

开发强度影响下鸟类多样性对城市蓝绿空间的响应与优化策略——以上海市长宁区为例

Responses of Bird Diversity to Urban Blue-Green Space Under the Impact of Development Intensity and Corresponding Optimization Strategies: A Case Study of Changning District, Shanghai

王敏^{1,2*} 李佳琪¹ 宋昊洋¹
WANG Min^{1,2*} LI Jiaqi¹ SONG Haoyang¹

(1.同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092; 2.高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室, 上海 200092)
(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai, China, 200092; 2. Key Laboratory of Ecology and Energy Saving Study of Dense Habitat, Ministry of Education, Shanghai, China, 200092)

文章编号: 1000-0283(2026)03-0012-10

DOI: 10.12193/j.laing.20251124002

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2025-11-24

修回日期: 2026-01-26

摘要

在快速城镇化持续影响蓝绿空间结构与功能的背景下,系统阐释鸟类多样性的差异化响应机制成为城市生态研究的重要课题。以上海市长宁区这一典型高密度城区为例,基于45个鸟类观测点建立300 m缓冲区,构建涵盖物种丰富度、Shannon-Wiener指数、Simpson指数与Pielou均匀度指数的鸟类多样性指标体系,并提取4个维度共8项蓝绿空间特征指标。通过开发强度将样本划分为高、低强度两组,与全域样本共同建立多重线性回归模型,以比较鸟类多样性对蓝绿空间特征的响应差异。结果表明,蓝绿空间的影响机制随开发强度呈现显著分异:在低开发强度区,物种丰富度主要受绿地覆盖面积影响,多样性则与景观均匀度相关;而在高开发强度区,传统蓝绿空间特征指标的解释力显著减弱。同时,鸟类物种丰富度对绿地空间特征响应更为敏感,而多样性指数更易受整体景观格局调控。从开发强度梯度视角,揭示蓝绿空间维持鸟类多样性的生态功能随城市化的动态变化特征,为高密度城市差异化生态管控提供科学依据。

关键词

鸟类多样性; 蓝绿空间; 开发强度; 响应机制; 生态规划管控

Abstract

Against the backdrop of rapid urbanization that continuously affects the structure and functions of blue-green spaces, elucidating the differential response mechanisms of avian diversity is a key topic in urban ecological research. Focusing on Changning District, Shanghai (a typical high-density urban area), this study established 300 m buffer zones around 45 bird observation sites, constructed an avian diversity index system (including species richness, Shannon-Wiener, Simpson, and Pielou evenness indices), and extracted 8 blue-green space indicators from four dimensions. Samples were divided into high and low-intensity groups based on development intensity, and multiple linear regression models were fitted using full-region samples to compare response differences. Results indicated notable differences in the impact mechanism of blue-green spaces relative to development intensity: in areas characterized by low development intensity, species richness was primarily influenced by green space coverage, whereas diversity was associated with landscape evenness; in regions with high development intensity, the explanatory efficacy of conventional blue-green space indicators diminished considerably. Meanwhile, bird species richness was more sensitive to green space characteristics, whereas diversity indices were more regulated by overall landscape patterns. From the perspective of the development intensity gradient, this study reveals the dynamic changes in the ecological function of blue-green spaces in maintaining avian diversity amid urbanization, providing a scientific basis for differentiated ecological regulation in high-density cities.

Keywords

bird diversity; blue-green space; development intensity; response mechanism; ecological planning and regulation

王敏

1975年生/女/福建福州人/博士/副教授、博士生导师/研究方向为蓝绿空间生态系统服务、城市绿地与生态规划设计、韧性景观与城市可持续

李佳琪

1999年生/女/内蒙古呼和浩特人/在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划设计、城市生物多样性

宋昊洋

1998年生/女/河南平顶山人/在读博士研究生/研究方向为风景园林规划设计、绿地碳中和与城市可持续

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: wmin@tongji.edu.cn

基金项目:

国家自然科学基金面上项目“城市绿地增汇减碳的生态系统服务耦联机制、绩效评价与格局优化”(编号: 32572129)、“基于多重价值协同的城市绿地空间格局优化机制:以上海大都市圈为例”(编号: 52178053);上海市住房和城乡建设管理委员会科研项目“碳中和目标下的超大城市复合生态功能空间优化与增效关键技术研究示范”(编号: 沪建科2024-001-011)

城市中的蓝绿空间(如绿地、河流、湖泊等)是城市自然生态系统的核心组成部分,不仅在维持局部气候调节、水源涵养等方面发挥着重要生态功能,也为众多动植物提供了栖息与迁徙的关键载体,在城市生物多样性保护中具有不可替代的作用^[1]。然而,近年来快速城镇化进程对蓝绿空间造成了显著影响。一方面,城市连片发展导致蓝绿空间总体规模缩减、形态破碎化,生态连通性下降^[2-3];另一方面,受周边建筑密度、道路网络、人类活动等开发强度差异的影响^[4],城市蓝绿空间生境特征呈现高度异质性,进而对物种栖息、觅食与迁徙等行为产生不同程度的干扰。因此,探讨不同开发强度影响下城市建成环境要素对生物多样性的影响机制,对于精准制定差异化生态规划策略、构建稳定健康的城市生态系统具有重要意义。

鸟类作为城市生物多样性的核心组成部分,对环境变化和人为干扰极其敏感,常被用作反映生物多样性变化及生态系统变化的重要指示物种^[5-6]。在栖息地尺度上,已有大量研究揭示了植被结构、水体比例、食物资源等微观生境特征对鸟类多样性的影响^[7-10]。此外,城市鸟类作为居民最容易接触到的野生动物,能够显著提升居民的自然联结感与生活福祉,并兼具较高的文化与教育价值。在此基础上,研究视角正从微观生境向宏观空间维度拓展:一方面关注城市建设中蓝绿空间连通性、景观异质性等空间配置的生态作用^[11-14],另一方面也深入探讨了建筑密度、容积率等开发强度指标的具体影响^[2,15-16]。开发强度通常以建筑密度、高层建筑面积比、容积率、人类活动密度等指标表征^[4,15],反映了人类建设活动的空间密集程度,是塑造城市环境的核心人为梯度。其与蓝绿空间特征

往往存在此消彼长的权衡关系,并通过改变栖息地面积、连通性与质量,对鸟类的栖息、觅食等活动产生不同强度的干扰。然而,现有研究大多孤立探讨蓝绿空间特征或开发强度单一维度与鸟类多样性的关系,缺乏将二者置于同一框架下的整合分析。这种分离视角难以系统揭示在不同开发强度梯度下,蓝绿空间的生态功能如何差异化地维持鸟类群落,现有研究成果难以有效转化为针对不同城市区域的、可操作性强的生态管控与空间规划策略。

