研 究 简 报
Research Notes

草地贪夜蛾耐低温能力研究

张同强， 张 蕾， 程云霞， 江幸福*

（植物病虫害生物学国家重点实验室，中国农业科学院植物保护研究所，北京 100193）

摘要 为阐明草地贪夜蛾的抗寒能力及越冬虫态，为其越冬区划和监测预警提供科学依据，本研究测定了草地贪夜蛾不同发育阶段在4种低温（－10℃、－5℃、0℃和5℃）条件下的存活率，并通过计算机软件拟合死亡率回归方程，计算出 LT_{50}、LT_{90} 和 LT_{99}。结果表明：草地贪夜蛾在4种低温条件下处理2 h后各虫态存活率均随处理温度降低而显著下降（$P<0.05$）。在－10℃下，除蛹外，其他各虫态的存活率均小于60%，其中成虫存活率最低，仅为40.34%。在－10℃及－5℃处理温度下，蛹的存活率显著高于其他虫态（$P<0.05$）。对死亡率回归方程分析表明，草地贪夜蛾同一虫态的 LT_{50}、LT_{90} 及 LT_{99} 均表现为5℃＞0℃＞－5℃＞－10℃。在相同温度条件下，草地贪夜蛾的存活能力随着发育阶段的变化而变化，不同虫态的耐低温能力依次为卵＜成虫＜幼虫＜蛹。在所有测试温度中，经9 d后卵的孵化率最高为1.8%。综上，草地贪夜蛾蛹耐低温能力最强，是草地贪夜蛾最有可能越冬的虫态。在0℃条件下，蛹的 LT_{99} 为40.27 d，表明其在冬季温度低于0℃的时间连续超过40 d的地区不能越冬。这些结果为科学划分我国草地贪夜蛾越冬区划及监测预警提供了依据。

关键词 草地贪夜蛾； 低温； 抗寒能力； 越冬虫态

中图分类号： S 435.132 **文献标识码：** A **DOI：** 10.16688/j.zwbh.2020265

Study on the cold resistance of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*

ZHANG Tongqiang, ZHANG Lei, CHENG Yunxia, JIANG Xingfu*

(*State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests*, *Institute of Plant Protection*, *Chinese Academy of Agricultural Sciences*, *Beijing* 100193, *China*)

Abstract To further clarify the cold-resistance and possible overwintering stage of *Spodoptera frugiperda*, the survival rates of *S. frugiperda* at different developmental stages under four different low temperatures were measured and the LT_{50}, LT_{90} and LT_{99} were calculated. The results showed that the survival rates of *S. frugiperda* under different low temperatures decreased significantly with decrease of the temperature. At －10℃, except for pupae, the survival rates of other stages were less than 60%, and the survival rate of adults was only 40.34%. The survival rate of pupae was significantly higher than that of other stages at －10℃ and －5℃. According to the mortality regression equation, the LT_{50}, LT_{90}, and LT_{99} of same developmental stage showed a tendency of 5℃＞0℃＞－5℃＞－10℃. Under the same temperature conditions, the viability of *S. frugiperda* varies with the developmental stage. The low temperature tolerance of different developmental stages from weak to strong was egg＜adults＜larva＜pupa. Among all tested temperatures, the hatching rate of eggs after nine days is the highest 1.8%. These results showed that the pupa was the most likely overwintering stage of *S. frugiperda*. The LT_{99} of pupae was 40.27 d at 0℃, which indicated that it cannot overwinter in areas where the temperature is continuously lower than 0℃ for more than 40 d. These results provided a basis for the scientific overwintering division of *S. frugiperda*, monitoring and early warning in China.

Key words *Spodoptera frugiperda*; low temperature; cold resistance; overwintering stage

收稿日期： 2020－05－25 **修订日期：** 2020－07－17

基金项目： 国家重点研发计划（2019YFD0300101，2017YFD0201701，2017YFD0201802）；中国农业科学院草地贪夜蛾联合攻关重大科技任务（Y2019YJ06）；国家绿肥产业技术体系（CARS-22）；国家自然科学基金（31672019，31871951）；北京市自然科学基金（6172030）

