

普施特降解菌 *Bacillus* sp. zx2 和 zx7 生长及降解特性

王 磊¹, 李淑芹^{1*}, 郑玉莲², 许景钢¹

(1.东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2.青岛源至诚实业有限公司, 青岛 266001)

摘 要:芽孢杆菌 zx2 和 zx7 是普施特高效降解菌,研究其生长和降解特性旨在为普施特污染土壤的生物修复提供科学依据。采用瓶培养法,对芽孢杆菌 zx2 和 zx7 的生长特性及单菌和复合菌对普施特的降解特性进行了研究。结果表明, zx2 和 zx7 均可在普施特初始浓度 $\leq 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的无机盐培养液中生长良好, zx2 在温度 25~35 °C 和 pH4.0~7.0 时生长良好, 而 zx7 适宜在温度 30~35 °C 和 pH5.0~8.0 时生长,可见在适应性上二者互补。在最佳条件(温度 32 °C、pH6.0 和普施特初始浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)下, zx2 和 zx7 在无机盐培养液中对普施特降解动态均符合阻滞动力学, 半衰期分别为 3.8 d 和 2.8 d, 培养 6 d 时普施特降解率分别为 85.81% 和 90.27%。在培养过程中, zx2 的 pH 是降低的, 而 zx7 的 pH 基本不变, 可初步表明二者降解机理不同; zx2 和 zx7 复合菌(1:1)对普施特降解率比单菌低, 为 82.70%, 这可能是由于 zx2 或 zx7 降解普施特的过程中利用了对方产生的降解产物。

关键词:普施特;降解;生长;芽孢杆菌

中图分类号:X172 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)02-0351-06

Growth and Degradation Characteristics of Imazethapyr-degrading *Bacillus* sp. zx2 and zx7

WANG Lei¹, LI Shu-qin^{1*}, ZHENG Yu-lian², XU Jing-gang¹

(1.College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2.Qingdao Rich Industry Co., LTD., Qingdao 266001, China)

Abstract: *Bacillus* sp. zx2 and zx7 are two effective degradation strains for imazethapyr. Study of their growth and degradation characteristics will provide a scientific basis for the practical bioremediation of soil contaminated by imazethapyr, reduce the harmful effect of imazethapyr on environment and human health and contribute to agricultural sustainable development. Bottle culture method was applied to research the growth characteristics of strains zx2, zx7 and their degradation characteristics for imazethapyr with single and mixed strains. The results showed that both of zx2 and zx7 could grow well in inorganic salt medium when the initial concentration of imazethapyr $\leq 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Strain zx2 showed good growth at the condition: Temperature of 25~35 °C and pH of 4.0~7.0, while the suitable condition for zx7 was temperature of 30~35 °C and pH of 5.0~8.0. Adaptation of the two strains was complementary to each other. Under the optimal growth conditions (temperature 32 °C, pH 6.0, and initial imazethapyr concentration of $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), degradation of imazethapyr by zx2 and zx7 in inorganic salt medium was conformed to the retardation kinetic model. Half-life of imazethapyr degradation was 3.8 days and 2.8 days respectively, and the degradation rates were 85.81% and 90.27% after 6 days culture. In the process of cultivation, pH of zx2 decreased, while pH of zx7 unchanged. It preliminarily showed that the degradation mechanism of zx2 was different from that of zx7. Degradation rate of the mixed strains of zx2 and zx7 was 82.7% which was lower than that of the single strain. It may be due to the reason that zx2 or zx7 utilized the degradation products of each other during their degrading imazethapyr process.

Keywords: imazethapyr; degradation; growth; *Bacillus* sp.

除草剂普施特(imazethapyr)的化学名为咪唑乙烟酸,又名咪草烟,是侧链氨基酸合成抑制剂,因其具

有杀草谱广、选择性强、活性高、用量低、价格低廉、药效好等优点,而被广泛用于防除豆田杂草。但普施特在土壤中不易降解,残余量大,残留期长、属于长残效除草剂。普施特的残留对某些后茬作物及非靶植物如水稻、玉米、甜菜等存在严重的药害,直接影响大豆的轮作换茬,使种植业结构调整受到极大地限制,同时对农田环境也造成了污染^[1-2]。研究利用外源微生物

收稿日期:2011-07-02

基金项目:东北农业大学创新团队基金(CXT003-1-3);黑龙江省博士后基金项目(LBH-206162)

