

桉树枝瘿姬小蜂体内细菌对其寿命及酶活性影响

周乐明

(广西大学 南宁 530004)

摘要:【目的】探索可培养内生细菌对宿主桉树枝瘿姬小蜂 (*Leptocybe invasa*) 的寿命和酶活性的影响, 为研究相关细菌的基因功能和研制桉树枝瘿姬小蜂生物抑制剂打下基础。【方法】以新羽化的桉树枝瘿姬小蜂雌虫以及前期从其体内分离出的 10 种优势内生菌 (LI01、LI03、LI05、LI07、LI09、LI10、LI12、LI13、LI14 和 LI16) 为材料, 利用纯化后培养的细菌以配制不同含菌液, 以饲喂 10% 的蜂蜜水为对照 (CK), 观察各组小蜂的寿命情况; 并挑选出对桉树枝瘿姬小蜂雌虫寿命具有延长、缩短和无影响的菌株各两株, 分别收集处理 1d、3d、6d 和 9d 后的雌虫用于保护酶、解毒酶和转氨酶活性的测定。【结果】CK 组桉树枝瘿姬小蜂寿命为 11.60 ± 1.52 d, 饲喂 LI01、LI14 和 LI07 菌株的桉树枝瘿姬小蜂寿命延长, 分别为 14.27 ± 0.85 d、 14.17 ± 0.68 d 和 13.50 ± 0.68 d, 分别延长了约 2.67d、2.57d、1.9d; 饲喂 LI10、LI16 和 LI09 菌株的桉树枝瘿姬小蜂寿命缩短, 分别为 3.83 ± 0.46 d、 3.50 ± 0.18 d 和 3.5 ± 0.31 d, 分别缩短了约 7.77d、8.1d 和 8.1d; 其余菌株对桉树枝瘿姬小蜂寿命无显著影响。饲喂对桉树枝瘿姬小蜂寿命有缩短作用的 LI09 和 LI10 含菌液后, 桉树枝瘿姬小蜂体内的保护酶 (SOD、CAT、POD)、解毒酶 (AchE、GST) 和转氨酶 (AST、ALT) 活性, 在第一天显著高于 CK 组的酶活性, 而第三天时低于 CK 组, 总体上都呈现出先升高后降低的趋势; 而饲喂对桉树枝瘿姬小蜂寿命有延长作用的 LI01、LI14 含菌液和缩短作用的 LI03 和 LI05 含菌液后, 其保护酶和解毒酶活性在第 1d、3d 和 6d 时都与 CK 相比无显著区别, 只有在饲喂含菌液的第 9d 时, 其转氨酶活性显著高于 CK。【结论】饲喂泛菌 (*Pantoea anthophila*) LI01、单胞菌 (*Stenotrophomonas sp.*) LI07 和葡萄球菌 (*Staphylococcus sp.*) LI14 对宿主寿命有延长的效果, 饲喂沙雷氏菌 (*Serratia marcescens*) LI09、克雷伯氏菌 (*Klebsiella pneumoniae*) LI10 和肠杆菌 (*Enterobacter cloacae*) LI16 会降低宿主寿命。饲喂 LI09 和 LI10 菌株后, 桉树枝瘿姬小蜂体内的保护酶、解毒酶和转氨酶发生显著改变, 说明此类沙雷氏菌和克雷伯氏菌能够影响宿主酶活性从而影响宿主的代谢与寿命。

关键词: 桉树枝瘿姬小蜂; 内生菌; 寿命; 保护酶; 解毒酶; 转氨酶

Effects of Bacterial Endosymbionts on the Lifespan and Enzyme Activities of *Leptocybe invasa*

Leming Zhou

(Guangxi University Nan Ning 530004)

Abstract: 【Objective】: To explore the effects of culturable endosymbiotic bacteria on the lifespan and enzyme activities of the host *Leptocybe invasa* (*L. invasa*), providing a foundation for the study of related bacterial gene functions and the development of biological inhibitors for *L. invasa* control. 【Methods】: Using newly emerged female *L. invasa* and ten dominant endosymbiotic bacteria (strains LI01, LI03, LI05, LI07, LI09, LI10, LI12, LI13, LI14, and LI16) previously isolated from their bodies, purified and cultured bacteria were used to prepare different bacterial suspensions. A 10% honey water solution served as the control (CK). The lifespan of the wasps was observed after feeding them with different bacterial suspensions. Two strains that extended, shortened, and had no effect on the lifespan of female *L. invasa* were selected. Female wasps collected at 1 d, 3 d, 6 d, and 9 d after treatment were used to determine the activities of protective enzymes (SOD, CAT, POD), detoxifying enzymes (AchE, GST), and transaminases (AST, ALT). 【Results】 The lifespan of *L. invasa* in the CK group was 11.60 ± 1.52 d. Feeding strains LI01, LI14, and LI07 increased the lifespan to 14.27 ± 0.85 d, 14.17 ± 0.68 d, and 13.50 ± 0.68

d, respectively, an increase of approximately 2.67 d, 2.57 d, and 1.9 d. Feeding strains LI10, LI16, and LI09 decreased the lifespan to 3.83 ± 0.46 d, 3.50 ± 0.18 d, and 3.5 ± 0.31 d, respectively, a decrease of approximately 7.77 d, 8.1 d, and 8.1 d. Other strains had no significant effect on the lifespan of *L. invasa*. After feeding *L. invasa* with bacterial suspensions containing strains LI09 and LI10, which shorten the wasp's lifespan, the activities of protective enzymes (SOD, CAT, POD), detoxifying enzymes (AchE, GST), and transaminases (AST, ALT) were significantly higher than those in the CK group on day 1, but lower on day 3, showing an overall trend of first increasing then decreasing. In contrast, when feeding bacterial suspensions containing strains LI01 and LI14, which extend the wasp's lifespan, and strains LI03 and LI05, which also shorten the lifespan, the activities of protective and detoxifying enzymes at days 1, 3, and 6 showed no significant difference compared to the CK group. Only on day 9 after feeding with the bacterial suspensions did the transaminase activity show a significant increase over the CK group.

【Conclusion】Feeding *Pantoea anthophila* strain LI01, *Stenotrophomonas* sp. strain LI07, and *Staphylococcus* sp. strain LI14 extends the host's lifespan, while feeding *Serratia marcescens* strain LI09, *Klebsiella pneumoniae* strain LI10, and *Enterobacter cloacae* strain LI16 reduces the host's lifespan. After feeding strains LI09 and LI10, there are significant changes in the activities of protective enzymes, detoxifying enzymes, and transaminases in *L. invasa*, indicating that these *Serratia* and *Klebsiella* strains can affect host enzyme activity, thereby influencing the host's metabolism and lifespan.

