

皖南地区农林交错带传粉蜂类 多样性及分布格局*

朱 斌^{1**} 姜丽君¹ 谢婷婷¹ 黄敦元^{1,2}
黄文翔¹ 郝家胜^{1***} 朱朝东^{3***}

(1. 安徽师范大学生命科学学院, 芜湖 241000; 2. 重庆师范大学生命科学学院, 重庆 401331;
3. 中国科学院动物研究所动物进化与系统学重点实验室, 北京 100101)

摘 要 【目的】 探讨皖南地区农林交错带传粉蜂类的物种多样性和群落结构与开花植物的关系。【方法】 选取安庆市宜秀区杨屋村、宣城市泾县马头村、池州市青阳县三增村和池州市石台县焦曹村 4 个皖南地区典型的农林交错带, 2019 年 7 月至 2021 年 4 月, 采用人工扫网法收集开花植物上的传粉蜂类。分析比较了不同植物类型上传粉蜂类的物种多样性和群落结构差异。【结果】 本研究共采集 4 484 头传粉蜂类, 隶属于 11 科 53 属 118 种, 被访植物有农作物、经济作物、观赏植物和野生植物 4 种类型。蜜蜂科的种类、数量以及所访问植物的种类都极显著高于其他科的蜂类 ($P < 0.01$)。蜜蜂总科-植物传粉网络的灭绝曲线系数高于胡蜂总科-植物传粉网络。野生植物上传粉蜂的种类和数量均极显著高于其他的类型的植物 ($P < 0.01$)。观赏植物的种类与其所吸引传粉蜂类的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Marglaf 丰富度指数均极显著相关 ($P < 0.01$), 但在其他类型植物上的相关性不显著。蜂类-观赏植物传粉网络的生态位重叠参数最低, 蜂类物种对花粉资源竞争压力小。【结论】 夏季的传粉蜂类多样性显著高于春秋两季。蜜蜂科在农林传粉生态系统中占主要地位, 对维持农林交错带传粉网络的稳定性尤为重要。野生植物能吸引更多种类和数量的野生蜂类, 是农林授粉生态系统中最重要景观类型之一。观赏植物的高丰富度有助于维持传粉蜂类的多样性, 然而, 并非所有观赏植物都能吸引蜂类传粉。本研究可为保护农林交错带中野生蜂类的栖息地, 进而保护当地的传粉生态系统及相关政策的制定提供理论参考。

关键词 传粉蜂类; 农林交错带; 野生植物; 观赏植物; 传粉生态系统

Diversity and distribution of pollinator wasps and bees in the southern Anhui agroforestry ecotone

ZHU Bin^{1**} JIANG Li-Jun¹ XIE Ting-Ting¹ HUANG Dun-Yuan^{1,2}
HUANG Wen-Xiang¹ HAO Jiao-Sheng^{1***} ZHU Chao-Dong^{3***}

(1. College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China; 2. College of Life Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 3. Key Laboratory of Zoological Systematics and Evolution, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract 【Objectives】 To investigate the relationship between pollinator wasps and bees, species diversity and flowering plants, in the agroforestry ecotone of southern Anhui. 【Methods】 Four typical villages in the agroforestry ecotone of southern Anhui: Yangwu village, Yixiu district, Anqing; Matou village, Jing county Xuancheng; Sanzeng village, Qingyang county, Chizhou and Jiaocao village, Shitai county, Chizhou, were selected as study sites. Pollinator wasps and bees were collected from flowering plants with manual sweep nets from July 2019 to April 2021. The community structure and species diversity of pollinator wasps and bees on different plant species was then analyzed and compared. 【Results】 A total of 4 484

*资助项目 Supported projects: 国家科技基础资源调查专项课题 (2018FY100405)

**第一作者 First author, E-mail: zhubin9797@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: jshaonigpas@sina.com; zhucd@ioz.ac.cn

收稿日期 Received: 2022-03-22; 接受日期 Accepted: 2022-07-20

individual wasps and bees were collected, which could be assigned to 118 species, 53 genera and 11 families. These wasp and bee species visited four types of flowering plants; crops, cash crops, ornamental plants and wild plants. Significantly ($P < 0.01$) more species and individuals belonged to the Apidae than to other families, and members of this family also visited significantly more plants than other families. The extinction slope coefficient of the Apoidea-plant bipartite network was higher than that of the Vespoidea-plant bipartite network. Significantly more species and individual wasps and bees visited wild plants than other plants ($P < 0.01$). Ornamental plant species were significant correlated with both the Shannon-Wiener diversity index and the Marglaf richness index ($P < 0.01$) of wasps and bees. No such correlation was found for other types of plants. The wasp and bee-ornamental plant bipartite network had the lowest niche overlap coefficient. Wasp and bee species had little competition pressure for pollen resources. **[Conclusion]** Pollinator diversity in the agroforestry ecotone of southern Anhui is significantly higher in summer than in spring or autumn. The Apidae play a major role in the pollination of agroforestry ecosystems and are particularly important for maintaining the stability of pollination networks in the agroforestry ecotone. Wild plants attract both more species and individuals of wild bees and consequently are an important component of the agroforestry ecosystem. High ornamental plant diversity helps maintain pollinator diversity. However, not all ornamentals attract bees. This study provides fundamental information for protecting the habitat of wild wasps and bees, thereby promoting pollination in the agroforestry ecotone.

Key words pollinator wasps and bees; agroforestry ecotone; wild plants; ornamental plants; pollination ecosystem

传粉昆虫作为最重要的开花植物传粉者,在农林授粉生态服务中发挥着重要的作用 (Klein *et al.*, 2007; Kratschmer *et al.*, 2018; 孙广芳等, 2018)。据报道,全世界 80%以上的被子植物、75%的主要粮食作物和 35%的粮食生产都与传粉昆虫的授粉有关 (Ollerton *et al.*, 2011; Potts *et al.*, 2016; 欧阳芳等, 2019)。在各类传粉昆虫中,膜翅目蜂类 (尤其是蜜蜂类) 种类多、分布广泛、适应能力强、不容易受气候影响,是最重要的传粉者,是公认的传粉效率最高的传粉者之一 (吴燕如, 1965), 它们可为大部分农林生态系统提供授粉服务 (Potts *et al.*, 2016; Rader *et al.*, 2016; Kratschmer *et al.*, 2018)。

农林交错带作为农业景观与自然生态系统的重要纽带,对维持野生蜂类授粉生态系统的稳定性至关重要 (Vanbergen and Initiative, 2013; Seibold *et al.*, 2019; Theodorou *et al.*, 2020)。农林交错带的农业景观 (特别在山地丘陵地区) 主要表现为农田面积小、形状不规则,遵循山地地形的轮廓而形成。这种半自然栖息地为传粉昆虫提供了多样的花资源、筑巢地点和筑巢材料,支持了传粉昆虫的高度多样性 (Beduschi *et al.*, 2018)。研究表明,近年来农业集约化通过增加局部区域干扰,降低了农林交错带景观复杂性 (Kennedy *et al.*, 2013), 在时间和空间尺度上恶化了野生蜂类的栖息环境 (Taki *et al.*, 2007;

Winfree *et al.*, 2011; Bennett *et al.*, 2020)。这种景观组成的变化减少了野生蜂类的食物资源和筑巢资源 (Baude *et al.*, 2016), 直接或间接导致了野生蜂类物种数量和多样性下降 (Andersson *et al.*, 2013; Fortel *et al.*, 2014; Emmerson *et al.*, 2016; Donkersley, 2019; Shaw *et al.*, 2020), 进而导致栽培作物和野生开花植物授粉服务的减少 (Liu *et al.*, 2020; Prendergast and Ollerton, 2021)。

近期,关于农林交错带中野生和观赏植物授粉的研究正逐渐获得关注 (Knight *et al.*, 2018; Shi *et al.*, 2021), 不同植物类型在景观尺度上对野生蜂类数量和多样性影响也引起了重视 (Hass *et al.*, 2019)。本研究以皖南地区的农林交错带为研究样地,于 2019 年 7 月至 2021 年 4 月,对该地区不同景观类型的开花植物传粉蜂类多样性展开调查和分析,旨在探讨我国东部农林交错带不同景观组成与野生蜂类多样性的关系,为我国野生蜂类栖息地的保护和资源可持续利用提供基础资料和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究样地

皖南地区 (116°31'E-119°45'E, 29°31'N-31°N) 位于我国南北交界山地地区,具有典型的

温带和亚热带山地季风气候特征,雨量充沛(年降水量达 1 100-2 500 mm),气候温和,光照资源丰富,四季分明(邵华木, 1990)。皖南地形以山地丘陵为主,林地属北亚热带落叶阔叶与常绿阔叶混交林带。用材林主要树种有杉、松、枫香、毛白杨和竹类等。经济林主要树种有油茶、茶树、板栗、枣树和枇杷等(张平等, 2018)。皖南地区人均可耕地面积偏少,并且农田的分布相对比较分散化和碎片化。种植的农作物主要有水稻、玉米、油菜、瓜类、豆类和薯类等(方伟和徐礼来, 2018)。

本研究选取具有代表性的 4 个农林交错带样地开展调查,分别为安庆市宜秀区杨屋村(AQ)、宣城市泾县马头村(JX)、池州市青阳县三增村(QY)和池州市石台县焦曹村(ST)。4 个样地均位于林地和农业用地之间,具有典型的农林交错带生态系统特征。

1.2 标本采集

于 2019 年 7 月至 10 月、2020 年 5-11 月和 2021 年 4 月进行传粉昆虫的采集,平均每月采样 1 次,日采样时间为 8:30-16:30。采用人工扫网收集法,对样地内所有开花植物上的传粉蜂类进行采集及调查,并记录每种蜂类的访花植物信息。采集日当晚将捕获的蜂类按访花植物种类进行分类,将采集的所有标本插针干燥并置于 -20 °C 冰箱保存,将需要进行分子鉴定的蜂类标本取右中足装入无水乙醇并置于 -20 °C 冰箱备用。植物的鉴定工作在采集现场完成,当现场有未能完成识别的植物物种,使用真空包装带回实验室,对照《中国植物志》电子版(<http://www.iplant.cn/frps>) 比对鉴定。植物的类型通过走访调查的形式,按照其对农户的价值功能划分为农作物、经济作物、观赏植物和野生植物。

本研究涉及的蜂类包括广义上的胡蜂总科和蜜蜂总科(Branstetter *et al.*, 2017)。胡蜂总科包括胡蜂科、马蜂科、蜾蠃科和土蜂科(李廷景等, 2021)。蜜蜂总科由泥蜂科和蜜蜂类组成;蜜蜂类包括准蜂科、蜜蜂科、切叶蜂科、隧蜂科、地蜂科和分舌蜂科(吴燕如, 1965)。

1.3 昆虫物种鉴定

首先根据形态学进行初步分类鉴定,然后基于 DNA 条形码序列(CO I 基因)对每一种蜂类进行分子鉴定。分子鉴定利用 GenBank 在线数据库和 BOLD 在线数据库(<http://www.boldsystems.org>)作为参考数据库和测得的蜂类 CO I 序列比对聚类注释,序列相似度达到 98% 以上的认为是同一个物种。对于无法比对的蜂类物种再根据形态学进行鉴定。

