

温度和寄生蜂对草地贪夜蛾生长发育的影响*

张浩** 蒋杰贤 李文伟 岳阳 王金彦 尤春梅 陈义娟 季香云***

(上海市农业科学院生态环境保护研究所, 上海 201403)

摘要 【目的】明确温度和寄生蜂对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 生长发育的影响, 为更有效的在田间利用淡足侧沟茧蜂 *Microplitis pallidipes* 防控草地贪夜蛾提供依据。【方法】通过游标卡尺和电子天平分别测定了 14、20、26 和 32 °C 温度条件下, 被淡足侧沟茧蜂寄生 1-4 d 的草地贪夜蛾幼虫的体长、头宽、体重和取食量, 分析温度和寄生蜂对草地贪夜蛾体长、头宽、体重生长速率以及被寄生幼虫死亡率和存活天数的影响。【结果】草地贪夜蛾幼虫的体长、头宽、体重和取食量均受到温度和寄生 2 个因素的影响。32 °C 未寄生处理 (第 4 天) 的草地贪夜蛾幼虫的体长、头宽、体重和取食量最高, 分别是同期寄生处理组 (32 °C) 的 1.76、1.68、7.29 和 14.25 倍, 是同期 14 °C 未寄生处理组的 2.85、2.77、19.96 和 19.90 倍, 是同期 14 °C 寄生处理组的 3.30、3.08、34.70 和 106.38 倍。对体长、头宽和体重生长速率分析发现, 4 个温度条件下, 未被寄生组幼虫的生长速率高于寄生组幼虫, 其中 32 °C 未被寄生组幼虫最高, 14 °C 被寄生组最低。对被寄生幼虫死亡率和存活时间的分析表明, 4 个温度条件下, 被寄生的草地贪夜蛾幼虫的死亡率 (100%) 显著高于未被寄生处理组的幼虫 (6.67%-16.67%) ($P < 0.05$), 未被寄生处理组幼虫的死亡率随温度升高而降低。未寄生处理组幼虫的幼虫期和寄生处理组幼虫的存活时间均随温度升高逐渐缩短。【结论】淡足侧沟茧蜂在不同温度下均能抑制草地贪夜蛾的生长发育并影响其存活, 而这种抑制作用在不同温度条件下存在差异。

关键词 草地贪夜蛾; 温度; 寄生蜂; 生长发育; 生物防治

Effects of temperature and parasitoids on the growth and development of *Spodoptera frugiperda*

ZHANG Hao** JIANG Jie-Xian LI Wen-Wei YUE Yang WANG Jin-Yan
YOU Chun-Mei CHEN Yi-Juan JI Xiang-Yun***

(Eco-environmental Protection Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China)

Abstract [Aim] To investigate the impact of temperature and the parasitoid *Microplitis pallidipes* on the growth and development of *Spodoptera frugiperda*, thereby assessing the potential of using *M. pallidipes* as a biological control for this pest. [Methods] The body length, head width, body weight and food intake of *S. frugiperda* larvae raised at temperatures of 14, 20, 26, and 32 °C were measured using vernier calipers and an electronic balance, and the effects of temperature and parasitism on the growth rate and survival of *S. frugiperda* larvae were analyzed. [Results] Our findings indicate that both temperature and parasite infestation significantly affected the body length, head width, weight, and food intake, of *S. frugiperda* larvae. Unparasitized larvae raised at 32 °C had 1.76 times the body length, 1.68 times the head width, 7.29 times the weight, and consumed 14.25 times more food, than those in the parasitized treatment group at the same temperature. They were also 2.85 times the body length, 2.77 times the head width, 19.96 times the body weight, and consumed 19.90 times more food, than those raised at 14 °C without parasitism, and had 3.30 times the body length, 3.08 times the head width, 34.70 times the weight, and consumed 106.38 times as much food, than those raised at 14 °C

*资助项目 Supported projects: 上海市科技创新行动计划农业科技领域项目 (23N41900200); 上海市农业科学院卓越团队建设项目 (2022-017)

**第一作者 First author, E-mail: zhangvhaov@126.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: shjxy2023@163.com

收稿日期 Received: 2024-02-08; 接受日期 Accepted: 2024-05-08

with parasitism. The body length, head width, and body weight, of unparasitized larvae were all greater than those of parasitized larvae at all four temperatures. The highest growth rate was observed in unparasitized larvae raised at 32 °C, and the lowest in parasitized larvae raised at 14 °C. The mortality rate of parasitized larvae was also significantly higher than that of non-parasitized larvae under all four temperatures ($P < 0.05$). Furthermore, the mortality rate of non-parasitized larvae decreased with increasing temperature, whereas the larval stage of non-parasitized larvae and the survival time of parasitized larvae decreased with increasing temperature. **[Conclusion]** These findings suggest that *M. pallidipes* inhibits the growth, development and survival of *S. frugiperda* at temperatures between 14 and 32 °C, and that the degree of inhibition varies with temperature.

Key words *Spodoptera frugiperda*; temperature; parasitoid; growth and development; biological control

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 属鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae, 是玉米和水稻等粮食作物以及其他一些作物上的重要农业害虫 (郭井菲等, 2019; 吴孔明, 2020; Tay *et al.*, 2023)。目前对草地贪夜蛾的防治以化学防治为主, 化学农药的大量使用不但使草地贪夜蛾产生了抗药性, 而且对环境安全和食品安全造成了潜在威胁 (吴益东等, 2019; Van den Berg and du Plessis, 2022)。应用生物防治手段控制草地贪夜蛾, 不但能减少对环境的污染, 还能降低害虫的抗药性, 对于提升农业生态系统的物种多样性和稳定性具有重要意义。有效利用寄生蜂和捕食性天敌等生物防治手段已经成为防治该虫的趋势 (唐璞等, 2019)。淡足侧沟茧蜂 *Microplitis pallidipes* 是甜菜夜蛾 *S. exigua* 和斜纹夜蛾 *S. litura* 等鳞翅目夜蛾的一种幼虫寄生蜂, 能够寄生 1-4 龄幼虫, 广泛分布于我国浙江、山东、河北和台湾等省份。淡足侧沟茧蜂对甜菜夜蛾幼虫的自然寄生率可达 30% 以上, 具有良好的生物防治效果 (Jiang *et al.*, 2018)。近年来, 研究人员发现淡足侧沟茧蜂可用于草地贪夜蛾的生物防治, 其对低龄草地贪夜蛾的寄生率为 36.67%-91.67%, 被寄生的幼虫均不能发育为成虫 (巨学阳等, 2021)。此外, 还在草地贪夜蛾被寄生后的免疫黑化, 以及温度对淡足侧沟茧蜂寄生效果的影响等方面开展了研究 (王金彦等, 2020; 黄兰兰等, 2022; 季香云等, 2022)。但是, 关于淡足侧沟茧蜂寄生调控草地贪夜蛾生长发育的研究还较少。

寄生蜂的寄生能够影响寄主的生长发育。昆虫被寄生蜂寄生后, 其生长发育往往会受到抑

制, 不能发育到下一阶段或者完成变态发育 (Gueguen *et al.*, 2013; 叶恭银等, 2019)。例如, 菜蛾盘绒茧蜂 *Cotesia plutellae* 寄生能够抑制小菜蛾 *Plutella xylostella* 体重的增加 (白素芬等, 2005); 斯氏侧沟茧蜂 *M. simili* 寄生能显著抑制草地贪夜蛾幼虫体重和取食量, 并最终致其死亡 (陈壮美等, 2019); 被稻螟赤眼蜂 *Trichogramma japonicum* 寄生的水稻二化螟 *Chilo suppressalis* 卵无法发育到幼虫阶段 (Zang *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2024); 斜纹夜蛾低龄幼虫被斜纹夜蛾侧沟茧蜂 *M. prodeniae* 寄生后无法继续发育到 5 龄 (蒋杰贤等, 2003), 以上研究都表明了寄生蜂能够影响寄主的生长发育。研究寄生蜂对寄主生长发育的影响对于更好的利用寄生蜂防控害虫具有积极意义。

