

植物间作下根际微生物和土壤酶与土壤多氯联苯(PCB)降解的关系

苏嘉欣, 卓 胜, 黎华寿, 林依敏, 贺鸿志

(1.华南农业大学农业部生态农业重点开放实验室, 广州 510642; 2.广东省高等学校农业生态与农村环境重点实验室, 广州 510642)

摘 要:以大豆、黑麦草和南瓜为材料,采用盆栽实验,研究了3种植物的单作和相互间作的不同种植方式对多氯联苯污染土壤的根际修复效应与机理。结果表明:(1)PCB去除率与土壤蛋白酶和磷酸酶活性均呈极显著正相关关系,相关系数分别为0.878和0.929($P<0.01$),推测这两类酶可能参与了PCB的生物降解过程;(2)PCB去除率与土壤真菌密度呈显著相关($r=0.797$),而PCB去除率与土壤细菌及放线菌密度相关不显著;(3)在本实验条件下,微生物因素对土壤PCB的降解起主导作用,非灭菌土处理的土壤PCB去除率比灭菌土相对应的对照高出17.7%~30.75%;(4)根系分泌物能显著强化微生物的降解功能,添加黑麦草和大豆根系分泌物处理的土壤PCB去除率分别比只加营养液的对照高出21.4%和24.9%。

关键词:多氯联苯;植物间作;土壤酶;微生物;分泌物

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)11-2114-07

Effects of Rhizospheric Microbes and Soil Enzymes on the Biodegradation of PCB in the Soil Within Intercropping Systems

SU Jia-xin, ZHUO Sheng, LI Hua-shou, LIN Yi-min, HE Hong-zhi

(1.Key Laboratory of Ecological Agriculture of Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2.Key Laboratory of Agroecology and Rural Environment of Guangdong Regular Higher Education Institutions, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The effects of rhizosphere remediation on Polychlorinated biphenyls (PCB) contaminated soil was studied through a pot-cultivation system with different combinations of three crops including ryegrass (*Lolium perenne* L.), pumpkin [*Cucurbita moschata* (Duch. ex Lam.) Duch. ex Poiret] and soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). The results showed that: (1) Phosphatase and proteinase had a very significant positive influences on remediation rate of PCB in soil. It indicated that phosphatase and proteinase might be involved in the process of PCB's degradation. (2) The number of fungus also had a significant impact on the PCB elimination, but bacterium and actinomycete did not have significant effect. (3) The soil microorganisms played an important role in PCB's degradation. The removal of PCB from non-sterilized soil was higher than sterilized soil. (4) The root exudates could strengthen the PCB's degradation of microorganism. Regarding the removal of PCB from soil, the addition of root exudates from ryegrass and soybean were 21.4% and 24.9% higher than the control respectively.

Keywords: PCB; plant intercropping; soil enzyme; soil microbes; root exudates

由植物介导的根际修复是目前污染土壤植物修复研究的热点。根际是指植物根系活动的影响下,在

物理、化学和生物学性质上不同于土体的根-土动态微域,是植物-土壤-微生物与环境交互作用的场所,其范围通常在2 cm以内。这个区域与非根际土体的区别在于根系的影响。由于植物根系的代谢活动,提供了适宜于环境微生物的微生态环境^[1]。一方面,植物根系巨大的表面积为微生物提供了寄宿之处,使植物根际微生物的数量明显多于周围土壤^[2];另一方面,植物向根际释放根系分泌物,其中有些分泌物

收稿日期:2010-05-17

基金项目:国家重点基础研究“973”项目(2006CB1000206);国家自然科学基金项目(30670380,30870413);华南农业大学国家级植物生物学基础实验中心资助项目(zwys0915)

作者简介:苏嘉欣(1988—),女,学士,研究方向为污染生态与生态恢复。E-mail:hakkasing@163.com

卓胜为同等贡献者

通讯作者:黎华寿 E-mail:lihuashou@scau.edu.cn

(如酚类、有机酸、醇、氮)可以为那些能降解有机污染物的微生物的生长和长期存活提供充足的碳源和氮源^[3],因而能促进微生物的生长、繁殖和代谢活动^[1,4-5]。

