

有机氯农药生物修复菌剂对雷竹生长及土壤化学性状的影响

郭子武, 陈双林, 李迎春, 杨清平

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400)

摘要:针对雷竹林有机氯农药六六六(HCH)残留普遍存在的现实问题,开展了雷竹林土壤 HCH 原位生物修复及修复菌剂(BHC-A)对雷竹新陈代谢及生理活性、竹林土壤养分活化影响的研究。结果表明,BHC-A 原位降解 HCH 效果显著,降解率高达 85.25%;BHC-A 使用后,处理 A、B 较对照雷竹叶片叶绿素 SPAD 值分别提高 12.82、11.36,根系活力分别提高了 37.77%、24.25%,处理间差异显著,说明 BHC-A 可以提高雷竹新陈代谢及生理活性;BHC-A 生物修复过程中,与对照相比,处理 A、B 土壤 pH 值分别下降了 0.40、0.14 个单位,土壤水解氮分别提高了 80.33、62.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,差异达显著水平;处理 A 土壤有效磷、速效钾较处理 B 和对照分别提高了 33.02、36.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 27.91、29.33 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,差异达显著水平;不同处理间土壤有机质及全效养分变化不明显,即 BHC-A 可以促进土壤养分释放,提高养分生物有效性。

关键词:有机氯农药;降解菌剂;雷竹;叶绿素值;根系活力;土壤化学性状

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)07-1290-06

Effect of Organochlorine Bioremediation Agent (BHC-A) on Growth of *Phyllostachys praecox* and Soil Properties

GUO Zi-wu, CHEN Shuang-lin, LI Ying-chun, YANG Qing-ping

(Research Institute of Subtropical Forest, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, China)

Abstract: The effect of bioremediation agent on metabolic and physiological activity of *Phyllostachys praecox* and soil chemical property was studied in this paper focusing on the approaching the residue of organochlorine pesticide in soils of bamboo plantation forested, as well its bioremediation by BHC-A. After applying bioremediation agent of BHC-A, it was found that HCH concentration in soils decreased significantly, and reduction rate reached above 85%. The SPAD value in leaf of *P. praecox* in treatment A and B increased by 37.77% and 24.25%, and root activity increased by 37.77% and 24.25% respectively. It also was found that SPAD value in leaf and root activity among treatments A, B and CK had very significant difference, which indicated that metabolic and physiological activity of *P. praecox* was enhanced greatly. After BHC-A was applied, soil pH value of treatment A, B decreased by 0.4 and 0.14, soil available nitrogen content increased to 80.33 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 62.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. While it was found soil pH value and available nitrogen content were significant different. Moreover the results shown that soil available phosphorus and potassium in treatment A was higher 33.02, 29.33 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ than that of treatment B, and that of treatment A was higher 27.91, 36.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ than that of CK, respectively. However it discovered that applying BHC-A had little effect on soil total nutrition and organic matter content, which indicated that BHC-A might stimulate the release of soil nutrients and enhance the bioavailability of soil nutrients.

Keywords: organochlorine pesticide; degrading bacterium BHC-A; *Phyllostachys praecox*; SPAD value; root activity; soil chemical property

有机氯农药主要是指六六六(HCH)和滴滴涕(DDT),为持久性有机污染物(POPs),因其具有毒性

强、化学性质稳定、降解难等特点^[1],已在全球范围内造成了严重的生态环境问题^[2-3],特别是土壤污染^[4-5],仅我国被污染的土壤面积就已超过了 1 400 万 hm^2 。因此,采用适当的方法去除残留于土壤生态系统中的有机氯农药,对于农产品和环境安全具有重要的现实意义。

雷竹(*Phyllostachys praecox* C.D.Chu et C.S.Chao)

收稿日期:2010-03-11

基金项目:杭州市科技计划项目院所专项项目(20090332N01);杭州市科技创新重大项目(20072312A23)

