

磺酰脲类除草剂残留的微生物降解研究进展

尹乐斌¹ 刘勇^{1,2*} 张德咏^{1,2} 张松柏² 张国民³

- (1. 中南大学研究生院隆平分院 湖南 长沙 410125)
(2. 湖南省植物保护研究所 湖南 长沙 410125)
(3. 湖南农业大学生物安全科学技术学院 湖南 长沙 410128)

摘要: 磺酰脲类除草剂是一类高效、低毒和高选择性的除草剂, 此类除草剂能有效地防除阔叶杂草, 其中有些品种对禾本科杂草也有抑制作用。由于该类除草剂易残留药害及容易对地表水造成污染, 因而其在环境中的持久性和环境安全性备受人们关注。本文综述了磺酰脲类除草剂的应用概况及其作用机理、降解磺酰脲类除草剂的常见微生物种类及影响微生物降解效率的因素, 最后展望了微生物修复技术与抗除草剂的转基因作物是解决除草剂残留药害的最佳途径。

关键词: 磺酰脲类除草剂, 作用机理, 微生物降解

Research Progress of Microbial Degradation of the Sulfonylurea Herbicides

YIN Le-Bin¹ LIU Yong^{1,2*} ZHANG De-Yong^{1,2} ZHANG Song-Bai²
ZHANG Guo-Min³

- (1. College of Longping, Graduate School of Central South University, Changsha, Hunan 410125, China)
(2. Hunan Plant Protection Institute, Changsha, Hunan 410125, China)
(3. College of Bio-safety Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: Sulfonylurea herbicides are a kind of high efficiency, low toxicity and good crop selective herbicides, such herbicides can be used to control of broadleaf weeds effectively, some varieties even can inhibit grass weeds efficiently. Because of this class herbicides' residual toxicity to crop rotation and also to surface water, thus people should pay more attention to their persistence and environmental safety. This paper reviews the general application, the mode of action of sulfonylurea herbicides and the variety of microorganisms capable of degrading sulfonylurea herbicides, the factors that affect the efficiency of microbial degradation, finally prospect that the best ways to resolve herbicide residues are microbial remediation technology and herbicide-resistant transgenic crops.

Keywords: Sulfonylurea herbicides, The mode of action, Microbial degradation

随着人口的不断增长, 粮食对于人类生存与发展具有重要的意义。通过农药的使用来提高单位面

积粮食产量是 21 世纪农业的重要措施之一。而农田杂草却给农业生产造成很大的损失, 根据联合国粮

基金项目: 国家 863 计划项目(No. 2006AA02401); 国家“十一五”科技支撑计划项目(No. 2006BAD17B08); 中南大学研究生学位论文创新基金项目(No. 2960-71131100065); 湖南省农村科技计划重点项目(No. 2008NK2009)

* 通讯作者: Tel: 86-731-84691176; ✉: haoasliu@163.com

收稿日期: 2009-11-24; 接受日期: 2010-01-22

© 中国科学院微生物研究所期刊联合编辑部 <http://journals.im.ac.cn>

食与农业组织的研究, 全球因杂草导致的粮食生产损失每年高达 950 亿美元。据统计, 我国稻田杂草危害面积为 1500 万公顷, 每年损失稻谷 1000 万吨, 损失率 15% 以上^[1]。除草剂的应用不仅增加了粮食产量, 促进了农业现代化程度的提高, 还大大降低了人工除草的强度及成本。但是, 一方面由于该类除草剂的活性较高, 长期使用其残留对后茬敏感作物造成一定的药害^[2]; 另一方面该类除草剂长期使用所造成的选择压力, 特别是作用靶标单一, 造成了杂草耐药性、抗药性的出现^[3-4], 从而使得磺酰脲类除草剂在农田土壤中的残留降解及影响因素等问题受到普遍关注。作者就国内外学者有关磺酰脲类除草剂残留微生物修复方面的研究进展作一综述。