根系分泌的糖类物质一般能为根系微生物提供碳源;分泌的各种氨基酸可以抑制线虫的繁殖,同时促进根部的生长,而有机酸的分泌则是为了调节植物的生长^[6]。根际不仅存在这些一般性有机物,而且可能产生某些特殊化合物,作为起降解作用的细菌的生长基质,促进降解细菌生长。萜类物质(如异丙基苯、 α -萜、 α -萜品烯、单萜和倍半萜烯)和酚类物质(如水杨酸盐)能诱导 PCB 降解菌中的联苯加双氧酶的产生^[7-9],而从某些植物根系分泌出来的柚皮素、过氧化物酶、香豆素和儿茶素等酚类物质能促进根际 PCB 降解菌的生长^[10-12]。

农田伴生植物和农作物间作套种复合系统往往由多种植物相互作用构成复合根际微环境,从而极可能对污染物的迁移转化有不同于单一植物根际的特性,这为利用植物多样性复合根际修复提供了高效率、低成本的可能途径。我国研究人员率先验证了不同生态习性的植物间种能实现复合根际强化修复的可能^[13-15],这也为污染耕地实施“边监测、边生产、边修复”的综合防治措施提供了科学参考^[16]。我们实验研究表明,不同生态特性的植物间作比单一植物修复 PCB 效果更好,其中南瓜-黑麦草间作尤佳,去除率比单作平均高 9.9%^[17]。但是对间作条件下植物根际微生物、土壤酶和根系分泌物与有机污染物(尤其是 PCBs)修复过程的关系如何仍有待研究。本文将在前文报道基础上,从南瓜、大豆、黑麦草 3 种植物两两组合在 PCBs 污染土壤中交互作用下,复合根际土壤的微生物数量、酶活性的变化特点以及根系分泌物的作用进行研究,探讨植物间作提高根系修复 PCB 的机理,为该技术的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 供试土壤

土壤于 2008 年 2 月采自华南农业大学农场水稻田,经化验未检测出 PCBs 残留。土壤采集后去除碎石、枯叶等杂物,自然风干,过 2 mm 筛备用。土壤基本理化性质见表 1。将溶于丙酮中的 PCB 与土样充分搅拌均匀进行土壤染毒,使土壤 PCB 含量浓度为 $0.267 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。置于通风橱 1 d,使丙酮挥发完全。

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physiochemical properties of the studied soil

有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH	Eh/mV
31.26	134.36	25.29	29.04	0.87	94.99	4.7	22

1.1.2 供试作物

黑麦草(*Lolium perenne* L.)为洱云牌一年生黑麦草,从种子子公司购得;南瓜[*Cucurbita moschata* (Duch. ex Lam.)Duch. ex Poirer]为富贵蜜本南瓜,从种子子公司购得;大豆[*Glycine max* (L.)Merr.]为华春 3 号,由华南农业大学农学院提供。

1.1.3 供试 PCB

2,2',5-三氯联苯(PCB No.18),购于美国 AccuStandard 公司,纯度为 100%(GC/MS)。

1.2 实验设计

1.2.1 实验 1

不同种植方式下盆栽实验共设 6 种处理:即单种大豆(G);单种南瓜(M);单种黑麦草(L);大豆-南瓜间作(G-M);大豆-黑麦草间作(G-L);南瓜-黑麦草间作(M-L)和无植物的控制对照(CK)。各处理 3 个重复。盆栽根袋详见文献[17]。盆栽实验在玻璃大棚里进行,以减少 PCB 通过气态和颗粒态沉降到叶片的蜡质表皮或者通过气孔吸收进入植物体而对本实验带来的影响,植物种植 2 个月后收集根际土进行分析。

1.2.2 实验 2

为根系分泌物和微生物对土壤 PCB 降解影响的实验。预先收集黑麦草、大豆的根系分泌物,然后在种植有南瓜的小盆里分别浇各类根系分泌物。其中土壤分灭菌土和非灭菌土,另设 1 个只浇营养液的对照,各处理设 3 个重复,于光照培养箱处理 15 d,然后比较灭菌土与非灭菌土、两种根系分泌物与对照(仅营养液)对土壤 PCB 残留量的影响。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤理化性质

