

功能、谱系多样性在机场鸟类群落研究中的应用——以扬州泰州国际机场为例

苗可儿^① 钱薇雅^① 张俊^② 李鹏^{①③} 胡超超^{①④*} 常青^{①*}

① 南京师范大学生命科学学院 南京 210046; ② 扬州泰州国际机场 扬州 225831; ③ 江苏省农业生物多样性培育与利用研究中心 南京 210014; ④ 南京师范大学分析测试中心 南京 210046

摘要: 随着航空业的发展, 野生动物与飞机之间的冲突愈发密集, 机场鸟类群落多样性研究引起了大量关注。研究鸟类群落对生境类型的使用状况, 可以掌握生境类型与鸟击风险的潜在关系, 为机场环境改造提供理论依据。本研究于 2019 年 7 月至 2021 年 11 月, 采用样点法对扬州泰州机场及周边 8 km 范围内的农田、湿地、林地和城镇 4 种生境中 30 个样点的鸟类群落进行调查。利用鸟类群落多样性指数, 包括丰富度、多度、香农威纳多样性指数、辛普森多样性指数以及均匀度指数来表征群落的物种多样性, 以及功能和谱系多样性, 阐明机场周边 4 种生境的鸟类群落多样性差异。同时, 基于多度加权的平均成对功能距离 (MFD) 和平均成对谱系距离 (MPD) 来表征群落的功能和谱系结构, 探究群落构建机制, 量化各多样性指标间的相关性。研究共记录扬州泰州国际机场鸟类 88 种, 分别隶属于 14 目 36 科, 目、科中数量最多的为雀形目 (Passeriformes) 和鹬科 (Scolopacidae)。谱系和功能多样性在生境间差异显著, 功能分散度在农田最高, 城镇最低; 谱系多样性指数在城镇最高, 湿地最低。标准化效应值分析表明, 随机生态过程影响了湿地鸟类群落功能和谱系的构建过程, 农田、城镇、林地三种生境群落的聚集主要受到生境过滤作用的影响。研究鸟类群落多样性及生境因子有助于掌握生境类型与机场鸟类群落的关系, 为机场及其周边环境整治提供理论帮助。

关键词: 物种多样性; 谱系多样性; 功能多样性; 机场

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2023) 02-182-16

Application of Functional and Phylogenetic Diversity in Airport Bird Communities: A Case Study of Yangzhou Taizhou International Airport

MIAO Ke-Er^① QIAN Wei-Ya^① ZHANG Jun^② LI Peng^{①③}
HU Chao-Chao^{①④*} CHANG Qing^{①*}

① School of Life Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023;

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 41271057), 江苏省农业生物多样性培育与利用研究中心委托研究项目 (No. 100605-2022-KY-00210); 江苏省林业科学研究院青年基金项目 (JAF-2022-01);

* 通讯作者, E-mail: huweichen@126.com, changq@nynu.edu.cn;

第一作者简介 苗可儿, 女, 硕士研究生; 研究方向: 动物生态学; E-mail: nicolemke@163.com。

收稿日期: 2022-06-13, 修回日期: 2022-11-23 DOI: 10.13859/j.cjz.202302003

② *Yangzhou Taizhou International Airport, Yangzhou 225831;*

③ *Jiangsu Agricultural Biodiversity Cultivation and Utilization Research Center, Nanjing 210014;*

④ *Analysis and Testing Center, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China*

Abstract: [Objectives] From July 2019 to November 2021, based on the data of bird community diversity surveys conducted at Yangzhou Taizhou International Airport and its surrounding areas, this study analyzed the species, function and phylogenetic diversity of bird communities in different habitats, to explore the function and phylogenetic structure of bird communities and the correlation between each index. This study investigated the construction process of the bird community in the human-disturbed airport environment and provided a theoretical basis for the prevention and control of bird disease in the airport and its surrounding areas. **[Methods]** The traditional point count method was used to investigate the bird community of 30 sampling sites in 4 habitats (Fig. 1). The statistical analysis included single-group *t*-test, with a total of 713 samples, which was the cumulative survey number of 30 samples in 2 years. A total of 2 224 individuals were included in the sample, which was the cumulative sum of the number of species observed during the survey of the sample sites. Traditional bird community diversity indices such as richness, abundance, Shannon-Wiener index, Simpson diversity index, and Pielou evenness index were used to characterize the species diversity, functional (FDis) and phylogenetic (Faith' PD) diversity elucidates the differences in the diversity of bird communities around the airport for each habitat type. Meanwhile, based on the mean pairwise functional distance (MFD) and mean pairwise phylogenetic distance (MPD) weighted by abundance, the function and phylogenetic structures of the community were characterized, and the community assembly mechanisms, as well as correlations between various diversity indicators, were explored. The calculation and statistical analysis of this study were completed in R 4.0.0. A total of 30 survey samples were designed in this study, with a total of 713 survey samples and 2 224 observational data. **[Results]** Our results showed that (1) The species accumulation curves of the four habitats were close to asymptotes, indicating that the survey data of bird species were relatively complete and fully met the requirements of the analysis (Fig. 2). (2) A total of 88 bird species were recorded, belonging to 14 orders and 36 families, respectively. The largest number of orders and families were Passeriformes and Scolopacidae (Fig. 3). (3) FDis was highest in farmland and lowest in urban areas, and PD was highest in urban areas and lowest in wetlands (Fig. 4). (4) Standardized effect size analysis showed that random processes affected the function and phylogenetic construction of wetland bird communities, and the clustering of communities in the other three habitats was mainly affected by habitat filtering (Fig. 5). **[Conclusion]** The analysis of bird community diversity and related indicators in this study can grasp the relationship between habitat types and airport bird communities, and provide theoretical guidance for airport managers.

Key words: Species diversity; Phylogenetic diversity; Functional diversity; Airport

随着航空业的发展，野生动物与航空器之间的冲突愈发密集，每年在世界范围内造成巨大损失 (Viljoen et al. 2016, Jeffery et al. 2019)。冲突事件中大多是鸟类与飞机发生碰撞，该问

题引起了全球大量关注 (De Vault et al. 2012)。机场除了航空运输业务外，机场内视野开阔的天然草坪为野生动物提供了良好的栖息和觅食场所。有些鸟类已习惯于机场和人类活动的干

扰 (Soldatini et al. 2010); 在受干扰的区域, 由于对相同资源的竞争较低, 可能会提高鸟类觅食成功率 (Mallord et al. 2007)。许多研究关注影响机场及其附近区域鸟类的主要因素 (Conkling et al. 2018), 如作物类型、植被组成、食物可获得性和景观结构已被证明可以改变机场内野生动物的群落组成 (Pennell et al. 2016, Iglay et al. 2017, Alquezar et al. 2020)。机场及其周围的生境类型会影响野生动物的种类和数量、分布和节律规律, 进而影响鸟击风险 (Blackwell et al. 2006, Dolbeer 2006, Pfeiffer et al. 2018)。近些年来, 机场及其周围地区的生境类型被纳入风险评估的重要性程序 (Blackwell et al. 2009), 鸟击风险评估亦逐渐考虑机场及其周边区域的生境类型及季节变化的影响 (Coccon et al. 2015)。

研究鸟类群落对生境的使用状况, 可以掌握生境类型与鸟击风险的关系及其潜在危害, 为机场环境改造提供理论依据 (Blackwell et al. 2009, Pfeiffer et al. 2020)。量化机场周边农作物类型与鸟击风险的研究发现, 作物类型和作物高度对鸟击中、高危险级别的鸟类种类具有重要影响 (Iglay et al. 2017)。通过连续 10 年收集肇事鸟种的研究发现, 机场间肇事鸟种的群落结构差异显著, 鸟击风险较高的鸟类也各不相同 (Steele et al. 2021)。水鸟和猛禽在鸟击时对飞机造成损害较大, 鸟类的体重是评估鸟击危险等级最重要因子, 种群大小、区域位置和季节变化对鸟击危险等级均有影响 (De Vault et al. 2016, Pfeiffer et al. 2018)。

传统的生物多样性研究多集中于分类多样性研究, 其假设所有物种和个体的生态效应相同, 忽略了物种的生态功能 (Villéger et al. 2013), 只用物种相对丰度表征物种的重要性, 缺乏物种的生态功能和系统发育信息 (Si et al. 2017)。在探索物种分类和功能多样性时, 群落的功能特征通过有效利用资源增加生态位互补性, 可以揭示与生物多样性起源和维持相关的机制 (Stegen et al. 2011)。谱系和功能多样性

