

南京禄口国际机场鸟类群落功能和谱系多样性及鸟击防范研究

周雨桐^{1,2}, 徐嘉晖², 胡东方³, 赵 阳³, 李权衡², 孙健翔², 陈 婉¹,
常 青², 李 鹏^{2,4}, 胡超超^{2,5}

(1.江苏开放大学环境生态学院,江苏 南京 210036)

(2.南京师范大学生命科学学院,江苏 南京 210023)

(3.南京禄口国际机场,江苏 南京 211113)

(4.江苏省农业生物多样性培育与利用研究中心,江苏 南京 210014)

(5.南京师范大学分析测试中心,江苏 南京 210023)

[摘要] 随着航空业的发展,野生动物与飞机之间的冲突愈演愈烈. 研究机场周围鸟类群落多样性对鸟击防范工作具有重要作用. 本研究于 2017 年 11 月~2019 年 12 月,采用样点法对南京禄口国际机场及其周边的 4 种生境(农田、湿地、林地、城镇),共计 27 个样点的鸟类群落进行调查. 经过调查,共记录鸟类 149 种,隶属于 16 目 44 科,其中物种数最多的为雀形目(Passeriformes),其次为鸽形目(Charadriiformes)鸟类. 种群个体数量最多的为牛背鹭(*Bubulcus ibis*),然后从多到少依次为白鹭(*Egretta garzetta*)、云雀(*Alauda arvensis*)等. 生境类型对鸟类的谱系和功能多样性具有显著影响. 湿地鸟类物种数最多,但个体数较少. 季节也对鸟类群落具有显著影响. 城镇和湿地鸟类群落的标准效应值与零假设差异不显著,它们表现为群落发散,随机生态过程影响了它们的群落构建;而林地和农田群落的标准效应值与零假设差异显著,它们表现为群落聚集,主要受到生境过滤作用的影响. 鸟类危险指数分析表明南京禄口国际机场危险等级非常高的鸟类是苍鹭(*Ardea cinerea*)、斑嘴鸭(*Anas zonorhyncha*)和环颈雉(*Phasianus colchicus*). 本研究为机场区域鸟击防范提供了一定的科学管理依据.

[关键词] 鸟击,物种多样性,谱系多样性,功能多样性

[中图分类号] X176 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2023)03-0069-10

Functional and Phylogenetic Bird Diversity and Bird Strike Avoidance at Nanjing Lukou International Airport

Zhou Yutong^{1,2}, Xu Jiahui², Hu Dongfang³, Zhao Yang³, Li Quanheng², Sun Jianxiang²,
Chen Wan¹, Chang Qing², Li Peng^{2,4}, Hu Chaochao^{2,5}

(1.College of Environment and Ecology,Jiangsu Open University,Nanjing 210036,China)

(2.School of Life Sciences,Nanjing Normal University,Nanjing 210023,China)

(3.Nanjing Lukou International Airport,Nanjing 211113,China)

(4.Jiangsu Agricultural Biodiversity Cultivation and Utilization Research Center,Nanjing 210014,China)

(5.Analytical and Testing Center,Nanjing Normal University,Nanjing 210023,China)

Abstract: With the development of the aviation industry, conflicts between wildlife and planes have become increasingly frequent. Studies on the diversity of bird communities around airports play an important role in bird strike prevention work. From November 2017 to December 2019, this study used a sample point method to investigate the bird communities in 4 habitats (farmland, wetland, forest, and urban areas) at a total of 27 point transect around Nanjing Lukou International Airport. After two years of field surveys, a total of 149 bird species were recorded, belonging to 16 orders and 44 families, with the most species belonging to the Passeriformes order and the second most belonging to the Charadriiformes order. The species with the largest population is Cattle Egret (*Bubulcus ibis*), followed by the Little Egret (*Egretta garzetta*), the Eurasian Skylark (*Alauda arvensis*). Habitat type had a significant impact on the phylogenetic and functional diversity of

收稿日期:2023-02-24.

基金项目: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(100605-2022-KY-00210).

通讯作者:陈婉,博士,副教授,研究方向:动物生态学. E-mail:544934275@qq.com

bird community, with wetland birds having the most species but fewer individuals. Season also had a significant impact on the bird community. The standard effect size (SES) values of urban and wetland bird communities were not significantly different from the t test, indicating community divergence and the influence of random ecological processes on their community assembly. In contrast, the SES values of forest and farmland bird communities were significantly different from the t test, indicating community aggregation and primarily influenced by habitat filtering. Bird hazard index analysis shows that the species with very high danger levels at Nanjing Lukou Airport are Grey Heron (*Ardea cinerea*), Eastern Spot-billed Duck (*Anas zonorhyncha*), and Common Pheasant (*Phasianus colchicus*). This study provides a scientific basis for the management and control of birds in airport areas.

Key words: bird strike, species diversity, phylogenetic diversity, functional diversity

鸟击是指飞行中的鸟类或蝙蝠与起飞、飞行或降落过程中的航空器相撞击导致的飞行安全事件^[1]。鸟击事件随着航空事业的持续发展不断增加,现已成为影响飞行安全的突出问题^[2]。鸟击事件不仅会带来巨大的经济损失^[3],也会对人类生命安全造成极大威胁^[4]。因此,鸟击防范工作应受到全球航空业的高度重视。

目前鸟击防范研究以调查鸟类多样性为主要手段^[5-7],还有些以生境因子与鸟类群落的关系以及肇事鸟种的物种鉴定为研究重点^[8-9]。基于评估5个容易测量的鸟类物种特征(相对数量部分、相对重量部分、飞行高度、集群系数、活动范围风险系数),通过模型预测以期实现鸟击风险预防系统的标准化^[5]。近年来的鸟击研究逐渐考虑了机场周边空间和时间的影响^[10]。为了解景观布局对鸟击的影响,研究发现土地利用格局对机场周边鸟类群落具有重要影响^[11-12]。考虑到航空运输的快速发展和稀有鸟类数量的不断减少,缺乏对珍稀动物的影响这一研究角度是一个很大的不足。因此,从鸟类生态学的角度,前瞻性地评估不同机场选址方案对鸟类生态的影响,并尽量减少对自然环境的破坏,是一项重要的任务^[13]。目前机场鸟类群落的调查仅用物种相对多度表征物种的重要性,涉及功能多样性和谱系多样性^[14]。而这两项指标,能够提供群落构建及维持稳定机制相关信息,为鸟击事件的防范提供更多数据支持^[15]。

