

三种波长紫外线对椭圆食粉螨的防治效果比较*

孙文萱^{1**} 邹 杨^{1**} 苗 罡¹ 张锦楠¹

郑洪峰² 杨远发¹ 邹志文^{1,3***}

(1. 南昌大学生命科学学院, 南昌 330031; 2. 福安艾斯博动力设备有限公司, 宁德 355017;
3. 江西省跨学科重点实验室, 南昌 330031)

摘 要 【目的】椭圆食粉螨 *Aleuroglyphus ovatus* (Troupeau) 是自然环境中最常见的储藏物害螨之一, 造成了严重的经济损失。本研究旨在探究不同条件紫外线 (Ultraviolet, UV) 对于椭圆食粉螨的生理影响、卵孵化率和产卵量影响, 以求为居家环境及储备粮仓除螨提供理论依据和防治新思路。【方法】使用不同波长紫外线 UV-A (365 nm)、UV-B (308 nm) 和 UV-C (254 nm), 功率均为 15 W, 分别处理各个发育历期 (卵、幼螨、前若螨、后若螨、成螨) 的椭圆食粉螨, 统计其死亡率、卵孵化率、产卵量并对比昆虫卵黄原蛋白 (Vitellogenin, Vg) 基因表达量, 最后使用 IBM SPSS Statistics 25.0 和 GraphPad Prism 9.5.0 对数据进行统计分析。【结果】比较 3 种波长处理组的结果, UV-B 的影响最大, 照射 180 min 后, 椭圆食粉螨各虫态死亡率均达 100%。在时间方面, 死亡率与照射时间呈正相关, 即在相同距离下, 照射时间越长, 粉螨的死亡率越高。在紫外线短期辐射后, 产卵量 (除日产卵量外) 和 Vg 基因表达量均显著提高或存在升高趋势 ($P < 0.05$)。UV-C 导致的椭圆食粉螨雌成螨生殖力提高最为显著 ($P < 0.05$), 产卵量增加 51.15%。【结论】3 种波长的紫外线均对椭圆食粉螨的生长发育有抑制作用, 且 UV-B 对螨的杀灭效果优于 UV-A 和 UV-C。在不同应用场景中, 可以使用 UV-B 辐射灯进行高效除螨。

关键词 椭圆食粉螨; 紫外线; 半致死时间; 生殖力; Vg

Comparative analysis of the control effects of three ultraviolet wavelengths on *Aleuroglyphus ovatus* (Troupeau)

SUN Wen-Xuan^{1**} ZOU Yang^{1**} MIAO Gang¹ ZHANG Jin-Nan¹

ZHENG Hong-Feng² YANG Yuan-Fa¹ ZOU Zhi-Wen^{1,3***}

(1. School of Life Science, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Fu'an Acepow Equipment Co., Ltd., Ningde 355017, China; 3. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Interdisciplinary Science, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract [Aim] *Aleuroglyphus ovatus* (Troupeau) is a widespread storage mite that causes serious economic losses. This study aimed to investigate the effect of different ultraviolet (UV) wavelengths on the survival, hatching rate, and fecundity of *A. ovatus*, providing a theoretical basis and an innovative approach for managing mite infestations in domestic environments and grain storage areas. [Methods] The mortality of *A. ovatus* at each developmental stage (adult, tritonymph, protonymph, larvae, and egg), egg hatching rate, egg laying capacity, and vitellogenin (Vg) gene expression were measured after treatments with UV-A (365 nm), UV-B (308 nm), and UV-C (254 nm) (15 W). Statistical analysis was carried out using IBM SPSS Statistics 25.0 and GraphPad Prism 9.5.0. [Results] Among the three wavelength treatment groups, UV-B demonstrated the most significant effect on *A. ovatus*. Following 180 minutes of UV-B irradiation, the mortality rate of *A. ovatus* reached 100% across all developmental stages. Furthermore, the mortality rate was positively correlated with the irradiation time. Following short-term ultraviolet radiation, there was a significant increase or an increasing trend in the number of eggs laid (in addition to

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金 (31860601); 江西省重点研发计划 (20212BBF63042, 20203BBF63041); 南昌大学自然科学跨学科创新基金 (9167-28220007-YB2105)

**共同第一作者 Co-first authors, E-mail: swx15621312967@163.com; 405600210093@email.ncu.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: zouzhiwen@ncu.edu.cn

收稿日期 Received: 2023-12-30; 接受日期 Accepted: 2024-03-25

the daily number of eggs) and an increase in the expression level of the *Vg* gene ($P < 0.05$) The UV-C treatment group had a significantly higher reproductive capacity (51.15%) compared to the UV-A and UV-B treatment groups ($P < 0.05$).

[Conclusion] All three ultraviolet wavelengths can inhibit the growth and development of *A. ovatus*. The mortality effect of UV-B was superior to UV-A and UV-C. Therefore, UV-B radiation lamps can serve as an effective method for mite control across various application scenarios.

Key words *Aleuroglyphus ovatus*; ultraviolet; semi-lethal time; fecundity; *Vg*

紫外线辐射 (Ultraviolet, UV) 也称紫外线, 属非电离辐射, 是一类位于日光高能区且不能够被人眼视觉感知的波长为 200-400 nm 的电磁波, 主要是 UV-A、UV-B 和 UV-C (王炳忠, 1988)。虽然其能量仅占太阳辐射总能量的 3%-5%, 但是会对绝大多数生物体造成影响。紫外线对生物的作用包括杀菌、色素沉积、诱导机体免疫反应、提高氧化反应过程及生物变异等 (田川北, 2018)。同时, 紫外线也可引起 DNA 损伤, 被证明为是一种致癌物质 (李立和白雪涛, 2008; Douki *et al.*, 2017)。紫外辐射的增强也会影响昆虫的行为和健康, 导致基因突变和染色体畸变, 影响其生长发育和生殖 (都二霞等, 2007; Osakabe, 2021)。不同波长、强度或不同暴露时间的紫外光辐照将对昆虫造成不同影响。波长方面, UV-A、UV-B 和 UV-C 均可影响西藏飞蝗 *Locusta migratoria tibetensis* 的抗氧化酶活性, 且 UV-B 的影响大于其他两种波长的紫外线 (李庆等, 2012)。短时紫外线辐射时间会使烟粉虱 *Bemisia argentifolii* 飞行能力下降, 从而改变它们的入侵行为 (Antignus *et al.*, 2001)。辐射强度方面, 不同强度的紫外线辐射均会抑制腐食酪螨 *Tyrophagus putrescentiae* 成螨的存活及卵的孵化, 且 UV-C 的抑制效果比 UV-B 更强 (Bakr, 2013)。而棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 在紫外照射 1-4 h 后, 雌虫的产卵量显著上升。

