海南蓝泥蜂 *Chalybion hainanense* 的筑巢产卵行为和生活史分析*

张楚格[1, 2**] 欧阳芳[2] 王茗毅[2, 3] 周 昊[2, 4]
陈李林[5***] 肖治术[2, 4***]

（1. 福建农林大学安溪茶学院，泉州 362406；2. 中国科学院动物研究所，农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室，北京 100101；3. 河北大学生命科学学院，保定 071002；4. 中国科学院大学生命科学学院，北京 100049；5. 福建农林大学植物保护学院，农林生物安全全国重点实验室，福州 350002）

摘 要 **【目的】** 旨在掌握海南蓝泥蜂 *Chalybion hainanense* 的筑巢产卵行为和生活史特征，以明确该物种的繁殖策略。**【方法】** 利用人工巢管技术在广东省车八岭自然保护区森林动态样地布设了 80 个巢箱并收集被独栖蜂筑巢的巢管，进行室内饲养并定期观察记录其发育情况，同时测量了海南蓝泥蜂的筑巢结构和成蜂个体大小（体长和头宽）。**【结果】** 2019 年共回收巢管 8 次，共收集 433 根海南蓝泥蜂的巢管和 450 个孵育室。单根巢管平均构建孵育室（1.04±0.19）个，产 1 个卵的巢管占比为 96.07%。孵育室平均长度（105.12±49.62）mm，平均直径（9.64±1.27）mm，平均体积（7 623.97±3 991.80）mm^3。子代性比偏向雌性（♀：♂=1.23：1），且雌蜂的巢管直径和孵育室体积均显著大于雄蜂（P<0.001），但雌雄蜂间的孵育室长度无显著差异（P=0.399）。海南蓝泥蜂在广东地区 1 年 2 代，第 2 代以预蛹形态滞育越冬，于翌年 5 月中旬开始羽化。该蜂卵期 2-3 d，孵化后的幼虫取食蜘蛛，历经 6-7 d 后化蛹，化蛹后持续 38-44 d 羽化，越冬代滞育期 220-290 d。雌蜂体长和头宽均显著大于雄蜂（P<0.001）。在雌蜂中，头宽与巢管直径呈显著正相关（*tau*=0.58，P<0.001），且第 2 代个体显著大于第 1 代（P<0.05）。**【结论】** 海南蓝泥蜂的筑巢产卵行为和生活史特征体现了其对环境的适应性及繁殖策略的复杂性，为了解其生态学意义和保护策略提供了重要依据。

关键词 海南蓝泥蜂；人工巢管；孵育室；生活史；个体大小；繁殖策略

The nesting, oviposition and life history, of *Chalybion hainanense*

ZHANG Chu-Ge[1, 2**] OUYANG Fang[2] WANG Ming-Yi[2, 3] ZHOU Hao[2, 4]
CHEN Li-Lin[5***] XIAO Zhi-Shu[2, 4***]

(1. Anxi College of Tea Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Quanzhou 362406, China; 2. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents in Agriculture, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China; 4. College of Biological Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. State Key Laboratory of Agricultural and Forestry Biosecurity, College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract **[Aim]** To describe the nesting, oviposition and life history, of *Chalybion hainanense*, and thereby clarify the reproductive strategy of this species. **[Methods]** Eighty artificial trap-nests were deployed within the forest dynamic plot in Chebaling National Nature Reserve in Guangdong Province. Trap-nests used by solitary bees and wasps were collected, and

*资助项目 Supported projects：2024 年推进北京园林绿化高质量发展科技创新专项（KJCXLM202409）；国家林业和草原局-中国科学院国家公园研究院研究专项（KFJ-STS-ZDTP-2022-001）；中央林业草原生态保护恢复资金

**第一作者 First author，E-mail：zhangcg1113@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors，E-mail：llchen@fafu.edu.cn；xiaozs@ioz.ac.cn

收稿日期 Received：2024-08-31；接受日期 Accepted：2024-10-24

their progress monitored by regular indoor observations. In addition, the nesting structure and adult body size of *C. hainanense* were measured. **[Results]** In 2019, a total of eight trap-nest collections were conducted, yielding 433 *C. hainanense* nests and 450 brood cells. On average, each trap-nest contained (1.04 ± 0.19) brood cells, with 96.07% containing a single egg. The average length of brood cells was (105.12 ± 49.62) mm, the average diameter was (9.64 ± 1.27) mm and the average volume was (7 623.97 ± 3 991.80) mm³. The offspring sex ratio was female biased (♀ : ♂ = 1.23 : 1), and the diameter of nests and the volume of female brood cells were significantly larger than those of males, although there was no significant difference in brood cell length between the sexes. *C. hainanense* has two generations a year in Guangdong, the second of which overwinters in pre-pupal form and starts to emerge in mid-May the following year. The egg stage lasts 2 to 3 days, after which the larvae feed on spiders, taking 6 to 7 days to pupate. Larvae pupate for 38 to 44 days before eclosion, whereas the overwintering generation undergoes a diapause period of 220 to 290 days. Female body length and head width are significantly greater than those of males. Among females, head width shows a significant positive correlation with tube diameter, and individuals of the second generation are significantly larger than those of the first generation. **[Conclusion]** The nesting and oviposition behavior of *Chalybion hainanense*, together with other life history traits, reflect its adaptability and complex reproductive strategy. These findings provide critical insights into the ecological significance of this species and inform conservation strategies.

Key words *Chalybion hainanense*; artificial nest tube; incubation chamber; life history; individual size; reproductive strategy

蜂类是具备多种生态功能的昆虫类群之一，根据习性可分为社会性蜂和独栖性蜂两大类。其中，独栖蜂（Solitary bees and wasps）主要包括蜜蜂总科和胡蜂总科（Krombein，1967；Batra，1984），是重要的传粉昆虫和天敌昆虫，在促进植物繁殖、植物保护和维持生态系统稳定中发挥关键的作用（Potts *et al.*，2016；Willmer *et al.*，2017；Brock *et al.*，2021）。独栖蜂独特的生存与繁殖方式是重要的研究内容。独栖蜂雌性个体在与雄蜂交配后，会独自构建巢室并寻觅食物储存在巢室内，作为对后代的投资方式（Morato and Martins，2006）。独栖蜂具有单倍二倍性，即雌性可以通过控制储存在受精囊中精子的释放决定后代性别（Stubblefield *et al.*，1994）。在许多物种中，尽管雌雄性别的总投资额相等，但不同性别个体所花费的平均投资不等，尤其在雌雄体型性二型物种中表现明显（Torchio and Tepedino，1980）。

