

# 台湾甲腹茧蜂及其寄主过冷却点和冰点测定

何昌本<sup>1</sup>, 赵海燕<sup>1\*</sup>, 唐良德<sup>2</sup>, 杨茂发<sup>1,3</sup>, 陈晓菡<sup>1</sup>

(1. 贵州大学烟草学院 贵州省烟草品质重点实验室, 贵阳 550025; 2. 贵州大学精细化工研究开发中心, 贵阳 550025; 3. 贵州大学昆虫研究所 贵州山地农业病虫害重点实验室, 贵阳 550025)

**摘要:** 台湾甲腹茧蜂 *Chelonus formosanus* Sonan 是多种鳞翅目夜蛾科害虫的重要寄生蜂, 对于这类害虫具有较大生防潜能。为了更好地了解该蜂的抗寒性, 本研究对其不同发育阶段的过冷却点和冰点进行了测定, 并分析了不同个体间的频次分布。结果表明, 台湾甲腹茧蜂不同发育阶段的过冷却点和冰点均差异显著, 其中, 5日龄蛹的过冷却点最低, 为 $-13.05^{\circ}\text{C}$ , 高龄幼虫的过冷却点最高, 为 $-11.08^{\circ}\text{C}$ ; 成虫的冰点最低, 为 $-8.23^{\circ}\text{C}$ , 高龄幼虫的冰点最高, 为 $-4.25^{\circ}\text{C}$ 。台湾甲腹茧蜂不同发育阶段不同个体过冷却点和冰点的变异均符合正态分布。此外, 寄生对寄主的过冷却点影响不显著, 被台湾甲腹茧蜂寄生的斜纹夜蛾过冷却点低于未被寄生的个体。结果显示, 台湾甲腹茧蜂蛹的抗寒能力强于高龄幼虫和成虫, 蛹期中龄蛹和末龄蛹抗寒能力较强。

**关键词:** 台湾甲腹茧蜂; 过冷却点; 冰点

## Determination of supercooling point and freezing point of *Chelonus formosanus* Sonan and its host

HE Chang-Ben<sup>1</sup>, ZHAO Hai-Yan<sup>1\*</sup>, TANG Liang-De<sup>2</sup>, YANG Mao-Fa<sup>1,3</sup>, CHEN Xiao-Han<sup>1</sup>

(1. Guizhou Provincial Key Laboratory of Tobacco Quality, College of Tobacco, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Center for Research and Development of Fine Chemicals, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Provincial Key Laboratory for Agricultural Pest Management of the Mountainous Regions, Institute of Entomology of Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** *Chelonus formosanus* Sonan (Hymenoptera : Braconidae ) is an important parasitoid of many lepidopteran noctuid pests. It has great potential for biocontrol of these pests. In order to better understand the cold resistance of the wasp, the supercooling point and freezing point of the wasp at different developmental stages were measured and the frequency distribution was analyzed. The results showed that the supercooling points and freezing point of different developmental stages of *C. formosanus* were significantly different. Among them, 5-day-old pupae was the lowest, ( $-13.05^{\circ}\text{C}$ ), while the older larvae was the highest, ( $-11.08^{\circ}\text{C}$ ). The freezing point of adults was the lowest ( $-8.23^{\circ}\text{C}$ ), and that of older larvae was the highest ( $-4.25^{\circ}\text{C}$ ). The variation of supercooling point and freezing point of different individuals at different developmental stage of *C. formosanus* in the bay conformed to the normal distribution. In addition, the supercooling point of the parasitized *S. litura* was lower than that of the unparasitized *S. litura*. The results showed that the cold tolerance of pupae was stronger than that of older larvae and adults, and the cold tolerance of middle-aged pupae and last-instar pupae was stronger.

**Key words:** *Chelonus formosanus* Sonan; supercooling point; freezing point

昆虫属于变温动物, 其生命活动和新陈代谢依赖环境温度变化 (余文远和张世泽, 2022), 温度是影响昆虫生物学重要的非生物因子之一 (蒋丰泽等, 2015)。其中, 低温影响着昆虫的生长发育、生殖, 和寿命等。例如, 日本食蚧蚜小蜂 *Coccophagus japonicus*

基金项目: 贵州大学引进人才科研项目 (贵大人基合字 (2020) 3 号); 贵州省科技创新人才团队 (黔科合人才平台-CXTD (2021) 004)

作者简介: 何昌本, 男, 硕士研究生, 研究方向为生物防治, E-mail: Hechangben@foxmail.com

\*通讯作者 Author for correspondence: 赵海燕, 女, 博士, 副教授, 研究方向为生物防治, E-mail: haitianyiyan7611@163.com