作者简介:王 磊(1984—),女,黑龙江大庆人,硕士研究生,研究方向为环境微生物学。E-mail:594883732@qq.com

* 通讯作者:李淑芹 E-mail:shuqinli007@126.com

消除土壤里的普施特,为解决长残效除草剂残留药害问题和保护农田生态环境具有重要的意义。

芽孢杆菌种类繁多,数量大,能够产生多种多样的生理活性物质,在工农业和医学上都有广泛应用。目前研究较多的是将芽孢杆菌做为饲料添加剂、微生物肥料及酶制剂等,既对动物机体无不良影响,又不会造成环境污染。在降解农药方面的研究也较多,如辛伟等^[3]分离得到一株能在茶树体内内生定殖的蜡状芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)TR2 对拟除虫菊酯类农药如氯氰菊酯等降解效能高,且对有机磷农药如乐果等也有一定降解能力;孙强^[4]采用富集和胁迫式培养方法筛选到一株芽孢杆菌属(*Bacillus* sp.)的 HPD-2,能够在以五氯苯酚(PCP)为唯一碳源和能源且对 PCP 有较高的降解能力;芽孢杆菌属(*Bacillus* sp.)还可以较好地降解多环芳烃^[5];王婷^[6]发现 2 株蜡状芽孢杆菌构成的复合菌对重金属及多溴联苯醚具有一定的去除作用;张菊^[7]筛选到一株芽孢杆菌(*Bacillus* sp.)PD2 对苯酚具有高效降解作用。2009 年本课题组郑玉莲等^[8]首次报道了从农药厂废水井的泥水与长期施用普施特的土壤混合样中分离出来对普施特具有较好的降解能力的芽孢杆菌属 zx2 和 zx7。微生物的生长与对除草剂的降解性受环境条件的影响较大,研究 zx2 和 zx7 的生长和降解特性,获知其生长和降解的适应条件,可为普施特污染土壤的生物修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

Bacillus sp. zx2 和 zx7:在 GeneBank 数据库的登陆号分别为 FJ463164 和 FJ463169,均能以普施特为唯一碳源生长,且两者无拮抗作用。

无机盐培养基:K₂HPO₄ 1.6 g, KH₂PO₄ 0.4 g, MgSO₄ 0.06 g, NH₄Cl 1.0 g, NaCl 0.5 g, Fe₂(SO₄)₃ 0.03 g, CaCl₂ 0.01 g, CuSO₄ 0.05 mg, ZnSO₄ 0.05 mg, HBO₃ 0.03 mg, 蒸馏水 1 L。

1.2 试验方法

1.2.1 菌悬液的制备

取保存的菌株 zx2、zx7 于 30 ℃恒温箱中活化 24 h,用接菌环取下 1 环,于牛肉膏蛋白胨培养液中,置于 30 ℃、140 r·min⁻¹ 过夜培养。将培养液于 4 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,去上清液。用 Na₂HPO₄-NaH₂PO₄ (pH=7.0, 0.2 mol·L⁻¹) 缓冲液 10 mL×4 次洗涤;以缓冲液为对照,调节菌悬母液 OD₆₀₀ 值至约为 2.0。

1.2.2 菌体生长量和普施特残余量的测定

取适量菌悬液,加入含一定浓度普施特的 50 mL 无机盐培养液中,调节一定 pH,以不加菌为对照,置于一定温度、140 r·min⁻¹ 的摇床培养,每天或 6 d 取样,用紫外可见分光光度计测定 OD₆₀₀ 值,并取 5 mL 培养液,用 3×5 mL 二氯甲烷萃取后,在旋转蒸发仪上浓缩近干,用乙腈准确定容至 5 mL,摇匀,在高效液相色谱上测定普施特的含量,计算其残留量和降解率。试验设 3 次重复。

1.2.3 高效液相色谱检测条件

不锈钢柱 zorbsx SB-C18 (ODS C18) 150 mm×4.6 mm i.d. 5 μm;流动相为乙腈:水:醋酸(1%)=70:25:5;流量为 1.0 mL·min⁻¹;进样量为 5 μL;波长为 254 nm;柱温为 30 ℃。

