

豆天蛾不同地理种群若干生物学特征的比较*

李晓峰^{1**} 陈 凤¹ 邓 盼² 李俊领³ 樊继伟¹ 郭明明^{1***}

(1. 连云港市农业科学院, 徐淮地区连云港农业科学研究所, 连云港 222000; 2. 江苏省农业科学院休闲农业研究所, 南京 210000; 3. 江苏省农垦农业发展股份有限公司云台分公司, 连云港 222063)

摘 要 【目的】豆天蛾 *Clanis bilineata* Walker 是连云港市及周边地区重要的食用昆虫, 江苏种群因长年人工养殖造成种群退化。对不同地理种群的豆天蛾进行杂交, 旨在探索江苏种群改良的可行性。【方法】比较豆天蛾江苏种群与野外采集的河南种群和湖北种群间不同虫态的表观性状差异以及化蛹率、羽化率、蛹期和雌成虫寿命; 将河南种群和湖北种群分别与江苏种群进行交配, 比较交配后雌虫的产卵量、子代卵孵化率、幼虫各龄期存活率。【结果】在豆天蛾 3 个地理种群中, 河南种群和湖北种群的参数表现要优于江苏种群。其中, 湖北种群豆天蛾幼虫、蛹和雌成虫的体长均最大, 分别为 7.59、5.19 和 5.16 cm, 蛹和雌成虫重量均最大, 分别为 5.23 g 和 2.23 g; 而河南种群豆天蛾雄成虫体长最大, 为 4.44 cm, 幼虫和雌成虫的重量最大, 分别为 8.25 g 和 3.52 g; 湖北种群、河南种群和江苏种群的化蛹率分别为 98.89%、94.44% 和 85.56%; 羽化率分别为 94.44%、97.78% 和 97.78%。豆天蛾 3 个地理种群自交和杂交后, 江苏♀×江苏♂组合的生命参数均为最低值, 河南♀×江苏♂组合单雌产卵量和卵孵化率最高, 分别为 139.67 粒和 90.67%。豆天蛾 3 个地理种群自交和杂交后的子代幼虫均表现出随着龄期增加存活率降低的现象。其中, 河南♀×江苏♂组合的 5 龄幼虫存活率 (74.67%) 显著高于湖北♀×江苏♂组合 (70.67%), 且两者均显著高于其它 5 个处理 ($P<0.05$)。【结论】将河南♀与江苏♂杂交可显著提高单雌产卵量、卵孵化率和幼虫各龄期存活率, 可有效解决江苏种群的种群退化问题, 对豆天蛾养殖产业发展具有重要意义。

关键词 豆天蛾; 种群退化; 地理种群; 杂交; 改良

Comparison of biological characteristics of different geographical populations of *Clanis bilineata*

LI Xiao-Feng^{1**} CHEN Feng¹ DENG Pan² LI Jun-Ling³ FAN Ji-Wei¹ GUO Ming-Ming^{1***}

(1. Lianyungang Academy of Agricultural Science, Institute of Lianyungang Agricultural Science of Xuhuai Area, Lianyungang 222000, China; 2. Institute of Leisure Agriculture, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Nanjing 210000, China; 3. Yantai Branch of Jiangsu Provincial Agricultural Reclamation and Development Corporation, Lianyungang 222063, China)

Abstract 【Objectives】To investigate the feasibility of improving the quality of captive-bred *Clanis bilineata*, an important edible insect in Lianyungang city and surrounding areas, by crossing individuals from this population with those from wild populations from different geographical areas. 【Methods】The size, pupation rate, emergence rate, pupal period and adult female lifespan between the captive-bred Jiangsu and wild Henan and Hubei populations collected in the field were compared. Adults from the Henan and Hubei populations were then crossed with those from the captive Jiangsu population by combining individuals from these populations at a 1: 1 sex ratio and allowing them to mate. After mating, the number of eggs laid by females, the hatching rate of eggs and the survival rate of larvae in each instar from each potential cross were compared. 【Results】The Henan and Hubei populations were superior to the Jiangsu population in all measured parameters. The Hubei population had the longest larval, pupal and adult female body lengths (7.59, 5.19 and 5.16 cm, respectively), and the Henan population had the longest adult male body length (4.44 cm). The Henan population also had the heaviest larvae and adult

*资助项目 Supported projects: 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(20)3117]; 连云港市财政局专项资金 (QNJJ2204)

**第一作者 First author, E-mail: 2275638093@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: gmm30277@163.com

收稿日期 Received: 2021-10-19; 接受日期 Accepted: 2022-03-21

females (8.25 g and 3.52 g, respectively) and the Hubei population had the heaviest pupae and adult males (5.23 g and 2.23 g, respectively). The pupation rates of the Hubei, Henan and Jiangsu populations were 98.89%, 94.44% and 85.56%, respectively, and their eclosion rates were 94.44%, 97.78% and 97.78%, respectively. The progeny of Jiangsu ♀× Jiangsu ♂ pairs were the lowest among the 7 potential pairings. The progeny of Henan ♀× Jiangsu ♂ pairs had the highest female fecundity and hatching rate (139.67 and 90.67%, respectively). The survival rate of larvae decreased with instar irrespective of parentage. The progeny of Henan ♀× Jiangsu ♂ pairs had the highest 5th instar larval survival rate (74.67%), followed by the progeny of Hubei ♀× Jiangsu ♂ pairs (70.67%). The 5th instar larval survival rate of the former was significantly higher than that of the latter ($P<0.05$), and both were significantly higher than those of the other 5 crosses ($P<0.05$). **[Conclusion]** Crossing Henan ♀ with Jiangsu ♂ can significantly increase the number of eggs laid by females, the larval hatching rate and the larval survival rate of each instar, thereby improving the quality of the captive Jiangsu population.