* 通信作者 E-mail：xfjiang@ippcaas.cn

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*（J. E. Smith）也称行军虫、秋黏虫，属于鳞翅目 Lepidoptera，夜蛾科 Noctuidae，灰翅夜蛾属 *Spodoptera*，原产于美洲热带和亚热带地区[1]。草地贪夜蛾具有寄主范围广，为害严重，繁殖能力强，适应性强等特点，为谷物和牧草等的重要害虫，可为害 353 种植物，具有很强的飞行能力，轨迹分析表明成虫在 30 h 内可以飞行 1 600 km，是联合国粮农组织全球预警的迁飞性重大农业害虫并被列为世界十大植物害虫[2-5]。2016 年 1 月草地贪夜蛾首次被发现入侵非洲，并迅速蔓延到非洲撒哈拉以南地区[6]，并于 2018 年 5 月侵入亚洲国家[7]。2019 年 1 月草地贪夜蛾首次入侵我国云南，随后迅速蔓延，不到一年时间，已在我国至少 22 个省（市、区）及 1 538 个县（区）发生为害，玉米发生面积高达 106.5 万 hm^2，对我国的农业生产构成了巨大的威胁[8]。2020 年 1 月至 3 月，已在云南、广东、海南、广西、福建、四川、贵州 7 省（区）176 个县玉米田查见草地贪夜蛾幼虫，累计发生面积 5 万 hm^2，在云南、广东、海南、江西等 8 省（区）228 个县见成虫，总体发生时间比 2019 年早 2 个月左右[9-10]。吴孔明等曾预计，2020 年中国草地贪夜蛾为害会更严重[11]。

低温是影响昆虫生长发育和存活的关键因子，制约着昆虫种群的延续。在温带和寒带地区，冬季低温成为昆虫生存的限制因素并直接影响其存活。而昆虫越冬阶段的存活率直接影响下一代种群基数和种群的增长，进而决定最终的成灾状况[12]。因此，昆虫抗寒性是影响其种群增长的重要因素[13]。抗寒性是有机体暴露于长期或短期低温下的存活能力，这种能力因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而变化[14]。昆虫的过冷却是指体液温度下降到冰点以下而不结冰的现象，可以通过过冷却点（supercoiling point，SCP）来量化反映[15]。SCP 是衡量昆虫抗寒能力的一个重要指标[16]。但也有学者认为，SCP 可以反映致死低温，但不是衡量昆虫抗寒性的一个绝对指标，因为一些昆虫在体液结冰前已经死亡[17]。对于耐结冰和不耐结冰的昆虫，SCP 都不应该被认为是衡量其抗寒性的唯一指标[18]。在温带及寒带地区，昆虫遭受更多的是短暂的极端低温天气或长期的低温冷伤害天气。因此，致死时间已成为研究昆虫低温存活能力的重要手段[19]。

目前，关于草地贪夜蛾抗寒性的研究已有一些报道[20-21]，且主要着重于 SCP 的测定，而对草地贪夜蛾在低温条件下的致死时间还未见报道。基于此，本研究测定了不同发育阶段的草地贪夜蛾在 4 种低温条件下的存活率，并建立了低温死亡率回归方程，计算其在低温条件下的致死时间，进一步阐明了草地贪夜蛾的抗寒能力，为科学划分草地贪夜蛾在我国的越冬区划，揭示其迁飞规律以及指导监测预警提供依据。

1　材料与方法

1.1　供试虫源

草地贪夜蛾试验用虫于 2019 年 4 月采自广西壮族自治区南宁市（108.37°E，22.82°N），并在室内人工饲养繁殖，建立供试种群。供试用虫为室内繁殖第 3 代。饲养条件为：光周期 L∥D＝16 h∥8 h、相对湿度（60±5）%、温度（26±1）℃、光照强度 18 000 lx。幼虫使用新鲜幼嫩玉米叶饲养，饲养密度为 20 头/盒（长 25 cm，宽 15 cm，高 15 cm）。待幼虫发育至老熟时，将其放置在相对湿度为 15%的灭菌土中化蛹。成虫羽化后，配对置于玻璃瓶（750 mL，高 14 cm，直径 8 cm）中，使用 120 目的尼龙纱布封住瓶口，每天饲喂 10%蜂蜜水。

1.2　仪器设备

高低温试验箱（BPH-060C 型），上海一恒科技有限公司；立式 4 门储存冰柜（SL-1020C2D2），海尔集团公司；立式 3 门风冷冰箱（NR-C320WP-S），无锡松下冷机有限公司。

