

欧阳芳,束祖飞,林木青,张应明,肖治术.基于人工巢管的自然保护地独栖蜂多样性监测方法研究与应用.国家公园,2023,1(3): - .
Ouyang F, Shu Z F, Lin M Q, Zhang Y M, Xiao Z S. Trap-nesting monitoring protocol of solitary bees and wasps and its application in protected areas .
National Park, 2023, 1(3): - .

基于人工巢管的自然保护地独栖蜂多样性监测方法研究与应用

欧阳芳¹, 束祖飞², 林木青³, 张应明², 肖治术^{1,4,*}

1 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

2 广东车八岭国家级自然保护区管理局, 韶关 512500

3 广东省科学院微生物研究所, 广州 510070

4 中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049

摘要:昆虫是地球上最丰富的动物类群, 无论是个体数量、生物量和物种数, 还是基因数均在生物多样性中占有十分重要的地位。然而目前较少针对国家公园等自然保护地的昆虫类群建立大尺度的监测技术并开展应用。独栖蜂 (solitary bees and wasps) 是重要的膜翅目昆虫, 包括蜜蜂总科 (bees) 和胡蜂总科 (wasps) 等。这类昆虫是生态系统健康评价的指示生物, 也是食物链和食物网中重要环节, 在植物传粉、种子传播、种群数量调节、有害生物的生态防控等方面发挥了重要生态功能。人工巢管技术 (Trap-nesting technology) 是指由植物空茎秆等材料制作的、人为放置的、用于独栖蜂采集和调查的工具。本研究基于文献调研及多年野外试验实践, 首次构建基于人工巢管的自然保护地独栖蜂多样性监测技术体系, 并应用于广东车八岭国家级自然保护区全域昆虫监测与评估。实践表明人工巢管技术结合形态学分类和 DNA 条形码等物种鉴定技术, 将可为国家公园为主体的自然保护地昆虫多样性监测提供技术方案。

关键词:人工巢管; 生物多样性; 自然保护地; 独栖蜂; 监测技术

Trap-nesting monitoring protocol of solitary bees and wasps and its application in protected areas

OUYANG Fang¹, SHU Zufe², LIN Muqing^{1,3}, ZHANG Yingming², XIAO Zhishu^{1,4,*}

1 State Key Laboratory of Integrated Pest Management, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Guangdong Chebaling National Nature Reserve Administration Bureau, Shaoguan, Guangdong 512500, China

3 Institute of Microbiology, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China

4 College of Life Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Insects are one of the most abundant species on earth and play very important roles in biodiversity in terms of individuals, biomass, species number, and genes. However, insect groups are currently under serious threat from factors such as habitat loss, global climate change and human activities. Although natural protected areas centering on national parks have played a prominent role in protecting many vertebrate species from anthropogenic threats, the importance of insect diversity and its ecological functions has rarely been widely considered in the development of conservation and management strategies in natural protected areas at large spatial scales in the past. At present, our natural protected land system has made remarkable development, but it is urgent to establish a standardized monitoring technology system for insect groups in China's natural protected areas system. Solitary bees and wasps, because of multiple ecological functions, become

基金项目: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-STZ-ZDTP-2022-001); 北京市自然科学基金资助项目 (5232018)

收稿日期:2023-11-06; **采用日期:**2023- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaozs@ioz.ac.cn

the typical species for priority monitoring, evaluation, protection and utilization in natural protected areas. This insect groups are as the indicator species for ecosystem health assessment and also play the important roles in the food chain and food web, and promotes nutrient circulation and energy flow. And they play the important ecosystem functions in plant pollination, seed dispersal, population regulation, pest control or as food for other animals. Trap-nesting technology is a human-placed tool made of materials such as empty plant stems for sample collection and survey of solitary bees and wasps. This technology system can attract solitary bees and wasps to build a nest, store food, lay eggs and breed offspring, and obtain a large number of biological samples and information of these insects and their food, parasitism and predator from the nest tubes. Based on the literature research and practical field experience of continuous years, this study proposed the trap-nesting monitoring protocol of solitary bees and wasps in protected areas for the first time. Further, this study used the trap-nesting technology to monitor and assess the diversity of solitary bees and wasps in Chebaling National Nature Reserve of Guangdong Province, China. The results show that the trap-nesting technology combined with morphological classification and DNA barcoding technology provides a scientific method for the investigation, monitoring and evaluation of the diversity of solitary bees and wasps, and is expected to provide a standardized technical specification for the monitoring of insect diversity and function in natural protected areas centering on national parks in China.

