

深圳鸟类适宜性生境时空分布格局变迁及驱动力探究

An Examination of the Spatiotemporal Patterns and Underlying Factors Influencing Avian Habitat Suitability in Shenzhen

王昭熙¹ 况 达² 刘钊启² 李相逸^{2,3*}
WANG Zhaoxi¹ KUANG Da² LIU Qizhao² LI Xiangyi^{2,3*}

(1.天津大学建筑学院, 天津 300072; 2.深圳大学建筑与规划学院, 深圳 518057; 3.亚热带建筑与城市科学国家重点实验室, 广州 510640)

(1. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin, China, 300072; 2. School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong, China, 518057; 3. State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science, Guangzhou, Guangdong, China, 510640)

文章编号: 1000-0283(2026)03-0076-09

DOI: 10.12193/j.laing.20250327001

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2025-03-27

修回日期: 2025-10-19

摘 要

生物多样性保护是城市生态系统可持续发展的核心议题。中国将“城市生物多样性保护”纳入国家战略体系,着力推进生物多样性要素与城市规划的深度融合。鸟类作为重要的指示物种,其生境选择可作为衡量城市生态环境质量的关键指标。通过运用随机森林算法,对2010年、2015年及2020年深圳市的鸟类数据与环境数据展开训练,旨在揭示高密度城市化进程中鸟类栖息地选择模式对环境因子的响应机制。通过特征重要性解析,识别出影响鸟类生存的关键因子,并提出具有针对性的生物多样性保护策略。经深入分析论证,研究结果如下:(1)鸟类生境热点集中于自然保护区、城市边缘带和绿色基础设施,冷点在高强度开发区域;(2)部分鸟类在2020年出现新的生境热点,表明该区域生态环境得到修复提升;(3)鸟类对城市化适应性差异明显,陆禽与鸣禽对城市化的适应程度不断增加,攀禽与游禽对生态栖息地依赖性较强;(4)气候因子、归一化植被指数、植被类型、水源距离影响显著,人为干扰因子影响的差异性较大。

关键词

鸟类适宜生境;生态修复;生物多样性保护;机器学习;高密度城市

Abstract

Biodiversity conservation is a core issue for the sustainable development of urban ecosystems. China has incorporated “urban biodiversity conservation” into its national strategic system, with a focus on the deep integration of biodiversity elements into urban planning. As important indicator species, birds’ habitat selection can serve as a key measure of urban ecological environment quality. This study employs the Random Forest algorithm to train on bird and environmental data from Shenzhen in 2010, 2015, and 2020, aiming to elucidate the mechanisms underlying the responses of bird habitat selection patterns to environmental factors during high-density urbanization. Using feature-importance analysis, the key factors affecting bird survival are identified, and targeted biodiversity conservation strategies are proposed. After in-depth analysis and argumentation, the following conclusions are drawn: (1) The hotspots of bird habitats are concentrated in nature reserves, urban fringe areas, and green infrastructure, while the cold spots are in high-intensity development areas. (2) The emergence of new habitat hotspots for certain bird groups in 2020 indicates that the ecological environment in some regions has been restored and improved. (3) There is a significant difference in the adaptability of birds to urbanization. The adaptability of terrestrial birds and songbirds to urbanization has increased over time, whereas climbing birds and waterfowl show a stronger dependence on ecological habitats. (4) Climatic factors, NDVI, vegetation types, and distance to water sources have significant impacts, while the influence of human disturbance factors varies greatly.

Keywords

bird suitable habitat; ecological restoration; biodiversity conservation; machine learning; high-density urban

王昭熙

2000年生/女/山西长治人/在读博士研究生/
研究方向为城市生态学

况 达

1991年生/男/重庆人/博士/助理教授/研究
方向为承洪韧性、灾害韧性和雨洪管理

李相逸

1990年生/女/甘肃陇南人/博士/副教授、硕
士生导师/研究方向为景观生态修复、景观
规划设计

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: lixiangyi@szu.edu.cn

基金项目:

广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金面上项目“建成环境对鸟类多样性影响机制下的粤港澳大湾区生态修复研究”(编号: 2024A1515011422); 广东省哲学社会科学规划青年项目“基于鸟类多样性提升的红树林湿地保护与城市生态发展研究”(编号: GD24YYS21); 广东省自然科学基金面上项目“泛洪区乡村家庭承洪韧性评估及提升路径研究——以广东北江中游为例”(编号: 2025A1515010973)

城市环境是人类赖以生存的保障, 是其他生物栖息繁衍的基底。随着现代城市建设的发展和人口数量攀升, 城市建设空间扩张, 并不断侵蚀自然空间, 造成了城市生态系统失衡, 生物多样性随之遭受严重破坏, 快速城镇化建设与生态保护之间的矛盾激烈。生物多样性与人类社会之间构成了相互依存的关系^[1]。生物多样性作为人类社会生存和发展的物质基础^[2], 不仅能帮助提升城市人群的身心健康, 而且有助于提高城市地区的健康福祉水平, 保护城市生物多样性具有重要的意义和价值^[3]。

鸟类作为城市生态系统食物链高营养级物种, 因其分布范围广、研究方法成熟且资料齐全以及其对环境变化的高度敏感性, 是城市化过程中最受干扰的物种之一, 以上特征使其成为研究城市生物多样性的重要指示类群^[4]。已有研究通过鸟类多样性反映城市生态相关问题, 并取得一定成果。这些研究根据不同侧重点和研究尺度, 选择相应的数学模型, 并结合生态学、统计学和生物学等多领域的理论与方法, 构建鸟类与城市关系的模型^[5-9]。此外, 研究还从区域、城市和绿地等多个尺度出发, 识别影响鸟类生境质量的环境因子, 并建立了相应的评价体系, 为后续的生态环境修复提供重要的研究基础^[9]。

近年来, 公众科学数据被广泛应用在研究中。公众观鸟数据提供了丰富的鸟类分布样本, 为研究鸟类分布及其生态功能提供了宏观时空尺度信息^[10]。但是由于观鸟者个人主观因素^[11]和地理空间上选择偏好^[12]的影响, 在使用观鸟数据进行鸟类分布模拟时, 数据的预处理与模型选择尤为关键。机器学习模型可以自动提取复杂的高维非线性

