

外源褪黑素对草地贪夜蛾过冷却点和结冰点的影响^{*}

石雪丽^{1**} 张廷伟^{1***} 郭 成² 韩建同¹ 刘长仲¹

(1. 甘肃农业大学植物保护学院, 甘肃省农作物病虫害生物防治工程实验室, 兰州 730070;

2. 甘肃省农业科学院植物保护研究所, 兰州 730070)

摘 要 【目的】明确外源褪黑素对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 过冷却点和结冰点的影响。

【方法】利用食物介导法对草地贪夜蛾 1-6 龄幼虫饲喂含有不同浓度 (0、0.2、2、20 和 200 $\mu\text{g/g}$) 外源褪黑素的人工饲料, 测定褪黑素处理后草地贪夜蛾各虫态的过冷却点和结冰点变化。【结果】外源褪黑素处理后, 草地贪夜蛾 3-6 龄幼虫、雌雄蛹和成虫的过冷却点和结冰点与对照相比均显著降低 ($P < 0.05$), 表明外源褪黑素处理有助于增强草地贪夜蛾的抗寒性。随着外源褪黑素处理浓度的升高, 草地贪夜蛾各虫态的过冷却点和结冰点与对照相比显著降低 ($P < 0.05$), 尤其在 200 $\mu\text{g/g}$ 浓度处理下, 草地贪夜蛾各虫态的过冷却点和结冰点最低。雌、雄性两性个体间过冷却点和结冰点具有一定差异, 雌虫过冷却点和结冰点略低于雄虫, 而且外源褪黑素处理能进一步增强雌、雄个体对低温环境的适应能力。【结论】外源褪黑素处理能降低草地贪夜蛾的过冷却点和结冰点, 增强草地贪夜蛾的抗寒性。

关键词 草地贪夜蛾; 褪黑素; 过冷却点; 结冰点; 抗寒性

Effect of exogenous melatonin on the supercooling and freezing points of different states of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae)

SHI Xue-Li^{1**} ZHANG Ting-Wei^{1***} GUO Cheng² HAN Jian-Tong¹ LIU Chang-Zhong¹

(1. Bio-control Engineering Laboratory of Crop Diseases and Pests of Gansu Province, College of Plant Protection, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Institute of Plant Protection, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract [Aim] To clarify the effect of exogenous melatonin on the supercooling and freezing points of *Spodoptera frugiperda*. [Methods] Using the food-mediated method, the 1st-6th instar of fall armyworm (*S. frugiperda*) larvae were fed an artificial diet containing different concentrations (0, 0.2, 2, 20, and 200 $\mu\text{g/g}$) of exogenous melatonin after which their supercooling and freezing points were measured and compared. [Results] Ingesting exogenous melatonin significantly reduced the supercooling and freezing points of 3rd to 6th stage larvae, pupae and adults, compared to the control, indicating that exogenous melatonin enhances the cold resistance of *S. frugiperda*. Increasing the exogenous melatonin concentration significantly lowered the subcooling and freezing points of each age class relative to the control group ($P < 0.05$). The lowest subcooling and freezing points for each age class were measured at an exogenous melatonin concentration of 200 $\mu\text{g/g}$. The males of *S. frugiperda* exhibited slightly higher supercooling points and freezing points than females. [Conclusion] Exogenous melatonin can lower the supercooling and freezing points of *S. frugiperda*, thereby enhancing its cold hardiness.

Key words *Spodoptera frugiperda*; melatonin; supercooling points; freezing points; cold hardiness

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金地区项目 (32560261, 31960227)

**第一作者 First author, E-mail: 1145600891@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhangtw@gsau.edu.cn

收稿日期 Received: 2025-08-08; 接受日期 Accepted: 2025-10-23

抗寒性是生物适应低温环境或寒冷气候的一种适应能力,对生物的生存和繁衍具有重要意义。抗寒能力的强弱决定生物的地理分布边界、越冬类型和生存策略 (Martínez *et al.*, 2012; Andersen *et al.*, 2015)。昆虫作为变温动物,其生长发育、繁殖、种群动态和地理分布范围均受环境温度的影响,尤其昆虫对低温的适应能力和耐受能力是昆虫种群存在与发展的重要前提 (Doucet *et al.*, 2009; Pan *et al.*, 2024)。不同的昆虫对低温的适应能力不同、抗寒性不同进而导致其越冬方式不同 (Lee, 1989; Rendoll-Cárcamo *et al.*, 2020)。在温带和寒带地区,昆虫经过长期进化通过行为对策(迁飞)或生理对策(滞育)以适应季节和温度变化来越冬 (唐斌和罗炎琳, 2024; Wang *et al.*, 2024)。昆虫的抗寒能力常通过其过冷却点 (Supercooling point, SCP) 和结冰点 (Freezing point, FP) 来衡量,这两项指标是评估昆虫抗寒性的关键 (陈豪等, 2010),其中过冷却点能够反映昆虫体液在结冰前能够耐受的最低温度阈值,昆虫的过冷却点与其耐寒性直接相关,该数值越低,表明昆虫在低温环境中的生存能力越强 (耿书宝等, 2022)。因此,明确昆虫的过冷却点有助于了解昆虫的越冬方式以及安全越冬的地理界限。

褪黑素 (Melatonin, N-乙酰-5-甲氧基色氨) 作为一种生长调节剂和抗氧化剂,广泛存在于各种生物体中,对动、植物的生殖、代谢以及免疫活动尤其抗逆活动起着重要的调节作用 (李经才等, 2000; Zeng *et al.*, 2022; Hazlerigg *et al.*, 2024; Sharma *et al.*, 2024)。对棉花、玉米、油菜等植物研究发现,外源褪黑素处理能够提高植物叶绿素含量和抗氧化酶活性,增强植物对低温、干旱的适应能力以及耐盐性 (Ye *et al.*, 2016; 史中飞等, 2019; 宋晨等, 2024)。在动物学研究方面,外源褪黑素不仅可以提高牛、羊、猪等动物的生产性能,还可以通过刺激抗氧化酶系统来减少氧化损伤,提高动物对逆境的适应能力 (Samuel *et al.*, 2023; Monteiro *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2024)。Fan 等 (2021) 对中华蜜蜂 *Apis cerana cerana* 饲喂外源褪黑素后发现,中华蜜蜂越冬抗寒性的增强与外源褪黑素显著提高其体内甘油

