

• 专论与综述 •

降解残留有机农药的微生物资源研究进展

赵杰宏^{1,2}, 赵德刚^{* 1,2}

(1 教育部绿色农药与农业生物工程重点实验室, 贵阳 550025; 2 贵州大学 农业生物工程省级重点实验室, 贵阳 550025)

摘要: 有机农药污染已成为一个世界性问题, 微生物在环境农药残留修复中起着重要作用。对降解有机磷、有机氯、拟除虫菊酯类和有机氮等农药的微生物种属资源以及相关酶资源和基因资源的研究进展进行了综述, 分析了近年来该领域中对微生物资源的开发和利用状况, 并讨论了在环境修复、生物防治和生物肥料等方面多功能化应用微生物资源, 同时保障转基因生物安全, 避免对环境造成二次污染等应成为该领域重要的研究方向。

关键词: 有机农药; 降解; 微生物; 资源

中图分类号: Q938.11

文献标志码: A

文章编号: 1008-7303(2008)03-0260-08

Review on the Resources from Micro-organisms in Degradation of Organic Pesticides

ZHAO Jie-hong^{1,2}, ZHAO De-gang^{* 1,2}

(1 Key Laboratory of Green Pesticide and Agricultural Bioengineering of Ministry of Education, Guiyang 550025, China;
2 Guizhou Key Laboratory of Agricultural Bioengineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract The pollution of organic pesticides is an important issue in the world. The utilization of micro-organisms is one of the most effective way in pesticide biodegradation. The progress in exploiting themicroorganism s in the field was reviewed. Resources of microorganism, enzyme and gene which degrade organic phosphorous pesticides, organic chloride pesticides and other pesticides were summarized. The research in the management of transgenic organism s' safety and multifunctional application of microorganism resources in bioremediation, biocontrol and biofertilizer were also discussed.

Key words organic pesticide; degradation; micro-organism; resource

有机农药的广泛使用有效促进了世界农业生产, 在很长一段时间内仍是不可替代的, 但大量生产 and 不合理使用有机农药所造成的种种环境污染问题, 已经危及到人类的健康和社会发展。国际社会于 2001 年通过《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》, 规定禁止生产和使用 8 种有机农

药^[1]。2006 年我国环保“十一五”规划提出的环境科技重点包括: 有毒化学品和持久性有机污染物 (POPs) 污染控制; 农药及其他农用化学品环境安全; 研究并提出相关污染控制技术和环境修复技术等^[2]。因此有效解决农药、特别是有机农药残留污染问题具有重要意义。

收稿日期: 2007-10-16; 修回日期: 2008-02-28.

作者简介: 赵杰宏 (1978-), 男, 山西长治人, 博士研究生, 主要从事环境生物工程及分子生物学研究; * 通讯作者 (Author for correspondence): 赵德刚 (1961-), 男, 贵州人, 博士, 教授, 主要从事植物基因工程及转基因安全研究. 联系电话: 0851-3867725; E-mail: dgzhao@gzu.edu.cn

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划课题 (2007BAD59B00); 科技部国际科技合作项目 (2007DFA31260); 贵州茅台科技联合基金项目.

大量研究表明,微生物在环境残留农药的降解中发挥了重要作用,微生物降解是目前治理残留农药污染的有效手段之一,利用微生物及其降解酶对环境中残留的有机农药进行净化处理已显示出良好的应用前景。近年来已有一些相关的综述报道^[3-5],但普遍关注于微生物对有机农药的降解机理和应用等方面,缺少对资源的挖掘、整理和分析。笔者综述了可降解有机农药的微生物资源及其相关基因资源和酶资源的研究进展,以期为进一步开发和利用微生物资源进行环境修复提供参考。

1 可降解农药的微生物

目前已经分离到多种可降解农药的微生物,包括细菌、真菌、放线菌等,主要分离自土壤或活性污泥。由于细菌适应能力强、易诱发突变且分布广泛,所以比较容易筛选,而真菌因其卓越的农药降解能力正逐渐被重视,但不如对细菌的研究普遍。

1.1 降解有机氯农药的微生物

有机氯农药普遍毒性高、残留量大且不易分解,自20世纪70年代以来已在全球范围内陆续被禁用,但由于其使用历史长、用量大,导致其在环境中残留量很高,对生态系统和人类健康造成了严重威胁。通过选择压力可以从土壤中分离到各种可降解有机氯农药的微生物,如分离出的节杆菌 *Arthrobacter* sp^[6]、栖土曲霉 *Aspergillus terricola*、土曲霉 *Aspergillus terreus*、多刺假单胞菌 *Pseudomonas sp. inosa*、铜绿假单胞菌 *P. aeruginosa* 和洋葱伯克霍尔德菌 *Burkholderia cepacia* 均可以降解硫丹 (endosulfan)^[7],毛茛蕈菌 *Stereum hirsutum* 可以降解甲氧滴滴涕 (methoxychlor)^[8],根瘤菌 *Rhizobium* sp 4-CP-20^[9]和热带假丝酵母 *Candida tropicalis*^[10]能降解四氯苯酚 (2,4,5,6-tetrachlorophenol)。

真菌虽然没有细菌的变异能力强,但真菌生活史比较复杂,因此可以通过准性生殖形成具有高降解力的异核体菌株,以适应逆境。将从含滴滴涕 (DDT) 的降解产物滴滴涕 (DDD) 或滴滴伊 (DDE) 的土壤中分离出的腐皮镰刀菌 *Fusarium solani* 培养在同时含有 DDD 和三氯杀螨醇 (dicofol) 的培养基上,发现某些菌株表现出协同增效作用,亲本菌株互补亲和,菌丝融合后诱发生

