

DOI: 10.20103/j.stxb.202401110103

宋蕊, 苏芝敏, 王效科, 刘颖, 万五星, 周伟奇. 北京城市绿地蝴蝶多样性空间格局及其影响因素. 生态学报, 2025, 45(1): 296-305.

Song R, Su Z M, Wang X K, Liu Y, Wan W X, Zhou W Q. The spatial pattern of butterfly diversity and its impact factors in Beijing urban green spaces. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 296-305.

北京城市绿地蝴蝶多样性空间格局及其影响因素

宋蕊^{1,2}, 苏芝敏^{2,3,*}, 王效科^{2,3}, 刘颖¹, 万五星¹, 周伟奇^{2,3}

1 河北师范大学生命科学学院, 石家庄 050016

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 北京京津冀区域生态环境变化与综合治理国家野外科学观测研究站, 北京 100085

摘要: 城市化带来的环境变化被公认为生物多样性下降的主要驱动力之一。蝴蝶作为生物多样性的重要组成部分, 具有帮助植物传粉、支撑食物链等生态功能和服务价值, 是城市环境变化的重要指示者。采用样线法和样点法相结合, 于 2023 年 4—9 月对北京城区五环路以内 47 个城市绿地中的蝴蝶多样性进行调查, 分析了蝴蝶物种多样性的空间格局及其与环境因子的关系。结果表明: 1) 共调查到蝴蝶 4469 头, 隶属于 5 科 16 属 17 种, 菜粉蝶 (*Pieris rapae*) 是最大的优势类群, 占总个体数的 74.67%, 其次是云粉蝶 (*Pontia edusa*) 和黄钩蛱蝶 (*Polygonia c-aureum*)。2) 蝴蝶物种多样性随城市化程度加强而降低, 城区外缘样地 (四环与五环之间) 的蝴蝶物种丰富度、多度及物种多样性指数均最高, 不同区域之间的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数存在显著差异。3) 非度量多维尺度分析 (non-metric multidimensional scaling, NMDS) 结果发现不同城市区域的蝴蝶群落相似性较高, 进一步的相似性分析 (analysis of similarities, ANOSIM) 检验结果显示组间差异性较小 ($R = -0.012, P > 0.05$), 表明城市绿地的蝴蝶物种组成较为相似。4) 三种蝴蝶优势种在不同区域的时间动态存在差异, 特别是菜粉蝶在城市中心地区的活跃期早于城市边缘地区。5) 冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 结果表明蝴蝶物种多样性与研究样地植物物种总数 ($P < 0.001$) 和蜜源植物物种数 ($P < 0.001$) 呈极显著正相关, 与样地面积呈显著正相关 ($P < 0.05$)。综上所述, 不同城市区域的蝴蝶多样性趋于均质化, 城市绿地面积和植物多样性是制约蝴蝶物种多样性的重要因素。建议在城市中保留一定比例的城市绿地, 扩大蝴蝶生存空间的同时, 提高植物多样性, 并从不同植物花期时序上进行科学合理的配置, 为蝴蝶提供更多的食源, 从而达到维持甚至提高蝴蝶物种多样性的目的。

关键词: 城市绿地; 蝴蝶; 人类干扰; 生境; 植被覆盖度

The spatial pattern of butterfly diversity and its impact factors in Beijing urban green spaces

SONG Rui^{1,2}, SU Zhimin^{2,3,*}, WANG Xiaoke^{2,3}, LIU Ying¹, WAN Wuxing¹, ZHOU Weiqi^{2,3}

1 College of Life Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Beijing-Tianjin-Hebei Urban Megaregion National Observation and Research Station for Eco-Environmental Change, Beijing 100085, China

Abstract: The environmental changes caused by urbanization were recognized as one of the main drivers for the decline in biodiversity. Butterflies, as an important component of biodiversity, play ecological roles and service values such as helping plants pollinate and supporting food chains, making them significant indicators of urban environmental changes. In this study, a combination of line-intercept and point sampling methods was used to investigate butterfly diversity in 47 urban

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFF1301103); 河北省自然科学基金项目 (C2017205152); 国家科技基础资源调查专项基金资助项目 (2021FY100703)

收稿日期: 2024-01-11; **网络出版日期:** 2024-09-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zmsu@cees.ac.cn

green spaces within the fifth ring road of Beijing from April to September 2023. Then, the spatial pattern of butterfly species diversity and its relationship with environmental factors were analyzed. The results showed that: 1) A total of 4469 butterflies were surveyed, belonging to 5 families, 16 genera, and 17 species. *Pieris rapae* was the most dominant group, accounting for 74.67% of the total individuals, followed by *Pontia edusa* and *Polygonia c-aureum*. 2) Butterfly species diversity decreased with increasing urbanization. The species richness, abundance, and diversity indices of butterfly were highest in the outer of the city (between the fourth and fifth ring roads). There were significant differences in the Shannon-Wiener diversity index and Margalef richness index among different urban zones. 3) The result of non-metric multidimensional scaling (NMDS) showed that butterfly communities in different urban zones had high similarity. Further analysis of similarities (ANOSIM) showed that intergroup differences were small ($R = -0.012$, $P > 0.05$), indicating that the composition of butterfly species in urban green spaces was relatively similar. 4) The temporal dynamics of the three dominant butterfly species varied in different urban zones, especially the active period of *Pieris rapae* in the city center was earlier than in the city outer. 5) Redundancy analysis (RDA) results showed that butterfly species diversity was extremely significantly positively correlated with the total species number of plants in the study area ($P < 0.001$) and the species number of nectar plants ($P < 0.001$), and significantly positively correlated with urban green space area ($P < 0.05$). In summary, butterfly diversity tended to be homogenized in different urban zones, and urban green space area and plant diversity were important factors limiting butterfly species diversity. It was suggested that a certain proportion of urban green spaces should be preserved in urban area to expand butterfly living space. Moreover, increasing plant diversity and scientifically arranging different plant flowering sequences were recommended to provide more food sources for butterflies, so as to maintain or even increase butterfly species diversity.

