



王金秀, 史旭曾, 赵苓, 濮永胜, 李强, 马丽. 西双版纳布朗山不同演替阶段植被的蛛蜂物种多样性研究 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (3): 601–612.

西双版纳布朗山不同演替阶段植被的 蛛蜂物种多样性研究

王金秀, 史旭曾, 赵 苓, 濮永胜, 李 强*, 马 丽*

(云南农业大学植物保护学院, 昆明 650201)

摘要: 为揭示西双版纳布朗山植被恢复过程中处于不同演替阶段的蛛蜂物种多样性及其群落特征与植被恢复程度的关系, 并对蛛蜂作为生态环境指示物的作用进行初步探讨, 本研究在布朗山天籽生物多样性保护区内采用马氏网、黄盘等诱集法系统调查研究了草丛、稀树草丛、次生林、天然林 4 类逐步演替生境中的蛛蜂物种多样性及群落特征。共采集到蛛蜂个体 2 584 头, 隶属 3 亚科 7 族 30 属 121 种, 其中某类生境特有的蛛蜂有 53 种, 占总物种数的 43%。次生林蛛蜂 Shannon-Wiener 多样性指数最高 (3.03), 天然林次之 (2.97), 草丛最低 (2.43), Pielou 均匀度指数与多样性指数趋势一致, Berger-Parker 优势度指数则相反。采用 Jaccard 相似系数进行蛛蜂群落相似性比较, 植被演替阶段越相近, 蛛蜂群落组成越相似。研究结果表明, 蛛蜂物种多样性及其群落特征与植被群落及其演替程度密切相关, 随着恢复植被的演替, 蛛蜂群落结构趋于复杂, 物种多样性增加, 各蛛蜂物种的个体数分布越均匀, 优势种的优势程度越下降; IndVal 指示值分析结果表明: 布朗山植被恢复过程中, 新沟蛛蜂待定种 1 *Eopompilus* sp. 1 和新沟蛛蜂待定种 3 *Eopompilus* sp. 3 可分别作为草丛生境与稀树草丛生境的指示物种, 奥沟蛛蜂待定种 1 *Auplopus* sp. 1、舟山奥沟蛛蜂 *Auplopus chusanensis*、扁腹沟蛛蜂待定种 1 *Minagenia* sp. 1、红股扁腹沟蛛蜂 *Minagenia fulvifemoralis* 4 种蛛蜂可作为草丛、稀树草丛、次生林、天然林 4 类生境变化的监测种。

关键词: 植被演替; 蛛蜂; 物种多样性; 布朗山

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2021) 03-0601-12

Species diversity of Pompilidae in different stages of vegetation succession of Bulang Mountain, Xishuangbanna

WANG Jin-Xiu, SHI Xu-Zeng, ZHAO Lin, PU Yong-Sheng, LI Qiang*, MA Li* (College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: To reveal the relationship between the species diversity and community characteristics of Pompilidae and the degree of vegetation restoration in different succession stages, and to discuss the function of Pompilidae as an indicator of ecological environment, the Pompilidae communities in four recovery stage forest types (meadow, meadow with few trees, secondary forest and natural forest) were investigated systematically by using the Malaise trap and yellow plate methods in Tianzi biodiversity reserve, Bulang Mountain, Xishuangbanna. A total of 2 584 Pompilidae individuals belonging to 3 subfamilies, 7 tribes, 30 genera and 121 species were collected, among which 53 species were endemic to a certain habitat, accounting for 43% of the total species. The Shannon Wiener diversity index of

项目基金: 国家自然科学基金 (31760641、31960112)

作者简介: 王金秀, 女, 1994 年生, 云南昆明人, 硕士研究生, 主要从事农业生物多样性与害虫综合治理研究, E-mail: 528065290@qq.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 李强, 博士, 教授, 主要从事昆虫分类及害虫生态治理研究, E-mail: liqiangkm@126.com; 马丽, 副教授, 主要从事昆虫分类及害虫治理研究, E-mail: maliwasps@aliyun.com

收稿日期 Received: 2020-03-31; 接受日期 Accepted: 2020-05-11

Pompilidae in secondary forest was the highest (3.03), higher in the natural forest (2.97), and the lowest in the meadow habitats (2.43). The Pielou evenness index was consistent with the trend of the diversity index, while the Berger Parker dominance index was opposite. The Jaccard similarity coefficient was used to compare the similarity of Pompilidae community, whose degree increased with the more similarity of vegetation restoration stage. The results showed that: The species diversity and community characteristics of Pompilidae were closely related to vegetation community and its succession degree. With the succession of vegetation restoration, the community structure of Pompilidae tended to be more complex, the species diversity increased, and the more evenly distributed the individuals of species, the lower dominance of dominant groups. In addition, the results of Indval indicated that *Eopopilus* sp. 1 and *Eopopilus* sp. 3 can be used as indicator species of meadow and meadow with few trees habitats and *Auplopus* sp. 1, *Auplopus chusanensis*, *Minagenia* sp. 1, *Minagenia fulvifemoralis* can be used as the monitoring species of four types of habitat (meadow, meadow with few trees, secondary forest and natural forest) changes in the process of vegetation restoration in Bulang Mountain.

Key words: Vegetation succession; Pompilidae; species diversity; Bulang Mountain

森林作为陆地生态系统的重要组成部分,近年来其生态恢复与生物多样性保护问题引起国际社会的广泛关注。森林反复破坏后逐渐恢复的次生森林植被随着本身的生长、发育、演替或经营可形成不同的林型,生境多样性变化大,是研究物种多样性与生境变化规律的良好系统。物种多样性能促进生态环境的恢复与重建 (Hooper, 1997), 而昆虫物种多样性能促进生态环境的稳定性和功能发挥 (Summerville, 2004)。昆虫群落对森林破坏及后来的植被环境变化程度十分敏感 (Andersen *et al.*, 2004), 森林次生演替改变了昆虫群落结构和多样性 (Siemann *et al.*, 1999), 演替程度影响昆虫物种分布、更替等 (Werner and Raffa, 2000; Cobb, 2005; 李晓晶等, 2007), 且不同生境中的昆虫群落多样性可反映植物演替、环境变化与物种间的关系 (Holloway, 1993)。已有研究报道, 昆虫可作为研究森林恢复和演替程度的指示物种, 对评测森林生态系统具有重要价值 (Grimbacher and Catterall, 2007)。

蛛蜂隶属膜翅目 Hymenoptera 细腰亚目 Apocrita 针尾部 Aculeata 胡蜂总科 Vespoidea 蛛蜂科 Pompilidae, 目前世界已知 130 属 5 000 余种 (Aguiar *et al.*, 2013), 中国已知 41 属 102 种 (马方舟, 2011)。作为昆虫物种多样性的重要组成部分, 蛛蜂种类多, 种群数量大, 广泛分布于世界各地的多种生态环境中, 在热带地区的物种多样性最高 (Wasbauer, 1995; Pitts *et al.*, 2006)。蛛蜂在长期进化过程中形成了自己独特的狩猎行为和生态环境适应性, 生物学习性复杂。蛛蜂成虫

