

多氯联苯污染土壤的豆科-禾本科植物田间修复效应

涂晨^{1,2}, 滕应^{1,2}, 骆永明^{1,2*}, 潘澄^{1,2}, 孙向辉^{1,2}, 李振高^{1,2}

(1. 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:选择豆科植物紫花苜蓿、禾本科植物黑麦草和高羊茅作为供试植物,初步探讨了这 3 种植物在单作和间作条件下对多氯联苯污染土壤的田间修复效应. 结果表明,经过 270 d 的田间原位修复后,所有种植植物的处理中土壤多氯联苯的去除率均高于对照组,其中紫花苜蓿单作处理土壤中多氯联苯的去除率最高,达到 59.6%. 土壤多氯联苯同系物分析结果表明,所有种植植物的处理都降低了土壤中二氯联苯的比例. 3 种植物中紫花苜蓿的生物量最大,其根部积累的多氯联苯含量最高可达 355.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$,显著高于黑麦草和高羊茅根中的含量. 各处理对土壤中多氯联苯的提取修复效率依次为:紫花苜蓿单作 > 紫花苜蓿-黑麦草-高羊茅间作 > 紫花苜蓿-黑麦草间作 > 黑麦草单作 > 紫花苜蓿-高羊茅间作 > 高羊茅单作. 豆科植物紫花苜蓿是多氯联苯污染土壤田间原位修复的理想材料.

关键词:多氯联苯; 紫花苜蓿; 黑麦草; 高羊茅; 植物修复

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)12-3062-05

Phytoremediation of Polychlorinated Biphenyls Contaminated Soil by Leguminosae-Gramineae Intercropping: A Field Trial

TU Chen^{1,2}, TENG Ying^{1,2}, LUO Yong-ming^{1,2}, PAN Cheng^{1,2}, SUN Xiang-hui^{1,2}, LI Zhen-gao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Phytoremediation of polychlorinated biphenyls (PCBs) contaminated soil by leguminosae (alfalfa) and gramineae (ryegrass and tall fescue) was studied in a field trial. All planted treatments had significantly higher PCBs removal efficiency compared with those of unplanted control after 270 days of *in-situ* phytoremediation. Alfalfa monoculture received the highest removal efficiency of soil PCBs by 59.6%. Analysis of PCBs congeners composition showed that the percentage of di-chlorinated biphenyl decreased in all planted treatments. Alfalfa produced the maximum biomass among the 3 plants. Total PCBs concentration in alfalfa roots reached 355.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$, which was significantly higher than those in ryegrass and tall fescue. The phytoextraction efficiency of different treatment was in order of alfalfa > alfalfa-ryegrass-tall fescue > alfalfa-ryegrass > ryegrass > alfalfa-tall fescue > tall fescue. The results suggest that alfalfa may be an ideal candidate for the phytoremediation of PCBs contaminated soil.

Key words: polychlorinated biphenyls (PCBs); alfalfa; ryegrass; tall fescue; phytoremediation

多氯联苯 (polychlorinated biphenyls, PCBs) 是国际上极为关注的一类典型持久性有机污染物^[1-3], 多氯联苯污染土壤的生物修复正成为土壤环境科技领域关注的热点. 根据修复所用的主体, 生物修复可分为微生物修复、植物修复、植物-微生物联合修复和微生物-动物联合修复等^[4]. 其中植物修复 PCBs 的机制主要包括以下 3 种: 直接吸收 PCBs, 并将其转化为低毒代谢物积累于植物组织中; 释放促进 PCBs 降解的酶类; 以及植物与根际微生物联合降解 PCBs^[5-10]. 不同的植物对 PCBs 表现出不同的吸收能力, 对 PCBs 的修复效果也有所不同. Chekol 等^[11] 通过室内模拟试验研究了 3 种豆类和 4 种草类植物对 PCBs (Aroclor 1248) 污染土壤的修复作用, 其中赫草 (*Phalaris arundinacea*) 和柳枝稷 (*Panicum virgatum*) 的降解效果最好. 滕应等^[12] 选用豆科植物

紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 作为宿主植物, 盆栽试验研究了丛枝菌根真菌 (*Glomus caledonium*) 和苜蓿根瘤菌 (*Rhizobium meliloti*) 单接种及双接种对 PCBs 复合污染土壤的联合修复效应, 研究结果表明紫花苜蓿对土壤中 PCBs 的降低起到明显作用, 菌根真菌-根瘤菌可以强化紫花苜蓿对 PCBs 污染土壤的修复作用. Shen 等^[13] 通过盆栽试验, 研究比较了豆科植物紫花苜蓿以及禾本科植物水稻、黑麦草和高羊茅对 PCBs 污染土壤的修复潜力.

