取食北方水果对橘小实蝇耐寒性的影响

苏方慧[1,2,3] 迟宝杰[2] 王冰怡[1,4] 门兴元[1] 郭文秀[1]
宋莹莹[1] 吕素洪[1] 崔洪莹[1] 于 毅[1] 李丽莉[1*]

（1. 山东省农业科学院植物保护研究所，山东省农业有害生物绿色防控重点实验室，国家农业生物安全科学中心山东分中心，济南 250100；2. 山东农业工程学院，济南 250100；3. 山东农业大学植物保护学院，泰安 271018；4. 安徽科技学院资源与环境学院，凤阳 233100）

摘要：为明确北方寄主苹果、桃、梨、石榴对橘小实蝇*Bactrocera dorsalis*耐寒性的影响，以取食南方寄主香蕉为参照，测定取食苹果、桃、梨、石榴的橘小实蝇老熟幼虫、5日龄蛹和5日龄成虫的过冷却点和结冰点，比较取食不同寄主果实后这3种虫态橘小实蝇体内含水量及糖原、山梨醇、海藻糖和蛋白质等耐寒物质含量的差异，并分析它们之间的相关性。结果表明：取食不同寄主果实后橘小实蝇的过冷却点和结冰点存在显著差异，取食石榴的5日龄蛹的过冷却点（−9.29 ℃）和结冰点（−9.00 ℃）最低，显著低于取食桃、苹果和梨的5日龄蛹的过冷却点和结冰点，且显著低于取食石榴的老熟幼虫和5日龄成虫。取食不同寄主果实后橘小实蝇体内含水量、糖原、海藻糖等物质的含量存在显著差异。取食石榴的5日龄蛹体内含水量（69.21%）显著低于取食梨的5日龄蛹体内含水量；取食桃的老熟幼虫体内糖原含量（15.24 mg/g）显著高于取食苹果和梨的老熟幼虫体内糖原含量，取食石榴（1.66 mg/g）和桃（1.56 mg/g）的5日龄成虫体内海藻糖含量显著高于取食梨的5日龄成虫体内海藻糖含量；取食桃的5日龄成虫体内蛋白质含量（29.94 mg/g）显著高于取食梨的5日龄成虫体内蛋白质含量。不同虫态橘小实蝇的过冷却点与结冰点呈正相关，与糖原含量呈负相关。表明取食桃和石榴的橘小实蝇种群有较强的耐寒性，因此在北方应加强桃园和石榴园橘小实蝇的监测。

关键词：橘小实蝇；寄主植物；过冷却点；结冰点；含水量；耐寒物质；北方水果

Effects of northern fruits on the cold tolerance of oriental fruit fly *Bactrocera dorsalis*

Su Fanghui[1,2,3] Chi Baojie[2] Wang Bingyi[1,4] Men Xingyuan[1] Guo Wenxiu[1] Song Yingying[1]
Lü Suhong[1] Cui Hongying[1] Yu Yi[1] Li Lili[1*]

（1. Shandong Branch of the National Center for Agricultural Biosafety Sciences, Shandong Key Laboratory for Green Prevention and Control of Agricultural Pests, Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, Shandong Province, China; 2. Shandong Agriculture and Engineering University, Jinan 250100, Shandong Province, China; 3. College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong Province, China; 4. College of Resource and Environment, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, Anhui Province, China）

Abstract: To clarify the effects of northern host fruits (apple, peach, pear, and pomegranate) on the cold tolerance of oriental fruit fly *Bactrocera dorsalis*, individuals reared on the southern host banana were used as the control. The supercooling points (SCP) and freezing points (FP) of mature larvae, 5-day-old pupae, and 5-day-old adults of *B. dorsalis* fed on the four northern fruits were determined. Differences in water content and cold-tolerance-related substances (glycogen, sorbitol, trehalose, and protein) in the

基金项目：山东省果品产业技术体系资助项目（SDAIT 0610），山东省重大科技创新工程项目（2019JZZY010711）
* 通信作者（Author for correspondence），E-mail：zbsli3@163.com
收稿日期：2025-06-26

three developmental stages after feeding on different host fruits were compared, and the correlations among these indices were analyzed. The results demonstrated significant differences in SCP and FP of *B. dorsalis* after host fruit treatments. Pupae fed on pomegranate exhibited the lowest SCP (−9.29 ℃) and FP (−9.00 ℃), significantly lower than those of pupae fed on peach, apple and pear, and significantly lower than those of mature larvae and adults fed on pomegranate. Significant variations were also observed in water content and the levels of glycogen, trehalose and other substances. The water content of 5-day-old pupae fed on pomegranate (69.21%) was significantly lower than that of pupae fed on pear. Mature larvae fed on peach (15.24 mg/g) had significantly higher glycogen levels (15.24 mg/g) than those fed on apple and pear. Trehalose contents in adults fed on pomegranate (1.66 mg/g) and peach (1.56 mg/g) were significantly higher than in adults fed on pear. In addition, adults fed on peach showed significantly higher protein levels (29.94 mg/g) than those fed on pear. Across all developmental stages, SCP and FP were positively correlated, while SCP was negatively correlated with glycogen content. These findings suggest that *B. dorsalis* populations feeding on peach and pomegranate exhibit stronger cold tolerance. Therefore, enhanced monitoring of *B. dorsalis* is recommended in peach and pomegranate orchards in northern regions.

