生物多样性 BIODIVERSITY SCIENCE
2023, 31 (2): 22060, pages 1–17
doi: 10.17520/biods.2022060

•研究报告•

中国亚热带森林筑巢独栖蜂类群及其寄生者多样性

郭士琨[1,2], 王明强[1,2], 郭鹏飞[1,3], 陈婧婷[1,2], 牛泽清[1], 罗阿蓉[1], 杨娟娟[1,2], 周青松[1], 朱朝东[1,2*]

1. 中国科学院动物研究所动物进化与系统学(院)重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049; 3. 贵州中医药大学药学院, 贵阳 550025

摘要: 筑巢独栖蜂包括捕食者和传粉者, 在生态系统中具有重要的生态功能。巢管法用于研究筑巢蜂的生物学、生活史、多样性和生态学特性, 但此前较少用于研究亚热带森林中的独栖蜂。经过在生物多样性–生态系统功能实验(BEF-China)新岗山样地5年的长期定点监测和实验样本积累, 我们发现了独栖蜂的主要类群和发生规律。巢管法共获得128个物种, 隶属于3目25科。其中传粉者占全部独栖蜂的26.6%, 共2科12种, 主要为分舌蜂和切叶蜂; 捕食者约占全部独栖蜂的73.4%, 有4科44种, 以蜾蠃、蛛蜂、泥蜂和方头泥蜂为主; 独栖蜂寄生者有19科72种, 主要类群是麻蝇、蜂虻、青蜂、钩腹蜂和姬小蜂。独栖蜂物种组成中传粉者多样性显著低于捕食者。同时独栖蜂中普遍存在着雌雄羽化异律现象, 即雄性先羽化, 并在越冬个体中更明显。切叶蜂科和方头泥蜂科的发生时间比蜾蠃亚科和蛛蜂科的发生时间更集中。此外, 通过构建独栖蜂及其寄生者的互作网络, 我们发现寄生者多度和多样性受较低营养级寄主的上行控制效应调节。上述结果揭示了对中国亚热带森林地区独栖蜂及其寄生者多样性, 有利于更好地保护野生独栖蜂资源, 发挥其生态服务功能。

关键词: BEF-China; 生物多样性; 独栖蜂; 寄生者; 生物学特性

郭士琨, 王明强, 郭鹏飞, 陈婧婷, 牛泽清, 罗阿蓉, 杨娟娟, 周青松, 朱朝东 (2023) 中国亚热带森林筑巢独栖蜂类群及其寄生者多样性. 生物多样性, 31, 22060. doi: 10.17520/biods.2022060.
Guo SK, Wang MQ, Guo PF, Chen JT, Niu ZQ, Luo AR, Yang JJ, Zhou QS, Zhu CD (2023) Diversity of cavity-nesting Hymenoptera and their parasitoids in subtropical forests, southeastern China. Biodiversity Science, 31, 22060. doi: 10.17520/biods.2022060.

Diversity of cavity-nesting Hymenoptera and their parasitoids in subtropical forests, southeastern China

Shikun Guo[1,2], Mingqiang Wang[1,2], Pengfei Guo[1,3], Jingting Chen[1,2], Zeqing Niu[1], Arong Luo[1], Juanjuan Yang[1,2], Qingsong Zhou[1], Chaodong Zhu[1,2*]

1 *Key Laboratory of Zoological Systematics and Evolution, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*
2 *College of Life Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*
3 *Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025*

ABSTRACT

Backgruound & Aims: Cavity-nesting Hymenoptera are both predators and pollinators and provide key services for ecosystem functioning. Previously, there have been few studies on cavity-nesting Hymenoptera in subtropical forests. Yet this study aims to better understand the diversity and biology of cavity-nesting Hymenopterans in subtropical forest in China.

Methods: Trap nests were used to study the biology, life history, diversity and ecology of solitary bees and wasps. We used this method to collect cavity-nesting Hymenoptera in 88 plots. Based on five years of long-term monitoring and sampling on Biodiversity–Ecosystem Functioning Experiment China (BEF-China) platform, we recorded the species diversity of cavity-nesting Hymenoptera and relevant occurrence patterns of solitary bees and wasps.

收稿日期: 2022-01-30; 接受日期: 2022-06-21
基金项目: 中国科学院B类先导科技专项(XDB310304)、国家杰出青年科学基金(31625024)和科技部基础资源调查项目(中国东部传粉昆虫资源调查与评估) (2018FY100401)
* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhucd@ioz.ac.cn

Results: We found 3 orders, 25 families and 128 species in the trap nest system. Pollinators accounted for 26.6% of the diversity, mainly including Colletidae and Megachilidae with 12 species in 2 families. Predators represented 73.4% of the diversity, mainly including Eumeninae, Sphecidae, Pompilidae and Crabronidae with 44 species in 4 families. There were 72 species of parasitoids in 19 families, mainly including Sarcophagidae, Bombyliidae, Chrysididae, Trigonalyidae, and Eulophidae.

Conclusion: For species composition, we found the diversity of pollinators was significantly less than that of predators. Meanwhile, we noted the protandry was common in cavity-nesting Hymenoptera and more obvious in overwintering individuals. In addition, we also found variable occurrence patterns in different species. The occurrence time of Megachilidae and Crabronidae were more concentrated than that of Eumeninae and Pompilidae. Finally, by constructing the interaction relationship between host and parasitoids, we explained the abundance and richness of parasitoids to be regulated by the bottom-up effect of lower trophic hosts. Ultimately, a greater understanding of these organisms will help to better protect the resources wild cavity-nesting Hymenoptera use for their ecological services.

Key words: BEF-China; biodiversity; solitary bee and wasp; parasitoid; biological characteristics

独栖蜂在分类学上属于膜翅目细腰亚目。它们最显著的生物学习性是独栖性，即雌性独自产下后代，建造巢穴，并寻找食物资源来供养它们的后代(Danforth et al, 2019)。在自然条件下，很多独栖蜂会选择在空腔洞穴中筑巢(Iwata, 1976)，场所可包括地面或石头上的孔洞、砖石缝隙、甲虫洞穴、蜗牛壳、空虫瘿，以及形状与空腔洞穴接近的几乎所有其他场所(Rozen & Eickwort, 1997)。独栖蜂功能类群包括独栖蜜蜂(传粉者，访花采粉)和捕食蜂(捕食者，捕食鳞翅目幼虫、蜘蛛等各种节肢动物)。此外，还有与独栖蜂密切相关的寄生类群。独栖蜂和寄生者是生态系统重要的组成部分，与环境密切相关(Loyola & Martins, 2006)。

独栖蜂的分布更倾向于干燥的环境，而非湿润的地区(Danforth et al, 2019)。温度是影响独栖蜂物种丰富度的重要因素，通常温度越高物种丰富度越高(Mayr et al, 2020)。在草地生态系统中，捕食蜂类群多样性与植物多样性直接正相关，而独栖蜜蜂和寄生者多样性与植物多样性间接正相关(Ebeling et al, 2012)。在温带森林中，尽管植物多样性对独栖蜜蜂和捕食蜂的物种丰富度没有影响，但是它们的多度与植物多样性正相关，同时它们天敌的丰富度和多度也增加(Sobek et al, 2009)。在亚热带森林系统中，研究发现独栖蜜蜂的丰富度和多度与树种丰富度无关，但是捕食蜂和寄生者的丰富度和多度与树种丰富度呈正相关(Guo et al, 2021)；独栖蜂与其寄生性天敌的多度以及树木的生物量和郁闭度正相关，丰富度与树木多度正相关(Fornoff et al, 2021)。

独栖蜂是生态系统中重要的捕食者、传粉者，有非常重要的生态功能和研究价值。巢管法为研究独栖蜂提供了良好的技术支持。在环境中设置巢管来模拟和替代独栖蜂在自然环境下的巢穴，利用其在空腔洞穴中筑巢的习性，吸引它们在巢管中筑巢，以达到收集样本的目的(Tscharntke et al, 1998)。利用巢管的独栖蜂研究涉及生物分类学、生物生活史、生态学甚至农业生产等多个方面。自第一篇文章(Medler & Fye, 1956)发表到1980年前后，巢管法主要用于研究独栖蜂生活史等生物学特性。1980年以后，特别是1990年至今，巢管法的相关研究大多以生态学为主(Staab et al, 2018)。

关于独栖蜂的生物学特性研究涉及温带、亚热带和热带几乎所有气候类型地区，如南美洲热带和亚热带的森林、种植园、沼泽和草地等(Hermes et al, 2013; Buschini & Buss, 2014; da Costa & Buschini, 2016; Marinho et al, 2018)；北美洲亚热带和温带山区、沙地、森林、草地和果园等(Giles & Ascher, 2006; Cane et al, 2007)；欧洲亚热带和温带的森林、草地和农田(Moron et al, 2008; Polidori et al, 2010; Osorio et al, 2015; Tucker et al, 2019)；非洲热带森林、草原和乞力马扎罗山区(Longair, 2004; Mayr et al, 2020)；甚至包括大洋洲澳大利亚的亚热带地区(Paini, 2004)。研究类群包括蜜蜂科、切叶蜂科、胡蜂科的蜾蠃亚科、蛛蜂科、泥蜂科和方头泥蜂科，而研究内容多是筑巢习性、季节动态、发生规律和寄生性天敌等生物学特性。对独栖蜂的研究遍布世界各地，大部分研究集中在北半球的温带和南半球的热带地区，主要有巴西(29.6%)、美国(24.7%)和德国(5.5%)，而对亚洲地区和亚热带地区的研究非常缺乏(Staab et al, 2018)。其中只有很少的研究在亚洲地区进行，如越南亚热带地区的黄喙蜾蠃(*Rhynchium*

brunneum)和倾秀蜾蠃(*Pareumenes quadrispinosus*) (Dang & Nguyen, 2019; Dang & Fateryga, 2021)、印度亚热带地区的*Megachile studiosa* (Kunjwal et al, 2021)、尼泊尔亚热带萨加玛塔国家公园的*Ancistrocerus sikhimensis*及其寄生性天敌(Boesi et al, 2005)等。在中国亚热带地区的研究更加稀少，只有少数物种的生物学特性记录，如捕食蜚蠊的*Isodontia diodon* (Barthélémy, 2010)、黄缘蜾蠃(*Anterhynchium flavomarginatum*) (窦飞越等, 2021)、日本佳盾蜾蠃(*Euodynerus nipanicus*) (黄敦元等, 2014)、缘叶舌蜂(*Hylaeus perforata*)及其天敌窄头褶翅蜂(*Gasteruption corniculigerum*) (郭鹏飞等, 2021)等。综上，世界范围内对独栖蜂的研究多集中在单个物种的生物学特性方面，仍缺乏对中国亚热带地区独栖蜂物种多样性和生物学特性的研究。

本研究基于世界上最大的亚热带树木多样性实验样地BEF-China (Bruelheide et al, 2014)，通过长期野外定点监测，综合研究了中国亚热带森林地区独栖蜂及其寄生者的多样性和生物学特征，以期为进一步研究独栖蜂与生态系统中环境因素的相互作用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验地点

本研究的实验地点位于中国东南部的江西省新岗山镇(117°54′ E, 29°07′ N)的亚热带森林中。实验样点包括A样地和B样地，两个样地相距4 km，面积共50 ha。在两个样地共设计了566个样方(每个样方大小为25.8 m × 25.8 m)。样方中所有树木均为本地物种(乔木物种信息请参见附录1)，分别于2009年(A样地)和2010年(B样地)种植(Bruelheide et al, 2014)。实验将两个样地原来的树木全部砍伐，按照树种丰富度梯度重新栽种。每个样方种植树木400株，共20行20列，每棵树间距离1.29 m。两个样地共选择88个样方设置巢管，其中A样地40个样方，B样地48个样方。A样地样方间平均距离为324.3 m, B样地样方间平均距离为314.2 m，以确保覆盖整个样地(样方分布参见附录2)。88个样方由1种树(24个样方)、2种树(16个)、4种树(16个)、8种树(16个)、16种树(12个)和24种树(4个)的多样性梯度组成(树种信息参见附录3、4)。树种多样性梯度按照断棍式(stick breaking)设计，使每个树种在所有的多样性梯度下都能出现。

1.2 实验方法与材料

在每个样方的中心(7 m × 7 m)沿东北、西南方向对角线端点放置两个巢管，管口东西朝向。每个巢管由芦苇管、塑料管和木桩组成。芦苇管长度150–200 mm，直径范围为0.2–2.5 cm，塑料管直径约12.5 cm，长度22 cm。芦苇管使用当地野生芦苇(*Phragmites* sp.)，烘干后制作备用。巢管装置固定在木桩上，高度约1.5 m。本研究的样本收集分别于2015、2016、2018、2019、2020年的4–10月的月底进行。通过观察巢口是否有黏土或树脂封口判断是否筑巢，将筑巢的芦苇管加标签带回实验室处理。

在实验室中剖开巢管，测量并初步记录以下信息：巢管收集日期、巢管长度、巢管直径、筑巢材料、封口材料、寄主食物、巢室数量、寄主数量、寄主物种、是否寄生、寄生者物种、寄生者数量。将处理好的巢管加标签放入玻璃管中，用棉花塞紧瓶口在室温下饲养、观察。以天为单位定期观察试管中筑巢蜂及其寄生类群羽化情况，确认并记录以下信息：寄主物种、性别、羽化时间和羽化数量，以及寄生者物种和羽化时间。选取部分样品针插制成干制标本进行后续鉴定。