收稿日期 Received: 2023-10-31; 接受日期 Accepted: 2024-02-20

Compere 幼虫、蛹分别经 2~6°C 的低温胁迫 2 d 后, 幼虫和蛹的发育历期显著延长, 初羽化雌蜂的成熟卵量及雌蜂寿命都显著降低 (杨美娟等, 2023); 沙葱萤叶甲 *Galeruca daurica* Joannis 卵经低温胁迫显著延长了卵的发育历期, 降低了卵的存活率 (高靖淳等, 2015); 南亚实蝇 *Bactrocera tau* Walker 卵、幼虫、蛹及成虫分别经过 12 h 的 -4~-0°C 的低温胁迫后, 除成虫外卵、幼虫和蛹的发育历期显著延长, 四个虫态的存活率显著下降, 单雌产卵量及成虫寿命都显著降低 (黄禹禹等, 2021)。可见, 低温对昆虫有广泛而深远的影响。因此昆虫不得不依赖多种多样的生态和生理适应才能在低温环境下生存。在长期的生物进化过程中, 昆虫进化出了抵御低温的机制 (秦建洋等, 2018)。其中过冷却是应对低温胁迫的一种方式, 昆虫拥有较强的过冷却能力可在低温胁迫下保持过冷却状态, 使得体液不结冰, 由此耐寒能力得以提高 (段云博等, 2018)。

过冷却的能力指体液的熔点与过冷却点间的差异, 通常用过冷却点来表示 (李冰祥等, 1998)。研究昆虫的过冷却点来反应抗寒性强弱是当前研究热点 (Ditrich *et al.*, 2018)。过冷却点是区分昆虫耐寒策略和衡量昆虫抗寒能力的一个重要指标, 一般情况下代表着昆虫能够存活的低温下限, 是环境温度低于昆虫冰点时昆虫体液保持液态的最低温度 (Pourani *et al.*, 2019; 冷猛等, 2023)。通常过冷却点越低, 昆虫对低温的耐受能力越强, 生存能力可能就越强, 反之, 对低温耐受能力可能就越弱, 低温下很难生存 (罗举等, 2020)。它作为一个相对的抗寒性指标是不容忽视的, 通过对它的测定, 有助于了解昆虫的抗寒能力、耐寒机制、扩散以及分布规律等, 是昆虫种群生存与发展的重要前提 (Sage *et al.*, 1999)。

台湾甲腹茧蜂 *Chelonus formosanus* Sonan 属膜翅目 Hymenoptera 茧蜂科 Braconidae 甲腹茧蜂族 Chelonini 甲腹茧蜂属 *Chelonus* Panzer。台湾甲腹茧蜂为单寄生 Monoparasitism 寄生蜂, 能进行有性生殖也能进行孤雌产雄生殖。台湾甲腹茧蜂还是一种卵-幼虫跨期寄生蜂, 主要寄生于鳞翅目夜蛾科昆虫 (Pinto *et al.*, 2021), 是斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* Fabricius、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* Hübner、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* Hübner、草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* Smith 和劳氏黏虫 *Mythimna loreyi* Duponchel 等重要农业害虫的自然控制因子之一 (吉训聪等, 2013; 余姿蓉等, 2022), 具有较大开发应用价值。目前对该蜂的研究, 国内外集中于其分布、部分生物学特性、线粒体和染色体水平基因组测定 (吉训聪等, 2012; 王录超等, 2023), 尚未见到台湾甲腹茧蜂抗寒能力的研究报道。因此, 为了明确台湾甲腹茧蜂不同发育阶段的耐寒能力, 本研究对该蜂的过冷却点和冰点以及被寄生与否的寄主 (斜纹夜蛾) 进行了测定, 以期为今后该蜂的应用奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试虫源

台湾甲腹茧蜂于海南儋州芦笋地采集 (109.5°E, 19.5°N), 在贵州大学烟草学院昆虫饲养室人工气候箱内用斜纹夜蛾卵块作为寄主进行繁殖, 在室内连续饲养 30 代后用于实验。饲养条件: 25°C±1°C, 相对湿度 RH 70%±5%、光周期为 14 L : 10 D。

斜纹夜蛾为贵州大学天敌扩繁中心长期饲养种群, 幼虫期通过人工饲料饲养, 成虫饲喂 15% 蜂蜜水。饲养条件为: 温度 25°C±1°C, 光周期 14 L : 10 D, 相对湿度 RH 60%±5%。

### 1.2 仪器设备

RXZ 型智能人工气候箱 (宁波江南仪器厂生产); SUN-V 型智能昆虫过冷却点测定仪及配套软件 (北京鹏程电子科技中心生产), 精度为 0.1°C; BC/BD-221SEA 型冰箱 (青岛海尔特特种电冰柜有限公司生产)。

### 1.3 台湾甲腹茧蜂过冷却点和冰点的测定

参照羿超群等 (2022) 过冷却点和冰点的测定方法, 选取健康且发育一致的台湾甲腹

茧蜂的高龄幼虫（寄生蜂从寄主体内破体而出到化蛹之前）、1日龄蛹（初蛹）、5日龄蛹（中蛹）、9日龄蛹（末蛹）、成虫（不区分雌雄）以及被该蜂寄生和未被寄生的斜纹夜蛾3龄幼虫各30头以上进行过冷却点和冰点的测定。测定时将每个样本放入1.5 mL离心管中，以无样品的测定管做对照。处理完成后，将电阻感温探头伸进装有试虫的离心管中，使探头与试虫充分接触，离心管外用脱脂棉进行包裹。将连接、固定好的离心管放入高低温试验箱中，最低温度设置为-28°C，以1°C/min的速率由室温开始下降到最低温，每秒记录1次试虫的体温变化，通过配套软件分析出体温变化曲线并得出过冷却点和冰点。过冷却点为温度下降到一定程度开始升温时的转折点温度，冰点为升温后又开始降温的拐点温度。

