昆虫多样性

城乡梯度下传粉昆虫多样性及其影响因素

朱紫睿 张君瑶 刘 慧 陆逸豪 卞显乐 王嘉楠

（安徽农业大学林学与园林学院/国家林业和草原局安徽合肥城市生态系统定位观测研究站，合肥 230036）

摘要：【目的】探究城乡梯度下传粉昆虫群落组成与分布差异，揭示土地利用类型及环境因子对其影响机制，为传粉昆虫群落保护和城乡土地利用优化提供科学依据。【方法】以合肥市南淝河流域传粉昆虫为研究对象，利用网格法布设 23 个研究样点，采用样线法、网捕法和盘式诱捕法调查分析其城乡梯度分布特征及主要驱动因素。【结果】1）共调查传粉昆虫 6 359 头，分属 3 目 18 科 62 属 96 种。2）城市样点的物种丰富度和多样性最高，农村-自然样点多度最高，农村-农业样点丰富度、多样性和多度最低。3）冗余分析显示，传粉昆虫群落的空间分异主要受农业用地与蜜源资源的共同驱动，林冠郁闭度对其结构具有调控作用。4）逐步回归分析显示，1 500 m 范围农业用地、林冠郁闭度和土壤温度等 5 个因子影响物种丰富度，而 100 m 范围半自然用地、林冠郁闭度及光照强度等 4 个因子是物种多度的主要驱动因素。【结论】传粉昆虫群落受土地利用与环境因子耦合调控，多因素间复杂交互导致其在城乡梯度下分布差异显著。建议综合考量环境特征与土地利用特征，针对传粉昆虫城乡梯度分异，城市绿地优化乔灌配置、提升透光并补充蜜源与筑巢资源，半自然区域合理疏伐乔木、保留原生灌草，农业区划定集约边界并增设田埂、缓冲带及野花廊道。

关键词：城乡梯度；传粉昆虫；土地利用类型；环境因子

DOI：10.12169/zgcsly.2026.03.14.0001

Pollinating Insect Diversity and Its Influencing Factors along an Urban-Rural Gradient

Zhu Zirui Zhang Junyao Liu Hui Lu Yihao Bian Xianle Wang Jianan

（The College of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Anhui Hefei Urban Ecosystem National Observation and Research Station, Hefei, 230036）

Abstract：【Objective】This study aimed to investigate differences in the community composition and distribution of pollinating insects along an urban-rural gradient, and to reveal the mechanisms by which land-use types and environmental factors influence these communities, thereby providing a scientific basis for pollinator conservation and the optimization of urban-rural land use.【Method】Based on pollinating insects in the Nanfei River Basin of Hefei City, a total of 23 study sites were established using a grid-based sampling method. Transect surveys, netting, and pan trapping were employed to investigate the distribution patterns and major driving factors of pollinating insects along the urban-rural gradient.【Result】1）A total of 6 359 pollinating insects were recorded, belonging to 3 orders, 18 families, 62 genera, and 96 species. 2）Species richness and diversity were highest at urban sites, while abundance was highest at rural-natural sites. Rural-agricultural sites showed the lowest species richness, diversity, and abundance.

收稿日期：2026-03-14

* 基金项目：国家自然科学基金面上项目（32371936）；安徽省林业科研创新项目（2024007，2025017）。

第一作者：朱紫睿，女，1998 年生，硕士，研究方向为城市生物多样性。E-mail：zirui_zhu@foxmail.com

通信作者：王嘉楠，男，1975 年生，博士，教授，研究方向为城市生态与城市森林。E-mail：wjn@ahau.edu.cn

3）Redundancy analysis showed that the spatial differentiation of pollinating insect communities was mainly driven by the combined effects of agricultural land and floral resources, while canopy closure played a regulatory role in shaping community structure. 4）Stepwise regression analysis indicated that five factors, including agricultural land within a 1 500 m radius, canopy closure, and soil temperature, influenced species richness. In contrast, four factors, including semi-natural land within a 100 m radius, canopy closure, and light intensity, were the main drivers of species abundance.【Conclusion】Pollinating insect communities are jointly regulated by land-use patterns and environmental factors. Complex interactions among multiple factors lead to significant differences in their distribution along the urban-rural gradient. Therefore, environmental characteristics and land-use patterns should be comprehensively considered in response to the differentiation of pollinating insects across urban-rural landscapes. For urban green spaces, the configuration of trees and shrubs should be optimized, light availability should be improved, and floral and nesting resources should be supplemented. In semi-natural areas, moderate thinning of trees should be conducted while preserving native shrubs and herbaceous vegetation. In agricultural areas, the boundaries of intensive cultivation should be clearly defined, and field margins, buffer zones, and wildflower corridors should be established.