取食花蜜, 狩猎蜘蛛饲喂幼虫, 且部分蛛蜂只攻击固定科或属的蜘蛛, 少数只攻击一种蜘蛛, 食性较为专一 (Kurczewski and Kiernan, 2015)。有研究报道表明蛛蜂对周围环境的变化反应敏感, 是监测生境变化的良好生物指标物种, 具有重要的生态功能 (Tscharntke *et al.*, 1998)。目前国内对外对蛛蜂的研究偏重于物种分类、捕食和筑巢行为等方面的研究, 有关其物种多样性与生态环境关系的研究甚少。目前欧美、日本等对蛛蜂物种多样性及其生态环境适应性的研究多集中于巴西大西洋沿岸热带雨林、亚马逊热带雨林等。我国涉及蛛蜂物种多样性的研究多基于膜翅目、传粉昆虫等群体 (刘萍, 2008; 王美娜, 2018; 刘娅萌, 2019), 尚未见单独针对该类群物种多样性以及通过对其群落研究来反映森林生态系统健康状况方面的研究报道。

布朗山位于西双版纳州勐海县境内, 与缅甸接壤, 保存了较大面积的典型山地雨林植被。山地雨林生物多样性丰富, 种类组成特殊, 富含国家珍惜濒危保护动植物, 群落演替过程复杂多变, 在生物多样性保护及科学研究工作上具有重要意义 (张高磊, 2015)。布朗山居民常采用传统刀耕火种的耕作方式发展农牧业, 且上世纪八十年代初, 为发展木材产业及种植茶叶、橡胶等经济林, 森林遭到商业性采伐和烧荒等人为破坏, 损毁了布朗山部分森林, 影响了当地植被的再生和恢复能力, 造成物种减少, 生物多样性降低等现象。自 1998 年国家停止布朗山商业性采伐, 实施天然林保护工程, 以及 2002 年实施退耕还林工程等相关

措施后, 布朗山生态环境得到一定程度的恢复, 现森林覆盖率达 80% (包晴忠, 2003)。

目前国内对布朗山地区的生物多样性现状了解较少, 仅有少数植物群落及动物类群研究报道, 缺乏全面的物种本底调查, 且对昆虫物种多样性的了解极少, 对蛛蜂类群的研究也尚属空白。由于蛛蜂生物学习性变化多样, 不同属与物种间的筑巢和狩猎行为特征不同, 属间的差异较大, 因此本研究将全部蛛蜂科昆虫作为 1 个群落, 从属、种两分类阶元水平上分析布朗山植被不同演替阶段生境中的蛛蜂物种多样性和蛛蜂群落特征及其环境指示作用。可为蛛蜂与生态环境之间关系、森林环境和植被恢复程度评价等研究提供参考, 体现了重要理论和实践意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究调查区位于西双版纳布朗山 2008 年成立的第一个民间生物多样性保护区—天籽生物多样性保护区境内, 总面积近 340 ha, 靠近中缅边境, 属亚热带季风气候, 阳光充足, 雨量充沛, 年平均降雨量 1 374 mm, 年平均气温 18 ~ 21℃, 海拔 1 600 m 以上。该保护区曾为当地村民农牧轮歇用地, 常经历山火侵袭, 生物资源贫瘠。保护区成立时 84% 为荒山荒坡, 16% 为次生林, 仅在山火不易侵袭的沟谷里保留了部分近原始雨林。保护区成立后采取封山育林及大量种植本地原生植被等方式进行雨林恢复工作。经过 11 年的保护工作, 该保护区森林得以进一步恢复。区内整体为山地雨林环境, 以壳斗科 Fagaceae、山茶科 Theaceae、樟科 Lauraceae、大戟科 Euphorbiaceae、豆科 Leguminosae 等植被占优势 (朱华, 2015), 受人为活动干扰较少。

1.2 样地设置

在西双版纳天籽生物多样性保护区内, 根据森林演替阶段及植被组成设立草丛 (I)、稀树草丛 (II)、次生林 (III)、天然林 (IV) 4 类逐步演替的调查区, 每个调查区内根据实际生境再分别设立 2 块具代表性的调查样地, 共计 4 类生境, 8 块样地。生境 I、II、III 均经受过山火侵袭, 生境 IV 为靠近沟谷的近原始雨林, 受山火干扰较小。生境 III 演替程度接近生境 IV, 在自然恢复的基础

上人工种植了部分兰科植物、具少量中耕除草活动。

1.3 昆虫数据采集与标本鉴定

在 4 类生境 8 个调查小区内均同时采用马氏网诱捕、黄盘诱集法, 定期、定点进行系统调查。每个调查小区内均设立一个 Townes 型马氏网, 收集瓶内有 95% 酒精约 400 mL, 每次调查时更换收集瓶。根据环境, 在马氏网周围 3 ~ 10 m 内分别放置黄盘 10 个, 每次调查时放置, 24 h 后收取标本并装入标本瓶中保存。于 2018 年 4 月至 2019 年 4 月期间, 每月 (21 ~ 28 d/月) 调查 1 次, 共调查 12 次。调查采集的蛛蜂均带回实验室内进行标本制作, 采用形态分类方法进行鉴定、记录数据。

1.4 数据分析

1.4.1 蛛蜂物种多样性及群落特征分析

多样性分析采用 ① Shannon-Wiener 多样性指数: $H' = -\sum (N_i/N) \ln (N_i/N)$ 式中 N_i 为第 i 种的个数; N 为总个体数量; ② 优势度指数采用 Berger-Parker 优势度指数: $D = N_{max}/N$, 式中 N_{max} 为优势种群数量; ③ 丰富度指数采用 Margalef 丰富度指数: $R = (S - 1) / \ln (N)$, 式中 S 为物种数; ④ 均匀度指数采用 Shannon-Wiener 均匀度指数: $E = H' / \ln (s)$ 式中 H' 为多样性指数。并通过单因素方差分析法 (ANOVA) 和最小显著检验法 (LSD) 对不同样地内蛛蜂多样性进行差异性分析。

1.4.2 群落相似性指标

群落相似性分析采用 Jaccard 相似性系数: $q = c / (a + b - c)$, 式中 a 为 A 群落类群数, b 为 B 群落类群数, c 为两群落共有类群数。0.75 ~ 1.00 为极相似。0.50 ~ 0.75 为中等相似, 0.25 ~ 0.50 为中等不相似, 0.00 ~ 0.25 为极不相似。以各样地中蛛蜂的组成和数量分布为属性, 基于 Jaccard 群落相似性系数, 采用组间联法对调查样地进行聚类分析 (郑国, 2013)。分析软件为 SPSS 23.0。

1.4.3 指示值和指示物种分析

采用 IndVal 指示生物评价法, 计算各物种的 IndVal 值: $I_{ij} = A_{ij} \times B_{ij} \times 100$; $A_{ij} = N_{ij}/N_i$; $B_{ij} = N_i/N_j$ (李巧, 2011)。式中 A_{ij} 表示存在样点 j 的物种 i 的数量占全部物种 i 数量的百分比; B_{ij} 表示有物种 i 的样点数占全部样点的百分比。参观相关研究以 $I_{ij} > 70\%$ 作为该生境指示物种, 以 $50\% < I_{ij} < 70\%$ 的物种作为生境类型变化的监测种 (Haddad *et al.*, 2009)。

