多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应

潘澄13 滕应13 骆永明123* 涂晨12 李秀芬13 冯婷婷13 张满云13 李振高1 宋静1

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室,南京 210008; 2. 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003; 3. 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘要:通过田间原位修复试验 初步研究了不同生态调控措施对多氯联苯(PCBs) 污染农田土壤的修复效应.结果表明,经添加石灰、翻耕、种植紫花苜蓿、种植水稻等修复阶段后,土壤中 PCBs 含量呈显著降低,平均去除率达 86.9%;同时也降低了土壤中类二嘧英 PCBs 毒性当量.对土壤 PCBs 同系物分析结果表明 在调控翻耕与种植紫花苜蓿修复阶段,主要对低氯代 PCBs 进行降解去除;在种植水稻修复阶段,则主要降低了高氯代 PCBs 含量.结果还显示原位生态调控修复并未对土壤微生物生态 产生较大影响.可见,该技术对于修复 PCBs 污染农田具有良好的应用前景与推广意义.

关键词:多氯联苯;土壤污染;生态调控;原位修复;农田土壤

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2510-06

In-situ Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures: A Field Trial

PAN Cheng^{1,3}, TENG Ying^{1,3}, LUO Yong-ming^{1,2,3}, TU Chen^{1,2}, LI Xiu-fen^{1,3}, MA Ting-ting^{1,3}, ZHANG Manyun^{1,3}, LI Zhen-gao¹, SONG Jing¹

(1. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation ,Institute of Soil Science ,Chinese Academy of Sciences ,Nanjing 210008 ,China; 2. Yantai Institute of Coastal Zone Research , Chinese Academy of Sciences ,Yantai 264003 ,China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100049 ,China)

Abstract: A field experiment was conducted to study the remediation of agricultural soils polluted with polychlorinated biphenyls (PCBs) by several ecological controlling measures. After sequential stages of liming , plowing , planting alfalfa and paddy , a significant part of PCBs was removed from the soil , with an average removal rate of 86.9%. The treatment also decreased the toxic equivalency of dioxin-like PCBs in soil. Analysis of PCB congener composition showed that at stages of liming , plowing and alfalfa planting , the low-chlorinated biphenyls were removed; whereas at the stage of paddy planting , the high-chlorinated biphenyls were degraded. The ecological controlling measures had little influence on the microbial communities in soil. The results suggest that ecological control techniques could be widely applied in the remediation of agricultural soils with PCBs contamination.

Key words: polychlorinated biphenyls(PCBs) ; soil contamination; ecological control; in-situ remediation; agricultural soils

多氯联苯(polychlorinated biphenyls,PCBs) 是国际上极为关注的《斯德哥尔摩公约》中首批受控的持久性有机污染物之一^[1].农田土壤受 PCBs 污染后,可通过农作物进入食物链,逐级富集放大,最终威胁人体健康^[2,3].目前对污染土壤已形成的修复技术体系包括生物修复、物理修复、化学修复及其联合修复等技术,并朝着绿色与环境友好的生物修复、联合杂交的综合修复、原位修复等技术方向发展^[4].

原位生态调控修复,是根据生态学原理,利用特 异生物(如修复植物或专性降解微生物等)对环境 污染物的代谢过程,并借助物理修复与化学修复以 及工程技术的某些措施加以强化或条件优化,使污 染环境得以修复的综合性环境污染治理技术^[5,6]. 对于长期受 PCBs 污染的农田土壤,采用原位生态 调控修复技术,可以最大限度地激活土壤生态系统 的自净功能,实现转移或转化、清除或消减土壤中的 污染物含量,降低土壤毒性当量、恢复或部分恢复土 壤服务功能,成为一种极具应用前景的修复措施.

