城市公园繁殖鸟类生态位与种间关系*

李斌强[1,2,3] 张象君[2] 崔庆江[2] 曾昭朝[2] 马山俊[2] 张绍辉[2] 章文杰[2]

1 西南林业大学生物多样性保护学院 昆明 650224
2 云南林业职业技术学院规划设计研究院 昆明 650224
3 广西生态工程职业技术学院林业工程学院 广西柳州 545004

摘要：探究城市鸟类的生态位和种间关系有助于正确认识城市鸟类的共存机制。2021 年 4—8 月，利用样线法对广西柳州 12 个城市公园进行鸟类调查，采用 Levins 生态位宽度指数、Pianka 生态位重叠度指数、Spearman 秩相关性系数等分析 14 种繁殖鸟类的生态位特征与种间关系。结果表明：柳州城市公园暗绿绣眼鸟的生态位宽度值最高，白头鹎和鹊鸲的生态位重叠度最大，鸟类的生态位宽度与其分布的公园数量呈线性相关；鸟类群落呈显著正联结，且鸟类群落正相关物种对的比率远远高于负相关物种对的比率，支持群落的正联结结论；鸟类的生态位重叠度受物种功能距离的影响，功能距离越近的物种，生态位重叠度越大，共同出现的概率越高。研究结果为城市鸟类物种的共存提供了实证数据和新的见解，建议在城市生境中，优先保护特化物种的栖息地；增加城市公园的生境复杂性，满足不同鸟类物种的生态需求，促进城市鸟类物种的共存和生态系统服务功能的发挥。

关键词：城市化；鸟类多样性；生态位宽度；种间联结；广西柳州
DOI：10.12169/zgcsly.2023.07.19.0001

Niche and Interspecific Relationship of Breeding Birds in Urban Parks

Li Binqiang[1,2,3] Zhang Xiangjun[2] Cui Qingjiang[2] Zeng Zhaozhao[2] Ma Shanjun[2]
Zhang Shaohui[2] Zhang Wenjie[2]

(1. Faculty of Biodiversity and Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Planning and Design Institute, Yunnan Forestry Technological College, Kunming 650224, China; 3. School of Forestry Engineering, Guangxi Eco-Engineering Vocational and Technical College, Liuzhou 545004, Guangxi, China)

Abstract: Understanding niche and interspecific relationship of bird species in cities is conducive to identifying their coexistence mechanism. From April to August 2021, using the line-transect method, we conducted bird surveys at 12 urban parks in Liuzhou, Guangxi. In this study, we use Levins niche breadth index, Pianka niche overlap index and Spearman rank correlation coefficient to measure niche characteristics and interspecific relationships of 14 breeding bird species. Our study shows that the Levins niche breadth of *Zosterops japonicus* is the highest, while the niche overlap of *Pycnonotus sinensis* and *Copsychus saularis* is the highest. There is a significant linear correlation between the niche breadth of birds and the number of parks with the birds, while bird communities show significant positive associations and the rates of positively associated species pairs in bird communities are much higher than the rates of negatively associated species pairs at that. This supports the conclusion of overall positive community associations. The niche overlap of bird species is affected by the functional distance of species. The closer

收稿日期：2023-07-19
* 基金项目：广西高校中青年教师科研基础能力提升项目（2022KY1238）；云南省教育厅项目（2023J1612）
第一作者：李斌强（1996- ），男，博士生，研究方向为野生动植物保护与利用。E-mail：wildlife_ diversity@163.com
通信作者：章文杰（1975- ），男，硕士，高级工程师，主要从事林业调查规划研究。E-mail：895305558@qq.com

the functional distance, the greater the niche overlap and the higher the probability of co-occurrence. This study provides the empirical data and new insights over the coexistence of bird species in cities. We suggest that priority should be given to conserving the habitat of specialized species in urban habitat environments. Additionally, increasing the habitat complexity of urban parks to meet the ecological needs of different bird species could promote the coexistence of urban bird species and enhance ecosystem services and functions.

Keywords: urbanization; bird diversity; niche breadth; interspecific association; Liuzhou, Guangxi

群落内物种共存和种间关系是生态学研究的核心问题，其关系可以由物种的生态位宽度与种间联结特征来反映[1-2]。生态位宽度反映物种利用资源的总和，生态位重叠度反映两个物种对同一资源的利用程度[3-4]。物种的生态位越宽，该物种的特化程度就越弱，更容易形成泛化种[5]；相反，物种的生态位越窄，该物种的特化程度就越高，从而形成一个特化种[6-7]。物种的联结特征是不同物种在空间上的相互关联，是物种群落结构形成和演化的重要基础[8]。在一定的立地条件中，一定的种可以指示另一种的存在，环境内几个物种对环境条件有相似的适应和反应，则为正关联[8]；反之，如两个以上物种相互竞争排斥或者对环境资源需求差异较大，则为负关联[9]。物种的生态位宽度和种间关系能够有效反映各物种在群落中的分布情况、对环境因子的适应程度以及在特定环境因子作用下的物种种间相互关系，有助于进一步认清群落的结构、类型和群落的发展趋势[10]。

