低温贮存对白星花金龟3龄幼虫存活、能量分配及抗氧化酶活性的影响

李彦萍　黄　勋　马德英*

（新疆农业大学农学院，农林有害生物监测与安全防控重点实验室，乌鲁木齐 830052）

摘要：为解决白星花金龟 *Protaetia brevitarsis* 幼虫生命周期与生产需求的时间错配问题，以其3龄幼虫为研究对象，测定不同贮存温度（4、8、12、25 ℃）与不同贮存时间（10、20、30 d）下该试虫的存活率、体内能源物质（总蛋白、粗脂肪、总糖、总氨基酸）含量、抗寒代谢物海藻糖含量及抗氧化酶系统超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）、过氧化氢酶（catalase，CAT）、过氧化物酶（peroxidase，POD）的活性变化。结果表明：12 ℃为白星花金龟3龄幼虫最适贮存温度，12 ℃贮存30 d后3龄幼虫的存活率仍保持在88.33%，而4 ℃和8 ℃贮存30 d后3龄幼虫的存活率显著降低，分别为24.17%和51.67%。12 ℃贮存20 d时白星花金龟3龄幼虫体内海藻糖、总糖与总蛋白含量均达到峰值，SOD活性也在同期显著升高；而在4 ℃和8 ℃低温胁迫下，多数能量物质代谢受到抑制，抗氧化酶系统协调性丧失，SOD、POD与CAT活性呈紊乱响应，机体清除自由基能力下降。表明在12 ℃下白星花金龟3龄幼虫通过积极积累抗寒物质并维持抗氧化系统稳定来适应低温环境，而更低温度导致的死亡与能量代谢失衡及保护酶系统功能破坏密切相关。

关键词：白星花金龟；3龄幼虫；低温贮存；贮存温度；贮存时间；代谢调控；抗氧化酶

Effect of cold storage on survival, energy metabolism, and antioxidant enzyme activities in third-instar larvae of white-spotted flower chafer *Protaetia brevitarsis*

Li Yanping　Huang Xun　Ma Deying*

（Key Laboratory of Monitoring and Safety Control of Harmful Organisms in Agriculture and Forestry, College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China）

Abstract: To resolve the temporal mismatch between the larval life cycle of white-spotted flower chafer *Protaetia brevitarsis* and industrial production needs, this study investigated how different cold-storage temperatures (4, 8, 12, and 25 ℃) and durations (10, 20, and 30 d) affect the survival rate of third-instar larvae. Measurements included survival rate, energy reserves (total protein, crude fat, total sugar, and total amino acid), the cryoprotectant trehalose, and the activities of major antioxidant enzymes, including superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and peroxidase (POD). The results showed that 12 ℃ was the optimal storage temperature, at which larval survival remained as high as 88.33% after 30 days. In contrast, storage at 4 ℃ and 8 ℃ significantly reduced survival, declining to 24.17% and 51.67%, respectively. After 20 days at 12 ℃, larvae exhibited peak levels of trehalose, total sugar, and total protein, accompanied by a significant elevation in SOD activity. However, under greater cold stress (4 ℃ and 8 ℃), the metabolism of most energy substances was inhibited, and the coordination of the antioxidant enzyme system was disrupted. The disordered responses of SOD, POD, and CAT resulted in weak-

基金项目：新疆维吾尔自治区重点研发专项（2022B02046），新疆农业大学校级大学生创新训练计划项目（dxscx2024291）

* 通信作者（Author for correspondence），E-mail：mdyxnd@163.com

收稿日期：2025-05-13

ened free radical scavenging capacity. These findings indicate that third-instar larvae of *P. brevitarsis* adapt to mild low-temperature storage (12 ℃) by actively accumulating cryoprotectants and maintaining antioxidant homeostasis, whereas mortality at lower temperatures is closely associated with energy-metabolism imbalance and impairment of protective enzyme function.

Key words: *Protaetia brevitarsis*; third instar larva; cold storage; storage temperature; storage duration; metabolic regulation; antioxidant enzyme

白星花金龟 *Protaetia brevitarsis* 属鞘翅目花金龟科，广泛分布于东亚地区（马文珍，1995；张广杰等，2020）。白星花金龟幼虫凭借强大的口器和能高效降解木质纤维素的肠道系统，可将农作物秸秆、菌渣等有机废弃物转化为高价值的蛋白饲料与有机肥料，实现“过腹转化”的生态循环（张广杰等，2019；徐安东，2024；张海霞等，2025）；此外，幼虫本身还是传统中药材（王晶梅，2020；陈楠，2024）及抗菌肽等活性物质的重要来源（孙敬，2019；秦铭潞，2020）。因此，在我国大力推行农业废弃物资源化的背景下，实现白星花金龟幼虫转化有机废弃物的产业化对缓解环境污染、促进资源高效利用具有重要意义。然而，白星花金龟的越冬休眠特性导致种群扩繁存在显著季节性波动，加之规模化饲养所需的高昂环境调控成本，严重制约了幼虫的连续生产能力（杨柳等，2019），使得其废弃物转化效能难以全年稳定发挥，阻碍了产业的可持续发展。针对这一挑战，开发基于低温贮存技术的种群调控方案，突破其生长发育周期限制，是实现资源昆虫稳定供应、保障产业化连续运行的关键途径。

低温贮存技术通过抑制昆虫代谢活性实现种质资源的保存与运输优化，近年来在黄粉虫 *Tenebrio molitor*、黑水虻 *Hermetia illucens* 等资源昆虫的规模化应用中取得显著进展（马雅莉等，2019；蔡文滔，2024）。一方面，低温暴露会诱导抗寒保护物质甘油、海藻糖的合成以维持细胞膜的稳定性。例如，在低温下草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 幼虫体内海藻糖、甘油等耐寒物质含量显著升高（任华维，2024）；在低温胁迫前期松墨天牛 *Monochamus alternatus* 幼虫体内脂肪、蛋白含量均上升（刘佳奇等，2024）。另一方面，长期低温胁迫可能导致能量物质过度消耗，进而引发发育迟滞或存活率下降。例如，低温贮存15 d后稻虱缨小蜂 *Anagrus nilaparvatae* 成虫存活率低于50%（张居念等，2023）；随着温度的降低和暴露时间的延长异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 成虫存活率显著降低（李贝等，2024）。此外，在低温适应过程中昆虫通过激活体内超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）、过氧化氢酶（catalase，CAT）、过氧化物酶（peroxidase，POD）等抗氧化酶来清除体内积累的过量活性氧，以保护细胞免受氧化损伤（胡文琴等，2004）。例如，在低温环境下印度谷螟 *Plodia interpunctella* 体内POD、CAT和SOD活性显著增强，从而提升了其氧化应激抗性（Shi et al.，2025）。但昆虫的自我调节能力存在阈值，当低温强度或持续时间超过其耐受阈值时，保护酶活性就会下降，机体防御功能衰退乃至崩溃。例如，低温处理后西藏飞蝗 *Locusta migratoria tibetensis* 成虫体内POD、SOD和CAT活性随温度的降低而下降（李庆等，2012）。关于低温对白星花金龟幼虫生长发育的影响也有一些报道。例如，在5~15 ℃温度范围内白星花金龟幼虫具有生存能力（王倩，2019）；低温是白星花金龟幼虫化蛹的关键诱导因素（Wightman，1974；Jang et al.，2018）；白星花金龟的转录组全序列已被测序（Li et al.，2019）及其脂肪酸代谢基因功能被鉴定（陈鑫，2024）。然而关于白星花金龟的低温适应机制，尤其是作为资源化利用核心载体的3龄幼虫的报道仍是空白。