和糖原含量密切相关。Li 等 (2018) 干扰中华蜜蜂的褪黑激素受体 1A 型基因 (*AccMTNR1A*) 后发现,中华蜜蜂的多种抗氧化相关基因 (如 *AccGSTT1*、*AccSOD1*、*AccTpx1*、*AccTrxR1* 等) 与抗低温相关基因 (如 *AccHsp22.6*、*AccGPDH*、*AccTre2*、*AccCYP4G11* 等) 表达均显著降低。Li 等 (2022) 进一步研究发现,对意大利蜜蜂 *Apis mellifera* 饲喂外源褪黑素能显著缓解吡虫啉对蜜蜂毒性损伤,增强蜜蜂的抗药性。

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 是公认的全球性农业“超级害虫”,因其繁殖能力强、寄主范围广、食量大、迁飞性强,被称为“无敌破坏王”,自 2019 年入侵以来对我国玉米、小麦等主要粮食作物造成严重威胁 (江幸福等, 2019; 梁沛等, 2020; 覃江梅等, 2023)。据报道,在我国 1 月份 6 °C 等温线到 10 °C 等温线、28°N-31°N 之间的长江流域为草地贪夜蛾的越冬区,28°N 线以南为周年繁殖区,而 31°N 线以北则草地贪夜蛾无法越冬 (陈辉等, 2020; 姜玉英等, 2021; Yang *et al.*, 2021)。每年夏季北方的虫源由南方越冬区向北方迁飞扩散而来 (姜玉英等, 2019; 吴孔明, 2020)。张大等为 (2024) 发现草地贪夜蛾近几年的发生北界有北移的趋势。本课题组前期对苜蓿蚜 *Aphis craccivora* (张育霞等, 2023) 和草地贪夜蛾 (张海洋等, 2024) 的研究表明,外源褪黑素处理后导致苜蓿蚜和草地贪夜蛾发育历期延长、体型减小、体重减轻以及生殖力下降。这些研究结果表明外源褪黑素在害虫防治方面具有潜在应用价值。Li 等 (2018) 和 Fan 等 (2021) 对中华蜜蜂的研究表明,外源褪黑素处理能显著提高蜜蜂的抗寒性,而草地贪夜蛾在我国北方无法越冬,那么外源褪黑素在抑制草地贪夜蛾生长发育与繁殖的同时,是否也会对其抗寒性产生影响? 外源褪黑素处理是否影响草地贪夜蛾的越冬范围和越冬习性? 这些问题都亟待研究和评估。因此,本研究通过给草地贪夜蛾初孵幼虫饲喂含有不同浓度外源褪黑素的人工饲料,测定了不同浓度外源褪黑素处理对草地贪夜蛾各虫态过冷却点和体液冰点的影响,旨在明确褪黑素处理对草地贪夜蛾抗寒性的影响,以期褪黑素在有害生物防控方面的潜在利用进行

安全评估, 为其在农业生产中的合理应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验虫源草地贪夜蛾幼虫采自甘肃省兰州市榆中县玉米田, 在室内 SPX-250-GB 型人工气候箱(上海跃进医疗器械有限公司)中设置温度为 $(27 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、湿度为 $60\% \pm 10\%$ 、光周期为 16 L : 8 D 的条件下, 利用张海洋等(2024)所用人工饲料饲养多代后备用。褪黑素(Melatonin)购自默克化工技术(上海)有限公司, 为色谱纯试剂, 纯度 $\geq 98\%$ 。

1.2 处理设置和虫样收集

参照张海洋等(2024)的方法, 配置 0(CK)、0.2、2、20 和 200 $\mu\text{g/g}$ 5 个含不同浓度外源褪黑素的人工饲料, 采用 24 孔板进行草地贪夜蛾幼虫饲养。将初孵幼虫(孵化后 $< 2\text{ h}$)单头转移至养虫板中, 每孔预先投放含特定浓度外源褪黑素的人工饲料。饲养期间每日及时补充新鲜的含有不同浓度外源褪黑素的饲料, 每天定期观察草地贪夜蛾的发育情况, 待其生长发育到特定虫态, 收集 3、4、5 和 6 龄幼虫, 根据蛹体第 8 腹节腹面中央纵裂缝两侧无瘤状突起结构的为雌蛹以及第 9 腹节腹面中央纵裂缝两侧有瘤状突起结构的为雄蛹, 收集 1 日龄雌、雄蛹和 1 日龄雌、雄蛾, 用于过冷却点和结冰点测定, 每个虫龄及虫态收集不少于 30 头。

1.3 过冷却点和结冰点的测定

参照张悦等(2020)和耿书宝等(2022)的方法, 采用 SUN-V 型智能昆虫过冷却点测定仪(北京鹏程电子科技有限公司)及其配套软件测定经外源褪黑素处理后的草地贪夜蛾 3-6 龄幼虫、雌雄蛹和成虫的过冷却点和结冰点。测定时, 将过冷却点测定仪感温探头和待测虫体置于 1.5 mL 的 EP 管中并用脱脂棉填充固定使二者紧密接触, 然后将 EP 管放置于 -30°C 超低温冰

