

土壤中咪唑啉酮类除草剂的分析及归趋研究

崔兆杰 陈婷婷

(山东大学环境科学与工程学院, 济南 250100)

摘要 咪唑啉酮类除草剂具有较长的残留活性,研究其在土壤中的环境行为具有重要的意义。介绍了咪唑啉酮类除草剂的特性,评述了咪唑啉酮类除草剂在土壤中的前处理方法和分析方法以及该类除草剂在土壤中的吸附、降解和迁移特性,并针对目前的状况和存在的问题提出了今后的研究方向。

关键词 除草剂 咪唑啉酮 吸附 降解 迁移

中图分类号 X53 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2007)01-0113-05

Studies on analysis and fate of imidazolinone herbicides in soil

Cui Zhaojie Chen Tingting

(School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100)

Abstract Imidazolinone herbicides were persistent in soil, so the studies about the fate of imidazolinone herbicides were very important. This paper introduced the properties of imidazolinone herbicides and discussed the analytical methods of the herbicides in soil. At the same time, the overview on sorption, degradation, mobility and research prospect of imidazolinone herbicides in soil was reported.

Key words herbicide; imidazolinone; sorption; degradation; mobility

随着农业经济的发展,农药日益成为生产中不可缺少的生产资料,在粮食等作物的稳产、高产和产品质量等方面起着极其重要的作用。在国外,每年农药的消耗大部分是用以杀死杂草的除草剂,除草剂的用量占农药总量的百分比为:加拿大 81%,美国 60%,法国接近 40%^[1]。随着除草剂的大量使用,不可避免产生环境污染并经常造成二次药害问题,同时,其对生态环境的冲击,尤其是对地下水可能造成的威胁,更要引起足够的重视。因此,除草剂在环境中的归趋研究已成为其环境安全性评价的关键工作。特别是近几年来,玉米田、大豆田和稻田都广泛使用除草剂,除草剂的用量呈上升趋势。因此,欧洲国家和美国环保局规定了水中除草剂的残留极限,单一组分残留为 0.1 $\mu\text{g/L}$,多组分残留为 0.5 $\mu\text{g/L}$ ^[2]。目前我国对此还没有明确的规定,但鉴于其在环境中的毒性、难降解性和生物富集等因素,对除草剂的使用需加以管理。因此,除草剂的分析监测及归趋是当前环境研究中的一个热点问题。

1 咪唑啉酮类除草剂简介

咪唑啉酮类除草剂是 20 世纪 80 年代由美国氰胺公司开发成功的一类高效低毒除草剂,到目前为

止已有 6 个商品化品种,包括咪唑烟酸(imazapyr)、咪唑乙烟酸(imazethapyr)、咪草酸酯(imazamethabenz)、咪唑啉酸(imazaquin)、甲氧咪草烟(imazamox)和甲基咪草烟(imazapic),其物化性能见表 1^[3]。该类除草剂活性高、用量低(每公顷用量以克计)、杀草谱宽、选择性强且使用方便,既可作土壤处理剂也可作茎叶处理剂,广泛用于大豆田、花生地及林地杂草的防除,不仅防除一年生和多年生的禾本科杂草、阔叶草,还可有效防除苔草和木本植物^[4]。因此,它在世界除草剂市场中占有重要的地位。

咪唑啉酮类除草剂的作用机制在于抑制乙酰乳酸合成酶(ALS)的活性,使侧链氨基酸的生物合成受抑制,从而导致植物生长停止而死亡^[5],而且该类除草剂在土壤中不易挥发和光解,残效期长,因此其在土壤中的残留对某些后茬作物及非靶植物等存在药害问题。如咪唑乙烟酸(推荐剂量