Key Words: trap-nesting; biodiversity; protected areas; solitary bees and wasps; monitoring technology

开展生物多样性监测和评估是自然保护地生物多样性保护管理与可持续发展的重要基础。目前,我国正在推进以国家公园为主体的自然保护地体系建设^[1],在我国自然生态系统和生物多样性保护中发挥重要作用^[2],从而为构建全世界最大的国家公园体系奠定基础,推进中国特色自然保护地体系健康发展^[3]。到2020年底,国家公园、自然保护区和自然公园等三类自然保护地总数量超过1万个,总面积占陆地面积的18%以上^[4]。我国自然保护地涉及面积大、数量多和分布范围广,急需建立一系列统一完整的标准化、规范化、信息化和智能化的生物多样性监测规范与评估技术体系。

昆虫是地球上最丰富的动物类群,占有动物物种的80%,无论是个体数量、生物量、物种数和基因数,它们在生物多样性和生态功能中占据非常重要的地位^[5]。但是昆虫在全球各国保护评估和环境管理活动中经常被忽视^[6]。最近来自北美和欧洲的研究表明昆虫多样性和丰度的急剧下降^[7],其原因包括农业集约化、气候变化、栖息地丧失和碎片化、环境污染、入侵物种和杀虫剂使用等^[8]。鉴于昆虫在各类生态系统中的重要性,监测与评估昆虫多样性时空动态特征及其驱动因素,以及制止和扭转这些下降趋势是全球生物多样性保护最重要的任务之一^[9]。尽管自然保护地在保护和恢复许多脊椎动物免受人为威胁方面发挥了突出作用,但以往保护地在制定各类保护管理策略时,通常很少广泛考虑监测与评估昆虫多样性及其生态功能的重要性^[10]。目前,我国自然保护地体系中急需针对不同昆虫类群建立标准化的监测技术体系。

自然保护地可为各类昆虫类群的生存和繁衍提供相对稳定的环境条件。昆虫类群物种繁多,而且不同昆虫类群在生态系统中可能具备不同的生态功能。由此,同时具备多种生态功能的昆虫类群将可成为自然保护地优先监测、评估、保护和利用的典型代表物种。蜂类正是具备多种生态功能的膜翅目昆虫类群,按照行为习性和生活史等特征可分为社会性蜂与独栖性蜂。独栖性蜂包括蜜蜂总科和胡蜂总科等的许多物种。独栖蜂与蜜蜂和熊蜂等社会性蜂不同,它营独栖生活,在自然中偏好在植物空茎、树洞、石缝、昆虫废弃的巢穴内营巢。雌性独栖蜂与雄虫成功交配后,独自为后代筑巢、觅食和产卵,全程无需雄虫或其它个体协助^[11]。独栖蜂是生态系统中食物链和食物网的重要环节,在植物传粉、种子传播、种群数量调节、有害生物的生态防控等方面发挥了重要生态功能,促进生态系统的物质循环和能量流动^[11-12],从而有利于维持和调节生态系统的结构和功能的关系。因此,独栖蜂作为人类和生态系统持续发展的重要生物资源,同时也被认为是生态系统健康评价的指示生物^[13]。

人工巢管技术(Trap-nesting technology)为独栖蜂多样性的调查与评估提供了科学方法^[13]。人工巢管技

术是指由植物空茎秆等材料制作的、人为放置的、用于独栖蜂采集和调查的工具。该技术可用来吸引独栖蜂生存栖息、筑巢、储备食物、产卵与繁育后代,从而在巢室内获得昆虫及其食物和寄生性天敌等物种样本和生物学信息^[13]。国外应用人工巢管技术研究独栖蜂的历史较早,并得到广泛应用^[14—15]。近年来,国内逐渐应用人工巢管技术开展了相关研究^[16—21]。可见,人工巢管技术为国内外独栖蜂物种多样性和生态功能的调查与评估提供了行之有效的科学方法。但是,目前还没有统一的基于人工巢管技术来监测自然保护地生物多样性的技术方案。

基于国内外文献调研以及多年野外试验实践,本研究首次构建基于人工巢管的自然保护地独栖蜂多样性监测技术体系。本文以广东省车八岭国家级自然保护区生物多样性监测为案例,重点介绍了以独栖蜂为指示生物的人工巢管监测技术的基本流程,拟为我国国家公园为主体的自然保护地体系中昆虫资源调查、监测、评估和保护管理提供技术方案。

1 研究区域与方法

1.1 研究地概况

研究区域位于广东车八岭国家级自然保护区(简称车八岭保护区,北纬 24°40′29″—24°46′21″,东经 114°09′04″—114°16′46″)。车八岭保护区位于广东省始兴县东南部,总面积 75.45 km²,地势西北高东南低,最高峰天平架海拔 1,256 m,最低处樟栋水海拔 330 m。该区年均温度 19.6℃,最高温 38.4℃,最低温 -5.5℃。年降水量 1150—2126 mm。森林覆盖率达 95%以上,植物区系为南亚热带向中亚热带过渡类型,是南岭山脉南缘保存完整、面积较大、分布集中、原生性较强的具有代表性的中亚热带常绿阔叶林^[22]。

