

小菜蛾响应⁶⁰Co- γ 辐照的实验室种群生命表



杨雨航 陈雅余 王梦然 李丹宁 王欣蕾 翁群芳*

(华南农业大学植物保护学院, 广州 510642)

摘要: 为明确⁶⁰Co- γ 亚不育剂量辐照对小菜蛾 *Plutella xylostella* 种群数量动态变化的影响, 构建小菜蛾种群动态变化模型, 在实验室条件下通过建立小菜蛾生命表获得种群特征参数、个体生理指标, 预测亚不育剂量辐照对小菜蛾种群的影响。结果显示, 亚不育剂量辐照组的羽化率显著高于完全不育剂量组, 与空白对照组无显著差异, 各处理羽化率无性别差异, 亚不育剂量辐照组F₁代孵化率显著低于空白对照组。亚不育剂量辐照组种群各阶段发育历期、存活率及繁殖力生命指标低于空白对照组。小菜蛾亚不育剂量辐照组世代平均历期(19.90 d)、世代净生殖率(2.35)、周限增长率(1.04 d⁻¹)、内禀增长率(0.04 d⁻¹)均低于空白对照组, 而种群加倍时间(16.16 d)高于空白对照组。空白对照组世代平均历期、每日单雌产卵量与产卵时间均长于亚不育剂量辐照组。辐照组与对照组种群生命表参数对比, 表明亚不育剂量降低了小菜蛾种群世代数和幼虫期的个体存活率, 使F₁代雌虫个体数减少。

关键词: 小菜蛾; 实验种群; 辐照; 生命表

Life tables of laboratory populations of diamondback moth *Plutella xylostella* in response to ⁶⁰Co- γ irradiation

Yang Yuhang Chen Yayu Wang Mengran Li Danning Wang Xinlei Weng Qunfang*

(College of Plant Protection, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong Province, China)

Abstract: In order to investigate the effect of ⁶⁰Co- γ sub-sterile irradiation on the population dynamics of diamondback moth *Plutella xylostella*, a model of the population dynamics of *P. xylostella* was constructed. The life table was formed and analyzed under laboratory conditions. The population characteristic parameters and individual physiological indicators were obtained by establishing the life table of moths treated with the sub-sterile dose, and the population trend was predicted. The fecundity of moths was significantly higher at the sub-sterile dose than at the sterile dose, but not different from the negative control. There was no sex difference between the doses, while the hatching rate of F₁ in the sub-sterile treatment group was significantly lower than in the control. The developmental duration, survival rate and fecundity of the treatment group were reduced. The mean generation time (19.90 d), the net reproduction rate (2.35), the finite rate of increase (1.04 d⁻¹) and the intrinsic rate of increase (0.04 d⁻¹) of the treatment group were lower than those of the control, but with higher population doubling time (16.16 d). The overall lifespan, daily egg production and egg-laying duration of the control were higher than those of the treatment group. Based on life table parameters in different treatments, the results indicated that the sub-sterile dose reduced the number of generations and the survival rate of larval stage, and the number of F₁ females was decreased.

Key words: *Plutella xylostella*; experimental population; irradiation; life table

小菜蛾 *Plutella xylostella* 属于鳞翅目菜蛾科, 主要为害十字花科蔬菜, 在全世界的种植区内均有发生 (Furlong et al., 2013)。我国广东省处于亚热带地区, 环境气候适宜小菜蛾生长发育, 导致其世代重叠尤为严重, 特别在秋季田间自然种群呈暴发式增长 (李振宇等, 2020)。目前针对小菜蛾的主要防治手段是化学防治, 各种农药频繁使用, 使其抗药性不断增加 (董万庆等, 2022)。在湖北省当阳、新洲地区, 小菜蛾对茼蒿威已达成中等抗性, 且抗性水平呈现不断上升趋势 (王茹梦, 2019); 在云南省西南地区小菜蛾已对氟啶脲产生中等抗性 (尹艳琼等, 2019)。目前, 小菜蛾已至少对 95 种杀虫活性成分产生了抗性 (<https://irac-online.org/>)。关于小菜蛾的抗药性机制也有较多研究报道 (孙诗晴, 2020), Guo et al. (2020) 研究表明, 在不影响小菜蛾正常生长发育的前提下, 保幼激素、蜕皮激素含量升高调控了丝裂原活化蛋白激酶信号途径, 从而对 Bt 产生抗性; Li et al. (2021) 研究发现, Cry1Ac 蛋白毒素可引起肠道菌群变化, 使小菜蛾对 Bt 的抗性升高。虽然采用化学防治方法控制种群数量起效快, 但随着时间增长, 昆虫本身的抗性机制会使得防治难度与成本加大。因此, 亟待探索一种更有效、合理的防治方法。

