

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.03.005

张骁, 李林. 城市景观设计中本土植物与多样化花卉资源对传粉昆虫群落稳定性和多样性的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(3): 46-59.

城市景观设计中本土植物与多样化花卉资源 对传粉昆虫群落稳定性和多样性的影响

张骁¹, 李林²

1. 信阳学院 美术与设计学院, 河南 信阳 464000; 2. 福建农林大学 菌草与生态学院, 福州 350002

摘要: 在城市化进程中, 城市生态系统中的传粉媒介面临诸多挑战。城市绿地(UGS)在维持传粉昆虫群落的稳定性和多样性方面发挥着至关重要的作用。对中国中部城市(合肥市)的 8 个城市绿地(公园)进行传粉媒介调查, 重点关注植物和花卉性状及它们与传粉媒介的相互作用。通过考察景观尺度特征, 分析开花植物物种丰富度对传粉昆虫多样性的生态影响, 运用广义线性混合模型(GLMM)和冗余分析(RDA)等方法, 为传粉昆虫友好植物提供实证数据。研究结果表明: 种植本土木本植物及有吸引力的外来植物能够支持多样的传粉昆虫群体。鉴于传粉昆虫的偏好差异, 增加开花植物的物种丰富度有助于促进整体传粉昆虫的多样性。该结果强调了合理城市绿地设计和多样化花卉资源对恢复城市绿地传粉昆虫栖息地的关键作用。

关键词: 城市景观设计; 本土植物; 多样性花卉资源;

传粉昆虫; 多样性

中图分类号: Q968; TU242

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2025)03-0046-14

An Ecological Exploration of the Effect of Native Plants and Diverse Floral Resources on the Stability and Diversity of Pollinator Communities in Urban Landscape Design

ZHANG Xiao¹, LI Lin²

1. School of Fine Arts and Design, Xinyang University, Xinyang Henan 464000, China;

2. College of Mycology and Ecology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

收稿日期: 2024-03-11

基金项目: 河南省科技发展计划项目(232102310353); 信阳市哲学社会科学规划课题(2023JJ076)。

作者简介: 张骁, 硕士, 讲师, 主要从事环境设计及设计理论研究。

Abstract: With the acceleration of urbanization, pollinators in urban ecosystems face various challenges. Urban green spaces (UGS) play a crucial role in maintaining the stability and diversity of pollinator communities. This study conducted a pollinator survey in eight urban green spaces (parks) in the central China (Hefei) with focusing on the traits of plants and flowers and their interactions with pollinators. By examining the landscape-scale features, and analyzing the impact of flowering plant species richness on pollinator diversity, we employed the methods like Generalized Linear Mixed Models (GLMM) and Redundancy Analysis (RDA) to provide empirical data for pollinator-friendly plants. The results revealed that planting native woody plants and attractive exotic plants can support the diversified pollinator communities. Given the differences in preference of pollinators, increasing the species richness of flowering plants contributed to overall pollinator diversity. These findings emphasize the critical role of well-designed urban green spaces and diverse floral resources in restoring the habitats of urban pollinators.

Key words: urban landscape design; native plants; diverse floral resources; pollinators; diversity

在温带和热带地区,分别高达78%和94%的开花植物依赖动物授粉才能结果。昆虫作为最常见和最重要的传粉媒介,对陆地生态系统中许多初级生产者的生存至关重要^[1]。在生态系统中,昆虫传粉媒介是一个不可或缺的环节,它们对植物繁殖和生态系统的稳定性发挥重要作用。昆虫通过收集花粉并将其传递给其他植物,促使植物授粉和繁殖,这一过程对维持植物群落多样性和生态系统健康至关重要^[2]。传粉昆虫多样性与粮食安全、农业经济和贸易、人类健康和膳食平衡等因素有关^[3]。此外,传粉昆虫还是农作物、蔬菜、园艺、果树和饲料发展不可或缺的重要元素。然而,在全球范围内城市化导致的栖息地丧失和破碎化对传粉昆虫多样性产生了许多负面影响^[4]。此外,农药、除草剂和化肥施用量增加,以及疾病和寄生虫对传粉昆虫产生了负面影响,同时也间接导致植物多样性减少。

传粉昆虫持续减少对自然生态系统造成严重后果。例如,一些具有共同传粉媒介的植物物种在这种条件下可能会经历多样性突然急剧下降。维持传粉昆虫群落稳定性对植物群落、食物网和生态系统功能具有重要的生态和进化影响^[5]。传粉昆虫在农业生态系统和自然栖息地中已经得到广泛研究,但是在城市地区相关研究仍有待深入。城市绿地(Urban Green Space, UGS)中各种昆虫传粉者在这些生态系统中发挥着重要作用,此类传粉昆虫还可为城市作物、人类种植和管理的其他植物及野生植物提供授粉服务。因此,UGS可用于维持高水平的城市传粉昆虫多样性。然而,并非所有地下储层对传粉昆虫都有相同的影响,不同地下储层维持传粉昆虫多样性的能力存在很大差异,这取决于地下储层的特征,如植被群落结构、覆盖度、分布模式及管理措施。

尽管传粉昆虫在大多数生境中表现出高度的适应性,但在一些地区,包括自然生态系统和地下储层,传粉昆虫的减少已经超过了阈值。当导致传粉昆虫减少的影响因素达到临界点时,传粉昆虫种群可能会突然崩溃,而传粉昆虫持续丧失会引发一系列灭绝事件^[6]。由于大多数授粉昆虫选择在其活动范围附近筑巢,导致居住在城市的传粉昆虫容易受到城市结构的影响。2017—2023年,中国城镇化率从60.24%提高到66.16%,因此对城市地区传粉昆虫进行广泛研究非常重要。有学者认为,传粉昆虫的具体特征,如饮食偏好、栖息地要求、筑巢条件、体型、群居性以及发育过程等,可能会导致UGS传粉昆虫多样性差异^[7]。传粉昆虫多样性通常会随着周围景观中人类土地利用的增加而减少。有学者证明,复杂且异质的植被结构可以提高UGS中传粉昆虫的多样性^[8]。

花卉多样性和数量减少导致的食物限制被认为是传粉昆虫减少的多种原因之一。虽然传粉昆虫种群对花卉资源的依赖因类群而异,但传粉昆虫采收的花粉会直接投入到下一代。以传粉昆虫中比较典型的蜜蜂

为例, 养育 1 只独居蜜蜂幼虫需要 20 朵至数千朵花的花粉; 一个温带欧洲蜜蜂蜂群每年收获 120 kg 花蜜和 20 kg 花粉。越来越多的研究显示, 传粉昆虫会造访城市花卉, 花卉丰度与传粉昆虫之间存在正相关。这些研究结果表明, 改变城市土地用途, 精心设计城市景观, 增加花卉资源的可用性, 可以提高传粉昆虫的丰度和多样性。城市水果和蔬菜生产也依赖于当地的传粉昆虫, 这些传粉昆虫的生活史在季节的可预测点需要糖分和蛋白质。在城市环境中, 花卉资源多样性可以弥补城市化带来的生境破碎化和资源匮乏。多样化花卉资源的引入呈现了更广泛的食物选择, 为不同种类的传粉昆虫提供了适宜的花期和花色。这有助于增加传粉昆虫群落的多样性, 同时提供了更稳定的食物来源。本土植物在这一研究中扮演着重要角色, 因为它们天然适应当地环境, 能够提供适宜的生境条件, 吸引和满足各类传粉昆虫的需求。与引入外来植物相比, 本土植物更可能建立稳定的传粉昆虫群落, 有助于维持当地生态系统平衡。