温度也是影响昆虫生长发育的重要因素。昆虫作为变温动物, 生长发育和体内酶活性等均与温度密切相关 (Xiao *et al.*, 2017; Kreitman *et al.*, 2021; 勾文山等, 2022)。例如, 大豆蚜 *Aphis glycines* 的体长、体宽和头宽等生长发育指标在 13、18、23、28 和 33 °C 温度下存在极显著变化 (陈晓慧等, 2015)。水椰八角铁甲 *Octodonta nipae* 的卵在低温和高温下均不能存活, 在其他不适宜的温度条件下, 即使能存活, 生长发育也受到显著影响 (翁章权, 2010)。王江峰等 (2002) 发现, 温度能够影响大头金蝇 *Chrysomya megacephala* 幼虫的体长变化。陈壮美 (2020) 也发现, 草地贪夜蛾的发育历期随温度的升高而缩短, 发育速率随温度的升高而加快。以上结果均表明了温度能够显著影响昆虫的生长发育。研究温度对害虫生长发育的影响能够为不同温度

条件下害虫的防控提供更有效的理论支撑。

目前,关于昆虫生长发育受到寄生蜂寄生或温度等单一因素影响的研究已有诸多报道,但对于昆虫在温度和寄生蜂这 2 个因素共同影响下生长发育的研究较少 (Dong *et al.*, 2023)。自然条件下,害虫往往会同时受到温度和寄生蜂寄生影响 (董传磊, 2024)。本研究以重要农业害虫草地贪夜蛾及其寄生蜂淡足侧沟茧蜂为对象,探究了温度和寄生蜂以及其共同作用对草地贪夜生长发育的影响,对提高淡足侧沟茧蜂田间防控草地贪夜蛾的效果具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试虫来源

草地贪夜蛾与淡足侧沟茧蜂均于 2023 年 7 月采集于上海市郊区,其中草地贪夜蛾幼虫采自作物玉米,淡足侧沟茧蜂的茧采自甘蓝,带回实验室后于人工气候培养箱 (型号 HZ-1000C-LED, 上海皓庄仪器有限公司) 中饲养,饲养条件为 26 °C,相对湿度 80%±5%,光周期 14 L : 10 D。草地贪夜蛾幼虫以人工饲料 (白芸豆、麦胚、琼脂、酵母和抗坏血酸等组成) 饲喂 (季香云等, 2022), 饲养至化蛹后置于羽化笼 (25 cm×25 cm×25 cm) 中羽化至成虫,成虫以玉米叶片饲喂,产卵后继续饲养至下一代 3 龄初幼虫备用。淡足侧沟茧蜂以低龄草地贪夜蛾作为寄主进行继代繁育,按 1 : 50 的比例将交配过的淡足侧沟茧蜂雌蜂和草地贪夜蛾幼虫放入繁蜂箱中,寄生 8-12 h 后取出,分装至带塞子的玻璃管 (高 10 cm, 底面直径 1.5 cm) 中单头饲养至寄生蜂出茧 (黄兰兰等, 2022)。选取羽化后健康且活力较强的 1 日龄雌蜂用于试验。

1.2 不同温度下被寄生草地贪夜蛾幼虫体长、头宽、体重和取食量的测定

试验设置 14、20、26 和 32 °C 共 4 个温度。将玻璃管中羽化 24 h 内的淡足侧沟茧蜂雌雄虫配对,每个玻璃管中放置 1 头雌蜂和 1 头雄蜂,在 26 °C 条件下交配 12 h 后,将雌蜂取出并放入

置有 50 头草地贪夜蛾 3 龄初幼虫的玻璃瓶中寄生,每个玻璃瓶中放置 3 头交配过的雌蜂,并于 8 h 后移出。将被寄生的草地贪夜蛾放入设置好的不同试验温度的人工气候箱中,每个温度处理设置 3 个重复,每个重复的初始寄生幼虫为 50 头,单头分装在试管中饲养,每个温度共处理 150 头寄生幼虫,置于不同温度人工气候培养箱 (4 个温度为 14、20、26 和 32 °C,相对湿度 80%±5%,光周期 14 L : 10 D) 中饲养。连续 4 d 每天观察并用数显游标卡尺 (精度 0.01 mm, 烟台市绿林工具有限公司, 型号为 GT01-PRO) 和电子天平 (精度为 0.000 1 g, 日本岛津, 型号为 AUW120) 测量各处理幼虫的头宽、体长和体重,及时更换饲料,并进行清洁处理,测定各处理幼虫每日的取食量。草地贪夜蛾幼虫出现发育缓慢,且背部出现发黑的寄生症状,认定为被寄生,如果该草地贪夜蛾后期发现未被寄生,则舍弃该虫数据。以同一批未进行寄生处理的草地贪夜蛾作为对照,对照组设置 3 个重复,每个重复 20 头虫。

1.3 被寄生草地贪夜蛾幼虫的死亡率和幼虫发育期测定

测定草地贪夜蛾幼虫的生长发育指标后,被寄生的幼虫继续置于各处理温度的培养箱中单头饲养,每日更换新鲜饲料,清理粪便,直至幼虫全部死亡。每个重复 20 头虫,每个处理设 3 个重复。统计不同温度条件下被寄生草地贪夜蛾幼虫的死亡率和幼虫发育期 (以 3 龄初被寄生时作为起点,死亡时作为终点),以未被寄生草地贪夜蛾幼虫作为对照 (幼虫发育期以 3 龄初作为起点,化蛹前作为终点)。

1.4 数据处理

所有数据均采用平均值±标准误 (Mean±SE) 表示。温度和寄生蜂对草地贪夜蛾幼虫体长、头宽和体重的影响,以及对幼虫死亡率和存活天数的影响均采用双因素方差分析 (Two-way ANOVA)。以处理后 1-4 d 寄生组和未寄生组幼虫的体长、头宽和体重指标建立线性模型,具体为:以时间 (1-4 d) 为横坐标,以长度或重

量为纵坐标, 建立不同温度条件下寄生处理和未寄生处理草地贪夜蛾幼虫的发育指标 (体长、头宽或体重) 随时间的变化曲线, 得到线性方程后, 以方程曲线的斜率代表该指标的生长速率, 统计各温度条件下幼虫体长、头宽和体重的生长速率, 并采用双因素方差分析比较寄生蜂和温度对幼虫生长速率的影响。数据差异显著性采用 Tukey HSD 多重比较 ($P<0.05$) 方法比较。数据统计分析软件为 Excel 2013 和 SPSS 16。

2 结果与分析

2.1 温度和淡足侧沟茧蜂对草地贪夜蛾幼虫体长的影响

草地贪夜蛾幼虫的体长在处理后的 1-4 d 内均受到温度和寄生蜂 2 个因素影响 (表 1)。温度的影响: 处理后 1-2 d, 32 °C 未寄生组的幼虫体长显著高于 14、20 和 26 °C 未寄生组幼虫

($P<0.05$) (图 1: A, B), 处理后 3-4 d, 4 个温度处理的未被寄生幼虫体长均存在显著差异 ($P<0.05$) (图 1: C, D)。寄生蜂的影响: 32 °C 条件下, 寄生组幼虫在处理后的 1-4 d 的体长均显著低于未被寄生组 ($P<0.05$), 20 和 26 °C 条件下, 寄生组的幼虫体长在处理后的 2-4 d 显著低于未寄生组 ($P<0.05$), 14 °C 条件下, 寄生组和未寄生组的幼虫头宽均无显著差异 ($P>0.05$)。温度和寄生蜂的影响: 处理后 1-4 d, 26 和 32 °C 寄生组的幼虫体长显著高于 14 和 20 °C 寄生组幼虫 ($P<0.05$), 处理后第 3 天, 各温度处理的寄生组的幼虫体长均存在显著差异 ($P<0.05$) (图 1: A-D)。

