

植物间作体系根际修复土壤多氯联苯的效应

卓 胜^{1,2}, 贺鸿志^{1,2}, 黎华寿^{1,2}, 秦之璇^{1,2}, 温贤有³, 李拥军³

(1.华南农业大学农业部生态农业重点开放实验室, 广东 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, 广东 广州 510642; 3.广东省中山市农产品质量监督检验检疫中心, 广东 中山 528403)

摘 要:以大豆、黑麦草和南瓜为材料,运用盆栽实验,通过3种植物的单作和间作对多氯联苯污染土壤的根际修复效应进行了研究。结果表明,植物不同种植方式均对根际土壤中PCB浓度的降解有促进作用,其中植物单作的去除率比CK提高了10.4%~17.0%,植物间作的去除率比CK提高18.4%~23.9%。南瓜-大豆体系中的大豆根的蓄积浓度显著差异高于其他处理,而与大豆南瓜间作方式下黑麦草根蓄积浓度均比其单作显著提高,大豆-南瓜和南瓜-黑麦草间作系统中的大豆和黑麦草根中PCB蓄积浓度也显著提高($P<0.05$)。各处理间根际土壤的pH、Eh、电导率的差异性规律性不大。相关分析结果表明,根际土壤PCB去除率与植物吸收量呈显著正相关,而与pH、Eh和电导率没有达到显著相关。

关键词:植物间作;根际微环境;多氯联苯;植物修复

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)01-0073-05

Effects of Rhizo-remediation Polychlorinated Biphenyl Contaminated Soil Under Intercropping System

ZHUO Sheng^{1,2}, HE Hong-zhi^{1,2}, LI Hua-shou^{1,2}, QIN Zhi-xuan^{1,2}, WEN Xian-you³, LI Yong-jun³

(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; 3.Zhongshan Quality Supervision & Test Center of Agricultural Products, Zhongshan 528403, China)

Abstract: The effects of rhizosphere remediation about PCB contaminated soil was studied through a pot-cultivation system with three plants intercropping including ryegrass (*Lolium perenne* L.), pumpkin (*Cucurbita moschata*) and soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). The results indicated that plant played an important role in decreased the concentration of PCB in the soil. The rate of remediation of sole plant increased 10.4%~17.0% than control, what is more, the effects of intercropping was better, improved 18.4%~23.9% than control. Under different cropping patterns, the pH, Eh, conductivity as well as plant uptake and the PCB content of unit root had certain extent differences. From the correlation analysis, we know the plant uptake had a significant positive correlation with the rate remediation of soil PCB. However pH, Eh and conductivity hadn't achieved significant correlation.

Keywords: intercropping; rhizosphere; PCB; phytoremediation

多氯联苯(PCBs)是一组由一个或多个氯原子取代苯分子中的氢原子而形成的氯代芳香族化合物,理论上共有209种同系物,化学通式为 $C_{12}H_nCl_{10-n}$ ^[1]。大量的废旧电子/电器设备随意丢弃是PCBs进入环境重要的途径之一^[2]。

由植物介导的根际修复是目前研究PCBs污染土壤的热点。根际的概念最早是由Lorenz Hiltner于1904年提出,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,它是植物-土壤-微生物与环境交互作用的场所,其范围通常只有2 cm以内^[3]。根际是土壤水分和矿物质进入根系参与生物循环的门户,也是根系自身生命活动和代谢对土壤影响最直接、最强烈的区域。在不同环境条件下,植物根系可以分泌有机阴离子、质子和酶等来改变根际微环境的生物化学性质,改变根际微环境中养分和污染物的化学形态和生物有效性,并最终

收稿日期:2009-09-17

基金项目:国家重点基础研究“973计划”项目(2006CB1000206);国家自然科学基金项目(30670380,30870413);农业部生态农业重点开放实验室基金(2009-K07)

作者简介:卓 胜(1985—),男,硕士研究生,广东人,研究方向为污染生态与生态恢复。E-mail:hakkasing@163.com

通讯联系:黎华寿 E-mail:lihuashou@scau.edu.cn

影响植物对养分和污染物的吸收与积累^[4-6]。

间套作是我国传统农业的精髓,具有大幅度提高农田生态系统生产力的特点,国内外对间作套种提高地上部光热资源利用进行了大量研究。目前在间套作方面已经取得了一些可喜的成绩^[7-12]。受此启发,本实验研究 3 种植物两两在污染土壤中的交互作用,初步探究植物间作提高根系修复 PCBs 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