可以分别提供有关进化和生态的信息, 整合二者能够为了解群落特征提供更为充分的信息 (Si et al. 2017), 有助于厘清生态过程 (如环境过滤和竞争排斥) 在群落构建中的作用 (Winter et al. 2013, Barbaro et al. 2014)。因此, 考虑谱系和功能多样性可以为机场鸟击防范提供新的视角。

本研究以 2019 年 7 月至 2021 年 11 月对扬州泰州国际机场 (下文简称扬泰机场) 及其周边地区进行鸟类群落多样性调查的数据为基础, 对 4 种生境 (农田、湿地、林地、城镇) 鸟类群落的物种、功能和谱系多样性进行分析, 研究鸟类群落的功能和谱系结构及各指标间的相关性, 探讨在人为干扰的机场环境中鸟类群落的构建过程, 为机场及其周边区域鸟情防控提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及栖息地现状

扬泰机场位于江苏省扬州市江都区丁沟镇境内, 该地区地势平坦, 河湖交织, 通扬运河横贯东西, 京杭运河纵贯南北, 平均海拔 5 m 左右。

1.2 样点设置及鸟类调查方法

研究使用分层随机抽样设计, 调查范围为机场周边 8 km。在国家科技资源共享服务平台-国家地球系统科学数据中心-长江三角洲分中心 (<http://nnu.geodata.cn:8008>) 下载扬泰机场及其周边生境类型图。结合遥感影像和野外实地调查, 根据机场及其周边鸟类栖息地与活动状况, 应用 ArcGIS 10.0 将生境划分为对鸟类具有重要影响的 4 种类型 (图 1), 其面积占比从高到低依次为, 农田 (82.92%)、城镇 (12.16%)、湿地 (3.25%) 和林地 (1.67%)。

依据生境面积占比共设置 30 个样点, 其中农田设置 12 个样点, 城镇设置 5 个样点, 湿地设置 5 个样点, 林地设置 8 个样点 (图 1)。采用样点法每月调查 4 类型生境中鸟类物种丰富度和个体数量。

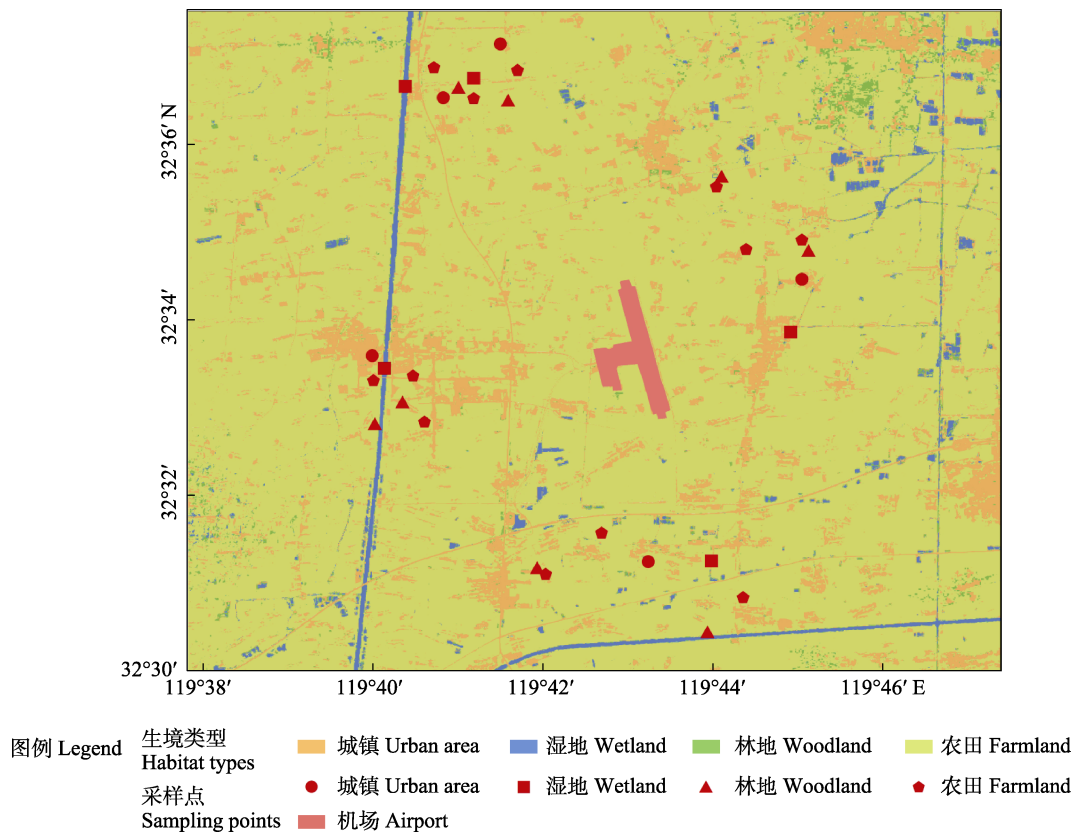


图 1 机场周边生境现状及样点分布图

Fig. 1 The distribution diagram of habitat and sample points around the airport

2019年7月至2021年11月，每月开展1次鸟类调查。调查选取晴朗无风的2~4d，调查时间从日出到日出后3h和日落前3h至日落，记录鸟类种类、数量、生境类型、GPS坐标等信息。鸟类物种鉴定参考《中国鸟类野外手册》(约翰·马敬能等2000)，居留型参考《中国鸟类分类与分布名录》(第三版)(郑光美2017)，鸟类保护级别依据世界自然保护联盟红色名录(IUCN Red List)评级标准。

1.3 物种累计曲线

物种积累曲线(species accumulation curve, SAC)被广泛用于判断取样充分性和估计真实的物种丰富度(Colwell et al. 2004)。本研究用物种累积曲线来评估鸟类生态调查的完整性。

1.4 优势种与指示种分析

使用鸟类种群数量占群落个体总数的百分

比(percent, P_{er})确定优势种, $P_{er} \leq 0.1\%$ 定为罕见种, $0.1\% < P_{er} \leq 1\%$ 的定为稀有种, $1\% < P_{er} \leq 10\%$ 定为常见种, $10\% < P_{er}$ 定为优势种。指示物种是对环境变化敏感的物种, 常用于监测环境变化或环境管理的有效性, 其在特定区域的丰度表明特定的环境条件(Thompson et al. 2013)。通常用指示值(indicator value index, IndVal)进行鸟类指示种分析(indicator species analysis), 其优于物种丰富度计算(Cheng et al. 2012)。

1.5 物种功能性状

选择与鸟类群落资源利用有关的18个功能特征计算鸟类功能多样性(表1), 即6个连续型特征(体长、喙长、翅长、尾长、跗骨长、体重)和3组分类特征(Wilman et al. 2014, 王彦平等2021)。

表 1 扬泰机场鸟类群落功能多样性使用的功能特征及谱系信号

Table 1 Traits used to measure bird functional diversity and its phylogenetic signals at Yangzhou Taizhou International Airport

功能特征类型 Trait type	功能特征 Traits	类别 Categories	Blomberg <i>K</i> 值 Blomberg's <i>K</i>	Pagel λ 值 Pagel's λ	Purvis <i>D</i> 值 Purvis' <i>D</i>
资源数量 Resource quantity	体重 Body mass		0.08	< 0.001	\
	体长 Body length		1.19***	0.89***	\
	喙长 Bill length	连续变量 Continuous	1.43***	0.98***	\
	翅长 Wing length		1.10***	0.90***	\
	尾长 Tail length		0.61***	0.98***	\
	跗骨长 Tarsus length		0.93***	0.96***	\
食物类型 Feeding guild	杂食鸟类 Omnivores	二元变量 Binary	\	\	- 0.26
	食虫鸟类 Insectivores		\	\	- 0.25
	食肉鸟类 Carnivores		\	\	- 0.63
巢址 Nest site	寄生 Parasitism		\	\	- 1.13
	地面 Ground	二元变量 Binary	\	\	- 0.85
	水面 Water		\	\	- 1.70
	树冠 Canopy		\	\	- 0.17
	壁 Wall		\	\	- 0.62
取食层 Foraging stratum	地面上 Ground		\	\	1.00
	林下层 2 m 以下 Understory	二元变量 Binary	\	\	0.91
	林地中高层 Mid-high		\	\	0.94
	树冠层 Canopy		\	\	1.04

*** $P < 0.001$

Blomberg's *K* 和 Pagel's λ 用于检验连续性特征的谱系信号强度, Purvis' *D* 用于检验二元特征的谱系信号强度。“\” 表示缺失值。

Blomberg's *K* and Pagel's λ are only used to test the phylogenetic signal for continuous features, while Purvis' *D* is used to test the phylogenetic signal for binary features. “\” represents missing value.

