

基于鸟类多样性保护的上海中心城区生态网络构建研究

Construction of Ecological Networks in the Center Urban Area of Shanghai Based on Bird Diversity Conservation

张瀚月¹ 张冬梅¹ 张浪^{1*} 余浩然²
ZHANG Hanyue¹ ZHANG Dongmei¹ ZHANG Lang^{1*} YU Haoran²

(1.上海市园林科学规划研究院, 城市困难立地生态园林国家林业和草原局重点实验室, 国家林业和草原局城市困难立地绿化造林国家创新联盟, 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心, 上海 200232; 2.南京林业大学风景园林学院, 南京 210037)

(1. Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Landscaping of Challenging Urban Sites, National Innovation Alliance of National Forestry and Grassland Administration on Afforestation and Landscaping of Challenging Urban Sites, Shanghai Engineering Research Center of Landscape on Challenging Urban Sites, Shanghai, China, 200232; 2. College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu, China, 210037)

文章编号: 1000-0283(2024)04-0042-09
DOI: 10.12193/j.laing.2024.04.0042.006
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2024-01-08
修回日期: 2024-02-18

摘要

城市化进程的高速发展不仅影响着城市生态系统, 还威胁着城市生物多样性。城市生态网络是保障生态过程、维护生态安全、提升城市生态系统服务的有效途径, 科学构建生物多样性保护空间网络是保障并提升生物多样性水平的必要措施。基于上海中心城区鸟类空间分布点位、气象、土地利用、植被指数及夜光灯指数数据, 通过物种分布模型识别出鸟类适生区, 进而筛选生态源地和构建鸟类活动阻力面, 并结合最小成本路径模型模拟生成鸟类多样性保护的上海中心城区生态廊道。研究表明: (1) 建筑物面积占比和植被指数 NDVI 是影响鸟类分布最为重要的因素, 建筑物面积占比越小, 植被指数 NDVI 越高, 鸟类生境适宜性越高; (2) 识别出的 60 个生态源地平均中心度为 321.98, 主要位于外环绿带及楔形绿地区域, 合计面积 4 975.47 hm², 占全部高适生区的 55.26%, 其中最大斑块面积 431.73 hm², 外环绿带及城中楔形绿地区域是鸟类的重要栖息地; (3) 建筑物占比较多、人类活动频繁、植被覆盖相对较少的城市中央活动区鸟类迁移阻力较高, 外环绿带对生态网络整体连通性至关重要。研究成果为高密度城市建成区的生物多样性保护和生态空间格局优化提供了新的视角和科学支撑, 对城市生态规划和可持续发展具有重要意义。

关键词

鸟类多样性保护; 物种分布模型; 最小成本路径; 电路理论; 生态空间格局

Abstract

The rapid development of urbanization affects urban ecosystems and threatens urban biodiversity. Urban ecological networks effectively ensure ecological processes, maintain ecological security, and enhance urban ecosystem services. Scientifically constructing a biodiversity conservation spatial network is necessary to guarantee and improve biodiversity levels. Based on bird spatial distribution points, meteorological data, land use, vegetation index, and night light index data in the central urban area of Shanghai, this study identified suitable bird habitats through species distribution models, selected ecological sources, and constructed a bird activity resistance surface. It also simulated the creation of ecological corridors for bird diversity conservation in central Shanghai by the least-cost path model. The study shows that: (1) The proportion of buildings and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) are the most critical factors affecting bird distribution, and the smaller the proportion of building area and the higher the NDVI will achieve the higher the habitat suitability for birds; (2) The 60 identified ecological sources

张瀚月

1994年生/女/江苏淮安人/博士/工程师/
研究方向为城市绿地生态网络与景观生态安全格局研究

张冬梅

1970年生/女/河南周口人/博士/教授级
高级工程师/上海领军人才/研究方向为城市
绿化适生树种选育

张浪

1964年生/男/安徽合肥人/博士/教授级
高工(二级)/博士生导师/上海领军人才/
享受国务院特殊津贴专家/上海市园林科学
规划研究院院长, 兼任城市困难立地园林绿
化国家创新联盟理事长、上海城市困难立地
绿化工程技术研究中心主任、城市困难立地
生态园林国家林草局重点实验室主任/研究
方向为生态园林规划设计与技术研究/本
刊主编

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: zl@shsyky.com

基金项目:

国家自然科学基金面上项目“城市生态廊道多尺度结构与功能连接度的关联机制”(编号: 32171569); 上海市科委社会发展科技攻关项目“超大城市上海公园城市构建关键技术研究与示范”(编号: 23DZ1204400); 上海市科委社会发展科技攻关项目“基于生物多样性的城市困难立地高质量园林绿化智能技术及示范”(编号: 22DZ1202200); 上海市园林科学规划研究院青年启动项目“基于生物多样性保护提升的城市生态廊道最小宽度确定方法”(编号: 2023-2-1)

have an average centrality of 321.98, mainly located in the outer ring green belt and wedge-shaped green areas, covering a total area of 4 975.47 hm², accounting for 55.26% of all high-suitability areas, among which the largest patch area being 431.73 hm²; (3) Urban central activity areas with a higher proportion of buildings, frequent human activities, and relatively less vegetation cover have higher bird migration resistance, and the outer ring green belt is crucial to the overall connectivity of the ecological network. The study provides a new perspective and scientific support for urban biodiversity protection and ecological spatial pattern optimization, which is significant for urban ecological planning and sustainable development.

