

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*

罗立平^{1,2**} 党英侨^{1**} 王小艺^{1***} 李 飞¹ 杨忠岐¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业和草原局森林保护学重点实验室, 北京 100091;

2. 国家棉花工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830091)

摘 要 【目的】探究光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* (ALB) 在吉林珲春的耐寒性, 为实现在当地释放花绒寄甲 *Dastarcus helophoroides* 防治 ALB 提供理论基础。【方法】于吉林珲春采集被 ALB 危害的杨树木段, 室内解剖木段后收集各虫态/龄期 ALB, 并测量这些天牛的过冷却点。通过设置同一时间 (0.5 h) 下 0、4 和 8 °C 不同驯化温度和最适驯化温度下 0.5、1 和 4 h 不同驯化时间, 以明确花绒寄甲成虫的过冷却能力受驯化温度和驯化时间的影响。将上述两组数据进行综合, 分析 ALB 大幼虫与不同冷驯化条件下花绒寄甲成虫过冷却点的相关性。【结果】ALB 卵 (分布在树皮表层) 的过冷却点最低, 随着其不断发育并向树内蛀食, 其过冷却点逐渐升高, 即不同虫态/龄期的过冷却点大小顺序为卵 < 小幼虫 (100 mg 以下) < 大幼虫 (500 mg 以上)。花绒寄甲成虫的过冷却能力受低温驯化影响明显, 4 °C 条件下冷驯化 0.5 h 时最易提高其耐寒性。ALB 大幼虫的过冷却点显著高于 0 (0.5 h)、4 (0.5 h)、8 (0.5 h) 和 4 °C (1 h) 冷驯化条件下处理的花绒寄甲成虫。【结论】ALB 能以高于当地最低温的过冷却点越冬, 除受自身耐寒能力影响外, 还与所处微生境有关。而花绒寄甲成虫在经历一定时间的快速冷驯化处理后, 过冷却点显著降低, 耐寒性得到明显提高。表明吉林珲春等高纬度地区利用花绒寄甲防治 ALB 存在较大的可行性。

关键词 花绒寄甲; 光肩星天牛; 快速冷驯化; 耐寒性; 过冷却点; 生物防治

The potential for using *Dastarcus helophoroides* as a biological control agent against *Anoplophora glabripennis* in Hunchun, Jilin province

LUO Li-Ping^{1,2**} DANG Ying-Qiao^{1**} WANG Xiao-Yi^{1***} LI Fei¹ YANG Zhong-Qi¹

(1. The Key Laboratory of Forest Protection of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of

Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. National Cotton Engineering Technology Research Center, Urumqi 830091, China)

Abstract 【Objectives】The cold hardiness of *Anoplophora glabripennis* (ALB) collected from Hunchun, Jilin province was investigated, together with the potential for using *Dastarcus helophoroides* as a biological control agent against this pest.

【Methods】ALB at different developmental stages were dissected from poplar logs collected in Hunchun, Jilin Province, and their supercooling points (SCP) were measured in laboratory subsequently. Insects were subjected to different rapid, cold-hardening temperature treatments (0, 4, 8 °C) for 0.5 h, and the optimal acclimation temperature for different periods of time (0.5, 1, 4 h). The effects of different combinations of temperature and exposure duration on the SCP of *D. helophoroides* adults were also measured and compared. The two data sets obtained using the above experimental design were compared to analyze the correlation in SCP between ALB larvae and *D. helophoroides* adults under different temperature conditions.

【Results】The SCP of ALB was the lowest during egg stage (laid under bark), afterwards it increased gradually with

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划 (2018YFD0600202); 贵州省平台建设即团队建设计划项目 (黔科合平台人才 [2017] 5202)

**共同第一作者 Co-first authors, E-mail: lipingluo1994@163.com; yqdang126@126.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: xywang@caf.ac.cn

收稿日期 Received: 2019-03-11; 接受日期 Accepted: 2020-11-08

developmental stages: egg < young larvae (< 100 mg) < large larvae (> 500 mg). The SCP of *D. helophoroides* adults decreased significantly under most rapid cold-hardening treatments and was the lowest in the 4 °C (0.5 h) treatment. The SCP of large ALB larvae was significantly higher than that of *D. helophoroides* adults in the 0 (0.5 h), 4 (0.5 h), 8 (0.5 h), and 4 °C (1 h) treatments. **[Conclusion]** Cold-hardiness and micro-environment play important roles in the overwintering survival of ALB, with a higher SCP in comparison to the lowest local temperature. The SCP of *D. helophoroides* adults can be effectively reduced, and their cold-tolerance ability improved, by rapid cold-hardening at low temperature for a specific period of time. It is practicable to use *D. helophoroides* as a biological control agent against ALB in high-latitude regions such as Hunchun, Jilin province.