#### 1.4 数据处理

采用SPSS 19.0软件对数据进行分析，数据以“平均数±标准误”表示。不同发育阶段使用单因素方差分析ANOVA，LSD检验，差异显著性水平为 $P < 0.05$ 。各发育阶段试虫过冷却点和结冰点频次分布图采用SPSS 19.0软件绘制，并用Kolmogorov-Smirnov法检验其是否符合正态分布。寄生和未被寄生斜纹夜蛾过冷却点和冰点通过独立样本t检验，差异显著性水平为 $P < 0.05$ ，并通过OriginPro 2019进行图形制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 台湾甲腹茧蜂不同发育阶段的过冷却点和冰点

台湾甲腹茧蜂不同发育阶段的过冷却点之间差异显著（ $P < 0.05$ ），其中，5日龄蛹过冷却点最低，除9日龄蛹外，显著低于其它发育阶段的过冷却点，高龄幼虫的过冷却点最高（表1）。台湾甲腹茧蜂不同发育阶段的过冷却点由低到高依次为5日龄蛹（-13.05°C）<9日龄蛹（-12.44°C）<1日龄蛹（-11.54°C）<成虫（-11.40°C）<高龄幼虫（-11.08°C）。结果表明，台湾甲腹茧蜂蛹期的耐寒能力最强，高龄幼虫耐寒能力最差；不同蛹龄对低温的耐受性也存在显著差异，5日龄的蛹显著高于1日龄的蛹。

台湾甲腹茧蜂冰点在不同发育阶段也表现出显著差异，随发育进度逐渐降低的，由高到低依次为高龄幼虫（-4.25°C）>1日龄蛹（-5.90°C）>5日龄蛹（-7.30°C）>9日龄蛹（-7.49°C）>成虫（-8.23°C）。成虫的冰点显著低于高龄幼虫和1日龄蛹的冰点（ $P < 0.05$ ），与5日龄蛹和9日龄蛹的冰点无显著差异（ $P > 0.05$ ）。

综合分析过冷却点和冰点，台湾甲腹茧蜂不同发育阶段的耐寒能力不同，其中，高龄幼虫的耐寒性最差，其表现为过冷却点和冰点最高；5日龄蛹和9日龄蛹的过冷却点显著低于其它发育阶段，冰点也显著低于高龄幼虫和1日龄蛹，表明5日龄蛹和9日龄蛹耐寒能力较强。

表1 台湾甲腹茧蜂不同发育阶段过冷却点和冰点

Table 1 Supercooling point and freezing point of different developmental stages of *Chelonus formosanus* Sonan

虫态 Stage	昆虫数量 No. of insects	过冷却点 (°C) Supercooling point			冰点 (°C) Freezing point		
		最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean±SE	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean±SE
高龄幼虫 Higher instar larvae	32	-5.86	-13.12	-11.08 ± 0.30 a	-1.82	-8.23	-4.25 ± 0.27 a
1日龄蛹 1-day-old pupa	35	-6.83	-13.63	-11.54 ± 0.32 ab	-3.33	-9.14	-5.90 ± 0.26 b
5日龄蛹 5-day-old pupa	37	-9.14	-16.26	-13.05 ± 0.23 c	-4.35	-13.25	-7.30 ± 0.30 c
9日龄蛹 9-day-old pupa	34	-6.90	-15.99	-12.44 ± 0.33 bc	-2.86	-12.45	-7.49 ± 0.44 c
成虫 Adult	33	-6.58	-15.72	-11.40 ± 0.44 a	-4.23	-11.78	-8.23 ± 0.39 c

注：表中数据为平均数±标准误，同列数据后相同小写字母表示在0.05水平上差异不显著，具有不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。Note: Data in the table were mean ± standard error. After the same column data, the same lowercase letters indicated that the difference is not significant at the 0.05 level, and different lowercase letters indicated that the difference is significant at the 0.05 level.

## 2.2 台湾甲腹茧蜂不同发育阶段过冷却点的频次分布

台湾甲腹茧蜂不同发育阶段不同个体之间的过冷却点存在差异，如图 1 所示，各个发育阶段的过冷却点均符合正态分布。不同发育阶段的不同个体的过冷却点分布范围有一定的宽度。其中，最低值出现在 5 日龄蛹的个体中，为 $-16.26^{\circ}\text{C}$ ；最高值在高龄幼虫个体中，为 $-5.86^{\circ}\text{C}$ 。成虫的过冷却点的分布范围最广，为 $-15.72 \sim -6.58^{\circ}\text{C}$ ；1 日龄蛹的过冷却点分布范围最窄，为 $-13.63 \sim -6.83^{\circ}\text{C}$ 。过冷却点频次分布范围由大到小排列顺序为：成虫 ( $9.14^{\circ}\text{C}$ ) > 9 日龄蛹 ( $9.09^{\circ}\text{C}$ ) > 高龄幼虫 ( $7.26^{\circ}\text{C}$ ) > 5 日龄蛹 ( $7.12^{\circ}\text{C}$ ) > 1 日龄蛹 ( $6.80^{\circ}\text{C}$ )。从过冷却点频次分布图看，5 日龄蛹能接受的低温变化以及对低温的耐受能力最强，频次分布多集中在 $-15 \sim -12^{\circ}\text{C}$ ；而高龄幼虫频次分布多集中在温度偏高的 $-13 \sim -8^{\circ}\text{C}$ 之间，说明其耐寒能力最差。