分别采用 Blomberg's *K* (Blomberg et al. 2003) 和 Pagel's λ (Pagel 1994) 检验连续性特征的谱系信号强度, 用 Purvis' *D* (Fritz et al. 2010) 检验二元特征的谱系信号强度。若 $K \leq 1$ 则表明性状的谱系发育信号弱; 若 $K > 1$, 则表明性状具有较强的谱系信号。Pagel's λ 值分布在 0 到 1 之间, $\lambda = 0$, 表示性状无系统发育信号; $\lambda = 1$, 表示性状系统发育信号强; 介于 0 和 1 之间, 表明系统发育信号弱。Purvis' *D* 值越低表明性状进化越保守 (即系统发育信号越强), 当 *D* 接近 0, 说明性状在进化上相对保守; 而 $D \geq 1$ 表明性状无系统发育信号或在谱系发育树上是分散的。

采用与零模型比较的方法检验功能性状的

谱系相关性, 将谱系树上的物种随机置换 999 次, 计算出每次置换产生的值, 然后将实际值与零模型谱系信号值进行比较。

1.6 多样性指数

使用香农威纳 (Shannon-Wiener) 多样性指数、辛普森 (Simpson) 多样性指数以及 Pielou 均匀度指数表征群落的物种多样性。谱系多样性: 首先从 BirdTree 数据库中下载包含调查所发现的所有物种在内的 5 000 棵基于 Hackett 的谱系随机树, 通过 Tree Annotator 软件合成一致树 (consensus tree) (Bouckaert et al. 2014); 采用 Faith's PD (Faith 1992) 统计物种间的总分支长度。使用功能分散度 (functional dispersion, FDis) 表征功能多样性指数, 该指

数主要量化群落功能性状的多度分布在性状空间中的最大离散程度 (Laliberté et al. 2010)。

1.7 群落功能和谱系结构

通过性状距离矩阵计算 Gower 距离, 使用非加权组平均法 (unweighted pair-group method with arithmetic means, UPGNMA) 构建功能性状树 (functional dendrogram) (Petchey et al. 2002)。根据谱系树和功能性状树, 利用多度加权的平均成对功能距离 (mean pairwise functional distance, MFD)、多度加权的平均成对谱系距离 (mean pairwise phylogenetic distance, MPD) 及最近种间谱系或功能距离 (mean nearest taxon distance, MNTD) 表征群落功能或谱系结构。具体计算公式为: D_{MF} or $D_{MP} = \frac{\sum_i \sum_j \xi_{i,j}}{n}$, $D_{MNT} = \frac{\sum_i \xi_{i,j,\min}}{n}$, 式中, D_{MF}

表示多度加权的平均成对功能距离, D_{MP} 表示多度加权的平均成对谱系距离, D_{MNT} 表示最近种间谱系或功能距离, n 为群落中物种数, $\xi_{i,j}$ 为物种 i 与 j 的功能或谱系距离, $\xi_{i,j,\min}$ 为物种 i 与群落中其他物种的最小谱系距离, 即最近种间距离。

基于生成的 999 个多度加权的平均成对谱系或功能距离 (D_{MF} 或 D_{MP}) 和最近种间谱系或功能距离 (D_{MNT}) 的平均值和标准差与实际观察的群落对比, 计算标准化效应值 (standard effect size, SES), 从而判断影响群落功能构建的生态过程。其公式为 $S_{ES.MPD}$ 或 $S_{ES.MFD}$ 或 $S_{ES.PD.MNTD}$ 或 $S_{ES.FD.MNTD} = \frac{o_{\text{obs}} - m_{\text{ean}(\text{null})}}{SD_{(\text{null})}}$, 以

群落谱系多样性为例, 式中 o_{obs} 为多度加权的平均成对谱系距离 (D_{MP}) 或最近种间谱系距离 (D_{MNT}) 的实际观测值; $m_{\text{ean}(\text{null})}$ 为 999 个随机群落多度加权的平均成对谱系距离 (D_{MP}) 或最近种间谱系距离 (D_{MNT}) 的平均值; $SD_{(\text{null})}$ 为 999 个随机群落多度加权的平均成对谱系距离 (D_{MP}) 或最近种间谱系距离 (D_{MNT}) 的标准差。若标准化效应值显著低于随机值 ($S_{ES} <$

0), 表明生境过滤驱动着群落谱系或功能的聚集; 若标准化效应值显著高于随机值 ($S_{ES} > 0$), 则表明种间竞争驱动着群落谱系或功能的发散 (Braghin et al. 2018)。当无显著差异时, 则认为随机的生态过程影响了群落谱系和功能的发散或聚集。

1.8 统计分析

本研究计算和统计分析均在 R 4.0.0 中完成。本研究共设计 30 个调查样点, 累计调查样本数 713 个, 共计 2 224 条观察数据。使用 vegan 程序包中的 specaccum 函数进行抽样充分性分析; indispesies 程序包的 multipatt 函数计算鸟类指示值。对于连续型特征, 使用 phytools 程序包的 phylsig 函数来计算得到 K 值和 λ 值; 对于二元特征, 利用 caper 程序包的 phylo.d 函数来计算得到 D 值。数据处理利用 vegan 程序包的 diversity 函数来计算得到物种多样性; picante 程序包的 sespd 函数来计算得到 PD 值; Gower 距离和功能分散度分别通过 FD 程序包中的 gowdis 和 dbFD 函数来计算。使用 Indicspecies 程序包的 multipatt 函数计算 IndVal。使用 Pearson 线性相关分析 α 多样性水平上物种多样性、功能多样性和谱系多样性指数之间的关系。

2 结果

2.1 扬泰机场鸟类种类组成

本研究共观测到鸟类 88 种, 隶属于 14 目 36 科。其中, 国家二级保护野生鸟类 5 种: 小鸨 (*Centropus bengalensis*)、小杓鹬 (*Numenius minutus*)、红隼 (*Falco tinnunculus*)、纵纹腹小鸮 (*Athene noctua*) 和云雀 (*Alauda arvensis*)。世界自然保护联盟 (IUCN) 近危级 (near threatened, NT) 的鸟类 3 种, 分别是鹌鹑 (*Coturnix japonica*)、凤头麦鸡 (*Vanellus vanellus*) 和东亚石鹇 (*Saxicola stejnegeri*)。物种积累曲线分析表明, 4 种生境的物种丰富度均接近渐近线, 表明调查的鸟类物种调查数据完整性较高, 充分达到分析要求 (图 2)。

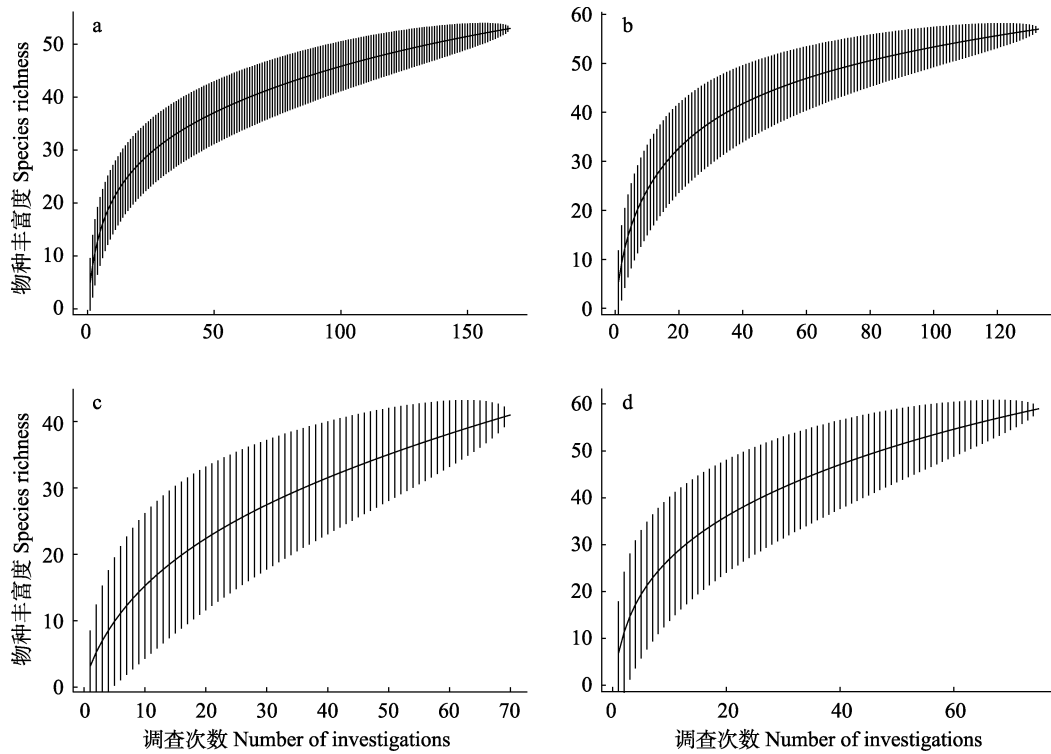


图 2 基于抽样次数的物种累计曲线 (纵线表示标准差)

Fig. 2 Species accumulation curve based on the numbers of survey, with vertical lines representing standard deviation

a. 农田; b. 林地; c. 湿地; d. 城镇。a. Farmland; b. Woodland; c. Wetland; d. Urban area.

