

不同冷藏条件对食蚜瘿蚊过冷却点和冰点的影响*

袁清婷^{1**} 苟剑渝² 黄纯杨² 申修贤³ 王雄³ 杨茂发^{1,3} 于晓飞^{1***}

(1. 贵州大学烟草学院, 贵州省烟草品质研究重点实验室, 贵阳 550025; 2. 贵州省烟草公司遵义市公司, 遵义 563000; 3. 贵州大学昆虫研究所, 贵州省山地农业病虫害重点实验室, 贵阳 550025)

摘要 【目的】食蚜瘿蚊 *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani) 是一种捕食性天敌, 其幼虫对蚜虫具有较好的控制潜能。研究不同冷藏条件对食蚜瘿蚊耐寒能力的影响, 为食蚜瘿蚊的低温冷藏技术提供了理论依据。【方法】利用热电偶原理, 测定食蚜瘿蚊在不同冷藏条件下的过冷却点和结冰点。【结果】25 °C 条件下, 食蚜瘿蚊各虫态的过冷却点及结冰点存在显著差异 ($P < 0.05$), 其中 2 龄幼虫过冷却点 (- 26.18 °C) 和结冰点 (- 24.98 °C) 最低, 雄成虫过冷却点 (- 22.95 °C) 和结冰点 (- 21.86 °C) 最高。在不同变温条件下冷藏食蚜瘿蚊蛹, 其过冷却点在冷藏 10、20 和 30 d 时均上升且高于对照, 冷藏 40 d 时低于对照; 同一冷藏时长下不同冷藏方式间过冷却点的差异均不显著 ($P > 0.05$)。食蚜瘿蚊蛹在 5 °C 条件下冷藏 50 d, 每天定时 7 °C 中断 4 h 的结冰点 (- 23.09 °C) 最低, 冷藏 30 d 的结冰点 (- 21.15 °C) 最高; 食蚜瘿蚊蛹在 5 °C 条件下冷藏 40 d, 每天定时 9 °C 中断 4 h 的结冰点 (- 22.66 °C) 最低, 冷藏 20 d 时的结冰点 (- 20.95 °C) 最高; 同一冷藏时长下 3 种冷藏方式间结冰点差异均不显著 ($P > 0.05$)。【结论】食蚜瘿蚊 2 龄幼虫的耐寒能力最强, 雌成虫的耐寒能力要高于雄成虫; 变温贮存和恒定低温均适合食蚜瘿蚊的低温贮存。

关键词 食蚜瘿蚊; 过冷却点; 结冰点; 耐寒性

Effects of different cold storage temperature conditions on the supercooling points and freezing points of *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani)

YUAN Qing-Ting^{1**} GOU Jian-Yu² HUANG Chun-Yang² SHEN Xiu-Xian³
WANG Xiong³ YANG Mao-Fa^{1,3} YU Xiao-Fei^{1***}

(1. College of Tobacco, Guizhou University, Guizhou Key Laboratory of Tobacco Quality Research, Guiyang 550025, China; 2. Zunyi Branch of Guizhou Provincial Tobacco Company, Zunyi 563000, China; 3. Institute of Entomology of Guizhou University, Provincial Key Laboratory for Agricultural Pest Management of the Mountainous Regions, Guiyang 550025, China)

Abstract 【Objectives】To determine the effect of different cold storage conditions on the cold tolerance of *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani), the larvae of which are used to control aphids, in order to determine optimal conditions for the cold storage of this biological control agent. 【Methods】The supercooling point (SCP) and freezing point (FP) of all life stages of *A. aphidimyza* were measured using a thermocouple under different cold storage conditions. 【Results】The SCP and FP of different developmental stages of *A. aphidimyza* were significantly different. At 25 °C, 2nd instar larvae had the lowest SCP

*资助项目 Supported projects: 贵州省烟草公司遵义市公司成果转化项目 (2020xm05, 2021520300200081); 贵州省烟草公司遵义市公司科技项目 (201608); 中国烟草总公司贵州省公司重大科技专项 (201603; 201752010040001); 贵州大学引进人才科研项目 {贵大人基合字[2016]70 号}; 2019 年贵州省农业生产防灾救灾资金 (农作物病虫害防治专项); 贵州省高层次创新型人才 (“百”层次) 培养项目 (黔科合人才[2016]4022 号)