2 研究方法

本研究基于国内外文献调研以及多年野外试验实践构建了基于人工巢管的自然保护地独栖蜂多样性监测技术。该监测技术体系包括 7 个环节:监测目标与对象内容、抽样方案与巢管布设、监测实施与样本鉴定、数据管理与样本保管、评估指标与分析方法、结果展示与成果分享和科学目标与保护管理(图 1)。具体监测技术流程如下:

2.1 监测目标与对象内容

监测目标:主要目标是应用人工巢管对自然保护地独栖蜂及其共生物种类群(包括独栖蜂的食物种类、寄生性或捕食性天敌以及相关共生物种)的群落组成和种群数量进行监测,调查与评估独栖蜂的物种多样性、空间分布格局,为生物多样性保护管理和资源利用提供基础数据和参考基线。

监测对象:监测目标物种为独栖蜂,包括包括蜜蜂总科(如切叶蜂和分舌蜂等)和胡蜂总科(如胡蜂和蜾蠃等),及其共生生物(如青蜂、蚁蜂、跳小蜂、姬小蜂、姬蜂、茧蜂和捕食螨等)。

监测内容:掌握自然保护地独栖蜂的物种种类、种群数量、物种多样性及其空间分布格局和时间动态变化。明确自然保护地独栖蜂的食物类型、寄生性或捕食性天敌等共生生物。

2.2 抽样方案与巢管布设

根据监测目标、对象和内容设定人工巢管诱集的抽样方法,同时确定巢管系统的布设方案。巢管布设方案的核心内容是根据监测目标确定抽样方法。抽样基本要求:为了掌握自然保护地的全域整体概况,抽样方案应考虑满足抽样的独立性、重复性、连续性、可比性、科学性等基本要求。

车八岭保护区及周边全境监测:共设置 100 个 1 km²公里网格(其中保护区内 80 个网格,保护区周边 20 个网格),每个公里网格布设 3 个巢管位点用以监测独栖蜂,同时确保网格中监测位点的间距不少于 100 m,累计共 300 个巢管位点(图 2)。每个位点布设 1 个巢箱,因此每个公里网格共布设 3 个巢箱,全境累计 300 个巢箱。调查时间从 2018 年开始,所有巢箱在调查年每 1—2 月回收被蜂类利用的巢管^[23]。

2.3 监测实施与样本鉴定

严格按照监测目标和具体内容,巢管诱集的抽样方法,巢管系统的布设方案,组织实施监测计划。实施监



图 1 基于人工巢管的自然保护区独栖蜂物种多样性监测与评估技术流程

Fig.1 Framework to monitor and assess species diversity of solitary bees and wasps by trap-nesting technology in protected areas

测计划主要包括：巢管准备与野外安置、巢管筑巢与样本回收、巢管解剖与样本调查(图 1)。

2.4 数据管理与样本保管

巢管解剖与取样后,将需要管理样本的调查数据、图形影像和实体标本。

(1)调查数据:记录的数据进行标准化和电子化管理,具体数据包括巢管监测的位点信息、地理信息、回收和解剖日期、巢管特征、虫室信息、食物类型、生活史、成虫类型、寄生物类型和未知死亡。

(2)影像信息:将所有调查样本拍摄图形影像信息,同时对剖开的巢管和样本进行拍摄照片或者视频。

(3)实体标本:标本进行形态分类学鉴定后,所有调查样本存入标本库保存。

(4)遗传分子 DNA 条形码:实体标本还可以用来做遗传分子 DNA 条形码的物种鉴定和物种系统进化分析等。图形影像的多备份存档和实体标本的保存,可用于科学研究、科普教育和成果展示等。

2.5 评估指标与分析方法

(1) 评估指标

独栖蜂及其共存生物的多样性评估指标包括种群水平、群落水平和种间互作三个生物组织层面(图 1, 表 1)。

种群水平层面:包括筑巢量、筑巢率,种群密度/相对多度;种群空间占有率,种群空间分布(网格或位点有无分布),种群数量空间分布;种群数量时间动态(月、季、年)。

群落水平层面:包括物种种类,物种多样性;物种分布格局。

种间互作层面:包括物种间网格同域分布与空间共存等。

表 1 基于人工巢管的自然保护地独栖蜂物种多样性监测评估指标与方法

评估 Assessment	组织尺度 Scale	监测指标 Monitoring index	评估指标 Assessment index	评估方法 Assessment method
抽样评估 Sampling effort	网格水平	物种数量	最少调查时间 最少网格数量	物种累计稀疏化曲线分析
物种评估 Species assessment	种群水平	种群数量	筑巢量、筑巢率, 种群密度; 种群空间占有率, 种群空间分布图; 种群数量空间分布; 种群数量时间动态;	种群密度; 空间分布率; 种群时空动态分析;
	群落水平	物种种类; 物种数量;	物种丰富度; 物种多样性; 物种分布图;	物种鉴定(形态分类学和 DNA 条形码); 物种多样性指数; 物种空间格局分析;
	种间互作	物种种类; 物种数量;	各物种空间分布图	物种间网格同域分布与空间共存分析