2.2 温度和淡足侧沟茧蜂对草地贪夜蛾幼虫头宽的影响

草地贪夜蛾幼虫的头宽在处理后的 1-4 d 内均受到温度和寄生蜂 2 个因素的影响 (表 1)。

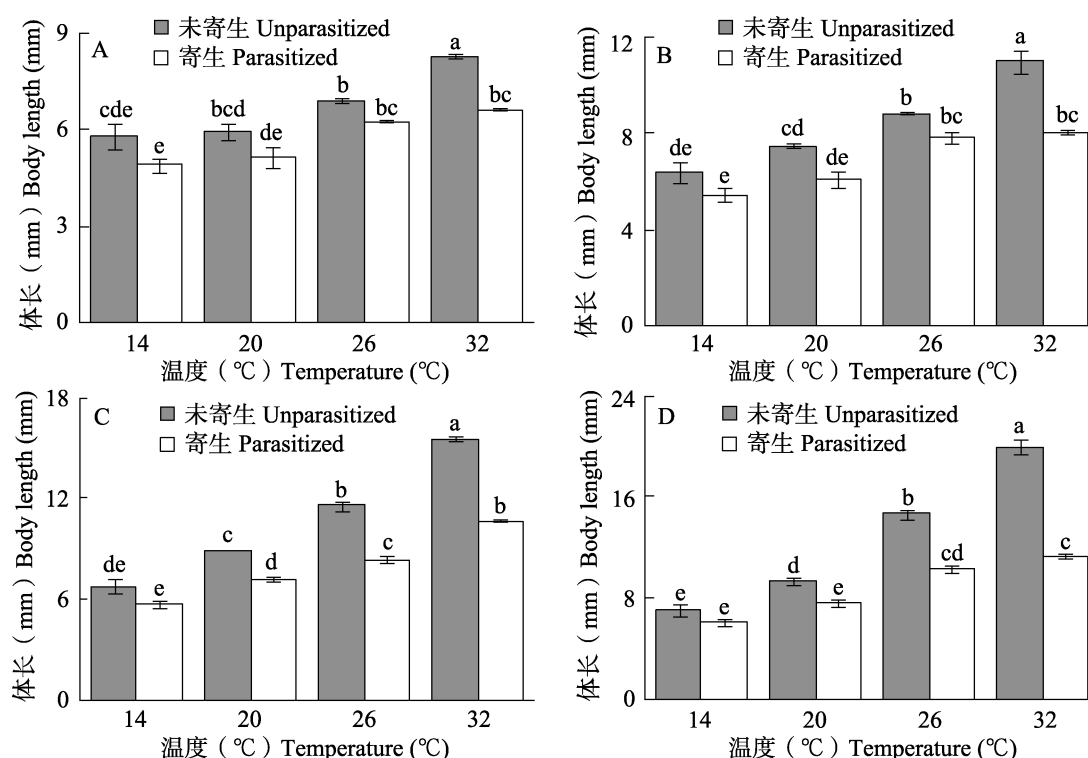


图 1 草地贪夜蛾幼虫在温度和寄生蜂 2 个因素处理下第 1 (A)、2 (B)、3 (C) 和 4 (D) 天的体长
Fig. 1 Body length of *Spodoptera frugiperda* larvae on day 1 (A), 2 (B), 3 (C), and 4 (D) under two factors of temperature and parasitoids

柱上不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Tukey 检验)。下图同。

Different lowercase letters above bars indicate significant difference ($P<0.05$, Tukey test). The same below.

表 1 温度和寄生蜂影响草地贪夜蛾幼虫生长指标的双因素方差分析

Table 1 Two-way ANOVA on the effects of temperature and parasitoids on larval growth indices of *Spodiphora frugiperda*

生长指标 Growth indicators	时间 (d) Time (d)	寄生蜂 Parasitoid			温度 Temperature			交互效应 Interactive effect		
		F 值 F-value	自由度 df	显著水平 Significant level	F 值 F-value	自由度 df	显著水平 Significant level	F 值 F-value	自由度 df	显著水平 Significant level
体长 Body length	1	44.315	1,16	$P<0.05$	40.779	3,16	$P<0.05$	2.093	3,16	$P=0.141$
	2	60.391	1,16	$P<0.05$	65.394	3,16	$P<0.05$	5.476	3,16	$P<0.05$
	3	312.674	1,16	$P<0.05$	352.162	3,16	$P<0.05$	29.879	3,16	$P<0.05$
	4	295.785	1,16	$P<0.05$	325.266	3,16	$P<0.05$	58.798	3,16	$P<0.05$
头宽 Head width	1	35.046	1,16	$P<0.05$	47.017	3,16	$P<0.05$	3.241	3,16	$P=0.05$
	2	126.103	1,16	$P<0.05$	122.826	3,16	$P<0.05$	17.184	3,16	$P<0.05$
	3	203.199	1,16	$P<0.05$	279.167	3,16	$P<0.05$	22.001	3,16	$P<0.05$
	4	559.553	1,16	$P<0.05$	657.410	3,16	$P<0.05$	96.428	3,16	$P<0.05$
体重 Body weight	1	83.311	1,16	$P<0.05$	97.202	3,16	$P<0.05$	16.596	3,16	$P<0.05$
	2	56.641	1,16	$P<0.05$	52.568	3,16	$P<0.05$	18.324	3,16	$P<0.05$
	3	2 010.627	1,16	$P<0.05$	2 569.909	3,16	$P<0.05$	1 266.388	3,16	$P<0.05$
	4	1 266.388	1,16	$P<0.05$	1 405.507	3,16	$P<0.05$	997.462	3,16	$P<0.05$
取食量 Food intake	1	13.108	1,16	$P<0.05$	521.632	3,16	$P<0.05$	2.018	3,16	$P=0.152$
	2	70.222	1,16	$P<0.05$	246.604	3,16	$P<0.05$	12.570	3,16	$P<0.05$
	3	646.339	1,16	$P<0.05$	216.380	3,16	$P<0.05$	122.793	3,16	$P<0.05$
	4	1 480.932	1,16	$P<0.05$	305.434	3,16	$P<0.05$	234.292	3,16	$P<0.05$

温度的影响：处理后 1-2 d，32 ℃未寄生组幼虫的头宽显著高于 14、20 和 26 ℃的幼虫 ($P<0.05$)，26 ℃未寄生组幼虫的头宽显著高于 14 和 20 ℃的幼虫头宽 ($P<0.05$) (图 2：A，B)；处理后 3-4 d，各温度处理的未寄生组的幼虫头宽均存在显著差异 ($P<0.05$) (图 2：C，D)。寄生的影响：32 ℃条件下，寄生组的幼虫头宽在处理后 1-4 d 均显著低于未寄生组 ($P<0.05$)；20 和 26 ℃条件下，寄生组的幼虫头宽在处理后 2-4 d 显著低于未寄生组 ($P<0.05$)；14 ℃条件下，寄生组和未寄生组的幼虫头宽均无显著差异 ($P>0.05$)。温度和寄生蜂的影响：处理后 1-4 d，26 和 32 ℃寄生组的幼虫头宽显著高于 14 和 20 ℃寄生组的幼虫 ($P<0.05$)，14 和 20 ℃寄生组的幼虫头宽不存在显著差异 ($P>0.05$) (图 2：A-D)。

2.3 温度和淡足侧沟茧蜂对草地贪夜蛾幼虫体重的影响

草地贪夜蛾幼虫的体重在处理后的 1-4 d 内

均受到温度和寄生蜂 2 个因素的影响 (表 1)。温度的影响：处理后 1-4 d，32 ℃未寄生组的幼虫体重均显著高于 14、20 和 26 ℃未寄生组的幼虫 ($P<0.05$) (图 3：A，B)；处理后 3-4 d，26 ℃未寄生组的幼虫体重显著高于 14 和 20 ℃处理的未被寄生幼虫 ($P<0.05$) (图 3：C，D)。寄生的影响：32 ℃条件下，寄生组的幼虫体重在处理后 1-4 d 均显著低于未寄生组 ($P<0.05$)；26 ℃条件下，寄生组的幼虫体重在处理后 3-4 d 显著低于未寄生组 ($P<0.05$)；14 和 20 ℃条件下，寄生组的幼虫体重只在处理后 3 d 显著低于未寄生组 ($P<0.05$)。温度和寄生蜂的影响：处理后 1-4 d，32 ℃寄生组的幼虫体重均高于 14、20 和 26 ℃寄生组幼虫，在第 1 天和第 3 天存在显著差异 ($P<0.05$) (图 3：A-D)。