所有数据录入到Excel 2010中，统计分析在R 4.1.2中执行，使用ggplot2、dplyr和ggsci包作图。

2 结果

2.1 独栖蜂多样性

巢管中全部样本共计25,354头，其中独栖蜂21,154头。巢管中的独栖蜂属于6科56种。其中，传粉者是独栖蜜蜂，并不包括泥蜂科和方头泥蜂科。尽管泥蜂科和方头泥蜂科在最新的分类系统上属于蜜蜂总科，但在本研究中根据食性将其归为捕食者功能群。传粉者共5,623头，占全部独栖蜂的26.58%，共有2科12种。捕食者有15,531头，占全部独栖蜂的73.4%，是整个巢管系统的优势类群，包括蜾蠃、蛛蜂、泥蜂和方头泥蜂4类，共有4科44种。所有独栖蜂物种如表1所示。

2.2 独栖蜂寄生者多样性

寄生者包括3目19科72种。寄生者分为两类：一类是寄生在独栖蜂中的拟寄生者和盗寄生者，另一

表1　生物多样性–生态系统功能实验(BEF-China)新岗山样地独栖蜂物种组成

Table 1　Species composition of cavity-nesting Hymenoptera in Biodiversity–Ecosystem Functioning Experiment China (BEF-China) plots in Xingangshan

科 Family	种 Species	科 Family	种 Species
分舌蜂科 Colletidae	叶舌蜂一种 *Hylaeus* sp. 1		四代佳盾蜾蠃 *E. quadrifasciatus*
切叶蜂科 Megachilidae	黑孔蜂 *Heriades sauteri*		墨体胸蜾蠃 *Orancistrocerus aterrimus*
	脊跗拟孔蜂 *Hoplitis carinotarsa*		黑胸蜾蠃 *O. drewseni*
	白斑切叶蜂 *Megachile strupigera*		丽旁喙蜾蠃 *Pararrhynchium ornatum*
	丘切叶蜂 *M. monticola*		倾秀蜾蠃 *Pareumenes quadrispinosus*
	拟丘切叶蜂 *M. pseudomonticola*	泥蜂科 Sphecidae	日本蓝泥蜂 *Chalybion japonicum*
	窄切叶蜂 *M. rixator*		黑等齿泥蜂 *Isodontia nigella*
	粗切叶蜂 *M. sculpturalis*		驼腹壁泥蜂 *Sceliphron deforme*
	细切叶蜂 *M. spissula*	方头泥蜂科 Crabronidae	*Passaloecus insignis*
	双切叶蜂 *M. dinura*		褐带豆短翅泥蜂 *Pison atripenne*
	壮壁蜂 *Osmia taurus*		*Pisoxylon* sp. 1
	Trachusa staabi		双色短翅泥蜂 *Trypoxylon bicolor*
胡蜂科 Vespidae	中华异喙蜾蠃 *Allorhynchium chinense*		*Trypoxylon schmiedeknechtii*
	黄缘蜾蠃 *Anterhynchium flavomarginatum*	蛛蜂科 Pompilidae	垦丁奥沟蛛蜂 *Auplopus kuarensis*
	黑唇元蜾蠃 *Discoelius nigridypeus*		奥沟蛛蜂属一种 *Auplopus carbonarius*
	元蜾蠃属一种 *Discoelius* sp. 1		奥沟蛛蜂属一种 *Auplopus* sp. 1
	王氏元蜾蠃 *Discoelius wangi*		奥沟蛛蜂属一种 *Auplopus* sp. 2
	福建埃蜾蠃 *Epsilon fujianensis*		奥沟蛛蜂属一种 *Auplopus* sp. 3
	方蜾蠃 *Eumenes quadratus*		奥沟蛛蜂属一种 *Auplopus* sp. 4
	Eumenes sillicus		奥沟蛛蜂属一种 *Auplopus* sp. 5
	蜾蠃属一种 *Eumenes* sp. 1		奥沟蛛蜂属一种 *Auplopus* sp. 6
	蜾蠃亚科一种 Eumeninae sp. 1		奥沟蛛蜂属一种 *Auplopus* sp. 7
	蜾蠃亚科一种 Eumeninae sp. 2		奥沟蛛蜂属一种 *Auplopus* sp. 9
	蜾蠃亚科一种 Eumeninae sp. 3		奥沟蛛蜂属一种 *Auplopus* sp. 10
	蜾蠃亚科一种 Eumeninae sp. 4		奥沟蛛蜂属一种 *Auplopus* sp. 11
	蜾蠃亚科一种 Eumeninae sp. 5		奥沟蛛蜂属一种 *Auplopus* sp. 12
	蜾蠃亚科一种 Eumeninae sp. 8		*Deuteragenia ossarium*
	显佳盾蜾蠃 *Euodynerus notatus*		蛛蜂科一种 Pompilidae sp. 1

类是寄生在独栖蜂食物中的寄生者。食物寄生者是巢管里的一种特殊情况(不同于盗寄生者)，通常是寄生者先在猎物体内寄生，然后猎物被蜾蠃等捕获成为食物。被寄生的猎物并不会被取食，寄生者会在巢管内羽化，但并不影响独栖蜂的正常羽化。

拟寄生者涉及3目：鞘翅目、膜翅目和双翅目，包括14科36种。盗寄生类群涉及2个目，分别是膜翅目和双翅目，包括4科15种。多胚跳小蜂属一种(*Copidosoma* sp. 1)的理论寄主是鳞翅目幼虫，但观察发现整个巢室中蜾蠃和食物全部被取食，同时多胚跳小蜂只有1头样本，因此归为拟寄生者类群。全部寄生类群物种如表2所示。

食物寄生者涉及2个目，分别是膜翅目和双翅目，共有6科21种。所有食物寄生的类群寄生行为均发生在雌性独栖蜂捕食之前，而且这种情况只出现在捕食者类群中。被寄生的猎物只是被捕食者麻醉，因此通常寄生者会在巢室中完成发育并羽化。而几乎不影响巢管独栖蜂的生长发育，所以这些寄生者与寄主无直接关系，只是独栖蜂雌性的捕食行为将其联系起来。食物寄生类群物种如表3所示。

表2　新岗山样地独栖蜂全部寄生类群物种组成

Table 2　Species composition of parasitoids of cavity-nesting Hymenoptera in Xingangshan plots

科 Family	种 Species
膜翅目 Hymenoptera	
茧蜂科 Braconidae	Braconidae sp. 1
姬小蜂科 Eulophidae	*Chaenotetrastichus semiflavus*
	Eulophidae sp. 1
	Kocourekia sp. 1
	Melittobia australica
	M. clavicornis
	M. sosui
	Melittobia sp. 1
	Melittobia sp. 2
青蜂科 Chrysididae	青蜂亚科一种 Chrysidinae sp. 1
	青蜂亚科一种 Chrysidinae sp. 2
	青蜂亚科一种 Chrysidinae sp. 3
	青蜂亚科一种 Chrysidinae sp. 4
	青蜂亚科一种 Chrysidinae sp. 5
	Chrysis principalis
	Chrysura sp. 1
跳小蜂科 Encyrtidae	多胚跳小蜂属一种 *Copidosoma* sp. 1
姬蜂科 Ichneumonidae	*Dusona* sp. 1
	姬蜂科一种 Ichneumonidae sp. 1
	姬蜂科一种 Ichneumonidae sp. 5
	姬蜂科一种 Ichneumonidae sp. 6
	姬蜂科一种 Ichneumonidae sp. 7
	Picardiella melanoleuca
褶翅小蜂科 Leucospidae	日本褶翅小蜂 *Leucospis japonicas*
	褶翅小蜂属一种 *Leucospis* sp. 1
钩腹蜂科 Trigonalyidae	*Lycogaster flavonigrata*
	青翅狼钩腹蜂 *Lycogaster violaceipennis*
蚁蜂科 Mutillidae	蚁蜂科一种 Mutillidae sp. 1
	蚁蜂科一种 Mutillidae sp. 2
巨胸小蜂科 Perilampidae	巨胸小蜂科一种 Perilampidae sp. 1
膜翅目 Hymenoptera	
长尾小蜂科 Torymidae	长尾小蜂科一种 Torymidae sp. 1
切叶蜂科 Megachilidae	厚腹尖腹蜂 *Coelioxys crassiventris*
	C. fenestrate
	尖腹蜂属一种 *Coelioxys* sp. 1
	基赤腹蜂 *Euaspis basalis*
	波赤腹蜂 *E. polynesia*
褶翅蜂科 Gasteruptiidae	窄头褶翅蜂 *Gasteruption corniculigerum*
双翅目 Diptera	
蜂虻科 Bombyliidae	岩蜂虻属 *Anthrax* sp. 1
	蜂虻科一种 Bombyliidae sp. 1
	蜂虻科一种 Bombyliidae sp. 2
	蜂虻科一种 Bombyliidae sp. 3
蚤蝇科 Phoridae	蚤蝇科一种 Phoridae sp. 1
	蚤蝇科一种Phoridae sp. 2
麻蝇科 Sarcophagidae	耳摩蜂麻蝇 *Amobia auriceps*
	摩蜂麻蝇属一种 *Amobia* sp. 1
	蜂麻蝇属一种 *Miltogramma* sp. 1
	蜂麻蝇属一种 *Miltogramma* sp. 2
	蜂麻蝇属一种 *Miltogramma* sp. 3
	赛蜂麻蝇属一种 *Senotainia* sp. 1
鞘翅目 Coleoptera	
芫菁科 Meloidae	*Zonitis* sp. 1
大花蚤科 Ripiphoridae	大花蚤科一种 Ripiphoridae sp. 1

表3　新岗山样地独栖蜂食物寄生类群物种组成

Table 3　Species composition of food parasitoids of cavity-nesting Hymenoptera in Xingangshan plots

科 Family	种 Species
膜翅目 Hymenoptera	
茧蜂科 Braconidae	脊茧蜂属一种 *Aleiodes* sp. 1
	长绒茧蜂属一种 *Dolichogenidea* sp. 1
	小腹茧蜂属一种 *Microgaster* sp. 1
	小腹茧蜂属一种 *Microgaster* sp. 2
	小腹茧蜂属一种 *Microgaster* sp. 3
	小腹茧蜂亚科一种 Microgastrinae sp. 1
	小腹茧蜂亚科一种 Microgastrinae sp. 2
	Yelicones belokobylskiji
姬蜂科 Ichneumonidae	*Skeatia* sp. 1
	Skeatia sp. 2
广肩小蜂科 Eurytomidae	*Eurytoma* sp. 1
双翅目 Diptera	
厕蝇科 Fanniidae	Fanniidae sp. 1
寄蝇科 Tachinidae	*Argyrophylax* sp. 1
	十和田阿特寄蝇 *Atylostoma towadensis*
	Belvosia sp. 1
	Cordyligaster sp. 1
	Exoristinae sp. 1
	花截尾寄蝇 *Nemorilla floralis*
	Patelloa sp. 1
	Senometopia sp. 1
麻蝇科 Sarcophagidae	*Sarcophaga albiceps*

2.3　生物学特性

2.3.1　独栖蜂

传粉者主要为分舌蜂和切叶蜂，以花粉为食；捕食者主要为蜾蠃、蛛蜂、泥蜂和方头泥蜂。其中蜾蠃以鳞翅目幼虫为食(占捕食性蜂食物的86.16%)；蛛蜂、部分泥蜂和部分方头泥蜂以蜘蛛为食(占12.53%)；一种方头泥蜂以蚜虫为食(占0.34%)；一种泥蜂以草螽为食(占0.97%) (食物组成见附录5)。

(1)分舌蜂科叶舌蜂。数量为125头，在传粉者里比例很小，约为2.2%。该蜂一年可发生多代，筑巢活动时间是5–9月，羽化时间是4–9月。其中5–8月个体均在1个月左右羽化，而9月份仅部分个体在1个月内羽化，其余个体于次年4月底至5月初羽化。分舌蜂科物种的筑巢材料是自身的腺体分泌物，形成膜质结构分割巢。窄头褶翅蜂专性盗寄生于该种分舌蜂，羽化时间通常早于寄主分舌蜂。