本研究使用上海生工生物工程公司生产的 DNA 提取试剂盒。PCR 反应体系(50 μL): 上下游引物各 1.8 μL(10 μmol/L), DNA 模板 1.5 μL(50-100 ng), ddH₂O 22.8 μL, dNTPs 1.5 μL(0.5 mmol/L), 10×LA PCR Buffer 6.0 μL, MgCl₂(25 mmol/L) 8.0 μL, TaKaRa LA Taq 酶(5 U/μL) 0.6 μL。主要扩增引物为 LCO1490/HCO2198(5'-GGTCAACAAATCATAAAGATATTGG-3'/5'-TAAACTTCAGGGTGACCAAAAAATCA-3')。CO1A/CO1B(5'-GGTCAACAAATCATAAAGATATTGG-3'/5'-TAAACTTCAGGGTGACCAAAAAAT-3')和 LepF1/LepR1(5'-ATTCAACCAATCATAAAGATATTGG-3'/5'-TAAACTTCTGGATGTCCAAAAATCA-3')作为备选引物。PCR 反应条件:95 °C 预变性 5 min, 94 °C 变性 50 s, 49.2 °C 退火 1 min, 72 °C 延伸 2 min, 共 35 个循环;最后 72 °C 延伸 10 min。PCR 产物经 1% 琼脂糖凝胶电泳检测,扩增产物送上海生工生物工程公司进行纯化、克隆及测序。

1.4 数据统计与分析

首先对每个样地采集的蜂类进行物种累计曲线分析。然后统计并计算各样地蜂类物种 α 多样性相关指数。

Shannon-Wiener 多样性指数 (H'):

$$H' = -\sum P_i \ln P_i;$$

Pielou 均匀度指数 (E): $E = \frac{H'}{H_{\max}}$; 式中

$$H_{\max} = \ln N;$$

Margalef 丰富度指数: $R = \frac{S-1}{\ln N}$ 。

式中 $P_i = \frac{N_i}{N}$, 为第 i 个物种个体数量占群落中总个体数的比例, N_i 为第 i 个物种的数量, N 为群落个体总数, S 为群落物种总数。

采用单因素方差 t -检验以及多重比较分析传粉蜂类的物种数、个体数量的差异显著性 ($P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著)。使用非度量多维尺度分析 (Non-metric multiple dimensional analysis, NMDS) 对蜂类群落的组成在二维空间进行了呈现。以上分析使用了 R 4.1.0 的 `vegan` 程序包 (<http://www.R-project.Org>)。

利用 R 4.1.0 的 `bipartite` 程序包绘制了皖南地区传粉蜂类-植物互作的二分网络图, 计算并分析了不同类型蜂类-植物传粉网络的相关指标和特征 (Dormann *et al.*, 2009)。群落中物种的组成、丰富度和种间互作关系是导致生态网络时空变异的重要因素 (Tylianakis and Morris, 2017)。基于此, 本研究选取了 4 个网络参数来理解网络的组成和结构变化, 其中网络连接度

(Connectance) 越高表示二分网络中两个营养级间的互作关系越多。蜂类和植物的一次互作为一次链接, 平均连接数 (Links per species) 表示网络中每个物种平均链接的次数。生态位重叠参数 (Niche overlap) 越高表示网络中蜂类物种资源竞争压力越大。灭绝曲线系数 (Extinction slope) 表示每去掉一个蜂类物种后植物物种数量的变化 (Hurlbert, 1978; Memmott *et al.*, 2004)。

2 结果与分析

2.1 传粉蜂类群落总体多样性特征

本研究共累计采集蜂类标本 4 484 头, 隶属 11 科 53 属 118 种。其中分子鉴定 61 种、形态学鉴定 37 种、还有 20 个未鉴定到种。访花植物有农作物、经济作物、观赏植物和野生植物 4 种类型共计 169 种开花植物 (表 1, 表 2)。其中, 蜜蜂类共采集 22 属 64 种 3 433 头, 占有蜂类标本的 76.56%。

表 1 皖南地区传粉蜂类物种名录及其主要访花植物种类
Table 1 Species list of pollinator bees and wasps and their main visiting plants in southern Anhui

科 Family	属 Genus	种 Species	主要访花植物 Main visiting plants	科 Family	属 Genus	种 Species	主要访花植物 Main visiting plants
胡蜂科 Vespidae	胡蜂属 Vespa	三齿胡蜂 Vespa analis	茶树, 红叶石楠, 桂花, 黄荆, 紫 苏	蜜蜂科 Apidae	无垫蜂属 Amegilla	领无垫蜂 Amegilla cingulifera	黄荆, 扁豆, 益 母草, 毛水苏, 蜀葵
		黑尾胡蜂 Vespa ducalis	油茶, 茶树, 红 叶石楠, 毛水苏, 黄荆			绿条无垫蜂 Amegilla zonata	扁豆, 黄荆, 萼 距花, 紫花香薷, 青豆
		黑盾胡蜂 Vespa bicolor	茶树, 油茶, 枇 杷, 薄荷, 红花 檵木			花无垫蜂 Amegilla florea	扁豆, 茄
		金环胡蜂 Vespa mandarinia	茶树, 紫苏, 茄, 桂花, 红叶石楠		芦蜂属 Ceratina	日本芦蜂 Ceratina japonica	黄荆, 青菜, 萝卜, 油菜, 野豌豆
		基胡蜂 Vespa basalis	茶树, 油茶, 扁 豆, 荞麦, 百日 菊			单一芦蜂 Ceratina unicolor	黄荆, 博落回, 青菜, 吴茱萸, 狼把草
		黑胸胡蜂 Vespa velutina	茶树, 油茶, 红 叶石楠, 紫苏, 丝瓜			冲绳芦蜂 Ceratina okinawana	黄荆, 芝麻, 丝瓜, 益母草, 扁豆

续表 1 (Table 1 continued)

科 Family	属 Genus	种 Species	主要访花植物 Main visiting plants	科 Family	属 Genus	种 Species	主要访花植物 Main visiting plants
胡蜂科 Vespidae	黄胡蜂属 <i>Vespula</i>	细黄胡蜂 <i>Vespula flaviceps</i>	丝瓜, 茶树, 南瓜, 黄檀, 扁豆	蜜蜂科 Apidae	芦蜂属 <i>Ceratina</i>	<i>Ceratina sutepensis</i>	黄荆, 丝瓜, 秋英, 博落回, 鸡冠花
	侧异腹胡蜂属 <i>Parapolybia</i>	变侧异腹胡蜂 <i>Parapolybia varia</i>	南瓜, 鬼针草			绿芦蜂 <i>Ceratina smaragdula</i>	黄荆, 扁豆, 翅果菊, 芝麻, 秋英
马蜂科 Polistidae	马蜂属 <i>Polistes</i>	陆马蜂 <i>Polistes rothneyi</i>	枣树, 南天竹, 高粱泡			蓝芦蜂 <i>Ceratina unimaculata</i>	夏枯草
		柑马蜂 <i>Polistes mandarinus</i>	黄荆, 丝瓜, 乌敛梅, 小蓬草, 辣椒		毛斑蜂属 <i>Melecta</i>	喜马毛斑蜂 <i>Melecta emodi</i>	黄荆, 毛水苏, 萼距花, 博落回, 翅果菊
		棕马蜂 <i>Polistes gigas</i>	茶树, 油茶, 黄荆, 萝卜, 丝瓜		艳斑蜂属 <i>Nomada</i>	未定种 <i>Nomada</i> sp.	青菜, 泽珍珠菜
		日本马蜂 <i>Polistes japonicus</i>	黄荆, 茶树, 油茶, 桂花, 红叶石楠		熊蜂属 <i>Bombus</i>	二色熊蜂 <i>Bombus bicoloratus</i>	芝麻, 苦瓜, 茶树, 秋英, 波斯菊
		果马蜂 <i>Polistes olivaceus</i>	丝瓜, 芝麻, 野豌豆, 乌敛梅, 黄荆			三条熊蜂 <i>Bombus trifasciatus</i>	益母草, 三裂叶薯, 秋英, 野芝麻, 毛水苏
		斯马蜂 <i>Polistes snelleni</i>	丝瓜, 冬瓜, 乌敛梅, 水蓼, 黄荆			短头熊蜂 <i>Bombus breviceps</i>	豇豆, 益母草, 扁豆, 芝麻, 茄
		<i>Polistes dawnae</i>	丝瓜, 接骨木, 小蓬草, 豇豆, 乌敛梅			黑足熊蜂 <i>Bombus atripes</i>	芝麻, 秋英, 博落回, 黄荆, 辣椒
		似中华马蜂 <i>Polistes dominula</i>	乌敛梅, 芝麻, 百日菊, 海桐, 丛枝蓼			红尾熊蜂 <i>Bombus haemorrhoidalis</i>	南天竹, 三裂叶薯, 益母草, 茶树, 秋英
蜾蠃科 Eumenidae	蜾蠃属 <i>Eumenes</i>	米蜾蠃 <i>Eumenes micado</i>	丝瓜, 茶树, 马兰, 芝麻, 枣树		木蜂属 <i>Xylocopa</i>	黄胸木蜂 <i>Xylocopa appendiculata</i>	扁豆, 波斯菊, 黄荆, 丝瓜, 博落回
		孔蜾蠃 <i>Eumenes punctatus</i>	黄荆, 商陆, 茶树, 薄荷, 乌敛梅			中华木蜂 <i>Xylocopa sinensis</i>	丝瓜, 博落回, 黄荆, 扁豆, 芝麻
		中华唇蜾蠃 <i>Eumenes labiatus</i>	油茶, 茶树, 乌敛梅			长木蜂 <i>Xylocopa tranquebarorum</i>	丝瓜, 黄荆, 波斯菊, 扁豆, 芝麻
		未定种 <i>Eumenes</i> sp.	乌敛梅, 荠菜			赤足木蜂 <i>Xylocopa rufipes</i>	丝瓜, 梧桐, 扁豆, 荞麦, 黄荆

续表 1 (Table 1 continued)