本研究以2017年11月—2019年12月对南京禄口国际机场(下文简称为南京机场)的鸟类群落调查数据为基础,从物种多样性、谱系多样性和功能多样性来分析鸟类群落结构,研究生境类型与季节对鸟类群落的功能和谱系结构及各指标间的影响,探讨在人为干扰的机场环境中鸟类群落的构建过程,对鸟类发生鸟击的风险性进行评估,以科学地指导机场开展鸟击防范工作。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

南京机场(40°04'48"N, 116°35'04"E)位于江苏省南京市南侧,距离市中心直线距离约35.8 km。属亚热带季风气候,雨量充沛,年均降水量1 200 mm,四季分明,年平均温度15.4℃。周边山丘、河湖、林地兼备,环境异质性高,野生动植物资源丰富。

1.2 生境类型

本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>)下载南京机场周边生境类型数据。结合遥感影像和野外实地调查,根据鸟类栖息地状况,将生境划分为农田、林地、湿地和城镇4种(图1)。用ArcGIS 10.0软件将生境类型划分为对鸟类具有重要影响的4种,其面积占比从高到低依次为:农田(59.49%)、建设用地(22.14%)、林地(12.52%)和湿地(5.85%)。

1.3 研究方法

1.3.1 调查方法

本研究共设置27个样点,其中农田9个样点、城镇6个样点、湿地7个样点、林地5个样点(图2)。调查时间为2017年11月—2019年12月,每月1次鸟类调查。调查选取晴朗无风的2 d~4 d,调查时间为日出到日出后的3 h以及日落前至日落的3 h,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》^[16],居留型参考《中国鸟类分类与分布名录》(第三版)^[17],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。