鸟类是生物多样性的重要组成部分和环境监测指示物种[11]，是城市中常见的动物类群，具有重要的生态系统服务功能，如传播种子、传粉和捕食害虫等[12]。然而，研究物种的生态位宽度、重叠度和种间关联性多报道于植物群落中[13-15]，而在鸟类的研究中报道较少，特别是在城市中的鸟类研究更少[16-18]。在城市化生境中，鸟类群落受环境过滤的影响，生态位越宽的鸟类分布越广，形成高密度种群，占据多种生境，属于泛化物种；而生态位宽度窄的鸟类则形成特化物种，仅占据少量生境[19-20]。董大颖等[10]对北京西山区的鸟类联结分析表明，受鸟类物种的居留类型和季节变化的影响，鸟类群落的联结度存在时间尺度上的动态变化，并提出了利用种间联结分析可以反映鸟类群落的种间联结特征，在鸟类生物多样性保护和恢复中具有重要的意义。

物种的种间关联仅仅是种间和种内竞争的结果或现状，并不能揭示其背后的生态学过程和机制[15]，如功能距离越近的鸟类物种是否生态位重叠度越大，种间关系越紧密？物种的功能距离是种间功能性状差异的度量、可以反映功能的相似性或者多样性，在理解物种适应和进化中有着关键作用，功能多样性的聚集或分散与生态系统动态和稳定性等密切相关[21-22]。根据现有知识，在相关的鸟类生态位和种间联结分析中，尚没有报道鸟类物种的功能距离是否对其生态位重叠度和种间联结度存在影响。本文选取广西柳州 12 个城市公园的繁殖鸟类为研究对象，分析其 Levins 生态位指数、Pianka 生态位重叠度指数与种间关系的变化，主要回答以下问题：1）广西柳州繁殖鸟类物种生态位特征如何？预测物种的分布范围与物种空间生态位宽度呈正相关，生态位宽度越低的物种，分布范围越小，越容易形成特化物种。2）繁殖鸟类的种间联结特征如何？由于城市化扮演着环境过滤的角色，预测鸟类群落为正联结。3）鸟类的功能距离与鸟类的生态位重叠度和种间联结系数是否存在潜在的相关关系。

1 研究区概况

广西柳州（108° 50′—109° 44′ E、23° 54′—24°50′N）属于喀斯特山地城市，海拔在 100 ~ 200 m，属于亚热带季风气候，年均气温 18 ℃，年降水量 1 500 mm[23-25]。柳州城市公园主要的绿化植物有 115 种，主要包括小叶榕（*Ficus coninna*）、樟（*Cinnamomum camphora*）、红花羊蹄甲（*Bauhinia*×*blakeana*）等[26]。

2　研究方法

2.1　鸟类调查方法

采用样线法调查 12 个城市公园的繁殖鸟类，因公园面积大小不一（0.05～3.08 km^2），每个公园内设置的样线 1～2 条、长度在 0.6～2 km。繁殖鸟类观察时间为 2021 年 4—8 月，4 月初至 5 月底对每个城市公园进行 2 次调查，6 月中旬至 8 月初对每个公园进行最后 1 次调查，每个公园累计重复调查 3 次，单个公园调查的时间间隔大于 1 周。调查时段为上午 6：00—10：00，下午 17：00—19：00。使用奥林巴斯 8 × 42 双筒望远镜记录样线两侧 100 m 以内的鸟类种类和数量。调查仅在晴天进行，避开不利天气，如下雨和起雾[25]。

2.2　数据分析

利用 Berger-Parker 指数计算物种优势度[27]，公式为：

$$d = Ni/N \tag{1}$$

式（1）中：Ni 为物种 i 的个体数量；N 为全部物种的总个体数量；$d \geqslant 0.05$ 为优势种。

采用 Levins 生态位指数计算鸟类的生态位宽度[28]，公式为：

$$B_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^{r} (P_{ij})^2} \tag{2}$$

式（2）中：B_i 为种 i 的生态位宽度；P_{ij} 代表物种 i 在第 j 个资源状态下的个体数占该物种所有个体数的比例；r 为公园总数。B_i 值越大，生态位宽度越大，其物种分布越广泛，规模更大。利用零模型 quasiswap 随机化重排模拟物种的出现频率，将生态位宽度指数超过 95% 置信区间上限的物种定义为泛化种，低于 95% 置信区间下限的物种定义为特化种，处于 95% 置信区间内的物种定义为中性类型[5]。

采用 Pianka 生态位重叠度指数计算鸟类的生态位重叠度[29]，公式为：

$$O_{ik} = \sum_{j=1}^{r} P_{ij}P_{kj} \Big/ \sqrt{\left(\sum_{j=1}^{r} P_{ij}\right)^2 \left(\sum_{j=1}^{r} P_{kj}\right)^2} \tag{3}$$

式（3）中：O_{ik} 为种 i 和 k 的生态位重叠度，值为 0～1；P_{kj} 代表代表物种 k 在第 j 个资源状态下的个体数占该物种所有个体数的比例。O_{ik} 值越大表示生态位重叠程度越高。

