

朱凤晓,孔洁,由焦化,等. 2011. 高效复合菌对多菌灵的生物降解[J]. 环境科学学报, 31(5): 1045-1050

Zhu F X, Kong J, You J H, et al. 2011. Biodegradation of carbendazim by a highly effective combined bacterial culture [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(5): 1045-1050

高效复合菌对多菌灵的生物降解

朱凤晓¹, 孔洁¹, 由焦化¹, 呼世斌^{2,*}, 秦宝福¹

1. 西北农林科技大学生命科学院, 杨凌 712100

2. 西北农林科技大学理学院, 杨凌 712100

收稿日期: 2010-08-09

修回日期: 2010-09-20

录用日期: 2010-10-08

摘要: 将多菌灵降解菌 *Alcaligenes* sp. 和 *Rhodococcus* sp. (编号为 A 和 R) 按不同比例进行复配, 并采用三波长校正法和 HPLC 法测定不同复配降解体系中多菌灵的残留量, 比较了纯培养和复合菌群对多菌灵的降解效果, 最后对高效复合菌的降解条件进行了优化. 试验结果表明, 得到的高效降解复合菌群 AR5(A:R 复配比例 1:4) 培养 24 h 后可完全降解 100 mg·L⁻¹ 的多菌灵, 对 200 mg·L⁻¹ 多菌灵的降解率为 74.25%, 明显优于单一菌株的降解效果. 同时, 该复合菌群对高浓度多菌灵也具有较好的耐受和降解能力, 72 h 内可将初始浓度为 600 mg·L⁻¹ 的多菌灵降解至 10 mg·L⁻¹ 左右. 正交优化试验结果表明, 该复合菌群的最优降解条件为温度 30 °C、pH=6.0、接种量 7%, 该条件下多菌灵的降解率可达 75.76%. 添加少量氮源(如尿素和酵母浸粉)可以促进复合菌对多菌灵的生物降解.

关键词: 多菌灵; 红球菌属; 产碱菌属; 复合菌群; 生物降解; 正交优化

文章编号: 0253-2468(2011)05-1045-06

中图分类号: X172

文献标识码: A

Biodegradation of carbendazim by a highly effective combined bacterial culture

ZHU Fengxiao¹, KONG Jie¹, YOU Jiaohua¹, HU Shibin^{2,*}, QIN Baofu¹

1. College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100

2. College of Science, Northwest A&F University, Yangling 712100

Received 9 August 2010;

received in revised form 20 September 2010;

accepted 8 October 2010

Abstract: Two carbendazim-degrading strains, an *Alcaligenes* sp. designated A and a *Rhodococcus* sp. designated R, were mixed in different proportions to develop a highly effective bacterial consortium, whose degradation conditions were then optimized. During the test, a ternary wavelength spectrophotometric method and HPLC were used to determine the residual carbendazim in the culture medium, based on which the degradation rates of individual strains and the combined bacteria were calculated. The combined bacterial consortium AR5 showed optimal degradation capability and could completely degrade 100 mg·L⁻¹ carbendazim within 24 hours of cultivation, while the degrading rate for 200 mg·L⁻¹ carbendazim reached 74.25%, which was superior to that of either individual strain alone. Moreover, the mixed culture had excellent tolerance and degradation ability against carbendazim of high concentrations, as carbendazim at 600 mg·L⁻¹ was degraded to about 10 mg·L⁻¹ within 72 hours. The result of an orthogonal optimization experiment showed that the optimal degradation conditions for AR5 were 30 °C, initial pH 6.0 and 7% inoculation volume, under which the degradation rate reached 75.76%. The addition of carbon and nitrogen sources, especially urea and yeast extract, could further promote the biodegradation of carbendazim by the combined bacterial culture AR5.

