

杭州不同城市化梯度下鸟类功能多样性差异

马梓贺^{①②} 宋凯^② 李欣海^{②③} 谢文冬^{②③} 王逸飞^{②③} 贾嘉^②
赵金明^④ 方昀^② 张丽荣^⑥ 戎可^{①⑤*} 孙悦华^{②*}

① 东北林业大学野生动物与自然保护地学院 哈尔滨 150040; ② 中国科学院动物研究所动物生态与保护生物学国家重点实验室 北京 100101; ③ 中国科学院大学生命科学学院 北京 100049; ④ 淮北师范大学生命科学学院 淮北 235000;
⑤ 国家林业局野生动物保护学重点开放实验室 哈尔滨 150040; ⑥ 生态环境部环境规划院, 生态保护修复规划研究所, 生物多样性与自然保护地研究中心 北京 100012

摘要: 随着全球城市化的发展, 城区面积不断扩大, 城市周围自然栖息地受到挤压, 面积减小并且变得破碎化。城市化进程会对生态系统功能产生重大影响, 很可能导致鸟类被迫适应城市生境并出现功能性状的同质化。我们对杭州三种不同城市化梯度的样地进行鸟类调查, 其中包括 15 个市区样地、15 个近郊样地和 15 个远郊样地。计算不同城市化程度下不同区域的鸟类物种丰富度和功能多样性, 并对比市区、近郊和远郊样地鸟类功能性状的差异, 探究哪些功能性状会影响鸟类适应城市化生境。研究发现, 远郊样地的鸟类物种丰富度水平最高, 但是近郊样地拥有更高的鸟类功能丰富度。虽然市区的物种丰富度和功能多样性低于近郊和远郊样地, 但市区的物种组成占总体比例也较高, 较高程度的城市绿化支撑了一定程度的鸟类物种多样性水平。市区、近郊和远郊区域鸟类在巢址选择、集群情况和食性方面差异较大。相对于近郊和远郊区域鸟类, 市区鸟类更倾向于选择在树冠筑巢, 而不是地面或灌丛, 并且倾向于形成更大的集群。在食性方面, 市区鸟类取食花果占比相对较高, 取食无脊椎动物相对占比较低。我们没有发现市区、近郊和远郊区域样地鸟类在体征上存在显著差异。

关键词: 城市化; 功能性状; 功能多样性; 鸟类多样性; 杭州

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2024) 06-843-14

Differences in Avian Functional Diversity Along Urbanization Gradients in Hangzhou, China

MA Zi-He^{①②} SONG Kai^② LI Xin-Hai^{②③} XIE Wen-Dong^{②③} WANG Yi-Fei^{②③} JIA Jia^②
ZHAO Jin-Ming^④ FANG Yun^② ZHANG Li-Rong^⑥ RONG Ke^{①⑤*} SUN Yue-Hua^{②*}

① College of Wildlife and Protected Area, Northeast Forestry University, Harbin 150040; ② Key Laboratory of Animal Ecology and Conservation Biology, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; ③ College of Life Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; ④ School of Life Sciences, HuaiBei Normal University, HuaiBei 235000; ⑤ Key Laboratory of Conservation Biology, State Forestry Administration, Harbin 150040; ⑥ Center of Biodiversity and Protected Areas, Institute of Ecological

基金项目 杭州市生物多样性保护与调查评估项目 (No. E390631134);

* 通讯作者, E-mail: rongke@nefu.edu.cn, sunyh@ioz.ac.cn;

第一作者介绍 马梓贺, 男, 硕士研究生; 研究方向: 动物生态学; E-mail: mazhowl@163.com.

