

联苯菊酯降解菌的筛选、鉴定及降解特性研究

刘婷婷¹, 董昆明^{1*}, 缪莉¹, 周晓见¹, 靳翠丽¹, 姜薇¹, 封克^{1,2}

(1.扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2.江苏扬州农业环境安全服务中心, 江苏 扬州 225127)

摘要:联苯菊酯是一种广谱高效杀虫剂,大规模的应用使其广泛残留在环境中,因此筛选联苯菊酯的高效降解菌具有重要意义。从扬州农药厂附近的地表土壤取样,利用富集驯化培养分离得到一株编号为 S8 的降解细菌,经表形特征、生理生化特性和 16S rDNA 序列分析其为醋酸钙不动杆菌(*Acinetobacter calcoaceticus*),该菌株在 pH7.0 和 30 ℃的条件下,对 100 mg·L⁻¹ 联苯菊酯的 3 d 降解率达 56.4%,半衰期为 60.7 h。其最适生长条件为:pH6.0~8.0,温度 30~35 ℃,接种量 5%。研究结果可为今后治理联苯菊酯残留污染提供理论参考。

关键词:联苯菊酯;降解菌;降解特性

中图分类号:X172 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)06-1147-06

Isolation, Identification and Biodegradation Characteristics of a Bacterial Strain able to Degrade Bifenthrin

LIU Ting-ting¹, DONG Kun-ming^{1*}, MIAO Li¹, ZHOU Xiao-jian¹, JIN Cui-li¹, JIANG Wei¹, FENG Ke^{1,2}

(1.Institute of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2.Yangzhou Technological Service Center for Agro-Environment Safety of Jiangsu Province, Yangzhou 225127, China)

Abstract: Bifenthrin (BF) is a broad-spectrum and highly efficient synthetic insecticide. However, the difficulty of its natural degradation makes it widely remain in the environment, which causes many critical environmental problems. Microbial biodegradation of pesticide residues, especially bacterial biodegradation, is the main way in repair of such sort of environment pollution. Although there have been some reports on the pyrethroid insecticide degradation bacteria, the degradation effect and stability of those bacteria still need to be explored. Therefore, the screen for efficient BF degrading bacteria has great research significance. In this study, a BF degrading bacterium designated as S8 was isolated, purified and sorted from the surface soil near to the Yangzhou Pesticide Plant. The bacterial strain S8 was identified as *Acinetobacter calcoaceticus*, according to its morphological, physiological and biochemical characterization, as well as the sequence analysis of its 16S rDNA. The BF degradation reached equilibrium at 72 h and the degradation rate was 56.4% (initial concentration of 100 mg·L⁻¹) with half lives of 2.53 d under the conditions of pH7.0 and 30 ℃. The optimal conditions for BF degradation were at pH6.0~8.0, 30~35 ℃ and with 5% inoculation. The results indicated that the BF-degrading strain S8 had great application potential for the future bioremediation of environmental contamination by BF.

Keywords: bifenthrin; degrading bacteria; biodegradation characteristics

联苯菊酯是 20 世纪 80 年代初开发的一种新型杀虫剂,具有强大的胃毒和触杀作用,广泛应用于对棉花、蔬菜、果树、茶树等害虫的防治及白蚁^[1]、螨虫等

家庭有害昆虫的防治。该化合物对光、热稳定,能附着作物表面不易被雨水冲刷,故残效期长,进入环境不易分解^[2]。据相关文献报道,联苯菊酯在土壤中的消解过程与施药浓度、土壤类型以及土壤含水率有关^[3],在含水率 20%的沙质和有机质土壤中,联苯菊酯的半衰期分别为 411 d 和 522 d,而在水浸没时两类土壤中的半衰期大致相同为 267 d^[4]。长期使用势必会在环境中造成大量残留,而联苯菊酯对哺乳动物具有神经毒性,对蜜蜂具有高强毒性,尤其是对鱼类以及水生生物有很强的毒性^[5],并能干扰内分泌,有抗雄激素作用^[6]。美

收稿日期:2011-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41076097,41006097,41106113);
江苏省自然科学基金(BK2010322);江苏省属高校自然科学研究项目(10KJB170013);扬州大学科技创新培育基金(2011CXJ032)

