

室内饲养的小菜蛾种群近交衰退分析*

蒲宇辰** 黄 斌 侯有明***

(福建农林大学植物保护学院, 福建省昆虫生态重点实验室, 农业部闽台作物有害生物综合治理重点实验室, 福州 350002)

摘 要 【目的】 分析近交繁殖对小菜蛾 *Plutella xylostella* 种群的影响, 为室内繁殖小菜蛾种群提供依据。【方法】 在室内条件下, 连续饲养 6 代小菜蛾种群, 比较近交种群和杂交种群在交配行为、繁殖能力、蛹重、成虫寿命及形态等方面的差异。【结果】 近交繁殖各代蛹重达极显著差异, 尤其第 3 代后, 蛹重显著下降; 近交各代的雌雄成虫在交配次数和交配持续时间上显著减小, 尤其是第 4 代后, 下降幅度极其明显, F_6 代雌 (雄) 成虫的交配次数和交配持续时间分别是 F_0 代的 12.9% (13.8%) 和 8.3% (8.9%), 表明自 F_4 代后, 近交小菜蛾种群已呈现出明显的衰退现象。同样, F_4 代后近交种群的产卵前期、产卵期、产卵量、卵孵化率、成虫寿命等均极显著下降, 但世代历期显著延长。同时, 近交对雌雄成虫体长有显著影响, F_6 代雌雄成虫体长是 F_0 代的 60% 左右。【结论】 自近交繁殖 3 代始, 会导致小菜蛾种群交配行为、繁殖及形态的变化, 尤其是近交繁殖 4 代以后变化更为明显, 使种群出现明显的衰退现象。因此, 在小菜蛾室内繁殖时, 隔一段时间 (至多 3 代) 采集远源虫源, 避免种群衰退。

关键词 小菜蛾, 近交系, 交配行为, 繁殖, 衰退

Inbreeding depression in captive-raised diamondback moths

PU Yu-Chen** HUANG Bin HOU You-Ming***

(Key Laboratory of Insect Ecology in Fujian, Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Fujian-Taiwan, Ministry of Agriculture, College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract [Objectives] To investigate the effects of inbreeding on the diamondback moth (DBM) in order to improve the captive rearing of DBM. [Methods] DBM were continuously reared for 6 generations under laboratory conditions, and differences in mating behavior, reproductive capacity, pupal weight, adult longevity and morphology etc. between inbred and outbred populations compared. [Results] The pupal weight of inbred populations decreased significantly, especially after the third generation. Mating frequency and mating duration of inbred generations of male and female adults also markedly decreased, especially after the fourth generation. These decreases were very obvious; the mating frequency and mating duration of females of the F_6 generation were, respectively, 12.9% and 8.3% those of the F_0 generation, whereas the corresponding data for males were 13.8% and 8.9% those of the F_0 generation. This indicates that the fitness of the inbred population had undergone a significant decline since the F_4 generation. Similarly, the preoviposition period, oviposition period, fecundity, hatching rate and adult longevity etc. all significantly decreased in the post- F_4 inbred population, but the developmental period significantly increased. Inbreeding also had significant effects on the size of male and female adults, the body length of male and female adults in the F_6 generation being only about 60% of that of the F_0 generation. [Conclusion] Changes in reproductive behavior and morphology were apparent in DBM after just 3 generations of inbreeding. These changes became more obvious after 4 generations, after which they became sufficient to cause populations to decline. Wild-caught moths should be incorporated into captive DBM breeding populations at least every 3 generations to avoid the deleterious effects of inbreeding.

Key words diamondback moth, inbred lines, mating behavior, production, depression

* 资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金重点项目 (31230061); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201103021); “十二五”农村领域国家科技计划课题 (2012BAD19B06); 福建省自然科学基金 (2013J01086)

**第一作者 First author, E-mail: fafupuyuchen@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: ymhou@fafu.edu.cn

收稿日期 Received: 2015-05-11, 接受日期 Accepted: 2015-06-03

小菜蛾 *Plutella xylostella* L. 俗称小青虫、两头尖, 由于幼虫受惊后具有吐丝下垂的习性, 又称“吊丝虫”, 属鳞翅目 Lepidoptera 菜蛾科 Plutellidae, 最早发源于地中海地区 (Harcourt, 1954), 取食为害甘蓝、白菜、萝卜、油菜、芥菜、花椰菜等十字花科植物, 属寡食性昆虫 (胡奇和刘玉冬, 2003; 尤民生和魏辉, 2007; You *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2014)。小菜蛾是一种世界性大害虫, 也是十字花科植物的头号害虫, 世界各地主要十字花科植物种植区均有小菜蛾发生为害的报道 (Talekar and Shelton, 1993; 尤民生等, 2004; 罗德等, 2011)。小菜蛾初龄幼虫仅取食叶肉, 留下表皮, 在菜叶上形成一个个透明的窗斑; 3~4 龄幼虫可将菜叶食成孔洞和缺刻, 严重时全叶被吃成网状, 造成重大的经济损失 (张二娜等, 2011)。据 Michael 等 (2013) 估计, 全球每年因小菜蛾的危害造成的经济损失达 40~50 亿美元。