(2)切叶蜂。共5,498头，占全部传粉者数量的97.8%，是传粉的主要类群。切叶蜂共有11个种，生活史相当多样化。双切叶蜂(*Megachile dinura*)、丘切叶蜂(*M. monticola*)和拟丘切叶蜂(*M. pseudomonticola*)是稀有种。其中双切叶蜂(占切叶蜂的0.21%)活动时间为9–10月，次年6月初越冬羽化；丘切叶蜂(占切叶蜂的0.38%)，活动时间为7–10月，次年6月底至7月初羽化；拟丘切叶蜂(占切叶蜂的0.43%)，活动时间为7–9月，9月底的个体则会在次年6月底羽化。黑孔蜂(*Heriades sauteri*)、窄切叶蜂(*M. rixator*)、白斑切叶蜂(*M. strupigera*)和细切叶蜂(*M. spissula*)是4种多化性切叶蜂，活动时间为5–10月，5–8月的个体会在1个月内完成发育(图1)，8月和9、10月的部分个体通常会越冬羽化，不同类群越冬羽化时间略有差别(图2)。黑孔蜂(占切叶蜂的7.2%)会在次年6月中旬羽化；窄切叶蜂(占6.6%)，白斑切叶蜂(占16.9%)次年4月中旬至5月中旬羽化；细切叶蜂(占10%)次年5月底、6月初羽化(图2)。另外4种切叶蜂均是单化性，一年一代，幼虫期短，多以预蛹越冬，次年羽化，羽化时间因种而异。脊跗拟孔蜂(*Hoplitis carinotarsa*) (占35.4%)活跃时间为5月，于4月中旬至5月初羽化，少数会在3月羽化；粗切叶蜂(*Megachile sculpturalis*) (占8.9%)活动时间是5–10月，所有个体都会在越冬后于次年5月、6月羽化；壮壁蜂(*Osmia taurus*) (占11.1%)活动时间为4月，所有个体都在次年3月中旬至3月底羽化；*Trachusa staabi* (占2.8%)筑巢活动集中在6月，所有个体会在次年5月底羽化(图3)。大部分切叶蜂不同性别之间羽化时间非常接近，雄性比雌性早几天，通常在1周以内，而单化性蜜蜂的越冬个体雌雄羽化时间差异更显著。此外，它们的筑巢材料相当多样化，树叶、泥、树脂、木屑等是常用筑巢材料。这一点在粗切叶蜂中更明显，同种的不同个体筑巢虽然主体形态相同，但材料均多样化，可能具有就近取材筑巢的习性。

(3)蜾蠃。是巢管里最多的类群，共计13,380头，占所有捕食者的86.1%。蜾蠃一般一年发生4–5代，活动时间为5–10月。8月的少数个体、9月的多数个体及10月全部个体会滞育越冬次年羽化；其他月份个体均会在1个月内羽化。雄性羽化早于雌性，时间从2天至2周左右不等。越冬羽化是在次年4–6月初，越冬个体雄性提前羽化现象更显著(图4)。黄缘蜾蠃(*Anterhynchium flavomarginatum*)是其中绝对的优势种，在全部独栖蜂里占52.5%，在全部捕食性蜂中占71.6%。其活动时间范围比其他蜾蠃更广，4–10月均有大量个体活动，甚至是10月之后也有活动痕迹，越冬个体次年4–6月初羽化。其他数量较多的蜾蠃有3种，黑胸蜾蠃(*Orancistrocerus drewseni*) (占全部蜾蠃的4.92%)在5–10月活动，9、10月的个体多在次年4月下旬至5月羽化；福建埃蜾蠃(*Epsilon fujianensis*) (占4.32%)活动时间是5–9月，大部分同年1个月内羽化，9月少数个体于次年4月中旬羽化；倾秀蜾蠃(*Pareumenes quadrispinosus*) (占3.13%)集中活动时间是6–9月，8–9月的个体于次年5月中旬至6月中旬羽化。大部分蜾蠃以泥土筑巢，但是有时会在泥土上覆盖植物制成的纸状物质，少数以纸状物、树脂或二者混合筑巢。蜾蠃通常捕猎鳞翅目幼虫为后代提供食物，初步鉴定猎物大部分为鳞翅目夜蛾科物种。

(4)蛛蜂。是巢管里比较常见的类群，共有1,425头，占全部捕食者的9.18%。主要有两类，一类是奥沟蛛蜂属(*Auplopus* spp.)的物种，占蛛蜂的87.7%；另一类是*Deuteragenia ossarium*，占蛛蜂的12.3%。

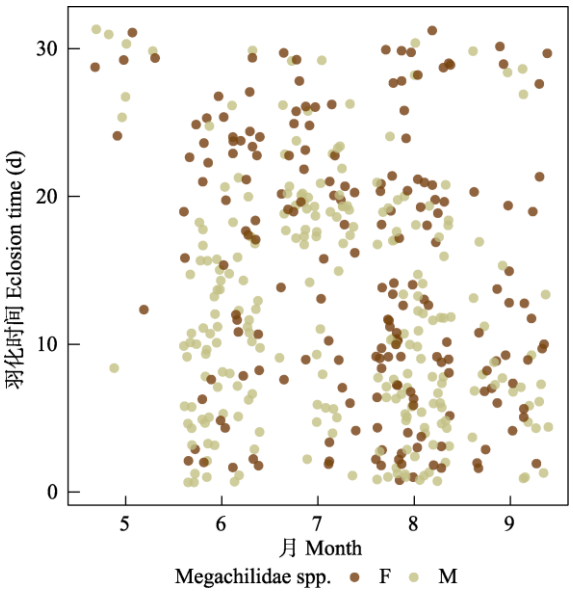


图1　4种多化性切叶蜂(黑孔蜂、窄切叶蜂、白斑切叶蜂和细切叶蜂)非越冬个体羽化时间图。F代表雌性，M代表雄性。
Fig. 1　Eclosion time of non-overwintering individuals of four multivoltine species of leaf cutting bees (*Heriades sauteri*, *Megachile rixator*, *M. strupigera*, *M. spissula*). F, Female; M, Male.

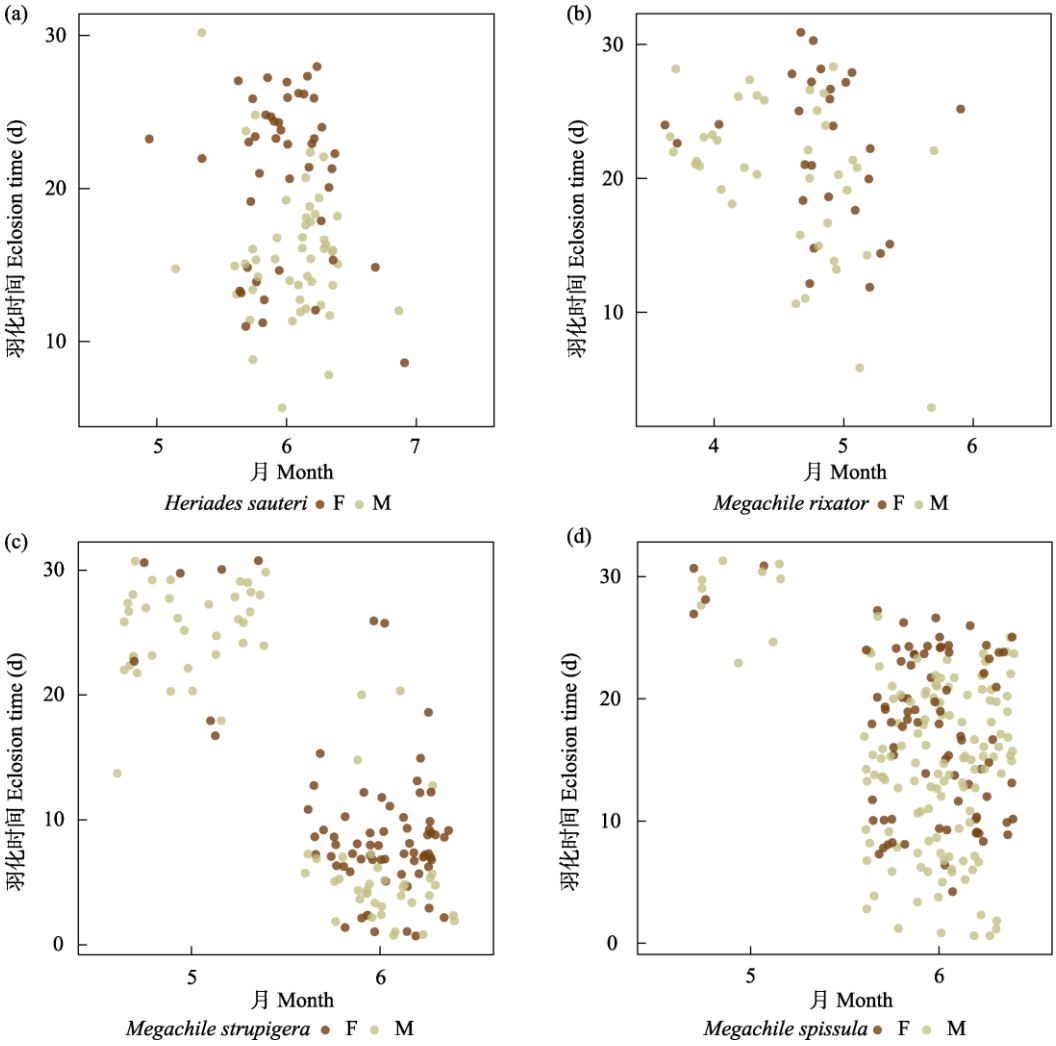


图2　4种多化性切叶蜂越冬个体羽化时间图。(a)黑孔蜂; (b)窄切叶蜂; (c)白斑切叶蜂; (d)细切叶蜂。F代表雌性, M代表雄性。
Fig. 2　Eclosion time of overwintering individuals of four multivoltine species of leaf cutting bees. (a) *Heriades sauteri*; (b) *Megachile rixator*; (c) *M. strupigera*; (d) *M. spissula*. F, Female; M, Male.

奥沟蛛蜂属的物种活动时间是4–10月，8月的部分个体及9月以后的个体全部滞育越冬，于次年4月中旬至5月中旬羽化，其余各月的个体均在1个月内羽化(图5)。*D. ossarium*的集中活动时间是在5月和6月上旬，有时10月也能发现踪迹。推测该物种适宜温度比较低，其中5月的个体在1个月内羽化，而10月的个体会在次年4月底至5月上旬羽化(图6)。蛛蜂不同种虽然形态非常接近，但是巢的形态非常多样化。筑巢材料主要是泥土，少数物种使用其他材料，如*D. ossarium*会将蚂蚁当成巢室的封口，垦丁奥沟蛛蜂(*Auplopus kuarensis*)会将树脂当成封口材料。蛛蜂的捕食对象主要是蜘蛛，奥沟蛛蜂属的物种均以跳蛛科蜘蛛为食，而*D. ossarium*则是以漏斗蛛科蜘蛛为食。

(5)泥蜂和方头泥蜂的数量较少，共计717头，占捕食者的4.62%。不同物种的活动时间差异大：日本蓝泥蜂(*Chalybion japonicum*)活动时间为6–10月，8月及以后的个体会于次年5月越冬羽化；黑等齿泥蜂(*Isodontia nigella*)活动时间为4–10月，8月及以后的个体会越冬于次年5月羽化；驼腹壁泥蜂(*Sceliphron deforme*)活动时间为4–10月，9月以后的多数个体于次年5月中旬至6月中羽化；*Passaloecus insignis*活动时间为5–7月，均在1个月内羽化，褐带豆短翅泥蜂(*Pison atripenne*)活动时间5–10月，9、10月个体越冬羽化；*Pisoxylon* sp. 1活动时间为5月，一个月内羽化；双色短翅泥蜂(*Trypoxylon bicolor*)活

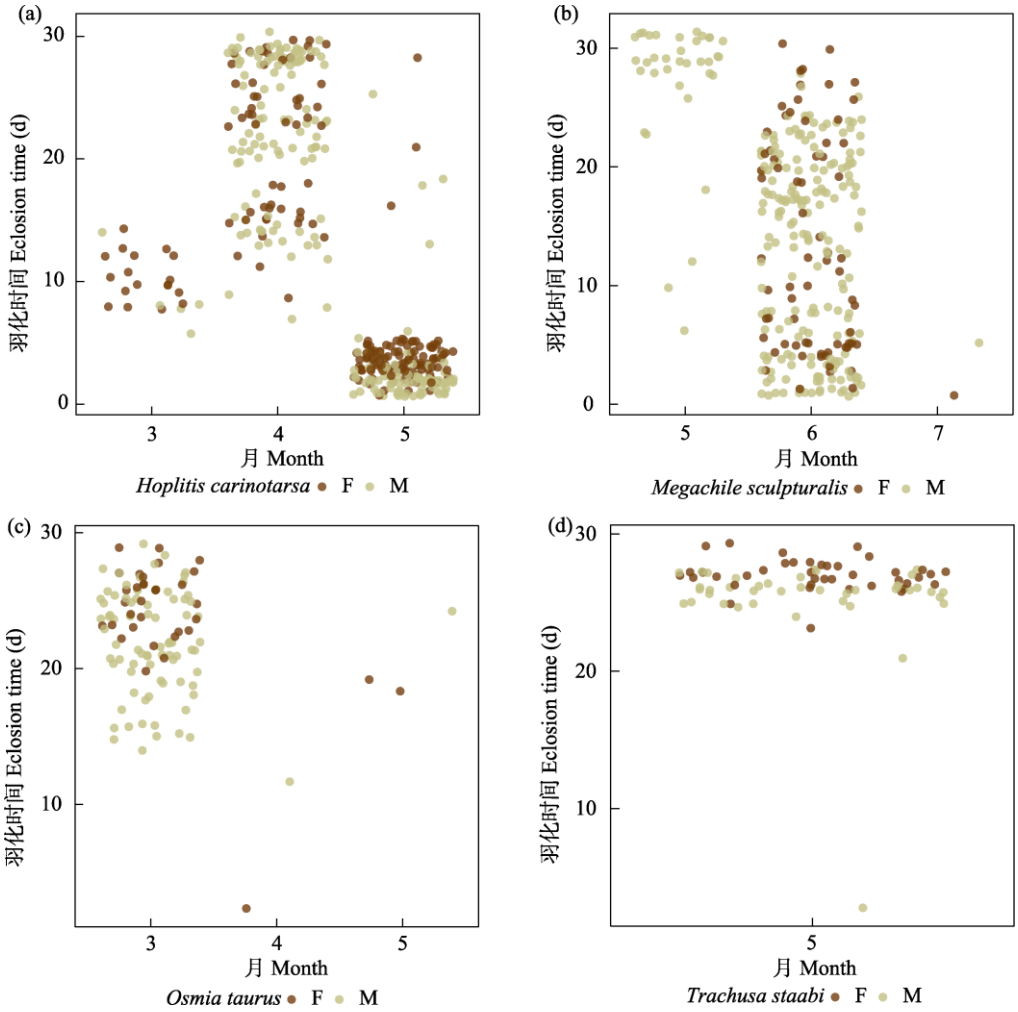


图3　4种单化性切叶蜂越冬个体羽化时间图。(a)脊跗拟孔蜂; (b)粗切叶蜂; (c)壮壁蜂; (d) *Trachusa staabi*。F代表雌性, M代表雄性。

Fig. 3　Eclosion time of overwintering individuals of four univoltine species of leaf cutting bees. (a) *Hoplitis carinotarsa*; (b) *Megachile sculpturalis*; (c) *Osmia taurus*; (d) *Trachusa staabi*. F, Female; M, Male.