为应对不断进化的昆虫, 昆虫不育技术 (sterile insect techniques, SIT) 受到广泛关注, 其中辐照不育技术在种群治理方面具有很大潜力。经辐照剂量处理的雄虫与野生雌虫交配产生 F_1 代, 若 F_1 代不能产生后代, 则此时辐照剂量为该昆虫的亚不育剂量, 辐照当代不可育的剂量为完全不育剂量。相较于药剂处理, 亚不育剂量辐照处理能防控害虫的范围更广, 能使防治效率最大化, 且对天敌、有益生物及其环境无负面影响 (Dyck et al., 2005; 钟国华等, 2012)。国际原子能机构的 IDIDAS (International Database on Insect Disinfestation and Sterilization) 数据库 (<https://nucleus.iaea.org/sites/naipc/ididas/Pages/Browse-IDIDAS.aspx>) 可查到大多数害虫的亚不育剂量。关于昆虫的亚不育剂量辐照技术研究已有较多报道, 如 Chen et al. (2022) 将果蝇幼虫、蛹经 X 射线照射, 发现亚不育剂量使果蝇交配频率和交配时间下降; Osouli et al. (2020) 使用 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 亚不育剂量 300 Gy 辐照欧洲玉米螟 *Ostrinia nubilalis* 能更好地控制害虫种群数量增长。辐照不育技术不仅克服了传统防治产

生抗性的缺点, 还具有持续控制的效果。长达 25 年的辐照苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* 放飞试验彻底根除了当地的蠹蛾种群, 建立了一道天然屏障 (This-tlewood & Judd, 2019)。辐射后的白纹伊蚊 *Aedes albopictus* 雌性绝育, 此时持续释放感染了沃尔巴克氏体 *Wolbachia* 的雄性蚊子, 使精子与卵细胞在结合期间胞质不相容而无法产生后代, 从而控制蚊子种群 (Zheng et al., 2019)。辐照也可杀灭仓储害虫延长果蔬保质期以降低收获后的损失, 在国际贸易中有着重要地位 (Arvanitoyannis et al., 2009)。关于辐照对小菜蛾生理功能损伤已有报道, 如辐照可以降低小菜蛾的生理功能 (罗玲艳等, 2018), 亚不育剂量辐照可升高小菜蛾体内的抗氧化酶 (Li et al., 2018), 对小菜蛾生殖组织造成微结构上的损伤 (Li et al., 2019)。但亚不育剂量处理对小菜蛾种群数量动态变化的影响目前尚不清楚。

昆虫发育中具有不同虫态与复杂种群生活史。为更好地研究昆虫种群动态变化, 掌握害虫生物学和生态学的特点, 通常采用生命表法建立种群趋势指数模型系统准确研究外界环境因子对昆虫种群发育、繁殖及生存状态的影响, 为害虫管理提供理论依据 (赵紫华, 2020)。目前, 利用生命表研究不同因素对昆虫种群的影响已有较多报道 (巴吐西等, 2020; Gamarra et al., 2020; Gou et al., 2020)。因此, 本研究以小菜蛾种群为研究对象, 采用庞雄飞和梁广文 (1995) 以及刘向东 (2016) 改进的生命表方法研究辐照处理对小菜蛾种群生长发育、繁殖能力的影响, 以期为田间大范围使用辐照不育技术防控小菜蛾提供理论支持。

1 材料与方 法

1.1 材 料

供试虫源与植物: 2020 年 3 月于华南农业大学跃进北农场采集小菜蛾高龄幼虫, 在温度 (22 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 60%~70%、光周期 8 L:16 D 条件下使用新鲜菜心苗饲喂多代 (郭兆将等, 2015)。将小菜蛾成虫置于长 45 cm、宽 45 cm、高 50 cm 的养虫笼中用 10% 蜂蜜水饲养, 产卵孵化幼虫后按照上述方法继续饲喂, 待老熟幼虫化蛹鉴别雌雄后于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存备用。油青菜心购自当地市场。

仪器: $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐照源, 加拿大渥太华 Nordion 公

司;Fricke 剂量计校准,广东省广州市南沙区辐锐高能技术有限公司;Motic SMZ-171 体视显微镜,麦克奥迪实业集团有限公司。

1.2 方法

1.2.1 辐照处理方法

挑选大小一致、生长正常的6日龄雌蛹和雄蛹分别置于直径9 cm的培养皿中,将培养皿封好放于4℃恒温盒中,委托广州市南沙区辐锐高能技术有限公司对雌、雄蛹进行辐照处理,使用⁶⁰Co-γ辐照源,处理剂量设置为0(空白对照)、200 Gy(亚不育剂量)和400 Gy(完全不育剂量),剂量率为16.67 Gy/min,200 Gy和400 Gy处理时间分别为12 min和24 min,辐照后取回置于养虫室于温度(22±1)℃、相对湿度60%~70%、光周期8 L:16 D的条件下饲养。

1.2.2 小菜蛾羽化率和孵化率的测定

将0、200和400 Gy处理过的雌蛹和雄蛹分别挑选30头置于边长为50 cm的正方体养虫笼中,每日20:00观察记录其羽化数量,计算羽化率,持续2周,每个处理重复3次。羽化后雌、雄成虫分别置于边长为50 cm的正方体养虫笼中,用10%蜂蜜水饲喂,挑选亚不育剂量处理雄成虫与正常雌成虫交配产卵,用卵卡收集F₁代卵放于湿润培养皿中,置于1.2.1中养虫室中饲养。200粒卵为1个重复,每个处理重复4次,对收集的卵每天20:00使用体视镜观察其孵化情况,统计孵化数量。

