



•技术与方法• 战略生物资源专题

不同方法对蜜蜂总科昆虫资源与多样性监测效果的比较

农莽伊^{1,2}, 曹军¹, 程文达^{3*}, 彭艳琼^{2*}

1. 云南大学生态与环境学院, 昆明 650091; 2. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南勐腊 666303; 3. 中山大学深圳校区生态学院, 广东深圳 518000

摘要: 蜜蜂总科昆虫是重要的生物资源, 可为人类提供蜂产品、为生态系统提供授粉服务等。当前全球蜜蜂资源呈下降趋势, 亟需加强监测和保护。虽然调查和监测蜜蜂总科昆虫的方法有多种, 但各方法适用的监测类群还不甚清楚。为了对蜜蜂总科昆虫进行系统监测, 更为了全面揭示蜜蜂总科昆虫的多样性, 本研究选择生物资源极为丰富的中国科学院西双版纳热带植物园, 利用样线法、马来氏网法和黄盘法对蜜蜂总科昆虫资源及多样性进行监测, 比较了不同方法的监测效果。经过一年期系统监测, 收集到蜜蜂总科(包括蜜蜂科、隧蜂科、切叶蜂科、分舌蜂科、泥蜂科、方头泥蜂科和蠼蜂科)昆虫14,896头, 隶属于7科54属345种。稀释曲线显示3种方法采样覆盖度均充分, 但收集的主要类群有差异。样线法监测到6科33属133种, 蜜蜂科、切叶蜂科和隧蜂科的多样性较高, 有3个优势种及44个稀有种。马来氏网法监测到7科50属260种, 方头泥蜂科、切叶蜂科和隧蜂科的多样性较高, 有6个优势种及130个稀有种。黄盘法监测到6科29属122种, 方头泥蜂科多样性高, 而蜜蜂科个体数多, 有6个优势种及49个稀有种。结果显示不同方法适合监测蜜蜂总科昆虫中不同的类群及种类, 组合使用可监测到更多物种, 这将为蜜蜂总科昆虫的调查、种群监测提供方法选择, 也为有效保护蜜蜂总科昆虫资源提供基础数据。

关键词: 蜜蜂总科昆虫; 样线法; 马来氏网法; 黄盘法; 生物多样性监测

农莽伊, 曹军, 程文达, 彭艳琼 (2025) 不同方法对蜜蜂总科昆虫资源与多样性监测效果的比较. 生物多样性, 33, 25057. doi: 10.17520/biods.2025057; cstr: 32101.14.biods.2025057.

Nong QY, Cao J, Cheng WD, Peng YQ (2025) Comparative study of monitoring methods for Apoidea resources and diversity. Biodiversity Science, 33, 25057. doi: 10.17520/biods.2025057; cstr: 32101.14.biods.2025057.

Comparative study of monitoring methods for Apoidea resources and diversity

Qiaoyi Nong^{1,2}, Jun Cao¹, Wenda Cheng^{3*}, Yanqiong Peng^{2*}

1 School of Ecology and Environment, Yunnan University, Kunming 650091, China

2 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303, China

3 School of Ecology, Sun Yat-sen University Shenzhen Campus, Shenzhen, Guangdong 518000, China

ABSTRACT

Aims: Apoidea insects are crucial biological resources, providing bee products for humans and pollination services for ecosystems etc. However, global Apoidea resources are declining, highlighting the urgent need for monitoring and conservation efforts. Despite the availability of various methods to survey and monitor Apoidea diversity, there remains uncertainty regarding the most appropriate method and the taxa they effectively monitor.

Methods: The study site is located at Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences where biodiversity is high. Three methods commonly used for Apoidae monitoring were employed: transects, Malaise traps, and pan traps. The richness and abundances of Apoidae were recorded and the effectiveness was compared to determine the best monitoring approach.

Results: Through one-year systematic monitoring, a total of 14,896 Apoidea insects were collected, including Apidae, Halictidae, Megachilidae, Colletidae, Sphecidae, Crabronidae, and Ampulicidae, which belonged to 7 families, 54

收稿日期 Received: 2025-02-18; 接受日期 Accepted: 2025-04-09

基金项目: 中国生物多样性监测与研究网络-昆虫网 Supported by the Sino BON Insect Diversity Monitoring Network (Sino BON-Insects)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: chengwd5@mail.sysu.edu.cn; pengyanqiong@xtbg.ac.cn

<https://www.biodiversity-science.net>

genera, and 345 species. The rarefaction curve showed adequate sampling coverage for all three methods, and there were differences in the major taxa collected. The transects collected 6 families, 33 genera, and 133 species, of which Apidae, Megachilidae, and Halictidae had high diversity, including 3 dominant species and 44 rare species. The Malaise traps collected 7 families, 50 genera, and 260 species, of which Crabronidae, Megachilidae, and Halictidae had high diversity, including 6 dominant species and 130 rare species. The pan traps collected 6 families, 29 genera, and 122 species, of which the diversity of Crabronidae was high, but Apidae had the most individuals, including 6 dominant species and 49 rare species.

Conclusion: The results demonstrate that different methods are effective for monitoring different Apoidea taxa and species. Combining multiple methods enhances the detection of Apoidea diversity. This study provides valuable methodological options for surveying Apoidea species and population monitoring, and also offer baseline data for the effective conservation of Apoidea resources.

Key words: Apoidea insects; transects; Malaise traps; pan traps; biodiversity monitoring

蜜蜂作为地球上最重要的生物资源之一, 不仅为人类提供了蜂蜜、蜂花粉、蜂蜡等产品(伍旭升, 2022), 还在生态系统中扮演着至关重要的角色, 它们通过授粉服务支持植物繁殖, 促进农业增产、改善产品质量, 以及维持生态系统稳定等(Klein et al, 2007; 刘秀薇等, 2018)。部分蜜蜂的社会性行为也为种群的繁殖、觅食和防御提供了复杂的社会结构支持(Leonhardt et al, 2016), 而大多数蜜蜂的独栖性行为使其在特定生态位上具有独特的适应性特征, 进一步丰富了生物多样性(Michener, 2007; 郭士琨等, 2023)。然而, 全球气候变化、土地利用改变和人为干扰的加剧对蜜蜂的生态服务功能造成了严重威胁, 蜜蜂的生物多样性呈下降趋势(Davison et al, 2021; Artamendi et al, 2025); 由于对蜜蜂资源本底掌握不充分, 其有效保护面临严峻挑战(Potts et al, 2010; 谢正华等, 2021)。蜜蜂总科昆虫包括蜂系(Anthophila)的蜜蜂科、地蜂科、分舌蜂科、隧蜂科、切叶蜂科、准蜂科、Stenotritidae和泥蜂类(Sphecidae)中的泥蜂科、蟪泥蜂科、方头泥蜂科和异泥蜂科(Michener, 2007; Pulawski, 2011)。蜜蜂总科的多样性和广泛分布使得对它们的监测和研究很不均衡(Klaus et al, 2024), 在热带地区尤为薄弱(Orr et al, 2021; Warrit et al, 2023), 而且单一的监测方法难以反映蜜蜂总科昆虫资源的真实情况。因此, 构建系统化的监测体系, 对促进蜜蜂总科昆虫资源的保护、可持续利用以及维持生态系统稳定具有重要意义。