椭圆食粉螨 *Aleuroglyphus ovatus* 是自然环境中最常见的螨类之一, 广泛分布于世界各地, 一生主要经历卵、幼虫、第一若螨 (前若螨)、第三若螨 (后若螨) 和成虫 5 个时期 (忻介六和沈兆鹏, 1964)。其体型微小、发育迅速、繁殖能力强 (阎孝玉等, 1992), 是世界范围内常见的粮食、储藏物害螨, 造成了严重的经济损失 (Bakr, 2013; 杨洁等, 2013)。同时, 由于其

数量众多、分布广泛, 且体型小、繁殖速度快、繁殖周期短, 而且可以长期人工饲养, 是研究害虫 (螨) 的理想模式物种 (程诗雨, 2018)。在家居生活中, 粉螨还会诱发皮肤病和呼吸系统疾病, 如哮喘和过敏性鼻炎 (Lorenzini *et al.*, 2015)。由于螨虫个体微小, 肉眼难以观察, 因此很难在常规卫生清洁中被清除 (张庆玲等, 2019)。随着居民卫生意识的增强, 各种款式的除螨装置开始进入消费者的视线, 紫外线杀螨是目前大家公认的最优除螨方式, 除螨率最高可达 99% (李曾婷, 2017)。

昆虫卵黄原蛋白 (Vitellogenin, *Vg*) 是一类由脂肪体合成的雌性特异性血淋巴蛋白, 是昆虫卵母细胞中最丰富的一种蛋白质 (Sappington and Raikhel, 1998), 是几乎所有卵生动物卵黄蛋白的前体 (王智健和牛长缨, 2014), 也是影响昆虫生殖调控的关键物质 (张乾等, 2017)。其最主要的生理功能是为发育中的胚胎提供氨基酸、脂质、维生素、磷和硫等营养和功能物质, 还能促进卵母细胞的生长分化 (Sappington and Raikhel, 1998; 张士瑾等, 2002)。近年的研究表明, 卵黄原蛋白还存在其他生物学功能, 如在蜜蜂种群中, *Vg* 具有抗氧化功能, 可以保护蜜蜂免受氧化应激的损伤, 对蜜蜂寿命的调节也具有一定积极影响 (Seehuus *et al.*, 2006; Corona *et al.*, 2007)。*Vg* 基因在不同物种中数量不同, 表达水平也具有时空特异性, 易受外界环境影响 (奚剑飞, 2019)。UV 辐射能够改变 DNA 的结构, 对于昆虫 *Vg* 基因的表达具有显著影响。在 UV 照射后, 棉铃虫体内的 *Vg* 基因表达量显著增加 (王智健和牛长缨, 2014)。UV-A 照射能诱导亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 雌成虫 *Vg* 基因的表达, 且表达量随着照射时间的延长, 呈先下降再快速上升的趋势 (刘芳等, 2020)。

目前,国内外已有研究涉及利用紫外线辐照动物、植物和细菌等以探究紫外线对其生长发育和生殖的影响,尤其是果蝇、蚜虫等昆虫,但关于紫外线对居室、储粮害螨椭圆食粉螨的影响未见报道。为了探究 UV 辐射对椭圆食粉螨的防治效果,本研究使用不同波长的紫外辐射即 UV-A (365 nm)、UV-B (308 nm)、UV-C (254 nm) 持续照射不同时间后,对椭圆食粉螨死亡率进行分析,预测其半致死时间 (LT_{50}),评价不同条件的紫外线对于椭圆食粉螨的生理影响。同时,以正常光照条件为对照,统计椭圆食粉螨卵的孵化数和未孵化数,探究不同条件紫外线对卵孵化率的影响。通过荧光定量反转录技术测定 UV 辐射后椭圆食粉螨成螨体内 *Vg* 基因 (*AoVg*) 的表达情况,并记录 UV 胁迫后椭圆食粉螨的总产卵量、产卵期和日均产卵量分析其生殖力变化。研究结果有助于深入了解椭圆食粉螨响应物理因子胁迫的机制,将为储粮及家居害螨的防治提供理论依据,在粮食储藏中具有重要的应用价值,有利于害虫防治产业的发展。

1 材料与方法

1.1 供试螨源

供试椭圆食粉螨由南昌大学生命科学学院动物生态与进化实验室提供,以人工饲料(小麦粉:酵母提取物=4:1,添加 1‰质量分数的山梨酸钾作防腐剂)饲养(奚剑飞,2019)。将椭圆食粉螨分装于 1 L 透明保存盒(每盒大约 1-2 万头),在条件为(28 ± 1)℃,相对湿度 70%-80% 的全黑暗气候箱(BIC-250,上海博讯实业有限公司)中培养。

1.2 试验设备

紫外辐射灯管购自北京中意博腾科技有限公司,波长分别为 UV-A (365 nm)、UV-B (308 nm)、UV-C (254 nm),功率均为 15 W。

1.3 试验方法

1.3.1 椭圆食粉螨不同虫态紫外辐射处理 分别挑取椭圆食粉螨雌成螨、后若螨、前若螨和幼

螨各 30 头,置于透明密封盒中进行辐射处理。放置于 3 种波长的 UV 辐射灯下,距离光源垂直距离 10 cm 处,分别处理 5、10、15、20、30、60、120 和 180 min,对照组不进行光照处理。每组实验进行 3 次重复。照射后,将螨放回培养箱中,在黑暗条件下正常饲养。24 h 后记录不同处理组的存活情况,测定死亡率和半致死时间 (LT_{50})。

挑取雌成螨若干,置于透明密封盒中,产卵 24 h 后,将卵挑出进行试验。经 3 种波长紫外辐射处理 30 min 后,进行正常饲养。每组 300 粒卵,观察卵的孵化情况,统计卵孵化数,计算其孵化率。