Key words: *Bactrocera dorsalis*; host plant; supercooling point; freezing point; water content; cold-tolerance-related substance; northern fruit

橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* 是一种重要的检疫性蛀果害虫，主要为害热带和亚热带水果，严重影响着中国南方水果产业的发展。据报道苹果、石榴、桃、梨等水果也是橘小实蝇的寄主，这些水果的主产区位于北方，由于气候条件的限制，原来少有橘小实蝇为害（施伟等，2003；张华纬等，2021）。近年来，随着全球气候变暖、果品南北调运、国际贸易和旅游活动的蓬勃发展，橘小实蝇在中国北方活动频繁，对北方水果产业构成潜在威胁。因此，明确橘小实蝇在北移过程中的生理适应机制，对于制订针对性的防控策略具有重要意义。

昆虫是变温动物，体温随环境温度的变化而变化。中国北方冬季低温持续时间长，显著影响昆虫的生存和繁殖（Forster et al.，2011；李艳红等，2014）。耐寒性指昆虫抵抗低温环境的能力，耐寒能力的高低决定其越冬存活率和地理分布界线（徐淑等，2009；Li et al.，2021）。过冷却点是昆虫耐寒性强弱的重要衡量指标，代表昆虫能存活的温度下限（Li et al.，2021）。橘小实蝇的越冬能力与其耐寒性密切相关，过冷却点和结冰点越低，其对低温的耐受能力越强（任璐等，2006）。任璐等（2007）研究结果显示在中国南方地区橘小实蝇自然种群的过冷却点在不同月份存在显著差异，其中在2月最高（−9.26 ℃），在8月最低（−15.20 ℃），而个体最低的过冷却点仅为−16.70 ℃，这意味着在中国北方冬季寒冷气候条件下橘小实蝇难以完成越冬过程，这可能是制约橘小实蝇向北扩散的主要原因。寄主也是影响昆虫耐寒性的关键因素，特别对橘小实蝇这类多食或杂食性昆虫，寄主营养条件会影响昆虫抗寒物质的代谢，进而影响其耐寒能力（欧阳芳和戈峰，2014）。例如，任璐等（2006）研究发现在15种寄主上不同虫态橘小实蝇的过冷却点均存在显著差异；朱丽珊等（2024）研究也发现与用西葫芦和黄瓜饲养的瓜实蝇*Bactrocera cucurbitae*种群相比，用节瓜饲养的瓜实蝇老熟幼虫和蛹的过冷却点和结冰点更低，低温下的存活率也更高；吴开元等（2024）研究结果显示不同寄主上南亚果实蝇 *Zeugodacus tau* 的过冷却点和结冰点存在显著差异。因此，明确橘小实蝇取食北方寄主水果后的耐寒性，对于评估其对北方水果产业的潜在威胁具有重要意义。

为揭示橘小实蝇在北移过程中的生理适应机制，以取食南方寄主果实香蕉为对照，在室内测定取食苹果、桃、梨和石榴的橘小实蝇老熟幼虫、5日龄蛹和5日龄成虫的过冷却点、结冰点及取食不同寄主果实后其体内含水量及耐寒物质含量，以期为制订针对性的防控策略提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试虫源、寄主和土：橘小实蝇为室内香蕉上连续培养15代以上的稳定种群，置于温度（26±1）℃、相对湿度（65±10）%、光周期14 L∶10 D的人工气候

室内饲养，将同时期羽化的成虫置于边长为30 cm的正方体养虫笼内饲养，每24 h补充一次成虫饲料（水解乳蛋白、糖、水质量比为3∶9∶100，现配现用），取同批次羽化的20日龄雌雄成虫供试。新鲜、无病虫害的红富士苹果、水蜜桃、河北鸭梨、软籽甜石榴和威尼斯香蕉果实均购于超市，用清水冲洗晾干后备用。自济南市黄河滩采集沙土，过孔径为2.00 mm筛网后备用。

试剂和仪器：糖原含量检测试剂盒、山梨醇含量检测试剂盒、海藻糖含量检测试剂盒和BCA法蛋白含量检测试剂盒，苏州科铭生物技术有限公司；其他试剂均为国产分析纯。SUV-V型智能昆虫过冷却点测定仪，北京鹏程电子科技中心；MTL503S电子分析天平，南京伯尼塔科学仪器有限公司。

1.2　方法

1.2.1　橘小实蝇耐寒能力的测定

2024年1—12月在山东省农业科学院植物保护研究所人工气候室内进行试验，温、湿度及光周期条件同上。取同批次羽化的30对20日龄雌雄成虫，置于边长为30 cm的养虫笼内，取单果体积约200 cm^3、单果质量约200 g、成熟度一致的红富士苹果、水蜜桃、河北鸭梨、软籽甜石榴和威尼斯香蕉5种水果，每种水果取两个，切成8小块后分别放入养虫笼内供成虫产卵，24 h后取出水果块分别放在上口径15.0 cm、下口径12.9 cm、高7.2 cm的塑料养虫盒内，置于上述人工气候室内。每天观察果实上幼虫的发育情况，当幼虫不再取食、行动缓慢、离开食物后即达到老熟阶段，取部分老熟幼虫备用；将剩余老熟幼虫分别置于相对含水量为（30±5）%、高温消毒的沙土中化蛹，每天观察，化蛹5 d后将沙土过筛，取5日龄蛹备用；成虫羽化后，取5日龄成虫备用。每种寄主果实上饲养的橘小实蝇老熟幼虫、5日龄蛹、5日龄成虫各取8头（1个重复），采用SUV-V型智能昆虫过冷却点测定仪分别测定其过冷却点和结冰点，具体参照朱丽珊等（2024）方法。每个处理重复4次。

