

DOI:10.14188/j.ajsh.20250619001

西藏自治区林芝市和拉萨市城市公园鸟类群落嵌套分布格局及其影响因素

王 鹏^{1,2}, 赵华斌^{2*}, 王彦平^{3*}

1. 西藏大学 生态环境学院, 西藏 拉萨 850000;
2. 武汉大学 生命科学学院, 湖北 武汉 430072;
3. 南京师范大学 生命科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 城市化对原本处于自然的空带来了巨大的变化, 鸟类是受其影响的动物类群之一。基于此, 为了探究西藏自治区林芝市和拉萨市两个高海拔城市中的城市公园鸟类群落是否呈现嵌套分布格局并分析其潜在影响因素, 从中国观鸟记录中心 (<http://www.birdreport.cn>) 收集了 2021 至 2023 年间 49 位观鸟者在林芝市和拉萨市各 14 个城市公园上传的 120 份观鸟报告数据。采用 NODF (nestedness based on overlap and decreasing fill) 分别计算了林芝市和拉萨市城市公园的所有鸟类、林鸟和水鸟群落的物种维度的嵌套分布格局。同时, 使用 Spearman 偏相关分析了嵌套序列与生境变量 (如公园面积和隔离度) 和物种生态学特征 (如食性) 之间的关系。然后, 使用 treeNODF 度量方式计算了功能维度 (traitNODF) 和谱系维度 (phyloNODF) 的嵌套分布格局, 使用函数 “treeNodfTest” 及零模型 “permRows” 检验不同生境变量对各类群鸟类的功能和谱系嵌套分布格局的影响。分析结果显示, 除水鸟群落外, 林芝市与拉萨市的所有鸟类和林鸟群落均检测出显著的物种、功能或谱系维度嵌套分布格局。林芝市全部鸟类和林鸟群落的物种嵌套与选择性灭绝相关的鸟类食性特征显著相关, 鸟类生境也是显著嵌套的, 而全部鸟类群落的功能和谱系嵌套主要受隔离度影响; 拉萨市全部鸟类和林鸟群落的功能和谱系嵌套主要受面积影响。综上所述, 为了更好地保护高海拔城市中的鸟类多样性, 应因地制宜地制定保护策略: 在林芝市, 应优先保护食肉性鸟类和隔离度较小的公园; 在拉萨市, 则应优先保护面积较大的公园。基于此, 建议在新建城市公园时, 除了增加生境的种类数量外, 还应综合考虑不同鸟类的生境需求, 以促进鸟类多样性保护。

关键词: 鸟类; 物种嵌套; 功能嵌套; 谱系嵌套; 选择性灭绝; 选择性迁移; 城市公园

中图分类号: Q958.15

文献标志码: A

文章编号: 2096-3491(2025)05-0470-12

Nested distribution patterns of bird communities and their influencing factors in urban parks of Nyingchi and Lhasa, Xizang

Wang Peng^{1,2}, Zhao Huabin^{2*}, Wang Yanping^{3*}

1. School of Ecology and Environment, Tibet University, Lhasa 850000, Xizang, China;
2. College of Life Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;
3. College of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, Jiangsu, China)

Abstract: Urbanization has brought profound changes to natural spaces, and birds are one of the animal groups affected by it. To investigate whether bird communities in urban parks of Nyingchi and Lhasa in Xizang exhibit nested distribution patterns, and to analyze the potential influencing factors, this study collected 120 birdwatching reports

收稿日期: 2025-06-19 修回日期: 2025-09-15 接受日期: 2025-10-03

作者简介: 王鹏 (1999-), 男, 硕士生, 研究方向为鸟类生态学, E-mail: wp99912@126.com

* 通信作者: 赵华斌 (1980-), 男, 教授, 研究方向为动物多样性与适应性进化, E-mail: huabinzhao@whu.edu.cn; 王彦平 (1977-), 男, 教授, 研究方向为岛屿生物地理学与保护生物学, E-mail: wangyanping@nynu.edu.cn

引用格式: 王鹏, 赵华斌, 王彦平. 西藏自治区林芝市和拉萨市城市公园鸟类群落嵌套分布格局及其影响因素[J]. 生物资源, 2025, 47(5): 470-481.

Wang Peng, Zhao Huabin, Wang Yanping. Nested distribution patterns of bird communities and their influencing factors in urban parks of Nyingchi and Lhasa, Xizang [J]. Biotic Resources, 2025, 47(5): 470-481.

uploaded by 49 birdwatchers between 2021 and 2023 to the China Bird Report Center (<http://www.birdreport.cn>), covering 14 urban parks each in Nyingchi and Lhasa. Using the NODF (nestedness based on overlap and decreasing fill) metric, taxonomic nestedness patterns were calculated for all birds, forest birds, and waterbirds in urban parks of both cities. Simultaneously, Spearman partial correlation analysis was employed to assess the relationships among nestedness ranks, park characteristics (such as area and isolation), and species traits (e. g., trophic level). Then the treeNODF metric was used to quantify functional (traitNODF) and phylogenetic (phyloNODF) nestedness patterns. Using the “treeNodfTest” function and “permRows” null model, the effects of park characteristics were tested on functional and phylogenetic nestedness patterns across bird assemblages. We detected significant taxonomic, functional, or phylogenetic nestedness patterns in all bird and forest bird assemblages of Nyingchi and Lhasa (excluding waterbird assemblages). The taxonomic nestedness of all bird and forest bird assemblages of Nyingchi was significantly related to species traits associated with selective extinction, such as trophic level, and their habitats also were significantly nested. The functional and phylogenetic nestedness of all bird assemblages was primarily determined by park isolation. The functional and phylogenetic nestedness of all bird and forest bird assemblages of Lhasa was significantly correlated with park area. This study suggests that, to better conserve urban bird diversity in high-altitude regions, conservation efforts in Nyingchi should prioritize carnivorous bird species and parks with lower isolation, while in Lhasa, larger parks should be prioritized. Based on these findings, it is recommended that when designing new urban parks, in addition to increasing habitat diversity, the habitat requirements of different bird groups should be comprehensively considered to enhance bird community conservation.