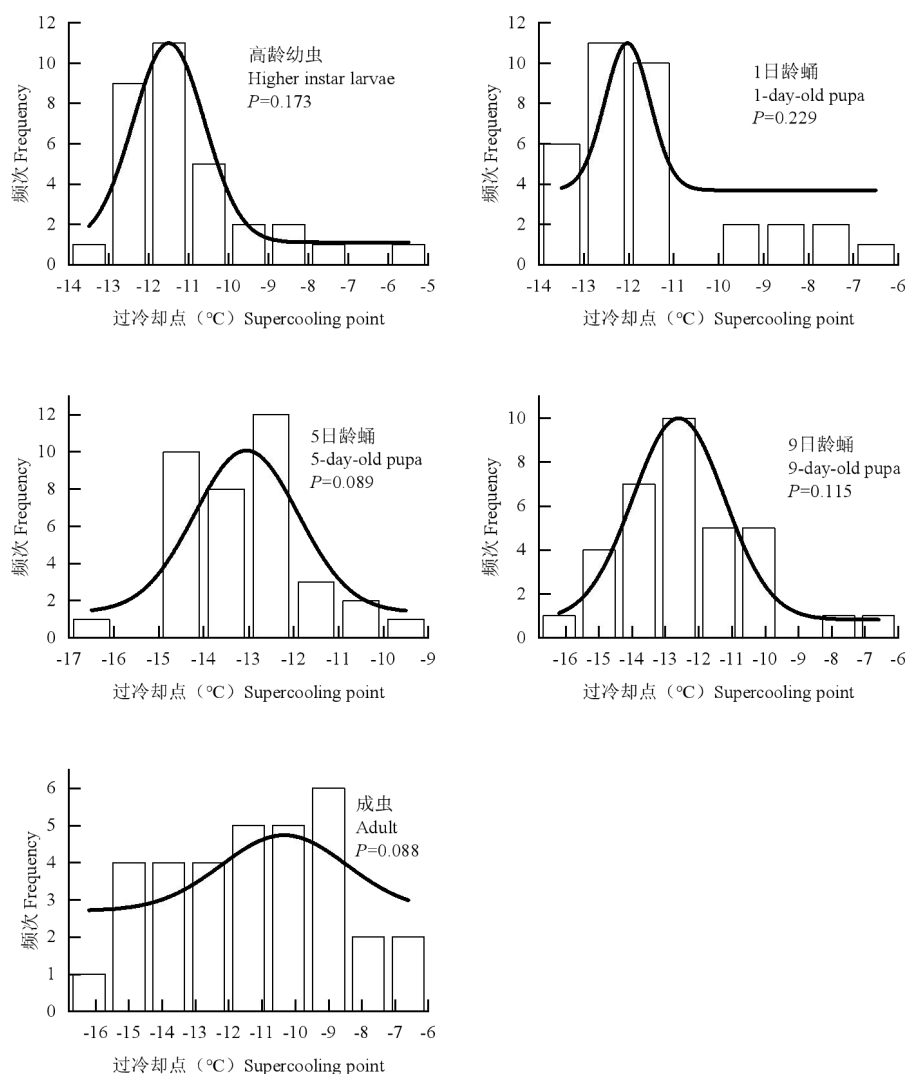


图 1 台湾甲腹茧蜂不同发育阶段过冷却点频次分布

Fig. 1 Frequency distribution of supercooling points in different developmental stages of *Chelonus formosanus*  
 注：柱状图表示频次分布， $P$ 为单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验值，拟合曲线均符合正态分布（图 2 同）。  
 Note: The histogram represented the frequency distribution,  $P$  was the single sample Kolmogorov-Smirnov test value, and the fitting curves were in accordance with the normal distribution (Fig. 2 Same as).