Key words *Dastarcus helophoroides*; *Anoplophora glabripennis*; rapid cold hardening; cold hardiness; supercooling point; biological control

光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* (ALB) 原产我国, 目前该虫已对我国林业生态系统造成重大损失 (冯宇倩, 2017; 罗立平等, 2018a)。在我国, 光肩星天牛最早分布于华北 (冀静等, 2003), 近年来, 该虫已向高纬度高海拔地区扩散, 已分布至新疆伊犁, 西藏的日喀则市、林芝市和拉萨市, 黑龙江省哈尔滨市等地区 (王志刚等, 2003, 2004; 乔海莉等, 2007), 且分布范围还在进一步扩大。

花绒寄甲 *Dastarcus helophoroides* 是防治光肩星天牛的优势天敌, 通过释放其成虫和卵卡, 可以较好的控制光肩星天牛危害 (李孟楼等, 2009; 魏建荣和牛艳玲, 2011)。目前, 该天敌已经在全国多个地区推广和应用 (李孟楼等, 2009; 高悦等, 2013)。在我国, 花绒寄甲广布于华北、西北、华中、华东和华南地区。黄大庄等 (2008) 调查发现该虫在我国最北分布到吉林梅河口。李飞 (2017) 在吉林珲春进行光肩星天牛天敌调查时, 发现 ALB 寄生性天敌种类丰富度极低, 且未发现花绒寄甲分布。光肩星天牛分布范围已超出花绒寄甲的分布范围, 这意味着有些地区无法应用花绒寄甲来防治 ALB。

作为一类变温动物, 昆虫的分布扩散以及种群动态变化均会受到温度影响, 而耐寒性是决定其能否在高纬度地区顺利完成生长发育和繁殖的关键因素 (Bale, 2002; Wang and Kang, 2005; Cárcamo *et al.*, 2009)。为适应高纬度地区的冬季低温, 一些昆虫会通过体液过冷却来避免零下低温对其自身所造成的不利影响。因此, 过冷却点 (Supercooling point, SCP) 常用来评价昆虫耐寒能力 (Soemme, 1996)。已有研究表明昆虫

耐寒能力具有一定可塑性 (曹凯丽等, 2018), 所处栖境的季节性变化、取食寄主、发育阶段和地理种群等均会影响其耐寒能力 (任璐等, 2006; Feng *et al.*, 2014, 2016a, 2016b)。昆虫耐寒能力的提升可以通过快速冷驯化 (Rapid cold hardening, RCH) 处理来实现 (孔璐等, 2012; 岳雷等, 2014; 罗文, 2017), 该方法主要通过将昆虫短时间暴露于亚致死低温条件下来显著提高其耐寒性 (Lee *et al.*, 1987)。天敌昆虫耐寒性的提高, 有助于其在高纬度高海拔等未分布区的正常生存和发展, 对分布在更北地区的害虫的有效防治具有积极作用。

研究发现室内人工饲养得到的花绒寄甲种群的耐寒性较差, 其过冷却点仅为 -15 °C (魏建荣等, 2010; 魏可等, 2015)。但高尚坤等 (2016) 发现花绒寄甲耐寒性受地理种群和越冬场所影响, 其生态可塑性可以促使其向高纬度地区扩散和助迁。目前, 与花绒寄甲快速冷驯化相关的研究较少, 而通过快速冷驯化提高花绒寄甲耐寒性, 有助于其在高纬度地区的分布和应用, 对于当地防治 ALB 具有十分重要的意义。鉴于此, 本研究采用以测定过冷却点的方法来界定不同虫态/龄期 ALB 和不同冷驯化处理的花绒寄甲的耐寒性, 为花绒寄甲在高纬度未分布区防治 ALB 提供理论基础和指导。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

1.1.1 光肩星天牛 2018 年 11 月末, 于吉林珲春 (42.76°N, 130.25°E) 杨树林内采集受 ALB

危害的约 10 年生北抗 1 号杨树 (*Populus del. CL.Beikang-1*(16-27/92)) 木段, 每段所截长度约 1 m, 之后将木段运回实验室, 解剖并测定过冷却点等指标。木段解剖过程中, 观察和测量各试虫发育时期、所处微生境、体重以及过冷却点。收集不同虫态/龄期的 ALB 试虫, 并将其分别放置于玻璃指形管 (1 cm×5 cm) 中。整个实验过程 (从木段采集到试虫处理、测量) 保证在 96 h 内完成。

1.1.2 花绒寄甲 实验所需花绒寄甲由中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所提供。室内人工繁育的花绒寄甲由河北秦皇岛和陕西武功林间寄生 ALB 生物型种群扩繁得到, 以大麦虫 *Zophobas morio* 蛹作为繁育所需替代寄主, 繁育温度为 27 °C, 相对湿度约 60%, 全暗条件。