Key words: birds; taxonomic nestedness; functional nestedness; phylogenetic nestedness; selective extinction; selective migration; urban park

0 引言

城市化代表了人类定居点的扩展,在此过程中人类建筑区域取代了原生植被,对原本处于自然的空间带来了巨大的变化^[1]。鸟类是特别容易受到城市扩张影响的动物类群之一,因为城市化通常伴随着生物多样性的丧失和物种同质化;鸟类丰富度、群落结构以及觅食繁殖等受到影响后可能会产生较大变化^[2-3]。然而,目前关于城市鸟类的研究大多集中在鸟类行为或丰富度变化方面,针对城市鸟类群落组成,特别是嵌套分布格局等方面的研究仍相对较少^[4]。

嵌套分布格局是群落结构研究的一部分,是指较小斑块中的物种是较大斑块物种的适当子集的一种分布模式^[5],自Patterson和Atmar在1986年首次使用矩阵分析度量嵌套以后^[6],已被广泛运用于诸多类群的研究中^[7-9]。研究者提出了五种假说来解释嵌套分布格局,分别是被动取样、选择性灭绝、选择性迁入、生境嵌套和人类干扰假说^[10-14]。被动取样假说认为,群落中稀有种较广布种更难被发现导致的物种多度差异影响了嵌套分布格局^[15-16];选择性灭绝假说认为,一些与灭绝相关的斑块特征(如面积)和物种生态学特征(如地理分布范围、食性)会导致物种发生选择性灭绝进而形成嵌套分布格局^[17-18];选择性迁入假说认为,由于物种自身扩散能力(如手翼指数)存在差异,斑块间的隔离会通过扩

散限制影响嵌套分布格局^[19];生境嵌套假说认为,当群落所处斑块的生境,即生境-地点矩阵符合嵌套格局时,该群落的物种也符合嵌套分布格局^[20-21]。最后,人类干扰也可以影响嵌套分布格局,因为物种对城市中人为干扰的承受程度不同^[12]。

然而,以往在城市景观中开展的鸟类群落嵌套分布格局研究大多聚焦在物种嵌套维度。例如,在西班牙马德里市(Madrid)的研究探究了人类干扰是否会影响物种维度的嵌套分布格局^[12];在西班牙瓦伦西亚市(Valencia)的研究探究了不同季节物种维度的嵌套分布格局是否存在不同^[22]。最近在岛屿系统开展的多维度嵌套分布格局研究证实,将物种视为在功能和进化方面等效的单位,可能会忽略具有相似功能特征的物种可能具有较高的生态位重叠,以及同样丰富度下亲缘关系较近的群落可能对环境会更敏感的问题^[23]。比如,在中国舟山群岛开展的两栖动物群落的嵌套分布格局研究显示,隔离(距大陆距离)对物种嵌套没有影响,但对功能维度和谱系维度嵌套却有显著影响,说明隔离驱动的选择性迁入过程对两栖动物群落的功能性状和系统发育多样性有影响^[17]。此外,在全球十个群岛开展的哺乳动物群落的嵌套分布格局研究也表明影响物种、功能和谱系嵌套的因素存在差异^[24]。因此,从生物多样性的多个维度开展嵌套分布格局研究是很有必要的,这可以帮助人们更全面地理解嵌套分布格局的驱动

因素^[24]。

另外,针对不同习性的物种开展多维度嵌套分布格局也是很有必要的^[9]。具体而言,虽然城市为鸟类提供了栖息场所^[25],但不同类群的鸟类对不同城市景观的适应程度是不同的。生态学研究,人们通常将猛禽、陆禽、攀禽和鸣禽定义为林鸟,而将游禽和涉禽定义为水鸟。这两类鸟类在栖息地需求、斑块占用模式、物种生态特征及行为习性等方面均存在显著差异^[25]。水生栖息地及其周边环境是水鸟的理想生境;虽然部分高度互联的环境(如芦苇植被)也能为林鸟提供栖息地^[26],但水鸟的物种丰富度主要受水面面积的影响,而林鸟的丰富度则与植被覆盖量密切相关^[26-27]。此外,城市中多数林鸟偏向杂食性,并对建筑密集区域表现出一定的适应能力;相比之下,水鸟则极少出现在高度城市化区域^[28]。这些关键差异可能导致林鸟和水鸟在城市公园中的分布模式各异,进而影响其嵌套分布格局的形成机制。因此,在嵌套分布格局研究中区分林鸟与水鸟至关重要,这将有助于为不同生态类群鸟类制定更具针对性的保护策略。

值得注意的是,不同类群对城市化的敏感性在不同海拔环境中可能呈现差异。然而,目前大多数研究主要关注低海拔城市鸟类的群落变化^[29],而在高海拔城市的探索仍较为匮乏。林芝市和拉萨市是青藏高原的两个重要城市,前者是位于西藏东南部的重要森林资源区^[30],后者是西藏自治区行政首府和最大面积的城市,也是西藏的文化和经济中心^[31],为检验高海拔城市不同鸟类类群嵌套分布格局提供了理想场景。为了探究不同鸟类群落在高海拔城市中的嵌套分布格局及其影响因素,本研究分析了林芝市和拉萨市各14个城市公园全部鸟类、林鸟和水鸟3个鸟类群落的物种、功能和谱系嵌套分布格局,回答了以下3个问题:(1)3个鸟类类群的群落在城市公园的分布是否符合物种、功能和谱系嵌套分布格局?(2)物种、功能和谱系维度嵌套分布格局是否遵循相同的生态过程?(3)如何应用嵌套分布格局理论来保护高海拔城市的鸟类多样性?

1 研究区概况

林芝位于西藏自治区东南部^[32],地势西北高、东南低,平均海拔3 100 m。该地区属于海洋性季风气候,年日照时间为2 000 h,气温变化较小,温暖湿润,年平均气温和降水量分别为8.7℃和650 mm^[30]。拉萨是西藏自治区首府,位于青藏高原中南部,总面积29 645 km²^[33];地势北高南低,平均海拔3 650 m,是世界上海拔最高的城市之一^[34]。拉

萨属于高原温带半干旱气候,年日照时数超3 000 h,冬季表现为低温干旱特征,夏季受季风影响呈现暖湿特性^[31],月均气温与相对湿度分别为0~18℃和18%~57%^[35]。

本研究选择了八一大桥、贡塔角、福建公园、干部学校、佳美家园、林海、林芝宾馆、林芝市人民政府、自然博物馆、尼洋阁、厦门广场、柏树王园林景区、西藏农牧学院和新机线等14个城市公园作为林芝市研究区域;选择了布达拉宫广场、体育馆、格桑花公园、拉鲁湿地、拉萨滨河公园、拉萨河、鹏鑫生态园、林琼公园、龙王潭、罗布林卡、曲米路公园、桑达、天路广场和博得林等14个城市公园作为拉萨市研究区域。