通过对城市景观进行有针对性的植被设计, 尤其是在公共空间和城市绿化项目中引入本土植物和多样化花卉资源, 可以为传粉昆虫提供更适宜的栖息地和繁殖条件。这不仅有助于维持城市中的生态平衡, 还提高了城市景观的美感和生态可持续性。为此, 本文以安徽省合肥市为研究区域, 对城市景观设计中本土植物与多样化花卉资源对传粉昆虫群落稳定性和多样性做了深入探究, 实验结果反映了当地地下储层传粉昆虫群落的现状, 旨在为改善城市传粉昆虫栖息地和植物配置提供可能的方向。

1 相关理论

1.1 传粉媒介

“传粉媒介”是根据其功能定义的一大类生物体。尽管其中蜜蜂和蝴蝶可能最著名, 但传粉媒介跨越了一系列分类类别, 不仅包括黄蜂和蜜蜂总科的其他成员, 还包括飞蛾(占鳞翅目物种数约 90%), 以及属于双翅目食虫科的食蚜蝇(真正的苍蝇)^[9]。尽管鸟类和蝙蝠在世界上许多地区扮演着重要的传粉媒介角色, 但昆虫仍然是全球城市地区最为常见的传粉媒介^[10]。具体而言, 在对全球城市地区的研究中, 膜翅目(尤其是蜜蜂和熊蜂)是迄今为止最常记录的昆虫, 其次是鳞翅目和双翅目。

人们对传粉媒介或“拯救蜜蜂”运动的看法通常集中在欧洲蜜蜂, 它们以生产蜂蜜和为某些作物授粉而闻名。事实上, 野生蜜蜂对于主要作物授粉(例如苹果和蓝莓)同样重要, 甚至更重要。欧洲蜜蜂在世界上大多数地区都不是本地物种, 它们会与本地蜜蜂竞争有限的花卉资源。人们对蜜蜂的关注太多, 导致了对传粉媒介生物多样性及其价值的错误理解。因此, “传粉媒介”一词涵盖了具有不同需求的许多物种, 而不仅仅是蜜蜂。

尽管传粉昆虫对城市化的反应因性状和规模而异, 但通常情况下城市化会导致广义性和社会性物种数量及优势增加, 而专性物种则相对较少。例如, 在城市地区更容易发现短舌蜜蜂等广泛适应环境的物种, 而专业蜜蜂物种则较为罕见。通过选择不同植物进行栽培, 有可能吸引更多专业物种; 即使在城市中只存在普通授粉媒介类群, 这些类群仍然构成了一个多样化的群落。

了解城市化对传粉媒介更精细尺度的影响差异, 可以让城市景观设计师专注于为最有可能存在的传粉昆虫提供栖息地, 或采取明智的方法来改善缺失类群的栖息地适宜性^[11]。例如, 地面筑巢蜜蜂物种的多样性随着区域不透水表面增加而降低, 因为地面筑巢物种需要在裸露泥土中筑巢。相反, 在建筑密集的城市地区, 空洞筑巢和地上筑巢蜜蜂种类更加丰富, 因为它们能够在城市结构预先存在的空洞中筑巢。研究还表明, 永久性草地的存在也可以增加稀有蜜蜂物种的数量。因此, 在高度不透水的表面区域增加裸露土壤和永久性草地的设计可以使传粉昆虫群落多样化^[12]。栖息地斑块大小也会影响传粉昆虫的组成。包含较小栖息地斑块的郊区和城市地点显示小型蜜蜂、群居蜜蜂和独居空巢蜜蜂物种均有增加。此类研究结果可以根据更受青睐的物种偏好, 更好地指导城市地区植物选择和栖息地建设。

1.2 植物类型

1.2.1 本地植物与非本地植物

近年来,学者们一直在讨论本地和非本地观赏植物在支持当地生物多样性和生态系统功能方面的作用^[13]。鉴于本地植物与昆虫之间共同进化的悠久历史,非本地植物在城市景观中的广泛使用很可能导致合适的食物和栖息地丧失,从而造成全球昆虫数量下降。虽然传粉昆虫经常被城市景观中的各种非本地观赏植物所吸引,但越来越多的研究表明,在种植本地植物的景观中传粉昆虫的整体丰度和多样性最高^[14]。例如,Rahimi 等^[15]发现,在城市景观中蜜蜂的丰度和多样性在含有更多本地植物的花园中更高,因此花朵更丰富、植被更高大、覆盖物更多,潜在的筑巢地点也更多。同样,Palmerheim 等^[16]发现,在城市景观中受本地植物吸引的传粉昆虫多样性明显高于受观赏植物吸引的传粉昆虫多样性。此外,在景观中种植 8 种或更多本地植物可能是提高本地蜜蜂数量和多样性的“门槛”。这些研究结果表明,将本地植物融入城市景观对支持丰富多样的传粉昆虫群落至关重要。对支持专性物种而言,使用本地植物尤为重要。非寄主植物花粉不仅非专性物种的首选,还具有毒性。因此,在城市环境中缺乏足够数量的寄主植物花粉将导致城市蜜蜂物种多样性总体较低。尽管稀有的专性传粉昆虫对作物授粉生态系统服务贡献不大,但在城市环境中它们及其相关植物可以提供文化和美学生态系统服务价值,并促进整体环境的多样性。

除了非本地植物潜在的社会价值,一些非本地观赏植物也直接为传粉昆虫提供了资源。例如,许多流行的、易于生长的一年生和多年生植物,以及非本地开花树木对传粉昆虫非常有吸引力,并可提供丰富的花卉资源。不过,越来越多的证据表明,非本地植物会吸引一部分传粉昆虫,而且这些传粉昆虫的觅食偏好往往更倾向于广义性植物。这种对广义性传粉昆虫的支持在资源匮乏的城市环境中具有重要价值,然而也需要认识到其局限性,并为专性和广义性物种提供多样化的觅食资源。面对气候变化,考虑非本地植物的价值尤为关键。许多非本地植物具有较长花期,在早春和晚秋等“肩季”能够延长传粉昆虫寻找食源的时间窗口,这在气候变化情况下非常重要。因此,在确定哪些植物物种适合用于城市绿地时,不仅需要考虑到其原产地,还需要综合评估其风险、社会价值、对特定传粉昆虫群体的支持程度以及适应城市气候条件的能力。

1.2.2 花艺特征

除了植物来源(本地或非本地)之外,香味、颜色、形状、营养数量和质量等花卉特征也会影响传粉昆虫的吸引力,通过在花园或绿地中表现其相关花卉的性状(表 1),可以支持传粉昆虫群落最广泛的多样性。

