

# 甲草胺在水稻上的残留及消解动态

田发军<sup>1,2</sup>, 吴艳兵<sup>1\*</sup>, 刘新刚<sup>2</sup>, 董丰收<sup>2</sup>, 徐 军<sup>2</sup>, 吴小虎<sup>2</sup>, 郑永权<sup>2</sup>

(1. 河南科技学院, 新乡 453000; 2. 中国农业科学院植物保护研究所,  
农业部作物有害生物综合治理重点实验室, 北京 100193)

**摘要** 采用气相色谱电子捕获检测(GC-ECD)建立了水稻中除草剂甲草胺的残留分析方法。样品经乙酸乙酯提取, 乙二氨基-*N*-丙基硅烷(PSA)和石墨化炭黑(GCB)净化后采用 GC-ECD 检测。结果表明:在 0.01~1 mg/L 范围内甲草胺浓度与响应值线性关系良好, 相关系数( $r$ )为 0.998 8。当甲草胺在水稻植株、稻壳、糙米、田水和土壤中的添加水平为 0.01~0.5 mg/kg 时, 平均回收率为 79.5%~113.6%, 相对标准偏差(RSD)为 2.5%~12.7%。甲草胺的最低检出浓度为 0.01 mg/kg。采用该方法对甲草胺在田间水稻中的消解动态和最终残留进行了测定。甲草胺在稻田植株和田水样品中的消解均符合一级动力学方程。半衰期分别为 11.17~26.65 d 和 1.56~1.78 d, 属于易降解农药。

**关键词** 甲草胺; 水稻; 残留分析; 消解动态; 气相色谱电子捕获检测

**中图分类号:** S 482.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.0529-1542.2016.06.018

## Residue and degradation dynamics of alachlor in rice

Tian Fajun<sup>1,2</sup>, Wu Yanbing<sup>1</sup>, Liu Xingang<sup>2</sup>, Dong Fengshou<sup>2</sup>, Xu Jun<sup>2</sup>, Wu Xiaohu<sup>2</sup>, Zheng Yongquan<sup>2</sup>

(1. *Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453000, China*; 2. *Key Laboratory of Integrated Pest Management in Crops, Ministry of Agriculture, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China*)

**Abstract** A residue analytical method of alachlor in paddy was established by using gas chromatography equipped with an electron-capture detector (GC-ECD). The samples were extracted with ethyl acetate, purified with primary secondary amine (PSA) and graphitized carbon black (GCB), and analyzed by GC-ECD. The method revealed excellent linearity ( $r=0.998\ 8$ ) for alachlor in the range of 0.01–1 mg/L. The recoveries ranged from 79.5% to 113.6% for the target compound at three spiking levels from 0.01 to 0.5 mg/kg with relative standard deviations (RSD) of 2.5%–12.7% in all matrices. The limit of detection (LOD) was 0.01 mg/kg. The decline study of alachlor residue in rice plants and paddy water showed that the decline curves accorded with the first-order kinetics equation, and the half-life of alachlor was 11.17–26.65 d in rice plants and 1.56–1.78 d in paddy water, respectively. Alachlor is an easily degradable pesticide.

**Key words** alachlor; rice; residue; degradation dynamics; GC-ECD

甲草胺(alachlor)是美国孟山都公司研制生产的一种应用范围广、除草活性高的酰胺类除草剂,其通过被萌发杂草的芽鞘、幼芽吸收、抑制蛋白酶的活性,阻碍蛋白质的合成而发挥除草作用<sup>[1-2]</sup>。它是一种选择性芽前除草剂,能够有效防治大多数一年生的禾本科和某些双子叶杂草,主要用于防除水稻田稗草、莎草和部分一年生阔叶杂草<sup>[3-5]</sup>。泡腾颗粒剂作为新型固体制剂,能够在水田中发泡、崩解,并释放出含有有效成分的颗粒。借助扩散剂的作用,颗粒在水田