1.2.2　橘小实蝇体内含水量的测定

1.2.1中每种寄主果实上饲养的橘小实蝇老熟幼虫、5日龄蛹、5日龄成虫各取10头（1个重复），用电子分析天平分别测定其鲜重，将其分别置于2 mL离心管中，放入60 ℃的电热鼓风干燥箱中干燥72 h至恒重，再分别测定其干重，计算含水量，含水量=（鲜重−干重）/鲜重×100%。每个处理重复4次。

1.2.3　橘小实蝇体内耐寒物质含量的测定

1.2.1中每种寄主果实上饲养的橘小实蝇老熟幼虫、5日龄蛹和5日龄成虫各取40头，置于−20 ℃冰箱保存。每个处理各取10头（1个重复），研磨混匀后取样，分别按照糖原含量检测试剂盒、山梨醇含量检测试剂盒、海藻糖含量检测试剂盒和BCA法蛋白含量检测试剂盒说明书测定其含量。每个处理重复4次。

1.2.4　橘小实蝇过冷却点与主要变量的相关性分析

过冷却点是昆虫耐寒核心指标，且昆虫不同发育虫态耐寒机制差异很大，因此选择橘小实蝇3种虫态的过冷却点与结冰点、含水量及糖原、山梨醇、海藻糖和蛋白质含量等耐寒物质进行相关性分析，采用双尾检验法进行显著性检验。

1.3　数据分析

采用SPSS 25.0软件对数据进行统计分析，应用Tukey检验法进行差异显著性检验。在统计分析前百分率数据均进行平方根转换和方差齐性检验。

2　结果与分析

2.1　取食不同寄主果实后橘小实蝇的耐寒能力

2.1.1　取食不同寄主果实后橘小实蝇的过冷却点

取食不同寄主果实后，不同虫态橘小实蝇的过冷却点存在差异。取食香蕉的老熟幼虫的过冷却点最低，为−8.14 ℃，与取食石榴和桃的老熟幼虫的过冷却点无显著差异，但均显著低于取食苹果和梨的老熟幼虫的过冷却点（$P<0.05$）；取食石榴的5日龄蛹的过冷却点最低，为−9.29 ℃，与取食香蕉的5日龄蛹的过冷却点无显著差异，但均显著低于取食桃、苹果和梨的5日龄蛹的过冷却点（$P<0.05$）；取食香蕉的5日龄成虫的过冷却点最低，为−8.93 ℃，与取食石榴的5日龄成虫的过冷却点无显著差异，但均显著低于取食桃、苹果和梨的5日龄成虫的过冷却点（$P<0.05$，表1）。

取食香蕉、桃和梨后，橘小实蝇3种虫态的过冷却点之间差异不显著；取食苹果后，橘小实蝇5日龄成虫的过冷却点最低，为−7.18 ℃，显著低于取食相同寄主的老熟幼虫的过冷却点（$P<0.05$），但与5日龄蛹的过冷却点差异不显著；取食石榴后，橘小实蝇5日龄蛹的过冷却点最低，为−9.29 ℃，显著低于其他两种虫态（$P<0.05$，表1）。

2.1.2　取食不同寄主果实后橘小实蝇的结冰点

取食不同寄主果实后，不同虫态橘小实蝇的结冰点存在差异。取食香蕉的老熟幼虫的结冰点最

低，为−7.94 ℃，与取食桃和石榴的老熟幼虫的结冰点无显著差异，但均显著低于取食苹果和梨的老熟幼虫的结冰点（P<0.05）；取食石榴的5日龄蛹的结冰点最低，为−9.00 ℃，与取食香蕉的5日龄蛹的结冰点无显著性差异，但均显著低于取食桃、苹果和梨的5日龄蛹的结冰点（P<0.05）；取食香蕉的5日龄成虫的结冰点最低，为−8.56 ℃，与取食石榴的5日龄成虫的结冰点差异不显著，但均显著低于取食桃、苹果和梨的5日龄成虫的结冰点（P<0.05，表1）。

取食香蕉、桃和梨后，橘小实蝇3种虫态的结冰点之间差异不显著；取食苹果后，橘小实蝇5日龄成虫的结冰点最低，为−6.82 ℃，显著低于取食相同寄主的老熟幼虫的结冰点（P<0.05），但与5日龄蛹的结冰点差异不显著；取食石榴后，橘小实蝇5日龄蛹的结冰点最低，为−9.00 ℃，显著低于其他两种虫态（P<0.05，表1）。

表1 取食不同寄主果实后不同虫态橘小实蝇的过冷却点和结冰点

Table 1 Supercooling points and freezing points of *Bactrocera dorsalis* at different developmental stages after feeding on different host fruits ℃