然而到目前为止, 针对 PCBs 污染土壤的植物

收稿日期: 2009-12-31; 修订日期: 2010-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40921061, 40701080); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-404, CXTD-22005-4); 农业部公益性行业科技专项 (200803034)

作者简介: 涂晨 (1982 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土壤环境与生物修复, E-mail: tchen@issas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: ymluo@issas.ac.cn

修复研究主要集中在利用紫花苜蓿、黑麦草以及高羊茅等不同植物单作或与微生物联合修复,研究尺度也多局限于室内盆栽试验,很少涉及到田间原位尺度上不同植物的间作修复效应。因此,本研究以长江三角洲某典型污染区 PCBs 复合污染农田土壤为对象,采用田间小区试验研究豆科植物紫花苜蓿和禾本科植物黑麦草、高羊茅间作对 PCBs 复合污染土壤的协同修复效应,以期为进一步研发 PCBs 污染土壤的原位生物修复技术提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试植物:豆科植物紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.)、禾本科植物黑麦草 (*Lolium perenne* L.) 和高羊茅 (*Testuca arundinacea*), 种子均购于江苏省农业科学院。

PCBs 混合标准样品 (包括 PCB8、PCB18、PCB28、PCB44、PCB52、PCB66、PCB77、PCB101、PCB105、PCB118、PCB126、PCB128、PCB138、PCB153、PCB170、PCB180、PCB195、PCB200、PCB206、PCB209) 购自百灵威。丙酮、正己烷等有机溶剂均为分析纯,重蒸后使用。硫酸为优级纯,无水硫酸钠为分析纯。硅胶(100~200目)和无水硫酸钠参照美国 EPA 测试方法 3550B 和 3630C 进行处理。

1.2 试验方案设计与实施

试验在长江三角洲某典型 PCBs 污染的农田中进行,供试土壤为水稻土,系统分类为铁聚水耕人为土。土壤 pH 值为 5.67,容重为 1.03 g/cm^3 ,有机质含量为 32.8 g/kg ,全氮、全磷、全钾分别为 1.79、0.44 和 24.1 g/kg 。试验设计 7 个处理,分别为对照 (CK)、紫花苜蓿单作 (Z)、黑麦草单作 (H)、高羊茅单作 (G)、紫花苜蓿-黑麦草间作 (ZH)、紫花苜蓿-高羊茅间作 (ZG) 和紫花苜蓿-黑麦草-高羊茅间作 (ZHG)。每个处理 4 次重复,共 28 个小区,每小区面积为 $2.4 \text{ m} \times 2.4 \text{ m}$,随机区组排列。植物种子以条播方式进行播种,试验进行 270 d 后,分别采集耕层土壤 (0~15 cm) 和植物样品。土壤样品按小区对角线采集 5 份,四分法获得混合样。样品经冷冻干燥后,过 60 目筛,以供土壤基本理化性质和多氯联苯含量分析。植物样品每小区随机采集 5 株,用蒸馏水洗净,分成根、茎叶两部分,50℃ 烘干称重,粉碎后过 60 目筛,以供植物多氯联苯含量分析。

1.3 PCBs 提取与分析

称取样品 (土壤样品 10 g,植物样品 2 g) 放入

离心管,用 30 mL 正己烷-丙酮提取液 (1:1, 体积比) 浸提过夜后,25℃ 超声提取 15 min, 1500 r/min 离心 5 min, 收集提取液。再分别用 20 mL 同样的提取液超声提取 2 次,每次 15 min, 合并 3 次提取液,旋转蒸发至近干,加入 5 mL 正己烷进行溶剂替换,浓缩至 2 mL 后转入复合硅胶柱进行纯化。复合硅胶柱 (长 250 mm, 内径 10 mm) 内依次装填硅胶、中性氧化铝、酸性硅胶和无水硫酸钠 (2:2:1:1, 质量比)。用 10 mL 正己烷淋洗该柱,弃去淋洗液,然后加入处理后的样品提取液,用 25 mL 正己烷洗脱,洗脱液旋转蒸发浓缩,用正己烷定容至 5 mL, 待上机分析。