科 Family	属 Genus	种 Species	主要访花植物 Main visiting plants	科 Family	属 Genus	种 Species	主要访花植物 Main visiting plants
螺赢科 Eumeni- dae	饰螺赢属 <i>Pseumenes</i>	四刺饰螺赢 <i>Pseumenes depressus</i>	南天竹	切叶 蜂科 Megac- hilidae	切叶蜂属 <i>Megachile</i>	粗切叶蜂 <i>Megachile sculpturalis</i>	黄荆, 黄檀, 梧桐, 扁豆, 鱼藤
	胸螺赢属 <i>Orancistrocerus</i>	墨体胸螺赢 <i>Orancistrocerus aterrimus</i>	扁豆, 接骨草, 南天竹, 接骨木, 豇豆			细切叶蜂 <i>Megachile spissula</i>	黄荆, 芝麻, 女贞, 胡枝子, 黄檀
		丽胸螺赢 <i>Orancistrocerus drewseni</i>	黄荆, 扁豆, 丝瓜, 茶树, 鸡冠花			白斑切叶蜂 <i>Megachile strupigera</i>	黄荆, 黄檀
		黄额胸螺赢 <i>Orancistrocerus aterrimus</i>	金荞麦			双叶切叶蜂 <i>Megachile dinura</i>	梧桐
	旁沟螺赢属 <i>Parancistrocerus</i>	长刻旁沟螺赢 <i>Parancistrocerus samarensis</i>	油茶, 高粱泡, 接骨草, 乌敛梅, 黄荆			月季切叶蜂 <i>Megachile nipponica</i>	益母草, 毛水苏, 黄荆
	短触螺赢属 <i>Apodynerus</i>	台湾短触螺赢 <i>Apodynerus formosensi</i>	蒲儿根, 乌敛梅			窄颊切叶蜂 <i>Megachile relata</i>	扁豆
	缘螺赢属 <i>Anterhynchium</i>	黄缘螺赢 <i>Anterhynchium flavomarginatum</i>	黄檀, 黄荆, 梧桐, 板栗, 搜疏			淡翅切叶蜂 <i>Megachile remota</i>	黄荆, 益母草, 紫花香薷, 马鞭草, 苦麦菜
	代喙螺赢属 <i>Dirhynchium</i>	常代喙螺赢 <i>Dirhynchium flavomarginatum</i>	板栗, 黄荆, 丝瓜, 紫苏, 枇杷			拟小突切叶蜂 <i>Megachile disjunctiformis</i>	黄荆
	异喙螺赢属 <i>Allorhynchium</i>	中华异喙螺赢 <i>Allorhynchium chinense</i>	搜疏, 黄荆, 丝瓜, 茶树			双色切叶蜂 <i>Megachile bicolor</i>	扁豆, 芝麻, 黄荆, 藿香
	代盾螺赢属 <i>Antodynerus</i>	未定种 1 <i>Antodynerus</i> sp.1	黄檀, 小蓬草			窄切叶蜂 <i>Megachile rixator</i>	黄荆, 三裂叶薯, 芝麻, 秋英, 益母草
		未定种 2 <i>Antodynerus</i> sp.2	鸡冠花, 黄荆, 梵天花			青岛切叶蜂 <i>Megachile tsingtauensis</i>	马鞭草, 波斯菊, 南天竹, 秋英, 黄荆
		显佳盾螺赢 <i>Euodynerus notatus</i>	窃衣, 小蓬草, 益母草, 黄檀, 乌敛梅			未定种 1 <i>Megachile</i> sp.1	黄荆, 马兰, 扁豆, 辣椒, 芝麻
	佳盾螺赢属 <i>Euodynerus</i>	纹佳盾螺赢 <i>Euodynerus strigatus</i>	黄荆, 扁豆, 油茶, 丝瓜, 大豆			未定种 2 <i>Megachile</i> sp.2	黄荆
		未定种 <i>Euodynerus</i> sp.	黄荆		尖腹蜂属 <i>Coelioxys</i>	长板尖腹蜂 <i>Coelioxys fenestrata</i>	黄檀, 辣椒, 茄, 黄荆
	秀螺赢属 <i>Pareumenes</i>	四秀螺赢 <i>Pareumenes quadrispinosus</i>	梧桐			短板尖腹蜂 <i>Coelioxys ducalis</i>	黄檀, 黄荆, 辣椒, 茄, 蒲公英

续表 1 (Table 1 continued)

科 Family	属 Genus	种 Species	主要访花植物 Main visiting plants	科 Family	属 Genus	种 Species	主要访花植物 Main visiting plants
蜾蠃科 Eumenidae	外舌蜾蠃属 <i>Ectopioglossa</i>	台湾外舌蜾蠃 <i>Ectopioglossa taiwana</i>	黄檀, 黄瓜, 鸡冠花, 黄荆	切叶蜂科 Megachilidae	赤腹蜂属 <i>Euaspis</i>	基赤腹蜂 <i>Euaspis basalis</i>	黄檀, 梧桐, 蛇床, 黄荆
土蜂科 Scoliidae	土蜂属 <i>Scolia</i>	橙头土蜂 <i>Scolia superciliaris</i>	乌敛梅, 黄荆, 韭菜, 博落回		黄斑蜂属 <i>Anthidium</i>	七齿黄斑蜂 <i>Anthidium septemspinatum</i>	黄荆, 马兰, 芝麻
		间色腹土蜂 <i>Scolia watanabei</i>	紫苏, 紫菀, 蓟, 攀倒甌, 野生紫苏		孔蜂属 <i>Heriades</i>	黑孔蜂 <i>Heriades sauteri</i>	黄荆, 吴茱萸, 翅果菊, 鬼针草
	长腹土蜂属 <i>Campsomeriella</i>	白毛长腹土蜂 <i>Campsomeriella annulata</i>	三裂叶薯, 黄荆, 荞麦, 秋英, 加拿大一枝黄花		地蜂属 <i>Andrena</i>	湖南地蜂 <i>Andrena hunanensis</i>	油茶, 茶树
		金毛长腹土蜂 <i>Campsomeriella prismatica</i>	加拿大一枝黄花, 高粱泡, 黄荆	地蜂科 Andrenidae		纹地蜂 <i>Andrena striata</i>	油茶, 茶树
	红腹土蜂属 <i>Liacos</i>	<i>Liacos erythrosoma</i>	黄荆, 花椒			<i>Andrena algida</i>	板栗, 荠菜
泥蜂科 Sphecidae	泥蜂属 <i>Sphex</i>	未定种 <i>Sphex</i> sp.	黄荆, 接骨木			克纓地蜂 <i>Andrena knuthi</i>	风轮菜, 蒲儿根, 板栗, 秋英, 毛水苏
	蓝泥蜂属 <i>Chalybion</i>	日本蓝泥蜂 <i>Chalybion japonicum</i>	乌敛梅, 黄荆, 接骨木, 南天竹, 接骨草			未定种 <i>Andrena</i> sp.	黄荆, 溲疏, 辣椒, 丝瓜, 野豌豆
		未定种 <i>Chalybion</i> sp.	乌敛梅	隧蜂科 Halictidae	隧蜂属 <i>Halictus</i>	铜色隧蜂 <i>Halictus aerarius</i>	翅果菊, 益母草, 黄荆, 小蓬草, 鼠麴草
	壁泥蜂属 <i>Sceliphron</i>	黄柄壁泥蜂 <i>Sceliphron madraspatanum</i>	丝瓜, 乌敛梅, 芝麻, 黄荆, 翅果菊		淡脉隧蜂属 <i>Lasioglossum</i>	反淡脉隧蜂 <i>Lasioglossum oppositum</i>	紫菀, 油茶, 扁豆, 秋英, 梧桐
		驼腹壁泥蜂 <i>Sceliphron deformis</i>	丝瓜, 芝麻, 黄檀, 乌敛梅, 接骨木			粗唇淡脉隧蜂 <i>Lasioglossum upinense</i>	吴茱萸, 黄荆, 板栗, 芝麻, 茶树
	锯泥蜂属 <i>Prionyx</i>	毛斑锯泥蜂 <i>Prionyx viduatus</i>	黄荆, 接骨草			群淡脉隧蜂 <i>Lasioglossum agelastum</i>	板栗, 小蓬草, 益母草, 茶树, 狗舌草
	沙泥蜂属 <i>Ammophila</i>	皱胸沙泥蜂 <i>Ammophila atripes</i>	黄荆, 乌敛梅, 板栗, 油茶, 翅果菊			未定种 1 <i>Lasioglossum</i> sp.1	芫荽, 茶树, 南天竹, 博落回, 益母草
	脊小唇泥蜂属 <i>Liris</i>	未定种 <i>Liris</i> sp.	乌敛梅, 蒲儿根			未定种 2 <i>Lasioglossum</i> sp.2	黄荆, 丝瓜, 秋英, 马兰, 翅果菊
	长足泥蜂属 <i>Podalonia</i>	未定种 <i>Podalonia</i> sp.	乌敛梅, 黄荆, 小蓬草			未定种 3 <i>Lasioglossum</i> sp.3	博落回, 青菜, 黄荆, 萝卜, 波斯菊

续表 1 (Table 1 continued)							
科 Family	属 Genus	种 Species	主要访花植物 Main visiting plants	科 Family	属 Genus	种 Species	主要访花植物 Main visiting plants
泥蜂科 Sphecidae	沙泥蜂属 <i>Ammophila</i>	未定种 <i>Ammophila</i> sp.	泽珍珠菜	隧蜂科 Halictidae	红腹蜂属 <i>Sphecodes</i>	<i>Sphecodes binghami</i>	黄荆, 扁豆, 荞麦, 马兰
	掌泥蜂属 <i>Palmodes</i>	未定种 <i>Palmodes</i> sp.	黄荆		彩带蜂属 <i>Nomia</i>	蓝彩带蜂 <i>Nomia chalybeata</i>	黄檀, 黄荆, 辣椒, 扁豆, 芝麻
	节腹泥蜂属 <i>Cerceris</i>	未定种 <i>Cerceris</i> sp.	乌敛梅, 黄荆, 扁豆, 丝瓜, 荞麦			绿彩带蜂 <i>Nomia viridicinctula</i>	茄, 芝麻, 辣椒, 黄荆, 扁豆
	捷小唇泥蜂属 <i>Tachytes</i>	中华捷小唇泥蜂 <i>Tachytes sinensis</i>	乌敛梅, 黄荆, 花椒, 辣椒, 紫苏			黄绿彩带蜂 <i>Nomia strigata</i>	辣椒, 紫薇, 黄荆, 山麦冬, 接骨木
准蜂科 Melittidae	宽痣蜂属 <i>Macropis</i>	斑宽痣蜂 <i>Macropis hedini</i>	过路黄, 蒲公英, 黄荆	分舌蜂科 Colletidae		黄胸彩带蜂 <i>Nomia thoracica</i>	黄荆, 高粱泡, 辣椒, 茄, 小蓬草
	毛足蜂属 <i>Dasypoda</i>	未定种 <i>Dasypoda</i> sp.	翅果菊, 三裂叶薯		分舌蜂属 <i>Colletes</i>	大分舌蜂 <i>Colletes gigas</i>	油茶, 紫花香薷, 茶树, 千里光
蜜蜂科 Apidae	蜜蜂属 <i>Apis</i>	中华蜜蜂 <i>Apis cerana</i>	翅果菊, 茶树, 萝卜, 野芝麻, 油菜			未定种 <i>Colletes</i> sp.	三裂叶薯, 紫菀
		意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera</i>	茶树, 益母草, 紫苏, 秋英, 板栗		叶舌蜂属 <i>Hylaeus</i>	黄叶舌蜂 <i>Hylaeus floralis</i>	黄荆, 吴茱萸, 辣椒, 薄荷, 野生紫苏
	长须蜂属 <i>Eucera</i>	花长须蜂 <i>Eucera floralia</i>	玫瑰, 锦绣杜鹃, 野芝麻, 马兰, 毛水苏			<i>Hylaeus nobuyakii</i>	黄荆, 乌敛梅, 蛇床, 薄荷, 辣椒