根据江苏省气候特点,春季迁徙期为3—5月,夏季繁殖期为6—8月,秋季迁徙期9—11月,越冬期为第一年12月至次年2月。

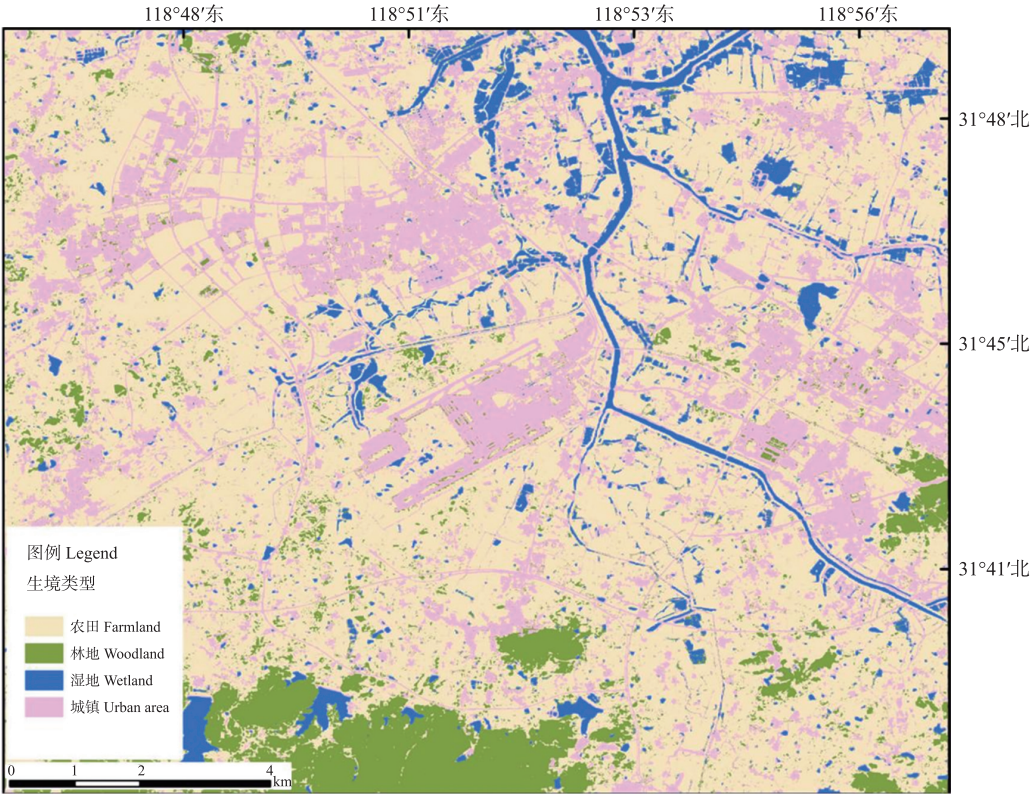


图 1 南京机场周边生境现状

Fig. 1 Habitat distribution around Nanjing Lukou International Airport

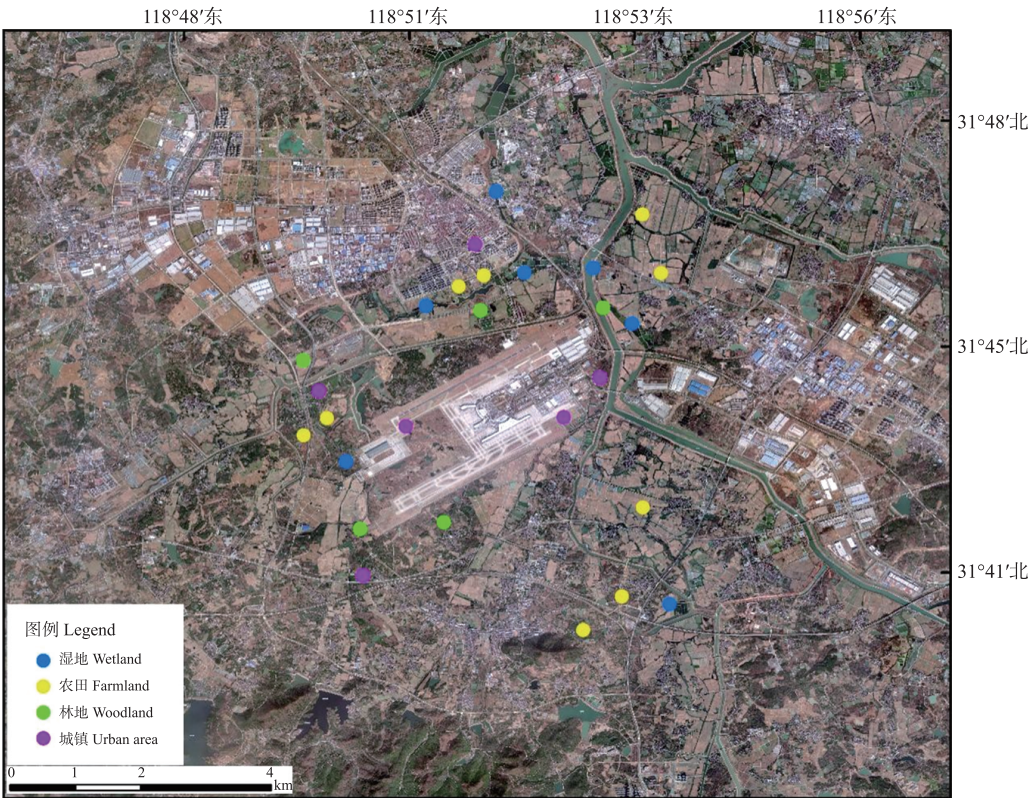


图 2 样点分布图

Fig. 2 Sampling sites of the avian survey in and around Nanjing Lukou International Airport

1.3.2 分析方法

(1)物种多样性

包括 Shannon-Wiener 指数(H')、Simpson 指数(D)和 Pielou 指数(J').
计算公式为

$$H' = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i,$$
$$D = 1 - \sum_{i=1}^s p_i^2,$$
$$J' = H' / \ln S.$$

p_i 为鸟类物种 i 的个体数占有所有鸟类物种个体总数的比值; S 为物种数目.

(2)功能多样性

与基于物种分类的多样性指标相比,功能多样性有更大的优点:功能多样性能更好地揭示群落聚集的过程^[18],且能指示群落所受到的扰动大小^[19]或群落环境梯度^[20]. 功能多样性包括功能丰富度(functional richness)、功能均匀度(functional evenness)以及功能分异度(functional divergence)3 个方面^[19]. 本研究选取体重、食性和取食层作为觅食和栖息生境选择有关的性状,其中体重为连续变量,食性(食无脊椎动物、食植、食鱼)和取食层(水面、地面、地面-水面混合、林地地下层、林地中高层)是分类变量^[7].

(3)谱系多样性

群落谱系多样性,建立物种库,在 BirdTree(<http://birdtree.org>)以 Ericson All Species 为建树资源下载对应物种的 2,000 棵随机树,使用 BEAST 中的 TreeAnnotator 2.4 软件合成一致树(consensus tree)^[16]. 计算平均成对谱系距离(mean pairwise distance,MPD)以及最近种间谱系距离(mean nearest taxon distance,MNTD). 为确定共生物种在谱系上是聚集还是发散,使用独立的交换算法随机生成 999 个物种丰富度和发生频率与所观察到的群落相同的群落(零模型,null model),并计算零模型 MPD 和 MNTD 的平均值. 将观测到的 MPD 和 MNTD 与该平均值作比较,计算谱系亲缘关系指数(nearest relative index,NRI)和最近种间亲缘关系指数(nearest taxon index,NTI). 计算公式为:

$$NRI/NTI = (M_{null} - M_{obs}) / SD_{null}$$

式中, M_{null} 为随机产生的 999 个 MPD 或 MNTD 零模型模拟值的平均值, M_{obs} 是 MPD 或 MNTD 的观测值, SD_{null} 为 999 个随机值的标准差. 若 NRI 和 NTI 大于 0,表示群落谱系聚集,反之群落谱系发散^[21].

(4)危险指数

鸟类危险指数:可能性=(集群大小+飞行高度风险系数+活动范围风险系数) $\times 100/3$;严重性=(相对数量+相对重量) $\times 100/2$,式中,相对数量=(某种鸟的个体数/数量最多的鸟种个体数) $\times 100$,相对重量=(某种鸟的体重/体重最重的鸟体重) $\times 100$ ^[5]. 由于鸟击高发区域在 40 m 左右的高空,40 m 以下鸟击风险系数与高度呈正相关,40 m 以上呈负相关,因此,将调查观察到的鸟类飞行高度分为 5 个等级:0 m~<5 m,5 m~<30 m,30 m~<50 m,50 m~<100 m, ≥ 100 m. 鸟类的飞行高度风险系数(H)分别赋值:0.1,0.5,1.0,0.5,0.1. 对于鸟类集群大小(聚类系数),按鸟类集群数量可分为 4 个等级:[1,3],[3,20],[20,100],100 以上,集群大小分别赋值:0,0.2,0.5,1. 对于鸟类活动范围风险系数,距机场远近可分为 4 个等级:0 km,0 km~<3 km,3 km~<6 km,6 km~8 km,鸟类的活动范围风险系数分别赋值:0.9,0.75,0.5,0.25. 根据可能性与严重性判定鸟类危险指数(表 1)^[5].