2 研究方法

2.1 数据收集

本研究从中国观鸟记录中心(<http://www.birdreport.cn>)收集数据,主要基于以下考量:该平台是免费开放注册的公众科学平台,提供鸟类观测记录的提交与保存服务;2021年起平台年上传报告量突破六万份,观鸟参与者持续增加,且涌现出具备较专业观测水平的爱好者群体。最终共获取49位观鸟者于2021—2023年间在西藏林芝市(14个公园)和拉萨市(14个公园)提交的120份有效报告。尽管多项研究证实公民科学数据具备与专业科学数据同等的可靠性^[36-38],但开放获取平台的调查数据始终存在潜在偏差^[39]。因此,本研究采用以筛选“合格观鸟者”为核心、辅以其他质量控制方法对数据进行处理:(1)仅保留正确报告数量超过30份、错误报告数不超过其正确报告数的一半以及在研究期间(2021—2023年)物种个体数量均为1的报告不超过总报告数一半的观鸟者所上传的报告^[40-41]。(2)删去所有匿名提交、重复和有误的观测记录;同时剔除记录鸟类科数不足5的报告。(3)使用Google地图手动验证所有报告坐标,删去坐标与实际地点不相符的报告;(4)通过整合中国观鸟记录中心的观测数据与《中国鸟类分类与分布名录(第四版)》的物种分布信息^[42],对鸟类记录进行系统复核,校正存在地理分布偏差或不符合实证的记录。

经严格筛选后,本研究分别建立了林芝市与拉萨市3个鸟类类群(全部鸟类、林鸟、水鸟)的物种名录。基于该名录,采用IUCN红色名录评估物种濒危等级^[43],使用phylo函数对Jetz等发表的全球鸟类系统发育树进行修剪^[44],以构建适用于两市不同鸟

类群落的系统发育树。

2.2 生境变量数据收集

对每个城市公园,本研究收集了4个可能影响嵌套分布格局的生境变量,分别是公园面积、隔离度、生境类型数量以及建筑指数^[13](表1和表2)。通过将 ArcGIS Online 中的 World Imagery 数据和城市公园的坐标添加到 ArcGIS 10.8 中,就可以查看并手动计算以上变量。公园面积为 ArcGIS 实际测量得到,隔离度为某个公园到最近更大公园的距离。本研究将生境类型分为16种(表3和表4),分别为建筑(房屋或凉亭)、稀疏树林(树木间距在30 cm 以上)、稠密树林(树木间距在10 cm 以下)、池塘(面积较小水域)、湖泊(面积较大水域)、河流(间距<20 m 的连续水道)、水库(水深>10 m 的人工水域)、湿地(植被盖度>60% 的淹水区)、湖心岛(面积>100m² 的离岸陆地)、草地(株高<1 m 的草本群落)、道路设施(人行道、假山)、灌丛(较矮灌木)、空地(裸地)、农田(垄距0.5~1.2 m 的耕作系统)、小山(高度20~100 m 的低山)、高山(高度100m 以上的山体),这些生境类型的数据根据天地图进行判断。建筑指数表示公园周围的建筑比例,用于体现其城市化水平^[45-46],根据 Bolger 等的方法,先测量公园半径为250 m、500 m、1 000 m 和2 000 m 范围内建筑所占面积的比例,然后使用以下公式计算:建筑指数=样方内建筑面积+0.5×(样方中心500 m 范围内建筑的面积)+0.25×(样方中心1000 m 范围内建筑的面积)+0.125×(样方中心2 000 m 范围内建筑的面积)。

2.3 物种生态学特征数据收集

本研究收集了可以反映鸟类灭绝和扩散能力的4个特征,分别是窝卵数、手翼指数、地理分布范围和食性^[47-48]。窝卵数、地理分布范围和食性是与灭绝相关的物种特征,因为窝卵数较少、地理分布范围较小和食肉的物种具有更高的灭绝风险^[49-51]。本研究将窝卵数作为鸟类繁殖潜力的指标^[18],将食性分为4个等级:1. 杂食性;2. 植食性;3. 食虫;4. 食肉。手翼指数是基于鸟类翅膀骨骼结构测量的形态功能指标,其量化结果直接反映物种的迁徙适应能力,是评估鸟类飞行效率与扩散能力的关键特征^[52-53]。

窝卵数和食性数据来自中国鸟类的生活史和生态学特征数据集^[14],手翼指数和地理分布范围等数据来自 AVONET 数据集^[53]。收集各个城市鸟类的生态学特征数据后,分别构建了不同鸟类群落物种特征(窝卵数、手翼指数、地理分布范围和食性)的距离性状矩阵,并将该距离矩阵转换为不同城市不同鸟类群落的功能树。

2.4 嵌套分析

2.4.1 物种嵌套及其影响因素

使用 NODF 度量方式计算不同城市不同鸟类群落的物种嵌套^[54],NODF 可以分析整个矩阵,还可以独立计算物种(NODF_r)和地点(NODF_c)是否嵌套^[55],这3个指标只要有一个是显著的,该群落就被认为符合嵌套分布格局^[24]。本研究采用 F-F 零模型检验嵌套分布格局的显著性,该模型在保持物种-地点矩阵的行总和列总和不变的约束条件下进行随机

表1 林芝市14个城市公园的生境变量与特征

Table 1 Habitat variables and characteristics of the 14 urban parks in Nyingchi City, China

名称	面积/hm ²	物种数	隔离度/km	建筑指数	生境类型数量	全部鸟类嵌套序列	林鸟嵌套序列
西藏农牧学院(NMXY)	13.8	6	0.85	162.17	8	14	14
贡塔角(GTJ)	32.52	19	4.13	26.32	4	11	9
八一大桥(BYDQ)	6.31	25	0.72	201.47	5	7	10
厦门广场(XMGC)	0.48	20	0.72	240.11	3	10	11
林海(LH)	32.07	45	0.78	220.66	6	2	2
福建公园(FJGY)	16.32	44	0.40	194.36	10	3	3
林芝宾馆(LZBG)	2.32	21	0.39	217.00	6	8	8
林芝市人民政府(RMZF)	1.25	54	0.40	192.66	4	1	1
佳美家园(JM)	4.43	34	0.39	191.66	2	5	5
干部学校(GBXX)	10.06	15	1.05	185.17	4	13	13
自然博物馆(ZRBWG)	5.21	16	1.25	27.94	4	12	12
尼洋阁(NYG)	3.89	33	1.02	127.44	4	6	6
新机线(XJX)	2.22	21	1.02	86.99	2	9	7
柏树王园林景观区(BSW)	27.23	38	1.31	51.01	4	4	4

表2 拉萨市14个城市公园的生境变量与特征
Table 2 Habitat variables and characteristics of the 14 urban parks in Lhasa City, China

名称	面积/ hm ²	物种数	隔离 度/km	建筑指 数	生境类 型数量
体育馆 (TYG)	3.24	18	7.029	259.73	4
桑达(SD)	16.75	24	7.029	62.59	4
罗布林卡 (LBLK)	8.44	52	1.15	301.2	5
拉萨滨河公 园(LSBH)	11.29	27	1.15	301.65	7
拉鲁湿地 (LL)	28.82	68	1.54	36.58	4
曲米路公园 (QML)	0.46	19	1.21	195.29	3
布达拉宫广 场(BDLG)	18.81	26	0.35	343.75	6
龙王潭 (LWT)	20.07	28	0.35	285.81	5
鹏鑫生态园 (PX)	6.38	20	1.76	88.96	6
格桑花园 (GSH)	1.09	5	0.73	261.65	4
博得林 (BDL)	2.15	5	2.54	191.54	2
拉萨河 (LSH)	2.17	26	2.86	115.51	2
林琼公园 (LQ)	2.02	15	2.86	255.24	4
天路广场 (TL)	1.69	16	2.94	127.91	4