Keywords: urban-rural gradient; pollinating insects; land-use types; environmental factors

随着全球人口增长与城乡要素集聚推动城市不断扩张[1]，人为土地利用强度持续升高，生态系统服务沿农村—城郊—中心城区梯度逐步衰减[2]，使得城乡生态分化加剧，威胁区域生态安全与人居福祉[3]，由此引发的生境破碎化、栖息地丧失等挑战，进一步造成城市生物多样性下降[4]。传粉昆虫作为生物多样性的关键类群，在近几十年间全球种群规模持续锐减[5]，触发了全球性“授粉危机”[6]，其中，蜂类、蝶类和食蚜蝇类作为典型且重要的传粉昆虫类群[7]，支撑着多数开花植物的种群繁衍，在维系生态系统稳定、保障野生植物与粮食作物授粉繁殖等方面发挥着重要作用[8]。

在城乡生态系统中，土地利用强度增加对全球多数传粉昆虫产生负面影响，以农业用地与城市用地表现最为突出[6]。农业集约化改变了农田景观格局，打破生态平衡，从而影响传粉昆虫多样性[9]。城市范围内人类活动干扰从城市郊区向中心递增，致使传粉昆虫多样性沿着城市梯度不断下降[10]。然而，农业地区向城市过渡的边缘地带可以提升区域连通性，改变并拓展传粉昆虫群落分布范围[11]，而这类边缘地区多属于农村半自然用地范畴。半自然的森林生境通过丰富的植物种类、低人为干扰等环境条件可以吸引传粉昆虫栖息[12]。

近年来，针对传粉昆虫群落的研究多聚焦城市绿地（城市公园、工业区、居住区）[13-14]、农业用地（菜地[15]、茶园[12]、果园[16]）等单一用地类型，已明确植被结构、管理强度、小气候等环境要素能够影响传粉昆虫分布格局[7,17]。具体而言，城市公园通过良好的水热环境、丰富的蜜源植物等吸引传粉昆虫栖息，而工业区、居住区绿地通过提升局部生境异质性、改善微气候等方式提高传粉昆虫多样性[13-14]。在农业用地方面，油菜等开花作物种植、田间野花自然繁衍等为传粉昆虫提供丰富蜜源[15]。然而，单一作物的茶园、果园等因季节性收割无法保证长期稳定的植物资源，导致传粉昆虫相对较少[16]。综上，城市-乡村尺度下传粉昆虫群落特征对土地利用和环境因子的响应研究较为匮乏，城市地区与半自然栖息地或农业用地的农村地区传粉昆虫群落分布差异尚不清楚。基于此，本研究以合肥主城区南淝河流域城乡梯度下 23 处样点内传粉昆虫群落为研究对象，分析其栖息偏好以及土地利用和环境要素如何影响传粉昆虫的机制，以期为传粉昆虫群落保护及城乡土地利用管理提供依据。

1　研究区概况

合肥市（116°40′—117°58′E，30°56′—32°33′N）是安徽省省会，属亚热带季风性湿润气候，总面积 11 445.1 km^2，建成区面积 528.5 km^2。南淝河贯穿合肥市建成区，全长约 70 km，流域面积达

1 700 hm^2，跨越多重城乡梯度，植被丰富，为传粉昆虫提供了多样化的栖息环境。流域内从上游到下游呈现城市中心、城乡结合部、农村地区的梯度变化，涵盖商业住宅、公园绿地、农田、半自然栖息地等土地利用类型，反映了合肥市城乡梯度发展的复杂性。

2 研究方法

2.1 样地设置与分类

基于南淝河流域沿线的生境特征和用地类型分布格局，在南淝河河流廊道遥感影像图上绘制 5 km×5 km 网格线，利用网格法布设 23 个研究样点（图 1），确保抽样具有代表性。每个样点随机抽样设置 2 条样段，每条样段 100 m，各样段平均间距大于 50 m。

以合肥市卫星遥感数据作为图像数据源，选取每处样点样段最南端为中心，截取 5 种缓冲区（R=100、500、1 000、1 500、2 000），部分样点高分辨率土地利用层次图如图 2 所示，通过 Arc Map10.8 软件进行人工目视矢量化处理，统计 23 个样点 6 类土地利用类型面积比例。依据土地利用类型聚类分析结果，将 23 个样点分为 3 类（表 1）：以庐州公园、杏花公园为代表的城市样点（UR，10 个），以滨湖国家森林公园、滨水公园为代表的农村-自然样点（RN，8 个），以纯斌科技园、环圩东路陈户村为代表的农村-农业样点（RA，5 个）。

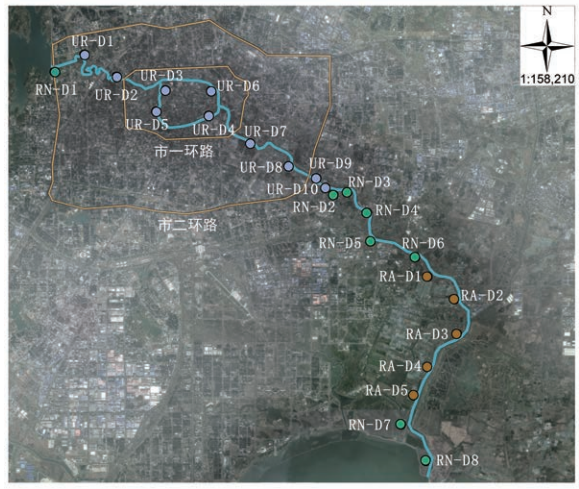
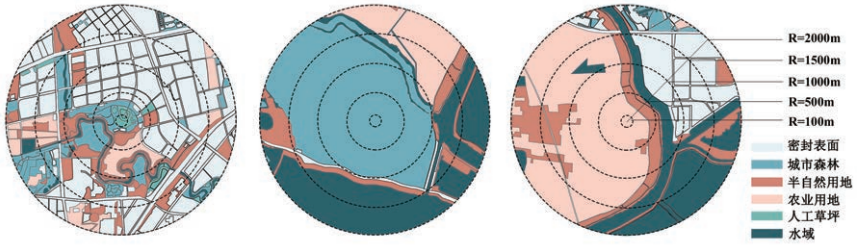


