

日本刀角瓢虫卵巢发育分级及动态变化研究*

雷高科^{1,2,3**} 甫秋梅^{1,2,3} 丁雪玲^{1,2,3} 郑宇^{1,2,3}
何玉仙^{1,2,3} 姚凤鸾^{1,2,3***}

(1. 福建省农业科学院植物保护研究所, 福州 350013; 2. 福建省作物有害生物监测与治理重点实验室, 福州 350013;
3. 福建省作物有害生物绿色防控工程研究中心, 福州 350013)

摘要 【目的】建立日本刀角瓢虫 *Serangium japonicum* 雌成虫卵巢发育的形态学分级标准, 揭示动态变化规律, 为优化人工繁殖技术提供理论依据。【方法】采用显微解剖和形态学观察方法, 观察雌成虫羽化后 30 d 内卵巢发育状况, 测量卵巢管长度, 统计卵子数量, 建立卵巢发育分级标准, 并分析各发育指标间的相关性。【结果】雌成虫生殖系统呈双侧对称结构, 主要由卵巢、侧输卵管、中输卵管等组成。基于卵巢形态特征、卵巢管长度、卵黄沉积程度和卵子数量, 将卵巢发育划分为 5 个等级: I 级[透明期, 羽化第 1 天, 卵巢管长度 (477.50 ± 8.17) μm]、II 级[生长期, 羽化第 2 天, 卵巢管长度 (569.55 ± 26.20) μm]、III 级[卵黄沉积期, 羽化第 3-5 天, 卵巢管长度 (939.95 ± 17.34) μm , 未成熟卵子 12-34 个]、IV 级[产卵盛期, 羽化第 6-28 天, 卵巢管长度 ($1\,265.82 \pm 19.43$) μm , 未成熟卵子 10-48 个, 成熟卵子 0-7 个]、V 级[产卵末期, 羽化第 29-30 天, 卵巢管长度 ($1\,706.91 \pm 42.32$) μm , 未成熟卵子 4-12 个]。不同等级在卵巢管长度 ($P < 0.001$)、未成熟卵子数 ($P < 0.001$) 和成熟卵子数 ($P < 0.001$) 方面均存在显著差异。卵巢管长度随羽化天数呈现三阶段发育模式, 与羽化日龄呈强正相关。【结论】建立的 5 级分级标准科学准确, 卵巢管长度可作为判断发育等级的重要形态学指标, 研究结果为天敌昆虫日本刀角瓢虫的规模化生产和生物防治应用提供了理论支撑。

关键词 日本刀角瓢虫; 卵巢发育; 形态学特征; 分级标准; 天敌昆虫; 卵巢管长度

Classification and patterns of ovarian development in *Serangium japonicum*

LEI Gao-Ke^{1,2,3**} FU Qiu-Mei^{1,2,3} DING Xue-Ling^{1,2,3} ZHENG Yu^{1,2,3}
HE Yu-Xian^{1,2,3} YAO Feng-Luan^{1,2,3***}

(1. Institute of Plant Protection, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China;
2. Fujian Key Laboratory for Monitoring and Integrated Management of Crop Pests, Fuzhou 350013, China;
3. Fujian Engineering Research Center for Green Pest Management, Fuzhou 350013, China)

Abstract [Aim] To establish morphological criteria for classifying ovarian development in adult female *Serangium japonicum* and reveal dynamic patterns in the ovarian development of this species, thereby providing a theoretical foundation for optimizing artificial breeding techniques. [Methods] Microscopic dissection and morphological observation were used to examine ovarian development during the first 30 days post-eclosion. Ovariole length was measured, and oocyte numbers were quantified to establish classification criteria. Correlations among developmental parameters were analyzed. [Results] The reproductive system exhibited typical bilateral symmetry, comprising ovaries, lateral oviducts, a median oviduct, and a spermatheca. Based on ovarian morphology, ovariole length, yolk deposition, and oocyte number, ovarian development was

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金项目 (32372625); 福建省属公益类科研院所基本科研专项 (2025R1022002); 福建省自然科学基金青年创新基金项目 (2025J08102); 福建省农业科学院国家自然科学基金项目延伸研究项目 (GJYS202403); “5511” 协同创新工程 (XTCXGC2021011)

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

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: yaofengluan@126.com

收稿日期 Received: 2025-10-13; 接受日期 Accepted: 2026-04-27

classified into five distinct grades: Stage I [transparent period, day 1, ovariole length (477.50 ± 8.17) μm], Stage II [growth period, day 2, (569.55 ± 26.20) μm], Stage III [yolk deposition period, days 3-5, (939.95 ± 17.34) μm , 12-34 immature oocytes], Stage IV [peak oviposition period, days 6-28, ($1\ 265.82 \pm 19.43$) μm , 10-48 immature oocytes, 0-7 mature oocytes], and Stage V [late oviposition period, days 29-30, ($1\ 706.91 \pm 42.32$) μm , 4-12 immature oocytes]. Significant differences ($P < 0.001$) were observed among stages in ovariole length, and in immature and mature oocyte number. Ovariole length underwent a three-phase developmental pattern and showed strong positive correlation with days post-eclosion. **[Conclusion]** The five-grade classification system is scientifically robust, with ovariole length serving as a reliable indicator of developmental stage. These findings provide theoretical support for the mass rearing of *S. japonicum* Chapin for use as a biological control agent.

