



李纳, 张丽阳, 刁雪, 等. 3 种三唑类杀菌剂对映体对镰刀菌的选择性活性[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(5): 56-60.

3 种三唑类杀菌剂对映体对镰刀菌的选择性活性

李 纳, 张丽阳, 刁 雪, 闭贤凤, 刘承兰

(天然农药与化学生物学教育部重点实验室/广东省生物农药创制与应用重点实验室/
华南农业大学 农学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】研究 3 种三唑类杀菌剂对映体对 3 种镰刀菌 *Fusarium* spp. 的杀菌活性。【方法】采用生长速率法, 测定戊唑醇、腈菌唑和苯醚甲环唑各对映体对串珠镰刀菌 *F. moniliforme*、再育镰刀菌 *F. proliferatum* 和禾谷镰刀菌 *F. graminearum* 的杀菌活性, 并分析各对映体 EC₅₀ 值。【结果】3 种三唑类手性杀菌剂对映体对供试串珠镰刀菌、再育镰刀菌和禾谷镰刀菌菌株的杀菌活性存在差异, (-)-戊唑醇>(+)戊唑醇, 二者杀菌活性相差 32~208 倍; (+)-腈菌唑>(-)-腈菌唑, 二者杀菌活性相差 1.4~6.4 倍; 在苯醚甲环唑对映体之间, (2*R*,4*R*)-苯醚甲环唑活性最高, 4 个对映体之间的杀菌活性相差 3.7~15.5 倍。【结论】3 种三唑类手性杀菌剂对映体对串珠镰刀菌、再育镰刀菌和禾谷镰刀菌的杀菌活性均表现出选择性差异, (-)-戊唑醇、(+)-腈菌唑和(2*R*,4*R*)-苯醚甲环唑表现出较高的杀菌活性。本研究结果可为筛选活性高的杀菌剂、减少农药使用提供理论参考。

关键词: 手性农药; 三唑类杀菌剂; 对映体; 镰刀菌; 杀菌活性; 立体选择性
中图分类号: S511; S502 文献标识码: A 文章编号: 1001-411X(2017)05-0056-05

Selective bioactivity of enantiomers of three triazole fungicides against *Fusarium* spp.

LI Na, ZHANG Liyang, DIAO Xue, BI Xianfeng, LIU Chenglan
(Key Laboratory of Natural Pesticide and Chemical Biology, Ministry of Education/Key Laboratory of Bio-pesticide Innovation and Application of Guangdong Province/College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To study the activities of enantiomers of three triazole fungicides against *Fusarium* spp.. 【Method】Three chiral fungicides included tebuconazole, myclobutanil and difenoconazole. The activities of fungicide enantiomers against *F. moniliforme*, *F. proliferatum* and *F. graminearum* were assessed by mycelial growth rate method, respectively. The EC₅₀ values of enantiomers were analyzed. 【Result】The activities of different enantiomers against three kinds of *Fusarium* spp. were different. The activity of (-)-tebuconazole was higher than (+)-tebuconazole, and the EC₅₀ difference of two enantiomers was 32–208 times. The inhibitory activity of (+)-myclobutanil was higher than (-)-myclobutanil, and the EC₅₀ difference of two enantiomers was 1.4–6.4 times. (2*R*,4*R*)-difenoconazole showed the maximum activity among four enantiomers of difenoconazole, and the EC₅₀ difference of four enantiomers was 3.7–15.5 times. 【Conclusion】For *Fusarium* spp., the activities of three fungicides show selective difference. (-)-tebuconazole, (+)-myclobutanil and (2*R*,4*R*)-difenoconazole show higher activities. These results might contribute to screening higher active fungicides and reducing the use of pesticides.