图 1 样点分布



注：UR-D1：庐州公园样点，RN-D7：滨湖国家森林公园样点；RA-D2：纯斌科技园样点。

图 2 部分样点土地类型层次示意

表 1 样地特征

样地类型	样点	密封表面		城市森林		半自然用地（非森林）		农业用地		人工草坪		水域	
	数量/个	面积/hm^2	占比/%	面积/hm^2	占比/%	面积/hm^2	占比/%	面积/hm^2	占比/%	面积/hm^2	占比/%	面积/hm^2	占比/%
UR	10	946.9	75.4	139.9	11.1	72.1	5.7	36.0	2.9	14.0	1.1	47.7	3.8
RN	8	347.4	27.6	173.8	13.8	314.3	25.0	91.3	7.3	4.8	0.4	325.9	25.9
RA	5	86.2	6.9	32.6	2.6	246.9	19.6	497.7	39.6	0	0	393.2	31.3

注：UR：城市样点，RN：农村-自然样点，RA：农村-农业样点，下同。

2.2 传粉昆虫和蜜源植物调查

于 2024 年 5—10 月（每月 1 次）采用样线法、网捕法和盘式诱捕法开展野外调查，记录传粉昆虫种类、数量和访花行为以及蜜源植物种类、数量和开花面积。将野外难以精准判定种类的传粉昆虫带回实验室进行物种鉴定。物种鉴定主要通过查阅专业生物数据库网站（Discover life 生物物种智能检索网 https://www.discoverlife.org/、中国动物主题数据库 http://www.zoology.csdb.cn/等）、参考《安徽省昆虫名录》《中国蝶类志》《安

徽蝴蝶志》等专业书籍、向相关领域专家咨询求助 3 种方式开展。所有传粉昆虫的物种鉴定均需精准到种级水平。

2.3　土地利用类型因子选取

根据《土地利用现状分类》(GBT21010 2022)和中科院土地资源分类系统，将土地利用类型简化分类为密封表面、城市森林、半自然用地（非森林）、农业用地、人工草坪、水域 6 类[18]。根据多重共线性检验结果，最终筛选出 8 个无强共线性的土地利用特征：100 m 密封表面、2 000 m 城市森林、100 m 半自然用地（非森林）、2 000 m 半自然用地（非森林）、1 500 m 农业用地、100 m 水域、500 m 水域、2 000 m 水域。

2.4　环境因子选取

根据样点植被结构和生境特征，选取蜜源植物丰富度、蜜源植物开花多度、土壤温度、土壤湿度、土壤 pH 值、坡度、海拔、林冠郁闭度、裸地盖度、光照强度、人为干扰程度 11 个环境因子。土壤温、湿度用土壤温湿度速测仪（温度量程-40~80 ℃，水分量程 0~100%）测定；土壤 pH 用土壤 pH 速测仪（量程 3~9，精度±0.3）测定；光照强度用特安斯 TA8123 照度计测定；海拔由 GPS 仪测定；坡度由水准测量仪测高程计算。裸地盖度与林冠郁闭度采用 5 点目测取均值；人为干扰程度结合样地周边景观与问卷调查赋值，按无、轻度、中度、重度、强度干扰分级。

2.5　数据处理与分析

传粉昆虫群落结构采用 Excel（2022）数理统计和计算，以传粉昆虫 Patrick 丰富度、多度、Simpson 优势度指数、Shannon 多样性指数、Pielou 均匀度指数进行衡量。结合 Locaspace viewer、GIS 软件实现数据可视化，模型建立、方差检验、图形绘制等统计分析借助 SPSS 26.0、Origin 2021Pro、Canoco 5 完成，通过单因素方差分析判断土地利用类型、环境因子与传粉昆虫群落指标的显著性差异，开展 Pearson 相关性分析，经共线性检验后开展冗余分析，再通过逐步回归分析筛选关键影响因子并建立、检验回归模型。

3　结果与分析

3.1　传粉昆虫群落组成特征

合肥市南淝河流域城乡梯度下 23 处样点调查记录传粉昆虫 6 359 头，分属 3 目 18 科 62 属 96 种（表 2）。蜂类 12 科 20 属 37 种，以蜜蜂科为优势科；蝶类 5 科 24 属 32 种，以灰蝶科（Lycaenidae）和粉蝶科（Pieridae）为优势科；食蚜蝇类 1 科 18 属 27 种（图 3）。在科属组成中单种科和单种属最多，优势种为中华蜜蜂（*Apis cerana*）、菜粉蝶（*Pieris rapae*）、意大利蜜蜂（*Apis mellifera ligustica*）、酢浆灰蝶（*Pseudozizeeria maha*）。

