

毒死蜱对舞毒蛾食物利用和解毒酶及 AChE 活性的影响

李 慧¹, 严善春^{1,2}, 王志英^{1,2}, 葛士林¹, 曹传旺^{1,2*}

(1. 东北林业大学林学院森林保护学科, 黑龙江 哈尔滨 150040;

2. 东北林业大学林木遗传育种与生物技术教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:采用质量法和酶活性测定法研究了毒死蜱对舞毒蛾 (*Lymantria dispar*) 3 龄幼虫食物利用的影响, 并测定了其毒力及解毒酶、乙酰胆碱酯酶 (AChE) 的活性。用亚致死浓度 ($1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 毒死蜱处理小黑杨叶片, 饲喂舞毒蛾 3 龄幼虫, 其幼虫生长率 (RGR)、食物利用率 (ECI) 和食物转化率 (ECD) 均显著低于对照, 而近似消化率 (AD) 显著高于对照, 相对取食量 (RCR) 处理和对照间差异不显著。毒死蜱对舞毒蛾幼虫 24 h 致死中浓度 (LC_{50}) 为 $5.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其毒力低于三氟氯氰菊酯而高于氧化乐果。毒死蜱对舞毒蛾 3 龄幼虫体内羧酸酯酶 (CarE)、谷胱甘肽 S-转移酶 (GSTs) 和 AChE 均有抑制作用, 抑制程度为 $\text{CarE} > \text{AChE} > \text{GSTs}$ 。毒死蜱通过影响舞毒蛾食物利用和抑制酶活性而表现出杀虫活性, 为一种有效防治舞毒蛾的有机磷杀虫剂。

关键词: 毒死蜱; 舞毒蛾; 食物利用; 解毒酶; 乙酰胆碱酯酶

中图分类号: S763

文献标识码: A

Effects of Chlorpyrifos on Food Utilization and Detoxifying Enzymes and Acetylcholinesterase of *Lymantria dispar*

LI Hui¹, YAN Shan-chun^{1,2}, WANG Zhi-ying^{1,2}, GE Shi-lin¹, CAO Chuan-wang^{1,2}

(1. Department of Forestry Protection, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;

2. Key Laboratory of Forest Tree Genetic Improvement and Biotechnology (Northeast Forestry University), Ministry of Education, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: The effects of sublethal dose of chlorpyrifos (CPF) on food utilization of gypsy moth, *Lymantria dispar*, as well as CPF toxicity and enzyme activities of carboxylesterase (CarE), glutathione S-transferases (GSTs) and acetylcholinesterase (AChE) were evaluated in the 3rd-instar gypsy moth larvae using gravimetric method and measuring enzyme activities. Relative growth rate (RGR), efficiency of the conversion of ingested food (ECI) and efficiency of the conversion of digested food (ECD) of 3rd-instar larvae fed on poplar leaves treated by sublethal concentration of CPF were significantly lower than those fed on normal poplar leaves. However, approximate digestibility (AD) of the treatment was significantly higher than that of control. The relative consumption rate (RCR) of the treatment and control groups were not significantly different. The 24 h LC_{50} of CPF to the gypsy moth 3rd-instar larvae was $5.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which was higher than that of omethoate but lower than that of cyhalothrin. *In vitro* inhibition assay indicated that the activities of AChE, CarE and GSTs were inhibited by CPF depended on concentrations. The enzyme activity inhibition percent is $\text{CarE} > \text{AChE} > \text{GSTs}$. The results suggest CPF is a kind of effective organ-

收稿日期: 2010-01-07

基金项目: 国家 973 计划前期研究专项 (2009CB125906); 国家公益性行业科研项目 (200904029-4); 中国博士后基金 (20090450942)

作者简介: 李 慧 (1985—), 女, 内蒙古海拉尔, 硕士研究生, E-mail: lihui_crystal@126.com

* 通讯作者: 曹传旺 (1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事昆虫毒理学和环境毒理学研究. E-mail: chuanwangcao@yahoo.com.cn

ophosphorous insecticide for controlling gypsy moth.