化计算^[56]。与其他模型相比,该零模型是限制性最强的零模型,只将很少一部分矩阵确定为显著嵌套,增强了结果的可信程度。上述计算在NODF 2.0版本中运行,在随机生成了1 000个矩阵后使用95%的置信区间评估嵌套显著程度^[57]。

随后,从默认输出的output.txt文件中获得了最大化排列的嵌套矩阵^[46],并得到了物种嵌套序列和地点嵌套序列。当物种地点矩阵显著嵌套时,使用Spearman秩相关检验计算地点嵌套序列与影响嵌套的生境变量(公园面积、隔离度、生境类型的数量和建筑指数)(表1和表2)之间的相关性,识别最重要的变量。同样,通过计算物种嵌套序列和物种生态学特征(窝卵数、手翼指数、地理分布范围和食性)之间的Spearman相关性评估这些变量在影响不同城市不同鸟类群落嵌套的作用。此外,本研究还使用NODF度量方式分析生境-地点矩阵是否符合嵌

套分布格局。如果该矩阵是显著嵌套的,那么城市公园鸟类群落符合生境嵌套假说^[54]。为了避免误差,本研究仅使用了林芝市和拉萨市三个类别的鸟类群落的缺失-存在矩阵进行分析,没有验证被动取样假说;由于没有收集到噪声数据,本研究也没有验证人类干扰假说。

2.4.2 功能和谱系嵌套及其影响因素

本研究使用treeNODF计算功能(traitNODF)和谱系(phyloNODF)嵌套^[23]。treeNODF是NODF的扩展,可以分为物种组成部分(S. Fraction)和树的拓扑结构(topoNODF),它通过将功能树或系统发育树与有序的物种地点矩阵连接起来,测量功能和谱系嵌套的主要驱动因素是物种组成还是功能和谱系树的拓扑结构。当具有较低功能性状和系统发育关系多样性的群落的物种组成是具有较高功能性状和系统发育关系多样性的群落的完美子集时,phyloNODF和traitNODF达到最大值^[23]。当treeNODF(traitNODF和phyloNODF)的结果显著时,物种组成部分(S. Fraction)和树的拓扑结构(topoNODF)有一个结果是显著的就可以认为该群落是显著嵌套的。

然后,根据每个生境变量的升序和降序分别对物种矩阵进行了排序,每个生境变量产生两个反向关联的矩阵,例如按增加公园面积排序的矩阵和按减少公园面积排序的矩阵^[17]。在此基础上,使用函数'treeNodfTest'和零模型permRows检验生境变量对不同城市不同类群鸟类群落功能嵌套的影响。通过检验按降低公园面积排序的矩阵是否嵌套,可以判断该群落是否符合选择性灭绝假说,同理,通过检验按增加隔离度排序的矩阵是否嵌套,可以判断其是否符合选择性迁入假说^[24]。最后,重复功能嵌套分析步骤,通过使用物种系统发育树来计算谱系嵌套及其驱动因素的显著程度^[23]。以上所有分析均在R.4.3.3中进行^[58]。

3 结果与分析

3.1 物种组成

2021年—2023年的调查中,在林芝市和拉萨市各14个城市公园中共记录鸟类18目48科165种,其中林鸟为12目38科132种,水鸟为6目10科33种。其中,濒危鸟类有2种,分别是草原雕(*Aquila nipalensis*)和猎隼(*Falco cherrug*);近危鸟类有4种,分别是白眼潜鸭(*Aythya nyroca*)、黑颈鹤(*Grus nigricollis*)、胡兀鹫(*Gypaetus barbatus*)和高山兀鹫(*Gyps himalayensis*)。

表3 林芝市14个城市公园的生境地点矩阵
Table 3 Habitat-by-site matrix for birds in 14 urban parks in Nyingchi City, China

名称	建筑	稀疏 树林	稠密 树林	池塘	湖泊	河流	水库	湿地	湖心 岛	草地	道路 设施	灌丛	空地	农田	小山	高山
西藏农牧学院(NMXY)	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
贡塔角(GTJ)	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
八一大桥(BYDQ)	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
厦门广场(XMGC)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
林海(LH)	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
福建公园(FJGY)	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
林芝宾馆(LZBG)	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
林芝市人民政府(RMZF)	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
佳美家园(JM)	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
干部学校(GBXX)	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
自然博物馆(ZRBWG)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
尼洋阁(NYG)	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
新机线(XJX)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
柏树王园林景区(BSW)	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0

表4 拉萨市14个城市公园的生境地点矩阵
Table 4 Habitat-by-site matrix for birds in 14 urban parks in Lhasa City, China

名称	建筑	稀疏 树林	稠密 树林	池塘	湖泊	河流	水库	湿地	湖心 岛	草地	道路 设施	灌丛	空地	农田	小山	高山
体育馆(TYG)	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
桑达(SD)	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
罗布林卡(LBLK)	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
拉萨滨河公园(LSBH)	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
拉鲁湿地(LL)	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
曲米路公园(QML)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
布达拉宫广场(BDLG)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
龙王潭(LWT)	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
鹏鑫生态园(PX)	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
格桑花公园(GSH)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
博得林(BDL)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
拉萨河(LSH)	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
林琼公园(LQ)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
天路广场(TL)	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

3.2 物种嵌套及其影响因素

物种嵌套分析结果显示,只有林芝市的全部鸟类和林鸟群落是显著嵌套的,林芝市的水鸟群落和拉萨市3个类别的鸟类群落均不存在嵌套分布格局(表5)。Spearman 偏相关分析结果表明,林芝市城市公园全部鸟类和林鸟群落的嵌套序列与代表灭绝风险的食性(表6)显著相关,与代表迁移能力的隔离度和手翼指数等没有显著相关性。因此,符合选择性灭绝假说,不符合选择性迁入假说。城市化没有对这两个鸟类群落的物种维度嵌套分布格局产生

影响,因为其嵌套序列与建筑指数相关性不显著。另外,林芝市城市公园全部鸟类和林鸟群落的生境-地点矩阵显著嵌套,说明其符合生境嵌套假说。

3.3 功能和谱系嵌套及其影响因素

当按公园面积对拉萨市全部鸟类和林鸟群落物种-地点矩阵进行降序排序时,观察到的 treeNODF (包含 traitNODF 和 phyloNODF)及其组成部分(S. Fraction 和 topoNODF)的值均显著大于预期值(表7和表8),当按最近公园距离对林芝市全部鸟类群落物种-地点矩阵进行升序排序时,观察到的 tree-

