



珠江三角洲城市群留鸟多样性格局及其驱动机制*

叶俊宏, 刘珍环, 杨帆, 魏莱, 周义

广东省粤北岩溶区碳水耦合野外科学观测研究站/中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510006

摘要: 鸟类是反映城市生境和生物多样性变化的重要指标, 城市鸟类多样性分布格局模拟与预测是当前城市生物多样性保护研究中重点关注的难题。珠江三角洲城市群经历了快速的城市化过程, 景观变化显著, 给城市生境和生物多样性保护带来了巨大挑战。为解析城市鸟类多样性与城市生境之间的空间关联机制, 构建“单物种分布预测-物种多样性聚类-多样性的影响归因”的空间综合途径, 开展珠江三角洲城市群留鸟空间格局与形成机制研究。结果表明: 1) 珠江三角洲城市群的87种留鸟构成的多样性与适宜性具有高度的城-乡梯度分布模式; 将留鸟的空间适宜性聚类可分为8类, 总体上留鸟的中高适宜区占比小于30%。2) 结构方程模型的解析可以发现, 人类活动显著地正向影响了鸟类多样性的空间分布格局, 影响系数介于0.28~1.94; 而植被、气候、地形的正向或负向效应差异明显。研究可为城市生物多样性保护, 调控鸟类多样性的生境影响因素, 开展城市生态建设与管理提供科学依据。

关键词: 城市生物多样性; 鸟类; MaxEnt模型; 结构方程模型

中图分类号: Q15 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)01-0218-10

The spatiotemporal pattern and driving force of resident bird biodiversity in the urban agglomeration area in the Pearl River Delta

YE Junhong, LIU Zhenhuan, YANG Fan, WEI Lai, ZHOU Yi

Carbon-Water Observation and Research Station in Karst Regions of Northern Guangdong /
School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

Abstract: The bird is an important biodiversity indicator of urban habitat change. The spatial pattern of bird biodiversity is a hot issue in urban biodiversity conservation. The Pearl River Delta has experienced rapid urbanization, and its landscape has undergone tremendous changes, which has brought great challenges for preserving habitat and biodiversity. To understand the interaction between bird biodiversity and habitat in urban areas, a framework was established to study the spatial pattern and mechanism of resident birds in the urban agglomeration of the Pearl River Delta, including three steps, namely, single species distribution simulation, resident bird diversity distribution classification, and attribution factor analysis. The results show that: 1) The diversity and suitability of 87 resident birds in the urban agglomeration area has a typical distribution along the urban-rural gradient, where the core area of the urban center has a high potential diversity of resident birds. Through cluster analysis, resident birds can be divided into 8 categories. Generally, the proportion of medium and high suitable areas for resident birds is under 30%. 2) Using a structural equation model to quantify the

* 收稿日期: 2024-04-22

录用日期: 2024-06-13

网络首发日期: 2024-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(42371109)

作者简介: 叶俊宏(2000年生), 男; 研究方向: 景观生态与土地利用; E-mail: yejh56@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 刘珍环(1982年生), 男; 研究方向: 景观生态与土地利用; E-mail: liuzhh39@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20240128

environmental factors that contribute to the categories of bird diversity, it can be found that human activities mostly exhibit positive effects, with influence coefficients ranging from 0.28 to 1.94; the positive or negative effects of vegetation, climate, and terrain differ significantly. This study can provide a scientific foundation for protecting urban biodiversity, regulating-habitat influencing factors of bird diversity, and policy-making in urban ecological management.

Key words: urban biodiversity; birds; MaxEnt model; structural equation model

在全球气候变化和城市化的双重影响下,高强度干扰、栖息地丧失与生境破碎化等严重威胁了城市生物多样性(Blicharska et al., 2019; Rands et al., 2010; Tian et al., 2019)。解析城市生物多样性的空间格局,测度城市化对生物多样性的影响程度,是科学开展城市生物多样性保护与提升的重要基础,对营造人与自然和谐共存的城市环境具有重要的意义(Pecl et al., 2017)。

鸟类种类丰富、数量众多、分布广泛且易于观察,是城市生物多样性的指示性物种,也是城市生物多样性研究的重要对象(Gregory et al., 2006)。鸟类在城市中栖息,按照生境选择和食物习性等行为可以将其分为定居者、利用者和规避者(吴佳雨等, 2023);从居留型角度又可分为夏候鸟、冬候鸟、旅鸟和留鸟(郑光美, 2023)。城市留鸟依赖城市栖息地环境,研究留鸟是认识城市生物多样性分布规律,揭示生物多样性与城市环境变化关联的重要途径(Marzluff et al., 2001; Ortega-Álvarez & MacGregor-Fors, 2009)。当前,在全球范围兴起的观鸟热潮和公民科学数据,为城市鸟类生物多样性的研究提供了较好的数据基础(Kelling et al., 2019),然而,在鸟类多样性的空间格局和驱动因素方面的研究还较少。当前主要有2种方式开展多样性分布与预测,一是开展地理单元空间内所有物种的清单调查,但这种方式对于空间结构表达较差(斯幸峰等, 2011);二是利用空间统计学方法分析格局与生境的关系,通过构建环境变量计算物种丰富度的物种分布模型,或者建立物种与生境因素相关的预测模型(吴庆明等, 2016)。