总体关联性采用方差比率法（VR）计算[30]，公式为：

$$\sigma_T^2 = \sum_{i=1}^{S} P_i(1 - P_i) \tag{4}$$

$$S_T^2 = (1/N) \sum_{i=1}^{N} (T_j - t)^2 \tag{5}$$

$$P_i = n_i/N,\ VR = S_T^2/\sigma_T^2 \tag{6}$$

式（4）～（6）中：S 为物种数；N 为总公园数；n_i 为物种 i 出现的公园数；，p_i 为物种 i 出现的频度；T_j 为公园内 j 出现的物种总数；t 为全部公园物种数的平均数；S_T 为所有公园物种数的方差；σ_T 为所有物种出现频度的方差。若 $VR = 1$，种间总体无关联；$VR > 1$，种间总体呈正关联；$VR < 1$，种间总体呈负关联。由于物种间的正联结和负联结可以相互抵消，因此使用检验统计量 W 进一步验证 VR 值与 1 的偏离程度，$W = VR \times N$，W 服从 χ^2 分布，若 $W \leqslant \chi^2_{0.95N}$ 或者 $W \geqslant \chi^2_{0.05N}$，则物种间总体关联显著（$P < 0.05$）；若 $\chi^2_{0.95N} < W < \chi^2_{0.05N}$，则物种间总体关联不显著（$P > 0.05$）。$\chi^2_{0.95N}$ 或 $\chi^2_{0.05N}$ 值由卡方检验临界值表获取。

物种间联结性采用 Yates 连续校正卡方检验（χ^2）和 Jaccard 指数（PC 值）表征[8]，卡方检验（χ^2）公式为：

$$\chi^2 = \frac{N\ [\,|\mathrm{ad} - bc| - 0.5N]^2}{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)} \tag{7}$$

式（7）中：N 为公园总数；a 为 A、B 两物种同时存在的公园数；，b 为 B 物种存在而 A 物种不存在的公园数；c 为 A 物种存在而 B 物种不存在的公园数；d 为 A 和 B 物种均不存在的公园数。当 $ad > bc$ 时，为正联结；当 $ad < bc$，为负联结。当 $\chi^2 < 3.841$（$P > 0.05$），种对间呈不显著联结；当 $3.841 \leqslant \chi^2 \leqslant 6.635$（$0.01 \leqslant P \leqslant 0.05$），种对间呈显著联结；$\chi^2 > 6.635$（$P < 0.01$），种对间呈极显著联结。

Jaccard 指数（PC 指数或共同出现百分率）表示种对相伴随出现的机率和联结性程度[8]，计算公式为：

$$PC = \frac{a}{a + b + c} \tag{8}$$

式（8）中，PC 值范围为 0～1，PC 值越大越接近 1，表明种正间联结性越强；反之，则越弱；

$PC=0$ 表示没有联结。通过 χ^2 检验后，计算 PC 值进一步验证 χ^2 检验中存在不显著的种对间的联结程度。

物种相关性分析通过 Spearman 秩相关系数计算，公式为：

$$r(i,\ k)=1-\frac{6\sum_{j=1}^{N}d_j^2}{N^3-N} \qquad (9)$$

式（9）中：N 为公园数；r（i，k）代表成对物种 i 和物种 k 的 Sperarman 秩相关系数；d_j 代表成对物种秩的差异。

在物种功能距离计算中，采用 Gower's 距离指数计算物种间的功能距离[21]，鸟类物种的功能性状选择体重、体长、取食类型和巢址类型 4 类，功能性状数据来源于王彦平等[31]研究成果，Gower's 距离指数公式参考 Podani[32]的说明。将物种生态位宽度与物种分布的公园数量数据进行 log 转换，以使数据呈现正态分布，两者的关系采用线性回归分析。由于生态位重叠度和 PC 值存在 0 值，难于进行 log 转换，同时经过 Shapiro-Wilk 检验，数据不呈正态分布。因此，物种功能距离与生态位重叠度、种间联结的关系通过 Spearman 秩相关性进行分析。以上分析在 R 语言（4.2.2）FD 程序包[33]和 spaa 程序包[34]中完成。

3 结果与分析

3.1 繁殖鸟类群落组成与分布

研究物种选择 Berger-Parker 优势度指数大于 0.01 的繁殖鸟类和 IUCN 受胁鸟类[25]，共 14 种（表 1），其中杂食性鸟类（n=7）最多，其次是食虫鸟类（n=6）和食肉鸟类（n=1）。巢型以开放巢最多（n=10），洞巢次之（n=3）。巢址类型以树冠巢最多（n=6），其次是灌丛巢（n=5）、岩壁（n=1）和地面巢（n=1）。各物种分布的公园数量存在差异，麻雀和鹊鸲分布最广，海南鹎和仙八色鸫分布最窄（表 1）。