作者简介:郭子武(1975—),男,博士,助理研究员,从事竹林有机农药污染土壤生物修复研究。E-mail:hunt-panther@163.com

通讯作者:陈双林 E-mail:cslbamboo@126.com

隶禾本科竹亚科刚竹属,具有出笋早、笋味鲜美、产量高、效益好等特点^[7-8],是我国重要的笋用竹种。在我国雷竹主产区,雷竹林多是由原来的农业耕作地,特别是水稻田发展起来的^[9],因其农药使用历史长、剂量大,致使目前的雷竹林土壤有机农药残留普遍,HCH 检出率达 100%^[10],含量最高可达 $31.8 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,虽未超过国家标准,但其生物活性和移动性较高,致使部分竹笋农药残留量超过国家食品安全标准($50 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[11]。而近年来,雷竹林经营强度的增大及大量化学品的使用,致使 HCH 生物活性和移动性不断增强的同时,也导致了雷竹生长活性的降低和竹林土壤环境改变,乃至劣变退化。目前有关雷竹林农药污染土壤生物修复研究尚属空白。本研究针对雷竹林生态系统有机氯农药污染的现实问题,着重开展有机氯农药原位生物修复及修复菌剂对雷竹生理活性、土壤养分活化影响的研究,旨在为竹林可持续经营与环境保护提供技术支撑。

1 试验地概况

试验地位于浙江省临安市太阳镇($30^{\circ}24'N$, $119^{\circ}32'E$),属中亚热带季风气候,温暖湿润,四季分明。年平均气温 15.9°C ,最高气温 41.3°C ,最低气温 -13.3°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年均积温 $4\,999.7^{\circ}\text{C}$,年均无霜期 234 d,年均相对湿度 80%,年均降雨量 1 400 mm。雷竹为当地主栽笋用竹种。

试验雷竹林面积 3 hm^2 ,竹林立地条件、生长状况一致,均由竹业大户统一经营,2001 年春季移 1~2 年生胸径 2~3 cm 的健壮母竹在原农业耕作地(水稻田)中营造,2004 年成林投产,2005、2006 年连续 2 a 林地有机材料覆盖促进竹笋早出,2007、2008 年均未实施林地覆盖。2008 年 11 月调查,平均立竹密度 $22\,134 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$,立竹平均胸径 3.48 cm,立竹年龄比(1 a:2 a:3 a)为 24:41:35,基本达到了雷竹林丰产栽培的林分结构要求。土壤为红壤,基本化学性质见表 1。

2 试验材料与方法

2.1 有机氯农药修复菌剂(BHC-A)

有机氯农药修复菌剂为鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas* sp.)菌株 BHC-A,是南京农业大学生命学院

微生物系、农业部农业环境微生物工程重点开放实验室从长期受 HCH 污染的土壤中分离得到的能以 HCH 为唯一碳源的高效降解菌^[12-13],该降解菌在 LB 培养基形成黄色扁平的、具有清晰边缘、不透明的圆菌落。该菌有极生鞭毛, G^{-} ,短杆菌,具有过氧化氢酶和氧化酶活性,产黄色色素,菌体周围产荚膜。发酵方法参照陈坚等方法^[14],菌体浓度为 $9.0\times 10^9 \text{ 个}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

2.2 菌剂施用

2008 年 4 月在试验雷竹林中设置 3 个区块,面积各 1 hm^2 ,每个区块内各设 3 个 $20 \text{ m}\times 20 \text{ m}$ 试验小区,菌剂用量分别为 A $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,B $150 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和不施菌剂的对照(CK)。菌剂与水 1:6 比例稀释摇匀后用喷雾器均匀地喷施于经凋落物适当清理的林地表,施后浅锄林地表土,菌株发酵液中 N、P、K 含量在 $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,其对竹林养分影响可以忽略不计。

2.3 指标测定

2.3.1 土壤取样及 HCH 测定

2008 年 11 月于试验雷竹林 9 个试验小区中,按 5 点取样法布点,取 0~30 cm 土壤样品 500 g,用冰壶带回实验室冷藏,用于 HCH 测定。土壤中 HCH 检测方法参照 GB/T 14550—2003^[15]。土壤 HCH 提取及净化采用石油醚-丙酮(1:1)索式提取浓硫酸净化法。HCH 采用 Agilent 6890N 型气相色谱仪(Agilent 公司,美国)测定,配有 ^{63}Ni 电子捕获器,DB-1701 毛细柱(柱长 30 m、内径 0.32 mm、膜厚 0.25 μm),载气为高纯 N_2 ,流速为 $3 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。色谱升温程序为 150°C 停留 3 min 后以 $8^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 250°C 保留 10 min。进样口温度 280°C ,检测器温度 320°C 。检测限 $0.001\sim 0.004 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,RSD<10%,回收率 91.8%。