Key Words: urban green space; butterfly; human interference; habitat; vegetation coverage

生物多样性是人类赖以生存和发展的基础^[1],在维持生态平衡、促进人与自然和谐发展扮演着重要的角色。随着城市化的快速发展,大量的人造景观尤其是高大建筑和硬化路面逐渐取代了自然景观^[2]。城市化减少了物种栖息地面积^[3],引起栖息地丧失和环境退化^[4],造成物种丰富度降低^[5]。

昆虫物种多样性作为生物多样性的重要组成部分,对于整个生态系统有着至关重要的作用^[6]。蝴蝶隶属昆虫纲(Insecta)鳞翅目(Lepidoptera)^[7],是一类体型较大、飞行能力较强、易观察和辨别的昆虫类群,且对环境变化敏感^[8],是城市生态环境的重要指示生物^[9],已受到国内外学者的广泛关注。大量研究表明,蝶类群落结构与地形、植物群落结构等因素密切相关^[10]。Hardy 和 Dennis 认为大部分蝴蝶物种数量与城市化进程速度呈负相关关系,主要原因是幼虫寄主植物受到影响^[11]。Koh 和 Sodhi 研究表明,缩短城市公园与森林的距离,种植丰富多样的潜在寄主植物,可以更好地保护城市公园的蝴蝶多样性^[12]。中国对蝴蝶多样性的研究主要集中在蝴蝶区系分析以及自然保护区的蝴蝶资源保护等方面^[13],对城市等非生物多样性热点区域的研究较少。陈振宁对青海祁连地区的 4 个不同生境中的蝶类多样性开展调查研究^[14]。杨芳等研究发现生境面积是影响蝴蝶物种多样性的重要环境因子^[15]。

近年来,城市蝴蝶多样性逐渐引起了人们的重视^[16],了解、认识城市蝴蝶多样性的分布格局及其影响因素,是保护城市蝴蝶多样性的前提^[2],将为蝴蝶多样性提升和城市可持续发展政策措施的制定提供科学基础^[17]。本研究以北京城市绿地的蝴蝶群落为研究对象,了解其群落组成、空间分布特点,同时量化研究样地的环境因子,分析蝴蝶多样性与环境因子之间的关系,旨在探讨城市化对蝴蝶多样性的影响机制,进一步为保护、恢复和提升城市蝴蝶多样性提供科学依据^[18]。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究样地的选择

北京市(115°24'—117°30'E, 39°38'—41°05'N),位于华北平原西北部,是典型的暖温带半湿润大陆性季

风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,地带性植被为暖温带落叶阔叶林,兼有温性针叶林。随着城市化的发展,北京城区逐渐形成独特的“摊煎饼”格局^[19],即沿环城高速公路呈同心辐射状扩张。以不透水面比例、道路密度和人口密度等指标衡量^[20],北京的城市化程度均呈现出由市中心向边缘地区递减的规律。基于这种城市景观格局,本研究利用环城路将五环路以内区域划分为4个城市区域(UZ1—UZ4,图1),UZ1代表城市化程度最高的城市中心地区,UZ4代表城市化程度较低的城市边缘地区。由于近几十年北京的城市化主要集中在北城,北城的城市化空间格局在一定程度上反映了北京的城市化发展历史。因此,本研究主要在北城随机选取了46个样地,并在南部随机选取1个样地作为对照。样地面积在0.5—729 hm²之间,每个环路区域分布4—16个样地不等。

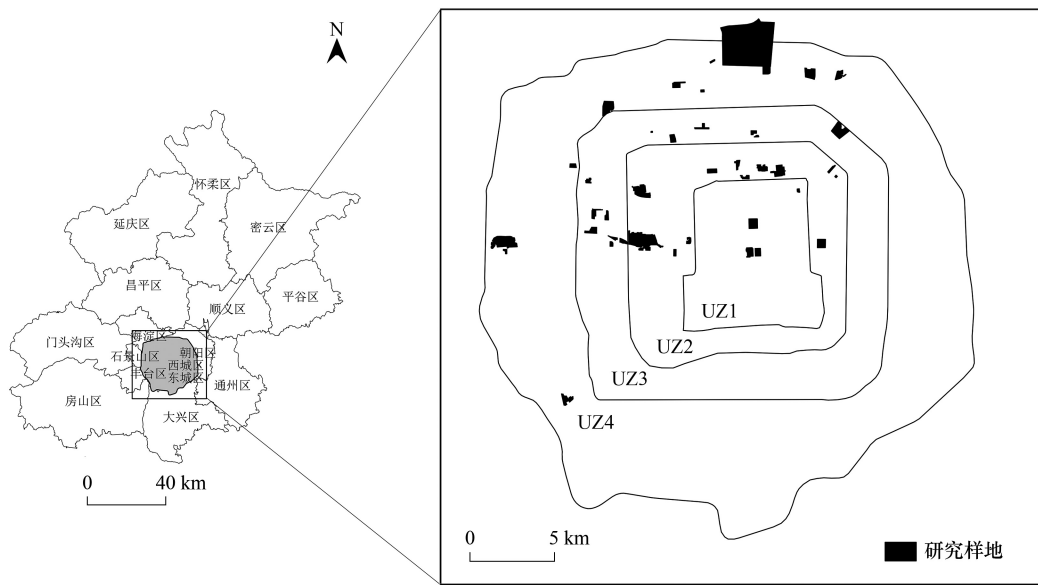


图1 研究样地分布

Fig.1 Distribution of study sites

UZ1,二环内的城市区域 urban zone 1;UZ2,二环到三环的城市区域 urban zone 2;UZ3,三环到四环的城市区域 urban zone 3;UZ4,四环到五环的城市区域 urban zone 4