物种分布模型已广泛应用于生物多样性保护(李国庆等, 2013; 朱耿平等, 2013)。其中,最大熵模型(MaxEnt)影响较大(Anderson et al., 2010; Pearson et al., 2007)。然而,MaxEnt物种分布模型多用于单一物种的分布与预测,对类群的多样性方面研究仍然较少,为探究物种多样性与生境之间的相互作用,需要构建物种多样性与影响因素识别

的耦合模型,突破模型只能预测单一物种的困境。在高度城市化地区,生境质量和生境分布受到高度的人类扰动影响,具有高频动态性的特征,因此本研究尝试构建基于“单物种分布预测-物种多样性聚类-多样性环境因素归因”的思路,研究珠江三角洲城市群留鸟空间格局的相似性,运用MaxEnt模拟珠江三角洲城市群留鸟的潜在分布,探索留鸟多样性的空间格局,并探究环境因子对留鸟多样性的影响程度。开展鸟类多样性分布及其影响因素的分析,可为开展城市生态建设与管理提供科学依据。

1 研究数据

1.1 研究区概况

珠江三角洲城市群位于广东省中部,地理位置112°45' E~113°50' E, 21°31' N~23°10' N,包括广州、深圳、珠海、佛山、江门、肇庆、惠州、东莞、中山9个城市,总面积约5.46万km²,属亚热带季风气候区,年均气温21~23℃,年均降水量1500mm。该区西北高而东南低,处于流域下游,有密集的河网,区域内生物多样性丰富。1980年以来区域内城市快速扩张引起了显著的景观变化,2020年城镇化率已达到86%(王少剑等, 2021; 吴健生等, 2021)。快速的城市扩张改变了城市生境,鸟类在适应城市生境变化方面的机制尚不清晰,据广东省林业局统计,广东省内有鸟类近500种,其中国家重点保护鸟类136种,因此是研究城市化与生物多样性相互作用的理想区域(图1)。

1.2 数据来源

鸟类观测数据主要来源于GBIF(www.gbif.org)和中国观鸟记录中心(www.birdreport.cn), 2016—2020年43729条观测记录,共246个种类。在数据可用性检验过程中,参考了《中国鸟类分类与分布名录》(郑光美, 2023)进行了常见的鸟种筛选,并剔除了部分偶然观测、错误观测或数量过少的鸟类,最后得到87种分布广泛且数量多的留鸟,且每鸟种的记录数在60条以上。为降低数据的空间

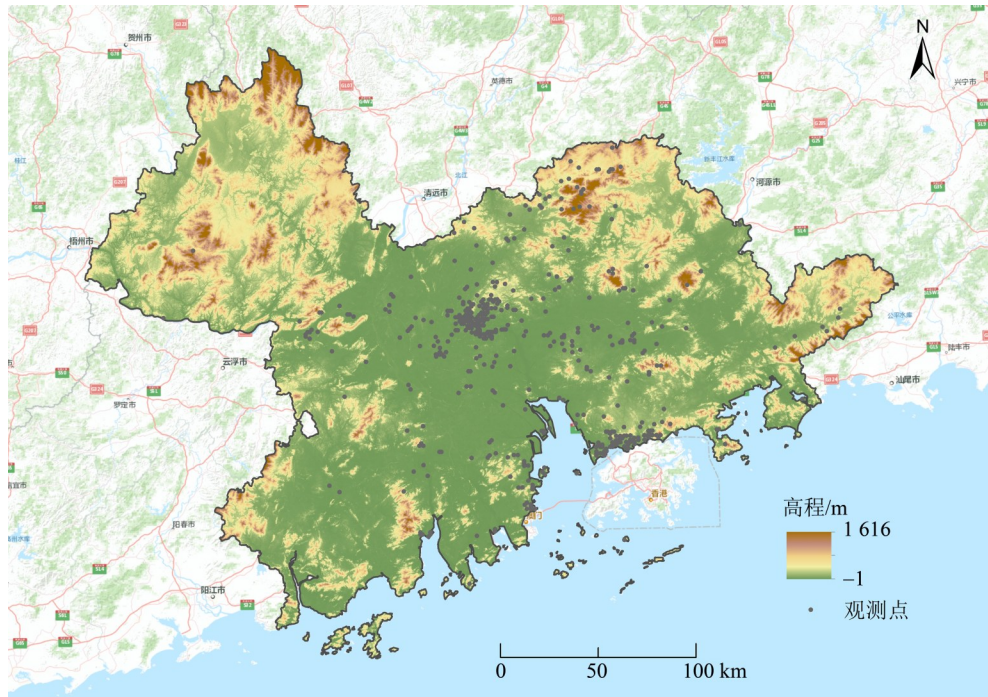


图1 研究区域概况图

Fig. 1 The location and bird records in this study

相关性和冗余性,将研究区划分为 $250\text{ m}\times 250\text{ m}$ 的网格单元,记录每个网格单元内的观测记录,当一个网格单元中有多条记录时,对数据进行优先级合并,同时对于麻雀、乌鸫等城市常见鸟类则根据其密集程度进行了公里网格筛选来避免城市区观测偏多的情况(Soley-Guardia et al., 2024),最终筛选出35 722个点位的观测数据。