表 2 4 种开花植物类型明细
Table 2 Details of four flowering plant landscape types

植物类型 Plant types	开花植物 Flowering plant	物种名 Species	开花植物 Flowering plant	物种名 Species
农作物 Crop	青菜	<i>Brassica rapa</i>	马铃薯	<i>Solanum tuberosum</i>
	油菜	<i>Brassica napus</i>	白菜	<i>Brassica rapa</i>
	芸苔	<i>Brassica campestris</i>	辣椒	<i>Capsicum annuum</i>
	芫荽	<i>Coriandrum sativum</i>	丝瓜	<i>Luffa cylindrica</i>
	萝卜	<i>Raphanus sativus</i>	芝麻	<i>Sesamum indicum</i>
	豌豆	<i>Pisum sativum</i>	青豆	<i>Pisum sativum</i>
	蚕豆	<i>Vicia faba</i>	大豆	<i>Glycine max</i>
	白花甘蓝	<i>Brassica oleracea</i>	冬瓜	<i>Benincasa hispida</i>
	豇豆	<i>Vigna unguiculata</i>	黄瓜	<i>Cucumis sativus</i>
	苦苣菜	<i>Sonchus oleraceus</i>	甜瓜	<i>Cucumis melo</i>
	扁豆	<i>Lablab purpureus</i>	玉米	<i>Zea mays</i>
	苦麦菜	<i>Sonchus arvensis</i>	紫苏	<i>Perilla frutescens</i>
	番薯	<i>Ipomoea batatas</i>	苦瓜	<i>Momordica charantia</i>

续表 2 (Table 2 continued)

植物类型 Plant types	开花植物 Flowering plant	物种名 Species	开花植物 Flowering plant	物种名 Species
农作物 Crop	荞麦	<i>Fagopyrum esculentum</i>	韭菜	<i>Allium tuberosum</i>
	菜豆	<i>Phaseolus vulgaris</i>	山芋	<i>Ipomoea batatas</i>
	向日葵	<i>Helianthus annuus</i>	茄	<i>Solanum melongena</i>
	南瓜	<i>Cucurbita moschata</i>	秋葵	<i>Abelmoschus esculentus</i>
经济作物 Cash crop	栗	<i>Castanea mollissima</i>	花椒	<i>Zanthoxylum bungeanum</i>
	油茶	<i>Camellia oleifera</i>	茶	<i>Camellia sinensis</i>
	枣	<i>Ziziphus jujuba</i>	枇杷	<i>Eriobotrya japonica</i>
观赏植物 Ornamental plant	金鸡菊	<i>Coreopsis basalis</i>	梧桐	<i>Firmiana simplex</i>
	鸡冠花	<i>Celosia cristata</i>	石楠	<i>Photinia serratifolia</i>
	黄秋英	<i>Cosmos sulphureus</i>	百日菊	<i>Zinnia elegans</i>
	秋英	<i>Cosmos bipinnatus</i>	茛苢	<i>Ipomoea quamoclit</i>
	木樨	<i>Osmanthus fragrans</i>	地肤	<i>Kochia scoparia</i>
	紫云英	<i>Astragalus sinicus</i>	蒲公英	<i>Taraxacum mongolicum</i>
	藤萝	<i>Wisteria villosa</i>	木芙蓉	<i>Hibiscus mutabilis</i>
	蜀葵	<i>Alcea rosea</i>	红叶石楠	<i>Photinia fraseri</i>
	凤仙花	<i>Impatiens balsamina</i>	一串红	<i>Salvia splendens</i>
	女贞	<i>Ligustrum lucidum</i>	海桐	<i>Pittosporum tobira</i>
	小叶女贞	<i>Ligustrum quihoui</i>	波斯菊	<i>Cosmos bipinnatus</i>
	木槿	<i>Hibiscus syriacus</i>	莲	<i>Nelumbo nucifera</i>
	薄荷	<i>Mentha canadensis</i>	长春花	<i>Catharanthus roseus</i>
	紫薇	<i>Lagerstroemia indica</i>	红花檵木	<i>Loropetalum chinense</i>
	玫瑰	<i>Rosa rugosa</i>	萼距花	<i>Cuphea hookeriana</i>
	锦绣杜鹃	<i>Rhododendron pulchrum</i>	大花马齿苋	<i>Portulaca grandiflora</i>
	锦葵	<i>Malva cathayensis</i>	南天竹	<i>Nandina domestica</i>
野生植物 Wild plant	鼠曲草	<i>Pseudognaphalium affine</i>	南烛	<i>Vaccinium bracteatum</i>
	荔枝草	<i>Salvia plebeia</i>	蛇床	<i>Cnidium monnieri</i>
	半边莲	<i>Lobelia chinensis</i>	大青	<i>Clerodendrum cyrtophyllum</i>
	野大豆	<i>Glycine soja</i>	胡枝子	<i>Lespedeza bicolor</i>
	长鬃蓼	<i>Polygonum longisetum</i>	林泽兰	<i>Eupatorium lindleyanum</i>
	毛梗豨莶	<i>Sigesbeckia glabrescens</i>	石芥苳	<i>Mosla scabra</i>
	加拿大一枝黄花	<i>Solidago canadensis</i>	破铜钱	<i>Hydrocotyle sibthorpioides</i>
	东风菜	<i>Aster scaber</i>	高粱泡	<i>Rubus lambertianus</i>
	葎草	<i>Humulus scandens</i>	蒙古马兰	<i>Kalimeris mongolica</i>
	山麦冬	<i>Liriope spicata</i>	多须公	<i>Eupatorium chinense</i>
	一年蓬	<i>Erigeron annuus</i>	丛枝蓼	<i>Polygonum caespitosum</i>
	三裂叶薯	<i>Ipomoea triloba</i>	商陆	<i>Phytolacca acinosa</i>
	辣蓼	<i>Polygonum hydropiper</i>	窃衣	<i>Torilis scabra</i>
	溲疏	<i>Deutzia scabra</i>	水苏草	<i>Stachys baicalensis</i>
	狗舌草	<i>Tephrosia kirilowii</i>	木蓝	<i>Indigofera tinctoria</i>
	风花菜	<i>Rorippa globosa</i>	过路黄	<i>Lysimachia christinae</i>

续表 2 (Table 2 continued)

植物类型 Plant types	开花植物 Flowering plant	物种名 Species	开花植物 Flowering plant	物种名 Species
野生植物 Wild plant	博落回	<i>Macleaya cordata</i>	马鞭草	<i>Verbena officinalis</i>
	鱼藤	<i>Derris trifoliata</i>	元宝草	<i>Hypericum sampsonii</i>
	吴茱萸	<i>Tetradium ruticarpum</i>	黄檀	<i>Dalbergia hupeana</i>
	何首乌	<i>Fallopia multiflora</i>	益母草	<i>Leonurus japonicus</i>
	菟丝子	<i>Cuscuta chinensis</i>	喜旱莲子草	<i>Alternanthera philoxeroides</i>
	风龙	<i>Sinomenium acutum</i>	风轮菜	<i>Clinopodium chinense</i>
	七爪龙	<i>Ipomoea mauritiana</i>	接骨草	<i>Sambucus javanica</i>
	鸭舌草	<i>Monochoria vaginalis</i>	乌敛梅	<i>Cayratia japonica</i>
	鳞花草	<i>Lepidagathis incurva</i>	黄荆	<i>Vitex negundo</i>
	野豌豆	<i>Vicia sepium</i>	小蓬草	<i>Erigeron canadensis</i>
	紫菀	<i>Aster tataricus</i>	龙葵	<i>Solanum nigrum</i>
	截菜	<i>Houttuynia cordata</i>	苦荞麦	<i>Fagopyrum tataricum</i>
	小鱼仙草	<i>Mosla dianthera</i>	水蓼	<i>Polygonum hydropiper</i>
	夏枯草	<i>Prunella vulgaris</i>	苎麻	<i>Boehmeria nivea</i>
	半枝莲	<i>Scutellaria barbata</i>	攀倒甍	<i>Patrinia villosa</i>
	蓟	<i>Cirsium japonicum</i>	贼小豆	<i>Vigna minima</i>
	头花蓼	<i>Polygonum capitatum</i>	藿香	<i>Agastache rugosa</i>
	梵天花	<i>Urena procumbens</i>	火炭母	<i>Polygonum chinense</i>
	野葛	<i>Pueraria montana</i>	千里光	<i>Senecio scandens</i>
	田麻	<i>Corchoropsis crenata</i>	紫花香薷	<i>Elsholtzia argyi</i>
	野生紫苏	<i>Perilla frutescens</i>	青葙	<i>Celosia argentea</i>
	翅果菊	<i>Lactuca indica</i>	接骨木	<i>Sambucus williamsii</i>
	狼把草	<i>Bidens tripartita</i>	金荞麦	<i>Fagopyrum dibotrys</i>
	蓬蘽	<i>Rubus hirsutus</i>	长箭叶蓼	<i>Polygonum hastatosagittatum</i>
	婆婆纳	<i>Veronica polita</i>	鬼针草	<i>Bidens pilosa</i>
	芦苇	<i>Phragmites australis</i>	野桐	<i>Mallotus tenuifolius</i>
	爵床	<i>Rostellularia procumbens</i>	金樱子	<i>Rosa laevigata</i>
	芥菜	<i>Capsella bursapastoris</i>	野芝麻	<i>Lamium barbatum</i>
	野蔷薇	<i>Rosa multiflora</i>	毛茛	<i>Ranunculus japonicus</i>
	鹅肠菜	<i>Myosoton aquaticum</i>	蒲儿根	<i>Sinosenecio oldhamianus</i>
	北美独行菜	<i>Lepidium virginicum</i>	黄鹌菜	<i>Youngia japonica</i>
	泽珍珠菜	<i>Lysimachia candida</i>		

从样地上看, 样地安庆 (AQ) 共采集蜂类 93 种 842 头, 访花植物 52 种; 样地泾县 (JX) 共采集蜂类 94 种 1 047 头, 访花植物 54 种; 样地青阳 (QY) 共采集蜂类 101 种 1 464 头, 访花植物 93 种; 样地石台 (ST) 共采集蜂类 89 种 1 131 头, 访花植物 72 种。

物种累计曲线结果显示, 随着采样次数的增加, 曲线趋于平缓, 这表明当前的样本数量已能

够反映研究样地的蜂类多样性 (图 1)。NMDS 显示 4 个样地的传粉蜂类群落组成差异并不明显 (图 2)。因此, 本研究的 4 个样地能较好的反映出皖南地区农林交错带的传粉蜂类群落组成情况。

从采集季节上看, 春季 (3-5 月) 采集了 68 种 888 头蜂类, 占有蜂类标本的 19.80%; 夏季 (6-8 月) 采集了 103 种 2 061 头蜂类, 所占

有蜂类标本的 45.96%; 秋季 (9-11 月) 采集了 80 种 1 535 头蜂类, 占有蜂类标本的 34.23%。分析结果显示夏季蜂类群落的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数均极显著高于春季和秋季 ($P < 0.01$)。夏季蜂类群落的 Pielou 均匀度指数显著高于春季和秋季 ($P < 0.05$) (表 3, 图 3: A-C)。夏季采集的蜂类物种数也极显著高于春季和秋季; 其次是秋季; 最低的是春季 ($P < 0.01$)。

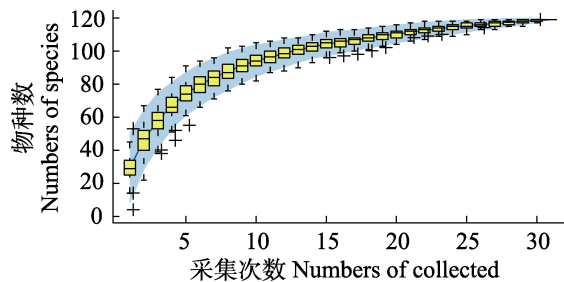


图 1 皖南的传粉蜂类物种累计曲线

Fig. 1 Species cumulative curve of sampling pollinator bees and wasps in southern Anhui

+表示每次采集的蜂类物种。

+ represents the wasps and bees species collected each time.