Keywords: *Leptocybe invasa*; endosymbionts; longevity; Protective enzymes; Detoxifying enzymes; Transaminases

在自然界中,昆虫与其内生菌之间存在着复杂而精细的共生关系。这些微生物,包括细菌、真菌、酵母和病毒等,对宿主昆虫的多个方面产生深远影响,如生长发育、生殖行为、信息素生产和抵御病原体等(CAO, Q *et al.*, 2018; CHENG, D F *et al.*, 2017; FRAGO, E *et al.*, 2017; LIU, B *et al.*, 2022; LU, M *et al.*, 2016; MONTAGNA, M *et al.*, 2015)。经过长期的进化选择,昆虫与体内的细菌相互适应,形成了稳定的共生关系(杜慧民等, 2020; 郑林宇等, 2022)。昆虫体内的细菌被认为是昆虫能够顺利入侵扩散的关键因素之一(杜慧民等, 2020)。昆虫体内的细菌可以根据与宿主的关系分为益生菌、病原菌和中间菌群(ENGEL, P *et al.*, 2013; 杜慧民等, 2020; 郑林宇等, 2022)。益生菌能够为宿主构建防护屏障,并在多种生命活动中发挥协助作用(SAVIO, C *et al.*, 2022);病原菌通常对宿主产生负面影响,而在群落中所占比例不大;中间菌群则由那些对宿主健康影响不具备明显正面或负面效应的细菌组成(ADAMU, K M *et al.*, 2022; NIODE, N J *et al.*, 2020)。

对于植食性昆虫而言,很难通过取食植物获得足够的营养来满足生长发育的需求,它们必须依赖体内的细菌代谢取食的化合物,以补充必需的氨基酸(ENGEL, P *et al.*, 2013)。例如,肠杆菌是几乎所有昆虫体内都存在的主要细菌群体,能够降解多环芳香烃等大分子物质、解毒农药、抵抗病原体,并增强宿主昆虫的适应性(郑翔, 2023)。不动杆菌与碳氮代谢有关,并能够促进许多昆虫的生长发育(BRODERICK, N A *et al.*, 2004; WARNECKE, F *et al.*, 2007; 夏远舰等, 2023)。泛菌可以产生一种抗真菌的酚类化合物,保护宿主昆虫免受病原体损害(WANG, X *et al.*, 2022)。白蚁体内的细菌,主要是厚壁菌和反硝化细菌,可以在分解木质纤维素和促进氮循环方面起到辅助作用(WARNECKE, F *et al.*, 2007; WONG, L J *et al.*, 2014)。棉蚜体内的细菌能提高其对不利环境的抗性和适应能力(LUKASIK, P *et al.*, 2013)。

桉树枝瘿姬小蜂 (*Leptocybe invasa* Fisher & La Salle) 是一种危害桉树的外来致瘿性害

虫(BARBOSA, L R *et al.*, 2018; CHEN, H *et al.*, 2009)。虽然关于其生物学特性和体内细菌多样性的研究已经有不少报道(PENG, X *et al.*, 2023; WANG, R *et al.*, 2018; ZHOU, J *et al.*, 2022), 但对于其寿命和酶活性是如何受到内生菌影响的研究相对较少。内生菌可能影响宿主体内的酶活性, 从而增强其对环境压力的抵抗力(吴晨源, 2021)。研究这些内生菌对桉树枝瘿姬小蜂的影响不仅有助于理解其与内生菌的生态学意义, 而且对于生物防治、害虫管理和昆虫种群动态研究具有重要意义(LUAN, J *et al.*, 2023)。

本研究以桉树枝瘿姬小蜂雌虫以及前期从其体内分离出的 10 种优势内生菌为材料(王蕊蕊, 2019), 以饲喂不同的人工含菌液为手段, 探索内生菌对宿主桉树枝瘿姬小蜂的寿命及保护酶、解毒酶和转氨酶酶活性的影响。

1 实材料和方法

1.1 实验材料

本研究所用细菌菌株为前期课题组从赣州、防城港和南宁 3 个不同地理种群采集的桉树枝瘿姬小蜂, 从其内分离培养出来的 10 种优势内生菌 (LI01、LI03、LI05、LI07、LI09、LI10、LI12、LI13、LI14 和 LI16), 具体信息如表 1。保存于广西大学林学院森林保护实验室。新羽化的桉树枝瘿姬小蜂采自广西大学林学院教学实验基地, 寄主为巨园桉 DH201-2 (*E. grandis*×*E. tereticornis*)。

表 1 桉树枝瘿姬小蜂体内可培养的 10 种优势内生菌

Table 1 Ten dominant culturable endosymbionts in the body of *L. invasa*

菌株名 strain name	种 species	属 genus	门 phylum
LI01	<i>P. anthophila</i>	泛菌属 <i>Pantoea</i>	
LI03	<i>P. mosselii</i>	泛菌属 <i>Pantoea</i>	
LI07	<i>Stenotrophomonas sp.</i>	单胞菌属 <i>Stenotrophomonas</i>	变形菌门 <i>Proteobacteria</i>
LI09	<i>S. marcescens</i>	沙雷氏菌属 <i>Serratia</i>	
LI10	<i>K. pneumoniae</i>	克雷伯氏菌属 <i>Klebsiella</i>	
LI12	<i>A. baumannii</i>	不动杆菌属 <i>Acinetobacter</i>	
LI16	<i>E. cloacae</i>	肠杆菌属 <i>Enterobacter</i>	
LI13	<i>B. pumilus</i>	芽孢杆菌属 <i>Bacillus</i>	厚壁菌门 <i>Firmicutes</i>
LI14	<i>Staphylococcus sp.</i>	葡萄球菌属 <i>Staphylococcus</i>	
LI05	<i>Microbacterium sp.</i>	微杆菌属 <i>Microbacterium</i>	放线菌门 <i>Actinobacteria</i>

1.2 实验方法

1.2.1 含菌饲料的配制 取出保存于-20 °C冰箱中的 10 种供试菌种, 使用 LB 液体培养基在 37°C 和 220rpm/min 的条件下活化培养, 过夜培养后调整各菌液的 OD 值至 1.5 (这通常对应着大约 10⁸ CFU/mL 的菌体浓度), 之后在 4°C 和 10000 rpm/min 条件下对不同菌液离心 3 min。去除上清后, 将沉淀溶于 10%的蜂蜜水中, 定容至 50 毫升, 通过平板计数法确认其活菌数, 并保存于 4 °C 冰箱中用于后续试验(ÜNAL, M *et al.*, 2022)。

1.2.2 饲料喂养与记录 以饲喂 10%蜂蜜水的雌虫为 CK, 饲喂 10 组不同含菌人工饲料为实验组, 将新羽化的桉树枝瘿姬小蜂雌虫放入无菌离心管中, 每个离心管内放 10 头, 每组 3 个重复。每天定时用移液枪取 2 毫升人工饲料饲喂姬小蜂, 前一天的液体饲料用移液枪吸出, 每隔 12 h 记录离心管中雌虫的存活情况, 直至雌虫全部死亡。

1.2.3 酶活性测定的样品准备 分别选择对桉树枝瘿姬小蜂雌虫寿命具有延长、缩短和无影响

的菌株各两株，以饲喂 10%蜂蜜水的雌虫为 CK。分别收集处理 1 d、3 d、6 d 和 9 d 后的雌虫保存于 -80 °C 冰箱中，用于后续保护酶、解毒酶和转氨酶活性的测定。以 100 头雌虫为一个样本，每个处理重复 3 次。