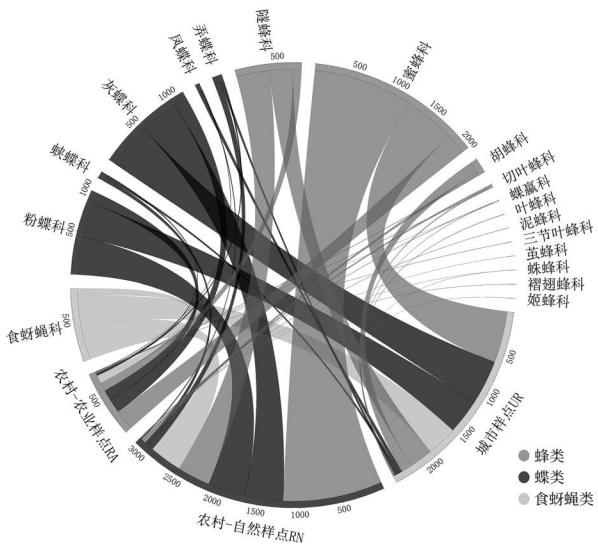


图 3　传粉昆虫群落组成和弦图

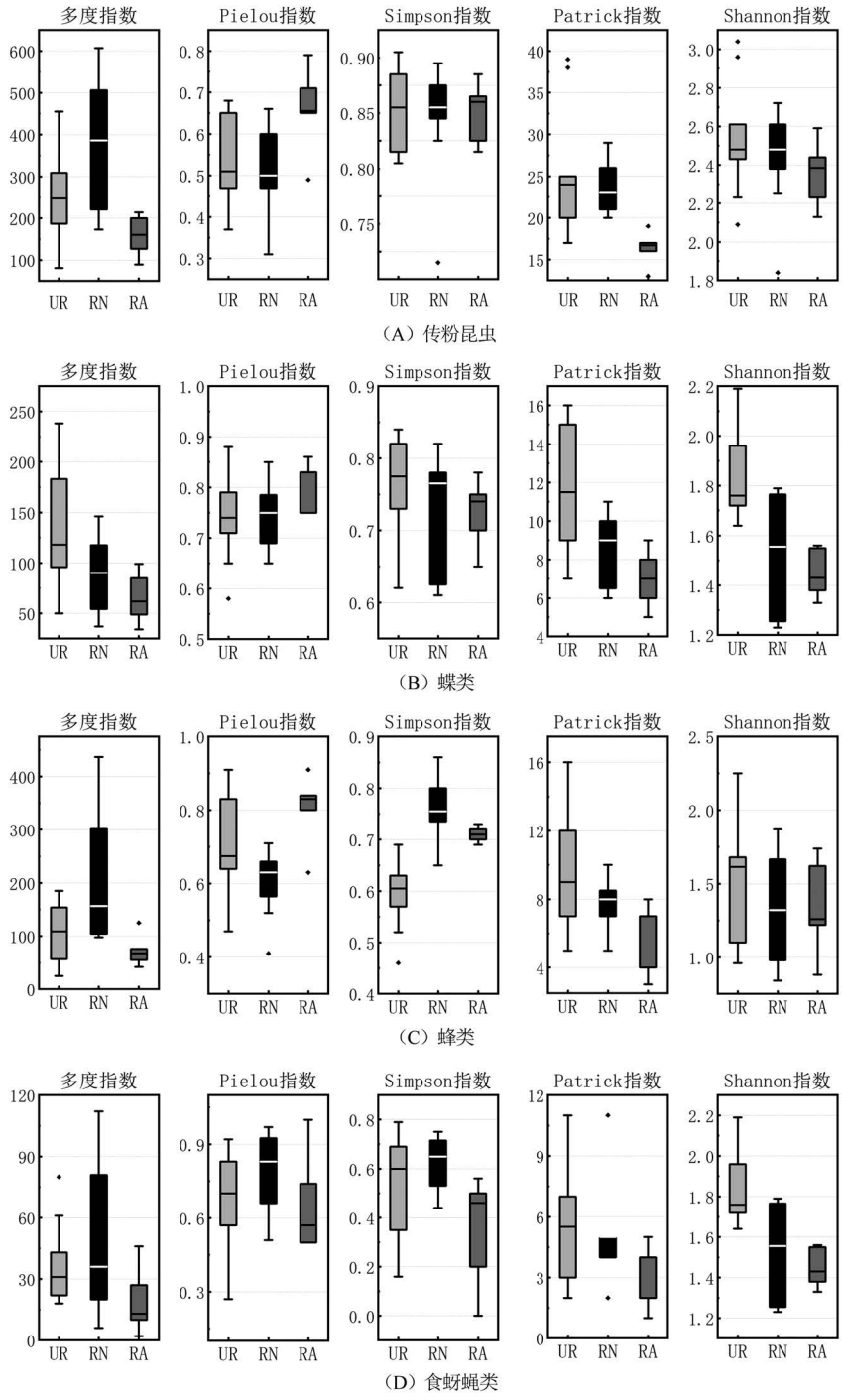
表 2　合肥市城乡梯度下传粉昆虫科属种组成

类别	科数	占比/%	属数	占比/%	种数	占比/%
蝶类	5	27.8	24	38.7	32	33.3
蜂类	12	66.6	20	32.3	37	38.6
食蚜蝇类	1	5.6	18	29.0	27	28.1
总计	18	100.0	62	100.0	96	100.0