箱中悬空, 确保虫体与测温探头的温度变化免受外界干扰, 待虫体温度保持恒定时, 依次记录各测试虫体的过冷却点和结冰点。

1.4 数据分析

试验获得的数据通过 Excel 2019 进行整理与基础计算, 图表中数据的误差处理方式均为平均值 $\pm$ 标准误 ($\text{mean} \pm \text{SE}$)。利用 IBM SPSS Statistics 27.0 软件 One-way ANOVA 程序和 Duncan 氏新复极差法进行方差分析和多重比较, 并采用独立样本 t 检验进行同一处理浓度下雌、雄蛹和雌、雄成虫之间过冷却点和结冰点的差异显著性检验。不同浓度处理下草地贪夜蛾不同虫态过冷却点和结冰点比较图采用 Origin 2024 软件制作。

2 结果与分析

2.1 不同浓度外源褪黑素对草地贪夜蛾不同龄期幼虫过冷却点和结冰点的影响

外源褪黑素不同浓度以及幼虫不同发育阶段对草地贪夜蛾过冷却点和结冰点均有显著影响 ($P < 0.05$) (表 1、表 2)。随着外源褪黑素处理浓度的升高, 同一龄期的草地贪夜蛾幼虫过冷却点和结冰点均逐渐降低, 其中以 200 $\mu\text{g/g}$ 处理浓度下 3 龄幼虫的过冷却点和结冰点最低, 分别为 -11.75 和 -4.39°C , 与对照相比分别降低 2.09 和 1.97°C 。在同一处理浓度下, 随着幼虫龄期的增大过冷却点和结冰点均逐渐升高。表明低龄幼虫过冷却点和结冰点最低, 其抗寒性强, 而饲喂外源褪黑素有助于增强草地贪夜蛾幼虫的抗寒能力。

2.2 不同浓度外源褪黑素对草地贪夜蛾雌、雄蛹过冷却点和结冰点的影响

由图 1(A, B)可知, 不同浓度的外源褪黑素处理显著诱导了草地贪夜蛾雌、雄蛹过冷却点与结冰点的降低 ($P < 0.05$), 且降低幅度与处理浓度呈正相关。在 200 $\mu\text{g/g}$ 外源褪黑素处理浓度下, 雌、雄蛹的过冷却点分别为 -14.45 和 -14.07°C , 与对照相比分别降低 2.86 和 2.98°C ,

表 1 不同浓度外源褪黑素处理下草地贪夜蛾幼虫的过冷却点 (°C)

Table 1 Supercooling points (°C) of *Spodoptera frugiperda* larvae under different concentrations of exogenous melatonin

处理浓度 (μg/g) Treatment concentration (μg/g)	幼虫龄期 Larval instar			
	3 龄 3rd instar	4 龄 4th instar	5 龄 5th instar	6 龄 6th instar
0 (CK)	- 9.66±0.24 Ca	- 8.55±0.26 Ba	- 6.88±0.17 Aa	- 6.40±0.21 Aa
0.2	- 9.72±0.25 Ca	- 8.70±0.29 Bab	- 7.91±0.21 Ab	- 7.37±0.26 Ab
2	- 10.40±0.25 Ca	- 9.40±0.25 Bb	- 8.38±0.20 Ab	- 8.24±0.24 Ac
20	- 11.55±0.24 Cb	- 10.30±0.29 Bc	- 9.29±0.20 Ac	- 8.76±0.17 Acd
200	- 11.75±0.27 Bb	- 11.72±0.31 Bd	- 9.87±0.27 Ac	- 9.18±0.27 Ad

表中数据为平均数±标准误, 同列数据后不同小写字母表示同龄期不同浓度间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan 氏新复极差法), 同行数据后不同大写字母表示同浓度不同龄期间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan 氏新复极差法)。下表同。

Data in the table are presented as mean ± SE, and the different lowercase letters within the same column indicate significant difference among various concentrations at the same larval instar ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test), while with the different capital letters within the same row indicate significant difference among different larval instars at the same concentration ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test). The same below.

表 2 不同浓度外源褪黑素处理下草地贪夜蛾幼虫的结冰点 (°C)

Table 2 Freezing point (°C) of *Spodoptera frugiperda* larvae under different concentrations of exogenous melatonin

处理浓度 (μg/g) Treatment concentration (μg/g)	幼虫龄期 Larval instar			
	3 龄 3rd instar	4 龄 4th instar	5 龄 5th instar	6 龄 6th instar
0 (CK)	- 2.42±0.15 Ca	- 1.56±0.13 Ba	- 1.51±0.06 Ba	- 1.21±0.06 Aa
0.2	- 3.00±0.16 Cb	- 1.62±0.07 Ba	- 1.82±0.10 Ba	- 1.26±0.10 Aa
2	- 3.35±0.22 Cb	- 1.85±0.11 Ba	- 2.26±0.15 ABb	- 1.71±0.13 Ab
20	- 4.01±0.18 Cc	- 2.62±0.17 Bb	- 2.74±0.16 Bc	- 2.12±0.16 Ac
200	- 4.39±0.23 Cc	- 3.45±0.30 Bc	- 3.23±0.20 Bd	- 2.30±0.20 Ac

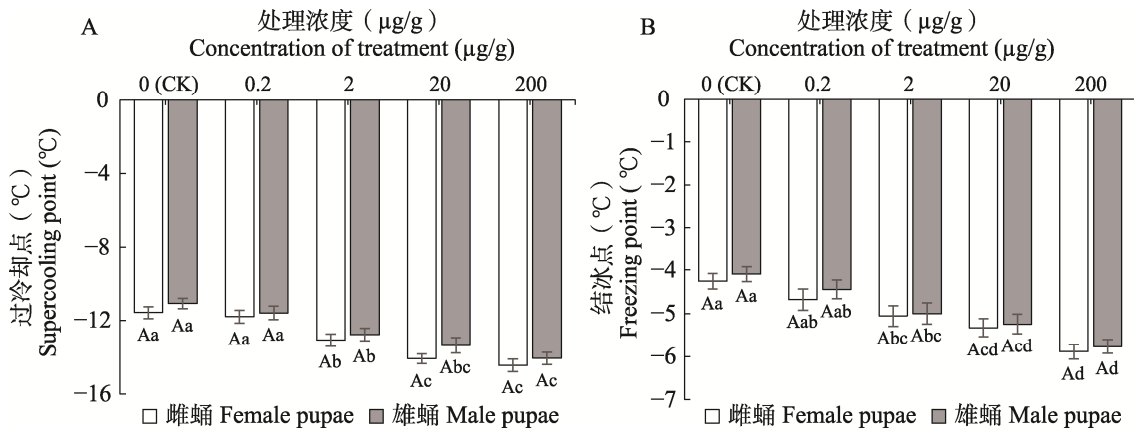


图 1 不同浓度外源褪黑素处理下草地贪夜蛾雌、雄蛹的过冷却点 (A) 和结冰点 (B)