1.2.3 实验室种群生命表的组建

亚不育剂量处理雄成虫与正常雌成虫交配产生卵作为初始虫源(亚不育剂量处理组),挑选1500粒卵作为种群基数。以未经辐射处理雄成虫与正常雌成虫交配所产后代F₁作为对照组。从卵期开始观测,用菜心苗饲喂,至其羽化为成虫,直至最终死亡。每天20:00观察1次,记录每个发育阶段虫态数量,计算死亡率和存活率。利用Origin 9软件进行自然种群存活率模型方程拟合。组建小菜蛾实验种群生命表,以卵为发育期起始点计,起始卵量为1500粒,计算种群内禀增长率 r_m 、周限增长率 λ 、世代平均历期 T 、种群趋势指数 I 、净增长率 R_0 和种群加倍时间 t 等生命表参数,计算公式为 $r_m = (\ln R_0)/T$, $\lambda = e^{r_m}$, $T = \sum x l_x m_x / \sum l_x m_x$, $R_0 = \sum l_x m_x$, $t = (\ln 2)/r_m$, $I = S_E S_1 S_2 S_3 S_4 S_P P_\varphi F P_F$, 式中, x 为以d为单位的时间间隔; l_x 为逐日存活率,表示个体在 x 期间的存活率; m_x 表示在 x 期间内平均每雌产卵数; S 表示各个虫态的存活率; P_φ 表示雌成虫比率; P_F 表示达标准卵量百分率; F 表示标准产卵量。

1.3 数据分析

试验数据用SPSS 21.0软件进行统计分析,采用 t 检验法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 辐照对小菜蛾羽化率的影响

随着辐照剂量增加,小菜蛾的羽化率呈明显下降趋势(图1)。经亚不育剂量辐照,雌蛹、雄蛹羽化率均为80.00%,完全不育剂量辐照雌蛹、雄蛹羽化率分别为49.00%和58.00%,空白对照雌蛹、雄蛹羽化率均为92.30%,在性别上不同处理对小菜蛾羽化率均无显著差异。亚不育剂量辐照处理羽化率略低于空白对照,表明在不影响羽化的情况下,200 Gy是适宜的亚不育剂量。完全不育剂量辐照处理的雄蛹羽化率略高于雌蛹羽化率,表明小菜蛾经高剂量辐照后其羽化率不会因性别差异而有所变化,雌虫对辐照敏感性高于雄虫。

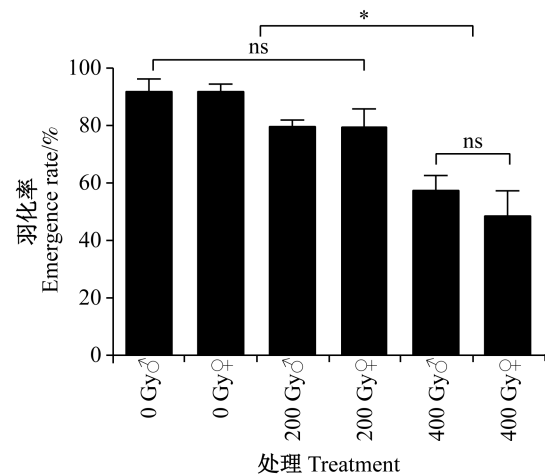


图1 辐照对小菜蛾羽化率的影响

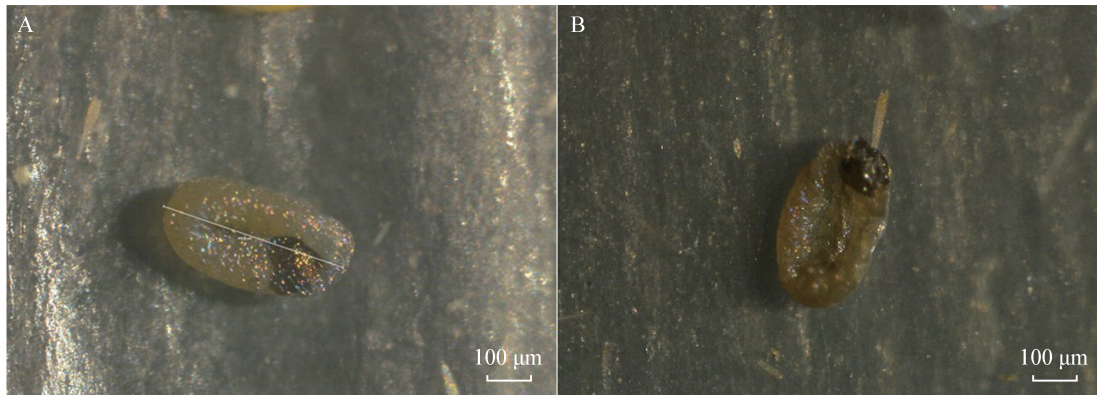
Fig. 1 Effects of irradiation on the emergence rate of

Plutella xylostella

图中数据为平均数±标准差。ns: 无显著差异。*表示不同处理间经 t 检验法检测差异显著($P < 0.05$)。Data are mean±SD. ns: No significant difference. * indicates significant difference among different treatments by t test ($P < 0.05$).