泥蜂科 Sphecidae 隶属膜翅目 Hymenoptera 细腰亚目 Clistogastra 针尾部 Aculeata 蜜蜂总科 Apoidea（吴燕如和周勤，1996）。作为独栖蜂的重要类群，泥蜂成虫以花蜜或猎物体液为食，具有传粉和控害的作用。泥蜂筑巢方式主要包括地下筑巢和地上筑巢 2 种。地下筑巢通常选择在地表的沙子、砾石或泥土中向下掘洞，构建多分支的巢结构（Miller and Kurczewski，1972；Harris，1998）；地上筑巢则通常选择已有洞穴筑巢，如钻空木头、竹子、植物中空的茎秆及其他蜂的废弃泥巢（Bohart and Menke，1976；Coville and Coville，1980）。雌蜂确定巢址后会进行捕猎活动，将猎物带回巢穴并产卵于猎物上，随后封闭巢室。泥蜂通常在春夏季活动，多为单化性（一年内繁殖 1 代）或二化性（一年内繁殖 2 代），存在滞育越冬的习性，其羽化模式与形态和行为特征一样，受当地环境条件的影响（Masaki，1978；Tauber and Tauber，1986；Brockmann，2004），二化性的羽化模式可能会影响其产卵行为和性别选择（Seger，1983）。

蓝泥蜂属 *Chalybion* 在全世界已知 51 种，广泛分布于除新热带界外的多个地区（Pulawski，2024）。蓝泥蜂成虫以花蜜为食，由于其习性及幼虫的发育需求，雌蜂通常会独自捕猎蜘蛛和筑巢（吴燕如和周勤，1996）。蓝泥蜂筑巢的主要材料是泥浆，雌蜂会利用水对干燥的泥土进行润湿和抹平，以用于构建巢室（Iwata，1976；Kazenas，2001；Gess and Gess，2014；Pham，2018）。海南蓝泥蜂 *Chalybion hainanense* 分布于中国华南地区（Terayama and Tano，2018），目前海南蓝泥蜂具体的筑巢产卵行为和生活史的研究尚缺。

本研究以海南蓝泥蜂为对象，利用人工巢管技术在广东省车八岭自然保护区森林动态样地布设了 80 个巢箱并收集被蜂类筑巢的巢管，进行室内饲养和定期观察记录其发育情况，同时测量了海南蓝泥蜂的巢室结构和成蜂个体大小。研究内容主要探究海南蓝泥蜂的筑巢产卵行为和生活史特征，以明确其繁殖策略，为自然保护区蜂类多样性保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

车八岭国家级自然保护区位于广东省始兴县东南部，地理坐标为 24°40′29″-24°46′21″ N，114°7′39″-114°16′46″ E。保护区属于华南褶皱地质构造，地势自西北向东南倾斜。亚热带湿润型季风气候，全年温暖湿润，日照充足，水热资源丰富，年均温度 19.6 ℃，最高温度 38.4 ℃，最低温度 - 5.5 ℃。年降雨量为 1 150-2 126 mm，雨季为 3-8 月，旱季为 9-2 月，年蒸发量为 1 530 mm，年均相对湿度为 79%（徐燕千，1993；肖治术，2019）。

1.2 巢箱布设与回收

样地选取了车八岭保护区设立的 20 hm^2 森林动态样地，为岭南山地典型的常绿阔叶林。样地按正北设置，投影东西长 500 m，南北宽 400 m（吴智宏等，2021）。人工巢管按每公顷布设相对均匀分布的 4 个位点，共 80 个巢管位点（彼此间隔至少 50 m），每个位点布设 1 个巢箱。巢箱由一对 PVC 管组成，采用长 25 cm，直径 11 cm 的 PVC 管作为外壳，PVC 管一侧用小刀切割一条缝隙，用于排水防潮，提供保护。PVC 管内按管径小（3-6 mm）：中（6-9 mm）：大（> 9 mm）为 1：2：1 填充芦苇管。2019 年共计回收 8 次，于 4-12 月平均 30-40 d 回收一次被筑巢的巢管，回收后采用同一规格芦苇管进行补充，同一批次回收巢管于实验室集中处理观察。

1.3 饲养处理与数据记录

回收的巢管用小刀沿管口 1/3 处进行剖管处理，放置于玻璃试管（长 25 cm，直径 0.6-2.0 cm）中进行饲养观察。玻璃管上对应记录收集时间和收集位点，采用游标卡尺测量巢管长度、巢管直径和孵育室长度，观察记录筑巢材料、产卵数量和巢室构建情况，玻璃管口用脱脂棉封口。每隔 2-3 d 集中观察记录一次海南蓝泥蜂的发育情况，待羽化后测量成虫头宽和体长并进行性别鉴定。羽化或死亡的海南蓝泥蜂均用贴标样本管加无水乙醇（99.7%）保存，所有标本保存在中国科学院动物研究所。

1.4 数据分析

数据采用 Excel 2010 进行统计整理，数据分析均在 R 4.3.1 软件中运行，通过“ggplot2”和“scales”包进行可视化。采用相关性分析确定成蜂个体的体长与头宽、头宽与巢管直径以及体长与孵育室长度之间的关系，数据符合正态分布采用 Pearson 相关系数检验，不符合正态采用 Kendall *tau* 检验；对雌雄蜂的管径、孵育室长度和体积、体长和头宽及不同世代雌性体长和头宽进行差异显著性分析，符合正态分布时，采用独立样本 *t* 检验，不符合正态采用 Wilcoxon 秩和检验。

孵育室体积：$V=\pi\cdot(d/2)^2\cdot l$，式中 d 为巢管直径，l 为孵育室长度。

2 结果与分析

2.1 筑巢产卵行为

本试验在 2019 年回收海南蓝泥蜂筑巢巢管共计 433 根，构建的巢室共 462 个，包括孵育室 450 个和空室 12 个。筑巢材料中封口由黄泥或油脂泥土混合物构成，其中油脂泥土混合物占总数的 91.45%，巢室隔板由黄泥构成，巢室呈线性排列，是典型的无间室线型巢室（图 1：A）。经测量统计，海南蓝泥蜂筑巢巢管直径 5.41-14.82 mm，平均直径（9.64±1.27）mm（n=430）；巢管长度 18.49-220.00 mm，平均长度（110.69±48.94)mm(n=373)；孵育室长度 14.71-220.00 mm，平均长度（105.12±49.62）mm（n=388）；孵育室体积 928.91-25 172.54 mm^3，平均体积