Key words *Clanis bilineata*; population degradation; geographic population; hybrid; improved

昆虫种群在繁殖过程中,会出现不同程度的种群退化问题,尤其是将种群在人工室内继代培养时,种群退化问题就更为显著(岳方正,2016)。这主要是由于种群规模较小,个体间近交使等位基因纯合几率增大导致个体适合度下降,从而导致昆虫种群生活力、生殖力及性比下降和退化等问题(Angeloni *et al.*, 2011; Karron *et al.*, 2012; Wright *et al.*, 2013)。有研究表明,室内近交繁殖的小菜蛾 *Plutella xylostella* 3 代以后其蛹重、交配次数、产卵量和孵化率等均显著下降,而雌雄虫的世代发育历期均显著上升(蒲宇辰等, 2015);还有学者发现,如果长期在实验室培养虫食性昆虫,种群的遗传谱可能会发生变化,这种变化可能改变虫食性昆虫的取食偏好,或可能导致生存能力和性能受损,从而降低其生防效力(Mackauer, 1976)。

豆天蛾 *Clanis bilineata* 属鳞翅目(Lepidoptera)天蛾科(Sphingidae)云纹天蛾亚科(Ambulicinae)豆天蛾属(*Clanis*),幼虫俗称豆丹、豆虫(席景会等,2000;闫茂华,2001),主要寄主为大豆、洋槐、刺槐、藤萝及葛属和黎豆属等植物(吕飞等,2006;田华,2009)。在河北及山东等地1年发生1代,湖北武昌和江西南昌等地1年发生2代(田华和张义明,2009;樊继伟等,2019)。豆天蛾幼虫的蛋白质、必需氨基酸及必需脂肪酸的质量分数均高于鸡蛋、牛奶、大豆等食物(李梦楼等,2006;詹永成等,2009;田华和张义明,2012a),还具有降血压和血脂作用,对高血压、冠心病和肠胃病也有独特的疗效(田华和张义

明,2012b,2012c)。江苏连云港市及周边地区,豆天蛾幼虫早已成为重要的食用昆虫(吴福忠等,2005)。近年来豆天蛾幼虫消费需求迅猛增长,养殖企业数量和规模不断增加,市场规模不断扩大。因此,可以预见豆天蛾幼虫将会产生更大的经济价值,拥有更广阔的发展前景(孙中伟等,2019)。但是,众多养殖企业在进行豆天蛾人工规模化养殖时也面临众多养殖难题。由于养殖企业所用的豆天蛾种群基本固定,种群规模较小,常年养殖后往往表现出种群个体趋小、趋弱,成虫产卵量减少,孵化率、化蛹率及羽化率等指标降低等现象,即出现了种群退化问题,这不仅降低了豆天蛾幼虫产品的品质,而且增大了生产损失,不利于豆天蛾幼虫产业的健康良好发展。

本研究比较了豆天蛾江苏、河南和湖北3个地理种群的幼虫、蛹和成虫的表观形状差异及其化蛹率、化蛹间期、羽化率和成虫寿命等生命参数。进一步地,将河南种群和湖北种群分别与江苏种群进行杂交,比较杂交后雌成虫产卵量、子代卵孵化率和幼虫各龄期的存活率等指标,筛选最优杂交组合,找出对豆天蛾江苏种群退化问题改良方法,从而为豆天蛾养殖企业提供种群复壮理论基础和具体的技术指导,减小生产损失,促进产业发展。

1 材料与方法

1.1 供试虫源与寄主

豆天蛾江苏种群老熟幼虫于2020年10月购

自江苏省连云港市海州区云台农场;豆天蛾河南种群老熟幼虫于 2020 年 8 月采集自河南省漯河市野外大豆田中;豆天蛾湖北种群老熟幼虫于 2020 年 8 月采集自湖北省潜江市野外大豆田中。将不同地理种群豆天蛾老熟幼虫带至连云港市农业科学院东辛试验基地后,分别放入不同的大豆田块中,等待其自然入土。试验中养殖豆天蛾幼虫用大豆品种为齐黄 34 (山东省农业科学院作物研究所提供)。

