

· 研究论文 ·

微生物及环境因子对土壤中乙草胺持效性的影响

朱九生, 乔雄梧*, 王 静, 秦 曙

(山西省农药重点实验室, 山西省农业科学院 植物保护研究所, 山西 太原 030031)

摘 要: 以稗草为生物测定材料, 研究了土壤微生物及环境因子对乙草胺持效性的影响。结果显示: 在相同温度、湿度和光照条件下, 相同浓度的乙草胺在灭菌土壤中的持效期比在非灭菌土壤中的持效期长; 在中性偏碱的华北褐土中的持效期比在中性偏酸的东北黑土和湖南红土中的短; 在试验湿度和温度范围内, 乙草胺在非灭菌土壤中的持效期随土壤湿度或温度的提高而变短。与黑暗处理相比, 光照可延长土壤中乙草胺的持效期。对 5 种试验因子的影响程度进行综合分析可知, 土壤微生物是影响乙草胺持效性的主要因素, 有益于土壤中微生物生长的环境因素对土壤中乙草胺的持效期有降低作用。可以预测, 通过栽培耕作等措施改变环境因子可以起到对农药的持效期进行人为调控的作用。

关键词: 乙草胺; 持效性; 微生物降解; 环境因子; 土壤

中图分类号: S482.4

文献标识码: A

文章编号: 1008-7303(2004)04-0067-06

Persistence of Acetochlor as Influenced by Soil Microorganism and Environmental Factors

ZHU Jiu-sheng, QIAO Xiong-wu*, WANG Jing, QIN Shu

(Shanxi Key Laboratory of Pesticide Science, Institute of Plant Protection,
Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China)

Abstract: Effects of microorganism and environmental factors on persistence of acetochlor in soils were studied by bioassay using *Echinochloa crusgalli*. The results indicated that persistence of acetochlor was much shorter in non-sterilized soil than that in sterilized soil under the same conditions of acetochlor concentrations, soil moisture, temperature and light. The period of persistence of acetochlor was shorter in alkaline soil such as cinnamon soil collected from North China than that in acidic soil such as terra nera soil collected from Northeast China and terra rossa soil collected from South China. Within the range of soil moisture and temperature tested, the persistence decreased with increasing of soil moisture or temperature. Longer persistence was observed in light than that in dark. It was considered that microorganism was a key factor and could significantly shorten the persistence of acetochlor in soil, while environmental factors benefiting microbe growth could reduce the persistence of acetochlor. It may be possible to regulate persistence of acetochlor by controlling cultural measures and improving environmental condition.

Key words: acetochlor; persistence; microbial degradation; environmental factors; soil

收稿日期: 2004-05-11; 修回日期: 2004-07-02

作者简介: 朱九生(1963-), 男, 山西新绛人, 硕士, 副研究员, 主要从事农药残留分析和农药应用技术研究

* 通讯作者; 联系电话: 0351-7127683; E-mail: nongyao.shi@163.net

基金项目: 山西省自然科学基金项目(20001092)资助

农药使用后一定时间内对靶标的有效性称为农药的持效性,它是农药有效控制有害生物的基本特征之一。依靠农药持续有效的作用可在预定的时间和使用剂量的前提下有效地控制靶标生物的为害,达到保产增收和保护环境的目的。合理的持效期是农药应用的重要基础,但持效期太长无疑会对后茬作物和环境构成威胁。我国是一个农业大国,各地常见或较常见的农田杂草有562种(包括变种),隶属73科,309属^[1],其危害一直是阻碍农业生产快速、持续发展的重要因素。21世纪的农业是高度集约化农业,农田杂草治理仍将离不开除草剂,但对化学除草剂的开发、应用提出了更高的要求。因此,通过研究农田生态环境对除草剂的持效性及安全性的影响,寻求调控农药持效性的有效措施和方法,将对指导除草剂的科学合理使用和防止土壤污染具有重要意义。