表 1 广西柳州城市公园繁殖鸟类优势物种和稀有物种信息

编号	物种	科	IUCN	食性	体重/g	体长/mm	巢型	巢址类型	分布的公园数量
1	珠颈斑鸠 *Streptopelia chinensis*	鸠鸽科	LC	杂食性	120	139	开放巢	灌丛	8
2	海南鹎 *Gorsachius magnificus*	鹭科	EN	食肉	750	288	开放巢	树冠	1
3	仙八色鸫 *Pitta nympha*	八色鸫科	VU	食虫	49	112	开放巢	地面	1
4	大山雀 *Parus cinereus*	山雀科	LC	食虫	11.8	64	–	–	10
5	纯色山鹪莺 *Prinia inornata*	扇尾莺科	LC	食虫	7	43	开放巢	灌丛	5
6	长尾缝叶莺 *Orthotomus sutorius*	扇尾莺科	LC	食虫	9	44.5	洞巢	树冠	10
7	红耳鹎 *Pycnonotus jocosus*	鹎科	LC	杂食性	26	80	开放巢	灌丛	10
8	白头鹎 *Pycnonotus sinensis*	鹎科	LC	杂食性	26	82	开放巢	树冠	11
9	红头长尾山雀 *Aegithalos concinnus*	长尾山雀科	LC	食虫	5	46	开放巢	树冠	3
10	暗绿绣眼鸟 *Zosterops japonicus*	绣眼鸟科	LC	杂食性	9	90	开放巢	灌丛	11
11	乌髇 *Turdus mandarinus*	髇科	LC	杂食性	80	50	开放巢	树冠	9
12	鹊鸲 *Copsychus saularis*	鹟科	LC	食虫	33	90	洞巢	树冠	12
13	麻雀 *Passer montanus*	雀科	LC	杂食性	33	90	洞巢	岩壁	12
14	金翅雀 *Chloris sinica*	燕雀科	LC	杂食性	15	75	开放巢	灌丛	4

注：LC 表示无危；VU 表示易危；EN 表示濒危；功能性状数据参考王彦平等[31]的研究成果。

3.2 繁殖鸟类生态位宽度和重叠度

零模型随机化重排结果（图 1a）显示：生态位宽度指数超过 95%置信区间上限的物种 4 种，即暗绿绣眼鸟、麻雀、鹊鸲和长尾缝叶莺，属于泛化种；低于 95%置信区间下限的物种 3 种，即海南鹎、仙八色鸫和红头长尾山雀，属于特化种；其他 7 种鸟类处于 95%置信区间内，属于中性物种。暗绿绣眼鸟的生态位宽度 Levins 指数值最高，其次是麻雀、鹊鸲、长尾缝叶莺和白头鹎。海南鹎和仙八色鸫生态位宽度值最小。

Pianka 生态位重叠度指数分析（图 1b）显示：生态位重叠度≥0.5 的物种对有 61 对，占总物种对（n=91）的 67%，其中大于 0.8 的有 19 对，占总物种对的 20.88%；生态重叠度<0.5 的物种对有 30 对，占总物种对的 32.97%。生态位重叠度最高的物种对是白头鹎和鹊鸲（0.93），其次是红耳鹎和乌髇（0.92）、暗绿绣眼鸟和麻雀（0.92），再次是乌髇和鹊鸲（0.90）；较低的

生态位重叠度物种对分别是仙八色鸫和红耳鹎（0.15）、仙八色鸫和白头鹎（0.15）、红头长尾山雀和金翅雀（0.20）；没有生态位重叠的物种对分别是海南鹃和仙八色鸫（0.00）、仙八色鸫和金翅雀（0.00）。