收稿日期: 2024-04-29, 修回日期: 2024-06-17 DOI: 10.13859/j.cjz.202424104

Protection and Restoration Planning, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China

Abstract: [Objectives] With the development of global urbanization, urban areas are constantly expanding, and natural habitats around cities are being squeezed, resulting in a decrease in area and an increase in fragmentation. The process of urbanization will have a significant impact on ecosystem functions, which may lead to birds being forced to adapt to urban habitats and exhibiting homogenization of functional traits. However, there is relatively little research on the impact of urbanization on birds in China, especially on the functional traits through which urbanization will affect birds. Therefore, this study aims to understand the differences in bird species richness and functional diversity under urbanization gradients, and whether it supports the moderate disturbance hypothesis. Also, the study compares the differences in functional traits of birds in urban, suburban, and outskirts to explore which functional traits will affect birds' adaptation to urban habitats. **[Methods]** We conducted bird surveys on three different urbanization intensity patches in Hangzhou, including 15 urban patches, 15 suburban patches, and 15 outskirt patches. Each urban survey area with varying levels of urbanization disturbance includes 3 patches of lake water habitats, 5 patches of mountain habitats, and 7 patches of green habitats. We calculate the species richness and functional diversity of birds in different urbanization levels in the region and compare the differences in functional traits of birds in urban, suburban, and outlying patches to explore which functional traits will affect the adaptation of birds to urban habitats. Bird surveys were conducted in November 2022, January to February 2023, March to April 2023, and June 2023. We designed a 1.5 km long survey transect of equal intensity for each patch and recorded the bird species and numbers seen or heard on both sides of the lines. We calculated the species functional richness, functional dispersion, Rao's Quadratic Entropy, and Community Weighted Mean for each patch to evaluate the diversity of bird communities. We selected 30 functional traits to assess avian functional diversity and calculated functional diversity and community-weighted means (Table 1). The first four axes of the PCoA analysis, which accounted for more than 80% of the variation, were used as the new "traits" to calculate functional diversity. Mann-Whitney *U* test was employed to analyze the significance of differences in community-weighted means among different regions. **[Results]** The bird species richness level is highest in outlying patches, but suburban patches have higher bird functional richness (Table 2). Although the species richness and functional diversity in urban areas are lower than those in suburban areas and outlying patches, the overall proportion of species composition in urban areas is also higher, and a higher degree of urban greening supports a certain level of bird species diversity. There are significant differences in nest site selection, clustering, and feeding habits among birds in urban, suburban, and outlying areas (Fig. 3). Compared to birds in suburban and outlying areas, urban birds tend to build nests in tree crowns rather than on the ground or in shrubs (Fig. 5) and are more inclined to form larger groups (Fig. 6). In terms of feeding habits, the proportion of urban birds feeding on flowers and fruits is relatively high, while the proportion of feeding on invertebrates is relatively low (Fig. 4). We did not find significant differences in body morphometrics among birds in urban, suburban, and outlying areas. **[Conclusion]** The moderate disturbance hypothesis of bird diversity under different urbanization gradients in Hangzhou is reflected through the functional diversity of birds. Suburbs with moderate urbanization disturbance intensity have higher functional diversity, while outlying areas have the highest species richness. Urbanization mainly affects birds through functional traits such as feeding habits, nest sites, foraging layers, and flocking behaviours. Among them, flocking behaviours,

nest sites, and feeding habits are the functional trait groups that distinguish urban birds from other birds the most. The low coverage of shrubs in cities, the high risk of human activities from the ground, and the tendency of vegetation types towards landscaping plants may be important factors contributing to significant differences in the feeding habits and nest sites of urban birds. Urban habitats, as a new and unfamiliar environment, are easier for larger groups of birds to adapt to. Improving urban shrub coverage, optimizing the selection of bird-feeding plants in landscaping, increasing and preserving ancient and dead trees, and providing artificial nests are crucial for birds to adapt to urban habitats.