2.2 亚不育剂量对F₁代卵孵化率与生长发育的影响

通过观察亚不育剂量处理雄成虫与正常雌成虫交配产生F₁代的不同龄期虫态,发现辐照对卵期影响最明显(图2)。对照的小菜蛾卵型饱满(图2-A),经亚不育剂量辐照处理后出现了干瘪、畸形发育的情况(图2-B)。亚不育剂量使F₁孵化率呈现显著差异,F₁代孵化率33.75%,正常小菜蛾孵化率82.25%(图3)。



A: 空白对照组卵; B: 亚不育剂量处理组卵。A: Egg of CK; B: egg of sub-sterile dose treatment.

图2 亚不育剂量辐照对小菜蛾卵期形态的影响

Fig. 2 Effects of sub-sterile irradiation on the morphology of *Plutella xylostella* at egg stage

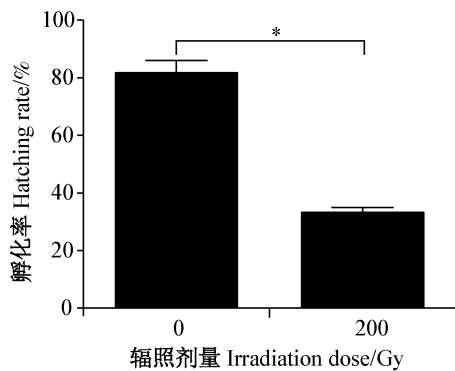


图3 亚不育剂量对F₁孵化率的影响

Fig. 3 Effects of sub-sterile irradiation on the hatching rate of *Plutella xylostella* eggs

图中数据为平均数±标准差。*表示不同处理间经 *t* 检验法检测差异显著 ($P < 0.05$)。Data are means±SD. ns: no significant difference. * indicates significant difference between different treatments by *t* test ($P < 0.05$).

亚不育剂量处理组小菜蛾的发育总历期为 23.31 d, 显著低于对照组的 29.95 d, 亚不育剂量处理组卵、1~4 龄幼虫的发育历期分别为 3.67、1.35、

1.63、1.31 和 2.43 d, 均短于空白对照组卵和 1~4 龄幼虫的发育历期, 亚不育剂量处理组蛹和成虫发育历期分别是 6.68 d 和 6.24 d, 均长于空白对照组蛹 (5.98 d) 和成虫发育历期 (5.48 d) (表 1)。

2.3 实验室种群的生殖力生命表

亚不育剂量处理组持续期为 25 d, 空白对照组为 33 d。空白对照组第 21 天开始产卵持续到第 33 天, 产卵期为 13 d; 亚不育剂量处理组第 17 天持续到第 25 天, 产卵期为 9 d, 亚不育剂量处理组产卵期短于对照组产卵期。空白对照组每日净增长量为 25.13 粒, 逐日净增长量为 614.38 粒, 均高于亚不育剂量处理组的 2.35 粒和 46.73 粒 (表 2)。表明亚不育剂量处理组生殖力弱于空白对照组。小菜蛾逐日存活率随天数的增长而下降, 4 d 时亚不育剂量处理组小菜蛾逐日存活率下降至 50% 以下, 对照组在 12 d 时逐日存活率降至 50% 以下。从平均产卵数来看, 小菜蛾生育高峰时间一致, 平均产卵数的数量和产卵期时长不同, 亚不育剂量处理组小菜蛾种群均低于空白对照组 (表 2)。

表 1 亚不育剂量对小菜蛾种群的发育历期影响

Table 1 Effects of sub-sterile irradiation on the developmental durations of *Plutella xylostella* populations

发育阶段 Developmental stage	亚不育剂量处理组发育历期 Developmental duration under sub-sterile treatment/d	样本数 Sample size	对照组发育历期 Developmental duration of the control group/d	样本数 Sample size
卵期 Egg stage	3.67±1.09	405	5.32±0.56*	998
1 龄 1st instar	1.35±0.96	289	5.07±1.38*	567
2 龄 2nd instar	1.63±0.80	232	2.58±0.89	381
3 龄 3rd instar	1.31±1.02	122	2.37±1.58	224
4 龄 4th instar	2.43±1.25	51	3.15±1.63	160
蛹 Pupa	6.68±0.85	41	5.98±1.77	152
成虫 Adult	6.24±2.01	42	5.48±1.90	149
发育总历期 Total developmental duration	23.31±2.82	1 500	29.95±3.12*	1 500

表中数据为平均数±标准差。*表示不同处理间经 *t* 检验法检验差异显著 ($P < 0.05$)。Data are means±SD. * indicates significant difference between different treatments by *t* test ($P < 0.05$).