常用的蜜蜂总科昆虫监测方法有样线法(transects)、马来氏网法(Malaise traps)、黄盘法(pan traps)、巢管法(trap nests)等(Prado et al, 2017; 童泽

宇等, 2018; González et al, 2020)。样线法是一种常见的收集蜜蜂总科昆虫的主动采样方法(Arun & Vijayan, 2004), 具有易于使用、便携、成本效益高的优点(Buffington & Redak, 1998; Zou et al, 2012)。马来氏网法是一种被动飞行拦截陷阱, 对收集膜翅目、双翅目昆虫非常有效(Malaise, 1937; 吴琼等, 2016), 也是一种成本效益好的收集方法(Noyes, 1989; Basset et al, 2003)。黄盘法是通过一种模仿开花植物颜色的彩色容器, 在视觉上引诱蜜蜂总科昆虫进入陷阱进行收集的方法, 具有易设置、可多点同时调查、省时等优点, 是野外采集蜜蜂总科昆虫的常用方法(Greenleaf & Kremen, 2006; Padrón et al, 2021)。巢管法是一种通过设置人工巢管吸引独栖蜂进入产卵, 以便对其生物学、生活史、生态学特性等开展研究的重要方法, 但需掌握一定的观测技术才有效(MacIvor, 2017; 林木青等, 2022; 郭士琨等, 2023)。然而, 由于蜜蜂总科昆虫的行为模式复杂且活动性强, 单一的方法难以揭示蜜蜂总科昆虫资源的全貌(Basset et al, 2012; Johnson et al, 2013; Smith et al, 2020); 尤其是在热带地区, 茂密高大的雨林生境及高温潮湿的气候给野外采集、监测带来了很大的挑战(Barlow et al, 2007; Malhi et al, 2008), 需组合不同方法才能更好地监测蜜蜂总科昆虫资源及其多样性。

根据中国科学院动物研究所朱朝东团队统计, 中国已知蜜蜂类昆虫约1,400种, 而西双版纳有记载的蜜蜂总科昆虫共155种(杨龙龙和吴燕如, 1998; 史旭曾等, 2021), 目前还缺乏其清晰的物种本底。中国科学院西双版纳热带植物园(简称版纳植物园)地处西双版纳热带地区腹地, 是我国保存物种和生

物资源最丰富的植物园，其生境多样，蜜粉源植物丰富，但蜜蜂总科昆虫资源本底尚不清楚，是比较不同方法对蜜蜂总科昆虫资源与多样性系统监测效果的理想之地。本研究选择已熟练掌握的样线法、马来氏网法和黄盘法，通过定点、定时地对版纳植物园的蜜蜂总科昆虫多样性进行系统监测，主要回答3个问题：(1) 版纳植物园有多少种蜜蜂总科昆虫？(2) 3种方法监测的蜜蜂总科昆虫类群是否存在差异？(3) 3种方法监测的蜜蜂总科昆虫群落多样性如何？以期为蜜蜂总科昆虫监测提供合适的方法，为热带地区蜜蜂总科昆虫资源的有效保护提供科学依据。

1 研究地点和方法

1.1 研究地点

研究地点位于云南省西双版纳傣族自治州勐腊县勐仑镇(21°55' N、101°16' E, 海拔580–700 m)的版纳植物园。该地区属典型的热带季风气候，年平均气温21.4℃，年平均降水量1,500 mm，其中超过80%的降水集中在6–10月，此时气候湿热，为雨季，11月至次年2月经常有晨雾，为雾凉季，而3–5月气候炎热干燥，为干热季(Cao et al, 2006; 朱华, 2015)。版纳植物园占地面积约1,125 ha，收集有活植物13,000多种，设有39个植物专类园区，且保存有一片面积约250 ha的原始热带雨林，是世界上野外保存植物种数和向公众展示植物类群数量最多的植物园。适宜的气候，多样的生境，全年开花不间断的蜜粉源植物，保存了丰富的蜜蜂总科昆虫资源。

1.2 研究材料

本研究主要调查了蜜蜂总科的昆虫。该总科全球有11科35亚科，已记述种类20,900余种(牛泽清等, 2018)。本文包括了国内分布的蜂系中的蜜蜂科、地蜂科、分舌蜂科、隧蜂科、切叶蜂科、准蜂科以及泥蜂类的泥蜂科、蠼蜂科和方头泥蜂科。

1.3 研究方法

本研究在版纳植物园里选取了6个生境类型，包括绿石林(属于西双版纳国家级自然保护区勐仑片区)、片断化的沟谷热带雨林、橡胶林、柚子林、蜜粉源植物丰富的专类园，以及蜜粉源植物较少的专类园。绿石林生境位于保护区中，是典型石灰山

季雨林，分布有1,000多种热带植物，栖息着上百种野生动物。片断化沟谷热带雨林水热条件好，以高大乔木和珍稀植物为主，收集有天南星(*Arisaema heterophyllum*)、蕨类等2,000余种植物，是100余种濒危植物的庇护所。橡胶林常受人为割胶、收胶等影响。柚子林中草本植物丰富，但受人为喷洒化肥、农药、采摘柚子等影响。蜜粉源植物丰富的专类园主要是百花园和百果园，百果园种植有黄皮(*Clausena lansium*)、芒果(*Mangifera indica*)、荔枝(*Litchi chinensis*)等641种果树；百花园种植、保存有木棉(*Bombax ceiba*)、凤凰木(*Delonix regia*)、火焰树(*Spathodea campanulata*)等645种热带花卉植物。蜜粉源植物较少的专类园是保存58种植物的国树国花园(开花植物少)，以及保存100多种隐头花序的榕树园(少见显花植物)。每个生境类型设置2个重复，并根据人为干扰将6个生境划分为3类：低干扰原始林(绿石林和沟谷雨林)，中干扰经济林(橡胶林和柚子林)，以及高干扰专类园，共12个样点。每个样点设置1条1 km长的样线、安装1套马来氏网，每次调查放置15个黄盘，从2023年9月至2024年9月用3种方法系统监测野生蜜蜂多样性。具体方法如下：

样线法：在12套马来氏网附近设置12条1 km长的样线，每2周定时调查，选择天晴日以恒定、缓慢的速度行走，对样线两侧蜜蜂总科昆虫的访花情况进行观测，记录访花蜜蜂总科昆虫的种类及数量；对于形态特征明显的物种，可直接鉴定记录，如蜜蜂属(*Apis*)昆虫；对形态特征明显，但飞行速度快、肉眼难以辨认的物种，用捕虫网进行捕捉，鉴定后释放，并注意不重复记录；对形态特征不明显，野外无法鉴定的物种，做好标签，装进10 mL的塑料管带回实验室，在体视镜下观察、鉴定，鉴定后的物种进行标本制作，对形态上难以鉴定的种类，保存于无水乙醇中，用分子测序辅助鉴定。

