

网络出版时间:2024-07-05 16:59 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2025.01.009
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20240704.1129.018

芦丁对家蚕取食及生长发育的影响

夏忠洁,吴梦佳,雷锋杰,张爱华

(吉林农业大学 中药材学院,吉林 长春 130118)

【摘要】【目的】明确次生代谢物质芦丁对鳞翅目昆虫家蚕取食及生长发育的影响,为开发新型生物防治药剂提供基础,并推进家蚕模式生物系统在鳞翅目害虫防治领域的实际应用。【方法】采用叶碟法,以蒸馏水处理的桑叶为对照,用不同质量浓度(5,10和20 mg/mL)芦丁处理的桑叶对家蚕进行拒食与产卵趋避试验,同时在室内对二龄和三龄家蚕分别饲喂不同质量浓度(5,10和20 mg/mL)芦丁处理的桑叶,喂食一定时间后,测定家蚕存活率、体质量、发育历期,探究芦丁对家蚕生长发育的影响。【结果】黄酮类化合物芦丁对二龄及三龄家蚕幼虫均具有拒食活性,且随着质量浓度的增大,芦丁对家蚕幼虫的拒食活性也随之增强;随着取食时间的延长,芦丁对家蚕幼虫的拒食活性逐渐降低,拒食率一般在刚取食时最高;芦丁对二龄与三龄家蚕幼虫拒食活性的影响差异不大。取食芦丁的家蚕幼虫均能够正常生长发育,但随着芦丁质量浓度的增加,二龄和三龄家蚕幼虫的发育历期逐步延长,表明芦丁对家蚕生长发育有一定的抑制作用,尤以20 mg/mL芦丁处理对家蚕生长发育的抑制作用最强。取食不同质量浓度芦丁处理的桑叶,家蚕产卵趋避率均大于50%,表明芦丁对家蚕成虫有较强的产卵趋避作用。【结论】黄酮类化合物芦丁在高质量浓度下对鳞翅目家蚕有一定的震慑和驱赶作用,对其生长发育有明显抑制作用,具有开发为生物农药的潜力。

【关键词】 芦丁;家蚕;拒食活性;生长发育;生物农药

【中图分类号】 S476

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2025)01-0091-08

Effects of rutin on feeding and growth of silkworm

XIA Zhongjie, WU Mengjia, LEI Fengjie, ZHANG Aihua

(College of Chinese Medicinal Material, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118, China)

Abstract: 【Objective】 This study determined the effects of secondary metabolite rutin on feeding and growth of Lepidopteran silkworm to provide basis for developing new biological control agents and promoting practical application of silkworm model biological system in the field of Lepidopteran pest control. 【Method】 Leaf plate method was used to test feeding resistance and oviposition avoidance of mulberry leaves treated with different mass concentrations (5, 10, and 20 mg/mL) of rutin. Distilled water was used as control. Mulberry leaves treated with different mass concentrations (5, 10, and 20 mg/mL) of rutin were fed to the second and third aged silkworms in laboratory for certain periods of feeding time. Survival rate, body weight and development period of silkworms were measured to explore the effects of rutin on growth and development of silkworms. 【Result】 Flavonoid rutin had anti-feeding activity on both the second and third instars of silkworm larvae and the activity increased with the increase of mass concentration. With the prolongation of feeding time, the anti-feeding activity of rutin on silkworm larvae gradually decreased with the highest anti-feeding rate at the beginning of feeding. There was no significant difference between the second and third instars. With the increase of rutin concentration, the development period of the second and

【收稿日期】 2023-10-27

【基金项目】 吉林省科技发展计划项目“基于人参内生菌的生防制剂与示范应用”(20170204018YY);吉林省科技发展计划项目“我省中东部地区人参林下仿生态栽培技术研究”(20210202084NC)

【作者简介】 夏忠洁(2001-),男,山东临沂人,在读硕士,主要从事中药资源研究。E-mail:xzj13384329763@163.com

【通信作者】 张爱华(1978-),女,吉林长春人,教授,硕士生导师,主要从事药用植物资源研究。E-mail:aihua@jlau.edu.cn

third instar larvae was gradually extended, indicating that rutin had inhibitory effects on growth period, especially in the 20 mg/mL treatment group. The oviposition evasion rate of all rutin treatments was greater than 50%, indicating that rutin had good oviposition evasion effects on adult silkworm. 【Conclusion】 Flavonoid rutin had certain deterrent and repelling effects on growth and development of Lepidoptera *Bombyx mori* at high concentrations, with the potential to be developed as bio-pesticide.

Key words: rutin; *Bombyx mori*; anti-feeding activity; growth and development; bio-pesticide

食物是动物赖以生存和繁衍的基础,而取食安全食物是动物最基本的本能。从生物圈的角度来看,植物充当主要的生产者,而动物则扮演主要的消费者角色。作为自养生物,植物能够为其他生物提供丰富的营养物质,同时由于其固定性较强,对其他生物构不成威胁。在长期共生过程中,植物与昆虫形成了复杂的互作关系,即昆虫选择适应寄主植物与植物进行抗虫斗争^[1]。在这种互作关系中,植物通过多种机制来防御、限制和对抗食草昆虫,其中合成次生代谢物是重要的防御机制之一^[2]。