成异核体,表现出优良的降解活性^[11]。

1.2 降解有机磷农药的微生物

有机磷农药都含有 P=O 或 P=S 基团,该基团被水解后形成低毒或无毒产物。但有机磷农药在环境中较稳定,部分属剧毒、高残留类化合物,易被植物富集,从而对人体产生毒害作用。土壤微生物可通过酶促反应降低残留有机磷农药的毒性。如放射性土壤杆菌 *Agrobacterium radiobacter* P230^[12]、假产碱假单胞菌 *Pseudomonas pseudoalcaligenes*、假单胞菌 *Pseudomonas* sp、单胞菌 *Alteromonas* sp、邻单胞杆菌 *Plesiomonas* sp、紫色杆菌 *Chromobacterium violaceum* ATCC 12472 和节杆菌均可产生有机磷降解酶,可降解多种有机磷农药^[13]。同样,巨大芽孢杆菌 *Bacillus megaterium*、外瓶霉 *Exophiala nigrum* A-29^[14]也能广谱性降解有机磷,推测其可能具有类似的降解酶。更多的降解菌株是经富集驯化而来,在长期的选择压力下,某些菌株发生变异,具备了降解某种有机磷农药的能力。如邻单胞杆菌 M6菌株^[15]、苍白杆菌 *Ochrobacterum* sp^[16]和产碱菌 *Alcaligenes* sp YcX-20^[17]是甲基对硫磷 (parathion-methyl) 的降解菌;不动杆菌 *Acinetobacter* HSA32可以降解甲胺磷 (methamidophos)^[18];沙雷铁氏菌 *Serratia* sp^[19]、采绒革盖菌 *Coriobacterium versicolor* 和簇生黄韧伞 *Hypholoma fasciculare*^[20]可降解毒死蜱 (chlorpyrifos);酿酒酵母 *Saccharomyces cerevisiae* 可降解草甘膦 (glyphosate)^[21]。酿酒酵母因具备降解有机磷的能力,对食品生产和葡萄酒酿造具有重要价值,有着广阔的应用前景。

1.3 降解拟除虫菊酯类农药的微生物

拟除虫菊酯类农药因其高效、低毒而在农业上得以广泛应用。但近年来有研究证明,拟除虫菊酯类药剂能刺激乳腺癌细胞增殖和 P52 基因的表达,具有拟雌激素活性^[22],因此有效降解环境中残留的拟除虫菊酯类农药也具有很重要的意义。已分离出的拟除虫菊酯类降解菌主要是细菌。如 Grant 等从土壤中分离出的荧光假单胞菌 *Pseudomonas fluorescens* 和普城沙雷菌 *Serratia plymuthica*^[23];洪源范等分离出了可降解甲氰菊酯 (fenpropathrin) 的鞘氨醇单胞菌 *Sphingomonas* sp JQIA-5,并证明其降解酶为胞内酶^[24];许育新等分离得到的红球菌 *Rhodococcus* sp CDT3^[25]和辛伟等分离到的蜡状芽孢杆菌 *Bacillus cereus* TR2^[26]均可以降解氯氰菊酯 (cypermethrin);

Nimali等^[27]分离得到能降解氯氟氰菊酯 (cyhalothrin)的施氏假单胞菌 *Pseudomonas stutzeri* Sl; Paingankar等分离出的酸单胞菌 *Acidomonas* sp 可降解丙烯菊酯 (allethrin)^[28]; 丁海涛等分离出了可降解氯氟氰菊酯、氰戊菊酯 (fenvalerate)、溴氰菊酯 (deltamethrin)的地衣芽孢杆菌 *Bacillus licheniformis* qw 5^[29]; 王兆守等分离到的假单胞菌 c16^[30]及其紫外诱变菌株 UW 19^[31]能同时降解联苯菊酯 (bifenthrin)、甲氰菊酯和氯氰菊酯 3 种农药。但目前要对这些菌株进行开发利用尚需更深入、全面的研究。

1.4 降解有机氮农药的微生物

有机氮农药包括氨基甲酸酯类、脘类、硫脲类、取代脲类和酰胺类等含氮有机化合物^[32], 多为除草剂, 使用量大且易被植物富集。微生物在有机氮农药残留降解中也具有重要作用: ZHU 等证明土壤微生物的存在能降解乙草胺 (acetochlor)^[33]; 沈东升等把优选青霉 *Penicillium* sp 引入土壤, 发现其有利于松结态甲磺隆 (metsulfuron-methyl)的降解^[34]。

已分离到的有机氮农药降解细菌较多。如鞘氨醇单胞菌 CDS-1 菌株^[35]、新鞘氨醇杆菌 *Novosphingobium* sp FND-3^[36]、假单胞菌 AEBL3 菌株^[37]可降解克百威 (carbofuran), 假单胞菌 AEBL3 菌株还可降解涕灭威 (aldicarb)和灭多威 (methomyl)^[37]; 鞣丸酮丛毛单胞菌 *Comamonas testosteroni* I2gfp 可降解 3-氯苯胺^[38]; 多食鞘氨醇杆菌 *Sphingobacterium multivolum* Y1 可降解苯噻草胺 (mefenacet)^[39]; 根瘤菌 *Rhizobium* sp. AC100 可以把甲萘威 (carbaryl)水解成萘酚和甲胺^[40]; 食油假单胞菌 *Pseudomonas oleovorans* LCa2 可以降解乙草胺^[41]; WANG 等分离到的蜡状芽孢杆菌对甲草胺 (alachlor)和毒草胺 (propachlor), 苏云金芽孢杆菌 *Bacillus thuringiensis* 对异丙甲草胺 (metolachlor)都有高降解活性^[42]。