马来氏网法：在12个样点，各选择地势平坦、视野开阔处安装1套马来氏网，在昆虫收集瓶上记录地点编号及收放时间，瓶内放置信息标签，收集液为无水乙醇，便于保存虫体(Ssymank et al, 2018)。由于该地区气候高温多雨，为避免液体全部蒸发或雨水灌入，每月的15日和30日分别收集、更换收集瓶一次。从收集回来的样品中挑拣出属于蜜

蜂总科的昆虫保存于无水乙醇中。

黄盘法: 在12个马来氏网样点附近设置的1 km长样线上, 每月15日更换马来氏网昆虫收集瓶时, 沿样线放置15个黄色塑料盘(黄盘), 尽量将其放置在开花植物附近, 黄盘中放置2/3的洗涤剂液体, 因为洗涤剂分子具亲水端溶于水、疏水端避开水面的特点, 可削弱水分子间的作用力, 降低液体的表面张力, 因而便于收集昆虫(Leong & Thorp, 1999)。黄盘放置24 h后收回, 通常第一天早上放置, 第二天早上收回, 及时挑出蜜蜂总科昆虫, 保存于无水乙醇中。

对3种方法收集到的蜜蜂总科昆虫及时进行鉴定分析和数量统计, 鉴定参考《中国动物志》、中国动物主题数据库(<http://zoology.especies.cn/>)以及相关的分类文献和书籍(附录1)。对于一些在形态鉴定上比较困难的种类, 请教蜜蜂分类专家进行协助。对于体型较小或形态特征不明显的蜜蜂总科种类, 采用DNA条形码进行辅助以准确鉴定。

1.4 数据分析

为了评估3种方法采样数据的覆盖度, 使用R 4.4.2软件包iNEXT分别计算3种方法监测到的蜜蜂总科昆虫种类及个体数量, 用稀释曲线(rarefaction curve)表示采样的覆盖度是否充分(Hsieh et al, 2016)。分别计算3种方法监测到的蜜蜂总科昆虫群落希尔数(Hill number) (Hill, 1973), 包括物种丰富度(species richness)、Shannon多样性及Simpson多样性指数(Hsieh et al, 2016): 物种多度指群落的物种数; Shannon多样性指数考虑了物种的数量和它们在群落中的分布, 值越高表明群落物种组成比例越相似; Simpson多样性指数测量的是群落中两种随机选择的个体属于同一物种的概率, 更能反映群落中优势物种的影响, 值越低表明群落中少数物种占据主导地位(冯志荣等, 2024)。此外, 根据胡冰冰等(2010)和王朝雅等(2023)的相关研究, 结合实际的监测数据, 计算了Berger-Parker优势度指数(d): $d = N_{max}/N_t$, 式中, N_{max} 为优势种的个体数量之和, N_t 为全部种类的个体数量之和(Berger & Parker, 1970); 当 $d > 0.1$ 时为优势种, 在0.01–0.1之间时为常见种, $d < 0.01$ 且监测到的个体数少于5只时为稀有种。利用Excel绘制3种方法监测到的蜜蜂总科昆虫的物种数量变化柱状图。

2 结果

2.1 3种方法监测的蜜蜂总科昆虫采样覆盖度评估

经过一年期定点、定时系统地监测蜜蜂总科昆虫物种的多样性, 虽然3种采样方法监测到的蜜蜂总科昆虫种类和数量有差异, 黄盘法在个体数量较少时的采样覆盖度略低于样线法和马来氏网法, 但随采集个体数量的增加, 3种采样方法的样本覆盖度都趋近于1, 表明本研究监测蜜蜂总科昆虫的3种方法采样量均充分(图1)。

2.2 3种方法监测的蜜蜂总科昆虫类群的差异

用3种方法经过一年期系统监测, 收集到蜜蜂总科昆虫7科54属345种, 共14,896头; 包括蜜蜂类4科: 蜜蜂科、隧蜂科、切叶蜂科和分舌蜂科, 泥蜂类3科: 方头泥蜂科、蠓泥蜂科和泥蜂科。在12条样线上共收集到蜜蜂总科昆虫6科33属133种, 其中蜜蜂科昆虫收集到的物种(36.6%)和数量(88.4%)均最多, 未监测到蠓泥蜂科昆虫。12套马来氏网共收集到蜜蜂总科昆虫7科50属260种, 其中方头泥蜂科收集到的物种(52.7%)和数量(53.1%)均最多。使用黄盘法共收集到蜜蜂总科昆虫6科29属122种, 其中方头泥蜂科收集到的物种数最多(49.2%), 而蜜蜂科收集到的个体数最多(44.7%), 未监测到分舌蜂科昆虫。总之, 3种方法共同监测到5科(方头泥蜂科、蜜蜂科、泥蜂科、切叶蜂科、隧蜂科) 36种, 有309种是不同方法监测到的, 可见3种方法收集到的种类和数量差异较大(图2)。

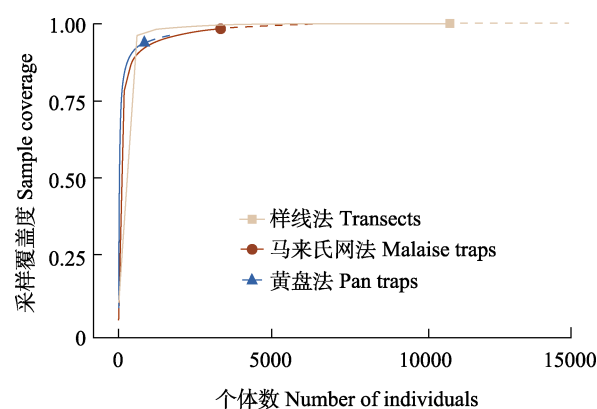


图1 样线法、马来氏网法及黄盘法监测的蜜蜂总科昆虫采样覆盖度

Fig. 1 Sample coverages of Apoidea insects monitored by transects, Malaise traps, and pan traps

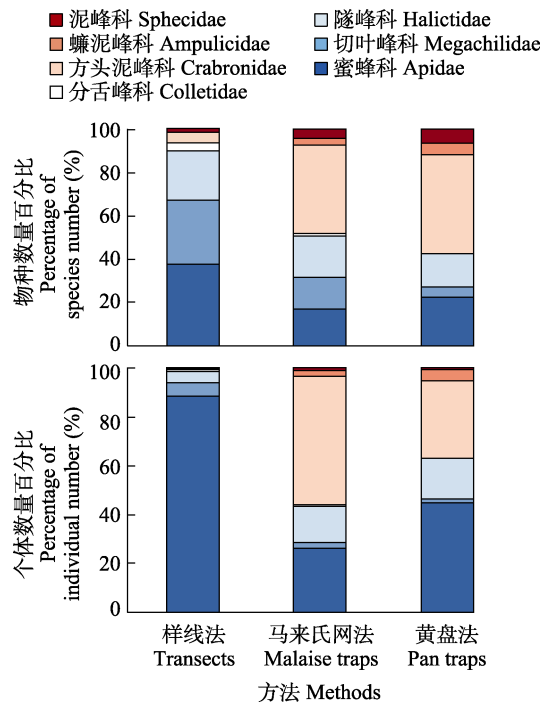


图2 样线法、马来氏网法及黄盘法监测的蜜蜂总科昆虫物种数量和个体数量百分比
Fig. 2 The percentages of species and individuals of Apoidea insects monitored by transects, Malaise traps, and pan traps