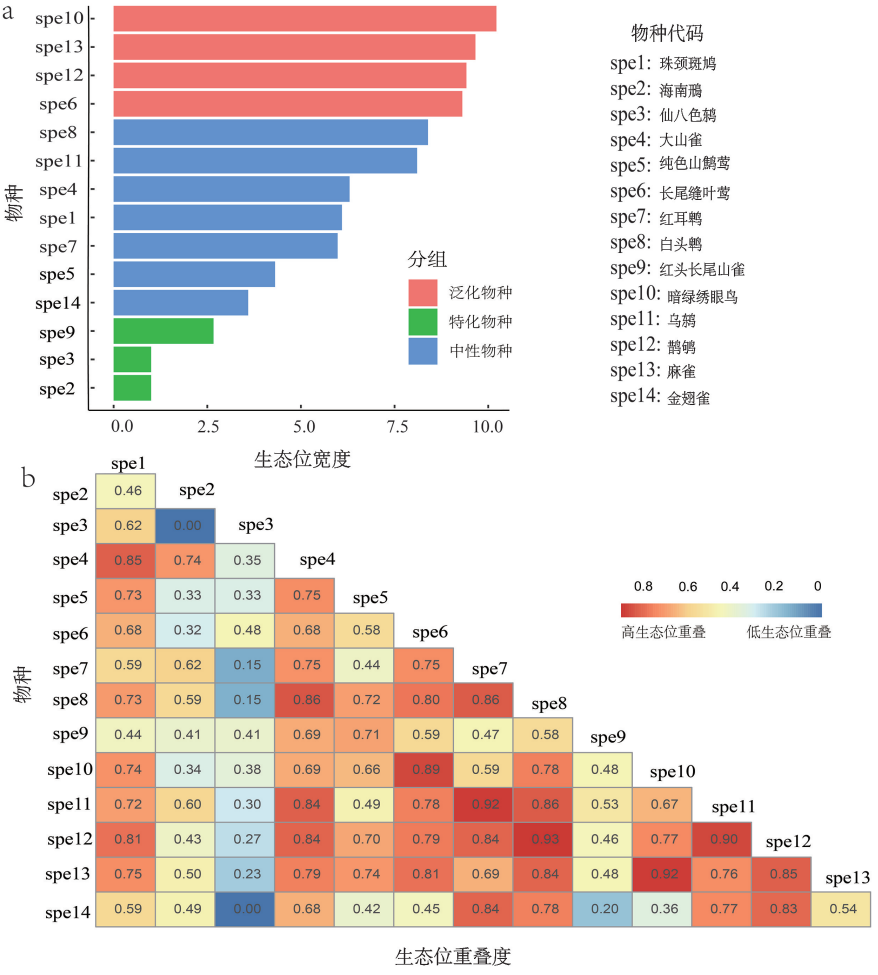


图 1　广西柳州城市公园繁殖鸟类生态宽度与重叠度

3.3　繁殖鸟类总体联结、种间联结性及相关性

繁殖鸟类总体联结显示，柳州城市公园繁殖鸟类呈显著总体正联结（$VR=2.59$，$W=31.10$，$W\geqslant\chi^2_{0.05N}$，$P<0.05$），若剔除受威胁繁殖鸟类，繁殖鸟类群落仍呈显著总体正联结（$VR=2.19$，$W=26.31$，$W\geqslant\chi^2_{0.05N}$，$P<0.05$）。

卡方检验（χ^2）结果（图 2a）显示：91 对鸟类物种中，25 对达到极显著联结，占总对数的 27.47%；66 对呈不显著联结，占总对数的 72.52%。其中鹊鸲和麻雀与所有物种均呈现极其显著的联结，其余物种对的联结程度都较弱。图 2b 显示：Jaccard 指数 $PC\geqslant0.6$ 的物种对有 34 对，占总物种对的 37.36%，其中 $PC\geqslant0.8$ 的物种对有 19 对，占总物种对的 20.87%，表明这些物种对之间的正联结性较强。$PC<0.6$ 的物种对有 57 对，占总物种对的 62.63%，其中 $0\leqslant PC\leqslant0.5$ 的物种对有 54 对，占总物种对的 59.34%，$PC=0.0$ 的物种对有 2 对，表明这些物种对之间的正联结性较弱。物种相关性分析（图 2c）表明：正相关物种对有 84 对，占总物种对的 92.31%，其中相关性系数大于 0.7 的物种对有 6 对，表明这些物种的相关性极显著；负相关物种对有 7 对，占总物种对 7.69%。

Gower's 距离指数（图 3a）显示，14 种鸟类的功能性状树共 2 个分支、3 个不同的支系。其中，海南鹃为独立的一支，长尾缝叶莺、红头长尾山雀、鹊鸲、麻雀、仙八色鸫、大山雀和纯色山鹪莺 7 个物种为一个支系，其余 6 个物种为一个支系。

