

黄缘螺赢筑巢因素对子代性别分配的影响*

李 瑶^{1**} 陆海霞^{1***} 刘邦友² 罗晓洪² 朱朝东^{3,4} 郭鹏飞^{1***}

(1. 贵州中医药大学药学院, 贵阳 550025; 2. 赤水桫欏国家级自然保护区管理局, 遵义 564799;

3. 中国科学院大学, 生命科学学院, 北京 100049; 4. 中国科学院动物研究所,

动物多样性保护与有害动物防控全国重点实验室, 北京 100101)

摘 要 【目的】本研究以赤水桫欏国家级自然保护区内黄缘螺赢 *Anterhynchium flavomarginatum* 为研究对象, 探讨筑巢时间和巢管内径对其子代数量和性别分配的影响。【方法】通过人工巢穴技术收集黄缘螺赢筑巢巢穴, 对其进行系统地观察记录, 分析其子代性比及巢室数量分布, 并用 Wilcoxon 秩和检验进行验证。【结果】共收集 2023 年独栖蜂筑巢巢管 1 741 个, 其中黄缘螺赢筑巢巢管共计 1 471 个, 占比 84.5%, 其猎物为鳞翅目草螟科和螟蛾科的幼虫。亲代黄缘螺赢 6 月筑巢子代雌雄比最高 (2.00), 8 月最低 (0.79); 巢室数量 10 月最多, 6 月最少; 8 月子代雄性数量最多且显著多于 6 月 ($P<0.001$), 10 月子代雌性数量最多且显著多于 6 月 ($P<0.001$) 和 9 月 ($P=0.031$)。亲代对巢管内径的选择分析显示巢管内径在 4-8 mm 之间子代雌雄比最高 (1.50), 16-20 mm 之间雌雄比最小 (0.69); 8-12 mm 内径的巢管中巢室数量和雌雄数量均显著 ($P<0.05$) 高于其它巢管, 雌雄比为 1.22。【结论】亲代黄缘螺赢可根据筑巢月份和巢管口径调整其营巢策略, 其子代巢室数量和性别分配均受筑巢月份和巢管口径的显著影响。研究结果为理解黄缘螺赢的生殖策略和生态适应提供了新的见解。

关键词 黄缘螺赢; 膜翅目; 胡蜂科; 人工巢管; 性比; 繁殖策略; 筑巢活动

Effects of different nesting parameters on offspring sex ratio of *Anterhynchium flavomarginatum*

LI Yao^{1**} LU Hai-Xia^{1***} LIU Bang-You² LUO Xiao-Hong² ZHU Chao-Dong^{3,4} GUO Peng-Fei^{1***}

(1. College of Pharmacy, Guizhou University of Chinese Medicine, Guiyang 550025, China;

2. Chishui Cyathea National Nature Reserve Administration, Zunyi 564799, China; 3. College of Life Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. State Key Laboratory of Animal Biodiversity Conservation and Integrated Pest Management, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract [Aim] To investigate the influence of nest-building time, emergence time and other factors, on the offspring sex ratio of the wasp *Anterhynchium flavomarginatum* in the Guizhou Chishui Cyathea Reserve. [Methods] *A. flavomarginatum* were captured using trap nests in 2023, after which colonies were systematically observed and recorded. The offspring sex ratio and temporal fluctuation in nest numbers were analyzed using the Wilcoxon rank sum test. [Results] A total of 1 471 nests were observed; 84.5% of the 1 741 solitary wasp nests. Prey were mainly lepidopteran larvae of the Crambidae and Pyralidae families. The offspring sex ratio was highest (2.00) in June and lowest (0.79) in August. The highest number of nests was in October and the lowest in June. The number of male offspring was highest in August, significantly higher than in June ($P<0.001$), and the number of female offspring was highest in October, significantly higher than in July ($P<0.001$) and September ($P=0.031$). The ratio of male to female offspring was highest in nests of 4-8 mm diameter (1.50), and in nests of 16-20 mm nest diameter (0.69). The number of insect cells and the number of males and females in nests with an inner entrance

*资助项目 Supported projects: 贵州省科技计划项目 (黔科合基础-ZK[2022]一般 476; 黔科合基础-ZK[2023]一般 432); 贵州中医药大学药用动物研究中心 (贵中医 ZX 合字[2024]0048 号); 贵中医博士启动金 ([2020]13 号; [2022]11 号)

**第一作者 First author, E-mail: 3034994889@qq.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: luhaixia122@gzy.edu.cn; pengfei_bee@163.com

收稿日期 Received: 2024-12-02; 接受日期 Accepted: 2025-01-02

diameter of 8-12 mm were significantly higher than in other nests, and the female to male offspring ratio in such nests was 1.22.

[Conclusion] *A. flavomarginatum* can adjust its nesting strategy according to the nesting season and the nest tube diameter, and the number of nests and sex ratio of its offspring are significantly affected by nesting time and nest tube diameter. These results provide new insights into the reproductive strategies and ecological adaptations of *A. flavomarginatum*.