然而到目前为止,针对 PCBs 污染农田土壤生 态调控修复的研究,其研究尺度多局限于室内盆栽 试验或田间微域试验^[7 8],较少涉及中等及中等以 上规模农田原位修复效应.因此,本研究以长江三角 洲某典型污染区中等规模面积 PCBs 污染农田为对 象 结合当地耕作习惯,研究不同生态调控修复阶段 下土壤中 PCBs 含量结构、土壤毒性、微生物数量的 动态变化趋势与污染土壤修复效应,以期为进一步

收稿日期: 2011-09-06; 修订日期: 2012-01-11

- 基金项目:国家自然科学基金重大国际合作项目(40810180);国家 高技术研究发展计划(863)项目(2009AA063104);环保 部公益性行业科研专项(2010467016)
- 作者简介: 潘澄(1986~) 男.硕士研究生,主要研究方向为土壤环 境与污染修复, E-mail: cpan@issas. ac. cn

* 通讯联系人 E-mail: ymluo@ yic. ac. cn

研发推广与扩大应用 PCBs 污染农田土壤的原位生态调控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:紫花苜蓿(Medicago sativa L.) 种子 购于江苏省农业科学院;水稻(甬优6号),种子购 于当地农资公司.

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、 PCB187、 PCB195、 PCB200、PCB206、PCB209) 购自百灵威公司. 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^[9].

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 4.37,有机质含量为 32.8 g•kg⁻¹, 全氮、全磷、全钾分别为 1.79、0.44 和 24.1 g•kg⁻¹. 试验用地面积约为 0.73 hm²,按照当地传统农田耕 作区域划分为 10 个小区(每个小区面积 0.05 ~ 0.10 hm² 不等) 编号 S1 ~ S10 随机排列.每个小区 中均放置无底的 PVC 圆筒(高度 50 cm,直径 30 cm 圆筒高出表层土壤 10 cm,防止桶内外物质互 换),保持圆筒中土壤无任何扰动影响,以作为对照 处理.

原位生态调控修复分为土壤调控翻耕修复、紫 花苜蓿修复、水稻种植修复三个阶段进行.土壤调控 翻耕修复阶段:对 PCBs 污染土壤施用石灰1 800 kg•hm⁻²,钙镁磷肥 450 kg•hm⁻²,并使用农用机械 对土壤进行周期型翻动,修复持续时间为1个月; 紫花苜蓿修复阶段:采用种植紫花苜蓿并接种根瘤 菌与菌根真菌方式进行修复,以条播方式进行播种, 播种量为 22.5 kg•hm⁻²,菌剂接种量均为 150 g•hm⁻²左右,修复时间持续3个月;水稻种植修复 阶段:将紫花苜蓿翻压入土壤,并按照当地种植习惯 和方式,实施种植水稻修复,修复时间持续4个月. 分别于每个修复阶段末采集土壤样品,土壤样品按 梅花形采样法采集,四分法获得混合样.将所采集样 品分成两份,一份土样放于自封袋中,于4℃保存, 以供土壤微生物数量测定;另一份样品经冷冻干燥 后 过 60 目筛 ,以供土壤基本理化性质和多氯联苯 含量分析.

1.3 PCBs 提取与分析

土壤中 PCBs 的提取与分析条件参考文献 [10] 方法如下.

称取土壤样品 5.0 g 放入玻璃离心管 ,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 ,1 500 r•min⁻¹离心 5 min ,收集浸 提液. 再分别用 20 mL 同样的提取液超声提取两次 , 每次 15 min ,合并 3 次浸提液 ,旋转蒸发至近干 ,加 入 5 mL 正己烷替换 ,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 30 mL 正己烷进行洗脱 ,洗脱液旋转蒸发浓缩 ,用正己 烷定容至 5 mL ,待上机分析测定.

色谱条件:采用带有电子俘获检测器和自动进 样器的 Varian 3800 型气相色谱仪分析. 色谱柱: CPsil24CB(30 m×0.25 mm×0.25 µm),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⁻¹梯度升温至 260℃, 持续 18 min,然后 15℃•min⁻¹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⁻¹.