1.2 花绒寄甲的快速冷驯化

已有研究表明, 昆虫的快速冷驯化条件存在一定界限, 超出一定范围的驯化温度和较长的驯化时间均不利于昆虫耐寒性的提高 (岳雷等, 2014)。基于此, 本研究随机选取刚羽化花绒寄甲成虫共 75 头, 分别将其放置于圆盒 (直径 6.5 cm) 内, 设置 0 °C (0.5 h)、4 °C (0.5 h) 和 8 °C (0.5 h) 短时低温处理来筛选能够较为有效的降低花绒寄甲过冷却点的驯化温度。随后, 基于上述研究所明确的最适驯化温度, 随机选取 75 头花绒寄甲成虫后将其置于上述新的圆盒内, 分别设置 0.5、1 和 4 h 不同驯化时间来对其进行低温冷驯化, 进一步筛选最适驯化时间。整个实验过程均以恒温 24 °C 下未进行快速冷驯化的花绒寄甲为对照。各快速冷驯化处理和恒温对照组处理均在光照培养箱内进行, 光照设置为全暗, 相对湿度设置为 60%。不同条件处理后立即对花绒寄甲试虫进行过冷却点测定。每个圆盒内放置 1 头成虫, 记为 1 次重复, 每个处理重复 25 次。

1.3 过冷却点测定

参考王鹏等 (2014) 及邓煜等 (2016) 测定过冷却点的方法, 采用数字型测温仪在 -40 °C

超低温冰箱中测定花绒寄甲成虫的过冷却点。选定健康花绒寄甲活虫后, 将所选试虫固定在测温探头上, 再将探头移入上述冰箱内进行测量。具体测量方法按照测温仪使用说明书进行, 记录相应过冷却点。

1.4 数据处理

利用 SPSS 21.0 分别对 ALB 各虫态/龄期过冷却点和快速冷驯化条件下花绒寄甲的过冷却点进行单因素方差分析, 并将上述两种试虫在不同发育状态或处理条件下的过冷却点进行汇总和多重比较 (Tukey 法), 显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 光肩星天牛各越冬虫态/龄期的过冷却点

光肩星天牛各越冬虫态/龄期的过冷却点差异极显著 ($df=4, 45, F=45.49, P<0.0001$)。老熟幼虫在树干木质部心材位置生存, 其过冷却点最高, 平均为 -10.48 °C, 最高为 -2.4 °C; 而卵主要位于木质部和韧皮部之间, 其过冷却点最低 (可达 -27.4 °C)。光肩星天牛不同越冬虫态/龄期的耐寒能力依次为卵>小幼虫 (体重小于 100 mg)>大幼虫 (体重大于 500 mg) (表 1)。表明 ALB 耐寒能力与其发育状态和所处微生境有关, 随着其不断发育和向树干内部蛀食, 过冷却点有所升高, 而耐寒力则逐渐下降。

2.2 花绒寄甲过冷却能力受驯化温度和驯化时间的影响

2.2.1 不同温度下快速冷驯化的影响 花绒寄甲成虫的过冷却点受不同驯化温度的影响明显 ($df=3, 96, F=14.66, P<0.0001$)。与对照相比, 花绒寄甲经历不同温度下 0.5 h 的快速冷驯化处理, 其过冷却点均显著降低, 其中 4 °C (0.5 h) 处理后过冷却点最低, 为 -25.10 °C。而 0 °C 处理 0.5 h 后花绒寄甲成虫的过冷却点较 4 °C 处理 0.5 h 有所上升, 平均为 -17.88 °C (图 1), 表明花绒寄甲快速冷驯化所需温度存在一定界限, 超出这一界限则不利于提高其耐寒性。

表 1 光肩星天牛不同越冬虫态/龄期的过冷却点

Table 1 SCP of the different overwintering stages/instars of *Anoplophora glabripennis*

微环境 Microhabitats	虫态/龄期 Stages/Instars	样本量 Sample size	体重 Weight (mg)	平均过冷却点±标准差 Mean SCP ± SD (°C)	过冷却点极小值 Minimum SCP (°C)	过冷却点极大值 Maximum SCP (°C)
形成层 Cambium	卵 Egg	14	≤10	- 25.70 ± 1.2 d	- 27.4	- 23.4
	小幼虫 Young larva	6	≤10	- 18.62 ± 1.1 c	- 19.8	- 16.8
	小幼虫 Young larva	16	10-100	- 17.70 ± 2.6 c	- 23.4	- 13.1
木质部边材 Sapwood	大幼虫 Large larva	8	500-1 000	- 14.06 ± 2.8 b	- 18.3	- 9.9
木质部心材 Heartwood	大幼虫 Large larva	6	≥1 000	- 10.48 ± 5.2 a	- 17.7	- 2.4

同列数据后标有不同小写字母表示相互间差异显著 (Tukey test, $P < 0.05$)。
Data followed by different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level (Tukey test).