土壤为 2008 年 2 月采集于华南农业大学农场水稻田,经化验没有 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。土壤染毒:将溶于丙酮中的 PCB 与土样充分搅拌均匀,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 physicochemical properties of the study 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,从种子公购得;南瓜(*Cucurbita moschata*)为富贵蜜本南瓜,从种子公购得;大豆(*Glycine max*(L.) Merr.)为华春 3 号,本学院提供。

1.1.3 供试 PCB

为 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

盆栽实验,设 6 个处理: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),另设一个无作物对照(CK),每个处理 3 个重复。盆栽实验置于玻璃大棚里,减少了 PCBs 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^[13],植物种植 2 个月(60 d)后收集根际土和植物样本进行分析测定。

如图 1(参考 Li^[14],略作改进),选一个 $13 \text{ cm} \times 18 \text{ cm} \times 26 \text{ cm}$ 塑料盆,每盆 7.5 kg 水稻土,盆中间是由

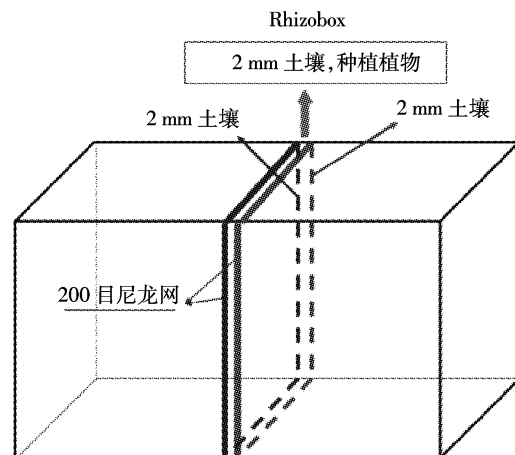


图 1 实验用根袋图

Figure 1 Rhizobox for the experiment

200 目尼龙网制成 2 mm 的根袋,两边再用尼龙网隔成 2 mm,全部用于收集根际土。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤理化性质

pH 值、Eh 值、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。

1.3.2 PCB 的提取方法

参考黄业茹的方法^[15]略作改进,具体过程:称取相当于 20 g 风干的根际土样(植物样为鲜样,分地上和地下部分,分别用液氮磨碎)于三角形瓶(100 mL),所有样品各加丙酮 20 mL 浸泡过夜。然后超声萃取 30 min(20 ℃),静置,取上清液于分液漏斗,各加正己烷 20 mL 于锥形瓶洗沉淀,再超声萃取 30 min,合并上清液。分别加入 20 mL 正己烷和 3% 的 NaCl 溶液[(植物用 20 mL 的饱和 NaCl 溶液和混合液(4 正己烷:1 乙酸乙酯)],充分摇匀,静置,放掉下层液,重复 2 次。然后用浓 H_2SO_4 洗涤数次,直至浓硫酸无色。各漏斗分别加 5 mL 3% 的 NaCl 溶液洗涤,重复 2 次。接着将溶液过预先烘干的无水 Na_2SO_4 柱脱水。脱水后在旋转蒸发器上减压浓缩至 5 mL。再过硅胶小柱。冰箱保存备用,上 GC 前用氮吹仪定容到 1 mL。GC-ECD 外标法定量,此方法的回收率为 84.8%~91.0%。

1.3.3 PCB 的 GC 条件

GC 色谱条件^[16]:气相色谱仪为 Agilent 6890N,检测器为 ECD,色谱柱为 DB-1701(30 m $\times$ 0.32 mm $\times$ 1 μm),进样口温度 225 ℃,检测器温度 300 ℃。柱升温程序:150 ℃起温,保持 1 min,5 ℃ $\cdot$ min⁻¹升温至 250 ℃,保持 1 min,5 ℃ $\cdot$ min⁻¹升至 260 ℃,保持 1 min,20 ℃ $\cdot$ min⁻¹升至 280 ℃,保持 4 min。进样量为 1 μL ,载气为高纯氮。

