

粘虫抗寒力的初步研究*

郑傲冰** 翟保平***

(南京农业大学昆虫学系, 农作物生物灾害综合治理教育部和农业部重点实验室, 南京 210095)

摘 要 【目的】 本研究旨在初步探索粘虫的抗寒力, 以期能够为粘虫 *Mythimna separata* (Walker) 预测预报提供依据。【方法】 测定粘虫不同发育期、不同光周期下的过冷却点, 并计算虫体含水量; 测定 0、5、10℃ 下处理不同时间时粘虫老熟幼虫和蛹的死亡率。【结果】 蛹的过冷却点、结冰点和含水量最低, 并且粘虫不同发育期的过冷却点、结冰点和含水量差异显著 ($P < 0.05$); 不同光周期下粘虫的过冷却点和含水量并无显著差异; 在 0、5、10℃ 条件下, 粘虫老熟幼虫和蛹的死亡率均随着温度降低而增加, 老熟幼虫的死亡率均小于蛹; 雌雄蛹对低温的抵抗力有差异, 温度较低并且处理时间较短时, 对雌蛹的死亡率影响较大, 而温度稍高或处理时间较长时, 对雄蛹的死亡率影响较大。【结论】 粘虫蛹的抗寒力最强, 低温以及低温的持续时间影响蛹的性比以及老熟幼虫和蛹的死亡率, 光周期对粘虫的抗寒力无显著影响。

关键词 发育期, 持续低温, 过冷却点, 死亡率

Preliminary studies on the cold hardiness of *Mythimna separata* (Walker)

ZHENG Ao-Bing** ZHAI Bao-Ping***

(Key Laboratory of Integrated Management of Crop Diseases and Insect Pests, Ministry of Education and Ministry of Agriculture, Department of Entomology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract [Objectives] To investigate the cold hardiness of the beet armyworm *Mythimna separata* (Walker) in order to provide a basis for predicting outbreaks of this pest. [Methods] We measured the super-cooling point (SCP), freezing point (FP) and water content of armyworms at different developmental stages that were raised under different photoperiods. Armyworms overwinter as pupae and mature larvae in some regions, so pupae and mature larvae were measured at 0, 5 and 10℃, respectively. [Results] 1. The SCP, FP and water contents of pupae were lowest, and there were significant differences in the SCP, FP and water content of different development stages ($P < 0.05$), but not different photoperiods. 2. The survival rate of larvae and pupae varied greatly with temperature. Mortality increased as temperature decreased from 10℃ to 0℃ at intervals of 5℃, regardless of developmental stage. The mortality of pupae was higher than that of mature larvae. The susceptibility of male and female pupae to low temperature differed; female pupae had higher mortality at lower temperatures when the exposure time was shorter. [Conclusion] The cold hardiness of pupae was highest, and the sustained duration of low temperature influenced the sex ratio of pupae and the mortality of overwintering individuals, thus affecting the dynamics of the population in the following year. Photoperiod had no influence on the cold hardiness of armyworms.

Key words developmental stage, sustained low temperature, SCP, mortality

粘虫 *Mythimna separata* (Walker) 属鳞翅目夜蛾科, 是一种远距离迁飞性害虫, 广泛分布于亚洲和澳洲, 地跨热带、亚热带和温带广大地区,

具有发生范围广、危害世代多、危害历史长等特点, 往往造成严重的经济和生态损失(林昌善等, 1963; 林昌善, 1990; Jiang *et al.*, 2011)。

*资助项目 Supported projects: 农业公益性行业科研专项 (201403031)

**第一作者 First author, E-mail: aobingzheng@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: bpzhai@njau.edu.cn

收稿日期 Received: 2017-03-13, 接受日期 Accepted: 2017-07-11

20 世纪 50 年代以前, 人们认为粘虫可在本地越冬且世代重叠(魏鸿钧, 1953)。张宗炳先生(1959)依据诱蛾峰期与西南大风出现相吻合的现象, 提出了东北地区的粘虫是由南方各地迁入的假说。1960 年通过全国大协作开展越冬调查和标记释放回收试验, 为粘虫迁飞提供了直接的证据, 明确了粘虫在我国的越冬北界大致为 33°N (0°C 等温线), 粘虫在我国东部地区大多以老熟幼虫或蛹于 $27^{\circ}\text{N}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 的区域越冬, 而在 27°N 以南 (8°C 等温线以南) 粘虫可终年发生(陈瑞鹿, 1962; 李光博等, 1964; 林昌善和张宗炳, 1964)。我国粘虫越冬、迁飞规律的揭示以及在此基础上建立起来的异地测报及综合防治技术的成功应用, 使得粘虫在我国大范围的暴发成灾基本上得到了控制(姜玉英等, 2014)。