3.2　城乡梯度下传粉昆虫群落多样性分布差异

根据单因素方差分析结果（图 4A），城乡梯度下传粉昆虫群落结构有显著差异（$P<0.05$）。城市样点传粉昆虫种类最多，Shannon 多样性指数最高，其中庐州公园样点物种丰富度（39）和多样性（3.04）最高。农村-自然样

点的传粉昆虫个体数最多，滨水公园样点最高（607），其中蜂类个体数最多，蝶类次之，食蚜蝇类最少。农村-农业样点的传粉昆虫 Pielou 均匀度指数最高（0.66），其中圩新路样点 Pielou 均匀度最高（0.85），类群间 Pielou 均匀度指数差异不大。



注：图中箱体表示数据四分位距，内部横线为中位数，◆表示异常值。

图 4 不同用地类型传粉昆虫群落多样性指数

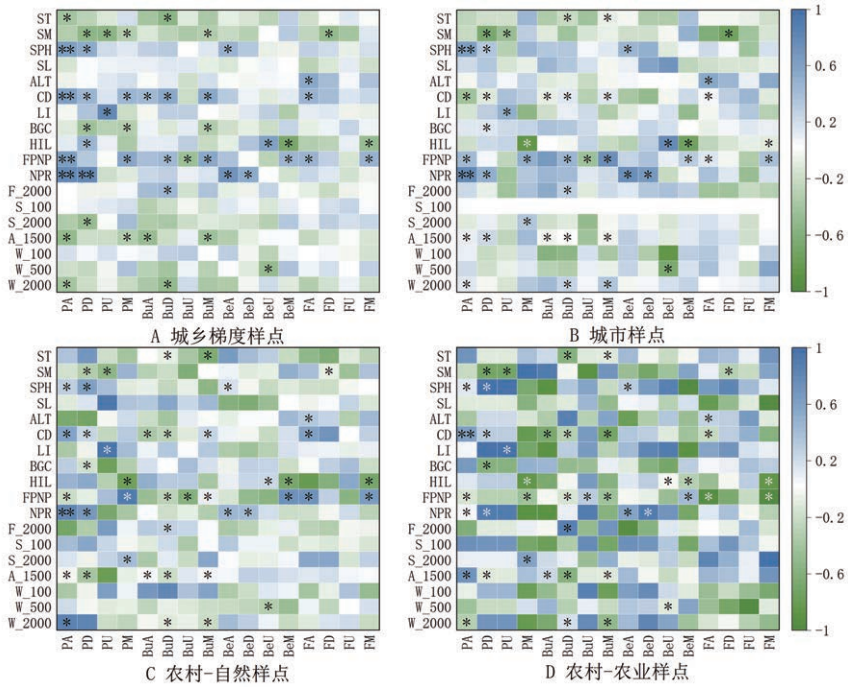
就蝶类而言（图 4B），丰富度、Shannon 多样性和多度指数在城市样点中最高，农村-农业样点最低。在蜂类类群中（图 4C），农村-自然样点的蜂类多度和 Simpson 优势度指数最高，城市样点种类最多，而农业-农村样地 Pielou 均匀度指数最高。食蚜蝇类（图 4D）在 3 类样地中种

类和多度均相对较少，但城市样点和农村-自然样点的 Simpson 优势度指数较高。

3.3　城乡梯度下传粉昆虫群落栖息的影响因素

2024 年 5—10 月共调查样地内乔木类蜜源植物 14 科 22 属 30 种，灌木类蜜源植物 23 科 39 属 50 种，草本类蜜源植物 47 科 104 属 134 种。根据正态性检验和方差分析结果，蜜源植物丰富度、土壤温度、土壤湿度、林冠郁闭度、光照强度、裸地盖度、人为干扰程度存在显著差异（$P<0.05$）。

通过城乡梯度下传粉昆虫群落结构与土地利用类型和环境因子相关性分析（图 5）发现，传粉昆虫丰富度与土壤 pH 值、林冠郁闭度、蜜源植物丰富度、蜜源植物开花多度呈极显著正相关（$P<0.01$），与土壤湿度、1 500 m 农业用地呈显著负相关（$P<0.05$）。传粉昆虫多度与蜜源植物丰富度呈极显著正相关（$P<0.01$），与人为干扰程度、2 000 m 半自然用地呈显著负相关（$P<0.05$）。此外，蝶类多度还与林冠郁闭度呈正相关，与 2 000 m 水域呈负相关（$P<0.05$）。传粉昆虫多样性与林冠郁闭度、蜜源植物开花多度呈显著正相关，与土壤湿度、裸地盖度和 1 500 m 农业用地呈负相关（$P<0.05$），与蝶类多样性分析结果相同，而蜂类和食蚜蝇类的相关因子较之更少。传粉昆虫均匀度与土壤湿度、光照强度呈显著正相关（$P<0.05$）。



