

沙葱萤叶甲的过冷却能力与抗寒性

李 浩, 周晓榕, 庞保平*, 常 静

(内蒙古农业大学草地昆虫研究中心, 呼和浩特 010019)

摘要:【目的】沙葱萤叶甲 *Galeruca daurica* Joannis 于 2009 年开始在内蒙古草原暴发成灾, 发生地区不断扩大, 危害日趋严重, 严重影响内蒙古草原畜牧业的可持续发展和生态安全。低温是影响昆虫生长发育和存活的关键因子, 而昆虫对低温的耐受性决定了其越冬存活率。了解沙葱萤叶甲的过冷却点及抗寒能力有助于预测其分布范围及种群数量动态。【方法】采用热电偶法, 在室内测定了沙葱萤叶甲各发育阶段的过冷却点; 比较了幼虫在不同低温条件下 ($-6 \sim -14^{\circ}\text{C}$) 暴露 2 h 及在 -5°C 低温条件下暴露不同时间 (0.5 ~ 8 d) 的存活率。【结果】沙葱萤叶甲不同发育阶段的过冷却点存在显著差异, 从低到高依次为卵 (-29.8°C)、1 龄幼虫 (-14.6°C)、2 龄幼虫 (-13.3°C)、蛹 (-12.1°C)、3 龄幼虫 (-10.2°C) 和成虫 (-9.0°C); 越冬卵 12 月和 1 月的过冷却点最低, 2 月的过冷却点最高。随着处理温度的降低和处理时间的延长, 幼虫的存活率降低。1、2 和 3 龄幼虫在 -5°C 下的半致死时间 ($L_{\text{time}_{50}}$) 分别为 3.84、3.80 和 2.28 d, 低温处理 2 h 后半致死温度 ($L_{\text{temp}_{50}}$) 分别为 -10.1 、 -9.1 和 -8.5°C , 高于其过冷却点。【结论】说明沙葱萤叶甲幼虫为不耐寒冷型 (chill-intolerant)。

关键词: 沙葱萤叶甲; 抗寒性; 过冷却点; 存活率; 致死温度; 致死时间

中图分类号: Q965 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2014)02-0212-06

Supercooling capacity and cold hardiness of *Galeruca daurica* (Coleoptera: Chrysomelidae)

LI Hao, ZHOU Xiao-Rong, PANG Bao-Ping*, CHANG Jing (Research Center for Grassland Insects, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

Abstract:【Aim】*Galeruca daurica* Joannis began to outbreak seriously since 2009 and has caused great losses in the Inner Mongolian grasslands. Its occurrence region has expanded constantly and the damage has become more and more severe, which greatly influenced the sustainable development of grassland animal husbandry and ecological safety in Inner Mongolia. Low temperature is a key factor that affects the development and survival of insects, and their overwintering survival mainly depends on their tolerance to low temperature in winter. Understanding the supercooling point (SCP) and cold hardiness of *G. daurica* is helpful to forecast its distribution and population dynamics.【Methods】We measured the supercooling points in various developmental stages in the laboratory and determined the survival rates of larvae exposed to different low temperatures ($-6^{\circ}\text{C} - -14^{\circ}\text{C}$) for 2 h or exposed to -5°C for different periods (0.5–8 d) with the thermocouple method.【Results】The supercooling points had obvious differences among various developmental stages of *G. daurica* in the following order from low to high: egg (-29.8°C), 1st instar larva (-14.6°C), 2nd instar larva (-13.3°C), pupa (-12.1°C), 3rd instar larva (-10.2°C) and adult (-9.0°C). The SCPs of eggs were the lowest in December and January, and the highest in February. The survival rates of larvae declined with the decrease of treatment temperature and the extension of treatment time. For 1st instar, 2nd instar and 3rd instar larva, the half lethal time of individuals ($L_{\text{time}_{50}}$) at -5°C was 3.84 d, 3.80 d and 2.28 d, respectively, while the lower lethal temperature needed to kill 50% of individuals ($L_{\text{temp}_{50}}$) after 2 h exposure was -10.1 , -9.1 and -8.5°C , respectively, higher than the corresponding SCPs.【Conclusion】The larvae of *G. daurica* can be considered as chill-intolerant.

