草地贪夜蛾室内种群抗寒能力测定

张 智[1,2]， 郑 乔[1,3]， 张云慧[1*]， 刘 杰[4]， 殷新田[1]， 汤清波[5]，
李 静[3]， 袁 源[1,5]， 李祥瑞[1]， 朱 勋[1]

(1. 中国农业科学院植物保护研究所，植物病虫害生物学国家重点实验室，北京 100193；2. 北京市植物保护站，北京 100029；
3. 河北农业大学，保定 071001；4. 全国农业技术推广服务中心，北京 100125；5. 河南农业大学，郑州 450002)

摘要 为明确草地贪夜蛾的过冷却点和结冰点，为判断草地贪夜蛾抗寒能力提供依据，本研究利用过冷却点测定仪对草地贪夜蛾不同虫态的过冷却点和结冰点进行了测定，并对其频次分布进行了分析。结果表明：草地贪夜蛾的过冷却点($df=834$，$F=430.26$，$P<0.01$)和结冰点($df=834$，$F=891.71$，$P<0.01$)在各虫态之间存在极显著差异，其中卵的过冷却点和结冰点最低，分别为(－25.45±0.25)℃和(－24.70±0.25)℃，显著低于其他虫态。6龄幼虫的过冷却点和结冰点最高，分别为(－7.35±0.14)℃和(－2.07±0.11)℃；过冷却点由低到高顺序为：卵＜1龄幼虫＜3日龄蛹＜2龄幼虫＜1日龄成虫＜3龄幼虫＜4龄幼虫＜5龄幼虫＜预蛹＜6龄幼虫。结冰点的变化趋势和过冷却点相似，由低到高的顺序为：卵＜1龄幼虫＜2龄幼虫＜3日龄蛹＜3龄幼虫＜1日龄成虫＜4龄幼虫＜预蛹＜5龄幼虫＜6龄幼虫；幼虫期，过冷却点和结冰点随龄期增加而逐渐升高。同一虫态个体间的过冷却点和结冰点频次分布存在不同程度的变异。雌雄成虫过冷却点之间没有显著差异，雌成虫结冰点显著低于雄成虫。本研究结果初步表明草地贪夜蛾具有较强的抗寒能力，该结论为草地贪夜蛾越冬区划分和监测预警提供了科学依据。

关键词 草地贪夜蛾； 抗寒性； 过冷却点； 结冰点

中图分类号： S 433.4 **文献标识码：** A **DOI：** 10.16688/j.zwbh.2019430

Cold hardiness of laboratory populations of *Spodoptera frugiperda*

ZHANG Zhi[1,2]， ZHENG Qiao[1,3]， ZHANG Yunhui[1]， LIU Jie[4]， YIN Xintian[1]，
TANG Qingbo[5]， LI Jing[3]， YUAN Yuan[1,5]， LI Xiangrui[1]， ZHU Xun[1]

(1. *Institute of Plant Protection*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Beijing* 100193, *China*; 2. *Beijing Plant Protection Station*, *Beijing* 100029, *China*; 3. *Hebei Agricultural University*, *Baoding* 071001, *China*; 4. *National Agro-Tech Extension and Service Centre*, *Beijing* 100125, *China*; 5. *Henan Agricultural University*, *Zhengzhou* 450002, *China*)

Abstract In order to clarify the cold resistance, and provide technical support for monitoring and early warning of fall armyworm (FAW)(*Spodoptera frugiperda*), the supercooling points and freezing points of all stages of FAW were measured using a thermocouple. It showed that the supercooling points and freezing points were significantly different among adult, egg, larva and pupa and the egg was of the lowest value, (－25.45±0.25)℃ and (－24.70±0.25)℃ respectively for supercooling point and freezing point. The 6th instar larvae showed the highest value, (－7.35±0.14)℃ for supercooling point and (－2.07±0.11)℃ for freezing point. The supercooling points from lowest to highest was egg＜1st instar larva＜3 days-old pupa＜2nd instar larva＜1 day-old adult＜3rd instar larva＜4th instar larva＜5th instar larva ＜pre-pupa＜6th instar larva. Pattern of freezing points was similar to that of supercooling points, from lowest to highest was egg＜1st instar larva＜2nd instar larva ＜3 days-old pupa ＜3rd instar larva ＜1 day-old adult＜4th instar larva ＜pre-pupa＜5th instar larva＜6th instar larva. The supercooling points of FAM varied among individuals, and most followed normal distribution. Supercooling points was not significantly different between male and female adults, but The freezing point of female adult was significantly lower than that of male. The results preliminarily clarified that FAW is of great cold resistance which provided a

收稿日期： 2019－08－26 **修订日期：** 2019－08－27
基金项目： 国家自然科学基金(31972260)；国家重点研发计划(2017YFD0201700，2018YFD0200501)；国家现代农业产业技术体系(CARS-03)；中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2019YJ06)；2019年世园会“百蔬园”建设项目(20190326053231)
* 通信作者 E-mail：yhzhang@ippcaas.cn

scientific basis for overwintering, monitoring and early warning of FAW.