次生代谢物种类繁多,已知的结构超过 20 000 种,主要包括酚类、萜类和含氮化合物等。其中,黄酮类化合物是迄今为止最广泛的多酚类物质,约有 8 000 多种。这些化合物以 C6—C3—C6 碳骨架为基础结构,包括许多异构体和还原产物。黄酮类化合物不仅具有多种生物活性和药用价值,还具有广谱的抗虫性。芦丁,又称芸香苷,是一种来源很广的黄酮类化合物,具有抗炎、抗氧化、保护血管和镇痛等多种药理作用,广泛存在于高等植物中。五加科人参属的人参(*Panax ginseng* C. A. Mey),其茎叶中总黄酮含量为 0.019~1.550 mg/g,其中芦丁的含量较高^[3];唇形科益母草属益母草(*Leonurus japonicus* Houtt.),其芦丁含量达到 1.3~1.97 mg/g^[4];伞形科柴胡属柴胡(*Bupleurum chinense* DC.),其芦丁含量为 0.105~21.658 mg/g^[5];唇形科草本植物夏枯草(*Prunella vulgaris* L.),其芦丁含量为 0.233 7~2.116 4 mg/g^[6]。研究表明,大多数中草药中无专性寄生害虫,而是多主寄生害虫^[7-12]。这间接表明中草药对害虫来说并不是最佳的食物来源,可能是由于其中的黄酮类次生代谢物对食草昆虫具有防御作用,从而减少了害虫的侵害。

黄酮类化合物具有多种生物活性,对昆虫的生长发育有着复杂的影响^[13-16]。DAI 等^[17]通过对 39 个天然水稻品种的分析发现,类黄酮含量的增加与抗褐飞虱能力的增强有关。ABOSHI 等^[18]用白桦叶片中的黄酮类甲醇提取物喂养斜纹夜蛾幼虫,结果发现 50%的幼虫在 1 周内死亡,且明显抑制了斜

纹夜蛾的生长。CUI 等^[19]用不同质量浓度黄酮类化合物处理亚洲蝗虫,结果表明黄酮类化合物对亚洲蝗虫的生长发育有明显的抑制作用。关于芦丁在植物抗虫性方面的作用也有文献报道,TANG 等^[20]用芦丁处理番茄种子引发番茄对烟粉虱的抗性,并且不会影响番茄芽生长;BENTIVENHA 等^[21]通过评估实验室条件下臭虫的生长和存活来检测大豆基因型的抗性,结果表明芦丁和染料木素可能与这些基因型对臭虫的抗性有关。然而,近年来国内关于芦丁对昆虫影响的报道较少,尤其是对鳞翅目昆虫的影响,并且关于增加植物中特定类黄酮含量对昆虫拒食行为影响的研究也甚少。

家蚕作为寡食性鳞翅目昆虫,因其易繁殖、世代短、子代多、遗传背景清晰、个体大小适宜、饲养成本低、无生物危害风险等基本优势,于 2002 年被正式确定为鳞翅目模式昆虫,在发育生物学、鳞翅目害虫防治等研究领域受到广泛关注。相较于其他鳞翅目昆虫,家蚕具有清晰的发育历期、成熟的繁育技术、悠久的历史基础、完备的基因组序列测序成果、丰富的突变资源等独特优势,因而研究次生代谢产物芦丁对家蚕的影响,对于整个鳞翅目害虫防控都具有重要意义。

家蚕主要寄主为桑树,研究表明桑树中亦含有少量芦丁,但家蚕仍取食桑叶并健康存活。或许因为家蚕体内形成了一套对低质量浓度芦丁解毒的作用机制,而有关高质量浓度芦丁对家蚕生长发育和生理代谢的影响及芦丁的精确杀虫机制尚不完全清楚。因此,本试验以家蚕为研究对象,进行了拒食与产卵趋避试验,并在室内用喷洒不同质量浓度芦丁的桑叶来喂养家蚕一定时间,研究高质量浓度芦丁对家蚕幼虫生长的影响,旨在为开发新型生物防治药剂提供理论基础,进而推进家蚕模式生物在鳞翅目害虫防治领域的实际应用。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试昆虫 家蚕品种为两广一号,消毒后在温度(25±1)℃、相对湿度 75%、光照 12 h/12 h

(光/暗)的养虫室内孵化,用新鲜无病虫害的桑叶饲养至二龄、三龄备用。

1.1.2 药 剂 芦丁(HPLC \geq 98%),购于上海源叶生物科技股份有限公司。使用时用无水乙醇分别配制成质量浓度为 20,10,5 mg/mL 的芦丁乙醇溶液,现配现用。

1.1.3 供试桑叶 在吉林农业大学校园内桑树上采集无病虫害的新鲜桑叶,备用。

1.2 试验方法

1.2.1 拒食活性测定 将采集的新鲜桑叶洗净、晾干,挑选厚度均匀的叶片,用打孔器打成直径为 2 cm 的叶碟,分别均匀喷洒质量浓度为 5,10 和 20 mg/mL 的芦丁乙醇溶液,以喷洒无菌蒸馏水为对照,自然晾干后备用。挑选生长健康、蜕皮 1 d 后的二龄、三龄家蚕幼虫,置于洁净灭菌的培养皿中饥饿处理 8 h。

(1)非选择性拒食活性测定。采用改良叶碟法测定家蚕对不同质量浓度芦丁的非选择性拒食活性。具体为:取经过饥饿处理 8 h 的二龄、三龄家蚕幼虫各 5 只,分别放入绕中心等距摆放 5 片不同质量浓度芦丁处理叶碟的培养皿中央(叶背面朝上),以蒸馏水处理叶碟作为对照,共 4 个处理,每处理 3 个重复,24 个平皿。三龄家蚕在取食 2,4,6,8 h 测量取食叶面积,二龄家蚕在取食 2,12,24,36 h 测量取食叶面积,取食叶面积采用坐标纸测定,计算非选择性拒食率^[22]。