表5 林芝市和拉萨市城市公园全部鸟类、林鸟、水鸟群落和生境嵌套分析结果

Table 5 Results of nestedness analysis of all birds, forest birds, waterbirds and habitats in urban parks in Nyingchi City and Lhasa City, China

群落	NODF		NODFr		NODFc	
	Obs	Prob	Obs	Prob	Obs	Prob
林芝市全部鸟类群落	36.61	<0.001	36.47	<0.001	46.93	0.464
林芝市林鸟群落	37.94	<0.001	37.77	<0.001	46.87	0.326
林芝市水鸟群落	55.42	0.401	50.92	0.5	68.99	0.329
林芝市生境-地点矩阵	35.76	<0.001	39.12	0.298	33.52	<0.001
拉萨市全部鸟类群落	48.48	0.311	48.35	0.327	56.81	0.096
拉萨市林鸟群落	44.85	0.293	44.64	0.287	51.84	0.416
拉萨市水鸟群落	67.66	0.107	66.92	0.106	72.72	0.487

表6 林芝市全部鸟类和林鸟群落的地点嵌套序列与生境变量的 Spearman 偏相关分析结果及其物种嵌套序列与生态学特征的 Spearman 偏相关分析结果

Table 6 Spearman rank correlations between the rank orders of sites (for all birds and forest birds in Nyingchi) and the orders according to habitat variables, and between the rank orders of species (for all birds and forest birds in Nyingchi) and the orders according to ecological traits

群落	面积/hm ²	隔离度/km	建筑指数	生境类型数量	窝卵数	手翼指数	地理分布范围	食性
林芝市全部鸟类群落	-0.32	0.39	-0.05	0.20	-0.05	0.06	-0.06	0.22*
林芝市林鸟群落	-0.33	0.41	0.08	0.23	-0.10	-0.06	-0.02	0.31**

NODF 的值也显著大于预期值,但 traitNODF 的 S. Fraction 部分和 phyloNODF 的 topoNODF 结果不显著(表7和表8)。这表明拉萨市面积较大的城市公园具有更丰富的功能性状和系统发育多样性,而距其他公园较远的林芝城市公园的功能性状和系统发育多样性较为贫瘠。

4 讨论

本研究以高海拔地区的林芝市和拉萨市为研究地点,探究影响其鸟类群落物种、功能与谱系嵌套分布格局及其影响因素。虽然目前已有部分在城市景观中开展的鸟类群落嵌套分布格局研究^[12,28,46],但尚未有研究在高海拔城市进行。高海拔环境使鸟类暴露在寒冷、干燥、低氧和高紫外线辐射的环境中^[59-60],而且海拔梯度可以通过环境过滤效应重新塑造群落,这对其生存与分布构成了巨大挑战^[61-62]。因此,本研究有助于为高海拔城市鸟类多样性保护提供参考。

4.1 物种嵌套及其影响因素

研究结果表明,林芝市的全部鸟类和林鸟群落在物种维度呈现显著嵌套分布格局,且均符合选择性灭绝假说。物种-地点矩阵经过最大化重排后显示,嵌套序列较小的鸟类占据更多公园,而这两个群落的物种嵌套序列均与食性呈显著正相关,表明食性赋值较大的物种——即食肉鸟类仅分布于少数

公园,其局域灭绝风险显著提升,驱动了选择性灭绝格局的形成。与之相反,林芝市水鸟集中分布于4~5个大型公园,其余公园仅零星出现,导致无法形成嵌套分布格局。这一对比证实:群落是否存在嵌套分布格局,取决于所选取的分析对象^[9],即使在同一城市内,不同鸟类类群的嵌套分布格局可能存在差异。

研究结果表明,林芝市的全部鸟类和林鸟群落的物种维度嵌套分布格局与隔离度和手翼指数都相关不显著。因此,均不符合选择性迁入假说,这一结果与郑州和南京开展的同类研究结果相同^[28,46]。这表明,在城市环境中,尽管鸟类的迁移能力存在较大差异,但“生境岛屿(城市公园)”的隔离程度远低于“真实岛屿”。因此,较少出现迁移能力强的鸟类同时占据大小公园,而迁移能力弱的鸟类仅局限于小公园的格局。

林芝市全部鸟类和林鸟群落的物种维度嵌套分布格局均符合生境嵌套假说,因为这两个群落的生境-地点矩阵是相同的,且均是显著嵌套的(表5)。生境嵌套假说已在此前的研究中被多次验证^[28,46],并被认为是最直接解释嵌套分布格局的假说^[20]。事实上丰富的生境可以促进群落稳定性,降低灭绝风险^[63],增强鸟类在城市中的生存能力。例如,更大的水域面积和更高的灌木覆盖可以增加鸟类多样性^[64],水生环境不仅吸引水鸟,如绿翅鸭(*Anas crec-*

表7 林芝市和拉萨市城市公园全部鸟类、林鸟、水鸟群落功能嵌套分析结果

Table 7 Results of functional nestedness analyses using the treeNODF conducted on the species-site abundance matrix for all birds, forest birds and water birds in Nyingchi City and Lhasa City, China

生境变量	群落	treeNODF		S.Fraction		topoNODF	
		Obs	Prob	Obs	Prob	Obs	Prob
面积	林芝市全部鸟类群落	32.97	0.624	22.85	0.526	10.12	0.783
	拉萨市全部鸟类群落	62.33	0.005	46.35	0.005	15.97	0.008
	林芝市林鸟群落	36.95	0.430	25.21	0.355	11.73	0.587
	拉萨市林鸟群落	59.84	0.005	44.41	0.006	15.42	0.014
	林芝市水鸟群落	37.30	0.658	32.98	0.616	4.31	0.801
	拉萨市水鸟群落	58.72	0.108	51.22	0.084	7.50	0.359
隔离度	林芝市全部鸟类群落	48.12	0.039	31.77	0.051	16.35	0.036
	拉萨市全部鸟类群落	46.46	0.196	34.95	0.17	11.51	0.351
	林芝市林鸟群落	45.33	0.098	30.55	0.101	14.78	0.144
	拉萨市林鸟群落	45.10	0.193	34.14	0.152	10.96	0.440
	林芝市水鸟群落	46.29	0.347	39.68	0.351	6.61	0.385
	拉萨市水鸟群落	53.18	0.221	45.20	0.212	7.97	0.283
建筑指数	林芝市全部鸟类群落	25.23	0.889	17.21	0.836	8.01	0.942
	拉萨市全部鸟类群落	40.71	0.433	29.72	0.439	10.98	0.432
	林芝市林鸟群落	29.16	0.795	18.45	0.811	10.71	0.725
	拉萨市林鸟群落	37.68	0.538	26.33	0.596	11.34	0.402
	林芝市水鸟群落	48.42	0.283	41.26	0.287	7.15	0.320
	拉萨市水鸟群落	52.71	0.234	45.19	0.224	7.51	0.375
生境类型数量	林芝市全部鸟类群落	34.74	0.507	23.66	0.456	11.08	0.638
	拉萨市全部鸟类群落	52.12	0.068	37.35	0.106	14.76	0.031
	林芝市林鸟群落	34.73	0.531	24.01	0.440	10.73	0.720
	拉萨市林鸟群落	47.60	0.119	34.69	0.128	12.90	0.177
	林芝市水鸟群落	42.11	0.514	37.43	0.455	4.67	0.741
	拉萨市水鸟群落	45.08	0.490	37.80	0.495	7.28	0.414

ca)和夜鹭(*Nycticorax nycticorax*),而且对其他被水吸引来获取水分和洗澡的物种同样重要。同时,灌木可能为鸟类提供大量三维空间,使它们尽量避免人类干扰^[65]。