1 磺酰脲类除草剂的应用概况及作用机理

1.1 磺酰脲类除草剂的应用概况

20世纪70年代末, 美国杜邦公司 Levitt 等发现第1个磺酰脲类除草剂品种氯磺隆以来^[3], 磺酰脲类化合物因用量低、对哺乳动物低毒及使用后易降解等特点, 已发展成为世界上最大的一类除草剂。它的使用大大降低了农药使用对环境的影响, 迅速在国际上掀起一股热潮。迄今为止, 美国、日本、瑞士、韩国等开发并商品化的磺酰脲类除草剂已有近40余种。我国南开大学农药国家工程研究中心历经十几年研制的磺酰脲类除草剂, 以高效、低毒和环境友好的特性, 成为我国农药研究史上的一个里程碑, 也使我国成为世界第7个具有独立创制新农药能力的国家, 其自主创制的磺酰脲类除草剂单啞磺隆、单啞磺酯等也取得了临时登记进入市场^[5]。磺酰脲类除草剂对许多一年生或多年生杂草有特效, 目前应用作物有水稻、玉米、油菜、麦类、大豆、林木等。我国目前广泛应用的品种有氯啞磺隆、苄啞磺隆、氯磺隆、甲磺隆、吡啞磺隆、苄啞磺隆、苯磺隆。

Levitt 等在合成了一系列磺酰脲类化合物之后, 将此类化合物的结构模式分为芳环、脲桥和杂环三部分 (见图1), 每一部分的分子结构在除草活性中都起重要作用, 并对其构效关系进行了广泛和深入的研究。在新品种开发过程中, 以芳环和杂环变化最大, 脲桥则变化不大, 除草活性随各取代基的性质和位置不同而异。

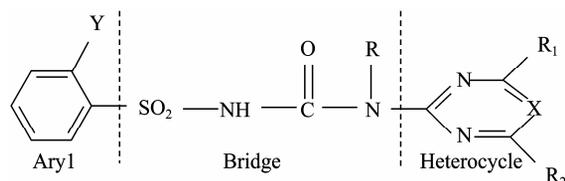


图1 磺酰脲类除草剂的模式结构

Fig. 1 The model structure of sulfonylurea herbicide

1.2 磺酰脲类除草剂的作用机理

磺酰脲类农药为选择性内吸传导型除草剂, 易被植物的根、叶吸收, 在木质部和韧皮部传导, 它能够抑制植物体内至关重要的乙酰乳酸合成酶 (Acetolactate synthase, ALS) 也称为乙酰羟酸合酶 (Acetohydroxyacid synthase, AHAS) 的活性, 从而抑制带支链氨基酸如缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸的生物合成, 导致底物 α -丁酮的积累, 阻碍细胞分裂期间 DNA 的合成, 使有丝分裂停止, 细胞不能正常生长, 最终达到除草目的。ALS 酶是植物、真菌和细菌细胞内支链氨基酸生物合成第一阶段关键酶^[6-9], 在支链氨基酸生物合成的开始阶段, 可将 2 分子丙酮酸或 1 分子丙酮酸与 1 分子 α -丁酮酸催化缩合, 分别生成乙酰乳酸或乙酰羟基丁酸, 再经过一系列反应形成缬氨酸、亮氨酸和异亮氨酸^[8]。

现已明确磺酰脲类除草剂作用于植物体内的 ALS, 且再无第 2 个作用靶标。ALS 实际上有 ALS I、ALS II、ALS III 之分, 编码的基因分别为 *ihvBN*、*ihvGN*、*ihvH*^[10], 这 3 种同工酶对各种除草剂的敏感性不同, 其中以 ALS II 最为敏感^[11-12]。ALS 是一个四聚体, 由 2 个大亚基和 2 个小亚基构成, 大亚基是催化中心, 小亚基是调控中心^[13]。Schloss^[12]认为, 磺酰脲分子和 ALS 的作用点为硫胺焦磷酸素 (Thiamine Pyrophosphate), 它与磺酰脲类的啞磺隆 (Sulfometuron) 分子结构相似, 均有一个取代的嘧啶基, 并在嘧啶环间隔的第 2 个键都有 1 个三角形中心 (羰基和三唑氮基), 间隔的第 3 键中均有一个负电子中心。啞磺隆可与 ALS II 产生的中间产物结合, 从而使 ALS 酶失去活性, 也就使杂草死亡。