2.4 温度和淡足侧沟茧蜂对草地贪夜蛾幼虫取食量的影响

草地贪夜蛾幼虫的取食量在处理后的 1-4 d 内均受到温度和寄生蜂 2 个因素的影响 (表 1)。

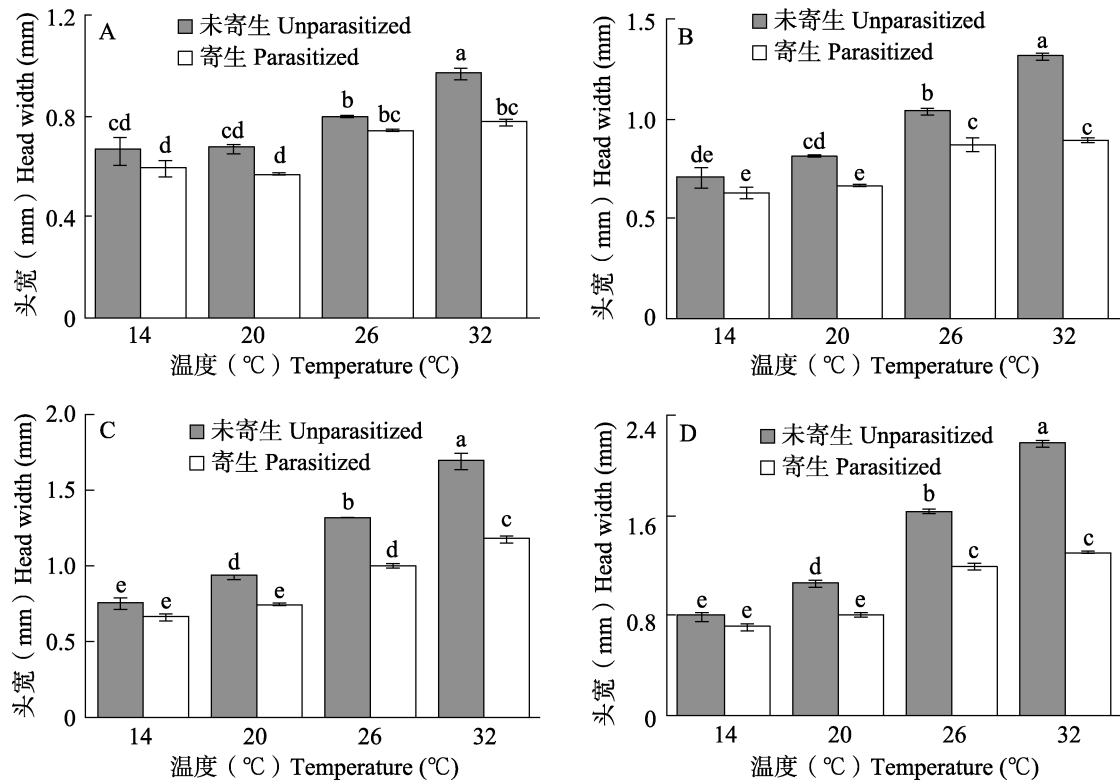


图 2 草地贪夜蛾在温度和寄生蜂 2 个因素处理下第 1 (A)、2 (B)、3 (C) 和 4 (D) 天的头宽

Fig. 2 Head width of *Spodoptera frugiperda* larvae on day 1 (A), 2 (B), 3 (C), and 4 (D) under two factors of temperature and parasitoids

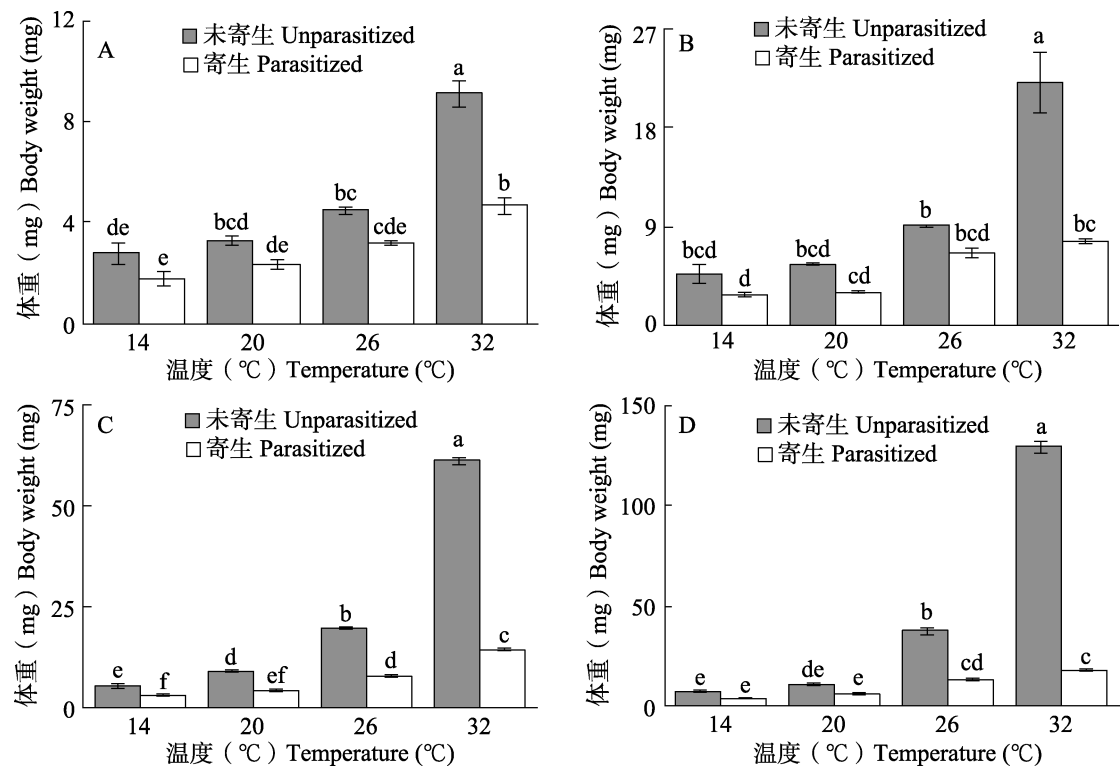


图 3 草地贪夜蛾在温度和寄生蜂 2 个因素处理下第 1 (A)、2 (B)、3 (C) 和 4 (D) 天的体重

Fig. 3 Body weight of *Spodoptera frugiperda* larvae on day 1 (A), 2 (B), 3 (C), and 4 (D) under two factors of temperature and parasitoids

温度的影响：在处理后 1-4 d, 14、20、26 和 32 °C 未寄生组幼虫的取食量均存在显著差异 ($P<0.05$), 且随温度升高而升高 (图 4: A-D)。寄生的影响：在处理后第 1 天, 各温度条件下寄生组幼虫和未寄生组幼虫的取食量均不存在显著差异 ($P>0.05$) (图 4: A); 在处理后 2-4 d, 20、26 和 32 °C 条件下, 寄生组的幼虫的取食量均显著低于未寄生组幼虫 ($P<0.05$) (图 4: B-D);

14 °C 条件下, 寄生组幼虫和未寄生组幼虫的取食量均不存在显著差异 ($P>0.05$)。温度和寄生蜂的影响：处理后 1-2 d, 14、20、26 和 32 °C 寄生组幼虫的取食量均存在显著差异 ($P<0.05$), 且随温度升高而升高; 处理后 3 d, 32 °C 寄生组幼虫的取食量显著高于 14 °C 寄生组幼虫 ($P<0.05$), 处理后第 4 天, 4 个温度条件下寄生组幼虫的取食量不存在显著差异 ($P>0.05$) (图 4: A-D)。