**第一作者 First author, E-mail: zandy2020@126.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: anjingfly2009@163.com

收稿日期 Received: 2021-10-09; 接受日期 Accepted: 2022-01-27

(- 26.18 °C) and FP (- 24.98 °C), whereas adult males had the highest SCP (- 22.95 °C) and FP (- 21.86 °C). The SCP of pupae in each cold storage treatment increased with storage duration from 10 to 30 d and was higher than that of the control group (25 °C). However, the SCP of refrigerated pupae for 40 days was lower than the control group. The different treatment groups within the same storage period had no effect on the SCP of pupae. The FP of pupae in the T1 treatment group (5 °C with 4 h at 7 °C daily) was lowest at 50 d and highest at 30 d. The FP of pupae in the T2 treatment group (5 °C with 4 h at 9 °C daily) was lowest at 40 d and highest at 20 d. Different treatment groups with the same storage period had no effect on the FP of pupae. **[Conclusion]** 2nd instar larvae is the most cold tolerant, and female adults are more cold tolerant than males. Both fluctuant and constant low temperature storage are suitable for *A. aphidimyza*.

Key words *Aphidoletes aphidimyza*; supercooling point; freezing points; cold tolerance

食蚜瘿蚊 *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani) 是控制蚜虫的有效天敌(Boulanger *et al.*, 2019), 具有分布范围广、适应性强、搜寻能力和分散能力强等特点(郭慧娟等, 2015)。其幼虫除能直接取食蚜虫体液外, 还对蚜虫有猎杀作用(叶长青, 1990), 能捕食包含烟蚜 *Myzus persicae* (Sulzer)、甘蓝蚜 *Brevicoryne brassicae* (Linnaeus) 和玉米蚜 *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) 等在内的 85 种蚜虫(张洁和杨茂发, 2007; 林清彩等, 2017; Boulanger *et al.*, 2019, 王秀琴等, 2020)。食蚜瘿蚊的饲养具有生产成本低、便于贮存和长距离运输, 且田间释放方式简单快捷等优点(于晓飞等, 2018; Boulanger *et al.*, 2019), 已在世界范围内得到普遍应用(谢明等, 2000)。

低温贮存是目前延长天敌昆虫货架期的重要手段, 但此过程中会对昆虫体内许多生理过程和生长发育产生直接影响, 例如新陈代谢紊乱、膜脂相变受阻及离子调节失去平衡(Kostál *et al.*, 2006)、存活率急剧下降(潘悦等, 2012; 张小香等, 2021)、过冷却点和冰点降低(宋修超等, 2012)等。昆虫的过冷却能力是指体液温度下降到冰点以下而不结冰的现象, 过冷却点是判断昆虫耐寒性强弱的重要的指标(欧阳芳和戈峰, 2014)。影响过冷却点的因素包括温度、湿度、体内低温保护剂含量和相关基因的转录调控等(谢殿杰等, 2020; 张小香等, 2021)。研究表明变温处理后的烟蚜茧蜂 *Aphidius gifuensis* 过冷却点和结冰点均下降, 提高了烟蚜茧蜂的低温抵抗力(宋修超等, 2012)。郭梦静等(2016)的研究表明, 低温胁迫能够降低异色瓢虫

Harmonia axyridis 的过冷却点。花绒寄甲 *Dastarcus helophoroides* 成虫在经快速冷驯化处理后, 过冷却点显著降低, 耐寒性得到明显提高(罗立平等, 2021)。

在自然界中, 昆虫经历昼夜变化的温度, 夜温通常作为短时低温胁迫因子对昆虫的存活、发育和繁殖产生较大影响, 而白天较高的日温能够修复部分昆虫在夜间积累的冷伤害(Huang *et al.*, 2007)。相对于恒温诱导而言, 变温接近于自然低温胁迫的模式, 能够诱导更强的适应机制。在一些昆虫的冷藏过程中, 使用变温代替恒定低温能显著提高其存活率(Lee and Denlinger, 2010)。Zheng 等(2011)对甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* (Hübner) 的冷适应研究发现, 与恒定低温(10 °C)相比, 变温(5-15 °C)显著提高了甜菜夜蛾卵、3 龄幼虫、5 龄幼虫和蛹的存活率。这种周期性的高温减少了低温伤害的积累, 并为虫体生理机能的修复提供了机会(Colinet *et al.*, 2007; 2010; Kostál *et al.*, 2007; Lalouette *et al.*, 2007)。因此本研究拟通过对比变温和恒温冷藏条件对食蚜瘿蚊过冷却点和结冰点的影响, 探索食蚜瘿蚊的最佳冷藏条件。