从物种组成上看,雀形目 (Passeriformes) 鸟类物种数最多,共 21 科 49 种,占总物种数的 55.68%;其次为鸻形目 (Charadriiformes),共 3 科 14 种,占总物种数的 15.91%。种群数量最多的为麻雀 (*Passer montanus*),然后从多到少依次为喜鹊 (*Pica pica*)、八哥 (*Acridotheres cristatellus*)、家鸽 (*Columba livia*) 等 (图 3)。从空间分布上看,4 种生境中各具特有物种,农田、林地、湿地和城镇的特有种分别有 4 种、10 种、4 种和 13 种。

2.2 扬泰机场鸟类群落指示种分析

在扬泰机场及周围地区,有 7 种鸟类是林地生境显著相关的指标物种、3 种鸟类是湿地生境显著相关的指标物种、14 种鸟类是城镇显著相关的指标物种,农田生境缺乏具有显著指示值的物种 (表 2)。一些物种种群数量较大,

如林地中的指示种乌鸫 (*Turdus merula*) 和白头鹎 (*Pycnonotus sinensis*) 等;而另一些则是特定生境的特有物种,如林地中的星头啄木鸟 (*Picoides canicapillus*)。

2.3 生境类型对群落多样性的影响

在 4 种生境中,鸟类物种丰富度和多度均在城镇最高,湿地生境最低;总体上所有生境鸟类群落的香农威纳、辛普森多样性指数呈现出相似的变化规律,在林地与农田较高,湿地最低;与其余生境比较,农田、湿地的均匀度更高,城镇最低 (表 3)。

鸟类群落谱系和功能多样性在不同生境间具有一定的差异,功能分散度在农田最高,城镇最低;谱系多样性在城镇最高,湿地最低。多度加权的平均成对功能距离、多度加权的平均成对谱系距离及最近种间功能距离、最近种

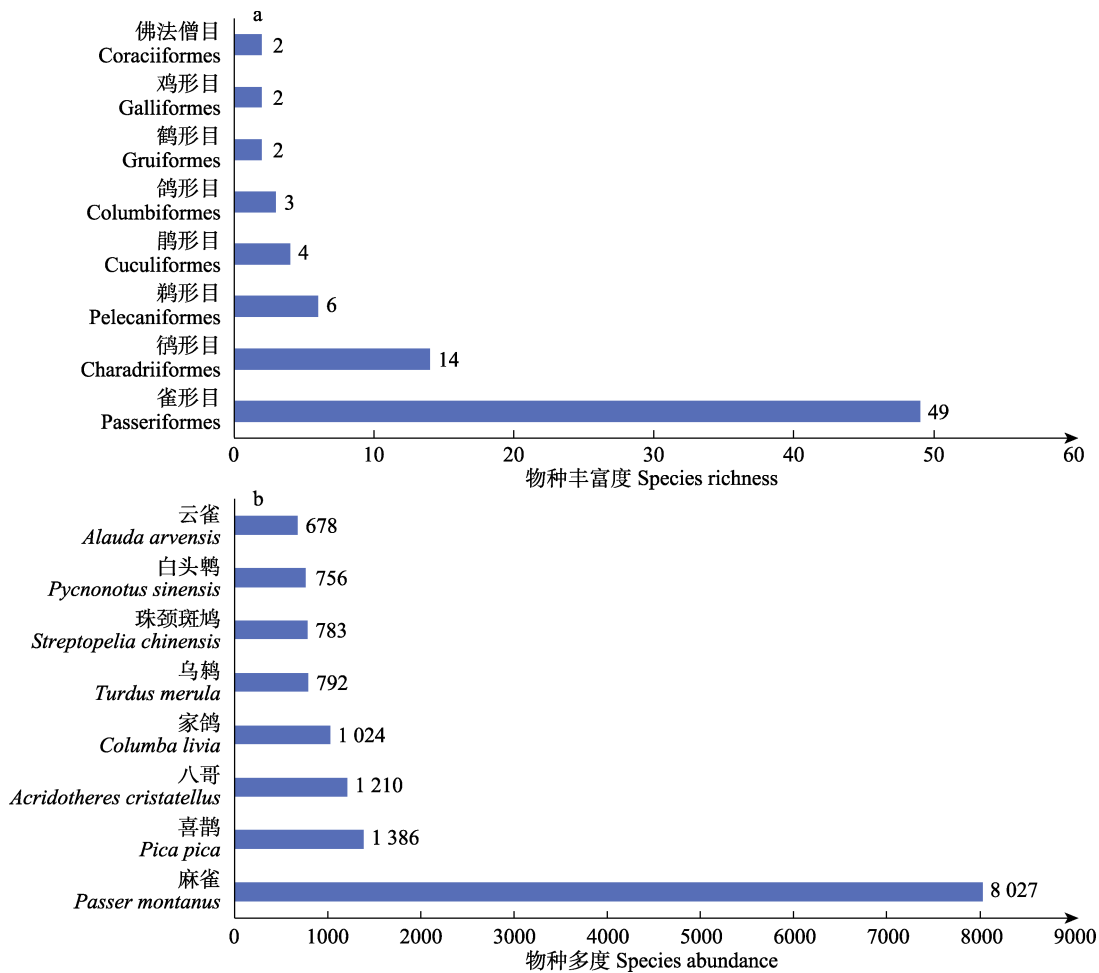


图3 扬泰机场物种丰富度 (a) 和多度 (b)

Fig. 3 Species richness (a) and abundance (b) at Yangzhou Taizhou International Airport

间谱系距离则呈现相似的变化模式，且均在湿地最高（图4）。

2.4 群落构建

选取具有显著系统发育信号的功能特征进行功能多样性分析（表1）。农田、林地和城镇3种生境的平均成对功能距离的标准化效应值（ $t_{\text{农田}} = -10.54, P < 0.05$; $t_{\text{林地}} = -12.16, P < 0.05$; $t_{\text{城镇}} = -7.44, P < 0.05$ ）和平均成对谱系距离的标准化效应值（ $t_{\text{农田}} = -6.82, P < 0.05$; $t_{\text{林地}} = -10.90, P < 0.05$; $t_{\text{城镇}} = -6.76, P < 0.05$ ）均显著小于0；湿地生境的平均成对功能距离的标准化效应值小于0（ $t_{\text{湿地}} = -1.07, P > 0.05$ ），平均成对谱系距离的标准化效应值大于

0（ $t_{\text{湿地}} = 0.28, P > 0.05$ ）（图5）。

2.5 相关性分析

在物种多样性方面，香农威纳多样性指数与辛普森多样性指数（ $r = 0.95, P < 0.001$ ）、Pielou均匀度指数（ $r = 0.38, P < 0.001$ ）、谱系多样性（ $r = 0.77, P < 0.001$ ）及功能分散度（ $r = 0.68, P < 0.001$ ）均呈显著正相关；与最近种间谱系距离（ $r = -0.44, P < 0.001$ ）及最近种间功能距离（ $r = -0.45, P < 0.001$ ）均呈显著负相关。在谱系多样性方面，谱系多样性指数与功能分散度指数呈显著正相关（ $r = 0.45, P < 0.001$ ），与最近种间功能距离（ $r = -0.41, P < 0.001$ ）及最近种间谱系距离（ $r = -0.31,$