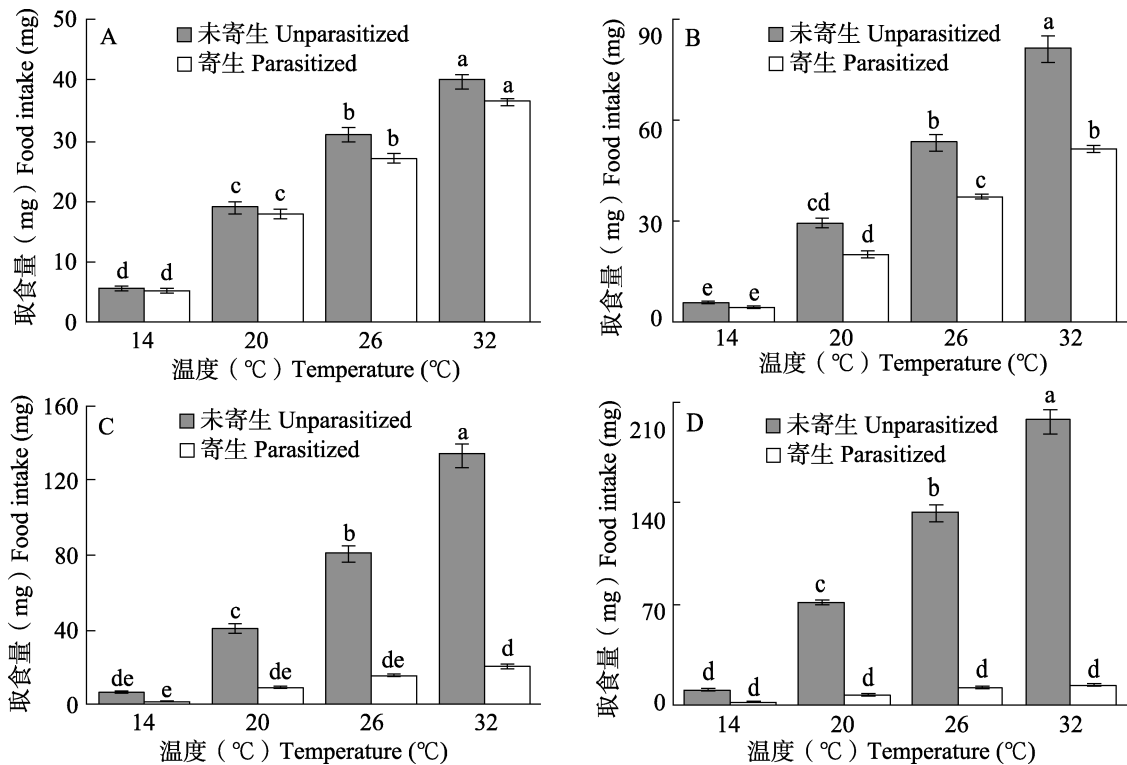


图 4 草地贪夜蛾在温度和寄生蜂 2 个因素处理下第 1 (A)、2 (B)、3 (C) 和 4 (D) 天的取食量

Fig. 4 Food intake of *Spodoptera frugiperda* larvae on day 1 (A), 2 (B), 3 (C), and 4 (D) under two factors of temperature and parasitoids

2.5 温度和淡足侧沟茧蜂对草地贪夜蛾幼虫生长速率的影响

草地贪夜蛾幼虫体长、头宽和体重的生长速率均受到温度和寄生蜂 2 个因素的影响 (表 2)。温度的影响：未被寄生幼虫体长和头宽的生长速率在 4 个不同的温度处理下均存在显著差异 ($P<0.05$) (图 5: A, B), 32 °C 条件下的体重生长速率最高 ($P<0.05$), 但 14、20 和 26 °C 未寄生处理幼虫的体重生长速率不存在显著差异 ($P>0.05$) (图 5: C)。寄生的影响：在 14 和

20 °C 条件下, 体长的生长速率不存在显著差异 ($P>0.05$), 26 和 32 °C 条件下存在显著差异 ($P<0.05$) (图 5: A); 头宽的生长速率在 14 °C 条件下不存在显著差异 ($P>0.05$), 在 20、26 和 32 °C 条件下存在显著差异 ($P<0.05$) (图 5: B); 体重的生长速率在 14、20 和 26 °C 条件下均不存在显著差异 ($P>0.05$), 只在 32 °C 条件下存在显著差异 ($P<0.05$) (图 5: C)。温度和寄生蜂的影响：各温度条件下, 寄生处理组幼虫头宽的生长速率均存在显著差异 ($P<0.05$); 而寄生处理组幼虫体长和体重的生长速率在 32

℃条件下显著高于 14 和 20 ℃条件下体长和体重的生长速率,但与 26 ℃条件下体长和体重的生长速率不存在显著差异 ($P>0.05$) (图 5: A-D)。

表 2 寄生和温度影响草地贪夜蛾生长速率的两因素方差分析
Table 2 Two-way ANOVA on the effects of temperature and parasitoids on the growth rate of *Spodoptera frugiperda*

生长速率指标 Growth rate indicators	寄生蜂 Parasitoid			温度 Temperature			交互效应 Interactive effect		
	F 值 F-value	自由度 df	显著水平 Significant level	F 值 F-value	自由度 df	显著水平 Significant level	F 值 F-value	自由度 df	显著水平 Significant level
体长生长速率 Growth rate of body length	150.563	1,16	$P<0.05$	174.312	3,16	$P<0.05$	39.194	3,16	$P<0.05$
头宽生长速率 Growth rate of head width	363.467	1,16	$P<0.05$	475.196	3,16	$P<0.05$	80.516	3,16	$P<0.05$
体重生长速率 Growth rate of body weight	930.975	1,16	$P<0.05$	756.337	3,16	$P<0.05$	523.114	3,16	$P<0.05$

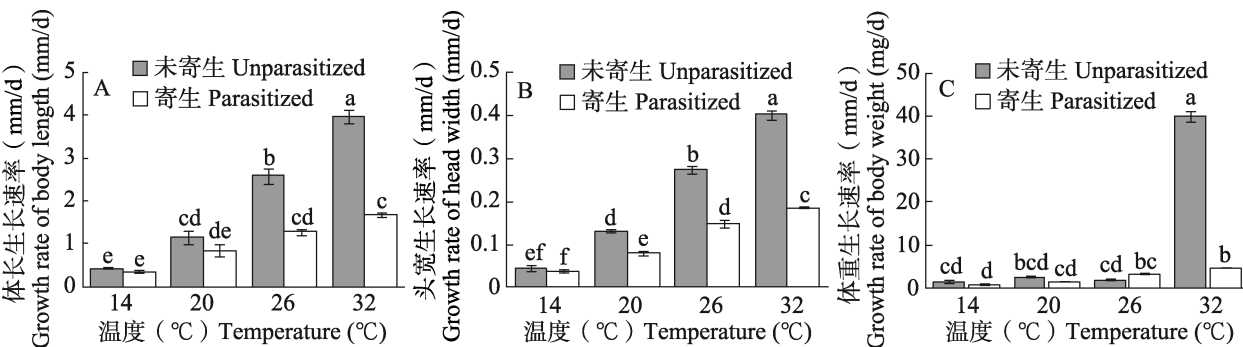


图 5 草地贪夜蛾体长 (A)、头宽 (B) 及体重 (C) 的生长速率
Fig. 5 Growth rate of body length (A), head width (B), and body weight (C) of *Spodoptera frugiperda*

2.6 温度对被寄生草地贪夜蛾幼虫死亡率和发育期的影响

在 14、20、26 和 32 ℃条件下,被寄生的草地贪夜蛾幼虫最终全部死亡,其死亡率显著高于未被寄生处理组的幼虫 ($P<0.05$)。未被寄生草地贪夜蛾幼虫的死亡率随温度升高而降低,14 ℃条件下的死亡率显著低于 32 ℃条件下的死亡率 ($P<0.05$) (图 6: A)。在 14、20、26 和 32 ℃条件下,未寄生处理组幼虫的幼虫发育期长于寄生处理组幼虫的存活期。在 20、26 和 32 ℃条件下,未寄生处理组幼虫的幼虫发育期短于寄生处理组幼虫的存活期 (图 6: B)。