表 1 机场鸟击危险指数矩阵
Table 1 Airport birdstrike risk assessment matrix

		严重性				
		非常高	高	中	低	非常低
可能性	非常高	3	3	3	2	2
	高	3	3	3	2	2
	中	3	3	2	1	1
	低	2	2	1	1	1
	非常低	1	1	1	1	1

注:(1)如果这只鸟是猛禽,危险等级加 1;(2)被看到穿过跑道或穿过跑道上空 3 次以上的鸟类的危险等级加 1.

1.4 数据处理

物种多样性使用 *vegan* 包 *diversity* 函数^[22], 功能多样性使用 *FD* 包 *dbFD* 函数^[23], 谱系多样性使用 *picante* 包 *sesmpd* 和 *sesmtd* 函数^[24], 用 *gvlma* 包 *gvlma* 函数进行正态性检验, 物种累计曲线和箱型图用 *vegan* 包 *plot* 函数绘制. 用 *multcomp* 包 *aov* 函数进行单因子方差分析 (one-way ANOVA), 用 Tukey HSD 进行多重比较; 使用 Kruskal-Wallis test 进行非参数检验, Bonferroni correction 进行多重比较. 使用 *t.test* 函数对 NRI 和 NTI 做 *t* 检验 (One-sample *t*-test)^[7]. 显著性水平设置为 $\alpha=0.05$. 数据处理和绘图在 R 4.0.2 中完成^[25].

2 结果与讨论

2.1 南京机场鸟类种类组成

本研究共观测到鸟类 149 种, 隶属于 16 目 44 科. 物种积累曲线分析表明物种丰富度接近渐近线, 表明调查的鸟类物种调查数据完整性较高 (图 3).

从物种组成上看, 雀形目 (Passeriformes) 的鸟类物种数最多, 共计 23 科 65 种, 占总物种数的 43.62%; 其次为 鸮形目 (Charadriiformes), 共计 7 科 27 种, 占总物种数的 18.12% (图 4). 种群个体数量最多的为牛背鹭 (*Bubulcus ibis*), 然后从多到少依次为白鹭 (*Egretta garzetta*)、云雀 (*Alauda arvensis*)、珠颈斑鸠 (*Stigmatopelia chinensis*)、白头鹎 (*Pycnonotus sinensis*)、八哥 (*Acridotheres cristatellus*)、灰椋鸟 (*Sturnus cineraceus*) (图 4). 从空间分布上看, 4 种生境中各具特有物种, 城镇、林地、农田、湿地特有种分别有 12 种、27 种、7 种和 22 种. 从时间分布上看, 4 个季节也各具特有物种, 春季、夏季、秋季、冬季特有种分别有 22 种、20 种、5 种、22 种.

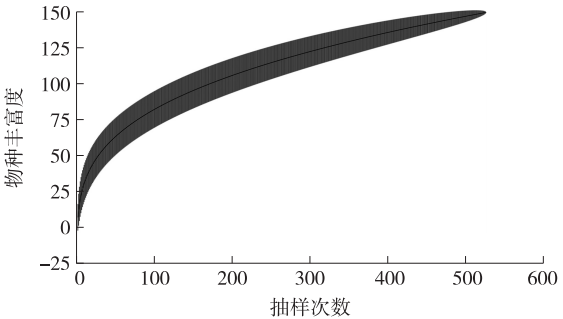


图 3 基于抽样次数的物种累计曲线 (纵线表示标准差)
Fig. 3 Species accumulation curve based on the samples of survey, with vertical lines representing standard deviation

2.2 生境类型及季节对群落多样性的影响

2.2.1 生境类型对群落多样性的影响

在四种生境中, 观测到的鸟类个体数按从大到小是城镇、林地、农田、湿地. 在湿地被观测到的鸟类总个体数最少, 但被观测到的鸟类物种数最多, 物种数与城镇相同. 农田被观测到的鸟类物种数最低. 对于均匀度, 湿地和林地较高, 城镇较低. 香农威纳指数和辛普森指数变化趋势大致相同 (表 2).

表 2 各生境鸟类群落物种多样性比较
Table 2 Bird diversity between different habitats

生境	总个体数	平均个体数	物种丰富度	香农威纳指数	辛普森指数	Pielou 均匀度指数
湿地	4865	5.68	88	1.23	0.6	0.78
农田	6728	7.64	61	1.18	0.58	0.74
林地	6941	7.46	87	1.55	0.69	0.77
城镇	10781	10.06	88	1.44	0.62	0.69

鸟类群落谱系和功能多样性在生境间显著差异. 功能分散度 *FD* 满足参数检验, 在生境间差异显著 ($F_{3,522}=10.52, P<0.05$), Tukey's HSD 多重比较分析表明, 林地和城镇的 *FD* 显著高于湿地和农田. 其他指标均不满足正态性, 使用 Kruskal-Wallis test 检验表明生境对鸟类群落谱系和功能多样性具有显著影响. $PD[H_{(3,N=522)}=43.62, P<0.05]$, $MFD[H_{(3,N=522)}=120.37, P<0.05]$, $MPD[H_{(3,N=522)}=71.21, P<0.05]$, $FD.MNTD[H_{(3,N=522)}=83.61, P<0.05]$ 和 $PD.MNTD[H_{(3,N=522)}=72.77, P<0.05]$ 在不同生境均有显著性差异 (图 5).

2.2.2 季节对群落多样性的影响

南京机场周边鸟类的物种丰富度及多度在不同季节存在差异, 鸟类物种丰富度在春季最高, 为 95 种; 其次为冬季和夏季, 分别为 83 种和 76 种; 秋季最低为 72 种. 冬季物种多度最高, 共记录到鸟类 9 535 只; 其次为秋季和夏季, 分别记录到 7 513 只和 6 770 只; 春季物种多度最低, 共记录到 5 487 只. 随着季节更

替, 鸟类群落的香农威纳、辛普森指数呈现出相似的变化规律; 与其余季节比较, 春季、夏季的均匀度更高, 冬季最低(表 3).