Key words *Anterhynchium flavomarginatum*; Hymenoptera; Vespidae; trap-nest; sex ratio; reproductive strategies; nest-building activity

生物多样性的丧失是当今世界面临的最严重的环境挑战之一(Cardinale *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2020)。人类活动,包括但不限于土地利用和气候变化,已经对全球生物多样性造成了前所未有的负面影响(Boyero *et al.*, 2012; Hooper *et al.*, 2012; Millard *et al.*, 2021)。同时,昆虫多样性与数量也在持续丧失(Biesmeijer *et al.*, 2006; Hallmann *et al.*, 2017, 2021; Wagner *et al.*, 2021)。昆虫的繁殖策略是维持其种群数量最重要的因素之一,这些策略包括但不限于季节性繁殖和性别分配(Tsuchiya *et al.*, 2021; Puppato *et al.*, 2023)。季节性繁殖可以确保它们的繁殖活动与食物资源丰富期相吻合,从而提高后代成活率(Clarke *et al.*, 2022)。昆虫可以根据环境和自身条件调整子代性别比例(O'Neill and O'Neill, 2003)。因此,昆虫的繁殖策略不仅影响个体繁殖成功率和后代质量,还与整个生态系统的稳定性和多样性保护紧密相关。

胡蜂科 Vespidae 作为重要的天敌昆虫与经济昆虫,在农林害虫防治方面有着重大的生态价值(Tylianakis *et al.*, 2007; Holzschuh *et al.*, 2010),同时其多样性也受到了严重的威胁(Heneberg and Bogusch, 2020)。螺赢亚科 Eumeninae 是胡蜂科中最大的一个类群(Selis, 2018),主要捕食鳞翅目幼虫(Kim, 2003; Klein *et al.*, 2004; Holzschuh *et al.*, 2009),是一类重要的捕食性天敌昆虫,通常在甲虫废弃的地道、树木、竹子以及芦苇中筑巢(Staab *et al.*, 2018)。它们分布广泛,筑巢策略多样,生活方式包括绝大多数独居到极少数种类的原始社会性群居,是非常好的研究社会性昆虫演化的素材昆虫(贺春玲等, 2024)。近年来,国内学者也积极探索胡蜂科不同种昆虫的生态防治方法和

价值,其中对隶属于胡蜂科螺赢亚科的黄缘螺赢 *Anterhynchium flavomarginatum* 的营巢习性和繁殖特性展开了一系列研究。例如,林木青等(2022)发现黄缘螺赢在寄生胁迫下会通过巢管内多产卵以降低被寄生风险;陆俊等(2024)在黄缘螺赢营巢生物学习性的研究中发现每年 5、7 和 10 月是黄缘螺赢营巢最活跃的时期。郭鹏飞等(2018)发现黄缘螺赢子代中雌性个体较大、所需的食物资源和生存空间更多,所以巢室可承载资源量会对其子代产生影响,具体体现在随巢管直径的增大,子代雌性比例上升;窦飞越等(2022)的研究表明海拔可通过影响黄缘螺赢对巢管内径大小的选择及前庭长度的分配进而影响其后代性比。但是,不同筑巢月份是否对黄缘螺赢子代数量和性别分配产生影响尚不清楚,巢管内径对其的相关影响也尚不全面。

因此,本研究在赤水桫欏国家级自然保护区设置了试验样方,使用人工巢管诱集黄缘螺赢进行研究,旨在探究黄缘螺赢亲代的筑巢月份和巢管内径的选择对其子代数量以及性别分配的影响。该研究将有助于深入探讨黄缘螺赢繁殖策略与环境的关系,揭示其适应性策略的内在机制,对于深化对物种繁衍的理解、促进其保护工作具有重大意义。同时,对于利用其捕食习性对鳞翅目害虫进行农业防治、减少对化学农药的依赖也能提供更充分的理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域

贵州赤水桫欏国家级自然保护区(28°20'19"-28°28'40"N, 105°57'54"-106°7'77"E, 海拔 290-1 730 m)是中国第一个以桫欏及其生

态环境为保护对象的国家级自然保护区。保护区地处贵州高原向四川盆地递降的过渡地带,属于中亚热带湿润季风气候区,年均气温约 17.7 °C,年降水量在 1 200-1 300 mm 之间,年均相对湿度大于 84%。保护区总面积 13 300 hm²,其中,核心区面积 5 200.3 hm²,缓冲区面积 4 016.6 hm²,实验区面积 4 083.1 hm² (刘钦等, 2019)。

1.2 实验设计与方法

1.2.1 实验样地设置与研究方法 本研究在贵州赤水桫欏国家级自然保护区内的实验区域开展,以直线距离每间隔 50 m 设置 1 个样点,每个样点分别放置 4 个人工巢管,共设置 75 个样点,300 个人工巢管,并分别标记。所用人工巢管均由芦苇管与 PVC 管制成(郭鹏飞等, 2021)。将内径范围 2-30 mm 干燥去皮的芦苇杆切至 20 cm,随机填充到 PVC 管内,确保 PVC 管中的芦苇管直径大小区间分布较为均匀。填充过程中,保证芦苇管排列紧密、松紧合宜、不易掉落、便于取出即可。

安装人工巢管时自保护区入口由外至内,在各样点挑选两棵较为平滑的树干或竹子,用铁丝将人工巢管固定于树干上,并用记号笔进行标记。由于黄缘螺赢偏爱巢口朝向东南方向的巢管筑巢(Alonso *et al.*, 2012; 陆俊等, 2024),因此,将巢管按照自西向东的方向进行排列。为防止鼠蚁对人工巢管造成破坏,固定好人工巢管后需在巢管上下方树干涂抹专用的隔离粘虫胶。2023 年每月前往样点收集已经筑巢的巢管,并替换以新的芦苇管,将已筑巢巢管带回室内进行饲养和观察。

1.2.2 巢管处理 收集回的巢管用解剖刀于管口处纵向剖开,观察、测量、记录如下信息在 Excel 表中:采集时间、采集样本点编号、巢室数量、筑巢物种、猎物。记录完成后将巢管 and 对应编号标签一同放入合适大小的试管,为避免外界污染以及黄缘螺赢幼虫羽化自行飞走;试管以脱脂棉封口后放置于实验室内饲养观察,等待其羽化后记录羽化时间、子代数量及雌雄数量;将羽化后成虫制作成针插标本,以便于后续形态学鉴定描述。