特征, 通过多次迭代学习, 减少模型输出结果的误差。当前已有研究者开始采用随机森林、神经网络等先进模型来模拟鸟类的分布模式^[13]。

大多数利用公民科学数据开展物种分布建模的研究, 往往仅聚焦单一时间的物种分布情况, 而忽视了物种分布随时间的动态变化。此外, 在运用机器学习模型进行分布预测时, 研究人员多集中于关注模型结果, 而对环境因素对物种分布模式的具体影响关注不足。为推进城市生态系统健康发展与构建生物多样性友好型城市, 需要深入理解城市环境因子如何影响物种分布模式的演变。本研究整合了公民科学数据和多维地理空间数据, 利用随机森林模型处理高维度和复杂性数据, 构建鸟类潜在生境分布模拟模型, 系统揭示鸟类生境格局的空间变化。此外, 通过特征重要性分析, 识别影响鸟类分布的关键环境因子, 并探讨这些因子的影响随时间的变化趋势, 从生物多样性保护维度提出针对性生态保护建议, 为城市生态空间优化提供科学支撑。

1 研究区域概况

深圳市位于中国广东省南部, 珠江三角洲东岸, 毗邻香港, 是粤港澳大湾区的核心城市之一, 属于高密度城市。全市面积1 997.47 km², 建成区面积927.96 km², 占比46.42%, 绿地率43%。常住人口约1 779万人, 人均用地面积112 m²。深圳市下辖10个行政区, 主要包括福田区、南山区、宝安区、龙岗区、龙华区、罗湖区、光明区、坪山区、盐田区等9个行政区以及大鹏新区1个功能区。属亚热带季风气候, 降水充沛, 生态系

统多样, 以低丘陵和平原为主, 拥有丰富的河湖、湿地和滩涂等生态廊道, 是多种生物栖息的热点地区。然而, 深圳作为中国最具影响力、建设成果最好的经济特区, 快速的人口增长和经济发展以及短时间内高密度的集中开发建设给城市生态环境带来巨大压力, 存在生态系统退化的风险, 并进一步威胁城市中的物种多样性。这种高密度城市化导致自然生境破碎化严重, 频繁的开发建设活动对生态环境干扰较大。同时, 城市生物多样性保护的空间规划不足, 公众参与意识和能力也有待提高。保护生态环境和生物多样性, 平衡城市发展与自然保护, 是深圳未来发展的关键任务。

2 研究数据与方法

2.1 数据来源与预处理

2.1.1 鸟类观测数据

鸟类观测数据来源于eBird数据集 (<https://ebird.org>)、中国观鸟中心 (<http://www.birdreport.cn>) 与观鸟君^①。其中, eBird数据集被公认为全球最大的鸟类观测数据库。中国观鸟中心则是中国最全面的鸟类观测记录库, 覆盖了中国94%以上的鸟类物种^[10]。通过整合多源鸟类记录大数据, 可以提升数据的准确性并减少潜在的偏差。

本研究选取了2010年、2015年与2020年深圳市鸟类观测记录, 邀请深圳市观鸟协会专家进行人工校对和清洗, 确保数据质量和代表性, 最终共得到11 412条观测数据(图1)。共统计到371种鸟种, 根据鸟类生态习性分为陆禽、猛禽、攀禽、游禽、涉禽和鸣禽^[14], 其中陆禽10种、猛禽30种、攀禽34种、游禽45种、涉禽75种、鸣禽177种。考

① 由中国国家地理图书与腾讯基金会联合开发的鸟类百科类应用, 其观鸟数据由公众自发上传。

考虑到公众科学方法中固有的潜在偏差，本研究选择了30 m×30 m的格网，基于空间坐标和环境变量对观测点进行聚类合并，在每个格网内随机保留每个鸟类种群的单个观测点，以避免空间聚集。

2.2.2 建成环境因子数据

研究表明，城市中的鸟类受到多种因素影响。(1) 气候条件如年均气温、年降雨量是影响鸟类生存和栖息地选择的主要环境因子，且气候的变化会影响鸟类种群数量和栖息地选择^[15-16]。(2) 地形因子通过影响气候、植被和水源的垂直梯度间接作用于鸟类多样性，海拔可在一定范围内反映生境多样性^[17]。(3) 植被覆盖度与鸟类群落的密度及多样性呈正相关，研究表明高归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDMI)区域的鸟类种群数量更多^[18]。食物资源丰富度对鸟类栖息地选择至关重要，绿地、水域和农林用地是主要觅食区域^[19]。(4) 城市化导致生境破碎化和岛屿化，建筑物和工程结构取代自然用地，使城市景观更加复杂^[20]。研究表明，人口密度、机动车数量和噪声水平等人为因素显著影响鸟类分布^[21]。此外，在城市化水平较低的小微湿地，鸟类物种丰富度较高^[22]。

本文选取4类14种影响因子，各变量基本信息如表1。(1) 气候因子选取年平均气温与年降水量，使用克里金插值法进行预处理以获取同空间分辨率的数据。(2) 地形因子中的坡度与坡向均由高程数据计算得到。(3) 生境因子包括NDVI，土地覆盖类型，与水体、海岸线的距离，植被覆盖类型。土地类型分为农田、森林、灌木、草原、水域、冰雪、裸地、不透水面、湿地9种类型，距离水、海岸线以及城镇的距离均为像元到最近