乙草胺属于酰胺类除草剂,土壤处理能有效防

除一年生禾本科杂草和部分阔叶杂草。可以认为土壤是乙草胺施用后的主要归宿之一,土壤环境关系到乙草胺的持效性及其除草效果的好坏。目前有关乙草胺在环境中的行为研究较多^[2~6],但对其在土壤中的持效性及影响因素研究较少。笔者测定了不同土壤条件下乙草胺防治稗草的持效性,旨在明确土壤微生物以及环境因子对乙草胺活性的影响,探讨农业措施对持效期调控的可行性。

1 材料与方 法

1.1 供试农药

50%的乙草胺(acetochlor)乳油(河北省张家口市宣化农药厂产品)。

1.2 土壤样品

供试土壤样品分别为华北褐土、东北黑土和湖南红土,采样深度为0~20 cm耕作层土壤,经自然风干,过2 mm筛备用。土壤理化性质见表1。

Table 1 The physicochemical properties of tested soils

Soil samples	No.	Types of soil	pH	Organic matter (%)
Cinnamon from North China	1 [#]	Loam	8.3	2.3
Terra nera from Northeast China	2 [#]	Clay	6.1	2.3
Terra rossa from South China	3 [#]	Loam	5.3	1.4

1.3 供试杂草

稗草 *Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv. 种子由河北省农林科学院提供,发芽率为80%。试验前2~3 d取稗草种子适量,分别置于垫有滤纸的培养皿中,加少量蒸馏水,置于30℃培养箱中催芽48~72 h,露白后的种子放入8℃左右的冰箱中保存待用。

1.4 试验处理

1.4.1 土壤微生物对乙草胺防除稗草持效性的影响 土壤为华北褐土,分为灭菌和非灭菌处理两组,土壤中乙草胺的添加浓度为1.25、2.5和5.0 mg/kg,土壤相对含水量(质量分数,下同)为20%。土壤添加农药后,置于25℃、黑暗培养箱中培养,并分别在0、1、3、7、14、21、35、49、70、91、112、133 d取土壤样品放入-20℃低温冰箱中保存,待按试验计划全部移至冰箱后,再放入温室中统一播种稗草种子进行生物测定。培养土需间隔2~3 d加适量水以保持土壤湿度不变。未灭菌土壤需在添加农药前7 d进行预培养,灭菌土壤需在121℃、1.1 kg/cm²压力下,间歇灭菌3次,每次30 min;灭菌土壤的制备及其他操作均在无菌室内进行;试验分别设灭菌与非灭菌的不施药对照,每处理重复3次(下同)。

1.4.2 土壤类型对乙草胺防除稗草持效性的影响 土壤分华北褐土、东北黑土和湖南红土3种类型,每种土壤又分灭菌和非灭菌处理两组。土壤中乙草胺的添加浓度为2.5 mg/kg,土壤相对含水量为20%。土壤制备好后,置于25℃、黑暗培养箱中培养,取样、样品保存和土壤湿度保持等均按1.4.1所述方法进行。各土壤类型均设灭菌与非灭菌的不施药对照。

1.4.3 土壤湿度对乙草胺防除稗草持效性的影响 土壤为华北褐土,分灭菌和非灭菌处理两组,土壤相对含水量设为13%、20%、27% 3个梯度,土壤中乙草胺的添加浓度为2.5 mg/kg。土壤添加农药后,置于25℃、黑暗培养箱中培养,取样、样品保存和土壤湿度保持等均按1.4.1所述进行。各湿度均设灭菌与非灭菌的不施药对照。

1.4.4 环境温度对乙草胺防除稗草持效性的影响 土壤为华北褐土,分灭菌和非灭菌处理两组,土壤相对含水量20%,土壤中乙草胺的添加浓度为2.5 mg/kg。土壤添加农药后,分别置于20、25和30℃黑暗培养箱中培养,取样、样品保存和土壤湿度保持等均按1.4.1所述方法进行。各温度均设灭菌