1.3 抗 ALS 抑制剂基因

由于该类除草剂的大量重复使用和作用位点单一, 导致抗该类除草剂杂草的大量出现, 并且作用于 ALS 的除草剂存在着交互抗性的问题。大量实验证明一个氨基酸残基的突变就会导致细菌、酵母和植物 ALS 除草抗性的产生, 且突变位点绝大部分出

现在形成通道的氨基酸残基上^[14-15]。抗 ALS 抑制剂的克隆和在转基因作物中的应用已成为生命科学研究的热点,它在抗除草剂植物基因工程中具有重要地位,常用来培育抗除草剂抗性植株。宋贵生等^[16]从水稻中分离了 ALS 基因的 cDNA,并构建了该基因的植物表达载体,转化烟草后对除草剂的抗性高达 50 mg/L,说明 ALS 转基因烟草有较强的除草剂抗性。孙笑非等^[13]从长期使用甲磺隆的土壤分离得到抗甲磺隆的假单胞菌,克隆了该菌 ALS 大小亚基基因 *ilvIH*,转化大肠杆菌表明 *ilvI* 基因表达的 ALS 大亚基对甲磺隆有很强的抗性。沈晶晶等^[17-18]研究表明,与 ALS 单一位点突变相比,多位点突变能使 ALS 空间结构发生更大的变化,导致 ALS 对除草剂抗性的大幅提高。Tu 等^[19]分离、克隆并定位了一个抗苯达松和磺酰脲类除草剂的水稻新基因 *CYP81A6*,构建了该基因的双元表达载体并转化农杆菌,经过严格的纯系选择和田间试验,获得可抗苯达松和磺酰脲类除草剂的转基因植株。Pan 等^[20]研究表明, *Bel* 基因与水稻对除草剂的抗性有关,该位点的隐性突变 *bel* (*bel^a*)和 *bsl* (*bel^b*),导致水稻丧失对除草剂苯达松和磺酰脲类的抗性,若将野生型 *Bel* 基因导入 *bel^a* 突变体,能恢复突变体对苯达松和磺酰脲类的抗性。现已推广的抗磺酰脲类除草剂的转基因作物有美国杜邦公司的大豆(STS)、棉

花(19-51a cotton)、甜菜(CRI-B)等。

2 可降解磺酰脲类除草剂的微生物种类

由于该类除草剂具有极高的活性和极强的选择性,土壤中少量的残留即可对后茬敏感作物产生药害^[3-4],因此该类除草剂在土壤中的残留对后茬敏感作物的安全性问题引起了人们的普遍关注。以微生物修复理论为基础的农药残留降解技术是解决残留药害的一条有效途径。国内外学者对于该类除草剂在水、土壤环境中的降解和消失规律研究,将重点放在了水解和微生物降解等方面^[21-22]。众多学者研究表明,无论用高压、环氧乙烷、还是 γ -射线消毒土壤,其结果为磺酰脲类除草剂在未灭菌土壤中降解速度比灭菌土壤中迅速,且在未灭菌土壤中降解产物更为复杂^[12],由此可见,微生物降解是除草剂从土壤中消失的重要因素。

由于微生物的易突变性和抗逆性强,它们可以在恶劣的环境中生存下来,对有害化学物质进行分解代谢。科研工作者通过富集培养、分离筛选等技术已获得了一大批能降解或转化有害物质的微生物。有关磺酰脲类除草剂在土壤中的微生物降解国内外均有报道,参与降解磺酰脲类除草剂的微生物有真菌、细菌与放线菌(表 1),其中研究最多的还是细菌。