本研究以白星花金龟3龄幼虫为对象，测定不同贮存温度（4、8、12、25 ℃）与不同贮存时间（10、20、30 d）下该试虫的存活率、能源物质（总蛋白、粗脂肪、总糖、总氨基酸）含量、抗寒代谢物海藻糖含量及SOD、CAT、POD等抗氧化酶活性，以期为解决白星花金龟幼虫生命周期与生产需求的时间错配问题提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试虫源：白星花金龟3龄幼虫为新疆农业大学玛纳斯科研基地继代饲养的标准化种群，选择生长发育一致、体型大小及体重相近的健康个体置于温度（25±1）℃、相对湿度（65±5）%的人工气候箱中于全黑暗条件下驯化培养，并饲喂混合发酵基质（40%牛粪+60%秸秆）。

试剂和仪器：SOD、CAT、POD检测试剂盒和总

蛋白、总氨基酸、总糖、海藻糖含量检测试剂盒，南京建成生物科技有限公司，其他试剂均为国产分析纯。RDN-1200C型智能人工气候箱，宁波扬辉仪器有限公司；Eppendorf 5804型台式高速冷冻离心机，德国艾本德有限公司；752N-Plus紫外可见分光光度计，上海精科实业有限公司；SpectraMax Mini多功能酶标仪，美谷分子仪器（上海）有限公司；VM-500多功能漩涡混匀仪，群安科学仪器（浙江）有限公司。

1.2 方法

1.2.1 *低温贮存对3龄幼虫存活率影响的测定*

基于产业应用场景，设置4、8、12 ℃三个梯度低温处理组，以25 ℃常温为对照。取生长发育一致、体型大小及体重相近的健康白星花金龟3龄幼虫置于长17.2 cm、宽11.7 cm、高6.5 cm的方形塑料养虫盒中，加入250 g混合发酵基质，分别置于4、8、12和25 ℃的智能人工气候箱中贮存，每盒30头试虫，每个处理分别于贮存10、20、30 d后观察试虫存活情况，计算存活率。试虫体节无收缩反应、体表无光泽视为个体死亡。存活率=（总虫数−死亡个体数）/总虫数×100%。每个处理重复4次，每个重复1盒。

1.2.2 *低温贮存对3龄幼虫能量物质影响的测定*

取生长发育一致、体型大小及体重相近的健康白星花金龟3龄幼虫置于长17.2 cm、宽11.7 cm、高6.5 cm的方形塑料养虫盒，加入250 g混合发酵基质，分别置于4、8、12和25 ℃的智能人工气候箱中贮存，每盒30头试虫，每个处理分别于贮存10、20、30 d时取样，每个时间取5头试虫，立即置于液氮中冷冻，于−80 ℃冰箱中保存备用，每个处理重复4次。

总蛋白含量测定：每个处理每个时间准确称取白星花金龟3龄幼虫0.1 g，参照总蛋白含量检测试剂盒说明书测定总蛋白含量。

粗脂肪含量测定：采用索氏抽提法测定粗脂肪含量。用组织匀浆机将白星花金龟3龄幼虫样品捣碎，每个处理每个时间称取匀浆1.0 g，移入滤纸筒内。将滤纸筒放入索氏抽提器的抽提筒内，连接已干燥至恒量的接收瓶，由抽提器冷凝管上端加入石油醚至瓶内容积的2/3处，水浴加热，使石油醚不断回流提取，抽提10 h；取下接收瓶，回收石油醚，待接收瓶内石油醚剩1 mL时置于水浴上蒸干，于100 ℃干燥箱中干燥2 h，置于干燥器内冷却0.5 h后称量质量。重复以上操作直至恒重。根据公式计算粗脂肪含量，粗脂肪含量=$(m_1-m_0)/m\times100\%$，式中，m_1为接收瓶和粗脂肪的质量，m_0为接收瓶的质量，m为样品质量。

总氨基酸含量测定：每个处理每个时间准确称取白星花金龟3龄幼虫0.1 g，参照总氨基酸含量检测试剂盒说明书测定总氨基酸含量。

总糖含量测定：每个处理每个时间准确称取白星花金龟3龄幼虫0.1 g，参照总糖含量检测试剂盒说明书测定总糖含量。

1.2.3 *低温贮存对3龄幼虫海藻糖含量影响的测定*

样品获取方法同1.2.2。每个处理每个时间准确称取白星花金龟3龄幼虫0.1 g，参照海藻糖含量检测试剂盒说明书测定海藻糖含量。

1.2.4 *低温贮存对3龄幼虫抗氧化酶活性影响的测定*

样品获取方法同1.2.2。采用羟胺法测定SOD活性，每个处理每个时间准确称取白星花金龟3龄幼虫0.1 g，按照SOD检测试剂盒说明书测定SOD活性。采取钼酸铵法测定CAT活性，每个处理每个时间准确称取白星花金龟3龄幼虫0.1 g，按照CAT检测试剂盒说明书测定CAT活性。采用比色法测定POD活性，每个处理每个时间准确称取白星花金龟3龄幼虫0.1 g，按照POD检测试剂盒说明书测定POD活性。

1.3 数据分析

采用SPSS 26.0软件对试验数据进行分析处理，应用Duncan氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 低温贮存对3龄幼虫存活率的影响

25 ℃（对照）贮存30 d时，白星花金龟3龄幼虫的存活率为93.33%，较贮存10 d的存活率（98.34%）仅显著下降5.01百分点（$P<0.05$），表明常温下贮存时间对白星花金龟3龄幼虫影响不大。12 ℃低温贮存30 d时，白星花金龟3龄幼虫的存活率仍高达88.33%，较贮存10 d时的存活率（97.50%）显著下降了9.17百分点（$P<0.05$），即3龄幼虫的存活率表现为稳定衰减的模式。8 ℃贮存30 d时，白星花金龟3龄幼虫存活率下降幅度较12 ℃贮存时增加，存活率为51.67%，较贮存10 d和20 d的存活率（95.84%和78.33%）分别显著下降44.17百分点和26.66百分点（$P<0.05$），即3龄幼虫的存活率表现为渐进衰减的模式。4 ℃贮存温30 d时，白星花金龟3龄幼虫的存活率骤减至24.17%，较贮存10 d和20 d时的存活率（93.33%和62.50%）分别显著下降了69.16百分点和38.33百分点（$P<0.05$），即3龄幼虫的存活率表现为加速衰减的模式（图1）。表明深度低温对白星花金龟3龄幼虫存活率有不利影响，故选择12 ℃作为白星花金龟3龄幼虫长期贮存的最佳温度。