1.2 供试试剂与设

84 消毒液、甲醛溶液(质量分数 37%)和盐酸溶液(质量分数 38%)均购自北京百灵威科技有限公司,将试剂于 4 °C 冰箱保存,备用。

试验所用的耗材主要有:长×宽×高=1.2 m×0.8 m×0.3 m 的木盒,其中底部对应面为空;长×宽×高=20 cm×15 cm×15 cm 的带盖塑料盒(平湖阳之光包装制品有限公司),其中盖子上有直径为 2 mm 的通气孔;量程为 20 cm 的塑料尺;0.01 g 电子秤(深圳市奥特斯衡器有限公司);长×宽×高=0.5 m×0.5 m×0.5 m 的交配笼,交配笼骨架为钢管材料,其上覆盖网径为 0.1 mm 的网布;长×宽×高=10 m×6 m×4 m 的加温室。

研究中所用设备包括:功率为 2 kW 的电加热器(北京恒润万佳科技有限公司);恒温培养箱(杭州绿博仪器有限公司)。

1.3 方法

1.3.1 不同地理种群豆天蛾体重和体长的比较

2020 年 11 月将豆天蛾 3 个地理种群老熟幼虫从土中挖出,在此期间尽量不对入蛰幼虫作过多扰动。3 个地理种群各挑出 1 000 头外形饱满圆润的老熟幼虫,分别放入加温室内含有 15 cm 深土壤基质的木盒中,每个木盒放入 500 头,老熟幼虫再次在木盒中入土。而后保持室内通风,不采取任何温度调节措施,每 7 d 用八四消毒液 10 倍液均匀喷洒房间,对木盒中土表和房间进行消毒,并使用喷壶向木盒中的土壤喷水,保证木盒底部无积水为宜。

2021 年 3 月 10 日通过电加热器向加温室作加温处理。开始温度为 10 °C,每 5 d 提高 5 °C,

至 25 °C 时不再升高。

在转入加温室时,随机挑选 3 个地理种群豆天蛾老熟幼虫各 50 头,测量体重和体长,每 10 头为 1 次重复,经加温处理的 3 个地理种群的豆天蛾化蛹和羽化后,随机挑选 50 头蛹和成虫,并测量并记录体重和体长,每 10 头为 1 次重复。

1.3.2 不同地理种群豆天蛾种群生命参数的比较

3 个地理种群豆天蛾在开始室内加温后,随机统计蛹的蛹历期,分 3 次重复,每次重复统计 30 头;随着加温的进行,3 个地理种群从蛹变态发育为成虫,随机对雌成虫进行寿命统计,分 3 次重复,每次重复统计 30 头雌成虫。在此基础上,计算豆天蛾 3 个地理种群的平均蛹历期、雌成虫平均寿命、化蛹率和羽化率。

1.3.3 种群间杂交后子代卵的数量及孵化率比较

比较豆天蛾不同地理种群自交以及河南、湖北种群与江苏种群杂交后单雌产卵量及卵孵化率差异。试验分为 7 个处理,分别为江苏♀×江苏♂、河南♀×河南♂、湖北♀×湖北♂、河南♀×江苏♂、江苏♀×河南♂、江苏♀×湖北♂及湖北♀×江苏♂。每个处理分别取相应地理种群的豆天蛾雌性或雄性成虫各 50 头放入 1 个交配笼中。当日 22:00 豆天蛾成虫陆续求偶、交配,交配结束后每处理将 30 头雌虫单独放置在塑料盒中,观察不同处理单雌产卵量;产卵结束后,每个处理取卵 300 粒,平均分到 3 个塑料盒中,而后置于 25 °C 恒温培养箱培养。4 d 后对卵表面进行消毒处理,将甲醛溶液、盐酸溶液和水按照 0.5 : 0.5 : 10 的体积比混合后制成消毒剂,对卵浸泡 30 min 后用清水冲净,而后置于滤纸上吸干表面水分,消毒工作即完成,继续将卵置于恒温培养箱中,5 d 后开始每日观察并记录每个处理卵的孵化率。

1.3.4 种群间杂交后子代幼虫存活率比较

大豆种植与豆天蛾室内加温处理同时进行。所用大豆品种为齐黄 34,行距×株距=25 cm×15 cm。大豆生长至 35 d 时大豆田进行小区划分,东西向每排 3 个小区,南北向每排 7 个小区,每个小区长(南北)×宽(东西)=2 m×1.5 m,小区间过道宽 0.5 m,共 21 个小区。将方法 1.2.3 中 7

个处理的卵各取 500 粒, 在培养箱中培养, 消毒方法如 1.2.3, 卵孵化后挑选健康活泼的 1 龄幼虫各 300 头, 每个处理卵随机放入 3 个小区中, 每小区取 100 头轻轻放在小区内的大豆叶片上。为防止其他昆虫对豆天蛾幼虫生长的影响, 将豆天蛾幼虫接在叶片上后, 使用网径 0.1 mm 的防虫网和木棍将小区覆盖。在豆天蛾幼虫每增长 1 个龄期后的第 2 d 统计各处理的幼虫存活率。