寄主果实 Host fruit	过冷却点 Supercooling point			结冰点 Freezing point		
	老熟幼虫 Mature larva	5日龄蛹 5 day-old pupa	5日龄成虫 5 day-old adult	老熟幼虫 Mature larva	5日龄蛹 5 day-old pupa	5日龄成虫 5 day-old adult
香蕉 Banana	−8.14±0.29 Ab	−8.62±0.26 Ab	−8.93±0.26 Ab	−7.94±0.29 Ab	−8.37±0.26 Ab	−8.56±0.24 Ac
桃 Peach	−7.67±0.30 Ab	−7.23±0.26 Aa	−7.59±0.30 Aa	−7.33±0.30 Ab	−6.76±0.26 Aa	−7.31±0.29 Ab
苹果 Apple	−6.42±0.25 Aa	−6.84±0.29 ABa	−7.18±0.27 Ba	−6.20±0.25 Aa	−6.62±0.29 ABa	−6.82±0.27 Bab
梨 Pear	−6.39±0.24 Aa	−6.63±0.26 Aa	−6.95±0.27 Aa	−6.19±0.23 Aa	−6.44±0.25 Aa	−6.29±0.49 Aa
石榴 Pomegranate	−7.95±0.27 Ab	−9.29±0.27 Bb	−8.42±0.25 Ab	−7.59±0.28 Ab	−9.00±0.27 Bb	−8.24±0.26 Ac

表中数据为平均数±标准差。同行不同大写字母表示相同寄主果实上不同虫态之间经Tukey检验法检验差异显著（P<0.05）；同列不同小写字母表示相同虫态在不同寄主果实之间经Tukey检验法检验差异显著（P<0.05）。Data are mean±SD. Different uppercase letters in the same row indicate significant differences among developmental stages on the same host fruit according to Tukey test (P<0.05); different lowercase letters in the same column indicate significant differences among host fruit treatments within the same developmental stage according to Tukey test (P<0.05).

2.2 取食不同寄主果实后橘小实蝇体内含水量

取食不同寄主果实后，橘小实蝇老熟幼虫和5日龄成虫体内含水量差异不显著；取食不同寄主果实后，橘小实蝇5日龄蛹体内含水量有差异，其中取食石榴的5日龄蛹体内含水量最低，为69.21%，显著低于取食梨和桃的（P<0.05），而取食其他4种寄主果实的5日龄蛹体内含水量之间差异不显著（表2）。取食桃和苹果的橘小实蝇3种虫态体内含水量之间差异均不显著；而取食香蕉的5日龄蛹体内含水量最低，为71.29%，显著低于取食相同寄主果实的老龄幼虫（P<0.05），但与取食相同寄主果实的5日龄成虫差异不显著；取食梨的5日龄成虫体内含水量最高，为73.96%，显著高于取食相同寄主果实的老龄幼虫和5日龄蛹（P<0.05）；取食石榴的5日龄成虫体内含水量最高，为74.04%，显著高于取食相同寄主果实的5日龄蛹（P<0.05），但与取食相同寄主果实的老龄幼虫差异不显著（表2）。

2.3 取食不同果实后橘小实蝇体内耐寒物质含量

2.3.1 取食不同寄主果实后橘小实蝇体内糖原含量

取食桃的橘小实蝇老熟幼虫体内糖原含量最高，为15.24 mg/g，取食香蕉的老熟幼虫体内糖原含量次之，为14.53 mg/g，两者均显著高于取食梨和苹果的老熟幼虫，取食梨的老熟幼虫体内糖原含量最低，为10.71 mg/g，显著低于取食桃、香蕉和石榴的老熟幼虫（P<0.05）。取食5种寄主果实的5日龄蛹体内糖原含量之间差异不显著。取食香蕉的5日龄成虫体内糖原含量最高，为16.13 mg/g，与取食石榴的5日龄成虫体内糖原含量差异不显著，但显著高于取食其他3种寄主果实的5日龄成虫（P<0.05），取食梨的5日龄成虫体内糖原含量最低，为10.73 mg/g，显著低于取食其他4种寄主果实时（P<0.05，表2）。取食香蕉、苹果和石榴的橘小实蝇3种虫态体内糖原含量存在显著差异，其中取食香蕉、苹果和石榴的5日龄成虫体内糖原含量最高，分别为16.13、13.15 mg/g和15.34 mg/g，前两者显著高于5日龄蛹（P<0.05），后者显著高于老熟成虫（P<0.05）；取食桃和梨的3种虫态体内糖原含量之间差异不显著（表2）。

2.3.2 取食不同寄主果实后橘小实蝇体内山梨醇含量

取食梨的橘小实蝇老熟幼虫体内山梨醇含量最高，为22.96 mg/g，显著高于取食苹果和香蕉的老熟

幼虫体内山梨醇含量（P<0.05）；取食梨的5日龄蛹体内山梨醇含量最高，为25.22 mg/g，显著高于取食苹果和香蕉的5日龄蛹体内山梨醇含量（P<0.05）；取食5种不同寄主果实的5日龄成虫体内山梨醇含量差异不显著（表2）。取食5种寄主果实的橘小实蝇3种虫态体内山梨醇含量变化一致，均是老熟幼虫<5日龄蛹<5日龄成虫，且3种虫态之间大部分差异不显著（表2）。

表2 取食不同寄主果实后不同虫态橘小实蝇体内耐寒物质的含量

Table 2 Contents of cold-tolerance-related substances in of *Bactrocera dorsalis* at different developmental stages after feeding on different host fruits

