

溴氰虫酰胺对棉蚜和麦长管蚜 生物活性的温度效应*

窦亚楠^{1**} 安静杰¹ 郭江龙¹ 袁文龙² 魏洪亮³
党志红¹ 高占林¹ 李耀发^{1***}

(1. 河北省农林科学院植物保护研究所, 河北省农业有害生物综合防治工程技术研究中心, 农业农村部华北北部作物有害生物综合治理重点实验室, 保定 071000; 2. 河北省植保植检总站, 石家庄 050031; 3. 保定市植保植检站, 保定 071051)

摘要 【目的】不同温度下, 杀虫剂对昆虫的生物活性因杀虫剂品种及昆虫种类的不同而表现出较大的差异。研究杀虫剂的温度效应及其影响机制, 为杀虫剂的田间合理使用提供技术支持。【方法】本研究采用浸渍法测定不同温度下双酰胺类杀虫剂溴氰虫酰胺对棉蚜 *Aphis gossypii* Glover 和麦长管蚜 *Sitobion avenae* Fabricius 的生物活性, 并进一步研究亚致死剂量溴氰虫酰胺处理后, 棉蚜和麦长管蚜体内重要解毒酶羧酸酯酶 (CarE)、谷胱甘肽 *S*-转移酶 (GST)、多功能氧化酶 (MFO) 和 UDP-葡萄糖醛酸转移酶 (UGT) 比活力随温度变化的趋势。【结果】溴氰虫酰胺对棉蚜和麦长管蚜均表现为正温度效应, 温度系数最高分别可达+9.44 和+8.24。亚致死剂量溴氰虫酰胺作用下, 两种蚜虫体内主要解毒酶的比活力测定表明, 15 °C 下, 棉蚜体内 GST 比活力值为 211.27 nmol·mg⁻¹·min⁻¹, 显著高于对照, 30 °C 下, 比活力值为 203.29 nmol·mg⁻¹·min⁻¹, 显著低于对照。与对照相比, 棉蚜 GST 比活力随温度升高逐渐降低, 这一趋势与溴氰虫酰胺对棉蚜的正温度效应的变化一致。同样, 麦长管蚜体内 GST 和 UGT 比活力较对照的变化趋势也与溴氰虫酰胺对麦长管蚜温度效应的变化相符。【结论】溴氰虫酰胺是对棉蚜和麦长管蚜具有明显的正温度系数药剂, 棉蚜体内的 GST 和麦长管蚜体内的 GST 和 UGT 可能参与溴氰虫酰胺对两种蚜虫的温度效应变化过程。

关键词 温度系数; 蚜虫; 杀虫剂; 毒力; 解毒酶

Effects of temperature on the bio-activity of cyananthramide to *Aphis gossypii* Glover and *Sitobion avenae* Fabricius

DOU Ya-Nan^{1**} AN Jing-Jie¹ GUO Jiang-Long¹ YUAN Wen-Long² WEI Hong-Liang³
DANG Zhi-Hong¹ GAO Zhan-Lin¹ LI Yao-Fa^{1***}

(1. Plant Protection Institute, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, IPM Center of Hebei Province, Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Northern Region of North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Baoding 071000, China; 2. Plant Protection and Quarantine Station of Hebei Province, Shijiazhuang 050031, China; 3. Plant Protection and Quarantine Station of Baoding, Baoding 071051, China)

Abstract 【Objectives】The bio-activity of insecticides to insects varies greatly temperature. Studying the effects of temperature on insecticides, and mechanism underlying these effects, can provide a scientific basis for the rational use of insecticides at different temperatures. 【Methods】The dipping method was used to measure the bio-activity of cyantraniliprole, a diamide insecticide, against *Aphis gossypii* Glover and *Sitobion avenae* Fabricius at different temperatures. After treatment with a sub-lethal dose of cyantraniliprole, the activity of carboxylesterase (CarE), glutathione *S*-transferase (GST), multifunctional

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划 (2017YFD0201906); 国家自然科学基金项目(31601632); 河北省农林科学院创新工程项目 (2022KJCXZX-ZBS-4); 河北省棉花产业技术体系 (HBCT2018040204)