与非灭菌的不施药对照。

1.4.5 光照强度对乙草胺防除稗草持效性的影响 土壤为华北褐土,分灭菌和非灭菌处理两组,土壤相对含水量 20%,土壤中乙草胺的添加浓度为 2.5 mg/kg。土壤添加农药后,分别置于黑暗(3 000 lx (人工气候箱)、自然光照(置于室内装有空调的窗台上,时间为3月26~8月6日)3种不同光照环境中培养,温度控制在 25℃,取样、样品保存和土壤湿度保持等均按 1.4.1 所述进行。每种光照强度均设灭菌与非灭菌的不施药对照。

1.5 生测方法

在 6 cm × 6 cm 的塑料钵中加解冻后的处理土

壤 85 g, 播种已露白的稗草种子 10 粒, 播后覆土(同一处理解冻后的土壤) 35 g, 用药勺将土壤稍压实, 称重并记录。将塑料钵放入塑料筐中, 用地膜封盖, 并将其置于 25℃、相对湿度 75%、光照/黑暗=12 h/12 h 的养虫室中培养。3 d 后取掉地膜, 随后间隔 1~2 d 取出塑料钵称取各钵重量, 补足失去的水分, 保持土壤湿度基本恒定。在播种后 8 d, 用剪刀剪下杂草地上部, 称其鲜重。根据下列公式(1)计算乙草胺对稗草的抑制率。

1.6 数据处理

用 SPSS 软件对拌药后取样天数与相应的抑制率作回归分析, 建立数据回归模型, 并对回归方程进

$$\text{抑制率}(\%) = \frac{\text{对照杂草鲜重} - \text{处理杂草鲜重}}{\text{对照杂草鲜重}} \times 100 \quad (1)$$

行 F 检验, 同时求出抑制率达 70% 时的天数 (IT_{70}), 以 IT_{70} 来评价各处理的持效性^[7]。

2 结果与分析

2.1 土壤微生物对乙草胺防除稗草持效性的影响

以添加农药后取样时间 (x) 为自变量, 鲜重抑制率 (y) 为因变量对生物测定结果进行回归分析, 结果见表 2。可以看出, 鲜重抑制率与取样时间呈很

好的线性关系, 回归模型为: $y = a + bx$ (下同)。在非灭菌土壤条件下, 乙草胺添加浓度为 1.25、2.50、5.00 mg/kg 处理的持效期 (IT_{70}) 分别为 9.3、13.0 和 22.9 d; 而在灭菌土壤条件下, 3 种添加浓度处理的持效期分别为 52.8、86.1 和 116.5 d。生物测定结果表明: 在灭菌土壤中, 乙草胺防除稗草的持效期较长; 而在非灭菌土壤中, 持效期较短。说明土壤微生物的存在能降低土壤中乙草胺防除稗草的持效性。

Table 2 Influence of microorganism on persistence of acetochlor in soil

Soil treatment	Concentration /mg · kg ⁻¹	Regression equation (y =)	r	F test	IT_{70}/d	95% CL /d
Unsterilization	1.25	92.67 - 2.443 x	-0.9454	42.1	9.3	5.0~14.0
	2.50	95.50 - 1.965 x	-0.9796	142.6	13.0	9.7~16.5
	5.00	107.3 - 1.630 x	-0.9673	87.2	22.9	18.0~27.0
Sterilization	1.25	106.5 - 0.691 x	-0.9295	57.2	52.8	39.5~61.9
	2.50	100.7 - 0.357 x	-0.9646	120.3	86.1	70.7~94.8
	5.00	103.2 - 0.285 x	-0.8847	28.8	116.5	66.0~129.2

对不同处理的土壤中乙草胺的残留量进行分析, 结果表明: 在非灭菌土壤中, 3 种添加浓度的半衰期为 2.8~5.1 d; 而在灭菌土壤中, 其半衰期为 20.0~25.3 d。说明微生物的存在能加速土壤中乙草胺的降解, 缩短其在土壤中的滞留时间, 在除草活性上表现为持效性降低。