色谱条件:采用带有电子捕获检测器和自动进样器的 Varian 3800 型气相色谱仪分析。色谱柱:CP-sil24CB ($30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$), 进样温度为 260℃, 检测器温度为 300℃。程序升温:初始温度为 180℃, 保留 0.5 min, 30℃/min 梯度升温至 260℃, 持续 18 min, 然后 15℃/min 梯度升温至 270℃, 持续 2 min。无分流进样 1 μL , 载气为高纯氮, 流速为 1.0 mL/min。

质量控制:在样品分析过程中进行方法空白、基质加标、平行样以及加标回收测定。21 种 PCBs 混标 ($10 \mu\text{g/kg}$) 的基质加标平均回收率是 72.0% ~ 109.8%, 相对标准偏差是 3.1% ~ 57.3%, 仪器检测限为 1.43 ~ 5.10 $\mu\text{g/kg}$, 方法检出限为 1.33 ~ 3.45 $\mu\text{g/kg}$ 。采用七点校正法得到标准物质的校正曲线, 根据保留时间对目标化合物进行定性分析, 采用峰面积积分法进行定量计算。

1.4 土壤基本理化性质分析

按常规方法测定, 具体参见文献 [14]。

1.5 土壤中多氯联苯的去除率及植物提取修复效率的计算

土壤中多氯联苯的去除率按小区进行统计, 计算公式如下:

$$\text{土壤中 PCBs 的去除率} = \frac{(c_1 - c_2)}{c_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, c_1 为修复前土壤中 PCBs 浓度 ($\mu\text{g/kg}$); c_2 为修复后土壤中 PCBs 浓度 ($\mu\text{g/kg}$)。

植物的提取修复效率按小区进行统计, 计算公式如下:

$$\text{植物提取修复效率} = \frac{\sum (m_R \times c_R + m_S \times c_S)}{c \times \rho \times h \times S} \times 100\% \quad (2)$$

式中, m_R 为植物根生物量 (kg); c_R 为植物根中

PCBs 浓度 ($\mu\text{g}/\text{kg}$); m_s 为植物茎叶生物量 (kg); c_s 为植物茎叶中 PCBs 浓度 ($\mu\text{g}/\text{kg}$); c 为修复前土壤 PCBs 浓度 ($\mu\text{g}/\text{kg}$); ρ 为土壤容重 (kg/m^3); h 为耕层土壤厚度 (m); S 为小区面积 (m^2).

1.6 数据统计分析

所有实验数据用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 15.0 统计软件分析.

2 结果与分析

2.1 土壤中 PCBs 组分及含量变化

由表 1 可见,除黑麦草单作处理以及空白对照以外,其他所有处理的土壤 PCBs 含量在修复前后都有显著性差异 ($p < 0.05$),说明植物修复的确可以有效去除土壤中的 PCBs. 其中紫花苜蓿单作 (Z) 对土壤 PCBs 的去除率高达 59.6%,而其他各种植物单作或间作处理下土壤中 PCBs 的去除率为 32.2% ~ 53.0%,与其余各处理相比,紫花苜蓿单作对土壤中 PCBs 的去除效果最佳. 这可能是由于紫花苜蓿属于豆科植物,易与土壤中的根瘤菌形成共生固氮体系,一方面直接促进了植物的生长以及植物体对土壤中 PCBs 的吸收积累^[15],另一方面可能通过强化根际土壤的氮素营养,增加土壤微生物对 PCBs 等碳源的利用,促进了土壤 PCBs 的降解. 而对照处理 (CK) 中土壤 PCBs 的去除率也达到 26.6%,这可能与土壤中土著微生物的作用有关.

表 1 不同处理下土壤中 PCBs 含量¹⁾

处理	土壤 PCBs 含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		PCBs 去除率/%
	修复前	修复后	
CK	102.1 ± 10.4a	74.9 ± 14.8a	26.6b
Z	96.2 ± 33.9a	38.9 ± 0.7b	59.6a
H	92.7 ± 16.4a	62.9 ± 23.5a	32.2ab
G	83.9 ± 16.3a	39.5 ± 11.9b	53.0ab
ZH	109.0 ± 10.6a	60.6 ± 12.5b	44.4ab
ZG	104.3 ± 7.1a	53.9 ± 14.2b	48.3ab
ZHG	95.5 ± 10.7a	50.8 ± 9.1b	46.8ab