3 讨论

草地贪夜蛾的生长发育和存活受到温度的显著影响。在本研究中,14 ℃条件下处理后第 4 天的草地贪夜蛾 (未被寄生) 幼虫的体长、头宽、体重和取食量分别为 7.03 mm、0.79 mm、6.52 mg 和 9.89 mg,而 32 ℃条件下,体长、头宽、体重和取食量分别为 20.02 mm、2.19 mm、130.12 mg 和 196.81 mg,分别是 14 ℃条件下的 2.85、2.77、19.96 和 19.90 倍。这与乔小燕等 (2022) 大蜡螟 *Galleria mellonella* 幼虫体重和体长随温度升高而升高的研究结论是一致的。未被寄生草地贪夜蛾幼虫的死亡率随温度升高 (14-32 ℃) 而降低,这与陈乾锦等 (2001) 的研究结果一致,低温下斜纹夜蛾的死亡率更高。李新畅等 (2018) 也发现,各虫态豆卷叶螟

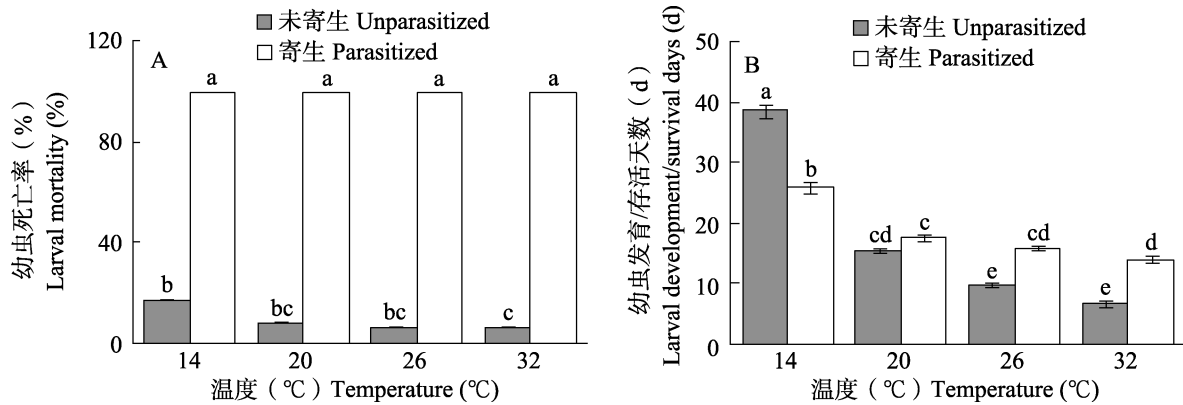


图6 不同温度下草地贪夜幼虫的死亡率 (A) 和存活天数 (B)

Fig. 6 Mortality (A) and survival days (B) of *Spodoptera frugiperda* larvae at different temperatures

幼虫的发育期以3龄初期作为起点,被寄生幼虫以死亡时作为终点,未被寄生幼虫以化蛹前作为终点。

The development period of larvae starts at the beginning of the third instar, ends at death of parasitized larvae, and ends before pupation of non-parasitized larvae.

Lamprosema indicata 的发育历期随着温度升高 (19-31 °C) 而缩短,发育速率与温度呈正相关。草地贪夜蛾幼虫的发育历期也随着温度 (18-33 °C) 升高而逐渐缩短,发育速率逐渐加快 (赵琳超等, 2020)。这与本研究中发现的未被寄生草地贪夜蛾的幼虫期随着温度升高而缩短的结果相同。但是,温度如果过高会使昆虫的发育速率变慢,甚至造成昆虫畸形等现象,温度过低则会使昆虫进入滞育 (He *et al.*, 2013)。原因可能是昆虫的生理和代谢受到温度影响,进一步影响了昆虫的生长发育 (Mutero *et al.*, 1994; 杜尧等, 2007; 李慧等, 2022; 师正浩, 2023)。

淡足侧沟茧蜂的寄生能够影响草地贪夜蛾的生长发育和存活。本研究中,淡足侧沟茧蜂的寄生显著抑制了草地贪夜蛾幼虫的发育,每个温度和时间点被寄生幼虫的体长、头宽和体重均低于未被寄生的幼虫。例如,14 °C条件下,处理后第4天未寄生幼虫的体长、头宽、体重和取食量分别是寄生幼虫的1.16、1.11、1.74和5.35倍,32 °C条件下,处理后第4天未寄生幼虫体长、头宽、体重和取食量分别为寄生幼虫的1.76、1.68、7.29和14.25倍。这与白素芬等 (2005) 的结论一致,发现被菜蛾盘绒茧蜂寄生的小菜蛾在寄生后2-5 d的体重显著低于未被寄生的小菜蛾。被斯氏侧沟茧蜂寄生的草地贪夜蛾幼虫第6天体重为未被寄生幼虫的12.81%-16.20% (陈壮

美, 2020)。被中红侧沟茧蜂 *M. mediator* 寄生的粘虫 *Pseudaletia separata* 幼虫体重先是缓慢上升,之后缓慢下降 (路子云等, 2016)。甲腹茧蜂 *Chelonus inanitus* 寄生海灰翅夜蛾 *S. littoralis* 后,寄主体重和头宽均低于未被寄生幼虫 (Lanzrein *et al.*, 1998)。本研究中,被寄生的草地贪夜蛾幼虫的存活时间随着温度升高而缩短,最终全部死亡。这与王春艳 (2012) 的研究结果一致,菜蛾盘绒茧蜂、半闭弯尾姬蜂 *Diadegma semiclausum* 和棉铃虫齿唇姬蜂 *Campoletis chloridae* 都能使其寄主在幼虫阶段死亡。寄主被寄生蜂抑制生长发育和存活的原因是随寄生蜂卵一起进入寄主体内的毒液蛋白和多分DNA病毒等寄生因子能够抑制或推迟寄主发育,影响其变态 (Valzania *et al.*, 2014; Kim and Hepat, 2016; Ignesti *et al.*, 2018; 时敏等, 2020)。

温度和淡足侧沟茧蜂共同作用对草地贪夜蛾的生长速率影响显著。在14-32 °C范围内,无论是寄生组还是未寄生组,草地贪夜蛾幼虫体长、头宽和体重的生长速率均随温度升高而增加,而且被寄生处理组在每个温度条件下的生长速率均低于未寄生处理组。本研究发现,32 °C被寄生幼虫的体长、头宽和体重的生长速率低于26 °C未被寄生的幼虫,这表明在较高温度下,寄生因素对抑制寄主增长发育起主导作用。14 °C未被寄生幼虫的生长速率低于20 °C被寄

生幼虫, 20 °C 未被寄生幼虫的生长速率低于 26 °C 被寄生幼虫, 这表明了较低温度条件(14 和 20 °C)下, 低温是抑制寄主生长发育的主要因素。此外, 在较高温度下(26 和 32 °C), 被寄生幼虫在处理 1-2 d 的取食量高于较低温度(14 和 20 °C)未被寄生幼虫的取食量。较高温度下(26 和 32 °C)被寄生幼虫的生长速率也高于较低温度(14 和 20 °C)未被寄生幼虫的生长速率, 这表明高温条件下被寄生的草地贪夜蛾幼虫在被寄生后的早期几天时间内, 仍然具有相当的取食能力。这与刘树生(1990)报道的桃蚜 *Myzus persicae* 被菜蚜茧蜂 *Diaeretiella rapae* 寄生前期发育速率没有受到显著影响的结果一致。因此, 应用淡足侧沟茧蜂防控草地贪夜蛾时, 如果温度较高, 被寄生的幼虫仍然会对作物造成危害, 此时应综合考虑其他防控措施, 或者在害虫基数较少时开展淡足侧沟茧蜂的应用。由于本试验是在室内条件下完成的, 寄生蜂对寄主生长发育的影响可能与田间复杂条件下有所差异。因此, 温度和淡足侧沟茧蜂对草地贪夜蛾生长发育的影响尚需在田间较为复杂的条件下进行综合分析。