在农业生产上, 由于化学农药的不合理使用, 导致小菜蛾对多种农药产生了抗性 (陈之浩和程罗根, 2000; 吴青君等, 2001; 刘霞等, 2013)。同时, 由于小菜蛾具有世代周期短、迁移能力强、繁殖系数大、抗逆能力强以及抗性发展快等特点, 因此作为非模式昆虫, 被广泛应用于昆虫生理学 (Reddy *et al.*, 2004)、昆虫毒理学 (高希武等, 2010)、昆虫性信息素 (王凯学等, 2009)、昆虫抗性 (冯夏等, 2011)、害虫防治 (Shelton and Nault, 2004) 等诸多领域的研究。为了提供大量、合适的虫源, 小菜蛾种群的室内大量饲养和繁殖成为科研工作者十分关注的问题。因此, 多年来发展了离体菜叶法、蛭石萝卜苗法、甘蓝苗活株法、莲花白繁殖法、人工饲料法、半合成人工饲料法等多种多样的小菜蛾室内饲养方法 (莫美华和庞雄飞, 1999; 陈宗麒等, 2001; 袁静和翁永军, 2001; 弓爱君等, 2005; 魏娟等, 2009; 董世峰等, 2010)。但是, 即便如此, 利用这些方法在室内连续人工饲养繁殖多代后, 发现小菜蛾存在种群退化问题, 主要表现为虫体变小、寿命缩短、后代个体数量减少、种群数量上升速度变慢和抗逆性降低等 (曹晓

明, 2010; Meunier and Kölliker, 2013)。小菜蛾在室内繁殖时, 个体间近亲交配的机会增大。因此, 本文就小菜蛾的近交衰退现象进行了研究, 通过分别测定近交和杂交各代的生物学指标差异, 分析小菜蛾近交对其种群发展的影响, 以期小菜蛾的室内饲养和科学研究中利用相关方法进行小菜蛾的防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源及寄主

供试小菜蛾采自福建省福州市闽侯县大学城近郊菜地, 采集的虫态和龄期为 2 龄幼虫。将采集到的野外种群于实验室条件下饲养。小菜蛾的饲养条件为温度 (28 ± 0.5) °C, RH75%, 光周期 14L:10D。所有试验均在可精确控温控湿的人工气候箱中进行。

从福州市花鸟市场购买芥菜 *Brassica juncea* (L.) 种子, 于网室无虫条件下栽培, 45 d 后, 选取健康、长势良好、叶片大小相近且无病虫害的芥菜叶片用于饲养小菜蛾, 每隔 1~3 d 更换一次新鲜的芥菜叶片, 更换时间视虫龄而定, 采用离体菜叶法饲养于塑料培养皿中。

1.2 小菜蛾 F_0 代雌雄成虫的饲养

将野外采集到的小菜蛾 2 龄幼虫, 在人工气候室中采用活体芥菜苗饲养, 每隔 2 d 更换一次菜苗, 待其化蛹后, 收集所有的蛹于产卵瓶 (用精细针头打孔的透明矿泉水瓶, 直径 9 cm, 高 20 cm)。小菜蛾开始羽化后, 喂以 10% 的蜂蜜水溶液, 置于 28°C 的条件下产卵。卵孵化后, 按类似的方法饲喂小菜蛾幼虫, 直至蛹期, 收集这些蛹。用电子天平称其蛹重, 保证挑选出来的蛹重量相近。而后将蛹单粒置于指形管 (直径 1.5 cm, 高 6 cm) 内, 管口塞上棉花, 共收集 100 管, 即 100 粒蛹。待纸形管中的蛹羽化后, 随机选择刚羽化且健康状况良好的雌雄成虫一一配对, 一个指形管放置 1 对, 并贴上标签, 做好编号, 共配对 10 对, 子代记为 F_0 代。

小菜蛾产卵后将卵按照一一配对的小菜蛾编号收集于含有新鲜芥菜叶片的塑料培养皿 (培

养皿盖用精细针头均匀打 20 个孔),培养皿底部铺一张滤纸,并用 5 滴蒸馏水润湿滤纸,起保湿作用。每个培养皿中平铺 4 片大小相近的芥菜叶片,同时将培养皿拉上封口膜,防止幼虫从缝隙处逃离培养皿。