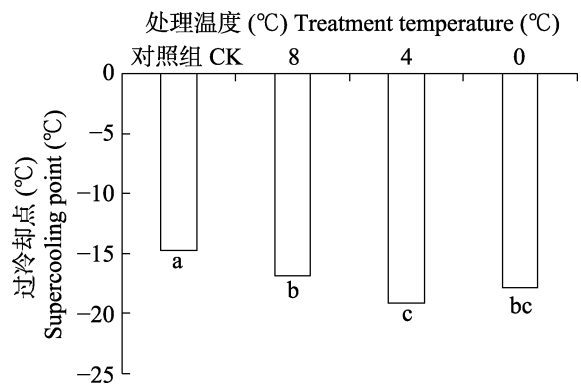


图 1 不同温度下花绒寄甲成虫冷驯化 0.5 h 后的平均过冷却点

Fig. 1 Effects of rapid cold hardening at different low temperatures for 0.5 h on mean SCP ± SE of *Dastarcus helophoroides* adults

柱上标有不同小写字母表示相互间差异显著 (Tukey test, $P < 0.05$)。下图同。
Histograms with different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level (Tukey test). The same below.

2.2.2 4 °C不同时间快速冷驯化的影响 不同时长的快速冷驯化处理对花绒寄甲过冷却点的影响明显不同。4 °C条件下花绒寄甲成虫经历不同时长快速冷驯化, 除 4 h 处理外, 其他时长处理下其过冷却点均明显降低 ($df = 3, 96, F = 18.17, P < 0.000 1$)。与对照相比, 4 °C条件下不同时长快速冷驯化均能在一定程度上降低花绒寄甲的过冷却点, 其中处理 0.5 h 后的过冷

却点最低 (- 19.14 °C)。随着处理时间延长, 过冷却点呈逐渐上升趋势, 处理 4 h 后花绒寄甲的过冷却点与对照组相比无明显差异 ($df = 3, 96, F = 18.17, P < 0.000 1$) (图 2)。表明花绒寄甲成虫的快速冷驯化所需时间相对较短, 冷驯化时间越长, 其耐寒能力反而降低。

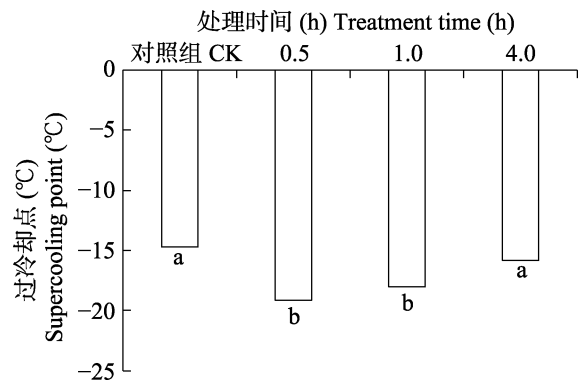


图 2 4 °C条件下花绒寄甲成虫的过冷却点受不同时长快速冷驯化的影响

Fig. 2 Effects of rapid cold hardening at 4 °C under different durations on SCP of *Dastarcus helophoroides* adults

2.3 光肩星天牛大幼虫与不同冷驯化条件下的花绒寄甲成虫的过冷却点的相关性

由图 3 可知, 光肩星天牛大幼虫 (体重大于 500 mg) 和不同快速冷驯化处理条件下的花绒寄甲的过冷却点差异显著 ($df = 6, 157, F = 9.81,$

$P < 0.0001$)。光肩星天牛大幼虫的过冷却点除与未经低温处理、经 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (4 h) 处理的花绒寄甲成虫的过冷却点差异不显著外, 均明显高于其他快速冷驯化处理的花绒寄甲成虫 ($df = 6, 157$, $F = 9.81$, $P < 0.0001$)。表明花绒寄甲成虫经过一定条件冷驯化后具有在高纬度地区生存发展和寄生光肩星天牛幼虫的可能性。

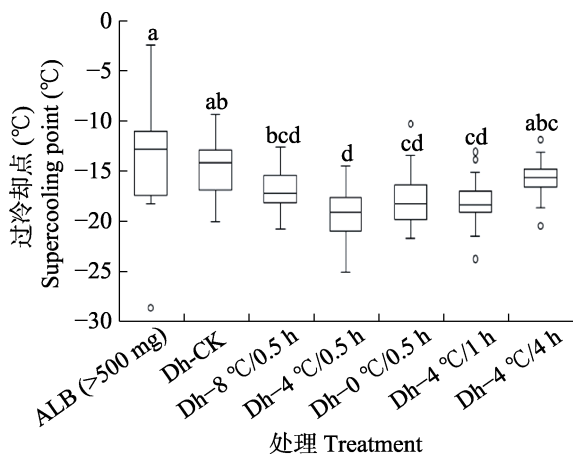


图3 光肩星天牛 (ALB) 幼虫及其经不同快速冷驯化处理的花绒寄甲 (Dh) 成虫的过冷却点

Fig. 3 SCP in *Anoplophora glabripennis* (ALB) larvae and *Dastarcus helophoroides* (Dh) adults in different conditions of rapid cold hardening