寄主果实 Host fruit	虫态 Insect state	含水量 Water content/%	耐寒物质含量 Cold-resistant substance content/（mg/g）			
			糖原 Glycogen	山梨醇 Sorbitol	海藻糖 Trehalose	蛋白质 Protein
香蕉 Banana	老熟幼虫 Mature larva	74.96±1.50 Aa	14.53±0.55 ABa	11.67±1.54 Ab	1.55±0.18 Ba	18.78±2.69 Aa
	5日龄蛹 5 day-old pupa	71.29±0.68 Bab	13.38±0.65 Ba	13.60±1.09 Ac	1.93±0.03 Aa	22.43±3.65 Aa
	5日龄成虫 5 day-old adult	74.37±0.79 ABa	16.13±0.31 Aa	17.13±2.63 Aa	0.97±0.09 Cc	21.94±1.37 Ab
桃 Peach	老熟幼虫 Mature larva	72.70±2.55 Aa	15.24±1.00 Aa	16.93±2.40 Aab	1.21±0.17 ABa	21.82±2.21 Ba
	5日龄蛹 5 day-old pupa	72.90±0.83 Aa	12.52±0.41 Aa	20.32±3.23 Aab	1.08±0.08 Bb	14.82±1.40 Ba
	5日龄成虫 5 day-old adult	75.27±0.49 Aa	13.51±1.33 Ab	23.62±2.78 Aa	1.56±0.15 Aa	29.94±3.43 Aa
苹果 Apple	老熟幼虫 Mature larva	72.79±0.47 Aa	11.65±0.18 Bbc	12.18±2.26 Bb	1.68±0.04 Aa	23.65±2.16 Aa
	5日龄蛹 5 day-old pupa	71.23±0.74 Aab	12.74±0.30 ABa	18.90±2.17 Bbc	1.20±0.18 Bb	19.46±4.39 Aa
	5日龄成虫 5 day-old adult	72.80±0.93 Aa	13.15±0.64 Ab	29.47±3.55 Aa	1.36±0.13 ABab	24.47±2.02 Aab
梨 Pear	老熟幼虫 Mature larva	71.07±0.08 Ba	10.71±0.21 Ac	22.96±3.20 Aa	1.36±0.19 Ba	16.01±2.27 Aa
	5日龄蛹 5 day-old pupa	72.08±0.66 Ba	11.98±1.13 Aa	25.22±0.79 Aa	1.82±0.06 Aa	19.28±4.37 Aa
	5日龄成虫 5 day-old adult	73.96±0.57 Aa	10.73±0.44 Ac	27.49±5.10 Aa	1.11±0.06 Bbc	22.19±2.06 Ab
石榴 Pomegranate	老熟幼虫 Mature larva	71.73±0.39 ABa	13.42±1.02 ABab	17.50±3.35 Aab	1.55±0.12 ABa	18.48±2.24 Aa
	5日龄蛹 5 day-old pupa	69.21±0.85 Bb	11.47±0.86 Ba	19.89±0.35 Aab	1.36±0.07 Bb	20.20±3.12 Aa
	5日龄成虫 5 day-old adult	74.04±1.22 Aa	15.34±0.27 Aab	22.36±4.43 Aa	1.66±0.06 Aa	21.19±2.74 Ab

表中数据为平均数±标准差。同列不同大写字母表示相同寄主果实上不同虫态之间经Tukey检验法检验差异显著（P<0.05）；同列不同小写字母表示相同虫态在不同寄主果实之间经Tukey检验法检验差异显著（P<0.05）。Data are mean±SD. Different uppercase letters in the same column indicate significant differences among developmental stages on the same host fruit according to Tukey test (P<0.05); different lowercase letters in the same column indicate significant differences among host fruit treatments within the same developmental stage according to Tukey test (P<0.05).

2.3.3 取食不同寄主果实后橘小实蝇体内海藻糖含量

取食5种寄主果实的橘小实蝇老熟幼虫体内海藻糖含量差异不显著；取食香蕉和梨的5日龄蛹体内海藻糖含量最高，分别为1.93 mg/g和1.82 mg/g，显著高于取食桃、苹果和石榴的5日龄蛹体内海藻糖含量（P<0.05）；取食石榴的5日龄成虫体内海藻糖含量最高，为1.66 mg/g，与取食桃和苹果的5日龄成虫体内海藻糖含量差异不显著，但显著高于取食梨和香蕉的5日龄成虫体内海藻糖含量（P<0.05，表2）。取食相同寄主果实的橘小实蝇3种虫态体内海藻糖含量存在差异，其中取食香蕉和梨的5日龄蛹体内海藻糖含量显著高于取食相同寄主果实的老熟幼虫和5日龄成虫体内海藻糖含量（P<0.05），而取食苹果、桃和石榴的5日龄蛹体内海藻糖含量最低，显著低于取食相应寄主果实的老熟幼虫或5日龄成虫体内海藻糖含量（P<0.05，表2）。

2.3.4 取食不同寄主果实后橘小实蝇体内蛋白质含量

取食5种寄主果实的橘小实蝇老熟幼虫和5日龄蛹体内蛋白质含量之间均差异不显著；取食桃的5日龄成虫体内蛋白质含量最高，为29.94 mg/g，显著高于取食香蕉、梨和石榴的5日龄成虫体内蛋白质含量（P<0.05，表2）。取食香蕉、苹果、梨和石榴的橘小实蝇3种虫态体内蛋白质含量之间均差异不显著；取食桃的5日龄成虫体内蛋白质含量最高，为29.94 mg/g，显著高于取食相同寄主果实的老熟幼虫和5日龄蛹体内蛋白质含量（P<0.05，表2）。