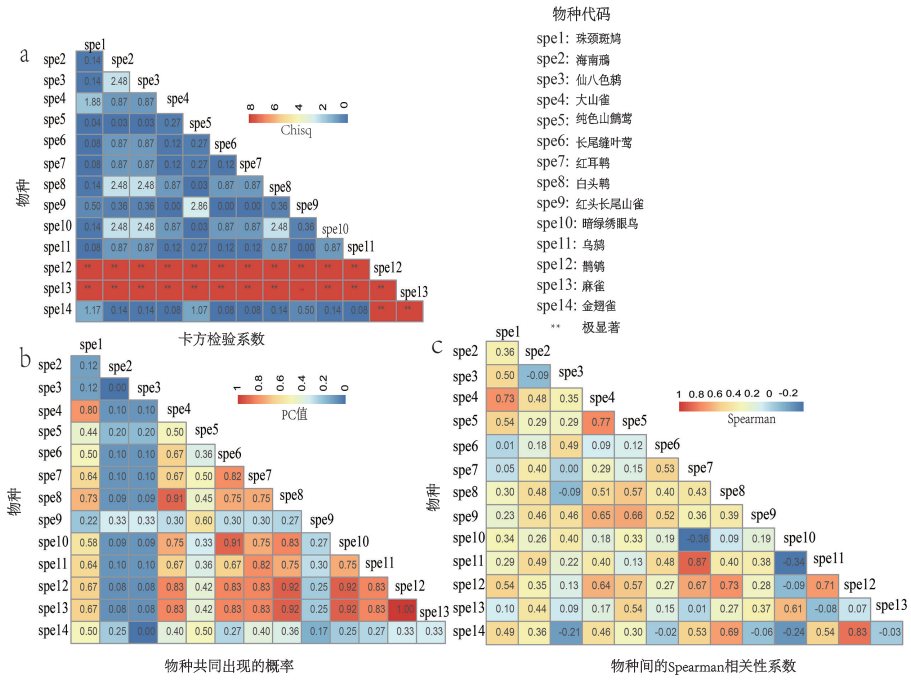


图 2 广西柳州城市公园繁殖鸟类种间联结

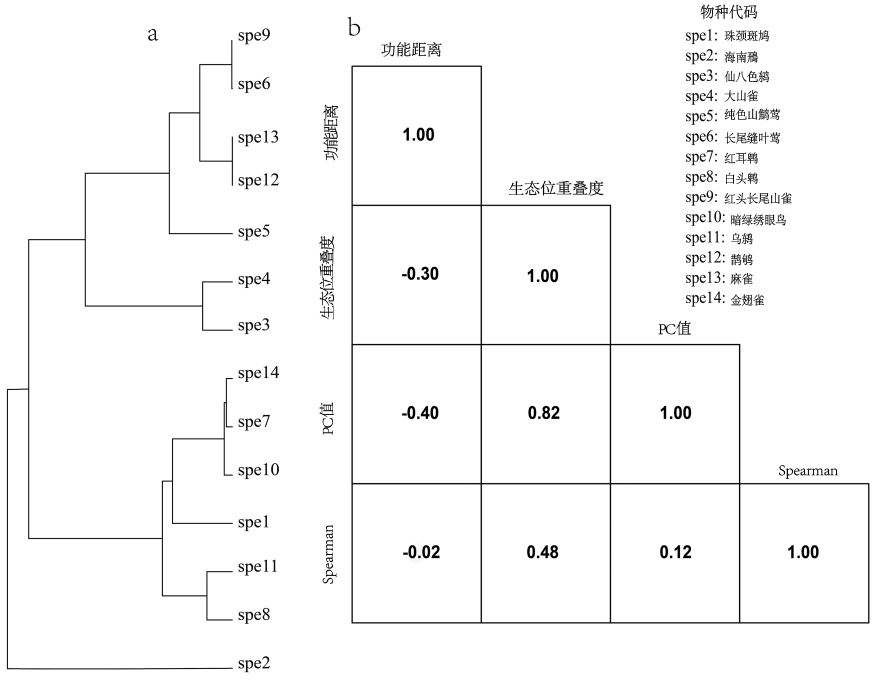


图 3 广西柳州城市公园繁殖鸟类功能距离与生态位宽度和物种种间联结的关系

线性回归分析显示，物种的生态位宽度与物种分布的公园数量呈线性相关（$\beta = 1.08$，$R^2 = 0.97$，$P<0.001$），即物种的分布范围越广，生态位宽度值越高。Spearman 秩相关分析（图 3b）显示：物种的功能距离分别与生态位重叠度（$r = -0.30$，$P < 0.001$）和 *PC* 值（$r = -0.40$，$P < 0.001$）负相关；生态位重叠度与 *PC* 值（$r = 0.82$，$P<0.001$）和 Spearman 秩相关系数（$r = 0.48$，$P<0.001$）呈正相关，但 Spearman 秩相关系数与 *PC* 值和物种功能距离相关性较弱。

4 讨论

4.1 生态位宽度

生态位代表一个个体或者物种能够生存和繁

殖的环境条件和资源质量的范围，通过生态位的研究，可以深入认识物种在群落中的地位和作用[4]。本研究中，暗绿绣眼鸟、麻雀、鹊鸲和长尾缝叶莺的空间生态位宽度值最高，属于泛化物种，而两种受胁物种海南鹃和仙八色鸫最低，属于特化物种。根据生态宽度假说[35-36]，物种的分布范围越广其生态位宽度值越大。14 个鸟类物种的生态位宽度与物种分布的公园数量相关性显著，与生态宽度假说一致。因此，城市中分布较广的鸟类物种则具有更高的空间生态位。物种的个体数量少，也同样会引起物种的窄生态位，Devictor 等[20]对英国繁殖鸟类的研究发现，受生境破碎化和人为干扰的影响，特化物种个体数量减少，从而形成小种群，生存于固定生境中，生态位较窄。本研究发现海南鹃和仙八色鸫属于典型的极小种群物种，与生态位宽度值最低的结果一致。综上可知，利用零模型随机化重排模拟物种的出现频率有助于识别哪些鸟类属于特化物种，特化物种应考虑优先保护，其栖息地的保护至关重要。

4.2　生态位重叠度

生态位重叠是反映物种对环境资源利用能力差异和竞争关系的重要指标[4,6]。根据竞争排斥原理[37]，两个在生态学上完全相同的物种不可能同时同地生活在一起，完全的生态位重叠是不可能的，如果两个物种实现了共存，那么在他们之间必然存在生态位分化[38]。白头鹎和鹊鸲、红耳鹎和鹊鸲、暗绿绣眼鸟和麻雀具有很高的生态位重叠度，表明这些物种对具有很高的空间分布重叠。高生态位重叠可能与这些鸟类对公园内的生存资源具有相似的需求有关，从而出现在同一城市公园内，如白头鹎和鹊鸲的巢址选择都位于林冠层，公园高大的乔木刚好可以提供较好的筑巢生境。较低的生态重叠物种对分别是仙八色鸫和红耳鹎、仙八色鸫和白头鹎，表明这些物种对之间的生态位分化显著，如食物和巢址的分化（表 1），可能导致对城市公园中的资源需求不同，分布也不相同。海南鹃和仙八色鸫没有生态位重叠，这两个物种的生境选择、食物资源和筑巢选择均不相同，生态位差异较大。因此，在制定保护策略时，应分别考虑这两个物种的生存需求。