Key words *Spodoptera frugiperda*; cold hardiness; supercooling points; freezing points

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*(J. E. Smith)(也称秋黏虫 fall armyworm)隶属于鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae,是联合国粮农组织全球预警的重大迁飞性农业害虫。草地贪夜蛾起源于美洲大陆,现已扩散至全球 100 多个国家,具有适生性强、迁飞距离远、繁殖快、食性杂、为害隐蔽、防控难度大等诸多特点[1-2]。2019 年 1 月,草地贪夜蛾首次入侵我国云南省普洱市江城县,之后快速向我国粮食主产区扩散,其发展速度之快、波及范围之广非常罕见。截至 8 月 17 日,草地贪夜蛾在我国 24 个省份的1 366个县(市、区)发生,全国发生面积达 95.4 万 hm^2,并呈现继续北扩态势,新增发生区域呈条带状分布[3]。

昆虫是一种变温动物,环境温度变化会引发新陈代谢等一系列生理生化反应。昆虫对温度变化的响应分为抗寒能力和高温耐受能力,它们决定着昆虫的分布与生活策略,是种群存在与发展的重要前提[4-5]。过冷却点(supercooling point,SCP)是评价昆虫抗寒能力高低的一种重要指标[6-7]。对褐飞虱、小地老虎、棉铃虫等害虫的抗寒能力研究表明,明确其耐寒性对确定其分布范围、越冬界限和发生趋势等都起着至关重要的作用[8-10]。研究资料表明,在美国,草地贪夜蛾只在德克萨斯州和佛罗里达州的南部地区越冬,并且各虫态在 0℃以下均无法长时间存活[11-12]。目前,草地贪夜蛾作为新入侵我国的重大迁飞性害虫,其在国内的抗寒能力、越冬界限等仍是空白。本研究通过测定草地贪夜蛾各虫态的过冷却点和结冰点,初步明确其抗寒能力,以期为今后研究草地贪夜蛾在我国的潜在分布和相关预测预报提供基础生物学依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

草地贪夜蛾虫源为采自云南省普洱市江城县(109°39′3″E, 22°40′53″N)冬玉米田的高龄幼虫,化蛹、羽化后用 5%的蜂蜜水饲养,收集卵块在室内用新鲜玉米叶饲养繁殖 1 代。本次试验供试虫源为 F3 代种群,虫态包括卵、各龄期幼虫、预蛹、蛹(3 日龄)和雌雄成虫(1 日龄)等。饲养条件为温度(24±1)℃,湿度 70%±5%、光周期 L//D=14 h//10 h、光照强度 18 000 lx。

1.2 试验仪器

高低温交变试验箱 GDW-150B(−40～150℃)由北京切克试验设备有限公司生产,降温速度 1℃/min,本试验最低温度设置为−30℃。SUN-Ⅴ型智能过冷却点测定仪及配套软件由鹏程电子有限公司研发,40 通路,数据精度为 0.1℃,5 s 记录 1 次虫体温度变化,该仪器自动采集并以 txt 格式存储数据,可用配套软件实时绘制虫体温度变化曲线。

1.3 测定方法

测定前,从各虫态草地贪夜蛾中随机选取发育一致个体放入 4℃冰箱 10 h,取出后室温恢复 2 h 以待测定。每虫态测定 60 头以上。测定准备工作分两类,卵和 1～2 龄幼虫为第一类,3 龄以上幼虫、预蛹、蛹和成虫为第二类。卵和 1～2 龄幼虫,单粒或单头放置在宽 4.5 cm、长 6 cm 的保鲜膜上,将过冷却点测定仪的热敏电阻感温探头与虫体充分接触后用保鲜膜把虫体与探头包好,并检查两者是否充分接触;3 龄以上幼虫、蛹和成虫置于 1 mL 离心管中,将热敏电阻感温探头插入离心管使探头与虫体充分接触。准备工作完成后将其置于高低温试验箱进行测试,当温度降到一定值时,昆虫体液开始结冰,此时的温度即为过冷却点,虫体结冰后释放出热量,在温度变化曲线上显示为跳跃峰值,峰值即为结冰点[5]。

1.4 数据分析

数据分析软件为 IBM SPSS Statistics 19.0 for Windows。描述性统计分析主要计算了过冷却点和结冰点的平均值和标准误差,利用单样本 Kolmogorov-Smirnov 法检验不同虫态过冷却点和结冰点的频次分布特征。利用单因素方差分析(ANOVA)检验了不同虫态对过冷却点和结冰点的影响,并采用 Duncan 氏新复极差法进行了多重比较。分析性别对过冷却点和结冰点的影响或比较两种虫态之间冷却点或结冰点的差异时采用 t 检验。

2 结果与分析

2.1 不同虫态的过冷却点

草地贪夜蛾的过冷却点在不同虫态之间存在极显著差异($df=834$, $F=430.26$, $P<0.01$)(表 1)。

过冷却点由低到高的顺序依次为:卵<1 龄幼虫<3 日龄蛹<2 龄幼虫<1 日龄成虫<3 龄幼虫<4 龄幼虫<5 龄幼虫<预蛹<6 龄幼虫。卵的过冷却点最低,为(-25.45±0.25)℃,其次为 1 龄幼虫,为(-19.02±0.41)℃。3 日龄蛹和 2 龄幼虫的过冷却点也较低,分别为(-17.23±0.27)℃和(-16.70±0.41)℃,但之间差异不显著(df=139,t=-1.11,P=0.27)。4 龄幼虫、5 龄幼虫和预蛹的过冷却点比较接近,6 龄幼虫过冷却点最高,达(-7.35±0.14)℃(表 1)。在幼虫阶段,随着龄期的增加过冷却点也逐渐升高(表 1)。达到预蛹阶段,过冷却点开始降低。进入蛹期,过冷却点进一步降低。成虫羽化后,过冷却点开始略微升高。预蛹、3 日龄蛹和 1 日龄成虫的过冷却点之间存在极显著差异(df=297,F=170.65,P<0.01)。

2.2　不同虫态的结冰点

草地贪夜蛾的结冰点在各虫态之间存在极显著差异(df=834,F=891.71,P<0.01)(表 1)。各虫态结冰点由低到高的顺序依次为:卵<1 龄幼虫<2 龄幼虫<3 日龄蛹<3 龄幼虫<1 日龄成虫<4 龄幼虫<预蛹<5 龄幼虫<6 龄幼虫。卵的结冰点最低,为(-24.70±0.25)℃,6 龄幼虫的结冰点最高,为(-2.07±0.11)℃,个体的极差值可达 27.26℃。幼虫阶段,结冰点随着龄期的增加逐渐升高,最高可达-0.37℃。进入化蛹阶段后,结冰点的变化趋势与过冷却点类似,也为先降低再升高。预蛹、3 日龄蛹和 1 日龄成虫的结冰点之间存在极显著差异(df=297,F=169.56,P<0.01)。