F_0 代小菜蛾幼虫化蛹后将蛹单个放置于指形管中。蛹羽化后测量成虫体长并随机选择同期羽化、个体大小相当且健康状况良好的雌雄个体用于后续的交配实验。

1.3 近交和杂交小菜蛾各代的交配、繁殖情况

共分三组处理:一是近交繁殖,即 F_0 代小菜蛾羽化成虫后,随机选择来自同一亲本的雌雄成虫配对,每个亲本配 3 对,共 30 对,其子代记为近交系 F_1 代;二是雌性杂交处理,即每个亲本的 F_0 代小菜蛾,随机选择 1 头雌虫与野外采集的同期羽化的雄虫配对,每个亲本配 3 对,共 30 对,其子代记为雌性杂交系 F_1 代,用于雌性个体与不同亲缘关系雄性个体的交配实验;三是雄性杂交处理,即每个亲本的 F_0 代小菜蛾,随机选择 1 头雄虫与野外采集的同期羽化的雌虫配对,每个亲本配 3 对,共 30 对,其子代记为雄性杂交系 F_1 代,用于雄性个体与不同亲缘关系雌性个体的交配实验。

配对后的各对小菜蛾做好编号、贴上标签,置于视频监控下 48 h,每对小菜蛾 24 h 换一次指形管,视频监控所处的环境温度、相对湿度和光暗周期均为预先设定的小菜蛾饲养条件(同上)。观察记录 48 h 内每对小菜蛾每次交配的起始和终止时间,同时记录每对小菜蛾的产卵量。将卵按照一一配对的小菜蛾编号收集于含有新鲜芥菜叶片的塑料培养皿后,记录卵的孵化率,孵化的幼虫即为 F_1 代。

F_1 代个体进行如上 F_0 代相同处理,以此类推进行后续试验,实验进行到 F_6 代。近交系 F_1 代和杂交系 F_1 代以及其后续子代卵的处理与幼虫饲养方法和 F_0 代的处理相同。配对个体始终放在一起饲养。

1.4 数据分析

对不同处理间各代生物学指标的差异显著

性检验采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Duncan's 多重比较($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 小菜蛾近交对蛹重的影响

结果表明(图 1),近交繁殖的小菜蛾,各代蛹重达极显著差异($F_{6,203}=91.28$, $P<0.000$),尤其从第 3 代开始,后续各代蛹重显著下降,第 3、4、5、6 代蛹重分别是 F_0 代蛹重的 95.1%、86.7%、66.7%和 45.2%。而小菜蛾雌性与远源雄性杂交,对各代蛹重的影响虽达显著水平($F_{6,203}=2.594$, $P=0.019$),但仅与 F_1 、 F_5 代的蛹重差异显著,其余各代之间的蛹重无显著差异,在 4.5~4.9 mg。

2.2 小菜蛾近交对成虫交配行为的影响

对于雌性成虫,杂交各代之间无论是交配次数(图 2:A, $F_{6,203}=1.07$, $P=0.38$),还是交配持续时间(图 2:B, $F_{6,203}=1.20$, $P=0.31$),都不存在显著差异,平均交配次数为 2.80~3.47 次,平均交配时间为 178.2~217.8 min;但在近交各代中,在交配次数上,前 3 代无显著差异,但 F_4 ~ F_6 代,差异显著(图 2:A, $F_{6,203}=24.83$, $P<0.000$),分别是 F_0 代交配次数的 66.9%、29.5%、12.9%,同样,当小菜蛾继代近交至 F_4 代后,交配持续时间也显著减少(图 2:B, $F_{6,203}=32.90$, $P<0.000$),分别是 F_0 代交配持续时间的 54.7%、20.0%、8.3%,表明自 F_4 代后,近交小菜蛾种群已呈现出明显的衰退现象。

对于雄性成虫,杂交各代的交配次数(图 2:C, $F_{6,203}=0.81$, $P=0.57$)、交配持续时间(图 2:D, $F_{6,203}=1.15$, $P=0.34$),都不存在显著差异,平均交配次数为 2.97~3.63 次,平均交配时间为 183.4~228.3 min;但在近交各代中,在交配次数上,前 3 代无显著差异,但 F_4 ~ F_6 代,差异显著(图 2:C, $F_{6,203}=25.45$, $P<0.000$),分别是 F_0 代交配次数的 65.3%、27.5%、13.8%,同样,当小菜蛾继代近交至 F_4 代后,交配持续时间也显著减少(图 2:D, $F_{6,203}=32.40$, $P<0.000$),分别是 F_0 代交配持续时间的 53.5%、20.2%、8.9%,