收稿日期:2006-03-05; 修订日期:2006-08-03

作者简介:崔兆杰(1963~),男,博士,教授,主要从事环境监测与分析、环境化学等方面的研究工作。

E-mail: Cuijz@sdu.edu.cn

75 g/hm²)施药 24 个月后仍对油菜、甜菜、白菜和烟酸,推荐剂量 50 g/hm²)施药 24 个月后仍不可种亚麻有严重药害。金普施特(甲氧咪草烟 + 咪唑乙烟酸,推荐剂量 50 g/hm²)施药 24 个月后仍不可种植白菜、甜菜和亚麻等^[6]。

表 1 咪唑啉酮类除草剂的物化性能^[3]

Table 1 Physicochemical characteristics of imidazolinone herbicides

除草剂	熔点	蒸气压	溶解度	其他物化性能
咪唑烟酸	128 ~ 130℃	0.013 mPa (60℃)	溶解度(15℃):水 9.74 g/L, 丙酮 6 g/L, 乙醇 72 g/L, 二氯甲烷 72 g/L, 甲醇 230 g/L	本品的异丙铵盐为无色固体, K_{ow} 1.3 (imazapyr)
咪唑乙烟酸	169 ~ 173℃	<0.013 mPa (60℃)	溶解度(25℃):水 1.4 g/L, 丙酮 48.2 g/L, 二氯甲烷 185 g/L, 二甲亚砜 422 g/L, 甲醇 105 g/L	白色无嗅结晶体, K_{ow} 31 (pH7), 16 (pH9), 均在 25℃。 pK_a 值: pK_{a1} = 2.1, pK_{a2} = 3.9
咪唑啉酸	219 ~ 222℃	<0.013 mPa (60℃)	溶解度(25℃):水 60 mg/L, 二氯甲烷 14 g/L, 二甲亚砜 159 g/L, 甲苯 0.4 g/L	粉色刺激性气味固体, 相对密度 1.383。 K_{ow} 2.2(22℃), 酸性(对羧基 pK_a 为 3.8)
甲基咪草烟	204 ~ 206℃	<0.01 mPa (25℃)	溶解度(25℃):水 2.15 g/L, 丙酮 18.9 g/L	无嗅灰白色或粉色固体, pK_a 值: pK_{a1} = 2.0, pK_{a2} = 3.6, pK_{a3} = 11.1
甲氧咪草烟	166 ~ 166.7℃	0.013 mPa (25℃)	溶解度(25℃):水 4.16 g/L, 丙酮 29.3 g/L	无嗅灰白色固体
咪草酸酯	113 ~ 153℃	-	溶解度(25℃):二氯甲烷 300 g/L, 甲醇 244 g/L	混合异构体为无色晶体

2 土壤中咪唑啉酮类除草剂的分析方法

2.1 样品前处理方法

样品前处理是农药残留分析的关键步骤,处理得好坏直接影响最终的分析结果。由于该类除草剂的施用量很低,因此其在土壤中的残留需要在 ng/g 水平进行监测。这就对样品的前处理提出了很高的要求,传统的样品制备技术有液-液萃取、振荡-过滤、索氏提取等,这些方法的主要缺点是有机溶剂使用量大,劳动强度大,步骤繁琐,周期长,易发生样品损失等。随着萃取技术的发展,一些新的样品制备技术如固相萃取(SPE)、超临界流体提取(SFE)、微波萃取(MAE)等被采用,这些新技术不仅节省时间和溶剂、减少样品用量,还能提高萃取或净化效率^[7],而且固相萃取容易实现前处理自动化,可与液相色谱结合实现许多农药残留的全自动分析^[8]。Steven J. Stout 等^[9]利用微波萃取法(MAE)联合气相色谱/电子捕获负化学离子源质谱对该类除草剂中应用最广泛的咪唑乙烟酸进行了测定,达到了 1 ng/g 的定量限,而且净化技术简单省时。Pace 等^[10]从 3 种得克萨斯州土壤中超临界流体萃取和固相萃取了 2 种咪唑啉酮类除草剂(AC 263, 22 和咪唑乙烟酸,其中用 SFE-CO₂ 2 种除草剂的回收率是 80%,SPE 的平均回收率为 78%。