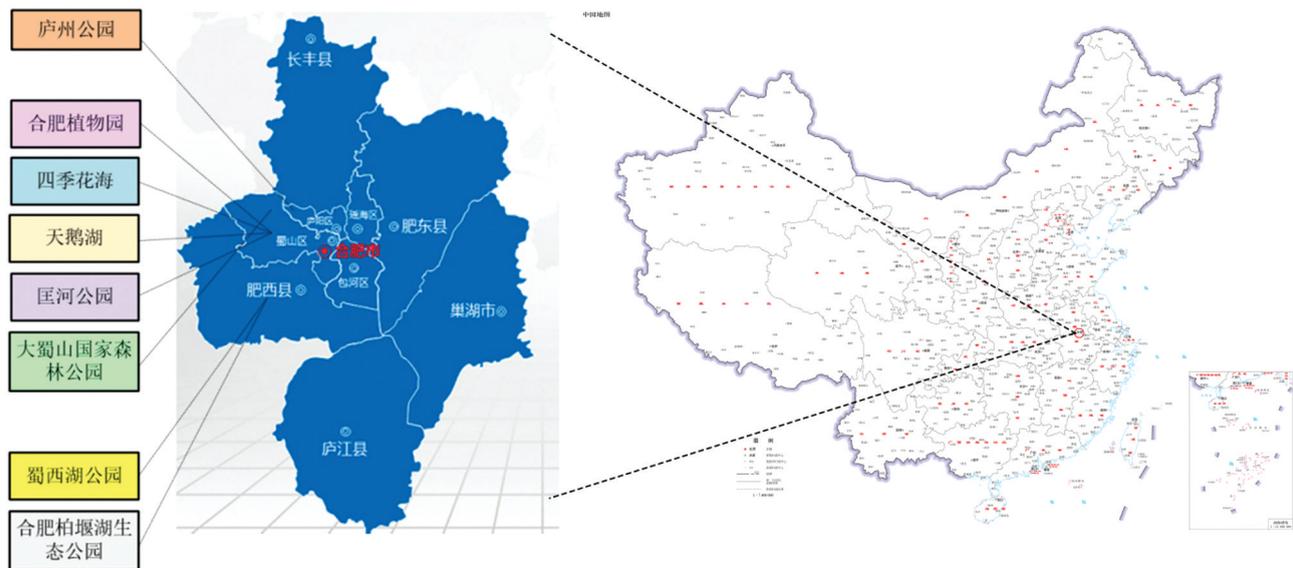
表 1 不同传粉昆虫对花卉花色及性状偏好

传粉昆虫	花卉性状
蜜蜂	主要为粉色,紫色和蓝色;其次为白色和黄色
黄蜂	深色亮眼的花色;更倾向于形状较为简单的花朵
鳞翅目(蝴蝶和白天觅食的飞蛾)	亮丽的花朵,尤其是红色、紫色和橙色的花朵;更倾向于开放的花朵
鳞翅目(夜间觅食的飞蛾)	白色或奶油色,香味浓郁
独居蜂	蓝色、紫色和白色的花朵;对花朵形状和深度有一定偏好
蚂蚁	白色、黄色和淡蓝色的花朵;易受到花朵表面特殊结构或分泌物吸引
甲虫	白色、绿色和淡黄色,且形状较为简单的花朵
双翅目(苍蝇)	扁平或碗状,伞形;白色或奶油色;发霉的香味

2 材料与方法

2.1 研究区域及取样地点

合肥市位于中国安徽省中部(30°57′—32°32′N, 116°41′—117°58′E), 全市总面积 11 445.1 km², 城市建设用地面积 528.5 km², 城市化率高, 为 82.28%。截至 2021 年 5 月, 常住人口为 937 万人。平均海拔为 20~40 m, 属亚热带季风湿润气候, 气温有明显的季节变化特征; 年平均气温 17.3 °C, 年平均降雨量为 1 240 mm。合肥市的植被由阔叶林、常绿林组成的针叶林、阔叶混交林组成。本研究在合肥市中心的 8 个公园进行了采样(图 1)。公园是典型的植物景观与文化元素相结合的城市绿地。公园的选择基于两个主要标准: ① 要求花卉的丰度和物种多样性较高, 以确保在研究中能够涵盖大量的植物物种。② 选择了一些流行的观赏植物和常见的自生植物作为研究对象, 这些植物在城市环境中形成单一-特异性区块, 从而极大地减少了不同植物种类对传粉者的影响。



审图号: GS(2023)2767 号

图 1 合肥市用于评估城市绿地影响传粉昆虫群落和多样性的样本点

2.2 开花植物调查

本研究对公园和绿地中的开花植物进行调查, 并根据以下标准选择了重点植物物种和斑块: ① 植物斑块中只有一个物种处于盛花期; ② 由于斑块大小影响传粉昆虫的觅食决策, 选择大小相似的斑块(约 16~25 m²); ③ 避开调查时处于阴凉处的斑块, 因为阳光照射可能会影响传粉昆虫的丰度; ④ 避开路边或其他人造表面的斑块, 以尽量减少人为干扰的影响。由于传粉昆虫观察困难, 选择高度不超过 2 m 的开花树木。由于公园和绿地中很少有植物达到 2 m 的高度, 排除这些地点少数较高植物对结果影响不大。由于人类干扰对授粉昆虫的造访造成影响, 因此行道树不包括在内。

在调查过程中, 本研究记录了以下植物与传粉昆虫的互动属性(表 2): ① 家族: 植物的科属, 按照世界粮食组织(WFO)植物名录进行分类。② 花型: 根据花朵的形态, 分为单一花朵和花序。③ 花色: 花朵的颜色, 包括白色、红/粉色、蓝/紫色、黄/橙色。④ 方向: 花朵的方向, 根据花朵主轴相对于水平位置的方向分为向上、水平、向下和多样方向。⑤ 对称性: 花朵的对称性, 分为辐射对称和两侧对称。⑥ 花冠筒长度: 花冠筒的长度, 使用数字卡尺从每个物种中随机选择 20 朵花进行测量。⑦ 植物高度: 植物的高度(m), 使用数字卡尺从每个物种中随机选择 20 个个体进行测量。⑧ 花朵形状: 根据 Kugler 形态分类法, 将花朵形状分为 10 种类型, 包括盘状和碗状花、漏斗花、钟形花、茎盘花、唇瓣花、旗状

花、头状花序、穗状花、刷状花和捕虫花。⑨ 本地/外来状态:植物在中国本地或外来状态,包括本地物种、人工栽培物种、非入侵性外来物种和入侵物种。⑩ 本地自然生长植物:本地自然生长的植物数量。⑪ 生活形态:植物的生活形态,分为一年/二年生草本、多年生草本和木本植物。⑫ 观察到的花朵数量:在调查期间观察到的花朵数量。⑬ 传粉昆虫访问情况:不同种类传粉昆虫访问的次数。⑭ 访问率:每朵花每小时平均接收到的访问次数。

