

温度胁迫对舞毒蛾营养成分和总抗氧化力的影响*

石中斌** 曾健勇** 国嘉兴 石疆红 张国财*** 张 杰***

(东北林业大学, 林学院, 哈尔滨 150040)

摘 要 【目的】为了探究温度胁迫对舞毒蛾 *Lymantria dispar* 幼虫营养成分和总抗氧化力的影响。【方法】测定了不同温度 (15、20、25、30、35、40) 下处理 3 h 的舞毒蛾幼虫可溶性蛋白、碳水化合物、海藻糖、脂质含量以及总抗氧化力, 以饲养温度 25 的舞毒蛾幼虫为对照。【结果】舞毒蛾幼虫在不同温度下可溶性蛋白含量变化无显著差异; 碳水化合物与海藻糖含量均随着温度的升高, 呈现逐渐下降趋势; 脂质含量无论处理温度低于还是高于对照温度均会增加; 而舞毒蛾幼虫总抗氧化力在经不同温度处理后均显著降低。【结论】温度变化可以显著影响舞毒蛾幼虫碳水化合物、海藻糖、脂质 3 种营养成分含量以及舞毒蛾幼虫的总抗氧化力的能力, 而对舞毒蛾幼虫可溶性蛋白含量无显著影响。本研究对舞毒蛾幼虫的耐热性及其在不同温度下的防治具有指导意义。

关键词 舞毒蛾; 温度胁迫; 营养成分; 总抗氧化力; 脂质含量

Effects of temperature stress on the nutrient content and total antioxidant capacity of the gypsy moth

SHI Zhong-Bin** ZENG Jian-Yong** GUO Jia-Xing SHI Jiang-Hong
ZHANG Guo-Cai*** ZHANG Jie***

(Northeast Forestry University, School of forestry, Harbin 150040, China)

Abstract [Objectives] To investigate the effects of temperature stress on the nutrient composition and total antioxidant capacity of gypsy moth (*Lymantria dispar*) larvae. [Methods] The soluble protein, carbohydrate and trehalose content of gypsy moth larvae kept at different temperatures (15, 20, 25, 30, 35, 40) for 3 h were measured. Lipid content and total antioxidant capacity were compared with those of gypsy moth larvae kept at a temperature of 25 . [Results] Temperature had no significant effect on the soluble protein content of gypsy moth larvae but their carbohydrate and trehalose content tended to decrease with temperature. Lipid content increased irrespective of whether the ambient temperature was lower, or higher, than the control. The total antioxidant activity of larvae was significantly affected by temperature. [Conclusion] Temperature can significantly affect the carbohydrate, trehalose and lipid content of gypsy moth larvae, and their total antioxidant activity, but has no significant effect on their soluble protein content. These results contribute to understanding the heat resistance of gypsy moth larvae and the control of this pest at different temperatures.

Key words temperature stress; gypsy moth; nutrients; total antioxidant activity; lipid content

舞毒蛾 *Lymantria dispar* 属鳞翅目毒蛾科, 主要分布在东北、西北、华北、华南、华中等地区, 是一种危害树木叶片的杂食性害虫, 该虫在国内区, 具有分布广泛, 危害严重的特点 (许娜,

*资助项目 Supported projects: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2572017AA18); 中央财政林业科技推广示范资金项目 (JLT[2016]13); 哈尔滨市科技创新人才项目 (2017RALXJ010)

**共同第一作者 Co-first authors, E-mail: 953167664@qq.com; zengjianyong123@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: zhang640308@126.com; zj88530878@sohu.com