表2 亚不育剂量对小菜蛾生殖力生命表的影响

Table 2 Effects of sub-sterile irradiation on the fecundity of *Plutella xylostella*

天数 No. of days/d	空白对照组 CK				亚不育剂量处理组 Treatment			
	逐日存活率 Day-to-day survival rate/%	平均产卵数 Average number of eggs laid	每日净增长量 Daily net growth	逐日净增长量 Day-to-day net growth	逐日存活率 Day-to-day survival rate/%	平均产卵数 Average number of eggs laid	每日净增长量 Daily net growth	逐日净增长量 Day-to-day net growth
1	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00
2	98.47	0.00	0.00	0.00	78.93	0.00	0.00	0.00
3	91.07	0.00	0.00	0.00	56.40	0.00	0.00	0.00
4	86.33	0.00	0.00	0.00	38.13	0.00	0.00	0.00
5	81.80	0.00	0.00	0.00	30.53	0.00	0.00	0.00
6	73.47	0.00	0.00	0.00	25.20	0.00	0.00	0.00
7	64.93	0.00	0.00	0.00	21.47	0.00	0.00	0.00
8	61.80	0.00	0.00	0.00	18.13	0.00	0.00	0.00
9	59.20	0.00	0.00	0.00	15.67	0.00	0.00	0.00
10	54.87	0.00	0.00	0.00	13.60	0.00	0.00	0.00
11	51.27	0.00	0.00	0.00	7.53	0.00	0.00	0.00
12	47.07	0.00	0.00	0.00	5.33	0.00	0.00	0.00
13	42.13	0.00	0.00	0.00	3.93	0.00	0.00	0.00
14	31.40	0.00	0.00	0.00	3.40	0.00	0.00	0.00
15	25.87	0.00	0.00	0.00	3.20	0.00	0.00	0.00
16	22.00	0.00	0.00	0.00	3.20	0.00	0.00	0.00
17	17.93	0.00	0.00	0.00	3.13	4.40	0.14	2.34
18	16.87	0.00	0.00	0.00	3.00	9.13	0.27	4.93
19	13.87	0.00	0.00	0.00	2.67	19.50	0.52	9.88
20	13.00	0.00	0.00	0.00	2.60	23.88	0.62	12.42
21	12.40	22.67	2.81	59.02	2.20	22.47	0.49	10.38
22	11.60	41.88	4.86	106.87	1.80	10.83	0.20	4.29
23	10.40	29.90	3.11	71.51	1.27	5.44	0.07	1.59
24	10.27	30.16	3.10	74.30	0.93	4.00	0.04	0.90
25	10.07	30.14	3.03	75.85	0.00	5.00	0.00	0.00
26	9.67	27.32	2.64	68.67	-	-	-	-
27	9.07	21.73	1.97	53.20	-	-	-	-
28	7.93	16.88	1.34	37.49	-	-	-	-
29	6.67	16.73	1.12	32.35	-	-	-	-
30	4.27	17.15	0.73	21.96	-	-	-	-
31	2.00	14.13	0.28	8.76	-	-	-	-
32	0.80	13.29	0.11	3.40	-	-	-	-
33	0.27	11.33	0.03	1.00	-	-	-	-
总和 Total	-	-	25.13	614.38	-	-	2.35	46.73

-: 无数据。 -: No data.

2.4 亚不育剂量辐照的种群特征参数

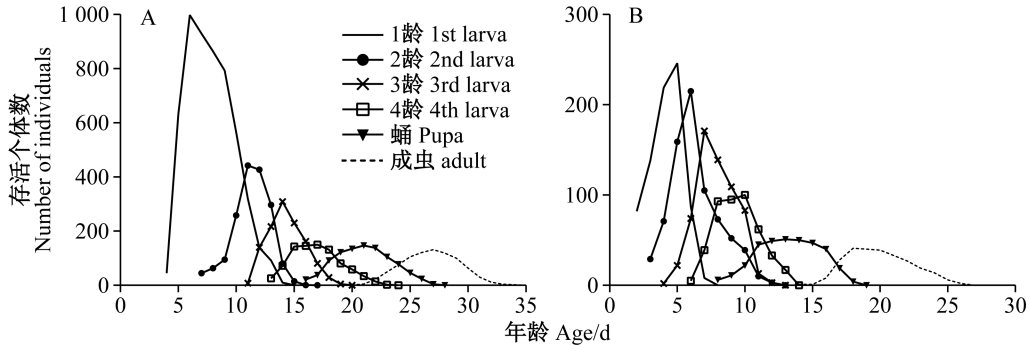
亚不育剂量处理组小菜蛾种群数量降低迅速且世代重叠的时间紧密程度大于空白对照组小菜蛾种群;1龄到2龄期间,空白对照组小菜蛾种群数量变化幅度大于亚不育剂量处理组小菜蛾种群;对于

3龄和4龄暴食期的幼虫而言,亚不育剂量处理组相较于空白对照组种群数量明显下降;亚不育剂量处理组和空白对照组小菜蛾种群数量变化趋势一致(图4)。

空白对照组种群加倍时间为5.26 d,低于亚不育剂量处理组的16.16 d;空白对照组小菜蛾种群世

代净生殖率为25.12,世代平均历期为24.45 d,内禀增长率为0.13 d⁻¹,周限增长率为1.14 d⁻¹;亚不育剂量处理组小菜蛾种群世代净生殖率为2.35,世代平均历期为19.90 d,内禀增长率为0.04 d⁻¹,周限增长

率为1.04 d⁻¹,空白对照组种群数量生命表参数均高于亚不育剂量处理组种群的生命表参数(表3),表明空白对照组小菜蛾种群数量将比亚不育剂量处理组小菜蛾种群增长迅猛。



A: 空白对照组; B: 亚不育剂量处理组。A: CK; B: sub-sterile dose treatment.