Key words *Serangium japonicum*; ovarian development; morphological classification; developmental stages; biological control; ovariole length

随着农业生产集约化程度提高和化学农药使用量日趋增加,生物防治已成为可持续农业发展和害虫综合治理体系的重要组成部分(Jaiswal *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2024a)。天敌昆虫是生物防治的核心要素,种群建立能力和持续控害效能主要取决于其繁殖潜能和生殖适应性(罗丽林和李莉, 2018; Mills, 2018)。卵巢作为昆虫主要的生殖器官,发育进程反映个体的生理状态和繁殖潜能,并受环境条件、营养水平和激素调节等多种因素影响(Gao *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2023)。深入研究天敌昆虫卵巢发育的形态特征和时间动态,对理解繁殖策略、预测种群动态和优化人工饲养技术具有重要理论价值(Liu *et al.*, 2023)。

瓢虫科 Coccinellidae 天敌昆虫捕食能力强、环境适应性广、繁殖力高,在生物防治体系中发挥关键作用(李浩森和庞虹, 2021)。目前,瓢虫卵巢发育研究主要集中于七星瓢虫 *Coccinella septempunctata*、异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 等大型种类,已基本阐明了卵巢发育的一般规律(张天澍等, 2009; 陈洁等, 2015)。然而,不同瓢虫种类的生殖系统结构存在显著差异,尤其体现在卵巢管数量上:大型瓢虫如七星瓢虫卵巢管多达 96 根且左右常不对称,异色瓢虫平均 58 根;中型种类如孟氏隐唇瓢虫 *Cryptolaemus montrouzieri* 为 22-28 根,龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 为 16-24 根;而小型瓢虫如小黑瓢虫 *Delphastus catalinae* 每侧仅 4 根且左右对称(尚玉昌等, 1980; 张天澍等, 2009; 刘其全等, 2010;

陈洁等, 2015; 刘志伟等, 2016)。这种结构上的差异意味着基于大型瓢虫建立的分级标准可能不适用于小型瓢虫。此外,已有研究多集中于卵巢初步发育至产卵盛期阶段(尚玉昌等, 1980; 任淑仙等, 1981),对产卵后期的形态学变化关注不足。系统研究小型瓢虫卵巢发育全周期的形态学特征,对全面解析瓢虫生殖生物学规律具有重要意义。

日本刀角瓢虫 *Serangium japonicum* 对烟粉虱 *Bemisia tabaci*、柑橘粉虱 *Dialeurodes citri* 和黑刺粉虱 *Aleurocanthus camelliae* 等多种粉虱具有良好的控制效果(Li *et al.*, 2015; Ozawa and Uchiyama, 2016; Kaneko, 2017; Yao *et al.*, 2021)。该虫捕食效率高、发育周期短、成虫寿命长且繁殖力强(Sun *et al.*, 2017),是害虫综合防治策略的重要组成部分(田密等, 2020)。随着烟粉虱等刺吸式害虫全球性暴发和抗药性不断增强(Xue *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024),日本刀角瓢虫作为重要天敌的研究价值日益凸显。虽然已有关于日本刀角瓢虫生物学特性、捕食功能和人工繁殖等方面的研究(丁雪玲等, 2019; Yao *et al.*, 2019, 2020; 田密等, 2020; 梅文娟等, 2022),但其卵巢发育的形态特征和动态规律仍缺乏系统研究。

基于上述背景,本研究以日本刀角瓢虫雌成虫为对象,采用显微解剖和形态学观察方法,系统研究其卵巢发育的结构特征和阶段变化。主要研究目标包括:(1)描述日本刀角瓢虫雌成虫内生殖系统的基本形态结构;(2)建立基于形

态学特征的卵巢发育分级标准; (3) 揭示卵巢发育过程中卵巢管长度、卵子数量等关键指标的时间动态变化规律; (4) 分析各发育指标间的相关性。本研究不仅有助于深入理解日本刀角瓢虫繁殖生物学特征, 为该天敌昆虫的高效利用和规模化生产提供理论支撑, 还可为其他小型瓢虫相关研究提供方法学参考, 推动天敌昆虫繁殖生物学研究发展。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

供试日本刀角瓢虫于 2009 年采自福建省福州市郊区甘薯田 ($26^{\circ}13'N$, $119^{\circ}34'E$), 经鉴定确认后在实验室建立种群。所有瓢虫均在恒温恒湿气候箱 (MGC-450HP-2, 上海一恒科学仪器有限公司) 中饲养, 条件为温度 (26 ± 1) $^{\circ}C$ 、相对湿度 $60\%\pm 5\%$ 、光周期 14 L : 10 D。2009-2017 年期间以接种烟粉虱的棉花 *Gossypium hirsutum* 幼苗连续饲养 120 代; 2018-2020 年改用接种烟粉虱的茄子 *Solanum melongena* 幼苗继续饲养 22 代。瓢虫接种密度严格控制为每株寄主植物 8-10 头成虫。试验期间, 供试雌成虫以接种于茄子幼苗上的烟粉虱卵和若虫 (混合虫态) 为食, 每 2 d 更换一次带虫植株, 始终保持猎物足量供给, 确保营养条件不成为卵巢发育的限制因素。

1.2 卵巢发育观察

日本刀角瓢虫雌雄成虫外部形态差异不明显, 需通过解剖鉴定性别。在体视显微镜下 (SZM45-BL3, 舜宇光学科技集团, 宁波, 中国), 用解剖针极其轻柔地按压成虫腹部末端, 仅通过观察微露的外生殖器来鉴定性别, 避免对内部生殖器官造成机械损伤。试验前对大批羽化成虫进行性别鉴定和标记, 仔细剔除疑似受损、畸形或活力弱的个体。供试雌成虫羽化后均与雄成虫按 1 : 1 比例混合饲养, 确保所有供试个体均为已交配状态。自雌成虫羽化当日 (第 1 天) 起, 每隔 24 h 随机选取 3 头雌成虫进行解剖观察, 连续观察 30 d, 共计解剖 90 头雌虫。卵巢解剖在