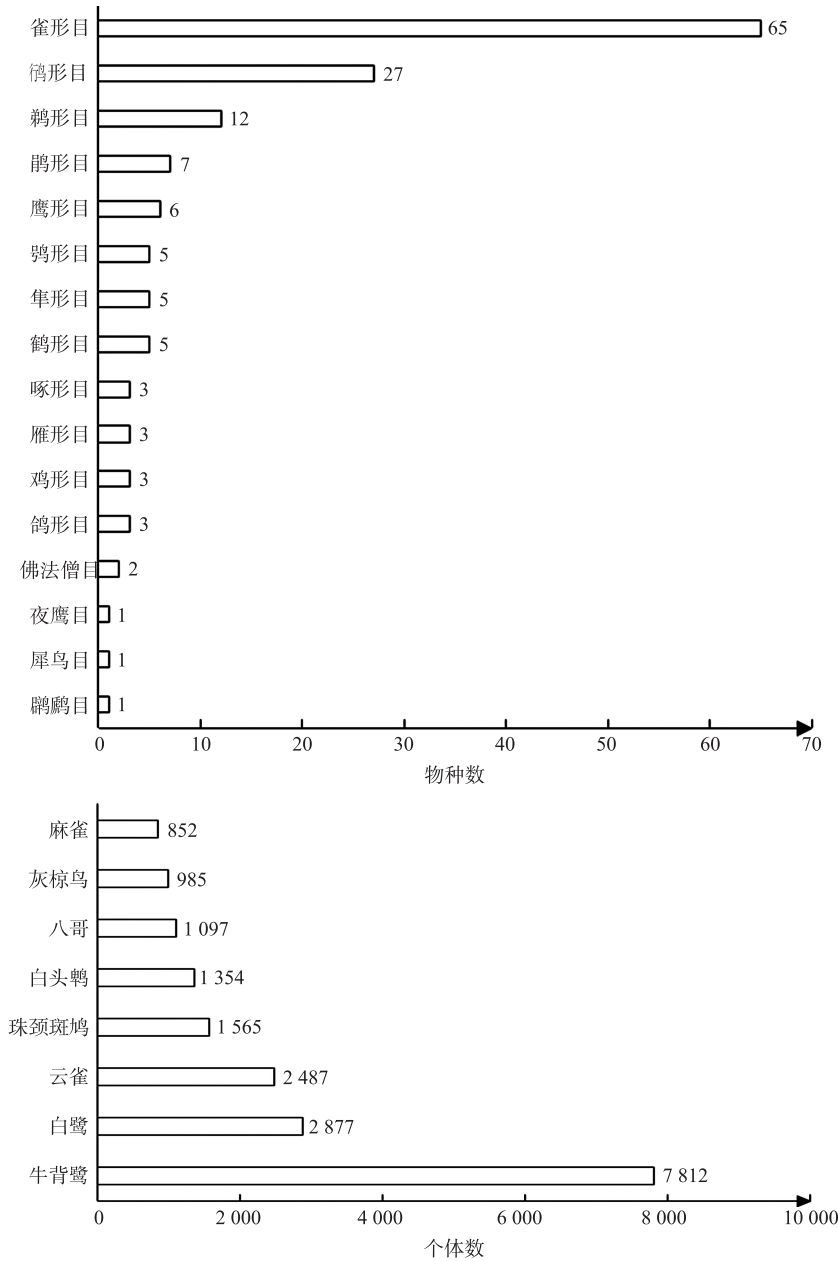


图 4 南京机场鸟类物种数和个体数

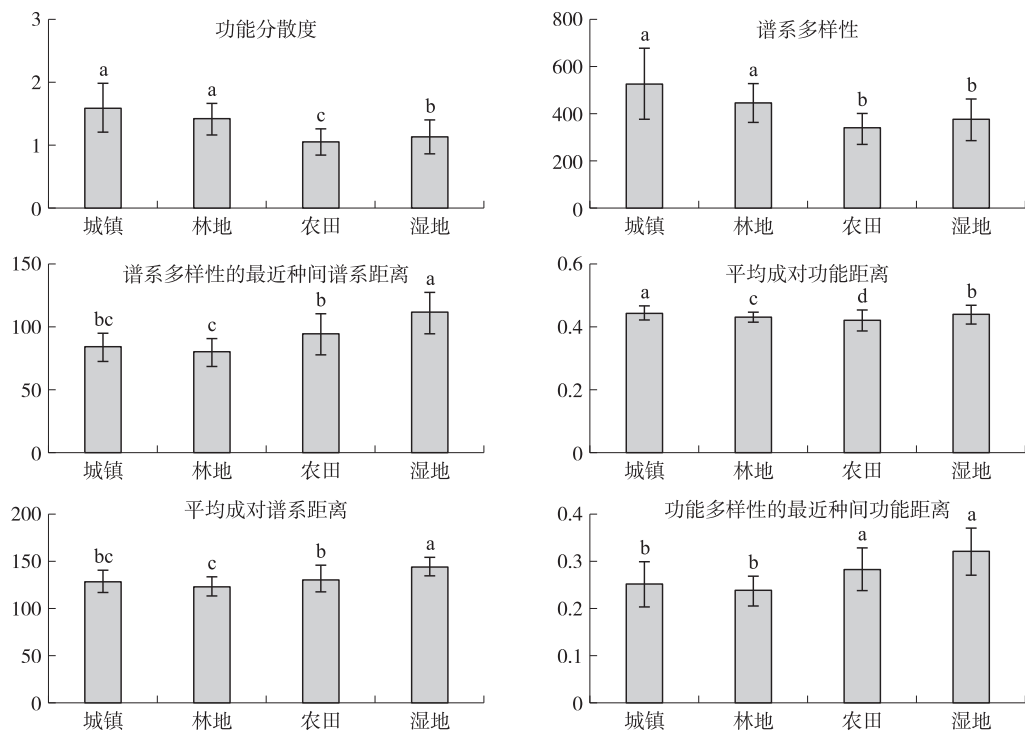
Fig. 4 Species richness and abundance at Nanjing Lukou International Airport