Keywords: carbendazim; *Rhodococcus* sp.; *Alcaligenes* sp.; combined bacteria; biodegradation; orthogonal optimization

1 引言(Introduction)

多菌灵(Carbendazim)是一种高效内吸性杀菌剂,广泛应用于由半知菌、多子囊菌等真菌引起的农作物病害的防治中;工业上,多菌灵主要用于皮革、造纸和橡胶等材料的防霉防腐.同时,多菌灵还

是许多苯并咪唑类杀菌剂的主要水解产物和有效成分(Mazellier *et al.* 2003).多菌灵化学性质稳定,在自然条件下降解半衰期较长,其在蔬菜、水果和土壤中的残留可通过食物链的积累效应影响人类健康.研究表明,多菌灵可引起肝病(潘尚任等, 1989),甚至导致染色体畸变(Sarrif *et al.*, 1994)

基金项目: 中央环境保护专项基金(财建(2006)859号)

Supported by the National Environmental Protection Foundation (No. (2006)859)

作者简介: 朱凤晓(1986—),女, E-mail: dywe_zfx@yahoo.com.cn; * 通讯作者(责任作者) E-mail: hushibin2003@yahoo.com.cn

Biography: ZHU Fengxiao(1986—), female, E-mail: dywe_zfx@yahoo.com.cn; * Corresponding author E-mail: hushibin2003@yahoo.com.cn

等,并对土壤中微生物群落的丰富度和优势度也能产生一定的抑制作用(向月琴等,2008)。微生物的生物降解是消除残留多菌灵的一种有效途径,目前已报道的多菌灵降解菌有假单胞菌属 *Pseudomonas* sp. (Fuchs *et al.*, 1978)、红球菌属 *Rhodococcus* sp. (Holtman *et al.*, 1997; Xu *et al.*, 2006)、罗尔斯通氏菌 *Ralstonia* sp. (张桂山等, 2004)、芽孢杆菌 *Bacillus pumilus* (张丽珍等, 2006) 和一株木霉菌株 *Trichoderma* sp. (田连生等, 2009) 等。以往有关多菌灵降解菌的研究多侧重于单一菌株的纯培养,而实际上混合培养可能更有利于多菌灵的生物降解,微生物可通过群落之间的代谢协同作用迅速将农药等有机污染物彻底降解,也更易于在污染环境成为优势群体(王伟东等, 2005)。因此,本文利用实验室已分离筛选得到的两株多菌灵降解菌 (*Rhodococcus* sp. 和 *Alcaligenes* sp.) 进行复配,比较其与纯培养降解菌的降解效果差异,以期获得一种高效复合菌剂。同时,对复合菌的降解条件进行优化,为土壤中多菌灵污染的生物修复提供参考。

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 材料

菌株:产碱菌属 (*Alcaligenes* sp.) 编号为 A; 红球菌属 (*Rhodococcus* sp.) 编号为 R。两菌株均由本实验室分离筛选获得(许炳云, 2009; 王军玲等, 2010)。

LB 液体培养基: NaCl 10.0 g, 蛋白胨 10.0 g, 酵母浸粉 5.0 g, 蒸馏水 1000 mL, pH = 7.0。无机盐培养基: NaCl 1.0 g, K_2HPO_4 1.5 g, KH_2PO_4 0.5 g, $(NH_4)_2SO_4$ 2.0 g, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.2 g, 蒸馏水 1000 mL, pH = 7.0。

试剂和仪器: 多菌灵由陕西石油化工研究院提供, 纯度 98%; UV-1200 型紫外可见分光光度计; SKY-200B 型恒温培养振荡器; LC-2010AHT 高效液相色谱仪购自日本岛津公司。

2.2 多菌灵含量的测定

三波长校正法(于彦彬等, 2005): 配制 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (有效成分) 的多菌灵标准溶液, 按需稀释成相应浓度。移取 100 μL 样品, 用稀盐酸 (1 + 11) 定容至 10 mL, 分别测定其在 278、281 和 290 nm 波长处的吸光度, 由 $\Delta A = A_{281} - (A_{278} + A_{290}) / 2$ 计算出校正吸光度 ΔA , 并根据标准曲线对样品中的多菌灵含量进行定量分析。

高效液相色谱法: 具体参见中华人民共和国农业行业标准 NY/T 1680—2009(牟仁祥等, 2009)。

2.3 种子液的制备

将保存于斜面的两种菌株分别进行活化和驯化培养, 挑取一环菌体, 接种至 LB 液体培养基中, 30 $^{\circ}\text{C}$ 下振荡培养 24 h。使用前调整其 OD_{600} 均为 1.0。移取 5 mL 菌液, 在 4 $^{\circ}\text{C}$ 、4000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 5 min, 收集菌体, 用灭菌的无机盐液体培养基洗涤 1 次后, 用等体积的灭菌无机盐液体培养基悬浮, 备用。