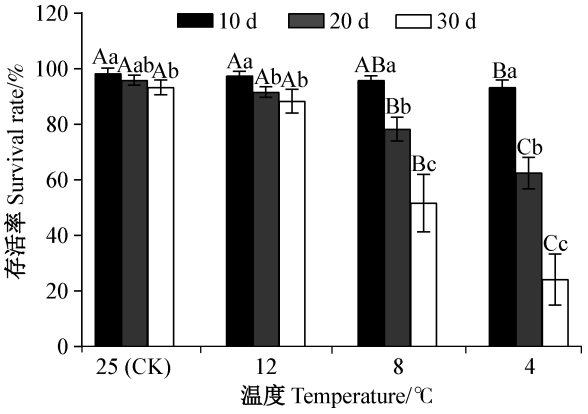

图1 不同贮存温度和贮存时间下白星花金龟3龄幼虫的存活率

Fig. 1 Survival rate of 3rd-instar larvae of *Protaetia brevitarsis* under different storage temperatures and durations

图中数据为平均数±标准误。不同大写字母表示相同贮存时间下不同温度之间经Duncan氏新复极差法检验差异显著(P<0.05);不同小写字母表示相同温度下不同贮存时间之间经Duncan氏新复极差法检验差异显著(P<0.05)。Data are mean±SE. Different uppercase letters indicate significant differences among different temperatures at the same storage duration according to Duncan's new multiple range test (P<0.05). Different lowercase letters indicate significant differences among different storage durations at the same temperature according to Duncan's new multiple range test (P<0.05).

2.2 低温贮存对3龄幼虫能量物质的影响

2.2.1 对3龄幼虫体内总蛋白含量的影响

低温胁迫下白星花金龟3龄幼虫总蛋白含量表现显著的梯度响应。25 ℃(对照)贮存温度下,不同贮存时间的白星花金龟3龄幼虫体内总蛋白含量均较高,且三者之间差异不显著;12 ℃贮存温度下,贮存10 d和30 d时3龄幼虫总蛋白含量较对照降低15.79%和7.69%,但与对照差异不显著,而贮存20 d时较对照增加5.41%,但与对照差异不显著;4 ℃和8 ℃贮存温度下,贮存10 d和20 d时3龄幼虫体内总蛋白含量较对照降低22.27%、17.37%与23.08%、2.70%,大部分与对照差异显著(P<0.05),贮存30 d时与对照相差不大(图2-A)。

2.2.2 对3龄幼虫体内粗脂肪含量的影响

25 ℃(对照)贮存温度下,不同贮存时间的白星花金龟3龄幼虫粗脂肪含量均较高,且三者之间差异不显著;12 ℃和8 ℃贮存温度下,白星花金龟3龄幼虫粗脂肪含量均较对照下降明显,但大部分与对照差异不显著,而4 ℃贮存温度下,白星花金龟3龄幼虫粗脂肪含量与对照差异不大,尤其是贮存10 d和20 d时(图2-B)。

2.2.3 对3龄幼虫体内总氨基酸含量的影响

25 ℃(对照)贮存温度下,贮存20 d时白星花金龟3龄幼虫体内总氨基酸含量较贮存10 d变化不大,贮存30 d时总氨基酸含量骤增,为19.14 μmol/mg,显著高于贮存10 d和20 d时(P<0.05);12 ℃贮存温度下,3龄幼虫体内总氨基酸含量变化与对照相似,贮存30 d时3龄幼虫体内总氨基酸含量骤增至21.24 μmol/mg,显著高于贮存10 d和20 d时(P<0.05);4 ℃和8 ℃贮存温度下,贮存10 d和20 d时3龄幼虫体内总氨基酸含量较对照变化不大,但贮存30 d时较对照和12℃贮存温度下显著下降(P<0.05),且相同贮存温度不同贮存时间下总氨基酸含量之间均差异不显著(图2-C)。

2.2.4 对3龄幼虫体内总糖含量的影响

25 ℃(对照)贮存温度下,贮存20 d时白星花金龟3龄幼虫体内总糖含量较贮存10 d时增加84.14%,但差异不显著,贮存30 d时总糖含量继续增加,达到峰值6.38 mg/g,较贮存20 d时增加19.25%,但差异不显著;12 ℃贮存温度下,贮存20 d时3龄幼虫体内总糖含量持续增加,与对照相似,较贮存10 d时显著增加104.63%(P<0.05),但贮存30 d时3龄幼虫体内总糖含量则较贮存20 d时降低23.98%,但差异不显著;8 ℃和4 ℃贮存温度下,3龄幼虫体内总糖含量均较对照下降,尤其是贮存20 d时和30 d时,较对照显著下降30.71%、37.27%与60.81%、57.68%(P<0.05),且不同贮存时间下总糖含量之间基本差异不显著(图2-D)。

2.3 低温贮存对3龄幼虫海藻糖含量的影响

低温胁迫下白星花金龟3龄幼虫体内海藻糖含量表现显著的梯度响应。25 ℃(对照)贮存温度下,随贮存时间延长3龄幼虫体内海藻糖含量呈先升高后下降的趋势,贮存20 d时达到峰值,为11.12 mg/g,显著高于贮存10 d时(P<0.05),但与贮存30 d时差异不显著;12、8和4 ℃贮存温度下,除贮存10 d时与对照差异不大外,贮存20 d和30 d时3龄幼虫体内海藻糖含量体均较对照逐渐下降(图3)。表明在低温胁迫下白星花金龟3龄幼虫会通过积累海藻糖来进行自我保护,但过长的贮存时间或过低的温度会削弱这种保护作用。

2.4 低温贮存对3龄幼虫抗氧化酶活性的影响

2.4.1 低温贮存对3龄幼虫POD活性的影响

25 ℃(对照)贮存温度下,贮存20 d时白星花金龟3龄幼虫体内POD活性较贮存10 d时变化不大,贮存

30 d时POD活性显著增加，达到峰值，为79.37 U/mg，较贮存20 d和10 d时分别显著增加92.13%和77.96%（P<0.05）；8 ℃和12 ℃贮存温度下，贮存10 d和20 d时3龄幼虫体内POD活性均较对照增加，贮存30 d时则较对照下降，但相同贮存温度不同贮存时间下POD活性之间均差异不显著；4 ℃贮存温度下，贮存10 d时白星花金龟3龄幼虫体内POD活性较对照显著下降（P<0.05），贮存20 d时与对照相差不大，贮存30 d时较对照下降，但差异不显著（图4-A）。