### 2.3 台湾甲腹茧蜂不同发育阶段冰点的频次分布

台湾甲腹茧蜂不同发育阶段的不同个体之间的冰点也存在差异，如图 2 所示，不同发育时期的不同个体的冰点分布范围也有一定的宽度。其中，最低值出现在 5 日龄蛹的个体中，为  $-13.25^{\circ}\text{C}$ ；最高值在高龄幼虫个体中，为  $-1.82^{\circ}\text{C}$ 。9 日龄蛹的冰点的分布范围最广，为  $-12.45 \sim -2.86^{\circ}\text{C}$ ；1 日龄蛹的冰点分布范围最窄，为  $-9.14 \sim -3.33^{\circ}\text{C}$ 。冰点频次分布范围由大到小排列顺序为：9 日龄蛹 ( $9.59^{\circ}\text{C}$ ) > 5 日龄蛹 ( $8.90^{\circ}\text{C}$ ) > 成虫 ( $7.55^{\circ}\text{C}$ ) > 高龄幼虫 ( $6.41^{\circ}\text{C}$ ) > 1 日龄蛹 ( $5.81^{\circ}\text{C}$ )。

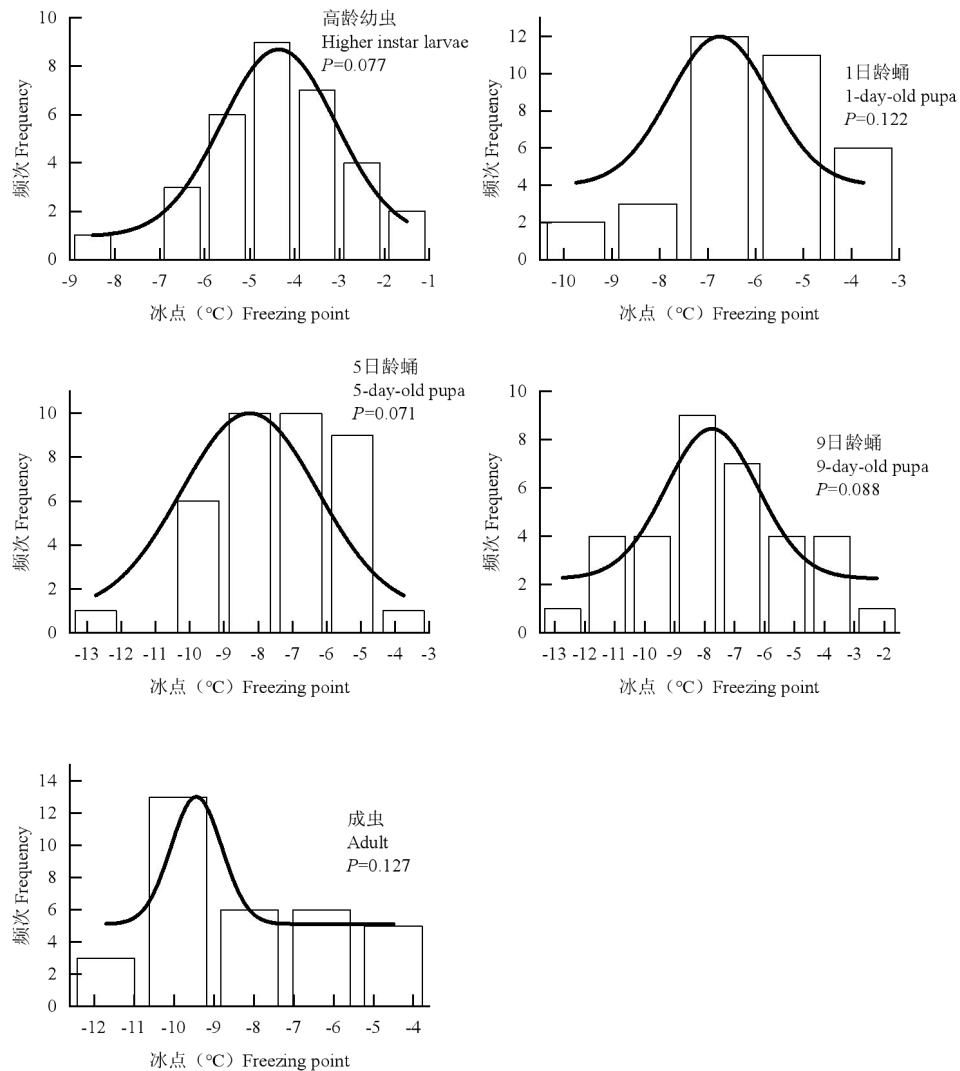


图 2 台湾甲腹茧蜂不同发育阶段冰点频次分布

Fig. 2 Frequency distribution of freezing points in different developmental stages of *Chelonus formosanus*

## 2.4 寄生与未被寄生斜纹夜蛾 3 龄幼虫过冷却点和冰点

研究发现被寄生斜纹夜蛾幼虫过冷却点略低于未被寄生斜纹夜蛾，而被寄生的斜纹夜蛾幼虫的冰点略高于未被寄生的斜纹夜蛾，但其过冷却点 ( $P=0.062$ ) 和冰点间 ( $P=0.733$ ) 的差异均不显著。

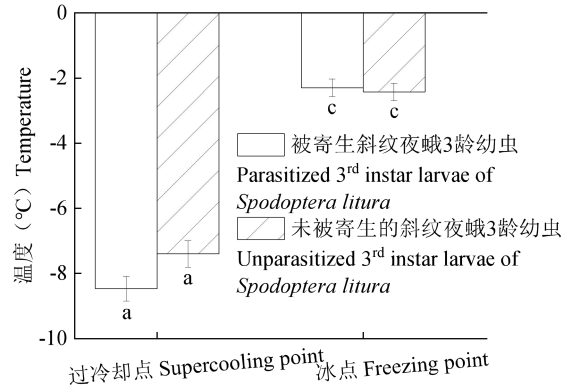


图3 被寄生与未被寄生斜纹夜蛾 3 龄幼虫过冷却点和冰点

Fig. 3 Supercooling point and freezing point of 3<sup>rd</sup> instar larvae of parasitized and unparasitized *Spodoptera litura*  
注：相同小写字母表示经 SNK 法检验在 0.05 水平上差异不显著。Note: The same lowercase letters indicated that there was no significant difference at the 0.05 level by SNK test.