同样表明自 F_4 代后, 近交小菜蛾种群已呈现出明显的衰退现象。

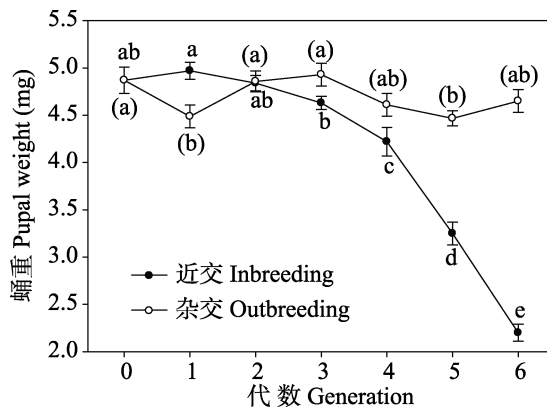


图 1 小菜蛾近交繁殖对各代蛹重的影响

Fig. 1 Inbreeding effects on pupa weight in different generation of diamondback moth

图中数据为平均值 $\pm$ 标准误, 括号内、外不同字母表示杂交、近交繁殖各代蛹重的差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Data are mean $\pm$ SE, different letters in parentheses or out parentheses indicate significantly different to each generation pupal weight in inbreeding or outbreeding, respectively ($P<0.05$). The same below.

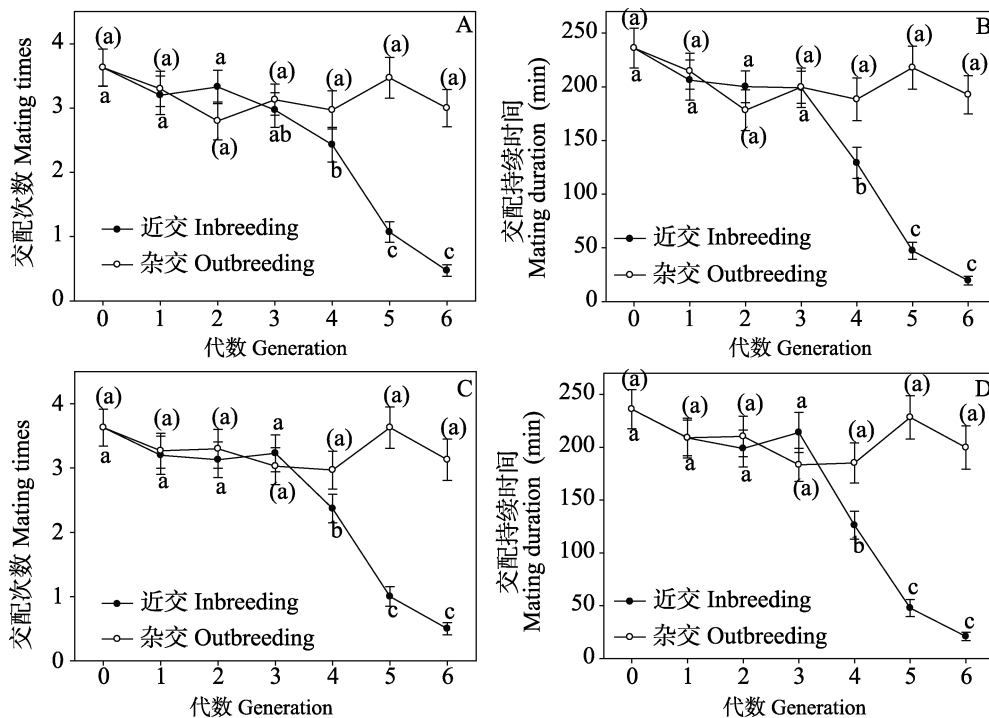


图 2 小菜蛾近交繁殖对各代成虫交配行为的影响

Fig. 2 Inbreeding effects on mating behavior in different generation of diamondback moth

A, B. 雌性成虫; C, D. 雄性成虫。

A, B. Female; C, D. Male.

2.3 小菜蛾近交对雌性成虫繁殖的影响

由图 3 可知, 杂交各代的产卵前期 ($F_{6,203}=3.23$, $P=0.005$) 虽有显著差异, 但波动不大, 为 1.48~1.78 d, 产卵期差异不显著 ($F_{6,203}=1.58$, $P=0.16$), 为 3.1~3.6 d。而近交各代的产卵前期 ($F_{6,203}=34.34$, $P<0.000$) 和产卵历期 ($F_{6,203}=46.75$, $P<0.000$) 均达极显著差异, 尤其是 F_4 代后, 产卵前期和产卵期大幅度下降。

同样, 杂交各代的产卵量 ($F_{6,203}=10.80$, $P<0.000$) 和卵孵化率 ($F_{6,203}=9.91$, $P<0.000$) 虽有显著差异, 但波动不大, 分别为 82.2~90.4 头和 87.9%~92.5%。而近交各代的产卵量 ($F_{6,203}=108.17$, $P<0.000$) 和卵孵化率 ($F_{6,203}=269.89$, $P<0.000$) 均达极显著差异, F_4 ~ F_6 代的产卵量分别是 F_0 代的 85.3%、53.2%、37.7%; F_4 ~ F_6 代的卵孵化率分别是 F_0 代的 90.9%、64.7%、31.5%。