Fig. 1 The supercooling point (A) and freezing point (B) of female and male pupae of *Spodoptera frugiperda* under different concentrations of exogenous melatonin

图中数据为平均值±标准误, 柱下不同小写字母表示不同浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan 氏新复极差法); 柱下不同大写字母表示同一浓度下不同性别间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan 氏新复极差法)。图 2 同。

Data in the figure are mean ± SE. Different lowercase letters below bars indicate significant difference between different concentration treatments ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test). Different capital letters below bars indicate significant difference between sexes at the same concentration ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test). The same for Fig. 2.

雌、雄蛹的结冰点分别为 -5.89 和 -5.77 $^{\circ}\text{C}$ ，与对照相比分别降低 1.63 和 1.67 $^{\circ}\text{C}$ 。在相同处理浓度下，过冷却点和结冰点总是雌蛹低于雄蛹，但 t 检验发现各处理浓度下雌、雄蛹间过冷却点和结冰点无显著差异 ($P > 0.05$)。结果表明草地贪夜蛾经外源褪黑素处理能够降低雌、雄蛹的过冷却点和结冰点。

2.3 不同浓度外源褪黑素对草地贪夜蛾成虫过冷却点和结冰点的影响

外源褪黑素处理对草地贪夜蛾雌、雄成虫过冷却点和结冰点的影响见图 2 (A, B)。与雌、雄蛹的处理结果相似，随着外源褪黑素处理浓度的升高，草地贪夜蛾雌、雄成虫的过冷却点和结冰点与对照相比均显著降低 ($P < 0.05$)。在 200 $\mu\text{g/g}$ 外源褪黑素处理浓度下，雌、雄成虫的过冷

却点分别为 -13.67 和 -12.82 $^{\circ}\text{C}$ ，与对照相比分别降低 2.73 和 2.83 $^{\circ}\text{C}$ ，雌、雄成虫的结冰点分别为 -5.83 和 -5.50 $^{\circ}\text{C}$ ，与对照相比分别降低 2.07 和 2.24 $^{\circ}\text{C}$ 。在相同处理浓度下，雌性成虫的过冷却点和结冰点在所有处理浓度下均低于雄性，但 t 检验发现仅对照组雌成虫与雄成虫的过冷却点间存在显著差异 ($P < 0.05$)，而其它浓度处理下雌、雄成虫间过冷却点和结冰点均无显著差异 ($P > 0.05$)。表明外源褪黑素处理能够降低草地贪夜蛾雌、雄蛹的过冷却点和结冰点，同时外源褪黑素具有缩小雄成虫与雌成虫抗寒性差异的趋势。

2.4 不同浓度外源褪黑素处理下草地贪夜蛾不同虫态过冷却点和结冰点比较

由图 3 (A, B) 可以看出，草地贪夜蛾经外

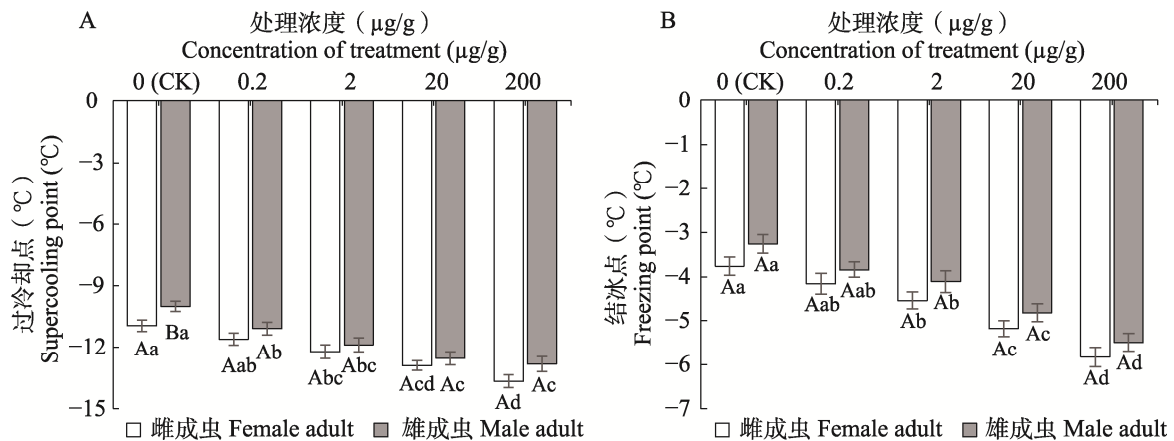


图 2 不同浓度外源褪黑素处理下草地贪夜蛾雌、雄成虫的过冷却点 (A) 和结冰点 (B)

Fig. 2 Supercooling point (A) and freezing point (B) of female and male adult of *Spodoptera frugiperda* under different concentrations of exogenous melatonin