表 1 目前分离获得的可降解磺酰脲类除草剂的微生物
Table 1 The microorganisms currently available capable of degradating sulfonylurea herbicides

磺酰脲类除草剂 Sulfonylurea herbicide	微生物种类及参考文献 Microbe species and references
氯磺隆 Chlorsulfuron-ethyl	浅灰链霉菌(<i>Streptomyces griseolus</i>)、黑曲霉(<i>Aspergillus niger</i>)、青霉菌属(<i>Penicillium</i> sp.)、真菌(Fungi) ^[23] ; 黄单胞菌属(<i>Xanthomonas</i> sp.) ^[24] ; 黑曲霉(<i>Aspergillus niger</i>) ^[25]
氟磺隆 Prosulfuron	浅灰链霉菌(<i>Streptomyces griseolus</i>) ^[26] ; 浅灰链霉菌(<i>Streptomyces griseolus</i>)、青霉菌属(<i>Penicillium</i> sp.) ^[23]
氟胺磺隆 Triflurosulfuron-methyl	浅灰链霉菌(<i>Streptomyces griseolus</i>) ^[27]
氯嘧磺隆 Chlorimuron-ethyl	鞣丸酮丛毛假单胞菌(<i>Comamonas</i> sp.) ^[28]
甲磺隆 Metsulfuron-methyl	青霉菌属(<i>Penicillium</i> sp.) ^[29-31] ; 黑曲霉(<i>Aspergillus niger</i>) ^[25] ; 假单胞菌(<i>Pseudomonas</i> sp.) ^[13,32]
噻磺隆 Thifensulfuron-methyl	放线菌属(<i>Actinomycetes</i>)、细菌(Bacteria) ^[33]
氯嘧磺隆 Chlorimuron-ethyl	假单胞菌属(<i>Pseudomonas</i> sp.) ^[34] ; 酿酒酵母(<i>Saccharomyces cerevisiae</i>) ^[35]
烟嘧磺隆 Nicosulfuron	黑曲霉(<i>Aspergillus niger</i>)、芽孢杆菌属(<i>Bacillus</i> sp.) ^[36]
苄嘧磺隆 Bensulfuron-methyl	沼泽红假单胞菌(<i>Rhodopseudomonas palustris</i>) ^[37]
吡嘧磺隆 Pyrazosulfuron-ethyl	假单胞菌属(<i>Pseudomonas</i> sp.)、芽孢杆菌属(<i>Bacillus</i> sp.) ^[38]

从表 1 中我们可以发现, 这些微生物往往具有多重活性, 即同一种微生物可以降解多种磺酰脲类除草剂, 并且同一种磺酰脲类除草剂也可被不同的微生物所降解, 这是微生物适应环境及生物多样性的体现。

3 影响磺酰脲类除草剂微生物降解的因素

众多研究表明(见表 1), 微生物在降解磺酰脲类除草剂中起着重要作用, 凡是能够影响微生物活性的因素均能影响它们的降解。如 pH 值、温度、湿度和土壤类型等环境因子, 此外化合物本身的结构也决定着其降解速度。

3.1 pH 值

pH 值是影响微生物降解磺酰脲类除草剂的主要因素。一方面, pH 值可以直接影响微生物群落种类及微生物数量等, 从而对微生物的降解能力产生影响; 另一方面, 不同的 pH 值可以影响磺酰脲类除草剂的存在形式, 磺酰脲类除草剂在土壤中以两种形态存在。在酸性和中性条件下, 磺酰脲类除草剂主要以中性型存在, 这种形态对水解非常敏感, 很易水解, 因此磺酰脲类除草剂在酸性条件下比在中性或碱性条件下水解的速率要快^[38-39], 随后微生物作用于水解产物, 从这个意义上微生物降解和化学水解是相互促进; 但在碱性条件下, 则以阴离子型存在, 水溶性较强, 这种形态不易水解, 此时主要微生物对磺酰脲类除草剂的降解起主要作用^[40]。室内及田间试验结果表明, 磺酰脲类除草剂在土壤中的降解速率随着基质 pH 值的降低而加快。如 Thirunarayanan 等^[41]的研究表明, 当 pH 为 6.2 时, 氯磺隆半衰期为 88.5 d, 当 pH 增大为 8.1 时, 其半衰期则长达 144 d。Xu 等^[15]研究表明, 吡嘧磺隆的非生物降解在低 pH 值条件下比中性条件下快, 且假单胞菌降解吡嘧磺隆在 pH 7.0 下快于 pH 9.0。