1.2 蝴蝶及植物调查

采用样线法和样点法相结合,对蝴蝶及植物进行调查。于2023年4—9月,选择晴朗无风的天气,在9:00—17:00时间段开展蝴蝶调查,共计完成五轮调查,每轮调查的时间间隔在20 d以上。利用“两步路户外助手”APP记录样线轨迹。2人沿固定样线以1.5 km/h速度匀速前进,采用观察法调查样线两侧各2.5 m、上方5.0 m、前方5.0 m内所有可见蝴蝶,借助相机拍照,记录蝴蝶种类和数量。结合网捕法,采集飞行速度较快的、不能在现场鉴定的蝴蝶标本,装入三角纸袋内带回实验室,依据《中国蝴蝶图鉴》^[21]、《中国蝴蝶原色图鉴》^[22]、《中国蝴蝶生活史图鉴》^[23]和《北京蝶类原色图鉴》^[24]进行物种鉴别。同时,记录研究区样线两侧的植物组成,统计各研究样地的植物物种总数(total species number of plants, TP),对于觅食行为的蝴蝶,记录其蜜源植物种类,并统计蜜源植物物种数(species number of nectar plants, NP)。同时记录采样的地点、时间、温度、经纬度和人为干扰类型等环境信息。

1.3 环境因子

在奥维地图(omap)上勾画样地边界并导入ArcGIS软件中,利用计算几何工具计算样地面积(Area)。利用2020年北京高分影像资料,获取调查样地的土地利用类型。2020年的GF-2号卫星影像,空间分辨率为4 m。经过地面校正和辐射校正,通过面向对象的分类方法将北京市土地覆盖分为林地、草地、不透水地表、农

田、水体和裸地六类。总体精度为 95%, Kappa 系数为 0.93。利用掩膜提取(Extract By Mask)工具获得样地的水体、植被覆盖以及不透水表面等景观格局特征数据,将栅格数据进行重分类(Spatial Analyst),把水体、植被和不透水表面分别赋予新的数值,最后利用以表格显示分区统计(Zonal Statistics As Table)工具提取样地的水体覆盖度(PerW)、植被覆盖度(PerV)和不透水表面覆盖度(PerI)。

1.4 数据分析

1.4.1 多样性指标

本研究选择下列多样性指标表征蝴蝶多样性,利用 Past4.13 软件计算蝴蝶群落的多样性指标。

Simpson 多样性指数(Simpson's diversity index):

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (1)$$

Shannon-Wiener 多样性指数(Diversity index):

$$H' = - \sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

Margalef 丰富度指数(Species richness index):

$$R = (S - 1) / \ln N \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数(Evenness index):

$$J = \left(- \sum P_i \ln P_i \right) / \ln S \quad (4)$$

相对多度(Relative abundance):

$$R_a = 100 n_i / N \quad (5)$$

式中, S 为物种种类总数, P_i 为物种 i 的个体数占总个体数的比例, N 为所有种的个体总数, n_i 为物种 i 的个体数, D 为 Simpson 多样性指数, H' 为 Shannon-Wiener 多样性指数, R 为 Margalef 丰富度指数, J 为 Pielou 均匀度指数, R_a 为相对多度。

1.4.2 统计方法

利用夏皮洛-威尔克检验方法(Shapiro-Wilk test)对自变量和因变量进行正态性检验,不符合正态分布的变量进行对数转换。利用 Origin 2021 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),来检验城市不同区域间的蝴蝶物种多样性指标是否存在显著差异,若存在显著差异则采用最小显著性差异法(least significance difference, LSD)检验差异显著性。为了探究蝴蝶群落的空间差异性,利用 R4.3.2 软件中的“vegan”和“ggplot2”程序包对城市不同区域蝴蝶群落组成进行非度量多维尺度分析(non-metric multidimensional scaling, NMDS),通常认为当 $\text{stress} < 0.05$ 时具有良好的代表性,并通过相似性分析(analysis of similarities, ANOSIM)以检验分组间差异是否显著。利用冗余分析(redundancy analysis, RDA)探究蝴蝶群落分布与环境因子的相关关系。

为了进一步量化蝴蝶多样性与重要环境因子之间的关系,本研究构建了广义线性模型(generalized linear model, GLM),基于 RDA 分析结果选取与蝴蝶多样性显著相关的环境因子作为自变量,分别以蝴蝶的物种数和个体数作为因变量。由于个别数据集较为分散,故使用负二项回归模型(negative binomial regression)。在构建模型之前利用方差膨胀因子(VIF)检查模型的共线性, $\text{VIF} > 10$ 即认为存在共线性,并基于 Akaike 信息准则(AIC)选择出拟合效果最好的模型,构建回归方程。

2 结果与分析

2.1 蝴蝶群落组成

从 47 个样地共调查到蝴蝶 4469 头,隶属于 5 科 16 属 17 种,包括粉蝶科(3820 头,比例为 85.48%)、灰蝶科(320 头,比例为 7.16%)、蛱蝶科(294 头,比例为 6.58%)、凤蝶科(33 头,比例为 0.74%)和弄蝶科(2 头,比例为 0.04%)。菜粉蝶(*Pieris rapae*)是最大的优势类群,占总个体数的 74.67%,其次是云粉蝶(*Pontia edusa*)