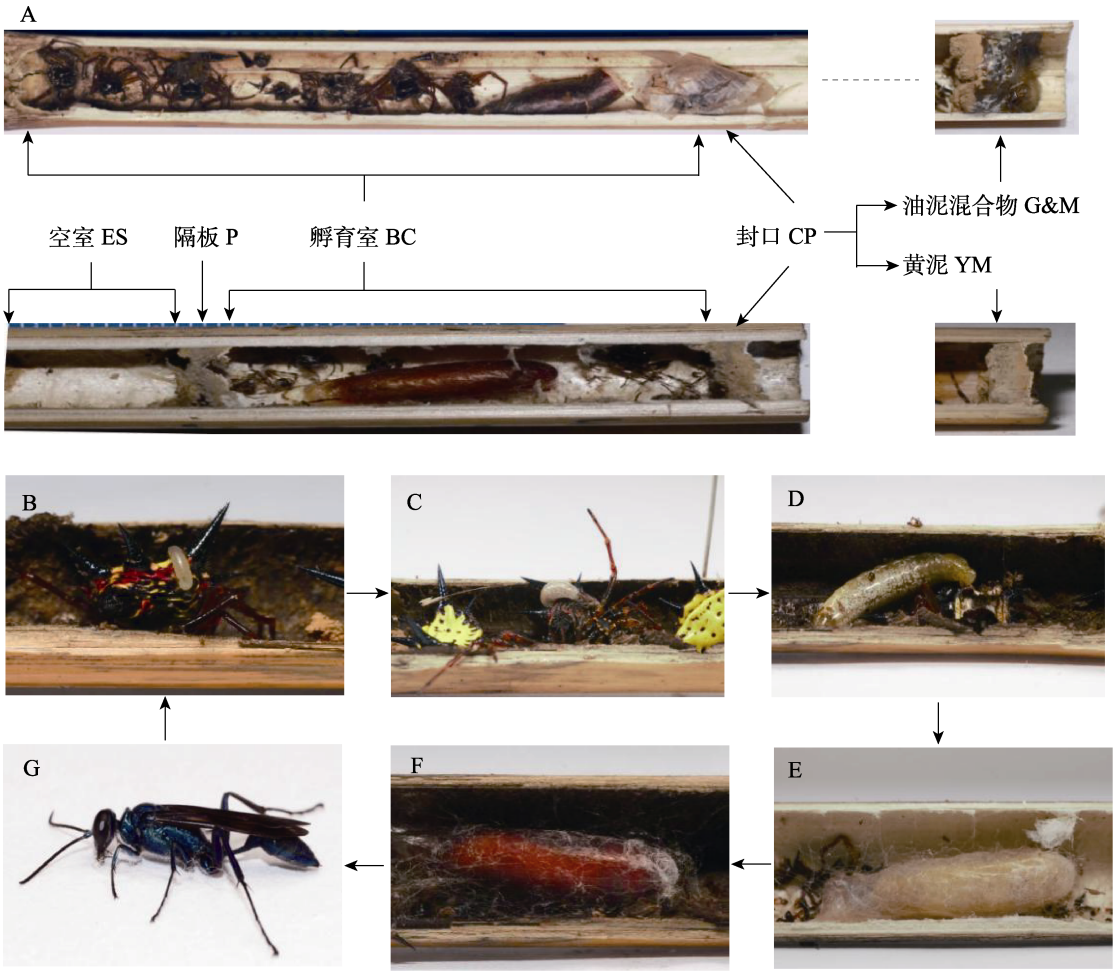

图 1　海南蓝泥蜂的筑巢结构和发育历期

Fig. 1　Nesting structure and developmental periods of *Chalybion hainanense*

A. 筑巢结构：空室（ES）、隔板（P）、孵育室（BC）、封口（CP）、油泥混合物（G&M）、黄泥（YM）；B. 卵；C. 低龄幼虫；D. 末龄幼虫；E-F. 蛹；G. 成蜂（♀）。

A. Nesting structure: Empty space (ES), partition (P), brood cell (BC), closing plug (CP), grease and mud (G&M), yellow mud (YM); B. Egg; C. Early instar larva; D. Last instar larva; E-F. Pupa; G. Adult wasp (♀).

（7 623.97±3 991.80）mm^3（*n*=387）。海南蓝泥蜂每根巢管构建 1-2 个孵育室，平均（1.04±0.19）个（*n*=433）；其中构建 1 个孵育室的 416 根，占比为 96.07%，构建 2 个孵育室的 17 根，占比为 3.93%。

回收巢管中海南蓝泥蜂共计产卵 450 粒，通过饲养，羽化个体数为 382 头，整体羽化率 84.89%，其中羽化雌蜂数量 211 头，占比为 55.24%，雄蜂数量 171 头，占比为 44.76%，雌雄性比（♀：♂）为 1.23：1（*n*=382）。在雌雄蜂共有的巢管中发现，雌蜂在内侧，雄蜂在外端（*n*=4）。饲养观察发现海南蓝泥蜂幼虫食物为蜘蛛，雌蜂通常为一头幼虫提供 4-9 头蜘蛛，且提供给雌性幼虫相较雄性幼虫更多。

在收集的筑巢巢管中，巢管直径范围 5-15 mm，其中使用最多的是直径为 8-11 mm（*n*=337）的巢管，占比 78.37%；其次是 7-8 mm（*n*=32），占比 7.44%，以及 11-12 mm（*n*=44），占比 10.23%。在直径小于 9 mm 的管径中雄性比例较高，占比为 64.70%，管径达到 9 mm 时，后代雌性比例会逐渐升高，在直径达到 12 mm 时，巢管中未发现雄性后代。产雌性后代的巢管直径范围为 5-15 mm，雄性后代的巢管直径范围为 5-12 mm（图 2：A）。差异显著性分析表明，

海南蓝泥蜂的雌性管径（9.94±1.27）mm 显著大于雄性（9.16±1.18）mm（Wilcoxon：W=16 256，P<0.001）（表 1）。

雌蜂和雄蜂孵育室数据统计结果显示，雌蜂的孵育室长度 18.49-220.00 mm，平均长度（110.28±48.25）mm；雄蜂孵育室长度 26.59-201.91 mm，平均长度（105.71±49.35）mm（表 1）。Wilcoxon 秩和检验结果显示，雌雄的孵育室长度无显著差异（W=12 674，P=0.399）（图 2：B）。雌蜂的孵育室体积 928.91-25 172.54 mm^3，平均体积（8 598.23±4 177.03）mm^3；雄蜂孵育室体积 1 137.21-18 590.48 mm^3，平均体积（6 903.02±3 453.62）mm^3（表 1）。Wilcoxon 秩和检验结果显示，雌蜂的孵育室体积显著大于雄蜂（W=14 836，P<0.001）（图 2：C）。

2.2 生活史特征

室内饲养观察记录发现，海南蓝泥蜂在广东韶关地区 1 年发生 2 代，越冬代于 5 月中旬开始羽化，其后代为 2019 年第 1 代，于 6 月下旬开始羽化，第 2 代以预蛹形态滞育越冬，翌年羽化，且通常雄蜂先于雌蜂羽化（n=4），整个成虫期从 5 月中旬持续到 9 月上旬，存在世代重叠。第 1 代性比（♀：♂=80：46）为 1.74：1，第 2 代性比（♀：♂=131：123）为 1.07：1，均有雌性偏向，第 1 代雌性和雄性占比分别为 63.49%和 36.51%，第 2 代雌性和雄性占比分别为 51.57%和 48.43%。