收稿日期 Received: 2019-03-08; 接受日期 Accepted: 2019-04-12

2009)。在自然环境条件下,温度是影响昆虫生存的重要因素之一,高温或低温都不利于昆虫的生长发育,甚至造成死亡(李品武等,2016)。褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål) 的长翅型雄成虫在 39℃ 下处理 48 h 后全部死亡,苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* 的幼虫在 52℃ 下处理 2 min,死亡率为 100% (Wang et al., 2004),茶小绿叶蝉 *Empoasca pirusuga* Matumura 成虫在 -10℃ 条件下处理,1 h 内几乎全部死亡(乔利等,2015)。温度对昆虫的生命活动有很大影响(陈菊红等,2018)。当受到不良温度时,其体内的能源物质糖类、蛋白质和脂肪会发生积累和相互转化,以抵抗不良环境的影响(张洁等,2013)。同时,昆虫在受到温度胁迫时,会产生活性氧,对蛋白质、脂类、DNA 造成氧化损伤,最终导致细胞死亡。昆虫在长期进化中形成了一种抗氧化系统,据报道,温度变化可以显著影响舞毒蛾卵的孵化率及幼虫的存活率等(杨丽娜,2018),以对抗温度胁迫下产生的活性氧的氧化胁迫。常用总抗氧化能力来衡量生物体对胁迫环境的应答能力(付雪莲,2017)。

有关环境因子对舞毒蛾幼虫影响的报道称,不同光照条件对舞毒蛾的生长发育有显著影响:在 100%光照下,舞毒蛾幼虫孵化率、存活率、化蛹率、羽化率都高于在 50%、25% 的光照条件的处理组,且随着光照强度的增加而上升;在不同湿度条件下,随着湿度的增加,舞毒蛾卵孵化率逐渐增加,湿度为 90% 达到最大,且高湿环境利于舞毒蛾幼虫的生长;在研究 Pb 胁迫对舞毒蛾幼虫的影响中发现,舞毒蛾幼虫和蛹的发育时间会在 Pb 胁迫下延长,而成虫的寿命会缩短,死亡率会随着 Pb 浓度的增加而增加(杨丽娜,2018)。中、高质量分数的 Cu、Cd 胁迫会使舞毒蛾幼虫体内的保护酶 SOD、POD、ACP、AKP 和 GSTs 活性受到不同程度的影响,对排毒代谢有显著的干扰作用(张凯等,2016)。而温度对舞毒蛾幼虫营养成分和抗氧化力影响的研究尚未见报道。本研究采用不同温度处理舞毒蛾幼虫,研究不同温度胁迫下对舞毒蛾幼虫的总抗氧化力,测定其可溶性蛋白、碳水化合物、海藻糖、

脂质含量以及总抗氧化力的变化,旨在为舞毒蛾在不同温度下的防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

舞毒蛾卵购自中国林业科学研究院,放置 4℃ 冰箱保存,在室内用智能人工气候培养箱 (PRX-600C-CO₂, 宁波市奉化区江口伯乐实验仪器厂) 饲养,温度为 (25±1)℃,光照周期 L:D=14:10,相对湿度 75%±5%,选取 4 龄大小一致的健康幼虫作为试验材料。

1.2 试验方法

1.2.1 温度对舞毒蛾幼虫的胁迫处理 将舞毒蛾 4 龄幼虫置于 50 mL 长试管中,用纱布塞住试管口。将封好的试管置于 15、20、25、30、35、40℃ 恒温水浴锅 (HH-SY11-Ni, 北京市长风仪器仪表公司) 中,使得纱布与液面平齐或低于液面处,以保证幼虫始终处于液面以下。3 h 后记录舞毒蛾幼虫存活情况,统计存活率。存活标准是用毛笔尖轻触虫体,虫体无反应即视为死亡。统计后将活的舞毒蛾幼虫立即用液氮冷冻,放置在 -80℃ 超低温冰箱备用。每处理选取大小一致的舞毒蛾幼虫 30 头,水平重复 3 次。