每 12 h 观察一次,每组设置 3 次重复。卵在 10 d 观察期后未孵化定义为孵化失败。

1.3.2 紫外辐射后椭圆食粉螨生殖力测定 挑取若干后若螨,置于玻璃板中饲养。待其发育为成螨后,将雌成螨置于 3 种波长的辐射中处理 5 min,对照组不进行光照处理。照射后,每头雌成螨挑取一头雄成螨进行配对饲养。每 24 h 统计产卵量并将卵挑出,直至雌成螨产卵量连续一周保持不变,最后增长日期即为产卵停止日期。

1.3.3 不同波长紫外辐射下椭圆食粉螨 *Vg* 基因表达量检测

1.3.3.1 椭圆食粉螨总 RNA 的提取和 cDNA 的合成 结合紫外辐射致死效果试验结果,选取 3 种波长紫外辐射分别处理 5、30 和 60 min 后的雌成螨,充分研磨后,采用 Trizol 法分别提取总 RNA,将产物存放于 -80℃ 冰箱。使用紫外分光光度计 NanoDrop™ (OD260/280) 测定总 RNA 纯度,再使用 1% 琼脂糖凝胶电泳分析 RNA 降解以及污染程度。cDNA 第一链按照 TaKaRa 公司的试剂盒说明书要求合成,产物 -20℃ 保存。

1.3.3.2 实时荧光定量 PCR (RT-qPCR) *AoVg* 实时荧光定量 PCR 引物源自奚剑飞(2019),使用椭圆食粉螨的 β -Actin 作为内参基因,引物由生工生物工程(上海)股份有限公司合成,引物信息见表 1。

RT-qPCR 的反应体系为 TB Green Premix Ex Taq (2×) 10 μ L、cDNA 2 μ L、ROX Reference Dye

表 1 实时荧光定量 PCR 所用引物列表
Table 1 Primers used in RT-qPCR

引物名称 Primer names	引物序列 (5'-3') Sequences (5'-3')	产物大小 (bp) Product size (bp)	引物长度 (bp) Primer length (bp)
AoVg F	CGGTCAATCGTACATCTACTCC	150	22
AoVg R	AATGTCCGAGTTGATCTCCAG		21
Actin F	TCCTCCCACCGACCAAAAT	120	18
Actin R	CACGCAGGTAGACGACGATA		20

(50×) 0.4 μL、正反引物各 1 μL, 最后加水补足 20 μL。

振荡混匀后瞬间离心, 采用两步法扩增。反应条件为 95 °C 预变性 30 s、95 °C 变性 30 s 和 60 °C 扩增 30 s (循环 40 次) 以及最后从 60 °C 至 95 °C 的溶解过程。

1.4 统计分析

文中数据采用 IBM SPSS Statistics 25.0 和 GraphPad Prism 9.5.0 进行统计分析。各组均数的比较采用单因素方差分析 (One-way ANOVA), 用最小显著差异法 (Least significant difference, LSD) 作两两比较, $P<0.05$ 为有显著性差异。半致死时间 LT_{50} 采用 Probit 分析法 (SPSS 25.0) 计算。椭圆食粉螨 *AoVg* 基因在不同波长紫外辐射下的相对表达量采用 $2^{-\Delta\Delta CT}$ 法计算。

对照组死亡率=(死螨数/受试螨数)×100%,

实验组死亡率=(照射后死螨数/受试螨数)×100%,

校正死亡率=(实验组死亡率-对照组死亡率)/(1-对照组死亡率)×100%,

日均产卵量=总产卵量/产卵期。

2 结果与分析

2.1 紫外线照射对椭圆食粉螨不同虫态死亡率的影响

2.1.1 紫外线照射对雌成螨死亡率的影响 不同波长紫外线分别处理各个发育历期的椭圆食粉螨, 其半致死浓度、毒力回归方程、95%置信区间和相关系数见表 2。

Probit 预测结果表明不同紫外线波长下, 椭

表 2 3 种波长紫外线照射下各龄期椭圆食粉螨的半致死时间

Table 2 Semi-lethal time of each stage of *Aleuroglyphus ovatus* state under three kinds of ultraviolet radiation

发育阶段 Development stage	紫外线辐射处理 Ultraviolet ray	半致死时间 (min) LT_{50} (min)	毒性方程 Toxicity equation	95%置信区间 95% confidence interval	χ^2
雌成螨 Female adult	UV-A (365 nm)	132.47	$y = -0.640 + 0.005x$	106.973-176.050	6.41
	UV-B (308 nm)	40.63	$y = -0.596 + 0.015x$	21.774-61.141	25.01
	UV-C (254 nm)	188.03	$y = -0.423 + 0.002x$	124.753-500.256	4.22
后若螨 Tritonymph	UV-A (365 nm)	42.91	$y = -0.287 + 0.007x$	0.431-78.640	19.78
	UV-B (308 nm)	16.79	$y = -0.323 + 0.019x$	54.984-43.855	67.00
	UV-C (254 nm)	46.32	$y = -0.335 + 0.007x$	11.204-78.661	18.48
前若螨 Protonymph	UV-A (365 nm)	160.82	$y = -0.538 + 0.003x$	119.983-260.544	9.23
	UV-B (308 nm)	42.94	$y = -0.716 + 0.017x$	36.725-49.622	3.62
	UV-C (254 nm)	39.53	$y = -0.268 + 0.007x$	1.528-69.879	16.25
幼螨 Larvae	UV-A (365 nm)	42.18	$y = -2.280 + 1.403x$	23.275-94.831	44.15
	UV-B (308 nm)	13.28	$y = -0.480 + 0.036x$	6.718-18.247	9.54
	UV-C (254 nm)	27.67	$y = -0.480 + 0.017x$	1.754-50.623	39.76

圆食粉螨雌成螨的 LT_{50} 值依次为: UV-B < UV-A < UV-C (表 2)。而较长时间的紫外辐照 (180 min) 试验也表明, UV-B 胁迫对椭圆食粉螨雌成螨的存活率影响最大 (图 1)。UV-A 照射 180 min 后死亡率为 $52.72\% \pm 7.80\%$; UV-C 组的死亡率仅为 $47.99\% \pm 8.92\%$, 均显著低于 UV-B 照射组的 100.00% ($P < 0.001$) (图 1)。此外, 随照射时间增加, 雌成螨的死亡率也总体呈现上升趋势 (图 1)。