非选择性拒食率=(对照取食叶面积-处理取食叶面积)/对照取食叶面积 \times 100%。

(2)选择性拒食活性测定。采用改良叶碟法进行家蚕幼虫的选择性拒食活性测定。具体为:取经过饥饿处理 8 h 的二龄、三龄家蚕幼虫各 5 只,每皿分别相间放置 1 种同质量浓度芦丁处理的叶碟和对照叶碟,共 4~8 片,绕中央围成圆形,其他操作同非选择性拒食活性测定,计算选择性拒食率^[22]。

选择性拒食率=(对照取食叶面积-处理取食叶面积)/(对照取食叶面积+处理取食叶面积) \times 100%。

1.2.2 生长发育抑制作用测定 芦丁对二龄、三龄家蚕幼虫生长发育抑制作用的测定主要参考谭世强等^[8-9]和杨安頓^[23]的方法,略有改动。具体为:挑选蜕皮 1 d 后大小一致的二龄、三龄家蚕幼虫,用分析天平(精确到 0.1 mg)称质量后放入垫有无菌滤纸的灭菌培养皿中饥饿处理 4 h。取新鲜桑叶洗净、晾干,分别喷洒质量浓度为 5,10 和 20 mg/mL 的芦丁

乙醇溶液,自然晾干后备用。将经过饥饿处理的家蚕幼虫放入灭菌培养皿中,加入不同质量浓度芦丁处理的桑叶,对照组家蚕饲喂表面喷洒无菌蒸馏水的桑叶,每处理 3 个重复,每重复 5 头虫。置于温度(25 \pm 1)℃、相对湿度 75%、光照 12 h/12 h(光/暗)的光照培养箱中培养至家蚕蜕皮。每隔 12 h 换 1 次桑叶,每 24 h 清理粪便 1 次,每天称量家蚕体质量,记录蜕皮数、蜕皮时间和死亡虫数,计算幼虫发育历期和存活率。

1.2.3 产卵趋避性测定 产卵趋避性测定参照周琼等^[24]的方法,挑选厚度均匀的桑叶,用打孔器打成直径为 2 cm 的叶碟,分别均匀喷洒质量浓度为 5,10 和 20 mg/mL 的芦丁乙醇溶液,以喷洒蒸馏水的叶碟作为对照,自然晾干后备用。将芦丁处理叶碟和对照叶碟均正面朝上,交叉排列放入有无菌滤纸的灭菌培养皿中,绕中央围成圆形,再放入 1 对新近羽化的蚕蛾成虫,置于 25℃室内培养。记录不同处理叶碟上的最终落卵量,计算产卵趋避率。

产卵趋避率=(对照落卵量-处理落卵量)/(对照落卵量+处理落卵量) \times 100%。

1.3 数据分析

使用 SPSS 26.0 软件统计并计算幼虫拒食率、幼虫发育历期、存活率和产卵趋避率的平均值和标准误,并采用 Tukey's HSD 和 Duncan's 新复极差法进行差异显著性方差分析,使用 Origin 2022 及 Excel 2019 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 芦丁对家蚕拒食活性的影响

观察发现,经过芦丁处理的桑叶干燥后,叶面上有黄色芦丁结晶。不同质量浓度芦丁对家蚕拒食活性的影响结果如图 1 和图 2 所示。由图 1 和图 2 可知,芦丁对家蚕幼虫有较明显的拒食活性,随着质量浓度的增加,芦丁对家蚕的拒食活性也随之升高;在相同质量浓度下,家蚕选择性拒食率明显高于非选择性拒食率。20 mg/mL 芦丁处理下,二龄和三龄家蚕幼虫的选择性拒食率、非选择性拒食率均为最高,且均在处理 2 h 时最高,其中二龄家蚕幼虫的选择性拒食率和非选择性拒食率分别是 96.71% 和 54.59%,三龄家蚕幼虫的选择性拒食率和非选择性拒食率分别为 92.54% 和 43.08%。

由图 1 还可知,二龄家蚕选择性拒食率在处理 2 h 时各质量浓度处理间差异显著($P < 0.05$);在处理 12 h 时,5 mg/mL 芦丁处理二龄家蚕选择性拒

食率与 20 mg/mL 处理间存在显著差异 ($P < 0.05$); 随着处理时间延长, 各质量浓度芦丁处理二龄家蚕的选择性拒食率和非选择性拒食率均下降。由图 2 还可知, 在处理 2 h 时, 5 mg/mL 芦丁处理三龄家蚕的选择性拒食率与 10 mg/mL 芦丁处理间差异不显著 ($P > 0.05$), 但二者均与 20 mg/mL 芦

丁处理差异显著 ($P < 0.05$)。由图 1 和图 2 还可知, 5 mg/mL 芦丁处理二龄家蚕 36 h, 家蚕对芦丁的非选择性拒食率为负值; 5 mg/mL 芦丁处理三龄家蚕 6 h, 家蚕对芦丁的非选择性拒食率也为负值, 表明随着处理时间推移, 家蚕对芦丁的适应性逐渐加强。