pH 值、Eh、电导率、土壤有机质含量及土壤氮、磷、钾含量的测定,均按土壤农化常规分析方法^[18]。

1.3.2 土壤蛋白酶和酸性磷酸酶的测定方法

蛋白酶采用茚三酮比色法,酸性磷酸酶采用 *p*-硝基苯磷酸钠法,均参考关松荫^[19]的方法。

1.3.3 微生物菌落观察与计数方法

微生物菌落观察与计数方法参照中科院南京土壤研究所^[20]的方法。

1.3.4 土壤中 PCB 的提取方法

土壤中 PCB 的提取方法采用索氏萃取, 详见文献[17]。

1.4 PCB 的 GC 条件

PCB 的 GC 色谱条件^[21]: GC 为 Agilent 6890N, 检测器为 ECD, 色谱柱 DB-1701 (30 m×0.32 mm×1 μm), 进样口温度 225 °C, 检测器温度 300 °C。柱升温程序: 150 °C 起温, 保持 1 min, 10 °C·min⁻¹ 升温至 250 °C, 保持 1 min, 5 °C·min⁻¹ 升至 260 °C, 保持 1 min, 20 °C·min⁻¹ 升至 280 °C, 保持 4 min。进样量为 1 μL, 载气为高纯氮。

1.5 数据分析方法

实验数据用 Excel 2007 和 SPSS 13.0 统计软件分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式下根际土壤蛋白酶、磷酸酶的变化

由图 1 得出, 在植物处理组中, 根际土壤蛋白酶的活性除了黑麦草单作与 CK 无显著差异外, 其他种植植物处理都显著高于无植物对照, 其中南瓜是单作处理中蛋白酶活性最高的。植物间作条件下其根际土壤蛋白酶的活性均显著高于单作条件下的根际土壤蛋白酶活性, 其中大豆-黑麦草间作处理下根际土壤蛋白酶活性最高。用 SPSS 相关分析结果显示, 土壤 PCB 去除率与根际土壤蛋白酶活性呈极显著相关, 相关系数为 0.878 ($P < 0.01$), 表明土壤蛋白酶很可能参与了土壤 PCB 的降解过程。

由图 2 可以看出, 植物处理组其根际土壤磷酸酶的活性都要显著高于无植物对照组, 其中南瓜是单作当中土壤磷酸酶活性最高的, 黑麦草则最低。植物间

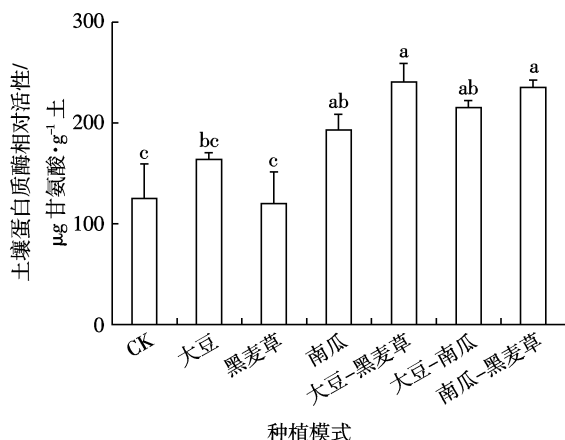


图 1 不同种植方式下根际土壤蛋白酶活性的差异

Figure 1 The variation of soil protease activities in rhizosphere under different planting patterns

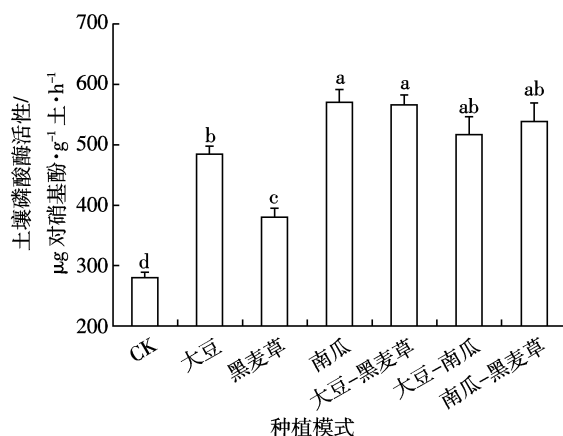


图 2 不同种植方式下根际土壤磷酸酶活性的差异

Figure 2 The variation of soil phosphatase activities in rhizosphere under different planting patterns