中分布均匀一致,达到杀灭靶标的目的,具有省工、省时、降低成本、提高药效的特点。但甲草胺的不恰当使用会对人畜造成一定的危害,因此,许多国家对其在农产品中的残留量都有严格的限量,大多数国家要求的最大残留限量(MRL)是 0.01 mg/kg,而中国规定甲草胺在糙米中的最大残留限量为 0.05 mg/kg。目前,国内还没有水稻上甲草胺残留的标准检测方法,因此研究甲草胺在植株和稻田水中的消解和残留动态等环境行为对评价甲草胺的生态环境风险具

收稿日期: 2015-12-21 修订日期: 2016-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(31371970)

\* 通信作者 E-mail: wybhist@126.com

有重要意义。

目前,对甲草胺残留物的检测主要采用色谱法。Hostetler 等采用高效液相色谱(HPLC)和高效液相色谱串联质谱(HPLC-MS)法测定了甲草胺在水中的残留<sup>[6]</sup>。Zang 等用液相色谱串联质谱(LC-MS)法测定了甲草胺及其代谢物在老鼠血浆和尿液中的残留<sup>[7]</sup>。Albanis 等采用固相萃取(SPE)净化、气相色谱(GC)的方法测定了地表水和地下水中甲草胺等多种农药及其代谢物的残留<sup>[8]</sup>。国内报道的甲草胺残留测定方法主要有气相色谱法、气相色谱-质谱法(GC-MS)和液相色谱-质谱法(LC-MS),这些方法多用于花生、大豆等样品中甲草胺残留的测定<sup>[9-14]</sup>。目前尚缺乏甲草胺在水稻上的残留分析的报道。此外文献中对甲草胺样品的前处理多使用固相萃取和液液萃取方法,很少有文献报道使用 QuEChERS 方法对样品进行前处理。QuEChERS 可节省大量有机溶剂,简化提取步骤,缩短样品提取时间和降低试验成本。因此,本文采用 QuEChERS 样品前处理和 GC-ECD 建立了一种简单、快速检测甲草胺在水稻植株、稻壳、糙米、土壤和水中的残留分析方法。并采用田间试验方法,探索甲草胺在稻田系统中的残留规律,可为指导水稻实际生产过程中甲草胺的科学合理使用,保证稻米安全生产,同时也为甲草胺在水稻田中的环境归趋和安全性评价提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

Agilent7890 型气相色谱仪(美国安捷伦科技公司);电子捕获检测器(ECD);XW-80A 漩涡混合器(美国 Scientific Industries 公司);TGL6-WS 台式快速离心机(长沙湘仪离心机仪器有限公司);KQ-500B 型超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司)。

农药标准品甲草胺纯度大于 99%,购于国家标准物质中心。31%甲草胺泡腾颗粒剂由哈尔滨富利生化科技发展有限公司提供。乙酸乙酯和丙酮均为分析纯,超纯水来自密理博超纯水仪;PSA 和 GCB 均购自天津博纳艾杰尔公司。

### 1.2 田间试验

#### 1.2.1 土壤类型

试验地点选在北京、安徽省潜山县和广西壮族自治区南宁市。试验田土壤类型:北京试验地为棕土,pH 7.4,有机质含量 1.7%;安徽潜山试验地为

砂壤土,pH 6.1,有机质含量 2.0%;广西南宁试验地为黏土,pH 5.9,有机质含量 1.7%。

#### 1.2.2 甲草胺在水稻中的消解动态

在供水水稻田中设置 3 个重复小区,小区长方形,每小区面积 30 m<sup>2</sup>,不少于 5 行水稻,各小区设保护行。于水稻移栽前 5~7 d(一年生杂草齐苗后)采用 31%甲草胺泡腾颗粒剂以制剂用量 105 g/667 m<sup>2</sup>(有效用量 489 g/hm<sup>2</sup>,为推荐最高剂量的 1.5 倍)施药 1 次。施药方式为撒施。分别于施药前、水稻移栽后 2 h、1、2、4、7、14、21 和 28 d 取水稻植株样品。另设清水空白对照。随机在试验小区内 6~12 个采集点采集 2 kg 生长正常、无病害的水稻植株切碎、混匀后用四分法留样 500 g,装入样品塑料袋中,贴好标签,贮藏于-20℃冰箱中。小区边行和每行距离两端 0.5 m 内不采样。