表 3 各季节鸟类群落物种多样性比较

Table 3 Bird diversity between different seasons

季节	总个体数	平均个体数	物种丰富度	香农威纳指数	辛普森指数	Pielou 均匀度指数
春	5497	5.77	95	1.47	0.67	0.79
夏	6770	6.52	76	1.42	0.66	0.80
秋	7513	9.24	72	1.16	0.56	0.70
冬	9535	10.20	83	1.25	0.59	0.69

平均成对谱系距离 $MPD[H_{(3,N=522)} = 11.13, P = 0.01]$ 与 $PD[H_{(3,N=522)} = 11.18, P = 0.01]$ 在季节间差异显著(图 6). $MFD[H_{(3,N=522)} = 4.91, P = 0.18]$, $FD.MNTD[H_{(3,N=522)} = 4.39, P = 0.22]$, $PD.MNTD[H_{(3,N=522)} = 5.33, P = 0.15]$ 在季节间差异不显著.



短线代表标准差 (standard deviation), 字母表示多重比较结果, 功能分散度使用 Tukey HSD, 其他指标使用 Bonferroni correction.

图 5 南京机场各生境鸟类功能分散度、谱系多样性、最近种间谱系距离、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、最近种间功能距离的变化

Fig. 5 Bird species FDis、PD、PD.MNTD、FD.MPD、PD.MPD、FD.MNTD in each habitat at Nanjing Lukou International Airport

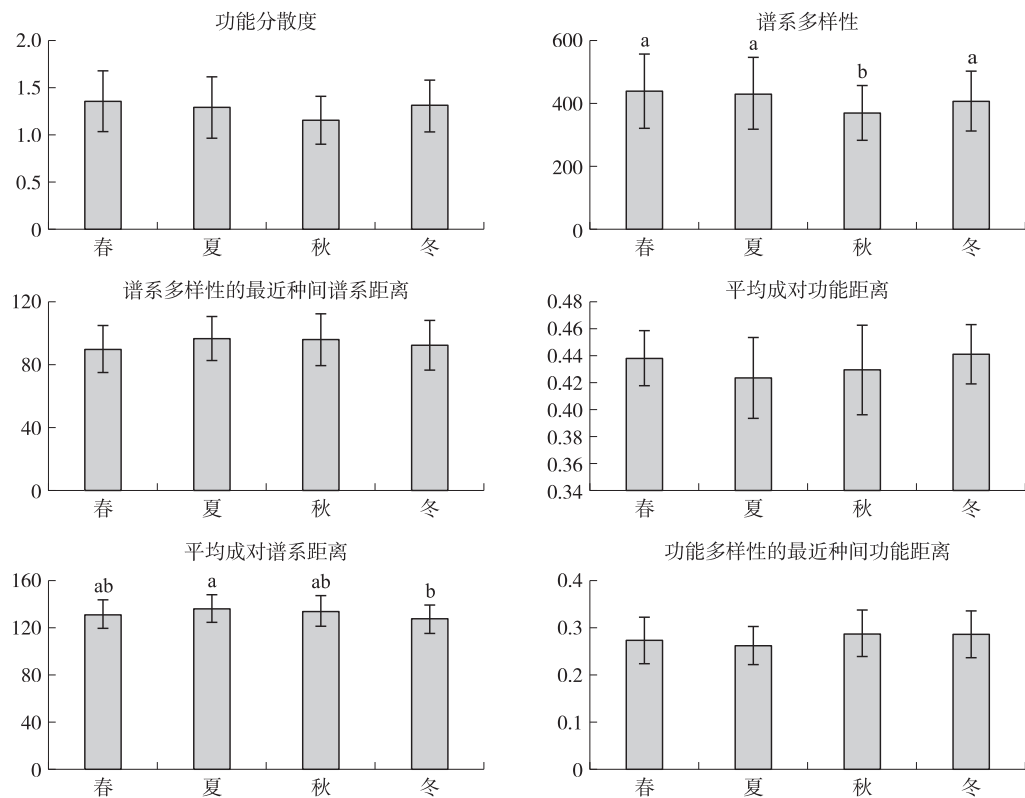


图 6 南京机场各季节鸟类功能分散度、谱系多样性、最近种间谱系距离、多度加权的平均成对功能距离、多度加权的平均成对谱系距离、最近种间功能距离的变化

Fig. 6 Bird species FDis、PD、PD.MNTD、FD.MPD、PD.MPD、FD.MNTD in each season at Nanjing Lukou International Airport

2.3 群落构建

农田和林地生境的平均成对谱系距离的标准化效应值 (MPD.SES) ($t_{\text{农田}} = -10.04, P < 0.05; t_{\text{林地}} = -14.51, P < 0.05$) 显著小于 0. 农田和林地生境的平均成对功能距离的标准化效应值 (MFD.SES) ($t_{\text{农田}} = -10.25, P < 0.05; t_{\text{林地}} = -13.27, P < 0.05$) 显著小于 0(表 4).

表 4 平均成对谱系距离的标准化效应值、平均成对功能距离的标准化效应值、最近种间谱系距离的标准化效应值、最近种间功能距离的标准化效应值在各生境的变化

Table 4 Patterns of the standardized effect size of MPD, MFD, PD, MNTD and FD, MNTD in each habitat							
生境	指标	<i>t</i> 值	自由度	生境	指标	<i>t</i> 值	自由度
城镇	MPD.SES	-11.33 *	107	农田	MPD.SES	-10.040 *	155
	MFD.SES	-7.76	107		MFD.SES	-10.250 *	155
	PD.MNTD.SES	-12.38 *	107		PD.MNTD.SES	-12.700 *	155
	FD.MNTD.SES	-8.43	107		FD.MNTD.SES	-10.980 *	155
林地	MPD.SES	-14.51 *	107	湿地	MPD.SES	-5.260	143
	MFD.SES	-13.27 *	107		MFD.SES	-5.810	143
	PD.MNTD.SES	-14.89 *	107		PD.MNTD.SES	-5.260	143
	FD.MNTD.SES	-13.15 *	107		FD.MNTD.SES	-4.623	143

注: * 表示与随机值有显著差异.