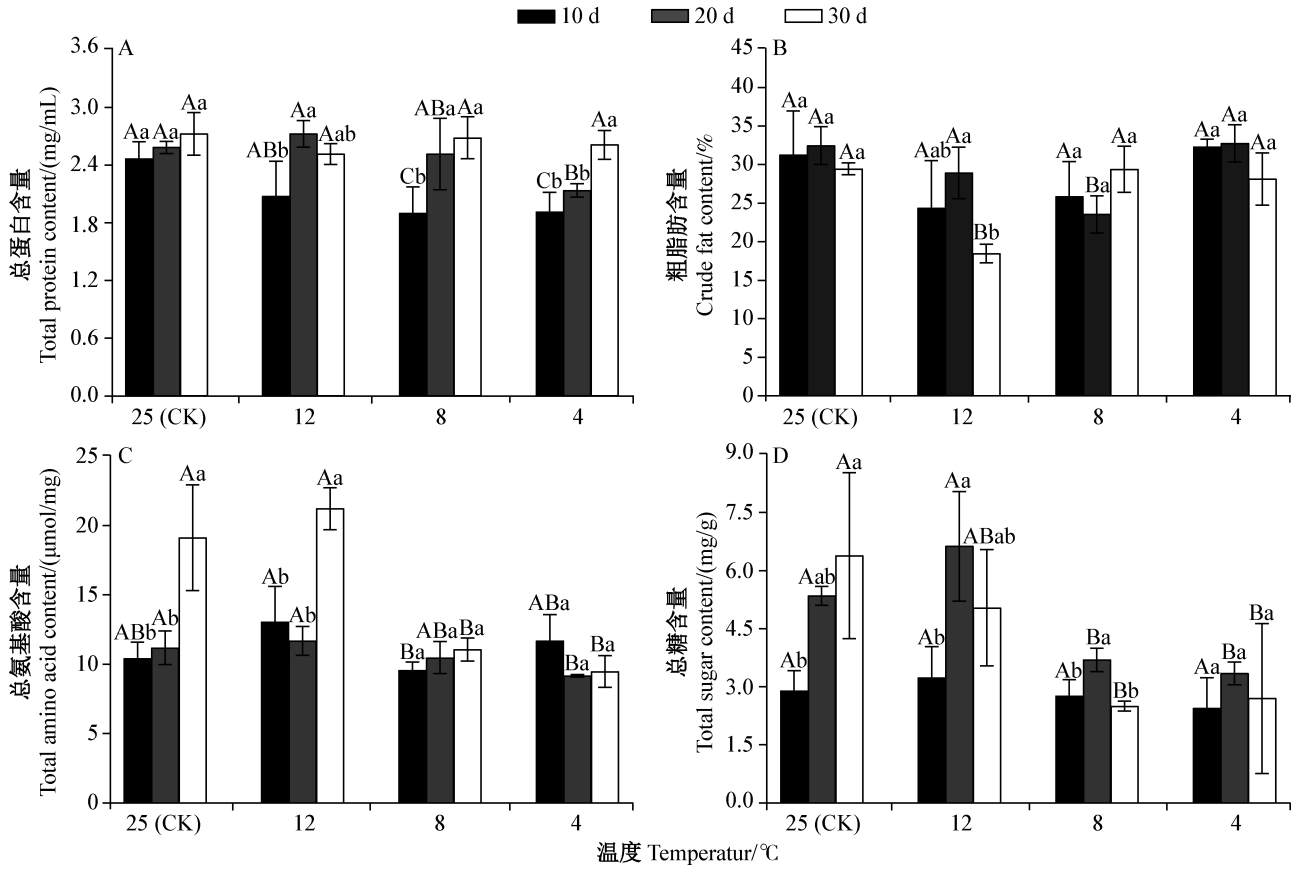

图2 不同贮存温度和贮存时间下白星花金龟3龄幼虫体内能源物质含量

Fig. 2 Energy reserve contents in the 3rd-instar larvae of *Protaetia brevitarsis* under different storage temperatures and durations

图中数据为平均数±标准误。不同大写字母表示相同贮存时间下不同温度之间经Duncan氏新复极差法检验差异显著（P<0.05）；不同小写字母表示相同温度下不同贮存时间之间经Duncan氏新复极差法检验差异显著（P<0.05）。Data are mean±SE. Different uppercase letters indicate significant differences among different temperatures at the same storage duration according to Duncan's new multiple range test (P<0.05). Different lowercase letters indicate significant differences among different storage durations at the same temperature according to Duncan's new multiple range test (P<0.05).

2.4.2 低温贮存对3龄幼虫SOD活性的影响

25 ℃（对照）贮存温度下，随贮存时间延长白星花金龟3龄幼虫体内SOD活性逐渐下降，贮存30 d时降到最低值，为412.47 U/mg，分别较贮存20 d和10 d时显著下降19.26%和22.49%（P<0.05）；12、8和4 ℃贮存温度下，贮存10 d时3龄幼虫体内SOD活性逐渐增加，4 ℃贮存10 d时3龄幼虫体内SOD活性最大，为573.66 U/mg，但与对照差异不显著，贮存20 d时3龄幼虫体内SOD活性较对照变化不大，贮存30 d时3龄幼虫体内SOD活性均高于对照，大部分与对照差异不显著（图4-B）。

2.4.3 低温贮存对3龄幼虫CAT活性的影响

25 ℃（对照）贮存温度下，随贮存时间延长3龄幼虫体内CAT活性表现为先下降后上升的趋势，贮存20 d时CAT活性降到最低，为27.50 U/mg，较贮存10 d时显著减少36.28%（P<0.05）；12、8和4 ℃贮存温度下，贮存10 d时3龄幼虫体内CAT活性较对照变化不大，贮存20 d时3龄幼虫体内CAT活性均较对照显著增加（P<0.05），贮存30 d时CAT活性均较对照下降，但均与对照差异不显著（图4-C）。

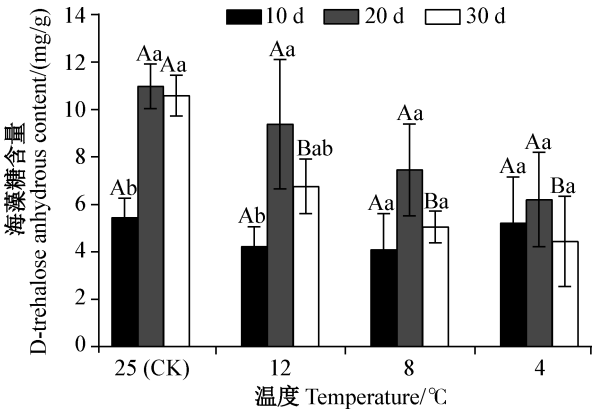

图3 不同贮存温度和贮存时间下白星花金龟3龄幼虫体内海藻糖含量

Fig. 3 Trehalose content in the 3rd-instar larvae of *Protaetia brevitarsis* under different storage temperatures and durations

图中数据为平均数±标准误。不同大写字母表示相同贮存时间下不同温度之间经Duncan氏新复极差法检验差异显著(P<0.05);不同小写字母表示相同温度下不同贮存时间之间经Duncan氏新复极差法检验差异显著(P<0.05)。Data are mean±SE. Different uppercase letters indicate significant differences among different temperatures at the same storage duration according to Duncan's new multiple range test (P<0.05). Different lowercase letters indicate significant differences among different storage durations at the same temperature according to Duncan's new multiple range test (P<0.05).