2 结果与分析

2.1 zx2 和 zx7 的生长曲线与 pH 变化

在 100 mg·L⁻¹ 浓度的普施特无机盐培养液中,接入 2%(V/V)的 zx2 和 zx7 菌悬液,30 ℃进行培养,每天取样一次,设 3 次重复,用紫外可见分光光度计测定 OD₆₀₀ 值,OD₆₀₀ 值和 pH 值随培养时间变化情况见图 1 和图 2。

从图 1 可以看出,zx2 和 zx7 生长曲线趋势相同,均存在一定的适应时间(约 2 d),继而自我调节后,快速生长。两株细菌的对数生长期相对较长,此时,细菌快速分裂生长,其代谢活动最强,代谢稳定,这对其实际的应用非常有利。培养 6 d 时菌株 zx2 和 zx7 生长量最大,6 d 后两株降解菌的生长量均有减小的趋势。另外,从图 1 可以看出,zx7 的生长量略大于 zx2。后续试验培养时间确定为 6 d。

从图 2 可以看出,zx2 和 zx7 的培养液 pH 值随时间的变化趋势不同。zx2 在 2 d 以内时 pH 值变化不明显,当时间在 2~3 d 时 pH 值急剧下降,降解过程中可能产生有机酸,3 d 后 pH 值有微小的变化;而 zx7 的 pH 值随时间几乎不变化。由 zx2 与 zx7 的 pH 值随时间的变化可知,两菌株降解普施特的切入点不同,降解机理不同,其降解过程的产物不同。

2.2 培养液 pH 值对 zx2 和 zx7 生长的影响

在不同 pH 值的含 200 mg·L⁻¹ 普施特的无机盐培养液中,接入 2%(V/V)的 zx2 和 zx7 菌悬液,以不加菌为对照,设 3 次重复,30 ℃条件下摇床培养 6 d,其 OD₆₀₀ 值随培养液 pH 值变化情况如图 3。