表 1　草地贪夜蛾不同虫态的过冷却点和结冰点[1)]

Table 1　Supercooling points and freezing points of *Spodoptera frugiperda*

发育期 Stages	测试数量 The number of samples	过冷却点/℃ Supercooling point			结冰点/℃ Freezing point		
		平均值±SE Average value	最低值 Minimum value	最高值 Maximum value	平均值±SE Average value	最低值 Minimum value	最高值 Maximum value
卵 Egg	110 粒	(-25.45±0.25)G	-28.44	-18.02	(-24.70±0.25)I	-27.63	-17.28
1 龄 1st instar larva	68 头	(-19.02±0.41)F	-24.70	-10.03	(-17.69±0.40)H	-24.04	-8.81
2 龄 2nd instar larva	65 头	(-16.70±0.41)E	-23.22	-8.90	(-12.72±0.41)G	-19.42	-4.87
3 龄 3rd instar larva	63 头	(-10.92±0.27)C	-14.75	-6.61	(-7.60±0.30)E	-14.04	-2.74
4 龄 4th instar larva	66 头	(-9.39±0.20)B	-12.73	-6.45	(-4.81±0.33)C	-11.68	-1.02
5 龄 5th instar larva	91 头	(-9.03±0.16)B	-11.92	-4.19	(-2.62±0.17)AB	-10.36	-1.15
6 龄 6th instar larva	74 头	(-7.35±0.14)A	-10.14	-3.25	(-2.07±0.11)A	-6.66	-0.92
预蛹 Pre-pupae	94 头	(-9.02±0.29) B	-17.54	-5.22	(-3.49±0.23)B	-8.97	-0.37
3 日龄蛹 3 days-old pupa	76 头	(-17.23±0.27) E	-21.20	-12.12	(-9.67±0.31)F	-20.37	-3.85
1 日龄成虫 1 day-old adult	128 头	(-15.03±0.32)D	-22.43	-8.35	(-5.86±0.16)D	-12.32	-1.92

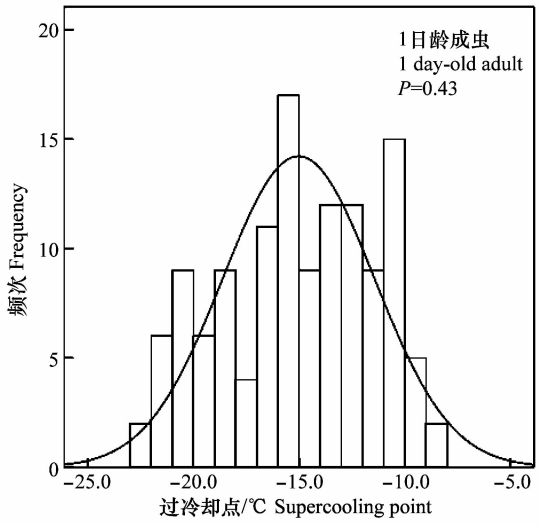
1) 表中所列的数据为平均值±标准误,同列数据后的不同字母表示 Duncan 氏新复极差法多重比较的结果(a=0.01)。
Data in the table are mean±SE. Different capital letters in the same column indicate significant different at 0.01 level based on Duncan's multiple comparisons (a=0.01).

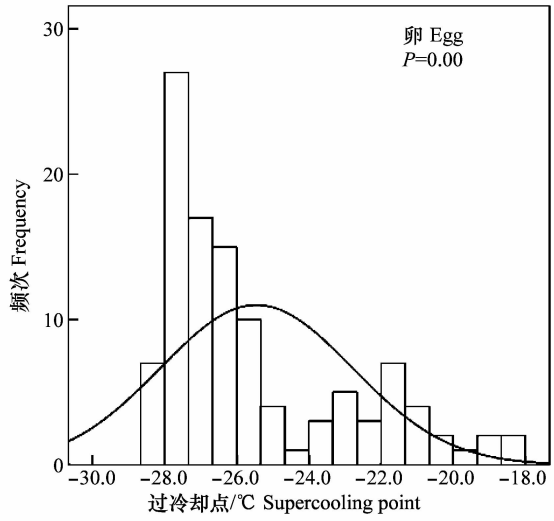
2.3　不同虫态过冷却点和结冰点的频次分布

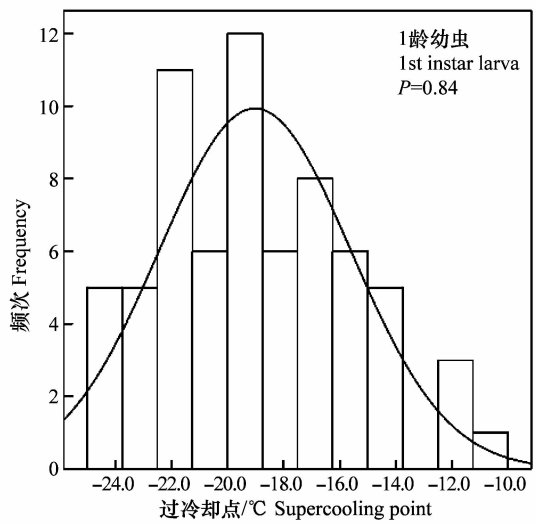
草地贪夜蛾各虫态个体的过冷却点存在不同程度变异(图 1),其分布范围具有一定宽度。过冷却点最低值为卵期-28.44℃,最高值出现在 6 龄幼虫,为-3.25℃。1 龄幼虫的过冷却点分布范围最宽为-10.03～-24.7℃,4 龄幼虫的过冷却点分布范围最小为-6.45～-12.73℃。过冷却点分布宽度范围由大到小依次为:1 龄幼虫(14.67℃)>2 龄幼虫(14.32℃)>1 日龄成虫(14.08℃)>预蛹(12.32℃)>卵(10.42℃)>3 日龄蛹(9.08℃)>3 龄幼虫(8.14℃)>5 龄幼虫(7.73℃)>6 龄幼虫(6.89℃)>4 龄幼虫(6.28℃)。除卵的过冷却点频次不符合正态分布以外(P<0.01),其余各虫态过冷却点频次均服从正态分布(P>0.05)。