1.2.4 粗酶液的制备 用万分之一天平记录每个样本的总重量。放置在 4 °C 预冷的匀浆器中，并加入 0.5 mL 4 °C 预冷的 50 mmol/L pH7.8 的磷酸氢二钠-磷酸二氢钠 (PBS) 缓冲液，低温研磨均匀后转移至 2 mL 离心管中，再加入 0.5 mL PBS 缓冲液冲洗匀浆器并转入离心管中，在 4 °C、10000 rpm/min 条件下离心 20 min，取上清为粗酶液(RAWAT, A *et al.*, 2023)。

1.2.5 总蛋白含量的测定 总蛋白含量的测定参考总蛋白测定试剂盒 (A045-2, 南京建成生物工程研究所) 说明书所述的方法进行测定。

1.2.6 保护酶活性的测定 保护酶主要测试 SOD、CAT 和 POD 的活性, 使用 SOD (A001-1-1, 南京建成生物工程研究所)、CAT (A007-1-1, 南京建成生物工程研究所) 和 POD (A084-1-1, 南京建成生物工程研究所) 试剂盒说明书所述的方法进行测定。

1.2.7 解毒酶活性的测定 解毒酶主要测试 AchE 和 GST 的活性, 使用 AchE 试剂盒(A024-1-1, 南京建成生物工程研究所) 和 GST 试剂盒 (A004-1-1, 南京建成生物工程研究所) 说明书所述的方法进行测定。

1.2.8 转氨酶活性的测定 转氨酶主要测试 AST 和 ALT 的活性, 使用 AST 试剂盒(C010-2-1, 南京建成生物工程研究所) 和 ALT 试剂盒 (C009-2-1, 南京建成生物工程研究所) 说明书所述的方法进行测定。

1.3 数据处理与分析 使用 SPSS 22.0 对试验数据进行处理和分析, 并采用最小显著差法 (least significant difference, LSD) 比较各个样本差异性。

2 结果和分析

2.1 体内细菌对桉树枝瘿姬小蜂寿命的影响

本研究分析了桉树枝瘿姬小蜂体内优势菌对其寿命的影响。结果如图 1 显示, 仅饲喂 10%蜂蜜水 (CK) 的桉树枝瘿姬小蜂寿命为 11.60 ± 1.52 d。饲喂 LI01、LI14 和 LI07 菌株后, 寿命显著延长, 分别比 CK 增加约 2.7、2.6 和 1.9 d。饲喂 LI03、LI12、LI05 和 LI13 菌株后, 寿命与 CK 无显著差异。饲喂 LI10、LI16 和 LI09 菌株后, 寿命显著缩短, 分别比 CK 缩短约 7.8、8.1 和 8.1 d。

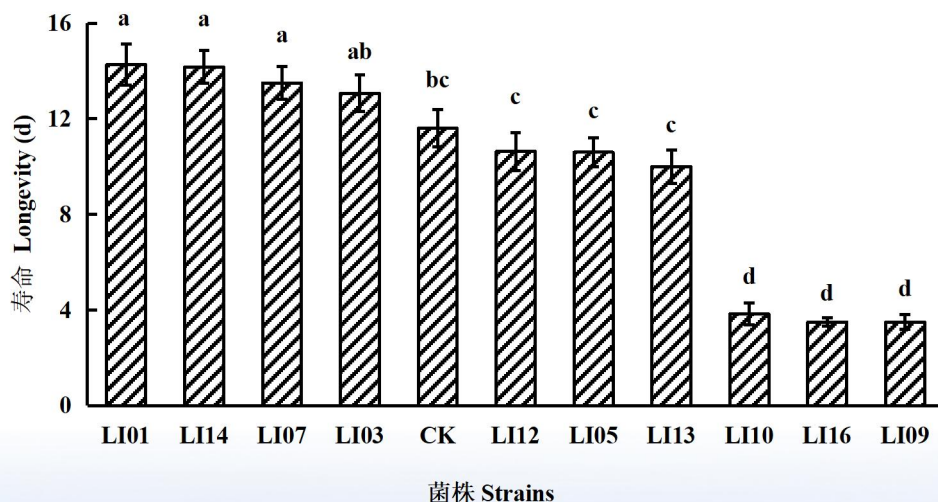


图 1 饲喂含有不同菌株的饲料对桉树枝瘿姬小蜂雌虫寿命的影响

Fig.1-1 Effect of feeding different bacteria on female *L. invasa* longevity

注：图中不同字母表示存在显著性差异 ($p<0.05$)，最小显著差法。Note: The different letters mean significant difference from each other at $p<0.05$ by LSD test.

2.2 体内细菌对桉树枝瘿姬小蜂体内主要保护酶活性的影响

2.2.1 超氧化物歧化酶活性 (SOD) 的变化 由表 2-1 所示，取食 1 d 后，饲喂 LI09 和 LI10 菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内的 SOD 活性分别升至 $37.41\pm 10.52\text{U/mg prot}$ 和 $38.91\pm 8.83\text{U/mg prot}$ ，约为 CK 的 1.1 倍和 1.2 倍；取食 3d 后，SOD 活性分别降至 $11.42\pm 8.38\text{U/mg prot}$ 和 $16.23\pm 1.93\text{U/mg prot}$ ，约为 CK 的 0.4 倍和 0.6 倍。饲喂其他菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内的 SOD 活性与 CK 无显著差异。

表 2-1 饲喂含有不同菌株的饲料对桉树枝瘿姬小蜂超氧化物歧化酶活性 (U/mg prot) 的影响

Table 2-1 Effect of feeding different bacteria on SOD activity (U/mg prot) in *L. invasa*

编号 Code	时间 Time (d)			
	1	3	6	9
CK	$33.23\pm 10.88\text{b}$	$25.65\pm 1.09\text{a}$	$19.48\pm 6.19\text{a}$	$11.89\pm 2.03\text{a}$
LI01	$33.00\pm 5.71\text{b}$	$23.99\pm 6.24\text{a}$	$19.77\pm 3.63\text{a}$	$12.50\pm 3.88\text{a}$
LI14	$31.71\pm 6.91\text{b}$	$22.57\pm 5.00\text{a}$	$20.96\pm 6.01\text{a}$	$11.75\pm 3.88\text{a}$
LI03	$33.05\pm 9.75\text{b}$	$24.91\pm 2.77\text{a}$	$21.07\pm 4.11\text{a}$	$11.03\pm 3.33\text{a}$
LI05	$32.43\pm 9.11\text{b}$	$22.16\pm 2.54\text{a}$	$19.06\pm 2.96\text{a}$	$12.50\pm 3.40\text{a}$
LI09	$37.41\pm 10.52\text{a}$	$11.42\pm 8.38\text{c}$	/	/
LI10	$38.91\pm 8.83\text{a}$	$16.23\pm 1.93\text{b}$	/	/

注：表中不同字母表示每一列差异显著 ($p<0.05$)，最小显著差法。Note: The different letters mean significant difference from each other at $p<0.05$ in line by LSD test.