近年来, 气候变暖、作物布局、栽培技术和防治措施等的演变很可能导致粘虫越冬区域扩大, 越冬北界北移, 主要危害世代以及各世代危害范围扩大、主要危害作物由小麦转为玉米、迁飞规律发生变化并且抗药性明显增强等(姜玉英等, 2014; 江幸福等, 2014a, 2014b)。粘虫的越冬情况对其迁飞动态和大发生预测至关重要, 而抗寒力的高低对其越冬存活和来年的种群动态有极大影响。

关于粘虫抗寒力的研究, 主要集中在 20 世纪 60 年代, 各地研究结果说明粘虫抗寒力较低, 但是对粘虫过冷却点和低温下存活时间的结果差异较大, 并且实验时间距今已过了半个世纪。近年来仅见有关粘虫过冷却点测定, 可见的相关的报道尚少。过冷却点是昆虫抗寒力的一种生理指标(梅增霞和李建庆, 2006), 但仅用过冷却点和结冰点来判定昆虫的抗寒力尚不完整, 而持续低温下的存活率更能反映田间越冬种群的抗寒性。为此, 我们通过对粘虫不同发育期、不同光周期下的过冷却点、虫体含水量测定以及 0°C 、 5°C 、 10°C 下不同处理时间下粘虫老熟幼虫和蛹的死亡率测定, 分析极端低温和持续低温下粘虫的抗寒力, 以期为新时期粘虫的大发生预测提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

供试粘虫于 2015 年 4 月采于江苏姜堰, 将采集的卵块带回室内饲养繁殖(恒温 $(24\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 、光周期 L14:D10 、相对湿度 $60\%\sim 70\%$)。成虫配对置于透明塑料罩中 ($R=10\text{ cm}$, $H=15\text{ cm}$), 底部为放有滤纸的培养皿 ($R=10\text{ cm}$), 罩顶为 100 目尼龙纱, 并喂以 5% 蜂蜜水, 每天收集卵块, 待卵块发黑时将其置于温室培育 3 d 的盆栽玉米苗上。苗被取食尽后, 便将幼虫转移置新鲜玉米苗上, 直至其生长为老熟幼虫, 将老熟幼虫置于土壤中化蛹。室内饲养 3 代后作为供试虫源。

1.2 过冷却点测定

对粘虫不同发育期的过冷却点进行测定时, 选择正常饲养条件下发育情况一致的 3 龄、5 龄幼虫及蛹 ($<12\text{ h}$) 作为实验材料。对不同光周期下粘虫的过冷却点测定时, 光周期设置为 L14:D10 、 L12:D12 、 L10:D14 、 L8:D16 , 将卵块放入塑料杯中 ($R=5\text{ cm}$, $H=5\text{ cm}$), 每杯 10 个卵块, 然后将装有卵块的塑料杯放在不同光周期条件下的培养箱中, 培养箱的温度为 $(24\pm 1)^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $60\%\sim 70\%$, 当幼虫长至 3 龄、5 龄、蛹 ($<12\text{ h}$) 时取出作为实验材料。其中每个处理有 3 次重复, 每个处理的总样本量为 90 头。

利用过冷却点测试系统(半导体感温探头+温度采集系统, 江苏森意经济发展有限公司)进行测定。将热敏电阻测温探头感应部分与虫体充分接触(需保证虫体不能被刺破), 打开过冷却点测定系统, 系统自动记录试虫体温, 当体温恒定时, 即为虫体体温, 然后将试虫放入低温冰箱内, 使冰箱温度以 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 左右的速度下降, 观察昆虫体温的变化情况, 当虫体体温由下降突然又上升时, 系统会自动读出上升点的体温大小, 即为过冷却点 (SCP), 当虫体体温上升到一定值时, 由于体液完全结冰不再放出热量, 体温又开始下降, 刚开始下降点的体温即为结冰点 (FP)。试虫出现过冷却现象, 即测定成功, 否则视为失败, 数据不计入实验结果。