2.4 复合菌对多菌灵的降解试验

在无机盐液体培养基中添加多菌灵标准溶液, 使其浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总体积为 100 mL, 调节 pH 为 6.0。按 5% 的接种量接入不同比例 (A:R 体积比分别为 4:1、3:2、2.5:2.5、2:3、1:4) 的复合菌群, 以接入无菌水为空白对照, 每个处理设置 3 个平行。置于 30 $^{\circ}\text{C}$ 、150 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下摇床振荡培养, 每隔 12 h 取样测定 1 次培养液中多菌灵的残留量及菌体生长量 OD_{600} 。

2.5 高效复合菌对不同浓度多菌灵的降解

在无机盐培养基中添加多菌灵标准溶液, 使其浓度分别为 100、200、300、400、500、600 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 调节 pH 值为 6.0, 以 5% 的接种量接入复合菌群, 于 30 $^{\circ}\text{C}$ 、150 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件下摇床培养, 每隔 12 h 测定多菌灵的降解率。

2.6 高效复合菌正交优化试验

本实验在单菌对多菌灵降解特性研究的基础上, 考察温度、pH 和接种量 3 个因素对复合菌降解多菌灵的影响。采用三因素三水平正交实验方案, 根据 $L_9(3^4)$ 正交表, 进行有空列无重复试验, 运用直观分析法及方差分析法对各因素的影响程度进行评估, 并给出最佳组合条件。试验各因素水平分配方案见表 1。

表 1 正交试验因素水平

水平	温度/ $^{\circ}\text{C}$	pH 值	接种量
1	25	5	3%
2	30	6	5%
3	35	7	7%

2.7 添加碳氮源对复合菌降解多菌灵的影响

在多菌灵浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的无机盐液体培养基中分别添加 0.2% 的葡萄糖、可溶性淀粉、尿素、酵母浸粉、蛋白胨, 调节 pH 值为 6.0, 以 5% 的

接种量接入供试菌悬液,在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下振荡培养 24 h 后取样分析培养液中多菌灵的含量。

3 结果(Results)

3.1 复合菌对多菌灵的降解效果

纯培养菌株与按不同比例复合的混合菌群均对多菌灵表现出了良好的降解能力(图 1),在 72 h 内,菌株 A 对 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多菌灵的降解率达 90% 以上,菌株 R 能将其完全降解,而不接菌对照的降解率则低于 2.15%。这表明多菌灵在自然条件下的非生物降解过程很缓慢,接种特定的微生物能够有效降解环境中的多菌灵。

对于复合菌群而言,随着菌株 R 投加比例的升高,复合菌对多菌灵的降解能力逐渐增强,且均优于菌株 A。其中,AR5 为优势降解复合菌群(复配比例 A:R = 1:4),能在 48h 内将起始浓度为 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的多菌灵彻底降解;在 24h 时多菌灵浓度已降低至 $51.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降解率为 74.25%,而此时菌株 A 和 R 对多菌灵的降解率分别为 29.00% 和 52.75%;在培养前期(36h 内),AR5 的菌体生长量(OD_{600})也高于单菌株在以多菌灵为唯一碳源时的菌体生长量。这表明,虽然在 LB 液体培养基中菌株 A 生长较快,但菌株 R 为多菌灵优势降解菌,菌株 A 和 R 能通过微生物之间的协同作用加快对多菌灵的生物降解过程,添加适量的菌株 A 可以有效促进菌株 R 对多菌灵的利用和转化。