和黄钩蛱蝶 (*Polygonia c-aureum*), 个体数比例分别为 9.62% 和 4.95%。红灰蝶 (*Lycaena phlaeas*) 和直纹稻弄蝶 (*Parnara guttata*) 的数量最少, 仅在四环路外分别调查到 2 头 (图 2)。

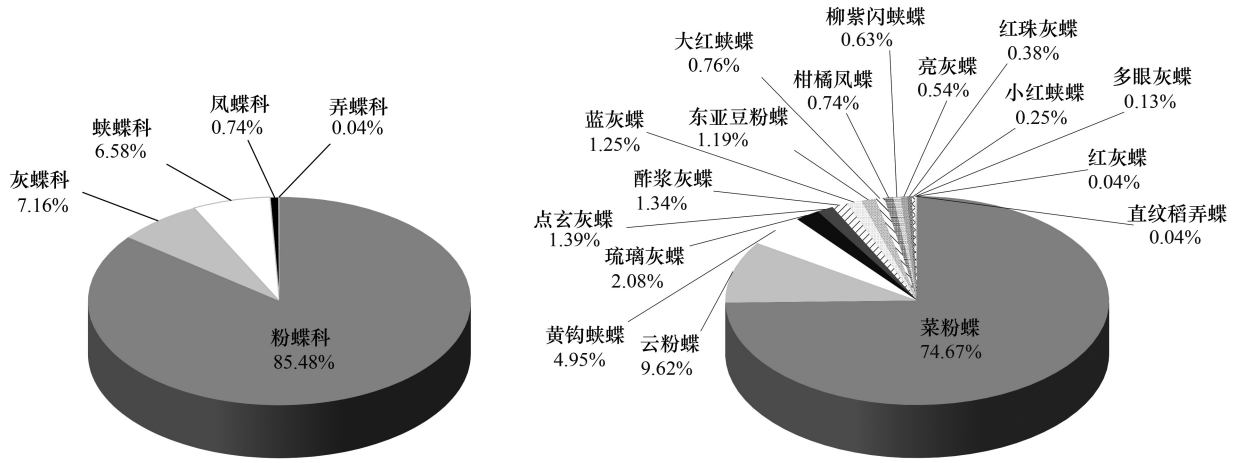


图 2 北京城市绿地蝴蝶不同科和物种个体数所占比例

Fig.2 Individual proportions of different families and species of butterflies in urban green space of Beijing

2.2 沿城市化梯度的变化

总体上, 城市边缘地区的蝴蝶物种数和个体数高于城市中心地区, UZ4 调查到的蝴蝶物种数和个体数均为最高, UZ2 的物种数和个体数略高于 UZ3, UZ1 调查到的物种数最少, 但不同区域间的差异未达到显著水平。根据城市不同区域蝴蝶物种多样性指标的单因素方差分析结果可知, 沿着城市化强度降低的梯度, 蝴蝶群落的 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数以及 Margalef 丰富度指数都表现出增加趋势。城市不同区域之间的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数存在显著差异, 而 Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数之间无显著差异 (图 3)。

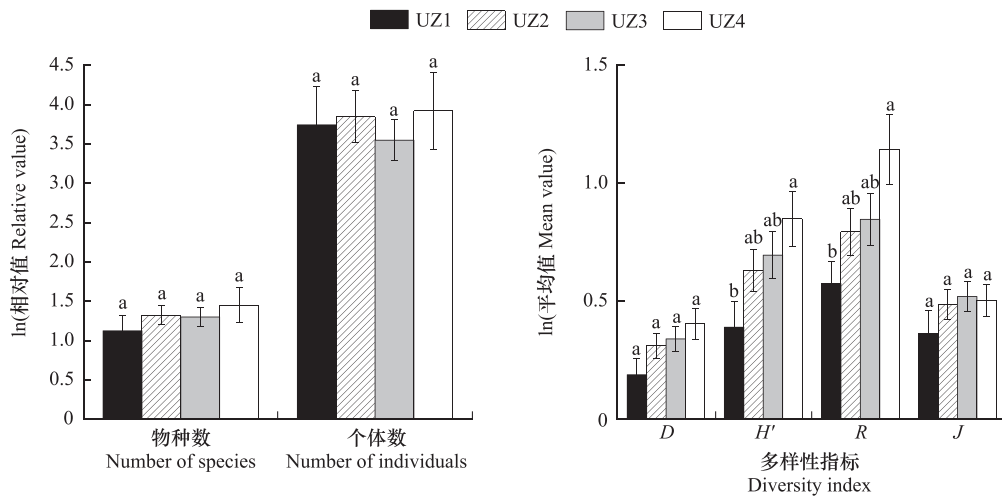


图 3 城市区域间蝴蝶物种数和个体数以及多样性指标的单因素方差分析

Fig.3 One-way ANOVA of number of species and individuals and diversity index of butterflies among urban zones

柱状图上方不同小写字母代表城市不同区域间在 $P < 0.05$ 水平上存在显著性差异。D: Simpson 多样性指数; H' : Shannon-Wiener 多样性指数; R: Margalef 丰富度指数; J: Pielou 均匀度指数

2.3 不同区域的蝴蝶群落相似性

城市不同区域蝴蝶群落的非度量多维尺度分析(non-metric multidimensional scaling, NMDS)计算得出的压力值(stress)为0.0455,表明排序分析结果合理。从图4可以看出,城市不同区域之间的蝴蝶物种组成重叠度较高,UZ1和UZ2城市区域的蝴蝶物种之间相似度高,UZ3和UZ4城市区域中的蝴蝶物种相似度相对较低。进一步的相似性分析(analysis of similarities, ANOSIM)检验结果可知,蝴蝶群落的组内差异大于组间差异,组间差异不显著,城市不同区域之间蝴蝶群落差异性较小($R = -0.012, P > 0.05$),可见城市绿地的蝴蝶物种组成较为相似(图4)。