1.2.2 舞毒蛾幼虫营养成分的测定 将 -80℃ 超低温冰箱中保存的虫体取出,于研钵中加液氮进行研磨成粉末状,称量 100 mg 粉末,并加入 0.15 mol/L NaCl 溶液 0.9 mL,制成 10% 的组织匀浆,漩涡震荡 2 min,使用高速冷冻离心机 (BR 4i, 法国捷安公司) 于 4℃、2 500 r/min,离心 10 min。抽取上清液作为样本分析(张方明等,2019)。蛋白质含量参照 Bradford (1976) 的方法,采用考马斯亮蓝 G-250 染色法进行测定。碳水化合物的测定参考 Roe (1955) 的方法稍加修改,海藻糖含量的测定采用蒽酮法(雷芳等,2006)。脂质含量的测定参照 Simek 等 (1998) 的方法。

1.2.3 舞毒蛾幼虫总抗氧化力的测定 总抗氧化力的测定利用机体中的抗氧化物质能使 Fe³⁺ 还原成 Fe²⁺,而后者可与菲啉类物质形成稳固的

络合物的原理,参照试剂盒说明书进行测定,试剂盒购于南京建成生物工程研究所。

1.3 数据分析

采用 Excel 及 SPSS 21.0 统计软件进行数据处理,采用 One-Way ANOVA : LSD 分析不同温度条件下舞毒蛾幼虫营养成分和总抗氧化能力的差异显著性 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同温度对舞毒蛾幼虫存活率的影响

在温度 15、20、25、30、35、40 条件下处理舞毒蛾 4 龄幼虫,3 h 后幼虫存活情况见表 1。由表 1 可知:在 15-30 下处理 3 h 舞毒蛾幼虫全部存活,而在 40 下处理 3 h 舞毒蛾幼虫死亡率为 30%。

表 1 不同温度处理的舞毒蛾幼虫存活情况
Table 1 Survival rate of gypsy moth larvae at different temperatures

温度 () Temperature	总数 (头) Total number	死亡数 (头) Number of deaths	死亡率 (%) Mortality rate
15	30	0	0±0.00
20	30	0	0±0.00
25	30	0	0±0.00
30	30	0	0±0.00
35	30	0	0±0.00
40	30	9	0.3±0.10

表中死亡率为平均值±标准误。
The mortality rate in the table is the mean ±SE.

2.2 不同温度对舞毒蛾幼虫营养成分含量的影响

2.2.1 不同温度对舞毒蛾幼虫可溶性蛋白的影响 不同温度处理 3 h 后舞毒蛾幼虫虫体可溶性蛋白含量见图 1。由图 1 可知:不同温度处理后舞毒蛾幼虫可溶性蛋白含量在 1.10-1.22 mg/g 之间可溶性蛋白含量随着温度的升高而上升,但温度胁迫对舞毒蛾可溶性蛋白含量的影响差异不显著。

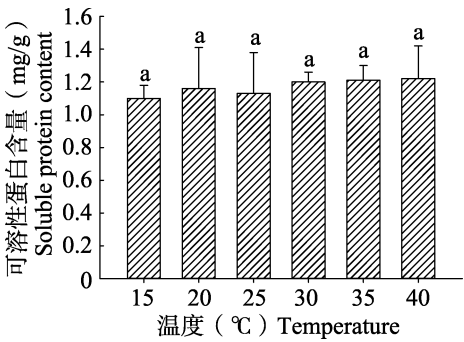


图 1 不同温度处理的舞毒蛾幼虫可溶性蛋白含量
Fig.1 Soluble protein content of gypsy moth larvae treated at different temperatures

图中数值为平均值±标准误,柱上标有不同字母表示不同温度处理间差异显著 ($P<0.05$)。下图同。
Each bar represents the means ± SE. Histograms with different letters indicate significant differences between treatments at different temperatures ($P<0.05$). The same below.