表 1 样地生境特征及植物群落组成

Table 1 Habitat characteristic and constitution of plant communities in sample plot

生境 Habitat type	平均海拔 (m) Altitude	生境特征 Habitat characteristic	主要植被组成 Main constitution of plant
I	1 646	草丛, 植被较为单一 Meadow, with relatively simple vegetation	禾本科 Gramineae、蔷薇科 Rosaceae 为主; 白茅 <i>Imperata cylindrical</i> 、马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i> 为优势种, 华南毛蕨 <i>Cyclosorus parasiticus</i> 、紫茎泽兰 <i>Ageratina adenophora</i> 、鬼针草 <i>Bidens pilosa</i> 等次之 Mostly Gramineae and Rosaceae; <i>Imperata cylindrical</i> and <i>Digitaria sanguinalis</i> were the dominant species, followed by <i>Cyclosorus parasiticus</i> , <i>Ageratina adenophora</i> and <i>Bidens pilosa</i>
II	1 634	草丛与林木交错混生, 草丛面积较大 Meadow and forest were interlaced and mixed, and the meadow area was larger	禾本科 Gramineae、壳斗科 Fagaceae 为主, 草本层以白茅 <i>Imperata cylindrical</i> 、华南毛蕨 <i>Cyclosorus parasiticus</i> 、紫茎泽兰 <i>Ageratina adenophora</i> 为优势种; 乔木层以野板栗 <i>Castanea mollissima</i> 、普洱茶 <i>Camellia sinensis</i> var. <i>assamica</i> 为优势种, 余甘子 <i>Phyllanthus emblica</i> 、野杨梅 <i>Myrica rubra</i> sp. 次之 Mostly Gramineae and Fagaceae; <i>Imperata cylindrical</i> , <i>Cyclosorus parasiticus</i> and <i>Ageratina adenophora</i> were dominant species in herb layer; <i>Castanea mollissima</i> and <i>Camellia sinensis</i> var. <i>assamica</i> were dominant species in tree layer, followed by <i>Phyllanthus emblica</i> and <i>Myrica rubra</i> sp.
III	1 676	森林, 具部分人为治理活动 Forest, with some man-made governance activities	壳斗科 Fagaceae、兰科 Orchidaceae、樟科 Lauraceae 为主, 以野板栗 <i>Castanea mollissima</i> 、大花万代兰 <i>Vanda coerulea</i> 、鼓槌石斛 <i>Dendrobium chrysotoxum</i> 栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i> 、麻栎 <i>Quercus acutissima</i> 、滇润楠 <i>Machilus yunnanensis</i> 为优势种; 草本层以禾本科马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i> 为优势种 Mostly Fagaceae, Orchidaceae and Lauraceae; <i>Castanea mollissima</i> , <i>Vanda coerulea</i> , <i>Dendrobium chrysotoxum</i> , <i>Quercus variabilis</i> , <i>Quercus acutissima</i> and <i>Machilus yunnanensis</i> were the dominant species; <i>Digitaria sanguinalis</i> was the dominant species in herb layer
IV	1 686	森林, 保存较完好的近原始雨林 Forest, well-preserved, similar to virgin rainforest	壳斗科 Fagaceae、樟科 Lauraceae 为主; 以野板栗 <i>Castanea mollissima</i> 、麻栎 <i>Quercus acutissima</i> 、栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i> 、截头石栎 <i>Lithocarpus truncatus</i> 为优势种, 余甘子 <i>Phyllanthus emblica</i> 次之, 常见巴豆藤 <i>Craspedolobium unijugum</i> 、云实 <i>Caesalpinia decapetala</i> 等藤本植物; 草本层植被少 Mostly Fagaceae and Lauraceae; <i>Castanea mollissima</i> , <i>Quercus acutissima</i> , <i>Quercus variabilis</i> and <i>Lithocarpus truncatus</i> were the dominant species, followed by <i>Phyllanthus emblica</i> , and common lianas such as <i>Craspedolobium unijugum</i> , <i>Caesalpinia decapetala</i> , etc.; little vegetation in herb layer

注: I, 草丛; II, 稀树草丛; III, 次生林; IV, 天然林。下表同。Note: I, Meadow; II, Meadow with few trees; III, Secondary forest; IV, Natural forest. The following tables were the same.

2 结果与分析

2.1 蛛蜂物种多样性及其与植被环境的关系

2.1.1 蛛蜂类群和物种组成

4 类生境中采集到蛛蜂科昆虫 2 584 头, 隶属 3 亚科 7 族 30 属 121 种, 各生境中的物种数及个体数按顺序依次为 I < (44 种 501 头) < II (63 种 675 头) < IV (64 种 680 头) < III (69 种 728 头) (表 2)。其中沟蛛蜂亚科较蛛蜂亚科和盗蛛蜂亚科的个体数、物种数和属的数量多, 为 15 属 99 种 2 369 头, 物种数占总物种数的 81.82%, 个体数占总个体数的 91.68%。有 18 种蛛蜂个体数超过 30 头, 占总个体数的 77.24%。

4 类生境中新沟蛛蜂属个体数最多, 占总个体数的 22.14%, 其次为扁腹沟蛛蜂属, 占 19.54%。锯胫沟蛛蜂属、闭沟蛛蜂属和奥沟蛛蜂属次之, 占比分别为 15.05%、11.92% 和 10.76%, 其他属个体数占比均小于 10%。奥沟蛛蜂属在各生境中物种均最丰富, 共有 21 种, 占物种总数的 17.36%。其次为短角沟蛛属和副沟蛛蜂属, 分别占物种总数的 9.09% 和 8.26%。其他属物种数均低于 10 种, 其中指沟蛛蜂属、剑毛沟蛛蜂属、童

蛛蜂属、双凸蛛蜂属、奇异蛛蜂属、隐唇沟蛛蜂属、副湾蛛蜂属、同背蛛蜂属、斑点蛛蜂属、蛛蜂属、和角蛛蜂属 10 属的蛛蜂均仅有 1 种。不同生境蛛蜂群落结构不同, 隶属同一属的蛛蜂在不同生境中的物种数及个体数不同, 其中双凸蛛蜂属、隐唇沟蛛蜂属、副湾蛛蜂属、斑点蛛蜂属、蛛蜂属 5 类蛛蜂仅出现于生境 II, 为该生境特有, 同背蛛蜂属、盗蛛蜂属为生境 I 特有, 童蛛蜂属为生境 III 特有。结果表明布朗山恢复植被不同演替阶段生境内蛛蜂群落组成明显不同。

2.1.2 蛛蜂优势物种与优势类群

对各个生境中的蛛蜂优势类群与总物种数、总个体数作 Pearson 相关性分析, 结果表明, 蛛蜂昆虫优势类群个体数与总个体数呈极显著正相关关系 ($r=0.976, P<0.01$) 而优势类群物种数与总物种数之间无显著相关关系 ($r=0.059, P=0.428$)。