## 3 结论与讨论

耐寒性是昆虫越冬的重要决定因素，是昆虫生态学和生理学研究的重点课题。对于生活在温带和寒带的昆虫来说，在它们长期的种群繁衍过程中都会受到低温的影响，为了适应这种低温环境，在长期的适应进化中获得了抵御寒冷的能力和方式（王锦林等，2013）。而生活在这些区域以外的昆虫，尤其是热带昆虫，对低温变化的感受和影响可能更为敏感（Somme，2000）。研究昆虫的耐寒性在推测其分布、种群发展规模、预测预报以及害虫治理等方面都起着至关重要的作用（肖婷等，2012）。

台湾甲腹茧蜂作为鳞翅目害虫的重要寄生性天敌，对其耐寒性的研究有助于生防潜能的挖掘和利用。因此，本研究对 26°C 下饲养的台湾甲腹茧蜂的过冷却点和冰点进行了测定。但由于台湾甲腹茧蜂是一种卵-幼虫跨期寄生蜂，卵-幼虫期都在寄主体内，目前的昆虫过冷却点测定仪的检测探头很难进行本体的测定，故本研究只对台湾甲腹茧蜂高龄幼虫、1 日龄蛹、5 日龄蛹、9 日龄蛹和成虫的过冷却点和冰点进行了测定。研究发现，台湾甲腹茧蜂高龄幼虫的过冷却点和冰点都高于其它发育阶段，表明其耐寒能力最弱；不同日龄蛹的过冷却点都低于成虫和高龄幼虫，表明蛹的耐寒能力强于成虫和高龄幼虫，对蛹进行冷藏研究效果可能更好，这一发育阶段也很可能是台湾甲腹茧蜂进行越冬的虫态；台湾甲腹茧蜂同发育阶段不同个体间过冷却点和冰点均有一定变异，但过冷却点和冰点均符合正态分布，表明同一虫态的不同个体之间的耐寒性存在差异。

不同种类的昆虫之间过冷却点通常差异很大（唐艳龙等，2014；孔维娜等，2019），即使是同一种昆虫也会因为日龄期、虫态、取食食物种类、生存环境等的不同也存在差异（罗立平等，2019；张悦等，2020）。本研究结果表明台湾甲腹茧蜂不同发育时期的过冷却点和结冰点之间均存在显著差异。其中，5 日龄蛹的过冷却点最低，抗寒性最强，其次为 9 日龄蛹；高龄幼虫的过冷却点最高，则抗寒能力也最弱。这与夏亚运等（2017）报道的红

颈常室茧蜂 *Peristenus spretus* Chen et van Achterberg 蛹的过冷却点低于其它发育阶段结果相似。对阿里山潜蝇茧蜂 *Fopius arisanus* Sonan 过冷却点的测定结果也与这一结果相似 (郭俊杰等, 2014)。但与椰心叶甲 *Brontispa longissima* 幼虫寄生蜂椰甲截脉姬小蜂 *Asecodes hispin arLtm* 和蛹寄生蜂椰扁甲啮小蜂 *Tetrastichus brontispae* 蛹的过冷却点和冰点高于成虫恰好相反 (吕宝乾等, 2011), 这一结果说明寄生蜂的过冷却点因种类不同而存在差异。此外, 研究还发现被台湾甲腹茧蜂寄生过的斜纹夜蛾过冷却点降低, 这可能是因为寄生蜂的过冷却点高于斜纹夜蛾, 使斜纹夜蛾延缓结冰。

本研究对台湾甲腹茧蜂不同发育阶段过冷却点及冰点的测定只是研究其耐寒能力的基础数据, 下一步需要结合其体内脂肪、蛋白质、糖和体内含水量变化开展进一步的研究, 来进一步分析其耐寒能力, 并结合相关气象数据进行越冬区划分, 以期为充分应用台湾甲腹茧蜂提供数据支撑。