作处理条件下的根际土壤磷酸酶的活性均显著高于单作大豆和黑麦草的, 但又都略低于南瓜单作的土壤磷酸酶的活性。相关分析显示, 土壤 PCB 去除率与根际土壤磷酸酶的活性呈极显著相关, 相关系数为 0.929 ($P < 0.01$), 表明土壤磷酸酶很有可能也参与土壤 PCB 的去除过程。

2.2 不同种植模式下根际土壤微生物活性的影响

从图 3~图 5 可以看出, 不同作物、不同种植模式下的不同种根际土壤微生物的菌群密度差异较大。其中土壤细菌和放线菌密度变化规律不明显, 与土壤 PCB 去除率无显著相关关系。但总的来说, 种植植物处理的根际土壤细菌和放线菌的菌群密度要高于无植物对照。土壤真菌密度的变化则随种植模式的不同而呈现一定规律的变化, 植物间作条件下根际土壤真菌密度要明显高于植物单作和无植物对照, 且植物单

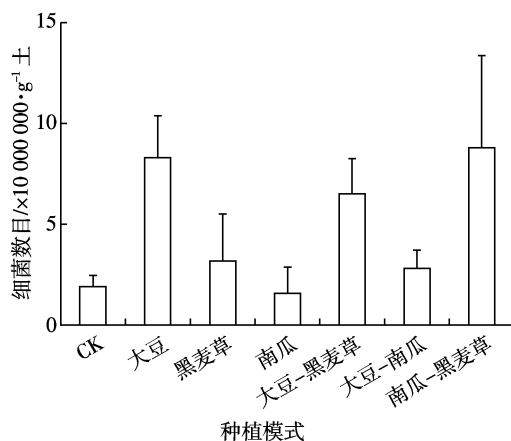


图 3 不同种植方式下根际土壤细菌密度的差异

Figure 3 The difference of rhizospheric bacteria density among different cropping patterns

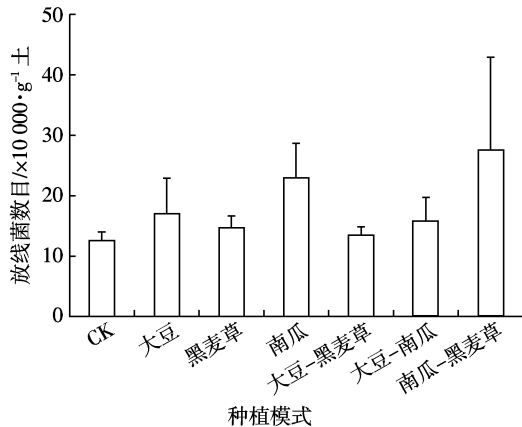


图 4 不同种植方式下根际土壤放线菌密度的差异

Figure 4 The difference of rhizospheric actinomycetes density among different cropping patterns

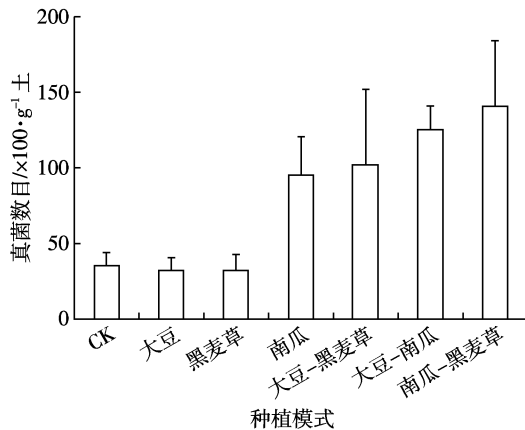


图 5 不同种植方式下根际土壤真菌密度的差异

Figure 5 The difference of rhizosphere fungi density among different cropping patterns

作处理要高于无作物对照处理。土壤真菌密度变化的趋势与根际土壤 PCB 去除率变化趋势相吻合, 相关系数达到显著水平($r=0.797$), 说明在此实验条件下, 土壤真菌群落结构与种植方式有关, 从而导致其生态学功能(PCB 去除过程)发生显著变化。