Key words: chlorpyrifos; gypsy moth; food utilization; detoxifying enzymes; AChE

舞毒蛾 (*Lymantria dispar* Linnaeus) 属鳞翅目 (Lepidoptera) 毒蛾科 (Liparidae), 是一种世界性害虫。据报道, 其可危害苹果、梨、杨树和松树等 500 多种植物, 是我国重要的食量大、食性杂的果树和森林害虫, 给林业生产和经济发展带来严重的损失^[1]。目前, 化学防治仍是控制舞毒蛾暴发成灾的有效、迅速的措施之一, 寻找高效、低毒、低残留的杀虫剂仍是林业工作者的工作重点。

毒死蜱 (Chlorpyrifos) 是一种具有触杀、胃毒和熏蒸作用的高效、广谱、低毒的有机磷杀虫剂, 广泛应用于农作物和果树等害虫防治。毒死蜱的主要作用机理是通过抑制中枢神经系统乙酰胆碱酯酶 (AChE) 的活性, 导致神经信号传递阻断致使昆虫死亡^[2]。大量药效试验结果表明, 毒死蜱对农业害虫稻纵卷叶野螟 (*Cnaphalocrocis medinalis* Guenée)、大麦毛眼水蝇 (*Hydrellia griseola* Fallén)、黄曲条菜跳甲 (*Phyllotreta striolata* Fabricius) 等均有速效和理想的防治效果^[3-5]。目前, 有关毒死蜱对害虫食物利用及其相关酶活性的影响研究甚少, 对林业害虫的作用效果尚无报道。本文以林业重要害虫舞毒蛾为对象, 系统研究了毒死蜱对舞毒蛾毒力、食物利用、解毒酶和 AChE 活性的影响, 旨在全面了解毒死蜱对林业害虫的毒理机制和亚致死浓度对食物利用的影响, 为合理应用毒死蜱防治林业害虫提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试昆虫

2009 年 2 月下旬在东北林业大学示范林场采集舞毒蛾卵块, 于 4 °C 冰箱保存, 4 月上旬取出孵化, 在温度 (25 ± 1) °C、光照周期为 14L: 10D、相对湿度 75% 的条件下用新鲜的小黑杨 (*Populus simonii* Carr. × *P. nigra* L.) 叶片饲养。本文各项实验均选择健康、大小一致的 3 龄舞毒蛾幼虫为试虫。

1.2 主要试剂

40% 氧化乐果乳油 (天津市农药研究所); 48% 毒死蜱乳油 (商品名: 陶丝本, 东莞市瑞德丰生物科技有限公司); 5% 三氟氯氰菊酯微乳剂 (商品名: 瑞功, 东莞市瑞德丰生物科技有限公司); α-乙酸萘酯 (α-NA), 购自国药集团化学试剂有限公司; 碘化硫代乙酰胆碱 (ATCh)、二硫代二硝基苯甲酸

(DTNB)、毒扁豆碱、固蓝 B 盐 (Fast Blue B Salt)、十二烷基硫酸钠 (SDS)、乙二胺四乙酸二钠盐 (EDTA) 均购自美国 Sigma 公司; 考马斯亮蓝 G-250、牛血清白蛋白 (BSA) 购自国药集团化学试剂有限公司; 磷酸氢二钠和磷酸二氢钠及其他试剂均为化学分析纯。