3 讨论

温度是调控昆虫生长发育和生理活动的关键环境因子,一定时间的低温暴露会影响昆虫的存活率。本研究结果显示低温对白星花金龟3龄幼虫有不利影响,且温度越低,存活率下降速率越快,与已有的研究结果一致。例如,赵静等(2014)研究发现异色瓢虫*Harmonia axyridis*存活率随温度降低和贮存时间延长而显著降低;税玲等(2016)报道在4、7、10 ℃贮存超过10 d后加州新小绥螨*Neoseiulus californicus*存活率呈下降趋势;陈强等(2025)研究也发现果蝇毛锤角细蜂*Trichopria drosophilae*存活率随温度降低而下降;仇兰芬等(2021)研究结果显示花绒寄甲*Dastarcus helophoroides*的生存能力随温度降低而减弱。此外,本研究结果显示持续的低温胁迫对白星花金龟3龄幼虫有明显的累积损伤效应,当4、8和12 ℃贮存30 d时白星花金龟3龄幼虫存活率分别表现为加速衰减型、渐进衰减型和稳定衰减型的模式,尤其是4 ℃处理组白星花金龟3龄幼虫存活率突降,表明该幼虫对极端低温的耐受能力有限。杨眉等(2022)也发现二化螟*Chilo suppressalis*对低温耐受能力有限。当温度过低时,物种生态适应达到极限,能量代谢稳态失衡,最终导致存活率急剧下降(Huang et al.,2020;田旭等,2025)。本研究发现8 ℃贮存30 d时白星花金龟3龄幼虫存活率呈渐进递减的趋势,反映了亚致死低温的累积损伤机制,与李静等(2024)报道的慢性胁迫生理响应一致;而12 ℃贮存30 d时白星花金龟3龄幼虫存活率较高(88.3%),与潘春妮(2024)关于叉角厉蝽*Eocanthecona furcellata*在12 ℃下适应性增强的结果一致。此外,本研究结果显示4~12 ℃贮存30 d时白星花金龟3龄幼虫的存活率介于24.2%~88.3%之间,明显低于Jang et al.(2018)报道的5 ℃下相同贮存周期内东方白点花金龟*Protaetia brevitarsis*的存活率(90%),这种差异或许与预冷处理、贮存基质含水量等关键参数的差异有关。

面对低温环境,昆虫演化出复杂的耐寒调控机制,其主要包括滞育状态转换、代谢抑制以及能量物质(主要为糖类、脂质、蛋白质)储备(Lee & Denlinger,1991)。蛋白质不仅构成虫体的基本结构,也作为重要的抗寒物质参与运输与调节过程。本研究结果显示温度对白星花金龟3龄幼虫的能量物质代谢有显著影响,在4 ℃和8 ℃低温环境下白星花金龟3龄幼虫体内总蛋白含量随贮存时间延长而显著增加,与段小凤等(2015)关于在0 ℃和5 ℃下茶尺蠖*Ectropis obliqua*体内蛋白含量升高的报道基本一致,表明在低温下蛋白积累可能是细胞维持稳态的重要机制。另一方面,脂肪作为昆虫重要的储能与保温物质,能为抗寒物质的合成及其他生理适应反应提供能量基础(Adedokun & Denlinger,1984)。本研究发现12 ℃贮存温度下白星花金龟3龄幼虫粗脂肪含量随贮存时间延长显著下降,而在其他温度下变化不显著,表明在相对温和的低温胁迫下3龄幼虫脂肪作为能源物质消耗或转化以维持生命活动,而4、8、25 ℃贮存温度下虫体的能量代谢途径发生改变,与刘玉娟等(2014)关于在低温环境中二点委夜蛾*Athetis lepigone*幼虫脂肪和糖原不断变化的报道一致。此外,本研究结果显示在4 ℃和8 ℃低温贮存下,白星花金龟3龄幼虫体内总氨基酸含量始终维持在较低水平,且总糖含量也无显著积累,表明该低温可能已超出幼虫的生理调节范围,导致其代谢活动趋于停滞,无法有效合成氨基酸等保护性物质及动员糖类能量储备,从而与其存活率急剧下降吻合,与乔利等(2015)的研究结论基本保持一致。

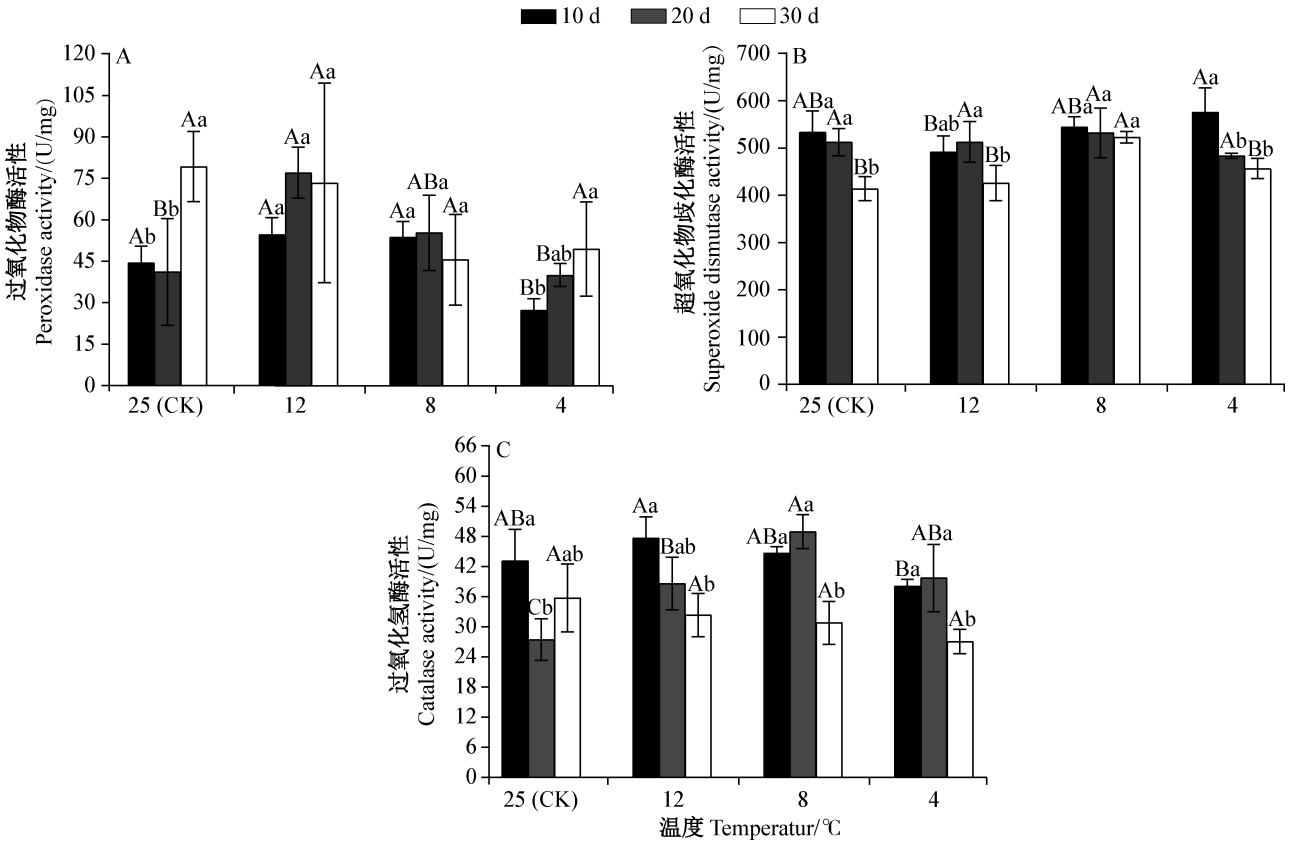

图4 不同贮存温度和贮存时间下白星花金龟3龄幼虫体内抗氧化酶活性

Fig. 4 Antioxidant enzyme activities in 3rd-instar larvae of *Protaetia brevitarsis* under different storage temperatures and durations

图中数据为平均数±标准误。不同大写字母表示相同贮存时间下不同温度之间经Duncan氏新复极差法检验差异显著（$P<0.05$）；不同小写字母表示相同温度下不同贮存时间之间经Duncan氏新复极差法检验差异显著（$P<0.05$）。Data are mean±SE. Different uppercase letters indicate significant differences among different temperatures at the same storage duration according to Duncan's new multiple range test ($P<0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences among different storage durations at the same temperature according to Duncan's new multiple range test ($P<0.05$).