PBS 缓冲液 (pH 7.2-7.4) 中进行, 参照小黑瓢虫的解剖方法 (刘其全等, 2010)。从头胸连接处沿翅间缝隙分离腹部背板, 取出完整卵巢并清除周围组织。利用体视显微镜和体视荧光显微镜数码成像系统 (M205FA, 徕卡, 韦茨拉尔, 德国) 观察并记录卵巢形态。采用 ImageJ 软件测量卵巢管长度, 测量起止点为卵巢管顶端 (端丝处) 至与侧输卵管连接处的基底。解剖过程中未见卵巢管退化或明显不对称发育情况。每头雌虫左右两侧所有卵巢管 (每侧 4 根, 共 8 根) 逐一测量后取平均值, 测量时避免组织压扁或过度拉伸。同时统计卵巢中未成熟卵子和成熟卵子的总数量 (累计存在量, 非当日新增量)。未成熟卵子定义为: 卵黄沉积未完全充满卵室或卵壳结构尚未完整形成的卵子; 成熟卵子定义为: 卵黄沉积完全充满整个卵室且卵壳结构完整、可随时排出的卵子。对于刚开始沉积卵黄或卵壳尚未完全硬化等界限不明显的中间过渡状态的卵子, 均统一保守归类为未成熟卵子。每日数据为当日解剖的 3 头雌虫测量值的平均值。借鉴七星瓢虫 (尚玉昌等, 1980) 和小黑瓢虫 (刘其全等, 2010) 卵巢发育分级的基本原理, 结合日本刀角瓢虫的形态学特征, 综合卵巢管长度、卵黄沉积程度和卵子数量等指标, 建立适用于该物种的卵巢发育分级标准。

1.3 数据分析

采用 R 软件 (R 4.1.0) 进行统计分析, 采用 GraphPad Prism 8 (GraphPad Software, San Diego, CA, USA) 绘制卵巢管长度、未成熟与成熟卵子数随羽化天数的发育动态曲线。回归分析中分别比较了线性、二次多项式和三次多项式模型的拟合效果, 依据拟合优度 (R^2) 选择最优模型。运用 Pearson 相关分析检验各测量指标间的相关性, 相关性强度判断标准为: $|r| > 0.7$ 为强相关, $0.3 \leq |r| \leq 0.7$ 为中等相关, $|r| < 0.3$ 为弱相关 (Ratner, 2009)。本研究采用破坏性取样, 每头雌虫仅解剖观察一次, 各观测值来自不同个体, 相互独立。按发育等级合并不同日龄数据进行单因素方差分析 (One-way ANOVA)

时,以个体为独立重复单位,满足方差分析的独立性假设。组间差异显著时采用 Tukey's HSD 进行多重比较。所有检验显著性水平设为 $\alpha=0.05$,数据以平均值 $\pm$ 标准误表示。

2 结果与分析

2.1 雌成虫内生殖系统基本形态结构

日本刀角瓢虫雌成虫生殖系统呈双侧对称结构,主要由卵巢、侧输卵管、中输卵管、受精囊、端丝、生殖板和生殖腔组成(图1)。每侧卵巢由多个卵泡构成,卵泡呈椭圆形,沿卵巢管

排列呈串珠状。卵巢管顶部具端丝,通过端丝相互缠绕聚拢,形成特有的端滋式结构。卵母细胞继续分裂发育,逐渐沉积卵黄,形成卵黄膜和卵壳,成熟后通过侧输卵管进入中输卵管,该结构作为卵子向下游输送的主要通道。生殖系统后部包括生殖腔、生殖板等结构,其中生殖腔为卵子受精和产出提供场所,生殖板则起到保护和支撑作用。雌性虫具有发达的球形受精囊,位于输卵管系统侧方,能够长期储存雄性配子。此外,卵室结构的存在表明卵子在产出前可能经历进一步的生理调节过程。

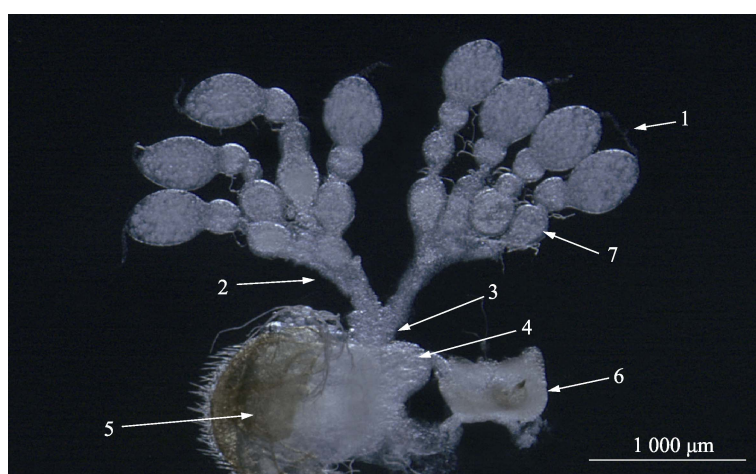


图1 日本刀角瓢虫雌成虫内生殖系统基本形态结构

Fig. 1 The reproductive system in adult female *Serangium japonicum*

1: 端丝; 2: 侧输卵管; 3: 中输卵管; 4: 生殖腔; 5: 生殖板; 6: 受精囊; 7: 卵室。

1: Terminal filament; 2: Lateral oviduct; 3: Median oviduct; 4: Genital chamber; 5: Genital plate; 6: Spermatheca; 7: Egg chamber.