Keywords

bird diversity conservation; species distribution models; least cost path; circuit theory; ecological spatial pattern

城市化进程的高速发展不仅影响着城市生态系统,还威胁着城市生物多样性。为应对城市化带来的挑战,中国在《中国生物多样性保护战略与行动计划》(2011-2020年)中将“城市生物多样性保护”纳入生物多样性保护优先项目,强调在城市绿地系统规划建设中体现生物多样性要素^[1]。城市生态网络构建强调了生态规划在城市发展中的重要性,其是保障生态过程、维护生态安全、提升城市生态系统服务的有效途径,科学构建生物多样性保护空间网络是保障并提升生物多样性水平的必要措施。

上海作为国际性大都市,人多地少特点尤为突出,不仅建设用地指标紧张,且非建设用地总量也较难满足生态、生产和生活的要求,同时各类型生态景观较破碎,连通性不够,在空间上分布较为分散,缺乏集聚效应,追求整个系统效益多样、高效、生态用地效益最大化等目标越发重要^[2]。上海市生态空间专项规划(2021-2035年)提出了要锚固市域生态网络结构,通过对水体、林地、绿地、农田等现状生态要素进行叠合,结合生态安全保障功能、环境品质提升功能、生物多样性功能以及休闲游憩功能,综合形成上海市域的生态空间格局的目标^[3]。

鸟类具有易观察性的特点,可作为城市生态网络构建的焦点物种,对维护城市生态

系统稳定性、维持和提升城市生物多样性、推动不动产增值、促进居民身心健康等方面起到重要的调节作用^[4-5]。通过规划城市绿道、林荫道、滨水蓝道等“蓝绿结合”的方式串联城市中的鸟类栖息地,增加栖息地连通性使城市鸟类可以通过生境廊道到城市外更广阔的范围迁移和觅食,有利于提高鸟类对城市建成环境的适应力^[6]。众多学者以鸟类多样性保护为目标探讨了鸟类生物多样性影响因素及城市生态网络构建方法,通常以图论、最小阻力模型以及电路理论为理论依据的“源地识别—阻力面构建—生态廊道确定”为研究范式^[7-10]。然而,上述研究范式中景观阻力面构建过程中通常基于经验赋值权重,主观性较高,过度依赖人为判断。同时,高密度城市建成区具有景观破碎化程度高、人类社会活动频繁等特点,严重威胁着城市建成区内鸟类的生存,且目前缺少以客观模型为依据的高密度城市建成区内的鸟类生物多样性保护体系研究案例。

综上,本研究以上海中心城区鸟类物种空间分布数据为基础,以气象、土地利用、植被指数以及人类活动夜光灯指数数据为依托,以物种分布模型(Species Distribution Models, SDMs)为支撑,识别生态源地和构建鸟类活动阻力面,通过最小成本路径模型(Least Cost Path, LCP)模拟生成鸟类多样性保护的上海

中心城区生态廊道,旨在为维持和提升上海中心城区鸟类多样性和生态空间格局优化提供科学支撑。

1 研究区概况与数据来源

上海作为全国特大城市之一,位于31.14° N、121.29° E,地处太平洋西岸,亚洲大陆东沿,长江三角洲前缘,属北亚热带季风气候,呈现出四季分明,春秋较短,冬夏较长的特征。《上海市鸟类名录》显示,截至2019年底,上海市共有鸟类22目78科494种,占全国鸟类种数的33.51%,且鸟类占上海全市野生动物种数的80%以上^[11]。《上海市生态空间建设和市容环境优化“十四五”规划》提出了到2025年城市生物多样性指数(鸟类)达到0.6以上,到2035年基本建成人地和谐共生的生态之城的目标^[12]。因此,本文以城市化程度较高的上海外环线以内区域即上海市总体研究规划和生态空间规划规定的上海中心城区为研究区,该区域总面积约为664 km²,包括黄浦、虹口、静安等全域以及浦东新区、闵行区、宝山区、嘉定区部分区域。

本研究数据主要来源于:(1)中国观鸟网(<http://www.birdreport.cn/>)与GBIF数据库(<https://www.gbif.org/>)中上海城区经常观测到的红嘴相思鸟、灰背伯劳、黄腹山雀等鸟类物种的



图1 研究区观测点分布图
Fig. 1 Distribution map of the study area

2023年点位分布数据(图1); (2) 国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/>) 的2022年道路、水系、行政边界等基础地理数据; (3) 世界气候数据库 (<https://worldclim.org/>) 获得的2.1版本(1970–2000年)的19个气候因子平均值(表1); (4) 全国土地覆盖数据集(SinocL-1, <https://doi.org/10.5281/zenodo.7707461>) 提供的2023年1 m分辨率的土地利用数据(图2-a)^[13]; (5) 基于多光谱遥感数据(GF-2)计算的2022年归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)(图2-b); (6) 美国国家冰雪数据中心(<https://nsidc.org/data/ICESat-2/data-sets>)获取的2019年ICESat-2数据产品ATL08植被冠层高度数据(Canopy Height, CH)(图2-c); (7) 美国国家海洋大气管理局(<https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>)获得的2018年夜光灯数据(Night Light, NL)(图2-d)。

2 研究方法

2.1 鸟类适生区模拟

相关性分析(correlation analysis)主要用来衡量两个变量之间的相关密切程度,高相关性变量可能会导致多重共线性、模型过拟合、模

型解释能力降低等现象,可以通过pearson、spearman和kendall相关系数阐释,当相关系数大于0,且p-value < 0.05时,表明变量之间存在显著正相关关系,当相关系数小于0,且p-value < 0.05时,表明变量之间存在显著负相关关系,绝对值越大,相关程度越高。为提高模型的精度,本研究针对研究区内bio_1–bio_19总计19个物候分布、NDVI、CH和NL以及由基础地理数据和由基础地理数据数据计算获得的与水系距离(DW)及与道路距离(DR)和由土地利用数据计算获得的建筑物面积占比(AP)和树木面积占比(TP)等环境因子进行相关性分析,所有数据分辨率均为30 m,坐标系统一为Krasovsky_1940_Albers。