植被不同演替阶段生境中的蛛蜂优势类群组成及优势类群数量均不同, 其中植被演替程度最高的生境 IV 具有 5 类优势类群, 生境 III 为 3 类次之, 生境 I 和 II 均为 2 类 (图 1)。表明不同演替阶段生境中的蛛蜂优势类群组成及相对多度不同, 整体上随着森林植被的恢复和演替, 优势类群更替趋势明显、优势类群增多、相对多度减少。

表2 植被不同演替阶段蛛蜂群落组成
Table 2 Pompilidae community in different stages of vegetation succession

亚科 Subfamily	属 Genus	I		II		III		IV		N(比例(%)) Proportion	S(比例(%)) Percent
		N	S	N	S	N	S	N	S		
沟蛛蜂亚科 Pepsinae	新沟蛛蜂属 <i>Eopompilus</i>	181	3	274	5	47	4	70	6	572(22.14)	6(4.96)
	扁腹沟蛛蜂属 <i>Minagenia</i>	14	4	56	5	230	5	205	5	505(19.54)	7(5.79)
	锯胫沟蛛蜂属 <i>Priocnemis</i>	175	4	67	4	54	3	93	2	389(15.05)	7(5.79)
	闭沟蛛蜂属 <i>Clistoderes</i>	32	3	92	3	100	4	84	5	308(11.92)	5(4.13)
	奥沟蛛蜂属 <i>Auplopus</i>	12	6	31	10	100	15	135	14	278(10.76)	21(17.36)
	短角沟蛛属 <i>Poecilagenia</i>	4	3	19	6	67	9	32	5	122(4.72)	11(9.09)
	副沟蛛蜂属 <i>Deuterationia</i>	22	6	32	5	14	5	12	6	80(3.10)	10(8.26)
	宽鳞沟蛛蜂属 <i>Platydialepis</i>	0	0	0	0	24	7	11	6	35(1.35)	9(7.44)
	指沟蛛蜂属 <i>Caliadurgus</i>	1	1	20	1	0	0	2	1	23(0.89)	1(0.83)
	刺沟蛛蜂属 <i>Phanagenia</i>	0	0	0	0	18	2	3	2	21(0.81)	3(2.48)
	剑毛沟蛛蜂属 <i>Machaerotherix</i>	5	1	7	1	0	0	3	1	15(0.58)	1(0.83)
	半沟蛛蜂属 <i>Hemipepsis</i>	0	0	4	3	3	2	4	4	11(0.43)	7(5.79)
	日本双角沟蛛蜂属 <i>Nipponodipogon</i>	1	1	3	2	0	0	0	0	4(0.15)	2(1.65)
	长沟蛛蜂属 <i>Longipompilus</i>	0	0	1	1	2	2	1	1	4(0.15)	2(1.65)
	隐唇沟蛛蜂属 <i>Cryptocheilus</i>	0	0	2	1	0	0	0	0	2(0.08)	1(0.83)

续表2 Continued table 2

亚科 Subfamily	属 Genus	I		II		III		IV		N(比例(%)) Proportion	S(比例(%)) Percent
		N	S	N	S	N	S	N	S		
蛛蜂亚科 Pompilinae	棒带蛛蜂属 <i>Batozonellus</i>	1	1	15	2	37	1	13	1	66(2.55)	2(1.65)
	安诺蛛蜂属 <i>Anoplius</i>	37	4	18	3	7	4	2	1	64(2.48)	6(4.96)
	<i>Euplaniceps</i>	6	1	8	1	13	1	6	1	33(1.28)	1(0.83)
	伊娃蛛蜂属 <i>Evagetes</i>	6	3	11	3	3	1	0	0	20(0.77)	5(4.13)
	双凸蛛蜂属 <i>Telostholus</i>	0	0	7	1	0	0	0	0	7(0.27)	1(0.83)
	叉爪蛛蜂属 <i>Episyrus</i>	0	0	3	2	1	1	0	0	4(0.15)	3(2.48)
	奇异蛛蜂属 <i>Atopopompilus</i>	0	0	0	0	2	1	2	1	4(0.15)	1(0.83)
	斑点蛛蜂属 <i>Arachnospila</i>	0	0	2	1	0	0	0	0	2(0.08)	1(0.83)
	角蛛蜂属 <i>Aporinellus</i>	1	1	1	1	0	0	0	0	2(0.08)	1(0.83)
	童蛛蜂属 <i>Agenioideus</i>	0	0	0	0	2	1	0	0	2(0.08)	1(0.83)
	同背蛛蜂属 <i>Homonotus</i>	1	1	0	0	0	0	0	0	1(0.04)	1(0.83)
	副湾蛛蜂属 <i>Paracyphononyx</i>	0	0	1	1	0	0	0	0	1(0.04)	1(0.83)
	蛛蜂属 <i>Pompilus</i>	0	0	1	1	0	0	0	0	1(0.04)	1(0.83)
盗蛛蜂亚科 Ceropalinae	弯爪盗蛛蜂属 <i>Irenangelus</i>	0	0	0	0	4	1	2	2	6(0.23)	2(1.65)
	盗蛛蜂属 <i>Ceropales</i>	2	1	0	0	0	0	0	0	2(0.08)	1(0.83)
总计 Total		501	44	675	63	728	69	680	64	2 584	121

注: *N*, 每个生境中出现的蛛蜂个体总数; *S*, 每个生境中出现的蛛蜂物种数。Note: *N*, total number of Pompilidae individuals in each habitat; *S*, number of species of Pompilidae in each habitat.

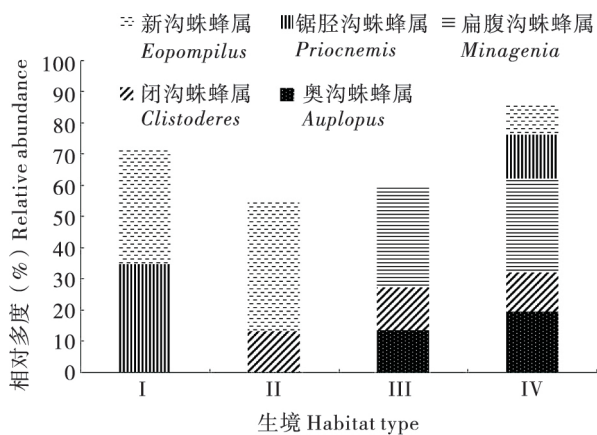


图1 布朗山植被不同演替阶段蛛蜂优势类群组成及相对多度
Fig. 1 Composition and relative abundance of dominant Pompilidae community in different stages of vegetation succession in Bulang Mountain

植被不同演替阶段蛛蜂特有种、稀有种、优势种、常见种分析结果表明, 调查的全部生境中均为稀有种最多, 占比达 1/2 以上, 优势种数相近, 为 2~3 种(表 3)。常见种和特有种均为生境

II 最多, 生境 III、IV 的稀有种数相同, 最少的均为 I。生境 III、IV 的优势种中均有扁腹沟蛛蜂 sp. 1。本研究中仅为其中某类生境特有的蛛蜂有 53 种, 占总体种数的 43%, 且各生境中特有种数不同。结合图 1 分析, 新沟蛛蜂属在草丛生境中占较大优势, 扁腹沟蛛蜂属在森林生境中占较大优势, 而植被群落结构差异较大的 I 与 III 无共同优势属和优势种。表明植被群落影响蛛蜂物种分布, 不同蛛蜂物种对各演替阶段生境的适应能力不同, 不同阶段有不同的适应种。