表 2 基于 IndVal 的指示种分析

Table 2 Indicator species analysis based on IndVal

生境 Habitat	物种 Species	IndVal 值 IndVal	个体数 Individuals (ind)
林地 Woodland	乌鸫 <i>Turdus merula</i>	0.43 [*]	289
	白头鹎 <i>Pycnonotus sinensis</i>	0.40 ^{**}	308
	黑尾蜡嘴雀 <i>Eophona migratoria</i>	0.35 ^{**}	201
	田鸫 <i>Emberiza rustica</i>	0.27 ^{**}	179
	灰喜鹊 <i>Cyanopica cyanus</i>	0.26 [*]	126
	黑脸噪鹛 <i>Garrulax perspicillatus</i>	0.25 ^{**}	37
	星头啄木鸟 <i>Picoides canicapillus</i>	0.17 [*]	4
湿地 Wetland	黑水鸡 <i>Gallinula chloropus</i>	0.81 ^{***}	144
	小鸊鷉 <i>Tachybaptus ruficollis</i>	0.59 ^{***}	65
	夜鹭 <i>Nycticorax nycticorax</i>	0.32 ^{**}	35
城镇 Urban area	麻雀 <i>Passer montanus</i>	0.63 ^{***}	3 375
	家鸽 <i>Columba livia</i>	0.53 ^{***}	629
	喜鹊 <i>Pica pica</i>	0.50 ^{**}	492
	云雀 <i>Alauda arvensis</i>	0.49 ^{***}	623
	棕背伯劳 <i>Lanius schach</i>	0.45 ^{***}	70
	珠颈斑鸠 <i>Spilopelia chinensis</i>	0.45 ^{***}	220
	八哥 <i>Acridotheres cristatellus</i>	0.41 [*]	266
	白鹡鸰 <i>Motacilla alba</i>	0.36 ^{***}	57
	戴胜 <i>Upupa epops</i>	0.35 ^{***}	45
	黑卷尾 <i>Dicrurus macrocercus</i>	0.25 [*]	20
	东方鸫 <i>Charadrius veredus</i>	0.20 ^{**}	24
	鹌鹑 <i>Coturnix japonica</i>	0.20 [*]	3
	针尾沙锥 <i>Gallinago stenura</i>	0.63 ^{***}	18
红隼 <i>Falco tinnunculus</i>	0.53 ^{***}	3	

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

表 3 各生境鸟类群落物种多样性比较

Table 3 Bird diversity between different habitats

生境 Habitat	总个体数 Total individuals (ind)	样点平均个体数 Mean value of individuals per plot (ind)	物种丰富度 Species richness	香农威纳多样性指数 Shannon-Wiener index	辛普森多样性指数 Simpson's diversity index	Pielou 均匀度指数 Pielou's evenness index
农田 Farmland	6 298	37.7	53	1.10	0.57	0.80
林地 Woodland	5 289	39.8	57	1.14	0.57	0.78
湿地 Wetland	897	12.8	41	0.69	0.38	0.82
城镇 Urban area	6 957	92.8	59	1.01	0.47	0.68

$P < 0.001$) 均呈显著负相关。在功能多样性方面, 功能分散度指数与平均成对功能距离呈显著正相关 ($r = 0.52$, $P < 0.001$)。此外,

对 4 种类型生境的谱系和功能多样性分别进行分析, 发现其均具有类似的相关性特征 (图 6)。

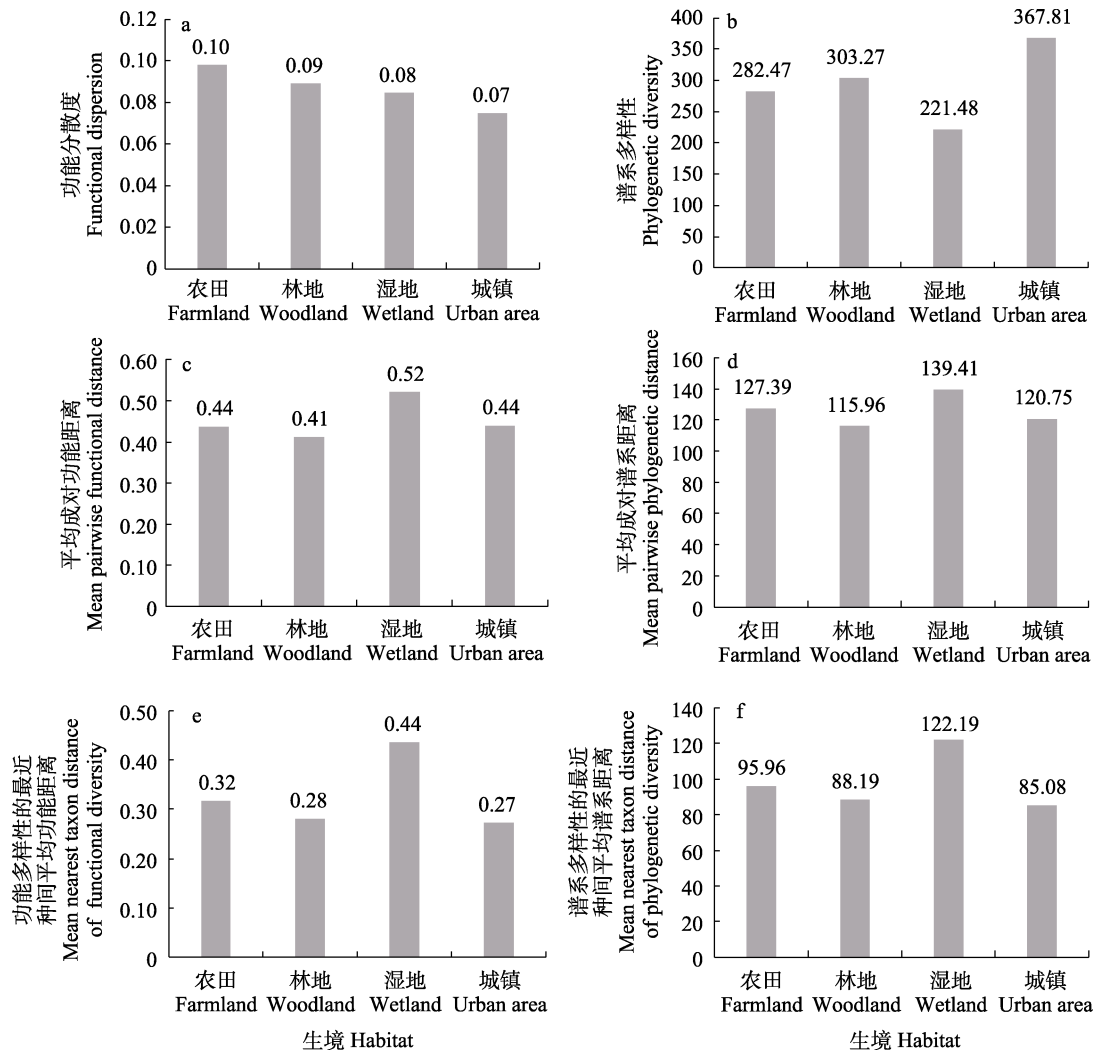


图4 扬泰机场各生境鸟类功能分散度 (a)、谱系多样性 (b)、多度加权的平均成对功能距离 (c)、多度加权的平均成对谱系距离 (d)、最近种间平均功能距离 (e) 和最近种间平均谱系距离 (f) 的变化

Fig. 4 Bird species functional dispersion (a), phylogenetic diversity (b), mean pairwise functional distance (c), mean pairwise phylogenetic distance (d), mean nearest taxon distance of functional diversity (e), mean nearest taxon distance of phylogenetic diversity (f) in each habitat at Yangzhou Taizhou International Airport

3 讨论

扬州泰州国际机场位于中国候鸟东部迁徙路线上，候鸟和旅鸟的数目较多。本研究结果显示，雀形目和鸽形目物种数最多，物种个体数最高的为麻雀、喜鹊等留鸟。物种多样性体现了群落中物种的共存情况 (Whittaker et al. 2001)。生境类型对鸟类群落多样性具有显著影

响，且各生境类型存在不同的指示种和功能群。扬州泰州机场周边主要以农田生态系统为主，调查发现农田群落鸟类 53 种，香农威纳多样性指数为 1.10，均匀度指数为 0.80。虽然农田受到较高的人为干扰，但其提供了丰富和多样的食物资源，提高了鸟类群落的物种丰富度和多度，均匀度也处于较高水平 (Wuczyński 2016)。本研究发现城镇群落鸟类 59 种，香农威纳多样