(2) 评估方法

为了明确自然保护地独栖蜂及其共存生物的种群数量、物种种类、群落组成和空间分布等,生物多样性监测与评估方法主要包括抽样评估和物种评估。

抽样评估:通过稀疏化物种累计曲线来评估抽样强度,确定在固定调查网格数量情况下的最少调查时间以及固定调查时间下的最小网格数量或者巢管数,并保证全保护区 90%以上的目标物种被记录到。

物种评估:通过巢管系统获得的调查信息和巢室样本,利用形态分类学与物种遗传分子 DNA 条形码鉴定自然保护地独栖蜂及其共存生物的物种种类,进一步从种群水平、群落水平和种间互作三个方面开展评估分析(表 1)。

2.6 结果展示与成果分享

根据监测目标实施监测计划,收集数据和样本,将数据信息提取和挖掘后,对有关数据(物种组成、物种分布、种群密度等)应用相对应的方法进行统计分析。然后把图像数据及其统计分析的结果整理成监测报告、科研论文(论著)、新闻报道、科普宣传材料等以便对外公布。

2.7 科学目标与保护管理

基于人工巢管的自然保护地生物多样性监测的主要目标是对独栖蜂及其关联物种类群的群落组成和种群动态进行监测,通过系统评估建立生物资源的本底清查和编目评估、生物多样性保护管理和资源利用基础数据和参考基线。监测与评估结果服务于自然保护地动态评估和保护管理。

3 研究结果

本研究利用人工巢管对广东车八岭国家级自然保护区全境进行监测,并以独栖蜂胡蜂总科的两个代表科

物种(螺 蕨 科 和 长 腹 胡 蜂 科) 为 案 例 对 上 述 人 工 巢 管 监 测 技 术 方 案 进 行 了 评 估 分 析。

3.1 抽样评估结果

采用全年公里网格系统抽样调查车八岭保护区胡蜂总科代表科物种数量,通过物种累计曲线分析,要达到期望 90% 以上的物种编目要求,全年调查所需的最小调查网格数 60 个以上(图 2)。