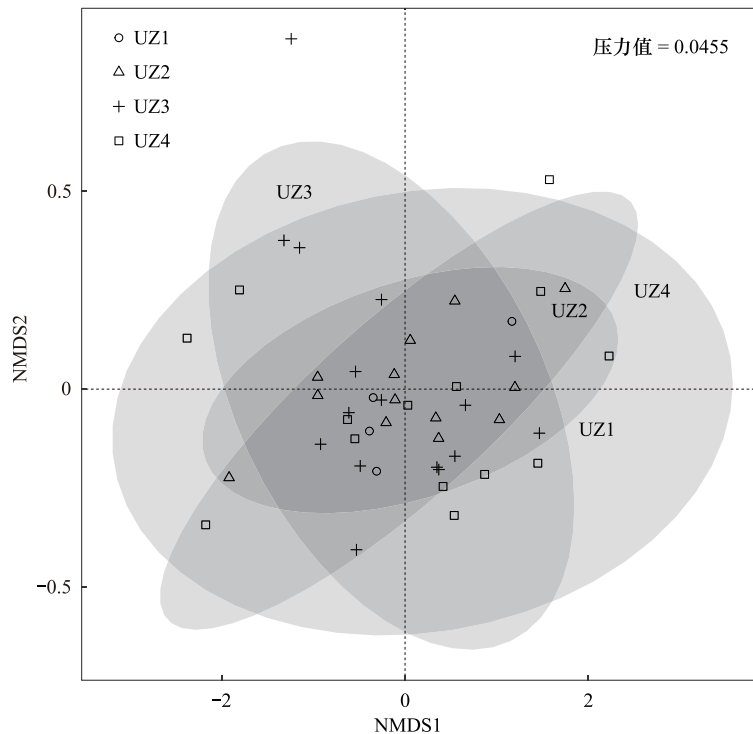


图4 城市区域间蝴蝶群落非度量多维尺度分析(NMDS)分析

Fig.4 Non-metric multidimensional scaling non-metric multidimensional scaling (NMDS) of butterfly communities among urban zones

2.4 三个优势种的时间动态

不同蝴蝶种类活跃期存在明显的季节性差异。菜粉蝶是每个月的优势种,5月各区域的菜粉蝶个体数均处于较低水平,在8月达到最高峰,并呈现由城市中心向外递增的趋势。菜粉蝶个体数在城市不同区域的增长幅度存在差异,UZ1的菜粉蝶个体数在7月有小幅的下降,UZ3和UZ4的菜粉蝶个体数均在7月和8月出现明显的增长趋势,而UZ2的菜粉蝶个体数在6月就急剧上升并超过了UZ3,与UZ4的个体数量相当。云粉蝶个体数在7月之前处于较低水平,在8月迅速增加,且UZ2的个体数大于UZ3,黄钩蛱蝶个体数在8月之前处于较低水平,在9月迅速增加,且UZ3的个体数最多(图5)。

2.5 蝴蝶物种多样性与环境因子的关系

由蝴蝶物种多样性与环境因子的冗余分析结果可知,6个环境因子对蝴蝶群落组成的总解释度为75.7%,排序轴1和2分别解释了54.52%和21.18%。其中,箭头的长度表示该环境因子对群落变化的影响强度,箭头的长度越长,表明环境因子的影响越大;箭头与坐标轴的夹角表示该环境因子与坐标轴的相关关系,夹角越小代表相关性越高;箭头间夹角是锐角表明是正相关关系,钝角则为负相关关系。蝴蝶物种多样性受蜜源植物物种数、植物物种总数和面积的影响最大,其次是不透水表面覆盖度和植被覆盖度,最后是水体覆盖度(图6)。根据蒙特卡洛置换检验结果可知,不同城市区域的蝴蝶物种多样性与蜜源植物物种数($R^2 = 0.54, P <$

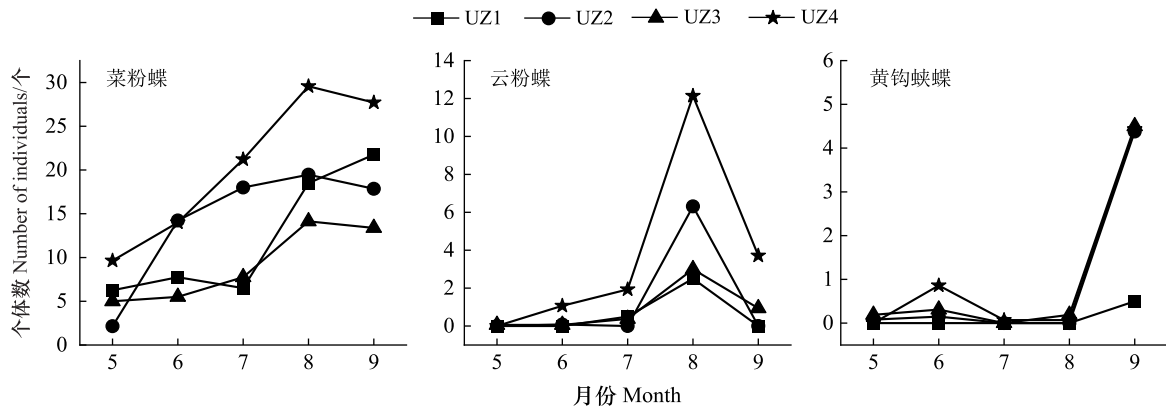


图 5 三个优势种在不同城市区域的时间动态

Fig.5 Time dynamics of three dominant species in different urban zones

0.001) 和植物物种总数 ($R^2 = 0.33, P < 0.001$) 呈极显著正相关, 与样地面积 ($R^2 = 0.61, P < 0.05$) 呈显著正相关, 与不透水表面覆盖度、植被覆盖度和水体覆盖度之间的相关关系未达到显著水平。