基于此,本研究选取上海市长宁区(中心城区部分)为研究区域,旨在深入探究在不同开发强度影响下,鸟类多样性对城市蓝绿空间的差异化响应规律,并据此提出相应的生态优化策略。长宁区作为上海市中心城区的典型高密度发展区域,土地利用类型多样,生物资源丰富,为开发强度梯度下的鸟类多样性研究提供了理想场所。具体研究内容包括:(1)在研究区全域范围内,识别鸟类多样性的空间分布特征;(2)通过“高开发强度”与“低开发强度”分组的对比研究,探究蓝绿空间要素对鸟类多样性的影响机制及其差异;(3)基于研究结果,面向不同开发强度的城市区域,提出提升鸟类多样性的蓝绿空间优化策略。

1 研究区概况

上海市长宁区(121° 18'—121° 26' E, 31° 10'—31° 14' N)位于上海市中心城区西部。考虑到外环线以外的上海虹桥国际机场区域存在持续噪声、人工照明及鸟类管控措施等强烈干扰,为排除极端干扰因素,研究区域具体限定于长宁区外环线以内的中心城区部分,总面积约26.52 km²,总人口约54.1万人。作为上海中心城区的重要组成部分,长

宁区位于“东亚—澳大利亚”全球候鸟迁徙路线上,区域内苏州河、新泾港等水系与多处城市绿地共同构成了丰富的蓝绿空间生态基底,为迁徙候鸟与本地留鸟提供了关键的停歇点、补给站与栖息地,对维持区域鸟类多样性具有重要生态价值^[8-9]。与此同时,该区域也面临着高度城市化的挑战,人口密集,建设用地以居住、商业服务和公共功能为主,高强度的人类活动与建设用地扩张对各类生境构成一定压力。其中,外环、中环、内环均穿越长宁区内部,使研究区域具备开发强度的梯度差异。

在研究单元划定方面,研究基于中国观鸟记录中心的数据,共筛选出45个鸟类观测点,这些样点涵盖居住区(15个)、商业区(10个)与公园(20个)等典型生境类型,能够较为全面地反映长宁区中心城区鸟类多样性的现实图景,为研究提供可靠的数据基础。相关研究指出,城市鸟类多样性对蓝绿空间的响应存在明显的尺度效应,相关研究多采用200~500 m范围的缓冲区进行分析^[16-17],以有效捕捉景观格局对鸟类分布的影响。本研究通过对200 m、300 m、500 m、1 000 m 4个不同尺度缓冲区的预研究,确立蓝绿空间特征影响研究区域鸟类多样性的最佳尺度为300 m,最终以鸟类观测点位为中心建立300 m缓冲区作为研究样本单元(图1)。

2 研究方法 with 数据处理

本研究采用“分区建模、组间对比”的分析思路,系统探究不同开发强度下蓝绿空间对鸟类多样性的影响(图2)。首先,构建鸟类多样性指标,包括物种丰富度(Species Richness)、Shannon-Wiener指数、Simpson多样性指数和Pielou均匀度指数4个指标;其次,提取蓝绿空间特征指标,包括绿地空间特征、

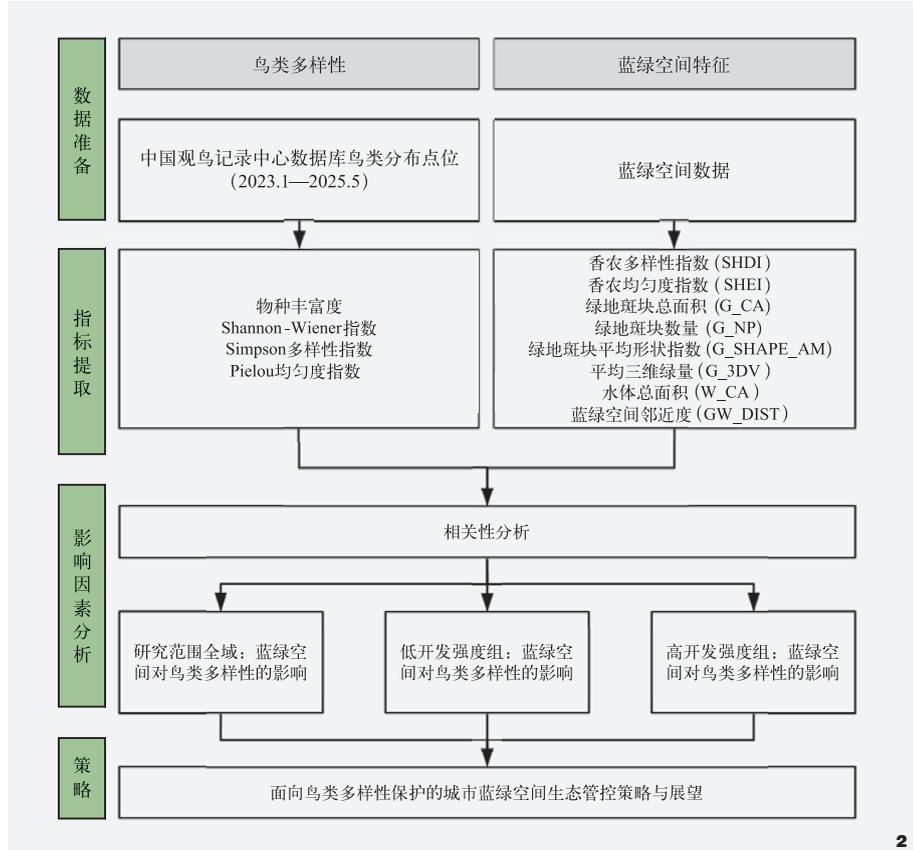
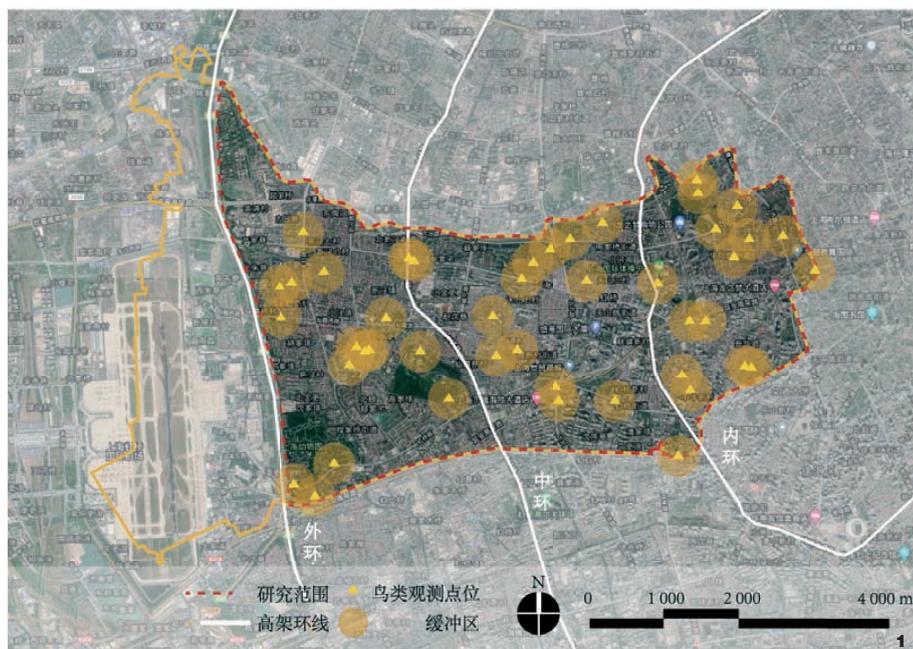