1) 第 2 列和第 3 列的同行中不同字母表示该处理下修复前后有显著差异 ($p < 0.05$); 第 4 列中不同字母表示各处理间有显著差异 ($p < 0.05$)

修复后土壤中 PCBs 同系物的组成变化见图 1, 土壤中的 PCBs 主要以低氯代 (氯原子数 ≤ 5) 组分为主. 研究表明, PCBs 的生物可降解程度与其氯原子的取代数目有关, 随着氯原子的取代数量增加, 生物可降解性逐渐降低^[16]. 由图 1 可知, 与对照相比, 所有种植植物的处理中低氯组分的总量均有所下降, 其中紫花苜蓿单作 (Z) 和高羊茅单作 (G) 处理

中的二氯联苯组分与对照相比降低最为显著 ($p < 0.05$). 这可能是一方面植物根系更易于吸收和转运疏水性较弱的低氯代 PCBs 组分; 另一方面, 植物根际的好氧细菌也优先对低氯代 PCBs 组分进行好氧降解, 从而使土壤中低氯组分的总量降低^[13], 高氯组分因其难降解性而在土壤中逐渐累积, 使其在 PCBs 总量中的比例不断增加.

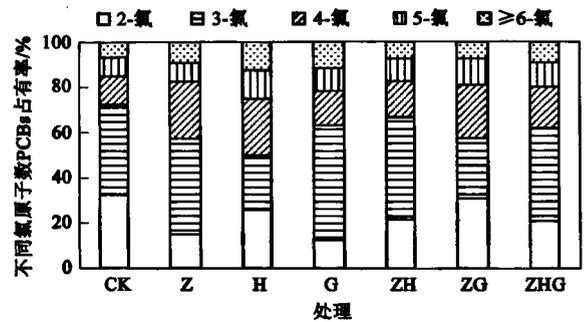


图 1 不同处理下土壤中 PCBs 同系物百分含量

Fig. 1 Percent composition of soil PCBs homologues under different treatments

2.2 不同处理下修复植物的生物量

由表 2 可知, 不同的修复植物 (紫花苜蓿、黑麦草、高羊茅) 之间的生物量存在着显著差异. 在 3 种植物单作时, 紫花苜蓿的总生物量干重显著高于黑麦草和高羊茅 ($p < 0.05$), 植物地上部干重也显示出相同的趋势. 分析其原因可能主要是植物品种的差异, 不同植物的生物量及其生长所占用空间不同, 而紫花苜蓿又可通过生物固氮向地上部运输氮素营养, 促进其地上部的生长发育, 提高整株植物的生物量^[17].

Zemenchik 等^[18] 研究表明, 豆科-禾本科植物混

表 2 不同处理下植物地下和地上部的生物量¹⁾

处理	根干重 /kg	地上部干重 /kg	总生物量干重 /kg
Z	1.67 ± 0.28b	4.25 ± 0.72a	5.92a
H	1.93 ± 0.06a	1.60 ± 0.05cd	3.53bc
G	0.27 ± 0.09de	0.93 ± 0.31def	1.20d
ZH	Z 1.00 ± 0.19b	2.55 ± 0.48b	4.88ab
	H 0.72 ± 0.08bc	0.60 ± 0.07ef	
ZG	Z 0.55 ± 0.08c	1.41 ± 0.22cde	2.53cd
	H 0.13 ± 0.11e	0.43 ± 0.39f	
ZHG	Z 0.98 ± 0.16b	1.85 ± 0.50bc	4.00bc
	H 0.49 ± 0.05cd	0.41 ± 0.04f	
	G 0.06 ± 0.03e	0.20 ± 0.09f	

1) 表中数据均按小区统计, 同一列中不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$), 下同

播与禾本科植物单播相比可提高禾本科植物的蛋白质含量和生物量,因为禾本科植物可以利用豆科植物固定的氮素,但在本研究中并未观察到这种现象.分析原因可能是因为豆科植物与禾本科植物间作的效果与播种方式以及混播比例密切相关^[19].实验中豆科植物与禾本科植物的间作采用隔行条播,混播比例为 1:1,因此对于间作组合中的混播比例以及播种方式对植物生物量的促进作用之间的关系有待作进一步研究.