1.3 虫体含水量测定

测定过冷却点之前, 将供试虫体于 1/10000 分析天平 (赛多利斯科学仪器有限公司) 上称量后编号。过冷却点测定后, 将试虫置于 60℃ 恒温箱 (宁波江南仪器厂, DHG-9053AS) 中烘 24 h 至恒重, 室温冷却后再称重, 根据下述公式计算虫体含水量:

虫体含水量(%)=[(烘干前体重-烘干后体重)/烘干前体重]×100。

1.4 低温下死亡率的测定

根据雌蛹生殖孔位于腹部第 8 节, 雄蛹生殖孔位于腹部第 9 节这一特征, 将粘虫的雌雄蛹分开 (洪晓月和丁锦华, 2002)。选取发育较一致的老熟幼虫和蛹 (<12 h), 置于底部放有滤纸的培养皿中 (R=10 cm), 加土壤覆盖试虫。将培养皿置于低温恒温箱中, 温度梯度设置为 0、5、10℃ (误差为±1℃), 正常饲养温度 24℃ 为对照。在各测定温度下按照不同时间取出试虫 30 头, 不同温度下达到处理时间后, 即刻将试虫取出并置于温度 (24±1)℃、光周期 L14:D10、湿度约 60%~70% 环境中, 24 h 后观察虫体存活情况 (时间间隔见表 1)。轻触试虫后, 试虫有反应视为存活, 观察并计算试虫死亡率。

表 1 粘虫抗寒性测定的不同温度设置及处理时间

Table 1 Different treatment times and temperature designing for cold hardiness test of *Mythimna separata*

温度 (°C)	处理时间 (d)							
Temperature	Treatment duration (d)							
0±1	2	4	6	8	10	12	14	
5±1	3	6	9	12	15	18	21	
10±1	5	10	15	20	25	30	35	

1.5 数据处理

使用 SPSS 20 对处理后的过冷却点、结冰点与含水量进行方差分析 (ANOVA), 平均数进行 Duncan's 多重比较 (显著水平 $P<0.05$, 极显著水平 $P<0.01$)。低温条件下老熟幼虫和蛹的死亡率与时间的关系用 Excel 统计分析并作图。

2 结果与分析

2.1 过冷却点、结冰点与虫体含水量

对不同发育期粘虫的过冷却点、结冰点与虫体含水量测定结果见表 2, 粘虫不同发育期的过冷却点差异极显著 ($P<0.01$), 结冰点和含水量差异显著 ($P<0.05$)。蛹的过冷却点最低, 平均值可达 -16.26℃, 5 龄幼虫的较高, 结冰点的变化趋势和过冷却点基本相同, 蛹的含水量最低, 平均值可达 76.25%, 3 龄幼虫的含水量最高。不同发育期的过冷却点和含水量均有显著差异, 3 龄幼虫、5 龄幼虫、蛹的含水量和过冷却点的变化趋势明显 (图 1)。随着粘虫的生长发育, 其体内含水量一直在下降, 在蛹期达到最低值, 而且 5 龄幼虫至蛹的变化速率要高于 3 龄幼虫至 5 龄幼虫, 与之相对应, 过冷却点在蛹期也达到最低值。

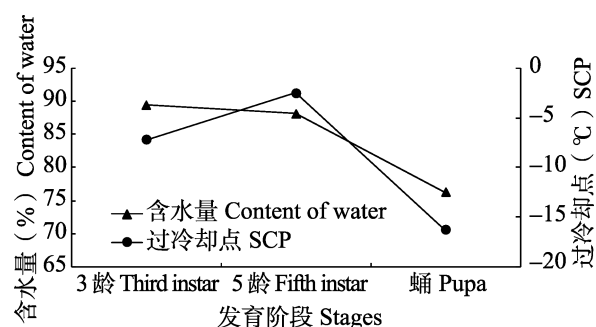


图 1 不同发育阶段越冬粘虫的含水量与平均过冷却点的变化

Fig. 1 The moisture content and average supercooling point (SCP) of *Mythimna separata* at different developmental stages