1.4 数据分析方法

实验数据用 Excel 2003 和 SPSS 统计软件分析。

2 结果与分析

2.1 根际土壤 PCB 残留量的变化

从图 2 可以看出,单种大豆、南瓜、黑麦草和间作大豆-南瓜、大豆-黑麦草、南瓜-黑麦草 6 种处理其根际土壤 PCB 残留量都显著低于无作物对照 ($P<0.05$)。其中 3 种作物单作之间根际土壤 PCB 残留量没有显著差异 ($P>0.05$),去除率为 73.7%~80.3%,但单作南瓜 PCB 去除率是最高的(80.3%);作物间作之间也没有显著差异 ($P>0.05$),但与单作相比都降低了 PCB 的残留量,南瓜-黑麦草间作是效果最好的(去除率为 87.2%),与单作大豆、黑麦草差异显著 ($P<0.05$)。由此说明南瓜-黑麦草间作有利于修复土壤 PCB。

2.2 植物体内 PCB 的含量

已有大量文献证明植物能吸收土壤 PCB^[17-22]。本实验再次证明了这一观点(如图 3),而间作普遍提高了植物吸收 PCB 的能力,其中南瓜和黑麦草间作吸收

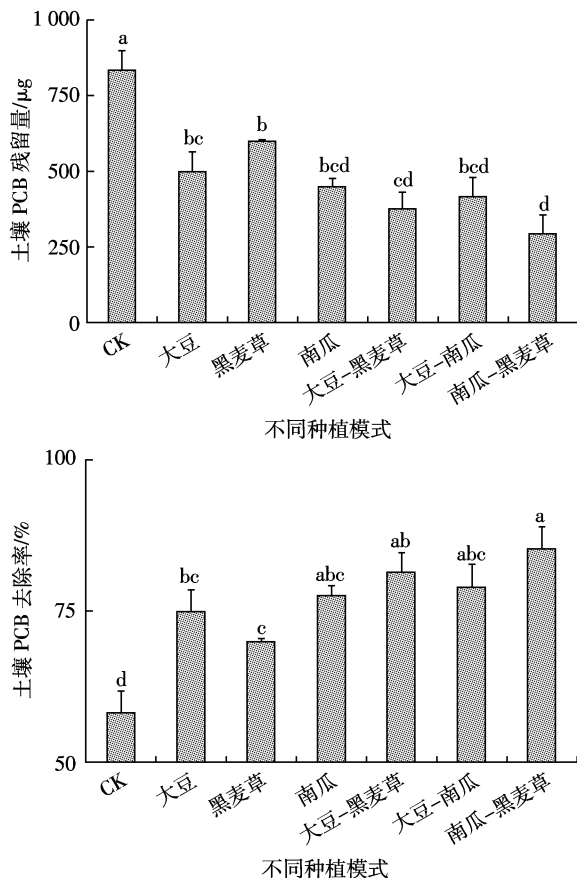


图 2 不同种植方式根际土壤 PCB 残留量与去除率比较
Figure 2 The residue level of PCB and remediation rate under different cropping patterns

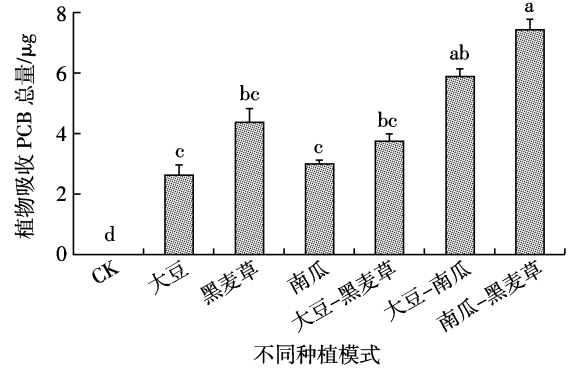


图 3 不同种植模式下植物体内 PCB 蓄积量
Figure 3 The PCB total quantities of plants under different cropping patterns

能力最佳。单作来说,黑麦草的效果最好,大豆最差,主要原因可能是在此盆栽前提下,黑麦草的根系要比大豆根系发达得多,根生物量也大,因此总吸收量更高。

从图 4 可以看出,单作之间大豆、南瓜单位根中 PCB 含量显著高于黑麦草 ($P<0.05$),说明大豆和南瓜的根系比黑麦草更容易吸收 PCB,这与前面的土壤 PCB 去除率一致。间作中各种植物根 PCB 含量比较复杂,并不是都比单作要高。无论间作或单作,南瓜、大豆根的蓄积浓度差异不显著,只有黑麦草根的蓄积浓度为两种间作方式均比单作高,差异显著 ($P<0.05$),但间作方式间差异也不显著;大豆-南瓜间作,只有大豆显著高于大豆单作,差异显著 ($P<0.05$);南瓜-黑麦草间作系统中大豆根的 PCB 含量也显著提高。总体来说,植物间作有利于植物生长,获得更高生物量,而且不同组合的间作模式中,其中的黑麦草和大豆的植物根系对土壤 PCB 的吸收蓄积显著提高。