表1 样线法、马来氏网法及黄盘法监测的蜜蜂总科昆虫群落多样性(平均值 ± 标准误)
Table 1 Diversity indices of Apoidea insects monitored by transects, Malaise traps, and pan traps (mean ± SE)

监测方法 Monitoring method	科名 Family	物种丰富度 Species richness	Shannon多样性指数 Shannon diversity index	Simpson多样性指数 Simpson diversity index
样线法 Transects	泥蜂科 Sphecidae	8 ± 0.20	1.93 ± 0.15	0.80 ± 0.11
	方头泥蜂科 Crabronidae	9 ± 0.71	4.88 ± 0.38	4.14 ± 0.48
	分舌蜂科 Colletidae	5 ± 0.39	3.25 ± 0.31	2.50 ± 0.32
	隧蜂科 Halictidae	30 ± 15.62	13.32 ± 0.73	8.92 ± 0.60
	切叶蜂科 Megachilidae	39 ± 11.24	19.81 ± 0.92	14.39 ± 0.70
	蜜蜂科 Apidae	49 ± 1.83	13.99 ± 0.16	8.69 ± 0.12
马来氏网法 Malaise traps	泥蜂科 Sphecidae	8 ± 2.36	5.72 ± 0.82	4.74 ± 0.76
	螋泥蜂科 Ampulicidae	19 ± 6.71	8.28 ± 0.32	8.76 ± 0.20
	方头泥蜂科 Crabronidae	138 ± 19.27	29.94 ± 0.83	14.35 ± 0.70
	分舌蜂科 Colletidae	1 ± 0.00	1.00 ± 0.00	1.00 ± 0.00
	隧蜂科 Halictidae	35 ± 4.18	16.86 ± 0.97	8.87 ± 0.77
	切叶蜂科 Megachilidae	29 ± 7.15	20.22 ± 2.50	13.92 ± 2.83
黄盘法 Pan traps	蜜蜂科 Apidae	31 ± 8.76	8.89 ± 0.37	5.50 ± 0.26
	泥蜂科 Sphecidae	5 ± 2.59	3.45 ± 0.86	1.50 ± 0.07
	螋泥蜂科 Ampulicidae	24 ± 10.57	12.08 ± 0.35	6.57 ± 0.26
	方头泥蜂科 Crabronidae	60 ± 26.01	28.56 ± 1.88	18.47 ± 1.54
	隧蜂科 Halictidae	12 ± 4.06	5.38 ± 0.53	3.60 ± 0.38
	切叶蜂科 Megachilidae	4 ± 1.45	0.80 ± 0.10	0.52 ± 0.02
	蜜蜂科 Apidae	17 ± 8.90	5.15 ± 0.31	3.24 ± 0.19

2.3 3种方法监测的蜜蜂总科昆虫多样性的变化

3种方法监测到的蜜蜂总科昆虫中各科的物种数及个体数不同, 其群落多样性存在差异(表1)。样线法监测到6科, 物种丰富度最高的是蜜蜂科, 其他依次是切叶蜂科、隧蜂科、方头泥蜂科及泥蜂科, 最少的是分舌蜂科; 其监测到的群落Shannon多样性指数表现为: 切叶蜂科 > 蜜蜂科 > 隧蜂科 > 方头泥蜂科 > 分舌蜂科 > 泥蜂科; Simpson多样性指数显示为: 切叶蜂科 > 隧蜂科 > 蜜蜂科 > 方头泥蜂科 > 分舌蜂科 > 泥蜂科, 可见切叶蜂科的Shannon多样性和Simpson多样性均最高, 泥蜂科的最低。用马来氏网法监测到7科, 物种丰富度最高的是方头泥蜂科, 其他依次是隧蜂科、蜜蜂科、切叶蜂科、螋泥蜂科及泥蜂科, 最少的是分舌蜂科; 其监测到的群落Shannon多样性指数显示为: 方头泥蜂科 > 切叶蜂科 > 隧蜂科 > 蜜蜂科 > 螋泥蜂科 > 泥蜂科 > 分舌蜂科; Simpson多样性指数显示为: 方头泥蜂科 > 切叶蜂科 > 隧蜂科 > 螋泥蜂科 > 蜜蜂科 > 泥蜂科 > 分舌蜂科, 可见方头泥蜂科的Shannon多样性和Simpson多样性均最

高, 切叶蜂科和隧蜂科次之, 分舌蜂科和泥蜂科的均低。黄盘法监测到6科, 物种丰富度最高的是方头泥蜂科, 其他依次是蠓泥蜂科、蜜蜂科、隧蜂科及泥蜂科, 最少的是切叶蜂科; 其监测到的群落Shannon多样性指数表现为: 方头泥蜂科 > 蠓泥蜂科 > 隧蜂科 > 蜜蜂科 > 泥蜂科 > 切叶蜂科; Simpson多样性指数显示为: 方头泥蜂科 > 蠓泥蜂科 > 隧蜂科 > 蜜蜂科 > 泥蜂科 > 切叶蜂科, 可见方头泥蜂科的Shannon多样性和Simpson多样性最高, 而切叶蜂科的最低, 其他4科的多样性相当(表1)。

2.4 3种方法监测的蜜蜂总科昆虫优势种、常见种和稀有种

3种方法共监测到蜜蜂总科昆虫优势种12种、常见种127种、稀有种203种; 3种方法不仅在监测到的优势科有区别, 在优势种、常见种和稀有种上也存在差异(图3)。样线法监测到的优势科是蜜蜂科, 优势度指数达0.88, 其中东方蜜蜂(*Apis cerana*)、大蜜蜂(*A. dorsata*)和小蜜蜂(*A. florea*)是优势种, 3个种共占总个体数的52.55%; 还监测到86种常见种和44种稀有种。马来氏网法和黄盘法监测到的优势科均是方头泥蜂科、隧蜂科和蜜蜂科。相较于黄盘法, 马来氏网法监测到的方头泥蜂科个体数量最多, 优势度指数达0.53, 其中岩田隆痣短柄泥蜂(*Carinostigmus iwatai*)和一种脊短柄泥蜂(*Psenulus* sp.1)是优势种; 隧蜂科优势度指数为0.25, 褐足淡脉隧蜂(*Lasioglossum vegans*)是优势种; 蜜蜂科优