2.4 橘小实蝇过冷却点与主要变量的相关性

橘小实蝇老熟幼虫过冷却点与结冰点呈极显著正相关（r=0.991，P<0.01），与糖原含量呈极显著负相关（r=−0.582，P<0.01）；橘小实蝇5日龄蛹过冷却

点与结冰点呈极显著正相关(r=0.986,P<0.01);橘小实蝇5日成虫过冷却点与结冰点呈极显著正相关(r=0.852,P<0.01),与糖原含量呈极显著负相关(r=0.986,P<0.01,表3)。

表3 橘小实蝇过冷却点与主要变量的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between the supercooling point and major variables in *Bactrocera dorsalis*

不同虫态的过冷却点 Supercooling point of different developmental stages	结冰点 Freezing point	含水量 Water content	糖原含量 Glycogen content	山梨醇含量 Sorbitol content	海藻糖含量 Trehalose content	蛋白质含量 Protein content
老熟幼虫 Mature larva	0.991**	0.025	−0.582**	0.005	−0.185	0.202
5日龄蛹 5 day-old pupa	0.986**	0.392	−0.052	0.411	−0.080	0.000
5日龄成虫 5 day-old adult	0.852**	0.020	−0.593**	0.253	0.291	0.392

表示极显著相关(P<0.01)。 indicates extremely an significant correlation (P<0.01).

3 讨论

昆虫的耐寒能力与其越冬存活密切相关,而过冷却点和结冰点是衡量昆虫耐寒能力的核心指标,过冷却点和结冰点越低,昆虫耐寒能力就越强,越冬存活率就越高(冯宇倩等,2014)。本研究结果显示取食5种寄主果实后橘小实蝇老熟幼虫、5日龄蛹和5日龄成虫的过冷却点和结冰点存在明显差异,其中取食香蕉、石榴和桃子的橘小实蝇3个虫态的过冷却点和结冰点明显低于取食梨和苹果的,表明寄主果实对橘小实蝇耐寒性有调控作用。此外,橘小实蝇的耐寒能力与其对不同寄主的产卵选择性呈正相关(任璐等,2006)。例如,苏方慧等(2025)室内试验结果显示橘小实蝇在香蕉、桃和石榴上的产卵选择性与适应性明显高于在苹果和梨上,与本研究的耐寒性结果高度契合。推测橘小实蝇偏好的香蕉、桃、石榴等寄主不仅为其生长发育提供充足的营养,更可能通过营养调控增强其耐寒性,进一步证实了寄主与耐寒性有关。值得注意的是,相同寄主上不同虫态橘小实蝇的过冷却点和结冰点存在差异,表明不同发育阶段的个体之间耐寒能力存在显著分化,这与变温动物的普遍特性一致,即多数变温动物在不同发育阶段的耐寒性存在明显差异(Worland et al.,2006)。例如,Zhao & Kang(2000)发现在美洲斑潜蝇 *Liriomyza sativae* 所有发育阶段中老熟幼虫的过冷却点最低,推测老熟幼虫通常钻出叶面的虫道化蛹,低过冷却点是其对外界环境温度波动的适应性策略。

本研究还发现不同寄主上橘小实蝇过冷却点最低的虫态不一致,取食桃和石榴的橘小实蝇老熟幼虫和5日龄蛹的过冷却点最低,但取食香蕉、苹果和梨的橘小实蝇5日龄成虫的过冷却点最低,与任璐等(2006)的研究结果不完全一致,究其原因可能是取食寄主种类不同,昆虫在生长过程中积累的耐寒物质也不同,这导致其越冬策略和越冬虫态不同(冯宇倩等,2014),具体原因还需进一步研究。此外,张华纬等(2021)研究发现橘小实蝇的潜在适生区主要位于秦岭淮河一线以南,在平均温度低于10 ℃地区的存活率接近于0。在中国北方地区,如山东省济南市近65年最低气温的平均数为−12 ℃(王金霞等,2016),此温度已超出本研究测定的橘小实蝇耐受范围,不适宜其存活,表明在山东省等北方地区,取食当地寄主的橘小实蝇无法越冬。王雁楠等(2020)通过橘小实蝇温度耐受范围和当地累年1月平均温度预测河南、山东、河北和北京4个省市是橘小实蝇的非越冬区,与本研究结果一致。

橘小实蝇的抗寒机制首先体现在对体内含水量的调节上。在越冬期,多数昆虫会通过降低体内含水量来减少细胞结冰损伤,进而增强耐寒能力(刘兆良等,2017;杨海博等,2019)。本研究的相关性分析结果显示橘小实蝇的耐寒能力与含水量呈负相关关系,与多数昆虫的表现一致(杨海博等,2019)。此外,能量物质的积累与调控也是橘小实蝇抗寒机制的重要组成部分。许敏等(2023)研究发现糖原作为越冬期昆虫最主要的能量物质,其含量随温度降低呈递增趋势。本研究结果显示取食不同寄主果实后橘小实蝇的过冷却点越低,其体内相应的糖原含量越高,与已有研究结果一致,表明糖原是橘小实蝇抵抗低温胁迫的主要物质。海藻糖、山梨醇等物质也参与了昆虫的抗寒过程。例如,在低温下海藻糖、山梨醇等耐寒物质能保护昆虫体内细胞不受损害(史彩华等,2016);在逆境下海藻糖能在细胞表面形成维持虫体正常生命活动的保护膜(秦加敏等,2015);同时在抵抗低温过程中,糖原能与海藻糖、山梨醇等