2.2 卵巢发育分级标准

基于卵巢形态特征、卵巢管长度、卵黄沉积程度和卵子数量等指标,将日本刀角瓢虫卵巢发育划分为5个等级(图2:A-E)。不同发育等级在卵巢管长度($F_{4,85}=59.62$, $P<0.001$)、未成熟卵子数($F_{4,85}=15.54$, $P<0.001$)和成熟卵子数($F_{4,85}=12.42$, $P<0.001$)均存在显著差异。多重比较分析(Tukey's HSD)表明,卵巢管长度随发育等级递增呈上升趋势,但I级与II级间差异不显著($P=0.940$),II级与III级间差异显著($P=0.003$),III级与IV级、IV级与V级间差异均极显著(P 均 <0.001)。未成熟卵子

数在I、II和V级间差异不显著(I vs II: $P=0.899$; I vs V: $P=0.664$; II vs V: $P=0.998$),III级与IV级间差异不显著($P=0.998$),但III、IV级分别与I、II、V级间均存在显著差异($P\leq 0.010$)。成熟卵子仅在IV、V级卵巢中出现,且IV级显著高于V级($P<0.001$)(表1)。结果表明,日本刀角瓢虫卵巢发育呈现明显的阶段性特征,卵巢管长度可作为判断发育等级的重要形态学指标,而成熟卵子的出现标志着卵巢进入功能成熟阶段。

I级(透明期):出现在羽化第1天,卵巢透明无色,卵巢管短小直立,长度为(477.50 ± 8.17) μm ,尚未出现卵室结构(图2:A)。

表 1 日本刀角瓢虫不同卵巢发育等级的形态学指标比较

Table 1 Morphological parameters of <i>Serangium japonicum</i> at different ovarian developmental stages				
发育等级	羽化天数 (d)	卵巢管长度 (μm)	未成熟卵子数	成熟卵子数
Development stages	Day after eclosion (d)	Ovariole length (μm)	Immature oocytes number	Mature oocytes number
I 级 Stage I	1	477.50±8.17 d	0.00±0.00 b	0.00±0.00 b
II 级 Stage II	2	569.55±26.20 d	6.00±1.00 b	0.00±0.00 b
III 级 Stage III	3-5	939.95±17.34 c	24.44±2.33 a	0.00±0.00 b
IV 级 Stage IV	6-28	1 265.82±19.43 b	25.33±1.06 a	2.62±0.19 a
V 级 Stage V	29-30	1 706.91±42.32 a	7.83±1.08 b	0.63±0.26 b

数据为平均值±标准误。同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$, Tukey's HSD 检验)。III 级数据为第 3-5 天的平均值 ($n=9$)；IV 级数据为第 6-28 天的平均值 ($n=69$)；V 级数据为第 29-30 天的平均值 ($n=6$)。

Values are mean ± SE, and followed by different lowercase letters within a column indicate significant difference ($P < 0.05$, Tukey's HSD test). Data for Grades III, IV, and V represent averages from days 3-5 ($n=9$), 6-28 ($n=69$), and 29-30 ($n=6$) post-eclosion, respectively.

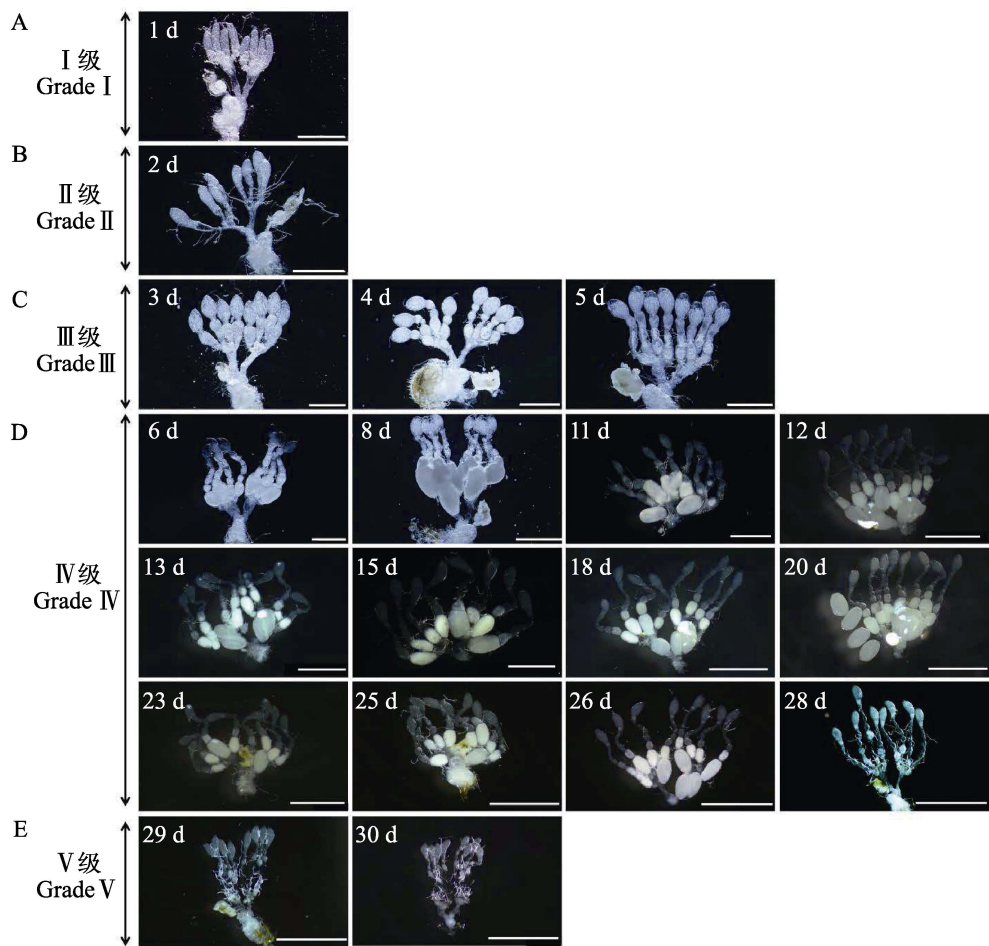


图 2 日本刀角瓢虫卵巢发育分级标准与特征

Fig. 2 Classification and characteristics of ovarian development in *Serangium japonicum*

A. 透明期 (I 级); B. 生长期 (II 级); C. 卵黄沉积期 (III 级); D. 产卵盛期 (IV 级); E. 产卵末期 (V 级)。标尺=1 000 μm。A. Transparent period (stage I); B. Growth period (stage II); C. Yolk deposition period (stage III); D. Peak oviposition period (stage IV); E. Late oviposition period (stage V). Scale bar = 1 000 μm.