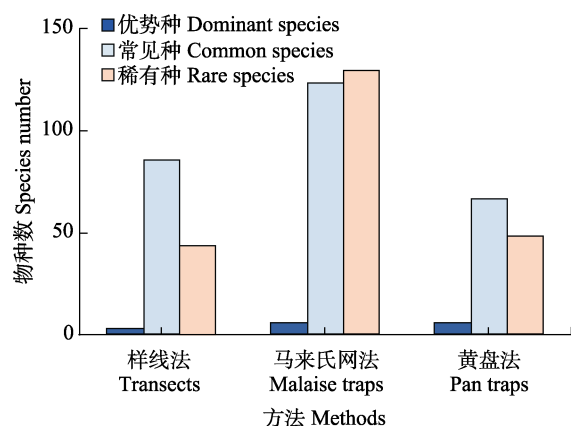


图3 样线法、马来氏网法及黄盘法监测的蜜蜂总科昆虫优势种、常见种和稀有种

Fig. 3 Dominant, common and rare species of Apoidea insects monitored by transects, Malaise traps, and pan traps

势度指数为0.14, 光足无刺蜂(*Tetragonula laeviceps*)、东方蜜蜂和齿胫芦蜂(*Ceratina dentipes*)是优势种; 共收集到优势种6种、常见种124种及稀有种130种。黄盘法监测到的蜜蜂科个体数量最多, 优势度指数为0.45, 波氏芦蜂(*Ceratina sutepensis*)和拟黄芦蜂(*C. hieroglyphica*)是优势种; 方头泥蜂科优势度指数为0.28, 岩田隆痣短柄泥蜂是优势种; 隧蜂科优势度指数为0.18, 褐足淡脉隧蜂、塔克棒腹蜂(*Lipotriches takauensis*)和难府棒腹蜂(*Lipotriches nanensis*)是优势种; 共收集到优势种6种、常见种67种及稀有种49种(图3)。

3 讨论

本研究在版纳植物园3类不同干扰程度下的6个生境里共选择12个样点, 分别设置了12条1 km样线、12套马来氏网以及每次放置15个黄盘, 定时、定点, 连续1年对蜜蜂总科昆虫开展多样性监测, 共收集到蜜蜂总科昆虫7科54属345种, 14,896头, 表明版纳植物园不仅有丰富的蜜粉源植物, 也有丰富的蜜蜂总科昆虫资源, 获得了该地区第一份蜜蜂总科物种本底, 极大丰富了西双版纳热带地区的蜜蜂总科昆虫资源及多样性。进一步通过比较3种方法充分采样的数据, 明确了不同方法适合监测的蜜蜂总科昆虫类群及种类。样线法监测到6科, 其中对蜜蜂科、切叶蜂科和隧蜂科监测效果较好, 尤其适合监测优势的东方蜜蜂、大蜜蜂和小蜜蜂种群, 并有助于监测、保护44种稀有的蜜蜂总科昆虫, 但未监测到蠓泥蜂科种类。马来氏网法监测到7科, 黄盘法监测到6科, 这两种方法对监测方头泥蜂科最有效, 对监测蜜蜂科、隧蜂科也有较好效果, 尤其适合监测优势的岩田隆痣短柄泥蜂和褐足淡脉隧蜂种群。此外, 马来氏网法还能有效监测一种脊短柄泥蜂、光足无刺蜂、东方蜜蜂及齿胫芦蜂的种群, 以及130种稀有的蜜蜂总科昆虫。黄盘法则可有效监测波氏芦蜂、拟黄芦蜂、塔克棒腹蜂和难府棒腹蜂种群, 以及对67种稀有的蜜蜂总科昆虫进行监测, 但未监测到分舌蜂科昆虫。研究结果首次清晰地展示了适合监测不同蜜蜂总科昆虫类群的不同方法, 包括优势种、常见种和稀有种, 为蜜蜂总科昆虫资源的普查、针对重要目标类群的持续监测、深入研究及保护提供了直接的方法参考。

在3种方法中, 样线法是主动扫网采集的方法, 受样线两侧蜜粉源植物多寡的影响, 虽然每2周采集1次, 但只收集到133种, 可能原因是没有访花的蜜蜂总科昆虫采集不足, 对于茂密热带雨林样线中林冠上层的访花蜜蜂总科昆虫的观测具有挑战性, 难于采集充分(Laroca & Orth, 2002; Zou et al, 2012)。总体上较为活跃、喜欢访花的蜜蜂科昆虫被监测到的最多, 但由于物种间数量差异大, 其Shannon多样性指数和Simpson多样性指数没有物种分布较均匀的切叶蜂科高。在样线上主动扫网采集的优点是可以记录、明确开花植物及访花蜜蜂总科昆虫, 进一步可以分析传粉网络, 研究蜜蜂总科传粉昆虫与蜜粉源植物间的互作关系, 从而有针对性地提高或改善生态系统中的授粉服务功能(Garibaldi et al, 2013; Nicholson & Ricketts, 2019); 缺点是费力费时, 还需培训能识花、善观察、能快速采集和鉴定蜜蜂总科昆虫的专职人员, 才能获得理想监测数据。马来氏网法和黄盘法属于被动监测的方法, 尤其是马来氏网法, 每天可自动收集进入收集瓶中的昆虫, 本研究安装了12套马来氏网, 每月收集2次, 共288瓶标本, 采集到的蜜蜂总科昆虫最为丰富, 有260种, 其中方头泥蜂科多样性最高, 其次是切叶蜂科、隧蜂科、蜜蜂科等, 分舌蜂科多样性最低。此外, 与Smith-Pardo和Gonzalez (2007)的研究结果相似, 马来氏网法还能监测到稀有物种(如*Ulugombakia* sp.1), 本研究中马来氏网法监测到优势蜜蜂总科昆虫6种、常见种124种及稀有种130种。马来氏网法省时省力, 且采集回室内可以集中挑拣、分类、统计数量, 唯一的不足是只能掌握蜜蜂总科昆虫的种类和数量, 不能与开花植物进行关联。黄盘法的监测结果主要与放置时间、地点和采集频次相关, 采集到的种类和数量变化较大, 在本研究中黄盘法最终监测到蜜蜂总科昆虫122种, 其中方头泥蜂科物种数最多, 但个体数是蜜蜂科的最多; 黄盘法投入人力及时间适中, 可以参考样线上开花植物的多寡进行放置, 能匹配监测一些随花期访花、活动的蜜蜂总科昆虫, 是样线法和马来氏网法的重要补充。总之, 不同方法适合监测的蜜蜂总科昆虫优势种、常见种和稀有种的差异大, 针对目标种类需选择相应有效的方法; 对于目标样点, 通过组合使用互补、相辅相成的方法, 可以监测到更