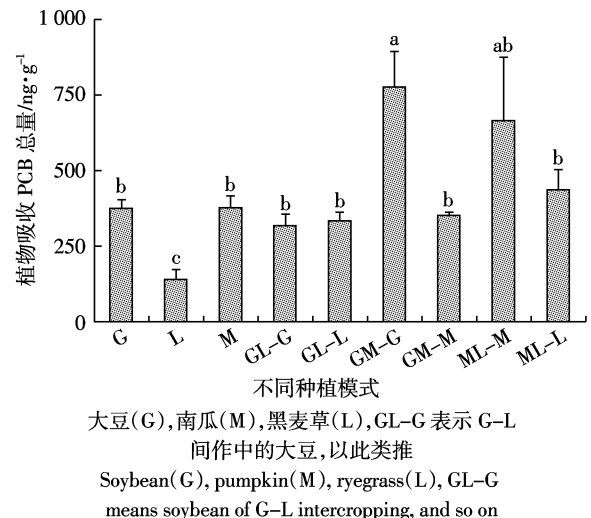


图 4 不同种植模式下植物根中 PCB 的含量
Figure 4 The PCB content of plant roots under different cropping patterns

2.3 种植方式对根际土壤 pH、Eh 和电导率的影响

种植模式不同,种植的植物不同,其根际土壤的理化性质会有很大的差异。由表 2 可以看出,南瓜单作或间作的根际土壤 pH 较低,与其他处理具有显著差异,其中南瓜单作只有 4.84,说明南瓜根系分泌了较多的酸性物质,如有机酸等,而黑麦草则分泌较少。本实验中,单作南瓜和间作大豆-南瓜氧化还原电位最高,氧化性最强,可能跟 PCB 的修复有关。电导率方面,单作都比对照要高,其中大豆的电导率是所有处理当中最高的,与对照和间作都呈显著差异,说明大豆的根系较活跃,分泌物较多较复杂;而间作的电导率都与对照差异不显著,可能是因为植物之间互相利用与降解 PCB 无关的分泌物,同时释放更多与根际降解相关的分泌物。

2.4 根际土壤 PCB 去除率的相关分析

相关分析是研究现象之间是否存在某种依存关系,并对具体有依存关系的现象探讨其相关方向以及相关程度。从表 3 可以看出植物体吸收的 PCB 总量与根际土壤 PCB 去除率呈显著正相关($P<0.05$),说明植物的吸收有利于土壤 PCB 残留量的降低。而 Eh 和 pH、电导率分别与根际土壤 PCB 去除率呈正、负相关,但是都没有到达显著相关的程度。

3 结论与讨论

相对以往采用抖落法取得根际土壤^[23-26],本实验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为准确。

从以上结果可以看出,植物能显著提高修复土壤 PCB 的能力,降低根际土壤 PCB 的残留量,这与多数学者的观点一致^[20-21,27-28]。不同生态特性的两种植物间作比单一植物修复 PCB 效果更好,其中南瓜-黑麦草间作是此次实验效应最好的,去除率比单作平均高 9.9%,值得进一步研究。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 POPs。不同种植模式下,根际环境和植物生长条件的变化多样,植物根际土壤的 pH、Eh 和电导率等理化性质都

表 3 根际土壤 PCB 去除率的相关分析表

Table 3 Correlation analysis about the remediation rate of soil PCB

项目	植物吸收 PCB 总量	pH	Eh	电导率
根际土壤 PCB 去除率	0.820*	-0.481	0.515	-0.315

注:*, Correlation is significant at the 0.05 level.