Key words: *Galeruca daurica*; cold hardiness; supercooling point; survival rate; lower lethal temperature; lower lethal time

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(20100379); 国家自然科学基金项目(31360441)

作者简介: 李浩, 女, 1988 年 9 月生, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 研究方向为昆虫生态学, E-mail: 553135343@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: pangbp@imau.edu.cn

收稿日期 Received: 2013-10-20; 接受日期 Accepted: 2014-01-05

沙葱萤叶甲 *Galeruca daurica* Joannis 属鞘翅目叶甲科萤叶甲亚科, 主要以幼虫为害沙葱 *Allium mongolium* Regel、多根葱 *Allium polyrhizum* Turcz. ex Regel、野韭 *Allium ramosum* L. 等百合科葱属牧草的叶部, 严重时会啃食茎部, 将牧草地上部分啃食一光。据历史记载, 该虫在国外主要分布在蒙古国、俄罗斯(西伯利亚)、朝鲜和韩国, 在我国内蒙古、新疆和甘肃也有记录(杨星科等, 2010)。该虫从2009年开始在内蒙古草原上突然大面积暴发成灾, 呈现逐年加重的趋势。发生范围从2009年的锡林郭勒盟的镶黄旗、锡林浩特市、苏尼特左旗和阿巴嘎旗等4个旗县, 现已迅速扩大到呼伦贝尔市新巴虎尔右旗、新巴虎尔左旗, 锡林郭勒盟锡林浩特市、阿巴嘎旗、东乌珠穆沁旗、镶黄旗、苏尼特左旗、苏尼特右旗, 乌兰察布市四子王旗、巴彦淖尔市乌拉特中旗以及阿拉善盟阿右旗5个盟市的11个旗县市(内蒙古草原工作站内部资料)。

低温是影响昆虫生长发育和存活的关键因子, 严格制约着昆虫种群的延续。因此, 昆虫抗寒性是其种群发展和扩散的重要前提(McDonald *et al.*, 1999; Chen and Kang, 2005; Lapointe *et al.*, 2007)。抗寒性是有机体暴露于长期或短期低温下的存活能力, 与有机体特定的发育阶段、环境的季节性变化、遗传因素及营养状况和暴露低温的时间长短有关(Lee, 1989)。在北方地区冬季气温低而多变, 抗寒性是保证昆虫越冬存活不可避免的前提, 抗寒性的强弱决定了昆虫低温下存活的概率(景晓红和康乐, 2004)。昆虫越冬阶段的存活率直接影响来年虫口基数、种群的增长及最终的成灾状况(Bale, 1989)。目前对叶甲类昆虫抗寒性已开展了部分研究, 如马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* (Boiteau and Coleman, 1996; 张云慧等, 2012)、油菜露尾甲 *Meligethes aeneus* (Hiisaar *et al.*, 2011)和广聚萤叶甲 *Ophraella communa* (Zhu *et al.*, 2011)等。

在鞘翅目昆虫中很少有以卵越冬的种类(Shintani and Ishikawa, 1999), 目前已知以卵越冬的主要叶甲类害虫有阔胫萤叶甲 *Pallasiola absinthii* (柴来智等, 1990)、韭萤叶甲 *Galeruca reichardtii* (杨春清和丁万隆, 1999)、双斑萤叶甲 *Monolepta hieroglyphica* (杨海龙等, 2008)和玉米根萤叶甲 *Diabrotica virgifera* (陈宏等, 2009)等。但对上述害虫均未有有关抗寒性方面的报道。我们的初步观察表明, 沙葱萤叶甲一年发生1代, 以卵在牛粪、石块及枯草丛下越冬, 在锡林浩特地区翌年4月下旬

开始孵化, 5月中旬达到高峰。蛹在5月中旬开始出现, 5月末、6月初达到高峰。成虫6月初开始出现, 6月中旬数量较多, 6月下旬开始夏眠, 8月下旬恢复活动并开始产卵。沙葱萤叶甲卵及其幼虫的抗寒能力直接影响其发生基数。因此, 开展沙葱萤叶甲卵和幼虫的过冷却能力及低温下存活力的研究, 有助于揭示其成灾机制和预测其扩散分布范围。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