参考文献 (References)

- Bai SF, Chen XX, Cheng JA, Fu WJ, He JH, 2005. Effects of wasp-associated factors of *Cotesia plutellae* on growth and development of *Plutella xylostella* larvae. *Journal of Plant Protection*, 32(3): 235–240. [白素芬, 陈学新, 程家安, 符文俊, 何俊华, 2005. 菜蛾盘绒茧蜂主要寄生因子对寄主小菜蛾生长发育的调控. 植物保护学报, 32(3): 235–240.]
- Chen XH, Fan YJ, Tian ZQ, Liu J, Zhao KJ, 2015. Effects of temperatures and hosts on morphological development of soybean aphid. *Journal of Environmental Entomology*, 37(2): 250–257. [陈晓慧, 范艳杰, 田镇齐, 刘健, 赵奎军, 2015. 温度及四种植物对大豆蚜形态发育的影响. 环境昆虫学报, 37(2): 250–257.]
- Chen QJ, Lin ZH, Yang JQ, Chen JH, Zhang YZ, 2001. Effects of temperature and humidity on the development duration, leaf consumption and survival of *Spodoptera litura* Fabricius. *Acta Tabacaria Sinica*, 7(3): 27–30. [陈乾锦, 林智慧, 杨建全, 陈家骅, 张玉珍, 2001. 温湿度对斜纹夜蛾幼虫发育历期、取食量与生存率的影响. 中国烟草学报, 7(3): 27–30.]
- Chen ZM, 2020. Effects of temperature and two natural enemies on the growth and development of *Spodoptera frugiperda*. Master dissertation. Changsha: Hunan Agricultural University. [陈壮美, 2020. 温度及两种天敌对草地贪夜蛾生长发育的影响. 硕士学位论文. 长沙: 湖南农业大学.]
- Chen ZM, Zhao LC, Liu H, Liao YX, Wang ZX, 2019. Parasitic behavior and effect of *Microplitis similis* on *Spodoptera frugiperda* larvae. *Plant Protection*, 45(5): 71–74. [陈壮美, 赵琳超, 刘航, 廖用信, 王星, 2019. 斯氏侧沟茧蜂对草地贪夜蛾幼虫的寄生行为及寄生效应. 植物保护, 45(5): 71–74.]
- Dong CL, 2024. The studies of the molecular mechanisms of *Chilo suppressalis* response to temperature and *Cotesia chilonis* parasitism stresses. Doctor dissertation. Yangzhou: Yangzhou University. [董传磊, 2024. 二化螟应对温度与二化螟盘绒茧蜂寄生胁迫的分子机制研究. 博士学位论文. 扬州: 扬州大学.]
- Dong CL, Zhu F, Du YZ, Lu MX, 2023. Depending on different apoptosis pathways, the effector Cscaspase-3 in *Chilo suppressalis* exposed to temperature and parasitic stress was induced. *International Journal of Biological Macromolecules*, 238: 124270.
- Du Y, Ma CS, Zhao QH, Ma G, Yang HP, 2007. Effects of heat stress on physiological and biochemical mechanisms in insects: A literature review. *Acta Ecologica Sinica*, 26(4): 1565–1572. [杜尧, 马春森, 赵清华, 马罡, 杨和平, 2007. 高温对昆虫影响的生理生化作用机理研究进展. 生态学报, 26(4): 1565–1572.]
- Gou WS, Ma WX, Liu NY, Hu GX, Sun YD, 2022. Effects of temperature on the growth, development, adult longevity and reproduction of *Leiomotopon simyrides* (Lepidoptera: Noctuidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(6): 1412–1420. [勾文山, 马维新, 刘宁云, 胡桂馨, 孙尧德, 2022. 温度对白刺夜蛾生长发育及成虫寿命和繁殖的影响. 应用昆虫学报, 59(6): 1412–1420.]
- Gueguen G, Kalamarz ME, Ramroop J, Uribe J, Govind S, 2013. Polydnal viral ankyrin proteins aid parasitic wasp survival by coordinate and selective inhibition of hematopoietic and immune NF-kappa B signaling in insect hosts. *PLoS Pathogens*, 9(8): e1003580.
- Guo JF, He KL, Wang ZY, 2019. Biological characteristics, trend of fall armyworm *Spodoptera frugiperda*, and the strategy for management of the pest. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(3): 361–369. [郭井菲, 何康来, 王振营, 2019. 草地贪夜蛾的生物学特性、发展趋势及防控对策. 应用昆虫学报, 56(3): 361–369.]
- He C, Meng QK, Yang XB, Hua L, 2013. Carbohydrate metabolism and antioxidant defense during diapause development in larvae

- of oriental fruit moth (*Grapholita molesta*) at low temperature. *International Journal of Agriculture Biology*, 15(1): 101–106.
- Huang LL, Jiang JX, Wang JY, Zhang H, 2022. Effects of the parasitoid *Microplitis pallidipes* on the menanization and phenoloxidase activity of the hemolymph of *Spodoptera frugiperda* larvae. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(3): 512–522. [黄兰兰, 蒋杰贤, 王金彦, 张浩, 2022. 淡足侧沟茧蜂寄生对草地贪夜蛾幼虫血淋巴黑化反应及酚氧化酶的影响. 应用昆虫学报, 59(3): 512–522.]
- Ignesti M, Ferrara R, Romani P, Valzania L, Serafini G, Pennacchio F, Cavaliere V, Gargiulo G, 2018. A polydnvirus-encoded ANK protein has a negative impact on steroidogenesis and development. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 95: 26–32.
- Ji XY, Jiang JX, Li WW, Wang JY, Zhang H, Zhang X, 2022. Effect of temperature on parasitism rate and life history parameters of a solitary endoparasitoid, *Microplitis pallidipes*. *Chinese Journal of Biological Control*, 38(2): 300–305. [季香云, 蒋杰贤, 李文伟, 王金彦, 张浩, 张栩, 2022. 温度对淡足侧沟茧蜂寄生和生长发育的影响. 中国生物防治学报, 38(2): 300–305.]
- Jiang JX, Yang JH, Ji XY, Zhang H, Wan NF, 2018. Experimental temperature elevation promotes the cooperative ability of two natural enemies in the control of insect herbivores. *Biological Control*, 117: 52–62.
- Jiang JX, Wang KW, Jiang ZR, 2003. Bionomics of *Microplitis* sp. (Hymenoptera), and the effect of parasitism on the development and food consumption of *Spodoptera litura* larvae. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 21(2): 125–130. [蒋杰贤, 王奎武, 蒋祝瑞, 2003. 斜纹夜蛾侧沟茧蜂生态学特性及寄生对寄主发育和取食的影响. 上海交通大学学报(农业科学版), 21(2): 125–130.]
- Ju XY, Xue RR, Tong L, Liao L, Song YY, Zeng RS, Wang J, 2021. Influences of larval instars and food of *Spodoptera frugiperda* larvae on parasitism of *Microplitis palidpes*. *Chinese Journal of Biological Control*, 37(6): 1126–1132. [巨学阳, 薛蓉蓉, 童璐, 廖露, 宋圆圆, 曾任森, 王杰, 2021. 草地贪夜蛾幼虫日龄及取食的食物对淡足侧沟茧蜂寄生效果的影响. 中国生物防治学报, 37(6): 1126–1132.]
- Kim Y, Hapat R, 2016. Baculoviral p94 homologs encoded in *Cotesia plutellae* bracovirus suppress both immunity and development of the diamondback moth, *Plutellae xylostella*. *Insect Science*, 23(2): 235–244.
- Kreitman D, Keena MA, Nielsen AL, Hamilton G, 2021. Effects of temperature on development and survival of nymphal *Lycorma delicatula* (Hemiptera: Fulgoridae). *Environmental Entomology*, 50(1): 183–191.
- Lanzrein B, Treiblmayr K, Meyer V, Pfister-Wilhelm R, Grossniklaus-Bürgin C, 1998. Physiological and endocrine changes associated with polydnvirus/venom in the parasitoid-host system *Chelonus inanitus-Spodoptera littoralis*. *Journal of Insect Physiology*, 44(3/4): 305–321.
- Li H, Hao DJ, Xu T, Dai LL, 2022. The effects of heat stress on herbivorous insects: An overview and future directions. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 46(6): 215–224. [李慧, 郝德君, 徐天, 代鲁鲁, 2022. 高温胁迫对植食性昆虫影响研究进展. 南京林业大学学报(自然科学版), 46(6): 215–224.]
- Li XC, Cui J, Xu W, Gao Y, Shi SS, 2018. Effects of temperature on growth and development of *Lamprosema indicata* Fabricius. *Soybean Science*, 37(4): 590–595. [李新畅, 崔娟, 徐伟, 高宇, 史树森, 2018. 温度对豆卷叶螟 *Lamprosema indicata* (Fabricius) 生长发育的影响. 大豆科学, 37(4): 590–595.]
- Liu SS, 1990. The relationship between the age at parasitization and parasite impact in *Myzus persicae*. *Acta Entomologica Sinica*, 33(4): 430–436. [刘树生, 1990. 桃蚜被寄生龄期与受寄生蜂影响大小的关系. 昆虫学报, 33(4): 430–436.]
- Lu ZY, Ma AH, Ran HF, Liu WX, Liu XX, Li JC, Zhang QW, 2016. Effects of parasitism by *Microplitis mediator* (Haliday) on the feeding and development of *Mythimna separata* (Walker) larvae. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(5): 982–987. [路子云, 马爱红, 冉红凡, 刘文旭, 刘小侠, 李建成, 张青文, 2016. 中红侧沟茧蜂寄生对粘虫幼虫取食及生长发育的影响. 应用昆虫学报, 53(5): 982–987.]
- Mutero A, Bride JM, Pralavorio M, Fournier D, 1994. *Drosophila melanogaster* acetylcholinesterase: Identification and expression of two mutations responsible for cold- and heat-sensitive phenotypes. *Molecular and General Genetics*, 243(6): 699–705.
- Qiao XY, Wang B, Sun JS, Sun C, Cui L, Huai GL, Chen BL, 2022. The effects of temperature and density on the growth and reproduction of *Galleria Mellonella*. *Journal of Bee*, 42(11): 1–9. [乔小燕, 王斌, 孙九胜, 孙晨, 崔磊, 槐国龙, 陈波浪, 2022. 温度及密度对大蜡螟生长繁殖的影响. 蜜蜂杂志, 42(11): 1–9.]
- Shi M, Tang P, Wang ZZ, Huang JH, Chen XX, 2020. Review of research on parasitoids and their use in biological control in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(3): 491–548. [时敏, 唐璞, 王知知, 黄健华, 陈学新, 2020. 中国寄生蜂研究及其在害虫生物防治中的应用. 应用昆虫学报, 57(3): 491–548.]
- Shi ZH, 2023. Effects of Temperature on hormone in soybean pod borer (*Leguminirora glycinoorella*) at different diapause stages.