图1 研究区域及研究单元
Fig. 1 Study area and units

图2 研究技术路线
Fig. 2 Research methodology framework

水体空间特征、蓝绿空间耦合特征和整体景观格局共计4个维度8个指标；在此基础上，构建开发强度指标，据此将全部样本点划分为高、低开发强度两个对比组，与全域样本共同构成三组样本，分别建立多重线性回归模型，通过组间比较揭示鸟类多样性对城市蓝绿空间的差异化响应机制。

2.1 数据获取、处理及指标构建

研究选取的数据主要包括地理空间数据与鸟类观测数据两大类，数据来源与处理方法见表1。

2.1.1 鸟类多样性指标

研究构建4大常用指标衡量鸟类多样性水平，指标含义及计算方法^[9,21,22]见表2，指标计算基于鸟类观测数据，选取2023年1月—2025年5月共计13 590条鸟类观测记录，包含物种名称、数量、位置等信息。该时间段覆盖多个鸟类迁徙与繁殖季节，能够较完整地反映区域鸟类组成的年际与季节性特征。

2.1.2 蓝绿空间特征指标

参考《城市绿地鸟类多样性生态恢复技术导则》中对鸟类栖息地评估的常用环境变量和相关文献^[13,16,23]，研究具体选取香农多样性指数 (SHDI)、香农均匀度指数 (SHEI)、绿地斑块总面积 (G_CA)、绿地斑块数量 (G_NP)、绿地斑块平均形状指数 (G_SHAPE_AM)、平均三维绿量 (G_3DV)、水体总面积 (W_CA)、蓝绿空间邻近度 (GW_DIST) 共8个指标作为蓝绿空间特征指标。所有蓝绿空间数据以鸟类观测点为中心的300 m缓冲区进行裁剪，基于ArcGIS 10.7与Fragstats软件计算以上指标结果。

2.2 统计分析方法及流程

研究采用相关性分析与多重线性回归分析相

表1 研究数据来源与处理
Tab. 1 Sources and processing of research data

数据类型 Data type	数据名称 Data name	数据来源 Data source	定义及描述 Definition and description
地理空间数据	土地覆盖分类	SinoLC-1数据集 ^[18]	中国首套 1 m 分辨率全国土地覆盖数据集 (2023 年), 包含建筑、道路、林地、水体等 11 类地物, 总体精度为 73.61%
	水系分布与距离	Open Street Map (https://www.openstreetmap.org/)	2023 年开放街道地图水系数据, 用于提取水系分布及计算距水系距离
	建筑三维空间数据	3D-GloBFP Dataset ^[19] (https://zenodo.org/records/11397015)	2023 年全球建筑高度数据集, 分辨率约 30 m, 用于表征建筑三维形态特征
	冠层高度数据	ETH Global Sentinel-2 10 m冠层植被高度数据集 ^[20]	基于 2020 年 10 m 分辨率全球冠层高度数据, 通过植被高度换算三维绿量指标
鸟类观测数据	鸟类物种与分布	中国观鸟记录中心 (http://www.birdreport.cn/)	选取 2023 年 1 月 1 日—2025 年 5 月 8 日鸟类观测记录, 包含物种名称、数量、位置等信息

表2 研究指标构建
Tab. 2 Development of research indicators

指标类别 Indicator category	指标名称 Indicator name	计算方法 Formula	定义及生态学含义 Definition and ecological significance
鸟类多样性特征	物种丰富度	$S = n$ 式中, S 为物种总数, n 为记录的鸟类物种总数	反映采样点内记录的鸟类物种总数, 是衡量生物多样性的基础指标
	Shannon-Wiener 指数	$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$ 式中, H' 为 Shannon-Wiener 指数, p_i 为第 i 个物种的相对多度	综合考虑物种丰富度和均匀度的多样性指标, 值越高表明群落结构越稳定
	Simpson 多样性指数	$D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2$ 式中, D 为 Simpson 多样性指数	反映群落优势度状况, 值越高表明群落中物种分布越均匀
	Pielou 均匀度指数	$j' = \frac{H'}{\ln S}$ 式中, j' 为 Pielou 均匀度指数	表征群落中不同物种个体数分布的均匀程度
蓝绿空间特征	整体景观格局 香农多样性指数(SHDI)	$L_{SHDI} = - \sum_{h=1}^q (P_h \times \ln P_h)$ 式中, L_{SHDI} 为香农多样性指数, q 为景观类型总数, P_h 为第 h 类景观的面积比例	反映景观类型的多样性和异质性, 值越高表明景观组成越丰富
	香农均匀度指数(SHEI)	$L_{SHEI} = \frac{L_{SHDI}}{L_{SHDI_{max}}}$ L_{SHEI} 为香农均匀度指数, $L_{SHDI_{max}}$ 为香农多样性指数最大值	表征不同景观类型分布的均匀程度, 值趋近 1 表明各景观类型分布均匀
	绿地空间特征 绿地斑块总面积 (G_CA)	$G_{CA} = \sum_{j=1}^m a_j$ 式中, G_{CA} 为绿地斑块总面积, m 为绿地斑块数量, a_j 为第 j 个绿地斑块的面积	研究区域内绿地斑块的总面积, 代表植被资源的总体规模, 反映鸟类栖息地中的植被与食源特点 ^[23]