2.4 小菜蛾近交对成虫寿命及形态的影响

由图 4 可知, 杂交各代对雌性 ($F_{6,203}=1.00$, $P=0.43$) 和雄性 ($F_{6,203}=1.55$, $P=0.162$) 成虫寿

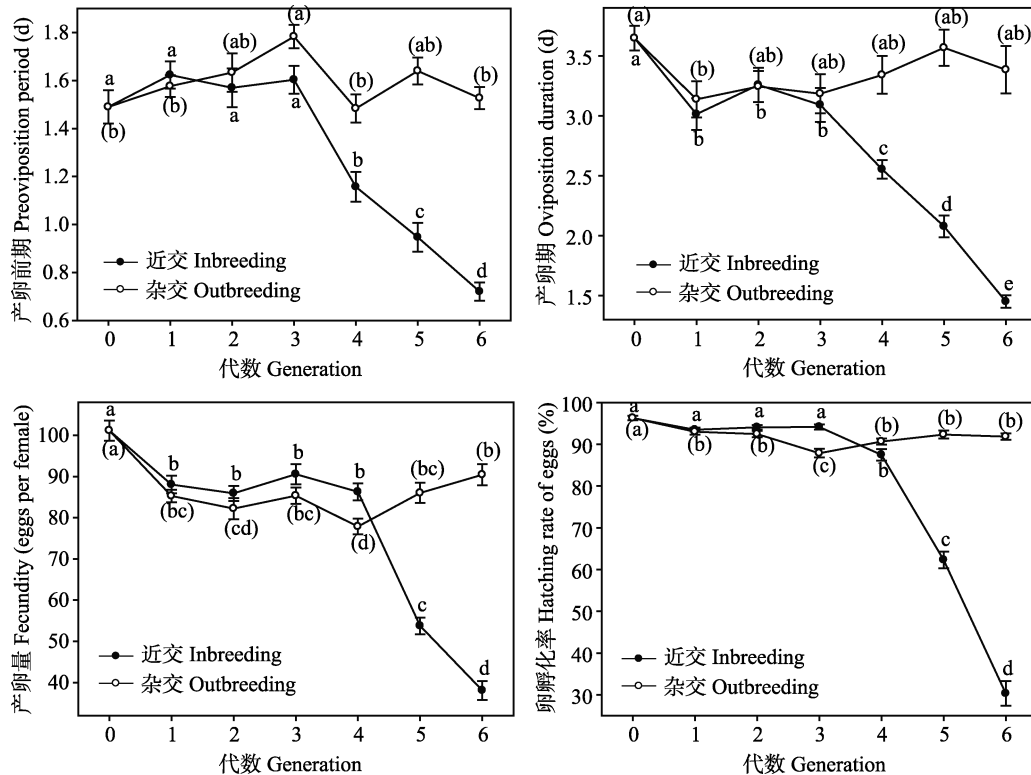


图3 小菜蛾近交对各代雌成虫繁殖的影响

Fig. 3 Inbreeding effects on reproduction in different generation of diamondback moth female

命均无显著影响,但近交各代雌性($F_{6,203}=61.59$, $P<0.000$)和雄性($F_{6,203}=28.82$, $P<0.000$)成虫寿命均存在极显著差异,尤其是 F_4 代后,雌、雄虫寿命大幅度减小。

对于成虫世代历期,虽然杂交各代之间差异显著(雌: $F_{6,203}=17.79$, $P<0.000$;雄: $F_{6,203}=11.12$, $P<0.000$),但波动幅度较小,雌、雄性分别为18.2~19.7 d和18.0~19.4 d。但近交各代雌性($F_{6,203}=246.97$, $P<0.000$)和雄性($F_{6,203}=201.31$, $P<0.000$)世代历期均存在极显著差异,尤其是 F_5 代后,雌、雄性的世代历期大幅度延长。

杂交对小菜蛾雌雄成虫的体长无影响(雌: $F_{6,203}=0.97$, $P=0.45$;雄: $F_{6,203}=2.02$, $P=0.07$),但近交对雌性($F_{6,203}=361.96$, $P<0.000$)和雄性($F_{6,203}=235.51$, $P<0.000$)成虫的体长有极显著的影响,尤其是 F_4 代后,成虫体长显著减小, F_4 ~ F_6 代,雌性成虫体长分别是 F_0 的91.1%、74.8%、60.0%,雄性成虫体长分别是 F_0 的93.5%、77.7%、59.9%。