作者简介:刘婷婷(1987—),女,江苏扬州人,硕士研究生,研究方向为环境科学。E-mail:tingtingliu117@gmail.com。

* 通讯作者:董昆明 E-mail:kmdong@yzu.edu.cn

国环保署针对联苯菊酯建立了 ADI 值 (Acceptable Daily Intake for Humans), 将联苯菊酯在淡水环境中人类可接受的每日摄入量限定为 $1.5 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

微生物作为生物修复中的主体,对农药残留的降解起着重要作用^[8]。人们对农药降解微生物的研究至今已取得了很大进展,表现在降解农药的微生物种类不断被发现,降解机理日趋深入,降解效果稳定提高等方面。目前国际上已分离出许多拟除虫菊酯类农药降解菌株,而且对菌株性质、生长条件进行了深入研究,但国内外对拟除虫菊酯农药的降解研究主要集中在氯氰菊酯^[9]和溴氰菊酯^[10]等几种,对联苯菊酯的降解研究较少。据目前收集的资料来看,产气肠杆菌^[11] (*Enterobacter aerogenes*)、假单胞菌^[12] (*Pseudomonas* sp.)、戴尔福特菌^[13] (*Delftia tsurhatensis*) 等对联苯菊酯均具有降解能力。由于有的菌株降解能力较低或生长较慢,不利于大范围推广应用。本研究从扬州农药厂附近地表土壤中,分离获得一株联苯菊酯的高效降解菌,并对其进行了鉴定和降解特性研究,以期对环境对联苯菊酯的降解提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品与试剂

土壤采自扬州农药厂附近的地表土壤;联苯菊酯原药(江苏扬农化工股份有限公司提供,纯度 97%);乳化剂吐温 20、丙酮、三氯甲烷、正己烷、牛肉浸膏、蛋白胨粉、琼脂粉等(购自上海国药试剂公司,均为分析纯)。

联苯菊酯储备液:称取联苯菊酯 1.031 g 溶于 30 mL 丙酮,按质量比 1:1.5 的比例加入吐温 20,并用丙酮定容至 100 mL,获得 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓乳液形式的储备液,以备稀释取用。

富集培养基、牛肉膏培养基、无机盐培养基等参照文献[11];磷酸盐缓冲液:称取 7.16 g 十二水磷酸二氢钠,2.72 g 磷酸二氢钾溶于 1 L 蒸馏水中,调节 pH 为 7.0。

1.2 实验方法

1.2.1 菌株的富集与分离

取 10 g 土壤于 100 mL 富集培养基中,30 ℃、130 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡培养 3 d。再取土壤培养液的上清液加入 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的联苯菊酯基础盐培养基中,于 30 ℃、130 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡培养 5 d。5 d 后取培养液上清液的 10% 接入到浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的联苯菊酯基础盐培养基中,同法培养 5 d。按 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的梯度逐次提高培养

基中联苯菊酯的浓度直到 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,培养同上。将经驯化最终得到的培养液经过梯度稀释后涂布在含有 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 联苯菊酯的无机盐固体培养基上,选取生长快、菌落规则、传代稳定的单菌落,划线培养,于 4 ℃冰箱内保存。

1.2.2 菌株的鉴定

对分离得到的菌株 S8 培养至对数生长期进行形态观察、电镜观察、生理生化实验,在此基础上进行 16S rDNA 基因序列分析。

1.2.3 唯一碳源证明实验

由于联苯菊酯在水中的溶解度极低,采用丙酮作为助溶剂,并添加乳化剂吐温 20,以保持农药体系的稳定,促进降解^[14]。为证明菌株 S8 是以联苯菊酯为唯一碳源生长,用无机盐培养基配制浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的联苯菊酯培养液, $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的丙酮培养液和 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的吐温 20 培养液,按 5% 的接种量投加菌悬液,每 24 h 测定 1 次 OD_{570} 值。

1.2.4 菌株降解能力的测定

采用气相色谱法^[15](GC-ECD)对菌株的降解能力进行定量分析,首先通过预处理提取出培养液中的联苯菊酯:取 2 mL 培养液加入 4 mL 三氯甲烷进行萃取,涡旋振荡 3 min,静置分层,加入无水硫酸钠至饱和,4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min,取下层有机相 1 mL 经氮吹仪吹干,用 10 mL 的正己烷定容,再经 0.22 μm 的滤膜过滤,待测。色谱分析条件为:色谱柱 SE-5、检测器 ECD、柱温 260 ℃、检测温度 280 ℃、进样口温度 260 ℃、进样量 0.2 μL 。并采用下式计算降解率:

$$\text{降解率} = [1 - (\text{实测残量} / \text{对照样残量})] \times 100\%$$

1.2.5 降解特性实验

选 pH、温度、接种量、联苯菊酯添加浓度为研究对象,将菌株培养活化后离心并用缓冲液反复清洗再重悬,调节菌液浓度 OD_{570} 为 0.1,再接入 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的联苯菊酯培养液中,在不同的培养条件下 130 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 培养 3 d,测定降解率。同时做 3 个平行处理,并设空白对照。