鸟类生境适宜性的3个气候变量(年均温、年降水、气温年较差)、4个地形变量(DEM、坡度、坡向、地表粗糙度)、2个植被变量(NDVI、植被类型)、2个水源变量(河流密度、水源距离)、4个人类活动变量(夜间灯光、人口密度、不透水面、道路密度),作为单种鸟类建模的环境变量(Coxen et al., 2017; Moreno et al., 2011; Zhang et al., 2019)。为消除环境变量的共线性影响,对所有环境因子计算皮尔逊相关系数,剔除相关系数大于0.8的变量(Li et al., 2023)。按照研究区经度范围统一了投影和分辨率(250 m),表1为本文使用的各类数据情况。

2 研究方法

2.1 留鸟多样性的潜在分布模拟

本研究运用MaxEnt模型(版本3.4.4)预测留鸟在城市中的潜在适宜性。生态位模型常见的模型众多,如GBM(Generalized Boosting Methods)、

GLM(generalized linear model)、GAM(generalized additive model)、随机森林等,且不同模型各有优势,目前研究表明没有一种算法的表现优于所有其他算法(Norberg et al., 2019; Shabani et al., 2016)。MaxEnt在高样本量中表现仅次于GBM,在低样本量中表现最佳(Wisz et al., 2008),而本研究各鸟种样本量在60~500之间,既包含高样本量也包含中低样本量。因此,基于各鸟种间样本量差异较大的情况,本文选择了在总体上有不错的敏感性和出色的预测能力的MaxEnt作为本文的生态位模型,确保在中低样本量和高样本量的情况下均能得到良好的预测结果。同时,MaxEnt模型原理简单,需要的生境参数较少,在广东省鸟类多样性研究中已有广泛的应用(马星等, 2021)。

为了确保模型的稳健性,对数据进行了1 000次迭代,并用10倍交叉验证法,其中随机选择75%的鸟类观测数据作为训练样本,剩下25%作为测试样本(Phillips et al., 2006)。对训练结果使用ROC(receiver operating characteristic)评估模型的准确性,该曲线用以描述灵敏度和特异性变化之间的关系,其曲线下面积(AUC)用于评估模型在不同阈值下的性能(Yackulic et al., 2013)。AUC取值一般为0.5~1,而AUC=0.5则代表随机预测的准确率,因此可以将其划分为5个等级,0.5~0.6为很差,0.6~0.7为较差,0.7~0.8为及格,0.8~0.9为好

表1 数据源及数据说明
Table 1 Data source and data description

数据类别	数据名称	数据来源	原始空间分辨率
气象	地表温度	MODIS-LST(modis. gsfc. nasa. gov/)	1 km
	降水量	1960—2020年中国1 km分辨率月降水数据集(www. csdata. org/)	1 km
地形	DEM	SRTM-DEM(srtm. csi. cgiar. org/)	30 m
植被	植被类型	1:100万中国植被图(westdc. westgis. ac. cn/)	矢量
	NDVI	MODIS-NDVI(modis. gsfc. nasa. gov/)	250 m
水源	河流分布	OSM(www. openstreetmap. org/)	矢量
人类活动	人口密度	World Pop(www. worldpop. org/)	100 m
	道路路网	OSM(www. openstreetmap. org/)	矢量
	不透水面	1985—2018年逐年不透水层数据(data-starcloud. pcl. ac. cn/zh)	30 m
	夜间灯光	NPP/VIIRS(ngdc. noaa. gov/eog/index. html)	500 m
公民科学	鸟类数据	GBIF(www. gbif. org) / 中国观鸟记录中心(www. birdreport. cn)	矢量

0.9~1为极好。模型结果的数值一般为0~1, 依照IPCC(intergovernmental panel on climate change)的概率分级将结果分为3类: 0~0.33表示该区域适宜性差, 0.33~0.66表示该区域适宜性中等, 而0.66~1则表示该区域适宜性好(Li et al., 2023)。

对MaxEnt输出的87种鸟类结果, 进行了辛普森多样性指数计算。辛普森多样性指数又称为优势度指数, 是对物种丰富度和均匀度的度量(刘玉明和马克平, 1994), 其值越大则表示物种越丰富或分布越均匀。优势度指数

$$D = 1 - \sum N_i(N_i - 1)/(N(N - 1)),$$

其中 S 为某个群落包含的种群个数, 共 N 个个体, N_i 表示第 i 个种群的个体数量($i = 1, 2, 3, \dots, S$)。

2.2 留鸟多样性分布的相似性聚类

在计算每种鸟类适宜性分布图之间的相关性矩阵后, 按照最近距离法对分布相似度最大的鸟类进行聚类, 获取鸟类的分布模式。再对同一类分布模式的鸟类进行平均计算, 得到每类的潜在适宜性。结构相似性法(SSIM, structural similarity index measure)被引入用作度量分布相似度, 以适宜性分布图的亮度、对比度、结构作为数据输入端(Channappayya et al., 2008), 权重同等, 计算公式为

$$\text{SSIM}(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)},$$

其中 x, y 为输入的图像; μ 为图像像素值的平均值, 与亮度相关; σ 为所有像素值的标准差与对比度相关; c 为用以维持稳定的常数。该方法在比较数值相似度的情况下, 可以分析空间分布结构的相似