图4 亚不育剂量对小菜蛾的年龄-龄期特征存活曲线的影响

Fig. 4 Effects of sub-sterile irradiation on age-stage specific survival curve

表3 亚不育剂量辐照对小菜蛾的种群生命表参数的影响

Table 3 Effects of sub-sterile irradiation on life table parameters of *Plutella xylostella*

处理 Treatment	世代净生殖率 Net reproduction rate	世代平均历期 Mean generation time/d	内禀增长率 Intrinsic rate of increase/(d ⁻¹)	周限增长率 Finite rate of increase/(d ⁻¹)	种群加倍时间 Population doubling time/d
空白对照组 CK	25.12	24.45	0.13	1.14	5.26
亚不育剂量处理组 Sub-sterile dose treatment	2.35	19.90	0.04	1.04	16.16

空白对照组卵、4龄幼虫、蛹存活率分别为82.14%、57.55%、66.98%,均高于亚不育剂量处理组的33.75%、39.97%、31.37%,表明亚不育剂量降低了卵、4龄幼虫、蛹存活率;空白对照组1、2、3龄幼虫存活率分别为71.15%、72.34%、69.22%,均低于亚不育剂量处理组的74.92%、88.83%、79.06%,表明亚不育剂量提高小菜蛾幼虫的存活率(表4)。

表4 亚不育剂量辐照对小菜蛾实验室种群存活率的影响

Table 4 Effects of sub-sterile irradiation on the survival rate of experimental populations of *Plutella xylostella* %

虫态 Insect stage	空白对照组 CK	亚不育剂量处理组 Sub-sterile treatment
卵 Egg	82.14	33.75
1龄 1st instar	71.15	74.92
2龄 2nd instar	72.34	88.83
3龄 3rd instar	69.22	79.06
4龄 4th instar	57.55	39.97
蛹 Pupa	66.98	31.37

空白对照组雌虫比例、达标准卵量比率、种群趋势指数分别为0.88、0.90、4.52,均高于亚不育剂量处

理组的0.39、0.81、0.18,说明亚不育剂量通过影响F₁雌虫抑制了小菜蛾种群繁殖能力(表5)。

表5 亚不育剂量辐照对小菜蛾实验室种群趋势指数的影响

Table 5 Effects of sub-sterile irradiation on the population trend indices of experimental populations of *Plutella xylostella*

作用因子 Factor	空白对照组 CK	亚不育剂量处理组 Sub-sterile treatment
标准卵量 F	50	25
Standard number of eggs		
雌虫比率 P _♀	0.88	0.39
Ratio of female to male		
达标准卵量比率 P _F	0.90	0.81
Percentage of females laying eggs ≥ standard number		
种群趋势指数 I	4.52	0.18
Population trend index		

3 讨论

本试验研究了⁶⁰Co-γ辐照对小菜蛾F₁种群的影响,各项种群参数结果表明辐照对小菜蛾种群的控制是成功的。昆虫是以种群的形式存在的生物,个体之间具有差异与不同步性,故需分别从群体水平

和个体水平研究昆虫的产卵、交配及死亡的过程,以达到精准描述种群动态变化的目的。种群的数量变化,不仅体现种群演化中的变异和趋势,而且体现出种群对各种环境因子变化的响应程度(高尚坤和杨忠岐,2015)。因此,通过生命表的构建可以准确预测目标种群趋势,掌握释放辐照雄虫的有利时机,控制释放比例,达到最佳的防控效果。

本研究结果表明,亚不育剂量在F₁各个龄期中对卵期不利影响最大,并使F₁代孵化率显著降低,这与罗玲艳等(2018)的研究结果一致,且没有性别上的差异。辐照在整体上缩短了小菜蛾种群的发育历期,辐照处理减少了小菜蛾幼虫积累营养的时间,前期营养积累量不足可能是发育后期亚不育剂量处理组生长速度慢于对照组的原因,同时也增大了亚不育剂量处理组后期死亡风险,另一方面说明辐照加速幼虫发育是以减少幼虫期营养积累为代价的。卵期、老熟幼虫期、蛹期这3个时期是小菜蛾变态发育的关键时期,小菜蛾实验室种群生命表中亚不育剂量主要就是通过影响这3个时期来阻碍小菜蛾种群的繁衍,这与李娜等(2022)对梨小食心虫 *Grapholita molesta* 的研究结果一致。Maharjan et al. (2020) 研究发现,声波高频处理小长蜡 *Nyctelia plebeius* 后,当代及其后代产卵率、发育历期、寿命均出现了不同程度的下降;⁶⁰Co- γ 辐照处理本质是一种能量的高频振动,与声波类似,本研究结果显示经亚不育剂量辐照后小菜蛾发育历期也出现类似趋势。从生殖力生命表的分析结果来看,小菜蛾正常种群1个世代的发育历期24.45 d,辐照种群发育历期为19.90 d,这与年龄-龄期特征存活率的趋势、发育历期的统计结果相同,进一步证明了结果的正确性。这与辐照使家阿蟋 *Acheta domestica* 发育时间缩短的结论类似(Li et al., 2021)。