2012年5-6月从内蒙古锡林浩特市农业部草原有害生物野外观测试验站采集沙葱萤叶甲幼虫和成虫, 带回呼和浩特市内蒙古农业大学昆虫实验室内进行饲养, 整个饲养过程均以野韭为食。成虫于9月初开始陆续产卵, 将同一天产出的卵放入同一培养皿中, 做好标记, 置于室外自然变温条件下。2013年2月末卵开始陆续孵化为幼虫, 收集各发育阶段的沙葱萤叶甲作为供试虫源。过冷却点测定试虫的选取: 卵分别在产卵当月(9月初)至次年2月, 每月中旬进行测定; 各龄期幼虫和蛹为蜕皮后2-3 d(25℃恒温下, 1龄8.3 d, 2龄7.7 d, 3龄12.2 d, 蛹7.0 d); 成虫为羽化后3 d。致死温度和致死时间实验幼虫的选取同上。

1.2 过冷却点的测定

采用热电偶方法进行过冷却点的测定, 仪器主要由低温培养箱(LRH-100CB型, 上海一恒仪器公司)和多路温度自动记录仪(TP9024U型, 深圳拓普仪器公司)组成。测定时将热电偶探头固定在卵体表面或幼虫、蛹及成虫腹面, 然后置于低温培养箱中, 使箱内温度从室温以约1℃/min的速率下降至-40℃。记录试虫体温变化, 不同发育阶段: 卵90粒, 1龄幼虫149头, 2龄幼虫136头, 3龄幼虫89头, 蛹72头, 成虫69头; 越冬卵: 9月10粒, 10月68粒, 11月37粒, 12月38粒, 1月47粒, 2月45粒。

1.3 致死温度和致死时间的测定

参考Hao和Kang(2004)的方法确定幼虫的致死温度和致死时间。致死温度实验: 将供试幼虫分别在25(常温对照), -6, -8, -10, -12和-14±0.5℃的低温培养箱中处理2 h。致死时间实验: 供试幼虫在温度为-5±0.5℃低温培养箱中分别处理0(对照), 0.5, 1, 2, 4, 6及8 d。处理结束后将

试虫移到 25℃ 光照培养箱内恢复 24 h 观察存活情况,以能协调爬行作为存活标准。每个处理 4~6 个重复,每个重复 20~30 头幼虫。

1.4 数据统计与分析

利用统计软件 DPS9.5 对各实验内容所得数据进行统计分析。不同处理之间的方差分析采用 ANOVA 法,多重比较采用 LSD 法。采用 Weibull Function: $p = 1 - \exp[-((t+a)/b)^c]$ (t : 温度; a , b 和 c : 参数) 和 Probit Analysis: $\ln[p/(1-p)] = a - bt$ (t : 时间; a , b : 参数),拟合存活率与温度或时间的关系,以确定致死温度和致死时间 (Hao and Kang, 2004)。

2 结果与分析

2.1 沙葱萤叶甲不同发育阶段过冷却点的比较

为明确沙葱萤叶甲不同发育阶段的抗寒性,测定了各发育阶段的过冷却点。结果表明 (图 1),沙葱萤叶甲不同发育阶段的过冷却点存在极显著的差异 ($F_{5,426} = 195.81$, $P < 0.001$)。过冷却点从低到高依次为卵 ($-29.8 \pm 0.88^\circ\text{C}$)、1 龄幼虫 ($-14.6 \pm 0.16^\circ\text{C}$)、2 龄幼虫 ($-13.3 \pm 0.25^\circ\text{C}$)、蛹 ($-12.1 \pm 0.26^\circ\text{C}$)、3 龄幼虫 ($-10.2 \pm 0.23^\circ\text{C}$) 和成虫 ($-9.0 \pm 0.20^\circ\text{C}$)。个体最低值出现在越冬卵中,为 -36.7°C ; 最高值出现在 3 龄幼虫中,为 -5.0°C 。