接上表

指标类别 Indicator category	指标名称 Indicator name	计算方法 Formula	定义及生态学含义 Definition and ecological significance
绿地空间特征	绿地斑块数量 (G_NP)	$G_{NP} = m$ 式中, G_{NP} 为绿地斑块数量	表征绿地斑块的总数量, 体现景观的破碎化程度, 值越高破碎化越严重, 反映鸟类栖息地中的植被分布特点 ^[23]
	绿地斑块平均形状指数 (G_SHAPE_AM)	$G_{SHAPE_AM} = \sum_{j=1}^m \left(\frac{p_j}{2\sqrt{\pi \cdot a_j}} \cdot \frac{a_j}{A} \right)$ 式中, G_{SHAPE_AM} 为绿地斑块平均形状指数, p_j 为第 j 个绿地斑块的周长, a_j 为第 j 个绿地斑块的面积, A 为景观总面积	绿地斑块形状的复杂程度, 值越高表明斑块边界越复杂, 受人为干扰越小, 反映鸟类栖息地中的水平植被复杂性特点 ^[23]
	平均三维绿量 (G_3DV)	$G_{3DV} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N (A_l \cdot H_l)$ 式中, G_{3DV} 为平均三维绿量, N 为研究区域内栅格总数, A_l 为第 l 个栅格的面积 (10 m × 10 m = 100 m ²), H_l 为第 l 个栅格的冠层高度	表征植被在三维空间中的体积总量, 反映鸟类栖息地中植被的垂直结构复杂性和生物量 ^[23]
蓝绿空间特征	水体空间特征 水体总面积 (W_CA)	$W_{CA} = \sum_{k=1}^r a_k$ 式中, W_{CA} 为水体总面积, r 为水体斑块数量, a_k 为第 k 个水体斑块的面积	研究区域内水体斑块的总面积, 代表水资源总量, 反映鸟类栖息地中的水源特点 ^[23]
蓝绿空间耦合特征	蓝绿空间邻近度 (GW_DIST)	$C = \min_{j \in G} \sqrt{(x_p - x_j)^2 + (y_p - y_j)^2} + \min_{k \in W} \sqrt{(x_p - x_k)^2 + (y_p - y_k)^2}$ 式中, C 为蓝绿空间邻近度, (x_p, y_p) 为采样点坐标, (x_j, y_j) 为第 j 个绿地斑块的坐标, G 表示所有绿地斑块的集合; (x_k, y_k) 为第 k 个水体斑块的坐标, W 表示所有绿地斑块的集合	观测点至最近绿地与最近水体的距离之和, 反映鸟类对蓝绿空间综合可达性, 表征鸟类栖息地中植被与水源的综合邻近特征 ^[23]

结合的方法, 以探究不同开发强度下蓝绿空间变量与鸟类多样性的定量关系。所有统计分析均通过 SPSS 27.0 软件完成, 统计显著性水平阈值设定为 $\alpha = 0.05$ 。为确保不同量纲变量间的可比性, 所有连续型变量在分析前均进行了 Z-score 标准化处理。

为系统比较不同开发强度下鸟类多样性的响应差异, 研究基于建筑三维空间数据构建开发强度指标^[4], 即开发强度为缓冲区内总建筑面积与缓冲区面积的比值。经预实验分组比较后, 以中位数 (2.125) 为分组依据, 将全部 45 个样本划分为两组: 开发强度 ≤ 2.125 的为“低开发强度组” ($n = 23$), 开发强度 > 2.125 的为“高开发强度组” ($n =$

22), 为后续构建分组回归模型奠定基础。

具体分析流程如下: (1) 分别对全域样本、低开发强度组和高开发强度组进行皮尔逊相关性分析, 初步筛选出与 4 个鸟类多样性指标存在显著相关关系 ($p < 0.05$) 的蓝绿空间特征指标。(2) 进行多重共线性诊断, 通过计算方差膨胀因子 (VIF) 预先剔除 VIF 值 > 10 的变量, 以控制变量集整体共线性。将筛选后的变量集分别纳入全域样本、低开发强度组与高开发强度组, 以 4 个鸟类多样性指标为因变量, 构建相应的多重线性回归模型。(3) 通过比较不同组别间显著变量的异同与标准化回归系数, 辨析蓝绿空间要素的差异化影响机制。

3 结果与分析

3.1 鸟类多样性指标

鸟类观测数据显示, 研究范围内共包含鸟类 193 种, 其中迁徙候鸟约 95 种, 本地留鸟约 85 种, 常见鸟种约 55 种, 国家一级保护动物 6 种, 国家二级保护动物 26 种。鸟类多样性数据计算结果显示, 研究范围内鸟类物种丰富度、多样性及均匀度良好 (图 3), 物种丰富度结果范围处于 1 ~ 144, 平均值 19.93, 方差 790.61; Shannon-Wiener 指数结果范围处于 0 ~ 3.35, 平均值 1.66, 方差 1.24; Simpson 多样性指数结果范围处于 0 ~ 0.96, 平均值 0.62, 方差 0.13; Pielou 均匀度指数结果处于 0 ~ 1, 平均值 0.63, 方差 0.13。其中,

上海动物园、西郊宾馆、长风公园、中山公园、新虹桥中心花园的物种丰富度、Shannon-Wiener指数和Simpson多样性指数均较高,说明丰富度及多样性较好的区域集中在绿地;新泾公园、水霞公园、苏州河沿岸及部分居住区的Pielou均匀度较高,代表该区域内鸟类物种分布较为均匀(图4)。

3.2 蓝绿空间特征指标与鸟类多样性指标的相关性分析

对全域样本、低开发强度组、高开发强度组分别进行皮尔逊相关性分析,结果见图5和表3。(1) 全域样本的物种丰富度、Shannon-Wiener指数与蓝绿空间SHDI、SHEI、G_CA、G_SHAPE_AM、G_3DV共5个自变量显著相关, Simpson多样性指数与蓝绿空间SHDI、SHEI、G_CA、G_SHAPE_AM共4个自变量显著相关, Pielou均匀度指数与蓝绿空间SHDI显著相关。(2) 低开发强度组的物种丰富度、Shannon-Wiener指数与蓝绿空间SHDI、SHEI、G_CA、G_SHAPE_AM、G_3DV共5个自变量显著相关, Simpson多样性指数与蓝绿空间SHDI、SHEI、G_CA、G_SHAPE_AM共4个自变量显著相关, Pielou均匀度无显著相关的自变量。(3) 高开发强度组均无显著相关的自变量。相关性分析结果表明, 蓝绿空间特征指标中SHDI、SHEI、G_CA、G_SHAPE_AM、G_3DV通常会对物种丰富度、Shannon-Wiener指数、Simpson多样性指数和Pielou均匀度指数产生不同程度的正向影响。

3.3 蓝绿空间特征指标对鸟类多样性的差异化影响特征

基于相关性分析结果进一步分组构建多重线性回归模型, 探讨不同蓝绿空间特征对于研究区域鸟类多样性的影响规律。分别筛选与4个鸟类多样性指标相关关系显著的蓝绿空间特征, 并进行共线性诊断, 通过方差膨胀因子(VIF)检验剔除存在严重多重共线性的变量。最终, 在