2.3 根系分泌物对微生物修复土壤 PCB 的影响

由图 6 与图 7 可以看出, 在添加 PCB 的灭菌土中种植南瓜, 土壤 PCB 残留量均显著高于种植南瓜在未灭菌的添加有 PCB 的土壤中的残留量, 说明土壤微生物可能参与 PCB 的降解过程。缺乏 PCB 的土壤, 其 PCB 去除率均低于 5%, 在灭菌处理下, 淋浇根系分泌物与否, 对 PCB 的去除也没有显著影响。而在有土壤微生物参与的非灭菌土中, 种植南瓜 15 d 内便显现显著的 PCB 除去效果, 土壤 PCB 去除率均提高到 20% 左右, 说明土壤微生物的存在对 PCB 的降解起着非常重要的作用。在土壤微生物存在的前提下,

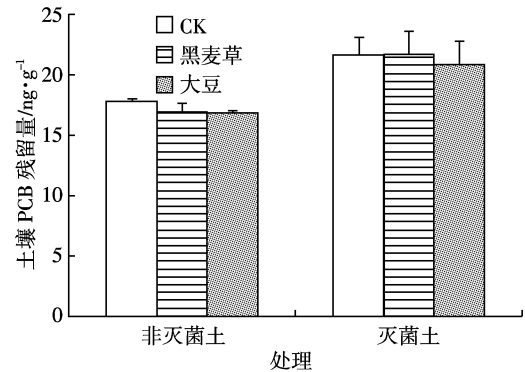


图 6 淋浇不同植物根系分泌物对灭菌与不灭菌处理土壤种植南瓜后的土壤 PCBs 残留的影响

Figure 6 PCB residues in sterile and non-sterilized soil planting pumpkin with various root exudates addition

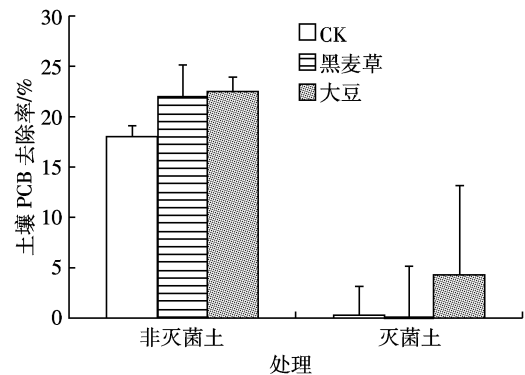


图 7 淋浇不同植物根系分泌物对灭菌与不灭菌处理土壤种植南瓜后的土壤 PCBs 去除率

Figure 7 The removal rate of PCB under sterile and non-sterilized soil planting pumpkin with various root exudates addition

淋浇大豆和黑麦草根分泌物处理的 PCB 去除率分别达到 22.61 % 和 21.97%, 分别高出 CK 24.9% 和 21.4%, 同样说明根系分泌物和植物-微生物群落的互作有助于土壤 PCB 的去除。

3 讨论

相对以往采用抖落法^[2]取得根际土壤, 本研究采用根袋法所取得的土壤更为符合“根际”的要求, 因此在一定程度上更能准确地揭示根际修复的效果与机理。

3.1 土壤蛋白酶和磷酸酶对去除 PCB 的影响

酶是土壤中最活跃的有机成分之一, 土壤作为“类生命体”, 土壤微生物和土壤酶一起共同推动土壤的代谢过程。土壤中各有机、无机营养物质的转化速度, 主要取决于转化酶、蛋白酶、磷酸酶、脲酶等, 土壤酶活性反映了土壤中各种生物化学过程的强度和方向, 是土壤肥力和土壤自净能力评价的重要指标之

一。因此,土壤酶的活性与土壤理化特性、肥力状况和农业措施有着显著的相关性。

本研究中,土壤蛋白酶和磷酸酶活性都与土壤 PCB 去除率呈极显著相关,相关系数分别为 0.878 和 0.929,表明土壤蛋白酶和磷酸酶很有可能参与土壤 PCB 的去除。因为土壤蛋白酶和磷酸酶活性的提高,土壤 C、N 含量、土壤肥力也相应提高^[23],使得植物生物量提高和植物吸收 PCB 总量的提高^[17],最终导致提高了土壤 PCB 去除率。