丰富的蜜蜂总科生物资源及其多样性, 获得理想的监测结果(Smith et al, 2020)。

考虑蜜蜂总科昆虫的行为及个体大小, 样线法倾向于监测具有社会性的蜜蜂总科昆虫, 尤其是蜜蜂属昆虫, 仅东方蜜蜂、大蜜蜂和小蜜蜂3个优势种就占了个体数量的52.55%。马来氏网法虽也能监测到体型较大的物种(如东方蜜蜂、木蜂等), 但个体数量较少, 更倾向于收集体型较小的蜜蜂总科昆虫(Westphal et al, 2008); 黄盘法也倾向于监测体型较小的蜜蜂总科昆虫(Padrón et al, 2021; Anderson et al, 2024)。本研究结果与Gonçalves和Oliveira (2013)在巴西南部的研究相似, 马来氏网法和黄盘法能有效收集隧蜂科昆虫, 在本研究中基于黄盘法收集的褐足淡脉隧蜂个体数占其收集到的蜜蜂总科昆虫总个体数的46.62%, 马来氏网法中收集的个体数占29.17%。光足无刺蜂、波氏芦蜂、拟黄芦蜂等在马来氏网法和黄盘法中也收集较多。对于独栖性的蜜蜂总科昆虫, 如切叶蜂, 巢管法是有效的监测方法(郭士琨等, 2023), 该方法通过模拟自然巢穴筑巢引蜂, 有助于增加蜜蜂总科昆虫的多样性及种群大小, 在已掌握蜜蜂总科昆虫资源本底背景下, 利用巢管法可以有针对性地增加目标蜜蜂总科昆虫的种群大小, 提高蜜蜂总科昆虫授粉服务功能(Bosch & Kemp, 2001; Eraerts et al, 2020)。下一步将考虑增加巢管法, 监测、研究独栖蜜蜂的生物学特性。

本研究仅在版纳植物园开展蜜蜂总科昆虫资源的系统监测, 也仅完成了一年期的监测, 但3种方法均监测到很多稀有种, 持续多年监测将可确定该地区的优势种、常见种及稀有种资源, 并掌握它们的月、季节和年际间的种群动态变化, 可助力有的放矢地制定该地区蜜蜂总科昆虫多样性的保护策略。此外, 扩大区域尺度, 考虑气候变化、土地利用方式转变、人类干扰强度等威胁因素, 组合不同监测方法, 开展系统、长期的监测, 才能更好地反映西双版纳热带地区蜜蜂总科昆虫资源的状况。针对蜜蜂总科昆虫资源的特异性及需求, 可结合多源环境数据(如卫星遥感植被指数、高精度气象站数据等)进行时空异质性分析, 量化气候变化和城市化进程对蜜蜂总科昆虫多样性的影响(Loke & Chisholm, 2022; Zabeo et al, 2024)。此外, 蜜蜂总科昆虫作为全球生态系统中的重要传粉者, 其多样性

变化直接关系到农作物产量及生态系统的稳定性, 定量评估其传粉服务功能也极为重要。蜜蜂总科昆虫也是对环境变化极为敏感的物种, 保护多样的生境、拥有充足多样的蜜粉源植物, 才能长久地保护和可持续利用好这类重要的生物资源。

致谢: 感谢中国科学院西双版纳热带植物园园林园艺中心在野外调查和采样中给予的支持与帮助, 感谢协同进化组员工张睿清在野外调查和采集中的帮助; 感谢云南农业大学李强老师、马丽老师、邓瑶博士等在泥蜂类物种鉴定中的支持!

参考文献

- Anderson N, Petersen S, Johnson R, Terry T, Kunzelman J, Lariviere D, Anderson V (2024) Pan trapping and Malaise trapping: A comparison of bee collection techniques in subalpine meadows. *Diversity*, 16, 536.
- Artamendi M, Martin PA, Bartomeus I, Magrach A (2025) Loss of pollinator diversity consistently reduces reproductive success for wild and cultivated plants. *Nature Ecology & Evolution*, 9, 296–313.
- Arun PR, Vijayan VS (2004) Patterns in abundance and seasonality of insects in the Siruvani forest of Western Ghats, Nilgiri Biosphere Reserve, Southern India. *The Scientific World Journal*, 4, 381–392.
- Barlow J, Gardner TA, Araujo IS, Ávila-Pires TC, Bonaldo AB, Costa JE, Esposito MC, Ferreira LV, Hawes J, Hernandez MIM, Hoogmoed MS, Leite RN, Lo-Man-Hung NF, Malcolm JR, Martins MB, Mestre LAM, Miranda-Santos R, Nunes-Gutjahr AL, Overal WL, Parry L, Peters SL, Ribeiro-Junior MA, da Silva MNF, da Silva Motta C, Peres CA (2007) Quantifying the biodiversity value of tropical primary, secondary, and plantation forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 104, 18555–18560.
- Basset Y, Cizek L, Cuénoud P, Didham RK, Guilhaumon F, Missa O, Novotny V, Ødegaard F, Roslin T, Schmidl J, Tishechkin AK, Winchester NN, Roubik DW, Aberlenc HP, Bail J, Barrios H, Bridle JR, Castaño-Meneses G, Corbara B, Curletti G, Duarte da Rocha W, De Bakker D, Delabie JHC, Dejean A, Fagan LL, Floren A, Kitching RL, Medianero E, Miller SE, Gama de Oliveira E, Orivel J, Pollet M, Rapp M, Ribeiro SP, Roisin Y, Schmidt JB, Sørensen L, Leponce M (2012) Arthropod diversity in a tropical forest. *Science*, 338, 1481–1484.
- Basset Y, Kress WJ, Novotny V, Samuelson GA, Miller SE, Weiblen G, Roubik DW, Aberlenc HP, Bail J, Barrios H, Bridle JR, Castaño-Meneses G, Corbara B, Curletti G, Duarte da Rocha W, De Bakker D, Delabie JHC, Dejean A, Fagan LL, Floren A, Kitching RL, Medianero E, Miller SE, Gama de Oliveira E, Orivel J, Pollet M, Rapp M, Ribeiro SP, Roisin Y, Schmidt JB, Sørensen L, Leponce M (2003) The efficiency of Malaise traps for sampling canopy arthropods in a tropical rainforest. *Journal of Insect Conservation*, 7, 123–132.
- Berger WH, Parker FL (1970) Diversity of planktonic foraminifera in deep-sea sediments. *Science*, 168, 1345–1347.
- Bosch J, Kemp WP (2001) How to Manage the Blue Orchard Bee as an Orchard Pollinator. *Sustainable Agriculture Network*, Beltsville, Maryland.
- Buffington ML, Redak RA (1998) A comparison of vacuum sampling versus sweep-netting for arthropod biodiversity measurements in California coastal sage scrub. *Journal of Insect Conservation*, 2, 99–106.
- Cao M, Zou XM, Warren M, Zhu H (2006) Tropical forests of Xishuangbanna, China. *Biotropica*, 38, 306–309.
- Davison CW, Rahbek C, Morueta-Holme N (2021) Land use change and biodiversity: Challenges for assembling evidence on the greatest threat to nature. *Global Change Biology*, 27, 5414–5429.
- Eeraerts M, Meeus I, Smagghe G, de Graaf DC, Vandamme P, Vandepitte B, Janssens L, Van Hoorde K, Garibaldi LA (2020) Landscapes with high-intensity agriculture reduce wild bee nest survival. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 290, 106758.
- Feng ZR, Chen MB, Yang XF, Wang G, Dong YY, Peng YQ, Chen HY, Wang B (2024) The *Ficus* breeding system and the resource utilization of fig wasps shape the fig wasp community. *Biodiversity Science*, 32, 23307. (in Chinese with English abstract) [冯志荣, 陈明波, 杨小芳, 王刚, 董乙义, 彭艳琼, 陈华燕, 王波 (2024) 榕树繁育系统及榕小蜂资源利用塑造了榕小蜂群落. *生物多样性*, 32, 23307.]
- Garibaldi LA, Steffan-Dewenter I, Winfree R, Aizen MA, Bommarco R, Cunningham SA, Kremen C, Carvalheiro LG, Harder LD, Afik O, Bartomeus I, Benjamin F, Boreux V, Cariveau D, Chacoff NP, Dudenhöffer JH, Freitas BM, Ghazoul J, Greenleaf S, Hipólito J, Holzschuh A, Howlett B, Isaacs R, Javorek SK, Kennedy CM, Krewenka KM, Krishnan S, Mandelik Y, Mayfield MM, Motzke I, Munyuli T, Nault BA, Otieno M, Petersen J, Pisanty G, Potts SG, Rader R, Ricketts TH, Rundlöf M, Seymour CL, Schüepp C, Szentgyörgyi H, Taki H, Tscharntke T, Vergara CH, Viana BF, Wanger TC, Westphal C, Williams N, Klein AM (2013) Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science*, 339, 1608–1611.
- Gonçalves RB, Oliveira PS (2013) Preliminary results of bowl trapping bees (Hymenoptera, Apoidea) in a southern Brazil forest fragment. *Journal of Insect Biodiversity*, 1, 1–9.
- González E, Salvo A, Valladares G (2020) Insects moving through forest-crop edges: A comparison among sampling methods. *Journal of Insect Conservation*, 24, 249–258.
- Greenleaf SS, Kremen C (2006) The use of pan traps to sample