2.1.3 种—多度关系

蛛蜂虽仅捕捉蜘蛛, 但对种类、体型、发育阶段不同的蜘蛛具有不同的捕食性, 分别对 4 类生境中的蛛蜂群落进行种—多度分析。图 2 中的倍程是指以 $\log_2$ 为标尺对个体数划分的区间, 倍程 0, 1, 2 等分别对应个体数为 1, 2~5, 6~11 等的蛛蜂物种。布朗山不同演替阶段生境中蛛蜂昆虫种—多度曲线均趋向于对数级数分布模型, 形成个体数多的物种少、个体数少的物种多的格局,

物种分布格局符合生态位优先占领假说。结合表 3 分析, 布朗山蛛蜂群落中优势种数量少, 稀有种数量较多, 物种间竞争较弱。说明人为破坏及火

烧等干扰导致布朗山森林生境改变, 进而影响蛛蜂群落组成, 蛛蜂优势种得以发展, 个体数较多。

表 3 植被不同演替阶段蛛蜂群落的优势种和稀有种
Table 3 Dominant and rare species of Pompilidae in different stages of vegetation succession

生境 Habitat types	特有种数 Endemic species number	稀有种数 Rare species number	常见种数 Common species number	优势种数 Dominant species number	优势种名 Dominant species
I	9	32	10	2	锯脛沟蛛蜂待定种 1 <i>Priocnemis</i> sp. 1 新沟蛛蜂待定种 1 <i>Eopompilus</i> sp. 1
II	17	40	20	3	闭沟蛛蜂待定种 3 <i>Clistoderes</i> sp. 3 新沟蛛蜂待定种 2 <i>Eopompilus</i> sp. 2 新沟蛛蜂待定种 3 <i>Eopompilus</i> sp. 3
III	15	48	19	2	扁腹沟蛛蜂待定种 1 <i>Minagenia</i> sp. 1 台湾扁腹沟蛛蜂 <i>Minagenia taiwana</i>
IV	12	48	14	2	扁腹沟蛛蜂待定种 1 <i>Minagenia</i> sp. 1 锯脛沟蛛蜂待定种 1 <i>Priocnemis</i> sp. 1

注: 特有种, 仅出现于其中一类生境, 未在其他三类生境中出现的蛛蜂种类; 以各蛛蜂物种在各生境所占百分比划分, $\leq 1\%$ 为稀有种, $1\% \sim 10\%$ 为常见种, $> 10\%$ 为优势种。Note: Endemic species, species of Pompilidae that only appeared in one habitat but not in the other three kinds of habitats; according to the percentage of each species in each habitat, the species less than 1% means rare species, $1\% \sim 10\%$ common species, and $> 10\%$ dominant species.

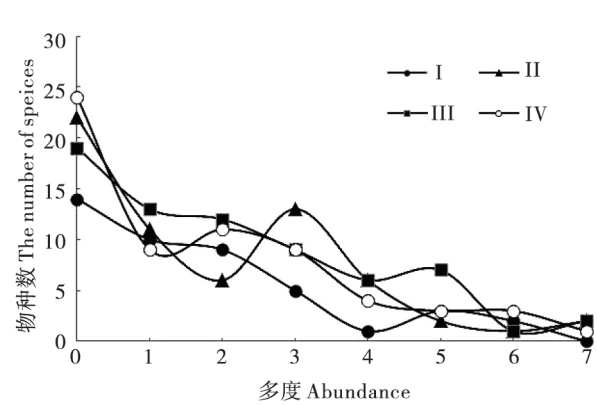


图 2 植被不同演替阶段蛛蜂种-多度关系图
Fig. 2 Curve of species-abundance in different stages of vegetation succession

2.2 蛛蜂群落特征及群落相似性

2.2.1 不同演替阶段生境中蛛蜂的物种多样性特征

将蛛蜂全部类群和种类作为 1 个独居捕猎群落, 分析其群落特征及群落相似性与植被演替的关系。对各演替阶段生境中蛛蜂物种多样性分析: 不同生境中蛛蜂的 Margalef 丰富度指数、Pielou 均

匀度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Berger-Parker 优势度指数均不同, 其中均匀度指数、丰富度指数与多样性指数一致, 均从高到低依次为 $III > II > IV > I$, 丰富度指数在生境 III、IV、I 此 3 类生境间差异显著 ($P < 0.05$) (表 4)。而优势度指数与多样性指数相反, 为生境 I 优势度最高 (0.53), 生境 IV 次之 (0.40), 生境 III 最低 (0.25), 且生境 I 显著高于生境 III ($P < 0.05$)。结合各蛛蜂群落结构分析, 随着恢复植被的演替, 蛛蜂物种数及个体数增加, 群落结构趋于复杂, 物种多样性增加, 均匀度指数增加, 优势度指数降低, 即各蛛蜂物种的个体数分布更加均匀, 优势类群地位逐渐不明显。

2.2.2 植被不同演替阶段蛛蜂群落相似性分析

蛛蜂群落相似性分析结果表明, III 和 IV 共有属、种最多, 分别为 16 属和 39 种, I 和 III 最少, 分别为 11 属和 23 种 (表 5)。Jaccard 相似系数结果表明, 在属、种不同水平上, III 与 IV 蛛蜂群落相似系数均为最高, 分别为 0.76 和 0.42, III 与 I 相似度最低。在物种水平上, 所有生境中蛛蜂群

落组成均为中等不相似，表明各演替阶段生境中的蛛蜂物种组成具差异。在属级水平上，相似性较物种水平高，其中Ⅲ与Ⅳ表现为极相似，与Ⅰ表现为中等不相似，表明各生境中的蛛蜂群落关系密切，演替阶段越相近，蛛蜂群落越相似。蛛

蜂群落在不同阶段生境中的物种组成具差异，但属组成相近，表明各演替阶段生境与受干扰较小的天然林生境接近，表明保护区内植被均得以良好保护，恢复效果明显。

表 4 布朗山植被不同演替阶段生境中的蛛蜂群落特征

Table 4 Community characteristics of Pompilidae communities in different stages of vegetation succession in Bulang Mountain

生境 Habitat types	丰富度指数 (R) Margalef	均匀度指数 (E) Pielou	r 多样性指 (H) Shannon-Wiene	优势度指数 (D) Berger-Parker
I	6.09 ± 0.06 a	0.70 ± 0.08 a	2.43 ± 0.25 a	0.53 ± 0.10 a
II	7.81 ± 0.20 bc	0.80 ± 0.06 a	2.97 ± 0.11 a	0.38 ± 0.09 ab
III	8.65 ± 0.40 c	0.81 ± 0.05 a	3.03 ± 0.26 a	0.25 ± 0.07 b
IV	7.55 ± 0.28 b	0.73 ± 0.01 a	2.78 ± 0.02 a	0.40 ± 0.01 ab

注：表中数据为样地平均值 ± 标准误，经 LSD 最小显著性差异法比较，具相同字母表示差异不显著。Note: Data were means ± SE. The same letters after data indicated no significance according to LSD's multiple range test.