1.3 实验方法

1.3.1 生物测定 采用叶片药膜法进行生物测定。用蒸馏水将 40% 氧化乐果乳油稀释成 800、400、200、100、50、25 mg · L⁻¹, 48% 毒死蜱乳油稀释成 25、12.5、6.25、3.125、1.5625、0.78 mg · L⁻¹, 5% 三氟氯氰菊酯微乳剂稀释成 12.5、6.25、3.125、2、0.78、0.25 mg · L⁻¹, 以蒸馏水处理为对照。将未接触过任何药剂的新鲜小黑杨叶片在稀释药液中浸渍 10 s 取出, 阴干。用蘸有充足水分的脱脂棉裹住叶柄, 放入透气性良好的塑料培养皿 (直径 *d* = 9 cm) 中, 将健康、大小一致的舞毒蛾 3 龄幼虫接到小黑杨叶片上, 每皿放 20 头, 每个浓度重复 3 次。置于恒温养虫室内 (温度 (25 ± 1) °C、相对湿度 75%、光周期 16L: 8D) 饲养, 分别于 3、6、24、48 和 72 h 后检查死亡数。以毛笔轻触幼虫不能活动视为死亡。

1.3.2 舞毒蛾食物利用测定 用蒸馏水将 48% 毒死蜱乳油稀释至 24 h 亚致死浓度 LC₁₀, 以蒸馏水为对照。将小黑杨叶片浸渍于药液中 10 s, 取出自然阴干, 称其鲜质量后放入培养皿内, 接入饥饿 10 h 后已称过体质量的 3 龄幼虫, 待取食 24 h 后将舞毒蛾幼虫、取食后的小黑杨叶片及粪便分别移至 50 °C 烘箱内烘 4 h 后, 再升温至 120 °C 烘至恒质量, 称干质量。另取刚蜕皮饥饿 10 h 的 20 头 3 龄幼虫及新鲜、大小一致的小黑杨叶片 20 片, 分别称其鲜质量, 然后在 50 °C 烘箱内烘 4 h 后, 再升温至 120 °C 烘干至恒质量, 称干质量, 计算幼虫和小黑杨干湿比, 以推测幼虫干质量。参照 Waldbauer 方法^[6] 计算各营养指标:

$$\text{相对生长率 (RGR)} = (D - C) / ((C + D) / 2) \times 100\%;$$

$$\text{相对取食量 (RCR)} = (A - B) / ((C + D) / 2);$$

$$\text{食物利用率 (ECI)} = (D - C) / (A - B) \times 100\%;$$

$$\text{食物转化率 (ECD)} = (D - C) / (A - B - E) \times 100\%;$$

$$\text{近似消化率 (AD)} = (A - B - E) / (A - B)$$

$\times 100\%$

上式中: A 为试验前叶片干质量; B 为试验后叶片干质量; C 为试验前幼虫干质量; D 为试验后幼虫干质量; E 为幼虫粪便干质量。

1.3.3 羧酸酯酶(CarE)体外抑制 将舞毒蛾3龄幼虫加1 mL 0.04 mol·L⁻¹ pH值7.0的磷酸盐缓冲液,冰浴充分匀浆,于4℃、12 000×g离心15 min,上清液为原酶。CarE活性测定参照Van Aspen方法^[7],略加修改。试管中依次加入1.8 mL 3×10⁻⁴ mol·L⁻¹ α-NA(含毒扁豆碱1:1),0.05 mL稀释酶液,30℃温育15 min后,加入1.8 mL显色剂(1%固蓝B盐:5%SDS=2:5,体积比)终止反应并显色,静置5~10 min后于波长600 nm处测定吸光值。对照管中在加入显色剂后补加酶液,实验重复3次。CarE活性抑制分析参考高希武等^[8]方法。将不同浓度的毒死蜥与CarE在30℃温育5 min,加入α-NA底物温育10 min后用显色剂终止抑制反应,测定其残余活性。CarE活性单位为ΔOD·min⁻¹·mg⁻¹protein。毒死蜥测试7个浓度(0.3125、0.625、1.25、2.5、5、10、20 mg·L⁻¹),每个浓度3次重复。