**第一作者 First author, E-mail: 1304894663@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: liyaofa@126.com

收稿日期 Received: 2021-09-16; 接受日期 Accepted: 2022-01-05

oxidase (MFO) and UDP-glycosyl transferase (UGT) in *A. gossypii* and *S. avenae* was also measured at different temperatures. **[Results]** Temperature had a positive effect on the bio-activity of cyantraniliprole to *A. gossypii* and *S. avenae*; the highest temperature coefficients were +9.44 and +8.24, respectively. After receiving a sub-lethal dose of cyantraniliprole, the specific activity of GST in *A. gossypii* was $211.27 \text{ nmol} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ at 15°C ; significantly higher than in the control. However, at 30°C this fell to $203.29 \text{ nmol} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, which was significantly lower than in the control. Consistent with the positive relationship between temperature and the bio-activity of cyantraniliprole to *A. gossypii*, GST activity gradually decreased with increasing temperature relative to that in the control. Similarly, differences in GST and UGT activity between treatment and control groups were consistent with those in the bioactivity of cyantraniliprole at different temperatures in *S. avenae*. **[Conclusion]** There is a significant, positive correlation between the bioactivity of cyantraniliprole to *A. gossypii* and *S. avenae* and temperature. GST and GST may be involved in the effect of temperature on cyantraniliprole in *A. gossypii*, and UGT may play a similar role in *S. avenae*.

Key words temperature coefficient; aphid; insecticide; toxicity; detoxification enzyme

杀虫剂对昆虫的生物活性(或毒力)易受温度、湿度、光照和 pH 等多种环境因素影响,其中温度是影响较为显著的因素之一(Gordon, 2005; DeLorenzo *et al.*, 2006)。随着温度的增加,杀虫剂生物活性表现为升高、降低或没有明显变化,分别被称为正、负或无温度效应,该杀虫剂也因而被称为正、负或无温度效应药剂(IUPS Thermal Commission, 2001)。温度系数常被用来表示温度效应变化的程度,即温度每上升 1°C , 杀虫剂生物活性变化的程度(Gordon, 2005)。不同类型杀虫剂对不同昆虫或相同类型杀虫剂对同种昆虫的温度效应可能会有所不同。例如在供试 $22\text{--}34^\circ\text{C}$ 范围内,随温度上升,有机磷类杀虫剂毒死蜱对褐飞虱 *Nilaparvata lugens* Stål 的生物活性明显增强,而昆虫生长调节剂类杀虫剂噻嗪酮的生物活性无显著变化(杨亚军等, 2016)。随温度(从 $15\text{--}35^\circ\text{C}$)升高,新烟碱类杀虫剂吡虫啉和啶虫脒对绿盲蝽 *Apolygus lucorum* 表现为明显正温度效应,拟菊酯类杀虫剂高效氯氰菊酯则对其表现为明显负温度效应(刘佳等, 2016),但氯氰菊酯和溴氰菊酯却对致倦库蚊 *Culex quinquefasciatus* 和小菜蛾 *Plutella xylostella* 表现为正温度效应(Jaleel *et al.*, 2020; Akinwande *et al.*, 2021)。由此来看,即使是同类杀虫剂,由于作用对象昆虫的种类不同,其温度效应也会出现明显差异。

影响杀虫剂温度效应的机制已有相关的研究报道,温度主要通过影响杀虫剂的理化性质和

昆虫的生命活动及代谢改变杀虫剂的生物活性(Johnson, 1990)。昆虫细胞内由解毒酶介导的解毒代谢过程是昆虫抵抗外界有毒外源物质的一个重要途径(梅洋等, 2019)。在此过程中,羧酸酯酶(CarE)、细胞色素 P450(CYP450)、谷胱甘肽 S-转移酶(GST)和 UDP-葡萄糖醛酸转移酶(UGT)等解毒酶系通过对外源化合物的逐步催化,使之最终排出细胞外,因而在机体代谢外源物质、保护细胞免受急性毒性化学物质攻击中起重要作用(徐莉等, 2020)。刘佳等(2015)研究发现,CarEs、GSTs 和多功能氧化酶(MFOs)活力随温度的变化出现了类似“钟形曲线”的现象,此外,还发现 GSTs 与溴虫腈对绿盲蝽的负温度效应密切相关。Mao 等(2019)同样发现 CYP450 分别参与了毒死蜱、环氧虫啉和烯啶虫胺对褐飞虱生物活性的正温度效应,及醚菊酯的负温度效应。