Ⅱ级（生长期）：出现在羽化第2天，卵巢呈乳白色，卵巢管增长增粗至（ 569.55 ± 26.20 ） μm ，生殖区充满滋养细胞和卵母细胞，出现4-7个未成熟卵子（图2：B）。

Ⅲ级（卵黄沉积期）：出现在羽化第3-5天，卵巢呈浅黄色，卵巢管长度达（ 939.95 ± 17.34 ） μm ，卵室膨胀增大，含12-34个未成熟卵子，开始卵黄沉积（图2：C）。

Ⅳ级（产卵盛期）：从羽化第6天开始，卵巢呈黄色，卵巢管长度为（ $1\,265.82 \pm 19.43$ ） μm ，卵室继续膨胀，管壁变薄，含10-48个未成熟卵子和0-7个成熟卵子，卵黄大量沉积（图2：D）。

Ⅴ级（产卵末期）：出现在羽化第29天后，卵巢大部分呈浅黄色，卵巢管长度达（ $1\,706.91 \pm 42.32$ ） μm ，细胞增殖分化速率减少，卵黄沉积减少，含4-12个未成熟卵子（图2：E）。

2.3 卵巢发育动态变化

羽化后30 d内，卵巢管长度随羽化天数的变化符合三次多项式回归模型： $y=452.9+127.8x-7.34x^2+0.15x^3$ （图3：A），该模型拟合优度（ $R^2=0.956$ ）明显优于线性模型（ $R^2=0.874$ ）和二次多项式模型（ $R^2=0.879$ ），能准确反映卵巢管长度的三阶段增长特征。卵巢管平均长度与羽化日龄呈极强正相关（表2）。发育过程呈现早期稳步增长（羽化前5 d，约500-1 000 μm ，Ⅰ-Ⅲ级发育阶段）、中期增长放缓（第6-20天，

Ⅳ级产卵盛期前期）、后期再次快速增长（第21-30天，Ⅳ级产卵盛期后期至Ⅴ级产卵末期）的三阶段发育模式，至第30天可达1 800 μm 以上（图3：B）。

未成熟卵子数在羽化第2天开始出现，第3-5天达到峰值（约30粒），随后在产卵期维持动态平衡，波动范围为10-40粒（图3：B）。未成熟卵子数与羽化日龄相关性不显著（ $r=0.293$ ， $P=0.115$ ），表明其数量变化主要受产卵活动调节（表2）。

成熟卵子从羽化第6天开始出现，呈现明显的周期性波动特征（图3：B）。成熟卵子数与羽化日龄呈显著正相关（ $r=0.464$ ， $P=0.010$ ）（表2），在产卵期内出现多个峰值，反映了间歇性产卵的生物学特性。

3 讨论

本研究建立了日本刀角瓢虫卵巢发育的5级分级标准，各等级间主要指标差异显著，分级体系具有良好的区分度和实用性。以下从分级方法的比较与适用性、繁殖策略的生态适应机制等方面展开讨论。

瓢虫卵巢发育分级有多种方法。尚玉昌等（1980）综合卵巢管长度、卵黄沉积程度和卵室发育状况等指标，将七星瓢虫卵巢发育划分为7个等级；任淑仙等（1981）主要根据卵母细胞发

表2 日本刀角瓢虫卵巢发育参数的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of ovarian development parameters in *Serangium japonicum*

参数 Parameter	羽化天数 Day after eclosion	卵巢管长度 Ovariolo length	未成熟卵子数 Immature oocytes number	成熟卵子数 Mature oocytes number
羽化天数 Day after eclosion	1	0.935 (<0.001) *	0.293 (0.115)	0.464 (0.010) *
卵巢管长度 Ovariolo length	0.935 (<0.001) *	1	0.364 (0.048) *	0.407 (0.025) *
未成熟卵子数 Immature oocytes number	0.293 (0.115)	0.364 (0.048) *	1	0.460 (0.010) *
成熟卵子数 Mature oocytes number	0.464 (0.010) *	0.407 (0.025) *	0.460 (0.010) *	1

数值表示皮尔逊相关系数，括号内为P值。*表示差异显著（ $P < 0.05$ ，双尾t检验）。

Values represent Pearson correlation coefficients with P-value shown in parentheses. Asterisks indicate statistically significant correlations ($P < 0.05$, two-tailed t-test).

