

鬼臼毒素对小菜蛾的生物活性及对其几种代谢酶系的影响

侯 军, 马志卿*, 冯俊涛, 张 兴

(西北农林科技大学无公害农药研究服务中心/陕西省生物农药工程技术研究中心, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为进一步揭示鬼臼毒素的杀虫活性及作用机理, 本实验采用小叶碟添加法测定了鬼臼毒素对小菜蛾 *Plutella xylostella* 的生物活性及其对幼虫体内羧酸酯酶 (CarE)、酸性磷酸酯酶 (ACP)、碱性磷酸酯酶 (AKP)、谷胱甘肽 S-转移酶 (GSTs) 和细胞色素 P450 酶系活性的影响。结果表明: 鬼臼毒素对小菜蛾具有较好的拒食、毒杀及生长发育抑制作用, 其 AFC_{50} 为 0.4110 mg/ml (24 h) 和 0.2617 mg/ml (48 h), LC_{50} 为 1.9061 mg/ml (72 h); 0.125 mg/mL 剂量下相对生长率比对照下降 57.56% (24 h) 和 41.18% (48 h), 化蛹率为 43.33%, 不能正常羽化。同时, 鬼臼毒素对小菜蛾幼虫体内各代谢酶存在不同程度的影响, 对羧酸酯酶表现为先激活后抑制的作用; 对酸性磷酸酯酶表现先抑制后激活的作用; 对碱性磷酸酯酶活性具有明显的抑制作用, 且随着处理时间的延长, 抑制作用增强; 对谷胱甘肽 S-转移酶和细胞色素 P450 酶系表现出先激活后抑制的影响。

关键词: 小菜蛾; 鬼臼毒素; 生物活性; 代谢酶

中图分类号: Q965.8 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2007)09-0895-05

Bioactivity of podophyllotoxin against *Plutella xylostella* and its effect on metabolic enzymes

HOU Jun, MA Zhi-Qing*, FENG Jun-Tao, ZHANG Xing (Biorational Pesticide Research and Development Center, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry/Shaanxi Research Center of Biopesticide Technology and Engineering, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to reveal the insecticidal activity and mechanism of podophyllotoxin, its bioactivity against *Plutella xylostella* larvae and its effect on their metabolic enzymes were assayed. The results showed that podophyllotoxin had high antifeedant and toxic activity, as well as obvious growth inhibitor activity against the moth. In 24-hour and 48-hour treatments, its AFC_{50} were 0.4110 mg/mL and 0.2617 mg/mL, respectively. Its LC_{50} of 72 h was 1.9061 mg/mL. When the tested insects were treated at the dosage of 0.125 mg/mL, their related growth rate reduced by 57.56% (24 h) and 41.18% (48 h) compared with the control; the pupation rate was only 43.33%, and the pupae did not eclose normally. At the same time, podophyllotoxin had different influence on metabolic enzymes. The activity of carboxyl esterases (CarE) in the tested larvae was first activated, and then inhibited. The activity of acid phosphatase (ACP) was first inhibited, and then activated. The activity of alkaline phosphatase (AKP) was inhibited obviously, and the inhibition became more intensive as the exposure time prolonged. Both glutathione S-transferase (GSTs) and cytochrome P450 were first induced, and then inhibited.

Key words: *Plutella xylostella*; podophyllotoxin; bioactivity; metabolic enzymes

鬼臼毒素为木脂素类化合物, 主要存在于小檗科多年生草本类群鬼臼亚科的八角莲属、桃儿七属、山荷叶属及足叶草属植物中。西北农林科技大学无

公害农药研究服务中心从柏科植物砂地柏 *Sabina vulgaris* 中分离得到了该化合物(王继栋等, 2000), 测试表明该化合物对菜青虫 *Pieris rapae*、粘虫

基金项目: 国家自然科学基金项目(30471156)

作者简介: 侯军, 男, 1979年生, 硕士研究生, 主要从事植物保护和生物农药研究, E-mail: houjun0629@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: mazhiqing2000@126.com