雌蜂将卵产于食物蜘蛛上，卵（图 1：B）呈椭圆形米粒状，透明略带米白色，表面光滑，卵期 2-3 d；幼虫初期体型粗胖，两端略尖，颜色为白色，无足（图 1：C），随着取食量的不断增加，体型逐渐变得细长，粪便排在管壁上，颜色呈暗黄色（图 1：D），幼虫期 6-7 d；蛹初期呈黄白色（图 1：E），随老熟程度颜色逐渐加深（图 1：F）。头、胸和腹分明，主要器官均明显可见，蛹期 38-44 d，越冬代滞育期 220-290 d，最后羽化出巢（图 1：G），其生活史详见表 2。

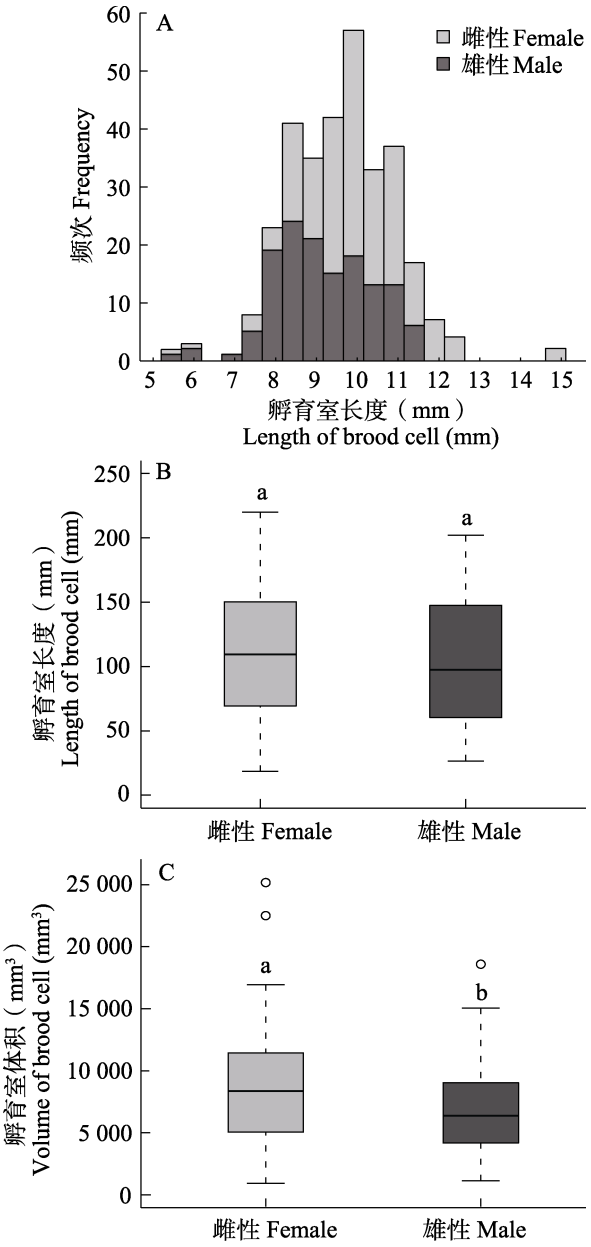

图 2 海南蓝泥蜂雌性与雄性孵育室大小的差异

Fig. 2 Differences in brood cell size between females and males of *Chalybion hainanense*

A. 海南蓝泥蜂在不同巢管直径下繁育子代雌性和雄性的巢管数量；B. 海南蓝泥蜂雌性与雄性的孵育室长度；C. 海南蓝泥蜂雌性与雄性的孵育室体积。箱型图中不同小写字母代表差异显著（P<0.001，Wilcoxon 秩和检验）。

A. Number of trap nests of *C. hainanense* breeding offspring females and males at different trap nest diameters; B. Brood cell length of *C. hainanense* females and males; C. Brood cell volume of *C. hainanense* females and males. Different lowercase letters indicate significant difference (P<0.001, Wilcoxon rank-sum test).

表 1　海南蓝泥蜂雌性与雄性巢室结构及个体的大小指标

Table 1　Size of male and female cell structure and individuals of *Chalybion hainanense*

指标 Parameters	雌性 Female (*n*=174)	雄性 Male (*n*=138)	显著性检验 Significant test
巢管直径（mm） Diameter of trap-nest (mm)	Range：5-15	Range：5-12	*W*=16 256，*P*<0.001
	Mean±SD：9.94±1.27	Mean±SD：9.16±1.18	
孵育室长度（mm） Length of brood cell (mm)	Range：18.49-220.00	Range：26.59-201.91	*W*=12 674，*P*=0.399
	Mean±SD：110.28±48.25	Mean±SD：105.71±49.35	
孵育室体积（mm^3） Volume of brood cell (mm^3)	Range：928.91-25 172.54	Range：1 137.21-18 590.48	*W*=14 836，*P*<0.001
	Mean±SD：8 598.23±4 177.03	Mean±SD：6 903.02±3 453.62	
头宽（mm） Head width (mm)	Range：3.42-4.57	Range：2.66-3.85	*W*=23 891，*P*<0.001
	Mean±SD：4.08±0.22	Mean±SD：3.20±0.24	
体长（mm） Body length (mm)	Range：15.24-23.15	Range：12.99-18.72	*t*=24.74，*P*<0.001
	Mean±SD：19.74±1.46	Mean±SD：15.88±1.30	

Range：范围；Mean±SD：平均值±标准差。显著性检验中 *W* 表示采用 Wilcoxon 秩和检验, *t* 表示采用独立样本 *t* 检验。
In significance testing, "*W*" denotes the use of the Wilcoxon rank-sum test, while "*t*"represents the independent samples *t*-test.

表 2　海南蓝泥蜂生活史

Table 2　The life cycle of *Chalybion hainanense*

世代 Generation	4 月 April			5 月 May			6 月 June			7 月 July			8 月 August			9 月 September			10-翌年 3 月 October-next March		
	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
	F	M	L	F	M	L	F	M	L	F	M	L	F	M	L	F	M	L	F	M	L
越冬代 Winter-surviving generation		±	±	±																	
				□	□	□	□	□													
					+	+	+	+	+												
第 1 代 The 1st generation							●	●	●	●	●										
							–	–	–	–	–	–									
								□	□	□	□	□	□								
									+	+	+	+	+	+	+	+					
第 2 代 The 2nd generation										●	●	●	●	●	●	●	●				
											–	–	–	–	–	–	–	–			
												±	±	±	±	±	±	±	±	±	±

F：上旬；M：中旬；L：下旬；±：预蛹（滞育）；□：蛹；+：成虫；●：卵；–：幼虫。
F: Early part of the month; M: Mid part of the month; L: Late part of the month; ±: Pre-pupae (lagomorphs); □: Pupa; +: Adult; ●: Egg; –: Larva.