2.2.2 过氧化氢酶活性 (CAT) 的变化 如表 2-2 所示，饲喂 1d 后，饲喂 LI09 和 LI10 菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内 CAT 活性分别升至 $37.29\pm 10.25\text{U/mg prot}$ 和 $31.01\pm 4.22\text{U/mg prot}$ ，约为 CK 的 1.6 倍和 1.3 倍；饲喂 3d 后，取食 LI09 和 LI10 菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内 CAT 活性显著下降至 $16.54\pm 4.02\text{U/mg prot}$ 和 $13.77\pm 1.87\text{U/mg prot}$ ，约为 CK 的 0.7 倍和 0.6 倍。但饲喂其他菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内 CAT 活性与 CK 差异不显著。

表 2-2 饲喂含有不同菌株的饲料对桉树枝瘿姬小蜂过氧化氢酶活性 (U/mg prot) 的影响

Table 2-2 Effect of feeding different bacteria on CAT activity (U/mg prot) in *L. invasa*

编号 Code	时间 Time (d)			
	1	3	6	9
CK	$23.92\pm 6.88\text{c}$	$22.29\pm 2.82\text{a}$	$21.05\pm 1.91\text{a}$	$18.65\pm 2.31\text{a}$
LI01	$24.33\pm 5.21\text{c}$	$22.69\pm 3.58\text{a}$	$20.95\pm 1.31\text{a}$	$19.21\pm 2.54\text{a}$
LI14	$24.37\pm 6.91\text{c}$	$21.78\pm 5.05\text{a}$	$21.04\pm 1.91\text{a}$	$18.67\pm 3.07\text{a}$
LI03	$26.05\pm 9.75\text{c}$	$23.77\pm 6.51\text{a}$	$21.07\pm 2.68\text{a}$	$18.87\pm 1.93\text{a}$
LI05	$25.54\pm 9.85\text{c}$	$24.07\pm 1.50\text{a}$	$20.09\pm 2.28\text{a}$	$18.61\pm 3.01\text{a}$
LI09	$37.29\pm 10.25\text{a}$	$16.54\pm 4.02\text{b}$	/	/
LI10	$31.01\pm 4.22\text{b}$	$13.77\pm 1.87\text{c}$	/	/

注：表中不同字母表示每一列差异显著 ($p<0.05$)，最小显著差法。Note: The different letters mean significant difference from each other at $p<0.05$ in line by LSD test.

2.2.3 过氧化物酶活性 (POD) 的变化 由表 2-3 可以看出, 取食 1d 后, 饲喂 LI09 和 LI10 菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内 POD 活性分别升至 $33.06 \pm 3.42 \text{ U/mg prot}$ 和 $32.11 \pm 4.69 \text{ U/mg prot}$, 约为 CK 的 1.2 倍和 1.2 倍; 取食 3d 后, POD 活性分别降至 $9.23 \pm 2.82 \text{ U/mg prot}$ 和 $8.96 \pm 1.06 \text{ U/mg prot}$, 约为 CK 的 0.6 倍和 0.6 倍。饲喂其他菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内 POD 活性与 CK 差异不显著。

表 2-3 饲喂含有不同菌株的饲料对桉树枝瘿姬小蜂过氧化物酶活性 (U/mg prot) 的影响

Table 2-3 Effect of feeding different bacteria on POD activity (U/mg prot) in *L. invasa*

编号 Code	时间 Time (d)			
	1	3	6	9
CK	$27.13 \pm 3.44b$	$14.33 \pm 1.78a$	$10.98 \pm 0.70a$	$9.07 \pm 0.40a$
LI01	$28.33 \pm 3.71b$	$15.25 \pm 4.99a$	$11.80 \pm 0.71a$	$9.84 \pm 0.51a$
LI14	$27.32 \pm 3.14b$	$15.54 \pm 0.86a$	$11.60 \pm 1.82a$	$9.00 \pm 0.16a$
LI03	$26.45 \pm 3.35b$	$13.45 \pm 1.87a$	$11.69 \pm 0.77a$	$8.66 \pm 1.10a$
LI05	$27.18 \pm 6.03b$	$13.77 \pm 1.47a$	$10.09 \pm 1.29a$	$9.69 \pm 0.43a$
LI09	$33.06 \pm 3.42a$	$9.23 \pm 2.82b$	/	/
LI10	$32.11 \pm 4.69a$	$8.96 \pm 1.06b$	/	/

注: 表中不同字母表示每一列差异显著 ($p < 0.05$), 最小显著差法。Note: The different letters mean significant difference from each other at $p < 0.05$ in line by LSD test.

2.3 体内细菌对桉树枝瘿姬小蜂体内主要解毒酶活性的影响

2.3.1 乙酰胆碱酯酶活性 (AChE) 的变化 如表 3-1 所示, 体内细菌对桉树枝瘿姬小蜂体内的转氨酶活性影响显著。取食 1d 后, 饲喂 LI09 和 LI10 菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内 AChE 活性分别升至 $7.11 \pm 0.21 \text{ U/mg prot}$ 和 $4.86 \pm 0.93 \text{ U/mg prot}$, 约为 CK 的 3 倍和 2 倍; 取食 3 d 后, AChE 活性分别降至 $0.47 \pm 0.09 \text{ U/mg prot}$ 和 $0.52 \pm 0.13 \text{ U/mg prot}$, 显著低于 CK, 约为 CK 的 0.4 倍和 0.5 倍。饲喂其他菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内 AChE 活性与 CK 差异不显著。

表 3-1 饲喂含有不同菌株的饲料对桉树枝瘿姬小蜂乙酰胆碱酯酶活性 (U/mg prot) 的影响

Table 2-4 Effect of feeding different bacteria on AChE activity (U/mg prot) in *L. invasa*

编号 Code	时间 Time (d)			
	1	3	6	9
CK	$2.39 \pm 0.23c$	$1.08 \pm 0.09a$	$1.02 \pm 0.06a$	$0.94 \pm 0.20a$
LI01	$2.25 \pm 0.08c$	$1.02 \pm 0.06a$	$0.98 \pm 0.06a$	$0.98 \pm 0.21a$
LI14	$2.30 \pm 0.24c$	$0.97 \pm 0.05a$	$0.92 \pm 0.05a$	$0.91 \pm 0.12a$
LI03	$2.50 \pm 0.16c$	$0.96 \pm 0.07a$	$0.90 \pm 0.13a$	$0.90 \pm 0.11a$
LI05	$2.54 \pm 0.24c$	$0.89 \pm 0.05a$	$0.90 \pm 0.04a$	$0.88 \pm 0.08a$
LI09	$7.11 \pm 0.21a$	$0.47 \pm 0.09b$	/	/
LI10	$4.86 \pm 0.93b$	$0.52 \pm 0.13b$	/	/

注: 表中不同字母表示每一列差异显著 ($p < 0.05$), 最小显著差法。Note: The different letters mean significant difference from each other at $p < 0.05$ in line by LSD test.