对不同光周期下粘虫的过冷却点与虫体含水量测定结果见表 3。对蛹来说, L12:D12 与 L14:D10 的过冷却点差异显著 ($P<0.05$), L14:D10 的含水量与其他光周期下的含水量差异极显著 ($P<0.01$); 对 3 龄幼虫来说, L12:D12、L8:D16 与 L14:D10、L10:D14 的过冷却点差异极显著 ($P<0.01$), 含水量无显著差异; 5 龄幼虫的过冷却点和含水量均无显著差异。但总的来说, 光周期对粘虫的过冷却点和含水量并无明显的显著影响。

2.2 低温对粘虫的影响

低温实验表明,不同低温处理下随着处理时间的延长,粘虫老熟幼虫和蛹的死亡率逐渐增高(图2)。0℃下处理10 d、5℃下处理15 d、10℃下处理25 d时,老熟幼虫的死亡率均可达到93%以上;0℃下处理14 d、5℃下处理21 d时,蛹的死亡率均达到98%以上,10℃下处理35 d时,蛹的死亡率可达到96%以上。观察发现,解除低温后的老熟幼虫,置正常温度时部分可化蛹,且在10℃时,老熟幼虫可部分化蛹。

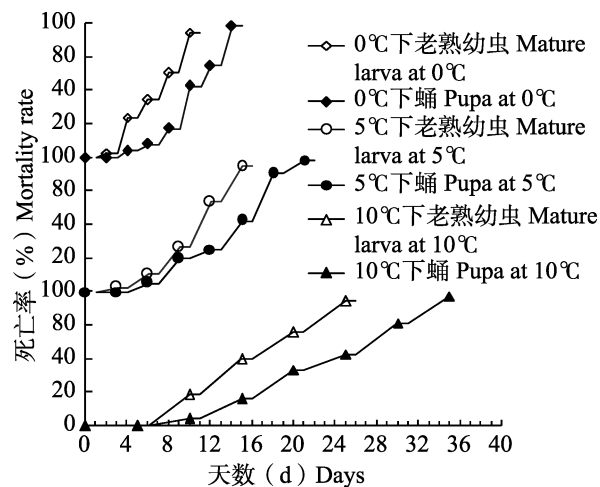


图2 不同温度下粘虫老熟幼虫和蛹的死亡率
Fig. 2 The mortality of mature larvae and pupae of *Mythimna separata* at different temperatures

不同温度下处理时间相同时,雌雄蛹的死亡率变化也不同(图3)。0℃时,处理时间不足8 d时,雌蛹的死亡率比雄蛹高,8 d至10 d时,雌蛹的死亡率比雄蛹低,此后又高于雄蛹,处理时间达到14 d时,雌雄蛹几乎全部死亡;5℃和10℃时,雄蛹的死亡率一直高于雌蛹。

3 讨论

虽然粘虫没有滞育性,但光周期对其生长发

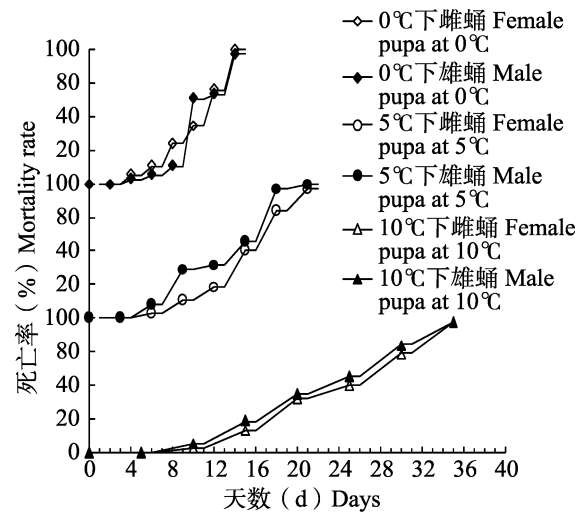


图3 不同温度下粘虫雌雄蛹的死亡率
Fig. 3 The mortality of both sexes of pupae of *Mythimna separata* at different temperatures