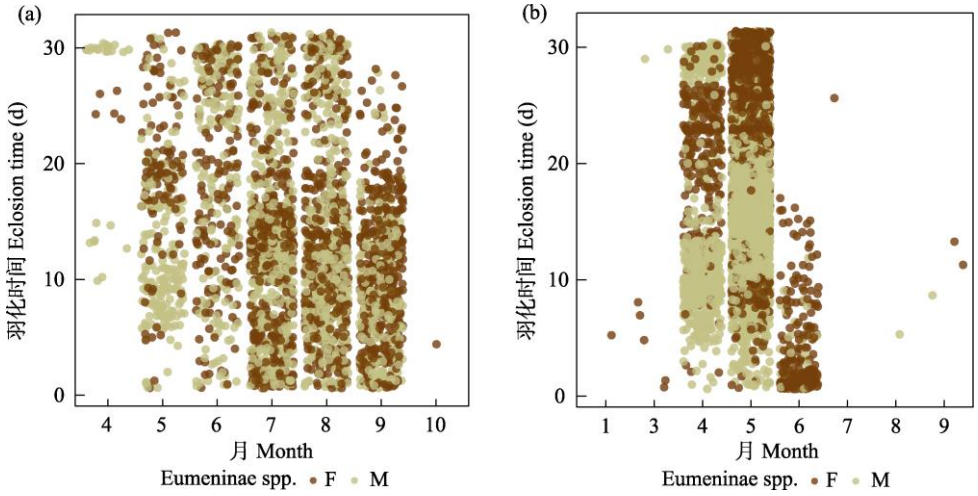


图4　捕食性蜾蠃羽化时间图。左为非越冬个体, 右为越冬个体。F代表雌性, M代表雄性

Fig. 4　Eclosion time of Eumeninae. Non-overwintering individuals on the left and overwintering individuals on the right. F, Female; M, Male.

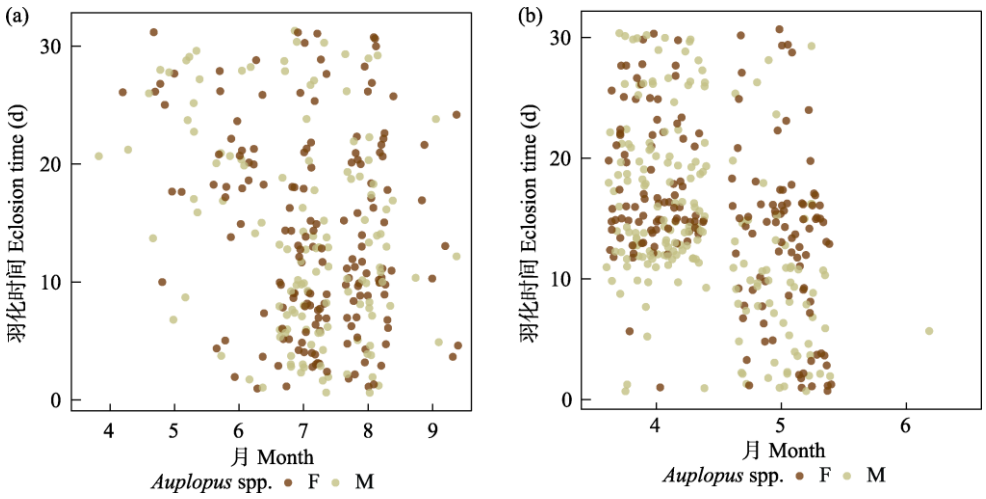


图5　蛛蜂科奥沟蛛蜂属羽化时间图。左为非越冬个体，右为越冬个体。F代表雌性, M代表雄性。
Fig. 5　Eclosion time of genus *Auplopus* (Pompilidae). Non-overwintering individuals on the left and overwintering individuals on the right. F, Female; M, Male.

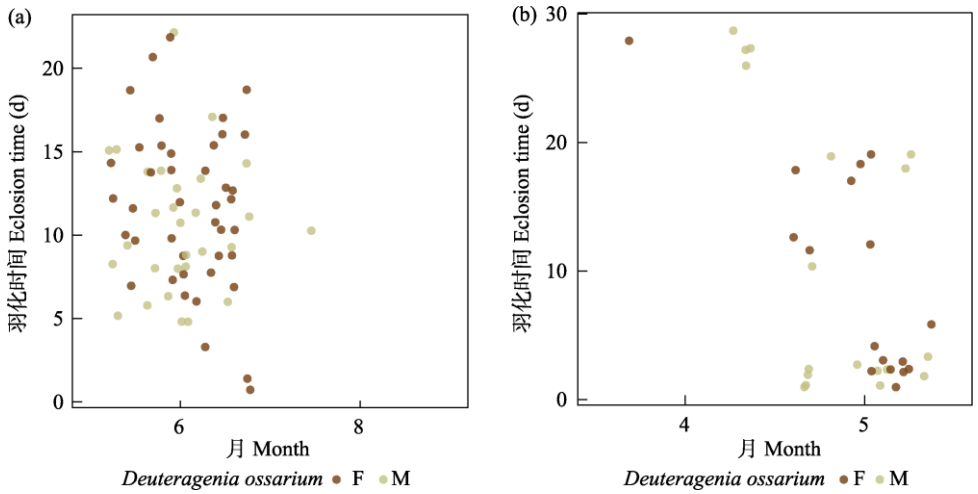


图6　蛛蜂科*Deuteragenia ossarium*羽化时间图。左为非越冬个体，右为越冬个体。F代表雌性, M代表雄性。
Fig. 6　Eclosion time of *Deuteragenia ossarium* (Pompilidae). Non-overwintering individuals on the left and overwintering individuals on the right. F, Female; M, Male.

动时间是 5–9月，9、10月的个体会在次年5月羽化；*T. schmiedeknechtii*活动时间是9月以后，次年6月开始羽化。通常雄性早于雌性羽化，约在1周以内，但是黑等齿泥蜂雄性羽化时间显著早于雌性，二者差距可以达2周时间。它们的捕食猎物范围极广，可以涵盖多个目，大部分泥蜂会捕猎蜘蛛哺育后代，但是也有很多其他的猎物类型，如褐带豆短翅泥蜂以蚜虫为猎物，黑等齿泥蜂以草螽为猎物。

2.3.2　寄生者

本研究中的寄生者是指与巢管中独栖蜂直接关联的拟寄生和盗寄生类群，而不考虑通过捕食关联的食物寄生者。因为在一个寄主的巢室里孵化出多头寄生者，所以本研究统计的寄生者数量是按照被寄生的寄主数量来计算的。寄生者的总数量为4,076头，主要是双翅目的摩蜂麻蝇属(*Amobia* spp.)和岩蜂虻属一种(*Anthrax* sp. 1)；膜翅目的*Chrysis principalis*、青翅狼钩腹蜂(*Lycogaster violaceipennis*)、*Melittobia sosui*和尖腹蜂属(*Coelioxys* spp.) (表4)。

除了岩蜂虻属一种和*Melittobia sosui*的寄主范围相当广之外，其他类群的寄生专化性较强。岩蜂虻属一种有127头，占寄生者的3.11%，寄主为5个

科(胡蜂科蜾蠃亚科、泥蜂科、方头泥蜂科、切叶蜂科和蛛蜂科) 15个种。活动时间为6–10月, 9月以后的越冬个体于次年5、6月羽化。*M. sosui*有444头, 占寄生者的10.9%, 其寄主为5个科(胡蜂科蜾蠃亚科、泥蜂科、方头泥蜂科、切叶蜂科和蛛蜂科) 28个种。*Melittobia*属的成员基本全年都可活动, 但很少越冬羽化, 大部分在同年羽化(图7)。摩蜂麻蝇属占寄生类群的24.7%, 主要是黄缘蜾蠃的盗寄生类群, 寄生于其他蜾蠃、泥蜂和蛛蜂的只发现了45例, 而只发现了1例寄生于白斑切叶蜂的情况。活跃时间为5–10月, 9、10月的个体越冬于次年4月至6月中旬羽化(图8)。*Chrysis principalis*有1,244头, 占全部寄生者的30.5%, 专性寄生在黄缘蜾蠃上, 只有30头寄生在其他蜾蠃上。活跃时间为5–10月, 9、10月的个体越冬并于次年4–5月羽化(图9)。青翅狼钩腹蜂有597头, 占14.6%, 主要寄生于黄缘蜾蠃和黑胸蜾蠃, 只发现9例寄生于其他蜾蠃。活跃时间为5–10月, 9、10月的大部分个体于次年4–5月羽化(图10)。尖腹蜂属有3个种, 其中厚腹尖腹蜂(*Coelioxys crassiventris*)有75头, 占全部寄生者的1.84%, 只寄生在窄切叶蜂上; *C. fenestrata*有52头, 占全部寄生者的1.27%, 寄生于粗切叶蜂和双叶切叶蜂上; *Coelioxys* sp. 1只发现了1头, 寄生在丘切叶蜂上。尖腹蜂属很少同年羽化, 大部分个体都越冬在次年4月中旬至6月中旬羽化。这似乎和其寄主独栖蜂类群大都越冬羽化有关。几乎所有的寄生者都早于寄主羽化, 通常越冬个体在次年羽化, 但是*Melittobia*属可以不越冬而正

表4 独栖蜂主要寄生者多样性概况

Table 4 Diversity of the main cavity-nesting Hymenoptera parasitoids

独栖蜂寄生者 Parasitoid	数量 Number	占比 Proportion
岩蜂虻属一种 *Anthrax* sp. 1	127	3.12%
摩蜂麻蝇属 *Amobia* spp.	1,007	24.71%
Chrysis principalis	1,244	30.52%
尖腹蜂属 *Coelioxys* spp.	128	3.14%
青翅狼钩腹蜂 *Lycogaster violaceipennis*	597	14.65%
Melittobia sosui	490	12.02%
其他 Other	529	12.98%

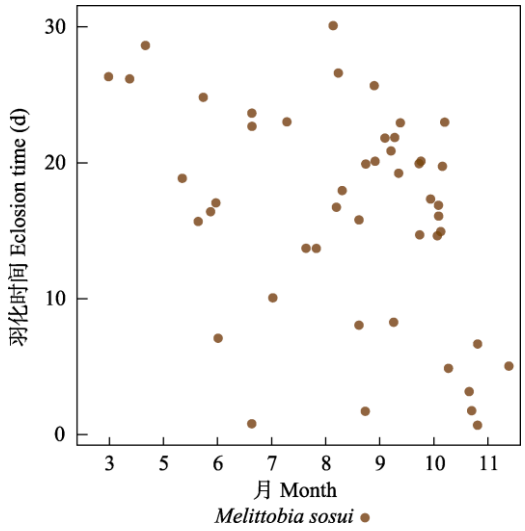


图7 寄生者膜翅目姬小蜂科*Melittobia sosui*羽化时间图

Fig. 7 Elosion time of *Melittobia sosui* (Eulophidae), a parasitoid species

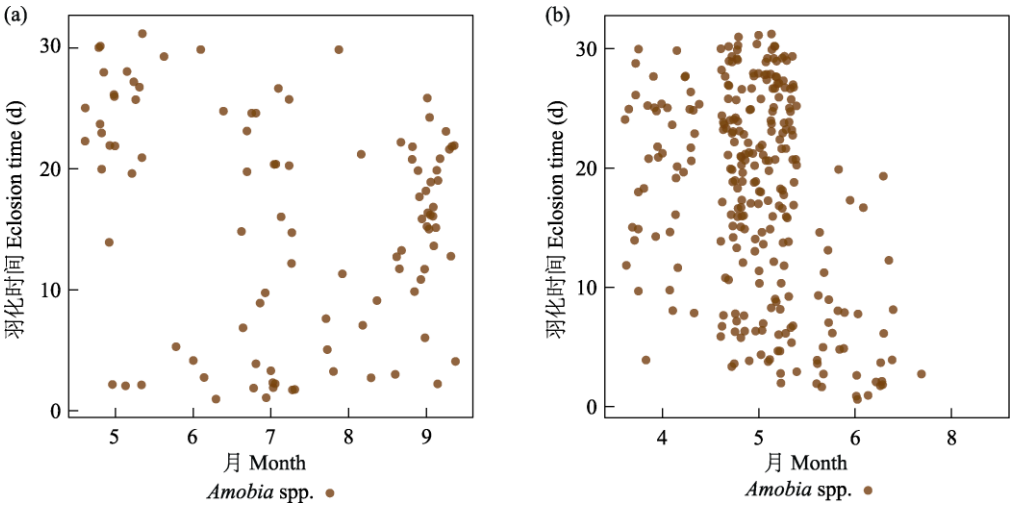


图8 寄生者双翅目摩蜂麻蝇属羽化时间图。左为非越冬个体, 右为越冬个体。

Fig. 8 Eclosion time of genus *Amobia* (Sarcophagidae), a parasitoid species. Non-overwintering individuals on the left and overwintering individuals on the right