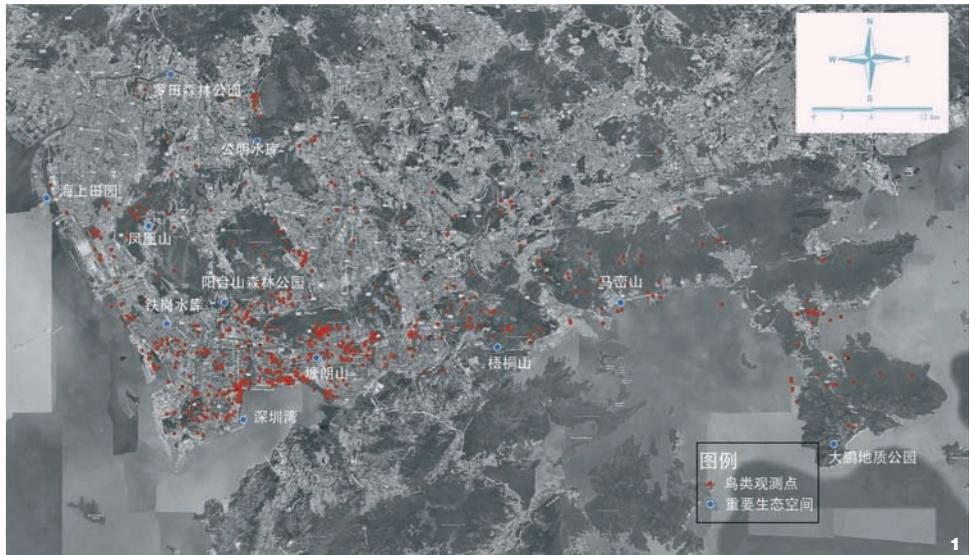


图1 鸟类观测点分布
Fig. 1 Distribution of bird observation points

表1 鸟类影响因子选择
Tab. 1 Selection of bird influencing factors

因子类型 Factor type	建成环境因子 Built environment factor	简写 Abbreviation	来源 Source
气候因子	年均气温	AAT	ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/isd-lite/
	年降水量	AP	
地形因子	高程	DEM	地理空间数据云
	坡度	S	
	坡向	A	
生境因子	归一化植被指数	NDVI	https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111395
	土地覆盖类型	LC	https://doi.org/10.5281/zenodo.5816591
	与水体的距离	WD	—
	与海岸线的距离	CD	—
人为因子	植被覆盖类型	PC	https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/26a0f-46c95ee4c29b5c650b129aab788
	人口密度	PD	LandScan 全球人口密度数据
	与城镇的距离	UD	—
	夜间灯光指数	NLI	EANTLI 夜间灯光数据集
	与道路的距离	RD	OSM 网站的历史道路数据

目标要素的欧式距离；植被类型包括常绿阔叶林、常绿针叶林、常绿阔叶灌木、落叶阔叶灌木、常绿针叶灌木、落叶针叶灌木、人工草场、天然草地等。(4) 人为影响数据主

要包括人口密度，夜晚灯光指数，以及与城镇、道路的距离。所有空间环境数据均进行重采样，分辨率为30 m×30 m，经掩膜提取后，使用栅格计算器进行归一化处理。

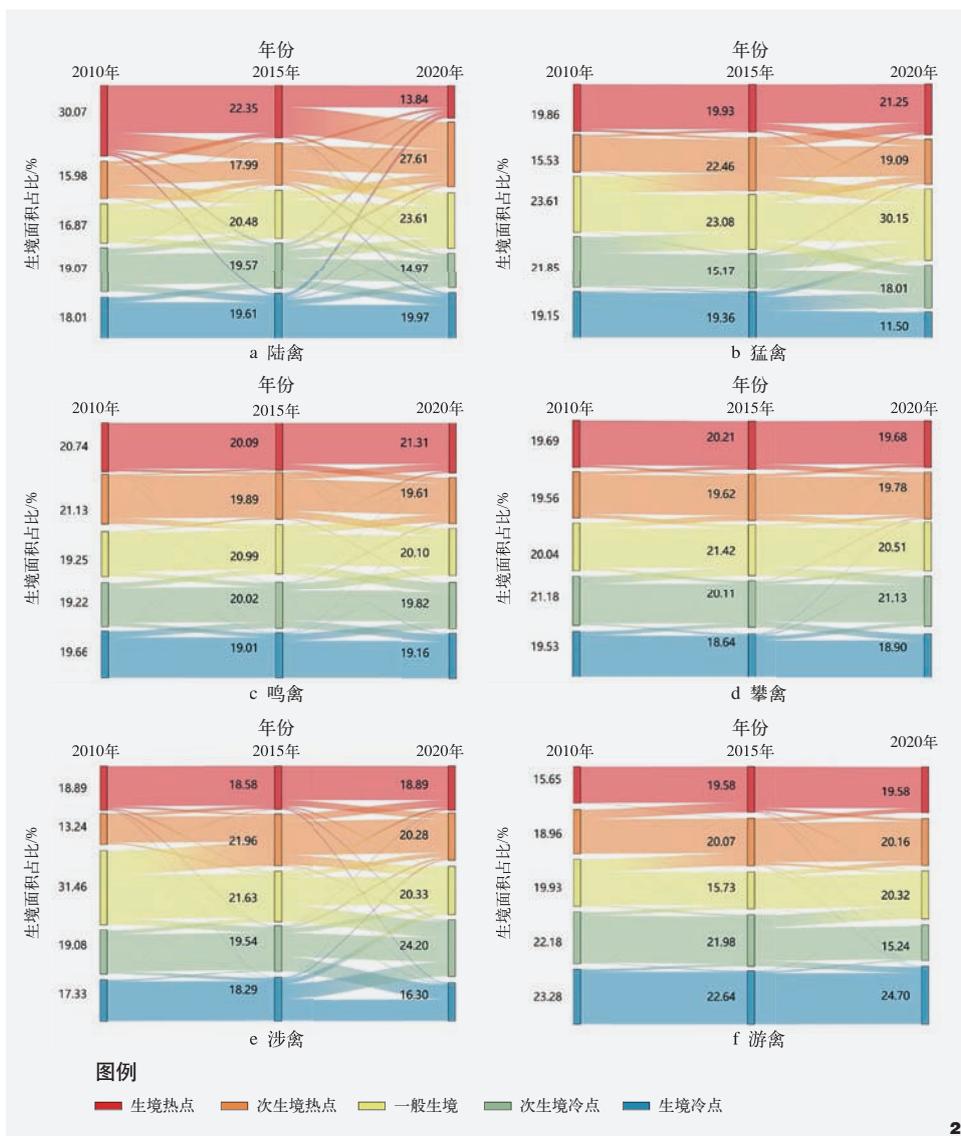


图2 2010年、2015年、2020年鸟类生境冷热点面积占比变化
Fig. 2 Changes in the proportion of cold and hot spot areas of bird habitats in 2010, 2015, and 2020

2.3 研究方法

随机森林是一种由美国科学家Breiman L.提出的机器学习算法，基于Bagging集成学习理论和随机子空间方法^[23]。本研究中的鸟类观测数据和环境因子数据具有高维度和复杂性，随机森林能够有效处理这些数据，避免因数据量大或特征多而导致的过拟合问题。此外，鸟类栖息地选择受多种环境因子的