2.3.2 竹叶叶绿素值测定

在 3 种处理的试验雷竹林中,随机选取 1~3 年生样竹各 10 株,按竹冠的 1/3 长度划分为竹冠上部、中部和下部,并分别选取 10 片叶片,每叶片在上、中、下部位用叶绿素测定仪(SPAD520,日本)各测 3 次。

2.3.3 竹子根系活力测定

2008 年 11 月于试验竹林小区内取 1 年生立竹竹鞭上细根 5~10 g,置于冰壶中带回实验室后,用蒸馏水冲洗干净,放于滤纸上晾干,剪碎后称取 2 g。根系活力采用 α -萘胺氧化法^[16]测定。

表 1 试验地土壤基本化学性质

Table 1 Soil chemical property of experiment plots

项目	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	水解氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH
含量	38.98	2.58	0.77	16.95	180.21	76.99	123.21	4.43

2.3.4 土壤主要化学性质指标测定

2008 年 11 月于试验竹林小区中,按 5 点取样法布点,取 0~30 cm 土壤样品,带回实验室风干后,过 1 mm 筛,用于土壤化学性质测定。pH 值采用电位法(土水比例 2.5:1),土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加加热法,土壤全氮采用半微量凯氏法,全磷采用酸溶-钼锑抗比色法,全钾采用酸溶-火焰光度法,水解氮采用碱解扩散法,有效磷采用双酸浸提钼锑抗比色法,速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定^[17]。

2.4 数据处理

所有数据均采用 Excel 及 SPSS 软件进行统计处理,包括单因素方差分析(One-Way ANOVA)及显著性检验。

3 结果与分析

3.1 有机氯农药污染土壤生物修复

施用 BHC-A 菌剂生物修复 180 d 后,HCH 降解效果明显,土壤中 HCH 含量显著降低,不同处理间差异达显著或极显著水平(图 1)。与对照相比,A 处理、B 处理 HCH 降解率分别达 81.62%、85.25%,差异极显著。由于 BHC-A 以 HCH 为唯一碳源,盆栽控制试验中,对 HCH 降解率达 80%以上^[12]。结合本研究结果认为,土壤中 HCH 浓度的降低主要是由于

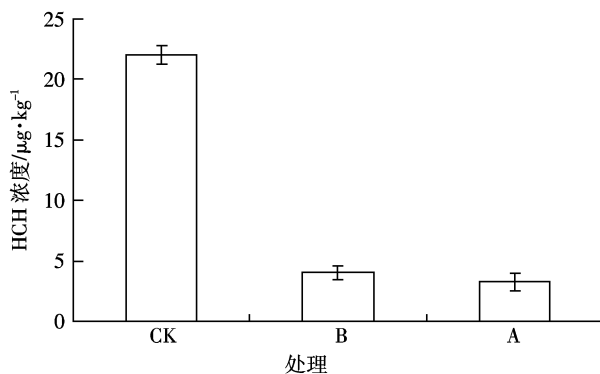


图 1 BHC-A 对 HCH 的降解效果

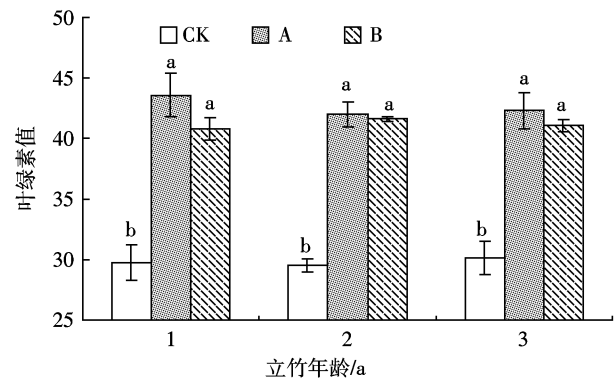
Figure 1 Degradation of HCH by BHC-A

BHC-A 的降解,土壤土著微生物的降解作用可以忽略不计^[12-13]。

3.2 生物修复对雷竹叶片叶绿素合成的影响

相同处理雷竹林不同年龄立竹叶片的叶绿素值均无显著差异(表 2),这与雷竹的换叶习性及 1~3 年生立竹生理活力均很强有关。相同处理立竹不同竹冠部位叶片的叶绿素值差异也不显著,这与试验雷竹林分立竹分布均匀,竹冠重叠少,透光性较好有关。