2.4 鸟类危险指数分析

南京机场危险等级高的鸟类(危险等级=3)一共有 40 种. 这 40 种鸟类中严重性非常高的鸟类($100 > \text{Severity} > 40$)有 3 种, 分别是苍鹭 (*Ardea cinerea*), 斑嘴鸭 (*Anas zonorhyncha*) 和环颈雉 (*Phasianus colchicus*); 可能性非常高的鸟类($100 > \text{Likelihood} > 70$)有 4 种, 分别是绿头鸭 (*Anas platyrhynchos*), 夜鹭 (*Nycticorax nycticorax*), 喜鹊 (*Pica pica*) 和灰椋鸟 (*Spodiopsar cineraceus*).

2.5 讨论

禄口机场及其周边的雀形目与鸽形目的物种数最多, 麻雀种群数量最大, 灰椋鸟次之. 物种多样性体现了群落中物种的共存情况^[26]. 本研究发现南京机场鸟类总个体数在城镇生境中最多(表 2), 可能缺乏天敌, 筑巢和捕食的险境减少^[27]. 但 Pielou 指数在城镇生境中最低(表 2), 城市化使鸟类栖息地破碎化, 城镇内部环境相似, 对鸟类的选择压力一致, 降低了鸟类群落均匀度^[28-29].

功能多样性是指影响群落/生态系统功能的物种性状值和范围, 可以解释和预测生态系统结构和功能, 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^[30]. 随着干扰和生境破碎化的加剧, 功能多样性将下降^[31-32]. 农田的功能分散度最低, 城镇、林地和湿地的鸟类群落功能分散度较高(图 5), 说明物种间生态位重叠程度低, 各种生境资源利用率高, 生态位空间得到了较充分的利用, 因而为更多功能类群鸟类提供栖息场所^[33-34]. 食物资源是影响鸟类数量和分布的决定因素^[33]. 春季、夏季两种季节的鸟类群落功能分散度较高, 说明该季节的鸟类对空间、时间的资源利用较充分. 谱系多样性表明了生境间鸟类群落存在的亲缘关系, 亲缘关系越密切, 指数越低. 本研究显示南京机场及周边的城镇、林地、农田和湿地 4 种生境中谱系多样性指数(PD)较高, 变化趋势与功能多样性指标(功能分散度, FDis)变化趋势相似. 城镇生境的鸟类群落谱系多样性和功能分散度最高(图 5). 表明城镇生境中鸟类物种亲缘关系较远, 且共用生态位较少, 使生态位空间得到充分利用^[35-36].

南京机场周边生境的平均成对功能距离的标准化效应值 (SES.MFD) 和平均成对谱系距离的标准化效应值 (SES.MPD) 显著小于 0(表 4), 推测鸟类群落在功能和谱系上呈聚集状态, 可能由环境过滤主导群落构建. 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, 生境过滤更有可能发生在受人为干扰的生境中^[37]. 湿地的平均成对功能/谱系距离的标准化效应值与平均成对功能/谱系距离的随机值无显著差异(表 4), 表明湿地和城镇的群落呈现主要受随机生态过程影响. 林地和农田的平均/最近成对功能/谱系距离的标准化效应值远低于平均/最近成对功能/谱系距离的随机值, 暗示生境过滤驱动着林地和农田生境群落谱系和功能的聚集. 中性理论假定所有物种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^[38-39].

3 结论

本研究表明南京机场及周边区域的 4 种生境类型(农田、城镇、湿地和林地)对鸟类群落具有显著性

影响,对机场附近的栖息地在鸟击防范工作中具有重要的作用. 季节的更替对鸟类群落也有显著的影响. 对机场周边鸟类群落生境和季节的研究,可以掌握生境类型与鸟击风险的关系及潜在危害,为机场环境改造提供理论依据.

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,特此致谢!

[参考文献]