- Heilongjiang Agricultural Sciences, 2023(7): 52–58. [师正浩, 2023. 温度对不同滞育期大豆食心虫体内激素的影响. 黑龙江农业科学, 2023(7): 52–58.]
- Tang P, Wang ZZ, Wu Q, Liu YQ, Shi M, Huang JH, Chen XX, 2019. The natural enemies of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* and their application in biological control programs. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(3): 370–381. [唐璞, 王知知, 吴琼, 刘银泉, 时敏, 黄健华, 陈学新, 2019. 草地贪夜蛾的天敌资源及其生物防治中的应用. 应用昆虫学报, 56(3): 370–381.]
- Tay WT, Meagher RL Jr, Czepak C, Groot AT, 2023. *Spodoptera frugiperda*: Ecology, evolution, and management options of an invasive species. *Annual Review of Entomology*, 68: 299–317.
- Valzania L, Romani P, Tian L, Li S, Cavaliere V, Pennacchio F, Gargiulo G, 2014. A polydnavirus ANK protein acts as virulence factor by disrupting the function of prothoracic gland steroidogenic cells. *PLoS ONE*, 9(4): e95104.
- Van den Berg J, du Plessis H, 2022. Chemical control and insecticide resistance in *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Economic Entomology*, 115(6): 1761–1771.
- Wang CY, 2012. Parasitism-induced regulation on host development and immune by three endoparasitods. Master dissertation. Zhengzhou: Henan Agricultural University. [王春艳, 2012. 三种幼虫内寄生蜂对寄主生长发育和免疫的调控. 硕士学位论文. 郑州: 河南农业大学.]
- Wang JF, Hu C, Chen YC, Min JX, Li JT, 2002. Effect of temperature over the body-length change of *Chrysomya megacephala* (Fabrius). *Acta Parasitologica et Medica Entomologica Sinica*, 9(2): 100–105. [王江峰, 胡萃, 陈玉川, 闵建雄, 李俊涛, 2002. 温度对大头金蝇 *Chrysomya megacephala* (Fabricius) 幼虫体长变化的影响. 寄生虫与医学昆虫学报, 9(2): 100–105.]
- Wang JY, Wan NF, Fan NN, Jiang JX, 2020. Functional response of *Microplitis pallidipes* parasitizing *Spodoptera frugiperda*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(6): 1319–1325. [王金彦, 万年峰, 范能能, 蒋杰贤, 2020. 淡足侧沟茧蜂对草地贪夜蛾的寄生功能反应. 应用昆虫学报, 57(6): 1319–1325.]
- Weng ZQ, 2010. The morphological character of *Octodonta nipae* and the effects of temperature and food utilization on its growth and development. Master dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [翁章权, 2010. 水椰八角铁甲形态观察及温度、食物利用对其生长发育的影响. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学.]
- Wu KM, 2020. Management strategies of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China. *Plant Protection*, 265(2): 7–11. [吴孔明, 2020. 中国草地贪夜蛾的防控策略. 植物保护, 265(2): 7–11.]
- Wu YD, Shen HW, Zhang Z, Wang XL, Shi Y, Wu SW, Yang YH, 2019. Current status of insecticide resistance in *Spodoptera frugiperda* and counter measures to prevent its development. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(4): 599–604. [吴益东, 沈慧雯, 张正, 王兴亮, 施雨, 武淑文, 杨亦桦, 2019. 草地贪夜蛾抗药性概况及其治理对策. 应用昆虫学报, 56(4): 599–604.]
- Xiao WF, Chen P, Xiao JS, Wang L, Liu TH, Wu YF, Dong FF, Jiang YM, Pan MH, Zhang YH, Lu C, 2017. Comparative transcriptome profiling of a thermal resistant vs. sensitive silkworm strain in response to high temperature under stressful humidity condition. *PLoS ONE*, 12(5): e0177641.
- Ye GY, Hu J, Zhu JY, Fang Q, Yan ZC, Wang L, 2019. Recent advances in research on the mechanisms through which parasitoid wasps regulate host immunity and development. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(3): 382–400. [叶恭银, 胡建, 朱家颖, 方琦, 严智超, 王磊, 2019. 寄生蜂调控寄主害虫免疫与发育机理的研究新进展. 应用昆虫学报, 56(3): 382–400.]
- Zang LS, Wang S, Zhang F, Desneux N, 2021. Biological control with *Trichogramma* in China: History, present status, and perspectives. *Annual Review of Entomology*, 66: 463–484.
- Zhao LC, Liao YX, Chen ZM, Liu H, Wang X, 2020. Impacts of temperatures on the growth and development of larvae and pupae of *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 43(1): 41–47. [赵琳超, 廖用信, 陈壮美, 刘航, 王星, 2020. 不同温度对草地贪夜蛾幼虫和蛹生长发育的影响. 湖南师范大学自然科学学报, 43(1): 41–47.]
- Zhang H, You CM, Wang JY, Woodcock BA, Chen YJ, Ji XY, Wan NF, 2024. A parasitic wasp-releasing engineering to promote ecosystem services in paddy systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 373: 109126.