注：** 表示 $P<0.01$、* 表示 $P<0.05$；PA：传粉昆虫丰富度；PD：传粉昆虫多度；PU：传粉昆虫均匀度；PM：传粉昆虫多样性；BuA：蝶类丰富度；BuD：蝶类多度；BuU：蝶类均匀度；BuM：蝶类多样性；BeA：蜂类丰富度；BeD：蜂类多度；BeU：蜂类均匀度；BeM：蜂类多样性；FA：食蚜蝇类丰富度；FD：食蚜蝇类多度；FU：食蚜蝇类均匀度；FM：食蚜蝇类多样性；ST：土壤温度；SM：土壤湿度；SPH：土壤 pH 值；SL：坡度；ALT：海拔；CD：林冠郁闭度；LI：光照强度；BGC：裸地盖度；HIL：人为干扰程度；NPR：蜜源植物丰富；FPNP：蜜源植物开花多度；F_2000：2 000 m 城市森林（Forest）；S_100：100 m 半自然用地（Seminatura）；S_2000：2 000 m 半自然用地；A_1500：1 500 m 农业用地（Agricultural）；W_100：100 m 水域（Water）；W_500：500 m 水域；W_2000：2 000 m水域，下同。

图 5　城乡梯度下传粉昆虫多样性与主要影响因素相关性热力图

冗余分析结果（图 6）表明，土地利用与环境因子总解释度达 82.9%，前两轴的解释量为 37.25%和 22.61%。经前向选择筛选结合蒙特卡洛置换检验结果，识别出 4 个显著影响因子（图 6A）：1 500 m 半径农业用地面积（28.8%）、蜜源植物丰富度（20.4%）、蜜源植物开花多度（13.2%）及林冠郁闭度（8.0%）（$P<0.05$）；裸地盖度呈边缘显著（$P=0.052$）。RDA 双标图（图 6B）揭示 3 类样点与环境因子的空间耦合关系：RN 样点集中于第一象限，与 FPNP 及传粉昆虫多度方向高度一致，开花植物促进了传粉昆虫种群数量的提升；UR 样点集中在第二象限，与

NPR、CD 及传粉昆虫丰富度、多样性和均匀度指数方向重合，反映城市绿地内受人为干扰与蜜源植物配置共同影响，传粉昆虫物种丰富度和多样性维持在较高水平；RA 样点聚集于第四象限，与 A_ 1500 呈显著正相关。

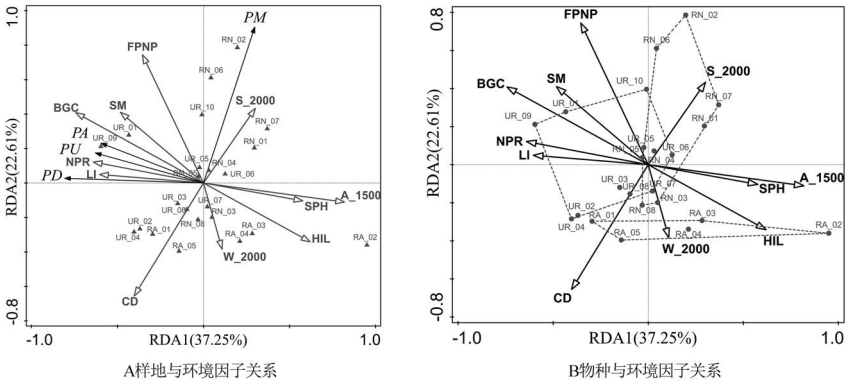


图 6 土地利用类型及环境因子与传粉昆虫关系 RDA 分析

逐步回归结果（表 3）表明，环境因子和土地利用特征显著影响传粉昆虫多样性，但不同变量之间存在一定差异。传粉昆虫丰富度与影响因素的回归方程是 Y = 1.064 ×ST + 6.547 ×SPH + 0.341 ×CD−0.009 ×A_1500−71.172（R^2 = 0.773，P<0.05），传粉昆虫多度与影响因素的回归方程为 Y = −62.684 ×S_100−127.242 ×CD−0.327 ×LI+ 108.231 ×HIL+909.201（R^2 = 0.708，P<0.05）。

表 3 传粉昆虫群落指标与土地利用类型和环境因子拟合模型

响应变量	环境变量	回归系数	t	显著性	VIF	R^2
丰富度指数	ST	1.064	4.341	0.012 *	2.175	0.773
	SPH	6.547	2.897	0.046 *	1.350	
	CD	0.341	5.672	0.043 *	2.570	
	A_1500	−0.009	−3.263	0.004 **	1.069	
多度指数	S_100	−62.684	−2.657	0.016 *	1.535	0.708
	CD	−127.242	−2.878	0.010 *	1.098	
	LI	−0.327	−5.752	0.014 *	1.050	
	HIL	−108.231	−5.702	0.017 *	1.579	