表2 粘虫不同发育期的过冷却点、结冰点与含水量
Table 2 The super-cooling point (SCP), freezing point (FP) and moisture content of *Mythimna separata* at different developmental stages

发育期 Developmental stages	过冷却点 (°C) SCP			结冰点 (°C) FP			烘干前 体重 (g) Weight before drying	烘干后 体重 (g) Weight after drying	含水量 (%) Moisture content
	最高值 Max	最低值 Min	平均值 Average	最高值 Max	最低值 Min	平均值 Average			
5龄 5 th instar	-0.8	-7.4	-2.4440±0.2767 A	-0.4	-4	-0.8260±0.0733 A	0.4848±0.1162	0.0563±0.0205	88.1699±3.9990 b
3龄 3 rd instar	-1.8	-11.5	-7.1620±0.3219 B	-0.2	-3.3	-0.9170±0.0956 A	0.0376±0.0101	0.0039±0.0012	89.5046±1.8000 a
蛹 Pupa	-7	-20.9	-16.2630±0.7353 C	-1.1	-11.3	-8.5920±0.5199 B	0.3334±0.0226	0.0792±0.0066	76.2451±1.0336 c

表中数据为平均数±标准差,数据后标有不同小写和大写字母分别表示 Duncan's 多重比较差异显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$)。下表同。

Data in the table are mean ± SD, and followed by the different lowercase and capital letters in the same columns are significant difference at 0.05 and 0.01 level by Duncan's multiple range test, respectively. The same below.

表 3 不同光周期下粘虫的过冷却点与含水量				
Table 3 Average super-cooling point (SCP) and moisture content of <i>Mythimna separate</i> in different photoperiods				
发育期	Developmental stages	光周期	Photoperiod (L : D)	过冷却点 (°C) SCP 含水量 (%) Moisture content
3 龄幼虫	3 rd instar		10 : 14	- 6.8280±0.1495 A
			14 : 10	- 7.1620±0.3219 A
			08 : 16	- 8.2880±0.2526 B
			12 : 12	- 8.2940±0.2602 B
			08 : 16	- 2.7960±0.3308
5 龄幼虫	5 th instar		10 : 14	- 2.9240±0.3770
			12 : 12	- 2.8450±0.3874
			14 : 10	- 2.4440±0.2767
			14 : 10	- 16.2630±0.7353 a
蛹	Pupa		10 : 14	- 17.6470±0.5146 a b
			08 : 16	- 18.0620±0.6678 a b
			12 : 12	- 18.7640±0.4154 b
				88.4240±2.3858
				89.5046±1.7997
				89.9257±1.9140
				89.6978±1.7330
				88.7208±4.6769
				89.3073±1.8610
				88.4077±2.1318
				88.1699±3.9990
				76.2451±1.0336 a
				74.5402±1.5225 b
				73.1240±2.3472 c
				74.0698±1.7599 bc

育也有影响。研究表明,不同的光周期(L8:D16、L12:D12、L16:8D)以及光周期变化(L16:D8→L12:D12、L8:D16→L12:D12)对粘虫的发育进度、生殖力和飞翔能力均有影响。光照由长变短能够使幼虫发育进度比其它处理平均缩短1 d以上,短光照、长变短、中等光照等条件下的成虫产卵前期均比长光照、短变长等处理下的显著延长,逐日变光照处理的雌蛾总产卵量比恒定光照处理蛾的总产卵量高,光照由长变短对成虫的飞翔能力有明显地促进作用(曹雅忠等,1997)。本研究对不同光周期下粘虫的过冷却点和含水量测定表明,随着光周期改变,粘虫的过冷却点和含水量并没有出现显著的趋势性变化,虽然对蛹来说,L12:D12与L14:D10的过冷却点差异显著($P<0.05$),L14:D10的含水量与其他光周期下的含水量差异极显著($P<0.01$),对3龄幼虫来说,L12:D12、L8:D16与L14:D10、L10:D14的过冷却点差异极显著($P<0.01$),但是整体来看,过冷却点和含水量并未随光周期变化而出现趋势性改变,粘虫的过冷却点和含水量也并无显著差异,所以认为光周期对粘虫的抗寒力可能没有显著影响,或者只是作为其中的一个次要因素。