1.3 数据分析

本次实验数据经 Excel 2019 整理后,使用 R 4.3.2 进行 Wilcoxon 秩和检验分析,以检测黄缘螺赢亲代的筑巢月份和巢管内径的选择对其子代数量以及性别分配影响是否显著。

2 结果与分析

2.1 人工巢管黄缘螺赢筑巢情况

本次实验共计收集 2023 年筑巢巢管 1 741 个,其中黄缘螺赢筑巢巢管共计 1 471 个,占比 84.5%。黄缘螺赢羽化子代中雌性 344 头,雄性 320 头。黄缘螺赢捕猎草螟科和螟蛾科等鳞翅目幼虫。

2.2 黄缘螺赢不同筑巢月份对其子代数量以及性别分配的影响

黄缘螺赢巢室数量在 6-10 月整体随时间变化呈增长趋势(表 1, 图 1: A),其中 10 月巢室数量最多,共 850 个,6 月最少,共 157 个,不同筑巢月份的巢室数量可以反映不同时期的黄缘螺赢筑巢活跃度。

7、10 月筑巢时,子代中雌性和雄性的羽化数量均达到较高水平。其中,10 月筑巢时子代雌性羽化数量最多,为 104 头;8 月筑巢时子代雄性羽化数量最多,为 99 头。相反,9 月筑巢时子代雌性羽化数量最低,仅为 40 头;6 月筑巢时子代雄性羽化数量最低,为 21 头。以 6-10 月为一个完整的周期,黄缘螺赢子代羽化数量总体呈现先上升后下降的趋势(表 1, 图 1: B)。此外,黄缘螺赢子代的雌雄比在 6 月达到最高值 2.00,随后在 7 和 8 月降至最低点,之后在 9 和 10 月又有所上升(表 1, 图 1: C)。

亲代黄缘螺赢不同筑巢月份对应的巢室数量、雄性数量和雌性数量关系之间存在显著差异($P<0.05$) (图 2: A-C)。6 月,巢室数量平均为 (2.093 ± 0.631) 个;7 月,平均 (7.013 ± 1.235) 个;8 月,平均 (10.000 ± 2.085) 个;9 月,平均 (9.067 ± 1.471) 个;10 月,平均 (11.333 ± 1.899) 个。黄缘螺赢 6 月巢室数量显著低于 7 月($P<0.001$)、8 月($P<0.0001$)、9 月($P<0.0001$)

和 10 月 ($P<0.0001$)，其它月份两两之间无显著性差异 ($P>0.05$) (图 2: A)。

6 月，黄缘螺赢子代雄性数量平均 (0.280 ± 0.125) 头；7 月，平均 (1.107 ± 0.246) 头、8 月，

平均 (1.320 ± 0.329) 头；9 月，平均 (0.480 ± 0.129) 头；10 月，平均 (0.973 ± 0.197) 头。黄缘螺赢在 6 月的子代雄性数量显著低于 7 月 ($P=0.001$)、8 月 ($P<0.001$)、9 月 ($P=0.009$) 和 10 月

表 1 黄缘螺赢筑巢月份与子代性别数量关系

Table 1 Relationship between the nesting months of *Anterhynchium flavomarginatum* and the number of offspring by sex

筑巢月份 Month	巢室数量 (个) Brood cells number	雌性数量 (头) Female number (ind.)	雄性数量 (头) Male number (ind.)	雌雄比 Female to male ratio
6	157	42	21	2.00
7	526	102	83	1.23
8	750	78	99	0.79
9	680	40	36	1.11
10	850	104	73	1.42

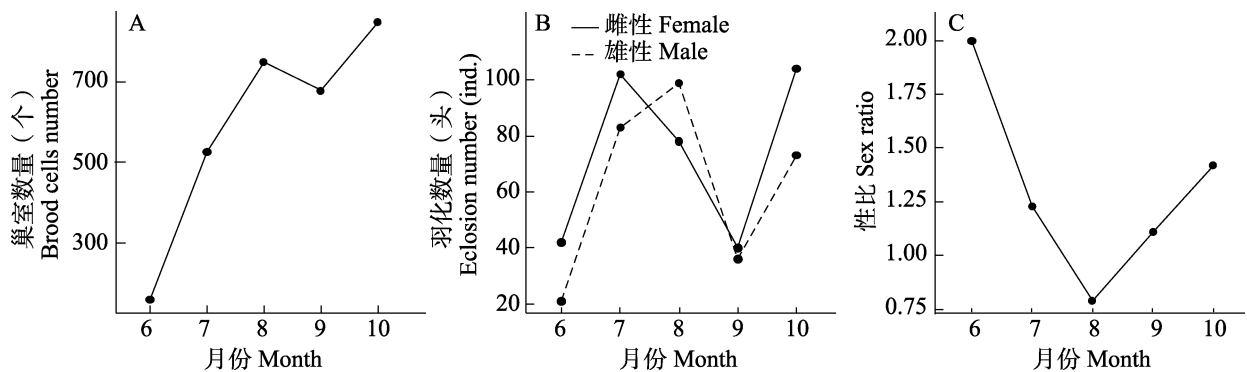


图 1 黄缘螺赢子代巢室数量 (A)、羽化数量 (B) 以及性比 (C) 随筑巢月份变化关系

Fig. 1 Relationship between brood cells number (A), emergence number (B) and sex ratio (C) of *Anterhynchium flavomarginatum* with nesting months