海藻糖作为昆虫最主要的血糖（于彩虹等，2008；杨萌萌等，2016），不仅是生命活动的能量物质，而且也是昆虫应激反应的代谢产物，其含量受低温影响（Wyatt，1967；Chen et al.，2003）。本研究发现在低温胁迫下白星花金龟3龄幼虫体内海藻糖含量随贮存时间的延长呈先升后降的趋势，表明在低温初期虫体能主动积累海藻糖以增强抗寒能力，与刘聪鹤（2017）及徐伟等（2018）的研究结论一致，但刘聪鹤（2017）发现暗黑鳃金龟*Holotrichia parallela*体内海藻糖含量随温度降低呈升高趋势，徐伟等（2018）也报道在低温下大豆食心虫*Leguminivora glycinivorella*体内海藻糖含量升高，这可能意味着能量物质消耗或其合成途径受到抑制。因此推测在遭遇短期低温时白星花金龟3龄幼虫通过提高海藻糖含量以抵御低温，并伴随海藻糖酶活性升高；当长期低温胁迫时其体内能量物质被大量消耗，可能导致海藻糖酶活性下降，从而促使海藻糖含量下降。

持续低温胁迫会导致昆虫体内积累大量乳酸、含氮废物等有毒代谢废物，并产生羟自由基；当其浓度达到阈值或得不到及时清除时，昆虫细胞膜系统中许多生物分子的结构或功能就会被破坏，并造成新陈代谢紊乱（李周直等，1994）。SOD是一种能防御活性氧及其他过氧化物伤害细胞膜系统的保护酶。POD普遍存在于真核生物的各类细胞中，其通过水解细胞内氧化还原反应中产生的细胞毒性物质过氧化氢来保护细胞。CAT通过清除昆虫细胞内过量羟自由基以避免其对机体细胞造成毒害（Al Ghouleh et al.，2011）。本研究结果显示随温度下降白星花金龟3龄幼虫体内SOD活性随之上升，POD和CAT活性逐渐下降，表明在低温下其抗氧化酶系统响应不协调，这可能导致活性氧清除能力不足，细胞膜结构受损，进而影响3龄幼虫存活，与张南等

(2018)关于低温胁迫对东方黏虫体内抗氧化酶的影响一致。

本研究通过试验系统阐明白星花金龟3龄幼虫对低温贮存的生理响应规律,证实12 ℃是其长期贮存的最佳温度,然而其在低温适应的分子机制,特别是关键功能基因在低温胁迫下的动态响应、调控网络及其与生理表型的精准关联仍有待今后深入解析。

参 考 文 献(References)

Adedokun TA, Denlinger DL. 1984. Cold-hardiness: a component of the diapause syndrome in pupae of the flesh flies, *Sarcophaga crassipalpis* and *S. bullata*. Physiological Entomology, 9(4): 361−364

Al Ghouleh I, Khoo NKH, Knaus UG, Griendling KK, Touyz RM, Thannickal VJ, Barchowsky A, Nauseef WM, Kelley EE, Bauer PM, et al. 2011. Oxidases and peroxidases in cardiovascular and lung disease: new concepts in reactive oxygen species signaling. Free Radical Biology and Medicine, 51(7): 1271−1288

Cai WT. 2024. Low temperature storage and fitness evaluation of black soldier fly (*Hermetia illucens)*. Master thesis. Wuhan: Huazhong Agricultural University (in Chinese) [蔡文滔. 2024. 黑水虻低温储存及其适合度评估. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学]

Chen N. 2024. Effects of *Locusta migratoria manilensis* and *Protaetia brevitarsis* on immunity of mice. Master thesis. Guiyang: Guizhou University (in Chinese) [陈楠. 2024. 东亚飞蝗和白星花金龟虫粉对小鼠免疫力的影响. 硕士学位论文. 贵阳: 贵州大学]

Chen Q, Tian Y, Li J, Zhang JL, Ren H, Chen GH, Zhang XM. 2025. Effects of short-term high and low temperature on the survival rate of *Trichopria drosophilae*. Chinese Journal of Ecology, 44(4): 1270−1275 (in Chinese) [陈强, 田烨, 李娟, 张金龙, 任会, 陈国华, 张晓明. 2025. 短时高低温对果蝇锤角细蜂存活率的影响. 生态学杂志, 44(4): 1270−1275]

Chen QF, Behar KL, Xu T, Fan CH, Haddad GG. 2003. Expression of *Drosophila* trehalose-phosphate synthase in HEK-293 cells increases hypoxia tolerance. Journal of Biological Chemistry, 278(49): 49113−49118

Chen X. 2024. Study on fatty acid composition and gene function of fatty acid metabolism in the *Protaetia brevitarsis*. Master thesis. Hefei: Anhui Agricultural University (in Chinese) [陈鑫. 2024. 白星花金龟脂肪酸组成及脂肪酸代谢基因功能的研究. 硕士学位论文. 合肥: 安徽农业大学]

Duan XF, Wang XQ, Li PW, Tian JT, Peng P, Chen SC. 2015. Effects of cold hardening on physiological indices related to cold tolerance in *Ectropis obliqua* pupaes. Chinese Journal of Applied Entomology, 52(6): 1413−1420 (in Chinese) [段小凤, 王晓庆, 李品武, 田景涛, 彭萍, 陈世春. 2015. 冷驯化对茶尺蠖抗寒性生理指标的影响. 应用昆虫学报, 52(6): 1413−1420]

Hu WQ, Wang T, Meng QL. 2004. Mechanisms of generating and scavenging reactive oxygen species in animals. Ecology of Domestic Animal, 25(3): 64−67 (in Chinese) [胡文琴, 王恬, 孟庆利. 2004. 动物中活性氧的产生及清除机制. 家畜生态, 25(3): 64-67]

Huang YY, Gu XP, Peng XQ, Tao M, Peng L, Chen GH, Zhang XM. 2020. Effect of short-term low temperature on the growth, development, and reproduction of *Bactrocera tau* (Diptera: Tephritidae) and *Bactrocera cucurbitae*. Journal of Economic Entomology, 113(5): 2141−2149

Jang H, Choi MB, Lee H, Kim Y, Kwon O. 2018. The effects of cold treatment on the pupal period, emergence rate, and number of *Protaetia brevitarsis* larvae spawned. Entomological Research, 48(6): 550−558

Lee RE Jr., Denlinger DL. 1991. Insects at low temperature. Boston, MA: Springer US

Li B, Li JX, Liu W, Wang XP. 2024. Cold storage for artificial rearing of diapause adults of multicolored Asian lady beetle *Harmonia axyridis*. Journal of Plant Protection, 51(1): 78−87 (in Chinese) [李贝, 李家旭, 刘文, 王小平. 2024. 异色瓢虫人工繁育中滞育成虫的冷藏条件. 植物保护学报, 51(1): 78−87]