1.3.4 乙酰胆碱酯酶(AChE)体外抑制 将舞毒蛾3龄幼虫洗净、擦干,剪下头部,在1 mL 0.1 mol·L⁻¹ pH值8.0预冷磷酸缓冲液(含0.1% Triton X-100)中冰浴匀浆,于4℃、10 000×g下离心15 min,取上清液抽滤即为原酶。AChE活性测定参考Gorun(1978)改进的Ellman方法^[9]。试管中依次加入0.5 mL 0.01 mol·L⁻¹ ATCh,0.5 mL稀释酶液,30℃温育10 min后,加入2 mL DTNB显色剂(含40%乙醇)终止并显色反应,于412 nm测其吸光值。活性抑制参考刘洪霞等^[10]方法,略加修改。将不同浓度毒死蜥与AChE在30℃温育5 min,然后加入底物温育5 min后用显色剂终止抑制反应,测定其残余活性。AChE活性单位以mmol·min⁻¹·mg⁻¹protein表示。毒死蜥测试7个浓度(0.3125、0.625、1.25、2.5、5、10、20 mg·L⁻¹),每个浓度3次重复。

1.3.5 谷胱甘肽S-转移酶(GSTs)体外抑制 将舞毒蛾3龄幼虫加1 mL 0.1 mol·L⁻¹ pH值6.5的磷酸盐缓冲液(分别含1 mmol·L⁻¹ EDTA、PMSF和DTT),在冰浴上充分匀浆,于4℃、10 000×g离心30 min,上清抽滤后即原酶。活性测定参照Habig等^[11]方法。于石英比色杯中依次加入2.7 mL 0.1 mol·L⁻¹ pH值6.5的磷酸缓冲液,150 μL 30 mmol·L⁻¹ GSH,50 μL酶液和100 μL CDNB,混匀,25℃下于340 nm波长处,测定2 min内OD变化值,对照以100 μL缓冲液代替酶液。将不同浓度毒死蜥与GST在25℃温育5 min,测定GST残余活性。GST活性单位以nmol·min⁻¹·mg⁻¹protein表示。毒死蜥测试7个浓度(0.3125、0.625、1.25、2.5、5、10、20 mg·L⁻¹),每个浓度3次重复。

1.3.6 蛋白质含量测定 参照Bradford^[12]的考马斯亮蓝G-250法。

1.4 数据统计分析

利用POLO软件计算毒死蜥LC₅₀和亚致死浓度LC₁₀。

酶活性抑制率=(对照活性-残留活性)/对照活性×100%。

利用GraphPad InStat Version 3.0软件进行统计分析,食物利用指标差异比较采用单因素方差分析(One-way ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 毒死蜥对舞毒蛾的毒力

表1表明:毒死蜥对舞毒蛾3龄幼虫24 h致死中浓度(LC₅₀)为5.86 mg·L⁻¹,三氟氯氰菊酯为0.99 mg·L⁻¹,三氟氯氰菊酯的作用效果是毒死蜥的5.92倍,这表明三氟氯氰菊酯对舞毒蛾3龄幼虫的毒力大于毒死蜥;氧化乐果处理舞毒蛾3龄幼虫48、72 h的LC₅₀分别为228.24、108.78 mg·L⁻¹,对舞毒蛾3龄幼虫毒力不及毒死蜥和三氟氯氰菊酯。毒死蜥对舞毒蛾3龄幼虫24 h亚致死浓度(LC₁₀)为1.5 mg·L⁻¹,该浓度作为研究毒死蜥对舞毒蛾3龄幼虫食物利用影响的处理浓度。