1.3　低温条件下草地贪夜蛾存活能力的测定

分别在 5、0、－5℃和－10℃ 4 种低温条件下测定草地贪夜蛾不同虫态的耐低温能力。5℃下的存活能力在低温培养箱中测定，0℃的测定在冰箱中进行且使用冰水混合物控制温度，－5℃和－10℃的测定在高低温试验箱中进行。待测样品卵放置于 750 mL（高 14 cm，直径 8 cm）的玻璃瓶中，底部放置滤纸，防止空气中的水冷凝破坏样品，每瓶放置 1 000粒卵。选择 5 日龄蛹和各龄期中生长发育一致的幼虫放入长宽均为 15 cm，底部放有一层滤纸的培养皿中，每皿放入 15 头幼虫或 10 头蛹，培养皿顶部夹盖吸水纸，以吸收待测样品在低温条件下释放出的水及防止幼虫爬出培养皿。将 1 日龄的成虫按雌雄比 1∶1的比例两两配对放入直径5 cm、高

12 cm的透明塑料罩中，在其底部放入滤纸及 10% 蜂蜜水，罩口封有 120 目并夹带吸水纸的尼龙纱布。按不同的时间梯度分批取出待测样品，共 5～6 批。第 1 批样品低温放置 2 h 后取出并以 28℃放置的试虫为对照，检查各虫态低温短时暴露下存活率，剩余 4～5 批根据第 1 批样品的存活情况按不同时间梯度分批取出。每次取出卵 1 000 粒，幼虫 45 头，蛹 30 头，成虫 24 头。幼虫和成虫取出后在光周期 L//D=16 h//8 h、温度(26±1)℃、相对湿度(60±5)%及光照强度 18 000 lx 的条件下恢复，24 h 后检查样品存活情况，以能协调爬行作为存活标准。卵和蛹则是在上述条件下观察并记录其孵化和羽化情况[19]。在－5℃和－10℃中的待测样品，在测定之前先放置于 5℃的冰箱中低温驯化 1 h。