Li J, Liu XG, Shi XD, Tang QB, Luo C, Xue F, Cai W, Li DL, Ding SS. 2024. Effects of sublethal exposure at low temperature on the two-sex life table parameters of *Lasioderma serricorne* (Coleoptera: Anobiidae) offspring. Acta Entomologica Sinica, 67(6): 788−796 (in Chinese) [李静, 刘晓光, 时向东, 汤清波, 罗诚, 薛芳, 蔡文, 李东亮, 丁松爽. 2024. 亚致死低温对烟草甲后代种群两性生命表参数的影响. 昆虫学报, 67(6): 788−796]

Li Q, Wu L, Yang G, Kuang JK, Feng CH, Luo HH, Yang QF, Jiang CX, Wang HJ. 2012. Effects of temperature stress and ultraviolet radiation stress on antioxidant systems of *Locusta migratoria tibetensis* Chen. Acta Ecologica Sinica, 32(10): 3189−3197 (in Chinese) [李庆, 吴蕾, 杨刚, 匡健康, 封传红, 罗怀海, 杨群芳, 蒋春先, 王海建. 2012. 温度和紫外辐射胁迫对西藏飞蝗抗氧化系统的影响. 生态学报, 32(10): 3189−3197]

Li ZJ, Meng MM, Li SS, Deng B. 2019. The transcriptome analysis of *Protaetia brevitarsis* Lewis larvae. PLoS ONE, 14(3): e0214001

Li ZZ, Shen HJ, Jiang QH, Ji BZ. 1994. A study on the activities of endogenous enzymes of protective system in some insects. Acta Entomologica Sinica, 37(4): 399−403 (in Chinese) [李周直, 沈惠娟, 蒋巧很, 嵇保中. 1994. 几种昆虫体内保护酶系统活力的研究. 昆虫学报, 37(4): 399−403]

Liu CH. 2017. Research on cold resistance and mechanism of *Holotrichia parallela* Motschulsky. Master thesis. Harbin: Northeast Agricultural University (in Chinese) [刘聪鹤. 2017. 暗黑鳃金龟耐寒性及其机理的研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北农业大学]

Liu JQ, Zhao LJ, Liu L, Huang RF, Han YZ, Zhang ZW, Cui SP, Gao RH. 2024. Physiological adaptation mechanism of 4-age wintering larvae of *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) in response to low temperature stress. Journal of Beijing Forestry University, 46(4): 74−83 (in Chinese) [刘佳奇, 赵立娟, 刘磊, 黄瑞芬, 韩有志, 张志伟, 崔绍朋, 高瑞贺. 2024. 松墨天牛4龄越冬幼虫响应低温胁迫的生理适应机制. 北京林业大学学报, 46(4): 74−83]

Liu YJ, Zhang TT, Bai SX, He KL, Wang ZY. 2014. Changes of cold hardiness of the overwintering larvae of *Athetis lepigone* (Lepidoptera: Noctuidae) at different overwintering stages. Acta Entomologica Sinica, 57(3): 379−384 (in Chinese) [刘玉娟, 张天涛, 白树雄, 何康来, 王振营. 2014. 越冬期不同阶段二点委夜蛾越冬幼虫耐寒性变化. 昆虫学报, 57(3): 379−384]

Ma WZ. 1995. A new species and a new record of the genus *Trigonophorus* from China (Coleoptera: Scarabaeoidea: Cetoniidae). Acta Zootaxonomica Sinica, 20(2): 225−227 (in Chinese) [马文珍. 1995. 中国唇花金龟属一新种及一新纪录(鞘翅目: 花金龟科). 动物分类学报, 20(2): 225−227]

Ma YL, Duan WY, Su YH, Wu S, Wang HX. 2019. Effects of cold storage on pupation and eclosion of *Tenebrio molitor*. Shandong Agricultural Sciences, 51(7): 92−95 (in Chinese) [马雅莉, 段文艳, 苏亚辉, 武帅, 王海香. 2019. 低温冷藏对黄粉虫蛹化和羽化的影响. 山东农业科学, 51(7): 92−95]

Pan CN. 2024. Effects of low-temperature storage on fitness and predatory capacity in *Eocanthecona furcellata* Wolff. Master thesis. Guiyang: Guizhou University (in Chinese) [潘春妮. 2024. 低温贮藏对叉角厉蝽适合度与捕食能力的影响. 硕士学位论文. 贵阳: 贵州大学]

Qiao L, Qin DZ, Lu ZC, Liu XC, Lü LZ, Wu JX. 2015. Effects of temperature on survival rate and protection enzymes of *Empoasca onukii* Matsuda. Journal of Plant Protection, 42(2): 223−228 (in Chinese) [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]

Qin ML. 2020. Study on extraction, separation, purification and anti-inflammatory property of *Protaetia brevitarsis* larvae protein. Master thesis. Tai'an: Shandong Agricultural University (in Chinese) [秦铭潞. 2020. 白星花金龟幼虫蛋白的提取、分离纯化及抗炎性研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学]

Qiu LF, Zhong L, Shao JL, Che SC, Li G, Wang JH, Wei JR. 2021. Influence of environmental temperature and adult body size on the mortality and fecundity of *Dastarcus helophoroides*. Chinese Journal of Applied Entomology, 58(4): 959−965 (in Chinese) [仇兰芬, 仲丽, 邵金丽, 车少臣, 李广, 王建红, 魏建荣. 2021. 环境温度和体型大小对花绒寄甲成虫死亡率及产卵量的影响. 应用昆虫学报, 58(4): 959−965]

Ren HW. 2024. Changes of cold tolerant substances and related genes in *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) larvae under low temperature. Master thesis. Guiyang: Guizhou University (in Chinese) [任华维. 2024. 低温胁迫下草地贪夜蛾幼虫耐寒物质的变化及其相关基因的探究. 硕士学位论文. 贵阳: 贵州大学]

Shi ZK, Zhang HY, Lu SH, Chen MS. 2025. The effects of cold acclimation on cold tolerance and growth and reproduction of *Plodia interpunctella*. Insects, 16(9): 927

Shui L, Pu P, Li Q, Ma XL, Li Y. 2016. Effects of cold storage on biological traits and predation of predatory mite *Neoseiulus californicus* (McGregor). Journal of Plant Protection, 43(5): 759−767 (in Chinese) [税玲, 蒲颇, 李庆, 马孝龙, 李颖. 2016. 低温贮藏对加州新小绥螨生物学特性和捕食能力的影响. 植物保护学报, 43(5): 759−767]

Sun J. 2019. Prediction and bioactivity of small molecule antimicrobial peptides from *Protaetia brevitarsis* Lewis larvae. Master thesis. Harbin: Northeast Agricultural University (in Chinese) [孙敬. 2019. 白星花金龟幼虫小分子抗菌肽预测及生物活性分析. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北农业大学]