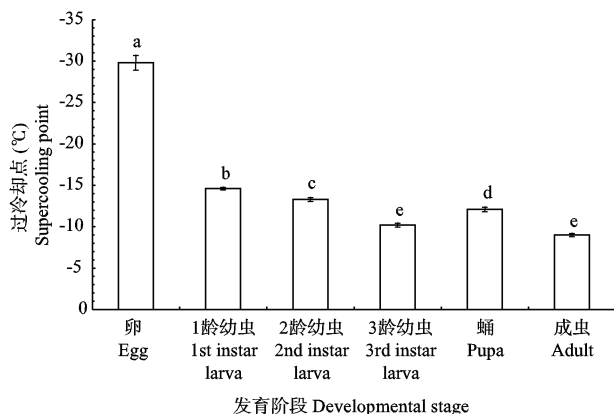


图 1 沙葱萤叶甲不同发育阶段过冷却点的比较

Fig. 1 Comparison of supercooling points of *Galeruca daurica* in different developmental stages

数据为平均值 $\pm$ 标准误; 柱上不同字母表示不同发育阶段或季节之间差异显著 (LSD 法, $P < 0.05$)。图 2 同。Data are means $\pm$ SE. Different letters above bars indicate significant differences among different developmental stages or seasons ($P < 0.05$) by LSD test. The same for Fig. 2.

2.2 沙葱萤叶甲卵过冷却点的动态变化

为明确不同季节越冬卵的抗寒性,在不同季节测定了卵的过冷却点。结果表明 (图 2),不同季节卵的过冷却点存在极显著差异 ($F_{5,239} = 30.159$, $P < 0.001$)。其中 12 月卵的过冷却点最低 ($-32.4 \pm 0.47^\circ\text{C}$),其次为 1 月 ($-30.8 \pm 0.45^\circ\text{C}$)、9 月 ($-30.3 \pm 0.49^\circ\text{C}$)、11 月 ($-30.2 \pm 0.40^\circ\text{C}$),再次为 10 月 ($-29.8 \pm 0.29^\circ\text{C}$),最高为 2 月 ($-25.9 \pm 0.31^\circ\text{C}$)。

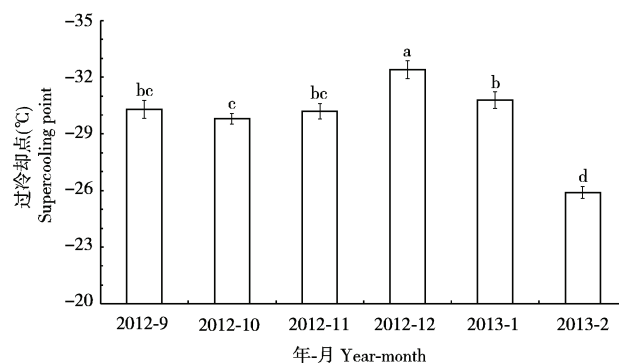


图 2 沙葱萤叶甲卵过冷却点的变化动态

Fig. 2 The dynamic changes of supercooling points of *Galeruca daurica* eggs

2.3 沙葱萤叶甲幼虫的致死温度

为比较不同龄期幼虫的抗寒能力,在室内测定了各龄幼虫在不同低温处理下的存活率。结果表明 (表 1),各龄幼虫低温存活率随处理温度的降低呈显著下降趋势 (1 龄幼虫: $F_{5,22} = 63.62$, $P < 0.001$; 2 龄幼虫: $F_{5,22} = 227.51$, $P < 0.001$; 3 龄幼虫: $F_{5,15} = 52.92$, $P < 0.001$),且温度低于 -10°C 以后,幼虫存活率均小于 50%。除 25°C 常温对照 ($P = 1.0000$) 和 -8°C ($P = 0.3964$) 处理外,在其他低温处理下各龄幼虫存活率存在显著差异 ($P < 0.05$),通常 1 龄 $>$ 2 龄 $>$ 3 龄。应用 Weibull 模型很好地描述了幼虫存活率与低温处理的关系,并计算出低温处理 2 h 后,致死 10%,50% 和 90% 的温度 (表 2)。从表 2 可知,50% 致死温度 ($Ltemp_{50}$) 从低到高依次为 1,2 和 3 龄幼虫,说明随着龄期的增加,幼虫的抗寒能力减弱。

2.4 沙葱萤叶甲幼虫的致死时间

为比较不同龄期幼虫的抗寒能力,在室内测定了各龄幼虫在 -5°C 低温下不同处理时间的存活率。结果表明 (表 3),各龄幼虫在 -5°C 低温下处理不同时间的存活率间存在极显著差异 (1 龄幼虫: $F_{6,28} = 49.39$, $P < 0.001$; 2 龄幼虫: $F_{6,30} = 20.23$, $P <$