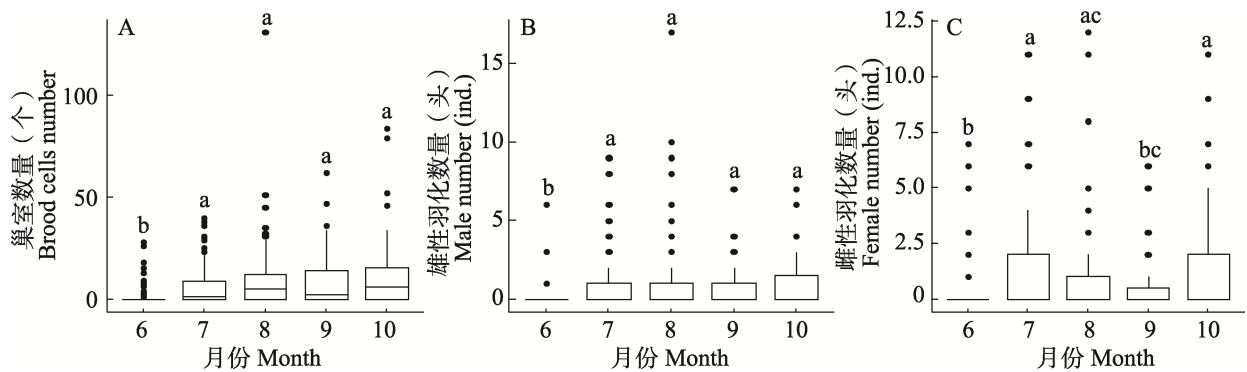


图 2 黄缘螺赢子代巢室数量 (A)、雄性羽化数量 (B) 以及雌性羽化数量 (C) 与筑巢月份的关系

Fig. 2 Relationship between brood cells number (A), male number (B), and female number (C) of *Anterhynchium flavomarginatum* and nesting month

箱线图的中间线为中位数，上下线分别为 25% 和 75% 分位数。图中不同小写字母表示 Wilcoxon 秩和检验结果组间差异显著 ($P<0.05$)。图 4 同。

In the boxplot, the middle line is the median, and the upper and lower lines are the 25th and 75th percentiles, respectively. Different lowercase letters in the figure indicate significant difference between groups as determined by the Wilcoxon rank-sum test ($P<0.05$). The same for Fig. 4.

($P<0.001$), 其它月份两两之间无显著性差异 ($P>0.05$) (图 2: B)。子代雌性数量在 6 月平均为 (0.560 ± 0.190) 头; 7 月, 平均 (1.360 ± 0.285) 头; 8 月, 平均 (1.040 ± 0.276) 头; 9 月, 平均 (0.533 ± 0.140) 头; 10 月, 平均 (1.387 ± 0.282) 头。黄缘螺赢在 6 月子代雌性数量显著低于 7 月 ($P=0.001\ 4$)、8 月 ($P=0.026$) 和 10 月 ($P<0.001$), 7 月显著高于 9 月 ($P=0.047$), 9 月显著低于 10 月 ($P=0.031$), 其它月份两两之间无显著性差异 ($P>0.05$) (图 2: C)。

2.3 巢管内径对黄缘螺赢子代数量和性别分配的影响

不同巢口内径对黄缘螺赢筑巢活跃度有影响, 巢口内径在 8-20 mm 时, 黄缘螺赢巢室数量随巢管直径增加而减少, 8-12 mm 时巢室数量最多 (1 615 个), 16-20 mm 时巢室数量最少 (114

个), 且黄缘螺赢雌、雄性羽化数量变化趋势与其一致 (表 2, 图 3: A, B); 巢口内径在 4-8 mm 时, 黄缘螺赢子代雌雄比最高 (1.50), 后子代雌雄比随巢管直径增加而减小, 在巢管直径为 16-20 mm 时达到最低 (0.69) (表 2, 图 3: C)。

亲代不同筑巢直径对应的巢室数量、雄性数量和雌性数量关系之间存在显著差异 (图 4: A-C)。直径 4-8 mm, 巢室数量平均为 (5.667 ± 0.808) 个; 直径 8-12 mm, 平均 (21.533 ± 2.702) 个; 直径 12-16 mm, 平均 (10.427 ± 1.573) 个; 直径 16-20 mm, 平均 1.520 ± 1.899 。黄缘螺赢巢管内径 4-8 mm 的巢室数量显著低于 8-12 mm ($P<0.000\ 1$)、12-16 mm ($P=0.03$) 和 16-20 mm ($P<0.000\ 1$), 8-12 mm 显著高于 12-16 mm ($P<0.001$) 和 16-20 mm ($P<0.000\ 1$), 12-16 mm 显著高于 16-20 mm ($P<0.000\ 1$) (图 4: A)。

表 2 黄缘螺赢筑巢直径与子代性别数量关系
Table 2 Relationship between the diameter of *Anterhynchium flavomarginatum* and the number of offspring by sex

巢管内径 (mm) Diameter (mm)	巢室数量 (个) Brood cells number	雌性数量 (头) Female number (ind.)	雄性数量 (头) Male number (ind.)	雌雄比 Female to male ratio
4-8	425	48	32	1.50
8-12	1 615	191	157	1.22
12-16	782	95	111	0.86
16-20	114	11	16	0.69