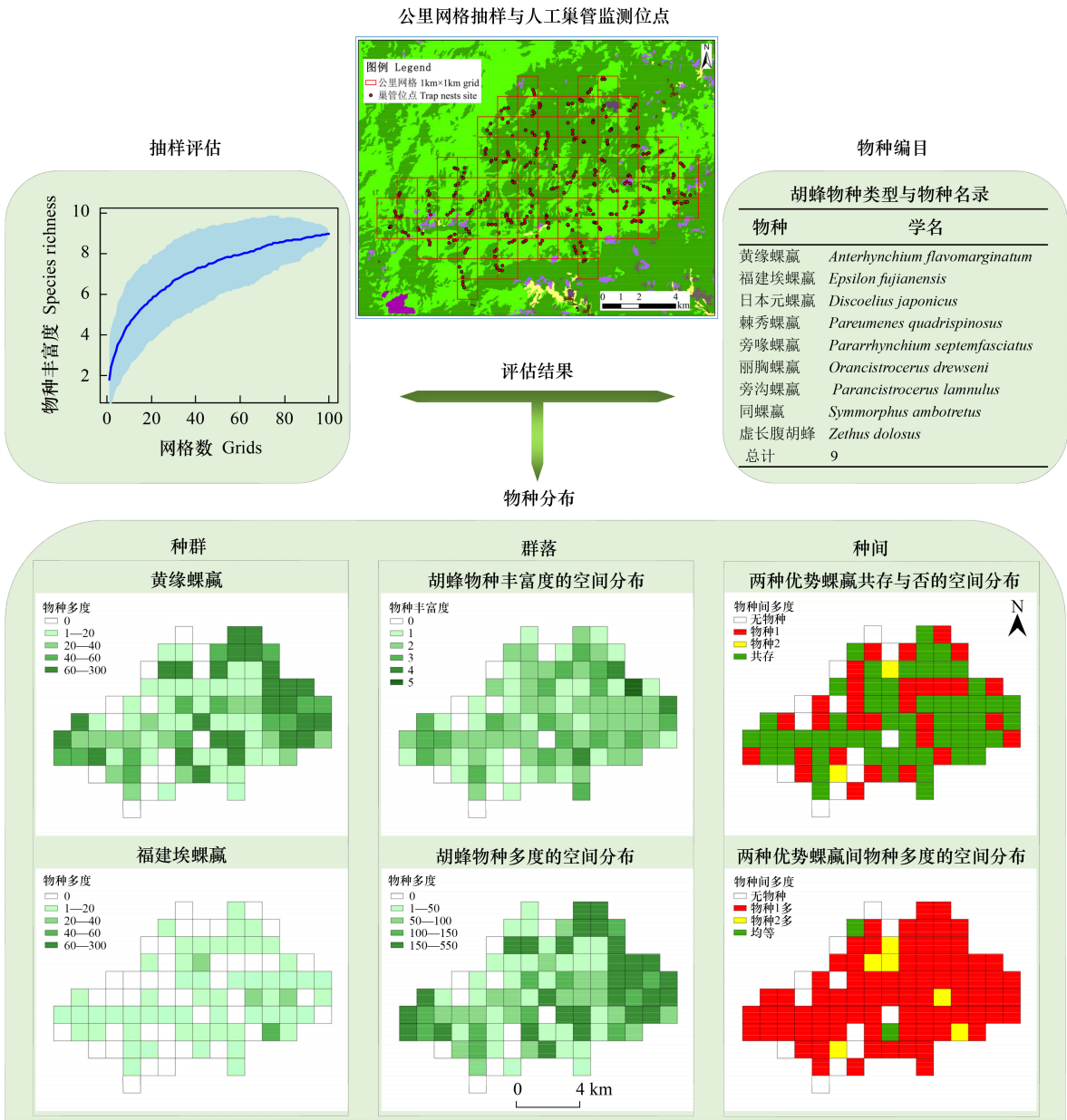


图 2 基于人工巢管技术监测广东车八岭国家级自然保护区胡蜂总科多样性(螺 蕨 科 和 长 腹 胡 蜂 科) 的 评 估 结 果

Fig.2 Assessment results of diversity for Vespoidea (Eumeninae and Zethidae) monitored in Guangdong Chebaling National Nature Reserve by trap-nesting technology

3.2 物种评估结果

3.2.1 物种编目评估

通过对车八岭保护区周边全境为期 3 年的调查,共监测并鉴定出胡蜂总科代表科独栖蜂 9 个物种,包括黄缘螺蕨、福建埃螺蕨、日本元螺蕨、棘秀螺蕨、旁喙螺蕨、丽胸螺蕨、旁沟螺蕨、同螺蕨和虚长腹胡蜂(表 2)。

表 2 基于人工巢管技术监测广东车八岭国家级自然保护区胡蜂总科多样性(蜾蠃科和长腹胡蜂科) 的物种名录和评估结果

Table 2 Species inventory and assessment results of diversity for Vespoidea (Eumeninae and Zethidae) monitored in Guangdong Chebaling National Nature Reserve by trap-nesting technology

科 Family	属名 Genus	物种名 Species	空间分布率 Spatial distribution rate	巢管数的比例 Percentage of nest number	种群数量的比例 Percentage of population size
蜾蠃科 Eumenidae	缘蜾蠃属 Anterhynchium	黄缘蜾蠃 <i>Anterhynchium flavomarginatum</i>	86%	89.82%	92.94%
	埃蜾蠃属 Epsilon	福建埃蜾蠃 <i>Epsilon fujianensis</i>	58%	8.33%	5.16%
	元蜾蠃属 Discoelius	日本元蜾蠃 <i>Discoelius japonicus</i>	10%	0.51%	0.56%
	秀蜾蠃属 Pareumenes	棘秀蜾蠃 <i>Pareumenes quadrispinosus</i>	12%	0.75%	0.64%
	旁喙蜾蠃属 Pararrhynchium	旁喙蜾蠃 <i>Pararrhynchium septemfasciatus</i>	3%	0.12%	0.07%
	胸蜾蠃属 Orancistrocerus	丽胸蜾蠃 <i>Orancistrocerus drewseni</i>	2%	0.07%	0.08%
	姬蜾蠃属 Parancistrocerus	旁沟蜾蠃 <i>Parancistrocerus lamnulus</i>	1%	0.05%	0.03%
	同蜾蠃 Symmorphus	同蜾蠃 <i>Symmorphus ambotretus</i>	1%	0.07%	0.12%
	长腹胡蜂科 Zethidae	虚长腹胡蜂属 Zethus	5%	0.29%	0.39%
		虚长腹胡蜂 <i>Zethus dolosus</i>			

3.2.2 物种丰富度和多度分布

基于人工巢管监测和网格空间分析,从群落组成来看,全境 100 个网格中总共监测到 9 个胡蜂总科的代
表科物种,分布在 89 个网格,单个网格中最高的物种丰富度为 5 种,还有 11 个网格没有物种分布;物种丰富
度为 1、2、3、4 和 5 的网格占有率分别为 27%、40%、18%、3%和 1%(图 2)。54%网格的物种多度为 1—50 头,
25%网格的物种多度为 51—100 头,11%网格的物种多度大于 100 头(图 2)。