有所不同,这可能导致植物修复根际土壤污染的能力发生改变。因为植物不同,其根系分泌必然有所差异,pH 等理化性质也就会受到变化,这可能改变了污染物的溶解度,增加了土壤污染物的生物可利用度,从而提高了生物体(包括植物和根际微生物)的吸附能力和降解能力^[29],最终影响污染物的迁移转化。

相对于无植物对照,除了植物体内吸收并代谢降解一部分 PCB 外,PCB 还可能有一些途径从土壤中得以消除:植物尤其是不同生态特性的两种植物间作可能有助于 PCB 在土壤中的解吸附,提高了 PCB 从土壤挥发的能力;也有可能是 PCB 被植物吸收之后从叶片挥发;还有可能是根际的微生物将部分的 PCB 成功降解了^[30];甚至是植物组织将 PCB 代谢成低氯物质^[19,30]。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^[7,31],最终影响 PCB 的根际降解和植物吸收。植物间作体系能强化修复多氯联苯究竟是以哪种机理为主或它们之间的联合作用,均有待深入探究。

参考文献:

[1] DeVor R, Carvalho-Knighton K, Aitken B, et al. Dechlorination comparison of mono-substituted PCBs with Mg/Pd in different solvent systems[J]. *Chemosphere*, 2008, 73: 896-900.

[2] Wong M H, Wu S C, Deng W J, et al. Export of toxic chemicals —a review of the case of uncontrolled electronic-waste recycling[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 149(2): 131-140.

[3] Hiltner L U. Neuere erfahrungen und1probleme dufdem gebietder bodenbakteriologie und unter besondererberu ecksichtigung der grundun-gung und brache[J]. *Arb Dtsch Land Wirt Ges*, 1904, 98: 59-78.

[4] 王书锦,胡江春,张 宪. 新世纪中国土壤微生物学的展望[J]. *微生物学杂志*, 2002, 22(1): 36-39.

表 2 植物根际 pH、Eh 和电导率变化

Table 2 The variety of pH、Eh and conductivity in the rhizosphere of plants

处理	CK	大豆	南瓜	黑麦草	大豆-南瓜	大豆-黑麦草	南瓜-黑麦草
pH	5.43±0.20ab	5.44±0.02ab	4.84±0.01c	5.71±0.07a	5.06±0.19bc	5.35±0.02ab	5.18±0.11 bc
Eh	82±10cd	88±1bcd	116±1a	71±3d	105±9ab	91±1bc	95±6 bc
电导率	109.2±2.6bc	115.8±0.4a	111.4±0.6ab	111.4±1.2ab	108.4±1.9bc	108.1±0.8bc	105.6±1.4 c