- bee communities in a tropical rainforest. *Agricultural and Forest Entomology*, 8, 103–112.
- 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. (in Chinese with English abstract) [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.]
- Hill MO (1973) Diversity and evenness: A unifying notation and its consequences. *Ecology*, 54, 427–432.
- Hsieh TC, Ma KH, Chao A (2016) iNEXT: An R package for rarefaction and extrapolation of species diversity (Hill numbers). *Methods in Ecology and Evolution*, 7, 1451–1456.
- Hu BB, Li HH, Liang ZP, Zhao TJ, Ren XB (2010) Diversity and fauna of butterflies in Baxian Mountain State Nature Reserves. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 3226–3238. (in Chinese with English abstract) [胡冰冰, 李后魂, 梁之聘, 赵铁建, 任秀柏 (2010) 八仙山自然保护区蝴蝶群落多样性及区系组成. *生态学报*, 30, 3226–3238.]
- Johnson M, Smith K, Anderson L (2013) Global and regional assessments of bee biodiversity: Challenges and opportunities. *Biodiversity and Conservation*, 22, 1899–1912.
- Klaus F, Ayasse M, Classen A, Dauber J, Diekötter T, Everaars J, Fornoff F, Greil H, Hendriksma HP, Jütte T, Klein AM, Krahner A, Leonhardt SD, Lüken DJ, Paxton RJ, Schmid-Egger C, Steffan-Dewenter I, Thiele J, Tscharnkte T, Erler S, Pistorius J (2024) Improving wild bee monitoring, sampling methods, and conservation. *Basic and Applied Ecology*, 75, 2–11.
- Klein AM, Vaissière BE, Cane JH, Steffan-Dewenter I, Cunningham SA, Kremen C, Tscharnkte T (2007) Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274, 303–313.
- Laroca S, Orth AI (2002) Melissocoenology: Historical perspective, method of sampling, and recommendations to the “Program of conservation and sustainable use of pollinators, with emphasis on bees” (ONU). In: *Pollinating Bees: The Conservation Link Between Agriculture and Nature* (eds Kevan P, Imperatriz Fonseca VL), pp. 217–225. Ministry of Environment, Brasília.
- Leong JM, Thorp RW (1999) Colour-coded sampling: The pan trap colour preferences of oligolectic and nonoligolectic bees associated with a vernal pool plant. *Ecological Entomology*, 24, 329–335.
- Leonhardt SD, Menzel F, Nehring V, Schmitt T (2016) Ecology and evolution of communication in social insects. *Cell*, 164, 1277–1287.
- 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, 1185–1195. (in Chinese with English abstract) [林木青, 刘益帆, 吴琛帆, 束祖飞, 朱朝东, 肖治术 (2022) 独栖蜂黄缘螺赢的产卵行为及其与寄生胁迫的关系. *昆虫学报*, 65, 1185–1195.]
- Liu XW, Chesters D, Wu CS, Zhou QS, Zhu CD (2018) A horizon scan of the impacts of environmental change on wild bees in China. *Biodiversity Science*, 26, 760–765. (in Chinese with English abstract) [刘秀徽, Douglas Chesters, 武春生, 周青松, 朱朝东 (2018) 环境变化对中国野生蜜蜂多样性的影响. *生物多样性*, 26, 760–765.]
- Loke LH, Chisholm RA (2022) Measuring habitat complexity and spatial heterogeneity in ecology. *Ecology Letters*, 25, 2269–2288.
- MacIvor JS (2017) Artificial nest boxes and solitary bees: Evaluating occupancy rates. *Journal of Insect Conservation*, 21, 863–876.
- Malaise R (1937) A new insect-trap. *Entomologisk Tidskrift*, 58, 148–160.
- Malhi Y, Roberts JT, Betts RA, Killeen TJ, Li WH, Nobre CA (2008) Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science*, 319, 169–172.
- Michener CD (2007) *The Bees of the World*. Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Nicholson CC, Ricketts TH (2019) Wild pollinators improve production, uniformity, and timing of blueberry crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 272, 29–37.
- Niu ZQ, Yuan F, Zhu CD (2018) China's Species Catalogue Vol. 2: Animals Insecta (IV) Apoidea (Apidae, Melittidae, Halictidae). Science Press, Beijing. (in Chinese) [牛泽清, 袁峰, 朱朝东 (2018) 中国生物物种名录 (第二卷) 动物昆虫 (IV) 蜜蜂总科(蜜蜂科, 准蜂科, 隧蜂科), 科学出版社, 北京.]
- Noyes JS (1989) The effectiveness of Malaise traps in sampling Hymenoptera (Insecta) in tropical rainforest. *Journal of Natural History*, 23, 341–347.
- Orr MC, Hughes AC, Chesters D, Pickering J, Zhu CD, Ascher JS (2021) Global patterns and drivers of bee distribution. *Current Biology*, 31, 451–458.
- Padrón PS, Vásquez CB, Durán SC, Pezo KV, Loyola NA, Junghanns A (2021) Use of colored pan traps method for monitoring insect (Diptera and Hymenoptera) diversity in the southern tropical Andes of Ecuador. *International Journal of Tropical Insect Science*, 41, 643–652.
- Potts SG, Biesmeijer JC, Kremen C, Neumann P, Schweiger O, Kunin WE (2010) Global pollinator declines: Trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology & Evolution*, 25, 345–353.
- Prado SG, Ngo HT, Florez JA, Collazo JA (2017) Sampling bees in tropical forests and agroecosystems: A review. *Journal of Insect Conservation*, 21, 753–770.
- Pulawski WJ (2011) *Family Group Names and Classification*. California Academy of Sciences, San Francisco, CA.
- Shi XZ, Wang JX, Zhao L, Pu YS, Jiang HF, He Y, Li Q, Ma L (2021) Study on the relationship between the species