小菜蛾具有迁飞、体型适中、适应性强及一年产生数个世代的特点,这些特点使其在全球广泛分布。同时,小菜蛾是一种典型的抗药性生物模型(赵善欢,1993)。多种农药的滥用乱用与小菜蛾的个体特征结合加速了其抗性水平的上涨。辐照不育技术与前沿的抗性机制理论相结合在昆虫种群控制方面拥有着巨大的潜力,但是目前关于小菜蛾的不育机理还不够具体,难以用于指导实践。例如辐照是否引起小菜蛾体内的免疫应答,是否调控信号通路,这些变化是否会引起新的抗药性,这些值得进一步研究。

参 考 文 献 (References)

- Arvanitoyannis IS, Stratakos AC, Tsarouhas P. 2009. Irradiation applications in vegetables and fruits: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 49(5): 427-462
- Batuxi, Zhang Z, Kou S, Li XR, Zhang AH, Zhang YH. 2020. Impacts of seed coating of thiamethoxam on life parameters of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Plant Protection*, 47(4): 891-899 (in Chinese) [巴吐西, 张智, 寇爽, 李祥瑞, 张爱环, 张云慧. 2020. 噻虫嗪种衣剂对草地贪夜蛾生命参数的影响. *植物保护学报*, 47(4): 891-899]
- Chen YZ, Pan H, Li J, Pan D, Liu PC, Hu HY. 2022. Effects of irradiated sterile male and mating sequence on the fertility of *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae). *Journal of Insect Science*, 22(1): 22
- Dong WQ, Yin YQ, Zheng LP, Zhao XQ, Li XY, Zhang HM, Feng PF, Liu Y, Song WH, Chen AD. 2022. Occurrence and resistance monitoring of *Plutella xylostella* in western Yunnan. *Journal of Environmental Entomology*, 44(3): 722-728 (in Chinese) [董万庆, 尹艳琼, 郑丽萍, 赵雪晴, 李向永, 张红梅, 冯鹏飞, 刘莹, 宋文宏, 谌爱东. 2022. 滇西菜区小菜蛾发生规律及抗药性监测. *环境昆虫学报*, 44(3): 722-728]
- Dyck VA, Hendrichs J, Robinson AS. 2005. Sterile insect technique: principles and practice in area-wide integrated pest management. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 3-26
- Furlong MJ, Wright DJ, Dossdall LM. 2013. Diamondback moth ecology and management: problems, progress, and prospects. *Annual Review of Entomology*, 58: 517-541
- Gamarra H, Sporleder M, Carhuapoma P, Kroschel J, Kreuze J. 2020. A temperature-dependent phenology model for the greenhouse whitefly *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Virus Research*, 289: 198107
- Gao SK, Yang ZQ. 2015. Application of life table in pest biological control. *Chinese Journal of Biological Control*, 31(2): 256-263 (in Chinese) [高尚坤, 杨忠岐. 2015. 生命表技术在害虫生物防治中的应用. *中国生物防治学报*, 31(2): 256-263]
- Gou YP, Quandahor P, Zhang KX, Guo SF, Zhang QY, Liu CZ, Coulter JA. 2020. Artificial diet influences population growth of the root maggot *Bradysia impatiens* (Diptera: Sciaridae). *Journal of Insect Science*, 20(5): 23
- Guo ZJ, Kang S, Sun D, Gong LJ, Zhou JL, Qin JY, Guo L, Zhu LH, Bai Y, Ye F, et al. 2020. MAPK-dependent hormonal signaling plasticity contributes to overcoming *Bacillus thuringiensis* toxin action in an insect host. *Nature Communications*, 11: 3003
- Guo ZJ, Kang S, Wu QJ, Zhang YJ. 2015. Technical specifications for the mass-rearing of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(2): 492-497 (in Chinese) [郭兆将, 康师, 吴青君, 张友军. 2015. 小菜蛾饲养技术与规范. *应用昆虫学报*, 52(2): 492-497]
- Li N, Cui ZB, Li XP, Wang YQ, Yang XQ. 2022. Effects of low dosages of ⁶⁰Co- γ ray irradiation on the emergence, fecundity and adult life span of *Grapholita molesta*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(3): 638-644 (in Chinese) [李娜, 崔智博, 李晓平, 王