的综合影响，这些因子之间存在复杂的非线性关系和交互作用。随机森林能够自动捕捉这些复杂关系和交互效应，从而更准确地模拟鸟类分布模式。同时，该模型具有一定的解释性，可以计算出不同环境因子特征对输出结果的影响程度。

在随机森林模型的训练阶段，通过人工判别补充鸟类不存在的数据点，将存在鸟

类的观测点标记为1，不存在的标记为0，并将其与环境栅格数据集进行空间匹配，形成训练样本。其中，70%的数据用于训练模型，30%的数据用于测试模型性能，并根据ROC曲线调整参数以达到最佳效果。使用模型模拟时，保持参数不变，改用回归随机森林，以输出鸟类出现的概率。最后，通过量化各环境因子对模型预测结果的贡献程度，进行因子分析，以揭示关键环境因子对鸟类分布的影响。

3 研究结果

3.1 模型性能评估

本研究采用AUC值评估随机森林模型的性能(表2)。结果显示，6类鸟类的AUC值均大于0.90，表明模型具有较高的预测精度，能够有效预测研究区域的鸟类生存情况。

表2 6类鸟类群随机森林模型AUC值
Tab. 2 AUC values of random forest models for six types of bird populations

鸟类分类 Avian group	AUC 值 AUC value
陆禽	0.90
猛禽	0.96
鸣禽	0.97
攀禽	0.98
涉禽	0.98
游禽	0.93

3.2 鸟类适宜性生境冷热点变化

使用训练好的模型模拟2010年、2015年与2020年三个时期各个鸟类在不同区域的出现概率作为生境适宜度，基于自然断点法将结果分为5类，分别为生境热点、次生境热点、中生境、次生境冷点和生境冷点，得到深圳市不同鸟类三个时间节点的生境冷热点面积变化及空间分布变化(图2, 图3)。

(1) 陆禽的生境热点面积数量上呈现持续收缩趋势，但2020年南山公园与深圳湾地区出现局部修复，生境冷点与次生境冷点的面积之和也有所降低(图2-a)。空间分布上，陆禽生境热点经历了“扩张-收缩-局部修复”的三阶段变化。2010年其生境热点广泛分布于研究区内部，生境冷点主要集中在西海岸地区及部分有大面积水体的区域。2015年，南山区南部的生境热点消失。2020年，研究区中部的生境热点进一步减少，热点重心向南部偏移，南山公园与深圳湾地区经过重新成为适合陆禽栖息的场所(图3-a)。

(2) 猛禽的生境热点数量呈现出缓慢扩大的趋势，其生境冷点和次生境冷点的面积之和不断减小，并逐渐转化为一般生境和次生境热点(图2-b)。空间上，猛禽的生境热点主要集中在林地资源丰富且临近水源地的区域，如宝安区北部的茅洲河、阳台山—铁岗水库—塘朗山片区等，冷点地区主要集中在西部沿海地区。2015年，全域范围内的次级生境热点向四周扩散，西部部分次级生境热点转变为生境热点。2020年，除西海岸地区外，绝大多数地区的生境冷点转变为次级生境冷点或一般生境。这表明猛禽的栖息环境得到了显著改善，研究区内林地的保护工作取得了显著成效，生态功能向周围辐射(图3-b)。

(3) 鸣禽各等级生境的占比较为均衡，生境热点在初期略有减少，随后又有所增加，次生境热点持续减少并转化为生境热点和一般生境，冷点面积变化不明显(图2-c)。空间上，鸣禽生境呈现“自然区修复与建成区退化”的空间分异。鸣禽的生境热点分布广泛，多为自然保护区、森林公园或湿地，如宝安区北部的罗田森林公园、海上田园等。生境冷点主要集中在各行政区中部的建成区。