2.2 分析方法

2.2.1 高效液相色谱法及气相色谱法

由于毛细管柱的高分离性能以及高灵敏度和高选择性能的检测器使得气相色谱广泛应用于农药的残留分析,咪唑啉酮类除草剂甲基化后可以用带有氮磷检测器的气相色谱和气质联用测定^[11]。但是气相色谱法局限于易挥发的和热稳定性好的除草剂的分离和分析,对于受热易分解或失去活性的物质,不能直接使用或不适合用气相色谱分析,从而推动液相色谱技术的发展,现在高效液相色谱和液相色谱-质谱联用已广泛用于不易挥发及热不稳定有机化合物的分析,是农药残留定性、定量分析的有效手段^[7]。特别是液相色谱与质谱的联用,将色谱对复杂基体化合物的高分离能力与质谱独特的选择性、灵敏度、分子量及结构信息结合于一体,成功地用于亲水性强、热不稳定、分子量大的化合物的分析,具有检测灵敏度高、选择性好、定性定量可同时进行和结果准确可靠等优点^[12]。Aldo Laganà^[13,14]和 Giuseppe D'Ascenzo 等^[15]报道了液相色谱-质谱联用测定土壤中的咪唑啉酮类除草剂,检测限最低可达到 0.1 ~ 0.05 ng/g。因此,液相色谱法不仅可作为咪唑啉酮类除草剂评价的常规筛选方法,也是研究该类除草剂在土壤中的环境行为的一种灵敏可靠的方法。

2.2.2 毛细管电泳法(CE)

随着毛细管电泳技术的发展,其应用于农药分析的研究逐渐增多,与 HPLC 相比,毛细管电泳法的分离效率、检测灵敏度和自动化程度要高得多,且分析时间和费用较低。文献已有报道毛细管电泳用于土壤中 ng/g 水平的咪唑啉酮类除草剂及其代谢物的快速和定量分析。Hudan Safarpour 等^[16]利用毛细管电泳-电喷射离子化质谱(CE-MS)对环境水样中的甲氧咪草烟进行了定性定量测定,这种方法的定量限是 200 ng/L,检测限是 20 ng/L。还有报道用反相胶束电动色谱同时测定赤小豆中的甲氧咪草烟及其 2 种极性代谢物^[16]。此外,毛细管电泳对手性化合物的分离有很高的效率,比 GC 和 HPLC 的费用低,是理想的手性分离技术。Kumar V. Penmetsa 等^[17]用环糊精-毛细管区带电泳成功地分离了咪唑啉酮酸和咪草酸酯的对映异构体和同分异构体。因此采用毛细管电泳测定土壤中的咪唑啉酮类除草剂具有很好的应用前景。

2.2.3 免疫分析法(IA)

免疫分析法是一种以抗体作为生物化学检测器对化合物、酶或蛋白质等物质进行定性和定量分析的技术,是基于抗原抗异性识别和结合反应为基础的分析方法。免疫法用于现行方法难分析的农药,具有特异性强、灵敏度高(检测极限可达 1 ~ 1000 ng/mL)、方便快捷、分析容量大、检测成本低、安全可靠、容易实现自动化等优点。该技术开发的产品——检测试剂盒,可广泛应用于现场样品和大量样品的快速检测^[8]。免疫分析技术是农药传统分析方法的一种有效的替代和补充,Myoyong Lee 等^[18]利用毛细管柱流动注射脂质体免疫分析方法定量测定了咪唑乙烟酸,其在三羟甲基氨基甲烷缓冲盐溶液中的校正曲线的工作范围是 0.1 ~ 100 ng/mL,在 1 和 100 ng/mL 之间,自来水和池水的加标水样的回收率是 93% ~ 114%,样品只需要过滤一下,检测时间少于 10 min。可见,免疫法灵敏度高、样品不需要纯化、简单、快速、经济,而且回收率高于常规的液相分析。已经开发的除草剂的免疫分析法多用于水样的测定,土壤中除草剂的免疫测定是今后的重要研究方向。