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 μ g•kg⁻¹)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 μ g•kg⁻¹~5.10 μ g•kg⁻¹,方法检出限 为 1.33 μ g•kg⁻¹~3.45 μ g•kg⁻¹.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 土壤中类二噁英 PCBs 毒性当量计算

土壤中类二噁英 PCBs 毒性当量(TEQ) 计算方 法参见文献[11],公式如下:

$$TEQ = \sum (c_{PCB} \times TEF_{PCB})$$

式中 ρ_{PCB} 表示各个类二噁英 PCB 浓度; TEF_{PCB}为各 个二噁英 PCB 的毒性当量因子.

1.5 土壤微生物数量及基本理化性质分析

土壤微生物数量分析,采用土壤稀释平板法,具体方法参见文献[12].土壤 pH 值采用 1:2.5 土液 比浸提, pH 计测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾 外加热法测定;全氮含量采用半微量开氏法测定; 采用 HClO₄-HF 消解土壤,钼锑抗比色法测定全磷 含量,火焰光度计测定全钾含量,具体方法参见文献 [13].

1.6 数据统计分析

所有试验数据用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 16.0 统计软件分析.

2 结果与分析

2.1 不同修复阶段土壤中 PCBs 含量变化

经过不同处理阶段后,试验用地与对照处理土 壤中 PCBs 含量与土壤 pH 变化情况见图 1. 由图 1 可见,在调控翻耕与紫花苜蓿修复阶段,土壤中 PCBs 的含量均较上一阶段逐步降低,土壤 pH 则有 所升高. 而在水稻修复阶段, PCBs 含量略有回升, 土 壤 pH 则有明显下降. 有研究表明,通过对土壤进行 周期型翻动,可以改善土壤的通气状况,有利于 PCBs 污染土壤中土著微生物的生长,提高代谢活 性 从而促进土壤中 PCBs 的自然降解^[14]. 而豆科植 物紫花苜蓿已被广泛用于 PCBs 污染土壤的植物修 复技术中^[15],并可通过接种根瘤菌以刺激提高根际 微生物活性,进而强化紫花苜蓿对 PCBs 污染土壤 的修复作用^[16].考虑到紫花苜蓿不宜在酸性土壤上 生长^[17] 因此通过前期添加石灰进行调控 改善当 地土壤酸化现象,为土壤微生物与紫花苜蓿提供了 适宜的生长环境,进一步强化对土壤中 PCBs 的去 除效果. 而在种植水稻后,由于土壤处于淹水条件 下,土壤处于厌氧状态,且 pH 明显降低,不利于土 壤中好氧微生物的生长与繁殖,因此限制了 PCBs 的好氧降解. 同时,一方面可能由于在种植水稻前需



将紫花苜蓿翻压入土壤,使得部分被紫花苜蓿直接 提取吸收的 PCBs 重新进入土壤^[18];另一方面可能 由于农田淹水而引入周边污染源中的 PCBs 并在土 壤中蓄积^[19],由此造成水稻修复阶段后土壤中 PCBs 含量略有上升.

课题组前期工作表明,当地农田土壤中 PCBs 的来源受到一些较为分散的人为因素影响,其空间 分布并不均匀^[20].而在本研究中修复试验区总面积 相对较大,因此各小区之间土壤中 PCBs 含量也存 在一定差异(图2),其修复前含量为406~2560 μg•kg⁻¹不等. 经不同阶段生态调控修复后,各小区 土壤中 PCBs 含量均有不同程度的下降,大部分变 化趋势也同样在调控翻耕与紫花苜蓿修复阶段持续 下降 在水稻修复阶段有所回升. 同时,在进行至紫 花苜蓿修复阶段后,各小区土壤中 PCBs 含量变化 基本趋于一致,均为100 µg•kg⁻¹左右.结果表明,对 于中低浓度 PCBs 长期污染农田土壤,由于土壤中 已存在有一定具有降解 PCBs 的土著微生物 通过 原位生态调控措施可刺激其活性,提高对 PCBs 降 解效果.同时,由图2可见,高浓度 PCBs 的降解速 率要明显高于低浓度污染水平,由此推测土壤中 PCBs 污染水平也可能为降解效率的影响因子之一, 但其具体影响效应仍有待进一步研究.