2.3.2 谷胱甘肽-S-转移酶活性 (GST) 的变化 如表 3-2 所示, 取食 1d 后, 饲喂 LI09 和 LI10 菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内 GST 活性分别升至 $236.53 \pm 32.63 \text{ U/mg prot}$ 和 $251.41 \pm 26.30 \text{ U/mg}$

prot, 约为 CK 的 1.7 倍和 1.9 倍; 取食 3d 后, GST 活性分别降至 $109.42 \pm 15.43 \text{ U/mg prot}$ 和 $108.91 \pm 19.32 \text{ U/mg prot}$, 显著低于 CK, 约为 CK 的 0.8 倍和 0.8 倍。饲喂其他菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内 GST 活性与 CK 差异不显著。

表 3-2 饲喂含有不同菌株的饲料对桉树枝瘿姬小蜂谷胱甘肽-S-转移酶活性 (U/mg prot) 的影响

Table 3-2 Effect of feeding different bacteria on GST activity (U/mg prot) in *L. invasa*

编号 Code	时间 Time (d)			
	1	3	6	9
CK	$135.49 \pm 16.45\text{b}$	$135.56 \pm 16.99\text{a}$	$132.33 \pm 13.00\text{a}$	$117.06 \pm 13.02\text{a}$
LI01	$134.75 \pm 16.03\text{b}$	$137.12 \pm 16.55\text{a}$	$126.29 \pm 10.06\text{a}$	$120.09 \pm 18.04\text{a}$
LI14	$135.68 \pm 26.43\text{b}$	$147.76 \pm 19.32\text{a}$	$124.30 \pm 13.41\text{a}$	$130.09 \pm 8.95\text{a}$
LI03	$136.81 \pm 13.43\text{b}$	$145.54 \pm 19.34\text{a}$	$125.39 \pm 13.00\text{a}$	$121.80 \pm 16.88\text{a}$
LI05	$133.48 \pm 26.43\text{b}$	$134.41 \pm 17.63\text{a}$	$129.07 \pm 10.95\text{a}$	$113.81 \pm 14.89\text{a}$
LI09	$236.53 \pm 32.63\text{a}$	$109.42 \pm 15.43\text{b}$	/	/
LI10	$251.41 \pm 26.30\text{a}$	$108.91 \pm 19.32\text{c}$	/	/

注: 表中不同字母表示每一列差异显著 ($p < 0.05$), 最小显著差法。Note: The different letters mean significant difference from each other at $p < 0.05$ in line by LSD test.

2.4 体内细菌对桉树枝瘿姬小蜂体内主要转氨酶活性的影响

2.4.1 谷丙转氨酶活性 (ALT) 的变化 如表 4-1 所示, 取食 1d 后, 饲喂 LI09 和 LI10 菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内 ALT 活性分别升至 $1.80 \pm 0.06 \text{ U/mg prot}$ 和 $1.98 \pm 0.10 \text{ U/mg prot}$, 约为 CK 的 2.2 倍和 2.5 倍; 取食 3d 后, ALT 活性分别降至 $0.48 \pm 0.08 \text{ U/mg prot}$ 和 $0.49 \pm 0.03 \text{ U/mg prot}$, 约为 CK 的 0.5 倍和 0.5 倍, 显著低于 CK。饲喂其他菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内 ALT 活性与 CK 差异不显著。(表 4-1)

表 4-1 饲喂含有不同菌株的饲料对桉树枝瘿姬小蜂谷丙转氨酶活性 (U/mg prot) 的影响

Table 4-1 Effect of feeding different bacteria on ALT activity (U/mg prot) in *L. invasa*

编号 Code	时间 Time (d)			
	1	3	6	9
CK	$0.80 \pm 0.03\text{b}$	$1.02 \pm 0.17\text{a}$	$1.20 \pm 0.01\text{a}$	$1.01 \pm 0.21\text{ab}$
LI01	$0.82 \pm 0.02\text{b}$	$1.03 \pm 0.01\text{a}$	$1.17 \pm 0.05\text{a}$	$1.09 \pm 0.08\text{ab}$
LI14	$0.82 \pm 0.10\text{b}$	$1.05 \pm 0.19\text{a}$	$1.18 \pm 0.19\text{a}$	$0.99 \pm 0.04\text{b}$
LI03	$0.79 \pm 0.04\text{b}$	$0.94 \pm 0.02\text{a}$	$1.21 \pm 0.27\text{a}$	$1.12 \pm 0.02\text{a}$
LI05	$0.80 \pm 0.10\text{b}$	$1.02 \pm 0.17\text{a}$	$1.23 \pm 0.02\text{a}$	$1.05 \pm 0.13\text{ab}$
LI09	$1.80 \pm 0.06\text{a}$	$0.48 \pm 0.08\text{b}$	/	/
LI10	$1.98 \pm 0.10\text{a}$	$0.49 \pm 0.03\text{b}$	/	/

注: 表中不同字母表示每一列差异显著 ($p < 0.05$), 最小显著差法。Note: The different letters mean significant difference from each other at $p < 0.05$ in line by LSD test.

2.4.2 谷草转氨酶活性 (AST) 的变化 如表 4-2 所示, 取食 1d 后, 饲喂 LI09 和 LI10 菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内 AST 活性升至 $5.44 \pm 1.05 \text{ U/mg prot}$ 和 $5.04 \pm 1.00 \text{ U/mg prot}$, 显著高于 CK, 约为 CK 的 1.3 倍和 1.3 倍。饲喂 3d 后, 取食 LI09 和 LI10 菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内 AST 活性分别降至 $2.78 \pm 0.73 \text{ U/mg prot}$ 和 $2.18 \pm 0.46 \text{ U/mg prot}$, 显著低于 CK, 约为 CK 的 0.5 倍和 0.4 倍。

饲喂 6d 后, LI03 和 LI14 菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内 AST 活性显著高于 CK; LI01 菌株 AST 活性低于 CK。饲喂 9d 后, LI03、LI05、LI01 和 LI14 菌株的桉树枝瘿姬小蜂体内 AST 活性均显著高于 CK。

表 4-2 喂含有不同菌株的饲料对桉树枝瘿姬小蜂谷草转氨酶活性 (U/mg prot) 的影响

Table 4-2 Effect of feeding different bacteria on AST acitivity (U/mg prot) in *L. invasa*

编号 Code	时间 Time (d)			
	1	3	6	9
CK	4.11±0.42c	5.98±0.35ab	6.07±0.96c	1.69±0.21d
LI01	4.14±0.52c	6.08±1.06a	5.36±0.50d	2.26±0.36c
LI14	4.06±0.56c	6.16±0.84a	6.85±1.07b	2.03±0.23c
LI03	3.96±0.67c	5.86±0.56ab	7.23±1.40a	3.67±0.40a
LI05	4.09±0.80c	5.41±1.11b	6.28±0.51c	2.92±0.12b
LI09	5.04±1.00b	2.78±0.73c	/	/
LI10	5.44±1.05a	2.18±0.46c	/	/

注: 表中不同字母表示每一列差异显著 ($p<0.05$), 最小显著差法。Note: The different letters mean significant difference from each other at $p<0.05$ in line by LSD test.