从种群水平来看,发现空间分布率最高、巢管数的比例和种群数量的比例最多的物种是黄缘蜾蠃,分别为
86%、89.82%和 92.94%(表 1,图 2)。其次,福建埃蜾蠃分别为 58%、8.33%和 5.16%(表 1,图 2)。黄缘蜾蠃
和福建埃蜾蠃是车八岭保护区蜾蠃类优势物种。53%的网格中黄缘蜾蠃物种多度大于 20;而 54%的网格中
福建埃蜾蠃物种多度小于 20。

从种间关系来看,黄缘蜾蠃和福建埃蜾蠃在 56%的网格中共存(图 2),前者在 30%的网格单独分布,而后
者仅 2%的网格单独分布。物种多度来看,80%的网格中黄缘蜾蠃多于福建埃蜾蠃,仅 6%的网格中福建埃
蜾蠃多于黄缘蜾蠃(图 2)。

4 讨论

本文为以国家公园为主体的自然保护地独栖蜂生物多样性监测与评估提供了一套科学有效的监测技术
体系。通过对车八岭国家级自然保护区全境及其周边区域公里网格系统抽样与巢管位点监测所获得的为期
3 年的独栖蜂胡蜂总科物种编目结果进行综合评估分析,建立了该保护区基于人工巢管监测数据开展全境清
查独栖蜂评估的技术方案及参考基线。

4.1 独栖蜂作为自然保护地指示生物的代表性

本文主要针对自然保护地独栖蜂物种类群研究了基于人工巢管的监测技术。一方面,本研究选择独栖蜂
类群作为自然保护地的物种监测对象,基于以下原因:(1)物种数量大,独栖蜂及关联物种类群主要包括蜜蜂
总科和胡蜂总科等^[11, 24]。全球蜜蜂总科的蜂类物种目前记录的超过 2 万种,其中独栖蜂超过 1.5 万种,占
75%以上;中国蜜蜂总科的蜂类物种已知约 1432 种^[25]。全球胡蜂总科物种包括 12 个科,约有 1.5 万种,已知

5000 种以上。中国目前记载 200 多种^[26-27]。(2) 物种分布广, 全球范围内亚洲、非洲、欧洲、拉丁美洲、北美洲、澳洲以及中东地区均有分布^[28]。中国各区域也有广泛分布^[23, 29]。3) 独立的巢室承载着个体的整个生活史。独栖蜂从卵到成虫期大多数时间栖居在独立的巢室内, 成虫一般数周之内有较短时间出巢活动, 包括交配、筑巢、采集食物和产卵^[11]。因此有较长的时间收集巢室样本和记录完整的生活史数据信息。4) 多样化的食物链和复杂的食物网结构, 与周边栖息地环境以及与上下级营养层有关系密切关联。由此, 利用人工巢管系统监测技术可以从独栖蜂巢室中获得更多的物种种类、物种间互作关系。5) 生态功能多样, 包括为开花植物授粉功能、为害虫防治提供的生物防控, 为食物链和食物网促进营养循环和能量流动, 从而有利于维持和调控生态系统的结构和功能的关系。这些有利于发现适合当地大量繁育的授粉昆虫和天敌昆虫资源, 为自然保护地生物多样性的生态服务价值提供实现途径, 满足我国各类生态系统对昆虫授粉和有害生物生态防控的巨大需求^[16, 30]。

4.2 人工巢管监测技术的优势与挑战

另一方面, 本研究选择人工巢管系统监测独栖蜂多样性, 基于以下优点: (1) 巢管材料来源于自然中植物体芦苇管, 当地蜂类昆虫偏好植物体空茎筑巢产卵。(2) 巢管系统安装简便和价格低廉, 巢箱内部巢管材料易于从当地获得, 用完后方便处理, 不污染环境; 巢箱的支持系统如木质箱或 PCV 塑料管和铁丝等可重复利用。(3) 巢管回收后, 便于剖管调查取样和拍摄存档。人工巢管系统位点监测适合小空间尺度的自然公园, 也适合大空间尺度自然保护区乃至国家公园生物多样性调查与评估。人工巢管系统位点监测技术与公里网格化系统抽样方法的结合, 可以实现对 100—1000 km² 甚至更大面积的国家公园等自然保护地的生物多样性监测。比如 100—300 个公里网格系统抽样方案, 需要 300—1500 套巢管监测系统, 总体设备材料价格在可承担范围内。随着人工巢管监测技术的广泛应用, 大批量的筑巢巢管和巢室标本将会被收集。同时, 该技术的广泛应用面临一定的挑战。最核心的问题之一是需要投入一支满足独栖蜂多样性监测和评估需求的专业化队伍, 比如在大区域空间尺度进行昆虫监测与评估间隔时间取样; 活体样本取回室内后需要长时间饲养与定期观察; 独栖蜂及其食物和天敌等共生物大量样本的物种鉴定与相关生物学研究等。为应对此类挑战, 在未来人工巢管监测技术需要结合样本图像智能识别技术和分子生物学遗传 DNA 条形码物种鉴定技术, 快速精确地对大批次巢管样品进行分类鉴定、物种编目、种群数量动态和空间分布格局分析。