收稿日期 Received: 2007-02-15; 接受日期 Accepted: 2007-04-16

Mythimna separata 均具有较强的拒食、胃毒及生长发育抑制作用(高蓉等 2001;张兴等 2002)。然而,该化合物对小菜蛾的影响尚未见系统的研究报道。基于此,本研究以小菜蛾 *Plutella xylostella* 为试虫,测定了鬼臼毒素对小菜蛾的生物活性及其体内几种代谢酶系的影响,以期为进一步明确该化合物的杀虫活性及作用机理提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫和药剂

小菜蛾由西北农林科技大学无公害农药研究服务中心养虫室提供,饲养条件:温度 $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,RH 60%~70%,光周期 14L:10D。选择个体发育一致的健康幼虫供试。

鬼臼毒素 纯度 >95% 西北农林科技大学无公害农药研究服务中心提供。

1.2 方法

1.2.1 拒食活性测定:采用小叶碟添加法(张兴和赵善欢,1983)。每处理重复 4 次,每重复 10 头试虫,以丙酮处理为对照。分别于 24 h、48 h 后测量取食叶面积,计算拒食率,并求出拒食毒力曲线。

1.2.2 毒杀活性测定:采用小叶碟添加法(张兴和赵善欢,1983)。每处理重复 4 次,每重复 10 头试虫,以丙酮处理为对照。72 h 后检查结果,计算校正死亡率,并求出毒力回归方程。

1.2.3 生长发育抑制作用测定:用不同浓度鬼臼毒素丙酮溶液处理甘蓝叶碟(直径 0.8 cm)饲喂饥饿 4 h 的 3 龄小菜蛾,每处理重复 6 次,每重复 10 头试虫,以丙酮处理为对照。饲喂带毒叶碟 24 h、48 h 后称量试虫体重,参照陈志辉(1987)方法计算相对生长率,然后更换无毒甘蓝叶片饲养至化蛹,记录蛹重、化蛹率及羽化率。

1.2.4 羧酸酯酶活性测定:(1)试虫处理方法:将新鲜甘蓝叶片用打孔器(直径 0.8 cm)打成叶碟,在 0.25 mg/mL 鬼臼毒素丙酮液中浸渍 2~3 s,取出晾干后放入已保湿的培养皿中,每皿放 8 片叶碟,接饥饿 4 h 的 4 龄小菜蛾 10 头。对照用丙酮处理。分别

在 6 h、12 h、24 h、36 h、48 h 取处理试虫和对照试虫各 10 头供试。(2)活性测定方法:将处理好的试虫整体置于预冷的玻璃匀浆器中,定量加入 0.04 mol/L pH 7.0 的磷酸缓冲液,在冰浴中匀浆,所得匀浆液在 $0^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ 下 $4\ 000 \times g$ 离心 15 min,上清液即为待测酶液。酶活性测定参照 Asperenc(1962)的方法进行。蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G250 法(Bradford,1976)。每处理重复 4 次。

1.2.5 磷酸酯酶活性测定:试虫处理方法同 1.2.4。分别取处理好的试虫 10 头,定量加入相应缓冲液(ACP,0.2 mol/L pH 4.6 醋酸缓冲液;AKP,0.04 mol/L pH 9.6 巴比妥钠盐酸缓冲液),冰浴匀浆,所得匀浆液在 $0^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ 下 $4\ 000 \times g$ 离心 15 min,上清液即为待测酶液。酶活性测定参照 Bessey(1964)的方法进行。蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G250 法(Bradford,1976)。每处理重复 4 次。

1.2.6 谷胱甘肽 S-转移酶活性测定:试虫处理方法同 1.2.4。将处理好的试虫整体置于预冷的玻璃匀浆器中,定量加入 Tris-HCl 缓冲液(0.1 mol/L pH 8.9,含 10 mmol/L 还原型谷胱甘肽),在冰浴中匀浆,所得匀浆液在 $0^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ 下 $10\ 000 \times g$ 离心 15 min,上清液即为待测酶液。酶活性测定参照 Brooth 等(1973)的方法进行。蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G250 法(Bradford,1976)。每处理重复 4 次。

1.2.7 细胞色素 P450 O-脱甲基活性测定:试虫处理方法同 1.2.4。将处理好的试虫整体置于预冷的玻璃匀浆器中,定量加入 0.1 mol/L pH 7.2 的磷酸缓冲液,在冰浴中匀浆。所得匀浆液在 $0^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ 下 $10\ 000 \times g$ 离心 15 min,上清液即为待测酶液。酶活性测定参照 Hensen 和 Hodgson(1971)及吴承春和王沫(2003)的方法进行。蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G250 法(Bradford,1976)。每处理重复 4 次。