施用 BHC-A 菌剂生物修复后,与对照相比,处理 A、B 雷竹林不同年龄立竹竹叶的叶绿素值分别提高了 12.82、11.36,增长率分别达 43.05%、38.12%,两处理与对照间差异均达显著水平(图 2),且处理 A 雷竹林竹叶叶绿素值略高于处理 B,但二者间差异不显著,说明 BHC-A 生物修复不但能有效降解 HCH,而且对竹叶的光合色素合成有促进作用。



小写字母不同表示差异显著($P<0.05$),相同表示差异不显著(下同)。

图 2 BHC-A 对雷竹叶片叶绿素合成的影响

Figure 2 Effect of BHC-A on SPAD Value of *Ph. praecox* leaf

3.3 生物修复对雷竹根系活力的影响

生物修复后,雷竹根系活力明显增强(图 3),这说明 BHC-A 生物修复对雷竹根系活力提高具有促进作用,这可能是雷竹叶片光合色素合成能力增强的原因之一。处理 A 雷竹林的根系活力比处理 B、对照雷竹林分别提高 10.88%、37.77%,处理 B 雷竹林根系

表 2 试验雷竹林叶片叶绿素测定值

Table 2 SPAD value of *Ph. praecox* leaf

立竹年龄/a	CK			A			B		
	上部	中部	下部	上部	中部	下部	上部	中部	下部
1	28.07±0.21b	30.86±1.09b	30.26±0.89b	42.73±2.03a	45.66±0.21a	42.39±1.24a	39.72±2.56a	41.24±1.23a	41.39±0.92a
2	28.94±1.87b	30.07±1.25b	29.55±0.98b	40.85±1.83a	42.33±0.35a	42.8±1.65a	41.71±2.54a	41.42±1.08a	41.69±1.21a
3	31.73±1.56b	29.6±1.24b	29.13±1.01b	40.59±1.98a	43.47±0.49a	42.84±0.95a	40.58±2.08a	41.56±1.69a	41.1±1.05a

注:数据为平均值±标准差。小写字母不同表示差异显著($P<0.05$),相同表示差异不显著。

活力较对照提高 24.25%。方差分析表明,3 处理间雷竹根系活力具极显著差异。可见 BHC-A 菌剂不仅对有机氯农药具高效降解作用,而且其所产生的酶和菌剂培养基中一定量的活性物质,能改善土壤性状,促进竹子生长。

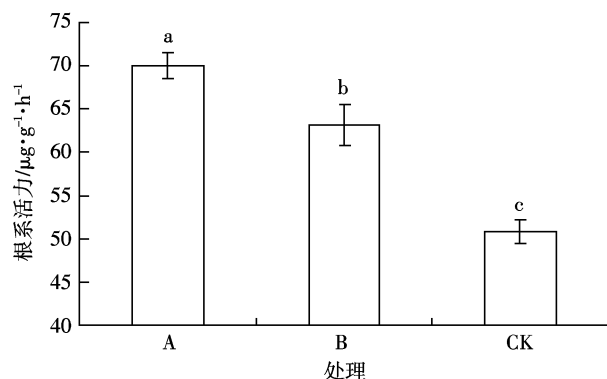


图3 BHC-A 对雷竹根系活力的影响

Figure 3 Effect of BHC-A on root activity of *Ph. Praecox*

3.4 生物修复对雷竹林土壤化学性质的影响

3.4.1 生物修复对土壤 pH 的影响

生物修复后,与对照相比,处理 A、处理 B 雷竹林土壤 pH 值均有显著下降。随着菌剂使用量的增多 pH 值下降幅度呈增大趋势(图 4)。处理 A 土壤 pH 值较处理 B 和对照分别下降了 0.26、0.40 个单位,处理 B 土壤 pH 值较对照下降了 0.14 个单位。方差分析表明,3 处理间 pH 值差异水平显著。