其中,水系距离(DW)及与道路距离(DR)利用基础数据中的水系、道路图层,利用ArcGIS距离分析工具,计算出每个像元距离最近源的距离(d),即欧式距离(euclidean distance),见公式(1)。

$$d = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2} \quad (1)$$

式中, x_a, y_a 为像元a的坐标, x_b, y_b 为最近源的像元b的坐标。此外,

表1 气候环境变量
Tab. 1 Climate environment variables

变量 Variables	含义 Meaning	单位 Unit
bio_1	年平均气温annual mean tempeamture	°C
bio_2	平均气温日较差mean diurnal rarge	°C
bio_3	等温性isothermality (bio_2 / bio_7) × 100	—
bio_4	气温季节性变动系数temperature seasonality (standard deviation × 100)	—
bio_5	最热月份最高温度max temperature of warmest month	°C
bio_6	最冷月份最高温度min temperature of coldest month	°C
bio_7	气温年较差tempeature annual range (bio_5 - bio_6)	°C
bio_8	最湿季度平均温度mean temperature of wettest quarter	°C
bio_9	最干季度平均温度mean temperature of driest quarter	°C
bio_10	最暖季度平均温度mean temperature of warmest quarter	°C
bio_11	最冷季度平均温度mean temperature of coldest quarter	°C
bio_12	年降水量annual precipitation	mm
bio_13	最湿月份降水量precipitation of wettest vbnth	mm
bio_14	最干月份降水量precipitacion of driest month	mm
bio_15	降水量季节性变化precipitation seasonality (coefficient of variation)	mm
bio_16	最干季度降水量precipitacion of wettest quarter	mm
bio_17	最湿季度降水量precipitation of driest quarter	mm
bio_18	最暖季度降水量precipitation of warmest quarter	mm
bio_19	最冷季度降水量precipitation of coldest quarter	mm

建筑物占比 (AP) 和树木占比 (TP) 利用上述获取的 1 m 分辨率土地利用数据, 通过 ArcGIS 创建 30 m × 30 m 的格网, 并利用其分区统计工具, 统计出各格网中建筑物面积和林地面积, 从而推算出各格网内建筑物面积占比和树木面积占比, 计算见公式 (2)。式中, P_i 为格网内建筑物或树木的面积占比, S_i 为建筑物或树木的面积 (m^2)。

$$P_i = \frac{S_i}{900} \quad (2)$$

SDMs 也被称为生态位模型或环境响应模型, 通过对物种分布信息和环境变量进行定量分析, 从而实现物种在空间上分布的模拟预测。其中, 广义线性模型 (Generalized Linear Models, GLM) 具有解释性强、灵活性高的优点, 但其需要满足一些假设限制; 随机森林模型 (Random Forest, RF) 具有处理能力强、不需要满足特定的分布假设的优点, 但其解释性较弱; 最大熵模型 (Maxent) 具有灵活性高、内置强大的正则化机制的优点, 但泛化能力较弱。综上, 本研究基于相关性分析结果, 利用 R 语言的 “Biomod2” 程辑包^[14], 构建上海中心城区鸟类物种分布 GLM、RF、Maxent 模型探究物候、植被以及人类活动对鸟类分布的贡献度及其之间响应关系, 并通过受试者工作特征曲线与坐标轴围城的面积 (Area Under the Curve, AUC)、真实技巧统计值 (True Skill Statistic, TSS) 和 Kappa 对各模型准确度进行检验, 实现对上海市中心城区鸟类适生区分布适宜性的模拟。

2.2 生态源地识别与景观阻力面构建

景观连通性是维持生态斑块功能和生态流平稳运行的前提, 对生物多样性保护和生态系统稳定性至关重要^[15]。目前, 常用的评价指标主要有连接指数、可能连通性以及

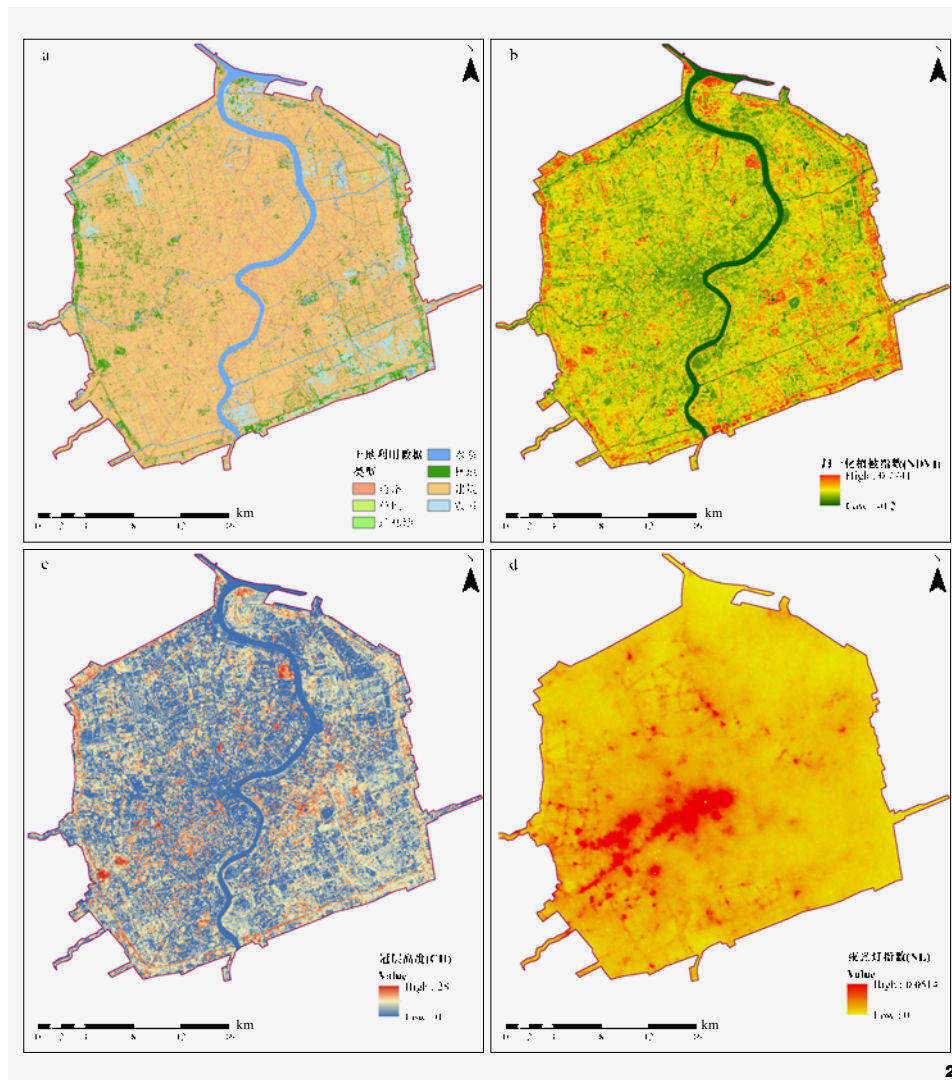


图2 土地利用、NDVI、冠层高度及夜光灯数据分布图
Fig. 2 Distribution map of land use, NDVI, canopy height, and night light data