此外真菌在有机氮农药的降解中也发挥了很大作用。黄曲霉 *Aspergillus flavus* 和栖土曲霉能有效地降解异丙甲草胺^[43]; 采绒革盖菌和黄金菇 *Hypohyma fasciculare* 可降解敌草隆 (diuron)和甲霜灵 (metalaxyl)^[20]; 鲁氏接合酵母 *Zygosaccharomyces rouxii* DBVPG 6399 可以降解杀真菌剂异菌脲 (prodione), 而且该菌可以生长在高渗透溶液中, 这对于环境的生物修复和食品工业均非常重要^[44]。林爱军^[45]等分离到 16 株二甲戊灵

(pendimethalin)的降解真菌, 其中 3 株分别属于土生曲霉 *Aspergillus terreus*、长梗串孢霉 *Monilochaetes* sp 和烟色曲霉 *Aspergillus fumigatus*; 此外, 芽孢杆菌 *Bacillus* sp HB-7^[46]也可以降解二甲戊灵。可见选育微生物用于修复土壤中残留的有机氮农药污染是有效的。

1.5 降解其他有机农药的微生物

三嗪类农药莠去津 (atrazine)的降解菌有节杆菌 HB-5 菌株^[47]、节杆菌 AG 菌株^[48]、微小杆菌 *Exiguobacterium* sp BTAH1^[48]、藤黄微球菌 *Micrococcus luteus* AD3^[49]、假单胞菌 *Pseudomonas* sp AD1^[50]以及白菖蒲 *Acorus calamus* 根围的嗜麦寡养食单胞菌 *Stenotrophomonas maltophilia* 和葡萄孢属 *Botrytis* sp 真菌^[51]。此外, 所分离到的降解微生物还有可降解环嗪酮 (hexazinone)的假单胞菌 WFX-1 菌株和阴沟肠杆菌 *Enterobacter cloacae* WFX-2 菌株^[52]; 降解磷化麦黄酮 (L-phosphiothricin, PPT)的肠杆菌 *Enterobacter* sp^[53]; 降解咪唑烟酸 (imazapyr)的荧光假单胞菌 II 型 *Pseudomonas fluorescens* biotype II zjx-5 和蜡状芽孢杆菌 *Bacillus cereus* ZJX-9^[54]; 降解对硝基酚 (p-nitrophenol, PNP)的原生节杆菌 *Aerobacter protophomiae* RKJ100^[55]等。

目前, 已筛选到可降解各种有机农药的微生物至少包括 25 个以上细菌属和 20 多个真菌属, 很多微生物具有广谱的降解能力。由于多数降解菌株分离自长期接触农药的土壤及活性污泥等特殊生态环境, 并可筛选出降解同一农药的不同菌属和降解不同农药的同种菌株, 说明微生物在环境中具有广泛的适应性和较快的进化速度, 这为环境修复提供了大量的菌种资源、基因资源和相关活性组分。如何全面搜集整理菌种资源, 充分利用其基因资源和活性组分, 更好地解决环境中残留物污染的修复问题, 形成新的产业, 还需大量深入的研究和实践验证。

2 降解农药的微生物酶资源和基因资源

降解农药的天然菌株的降解酶往往是胞内酶, 应用菌剂时, 菌体在生长繁殖过程中缓慢分解农药而获得营养源。由于菌株对正常生长条件要求严格, 利用固定化酶制剂代替菌剂具有广阔的应用前景, 因此开发农药降解菌的酶资源, 并利用其相关基因进行工程菌改造非常重要。

2.1 真菌降解酶

木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶和漆酶在农药降解中有着重要作用。从污染严重的土壤中分离出的葡萄穗霉 *Stachybotrys* sp. DABAC3 和侧孢菌 *Phlebia* sp. DABAC9 能生产漆酶、锰过氧化物酶和木质素过氧化物酶, 可降解萘、二氯苯胺异构体、O-羟基联苯和 1,1-联二萘^[56]。来自白腐真菌的锰过氧化物酶、漆酶和木质素过氧化物酶可以降解甲氧滴滴涕及其中间酶解产物^[57]。毛革盖菌 *Coriobolus hirsutus*、革孔菌 *Coriobolus floccinereus*、齿毛菌 *Cerrena maxima* 产生的漆酶在莠去津降解中可能起着重要作用^[58]。黄孢原毛平革菌 *Phanerochaete chrysosporium* 产生的漆酶可以降解狄氏剂 (dieldrin)、西玛津 (simazine) 和氟乐灵 (trifluralin) 的混合物, 变色栓菌 *T. versicolor* 也可以产生类似的酶^[59]。除木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶和漆酶以外, Liu 等还从黑曲霉 *Aspergillus niger* 中分离出了新颖的乐果降解酶^[60]。

尽管真菌是微生物中的一大类群, 并已分离出很多可降解农药的菌株, 但目前对其降解酶和降解基因的研究还不够广泛和深入。

2.2 细菌的降解酶和降解基因资源

随着酶工程和基因工程的发展, 目前已从不同的微生物中分离到各种农药降解酶和降解基因 (见表 1), 农药降解基因的多样性和来源的广泛性将为工程菌的构建和改造打下良好基础。