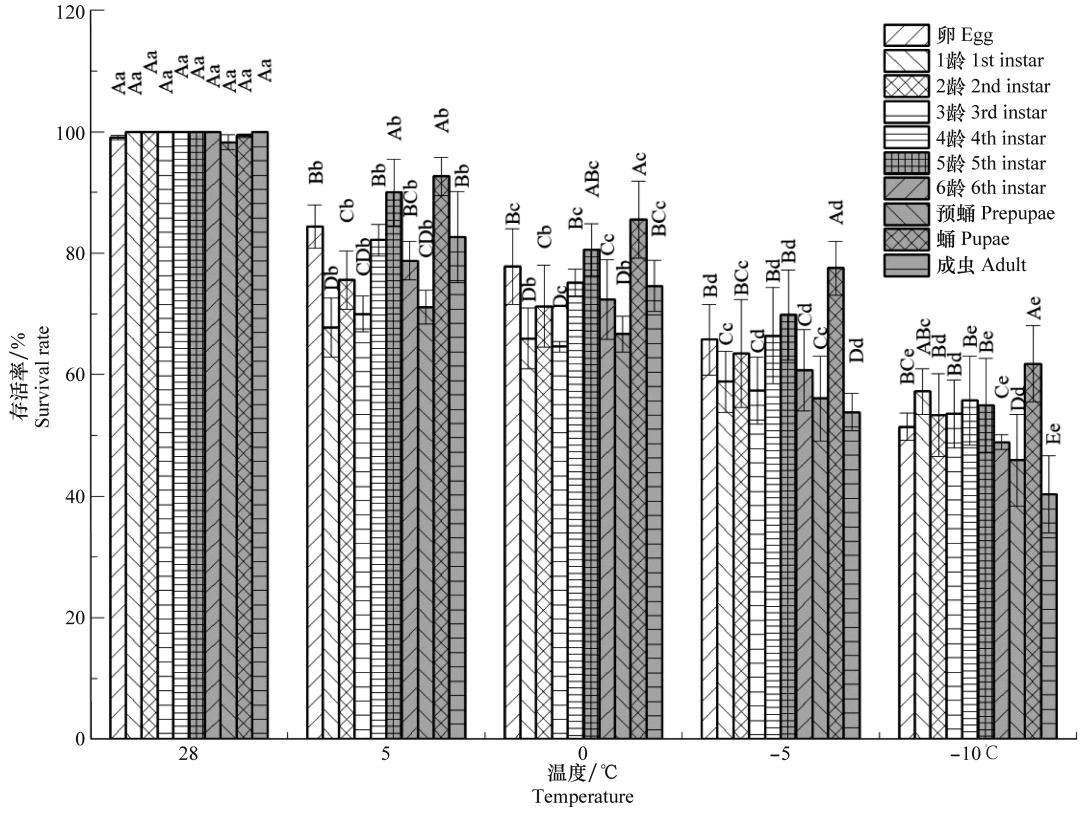
1.4 数据分析

运用 SPSS 20 统计软件对试验数据进行统计分析。草地贪夜蛾短时(2 h)低温暴露下不同温度处理之间的存活率数据经平方根反正弦转换后进行单因素方差分析法(ANOVA)，多重比较采用 LSD 法，进行差异显著性检验。草地贪夜蛾在低温条件下的存活能力采用几率值分析法，即昆虫在低温条件下存活时间的对数值与死亡率的几率值呈线性关系[22-23]。计算草地贪夜蛾不同虫态分别在 4 种低温条件下的死亡率回归方程，并计算出 LT_{50}、LT_{90} 和 LT_{99}。

2 结果与分析

2.1 草地贪夜蛾低温短时暴露下存活率

研究结果表明(图 1)，与对照相比，草地贪夜蛾在 4 种短时低温暴露下的各虫态存活率均显著下降($P<0.05$)，且随处理温度的降低呈显著下降趋势(卵：$F_{4,10}=138.00$，$P<0.05$；1 龄幼虫：$F_{4,10}=30.33$，$P<0.05$；2 龄幼虫：$F_{4,10}=86.25$，$P<0.05$；3 龄幼虫：$F_{4,10}=15.15$，$P<0.05$；4 龄幼虫：$F_{4,10}=137.00$，$P<0.05$；5 龄幼虫：$F_{4,10}=133.94$，$P<0.05$；6 龄幼虫：$F_{4,10}=126.72$，$P<0.05$；预蛹：$F_{4,10}=45.14$，$P<0.05$；蛹：$F_{4,10}=144.33$，$P<0.05$；成虫：$F_{4,10}$



图中数据为平均值±标准误，不同大写字母表示同一温度下不同虫态的存活率有显著差异，不同小写字母表示同一虫态不同温度下的存活率有显著差异($P<0.05$, LSD法)

The data in the figure are mean ± SE. Different capital letters indicate significant difference of survival rates among different insect stages at the same temperature, and different lowercase letters indicate significant difference of survival rates among different temperature at the same insect stages ($P<0.05$, LSD)

图 1 草地贪夜蛾暴露在不同低温条件下 2 h 后的存活率

Fig. 1 Survival rate of *Spodoptera frugiperda* after exposure to different low temperatures for 2 h

=284.25,$P<0.05$)。处理温度高于 0℃时,各虫态存活率的下降速率较慢;温度低于 0℃时,各虫态存活率下降速率较快。在−10℃处理条件下,除蛹外,其他各虫态存活率均约小于 60%,其中成虫的存活率最低,仅为 40.34%。在同一低温短时暴露下,草地贪夜蛾各虫态存活率存在显著差异(5℃:$F_{9,20}=41.28$,$P<0.05$;0℃:$F_{9,20}=32.39$,$P<0.05$;−5℃:$F_{9,20}=29.73$,$P<0.05$;−10℃:$F_{9,20}=15.62$,$P<0.05$)。在−10℃及−5℃处理温度下,蛹的存活率均显著高于其他虫态,存活率高低依次为蛹>卵>成虫。在幼虫中,5 龄幼虫存活率显著高于其他龄期的幼虫,但显著低于蛹的存活率。

2.2　草地贪夜蛾在 4 种低温条件下的致死时间

为明确不同低温条件下处理不同时间对草地贪夜蛾各虫态存活率的影响,在 4 种低温条件下测定了各虫态在不同处理时间下的存活率,并建立其死亡率回归方程,结果(表 1)显示,同一虫态其 LT_{50}、LT_{90} 及 LT_{99} 均表现为 5℃>0℃>−5℃>−10℃,

表 1　草地贪夜蛾不同发育阶段在低温下的死亡率回归方程[1)]

Table 1　Time-mortality lines of different stages of *Spodoptera frugiperda* at selected low temperatures