1.4 数据处理

本试验参数主要有体长、体重、化蛹率、蛹历期、羽化率、成虫寿命、单雌产卵量、卵孵化率和幼虫各龄期存活率。所有数据均由 SPSS 17.0 软件进行统计分析, 采用 One-way ANOVA 方差分析参数间的差异显著性; 其中, 化蛹率、羽化率、卵孵化率和幼虫各龄期存活率间的比较首先要进行反正弦平方根转换, 然后采用 Duncan's 新复极差法进行不同处理之间差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同地理种群豆天蛾体重和体长的比较

豆天蛾 3 个地理种群不同虫态体长如图 1 所

示。湖北种群幼虫体长最大, 达 7.59 cm, 其次为河南和江苏种群, 体重分别为 7.13 cm 和 6.71 cm, 3 个地理种群豆天蛾幼虫体长互呈显著性差异 ($P<0.05$); 湖北种群豆天蛾蛹、雌成虫和雄成虫体长分别为 5.19、5.16 和 4.41 cm; 河南种群豆天蛾蛹、雌成虫和雄成虫体长分别为 5.08、5.05 和 4.44 cm; 江苏种群豆天蛾蛹、雌成虫和雄成虫体长分别为 4.46、4.58 和 4.07 cm。其中, 湖北种群与河南种群的体长差异不显著 ($P>0.05$), 但均显著高于江苏种群体长 ($P<0.05$)。

豆天蛾江苏种群、河南种群和湖北种群的幼虫体重分别为 7.41、8.25 和 8.26 g, 蛹重分别为 4.37、5.17 和 5.23 g; 豆天蛾幼虫和蛹重河南种群和湖北种群无显著性差异 ($P>0.05$), 但均显著大于江苏种群 ($P<0.05$)。雌成虫体重最高为河南种群, 为 3.52 g, 其次分别为湖北和江苏种群, 分别为 3.42 g 和 3.11 g, 河南种群雌成虫体重显著大于江苏种群 ($P<0.05$), 而湖北种群与江苏种群差异不显著 ($P>0.05$)。雄成虫体重最大为湖北种群, 为 2.23 g, 其次为河南和江苏种群, 分别为 2.16 g 和 2.04 g, 湖北种群豆天蛾雄虫体重显著大于江苏种群 ($P<0.05$), 而河南种群与江苏种群差异不显著 ($P>0.05$) (图 2)。

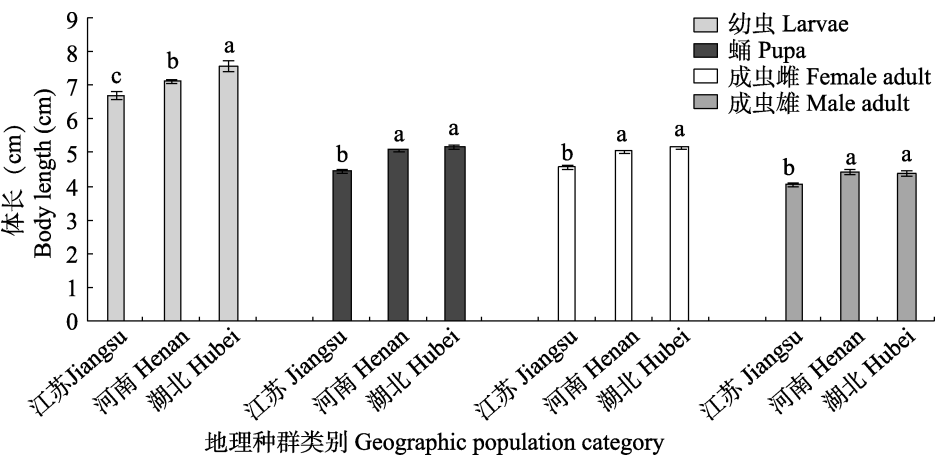


图 1 豆天蛾不同地理种群不同虫态体长的比较
Fig. 1 Comparison of body length of different developmental stages in different geographical populations of *Clanis bilineata*

柱上标有不同小写字母表示经 Duncan's 新复极差法检验差异显著 ($P<0.05$)。图 2 同。
Histograms with different lowercase letters indicate significant differences by Duncan's new multiple range test ($P<0.05$). The same as Fig. 2.

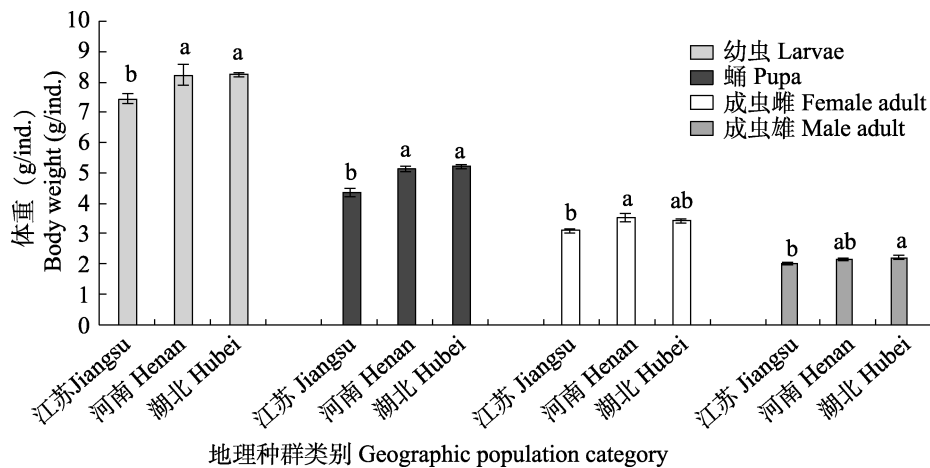


图 2 豆天蛾不同地理种群不同虫态体重的比较

Fig. 2 Comparison of body weight of different developmental stages in different geographical populations of *Clanis bilineata*