棉蚜 *Aphis gossypii* Glover 和麦长管蚜 *Sitobion avenae* Fabricius 属半翅目昆虫,分别是棉田和麦田的重要害虫,多分布于棉花叶片或小麦穗部刺吸汁液,造成叶片卷曲,植株萎缩,同时其排泄的蜜露可造成霉污病,并传播病毒,严重影响植株的正常生长(李耀发等, 2013; Shrestha and Parajulee, 2013)。近年来,双酰胺类杀虫剂已成为世界上第 4 类最常用的杀虫剂品种,该类杀虫剂作用于昆虫的鱼尼丁受体,其中氯虫苯甲酰胺等多数品种对鳞翅目昆虫表现出了优秀的防治效果,而溴氰虫酰胺不仅对鳞翅目害虫防效优

异,还能有效防治刺吸式口器害虫(Cordova *et al.*, 2006; Foster *et al.*, 2012)。然而有关溴氰虫酰胺对棉蚜和麦长管蚜的温度效应尚未清晰,本研究将在弥补双酰胺类杀虫剂对刺吸式害虫温度效应研究空白的同时,丰富杀虫剂对昆虫生物活性温度效应的研究现状。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

棉蚜和麦长管蚜种群均来自于河北省农林科学院植物保护研究所养虫室长期饲养种群,温度(20 ± 1) $^{\circ}\text{C}$,相对湿度60%-70%,L:D=16L:8D。

1.2 供试药剂

95.0%溴氰虫酰胺原药(河北威远生物化工有限公司)。

1.3 生物活性测定方法

试验所有操作均在系列温控室内进行,温控室可控温度范围10-35 $^{\circ}\text{C}$ 。棉蚜的试验温度设置为15、20、25和30 $^{\circ}\text{C}$,麦长管蚜的试验温度设置为15、20和25 $^{\circ}\text{C}$ 。接触药剂前24 h将试虫置于不同温度的温控室中饲养,使其适应环境温度。

采用浸渍法测定溴氰虫酰胺对供试蚜虫的生物活性。将溴氰虫酰胺原药提前用丙酮溶解后配制为50 mg/mL的母液,保存至4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱待用,随后用0.1%吐温80水溶液将其稀释成为5-7个浓度梯度的药液。将生理状态一致的无翅成蚜连同寄主植物叶片完全浸渍于药液中,10 s后取出,在吸水纸上自然晾干后,置于铺有滤纸的养虫盒内,并在叶片根部覆上浸湿棉球。以0.1%的吐温80水溶液为对照。每个处理3次重复,总数不少于90头试虫,72 h后检查死亡结果,以用毛笔轻触试虫虫体,试虫无反应视为死亡。

1.4 解毒酶比活力测定方法

1.4.1 试虫处理 取生物活性测定得到的各温度下的 $0.1\times\text{LC}_{50}$ 值为作为亚致死浓度,以0.1%

吐温80水溶液为对照,在各温度下进行药剂处理,其余步骤同1.2生物活性测定方法。72 h后将试虫挑入1.5 mL的离心管中,液氮速冻后保存至-80 $^{\circ}\text{C}$ 下备用。

1.4.2 酶源制备 按每0.04-0.06 g试虫加1 mL缓冲液的比例,向装有试虫的离心管中加入预冷的缓冲液,冰浴条件下充分研磨至匀浆,并在4 $^{\circ}\text{C}$ 、10 000 g条件下离心15 min,取上清液,混匀,冰浴待用。不同解毒酶选用不同的缓冲液,0.04 mol/L pH7.0的磷酸缓冲液用于CarE,0.05 mol/L pH7.5的Tris-HCl缓冲液用于GST,0.1 mol/L pH7.8的磷酸缓冲液用于MFO,0.1 mol/L pH7.6的磷酸缓冲液用于UGT。

1.4.3 比活力测定 CarE比活力测定参照冉春等(2007)的方法;GST测定参照Clark等(1984)的方法;MFO测定参照Kim等(2007)的方法;UGT测定参照王梦瑶(2018)的方法。

1.4.4 酶源蛋白质测定 参考Bradford(1976)的考马斯亮蓝G-250染色法测定酶源蛋白含量。

1.5 数据分析

使用DPS v6.55分析所得数据,得到各温度下的致死中浓度(LC_{50})等参数。各温度与最低温度的 LC_{50} 比值的绝对值为温度系数,其中生物活性随温度升高而增强,温度系数前标“+”,反之标“-”。各温度与最低温度下95%置信区间不重叠则认为温度系数具有显著性差异。

使用SPSS 19.0软件进行差异显著性分析,使用 t -检验($P<0.05$)分析同一温度下不同处理间的解毒酶比活力的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 溴氰虫酰胺对棉蚜和麦长管蚜生物活性的温度效应