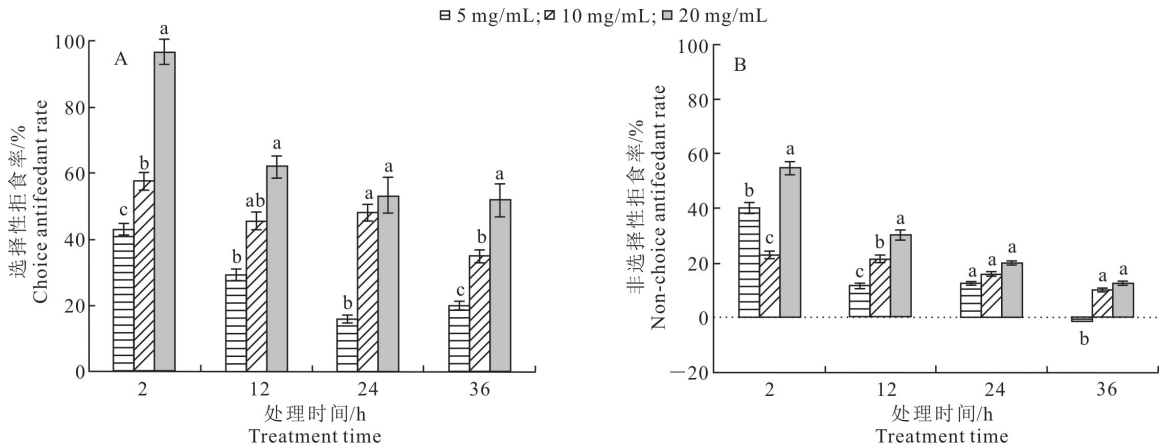


图 1 上标不同小写字母表示相同处理时间不同质量浓度间差异显著 ($P < 0.05$)。图 2 同。

Different lowercase letters indicate significant differences between different mass concentrations at same processing time ($P < 0.05$). The same as Fig. 2.

图 1 不同质量浓度芦丁对二龄家蚕的拒食作用

Fig. 1 Antifeedant effects of rutin with different concentrations on second instar silkworm

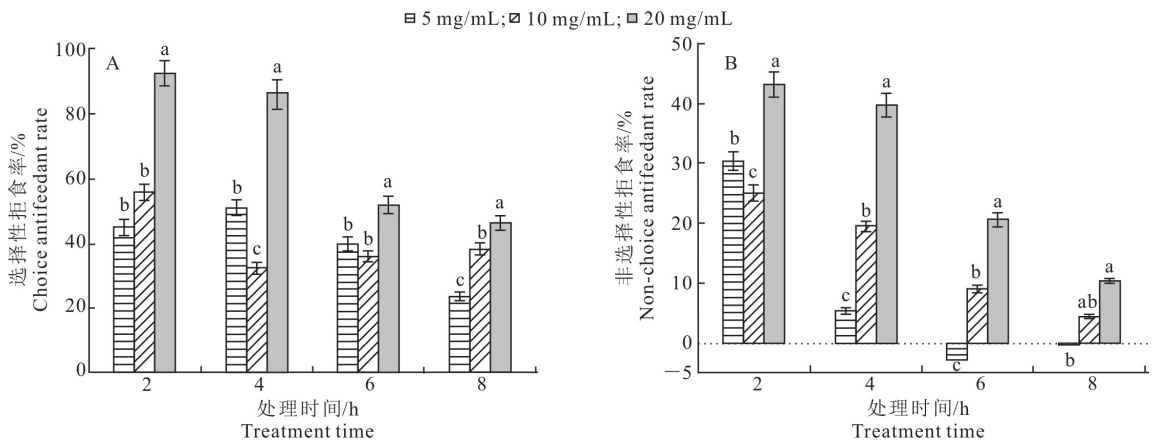


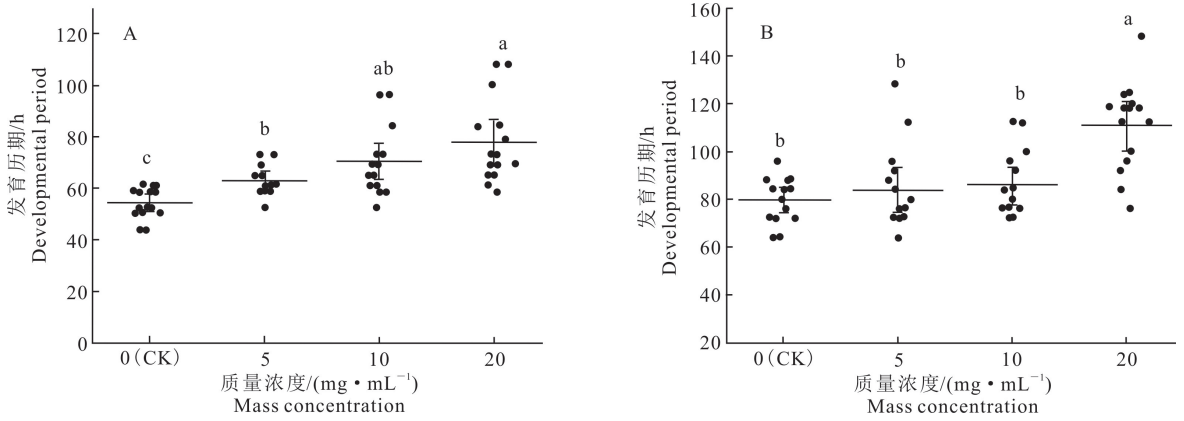
图 2 不同质量浓度芦丁对三龄家蚕的拒食作用

Fig. 2 Antifeedant effects of rutin with different concentrations on silkworm of third instar