2.3 植物体各组织中 PCBs 的含量

从表 3 可知,不同处理下各种植物的茎叶和根中都存在着 PCBs 的积累.除了紫花苜蓿-黑麦草间作处理中的黑麦草外,所有植物根部 PCBs 的含量均高于茎叶部,这可能与 PCBs 属于疏水性有机污染物($\lg K_{ow} > 3.5$),易被植物根表强烈吸附而难以被植物吸收转运有关^[20].3 种植物在单作时,其根部对 PCBs 的吸收累积的能力顺序为紫花苜蓿 > 高羊茅 > 黑麦草.研究表明不同植物根系对同种有机污染物的吸收能力主要与植物根部的比表面积、根内脂肪含量以及植物的蒸腾作用强度有关^[21].由于 PCBs 在植物体内不易向上运输,因此在各处理中植物地上部 PCBs 的含量之间差异并不明显.

表 3 不同处理下植物各组织中的 PCBs 含量

处理	根中 PCBs 含量 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	地上部 PCBs 含量 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
Z	355.1 ± 19.7a	70.7 ± 5.6e
H	120.1 ± 11.9e	79.1 ± 10.1de
H	232.9 ± 15.4c	86.7 ± 10.1cd
ZH	Z 113.3 ± 15.2ef	79.2 ± 10.3de
	H 111.7 ± 3.5ef	156.2 ± 17.9a
ZG	Z 109.1 ± 8.0ef	93.0 ± 5.1bc
	G 288.7 ± 24.4b	100.1 ± 4.5bc
ZHG	Z 172.3 ± 5.0d	91.2 ± 9.3bc
	H 88.5 ± 10.3f	84.4 ± 6.6cd
	G 281.1 ± 11.8b	107.6 ± 13.4b

2.4 不同处理下植物提取修复效率比较

由图 2 可见,在所有的 6 个种植植物的处理中,紫花苜蓿单作(Z)对土壤 PCBs 的提取修复效率最高,分别为其他各处理的 2~4 倍.不同处理下植物提取修复效率的顺序依次为:紫花苜蓿单作(Z) > 紫花苜蓿-黑麦草-高羊茅间作(ZHG) > 紫花苜蓿-黑麦草间作(ZH) > 黑麦草单作(H) > 紫花苜蓿-高羊茅间作(ZG) > 高羊茅单作(G).紫花苜蓿分别与黑麦草和高羊茅间作后,对土壤 PCBs 的提取修复效率高于黑麦草和高羊茅单作处理,这可能是因为

与黑麦草及高羊茅相比,紫花苜蓿具有更高的生物量,且其根部更易吸收富集 PCBs.在面积相等的小区内混播紫花苜蓿与禾本科植物必然会增加该小区植物对土壤 PCBs 的吸取量.然而间作处理对土壤中 PCBs 的总去除率变化却没有显著性差异,分析这一结果的原因,可能主要与以下 2 个因素有关:①不同植物根际的微生物群落对土壤中 PCBs 的降解与转化发挥着重要作用.在植物根际微域,根系分泌物和分解产物为微生物繁殖提供了营养,使根域附近存在大量的微生物,从而促使根际微域中有害有机物的降解.②对于疏水性较强的 PCBs 等有机污染物,植物提取技术本身的修复效率在短期内并不显著.在本试验中,不同的植物提取效率在 0.19%~1.04%,Zeeb 等^[22]研究了紫花苜蓿等 9 种植物在盆栽条件下 8 周内对 PCBs 污染土壤的修复效率,结果表明 9 种植物的提取修复效率在 0.2%~1.3%,这说明植物提取修复技术对于土壤中 PCBs 类化合物的去除贡献率较低.

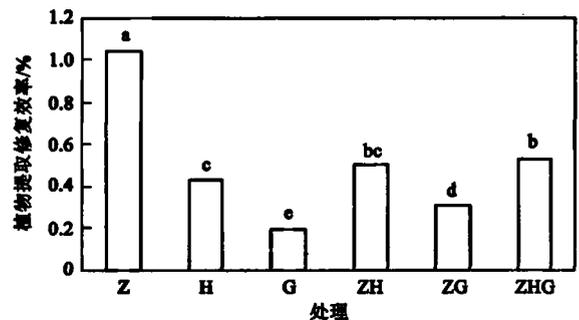


图 2 不同处理下植物对土壤中 PCBs 的提取修复效率

Fig. 2 Phytoextraction efficiency of soil PCBs under different treatments

3 结论

(1) 豆科植物紫花苜蓿因具有生物量大、根部吸收富集 PCBs 能力强等优点,其单作时对土壤中 PCBs 的提取修复效率最高,对 PCBs 污染土壤具有良好的修复潜力.