2.2 土壤类型对乙草胺防除稗草持效性的影响

测定结果见表 3。结果显示, 乙草胺在 1[#] 土壤中持效期较短, 在 2[#] 和 3[#] 土壤中持效期较长。1[#] 土壤为华北褐土, 土壤中性偏碱; 2[#] 和 3[#] 土壤分别为东北黑土和湖南红土, 土壤中性偏酸。可见, 乙草胺在

酸性土壤中的持效期长于在碱性土壤中的持效期, 表明土壤类型是影响乙草胺持效性的一个重要因素。

对不同类型土壤中乙草胺的残留量进行分析, 结果表明, 乙草胺在 1[#]、2[#] 和 3[#] 土壤中的半衰期分别为 4.2、10.7 和 6.5 d。说明乙草胺在 1[#] 土壤中的降解速度较快, 在 2[#] 和 3[#] 土壤中的降解速度较慢。所以, 在除草活性上表现为在 2[#] 和 3[#] 土壤中的持效期长于在 1[#] 土壤中的持效期。

乙草胺在不同类型土壤中的持效性差异除与土壤的酸碱度有关外, 也可能间接地与土壤有机质含

Table 3 Influence of soil types on persistence of acetochlor

Soil treatment	No.	Regression equation (y =)	r	F test	IT ₇₀ /d	95% CL /d
Unsterilization	1 [#]	89.21 - 1.669x	-0.8961	28.5	11.5	4.6~21.7
	2 [#]	96.89 - 1.022x	-0.9612	84.9	26.3	20.6~31.0
	3 [#]	104.8 - 1.770x	-0.9659	97.4	19.7	15.0~24.4
Sterilization	1 [#]	99.56 - 0.527x	-0.8357	23.2	56.1	34.8~68.4
	2 [#]	96.81 - 0.292x	-0.9087	47.4	91.8	64.8~101.6
	3 [#]	104.5 - 0.358x	-0.9261	60.3	96.4	71.0~106.1

量有关。因为土壤pH值和有机质含量决定了微生物的生长和繁殖状况(生物降解),同时对乙草胺在土壤中可能发生的水解也有影响。

2.3 土壤湿度对乙草胺防除稗草持效性的影响

测定结果见表4。结果表明:在相对含水量为13%~27%的非灭菌土壤中,乙草胺的持效期随土壤湿度的增大而缩短;在灭菌土壤中,乙草胺在含水量为20%和27%的土壤中的持效期也比在含水量为13%土壤中的短。可见,不论在灭菌土壤中还是在非灭菌土壤中,湿度对乙草胺防除稗草的持效性均有一定的影响。

对不同湿度的非灭菌土壤中乙草胺的残留量进行分析,结果表明,乙草胺在相对含水量为13%、20%和27%的土壤中的半衰期分别为7.3、3.8和3.0d。说明随着湿度增大,土壤中乙草胺的降解速度加快,在土壤中的滞留时间缩短,所以在除草活性上表现为持效性降低。水作为微生物生长所必需的营养成分,是影响农药降解转化、进而影响农药持效性的一个重要因素。同时在土壤环境中,水分还参与水解反应,并与氧化还原电位、化合物的溶解等密切相关,这些对农药的持效性均有一定的影响。

Table 4 Influence of soil moisture on persistence of acetochlor in soil

Soil treatment	Relative water content (%)	Regression equation (y =)	r	F test	IT ₇₀ /d	95% CL /d
Unsterilization	13	106.4 - 2.100x	-0.9657	83.0	17.3	12.9~21.6
	20	95.50 - 1.965x	-0.9796	142.6	13.0	9.7~16.5
	27	91.69 - 2.120x	-0.9576	66.3	10.2	5.7~15.8
Sterilization	13	101.2 - 0.244x	-0.8891	37.7	128.0	82.7~138.6
	20	100.7 - 0.357x	-0.9646	120.3	86.1	70.7~94.8
	27	100.0 - 0.298x	-0.9246	58.9	100.7	74.3~110.9