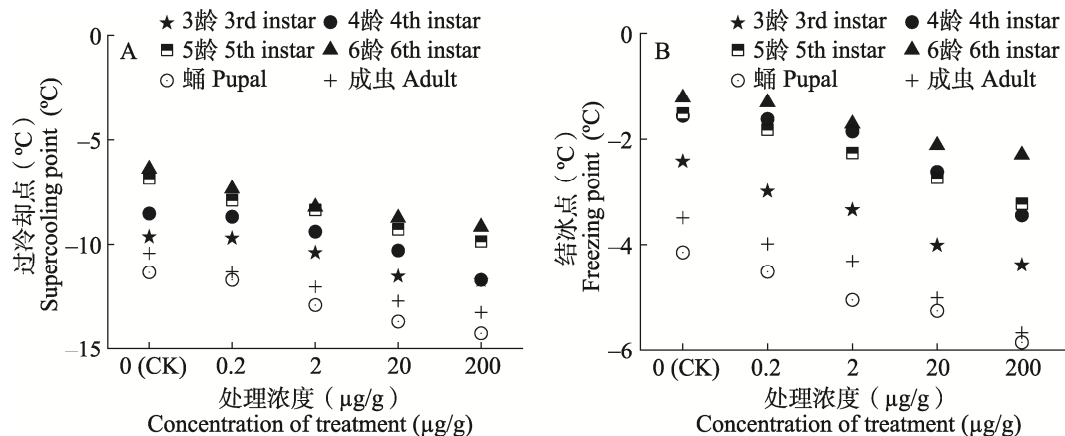


图 3 不同浓度外源褪黑素处理下草地贪夜蛾不同虫态的过冷却点 (A) 和结冰点 (B)

Fig. 3 Supercooling points (A) and freezing points (B) at different developmental stages of *Spodoptera frugiperda* under different concentrations of exogenous melatonin

源褪黑素处理后不同虫态的过冷却点和结冰点存在显著差异。在相同处理浓度下,草地贪夜蛾不同发育阶段均以蛹的过冷却点和结冰点最低,成虫次之,幼虫的过冷却点和结冰点相对最高。在幼虫中,草地贪夜蛾的过冷却点和结冰点随着龄期的增加呈上升趋势,3龄时,幼虫的过冷却点和结冰点最低;6龄时,幼虫的过冷却点和结冰点最高。在同一龄期,草地贪夜蛾的过冷却点和结冰点受外源褪黑素的影响,随着处理浓度的上升而显著降低($P < 0.05$),当外源褪黑素浓度为 200 $\mu\text{g/g}$ 时,各虫态的过冷却点和结冰点达到最小值,其中,蛹的过冷却点为 $-14.28\text{ }^{\circ}\text{C}$,结冰点为 $-5.86\text{ }^{\circ}\text{C}$,在各虫态中最小,表明蛹的抗寒能力最强。

3 讨论

抗寒性是昆虫适应低温环境的关键能力,直接关系到其越冬存活率的高低。这一特性不仅影响昆虫的地理分布范围,还直接决定了它们向高纬度地区扩散的越冬北界(张润杰和何新风,1997)。在评价昆虫抗寒性强弱的指标中,过冷却点和结冰点是最为直接的生理参数(景晓红和康乐,2004)。褪黑素作为一种广泛存在的多效性分子,已被证实参与调控昆虫的抗药性、抗氧化应激以及植物的逆境响应(Li *et al.*, 2018, 2022; 张融雪等, 2021)。本研究对草地贪夜蛾不同虫态的过冷却点和结冰点测定发现,蛹的过冷却点和结冰点值最低,该结果与谢殿杰等(2020)研究结果一致;在幼虫阶段,3龄幼虫的过冷却点和结冰点最低,这与张智等(2019)和张悦等(2020)的测定结果一致。在草地贪夜蛾越冬区调查发现,蛹是其主要越冬虫态(齐国君, 2020)。邱良妙等(2020)发现在福建莆田和漳州地区草地贪夜蛾可以低龄幼虫越冬,说明低龄幼虫期也具有较强的耐寒能力,与本研究的研究结果相一致。

同时研究发现,外源褪黑素饲喂处理草地贪夜蛾幼虫后,草地贪夜蛾所受测虫态的过冷却点和结冰点与对照相比均显著降低,并在 0-200 $\mu\text{g/g}$ 外源褪黑素处理浓度范围内随着外源褪黑素处

理浓度的升高,草地贪夜蛾各虫态的过冷却点和结冰点均逐渐降低,表明外源褪黑素处理有助于增强草地贪夜蛾的抗寒性。李兴鹏等(2012)发现蠋蛾 *Arma chinensis* 的耐寒性与体内葡萄糖、山梨醇和甘油等小分子物质含量有关;温乙妮等(2024)发现番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* 体内的脂肪、蛋白质、海藻糖和山梨醇的含量变化会影响抗寒性的强弱;Niva 和 Takeda(2003)研究发现,通过植物介导法饲喂外源褪黑素能够促进茶翅蛾 *Halyomorpha halys* 体内的脂肪蓄积。Fan 等(2021)发现外源褪黑素处理后中华蜜蜂体内的糖原和甘油含量显著增加,中华蜜蜂的抗寒性也显著增强。因此,外源褪黑素处理增强草地贪夜蛾抗寒性的原因可能与褪黑素影响虫体内营养物质代谢以及耐寒物质的积累有关,后续有待对外源褪黑素处理后草地贪夜蛾体内营养物质以及相关抗寒物质含量变化进一步研究。

此外,本研究还发现草地贪夜蛾雌雄两性个体的抗寒性存在一定差异,雌虫的过冷却点和结冰点始终低于雄性,但雌蛹与雄蛹和雌成虫与雄成虫的过冷却点与结冰点数值变化均未达到显著差异。这与孔维娜等(2019)对梨小食心虫 *Grapholita molesta*、张悦等(2020)对草地贪夜蛾的研究结果一致。前人对白纹雏蝗 *Chorthippus albonemus* 研究发现,白纹雏蝗雌成虫体内游离水含量显著低于雄成虫,而不饱和脂肪酸含量则显著高于雄成虫(魏淑花等, 2021)。雌雄成虫这种生理代谢差异可能是造成雌性个体的过冷却点和结冰点低于雄性的原因,使具有繁衍后代能力的雌虫更能适应低温环境,而外源褪黑素处理能进一步增强雌、雄个体对低温的适应能力。