2.2 不同修复阶段土壤中 PCBs 组分结构变化

由表1可见,试验农田土壤中的 PCBs 组成,主 要以低氯代(氯原子数≤5)组分为主,其中,三氯联 苯含量最多,其次为二氯与四氯联苯.本课题组前期 研究表明,农田土壤 PCBs 主要来源于废弃电容器 的中的介质油,造成土壤中二、三、四氯等低氯代 PCBs 的大量累积.而经不同阶段生态调控修复后, 各组分含量均有不同程度降低,但总体上依旧以低 氯代组分为主.

潘澄等: 多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应

表 1 不同修复阶段土壤中 PCBs 同系物含量 / μg^{-1}									
Table 1 Concentrations of PCB congeners in soil at different stages/µg•kg ⁻¹									
PCBs 氯代数	修复前	调控翻耕阶段	苜蓿修复阶段	水稻修复阶段					
2-氯	297.1 ± 56.4	117.5 ±21.6	30. 6 ± 6. 1	41.8 ± 8.3					
3-氯	714.6 ± 128.6	467.8 ± 86.3	49.7 ±11.8	109.1 ± 16.9					
4-氯	256.9 ± 34.2	192. 0 ± 36. 5	12.3 ± 3.0	54.1 ± 10.9					
5-氯	50.2 ± 12.9	34.5 ±7.1	9.3 ±2.1	6.9 ± 1.3					
6-氯	13.4 ± 2.6	14.3 \pm 3.6	11.8 ±2.7	4.9 ± 0.9					
6-氯以上	10.7 ± 1.9	8.5 ± 1.6	7.2 ± 1.6	3.2 ± 0.6					

通过对修复试验与对照处理土壤中 PCBs 组分 结构动态变化分析,可以看出,在不同修复阶段,土 壤中高、低氯代 PCBs 的变化规律不同(图 3). 在调 控翻耕与紫花苜蓿修复阶段,低氯代 PCBs 组分显 著下降 而高氯代组分变化不明显; 在水稻修复阶 段 低氯代组分又呈现出明显的上升趋势 而高氯代 组分则进一步降低. 与此相比,对照处理中,虽然在 调控翻耕与紫花苜蓿修复阶段后各组分均有一定降 低,但不及修复处理中效果明显;而在水稻修复阶 段 低氯与高氯组分含量均有显著上升.





一般认为,土壤微生物对 PCBs 的降解主要通 过好氧与厌氧脱氯两种途径^[21].对于低氯代 PCBs 组分,主要通过微生物好氧降解进行^[22],因此,通过 添加石灰与翻耕,调节土壤理化性质并改善土壤通 气性 ,为好氧微生物提供了适宜的生长环境; 同时

又通过种植紫花苜蓿强化促进根际微生物活性,使 土壤中的低氯代组分被大量降解. 对于高氯代 PCBs 组分 则主要通过厌氧脱氯途径进行 即在厌氧条件 下 通过催化还原反应 把芳香族的氯代化合物从高 氯转化为低氯或无氯的物质^[23],因此,在种植水稻 后,由于进行淹水处理,土壤处于厌氧状态,使高氯 代 PCBs 脱氯转为低氯代物质,使土壤中高氯代 PCBs 含量减少,而低氯代 PCBs 则因不断积累使得 含量有所上升.同时,由于废旧电容器油是 PCBs 污 染的主要来源 加之试验田本身为开放体系 淹水措 施也有可能引入周边含 PCBs 的污水并在土壤中富 集 因此使对照土壤中 PCBs 总量有所上升.

2.3 生态调控修复措施对土壤中类二噁英 PCBs 毒 性当量及微生物数量的影响

PCBs 同系物数目繁多 但由于联苯氯代程度与位 置不同 其毒性也存在着很大的差异^[24]. 其中 12 种具 有共平面分子结构的 PCBs 同系物被称为类二噁英 PCBs 具有较强的生物毒性^[25].本研究中,可检出的类 二 熙 英 PCB 单体主要为 PCB77、PCB105、PCB118、 PCB126 这4种 其毒性当量计算结果见表2.