此外, pH 影响着该类化合物辛醇/水的分配系数及水溶性, 由此影响其移动性; 当 pH 为 5.0 时, 化合物处于中性分子状态, 亲脂性最强, 亲水性最弱; 当 pH 为 7.0 时, 水溶性提高 10-100 倍, 亲脂性下降, 所以当 pH 增大时, 平衡趋于水溶性离子型, 使之脱离土壤的结合态进入水相, 游离移动到耕层以下, 此深度的土壤微生物活动弱, 且 pH 较耕层高, 导致化合物降解缓慢, 然后残留药剂又会随蒸腾流回升

到耕层土壤, 危害后茬敏感作物^[40]。

3.2 温度、湿度

影响磺酰脲类除草剂在土壤中残留和降解的另一重要因素是温度和湿度。Thirunarayanan 等^[41]报道在 pH 7.7 的土壤中, 湿度为 75% 的田间持水量条件下, 温度由 10°C 升到 40°C 时, 氯磺隆的半衰期由 229 d 降为 62.5 d。Fuesler 等^[42]研究了氯磺隆的降解随温度的升高而降低。Dinelli^[20]等研究了 4 种磺酰脲除草剂的降解速度与温度的关系后得出, 温度越高, 降解半衰期越短, 同时建立了降解速率与温度、湿度之间的函数关系, 用来预测它们的降解及散失状况。另有人报道在 pH 6.4 的土壤中, 湿度从 25% 提高到 75% 的田间持水量下, 醚苯磺隆的半衰期从 73 d 降到 20 d, 而温度从 21°C 上升到 35°C 时, 降解速度增加 0.5 倍到 1 倍^[40]。其它众多学者的研究皆获得同样的结果, 即磺酰脲类除草剂在土壤中的降解随温度和湿度的提高而加快^[38,43], 然而温度、湿度的作用是相互依赖的, 且大多数时候还受其他相关因素的制约。另外, 温度、湿度也影响土壤中微生物活动及酶的活性, 对微生物降解的速度产生影响。

3.3 其他因素

除上述土壤 pH 值、温度和湿度对磺酰脲类除草剂的微生物降解有着重要的影响外, 其他因素如土壤类型、土壤有机质的含量、化合物本身的结构、降雨量、氧气供应、施用时间及用量等均会影响该类化合物在土壤中的降解速率。磺酰脲类除草剂在土壤中的移动、下移深度和速度直接和土壤类型性质有关, 一般有机质含量和粘粒含量高的重土壤, 吸附较强, 相对移动就慢; 有机质含量和粘粒含量低的轻土壤, 尤其是砂土壤, 吸附较弱, 相对移动就快, 下移就深。Jang 等^[44]研究了苄嘧磺隆在粘壤土和砂壤土中的迁移和降解行为, 发现苄嘧磺隆在粘土中的降解时间比在砂壤土中的降解时间长, 但在砂壤土中的迁移速度比粘壤土中快。Tang 等^[45]研究了单嘧磺隆在土壤中吸附与解吸附的特性, 结果表明单嘧磺隆在不同的土壤中的吸附能力不同, 这与土壤的特性有重要关系, 土壤中有机物的含量与化学性质被认为是单嘧磺隆在土壤中吸附差异的一个重要因素, 并且单嘧磺隆在土壤中的吸附程度随着 pH 值的升高而降低。另外, 降雨量对磺酰脲类