2.2 不同地理种群豆天蛾种群生命参数的比较

3 个地理种群豆天蛾种群生命表参数如表 1 所示。湖北种群化蛹率最高, 达 98.89%, 其次为河南种群和江苏种群, 化蛹率分别为 94.44% 和 85.56%; 湖北种群化蛹率与河南种群无显著差异 ($P>0.05$), 但显著高于江苏种群 ($P<0.05$)。江苏种群、河南种群和湖北种群羽化率分别为

97.78%、97.78%和 94.44%, 3 个地理种群间羽化率无显著性差异 ($P>0.05$)。江苏种群蛹历期和雌成虫寿命分别为 14.00 d 和 3.20 d; 河南种群蛹历期和雌成虫寿命分别为 13.80 d 和 2.80 d; 湖北种群蛹历期和雌成虫寿命分别为 12.20 d 和 2.80 d; 江苏种群和河南种群蛹历期无显著性差异 ($P>0.05$), 但均显著高于湖北种群 ($P<0.05$); 3 个地理种群的雌成虫寿命无显著性差异 ($P>0.05$)。

表 1 不同地理种群豆天蛾若干生命参数的比较

Table 1 Comparison of several life parameters of different geographical populations of *Clanis bilineata*

地理种群 Geographical populations	化蛹率 (%) Pupation rate	蛹历期 (d) Pupar duration period (d)	羽化率 (%) Rate of exclusion	雌虫寿命 (d) Female adult lifespan (d)
江苏 Jiangsu	85.56±6.16b	14.0±0.32a	97.78±6.12a	3.20±0.20a
河南 Henan	94.44±9.87ab	13.8±0.37a	97.78±6.12a	2.80±0.37a
湖北 Hubei	98.89±6.12a	12.2±0.49b	94.44±9.87a	2.80±0.37a

数据为平均数±标准误; 同列数据后标有不同小写字母表示经 Duncan's 新复极差法检验差异显著 ($P<0.05$)。表 2, 表 3 同。
Data are mean ± SE, and followed by different lowercase letters in the same column indicate significant differences by Duncan's new multiple range test ($P<0.05$). The same as table 2 and table 3.

2.3 种群间杂交后代卵的数量及孵化率比较

豆天蛾地理种群间交配和种群间杂交后, 其单雌产卵量和卵的孵化率如表 2 所示。在 7 个处理中, 单雌产卵量最高的为河南♀×江苏♂组合, 达 139.67 粒, 其次为江苏♀×河南♂、江苏♀×湖北♂和河南♀×河南♂组合, 单雌产卵量分别为 124.67、124.33 和 123.67 粒; 4 个处理间单雌产

卵量无显著差异 ($P>0.05$), 但河南♀×江苏♂组合单雌产卵量显著高于其它 3 个处理 ($P<0.05$)。组合河南♀×江苏♂的卵孵化率最高, 达到 90.67%; 其次分别为湖北♀×江苏♂、湖北♀×湖北♂、河南♀×河南♂和江苏♀×湖北♂组合, 卵孵化率分别为 89.33%、89.00%、87.67%和 87.33%, 5 个处理间卵孵化率差异不显著 ($P>0.05$), 但组合河南♀×江苏♂卵孵化率显著高于江苏♀×河南♂组合

(86.33%) 和江苏 ♀×江苏 ♂ 组合 (79.00%) ($P<0.05$)。

表 2 豆天蛾种群间杂交后子代卵的数量及孵化率
Table 2 Number and hatchability of progeny eggs after hybridization between populations of *Clanis bilineata*

处理 Treatments	单雌产卵量 Number of eggs laid by single female	卵孵化率 (%) Egg hatchability (%)
江苏♀×江苏♂ Jiangsu ♀× Jiangsu ♂	99.67±2.03c	79.00±2.53c
河南♀×河南♂ Henan ♀× Henan ♂	123.60±1.20ab	87.60±0.54ab
湖北♀×湖北♂ Hubei ♀× Hubei ♂	120.00±2.03b	89.00±2.39ab
河南♀×江苏♂ Henan ♀× Jiangsu ♂	139.67±1.20a	90.67±1.17a
江苏♀×河南♂ Jiangsu ♀× Henan ♂	124.67±21.22ab	86.33±0.49b
江苏♀×湖北♂ Jiangsu ♀× Hubei ♂	124.33±5.69ab	87.33±1.79ab
湖北♀×江苏♂ Hubei ♀× Jiangsu ♂	120.67±2.52b	89.33±1.07ab