表 5 植被不同演替阶段蛛蜂群落相似性系数

Table 5 Similarity coefficients of Pompilidae communities in different stages of vegetation succession in Bulang

对比生境 Compared habitat	共有属 Shared genus	共有物种 Shared species	Jaccard 相似系数 Jaccard similarity coefficient	
			属水平 Level at genus	种水平 Level at species
I & II	15	29	0.60	0.37
I & III	11	23	0.44	0.26
I & IV	12	24	0.52	0.29
II & III	14	34	0.50	0.35
II & IV	14	32	0.52	0.34
III & IV	16	39	0.76	0.42

采用组间联法，以 Jaccard 系数测度不同单元间的相似性，对分属 4 类生境的 8 块样地进行聚类得如下树系图。不同演替阶段样地聚类图中反映的样地间的相似性与蛛蜂群落相似性系数一致 (图 3)。当欧氏距离为 16.1 附近时，可将布朗山恢复区的 8 块样地分为草丛与森林两大类，当欧氏距离为 12.5 附近时，可分为草本植物群落、草本木本混交植物群落、木本植物群落 3 类环境，其中生境Ⅲ与生境Ⅳ样地聚为一类，但生境Ⅲ的两块样地在欧氏距离为 0.25 时率先聚为一类，表明生境Ⅲ与Ⅳ环境条件相似，即次生林生境恢复程度接近天然林生境，恢复效果明显。样地聚类结果与实际调查中以森林演替阶段、植被组成为依据进行样地设置时的分类结果相近，表明植被演替阶段、植被组成与蛛蜂群落物种组成密切相

关。结合植被各演替阶段生境中的蛛蜂群落物种组成和演替趋势分析，蛛蜂属、种组成的变化随着植物群落的演替而变化。

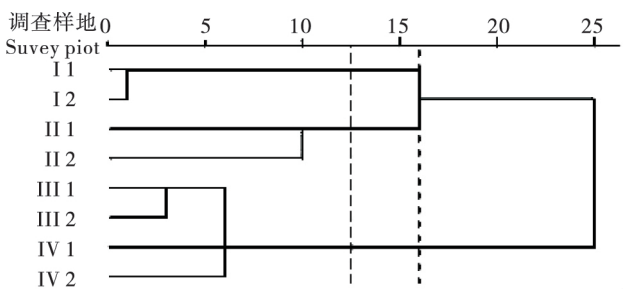


图 3 布朗山植被不同演替阶段样地聚类图

Fig. 3 Clustering graph of different stages of vegetation succession restoration in Bulang Mountain

3.3 指示物种及指示值分析

指示生物评价法 (IndVal) 通过比较不同生境间物种频率高低来评价森林健康状况, 是生物指示方法研究中高效且最具影响力的方法。指示值较高的指示物种能够反映生态环境的变化, 能对森林健康的监测做出有效指示 (郭瑞, 2012)。对 4 类生境中的蛛蜂物种 IndVal 指示值进行计算, 选

取各生境中 $I_{ij} > 50\%$ 的物种 (表 6)。新沟蛛蜂待种 1 *Eopompilus* sp. 1 和新沟蛛蜂待种 3 *Eopompilus* sp. 3 在生境 I 和 II 中的 IndVal 指示值分别为 85.33% 和 73.33%, 均大于 70%, 可分别作为这两类生境的有效指示物。其它 4 种蛛蜂在四类生境中的 IndVal 指示值不同, 但均在 50% ~ 70% 之间, 可用于对 4 类生境的变化进行监测。

表 6 布朗山植被不同演替阶段蛛蜂群落指示值分析
Table 6 IndVal analysis of Pompilidae communities in different stages of vegetation succession in Bulang Mountain

亚科 Subfamily	指示物种 Indicator species	I	II	III	IV
沟蛛蜂亚科 Pepsinae	奥沟蛛蜂待种 1 <i>Auplopus</i> sp. 1	3.95	0.00	63.16	7.89
	红股扁腹沟蛛蜂 <i>Minagenia fulvifemoralis</i>	8.33	64.58	0.00	2.08
	新沟蛛蜂待种 1 <i>Eopompilus</i> sp. 1	85.33	6.67	1.33	6.67
	舟山奥沟蛛蜂 <i>Auplopus chusanensis</i>	5.80	2.90	33.33	57.97
	新沟蛛蜂待种 3 <i>Eopompilus</i> sp. 3	24.00	73.33	0.67	2.00
	扁腹沟蛛蜂待种 1 <i>Minagenia</i> sp. 1	1.01	2.35	35.23	61.41

3 结论与讨论

3.1 蛛蜂物种多样性与植被不同演替阶段生境的关系

蛛蜂物种多样性与植被恢复程度密切相关。已有许多学者的研究表明, 森林演替、植被恢复程度影响昆虫物种多样性 (张淑莲, 2005; 汤春梅, 2010; 侯沁文, 2014)。本研究中, 蛛蜂物种多样性随植被的恢复与演替而逐步发生改变。该地自 2008 年实施保护、恢复措施后, 其生境复杂性和异质性已随着恢复植被本身的演替过程发生了改变, 进而导致不同演替阶段生境中的蛛蜂群落物种组成和物种多样性发生改变。受植被演替程度的影响, 不同演替阶段生境中的蛛蜂属数、物种数及个体数均有明显差异, 具有不同优势属、种, 且优势属、种随植被演替过程的进行而表现出明显的更替趋势, 而演替阶段相近的次生林和天然林中, 蛛蜂群落组成及物种多样性差异较小。

植被群落影响蛛蜂物种多样性。已有研究表明, 生态环境影响植被群落类型形成 (刘玉成, 1993), 而植被群落影响蛛蜂物种分布

(Rodriguez, 2014)。有研究发现, 与杂草丛地和林地边界相比, 落叶林地中的蛛蜂种类、个体数量更多 (Kurczewski and Edwards, 2012; Kurczewski and Kiernan, 2015)。本研究中, 稀树草丛正处于草原带向森林带过渡的中间阶段, 与生境相近但植被较为单一的草丛相比, 蛛蜂物种组成趋于复杂化, 种类增加, 物种多样性提高, 与植被组成更加复杂的次生林和天然林比则相反, 可见蛛蜂物种多样性与植物群落关系密切。本研究中蛛蜂物种多样性最丰富的阶段不是处于顶级演替阶段的生境 IV, 而是在此阶段之前且与之相近的生境 III, 符合群落演替最终趋于稳定的普遍性规律, 但发生次生演替的地方均受到干扰的影响, 且生境 III 具部分人为干扰, 结果亦符合“适度干扰”假设, 即适度的干扰有利于动植物的生长, 能够增加物种多样性 (文陇英, 2006)。生境 III 种植了大量兰科植物, 可为蛛蜂成虫提供更多食物资源。除人工种植兰花外, 该生境具少量中耕除草活动, 已有研究报道认为砍伐植被形成的开阔地成为大量先锋物种的栖息地, 这些物种成为胡蜂类昆虫的重要食物来源, 有利于它们数量的增加 (Fye, 1972)。干扰改变了植物群落结构, 生境异质性提