3 结论与讨论

快速冷驯化是提高昆虫耐寒性的重要途径 (Lee et al., 1987; Kelty and Lee, 1999)。本研究表明经过低温驯化的花绒寄甲成虫, 其过冷却点得到明显下降。但处理条件不同时, 昆虫耐寒性的变化幅度同样存在差异。花绒寄甲经历 0.5 h 不同温度的快速冷驯化处理后, 其过冷却点较对照组均有不同程度的降低。其中, 该虫经历 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0.5 h) 处理后过冷却点最低, 而经过 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0.5 h) 处理的成虫, 其过冷却点则有所回升, 表明花绒寄甲成虫的过冷却点不会随驯化温度的降低而持续下降。花绒寄甲成虫在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下经历不同时长低温驯化后, 仍以 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0.5 h) 处理所得到的过冷却点最低, 而 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (4 h) 处理后过冷却点则有所回升, 且与对照组相比无明显差异。由此推测, 花绒寄甲耐寒性提升所需的

快速冷驯化条件存在一定界限, 超出这一界限则不利于耐寒性的提升。这与李兴鹏等 (2012) 及岳雷等 (2014) 对蠋蝽 *Arma chinensis* 和广聚萤叶甲 *Ophraella communa* 快速冷驯化的研究结果较为一致, 即认为昆虫的快速冷驯化存在一定临界值, 处于该界限内的驯化低温和时间才能更有效地提高昆虫耐寒性。本研究发现, 经过 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0.5 h) 冷驯化处理得到的花绒寄甲成虫, 其过冷却点平均为 $-19.14\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最低能达到 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 这与魏可等 (2015) 调查到的甘肃野外越冬种群的数值相接近, 表明花绒寄甲可通过室内快速冷驯化处理来达到与野外驯化类似的效果。因此, 对于高纬度地区利用花绒寄甲进行光肩星天牛的防治, 建议应先在室内对这些人工繁育的花绒寄甲进行快速冷驯化处理, 提高其耐寒性后再加以释放, 以避免该虫因无法顺利越冬而死亡, 既浪费天敌资源, 又达不到控害效果。

昆虫可通过越冬来抵御冬季低温并顺利完成生活史, 昆虫因种类不同、生活史不同, 其越冬虫态也不同 (景晓红和康乐, 2004)。昆虫的越冬虫态大致可以分为两类: 一类是以一种虫态越冬, 如丝带凤蝶 *Sericens montelus* 和美国白蛾 *Hyphantria cunea* 以蛹越冬 (杨秋生等, 2008; 罗立平等, 2018b); 另一类是以多种虫态越冬, 如赵建兴等 (2008) 发现红脂大小蠹 *Dendroctonus valens* 的越冬虫态包括老熟幼虫和成虫两类。已有研究表明, 昆虫处于不同虫态时其耐寒能力明显不同, 如江幸福等 (2001) 发现甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 蛹期时最具耐寒性, 而卵期时最弱; 鞠瑞亭等 (2010) 发现红棕象甲 *Rhynchophorus ferrugineus* 幼虫耐寒性最强, 其次是成虫, 卵则最弱。本研究也发现, ALB 在吉林珲春的 3 种越冬虫态/龄期其耐寒性存在差异, 耐寒性由低到高依次是大幼虫、小幼虫和卵, 表明随着该虫发育和向树内蛀食, 其耐寒性呈下降趋势。

尽管一些昆虫的过冷却点较当地冬季最低温明显高, 但这些昆虫仍然能够顺利越冬。冬季时红脂大小蠹幼虫过冷却点约为 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但其经历 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件仍能正常越冬 (赵建兴等,

2009)。本研究同样发现, ALB 在吉林珲春越冬期间, 其越冬卵、幼虫的过冷却点均明显高于当地最低温, 但该虫在当地仍能正常生存。推测这可能与这些昆虫所处微生境有关, 这些隐蔽性害虫长期在树干内生存, 树皮等组织结构对其度过不良环境发挥了较强的保护作用。如新疆杨树体内外温差最大可达 4 °C(魏建荣等, 2010)。ALB 各越冬虫态/龄期时均未直接接触外界环境, 因而受外界条件影响较小。

本研究通过研究吉林珲春 ALB 种群的耐寒性以及快速冷驯化处理对其天敌花绒寄甲耐寒性的影响, 发现昆虫自身过冷却能力、所处微生境以及外界低温驯化等均会对其耐寒性产生影响。对于长期在树干内越冬、生存的蛀干害虫来说, 即使其自身过冷却能力较弱, 树体也会对其产生一定的保护作用。而一些天敌昆虫则需要通过低温驯化来有效提高耐寒性。本研究发现, 花绒寄甲成虫的过冷却点可以通过一定程度的驯化低温和驯化时间处理来有效降低, 而其耐寒能力的提升将有利于高纬度地区利用这一天敌来防治 ALB。因此, 建议在吉林珲春等高纬度地区释放花绒寄甲前, 对其室内人工繁育种群进行快速冷驯化处理, 并于释放前在当地寄主树上人为制造一些适合花绒寄甲生存的隐蔽性的孔洞、凹槽等, 进一步提高花绒寄甲的越冬能力及其生物防治效果。