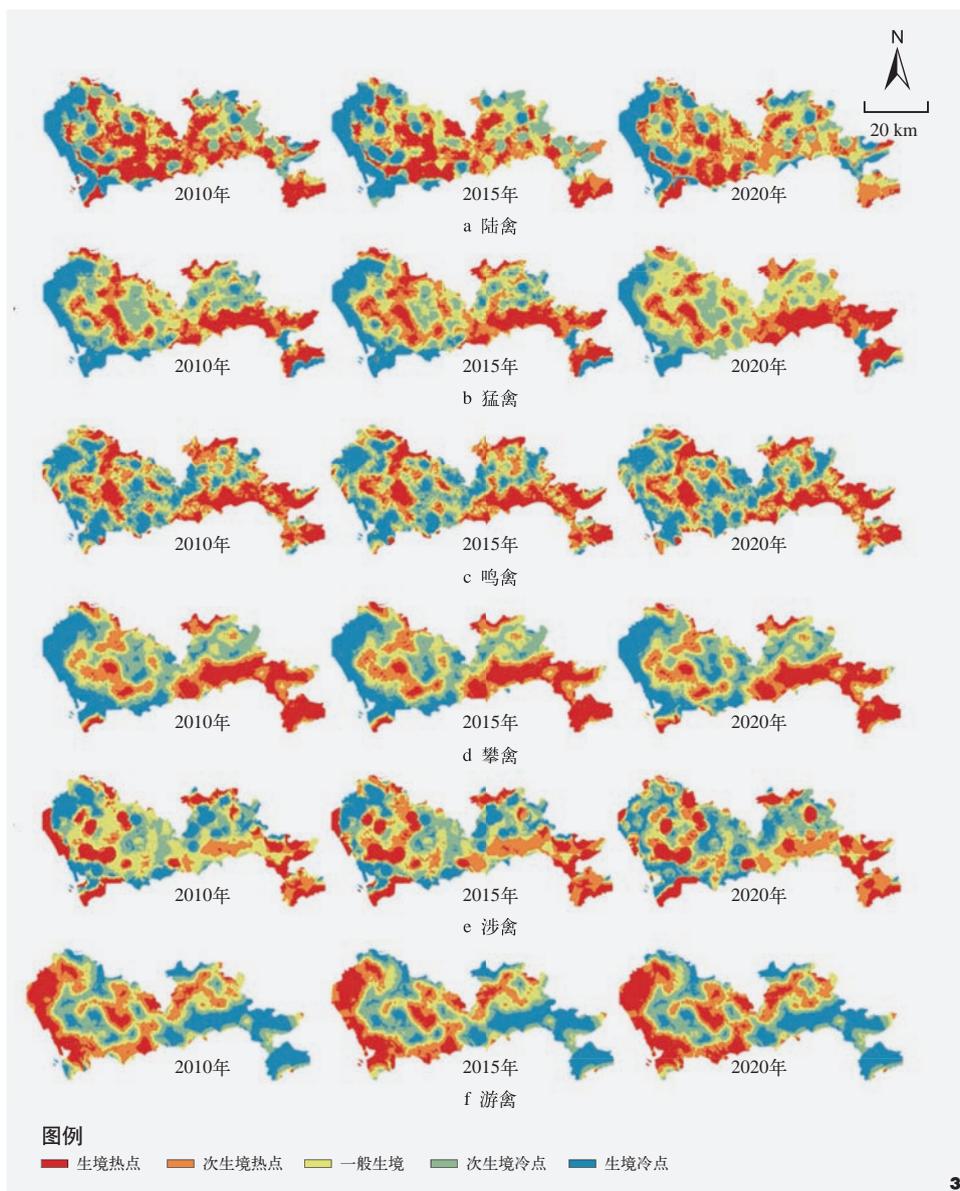


图3 2010年、2015年、2020年鸟类生境冷热点空间分布变化
Fig. 3 Spatial distribution changes of cold and hot spot areas of bird habitats in 2010, 2015, and 2020

2010—2015年，马峦山地区的生境热点收缩。2020年，研究区西部与大鹏区的生境热点面积显著扩大，深圳湾地区的热点更为明显，龙岗区东部出现新的生境热点，但光明区与龙岗区建成区的生境冷点进一步扩大，说明这些区域的人类活动对生态环境的影响仍在加剧(图3-c)。

(4) 攀禽的生境热点数量呈现出先增大后减小的趋势，生境冷点和次生境冷点在2015年都有所改善，到2020年二者面积之和再次恢复到2010年的水平(图2-d)。空间上，攀禽生境热点连通性增强，西部沿海冷点仍存在，但其他建成区冷点生态质量提升。2010年，攀禽的生境热点主要分布在林

地资源丰富的山地和森林公园, 生境冷点集中在人类活动频繁的西部沿海地区及建成区。2015年, 西部的凤凰山—铁岗水库片区次级生境热点连通性增强, 出现小面积零散分布的生境热点。2020年, 研究区西部的多个次级生境热点连通性进一步增强, 新出现的生境热点面积显著扩大, 除西海岸地区外, 其他区域的生境冷点生态质量有所提升。这表明攀禽栖息地的保护与生态修复取得了一定成效, 但尚未实现可持续的增益效果(图3-d)。

(5) 涉禽的生境热点总面积变化趋势不明显, 生境冷点和次生境冷点却呈现不断扩张的趋势(图2-e)。空间上, 涉禽的生境同样存在修复与退化共存的特征。涉禽的生境热点主要集中在水体附近, 如铁岗水库、石岩水库、深圳湾等, 冷点分布在高密度建成区内。2015年, 海上田园—机场区域的生境热点连通性降低。2020年, 光明区东部公明水库、马峦山等地区的部分次级生境热点转变为生境热点, 但宝安区海上田园以及机场区域的生境热点面积进一步减少。海上田园吸引较多的游客, 机场地区虽然开阔并且与海岸线较近, 但是工程活动、交通运输十分频繁, 生境适宜性会受到影响(图3-e)。

(6) 游禽的生境热点面积扩大了约3.93%, 是6种类群中生境热点增大最为显著的鸟类, 次生境热点面积也有所提升, 但2020年部分次生境冷点地区的生态环境质量进一步降低(图2-f)。空间上, 游禽生境经历“带状断裂—内陆缩减—海岸修复”过程。2010年, 游禽的生境热点沿西海岸地区呈现带状分布, 延伸至南部的深圳湾地区, 其他热点较小, 主要分布在河流附近, 生境冷点多分布在建成区与大型林地空间。2015年, 西海岸地带

的生境热点分裂且面积缩小, 内陆区域的生境热点也缩减, 但罗湖区的生境热点面积增大, 福田区南部出现新的生境热点。2020年, 研究区域内的生境热点面积再度扩大, 西海岸地区的生境热点连通性显著增强, 但仍未恢复到2010年的水平(图3-f)。

3.3 鸟类生境适宜度因子分析

基于模型自身的解释性能, 得出各鸟类生境适宜度影响因子的变化情况, 揭示城市化过程对鸟类生存影响的动态过程。气候因子在6类鸟类中的影响均较为显著, 尤其是年降水量在猛禽、鸣禽、攀禽、涉禽和游禽的生存中均扮演重要角色。

(1) 对陆禽生存产生显著影响的因子有年均气温、坡度、与水体的距离、NDI和人口密度, 其中与水体的距离对其影响逐渐降低, 表明陆禽对在水源附近觅食的依赖性降低。NDI的影响逐渐增强, 结合研究区内部陆禽生境热点不断收缩的趋势来看, 说明尽管研究区域内的植被覆盖度增加, 但栖息地破碎化对鸟类生存的威胁依旧存在。人口密度对陆禽的影响先增强后减弱, 同时其他人为干扰影响较小, 表明陆禽对人类环境的适应性有所增强(图4-a)。

(2) 对于猛禽而言, 其生境适宜度与气候、NDI、与海岸线的距离、夜间灯光指数以及人口密度有关。NDI对其影响先增强后减少, 到2020年植被的正向影响逐渐减弱。与2010年相比, 与海岸线的距离对猛禽的影响更为明显, 西部沿海地区的开发活动, 影响到了原有栖息地, 南山区内面积较小的生境热点也因此消失。夜间灯光指数和人口密度的影响均呈现先增强后降低的趋势, 这一变化反映了人类活动区的环境质量因开发活动而恶化, 但随后通过生态修复和环境管理

措施得到了一定程度的改善(图4-b)。

(3) 鸣禽主要受气候因子和城镇的影响。2015年, 与城镇的距离对鸣禽产生了十分显著的影响, 而后到2020年大幅度减弱, 表明在部分区域城镇地区通过绿地优化等手段提升了整体质量, 也说明鸣禽对城镇环境的适应性增强(图4-c)。