3.2 根际微生物对降解土壤 PCB 的主导作用

大量文献报道,植物能通过改善土壤微生物生存条件和提高微生物活性,从而帮助根际微生物降解包括多氯联苯在内的部分持久性有机污染物(POPs)。本文研究结果表明,在不同的种植模式下,根际土壤微生物菌群密度发生极大的变化,这与徐强等^[23]和耿广东等^[24]的研究结果一致。平板培养微生物结果显示,3 类微生物都与 PCB 去除率呈正相关,其中土壤真菌密度与 PCB 去除率呈显著正相关,可能正是 PCB 降解的直接参与者,这与 Suzuki 等^[25]、He 等^[26]研究结果相似。对比灭菌土和非灭菌土前后土壤 PCB 残留量可以得知,灭菌土的 PCB 去除率要显著低于非灭菌土,同样说明土壤中的微生物对 PCB 的去除起着至关重要的作用。

植物直接分泌或者外加的根系分泌物可刺激生物表面活性剂菌群的产生,而生物表面活性剂菌可增加有机污染物的溶解度,从而加速有机物在根际的降解。Uhlik 等^[27]利用 DNA-稳定同位素探测技术(SIP)和末端限制性长度多态性(T-FRLP)技术来鉴别山葵(*Armoracia rusticana*)根际中代谢 PCBs 前后微生物种类上的差异,研究结果揭示了土壤环境的改变能导致不同种类的细菌参与 PCB 的代谢。Reardon 等^[28]研究发现,有植被的有机污染土壤和非污染土壤比,相对应的无植被的土壤都存在更多的生物表面活性剂菌群,这与有机物的降解密切相关。由此说明,PCB 的生物降解受植物与根际细菌相互作用的影响显著,是影响 PCB 残留量的重要因素^[29],而不同生态特征的两种植物间作,更能极大地提高根际细菌降解土壤 PCB。

已有研究证明,植物与根际细菌的协同作用提高修复土壤 PCBs 的能力,其机理可能是生长在受 PCBs 污染土壤的植物为了代谢根际周围 PCBs,通过分泌根系分泌物、植物酶甚至提高根系周围的氧气浓度^[30]来富集大量的 PCBs 降解菌,并诱导基因编码酶来参与 PCBs 的降解^[31],从而提高了土壤 PCBs 的修复效果。

3.3 根系分泌物对 PCB 降解的促进作用

植物释放根系分泌物参与土壤 PCB 的降解是植物对 PCB 降解的间接作用。根系分泌的碳水化合物一般能为根系微生物提供碳源,分泌的各种氨基酸可以抑制线虫的繁殖,同时促进根部的生长,而有机酸的分泌则是为了调节植物的生长^[6]。根际不仅分泌这些一般性有机物,而且可能产生特殊化合物,作为降解细菌的底物,以促进降解细菌生长。

本文研究结果表明,对于灭菌土来说,添加根系分泌物与只加营养液之间的结果差异较小,而对于非灭菌土,添加根系分泌物的土壤 PCB 残留量明显低于只加营养液的对照,其中添加大豆根系分泌物的处理效果最明显。由此说明,植物的根系分泌物可能含有特殊的有机物质如酚类物质或者萜类物质,这类物质能富集 PCB 降解菌并促进细菌的生长^[10-12]或者诱导 PCB 降解菌中联苯加双氧酶的产生^[7-9],从而达到修复土壤 PCB 的效果。

根系分泌物在污染土壤的根际修复中发挥着重要作用,根据目前的文献,应用于污染土壤根际修复的可能途径主要包括:酶系统的直接降解,通过增加微生物的数量形成富集效应的间接降解;以及根系分泌物(如类异戊二烯)诱导的共代谢或协同代谢降解途径^[1,5,32-35]。

从本文研究结果可见,恰当的不同植物品种组合形成的间作系统,能改变根际微环境的理化性质和生物学特性,特别是能通过根系分泌物和其他根际过程,从而改变根际微生物的种类和数量,改变根际土壤酶的活性和植物生长的营养条件等,最终影响 PCB 的根际降解和植物吸收。