4.3　种间联结特征

物种的种间联结是物种之间以及物种与环境之间的综合作用形成的。研究表明柳州城市公园繁殖鸟类群落总体呈正联结趋势，群落结构较为稳定。在城市化进程中，已有研究表明城市化对城市鸟类多样性扮演着环境过滤的作用[19]，正联结趋势可能是城市化已经淘汰了不适应城市环境的鸟类物种，形成物种功能同质化[39]，从而使当前的城市鸟类结构较为稳定。其他研究也得出相似的结论，如董大颖等[10]对北京西山区的 18 种鸟类的种间联结性分析表明，在月尺度上除了 8 月份以外，其余各月的鸟类群落均为显著正联结。鹊鸲和麻雀与所有物种均呈现极显著的联结，而其他物种对之间的联结较弱，其主要原因可能是麻雀和鹊鸲属于泛化物种，见于城市公园各种生境，种群密度较高，与其他鸟类共同出现的概率更高，从而导致极显著的正联结。不显著联结物种对或正联结性较弱的物种对可能与鸟类物种本身的生物学特性不同相关，如鸟类的居留类型、食物需求、繁殖策略和扩散能力等不同[18]，导致共同出现的概率较低。

本研究中 3 种物种联结性分析方法的结果存在差异，与徐满厚等[8]、董大颖等[10]、吕岩[17]的研究结论一致。研究结果表明 Spearman 秩相关系数与 PC 值没有显著相关性。同时，χ^2 检验和 PC 指数仅使用鸟类物种的存在和不存在数据，当物种存在于所有样方的时候，关联指数并不能有效反映物种间的相关性，因此，物种数量数据更为有效。Spearman 秩相关系数基于鸟类多度数据能够客观地反映物种间的线性关系，该系数更为灵敏，可以有效弥补χ^2 检验的不足[2]。本研究中 Spearman 秩相关性系数分析表明，正相关物种对比率超过 90%，与吕岩[17]对浙江天童山的鸟类研究结果存在差异。究其原因可能与研究区域的生境异质性和取样尺度有关[8]，浙江天童山属于保护地，而本调查区域位于城市化生境，生境高度破碎化，鸟类在绿地中的分布较为聚集。

城市鸟类的群落组成并非随机的，生态位重叠度和联结系数 *PC* 值受到鸟类物种的功能距离影响，即功能距离越近的物种，生态位重叠度越大，共同出现的概率越高。功能相似的物种之间的共存是受限的，物种限制性相似假说认为[40]，功能不同的物种利用不同的资源，功能性状的差

异可以减少物种间的竞争，以达到共存。值得注意的是，物种的生态位是 N 维的[41]，空间生态位仅仅代表物种的分布空间情况，并不能揭示物种潜在的资源利用程度和生态系统服务功能，由于相关研究报道极少，其负相关机制还有待深入研究。空间生态位重叠度与 *PC* 值和 Spearman 秩相关系数呈正相关，这与刘润红等[2]在广西桂林青冈群落灌木层的种间联结研究结果一致。本研究综合表明，研究城市鸟类的生态位与种间联结可以为城市鸟类多样性保护、引种恢复和管理提供基础数据。

5 结论

生态位宽度与鸟类的分布范围显著相关，其中暗绿绣眼鸟、麻雀和鹊鸲显示出较高的生态位宽度，为泛化种，而海南鸦和仙八色鸫生态位宽度较小，为特化种。生态位重叠度分析揭示了不同鸟类物种间在资源利用和空间分布上的相似性与差异性，其中白头鹎和鹊鸲的生态位重叠度最高，而海南鸦和仙八色鸫之间则几乎没有生态位重叠。此外，柳州城市公园的鸟类群落整体表现出正联结趋势，群落结构较为稳定；功能相似的物种生态位重叠度更高，共同出现的概率也更高。研究结果强调了在城市生境中保护特化物种栖息地的重要性，建议增加城市公园的生境复杂性以满足不同鸟类的生态需求，为城市鸟类多样性的保护和恢复提供科学依据。

参考文献

[1]杜忠毓,邢文黎,薛亮,等.喀斯特石漠化锑矿区植物群落主要物种生态位特征及其种间联结[J].生态学报,2023,43(7):2865-2880.

[2]刘润红,陈乐,涂洪润,等.桂林岩溶石山青冈群落灌木层主要物种生态位与种间联结[J].生态学报,2020,40(6):2057-2071.

[3]WHITTAKER R H.Communities and ecosystems[M].New York:MacMillan,1970.

[4]WILLSON M F.Avian niche size and morphological variation[J].The American Naturalist,1969,103(933):531-542.

[5]ZHANG J,ZHANG B G,LIU Y,et al.Distinct large-scale biogeographic patterns of fungal communities in bulk soil and soybean rhizosphere in China[J].Science of the Total Environment,2018,644:791-800.

[6]张金屯.数量生态学[M].第3版.北京:科学出版社,2018.

[7]COLWELL R K,FUTUYMA D J.On the measurement of niche breadth and overlap[J].Ecology,1971,52(4):567-576.