参考文献 (References)

- Bale JS, 2002. Insects and low temperatures: From molecular biology to distributions and abundance. *Philosophical Transactions Biological Sciences*, 357(1423): 849–862.
- Cao KL, Wang FY, Hu M, Dawuti W, Roman J, Ji R, 2018. Cold resistance and adaptation of *Pyrrhocoris apterus*. *Acta Ecologica Sinica*, 38(5): 1826–1831. [曹凯丽, 王芳艳, 胡敏, 吾尔买提·达吾提, Roman Jashenko, 季荣, 2018. 驯化对始红蝽 (*Pyrrhocoris apterus*) 耐寒能力的影响及越冬适应策略. 生态学报, 38(5): 1826–1831.]
- Cárcamo HA, Herle CE, Otani J, McGinn SM, 2009. Cold hardiness and overwintering survival of the cabbage seedpod weevil, *Ceutorhynchus obstrictus*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 133(3): 223–231.
- Deng Y, Sun SH, Qi JY, Yin DC, Li F, 2016. Factors affecting *Hyphantria cunea* supercooling point. *Chinese Journal of Ecology*, 35(3): 767–771. [邓煜, 孙守慧, 祁金玉, 尹大川, 李飞, 2016. 美国白蛾过冷却点的影响因子. 生态学杂志, 35(3): 767–771.]
- Feng Y, Xu L, Tian B, Tao J, Wang JL, Zong SX, 2014. Cold hardiness of Asian longhorned beetle (Coleoptera: Cerambycidae) larvae in different populations. *Environmental Entomology*, 43(5): 1419–1426.
- Feng YQ, Tursun R, Xu ZC, Ouyang F, Zong SX, 2016a. Effect of three species of host tree on the cold hardiness of overwintering larvae of *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae). *European Journal of Entomology*, 113(1): 212–216.
- Feng YQ, Xu LL, Li WB, Xu ZC, Cao M, Wang JL, Tao J, Zong SX, 2016b. Seasonal changes in supercooling capacity and major cryoprotectants of overwintering Asian longhorned beetle (*Anoplophora glabripennis*) larvae. *Agricultural & Forest Entomology*, 18(3): 302–312.
- Feng YQ, 2017. Cold tolerance and adaptation mechanisms of *Anoplophora glabripennis* larvae. Doctoral dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [冯宇倩, 2017. 光肩星天牛幼虫的耐寒性及其适应机制. 博士学位论文. 北京: 北京林业大学.]
- Gao SK, Zhang YL, Tang YL, Yang ZQ, Wang XY, Lu JF, Wang J, Situ CN, Fu FY, 2016. Overwintering characteristics and cold-hardiness of biotype of *Dastarcus helophoroides* (Coleoptera: Bothrideridae) on *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae). *Scientia Silvae Sinicae*, 52(3): 68–74. [高尚坤, 张彦龙, 唐艳龙, 杨忠岐, 王小艺, 路纪芳, 王健, 司徒春南, 付甫永, 2016. 花绒寄甲松褐天牛生物型的越冬特性及耐寒性. 林业科学, 52(3): 68–74.]
- Gao Y, Xie CX, Liu YP, Zheng HY, Xu M, 2013. Study on parasitic efficiency of releasing *Dastarcus helophoroides* to control *Anoplophora glabripennis* in park willows. *Journal of Southwest Forestry University*, 33(5): 104–106. [高悦, 解春霞, 刘云鹏, 郑华英, 徐明, 2013. 花绒寄甲对柳树光肩星天牛的防治效果及寄生能力. 西南林业大学学报, 33(5): 104–106.]
- Huang DZ, Yang ZQ, Bei B, Su N, Tang H, 2008. Geographical distribution of *Dastarcus helophoroides* in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 44(6): 171–175. [黄大庄, 杨忠岐, 贝蓓, 孙娜, 唐桦, 2008. 花绒寄甲在中国的地理分布区. 林业科学, 44(6): 171–175.]
- Ji J, Luo YQ, Liu HX, 2003. Isolation and identification of fungi from the incisions of *Anoplophora glabripennis* in willow in Beijing. *Forest Pest and Disease*, 22(2): 6–8. [冀静, 骆有庆, 刘红霞, 2003. 北京地区柳树上光肩星天牛刻槽中真菌的分离