2.4 环境温度对土壤中乙草胺防除稗草持效性的影响

测定结果见表5。可以看出,在20~25之间,乙草胺的持效期随温度的升高而缩短,且随着温度的升高,其缩短得更加显著。可见,不论灭菌土壤还是非灭菌土壤,温度对土壤中乙草胺的持效性均有显著的影响。即在一定的范围内,温度越高,乙草胺防除稗草的持效期越短,反之则长。

对不同温度下非灭菌土壤中乙草胺的残留量进行分析,结果表明,乙草胺在20、25和30下的半衰期分别为5.7、3.8和3.3d。说明随着温度升高,土壤

中乙草胺的降解速度加快,在土壤中的滞留时间变短,故在除草活性上表现为持效性降低。温度影响乙草胺在土壤中的持效性,其实质是适宜的温度加速了土壤中的微生物对乙草胺的生物降解和乙草胺的化学降解,从而缩短了乙草胺的持效期。

2.5 光照对土壤中乙草胺防除稗草持效性的影响

由表6可以看出,在非灭菌土壤中,乙草胺在黑暗、3000 lx和自然光照条件下对稗草的IT₇₀分别为13.0、18.7和20.3d;在灭菌土壤中,乙草胺在上述光照条件下对稗草的IT₇₀分别为86.1、85.3和102.2d。结果表明,在非灭菌土壤中,光照对乙草胺

Table 5 Influence of temperature on persistence of acetochlor in soil

Soil treatment	Temperature/ (± 1)	Regression equation ($y =$)	r	F test	IT_{70}/d	95% CL /d
Unsterilization	20	98 52- 1. 651 x	- 0. 996 2	783. 7	17. 3	15. 8~ 18. 7
	25	95 50- 1. 965 x	- 0. 979 6	142. 6	13. 0	9. 7~ 16. 5
	30	92 03- 4. 728 x	- 0. 963 9	52. 3	4. 7	1. 9~ 7. 7
Sterilization	20	99 32- 0. 247 x	- 0. 964 7	120. 7	118. 9	95. 8~ 130. 6
	25	100 7- 0. 357 x	- 0. 964 6	120. 3	86. 1	70. 7~ 94. 8
	30	96 54- 0. 930 x	- 0. 927 1	55. 0	28. 5	18. 9~ 40. 4

的持效性有一定的影响,即在较强的光照条件下,乙草胺的持效期比在黑暗中的长。

对不同光照下非灭菌土壤中乙草胺的残留量进行分析,结果表明,乙草胺在黑暗、3 000 lx 和自然光照下的半衰期分别为3 & 5. 2 和6 5 d。说明在黑

暗条件下,土壤中乙草胺的降解速度较快,在土壤中的滞留时间较短,故在防效上表现为持效性降低。在光照条件下,可能是土壤微生物生长或活性受到抑制,土表局部温湿度发生变化,乙草胺生物降解受阻,所以持效期较长。

Table 6 Influence of light on persistence of acetochlor in soil

Soil treatment	Light	Regression equation ($y =$)	r	F test	IT_{70}/d	95% CL /d
Unsterilization	Dark	95 50- 1. 965 x	- 0. 979 6	142. 6	13. 0	9. 7~ 16. 5
	3 000 lx	98 39- 1. 516 x	- 0. 960 4	83. 4	18. 7	13. 2~ 24. 8
	Sunlight	98 62- 1. 408 x	- 0. 983 1	202. 2	20. 3	16. 6~ 24. 2
Sterilization	Dark	100 7- 0. 357 x	- 0. 964 6	120. 3	86. 1	70. 7~ 94. 8
	3 000 lx	103 4- 0. 392 x	- 0. 908 3	47. 1	85. 3	61. 2~ 95. 3
	Sunlight	102 4- 0. 317 x	- 0. 928 2	63. 0	102. 2	76. 0~ 112. 5