耐寒物质之间进行相互转化(陈豪等,2010;丁惠梅等,2011)。本研究结果显示取食不同寄主果实后不同虫态橘小实蝇的过冷却点与海藻糖和山梨醇含量多呈负相关,表明海藻糖和山梨醇与橘小实蝇抵抗低温有关;而与蛋白质含量多呈正相关,是否与糖原和海藻糖等转化有关尚不明确,需进一步研究。

本研究通过室内试验发现取食石榴、桃和香蕉的橘小实蝇的过冷却点和结冰点均显著低于取食苹果和梨的,同时苏方慧等(2025)研究发现橘小实蝇在香蕉、桃和石榴上的适应性明显高于在苹果和梨上的适应性。因此,在石榴和桃的主产区需要特别关注橘小实蝇的发生情况,及时采取防控措施。本研究仅是在室内进行试验,与自然条件存在一定差异,且本试验仅研究了不同寄主果实对橘小实蝇耐寒性的影响,而湿度、光照等环境因子同样也会影响橘小实蝇的耐寒能力,进而可能影响其耐寒机制。因此,在北方橘小实蝇寄主生长区,需要加强监测其发生情况,及时掌握其动态,进而采用有效措施进行防范。

参 考 文 献（References）

Chen H, Liang GM, Zou LY, Guo F, Wu KM, Guo YY. 2010. Research progresses in the cold hardiness of insects. Plant Protection, 36(2): 18−24 (in Chinese) [陈豪, 梁革梅, 邹朗云, 郭芳, 吴孔明, 郭予元. 2010. 昆虫抗寒性的研究进展. 植物保护, 36(2): 18−24]

Ding HM, Ma G, Wu SA, Zhao F, Ma CS. 2011. A literature review on changes of small molecules of diapause insects during overwintering period. Chinese Journal of Applied Entomology, 48(4): 1060−1070 (in Chinese) [丁惠梅, 马罡, 武三安, 赵飞, 马春森. 2011. 滞育昆虫小分子含量变化研究进展. 应用昆虫学报, 48(4): 1060−1070]

Feng YQ, Wang JL, Zong SX. 2014. Review of insects overwintering stages and cold-resistance strategies. Chinese Agricultural Science Bulletin, 30(9): 22−25 (in Chinese) [冯宇倩, 王锦林, 宗世祥. 2014. 昆虫越冬虫态及耐寒策略概述. 中国农学通报, 30(9): 22−25]

Forster J, Hirst AG, Woodward G. 2011. Growth and development rates have different thermal responses. American Naturalist, 178 (5): 668−678

Li CC, Pei JH, Li JL, Liu XB, Ren LL, Luo YQ. 2021. Overwintering larval cold tolerance of *Sirex noctilio* (Hymenoptera: Siricidae): geographic variation in Northeast China. Insects, 12(2): 116

Li YH, Cheng JL, Zhang N, Wu JX, Yuan XQ. 2014. Effects of high or low temperature treatment on development, survival, and cold tolerance of cotton leafworm, *Spodoptera litura* (Fabricius). Journal of Plant Protection, 41(4): 501−508 (in Chinese) [李艳红, 成巨龙, 张南, 仵均祥, 袁向群. 2014. 高、低温处理对斜纹夜蛾生长发育、存活及耐寒性的影响. 植物保护学报, 41(4): 501−508]

Liu ZL, Yuan ZL, Luo L. 2017. Changes in the cold hardiness and contents of the related biochemical substances in female adults of *Ceroplastes japonicus* (Hemiptera: Coccoidea) before and after overwintering. Acta Entomologica Sinica, 60(1): 120−126 (in Chinese) [刘兆良, 袁忠林, 罗兰. 2017. 日本龟蜡蚧雌成虫越冬前后耐寒性及相关生化物质含量的变化. 昆虫学报, 60(1): 120−126]

Ouyang F, Ge F. 2014. Methodology of measuring and analyzing insect cold hardiness. Chinese Journal of Applied Entomology, 51(6): 1646−1652 (in Chinese) [欧阳芳, 戈峰. 2014. 昆虫抗冻耐寒能力的测定与分析方法. 应用昆虫学报, 51(6): 1646−1652]

Qin JM, Luo SD, He SY, Wu J. 2015. Researching in characters and functions of trehalose and trehalase in insects. Journal of Environmental Entomology, 37(1): 163−169 (in Chinese) [秦加敏, 罗术东, 和绍禹, 吴杰. 2015. 昆虫海藻糖与海藻糖酶的特性及功能研究. 环境昆虫学报, 37(1): 163−169]

Ren L, Lu YY, Zeng L. 2007. Cold hardiness of pupae and overwintering adults from natural populations of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) in China. Acta Entomologica Sinica, 50(6): 588−596 (in Chinese) [任璐, 陆永跃, 曾玲. 2007. 桔小实蝇自然种群蛹和越冬成虫的耐寒性. 昆虫学报, 50(6): 588−596]

Ren L, Lu YY, Zeng L, Pang ST. 2006. Effect of different host fruits on the cold hardiness of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae). Acta Entomologica Sinica, 49(3): 447−453 (in Chinese) [任璐, 陆永跃, 曾玲, 庞淑婷. 2006. 寄主对桔小实蝇耐寒性的影响. 昆虫学报, 49(3): 447−453]