0.001; 3 龄幼虫: $F_{3,31} = 71.33$, $P < 0.001$), 随着处理时间的延长, 存活率逐渐降低。与对照(0 d)相比, 1 龄和 2 龄幼虫处理 1 d 后存活率显著下降($P < 0.05$), 而 3 龄幼虫处理 0.5 d 后即显著下降($P < 0.01$)。1 龄和 2 龄幼虫在 -5°C 低温下处理 4 d 后, 死亡率开始超过 50%, 而 3 龄处理 2 d 后, 死亡率就超过 50%。除低温处理第 8 天($P = 0.7449$)外, 不同龄期幼虫存活率在其他处理时间

均存在显著差异($P < 0.05$), 在同一处理时间, 1 龄和 2 龄幼虫存活率大于 3 龄幼虫。应用 Probit 分析很好地描述了幼虫存活率与处理时间的关系, 并计算出在 -5°C 低温处理下, 致死 10%, 50% 和 90% 所需的时间(表 4)。从表 4 可知, 在 -5°C 低温下 50% 致死时间($L\text{time}_{50}$)从大到小依次为 1, 2 和 3 龄幼虫, 这也进一步说明随着幼虫龄期的增加, 幼虫的抗寒能力减弱。

表 1 沙葱萤叶甲幼虫在不同低温处理 2 h 后的存活率
Table 1 Survival rates of *Galeruca daurica* larvae exposed to different low temperatures for 2 h

幼虫龄期 Larval instar	存活率 Survival rate (%)					
	25℃	-6℃	-8℃	-10℃	-12℃	-14℃
1 龄 1st instar	100.00 ± 0.00 Aa	97.66 ± 1.36 Aa	70.25 ± 5.26 Ab	50.00 ± 40.8 Ac	32.59 ± 6.16 Ad	5.00 ± 2.04 Ae
2 龄 2nd instar	100.00 ± 0.00 Aa	95.75 ± 1.65 Aa	60.86 ± 5.22 Ab	41.91 ± 3.39 ABc	10.00 ± 2.23 Bd	0.00 ± 0.00 Be
3 龄 3rd instar	100.00 ± 0.00 Aa	85.00 ± 2.07 Ba	51.50 ± 17.13 Ab	33.33 ± 3.33 Bb	0.00 ± 0.00 Cc	0.00 ± 0.00 Bc

数据为平均数 ± 标准误; 同行数据后不同小写字母表示同一龄期不同处理间差异显著($P < 0.05$); 同列数据后不同大写字母表示同一处理不同龄期间差异显著($P < 0.05$)(LSD 法); 表 3 同。Data are means ± SE; different small letters in the same row indicate significant difference among different treatments for the same instar ($P < 0.05$) and different capital letters in the same column indicate significant difference among different instars for the same treatment ($P < 0.05$) (LSD test). The same for the Table 3.

表 2 沙葱萤叶甲幼虫的致死温度
Table 2 Lethal temperature of *Galeruca daurica* larvae

幼虫龄期 Larval instar	a	b	c	R^2	致死温度 Lethal temperature (°C)		
					Ltemp ₁₀	Ltemp ₅₀	Ltemp ₉₀
1 龄 1st instar	19.44 ± 9.57	10.38 ± 9.75	3.53 ± 3.74	0.9823 **	-6.29	-10.08	-13.95
2 龄 2nd instar	16.43 ± 6.12	8.12 ± 6.24	3.40 ± 3.03	0.9870 **	-6.05	-9.14	-12.24
3 龄 3rd instar	13.37 ± 1.21	5.76 ± 1.29	2.13 ± 0.67	0.9877 **	-4.84	-8.52	-11.37

a, b 和 c 为模型参数; 单星号和双星号分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 的统计显著性; 表 4 同。a, b and c are parameters of the model. Single asterisk and double asterisks indicate statistical significance of $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively. The same for Table 4.