海南蓝泥蜂的雌性体长（19.74±1.46）mm 显著大于雄性体长（15.88±1.30）mm（独立样本 *t* 检验：*t*=24.74，*P*<0.001）；雌蜂头宽（4.08± 0.22）mm 显著大于雄蜂头宽（3.20±0.24）mm（Wilcoxon：*W*=23 891，*P*<0.001）（表 1）。相关性分析表明，雌蜂体长与头宽之间（Kendall *tau*：*tau*=0.58，*P*<0.001）和雄蜂体长与头宽之间（Pearson 相关系数检验：*cor*=0.79，*P*<0.001）

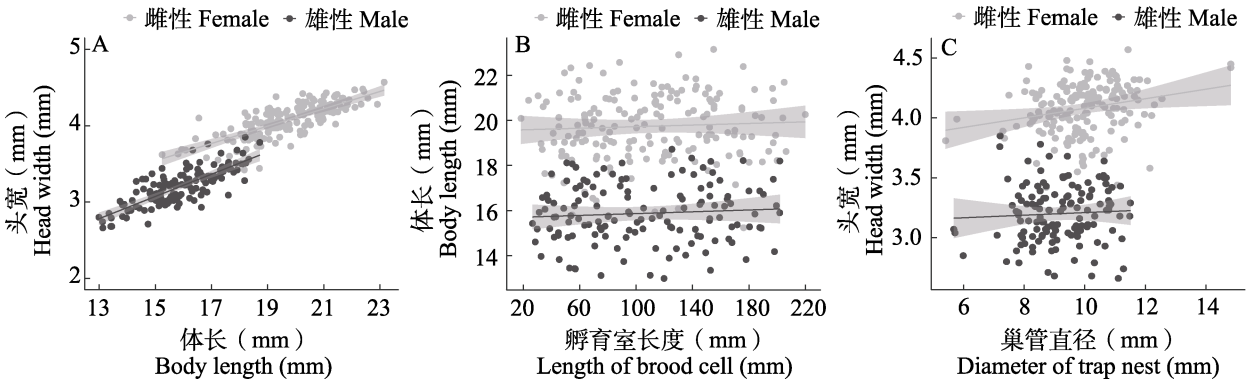

图 3　海南蓝泥蜂雌雄个体大小与孵育室结构的关系

Fig. 3　The relationship between the body size of male and female *Chalybion hainanense* individuals and the structure of their brood cells

A. 雌雄个体体长与头宽的相关性分析；B. 雌蜂和雄蜂孵育室长度与个体体长的相关性分析；C. 雌蜂和雄蜂巢管直径与个体头宽的相关性分析。A. Correlation analysis between body length and head width of female and male; B. Correlation analysis between brood cell length and body length of female and male; C. Correlation analysis between trap nest diameters and head width of female and male.

均呈现显著正相关（图 3：A）。

相关性分析表明，雌蜂和雄蜂的孵育室长度与体长之间均无显著相关性（Kendall *tau*：雌蜂 *tau*=0.05，*P*=0.336 8；雄蜂 *tau*=0.05，*P*=0.420 1）（图 3：B）。对雌雄蜂头宽和巢管直径进行相关性分析，结果显示，雌蜂的头宽与巢管直径间呈显著正相关，（Kendall *tau*：*tau*=0.16，*P*<0.01），雄蜂头宽与巢管直径的相关性不显著（Kendall *tau*：*tau*=0.06，*P*=0.264 5）（图 3：C）。

第 1 代雌蜂体长 15.24-22.91 mm，平均长度为（19.48±1.43）mm（*n*=80）；第 2 代雌蜂体长 15.94-23.15 mm，平均长度为（20.00±1.46）mm（*n*=131）。第 2 代雌蜂体长显著大于第 1 代（Wilcoxon 秩和检验：*W*=4178.5，*P*<0.05）（图 4：A）。第 1 代雌蜂头宽 3.62-4.40 mm，平均宽度为（4.06±0.18）mm（*n*=80）；第 2 代雌蜂头宽 3.42-4.57 mm，平均宽度为（4.11±0.25）mm（*n*=131）。第 2 代雌蜂头宽显著大于第 1 代（Wilcoxon 秩和检验：*W*=4 306.5，*P*<0.05）（图 4：B）。

第 1 代雄蜂体长 13.74-18.72 mm，平均长度为（16.17±1.34）mm（*n*=46）；第 2 代雄蜂体长 12.43-18.33 mm，平均长度为（15.61±1.31）mm（*n*=120），独立样本 *t* 检验结果显示，第 2 代雄蜂体长显著小于第 1 代（*t*=2.44，*P*<0.05）（图 4：C）。第 1 代雄蜂头宽 2.81-3.85 mm，平均宽度为（3.28±0.25）mm（*n*=46）；第 2 代雄蜂头宽 2.51-3.68 mm，平均宽度为（3.15±0.23）mm（*n*=120）。独立样本 *t* 检验结果显示，第 2 代雄蜂头宽显著小于第 1 代（*t*=3.12，*P*<0.01）（图 4：D）。总体上第 2 代雌蜂个体相较于第 1 代偏大，第 2 代雄蜂个体相较于第 1 代偏小。

3　讨论

3.1　筑巢产卵行为

筑巢资源是决定蜂类生存和繁殖的关键因素之一（Orr *et al.*，2022）。同属的不同物种可能在筑巢材料上存在差异，如蓝泥蜂属 *C. turanicum* 以灰泥作为筑巢材料（Fateryga *et al.*，2020）；本研究发现海南蓝泥蜂在广东地区使用黄泥和油脂泥土混合物筑巢，且海南蓝泥蜂在一根巢管中通常只构建 1 个孵育室且空间富余，这与多数独栖蜂会充分利用空间的习惯相反（Iwata，1976）。此外，发现海南蓝泥蜂会侵占其他蜂类筑巢的巢管，并在其最外端筑巢产卵，这一现象也在其他的同属物种日本蓝泥蜂 *Chalybion japonicum* 中得到了验证（Pham，2018），且类似的共筑巢现象也存在于 *Isodontia auripes* 等泥蜂科物种中（Barrett *et al.*，2022）。