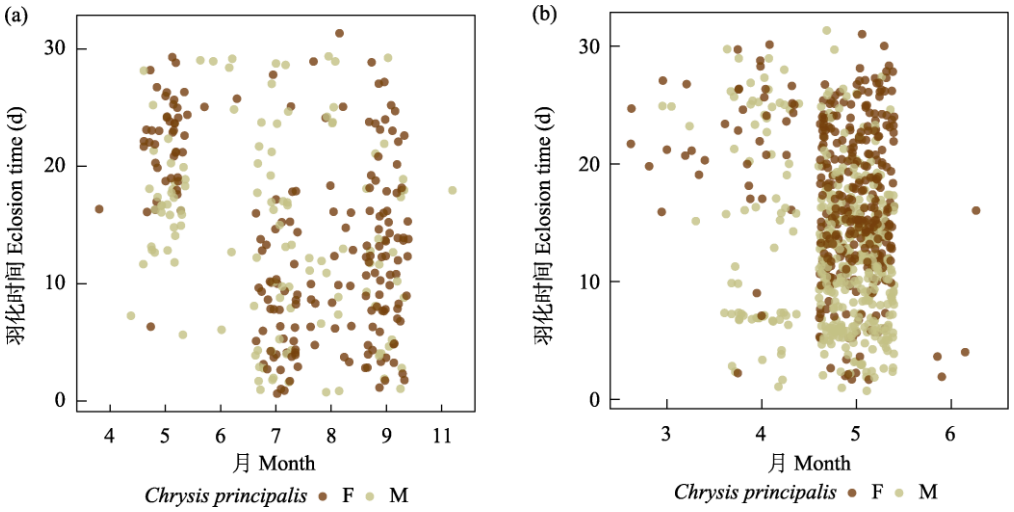


图9　寄生者膜翅目青蜂科*Chrysis principalis*羽化时间图。左为非越冬个体，右为越冬个体。F代表雌性，M代表雄性。
Fig. 9　Eclosion time of *Chrysis principalis* (Chrysididae). Non-overwintering individuals on the left and overwintering individuals on the right. F, Female; M, Male.

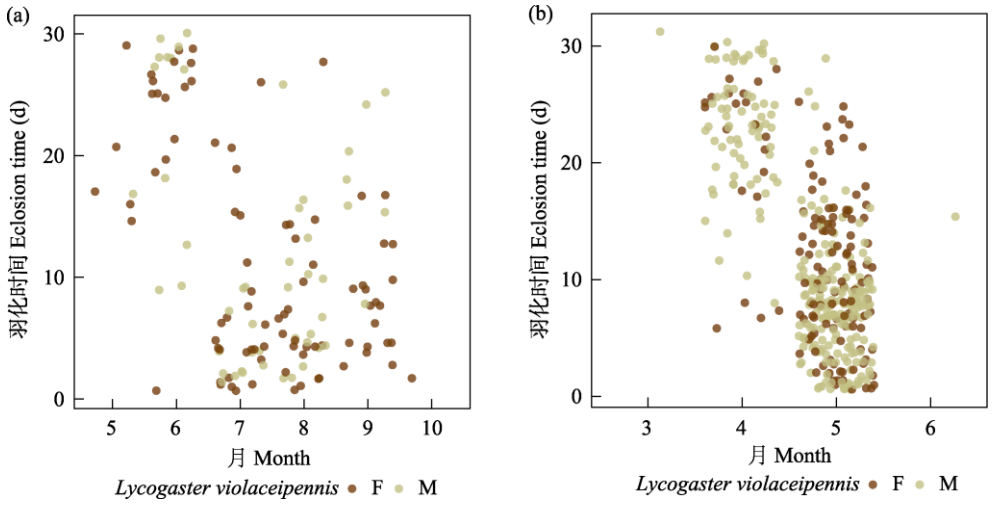


图10　寄生者膜翅目青翅狼钩腹蜂羽化时间图。左为非越冬个体，右为越冬个体。F代表雌性，M代表雄性。
Fig. 10　Eclosion time of *Lycogaster violaceipennis* (Trigonalyidae). Non-overwintering individuals on the left and overwintering individuals on the right. F, Female; M, Male.

常羽化。越冬的尖腹蜂、青蜂和钩腹蜂雄性通常早于雌性数天羽化，而同年羽化的寄生者雌雄之间没有显著差异。

3　讨论

3.1　独栖蜂多样性的组成差异

本研究表明，在中国亚热带森林中传粉者多度占独栖蜂的26.6%，捕食者占73.4%，比例约为1∶2.76，而物种丰富度比例约为1∶3.6，捕食蜂多样性远大于独栖蜜蜂。且捕食蜂筑巢的巢管数为11,232个，筑巢率约为84.6%；传粉者筑巢的巢管数为2,035个，筑巢率约为15.4%。在巴西的热带森林，捕食者筑巢率约为75% (Loyola & Martins, 2006)，与本研究筑巢率85%结果相近。这可能反映了自然环境中筑巢独栖蜂中传粉者和捕食者的真实组成。实际上，筑巢的独栖蜜蜂类群较少，且其中约64%的类群会在地下挖土筑巢(Cane & Neff, 2011)，剩下的大部分个体(主要是切叶蜂)会在天然空腔洞穴中筑巢(Danforth et al, 2019)；捕食蜂大多选择空腔筑巢(Evans, 1966)。有洞穴筑巢习性的传粉者和捕食者的不同比例可能直接导致了传粉者数量少于捕食者。此外，多项研究已经证明，独栖蜜蜂的多样性

与开花植物的多样性密切相关(Ebeling et al, 2012), 与树木多样性关联性较小(Guo et al, 2021)。而本研究样地里高大乔木居多, 地面的开花植物少, 再加上每年除草, 人为去除地面开花植物; 同时独栖性蜜蜂与社会性蜂相比具有更窄的食性, 种群内个体间也缺少通讯能力, 不能进行远距离的觅食活动(Danforth et al, 2019)。所以本研究的样地环境实际上不利于独栖性蜜蜂生存, 导致传粉者数量少于捕食者。

3.2 独栖蜂羽化时间

雄性先羽化现象在昆虫中普遍存在, 如蝴蝶(Zonneveld & Metz, 1991)、二化螟(肖丹凤和胡阳, 2010)、蝗虫(del Castillo & Núñez-Farfán, 2002)等都曾记录到该现象。此外, 在某些膜翅目物种如方头泥蜂、切叶蜂科的物种中也观察到过该现象(Polidori et al, 2010)。本研究同样发现了筑巢独栖蜂明显的雄性先羽化现象: 独栖蜂中大部分都是雄性先羽化, 只有蛛蜂是雌雄几乎同时羽化。在筑巢产卵行为上, 独栖蜂表现出了对雄性先羽化行为的适应: 雌性可以控制产下后代的性别(雄性为单倍体, 雌性为二倍体), 在巢穴中呈线型排列; 雌性的巢在内侧, 而雄性的巢在外侧。这样避免了雌性阻挡先羽化的雄性出巢(Gerber & Klostermeyer, 1970)。对于雄性先羽化现象(Fagerstrom & Wiklund, 1982)有很多解释: (1)可以防止近亲繁殖(Petersen, 1892); (2)确保只有存活足够长时间的最高适合度雄性才能与雌性交配(Demoll, 1908); (3)确保雌性在羽化后立即受精以尽量减少其在生殖前的死亡(Lundgren & Bergström, 1975); (4)雄性先羽化比在雌性之后羽化有更多交配的机会(Petersen, 1947)。雄性先羽化类群有很多特征, 在高密度、雌雄二型(雌性更大)、雄性比重大和雌性只交配一次的昆虫种群中, 往往会出现雄性先羽化现象(del Castillo & Núñez-Farfán, 2002)。对蝴蝶的雄性先羽化行为研究认为, 该行为的维持主要取决于雌性只交配一次而雄性能够多次交配的机制(Zonneveld & Metz, 1991)。本研究中的雄性先羽化类群基本符合这些特征。蜾蠃、泥蜂和切叶蜂雌雄二型明显, 除一些形态差异外, 雌性个体明显大于雄性。蛛蜂雌雄个体大小相近, 最显著的差异特征为触角(雌性触角盘旋成漩涡状)。此外, 蜾蠃、泥蜂和切叶蜂性比更偏重雄性, 其中蜾蠃雄性雌性比约为1.64 : 1; 泥蜂约为1.97 : 1; 切叶蜂约为1.65 : 1。而蛛蜂雄性雌性比为0.97 : 1, 接近1 : 1。因此, 相较于蛛蜂, 蜾蠃、泥蜂和切叶蜂有雄性早于雌性的羽化现象, 符合预期。对切叶蜂属的研究认为雄性先羽化可以增加雌雄的交配成功率, 并减少雌性生殖前的空白期(Paini, 2004)。该解释可推广至其他独栖蜂类群, 在一定程度上解释了独栖蜂雄性先羽化现象。独栖蜂相比于社会性蜂活动时间更短, 一个典型的独栖蜂成虫活动时间仅仅为几个星期到1个月(Minckley et al, 1994), 独栖蜂必须在有限的时间内成功交配繁殖, 而雄性先羽化增加了交配成功率, 因此该策略对种群繁衍有重要意义。但在越冬个体中观察到异常明显的雄性先羽化现象仍无法准确解释, 需要进一步研究。

3.3 不同类群的发生规律

独栖蜂活动的季节性规律在很多地区的研究中都有记录(Camillo et al, 1996; Ribeiro & Garófalo, 2010), 如巴西亚热带地区的*Podium denticulatum*活动集中在炎热多雨的9月到次年4月(Shibata et al, 2020); 巴西亚热带的*Megachile nigripennis*主要在11月至次年2月活动(Marques & Gaglianone, 2013)。在北美洲亚热带的火炬松(*Pinus taeda*)林中对独栖蜂的季节活动规律的研究表明, 同一地区切叶蜂、蜾蠃、泥蜂和方头泥蜂筑巢活动规律显著不同, 2种切叶蜂活动时间集中在4月至5月中旬, 而8种捕食蜂活动时间集中在5月下旬至8月(Jenkins & Matthews, 2004)。本研究结合筑巢时间和羽化时间印证了独栖蜂活动具有季节性的结论(表5), 发现亚热带地区不同独栖蜂类群的发生规律具有差异。切叶蜂和方头泥蜂活动时间较集中, 甚至仅在单个月发生; 而蜾蠃和蛛蜂活动时间范围较广, 在全年多个月份都能发生。这种差异与环境温度直接相关, 有研究表明独栖蜂会在寒冷和干燥时期减少活动(Camillo et al, 1996; Camillo, 2001)。同时, 独栖蜂的羽化时间也受温度影响, 较高的温度能促进独栖蜂的羽化, 较低的温度则推迟羽化(Danforth et al, 2019)。但温度对独栖蜂的影响并不是简单的线性关系, 而是不同类群对温度的适应性不同, 有自己的生态幅。因此不同类群的活动时间有季节性规律。另一个影响独栖蜂活动时间的因素是食物资源的同步情况(Danforth et al, 2019)。独栖蜜蜂与开花植

表5　新岗山样地主要类群筑巢、羽化时间

Table 5　Nesting and eclosion patterns of main species in different months in Xinganshan plots

	筑巢时间 Nesting time							羽化时间 Eclosion time						
物种 Species	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 Aug.	9月 Sept.	10月 Oct.	3月 March	4月 April	5月 May	6月 June	7月 July	8月 Aug.	9月 Sept.
Heriades sauteri		√			√	√					√			
Hoplitis carinotarsa		√	√						√	√				
Hylaeus sp. 1					√	√							√	√
Megachile rixator		√	√				√			√	√			
M. sculpturalis				√	√	√	√				√			
M. spissula						√	√				√			
M. strupigera				√	√	√	√			√	√	√	√	
Osmia taurus	√	√						√						
Trachusa staabi			√							√				
Anterhynchium flavomarginatum	√	√	√	√	√	√	√		√	√	√	√	√	√
Epsilon fujianensis		√	√	√	√						√		√	
Auplopus spp.	√	√	√	√	√	√	√		√	√		√	√	
Deuteragenia ossarium		√	√				√				√			
Isodontia nigella						√	√			√				
Pareumenes quadrispinosus				√	√	√				√	√		√	
Sceliphron deforme			√	√	√	√				√	√	√	√	√
Orancistrocerus drewseni					√	√	√		√	√		√	√	
Passaloecus insignis		√	√											√
Pisoxylon sp. 1			√		√		√				√			
Pison atripenne	√									√	√	√	√	
Trypoxylon bicolor		√		√		√					√	√		
T. schmiedeknechtii						√					√			

表中物种的中文名称参见表1. All Chinese names refer to Table 1.