3 咪唑啉酮类除草剂在土壤中的归趋研究

3.1 在土壤中的吸附与脱附

吸附是影响土壤中除草剂持久性的最重要的过程,吸附控制着除草剂对靶植物、土壤微生物的有效性以及在土壤剖面的移动。研究表明,影响咪唑啉酮类除草剂吸附的因素有土壤中的有机质(OM)、腐殖质(HM)、粘土含量^[19-21]和 pH^[22,23]等。该类

除草剂在土壤中可能存在 3 种形式的吸附机理,其中分子型的通过物理结合机理吸附到 HM、OM 和粘土表面,阴离子型的被这些组分排斥很可能是通过离子键吸附到金属水合氧化物的带正电荷的部位上,在低 pH 下或在酸性物质的表面形成的阳离子型通过阳离子交换力结合^[24]。Jerome B. Weber 等^[24]研究了¹⁴C-咪唑啉酮酸在 4 种土壤中的吸附受土壤特性的影响,研究得到咪唑啉酮酸在其研究的 4 种土壤中的吸附作用随着 HM、OM 和粘土含量的增加和 pH 的降低而增大;咪唑啉酮酸对其中一种名为 Cape Fear 的砂质粘壤土的吸附随着除草剂浓度的增加、悬浮液 pH 的降低而增加,最大吸附出现在 $pK_{a1} = (1.8)$ 附近,当 pH 值低于 pK_{a1} 时,咪唑啉酮酸的吸附随着水合氢离子(H_3O^+)的增加而降低,并且竞争吸附点,pH 水平在 pK_{a1} 附近时 NaCl 溶液比水更有利于咪唑啉酮酸的脱附。Bresnahan 等^[25]报道了土壤 pH-吸附对甲氧咪草烟的短期和长期残留的作用,得出甲氧咪草烟的吸附等温线符合 Freundlich 方程($r^2 > 0.96$),对土壤 pH 5.4 ~ 7.7 的大部分情况下是线性的,表明吸附作用和浓度无关,除草剂在 pH 高的土壤中比 pH 低的土壤中吸附量少;脱附等温线也符合 Freundlich 方程($r^2 > 0.90$),在脱附过程中还观察到了滞后现象,而且土壤 pH 越高脱附滞后现象越明显,这表明尽管在高 pH 时,甲氧咪草烟吸附量较少,但其不易脱附,相反在低 pH 下,甲氧咪草烟更易脱附。王琪全等^[26]选用 8 种理化性质各异的土壤进行了吸附、脱附试验,对吸附平衡时间、温度、pH 值的影响进行了研究,并对吸附、脱附和土壤理化特性的相关性进行了分析,研究结果表明,灭草烟在土壤上的吸附量随温度升高而增大,随土壤 pH 值下降而上升;灭草烟在土壤上吸附的 K_{af} 值与土壤的(H^+)(OM%)呈正相关;灭草烟被土壤吸附后,脱附的难易程度主要取决于土壤有机质含量,土壤有机质含量愈高,灭草烟愈难以脱附。

3.2 光解、水解及微生物降解

在需氧条件下的微生物降解是咪唑啉酮类除草剂的主要降解机制^[5,27]。然而当其应用于土壤表层时,光降解也是重要的降解途径^[28]。有研究指出^[29-31]咪唑啉酮酸在土壤中的降解主要是由微生物代谢引起的。它在水溶液中很快就进行光降解(光水解),但在土壤中几乎没有光解,也不容易进行水解等其他的化学过程,并且在厌氧土壤条件下它的降解速率减小。咪唑啉酮酸的微生物降解速率随着土壤湿度(在 5% ~ 75% 的田间持水量之间)和土壤温度(从 15°C 到 30°C)的增加而增大。另外,当除草剂和土壤结合不牢固时,微生物降解加快。对于