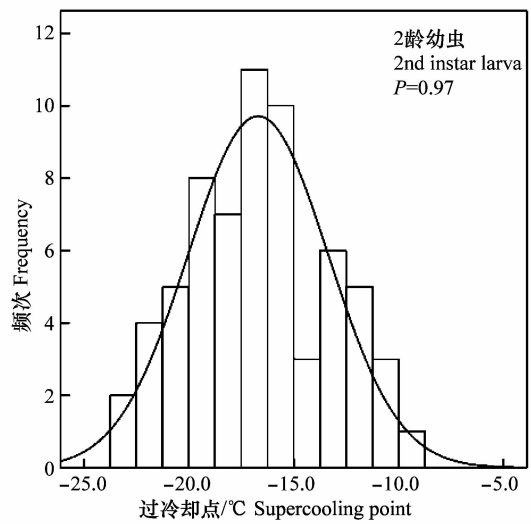
草地贪夜蛾各虫态个体的结冰点和过冷却点相似,也存在不同程度变异(图 2),冰点最低值为卵期-27.63℃,最高值为预蛹期-0.37℃。3 日龄蛹的结冰点分布范围最宽为-3.85～-20.37℃,6 龄幼虫结冰点分布范围最小为-0.92～-6.66℃。具体宽度范围由大到小为:3 日龄蛹(16.52℃)>1 龄幼虫(15.23℃)>2 龄幼虫(14.55℃)>3 龄幼虫(11.3℃)>4 龄幼虫(10.66℃)>1 日龄成虫(10.40℃)>卵

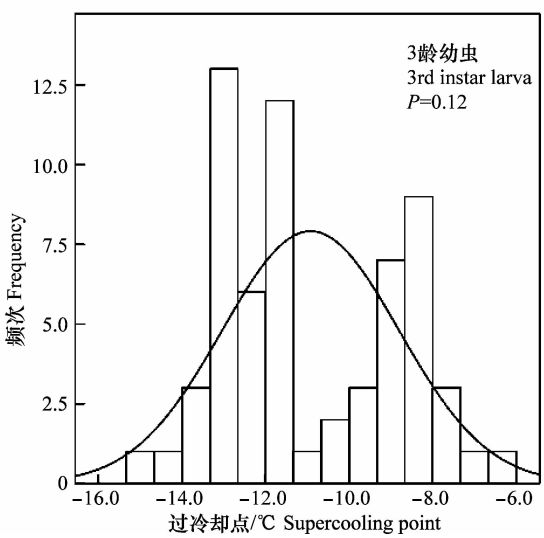
(10.35℃)>5 龄幼虫(9.21℃)>预蛹(8.60℃)>6 龄幼虫(5.74℃)。卵、5 龄幼虫、6 龄幼虫、预蛹的结冰点频次不符合正态分布($P<0.05$),其余虫态结冰点频次均服从正态分布($P>0.05$)。