由表2可知,至苜蓿修复阶段完成后,毒性当量 已从修复前的 259.52 ng•kg⁻¹降至 0.58 ng•kg⁻¹, 修复效果显著;但经水稻修复阶段后,又上升至 62.51 ng•kg⁻¹.由于在该试验田土壤中,PCB126 是 毒性当量因子最大的单体 因此 其含量直接影响土 壤毒性当量变化. 土壤毒性当量变化与土壤 PCBs 含量变化趋势基本一致,说明进行调控翻耕与紫花

表 2 不同修复阶段土壤中类二噁英 PCBs 毒性当量(TEQ) /ng•kg⁻¹

Table 2 Toxic equivalency of dioxin-like PCBs in soil at different stages (TEQ) $/\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$										
类二噁英 PCBs	TEF	修复前 -	调控翻耕阶段		苜蓿修复阶段		水稻修复阶段			
			修复处理	对照处理	修复处理	对照处理	修复处理	对照处理		
PCB77	0.0001	2.37	1.63	2.47	0.43	0. 70	0.87	1.08		
PCB105	0.00003	0.31	0.27	0.36	0.09	0.12	0.09	0.25		
PCB118	0.00003	0.32	0.18	0.35	0.06	0.08	0.04	0.26		
PCB126	0.1	256. 52	N. C. ¹⁾	168.28	N. C.	108.62	61.52	240.11		
TEQ		259. 52	2.08	171.46	0.58	109.52	62.51	241.70		

1) N. C. 表示该 PCB 单体未有检出或浓度太低无法计算

苜蓿修复有助于毒性当量的显著降低,而水稻修复 则会产生不利影响.

由于农田原位生态调控修复主要利用土壤中的 土著微生物类群,通过进行环境因子调控与种植植 物强化刺激,以激发其对污染物的降解潜力,从而在 不影响自身土壤微生物生态的情况下,达到降解氯 代芳香族污染物的修复目的;同时,土壤微生物生 态的变化情况,一定程度上可以通过土壤中各类微 生物的种群数量反映.因此,对土壤中主要微生物 (细菌、真菌、放线菌)数量动态变化进行分析,结果 如图4所示.



从图 4 可知 在进行调控翻耕修复时 土壤中细 菌与真菌数量均有所下降,而放线菌数量则略有上 升 说明添加石灰并进行土壤翻耕 有利于放线菌的 生长,但对细菌与真菌生长有一定影响;在进行苜 蓿修复时 土壤中细菌与真菌数量均呈显著增加趋 势 而放线菌数量变化不大,可见通过种植紫花苜蓿 后 强化刺激了土壤微生物的生长活性 同时也改善 了土壤根际微生物生态;在进行水稻修复时,三大 菌群数量均呈现明显的下降趋势 表明淹水条件并 不利于土壤微生物生长 ,也由此造成微生物活性降 低 这可能也是导致淹水状态下供试土壤中 PCBs 降解十分缓慢的重要原因之一. 结果表明,进行原位 生态调控修复时,虽然各阶段不同微生物有其各自 变化规律 但整体而言 在修复前后 ,土壤中微生物 数量总体变化并不大,可见该修复措施并未对原土 壤微生物生态造成剧烈影响.

3 结论

(1) 对于中等规模 PCBs 污染农田通过原位生态调控措施,包括添加石灰,土地翻耕,种植紫花苜蓿等进行原位修复,可使土壤中 PCBs 含量显著降低,同时可改善土壤理化性质,减轻土壤酸化,促进 土壤微生物生长活性,获得了较好的修复效果,具有 进一步推广与扩大应用的发展前景.