4 结论

(1)植物间作能极大地影响土壤酶活性,土壤磷酸酶和蛋白酶活性与土壤 PCB 去除率呈极显著相关,这两种酶可能参与了 PCB 降解。

(2)植物间作对土壤微生物的数量影响很大,土壤真菌密度与 PCB 去除率呈显著相关,而土壤细菌与放线菌密度则与 PCB 的去除无显著相关。

(3)根际微生物对土壤 PCB 的降解起主导作用,非灭菌土处理的土壤 PCB 去除率比相对应的灭菌土高出 17.7%~30.75%。

(4)根系分泌物能显著加强微生物的降解,添加黑麦草和大豆根系分泌物处理的土壤 PCB 去除率分别比只加营养液的对照高出 21.4%和 24.9%。

参考文献:

- [1] Schnoor J L, Licht L A, Mccutcheon S C, et al. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants[J]. *Environmental Science and Technology*, 1995, 29:318-323.
- [2] 吴 辉, 郑师章. 凤眼莲根分泌物对 *Enterobacter sp. nov.* 苯酚代谢的影响[J]. 应用生态学报, 1993, 4(1):78-84.
WU Hui, ZHENG Shi-zhang. Effect of root exudates from *Eichhornia crassipes* on phenol-degrading *Enterobacter sp. nov.*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1993, 4(1):78-84.
- [3] Betts K S. Getting to the root of phytoremediation[J]. *Environmental Science and Technology*, 1998, 32:18A.
- [4] Shimp J F, Tracy J C, Davis L C, et al. Beneficial effects of plants in the remediation of soil and ground-water contaminated with organic materials[J]. *Environmental Science and Technology*, 1993, 23:41-47.
- [5] Cunningham S D, Berti W R, Huang J W. Phytoremediation of contaminated soils[J]. *Trends in Biotechnology*, 1995, 13:393-397.
- [6] Bertin C, Yang X H, Weston L A. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere[J]. *Plant and Soil*, 2003, 256(1):67-83.
- [7] Focht, D D. Strategies for the improvement of aerobic metabolism of polychlorinated-biphenyls[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1995, 6(3):341-346.
- [8] Chen S H, Aitken M D. Salicylate stimulates the degradation of high-molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons by *Pseudomonas saccharophila* P15[J]. *Environmental Science and Technology*, 1999, 33(3):435-439.
- [9] Singer A C, Smith D, Jury W A, et al. Impact of the plant rhizosphere and augmentation on remediation of polychlorinated biphenyl contaminated soil[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, 22(9):1998-2004.
- [10] Donnelly P K, Hegde R S, Fletcher J S. Growth of PCB-degrading bacteria on compounds from photosynthetic plants[J]. *Chemosphere*, 1994, 28(5):981-988.
- [11] Macek T, Macková M, Káš J. Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation[J]. *Biotechnology Advances*, 2000, 18(1):23-34.
- [12] Chaudhry Q, Blom-Zandstra M, Gupta S, et al. Utilising the synergy between plants and rhizosphere microorganisms to enhance breakdown of organic pollutants in the environment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2005, 12(1):34-48.
- [13] 黑 亮, 吴启堂, 龙新宪, 等. 东南景天和玉米套种对 Zn 污染污泥的处理效应[J]. 环境科学, 2007, 28(4):852-858.
HEI Liang, WU Qi-tang, LONG Xin-xian, et al. Effect of Co-planting of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on Zn-contaminated sewage [J]. *Environment Science*, 2007, 28(4):852-858.
- [14] Wu Q T, Hei L, Wong J W C, et al. Co-cropping for phyto-separation of zinc and potassium from sewage sludge[J]. *Chemosphere*, 2007, 68:1954-1960.
- [15] Pan S W, Wei S Q, Yuan X, et al. The removal and remediation of phenanthrene and pyrene in soil by mixed cropping of alfalfa and rape[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(11):1355-1364.
- [16] 唐世荣, 高尚宾, 丁永祯, 等. 我国农业环境研究中值得关注的几个科学问题[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1):1-7.
TANG Shi-rong, GAO Shang-bin, DING Yong-zhen, et al. Some scientific issues concerning the agroenvironmental research in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1):1-7.
- [17] 卓 胜, 贺鸿志, 黎华寿, 等. 植物间作体系根际修复土壤多氯联苯的效应[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):73-77.
ZHUO Sheng, HE Hong-zhi, LI Hua-shou, et al. Effects of rhizo-remediation PCB contaminated soil under intercropping system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1):73-77.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:25-151.
BAO Shi-dan. Soil agriculture chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:25-151.
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986:260-346.
GUAN Song-yin. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986:260-346.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985:44-58.
Microbial Room of Institute of Soil CAS. Research methods on soil microbes[M]. Beijing: Science Press, 1985:44-58.
- [21] 中华人民共和国农业行业标准. 乳与乳制品中多氯联苯的测定气相色谱法[S]. 2008, NY/T 1661-2008.
NY/T of PRC. Determination of PCBs contents in milk and dairy products by gas chromatography method[S]. 2008, NY/T 1661-2008.
- [22] 徐 莉, 滕 应, 张雪莲, 等. 多氯联苯污染土壤的植物-微生物联合田间原位修复[J]. 中国环境科学, 2008, 28(7):646-650.
XU Li, TENG Ying, ZHANG Xue-lian, et al. Combined remediation of PCBs polluted soil by plant and microorganism in a field trial[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(7):646-650.
- [23] 徐 强, 程智慧, 孟焕文, 等. 玉米-线辣椒套作系统中土壤养分与根际土壤微生物、酶活性的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12):2747-2754.
XU Qiang, CHENG Zhi-hui, MENG Huan-wen, et al. Relationships between soil nutrients and rhizospheric soil microbial communities and enzyme activities in a maize-capsicum intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(2):2747-2754.
- [24] 耿广东, 王忠平, 冯道友, 等. 玉米与姜间作对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2009, 40(5):1104-1106.
GENG Guang-dong, WANG Zhong-ping, FENG Dao-you, et al. Effects of maize and ginger intercropping on the soil microorganisms and enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(5):1104-1106.
- [25] Suzuki C, Nagaoka K, Shimada A, et al. Bacterial communities are more dependent on soil type than fertilizer type, but the reverse is true for fungal communities[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55:80-90.
- [26] He J Z, Zheng Y, Chen C R, et al. Microbial composition and diversity of an upland red soil under long-term fertilization treatments as revealed by culture-dependent and culture-independent approaches[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2008, 8:349-358.
- [27] Uhlik O, Jecna K, Macková M, et al. Stable isotope probing reveals bi-