细胞色素 P450 单加氧酶具有农药降解活性。从鞘氨醇单胞菌 AO1 菌株中分离纯化的细胞色素 P450 单加氧酶可以降解双酚 A (BPA)^[61]。细胞色素 P450 的抑制剂胡椒基丁醚 (piperonyl butoxide) 还能抑制真菌对草枯醚 (chlorobutylfen) 和除草醚 (nitrofen) 的氧化^[62]。Cu 等^[15] 从邻单胞菌 M6 菌株基因组文库中克隆到一个新的有机磷水解酶基因, 命名为 mpd。从苍白杆菌 YwB 菌株^[16] 和甲基对硫磷降解菌恶臭假单胞菌 *Pseudomonas putida* DLL21 菌株^[63] 中也克隆出了 mpd 基因。颜慧等^[64] 从扑草净 (prometryn) 降解菌假单胞菌 FR 菌株中扩增得到一条长度约为 500 bp 的降解基因保守片段, 该片段与 atzA、trxA 基因具有很高的同源性。代先祝等^[65] 从降解莠去津的节杆菌 AGI 和 ADGI 菌株中扩增得到的降解基因都是 trzN 和 atzBC 的组合。胡江等^[66] 以降解莠去津的微小杆菌 BTAH1 菌株的总 DNA 为模板, 扩增 atzA、atzB 和 atzC 的保守片段, atzB 和 atzC 位于其

中一个较小的质粒 pBTAH11 上, 通过探针与金黄色杆菌 *Arthrobacter aureus* TC1 菌株的人工染色体序列杂交分析, 发现其基因组存在 trzN、atzB 和 atzC 基因, 定位在质粒 BAC6010 上^[67]。RENE 等从放射性土壤杆菌 P230 菌株中克隆得到水解酶基因 opdA, 其与丛黄杆菌 *Flavobacterium* sp. ATCC27551 菌株和缺陷短波单胞菌 *Brevundimonas diminuta* MG 菌株中分离到的有机磷水解酶 OPH 的基因 opd 相似, OPDA 能水解 OPH 很难水解的亚胺硫磷 (phosmet) 和倍硫磷 (fenthion)^[12]。邓敏捷等^[13] 将来源于假产碱假单胞菌的有机磷降解酶 OPHC2 进行了 N 端及内肽的氨基酸序列测定, 然后从该菌中克隆出有机磷降解酶基因 ophc2 与目前发表的有机磷降解酶基因同源性很低, 最高的只有 46.4%, 可能是一个新的有机磷降解酶基因。Hashimoto 等^[40] 从根瘤菌 AC100 菌株的质粒中克隆出甲萘威水解酶基因 cehA, 在数据库中未搜索到同源核苷酸序列和推理的氨基酸序列, 并且经序列分析后发现该基因组成了部分复合转座子。Weir 等^[6] 从节杆菌中分离出了降解硫丹和硫丹硫酸酯 (endosulfan sulfate) 的酶基因 ese, 该酶属于黄素依赖型单加氧酶家族, 编码含低硫氨基酸的蛋白质。

利用农药降解基因构建工程菌用于降解酶的生产或农药污染环境的修复, 已进行了大量的研究。Shinazu 等^[68] 用 NPNC-OPH 将农药水解酶 OPH 定位到大肠杆菌 *E. coli* 和摩氏杆菌 *Moraxella* sp. 细胞表面, 使其能够同时降解有机磷农药和对硝基酚。Lan 等^[69] 在 pETDuet 中同时表达了来自黄杆菌的有机磷水解酶基因 opd 和来自致倦库蚊 *Culex pipiens* 的羧酸酯酶基因 b1, 携带该载体的工程菌可以同时降解有机磷、氨基甲酸酯和拟除虫菊酯 3 类农药。蒋建东等^[35] 将 mpd 基因插入到鞘氨醇单胞菌 CDS-1 菌株的 dNA 位点且不带入外源抗性, 所得到的工程菌株 CDS-1mpd 和 CDS-2mpd 能同时降解甲基对硫磷和克百威。但具体到实践中如何充分发挥工程菌株的功能为人类造福还需进一步研究。

3 展望

构建遗传稳定的多功能农药降解工程菌可以为环境中残留农药污染的生物修复提供良好的菌种资源, 构建遗传稳定且具有分泌型表达、同时还不带入外源抗性基因的工程菌依然是研究的重点。

表 1 降解农药的微生物酶资源和基因资源

Table 1 Resources of enzyme and gene from microorganisms for degrading pesticides

基因 Gene	酶 Enzyme	基因库编号 GeneBank accession	来源菌株 Strain of microorganism	序列长度 Sequence size /bp
opd	对硫磷水解酶 Parathion hydrolase	M 29593	黄杆菌 Flavobacterium sp. ATCC 27551	1 098
opd	磷酸二酯酶 Phosphodiesterase	M 20392	缺陷假单胞菌 Pseudomonas diminuta	978
opdA	有机磷酸酯水解酶 Organophosphate hydrolase	AY 043245	根癌土壤杆菌 Agrobacterium tumefaciens	1 155
mpd	甲基对硫磷水解酶 Methylparathion hydrolase	A F338 729	邻单胞菌 Plesiomonas sp. M 6	996
dn p	甲基对硫磷降解蛋白 Methylparathion degrading protein	AY 029773	恶臭假单胞菌 Pseudomonas putida DLL-1	1 026
oph	有机磷杀虫剂水解酶 Organophosphorus insecticide hydrolase	AB 007293	节杆菌 Arthrobacter sp. B-5	1 248
opaA	有机磷酸酐水解酶-2 Organophosphorus acid anhydrolase-2	U 29240	交替单胞菌 Alteromonas sp. JD 6. 5	1 554
opaB	有机磷酸酯酸酐酶 Organophosphate acid anhydrase	M 91040	分枝杆菌 Mycobacterium sp. B-1	1 230
ophc2	有机磷水解酶前体 Organophosphorus hydrolase precursor	A J605330	假产碱假单胞菌 Pseudomonas pseudoalcaligenes	975
mcd	克百威水解酶 Carbofuran hydrolase	A F160 188	无色杆菌 Achromobacter sp. WM 111	1 983
—	磷酸二酯酶 Phosphotriesterase	DD088218	放射形土壤杆菌 Agrobacterium radiobacter P230	1 155
phn	邻苯二酚-2, 3-氧化酶 Catechol2, 3-dioxygenase	U 88298	鞘脂菌 Sphingobium chungbukense	458
estA	酯酶 Esterase	A J251831	劳尔氏菌 Ralstonia metallidurans CH34	828
cehA	甲萘威水解酶 Carbaryl hydrolase	AB 069723	根瘤菌 Rhizobium sp. AC 100	2 385