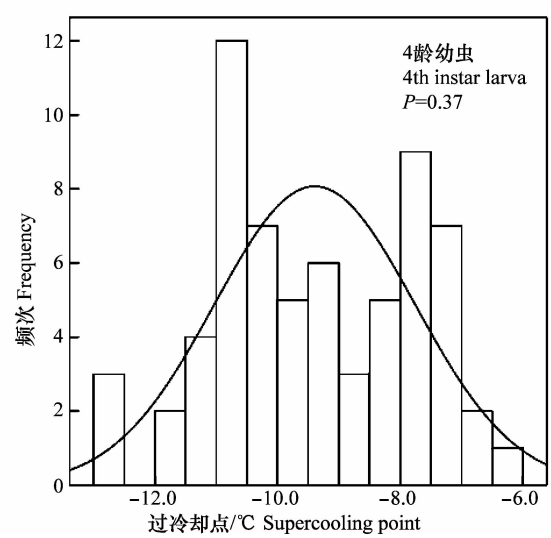












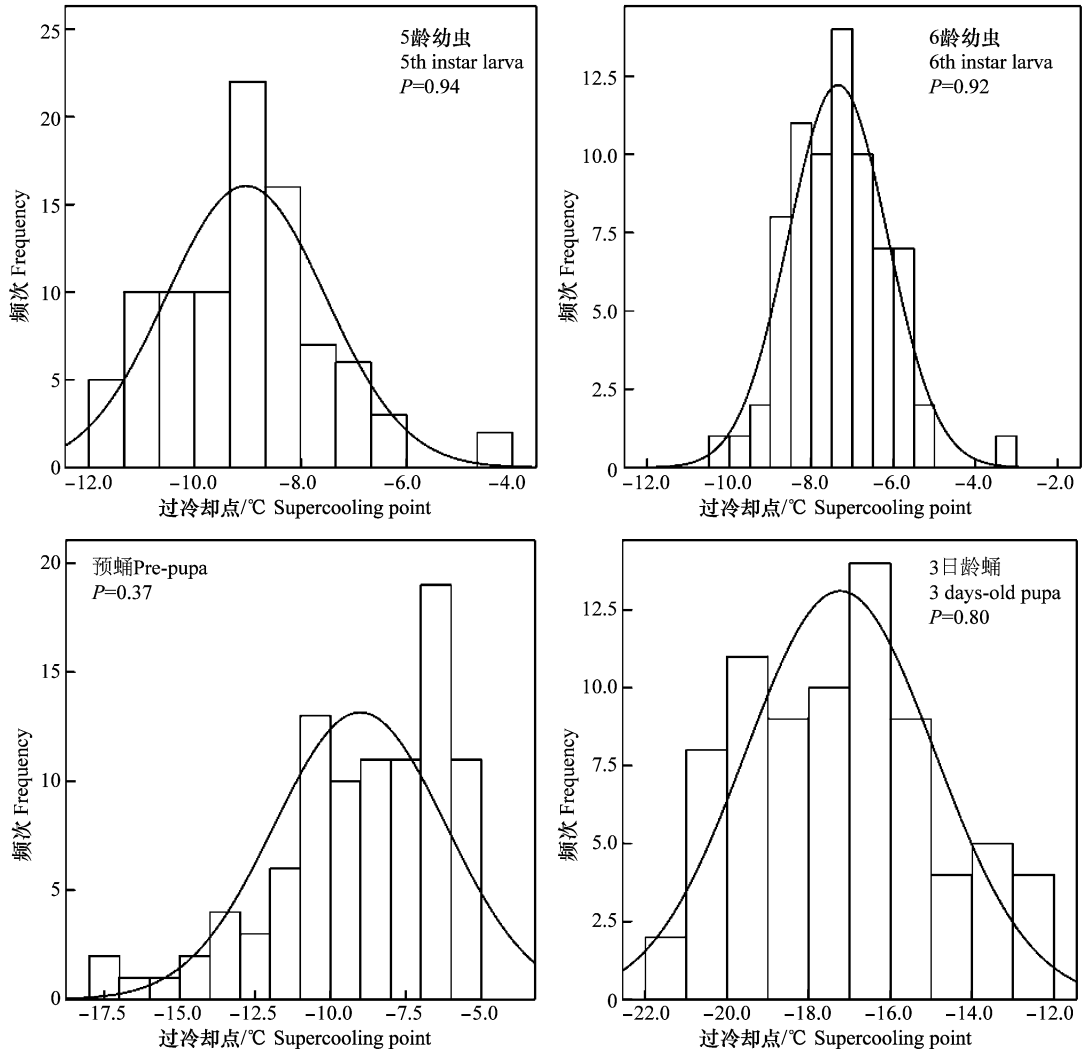
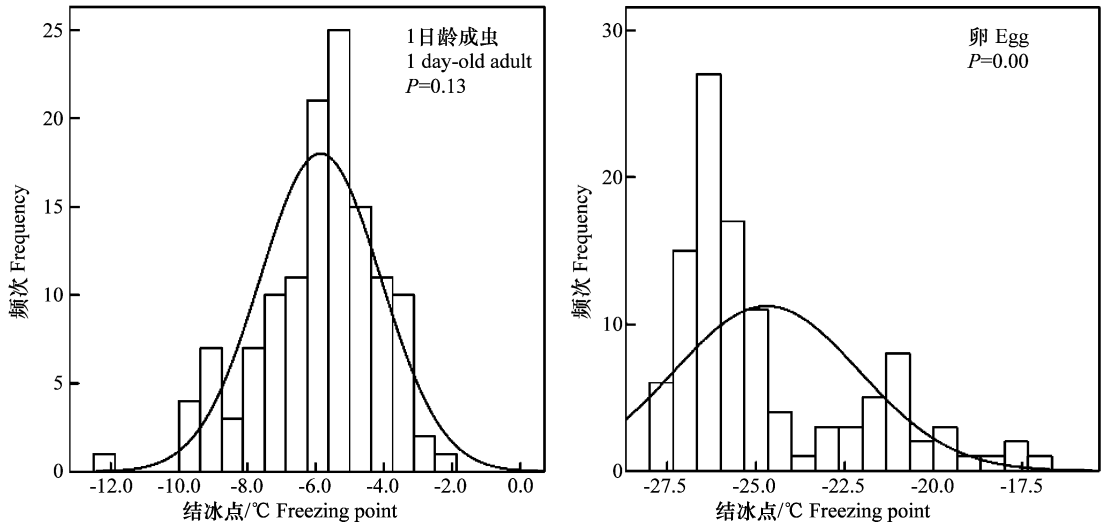
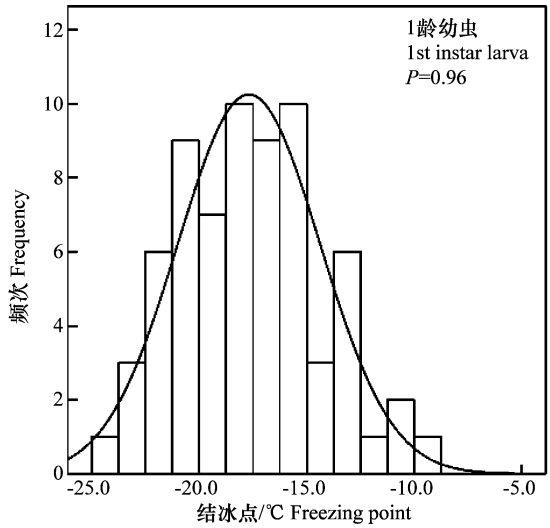
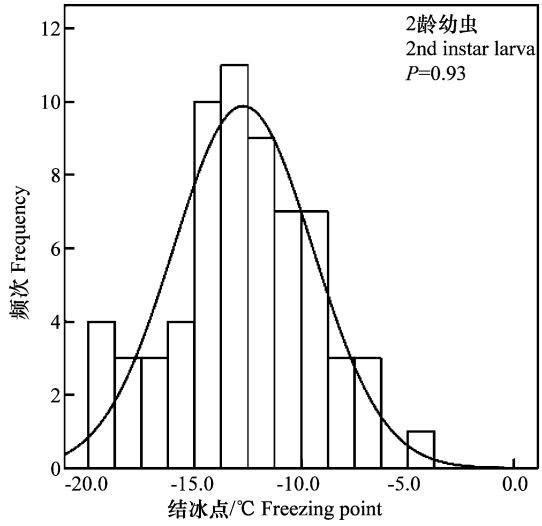