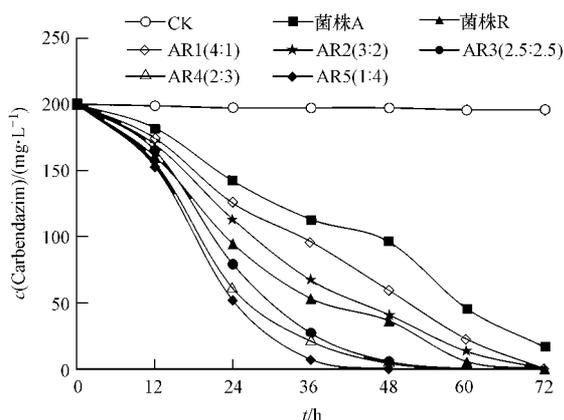


图 1 单菌及复合菌对多菌灵的降解曲线

Fig. 1 The degradation curves of carbendazim by individual strains and combined bacterial cultures in different proportions

复合菌群对多菌灵的降解能力明显优于单菌,推测其原因可能为复合菌具有更完整的多菌灵降解酶系,能够较快地将多菌灵代谢为小分子化合

物,而无中间产物的积累;再者,也可能是菌体 A 的代谢产物促进了菌体 R 的生长,从而提高了菌体 R 对多菌灵的降解率。

3.2 高效复合菌对不同浓度多菌灵的降解率

由图 2 可见,高效复合菌群 AR5 对多菌灵的耐受浓度高于 $600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,完全降解初始浓度为 100 、 200 和 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的多菌灵所需的时间分别为 24、48 和 72 h;初始浓度为 $400\sim 600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的多菌灵在 72 h 时浓度也已降低至 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右。复合菌对多菌灵的降解后期降解速率缓慢,可能是因为此时大部分多菌灵已被降解,培养液中营养物质相对匮乏,导致有较高生物量的菌体生长受到抑制,降解代谢能力下降。

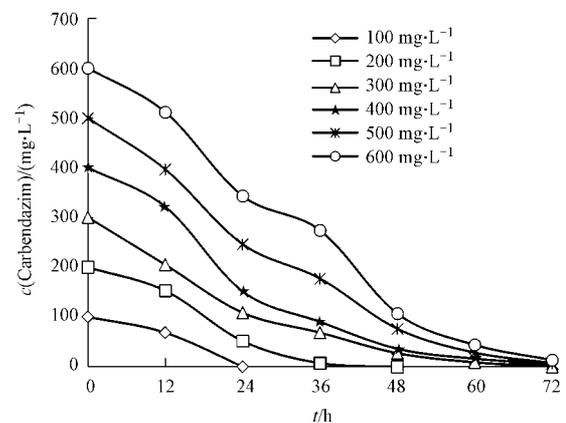


图 2 复合菌 AR5 对不同浓度多菌灵的降解

Fig. 2 The degradation of carbendazim at different concentrations by combined bacterium AR5

在 $\text{pH}=6.0$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下培养 24 h 时,复合菌 AR5 对初始浓度分别为 100 、 200 、 300 、 400 、 500 、 $600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多菌灵的降解率分别为 100%、74.24%、63.91%、62.19%、50.74%、42.84% (图 3)。由此可见,多菌灵的初始浓度对复合菌的降解率有较大影响:在 24h 内,多菌灵初始浓度越高,降解率越低。但就比降解速率而言,初始浓度越高,比降解速率也越高,分别为 100.0 、 148.5 、 191.7 、 248.8 、 253.7 和 $257.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,并且此时段的菌体生长量也随培养液中多菌灵初始浓度的升高而呈上升趋势,表明复合菌 AR5 可以利用高浓度的多菌灵作为碳源和能源进行生长。

由图 4 可知,在多菌灵浓度在 $100\sim 600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,相对纯培养单菌株而言,复合菌群 AR5 对多菌灵的 24h 降解率均有明显提高,为高效多菌灵降解复合菌,且降解效果优于国内外已报道的多菌

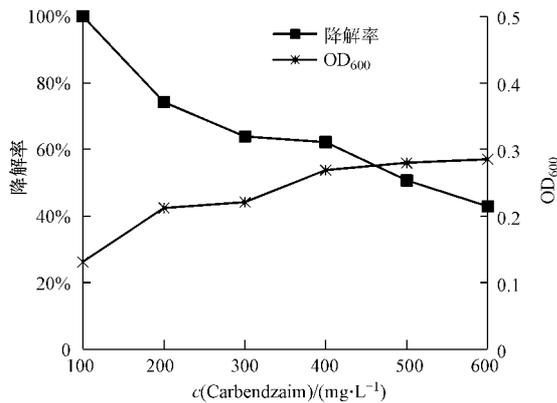


图3 复合菌 AR5 对不同浓度多菌灵的降解率及生长量

Fig. 3 The degradation rate of carbendazim at different concentrations by combined bacterium and its biomass

灵降解菌株(Holtman *et al.* ,1997; Xu *et al.* ,2006; 张桂山等,2004; 田连生等,2009; 张世恒等,2008) .