注: 表中数据来自 NCBI数据库^[70]。Note: all data above cited from NCBI database.

此外,如何改善微生物制剂或酶制剂的固定化途径以提高其对农药的降解功效也非常重要。在构建工程菌的同时也应考虑通过使所构建的菌群携带可以利用植物次生代谢物质的基因,提高工程菌在植物体内的增殖能力^[71],实现可用于环境修复、生物肥或生物防治等领域的多功能化,从而实现规模化和产业化生产。

目前各国科研工作者已分离出大量可降解农药的菌种资源,并成功构建了各种工程菌株,但是发展快速、高效的微生物分离技术,建立菌种资源库,加强菌种资源和基因资源的整合,实现环境修复的规模化和集约化,避免造成二次污染,保障转基因生物安全等仍是当前面临的重要课题。我国在生物修复领域的研究比较领先,但是相关数据

库的建立却非常落后。在目前农业生产对农药依赖程度还很高的情况下,充分发挥微生物对环境的修复潜力,整合各方面科研力量,对解决环境中的农药残留问题具有重要的理论意义和现实意义。

参考文献:

[1] Interim Secretariat for the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants [M]. Stockholm: United Nations Environment Programme Press 2001: 33-38.

[2] State Council of the People's Republic of China (中华人民共和国国务院). 国家环境保护“十一五”规划[Z]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China(中华人民共和国国务院令).