高,可以提供更多的生态位,承载更多的物种,从而影响蜘蛛物种多样性。进一步表明该地人工植被和自然恢复植被种类搭配合理,恢复效果明显。

3.2 蜘蛛群落特征与植被不同演替阶段生境的关系

蜘蛛群落特征与植被群落及其演替程度密切相关。本研究在实际调查中以植被群落组成为依据,将生境分为两大类:第一类为以禾本科植物为主要植被类型的草丛环境,包含草丛生境 I 与生境 II,第二类为以壳斗科乔木为主要植被类型的森林环境,包含生境 III 与生境 IV。在分析时以蜘蛛群落相似性系数为属性进行聚类分析,当欧氏距离为 16.1 附近时,亦可将 8 块样地划分为草丛与森林两大类,当欧氏距离为 12.5 附近时生境 I 与生境 II 中样地均单独聚为一类,生境 III 和生境 IV 中样地共同聚为一类,但生境 III 的两块样地在欧氏距离为 0.25 时率先聚为一类,分类结果接近一致,因此蜘蛛群落与植被群落密切相关。

无论从蜘蛛还是植被的群落组成上看,4 类生境间皆不是孤立的生境,具有部分相同优势类群、优势种和常见种,表明彼此之间具有物种交流,但交流有限,部分物种减少或消失。而相同性质的生境之间物种的交流更为丰富,均具有共同主要优势种和优势类群,共有物种较多。本研究中,布朗山植被虽处于不同演替阶段,植被类型不同,但演替是一个连续的渐进过程,且各调查生境中的蜘蛛类群在属级水平上群落组成相近,表明该保护区各调查生境均接近受干扰较小的天然林生境,各生境间关系密切,恢复成效明显。且有研究表明锯脰沟蜘蛛属、奥沟蜘蛛属等体型相近蜘蛛类群的食性、栖息环境相似 (Kurczewski *et al.*, 2017)。本研究各调查生境中的优势蜘蛛类群大部分为体长在 11.0 mm 以内的小型或中等体型蜘蛛,其中奥沟蜘蛛属和锯脰沟蜘蛛属在 4 类生境中均有分布,且奥沟蜘蛛为演替程度较高的森林植被类型的优势类群,表明该保护区为中小体型蜘蛛提供了相对适宜的栖息环境。

3.3 蜘蛛指示值和指示种分析

植被恢复及演替过程导致生境发生改变,昆虫物种多样性及群落特征随之发生改变,而有研究表明指示物种对生境的选择能够反映不同恢复

阶段生境变化 (马艳滢, 2013)。蜘蛛作为分布广泛且受食物资源限制的寡食性昆虫,对环境变化非常敏感,生境改变时,蜘蛛类群可以转移到新的环境中或消失。本研究中,蜘蛛群落组成随着植被的恢复及演替明显发生改变,不同演替阶段有不同适应种类,表明蜘蛛对生境变化有明显的响应,因此以蜘蛛作为指示物监测森林恢复具备可行性。由于指示物种栖息地的特异性和相似性,本研究中新沟蜘蛛待种 1 *Eopompilus* sp. 1 和新沟蜘蛛待种 3 *Eopompilus* sp. 3 可分别对布朗山地区森林经历火烧后恢复过程中的草丛和稀树草丛生境做出有效指示,奥沟蜘蛛待种 1 *Auplopus* sp. 1、舟山奥沟蜘蛛 *Auplopus chusanensis*、扁腹沟蜘蛛待种 1 *Minagenia* sp. 1、红股扁腹沟蜘蛛 *Minagenia fulvifemoralis* 4 种蜘蛛可对草丛、稀树草丛、次生林、天然林 4 类生境进行监测。

虽然目前以昆虫作为指示性生物对森林生态系统恢复已有部分研究报道,但与蜘蛛相关的研究较少,缺乏系统性的数据资料。目前全世界对蜘蛛分类的研究相对较少,因此物种的准确鉴定成为研究该类群的难题,且中国蜘蛛类群未得到广泛研究,可能有许多未被描述的物种,因此本研究采集到的蜘蛛未能全部鉴定到种。因此,进一步了解蜘蛛群落与森林恢复间的本质关系,应深入加强相关方面的研究,以便为区域森林生态恢复建设与生物多样性保护提供相关参考。

参考文献 (References)

- Aguiar A, Deans A, Engel M, *et al.* Order Hymenoptera. Animal biodiversity: An outline of higherlevel classification and survey of taxonomic richness [J]. *Zootaxa*, 2013, 3703 (1): 51–62.
- Andersen AN, Fisher A, Hoffmann BD, *et al.* Use of terrestrial invertebrates for biodiversity monitoring in Australian rangelands, with particular reference to ants [J]. *Austral Ecology*, 2004, 29 (1): 87–92.
- Bao QZ, Li ZY. An investigation on implementation of the project of protecting natural forests and the project of converting cultivated land back to forests at Bulangshan township of Menghai county [J]. *Forest Inventory and Plan*, 2003, 28 (1): 1671–3168. [包晴忠, 李志勇. 勐海县布朗山“天保”工程与退耕还林的调查 [J]. 林业调查规划, 2003, 28 (1): 1671–3168]
- Cobb NS. Issues insampling techniques, design, and theory in studying forest insects [J]. *Ecology*, 2005, 86 (11): 3133–3134.
- Fye RE. The effect of forest disturbances on populations of wasps and bees in northwestern Ontario (Hymenoptera: Aculeata) [J]. *The*