除草剂的影响也很重要。Vicari 等^[46]报道氯磺隆在 4 个区域其半衰期分别为 149、70、59 和 51 d, 而这 4 个区域降雨量分别为 250 mm、508 mm、700 mm 和 1224 mm。总之, 磺酰脲类除草剂在温暖、湿润、光照、低 pH 值的土壤中降解较快, 残留期比寒冷、干燥、阴暗、高 pH 的土壤中短得多。

4 展望

除草剂的使用使杂草的防除效率大大提高, 但大量使用除草剂不仅使杂草产生抗药性, 而且对下茬敏感作物产生严重的药害并且还严重污染环境。以微生物修复理论为基础的农药残留降解技术是解决残留药害的一种安全、有效、廉价的途径, 该方法具有无毒、无残留、无二次污染等优点。该技术是近 20 年发展起来的一项用于土壤污染治理的新技术, 它主要是通过微生物的作用, 将环境中的有机污染物转化成 CO₂ 和 H₂O 等对环境影响小, 无二次污的小物质。目前对该类除草剂的微生物降解研究还仅仅处于微生物菌种的筛选及降解产物的分析等方面, 大部分的工作还局限于实验室, 研究还不是很深入。

大多数抗除草剂作物的创制是将除草剂作用靶标或解毒酶有关的基因导入作物并获得稳定表达, 因此种植抗除草剂转基因作物是解决除草剂残留药害的另一条最佳途径。目前, 大量针对各种除草剂的抗性基因资源被发掘, 如抗草甘膦的 EPSP 合成酶基因 *aroA*^[47-48], 降解草丁磷的 *bar* 基因^[49], 降解阿特拉津氯水解酶基因 *atza*^[50]等。有的转基因抗性作物已到商业应用阶段, 如美国孟山都公司开发的转 *aroA* 基因的抗草甘膦作物, 包括大豆、玉米、棉花等, 已经成功在全球推广应用, 种植面积在亿亩以上^[13]。这些研究主要集中在美国和欧洲, 而我国这项工作刚刚开始, 为了我国抗除草剂作物品种选育、推广的开展不受制于他人, 我们必须进行创新研究, 筛选出具有自己知识产权的抗性基因。我国在国家转基因植物研究与产业化专项支持下, 获得了一批具有重要应用价值并拥有自主知识产权的新型抗除草剂基因^[19-20,51]。虽然抗磺酰脲类除草剂的转基因作物已有报道并在商业化推广应用, 但是随着研究的不断深入, 抗不同除草剂转基因作物数量将会逐渐增加; 基因种类、来源日益丰富; 转基因性

状也会日趋多样、复杂。抗除草剂转基因作物在选育技术上已日渐成熟, 但其在市场化过程中能否健康、稳定发展并获得与之相适应的市场规模, 将主要取决于其安全性问题的妥善解决。