注：* 表示 P<0.05；** 表示 P<0.01。

4 讨论

4.1 传粉昆虫在城乡梯度的空间分布存在显著差异

根据方差分析结果，城市样点的丰富度、Simpson 和 Shannon 指数整体最高，与法国传粉网络研究结果一致[19]。由于绿地斑块面积完整，蜜源植物种类丰富且补植频繁，城市绿地形成了“中等干扰”环境。其中，蝴蝶类群更偏好城市环境，主要由于城市绿地的蜜源植物花期连贯、花色艳丽，适配其取食偏好[20]，且城市热岛效应延长其活动周期，提供了更适宜的生存条件。农村-农业样点丰富度、Simpson 和 Shannon 指数相对来说整体最低，与欧洲多城市研究结果相符[21]，主要源于集约化农业的高强度干扰[22]：研究区农业多为连片种植、边界简单、半自然田埂与缓冲带缺失，单一作物结构降低蜜源植物的连续性，耕作及施肥措施直接威胁传粉昆虫生存[23]。农村-自然样点丰富度和多样性均低于城市样点，但多度最高，大面积半自然用地能够提供稳定的蜜源与栖息资源，成为传粉昆虫的重要避难所[16,24]。食蚜蝇类常活跃于该类样点的花间草丛上，因其喜阳且草丛中蚜虫等猎物稳定、丰富，印证了农田-半自然互补效应是传粉昆虫在破碎化农业景观中得以存续的关键机制[23]。未来城乡建设应将传粉昆虫栖息地保护纳入规划范畴，划定集约化农业管控边界，构建半自然田埂、沟渠缓冲带、野花廊道，与林地等自然斑块衔接，搭配不同花期的经济与蜜源作物，形成“栖息地-迁徙廊道”复合系统[25]。

4.2　传粉昆虫群落分布的主要驱动因子

冗余分析显示，传粉昆虫群落分布主要驱动因子是 1 500 m 农业用地、林冠郁闭度、蜜源植物丰富度和开花多度。1 500 m 范围农业用地对传粉昆虫多样性和均匀度指数呈显著负向影响，其负向效应与已有研究一致[26]。农村-农业样点传粉昆虫多度在 5—6 月达峰值后锐减，与合肥市主要作物物候相关。由于农村-农业样点以水稻、油菜等粮油作物与葡萄等果蔬类经济作物为主，普遍存在种植结构单一、蜜源资源季节性缺口明显等特征，结合杀虫剂、除草剂使用[27]，既降低传粉昆虫存活率，又破坏巢址生境[28]。其次，林冠郁闭度与传粉昆虫多度呈负相关，高郁闭度会降低林下光照强度，限制传粉昆虫活动时间[29]。同时，蜜源植物丰富度和开花多度对传粉昆虫多样性和优势度指标呈正向影响[12-13]。滨湖国家森林公园样点（RN-D7）蜜源植物丰度最高，传粉昆虫多样性也相对较高。传粉昆虫对蜜源植物存在偏好差异，例如口器较长的切叶蜂科（Megachilidae）、蜜蜂科（Apidae）等蜂类偏好具深花管结构的豆科（Fabaceae）和唇形科（Lamiaceae）植物，这反映了蜂类与蜜源植物间的协同特征，而此类植物在农村-自然样点中大量存在。此外，裸地盖度与传粉昆虫均匀度和优势度指数边缘显著，可通过影响优势类群调控传粉昆虫群落结构，例如蜾蠃科（Eumenidae）、泥蜂科（Sphecidae）偏好农村-自然样点的裸地。

4.3　城乡梯度下传粉昆虫群落差异是多因素交互的结果

逐步线性回归显示，传粉昆虫丰富度受环境因子（土壤温度、pH 值、林冠郁闭度）和土地利用特征（1 500 m 农业用地）的双重驱动，而传粉昆虫多度受 100 m 半自然用地、林冠郁闭度、光照强度及人为干扰共同调控。这与 Proesmans 等[19]提出的“土地利用与局地生境共同塑造传粉群落”的结论契合。同时，本研究核心聚焦于城乡梯度下整体传粉昆虫群落多样性及其与环境的耦合关系，未来应聚焦传粉昆虫不同类群在各尺度范围具体分异的深度解析。

5　结论

合肥市城乡梯度下不同类型样点传粉昆虫群落特征差异明显，城市样点和农村-自然样点相较于农村-农业样点，传粉昆虫物种更为丰富。受土地利用与环境因子耦合调控，多因素间复杂交互导致传粉昆虫在城乡梯度下分布差异显著，农业用地扩张抑制传粉昆虫多样性，充足蜜源资源与适宜林冠结构可有效维持群落稳定。未来城乡传粉昆虫群落保护，应综合考量环境特征与土地利用特征，城市绿地在考虑传粉昆虫偏好的蜜源植物和筑巢资源基础上减少高密度乔木种植，增加透光性；半自然区域合理疏伐过密乔木，保留原生灌草层；农业区划定集约化边界，补充半自然田埂、沟渠缓冲带、野花廊道。

参考文献

[1] FANG G J, SUN X, LIAO C, et al. How do ecosystem services evolve across urban-ruraltransitional landscapes of Beijing-Tianjin-Hebei region in China: patterns, trade-offs, and drivers[J]. Landscape Ecology, 2023, 38(4): 1125-1145.