由图 3 可以看出,zx2 在 pH 值为 4.0~5.0 之间,

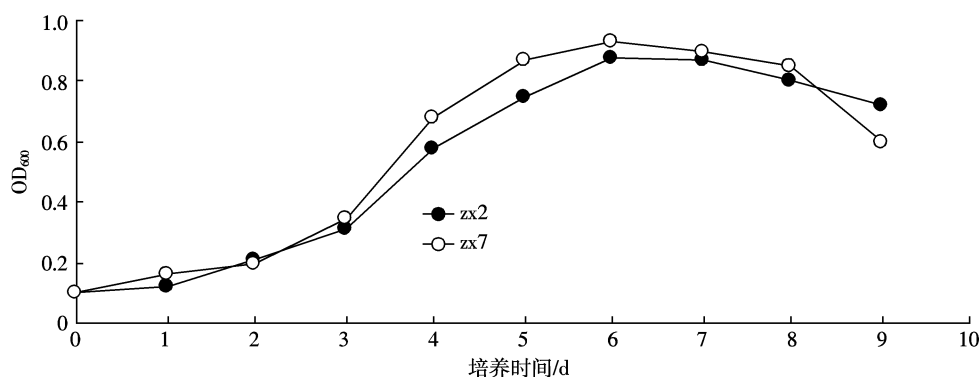


图1 zx2 和 zx7 的生长曲线

Figure 1 Growth curves of zx2 and zx7

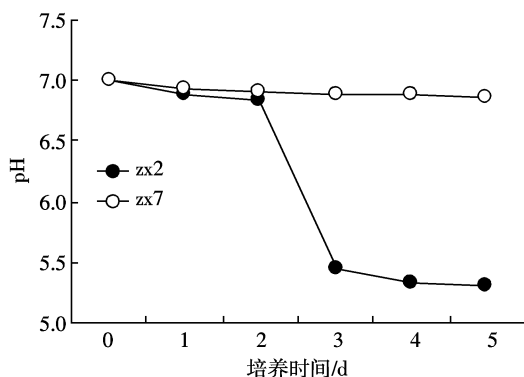


图2 pH 随培养时间的变化

Figure 2 Change of pH with culture time

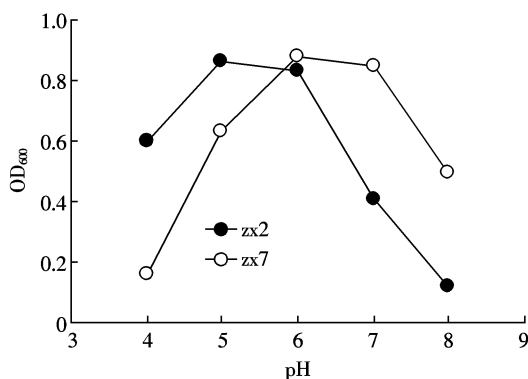


图3 pH 对 zx2 和 zx7 生长的影响

Figure 3 Effects of pH on growth of zx2 and zx7

随着 pH 值增加 zx2 的生长量也增加, 在 pH 值为 5.0~6.0 之间, 菌体生长量维持在较高水平, 当 pH 值大于 6.0 时 zx2 的生长量随 pH 值的增加而急剧下降, pH 为 8.0 几乎不生长。zx7 在 pH 值为 4.0 时略有生长, 在 pH 值为 4.0~6.0 之间, 其生长量随着 pH 值的增加而急剧增加, 其中 pH 值 6.0 时菌体生长量最大, 在 pH 值为 6.0~7.0 之间, 菌体生长量维持在较高

水平, 当 pH 值大于 7.0 时, 菌体生长量随 pH 值的升高而减少。可见, 适合两株菌生长的最佳 pH 值是不同的, 两株菌在 pH 值的适应性上是互补的。

2.3 温度对 zx2 和 zx7 生长的影响

pH 值为 6.0 时, 以 2% 接菌量加入含 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 普施特无机盐培养液中, 不同温度下摇床培养, 以不加菌为对照, 设 3 次重复, 6 d 取样, 测其 OD₆₀₀ 值, OD₆₀₀ 值随培养液温度变化情况如图 4。

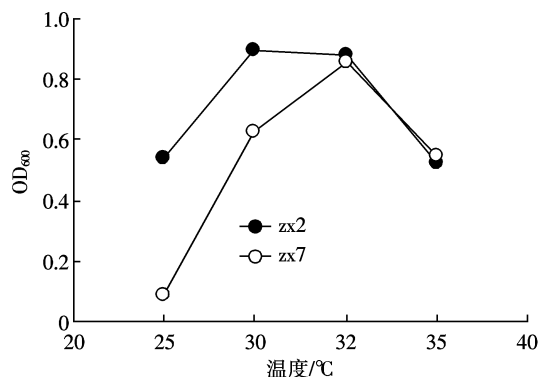


图4 培养温度对 zx2 和 zx7 生长的影响

Figure 4 Effects of temperature on growth of zx2 and zx7

由图 4 可知, zx2 和 zx7 的生长量随温度的变化不同。zx2 当温度在 25~30 °C 之间时, 菌体生长量随温度的升高而同步上升, 当温度在 30~32 °C 之间时, 生长量较大且稳定, 温度高于 32 °C 时, 生长量则随温度的升高而下降; zx2 适合的培养温度为 25~35 °C。zx7 当温度为 25 °C 时几乎不生长, 温度在 25~32 °C 生长量随温度的升高而迅速上升, 32 °C 时菌体生长量达到最大值, 之后 zx7 的生长量随温度的升高而下降; zx7 的适合生长温度为 30~35 °C。由图 4 还可知, zx2 适合在中温条件下生长, 而 zx7 对生长环境的温度变化比较敏感。两菌在 32 °C 条件下都生

长最好。

2.4 普施特初始浓度对 zx2 和 zx7 生长的影响

在普施特初始浓度不同的无机盐培养液中,接入 2%(V/V)的 zx2 和 zx7 菌悬液,在 pH 值为 6.0 和温度为 32 ℃下进行培养,以不加菌为对照,设 3 次重复,摇床培养 6 d 取样,其 OD₆₀₀ 值随普施特初始浓度变化情况如图 5。

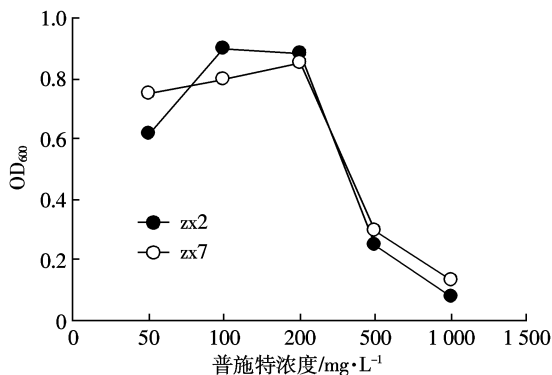


图 5 普施特初始浓度对 zx2 和 zx7 生长的影响

Figure 5 Effects of initial concentration of imazethapyr on growth of zx2 and zx7