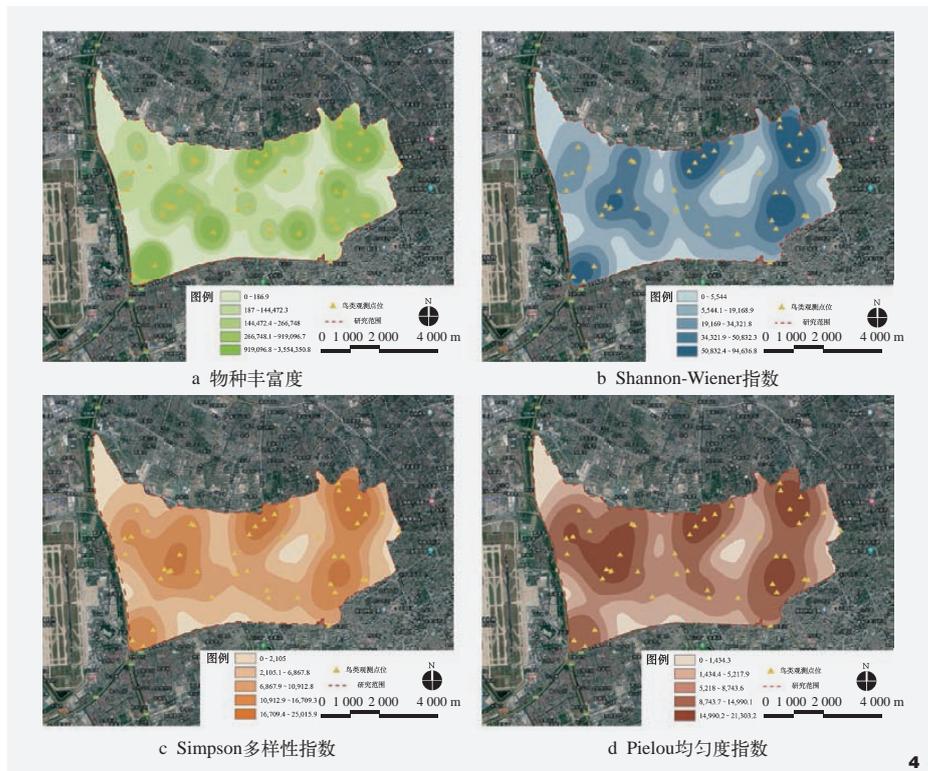
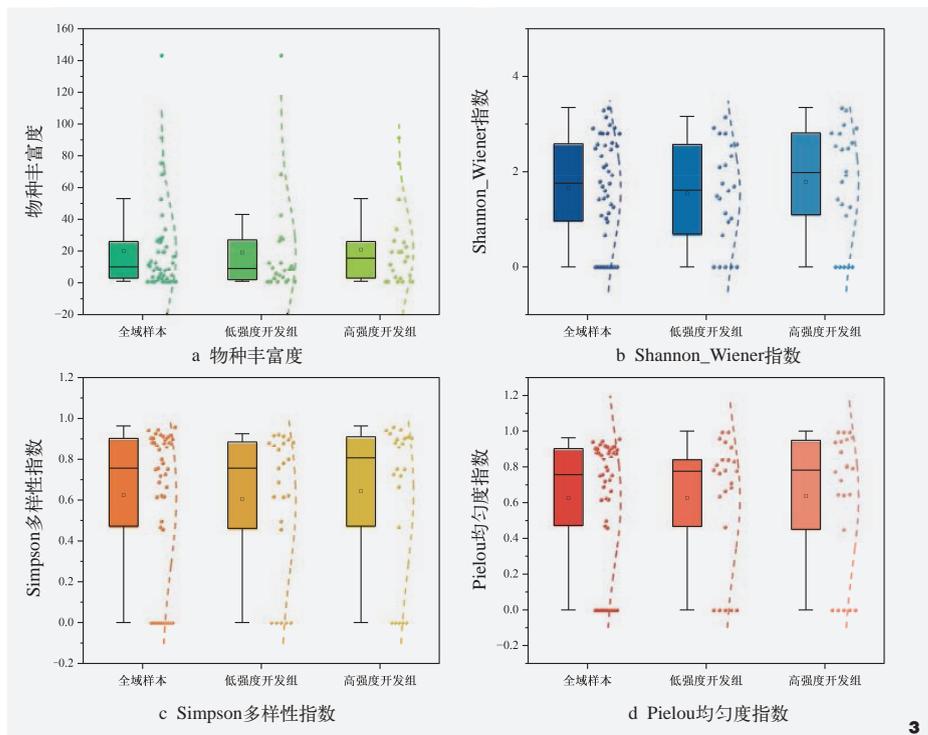


图3 鸟类多样性箱型图
Fig. 3 Box plot of bird diversity

图4 鸟类多样性核密度图
Fig. 4 Kernel density map of bird diversity

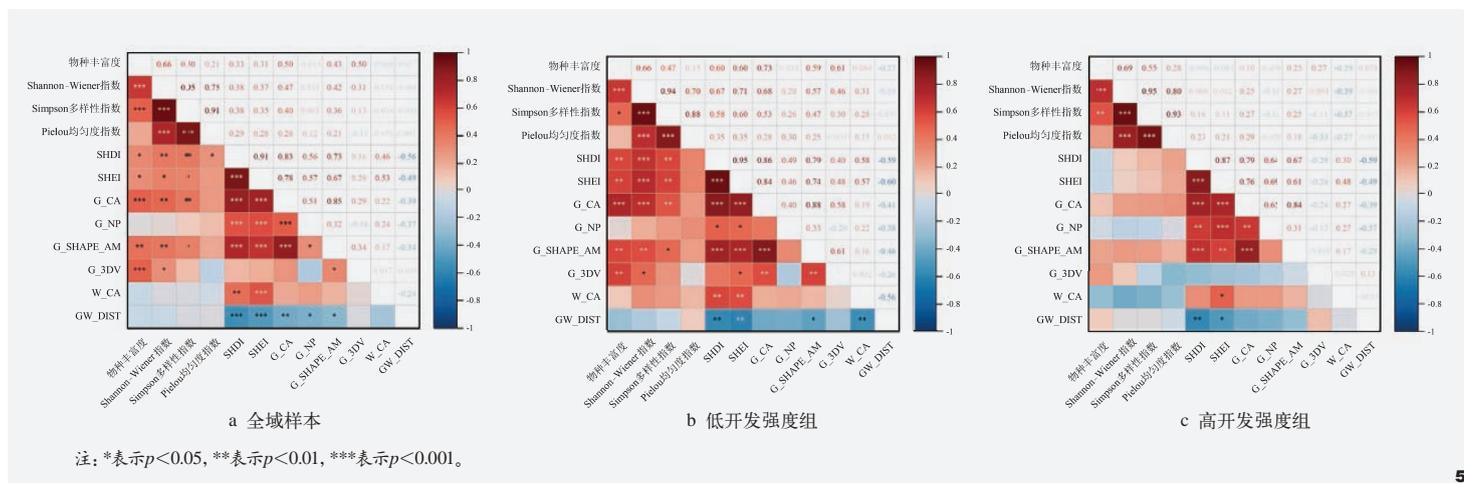


图5 全域、低开发强度组与高开发强度组样本相关性热力图
Fig. 5 Correlation heatmap of the full-domain samples, low development intensity group, and high development intensity group