虫态 Stage	温度/℃ Temperature	回归方程 Regression equation	χ^2 (df=3)	LT_{50}/d	95%置信限/d 95% confidence interval	LT_{90}/d	95%置信限/d 95% confidence interval	LT_{99}/d	95%置信限/d 95% confidence interval
卵 Egg	5	$y=5.6426x-3.0877$	0.093	3.53	3.51～3.58	5.95	5.92～6.17	9.11	9.05～9.56
	0	$y=6.1885x-2.8338$	2.096	2.87	2.69～2.92	4.62	4.25～4.78	6.82	6.51～7.28
	−5	$y=3.4551x+0.3281$	2.198	0.80	0.67～0.85	1.89	1.62～2.03	3.79	3.26～4.21
	−10	$y=2.7125x+1.5054$	4.531	0.28	0.21～0.34	0.83	0.71～0.93	2.00	1.82～2.45
1 龄幼虫 1st instar	5	$y=2.3674x-1.7523$	0.318	5.50	5.39～8.47	19.12	10.12～61.71	52.83	25.83～239.39
	0	$y=3.1609x-2.0418$	0.136	4.43	2.59～5.52	11.26	8.26～21.19	24.10	16.11～65.47
	−5	$y=4.7092x-2.0875$	0.070	2.78	1.62～3.58	5.19	3.31～6.63	8.66	6.55～12.41
	−10	$y=2.2413x+1.4513$	0.092	0.23	0.12～0.35	0.84	0.51～3.04	2.46	1.45～18.21
2 龄幼虫 2nd instar	5	$y=3.2106x-2.9880$	0.170	8.52	6.52～10.45	21.37	17.23～36.55	45.21	24.85～115.52
	0	$y=3.1638x-2.4791$	0.061	6.08	4.67～9.81	15.44	10.41～35.68	33.03	19.27～126.82
	−5	$y=3.9911x-0.9641$	1.048	1.74	1.44～3.42	3.65	2.35～8.21	6.68	3.57～22.40
	−10	$y=2.1715x+1.2832$	0.909	0.26	0.05～0.51	1.00	0.56～5.71	3.02	1.03～47.26
3 龄幼虫 3rd instar	5	$y=3.1519x-2.6544$	0.004	6.95	3.59～8.16	17.73	13.56～28.26	38.04	24.76～82.06
	0	$y=4.9433x-3.0771$	0.579	4.19	3.47～4.79	7.62	5.36～9.71	12.39	9.15～18.57
	−5	$y=4.5589x-0.3235$	0.044	1.18	1.00～1.73	2.25	1.59～5.77	3.81	2.28～15.47
	−10	$y=1.9068x+1.5384$	0.570	0.16	0.13～0.25	0.73	0.47～1.61	2.59	1.26～9.23
4 龄幼虫 4th instar	5	$y=5.4431x-5.8671$	0.106	11.96	10.39～17.81	20.57	15.03～53.37	32.01	20.19～131.41
	0	$y=5.8003x-5.4621$	0.053	8.74	7.78～10.73	14.54	11.37～24.31	22.02	15.35～47.79
	−5	$y=4.9557x-1.1521$	0.055	1.71	1.55～2.07	3.10	2.51～5.29	5.03	3.66～11.58
	−10	$y=3.5061x+2.8089$	6.380	0.16	0.14～0.17	0.37	0.30～0.51	0.73	0.52～1.26
5 龄幼虫 5th instar	5	$y=10.5833x-13.4365$	0.162	18.60	16.90～25.37	24.59	20.32～47.05	30.87	23.56～78.04
	0	$y=6.5630x-6.6926$	0.199	10.47	9.30～13.78	16.41	12.83～30.51	23.67	16.60～58.68
	−5	$y=6.1994x-2.8843$	0.010	2.92	2.72～3.12	4.70	4.17～5.75	6.93	5.68～9.82
	−10	$y=4.5400x+4.1429$	3.388	0.12	0.11～0.13	0.23	0.20～0.29	0.40	0.32～0.57
6 龄幼虫 6th instar	5	$y=5.7667x-5.7047$	1.502	9.76	8.77～12.21	16.28	12.78～28.76	24.70	17.22～58.30
	0	$y=6.0711x-5.0057$	0.225	6.68	6.14～7.60	10.85	9.08～15.18	16.13	12.31～27.07
	−5	$y=5.1615x-1.0127$	1.111	1.57	1.42～1.71	2.78	2.47～3.30	4.43	3.66～6.02
	−10	$y=3.9085x+3.8957$	2.067	0.10	0.09～1.16	0.21	0.19～0.27	0.39	0.31～0.57
预蛹 Prepupa	5	$y=2.9070x-2.5198$	0.206	7.36	5.93～12.16	20.31	12.2～75.09	46.46	21.80～336.69
	0	$y=3.1158x-2.0900$	0.119	4.69	4.12～6.51	12.08	8.81～22.98	26.15	15.69～75.81
	−5	$y=2.0425x+0.0845$	0.081	0.91	0.75～1.20	3.86	2.36～10.98	12.52	5.62～71.39
	−10	$y=2.5773x+2.4702$	4.303	0.11	0.10～0.13	0.35	0.26～0.54	0.88	0.56～1.83
蛹 Pupa	5	$y=2.9066x-3.1438$	0.123	12.07	8.80～89.14	33.31	16.02～476.15	76.21	25.83～1 232.46
	0	$y=3.0227x-2.5249$	0.797	6.84	5.64～10.87	18.17	11.52～60.55	40.27	20.26～279.09
	−5	$y=1.9637x+0.4787$	0.473	1.75	1.13～2.49	7.88	4.47～31.15	26.82	10.68～266.47
	−10	$y=1.2784x+1.0119$	0.026	0.16	0.05～0.24	1.63	0.84～19.21	10.67	2.81～212.39
成虫 Adult	5	$y=3.5503x-2.7707$	0.555	6.03	5.17～8.27	13.85	9.47～47.43	27.27	14.81～206.38
	0	$y=5.4033x-4.0331$	0.134	5.58	3.02～6.41	9.63	6.88～14.93	15.03	9.16～34.92
	−5	$y=2.1488x+0.8833$	0.083	0.39	0.28～0.50	1.53	0.98～4.79	4.69	2.15～37.89
	−10	$y=1.7547x+2.0722$	0.250	0.06	0.05～0.67	0.35	0.13～60.91	1.40	0.28～107.29