表1 3种农药不同处理时间对舞毒蛾3龄幼虫的毒力

药剂	处理时间/h	LC ₅₀ (95%置信区间)/(mg·L ⁻¹)	斜率	卡方值(χ ²)
毒死蜥	3	11.04(8.75~14.50)	2.41±0.34	7.41
	6	8.36(6.72~10.54)	2.58±0.34	14.30
	24	5.86(4.28~8.14)	2.14±0.27	22.11
氧化乐果	48	228.24(171.50~289.694)	2.84±0.47	13.62
	72	108.78(50.08~160.45)	2.20±0.51	14.82
三氟氯氰菊酯	6	2.88(1.35~8.70)	0.65±0.11	14.32
	24	0.99(0.54~1.53)	1.05±0.18	5.09

注:卡方值小于χ²_(19, 0.05) = 30.14,故毒力回归方程与实际相符。

2.2 毒死蜥对舞毒蛾食物利用的影响

表2表明:舞毒蛾3龄幼虫取食毒死蜥亚致死浓度(LC₁₀)处理的小黑杨叶片后,幼虫相对生长率、食物利用率、食物转化率分别为23.92%、13.35%、

16.11%,显著低于对照($P < 0.05$)。对照和处理组幼虫相对取食量分别为1.93和2.07,二者差异不显著。处理组幼虫近似消化率(83.28%)极显著高于对照组(53.90%),为对照组的1.55倍($P < 0.01$)。

表2 毒死蜥亚致死浓度对舞毒蛾3龄幼虫食物利用的影响

项目	相对生长率/%	相对取食量	食物利用率/%	食物转化率/%	近似消化率/%
对照	35.71 ± 0.83 ***	1.93 ± 0.60	19.97 ± 5.96 **	36.51 ± 5.89 *	53.90 ± 9.06
处理	23.92 ± 2.22	2.07 ± 0.86	13.35 ± 6.80	16.11 ± 8.31	83.28 ± 4.50 **

注:同一列数据后***、**和*分别表示对照和处理之间差异极其显著($P < 0.001$)、极显著($P < 0.01$)和显著($P < 0.05$)。

2.3 毒死蜥对舞毒蛾解毒酶和AChE体外抑制

毒死蜥对舞毒蛾体内羧酸酯酶(CarE)、谷胱甘肽S-转移酶(GSTs)和乙酰胆碱酯酶(AChE)活性体外抑制结果(图1)表明:0~20 mg·L⁻¹毒死蜥对CarE、GSTs和AChE三种酶均有抑制作用,且随着浓度的增加而增大;其中,对解毒酶CarE抑制作用最为显著,抑制率为39.30%~81.64%;其次为神经递质水解酶AChE,抑制率为5.08%~27.11%;对解毒酶GSTs抑制作用最小,为3.94%~22.49%。

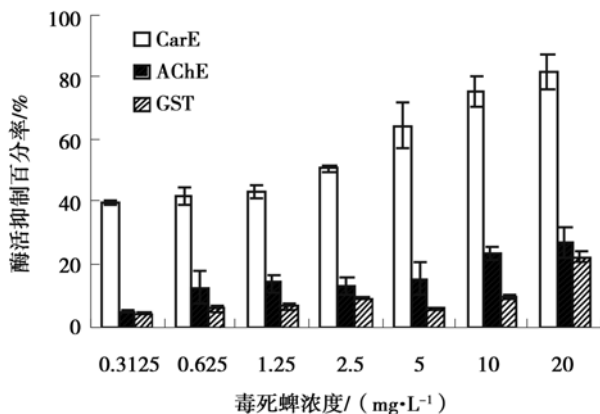


图1 毒死蜥对舞毒蛾3龄幼虫解毒酶(CarE、GSTs)和AChE体外抑制

3 讨论

毒死蜥是一种广谱性、低毒有机磷杀虫剂,可以抑制胆碱酯酶活性,还可以阻断植物的光合作用,既是杀虫剂也是除草剂,是目前我国生产中应用较广、具有代表性的有机磷杀虫剂的理想品种^[4,13]。本文室内生物测定结果显示:毒死蜥对舞毒蛾3龄幼虫具有较高的杀虫活性,其毒力高于常用杀虫剂氧化乐果,但低于速效菊酯类杀虫剂三氟氯氰菊酯,这可能是由于毒理机制不同所致。