由图 5 可见,在最佳 pH 值和培养温度条件下, zx2 和 zx7 在无机盐培养液中随普施特初始浓度的升高,其生长量也随之增加,达到一定值后生长量降低。当普施特初始浓度在 50~200 mg·L⁻¹ 之间时,对两株菌的生长影响不大,均在普施特初始浓度为 200 mg·L⁻¹ 条件下生长良好;当普施特浓度达到或超过 500 mg·L⁻¹ 时,对两株降解菌均有明显的抑制和毒害作用,两株菌的生长量随普施特浓度的增加迅速下降;当普施特浓度为 1 000 mg·L⁻¹ 时,两株菌均几乎不生长。

2.5 zx2 和 zx7 对普施特的降解动力学

在 200 mg·L⁻¹ 的普施特无机盐培养液中分别接入 2%(V/V)的 zx2 和 zx7 菌悬液,两菌株在 pH 值为 6.0 和温度为 32 ℃下进行摇床培养,设 3 次重复,普施特浓度随时间的变化情况如图 6。

由图 6 可知, zx7 降解普施特比 zx2 要快,普施特的浓度变化曲线呈倒 S 型,存在两个拐点,降解速率也有“慢-快-慢”的变化,经拟合 zx2 和 zx7 降解普施特均符合阻滞动力学模型, zx2 模型方程为:

$$c(t) = \frac{200}{1 + 0.085t^{1.83}}, R^2 = 0.9810, P = 0.001 < 0.01 \text{ 显著}$$

相关,半衰期为 3.8 d。

zx7 模型方程为:

$$c(t) = \frac{200}{1 + 0.231t^{1.44}}, R^2 = 0.9610, P = 0.001 < 0.01 \text{ 显著}$$

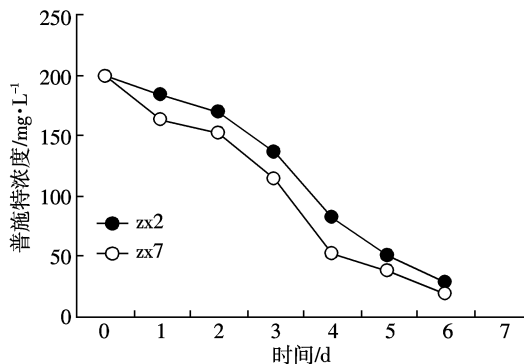


图 6 普施特的浓度随时间的变化

Figure 6 Change of imazethapyr concentration with time

相关,半衰期为 2.8 d。

用一级动力学模型对其降解过程进行拟合, zx2 降解动态方程为:

$$y = 266.93e^{-0.3272t}, R^2 = 0.9058, P = 0.004 < 0.01 \text{ 显著}$$

相关,半衰期为 3.0 d。

zx7 降解动态方程为:

$$y = 260.2e^{-0.3903t}, R^2 = 0.9603, P = 0.002 < 0.01 \text{ 显著}$$

相关,半衰期为 2.4 d。

通过阻滞动力学模型和一级动力学模型的相关系数与 P 值进行比较,可知 zx2 和 zx7 降解普施特更符合阻滞动力学模型。

2.6 单株菌与复合菌降解率比较

在 200 mg·L⁻¹ 的普施特无机盐培养液中同时接入 1%(V/V)的 zx2 和 zx7 菌悬液,在 pH 值为 6.0 和温度为 32 ℃下进行摇床培养,6 d 时普施特降解率如图 7。由图可知, zx2 和 zx7 复合菌(zx)降解率低于单株菌,为 82.70%。由于本试验降解率是普施特的减少量的比例,且 zx2 与 zx7 间无拮抗,则推测复合菌中的单菌在降解普施特的过程中可能利用了对方产生的降解产物,致使复合菌的降解率降低。