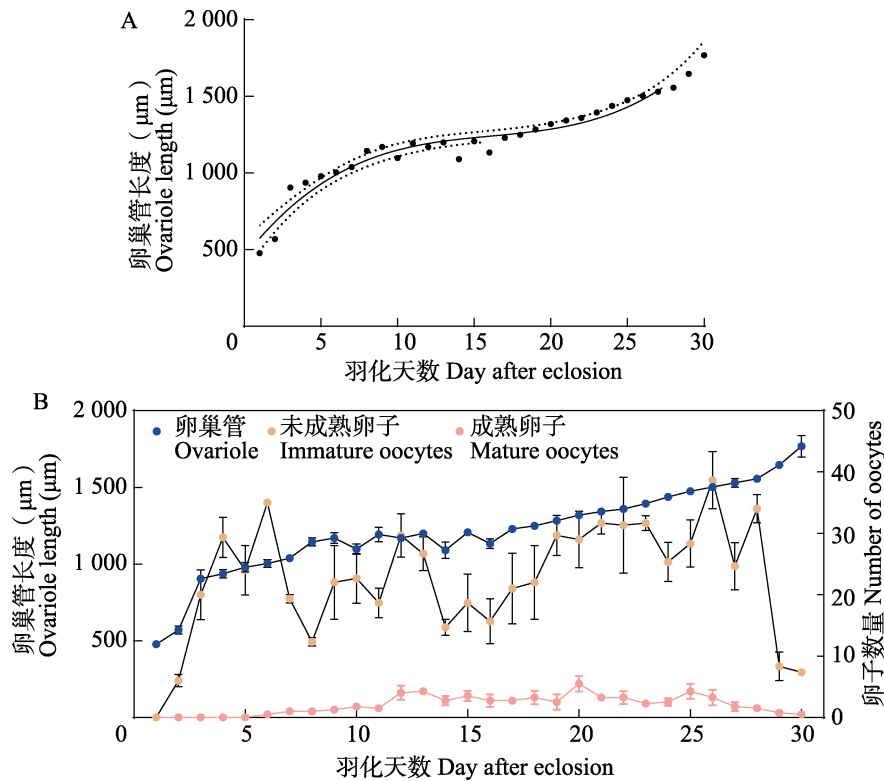


图3 日本刀角瓢虫卵巢发育动态变化

Fig. 3 Dynamic changes in ovarian development of *Serangium japonicum*

A. 卵巢管长度与羽化天数的回归分析。黑色实点为实测数据，实线为拟合曲线，虚线为95%置信区间。

B. 羽化后30 d内卵巢管长度及卵子数量的时间序列变化。图中数据为平均值±标准误 ($n=3$)。

A. Regression analysis of ovariole length against days post-eclosion. Black solid circles represent observed data points, the solid line indicates the fitted regression curve, and dashed lines represent 95% confidence intervals. B. Time-series changes in ovariole length and oocytes number within 30 d post-eclosion. Data in the figure represent mean $\pm$ SE ($n=3$).

育情况将卵巢发育分为3个时期9个阶段;近年来张天澍等(2009)、刘志伟等(2016)多基于卵母细胞发育状况进行6-7级分级。然而,基于卵母细胞发育进行分级的方法在应用于小型瓢虫时面临挑战。日本刀角瓢虫发育节律快,从卵黄沉积期到产卵盛期仅需3 d,显著短于七星瓢虫的5-16 d(尚玉昌等,1980),传统形态学观察难以准确区分快速过渡阶段间的微妙差异。因此,本研究采用综合性分级策略,以卵巢管长度为核心指标,结合卵黄沉积程度和卵子数量进行分级判定,可操作性强,适用于小型瓢虫的快速评估。此外,已有研究多集中于卵巢初步发育至产卵盛期阶段(尚玉昌等,1980;任淑仙等,1981),本研究将观察期延长至产卵末期,揭示了产卵后期卵巢管持续增长而成熟卵子数量显

著减少的现象,反映了小型瓢虫在生殖衰退期的资源分配变化。

瓢虫卵巢管数量与体型存在明显的正相关关系,从七星瓢虫(96根)、异色瓢虫(58根),到龟纹瓢虫(16-24根),再到日本刀角瓢虫(恒定8根),体现了不同体型瓢虫繁殖策略的分化(张天澍等,2009;陈洁等,2015;刘志伟等,2016)。日本刀角瓢虫虽卵巢管数量有限,但仍保持完整的端滋式结构,且能维持数百粒的产卵量(丁雪玲等,2019),表明其通过提高单个卵巢管效率来补偿数量劣势。

瓢虫属于典型的 synovigenic 类型,即雌成虫羽化时卵巢内无成熟卵子,需通过持续的卵子发生来维持繁殖能力(Jervis *et al.*, 2002)。日本刀角瓢虫的主要猎物烟粉虱等在时空分布上

表现出高度不可预测性 (Ferreira Rodrigues *et al.*, 2022), 这种繁殖策略使其能在猎物密度剧烈变化的环境中维持稳定的繁殖输出。本研究中未成熟卵子数量与羽化日龄间无显著相关性, 在羽化第 3-5 天迅速增至峰值后维持相对稳定, 表明该虫能够维持固定的未成熟卵子库作为繁殖储备, 为根据环境条件动态调节产卵节律提供生理基础。卵巢管长度则与羽化日龄呈显著正相关关系, 各发育等级间均差异显著, 可作为快速评估雌成虫生理发育状态的可靠形态学标准。

从应用角度来看, 烟粉虱等小型害虫世代周期短、繁殖速度快 (Xia *et al.*, 2021; Milenovic *et al.*, 2023), 日本刀角瓢虫较短的卵巢发育时间使其能在害虫暴发初期迅速建立数量优势。基于本研究结果, 建议将Ⅳ级雌成虫 (卵巢管长度 $1\,265.82 \pm 19.43\, \mu\text{m}$) 作为田间释放的最适发育阶段, 此时繁殖潜能最高。

在试验设计方面, 本研究每日解剖 3 头雌成虫的取样方案主要受限于日本刀角瓢虫体型微小 (1.7-2.0 mm)、雌雄外部形态无差异、性别鉴定需逐一操作等技术因素, 大量获取同日龄已知性别雌成虫的难度较大。尽管如此, 本研究连续观察 30 d, 累计解剖 90 头雌虫, 涵盖卵巢发育全周期, 各发育等级的统计分析结果显示指标间差异显著。但该样本量仍存在一定局限, 尤其是Ⅰ级 ($n=3$) 和Ⅱ级 ($n=3$) 阶段样本量偏少, 后续研究应在条件允许时增大每日取样量, 以进一步提高结果的稳健性。

此外, 本研究基于标准实验室条件获得的基础数据, 自然环境中温度波动、营养状况及种间竞争等因子会对卵巢发育产生复杂影响 (Agyekum *et al.*, 2022; Tiwari *et al.*, 2024; 姜婉凝等, 2025), 未来研究应重点关注环境因子对卵巢发育的影响机制。同时, 本研究主要依赖形态学观察手段, 缺乏对分子调控机制的深入探讨。随着保幼激素、蜕皮激素、卵黄蛋白原等关键调控因子作用机制的逐渐明确 (Wu *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2024b), 今后应结合转录组学、蛋白质组学等手段, 深入解析日本刀角瓢虫卵巢发育的分子调控网络。