#### 1.2.3 甲草胺在稻田水中的消解动态

在上述水稻试验地块附近选择有代表性的水稻田设置不种水稻试验小区,小区面积 30 m<sup>2</sup>。灌水深度 4~6 cm。与甲草胺在水稻植株中消解动态试验同时施药 1 次,施药剂量为 105 g/667 m<sup>2</sup>(有效用量 489 g/hm<sup>2</sup>,为推荐最高剂量的 1.5 倍)。施药方式为兑水喷雾。分别于喷药前、喷药后 2 h、1、2、4、7、14、21 和 28 d 随机采集 5~10 个点水样品 2 000 mL,混匀后田水样品留样 500 mL,贮藏于-20℃冰箱中。另设清水空白对照。

#### 1.2.4 最终残留试验

设置低剂量和高剂量 2 个施药剂量。低剂量为制剂量 70 g/667 m<sup>2</sup>(有效用量 326 g/hm<sup>2</sup>);高剂量为制剂量 105 g/667 m<sup>2</sup>(有效用量 489 g/hm<sup>2</sup>)。每个处理设 3 个重复,于水稻移栽或播种前 5~7 d(一年生杂草齐苗后)施药 1 次,施药方式为撒施,施药时间分别为北京 2014 年 9 月 3 日,安徽 2014 年 7 月 23 日,广西 2014 年 6 月 9 日。另设清水空白对照,各处理间设保护带。采样时间分别为北京 2014 年 10 月 21 日,安徽为 2014 年 10 月 9 日,广西为 2014 年 8 月 5 日。于水稻收获期在试验小区内随机选取 6~12 个采样点分别采集水稻稻穗 2 kg、水稻植株 2 kg 和土壤 2 kg,混匀后采用四分法留样 500 g,装入样本容器中,贴好标签,贮藏于-20℃冰箱中。

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 样品提取

植株、稻壳和糙米样品:从试验田的空白区收集

的样品,准确称取植株 10 g、稻壳 10 g、糙米 10 g(精确至 0.01 g)于 50 mL 离心管中,植株样品中加入 10 mL 乙酸乙酯,稻壳和糙米样品中加入 10 mL 水和 10 mL 乙酸乙酯,振荡 10 min。然后在 4 000 r/min 下离心 5 min,取 1.5 mL 上清液,待净化。

土壤和稻田水样品:准确称取土壤 10 g、水 10 g(精确至 0.01 g)于 50 mL 离心管中,加入 10 mL 乙酸乙酯,振荡 10 min。然后在 4 000 r/min 下离心 5 min,取 1 mL 上清液,氮气吹干,加 1 mL 丙酮定容,0.22 μm 微膜过滤,待进样。

1.3.2 净化

水稻植株:取上清液加入到含有 50 mg PSA、75 mg GCB 和 150 mg 无水硫酸镁的 2 mL 离心管中,涡旋 1 min,在 5 000 r/min 离心 5 min,取 1 mL 上清液,氮气吹干,加 1 mL 丙酮定容,0.22 μm 微膜过滤,待进样。

糙米和稻壳:取上清液加入到含有 50 mg PSA、50 mg GCB 和 150 mg 无水硫酸镁的 2 mL 离心管中,涡旋 1 min,在 5 000 r/min 离心 5 min,取 1 mL 上清液,氮气吹干,加 1 mL 丙酮定容,0.22 μm 微膜过滤,待进样。

1.4 色谱检测条件

色谱柱:HP-5,0.25 mm×30 m×0.25 μm 石英毛细管柱;进样口温度为 280℃;检测器温度为 300℃;程序升温:初始温度 90℃,保持 1 min,以 30℃/min 升至 280℃,保持 8 min。载气(N<sub>2</sub>)流速为 1 mL/min,补偿气 30 mL/min,进样量 1 μL,不分流进样。