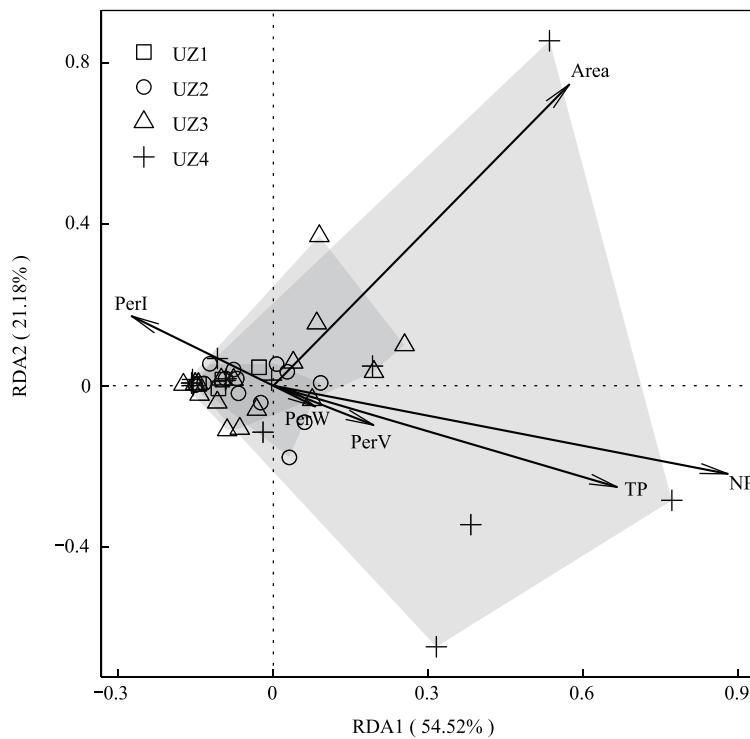


图 6 蝴蝶群落与环境因子的冗余分析(RDA)

Fig.6 Redundancy analysis redundancy analysis (RDA) of butterfly communities and environmental factors

阴影表示多边形外围连线区分不同分组; Area: 样地面积 area; PerW: 水体覆盖度 percentage of water; PerV: 植被覆盖度 percentage of vegetation; PerI: 不透水表面覆盖度 percentage of impervious surfaces; TP: 植物物种总数 total species number of plants; NP: 蜜源植物物种数 species number of nectar plants

利用广义线性模型, 以面积、植物物种总数和蜜源植物物种数作为自变量, 分别以蝴蝶的物种数、个体数和菜粉蝶个体数作为因变量构建量化模型, 结果发现仅蜜源植物物种数对蝴蝶多样性具有显著的影响。蝴蝶物种数与蜜源植物物种数的回归方程是 $y = 0.094x + 0.921 (R^2 = 0.178, P < 0.001)$, 蝴蝶个体数与蜜源植物物种

数的回归方程是 $y = 0.252x + 2.745$ ($R^2 = 0.124, P < 0.001$), 菜粉蝶个体数与蜜源植物物种数的回归方程是 $y = 0.223x + 2.544$ ($R^2 = 0.111, P < 0.001$) (表 1)。

表 1 蝴蝶多样性与环境因子负二项回归

Table 1 Negative binomial regression of butterfly diversity with environmental factors

响应变量 Response variable	环境变量 Environmental variable	回归系数 Estimate	标准误 Std. Error	Z 值 Z value	P 值 $Pr(> Z)$	赤池信息量准则 Akaike information criterion	判定系数 R^2
蝴蝶物种数 Number of Species	截距	0.921	0.206	4.479	<0.001	186.83	0.178
	Area	0.000	0.001	0.247	0.805	182.89	
	TP	0.001	0.005	0.198	0.843	182.87	
	NP	0.094	0.025	3.712	<0.001	196.38	
蝴蝶个体数 Number of Individuals	截距	2.745	0.292	9.398	<0.001	465.62	0.124
	Area	-0.001	0.001	-0.635	0.525	461.99	
	TP	0.002	0.007	0.301	0.763	461.70	
	NP	0.252	0.039	6.508	<0.001	493.64	
菜粉蝶个体数 Individual number of <i>Pieris rapae</i>	截距	2.544	0.306	8.306	<0.001	449.20	0.111
	Area	-0.001	0.001	-0.888	0.374	445.90	
	TP	0.004	0.007	0.615	0.539	445.57	
	NP	0.223	0.040	5.514	<0.001	469.66	

Area: 样地面积 area; TP: 植物物种总数 total species number of plants; NP: 蜜源植物物种数 species number of nectar plants

3 讨论

蝴蝶物种多样性沿城市化强度呈递减趋势,此次调查到的蝴蝶物种数有所下降,城市不同区域间蝴蝶物种多样性存在差异。已有研究发现北京城市公园分布有 30 余种蝴蝶,2017 年在北京市六环内 10 个城市公园记录到 5 科 31 种蝴蝶^[25],2020 年在北京市六环内 26 个城市公园记录到 5 科 32 种蝴蝶^[26]。本次调查仅记录到 5 科 17 种蝴蝶,一方面可能与本次调查大部分地点位于城市用地较多和人类活动强度较高的区域有关,另一方面本研究未包含五环外的城市区域,而五环外的区域位于城乡交错地带,并且靠近自然山体,野生植被丰富,可用生境的连通性较高,因此利于郊区蝴蝶的扩散^[27]。不同城市地区的土地覆盖度和植物资源存在显著差异^[28],城市区域也常依赖于周边绿色区域的物种扩散和迁入^[29],这可能是导致蝴蝶物种多样性差异的原因之一。我们研究发现位于四环至五环城市区域的蝴蝶物种丰富度和丰度均高于二环内的城市区域,这与其他研究结果相似^[25, 30-31],蝴蝶物种多样性沿 UZ1—UZ4 城市区域梯度呈递增趋势,这可能与城市不同区域间的环境特征不同有关。