(1) pH: 调节 pH 值分别为 5、6、7、8、9,以 5% 的量接种,30 ℃摇床培养。

(2) 温度: 调节 pH 值为 7,以 5% 的量接种,分别在 20、25、30、35、40 ℃摇床培养。

(3) 接种量: 调节 pH 值为 7,分别以 2%、4%、6%、8%、10%、15% 的量接种,30 ℃摇床培养。

(4) 联苯菊酯添加浓度: 调节 pH 值为 7.0,以 5% 的量分别接种于联苯菊酯浓度为 50、100、150、200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

L^{-1} 的基础盐培养液中, 30 °C 摇床培养。

2 结果与分析

2.1 联苯菊酯降解菌的筛选

经富集驯化培养、分离纯化得到 8 株具有联苯菊酯降解效果的菌株, 编号为 S1~S8。在联苯菊酯浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 7.0、30 °C、 $130\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下, 对这 8 株菌进行降解能力测试, 3 d 的降解率分别为 12.7%、35.3%、9.5%、23.8%、43.1%、22.2%、17.7%、56.1%, 其中 S8 降解率最高, 所以选取 S8 为研究对象。

2.2 菌种的鉴定

菌落特征: 在牛肉膏培养基上菌落个体小, 呈淡黄色, 圆形高凸, 表面光滑湿润, 易挑起, 边缘整齐。菌体形态: 如电镜照片所示(图 1), 呈短杆状, 无鞭毛, 长约 $0.8\text{ }\mu\text{m}$, 宽约 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 。生理生化特征: 革兰氏染色阴性, 能发酵葡萄糖产酸, 能利用淀粉, 氧化酶阴性, 接触酶阳性, 甲基红实验阴性。

菌株 S8 的 16S rDNA 基因序列测试由上海生工生物工程有限公司完成, 序列提交 NCBI 后进行 BLAST, 利用 MEGA 软件 Alignment, 再用 NJ 法进行进化树的构建, 模型为 Maximum Composite Likelihood, 其 Bootstrap 值为 1 000。发现 S8 与不动杆菌属 (*Acinetobacter* sp.) 的醋酸钙不动杆菌 (*Acinetobacter calcoaceticus*) 的相似性达 100%(图 1)。

2.3 唯一碳源证明及菌株的降解过程

唯一碳源实验结果如图 2, 菌株 S8 无法以丙酮和吐温 20 为唯一碳源生长, 但能在含有丙酮和吐温 20 的联苯菊酯培养液中良好生长, 由此得出 S8 能以联苯菊酯为唯一碳源生长。

菌株 S8 对联苯菊酯的降解过程如图 3 所示。在 1~2 d 内菌株 S8 可利用联苯菊酯进入对数生长

期, 联苯菊酯的浓度迅速下降, 延长培养时间降解变缓, 超过 3 d 菌株生长进入衰亡期, 培养液中联苯菊酯的浓度基本稳定不再降低, 这可能是由于降解产物对细菌的降解有抑制作用。菌株 S8 的降解过程在 3 d 时基本达平衡, 故选用 3 d 的降解率为研究对象。

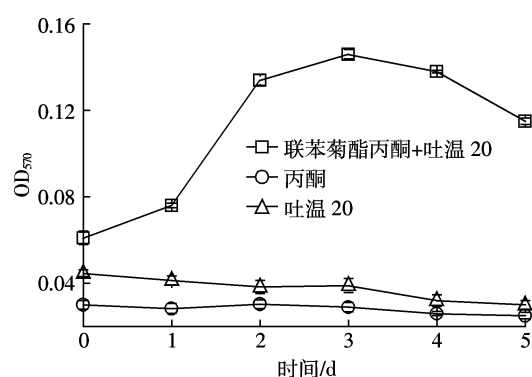


图 2 S8 利用联苯菊酯为唯一碳源生长的证明

Figure 2 Proof of strain S8 using bifenthrin as the sole carbon and energy source