3 讨论

3.1 内生菌对桉树枝瘿姬小蜂寿命的影响

昆虫与其内生菌之间存在着复杂的共生关系, 这些细菌不仅为宿主提供必需的氨基酸和营养物质, 还通过共同的代谢途径支持昆虫的生命活动, 对昆虫的寿命和多种生理指标产生重要影响(姚明燕等, 2017)。同时, 一些病原微生物的存在也会对昆虫的寿命产生不利影响(杜慧民等, 2020)。本研究发现, 桉树枝瘿姬小蜂体内的泛菌 LI01、单胞菌 LI07 和葡萄球菌 LI14 能够显著延长宿主寿命, 这可能是因为这些细菌能够代谢糖类等物质, 为宿主提供必需的营养(LI, S *et al.*, 2023), 类似于地中海实蝇 (*Ceratitis capitata*) 体内的成团泛菌 (*P. agglomerans*) 能够增强其实蝇宿主的寿命(LAUZON, C R *et al.*, 2012)。这些结果表明, 有益的内生菌能够通过提供必需的营养物质来支持宿主的生命活动, 从而延长宿主寿命(BEN-YOSEF, M *et al.*, 2008; BRUMMEL, T *et al.*, 2004; LAUZON, C R *et al.*, 2012)。另一方面, 饲喂假单胞菌 LI03、微杆菌 LI05、不动杆菌 LI12 和苍白杆菌 LI13 对桉树枝瘿姬小蜂的寿命没有显著影响, 这表明这些细菌对宿主寿命的影响不大, 可能是由于它们与宿主之间没有明显的共生作用或是它们提供的营养物质对宿主寿命的影响较小。饲喂沙雷氏菌 LI09、克雷伯氏菌 LI10 和肠杆菌 LI16 后, 桉树枝瘿姬小蜂的寿命显著减少。研究表明, 沙雷氏菌是一种昆虫病原细菌, 广泛存在于自然界中, 对多种昆虫都能造成侵害(CONNICK, W J *et al.*, 2001; TAO, K *et al.*, 2006; 张晶等, 2011)。例如, 取食粘质沙雷氏菌 S-JS1 的灰飞虱寿命明显减少(牛洪涛等, 2018)。这些结果提示, 某些病原微生物的存在能够通过干扰宿主的正常生理机能或直接损害宿主来缩短其寿命(LI, Q *et al.*, 2024; PAN, Q *et al.*, 2024; SUN, L *et al.*, 2024)。

3.2 内生菌对桉树枝瘿姬小蜂保护酶活性的影响

昆虫体内的保护酶是生命活动中不可或缺的重要酶系, 如 SOD、CAT 和 POD 等保护酶, 它们能够调节自由基的产生与清除, 保护昆虫免受氧化损伤(嵇保中李周直沈惠娟蒋巧很, 1994)。例如, 取食粘质沙雷氏菌处理的水稻后, 灰飞虱体内的 SOD 和 POD 活性均显著低于对照组(牛洪涛等, 2018)。本研究中, 饲喂菌株 LI09 和 LI10 后, 桉树枝瘿姬小蜂体内的

SOD、CAT 和 POD 活性在取食 1 天后显著上升,但在 3 天后显著下降至低于 CK,这与前人研究结果相同,即用球孢白僵菌处理葱蝇成虫后,其体内的 SOD 和 POD 活性呈先上升后下降(张慧等, 2017)。保护酶活性在初期显著上升,这可能是昆虫对细菌代谢物或潜在威胁的一种应激反应(JIE, W *et al.*, 2022; WANG, J *et al.*, 2022),试图通过提高保护酶活性来清除自由基和过氧化物,以减轻氧化应激(KAUR, A *et al.*, 2017; TIAN, Y *et al.*, 2013)。然而,随着细菌在宿主体内的持续存在,保护酶活性显著下降,这可能反映了昆虫抗氧化系统的耗竭,或细菌产生的次级代谢产物开始对昆虫产生负面影响(LI, Y *et al.*, 2017; TIAN, Y *et al.*, 2013)。

3.3 内生菌对桉树枝瘿姬小蜂解毒酶活性的影响

解毒酶如 AchE、CarE 和 GST 等能够保护昆虫免受毒素的影响(张红英 赤国彤 张金林, 2002)。本研究中饲喂菌株 LI09 和 LI10 后,桉树枝瘿姬小蜂体内的 AchE 和 GST 活性在取食 1 天后显著上升,但在 3 天后显著下降至低于 CK。表明这两种细菌能够影响宿主解毒酶的活性。解毒酶活性在初期显著上升,这可能是昆虫试图通过提高解毒酶活性来清除或分解外源毒物,以减轻毒性效应(张红英 赤国彤 张金林, 2002)。然而,随着细菌在宿主体内时间的加长,解毒酶活性显著下降,这可能是细菌产生的次级代谢产物对昆虫解毒系统造成破坏(孟思苗, 2024; 王铭铭等, 2023)。这些变化模式与之前的研究结果一致,即当取食经粘质沙雷氏菌处理的水稻后,灰飞虱体内的 GST 活性呈先降低后升高趋势(牛洪涛等, 2018),说明昆虫以变化解毒酶的活性应对潜在的毒物和细胞损伤。

3.4 内生菌对桉树枝瘿姬小蜂转氨酶活性的影响

昆虫体内的转氨酶催化氨基酸与酮酸间的氨基转移,在氨基酸的分解与合成过程中扮演着关键角色(MURAWSKA, A *et al.*, 2021; 练启仙, 2017)。本研究发现,饲喂 LI09 菌株和 LI10 后,桉树枝瘿姬小蜂体内的 ALT 和 AST 活性在取食 1 天后显著上升,但在 3 天后显著下降。初期转氨酶活性显著上升,可能是昆虫试图通过提高转氨酶活性来促进氨基酸的合成和代谢,以支持能量需求和修复受损组织(IÇEN, E *et al.*, 2005)。后期宿主转氨酶活性显著下降,可能是细菌产生的次级代谢产物对昆虫代谢系统的耗竭(PALEOLOG, J *et al.*, 2020)。这些变化模式与之前的研究结果一致,例如,饲喂利福平的麦长管蚜体内 ALT 和 AST 的活性显著升高(亢菊侠等, 2011);饲喂盐酸土霉素处理的大青叶蝉若虫体内的转氨酶活性先升高后降低(练启仙, 2017)。所以当昆虫面临病原微生物时,其体内的转氨酶活性会发生显著变化,以应对潜在的代谢需求和细胞损伤。