2.1.2 紫外线照射对后若螨死亡率的影响 3 种

波长紫外线照射后椭圆食粉螨后若螨的 LT_{50} 值依次为: UV-B < UV-A < UV-C (表 2)。当照射时间达到 20 min 后, UV-B 对后若螨的杀灭效果最好 ($P < 0.05$), 并在照射 180 min 后, 后若螨全部死亡, 而此时 UV-A 和 UV-C 两种波长紫外线的致死率分别为 $77.78\% \pm 5.40\%$ 和 $81.28\% \pm 5.40\%$ (图 2)。随照射时间增加, 后若螨的死亡率也总体呈现上升趋势, 并在 20 min 时 UV-B 照射组的死亡率超过 50.00%, 与 Probit 预测结果相符合。

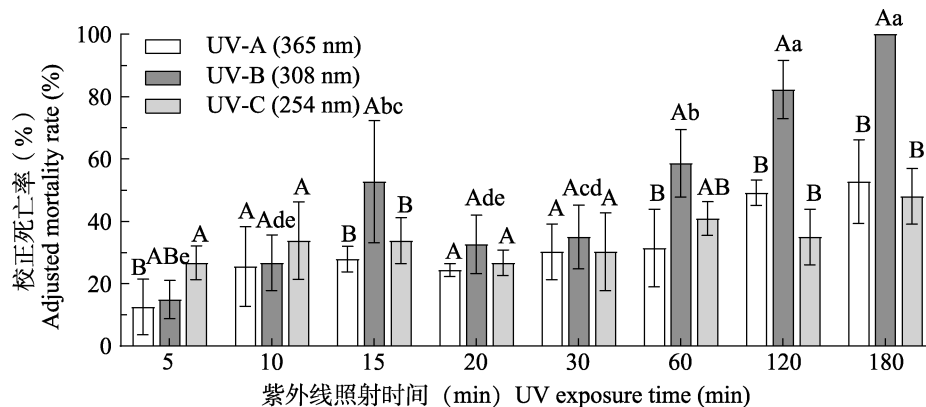


图 1 紫外线照射后椭圆食粉螨雌成螨的校正死亡率

Fig. 1 Adjusted mortality rate of *Aleuroglyphus ovatus* female adult after ultraviolet radiation

图中数据为平均值 $\pm$ 标准误, 各组数据的显著性分析使用单因素方差分析 (One-way ANOVA), 用最小显著差异法 (Least significant difference, LSD) 进行, 柱上不同大写字母代表同一照射时间不同波长处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母代表同一波长不同照射时间处理间差异显著 ($P < 0.05$)。图 2-图 4 同。

Data are mean $\pm$ SE, the significance analysis is conducted using one-way ANOVA and least significant difference (LSD) method. Histograms with different uppercase letters indicate significant difference between different wavelength treatment groups at the same time ($P < 0.05$), while with different lowercase letters indicate significant difference between UV-B treatment groups at different times ($P < 0.05$). The same for Fig. 2-Fig. 4.

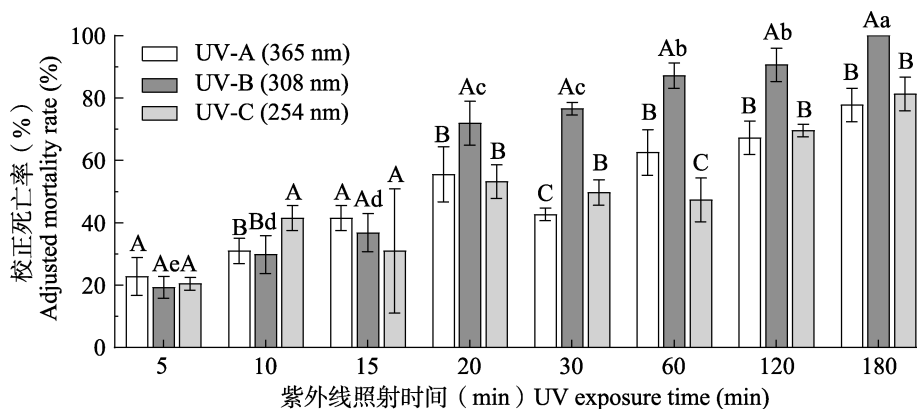


图 2 紫外线照射后后若螨的校正死亡率

Fig. 2 Adjusted mortality rate of tritonymph after ultraviolet radiation

2.1.3 紫外线照射对前若螨死亡率的影响 Probit 预测结果显示 UV-B 组前若螨的半致死时间为 42.94 min, 比 UV-C 组略长 (表 2), 但当照射时间超过 60 min 后, UV-B 组前若螨死亡率开始拔高, 并显著高于其余两组 ($P < 0.05$) (图 3)。此外, UV-A 对于前若螨表现出的杀灭效果最差 ($P < 0.05$), 照射 180 min 后的死亡率仅为 $42.82\% \pm 5.25\%$ ($P < 0.001$) (图 3)。