表 3 皖南地区不同季节传粉蜂类多样性指数

Table 3 Diversity indices of pollinator bees and wasps in each season in southern Anhui

样地 Study plots	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index			Margalef 丰富度指数 Margalef richness index			Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index		
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn
JX	2.652	3.241	2.579	5.728	9.166	7.340	0.524	0.550	0.412
ST	2.660	3.507	2.881	6.046	9.672	7.084	0.473	0.547	0.523
AQ	2.180	3.633	2.836	4.679	12.066	6.871	0.486	0.569	0.557
QY	2.674	3.743	3.235	6.613	10.774	9.382	0.453	0.602	0.506

AQ: 安庆市宜秀区杨屋村; JX: 宣城市泾县马头村; QY: 池州市青阳县三增村; ST: 池州市石台县焦曹村。下表同。

AQ: Yangwu village, Yixiu district, Anqing; JX: Matou village, Jing county, Xuancheng; QY: Sanzeng village, Qingyang county, Chizhou; ST: Jiaocao village, Shitai county, Chizhou. The same below.

2.2 不同类群传粉蜂类群落多样性特征

从个体数量上来看, 蜜蜂科昆虫数量 (1 991 头) 最多, 极显著高于其他 10 科蜂类, 其次为隧蜂科和切叶蜂科, 最少的是准蜂科和土蜂科 ($P < 0.01$) (图 4: A)。从物种数上来看, 蜜蜂科物种数量 (23 种) 最多, 极显著高于其他 10 科昆虫, 其次为蝶翼科和切叶蜂科, 最少的是准

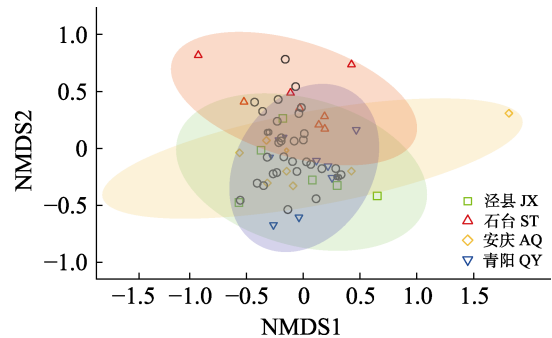


图 2 基于非度量多维尺度分析 (NMDS) 的皖南地区 4 个样地传粉蜂类群落组成 (stress = 0.195)

Fig. 2 Pollinator bees and wasps community of four study plots in southern Anhui based on non-metric multi-dimensional scaling (NMDS) analysis (stress = 0.195)

椭圆表示每种植物类型中心的标准差,

每一个点表示在一株花上一次的采样。

绿色代表泾县 (JX); 红色代表石台 (ST);

黄色代表安庆 (AQ); 蓝色代表青阳 (QY)。

Ellipses represent the standard deviation around the centroids of each plant type, each point represents a sample in a flower.

Green: Jingxian (JX); Red: Shitai (ST);

Yellow: Anqing (AQ); Blue: Qingyang (QY).

蜂科和分舌蜂科 ($P < 0.01$) (图 4: B)。从访花多度上来看, 蜜蜂科访问花的种类 (131 种) 最多, 极显著高于其他 10 科昆虫, 其次为隧蜂科和蝶翼科, 最少的是准蜂科和土蜂科 ($P < 0.01$) (图 4: C)。在 11 科蜂类群落中, 蜜蜂科群落的 Shannon-Wiener 多样性指数 (2.393) 最高, 其次是切叶蜂科和蝶翼科, 最低的是准蜂科和分舌蜂科 (图 4: D)。

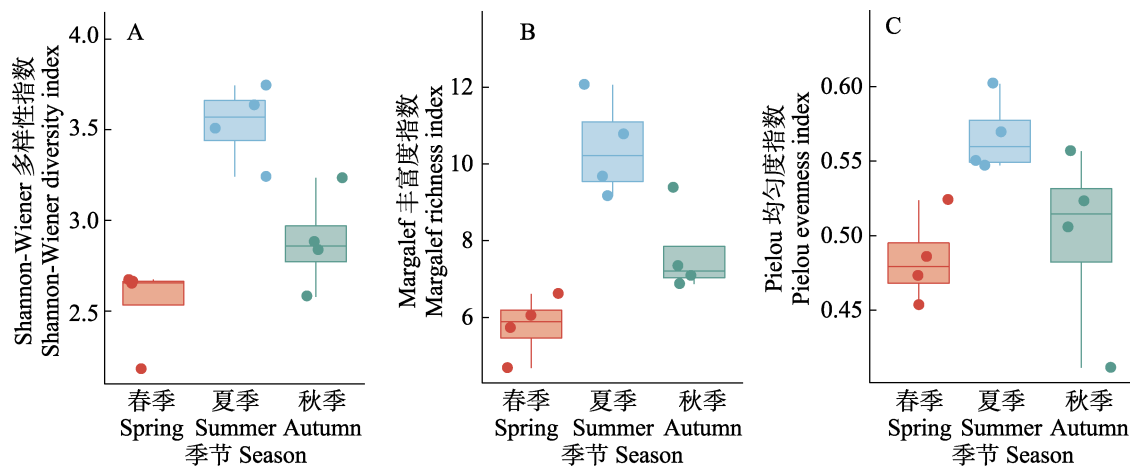


图 3 皖南地区每个采样季蜂类的多样性差异

Fig. 3 Diversity of sampling pollinator bees and wasps in each season in southern Anhui

A. Shannon-Wiener 多样性指数; B. Margalef 丰富度指数; C. Pielou 均匀度指数。
A. Shannon-Wiener diversity index; B. Margalef richness index; C. Pielou evenness index.

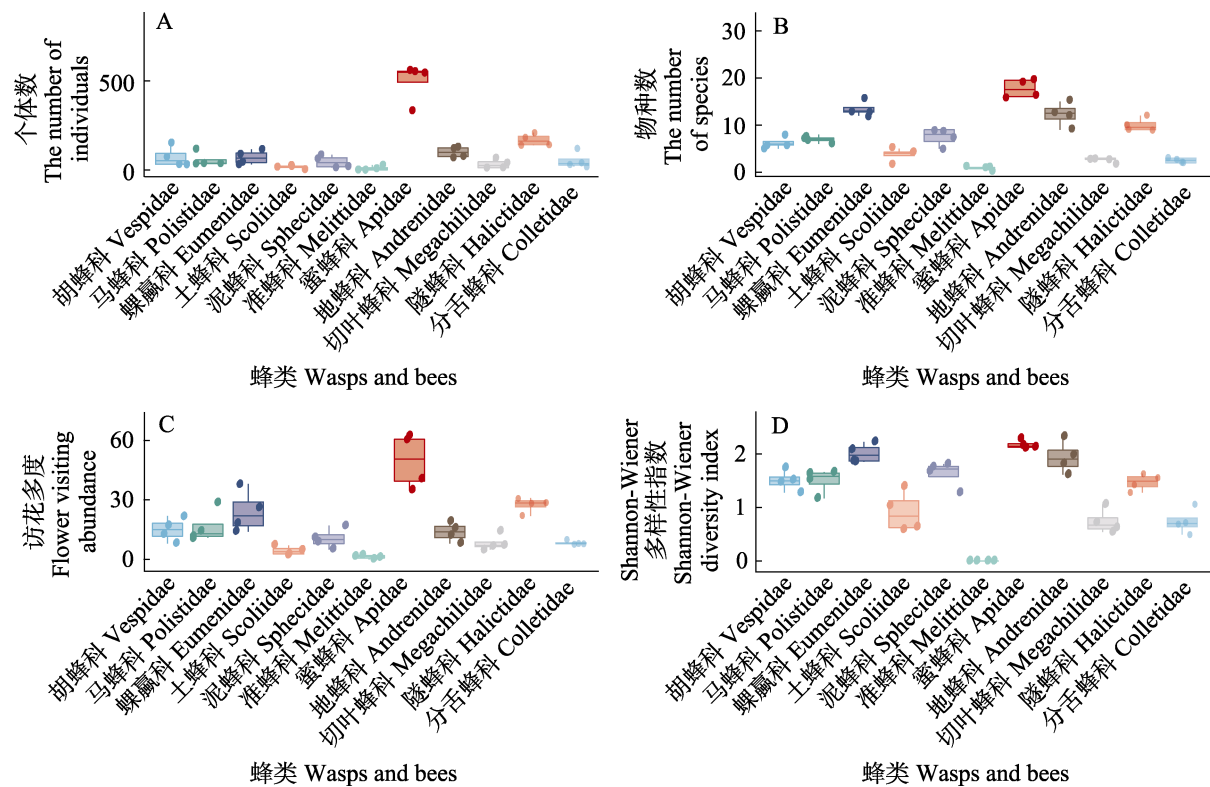


图 4 皖南地区传粉蜂类群落组成

Fig. 4 Community composition of pollinator bees and wasps in southern Anhui

A. 蜂类个体数量; B. 蜂类物种数量; C. 访花多度; D. Shannon-Wiener 多样性指数。
A. The number of individuals; B. The number of species;
C. Flower visiting abundance; D. Shannon-Wiener diversity index.