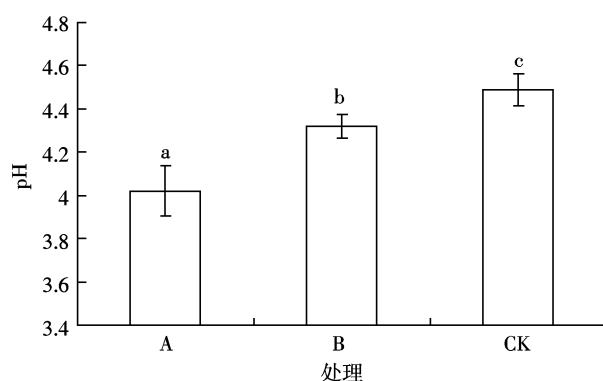


图4 BHC-A 对雷竹林土壤 pH 值的影响

Figure 4 Effect of BHC-A on soil pH

3.4.2 生物修复对雷竹林土壤养分有效性的影响

菌剂施用后,3 处理间土壤有机质、全氮、全磷、全钾无显著差异(图 5)。菌剂对土壤全效养分和有机质影响不大,说明施用菌剂的生物修复并不能有效改变土壤全效养分的含量。

经施用 BHC-A 菌剂生物修复后,雷竹林土壤水

解氮含量明显提高。处理 A、B 较对照土壤水解氮含量分别提高了 80.33 mg·kg⁻¹ 和 62.67 mg·kg⁻¹,差异达显著水平。有效磷、速效钾的变化规律相似,即处理 A 较处理 B 和对照显著提高,与处理 B 和对照相比,有效磷分别提高了 33.02 mg·kg⁻¹ 和 27.91 mg·kg⁻¹,速效钾分别提高了 36.98 mg·kg⁻¹ 和 29.33 mg·kg⁻¹。而处理 B 与对照差异未达显著水平(图 6)。这说明施用菌剂对雷竹林地土壤养分的活化有重要影响,但不同养分对生物修复的响应不同。氮较容易被动员而活化,但活化后的释放比较缓慢。而磷、钾则不同,其较难活化,一旦活化,释放较快。这可能与菌剂特性、养分性质及土壤性状有关。

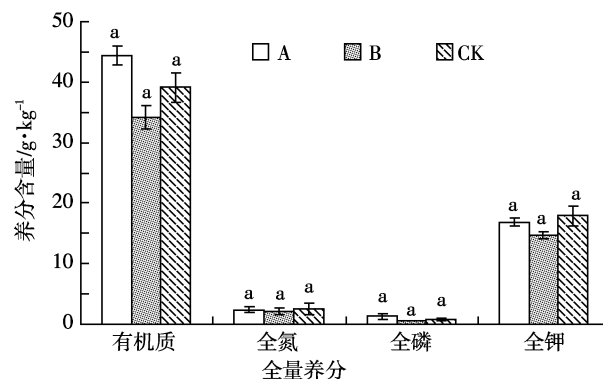


图5 BHC-A 对雷竹林土壤全量养分的影响

Figure 5 Effect of BHC-A on soil total nutrients

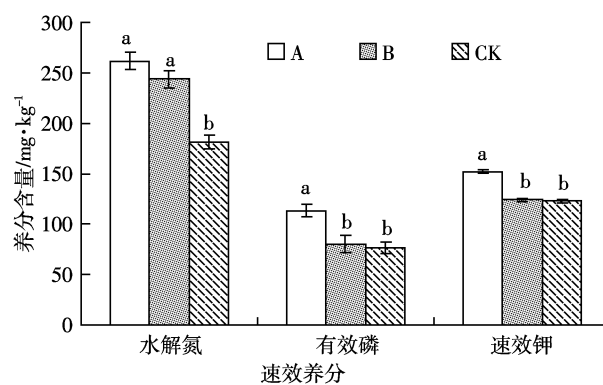


图6 菌剂 BHC-A 对土壤速效养分的影响

Figure 6 Effect of BHC-A on soil available nutrients

4 讨论

有机氯农药,特别是 HCH 残留污染已经遍及全球的每一个角落^[18-19],因此环境中残留的 HCH 高效、安全清除技术已成为环境学研究的热点之一^[20]。本研究结果显示,经菌剂 BHC-A 原位生物修复后,残留于雷竹林地土壤中的 HCH 含量显著降低,HCH 降解率达 80% 以上。这与 BHC-A 高效、专一的降解特性