不同供试温度下,溴氰虫酰胺对棉蚜和麦长管蚜生物活性的测定结果如表1所示。对于棉蚜,在15-30 $^{\circ}\text{C}$ 间,溴氰虫酰胺对棉蚜的生物活性随温度升高逐渐增强, LC_{50} 由41.55 mg/L降至4.40 mg/L。在20 $^{\circ}\text{C}$ 下,温度系数为+1.32,

生物活性受温度影响不显著, 在 25 ℃和 30 ℃下温度系数分别为+4.91 和+9.44, 表现为显著的正温度效应。对于麦长管蚜, 在 15-25 ℃下, 溴氰虫酰胺对麦长管蚜的 LC₅₀ 值分别为 2.80、1.71 和 0.34 mg/L, 随温度升高溴氰虫酰胺对麦长管蚜的生物活性逐渐增强。在 25 ℃下, 生物活性较 15 ℃增加了 8.24 倍, 溴氰虫酰胺对麦长管蚜整体表现为显著的正温度效应。

表 1 溴氰虫酰胺对棉蚜和麦长管蚜生物活性的温度效应

Table 1 Temperature effects on the bio-activity of cyantraniliprole to *Aphis gossypii* and *Sitobion avenae*

供试昆虫 Insects	温度 (°C) Temperatures (°C)	斜率±标准误 Slope±SE	致死中浓度 (mg/L) LC ₅₀ (mg/L)	95%置信限 95% CL	P 值 P-value	温度系数 Temperature coefficient
棉蚜 <i>A. gossypii</i>	15	1.26±0.17	41.55	32.13-57.80	0.41	—
	20	0.42±0.11	31.54	15.99-71.05	0.95	+1.32
	25	0.81±0.18	8.47	4.17-13.08	0.34	+4.91*
	30	1.15±0.18	4.40	2.90-6.15	0.38	+9.44*
麦长管蚜 <i>S. avenae</i>	15	0.90±0.19	2.80	1.67-3.97	0.45	—
	20	1.37±0.19	1.71	1.24-2.21	0.65	+1.64
	25	1.26±0.23	0.34	0.16-0.52	0.15	+8.24*

*表示各温度的致死中浓度与 15 ℃的相比差异显著 (*t*-检验, *P*<0.05)。
* indicates the LC₅₀ at each temperature is significantly different from that at 15 ℃ (*t*-test, *P*<0.05).

2.2 不同温度下溴氰虫酰胺处理后试虫体内解毒酶比活力变化

2.2.1 棉蚜体内解毒酶比活力变化 不同温度下溴氰虫酰胺处理后棉蚜体内主要解毒酶比活力变化如表 2。对于 GST, 在 15 ℃时, 棉蚜经溴氰虫酰胺处理后的比活力显著高于对照 (*P*=0.013), 在 30 ℃时显著低于对照 (*P*=0.037), 与棉蚜对溴氰虫酰胺敏感性随温度升高逐渐增强的趋势相符; 而 CarE、MFO 和

UGT 比活力与对照相比, 均不符合溴氰虫酰胺对棉蚜的生物活性随温度变化的趋势。

2.2.2 麦长管蚜体内解毒酶比活力变化 不同温度下溴氰虫酰胺处理后麦长管蚜体内主要解毒酶比活力变化如表 3。对于 GST, 麦长管蚜经溴氰虫酰胺处理后, GST 比活力在 15 ℃ (*P*=0.007) 和 20 ℃ (*P*=0.010) 下显著高于对照, 在 25 ℃下被药剂诱导后反而显著低于对照 (*P*=0.016), 与溴氰虫酰胺生物活性随温度的

表 2 不同温度下溴氰虫酰胺处理后棉蚜解毒酶比活力变化

Table 2 Variation of specific activity of detoxification enzymes in *Aphis gossypii* treated by cyantraniliprole at different temperatures

温度 (°C) Temperatures (°C)	处理 Treatments	羧酸酯酶 CarE (nmol·mg ⁻¹ ·min ⁻¹)	谷胱甘肽-S-转移酶 GST (nmol·mg ⁻¹ ·min ⁻¹)	多功能氧化酶 MFO (nmol·mg ⁻¹ ·min ⁻¹)	UDP-葡萄糖醛酸转移酶 UGT (nmol·mg ⁻¹ ·min ⁻¹)
15	CK	127.19±2.73	188.80±3.65	7.45±1.62	78.16±2.70
	CY	40.92±3.07*	211.27±5.35*	4.36±0.57	44.42±4.55*
20	CK	106.54±2.70	176.78±4.10	8.48±0.48	37.16±5.35
	CY	46.07±1.59*	194.55±6.88	1.94±0.80*	49.48±2.51
25	CK	111.81±4.05	220.60±4.72	8.28±2.10	88.43±15.44
	CY	61.07±2.77*	206.14±11.08	1.87±0.47	21.83±3.20*
30	CK	70.35±11.48	231.94±9.01	3.35±0.18	77.77±4.28
	CY	42.07±1.00	203.29±5.89*	1.56±0.65	35.38±3.20*