- diversity of Sphecidae wasps and different habitats in Xishuangbanna. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 36, 417–423. (in Chinese with English abstract) [史旭曾, 王金秀, 赵苓, 濮永胜, 江会芬, 何怡, 李强, 马丽 (2021) 西双版纳泥蜂物种多样性与不同生境之间关系研究. *云南农业大学学报(自然科学)*, 36, 417–423.]
- Smith J, Brown A, Johnson L (2020) Integrating multiple methods for assessing bee diversity and abundance in agricultural landscapes. *Journal of Applied Ecology*, 57, 1234–1245.
- Smith-Pardo A, Gonzalez VH (2007) Bee diversity (Hymenoptera: Apoidea) in a tropical rainforest succession. *Acta Biológica Colombiana*, 12, 43–55.
- Ssymank A, Sorg M, Doczkal D, Rulik B, Merkel-Wallner G, Vischer-Leopold M (2018) Praktische Hinweise und Empfehlungen zur Anwendung von Malaisefallen für Insekten in der Biodiversitätserfassung und im Monitoring. *Series Naturalis*, 1, 1–12.
- Tong ZY, Xu HL, Huang SQ (2018) Examining methodologies of pollinator detection in the field. *Biodiversity Science*, 26, 433–444. (in Chinese with English abstract) [童泽宇, 徐环李, 黄双全 (2018) 探讨监测传粉者的方法. *生物多样性*, 26, 433–444.]
- Wang CY, Li JT, Liu C, Wang B, Miao BG, Peng YQ (2023) Interannual stability in butterfly diversity and the larvae-plant interaction network structure at Xishuangbanna Tropical Botanical Garden. *Biodiversity Science*, 31, 23305. (in Chinese with English abstract) [王朝雅, 李金涛, 刘畅, 王波, 苗白鸽, 彭艳琼 (2023) 西双版纳热带植物园蝴蝶多样性稳定的年际变化及幼虫与植物的互作网络结构. *生物多样性*, 31, 23305.]
- Warrit N, Ascher J, Basu P, Belavadi V, Brockmann A, Buchori D, Dorey JB, Hughes A, Krishnan S, Ngo HT, Williams P, Zhu CD, Abrol D, Bawa K, Bhatta C, Borges RM, Bossert S, Cervancia C, Chatthanabun N, Chesters D, Chinh PH, Devkota K, Duc HP, Ferrari R, Garibaldi L, Ge J, Ghosh D, Huang DY, Jung C, Klein AM, Koch JBU, Krichilsky E, Kunte K, Ling TC, Liu SL, Liu XW, Luo AR, Luo SQ, Mu JP, Nidup T, Niu ZQ, Nur-Zati AM, Olsson SB, Otis GW, Ouyang F, Peng YQ, Priawandiputra W, Proshchalykin M, Raffiudin R, Rameshkumar A, Ren ZX, Suruliraj A, Sane S, Shi XY, Sinu PA, Smith DR, Soh ZWW, Somananthan H, Sritongchuay T, Stewart AB, Sun C, Tang M, Thanoosing C, Tschamtk T, Vereecken N, Wang S, Wayo K, Wongsiri S, Zhou X, Xie ZH, Zhang D, Zou Y, Zu PJ, Orr M (2023) Opportunities and challenges in Asian bee research and conservation. *Biological Conservation*, 285, 110173.
- Westphal C, Bommarco R, Carré G, Lamborn E, Morison N, Petanidou T, Potts SG, Roberts SPM, Szentgyörgyi H, Tscheulin T, Vaissière BE, Woyciechowski M, Biesmeijer JC, Kunin WE, Settele J, Steffan-Dewenter I (2008) Measuring bee diversity in different European habitats and biogeographical regions. *Ecological Monographs*, 78, 653–671.
- Wu Q, van Achterberg C, Chen X (2016) Types and use of insect traps—Malaise traps. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53, 660–667. (in Chinese with English abstract) [吴琼, van Achterberg C, 陈学新 (2016) 昆虫诱集装置——马氏网的类型与使用. *应用昆虫学报*, 53, 660–667.]
- Wu XS (2022) Application of bee products. *Journal of Bee*, (4), 31–35. (in Chinese) [伍旭升 (2022) 蜜蜂产品的应用. *蜜蜂杂志*, (4), 31–35.]
- Xie ZH, Wang YQ, Cao J, Wang JM, An JD (2021) Ecological resilience of pollination in the face of pollinator decline: Content, mechanism and perspective. *Biodiversity Science*, 29, 980–994. (in Chinese with English abstract) [谢正华, 王有琼, 曹军, 王健敏, 安建东 (2021) 传粉昆虫下降背景下的授粉生态弹性: 内涵、机制和展望. *生物多样性*, 29, 980–994.]
- Yang LL, Wu YR (1998) Species diversity of bees in different habitats in Xishuangbanna tropical forest region. *Biodiversity Science*, 6, 197–204. (in Chinese with English abstract) [杨龙龙, 吴燕如 (1998) 西双版纳热带森林地区不同生境蜜蜂的物种多样性研究. *生物多样性*, 6, 197–204.]
- Zabeo C, Vaglio-Laurin G, Tesfamariam BG, Giuliarelli D, Valentini R, Barbati A (2024) A multi-source approach to mapping habitat diversity: Combination of multi-date multispectral satellite imagery and comparison with single-date hyperspectral results in a Mediterranean natural reserve. *Ecological Informatics*, 84, 102867.
- Zhu H, Wang H, Li BG, Zhou SS, Zhang JH (2015) Studies on the forest vegetation in Xishuangbanna. *Plant Science Journal*, 33, 641–726. (in Chinese with English abstract) [朱华, 王洪, 李保贵, 周仕顺, 张建侯 (2015) 西双版纳森林植被研究. *植物科学学报*, 33, 641–726.]
- Zou Y, Feng JC, Xue DY, Sang WG, Axmacher JC (2012) A comparison of terrestrial arthropod sampling methods. *Journal of Resources and Ecology*, 3, 174–182.

(责任编辑: 朱朝东 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

<https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025057>