3 讨论

本研究表明,雌性个体与不同亲缘关系雄性个体的杂交不会引起小菜蛾种群生物学指标发生显著的变化,然而近交会导小菜蛾种群交配行为、繁殖及形态的显著变化。当小菜蛾连续近交至3代时,各项生物学指标开始变化,4代以后显著变化,使种群出现明显的衰退现象。这些衰退主要体现在交配次数减少、交配持续时间缩短、产卵前期缩短、产卵期缩短、产卵量下降、卵孵化率下降、蛹重减少、虫体变小、成虫寿命缩短、发育速率减缓等方面。同时,在多次观察中还发现近交小菜蛾种群中,死亡个体数比杂交多,即死亡率高,也从一个侧面说明了近交小菜蛾抗逆能力低。

同时,雄性个体与来自同一亲本的雌性个体交配繁殖至一定代数时交配次数减少、交配时间缩短,说明在雄性个体亲缘关系不同情况下雄性个体能区分出近亲个体,并通过避免与近亲个体

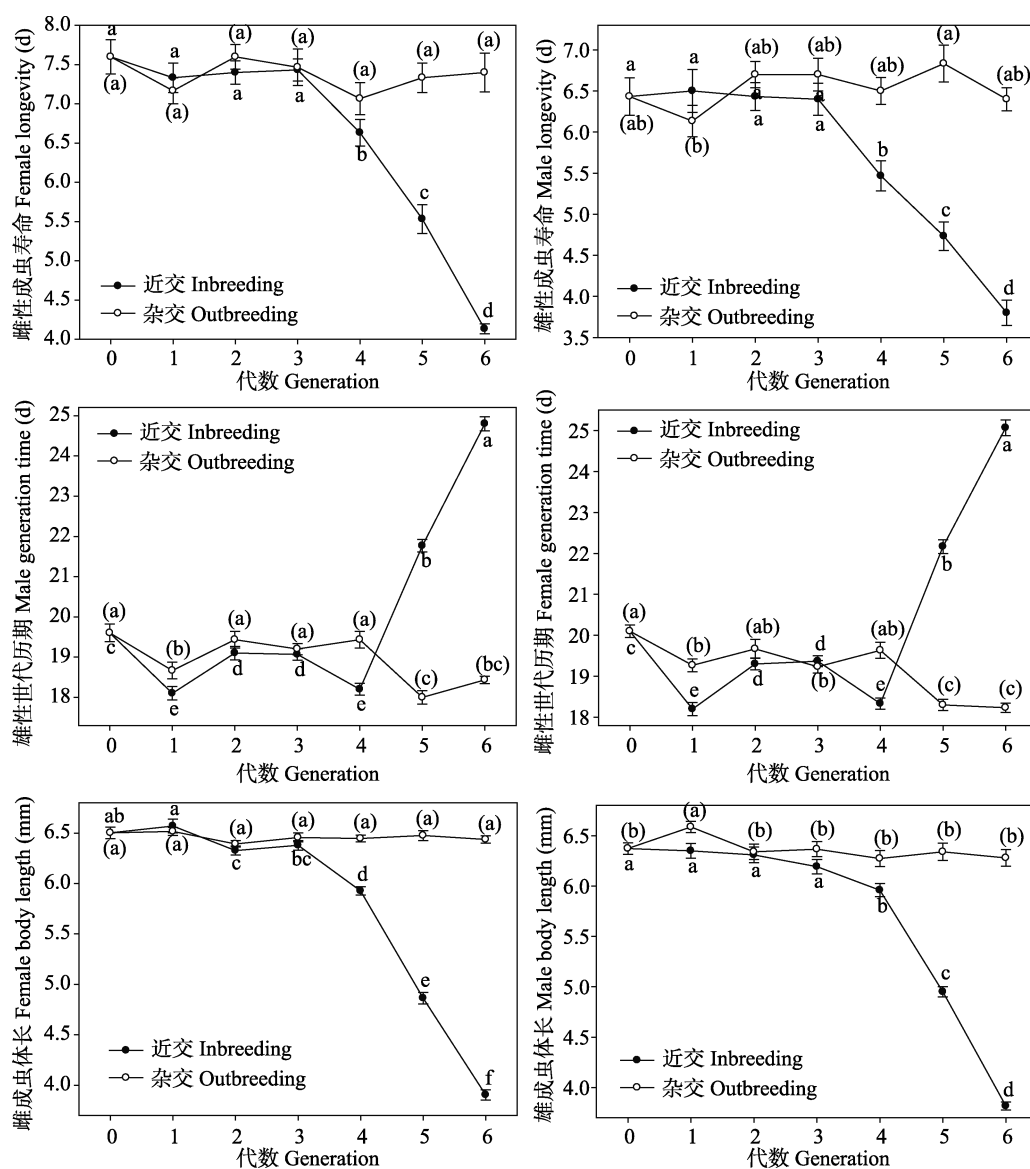


图4 小菜蛾近交对成虫寿命和体长的影响

Fig. 4 Inbreeding effects on adult longevity and body length in different generation of diamondback moth