[8]徐满厚,刘敏,翟大彤,等.植物种间联结研究内容与方法评述[J].生态学报,2016,36(24):8224-8233.

[9]薛建辉.森林生态学[M].修订版.北京:中国林业出版社,2006.

[10]董大颖,范宗骥,李扎西姐,等.北京西山地区大山雀与其它鸟类种群种间联结分析[J].生态学报,2013,33(20):6614-6633.

[11]KOSKIMIES P.Birds as a tool in environmental monitoring[J].AnnalesZoologici Fennici,1989,26(3):153-166.

[12]LUCK G W,LAVOREL S,MCINTYRE S,et al.Improving the application of vertebrate trait-based frameworks to the study of ecosystem services[J].Journal of Animal Ecology,2012,81(5):1065-1076.

[13]柴勇,李贵祥,袁春明,等.高黎贡山中山湿性常绿阔叶林树种的种间联结性研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2018,38(2):1-9.

[14]何忠伟,胡仁传,黄日波,等.广西银杉林主要树种种群生态位分析[J].林业科学研究,2012,25(6):761-766.

[15]涂洪润,农娟丽,朱军,等.桂林岩溶石山密花树群落主要物种的种间关联及群落稳定性[J].生态学报,2022,42(9):3688-3705.

[16]石永志.浙江天童鸦科鸟类共存模式研究[D].上海:华东师范大学,2015.

[17]吕岩.浙江天童国家森林公园鸟类种间关系分析[D].上海:华东师范大学,2016.

[18]朱曦,章立新,梁峻,等.鹭科鸟类群落的空间生态位和种间关系[J].Zoological Research,1998,19(1):45-51.

[19]LIU J,BAI H T,MA H Y,et al.Bird diversity in Chinese urban parks was more associated with natural factors than anthropogenic factors[J].Urban Forestry & Urban Greening,2019,43:126358.

[20]DEVICTOR V,JULLIARD R,JIGUET F.Distribution of specialist and generalist species along spatial gradients of habitat disturbance and fragmentation[J].Oikos,2008,117(4):507-514.

[21]MASON N W H,MOUILLOT D,LEE W G,et al.Functional richness,functional evenness and functional divergence:the primary components of functional diversity[J].Oikos,2005,111(1):112-118.

[22]李斌强,谭丽凤,唐婷婷,等.广西柳州不同城市化梯度的繁殖鸟类多样性[J].西部林业科学,2023,52(3):101-108.

[23]肖海龙,周善义.柳州市夏季鸟类多样性的研究[J].广西师范大学学报(自然科学版),2001,19(2):78-83.

[24]蒋爱伍,周天福,韦振海,等.广西柳州市鸟类调查及区系研究初报[J].四川动物,2005,24(2):186-190.

[25]李斌强,唐婷婷,杨妙丹,等.城市公园繁殖鸟类多样性与嵌套分布格局:以广西柳州为例[J].自然保护地,2022,2(3):50-64.

[26]马翠平.柳州市木本观花植物资源调查与观赏特性研究[J].河池学院学报,2019,39(2):30-37,97.

[27]WOIWOD I P,MAGURRAN A E.Ecological diversity and its measurement[J].Biometrics,1990,46(2):547.

[28]LEVINS R.Evolution in Changing Environments[M]. Princeton: Princeton University Press,2020.

[29]PIANKA E R.The structure of lizard communities[J].Annual Review of Ecology and Systematics,1973,4:53-74.

[30]SCHLUTER D.A variance test for detecting species associations, with some example applications[J].Ecology,1984,65(3):998-1005.

[31]王彦平,宋云枫,钟雨茜,等.中国鸟类的生活史和生态学特征数据集[J].生物多样性,2021,29(9):1149-1153.

[32]PODANI J.Extending Gower's general coefficient of similarity to ordinal characters[J].Taxon,1999,48(2):331-340.

[33]LALIBERTÉ E,LEGENDRE P.A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits[J].Ecology,2010,91(1):299-305.

[34]张金龙.种间联结和生态位重叠的计算:spaa 程序包[EB/OL].(2020-06-26)[2023-07-19].https://mp.weixin.qq.com/s/e2QzTTNV331LU9beYXeFDA.

[35]BROWN J H.On the relationship between abundance and distribution of species[J].The American Naturalist,1984,124(2):255-279.

[36]SHETH S N,MORUETA-HOLME N,ANGERT A L.Determinants of geographic range size in plants[J].New Phytologist,2020,226(3):650-665.

[37]HARDIN G.The competitive exclusion principle[J].Science,1960,131(3409):1292-1297.

[38]李俊清.森林生态学[M].第 3 版.北京:高等教育出版社,2017.

[39]CLAVEL J,JULLIARD R,DEVICTOR V.Worldwide decline of specialist species:toward a global functional homogenization? [J].Frontiers in Ecology and the Environment,2011,9(4):222-228.

[40]MACARTHUR R,LEVINS R.The limiting similarity,convergence, and divergence of coexisting species [J]. The American Naturalist,1967,101(921):377-385.

[41]HUTCHINSON G E.Concluding remarks[J].Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology,1957,22:415-427.