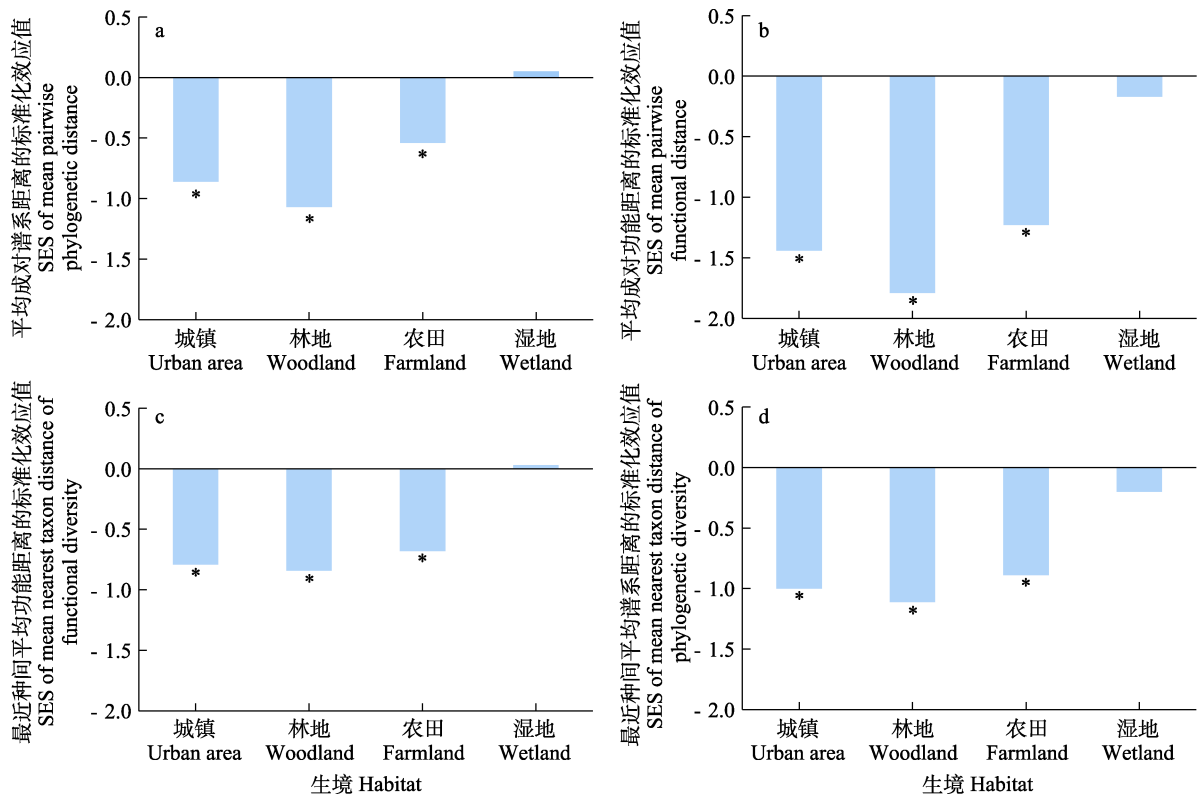


图 5 平均成对谱系距离的标准化效应值 (a)、平均成对功能距离的标准化效应值 (b)、最近种间平均功能距离的标准化效应值 (c)、最近种间平均谱系距离的标准化效应值 (d) 在各生境的变化

Fig. 5 Patterns of the standardized effect size (SES) of mean pairwise phylogenetic distance (a), mean pairwise functional distance (b), mean nearest taxon distance of functional diversity (c) and mean nearest taxon distance of phylogenetic diversity (d) in each habitat

表示与随机值有显著差异。 means that statistical test is significant.

性指数为 1.01，均匀度指数为 0.68。城镇生境具有一定的内部异质性，适合多种鸟类栖息，但由于城镇化环境大多类似，栖息地往往基于相似的特征过滤、选择物种，因而城市化倾向于使鸟类同质化，导致群落均匀度降低 (Pellissier et al. 2012)。有些鸟类不能适应城市环境，在城市化进程中逐渐消失；而能够适宜在城市生存的鸟类丰富度较高 (Sol et al. 2014)。麻雀、家鸽、喜鹊、棕背伯劳 (*Lanius schach*)、八哥、白鹡鸰 (*Motacilla alba*) 都是城镇生境常见的鸟类，大部分都是伴人鸟种，因此对城镇的指示值较高。湿地生境鸟类物种丰富度和多度最低，但均匀度却最高。这与

调查区域仅有 3.25%的湿地占地有关，特定生境的面积越大，容纳的物种越多，栖息地类型和面积对鸟类的丰富度有显著影响 (Goddard et al. 2010)。湿地生境中比例适宜的植被、滩涂和水域面积，为筑巢、避难所和食物提供更多空间，成为各种鸟类的良好栖息地，分布也较为均匀 (Mao et al. 2019)。黑水鸡 (*Gallinula chloropus*)、小鸕鶿 (*Tachybaptus ruficollis*)、夜鹭 (*Nycticorax nycticorax*) 近水生活，分布较广，常常在鱼塘生境中觅食，以浮游植物或以小型鱼虾为食，且可以受到水生植物的保护，因此对湿地生境具有较高的指示性。

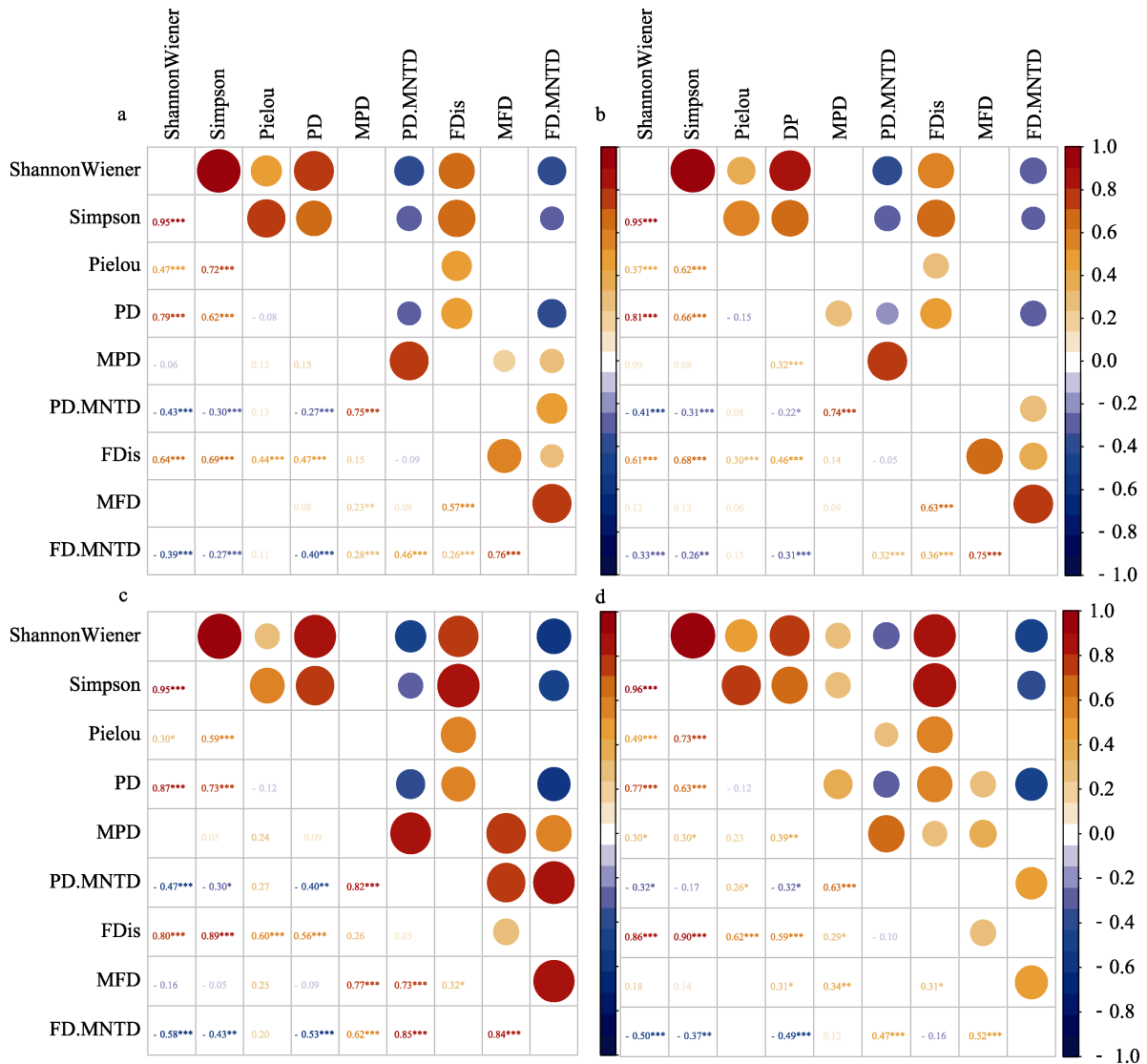


图6 各生境物种、谱系、功能多样性指数的 Pearson 相关系数

Fig. 6 Pearson correlation coefficients between species, phylogenetic and functional diversity indices

a. 农田; b. 林地; c. 湿地; d. 城镇。ShannonWiener. 香农威纳多样性指数; Simpson. 辛普森多样性指数; Pielou. Pielou 均匀度指数; PD. 谱系多样性指数; MPD. 多度加权的平均成对谱系距离; FD.MNTD. 最近种间功能距离; FDis. 功能分散度; MFD. 多度加权的平均成对功能距离; PD.MNTD. 最近种间谱系距离; 右侧颜色标尺表示各指标的相关程度, 红色表示正相关, 蓝色表示负相关, 圆圈越大代表相关性越强。

a. Farmland; b. Woodland; c. Wetland; d. Urban area. ShannonWiener. Shannon-Wiener index; Simpson. Simpson diversity index; Pielou. Pielou evenness index; PD. Phylogenetic diversity (Faith' PD); MPD. The mean pairwise phylogenetic distance; FD.MNTD. The mean nearest taxon distance of functional diversity; FDis. Functional diversity; MFD. The mean pairwise functional distance; PD.MNTD. The mean nearest taxon distance of phylogenetic diversity. The color scale on the right side indicates the correlation degree among indicators, red indicates positive correlation, blue indicates negative correlation, and larger circles represent stronger correlation.