1) LT_{50},LT_{90},LT_{99}分别表示致死 50%, 90%和 99%试虫所需要的时间。

LT_{50},LT_{90},LT_{99} are the days caused 50%, 90% and 99% mortality of *Spodoptera frugiperda* at low temperature respectively.

表明随着温度的降低，草地贪夜蛾存活能力也降低。蛹在 5、0、－5、－10℃下的 LT_{50} 分别为 12.07、6.84、1.75 d 及 0.16 d。在 0℃和 5℃下，各龄幼虫的生存能力很强，但温度低于 0℃时，生存能力迅速下降。在相同温度条件下，草地贪夜蛾的存活能力随着发育阶段的变化而显著变化，不同虫态的耐低温能力由弱到强的顺序排列依次为卵＜成虫＜幼虫＜蛹。5℃条件下：卵、成虫、1 龄幼虫（幼虫中最大值）及蛹的 LT_{99} 分别为 9.11、27.27、52.83、76.21 d。随着温度的降低，各虫态的致死时间依次缩短，－10℃条件下：卵、成虫、2 龄幼虫（幼虫中最大值）及蛹的 LT_{99} 分别为 2.00、1.40、3.02、10.67 d。在所有测试温度中，经 9 d 后卵的孵化率最高为1.8%。成虫在－10℃中经过 2 d 左右基本全部死亡。蛹的生存能力最强，因而是草地贪夜蛾最有可能的越冬虫态之一。

3 讨论

气候条件及昆虫体内含水量可以决定昆虫的抗寒能力[24]。昆虫的抗寒能力在一定程度上决定了其分布范围，成为判定昆虫在地理空间分布的重要因素。判定无脊椎动物的抗寒能力，有些生物学家非常重视低温持续时间和低温强度的重要性[25]，低温暴露试验是最常用的昆虫耐寒性测定与评价方法之一。对于特定昆虫来说，其耐寒性的强弱最终取决于低温存活率的试验结果[16]。本研究测定了草地贪夜蛾在 4 种低温条件下暴露 2 h 后的存活率。结果表明随着测试温度降低，草地贪夜蛾各虫态的个体存活率均呈下降趋势，且温度低于 0℃时，存活率的下降趋势变大。在同一低温条件下，蛹的存活率均高于其他虫态，表明草地贪夜蛾蛹对短时低温的忍耐能力最强。

昆虫的耐寒性与其在低温条件下暴露时间长短密切相关[26]。前人研究表明，昆虫在低温下生存时间的对数和死亡率几率值呈线性关系。几率值分析法适用于昆虫抗寒性的研究[22]。本试验通过死亡率几率值分析了草地贪夜蛾在 4 种短时（2 h）低温条件下的致死时间，结果显示：随着温度的降低，草地贪夜蛾的死亡率回归方程中的 LT_{50}、LT_{90} 及 LT_{99} 均减小，表明当外界温度降低时，草地贪夜蛾的存活能力降低。同时，当温度低于 0℃时，其 LT_{50}、LT_{90} 及 LT_{99} 减少速率加快，这与甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*（Hübner）的抗寒能力研究结果相似[19]。在同一低温条件下，蛹的极限致死时间（LT_{99}）均大于其他虫态，表明草地贪夜蛾蛹的存活能力强于其他发育阶段，这也可以说明草地贪夜蛾蛹耐低温能力最强。