2.2.2 不同温度对舞毒蛾幼虫碳水化合物的影响 不同温度处理的舞毒蛾幼虫碳水化合物含量见图 2。由图 2 可知:舞毒蛾幼虫碳水化合物含量在不同温度处理后存在显著性差异,且随着温度的升高,幼虫体内的碳水化合物的含量不断下降。当温度低于对照温度,在 15 条件下,舞毒蛾幼虫碳水化合物为 278.49 mg/g,相比增加了 11.19%,而在 20 条件下,舞毒蛾幼虫碳水化合物含量与对照组无显著性差异;当温度高于对照组温度,即在 30、35、40 条件下,舞毒蛾幼虫碳水化合物含量与对照组相比,依次降低了 12.29%, 28.36%, 43.16%。表明在研究温度范围内,舞毒蛾幼虫碳水化合物含量,在低

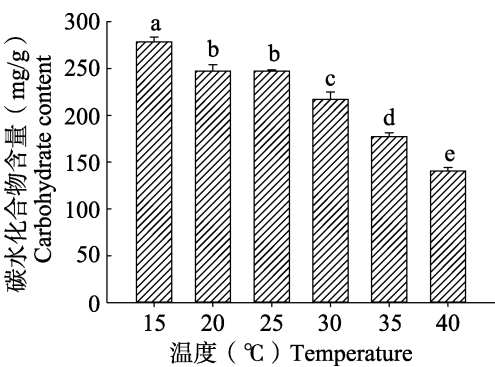


图 2 不同温度处理的舞毒蛾幼虫碳水化合物含量
Fig. 2 Carbohydrate content of gypsy moth larvae treated at different temperatures

于对照温度,随着温度的降低,不断积累;而在高于对照温度,随着温度的升高,不断消耗碳水化合物来应对环境变化。

2.2.3 不同温度对舞毒蛾幼虫海藻糖的影响

不同温度处理的舞毒蛾幼虫体内的海藻糖含量见图 3。由图 3 可知:舞毒蛾幼虫海藻糖含量在不同温度处理后呈现显著性差异,且随着温度的升高,呈现逐渐下降趋势,当温度低于对照温度,在 15℃ 条件下,舞毒蛾幼虫体内的海藻糖含量最高,为 10.11 mg/g,与对照组相比增加了 26.24%;20℃ 条件下处理与对照组相比,差异不显著;当温度高于对照组温度,30℃ 与 35℃ 处理的舞毒蛾幼虫海藻糖含量分别降低了 20.60%,23.19%;在 40℃ 条件下,舞毒蛾幼虫体内的海藻糖含量最少,为 3.83 mg/g,与对照组相比降低了 48.62%。表明在研究温度范围内,舞毒蛾幼虫海藻糖含量会随着温度的降低,不断增加海藻糖含量的积累。

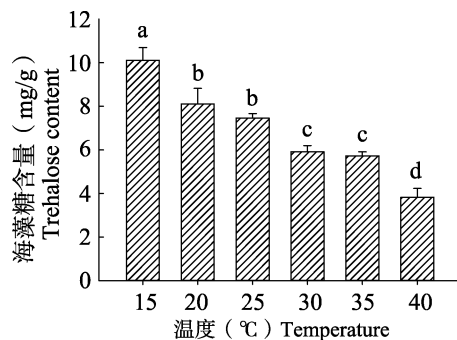


图 3 不同温度处理的舞毒蛾幼虫海藻糖含量
Fig. 3 The trehalose content of the gypsy moth larvae treated at different temperatures

2.2.4 不同温度对舞毒蛾幼虫脂质的影响 不同温度对舞毒蛾幼虫体内的脂质含量见图 4。由图 4 可知:舞毒蛾幼虫脂质含量在不同温度处理条件下存在显著性差异。在 25℃ 饲养温度条件下,舞毒蛾幼虫体内的脂质含量最低。当温度低于对照组温度,其脂质含量随着温度的降低而逐渐升高。当温度高于对照组温度,随着温度的升高,其脂质含量逐渐升高,可见舞毒蛾幼虫的脂质含量对抵抗不良温度有重要作用。