2.2 芦丁对家蚕生长发育的抑制作用

2.2.1 对家蚕幼虫发育历期的影响 观察发现, 取食不同质量浓度芦丁处理桑叶的家蚕幼虫均能够正常生长发育, 无死亡。由图 3 可知, 随着芦丁质量浓度的增加, 二龄和三龄家蚕幼虫的发育历期均逐渐延长, 表明芦丁对家蚕幼虫生长发育有一定的抑制作用。由图 3-A 可知, 与对照相比, 各质量浓度芦丁处理组二龄家蚕幼虫的发育历期显著延长 ($P < 0.05$)。由图 3-B 可知, 与对照相比, 各质量浓度芦

丁处理组三龄家蚕幼虫的发育历期均延长, 其中 5 和 10 mg/mL 芦丁处理组三龄家蚕幼虫的发育历期与对照组无显著差异, 但 20 mg/mL 芦丁处理组三龄家蚕幼虫的发育历期与对照组差异显著 ($P < 0.05$); 5 和 10 mg/mL 芦丁处理组三龄家蚕幼虫的发育历期均与 20 mg/mL 芦丁处理组差异显著 ($P < 0.05$), 但 5 mg/mL 芦丁处理组三龄家蚕幼虫的发育历期与 10 mg/mL 芦丁处理组无显著差异。



A. 二龄家蚕;B. 三龄家蚕。不同小写字母表示不同质量浓度间差异显著($P < 0.05$)。图 4 同。

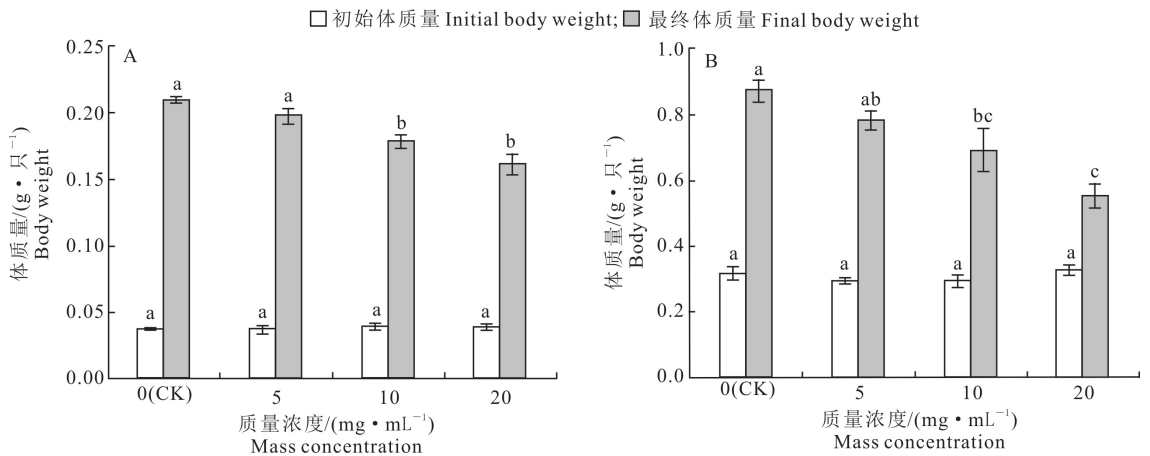
A. Second instar silkworm;B. Third instar silkworm. Different lowercase letters indicate significant differences between different mass concentration($P < 0.05$). The same as Fig. 4

图 3 不同质量浓度芦丁对家蚕幼虫发育历期的影响

Fig. 3 Effects of rutin at different concentrations on development period of silkworm larva

2.2.2 对家蚕幼虫体质量的影响 由图 4-A 可知,与对照相比,不同质量浓度芦丁处理均对二龄家蚕幼虫生长有明显的抑制作用;5 mg/mL 芦丁处理组二龄家蚕幼虫的最终体质量与对照组相比略有下降,但差异不显著;10 和 20 mg/mL 芦丁处理组二龄家蚕幼虫的最终体质量与对照组相比显著下降,其中 10 mg/mL 芦丁处理组二龄家蚕幼虫的最终体质量约为对照的 81.28%,20 mg/mL 芦丁处理组二龄家蚕幼虫的最终体质量约为对照的 72.32%。

由图 4-B 可知,与对照相比,不同质量浓度芦丁处理均对三龄家蚕幼虫生长有一定的抑制作用,且随着芦丁质量浓度的增加,三龄家蚕幼虫的最终体质量越来越小,表明抑制作用越来越强。与对照相比,10 和 20 mg/mL 芦丁处理组三龄家蚕幼虫的最终体质量显著下降,其中 10 mg/mL 芦丁处理组三龄家蚕幼虫的最终体质量约为对照的 69.73%,20 mg/mL 芦丁处理组三龄家蚕幼虫的最终体质量约为对照的 40.85%。



A. 二龄家蚕;B. 三龄家蚕。

A. Second instar silkworm;B. Third instar silkworm.

图 4 不同质量浓度芦丁对家蚕体质量的影响

Fig. 4 Effects of rutin at different concentrations on body weight of *Bombyx mori*

2.3 芦丁对家蚕的产卵趋避作用

芦丁对家蚕成虫产卵选择的影响如表 1 所示。由表 1 可知,随着芦丁质量浓度增大,家蚕成虫选择产卵的数量逐渐减少,产卵趋避率逐渐增大。5,10

和 20 mg/mL 芦丁处理组,家蚕成虫的产卵趋避率分别达到 68.05%,84.23%和 97.70%,且不同处理间存在显著差异($P < 0.05$)。表明芦丁对家蚕成虫有良好的产卵趋避作用,且随着质量浓度的增大,芦