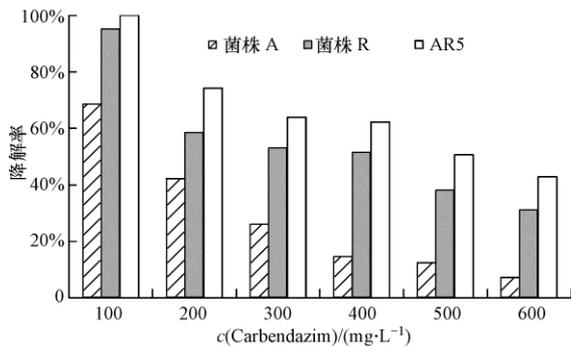


图4 单菌与复合菌 AR5 对不同浓度多菌灵降解率的比较

Fig. 4 The comparison of degradation rate of carbendazim by individual strains and combined bacterium

此外,在菌株 R 和复合菌 AR5 对多菌灵的降解试验中观察发现,当多菌灵浓度大于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,随着多菌灵初始浓度的增大或随着培养时间的延长,培养液略呈现出暗红色,推断可能是由菌体本身颜色或菌体分泌色素所致,因为菌株 A 为乳白色杆菌而菌株 R 为红色球菌.因此,培养液的红色可以作为判断菌体生长量的一项直观指标,还能间接反映出菌体对多菌灵的降解情况.但据此并不能排除培养液颜色变化是由多菌灵降解代谢产物引起的可能性.据报道,多菌灵的中间代谢产物有:2-氨基苯腈、2-氨基苯并咪唑和苯并咪唑(Xu *et al.* ,2006; 田连生等,2009) .

3.3 正交优化试验

影响微生物降解农药等有机污染物的环境因

素主要包括温度、酸碱度、氧气、营养物质、底物浓度等.单菌株对多菌灵的降解特性结果显示,菌株 A 和 R 降解多菌灵的最适条件均为 $\text{pH} = 6.0$ 和接种量 5%,最适温度分别为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $30 \text{ }^\circ\text{C}$.在此基础上对复合菌 AR5 进行正交优化试验,结果如表 2 所示.各因素不同水平下的均值大小表明,最佳降解条件组合是:温度 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (第 2 个水平)、 $\text{pH} = 6.0$ (第 2 个水平)、接种量 7% (第 3 个水平),即正交试验中的第 5 个组合,此时有最大降解率 75.76%.接种量为 5% 和 7% 时的降解率均值分别为 53.53% 和 53.78%,二者几乎没有差别,因此,接种量取 5% 或 7% 都是可行的,而从节约种子液的角度考虑,按 5% 进行接种更加合理,这与之前的单菌降解特性研究结果也是一致的.

表 2 正交试验数据处理

Table 2 The results of orthogonal experiment

试验编号	因素水平编号			24h 降解率
	温度	pH 值	接种量	
1	1	1	1	26.69%
2	1	2	2	67.33%
3	1	3	3	58.13%
4	2	1	2	28.22%
5	2	2	3	75.76%
6	2	3	1	59.66%
7	3	1	3	27.45%
8	3	2	1	64.26%
9	3	3	2	65.03%
均值 1	50.72%	27.45%	50.20%	
均值 2	54.55%	69.12%	53.53%	
均值 3	52.25%	60.94%	53.78%	
极差	3.83%	41.67%	3.58%	

极差是反映各因素重要程度的指标,因素 pH 的极差最大,为 41.67%,温度和接种量的极差较小,分别为 3.83% 和 3.58%,因此,得出 3 个环境因素对降解率的影响程度排序为: $\text{pH} > \text{温度} > \text{接种量}$.但是,通过极差来估计各因素对试验的影响程度是一种直观分析的方法,缺乏客观的评判标准,所以需对数据进行方差分析(杨丽英等,2008) .