Tian X, Wang HC, Li JM, Zhou F, Wang Q, Meng JY, Zhang XH, Gao G, Su Q. 2025. Effects of cold storage duration on the biology of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) and the metabonomic characteristics of its pupae. Acta Entomologica Sinica, 68(7): 914−925 (in Chinese) [田旭, 汪汉成, 李金梦, 周凤, 王清, 孟建玉, 张兴红, 高贵, 苏奇. 2025. 低温保藏时间对斜纹夜蛾生物学的影响及其蛹的代谢组学特征. 昆虫学报, 68(7): 914−925]

Wang JM. 2020. Study of the anti-hepatoma effect of the polysaccharide hdps-4ii from *Holotrichia diomphalia* Bates and its sulfated derivatives targeting ALDOA. Master thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [王晶梅. 2020. 中药蛴螬多糖及硫酸酯化衍生物以ALDOA为靶点抗肝癌药效研究. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]

Wang Q. 2019. Study on techniques for combined transformation of waste in apple orchard by *Potosia brevitarsis* (Coleoptera: Cetoniidae) and *Tenebrio molitor* L. Master thesis. Tai'an: Shandong Agricultural University (in Chinese) [王倩. 2019. 利用白星花金龟和黄粉虫联合转化苹果园废弃物的技术研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学]

Wightman JA. 1974. Influence of low temperature on pupation induction in *Costelytra zealandica* (Coleoptera: Scarabaeidae). New Zealand Journal of Zoology, 1(4): 503−507

Wyatt GR. 1967. The biochemistry of sugars and polysaccharides in insects. Advances in Insect Physiology, 4: 287−360

Xu AD. 2024. Optimization of the technique and parameters for bioconversion of grape branches by *Protaetia brevitarsis* Lewis. Master thesis. Urumqi: Xinjiang Agricultural University (in Chinese) [徐安东. 2024. 白星花金龟生物转化葡萄枝条的技术及参数优化. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆农业大学]

Xu W, Qin HD, Gao Y, Bi R, Cui J, Shi SS. 2018. Analysis of supercooling point and low-molecular weight compounds in overwintering soybean pod borer *Leguminivora glycinivorella* larvae. Journal of Plant Protection, 45(4): 697−704 (in Chinese) [徐伟, 秦昊东, 高宇, 毕锐, 崔娟, 史树森. 2018. 大豆食心虫越冬幼虫过冷却点及其体内小分子内含物分析. 植物保护学报, 45(4): 697−704]

Yang L, Zhang GJ, Xu T, Zhang LJ, Qiang S, Ma DY, Liu YS. 2019. Study on the conversion capacity of different agricultural organic wastes by larvae of *Protaetia brevitarsis* Lewis. Journal of Xinjiang Agricultural University, 42(3): 189−193 (in Chinese) [杨柳, 张广杰, 徐韬, 张连俊, 羌松, 马德英, 刘玉升. 2019. 白星花金龟幼虫对不同农业有机废弃物的转化力研究. 新疆农业大学学报, 42(3): 189−193]

Yang M, Yu FQ, Li ZQ, Liu XY, Sun FY. 2022. Effects of low temperature on physiological metabolism of *Chilo suppressalis* larvae. Horticulture & Seed, 42(6): 92−94 (in Chinese) [杨眉, 于凤泉, 李志强, 刘欣宇, 孙富余. 2022. 低温对二化螟幼虫生理代谢的影

响. 园艺与种苗, 42(6): 92−94]

Yang MM, Xie GQ, Shen QD, Liu Y, Yu SS, Tang B. 2016. Effects of *Nilaparvata lugens* (Stål) infestation on the trehalose contents and trehalase activities in both rice and brown planthoppers. Journal of Plant Protection, 43(3): 398−404 (in Chinese) [杨萌萌, 谢国强, 沈祺达, 刘雅, 俞姗姗, 唐斌. 2016. 取食不同水稻品种对褐飞虱和稻株内海藻糖及海藻糖酶的影响. 植物保护学报, 43(3): 398−404]

Yu CH, Lu D, Lin RH, Wang XJ, Jiang H, Zhao F. 2008. Trehalos: the blood sugar in insects. Entomological Knowledge, 45(5): 832−837 (in Chinese) [于彩虹, 卢丹, 林荣华, 王晓军, 姜辉, 赵飞. 2008. 海藻糖: 昆虫的血糖. 昆虫知识, 45(5): 832−837]

Zhang GJ, Wang Q, Liu YS. 2020. Biology under artificial condition and utilization potential of *Potosia brevitarsis* (Coleoptera: Cetoniidae). Journal of Environmental Entomology, 42(2): 257−266 (in Chinese) [张广杰, 王倩, 刘玉升. 2020. 白星花金龟人为条件生物学与应用潜力. 环境昆虫学报, 42(2): 257−266]

Zhang GJ, Wang Q, Liu YS, Li ZA. 2019. Study on the transformation capability of four materials in different fermentation cycles fed by *Potosia brevitarsis* (Coleoptera: Cetoniidae) larvae. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 50(5): 764−767, 804 (in Chinese) [张广杰, 王倩, 刘玉升, 李增安. 2019. 白星花金龟幼虫对不同酵化周期四种物料的转化力研究. 山东农业大学学报(自然科学版), 50(5): 764−767, 804]

Zhang HX, He X, Shu CL, Xue TT, Han ML, Sun XH. 2025. Optimizing bioconversion conditions of spent *Pleurotus ostreatus* substrate by *Protaetia brevitarsis* larvae and evaluating frass applications. Journal of Agricultural Resources and Environment, https://link.cnki.net/doi/10.13254/j.jare.2025.0128. (in Chinese) [张海霞, 何昕, 束长龙, 薛婷婷, 韩梅琳, 孙晓红. 2025. 白星花金龟幼虫转化平菇菌渣的条件优化及虫粪应用. 农业资源与环境学报, https://link.cnki.net/doi/10.13254/j.jare.2025.0128.]

Zhang JN, Lian L, Wu CZ, Dong M, Shi LQ, Xie ZX, Jiang ZW, Zhan ZX. 2023. Effects of cold storage on the fitness of *Anagrus nilaparvatae* Pang and Wang (Hymenoptera: Mymaridae). Chinese Journal of Biological Control, 39(5): 1015−1028 (in Chinese) [张居念, 连玲, 吴春珠, 董萌, 施龙清, 解振兴, 姜照伟, 占志雄. 2023. 不同虫态稻虱缨小蜂低温贮藏后的适合度. 中国生物防治学报, 39(5): 1015−1028]

Zhang N, Xie XC, Cheng WN, Wu JX, Li YP. 2018. Effects of high-or low-temperature treatment time on energy material and flight capacity in the adults of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Walker). Journal of Plant Protection, 45(2): 243−250 (in Chinese) [张南, 解幸承, 成卫宁, 仵均祥, 李怡萍. 2018. 高、低温处理时间对东方粘虫成虫能源物质及飞行能力的影响. 植物保护学报, 45(2): 243−250]

Zhao J, Li S, Chen ZZ, Wang S, Xu YY. 2014. Effects of cold stress on survival and activities of several enzymes in multicolored Asian lady beetle *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) adults. Journal of Plant Protection, 41(5): 513−518 (in Chinese) [赵静, 李姝, 陈珍珍, 王甦, 许永玉. 2014. 低温胁迫对异色瓢虫成虫存活及体内几种酶活力的影响. 植物保护学报, 41(5): 513−518]

（责任编辑：张俊芳）