参 考 文 献

- [1] 于改莲. 稻田除草剂的正确施用方法. 农药, 2001, 40(12): 43-45.
- [2] 姚东瑞, 陈杰. 绿黄隆对春播轮作作物生长的影响. 江苏农业科学, 1998, 14(3): 154-158.
- [3] 卢宗志, 张朝贤, 傅俊范, 等. 抗苄嘧磺隆雨久花 ALS 基因突变研究. 中国农业科学, 2009, 42(10): 3516-3521.
- [4] Tranel PJ, Wright TR. Resistance of weeds to ALS-inhibiting herbicides: What have we learned? *Weed Science*, 2002, 50(6): 700-712.
- [5] 刘金胜, 寇俊杰, 刘桂龙. 磺酰脲类除草剂的应用研究进展. 农药, 2007, 46(3): 145-147.
- [6] Duggleby RG, Mccourt JA, Guddatb LW. Structure and mechanism of inhibition of plant acetoxyacid synthase. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2008, 46(3): 309-324.
- [7] Zhou QY, Liu WP, Zhang YS. Action mechanisms of acetolactate synthase-inhibiting herbicides. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2007, 89(2): 89-96.
- [8] Lee YT, Duggleby RG. Mutations in the regulatory subunit of yeast acetoxyacid synthase affect its activation by MgATP. *Biochem J*, 2006, 395(Pt2): 331-336.
- [9] Pang SS, Duggleby RG. Regulation of yeast acetoxyacid synthase by valine and ATP. *Biochem J*, 2001, 357(3): 749-757.
- [10] Hill CM, Duggleby RG. Mutagenesis of *Escherichia coli* acetoxyacid synthase isoenzyme II and characterization of three herbicide-insensitive forms. *Biochem J*, 1998, 335(Pt3): 653-661.
- [11] 姜林, 李长城, 张玉镭, 等. 磺酰脲类除草剂的研制与应用. 山东农业大学学报(自然科学版), 2003, 34(4): 597-599.
- [12] 肖艳松, 谭琳, 陈桂华, 等. 磺酰脲类除草剂的微生物降解. 农药研究与应用, 2007, 11(3): 15-19.
- [13] 孙笑非, 黄星, 陈博, 等. 抗甲磺隆假单胞菌的分离及其乙酰乳酸合酶的大小亚基 *ihvH* 基因的克隆和表达. 微生物学报, 2008, 48(11): 1493-1498.
- [14] Pang SS, Duggleby RG, Guddat LW. Crystal structure of yeast acetoxyacid synthase: a target for herbicidal inhibitors. *Journal of Molecular Biology*, 2002, 317(2): 249-262.