本文采用 SAS 8.0 软件的 ANOVA 程序对数据进行了分析,结果如表 3 所示.来源于 pH 的变异 p 值为 0.0175,因为 $0.01 < 0.0175 < 0.05$,因而可认为在 $\text{pH} = 5.0 \sim 7.0$ 范围内,pH 值变化对复合菌的降解率有显著影响,但未达到极显著水平;温度和接种量则对降解率没有显著影响,说明复合菌有较

广泛的温度适用范围。在 $\text{pH} = 5.0$ 的条件下,多菌灵呈完全溶解状态,但此时的降解率较低,平均仅为 27.45%,可能是由于 pH 过低严重抑制了菌体生长及降低了降解酶的活性;在 pH 值为 7.0 的中性条件下,多菌灵在培养液中析出较多,阻碍了农药向菌体细胞的运输或减少了降解酶与底物的接触面积,从而使得其降解率较 $\text{pH} = 6.0$ 条件下有所下降。因此,在利用复合菌 AR5 降解环境中的多菌灵污染时,要注意酸碱度的调整和控制。

表 3 方差分析结果

Table 3 The results of variance analysis

因素	df	SS	MS	F	p
温度	2	22.2998	11.1499	0.43	0.7005
pH	2	2924.048161462	0.240	56.08	0.0175
接种量	2	23.9013	11.9506	0.46	0.6857

注: df 表示自由度; SS 表示离差平方和; MS 表示均方。

3.4 碳氮源对复合菌降解多菌灵的影响

由图 5 可以看出,添加少量的碳氮源(如葡萄糖、可溶性淀粉、尿素、酵母浸粉、蛋白胨)均有助于促进复合菌 AR5 对多菌灵的生物降解,其中,添加少量氮源(如尿素和酵母浸粉)能明显提高复合菌对多菌灵的降解率,较无机盐培养基分别提高了 14.5% 和 15.5%。

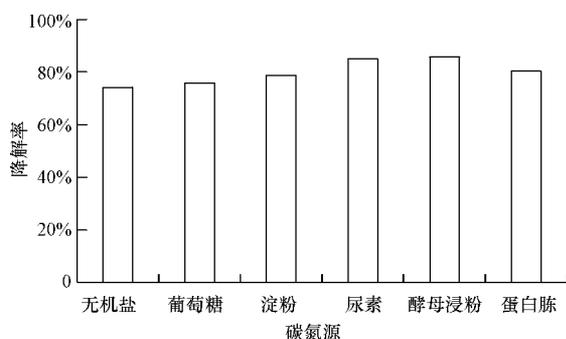


图 5 不同碳氮源对复合菌降解多菌灵的影响

Fig. 5 Effect of carbon and nitrogen sources on the degradation of carbendazim by AR5

4 讨论 (Discussion)

多菌灵的长期施用使得许多植物病菌对其产生了抗药性,为了达到防治效果,农民在使用时加大了多菌灵的用量,导致其在农产品和土壤中的残留量严重超标。张建新等(2005)以无公害蔬菜标准为评价标准,对陕西省 10 个蔬菜主产区 152 个蔬菜样品中的多菌灵农药残留情况进行了分析与评价,

发现多菌灵超标率达 65.1%,超标的蔬菜种类主要以韭菜、芹菜、空心菜、茼蒿、青菜等叶菜类及菜花、青椒等为主。例如,我国国家标准 GB18406.1—2001(马伯禄等 2001)规定多菌灵最高残留量为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而西安蔬菜产区的韭菜中多菌灵残留量平均为 $1.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超标 118%;芹菜中含量为 $1.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超标 122%;青椒中含量为 $1.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超标 110%。

多菌灵在土壤中的降解半衰期较长,分离筛选高效降解菌是对多菌灵污染土壤进行生物修复的重要手段,而将高效降解菌株进行复合得到混合菌群可能是一种更为行之有效的方法。Pattanasupong(2004)从日本稻田土中分离得到的能同时降解杀菌剂多菌灵和除草剂 2,4-D 的微生物聚生体 36 h 内可完全降解 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的多菌灵。本试验获得的复合菌群 AR5 的降解效果优于此微生物聚生体,在多菌灵的生物修复中具有较大的应用潜力。