- [1] 陈建琴,宋涛,彭昭杰,等. 池州九华山机场鸟类多样性调查及鸟击防范措施初探[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2016,39(2):96-105.
- [2] COGHLAN M L, WHITE N E, MURRAY D C, et al. Metabarcoding avian diets at airports: implications for birdstrike hazard management planning[J]. *Investigative genetics*, 2013, 4(1): 1-10.
- [3] JEFFERY R F, BUSCHKE F T. Urbanization around an airfield alters bird community composition, but not the hazard of bird-aircraft collision[J]. *Environmental conservation*, 2019, 46(2): 124-131.
- [4] DOLBEER R A, BEGIER M J, MILLER P R, et al. Wildlife strikes to civil aircraft in the United States, 1990-2021[R]. Washington, DC, USA: Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2013.
- [5] HU Y, XING P, YANG F, et al. A birdstrike risk assessment model and its application at Ordos airport, China[J]. *Scientific reports*, 2020, 10(1): 1-7.
- [6] 苗可儿,钱薇雅,张俊,等. 功能、谱系发育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[J]. *动物学杂志*, 2023, 58(2): 182-197.
- [7] 陈婉,袁思佳,钱汝恩,等. 扬州泰州国际机场鸟类多样性及鸟击防控[J]. *生态科学*, 2022, 41(6): 193-201.
- [8] CHEN W, MIAO K E, LIU Y Z, et al. Using DNA barcoding and field surveys to guide wildlife management at Nanjing Lukou International Airport, China[J]. *Ecology and evolution*. 2023, 13(4): e10005.
- [9] YANG R, WU X, YAN P, et al. Using DNA barcodes to identify a bird involved in a birdstrike at a Chinese Airport[J]. *Molecular biology reports*, 2010, 37(7): 3517-3523.
- [10] SHAO Q, ZHOU Y, ZHU P. Spatiotemporal analysis of environmental factors on the birdstrike risk in high plateau airport with multi-scale research[J]. *Sustainability*, 2020, 12(22): 9357.
- [11] PFEIFFER M B, KOUGHIER J D, DEVAULT T L. Civil airports from a landscape perspective: a multi-scale approach with implications for reducing bird strikes[J]. *Landscape and urban planning*, 2018, 179: 38-45.
- [12] YUAN S J, MIAO K E, QIAN R E, et al. The role of landscape in shaping bird community and implications for landscape management at Nanjing Lukou International Airport[J]. *Ecology and evolution*, 2023, 13(1): e9646.
- [13] ZHAO B, WANG N, FU Q, et al. Searching a site for a civil airport based on bird ecological conservation: an expert-based selection(Dalian, China)[J]. *Global ecology and conservation*, 2019, 20: e00729.
- [14] LI C L, ZHANG Y, ZHA D D, et al. Assembly processes of waterbird communities across subsidence wetlands in China: a functional and phylogenetic approach[J]. *Diversity and distributions*, 2019, 16(42): 1-12.
- [15] 张敏,车先丽,彭逸生,等. 广东雷州湾和汕头沿海湿地越冬水鸟多样性[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(5): 553-559.
- [16] 约翰·马敬能,卡伦·菲利普斯. 中国鸟类野外手册:中文版[M]. 长沙:湖南教育出版社,2000.
- [17] 郑光美. 中国鸟类分类与分布名录[M]. 3版. 北京:科学出版社,2017.
- [18] CORNWELL W K, SCHWILK D W, ACKERLY D D. A trait-based test for habitat filtering: convex hull volume[J]. *Ecology*, 2006, 87(6): 1465-1471.
- [19] VILLÉGER S, MASON N, MOUILLOT D. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology[J]. *Ecology*, 2008, 89(8): 2290-2301.
- [20] SI X, CADOTTE M W, ZENG D, et al. Functional and phylogenetic structure of island bird communities[J]. *Journal of animal ecology*, 2017, 86(3): 532-542.
- [21] SUKUMARAN J, HOLDER M T. DendroPy: a Python library for phylogenetic computing[J]. *Bioinformatics*, 2010, 26(12): 1569-1571.
- [22] OKSANEN J, BLANCHET F G, FRIENDLY M, et al. Vegan: community ecology package. R package Version 2.5-6[CP/OL]. R Core Team, 2019[2020-11-05]. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan/>.

- [23] LALIBERTÉ E, LEGBRE P, SHIPLEY B. FD: measuring functional diversity (FD) from multiple traits, and other tools for functional ecology. R package Version 1.0-12 [CP/OL]. R Core Team, 2014 [2020-11-05]. <https://CRAN.R-project.org/package=FD/>.
- [24] KEMBEL S W, ACKERLY D D, BLOMBERG S P. et al. Picante: integrating phylogenies and ecology. R package Version 1.8.2 [CP/OL]. R Core Team, 2020 [2020-11-05]. <https://CRAN.R-project.org/package=picante/>.
- [25] R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing [CP/OL]. Beijing, China, 2020 [2020-06-30]. <https://www.r-project.org/>.
- [26] WHITTAKER R J, WILLIS K J, FIELD R. Scale and species richness: towards a general, hierarchical theory of species diversity [J]. Journal of biogeography, 2001, 28(4): 453-470.
- [27] BENINDE J, VEITH M, HOCHKIRCH A. Biodiversity in cities needs space: A meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation [J]. Ecology letters, 2015, 18(6): 581-592.
- [28] PELLISSIER V, COHEN M, BOULAY A, et al. Birds are also sensitive to landscape composition and configuration within the city centre [J]. Landscape and urban planning, 2012, 104(2): 181-188.
- [29] GODDARD M A, DOUGILL A J, BENTON T G. Scaling up from gardens: biodiversity conservation in urban environments [J]. Trends in ecology & evolution, 2010, 25(2): 90-98.
- [30] MAURE L A, RODRIGUES R C, ALCÂNTARA Â V, et al. Functional redundancy in bird community decreases with riparian forest width reduction [J]. Ecology and evolution, 2018, 8(21): 10395-10408.
- [31] MOUILLOT D, GRAHAM N, VILLÉGER S, et al. A functional approach reveals community responses to disturbances [J]. Trends in ecology & evolution, 2013, 28(3): 167-177.
- [32] MAHMOUDI S, ILANLOO S S, SHAHRESTANAKI A K, et al. Effect of human-induced forest edges on the understory bird community in Hyrcanian forests in Iran: implication for conservation and management [J]. Forest ecology and management, 2016, 382: 120-128.
- [33] JIANG X L, ZHANG W G, WANG G. Effects of different components of diversity on productivity in artificial plant communities [J]. Ecological research, 2007, 22(4): 629-634.
- [34] TUOMISTO H, RUOKOLAINEN L, RUOKOLAINEN K. Modelling niche and neutral dynamics: on the ecological interpretation of variation partitioning results [J]. Ecography, 2012, 35(11): 961-971.
- [35] CRAMPTON L H, LONGLAND W S, MURPHY D D, et al. Food abundance determines distribution and density of a frugivorous bird across seasons [J]. Oikos, 2011, 120(1): 65-76.
- [36] MORLON H, SCHWILK D W, BRYANT J A, et al. Spatial patterns of phylogenetic diversity [J]. Ecology letters, 2011, 14(2): 141-149.
- [37] KRAFT N J B, ACKERLY D D. Functional trait and phylogenetic tests of community assembly across spatial scales in an Amazonian forest [J]. Ecological monographs, 2010, 80(3): 401-422.
- [38] CADOTTE M W, TUCKER C M. Should environmental filtering be abandoned? [J]. Trends in ecology & evolution, 2017, 32(6): 429-437.
- [39] BATISTELI A F, TANAKA M O, SOUZA A L T. Bird functional traits respond to forest structure in riparian areas undergoing active restoration [J]. Diversity, 2018, 10(3): 90.

[责任编辑:黄敏]