4 结论

不同细菌对桉树枝瘿姬小蜂的寿命产生不同影响,泛菌 LI01、单胞菌 LI07 和葡萄球菌 LI14 显著延长宿主寿命,而沙雷氏菌 LI09、克雷伯氏菌 LI10 和肠杆菌 LI16 则显著缩短了宿主寿命。饲喂沙雷氏菌 LI09 和克雷伯氏菌 LI10 时,宿主体内保护酶(SOD、CAT、POD)、解毒酶(AchE、GST)和转氨酶(ALT、AST)活性初期显著上升,这可能是昆虫对有害病菌的应激反应,试图通过提高酶活性应对氧化应激、毒物和代谢需求。后期酶活性显著降低可能是由于长时间细菌存在导致氧化、解毒和代谢系统的衰竭,加速了昆虫的死亡。本研究为利用病原细菌防控桉树枝瘿姬小蜂提供了新思路,并加深了我们对昆虫与内生菌相互作用的理解。

参考文献

- [1]ADAMU K M, ALIYU-PAIKO M, MOHAMMED Y M, *et al.* 2022. Bacteria and Fungi Analyses of Fish Diets with Grasshopper and Cockroach Meals: The Potential Replacement of Fishmeal in Fish Diets. *Journal of Fisheries*, 10(2).
- [2]BARBOSA L R, RODRIGUES A P, de SOUZA A R, *et al.* 2018. *Leptocybe Invasa* (Hymenoptera: Eulophidae) On *Eucalyptus* Seedlings in Santa Catarina State, Brazil. *Ciencia Florestal*, 28(4): 1770-1775.
- [3]BEN-YOSEF M, BEHAR A, JURKEVITCH E, *et al.* 2008. Bacteria-Diet Interactions Affect Longevity in the Medfly - *Ceratitis Capitata*. *Journal of Applied Entomology*, 132(9-10): 690-694.
- [4]BRODERICK N A, RAFFA K F, GOODMAN R M, *et al.* 2004. Census of the Bacterial Community of the Gypsy Moth Larval Midgut by Using Culturing and Culture-Independent Methods. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(1): 293-300.
- [5]BRUMMEL T, CHING A, SEROUDE L, *et al.* 2004. *Drosophila* Lifespan Enhancement by Exogenous Bacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(35): 12974-12979.
- [6]CAO Q, WICKHAM J D, CHEN L, *et al.* 2018. Effect of Oxygen On Verbenone Conversion From *Cis*-Verbenol by Gut Facultative Anaerobes of *Dendroctonus Valens*. *Frontiers in Microbiology*, 9.
- [7]CHEN H, YAO J, XU Z. 2009. First Description of the Male of *Leptocybe Invasa* Fisher & La Salle (Hymenoptera: Eulophidae) From China. *Journal of Environmental Entomology*, 31(3): 285-287.
- [8]CHENG D F, GUO Z J, RIEGLER M, *et al.* 2017. Gut Symbiont Enhances Insecticide Resistance in a Significant Pest, the Oriental Fruit Fly *Bactrocera Dorsalis* (Hendel). *Microbiome*, 5.
- [9]CONNICK W J, OSBRINK W, WRIGHT M S, *et al.* 2001. Increased Mortality of *Coptotermes Formosanus* (Isoptera: Rhinotermitidae) Exposed to Eicosanoid Biosynthesis Inhibitors and *Serratia Marcescens* (Eubacteriales: Enterobacteriaceae). *Environmental Entomology*, 30(2): 449-455.
- [10]ENGEL P, MORAN N A. 2013. The Gut Microbiota of Insects - Diversity in Structure and Function. *Fems Microbiology Reviews*, 37(5): 699-735.
- [11]FRAGO E, MALA M, WELDEGERGIS B T, *et al.* 2017. Symbionts Protect Aphids From Parasitic Wasps by Attenuating Herbivore-Induced Plant Volatiles. *Nature Communications*, 8.
- [12]IÇEN E, ARMUTÇU F, BÜYÜKGÜZEL K, *et al.* 2005. Biochemical Stress Indicators of Greater Wax Moth Exposure to Organophosphorus Insecticides. *Journal of Economic Entomology*, 98(2): 358-366.
- [13]JIE W, GERMINARA G S, ZIYI F, *et al.* 2022. Comparative Effects of Heat and Cold Stress On Physiological Enzymes in *Sitophilus Oryzae* and *Lasioderma Serricornis*. *Journal of Stored Products Research*, 96: 101949.
- [14]KAUR A, GREWAL S K, SINGH R, *et al.* 2017. Induced Defense Dynamics in Plant Parts is Requisite for Resistance to *Helicoverpa Armigera* (Hubner) Infestation in Chickpea. *Phytoparasitica*, 45(4): 559-576.
- [15]LAUZON C R, POTTER S E. 2012. Description of the Irradiated and Nonirradiated Midgut of *Ceratitis Capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae) and *Anastrepha Ludens* Loew (Diptera: Tephritidae) Used for Sterile Insect Technique. *Journal of Pest Science*, 85(2): 217-226.
- [16]LI Q, LI W, JIN Z, *et al.* 2024. *Penicillium*-Infected Apples Benefit Larval Development of *Conogethes Punctiferalis* Via Alterations of their Gut Bacteria Community and Gene Expression. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(14): 7774-7783.
- [17]LI S, WANG J, TIAN X, *et al.* 2023. Immunometabolic Regulation During the Presence of Microorganisms and Parasitoids in Insects. *Frontiers in Immunology*, 14.
- [18]LI Y, CAO G, JIA M, *et al.* 2017. The Effects of Kojic Acid On the Activities of Phenoloxidase and Other Biochemical Enzymes of Locust *Migratoria L.* *Journal of Environmental Entomology*, 39(3): 640-649.
- [19]LIU B, LU Y, WAN F, *et al.* 2022. Biological Invasion of Insects: The Roles of Microbes. *Entomologia Generalis*.
- [20]LU M, HULCR J, SUN J. The Role of Symbiotic Microbes in Insect Invasions//Futuyma D. J. 2016:487-505.
- [21]LUAN J, WANG S. 2023. Insect Symbionts: Research Progresses and Prospects. *Acta Entomologica Sinica*, 66(10): 1271-1281.
- [22]LUKASIK P, van ASCH M, GUO H, *et al.* 2013. Unrelated Facultative Endosymbionts Protect Aphids Against a Fungal Pathogen.