参考文献 (References)

- Agyekum TP, Arko-Mensah J, Botwe PK, Hogarh JN, Issah I, Dwomoh D, Billah MK, Dadzie SK, Robins TG, Fobil JN, 2022. Effects of elevated temperatures on the development of immature stages of *Anopheles gambiae* (s.l.) mosquitoes. *Tropical Medicine & International Health*, 27(4): 338–346.
- Chen J, Wu CJ, Zhang QW, Ma Z, Sun HK, He YZ, 2015. Ovarian development and oogenesis of *Harmonia axyridis* Pallas. *Journal of Plant Protection*, 42(2): 237–243. [陈洁, 吴春娟, 张青文, 马卓, 孙海昆, 何运转, 2015. 异色瓢虫卵巢发育及卵子发生过程观察. 植物保护学报, 42(2): 237–243.]
- Ding XL, Yao FL, Zheng Y, Lu XS, He YX, 2019. Effects of two alternative prey species on development and fecundity of *Serangium japonicum* (Coleoptera: Coccinellidae). *Chinese Journal of Biological Control*, 35(6): 855–860. [丁雪玲, 姚凤鑫, 郑宇, 卢学松, 何玉仙, 2019. 两种替代猎物对日本刀角瓢虫生长发育及生殖力的影响. 中国生物防治学报, 35(6): 855–860.]
- Ferreira Rodrigues RH, Silva LB, Silva MCF, Batista Lopeset JW, Lima EA, Barbosa RS, Oliveira Almeida LF, 2022. Population fluctuation and distribution of *Bemisia tabaci* MEAM1 (Hemiptera: Aleyrodidae) in soybean crops. *Frontiers in Agronomy*, 4: 958498.
- Gao J, Wang J, Chen H, 2021. Ovary structure and oogenesis of *Trypophloeus klimeschi* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *Insects*, 12(12): 1099.
- Jaiswal DK, Gawande SJ, Soumia PS, Krishna R, Vaishnav A, Ade AB, 2022. Biocontrol strategies: An eco-smart tool for integrated pest and diseases management. *BMC Microbiology*, 22(1): 324.
- Jervis MA, Heimpel GE, Ferns PN, Harvey JA, Kidd NAC, 2002. Life - history strategies in parasitoid wasps: A comparative analysis of 'ovigeny'. *Journal of Animal Ecology*, 70(3): 442–458.
- Jiang WN, Wang XC, Zheng WQ, Zhang LJ, Wang J, Zhao Y, Zhang JJ, 2025. Effects of yacon and tobacco on the morphology and oogenesis of the parasitic wasp *Encarsia formosa*. *Journal of Plant Protection*, 52(2): 437–445. [姜婉凝, 王晓聪, 郑维琪, 张凌峻, 王晶, 赵悦, 张俊杰, 2025. 雪莲果和烟草对丽蚜小蜂个体及其卵子发生的影响. 植物保护学报, 52(2): 437–445.]
- Kaneko S, 2017. Seasonal and yearly change in adult abundance of a predacious ladybird *Serangium japonicum* (Coleoptera: Coccinellidae)