- WANG Shu-jin, HU Jiang-chun, ZHANG Xian-wu. Prospect of Chinese soil microbiology in the new century[J]. *Journal of Microbiology*, 2002, 22(1):36-39.
- [5] 朱永官. 土壤-植物系统中的微界面过程及其生态环境效应[J]. 环境科学学报, 2003, 23(2):205-210.
- ZHU Yong-guan. Micro-interfacial processes in soil-plant systems and their environmental impacts[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(2):205-210.
- [6] Kidd P S, Prieto-Fernández A, Monterroso C, et al. Rhizosphere microbial community and hexachlorocyclohexane degradative potential in contrasting plant species[J]. *Plant Soil*, 2008, 302(1-2):233-247.
- [7] 李 隆, 李晓林, 张福锁. 小麦/大豆间作中小麦对大豆磷吸收的促进作用[J]. 生态学报, 2000, 20(4):629-633.
- LI Long, LI Xiao-lin, ZHANG Fu-suo. Facilitation of wheat to phosphorus uptake by soybean in the wheat-soybean intercropping[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4):629-633.
- [8] 朱有勇. 生物多样性持续控制作物病害理论与技术[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2004.
- ZHU You-yong. Sustainable control of crop diseases and pests on biological diversity theory and technology[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2004.
- [9] Zhu Y, Chen H, Fan J, et al. Genetic diversity and disease control in rice[J]. *Nature*, 2000, 406(6797):718-722.
- [10] Zhang F S, Shen J B, Li L et al. An overview of rhizosphere processes related with plant nutrition in major cropping systems in China[J]. *Plant Soil*, 2004, 260:89-99.
- [11] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Root distribution and interactions between intercropped species[J]. *Oecologia*, 2005, 147(2):280-290.
- [12] Li W X, Li L, Sun J H, et al. Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China[J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2005, 105(3):483-491.
- [13] Simonich S L, Hiles R A. Organic pollutant accumulation in vegetation[J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, 29:2905-2914.
- [14] Li H, Shen J, Zhang F, et al. Dynamics of phosphorus fractions in the rhizosphere of common bean (*phaseolus vulgaris* L.) and durum wheat (*triticum turgidum durum* L.) grown in monocropping and intercropping systems[J]. *Plant Soil*, 2008, 312:139-150.
- [15] 黄业茹, 施钧慧, 唐 莉. GC/MS 分析环境样品中的多氯联苯 (PCBs)[J]. 分析测试技术与仪器, 2000, 6(4):216-224.
- HUANG Ye-ru, SHI Jun-hui, TANG Li. Analysis of PCBs in environmental Samples by GC-MS[J]. *Analysis and Testing Technology and Instruments*, 2000, 6(4):216-224.
- [16] NY/T 1661—2008, 乳与乳制品中多氯联苯的测定气相色谱法[S]. NY/T 1661—2008. NY of PRC. Determination of PCBs contents in milk and dairy products Gas chromatography method[S].
- [17] White J C, Parrish Z D, Isleyen M, et al. Influence of citric acid amendments on the availability of weathered PCBs to plant and earthworm species[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2006, 8(1):63-79.
- [18] Jou J J, Chung J C, Weng Y M, et al. Identification of dioxin and dioxin-like polychlorobiphenyls in plant tissues and contaminated soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 149(1):174-179.
- [19] Rezek J, Macek T, Mackova M, et al. Plant metabolites of polychlorinated biphenyls in hairy root culture of black nightshade *Solanum nigrum* SNC-90[J]. *Chemosphere*, 2007, 69(8):1221-1227.
- [20] Inui H, Wakai T, Gion K, et al. Differential uptake for dioxin-like compounds by zucchini subspecies[J]. *Chemosphere*, 2008, 73:1602-1607.
- [21] Whitfield Åslund M L, Rutter A, Reimer K J, et al. The effects of repeated planting, planting density, and specific transfer pathways on PCB uptake by *Cucurbita pepo* grown in field conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 405(1-3):14-25.
- [22] Mikes O, Cupr P, Trapp S, et al. Uptake of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides from soil and air into radishes (*Raphanus sativus*)[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(2):488-496.
- [23] 郭兰萍, 黄璐琦, 蒋有绪, 等. 苍术根茎及根际土水提物生物活性研究及化感物质的鉴定[J]. 生态学报, 2006, 26(2):528-535.
- GUO Lan-ping, HUANG Lu-qi, JIANG You-xu, et al. Bioactivity of extracts from rhizoma and rhizosphere soil of cultivated *Atractylodes lancea* DC. and identification of their allelopathic compounds[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2):528-535.
- [24] 张广志, 杨合同, 周红姿. 土壤杀菌剂对木霉根际竞争的影响及木霉对玉米生长作用的初步研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊):229-231.
- ZHANG Guang-zhi, YANG He-tong, ZHOU Hong-zi, et al. Competitive effects of fungicide on rhizosphere of *Trichoderma* spp. in soil and maize growth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26:229-231.
- [25] 吉艳芝, 冯万忠, 陈立新, 等. 落叶松混交林根际与非根际土壤养分、微生物和酶活性特征[J]. 生态环境, 2008, 17(1):339-343.
- JI Yan-zhi, FENG Wan-zhong, CHEN Li-xin, et al. Soil nutrition, microorganisms and enzyme activity of the rhizosphere and non-rhizosphere soils of mixed plantation of Larix[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(1):339-343.
- [26] 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.
- [27] Chekol T, Vough L R, Chaney R L. Phytoremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soils: The rhizosphere effect[J]. *Environment International*, 2004, 30(6):799-804.
- [28] Shen C F, Tang X J, Cheema X A, et al. Enhanced phytoremediation potential of polychlorinated biphenyl contaminated soil from e-waste recycling area in the presence of randomly methylated- β -cyclodextrins[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, doi:10.1016/j.jhazmat.2009.08.064.
- [29] Semple KT, Morriss AWJ, Paton GI. Bioavailability of hydrophobic contaminants in soils: fundamental concepts and techniques for analysis[J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54(4):809-818.
- [30] 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.
- [31] Li L, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. *Proceedings of National Academy of Sciences USA (PNAS)*, 2007, 104:11192-11196.