4.2 功能和谱系嵌套及其影响因素

功能与谱系维度的嵌套分析结果与物种维度的结果在林芝市和拉萨市呈现相反模式,但两地差异的驱动机制不同。在林芝市,全部鸟类和林鸟群落的物种维度嵌套格局符合选择性灭绝假说(表6),但其功能与谱系维度的嵌套分布格局则未表现出这一特征(表7和表8)。这说明城市化可能会导致进化上最独特以及具有特殊功能性状物种的丧失^[63],使得较小公园的物种虽是较大公园的子集,但留存物种的功能性状和系统发育关系趋同,不足以形成显著的梯度格局。与之相反,拉萨市的全部鸟类和林鸟群落的功能与谱系维度嵌套分布格局符合选择性灭绝假说,而物种维度的嵌套分布格局却不符合

该假说。这是因为功能性状与系统发育关系相似的物种组合,如麻雀(*Passer montanus*)与山麻雀(*Passer cinnamomeus*)在不同公园中可能由不同的具体物种随机填充,导致群落物种组成偏向随机分布而非梯度格局。另外,值得注意的是,物种与功能和谱系维度嵌套分布格局的计算方法存在本质差异——物种维度通过检验嵌套序列与灭绝相关的特征(如公园面积、食性)是否显著相关,功能和谱系维度则需要将功能树或系统发育树与按灭绝相关的特征(公园面积)排序的矩阵关联起来,然后量化。这种统计方法上的差异或许是产生此类结果不同的一个原因。

林芝市全部鸟类群落的功能与谱系维度嵌套格局均符合选择性迁入假说(表7和表8),但物种维度嵌套格局却不符合。这种模式可能源于3方面原因。首先,城市景观中的扩散限制使多数物种局限于隔离较小的公园,仅扩散能力较强的物种可抵达

表8 林芝市和拉萨市城市公园全部鸟类、林鸟、水鸟群落谱系嵌套分析结果

Table 8 Results of phylogenetic nestedness analyses using the treeNODF conducted on the species-site abundance matrix for all birds, forest birds and water birds in Nyingchi City and Lhasa City, China

生境变量	群落	treeNODF		S.Fraction		topoNODF	
		Obs	Prob	Obs	Prob	Obs	Prob
面积	林芝市全部鸟类群落	31.26	0.582	22.66	0.527	8.59	0.704
	拉萨市全部鸟类群落	58.39	0.005	46.07	0.005	12.31	0.009
	林芝市林鸟群落	34.31	0.466	24.81	0.398	9.48	0.634
	拉萨市林鸟群落	56.05	0.010	43.08	0.006	12.96	0.027
	林芝市水鸟群落	39.80	0.584	35.00	0.565	4.80	0.652
	拉萨市水鸟群落	59.28	0.077	51.55	0.064	7.73	0.287
隔离度	林芝市全部鸟类群落	45.01	0.037	32.19	0.047	12.81	0.052
	拉萨市全部鸟类群落	41.11	0.311	33.45	0.243	7.66	0.591
	林芝市林鸟群落	41.42	0.154	29.80	0.146	11.62	0.244
	拉萨市林鸟群落	41.47	0.286	33.19	0.210	8.28	0.659
	林芝市水鸟群落	40.58	0.531	36.11	0.495	4.47	0.703
	拉萨市水鸟群落	51.66	0.245	44.86	0.217	6.79	0.470
建筑指数	林芝市全部鸟类群落	24.96	0.860	17.51	0.844	7.44	0.866
	拉萨市全部鸟类群落	40.51	0.354	31.11	0.388	9.41	0.261
	林芝市林鸟群落	29.91	0.712	20.00	0.734	9.90	0.568
	拉萨市林鸟群落	37.51	0.470	27.00	0.553	10.51	0.248
	林芝市水鸟群落	45.88	0.355	38.99	0.386	6.89	0.287
	拉萨市水鸟群落	55.01	0.144	46.44	0.151	8.56	0.132
生境类型数量	林芝市全部鸟类群落	35.05	0.418	25.31	0.390	9.74	0.539
	拉萨市全部鸟类群落	45.71	0.151	35.85	0.158	9.85	0.201
	林芝市林鸟群落	32.95	0.530	24.28	0.46	8.66	0.739
	拉萨市林鸟群落	42.56	0.253	32.92	0.224	9.63	0.427
	林芝市水鸟群落	44.50	0.388	39.44	0.363	5.05	0.593
	拉萨市水鸟群落	41.62	0.591	35.82	0.569	5.79	0.670

隔离较大的公园。这导致隔离较小的公园因频繁物种交流而具有更丰富的功能与谱系多样性,而隔离较大公园的多样性则相对较弱。高海拔与城市化引发的功能性状及系统发育同质化^[61,66-67]虽强化了功能和谱系维度的扩散梯度,却因多维冗余削弱了物种组成的规律性分布。其次,隔离较小公园的生境类型通常更为多样,进一步促进其功能与谱系多样性高于隔离较大公园。最后,林鸟与水鸟群落的功能性状和系统发育关系差异显著——隔离效应未能驱动二者的选择性迁入过程,仅当二者整合为全部鸟类群落时(含扩散能力弱的林鸟与扩散能力强的水鸟),才在功能与谱系维度呈现符合假说的嵌套格局。

综上所述,本研究发现3个鸟类类群在物种、功能和谱系3个维度的嵌套分布格局及其影响因素存在明显差异。因此强调从这3个维度开展嵌套分布格局研究是非常有必要的。根据研究结果,为了更

好地保护高海拔城市的鸟类多样性,本研究对林芝市和拉萨市城市公园鸟类多样性保护提出以下三点建议:首先,林芝市应优先保护食肉鸟类;例如,白尾鹞(*Circus cyaneus*),因为这些鸟类具有较高的局域灭绝风险,拉萨市应优先保护面积较大的公园,因为其容纳了更多的功能和系统发育多样性,降低了物种灭绝风险;其次,林芝市应优先保护隔离程度小的公园,构建生态走廊,增加城市公园间的连通性。因为隔离驱动了林芝市全部鸟类群落功能和谱系维度嵌套分布格局,迁移能力较弱的鸟类主要分布在隔离程度较小的公园;最后,在新建城市公园时应注意生境的配置,在丰富生境数量的同时兼顾不同类群鸟类的生境需求。