Key words: chiral pesticide; triazole fungicide; enantiomer; *Fusarium* spp.; fungicidal activity; enantioselective

水稻、玉米和小麦是我国三大主要粮食作物, 产量占我国粮食总量的 90% 以上^[1]。镰刀菌属 *Fusarium* spp. 是农作物最重要的病原真菌之一, 严重影响谷类作物生长及粮食产量^[2]。史晓榕等^[3]研究表明, 串珠镰刀菌 *F. moniliforme* 是作物穗粒腐病的主要病原菌, 占有所有分离群落的 50%~83%; 侯恩庆等^[4]对水稻穗腐病原菌进行分离与鉴定发现, 63.4% 是再育镰刀菌 *F. proliferatum*; 我国小麦赤霉病病原菌中禾谷镰刀菌 *F. graminearum* 高达 94.5%^[5]。同时, 上述 3 种病原镰刀菌可产生多种真菌毒素。串珠镰刀菌和再育镰刀菌可产生伏马菌素, 伏马菌素可以引起人畜急性中毒和慢性毒性, 如马脑白质软化综合征、猪肺水肿和羊肝肾病变等, 也可能与人类食管癌有关^[6]。而小麦赤霉病致病菌禾谷镰刀菌可产生单端孢霉烯族毒素脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON, 又称呕吐毒素)^[7]。研究表明, 呕吐毒素能引起猪食欲减退或废绝、呕吐、体质量下降、流产、死胎和弱仔, 抑制免疫机能和降低机体抵抗力^[8]。可见, 农作物中镰刀菌病害的防治具有重要意义。

三唑类杀菌剂是目前应用范围广、防治效果好、使用量最大的一类杀菌剂, 对多种作物病原菌具有良好的防治效果, 可用于对担子菌、子囊菌及半知菌三大菌纲真菌引起的多种病害的防治^[9]。目前, 三唑类杀菌剂也已广泛用于作物中镰刀菌病原菌的防治。同时, 大多数三唑类杀菌剂是手性农药, 分子中一般均有 1~2 个手性中心, 存在 2 或 4 个对映异构体。研究表明, 手性农药各对映体对靶标生物的生物活性、非靶标生物的毒性及在动植物体和环境中的降解行为都存在很大差异^[10-11]。研究发现, 某些三唑类手性杀菌剂对映体对多种病原菌如立枯丝核菌 *Rhizoctonia solani*、番茄早疫病菌 *Alternaria solani*、番茄叶霉病菌 *Cladosporium fulvum*、稻瘟病菌 *Magnaporthe oryzae*、玉蜀黍赤霉菌 *Gibberella zeae* 等表现出明显的活性差异^[12]。三唑类手性杀菌剂对映体对串珠镰刀菌、再育镰刀菌和禾谷镰刀菌这 3 种产毒性病原镰刀菌的活性研究鲜见报道。本研究选取戊唑醇、腈菌唑和苯醚甲环唑 3 种三唑类手性杀菌剂为供试药剂, 测定其外消旋体和各对映体对上述 3 种产毒性病原镰刀菌的生物活性, 以期筛选出高效的对映体, 减少农药的使用量和环境污染。

1 材料与方法

1.1 材料

供试药剂: 戊唑醇外消旋体、腈菌唑外消旋体、
<http://xuebao.scau.edu.cn>

苯醚甲环唑外消旋体和各对映体(+)-戊唑醇、(-)-戊唑醇、(+)-腈菌唑、(-)-腈菌唑、(2*S*,4*S*)-苯醚甲环唑、(2*S*,4*R*)-苯醚甲环唑、(2*R*,4*S*)-苯醚甲环唑、(2*R*,4*R*)-苯醚甲环唑, 均购自于上海勤路生物技术有限公司, *w* 为 98%。所有药剂均用丙酮配制成质量浓度为 5 000 μg·mL⁻¹ 的母液, 4 ℃ 条件下保存备用, 用无菌水稀释成不同质量浓度的工作液使用。

供试菌株: 串珠镰刀菌菌株(KU554607.1)和再育镰刀菌菌株(AF291057.1)由华南农业大学天然农药与化学生物学实验室分离自芦笋植株上并进行病原菌分离, 得到的菌株经过纯化, 再进行单孢分离, 最后进行分子生物学鉴定各选取 1 株作为本试验的供试菌株; 禾谷镰刀菌菌株(KK082465.1)由南京农业大学周明国教授惠赠。