我国大部分地区处于温带，一年有四季之变化，明确昆虫的越冬虫态对其发生为害程度的预测预报有重要作用。昆虫在长期进化过程中逐渐形成了一定的越冬虫态。不同昆虫越冬虫态会有所不同。以夜蛾科昆虫为例：二点委夜蛾 *Athetis lepigone*（Moschler）越冬虫态为老熟幼虫[27]；甜菜夜蛾[28]及黏虫 *Mythimna separata*（Walker）的越冬虫态为蛹[17]；双委夜蛾 *Athetis dissimilis*（Hampson）的越冬虫态为蛹或老熟幼虫[29]；苦豆夜蛾 *Apopestes spectrum*（Esper）的越冬虫态为成虫[30]。通常越冬虫态抗寒能力最强，而处在发育时期的各虫态抗寒能力均相对较弱[16]。本试验中同一低温条件下，蛹的存活能力均强于其他虫态，即蛹在所有虫态中抗寒能力最强，表明蛹最有可能是草地贪夜蛾的越冬虫态，这与张悦等[31]、罗举等[32]的研究结果基本一致。鉴于草地贪夜蛾无滞育特性[33]，其越冬北界受到冬季低温的严格限制。通过死亡率回归方程推测蛹在 0℃条件下 LT_{99} 为 40.27 d，在－5℃条件下 LT_{99} 为 26.82 d，表明其在冬季温度连续低于 0℃的时间超过 40 d，或连续低于－5℃的时间超过 26.82 d 的地区基本不能越冬。

值得一提的是，本试验是在室内恒定温度短时（2 h）低温条件下测得的结果，会与多种因素相互作用下自然环境中的抗寒能力有所差异；另外，回归方程推测蛹在 0℃和－5℃条件下的致死时间是否符合实际情况，还需要进行田间相应的试验和越冬调查以及观测蛹或老熟幼虫在长于 2 h 的持续低温条件下其个体或群体的存活时间，以便更准确了解草地贪夜蛾野外抗寒能力与越冬区划，从而为其预测预报和防控提供理论依据。

参考文献

[1] TODD E L, POOLE R W. Keys and illustrations for the armyworm moths of the noctuid genus *Spodoptera* Guenée from the Western Hemisphere [J]. Annals of the Entomological Society of America, 1980, 73(6): 722－738.

[2] MUR ÚA G, MOLINA-OCHOA J, COVIELLA C. Population dynamics of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and its parasitoids in northwestern Argentina [J]. Florida Entomologist, 2006, 89(2): 175－183.

[3] LUGINBILL P. The fall army worm [R]. USDA Technology Bulletin，1928，34：91.

[4] MONTEZANO D G，SPECHT A，SOSA-GÓMEZ D R，et al. Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera：Noctuidae) in the Americas [J]. African Entomology，2018，26(2)：286－301.

[5] WESTBROOK J K，NAGOSHI R N，MEAGHER R L，et al. Modeling seasonal migration of fall armyworm moths [J]. International Journal of Biometeorology，2015，60(2)：255－267.

[6] ROGER D，PHIL A，MELANIE B，et al. Fall armyworm：impacts and implications for Africa [J]. Outlooks on Pest Management，2017，28(5)：196－201.

[7] 刘刚. 全国农技中心通报我国及周边国家草地贪夜蛾发生为害情况[J]. 农药市场信息，2019(9)：59.

[8] 姜玉英，刘杰，谢茂昌，等. 2019 年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测[J]. 植物保护，2019，45(6)：10－19.

[9] 湖南省植保植检站. 2020 年草地贪夜蛾防控技术[J]. 湖南农业，2020(5)：14.

[10] 全国农技推广中心. 今春草地贪夜蛾发生动态[J]. 农药市场信息，2020(8)：63.

[11] 吴孔明，杨现明，赵胜园，等. 草地贪夜蛾防控手册[M]. 北京：中国农业科学技术出版社，2020.

[12] BALE J S. Insect cold hardiness：freezing and supercooling—an ecophysiological perspective [J]. Journal of Insect Physiology，1987，33(12)：899－908.