2 结果与分析

2.1 鬼臼毒素对小菜蛾的拒食活性

鬼臼毒素对小菜蛾的拒食活性测定结果见表 1。从表 1 可以看出鬼臼毒素对小菜蛾具有较好的

表 1 鬼臼毒素对小菜蛾 3 龄幼虫的拒食活性

Table 1 Antifeedant activity of podophyllotoxin against the 3rd instar larvae of *Plutella xylostella*

供试物质 Test substance	处理时间 Time (h)	拒食毒力回归方程 $y = a + bx$	拒食中浓度 AFC_{50} (mg/mL) (95% 置信限 95% CI)	相关系数 R^2	卡方值 χ^2
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	24	$y = 5.3764 + 0.9746x$	0.4110 (0.173 ~ 0.976)	0.9900	5.56
	48	$y = 5.7913 + 1.3590x$	0.2617 (0.120 ~ 0.569)	0.9919	3.22

注: $\chi^2_{0.05} = 7.81$ 。若所测方程 χ^2 小于该值则方程符合实际,否则不符合。

Notes: Equation fits the fact unless the " χ^2 " is greater than 7.81.

拒食活性,其 24 h 和 48 h 的 AFC_{50} 分别为 0.4110 mg/mL 和 0.2617 mg/mL。

2.2 鬼臼毒素对小菜蛾的毒杀活性

鬼臼毒素对小菜蛾具有较好的毒杀活性。以鬼臼毒素质量浓度对数为自变量(x),校正死亡率的机率值(y)为因变量作回归,则 $y = 4.4972 + 1.7950x$ ($R^2 = 0.9890$, $t\chi^2 = 1.32$), LC_{50} 为 1.9061 mg/mL, 95% 置信限为 1.433 ~ 2.535 mg/mL。

表 2 鬼臼毒素对小菜蛾 3 龄幼虫生长发育的影响

Table 2 Effect of podophyllotoxin on the growth of the 3rd instar larvae of *Plutella xylostella*

供试浓度 Concentration (mg/mL)	幼虫体重 Weight of larva (mg/head)			相对生长率 Related growth rate [mg/(mg·24 h)]		蛹重 Weight of pupa (mg/head)	化蛹率(%) Pupation rate
	0 h	24 h	48 h	24 h	48 h		
0.5	0.623 ± 0.012	0.613 ± 0.049 b	0.629 ± 0.055 c	-0.016	0.005	2.725 ± 0.322 c	6.67 d
0.25	0.630 ± 0.048	0.648 ± 0.073 b	0.776 ± 0.084 b	0.028	0.094	2.960 ± 0.129 c	25.00 c
0.125	0.630 ± 0.047	0.690 ± 0.084 b	0.807 ± 0.087 b	0.087	0.110	3.450 ± 0.308 b	43.33 b
对照 CK	0.640 ± 0.029	0.805 ± 0.025 a	1.023 ± 0.103 a	0.205	0.187	4.040 ± 0.125 a	76.28 a

注:表中数据为 6 次重复的平均值 ± 标准差。同列数据后标有不同字母者表示经 Duncan 氏新复极差测验在 $P_{0.05}$ 水平上差异显著。

Notes: Data are given as mean ± SD from 6 duplications. Data within a column followed by different letters show significant difference at $P_{0.05}$ by Duncan's multiple range test.

2.4 鬼臼毒素对小菜蛾羧酸酯酶活性的影响

鬼臼毒素对小菜蛾 4 龄幼虫羧酸酯酶活性的影响见表 3。由表 3 可知鬼臼毒素对羧酸酯酶活性具有明显影响,表现出先激活后抑制的趋势。处理 6 h 后比值达到最大,随着时间的延长比值逐渐降低,到 36 h 后,酶活性逐渐被抑制,处理各期酶比活力分别为同期对照的 1.32、1.21、1.19、0.79 和 0.43 倍,各时期酶比活力与相应对照的酶比活力均差异显著。