2 结果与讨论

2.1 标准曲线

用丙酮配制 100 mg/L 甲草胺标准溶液 100 mL,然后用丙酮将标准溶液稀释成 0.01、0.05、0.1、0.5、1 mg/L 标准工作液。在 1.4 色谱条件下进行测定,以质量浓度(mg/L)为横坐标,相应峰面积为纵坐标,制作标准曲线。其线性回归方程为  $y=83\,404x+181.04$ ,相关系数  $r=0.998\,8$ 。表明在 0.01~1.00 mg/L 的质量浓度范围内,浓度与响应值的线性关系良好。

2.2 方法的灵敏度

在 1.4 色谱检测条件下,甲草胺的相对保留时间为 7.8 min。仪器对甲草胺的最小检测量为  $1\times$

$10^{-5}\mu\text{g}$ 。甲草胺在水稻植株、土壤、稻田水、糙米和稻壳中的最低检出浓度为 0.01 mg/kg。

2.3 方法的准确度和精密度

分别在空白水稻植株、土壤、稻田水、糙米和稻壳样品中添加 3 种浓度的甲草胺标样,每个处理设置 5 个重复,测定不同基质中甲草胺的平均回收率。结果表明,甲草胺在水稻植株中的平均回收率为 96.1%~113.6%,RSD 为 2.5%~12.7%;在土壤中平均回收率为 88.0%~101.2%,RSD 为 4.0%~11.8%;在稻田水中的平均回收率为 79.5%~91.5%,RSD 为 3.7%~6.9%;在糙米中的平均回收率为 83.5%~98.8%,RSD 为 3.8%~10.2%;在稻壳中平均回收率为 86.6%~106.6%,RSD 为 3.3%~7.9%(表 1),能够满足甲草胺在水稻、土壤和稻田水中残留测定的要求。

表 1 甲草胺在水稻植株、稻壳、糙米、稻田水及土壤中的添加回收率(n=5)

Table 1 Recovery of alachlor in plant, hull, brown rice, paddy water and soil samples(n=5)

| 基质<br>Matrix       | 添加浓度/mg·kg <sup>-1</sup><br>Fortified<br>concentration | 回收率平均值/%<br>Average recovery | 相对标准<br>偏差/%<br>RSD |
|--------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| 植株 Plant           | 0.01                                                   | 113.6                        | 2.5                 |
|                    | 0.05                                                   | 96.1                         | 6.0                 |
|                    | 0.5                                                    | 99.5                         | 12.7                |
| 土壤 Soil            | 0.01                                                   | 101.2                        | 8.2                 |
|                    | 0.05                                                   | 94.6                         | 11.8                |
|                    | 0.5                                                    | 88.0                         | 4.0                 |
| 稻田水<br>Paddy water | 0.01                                                   | 91.5                         | 6.9                 |
|                    | 0.05                                                   | 79.5                         | 3.7                 |
|                    | 0.5                                                    | 90.1                         | 5.2                 |
| 糙米<br>Brown rice   | 0.01                                                   | 93.2                         | 10.2                |
|                    | 0.05                                                   | 98.8                         | 3.8                 |
|                    | 0.5                                                    | 83.5                         | 3.8                 |
| 稻壳<br>Rice hull    | 0.01                                                   | 86.6                         | 7.9                 |
|                    | 0.05                                                   | 106.6                        | 3.3                 |
|                    | 0.5                                                    | 92.5                         | 5.4                 |

2.4 方法的基质效应评价

检测系统对于一些农药可能存在基质效应。农药表现出基质抑制效应还是增强效应主要取决于目标农药在纯溶剂和基质中的响应值。基质效应会明显地影响方法的再现性和重现性。影响基质效应的主要因素有:前处理方法、基质类型、农药种类及浓度。基质效应采用农药在基质中线性方程的斜率和纯溶剂中线性方程的斜率的比值来评价,计算方法为:

基质效应(%) =  
[(基质斜率 / 溶剂斜率) - 1] × 100。

甲草胺在所有基质中的基质效应变化范围是-19.79~77.76(表2)。水稻植株和稻壳具有明显

的基质增强效应。然而土壤和稻田水具有一定的基质减弱效应。糙米的基质效应不明显。因此,本试验采用基质标准曲线来消除基质效应,以使甲草胺在水稻上的残留测定获得更精确的试验结果。