- [15] Pang SS, Guddat LW, Duggleby RG. Molecular basis of sulfonylurea herbicide inhibition of acetohydroxyacid synthase. *The Journal of Biological Chemistry*, 2003, **278**(9): 7639-7644.
- [16] 宋贵生, 冯德江, 魏晓丽, 等. 水稻乙酰乳酸合成酶基因的克隆和功能分析. *中国农业科技导报*, 2007, **9**(3): 66-72.
- [17] 沈晶晶, 黄星, 俞欣妍, 等. 两株抗乙酰羟酸合成酶类除草剂克雷斯伯氏菌的分离及其 AHAS 基因 *ahvIH* 的克隆. *应用与环境微生物学报*, 2008, **14**(5): 663-667.
- [18] 沈晶晶, 李永丰, 黄星, 等. 乙酰羟酸合成酶同功酶基因 *ahvBN*、*ahvGN* 和 *ahvIH* 的表达及对除草剂抗性的比较. *生物工程学报*, 2009, **25**(7): 1007-1013.
- [19] Tu JM, Zhang JW, Pan G, *et al.* The rice bentazon and sulfonylurea herbicide resistant gene CYP81A6. United States, US2008/0313772A1, 2008.
- [20] Pan G, Zhang XY, Liu KD, *et al.* Map-based cloning of a novel rice cytochrome P450 gene CYP81A6 that confers resistance to two different classes of herbicides. *Plant Molecular Biology*, 2006, **61**(6): 933-943.
- [21] Bekker BM, Wolfe NL. Hydrolysis and biodegradation of sulfonylurea herbicides in aqueous buffers and anaerobic water sediment systems: Assessing fate pathways using molecular descriptors. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1996, **15**(9): 1500-1507.
- [22] Xu J, Li XS, Xu YJ, *et al.* Biodegradation of pyrazosulfuron-ethyl by three strains of bacteria isolated from contaminated soils. *Chemosphere*, 2009, **74**(5): 682-687.
- [23] Joshi MM, Brown HM, Romesser JA. Degradation of chlorsulfuron by soil microorganisms. *Weed Science*, 1985, **33**(6): 888-893.
- [24] 邵劲松, 沈标, 洪青, 等. 一株氯磺隆降解菌的分离鉴定及其特性研究. *土壤学报*, 2003, **40**(6): 952-956.
- [25] Boschini G, D'Agostina A, Arnoldi A, *et al.* Biodegradation of chlorsulfuron and metsulfuron-methyl by *Aspergillus niger* laboratory conditions. *Journal of Environmental Science and Health. Part B, Pesticides, Food Contaminants and Agricultural Waters*, 2003, **38**(6): 737-746.
- [26] Kulowski K, Zirbes EL, Thede BM, *et al.* Microbial transformations of prosulfuron. *J Agric Food Chem*, 1997, **45**(4): 1479-1485.
- [27] Dietrich RF, Reiser RW, Stieglitz B. Identification of microbial and rat metabolites of triflurosulfuron methyl, a new sugar beet herbicide. *J Agric Food Chem*, 1995, **43**(2): 531-536.
- [28] 丁伟, 杨薇, 白赫, 等. 长残留除草剂氯磺隆降解菌的筛选、鉴定和降解特性. *作物杂志*, 2007(4): 88-91.
- [29] 沈东升, 方程冉, 周旭辉. 土壤中降解甲磺隆除草剂的微生物的分离与筛选. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2002, **20**(3): 186-189.
- [30] 沈东升, 方程冉, 周旭辉. 一株甲磺隆降解真菌 (*Penicillium* sp.) 的降解特性研究. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2002, **28**(5): 542-546.
- [31] 沈东升, 方程冉, 周旭辉. 土壤中结合残留态甲磺隆的微生物降解研究. *土壤学报*, 2002, **39**(5): 715-719.
- [32] 黄星, 何健, 潘继杰, 等. 甲磺隆降解菌 FLDA 的分离鉴定及其降解特性研究. *土壤学报*, 2006, **43**(5): 821-827.
- [33] Brown HM, Joshi MM, Van AT, *et al.* Degradation of thifensulfuron methyl in soil: Role of microbial carboxyesterase activity. *J Agric Food Chem*, 1997, **45**(3): 955-961.
- [34] 王哲, 孙纪全, 马吉平, 等. 氯磺隆降解菌株 LW-3 的分离及生物学特性研究. *微生物学通报*, 2008, **35**(12): 1899-1904.
- [35] 滕春红, 陶波. 氯磺隆高效降解真菌 F8 的分离和鉴定. *土壤通报*, 2008, **39**(5): 1160-1163.
- [36] 杨亚君, 刘顺, 武丽芬, 等. 可降解水体中烟磺隆微生物的分离与筛选. *农药学报*, 2007, **9**(3): 275-279.
- [37] 张松柏, 张德咏, 罗香文, 等. 一株降解苄嘧磺隆光合细菌的分离鉴定及其降解特性. *生态环境*, 2008, **17**(5): 1774-1777.
- [38] Zheng W, Yates SR, Papiernik SK. Transformation kinetics and mechanism of the sulfonylurea herbicides pyrazosulfuron ethyl and halosulfuron methyl in aqueous solutions. *J Agric Food Chem*, 2008, **56**(16): 7367-7372.
- [39] Boschini G, Agostina AD, Antonioni C, *et al.* Hydrolytic degradation of azimsulfuron, a sulfonylurea herbicide. *Chemosphere*, 2007, **68**(7): 1312-1317.
- [40] 闻长虹. 磺酰胺类除草剂的微生物降解与转化. *池州师专学报*, 2004, **18**(5): 44-45.
- [41] Thirunaryanan K, Zimdahl RL, Smika DE. Chlorsulfuron adsorption and degradation in soil. *Weed Science*, 1985, **33**(4): 558-563.
- [42] Fuesler TP, Hanafey MK. Effect of moisture on chlormuron degradation in soil. *Weed Science*, 1990, **38**(3): 256-261.
- [43] Supradip S, Gita K. Hydrolysis kinetics of the sulfonylurea herbicide sulfosulfuron. *International Journal of Environmental and Analytical Chemistry*, 2008, **88**(12): 891-898.
- [44] Jang IS, Moon YH, Ryang HS. Behavior of the new herbicide bensulfuron methyl (DPX-F5384) in soil. *Korean-Journal-of-Weed Science (Korea R.)*, 1987, **7**(1): 74-77.