- 共和国国务院公报), 2008, (1): 20-36
- [3] WU Hong-ping(吴红萍), ZHENG Fu-cong(郑服丛). 微生物降解有机磷农药研究进展 [J]. Guangdong Agric Sci(广东农业科学), 2008, (1): 48-52
- [4] GUO Zi-wu(郭子武), CHEN Shuang-lin(陈双林), XIAO Jiang-hua(萧江华). 有机氯农药微生物降解研究进展 [J]. Journal of Southwest Forestry College(西南林学院学报), 2007, 27(4): 69-75.
- [5] LI Yan(李岩), JIANG Ji-zhi(蒋继志), LIU Cui-fang(刘翠芳). 微生物降解农药研究的新进展 [J]. J Biology(生物学杂志), 2007, 24(2): 59-62
- [6] WERK M, SUTHERLAND T D, HORNE J et al. A Single Monooxygenase Enzyme is Involved in the Metabolism of the Organochlorides Endosulfan and Endosulfate in an *Arthrobacter* sp. [J]. Appl Environ Microbiol, 2006, 72(5): 3524-3530.
- [7] HUSSAIN S, ARSHAD M, SALEEM M, et al. Screening of Soil Fungi for *in vitro* Degradation of Endosulfan [J]. World J Microbiol Biotechnol, 2007, 23: 939-945
- [8] LEE S M, LEE J W, PARK K R, et al. Biodegradation of Methoxychlor and its Metabolites by the White Rot Fungus *Stereum hirsutum* Related to the Inactivation of Estrogenic Activity [J]. J Environ Sci Health B, 2006, 41(4): 385-397
- [9] YANG C F, LEE C M. Enrichment Isolation and Characterization of 4-chlorophenol Degrading Bacterium *Rhizobium* sp. 4-CP-20 [J]. Biodegradation, 2008, 19(3): 329-336.
- [10] JIANG Y, WEN J P, LAN L, et al. Biodegradation of Phenol and 4-Chlorophenol by the Yeast *Candida tropicalis* [J]. Biodegradation, 2007, 18(6): 719-729.
- [11] MITRA J, MUKHERJEE P K, KALE S P, et al. Bioremediation of DDT in Soil by Genetically Improved Strains of Soil Fungus *Fusarium solani* [J]. Biodegradation, 2001, 12(4): 235-245.
- [12] HORUE I, SUTHERLAND T, HARCOURT R, et al. Identification of an opd (Organophosphate Degradation) Gene in an *Agrobacterium* Isolate [J]. Appl Environ Microbiol, 2002, 68(7): 3371-3376.
- [13] DENG Min-jie(邓敏捷), WU Ning-feng(伍宁丰), LIANG Guo-yi(梁果义), et al. 一种新的有机磷降解酶基因 *ophc2* 的克隆与表达 [J]. Chin Sci Bull(科学通报), 2004, 49(11): 1068-1072
- [14] LISNA T O, GARAN'KINA N G, KRUGLOV Y V. The Effect of Soil Inoculation with Microbial Pesticide Destructors on Plant Growth and Development [J]. Prikl Biokhim Mikrobiol, 2001, 37(3): 374-381.
- [15] CUI Z L, LI S P, FU G P. Isolation of Methyl Parathion-degrading Strain M6 and Cloning of the Methyl Parathion Hydrolyase Gene [J]. Appl Environ Microbiol, 2001, 67(10): 4922-4925.
- [16] WANG Sheng-hui(王圣惠), YAN Yan-chun(闫艳春), XU Gang-ming(徐刚明), et al. 一株有机磷农药降解菌的分离、鉴定及降解酶基因的克隆 [J]. J Agro-Environ Sci(农业环境科学学报), 2007, 26(Suppl): 84-88.
- [17] JIANG Hong-xia(姜红霞), WANG Sheng-hui(王圣惠), XU Qing-jie(薛庆节), et al. 甲基对硫磷降解菌 *Alcaligenes* sp. YcX-20 的分离鉴定及降解性能研究 [J]. J Agro-Environ Sci(农业环境科学学报), 2005, 24(5): 962-965.
- [18] ZHENG Yong-liang(郑永良), LIU De-li(刘德立), LIU Shi-wang(刘世旺), et al. 甲胺磷农药降解菌的筛选鉴定及其降解效能研究 [J]. J Cent China Norm Univ (Nat Sci)(华中师范大学学报, 自然科学版), 2007, 41(1): 95-98
- [19] XU G M, LI Y Y, ZHENG W, et al. Mineralization of Chlorpyrifos by Co-culture of *Serratia* and *Trichosporon* spp. [J]. Biotechnol Lett, 2007, 29(10): 1469-1473.
- [20] BENDING G D, FRILLOUX M, WALKER A. Degradation of Contrasting Pesticides by White Rot Fungi and its Relationship with Lignolytic Potential [J]. FEMS Microbiol Lett, 2002, 212(1): 59-63.
- [21] LOW F L, SHAW I C, GERRARD J A. The Effect of *Saccharomyces cerevisiae* on the Stability of the Herbicide Glyphosate During Bread Leavening [J]. Lett Appl Microbiol, 2005, 40(2): 133-137.
- [22] HU Chun-rong(胡春容). 拟除虫菊酯农药的毒性研究进展 [J]. J Toxicol(毒理学杂志), 2005, 19(3): 239-241.
- [23] GRANT R J, BETTS W B. Biodegradation of the Synthetic Pyrethroid Cypermethrin in Used Sheep Dip [J]. Lett Appl Microbiol, 2003, 36: 173-176.
- [24] HONG Yuan-fan(洪源范), HONG Qing(洪青), SHEN Yu-jia(沈雨佳), et al. 甲氰菊酯降解菌 *Sphingomonas* sp. JQ14-5 对污染土壤的生物修复 [J]. Environmental Science(环境科学), 2007, 28(5): 1121-1125.
- [25] XU Yu-xin(许育新), LIXiao-hui(李晓慧), ZHANG Ming-xing(张明星), et al. 红球菌 CDT3 降解氯氰菊酯的特性及途径 [J]. China Environ Sci(中国环境科学), 2005, 25(4): 399-402.
- [26] XIN W ei(辛伟), HONG Yong-cong(洪永聪), HU Mei-ling(胡美玲), et al. 氯氰菊酯降解菌的筛选及其特性研究 [J]. Journal of Laiyang Agricultural College(莱阳农学院学报), 2006, 23(2): 88-92.
- [27] NIRMALIS, SUBRATA D, BHARAT P, et al. Biodegradation of beta-Cyfluthrin by *Pseudomonas stutzeri* Strain S1 [J]. Biodegradation, 2005, 16(6): 581-589.
- [28] PAN GANKAR M, JAN M, DEOBAGKAR D. Biodegradation of Allethrin, A Pyrethroid Insecticide, by an *Acidomonas* sp. [J]. Biotechnol Lett, 2005, 27(23-24): 1909-1913.
- [29] DING Hai-tao(丁海涛), LI Shun-peng(李顺鹏), SHEN Biao(沈标), et al. 拟除虫菊酯类农药残留降解菌的筛选及其生理特性研究 [J]. Acta Pedologica Sinica(土壤学报), 2003, 40(1): 123-129.
- [30] WANG Zhao-shou(王兆守), LIN Gan(林淦), YOU Min-sheng(尤民生), et al. 茶叶上拟除虫菊酯类农药降解菌的分离及其特性 [J]. Acta Ecologica Sinica(生态学报), 2005, 25(7): 1824-1827.
- [31] WANG Zhao-shou(王兆守), LIANG Xiao-xia(梁小虾), LIN Gan(林淦), et al. 拟除虫菊酯类农药降解菌的紫外线诱变