综上所述,本研究通过食物介导法给草地贪夜蛾饲喂不同浓度外源褪黑素证实,褪黑素处理能有效降低草地贪夜蛾的过冷却点和结冰点,显著增强草地贪夜蛾各虫态的抗寒能力。本研究结果表明饲喂外源褪黑素有利于提高昆虫的抗寒性,揭示了褪黑素在调控昆虫低温适应性中的积极作用和潜在应用价值。在有益昆虫的人工饲养中,可以通过添加外源褪黑素,从而提高有益昆虫的越冬能力及抗寒性,提高其在低温季节的存

活率、保障其种群基数,有利于有益昆虫次年春季的繁殖与持续利用。因此,本研究为资源昆虫(如传粉昆虫、产丝昆虫)和天敌昆虫(如寄生蜂、捕食性瓢虫)的规模化饲养提供了潜在的新策略。

参考文献 (References)

- Andersen JL, Manenti T, Sørensen JG, MacMillan HA, Loeschcke V, Overgaard J, 2015. How to assess *Drosophila* cold tolerance: Chill coma temperature and lower lethal temperature are the best predictors of cold distribution limits. *Functional Ecology*, 29(1): 55–65.
- 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. [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.]
- Chen H, Wu MF, Liu J, Chen AD, Jiang YY, Hu G, 2020. Migratory routes and occurrence divisions of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in China. *Journal of Plant Protection*, 47(4): 747–757. [陈辉, 武明飞, 刘杰, 湛爱东, 姜玉英, 胡高, 2020. 我国草地贪夜蛾迁飞路径及其发生区划. 植物保护学报, 47(4): 747–757.]
- Doucet D, Walker VK, Qin W, 2009. The bugs that came in from the cold: Molecular adaptations to low temperatures in insects. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 66(8): 1404–1418.
- Fan WY, Li GL, Zhang XM, Wang Y, Wang C, Xu BH, Guo XQ, Li H, 2021. The role of melatonin and tryptophan-5-hydroxylase-1 in different abiotic stressors in *Apis cerana cerana*. *Journal of Insect Physiology*, 128: 104180.
- Geng SB, Hou HL, Hong F, Jin YL, Yin J, Pan PL, 2022. Determination of the supercooling point and freezing point of tea silvery geometrid *Scopula subpunctaria* at different stages. *Journal of Plant Protection*, 49(4): 1180–1186. [耿书宝, 侯贺丽, 洪枫, 金银利, 尹健, 潘鹏亮, 2022. 不同虫态茶银尺蠖过冷却点和结冰点的测定. 植物保护学报, 49(4): 1180–1186.]
- Hazlerigg DG, Simonneaux V, Dardente H, 2024. Melatonin and seasonal synchrony in mammals. *Journal of Pineal Research*, 76(5): e12996.
- Jiang XF, Zhang L, Cheng YX, Song LL, 2019. Advances in migration and monitoring techniques of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith). *Plant Protection*, 45(1): 12–18. [江幸福, 张蕾, 程云霞, 宋琳琳, 2019. 草地贪夜蛾迁飞行为与监测技术研究进展. 植物保护, 45(1): 12–18.]
- Jiang YY, Liu J, Wu QL, Cirenzhugong, Zeng J, 2021. Investigation on winter breeding and overwintering areas of *Spodoptera frugiperda* in China. *Plant Protection*, 47(1): 212–217. [姜玉英, 刘杰, 吴秋琳, 次仁卓嘎, 曾娟, 2021. 我国草地贪夜蛾冬繁区和越冬区调查. 植物保护, 47(1): 212–217.]
- Jiang YY, Liu J, Xie MC, Li YH, Yang JJ, Zhang ML, Qiu K, 2019. Observation on law of diffusion damage of *Spodoptera frugiperda* in China in 2019. *Plant Protection*, 45(6): 10–19. [姜玉英, 刘杰, 谢茂昌, 李亚红, 杨俊杰, 张曼丽, 邱坤, 2019. 2019 年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测. 植物保护, 45(6): 10–19.]
- Jing XH, Kang L, 2004. Overview and evaluation of research methodology for insect cold hardiness. *Entomological Knowledge*, 41(1): 7–10. [景晓红, 康乐, 2004. 昆虫耐寒性的测定与评价方法. 昆虫知识, 41(1): 7–10.]
- Kong WN, Wang Y, Guo YF, Gao Y, Zhao F, Li J, Ma RY, 2019. Supercooling points and freezing points of *Grapholita molesta* (Busck). *Plant Protection*, 45(3): 102–105. [孔维娜, 王怡, 郭永福, 高越, 赵飞, 李捷, 马瑞燕, 2019. 梨小食心虫过冷却点及结冰点测定. 植物保护, 45(3): 102–105.]
- Lee RE, 1989. Insect cold-hardiness: To freeze or not to freeze. *BioScience*, 39(5): 308–313.
- Li GL, Zhang YM, Ni Y, Wang Y, Xu BH, Guo XQ, 2018. Identification of a melatonin receptor type 1A gene (AceMTNR1A) in *Apis cerana cerana* and its possible involvement in the response to low temperature stress. *The Science of Nature*, 105(3/4): 24.
- Li JC, Wang F, Huo Y, Liu DC, 2000. The primary function of melatonin in evolution. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 12(3): 130–133. [李经才, 王芳, 霍艳, 刘东春, 2000. 从生物进化看褪黑素的功能意义. 生命科学, 12(3): 130–133.]
- Li XP, Song LW, Zhang HH, Chen YQ, Zuo TT, Wang J, Sun W, 2012. Responses of *Arma chinensis* cold tolerance to rapid cold hardening and underlying physiological mechanisms. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23(3): 791–797. [李兴鹏, 宋丽文, 张宏浩, 陈越渠, 左彤彤, 王君, 孙伟, 2012. 蝓蛄抗寒性对快速冷驯化的响应及其生理机制. 应用生态学报, 23(3): 791–797.]
- Li Z, Duan JX, Chen LC, Wang YD, Qin QQ, Dang XQ, Zhou ZY, 2022. Melatonin enhances the antioxidant capacity to rescue the honey bee *Apis mellifera* from the ecotoxicological effects caused by environmental imidacloprid. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 239: 113622.
- Liang P, Gu SH, Zhang L, Gao XW, 2020. Research status and prospects of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in China. *Acta Entomologica Sinica*, 63(5): 624–638. [梁沛, 谷少华, 张雷, 高希武, 2020. 我国草地贪夜蛾的生物学、生态学