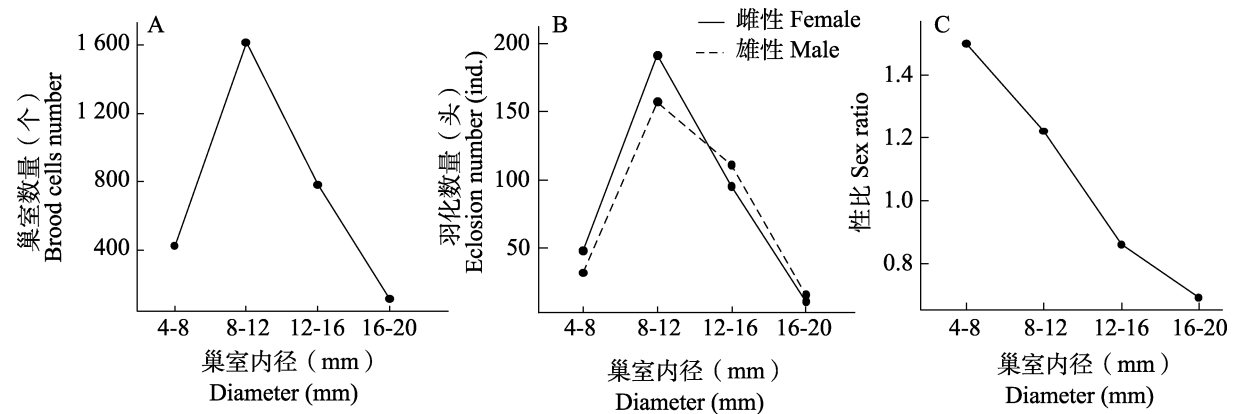


图 3 黄缘螺赢子代巢室数量 (A)、羽化数量 (B) 以及性比 (C) 随巢室内径变化关系
Fig. 3 Relationship between brood cells number (A), emergence number (B) and sex ratio (C) of *Anterhynchium flavomarginatum* and inner diameter

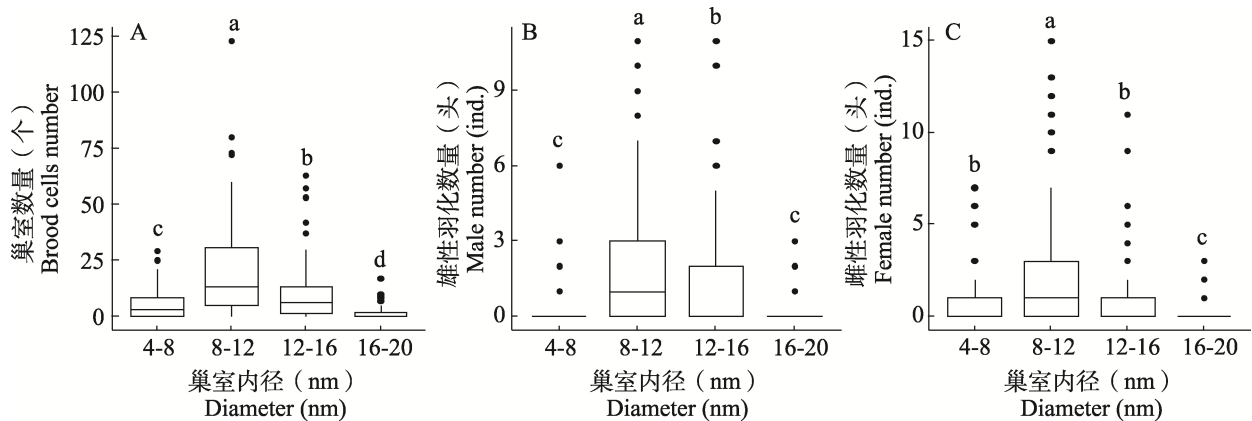


图4 黄缘螺赢子代巢室数量 (A)、雄性羽化数 (B) 以及雌性羽化数量 (C) 与巢室内径的关系

Fig. 4 Relationship between brood cells number (A), male number (B), and female number (C) of *Anterhynchium flavomarginatum* and inner diameter

直径 4-8 mm, 黄缘螺赢子代雄性数量为平均 (0.427 ± 0.113) 头、直径 8-12 mm 平均 (2.093 ± 0.307) 头、直径 12-16 mm 平均 (1.480 ± 0.279) 头、直径 16-20 mm 平均 (0.213 ± 0.067) 头。黄缘螺赢巢管内径 4-8 mm 的子代雄性数量显著低于 8-12 mm ($P < 0.0001$)、12-16 mm ($P < 0.001$), 8-12 mm 显著高于 12-16 mm ($P = 0.049$) 和 16-20 mm ($P < 0.0001$), 12-16 mm 显著高于 16-20 mm ($P < 0.0001$), 8-12 mm 与 12-16 mm 之间无显著差异 ($P > 0.05$) (图 4: B)。直径 4-8 mm 子代雌性数量平均为 (0.640 ± 0.156) 头; 直径 8-12 mm, 平均 (2.547 ± 0.402) 头; 直径 12-16 mm, 平均 (1.267 ± 0.265) 头; 直径 16-20 mm, 平均 (0.147 ± 0.060) 头。黄缘螺赢巢管内径 4-8 mm 的子代雌性数量显著低于 8-12 mm ($P < 0.0001$) 和 16-20 mm ($P = 0.0017$), 8-12 mm 显著高于 12-16 mm ($P = 0.0049$) 和 16-20 mm ($P < 0.0001$), 12-16 mm 显著高于 16-20 mm ($P < 0.0001$), 4-8 mm 与 12-16 mm 之间无显著差异 ($P > 0.05$) (图 4: C)。

3 结论与讨论

本研究基于大量巢管观察记录以及系统的数据分析, 发现黄缘螺赢亲代会根据筑巢环境 (巢管内径和筑巢月份) 变化调控其子代性别分配。黄缘螺赢筑巢巢管占比 84.5%, 表明该物种