- [J]. Entomological Journal of East China (华东昆虫学报), 2003, 12(2): 82-86.
- [32] SHI Zhicheng(史志诚). Animal Toxicology (动物毒物学) [M]. Beijing(北京): China Agriculture Press (中国农业出版社), 2001: 625-625.
- [33] ZHU Ji-sheng(朱九生), QIAO Xiong-wu(乔雄梧), WANG Jing(王静). 土壤中乙草胺的微生物降解及其对防除稗草持效性的影响 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), 2006, 17(3): 489-492.
- [34] SHEN Dong-sheng(沈东升), FANG Cheng-ran(方程冉), ZHOU Xu-hui(周旭辉). 土壤中结合残留态甲磺隆的微生物降解研究 [J]. Acta Pedologica Sinica (土壤学报), 2002, 39(5): 714-719.
- [35] JIANG Jian-dong(蒋建东), GU Lili-feng(顾立锋), SUN Jiquan(孙纪全), et al 同源重组法构建多功能农药降解基因工程菌研究 [J]. Chinese Journal of Biotechnology (生物工程学报), 2005, 21(6): 884-891.
- [36] YAN Q X, HONG Q, HAN P, et al Isolation and Characterization of a Carbofuran-degrading Strain *Novosphingobium* sp. FND-3 [J]. FEMS Microbiology Letters, 2007, 271(2): 207-213.
- [37] LIU Xian-hua(刘宪华), SONG Wen-hua(宋文华), DAI Shuguai(戴树桂). 呋喃丹降解菌 AEBL3 的筛选及特性研究 [J]. Shanghai Environ Sci(上海环境科学), 2003, 22(11): 743-745.
- [38] BOON N, GORIS J VOS P D, et al Biodegradation of Activated Sludge by an Indigenous 3-Chloroaniline-degrading *Comamonas testosteroni* Strain Dgfp [J]. Appl Environ Microbiol, 2000, 66(7): 2906-2913.
- [39] YE Yang-fang(叶央芳), MIN Hang-bo(闵航卜), DU Yufang(杜宇峰), et al 一株苯噻草胺降解菌的系统发育分类及其降解特性研究 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报), 2004, 24(6): 1110-1115.
- [40] HASHIMOTO M, FUKUIM, HAYANO K, et al Nucleotide Sequence and Genetic Structure of a Novel Carbaryl Hydrolase Gene (*cehA*) from *Rhizobium* sp. Strain AC100 [J]. Appl Environ Microbiol, 2002, 68(3): 1220-1227.
- [41] XU J Q, LIU X H, DAI J Y, et al Isolation and Characterization of a *Pseudomonas* *oleovorans* Degrading the Chloroacetamide Herbicide Acelchbr [J]. Biodegradation, 2006, 17(3): 219-225.
- [42] WANG Y S, LIU J C, CHEN W C, et al Characterization of A cetanilide Herbicides Degrading Bacteria Isolated from Tea Garden Soil [J]. Microb Ecol, 2008, 55(3): 435-443.
- [43] SANYAL D, KULSHRESTHA G. Metabolism of Metolachlor by Fungal Cultures [J]. J Agric Food Chem, 2002, 50(3): 499-505.
- [44] ZADRA C, CARDINALIG, CORTE L, et al Biodegradation of the Fungicide Imidazole by *Zygosaccharomyces rouxii* Strain DBVPG 6399 [J]. J Agric Food Chem, 2006(13), 54: 4734-4739.
- [45] LIN Aijun(林爱军), ZHU Lu-sheng(朱鲁生), WANG Jun(王军), et al 除草剂二甲戊灵的真菌降解及其特性研究 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报), 2003, 14(11): 1929-1933.
- [46] ZHU Lu-sheng(朱鲁生), LIN Aijun(林爱军), WANG Jun(王军), et al 二甲戊灵降解细菌 HB-7 的分离及降解特性研究 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (环境科学学报), 2004, 24(2): 360-365.
- [47] WANG Xing-guo(王秀国), ZHU Lu-sheng(朱鲁生), WANG Jun(王军), et al 细菌 HB-5 对除草剂莠去津的酶促降解研究 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报), 2006, 26(4): 579-583.
- [48] HU Jiang(胡江), DAI Xian-zhu(代先祝), LI Shun-peng(李顺鹏). 两株降解菌对阿特拉津污染土壤的修复效果研究 [J]. Acta Pedologica Sinica (土壤学报), 2005, 42(2): 323-327.
- [49] WEN Xue-song(温雪松), LI Ying(李颖), LI Jing(李婧), et al 降解除草剂阿特拉津的藤黄微球菌 AD3 菌株的分离、鉴定和降解特性研究 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报), 2005, 25(8): 1066-1070.
- [50] WANG Song-wen(王松文), LV Xian-yu(吕宪禹), JIANG Leijia(江磊), et al 假单胞菌 AD1 菌株对阿特拉津污染土壤的生物修复 [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis(南开大学学报, 自然科学版), 2001, 34(3): 121-123.
- [51] MAREK R, KRO' LICZAK P, CZACZYK K, et al Atrazine Degradation by Aerobic Microorganisms Isolated from the Rhizosphere of Sweet Flag (*Acorus calamus* L.) [J]. Biodegradation, 2008, 19(2): 293-301.
- [52] WANG X D, ZHOU S M, WANG H L, et al Biodegradation of Hexazinone by Two Isolated Bacterial Strains (WFX-1 and WFX-2) [J]. Biodegradation, 2006, 17: 331-339.
- [53] KUANG Xiaoying(匡小婴), RAO Zhiming(饶志明), SHEN Wei(沈微), et al 一株降解除草剂醚化麦黄酮 (PPT) 菌的筛选与鉴定技术 [J]. Chin J Appl Environ Biol (应用与环境生物学报), 2005, 11(2): 215-217.
- [54] WANG Xue-dong(王学东), OUYANG Xing-ming(欧晓明), WANG Huili(王慧利), et al 除草剂咪唑烟酸在土壤中的微生物降解研究 [J]. Acta Pedologica Sinica (土壤学报), 2004, 41(1): 156-159.
- [55] LABANA S, SINGH O V, BASU A, et al A Microcosm Study on Bioremediation of p-Nitrophenol-contaminated Soil Using *Aerobacter proteophormiae* RKJ100 [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2005, 68(3): 417-424.
- [56] D'ANNIBALE A, ROSETTO F, LEONARDI V, et al Role of Autochthonous Filamentous Fungi in Bioremediation of a Soil Historically Contaminated with Aromatic Hydrocarbons [J]. Appl Environ Microbiol, 2006, 72(1): 28-36.
- [57] HIRAI H, NAKANISHI S, NISHIDA T. Oxidative Dechlorination of Methoxychlor by Lignolytic Enzymes from White-rot Fungus [J]. Chemosphere, 2004, 55(4): 641-645.
- [58] GORBATOVA O N, KOROLEVA O V, LANDESMAN E O, et al Increase of the Detoxification Potential of Basidiomycetes by