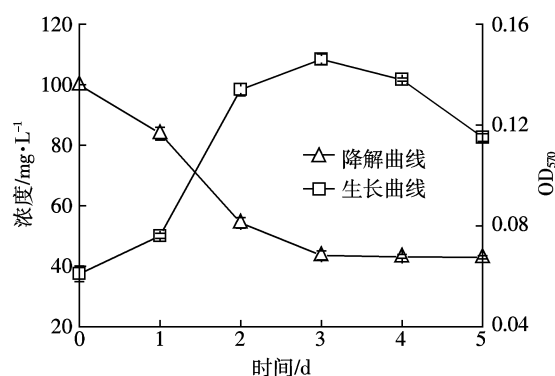


图 3 菌株 S8 对联苯菊酯降解过程

Figure 3 Performance process of biodegradation of bifenthrin by strain S8

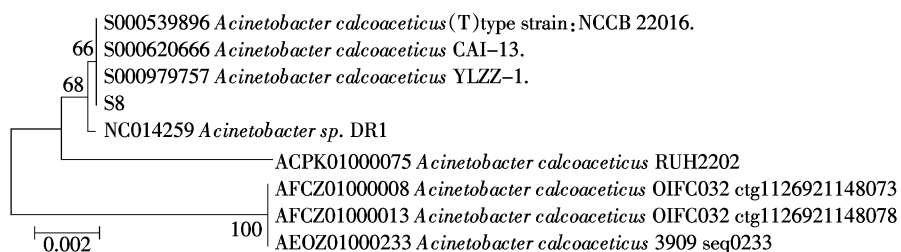
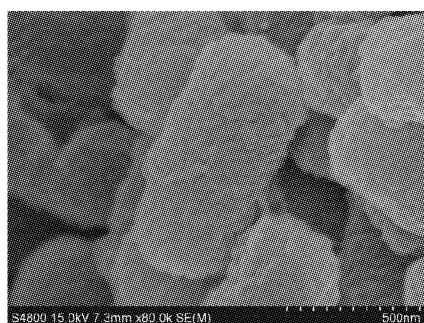


图 1 菌株 S8 的场发射扫描电子显微镜照片及 16S rDNA 的系统进化树

Figure 1 Field emission scanning electron microscope photograph of strain S8 and phylogenetic tree based on its 16S rDNA sequences homology

2.4 菌株 S8 的降解特性

2.4.1 pH 对菌株降解效果的影响

如图 4 所示, S8 对联苯菊酯的降解在 pH 值为 6.0~8.0 时可保持较高的降解活性, 但随 pH 的升高有降低的趋势, 3 d 的降解率分别为 57.1%、56.4%、54.6%, 这可能与该菌种的性质有关。该结果与陈明等^[16]所研究的醋酸钙不动杆菌 PHEA-2 对苯酚的降解可在 pH 值 5.0~9.0 时保持较好的降解性能一致。

2.4.2 温度对菌株降解效果的影响

菌株 S8 对联苯菊酯的降解率随温度的增加先增大后减小, 如图 5 所示。在 30~35 °C 范围内可保持较高的降解率, 20 °C 时降解率为 22.6%, 随着温度的升高降解率逐渐增大, 35 °C 时达到最大值 56.2%, 而后降解率随着温度的增加而减小, 40 °C 时降解率降低为 21.3%。