目前国内已实现食蚜瘿蚊的工厂化繁殖技术(于晓飞等, 2018)。但食蚜瘿蚊的生长发育及存活期都很短, 为保证食蚜瘿蚊产品的生物防治效果, 延长食蚜瘿蚊货架期, 探索食蚜瘿蚊蛹的低温储存技术, 是亟待解决的问题。为明确不同冷藏方式对食蚜瘿蚊耐寒能力的影响, 本文测定了常温下食蚜瘿蚊不同虫态的过冷却点和结冰点, 以及不同冷藏温度和时长条件下食蚜瘿蚊蛹的过冷却点和结冰点, 以明确食蚜瘿

蚊的耐寒能力, 为食蚜瘿蚊低温冷藏技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

食蚜瘿蚊来源于蚕豆苗-豌豆修尾蚜-食蚜瘿蚊三级营养系统稳定繁育的室内种群。人工气候室内温度为 $(25 \pm 1) ^\circ\text{C}$, 光周期为 $L:D=14:10$, 相对湿度为 $75\% \pm 5\%$ 。

试验过程中, 选取正常温度 $(25 ^\circ\text{C})$ 条件下发育一致且健康的 2 龄幼虫、3 龄幼虫、蛹、雌成虫和雄成虫进行过冷却点和结冰点的测定, 每个虫态 30 个重复。

1.2 食蚜瘿蚊蛹不同冷藏条件的设置

预试验结果表明, 冷藏温度在 $4-10 ^\circ\text{C}$ 间食蚜瘿蚊蛹存活的效果最好, 结合前人 (宫亚军, 2007) 的研究结果, 本研究设置如下不同的变温条件。T1 变温: 在 $5 ^\circ\text{C}$ 条件下冷藏, 每天定时 $7 ^\circ\text{C}$ 中断 4 h; T2 变温: 在 $5 ^\circ\text{C}$ 条件下冷藏, 每天定时 $9 ^\circ\text{C}$ 中断 4 h; T3 恒定低温: 食蚜瘿蚊蛹冷藏于 $5 ^\circ\text{C}$ 恒温条件下。实验过程中, 以 $25 ^\circ\text{C}$ 常温下不冷藏的食蚜瘿蚊蛹作为对照。

将食蚜瘿蚊蛹置于顶部铺有透气网的塑料储物盒 ($253 \text{ mm} \times 173 \text{ mm} \times 93 \text{ mm}$) 内, 并置于湿度为 $75\% \pm 5\%$, 无光照的人工气候箱 (宁波江南仪器厂, 型号 DRXM-358A) 中进行冷藏处理, 分别冷藏 10、20、30、40 和 50 d。每处理各选择 1 头进行过冷却点和冰点的测定, 每个处理重复 30 次。

1.3 过冷却点和冰点的测定

用于测定过冷却点 (Supercooling point, SCP) 和结冰点 (Freezing point, FP) 的食蚜瘿蚊各个虫态用微量胶固定于感温探头上, 注意不要伤害虫体。将虫体置入 $-40 ^\circ\text{C}$ 的超低温冰箱 (澳柯玛, DW-40L525) 中降温, 为避免降温速率过快, 在虫体与感温头固定后, 用棉花包裹外部, 使虫体以约 $1 ^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率降温。每秒记录 1 次虫体温度, 通过配套软件记录数据, 并

绘制虫体温度变化曲线, 确定其过冷却点和结冰点。

1.4 数据处理

采用 SPSS 25.0 统计软件进行数据分析。采用 Shapiro-Wilk test 检验数据是否符合正态分布, 符合正态分布的数据采用单因素方差分析; 不符合正态分布的数据采用 Kruskal-Wallis H (K) 检验, 两两比较采用 Bonferroni 法。