定量研究亚致死浓度杀虫剂处理的食物对昆虫摄食量、食物利用、转化、代谢等营养指标的影响,可以准确了解低浓度药剂对昆虫食物利用效率的影响^[14]。本项研究结果显示:亚致死浓度毒死蜥处理幼虫食物后,舞毒蛾3龄幼虫的相对生长率、食物利用率和食物转化率显著降低,这表明亚致死浓度毒死蜥通过降低舞毒蛾幼虫对食物的利用和转化而阻止其生长;然而,毒死蜥处理显著增加了幼虫近似消化率,这可能是舞毒蛾中肠增加对食物消化代谢速度,缩短药剂在中肠残留时间,从而有利于最大化的获取更多的营养物质,但这需要高的消化率对低的转化率和利用率进行生理补偿才能维持生命的延续^[15]。受病原菌(如微孢子、真菌和病毒)感染的鳞翅目昆虫幼虫对食物的近似消化率的影响也有类似效果^[16]。亚致死浓度毒死蜥对舞毒蛾3龄幼虫相对取食量作用效果不明显。与本文结果不同,唐文成等^[14]报道,低浓度($\leq 100 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)毒死蜥对5龄烟草近尺蠖夜蛾(*Prodenia litura* Fabricius)幼虫食物利用的影响不明显,但可显著增加6龄幼虫相对生长率、食物利用率和食物转化率,这可能是由于毒死蜥的浓度及害虫种类、虫龄不同所致。

内源和外源有毒物质(包括杀虫剂)通过抑制或激活昆虫解毒酶系活性而使其产生适应性^[17]。CarE是昆虫体内的重要解毒酶系,主要通过水解某些含有酯键的内源和外来有害物质,使其分解,排出体外,从而达到解毒的目的^[18]。大量研究已表明,有机磷杀虫剂抑制昆虫羧酸酯酶而使之活性降低,且抑制大小差异是产生毒力大小的主要原因之一^[19]。本文研究表明,毒死蜥对CarE有显著的体外抑制作用,20 mg·L⁻¹毒死蜥抑制率达81.64%。GSTs是对杀虫剂产生代谢抗性的另一重要酶系,能对外源有毒物质解毒,保护细胞免受氧化损伤,参与许多分子的解毒过程^[20-21]。一定浓度(0.3125~20 mg·L⁻¹)的毒死蜥对舞毒蛾3龄幼虫GSTs也有