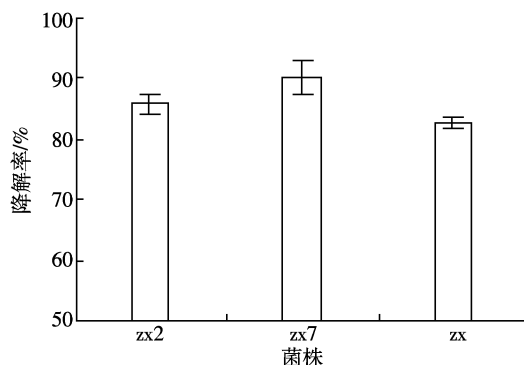


图 7 zx2、zx7 与 zx 的降解率比较

Figure 7 Comparison of degradation rate among zx2, zx7 and zx

3 讨论

目前,人们已分离了许多可降解农药的微生物^[9-14],其中关于普施特的生物降解菌目前研究也较多,曹知平^[15]分离得到一株黑曲霉 LZ1,在含有 200 mg·L⁻¹ 普施特的培养液中降解率达到 72.5%;霍莹^[16]获得了一株大宫链霉菌属(*Streptomyces omiyaensis*) S181,能够以普施特为唯一氮源生长,对普施特的降解率为 84%。Wang 等^[17]报道了从土壤中分离得到节细菌属,命名为 WWX-1,该菌在 50 μg·mL⁻¹ 和 200 μg·mL⁻¹ 咪唑乙烟酸浓度下,降解半衰期分别为 1.51 d 和 4.75 d。而本试验分离得到的芽孢杆菌属 zx2 和 zx7 菌株在 200 μg·mL⁻¹ 普施特浓度下,降解率可分别达 85.81% 和 90.27%,降解半衰期分别为 3.8 d 和 2.8 d。由此可知, zx2 和 zx7 降解普施特的降解率较高,且降解比较快,降解的时间短,这对其实际的应用非常有利。zx2 和 zx7 的复合菌(1:1)对普施特降解率比两株单菌低,且两菌不产生拮抗作用,降解过程中 zx2 产酸而 zx7 不产酸,初步说明了二菌株降解普施特过程中切入点不同,其降解产物不同,降解机理不同, zx2 或 zx7 在降解的过程中利用了对方的降解产物,产生更小分子的物质,但实际的降解机理还有待于进一步研究。鉴于 zx2 和 zx7 属于同一属的菌株,建议实际田间应用可根据土壤的理化性质选择适合的单菌株。

4 结论

本试验研究了芽孢杆菌 zx2 和 zx7 的生长特性及单菌和复合菌对普施特的降解特性。试验结果表明,在降解普施特过程中 zx2 产酸而 zx7 不产酸,推测二菌株降解机理不同。zx2 和 zx7 的生长与温度、pH 值、底物浓度等有关,在无机盐培养液中,普施特初始浓度 ≤ 200 mg·L⁻¹ 时 zx2 和 zx7 均可良好地进行生长, zx2 适合的生长温度为 25~35 °C 和适合的 pH 值为 4.0~7.0,而 zx7 在温度 30~35 °C 和 pH 值 5.0~8.0 时适宜生长。可知在适应性上二者互补。在最适生长条件(pH 值 6.0、温度 32 °C 和普施特初始浓度为 200 mg·L⁻¹)下, zx2 和 zx7 在无机盐培养液中培养 6 d 时对普施特降解率分别为 85.81% 和 90.27%,对普施特的降解均符合阻滞动力学,普施特半衰期分别为 3.8 d 和 2.8 d。zx2 和 zx7 的混合菌(1:1)对普施特降解率比两株单菌低,为 82.70%。这可能是因为 zx2 或 zx7 降解普施特的过程中利用了对方产生的降解产物。

参考文献:

- [1] 苏少泉. 长残留除草剂在土壤中的分解及其使用中带来的严重问题[J]. 农化新世纪, 2008(4): 24-26.
SU Shao-quan. Degradation of long-residue herbicides in soil and the serious problems brought in their using[J]. *The New Century of Agrochem*, 2008(4): 24-26.
- [2] 赵长山, 何付丽. 长残留性除草剂与黑龙江省农业的未来发展[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(1): 136-139.
ZHAO Chang-shan, HE Fu-li. Effects of long residue herbicides on a-gricultural development of Heilongjiang Province[J]. *Journal of North-east Agricultural University*, 2007, 38(1): 136-139.
- [3] 辛伟, 洪永聪, 胡美玲, 等. 氯氰菊酯降解菌的筛选及其降解特性研究[J]. 莱阳农学院学报(自然科学版), 2006, 23(2): 88-92.
XIN Wei, HONG Yong-cong, HU Mei-ling, et al. Screening of cyper-methrin degrading bacteria and studies on its characteristics[J]. *Journal of Laiyang Agricultural College (Natural Science Edition)*, 2006, 23(2): 88-92.
- [4] 孙强. 五氯苯酚降解菌的筛选及其降解条件研究[D]. 河南农业大学硕士学位论文, 2007.
SUN Qiang. Screening of pentachlorophenol degrading bacteria and its degradation condition[D]. Henan Agricultural University Master's Degree Paper. 2007.
- [5] 周乐. 多环芳烃降解菌的筛选、降解条件及其与玉米联合修复菲、芘污染土壤的研究[D]. 南京农业大学硕士学位论文, 2006.
ZHOU Le. Screening of PAHs-degrading bacteria and their effects on combined remediation of phenanthrene and pyrene contaminated soils with maize[D]. Nanjing Agricultural University Master's Degree Paper. 2006.
- [6] 王婷. 蜡状芽孢杆菌修复重金属多溴联苯醚复合污染的研究[D]. 暨南大学硕士学位论文, 2007.
WANG Ting. Research on remediation of combined contamination of heavy metals and poly-brominated diphenyl ethers by *Bacillus Cereus* [D]. Jinan University Master's Degree Paper, 2007.
- [7] 张菊. 苯酚降解菌的分离筛选及其降解特性研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2004.
ZHANG Ju. The Research of degradation characteristic and separation of phenol degradation bacteria[D]. Southwest Jiaotong University Master's Degree Paper, 2004.
- [8] 郑玉莲, 许景钢, 李淑芹, 等. 普施特优势降解细菌的筛选与鉴定[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(6): 40-44.
ZHENG Yu-lian, XU Jing-gang, Li Shu-qin, et al. Selection and identification of the effective imazethapyr degradation bacteria[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2009, 40(6): 40-44.
- [9] Chen W, Mulchandani A. The use of live biocatalysts for pesticide detoxification[J]. *Trends in Biotechnology*, 1998, 16(2): 71-76.
- [10] Souza M L, Wackett L P, Bound-Mills K L, et al. Cloning, characterization, and expressing of a gene region from *Pseudomonas* sp. Strain ADP involved in the dechlorination of atrazine[J]. *Appl Environ Microbial*, 1995, 61: 3373-3378.
- [11] Wackett L P, Sadowsky M J, Martinez B, et al. Biodegradation of a-

- triazine and related s-triazine compounds; From enzymes to field studies[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2002, 58:39-45.
- [12] 李 岩, 蒋继志, 马 平, 等. 细菌降解农药研究新进展[J]. 西北农林科技大学学报, 2005, 33(增刊):250-252.
- LI Yan, JIANG Ji-zhi, MA Ping, et al. Novel advances on pesticides degradation by bacteria[J]. *Journal of Northwest University of Agriculture and Forestry*, 2005, 33(Suppl):250-252.
- [13] 牛明芬, 刘知远, 李卓坪, 等. 降解毒死蜱的高效复合微生物菌剂的制备及研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2):381-385.
- NIU Ming-fen, LIU Zhi-yuan, LI Zhuo-ping, et al. Preparing and researching the efficient comple microbial community for degradating chlorpyrifos[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2):381-385.
- [14] 李宝庆, 鹿秀云, 郭庆港, 等. 克百威降解菌 CYW-44 的分离及其酶促降解研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊):196-200.
- LI Bao-qing, LU Xu-yun, GUO Qing-gang, et al. Isolation of a novel carbofuran-degrading bacterium and its enzymatic degradation of carbofuran[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl):196-200.
- [15] 曹知平, 李淑芹, 许景钢, 等. 黑曲霉 LZ1 降解咪唑乙烟酸的特性研究[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(7):66-69.
- CAO Zhi-ping, LI Shu-qin, XU Jing-gang, et al. *Aspergillus niger* LZ1 degradation characteristics of imazethapyr[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(7):66-69.
- [16] 霍 莹, 许景钢, 李淑芹, 等. 咪唑乙烟酸降解菌 S181 的分离鉴定及其降解特性[J]. 环境科学, 2011, 32(5):1518-1523.
- HUO Ying, XU Jing-gang, LI Shu-qin, et al. Isolation and identification of imazethapyr degradable actinomyces S181 and its degradation characteristics[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(5):1518-1523.
- [17] Wang X, Liu X, Wang H, et al. Utilization and degradation of imazaquin by a naturally occurring isolate of *arthrobacter crystallopoietes*[J]. *Chemospher*, 2007, 67(11):2156-2162.