- Canadian Entomologist*, 1972, 104 (10): 1623 – 1633.
- Grimbacher PS, Catterall CP, *et al.* Responses of ground – active beetle assemblages to different styles of reforestation on cleared rainforest land [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2007, 16 (7): 2167 – 2184.
- Guo R, Wang YP, Wu H. Relationship between arthropods in forest litter and forest health [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48 (3): 122 – 127. [郭瑞, 王义平, 吴鸿. 森林凋落物层的节肢动物与森林健康的关系 [J]. 林业科学, 2012, 48 (3): 122 – 127]
- Haddad CR, Honiball AS, *et al.* Spiders as potential indicators of elephant – induced habitat changes in endemic sand forest, Maputaland, South Africa [J]. *African Journal of Ecology*, 2009, 48: 446 – 460.
- Holloway JD. New Caledonia: A case study in biodiversity Lepidoptera in New Caledonia: Diversity and endemism in an elant – feeding insect group [J]. *Biodiversity Letters*, 1993, 1 (3 – 4): 92 – 101.
- Hooper DU, Vitousek PM. The effects of plant composition and diversity on ecosystem processes [J]. *Science*, 1997, 277 (5330): 1302 – 1305.
- Hou QW, Bai YY, Tie J, *et al.* Moth diversity in different forest successional stages in Lishan national nature reserve, Shanxi [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2014, 51 (5): 1310 – 1319. [侯沁文, 白海艳, 铁军, 等. 山西历山国家级自然保护区不同演化阶段林型蛾类多样性 [J]. 应用昆虫学报, 2014, 51 (5): 1310 – 1319]
- Kurczewski FE, Edwards GB. Hosts, nesting behavior, and ecology of some North American spider wasps (Hymenoptera: Pompilidae) [J]. *Southeastern Naturalist*, 2012, 11 (m4): 1 – 71.
- Kurczewski FE, Kiernan DH. Analysis of spider wasp host selection in the eastern Great Lakes region (Hymenoptera: Pompilidae) [J]. *Northeastern Naturalist*, 2015, 22 (m11): 1 – 88.
- Kurczewski FE, Edwards GB, Pitts JP. Hosts, nesting behavior, and ecology of some North American spider wasps (Hymenoptera: Pompilidae), II [J]. *Southeastern Naturalist*, 2017, 16 (m9): 1 – 82.
- Li Q. Indicator value (IndVal) method and its application [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2011, 48 (2): 457 – 462. [李巧. 指示值方法及其在昆虫中的应用 [J]. 应用昆虫学报, 2011, 48 (2): 457 – 462]
- Li XJ, Liu Y, Li CH, *et al.* Effect of forest succession on arthropod diversity in Jinyun Mountain, Chongqing [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37 (10): 35 – 39. [李晓晶, 刘玉安, 李春辉, 等. 缙云山森林演替对节肢动物多样性的影响. 东北林业大学学报, 2009, 37 (10): 35 – 39]
- Liu YM. Pollinating Insects Species Diversity of Different Landscape Background [D]. Kaifeng: Henan University, 2019. [刘娅萌. 不同景观背景下传粉昆虫多样性特征分析 [D]. 开封: 河南大学, 2019]
- Lu P. Diversity and Dynamic Distributions of Hymenoptera Communities in Yeyahu Lake Nature Reserve, Beijing [D]. Beijing: Capital Normal University, 2008. [刘萍. 北京野鸭湖湿地自然保护区膜翅目群落多样性及其动态分布的研究 [D]. 北京: 首都师范大学, 2008]
- Lu YC, Liao SL, Du DL. Studies on species diversity in the secondary succession of the evergreen broad – leaved forest in Jinyun Mountain, Sichuan Province [J]. *Plant Science Journal*, 1993, 11 (4): 327 – 337. [刘玉成, 缪世利, 杜道林. 四川缙云山常绿阔叶林次生演替及其物种多样性的研究 [J]. 植物科学学报, 1993, 11 (4): 327 – 337]
- Ma FZ, Li Q. Ten newly recorded species of Pompilidae (Hymenoptera: Pompilidae) from China [J]. *Entomotaxonomia*, 2011, 33 (1): 74 – 76. [马方舟, 李强. 中国蛛蜂科十新记录种 [J]. 昆虫分类学报, 2011, 33 (1): 74 – 76]
- Ma YY, Li Q, Feng P, *et al.* Diversity of ground – dwelling spider community in different restoring times of post – fire forest, Cangshan Mountain, Yunnan Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (3): 964 – 974. [马艳艳, 李巧, 冯萍, 等. 云南苍山火烧迹地不同恢复期地表蜘蛛群落多样性 [J]. 生态学报, 2013, 33 (3): 964 – 974.]
- Pitts JP, Wasbauer MS, Von Dohlen CD. Preliminary morphological analysis of relationships between the spider wasp subfamilies (Hymenoptera: Pompilidae): Revisiting an old problem [J]. *Zoologica Scripta*, 2006, 35 (1): 63 – 84.
- Rodriguez J. Molecular Systematics, Historical Biogeography, and Evolution of Spider Wasps (Hymenoptera: Pompilidae) [D]. Logan: Utah State University, 2014.
- Siemann E, Haarstad J, Tilman D. Dynamics of plant and arthropod diversity during old field succession [J]. *Ecography*, 1999, 22 (4): 406 – 414.
- Summerville KS, Ritter LM, Crist TO. Forest moth taxa as indicators of lepidopteran richness and habitat disturbance: A preliminary assessment [J]. *Biological Conservation*, 2004, 116 (1): 9 – 18.
- Tang CM, Yang GS, Cai JZ. The butterfly diversity of different habitat types in Xiaolongshan forest area, Gansu Province [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2010, 47 (3): 563 – 567. [汤春梅, 杨庆森, 蔡继增. 甘肃小陇山林区不同生境类型蝶类多样性研究 [J]. 昆虫知识, 2010, 47 (3): 563 – 567]
- Tschamtké T, Gathmann A, Dewenter IS. Bioindication using trap – nesting bees and wasps and their natural enemies: Community structure and interactions [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1998, 35 (5): 708 – 719.
- Wang MN, Lu XL, Cu Y, *et al.* Effects of woodland types with different levels of human disturbance on pollinators: A case study in Gongyi, Henan, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 (2): 464 – 474. [王美娜, 卢训令, 崔洋, 等. 不同人为干扰下林地类型对传粉昆虫的影响——以河南省巩义市为例 [J]. 生态学报, 2018, 38 (2): 464 – 474]
- Wasbauer MS. Pompilidae. In: Hanson and Gauld, eds. The Hymenoptera of Costa Rica [C]. Oxford: Oxford University Press, 1995, 522 – 539.

- Wen LY, Li ZF. The effects of disturbance on maintaining mechanism of species diversity [J]. *Journal of Northwest Normal University* (Natural Science), 2006, 4: 87–91. [文隄英, 李仲芳. 干扰对物种多样性维持机制的影响 [J]. 西北师范大学学报 (自然科学版), 2006, 4: 87–91]
- Werner SM, Raffa KF. Effects of forest management practices on the diversity of ground – occurring beetles in mixed northern hardwood forests of the Great Lakesregion [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 139 (1–3): 135–155.
- Zhang GL, Du F, Wang H, *et al.* Study on tree layer dynamic in Xishuangbanna montane rain forest based on 20 years monitoring [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (12): 4053–4062. [张高磊, 杜凡, 王欢, 等. 西双版纳山地雨林乔木层树种 20 年动态研究 [J]. 生态学报, 2015, 35 (12): 4053–4062]
- Zhang SL, Zhang F, Chen ZJ, *et al.* Structures and diversity of insect communities under different types of vegetation rehabilitations of hilly and gully loess regions [J]. *Acta Botanica Boreali – Occidentalia Sinica*, 2005, 7: 1323–1328. [张淑莲, 张锋, 陈志杰, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被恢复类型昆虫群落结构及多样性的研究 [J]. 西北植物学报, 2005, 7: 1323–1328]
- Zhen G, Yang XD, Li SQ. Biodiversity of ground – dwelling spider in six forest types in Xishuangbanna S. W. China [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2009, 52 (8): 875–884. [郑国, 杨效东, 李枢强. 西双版纳地区六种林型地表蜘蛛多样性比较研究 [J]. 昆虫学报, 2009, 52 (8): 875–884]
- Zhu H, Wang H, Li BG, *et al.* Studies on the forest vegetation of Xishuangbanna [J]. *Plant Science Journal*, 2015, 5: 67–152. [朱华, 王洪, 李保贵, 等. 西双版纳森林植被研究 [J]. 植物科学学报, 2015, 5: 67–152]