表2 植物与传粉昆虫互动属性表

类别	含义
家族	植物的科属,按照 WFO 植物名录分类
种类	植物物种
缩写	植物物种的缩写
花型	单一花朵、花序
花色	白色、红色/粉色、蓝色/紫色、黄色/橙色
方向	向上、水平、向下和不同方向
对称性	辐射对称、两侧对称
花冠筒长度	花冠筒长度,使用数字卡尺从每个物种中随机选择 20 朵花进行测量
植物高度	植物高度/m,使用数字卡尺从每个物种中随机选择 20 个个体进行测量
花朵形状	Kugler 形态分类,包括:1-盘状和碗状花;2-漏斗花;3-钟形花;4-茎盘花;5-唇瓣花;6-旗状花;7-头状花序;8-穗状花;9-刷状花;10-捕虫花
本地/外来状态	植物在中国本地/外来状态,包括本地物种、人工栽培物种、非入侵性外来物种和入侵物种
本地自然生长植物	本地自然生长的植物数量
生活形态	一年/二年生草本、多年生草本、木本植物
观察到的花朵数量	在调查期间观察到的花朵数量
传粉昆虫访问情况	不同种类传粉昆虫访问的次数
访问率	每朵花每小时平均接收到的访问次数

2.3 传粉昆虫取样

使用盘式诱捕和扫网捕获传粉昆虫。盘式诱捕是在广泛的地理范围内收集传粉昆虫最有效的方法。然而,盘式诱捕可能会对传粉昆虫群落组成的估计出现偏差,因为它不成比例地吸引了小型多面性蜜蜂,并在收集较大的社会性蜜蜂(例如蜜蜂和熊蜂)方面表现不佳。尽管有缺点,盘式诱捕仍然是传粉昆虫研究中最常见的采样方法之一。扫网和手动搜索通常与盘式诱捕结合实施,以克服偏差。

在5-8月晴天、微风、无降水的日子里,大约每4周进行一次调查。对于盘式诱捕,每个月在开阔草原的每个绿地设置两组盘式诱捕器(黄、白、蓝),彼此相距至少50 m。在进行主动采样时,将它们留在原位2 h。回收诱捕器后,收集昆虫并将其保存在乙醇(70%)中,然后在实验室进行处理。采用扫网方法,使用长柄扫网在每个地点半径25 m范围内捕获不被陷阱吸引的蜜蜂,持续约30 min。在放置盘式诱捕器之前或之后1~5 d进行扫网,避免采样方法之间的干扰。由于传粉昆虫全天活动可能会有所不同,因此每个月都会以不同的顺序访问地点,以便在早上和下午都对地点进行采样。用乙酸乙酯蒸气对捕获的昆虫实施安乐死。一些明确可识别的昆虫在田间被识别出来,但大多数昆虫被固定、干燥并贴上标签,并暂时储存在变性异丙醇中以供专家识别。将形态上相同物种作为单一物种聚集体一起分析,所有标本均按物种或形态进行标记和分类。最后,将传粉昆虫分为6种功能形态类型:① 蜜蜂(东方蜜蜂和欧洲蜜蜂);② 独居蜂(来自木蜂科、益蜂科、蜜蜂科、巨蜂科、短喙蜂科和裂蜂属的蜜蜂);③ 黄蜂(黄蜂科和伊西蜜蜂科);④ 鳞翅目昆虫(来自弄蝶科、粉蝶科、凤蝶科、蛱蝶科、天蛾科等的所有蝴蝶和蛾类个体);⑤ 双翅目昆虫(食蚜蝇科、花蝇科、肉蝇科等的食蚜蝇和其他蝇类);⑥ 蚂蚁。

2.4 统计分析

本研究的数据分析和建模工作均在 R 软件的 4.0.5 版本中完成。使用莫兰指数检验(Moran's I test)检查了传粉昆虫物种丰度和多样性的空间自相关性。其中,莫兰指数检验是一种用于检验空间自相关的统计方法,可以确定数据是否在空间上呈现出显著的集聚或分散趋势。

莫兰指数(Moran's I)的计算公式为:

$$I = \frac{N}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

其中, N 是样本点的数量; S_0 是权重矩阵 \mathbf{W} 的总权重; w_{ij} 是样本点 i 和 j 之间的权重; x_i 和 y_j 分别是传粉昆虫物种丰度和多样性的观测值, \bar{x} 和 \bar{y} 分别是这两个变量的均值。根据景观变量研究城市景观中授粉昆虫群落和多样性的变化。使用具有二项式误差分布的广义线性混合模型(GLMM),评估植被、植物和花卉性状的比例对样地授粉昆虫丰度的影响。GLMM 的计算公式为:

$$\mathbf{g}(\mu_i) = \mathbf{L}_i \boldsymbol{\beta} + \mathbf{Z}_i \mathbf{b}_i \quad (2)$$

其中, μ_i 是期望的响应变量; \mathbf{L}_i 是固定效应的设计矩阵; \mathbf{Z}_i 是随机效应的设计矩阵; $\boldsymbol{\beta}$ 是固定效应的参数向量; \mathbf{b}_i 是随机效应的参数向量,表示个体或观测单位的随机效应。

本研究使用高斯误差分布,因为它最符合模型假设,并通过“DHARMA”包进行验证。模型选择采用向后逐步方法,以获取基于 AICc 的最佳拟合。最佳拟合通过使用“LmerTest”包进行逐步变量选择得到,并检查了多重共线性,因为几个景观和局部变量是相关的。响应变量依次为每个公园、每年(2022 年、2023 年)和每两个月(3 月至 4 月、5 月至 6 月、7 月至 8 月、9 月至 10 月)的传粉昆虫群落和多样性。其他变量包括作为随机效应的调查地点和传粉昆虫种类。本次研究中排除了稀有物种,即占蜜蜂捕获总量少于 1/1 000 的物种,这也排除了两年内仅在一个地点出现的蜂种。固定效应为每个调查点周围不透水表面的比例(200 m 半径、500 m 半径和 1 000 m 半径),以及给定两个月时间段内当地植物群落的记录描述符。这些描述符包括开花植物物种丰度、本地植物物种比例、花密度(每平方米平均花单位数)以及多样化花卉的性状。此外,我们将调查地点和年份中嵌套的时期视为随机效应,并将管理的蜜蜂排除在分析之外,因为它们在城市栖息地的存在很大程度上取决于当地的蜂巢密度。对于每个模型,只保留一个不透水表面的比例,即最适合数据的比例。

为探索各传粉昆虫群对植物和花卉性状的偏好,使用 R 软件包 Vegan 进行冗余分析(RDA)。本研究中 RDA 用于揭示植物和花卉性状以及它们与传粉媒介的相互作用。RDA 通过最大化解释变量对响应变量的方差来确定主要的解释变量,从而帮助理解城市景观设计中植物和花卉与传粉媒介的关系。植物物种被设定为样本,各传粉昆虫群对各植物物种的相对访问比例被指定为响应变量。生命形式、原生/外来状态、花型、颜色、对称性、朝向、花形、筒长和株高被用作解释变量。RDA 的计算公式为:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\mathbf{B} + \mathbf{E} \quad (3)$$

其中, \mathbf{Y} 是响应变量的矩阵; \mathbf{X} 是解释变量(植物和花卉性状)的矩阵; \mathbf{B} 是系数矩阵,表示解释变量对响应变量的贡献; \mathbf{E} 是残差矩阵。

为验证 RDA 的适用性,构建了去趋势对应分析(DCA)(梯度长度 = 3.26)。对响应变量矩阵进行了海灵格变换。为了区分单个变量的贡献,使用“rdacca.hp”软件包进行分层分析,量化每种植物和花卉性状的相对重要性。由于生命形式和对称性具有较高的共线性,因此未将其纳入该模型。在总体模型中,