- Induction of Laccase Biosynthesis [J]. *Prkl Bikhim Mikrobiol*, 2006, 42(4): 468-74
- [59] FRAGOERO S, NARESH M. Enzymatic Activity, Osmotic Stress and Degradation of Pesticide Mixtures in Soil Extract Liquid Broth Inoculated with *Phanerochaete chrysosporium* and *Trametes versicolor* [J]. *Environ Microbiol*, 2005, 7(3): 348-355.
- [60] LIU Y H, CHUNG Y C, XIONG Y. Purification and Characterization of a Dimethoate-degrading Enzyme of *Aspergillus niger* ZHY 256 Isolated from Sewage [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2001, 67(8): 3746-3749.
- [61] SASAKI M, AKAHARA A, OSHIMAKI K, et al. Purification of Cytochrome P450 and Ferredoxin Involved in Bisphenol A Degradation from *Sphingomonas* sp. Strain AO1 [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2005, 71(12): 8024-8030.
- [62] HIRATSUKA N, WARIISHI H, TANAKA H. Degradation of Diphenyl Ether Herbicides by the Lignin-degrading Basidiomycete *Coriolus versicolor* [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2001, 57(4): 563-571.
- [63] LIU Zhi(刘智), HONG Qing(洪青), XU Jian-hong(徐剑宏), et al. 耐盐及苯乙酸、甲基对硫磷降解基因工程菌的构建 [J]. *Acta Microbiologica Sinica* (微生物学报), 2003, 43(5): 554-559.
- [64] YAN Hui(颜慧), LI Jun-hong(李军红), SONG Wen-hua(宋文华), et al. 扑草净降解菌降解特性、降解基因保守序列的扩增及同源性分析 [J]. *Urban Environment & Urban Ecology* (城市环境与城市生态), 2002, 15(4): 61-63.
- [65] DAIXIAN-zhu(代先祝), HU Jiang(胡江), JIANG Jian-dong(蒋建东), et al. 污染土壤中原位阿特拉津降解菌的分离和鉴定 [J]. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2006, 43(3): 467-472.
- [66] HU Jiang(胡江), DAIXIAN-zhu(代先祝), LI Shun-peng(李顺鹏). 阿特拉津降解菌 BTAH1 的分离与鉴定 [J]. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2004, 24(6): 738-742.
- [67] SAJJAHAN K, SHAPIR N, WACKETT L P, et al. *A. rhizobacter* *aureus* TC1 Atrazine Catabolism Genes *trnA*, *trnB*, and *trnC* Are Linked on a 160-Kilobase Region and Are Functional in *Escherichia coli* [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2004, 70(7): 4402-4407.
- [68] SHIMAZU M, MULCHANDANI A, CHEN W. Simultaneous Degradation of Organophosphorus Pesticides and p-Nitrophenol by a Genetically Engineered *Moraxella* sp. with Surface-expressed Organophosphorus Hydrolase [J]. *Biotechnol Bioeng*, 2001, 76(4): 318-324.
- [69] LAN W S, GU J D, ZANG J L, et al. Coexpression of Two Detoxifying pesticide-degrading Enzymes in a Genetically Engineered Bacterium [J]. *Int Biodeterior Biodegrad*, 2006, 58(2): 70-76.
- [70] GENE BANK. National Center for Biotechnology Information (NCBI) [DB/OL]. [2008-07]. [http // www. ncbi. nlm. nih. gov](http://www.ncbi.nlm.nih.gov)
- [71] NARASIMHAN K, BASHEER C, BAJIC V B, et al. Enhancement of Plant-microbe Interactions Using a Rhizosphere Metabolism-driven Approach and its Application in the Removal of Polychlorinated Biphenyls [J]. *Plant Physiol*, 2003, 132(1): 146-153.

(Ed. TANG J)

《农产品加工·学刊》征订启事

《农产品加工·学刊》是由农业部农产品加工局重点支持的中国农产品加工业专业媒体, 是中国科技核心期刊、中国期刊全文数据库收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库源刊、中文科技期刊数据库及科技部万方期刊数据库收录期刊。《农产品加工·学刊》与中国技术市场协会、中国农学会农产品贮藏加工分会、中国农业工程学会农产品加工与贮藏分会、中国机械工程学会包装与食品工程分会、中国农业机械学会农副产品加工机械分会合办, 以农产品加工的科研人员、大专院校教师、在读博士生和硕士生为主要读者群和作者群, 以推进农产品加工业技术进步为己任, 为从事农产品开发研究和推广应用的科研人员提供学术交流和成果转让平台。设有专题论述、试验研究、工艺探讨、分析测试、技术装备、应用推广、学科创新、行业资讯、互动平台等栏目。

《农产品加工·学刊》选稿严谨, 编排规范, 出版及时, 服务周到。欢迎从事农产品加工、食品加工及相关学科的科研、教学、情报和推广应用人员积极订阅, 踊跃投稿。定价 8 元/册, 全年 12 期共 96 元。邮发代号: 22-19, 各地邮局均可订阅。

地 址: 山西省太原市双塔东街 124 号 闻汇大厦 B 座 2102 号

邮 编: 030012

电 话: 0351-4606085

E-mail: nepjxk@163.com

联系人: 蒲晓鸥