4.3 基于人工巢管的定量评估与自然保护地的保护管理

人工巢管的独栖蜂监测可以从种群水平、群落水平和种间互作多个生物组织层面获得样本信息, 进一步可以对整个自然保护地范围从巢管位点、网格水平和保护区大尺度区域等多个空间尺度开展定量监测与评估。利用人工巢管的独栖蜂监测的核心指标包括物种种类、物种数量以及各物种的种群个体数量; 评估指标包括种群相对密度、物种多度和物种丰富度。本研究结果表明利用人工巢管监测位点获得的胡蜂总科物种种类及其各物种种群数量, 通过网格空间分析从群落组成层面定量评价了 9 个胡蜂总科的代表科物种的网格占有率和网格空间分布图, 明确了车八岭保护区及周边区域代表物种的空间分布, 以及哪些网格区域内物种丰富度密集和物种多度高; 从种群水平层面评价了两种优势物种的多度或种群相对密度, 明确了代表物种在哪些网格区域种群密度高; 从种间互作关系层面分析了两种优势物种网格区域空间上共存分布, 明确了两种物种在哪个位点和网格有同域分布。由此可见, 应用人工巢管技术对同一个自然保护地进行全域网格化长期定点监测, 有利于评估代表物种的时间动态和空间分布变化趋势及其对环境因素的响应机制和生物多样性管理措施的生态效应。类似地, 人工巢管技术也可以用来评价不同自然保护地之间物种多样性特征以及管理措施的效应。

4.4 未来的应用前景与建议

自然保护地体系是最重要的生态安全屏障, 是全球和世界各国自然保护战略核心, 也是世界公认的最有效的自然保护手段, 对于保护生物多样性及国家生态安全至关重要^[4]。针对不同类群的生物群落, 建立相应的标准化生物多样性监测规范与技术流程是建设和完善自然保护地体系的重要基础。总之, 本研究利用人工

巢管系统监测技术可反映自然保护地独栖蜂生物多样性特征、种群分布、群落组成、种间分布关系以及相关栖息地环境条件。同时,本研究通过广东车八岭国家级自然保护区实践应用,表明独栖蜂多样性巢管监测规范和技术体系适合我国以国家公园为主体的自然保护地的生物多样性监测与评估。

致谢: 野外调查实践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大力支持和帮助。感谢中国科学院动物研究所朱朝东老师和袁峰老师,重庆师范大学的李廷景老师对胡蜂总科物种的分类鉴定及相关指导。感谢审稿专家们提供的宝贵建议。

参考文献 (References):