- 和鉴定. 中国森林病虫, 22(2): 6–8.]
- Jiang XF, Luo ZZ, Li KB, Zhao YC, Hu Y, 2001. A study on the cold hardiness of the beet armyworm, *Spodoptera exigua*. *Acta Ecologica Sinica*, 21(10): 1575–1582. [江幸福, 罗礼智, 李克斌, 赵廷昌, 胡毅, 2001. 甜菜夜蛾抗寒与越冬能力研究. 生态学报, 21(10): 1575–1582.]
- Jing XH, Kang L, 2004. Overview and evaluation of research methodology for insect cold hardiness. *Chinese Bulletin of Entomology*, 41(1): 7–10. [景晓红, 康乐, 2004. 昆虫耐寒性的测定与评价方法. 昆虫知识, 41(1): 7–10.]
- Ju RT, Wang F, Xiao YY, Li YZ, Du YZ, 2010. Cold hardiness of the red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier) (Coleoptera: Curculionidae) in Shanghai. *Acta Entomologica Sinica*, 53(2): 226–232. [鞠瑞亭, 王凤, 肖娉玉, 李跃忠, 杜予州, 2010. 上海地区红棕象甲的耐寒性研究. 昆虫学报, 53(2): 226–232.]
- Kelty JD, Lee RE Jr, 1999. Induction of rapid cold hardening by cooling at ecologically relevant rates in *Drosophila melanogaster*. *Journal of Insect Physiology*, 45(8): 719–726.
- Kong L, Guo JY, Zhou ZS, Wan FH, 2012. Progress in research on cold hardening in insects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(6): 1664–1669. [孔璐, 郭建英, 周忠实, 万方浩, 2012. 昆虫冷驯化机制研究进展. 应用昆虫学报, 49(6): 1664–1669.]
- Lee RE, Chen CP, Denlinger DL, 1987. A rapid cold-hardening process in insects. *Science*, 238(4832): 1415–1417.
- Li F, 2017. Study on the key control factors of Asian longhorned beetle (*Anoplophora Glabripennis*) natural populations. Master dissertation. Shenyang: Shenyang Agricultural University. [李飞, 2017. 光肩星天牛自然种群关键控制因子研究. 硕士学位论文. 沈阳: 沈阳农业大学.]
- Li ML, Li YZ, Lei Q, Yang ZQ, 2009. Biocontrol of Asian longhorned beetle larva by releasing eggs of *Dastarcus helophoroides* (Coleoptera: Bothrididae). *Scientia Silvae Sinicae*, 45(4): 78–82. [李孟楼, 李有忠, 雷琼, 杨忠岐, 2009. 释放花绒寄甲卵对光肩星天牛幼虫的防治效果. 林业科学, 45(4): 78–82.]
- Li XP, Song LW, Zhang HH, Chen YQ, Zuo TT, Wang J, Sun W, 2012. Responses of *Arma chinensis* cold tolerance to rapid cold hardening and underlying physiological mechanisms. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23(3): 791–797. [李兴鹏, 宋丽文, 张宏浩, 陈越渠, 左彤彤, 王君, 孙伟, 2012. 蠋蛾抗寒性对快速冷驯化的响应及其生理机制. 应用生态学报, 23(3): 791–797.]
- Luo LP, Wang XY, Yang ZQ, Zhao JX, Tang YL, 2018a. Progress in biological control over *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae). *Biological Disaster Science*, 41(4): 247–255. [罗立平, 王小艺, 杨忠岐, 赵建兴, 唐艳龙, 2018a. 光肩星天牛生物防治研究进展. 生物灾害科学, 41(4): 247–255.]
- Luo LP, Wang XY, Yang ZQ, Cao LM, 2018b. Research progress in the management of fall webworm, *Hyphantria cunea* (Drury) (Lepidoptera: Arctiidae). *Journal of Environmental Entomology*, 40(4): 721–735. [罗立平, 王小艺, 杨忠岐, 曹亮明, 2018b. 美国白蛾防控技术研究进展. 环境昆虫学报, 40(4): 721–735.]
- Luo W, 2017. Comparative studies on cold hardiness and instar determination of *Eucryptorrhynchus scrobiculatus* and *E. brandti*. Master dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [罗文, 2017. 沟眶象与臭椿沟眶象耐寒性比较及幼虫虫龄划分. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学.]
- Qiao HL, Luo YQ, Feng XF, Sun JH, Han XW, 2007. The resistance of the main host-tree species to *Anoplophora glabripennis* in Xinjiang. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(5): 660–664. [乔海莉, 骆有庆, 冯晓峰, 孙建华, 韩新伟, 2007. 新疆主要造林树种对光肩星天牛的抗性. 昆虫知识, 44(5): 660–664.]
- Ren L, Lu YY, Zeng L, Pang ST, 2006. Effect of different hostfruits on the cold hardiness of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae). *Acta Entomologica Sinica*, 49(3): 447–453. [任璐, 陆永跃, 曾玲, 庞淑婷, 2006. 寄主对桔小实蝇耐寒性的影响. 昆虫学报, 49(3): 447–453.]
- Soemme L, 1996. The effect of prolonged exposures at low temperatures in insects. *Cryo Letters*, 17(6): 341–346.
- Wang P, Yu Y, Xu YY, Li LL, Zhang AS, Men XY, Zhang SC, Zhou XH, 2014. Effects of different host plants on the cold-resistant substances in overwintering larvae of *Carposina sasakii* Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(5): 1513–1517. [王鹏, 于毅, 许永玉, 李丽莉, 张安盛, 门兴元, 张思聪, 周仙红, 2014. 寄主植物对桃小食心虫越冬幼虫耐寒性物质的影响. 应用生态学报, 25(5): 1513–1517.]
- Wang XH, Kang L, 2005. Differences in egg thermotolerance between tropical and temperate populations of the migratory locust *Locusta migratoria* (Orthoptera: Acrididae). *Journal of Insect Physiology*, 51(11): 1277–1285.
- Wang ZG, Yan JJ, Liu YJ, Tang XQ, Chen YQ, 2003. Investigation of *Anoplophora glabripennis* in Southern Tibet. *Journal of Northeast Forestry University*, 31(4): 70–71. [王志刚, 阎浚杰, 刘玉军, 唐晓琴, 陈彦芹, 2003. 西藏南部光肩星天牛发生情况调查报告. 东北林业大学学报, 31(4): 70–71.]
- Wang ZG, 2004. Study on the occurrence dynamics of *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) and its control measures.