表3 全域、低开发强度组与高开发强度组样本相关性分析结果
Tab. 3 Correlation analysis results of the full-domain samples, low development intensity group, and high development intensity group

因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable	开发强度分组 Development intensity grouping	香农多样性指数 SHDI	香农均匀度指数 SHEI	绿地斑块总面积 G_CA	绿地斑块数量 G_NP	绿地斑块平均形状指数 G_SHAPE_AM	平均三维绿量 G_3DV	水体总面积 W_CA	蓝绿空间邻近度 GW_DIST
物种丰富度	全域样本 (n = 45)	全域样本 (n = 45)	0.333*	0.305*	0.496**	-0.015	0.432**	0.497**	-0.068	-0.077
		低开发强度组 (n = 23)	0.599**	0.601**	0.729**	0.018	0.588**	0.614**	0.084	-0.270
		高开发强度组 (n = 22)	-0.086	-0.083	0.101	-0.056	0.235	0.267	-0.294	0.078
Shannon-Wiener指数	全域样本 (n = 45)	全域样本 (n = 45)	0.383**	0.371*	0.468**	0.018	0.417**	0.310*	-0.038	-0.060
		低开发强度组 (n = 23)	0.674**	0.708**	0.682**	0.199	0.569**	0.463*	0.306	-0.191
		高开发强度组 (n = 22)	0.068	0.042	0.249	-0.138	0.275	0.094	-0.395	-0.010
Simpson多样性指数	全域样本 (n = 45)	全域样本 (n = 45)	0.382**	0.354*	0.404**	0.063	0.361*	0.134	-0.038	-0.038
		低开发强度组 (n = 23)	0.581**	0.602**	0.532**	0.261	0.470*	0.297	0.278	-0.097
		高开发强度组 (n = 22)	0.158	0.110	0.265	-0.116	0.255	-0.108	-0.372	-0.015
Pielou均匀度指数	全域样本 (n = 45)	全域样本 (n = 45)	0.295*	0.280	0.278	0.124	0.214	-0.133	-0.058	-0.002
		低开发强度组 (n = 23)	0.355	0.354	0.277	0.301	0.252	-0.005	0.145	0.062
		高开发强度组 (n = 22)	0.229	0.210	0.288	-0.038	0.177	-0.334	-0.271	-0.047

注: *表示p<0.05, **表示p<0.01, ***表示p<0.001。

全域样本组中, SHDI、SHEI、G_3DV、G_CA、G_SHAPE_AM被纳入物种丰富度模型构建和Shannon-Wiener指数模型构建, SHDI、SHEI、G_CA、G_SHAPE_AM被纳入Simpson多样性指数模型, SHDI被纳入Pielou均匀度指数模型构建; 在低开发强度组中, G_CA、G_3DV被纳入物种丰富度模型构建, SHEI、G_3DV、G_SHAPE_AM被纳入Shannon-Wiener指数模型构建, SHEI、G_SHAPE_AM被纳入Simpson多样性指数模型构建; 在高开发强度组中, 由于各变量均无相关性, 故未构建多重线性回归模型。

全域样本的模型结果显示(表4), 不同鸟类多样性指标对蓝绿空间特征指标的响应存在差异。物种丰富度的回归模型解释力最佳, 达到极为显著的水平, 并识别出两个关键的正向预测因子: G_3DV ($\beta = 0.390$) 与 G_CA ($\beta = 0.596$)。这一结果明确表明在研究区域内, 植被的垂直结构复杂性、绿地的水平扩展规模共同构成了影响鸟类物种数量的核心生态要素。Shannon-Wiener指数的模型整体显著, 但模型中无单一变量达到显著水平。对于反映物种多度与均匀度综合信息的Shannon-Wiener指数而言, 其受到多个蓝绿空间变量的协同影响, 各变量的独立贡献相对

均衡, 未出现单一主导因子。Pielou均匀度指数与SHDI呈显著正相关 ($\beta = 0.295$), 表明景观异质性的提升有助于促进物种分布的均匀性。而Simpson多样性指数的模型未达到显著水平, 说明其与所选蓝绿空间变量的线性关系相对较弱。

低开发强度组的回归模型展现出远高于全域样本的解释力和显著性, 清晰地揭示了蓝绿空间的核心作用。物种丰富度模型调整 R^2 高达0.546, 表明蓝绿空间变量解释了超过一半的物种丰富度变异, G_CA是极其显著的正向预测因子 ($\beta = 0.561$), 而G_3DV虽未达统计显著水平 ($p = 0.116$), 但其标准化系数 ($\beta = 0.290$) 显示出稳定的正向趋势。这一结果凸显了在低开发强度环境中, 绿地的水平分布规模是决定物种数量的首要因素, 而植被的垂直结构可能作为辅助性因素发挥作用。Shannon-Wiener指数(调整 $R^2 = 0.445$)与Simpson多样性指数(调整 $R^2 = 0.300$)的模型均高度显著, 且二者共同的关键预测因子均为SHEI (β 分别为0.622和0.561)。该结果有力地证明在人为干扰较弱的环境中, 不同景观斑块的均匀分布对维持鸟类群落的物种多样性和优势度结构起到了主导作用, 其重要性甚至超过了部分

植被结构特征。

与低开发强度组形成鲜明对比的是, 在高开发强度区域所有试图建立的鸟类多样性指标与蓝绿空间变量之间的回归模型均不显著, 与前期相关性分析结果一致。这一结果表明当开发强度超过某一临界阈值后, 传统的蓝绿空间指标(如植被量、景观格局)对鸟类多样性的解释力和预测能力显著降低。这表明高强度的人为干扰已经从根本上简化或重构了该区域的生态关系, 鸟类多样性可能更多地受其他因子(如人为噪声、光污染、食物资源类型、建筑形态等)的支配, 亟须新的生态评估框架予以解读。