海南蓝泥蜂的产卵行为及后代性别分配与

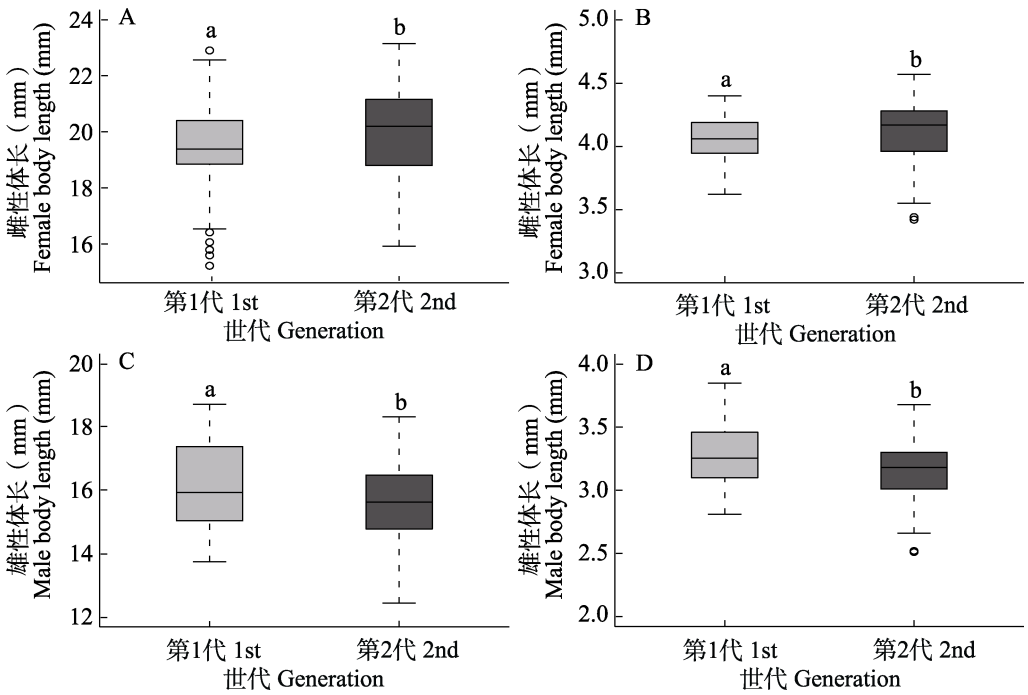

图 4　海南蓝泥蜂第 1 代和第 2 代雌雄个体的体长和头宽

Fig. 4　Body length and head width of male and female individuals in the first and second generations of *Chalybion hainanense*

A. 第 1 代和第 2 代雌性个体体长；B. 第 1 代和第 2 代雌性个体头宽；C. 第 1 代和第 2 代雄性个体体长；D. 第 1 代和第 2 代雄性个体头宽。不同小写字母代表差异显著（A 和 B：P<0.05，Wilcoxon 秩和检验；C：P<0.05，独立样本 t 检验；D：P<0.01，独立样本 t 检验）。

A. Body length of females in the first and second generations; B. Head width of females in the first and second generations; C. Body length of males in the first and second generations; D. Head width of males in the first and second generations. Different lowercase letters indicate significant difference (A and B: P<0.05, Wilcoxon rank-sum test; C: P<0.05, independent samples t-test; D: P<0.01, independent samples t-test).

筑巢结构相关。本研究发现，选择产雌性的巢管直径显著大于雄性，一定范围内，雌性比例随着巢管直径增加而逐渐升高，这与其他独栖蜂（*Trypoxylon rogenhoferi*、黄缘蜾蠃 *Anterhynchium flavomarginatum* 和凹唇壁蜂 *Osmia excavata*）的研究结果一致（Peruquetti and Del Lama，2003；郭鹏飞等，2018；王丽娜等，2018）。尽管海南蓝泥蜂雌雄个体孵育室长度间无显著差异，与一些报道过的泥蜂科物种（*Trypoxylon lactitarse* 和角短翅泥蜂 *Trypoxylon melanocorne*）结论相反（Buschini *et al.*，2006；胡俊杰等，2023），但其雌性个体孵育室体积显著大于雄性，主要是巢管直径差异所致。

3.2　生活史特征

本研究生活史数据表明，海南蓝泥蜂 1 年发生 2 代，以预蛹形态滞育越冬，羽化率较高，这可能与其越冬代较长的滞育期有关。Bosch（1994，1995）在 *Osmia cornuta* 中发现越冬代存活率与越冬周期呈正相关。海南蓝泥蜂的雌雄性比为 1.23∶1，具有雌性偏向性，推测原因与其一年二化性有关，一年二化性的物种可能会出现一代多产雌性，一代多产雄性的现象(Werren and Charnov，1978；Seger，1983)。本研究中该蜂第 1 代雌性偏向显著，第 2 代虽整体偏雌，但雄性数量占比（48.43%）相对 1 代（36.51%）显著上升，雌性占比（51.57%）相对 1 代（63.49%）显著下降。此外，局域配偶竞争（Local mate competition）也可能是导致雌性偏向的原因。在同一群落中，雄性个体为争取与其同胞雌性交配的机会而竞争，使得亲代倾向多产雌性以缓解雄性之间的交配竞争（Taylor，1981；Nunney and

Luck，1988）。由于海南蓝泥蜂多数情况一巢一卵，尚不清楚同一雌性个体是否会多巢产卵，因此无法完全排除局部配偶竞争导致雌性偏向的可能。

本研究进一步探讨了海南蓝泥蜂成虫个体大小的影响因素。体长和头宽是反映成虫个体大小的 2 个重要指标，与成虫重量有正相关关系（Fricke，1991；Kim and Thorp，2001；Straus and Aviles，2018；Barrett *et al.*，2022）。研究结果显示，海南蓝泥蜂雌雄成虫个体大小存在显著差异，通常雌性大于雄性，属于雌雄体型性二型物种，且体长与头宽呈正相关。此外，海南蓝泥蜂雌雄个体体长与孵育室长度均不相关，这与 Polidori 等（2011）在后佳盾蜾蠃 *Euodynerus posticus* 中的发现一致，推测原因是雌性产卵少，孵育室长度通常远远大于雌雄成蜂体长导致两者间不相关。直径较小的巢管会导致雌蜂偏向产体型较小的个体，巢管直径对后代的个体大小存在一定的影响（Longair，1981；O'Neill *et al.*，2010）。本研究中，巢管直径对雌蜂头宽有显著正影响，对雄蜂头宽无显著影响。类似现象也存在于其他蜂类，如 *E. posticus* 和 *Coelioxys modesta*（Polidori *et al.*，2011；O'Neill and O'Neill，2016）。