2.4 种群间杂交后子代幼虫存活率比较

豆天蛾 3 个地理种群自交和杂交子代幼虫各龄期存活率如表 3 所示。所有处理的幼虫均表

现出随着龄期增加而存活率降低的现象。其中江苏♀×江苏♂组合幼虫各龄期存活率在 7 个处理中均最低, 其中 3 龄幼虫存活率显著低于其它 6 个处理的幼虫存活率 ($P<0.05$)。组合江苏♀×河南♂、江苏♀×湖北♂和河南♀×江苏♂的 2 龄幼虫存活率较高, 分别为 81.33%、81.33%和 81.00%, 但随着龄期增加, 组合江苏♀×河南♂和江苏♀×湖北♂的幼虫存活率下降较快, 而组合湖北♀×江苏♂虽在 2 龄时存活率较低 (77.67%), 但在 3-5 龄时存活率下降较小, 最终导致 5 龄幼虫存活率最高的为河南♀×江苏♂组合, 为 74.67%, 其次为湖北♀×江苏♂组合, 为 70.67%, 前者 5 龄幼虫存活率显著高于后者, 但两者均显著高于其他 5 个处理 ($P<0.05$)。从 2.3 和 2.4 结果可看出, 豆天蛾野生的河南种群和人工饲养的江苏种群按照雌: 雄=1: 1 数量交配后, 其单雌产卵量、卵孵化率和 5 龄幼虫存活率均高于其他处理, 因此此方法可有效解决江苏种群的种群退化问题。

3 讨论

本文比较筛选了可提高江苏种群繁殖力的可行方案, 最终确定了解决种群退化问题的最优路线。在江苏省连云港市, 仅仅凭借野生豆天蛾

表 3 豆天蛾种群间杂交后子代幼虫不同龄期存活率
Table 3 Survival rates of progeny larvae at different instars after interpopulation hybridization of *Clanis bilineata*

处理 Treatments	幼虫存活率 (%) Survival rate of larvae (%)			
	2 龄 2nd instar	3 龄 3rd instar	4 龄 4th instar	5 龄 5th instar
江苏♀×江苏♂ Jiangsu ♀× Jiangsu ♂	74.33±1.67b	61.33±2.48d	59.67±0.90d	59.67±0.90d
河南♀×河南♂ Henan ♀× Henan ♂	80.33±2.57ab	68.67±1.30bc	66.00±0.61c	65.67±0.70c
湖北♀×湖北♂ Hubei ♀× Hubei ♂	80.33±2.57ab	67.67±0.36c	66.67±0.93c	66.67±0.93c
河南♀×江苏♂ Henan ♀× Jiangsu ♂	81.00±1.47a	81.00±1.47a	79.00±1.22a	74.67±1.67a
江苏♀×河南♂ Jiangsu ♀× Henan ♂	81.33±1.53a	77.67±2.14a	62.00±2.15d	59.67±0.34d
江苏♀×湖北♂ Jiangsu ♀× Hubei ♂	81.33±3.38a	73.33±1.00b	68.00±1.24bc	67.33±0.94c
湖北♀×江苏♂ Hubei ♀× Jiangsu ♂	77.67±2.43ab	72.33±1.63bc	70.67±1.33b	70.67±1.33b

幼虫无法满足当地消费需求,因此众多的当地企业开始人工养殖豆天蛾。养殖技术基本涵盖了豆天蛾完整生活史,人工集中养殖豆天蛾满足了市场需求。与此同时,由于长年养殖所用的虫源较为固定,无外来新基因交流,导致了严重的种群退化问题。种群退化问题在人工养殖领域普遍存在,朱艳娟等(2020)研究表明,蠋蛾 *Arma chinensis* 室内种群,存在着同一卵块的个体发育不整齐,室内种群普遍体型偏小,孵化率下降的现象;蒲宇辰等(2015)尝试使用离体菜叶法、蛭石萝卜苗法、甘蓝苗活株法、莲花白繁殖法、人工饲料法及半合成人工饲料法等多种方法对小菜蛾在实验室进行继代饲养,均不能避免出现后代虫体变小、寿命缩短和后代数量减少等种群退化现象。同样,本试验江苏种群与野生的河南和湖北种群几个生命参数对比中不难看出,长期的人工养殖导致江苏种群表现出显著的虫体弱小,繁殖力降低。研究表明,当河南种群和湖北种群与江苏种群杂交后,尤其是河南种群雌成虫与江苏种群雄成虫 1:1 交配后,其单雌产卵量、卵孵化率和幼虫各龄期存活率均有较大提高甚至显著提高,此结果为解决人工养殖豆天蛾过程中的种群退化问题提供了有力的理论基础。在大规模人工养殖豆天蛾时,定期加入一定量的河南种群雌性成虫,可有效提高种群抗性与繁殖力,减小豆天蛾人工养殖损失,促进市场的健康发展。