表 3 沙葱萤叶甲幼虫 -5°C 低温处理不同时间的存活率
Table 3 Survival rates of *Galeruca daurica* larvae exposed to -5°C for different treatment duration

幼虫龄期 Larval instar	存活率 Survival rate (%)						
	0 d	0.5 d	1 d	2 d	4 d	6 d	8 d
1 龄 1st instar	100.00 ± 0.00 Aa	96.87 ± 1.35 Aa	80.56 ± 2.86 Ab	69.76 ± 6.61 Ab	51.00 ± 5.57 Ac	32.57 ± 8.09 Ad	7.61 ± 3.91 Ae
2 龄 2nd instar	96.76 ± 2.03 ABa	94.70 ± 2.02 Aa	72.17 ± 8.66 Ab	67.42 ± 7.57 Ab	46.32 ± 8.92 Ac	24.00 ± 11.66 Ad	5.11 ± 2.51 Ad
3 龄 3rd instar	95.75 ± 1.65 Ba	77.53 ± 2.07 Bb	52.14 ± 2.64 Bc	28.25 ± 6.06 Bd	20.00 ± 6.52 Bde	9.18 ± 2.68 Bef	2.70 ± 1.11 Af

3 讨论

昆虫的过冷却能力不仅取决于其不同的发育阶段, 还随季节变化而变化(Košťál *et al.*, 2001)。通

常越冬虫态抗寒能力最强, 休眠或滞育虫态对低温的耐受能力较强, 而处在发育时期的昆虫各虫态耐寒能力均相对较差(景晓红和康乐, 2002)。本研究表明沙葱萤叶甲不同发育阶段的过冷却点均存在显著差异, 过冷却点由低到高依次是卵、1 龄幼虫、2

表 4 沙葱萤叶甲幼虫的致死时间
Table 4 Lethal time of *Galeruca daurica* larvae

幼虫龄期 Larval instar	a	b	R^2	致死时间 Lethal time (d)		
				Ltime ₁₀	Ltime ₅₀	Ltime ₉₀
1 龄 1st instar	1.86 ± 0.67	0.49 ± 0.16	0.6514 *	0.68	3.84	8.28
2 龄 2nd instar	2.68 ± 0.38	0.70 ± 0.09	0.9206 **	0.69	3.80	6.99
3 龄 3rd instar	1.55 ± 0.53	0.68 ± 0.13	0.8499 **	0.94	2.28	5.51

龄幼虫、蛹、3 龄幼虫及成虫；不同时期越冬卵的过冷却点也存在显著差异，其中 12 月和次年 1 月最低，为全年最冷的 2 个月，而即将孵化时(2 月)最高。其他研究者也获得了类似的结果。例如：光滑萤甲 *Anatolica polita borealis* 成虫的耐寒性和 SCP 具有明显的季节性变化，3 月初 SCP 为 -12.5℃，7 月为 -6℃，9 月底为 -13.6℃ (马延龙等, 2009)；广聚萤叶甲 *Ophraella communa* 成虫的过冷却点随季节(7-10 月)而变化，夏季最高，秋季最低(Zhu *et al.*, 2011)；油菜露尾甲 *Meligethes aeneus* 成虫夏季种群的过冷却点远高于冬季种群(Hiisaar *et al.*, 2011)。马铃薯甲虫各虫态过冷却点从低到高依次为卵、成虫、1 龄幼虫、蛹、4 龄幼虫、2 龄幼虫和 3 龄幼虫，其最低的卵也仅为 -13.73℃ (张云慧等, 2012)，远高于沙葱萤叶甲卵(-27.5 ~ -31.7℃) (本研究结果)及油菜露尾甲卵(-24.4 ~ -28.0℃) (Hiisaar *et al.*, 2011)的过冷却点。沙葱萤叶甲成虫的过冷却点只有 -9.0℃，远高于油菜露尾甲越冬成虫的 -20℃，也高于其夏季成虫的 -12℃。这很可能是因为沙葱萤叶甲以卵越冬，而油菜露尾甲以成虫越冬，前者成虫未经过长期的低温驯化，因而其成虫过冷却能力远低于油菜露尾甲越冬成虫。

关于过冷却点(SCP)是否可以作为昆虫抗寒性的可靠指标一直存在较大的争议。一些研究者认为某些昆虫在 SCP 以上的低温就大量死亡，SCP 不能作为其抗寒性的合适指标(Bennett and Lee, 1989; Nedvĕd, 2000; Košťál *et al.*, 2001; Bale, 2002; Carrillo *et al.*, 2005; Hiisaar *et al.*, 2011)。但也有许多昆虫的 SCP 与低温存活率存在显著的相关关系，可以作为其抗寒性的可靠指标(Lee and Denlinger, 1985; Nedvĕd *et al.*, 1995; Hodková and Hodek, 1997; Hao and Kang, 2004)。本研究结果表明，沙葱萤叶甲幼虫的致死低温(Ltemp₅₀)高于其相应的 SCP，而且易受低温的影响，幼虫在 -5℃ 下 6~8 d 死亡率可达 90% 以上。按照 Lee (2010)