营养物质的积累是滞育物种提高越冬存活率的关键机制之一（Mitchell and Briegel，1989）。本研究比较了海南蓝泥蜂不同世代的差异，发现第 2 代（越冬代）的雌雄个体数量高于第 1 代。推测原因是第 2 代发生期与其食物发生高峰期时间重合度较高，雌蜂能够提供的食物资源更多；同时由于温度较低，雌蜂可能产更多的卵以保证存活率。在 *Tranosema rostrale* 中发现，低温时该蜂的潜在繁殖力较大（Seehausen *et al.*，2017）。亲代供应的食物量与子代个体大小间有密切联系，体长能够侧面反应其所消耗食物量（Mitchell and Briegel，1989；Straus and Aviles，2018；王丽娜等，2018）。在 *Osmia lignaria* 和额斑黄胡蜂 *Vespula maculifrons* 中发现个体大小与越冬存活率呈正相关（Tepedino and Torchio，1982；Kovacs and Goodisman，2012）。本研究结果显示第 2 代雌性个体大于第 1 代，而雄性小于第 1 代，可能原因是第 2 代的雌性占比下降，为保证种群繁衍，提高雌性存活率，雌性个体获得更多的食物，因此体型较大，而雄性则相反，这一现象的具体原因有待进一步研究验证。

3.3 结语

本研究明确了海南蓝泥蜂的筑巢产卵行为及生活史并探究了其世代间的差异，可以帮助管理者确定保护区蜂类数量及其规模，有助于其更好的繁殖，发挥传粉、控害、种群调节和维护森林生态系统的作用，为自然保护区和农林生态系统的昆虫多样性保护和利用提供科学依据。在本研究的基础上，未来可以进一步应用相关技术开展食物来源及其天敌类群的定性和定量分析，有利于更全面地掌握其生存与繁殖策略。

致谢：野外调查工作得到了广东车八岭国家级自然保护区管理局和当地村民的积极支持和帮助。感谢中国科学院动物研究所袁峰老师和周青松老师对海南蓝泥蜂的鉴定。

参考文献 (References)

Barthélémy C, 2011. Notes on the biology of the conspicuous mud dauber wasp, *Chalybion hainanense* (Gribodo, 1883) (Sphecidae), a major predator of spiders in Hong Kong. *Hong Kong Entomological Bulletin*, 3(1): 7–14.

Barrett M, Kang AK, Gomez A, Kainth D, O'Donnell S, 2022. Nest architecture, prey, and body size in the grass-carrying wasp, *Isodontia auripes*, at two sites in New York (Hymenoptera: Sphecidae). *Journal of the Kansas Entomological Society*, 94(3): 199–212.

Batra SWT, 1984. Solitary bees. *Scientific American*, 250(2): 120–127.

Bohart RM, Menke AS, 1976. Sphecid Wasps of the World: A Generic Revision. California: University of California Press. 695.

Bosch J, 1994. Improvement of field management of *Osmia cornuta* (Latreille) (Hymenoptera, Megachilidae) to pollinate almond. *Apidologie*, 25(1): 71–83.

Bosch J, 1995. Comparison of nesting materials for the orchard pollinator *Osmia cornuta* (Hymenoptera: Megachilidae). *Entomologia generalis*, 19(4): 285–289.

Brock RE, Cini A, Sumner S, 2021. Ecosystem services provided by aculeate wasps. *Biological Reviews*, 96(4): 1645–1675.

Brockmann HJ, 2004. Variable life-history and emergence patterns of the pipe-organ mud-daubing wasp, *Trypoxylon politum* (Hymenoptera: Sphecidae). *Journal of the Kansas Entomological Society*, 77(4): 503–527.

Buschini MLT, Niesing F, Wolff LL, 2006. Nesting biology of *Trypoxylon* (*Trypargilum*) *lactitarse* Saussure (Hymenoptera, Crabronidae) in trap-nests in Southern Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 66(3): 919–929.

Coville RE, Coville PL, 1980. Nesting biology and male behavior of *Trypoxylon* (*Trypargilum*) *tenoctitlan* in Costa Rica (Hymenoptera: Sphecidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 73(1): 110–119.

Fateryga AV, Kovblyuk MM, Kvetkov RS, 2020. The first data on the nesting biology of the invasive blue nest-renting wasp, *Chalybion turanicum* (Gussakovskij, 1935) (Hymenoptera, Sphecidae, Sceliphrinae) in the Crimea. *Acta Biologica Sibirica*, 6: 571–582.

Fricke JM, 1991. Trap-nest bore diameter preferences among sympatric *Passaloecus* spp. (Hymenoptera: Sphecidae). *The Great Lakes Entomologist*, 24(2): 10.

Gess SK, Gess FW, 2014. Wasps and Bees in Southern Africa. Pretoria: South African National Biodiversity Institute. 320.

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.]

Harris AC, 1998. Nesting behaviour, life history and description of the mature larva of the beetle predator, *Podagritus parrotti* Leclercq (Hymenoptera: Sphecidae: Crabroninae). *Journal of the Royal Society of New Zealand*, 28(4): 591–604.

Hu JJ, Fang QB, Wang X, Sun KL, Liu XY, He CL, 2023. Morphological characteristics and nesting behavior of *Trypoxylon melanocorne* (Hymenoptera: Sphecidae). *Acta Entomologica. Sinica*, 66(6): 805–815. [胡俊杰, 方全博, 王翔, 孙凯丽, 刘潇宇, 贺春玲, 2023. 角短翅泥蜂的形态特征和筑巢行为. 昆虫学报, 66(6): 805–815.]

Iwata K, 1976. Evolution of instinct//Kunio I (ed.). Comparative Ethology of Hymenoptera. New Delhi: Amerind. 535.

Kim JY, Thorp RW, 2001. Maternal investment and size-number trade-off in a bee, *Megachile apicalis*, in seasonal environments. *Oecologia*, 126(3): 451–456.

Kovacs JL, Goodisman MAD, 2012. Effects of size, shape, genotype, and mating status on queen overwintering survival in the social wasp *Vespula maculifrons*. *Environmental Entomology*, 41(6): 1612–1620.

Krombein KV, 1967. Trap-nesting Wasps and Bees: Life Histories, Nests and Associates. Washington: Smithsonian Press. 570.

Kazenas VL, 2001. Fauna and Biology of Sphecid Wasps (Hymenoptera, Sphecidae) of Kazakhstan and Central Asia. Almaty: Kazgos INTI. 333.

Longair RW, 1981. Sex ratio variations in xylophilous aculeate Hymenoptera. *Evolution*, 35(3): 597–600.

Masaki S, 1978. Seasonal and latitudinal adaptations in the life cycles of crickets//Dingle H (eds.). Evolution of Insect Migration and Diapause. New York: Springer-Verlag. 72–100.

Miller RC, Kurczewski FE, 1972. A review of nesting behavior in the genus *Entomognathus*, with notes on *E. memorialis* Banks (Hymenoptera: Sphecidae). *Psyche*: *A Journal of Entomology*, 79(1/2): 61–78.

Mitchell CJ, Briegel H, 1989. Inability of diapausing *Culex pipiens* (Diptera: Culicidae) to use blood for producing lipid reserves for overwinter survival. *Journal of Medical Entomology*, 26(4): 318–326.