物密切相关，传粉者的活动时间往往同步于植物花期。而捕食性蜂的食物资源没有严格的时间限制，作为其食物的鳞翅目幼虫和蜘蛛全年可获得，因此活动时间范围更广。这也是捕食者类群多样性更高的原因。

3.4　寄生者与独栖蜂互作

据上行控制效应，高营养级生物受较低营养级生物的影响。自下而上的营养级联表明，植物物种丰富度的增加可导致食草动物和捕食者物种丰富度的增加(Knops et al, 1999)。相似的研究也表明较高的植物多度可以支持植食性动物的高多度，进而支持捕食者的高多度(Hunter & Price, 1992)。研究发现寄生者(高营养级)的多度和多样性能受到寄主(低营养级)上行控制效应的调节。独栖蜂和寄生者互作网络(图11)表明多度最高的黄缘蝶蠃其寄生者物种丰富度最高(多达14种)，这符合上行控制效应。同时寄生者*Chrysis principalis*和摩蜂麻蝇属有着较高的多度，其主要寄主是黄缘蝶蠃，这也与上行效应控制一致。此外，寄生范围最广的寄生蜂*Melittobia sosui*多度也远高于其他寄生者物种，而寄生范围相对较窄的寄生蜂，如*Euaspis basalis*, *Picardiella melanoleuca*, *Gasteruption corniculigerum*等，其多度较小，这表明寄生者的数量也与其寄生范围的专化程度有关系。

综上，本文基于巢管法，通过长期监测揭示了亚热带森林不同功能群独栖蜂及寄生者的多样性和生物学特性。独栖蜂中传粉者多样性显著少于捕食者(多度比例约1∶3，物种丰富度比例为1∶3.7)。独栖蜂中普遍存在雌雄羽化异律的现象，主要表现为雄性先羽化，并在越冬个体中更明显。据推测

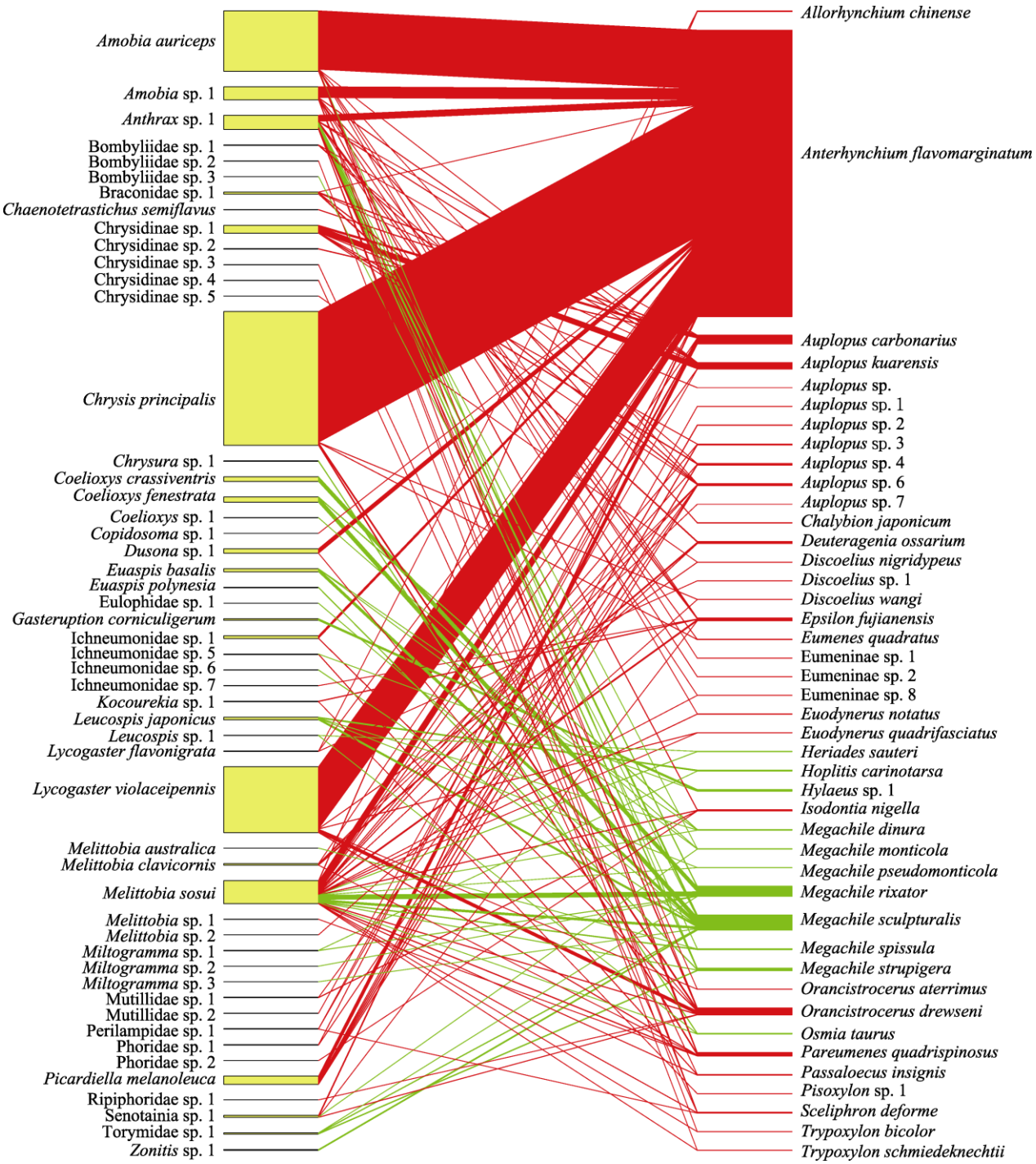


图11　独栖蜂与寄生者互作关系图。左边矩形代表寄生者，右边矩形代表独栖蜂，面积大小代表该物种互作的多度。物种中文名可参考表1和表2。

Fig. 11　The diagram of interaction between cavity-nesting Hymenoptera and parasitoids. The rectangle on the left represents parasitoids; the rectangle on the right represents cavity-nesting Hymenoptera; the size of rectangular area represents the abundance of species interaction. All Chinese names refer to Table 1 and Table 2.

这是为了防止近亲交配和减少雌性在生殖前的死亡。我们总结了不同类群的发生规律，其中以切叶蜂和方头泥蜂为主的独栖蜂发生时间比以蜾蠃和蛛蜂为主的捕食蜂发生时间更集中。此外，通过构建独栖蜂和寄生者互作关系，发现寄生者的多度和多样性受较低营养级寄主的上行控制效应调节。

致谢: 感谢中国科学院动物研究所袁峰对物种鉴定提供帮助, 吴清涛对实验提供大力支持; 感谢齐银泉师傅等对样本收集以及一同在新岗山野外采样团队的帮助。

ORCID

郭士琨 https://orcid.org/0000-0002-4747-257X
王明强 https://orcid.org/0000-0002-3175-2200
郭鹏飞 https://orcid.org/0000-0002-9262-7577
陈婧婷 https://orcid.org/0000-0002-3350-3478
牛泽清 https://orcid.org/0000-0002-0964-0317
罗阿蓉 https://orcid.org/0000-0001-9652-5896
杨娟娟 https://orcid.org/0000-0001-6723-0693
周青松 https://orcid.org/0000-0002-7312-1589
朱朝东 https://orcid.org/0000-0002-9347-3178

参考文献

Barthélémy C (2010) Nesting biology of *Isodontia diodon* (Kohl, 1890) (Hymenoptera: Sphecidae), a predator of cockroaches, in Hong Kong. Journal of Hymenoptera Research, 19, 201–216.

Boesi R, Polidori C, Tormos J, Bevacqua S, Asís JD, Andrietti F (2005) Trap-nesting *Ancistrocerus sikhimensis* (Hymenoptera: Eumenidae) in Nepal: Nest structure and associates (Hymenoptera: Chrysididae; Acarina: Saproglyphidae). Florida Entomologist, 88, 135–140.

Bruelheide H, Nadrowski K, Assmann T, Bauhus J, Both S, Buscot F, Chen XY, Ding BY, Durka W, Erfmeier A, Gutknecht JLM, Guo DL, Guo LD, Härdtle W, He JS, Klein AM, Kühn P, Liang Y, Liu XJ, Michalski S, Niklaus PA, Pei KQ, Scherer-Lorenzen M, Scholten T, Schuldt A, Seidler G, Trogisch S, Oheimb G, Welk E, Wirth C, Wubet T, Yang XF, Yu MJ, Zhang SR, Zhou HZ, Fischer M, Ma KP, Schmid B (2014) Designing forest biodiversity experiments: General considerations illustrated by a new large experiment in subtropical China. Methods in Ecology and Evolution, 5, 74–89.

Buschini MLT, Buss CE (2014) Nesting biology of *Podium angustifrons* Kohl (Hymenoptera, Sphecidae) in an *Araucaria* forest fragment. Brazilian Journal of Biology, 74, 493–500.

Camillo E (2001) Inquilines of *Brachymenes dyscherus* nests with special reference to *Monobia schrottkyi* (Hymenoptera, Vespidae, Sphecidae). Revista de Biologia Tropical, 49, 1005–1012.

Cane JH, Griswold T, Parker FD (2007) Substrates and materials used for nesting by North American *Osmia* bees (Hymenoptera: Apiformes: Megachilidae). Annals of the Entomological Society of America, 100, 350–358.

Cane JH, Neff JL (2011) Predicted fates of ground-nesting bees in soil heated by wildfire: Thermal tolerances of life stages and a survey of nesting depths. Biological Conservation, 144, 2631–2636.

da Costa CCF, Buschini MLT (2016) Biology of a trap-nesting wasp of one species the ground-nesting *Liris* (Hymenoptera: Crabronidae) from the Atlantic Forest of southern Brazil. Zoologia (Curitiba), 33, e20150185.

Danforth BN, Minckley RL, Neff JL (2019) The Solitary Bees: Biology, Evolution, Conservation. Princeton University Press, New Jersey.

Dang HT, Fateryga AV (2021) Nesting biology of *Pareumenes quadrispinosus* (de Saussure, 1855) (Hymenoptera: Vespidae: Eumeninae) in trap nests in North Vietnam. Journal of Asia-Pacific Entomology, 24, 1275–1285.

Dang HT, Nguyen LTP (2019) Nesting biology of the potter wasp *Rhynchium brunneum brunneum* (Fabricius, 1793) (Hymenoptera: Vespidae: Eumeninae) in north Vietnam. Journal of Asia-Pacific Entomology, 22, 427–436.

del Castillo RC, Núñez-Farfán J (2002) Female mating success and risk of pre-reproductive death in a protandrous grasshopper. Oikos, 96, 217–224.

Demoll R (1908) Die Bedeutung der Proterandrie bei Insekten. Zoologische Jahrbücher Systems, 26, 621–628.

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, 3279–3287. (in Chinese with English abstract) [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, 3279–3287.]

Ebeling A, Klein AM, Weisser WW, Tscharntke T (2012) Multitrophic effects of experimental changes in plant diversity on cavity-nesting bees, wasps, and their parasitoids. Oecologia, 169, 453–465.

Evans HE (1966) The behavior patterns of solitary wasps. Annual Review of Entomology, 11, 123–154.

Fagerström T, Wiklund C (1982) Why do males emerge before females? Protandry as a mating strategy in male and female butterflies. Oecologia, 52, 164–166.

Fornoff F, Staab M, Zhu CD, Klein AM (2021) Multi-trophic communities re-establish with canopy cover and microclimate in a subtropical forest biodiversity experiment. Oecologia, 196, 289–301.

Gerber HS, Klostermeyer EC (1970) Sex control by bees: A voluntary act of egg fertilization during oviposition. Science, 167, 82–84.

Giles V, Ascher J (2006) A survey of the bees of the Black Rock Forest Preserve, New York (Hymenoptera: Apoidea). Journal of Hymenoptera Research, 15, 208–231.

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: Gasteruptiidae) and their correlation with environmental variables. Acta Entomologica Sinica, 64, 605–610. (in Chinese with English abstract) [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, 605–610.]

Guo PF, Wang MQ, Orr M, Li Y, Chen JT, Zhou QS, Staab M, Fornoff F, Chen GH, Zhang NL, Klein AM, Zhu CD (2021) Tree diversity promotes predatory wasps and parasitoids but not pollinator bees in a subtropical experimental forest. Basic and Applied Ecology, 53, 134–142.

Hermes MG, Somavilla A, Garcete-Barrett BR (2013) On the nesting biology of *Pirhosigma giordani soika* (Hymenoptera, Vespidae, Eumeninae), with special reference to the use of vegetable matter. Revista Brasileira De Entomologia, 57, 433–436.

Huang DY, He B, Gu P, Yu JF, Peng F, Xu XF (2014) Bionomics of *Euodynerus nipanicus* (Schulthess) (Hymenoptera: Vespidae). Journal of Environmental Entomology, 36, 890–897. (in Chinese with English abstract) [黄敦元, 何波, 谷平, 余江帆, 彭飞, 许晓风 (2014) 日本佳盾蜾蠃的生物学特性观察. 环境昆虫学报, 36, 890–897.]

Hunter MD, Price PW (1992) Playing chutes and ladders: Heterogeneity and the relative roles of bottom-up and top-down forces in natural communities. Ecology, 73, 724–732.

Iwata K (1976) Evolution of instinct: Comparative ethology of Hymenoptera. Bulletin of the Entomological Society of America, Maryland.