2 结果与分析

2.1 食蚜瘿蚊不同虫态的过冷却点及结冰点

$25 ^\circ\text{C}$ 条件下食蚜瘿蚊各虫态的过冷却点依次为: 2 龄幼虫 ($-26.18 ^\circ\text{C}$) $<$ 3 龄幼虫 ($-25.62 ^\circ\text{C}$) $<$ 蛹 ($-24.39 ^\circ\text{C}$) $<$ 雌成虫 ($-24.27 ^\circ\text{C}$) $<$ 雄成虫 ($-22.95 ^\circ\text{C}$), 且 2 龄幼虫与 3 龄幼虫之间的过冷却点无显著差异 ($P>0.05$), 雄成虫分别与雌成虫和蛹间差异不显著 ($P>0.05$)。 $25 ^\circ\text{C}$ 条件下食蚜瘿蚊各虫态的体液结冰点依次为: 2 龄幼虫 ($-24.98 ^\circ\text{C}$) $<$ 雌成虫 ($-22.97 ^\circ\text{C}$) $<$ 蛹 ($-22.20 ^\circ\text{C}$) $<$ 3 龄 ($-22.08 ^\circ\text{C}$) $<$ 雄成虫 ($-21.86 ^\circ\text{C}$), 2 龄幼虫与其它虫态间均存在显著差异 ($P<0.05$) (表 1)。

2.2 不同冷藏条件对食蚜瘿蚊蛹过冷却点的影响

不同冷藏条件下食蚜瘿蚊体液的过冷却点如表 2 所示, 在不同变温条件下冷藏 10、20 和 30 d 的蛹过冷却点均高于对照, 而冷藏 40 d 和 50 d 时均低于对照。变温 T1 处理后, 冷藏不同时间长度的过冷却点大小依次为: $10 \text{ d} > 20 \text{ d} > 30 \text{ d} > \text{CK} > 40 \text{ d} > 50 \text{ d}$, 冷藏 50 d 与 CK 和冷藏 40 d 的过冷却点差异不显著 ($P>0.05$), 与其余处理的差异均显著 ($P<0.05$); 变温 T2 处理后的结果为: $20 \text{ d} > 10 \text{ d} > 30 \text{ d} > 50 \text{ d} > \text{CK} > 40 \text{ d}$, 20 d 与 40 d 间差异显著 ($P<0.05$), 同时与 CK 间差异达到显著水平 ($P<0.05$); 恒定低温 T3 处理后的结果为: $10 \text{ d} > 30 \text{ d} > 20 \text{ d} > \text{CK} > 40 \text{ d} > 50 \text{ d}$, 其中冷藏时长 40 d、50 d 与 10 d、20 d 间差异显著 ($P<0.05$)。在同一冷藏时长条件下, T1、T2 和 T3 三者间均无显著差异 ($P>0.05$) (表 2)。

表 1 食蚜瘿蚊不同虫态的过冷却点及冰点

Table 1 Supercooling points and freezing points of *Aphidoletes aphidimyza* during different stages

虫态 Stage	过冷却点 (°C) Supercooling point (°C)		冰点 (°C) Freezing point (°C)	
	平均值 Average value	范围 Range	平均值 Average value	范围 Range
2 龄 2nd instar	- 26.18±0.44b	- 29.11— - 18.85	- 24.98±0.45b	- 28.54— - 17.62
3 龄 3rd instar	- 25.62±0.44b	- 28.44— - 17.48	- 22.08±0.48a	- 27.82— - 14.71
蛹 Pupa	- 24.39±0.46ab	- 26.47— - 15.83	- 22.20±0.44a	- 25.24— - 14.59
雌成虫 Female adult	- 24.27±0.30a	- 26.62— - 20.46	- 22.97±0.33a	- 26.02— - 18.74
雄成虫 Male adult	- 22.95±0.47a	- 26.22— - 17.17	- 21.86±0.48a	- 25.80— - 16.02

表中数据为平均值±标准误，同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$ ，多个独立样本比较的秩和检验)。下表同。

Data in the table are mean± SE, and followed by different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$, K Independent Samples Kruskal-Wallis H test). The same below.

表 2 不同冷藏条件对食蚜瘿蚊蛹过冷却点的影响

Table 2 The effect of different cold storage conditions on the supercooling points of *Aphidoletes aphidimyza* pupa

时长 (d) Period (d)	过冷却点 (°C) Supercooling point (°C)		
	T1	T2	T3
0 (CK)	- 24.39±0.45Aab	- 24.39±0.45Ab	- 24.39±0.45Aab
10	- 23.12±0.47Aa	- 23.47±0.51Aab	- 23.36±0.36Aa
20	- 23.39±0.49Aa	- 23.02±0.39Aa	- 23.76±0.33Aa
30	- 23.53±0.36Aa	- 23.48±0.32Aab	- 23.46±0.58Aab
40	- 24.49±0.39Aab	- 24.95±0.26Ab	- 24.81±0.37Ab
50	- 25.08±0.26Ab	- 23.69±0.65Aab	- 24.91±0.32Ab