参考文献

[1] Grimm N B, Foster D, Groffman P, et al. The changing landscape: ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients [J]. Fron-

- tiers in Ecology and the Environment, 2008, 6(5): 264-272.
- [2] Hostetler M, Holling C. Detecting the scales at which birds respond to structure in urban landscapes [J]. Urban Ecosyst, 2000, 4: 25-54.
- [3] Marzluff J M, Bowman R, Donnelly R. A historical perspective on urban bird research: trends, terms, and approaches [C]//Marzluff J M, Bowman R, Donnelly R. Avian Ecology and Conservation in an Urbanizing World. Boston: Springer, 2001: 1-17.
- [4] Wang Y P, Ding P, Chen S H, et al. Nestedness of bird assemblages on urban woodlots: implications for conservation [J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 111: 59-67.
- [5] Darlington P J. Zoogeography: the geographical distribution of animals [M]. New York: John Wiley and Sons, 1957: 675.
- [6] Patterson B D, Atmar W. Nested subsets and the structure of insular mammalian faunas and archipelagos [J]. Biological Journal of the Linnean Society, 1986, 28(1-2): 65-82.
- [7] Li C L, Zhao B B, Wang Y P. Nestedness of waterbird assemblages in the subsidence wetlands recently created by underground coal mining [J]. Current Zoology, 2019, 65(2): 155-163.
- [8] Zhang M C, Tang C N, Zhang Q, et al. Selective extinction and habitat nestedness are the main drivers of lizard nestedness in the Zhoushan Archipelago [J]. Current Zoology, 2024, 70(2): 244-252.
- [9] Zhan C X, Li B C, Chen C W, et al. Taxonomic, phylogenetic, and functional nestedness of mammal assemblages in the Zhoushan Archipelago, China [J]. Current Zoology, 2024, 70(6): 728-738.
- [10] Cutler A H. Nested biotas and biological conservation: metrics, mechanisms, and meaning of nestedness [J]. Landscape and Urban Planning, 1994, 28(1): 73-82.
- [11] Cook R R, Quinn J F. The influence of colonization in nested species subsets [J]. Oecologia, 1995, 102: 413-424.
- [12] Fernández-Juricic E. Can human disturbance promote nestedness? A case study with breeding birds in urban habitat fragments [J]. Oecologia, 2002, 131: 269-278.
- [13] Wright D H, Patterson B D, Mikkelsen G M, et al. A comparative analysis of nested subset patterns of species composition [J]. Oecologia, 1998, 113: 1-20.
- [14] 王彦平, 张敏楚, 詹成修. 嵌套分布格局研究进展: 分析方法、影响机制及保护应用 [J]. 生物多样性, 2023, 31(12), 23314.
- Wang Y P, Zhang M C, Zhan C X. A review on the nested distribution pattern (nestedness): analysis methods, mechanisms and conservation implications [J]. Biodiversity Science, 2023, 31(12): 23314.
- [15] Andrén H. Can one use nested subset pattern to reject the random sample hypothesis? Examples from boreal bird communities [J]. Oikos, 1994, 70(3): 489-491.
- [16] Higgins C L, Willig M R, Strauss R E. The role of stochastic processes in producing nested patterns of species distributions [J]. Oikos, 2006, 114(1): 159-167.
- [17] Chen C W, Zhan C X, Wang Y P. Do functional and phylogenetic nestedness follow the same mechanisms as taxonomic nestedness? Evidence from amphibians in the largest archipelago of China [J]. Journal of Animal Ecology, 2022, 91(12): 2424-2436.
- [18] Wang Y P, Wang X, Ding P. Nestedness of snake assemblages on islands of an inundated lake [J]. Current Zoology, 2012, 58(6): 828-836.
- [19] Meyer C F J, Kalko E K V. Bat assemblages on neotropical land-bridge islands: nested subsets and null model analyses of species co-occurrence patterns [J]. Diversity and Distributions, 2008, 14(4): 644-654.
- [20] Calmé S, Desrochers A. Nested bird and micro-habitat assemblages in a peatland archipelago [J]. Oecologia, 1999, 118: 361-370.
- [21] Honnay O, Hermy M, Coppin P. Nested plant communities in deciduous forest fragments: species relaxation or nested habitats? [J]. Oikos, 1999, 84(1): 119-129.
- [22] Murgui E. Seasonality and nestedness of bird communities in urban parks in Valencia, Spain [J]. Ecography, 2010, 33(5): 979-984.
- [23] Melo A S, Cianciaruso M V, Almeida-Neto M. tree-NODF: nestedness to phylogenetic, functional and other tree-based diversity metrics [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(6): 563-572.
- [24] Millien V, Zhan C, Li Y, et al. A global assessment of nested patterns in insular mammal assemblages [J]. Global Ecology and Biogeography, 2024, 33(9): e13885.
- [25] Aronson M F J, La Sorte F A, Nilon C H, et al. A global analysis of the impacts of urbanization on bird and plant diversity reveals key anthropogenic drivers [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2014, 281(1780): 20133330.
- [26] Aubrechtová E, Bydžovská T, Horák J. Blue-green infrastructure and biodiversity: urbanization and forestation have an important influence on bird diversity in water habitats [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2024, 91: 128151.