及修复时间的延长有密切关系。

施用 BHC-A 菌剂生物修复后,雷竹叶片叶绿素值显著提高,根系活力明显增强,这说明施用菌剂 BHC-A 原位微生物修复不仅能够有效地降解 HCH,还可以促进叶绿素合成,提高雷竹根系代谢活力。其原因可能是菌剂液体组分中的小分子活性成分对雷竹叶绿素合成及根系活力有刺激作用。而修复过程中农药降解、外源微生物活动及其向土壤中释放活性物质也可能对雷竹叶绿素合成和根系活力有激活作用^[21]。

原位微生物修复,可导致雷竹林地土壤 pH 值降低,不同处理间土壤 pH 差异达显著水平。其原因可能是菌剂施用后,雷竹生理活性提高,根系分泌的有机酸释放到土壤中,致使土壤酸化^[22-23]。而加入的外源微生物的生命活动,特别是对农药降解,也有可能向环境中释放酸性物质。

原位微生物修复过程中,土壤有机质、全氮、全磷、全钾变化较小,处理间无显著差异;而土壤水解氮、有效磷、速效钾含量则显著提高,这说明施用菌剂虽不能从根本上增加土壤养分的总量,但可以促进土壤养分的释放,提高土壤养分的生物有效性,这也可能是雷竹叶片叶绿素值和根系活力提高的原因之一。

5 结论

(1)有机氯农药降解菌剂 BHC-A 原位降解 HCH 效果显著。施用 BHC-A 原位生物修复 180 d 后,土壤中 HCH 残留浓度显著降低,HCH 降解率超过 80%,最高可达 85.25%。

(2)有机氯农药 HCH 原位生物修复后,雷竹叶绿素值、根系活力均明显提高,与对照相比差异显著。这说明有机氯农药生物修复菌剂 BHC-A 能够提高雷竹的新陈代谢及生理活性。

(3)有机氯农药生物修复后,与对照相比,土壤养分总量(全氮、全磷及全钾)变化不大,而土壤速效养分(水解氮、有效磷、速效钾)含量均显著提高,即施用 BHC-A 的原位生物修复可以促进土壤养分的释放,增加土壤养分的生物有效性。

参考文献:

- [1] 白清云. 农产品中环境污染物的控制标准与食品安全体系[J]. 农业环境保护, 2000, 19(4): 230-233.
BAI Qing-yun. Food safety and setting up of maximum residue limits of pollutants in foods[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(4): 230-233.
- [2] 马晓轩, 冉勇. 珠江三角洲土壤中有机氯农药的分布特征[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 134-137.
MA Xiao-xuan, RAN Yong. The research for organochlorine pesticides in soils of the Pearl River Delta[J]. *Ecology and Environment*, 2009, 18(1): 134-137.
- [3] Tao S, Xu F L, Wang X J, et al. Organochlorine pesticides in agricultural soil and vegetables from Tianjin, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 29: 2494-2499.
- [4] Tawfic M A, Saad M M, Mabrouk S S. Residues of some chlorinated hydrocarbon pesticides in rain water, soil and ground water, and their influence on some soil microorganisms[J]. *Environment International*, 1998, 24: 665-670.
- [5] Miglioranza K S B, Gonzalez M A S, de Moreno J E A, et al. Agricultural soil as a potential source of input of organochlorine pesticides into nearby pond [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2002, 9: 250-256.
- [6] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
CHEN Huai-man. Behavior of chemicals in soils and its relation to environmental quality[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [7] 胡超宗, 张建国, 胡明强. 雷竹生物学特性的研究[J]. 浙江林学院学报, 1992, 9(2): 133-143.
HU Chao-zong, ZHANG Jian-ming, HU Ming-qiang. Study on biological characteristics of *Phyllostachys praecox* [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 1992, 9(2): 133-143.
- [8] 汪祖潭, 方伟, 何钧潮, 等. 雷竹笋用林高产栽培技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993.
WANG Zu-tang, FANG Wei, HE Jun-chao, et al. High yield cultivation technique of *Phyllostachys praecox* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993.
- [9] Hua X M, SHAN Z J. Production and application of pesticides and factor analysis for their pollution in environment in China[J]. *Advanced Environmental Science*, 1996, 2: 33-45.
- [10] 郭子武, 陈双林, 张刚华, 等. 浙江省商品竹林土壤有机农药污染评价[J]. 生态学杂志, 2008, 27(3): 434-438.
GUO Zi-wu, CHEN Shuang-lin, ZHANG Gang-hua, et al. Assessment of organic pesticides pollution of commercial bamboo forest soils in Zhejiang Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(3): 434-438.
- [11] 郭子武, 陈双林, 张刚华, 等. 散生型笋用竹笋中有机农药残留[J]. 生态学杂志, 2008, 27(9): 1587-1591.
GUO Zi-wu, CHEN Shuang-lin, ZHANG Gang-hua, et al. Residual of organic pesticides in single axile dispersal type shoot—using bamboo shoot[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(9): 1587-1591.
- [12] 马爱芝, 武俊, 汪婷, 等. 六六六(HCH)降解菌 *Sphingomonas* sp. BHC-A 的分离与降解特性的研究[J]. 微生物学报, 2005, 45(5): 728-732.
MA Ai-zhi, WU Jun, WANG Ting, et al. Isolation and characterization of a HCH degradation *Sphingomonas* sp. stain BHC-A[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2005, 45(5): 728-732.
- [13] 张明星, 洪青, 何健, 等. BHC-A 与 CDS-1 降解菌对六六六、呋喃丹污染土壤的原位生物修复[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 693-

- 696.
- ZHANG Ming-xing, HONG Qing, HE Jian, et al. In-situ bioremediation of carbonfuran and HCH contaminated soil using degrading bacteria BHC-A and CDS-1[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(4):693-696.
- [14] 陈坚, 堵国成, 李寅, 等. 发酵工程试验技术[M]. 北京: 化工出版社, 2003:28-34.
- CHEN Jian, DU Guo-cheng, LI Yin, et al. Experiment technology of fermentation engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 28-34.
- [15] GB/T14552—2003 土壤中六六六和滴滴涕测定气相色谱法[S].
- GB/T14552—2003 Method of gas chromatographic for determination of BHC and DDT in soil[S].
- [16] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- ZHANG Zhi-liang. Experimental guide for plant physiology[M]. 3rd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- BAO Shi-dan. Soil and agriculture chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [18] Lee W Y, William I B, Eitzer B D, et al. Persistent organic pollutants in the environment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32:224-231.
- [19] Verreault J, Muir D C G, Norstrom R J, et al. Chlorinated hydrocarbon contaminants and metabolites in Polar Bears (*Ursus maritimus*) from Alaska, Canada, East Greenland, and Svalbard: 1996—2002[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 352:369-390.
- [20] Rieger P G, Meier H M, Gerle M, et al. Xenobiotics in the environment: Present and future strategies to obviate the problem of biological persistence[J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, 94:101-123.
- [21] 齐会岩, 奥岩松. 微生物制剂对连作西瓜生长和果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2009, 7:7-10.
- QI Hui-yan, AO Yan-song. Effect of different microbial amendments on the growth and fruit qualities of watermelon continuous cropping[J]. *Northern Horticulture*, 2009, 7:7-10.
- [22] Lazar I, Dobrota S, Voicu A, et al. Microbial degradation of waste hydrocarbons in oily sludge from some romanian oil fields[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1999, 22:151-160.
- [23] 黄廷林, 唐智新, 徐金兰, 等. 黄土地区石油污染土壤生物修复室内模拟试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2206-2210.
- HUANG Ting-lin, TANG Zhi-xin, XU Jin-lan, et al. Laboratory study on bioremediation of petroleum-contaminated soil in Loess Region of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2206-2210.