表 3 鬼臼毒素对小菜蛾 4 龄幼虫羧酸酯酶活性的影响

Table 3 Effect of podophyllotoxin on the activity of carboxyl esterases in the 4th instar larvae of *Plutella xylostella*

处理 Treatment	处理时间 Time (h)	酶比活力 Specific activity [$\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot 30 \text{ min})$]	比值 Ratio
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	6	0.6572 ± 0.0111**	1.32
对照 CK		0.4989 ± 0.0029	
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	12	1.6970 ± 0.0082**	1.21
对照 CK		1.3978 ± 0.0065	
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	24	1.4502 ± 0.0121**	1.19
对照 CK		1.2143 ± 0.0076	
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	36	0.7010 ± 0.0048**	0.79
对照 CK		0.8904 ± 0.0094	
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	48	0.3400 ± 0.0023**	0.43
对照 CK		0.7893 ± 0.0086	

注:鬼臼毒素剂量为 0.25 mg/mL,表中数据为 4 次重复的平均值 ± 标准差;* 表示经 t 检验差异显著($P < 0.05$),** 表示差异极显著($P < 0.01$),比值 = 处理酶比活力/相应对照酶比活力。下同。

Notes: The dose of podophyllotoxin is 0.25 mg/mL. Data are given as mean ± SD from 4 duplications. * Significant difference at 0.05 level by t -test; ** Significant difference at 0.01 level by t -test. Ratio = Treatment/CK. The same below.

2.3 鬼臼毒素对小菜蛾生长发育的影响

测定了鬼臼毒素对小菜蛾生长发育的影响(表 2)。结果显示,供试不同浓度的鬼臼毒素处理均可明显抑制小菜蛾幼虫的生长发育:处理试虫体重和相对生长率均显著低于对照;蛹重、化蛹率明显降低,所化蛹多为畸形蛹;均不能正常羽化;且随着药剂浓度的增大,试虫生长受抑程度增强。

2.5 鬼臼毒素对小菜蛾磷酸酯酶活性的影响

以鬼臼毒素处理小菜蛾 4 龄幼虫后,测定了不同处理时间酸性磷酸酯酶(ACP)和碱性磷酸酯酶(AKP)的活性,结果见表 4。从表 4 可以看出,鬼臼毒素对 ACP 有明显的抑制作用,处理各期酶比活力分别为同期对照的 0.94、0.79、0.56、0.86 和 0.96 倍,表现出先逐渐被抑制,后逐渐恢复的变化趋势。鬼臼毒素对 AKP 有明显的抑制作用,处理 6 h 后酶活性几乎不受影响,随着处理时间的延长,对酶的抑制作用逐渐增强,到 48 h 后,酶比活力为同期对照的 0.48 倍,差异显著。

2.6 鬼臼毒素对小菜蛾谷胱甘肽 S-转移酶活性的影响

鬼臼毒素对小菜蛾 4 龄幼虫谷胱甘肽 S-转移酶活性的影响见表 5。从表 5 可以看出鬼臼毒素对谷胱甘肽 S-转移酶活性具有明显影响,且表现出先激活后抑制的趋势。处理 6 h 后比值达到最大,为同期对照的 1.75 倍差异显著,此后逐渐恢复正常,到 48 h 后,酶活性逐渐被抑制,为同期对照的 0.6 倍,差异显著。

2.7 鬼臼毒素对小菜蛾细胞色素 P450 O-脱甲基活性的影响

测定了鬼臼毒素对小菜蛾细胞色素 P450 O-脱甲基活性的影响。由表 6 可知,鬼臼毒素对小菜蛾细胞色素 P450 O-脱甲基活性具有明显的影响。处

表 4 鬼臼毒素对小菜蛾 4 龄幼虫 ACP 和 AKP 活性的影响

Table 4 Effect of podophyllotoxin on the activity of ACP and AKP in the 4th instar larvae of *Plutella xylostella*