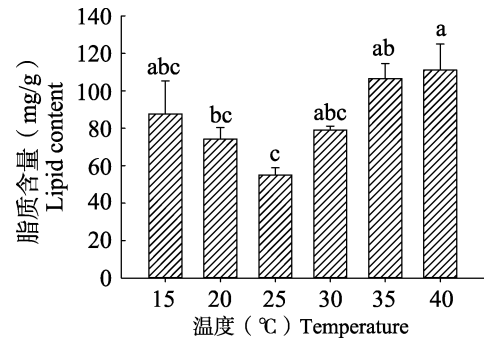


图 4 不同温度处理的舞毒蛾幼虫脂质含量
Fig. 4 Lipid content of gypsy moth larvae treated at different temperatures

2.3 不同温度对总抗氧化力的影响

温度胁迫对其总抗氧化力影响见图 5。由图 5 可知:舞毒蛾幼虫的总抗氧化力在温度胁迫后呈现显著性差异,当低于对照温度时,随着温度的升高,总抗氧化力显著升高,在 25℃ 下达到最高值:10.28 U/mg protein,高于对照温度时,总抗氧化力呈显著下降趋势。由此可知,温度胁迫会显著降低舞毒蛾幼虫总抗氧化力。

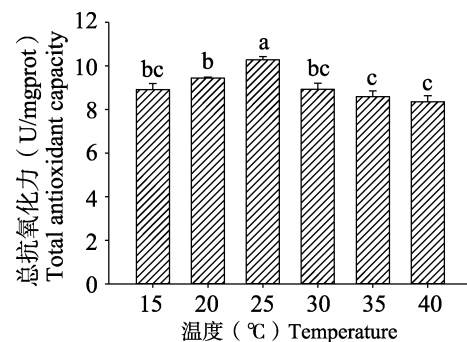


图 5 不同温度处理的舞毒蛾幼虫总抗氧化力
Fig. 5 Total antioxidant capacity of gypsy moth larvae treated at different temperatures

3 结论与讨论

碳水化合物是昆虫重要的能源物质,同时是昆虫越冬期重要的抗寒物质(陈永杰等,2005;陈龙等,2018),舞毒蛾幼虫碳水化合物含量在 15℃ 条件下最高,随着温度的升高而逐渐降低,除 20℃ 条件下,均与对照组呈现显著差异,表明舞毒蛾幼虫的碳水化合物与抵御不良温度密切相关,在高温下,主要消耗大量的碳水化合物

来应对高温环境;海藻糖在低温胁迫下可作为一种抗冻剂,增强昆虫的抗寒性(刘超,2016)。舞毒蛾幼虫海藻糖含量在低于对照温度时随着温度的降低含量上升,这与阿松扁叶蜂 *Acantholyda posticalis* Matsumura 滞育幼虫在越冬期间的碳水化合物和海藻糖随着温度的降低含量升高(梁中贵等,2005),麦红吸浆虫 *Sitodiplosis mosellana* (仵均祥等,2004)、赤松毛虫 *Dendrolimus spectabilis* (韩瑞东等,2004)同样在幼虫越冬期间的碳水化合物和海藻糖含量的变化趋势类似,表明舞毒蛾幼虫在较低温度范围内,通过积累碳水化合物和海藻糖来作为抗寒物质增强抗寒能力,而在高于对照温度时,海藻糖含量随着温度的升高呈逐渐下降趋势,表明舞毒蛾幼虫为了提供足够的能量来抵御高温胁迫,持续地消耗海藻糖(蹇蕾阳等,2017);脂质随温度降低而含量增加,说明舞毒蛾幼虫在较低的温度下积聚更多的脂质,当温度降低时可将其转化为其他抗寒物质以具有更高的抗寒能力(梁利娜,2014),而高于对照温度时,脂质含量与碳水化合物及海藻糖含量相反,呈上升趋势,这表明舞毒蛾幼虫在高于对照温度时脂质可能是主要储能物质(程媛等,2016),推测可能是由体内的糖转化而来(朱锡勇,2016);可溶性蛋白含量随温度升高逐渐增加,表明温度的升高对可溶性蛋白有一定的促进作用(郭苏帆,2018)。