2.4.3 接种量对菌株降解效果的影响

如图 6 所示, 低菌量时菌株 S8 对联苯菊酯的降解率随接种量增加而增大, 接种量 2% 时降解率为 30.5%, 当接种量增加到 6% 时降解率也提高为

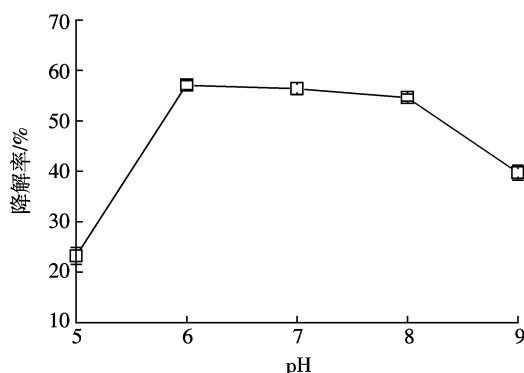


图 4 pH 对 S8 降解联苯菊酯的影响

Figure 4 Effect of pH on degradation of bifenthrin by strain S8

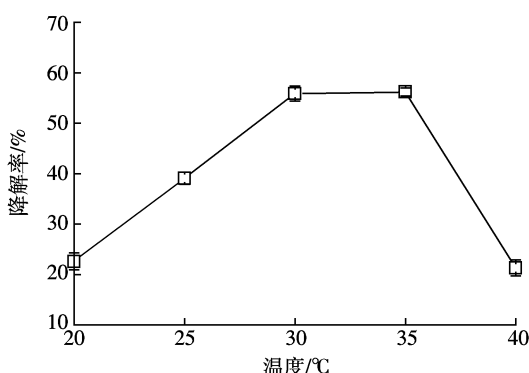


图 5 温度对 S8 降解联苯菊酯的影响

Figure 5 Effect of temperature on degradation of bifenthrin by strain S8

56.7%, 之后降解率略有下降但趋于平缓, 可能是由于随接种量的增加, 微生物生长所需的碳源相对不足, 从而影响降解效果。

2.4.4 联苯菊酯添加浓度对菌株降解效果的影响

联苯菊酯的初始添加量对菌株 S8 的降解有较大影响, 如图 7 所示。降解率随着添加浓度的升高而逐渐降低, 初始添加的联苯菊酯浓度为 50 mg·L⁻¹ 时, S8 的降解率最高达 78.2%, 而 200 mg·L⁻¹ 时的降解率仅为 9.7%。分析其原因, 高浓度的联苯菊酯可能会对其产生反馈抑制, 从而限制了降解菌对营养物质的摄取量, 其生长使降解效果受到影响。

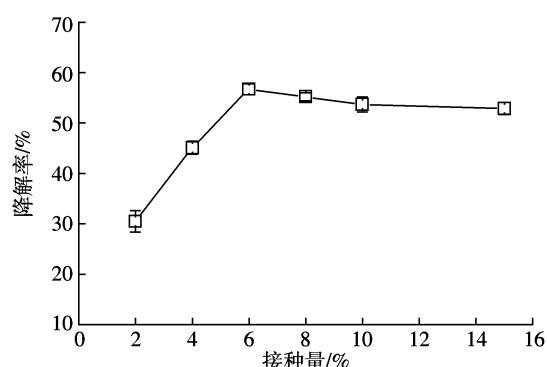


图 6 接种量对 S8 降解联苯菊酯的影响

Figure 6 Influence of S8 inoculation rate on degradation of bifenthrin

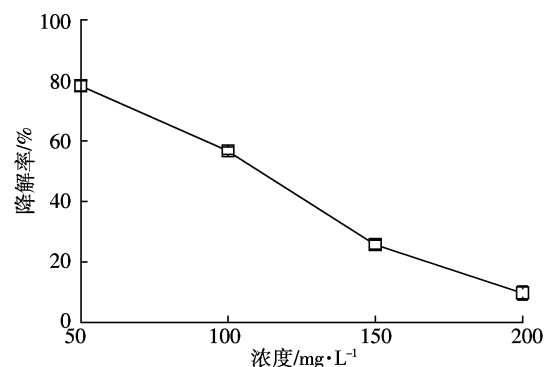


图 7 添加浓度对 S8 降解联苯菊酯的影响

Figure 7 Effect of initial bifenthrin concentration on its degradation by S8

3 讨论

本文利用富集驯化的方法, 从长期耐受农药污染的地表土壤中分离到一株能够降解联苯菊酯的醋酸钙不动杆菌 (*Acinetobacter calcoaceticus*) S8, 该菌株对 100 mg·L⁻¹ 联苯菊酯 3 d 的降解率达 56.4%。据文献报道, 醋酸钙不动杆菌对苯酚^[17]、DBP^[18]等具有降解能

力,且对石油^[9]有较好的乳化能力,而对联苯菊酯的降解尚未见报道。近年来已分离到的联苯菊酯降解菌中,产气肠杆菌 M6R9^[11]对 100 mg·L⁻¹ 联苯菊酯 3 d 的降解率为 55.74%,戴尔福特菌 HLB-1^[13]对 200 mg·L⁻¹ 联苯菊酯 5 d 的降解率为 74.5%。相比 HLB-1 菌, S8 的降解率略低,这可能是由于驯化过程中联苯菊酯的最大添加量明显低于上述文献导致。

