2217-2221.
Li Q L, Ling W T, Gao Y Z *et al.* Arbuscular mycorrhizal bioremediation and its mechanisms of organic pollutants contaminated soils[J]. *Chin. Appl. Ecol.*, 2006, 17(11): 2217-2221.
- [7] Leyval C, Binet P. Effect of polyaromatic hydrocarbons in soil on arbuscular mycorrhizal plants[J]. *J. Environ. Qual.*, 1998, 27(2): 402-407.
- [8] Joner E J, Imyval C. Rhizosphere gradients of polycyclic aromatic hydrocarbon(PAH) dissipation in two industrial soils and the impact of arbuscular mycorrhiza[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2003, 37: 2371-2375.
- [9] 刘世亮, 骆永明, 丁克强, 等. 苯并[a]芘污染土壤的丛枝菌根真菌强化植物修复作用研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(3): 336-342.
Liu S L, Lou Y M, Ding K Q *et al.* Enhanced Phytoremediation of benzo[a]pyrene contaminated soil with arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2004, 4(3): 336-342.
- [10] 程国玲, 李培军, 王凤友, 等. 多环芳烃污染土壤生物修复的强化方法[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2005, 6(6): 1-6.
Cheng G L, Li P J, Wang F Y *et al.* Enhanced bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil[J]. *Tech. Equip. Environ. Poll. Contr.*, 2005, 6(6): 1-6.
- [11] 刘润进, 李晓林. 丛枝菌根及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 93-94, 153-158, 192-195.
Liu R J, Li X L. Application of Arbuscular mycorrhiza[M]. Beijing: Science Press, 2000. 93-94, 153-158, 192-195.
- [12] Ravelet C, Krivobok S, Sage L *et al.* Biodegradation of pyrene by sediment fungi[J]. *Chemosphere*, 2000, 40: 557-573.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 79-168.

- Bao S D. Analysis technology of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. 79-168.
- [14] Vance E D, Brooks P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass[J]. Soil Biol. Biochem., 1987, 19: 703-707.
- [15] 宋玉芳, 区自清, 孙铁珩. 土壤、植物样品中多环芳烃(PAHs) 分析方法[J]. 应用生态学报, 1995, 6(1): 92-96.
- Song Y F, Qu Z Q, Sun T H. Analysis technique of PAHs in the soil and plant samples[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 1995, 6(1): 92-96.
- [16] Binet P, Portal J M, Leyval C. Dissipation of 3 to 6-ring polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere of ryegrass[J]. Soil Biol. Biochem., 2000, 32: 2011-2017.
- [17] Bohello P, Bruns T D, Gardes M. Genetic structure of a natural population of the ectomycorrhizal fungus *Suillus pungens*[J]. New Phytol., 1998, 138: 533-542.
- [18] 耿春女, 李培军, 韩桂云, 等. 生物修复的新方法—菌根根际生物修复[J]. 环境污染治理技术与设备, 2001, 2(5): 20-24.
- Geng C N, Li P J, Han G Y *et al.* New method of bioremediation—Mycorrhizosphere bioremediation[J]. Tech. Equip. Environ. Poll. Contr., 2001, 2(5): 20-24.
- [19] Johnson D L, Anderson D R, Mcgrath S P. Soil microbial response during the phytoremediation of a PHA contaminated soil[J]. Soil Biol. Biochem., 2005, 37: 2334-2336.
- [20] Zhang X X, Cheng S P, Zhu C J *et al.* Microbial PHA - degradation in soil: Degradation pathways and contributing factors[J]. Pedosphere, 2006, 16(5): 555-565.
- [21] Joner E J, Corgie S C, Amellal N *et al.* Nutritional constants to degradation of polycyclic hydrocarbons in a simulated rhizosphere[J]. Soil Biol. Biochem., 2002, 34: 859-864.