性, 被用来对鸟类潜在适宜性分布进行聚类。

2.3 鸟类多样性分布的影响归因

目前, 结构方程模型已广泛应用于生态学领域(Jiang et al., 2020)。在此, 该方法被用来确定鸟类多样性分布在环境和非生物因素组合之间的关系, 并探索影响鸟类多样性分布的关键变量(Wu et al., 2021)。将年降水、年均气温、气温年较差作为观测变量构成气候潜变量, 夜间灯光、不透水面、人口密度、道路密度作为观测变量构成人类活动潜变量, 植被类型、NDVI作为观测变量构成植被潜变量, DEM、坡度、坡向、地表粗糙度作为观测变量构成地形潜变量, 河流密度、水源距离作为观测变量构成水源潜变量。该模型主要公式

$$x = \Lambda_x \xi + \delta,$$

$$y = \Lambda_y \eta + \varepsilon,$$

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta,$$

其中 x 为外生观测变量向量, y 为内生观测变量, ξ 为外生潜变量, η 为内生潜变量, Λ 则表示观测变量和潜变量之间的关系, δ 和 ε 则表示各自公式的残差。 B 为内生潜变量之间的关系, Γ 为外生潜变量对内生潜变量值的影响, ζ 则为残差。在模型构建中, 假设气候直接影响植被变量和留鸟多样性分布, 植被变量对留鸟分布有直接影响, 地形对植被、水源和留鸟多样性分布有直接影响, 水源对人类活动和留鸟分布有直接影响, 人类活动对植被和留鸟多样性有直接影响。在完成了模型假设后, 计算了路径系数并进行1000次迭代, 最终以 $P < 0.01$ 为显著性检验标准。

3 结果与分析

3.1 留鸟多样性分布格局

运用MaxEnt软件模拟了2016—2020年珠江三角洲城市群留鸟观测记录的空间格局,87种留鸟模拟的AUC指数都介于0.85~0.95之间,平均训练指数为0.92,平均测试指数为0.88,MaxEnt模型在预测87种鸟类的潜在分布方面具有良好的精度。运用辛普森多样性指数综合87种留鸟的潜在多样性分布格局(图2),总体上,留鸟的多样性随着城

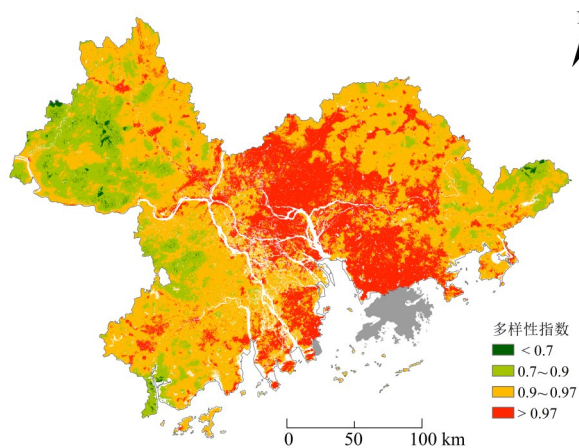


图2 珠三角城市群留鸟的辛普森多样性指数空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of Simpson diversity index of resident bird in the Pearl River Delta area

市化梯度呈现从城市中心区向乡村地区递减的城乡梯度分布,留鸟的辛普森多样性指数介于0.5~0.99之间且高多样性指数区域占比大,低多样性指数区域分布在城市群外围。采用几何间隔法进行多样性分级,经统计,留鸟多样性的值介于0.51~0.7的低多样性区占珠三角城市群总面积的8.3%;0.7~0.9为中等多样性区,占22.9%;0.9~0.97为高多样性区,占43%;高于0.97的极高多样性区,占25.8%。高多样性区域主要集中于城市建成区及其周边,以广州、深圳和珠海为中心,其分布格局与中高密度建成区基本重合,可能是受限于公民科学数据收集点位记录主要集中于城市地区,该类观测数据在山区等地数据样本量较少;此外,城市留鸟的生活习性使它们喜欢城市生境,与人类关系密切,从而使得高多样性主要分布在城市。低多样性地区主要分布于珠三角东部地区的惠州市惠东县、肇庆、佛山和江门等地,其分布范围与低山地区重合。

3.2 留鸟多样性分布类型

在评估区域鸟类多样性现状的基础上,通过聚类分析提出典型群落和重点珍稀物种是科学制定鸟类资源保护措施的重要措施。为此,用SSIM进行相似性分析,获得了8类留鸟多样性分布的聚类,城市留鸟类型总体上以常见的鸣禽和濒危物种的适宜性为特性(图3)。