在贵州赤水桫欏国家级自然保护区具有高筑巢活性, 为优势物种。当食物资源充足时, 独栖蜂倾向于产出更多的雌性子代 (Staab *et al.*, 2018)。结合本研究中较高的子代羽化数量, 认为该保护区有较充足的黄缘螺赢食物资源 (鳞翅目幼虫)。

本研究发现, 黄缘螺赢子代雌雄比与筑巢积极性在不同筑巢月份有显著变化。6 月份的子代雌雄比最高, 达到 2.00, 而 8 月份的雌雄比最低, 为 0.79, 且除 8 月外, 6、7、9 和 10 月雌性子代均占优。独栖蜂子代食物资源的丰富程度与子代雌性数量有一定的正相关关系 (Kim, 1999; Seidelmann, 2006), 因此, 6 月份充足的食物来源可能使得亲代黄缘螺赢产出更多的雌性后代, 而 10 月份黄缘螺赢巢室数量最多, 表明该月份是其筑巢高峰期。陆俊等 (2024) 研究显示, 我国东南地区黄缘螺赢的筑巢活跃月份是 5、7 和 10 月, 本研究则显示西南地区黄缘螺赢的筑巢活跃期在 8 和 10 月。陆俊等 (2024) 的研究在江西省, 根据赤水市人民政府 (<https://www.gzchishui.gov.cn/gzcy/>) 和中国气象网的资料 (<https://www.weather.com.cn/jiangxi/jxqh/>), 江西省全省冬暖夏热, 属亚热带温暖湿润季风气候, 夏季较长, 平均气温为 27.6°C , 7 月温度变化幅度小; 赤水市冬暖春早, 属中亚热带湿润季风气候, 7 月平均气温最高达 27.2°C 左右, 夏季 (6-8 月) 降水量最多, 7、8 月常有 8 级大风出现。根据陆俊等 (2024) 的研究, 江西较长

的夏季以及 7 月的平均温度, 恰好处于黄缘蜾蠃适宜繁殖的温湿度范围之内, 能够为其提供稳定且适宜的繁殖环境, 从而有利于其筑巢繁殖行为的产生。而赤水夏季温差大、多雨、多风的特点无法给黄缘蜾蠃提供足够稳定的繁殖环境, 赤水夏季温差大、多雨、多风, 这种气候条件无法为黄缘蜾蠃提供足够稳定的繁殖环境。此外, 温度的下降还会对其生存构成威胁。因此, 黄缘蜾蠃选择在 8 月进行更活跃的筑巢繁殖行为, 以此提高种群存活率。结合本研究 and 陆俊等 (2024) 的研究结果, 黄缘蜾蠃的营巢活跃时期均为 10 月, 这表明其筑巢行为和生殖策略受到季节性因素的显著影响。冬季温度低、食物资源匮乏, 导致子代存活率降低。为了确保子代具有一定的成活数量, 黄缘蜾蠃通过增加子代数量来应对冬季带来的高死亡率 (郭鹏飞等, 2021; 易小龙等, 2021)。

黄缘蜾蠃主要选择在直径 4-20 mm 的巢管内筑巢, 巢室数量、子代雄性和雌性羽化数量均随巢管直径增大先上升至 8-12 mm 的最高点后下降, 子代雌雄比随巢管直径的增大而降低。这表明巢管内径能直接显著影响黄缘蜾蠃的子代雌性分配策略。一般口径较大的巢室提供了更多的空间和资源, 会有利于雌性后代的发育和生存 (Seidelmann *et al.*, 2016)。但是, 过大的口径蜂巢则需要更多的食物资源, 而食物资源是有上限的 (王晴晴等, 2021)。

由于试验地的食物资源有限, 黄缘蜾蠃无法选择更大口径的巢管进行筑巢活动。在资源有限的条件下, 较大口径巢管内无法支持较多的子代数量以及较高的雌性子代比例。此外, 较大口径巢管的内部空间相对较大, 这使得幼虫在实验过程中更容易受到寄生等因素的影响, 从而增加了死亡风险 (Mayr *et al.*, 2021)。这解释了本研究结果: 在一定范围内, 黄缘蜾蠃巢室数量随巢管内径的增加而增加, 而当巢管内径继续超出这一范围时, 随着巢管内径的增大其巢室数量反而降低, 在巢管内径为 16-20 mm 时巢室数量达到最低。

综上所述, 黄缘蜾蠃为贵州赤水桫欏国家级自然保护区内独栖性筑巢蜂优势物种。在 6-10

月, 黄缘蜾蠃的筑巢行为具有明显的季节性, 具体体现在 10 月筑巢积极性最高。而 8 月筑巢积极性仅次于 10 月, 可以考虑在这两个月增加人工巢管数量, 以提升筑巢率。同期, 黄缘蜾蠃子代雌雄比呈现先降后升的趋势, 6 月雌雄比最高, 表明可能存在应对环境变化的性别调控机制。可以考虑在 6 月增加人工巢管, 以促进雌性子代的增加, 可提高整体子代数量。巢管内径对黄缘蜾蠃巢室数量、子代的数量和性别比例有显著影响。在实验中, 当巢管内径处于 8-12 mm 时, 黄缘蜾蠃的巢室数量和子代数量均显著高于其他口径的巢管, 且子代中雌性占比也更高。在实际应用中, 可以通过增加 8-12 mm 口径的人工巢管, 促使黄缘蜾蠃产生更多的雌性子代。

参考文献 (References)