蒲蛰龙等(1961)测定出粘虫4龄幼虫、蛹

和成虫的平均过冷却点分别为-9.9℃、-24℃、-5.2℃,平均结冰点分别为-3.6℃、-11.7℃、-4.6℃;李绵春等(1965)测定粘虫幼虫、蛹、成虫的平均过冷却点分别为-3.2℃、-7.5℃、-5.9℃,结冰点分别为-2.1℃、-3.1℃、-3.7℃;段云等(2016)测定,4龄、5龄、6龄幼虫以及1日龄、3日龄、5日龄蛹的过冷却点分别为-6.23℃、-4.38℃、-3.58℃、-14.16℃、-12.98℃、-15.07℃,幼虫和蛹的过冷却点平均值分别为-4.79℃、-14.05℃,蛹的过冷却点和结冰点在日龄和性别上有差异,并且与蛹重无明显相关性。虽然本研究测得过冷却点和结冰点数值与前人所测不同,但不同发育阶段的过冷却点与结冰点有差异,并且蛹的过冷却点最低,抗寒力最强的这个结果与前人研究一致。粘虫排除体内的水分可以增加体内溶质的浓度,降低体液的过冷却点,从而增加粘虫的抗寒力,随着粘虫的生长发育,其体内含水量一直在下降,在蛹期达到最低值,而且5龄幼虫至蛹的变化速率要高于3龄幼虫至5龄幼虫,这可能是因为化蛹前的一段时间,粘虫要加快降低体内水分的速度,以此来提高其抗寒力。由3龄到5龄,幼虫的含水量降低,过冷却点却增高,这一现象出现的原因可能是5龄幼虫的生活力较差。因为在饲养过程

中发现, 高龄幼虫的死亡率很高, 同时也很容易染病, 5 龄幼虫的过冷却点增高, 可能是由于其生活力差所致。

过冷却点作为一种代表抗寒力的指标, 可以确定昆虫抗寒力的差异, 但并不能完全代表昆虫的抗寒力。曾有研究发现森林天幕毛虫 *Malacosoma disstria* 初孵幼虫的过冷却点为 -13.4°C (Hanec, 1966), 而在实验室内幼虫用 -12°C 处理 7 d 后还能存活, 当温度达到 -7°C 到 -1°C 时, 只有极少量幼虫死亡 (Raske, 1975), 并且过冷却点以上的亚致死温度持续一定时间也能导致昆虫大量死亡, 所以过冷却点仅反映不同时期的抗寒力差异, 而低温和持续低温下昆虫存活率才能代表实际的抗寒力。陈瑞鹿 (1962) 测定, 在 1°C 条件下, 粘虫幼虫、蛹、成虫死亡率达到 100% 所需时间分别为 23、22、20 d, 在 -5°C 条件下, 死亡率达到 100% 的处理时间分别为 6、7、3 d, 0°C 条件下 15 d 即全部死亡。中国农业科学院植物保护研究所粘虫组林昌善 (1990) 测定出 0°C 下, 3 龄幼虫、4 龄幼虫、6 龄幼虫分别处理 15、20、30 d, 死亡率可达 100%, 蛹处理 30 d, 死亡率可达 91.8%~95.0%, 处理 40 d 死亡率为 100%, 成虫处理 25~30 d 全部死亡; 5°C 时, 6 龄幼虫处理 30 d 死亡率可达 59.5%, 成虫处理 25 d 全部死亡。根据以上研究结果可以看出, 粘虫抗寒力较低, 但是低温下粘虫达到一定死亡率所需时间的测定的结果差异较大。本研究测出 0°C 下处理 10 d 时, 老熟幼虫的死亡率可达到 93.33% 以上, 0°C 下处理 14 d 时, 蛹的死亡率达到 98.33% 以上, 这与陈瑞鹿 (1962) 和中国农业科学院植物保护研究所粘虫组林昌善 (1990) 的研究结果有差异。本研究测定结果表明, 相同低温条件下, 老熟幼虫的死亡率小于蛹, 说明蛹的抗寒力大于老熟幼虫; 随着温度升高, 老熟幼虫和蛹的死亡参数均随之增加, 说明在一定温度范围内, 温度越高, 其生存力越强; 实验时观察发现, 解除低温后的老熟幼虫, 置正常温度时可部分化蛹, 且在 10°C 时, 老熟幼虫可部分化蛹。此外, 雌雄蛹对低温的抵抗力有所差异, 温度较低并且处理时间较短时, 对雌蛹影响较大, 而温