划分标准，沙葱萤叶甲幼虫属于不耐寒冷型(chill-intolerant)，并且 SCP 不适合作为衡量沙葱萤叶甲幼虫抗寒性的绝对指标。但是，SCP 仍然可以作为比较其不同龄期幼虫抗寒性的相对指标，因为 1-3 龄幼虫 SCP 大小的排列顺序与表明其抗寒能力指标(Ltemp₅₀和 Ltime₅₀)的排列顺序是一致的。然而，该虫以卵越冬，冬季和早春的低溫是否会影响其存活率还有待于进一步研究。另外，不同地区沙葱萤叶甲种群的抗寒性是否存在差异也需进一步研究。

参考文献 (References)

- Bale JS, 1989. Cold hardiness and overwintering of insects. *Agric. Zool. Rev.*, 3: 157-192.
- Bale JS, 2002. Insects and low temperatures: from molecular biology to distribution and abundance. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B*, 357: 849-862.
- Bennett LE, Lee RE, 1989. Stimulated winter to summer transition in diapause adults of the lady beetle (*Hippodamia convergens*): supercooling point is not indicative of cold hardiness. *Physiol. Entomol.*, 14: 361-367.
- Boiteau G, Coleman W, 1996. Cold tolerance in the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* (Say) (Coleoptera: Chrysomelidae). *Can. Entomol.*, 128(6): 1087-1099.
- Carrillo MA, Heimpel GE, Moon RD, Cannon CA, Hutchison WD, 2005. Cold hardiness of *Habrobracon hebetor* (Say) (Hymenoptera: Braconidae), a parasitoid of pyralid moths. *J. Insect Physiol.*, 51: 759-768.
- Chai LZ, Huan GN, Shi KY, Tang XF, Wang XL, He ZY, 1990. A preliminary report of observation on a broad-necked *Pallasiola* beetle species (*Pallasiola absinthii* Pallas) occurred on desert rangeland. *Pratacultural Science*, 7(4): 49-50. [柴来智, 郇庚年, 史奎英, 汤学峰, 王兴隆, 贺占英, 1990. 荒漠草地阔颈萤叶甲观察初报. 草业科学, 7(4): 49-50]
- Chen B, Kang L, 2005. Implication of pupal cold tolerance for the northern over-wintering range limit of the leafminer *Liriomyza sativae* (Diptera: Agromyzidae) in China. *Appl. Entomol. Zool.*, 40: 437-446.
- Chen H, Siegfried BD, Chen NZ, Wang Y, 2009. Advances in stress resistance and control of the western corn rootworm, *Diabrotica virgifera virgifera*. *Plant Protection*, 35(6): 6-11. [陈宏,