唯一碳源的实验表明,菌株 S8 可以以联苯菊酯为唯一碳源生长,菌株的降解曲线与生长曲线研究表明,在菌株生长的对数期和稳定期内,农药降解和菌株生长呈正相关,随着菌株生长进入衰亡期,受周围不利因素影响,降解能力受到抑制,农药降解也趋向减缓而达到平衡,菌株生长和农药降解过程呈现出良好的同步关系,揭示了菌株 S8 确实能够降解联苯菊酯农药。降解过程经动力学分析基本满足一级反应模型, $R^2=0.9713$, 降解速率常数为 0.289 d⁻¹, 半衰期为 60.7 h。廖敏等筛选出的菌株 M5R14^[20]和 M6R9^[11]均可对联苯菊酯降解,半衰期分别为 97.6 h 和 65.4 h。与此结果相比菌株 S8 的半衰期更短,这可能是由于菌株的不同造成的。

本文针对 S8 降解特性研究证明了环境因素对降解效果的影响,该菌的最适生长条件为:pH6.0~8.0, 温度 30~35℃,接种量 5%。菌株 S8 对联苯菊酯的降解性能在一定的 pH 和温度变化区间内表现出稳定性,尤其是对 pH 的耐受范围较大,这与陈明等^[16]研究得出的在 pH 值 5.0~9.0 时醋酸钙不动杆菌 PHEA-2 对苯酚的降解均保持较高的降解性能的结论一致。

因此,本研究得到的菌株 S8(*Acinetobacter calcoaceticus*) 是一株可利用联苯菊酯为唯一碳源的高效菌株,且其降解的半衰期相对更短,对 pH 的耐受范围较大,表明其在控制拟除虫菊酯类农药残留方面具有一定的实际应用潜力。

4 结论

(1)本研究从长期受农药污染的土壤中分离得到一株联苯菊酯降解菌 S8,经过形态观察、生理生化特征及 16S rDNA 基因序列分析,鉴定为醋酸钙不动杆菌(*Acinetobacter calcoaceticus*),相似度为 100%。

(2)在 pH7.0 和 30℃的条件下, S8 对 100 mg·L⁻¹ 联苯菊酯的降解 3 d 达平衡,降解率达 56.4%,半衰期为 60.7 h。

(3)降解的最佳条件为:pH6~8, 温度 30~35℃, 接种量 5%。

参考文献:

- [1] GUAN Yan-qing, CHEN Jia-mei, TANG Jin-hua, et al. Immobilizing bifenthrin on wood for termite control[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2011, 65(3):389-395.
- [2] Grant R J, Betts W B. Biodegradation of the synthetic pyrethroid cypermethrin in used sheepdip[J]. *Applied Microbiology*, 2003(36):173-176.
- [3] Manoj V B, Gajbhiye V T. Effect of rate of application and moisture regimes on persistence of bifenthrin in soil under laboratory conditions[J]. *Pesticide Research Journal*, 2008, 20(2):287-291.
- [4] Mohapatra Soudamini, Ahuja A K. Effect of moisture and soil type on the degradation of bifenthrin in soil[J]. *Pesticide Research Journal*, 2009, 21(2):191-194.
- [5] Wolansky M J, McDaniel K L, Moser V C, et al. Influence of dosing volume on the neurotoxicity of bifenthrin[J]. *Neurotoxicology and Teratology*, 2007, 29(3):377-384.
- [6] 朱威, 郑一凡, 祝慧娟, 等. 联苯菊酯的抗雄激素作用及其机制[J]. *毒理学杂志*, 2006, 20(5):305-307.
- [7] ZHU Wei, ZHENG Yi-fan, ZHU Hui-juan, et al. The antiandrogenic effect and mechanism of bifenthrin[J]. *Journal of Toxicology*, 2006, 20(5):305-307.
- [8] Murray Kyle E, Thomasb Sheeba M, Bodourc Adria A. Prioritizing research for trace pollutants and emerging contaminants in the freshwater environment[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(12):3462-3471.
- [9] 李玲玉, 刘艳, 颜冬云, 等. 拟除虫菊酯类农药的降解与代谢研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(4):65-69.
- [10] LI Ling-yu, LIU Yan, YAN Dong-yun, et al. Research progress on degradation and metabolism of pyrethroid insecticides[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(4):65-69.
- [11] ZHANG Chen, WANG Sheng-hui, YAN Yan-chun. Isomerization and biodegradation of beta-cypermethrin by *Pseudomonas Aeruginosa* CH7 with biosurfactant production[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(14):7139-7146.
- [12] CHEN Shao-hua, LAI Kai-ping, LI Yan-an, et al. Biodegradation of deltamethrin and its hydrolysis product 3-phenoxybenzaldehyde by a newly isolated *Streptomyces aureus* strain HP-S-01[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, 90(4):1471-1483.
- [13] 廖敏, 张海军, 谢晓梅. 拟除虫菊酯类农药残留降解菌产气肠杆菌的分离、鉴定及降解特性研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(8):2445-2551.
- [14] LIAO Min, ZHANG Hai-jun, XIE Xiao-mei. Isolation and identification of degradation bacteria *Enterobacter aerogenes* for pyrethroids pesticide residues and its degradation characteristics[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(8):2445-2551.
- [15] 赵宇蕾. 联苯菊酯降解菌筛选鉴定、降解特性及应用研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2009.
- [16] ZHAO Yu-lei. Isolation, identification, degradation characters and application of bifenthrin degrading strains[D]. Yangling:Northwest Agriculture and Forestry University, 2009.
- [17] 景岳龙, 朱凤晓, 王军玲, 等. 联苯菊酯降解菌的筛选、鉴定及其降