(2) 不同的修复措施具有各自针对的污染物 类型,采用调控翻耕与种植苜蓿可有效去除低氯 代 PCBs 组分,种植水稻可降低高氯代 PCBs 含 量.而对于多种 PCBs 复合污染土壤,宜通过两种 或以上的修复措施合理组合合理交替,进行长期 原位修复,达到对土壤中各类 PCBs 组分的全面 修复效果.

参考文献:

- [1] Xing Y , Lu Y L , Dawson R W , et al. A spatial temporal assessment of pollution from PCBs in China [J]. Chemosphere , 2005 , 60(6): 731-739.
- [2] Zhang J Y, Qiu L M, He J, et al. Occurrence and congeners specific of polychlorinated biphenyls in agricultural soils from Southern Jiangsu, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(3): 338-342.
- [3] Juan C Y, Thomas G O, Sweetman A J, et al. An input-output balance study for PCBs in humans [J]. Environment International, 2002, 28(3): 203–214.
- [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] 周启星,魏树和,刁春燕.污染土壤生态修复基本原理及研 究进展[J].农业环境科学学报,2007,26(2):419-424.

- [6] 李培军,孙铁珩,巩宗强,等. 污染土壤生态修复理论内涵 的初步探讨[J]. 应用生态学报,2006,17(4):747-750.
- [7] 徐莉,滕应,李振高,等.不同强化调控措施对多氯联苯污 染土壤的修复效应[J].土壤学报,2010,47(4):646-651.
- [8] Tu C, Teng Y, Luo Y M, et al. PCB removal, soil enzyme activities, and microbial community structures during the phytoremediation by alfalfa in field soils [J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(4): 649-656.
- [9] Gao J, Luo Y M, Li Q B, et al. Distribution patterns of polychlorinated biphenyls in soils collected from Zhejiang province, east China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2006, 28(1-2): 79-87.
- [10] 李秀华. 土壤中多氯联苯的分析方法优化和物化及生物修复 试验研究 [D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2009.
- [11] Erickson M D. Analytical chemistry of PCBs [M]. (2nd ed). New York: Lewis Publishers, 1997.
- [12] 李振高,骆永明,滕应. 土壤与环境微生物研究法 [M]. 北京:科学出版社,2008.
- [13] 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.
- [14] 滕应,骆永明,李振高,等. 多氯联苯复合污染土壤的土著 微生物修复强化措施研究 [J]. 土壤,2006,38(5):645-651.
- [15] Chekol T , Vough L R. A study of the use of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) for the phytoremediation of organic contaminants in soil [J]. Remediation Journal , 2001 , 11(4): 89–101.
- [16] 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.

- [17] 郭彦军,黄建国.紫花苜蓿在酸性土壤中的生长表现 [J]. 草业学报,2006,15(1):84-89.
- [18] 涂晨, 滕应, 骆永明, 等. 多氯联苯污染土壤的豆科-禾本科 植物田间修复效应[J].环境科学, 2010, **31**(12): 3062-3066.
- [19] 毕新慧,储少岗,徐晓白. 多氯联苯在水稻田中的迁移行为 [J]. 环境科学学报,2001,21(4):454-458.
- [20] 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.
- [21] 高军,骆永明. 多氯联苯(PCBs) 污染土壤生物修复的研究 进展 [J]. 安徽农业科学,2005,33(11):2119-2121.
- [22] Komancová M, Jurčová I, Kochánková L, et al. Metabolic pathways of polychlorinated biphenyls degradation by *Pseudomonas* sp. 2 [J]. Chemosphere, 2003, 50(4): 537– 543.
- [23] Borjia J , Taleon D M , Auresenia J , et al. Polychlorinated biphenyls and their biodegradation [J]. Process Biochemistry , 2005 , 40(6): 1999-2013.
- [24] McKinney J D, Waller C L. Polychlorinated biphenyls as hormonally active structural analogues [J]. Environmental Health Perspect, 1994, 102(3): 290-297.
- [25] Tan Y S , Chen C H , Lawrence D , et al. Ortho-substituted PCBs kill cells by altering membrane structure [J]. Toxicological Science , 2004 , 80(1): 54-59.