Morato EF, Martins RP, 2006. An overview of proximate factors affecting the nesting behavior of solitary wasps and bees (Hymenoptera: Aculeata) in preexisting cavities in wood. *Neotropical Entomology*, 35(3): 285–298.

Nunney L, Luck RF, 1988. Factors influencing the optimum sex ratio in a structured population. *Theoretical Population Biology*, 33(1): 1–30.

O'Neill KM, Pearce AM, O'Neill RP, Miller RS, 2010. Offspring size and sex ratio variation in a feral population of alfalfa leafcutting bees (Hymenoptera: Megachilidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 103(5): 775–784.

O'Neill KM, O'Neill JF, 2016. Brood parasitism of the resin bee *Megachile campanulae* (Robertson) by *Coelioxys modesta* Smith (Hymenoptera: Megachilidae). *Journal of the Kansas Entomological Society*, 89(2): 117–127.

Orr MC, Jakob M, Harmon-Threatt A, Mupepele AC, 2022. A review of global trends in the study types used to investigate bee nesting biology. *Basic and Applied Ecology*, 62: 12–21.

Peruquetti RC, Del Lama MA, 2003. Sex allocation and sex-dependent selection for body size in *Trypoxylon rogenhoferi* Kohl (Hymenoptera, Sphecidae). *Revista Brasileira de Entomologia*, 47(4): 581–588.

Pham PH, 2018. Notes on nesting and gregarious behavior of a blue nest-renting wasp, *Chalybion hainanense* (Gribodo) with

comments on commonly used name for *Chalybion* species (Hymenoptera: Sphecidae). *Entomologica Americana*, 124(1/4): 35–38.

Polidori C, Boesi R, Borsato W, 2011. Few, small, and male: Multiple effects of reduced nest space on the offspring of the solitary wasp, *Euodynerus* (*Pareuodynerus*) *Posticus* (Hymenoptera: Vespidae). *Comptes Rendus Biologies*, 334(1): 50–60.

Potts SG, Imperatriz-Fonseca V, Ngo HT, Aizen MA, Biesmeijer JC, Breeze TD, Dicks LV, Garibaldi LA, Hill R, Settele J, Vanbergen AJ, 2016. Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, 540(7632): 220–229.

Pulawski WJ, 2024. Number of Extant Species of Sphecidae sensu lato.12 August 2024, https://researcharchive.calacademy.org/research/entomology/entomology_resources/hymenoptera/sphecidae/number_of_species.pdf.

Seehausen ML, Régnière J, Martel V, Smith SM, 2017. Developmental and reproductive responses of the spruce budworm (Lepidoptera: Tortricidae) parasitoid *Tranosema rostrale* (Hymenoptera: Ichneumonidae) to temperature. *Journal of Insect Physiology*, 98: 38–46.

Seger J, 1983. Partial bivoltinism may cause alternating sex-ratio biases that favour eusociality. *Nature*, 301(5895): 59–62.

Straus S, Avilés L, 2018. Estimating consumable biomass from body length and order in insects and spiders. *Ecological Entomology*, 43(1): 69–75.

Stubblefield JW, Seger J, Short RV, Balaban E, 1994. Sexual dimorphism in the Hymenoptera//Short RV, Balaban E (eds.). The Differences Between the Sexes. Cambridge: Cambridge University Press. 71–103.

Terayama M, Tano T, 2018. A new species of the blue mud-dauber wasp genus *Chalybion* Dahlbom (Hymenoptera: Apoidea: Sphecidae) from Hainan Island, southeastern China. *Tsunekibachi*, 32: 1–5.

Tauber MJ, Tauber CA, Masaki S, 1986. Seasonal Adaptations of Insects. New York: Oxford University Press. 411

Taylor PD, 1981. Intra-sex and inter-sex sibling interactions as sex ratio determinants. *Nature*, 291(5810): 64–66.

Tepedino VJ, Torchio PF, 1982. Phenotypic variability in nesting success among *Osmia lignaria propinqua* females in a glasshouse environment: (Hymenoptera: Megachilidae). *Ecological Entomology*, 7(4): 453–462.

Torchio PF, Tepedino VJ, 1980. Sex ratio, body size and seasonality in a solitary bee, *Osmia lignaria propinqua* Cresson (Hymenoptera: Megachilidae). *Evolution*, 34(5): 993–1003.

Wang LN, Yan Z, Ou YF, Men XY, Ye BH, 2018. The inner diameter of nest tubes influences reproductive parameters of *Osmia excavata* Alfken (Hymenoptera: Megachilidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(6):1001–1006. [王丽娜, 闫卓, 欧阳芳, 门兴元, 叶保华, 2018. 巢管内径尺寸对凹唇壁蜂(膜翅目: 切叶蜂科)种群参数的影响. 应用昆虫学报, 55(6): 1001–1006.]

Werren JH, Charnov EL, 1978. Facultative sex ratios and population dynamics. *Nature*, 272(5651): 349–350.

Willmer PG, Cunnold H, Ballantyne G, 2017. Insights from measuring pollen deposition: Quantifying the pre-eminence of bees as flower visitors and effective pollinators. *Arthropod-Plant Interactions*, 11(3): 411–425.

Wu YR, Zhou Q, 1996. Economic Insect Fauna of China. Vol. 52. Hymenoptera: Sphecidae. Beijing: Science Press. 197. [吴燕如, 周勤, 1996. 中国经济昆虫志. 第 52 册. 膜翅目: 泥蜂科. 北京: 科学出版社. 197.]

Wu ZH, Wang Z, Luan FC, Shu ZF, Li BH, 2021. Community composition and floral characteristics of the Chebaling 20 hm^2 forest dynamic plot in a mid-subtropical evergreen broad-leaved fores. *Forestry and Environmental Science*, 37(3): 86–91. [吴智宏, 王梓, 栾福臣, 束祖飞, 李步杭, 2021. 车八岭 20 hm^2 中亚热带常绿阔叶林监测样地群落物种组成和区系特征. 林业与环境科学, 37(3): 86–91.]

Xiao ZS, 2019. Inventory and Assessment of Wildlife and its Habitat in Protected Areas-An Example from Chebaling National Nature Reserve, Guangdong, China. Beijing: China Forestry Publishing House Press. 199. [肖治术, 2019. 自然保护地野生动物及栖息地的调查与评估研究—广东车八岭国家级自然保护区案例分析. 北京: 中国林业出版社. 199.]

Xu YQ, 1993. A comprehensive report on investigation in Chebaling National Nature Reserve//Editorial Committee of Collected Papers for Investigation in Chebaling National Nature Reserve (eds.). Collected Papers for Investigation in Chebaling National Nature Reserve. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press. 1–7. [徐燕千, 1993. 车八岭国家级自然保护区调查研究综合报告//车八岭国家级自然保护区调查研究论文集编委会编. 车八岭国家级自然保护区调查研究论文集. 广州: 广东科技出版社. 1–7.]