- [1] 徐卫华, 赵磊, 韩梅, 欧阳志云. 国家公园空间布局的物种保护状况评估. 国家公园, 2023, 1(1): 11-16.
- [2] 黄宝荣, 马永欢, 黄凯, 苏利阳, 张丛林, 程多威, 王毅. 推动以国家公园为主体的自然保护地体系改革的思考. 中国科学院院刊, 2018, 33(12): 1342-1351.
- [3] 唐小平, 欧阳志云, 蒋亚芳, 马炜, 徐卫华, 陈尚, 刘增力. 中国国家公园空间布局研究. 国家公园, 2023, 1(1): 1-10.
- [4] 徐卫华, 欧阳志云. 中国国家公园与自然保护地体系. 郑州: 河南科学技术出版社, 2022: 2-25.
- [5] Stork N E. How many species of insects and other terrestrial arthropods are there on earth? Annual Review of Entomology, 2018, 63: 31-45.
- [6] Taylor G S, Braby M F, Moir M L, Harvey M S, Sands D P A, New T R, Kitching R L, McQuillan P B, Hogendoorn K, Glatz R V, Andren M, Cook J M, Henry S C, Valenzuela I, Weinstein P. Strategic national approach for improving the conservation management of insects and allied invertebrates in Australia. Austral Entomology, 2018, 57(2): 124-149.
- [7] Van K R, Bowler D E, Gongalsky K B, Swengel A B, Gentile A, Chase J M. Meta-analysis reveals declines in terrestrial but increases in freshwater insect abundances. Science, 2020, 368(6489): 417-420.
- [8] Dicks L V, Breeze T D, Ngo H T, Senapathi D, An J D, Aizen M A, Basu P, Buchori D, Galetto L, Garibaldi L A, Gemmill-Herren B, Howlett B G, Imperatriz-Fonseca V L, Johnson S D, Kovács-Hostyánszki A, Kwon Y J, Lattorff H M G, Lungharwo T, Seymour C L, Vanbergen A J, Potts S G. A global-scale expert assessment of drivers and risks associated with pollinator decline. Nature Ecology & Evolution, 2021, 5(10): 1453-1461.
- [9] Wilson E O. The little things that Run the world (the importance and conservation of invertebrates). Conservation Biology, 1987, 1(4): 344-346.
- [10] Chowdhury S, Jennions M D, Zalucki M P, Maron M, Watson J E M, Fuller R A. Protected areas and the future of insect conservation. Trends in Ecology & Evolution, 2023, 38(1): 85-95.
- [11] Danforth B N, Minckley R L, Neff J L. The Solitary Bees; Biology, Evolution, Conservation. The Solitary Bees: Biology, Evolution, Conservation, 2019.
- [12] 欧阳芳, 赵紫华, 戈峰. 昆虫的生态服务功能. 应用昆虫学报, 2013, 50(2): 305-310.
- [13] Tschamtk T, Gathmann A, Steffan-Dewenter I. Bioindication using trap-nesting bees and wasps and their natural enemies: community structure and interactions. Journal of Applied Ecology, 1998, 35(5): 708-719.
- [14] Krombein K V. Trap-Nesting Wasps and Bees. Life Histories, Nests, and Associates. American Association for the Advancement of Science (AAAS). Washington, D.C.: Smithsonian press. 1967: 8-38.
- [15] Staab M, Pufal G, Tschamtk T, Klein A M. Trap nests for bees and wasps to analyse trophic interactions in changing environments—a systematic overview and user guide. Methods in Ecology and Evolution, 2018, 9(11): 2226-2239.
- [16] 欧阳芳, 王丽娜, 闫卓, 门兴元, 戈峰. 中国农业生态系统昆虫授粉功能与服务价值评估. 生态学报, 2019, 39(1): 131-145.
- [17] 王丽娜, 闫卓, 欧阳芳, 门兴元, 叶保华. 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, 2018, 55(6): 1001-1006.
- [18] 闫卓, 王丽娜, 门兴元, 肖云丽, 戈峰, 欧阳芳. 苹果园周围生境对凹唇壁蜂种群的维持作用. 应用昆虫学报, 2018, 55(06): 1007-1015.
- [19] Yan Z, Wang L, Reddy G V P, Gu S, Men X, Xiao Y, Su J, Ge F, Ouyang F. The Supercooling Responses of the Solitary Bee *Osmia excavata* (Hymenoptera: Megachilidae) under the Biological Stress of Its Brood Parasite, *Sapyga coma* (Hymenoptera: Sapygidae) Insects, 2022, 13(3): 235.
- [20] 门兴元, 李丽莉, 卢增斌, 欧阳芳, 刘丽, 徐衡, 于毅. 壁蜂生物学特性与传粉服务功能. 应用昆虫学报, 2018, 55(06): 973-983.
- [21] 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. 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, 2023, 31(2): 109-125.
- [22] 肖治术, 陈立军, 宋相金, 束祖飞, 肖荣高, 黄小群. 基于红外相机技术对广东车八岭国家级自然保护区大中型兽类与雉类的编目清查与评估. 生物多样性, 2019, 27(3): 237-242.
- [23] 林木青, 张应明, 欧阳芳, 束祖飞, 朱朝东, 肖治术. 广东车八岭国家级自然保护区独栖性胡蜂多样性空间分布特征及其对环境因子的响应. 生物多样性, 2023, 31(2): 126-136.
- [24] 吴燕如. 中国经济昆虫志. 第九册. 膜翅目蜜蜂总科. 北京: 科学出版社. 1965: 4-5.
- [25] 牛泽清, 袁峰, 朱朝东. 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). 北京: 科学出版社. 2018: 2-10.
- [26] 李铁生. 中国农区胡蜂. 北京: 中国农业出版社. 1982: 3-12.
- [27] 李铁生. 中国经济昆虫志. 第三十册, 膜翅目, 胡蜂总科. 北京: 科学出版社. 1985: 2-9.
- [28] Orr M C, Hughes A C, Chesters D, Pickering J, Zhu C D, Ascher J S. Global patterns and drivers of bee distribution. Current Biology, 2021, 31(3): 451-458.
- [29] 吴燕如. 中国动物志. 昆虫纲. 第四十四卷. 膜翅目切叶蜂科. 北京: 科学出版社. 1998: 3-15.
- [30] 欧阳芳, 吕飞, 门兴元, 赵紫华, 曾菊平, 肖云丽, 戈峰. 中国农业昆虫生态调节服务价值估算. 生态学报, 2015, 35(12): 4000-4006.