表 2 甲草胺的基质标准曲线和溶剂效应

Table 2 Comparison of matrix-matched calibration and solvent calibration at 0.01—1 mg/kg

| 基质<br>Matrix    | 线性方程<br>Regression equation | R <sup>2</sup> | 斜率比<br>Slope ratio (matrix/acetone) | 基质效应/%<br>Matrix effect |
|-----------------|-----------------------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------|
| 丙酮 Acetone      | y=83 404x+181.04            | 0.997 6        | —                                   | —                       |
| 植株 Plant        | y=148 262x+12 458           | 0.999 1        | 1.78                                | 77.76                   |
| 土壤 Soil         | y=66 899x+303.73            | 0.999 0        | 0.80                                | -19.79                  |
| 稻田水 Paddy water | y=60 524x+913.18            | 0.990 8        | 0.73                                | -27.43                  |
| 糙米 Brown rice   | y=82 475x+669.69            | 0.999 7        | 0.99                                | 1.11                    |
| 稻壳 Rice hull    | y=137 777x+3 907.1          | 0.986 2        | 1.65                                | 65.19                   |

2.5 甲草胺在样品中的消解动态

甲草胺在稻田水和水稻植株中的消解动态如图1所示。甲草胺在植株上的消解动态符合一级动力学方程:北京试验点为 $C=0.202\ 3e^{-0.045t}$ ,  $R^2=0.780\ 3$ ,半衰期为 $t_{1/2}=15.4\ d$ ;安徽潜山县试验点为 $C=0.220\ 9e^{-0.026t}$ ,  $R^2=0.771\ 0$ ,半衰期为 $t_{1/2}=26.65\ d$ ;广西南宁试验点为 $C=0.142\ 9e^{-0.062t}$ ,  $R^2=0.831\ 0$ ,半衰期为 $t_{1/2}=11.17\ d$ 。甲草胺在稻

田水中的消解动态符合一级动力学方程:北京试验点为 $C=0.102\ 3e^{-0.389t}$ ,  $R^2=0.609\ 7$ ,半衰期为 $t_{1/2}=1.78\ d$ ;安徽潜山县试验点为 $C=0.226\ 5e^{-0.442t}$ ,  $R^2=0.956\ 6$ ,半衰期为 $t_{1/2}=1.56\ d$ ;广西南宁试验点为 $C=0.243\ 2e^{-0.431t}$ ,  $R^2=0.956\ 1$ ,半衰期为 $t_{1/2}=1.61\ d$ ;根据一级动力学方程计算半衰期的结果表明,甲草胺在水稻植株和稻田水中属于易降解农药( $t_{1/2}<30\ d$ )。

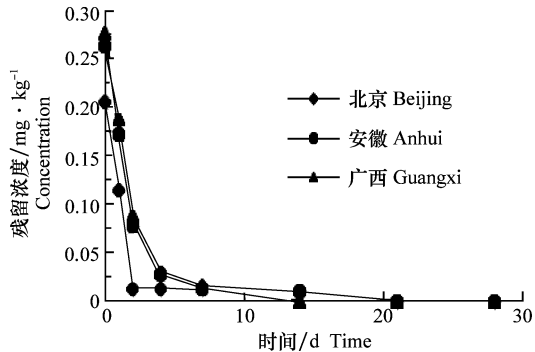
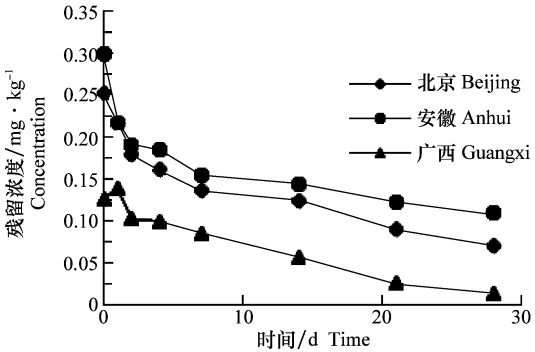