- Alonso JDS, Silva JF, Garófalo CA, 2012. The effects of cavity length on nest size, sex ratio and mortality of *Centris (Heterocentris) analis* (Hymenoptera, Apidae, Centridini). *Apidologie*, 43(4): 436-448.
- Biesmeijer JC, Roberts SM, Reemer M, Ohlemüller R, Edwards M, Peeters T, Schaffers AP, Potts SG, Kleukers R, Thomas CD, Settele J, Kunin WE, 2006. Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science*, 313(5785): 351-354.
- Boyero L, Pearson RG, Dudgeon D, Ferreira V, Graça MAS, Gessner MO, Boulton AJ, Chauvet E, Yule CM, Albariño RJ, Ramírez A, Helson JE, Callisto M, Arunachalam M, Chará J, Figueroa R, Mathooko JM, Gonçalves JF Jr, Moretti MS, Chará-Serna AM, Davies JN, Encalada A, Lamothe S, Buria LM, Castela J, Cornejo A, Li AOY, M'Erimba C, Villanueva VD, del Carmen Zúñiga M, Swan CM, Barmuta LA, 2012. Global patterns of stream detritivore distribution: Implications for biodiversity loss in changing climates. *Global Ecology and Biogeography*, 21(2): 134-141.
- Cardinale BJ, Emmett Duffy J, Gonzalez A, Hooper DU, Perrings C, Venail P, Narwani A, Mace GM, Tilman D, Wardle DA, Kinzig AP, Daily GC, Loreau M, Grace JB, Larigauderie A, Srivastava DS, Naeem S, 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486(7401): 59-67.
- Chen YX, Huang YY, Niklaus PA, Castro-Izaguire N, Clark AT, Bruehlheide H, Ma KP, Schmid B, 2020. Directed species loss

- reduces community productivity in a subtropical forest biodiversity experiment. *Nature Ecology & Evolution*, 4(4): 550–559.
- Clarke AR, Leach P, Measham PF, 2022. The fallacy of year-round breeding in polyphagous tropical fruit flies (Diptera: Tephritidae): Evidence for a seasonal reproductive arrestment in *Bactrocera* species. *Insects*, 13(10): 882.
- Dou FY, Zhang H, Wu ZH, Lin MQ, Shu ZF, Li HY, Kou RM, Zhou ZY, Huang DY, Xiao ZS, 2022. Effects of altitude gradient changes on nesting and biology for the potter wasp *Anterhynchium flavomarginatum* (Hymenoptera: Vespidae: Eumeninae). *Acta Ecologica Sinica*, 42(8): 3279–3287. [窦飞越, 张欢, 吴智宏, 林木青, 束祖飞, 李红英, 寇若玫, 周泽扬, 黄敦元, 肖治术, 2022. 海拔梯度变化对黄缘蜾蠃筑巢结构及相关生物学特性的影响. *生态学报*, 42(8): 3279–3287.]
- Guo PF, Tao M, Yuan F, Zhu CD, 2018. The research on the sex allocation of offspring of *Anterhynchium flavomarginatum* (Hymenoptera: Eumeninae). *Journal of Environmental Entomology*, 40(3): 645–650. [郭鹏飞, 陶玫, 袁峰, 朱朝东, 2018. 探究黄缘蜾蠃后代性别的分配. *环境昆虫学报*, 40(3): 645–650.]
- Guo PF, Wang MQ, Li Y, Chen JT, Guo SK, Chen GH, Zhu CD, 2021. Biological characteristics of *Hylaeus perforata* (Hymenoptera: Colletidae) and its natural enemy *Gasteruption corniculigerum* (Hymenoptera: Gasteruptionidae) and their correlation with environmental variables. *Acta Entomologica Sinica*, 64(5): 605–610. [郭鹏飞, 王明强, 李逸, 陈婧婷, 郭士琨, 陈国华, 朱朝东, 2021. 缘叶舌蜂与其天敌窄头褶翅蜂的生物学特性及其与环境变量的相关性. *昆虫学报*, 64(5): 605–610.]
- Hallmann CA, Sorg M, Jongejans E, Siepel H, Hofland N, Schwan H, Stenmans W, Müller A, Sumser H, Hörrn T, Goulson D, de Kroon H, 2017. More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS ONE*, 12(10): e0185809.
- Hallmann CA, Ssymank A, Sorg M, de Kroon H, Jongejans E, 2021. Insect biomass decline scaled to species diversity: General patterns derived from a hoverfly community. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(2): e2002554117.
- Heneberg P, Bogusch P, 2020. Identification of a previously overlooked anthropogenic habitat that attracts diverse assemblages of threatened bees and wasps. *Ecological Engineering*, 147: 105759.
- He CL, Wang X, Liu XY, 2024. Research status of the nesting biology of Eumeninae (Hymenoptera: Vespidae). *Acta Entomologica Sinica*, 67(1): 135–150. [贺春玲, 王翔, 刘潇宇, 2024. 蜾蠃亚科物种的筑巢生物学研究现状. *昆虫学报*, 67(1): 135–150.]
- Holzschuh A, Steffan-Dewenter I, Tschamtk T, 2009. Grass strip corridors in agricultural landscapes enhance nest-site colonization by solitary wasps. *Ecological Applications*, 19(1): 123–132.
- Holzschuh A, Steffan-Dewenter I, Tschamtk T, 2010. How do landscape composition and configuration, organic farming and fallow strips affect the diversity of bees, wasps and their parasitoids? *Journal of Animal Ecology*, 79(2): 491–500.
- Hooper DU, Carol Adair E, Cardinale BJ, Byrnes JEK, Hungate BA, Matulich KL, Gonzalez A, Emmett Duffy J, Gamfeldt L, O'Connor MI, 2012. A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature*, 486(7401): 105–108.
- Millard J, Outhwaite CL, Kinnersley R, Freeman R, Gregory RD, Adedjoja O, Gavini S, Kioko E, Kuhlmann M, Ollerton J, Ren ZX, Newbold T, 2021. Global effects of land-use intensity on local pollinator biodiversity. *Nature Communications*, 12(1): 2902.
- Kim JK, 2003. Taxonomic review of the genus *Anterhynchium* Saussure (Eumeninae, Vespidae, Hymenoptera) from east Asia. *Korean Journal of Entomology*, 33(2): 105–117.
- Kim JY, 1999. Influence of resource level on maternal investment in a leaf-cutter bee (Hymenoptera: Megachilidae). *Behavioral Ecology*, 10(5): 552–556.
- Klein AM, Steffan-Dewenter I, Tschamtk T, 2004. Foraging trip duration and density of megachilid bees, eumenid wasps and pompilid wasps in tropical agroforestry systems. *Journal of Animal Ecology*, 73(3): 517–525.
- Liu Q, Deng HP, Li ZF, Liang S, Li QL, Ni DP, 2019. Characteristics of plant community in the Guizhou Chishui *Alsophila spinulata* National Nature Reserve, southwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 41(1): 19–31. [刘钦, 邓洪平, 李宗峰, 梁盛, 李丘霖, 倪东萍, 2019. 贵州赤水桫欏国家级自然保护区植物群落特征. *北京林业大学学报*, 41(1): 19–31.]
- Lin MQ, Liu YF, Wu CF, Shu ZF, Zhu CD, Xiao ZS, 2022. Oviposition behavior of the solitary wasp *Anterhynchium flavomarginatum* (Hymenoptera: Eumeninae) in relation to parasitism pressure. *Acta Entomologica Sinica*, 65(9): 1185–1195. [林木青, 刘益帆, 吴琛帆, 束祖飞, 朱朝东, 肖治术, 2022. 独栖蜂黄缘蜾蠃的产卵行为及其与寄生胁迫的关系. *昆虫学报*, 65(9): 1185–1195.]
- Lu J, Li WQ, Liu Q, Ran YQ, Hu F, Gong WA, Zhang SY, Zhang ZQ, Huang DY, 2024. Nesting biology of *Anterhynchium flavomarginatum* Smith (Hymenoptera: Eumenidae). *Journal of Environmental Entomology*, 46(3): 744–754. [陆俊, 李文强, 刘