影响蝴蝶物种多样性的环境因素有很多,包括样地面积、温度以及所处生境的蜜源植物分布情况等^[25],这些环境因素共同影响着蝴蝶物种多样性^[32]。已有研究表明蝴蝶群落分布与样地面积呈显著正相关,这与我们的研究结果一致^[33],并发现位于 UZ2 的菜粉蝶数量在 6 月就快速上升,甚至接近 UZ4 的数量,我们猜测由于城市热岛效应影响,城市中心地区相比于其他区域升温较快,导致菜粉蝶在城市中心地区的物候期早于城市边缘地区。已有研究表明北京城市公园的植物资源对蝴蝶物种多样性影响较大^[31],我们研究发现蝴蝶物种多样性与研究区植物物种总数和蜜源植物物种数呈极显著正相关,随着研究样地植物多样性水平的提高,蝴蝶物种多样性水平呈升高趋势,可见丰富的植物资源为蝴蝶增加了更多的寄主植物和蜜源植物,在城市生境中局部生境资源仍是维持蝴蝶物种多样性水平的决定性因素之一^[34]。

基于以上分析,可以通过提高蝴蝶蜜源植物多样性,合理选择与配置蜜源植物来维持城市蝴蝶物种多样性水平。例如,在城市建设过程中,可以开发小微绿地,构建城市绿色生态廊道。2020 年有研究发现在北京中心城市的小微绿地共调查到 4 科 16 种蝴蝶^[31],可见小微绿地可以为蝴蝶在城市中的生存提供栖息地,起

到补充、串联大型公园绿地的作用,为物种提供生存空间和运动通道^[31]。同时在选择蝴蝶目标物种营造植物景观时,可以聚焦于取食范围较窄的单食性蝴蝶^[35],合理选择与配置蝴蝶的寄主植物和蜜源植物^[36],在城市园林绿化建设的过程中,可以种植较为丰富的人工栽培蜜源植物,如八宝景天(*Hylotelephium erythrostictum*)和菊芋(*Helianthus tuberosus*)等。本研究在北京城市五环路内开展蝴蝶物种多样性的研究,积累了大量基础资料和科学数据,为今后开展蝴蝶物种多样性保护和城市绿地规划提供重要参考。

4 结论

城市的不断扩张和建立导致城区绿地萎缩和碎片化,城市物种多样性显著降低。通过对北京城市绿地蝴蝶的物种组成、空间分布、时间动态及与环境因子相关性等进行调查研究,发现不同城市区域的蝴蝶多样性趋于均质化,城市绿地面积和植物多样性是制约蝴蝶物种多样性的重要因素。建议在城市中保留一定比例的城市绿地、扩大蝴蝶生存空间的同时,提高植物多样性,并从不同植物花期时序上进行科学合理的配置,为蝴蝶提供更多的食源,从而达到维持甚至提高蝴蝶物种多样性的目的。

致谢:感谢中国科学院生态环境研究中心王静老师、四川师范大学饶恩明老师在遥感影像数据的使用和环境变量数据的提取中给予技术指导。感谢北京林业大学硕士生胡蕾、孙语倩和舒乐,本科生刘京、李强和叶燊,河北师范大学本科生庞博和阿依古丽·买合木提协助开展野外调查工作。

参考文献(References):