### 参考文献 (References)

- Ditrich T, Janda V, Vaněčková H, et al. Climatic variation of supercooling point in the Linden Bug *Pyrrhocoris apterus* (Heteroptera: Pyrrhocoridae) [J]. *Insects*, 2018, 9 (4): 144.
- Duan YB, Wu HP, Zheng XL, et al. Supercooling points and freezing points at different stages of *Dermestes ater* De Geer [J]. *Plant Protection*, 2018, 44 (2): 116-121. [段云博, 吴海盼, 郑霞林, 等. 沟纹皮蠹不同虫态过冷却点及结冰点的测定 [J]. 植物保护, 2018, 44 (2): 116-121]
- Gao JC, Zhou XR, Pang BP, et al. Effects of low temperature on the survivorship and development of overwintering eggs of *Galeruca daurica* (Coleoptera:Chrysomelidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2015, 58 (8): 881-886. [高靖淳, 周晓榕, 庞保平, 等. 低温对沙葱萤叶甲越冬卵存活和发育的影响 [J]. 昆虫学报, 2015, 58 (8): 881-886]
- Guo JJ, Ji QE, Wang B, et al. The supercooling point and freezing point of *Fopius arisanus* (Sonan) at different developmental stages [J]. *Journal Environmental Entomology*, 2014, 36 (1): 22-27. [郭俊杰, 季清娥, 王波, 等. 阿里山潜蝇茧蜂不同发育阶段过冷却点和结冰冰点 [J]. 环境昆虫学报, 2014, 36 (1): 22-27]
- Huang YY, Gu XP, Peng XX, et al. Effects of short-term high and low temperature on the development and reproduction of *Bactrocera tau* (Walker) [J]. *Plant Protection*, 2021, 47 (1): 135-142. [黄禹禹, 顾祥鹏, 彭孝琴, 等. 短时高低温胁迫对南亚实蝇生长发育及繁殖的影响 [J]. 植物保护, 2021, 47 (1): 135-142]
- Ji XC, Yue JJ, Qin S, et al. A preliminary study on the biological characteristics of *Chelonus formosanus* Sonan [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2013, 29 (1): 153-156. [吉训聪, 岳建军, 秦双, 等. 台湾甲腹茧蜂的生物学特性 [J]. 中国生物防治学报, 2013, 29 (1): 153-156]
- Ji XC, Yue JJ, Qin S, et al. Record of *Chelonus formosanus* Sonan of *Chelonus* Panzer from China [J]. *Journal of Tropical Biology*, 2012, 3 (1): 66-68. [吉训聪, 岳建军, 秦双, 等. 中国甲腹茧蜂属台湾甲腹茧蜂的记述 [J]. 热带生物学报, 2012, 3 (1): 66-68]
- Jiang FZ, Zheng LY, Guo JX, et al. Effects of temperature stress on insect fertility and its physiological and biochemical mechanisms [J]. *Journal Environmental Entomology*, 2015, 37 (3): 653-663. [蒋丰泽, 郑灵燕, 郭技星, 等. 温度对昆虫繁殖力的影响及其生理生化机制 [J]. 环境昆虫学报, 2015, 37 (3): 653-663]
- Kong WN, Wang Y, Guo YF, et al. Supercooling point and freezing point of *Grapholita molesta* (Busck) [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (3): 102-105. [孔维娜, 王怡, 郭永福, 等. 梨小食心虫过冷却点及结冰点测定 [J]. 植物保护, 2019, 45 (3): 102-105]
- Leng M, Yao DH, Long K, et al. Effects of different temperature on supercooling point and freezing point of *Picromerus lewisi* Scott [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2023, 35 (3): 624-629. [冷猛, 姚地慧, 龙凯, 等. 不同温度对益蝽过冷却点和冰点的影响 [J]. 浙江农业学报, 2023, 35 (3): 624-629]
- Li BX, Chen YL, Cai HL. Supercooling and cold tolerance of insects [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 1998, 35 (6): 361-364. [李冰祥, 陈永林, 蔡惠罗. 过冷却和昆虫的耐寒性 [J]. 昆虫知识, 1998, 35 (6): 361-364]
- Luo J, Yu JJ, Zhou MH, et al. Determination of super cooling points and freezing points of *Spodoptera frugiperda* [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61 (3): 428-432. [罗举, 俞俊杰, 周明好, 等. 草地贪夜蛾过冷却点和结冰点的测定 [J]. 浙江农业科学, 2020, 61 (3): 428-432]
- Luo LP, Dang YQ, Zhang YL, et al. Effects of different hosts on the development and cold hardness of *Dastarcus helophoroides* (Fairmaire) [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2019, 35 (6): 841-847. [罗立平, 党英桥, 张彦龙, 等. 不同寄主对花绒寄甲生长发育和耐寒性的影响 [J]. 中国生物防治学报, 2019, 35 (6): 841-847]
- Lyu BQ, Wei ML, Jin QA, et al. Determination of super cooling points and freezing points of *Asecodes hispinarum* and *Tetrastichus brontispae* [J]. *Journal of Tropical Crops*, 2011, 32 (8): 1537-1540. [吕宝乾, 韦曼丽, 金启安, 等. 椰心叶甲两种寄生蜂过冷却点及冰点测定 [J]. 热带作物学报, 2011, 32 (8): 1537-1540]
- Pinto BJ, Weis JJ, Gamble T, et al. A chromosome-level genome assembly of the parasitoid wasp, *Cotesia glomerata* (Hymenoptera: Braconidae) [J]. *Journal of Heredity*, 2021, 112 (6): 558-564.
- Pourani MS, Mahdian K, Izadi H, et al. Cold tolerance and supercooling points of two ladybird beetles (Col.: Coccinellidae): Impact of the diet [J]. *Cryobiology*, 2019, 91: 61-68.
- Qin JY, Lan JJ, Zhang L, et al. Determination of supercooling point and freezing point of larvae and pupae of *Mythimna loreyi* (Duponchel) [J]. *China Plant Protection*, 2018, 38 (8): 33-38. [秦建洋, 兰建军, 张蕾, 等. 劳氏黏虫幼虫和蛹过冷却点及结冰点的测定 [J]. 中国植保导刊, 2018, 38 (8): 33-38]