花形状的方差膨胀因子(VIF)为3.36。方差膨胀因子是多重共线性的度量,用于评估模型中自变量之间的相关性。当VIF的值超过10时,通常会引起担忧,表明存在较高的共线性。在这种情况下,3.36的VIF表明花形状与其他自变量之间存在一些相关性,但并未达到引起担忧的水平。进一步评估这种相关性对模型参数估计的影响,发现它对模型的整体解释性和预测性产生的影响相对较小。考虑到花形状很重要,而且也是一个分类变量,VIF值也达到了临界值,我们决定将该变量纳入模型。由于蜜蜂访问率很高,它们可能会在分析中占据主导地位,并掩盖其他授粉昆虫的模式,于是进行了单独分析,排除了蜜蜂的数据。其他授粉昆虫群对每种植物的相对访问比例被指定为响应变量。这两项分析所显示的偏好都包含在最终结果中。在这一分析中排除了受管理的蜜蜂以及稀有传粉媒介物种,这些物种被定义为占所有捕获量不到1/1 000的物种或仅在两个时期出现在一个地点的物种。

传粉昆虫群落对植物和花卉性状的偏好可在RDA双轴图中得到解释。不过,双轴图仅显示响应变量与解释变量之间的关联程度。我们对环境变量(生命形式、原生/外来状态、花型、颜色、对称性、方向和花朵形状)进行了测试,以确定传粉昆虫的偏好。如果这两项分析表明传粉昆虫群体对某些植物和花卉性状有偏好,则将其纳入最终结果。对于每个类别,假设传粉昆虫群落对分类花卉性状(即单花)没有偏好,则传粉昆虫*i*对具有花卉性状*n*的花朵的访问次数为:

$$Q_{in} = \frac{F_n Q_i}{F} \quad (4)$$

其中, F_n 是具有花卉性状*n*的花朵数量, F 是所有观察到的花朵总数量, Q_i 是授粉昆虫群体*i*在调查期间记录到的所有访问次数。当预期值大于(等于)5时,采用Pearson卡方检验;当预期值小于5时,采用Fisher精确检验。

3 结果与分析

3.1 花卉资源对传粉昆虫群体和多样性的影响分析

分析中总共纳入了35 467个植物与传粉昆虫的相互作用,其中包括1 016个传粉昆虫个体(6个传粉昆虫群体)、98个植物物种和品种(37个科)。蜜蜂、双翅目和独居蜂占植物—传粉昆虫相互作用的94.62%。研究地点支持多种外来观赏植物,其中非入侵外来物种61种,入侵物种3种(喜旱莲子草、一年蓬、马缨丹)。本地自发物种包括泽苔草、蛇莓、泽珍珠菜、通泉草、黄花苜蓿、草木樨和酢浆草。最常见的植物是菊科、唇形科、蔷薇科和豆科。

在本研究中,植被比例与传粉者数量之间缺乏相关性可能是由于城市绿地中花卉资源以及特定植物的丰度和密度分布不均匀所致。因此,花卉资源的可用性和生境质量不能简单地用景观层面的植被数量来衡量,需要使用更详细的景观指标和识别技术来探索景观变量对传粉昆虫丰度和多样性的影响。

将本土植物与多样化花卉融入城市景观设计对支持丰富、多样化的传粉昆虫种群至关重要。本土植物的引入具有多重优势:①通常更为抗逆,更容易在城市环境中生存和繁衍;②这些植物更符合当地传粉昆虫的生态需求,创造了更为有利的传粉网络。多样化的花卉资源同样是吸引不同昆虫的关键,一些传粉昆虫更喜欢特定颜色或形状的花朵,因此花卉的多样性可以吸引更多种类的昆虫,形成更为复杂和稳定的生态系统。

3.2 开花植物的访问率和传粉昆虫组合分析

不同植物种类的访问率差异很大,其中南天竹、矢车菊和玻璃苣对传粉昆虫最具吸引力。相比之下,四季秋海棠、角堇(蓝色)和紫娇花的吸引力最差。访问率(每朵花每小时接受的平均访问次数)最高的15种植物如图2所示。

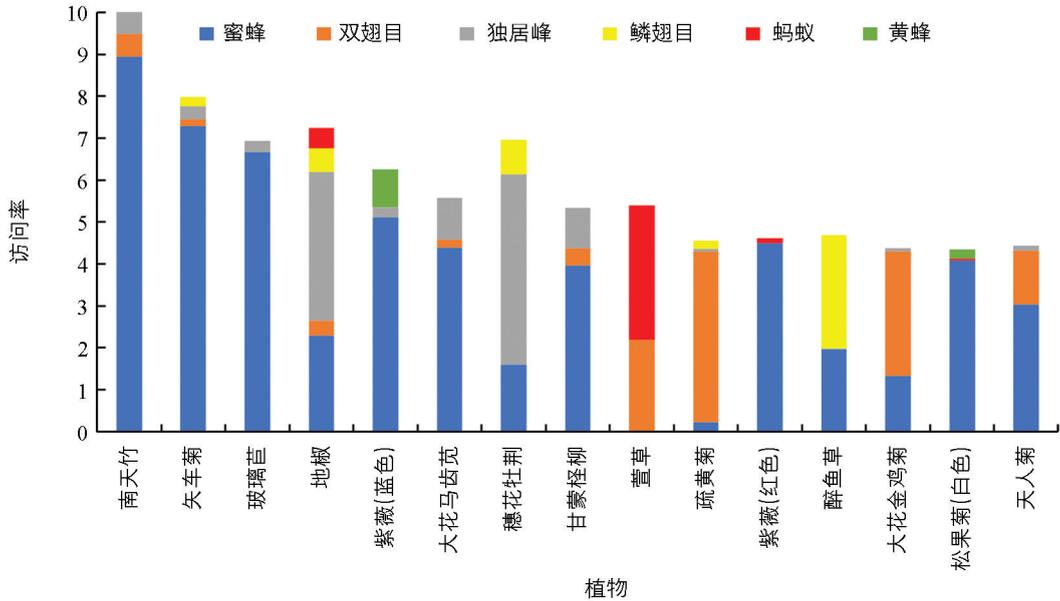


图 2 15 种最具吸引力的植物物种访问率与传粉昆虫群落比例

对于最丰富的传粉昆虫群落来说,蜜蜂主要访问南天竹、矢车菊和琉璃苣。双翅目被菊科物种(疏黄菊、天人菊和大花金鸡菊)所吸引。独居蜂访问量最大的植物是地椒、穗花牡荆、大花马齿苋和甘蒙柽柳,如图 3 所示。