- 雅琪, 杨雪清. 2022. 低剂量⁶⁰Co- γ 射线辐照对梨小食心虫羽化、繁殖和成虫寿命的影响. 应用昆虫学报, 59(3): 638–644]
- Li SZ, Xu XX, De Mandal S, Shakeel M, Hua YY, Shoukat RF, Fu DR, Jin FL. 2021. Gut microbiota mediate *Plutella xylostella* susceptibility to Bt CryI Δ C protoxin is associated with host immune response. Environmental Pollution, 271: 116271
- Li XX, Luo LY, Karthi S, Zhang K, Luo JJ, Hu QB, Weng QF. 2018. Effects of 200 Gy ⁶⁰Co- γ radiation on the regulation of antioxidant enzymes, *Hsp70* genes, and serum molecules of *Plutella xylostella* (Linnaeus). Molecules, 23(5): 1011
- Li XX, Zhang K, Deng YK, He RK, Zhang XF, Zhong GH, Hu QB, Weng QF. 2019. Effects of ⁶⁰Co- γ radiation on testis physiological aspects of *Plutella xylostella* (Linnaeus). Ecotoxicology and Environmental Safety, 169: 937–943
- Li ZY, Xiao Y, Feng X. 2020. Research progress in integrated management of vegetable pests in Guangdong. Guangdong Agricultural Sciences, 47(12): 90–97 (in Chinese) [李振宇, 肖勇, 冯夏. 2020. 广东蔬菜害虫综合治理研究进展. 广东农业科学, 47(12): 90–97]
- Liu XD. 2016. Insect ecology and pest prediction. Beijing: China Agriculture Press, pp. 36 (in Chinese) [刘向东. 2016. 昆虫生态及预测预报. 北京: 中国农业出版社, pp. 36]
- Luo LY, Zhang XF, Wei XQ, Zhang K, Weng QF. 2018. Effect of ⁶⁰Co- γ radiation on inherited sterility of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 46(5): 149–154 (in Chinese) [罗玲艳, 张晓锋, 魏香琴, 张珂, 翁群芳. 2018. ⁶⁰Co- γ 射线对小菜蛾遗传不育的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 46(5): 149–154]
- Maharjan R, Yoon Y, Jang Y, Jeong M, Jung TW, Suk Cho H, Yi H. 2020. Artificial radiofrequency driven life-table parameters of perilla seed bugs (*Nysius* sp.) (Heteroptera: Lygaeidae). Journal of Asia-Pacific Entomology, 23(4): 1264–1271
- Osouli S, Atapour M, Ahmadi M. 2020. Effect of gamma radiation on the biology and inherited sterility in European corn borer *Ostrinia nubilalis* Hubner (Lep: Crambidae). Applied Radiation and Isotopes, 160: 109096
- Pang XF, Liang GW. 1995. The control of pest population systems. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, pp. 33 (in Chinese) [庞雄飞, 梁广文. 1995. 害虫种群系统的控制. 广州: 广东科技出版社, pp. 33]
- Sun SQ. 2020. Research on the mechanism of the effect of flubendiamide resistance on reproduction in *Plutella xylostella* L. Master thesis. Tai'an: Shandong Agricultural University (in Chinese) [孙诗晴. 2020. 氟苯虫酰胺抗性对小菜蛾生殖的影响机制初探. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学]
- Thistlewood MA, Judd GJR. 2019. Twenty-five years of research experience with the sterile insect technique and area-wide management of codling moth, *Cydia pomonella* (L.), in Canada. Insects, 10(9): 292
- Wang RM. 2019. Mechanisms of detoxification and metabolism to indoxacarb mediated by P χ GSTO4 in diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). Master thesis. Wuhan: Huazhong Agricultural University (in Chinese) [王茹梦. 2019. P χ GSTO4介导小菜蛾对茚虫威解毒代谢机制研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学]
- Yin YQ, Yang MW, Peng GQ, Zhao XQ, Li XY, Huang L, Xi YQ, Li C, Xu XM, Chen AD. 2019. Occurrence and insecticide resistance of *Plutella xylostella* in the areas of southwestern Yunnan. Plant Protection, 45(6): 288–291, 310 (in Chinese) [尹艳琼, 杨明文, 彭桂清, 赵雪晴, 李向永, 黄玲, 刁有强, 李晨, 许晓敏, 谌爱东. 2019. 滇西南菜区小菜蛾发生规律及抗药性现状. 植物保护, 45(6): 288–291, 310]
- Zhao SH. 1993. Insect toxicology. Beijing: China Agriculture Press, pp. 10 (in Chinese) [赵善欢. 1993. 昆虫毒理学. 北京: 中国农业出版社, pp.10]
- Zhao ZH. 2020. Concepts and applications of insect demography. Journal of Plant Protection, 47(4): 904–911 (in Chinese) [赵紫华. 2020. 虫口统计学的概念与应用. 植物保护学报, 47(4): 904–911]
- Zheng XY, Zhang DJ, Li YJ, Yang C, Wu Y, Liang X, Liang YK, Pan XL, Hu LC, Sun Q, et al. 2019. Incompatible and sterile insect techniques combined eliminate mosquitoes. Nature, 572(7767): 56–61
- Zhong GH, Chen Y, Yang HX, Hu MY. 2012. Advances in application and research of sterile insect irradiation techniques. Plant Protection, 38(2): 12–17 (in Chinese) [钟国华, 陈永, 杨红霞, 胡美英. 2012. 昆虫辐照不育技术研究与应用进展. 植物保护, 38(2): 12–17]

(责任编辑:王璇)