处理 Treatment	处理时间 Time (h)	酸性磷酸酯酶 ACP		碱性磷酸酯酶 AKP	
		酶比活力 Specific activity [$\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot 30\text{ min})$]	比值 Ratio	酶比活力 Specific activity [$\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot 30\text{ min})$]	比值 Ratio
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	6	0.0306 \pm 0.0008	0.94	0.0735 \pm 0.0013	1.00
对照 CK		0.0324 \pm 0.0026		0.0733 \pm 0.0006	
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	12	0.0210 \pm 0.0012**	0.79	0.0579 \pm 0.0019	0.93
对照 CK		0.0265 \pm 0.0019		0.0620 \pm 0.0038	
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	24	0.0271 \pm 0.0024**	0.56	0.0596 \pm 0.0021**	0.86
对照 CK		0.0487 \pm 0.0052		0.0696 \pm 0.0032	
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	36	0.0365 \pm 0.0027*	0.86	0.0444 \pm 0.0014**	0.63
对照 CK		0.0422 \pm 0.0047		0.0700 \pm 0.0042	
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	48	0.0354 \pm 0.0010	0.96	0.0374 \pm 0.0037**	0.48
对照 CK		0.0370 \pm 0.0035		0.0786 \pm 0.0025	

表 5 鬼臼毒素对小菜蛾 4 龄幼虫谷胱甘肽 S-转移酶活性的影响

Table 5 Effect of podophyllotoxin on the activity of GSTs in the 4th instar larvae of *Plutella xylostella*

处理 Treatment	处理时间 Time (h)	酶比活力 Specific activity [$\Delta\text{OD}/(\text{mg}\cdot \text{min})$]	比值 Ratio
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	6	0.3797 \pm 0.0031**	1.75
对照 CK		0.2169 \pm 0.0036	
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	12	0.7792 \pm 0.0073**	1.10
对照 CK		0.7112 \pm 0.0038	
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	24	0.8924 \pm 0.0053**	1.16
对照 CK		0.7701 \pm 0.0017	
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	36	0.5148 \pm 0.0024**	1.18
对照 CK		0.4380 \pm 0.0049	
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	48	0.3162 \pm 0.0062**	0.60
对照 CK		0.5306 \pm 0.0132	

理 24 h 后比值达到最大,为同期对照的 2.65 倍。各时期酶比活力与相应对照的酶比活力均差异显著。

表 6 鬼臼毒素对小菜蛾 4 龄幼虫细胞色素 P450 O-脱甲基活性的影响

Table 6 Effect of podophyllotoxin on the activity of O-demethylase of cytochrome P450 in the 4th instar larvae of *Plutella xylostella*

处理 Treatment	处理时间 Time (h)	酶比活力 Specific activity [$\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot 30\text{ min})$]	比值 Ratio
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	6	0.6027 \pm 0.0052**	1.30
对照 CK		0.4634 \pm 0.0028	
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	12	0.3919 \pm 0.0048**	1.66
对照 CK		0.2362 \pm 0.0016	
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	24	0.1199 \pm 0.0049**	2.65
对照 CK		0.0453 \pm 0.0016	
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	36	0.2284 \pm 0.0031**	1.64
对照 CK		0.1393 \pm 0.0006	
鬼臼毒素 Podophyllotoxin	48	0.0244 \pm 0.0027**	0.69
对照 CK		0.0351 \pm 0.0015	

3 讨论

鬼臼毒素对小菜蛾具有拒食、毒杀及生长发育抑制等多种生物活性。本研究结果表明,鬼臼毒素对小菜蛾具有较好的拒食活性,24 h 和 48 h 的 AFC_{50} 分别为 0.4110 mg/mL 和 0.2617 mg/mL;同时也具有较强的毒杀活性,72 h 的 LC_{50} 为 1.9061 mg/mL;对生长发育也具有明显的抑制作用,经鬼臼毒素处理的小菜蛾幼虫体重明显低于对照,蛹重、化蛹率降低,且多为畸形蛹,不能羽化。另外,大量研究表明鬼臼毒素对粘虫、菜青虫也具有较好的拒食、毒杀和生长发育抑制作用(张兴等,2002;刘艳青等,2006;李广泽等,2006)。可见,鬼臼毒素对多种害虫具有较好的生物活性,且作用方式多样,值得进一步研究。