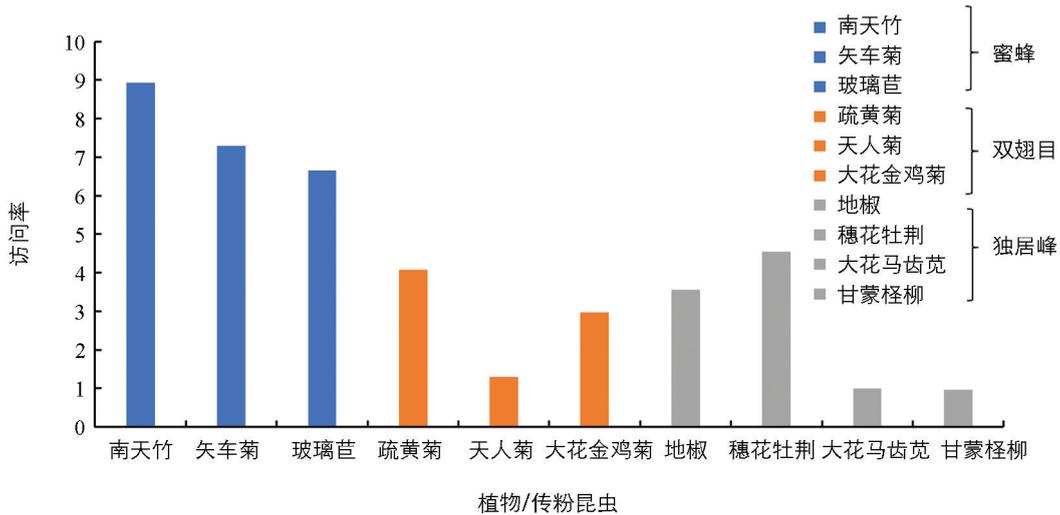


图 3 蜜蜂、双翅目和独居蜂喜欢的植物种类及其访问率

由图 3 可知,原生木本植物南天竹、矢车菊和琉璃苣被列为对蜜蜂和双翅目最具吸引力的植物。这些物种的特点是花序密集,由唇形或盘形/碗形小花组成。同一科内的相关植物通常具有相似的花形态,特别是花形和花的对称性。因此,密切相关的物种可能具有相似的传粉昆虫组合。然而,相关物种的访问率差异很大。例如,羽扇豆、野苜蓿和蛇莓的吸引力远低于同一科的同类植物。因此,本研究认为密切相关的植物物种之间花色、花型、株高或生活习性的差异对传粉昆虫的吸引具有重要影响。

植物本土或外来状态对 UGS 上的传粉昆虫数量没有显著影响,但相对比例的访问分析显示蜜蜂更偏好非侵入性的外来植物。在本研究中,蜜蜂(主要是亚洲蜜蜂)经常访问外来植物(如南天竹、矢车菊和琉璃苣),这种相互作用可能增强了亚洲蜜蜂的优势。传粉昆虫对植物生命形式也有不同偏好,这表明一个既有木本物种又有草本物种,结构复杂的植物群将更有益于更多的传粉昆虫群落。本研究结果也证实了双翅目对一年生或两年生草本植物的偏好,同时还确定了一些有吸引力的木本植物,如南天竹、地椒、紫薇、穗花

牡荆、甘蒙怪柳和醉鱼草等。在 UGS 中, 木本植物的更替频率没有草本植物那么高, 因此它们可能为传粉昆虫社群提供更为稳定的花卉资源。

3.3 植被、植物和花卉性状的比例对样地传粉昆虫数量的影响分析

对于总授粉昆虫、蜜蜂和独居蜂, 每个观察期的样地个体数量不受植被、植物和花卉性状比例的影响(图 4a、图 4b、图 4c)。对于鳞翅目, 盘状/碗状花的个体数量最低(图 4d, 表 3), 个体数量随着花冠筒长度的增加而减少(图 4d)。对于双翅目, 样地个体数量受到花色的影响(图 4e), 白色、红色/粉色和黄色/橙色花朵的个体数量高于蓝色/紫色花朵(表 3)。图 4 中的 p 值表示显著性水平, $p < 0.05$ 表示结果具有统计学意义; z 值表示标准正态分布的统计量, z 值的绝对值越大, 表示差异越显著。

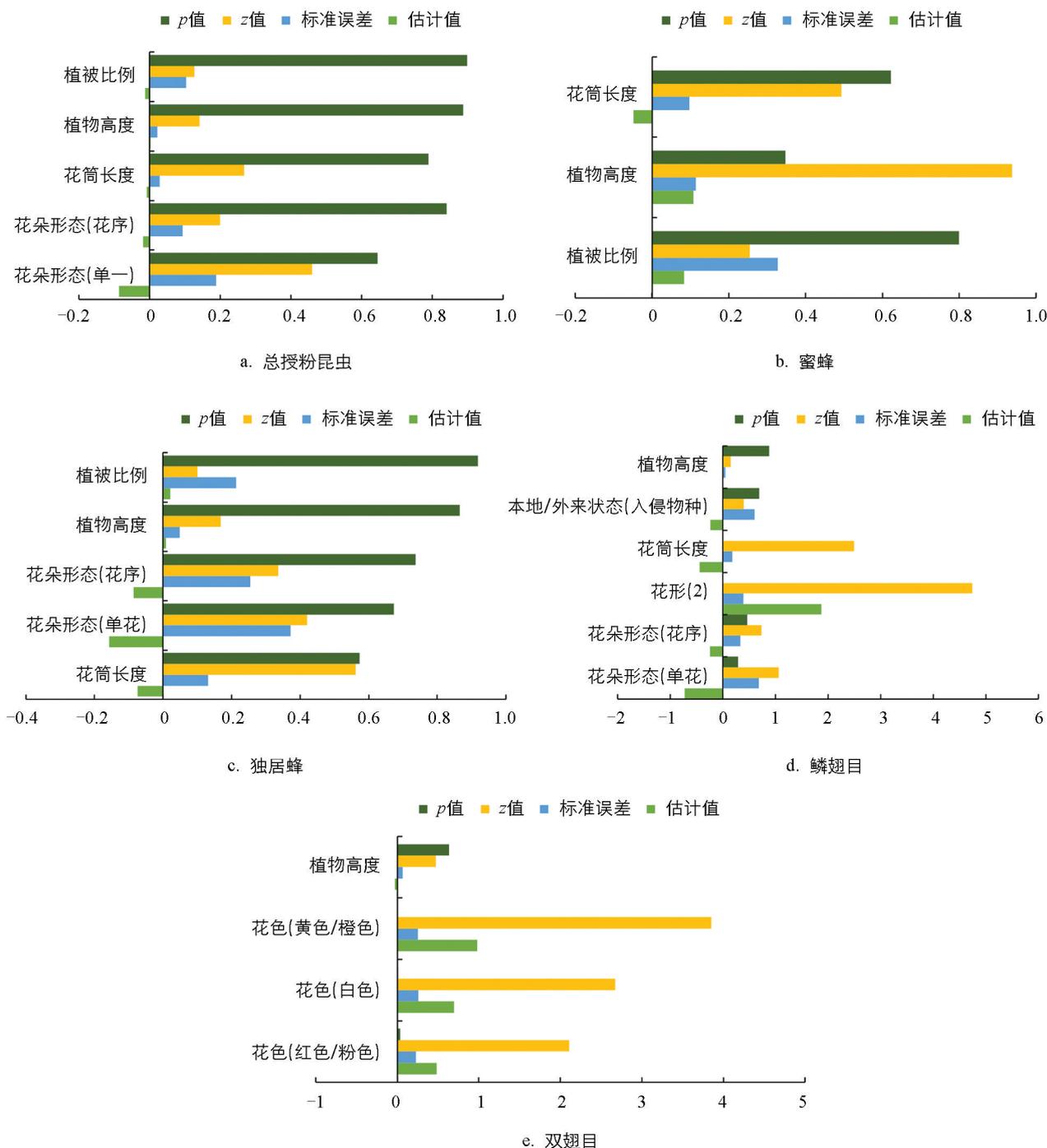


图 4 探究植被、植物和花卉性状比例对传粉昆虫群丰度影响的 GLMM 参数估计结果

表 3 花形和花色对每个观察期内该地块传粉昆虫个体数量的影响统计(30 min)