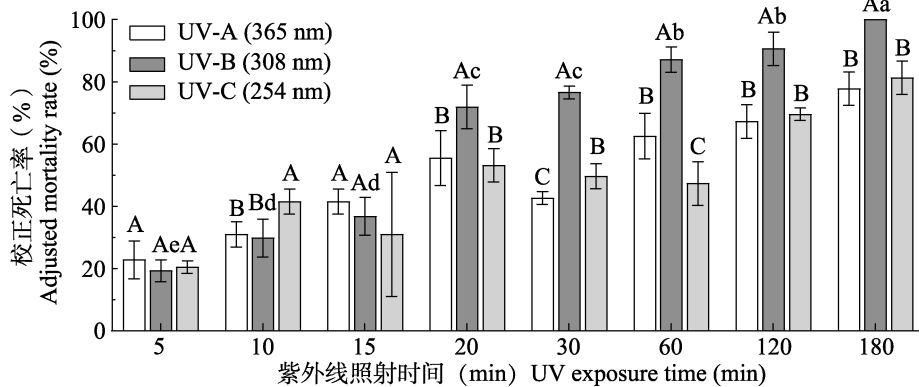


图 3 紫外线照射后前若螨的校正死亡率

Fig. 3 Adjusted mortality rate of protonymph after ultraviolet radiation

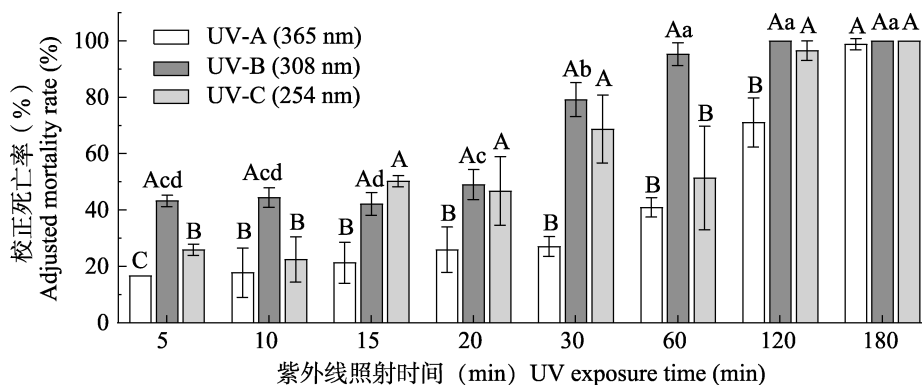


图 4 紫外线照射后幼螨的校正死亡率

Fig. 4 Adjusted mortality rate of larva after ultraviolet radiation

2.1.5 紫外线照射对卵孵化率的影响 由图 5 可知, 不同波长紫外线辐射对于椭圆食粉螨卵的孵化均有抑制作用 ($P < 0.05$)。其中, UV-B 辐照后卵孵化率最低, 仅为 $5.48\% \pm 1.65\%$ 。

2.2 紫外线照射对雌成螨生殖力的影响

经不同波长紫外线辐照 5 min 后, 单雌平均产卵量和产卵期均呈现上升趋势 (图 6: A, B)。其中, UV-A 和 UV-C 处理组雌虫产卵量显著高

2.1.4 紫外线照射对幼螨死亡率的影响 3 种紫外线照射后, 幼螨 LT_{50} 值依次为: UV-B < UV-C < UV-A (表 2), 且均小于其他发育历期, 可见幼螨的抵抗能力最弱。其中 UV-B 和 UV-C 照射 180 min 后, 幼螨死亡率均可达到 100%, UV-A 死亡率为 $98.77\% \pm 2.00\%$ (图 4)。仅需 60 min 的 UV-B 照射即可获得完全杀灭幼螨的效果 ($P > 0.05$)。

于对照组 ($P < 0.05$), 分别增长 40.00% 和 51.15% (图 6: A)。紫外照射后, 雌成螨产卵期均出现显著延长 ($P < 0.05$), UV-A 照射组可达 56.44% (图 6: B)。UV-A 和 UV-B 照射后, 雌成螨日产卵量显著下降 ($P < 0.05$) (图 6: C)。

2.3 紫外线照射对雌成螨 Vg 表达的影响

在不同波长的 UV 分别照射 5、30 和 60 min 后, 处理组 Vg 基因的表达量均呈上升趋势。紫

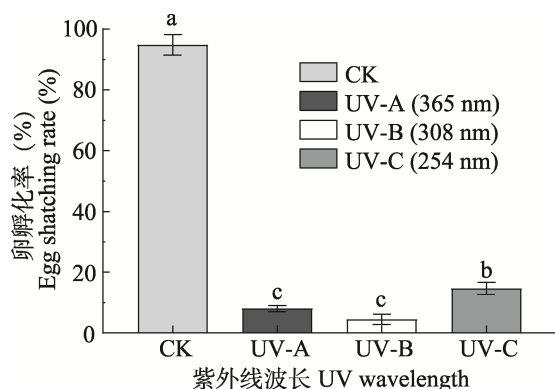


图5 紫外线照射后卵的孵化率

Fig. 5 Hatching rate of eggs after ultraviolet radiation

各组数据的显著性分析使用单因素方差分析 (One-way ANOVA), 用最小显著差异法 (Least significant difference, LSD) 进行, 柱上不同小写字母代表差异显著 ($P < 0.05$)。下图同。

The significance analysis is conducted using one-way ANOVA and least significant difference (LSD) method. Histograms with different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$). The same below.

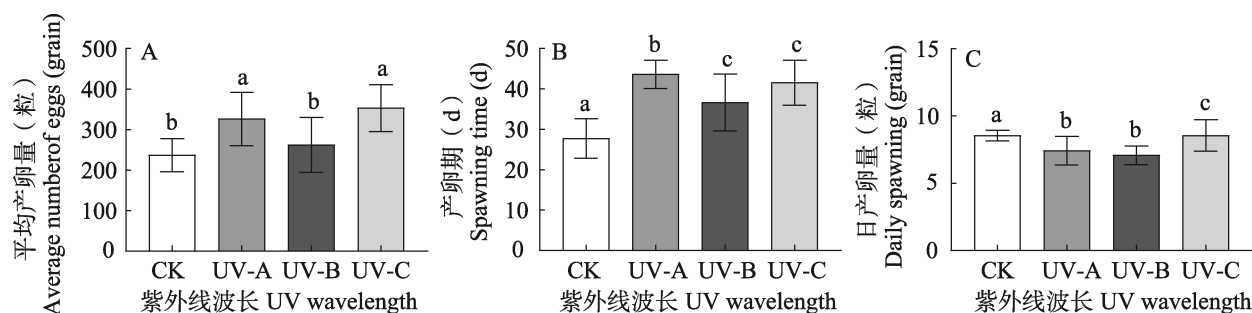


图6 紫外线照射后的生殖力变化

Fig. 6 Fecundity change after ultraviolet irradiation

A. 紫外线照射后的单雌平均产卵量; B. 紫外线照射后的产卵期; C. 紫外线照射后的每日产卵量。

UV-A: 365 nm; UV-B: 308 nm; UV-C: 254 nm。

A. Average number eggs after ultraviolet irradiation; B. Spawning time after ultraviolet irradiation; C. Daily spawning after ultraviolet irradiation.