[2] 孙晓, 石磊, 庞军. 长江经济带城-郊-乡生态系统服务与生态风险的时空关联及安全分区[J]. 生态学报, 2026, 46(4): 1752-1769.

[3] YANG H L, SHAO H Y, ZHANG C B, et al. Optimization framework for coupled and coordinated development of ecological environment and urbanization in dual-core urban agglomerations: a case study area of Chengdu-Chongqing[J]. Ecological Indicators, 2025, 176: 113624.

[4] YAO L. Assessment of long time-series greening signatures across the urban-rural gradient in Chinese cities [J]. Ecological Indicators, 2024, 160: 111826.

[5] WAGNER D L, GRAMES E M, FORISTER M L, et al. Insect decline in the Anthropocene: death by a thousand cuts [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(2): e2023989118.

[6] KEARNS C A, INOUYE D W, WASER N M. Endangered mutualisms: the conservation of plant-pollinator interactions[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1998, 29: 83-112.

[7] DYLEWSKI Ł, MAĈKOWIAK Ł, BANASZAK-CIBICKA W. Linking pollinators and city flora: how vegetation composition and environmental features shapes pollinators composition in urban environment[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 56: 126795.

[8] WINFREE R, GROSS B J, KREMEN C. Valuing pollination services to agriculture[J]. Ecological Economics, 2011, 71: 80-88.

[9] RUNDLÖF M, ANDERSSON G K S, BOMMARCO R, et al. Seed coating with a neonicotinoid insecticide negatively affects wild bees[J]. Nature, 2015, 521(7550): 77-80.

[10] POTTS S G, BIESMEIJER J C, KREMEN C, et al. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2010, 25(6): 345-353.

[11] DILTS T E, BLACK S H, HOYLE S M, et al. Agricultural margins could enhance landscape connectivity for pollinating insects across the Central Valley of California, U.S.A[J]. PLoS One, 2023, 18(2): e0267263.

[12] 彭智奇,尹明明,沈明明,等.森林、茶园和菜园 3 种土地利用类型下的蝴蝶群落物种与功能多样性比较研究[J].环境监控与预警,2022,14(4):11-18,30.

[13] 韩丹,韩丛海,王成,等.北京不同城市区域蝴蝶多样性及优势种生态位差异[J].中国城市林业,2023,21(5):74-81.

[14] ZENG H C, LIU H, WANG J N, et al. Characteristics and influencing factors of taxonomic and functional diversity of butterflies in urban green spaces[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2025, 104: 128662.

[15] 孙广芳,邹大为,闵梦月,等.农田传粉者生物多样性及其与不同土地利用方式的关系[J].江苏农业科学,2018,46(21):297-302.

[16] 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.

[17] ZENG H C, WANG J N, GUAN M Z, et al. Effects of vegetation structure and environmental characteristics on pollinator diversity in urban green spaces[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2023, 84: 127928.

[18] BIRDSHIRE K R, CARPER A L, BRILES C E. Bee community response to local and landscape factors along an urban-rural gradient[J]. Urban Ecosystems, 2020, 23(4): 689-702.

[19] PROESMANS W, FELTEN E, LAURENT E, et al. Urbanisation and agricultural intensification modulate plant-pollinator network structure and robustness[J]. Functional Ecology, 2024, 38(3): 628-641.

[20] 李剑飞,庄明亮,兰凤明,等.东北地区早春蜜源植物传粉昆虫多样性研究[J].环境昆虫学报,2024,46(03):598-605.

[21] ELLIS EE, CAMPBELL S A, EDMONDSON J L. Drivers of nocturnal and diurnal pollinating insect declines in urban landscapes[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2025, 292(2052): 20250102.

[22] 姚晨晨,侯银续,郭东旭,等.鹞落坪保护区典型农林交错带传粉昆虫多样性及其与环境因子间的关系[J].生物学杂志,2023,40(4):70-75.

[23] 刘娅萌,卢训令,丁圣彦,等.不同农业景观背景下传粉昆虫群落的分布差异[J].生态学报,2020,40(7):2376-2385.

[24] SHI X Y, XIAO H J, LUO S D, et al. Can landscape level semi-natural habitat compensate for pollinator biodiversity loss due to farmlandconsolidation? [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 319: 107519.

[25] 胡文浩,朱钰,倪康,等.农业景观野花带建设对传粉昆虫群落多样性及共现网络的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2025,33(9):1771-1781.

[26] 肖海军,朱玉麟,邹怡.农田景观格局对油菜传粉昆虫和稻田天敌生物控害的影响[J].江西农业大学学报,2025,47(5):1171-1182.

[27] 殷利华,巩思凝,李良,等.城市昆虫传粉生境营建研究进展及思考[J].中国城市林业,2024,22(1):77-86.

[28] DICKS L V, BREEZE T D, NGO H T, et al. A global-scale expert assessment of drivers and risks associated with pollinator decline[J]. Nature Ecology & Evolution, 2021, 5(10): 1453-1461.

[29] XIE TT, LI Y, WANG M Q, et al. Tree species richness drives multiple facets of bee diversity *via* understorey microenvironment[J]. Journal of Animal Ecology, 2026, 95(2): 270-281.