按照IPCC的适宜性分类,可分为高中低适宜性,高适宜区占比均小于15%,其中第VII类留鸟占比最少,仅1.9%(图4)。第I类留鸟主要为白头鹎、鹊鸂、普通翠鸟、八哥、白鹭、麻雀等鸟类,其高适宜区面积为4 485.6 km²,占比9%;中等潜在适宜区面积为5 402.9 km²,占比10.8%。第II类留鸟主要为山斑鸠、大嘴乌鸦、红尾水鸲等鸟类,其高适宜区面积为3 559.6 km²,占比7.1%;中等适宜区面积为4 927.6 km²,占比9.9%。第III类留鸟为领角鸮、斑头鸺鹠,其高适宜区面积为2 986.3 km²,占比6%;其中等适宜区面积为3 675.8 km²,占比7.4%。第IV类留鸟主要为乌鸫、远东山雀、池鹭、画眉、噪鹛等,其高适宜区面积为2 552.7 km²,占比5.1%;其中等适宜区面积为3 620.2 km²,占比7.3%。第V类留鸟为苍鹭、棕扇尾莺、栗苇莺、牛背鹭、黑翅鸢、红隼,其高适宜区面积为7 109.3 km²,占比14.3%;中等潜在适宜区面积为7 594.6 km²,占比15.2%。第VI类留鸟为金头扇尾莺、灰背棕鸟、普通秧鸡,其高适宜区面积为6 859.1 km²,占比13.8%;中等适宜区面积为6 408.8 km²,占比12.8%。第VII类留鸟主要为夜鹭、喜鹊、淡眉雀鹛、黑领噪鹛、斑姬啄木鸟、灰喜鹊等,其高适宜区面积为965.7 km²,占比1.9%;中等潜在适宜区面积为2 482.1 km²,占比5%。第VIII类型的鸟类为黑短脚鹬、凤头鹰、蛇雕,其高潜在适宜区面积为2 996.8 km²,占比6%;中等适宜区面积为3 745.5 km²,占比7.5%。

从留鸟类型的比例和观测记录丰富度可以看出,I类包含了25种鸟类,占鸟类种类的28.7%,其绝对丰度为21 587;VII类包含了23种鸟类,占鸟类种类的26.4%,其绝对丰度为3 417;IV类包含了13种鸟类,占鸟类种类的14.9%,其绝对丰度为7 106。III、V和VIII类的留鸟类型占比均小于10%,但都包含了濒危物种类型(表2)。此外,87种城市留鸟中彩鹬、银耳相思鸟、鸮没有被分到8种类型,其中彩鹬的高潜在分布区主要在深圳南部,而中等潜在分布区则较为广泛。银耳相思鸟