在少量有机氮源作为共存底物时,复合菌群对多菌灵的降解效果有明显提高,且培养 24h 后,添加尿素的培养液呈明显碱性,说明尿素被代谢成了铵。这表明在使用复合菌群 AR5 进行多菌灵污染土壤修复时,尿素作为一种经常施用的化肥可以促进多菌灵的生物降解,这与张丽珍等(2006)关于尿素会抑制短小芽孢杆菌 NY97-1 降解多菌灵能力的研究结果相反。

5 结论 (Conclusions)

1) 将菌株 A 和菌株 R 按适当的比例进行复配,获得了能高效降解多菌灵的复合菌群 AR5,复配比例为 A:R = 1:4(体积比)。在 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\text{pH} = 6.0$ 的条件下,当以 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的多菌灵为唯一碳源时,该菌在 48 h 内可以将多菌灵降解完全,明显优于单菌的降解效果,为有效减少水体或土壤等环境中的多菌灵残留提供了优势菌种资源。

2) 高效复合菌 AR5 对多菌灵具有较高的耐受能力,72h 内可将初始浓度为 $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的多菌灵降解至 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,24h 内即可完全降解初始浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的多菌灵;在多菌灵浓度为 $100 \sim 600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,复合菌的降解率均明显高于单菌。

3) 正交优化试验表明,温度和接种量对复合菌 AR5 的降解率没有显著影响,而初始 pH 值对其有

显著影响,因此,为了保证有较高的降解率,不能将复合菌置于 pH 过低的培养环境中.当温度为 30℃、pH 值为 6.0、接种量为 7% 时,多菌灵 24h 的降解率可达 75.76%.

4) 外加氮源(如尿素、酵母浸粉)可以有效提高复合菌 AR5 对多菌灵的降解能力,而添加少量碳源对其降解能力影响不大.

责任作者简介:呼世斌(1955—),男,教授,博士生导师,研究方向为废水处理与资源清洁利用. E-mail: hushibin2003@yahoo.com.cn.

参考文献(References):