- [27] Guo Y, Lu X, Wang Y. Responses of birds with different habitat preferences to urban blue-green spaces: a systematic review and meta-analysis at a global scale [J]. *Biological Conservation*, 2025, 307: 111190.
- [28] 王鹏, 隋佳容, 丁欣瑶, 等. 郑州城市公园鸟类群落嵌套分布格局及其影响因素 [J]. *生物多样性*, 2024, 32(3): 52-62.
Wang P, Sui J R, Ding X Y, et al. Nested distribution patterns of bird assemblages and their influencing factors in Zhengzhou urban parks [J]. *Biodiversity Science*, 2024, 32(3): 52-62.
- [29] Kopp J, Leveau L M. Bird metacommunities of urban parks in the pampean region, Argentina [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2025, 253: 105202.
- [30] Liu J H, Guo J N, Lu H, et al. Activity-based screening of soil samples from Nyingchi, Tibet, for amylase-producing bacteria and other multifunctional enzyme capacities [J]. *International Journal of Microbiology*, 2022, 2022: 2401766.
- [31] Yin X F, de Foy B, Wu K F, et al. Gaseous and particulate pollutants in Lhasa, Tibet during 2013-2017: spatial variability, temporal variations and implications [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 253: 68-77.
- [32] Wang Y F, Cheng H F. Soil heavy metal(loid) pollution and health risk assessment of farmlands developed on two different terrains on the Tibetan Plateau, China [J]. *Chemosphere*, 2023, 335: 139148.
- [33] Huang L, Wang D R, He C L. Ecological security assessment and ecological pattern optimization for Lhasa city (Tibet) based on the minimum cumulative resistance model [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29: 83437-83451.
- [34] Guo X M, Gong D C, Li J Y, et al. Comprehensive measurement of carbonyls in Lhasa, Tibetan Plateau: implications for strong atmospheric oxidation capacity [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 948: 174626.
- [35] Shen X, Jiang Y S, Shang Y J, et al. A preliminary study of necrophagous flies (Insecta: Diptera) in the Lhasa region (Qinghai-Tibet Plateau), China [J]. *Journal of Medical Entomology*, 2022, 59(2): 467-479.
- [36] Aceves-Bueno E, Adeleye A S, Feraud M, et al. The accuracy of citizen science data: a quantitative review [J]. *The Bulletin of the Ecological Society of America*, 2017, 98(4): 278-290.
- [37] Callaghan C T, Lyons M B, Martin J M, et al. Assessing the reliability of avian biodiversity measures of urban greenspaces using eBird citizen science data [J]. *Avian Conservation and Ecology*, 2017, 12(2): 12.
- [38] Oldekop J A, Bebbington A J, Berdel F, et al. Testing the accuracy of non-experts in biodiversity monitoring exercises using fern species richness in the Ecuadorian Amazon [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2011, 20: 2615-2626.
- [39] Duan H L, Yu X B, Xia S X, et al. Conserving unprotected important sites for shorebirds on China's coasts [J]. *Ecosphere*, 2022, 13(2): e3950.
- [40] Brodie J F, Mohd-Azlan J, Chen C, et al. Landscape-scale benefits of protected areas for tropical biodiversity [J]. *Nature*, 2023, 620: 807-812.
- [41] Cazalis V, Princé K, Mihoub J B, et al. Effectiveness of protected areas in conserving tropical forest birds [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4461.
- [42] 郑光美. 中国鸟类分类与分布名录 [M]. 第4版. 北京: 科学出版社, 2023: 496.
Zheng G M. A checklist on the classification and distribution of the birds of China [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2023: 496.
- [43] International Union for Conservation of Nature (IUCN). The IUCN Red List of Threatened Species [DB/OL]. Version 2025-1, [2025-05-10]. <https://www.iucnredlist.org>.
- [44] Jetz W, Thomas G H, Joy J B, et al. The global diversity of birds in space and time [J]. *Nature*, 2012, 491: 444-448.
- [45] Bolger D T, Scott T A, Rotenberry J T. Breeding bird abundance in an urbanizing landscape in coastal Southern California [J]. *Conservation Biology*, 1997, 11(2): 406-421.
- [46] Tan X W, Yang X R, Chen C W, et al. Nestedness and underlying processes of bird assemblages in Nanjing urban parks [J]. *Current Zoology*, 2021, 67(4): 383-392.
- [47] Li Y M, Niemelä J, Li D M. Nested distribution of amphibians in the Zhoushan Archipelago, China: can selective extinction cause nested subsets of species? [J]. *Oecologia*, 1998, 113: 557-564.
- [48] Zhong Y X, Chen C W, Wang Y P. Biological and extrinsic correlates of extinction risk in Chinese lizards [J]. *Current Zoology*, 2022, 68(3): 285-293.
- [49] Gaston K J, Fuller R A. The sizes of species' geographic ranges [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 46(1): 1-9.
- [50] Purvis A, Gittleman J L, Cowlshaw G, et al. Predicting extinction risk in declining species [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2000, 267(1456): 1947-1952.

- [51] Smyčka J, Toszogyova A, Storch D. The relationship between geographic range size and rates of species diversification [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5559.
- [52] Claramunt S. Flight efficiency explains differences in natal dispersal distances in birds [J]. *Ecology*, 2021, 102(9): e03442.
- [53] Tobias J A, Sheard C, Pigot A L, et al. AVONET: morphological, ecological and geographical data for all birds [DS]. *Ecology Letters*, 2022, 25(3): 581-597.
- [54] Almeida-Neto M, Guimarães P, Guimarães Jr P R, et al. A consistent metric for nestedness analysis in ecological systems: reconciling concept and measurement [J]. *Oikos*, 2008, 117(8): 1227-1239.
- [55] Ulrich W, Almeida-Neto M, Gotelli N J. A consumer's guide to nestedness analysis [J]. *Oikos*, 2009, 118(1): 3-17.
- [56] Ulrich W, Gotelli N J. Null model analysis of species nestedness patterns [J]. *Ecology*, 2007, 88(7): 1824-1831.
- [57] Almeida-Neto M, Ulrich W. A straightforward computational approach for measuring nestedness using quantitative matrices [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(2): 173-178.
- [58] Core Team R. R: a language and environment for statistical computing [CP]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025.
- [59] MacInnis M J, Rupert J L. 'ome on the Range: altitude adaptation, positive selection, and Himalayan genomics [J]. *High Altitude Medicine & Biology*, 2011, 12(2): 133-139.
- [60] Hao Y, Xiong Y, Cheng Y L, et al. Comparative transcriptomics of 3 high-altitude passerine birds and their low-altitude relatives [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(24): 11851-11856.
- [61] Hanz D M, Böhning-Gaese K, Ferger S W, et al. Functional and phylogenetic diversity of bird assemblages are filtered by different biotic factors on tropical mountains [J]. *Journal of Biogeography*, 2019, 46(2): 291-303.
- [62] Ivy C M, Williamson J L. On the physiology of high-altitude flight and altitudinal migration in birds [J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2024, 64(6): 1766-1779.
- [63] Becker C G, Fonseca C R, Haddad C F B, et al. Habitat split and the global decline of amphibians [J]. *Science*, 2007, 318(5857): 1775-1777.
- [64] Li X Y, Li Z J, Chen Y, et al. Enhancing bird diversity in urban parks: insights from the Futian Mangrove Ecological Park, Shenzhen [J]. *Forests*, 2024, 15(12): 2088.
- [65] Chan M, Tsang T P N, Dingle C, et al. Microhabitat coverage influences avian species composition more than habitat heterogeneity in Hong Kong urban parks [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2024, 101: 128519.
- [66] La Sorte F A, Lepczyk C A, Aronson M F J, et al. The phylogenetic and functional diversity of regional breeding bird assemblages is reduced and constricted through urbanization [J]. *Diversity and Distributions*, 2018, 24(7): 928-938.
- [67] Sinha A, Chatterjee N, Krishnamurthy R, et al. Community assembly, functional traits, and phylogeny in Himalayan river birds [J]. *Ecology and Evolution*, 2022, 12(2): e9012.