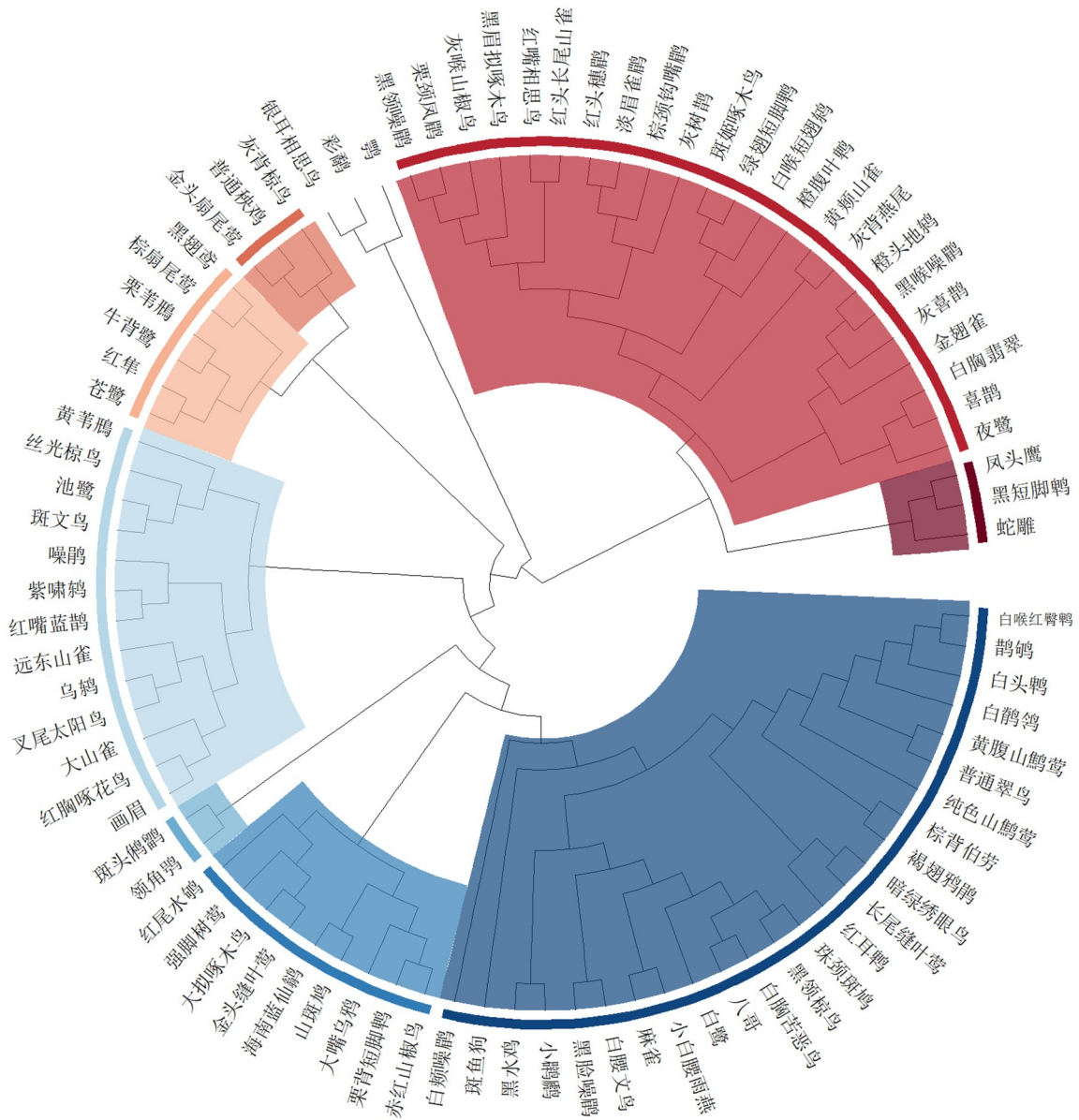


图3 留鸟适宜区格局聚类

Fig. 3 Cluster analysis of suitable areas for resident birds

的高潜在分布区主要位于草丛灌丛或林地边缘。鹞的高潜在分布区主要在深圳东南部、东莞市和惠州市的中心城区。

3.3 留鸟多样性影响归因

运用结构方程模型, 选取气候、植被、地形、水源和人类活动5个潜在变量, 评估驱动因素对留鸟多样性分布及类型的影响。图5中蓝色表示正向效应, 红色表示负向效应, 灰色表示该影响不显著, 线条粗细代表影响程度。气候、植被、地形、水源和人类活动对生物多样性的直接影响分别为0.48、-0.34、0.23、0.42和0.33, 表明气候和水源对生物多样性的影响最大, 其次是植被和人类活

动, 而地形对多样性指数的影响最小。从留鸟多样性类型看, 水源对各留鸟多样性类型主要是正向效应, 路径系数介于0.17~0.49, 水源是鸟类生存的基础, 因此城市水体的增加有利于留鸟多样性的维持; 人类活动也多数呈现正向效应, 除VI类留鸟路径系数是-0.8, 为负向效应, 其余类型路径系数在0.28~1.94之间。除第VI类外, 人类活动越频繁的区域越适宜其他留鸟生存, 这与Soh的研究结果是一致的(Soh et al., 2021)。通过聚类分析将留鸟分类, 再运用结构方程模型可以判断环境因子是正向或负向的效应, 并可根据该类影响因子的空间格局调控城市栖息地的环境。