与 Bakr (2013) 使用 15 W 的 UV-B (315 nm) and UV-C (260 nm) 照射腐食酪螨后得出的结论类似, 本研究中 3 种波长的紫外辐照都显著降低了椭圆食粉螨卵的孵化率。但腐食酪螨在 15W UV-B 和 UV-C 照射 30 min 后, 卵均未孵化。Needham 等 (2006) 的研究也表明, 将屋尘螨 *Dermatophagoides pteronyssinus* 的卵置于距离小于 2 cm 处的 UV-C 灯下进行照射, 15 s 后, 部分卵无法孵化, 在显微镜下发现辐射后的卵胚被

外线辐照 5 min 后, 各 UV 照射组雌成螨 *Vg* 基因表达量均显著升高 ($P < 0.05$), 与雌成螨产卵量数据中单雌平均产卵量的上升趋势相符 (图 7)。

3 结论与讨论

由于空气污染程度增加, 平流层的臭氧变得稀薄, 导致其对太阳辐射的吸收减少, 到达地面的紫外辐射强度逐年增加 (Sasha *et al.*, 1995)。此外, 紫外线常用于日常消毒 (李江, 2004) 和灭菌 (Hamzavi *et al.*, 2020), 并作为一种环境信号影响昆虫的行为学、生物学和生理学特征 (王姿烨等, 2022), 因此常被认为是家居除虫、除螨的最好方式 (李曾婷, 2017)。本试验控制紫外辐射波长和持续时间, 测得各发育阶段椭圆食粉螨的死亡率和半致死时间, 同时分析了不同波长 UV 照射后雌成螨生殖力的变化, 并与生殖相关基因 *Vg* 表达动态相联系。

杀死, 从而使螨无法正常生长发育。因此, 波长约在 200-400 nm 之间的紫外辐射对多种螨的防治都是有效的。这可能是由于紫外线诱发了粉螨体内产生活性氧, 从而破坏 DNA 等大分子遗传物质, 致使死亡或卵无法孵化 (Buck and Callaghan, 1999)。椭圆食粉螨的死亡率与照射时间呈正相关。在相同距离下, 照射时间越长, 粉螨的死亡率越高, 这可能是由于紫外辐射产生的影响能够不断积累 (袁伟宁等, 2016), 而紫

外灯照射时间越长, 辐射剂量越大(都二霞等, 2006), 引发的死亡率就越高。

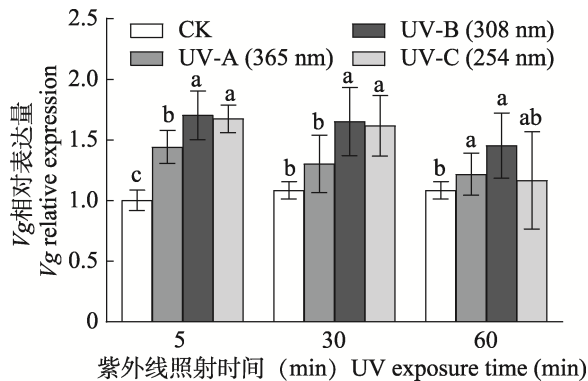


图7 紫外线照射后的椭圆食粉螨雌成螨 *Vg* 相对表达量
Fig. 7 *Vg* relative expression of *Aleuroglyphus ovatus* female adult after ultraviolet irradiation

使用 UV-B 处理后, 除前若螨 LT_{50} 与 UV-C 处理相当外, 不同龄期螨的 LT_{50} 均最低(表 2), 180 min 后螨全部死亡, 且 UV-B 对卵孵化率的抑制最明显。这说明 UV-B 对椭圆食粉螨存活率和子代孵化率等造成的影响最大。刘旭祥等(2021)的试验也显示, 经过 UV-A 和 UV-C 辐照处理的黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster* 蛹的羽化率并未受到明显影响, 而 UV-B 辐射组黑腹果蝇蛹羽化率显著降低, 蛹的死亡率也有明显升高。经 UV-B 照射后的二斑叶螨 *Tetranychus urticae* 的卵均未孵化, 而 UV-A 照射后的卵正常孵化, 说明叶螨卵的孵化受 UV-B 影响更大(Sakai and Osakabe, 2010), 与本试验结果一致。不同的是, 对于腐食酪螨, Bakr(2013)的研究结果显示 UV-C 比 UV-B 杀螨效果更好。这表明对于部分节肢动物来说, UV-B 辐射对其生长发育与繁殖造成的影响更大, 多呈抑制作用, 但是不同物种对不同波长的紫外光的耐受性也存在一定差异。

针对不同龄期的螨, 紫外线辐射所能造成的最大影响也不同, 杀灭效果表现为卵>幼螨>若螨>成螨(表 2, 图 5), 表明椭圆食粉螨对紫外辐射敏感性存在发育阶段特异性, 且敏感性大致随龄期增长而降低, 卵期和幼虫期等低龄虫态对环境变化较为敏感, 且较易死亡。Ghanem 和

Shamma(2007)的研究也指出 UV-C 的影响因昆虫和发育历期不同而不同, 在针对不同年龄段的谷斑皮蠹 *Trogoderma granarium* 幼虫的 UV-C 照射下, 死亡率与寿命成反比, 新生成虫的死亡率远低于幼虫。这可能是由于低龄虫态的螨个体更小, 体重也相应的小, 所以对 UV 辐射的抗性低。生物龄期与其对于紫外线的耐受有直接关系, 个体越大, 耐受性越强(Karanas et al., 1979)。

AoVg 在受短时间紫外照射的椭圆食粉螨雌成螨体内大量表达, 这与刘芳等(2020)研究结果类似, UV-A 胁迫后亚洲玉米螟雌成虫体内 *OfVg* 基因表达水平提高。*Vg* 是影响昆虫生殖调控的关键物质(张乾等, 2017), 直接影响昆虫产卵量。使用 UV-A、UV-B 和 UV-C 照射椭圆食粉螨雌成螨 5 min 后, 产卵量呈上升趋势, 且产卵期出现不同程度延长, 与 *Vg* 基因表达量的上升相对应。这与 UV 照射棉铃虫 1-4 h 后, 棉铃虫的产卵量显著增加结果一致(王智健和牛长缨, 2014)。UV-C 照射后, 椭圆食粉螨雌成螨体内 *Vg* 基因表达量最高, 且产卵量最高, 可能是因为核酸和蛋白质对波长在 100-280 nm 内的 UV-C 紫外线较为敏感, 易发生损伤(李军等, 2005), 因此表达量出现增加。