CY: 溴氰虫酰胺。*表示为同一温度下各个处理与 CK 相比具有显著性差异 (*t*-检验, *P*<0.05)。下表同。
CY: Cyantraniliprole. * indicates that each treatment has a significant difference compared with CK at the same temperature (*t*-test, *P*<0.05). The same below.

表 3 不同温度下溴氰虫酰胺处理后麦长管蚜解毒酶比活力变化
Table 3 Variation of specific activity of detoxification enzymes in *Sitobion avenae* treated by cyantraniliprole at different temperatures

温度 (°C) Temperatures (°C)	处理 Treatments	羧酸酯酶 CarE (nmol·mg ⁻¹ ·min ⁻¹)	谷胱甘肽-S-转移酶 GST (nmol·mg ⁻¹ ·min ⁻¹)	多功能氧化酶 MFO (nmol·mg ⁻¹ ·min ⁻¹)	UDP-葡萄糖醛酸 转移酶 UGT (nmol·mg ⁻¹ ·min ⁻¹)
15	CK	38.64±6.62	167.14±4.61	16.24±1.87	39.35±1.33
	CY	47.41±4.05	205.64±8.41*	15.66±0.56	84.69±7.06*
20	CK	32.11±0.47	187.51±3.53	15.92±0.50	123.71±5.41
	CY	33.34±4.54	224.00±9.26*	15.28±0.35	84.70±7.30*
25	CK	41.29±3.45	240.79±0.65	15.25±2.93	119.31±14.16
	CY	33.12±0.70	221.24±4.07*	15.42±1.10	84.45±3.93

变化趋势相符；对于 UGT，经溴氰虫酰胺处理后，与对照相比，UGT 比活力在较低温度 15 °C 下显著高于对照 ($P=0.001$)，为对照的 2.15 倍，在 20 °C 和 25 °C 时较对照明显降低，与溴氰虫酰胺对麦长管蚜生物活性随温度升高而逐渐增强的变化趋势相符。对于麦长管蚜 CarE 和 MFO，经溴氰虫酰胺处理后，比活力在各个温度下较对照未表现出明显变化。

3 结论与讨论

在众多环境因素中，温度对杀虫剂生物活性表现出了显著的影响，而温度与杀虫剂间的相互关系也成为制定 IPM 综合防治策略的重要研究内容 (Jaleel *et al.*, 2020)。昆虫是变温动物，对温度的变化敏感，体内多种生命活动受温度影响较大，故而在温度与杀虫剂联合作用下，温度不同，昆虫对杀虫剂的敏感性也不同 (左太强等, 2015)。在 20-34 °C 间，毒死蜱和丙溴磷对家蝇 *Musca domestica* L. 的生物活性随温度的升高分别增加了 2.10 倍和 2.93 倍 (即正温度系数)，而氯氰菊酯和溴氰菊酯对家蝇的毒性则分别降低了 2.21 倍和 2.42 倍 (即负温度系数) (Khan and Akram, 2014)。噻虫嗪对多种仓储甲虫都表现为显著的正温度效应 (Tsaganou *et al.*, 2021)。一直以来有机磷类杀虫剂和氨基甲酸酯类杀虫剂被认为是正温度系数药剂，拟除虫菊酯类杀虫剂被认为是负温度系数药剂 (Satpute *et al.*, 2007; Srigiriraju *et al.*, 2010)。然而，拟除虫菊酯类杀虫剂并非在所有情况下都表现为负温度

效应。杀灭菊酯、二氯苯醚酯和溴氰菊酯对苜蓿蚜 *Aphis craccivora* Koch 均表现为显著的负温度效应，而对梨网蝽 *Stoephanitis nashi* 和粘虫 *Mythimna separata* 则呈正温度系数 (应松鹤, 1986)。高效氯氰菊酯和高效氯氟氰菊酯对绿盲蝽表现为不同程度的负温度效应，而氰戊菊酯则受温度影响不显著 (刘佳等, 2016)。杀虫剂的温度效应并不是一成不变的，对于不同昆虫可能表现出不同的温度效应。有研究发现，双酰胺类杀虫剂对于鳞翅目昆虫小菜蛾、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 和二点委夜蛾 *Athetis lepigone* 表现为显著的正温度效应 (Li *et al.*, 2020)，但对于其他未进行研究过的昆虫种类，不能简单地认定其温度效应。