咪唑乙烟酸来说^[32],实验室数据显示水解不是其在环境中消散的主要途径,在用除草剂处理过的池水或缓冲水溶液中 30 d 后无降解发生。在水介质中测试结果显示,光转化是咪唑乙烟酸在水环境中消散的潜在的主要途径,暴露于模拟太阳光下时,该化合物在蒸馏水和缓冲溶液中进行光转化,半衰期如下:在蒸馏水中 45.8 h,在 pH 5、7 和 9 的缓冲溶液中分别为 43.5、49.8 和 56.8 h;在砂质壤土测得的结果显示土壤表层的光降解不是咪唑乙烟酸在陆地环境中消散的主要途径,当处理过的土壤连续的暴露于模拟太阳光下 28 d 时,只有 13% 的化合物进行了光转化,半衰期外推为 126 d。生物转化研究显示咪唑乙烟酸在土壤中是持久性的,在实验室中有氧土壤条件下(22℃),该化合物不易进行光转化(半衰期是 29~37 月);在厌氧条件下,咪唑乙烟酸在土壤中没有任何程度的转化。

3.3 在土壤中的迁移及残留动态

进入土壤中的除草剂,在被土壤固相吸附的同时,还通过气体挥发和随水淋溶而在土壤中扩散移动,从而被生物吸收或移出土体之外而导致大气、水体和生物污染^[33]。除草剂在土壤中的迁移取决于其本身的物理化学性质、土壤类型和气候条件。咪唑啉酮类除草剂应用于土壤后不易挥发,其挥发性随温度和土壤水分的增加,粘土和有机质含量的降低而增强^[34]。Regitano 等^[35]报道了热带土壤中咪唑啉酮类的迁移率和土壤湿度以及降水时间的关系,得出在潮湿的砂土中淋洗作用大,粘土中淋洗作用较小;对 2 种土壤来说,当除草剂施加后很快就发生降水时,咪唑啉酮的迁移较大;因此土壤湿度和降水时间影响咪唑啉酮的迁移率,但程度大小依赖于土壤类型。Jerome B. Weber 等^[24]对¹⁴C-咪唑啉酮类在 4 种土壤中的迁移率受土壤特性影响的研究表明:其在土壤中的迁移指数和土壤 OM ($r = -0.95$)、HM ($r = -0.74$)、粘土含量 ($r = -0.87$)、阳离子交换容量(CEC) ($r = -0.98$)及孔隙体积 ($r = -0.78$)负相关,和土壤容积密度 ($r = 0.81$)正相关。美国科学家在 8 种不同类型的土壤中用薄层色谱对放射性同位素标记的咪唑乙烟酸的迁移率进行测定的研究表明,除了在威斯康星州的一种粉砂壤土中咪唑乙烟酸是中度迁移外(等级为 3),在其他所有土壤中都是高迁移性(等级 4 或 5)的^[32]。尽管实验室数据显示咪唑乙烟酸的淋溶具有很高的潜力并因此污染地下水,但在田地里该除草剂的淋溶是轻微的,在所有的田间研究中发现大部分除草剂存在于 0~15 cm 的土壤层中^[32]。

4 展 望

在我国咪唑啉酮类除草剂广泛用于大豆田等杂草的去除,其在土壤及植物中的残留已经引起人们的重视,对此,今后应加强以下几方面的工作:

(1) 研究用于该类除草剂的简单、快速、灵敏、可靠的检测方法。目前的方法多种多样,但都比较复杂,特别是样品的前处理步骤繁琐、费时费力、溶剂消耗量大,迫切需要简单快速的测定方法,为进一步研究除草剂的残留动态、归趋及对生态环境的影响提供有效的工具。

(2) 在土壤中的迁移率和生物有效性。研究土壤类型、气候条件和灌溉时间的选择对除草剂的扩散和有效性的影响,可用于指导用药以达到最大利用率,尽可能避免残留带来的危害。