- 和防治研究概况与展望. 昆虫学报, 63(5): 624–638.]
- Martínez B, Arenas F, Rubal M, Burgués S, Esteban R, García-Plazaola I, Figueroa FL, Pereira R, Saldaña L, Sousa-Pinto I, Trilla A, Viejo RM, 2012. Physical factors driving intertidal macroalgae distribution: Physiological stress of a dominant furoid at its southern limit. *Oecologia*, 170(2): 341–353.
- Monteiro KK, Shiroma ME, Damous LL, Simões MD, Simões RD, Cipolla-Neto J, Baracat EC, Soares-Jr JM, 2024. Antioxidant actions of melatonin: A systematic review of animal studies. *Antioxidants*, 13(4): 439.
- Niva CC, Takeda M, 2003. Effects of photoperiod, temperature and melatonin on nymphal development, polyphenism and reproduction in *Halyomorpha halys* (Heteroptera: Pentatomidae). *Zoological Science*, 20(8): 963–970.
- Pan CN, Zhou W, Lu CH, Pan YN, Liu LY, Chen WL, 2024. Fitness implications of low-temperature storage for *Eocanthecona furcellata* (Hemiptera: Pentatomidae). *Journal of Economic Entomology*, 117(5): 1739–1752.
- Qi GJ, Huang DC, Wang L, Zhang YP, Xiao HX, Shi QX, Xiao Y, Su XN, Huang SH, Zou SF, Chen KW, Zhou ZB, Zhong BY, Zheng JJ, Zhang ZX, Jiang TH, Lü LH, Lu YY, Zhang ZF, 2020. The occurrence characteristic in winter and year-round breeding region of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in Guangdong Province. *Journal of Environmental Entomology*, 42(3): 573–582. [齐国君, 黄德超, 王磊, 章玉苹, 肖汉祥, 石庆型, 肖勇, 苏湘宁, 黄少华, 邹寿发, 陈科伟, 周振标, 钟宝玉, 郑静君, 张志祥, 江腾辉, 吕利华, 陆永跃, 张振飞, 2020. 广东省草地贪夜蛾冬季发生特征及周年繁殖区域研究. 环境昆虫学报, 42(3): 573–582.]
- Qin JM, Qin W, Cai XY, Yu YH, Chen HS, 2023. Predation of spider *Oxyopes sertatus* on fall armyworm *Spodoptera frugiperda* larvae. *Journal of Plant Protection*, 50(4): 1033–1041. [覃江梅, 覃武, 蔡晓燕, 于永浩, 陈红松, 2023. 斜纹猫蛛对草地贪夜蛾幼虫的捕食作用. 植物保护学报, 50(4): 1033–1041.]
- Qiu LM, Liu QQ, Tian XH, Chen YS, Huang XY, Lin RK, Yang XJ, Liu BP, Wang ZH, He YX, Zhan ZX, 2020. Cold hardiness and overwintering ability of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* populations in Fujian Province. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(6): 1299–1310. [邱良妙, 刘其全, 田新湖, 陈益生, 黄晓燕, 林仁魁, 杨秀娟, 刘必炮, 王竹红, 何玉仙, 占志雄, 2020. 福建省草地贪夜蛾种群的耐寒性与越冬能力研究. 应用昆虫学报, 57(6): 1299–1310.]
- Rendoll-Cárcamo J, Contador T, Convey P, Kennedy J, 2020. Sub-Antarctic freshwater invertebrate thermal tolerances: An assessment of critical thermal limits and behavioral responses. *Insects*, 11(2): 102.
- Samuel FU, Ogunkunle N, Simpson MD, Jones K, Hering J, Abdelrahim GE, Verghese M, Cerbet E, Kuang XY, 2023. PSIII-18 effect of industrial hemp supplementation on the salivary melatonin concentrations of Angus cattle at different phase of reproductive cycle. *Journal of Animal Science*, 101(Suppl. 3): 394.
- Sharma P, Thakur N, Mann NA, Umar A, 2024. Melatonin as plant growth regulator in sustainable agriculture. *Scientia Horticulturae*, 323: 112421.
- Shi ZF, Liang JH, Zhang XH, Cheng HB, Zheng S, Wang J, Zhang TG, 2019. Effect of exogenous melatonin on cold resistance of *Brassica rapa* seedlings under low temperature stress. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 37(4): 163–170. [史中飞, 梁娟红, 张小花, 成宏斌, 郑晟, 王娟, 张腾国, 2019. 外源褪黑素对低温胁迫下油菜幼苗抗寒性的影响. 干旱地区农业研究, 37(4): 163–170.]
- Song C, Liu SS, Wang J, Ma XY, Liu LT, Zhang K, Zhang YJ, Sun HC, Bai ZY, Li CD, 2024. Effects of exogenous melatonin on the growth and development, antioxidant enzyme activity, and osmotic adjustment substance content of cotton under salt stress. *Cotton Science*, 36(6): 486–498. [宋晨, 刘莎莎, 王简, 马鑫颖, 刘连涛, 张科, 张永江, 孙红春, 白志英, 李存东, 2024. 外源褪黑素对盐胁迫下棉花生长发育、抗氧化酶活性及渗透调节物质含量的影响. 棉花学报, 36(6): 486–498.]
- Tang B, Luo YL, 2024. Guidance: Occurrence and control of migratory pests. *Scientia Agricultura Sinica*, 57(20): 3986–3988. [唐斌, 罗炎琳, 2024. 导读: 迁飞性害虫发生与防控. 中国农业科学, 57(20): 3986–3988.]
- Wang XY, Ma HT, Zhao YC, Gao Y, Wu KM, 2024. Abundance and seasonal migration patterns of green lacewings (Neuroptera: Chrysopidae) across the Bohai strait in eastern Asia. *Insects*, 15(5): 321.
- Wei SH, Wu XZ, Wang Y, Ma ZN, Gao LY, Huang WG, Zhang R, 2021. Cold resistance, high temperature tolerance and resistance mechanism of grasshopper *Chorthippus albonemus*. *Journal of Plant Protection*, 48(1): 172–178. [魏淑花, 吴秀芝, 王颖, 马志宁, 高立原, 黄文广, 张蓉, 2021. 白纹雏蝗抗寒特性和高温耐受性及其机制. 植物保护学报, 48(1): 172–178.]
- Wen YN, Ding JX, Gu X, Wang XP, 2024. Effect of low-temperature stress on the content of cold-resistant substances in *Tuta absoluta*. *Journal of Environmental Entomology*, 46(6): 1367–1373. [温乙妮, 丁嘉欣, 顾欣, 王新谱, 2024. 低温胁迫对番茄潜叶蛾体内抗寒物质含量的影响. 环境昆虫学报, 46(6): 1367–1373.]