斑块重要性指数^[16]。本研究将 SDMs 模拟结果的高适生区作为备选生态源地, 且面积大于 30 hm^2 的生态斑块作为备选生态源地 1, 此外, 选择备选生态源地面积大于 10 hm^2 生态斑块利用 Conefor 2.6 软件^[17] 及其 ArcGIS 插件计算其景观连通性, 并将斑块重要性指数在前 30% 的斑块作为备选生态源地 2。大面积核心斑块 (备选生态源地 1) 和高重要性斑块 (备选生态源地 2) 共同构成最终生态源地。

景观阻力面通常用来描述地表不同区域对物种迁移和分布的影响程度, 往往考虑不同物候、地形、土地利用/覆被、城市建设强度及人类活动等对物种迁移活动的影响。传统景观阻力面构建通常依据生物通过不同类型环境的难易程度进行阻力赋值, 结合专家打分或主成分分析, 通过加权叠加运行计算获得综合景观阻力面^[18]。上述方法依赖专家经验, 且仅将不同环境因素线性叠

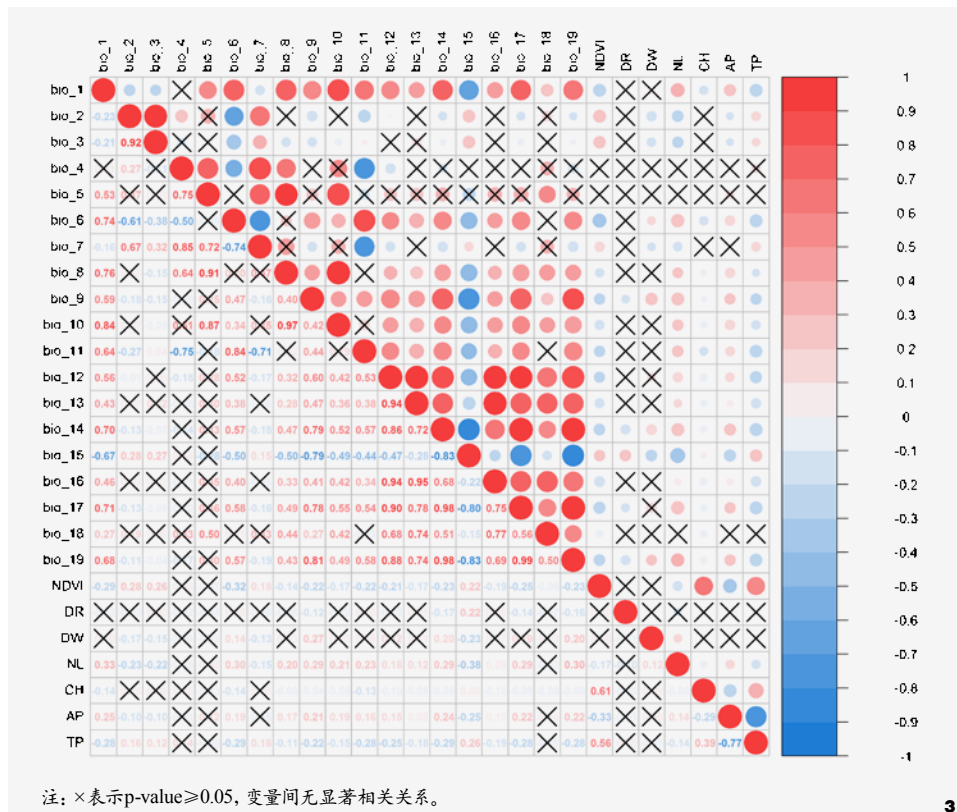


图3 环境因子相关性热图
Fig. 3 Heatmap of environmental factor correlation

加, 而往往实际中大多为非线性关系, 一些学者开始基于物种分布模型结果绘制物种迁移景观阻力面^[19-20]。为考虑不同环境变量间的非线性关系, 本研究依据鸟类适宜性分布SDMs模型模拟结果计算综合景观阻力面, 见公式(3)。

$$R = (1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i) \times 100 \quad (3)$$

式中, R 为阻力值, 数值越大, 阻力越大; S_i 为鸟类适宜性分布SDMs模型 i 模拟结果, 范围为0~1, 数值越大, 适宜程度越高, 阻力越小; n 为模型个数。

2.3 生态廊道模拟

生态网络作为一种生态规划和保护策

略, 旨在在城市和自然环境之间建立联系, 以促进生态系统的健康和生物多样性的维护, 构建生态网络对解决生态源地破碎化问题, 增强生态源地间的连接度具有重要意义^[21]。本研究基于ArcGIS 10.2, 利用McRae等开发的GIS插件Linkage Mapper 2.0^[22]进行LCP模拟及生态廊道提取, 该工具通过计算每个像元距离最近“源”的成本加权距离形成成本加权距离面, 计算最低成本加权距离, 生成一个核心区到另一个核心区的最小“成本”路径, 最早应用于野生动物栖息地连接度分析^[23]。具体而言, 利用Linkage Pathways Tool工具集中Build Network and Map links工具条, 同时采用欧几里得和成本加权距离(cost-weighted & Euclidean)的网络邻接方法,

并限制每个核心区最大相邻连接数为4, 截断成本加权距离阈值设置为200 000, 模拟生成最小成本廊道。

本研究在提取出最小成本路径的基础上, 基于电路理论通过调用Circuitscape软件利用Centrality Mapper模块分析生成的连接网络, 计算出每个核心区电流流动中心性, 即该连接对于维持整个网络连通性的重要性程度, 电流流动中心性越高, 该核心区对保持整个网络的连通性贡献越大。同时, 本研究利用Pinchpoint Mapper模块进行生态夹点识别, 夹点区域为电流值较大的区域, 代表影响整个景观连接度的“瓶颈”地区, 对维持整个网络的连接性至关重要, 模块运行核心参数CWD cutoff distance设置为10 000, Circuitscape模式采用Pairwis。此外, 本研究还利用Barrier Mapper模块进行障碍点识别, 障碍点是指对生态走廊的质量和位置产生不利影响因素, 模块核心参数Minimum Detection Radius设置为50, Maximum Detection Radius设置为100, 检测步长为50, 组合方法为Sum。