度稍高或处理时间较长时, 对雄蛹影响较大, 所以低温以及低温持续时间对蛹的性比以及老熟幼虫和蛹的死亡率均有影响。

综合粘虫的过冷却点和耐低温能力测定, 可以认定蛹的抗寒力最强, 这与田间调查中粘虫以老熟幼虫和蛹越冬相符。由于粘虫无滞育特性, 所以其越冬北界会受到冬季低温的限制, 低温及其持续时间对越冬蛹的雌雄比例有影响, 从而影响翌年粘虫的种群数量。但本文对粘虫抗寒力的初步研究均是在室内测定而得, 粘虫在野外的实际越冬情况, 尚需进一步结合野外的实际越冬调查后才可下结论, 从而掌握粘虫的抗寒力变化, 为粘虫的预测预报提供更多的依据。

参考文献 (References)

- Cao YZ, Li GB, Hu Y, 1997. Effect of photoperiod on reproduction and flight of oriental armyworm *Mythimna separata* (Walker). *Acta Ecologia Sinica*, 17(2): 402–406. [曹雅忠, 李光博, 胡毅, 1997. 光周期对粘虫生殖与飞翔影响的初步研究. 生态学报, 17(4): 402–406.]
- Chen RL, 1962. Discussion on several issues related to armyworm occurrence researches. *Scientia Agricultura Sinica*, 3(7): 12–16. [陈瑞鹿, 1962. 粘虫发生规律研究中几个有关问题的研讨. 中国农业科学, 3(7): 12–16.]
- Duan Y, Gong ZJ, Li HL, Miao J, Jiang YL, Li T, Wu YQ, 2016. Supercooling points and freezing points of the larvae and pupae of *Mythimna separata* Walker. *Plant Protection*, 42(4): 147–150. [段云, 巩中军, 李慧玲, 苗进, 蒋月丽, 李彤, 武予清, 2016. 粘虫幼虫和蛹过冷却点及结冰点的测定. 植物保护, 42(4): 147–150.]
- Hanec W, 1966. Cold-hardiness in the forest tent caterpillar, *Malacosoma disstria* Hübner (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Journal of Insect Physiology*, 12(11): 1443–1449.
- Hong XY, Ding JH, 2002. *Agricultural Entomology*. Beijing: China Agriculture Press. 123. [洪晓月, 丁锦华, 2002. 农业昆虫学. 北京: 中国农业出版社. 123.]
- Jiang XF, Luo LZ, Zhang L, Sappington TW, Hu Y, 2011. Regulation of migration in *Mythimna separata* (Walker) in China: A review integrating environmental, physiological, hormonal, genetic, and molecular factors. *Environmental Entomology*, 40(3): 516–533.
- Jiang XF, Jiang YY, Zhang L, Cheng YX, Luo LZ, 2014a. Investigation and monitoring of overwintering and migrant populations, and the larval occurrence of the oriental armyworm,