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

功能多样性量化功能性状在多维空间中的分布,反映了物种对资源的利用以及对生态过程的影响 (Maure et al. 2018)。随着干扰和生境破碎化的加剧,功能多样性将下降 (Mouillot et al. 2013)。城镇的功能分散度较低,说明人为干扰较大的城镇限制了鸟类群落对资源的利用效率 (Camacho-Cervantes et al. 2018)。具有自我调节能力的物种数量减少,从而使城镇的鸟类群落稳定性减弱 (Kowarik 2011)。农田、湿地和林地 3 种生境类型的鸟类群落功能分散度较高,说明这 3 种类型生境的鸟类对空间、时间和资源类型的互补资源利用较充分,生态系统生产力较高,能为更多功能类群鸟类提供栖息场所 (Jiang et al. 2007)。

谱系多样性反映了群落构建的进化历史,与鸟类群落在面对环境变化时产生并维持结构稳定性能力有关,谱系多样性是表征群落结构、构建过程和特征的有用工具 (He et al. 2018)。本研究显示,扬泰机场及周边的农田、湿地和林地 3 种生境中鸟类群落的谱系和功能多样性变化大体一致,这表明谱系结构可能整合了与功能性状类似物种间的重要生态相似性 (Kraft et al. 2010)。城镇生境的鸟类群落谱系多样性在 4 种生境中呈现最高值,而城镇的功能分散度则是最低值,表明城镇生境中鸟类物种虽然亲缘关系较远,但共用生态位较多。

机场及其周边区域的农田、城镇和林地 3 种生境的平均成对谱系距离的标准化效应值和平均成对功能距离的标准化效应值均显著小于 0,即鸟类群落的平均成对距离比随机群落更为相似,表明该 3 种群落的构建主要受到生境过滤作用影响。小尺度范围内的物种间相互作用影响群落构建,而大尺度上生境过滤起主要作用 (Thuiller et al. 2015)。生境过滤的本质是在特定的微生境中定向选择,过滤具有相同或相似功能特征的物种的过程,而生境过滤则更有可能发生在受人为干扰的生境中 (Cadotte et al. 2017)。湿地生境的平均成对功能/谱系距离的标准化效应值与随机群落多度加权的平均成对

功能/谱系距离无显著性差异,表明湿地鸟类群落功能和谱系的构建过程主要受随机的生态过程影响。中性理论假定所有物种在生态上是相等的,它们的种群由于数量随机变化和空间有限的随机扩散而波动,但随机过程的出现取决于多样性指标和调查尺度 (Tuomisto et al. 2012, He et al. 2021)。机场及其周边区域鸟类群落谱系结构在生境间的差异也一定程度上反映人为干扰影响的作用。

阐明物种多样性、谱系多样性和功能多样性之间的关系对揭示其对生态系统功能的影响具有重要的生态学意义 (Stegen et al. 2011)。本研究结果表明,生境间物种多样性指标 (香农威纳多样性指数、辛普森多样性指数以及 Pielou 均匀度指数) 与功能多样性指标 (功能分散度, FDis) 均呈显著正相关。功能丰富度主要衡量一个群落中物种所占据的生态位空间的大小,群落中的物种越多,功能特征的分布范围就越广 (Batisteli et al. 2018),所以物种所占据的功能位就越大,群落稳定性越高 (Cosset et al. 2017)。本研究显示,物种多样性指数 (香农威纳和辛普森多样性指数) 与谱系多样性指数 (PD) 之间亦呈显著正相关,但相关系数存在差异,分析可能是由于物种丰度高、同质化较低的生境包含多种系统发育谱系 (Morlon et al. 2011, Weideman et al. 2020)。香农威纳多样性指数、辛普森多样性指数以及 Pielou 均匀度指数之间存在一定的相关性,但要全面了解对鸟类群落的影响,仅依靠单一指标是不够的,应综合考虑鸟类群落多样性的所有指标 (Mahmoudi et al. 2016),不同的物种多样性指标提供了不同的群落视角 (Renner et al. 2006)。辛普森多样性指数是衡量优势度的指标,它赋予优势物种权重,香农威纳多样性指数赋予优势物种和稀有物种权重;在时间尺度上研究均匀度变化可以选择均匀度指数 (Stegen et al. 2011)。

扬泰机场及周边区域的 4 种类型生境 (农田、城镇、湿地和林地) 对鸟类群落具有显著性影响,机场附近的栖息地在鸟击防范工作中

具有重要的作用,影响着野生动物种类和种群数量。农田、城镇和林地 3 种生境的鸟类群落构建主要受到生境过滤作用影响,生境过滤是在特定的生境中定向选择,过滤具有相同或相似功能特征的物种的过程,生境过滤在人为干扰的生境容易发生。湿地鸟类群落的构建过程主要受随机的生态过程影响,受种群的数量随机变化和空间有限的随机扩散而波动。对机场周边鸟类群落生境利用的研究,可以掌握生境类型与鸟击风险的关系及潜在危害。

致谢 感谢国家科技资源共享服务平台-国家地球系统科学数据中心-长江三角洲分中心提供数据支撑。感谢袁思佳、孙婉、钱汝恩、王浩等同学在鸟类调查和数据处理中提供的帮助。感谢审稿专家审阅稿件和提出的宝贵意见,感谢编辑老师在论文修订和出版中提供的帮助。

参 考 文 献

- Alquezar R D, Tolesano-Pascoli G, Gil D, et al. 2020. Avian biotic homogenization driven by airport-affected environments. *Urban Ecosystems*, 23(3): 1–11.
- Barbaro L, Giffard B, Charbonnier Y, et al. 2014. Bird functional diversity enhances insectivory at forest edges: A transcontinental experiment. *Diversity and Distributions*, 20(2): 149–159.
- Batisteli A F, Tanaka M O, Souza A L. 2018. Bird functional traits respond to forest structure in riparian areas undergoing active restoration. *Diversity*, 10(3): 90.
- Blackwell B F, De Vault T L, Fernández-Juricic E, et al. 2009. Wildlife collisions with aircraft: a missing component of land-use planning for airports. *Landscape and Urban Planning*, 93(1): 1–9.
- Blackwell B F, Wright S E. 2006. Collisions of Red-tailed Hawks (*Buteo jamaicensis*), Turkey Vultures (*Cathartes aura*), and Black Vultures (*Coragyps atratus*) with aircraft: Implications for bird strike reduction. *Journal of Raptor Research*, 40(1): 76–80.
- Blomberg S P, Garland Jr T, Ives A R. 2003. Testing for phylogenetic signal in comparative data: Behavioral traits are more labile. *Evolution*, 57(4): 717–745.
- Bouckaert R, Heled J, Kühnert D, et al. 2014. BEAST 2: A software platform for Bayesian evolutionary analysis. *PLoS Computational Biology*, 10(4): e1003537.
- Braghin L, Almeida B, Amaral D C, et al. 2018. Effects of dams decrease zooplankton functional β -diversity in river-associated lakes. *Freshwater Biology*, 63(7): 721–730.
- Camacho-Cervantes M, Ojanguren A F, MacGregor-Fors I. 2018. Birds from the burgh: Bird diversity and its relation with urban traits in a small town. *Journal of Urban Ecology*, 4(1): 1–7.
- Cheng L, Lek S, Lek-Ang S, et al. 2012. Predicting fish assemblages and diversity in shallow lakes in the Yangtze River basin. *Limnologica*, 42(2): 127–136.
- Coccon F, Zucchetta M, Bossi G, et al. 2015. A land-use perspective for birdstrike risk assessment: The attraction risk index. *PLoS ONE*, 10(6): e0128363.
- Colwell R K, Mao C X, Chang J. 2004. Interpolating, extrapolating, and comparing incidence-based species accumulation curves. *Ecology*, 85(10): 2717–2727.
- Conkling T J, Belant J L, De Vault T L, et al. 2018. Impacts of biomass production at civil airports on grassland bird conservation and aviation strike risk. *Ecological Applications*, 28(5): 1168–1181.
- Cosset C C, Edwards D P. 2017. The effects of restoring logged tropical forests on avian phylogenetic and functional diversity. *Ecological Applications*, 27: 1932–1945.
- Cadotte M W, Tucker C M. 2017. Should environmental filtering be abandoned? *Trends in Ecology and Evolution*, 32(6): 429–437.
- De Vault T L, Belant J L, Blackwell B F, et al. 2012. Airports offer unrealized potential for alternative energy production. *Environmental Management*, 49(3): 517–522.
- De Vault T L, Blackwell B F, Seamans T W, et al. 2016. Identification of off airport interspecific avian hazards to aircraft. *The Journal of Wildlife Management*, 80(4): 746–752.
- Dolbeer R A. 2006. Height distribution of birds recorded by collisions with civil aircraft. *The Journal of Wildlife Management*, 70(5): 1345–1350.
- Faith D P. 1992. Conservation evaluation and phylogenetic diversity. *Biological Conservation*, 61(1): 1–10.
- Fritz S A, Purvis A. 2010. Selectivity in mammalian extinction risk and threat types: A new measure of phylogenetic signal strength in binary traits. *Conservation Biology*, 24(4): 1042–1051.