T1: 在 5 °C 条件下冷藏过程中，每天定时 7 °C 中断 4 h; T2: 在 5 °C 条件下冷藏过程中，每天定时 9 °C 中断 4 h; T3: 食蚜瘿蚊蛹冷藏于 5 °C 恒温条件下。同行数据后标有不同大写字母表示差异显著 ($P<0.05$)，下表同。

T1: In the process of cold storage at 5 °C, it is interrupted at 7 °C every day for 4 h; T2: In the process of refrigeration at 5 °C, it is interrupted at 9 °C every day for 4 h; T3: *Aphidoletes aphidimyza* pupae were stored at a constant temperature of 5 °C. Data followed by different capital letters in the same line indicate significant differences ($P<0.05$). The same below.

2.3 不同冷藏条件对食蚜瘿蚊蛹结冰点的影响

由表 3 可知，变温 T1 处理的食蚜瘿蚊蛹冷藏 50 d 的结冰点最低，为 - 23.09 °C，与 40 d 和 CK 之间差异不显著 ($P>0.05$)；冷藏 30 d 的结冰点最高，为 - 21.15 °C，且与 50 d 差异显著 ($P<0.05$)。变温 T2 处理冷藏 40 d 的结冰点最低，为 - 22.66 °C，分别与 20 d 和 30 d 间的差异显著 ($P<0.05$)；冷藏 20 d 时的结冰点最高为 - 20.95 °C。变温 T3 处理不同时长 的结冰点均无显著差异 ($P>0.05$)。在同一冷藏时长条件下，变温处理 T1、T2 和 T3 之间的冰点均无显著差异 ($P>0.05$) (表 3)。

3 结论与讨论

昆虫的过冷却点是研究昆虫耐寒性的重要指标之一，过冷却点会因为环境、营养、发育阶段等的不同而存在差异 (景晓红和康乐, 2002)。本研究中食蚜瘿蚊各个虫态过冷却点及冰点结果表明：食蚜瘿蚊 2 龄幼虫的过冷却点和冰点均低于其余虫态，因此 2 龄幼虫的耐寒能力最强。雌成虫的耐寒能力要高于雄成虫，这可能与食蚜瘿蚊雌雄成虫在幼虫期积累的脂肪等物质的含量有关。有研究表明其雌性幼虫的捕食量比雄性幼虫的高 (Boulanger, 2019)。本研究中

表 3 不同冷藏条件对食蚜瘿蚊蛹结冰点的影响

Table 3 The effect of different cold storage conditions on the freezing points of *Aphidoletes aphidimyza* pupa

时长 (d) Period (d)	冰点 (°C) Freezing point (°C)		
	T1	T2	T3
0 (CK)	- 22.20±0.44Aab	- 22.20±0.44Aab	- 22.20±0.44Aa
10	- 21.15±0.45Aa	- 21.71±0.51Aab	- 21.17±0.40Aa
20	- 21.17±0.46Aa	- 20.95±0.40Aa	- 21.77±0.34Aa
30	- 21.15±0.38Aa	- 21.31±0.33Aa	- 21.66±0.57Aa
40	- 22.06±0.39Aab	- 22.66±0.27Ab	- 22.53±0.36Aa
50	- 23.09±0.30Ab	- 21.66±0.61Aab	- 22.50±0.33Aa

供试的幼虫为未滞育的幼虫, 其中 3 龄幼虫的过冷却点范围在 - 28.44 °C 到 - 17.48 °C 之间, 这与 Kostál 和 Havelka (2000) 的过冷却点范围 (- 26.4- - 19.0 °C) 相比, 本研究中的最高过冷却点较高, 可能与实验材料是否是滞育虫态有很大关联。

耐冷藏时间是衡量昆虫耐冷藏力的关键因子 (王瑞珍等, 2021), 在冷藏过程中, 昆虫普遍通过调节自身体液过冷却点适应低温条件的变化 (景晓红和康乐, 2002, 2003)。有研究表明, 红颈常室茧蜂 *Peristenus spretus* Chen et van Achterberg 和管侧沟茧蜂 *Microplitis tuberculifer* (Wesmael) 滞育蛹的过冷却点和结冰点随着滞育时间的延长而逐渐降低, 低温耐受力随储藏时间的越长逐渐增强 (路子云, 2014; 夏亚运等, 2017)。本研究结果表明, 3 种冷藏方式均随着冷藏时间的延长, 过冷却点和结冰点总体呈现出逐渐下降趋势, 而 3 种冷藏方式中 40 d 和 50 d 的过冷却点和冰点均与对照之间差异不显著, 因此食蚜瘿蚊未滞育蛹的低温贮存时间可持续 40 d 至 50 d, 未来生产可根据实际需求调整贮存时长。