麦长管蚜和棉蚜对多种药剂的敏感性易受温度影响。如麦长管蚜经吡虫啉亚致死浓度处理后，死亡率随温度升高而增加 (裴秀芹, 2014)。有机磷类杀虫剂毒死蜱对麦长管蚜表现为明显的正温度效应，温度系数高达+57.70，而部分菊酯类及新烟碱类杀虫剂受温度影响不明显 (马云华等, 2011)。溴氰菊酯对棉蚜表现为正温度效应，而百树菊酯和氰戊菊酯则相反，对棉蚜表现为负温度系数药剂 (张丛等, 2018)。本研究发现棉蚜和麦长管蚜对双酰胺类杀虫剂溴氰虫酰胺的敏感性均随温度上升而明显增强，温度系数最高分别可达+9.44 和 +8.24，表现为显著的正温度效应。

杀虫剂对昆虫生物活性的温度效应影响因素复杂多样，其中昆虫体内杀虫剂的靶标位点、

用于解毒代谢的主要酶系以及其他生长发育中的重要生命活动都会不同程度地受到温度的影响,进而影响杀虫剂的生物活性及药效(刘佳等, 2015)。而昆虫体内多种解毒酶受温度影响较大,田间小菜蛾体内解毒酶(CarE、GST 和 MFO)活力随环境温度变化而出现季节性变化,导致了其抗药性水平也出现了相应的变化(刘群, 2009)。绿盲蝽体内 CYP450、CarE 和 UGT 等基因在 15 °C 和 35 °C 下差异表达显著,分别与高效氯氰菊酯和吡虫啉的正、负温度效应密切相关(An *et al.*, 2020)。本研究中,溴氰虫酰胺和温度共同作用下,2 种蚜虫体内主要解毒酶的比活力测定发现,随着温度的增加,棉蚜 GST 与对照比活力的变化趋势与溴氰虫酰胺对棉蚜生物活性的变化相符,麦长管蚜体内 GST 和 UGT 较对照的比活力变化趋势与溴氰虫酰胺对麦长管蚜的生物活性变化呈正相关,因此可推断以上解毒酶分别参与了麦长管蚜和棉蚜的正温度效应变化过程。

我国地域辽阔,气候跨度大,害虫发生温度范围广,多种杀虫剂在不同温度下的药效有较明显差异,因此研究杀虫剂对昆虫的温度效应对害虫防治具有重要意义。本研究仅针对于溴氰虫酰胺对麦长管蚜和棉蚜的温度效应及昆虫体内主要解毒酶与温度效应的关系进行初步探究,而关于温度效应的更多的影响机制仍需要进一步的探索研究。

参考文献 (References)