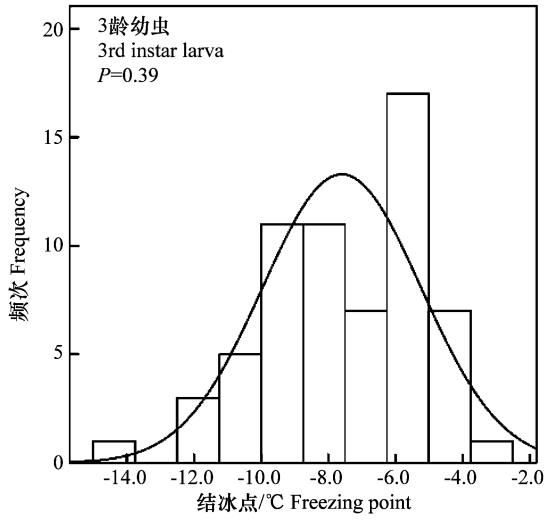
图 1　草地贪夜蛾各虫态个体的过冷却点频次分布

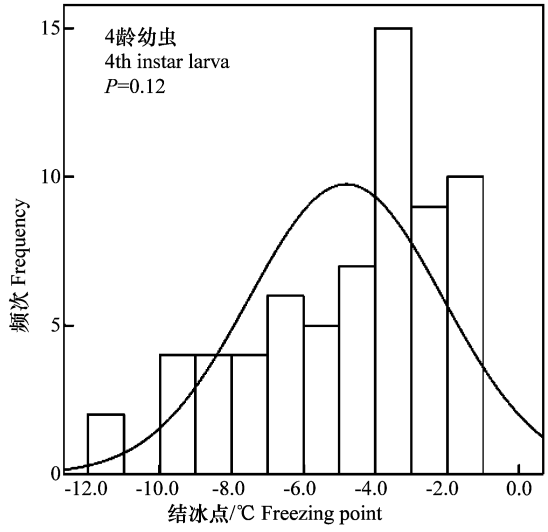
Fig. 1　Distribution pattern of supercooling points of *Spodoptera frugiperda* during different stages