羧酸酯酶、谷胱甘肽 S-转移酶及细胞色素 P450 等解毒代谢酶诱导激活可能是小菜蛾对鬼臼毒素的抗性反应,而后期被抑制可能与其中毒后的生理机能下降有关。酯酶(包括磷酸酯酶、羧酸酯酶等)、谷胱甘肽 S-转移酶、细胞色素 P450 酶系均为昆虫体内重要的解毒代谢酶,参与各种外源毒物的代谢,如水解、氧化、还原、结合等。在昆虫与植物的关系中,当昆虫取食非嗜食寄主后,可引起体内多种代谢酶活性的变化,以起到解毒作用,如董向丽等(1998)、李云寿等(1996a,1996b,1997)的研究结果显示,取食不同寄主植物的小菜蛾幼虫,其多种代谢酶的活性发生了显著变化,这可能是由于不同寄主植物体内含有不同种类或不同量的次生物质造成的。本研究发现,鬼臼毒素处理小菜蛾后,可明显诱导其体内羧酸酯酶、谷胱甘肽 S-转移酶及细胞色素 P450 等多种代谢酶被激活,这可能是试虫对非嗜食物质的应激

反应,即增强代谢以起到解毒作用。但是,在处理后期小菜蛾幼虫体内的各代谢酶活性均低于同期对照且差异显著(除 ACP 外),这可能与试虫中毒后生理机能下降有关,也可能是其他因素所致,对此有待于进一步研究。另外,鬼臼毒素对 AKP 有明显的抑制作用,处理 48 h 后,酶比活力仅为同期对照的 0.48 倍。可见,该酶系有可能是鬼臼毒素的作用靶标之一。由于鬼臼毒素类化合物的杀虫作用机理十分复杂(Inamori *et al.*, 1983, 1984; 林琏, 2004),至今其靶标也不清楚,因此有必要进行更为深入的研究。

由于鬼臼毒素对羧酸酯酶、谷胱甘肽 S-转移酶及细胞色素 P450 等多种代谢酶具有明显的激活作用,因此,在实际应用该类杀虫剂防治小菜蛾时,应考虑加入代谢酶抑制剂,以提高药效及作用速度。

参 考 文 献 (References)

Asperene KVA, 1962. Study of housefly esterase by means of a sensitive colorimetric method. *J. Insect Physiol.*, 8: 401 - 406.

Bessey OA, 1964. A method for the rapid determination of phosphatase with five cubic millimeters of serum. *J. Biol. Chem.*, 164: 321 - 329.

Bradford MM, 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.*, 72: 248 - 254.

Brooth J, Conner MJ, Meteauf RA, Larsen JR, 1973. A comparative study of the effect of selective inhibitors on esterase from the mosquito *Aopheles punetipennis*. *Comp. Biochem. Physiol.*, 44B: 1 185 - 1 195.

Chen ZH, 1987. Quantitative measurement and calculation of nutrient index in insects. *Entomological Knowledge*, 24(5): 299 - 301. [陈志辉, 1987. 昆虫营养指标的定量测量与计算. 昆虫知识, 24(5): 299 - 301]

Dong XL, Gao XW, Zheng BZ, 1998. Effect of plant allelochemicals on the glutathione S-transferase and acetylcholinesterase in *Helicoverpa armigera*. *Acta Phytopylalicca Sinica*, 25(1): 72 - 78. [董向丽, 高希武, 郑炳宗, 1998. 植物次生物质对棉铃虫谷胱甘肽 S 转移酶和乙酰胆碱酯酶的影响. 植物保护学报, 25(1): 72 - 78]

Gao R, Tian X, Zhang X, 2001. Study on insecticidal activities of 3 podophyllotoxin analogues. *J. Northwest Sci-Tech Univ. Agri. For. (Nat. Sci. Ed.)*, 29(1): 71 - 74. [高蓉, 田暄, 张兴, 2001. 3 种鬼臼毒素类物质杀虫活性测试. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 29(1): 71 - 74]

Hensen LG, Hodgson E, 1971. Biochemical characteristics of insect microsomes: N- and O-demethylation. *Biochem. Pharmacol.*, 20: 1 569 - 1 678.

Inamori Y, Kato Y, Kubo M, Baba K, Matsuyama Y, Sakai M, Kozawa M, 1983. Mechanisms of insecticidal action of deoxypodophyllotoxin (anthricin). I. *Chem. Pharm. Bull.*, 31(12): 4 464 - 4 468.