GXZ 型智能光照培养箱(上海一恒科学仪器有限公司)。PDA 培养基(马铃薯 200 g、葡萄糖 20 g、琼脂 20 g、无菌水 1 L)。

1.2 不同对映体对供试菌株的毒力测定

采用慕立义^[13]的菌丝生长速率法。供试三唑类杀菌剂外消旋体和各对映体用无菌水配置成 7 个质量浓度梯度, 添加到 50 ℃ 左右的 PDA 培养基中, 充分震荡混匀, 然后倒入 90 mm 培养皿中制成含药平板, 各药剂的质量浓度梯度(0~500 mg·L⁻¹), 根据预试验结果设定预试验以加入丙酮的培养基做空白对照, 试验表明丙酮对菌丝生长无影响。以加入等体积无菌水的培养基做空白对照, 每个浓度 3 次重复。首先将供试菌株接到 PDA 平板上, 25 ℃ 培养 4 d, 再用直径为 4 mm 的打孔器在菌落边缘打孔, 将菌饼朝下转接到含药 PDA 平板中央; 将接菌后的平板置于 25 ℃ 下倒置培养一定时间(串珠镰刀菌培养 6 d, 再育镰刀菌培养 4 d, 禾谷镰刀菌培养 3 d)后, 测量菌落生长量。

采用十字交叉法测定菌落生长直径^[15], 求出平均值, 计算菌丝生长抑制率:

抑制率=[(对照菌落直径-处理菌落直径)/对照菌落直径]×100%。

1.3 数据处理

采用 SPSS17.0 软件计算毒力回归方程、EC₅₀ 值及 95% 置信限。以药剂浓度对数为 *X* 轴, 菌丝生长抑制率的概率为 *Y* 轴, 得到毒力回归方程

$$Y = aX + b。$$

计算出各药剂抑制菌落的 EC₅₀ 值和相关系数(*r*)。

2 结果与分析

2.1 戊唑醇对映体对镰刀菌的杀菌活性

戊唑醇对映体对 3 种镰刀菌菌丝生长的抑制效果存在明显差异(表 1)。从表 1 可以看出, (–)-戊唑醇对 3 株镰刀菌菌株的杀菌活性最高, 对串珠镰刀菌菌株(KU554607.1)、再育镰刀菌菌株(AF291057.1)和禾谷镰刀菌菌株(KK082465.1)

的 EC₅₀ 值分别为 0.015、0.131 和 0.311 μg·mL⁻¹; (+)-戊唑醇对 3 种供试镰刀菌菌株的 EC₅₀ 值分别为 3.147、4.223 和 11.128 μg·mL⁻¹。 (–)-戊唑醇的杀菌活性明显高于(+)-戊唑醇, 二者对 3 种镰刀菌菌株的杀菌活性相差 32~208 倍。戊唑醇外消体对 3 种镰刀菌菌株的杀菌活性介于(+)-戊唑醇和(–)-戊唑醇之间, EC₅₀ 值分别为 0.041、0.259 和 0.577 μg·mL⁻¹。

表 1 戊唑醇对映体对 3 种供试镰刀菌的毒力测定结果
Tab. 1 Toxicity of tebuconazole and its enantiomers against *Fusarium* spp.

供试药剂	菌株	毒力回归方程 ¹⁾	EC ₅₀ /(μg·mL ⁻¹)	95%置信区间/ (μg·mL ⁻¹)	相关系数 (r)
(+)–戊唑醇	KU554607.1	$Y=0.777X-0.387$	3.147	2.112~4.754	0.997
	AF291057.1	$Y=0.820X-0.513$	4.223	3.149~5.700	0.992
	KK082465.1	$Y=0.928X-0.971$	11.128	8.718~14.485	0.979
(–)–戊唑醇	KU554607.1	$Y=1.172X-2.133$	0.015	0.012~0.020	0.993
	AF291057.1	$Y=0.839X+0.740$	0.131	0.100~0.174	0.993
	KK082465.1	$Y=1.547X+0.785$	0.311	0.264~0.365	0.998
(±)–戊唑醇	KU554607.1	$Y=0.882X+1.218$	0.041	0.030~0.058	0.990
	AF291057.1	$Y=0.928X+0.545$	0.259	0.198~0.337	0.993
	KK082465.1	$Y=1.367X+0.326$	0.577	0.480~0.688	0.998