- Wu KM, 2020. Management strategies of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China. *Plant Protection*, 46(2): 1–5. [吴孔明, 2020. 中国草地贪夜蛾的防控策略. 植物保护, 46(2): 1–5.]
- Xie DJ, Zhang L, Cheng YX, Jiang XF, 2020. Effects of different feeding temperature on the supercooling points and freezing points of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 46(2): 62–71. [谢殿杰, 张蕾, 程云霞, 江幸福, 2020. 不同饲养温度对草地贪夜蛾过冷却点和体液冰点的影响. 植物保护, 46(2): 62–71.]
- Yang XM, Song YF, Sun XX, Shen XJ, Wu QL, Zhang HW, Zhang DD, Zhao SY, Liang GM, Wu KM, 2021. Population occurrence of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), in the winter season of China. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(3): 772–782.
- Ye J, Wang SW, Deng XP, Yin LN, Xiong BL, Wang XY, 2016. Melatonin increased maize (*Zea mays* L.) seedling drought tolerance by alleviating drought-induced photosynthetic inhibition and oxidative damage. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38(2): 48.
- Zeng W, Mostafa S, Lu ZG, Jin B, 2022. Melatonin-mediated abiotic stress tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science*, 13: 847175.
- Zhang DW, Chen J, Wei YH, Hui NN, Guo ZJ, Luo JC, 2024. Genetic diversity analysis and governance strategy of *Spodoptera frugiperda* populations in northwest China. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 33(2): 312–320. [张大为, 陈靖, 魏玉红, 惠娜娜, 郭致杰, 罗进仓, 2024. 西北地区草地贪夜蛾种群遗传多样性分析及治理策略. 西北农业学报, 33(2): 312–320.]
- Zhang HY, Guo C, Zhang TW, Zhang QY, Liu CZ, 2024. Effects of exogenous melatonin on the growth, development and reproduction of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 67(6): 797–805. [张海洋, 郭成, 张廷伟, 张强艳, 刘长仲, 2024. 外源褪黑素对草地贪夜蛾生长发育和繁殖的影响. 昆虫学报, 67(6): 797–805.]
- Zhang RJ, He XF, 1997. Potential effects of climate change on agricultural insect pests. *Chinese Journal of Ecology*, 16(6): 36–40. [张润杰, 何新风, 1997. 气候变化对农业害虫的潜在影响. 生态学杂志, 16(6): 36–40.]
- Zhang RX, Sun Y, Su JP, Wang SJ, Tong H, Liu YQ, Sun LJ, 2021. Research progress on plant melatonin. *Current Biotechnology*, 11(3): 297–303. [张融雪, 孙玥, 苏京平, 王胜军, 佟卉, 刘燕清, 孙林静, 2021. 植物褪黑素研究进展. 生物技术进展, 11(3): 297–303.]
- Zhang Y, Deng XY, Zhang XY, Jiang CX, Huang C, Chen HN, Li Q, Feng CH, Ma L, 2020. Supercooling and freezing points of *Spodoptera frugiperda* feeding on different foods. *Plant Protection*, 46(2): 72–77. [张悦, 邓晓悦, 张雪艳, 蒋春先, 黄川, 陈昊楠, 李庆, 封传红, 马利, 2020. 取食不同食物的草地贪夜蛾的过冷却点和结冰点. 植物保护, 46(2): 72–77.]
- Zhang YX, Zhang TW, Shi L, Yuan Y, Liu CZ, 2023. Effects of exogenous melatonin on the growth and reproduction of *Aphis craccivora*. *Chinese Journal of Ecology*, 42(5): 1150–1154. [张育霞, 张廷伟, 史历, 袁月, 刘长仲, 2023. 外源褪黑素对苜蓿蚜生长发育和繁殖的影响. 生态学杂志, 42(5): 1150–1154.]
- Zhang Z, Zheng Q, Zhang YH, Liu J, Yin XT, Tang QB, Li J, Yuan Y, Li XR, Zhu X, 2019. Cold hardiness of laboratory populations of *Spodoptera frugiperda*. *Plant Protection*, 45(6): 43–49, 69. [张智, 郑乔, 张云慧, 刘杰, 殷新田, 汤清波, 李静, 袁源, 李祥瑞, 朱勋, 2019. 草地贪夜蛾室内种群抗寒能力测定. 植物保护, 45(6): 43–49, 69.]
- Zhao RH, Bai YC, Yang FX, 2024. Melatonin in animal husbandry: Functions and applications. *Frontiers in Veterinary Science*, 11: 1444578.