- 解特性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(10): 98-102.
- JING Yue-long, ZHU Feng-xiao, WANG Jun-ling, et al. Isolation, identification and degradation characteristics of a bifenthrin-degrading strain *Delfia isuruhatensis* [J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed)*, 2010, 38(10):98-102.
- [14] Hundt Kai, Wagner Martin, Becher Dorte, et al. Effect of selected environmental factors on degradation and mineralization of biaryl compounds by the bacterium *Railstonia PickettII* in soil and compost [J]. *Chemosphere*, 1998, 36(10):2321-2335.
- [15] 张 建, 张振华, 黄 星, 等. 功夫菊酯降解菌 GF-1 的分离鉴定及其降解特性研究[J]. 土壤, 2009, 41(3):454-458.
- ZHANG Jian, ZHANG Zhen-hua, HUANG Xing, et al. Isolation and characteristics of lambda-cyhalothrin-degrading bacterium GF-1 [J]. *Soils*, 2009, 41(3):454-458.
- [16] 陈 明, 张 维, 徐玉泉, 等. 醋酸钙不动杆菌 PHEA-2 对苯酚的降解特性研究[J]. 中国环境科学, 2001, 21(3):226-229.
- CHEN Ming, ZHANG Wei, XU Yu-quan, et al. Study on characteristics of *Acinetobacter calcoaceticus* PHEA-2 for phenol degradation [J]. *China Environmental Science*, 2001, 21(3):226-229.
- [17] Fumiko Yamaga, Kenji Washio, Masaaki Morikawa. Sustainable biodegradation of phenol by *Acinetobacter calcoaceticus* P23 isolated from the rhizosphere of duckweed *lemna aoukikusa* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(16):6470-6474.
- [18] 段星春, 易筱筠, 党 志, 等. 乙酸钙不动杆菌 TS2H 对 DBP 降解特性的研究[J]. 生态环境, 2007, 16(3):846-849.
- DUAN Xing-chun, YI Xiao-jun, DANG Zhi, et al. Characterization of di-n-butyl phthalate degrading microbial *Acinetobacter calcoaceticus* TS2H [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3):846-849.
- [19] 刘五星, 骆永明, 滕 应, 等. 石油污染土壤的生态风险评价和生物修复:一株具有乳化石油能力的细菌分离鉴定[J]. 土壤学报, 2006, 43(3):461-465.
- LIU Wu-xing, LUO Yong-ming, TENG Ying, et al. Eco-risk & bioremediation of petroleum contaminated soil-isolation and identification of petroleum-emulsifying bacteria [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3):461-465.
- [20] 廖 敏, 张海军, 谢晓梅. 降解拟除虫菊酯类农药的缺陷假单胞菌的分离、鉴定及降解特性研究[J]. 环境科学学报, 2009, 29(7):1388-1394.
- LIAO Min, ZHANG Hai-jun, XIE Xiao-mei. Isolation, identification and degradation characteristics of a *Pseudomonas diminuta* strain able to degrade pyrethroid pesticides [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 29(7):1388-1394.