丁对家蚕成虫的产卵趋避率作用逐渐增强。

表 1 芦丁对家蚕成虫的产卵趋避作用

Table 1 Antioviposition activity of rutin on

Bombyx mori adults

质量浓度/ (mg · mL ⁻¹) Mass concentration	落卵数 Number of falling eggs	产卵趋避率/% Spawning avoidance rate
0(CK)	22.33±2.96 a	—
5	4.33±0.88 b	68.05±1.94 c
10	2.00±0.58 b	84.23±2.66 b
20	0.33±0.33 b	97.70±2.30 a

注:同列数据后标不同小写字母表示不同质量浓度间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different mass concentration ($P<0.05$).

3 讨论与结论

植物次生代谢物是植物在长期进化过程中与环境相互作用的产物^[25],与植物的生长发育和繁殖均无直接关系。作为植物新陈代谢的最终产物,植物次生代谢物虽然产量有限,但具有较强的生物活性,主要参与调节植物防御反应,帮助植物抵御来自环境的胁迫,在防御昆虫和植食动物侵食过程中也发挥着重要作用。研究表明,植物次生代谢物对植食性昆虫的防御作用主要体现在趋避与拒食、干扰昆虫体内酶活性、抑制生长发育、毒杀以及引诱昆虫天敌和影响昆虫共生菌等方面^[26]。

已有研究表明,芦丁会对昆虫的生长发育产生不利影响^[27-28],但大多报道在 2000 年之前,且基本为国外报道。近年来涉及芦丁对昆虫影响的报道较少,且基本为多种黄酮类化合物对昆虫触杀程度差异的比较。有关高质量浓度芦丁对家蚕生长发育和生理代谢的影响尚未见报道。本试验从取食行为、生长发育及产卵趋避等方面研究了高质量浓度黄酮类化合物芦丁对鳞翅目家蚕幼虫的影响。结果表明,随着芦丁质量浓度的增加,二龄和三龄家蚕幼虫的发育历期逐渐延长,表明芦丁对家蚕生长有一定抑制作用,尤以 20 mg/mL 芦丁处理的抑制作用更强。这可能是由于家蚕幼虫在抵御芦丁的过程中,摄入能量的一部分用于芦丁的解毒代谢,而另一部分才被用于自身的生长发育。VALKAMA 等^[29]研究发现,桦树叶表面的类黄酮含量与鳞翅目秋蛾五龄幼虫的生长率和蛹质量呈负相关;LAHTINEN 等^[30]研究发现,类黄酮降低了秋蛾一龄幼虫的生长速度,同时延长了秋蛾幼虫的寿命,这与本研究中随芦丁质量浓度的增加,二龄和三龄家蚕幼虫的发育

历期逐步延长的结果是一致的。

本研究中,二龄和三龄家蚕幼虫在取食不同质量浓度芦丁处理的桑叶后均能够正常生长发育,未出现死亡情况。然而,MALLIKARJUNA 等^[31]研究发现,花生中的槲皮素和芦丁导致烟草粘虫(夜蛾)死亡率增加,这可能与烟草粘虫自身的代谢能力及其体内肠道菌群互作有关。此外,本研究结果还显示,芦丁对二龄和三龄家蚕幼虫具有较明显的拒食活性,且随着芦丁质量浓度的增加,其对家蚕幼虫的拒食活性也逐渐增强;同时,拒食率一般在刚取食时最高,随着取食时间的延长,芦丁对家蚕幼虫的拒食活性逐渐降低;芦丁对二龄与三龄家蚕幼虫的拒食活性差异不大。表明芦丁能够抑制家蚕幼虫的摄食行为,进而抑制幼虫的生长发育。类似的结果也见于其他研究,如 GOLAWSKA 等^[32]的研究显示,异黄酮金雀异黄素和黄酮木犀草素对豌豆蚜虫的摄食行为有不利影响;GOLAWSKA 等^[33]的研究显示,苜蓿中的黄酮类化合物会影响豌豆蚜虫的取食行为。然而芦丁对家蚕幼虫取食行为的具体影响机制尚不明确,或许家蚕幼虫能够感知芦丁,这可以通过含有和不含芦丁的混合物进行电生理试验来进一步研究家蚕幼虫对芦丁的感知神经机制。综上所述,黄酮类化合物对昆虫生长发育具有抑制作用,其对昆虫的抑制作用可能主要是通过影响其摄食行为来实现的。

本研究发现芦丁改变了桑叶的外观颜色,经过芦丁处理的桑叶干燥后,叶面上有黄色芦丁结晶。各质量浓度芦丁处理组家蚕成虫的产卵趋避率均大于 50%,表明芦丁对家蚕成虫有着较强的产卵趋避作用,这与 TABASHNIK 等^[34]研究发现芦丁在高浓度(0.1 mol/L)和低浓度(0.01 mol/L)下强烈抑制小菜蛾成虫产卵的结果一致。因此芦丁具有开发成绿色环保的新型产卵忌避剂的潜力。