2.3 不同景观类型的传粉蜂类多样性特征

从植物类型上看, 在本研究采集的所有样本

中, 34 种农作物上共采集蜂类 940 头, 占有所有蜂类标本的 20.96%; 6 种经济作物上共采集蜂类 518 头, 占有所有蜂类标本的 11.55%; 34 种观赏

植物上共采集蜂类 444 头，占有蜂类标本的 9.90%；95 种野生植物上共采集蜂类 2 582 头，占有蜂类标本的 57.58%。

其中野生植物上蜂类群落的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数均极显著高于其他 3 种植物类型 ($P < 0.01$)。但蜂类群落的 Pielou 均匀度指数在 4 种植物类型群落间差异并不显著 (表 4, 图 5)。在野生植物上捕获到的传粉蜂类个体数量也极显著高于其他 3 种植物类型 ($P < 0.01$)。NMDS 显示农作物、经济作物和野生植物之间的蜂类群落组成差异明显，与观赏植物上的蜂类群落组成差异并不明显 (图 6)。线性回归结果显示，观赏植物丰富度与其所

吸引的传粉蜂类的多样性指数 (Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数) 均呈极显著的正相关关系 ($P = 0.007, P = 0.002$) (图 7: A, E)。但是在野生植物、农作物和经济作物上的相关性并不显著 ($P > 0.01$) (图 7: B-D, F-H)。

2.4 不同类型蜂类-植物传粉网络特征

不同蜂类类型与不同景观植物类型相互作用的传粉网络指标有所差别 (表 5)。从植物类型上看，蜂类-经济作物的网络连接度最高 (0.311)，其次是农作物 (0.097)、观赏植物 (0.080) 和野生植物 (0.059)；蜂类-野生植物的平均连接数最高 (3.000)，其次是农作物

表 4 皖南地区传粉蜂类涉及的植物群落类型多样性指数

Table 4 Diversity indices of the plant community types concerned with the pollinator bees and wasps in southern Anhui

样地 Study plots	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index				Margalef 丰富度指数 Margalef richness index				Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index			
	农作物 Crop	经济作物 Cash crop	观赏植物 Ornamental plant	野生植物 Wild plant	农作物 Crop	经济作物 Cash crop	观赏植物 Ornamental plant	野生植物 Wild plant	农作物 Crop	经济作物 Cash crop	观赏植物 Ornamental plant	野生植物 Wild plant
JX	2.941	2.085	2.988	3.324	7.374	3.476	6.705	11.233	0.571	0.426	0.572	0.526
ST	2.908	2.429	2.96	3.408	7.815	3.892	6.158	9.069	0.494	0.591	0.628	0.533
AQ	2.97	1.617	1.911	3.577	7.090	1.842	2.424	12.183	0.619	0.496	0.515	0.552
QY	3.293	2.622	3.261	3.551	7.956	5.441	8.132	11.426	0.582	0.46	0.698	0.534

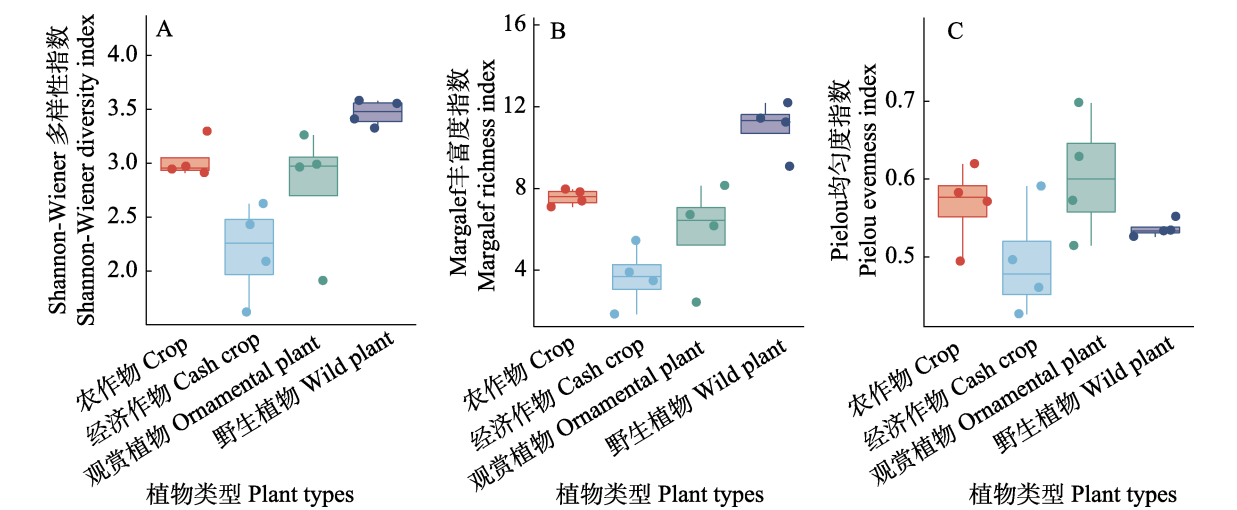


图 5 皖南地区 4 种植物群落类型上传粉蜂类的多样性差异

Fig. 5 Diversity of pollinator bees and wasps of four plant community types in southern Anhui

A. Shannon-Wiener 多样性指数; B. Margalef 丰富度指数; C. Pielou 均匀度指数。
A. Shannon-Wiener diversity index; B. Margalef richness index; C. Pielou evenness index.

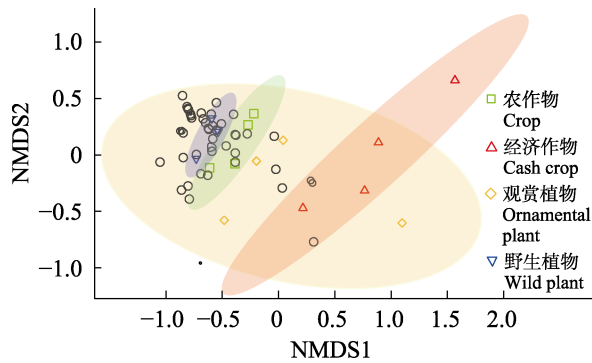


图 6 基于非度量多维尺度分析 (NMDS) 的皖南地区 4 种植物类型传粉蜂类群落组成 (stress = 0.103)

Fig. 6 Community composition of pollinator bees and wasps of four plant community types in southern Anhui based on non-metric multi-dimensional scaling (NMDS) analysis (stress = 0.103)

椭圆表示每种植物类型中心的标准差, 每一个点表示在一株花上的一次采样。绿色代表农作物; 红色代表经济作物; 黄色代表观赏植物; 蓝色代表野生植物。

Ellipses represent the standard deviation around the centroids of each plant type, each point represents a sample in a flower. Green represents crop; red represents cash crop; yellow represents ornamental plant; blue represents wild plant.

(2.275)、观赏植物(1.786)和经济作物(1.640); 蜂类-经济作物的生态位重叠参数最高(0.399), 其次是野生植物(0.268)、农作物(0.218)和观赏植物(0.124); 蜂类-野生植物的灭绝曲线系数最高(3.557), 其次是农作物(2.624)、观赏植物(2.008)和经济作物(1.677)。

从蜂类类型上看, 蜜蜂总科-植物的网络连接度(0.066)低于胡蜂总科(0.085); 平均连接数(3.349)高于胡蜂总科(2.465); 蜜蜂总科-植物的生态位重叠参数(0.204)和灭绝曲线系数(5.146)都高于胡蜂总科(0.166)和(4.797)。

3 讨论

近年来, 随着全球环境的持续恶化和人类活动干扰的不断加剧, 传粉昆虫的自然栖息地正面临着严重的威胁。而农林交错带半自然栖息地作为农业景观与自然生态系统的过渡带, 具有较高的生物多样性, 可为很多野生传粉昆虫提供庇护的场所, 对保护野生蜂类及授粉生态系统有重要意义 (Silva *et al.*, 2021)。本研究聚焦皖南地区

代表性农林交错带, 在 151 种开花植物上共采集了蜜蜂类 3 433 头, 占有采集传粉蜂类数量的 76.56%。可见蜜蜂类是皖南地区农林交错带中最主要的传粉蜂类类群, 在农林传粉生态系统中起主导地位, 这与很多前人研究的结论相吻合 (Kratschmer *et al.*, 2018; Winfree *et al.*, 2018; Theodorou *et al.*, 2020)。其中蜜蜂科蜂类采集的数量和种类都极显著高于其他 10 科蜂类, Shannon-Wiener 多样性指数也最高。同时, 蜜蜂科访花种类也极显著 ($P < 0.01$) 高于其他 10 科蜂类, 为农林作物储存了丰富的传粉资源, 也为交错带中的各类开花植物传播花粉, 为维持植物群落的稳定和多样性提供了可能。另外, 蜜蜂总科-植物传粉网络的灭绝曲线系数高于胡蜂总科, 表明开花植物的稳定性更容易受蜜蜂总科物种数量波动的影响, 蜜蜂总科对维持农林交错带传粉网络的稳定性尤为重要。可见蜜蜂科蜂类是皖南地区农林交错带传粉蜂类中的优势类群, 是传粉蜂类中最重要的传粉者。

作为农业景观与自然生态系统的重要纽带, 农林交错带栖息地的改变即自然景观转变为作物农业系统, 是野生蜂类数量下降的主要驱动因素 (Koh *et al.*, 2016; Sánchez-Bayo and Wyckhuys, 2019)。本研究结果显示, 野生植物上采集了蜂类 2 583 头, 占有采集蜂类的 57.58%。野生植物上蜂类群落的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数均极显著高于其他 3 种植物。可见在农林交错带中野生植物能承载更多数量和种类的传粉蜂类。这些在农林交错带中广泛存在的野生植物在授粉生态系统中发挥着重要的作用。野生植物能给更多种类和数量的野生蜂类提供食物来源, 这些传粉蜂类反过来又能为农林业中绝大多数的开花植物授粉。这也支持 Bucharova 等 (2017) 提出的农业生产应遵循丰富当地开花资源、提高花粉资源和景观范围内的野生植物物种多样化的原则。这些开花植物往往最容易受到人为因素干扰, 如过度的除草、农药和杀虫剂的滥用等, 这些行为会破坏野生植物的生存环境, 破坏野生蜂类的栖息地, 进而破坏当地的授粉生态系统。