3 结果与讨论

3.1 鸟类适生环境分析

3.1.1 特征因子筛选

本研究利用Spearman相关性分析计算19个物候数据以及NDVI、DR、DW、NL、CH、AP和TP相关关系。从图3可以看出, bio_4、bio_5与其他物候因子间的相关关系不显著, 且bio_4和bio_5之间显著正相关, 相关系数达0.75 (p-value < 0.05), bio_1-bio_19绝大多数两两间存在显著较强相关性, 其他环境变量中DR、DW和NDVI、NL、CH、AP和TP均不存在显著相关关系, NDVI、NL、CH、AP之间相关性较低, AP与TP存在显著负相关关系, 且相关系数为-0.77 (p-value < 0.05)。一般来说, 当相

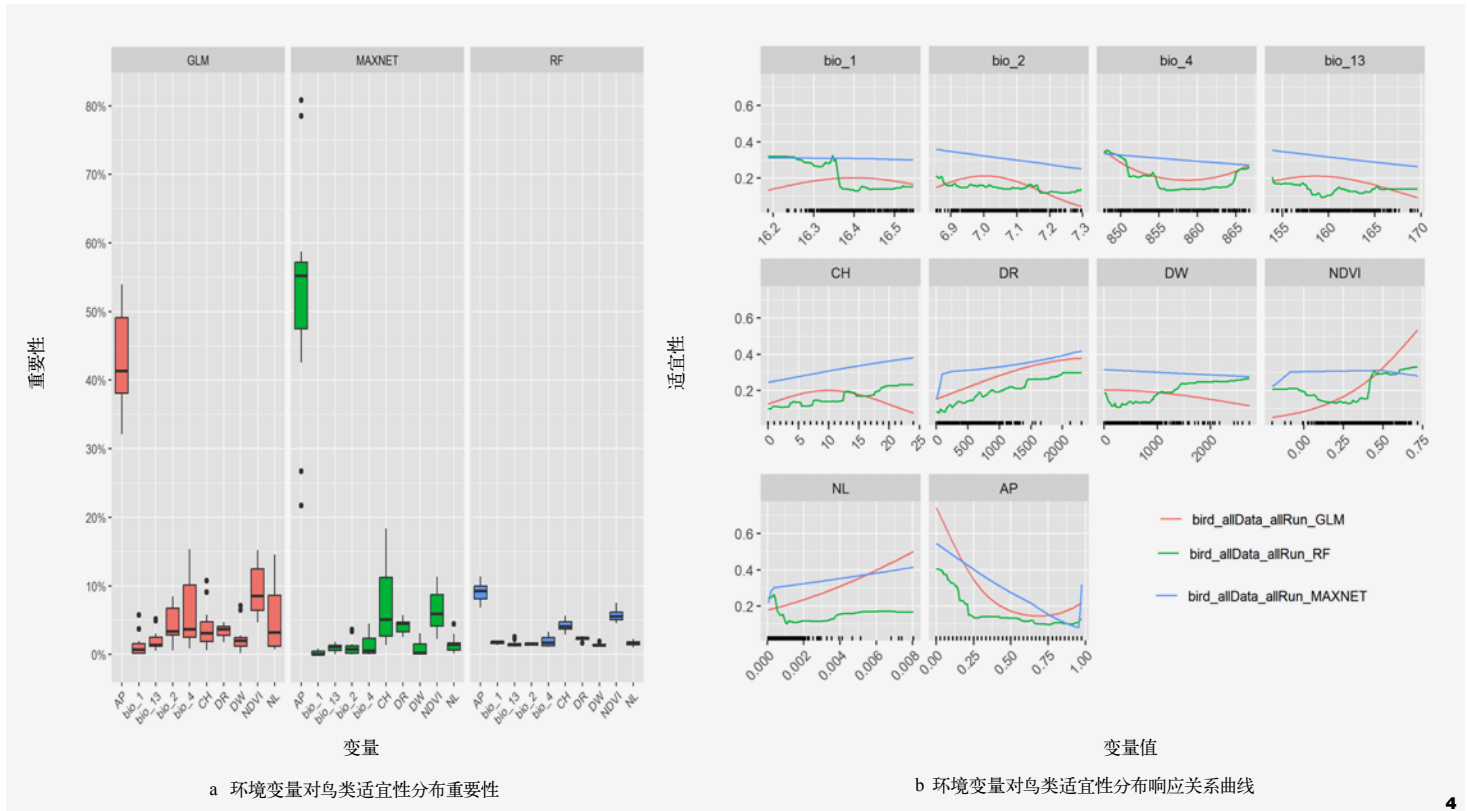


图4 GLM、RF和Maxent模型下各环境变量重要性及其对鸟类适宜性分布响应曲线图
Fig. 4 Importance of environmental variables and their response curves for bird suitability under GLM, RF, and Maxent models

关系数绝对值分别介于0.1 ~ 0.3、0.3 ~ 0.5和大于0.5时，认为变量间存在弱相关、中度相关和强相关关系。同时，相关研究表明建筑指数是鸟类物种、谱系以及功能多样性的重要影响因素^[24]。因此，本研究筛选出相关系数低于0.5及与其他变量不存在显著相关关系的环境变量进行SDMs模型构建，即为bio_1、bio_2、bio_4、bio_13、NDVI、DR、DW、NL、CH及AP总计10个变量。