Jenkins DA, Matthews RW (2004) Cavity-nesting Hymenoptera in disturbed habitats of Georgia and South Carolina: Nest architecture and seasonal occurrence. Journal of the Kansas Entomological Society, 77, 203–214.

Knops JMH, Tilman D, Haddad NM, Naeem S, Mitchell CE, Haarstad J, Ritchie ME, Howe KM, Reich PB, Siemann E, Groth J (1999) Effects of plant species richness on invasion dynamics, disease outbreaks, insect abundances and diversity. Ecology Letters, 2, 286–293.

Kunjwal N, Khan MS, Srivastava P (2021) Nesting biology of *Megachile* (*Eutricharea*) *studiosa* Bingham, a leafcutter bee. Journal of Apicultural Research, 60, 491–502.

Longair RW (2004) Tusked males, male dimorphism and nesting behavior in a subsocial afrotropical wasp, *Synagris cornuta*, and weapons and dimorphism in the genus (Hymenoptera: Vespidae: Eumeninae). Journal of the Kansas Entomological Society, 77, 528–557.

Loyola RD, Martins RP (2006) Trap-nest occupation by solitary wasps and bees (Hymenoptera: Aculeata) in a forest urban remanent. Neotropical Entomology, 35, 41–48.

Lundgren L, Bergström G (1975) Wing scents and scent-released phases in the courtship behavior of *Lycaeides argyrognomon* (Lepidoptera: Lycaenidae). Journal of Chemical Ecology, 1, 399–412.

Marinho D, Muniz DB, Azevedo GG (2018) Nesting biology of three *Megachile* (Hymenoptera: Megachilidae) species from Eastern Amazonia, Brazil. Revista Brasileira De Entomologia, 62, 97–106.

Marques MFA, Gaglianone MC (2013) Nesting biology and altitudinal variation in the abundance of *Megachile* (*Melanosarus*) *nigripennis* Spinolla (Hymenoptera, Megachilidae) in an Inselberg in the Mata Atlantica, Rio de Janeiro. Bioscience Journal, 29, 198–208.

Mayr AV, Peters MK, Eardley CD, Renner ME, Röder J, Steffan-Dewenter I (2020) Climate and food resources shape species richness and trophic interactions of cavity-nesting Hymenoptera. Journal of Biogeography, 47, 854–865.

Medler JT, Fye RE (1956) Biology of *Ancistrocerus antilope* (Panzer) (Hymenoptera, Vespidae) in trap-nests in Wisconsin. Annals of the Entomological Society of America, 49, 97–102.

Minckley RL, Wcislo WT, Yanega D, Buchmann SL (1994) Behavior and phenology of a specialist bee (*Dieunomia*) and sunflower (*Helianthus*) pollen availability. Ecology, 75, 1406–1419.

Moroń D, Szentgyörgyi H, Wantuch M, Celary W, Westphal C, Settele J, Woyciechowski M (2008) Diversity of wild bees in wet meadows: Implications for conservation. Wetlands, 28, 975–983.

Osorio S, Arnan X, Bassols E, Vicens N, Bosch J (2015) Local and landscape effects in a host–parasitoid interaction network along a forest-cropland gradient. Ecological Applications, 25, 1869–1879.

Paini DR (2004) Nesting biology of an Australian resin bee (*Megachile* sp.; Hymenoptera: Megachilidae): A study using trap nests. Australian Journal of Entomology, 43, 10–15.

Petersen B (1947) Die geographische Variation einiger Fennoskandischer Lepidopteren. Zoologiska bidrag från Uppsala, 26, 329–531.

Petersen W (1892) Uber die Ungleichzeitigkeit in der Erscheinung der Geschlechter bei Schmentterlingen. Zoologische Jahrbücher. Abteilung für Systematik, Geographie und Biologie der Tiere, 6, 671–679.

Polidori C, Giordani I, Mendiola P, Asís JD, Tormos J, Selfa J (2010) Emergence and dispersal relative to natal nest in the digger wasp *Stizus continuus* (Hymenoptera: Crabronidae). Comptes Rendus Biologies, 333, 255–264.

Ribeiro F, Garófalo CA (2010) Nesting behavior of *Podium denticulatum* Smith (Hymenoptera: Sphecidae). Neotropical Entomology, 39, 885–891.

Rozen JG Jr, Eickwort GC (1997) The entomological evidence. Journal of Forensic Sciences, 42, 14136J.

Shibata L, Santoni MM, De Oliveira Silva V, del Lama MA (2020) Nesting biology, sexual dimorphism, and populational morphometric variation in *Podium denticulatum* F. Smith, 1856 (Hymenoptera: Sphecidae). Sociobiology, 67,

572.

Sobek S, Tscharntke T, Scherber C, Schiele S, Steffan-Dewenter I (2009) Canopy vs. understory: Does tree diversity affect bee and wasp communities and their natural enemies across forest strata? Forest Ecology and Management, 258, 609–615.

Staab M, Pufal G, Tscharntke 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, 2226–2239.

Tscharntke T, Gathmann A, Steffan-Dewenter I (1998) Bioindication using trap-nesting bees and wasps and their natural enemies: Community structure and interactions. Journal of Applied Ecology, 35, 708–719.

Tucker SK, Ginsberg HS, Alm SR (2019) Eastern carpenter bee (Hymenoptera: Apidae): Nest structure, nest cell provisions, and trap nest acceptance in Rhode Island. Environmental Entomology, 48, 702–710.

Xiao DF, Hu Y (2010) A preliminary research on protandry in rice striped stem borer. Chinese Bulletin of Entomology, 47, 736–739. (in Chinese with English abstract) [肖丹凤, 胡阳 (2010) 二化螟成虫雄性先羽化现象. 昆虫知识, 47, 736–739.]

Zonneveld C, Metz JAJ (1991) Models on butterfly protandry: Virgin females are at risk to die. Theoretical Population Biology, 40, 308–321.

(责任编委: 周欣　责任编辑: 周玉荣)

附录　Supplementary Material

附录1　BEF-China树种丰富度实验样地树种组成
Appendix 1　Tree species composition in BEF-China tree diversity experiment
https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022060-1.pdf

附录2　新岗山样地巢管样方分布图
Appendix 2　The distribution of trap nests in Xingangshan plots
https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022060-2.pdf

附录3　A样地巢管设置样方树种组成
Appendix 3　Tree species composition of trap nest plots in Site A
https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022060-3.pdf

附录4　B样地巢管设置样方树种组成
Appendix 4　Tree species composition of trap nest plots in Site B
https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022060-4.pdf

附录5　新岗山样地独栖蜂食物图
Appendix 5　The food of cavity-nesting Hymenoptera in Xingangshan plots
https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022060-5.pdf

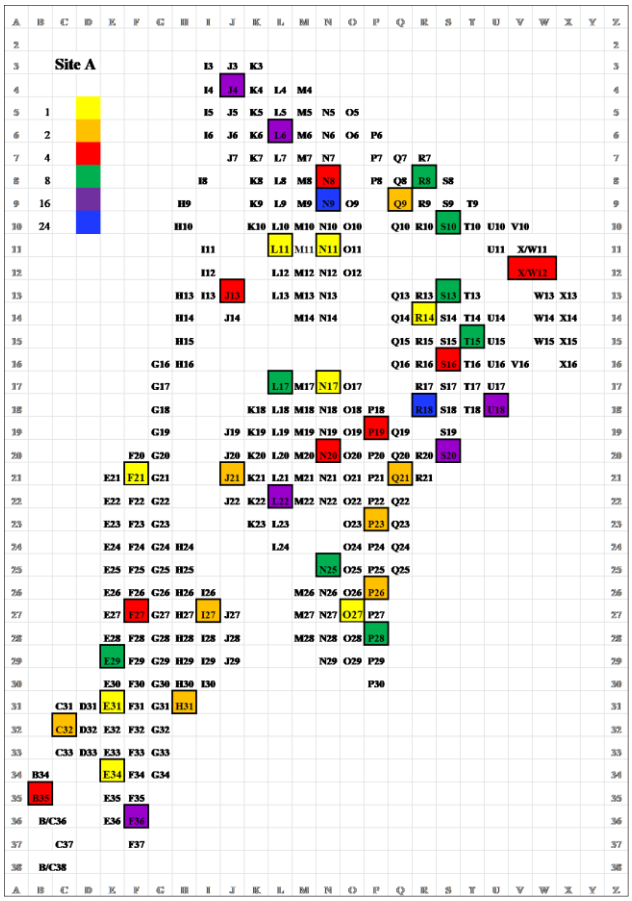
郭士琨，王明强，郭鹏飞，陈婧婷，牛泽清，罗阿蓉，杨娟娟，周青松，朱朝东 (2022) 中国亚热带森林筑巢独栖蜂类群及其寄生者多样性. 生物多样性, 30, 22060. https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2022060.

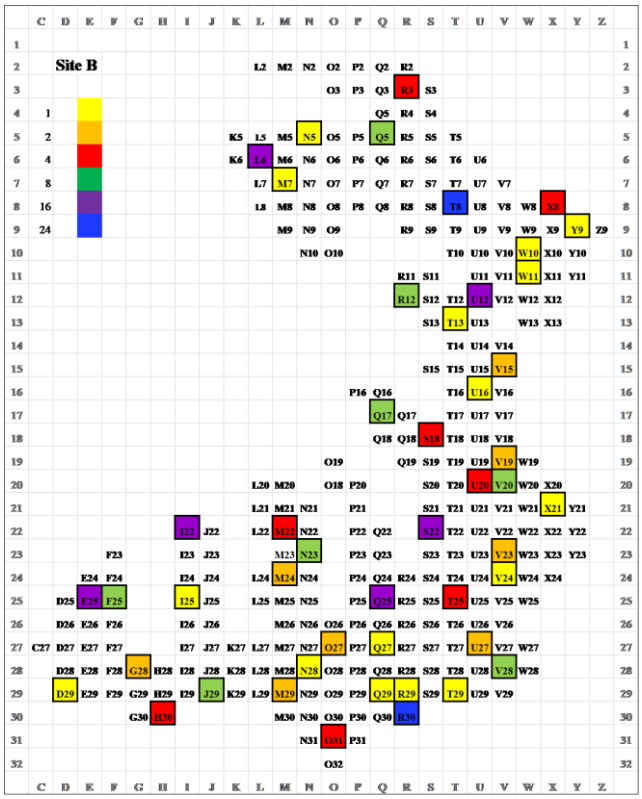
附录1　BEF-China树种丰富度实验样地树种组成

Appendix 1　Tree species composition in BEF-China tree diversity experiment

中文名 Chinese name	拉丁名 Latin name	中文代码 C_Code	数字代码 NO_Code	中文及数字代码 C_NO_Code	样地 Site
青榨槭	*Acer davidii*	榨	27	榨 27	A
米槠	*Castanopsis carlesii*	米	10	米 10	A
南酸枣	*Choerospondias axillaris*	南	4	南 4	A
细叶青冈	*Cyclobalanopsis myrsinifolia*	细	9	细 9	A
复羽叶栾树	*Koelreuteria bipinnata*	复	18	复 18	A
枫香	*Liquidambar formosana*	枫	6	枫 6	A
苦楝	*Melia azedarach*	楝	26	楝 26	A
蓝果树	*Nyssa sinensis*	蓝	20	蓝 20	A
麻栎	*Quercus acutissima*	麻	25	麻 25	A
白栎	*Quercus fabri*	白	24	白 24	A
短柄枹栎	*Quercus serrata*	短	8	短 8	A
盐肤木	*Rhus chinensis*	盐	23	盐 23	A
无患子	*Sapindus mukorossi*	无	19	无 19	A
山乌桕	*Sapium discolor*	山	22	山 22	A
乌桕	*Sapium sebiferum*	乌	21	乌 21	A
锥栗	*Castanea henryi*	锥	1	锥 1	A
甜槠	*Castanopsis eyrei*	甜	13	甜 13	A&B
苦槠	*Castanopsis sclerophylla*	苦	14	苦 14	A&B
香樟	*Cinnamomum camphora*	香	17	香 17	A&B
杉木	*Cunninghamia lanceolata*	杉	28	杉 28	A&B
青冈	*Cyclobalanopsis glauca*	青	11	青 11	A&B
虎皮楠	*Daphniphyllum oldhamii*	虎	16	虎 16	A&B
浙江柿	*Diospyros glaucifolia*	浙	15	浙 15	A&B
石栎	*Lithocarpus glaber*	石	12	石 12	A&B
马尾松	*Pinus massoniana*	马	2	马 2	A&B
木荷	*Schima superba*	木	3	木 3	A&B
臭椿	*Ailanthus altissima*	臭	29	臭 29	B
拟赤杨	*Alniphyllum fortunei*	拟	30	拟 30	B
光皮桦	*Betula luminifera*	光	31	光 31	B
丝栗栲	*Castanopsis fargesii*	丝	32	丝 32	B
黄果朴	*Celtis biondi*	朴	33	朴 33	B
华杜英	*Elaeocarpus chinensis*	华	34	华 34	B
秃瓣杜英	*Elaeocarpus glabripetalus*	秃	35	秃 35	B
薯豆	*Elaeocarpus japonicus*	豆	36	豆 36	B
山桐子	*Idesia polycarpa*	桐	37	桐 37	B
黄绒润楠	*Machilus grijsii*	黄	39	黄 39	B
红楠	*Machilus thunbergii*	红	40	红 40	B
华东楠	*Machilus leptophylla*	东	41	东 41	B
乳源木莲	*Manglietia yuyuanensis*	乳	42	乳 42	B
垂枝泡花树	*Meliosma flexuosa*	胡	38	胡 38	B
闽楠	*Phoebe bournei*	闽	43	闽 43	B
乌冈栎	*Quercus phillyraeoides*	乌	44	乌 44	B

郭士琨，王明强，郭鹏飞，陈婧婷，牛泽清，罗阿蓉，杨娟娟，周青松，朱朝东 (2022) 中国亚热带森林筑巢独栖蜂类群及其寄生者多样性. 生物多样性, 30, 22060. https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2022060.