(4) 土地覆盖类型、与水源的距离以及夜间灯光指数对攀禽都会产生明显的影响。其中, 与水源的距离对攀禽的影响不断增强, 表明水源附近的湿地、湖泊等修复工作为攀禽提供了更稳定的食物条件。土地覆盖类型对攀禽的影响呈现出先增强后减弱的趋势。结合攀禽的栖息习性, 这可能与研究区内林地恢复及保护措施的实施有关。夜间灯光指数对攀禽的影响先增强后减弱, 并且攀禽受到其他人为因子的干扰也相对明显, 与城镇的距离的影响呈现出不断降低的态势, 而人口密度和与道路的距离则随着时间增强, 综合来看, 林地的保护工作一定程度上隔绝了城镇活动对栖息地的负面影响, 但建设区内部的活动, 如交通和道路建设仍会对攀禽的迁飞造成阻碍(图4-d)。

(5) 涉禽受到植被覆盖类型与用地类型的影响, 其对浅水环境和适度植被覆盖的偏好密切相关, 其中植被覆盖类型对其影响逐渐减少, 这可能与湿地生态系统的修复和保护工作有关, 例如植被结构的优化使得涉禽对植被类型的要求不再那么严格。而用地类型对其影响不断增加, 表明湿地、湖泊等用地面积减少, 对涉禽的负面影响愈发显著。综上所述, 涉禽栖息地内部的环境有所提升, 但宏观上其栖息地面临着数量减少和破碎度增加的问题(图4-e)。

(6) 游禽同样依赖水源生存, 植被覆盖类型与距水源的距离均对其产生显著影响,

但并未发生明显变化，表明其栖息地环境较为稳定。用地类型影响的增加，说明了水域等栖息地面积减少的问题。人为干扰因子中，与城镇的距离以及夜间灯光指数的影响均呈现先增强后减弱的情况，而人口密度的影响则相反，尽管城市绿化和生态保护措施在一定程度上缓解了人类活动对游禽栖息地的压力，但人口密度的增加仍然是一个不可忽视的威胁(图4-f)。

4 讨论

4.1 多源数据整合与机器学习模型构建

研究数据上，本研究整合多种公民科学数据，相比传统实地调查数据，该数据量更加丰富且具有时效性，对公众观鸟数据进行空间聚类、网格筛选等预处理，提升了自发性地理信息数据的可靠性。研究方法上，选择随机森林模型。随机森林是一种集成学习算法，能够有效处理大规模数据集，并且在处理高维特征时表现出色。此外，随机森林模型具有一定的解释性，能够通过特征重要性评估，识别出在不同时间节点影响鸟类分布的关键环境要素。这为理解鸟类分布的动态变化提供了重要依据，也为后续的保护和管理措施提供了科学指导。

4.2 鸟类生境适宜性时空特征解析

各鸟类的适宜性生境热点主要分布在以下三个区域：(1) 自然保育核心区，如铁岗水库、马峦山、大鹏地质公园等大型生态区域；(2) 城市边缘过渡带，如涉禽和游禽在机场区域的适宜性较高，该区域距离海岸线较近并且空间开阔；(3) 建成区绿色基础设施，如红树林自然保护区和深圳湾公园，这些区域对城市生态保护和恢复至关重要。生境冷点则集中于高强度开发区域，例如在密