(2) 紫花苜蓿与禾本科植物黑麦草、高羊茅间作后,土壤 PCBs 的植物提取修复效率高于黑麦草和高羊茅单作处理,但对土壤中 PCBs 总量的去除率却没有显著性促进作用.这可能一方面是因为植物提取修复本身对土壤中 PCBs 总量的去除贡献较低,土壤微生物对 PCBs 的降解起着关键作用;此外,不同植物品种间的混播比例与混播方式对混播效果的影响也有待作更深入的研究.

参考文献:

- [1] 毕新慧,徐晓白.多氯联苯的环境行为[J].化学进展,2000,2(2):152-160.
- [2] 黄业茹,田洪海,郑明辉,等.持久性有机污染物调查监控与预警技术[M].北京:中国环境科学出版社,2009.
- [3] 滕应,郑茂坤,骆永明,等.长江三角洲典型地区农田土壤多氯联苯空间分布特征[J].环境科学,2008,29(12):3477-3482.
- [4] 骆永明.污染土壤修复技术研究现状与趋势[J].化学进展,2009,21(2/3):558-565.
- [5] Fletcher J S, Donnelly P K, Hegde R S. Biostimulation of PCB-degrading bacteria by compounds released from plant roots[A]. In: Hoeppe R E. (ed.), Bioremediation of Recalcitrant Organics[M]. Columbus: Battelle Press, 1995.
- [6] Susarla S, Medina V F, Mccutcheon S C. Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination[J]. Ecol Eng, 2002, 18(5):647-658.
- [7] Webber M D, Pietz R I, Granato T C, et al. Plant uptake of PCBs and other organic contaminants from sludge-treated coal refuse[J]. J Environ Qual, 1994, 23(5):1019-1026.
- [8] Mehmannaaz R, Prasher S O, Ahmad D. Rhizospheric effects of alfalfa on biotransformation of polychlorinated biphenyls in a contaminated soil augmented with *Sinorhizobium meliloti* [J]. Process Biochem, 2002, 37(9):955-963.
- [9] 刘世亮,骆永明,丁克强,等.土壤中有有机污染物的植物修复研究进展[J].土壤,2003,35(3):187-192.
- [10] 刘亚云,陈桂珠.植物修复多氯联苯研究进展[J].应用生态学报,2006,17(2):325-330.
- [11] Chekol T, Vough L R, Chaney R L. Phytoremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soils: the rhizosphere effect[J]. Environ Int, 2004, 30(6):799-804.
- [12] 滕应,骆永明,高军,等.多氯联苯污染土壤菌根真菌-紫花苜蓿-根瘤菌联合修复效应[J].环境科学,2008,29(10):2925-2930.
- [13] Shen C F, Tang X J, Cheema S 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]. J Hazard Mater, 2009, 172(2-3):1671-1676.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
- [15] 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.
- [16] Wiegel J, Wu Q. Microbial reductive dehalogenation of polychlorinated biphenyls[J]. FEMS Microbiol Ecol, 2000, 32(1):1-15.
- [17] Xu L, Teng Y, Li Z G, et al. Enhanced removal of polychlorinated biphenyls from alfalfa rhizosphere soil in a field study: the impact of a rhizobial inoculum[J]. Sci Total Environ, 2010, 408(5):1007-1013.
- [18] Zemenchik R A, Albrecht K A, Shaver R D. Improved nutritive value of Kura Clover- and Birdsfoot Trefoil-grass mixtures compared with grass monocultures[J]. Agron J, 2002, 94(5):1131-1138.
- [19] 曹昭海,胡跃高,陈文新,等.接种高效根瘤菌对紫花苜蓿-禾本科混播组合生产性能的影响[J].干旱地区农业研究,2006,24(5):55-58.
- [20] Schnoor J L, Licht L A, Mccutcheon S C, et al. Phytoremediation of contaminated soils and sediments[J]. Environ Sci Technol, 1995, 29(7):318-323.
- [21] 李兆君,马国瑞.有机污染物污染土壤环境的植物修复机理[J].土壤通报,2005,36(3):436-439.
- [22] Zeeb B A, Amphlett J, Rutter A, et al. Potential for phytoremediation of polychlorinated biphenyl-(PCB)-contaminated soil[J]. Int J Phytoremediat, 2006, 8(3):199-221.