- Goddard M A, Dougill A J, Benton T G. 2010. Scaling up from gardens: Biodiversity conservation in urban environments. *Trends in Ecology and Evolution*, 25(2): 90–98.
- He X, Brown C, Lin L. 2021. Relative importance of deterministic and stochastic processes for beta diversity of bird assemblages in Yunnan, China. *Ecosphere*, 12(6): e03545.
- He X, Luo K, Brown C, et al. 2018. A taxonomic, functional, and phylogenetic perspective on the community assembly of passerine birds along an elevational gradient in southwest China. *Ecology and Evolution*, 8(5): 2712–2720.
- Igley R B, Buckingham B N, Seamans T W, et al. 2017. Bird use of grain fields and implications for habitat management at airports. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 242: 34–42.
- Jeffery R F, Buschke F T. 2019. Urbanization around an airfield alters bird community composition, but not the hazard of bird-aircraft collision. *Environmental Conservation*, 46(2): 124–131.
- Jiang X L, Zhang W G, Wang G. 2007. Effects of different components of diversity on productivity in artificial plant communities. *Ecological Research*, 22(4): 629–634.
- Kowarik I. 2011. Novel urban ecosystems, biodiversity, and conservation. *Environmental Pollution*, 159(8/9): 1974–1983.
- Kraft N J, Ackerly D D. 2010. Functional trait and phylogenetic tests of community assembly across spatial scales in an Amazonian forest. *Ecological Monographs*, 80(3): 401–422.
- Laliberté E, Legendre P. 2010. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology*, 91(1): 299–305.
- Mahmoudi S, Ilanloo S S, Shahrestanaki A K, et al. 2016. Effect of human-induced forest edges on the understory bird community in Hyrcanian forests in Iran: implication for conservation and management. *Forest Ecology and Management*, 382: 120–128.
- Mallord J W, Dolman P M, Brown A F, et al. 2007. Linking recreational disturbance to population size in a ground-nesting passerine. *Journal of Applied Ecology*, 44(1): 185–195.
- Mao Q, Liao C, Wu Z, et al. 2019. Effects of land cover pattern along urban-rural gradient on bird diversity in wetlands. *Diversity*, 11(6): 86.
- Maure L A, Rodrigues R C, Alcântara Â V, et al. 2018. Functional redundancy in bird community decreases with riparian forest width reduction. *Ecology and Evolution*, 8(21): 10395–10408.
- Morlon H, Schwikl D W, Bryant J A, et al. 2011. Spatial patterns of phylogenetic diversity. *Ecology Letters*, 14(2): 141–149.
- Mouillot D, Graham N A, Villéger S, et al. 2013. A functional approach reveals community responses to disturbances. *Trends in Ecology and Evolution*, 28(3): 167–177.
- Pagel M. 1994. Detecting correlated evolution on phylogenies: a general method for the comparative analysis of discrete characters. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 255(1342): 37–45.
- Pellissier V, Cohen M, Boulay A, et al. 2012. Birds are also sensitive to landscape composition and configuration within the city centre. *Landscape and Urban Planning*, 104(2): 181–188.
- Pennell C G, Popay A J, Rolston M P, et al. 2016. Avian unique endophyte technology: Reduced insect food source at airports. *Environmental Entomology*, 45(1): 101–108.
- Petchey O L, Gaston K J. 2002. Functional diversity (FD), species richness and community composition. *Ecology Letters*, 5(3): 402–411.
- Pfeiffer M B, Blackwell B F, De Vault T L. 2020. Collective effect of landfills and landscape composition on bird-aircraft collisions. *Human-Wildlife Interactions*, 14(1): 43–54.
- Pfeiffer M B, Kougher J D, De Vault T L. 2018. Civil airports from a landscape perspective: A multi-scale approach with implications for reducing bird strikes. *Landscape and Urban Planning*, 179: 38–45.
- Renner S C, Waltert M, Mühlberg M. 2006. Comparison of bird communities in primary vs. young secondary tropical montane cloud forest in Guatemala. *Biodiversity and Conservation*, 15(4): 1545–1575.
- Si X, Cadotte M W, Zeng D, et al. 2017. Functional and phylogenetic structure of island bird communities. *Journal of Animal Ecology*, 86(3): 532–542.
- Sol D, González-Lagos C, Moreira D, et al. 2014. Urbanisation tolerance and the loss of avian diversity. *Ecology Letters*, 17(8): 942–950.
- Soldatini C, Geogalas V, Torricelli P, et al. 2010. An ecological approach to birdstrike risk analysis. *European Journal of Wildlife Research*, 56(4): 623–632.

- Steele W K, Weston M A. 2021. The assemblage of birds struck by aircraft differs among nearby airports in the same bioregion. *Wildlife Research*, 48(5): 422–425.
- Stegen J C, Hurlbert A H. 2011. Inferring ecological processes from taxonomic, phylogenetic and functional trait β -diversity. *PLoS ONE*, 6(6): e20906.
- Thompson I D, Guariguata M R, Okabe K, et al. 2013. An operational framework for defining and monitoring forest degradation. *Ecology and Society*, 18(2): 20–42.
- Thuiller W, Pollock L J, Gueguen M, et al. 2015. From species distributions to meta-communities. *Ecology Letters*, 18(12): 1321–1328.
- Tuomisto H, Ruokolainen L, Ruokolainen K. 2012. Modelling niche and neutral dynamics: On the ecological interpretation of variation partitioning results. *Ecography*, 35(11): 961–971.
- Viljoen I M, Bouwman H. 2016. Conflicting traffic: Characterization of the hazards of birds flying across an airport runway. *African Journal of Ecology*, 54(3): 308–316.
- Villéger S, Grenouillet G, Brosse S. 2013. Decomposing functional β -diversity reveals that low functional β -diversity is driven by low functional turnover in European fish assemblages. *Global Ecology and Biogeography*, 22(6): 671–681.
- Wilman H, Belmaker J, Simpson J, et al. 2014. EltonTraits 1.0: Species-level foraging attributes of the world's birds and mammals. *Ecological Archives* E095-178. *Ecology*, 95(7): 2027–2027.
- Winter M, Devictor V, Schweiger O. 2013. Phylogenetic diversity and nature conservation: Where are we? *Trends in Ecology and Evolution*, 28(4): 199–204.
- Wuczyński A. 2016. Farmland bird diversity in contrasting agricultural landscapes of southwestern Poland. *Landscape and Urban Planning*, 148: 108–119.
- Weideman E A, Slingsby J A, Thomson R L, et al. 2020. Land cover change homogenizes functional and phylogenetic diversity within and among African Savanna bird assemblages. *Landscape Ecology*, 35(1): 145–157.
- Whittaker R J, Field W R. 2001. Scale and species richness: Towards a general, hierarchical theory of species diversity. *Journal of Biogeography*, 28(4): 453–470.
- 王彦平, 宋云枫, 钟雨茜, 等. 2021. 中国鸟类的生活史和生态学特征数据集. *生物多样性*, 29(9): 1149–1153.
- 约翰·马敬能, 卡伦·菲利普斯, 何芬. 2000. 中国鸟类野外手册. 长沙: 湖南教育出版社, 1–571.
- 郑光美. 2017. 中国鸟类分类与分布名录. 3 版. 北京: 科学出版社, 1–512.