的交配或减少与近亲个体的交配次数或持续时间来作为一种近亲交配的避免机制。但松毛虫赤眼蜂在寄主卵中进行近亲繁殖,这是种的特性(唐泉富等,1988),这种近亲繁殖对后代的生活力并无影响(唐泉富等,1991),其机理有待进一步研究。

小菜蛾自交衰退的研究具有广泛的应用价值,为科技工作者提高小菜蛾人工繁殖的效率提供参考。小菜蛾室内人工大量饲养繁殖是小菜蛾研究者必须经历的一项工作。小菜蛾研究中需要大量的种群,在繁殖室内种群时,隔一段时间(至

多3代)采集远源的种群释放到室内,让两个亲缘关系不同的种群进行杂交,有利于复壮室内种群,避免衰退,维持室内种群的稳定,提高人工繁殖效率。

参考文献 (References)

- Cao XM, 2010. The observations of the breeding *Plutella xylostella* L. biological characteristics. *Benjing Agriculture*, (33): 50–52. [曹晓明, 2010. 室内饲养的小菜蛾生物学特性的观察. 北京农业, (33): 50–52.]
- Chen ZH, Cheng LG, 2000. Present situation and prospect of study on the resistance of diamondback moth. *Entomological Knowledge*, 37(2): 103–107. [陈之浩, 程罗根, 2000. 小菜