- 琪, 冉芸琪, 胡锋, 龚文奥, 张诗雨, 章肇棋, 黄敦元, 2024. 黄缘螺赢营巢生物学研究. 环境昆虫学报, 46(3): 744–754.]
- Mayr AV, Keller A, Peters MK, Grimmer G, Krischke B, Geyer M, Schmitt T, Steffan-Dewenter I, 2021. Cryptic species and hidden ecological interactions of halictine bees along an elevational gradient. *Ecology and Evolution*, 11(12): 7700–7712.
- O'Neill KM, O'Neill RP, 2003. Sex allocation, nests, and prey in the grass-carrying wasp *Isodontia mexicana* (Saussure) (Hymenoptera: Sphecidae). *Journal of the Kansas Entomological Society*, 76(3): 447–454.
- Puppato S, Fiorenza G, Carraretto D, Gomulski LM, Gasperi G, Caceres C, Grassi A, Mancini MV, De Cristofaro A, Ioriatti C, Guilhot R, Malacrida AR, 2023. High promiscuity among females of the invasive pest species *Drosophila suzukii*. *Molecular Ecology*, 32(22): 6018–6026.
- Seidelmann K, 2006. Open-cell parasitism shapes maternal investment patterns in the red mason bee *Osmia rufa*. *Behavioral Ecology*, 17(5): 839–848.
- Seidelmann K, Bienesch A, Pröhl F, 2016. The impact of nest tube dimensions on reproduction parameters in a cavity nesting solitary bee, *Osmia bicornis* (Hymenoptera: Megachilidae). *Apidologie*, 47(1): 114–122.
- Selis M, 2018. Additions to the knowledge of solitary wasps (Hymenoptera: Vespidae: Eumeninae), with description of eight new species. *Zootaxa*, 4403(3): 441–468.
- Staab M, Pufal G, Tschardt T, Klein AM, 2018. Trap nests for bees and wasps to analyse trophic interactions in changing environments: A systematic overview and user guide. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(11): 2226–2239.
- Tsuchiya R, Kaneshima A, Kobayashi M, Yamazaki M, Takasu Y, Sezutsu H, Tanaka Y, Mizoguchi A, Shiomi K, 2021. Maternal GABAergic and GnRH/corazonin pathway modulates egg diapause phenotype of the silkworm *Bombyx mori*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(1): e2020028118.
- Tylianakis JM, Tschardt T, Lewis OT, 2007. Habitat modification alters the structure of tropical host-parasitoid food webs. *Nature*, 445(7124): 202–205.
- Wagner DL, Grames EM, Forister ML, Berenbaum MR, Stopak D, 2021. Insect decline in the anthropocene: Death by a thousand cuts. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(2): e2023989118.
- Wang QQ, Gao Y, Wang R, 2021. Review on impacts of global change on food web structure. *Journal of Plant Ecology*, 45(10): 1064–1074. [王晴晴, 高燕, 王嵘, 2021. 全球变化对食物网结构影响机制的研究进展. 植物生态学报, 45(10): 1064–1074.]
- Yi XL, Wang XY, Zheng XL, Lu W, 2021. Advance in insects reproductive fitness. *Guangdong Agricultural Science*, 48(4): 84–92. [易小龙, 王小云, 郑霞林, 陆温, 2021. 昆虫繁殖适度研究进展. 广东农业科学, 48(4): 84–92.]