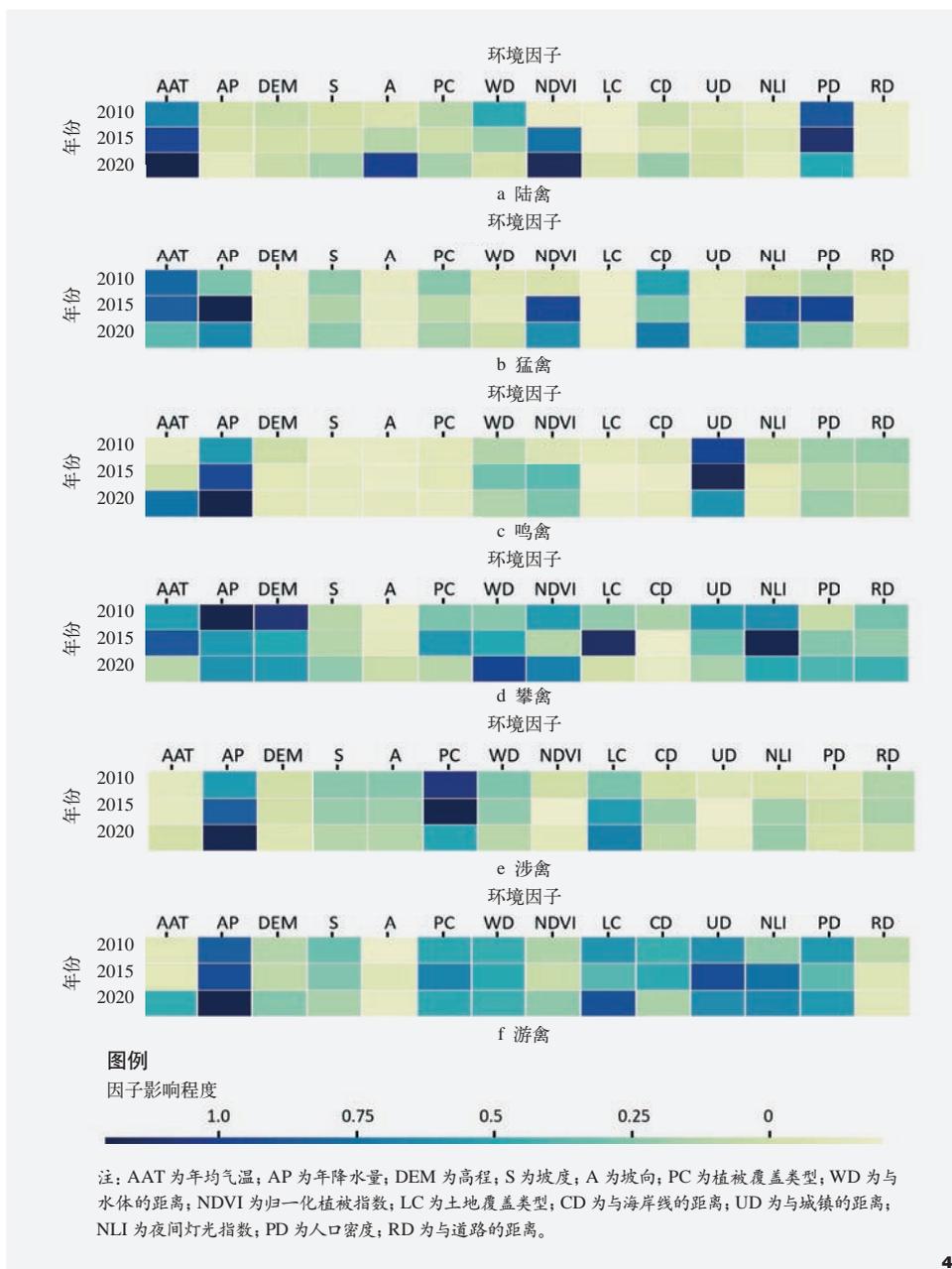


图4 2010年、2015年、2020年鸟类生境适宜度影响因素变化
Fig. 4 Changes in factors affecting bird habitat suitability in 2010, 2015, and 2020

集建设的工业园区和城中村，其内部绿色空间有限且破碎化严重。

从时间维度看，2010—2015年陆禽、鸣禽、游禽出现部分生境热点的面积缩减，尤以西部沿海建成区如机场、海上田园和中

部城市化区域如南山区北部、龙华区最为显著。而2015—2020年陆禽新生境热点的出现、猛禽与攀禽冷点适宜度的提升，以及鸣禽热点范围的扩张，共同印证了南山公园、深圳湾等核心生态节点的生境修复成效及其

空间辐射效应。

4.3 建成环境对鸟类生境适宜性影响因素分析

气候因子尤其是降水对于多种鸟类具有显著的影响, 研究表明, 温度、降水的变化会影响鸟类的迁徙活动^[23]。地形因子主要对攀禽产生较大影响, 这与其栖息地选择偏好密切相关。

生境因子中, NDI、植被覆盖类型以及与水源地距离是影响较为显著的三个因素。研究表明, NDI的提升通常能够显著增加鸟类多样性^[24], 然而, 研究结果发现NDI对陆禽的影响强度持续增强, 但陆禽的生境热点却呈现出收缩的趋势。这一现象表明, 尽管植被覆盖度在不断增加, 但栖息地的破碎化现象也愈发明显。特别是在研究区中部, 这种现象可能与城市化进程导致的林地斑块化密切相关。与此同时, NDI对猛禽的影响呈现出先增后减的态势, 这表明林地修复后植被恢复的效应逐渐达到饱和状态。涉禽对植被类型的依赖性降低, 反映出湿地植被结构得到优化, 减少了对单一类型植被的依赖性, 这可能与城市中多样化的食物来源有关。此外, 陆禽对水源地的依赖性降低, 表明城市地区为陆禽提供了新的食物来源^[25]。已有研究表明, 城市化会改变原有的栖息条件, 促成了更大的栖息地异质性^[26], 并且直接或间接提供人为食物来源。攀禽对水源距离的依赖性增强, 结合其生境热点的扩张来看, 表明其适宜栖息地内的水体和湿地质量得到了提升。

人为干扰因子中, 人口密度与夜间灯光指数的影响较为明显。通常认为, 城市的人口规模与城市的建筑密度^[27]、环境污染^[28]呈现正相关关系, 同时鸟类的栖息地在以人为主导的景观中存在严重的破碎化情况^[29], 这

些现象均会导致生态环境恶化, 鸟类数量减少, 这与本研究中人口密度较高的宝安区为多数鸟类生境冷点的发现相吻合。夜间灯光指数会影响鸟类的觅食、栖息等行为^[30], 直接影响鸟类的生存, 或者通过影响植物的生命周期、天敌的行为对鸟类产生间接影响。从时间变化来看部分鸟类受到城市化威胁程度有所减少, 在本研究中, 陆禽对人口密度的敏感度先增后减, 鸣禽对城镇距离的敏感性先增强而后显著下降, 猛禽夜间灯光指数影响的先增后减, 均显示出其对于高密度城市的适应性提升。相比之下, 游禽受人口密度的影响相对稳定, 结合其生境热点多分布在西部沿海地区的结果来看, 表明沿海开发持续对游禽的生存构成威胁。

4.4 研究不足与展望

本研究存在以下局限性。(1) 在使用随机森林模型模拟鸟类潜在分布时, 需要“伪缺席点”数据。采用手动补充的方式, 虽然比随机生成更准确, 但成本较高。未来研究可探索更具成本效益的伪缺席点获取方法。(2) 本研究受限于单一案例, 难以揭示高密度城市下鸟类群落结构及生境管理策略与其他城市的差异性。后续开展多城市比较研究, 通过控制地貌类型、气候区等自然变量, 揭示社会生态因子对鸟类分布的差异化调控机制。(3) 环境因子对物种的影响具有尺度依赖性。本研究选取了城市尺度, 未来可拓展至不同尺度, 验证模型的泛化能力, 并对不同尺度下驱动机制的异质性。

5 结论与建议

本研究通过随机森林模型对深圳市2010年、2015年和2020年的鸟类适宜性分布和环境因子数据进行分析, 揭示了高密度城市

发展中鸟类栖息地选择模式对环境因子的响应机制, 主要得出以下结论:(1) 鸟类生境热点集中于自然保护区、城市边缘带和绿色基础设施, 冷点在高强度开发区域;(2) 2015—2020年陆禽、猛禽、攀禽和鸣禽出现新的生境热点, 表明生态环境得到修复提升;(3) 鸟类对城市化适应性差异明显, 陆禽与鸣禽对城市化的适应程度不断增加, 攀禽与游禽对生态栖息地依赖性较强;(4) 气候因子、NDI、植被类型、水源距离影响显著, 人为干扰因子影响的差异性较大。

基于上述结论, 本研究提出以下针对性的建议, 以促进城市生态系统的健康发展和生物多样性保护。(1) 针对不同鸟类加强生态修复与保护措施。陆禽, 通过生态廊道连接中部绿地斑块控制栖息地破碎化; 猛禽, 抑制光污染扩散; 涉禽, 严控湿地用途转换; 鸣禽: 推广“生物友好型”城市设计(如声屏障+立体绿化组合); 攀禽, 划定生态林地保护区。(2) 对不同的地区优化生态规划。西部海岸带, 针对游禽栖息地退化, 推行“潮间带弹性修复”; 中部建成区, 通过“小微生境网络”提升鸟类适应性; 东部生态地区, 限制栖息地及周边的人类活动开发, 建设生态缓冲区。(3) 建立长期的鸟类监测网络, 及时调整和优化保护措施, 确保生态修复工作的可持续性。(4) 鼓励公众参与鸟类观测和保护活动, 提高公众对鸟类保护的重视程度。

注: 文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability[R]. International Environment Forum, 2022.