图 1 甲草胺在水稻植株(a)和稻田水(b)中的消解曲线

Fig. 1 Decline curves of alachlor in rice plants (a) and paddy water (b)

2.6 甲草胺在水稻中的最终残留量

最终残留量的检测对于甲草胺在水稻上使用的安全性评价具有重要的意义。31%甲草胺泡腾颗粒剂按制剂量70 g/667 m<sup>2</sup>(低剂量,有效剂量326 g/hm<sup>2</sup>)和105 g/667 m<sup>2</sup>(高剂量,有效剂量489 g/hm<sup>2</sup>)施药1次,于水稻收获期采样。样品中的甲草胺按照1.3和1.4的方法进行提取、净化及测定。结果表明:北京、安徽和广西三地,甲草胺在水稻糙米和稻壳中均未检出残留;在水稻土壤中的最终残留量分别为0.012、0.013、0.012 mg/kg,在水稻植株中的最终残留量分

别为0.048、0.047、0.042 mg/kg,显著高于土壤中残留量,但也较低。根据我国对甲草胺在糙米中的MRL值(0.05 mg/kg)的规定,31%甲草胺泡腾颗粒剂在有效剂量326 g/hm<sup>2</sup>和489 g/hm<sup>2</sup>,施药1次的情况下,以收获期为安全间隔期,完全满足对水稻最大残留限量的要求。

3 结论

本研究首次建立了甲草胺在水稻植株、糙米、稻壳、土壤和稻田水中的残留分析方法,样品经过提取

和净化后,用 GC-ECD 检测在水稻植株、糙米、稻壳、土壤和稻田水中的甲草胺。该分析方法对水稻植株、糙米、稻壳、土壤和稻田水的添加回收率在 79.5%~113.6%,相对标准偏差(RSD)均小于 12.7%。水稻植株、糙米、稻壳、土壤和稻田水的甲草胺的最低检测浓度为 0.01 mg/kg,满足残留检测试验的要求。

采用所建立的方法,首次对甲草胺在水稻植株和稻田水中的消解动态,以及在糙米、稻壳和水稻植株中的最终残留量进行了研究。结果表明,甲草胺在水稻植株和稻田水中的消解动态均符合一级动力学方程,半衰期分别为 11.17~26.65 d 和 1.56~1.78 d,属于易降解农药。且稻田水中的降解率明显快于植株中的降解率。在施药浓度为推荐高剂量的 1.5 倍时,施药 1 次,收获期的甲草胺残留量均未检出。本研究对我国制定甲草胺在水稻中的合理使用准则具有一定的参考价值。

## 参考文献

- [1] 段劲生,岳永德,花日茂,等. 甲草胺在花生中的残留分析及其稳定性[J]. 农药, 2009, 48(9): 664-666.
- [2] 张云月,卢宗志,李洪鑫,等. 杂草对乙酰乳酸合成酶抑制剂类除草剂抗药性的研究进展[J]. 杂草科学, 2013, 31(2): 1-5.
- [3] 张青华,路福媛,冯建国,等. 20%甲草胺水乳剂的研制[J]. 农药, 2008, 47(11): 802-804.
- [4] 叶照春,王楠,陆德清,等. 稻田杂草眼子菜对磺酰脲类除草剂的抗性研究[J]. 植物保护, 2013, 39(3): 144-147.