(3) 在土壤中的降解机制研究。虽然国内外在这方面的研究较多,但对其降解受土壤理化性质等因素的影响没有统一的结论,对微生物降解特别是优势降解菌的研究也较少。了解咪唑啉酮类除草剂在土壤中的降解机制可以通过改变土壤的一些特性或施加优势降解菌来加速其降解,减少其长期残留对后茬作物或非靶生物的药害。

(4) 咪唑啉酮类除草剂进入土壤后对土壤生物的影响,被植物吸收后对农产品安全以及进入食物链后对人体健康的影响等方面都需要进一步深入的研究。

参 考 文 献

- [1] Hassan Sabik. Multiresidue methods using solid-phase extraction techniques for monitoring priority pesticides, including triazines and degradation products, in ground and surface waters. *Journal of Chromatography A*, **2000**, 885 (1~2): 217~236
- [2] Pinto G. M. F., Jar dim I. C. S. F. Mobile phase optimization for the separation of some herbicide samples using HPLC. *Journal of Liquid Chromatography Related Technologies*, **2000**, 23(9): 1353~1363
- [3] 刘长令主编. 世界农药大全(除草剂卷). 北京: 化学工业出版社, **2002**
- [4] 李海屏. 20 世纪 80 年代以来世界除草剂新品种开发进展及特点. *农药科学与管理*, **2004**, 25(4): 28~31
- [5] Mangels G. Behavior of the imidazolinone herbicides in soil. *The Imidazolinone Herbicides*. Boca Raton, FL. CRC Press, Inc., **1991**
- [6] 黄春艳, 陈铁保, 王宇, 等. 咪唑啉酮类除草剂对后茬作物安全性研究初报. *农药学报*, **2001**, 3(2): 29~34
- [7] 申继忠. 农药残留分析样品前处理新技术简介. *农药科学与管理*, **1998**, (4): 8~10
- [8] 黄德智, 岳永德, 汤锋. 农药残留分析的研究进展. 安