作为鳞翅目昆虫的模式生物,家蚕对研究黄酮类次生代谢产物芦丁对鳞翅目昆虫生长发育的影响具有重要意义,也对研究鳞翅目害虫防控具有重要作用。本研究结果表明,高质量浓度芦丁对鳞翅目模式生物家蚕有明显的负面影响,因而黄酮类化合物芦丁是植物用来防御鳞翅目植食性昆虫的一种次生代谢物。从拒食和产卵趋避结果来看,芦丁对鳞翅目家蚕有一定的震慑和驱赶作用。然而,从生长发育的结果来看,芦丁对鳞翅目家蚕幼虫有负面影响。因此,芦丁的杀虫活性可能与影响鳞翅目家蚕的摄食行为和生长发育有关,芦丁可能具有控制鳞

翅目类昆虫的潜力,以上结果为未来开发利用植物次生代谢物作为杀虫剂来防治害虫提供了参考。后续将进一步研究黄酮类化合物芦丁对家蚕幼虫体内消化酶、保护酶、解毒酶以及肠道菌群结构和丰度的影响,以便更深入地分析芦丁对鳞翅目昆虫家蚕的作用机制,推进对家蚕模式生物系统的实际应用,并提高对鳞翅目害虫的综合治理水平。

[参考文献]

- [1] 张月白, 娄永根. 植物与植食性昆虫化学互作研究进展 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2151-2160.
ZHANG Y B, LOU Y G. Research progress in chemical interactions between plants and phytophagous insects [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(7): 2151-2160.
- [2] 马瑞, 董冬. 植物与昆虫互作机理研究概述 [J]. 生物学教学, 2018, 43(1): 65-67.
MA R, DONG D. Overview of the research on the mechanism of plant-insect interactions [J]. Biology Teaching, 2018, 43(1): 65-67.
- [3] 史得君, 程茵, 崔福顺. HPLC 法测定人参茎叶总黄酮 [J]. 食品工业, 2015, 36(5): 287-289.
SHI D J, CHENG Y, CUI F S. Determination of total flavonoid in ginseng stem and leave by HPLC [J]. Food Industry, 2015, 36(5): 287-289.
- [4] 李宝辉, 李冬晖, 薛党党, 等. 中药益母草的化学指纹图谱及多组分定量分析方法的建立及应用研究 [J]. 天津中医药大学学报, 2020, 39(3): 336-340.
LI B H, LI D H, XUE D D, et al. The establishment and application of chemical fingerprint and multi-component quantitative analysis for Leonuri Herba [J]. Journal of Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, 2020, 39(3): 336-340.
- [5] 耿茂林, 宋萍萍, 徐增莱, 等. 不同种质来源柴胡地上部分的 HPLC 比较研究 [J]. 中国中药杂志, 2010, 35(5): 574-578.
GENG M L, SONG P P, XU Z L, et al. Comparison on HPLC analysis of aerial part of *Bupleurums* from different germplasm resources [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2010, 35(5): 574-578.
- [6] 贾晓斌, 刘光敏, 封亮, 等. HPLC 测定夏枯草中的芦丁和槲皮素 [J]. 华西药理学杂志, 2010, 25(1): 70-71.
JIA X B, LIU G M, FENG L, et al. Determination of rutin and quercetin in *Prunella vulgaris* L. by HPLC [J]. West China Journal of Pharmacy, 2010, 25(1): 70-71.
- [7] 赵玉敏. 人参的虫害及防治 [J]. 人参研究, 1998, 10(3): 47-48.
ZHAO Y M. Insect pests of ginseng and their control [J]. Ginseng Research, 1998, 10(3): 47-48.
- [8] 谭世强, 马琳, 许永华, 等. 人参总皂苷对 4 龄粘虫的取食及生长发育的影响 [J]. 中国中药杂志, 2015, 40(14): 2787-2791.
TAN S Q, MA L, XU Y H, et al. Effects of total ginseng saponins on feeding and growth and development of 4th instar stickleback [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2015, 40(14): 2787-2791.
- [9] 谭世强, 张爱华, 谢敬宇, 等. 人参总皂苷对苜蓿夜蛾幼虫的拒食作用 [J]. 中国中药杂志, 2013, 38(1): 37-39.
TAN S Q, ZHANG A H, XIE J Y, et al. Anti-feeding effect of total ginsenoside from *Panax ginseng* on *Heliothis dipsacea* larvae [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2013, 38(1): 37-39.
- [10] 徐建中, 王志安, 俞旭平, 等. 益母草 GAP 栽培技术研究 [J]. 现代中药研究与实践, 2006, 20(4): 8-11.
XU J Z, WANG Z A, YU X P, et al. Research on GAP cultivation technology of motherwort [J]. Modern Chinese Medicine Research and Practice, 2006, 20(4): 8-11.
- [11] 史金玉, 董凯. 柴胡栽培与病虫害防治技术研究 [J]. 种子科技, 2022, 40(10): 19-21.
SHI J Y, DONG K. Study on cultivation and pest control techniques of *Bupleurum chinense* DC [J]. Seed Science and Technology, 2022, 40(10): 19-21.
- [12] 刘宵宵, 简美玲, 毛润乾. 夏枯草药材栽培技术研究进展 [J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(3): 134-138.
LIU X X, JIAN M L, MAO R Q. Research advance of culture technics of *Prunella vulgaris* L. [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2012, 43(3): 134-138.
- [13] HARBORNE J B. The flavonoids: advances in research since 1986 [M]. Boston, MA: Springer US, 1994.
- [14] SIMMONDS M S. Importance of flavonoids in insect-plant interactions: feeding and oviposition [J]. Phytochemistry, 2001, 56(3): 245-252.
- [15] SIMMONDS M S. Flavonoid-insect interactions: recent advances in our knowledge [J]. Phytochemistry, 2003, 64(1): 21-30.
- [16] SCHNARR L, SEGATTO M L, Olsson O, et al. Flavonoids as biopesticides: systematic assessment of sources, structures, activities and environmental fate [J]. Science of the Total Environment, 2022, 824: 153781.
- [17] DAI Z Y, TAN J, ZHOU C, et al. The OsmiR396-OsGRF8-Os-F3H-flavonoid pathway mediates resistance to the brown planthopper in rice (*Oryza sativa*) [J]. Plant Biotechnology Journal, 2019, 17(8): 1657-1669.
- [18] ABOSHI T, ISHIGURI S, SHIONO Y, et al. Flavonoid glycosides in *Malabar spinach* *Basella alba* inhibit the growth of *Spodoptera litura* larvae [J]. Bioscience, Biotechnology and Biochemistry, 2018, 82(1): 9-14.
- [19] CUI B Y, HUANG X B, LI S, et al. Quercetin affects the growth and development of the grasshopper *Oedaleus asiaticus* (Orthoptera: Acrididae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2019, 112(3): 1175-1182.
- [20] TANG J, SHEN H W, ZHANG R, et al. Seed priming with rutin enhances tomato resistance against the whitefly *Bemisia tabaci* [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2023, 194: 105470.
- [21] BENTIVENHA J P F, CANASSA V F, BALDIN E L L, et al. Role of the rutin and genistein flavonoids in soybean resistance to *Piezodorus guildinii* (Hemiptera: Pentatomidae) [J]. Arthropod-Plant Interactions, 2018, 12(2): 311-320.