总抗氧化力在 15-25 范围内呈上升趋势,在 25 达到最高,而 25-40 呈下降趋势,与黄粉虫 *Tenebrio molitor* (刘缠民,2006)幼虫在不适的温度下其保护酶的活性随着温度而变化的结果类似。表明在该温度范围内无论低于对照温度还是高于对照温度都抑制了舞毒蛾幼虫的抗氧化能力,从而对舞毒蛾幼虫造成影响。而可溶性蛋白含量和总抗氧化力在 30-40 的变化趋势,与异迟眼蕈蚊 *Bradysia difformis* Frey (郭苏帆,2018)在过高温(37)下处理(4 h、6 h)保护酶活均下降,蛋白含量上升的结果相吻合。表明超过一定温度可能会对舞毒蛾

幼虫造成一定程度的损伤,从而致使其总抗氧化力活性下降。

参考文献 (References)

- Bradford MM, 1976. A rapid method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(S1/2): 248-254.
- Chen JH, Cui J, Zhang JP, Bi R, Gao Y, Xu W, Shi SS, 2018. Effects of temperature on the activities of key enzymes related to respiratory metabolism in *Riptortus pedestris* (Hemiptera Coreidae) adults. *Acta Entomologica Sinica*, 61(9): 1003-1009. [陈菊红, 崔娟, 张金平, 毕锐, 高宇, 徐伟, 史树森, 2018. 温度胁迫对点蜂缘蝽成虫呼吸代谢关键酶活性的影响. *昆虫学报*, 61(9): 1003-1009.]
- Chen L, Zhou XR, Gao LJ, Tan Y, Pang BP, 2018. Change of carbohydrate, protein and lipid contents in *Galeruca daurica* (Coleoptera: Chrysomelidae) adults during overwintering. *Acta Entomologica Sinica*, 61(7): 808-814. [陈龙, 周晓榕, 高利军, 谭瑶, 庞宝平, 2018. 沙葱萤叶甲成虫越冬期间糖类、蛋白及脂肪含量的变化. *昆虫学报*, 61(7): 808-814.]
- Chen YJ, Sun XL, Zhang WG, Guo YY, Mou ZG, Guo GZ, 2005. Relationship between variation of protein, amino acid, low-molecular carbohydrate in over-wintering *Diaphania pyralis* Walker larvae and cold-hardiness. *Science of Sericulture*, 31(2): 111-116. [陈永杰, 孙绪良, 张卫光, 郭彦彦, 牟志刚, 郭光智, 2005. 桑螟越冬幼虫体内蛋白质、氨基酸、碳水化合物的变化与抗寒性的关系. *蚕业科学*, 31(2): 111-116.]
- Cheng Y, Han LL, Zhao KJ, Xu XZ, Li DP, Zhang XX, 2016. Effect of host plants and temperature on the accumulation of carbohydrates and lipid in the soybean pod borer, *Leguminivora glycinivorella* (Mats.) Obraztsov. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(4): 716-722. [程媛, 韩岚岚, 赵奎军, 徐馨竹, 李东坡, 张旭霞, 2016. 寄主植物与温度对大豆食心虫滞育期间糖类和脂质含量的影响. *应用昆虫学报*, 53(4): 716-722.]
- Fu XL, 2017. Study on biological and antioxidant systems to temperature stress of *Darna trima* (Moore). Doctoral dissertation. Sichuan: Sichuan Agricultural University. [付雪莲, 2017. 茶淡黄刺蛾生物学特性及在温度胁迫下抗氧化反应研究. 博士学位论文. 四川: 四川农业大学.]
- Guo SF, 2018. Effects of high temperature on the growth, development and physiological metabolism of *Bradysia odoriphaga* Yang et Zhang and *Bradysia difformis* Frey. Doctoral dissertation. Gansu: Gansu Agricultural University. [郭苏帆, 2018. 高温对韭菜迟眼蕈蚊和异迟眼蕈蚊生长发育及生理代谢的影响. 博士学位论文. 甘肃: 甘肃农业大学.]
- Han RD, Sun XG, Xun YY, Zhang WG, 2004. The biochemical mechanism of cold-hardiness in overwintering larva of *Dendrolimus spectabilis* Butler (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Acta Ecologica Sinica*, 25(6): 1352-1356.
- Lei F, Zhang GF, Wang HF, Ma J, 2006. Effects of plant species