传粉昆虫	花形/花色	地块每期的传粉昆虫数量	显著性差异程度
鳞翅目	盘形/碗形	0.14	B
	漏斗形	0.7	A
	钟形	0.17	AB
	茎盘形	0.48	AB
	唇瓣形	0.56	A
	旗状花	0.21	AB
	头状花序	0.52	A
双翅目	白色	1.04	A
	红色/粉色	0.91	A
	蓝色/紫色	0.41	B
	黄色/橙色	1.42	A

注：表中大写字母 A、AB、B 通常表示不同水平之间的显著性差异，这些标记通过进行统计检验来确定，表示不同组别或条件之间的显著差异程度。具体来讲，A 表示在统计检验中，该组别与其他组别之间存在显著差异；AB 表示在统计检验中，该组别与某些组别之间存在显著差异，但与另一些组别无显著差异；B 表示在统计检验中，该组别与其他组别之间无显著差异。

3.4 景观变量对传粉昆虫出现概率相关性的影响分析

在本研究中，通过对合肥市 8 个公园的不透水表面比例进行不同半径范围(200 m、500 m、1 000 m)比较，探究景观变量对传粉昆虫出现概率的相关性影响。具体为：对 8 个公园在不同半径范围内的不透水表面比例进行详细测量，并在各个地点和半径范围内观察传粉昆虫群落的多样性及传粉昆虫物种的出现概率，结果如表 4 所示。

表 4 景观设计中不透水表面比例对传粉昆虫物种出现概率的影响结果

地点编号	不透水表面比例			传粉昆虫物种出现概率		
	半径 200 m	半径 500 m	半径 1 000 m	半径 200 m	半径 500 m	半径 1 000 m
庐州公园	0.15	0.25	0.35	0.572	0.432	0.321
合肥市植物园	0.12	0.20	0.30	0.522	0.396	0.285
四季花海公园	0.18	0.30	0.40	0.622	0.465	0.354
蜀西湖公园	0.20	0.35	0.45	0.672	0.526	0.415
大蜀山国家森林公园	0.25	0.40	0.50	0.722	0.567	0.456
合肥市柏堰湖生态公园	0.30	0.45	0.55	0.772	0.668	0.557
天鹅湖公园	0.22	0.32	0.42	0.642	0.534	0.423
匡河公园	0.28	0.38	0.48	0.702	0.589	0.478

由表 4 的实验结果可知，不透水表面比例的增加在不同地点均呈现出一致的趋势，随着半径范围扩大，不透水表面比例逐渐升高。反之，随着半径范围增加，传粉昆虫物种出现概率呈下降趋势。

3.5 传粉媒介群体对植物和花卉性状的偏好影响分析

在涵盖所有传粉昆虫群体的冗余分析(RDA)中，结果显示前两个轴共同解释了大部分性状变异，第一轴(RDA1)解释了数据约 49.21% 的变异，而第二轴(RDA2)解释了约 30.32% 的变异(图 5)。花卉方向和花冠筒长度对传粉昆虫访问的组成产生了显著影响(表 5)。植物/花卉性状与传粉昆虫群体之间的关联在

RDA 双标图中得以展示。在不包含蜜蜂数据的 RDA 结果在很大程度上与整体模型一致。

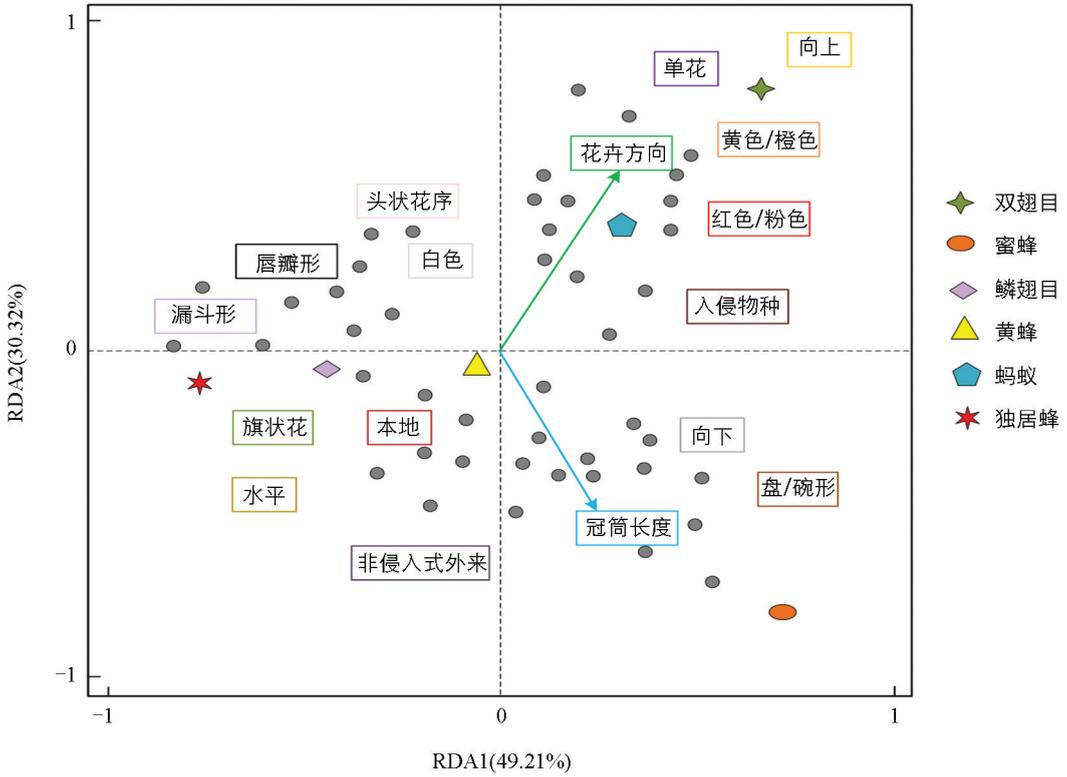


图 5 植物和花卉性状与传粉昆虫群体之间的 RDA 双标图

冗余分析(RDA)双标图是一种常用的生态学数据分析方法,通过可视化环境变量(如植物和花卉的性状)与响应变量(如传粉昆虫群体)之间的关系,来揭示生态学系统中各因素之间的相互作用和影响。具体来讲,箭头的方向和长度表示环境变量的贡献程度和方向,显示了它们对解释响应变量变异的影响。箭头越长,表示环境变量在解释变异方面的贡献越大。