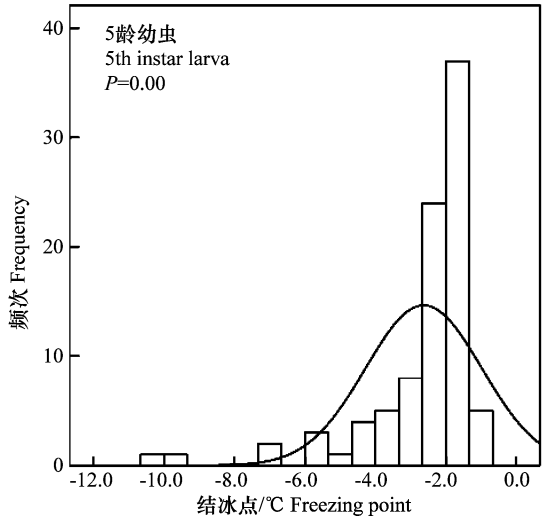


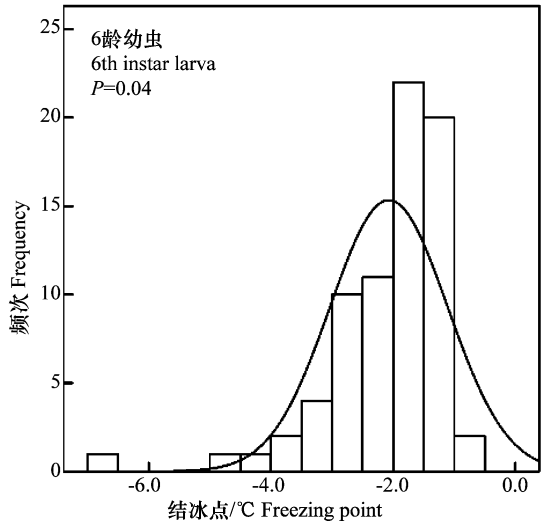

1龄幼虫
1st instar larva
P=0.96
频次 Frequency
结冰点/℃ Freezing point


2龄幼虫
2nd instar larva
P=0.93
频次 Frequency
结冰点/℃ Freezing point


3龄幼虫
3rd instar larva
P=0.39
频次 Frequency
结冰点/℃ Freezing point


4龄幼虫
4th instar larva
P=0.12
频次 Frequency
结冰点/℃ Freezing point


5龄幼虫
5th instar larva
P=0.00
频次 Frequency
结冰点/℃ Freezing point


6龄幼虫
6th instar larva
P=0.04
频次 Frequency
结冰点/℃ Freezing point

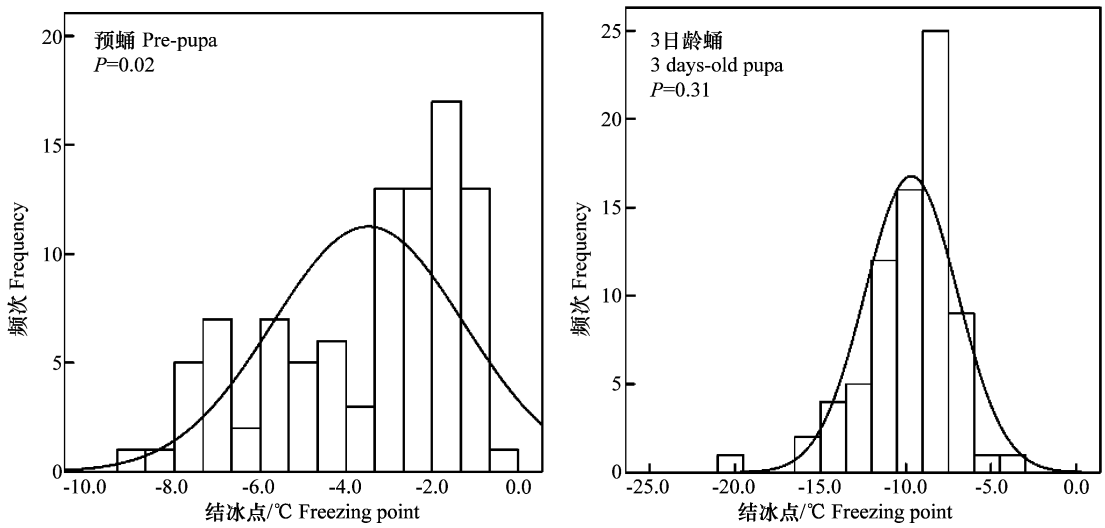


图 2　草地贪夜蛾各虫态个体的结冰点频次分布

Fig. 2　Distribution pattern of freezing points of *Spodoptera frugiperda* during different stages

2.4　雌雄成虫的过冷却点和结冰点

雌成虫过冷却点为(−15.11±0.45)℃,雄成虫的过冷却点(−14.93±0.44)℃,两者之间差异不显著(df=125.29,t=−0.29,P=0.773)。雌成虫结冰点为(−6.19±0.23)℃,雄成虫的结冰点为(−5.46±0.19)℃,两者之间差异显著(df=126,t=−0.2.37,P=0.02<0.05)。

3　讨论

过冷却点代表昆虫能够存活的生理低温下限,是反映昆虫越冬抗寒性的一个主要指标。过冷却点越低,昆虫抗寒性越强[13]。本文对草地贪夜蛾各虫态的抗寒性测试结果显示卵的过冷却点和结冰点最低,其次为蛹和成虫,幼虫随着龄期的增长过冷却点逐渐升高,雌雄成虫过冷却点之间差异不显著,但雌成虫结冰点显著低于雄成虫。何莉梅等对草地贪夜蛾的发育起点温度、有效积温和发育历期等指标测定结果显示卵和 1 龄幼虫的发育起点温度较低,说明卵和 1 龄幼虫对温度的适应能力更强[14]。对于非滞育状态的昆虫,主观印象认为其抗寒能力较低,本文的研究结果显示卵和 1 龄幼虫的过冷却点(−25.45±0.25)℃、(−19.02±0.41)℃,比甜菜夜蛾卵和 1 龄幼虫的过冷却点(−14.60±1.80)℃、(−15.86±1.43)℃[13,15]和小地老虎的卵和 1 龄幼虫过冷却点−9.5℃和−8.8℃[9]明显偏低。蛹的过冷却点为(−17.23±0.27)℃比黏虫的(−15.07±0.561)℃[16]、甜菜夜蛾(−15.55±1.13)℃[13,15]、劳氏黏虫(−16.20±0.57)℃[17]偏低,比滞育状态下的草地螟幼虫(−25.82±0.26)℃、旋幽夜蛾蛹(−23.67±2.63)℃[18-19]偏高。上述研究结果表明草地贪夜蛾可能比非滞育且迁飞的其他昆虫如小地老虎、甜菜夜蛾、黏虫等具有更强的耐寒能力。

本文对草地贪夜蛾的过冷却点测定发现同一发育阶段个体的过冷却点有一定的变异,除卵以外,其余虫态的过冷却点频次分布均符合正态分布,结冰点的频次分布除卵、5 龄幼虫、6 龄幼虫、预蛹外,其余各虫态冰点频次均符合正态分布。频次分布表明,同一发育阶段的不同个体之间耐寒性存在差异。Klok 和 Chown 认为这种差异现象是变温动物的一种适应策略,在遭受突如其来的寒冷天气时,抗逆性强的个体也能存活下来[20]。另外,影响昆虫过冷却点和结冰点测定结果的因素有很多,如不同地理种群、不同季节的虫源、昆虫本身的生长发育状况、室内和野外种群、不同取食状态以及不同测定方法等都会影响其测定结果[15]。根据对其他昆虫的研究结果,草地贪夜蛾的抗寒力和越冬区的划分,除测定其过冷却点和结冰点外,还应结合潜在越冬区的实际虫情普查、寄主调查、田间笼罩试验及气候条件等因素进行综合分析,获得该虫在不同环境因子下发生为害规律等科学数据,以便今后更加全面系统地了解草地贪夜蛾的抗寒能力,为其越冬区划分和预测预报等提供更全面可靠的数据支持。

(下转 69 页)