4 结论与讨论

4.1 蓝绿空间特征对鸟类多样性的综合影响

本研究基于上海长宁区45个鸟类观测点的系统分析, 揭示了蓝绿空间特征对鸟类多样性的综合影响。相关性分析结果显示, 全域样本中, 物种丰富度、Shannon-Wiener指数与SHDI、SHEI、G_CA、G_SHAPE_AM和G_3DV等5个蓝绿空间特征指标呈显著相关; Simpson多样性指数与其中4个指标显著相关; Pielou均匀度指数则与SHDI显著相关。进一步构建的全域多重线性回归模型表明, 不同鸟类多样

表4 多重线性回归模型结果
Tab 4. Results of the multiple linear regression model

因变量 Dependent variable	统计量 statistic		R		R^2		调整 R^2 Adjusted R^2		F		显著预测变量 Significant predictor variable	
	全域	低强度	全域	低强度	全域	低强度	全域	低强度	全域	低强度	全域	低强度
物种丰富度	0.630**	0.766***	0.397	0.587	0.320	0.546	5.136	14.204	G_3DV (0.390**) G_CA (0.596*)		G_CA (0.561**)	
Shannon-Wiener 指数	0.503*	0.721**	0.253	0.520	0.157	0.445	2.641	6.871	—		SHEI (0.622*)	
Simpson 多样性指数	0.413	0.603*	0.171	0.363	0.088	0.300	2.060	5.709	—		SHEI (0.561*)	
Pielou 均匀度指数	0.295*	/	0.087	/	0.066	/	4.086	/	SHDI (0.295*)		/	

注: *表示 $p < 0.05$, **表示 $p < 0.01$, ***表示 $p < 0.001$; “—”表示模型不显著或无单个变量显著; “/”表示因相关性不显著未建立模型; 显著预测变量中, 括号内为标准化系数 β 。

性指标对蓝绿空间特征的响应存在差异。其中, 物种丰富度的回归模型解释力最佳(调整 $R^2 = 0.320$), 识别出两个关键正向预测因子: G_3DV ($\beta = 0.390$) 与 G_CA ($\beta = 0.596$), 说明植被垂直结构复杂性与绿地水平扩展规模共同构成影响鸟类物种数量的核心生态要素^[24-25]。Shannon-Wiener 指数的模型整体显著, 但无单一变量达到显著水平, 暗示其受多个蓝绿空间变量的协同影响^[26]。Pielou 均匀度指数与 SHDI 呈显著正相关 ($\beta = 0.295$), 表明景观异质性提升有助于促进物种分布的均匀性。总体来看, 物种丰富度对绿地与植被结构特征最为敏感, 而多样性指数更易受景观格局配置的影响。

4.2 开发强度梯度下鸟类多样性对蓝绿空间的响应

研究进一步发现, 鸟类多样性对蓝绿空间的响应模式随开发强度变化呈现明显梯度差异。在低开发强度区域, 蓝绿空间变量对鸟类多样性具有较强解释力。物种丰富度模型调整 R^2 高达 0.546, 其中 G_CA 是极其显著的正向预测因子 ($\beta = 0.561$), 凸显绿地水平分布规模在维持物种数量方面的关键作用^[24]。Shannon-Wiener 指数与 Simpson 多样性指数的模型中, SHEI 均为关键预测因子 (β 分别为 0.622 和 0.561), 说明在人为干扰较弱的环境中, 景观格局的均衡配置对维持鸟类群落结构与多样性至关重要^[25]。这与汪洁琼等^[26] 强调的“生境源地完整性与连接度对物种多样性维持至关重要”的结论相一致, 反映出在低干扰背景下, 优化景观格局质量与资源配置效率可有效提升生物多样性。

然而, 在高开发强度区域, 所有鸟类多样性指标与蓝绿空间变量之间均未呈现显著统计关联, 且无法建立有效的回归模型。这

与全域样本中模型解释力降低(如物种丰富度调整 $R^2 = 0.320$) 的趋势一致, 说明随着开发强度提升, 传统蓝绿空间指标对鸟类多样性的解释力显著减弱。究其原因, 高强度开发往往伴随生境碎片化、蓝绿空间结构失衡及生态廊道断裂等问题, 导致绿地与水体难以形成功能完整的生境网络^[27]。城市化带来的噪声、光污染及频繁人为活动等干扰因素, 可能掩盖或抵消蓝绿空间的积极生态贡献, 使鸟类多样性更多受非空间性环境压力支配。

这一组间对比结果揭示了开发强度对鸟类群落的生态过滤效应。生态过滤效应指的是自然或人为因素对鸟类物种库过滤并影响其在特定环境中生存与分布的过程^[28]。在低开发强度区域, 生态系统相对完整, 蓝绿空间的生态功能得以充分表达; 而在高开发强度区域, 传统蓝绿空间变量失去解释力, 强烈的人为干扰使该区域的鸟类多样性影响机制更为复杂^[29], 亟须构建新的生态评估框架以应对高强度人为干扰下的生境管理与修复挑战。

4.3 面向鸟类多样性保护的城市蓝绿空间生态管控策略

本研究系统揭示了不同开发强度下鸟类多样性对蓝绿空间的差异化响应机制, 证实开发强度作为生态管控指标的潜力, 强调了在高度建成环境中, 需要在蓝绿空间思维的基础上探索精细化的分区分管。基于研究结论, 本文对高密度城区的鸟类多样性保护规划提出以下策略与建议。

在低开发强度区域, 生态管控策略应立足于生态本底保护与功能强化, 重点关注以下几个方面。(1) 植被资源保护与优化: 重点保护和发展植被覆盖, 注重垂直植物搭

配模式, 为不同鸟类对植被的偏好提供丰富选择^[30]。(2) 景观格局优化: 注重景观要素的均衡分布, 提高景观均匀度, 通过生态廊道建设增强生境连通性^[31]。(3) 生境质量提升: 实施“生态优化型”精细化管理, 针对不同鸟类群体的生态需求优化栖息地结构。

在高开发强度区域, 生态管控策略应转向生态功能补偿与过程重构, 重点关注以下几个方面。(1) 补偿性生态措施: 积极探索立体绿化、屋顶花园等补偿性措施, 弥补地面生态空间的不足。(2) 生境连通性重建: 注重生态廊道和踏脚石生境的构建, 增强孤立生境斑块间的生态联系^[15,26]。(3) 创新型生态管理: 通过人工栖息地、生态化基础设施等生态空间, 重构高强度建成环境中的生态过程。