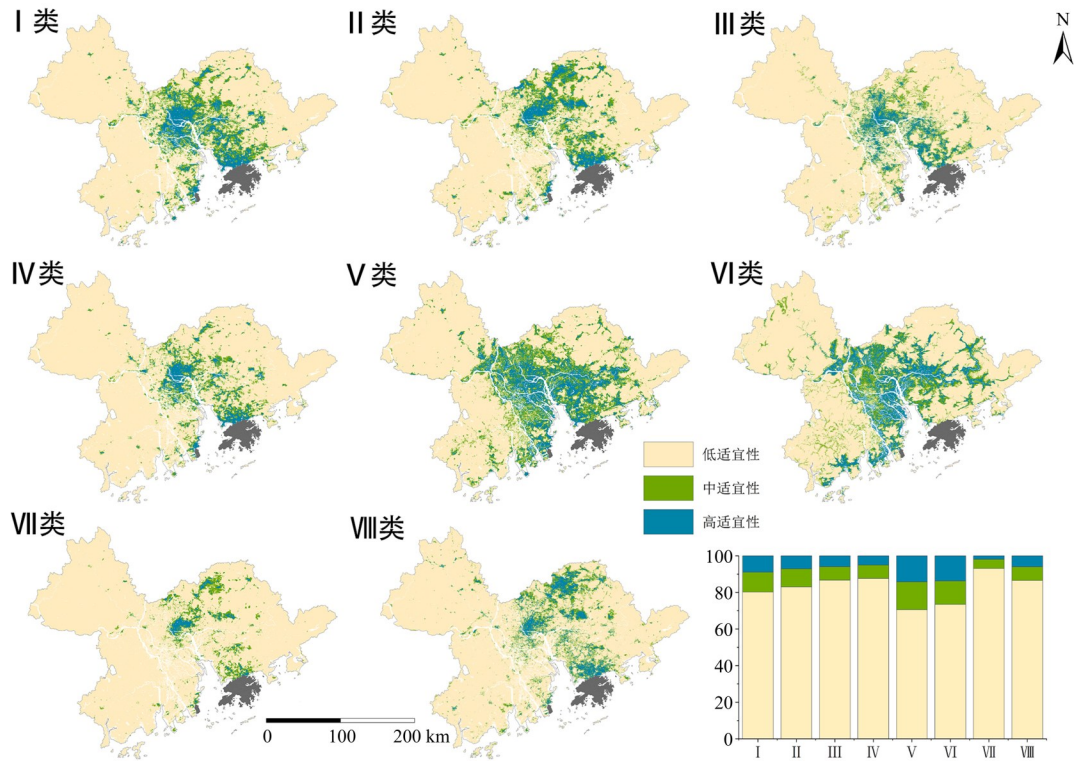


图4 留鸟多样性类型的适宜性分布图

Fig. 4 The suitable distribution of resident bird diversity type

表2 鸟类多样性分布聚类结果统计

Table 2 Statistic results of bird diversity distribution

类别	鸟类名称	II级保护物种	类型占比/%	绝对丰度
I	白头鹎、鹁鹑、暗绿绣眼鸟、白鹁鹑、红耳鹎、长尾缝叶莺、珠颈斑鸠、普通翠鸟、棕背伯劳、八哥、白鹭、黄腹山鹪莺、白喉红臀鹎、黑领棕鸟、黑水鸡、白胸苦恶鸟、纯色山鹪莺、麻雀、褐翅鸦鹃、黑脸噪鹛、小鸊鷉、小白腰雨燕、白腰文鸟、斑鱼狗、白颊噪鹛	褐翅鸦鹃	28.7	181 977
II	栗背短脚鹎、大嘴乌鸦、山斑鸠、赤红山椒鸟、大拟啄木鸟、金头缝叶莺、海南蓝仙鹟、强脚树莺、红尾水鹩	无	10.3	12 812
III	领角鸮、斑头鸺鹠	领角鸮、斑头鸺鹠	2.3	667
IV	乌鸫、远东山雀、池鹭、叉尾太阳鸟、斑文鸟、红嘴蓝鹊、画眉、丝光椋鸟、噪鹛、紫啸鸫、红胸啄花鸟、黄苇鹪、大山雀	画眉	14.9	51 998
V	苍鹭、棕扇尾莺、栗苇鹪、牛背鹭、黑翅鸢、红隼	黑翅鸢、红隼	6.9	12 475
VI	金头扇尾莺、灰背棕鸟、普通秧鸡	无	3.4	798
VII	夜鹭、喜鹊、白胸翡翠、黑喉噪鹛、红头长尾山雀、红头穗鹛、淡眉雀鹛、棕颈钩嘴鹛、金翅雀、黑领噪鹛、灰树鹊、栗颈凤鹛、斑姬啄木鸟、灰背燕尾、黑眉拟啄木鸟、橙头地鸫、灰喉山椒鸟、绿翅短脚鹎、红嘴相思鸟、灰喜鹊、黄颊山雀、白喉短翅鸫、橙腹叶鹎	白胸翡翠、黑喉噪鹛、红嘴相思鸟	26.4	29 763
VIII	黑短脚鹎、凤头鹰、蛇雕	凤头鹰、蛇雕	3.4	1 415
单一鸟	彩鹇、银耳相思鸟、鸮	银耳相思鸟、鸮	3.4	1 307

被均对留鸟分布有着正向效应,分别为1.02、0.49、0.04和0.84。第VIII类留鸟中,人类活动、水源、气候和地形均正向效应,路径系数分别为0.28、0.47、0.5和0.59;植被则呈负向效应,路径系数为-0.27。

4 结论

在高度城市化地区,生境质量和分布影响了城市生物多样性的空间格局与形成机制。为解析城市鸟类多样性与城市生境之间的空间关联与互动机制,运用最大熵模型模拟珠江三角洲城市群留鸟的潜在分布,绘制留鸟的多样性空间分布,解析环境因子对鸟类多样性的影响程度,获得以

下主要结论:

1) 87种留鸟鸟类构成的多样性与适宜性具有高度从城市到乡村的梯度分布模式,通过聚类分析可将留鸟分为8类,总体上留鸟的中高适宜区占比小。

2) 通过结构方程模型的解析可以发现,人类活动多呈正向效应,影响系数介于0.28~1.94;而植被、气候、地形的正向或负向效应差异明显。

研究可为确定城市鸟类多样性及其栖息地保护计划中的空间分布规律,调控鸟类多样性的生境影响因素,开展城市生态建设与管理提供科学依据。

参考文献:

- 李国庆,刘长成,刘玉国,等,2013.物种分布模型理论研究进展[J].生态学报,33(16):4827-4835.
- 刘玉明,马克平,1994.生物群落多样性的测度方法I α 多样性的测度方法(下)[J].生物多样性,(4):231-239.
- 马星,王浩,余蔚,等,2021.基于MaxEnt模型分析广东省鸟类多样性热点分布及保护空缺[J].生物多样性,29(8):1097-1107.
- 瞿莉莎,朱求安,朱超凡,等,2023.1960—2020年中国1 km分辨率月降水数据集[DB].中国科学数据,8(2):(2023-06-07).
- 斯幸峰,丁平,2011.欧美陆地鸟类监测的历史、现状与我国的对策[J].生物多样性,19(3):303-310.
- 王少剑,崔子恬,林靖杰,等,2021.珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J].地理学报,76(4):973-991.
- 吴健生,易腾云,王晗,2021.2000—2030年深港景观格局演变时空分异与趋势对比分析[J].生态学报,41(22):8718-8731.
- 吴佳雨,杨梦夏,周侃,2023.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,78(11):2850-2863.
- 吴庆明,王磊,朱瑞萍,等,2016.基于MAXENT模型的丹顶鹤营巢生境适宜性分析——以扎龙保护区为例[J].生态学报,36(12):3758-3764.
- 郑光美,2023.中国鸟类分类与分布名录:科学出版社[M].
- 朱耿平,刘国卿,卜文俊,等,2013.生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用[J].生物多样性,21(1):90-98.
- ANDERSON R P, RAZA A, 2010. The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic distributions and estimates of niche evolution: preliminary tests with montane rodents (genus *Nephelomys*) in Venezuela[J]. *J Biogeogr*, 37(7):1378-1393.
- BACKSTROM L J, CALLAGHAN C T, LESEBERG N P, et al, 2024. Assessing adequacy of citizen science datasets for biodiversity monitoring[J]. *Ecol Evol*, 14(2):e10857.
- BLICHARSKA M, SMITHERS R J, MIKUSINSKI G, et al, 2019. Biodiversity's contributions to sustainable development[J]. *Nat Sustainability*, 2(12):1083-1093.
- CHANNAPPAYYA S S, BOVIK A C, ALAN C H, et al, 2008. Rate bounds on SSIM index of quantized images [J]. *IEEE Trans Image Process*, 17(9):1624-1639.
- COXEN C L, FREY J K, CARLETON S A, et al, 2017. Species distribution models for a migratory bird based on citizen science and satellite tracking data [J]. *Global Ecol Conserv*, 11:298-311.
- GONG P, LI X C, WANG J, et al, 2020. Annual maps of global artificial impervious area(GAIA) between 1985 and 2018 [J]. *Remote Sens Environ*, 236:111510.
- GREGORY R D, STRIEN A, VORISEK P, 2006. Using birds as indicators of environmental change in Europe[J]. *J Ornithol*, 147(5):16.
- JIANG Z H, LIU H Y, WANG H Y, et al, 2020. Bedrock geochemistry influences vegetation growth by regulating the regolith water holding capacity[J]. *Nat Commun*, 11(1):2392.
- KELLING S, JOHNSTON A, BONN A, et al, 2019. Using semistructured surveys to improve citizen science data for monitoring biodiversity[J]. *Bioscience*, 69(3):170-179.
- LI X L, WU K N, HAO S H, et al, 2023. Mapping cropland suitability in China using optimized MaxEnt model [J]. *Field Crops Res*, 302:109064.
- MARZLUFF J M, MCGOWAN K J, DONNELLY R, et al,

2001. Causes and consequences of expanding American Crow populations[M]. Germany: Springer. 331–363.
- MORENO R, ZAMORA R, MOLINA J R, et al, 2011. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in South Chilean temperate forests using Maximum entropy (Maxent) [J]. *Ecol Inf*, 6(6): 364–370.
- NORBERG A, ABREGO N, BLANCHET F G, et al, 2019. A comprehensive evaluation of predictive performance of 33 species distribution models at species and community levels[J]. *Ecol Monogr*, 89(3): e01370.
- ORTEGA-ÁLVAREZ R, MACGREGOR-FORS I, 2009. Living in the big city: Effects of urban land-use on bird community structure, diversity, and composition [J]. *Landscape Urban Plann*, 90(3/4): 189–195.
- PEARSON R G, RAXWORTHY C J, NAKAMURA M, et al, 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar[J]. *J Biogeogr*, 34(1): 102–117.
- PECL G T, ARAUJO M B, BELL J D, et al, 2017. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being[J]. *Science*, 355(6332): 1389.
- PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions[J]. *Ecol Modell*, 190(3/4): 231–259.
- RANDS M R W, ADAMS W M, BENNUN L, et al, 2010. Biodiversity Conservation: Challenges Beyond 2010[J]. *Science*, 329(5997): 1298–1303.
- SHABANI F, KUMAR L, AHMADI M, 2016. A comparison of absolute performance of different correlative and mechanistic species distribution models in an independent area [J]. *Ecol Evol*, 6(16): 5973–5986.
- SOH M C K, PANG R Y T, NG B X K, et al, 2021. Restricted human activities shift the foraging strategies of feral pigeons (*Columba livia*) and three other commensal bird species[J]. *Biol Conserv*, 253: 108927.
- SOLEY-GUARDIA M, ALVARADO-SERRANO D F, ANDERSON R P, 2024. Top ten hazards to avoid when modeling species distributions: A didactic guide of assumptions, problems, and recommendations[J]. *Ecography*, 2024(4): e06852.
- TIAN D X, XIE Y, BARNOSKY A D, et al, 2019. Defining the balance point between conservation and development [J]. *Conserv Biol*, 33(2): 231–238.
- WISZ M S, HIJMANS R J, LI J, et al, 2008. Effects of sample size on the performance of species distribution models [J]. *Divers Distrib*, 14(5): 763–773.
- WU X T, LIU J G, FU B J, et al, 2021. Integrating multiple influencing factors in evaluating the socioeconomic effects of payments for ecosystem services [J]. *Ecosyst Serv*, 51(2021): 101348.
- YACKULIC C B, CHANDLER R, ZIPKIN E F, et al, 2013. Presence-only modelling using MAXENT: When can we trust the inferences? [J]. *Methods Ecol Evol*, 4(3): 236–243.
- ZHANG J J, JIANG F, LI G Y, et al, 2019. Maxent modeling for predicting the spatial distribution of three raptors in the Sanjiangyuan National Park, China [J]. *Ecol Evol*, 9(11): 6643–6654.

(责任编辑 秦社彩)