- [22] 宋程飞,冯雪梦,王志宇,等. 四种非寄主植物精油对小菜蛾的生物活性 [J]. 植物保护学报, 2022, 49(2): 671-682.
SONG C F, FENG X M, WANG Z Y, et al. Bioactivities of the essential oils derived from four species of non-host plants against diamondback moth *Plutella xylostella* [J]. Journal of Plant Protection, 2022, 49(2): 671-682.
- [23] 杨安岷. 灵菌红素粗提物对甜菜夜蛾生长发育及代谢酶活性的影响 [D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
YANG A D. Effects of crude extracts from prodigiosin on the growth and metabolic enzyme activity of *Spodoptera exigua* [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [24] 周琼, 苏旭, 熊正燕, 等. 苍耳甾醇类物质对小菜蛾的产卵及趋向行为选择的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2011, 33(1): 52-57.
ZHOU Q, SU X, XIONG Z Y, et al. Effects of asteroids on egg-laying and tendency behavioral selection in the cabbage moth, *Ranunculus aegypti* [J]. Journal of Environmental Entomology, 2011, 33(1): 52-57.
- [25] 董向丽, 高希武, 郑炳宗. 植物次生物质诱导作用对杀虫药剂毒力影响研究 [J]. 昆虫学报, 1998, 41(S1): 113-118.
DONG X L, GAO X W, ZHENG B Z. Study on the effect of plant secondary substances on the toxicity of insecticides [J]. Journal of Entomology, 1998, 41(S1): 113-118.
- [26] 赖城玲, 张珺, 申屠旭萍, 等. 植物次生代谢物对植食性昆虫防御作用的研究进展 [J]. 应用昆虫学报, 2022, 59(5): 969-978.
LAI C L, ZHANG J, SHENTU X P, et al. Progress in the study of plant secondary metabolites on the defense of phytophagous insects [J]. Journal of Applied Entomology, 2022, 59(5): 969-978.
- [27] ISMAN M B, DUEY S S. Toxicity of tomato phenolic compounds to the fruitworm, *Heliothis zea* [J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 1982, 31(4): 370-376.
- [28] BENINGER C W, ABOU-ZAID M M. Flavonol glycosides from four pine species that inhibit early instar gypsy moth (*Lepidoptera lymantriidae*) development [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 1997, 25(6): 505-512.
- [29] VALKAMA E, KORICHEVA J, SALMINEN J P, et al. Leaf surface traits: overlooked determinants of birch resistance to herbivores and foliar micro-fungi [J]. Trees, 2005, 19(2): 191-197.
- [30] LAHTINEN M, SALMINEN J P, KAPARI L, et al. Defensive effect surface flavonoid aglycones of *Betula pubescens* leaves against first instar *Epirrita autumnata* larvae [J]. Journal of Chemical Ecology, 2004, 30(11): 2257-2268.
- [31] MALLIKARJUNA N, KRANTHI K R, JADHAV D R, et al. Influence of foliar chemical compounds on the development of *Spodoptera litura* in interspecific derivatives of groundnut [J]. Journal of Applied Entomology, 2004, 128(5): 321-328.
- [32] GOLAWSKA S, LUKASIK I. Antifeedant activity of luteolin and genistein against the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum* [J]. Journal of Pest Science, 2012, 85(4): 443-450.
- [33] GOLAWSKA S, LUKASIK I, GOLAWSKI A, et al. Alfalfa (*Medicago sativa* L.) apigenin glycosides and their effect on the pea aphid (*Acyrtosiphon pisum*) [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2010, 19: 913-920.
- [34] TABASHNIK B E. Deterrence of diamondback moth (*Lepidoptera: Plutellidae*) oviposition by plant compounds [J]. Environmental Entomology, 1985, 14(5): 575-578.

(责任编辑: 陈丽)