对寄生蜂进行长期的恒定低温贮藏会使虫体内的有害物质持续累积, 当达到一定量时会不利于其虫体的生存 (Levie et al., 2005; Colinet et al., 2007); 而将昆虫低温贮藏后再进行高温间断的变温条件则有利于提高昆虫冷藏后的存活率。Hughes 等 (2011) 研究发现, 短时间低温暴露后的茶足柄瘤蚜茧蜂 *Lysiphlebus*

testaceipes Cresson 的过冷却点显著低于对照。宋修超等 (2012) 发现与恒温 (4 °C) 冷藏相比, 变温 (在 4 °C 冷藏过程中, 每隔 2 d 20 °C 高温中断 2 h) 冷藏后的烟蚜茧蜂个体过冷却点差异不明显。本研究通过测定过冷却点和结冰点来评价 3 种冷藏方式下食蚜瘿蚊蛹的耐寒能力变化, 结果显示同一冷藏时长下 3 种冷藏方式间过冷却点和结冰点均无显著差异, 说明变温贮存和恒定低温均适合食蚜瘿蚊的低温贮存。

本研究仅以过冷却点和结冰点作为衡量食蚜瘿蚊耐寒能力的指标, 探究不同贮藏条件对食蚜瘿蚊耐寒能力的影响。而昆虫的过冷却点和结冰点通常受多种体内化学物质和生理因素的调节。判断食蚜瘿蚊耐寒能力的强弱, 需要进一步结合其体内脂肪、蛋白质、糖和体内水含量变化开展进一步的研究。

参考文献 (References)

- Boulanger F, Jandricic S, Bolckmans K, Wäckers F, Pekas A, 2019. Optimizing aphid biocontrol with the predator *Aphidoletes aphidimyza*, based on biology and ecology. *Pest Management Science*, 75(6): 1479–1493.
- Colinet H, Muratori F, Hance T, 2010. Cold-induced expression of diapause in *Praon volucre*: Fitness cost and morpho-physiological characterization. *Physiological Entomology*, 35(4): 301–307.
- Colinet H, Vernon P, Hance T, 2007. Does thermal-related plasticity in size and fat reserves influence supercooling abilities and cold-tolerance in *Aphidius colemani* (Hymenoptera: Aphidinae) mummies? *Journal of Thermal Biology*, 32(8): 374–382.
- Gong YJ, Shi BC, Lu H, 2007. A study on the optimum cold storage