本试验就不同龄期椭圆食粉螨以及卵受紫外辐射后发育水平的变化情况进行了研究分析, 得到 UV-A(365 nm)、UV-B(308 nm)和 UV-C(254 nm)3 种紫外线均会对椭圆食粉螨的发育产生抑制作用, 同时会刺激雌成螨体内 *Vg* 基因的表达上升, 除 UV-B 组外, 产卵量显著提高。其中 UV-B 杀螨效果最好, 卵期和幼虫期等低龄虫态受紫外线抑制最显著。在目前家居除螨场景中, 由于 UV-C 波长更短, 能量更强, 致使该波长辐射灯出现频率更高。而 UV-C 短期胁迫下椭圆食粉螨产卵量大幅提高, 表明现有产品的隐患。基于试验结果中 UV-B 的优良表现, 在今后防螨过程中或可优先考虑 UV-B。但在紫外长期胁迫下, 椭圆食粉螨生殖力是否会出现变化, 以及紫外辐射是否会对后代椭圆食粉螨的发育及生殖造成影响, 还需要做多代的研究。关于紫外线对于其生化水平的影响, 例如在不同波长和不

同持续时间的紫外辐射下,各龄期椭圆食粉螨体内各种生理指标的变化情况、分子机理以及蛋白质和核酸的遗传变异情况有待进一步深入研究。

参考文献 (References)

- Antignus Y, Nestel D, Cohen S, Lapidot M, 2001. Ultraviolet-deficient greenhouse environment affects whitefly attraction and flight-behavior. *Environmental Entomology*, 30(2): 394–399.
- Bakr AA, 2013. Effectiveness of ultraviolet radiation as a physical method in controlling the stored product mite, *Tyrophagus putrescentiae* (Acari: Acaridae). *Journal of Entomology*, 10(1): 43–48.
- Buck N, Callaghan TV, 1999. The direct and indirect effects of enhanced UV-B on the moth caterpillar *Epirrita autumnata*. *Ecological Bulletins*, 47: 68–76.
- Cheng SY, 2018. Analysis of transcriptome data of *Aleuroglyphus ovatus* under different concentrations of lead stress. Master dissertation. Nanchang: Nanchang University. [程诗雨, 2018. 不同浓度铅胁迫下椭圆食粉螨转录组数据分析. 硕士学位论文. 南昌: 南昌大学.]
- Corona M, Velarde RA, Remolina S, Moran-Lauter A, Wang Y, Hughes KA, Robinson GE, 2007. Vitellogenin, juvenile hormone, insulin signaling, and queen honey bee longevity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(17): 7128–7133.
- Douki T, von Koschimbahr A, Cadet J, 2017. Insight in DNA repair of UV-induced pyrimidine dimers by chromatographic method. *Photochemistry and Photobiology*, 93(1): 207–215.
- Du EX, Guo JW, Zhao HY, 2006. UV-induced DNA mutation of peach aphid. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17(7): 1245–1249. [都二霞, 郭剑文, 赵惠燕, 2006. 紫外辐射诱导桃蚜 DNA 变异. 应用生态学报, 17(7): 1245–1249.]
- Du EX, Zhao HY, Guo JW, 2007. UV-induced ecological response and CO I-II mutation of *Myzus persicae*. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 35(9): 123–126, 131. [都二霞, 赵惠燕, 郭剑文, 2007. 紫外线诱导对桃蚜生态学及线粒体基因 CO I - II 突变的影响. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 35(9): 123–126, 131.]
- Ghanem I, Shamma M, 2007. Effect of non-ionizing radiation (UVC) on the development of *Trogoderma granarium* Everts. *Journal of Stored Products Research*, 43(4): 362–366.
- Hamzavi IH, Lyons AB, Kohli I, Narla S, Parks-Miller A, Gelfand JM, Lim HW, Ozog DM, 2020. Ultraviolet germicidal irradiation: Possible method for respirator disinfection to facilitate reuse during the COVID-19 pandemic. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 82(6): 1511–1512.
- Karanas JJ, Van Dyke H, Worrest RC, 1979. Midultraviolet (UVB) sensitivity of *Acartia clausii* Giesbrecht (Copepoda) 1. *Limnology and Oceanography*, 24(6): 1104–1116.
- Li J, 2004. Research on ultraviolet disinfection technology. Master dissertation. Tianjin: Tianjin University. [李江, 2004. 紫外线消毒技术的研究. 硕士学位论文. 天津: 天津大学.]
- Li J, Zhao HY, Zhao XD, 2005. Study on effect of ecological characteristics and enzyme activity of aphid radiated by different intensities of ultraviolet. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 33(4): 61–64. [李军, 赵惠燕, 赵学达, 2005. 不同强度紫外线对蚜虫生态学特征及有关酶活性的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 33(4): 61–64.]
- Li L, Bai XT, 2008. Effects of ultraviolet radiation on human skin health. *Foreign Medicine (Health Science)*, 2008(4): 198–202. [李立, 白雪涛, 2008. 紫外线辐射对人类皮肤健康的影响. 国外医学(卫生学分册), 2008(4): 198–202.]
- Li Q, Wu L, Yang G, Kuang JK, Feng CH, Luo HH, Yang QF, Jiang CX, Wang HJ, 2012. Effects of temperature stress and ultraviolet radiation stress on antioxidant systems of *Locusta migratoria tibetensis* Chen. *Acta Ecologica Sinica*, 32(10): 3189–3197. [李庆, 吴蕾, 杨刚, 匡健康, 封传红, 罗怀海, 杨群芳, 蒋春先, 王海建, 2012. 温度和紫外辐射胁迫对西藏飞蝗抗氧化系统的影响. 生态学报, 32(10): 3189–3197.]
- Li ZT, 2017. Mite removal machine: Lack of standards and controversial technical direction. *Electrical Appliances*, 2017(7): 34–35. [李曾婷, 2017. 除螨机: 标准缺失, 技术方向存争议. 电器, 2017(7): 34–35.]
- Liu F, Meng JY, Yang CL, Zhang CY, 2020. Cloning and expression profiling of vitellogenin gene and its response to UVA stress in *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Crambidae). *Acta Entomologica Sinica*, 63(3): 255–265. [刘芳, 孟建玉, 杨昌利, 张长禹, 2020. 亚洲玉米螟卵黄原蛋白基因的克隆、表达谱及对 UV-A 胁迫的响应. 昆虫学报, 63(3): 255–265.]
- Liu XX, Yi CD, Ao GF, Chen S, Ji QE, 2021. Effects of three kinds of ultraviolet radiation on pupae of *Drosophila melanogaster*. *Chinese Journal of Biological Control*, 37(2): 228–234. [刘旭祥, 仪传冬, 敖国富, 陈湜, 季清娥, 2021. 三种紫外线辐照对黑腹果蝇蛹的影响. 中国生物防治学报, 37(2): 228–234.]
- Lorenzini D, Pires M, Aoki V, Takaoka R, Souza RL, Vasconcellos C, 2015. Atopy patch test with *Aleuroglyphus ovatus* antigen in patients with atopic dermatitis. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 29(1): 38–41.
- Needham G, Begg C, Buchanan S, 2006. Ultraviolet C exposure is fatal to American house dust mite egg. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 117(2): S28.