3 讨论

施入土壤中的除草剂其持效性与其在土壤中的降解和残留有直接的关系,而除草剂的降解和残留受其本身的理化特性、土壤物理化学因素和土壤生物因素、施药浓度、施药次数、施药方法及气候条件等诸多因素的影响^[8,9]。已有研究表明,土壤中残留除草剂的消解或降解在很大程度上依赖于土壤生物,特别是土壤微生物对除草剂的降解^[10-13],因此土壤微生物量及其代谢活性的高低直接影响除草剂在土壤中的滞留时间,进而影响除草剂防治杂草的持效性。

本项研究表明,土壤微生物是影响土壤中乙草胺持效性的主要因素,即土壤中乙草胺的持效性与土壤微生物对其降解、转化有直接的关系。同时,对土壤微生物生长、繁殖及代谢活性有影响的环境因子也是影响土壤中乙草胺持效性的重要因素。在

4 种非生物试验因子中,温度和土壤类型是影响土壤中乙草胺持效性的主要环境因子,土壤湿度和光照强度是次要因子。

一般情况下,光照会增加农药的降解,缩短农药的持效期。但在本实验条件下,不论是持效性测定结果,还是残留分析结果,都说明自然光照对土壤中乙草胺没有降解作用。这是因为农药只有吸收适当波长的光能呈激发态分子后,才能进行光化学反应。太阳光的光谱较宽,但由于臭氧层的作用,到达地球表面最短波长为286.3 nm,而乙草胺的最大吸收光谱为194.0 nm^[4],因此对于到达地球表面的太阳光不能有效地吸收。其次土壤颗粒对光的吸收和传导可能产生阻碍、掩蔽效应,从而使乙草胺的光致降解受阻。所以光照是影响土壤中乙草胺持效性的次要因子。

自然界中微生物对农药的降解是一个诱导和适应的过程。农药的使用给农田生态系统中的微生物

提供了选择机会,诱使其逐渐产生降解该类农药的能力,宏观上的表现就是农药的持效性降低。一方面,生物降解对消除农药污染给环境带来的压力起到了积极的作用;另一方面,过快的生物降解又使得农药不能发挥应有的效力。以往一般认为,农药持效性降低是由于病、虫、草害产生抗药性所致,其实,农药的微生物降解也起着举足轻重的作用。美国学者研究发现,20世纪80年代克百威土壤处理效果越来越差,持效期越来越短的现象正是由于微生物对克百威的降解增强造成的^[14]。生产中,随着单一除草剂品种的连年使用,微生物对该除草剂的适应期消失,分解加快,持效期缩短^[15]。可见,农药的持效性与农药的生物降解关系密切。

农药的生物降解受生态环境因素的影响很大^[10],这就使人们通过改变环境因子促进或抑制土壤中相应微生物的生长,从而起到对农药的持效期进行人为调控的作用成为可能。如在土壤中人工接种能降解某种除草剂的微生物或改善土壤环境条件,如通过灌溉增加土壤湿度、通过地膜覆盖和浅耕等措施提高土壤温度、通过施肥丰富土壤营养条件等来激活土壤微生物,利用土壤微生物加速降解土壤中的除草剂,从而缩短除草剂的持效期或残效期,同时也可起到对污染土壤的生物修复作用^[16]。反之,也可根据实际需要,在不污染环境和对后茬作物不造成药害的前提下,向土壤中施入除草剂的微生物降解酶的抑制剂^[15]或通过栽培措施创造不利于微生物生长的环境条件,抑制微生物对除草剂的降解,延长除草剂在土壤中的持效期。

参考文献:

- [1] Editorial Committee of Farmland Weeds in China (《中国农田杂草原色图谱》编委会). Farmland Weeds in China—A Collection of Coloured Illustrative Plates (中国农田杂草原色图谱) [M]. Beijing (北京): China Agriculture Press (中国农业出版社), 1990
- [2] YU Jian-lei (于建垒), ZHAO De-you (赵德友), LIU Bing-hai (刘炳海). 乙草胺在大豆和土壤中的残留研究 [J]. *Pestic (农药)*, 1998, 37(1): 28-30
- [3] FENG Tao (冯涛), CAO Ai-hua (曹爱华), XU Guang-jun (徐光军), et al. 乙草胺在花生和土壤中的残留研究 [J]. *Peanut Sci Technol (花生科技)*, 2000, (3): 1-4
- [4] HUA Rimao (花日茂), YUE Yong-de (岳永德), FAN De-fang (樊德方). 乙草胺在水中的光化学降解 [J]. *Chin J Pestic Sci (农药学学报)*, 2000, 2(1): 71-74
- [5] ZHENG He-hui (郑和辉), YE Chang-ming (叶常明). 乙草胺和丁草胺在土壤中的移动性 [J]. *Environ Sci (环境科学)*, 2001, 22(5): 117-121
- [6] ZHANG Huiwen (张惠文), ZHANG Qian-ru (张倩茹), ZHOU Qixing (周启星), et al. 乙草胺及铜离子复合施用对黑土农田生态系统土著微生物的毒性效应 [J]. *J Agro-Environ Sci (农业环境科学学报)*, 2003, 22(2): 129-133
- [7] TU Le-ping (屠乐平). 除草剂土壤处理的有关名词概念浅见 [J]. *Pestic Sci Adm in (农药科学与管理)*, 1991, 12(2): 46-47
- [8] QIAO Xiong-wu (乔雄梧). 农药在土壤中的环境行为 [J]. *Pestic Sci Adm in (农药科学与管理)*, 1999, 20 (Suppl): 12-16
- [9] State Environmental Protection Administration of China (国家环保总局). 化学农药环境安全评价试验准则 [J]. *Pestic Sci Adm in (农药科学与管理)*, 1990, 11 (2): 1-5
- [10] WANG Hai-zhen (汪海珍), XU Jian-min (徐建民), XIE Zheng-miao (谢正苗), et al. 土壤环境中除草剂甲磺隆降解的研究 I——土壤性质的影响 [J]. *Chin J Applied Ecology (应用生态学报)*, 2003, 14(1): 79-84
- [11] QIAO Xiong-wu (乔雄梧), MA Li-ping (马利平), Hummel H E. 阿特拉津在土壤中的降解途径及其对持留性的影响 [J]. *Rural Eco-Environ (农村生态环境)*, 1995, 11(4): 5-8
- [12] WANG Jun (王军), ZHU Lu-sheng (朱鲁生), LIN Aijun (林爱军), et al. 二甲戊乐灵在土壤中的吸附及微生物降解 [J]. *J Agro-Environ Sci (农业环境科学学报)*, 2003, 22(4): 488-492
- [13] Cox L, Walker A, Welch S J. Evidence for the accelerated degradation of isoproturon in soils [J]. *Pestic Sci*, 1996, 48(3): 253-260
- [14] Shelton D R. Enhancement of carbofuran degradation by soil enrichment cultures, bacterial cultures and by synergistic interaction among bacterial cultures [J]. *Pestic Sci*, 1997, 49(2): 164-168
- [15] SU Shao-quan (苏少泉), SONG Shun-zu (宋顺祖). Chemical Control of Farmland Weeds in China (中国农田杂草化学防治) [M]. Beijing (北京): China Agriculture Press (中国农业出版社), 1996
- [16] WANG Hai-zhen (汪海珍), XU Jian-min (徐建民), XIE Zheng-miao (谢正苗). 甲磺隆污染土壤生物修复的初步探索 [J]. *Chin J Pestic Sci (农药学学报)*, 2003, 5(4): 53-58

(责任编辑: 金淑惠)