本试验开展中发现豆天蛾人工养殖领域还存在其他亟需解决的问题。在本研究中 7 个处理的子代幼虫至 5 龄阶段其存活率从 59.67%至 74.67%不等,不同处理子代虫体抗性不同。死亡的虫体多表现出虫体倒挂现象,是典型的被核型多角体病毒感染后表现的特征(朱姍颖等, 2014)。豆天蛾幼虫被核型多角体病毒感染而死亡的现象在养殖领域普遍存在,对生产造成了较为严重的损失。故下一步工作可围绕病毒来源展开,在大豆种子,田间土壤,其他昆虫传播等途径分离核型多角体病毒,确认途径后通过适当的方法进行灭毒处理,切断病毒根源,减小豆天蛾幼虫死亡率,减小人工养殖豆天蛾生产损失。此

外,开展核型多角体病毒对豆天蛾不同龄期幼虫毒力测定、室外毒力验证、病毒在幼虫体内不同组织时空增殖情况研究、幼虫中肠组织病毒侵染前后转录组建立及免疫功能基因筛选鉴定。在病毒和宿主两个角度系统性分析核型多角体病毒对豆天蛾幼虫的毒力效果,开发完整的毒力检测技术,为减少因核型多角体病毒导致的幼虫产量损失提供技术指导。

本研究还发现,经人工养殖多代的江苏种群其化蛹和羽化整齐度要高于野生的河南和湖北种群,这样可以在成虫总数一定的情况下,更短时间获得更大量的虫卵,对生产上有积极作用。据报道,豆天蛾幼虫滞育类型为兼性滞育,可以通过一定外在条件来打破(郭明明等, 2021a, 2021b)。在豆天蛾人工养殖上通常以加温的方式打破老熟幼虫的滞育状态,使化蛹和羽化过程提前并集中进行。与此同时,对打破老熟幼虫滞育状态目前仅有温度调节一种较为简单的方法,故下一步工作可在温度、湿度、光周期及培养基质等几个条件下系统开展对打破老熟幼虫滞育的研究,筛选可以快速打破滞育且能进一步提高化蛹率、羽化和成虫交配率的最优组合,及时进行成果转化,为人工养殖提供有力的技术支持。

参考文献 (References)

- Angeloni F, Ouborg NJ, Leimu R, 2011. Meta-analysis on the association of population size and life history with inbreeding depression in plants. *Biological Conservation*, 144(1): 35–43.
- Fan JW, Sun ZW, Li Q, Wang KJ, Zhang GX, Zhao XJ, Chen F, Guo MM, 2019. Advances in research on biological characteristics and application of Lianyungang population of *Clanis bilineata tsingtaica*. *Agricultural Development and Equipment*, 2019(2): 170–172. [樊继伟, 孙中伟, 李强, 王康君, 张广旭, 赵雪君, 陈凤, 郭明明, 2019. 豆天蛾连云港种群生物学特性及应用研究进展. 农业开发与装备, 2019(2): 170–172.]
- Guo MM, Li XF, Deng Pan, Li DW, Li JL, Fan JW, Chen Feng, 2021a. Study on biological characteristics of overwintering larvae of *Clanis bilineata tsingtaica* after diapause release. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(4): 966–972. [郭明明, 李晓峰, 邓盼, 李大维, 李俊领, 樊继伟, 陈凤, 2021. 豆天蛾越冬幼虫滞育解除后生物学特性的研究. 应用昆虫学报, 58(4): 966–972.]