- [5] 张栋梁,沈雪峰,陈勇. 31% 苯·吡·甲草胺泡腾颗粒剂防除水稻移栽田杂草试验[J]. 农药, 2014, 53(3): 214-216.
- [6] Hostetler K A, Thurman E M. Determination of chloroacetanilide herbicide metabolites in water using high-performance liquid chromatography-diode array detection and high-performance liquid chromatography/mass spectrometry[J]. The Science of the Total Environment, 2000, 248(2): 147-155.
- [7] Zang Lunyi, DeHaven J, Yocum A, et al. Determination of alachlor and its metabolites in rat plasma and urine by liquid chromatography-electrospray ionization mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography B, 2002, 767(1): 93-101.
- [8] Albanis T, Hela D G, Sakellarides T M, et al. Monitoring of pesticide residues and their metabolites in surface and underground waters of Imathia (N. Greece) by means of solid-phase extraction disks and gas chromatography[J]. Journal of Chromatography A, 1998, 823(1): 59-71.
- [9] 藏小丹,牟光庆. 气相色谱法同时测定大豆中多种除草剂的残留[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(3): 132-134.
- [10] 刘伊玲,逯忠斌,徐威. 农药残留分析中含油脂及硫化物样品的净化方法[J]. 农药科学与管理, 2000, 21(1): 17-20.
- [11] 白梅,张冠英,马莹,等. 气相色谱法测定花生和大豆中甲草胺残留量[J]. 中国卫生检验杂志, 2006, 16(12): 1463-1464.
- [12] 王明泰,牟峻,周晓,等. 农产品中甲草胺残留量的气相色谱-质谱检测[J]. 色谱, 2007, 25(4): 569-572.
- [13] 胡敏,李二虎,吴兵兵,等. 气相色谱法测定大豆中氟乐灵、甲草胺和乙草胺农药残留[J]. 现代农药, 2006, 5(6): 27-28.
- [14] 许泓,林安清,古珑,等. 果蔬中 107 种残留农药的气相色谱-质谱检测方法[J]. 分析测试学报, 2004, 23(3): 34-38.

(责任编辑: 杨明丽)

(上接 66 页)

- [7] 刘小民,孟庆民,王学清,等. 玉米秸秆不同部位水浸提液对芥菜化感作用的研究[J]. 河北农业科学, 2013, 17(6): 36-39.
- [8] 樊翠芹,王贵启,李秉华,等. 保护性耕作对小麦田杂草发生规律及小麦农艺性状的影响[J]. 河北农业科学, 2010, 14(8): 101-103.
- [9] 冒宇翔,李贵,沈俊明,等. 玉米秸秆覆盖还田结合化学除草剂对水稻田杂草的控制效果及对水稻产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(6): 1336-1344.
- [10] 罗小勇,付艳红,周世军. 琼脂混粉法的建立及其在植物叶片化感活性测定中的应用[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2007, 24(4): 267-270.
- [11] 罗小勇. 牡丹不同器官的除草活性研究[J]. 植物保护, 2011, 37(2): 87-90.
- [12] Dixon D P, Sellars J D, Kenwright A M, et al. The maize benzoxazinone DIMBOA reacts with glutathione and other thiols to form spirocyclic adducts[J]. Phytochemistry, 2012, 77: 171-178.
- [13] Li Jing, Liu Xingang, Dong Fengshou, et al. A simple method for the isolation and purification of 2, 4-dihydroxy-7-methoxy-2H-1,4-benzoxazin-3(4H)-one (DIMBOA) from maize (*Zea*

*mays* L.) seedlings[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(1): 95-102.

- [14] 李贵,王晓琳,张朝贤,等. 水稻秸秆还田结合炔草酯对禾本科杂草和小麦生长发育的影响[J]. 植物保护学报, 2015, 42(1): 130-137.
- [15] 韩君,罗小勇. 一些十字花科植物组织的化感活性研究[J]. 江西农业学报, 2008, 20(10): 76-78.
- [16] 罗小勇,苗荣荣,周世军. 16 种园林植物不同器官的化感活性研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(21): 266-271.
- [17] 罗小勇,孙启涛,周世军. 20 种菊科植物不同器官的化感活性[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(30): 14672-14677.
- [18] 罗小勇,任贻晓,周世军. 一些松、柏、杉科植物的化感活性[J]. 杂草科学, 2008, (4): 22-25.
- [19] 杨思存,霍琳,王建成. 秸秆还田的生化他感效应研究初报[J]. 西北农业学报, 2005, 14(1): 52-56.
- [20] 王俊峰,王景财,曹增礼,等. 玉米秸秆还田对棉花生育及产量的影响[J]. 江西棉花, 1996, 16(5): 14-15.

(责任编辑: 田 喆)