- [1] 蔡睿,裴洪淑. 延吉市不同类型绿地蝶类物种组成与多样性研究. 绿色科技, 2017(10): 142-145.
- [2] 吴云鹤,顾成波,李文博,刘乃一,韩德民,方杰. 城市化对合肥蝶类多样性的影响. 生态学杂志, 2016, 35(4): 992-996.
- [3] Melliger R L, Rusterholz H P, Baur B. Habitat- and matrix-related differences in species diversity and trait richness of vascular plants, Orthoptera and Lepidoptera in an urban landscape. *Urban Ecosystems*, 2017, 20(5): 1095-1107.
- [4] Di Mauro D, Dietz T, Rockwood L. Determining the effect of urbanization on generalist butterfly species diversity in butterfly gardens. *Urban Ecosystems*, 2007, 10(4): 427-439.
- [5] Dennis E B, Morgan B J T, Roy D B, Brereton T M. Urban indicators for UK butterflies. *Ecological Indicators*, 2017, 76: 184-193.
- [6] 张超,李娟,程海云,段家充,潘昭. 秦岭西段地区蝴蝶群落多样性与环境因子相关性. 生物多样性, 2023, 31(1): 194-206.
- [7] Bibi M, Bibi S, Akhtar N, Ullah Z, Fiaz Khan M, Qureshi I Z. Butterfly (Order: Lepidoptera) species Richness, diversity and distribution in different localities of Battagram, Pakistan. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2022, 29(3): 1853-1857.
- [8] 左自途,袁兴中,刘红,黎璇. 重庆市主城区不同生境类型的蝴蝶多样性. 生态学杂志, 2008, 27(6): 946-950.
- [9] 闫振天,卢明娟,李廷景,傅樵,付文博,陈斌. 重庆缙云山国家级自然保护区蝴蝶种类调查和区系分析. 生态与农村环境学报, 2021, 37(2): 194-200.
- [10] Fleishman E, Betrus C J, Blair R B. Effects of spatial scale and taxonomic group on partitioning of butterfly and bird diversity in the Great Basin, USA. *Landscape Ecology*, 2003, 18(7): 675-685.
- [11] Hardy P B, Dennis R L H. The impact of urban development on butterflies within a city region. *Biodiversity & Conservation*, 1999, 8(9): 1261-1279.
- [12] Koh L P, Sodhi N S. Importance of reserves, fragments, and parks for butterfly conservation in a tropical urban landscape. *Ecological Applications*, 2004, 14(6): 1695-1708.
- [13] 蒲正宇,周德群,姚俊,史军义. 中国蝶类生物多样性生存现状及其新的保护模式探索. 生态经济, 2011, 27(11): 148-151, 165.
- [14] 陈振宁,曾阳,鲍敏,马继雄,柯君. 青海互助北山国家森林公园不同生境的蝶类多样性研究. 生物多样性, 2006, 14(6): 517-524.
- [15] 杨芳,贺达汉. 生境破碎化对植物-昆虫及昆虫之间相互关系的影响. 昆虫知识, 2007, 44(5): 642-646.
- [16] 彭羽,刘雪华. 城市化对植物多样性影响的研究进展. 生物多样性, 2007, 15(5): 558-562.
- [17] Kuussaari M, Toivonen M, Heliölä J, Pöyry J, Mellado J, Ekroos J, Hyryläinen V, Vähä-Piikkiö I, Tiainen J. Butterfly species' responses to urbanization: differing effects of human population density and built-up area. *Urban Ecosystems*, 2021, 24(3): 515-527.
- [18] 彭靖轩,刘子仪,张欣然,李晓鹏. 城市荒野蝶类栖息地景观特征与景观营造策略. 绿色科技, 2023, 25(11): 111-121.
- [19] Wang G M, Jiang G M, Zhou Y L, Liu Q R, Ji Y S, Wang S X, Chen S B, Liu H. Biodiversity conservation in a fast-growing metropolitan area in

- China; a case study of plant diversity in Beijing. *Biodiversity and Conservation*, 2007, 16(14): 4025-4038.
- [20] Liu S H, Prieler S, Li X B. Spatial patterns of urban land use growth in Beijing. *Journal of Geographical Sciences*, 2002, 12(3): 266-274.
- [21] 武春生, 徐培峰. 中国蝴蝶图鉴. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [22] 周尧. 中国蝴蝶原色图鉴. 郑州: 河南科学技术出版社, 1999.
- [23] 朱建青. 中国蝴蝶生活史图鉴. 重庆: 重庆大学出版社, 2018.
- [24] 杨宏, 王春浩, 禹平. 北京蝶类原色图鉴. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [25] Sing K W, Luo J S, Wang W Z, Jaturas N, Soga M, Yang X Z, Dong H, Wilson J J. Ring roads and urban biodiversity: distribution of butterflies in urban parks in Beijing city and correlations with other indicator species. *Scientific Reports*, 2019, 9: 7653.
- [26] 韩丹, 王成, 殷鲁秦. 北京城市蝴蝶蜜源植物网络特征及重要蜜源植物识别. *生态学报*, 2021, 41(22): 8892-8905.
- [27] 韩丹, 韩丛海, 王成, 余珺莹, 边琦, 韩文静, 殷鲁秦. 北京不同城市区域蝴蝶多样性及优势种生态位差异. *中国城市林业*, 2023, 21(5): 74-81.
- [28] Tzortzakaki O, Kati V, Panitsa M, Tzanatos E, Giokas S. Butterfly diversity along the urbanization gradient in a densely-built Mediterranean city: land cover is more decisive than resources in structuring communities. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 183: 79-87.
- [29] Snep R P H, Opdam P F M, Baveco J M, WallisDeVries M F, Timmermans W, Kwak R G M, Kuypers V. How peri-urban areas can strengthen animal populations within cities: a modeling approach. *Biological Conservation*, 2006, 127(3): 345-355.
- [30] Han D, Zhang C, Wang C, She J Y, Sun Z K, Zhao D X, Bian Q, Han W J, Yin L Q, Sun R L, Wang X Y, Cheng H. Differences in response of butterfly diversity and species composition in urban parks to land cover and local habitat variables. *Forests*, 2021, 12(2): 140.
- [31] 余珺莹, 韩丹, 王成, 殷鲁秦, 孙振凯, 韩丛海. 北京中心城区小微绿地的蝴蝶多样性特征. *中国城市林业*, 2022, 20(3): 1-6.
- [32] Ren J Z, Li S Y, He M D, Zhang Y L. Butterfly community diversity in the Qinling Mountains. *Diversity*, 2022, 14(1): 27.
- [33] Nielsen A B, van den Bosch M, Maruthaveeran S, van den Bosch C K. Species richness in urban parks and its drivers: a review of empirical evidence. *Urban Ecosystems*, 2014, 17(1): 305-327.
- [34] Curtis R J, Brereton T M, Dennis R L H, Carbone C, Isaac N J B. Butterfly abundance is determined by food availability and is mediated by species traits. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(6): 1676-1684.
- [35] 胡晔, 董丽. 北京大运河森林公园蝴蝶蜜源植物调查分析. *安徽农业科学*, 2023, 51(6): 110-112, 116.
- [36] Tam K C, Bonebrake T C. Butterfly diversity, habitat and vegetation usage in Hong Kong urban parks. *Urban Ecosystems*, 2016, 19(2): 721-733.