Inamori Y, Kato Y, Kubo M, Waku Y, Hayashiya K, Sakai M, Baba K, Kozawa M, 1984. Mechanisms of insecticidal action of deoxypodophyllotoxin (anthricin). II. *Chem. Pharm. Bull.*, 32

(5): 2 015 - 2 019.

Li GZ, Ma ZQ, Feng JT, Feng G, Zhang X, 2006. Effects of extracts from *Sabina vulgaris* Ant., podophyllotoxin and deoxypodophyllotoxin on growth and food utilization of *Mythimna separata* larvae. *Acta Entomologica Sinica*, 49(3): 404 - 409. [李广泽, 马志卿, 冯俊涛, 冯岗, 张兴, 2006. 砂地柏提取物鬼臼毒素和脱氧鬼臼毒素对粘虫幼虫生长发育和食物利用的影响. 昆虫学报, 49(3): 404 - 409]

Li YS, Luo WC, Mu LY, 1996. Effects of food plants on the aldrin epoxidationase and acetylcholinesterase of the diamondback moth. *Acta Phytopylalicca Sinica*, 23(2): 181 - 184. [李云寿, 罗万春, 慕立义, 1996. 不同寄主植物对小菜蛾艾氏剂环氧化酶和乙酰胆碱酯酶活性的影响. 植物保护学报, 23(2): 181 - 184]

Li YS, Luo WC, Zhao SH, 1996. Effects of food plants on the activity of carboxylesterase of the diamondback moth. *Journal of Shandong Agricultural University*, 27(2): 147 - 151. [李云寿, 罗万春, 赵善欢, 1996. 不同寄主植物对小菜蛾羧酸酯酶活性的影响. 山东农业大学学报, 27(2): 147 - 151]

Li YS, Luo WC, Zhao SH, 1997. Studies on the esterase isozyme of the diamondback moth feeding on different host plants. *Journal of Shandong Agricultural University*, 28(1): 5 - 8. [李云寿, 罗万春, 赵善欢, 1997. 取食不同寄主植物的小菜蛾酯酶同工酶的研究. 山东农业大学学报, 28(1): 5 - 8]

Lin J, 2004. Preliminary Study on the Insecticidal Mechanism of Deoxypodophyllotoxin. MSc Dissertation, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi. 34 - 38. [林琏, 2004. 脱氧鬼臼毒素杀虫作用机理初步研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文. 34 - 38]

Liu YQ, Zhang SG, Cheng J, Xiao H, Gao R, 2006. Bioactivity of several podophyllotoxin analogues. *Journal of Medical Postgraduates*, 19(3): 205 - 209. [刘艳青, 张守刚, 程洁, 肖杭, 高蓉, 2006. 鬼臼毒素类物质生物活性的研究. 医学研究生学报, 19(3): 205 - 209]

Wang JD, Tian X, Zhang X, 2000. The isolation and identification of podophyllotoxin from *Sabina vulgaris* Ant. *Acta Univ. Agric. Boreali-Occidentalis*, 28(6): 25 - 29. [王继栋, 田暄, 张兴, 2000. 砂地柏叶中鬼臼毒素的分离与鉴定. 西北农业大学学报, 28(6): 25 - 29]

Wu CC, Wang M, 2003. Effect of different diets on the susceptibility of insecticides and the activity of detoxifying enzymes in the beet armyworm, *Spodoptera exigua*. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 5(1): 56 - 60. [吴承春, 王沫, 2003. 不同食料对甜菜夜蛾药剂敏感性及解毒酶活性的影响. 农药学报, 5(1): 56 - 60]

Zhang X, Feng JT, Chen AL, Ma ZQ, 2002. A brief review on insecticidal function of Savin juniper (*Sabina vulgaris*). *J. Northwest Sci-Tech Univ. Agri. For. (Nat. Sci. Ed.)*, 30(4): 130 - 134. [张兴, 冯俊涛, 陈安良, 马志卿, 2002. 砂地柏杀虫作用研究概况. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 30(4): 130 - 134]

Zhang X, Zhao SH, 1983. Repellent and antifeedant activities of *Melia* plants on several insects. *Journal of South China Agricultural University*, 4(3): 1 - 7. [张兴, 赵善欢, 1983. 楝科植物对几种害虫的拒食和忌避作用. 华南农学院学报, 4(3): 1 - 7]