- Sage RB, Fell D, Tucker K, *et al.* Post hibernation dispersal of three leaf-eating beetles (Coleoptera: Chrysomelidae) colonising cultivated willows and poplars [J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 1999, 1 (1): 61-70.
- Somme L. The history of cold hardiness research in terrestrial arthropods [J]. *Cryo Letters*, 2000, 21 (5): 289-296.
- Tang YL, Wang XY, Yang ZQ, *et al.* Studies on control young larvae of *Massicus raddei* (Coleoptera: Cerambycidae) by aoolying parasitoid *Scleroderma pupariae* (Hymenoptera: Bethyilidae) and its supercooling point [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2014, 30 (3): 293-299. [唐艳龙, 王小艺, 杨忠岐, 等. 白蜡吉丁虫腿蜂过冷点和其防治栗山天牛幼龄幼虫研究 [J]. 中国生物防治学报, 2014, 30 (3): 293-299]
- Wang JL, Feng YQ, Zong SX. Types, determination methods and influencing factors of insect cold tolerance [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2013, 19 (9): 32-35. [王锦林, 冯宇倩, 宗世祥. 昆虫耐寒性的类型、测定方法及影响因素综述 [J]. 安徽农学通报, 2013, 19 (9): 32-35]
- Wang LC, Lin ZF, Jia JJ, *et al.* Effects of cold storage of 7-day-old pupae biological characters of *Chelonus formosanus* (Hymenoptera: Braconidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2023, 66 (6): 797-804. [王录超, 林珠凤, 贾静静, 等. 低温贮藏 7 日龄蛹对台湾甲腹茧蜂生物学特性的影响 [J]. 昆虫学报, 2023, 66 (6): 797-804]
- Xia YY, Wei N, Cai DC, *et al.* The supercooling points and freezing points of pupae and adults of *Peristenus spretus* Chen *et van Achterberg* at different rearing temperatures [J]. *Plant Protection*, 2017, 43 (3): 60-64. [夏亚运, 韦宁, 蔡笃程, 等. 不同温度条件下红颈常室茧蜂蛹和成虫过冷点和结冰点的测定 [J]. 植物保护, 2017, 43 (3): 60-64]
- Xiao T, Chen XY, Zhuang YQ, *et al.* Study on supercooling point and freezing point of *Liriomyza trifolii* [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25 (4): 1289-1293. [肖婷, 陈啸寅, 庄义庆, 等. 三叶斑潜蝇过冷点和冰点的测定 [J]. 西南农业学报, 2012, 25 (4): 1289-1293]
- Yang MJ, Chen JY, Ye ZP, *et al.* Effects of short-term low temperature stress on survival, development and reproduction of the *Coccophagus japonicus* Compere [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2023, 39 (5): 1029-1037. [杨美娟, 陈俊谕, 叶政培, 等. 短时低温胁迫对日本食蚜蚜小蜂存活、发育及繁殖的影响 [J]. 中国生物防治学报, 2023, 39 (5): 1029-1037]
- Yi CQ, Xie JX, Liu XX, *et al.* Determination of supercooling point and freezing point of hymolymph in *Hippobamia variegata* (Coleoptera: Coccinellidae) at different developmental stages [J]. *Plant Protection*, 2022, 48 (2): 106-110, 117. [羿超群, 谢俊昕, 刘晓旭, 等. 多异瓢虫不同发育阶段过冷点及体液结冰点的测定 [J]. 植物保护, 2022, 48 (2): 106-110, 117]
- Yu WY, Zhang SZ. Responses of natural enemy insects to temperature stress [J]. *Shanxi Journal Agricultural Sciences*, 2022, 68 (10): 90-96. [余文远, 张世泽. 天敌昆虫对温度胁迫的响应 [J]. 陕西农业科学, 2022, 68 (10): 90-96]
- Yu ZR, Lin ZF, Jia JJ, *et al.* Effects of five commonly used insecticides on *Chelonus formosanus* [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2022, 43 (8): 1663-1670. [余姿蓉, 林珠凤, 贾静静, 等. 5 种常用杀虫剂对台湾甲腹茧蜂的影响 [J]. 热带作物学报, 2022, 43 (8): 1663-1670]
- Zhang Y, Deng XY, Zhang XY, *et al.* Supercooling and freezing points of *Spodoptera frugiperda* feeding on different foods [J]. *Plant Protection*, 2020, 46 (2): 72-77. [张悦, 邓晓悦, 张雪艳, 等. 取食不同食物的草地贪夜蛾的过冷点和结冰点 [J]. 植物保护, 2020, 46 (2): 72-77]