- Guo MM, Li XF, Fan JW, Deng P, Chen F, 2021b. Research progress and prospect of diapause of *Clanis bilineata tsingtauca*. *Southern Agriculture*, 15(16): 89–93. [郭明明, 李晓峰, 樊继伟, 邓盼, 陈凤, 2021. 豆天蛾滞育研究进展及展望. 南方农业, 15(16): 89–93.]
- Karron JD, Ivey CT, Mitchell RJ, Whitehead MR, Peakall R, Case AL, 2012. New perspectives on the evolution of plant mating systems. *Annals of Botany*, 109(3): 493–503.
- Li ML, Li SM, Wang D, Liu RP, 2006. Fatty acid composition and contents of five insect species. *Chinese Bulletin of Entomology*, 43(2): 226–228. [李梦楼, 李生梅, 王敦, 刘汝平, 2006. 5 种昆虫脂肪酸组分与含量分析. 昆虫知识, 43(2): 226–228.]
- Lv F, Liu YS, Wang ZP, Zhang XB, 2006. Advances in production and comprehensive utilization of *Clanis bilineata tsingtauca*. *Entomological Journal of East China*, 15(3): 192–195. [吕飞, 刘玉升, 王振鹏, 张秀波, 2006. 豆天蛾生产与综合利用的研究进展. 华东昆虫学报, 15(3): 192–195.]
- Mackauer M, 1976. Genetic problems in the production of biological control agents. *Annual Review of Entomology*, 21: 369–385.
- Pu YC, Huang B, Hou YM, 2015. Inbreeding depression in captive-raised diamondback moths. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(5): 1244–1250. [蒲宇辰, 黄斌, 侯有明, 2015. 室内饲养的小菜蛾种群近交衰退分析. 应用昆虫学报, 52(5): 1244–1250.]
- Sun ZW, Fan JW, Wang KJ, Li Q, Guo MM, Zhang GX, Chen F, 2019. The present situation and prospect of larval culture of *Clanis bilineata tsingtauca*. *Development and Equipment*, 2019(5): 64–67. [孙中伟, 樊继伟, 王康君, 李强, 郭明明, 张广旭, 陈凤, 2019. 豆天蛾幼虫养殖现状与展望. 农业开发与装备, 2019(5): 64–67.]
- Tian H, 2009. Integrated control measures to the harms of soybean pest *Clanis bilineata tsingtauca*. *Journal of Nanyang Normal University*, 8(6): 58–60. [田华, 2009. 大豆害虫豆天蛾的危害与综合防治. 南阳师范学院学报, 8(6): 58–60.]
- Tian H, Zhang YM, 2009. Advances of integrated utilization on resource insect *Clanis bilineata tsingtauca*. *Guizhou Agricultural Sciences*, 37(6): 111–113. [田华, 张义明, 2009. 资源昆虫豆天蛾综合利用研究进展. 贵州农业科学, 37(6): 111–113.]
- Tian H, Zhang YM, 2012a. Amino acids and fatty acids analysis and evaluation of *Clanis bilineata tsingtauca* Mell. *Food Science and Technology*, 37(5): 68–70, 73. [田华, 张义明, 2012a. 豆天蛾氨基酸及脂肪酸分析与评价. 食品科技, 37(5): 68–70, 73.]
- Tian H, Zhang YM, 2012b. The anti-oxidant activity of polysaccharide CBP3 in *Clanis bilineata tsingtauca* Mell. *Food Science and Technology*, 37(6): 228–231. [田华, 张义明, 2012b. 豆天蛾多糖 CBP3 抗氧化活性研究. 食品科技, 37(6): 228–231.]
- Tian H, Zhang YM, 2012c. The nutritional components analysis and evaluation of *Clanis bilineata tsingtauca* Mell. *Acta Nutrimenta Sinica*, 34(3): 289–291. [田华, 张义明, 2012c. 豆天蛾主要营养成分分析及营养评价. 营养学报, 34(3): 289–291.]
- Wang XQ, Chen CQ, Zhao HE, 2002. Rearing *Clanis bilineata* in soybean field and its profit. *Entomological Knowledge*, 39(1): 30–33. [汪西强, 陈春秋, 赵虎, 2002. 豆天蛾的田间饲养量及效益研究. 昆虫知识, 39(1): 30–33.]
- Wright SI, Kalisz S, Slotte T, 2013. Evolutionary consequences of self-fertilization in plants. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1760): 20130133.
- Wu FZ, Lin HF, Liu ZH, Hu C, 2005. The situation and tactics of the utilization of *Tenebrio molitor*'s production in China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005(8): 1–4. [吴福中, 林华峰, 刘志红, 胡萃, 2005. 中国黄粉虫产品开发利用的现状及其对策. 中国农学通报, 2005(8): 1–4.]
- Xi JH, Chen YJ, Zhang XR, 2000. A list of Sphingidae in Jilin province. *Journal of Jilin Agricultural University*, 22(2): 38–40. [席景会, 陈玉江, 张秀荣, 2000. 吉林省天蛾科昆虫名录. 吉林农业大学学报, 22(2): 38–40.]
- Yan MH, 2001. *Clanis bilineata tsingtauca*-feed. *Journal of Biology*, 18(2): 33. [闫茂华, 2001. 豆天蛾的人工饲养. 生物学杂志, 18(2): 33.]
- Yue FZ, 2016. The research on degradation and rejuvenation of *Exorista civilis* adults (Diptera Tachinidae). Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [岳方正, 2016. 伞裙追寄蝇的退化及复壮研究. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Zhan YC, Li T, Chang JX, 2009. Extraction of oil and analysis of fatty acid composition of *Clanis bilineata tsingtauca*. *Food and Nutrition in China*, 2009(2): 52–54. [詹永成, 刘涛, 常金秀, 2009. 豆天蛾中油脂的提取及脂肪酸组成分析. 中国食物与营养, 2009(2): 52–54.]
- Zhu SY, Wu XQ, Ge JJ, He HG, Wang WB, 2014. Functional analysis of photolyase genes from *Clanis bilineata* nucleopolyhedrovirus and *Theretra japonica* nucleopolyhedrovirus. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 30(6): 1299–1303. [朱姗姗, 吴晓倩, 葛娇娇, 何华纲, 王文兵, 2014. 豆天蛾核型多角体病毒和雀纹天蛾核型多角体病毒光解酶基因的功能鉴定. 江苏农业学报, 30(6): 1299–1303.]
- Zhu YJ, Wang MQ, Li YY, Mao JJ, Zhang LS, Chen HY, Liu CX, 2020. Studies on the degradation of *Arma chinensis* population in indoor rearing. China Society of Plant Protection. Beijing: 122. [朱艳娟, 王孟卿, 李玉艳, 毛建军, 张礼生, 陈红印, 刘晨曦, 2020. 蠨蛸种群室内饲养退化规律的研究. 中国植物保护学会. 北京: 122.]