附录2　新岗山样地巢管样方分布图。每个方格代表所在样地的一个样方，不同颜色代表不同树种丰富度。

Appendix 2　The distribution of trap nests in Xingangshan plots. Each square represents one sampling plot; different colors represent different tree species richness.

郭士琨，王明强，郭鹏飞，陈婧婷，牛泽清，罗阿蓉，杨娟娟，周青松，朱朝东 (2022) 中国亚热带森林筑巢独栖蜂类群及其寄生者多样性. 生物多样性, 30, 22060. https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2022060.

附录3　A样地巢管设置样方树种组成(中文名及拉丁全称参考附录1)

Appendix 3　Tree species composition of trap nest plots in Site A (Chinese names and full Latin names refer to Appendix 1)

样方 Plot	树种组成 Tree species composition
E31	*Q. fabri*
E34	*C. henryi*
F21	*Q. serrata*
L11	*C. sclerophylla*
N11	*S. mukorossi*
N17	*Rh. chinensis*
O27	*Ch. axillaris*
R14	*C. glauca*
C32	*C. henryi, N. sinensis*
H31	*L. formosana, S. mukorossi*
I27	*Ch. axillaris, S. sebiferum*
J21	*K. bipinnata, L. glaber*
P23	*S. superba, Rh. chinensis*
P26	*Q. serrate, C. sclerophylla*
Q21	*Q. fabri, C. glauca*
Q9	*C. myrsinifolia, C. eyrei*
F27	*Q. serrate, Ch. axillaris, S. sebiferum, C. sclerophylla*
N8	*S. superba, Q. fabri, Rh. chinensis, C. glauca*
P19	*C. henryi, L. formosana, S. mukorossi, N. sinensis*
B35	*C. carlesii, C. eyrei, L. glaber, S. superba*
J13	*C. carlesii, C. glauca, S. discolor, S. sebiferum*
N20	*C. sclerophylla, Ch. axillaris, Q. serrate, S. sebiferum*
S16	*C. eyrei, C. glauca, C. myrsinaefolia, L. glaber*
W12	*K. bipinnata, C. myrsinifolia, L. glaber, C. eyrei*
S10	*C. henryi, L. formosana, Q. serrate, Ch. axillaris, S. mukorossi, N. sinensis, S. sebiferum, C. sclerophylla*
E29	*D. glaucifolia, N. sinensis, Q. acutissima, Q. fabri, S. mukorossi, S. discolor, S. superba, D. oldhamii*
P28	*C. carlesii, C. eyrie, C. sclerophylla, Ch. axillaris, C. camphora, D. oldhamii, L. formosana, L. glaber*
N25	*C. carlesii, Ch. axillaris, C. glauca, D. oldhamii, D. glaucifolia, Q. serrate, S. discolor, S. sebiferum*
L17	*C. carlesii, Ch. axillaris, D. oldhamii, D. glaucifolia, L. formosana, L. glaber, Q. serrate, S. superba*
R8	*C. carlesii, C. eyrei, C. sclerophylla, Ch. axillaris, C. glauca, L. glaber, Q. serrate, S. superba*
S13	*A. davidii, C. henryi, C. sclerophylla, C. camphora, L. formosana, M. azedarach, Q. acutissima, R. chinensis*
T15	*S. superba, K. bipinnata, Q. fabri, Rh. chinensis, C. glauca, C. myrsinifolia, L. glaber, C. eyrei*
F36	*A. davidii, C. henryi, C. carlesii, C. sclerophylla, C. camphora, C. glauca, C. myrsinaefolia, D. oldhamii, D. glaucifolia, L. glaber, N. sinensis, Q. acutissima, Q. fabri, Q. serrate, S. discolor, S. superba*
J4	*A. davidii, C. henryi, C. carlesii, C. sclerophylla, C. camphora, C. glauca, C. myrsinaefolia, D. oldhamii, D. glaucifolia, L. glaber, N. sinensis, Q. acutissima, Q. fabri, Q. serrate, S. discolor, S. superba*
L6	*A. davidii, C. carlesii, C. eyreim, C. camphora, C. myrsinaefolia, D. oldhamii, D. glaucifolia, K. bipinnata, L. glaber, M. azedarach, N. sinensis, Q. acutissima, Q. fabri, S. mukorossi, S. discolor, S. superba*
S20	*A. davidii, C. henryi, C. eyrei, C. sclerophylla, Ch. axillaris, C. camphora, C. glauca, D. oldhamii, L. formosana, Q. acutissima, Q. fabri, Q. serrate, R. chinensis, S. mukorossi, S. discolor, S. superba*
U18	*C. henryi, C. carlesii, C. eyrei, C. sclerophylla, Ch. axillaris, C. camphora, C. glauca, C. myrsinaefolia, D. oldhamii, D. glaucifolia, L. formosana, L. glaber, Q. fabri, Q. serrate, R. chinensis, S. superba*
L22	*C. henryi, S. superba, L. formosana, Q. fabri, Q. serrate, K. bipinnata, Ch. axillaris, Rh. Chinensis, C. glauca, S. mukorossi, C. eyrie, N. sinensis, S. sebiferum, L. glaber, C. myrsinifolia, C. sclerophylla*
N9	*C. henryi, S. superba, L. formosana, Q. fabri, Q. serrate, K. bipinnata, Ch. axillaris, Rh. chinensis, C. glauca, S. mukorossi, C. eyrie, N. sinensis, S. sebiferum, L. glaber, C. myrsinifolia, C. sclerophylla, Acer davidii, Sapium discolor, Daphniphyllum oldhamii, Diospyros glaucifolia, Melia azedarach, Quercus acutissima, Cinnamomum camphora, Castanopsis carlesii*
R18	*C. henryi, S. superba, L. formosana, Q. fabri, Q. serrate, K. bipinnata, Ch. axillaris, Rh. chinensis, C. glauca, S. mukorossi, C. eyrie, N. sinensis, S. sebiferum, L. glaber, C. myrsinifolia, C. sclerophylla, Acer davidii, Sapium discolor, Daphniphyllum oldhamii, Diospyros glaucifolia, Melia azedarach, Quercus acutissima, Cinnamomum camphora, Castanopsis carlesii*

郭士琨，王明强，郭鹏飞，陈婧婷，牛泽清，罗阿蓉，杨娟娟，周青松，朱朝东 (2022) 中国亚热带森林筑巢独栖蜂类群及其寄生者多样性. 生物多样性, 30, 22060. https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2022060.

附录4　B样地巢管设置样方树种组成(中文名及全称参考附录1)

Appendix 4　Tree species composition of trap nest plots in Site B (Chinese names and full Latin names refer to Appendix 1)

样方 Plot	树种组成 Tree species composition
D29	*M. flexuosa*
I25	*M. yuyuanensis*
M7	*B. luminifera*
N28	*I. polycarpa*
N5	*A. altissima*
Q27	*A. fortunei*
Q29	*M. leptophylla*
R29	*C. fargesii*
T13	*M. thunbergii*
T29	*Q. phillyreoides*
U16	*E. japonicus*
V24	*E. chinensis*
W10	*P. bournei*
W11	*E. glabripetalus*
X21	*M. grijsii*
Y9	*C. biondii*
G28	*B. luminifera, C. fargesii*
M24	*C. biondii, E. glabripetalus*
M29	*E. japonicas, P. bournei*
O27	*M. yuyuanensis, Q. phillyreoides*
U27	*I. polycarpa, M. grijsii*
V15	*A. altissima, M. flexuosa*
V19	*E. chinensis, M. thunbergii*
V23	*A. fortune, M. leptophylla*
M22	*A. fortune, E. chinensis, M. thunbergii, M. leptophylla*
O31	*C. biondii, E. glabripetalus, E. japonicas, P. bournei*
R3	*B. luminifera, C. fargesii, M. yuyuanensis, Q. phillyreoides*
H30	*B. luminifera, C. fargesii, M. yuyuanensis ,Q. phillyreoides*
U20	*A. fortune, E. chinensis, M. thunbergii, M. leptophylla*
T25	*C. biondii, E. glabripetalus, E. japonicas, P. bournei*
X8	*A. altissima, I. polycarpa, M. flexuosa, M. grijsii*
S18	*A. altissima, I. polycarpa, M. flexuosa, M. grijsii*
J29	*A. altissima, C. biondii, E. glabripetalus, E. japonicas, I. polycarpa, M. flexuosa, M. grijsii, P. bournei*
Q17	*A. fortune, B. luminifera, C. fargesii, E. chinensis, M. thunbergii, M. leptophylla, M. yuyuanensis, Q. phillyreoides*
N23	*A. fortune, C. eyrei, C. fargesii, C. sclerophylla, C. glauca, L. glaber, M. thunbergii, S. superba*
V20	*A. altissima, C. biondii, E. glabripetalus, E. japonicas, I. polycarpa, M. flexuosa, M. grijsii, P. bournei*
V28	*A. altissima, C. eyrei, C. fargesii, C. sclerophylla, C. biondii, L. glaber, M. thunbergii, Q. phillyreoides*
Q5	*A. fortune, C. eyrei, C. fargesii, C. sclerophylla, C. glauca, L. glaber, M. thunbergii, S. superba*
R12	*E. chinensis, I. polycarpa, M. flexuosa, M. yuyuanensis, C. sclerophylla, C. camphora, D. glaucifolia, S. superba*
F25	*A. fortune, B. luminifera, C. fargesii, E. chinensis, M. thunbergii, M. leptophylla, M. yuyuanensis, Q. phillyreoides*
S22	*A. altissima, A. fortune, B. luminifera, C. fargesii, C. biondii, E. chinensis, E. glabripetalus, E. japonicus, I. polycarpa, M. flexuosa, M. grijsii, M. thunbergii, M. leptophylla, M. yuyuanensis, P. bournei, Q. phillyreoides*
E25	*B. luminifera, C. sclerophylla, C. biondii, C. glauca, D. oldhamii, D. glaucifolia, E. chinensis, E. glabripetalus, L. glaber, M. grijsii, M. leptophylla, M. thunbergii, M. yuyuanensis, P. bournei, Q. phillyreoides*
I22	*A. altissima, A. fortune, B. luminifera, C. fargesii, C. biondii, E. chinensis, E. glabripetalus, E. japonicas, I. polycarpa, M. flexuosa, M. grijsii, M. thunbergii, M. leptophylla, M. yuyuanensis, P. bournei, Q. phillyreoides*
Q25	*A. fortune, C. eyrei, C. fargesii, C. sclerophylla, C. biondii, C. camphora, C. glauca, D. oldhamii, D. glaucifolia, E. chinensis, E. japonicas, I. polycarpa, L. glaber, M. grijsii, M. thunbergii, S. superba*
L6	*A. altissima, B. luminifera, C. eyrei, C. fargesii, C. sclerophylla, C. biondii, C. glauca, D. oldhamii, E. glabripetalus, E. japonicas, L. glaber, M. thunbergii, M. yuyuanensis, P. bournei, Q. phillyreoides, S. superba*
U12	*A. altissima, C. eyrei, C. fargesii, C. sclerophylla, C. biondii, C. glauca, E. chinensis, E. glabripetalus, E. japonicas, L. glaber, M. grijsii, M. leptophylla, M. thunbergii, P. bournei, Q. phillyreoides, S. superba*
T8	*A. altissima, C. eyrei, C. fargesii, C. sclerophylla, C. biondii, E. chinensis, E. glabripetalus, E. japonicas, L. glaber, M. grijsii, M. leptophylla, M. thunbergii, P. bournei, Q. phillyreoides, S. superba, C. camphora, C. glauca, D. oldhamii, glaucifolia, M. yuyuanensis, M. flexuosa, I. polycarpa, A. fortune, B. luminifera*
R30	*A. altissima, C. eyrei, C. fargesii, C. sclerophylla, C. biondii, E. chinensis, E. glabripetalus, E. japonicas, L. glaber, M. grijsii, M. leptophylla, M. thunbergii, P. bournei, Q. phillyreoides, S. superba, C. camphora, C. glauca, D. oldhamii, glaucifolia, M. yuyuanensis, M. flexuosa, I. polycarpa, A. fortune, B. luminifera*

郭士琨，王明强，郭鹏飞，陈婧婷，牛泽清，罗阿蓉，杨娟娟，周青松，朱朝东 (2022) 中国亚热带森林筑巢独栖蜂类群及其寄生者多样性. 生物多样性, 30, 22060. https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2022060.

a

b

c

d

e

f

附录5　新岗山样地独栖蜂食物图。a: 蜾蠃的食物; b:泥蜂的食物; c, d: 切叶蜂的食物; e, f: 蛛蜂的食物。

Appendix 5　The food of cavity-nesting Hymenoptera in Xingangshan plots. a. Food for Eumeninae; b. Food for Sphecidae; c, d. Food for Megachilidae; e, f. Food for Pompilidae.