- Osakabe M, 2021. Biological impact of ultraviolet-B radiation on spider mites and its application in integrated pest management. *Applied Entomology and Zoology*, 56(2): 139–155.
- Sakai YT, Osakabe M, 2010. Spectrum-specific damage and solar ultraviolet radiation avoidance in the two-spotted spider mite. *Photochemistry and Photobiology*, 86(4): 925–932.
- Sappington TW, Raikhel AS, 1998. Molecular characteristics of insect vitellogenins and vitellogenin receptors. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 28(5/6): 277–300.
- Sasha M, Richard LM, Martyn MC, Lars OB, Li W, 1995. Changes in surface ultraviolet radiation. *Ambio-A Journal of the Human Environment*, 24(3): 143–152. [Sasha Madronich, Richard L. McKenzie, Martyn M. Caldwell, Lars Olof Björn, 李卫, 1995. 地表紫外辐射的变化. *AMBIO- 人类环境杂志*, 24(3): 143–152.]
- Seehuus SC, Norberg K, Gimsa U, Krekling T, Amdam GV, 2006. Reproductive protein protects functionally sterile honey bee workers from oxidative stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(4): 962–967.
- Tian CB, 2018. Effects of ultraviolet UVB on the growth and development of *Neoseiulus babsoni* and antioxidant enzymes. Master dissertation. Chongqing: Southwest University. [田川北, 2018. 紫外线 UVB 对巴氏新小绥螨生长发育及抗氧化酶的影响研究. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.]
- Wang BZ, 1988. Measurement and Standard of Solar Radiant Energy. Beijing: Science Press. 4. [王炳忠, 1988. 太阳辐射能的测量与标准. 北京: 科学出版社. 4.]
- Wang ZJ, Niu CY, 2014. Influence of ultraviolet light irradiation on HMG-CoA reductase, vitellogenin mRNA expression and oviposition of *Helicoverpa armigera*. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 33(2): 46–50. [王智健, 牛长缨, 2014. UV 照射对棉铃虫产卵量及 HMG-CoA 还原酶和卵黄原蛋白基因表达量的影响. *华中农业大学学报*, 33(2): 46–50.]
- Wang ZY, Wang FF, He WC, Qiu BL, Lei CL, 2022. Biological effects of ultraviolet light on insects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(1): 16–28. [王姿烨, 王飞凤, 何万财, 邱宝利, 雷朝亮, 2022. UV 对昆虫的生物学效应及昆虫适应机制. *应用昆虫学报*, 59(1): 16–28.]
- Xi JF, 2019. Response mechanism of vitellogenin gene of *Aleuroglyphus ovatus* (Troupeau) to heavy metal lead stress. Master dissertation. Jiangxi: Nanchang University. [奚剑飞, 2019. 椭圆食粉螨卵黄原蛋白基因对重金属铅胁迫的响应机制. 硕士学位论文. 南昌: 南昌大学.]
- Xin JL, Shen ZP, 1964. Studies on the life-history of *Aleuroglyphus ovatus* Troupeau (Acarina, Acaridae). *Acta Entomologica Sinica*, 13(3): 428–435. [忻介六, 沈兆鹏, 1964. 椭圆食粉螨 (*Aleuroglyphus ovatus* Troupeau, 1878) 生活史的研究(蜱螨目, 粉螨科). *昆虫学报*, 7(3): 428–435.]
- Yan XY, Yang NZ, Yuan DZ, Wu HS, Chen JH, 1992. Study on the life history of *Aleuroglyphus ovatus* (Troupeau). *Grain and Oil Storage Technology Communication*, 8(6): 53–55. [阎孝玉, 杨年震, 袁德柱, 吴梅松, 陈俊华, 1992. 椭圆食粉螨生活史的研究. *粮油仓储科技通讯*, 8(6): 53–55.]
- Yang J, Shang SQ, Zhang XH, 2013. Effect of temperature on developmental duration of *Aleuroglyphus ovatus*. *Journal of Gansu Agricultural University*, 48(5): 86–88, 93. [杨洁, 尚素琴, 张新虎, 2013. 温度对椭圆食粉螨发育历期的影响. *甘肃农业大学学报*, 48(5): 86–88, 93.]
- Yuan WN, Zhu YY, Sun XL, Yang QY, Liu CZ, 2016. Effects of UVB stress on biological characteristics of red pea aphid *Acyrtosiphon pisum* Harris. *Plant Protection*, 42(4): 77–82. [袁伟宁, 朱仰艳, 孙小玲, 杨巧燕, 刘长仲, 2016. 紫外线胁迫对红色型豌豆蚜生物学特性的影响. *植物保护*, 42(4): 77–82.]
- Zhang AL, Feng SM, Hu WW, Zhao JD, 2019. Introduction of QB/T 5363-2019 eliminating mites machine standard and test method. Proceedings of the 2019 China Household Electrical Appliances Technology Conference. 1028–1031. [张庆玲, 冯素梅, 胡威威, 赵金丹, 2019. QB/T 5363–2019《除螨机》行业标准试验方法简介. 2019 年中国家用电器技术大会论文集. 北京: 中国轻工业出版社. 1028–1031.]
- Zhang Q, Li YZ, He HL, 2017. Research progresses on molecular characterization of insect vitellogenin. *Entomology of Central China*, 13: 17–24. [张乾, 李有志, 贺华良, 2017. 昆虫卵黄原蛋白分子特性的研究进展. *华中昆虫研究*, 13: 17–24.]
- Zhang SC, Sun XT, Li HY, 2002. Review on vitellogenin. *Marine Sciences*, 26(7): 32–35. [张士瑾, 孙旭彤, 李红岩, 2002. 卵黄蛋白原研究及其进展. *海洋科学*, 26(7): 32–35.]