- phenyl-metabolizing bacteria in the rhizosphere of horseradish and bulk soil contaminated by polychlorinated biphenyls[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75:6471-6477.
- [28] Reardon K F, Olson P E, Lowell J, et al. Stimulation of microbial polycyclic aromatic hydrocarbon biodegradation by plant chemicals. Abstr. Pap. S 221:49-BIOT Part I, American Chemical Society, Washington, D. C., 2001, 4(3).
- [29] Macková M, Vrchotová B, Francová K, et al. Biotransformation of PCBs by plants and bacteria: Consequences of plant-microbe interactions[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2007, 43(4):233-241.
- [30] Huesemann M H, Hausmann T S, Fortman T J, et al. In situ phytoremediation of PAH- and PCB-contaminated marine sediments with eelgrass (*Zostera marina*) [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(10):1395-1404.
- [31] McLoughlin E, Rhodes A H, Owen S M, et al. Biogenic volatile organic compounds as a potential stimulator for organic contaminant degradation by soil microorganisms[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(1):86-94.
- [32] 旷远文, 温达志, 钟传文, 等. 根系分泌物及其在植物修复中的作用[J]. 植物生态学报, 2003, 27(5):709-717.
- KUANG Yuan-wen, WEN Da-zhi, ZHONG Chuan-wen, et al. Root exudates and their roles in phytoremediation[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2003, 27(5):709-717.
- [33] 魏树和, 周启星, 张凯松, 等. 根际圈在污染土壤修复中的作用与机理分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1):143-147.
- WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, ZHANG Kai-song, et al. Roles of rhizosphere of remediation for contaminated soils and its mechanisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1):143-147.
- [34] Newman L A, Strand S E, Choe N, et al. Uptake and transformation of trichloroethylene by hybrid poplar[J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31(4):1062-1067.
- [35] Cleveland, C C, Yavitt, J B. Microbial consumption of atmospheric isoprene in a temperate forest soil[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64:172-177.

致谢:感谢华南农业大学农业部生态农业重点开放实验室主任骆世明教授对英文摘要的润色和对全文提出的宝贵意见。