- Mythimna separata* (Walker). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4): 1114–1119. [江幸福, 姜玉英, 张蕾, 程云霞, 罗礼智, 2014a. 粘虫越冬迁飞与危害的调查及监测技术. *应用昆虫学报*, 51(4): 1114–1119.]
- Jiang XF, Zhang L, Cheng YX, 2014b. Novel features, occurrence trends and economic impact of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker) in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(6): 1444–1449. [江幸福, 张蕾, 程云霞, 2014b. 我国粘虫发生危害新特点及趋势分析. *应用昆虫学报*, 51(6): 1444–1449.]
- Jiang YY, Li CG, Zeng J, Liu J, 2014. Population dynamics of the armyworm in China: A review of the past 60 years' research. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4): 890–898. [姜玉英, 李春广, 曾娟, 刘杰, 2014. 我国粘虫发生概况: 60 年回顾. *应用昆虫学报*, 51(4): 890–898.]
- Li GB, Wang HX, Hu WX, 1964. Route of the seasonal migration of the oriental armyworm moth in the eastern part of China as indicated by a three year result of releasing and recapturing of marked moths. *Acta Phytophylacica Sinica*, 3(2): 101–110. [李光博, 王恒祥, 胡文绣, 1964. 粘虫季节性迁飞为害假说及标记回收试验. *植物保护学报*, 3(2): 101–110.]
- Li MC, Chen RC, Liu ZY, Lu ZX, 1965. Studies on the source of the early spring generation of the armyworm, *Leucania separata* Walker, in Kirin Province. I. Studies on the hibernation and problems of the source. *Acta Entomologica Sinica*, 14(1): 21–31. [李绵春, 陈瑞鹿, 刘增义, 卢兆先, 1965. 吉林省粘虫猖獗世代发生虫源的研究 I. 发生虫源的探讨和越冬问题研究. *昆虫学报*, 14(1): 21–31.]
- Lin CS, 1990. *Physiological Ecology of Armyworm*. Beijing: Peking University Press. 168–169 [林昌善, 1990. 粘虫生理生态学. 北京: 北京大学出版社. 168–169.]
- Lin CS, Zhang ZB, 1964. Studies of the regularities of the outbreak of the oriental armyworm (*Leucania separata* Walker). V. A model for seasonal long-distance migration of the oriental armyworm. *Acta Phytophylacica Sinica*, 3(2): 93–100. [林昌善, 张宗炳, 1964. 粘虫发生规律的研究 V. 粘虫季节性远距离迁飞的一个模式. *植物保护学报*, 3(2): 93–100.]
- Lin CS, Sun JR, Chen RL, Zhang ZB, 1963. Studies on the occurrence regularities of the outbreak of the oriental armyworm, *Leucania separata* Walker I. The early spring migration of the oriental armyworm moths and its relation to winds. *Acta Entomologica Sinica*, 12(3): 243–262. [林昌善, 孙金如, 陈瑞鹿, 张宗炳, 1963. 粘虫 (*Leucania separata* Walker) 发生规律的研究 I. 东北春季粘虫发生与风的关系. *昆虫学报*, 12(3): 243–262.]
- Mei ZX, Li JQ, 2006. Physiological mechanism and influencing factors of cold resistance in insects. *Journal of Binzhou College*, 22(3): 57–61. [梅增霞, 李建庆, 2006. 昆虫抗寒性的生理机制及影响因子. *滨州学院学报*, 22(3): 57–61.]
- Pu ZL, Zhu JL, Chen XW, Bao JC, 1961. Study on cold resistance of insects-The Super-cooling point and freezing point of *Pseudaletia separata* (Walker) and *Prodenia litura* Fabr. *Journal of Sun Yatsen University*, (1): 30–36. [蒲蛰龙, 朱金亮, 陈熙雯, 包金才, 1961. 昆虫抗寒性研究(一)粘虫 *Pseudaletia separata* (Wlk.) 和斜纹夜蛾 *Prodenia litura* Fabr. 的过冷却点及冻结点温度测定. *中山大学学报*, (1): 30–36.]
- Raske AG, 1975. Cold-Hardiness of first instar larvae of the forest tent caterpillar, *Malacosoma disstria*. (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Canadian Entomologist*, 107(1): 75–80.
- Wei HJ, 1953. Armyworm. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, (7): 296–297. [魏鸿钧, 1953. 粘虫. *农业科学通讯*, (7): 296–297.]
- Zhang ZB, 1959. Discussion on overwinter problem and the hypothesis of wind borne migration of armyworm. Proceedings of Workshop on Overwinter Problem of Armyworm. Harbin. [张宗炳, 1959. 粘虫的随风迁移的假说与越冬问题 (粘虫越冬问题讨论会的发言提纲). 粘虫越冬问题座谈会材料 (油印本). 哈尔滨.]