- switching on contents and dynamics of trehalose and trehalase activity of *Bemisia tabaci* b-biotype and *Trialeurodes vaporariorum*. *Scientia Agricultura Sinica*, 39(7): 1387–1394. [雷芳, 张桂芬, 万方浩, 马骏, 2006. 寄主转换对 B 型烟粉虱和温室粉虱海藻糖含量和海藻糖酶活性的影响. 中国农业科学, 39(7): 1387–1394.]
- Li PW, Fu XL, Chen SC, Hu X, Wang XQ, Peng P, 2016. Effects of temperature stress on four protective enzymes and overall antioxidant capacity in *Darna trima* (Moore). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(4): 809–816. [李品武, 付雪莲, 陈世春, 胡翔, 王晓庆, 彭萍, 2016. 温度胁迫对茶淡黄刺蛾四种保护酶活力和总抗氧化力的影响. 应用昆虫学报, 53(4): 809–816.]
- Liang LN, 2014. The effect of temperature on reproduction and diapause of *Grapholitha molesta* (Busck) (Lepidoptera: Tortricidae). Doctoral dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [梁利娜, 2014. 温度对梨小食心虫生殖及滞育的影响. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Liang ZG, Zhang WG, Liu XH, Sun XL, 2005. Cold-hardiness analysis of over-wintering larva of *Acantholyda posticalis*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 42(6): 695–699. [梁中贵, 张卫光, 刘学辉, 孟庆英, 孙绪良, 2005. 松阿扁叶蜂越冬幼虫体内抗寒物质分析. 应用昆虫学报, 42(6): 695–699.]
- Liu C, 2016. The impact of short-term high temperature on the Asian corn borer (*Ostrinia furnacalis*). Doctoral dissertation. Shenyang: Shenyang Agricultural University. [刘超, 2016. 短时高温对亚洲玉米螟的影响. 博士学位论文. 沈阳: 沈阳农业大学.]
- Liu CM, 2006. Effects of temperatures on survival rate and protection enzymes of *Tenebrio molitor* larva. *Journal of Northwest Forestry University*, 21(1): 107–109. [刘缙民, 2006. 不同温度对黄粉虫幼虫存活率和保护酶系的影响. 西北林学院学报, 21(1): 107–109.]
- Qian LY, Kou XY, Dong ZH, Chang YL, Zhou ZJ, 2017. Effects of different temperature regimes on the expression of the trehalose-6-phosphate synthase gene and haemolymph sugar content in *Gampsocleis gratiosa*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(1): 56–67. [蒋蕾阳, 寇晓艳, 董泽华, 常岩林, 周志军, 2017. 不同温度驯化策略诱导优雅蝓蠹海藻糖合成酶基因表达及血淋巴糖类含量变化. 应用昆虫学报, 54(1): 56–67.]
- Qiao L, Qin DZ, Lu ZC, Liu XC, Lv LZ, Wu JX, 2015. Effect of temperature on survival rate and protective enzyme system of *Empoasca onukii* Matsuda. *Journal of Plant Protection*, 42(2): 223–228. [乔利, 秦道正, 卢兆成, 刘祥臣, 吕立哲, 仵均祥, 2015. 温度对茶小绿叶蝉成虫存活率及保护酶系的影响. 植物保护学报, 42(2): 223–228.]
- Roe JH, 1955. The determination of sugar in blood and spinal fluid with anthrone reagent. *The Journal of Biological Chemistry*, 212(1): 335.
- Simek P, Sula J, Kostal V, 1998. Physiology of drought tolerance and cold hardiness of the Mediterranean tiger moth *Cymbalophora pudica* during summer diapause. *Journal of Insect Physiology*, 44(2): 165–173.