4.4 研究局限及未来展望

本研究主要存在以下局限: (1) 受公民科学数据特点的影响, 样本量相对有限, 可能影响统计功效和模型稳定性; (2) 在变量选择上, 主要关注蓝绿空间的结构与格局特征, 未能纳入噪声、夜间光照强度等人为干扰因素, 这可能导致对高开发强度区域鸟类多样性驱动机制的解释不够全面。基于此, 未来研究可在三个方向进行深化: (1) 将研究范围扩展到上海市全域, 大幅增加样本量以提高结论的普适性和稳健性; (2) 引入多源数据以降低公民科学数据局限性对研究结果的影响; (3) 在后续研究中系统纳入建筑密度、噪声污染、光污染等关键开发强度与人为干扰变量, 构建更全面的解释框架, 从而更深入地揭示高强度城市化环境下鸟类多样性的维持机制。

注: 图1与图4底图来源于谷歌地球(2024年3月27日拍摄); 其余图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] CANEDOLI C, MANENTIR, PADOA-SCHIOPPA E. Birds Biodiversity in Urban and Periurban Forests: Environmental Determinants at Local and Landscape Scales[J]. *Urban Ecosystems*, 2018, 21(4): 779-793.
- [2] MCKINNEY M L. Effects of Urbanization on Species Richness: A Review of Plants and Animals[J]. *Urban Ecosystems*, 2008, 11(2): 161-176.
- [3] WILLIAMS N S G, SCHWARTZ M W, VESK P A, et al. A Conceptual Framework for Predicting the Effects of Urban Environments on Floras[J]. *Journal of Ecology*, 2009, 97(1): 4-9.
- [4] 叶宇, 黄镛, 张灵珠. 多源数据与深度学习支持下的人本城市设计: 以上海苏州河两岸城市绿道规划研究为例[J]. *风景园林*, 2021, 28(1): 39-45.
- [5] BIBBY C J. Making the Most of Birds as Environmental Indicators[J]. *Ostrich*, 1999, 70(1): 81-88.
- [6] 王敏, 余谦益, 汪洁琼. 融合景观特征识别和城乡梯度分析的滨水生境网络构建方法——以江苏省昆山市为例[J]. *中国园林*, 2025, 41(1): 117-124.
- [7] MATTHIES S A, RÜTER S, SCHAARSCHMIDT F, et al. Determinants of Species Richness Within and Across Taxonomic Groups in Urban Green Spaces[J]. *Urban Ecosystems*, 2017, 20(4): 897-909.
- [8] 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.
- [9] 邓卓迪, 丁志锋, 曾小悦, 等. 广州城市绿地景观特征及其对鸟类多样性的影响[J]. *四川动物*, 2023, 42(5): 568-578.
- [10] 曾子轩, 杨锐, 黄越, 等. 清华大学校园鸟类多样性特征与环境关联[J]. *生物多样性*, 2025, 33(5): 21-33.
- [11] 游巍斌, 蔡新瑜, 王英姿, 等. 基于不同网格尺度福州主城区鸟类多样性与景观特征的关系研究[J]. *生态学报*, 2023, 43(18): 7670-7681.
- [12] 袁鹏, 刘荣国, 张波, 等. 宁夏中卫沙坡头国家级自然保护区景观格局变化对鸟类多样性的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2024, 38(8): 189-200.
- [13] 朱光, 王雪, 张文文, 等. 城市景观格局对鸟类群落的影响: 以南京溧水区为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(3): 327-333.
- [14] 李乐, 张承云, 裴有才, 等. 基于被动声学监测技术的城市绿地景观格局与鸟类多样性关联分析[J]. *生物多样性*, 2024, 32(10): 157-171.
- [15] 李梦芸. 国土空间规划对城市生物多样性的主要影响及规划提升策略研究[J]. *上海城市规划*, 2025(2): 82-89.
- [16] YU H R, XIAO H W, GU X C. Impact of Urban Environmental Matrices on Bird Diversity: Mediating Effects and Ecological Thresholds[J]. *Applied Geography*, 2025, 174: 103476.
- [17] HASTEDT A, TIETZE D T. The Importance of Unsealed Areas in the Urban Core and Periphery for Bird Diversity in a Large Central European City[J]. *Urban Ecosystems*, 2023, 26(4): 1015-1028.
- [18] LI Z H, HE W, CHENG M F, et al. SinoLC-1: The First 1m Resolution National-scale Land-cover Map of China Created with a Deep Learning Framework and Open-access Data[J]. *Earth System Science Data*, 2023, 15(11): 4749-4780.
- [19] CHE Y Z, LI X C, LIU X P, et al. 3D-GloBFP: A Global Building Height Dataset[EB/OL]. (2024-05-30) [2025-11-23]. <https://zenodo.org/records/11397015>.
- [20] LANG N, JETZ W, SCHINDLER K, et al. A High-resolution Canopy Height Model of the Earth[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2023, 7(11): 1778-1789.
- [21] 任诗超, 张银龙, 曹铭昌, 等. 成都市鸟类多样性时空分布格局及热点区域识别[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(5): 189-196.
- [22] 曹洋, 田国行, 罗雅文, 等. 高密度城市建成环境对沿海地区鸟类多样性的影响探究——以超大城市上海和广州为例[J]. *中国园林*, 2025, 41(3): 115-122.
- [23] 城市绿地鸟类多样性生态恢复技术导则: T/CHSLA 10011-2023[S]. 中国风景园林学会, 2023.
- [24] 王云才, 王敏. 美国生物多样性规划设计经验与启示[J]. *中国园林*, 2011, 27(2): 35-38.
- [25] 宋岩, 王敏. 新型城镇化视角下景观规划中生物多样性的控制与引导[C]// 中国风景园林学会2014年论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 441-444.
- [26] 汪洁琼, 李心蕊, 王敏, 等. 基于水鸟栖息地保育的城市滨水生境网络构建与优化策略: 以昆山市为例[J]. *风景园林*, 2021, 28(6): 76-81.
- [27] 王敏, 宋昊洋, 朱雯, 等. 国土空间规划背景下城市水网空间近自然修复规划策略与实践——以江苏省太仓市为例[J]. *风景园林*, 2022, 29(12): 36-42.
- [28] 许取丹, 董世魁, 李帅, 等. 植物群落构建的生态过滤机制研究进展[J]. *生态学报*, 2019, 39(7): 2267-2281.
- [29] SUN B, LU Y L, YANG Y F, et al. Urbanization Affects Spatial Variation and Species Similarity of Bird Diversity Distribution[J]. *Science Advances*, 2022, 8(49): eade3061.
- [30] 杜长沛, 鞠昱佳. 基于生境单元制图法提升鸟类多样性的湿地营造策略——以徐州九里湖湿地为例[J]. *中国资源综合利用*, 2023, 41(11): 28-33.
- [31] 郭诗怡, 高藤馨, 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.