- Doctoral dissertation. Harbin: Northeast Forestry University. [王志刚, 2004. 中国光肩星天牛发生动态及治理对策研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 东北林业大学.]
- Wei JR, Niu YL, 2011. Evaluation of biological control of *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) by releasing adult *Dastarcus helophoroides* (Coleoptera: Zopheridae): A case study in Xi'an city, northwestern China. *Acta Entomologica Sinica*, 54(12): 1399–1405. [魏建荣, 牛艳玲, 2011. 西安城区环境中释放花绒寄甲成虫对光肩星天牛的生物防治效果评价. 昆虫学报, 54(12): 1399–1405.]
- Wei JR, Wang SY, Niu YL, Tang YL, 2010. Cold tolerance of *Dastarcus helophoroides*. *Forest Pest and Disease*, 29(5): 19–20. [魏建荣, 王素英, 牛艳玲, 唐艳龙, 2010. 花绒寄甲耐寒性研究. 中国森林病虫, 29(5): 19–20.]
- Wei K, Zhang YN, Yang ZQ, Wang XY, Han YY, Liu Y, Qu MQ, 2015. Overwintering and cold tolerance of a parasitic natural enemy, *Dastarcus helophoroides* (Coleoptera: Bothrideridae), in Gansu province. *Forest Research*, 28(4): 588–592. [魏可, 张翌楠, 杨忠岐, 王小艺, 韩玉英, 刘毅, 瞿明青, 2015. 花绒寄甲在甘肃地区越冬情况和耐寒能力调查. 林业科学研究, 28(4): 588–592.]
- Yang QS, Wang XP, Xu S, Pan Y, Lei CL, 2008. Morphology of diapause and non-diapause pupae and their adults of *Sericinus montelus* Gray (Lepidoptera: Papilionidae). *Acta Entomologica Sinica*, 51(4): 454–458. [杨秋生, 王小平, 徐淑, 潘悦, 雷朝亮, 2008. 丝带凤蝶滞育与非滞育蛹及其成虫的形态学观察. 昆虫学报, 51(4): 454–458.]
- Yue L, Zhou ZS, Liu ZB, Guo JY, Wan FH, 2014. Effects of rapid cold hardening in different intensities on the physiological indices related to cold tolerance in adults of *Ophraella communa* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Acta Entomologica Sinica*, 57(6): 631–638. [岳雷, 周忠实, 刘志邦, 郭建英, 万方浩, 2014. 不同强度快速冷驯化对广聚萤叶甲成虫耐寒性生理指标的影响. 昆虫学报, 57(6): 631–638.]
- Zhao JX, Yang ZQ, Gregoire JC, 2009. The cold-hardiness of *Dendroctonus valens* (Coleoptera, Scolytidae) and *Rhizophagus grandis* (Coleoptera, Rhizophagidae). *Journal of Environmental Entomology*, 31(1): 20–28. [赵建兴, 杨忠岐, Gregoire JC, 2009. 红脂大小蠹 *Dendroctonus valens* (Coleoptera, Scolytidae) 和大喙蜡甲 *Rhizophagus grandis* (Coleoptera, Rhizophagidae) 的耐寒性. 环境昆虫学报, 31(1): 20–28.]
- Zhao JX, Yang ZQ, Ren XH, Liang XM, 2008. Biological characteristics and occurring law of *Dendroctonus valens* in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 44(2): 99–105. [赵建兴, 杨忠岐, 任晓红, 梁小明, 2008. 红脂大小蠹的生物学特性及在我国的发生规律. 林业科学, 44(2): 99–105.]