- conditions of *Aphidoletes aphidimyza*. *Plant Protection*, 33(1): 48–50. [宫亚军, 石宝才, 路虹, 2007. 食蚜瘿蚊最佳冷藏条件的研究. 植物保护, 33(1): 48–50.]
- Guo HJ, Li BP, Wang YB, Zheng L, Meng L, 2015. Effects of Aphid density on lifetime fecundity in *Aphidoletes aphidimyza* (Diptera: Cecidomyiidae). *Chinese Journal of Biological Control*, 31(3): 312–316. [郭慧娟, 李保平, 王玉波, 郑礼, 孟玲, 2015. 蚜虫密度对食蚜瘿蚊终身产卵量的影响. 中国生物防治学报, 31(3): 312–316.]
- Huang LH, Chen B, Kang L, 2007. Impact of mild temperature hardening on thermotolerance, fecundity and *Hsp* gene expression in *Liriomyza huidobrensis*. *Journal of Insect Physiology*, 53(12): 1199–1205.
- Hughes GE, Sterk G, Bale GS, 2011. Thermal biology and establishment potential in temperate climates of the aphid parasitoid, *Lysiphlebus testaceipes*. *Biocontrol*, 56(1): 19–33.
- Jing XH, Kang L, 2002. Research progress in insect cold hardiness. *Acta Ecologica Sinica*, 22(12): 2202–2207. [景晓红, 康乐, 2002. 昆虫耐寒性研究. 生态学报, 22(12): 2202–2207.]
- Jing XH, Kang L, 2003. Seasonal changes in the supercooling point of overwintering eggs of *Locusta migratoria*. *Entomological Knowledge*, 40(4): 326–328. [景晓红, 康乐, 2003. 飞蝗越冬卵过冷却点的季节性变化及生态学意义. 昆虫知识, 40(4): 326–328.]
- Kostál V, Havelka J, 2000. Diapausing larvae of the midge *Aphidoletes aphidimyza* (Diptera: Cecidomyiidae) survive at subzero temperatures in a supercooled state but tolerate freezing if inoculated by external ice. *European Journal of Entomology*, 97(3): 433–436.
- Kostál V, Renault D, Mehrabianova A, Bastl J, 2007. Insect cold tolerance and repair of chill-injury at fluctuating thermal regimes: Role of ion homeostasis. *Comparative Biochemistry and Physiology A: Molecular and Integrative Physiology*, 147(1): 231–238.
- Kostál V, Yanagimoto M, Bastl J, 2006. Chilling-injury and disturbance of ion homeostasis in the coxal muscle of the tropical cockroach (*Nauphoeta cinerea*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 143(2): 171–179.
- Lalouette L, Kostal V, Colinet H, Gagneul D, Renault D, 2007. Cold exposure and associated metabolic changes in adult tropical beetles exposed to fluctuating thermal regimes. *The FEBS Journal*, 274(7):1759–1767.
- Lee REJ, Denlinger DL, 2010. Rapid cold hardening: Ecological significance and underpinning mechanism//Denlinger DL, Lee REJ (eds.). *Low Temperature Biology of Insects*. Cambridge: Cambridge University Press. 35–58.
- Levie A, Vernon P, Hance T, 2005. Consequences of acclimation on survival and reproductive capacities of cold-stored mummies of *Aphidius rhopalosiphi* (Hymenoptera: Aphidiinae). *Journal of Economic Entomology*, 98(3): 704–708.
- Lin QC, Zhai YF, Chen H, Yin YY, Sun M, Yu Y, Zheng L, 2017. Predatory capacity of *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani). *Chinese Journal of Biological Control*, 33(2): 171–175. [林清彩, 翟一凡, 陈浩, 尹园园, 孙猛, 于毅, 郑礼, 2017. 食蚜瘿蚊捕食能力研究. 中国生物防治学报, 33(2): 171–175.]
- Lu ZY, Ran HF, Liu WX, Qu ZG, LIU XX, Li JC, Zhang QW, 2014. Effects of photoperiod and temperature on diapause induction in *Microplitis tuberculifer* (Hymenoptera: Braconidae) and the cold storage of its diapause pupae. *Acta Entomologica Sinica*, 57(10): 1206–1212. [路子云, 冉红凡, 刘文旭, 屈振刚, 刘小侠, 李建成, 张青文, 2014. 温度和光周期对管侧沟茧蜂滞育诱导及滞育茧的低温冷藏. 昆虫学报, 57(10): 1206–1212.]
- Luo LP, Dang YQ, Wang XY, Li F, Yang ZQ, 2021. The potential for using *Dastarcus helophoroides* as a biological control agent against *Anoplophora glabripennis* in Hunchun, Jilin province. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(1): 187–194. [罗立平, 党英侨, 王小艺, 李飞, 杨忠岐, 2021. 吉林珲春地区利用花绒寄甲防治光肩星天牛的可行性研究. 应用昆虫学报, 58(1): 187–194.]
- Ou YF, Ge F, 2014. Methodology of measuring and analyzing insect cold hardiness. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(6): 1646–1652. [欧阳芳, 戈峰, 2014. 昆虫抗冻耐寒能力的测定与分析方法. 应用昆虫学报, 51(6): 1646–1652.]
- Pan Y, Chang SR, Zhang XL, Mao CT, Lv K, Du BX, Huang FF, 2012. Effects of different cold storage conditions on survival rate of the over-wintering *Harmonia axyridis*. *Hunan Agricultural Sciences*, (17): 77–78, 81. [潘悦, 常寿荣, 张晓龙, 毛春堂, 吕凯, 杜碧雄, 黄飞燕, 2012. 不同冷藏条件对越冬代异色瓢虫成虫存活率的影响. 湖南农业科学, (17): 77–78, 81.]
- Song XC, Cui NN, Zheng FQ, Mo TL, Liu TX, Xu YY, 2012. Effects of fluctuating thermal regime on cold tolerance of parasitoid wasp *Aphidius gifuensis*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23(9): 2515–2520. [宋修超, 崔宁宁, 郑方强, 墨铁路, 刘同先, 许永玉, 2012. 变温贮藏僵蚜对烟蚜茧蜂耐寒能力的影响. 应用生态学报, 23(9): 2515–2520.]
- Wang RZ, Zhang Y, Wang XD, Song LW, Li H, Liu XR, Li XP, 2021. Research progress on cold storage tolerance of natural enemy insects. *Journal of Environmental Entomology*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1640.Q.20210715.1808.002.html>. [王瑞珍, 张杨, 王晓丹, 宋丽文, 李宏, 刘鑫荣, 李兴鹏, 2021. 天敌昆虫耐冷藏力研究进展. 环境昆虫学报, <http://kns.cnki.net/kcms/>