- Akinwande KL, Arotiowa AR, Ete AJ, 2021. Impacts of changes in temperature and exposure time on the median lethal concentrations (LC₅₀) of a combination of organophosphate and pyrethroid in the control of *Culex quinquefasciatus*, Say (Diptera: Culicidae). *Scientific African*, 12(7): e00743.
- An JJ, Liu C, Dou YN, Gao ZL, Dang ZH, Yan X, Pan WL, Li YF, 2020. Analysis of differentially expressed transcripts in *Apolygus lucorum* (Meyer-Dür) exposed to different temperature coefficient insecticides. *International Journal of Molecular Science*, 21(2): 658.
- Bradford MM, 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1/2): 248–254.
- Clark AG, Dick GL, Smith JN, 1984. Kinetic studies on a glutathione S-transferase from the larvae of *Costelytra zealandica*. *Biochemical Journal*, 217(1): 51–58.
- Cordova D, Benner EA, Sacher MD, Rauh JJ, Sopa JS, Lahm GP, Selby TP, Stevenson TM, Flexner L, Gutteridge S, Rhoades DF, Wu L, Smith RM, Tao Y, 2006. Anthranilic diamides: A new class of insecticides with a novel mode of action ryanodine receptor activation. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 84(3): 196–214.
- DeLorenzo ME, Serrano L, Chung KW, Hoguet J, Key PB, 2006. Effects of the insecticide permethrin on three life stages of the grass shrimp, *Palaemonetes pugio*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 64(2): 122–127.
- Foster SP, Denholm I, Rison JL, Portillo HE, Margaritopoulos J, Slater R, 2012. Susceptibility of standard clones and european field populations of the green peach aphid, *Myzus persicae*, and the cotton aphid, *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae), to the novel anthranilic diamide insecticide cyantraniliprole. *Pest Management Science*, 68(4): 629–633.
- Gordon CJ, 2005. Temperature and Toxicology: An Integrative, Comparative and Environmental Approach. Boca Raton: CRC Press. 1–338.
- IUPS Thermal Commission, 2001. Glossary of terms for thermal physiology (Third edition). *The Japanese Journal Physiology*, 51(2): 245–280.
- Jaleel W, Saeed S, Naqqash MN, Sial MU, Ali M, Zaka SM, Sarwar ZM, Ishtiaq M, Qayyum MA, Aine QU, Anwar A, Sarmad M, Azad R, Latif M, Ahmed F, Islam W, Khan KA, Ghranh HA, 2020. Effects of temperature on baseline susceptibility and stability of insecticide resistance against *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) in the absence of selection pressure. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(1): 1–5.
- Johnson DL, 1990. Influence of temperature on toxicity of two pyrethroids to grasshoppers (Orthoptera: Acrididae). *Journal of Economic Entomology*, 83(2): 366–373.
- Khan HAA, Akram W, 2014. The effect of temperature on the toxicity of insecticides against *Musca domestica* L.: Implications for the effective management of diarrhea. *PLoS ONE*, 9(4): e95636.
- Kim YJ, Lee SW, Cho JR, Park HM, Ahn YJ, 2007. Multiple resistance and biochemical mechanisms of dicofol resistance in *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 10(2): 165–170.
- Li YF, Dang ZH, Pan WL, Gao ZL, 2013. Evaluation on the safety and field effect of the seed dressing by neonicotinoid insecticides clothianidin to control wheat aphids. *Pesticides*, 52(9): 689–691.
- [李耀发, 党志红, 潘文亮, 高占林, 2013. 新烟碱类杀虫剂噻虫胺拌种防治麦蚜的田间药效及安全性评价. 农药, 52(9): 689–691.]
- Li YF, Dou YN, An JJ, Tu XW, Lv HY, Pan WL, Dang ZH, Gao ZL,