治中的应用[J]. 应用昆虫学报, 2019, 56(3): 370 - 381.
[5] 冼继东, 陈科伟, 王磊, 等. 外来入侵新害虫草地贪夜蛾调查监测方法探讨[J]. 环境昆虫学报, 2019, 41(3): 503 - 507.
[6] CHENG Guiping, DUAN Xuewu, SHI J, et al. Effects of reactive oxygen species on cellular wall disassembly of banana fruit during ripening [J]. Food Chemistry, 2008, 109(2): 319 - 324.
[7] WRAIGHT S P, RAMOS M E, AVERY P B, et al. Comparative virulence of *Beauveria bassiana* isolates against lepidopteran pests of vegetable crops [J]. Journal of Invertebrate Pathology, 2010, 103(3): 186 - 199.
[8] DEQUECH S T B, DA SILVA R F P, FIUZA L M. Interaction between *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), *Campoletis flavicincta* (Ashmead) (Hymenoptera: Ichneumonidae) and *Bacillus thuringiensis* aizawai in laboratory [J]. Neotropical Entomology, 2005, 34(6): 937 - 944.
[9] PRASANNA B, HUESING J, EDDY R, et al. Fall armyworm in Africa: A guide for integrated pest management [M]. Wallingford: CAB International, 2018: 1 - 109.
[10] NETO F D C, CRUZ I, ZANUNCIO J C, et al. Parasitism by *Campoletis flavicincta* on *Spodoptera frugiperda* in corn [J]. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, 2004, 39(11): 1077 - 1081.
[11] CORREA FIGUEIREDO M D L, CRUZ I, DA SILVA R B, et al. Biological control with *Trichogramma pretiosum* increases organic maize productivity by 19.4% [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(3): 1175 - 1183.
[12] POMARI A F, BUENO A D, BUENO R, et al. Releasing number of *Telenomus remus* (Nixon) (Hymenoptera: Platygastridae) against *Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera: Noctuidae) in corn, cotton and soybean [J]. Ciência Rural, 2013, 43(3): 377 - 382.
[13] KENIS M, DU PLESSIS H, VAN DEN BERG J, et al. *Telenomus remus*, a candidate parasitoid for the biological control of *Spodoptera frugiperda* in Africa, is already present on the continent [J]. Insects, 2019, 10(4): 92.
[14] ZENNER I, ALVAREZ A, BARRETO S, Influence of parasitism by *Chelonus insularis* Cresson (Hymenoptera: Braconidae) on the susceptibility of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) to insecticides [J]. Neotropical Entomology, 2006, 35(6): 818 - 822.
[15] MOLINA-OCHOA J, CARPENTER J E, LEZAMA-GUTIERREZ R, et al. Natural distribution of Hymenopteran parasitoids of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) larvae in Mexico [J]. Florida Entomologist, 2004, 87(4): 461 - 472.
[16] MURUA M G, MOLINA-OCHOA J, FIDALGO P. Natural distribution of parasitoids of larvae of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in Argentina [J]. Journal of Insect Science, 2009, 9(1): 20.

(责任编辑: 杨明丽)

(上接 49 页)

参考文献

[1] 姜玉英, 刘杰, 朱晓明. 草地贪夜蛾侵入我国的发生动态与未来趋势分析[J]. 中国植保导刊, 2019, 39(2): 33 - 35.
[2] 张智, 张云慧, 姜玉英, 等. 草地贪夜蛾覆毛卵块与绒茧蜂茧块的识别特征[J/OL]. 植物保护: 1 - 4[2019 - 08 - 23]. https://doi.org/10.16688/j.zwbh.2019402.
[3] 全国农业技术推广服务中心. 当前玉米重大病虫害发生动态[EB/OL]. (2019 - 08 - 23). https://www.natesc.org.cn/Html/2019_08_23/28092_151760_2019_08_23_459724.html.
[4] LEATHER S R, WALTERS K F A, BALE J S. The ecology of insect overwintering [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
[5] RENAULT D, SALIN C, VANNIER G, et al. Survival at low temperatures in insects: What is the ecological significance of the supercooling point? [J]. CryoLetters, 2002(4), 23: 217 - 228.
[6] 景晓红, 康乐. 昆虫耐寒性的测定与评价方法[J]. 昆虫知识, 2004, 40(1): 7 - 10.
[7] SALT R W. Principles of insect cold-hardiness [J]. Annual Review of Entomology, 1961, 6(3): 55 - 74.
[8] 陈若篪, 赵健, 徐秀媛. 褐飞虱越冬温度指标的研究[J]. 昆虫学报, 1982, 25(4): 390 - 396.
[9] 王荫长, 陈长琨, 尤子平. 小地老虎抗寒能力的研究[J]. 植物保护学报, 1987, 14(1): 9 - 14.
[10] 吴孔明, 郭予元. 棉铃虫的抗寒能力[J]. 生态学报, 1997, 17(3): 298 - 302.
[11] SPARKS A N. A review of the biology of the fall armyworm [J]. Florida Entomologist, 1979, 62(2): 82 - 87.
[12] BOTHA A S, ERASMUS A, DU PLESSIS H, et al. Efficacy of Bt maize for control of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in South Africa [J/OL]. Journal of Economic Entomology, 2019, doi: 10.1093/jee/toz048.
[13] 江幸福. 甜菜夜蛾抗寒与越冬能力研究[J]. 生态学报, 2011, 21(10): 1575 - 1582.
[14] 何莉梅, 葛世帅, 陈玉超, 等, 草地贪夜蛾的发育起点温度、有效积温和发育历期预测模型[J/OL]. 植物保护: 1 - 11[2019 - 08 - 23]. https://doi.org/10.16688/j.zwbh.2019409.
[15] 韩兰芝, 翟保平, 张孝羲. 甜菜夜蛾的抗寒力研究[J]. 植物保护学报, 2005, 32(2): 169 - 173.
[16] 段云, 巩中军, 李慧玲, 等. 黏虫幼虫和蛹过冷却点及结冰点的测定[J]. 植物保护, 2016, 42(4): 147 - 150.
[17] 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.
[18] 李朝绪, 罗礼智, 潘贤丽. 草地螟滞育和非滞育幼虫抗寒能力的研究[J]. 植物保护, 2006, 32(2): 41 - 44.
[19] 赵琦, 张云慧, 韩二宾, 等. 旋幽夜蛾各虫态的过冷却点测定[J]. 植物保护, 2011, 37(2): 63 - 66.
[20] KLOK C J, CHOWN S L. Interactions between desiccation resistance, host plant contact and the thermal biology of aleaf-dwelling sub-antarctic caterpillar, *Embryonopsis halticella* (Lepidoptera: Yponomeutidae) [J]. Journal of Insect Physiology, 1998, 44: 615 - 628.

(责任编辑: 杨明丽)