1) 式中, Y 为菌丝生长抑制率的概率, X 为药剂浓度对数。

2.2 腈菌唑对映体对镰刀菌的杀菌活性

腈菌唑外消旋体及 2 个对映体对 3 种镰刀菌的杀菌活性见表 2。从表 2 可以看出, (+)-腈菌唑对 3 种镰刀菌的杀菌活性均小于(–)-腈菌唑, (–)-腈菌唑与(+)-腈菌唑之间的毒力相差 1.4~6.4 倍; (+)-腈菌唑对串珠镰刀菌菌株(KU554607.1)、再育镰刀菌菌株(AF291057.1)和禾谷镰刀菌菌株

(KK082465.1)的 EC₅₀ 值分别为 0.425、1.703 和 0.560 μg·mL⁻¹; 而(–)-腈菌唑对 3 种镰刀菌的 EC₅₀ 值分别为 0.578、10.902 和 2.204 μg·mL⁻¹。腈菌唑外消旋体对 3 种供试镰刀菌的 EC₅₀ 值介于(–)-腈菌唑和(+)-腈菌唑之间, EC₅₀ 值分别为 0.426、3.376 和 0.683 μg·mL⁻¹。

表 2 腈菌唑对映体对 3 种供试镰刀菌的毒力测定结果
Tab. 2 Toxicity of myclobutanil and its enantiomers against *Fusarium* spp.

供试药剂	菌株	毒力回归方程 ¹⁾	EC ₅₀ /(μg·mL ⁻¹)	95%置信区间/ (μg·mL ⁻¹)	相关系数 (r)
(+)–腈菌唑	KU554607.1	$Y=0.923X+0.343$	0.425	0.310~0.586	0.991
	AF291057.1	$Y=0.992X-0.229$	1.703	1.209~2.405	0.998
	KK082465.1	$Y=1.416X+0.356$	0.560	0.453~0.691	0.993
(–)–腈菌唑	KU554607.1	$Y=1.094X+0.298$	0.578	0.402~0.708	0.994
	AF291057.1	$Y=0.980X-1.017$	10.902	7.688~15.679	0.995
	KK082465.1	$Y=1.051X-0.361$	2.204	1.672~2.934	0.992
(±)–腈菌唑	KU554607.1	$Y=0.946X+0.351$	0.426	0.311~0.588	0.994
	AF291057.1	$Y=0.787X-0.394$	3.376	2.129~4.794	0.997
	KK082465.1	$Y=1.100X+0.182$	0.683	0.521~0.894	0.991

1) 式中, Y 为菌丝生长抑制率的概率, X 为药剂浓度对数。

2.3 苯醚甲环唑对映体对镰刀菌的杀菌活性

苯醚甲环唑外消旋体和 4 个对映体对镰刀菌菌株的活性见表 3。从表 3 可知, 在 4 个对映体中,

(2*R*,4*R*)-苯醚甲环唑对 3 种镰刀菌的杀菌活性最高, EC₅₀ 值分别为 0.242、0.217 和 0.555 μg·mL⁻¹; (2*S*,4*R*)-苯醚甲环唑和(2*R*,4*S*)-苯醚甲环唑对 3 种

镰刀菌的活性相差不大, EC_{50} 值在 $0.355\sim1.535\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 之间; (2*S*,4*S*)-苯醚甲环唑对 3 种供试镰刀菌的杀菌活性最小, EC_{50} 值分别为 3.020、3.376 和 $2.026\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。苯醚甲环唑 4 个对映体对 3 种镰刀菌的杀菌活性相差 3.7~15.5 倍。

表 3 苯醚甲环唑对映体对 3 种供试镰刀菌的毒力测定结果
Tab. 3 Toxicity of difenaconazole and its enantiomers against *Fusarium* spp.