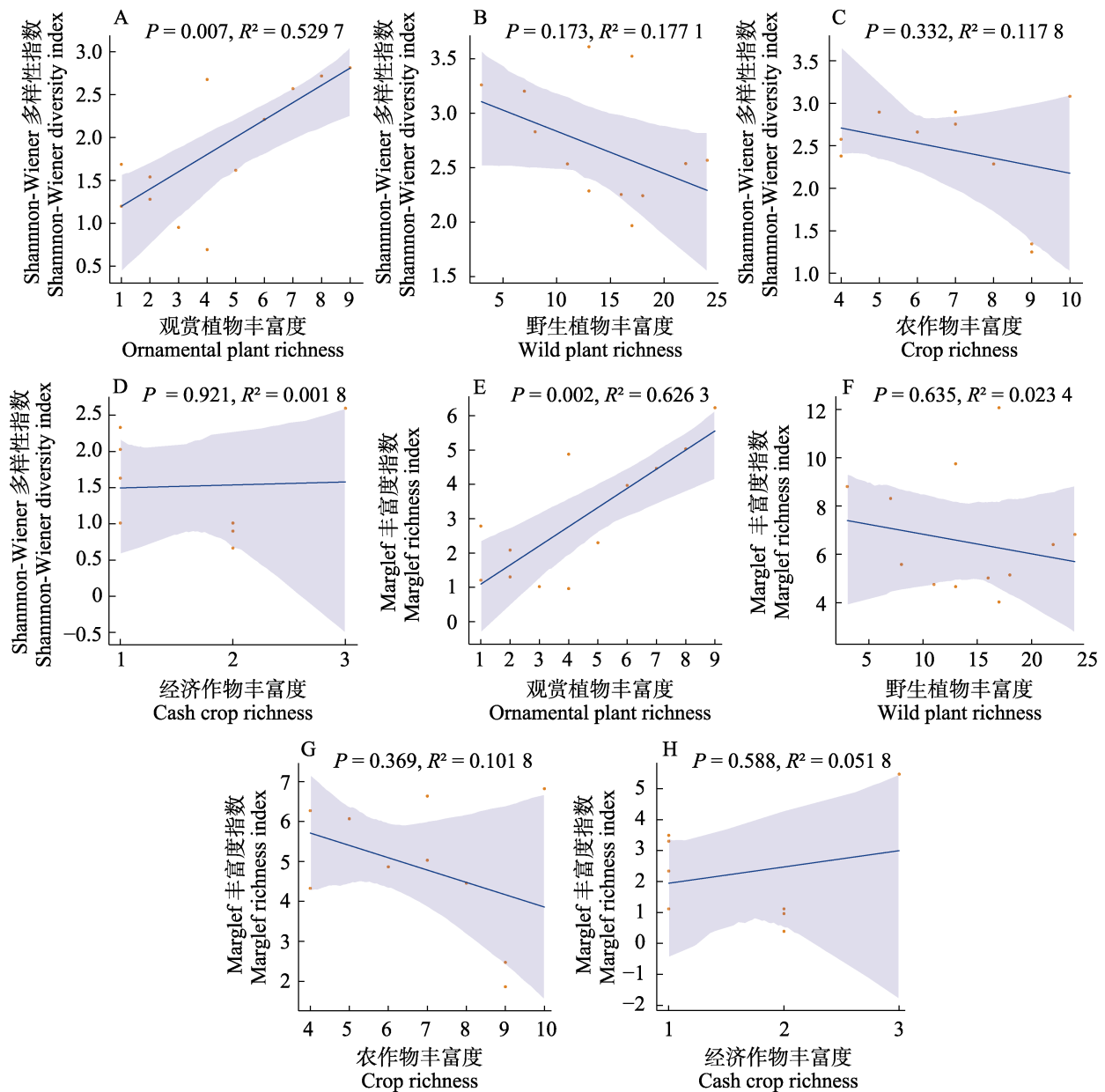


图7 植物丰富度与蜂类物种多样性指数的关系

Fig. 7 Relationships between plant richness and insects species diversity indices

- A. 观赏植物丰富度与昆虫 Shannon-Wiener 多样性指数的关系；B. 野生植物丰富度与昆虫 Shannon-Wiener 多样性指数的关系；C. 农作物丰富度与昆虫 Shannon-Wiener 多样性指数的关系；D. 经济作物丰富度与昆虫 Shannon-Wiener 多样性指数的关系；E. 观赏植物丰富度的关系与昆虫 Margalef 丰富度指数；F. 野生植物丰富度的关系与昆虫 Margalef 丰富度指数；G. 农作物丰富度的关系与昆虫 Margalef 丰富度指数；H. 经济作物丰富度的关系与昆虫 Margalef 丰富度指数。绘制的线表示预测的关系，阴影区域表示 95% 置信区间，红色的圆代表样点内的采样。
- A. Relationships between ornamental plant richness and insect Shannon-Wiener index; B. Relationships between wild plant richness and insect Shannon-Wiener index; C. Relationships between crop richness and insect Shannon-Wiener index; D. Relationships between cash crop richness and insect Shannon-Wiener index; E. Relationships between ornamental plant richness and insect Margalef index; F. Relationships between wild plant richness and insect Margalef index; G. Relationships between crop richness and insect Margalef index; H. Relationships between cash crop richness and insect Margalef index.
- Plotted lines show predicted relationships and the shaded areas indicate 95% confidence intervals.

Red circles correspond to samples in plot sites.

表 5 皖南地区不同类型传粉蜂类-植物二分网络指标

Table 5 Bipartite network metrics of different types of pollinator bees, wasps and their visiting plants in southern Anhui

网络指标 Network metrics	蜂类-农作物 Wasps and bees-crop	蜂类-经济作物 Wasps and bees-cash crop	蜂类-观赏植物 Wasps and bees-ornamental plants	蜂类-野生植物 Wasps and bees-wild plant	蜜蜂总科-植物 Apoidea-plants	胡蜂总科-植物 Vespoidea-plants
网络连接度 Connectance	0.097	0.311	0.080	0.059	0.066	0.085
平均连接数 Links per species	2.275	1.640	1.786	3.000	3.349	2.465
生态位重叠参数 Niche overlap	0.218	0.399	0.124	0.268	0.204	0.166
灭绝曲线系数 Extinction slope	2.624	1.677	2.008	3.557	5.146	4.797

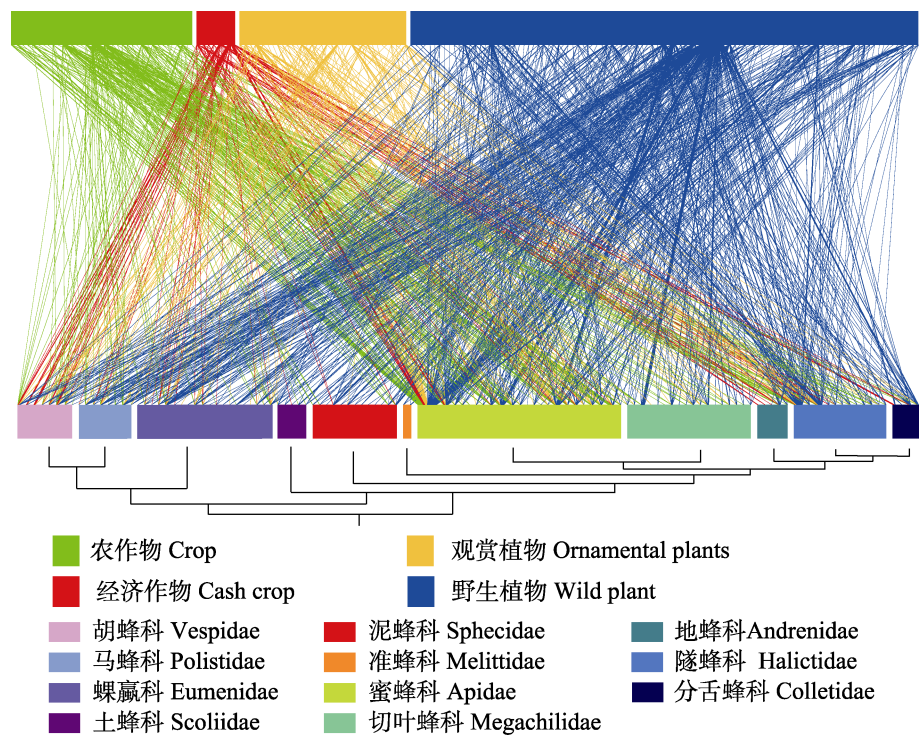


图 8 皖南地区传粉蜂类-植物互动关系的二分网络

Fig. 8 Bipartite networks of pollinator bees, wasps and their visiting plants in southern Anhui

网络上方为植物物种，下方为蜂类物种。长方形宽度与植物相互作用次数成正比；每一条线代表一次访花行为。

In the network, upper bars represent host plant species, and lower bars represent bees and wasps species. Rectangle width is proportional to the number of interactions of each bees and wasps species and plants; each line represents a flower visiting behavior.

农林交错带半自然生境可能是弥补野生授粉昆虫物种丰富度损失的一个因素（Shi *et al.*, 2021）。开花植物丰富的田地边缘可以为传粉蜂类提供重要的生命支持功能（Gardner *et al.*, 2021）。本研究结果显示，观赏植物的种类与它们所吸引传粉蜂类的 Shannon-Wiener 多样性指

数和 Margalef 丰富度指数都呈极显著的正相关。这也支持 St Clair 等（2020）的调查发现通过种植水果和蔬菜增加的植物多样性并没有支持大多数野生蜂类物种多样性的增加的结论。这也符合 Buhk 等（2018）提出的建议即在农业景观中混合种植多年生的花带，为传粉者提供一个多样

化的栖息地和觅食资源网络。可见通过种植观赏植物能给农林授粉生态系统带来更多种类的传粉蜂类, 而仅通过增加种植农作物或者经济作物的种类并不能达到这样的效果。尽管如此, 研究发现蜂类对经济作物的花粉资源竞争压力表现更大。反而观赏植物传粉网络中蜂类物种对花粉资源竞争压力表现更小, 有更多冗余的观赏植物花粉资源。可见蜂类更偏向于取食经济作物的花粉资源, 这可能是因为经济作物作为皖南地区农林交错带中的传统植物类型, 与蜂类协同进化历史更久, 花粉资源更适合蜂类取食。而近年来随着乡村人民生活水平的提高, 以及美丽乡村建设的进一步加快, 使种植观赏植物的热潮走进千家万户。虽然观赏植物种类的增加能支持蜂类的高多样性, 但相对于传统作物来讲, 观赏植物的花粉资源还不够吸引蜂类。因此, 在未来研究中, 尝试寻找更适合蜂类的观赏花卉品种才能更有效的利用观赏植物的优势。

农林交错带是一个由多种要素相互组合协调的整体景观。这种复合生态系统中生物多样性的稳定依赖于农林景观的整体结构, 并不仅仅依赖于其中某一种要素的功能。因此, 在农林交错带中积极的整合改善自然栖息地和农业景观, 可能是野生蜂类保护工作的更好的选择。基于上述研究结果, 针对保护农林授粉生态系统保护给出以下建议: 1. 保护野生蜂类(尤其是蜜蜂类)的自然栖息地环境。2. 对野生花草实施合理的管控, 限制人工或化学杀虫和过度的除草。3. 鼓励农户在田间或边界混合种植有利于吸引传粉昆虫的观赏性花卉, 来提高田地开花植物多样性及开花持续时间。

致谢: 中国科学院动物研究所牛泽清老师、袁峰老师以及重庆师范大学李廷景老师在本研究的蜂类标本鉴定工作中给予了热情帮助和支持, 在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

Andersson GKS, Birkhofer K, Rundlöf M, Smith HG, 2013. Landscape heterogeneity and farming practice alter the species

composition and taxonomic breadth of pollinator communities. *Basic and Applied Ecology*, 14(7): 540–546.

Baude M, Kunin WE, Boatman ND, Conyers S, Davies N, Gillespie MAK, Morton RD, Smart SM, Memmott J, 2016. Historical nectar assessment reveals the fall and rise of floral resources in Britain. *Nature*, 530(7588): 85–88.

Beduschi T, Kormann UG, Tschamtk T, Scherber C, 2018. Spatial community turnover of pollinators is relaxed by semi-natural habitats, but not by mass-flowering crops in agricultural landscapes. *Biological Conservation*, 221: 59–66.

Bennett JM, Steets JA, Burns JH, Burkle LA, Vamosi JC, Wolowski M, Arceo-Gómez G, Burd M, Durka W, Ellis AG, Freitas L, Li JM, Rodger JG, Ștefan V, Xia J, Knight TM, Ashman TL, 2020. Land use and pollinator dependency drives global patterns of pollen limitation in the Anthropocene. *Nature Communications*, 11: 1–6.