抑制作用,在一定程度上降低了 GSTs 的代谢能力,但总体来看影响不大。AChE 是毒死蜱作用的主要靶标,其通过抑制 AChE 活性导致乙酰胆碱(ACh)不能分解而堆积在突触间隙,引起一系列毒性作用^[22]。毒死蜱对舞毒蛾的 AChE 活性有抑制作用,但作用不显著,20 mg · L⁻¹ 毒死蜱抑制率仅为 27.11%,表明舞毒蛾的 AChE 对毒死蜱不敏感。这些研究结果表明,解毒酶 CarE、GSTs 和 AChE 参与了毒死蜱对舞毒蛾的致毒作用。总之,杀虫剂对害虫毒理机制研究是害虫可持续治理中一项复杂而重要的课题,探讨杀虫剂对害虫营养利用和生化及分子机制,对于合理评价和利用杀虫剂具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 胡春祥. 舞毒蛾生物防治研究进展[J]. 东北林业大学学报, 2002, 30 (4): 40-43
- [2] 王 香, 陈晓萍, 方 舒, 等. 毒死蜱对神经系统发育毒性作用的研究进展[J]. 生物学杂志, 2009, 26 (3): 56-58
- [3] 朱文达, 郭嗣斌, 涂爱萍, 等. 48% 毒死蜱乳油对水稻纵卷叶螟的防治效果[J]. 华中农业大学学报, 2008, 27 (1): 56-58
- [4] 卢 颖, 姜 龙, 毛军旗, 等. 48% 毒死蜱 EC 防治水稻潜叶蝇的药效试验[J]. 农药, 2008, 47 (4): 300-301
- [5] 郑丽祯, 傅建炜, 陈小龙, 等. 黄曲条跳甲对毒死蜱敏感性差异的生化机制[J]. 昆虫知识, 2009, 46 (2): 256-259
- [6] Waldbauer G P. The consumption, digestion and utilization of solanaceous and non-solanaceous plants by larvae of the tobacco hornworm, *Protoparce sexta* (Johan.) (Lepidoptera: Sphingidae) [J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 1964, 7: 253
- [7] Van Aspern K. A study of housefly esterase by means of a sensitive colorimetric method [J]. Insect Physiology, 1962, 8: 401-406
- [8] 高希武, 郑炳宗, 梁同庭, 等. 杀虫剂混用或加增效剂对爪-棉蚜增效作用及机制的研究[J]. 植物保护学报, 1989, 16 (4): 273-278
- [9] 高希武. Gorun 等改进的 Ellman 胆碱酯酶活性测定方法介绍[J]. 昆虫知识, 1987, 24 (4): 245-246
- [10] 刘洪霞, 高希武, 冷培恩. 花翅摇蚊乙酰胆碱酯酶的底物专一性及对胆碱酯酶抑制剂敏感度的比较[J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14 (2): 211-214
- [11] Habig W H, Pabst M J, Jakoby W B. Glutathione S-transferase AA from rat liver[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1976, 175 (2): 710-716
- [12] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding [J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72 (2): 248-254
- [13] Fountain M T, Brown V K, Gange AC, et al. The effects of the insecticide chlorpyrifos on spider and Colembola communities [J]. Pedobiologia, 2007, 51: 147-158
- [14] 唐文成, 孙虹霞, 舒迎花, 等. 低浓度毒死蜱对斜纹夜蛾幼虫生长发育和食物利用的影响[J]. 环境昆虫学报, 2009, 31 (2): 137-142
- [15] 高海燕, 王 静, 朱九生, 等. 亚致死剂量氨基阿维菌素苯甲酸盐对家蚕食物利用的影响[J]. 农药学报, 2008, 10 (3): 297-302
- [16] Rath S S, Prasad B C, Sinha BRRP. Food utilization efficiency in fifth instar larvae of *Antheraea mylitta* (Lepidoptera: Saturniidae) infected with *Nosema* sp. and its effects on reproductive potential and silk production [J]. Journal of Invertebrate Pathology, 2003, 83: 1-9
- [17] 唐振华, 毕 强. 杀虫剂作用的分子行为[M]. 上海: 上海远东出版社, 2003: 58-110
- [18] Cao C W, Zhang J, Gao X W, et al. Overexpression of carboxylesterase gene associated with organophosphorous insecticide resistance in cotton aphids, *Aphis gossypii* (Glover) [J]. Pesticide biochemistry and physiology, 2008, 90: 175-180
- [19] Wheelock C E, Shan G, Ottea J. Overview of carboxylesterases and their role in the metabolism of insecticides [J]. Journal of Pesticide Science, 2005, 30: 75-83
- [20] Motoyama N, Dauterman W C. Glutathione S-transferases: Their role in the metabolism of organophosphorus insecticides [J]. Review of Biochemistry and Toxicology, 1980, 2: 49-69
- [21] Yu S J. Consequences of induction of foreign compounds metabolizing-enzyme in insects [M] // Brattsten L B, Ahmad S. Molecular Aspects of Insect-Plant Association. Plenum Press, New York, 1986: 153
- [22] 杨正先, 孟范平, 刘 强, 等. 家蝇 AChE 检测毒死蜱残留的最佳条件研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29 (7): 42-44