3.1.2 物种分布模型结果分析

本研究基于GLM、Maxent和RF模型模拟了上海中心城区鸟类分布适宜性，三种模型交叉验证的AUC、TSS和KAPPA预测结果表明RF模型预测精度最高，Maxent模型预测精度优于GLM模型(表2)。此外，本研究还挖掘了三种模型下各环境变量重要性及其响应关系，结果表明：AP是影响鸟类分布最为重要的因素，NDVI次之，bio_1、bio_2、bio_4、

bio_13、DW、DR、NL以及CH对鸟类分别影响较小(图4)；AP与鸟类适宜性呈现出明显的负相关关系，AP越高越不适宜鸟类生存。

3.2 生态源地与景观阻力面分布

本研究利用SDMs模型模拟上海中心城区鸟类适宜性分布，模拟结果越高表明越适宜鸟类生存，GLM、RF和Maxent模型模拟结果通过自然断点法将全部区域划分为非适生区、低适生区、中适生区和高适生区4类，如图5-a、图5-b、图5-c所示，三种模型模拟高适生区模拟范围呈现出RF < GLM < Maxent的趋势。本研究将三种模型模拟出的高适生区合并为源地备选斑块，合计面积为9 033.33 hm²(图5-d)，筛选面积大于30 hm²生态斑块，以及面积大

表2 GLM、RF和Maxent模型精度评定结果表
Tab. 2 Evaluations of GLM, RF and Maxent models

模型 Models	AUC	TSS	KAPPA
GLM	0.927 ± 0.013	0.710 ± 0.023	0.707 ± 0.027
RF	0.999 ± 0.001	0.979 ± 0.011	0.978 ± 0.012
Maxent	0.939 ± 0.016	0.726 ± 0.030	0.725 ± 0.036

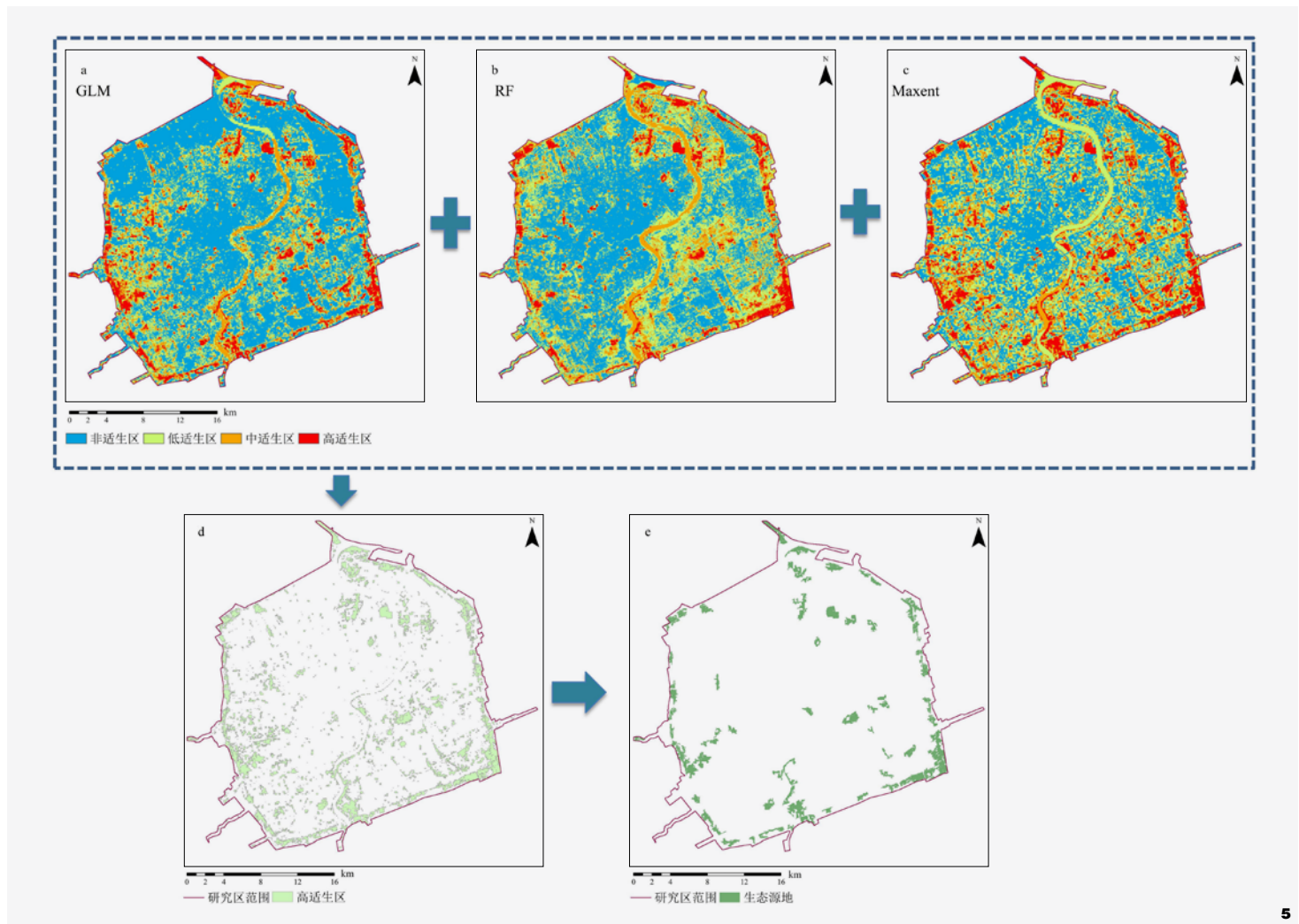


图5 生态源地识别结果
Fig. 5 Identification results of ecological sources

于10 hm²且其斑块重要性指数为前30%的生态斑块，识别出60个生态斑块为生态源地，主要位于外环绿带及城中楔形绿地区域，合计面积为4 975.47 hm²，其中，最大斑块面积431.73 hm²，最小斑块面积16.47 hm²（图5-e）。

本研究利用GLM、RF和Maxent适宜性结果通过公式(3)计算得综合景观阻力面，如图6所示。结果显示，综合景观阻力值介于12~98，外环绿带、城中楔形绿地区域阻力值较低，城中心大部分区域阻力值较高，这