- Siegfried BD, 陈乃中, 王音, 2009. 玉米根萤叶甲的抗逆性与防治研究进展. 植物保护, 35(6): 6-11]
- Hao SG, Kang L, 2004. Supercooling capacity and cold hardiness of the eggs of the grasshopper *Chorthippus fallax* (Orthoptera: Acrididae). *Eur. J. Entomol.*, 101: 231-236.
- Hiisaar K, Williams IH, Mänka M, Luik A, Jõgar K, Metspalu L, Švilponis E, Ploomi A, Kivimägi I, 2011. Supercooling ability and cold hardiness of the pollen beetle *Meligethes aeneus*. *Entomol. Exp. Appl.*, 138(2): 117-127.
- Hodková M, Hodek I, 1997. Temperature regulations of supercooling and gut nucleation in relation to diapause of *Pyrhocris apterus* (L.) (Heteroptera). *Cryobiology*, 34: 70-79.
- Jing XH, Kang L, 2002. Research progress in insect cold hardiness. *Acta Ecol. Sin.*, 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, 2004. Overview and evaluation of research methodology for insect cold hardiness. *Entomol. Knowl.*, 40(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, 40(1): 7-10]
- Košťál V, Šlachta M, Šimek P, 2001. Cryoprotective role of polyols independent of the increase in supercooling capacity in diapausing adults of *Pyrhocris apterus* (Heteroptera: Insecta). *Comp. Biochem. Physiol. B*, 130: 365-374.
- Lapointe SL, Borchert DM, Hall DG, 2007. Effect of low temperatures on mortality and oviposition in conjunction with climate mapping to predict spread of the root weevil *Diaprepes abbreviatus* and introduced natural enemies. *Environ. Entomol.*, 36: 73-82.
- Lee RE, 1989. Insect cold hardiness: to freeze or not to freeze. *Bioscience*, 39: 308-313.
- Lee RE, 2010. A primer on insect cold-tolerance. In: Denlinger DL, Lee RE eds. *Low Temperature Biology of Insects*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 3-34.
- Lee RE, Denlinger DL, 1985. Cold tolerance in diapausing and non-diapausing stage of the flesh fly, *Sarcophaga crassipalpis*. *Physiol. Entomol.*, 10: 309-315.
- Ma YL, Hou F, Ma J, 2009. Seasonal changes in cold tolerance of desert beetle *Anatolica polita borealis* (Coleoptera: Tenebrionidae) and their physiological mechanisms. *Acta Entomol. Sin.*, 52(4): 372-379. [马延龙, 侯凤, 马纪, 2009. 荒漠昆虫光滑鳖甲的耐寒性季节变化及其生理机制. 昆虫学报, 52(4): 372-379]
- McDonald JR, Bale JS, Walters KFA, 1999. Temperature, development and establishment potential of *Thrips palmi* (Thysanoptera: Thripidae) in the United Kingdom. *Eur. J. Entomol.*, 96: 169-173.
- Nedvěd O, 2000. Chill tolerance in the tropical beetle *Stenotarsus rotundus*. *CryoLetters*, 21: 25-30.
- Nedvěd O, Hodková M, Brunnhofer V, Hodek I, 1995. Simultaneous measurement of low temperature survival and supercooling in sample of insects. *CryoLetters*, 16: 108-133.
- Shintani Y, Ishikawa Y, 1999. Geographic variation in cold hardiness of eggs and neonate larvae of the yellow-spotted longicorn beetle *Psacotha hilaris*. *Physiol. Entomol.*, 24: 158-164.
- Yang CQ, Ding WL, 1999. Harmfulness of *Galeruca reichardti* Jacobson to traditional Chinese medicine *Allium macrostemon*. *Entomol. Knowl.*, 36(5): 275-277. [杨春清, 丁万隆, 1999. 韭萤叶甲为害中药薤白的观察. 昆虫知识, 36(5): 275-277]
- Yang HL, Xue T, Li DH, Fu J, Fu JF, 2008. Occurrence and control of corn pest *Monolepta hieroglyphica* in Liaoning. *Henan Agricultural Science*, (11): 96-98. [杨海龙, 薛腾, 李德会, 付俊, 傅俊范, 2008. 辽宁玉米害虫双斑长跗萤叶甲的发生危害与防治. 河南农业科学, (11): 96-98]
- Yang XK, Huang DC, Ge SQ, Bai M, Zhang RZ, 2010. One million mu of meadow in inner Mongolia suffer from the harm of breaking out of *Galeruca daurica* (Joannis). *Chin. Bull. Entomol.*, 47(4): 812. [杨星科, 黄顶成, 葛斯琴, 白明, 张润志, 2010. 内蒙古百万亩草场遭受沙葱萤叶甲暴发危害. 昆虫知识, 47(4): 812]
- Zhang YH, Zhang Z, He J, Tuexun, Cheng DF, 2012. Cold hardiness of natural populations of the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*. *Plant Protection*, 38(5): 64-67. [张云慧, 张智, 何江, 吐尔逊, 程登发, 2012. 马铃薯甲虫自然种群抗寒能力测定. 植物保护, 38(5): 64-67]
- Zhu ZS, Guo JY, Li M, Ai HM, Wan FH, 2011. Seasonal changes in cold hardiness of *Ophraella communa*. *Entomol. Exp. Appl.*, 140: 85-90.

(责任编辑: 袁德成)