- Ecology Letters, 16(2): 214-218.
- [23]MONTAGNA M, CHOUAIA B, MAZZA G, *et al.* 2015. Effects of the Diet On the Microbiota of the Red Palm Weevil (Coleoptera: Dryophthoridae). Plos One, 10(1).
- [24]MURAWSKA A, MIGDAL P, ROMAN A. 2021. Effects of Plant Protection Products On Biochemical Markers in Honey Bees. Agriculture-Basel, 11(7).
- [25]NIODE N J, SALAKI C L, RUMOKOY L J M, *et al.* Lactic Acid Bacteria From Honey Bees Digestive Tract and their Potential as Probiotics: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE AND THE 10TH CONGRESS OF THE ENTOMOLOGICAL SOCIETY OF INDONESIA (ICESI 2019). Buchori D., Dadang, Sartiami D., 等. International Conference and the 10th Congress of the Entomological-Society-of-Indonesia (ICESI): 2020: 8, 236-241.
- [26]PALEOLOG J, WILDE J, SIUDA M, *et al.* 2020. Imidacloprid Markedly Affects Hemolymph Proteolysis, Biomarkers, Dna Global Methylation, and the Cuticle Proteolytic Layer in Western Honeybees. Apidologie, 51(4): 620-630.
- [27]PAN Q, YU S, LEI S, *et al.* 2024. Bacterial Symbionts Contribute to Insecticide Susceptibility of *Diaphorina Citri* Via Changing the Expression Level of Host Detoxifying Genes. Journal of Agricultural and Food Chemistry.
- [28]PENG X, WANG H, YANG Z. 2023. Differences in Male-Killing *Rickettsia* Bacteria Between Lineages of the Invasive Gall-Causing Pest *Leptocybe Invasa*. Insects, 14(9).
- [29]RAWAT A, PRAKASH O, NAGARKOTI K, *et al.* 2023. Chemical Composition, Pesticidal Activities and *in-Silico* Investigation of *Hedychium Spicatum* Sm. Chloroform Extract. Anais Da Academia Brasileira De Ciencias, 95.
- [30]SAVIO C, MUGO-KAMIRI L, UPFOLD J K. 2022. Bugs in Bugs: The Role of Probiotics and Prebiotics in Maintenance of Health in Mass-Reared Insects. Insects, 13(4).
- [31]SUN L, MENG J, WANG Z, *et al.* 2024. Research Progress of Aphid Immunity System: Potential Effective Target for Green Pest Management. Insect Science.
- [32]TAO K, LONG Z F, LIU K, *et al.* 2006. Purification and Properties of a Novel Insecticidal Protein From the Locust Pathogen *Serratia Marcescens* Hr-3. Current Microbiology, 52(1): 45-49.
- [33]TIAN Y, MA W, WEI Q, *et al.* 2013. Effects of Alpha-Terpineol Fumigation On the in Vivo Antioxidant Activity in Zophobas Morio (Coleoptera: Tenebrionidae). Acta Entomologica Sinica, 56(1): 47-53.
- [34]ÜNAL M, YÜKSEL E, CANHILAL R. 2022. Biocontrol Potential of Cell Suspensions and Cell-Free Superntants of Different *Xenorhabdus* and *Photorhabdus* Bacteria Against the Different Larval Instars of *Agrotis Ipsilon* (Hufnagel) (Lepidoptera: Noctuidae). Experimental Parasitology, 242.
- [35]WANG J, GERMINARA G S, FENG Z, *et al.* 2022. Comparative Effects of Heat and Cold Stress On Physiological Enzymes in *Sitophilus Oryzae* and *Lasioderma Serricorne*. Journal of Stored Products Research, 96.
- [36]WANG R, HU Y, YANG Z, *et al.* 2018. Isolation, Identification and Diversity of Culturable Bacteria in Female Adults of *Leptocybe Invasa* Fisher & La Salle. Journal of Southern Argiculture, 49(12): 2432-2439.
- [37]WANG X, YANG X, ZHOU F, *et al.* 2022. Symbiotic Bacteria On the Cuticle Protect the Oriental Fruit Moth *Grapholita Molesta* From Fungal Infection. Biological Control, 169.
- [38]WARNECKE F, LUGINBUEHL P, IVANOVA N, *et al.* 2007. Metagenomic and Functional Analysis of Hindgut Microbiota of a Wood-Feeding Higher Termite. Nature, 450(7169): 517-560.
- [39]WONG L J, H'NG P S, WONG S Y, *et al.* 2014. Termite Digestomes as a Potential Source of Symbiotic Microbiota for Lignocelluloses Degradation: A Review. Pakistan Journal of Biological Sciences : Pjbs, 17(8): 956-963.
- [40]ZHOU J, WANG R, DING Z, *et al.* 2022. Effects of Two Different Hosts On the Bacterial Diversity in *Leptocybe Invasa* Fisher & Lasalle (Hymenoptera: Eulophidae: Tetrastichinae). Journal of Biosafety, 31(1): 81-86.
- [41]杜慧民, 李文彬, 刘润进. 2020. 昆虫共生细菌研究进展. 环境昆虫学报, 42(03): 615-629.
- [42]嵇保中李周直沈惠娟蒋巧很. 1994. 几种昆虫体内保护酶系统活力的研究. 昆虫学报(04): 399-403.
- [43]亢菊侠, 胡祖庆. 2011. 脱共生菌对麦长管蚜总蛋白含量及转氨酶活性的影响. 安徽农业科学, 39(08): 4574-4575.

- [44]练启仙. 2017. 大青叶蝉内共生菌及营养功能研究. 贵州大学.
- [45]孟思苗. 2024. 陕西留坝西洋参害螨的鉴定及其抗药性研究. 陕西理工大学.
- [46]牛洪涛, 肖李俊杰, 王娜, 等. 2018. 粘质沙雷氏菌 S-Js1 与 5 种杀虫剂对灰飞虱的联合作用及该菌对灰飞虱相关酶活性的影响. 农药学报, 20(02): 185-191.
- [47]王铭铭, 张勇娟, 崔国盈, 等. 2023. 茶皂素对飞蝗解毒酶与保护酶活性的影响. 应用昆虫学报, 60(05): 1412-1422.
- [48]王蕊蕊. 2019. 桉树、桉树枝瘿姬小蜂及孟氏胯姬小蜂体内细菌多样性研究. 广西大学.
- [49]吴晨源. 2021. 草地贪夜蛾高毒力球孢白僵菌筛选及其致病机制研究. 安徽农业大学.
- [50]夏远舰, 杨小丽, 李海华, 等. 2023. 异养硝化-好氧反硝化菌 *Acinetobacter Johnsonii* Sp. N26 的脱氮性能及代谢途径. 微生物学通报, 50(04): 1374-1395.
- [51]姚明燕, 季清娥, 陈家骅. 2017. 实蝇肠杆菌科共生菌的研究进展. 生物安全学报, 26(02): 103-110.
- [52]张红英, 赤国彤, 张金林. 2002. 昆虫解毒酶系与抗药性研究进展. 河北农业大学学报(S1): 193-195.
- [53]张慧, 吴圣勇, 王帅宇, 等. 2017. 葱蝇成虫防御类酶和血细胞对球孢白僵菌的防御作用. 中国生物防治学报, 33(02): 198-205.
- [54]张晶, 覃伟权, 阎伟, 等. 2011. 一株对红棕象甲幼虫和卵有致病力的病原菌的分离鉴定. 热带作物学报, 32(12): 2331-2335.
- [55]郑林宇, 伦才智, 柳丽君, 等. 2022. 昆虫共生菌调控宿主生长发育和生殖的研究进展. 植物保护学报, 49(01): 207-219.
- [56]郑翔. 2023. 蠹亚目食性与肠道菌群结构和功能的关系及肠道功能微生物的筛选鉴定. 河北大学.