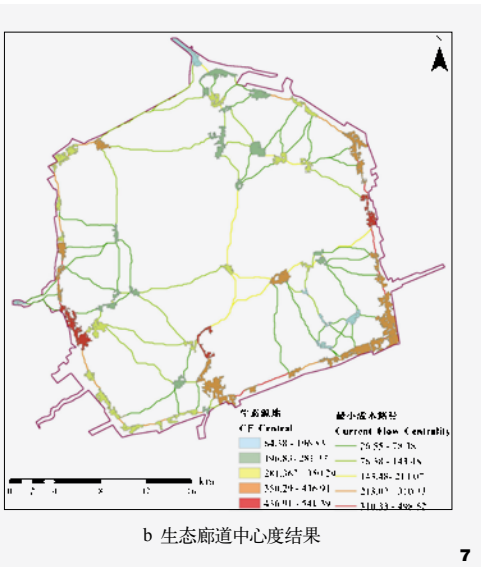
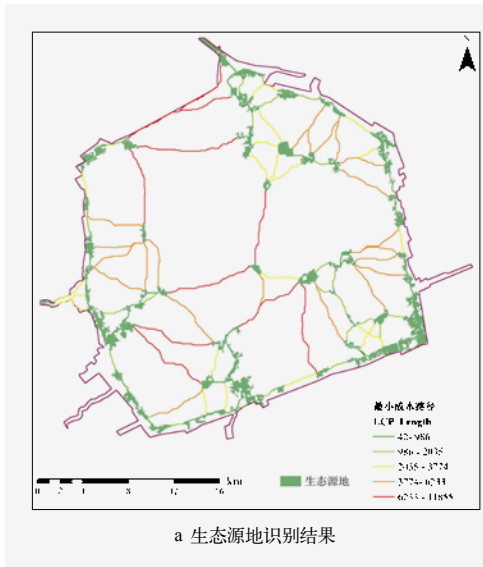
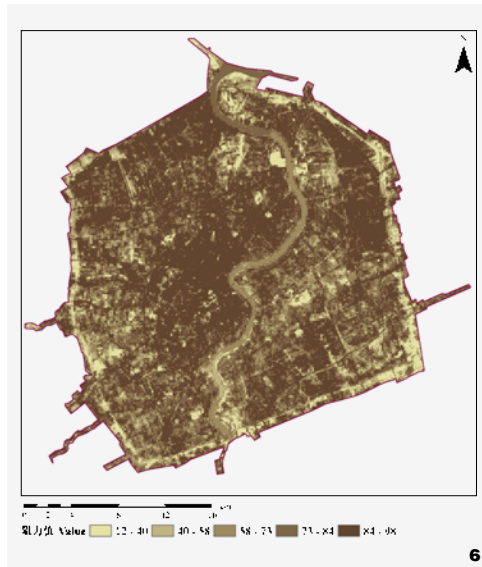
主要是由于城中心大部分为中央活动区，该区域建筑物占比较多、人类活动频繁、植被覆盖相对较少。

3.3 生态网络构建

3.3.1 生态廊道构建及中心度识别

基于LCP识别生态廊道111条（图7-a），总长达300.83 km，平均廊道长度2.71 km，其中最短为42 m，最长达11 855 m。生态廊道及生态源地中心性分析结果（图7-b）显示

111条生态廊道中心性为26.55~198.52，平均廊道中心性为158.1，Centrality Mapper结果表明60个生态源地中心性介于84.38~541.39，平均中心度为321.98。研究表明：外环绿带之间的生态廊道长度较小，但其中心度最高，且外环绿带处生态源地中心度相对较高，城中楔形绿地之间生态廊道长度最长，但其中心度却相对较低，综上，无论是外环绿带生态源地还是其间的生态廊道均对整体连通性贡献最大。



3.3.2 生态廊道夹点与障碍点识别

基于 Pinchpoint Mapper 识别的生态廊道“夹点”区域和 Barrier Mapper 识别的障碍区域如图 8 所示。“夹点”通过将相邻节点间具有一定“宽度”的生态廊道看作一个导电表面，向一个节点输入 1 A 的电流，通过迭代计算到另一个接地节点的廊道内栅格的电流值来识别，电流值较大的区域即为整条廊道的夹点区域。障碍点通过使用圆形移动窗口计算比较移除和恢复阻力值的最小成本路径获得。本研究利用自然断点法将 Pinchpoint Mapper 和 Barrier Mapper 识别结果划分为 5 个等级，最高一级划定为生态“夹点”地区（图 8-a）和障碍点地区（图 8-b），生态“夹点”和障碍点均呈现出零散分布的特点。受边界范围的影响，研究区边界范围附近的几条廊道整体电流值均较大，其他相邻源地之间大多也存在“夹点”（0.108 ~ 0.321），但面积相对较小。此外，研究表明由于城市化进程中，工业区、住宅区以及交通设施等的快速发展，东部张江镇、东北东沟镇以及上海西站附近部分地区障碍

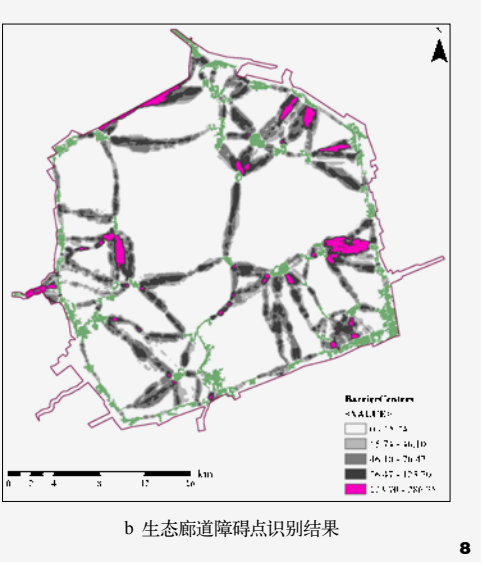
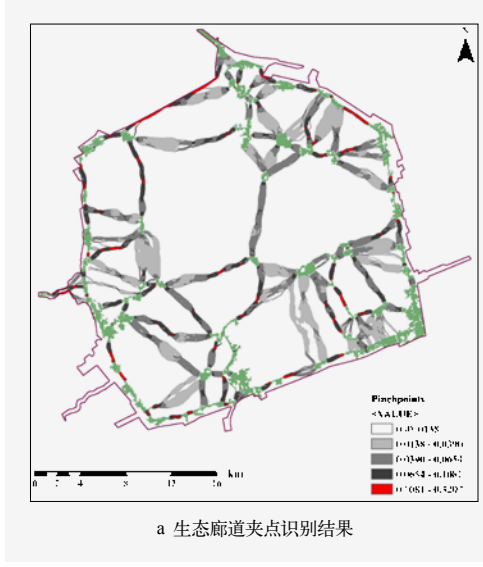