供试药剂	菌株	毒力回归方程 ¹⁾	$EC_{50}/$ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	95% 置信区间/ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	相关系数 (<i>r</i>)
(2 <i>R</i> ,4 <i>R</i>)-苯醚甲环唑	KU554607.1	$Y=0.667X+0.411$	0.242	0.150~0.378	0.990
	AF291057.1	$Y=0.799X+0.558$	0.217	0.147~0.325	1.000
	KK082465.1	$Y=0.844X+0.216$	0.555	0.393~0.771	0.998
(2 <i>S</i> ,4 <i>S</i>)-苯醚甲环唑	KU554607.1	$Y=0.688X-0.330$	3.020	1.986~4.630	0.999
	AF291057.1	$Y=0.654X-0.345$	3.376	2.151~5.314	0.996
	KK082465.1	$Y=0.698X-0.214$	2.026	1.409~2.941	0.995
(2 <i>R</i> ,4 <i>S</i>)-苯醚甲环唑	KU554607.1	$Y=0.782X+0.130$	0.646	0.464~1.033	0.993
	AF291057.1	$Y=0.659X+0.118$	0.662	0.419~1.033	1.000
	KK082465.1	$Y=0.869X+0.120$	0.729	0.525~1.006	0.997
(2 <i>S</i> ,4 <i>R</i>)-苯醚甲环唑	KU554607.1	$Y=0.632X+0.292$	0.355	0.221~0.539	0.991
	AF291057.1	$Y=0.746X-0.139$	1.535	1.020~2.325	0.996
	KK082465.1	$Y=0.724X+0.015$	0.953	0.633~1.386	0.997
苯醚甲环唑	KU554607.1	$Y=0.664X+0.063$	0.805	0.524~1.250	0.999
	AF291057.1	$Y=0.763X+0.118$	0.701	0.466~1.048	0.997
	KK082465.1	$Y=0.673X+0.103$	0.704	0.450~1.093	0.998

1) 式中, *Y* 为菌丝生长抑制率的概率, *X* 为药剂浓度对数。

3 讨论与结论

三唑类杀菌剂作为目前应用范围最广、使用量最大的一类杀菌剂, 已用于多种作物病原菌的防治。三唑类杀菌剂对小麦的多种病害, 如锈病、白粉病、纹枯病、全蚀病、根腐病以及黑穗病等均有良好的防治效果^[14]。本研究表明, 三唑类杀菌剂戊唑醇、腈菌唑和苯醚甲环唑对串珠镰刀菌、再育镰刀菌和禾谷镰刀菌这 3 种重要作物病原镰刀菌表现出较强的生物活性, 戊唑醇对 3 种病原镰刀菌的 EC_{50} 值分别达 0.041 、 0.259 和 $0.577\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$; 腈菌唑对 3 种病原镰刀菌的 EC_{50} 值为 0.426 、 3.376 和 $0.683\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$; 苯醚甲环唑对 3 种病原镰刀菌的 EC_{50} 值为 0.805 、 0.701 和 $0.704\ \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。表明这 3 种三唑类杀菌剂具有防治镰刀菌病害的潜力, 但需要做进一步的室内和田间研究。总的来说, 戊唑醇对于 3 种病原镰刀菌的杀菌活性高于另外 2 种三唑类杀菌剂腈菌唑和苯醚甲环唑。这与张勇等^[15]曾报道室内离体条件下戊唑醇对小麦赤霉病菌的杀菌活性高于腈菌唑的结果一致。

大多数三唑类杀菌剂是手性农药, 分子中均有 1 个或多个手性中心。研究表明, 手性农药对映体之间对靶标生物的活性表现出立体选择性差异^[16]。本研究采用菌丝生长速率法, 分别测定了戊唑醇、<http://xuebao.scau.edu.cn>

腈菌唑和苯醚甲环唑 3 个手性杀菌剂对映体对 3 种镰刀菌的杀菌活性, 结果表明, 对映体间存在立体选择性差异, 其差异大小与杀菌剂种类和靶标生物有关。在戊唑醇的 2 个对映体之间, (–)-戊唑醇的杀菌活性远高于(+)-戊唑醇, 对串珠镰刀菌、再育镰刀菌和禾谷镰刀菌的杀菌活性相差分别达 208、32 和 35 倍, 表现出明显的立体选择性差异, 同时其差异大小与目标菌株也相关。同样, 腈菌唑和苯醚甲环唑各对映体间也表现出选择性差异, 对 3 种菌株的杀菌活性差异分别为 1.4~6.4 和 3.7~15.5 倍。有研究报道, 在手性杀菌剂对映体间, 往往一个对映体具有强的活性, 而另一个对映体活性却很低。Dong 等^[12]报道, 2*R*,4*S*-苯醚甲环唑对灰葡萄孢菌的活性高于 2*S*,4*S*-苯醚甲环唑, 二者相差 24.2 倍; Han 等^[17]研究发现, (–)-己唑醇对褐腐病菌、芒果炭疽病菌和链格孢菌等的活性远高于(+)-己唑醇; Stehmann 等^[18]研究结果表明, (–)-戊唑醇的生物活性比(+)-戊唑醇高出 100 多倍; Sun 等^[19]报道, (+)-腈菌唑对番茄晚疫病菌、褐斑病菌和番茄叶霉病菌的活性高于(–)-腈菌唑, 二者相差 1.79~1.90 倍。本研究结果与前人研究结果相一致, 手性农药对映体对靶标生物的活性存在立体选择性差异, 其原因或许在于结合了结构敏感生物受体或有