- 蛾抗药性研究的现状及展望. 昆虫知识, 37(2): 103–107.]
- Chen ZQ, Miao S, Luo KJ, 2001. Mass rearing techniques of diamondback moth. *Entomological Knowledge*, 38(1): 68–70. [陈宗麒, 缪森, 罗开君, 2001. 小菜蛾群体繁殖技术. 昆虫知识, 38(1): 68–70.]
- Dong SF, Niu ZF, Xiao P, Liu WH, Cao CD, 2010. Comparison of artificial rearing methods for *Plutella xylostella* L. *Shandong Agricultural Sciences*, (12): 50–52. [董世峰, 牛柱峰, 肖鹏, 刘卫华, 曹长代, 2010. 小菜蛾人工饲养方法比较. 山东农业科学, (12): 50–52.]
- Feng X, Li ZY, Wu QJ, Chen AD, Wu YD, Hou YM, He YR, Li JH, Xie SH, Zhang JM, Fu W, Ma CS, 2011. Research progress of the resistance management and sustainable control of diamondback moth (*Plutella xylostella*) in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(2): 247–253. [冯夏, 李振宇, 吴青君, 谌爱东, 吴益东, 侯有明, 何余容, 李建洪, 谢圣华, 章金明, 符伟, 马春森, 2011. 小菜蛾抗性治理及可持续防控技术研究与示范—公益性行业(农业)科研专项“小菜蛾可持续防控技术研究与示范”进展. 应用昆虫学报, 48(2): 247–253.]
- Gao XW, Han ZJ, Qiu XH, Liu ZW, 2010. Progress and perspective in insect toxicology. *Entomological Knowledge*, 47(3): 431–434. [高希武, 韩召军, 邱星辉, 刘泽文, 2010. 昆虫毒理学发展与展望. 昆虫知识, 47(3): 431–434.]
- Gong AJ, Qiu LN, Gao HY, Qu DM, Kong LF, 2005. A new method rearing diamondback moth without larva shift. *Laboratory Animal and Comparative Medicine*, 25(2): 90–92. [弓爱君, 邱丽娜, 高鹤永, 曲冬梅, 孔令芳, 2005. 无幼虫转移的小菜蛾繁殖新方法. 实验动物与比较医学, 25(2): 90–92.]
- Harcourt DG, 1954. The Biology and Ecology of the Diamondback Moth *Plutella maculipennis* Curtis in Eastern Ontario. Cornell University, Ithaca, New York, USA. 106.
- Hu Q, Liu YD, 2003. Progress and summarization of study on diamondback moth (*Plutella xylostella* L.). *Journal of Tianjin Agricultural College*, 10(1): 33–36, 41. [胡奇, 刘玉冬, 2003. 小菜蛾研究的概况与进展. 天津农学院学报, 10(1): 33–36, 41.]
- Huang B, Shi ZH, Hou YM, 2014. Host selection behavior and the fecundity of the diamondback moth, *Plutella xylostella* on multiple host plants. *Journal of Insect Science*, Doi: ieu113.
- Liu X, Niu F, Wang KY, 2013. Studies on resistance to insecticides and control measures in diamondback moth (*Plutella xylostella* L.). *Pesticide Science and Administration*, 34(2): 51–55. [刘霞, 牛芳, 王开运, 2013. 小菜蛾抗药性研究现状及防治措施. 农药科学与管理, 34(2): 51–55.]
- Luo D, Huang B, Hou YM, 2011. Analysis of diamondback moth populations under host plants stress by RAPD. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(2): 273–279. [罗德, 黄斌, 侯有明, 2011. 寄主胁迫下小菜蛾种群的 RAPD 分析. 应用昆虫学报, 48(2): 273–279.]
- Meunier J, Kölliker M, 2013. Inbreeding depression in an insect with maternal care: influences of family interactions, life stage and offspring sex. *Journal of Evolutionary Biology*, 26(10): 2209–2220.
- Michael JF, Denis JW, Lloyd MD, 2013. Diamondback moth ecology and management: problems, progress and prospects. *Annual Review of Entomology*, 58: 517–541.
- Mo MH, Pang XF, 1999. Rearing *Plutella xylostella* on semi-synthetic diets. *Journal of South China Agricultural University*, 20(2): 13–17. [莫美华, 庞雄飞, 1999. 利用半合成人工饲料饲养小菜蛾的研究. 华南农业大学学报, 20(2): 13–17.]
- Reddy GVP, Tabone E, Smith MT, 2004. Mediation of host selection and oviposition behavior in the diamondback moth *Plutella xylostella* and its predator *Chrysoperla carnea* by chemical cues from cole crops. *Biological Control*, 29(2): 270–277.
- Shelton AM, Nault BA, 2004. Dead-end trap cropping: a technique to improve management of the diamondback moth *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Crop Protection*, 23(6): 497–503.
- Talekar NS, Shelton AM, 1993. Biology, ecology, and management of the diamondback moth. *Annual Review of Entomology*, 38: 275–301.
- Tang QF, Du ZQ, Xu QY, Shen Q, 1988. A preliminary study on the insect breeding of *Trichogramma dendrolimi* Matsumura. *Journal of Zhejiang Forestry Science & Technology*, 8(4): 22–23. [唐泉富, 杜增庆, 徐企尧, 沈强, 1988. 松毛虫赤眼蜂近亲交配的初步研究. 浙江林业科技, 8(4): 22–23.]
- Tang QF, Du ZQ, Xu QY, Shen Q, 1991. Study on the insect breeding and its effect on progeny vitality of *Trichogramma dendrolimi*. *Forest Research*, 4(4): 463–466. [唐泉富, 杜增庆, 徐企尧, 沈强, 1991. 松毛虫赤眼蜂近亲交配及其对子代生活力的影响. 林业科学研究, 4(4): 463–466.]
- Wang KX, Huang QW, Chen BY, He Y, Li GK, 2009. Study on trapping male moth by *Plutella xylostella* sex pheromone. *China Plant Protection*, 29(12): 22–23. [王凯学, 黄庆文, 陈斌艳, 何燕, 黎关坤, 2009. 小菜蛾性信息素诱杀雄蛾技术研究. 中国植保导刊, 29(12): 22–23.]
- Wei J, Xiao TG, Zhang YJ, 2009. Continuous rearing techniques in laboratory for diamondback moth and toxicity testing. *Crop Research*, 23(2): 129–132. [魏娟, 肖铁光, 张友军, 2009. 小菜蛾室内继代饲养技术及抗性选育. 作物研究, 23(2): 129–132.]
- Wu QJ, Zhang WJ, Zhu GR, 2001. Occurrence characteristics and resistance of diamondback moth. *China Vegetables*, (5): 49–51. [吴青君, 张文吉, 朱国仁, 2001. 小菜蛾的发生为害特点及抗性现状. 中国蔬菜, (5): 49–51.]
- You MS, Hou YM, Yang G, 2004. Population System Control of the Diamondback Moth. Fuzhou: Fujian Scientific and Technology Press. 84–102. [尤民生, 侯有明, 杨广, 2004. 小菜蛾种群系统控制. 福州: 福建科学技术出版社. 84–102.]
- You MS, Hou YM, Yang G, Geoff Gurr, 2012. Development and implementation of environmentally benign approaches for integrated pest management of cruciferous crops in China// Claudia W, Helinda M (eds.). *Vegetable Consumption and Health: New Research*. NY: Nova Science Publishers, Inc. 65–86.
- You MS, Wei H, 2007. Study on the Diamondback Moth. Beijing: China Agricultural Press. 12–14. [尤民生, 魏辉, 2007. 小菜蛾的研究. 北京: 中国农业出版社. 12–14.]
- Yuan J, Weng YJ, 2001. Artificial breeding and virulence determination of some pesticides on diamondback moth. *Liaoning Agricultural Sciences*, (2): 44–45. [袁静, 翁永军, 2001. 小菜蛾人工饲养和几种药剂的毒力测定. 辽宁农业科学, (2): 44–45.]
- Zhang EN, Huang B, Hou YM, 2011. The effect of competition by *Phyllotreta stridata* on the feeding and growth of *Plutella xylostella*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(2): 267–272. [张二娜, 黄斌, 侯有明, 2011. 虫害诱导的植株对小菜蛾取食和生长发育的影响. 应用昆虫学报, 48(2): 267–272.]