图6 综合景观阻力面分布图
Fig. 6 Distribution map of comprehensive landscape resistance surface

图7 生态源地与生态廊道中心度
Fig. 7 Ecological source areas and ecological corridor centrality

图8 生态廊道夹点与障碍点
Fig. 8 Ecological corridor pinch points and barrier points

区域（123.70 ~ 286.75）面积相对较大。

4 结论

本研究以上海中心城区鸟类多样性保护为目的，基于多源数据通过物种分布模型有

效识别出鸟类适宜生境，构建鸟类迁移景观阻力面，并进一步构建出上海中心城区鸟类多样性保护生态廊道，得到主要结论如下：

对于城市建成区，建筑物面积占比和植被指数 NDI 是影响鸟类分布最为重要的因素，

建筑物面积占比越小, NDMI越高, 鸟类生境适宜程度越高。

上海中心城区鸟类生态源地斑块面积4 975.47 hm², 占全部高适生区的55.26%, 其中林地面积占比高的外环绿带及城中楔形绿地区域是鸟类的重要栖息地, 建筑物占比较多、人类活动频繁、植被覆盖相对较少的城市中央活动区鸟类迁移阻力较高。

基于物种分布模型结合最小成本路径和电路理论构建城市生物多样性保护网络, 为高密度城市建成区的生物多样性保护和生态空间格局优化提供了新的视角和科学支撑, 对城市生态规划和可持续发展具有重要意义。

注: 图1底图为ArcGIS在线图, 文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] 世界自然基金会(瑞士)北京代表处, 深圳市一个地球自然基金会, 清华同衡规划设计研究院. 城市生物多样性框架研究[R]. 2020.
- [2] 陆亮, 郝瑞军, 梁晶, 等. 上海市基本生态网络规划策略研究[J]. 上海建设科技, 2016(2): 62-64.
- [3] 上海市绿化和市容管理局, 上海市规划和自然资源局. 上海市生态空间专项规划(2021-2035)[R]. 2021.
- [4] 李波, 贺萌, 彭琳, 等. 基于林鸟迁移扩散的重庆市高密度城区生态网络构建研究[J]. 中国园林, 2023, 39(7): 35-39.
- [5] 田北辰, 李沛权, 黄千杜. 基于鸟类视角的城市生态廊道构建方法研究综述[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 3010-3022.
- [6] 郭诗怡, 斋藤馨, 夏原由博, 等. 城市建成环境对鸟类多样性的影响机制研究评述及展望[J]. 中国园林, 2022, 38(2): 71-76.
- [7] 阳文锐, 李婧, 闻丞, 等. 基于物种分布的北京平原生态网络构建[J]. 生态学报, 2022, 42(20): 8213-8222.
- [8] 王春晓, 何建华, 刘殿锋, 等. 土地利用变化对鸟类栖息地连通性的影响——以鄂州市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 4197-4208.
- [9] 刘俊男, 陈航, 高凯. 基于城市生物多样性保护的环滇池鸟类生境识别与网络构建[J]. 中国园林, 2022, 38(10): 32-37.
- [10] YANG X, LIU W, LI S, et al. Restoration of Urban Waterbird Diversity: A Case Study of the Construction of a Waterbird Ecological Corridor in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, Southern China[J]. Global Ecology and Conservation, 2022, 39: e02277.
- [11] 干靓, 郭光普. 上海高密度城区不同用地的鸟类群落结构研究[J]. 中国城市林业, 2017, 15(2): 18-23.
- [12] 王云才, 卢星昊, 王若静. 上海主城区绿地对鸟类多样性的影响及其边际效应[J]. 中国城市林业, 2023, 21(4): 1-7.
- [13] LI Z, HE W, CHENG M, et al. SinoLC-1: The First 1-Meter Resolution National-scale Land-cover Map of China Created with the Deep Learning Framework and Open-access Data (User guide V2.4)[DB]. Zenodo, 2023.
- [14] THUILLER W, GEORGES D, ENGLER R, et al. Biomod2: Ensemble Platform for Species Distribution Modeling[J]. R Package Version, 2016, 3(3): r539.
- [15] 杜箫宇, 吕飞南, 王春雨, 等. 基于MSPA-Conefor-MCR的县域尺度生态网络构建——以延庆区为例[J]. 应用生态学报, 2023, 34(4): 1073-1082.
- [16] 王越, 赵雯琳, 刘纯青. 基于MSPA-Conefor-MCR路径的生态网络优化及其构建——以彭泽县为例[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(2): 504-518.
- [17] SAURA S, TORNÉ J. Conefor Sensinode 2.2: A Software Package for Quantifying the Importance of Habitat Patches for Landscape Connectivity[J]. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(1): 135-139.
- [18] 马驰骋, 杨东峰, 李康康. 基于电路理论的高原寒地县域生态网络构建[J]. 中国城市林业, 2023, 21(5): 95-102.
- [19] LIU C, NEWELL G, WHITE M, et al. Identifying Wildlife Corridors for the Restoration of Regional Habitat Connectivity: A Multispecies Approach and Comparison of Resistance Surfaces[J]. PLoS One, 2018, 13(11): e0206071.
- [20] SHAHNASERI G, HEMAMI M R, KHOSRAVI R, et al. Contrasting Use of Habitat, Landscape Elements, and Corridors by Grey Wolf and Golden Jackal in Central Iran[J]. Landscape Ecology, 2019, 34(6): 1263-1277.
- [21] 胡炳旭, 汪东川, 王志恒, 等. 京津冀城市群生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4383-4392.
- [22] MCRAE B H. Isolation by Resistance[J]. Evolution, 2006, 60(8): 1551-1561.
- [23] 宋利利, 秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3344-3352.
- [24] 杨雪如. 南京城市公园鸟类多样性及其影响因素[D]. 南京: 南京师范大学, 2022.