- Sun XG, Han RD, Xu YY, Zhang WG, 2003. The biochemical mechanism of cold-hardiness in overwintering larva of *Dendrolimus spectabilis* Butler (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Acta Ecologica Sinica*, 34(3): 315–320. [孙绪良, 韩瑞东, 许永玉, 张卫光, 2003. 赤松毛虫越冬幼虫生化物质变化与抗寒性的关系. 生态学报, 34(3): 315–320.]
- Wang S, Yin X, Tang J, Hansen JD, 2004. Thermal resistance of different life stages of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Stored Products Research*, 40(5): 565–574.
- Wu JX, Yuan F, Su L, 2004. Change of carbohydrate contents in larvae of the wheat midge *Stodiplosis mosellana* (Gehin) during mature and diapause stage. *Acta Entomologica Sinica*, 47(2): 178–183. [仵均祥, 袁锋, 苏丽, 2004. 麦红吸浆虫幼虫滞育期间糖类物质变化. 昆虫学报, 47(2): 178–183.]
- Xu N, Sun BL, 2009. Occurrence and prevention of *Lymantria dispar*. *Modern Agricultural Science and Technology*, (17): 172–173. [许娜, 孙宝丽, 2009. 舞毒蛾的发生及防治. 现代农业科技, (17): 172–173.]
- Yang LN, 2018. Response mechanism of *Lymantria dispar* to environmental factors and Pb stress. Doctoral dissertation. Haerbin: Northeast Forestry University. [杨丽娜, 2018. 舞毒蛾对环境因子及 Pb 胁迫的响应机制. 博士学位论文. 哈尔滨: 东北林业大学.]
- Zhang FM, Zeng JY, Wu Y, Zhang TT, Zhang GC, 2019. Response mechanism of Gypsy moth larvae to stress of Avi-Buteillin complex. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, (1): 106–110. [张方明, 曾健勇, 吴玥, 张婷婷, 张国财, 2019. 舞毒蛾幼虫对阿维·杀铃脲复合剂胁迫的响应机制. 黑龙江畜牧兽医, (1): 106–110.]
- Zhang J, Qin XW, Zheng X, Dong JH, Zhang JK, 2013. Effects of SRBSDV-infected rice the accumulation of energy substances of the virus vector, *Sogatella furcifera* (Horváth). *Journal of Environmental Entomology*, 35(5): 597–602. [张洁, 秦小娃, 郑雪, 董家红, 张仲凯, 2013. 饲食感染 SRBSDV 的水稻植株对传毒介体白背飞虱相关能源物质含量的影响. 环境昆虫学报, 35(5): 597–602.]
- Zhang K, Zhou YT, Wang XW, Jiang H, Wang JB, Zhang WY, Yang SC, 2016. Effects of copper and cadmium stress on the activities of detoxifying metabolic enzymes in *Lymantria dispar*. *Journal of Beijing Forestry University*, 38(2): 61–67. [张凯, 周艳涛, 王哲玮, 姜虹, 王嘉冰, 张文一, 严善春, 2016. 铜、镉胁迫对舞毒蛾排毒代谢酶的影响. 北京林业大学学报, 38(2): 61–67.]
- Zhu XY, 2016. Comparison of wing morphological traits between different generations in *Sericanus montelus* Gray and its metabolite in non-diapusing and diapausing pupae. Doctoral dissertation. Changsha: Central South University of Forestry and Technology. [朱锡勇, 2016. 丝带凤蝶季节多型成虫翅的形态及蛹体代谢物质的比较. 博士学位论文. 长沙: 中南林业科技大学.]