- detail/44.1640.Q.20210715.1808.002.html.]
- Wang XQ, Ou HD, Yu XF, Gou JY, Liu JF, Shen XX, Liu MH, Yang MF, 2020. Predation ability of the gall midge *Aphidoletes aphidimyza* (Rondani) on tobacco aphid *Myzus persicae* (Sulzer). *Chinese Tobacco Science*, 41(5): 79–86. [王秀琴, 欧后丁, 于晓飞, 苟剑渝, 刘健锋, 申修贤, 刘明宏, 杨茂发, 2020. 食蚜瘿蚊对烟蚜的捕食作用. 中国烟草科学, 41(5): 79–86.]
- Wu MJ, Xu QY, Liu Y, Shi XR, Sheng QD, Yang MM, Wang SG, Tang B, 2016. The super cooling point change of *Harmonia axyridis* under low temperature stress and its cold-resistance genes' expression analysis. *Scientia Agricultura Sinica*, 49(4): 677–685. [邬梦静, 徐青叶, 刘雅, 施兴荣, 沈祺达, 杨萌萌, 王世贵, 唐斌, 2016. 异色瓢虫低温胁迫下过冷却点变化及抗寒基因表达分析. 中国农业科学, 49(4): 677–685.]
- Xia YY, Wei N, Cai DC, Luo SP, 2017. The supercooling points and freezing points of pupae and adults of *Peristenus spretus* Chen et van Achterberg at different rearing temperatures. *Plant Protection*, 43(3): 60–64. [夏亚运, 韦宁, 蔡笃程, 罗淑萍, 2017. 不同温度条件下红颈常室茧蜂蛹和成虫过冷却点和结冰点的测定. 植物保护, 43(3): 60–64.]
- Xie DJ, Zhang L, Cheng YX, Jiang XF, 2020. Effects of diferent feeding temperature on the supercooling points and freezing points of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Plants Protection*, 46(2): 62–71. [谢殿杰, 张蕾, 程云霞, 江幸福, 2020. 不同饲养温度对草地贪夜蛾过冷却点和体液冰点的影响. 植物保护, 46(2): 62–71.]
- Xie M, Cheng HK, Qiu WL, 2000. The efficiency evaluation of the mass propagation system of *Aphioletes aphidimyza* by life table. *Acta Entomologica Sinica*, 43(S1): 151–156. [谢明, 程洪坤, 邱卫亮, 2000. 应用生命表评价食蚜瘿蚊扩繁系统. 昆虫学报, 43(S1): 151–156.]
- Ye CQ, 1990. Progress in research on *Aphidoletes aphidimyza*. *Entomological Knowledge*, 27(3): 181–184. [叶长青, 1990. 食蚜瘿蚊研究进展. 昆虫知识, 27(3): 181–184.]
- Yu XF, Han XB, Song DM, Wang XQ, Cheng TZ, Tian TA, Yang MF, 2018. Technical regulations for industrialize propagation of *Aphidoletes aphimyza*. *Guizhou Agricultural Sciences*, 46(5): 2, 38–40. [于晓飞, 韩小斌, 宋冬梅, 王秀琴, 陈廷智, 田太安, 杨茂发, 2018. 食蚜瘿蚊工厂化繁殖技术规程. 贵州农业科学, 46(5): 2, 38–40.]
- Zhang J, Yang MF, 2007. Study on the predation function of *Aphidoletes aphidimyza* on three species of aphids. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 35(36): 11897–11898. [张洁, 杨茂发, 2007. 食蚜瘿蚊对 3 种蚜虫捕食作用的研究. 安徽农业科学, 35(36): 11897–11898.]
- Zhang XX, Junaid I, Du YZ, 2021. Advances in research on the rapid cold hardening of insects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(2): 256–264. [张小香, JUNAID Iqbal, 杜予州, 2021. 昆虫快速冷耐受的研究进展. 应用昆虫学报, 58(2): 256–264.]