- and the citrus whitefly *Dialeurodes citri* (Hemiptera: Aleyrodidae) in citrus groves. *Applied Entomology and Zoology*, 52(3): 481–489.
- Li HS, Pang H, 2021. Next generation biological control and its research progress in predatory ladybird beetles. *Journal of Environmental Entomology*, 43(3): 613–622. [李浩森, 庞虹, 2021. 新一代生物防治及其在天敌瓢虫中的研究进展. 环境昆虫学报, 43(3): 613–622.]
- Li P, Chen QZ, Liu TX, 2015. Effects of a juvenile hormone analog, pyriproxyfen, on *Serangium japonicum* (Coleoptera: Coccinellidae), a predator of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Biological Control*, 86: 7–13.
- Li YP, Mbata GN, Simmons AM, Shapiro-Ilan DI, Wu SH, 2024. Management of *Bemisia tabaci* on vegetable crops using entomopathogens. *Crop Protection*, 180: 106638.
- Liu QQ, Sun L, Xu GP, Wang ZH, Huang J, 2010. Anatomical observation of the reproductive system of *Delphastus catalinae* (Horn). *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 39(5): 460–464. [刘其全, 孙莉, 徐桂萍, 王竹红, 黄建, 2010. 小黑瓢虫生殖系统的解剖观察. 福建农林大学学报(自然科学版), 39(5): 460–464.]
- Liu X, Guo X, Feng Y, Zhang L, Wang M, Li Y, Mao J, 2023. Morphology of the male reproductive system and sperm ultrastructure of the green lacewing, *Chrysopa pallens* (Rambur, 1838) (Neuroptera: Chrysopidae). *BMC Zoology*, 8(1): 15.
- Liu ZW, Zhang C, Qiu BL, Wang XM, 2016. Reproductive system and oogenesis of *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant (Coccinellidae: Coleoptera). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(2): 381–389. [刘志伟, 张灿, 邱宝利, 王兴民, 2016. 孟氏隐唇瓢虫生殖系统结构和卵子发生的研究. 应用昆虫学报, 53(2): 381–389.]
- Luo LL, Li L, 2018. Research progress on adaptive reproductive behavior strategies of parasitic wasps. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 47(6): 7–12. [罗丽林, 李莉, 2018. 寄生蜂适应性生殖行为策略的研究进展. 河南农业科学, 47(6): 7–12.]
- Milenovic M, Eickermann M, Junk J, Rapisarda C, 2023. Life history parameters of *Bemisia tabaci* MED (Hemiptera: Aleyrodidae) in the present and future climate of central Europe, predicted by physically realistic climatic chamber simulation. *Environmental Entomology*, 52(3): 502–509.
- Mei WJ, Lin S, Zhang QR, Ding XL, Zheng Y, Lu XS, Yao FL, He YX, Weng QY, 2022. Oviposition preference of *Serangium japonicum* (Coleoptera: Coccinellidae) to different tomato varieties and its influencing factors. *Acta Entomologica Sinica*, 65(6): 757–771. [梅文娟, 林硕, 张前荣, 丁雪玲, 郑宇, 卢学松, 姚凤奎, 何玉仙, 翁启勇, 2022. 日本刀角瓢虫对不同番茄品种的产卵选择性及其影响因素. 昆虫学报, 65(6): 757–771.]
- Mills NJ, 2018. An alternative perspective for the theory of biological control. *Insects*, 9(4): 131.
- Ozawa A, Uchiyama T, 2016. Effects of pesticides on adult ladybird beetle *Serangium japonicum* (Coleoptera: Coccinellidae), a potential predator of the tea spiny whitefly *Aleurocanthus camelliae* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology*, 60(1): 45–49.
- Ratner B, 2009. The correlation coefficient: Its values range between +1/–1, or do they? *Journal of Targeting, Measurement and Analysis for Marketing*, 17(2): 139–142.
- Ren SX, Li YT, Xu J, 1981. Oogenesis in *Coccinella septempunctata* L. *Acta Entomologica Sinica*, 24(3): 268–273. [任淑仙, 李燕婷, 徐筠, 1981. 七星瓢虫卵子发生的观察. 昆虫学报, 24(3): 268–273.]
- Shang YC, Cai XM, Yan JJ, 1980. Research on the natural enemy of aphids-ladybug *Coccinella septempunctata* L. II. *Classification criteria* for ovarian development of *Coccinella septempunctata* and the ecological significance of studying ovarian development. *Natural Enemies of Insects*, 2: 7–10. [尚玉昌, 蔡晓明, 阎浚杰, 1980. 蚜虫天敌-七星瓢虫 *Coccinella septempunctata* L. 的研究 - II. 七星瓢虫卵巢发育的分级标准及研究卵巢发育的生态学意义. 昆虫天敌, 2: 7–10.]
- Sun YX, Hao YN, Riddick EW, Liu TX, 2017. Factitious prey and artificial diets for predatory lady beetles: Current situation, obstacles, and approaches for improvement: A review. *Biocontrol Science and Technology*, 27(5): 601–619.
- Tian M, Zhang SZ, Liu TX, 2020. Advances in research on the biology and ecology of *Serangium japonicum* Chapin, a predator of *Bemisia tabaci* (Gennadius). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(4): 800–805. [田密, 张世泽, 刘同先, 2020. 烟粉虱天敌日本刀角瓢虫生物生态学研究进展. 应用昆虫学报, 57(4): 800–805.]
- Tiwari RS, Bhaisare LY, Pathak S, Kumar B, Chaudhary DD, 2024. Biotic factors as key determinants for ovarian and oothecal developmental plasticity of a tortoise beetle. *Zoology*, 167: 126225.
- Wang M, Li H, Zhang W, Zhuo F, Li T, Lowry A, Zhang A, 2023. Reproduction system development of *Ceracris kiangsu* Tsai

- female adults and its relationship with fitness characteristics. *Frontiers in Physiology*, 14: 1136559.
- Wu Z, Yang L, He Q, Zhou S, 2021. Regulatory mechanisms of vitellogenesis in insects. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 8: 593613.
- Xia J, Guo Z, Yang Z, Han H, Wang S, Xu H, Yang X, Yang F, Wu Q, Xie W, Zhou X, Dermauw W, Turlings TCJ, Zhang Y, 2021. Whitefly hijacks a plant detoxification gene that neutralizes plant toxins. *Cell*, 184(7): 1693–1705.
- Xue H, Fu B, Huang M, He C, Liang J, Yang J, Wei X, Liu S, Du T, Ji Y, Yin C, Gong P, Hu J, Du H, Zhang R, Wang C, Khajehali J, Su Q, Yang X, Zhang Y, 2023. CYP6DW3 metabolizes imidacloprid to imidacloprid-urea in whitefly (*Bemisia tabaci*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(5): 2333–2343.
- Yao FL, Zheng Y, Ding XL, Zhao JW, Lu XS, Desneux N, He YX, Weng QY, 2019. Effects of heat shock on survival and predation of an important whitefly predator, *Serangium japonicum*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 167(5): 476–489.
- Yao FL, Ding XL, Mei WJ, Zheng Y, Desneux N, He YX, Weng QY, 2020. Impact of heat stress on the development of egg and adult coccinellid *Serangium japonicum*: Evidence for cross-stage and cross-generation effects. *Entomologia Generalis*, 40(4): 365–376.
- Yao FL, Lin S, Wang LX, Mei WJ, Monticelli LS, Zheng Y, Desneux N, He YX, Weng QY, 2021. Oviposition preference and adult performance of the whitefly predator *Serangium japonicum* (Coleoptera: Coccinellidae): Effect of leaf microstructure associated with ladybeetle attachment ability. *Pest Management Science*, 77(1): 113–125.
- Zhang TS, Li K, Zhang LL, Wang B, 2009. Oogenesis in *Propylea japonica* (Thunberg). *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 37(3): 175–180. [张天澍, 李恺, 张丽莉, 王斌, 2009. 龟纹瓢虫 (*Propylea japonica* Thunberg) 卵子发生的组织学研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 37(3): 175–180.]
- Zhou W, Arcot Y, Medina RF, Bernal J, Cisneros-Zevallos L, Akbulut MES, 2024a. Integrated pest management: An update on the sustainability approach to crop protection. *ACS Omega*, 9(40): 41130–41147.
- Zhou H, Lei G, Li Y, Chen P, Liu Z, Li C, Li B, 2024b. Novel regulation pathway of eclosion hormones in *Tribolium castaneum* by distinct transcription factors through the initiation of 20-hydroxyecdysone. *Journal of Biological Chemistry*, 300(11): 107898.