表 5 传粉昆虫群体对植物和花卉性状的 RDA 偏好分析结果

RDA(方差分析)	自由度	方差	F 值	p 值	
整体型号	17	0.103	1.595	0.02	
花卉图案	2	0.007	2.242	0.082	
花色	4	0.011	1.183	0.43	
花卉方向	4	0.036	3.252	0.003	
冠筒长度	2	0.015	4.202	0.008	
株高	2	0.006	1.314	0.243	
花形	7	0.018	0.805	0.557	
本地/外来状态	2	0.009	0.546	0.746	
特征值/%	3.681	2.907	1.437	0.437	0.002
解释比例/%	48.214	30.319	15.499	5.419	0.002
累积比例/%	48.214	78.649	94.259	99.789	1.001

注: F 值为方差分析中衡量变量显著性的统计量,数值越大表示变量对变异的解释能力越强。p 值表示显著性水平, $p < 0.05$ 表示变量对传粉昆虫访问组成的影响具有统计学意义。

以上结果显示,蜜蜂更喜欢非侵入性外来植物物种,尤其是盘形/碗形花朵和旗状花。独居蜂更喜欢水平花、唇花或旗状花。鳞翅目最常见的是水平花、漏斗花或头状花序。双翅目喜欢黄色/橙色、向上的头状花序。有一些花性状类别受到许多传粉媒介群体的青睐,并未在双标图中显示,但是环境变量的测试表明其存在显著影响。独居蜂和鳞翅目单花呈负相关。蓝色/紫色花朵对独居蜜蜂和鳞翅目具有吸引力。蜜蜂、独居蜂和鳞翅目更喜欢不同的方向。由于高度共线性,生命形式和花对称性未包含在 RDA 分析中。根据环境变量的检验,独居蜂和鳞翅目最常访问双侧花。蜜蜂和双翅目首选一年生/二年生草本植物,而独居蜂和鳞翅目则选择木本植物。

花卉形态是提高传粉媒介栖息地质量时需要考虑的另一个重要因素。具有不同花朵形状、颜色和其他特征的城市景观将吸引更多多样化的传粉昆虫,在整个生长季节提供多样化的花朵将支持传粉昆虫群落在其整个生命周期中的稳定性和多样性。开花的季节性和整个生长季节的食物供应对确保多样化的传粉昆虫群落,即使在相对较小的区域内也能持续存在至关重要。因此,将本地及多样化开花树种纳入景观中,可以在很小的占地面积内提供大量的传粉媒介资源,并为空巢鸟提供木本植被,进而支持生态系统服务。此外,落叶、植物茎、死亡和腐烂的植物残骸、裸露的土壤以及花卉资源之外的其他栖息地,为传粉昆虫提供了宝贵的筑巢和越冬栖息地。

4 结论

本研究深入调查了中国中部城市(合肥市)的城市绿地中传粉媒介的情况,并重点关注了植物和花卉性状以及它们与传粉媒介的相互作用。通过应用广义线性混合模型(GLMM)和冗余分析(RDA)等方法,为传粉昆虫友好植物提供了实证数据。研究结果显示,种植本土木本植物和有吸引力的外来植物能够支持多样的传粉昆虫群体。城市绿地设计中引入本土植物和多样化花卉资源对维持传粉昆虫群落的稳定性和多样性至关重要。鉴于传粉昆虫的偏好差异,增加开花植物的物种丰度有助于促进整体传粉昆虫的多样性。因此,合理化城市绿地设计以及多样化的花卉资源是恢复城市绿地传粉昆虫栖息地的关键。

本研究虽然在城市绿地中对传粉昆虫群落的调查和分析方面取得了一定成果,但仍存在一些不足之处和局限性。① 地域限制:本研究主要关注中国中部城市(合肥市)的城市绿地,地域范围相对狭窄。未来的研究可以扩大地域范围,涵盖不同气候和地理条件下的城市,以获取更全面的城市绿地传粉昆虫群落信息。② 样本时段:由于研究仅集中在特定的季节或时间段内进行,未能覆盖全年的传粉昆虫活动情况。后续研究可以考虑长时间监测,以更好地理解传粉昆虫在城市绿地中的季节性变化。

参考文献:

- [1] 王花,王慧,邵晓莉,等. 田边伴生植物种植提升作物传粉服务功能的研究现状与展望 [J]. 应用生态学报, 2023, 34(10): 2854-2860.
- [2] 阿如汗,张启宇,刘云慧. 欧美主要国家与我国传粉昆虫多样性保护政策和研究比较分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(1): 1-11.
- [3] 代文魁,林安幸,刘思涵,等. 广东高州油茶传粉昆虫多样性异地比较分析 [J]. 仲恺农业工程学院学报, 2023, 36(1): 17-25, 47.
- [4] 邓晶,李艺,侯一蕾. 城市生物多样性保护:基于中欧对比视角下的经验借鉴 [J]. 生物多样性, 2023, 31(8): 160-171.

- [5] VALDOVINOS F S, HALE K R S, DRITZ S, et al. A Bioenergetic Framework for Aboveground Terrestrial Food Webs [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2023, 38(3): 301-312.
- [6] 杨柳, 周天华, 王勇, 等. 珍稀濒危植物陕西羽叶报春的开花及传粉生物学研究 [J]. *西北植物学报*, 2023, 43(7): 1218-1226.
- [7] 周峰, 姚丽媛, 石涵, 等. 传粉熊蜂访花行为的研究进展 [J]. *昆虫学报*, 2023, 66(3): 419-438.
- [8] 牛永杰, 马全会, 朱玉, 等. 氮沉降对草地昆虫多样性影响的研究进展 [J]. *生物多样性*, 2023, 31(9): 147-158.
- [9] BRAMAN S K, GRIFFIN B. Opportunities for and Impediments to Pollinator Conservation in Urban Settings: A Review [J]. *Journal of Integrated Pest Management*, 2022, 13(1): 6.
- [10] SCHUELLER S K, LI Z L, BLISS Z, et al. How Informed Design Can Make a Difference: Supporting Insect Pollinators in Cities [J]. *Land*, 2023, 12(7): 1289.
- [11] 徐荣臻, 申爽, 朱永强, 等. 叶蝇科昆虫生物学和地理分布分析 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(5): 92-99.
- [12] 王明强, 罗阿蓉, 周青松, 等. 昆虫多样性三十年研究进展 [J]. *生物多样性*, 2022, 30(10): 121-149.
- [13] 唐佳, 邓洪平, 张家辉, 等. 重庆武陵山生物多样性保护优先区入侵植物现状及防治对策研究 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(5): 65-73.
- [14] 李浩, 潘云飞, 杨龙, 等. 农田景观格局对南疆枣园传粉昆虫群落多样性的影响 [J]. *昆虫学报*, 2022, 65(2): 208-217.
- [15] RAHIMI E, BARGHJELVEH S, DONG P L. A Review of Diversity of Bees, the Attractiveness of Host Plants and the Effects of Landscape Variables on Bees in Urban Gardens [J]. *Agriculture & Food Security*, 2022, 11(1): 6.
- [16] PALMERSHEIM M C, SCHÜRCH R, O'ROURKE M E, et al. If You Grow It, they Will Come: Ornamental Plants Impact the Abundance and Diversity of Pollinators and Other Flower-Visiting Insects in Gardens [J]. *Horticulturae*, 2022, 8(11): 1068.

责任编辑 夏娟

周梦媛