Branstetter MG, Danforth BN, Pitts JP, Faircloth BC, Ward PS, Buffington ML, Gates MW, Kula RR, Brady SG, 2017. Phylogenomic insights into the evolution of stinging wasps and the origins of ants and bees. *Current Biology*, 27(7): 1019–1025.

Bucharova A, Michalski S, Hermann JM, Heveling K, Durka W, Hölzel N, Kollmann J, Bossdorf O, 2017. Genetic differentiation and regional adaptation among seed origins used for grassland restoration: Lessons from a multispecies transplant experiment. *Journal of Applied Ecology*, 54(1): 127–136.

Buhk C, Oppermann R, Schanowski A, Bleil R, Lüdemann J, Maus C, 2018. Flower strip networks offer promising longterm effects on pollinator species richness in intensively cultivated agricultural areas. *BMC Ecology*, 18(1): 1–13.

Donkersley P, 2019. Trees for bees. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 270/271: 79–83.

Dormann CF, Jochen F, Nico B, Bernd G, 2009. Indices, graphs and null models: Analyzing bipartite ecological networks. *The Open Ecology Journal*, 2(1): 7–24

Emmerson M, Morales MB, Oñate JJ, Batáry P, Berendse F, Liira J, Aavik T, Guerrero I, Bommarco R, Eggers S, Pärt T, Tschamtk T, Weisser W, Clement L, Bengtsson J, 2016. How agricultural intensification affects biodiversity and ecosystem services. *Advances in Ecological Research*, 55: 43–97.

Fang W, Xu LL, 2018. Present situation of forest fire prevention in southern Anhui mountains and its countermeasures. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 46(20): 92–93. [方伟, 徐礼来, 2018. 皖南山区森林防火现状及对策. 安徽农业科学. 46(20): 92–93.]

Fortel L, Henry M, Guilbaud L, Guirao AL, Kuhlmann M, Mouret H,

- Rollin O, Vaissière BE, 2014. Decreasing abundance, increasing diversity and changing structure of the wild bee community (Hymenoptera: Anthophila) along an urbanization gradient. *PLoS ONE*, 9(8): 1–12.
- Gardner E, Breeze T, Clough Y, Smith HG, Baldock KCR, Campbell A, Garratt M, Gillespie M, Kunin W, McKerchar M, Potts S, Senapathi D, Stone G, Wäckers F, Westbury D, Wilby A, Oliver T, 2021. Field boundary features can stabilise bee populations and the pollination of mass-flowering crops in rotational systems. *Journal of Applied Ecology*, 58(10): 2287–2304.
- Hass A, Brachmann L, Batáry P, Clough Y, Behling H, Tscharnkte T, 2019. Maize-dominated landscapes reduce bumblebee colony growth through pollen diversity loss. *Journal of Applied Ecology*, 56(2): 294–304.
- Hurlbert SH, 1978. The measurement of niche overlap and some relatives. *Ecology*, 59(1): 67–77.
- Kennedy C, Lonsdorf E, Neel M, Williams N, Ricketts T, Winfree R, Bommarco R, Brittain C, Burley AL, Cariveau D, Carvalheiro L, Chacoff N, Cunningham S, Danforth B, Dudenhöffer J, Elle E, Gaines HR, Garibaldi L, Gratton C, Holzschuh A, Isaacs R, Javorek S, Jha S, Klein A, Krewenka K, Mandelik Y, Mayfield M, Morandin L, Neame LA, Otieno M, Park MG, Potts S, Rundlöf M, Sáez A, Steffan-Dewenter I, Taki H, Viana B, Westphal C, Wilson JK, Greenleaf SS, Kremen C, 2013. A global quantitative synthesis of local and landscape effects on wild bee pollinators in agroecosystems. *Ecology Letters*, 16(5): 584–599.
- 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(1608): 303–313.
- Knight TM, Ashman TL, Bennett JM, Burns JH, Passonneau S, Steets JA, 2018. Reflections on, and visions for, the changing field of pollination ecology. *Ecology Letters*, 21(8): 1282–1295.
- Koh I, Lonsdorf EV, Williams NM, Brittain C, Isaacs R, Gibbs J, Ricketts TH, 2016. Modeling the status, trends, and impacts of wild bee abundance in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(1): 140–145.
- Kratschmer S, Pachinger B, Schwantzer M, Paredes D, Guernion M, Burel F, Nicolai A, Strauss P, Bauer T, Kriechbaum M, Zaller JG, Winter S, 2018. Tillage intensity or landscape features: What matters most for wild bee diversity in vineyards? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 266: 142–152.
- Li TJ, Chen J, Chen B, 2021. Advances in classification of Scolidae (Hymenoptera: Vespidae). *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 38(3): 25–31. [李廷景, 陈洁, 陈斌, 2021. 土蜂科(膜翅目: 胡蜂总科)分类研究进展. 重庆师范大学学报(自然科学版), 38(3): 25–31.]
- Liu RR, Chen DL, Luo SD, Xu SJ, Xu HL, Shi XY, Zou Y, 2020. Quantifying pollination efficiency of flower-visiting insects and its application in estimating pollination services for common buckwheat. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 301: 107011.
- Memmott J, Waser NM, Price MV, 2004. Tolerance of pollination networks to species extinctions. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 271(1557): 2605–2611.
- Ollerton J, Winfree R, Tarrant S, 2011. How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos*, 120(3): 321–326.
- Ouyang F, Wang LN, Yan Z, Men XY, Ge F, 2019. Evaluation of insect pollination and service value in China's agricultural ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 39(1): 131–145. [欧阳芳, 王丽娜, 闫卓, 门兴元, 戈峰, 2019. 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, 39(1): 131–145.]
- Potts SG, Imperatriz-Fonseca V, Ngo HT, Aizen MA, Biesmeijer JC, Breeze TD, Dicks LV, Garibaldi LA, Hill R, Settele J, Vanbergen AJ, 2016. Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, 540(7632): 220–229.
- Prendergast KS, Ollerton J, 2021. Plant-pollinator networks in Australian urban bushland remnants are not structurally equivalent to those in residential gardens. *Urban Ecosystems*, 24(5): 973–987.
- Rader R, Bartomeus I, Garibaldi LA, Garratt MPD, Howlett BG, Winfree R, Cunningham SA, Mayfield MM, Arthur AD, Andersson GKS, Bommarco R, Brittain C, Carvalheiro LG, Chacoff NP, Entling MH, Foully B, Freitas BM, Gemmill-Herren B, Ghazoul J, Griffin SR, Gross CL, Herbertsson L, Herzog F, Hipólito J, Jaggar S, Jauker F, Klein AM, Kleijn D, Krishnan S, Lemos CQ, Lindström SAM, Mandelik Y, Monteiro VM, Nelson W, Nilsson L, Pattemore DE, Pereira NO, Pisanty G, Potts SG, Reemer M, Rundlöf M, Sheffield CS, Scheper J, Schüepp C, Smith HG, Stanley DA, Stout JC, Szentgyörgyi H, Taki H, Vergara CH, Viana BF, Woyciechowski M, 2016. Non-bee insects are important contributors to global crop pollination. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(1): 146–151.
- Sánchez-Bayo F, Wyckhuys KAG, 2019. Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232: 8–27.
- Seibold S, Gossner MM, Simons NK, Blüthgen N, Müller J, Ambarlı D, Ammer C, Bauhus J, Fischer M, Habel JC, Linsenmair KE, Nauss T, Penone C, Prati D, Schall P, Schulze ED, Vogt J, Wöllauer S, Weisser WW, 2019. Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level

- drivers. *Nature*, 574(7780): 671–674.
- Shao HM, 1990. A fuzzy clustering analysis of the climatic resource in the south of Anhui province. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2: 56–65. [邵华木, 1990. 皖南地区气候资源的模糊聚类分析. 安徽师大学报(自然科学版), 2: 56–65.]
- Shaw RF, Phillips BB, Doyle T, Pell JK, Redhead JW, Savage J, Woodcock BA, Bullock JM, Osborne JL, 2020. Mass-flowering crops have a greater impact than semi-natural habitat on crop pollinators and pollen deposition. *Landscape Ecology*, 35(2): 513–527.
- Shi XY, Xiao HJ, Luo SD, Hodgson JA, Bianchi FJJA, He HM, van der Werf W, Zou Y, 2021. Can landscape level semi-natural habitat compensate for pollinator biodiversity loss due to farmland consolidation? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 319: 107519.
- Silva FDS, Carvalheiro LG, Aguirre-Gutiérrez J, Lucotte M, Guidoni-Martins K, Mertens F, 2021. Virtual pollination trade uncovers global dependence on biodiversity of developing countries. *Science Advances*, 7(11): eabe6636.
- St Clair AL, Zhang G, Dolezal AG, O'Neal ME, Toth AL, 2020. Diversified farming in a monoculture landscape: Effects on honey bee health and wild bee communities. *Environmental Entomology*, 49(3): 753–764.
- Sun GF, Zou DW, Min MY, An SQ, Leng X, 2018. Biodiversity of farmland pollinators and its relationship with different land use patterns. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 46(21): 297–302. [孙广芳, 邹大为, 闵梦月, 安树青, 冷欣, 2018. 农田传粉者生物多样性及其与不同土地利用方式的关系. 江苏农业科学, 46(21): 297–302.]
- Taki H, Kevan PG, 2007. Does habitat loss affect the communities of plants and insects equally in plant–pollinator interactions? Preliminary findings. *Biodiversity and Conservation*, 16(11): 3147–3161.
- Theodorou P, Radzevičiūtė R, Lentendu G, Kahnt B, Husemann M, Bleidorn C, Settele J, Schweiger O, Grosse I, Wubet T, Murray TE, Paxton RJ, 2020. Urban areas as hotspots for bees and pollination but not a panacea for all insects. *Nature Communications*, 11(1): 1–13.
- Tylianakis JM, Morris RJ, 2017. Ecological networks across environmental gradients. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48(2017): 25–48.
- Vanbergen AJ, Initiative TIP, 2013. Threats to an ecosystem service: Pressures on pollinators. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(5): 251–259.
- Winfree R, Bartomeus I, Cariveau DP, 2011. Native pollinators in anthropogenic habitats. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 42: 1–22.
- Winfree R, Reilly JR, Bartomeus I, Cariveau DP, Williams NM, Gibbs J, 2018. Species turnover promotes the importance of bee diversity for crop pollination at regional scales. *Science*, 359(6377): 791–793.
- Wu YR, 1965. The Economic Insect Fauna of China. Beijing: Science Press. 1–83. [吴燕如, 1965. 中国经济昆虫志. 北京: 科学出版社. 1–83.]
- Zhang P, Lu LM, Wang SH, Zhao MS, 2018. Distribution characteristics of land use types under different terrain index gradients in southern Anhui province. *Soils*, 50(5): 1041–1045. [张平, 陆龙妹, 王世航, 赵明松, 2018. 基于地形梯度的皖南地区土地利用分布特征. 土壤, 50(5): 1041–1045.]