Shi CH, Hu JR, Li CR, Zhang YJ. 2016. Research progress in the cold tolerance mechanism of insects under environmental stress. Plant Protection, 42(6): 21−28 (in Chinese) [史彩华, 胡静荣, 李传仁, 张友军. 2016. 环境胁迫下昆虫的耐寒适应机制研究进展. 植物保护, 42(6): 21−28]

Shi W, Zhang ZY, Ye H. 2003. Taxis responses of three oriental fruit fly (*Bactrocera dorsalis* Hendel) populations to the odors of three host fruits. Journal of Yunnan University (Natural Sciences), 25(1): 77−80 (in Chinese) [施伟, 张智英, 叶辉. 2003. 桔小实蝇对寄主水果气味的趋向反应测试. 云南大学学报(自然科学版), 25(1): 77−80]

Su FH, Chi BJ, Men XY, Cui HY, Yu Y, Guo WX, Lü SH, Song YY, Li LL. 2025. Oviposition preference and host adaptability of oriental fruit fly *Bactrocera dorsalis* to four fruit species in northern China. Journal of Plant Protection, 52(3): 584−590 (in Chinese) [苏方慧, 迟宝杰, 门兴元, 崔洪莹, 于毅, 郭文秀, 吕素洪, 宋莹莹, 李丽莉. 2025. 橘小实蝇对我国北方四种主要水果的产卵选择性及适应性. 植物保护学报, 52(3): 584−590]

Wang JX, Li R, Su Y. 2016. Winter temperature characteristics of Jinan during 1951-2015. China Population, Resources and Environment, 26(Suppl. 2): 329−332 (in Chinese) [王金霞, 李瑞, 苏轶. 2016. 65年来济南冬季气温变化特征. 中国人口·资源与环境, 26(增刊2): 329−332]

Wang YN, Zhang Y, Zhao ZH. 2020. Forecasted distribution and natural overwintering north boundary of six alien invasive insects in China. Journal of Plant Protection, 47(5): 1155−1156 (in Chinese)

[王雁楠, 张玉, 赵紫华. 2020. 六种外来入侵昆虫在我国分布范围及自然越冬北界的预测. 植物保护学报, 47(5): 1155−1156]

Worland MR, Leinaas HP, Chown SL. 2006. Supercooling point frequency distributions in Collembola are affected by moulting. Functional Ecology, 20(2): 323−329

Wu KY, Chen HS, Wang GQ, Tian ZY, Zhu LS, Li RW, Zhou ZS. 2024. Effects of host plants on the supercooling and freezing points of *Zeugodacus tau* (Walker). Journal of Environmental Entomology, 46(1): 151−165 (in Chinese) [吴开元, 陈红松, 王国全, 田震亚, 朱丽珊, 李汝雯, 周忠实. 2024. 寄主植物对南亚果实蝇过冷却点和体液冰点的影响. 环境昆虫学报, 46(1): 151−165]

Xu M, Chen LZ, Li WJ, Wan P. 2023. Effect of low temperature on cold hardiness and the main cold hardiness substances of *Apolygus lucorum* adults. Chinese Agricultural Science Bulletin, 39(35): 144−149 (in Chinese) [许敏, 陈利珍, 李文静, 万鹏. 2023. 低温对绿盲蝽成虫耐寒性及主要耐寒物质的影响. 中国农学通报, 39(35): 144−149]

Xu S, Zhou XM, Zeng J, Lei CL, Wang XP. 2009. Cold hardiness of overwintering larvae of *Chilo suppressalis* at different ages. Journal of Plant Protection, 36(1): 11−15 (in Chinese) [徐淑, 周兴苗, 曾俊, 雷朝亮, 王小平. 2009. 二化螟不同年龄段越冬幼虫的耐寒性比较. 植物保护学报, 36(1): 11−15]

Yang HB, Hu ZJ, Dong JF, Zhu PH, Li DX. 2019. Changes in the cold hardiness of overwintering larvae of *Histia rhodope* (Lepidoptera: Zygaenidae). Acta Entomologica Sinica, 62(8): 979−986 (in Chinese) [杨海博, 胡镇杰, 董钧锋, 朱品红, 李定旭. 2019. 重阳木锦斑蛾越冬幼虫的耐寒性变化. 昆虫学报, 62(8): 979−986]

Zhang HW, Zhao J, Li ZP. 2021. Prediction of suitable establishment areas of invasive species based on GIS: take *Bactrocera dorsalis* (Hendel) as an example. Geomatics & Spatial Information Technology, 44(6): 59−64 (in Chinese) [张华纬, 赵健, 李志鹏. 2021. 基于GIS的入侵生物适生区预测: 以桔小实蝇为例. 测绘与空间地理信息, 44(6): 59−64]

Zhao YX, Kang L. 2000. Cold tolerance of the leafminer *Liriomyza sativae* (Dipt., Agromyzidae). Journal of Applied Entomology, 124(3/4): 185−189

Zhu LS, Chen HS, Tian ZY, Zhou ZS. 2024. Effects of host plant on the low-temperature tolerance of fully-grown larvae and pupae of *Bactrocera cucurbitae* (Coquillett). Plant Protection, 50(1): 165−171 (in Chinese) [朱丽珊, 陈红松, 田震亚, 周忠实. 2024. 寄主对瓜实蝇老熟幼虫和蛹的低温耐受性的影响. 植物保护, 50(1): 165−171]

（责任编辑：张俊芳）