2020. Temperature-dependent variations in toxicity of diamide insecticides against three lepidopteran insects. *Ecotoxicology*, 29(5): 607–612.
- Liu J, Gao ZL, Dang ZH, Pan WL, Yuan WL, Zhu LH, Li YF, 2015. The effect of temperature on the activity of three detoxification enzymes in *Apolygus lucorum*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(3): 609–615. [刘佳, 高占林, 党志红, 潘文亮, 袁文龙, 朱利红, 李耀发, 2015. 不同温度效应杀虫剂诱导对绿盲蝽三种解毒酶活力的影响. *应用昆虫学报*, 52(3): 609–615.]
- Liu J, Dang ZH, An JJ, Gao ZL, Pan WL, Li YF, 2016. Temperature effect of different mechanism insecticides on *Apolgus lucorum* Meyer-Dür (Hemiptera: Miridae). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 32(29): 70–75. [刘佳, 党志红, 安静杰, 高占林, 潘文亮, 李耀发, 2016. 不同作用机制杀虫剂对绿盲蝽室内毒力的温度效应. *中国农学通报*, 32(29): 70–75.]
- Liu Q, 2009. Effect of high temperature on acetylcholinesterase and detoxification enzyme in insecticide-susceptible and resistant strains of *Plutella xylostella*. Master dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [刘群, 2009. 高温对抗性和敏感小菜蛾 AChE 及解毒酶系活性的影响. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学.]
- Ma YH, Gao ZL, Li YF, Dang ZH, Pan WL, 2011. Effect of temperature on the toxicity of several insecticides to the English grain aphid, *Sitobion avenae*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(6): 1661–1668. [马云华, 高占林, 李耀发, 党志红, 潘文亮, 2011. 四种类型杀虫剂对麦长管蚜的温度效应及其与主要解毒酶的关系. *应用昆虫学报*, 48(6): 1661–1668.]
- Mao KK, Jin RH, Li WH, Ren ZJ, Qin XY, He S, Li JH, Wan H, 2019. The influence of temperature on the toxicity of insecticides to *Nilaparvata lugens* (Stål). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 156(5): 80–86.
- Mei Y, Yang Y, Ye XH, Xiao HM, Li F, 2019. Evolutionary analysis of detoxification gene families of *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Environmental Entomology*, 41(4): 727–735. [梅洋, 杨义, 叶昕海, 肖花美, 李飞, 2019. 草地贪夜蛾解毒代谢相关基因家族的进化分析. *环境昆虫学报*, 41(4): 727–735.]
- Pei XQ, 2014. Influence of temperature on the sensitivity of *Sitobion avenae* to imidacloprid. Master dissertation. Jinzhong: Shanxi Agricultural University. [裴秀芹, 2014. 温度处理下麦长管蚜对吡虫啉敏感性的研究. 硕士学位论文. 晋中: 山西农业大学.]
- Ran C, Chen ZY, Chen Y, Wang JJ, 2007. Susceptibility to amitraz and biochemical characterizations of two enzymes from *Panonychus citri* field populations. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 23(11): 284–288. [冉春, 陈志永, 陈洋, 王进军, 2007. 桔全爪螨田间种群对双甲脒的敏感性及其两种酶的生化特性. *中国农学通报*, 23(11): 284–288.]
- Satpute NS, Deshmukh SD, Rao NGV, Tikar SN, Moharil MP, Nimbalkar SA, 2007. Temperature-dependent variation in toxicity of insecticides against *Earias vitella* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Economic Entomology*, 100(2): 357–360.
- Shrestha RB, Parajulee MN, 2013. Potential cotton aphid, *Aphis gossypii*, population suppression by arthropod predators in upland cotton. *Insect Science*, 20(6): 778–788.
- Strigiraju L, Semtner PJ, Bloomquist JR, 2010. Influence of post-exposure temperature on the toxicity of insecticides to the tobacco-adapted form of the green peach aphid (Hemiptera: Aphididae). *Journal of Entomological Science*, 45(2): 178–187.
- Tsaganou FK, Vassilakos TN, Athanassiou CG, 2021. Influence of temperature and relative humidity on the efficacy of thiamethoxam for the control of three stored product beetle species. *Journal of Stored Products Research*, 92: 101784.
- Wang MY, 2018. Mechanism analysis of *UGT201D3* associated with abamectin resistance in *Tetranychus cinnabarinus* (Boisduval). Master dissertation. Chongqing: Southwest University. [王梦瑶, 2018. 朱砂叶螨 UGT201D3 基因参与阿维菌素抗药性的机制研究. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.]
- Xu L, Wang JH, Mei Y, Li DZ, 2020. Research progress on the molecular mechanisms of insecticides resistance mediated by detoxification enzymes and transporters. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 22(1): 1–10. [徐莉, 王建华, 梅宇, 李冬植, 2020. 解毒酶和转运蛋白介导的害虫抗药性分子机制研究进展. *农药学报*, 22(1): 1–10.]
- Yang YJ, Wang BJ, Xu HX, Zheng XS, Lv ZX, 2016. Toxicity of chlorpyrifos and buprofezin to *Nilaparvata lugens* Stål (Hemiptera: Delphacidae) under different temperatures. *Journal of Environmental Entomology*, 38(6): 1099–1105. [杨亚军, 王保菊, 徐红星, 郑许松, 吕仲贤, 2016. 不同温度下毒死蜱和噻嗪酮对褐飞虱的毒力作用. *环境昆虫学报*, 38(6): 1099–1105.]
- Ying SH, 1986. The relationship between the insecticidal activity of pyrethroids and temperature. *Acta Entomologica Sinica*, 29(1): 29–34. [应松鹤, 1986. 拟除虫菊酯的杀虫活性和温度的关系. *昆虫学报*, 29(1): 29–34.]
- Zhang C, Niu JW, Chang J, Li HP, Diao QY, 2018. Effect of temperature on the toxicity of pyrethroids to *Aphis gossypii* Glover. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(2): 251–259. [张丛, 牛婧玮, 常静, 李海平, 刁青云, 2018. 温度对菊酯类杀虫剂在枸杞蚜虫作用机制的影响. *应用昆虫学报*, 55(2): 251–259.]
- Zuo TQ, Zhang B, Zhang ST, Zheng CY, Wan FH, 2015. Combined effects of high temperature and acetamiprid on life table parameters of the F_1 offspring of the treated *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *Acta Entomologica Sinica*, 58(7): 767–775. [左太强, 张彬, 张绍婷, 郑长英, 万方浩, 2015. 高温和啉虫脒处理西花蓟马对其 F_1 代生命表参数的联合作用. *昆虫学报*, 58(7): 767–775.]