天然存在的手性生物分子。今后将进一步开展室内生物测定和田间试验,为筛选高活性杀菌剂单体,减少农药使用和保护环境提供参考。

参考文献:

[1] 赵倩倩. 中国主要粮食作物农药使用现状及问题研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

[2] 林镇跃, 阙友雄, 刘平武, 等. 植物致病镰刀菌的研究进展[J]. 中国甜菜, 2014(1): 58-64.

[3] 史晓榕, 白丽. 不同类型玉米群体穗粒腐病病原菌的调查研究[J]. 植物保护, 1992, 18(5): 28-29.

[4] 侯恩庆. 水稻穗腐病镰刀菌及相关毒素研究[D]. 南宁: 广西大学, 2013.

[5] 全国小麦赤霉病研究协作组. 我国小麦赤霉病穗部镰刀菌种类、分布及致病性[J]. 上海师范学院学报(自然科学版), 1984(3): 69-82.

[6] 王少康. 伏马菌素污染情况及其毒性研究进展[J]. 环境与职业医学, 2003, 20(2): 129-131.

[7] 史建荣, 刘馨, 仇剑波, 等. 小麦中镰刀菌毒素脱氧雪腐镰刀菌烯醇污染现状与防控研究进展[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3641-3654.

[8] SWAMY H V L N, SMITH T K, MACDONALD E J, et al. Effects of feeding a blend of grains naturally contaminated with *Fusarium* mycotoxins on swine performance, brain regional neurochemistry, and serum chemistry and the efficacy of a polymeric glucomannan mycotoxin adsorbent[J]. J Anim Sci, 2002, 80(12): 3257-3267.

[9] 周子燕, 李昌春, 高同春, 等. 三唑类杀菌剂的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(27): 11842-11844.

[10] 李远播. 几种典型手性三唑类杀菌剂对映体的分析、环境行为及其生物毒性研究[D]. 北京: 中国农业科

学院, 2013.

[11] 孙明婧. 四种三唑类手性农药的环境行为研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.

[12] DONG F, LI J, CHANKVETADZE B, et al. Chiral triazole fungicide difenoconazole: Absolute stereochemistry, stereoselective bioactivity, aquatic toxicity, and environmental behavior in vegetables and soil[J]. Environ Sci Technol, 2013, 47(7): 3386-3394.

[13] 慕立义. 植物化学保护研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 76-81.

[14] 刘传德, 王培松, 王继秋, 等. 三唑类杀菌剂及其在小麦病害防治中的应用研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2005, 36(1): 157-160.

[15] 张勇, 马严明, 徐劲锋, 等. 几种三唑类杀菌剂对小麦赤霉病菌毒力的测定及药效试验[J]. 安徽农业科学, 2004, 32(2): 248-249.

[16] 李晶. 三唑类手性杀菌剂苯醚甲环唑的立体选择性生物活性与环境行为研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.

[17] HAN J, JIANG J, SU H, et al. Bioactivity, toxicity and dissipation of hexaconazole enantiomers[J]. Chemosphere, 2013, 93(10): 2523-2527.

[18] STEHMANN C, DE WAARD M A. Relationship between chemical structure and biological activity of triazole fungicides against *Botrytis cinerea*[J]. Pest Manag Sci, 1995, 44(2): 183-195.

[19] SUN M, LIU D, QIU X, et al. Acute toxicity, bioactivity, and enantioselective behavior with tissue distribution in rabbits of myclobutanil enantiomers[J]. Chirality, 2014, 26(12): 784-789.

【责任编辑 周志红】