- 徽农业科学, **2002**, 30(4):523 ~ 526, 541
- [9] Steven J. Stout, Adrian R. daCunha, Darryl G. Allardice. Microwave-assisted extraction coupled with gas chromatography/electron capture negative chemical ionization mass spectrometry for the simplified determination of imidazolinone herbicides in soil at the ppb level. *Analytical Chemistry*, **1996**, 68:653 ~ 658
- [10] Pace P. F., Senseman S. A., Ketchersid M. L., et al. Supercritical fluid extraction and solid-phase extraction of AC 263, 222 and imazethapyr from three Texas soils. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **1999**, 37: 440 ~ 444
- [11] Marisol Rodriguez, David B. Orescan. Confirmation and quantitation of selected sulfonylurea, imidazolinone, and sulfonamide herbicides in surface water using electrospray LC/MS. *Analytical Chemistry*, **1998**, 70(13): 2710 ~ 2717
- [12] 云子厚, 欧阳津, 张晓彤. 液相色谱检测方法(第2版). 北京: 化学工业出版社, **2005**
- [13] Aldo Laganù, Giovanna Fago, Alessondra Marino, et al. Liquid chromatography mass spectrometry tandem for multiresidue determination of selected post-emergence herbicides after soil column extraction. *Analytica Chimica Acta*, **2000**, 415:41 ~ 56
- [14] Aldo Laganù, Giovanna Fago, Aldo Marino. Simultaneous determination of imidazolinone herbicides from soil and natural waters using soil column extraction and off-line solid-phase extraction followed by liquid chromatography with UV detection or liquid chromatography/electrospray mass spectroscopy. *Analytical Chemistry*, **1998**, 70(1): 121 ~ 130
- [15] Giuseppe D'Ascenzo, Alessandra Gentili, Stefano Marchese, et al. Optimization of high performance liquid chromatography/mass spectrometry apparatus for determination of imidazolinone herbicides in soil at levels of a few ppb. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **1998**, 12:1359 ~ 1365
- [16] Hudan Safarpour, Reza Asiaie, Stanley Katz. Quantitative analysis of imazamox herbicide in environmental water samples by capillary electrophoresis electrospray ionization mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, **2004**, 1036:217 ~ 222
- [17] Kumar V. Penmetsa, Ross B. Leidy, Damian Shea. Enantiomeric and isomeric separation of herbicides using cyclodextrin-modified capillary zone electrophoresis. *Journal of Chromatography A*, **1997**, 790: 225 ~ 234
- [18] Myoyong Lee, Richard A. Durst. Determination of imazethapyr using capillary column flow injection liposome immunoanalysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **1996**, 44:4032 ~ 4036
- [19] Basham G. T., Lavy T. L., Oliver L. R., et al. Imazaquin persistence and mobility in three Arkansas soils. *Weed Science*, **1987**, 35: 576 ~ 582
- [20] Aálvarez/Benedy' J. Carto'n A. Ferna'ndez J. C. Sorption of tribenuron-methyl, chlorsulfuron, and imazamethabenz-methyl by soils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **1998**, 46:2840 ~ 2844
- [21] Ne'gre M., Schulten H. R., Gennari M., et al. Interaction of imidazolinone herbicides with soil humic acids. Experimental results and molecular modeling. *Journal of Environmental Science and Health*, **2001**, B36:107 ~ 125
- [22] Renner K. A., Meggitt W. F., Penner D. Effect of soil pH on imazaquin and imazethapyr adsorption to soil and phytotoxicity to corn (*Zea mays*). *Weed Science*, **1988**, 36:78 ~ 83
- [23] Loux M. M., Reese K. D. Effect of soil pH on adsorption and persistence of imazaquin. *Weed Science*, **1992**, 40:490 ~ 496
- [24] Jerome B. Weber, Mckinnon E. Jane, Swain L. R. Sorption and Mobility of ¹⁴C-labeled imazaquin and metolachlor in four soils as influenced by soil properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **2003**, 51: 5752 ~ 5759
- [25] Bresnahan G., Dexter A., Koskinen W., et al. Influence of soil pH-sorption interactions on the carry-over of fresh and aged soil residues of imazamox. *European Weed Research Society. Weed Research*, **2002**, 42:45 ~ 51
- [26] 王琪全, 刘维屏. 除草剂灭草烟在土壤中的吸附、脱附. *中国环境科学*, **1998**, 18(4): 314 ~ 318
- [27] Cantwell J. R., Liebl R. A., Slife F. W. Biodegradation characteristics of imazaquin and imazethapyr. *Weed Science*, **1989**, 37:815 ~ 819
- [28] Curran W. S., Loux M. M., Liebl R. A., et al. Photolysis of imidazolinone herbicides in aqueous solution and on soil. *Weed Science*, **1992**, 40:143 ~ 148
- [29] Mallipudi N. M., Stout S. J., daCunha A. R., et al. Photolysis of imazapyr (AC243997) herbicide in aqueous media. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **1991**, 39(2):412 ~ 417
- [30] Mangels G. Behavior of the imidazolinone herbicides in the aquatic environment. Boca Raton, FL. CRC Press, **1991**
- [31] WSSA. Herbicide Handbook. Champaign, Illinois: Weed Society of America, **1994**
- [32] Decision Document: Imazethapyr. Pest Management Regulatory Agency, **1994**
- [33] 邱小香. 化学农药在土壤中的动态分析. 渭南师范学院学报, **2002**, 17(增刊):86 ~ 87
- [34] Helling C. S., Kearney P. C., Alexander M. Behavior of pesticides in soil. *Advances in Agronomy*, **1971**, 23:147 ~ 240
- [35] Regitano J. B., Prata F., Rocha W. S. D., et al. Imazaquin mobility in tropical soils in relation to soil moisture and rainfall timing. *Weed Research*, **2002**, 42:271 ~ 279