- [2] 王海洋, 王浩琪, 陈禧悦, 等. 国内外城市生物多样性评价与提升研究综述[J]. 生态学报, 2023, 43(8): 2995-3006.
- [3] 钟乐, 杨锐, 付彦荣. 基于政策文本分析的中国城市生物多样性治理进展研究[J]. 中国园林, 2022, 38(9): 51-56.
- [4] 满卫东, 刘明月, 李晓燕, 等. 1990-2015年三江平原生态功能区生态功能状况评估[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(2): 136-141.
- [5] 陈梦芸, 林广思. 城市中心区湿地生物多样性提升策略研究——以海珠湿地为例[J]. 中国园林, 2022, 38(10): 20-25.
- [6] 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.
- [7] 马彦红, 朱捷, 陈曦. 城市公园感知生物多样性促进注意力恢复的影响研究[J]. 中国园林, 2022, 38(7): 80-85.
- [8] 张梦园, 冉呈程, 滕雨欣, 等. 北京温榆河生态廊道春季鸟类物种构成与多尺度环境因子的关系[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(6): 115-127.
- [9] 李相逸, 崔冬瑾, 马超, 等. 基于鸟类生境修复与营造的湿地生态设计策略[J]. 中国园林, 2020, 36(5): 133-138.
- [10] 吴佳雨, 杨梦夏, 周侃. 基于公民科学数据的中国鸟类城市化响应及适应性[J]. 地理学报, 2023, 78(11): 2850-2863.
- [11] CALLAGHAN C T, WATSON J E M, LYONS M B, et al. Conservation Birding: A Quantitative Conceptual Framework for Prioritizing Citizen Science Observations[J]. *Biological Conservation*, 2021, 253: 108912.
- [12] DUAN H L, XIA S X, YU X B, et al. Using Citizen Science Data to Inform the Relative Sensitivity of Waterbirds to Natural versus Human-dominated Landscapes in China[J]. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(14): 7233-7241.
- [13] BIKKINA V. Comparison of Machine Learning Methods for Predicting Bird Distributions[D]. Corvallis: Oregon State University, 2014.
- [14] 李晖, 刘彦, 黄伊琳, 等. 基于Maxent模型的深圳湾鸟类热点生境判别及修复研究[J]. 中国园林, 2022, 38(12): 14-19.
- [15] LEMOINE N, BAUER H G, PEINTINGER M, et al. Effects of Climate and Land-use Change on Species Abundance in a Central European Bird Community[J]. *Conservation Biology*, 2007, 21(2): 495-503.
- [16] GASNER M R, JANKOWSKI J E, CIECKA A L, et al. Projecting the Local Impacts of Climate Change on a Central American Montane Avian Community[J]. *Biological Conservation*, 2010, 143(5): 1250-1258.
- [17] RAHBK C, GRAVES G R. Multiscale Assessment of Patterns of Avian Species Richness[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2001, 98(8): 4534-4539.
- [18] MORELLI F, BENEDETTI Y, SU T P, et al. Taxonomic Diversity, Functional Diversity and Evolutionary Uniqueness in Bird Communities of Beijing's Urban Parks: Effects of Land Use and Vegetation Structure[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 23: 84-92.
- [19] 刘奕彤, 齐增湘, 刘慧. 基于鸟类栖息地的江口鸟洲湿地适宜性评价[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(4): 83-88.
- [20] MCKINNEY M L. Urbanization, Biodiversity, and Conservation The Impacts of Urbanization on Native Species are Poorly Studied, but Educating a Highly Urbanized Human Population about These Impacts can Greatly Improve Species Conservation in all Ecosystems[J]. *Bioscience*, 2002(10): 883-890.
- [21] BUTLER C J. The Disproportionate Effect of Global Warming on the Arrival Dates of Short-distance Migratory Birds in North America[J]. *Ibis*, 2003, 145(3): 484-495.
- [22] CHACE J F, WALSH J J. Urban Effects on Native Avifauna: A Review[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 74(1): 46-69.
- [23] BREIMAN L. Random Forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [24] SCHÜTZ C, SCHULZE C H. Functional Diversity of Urban Bird Communities: Effects of Landscape Composition, Green Space Area and Vegetation Cover[J]. *Ecology and Evolution*, 2015, 5(22): 5230-5239.
- [25] OLIVEIRA HAGEN E, HAGEN O, IBÁÑEZ-ÁLAMO J D, et al. Impacts of Urban Areas and Their Characteristics on Avian Functional Diversity[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2017, 5: 84.
- [26] CONNELL J H. Diversity in Tropical Rain Forests and Coral Reefs: High Diversity of Trees and Corals Is Maintained Only in a Nonequilibrium State[J]. *Science*, 1978, 199(4335): 1302-1310.
- [27] BETTENCOURT L M A, LOBO J, HELBING D, et al. Growth, Innovation, Scaling, and the Pace of Life in Cities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(17): 7301-7306.
- [28] LEWIS C A, CRISTOL D A, SWADDLE J P, et al. Decreased Immune Response in Zebra Finches Exposed to Sublethal Doses of Mercury[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2013, 64(2): 327-336.
- [29] SMITH A C, FAHRIG L, FRANCIS C M. Landscape Size Affects the Relative Importance of Habitat Amount, Habitat Fragmentation, and Matrix Quality on Forest Birds[J]. *Ecography*, 2011, 34(1): 103-113.
- [30] CIACH M, FRÖHLICH A. Ungulates in the City: Light Pollution and Open Habitats Predict the Probability of Roe Deer Occurring in an Urban Environment[J]. *Urban Ecosystems*, 2019, 22(3): 513-523.