- Fuchs A, Vries F W. 1978. Bacterial breakdown of benomyl I. Purecultures [J]. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 44(3/4): 283-292
- Holtman M A, Kobayashi D Y. 1997. Identification of *Rhodococcus erythropolis* isolates capable of degrading the fungicide carbendazim [J]. *Applied Microbiology Biotechnology*, 47: 578-582
- 马伯禄,吴惠敏,刘昱 等. 2001. GB 18406.1—2001. 农产品质量安全无公害蔬菜安全要求[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
- Ma B L, Wu H M, Liu Y, et al. 2001. GB 18406.1—2001. Safety qualification for agricultural product—Safety requirements for non-environmental pollution vegetable [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China (in Chinese)
- Mazellier P, Leroy E, De Laat J, et al. 2003. Degradation of carbendazim by UV/H₂O₂ investigated by kinetic modeling [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 1: 68-72
- 牟仁祥,陈铭学,曹赵云 等. 2009. NY/T 1680—2009 蔬菜水果中多菌灵等 4 种苯并咪唑类农药残留量的测定高效液相色谱法[S]. 北京:中华人民共和国农业部
- Mou R X, Chen M X, Cao Z Y, et al. 2009. NY/T 1680—2009 Determination of carbendazim and other 3 benzimidazoles in vegetable and fruit by HPLC [S]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (in Chinese)
- Pattanasupong A, Nagase H, Inoue M, et al. 2004. Ability of a microbial consortium to remove pesticide, carbendazim and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid [J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 20: 517-522
- 潘尚任,邵鹤生,景锡南. 1989. 多菌灵在大鼠体内转运过程的研究[J]. *核技术*, 6(12): 376-381
- Pan S R, Shao H S, Jing X N. 1989. The fate of [2-14C] carbendazim in rats [J]. *Nuclear Techniques*, 6(12): 376-381 (in Chinese)
- Sarrif A M, Arce G T, Krahn D F, et al. 1994. Evaluation of carbendazim for gene mutations in the salmonella/pames plate-incorporation assay: the role of aminophenazine impurities [J]. *Mutation Research*, 321: 43-56
- 田连生,陈菲. 2009. T2-2 菌株对多菌灵的降解特性及生物修复试验[J]. *微生物学报*, 49(7): 925-930
- Tian L S, Chen F. 2009. Characterization of a carbendazim-degrading *Trichoderma* sp. T2-2 and its application in bioremediation [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 49(7): 925-930 (in Chinese)
- 王军玲,呼世斌,秦宝福 等. 2010. 多菌灵降解菌的筛选及降解特性初步研究[J]. *中国土壤与肥料*, 3: 73-77
- Wang J L, Hu S B, Qin B F, et al. 2010. Screening of carbendazim degrading bacterium and characteristic of carbendazim degradation [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 3: 73-77 (in Chinese)
- 王伟东,牛俊玲,崔宗均. 2005. 农药的微生物降解综述[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 17(2): 18-22
- Wang W D, Niu J L, Cui Z J. 2005. Biodegradation of pesticides: A review [J]. *Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University*, 17(2): 18-22 (in Chinese)
- 许炳云. 2009. 多菌灵降解菌的筛选和降解研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学. 1-46
- Xu B Y. 2009. Isolation of carbendazim degrading microbe and optimized the parameters of degradation [D]. Yangling: Northwest A&F University. 1-46 (in Chinese)
- Xu J L, Gu X Y, Li S P, et al. 2006. Isolation and characterization of a carbendazim-degrading *Rhodococcus* sp. dj1-6 [J]. *Current Microbiology*, 53: 72-76
- 向月琴,高春明,虞云龙 等. 2008. 土壤中多菌灵的降解动态及其对土壤微生物群落多样性的影响[J]. *土壤学报*, 45(4): 699-704
- Xiang Y Q, Gao C M, Yu Y L, et al. 2008. Degradation dynamics of carbendazim in soil and its effects on soil microbial community diversity [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 45(4): 699-704 (in Chinese)
- 杨丽英,庞晖,马国顺. 2008. 正交设计在微生物发酵试验中的应用[J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 26(6): 859-861
- Yang L Y, Pang H, Ma G S. 2008. The application of orthogonal design in experiment of microorganism fermentation [J]. *Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)*, 26(6): 859-861 (in Chinese)
- 于彦彬,苗在京,万述伟 等. 2005. 三波长校正光度法测定水果蔬菜中多菌灵残留量[J]. *理化检验-化学分册*, 41(5): 353-357
- Yu Y B, Miao Z J, Wan S W, et al. 2005. Ternary wavelength spectrophotometric determination of residual carbendazim in vegetables and fruits [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part B (Chemical Analysis)*, 41(5): 353-357 (in Chinese)
- 张桂山,贾小明,马晓航 等. 2004. 一株多菌灵降解菌的分离、鉴定及系统发育分析[J]. *微生物学报*, 44(4): 417-421
- Zhang G S, Jia X M, Ma X H, et al. 2004. Isolation, identification and phylogenetic analysis of carbendazim-degrading bacterium strain [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 44(4): 417-421 (in Chinese)
- 张建新,杜双奎,杨小姣. 2005. 陕西省主要蔬菜产区多菌灵农药残留分析与评价[J]. *安全与环境学报*, 5(6): 78-80
- Zhang J X, Du S K, Yang X J. 2005. Analysis and evaluation of carbendazim residues in vegetables from Shaanxi Province main vegetables producing region [J]. *Journal of Safety and Environment*, 5(6): 78-80 (in Chinese)
- 张丽珍,乔雄梧,马利平 等. 2006. 多菌灵降解菌 NY97-1 的鉴定及降解条件[J]. *环境科学学报*, 26(9): 1440-1444
- Zhang L Z, Qiao X W, Ma L P, et al. 2006. Identification of a carbendazim-degrading strain and its degradation performance [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(9): 1440-1444 (in Chinese)
- 张世恒,张建新,钟丹. 2008. 多菌灵降解菌的分离与降解特性研究[J]. *西北农业学报*, 17(2): 262-265
- Zhang S H, Zhang J X, Zhong D. 2008. Isolation and degradation characters of carbendazim-degrading bacterium [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 17(2): 262-265 (in Chinese)