[13] CHEN Bing，KANG Le. Implication of pupal cold tolerance for the northern over－wintering range limit of the leafminer *Liriomyza sativae* (Diptera：Agromyzidae) in China [J]. Applied Entomology and Zoology，2005，40(3)：437－446.

[14] LEE R E. Insect cold-hardiness：to freeze or not to freeze [J]. Bioscience，1989，39：308－313.

[15] MME L S. The history of cold hardiness research in terrestrial arthropods [J]. Cryo Letters，2000，21(5)：289－296.

[16] 景晓红，康乐. 昆虫耐寒性研究[J]. 生态学报，2002(12)：2202－2207.

[17] BALE J S. Insect cold hardiness：A matter of life and death [J]. European Journal of Entomology，1996，93：369－382.

[18] NEDVED O. Chill tolerance in the tropical beetle *Stenotarsus rotundus* [J]. Cryo letters，2000，21(1)：25－30.

[19] 江幸福，罗礼智，李克斌，等. 甜菜夜蛾抗寒与越冬能力研究[J]. 生态学报，2001(10)：1575－1582.

[20] 谢殿杰，张蕾，程云霞，等. 不同饲养温度对草地贪夜蛾过冷却点和体液冰点的影响[J]. 植物保护，2020，46(2)：62－71.

[21] 张智，郑乔，张云慧，等. 草地贪夜蛾室内种群抗寒能力测定[J]. 植物保护，2019，45(6)：43－49.

[22] EGER J E，WITZ J A，HARTSTACK A W，et al. Survival of pupae of *Heliothis virescens* and *Heliothis zea* (Lepidoptera：Noctuidae) at low temperatures [J]. Canadian Entomologist，1982，114(4)：289－301.

[23] CASAGRANDE R A，HAYNES D L. A predictive model for cereal leaf beetle mortality from sub-freezing temperatures [J]. Environmental Entomology，1976，5(4)：761－769.

[24] WILLMER P G. Water relations of terrestrial arthropods [J]. Trends in Ecology & Evolution，1995，10(4)：173.

[25] NEDVED O，LAVY D，VERHOEF H A. Modelling time-temperature relationship in cold injury and effect of high temperature interruptions on survival in chill sensitive collembolan [J]. Functional Ecology，2002，12(5)：816－824.

[26] SALT R W. Relation between time of freezing and temperature in supercooled larvae *Cephus cinctus* Nort [J]. Revue Canadienne de Zoologie，1966，44(5)：947－952.

[27] 马继芳，王玉强，李立涛，等. 二点委夜蛾过冷却点测定及越冬虫态分析[J]. 河北农业科学，2011，15(9)：1－3.

[28] 韩兰芝，翟保平，张孝羲，等. 甜菜夜蛾的抗寒力研究[J]. 植物保护学报，2005，32(2)：169－173.

[29] 郭婷婷，于志浩，门兴元，等. 双委夜蛾不同虫态耐寒性及体内生化物质含量变化[J]. 昆虫学报，2016，59(12)：1291－1297.

[30] 章士美，章志英. 夜蛾科昆虫的越冬虫态及其场所[J]. 江西农业大学学报，1986(S3)：38－41.

[31] 张悦，邓晓悦，张雪艳，等. 取食不同食物的草地贪夜蛾的过冷却点和结冰点[J]. 植物保护，2020，46(2)：72－77.

[32] 罗举，俞俊杰，周明好，等. 草地贪夜蛾过冷却点和结冰点的测定[J]. 浙江农业科学，2020，61(3)：428－432.

[33] 齐国君，黄德超，王磊，等. 广东省草地贪夜蛾冬季发生特征及周年繁殖区域研究[J]. 环境昆虫学报，2020，42(3)：573－582.

（责任编辑：杨明丽）

（上接 175 页）

[22] RIDDICK E W，WU Zhixin. Potential long-term storage of the predatory mite *Phytoseiulus persimilis* [J]. BioControl，2010，55(5)：639-644.

[23] JENSEN K，KRISTENSEN T N，OVERGAARD J，et al. Cold acclimation reduces predation rate and reproduction but increases cold- and starvation tolerance in the predatory mite *Gaeolaelaps aculeifer* Canestrini [J]. Biological Control，2017，114：150－157.

[24] GHAZY N A，SUZUKI T，AMANO H，et al. Air temperature optimisation for humidity-controlled cold storage of the predatory mites *Neoseiulus californicus* and *Phytoseiulus persimilis* (Acari：Phytoseiidae) [J]. Pest Management Science，2014，70(3)：483－487.

（责任编辑：杨明丽）