Key words: Urbanization; Functional traits; Functional diversity; Bird diversity; Hangzhou

全球城市化发展迅速,人口大量涌入城市,城市土地显著扩张,其扩张速度甚至快于城市人口的扩张速度(Seto et al. 2010)。有研究预测,到2050年,全球城市覆盖面积将达到170万 km^2 ,约为2012年的1.4倍(Zhou et al. 2019)。一方面,城市化的发展可能导致野生动物栖息地的破坏或碎片化,大量物种由于城市化进程受到直接威胁,导致生物多样性的减少(Grimm et al. 2008, Simkin et al. 2022)。另一方面,城市化在一定程度上也给野生动物带来了新的生存机会。城市绿地公园作为城市景观的一部分,是野生动物的重要栖息地。一些城郊或远郊栖息地尽管受到了城市化的影响,但是由于保留了原始生境,从而可能表现出更高的生物多样性水平。因此,在不可逆转的城市化进程中,保持良好的人类生活环境,同时保持高水平的生物多样性,是未来城市可持续发展的关键问题。

在城市化进程中,城区的自然生境通常会逐步破碎化并相互隔离,从而限制物种的迁移和扩散,难以维持较高的物种丰富度(Angold et al. 2006, Fahrig 2013)。研究表明,生物多样性随着从自然生境向城市生境转化的梯度呈现线性下降趋势(Blair 1996),因为自然生境通常拥有更为丰富的食物、水源或栖息地资源,使得更多物种能够找到适宜的生存环境。相比之下,城市斑块内的资源有限,生物会出现同质化趋势(McKinney 2006)。但在某些情况下,中等程度城市化水平地区(如城郊)可能会表现出更高的物种丰富度水平。根据中度干

扰假说,中等的城市化水平可能会增加生境的类型和资源的多样性,使得鸟类物种数达到最高(Callaghan et al. 2019)。

功能多样性是指生物群落或生态系统中各个物种在功能性状上的差异和多样性,是影响生态系统功能的主要因素之一。与传统的物种丰富度相比,功能多样性考虑了可能揭示群落变化的功能性状,能够更好地揭示生态系统的功能组成和生态过程,对于生态系统管理和保护具有更高的指导性和预测能力,而这些变化仅通过物种丰富度无法体现出来(Díaz et al. 2001, 2006, Petchey et al. 2006)。功能性状是指物种在生理和生态学方面的特点和行为方式,包括行为、形态、物候和生理等性状。功能性状的差异会导致物种在生态系统中有不同的作用,并最终影响生态系统的功能(Mason et al. 2005, Gallé et al. 2019)。

城市化对鸟类功能性状有很大影响。由于城市绿化、人类的投喂以及生产生活垃圾会给鸟类带来一定的食物资源,城市生境更有利于杂食性、食果等鸟类,而不利于食虫鸟类(Blair et al. 2008)。从筑巢方面来看,很多城市绿地往往会提供人工巢箱,从而有利于洞巢鸟类,但是城市环境中复杂的筑巢材料也给筑巢带来挑战,与天然材料相比,常见的城市筑巢材料(如塑料和绳子),作为筑巢材料可能更难断裂或被撕碎(James Reynolds et al. 2019)。由于城市地面人类活动频繁并且灌丛的覆盖较少,在地面或者灌丛筑巢的鸟类可能偏少(Clergeau et al. 2006)。此外,从体征上来看,城市鸟类

可能偏向于更大的翼展等特征 (Crocì et al. 2008)。由于城市发展水平不同,各城市生境组成情况不同,鸟类适应城市化发展的情况也会有所区别。在城市化发展较早的欧洲,许多鸟类已经成为人类的共栖物种 (Diamond 1986)。中国的城市化发展较欧洲等地区相对滞后,对于城市鸟类功能性状的研究也相对较少。

杭州是中国四大园林城市之一,自古以来杭州西湖周围就有大量著名的园林景观。近年来,杭州努力践行“绿水青山就是金山银山”理念,全面打造生态文明之都。2017年杭州被住建部正式命名并授牌“国家生态园林城市”,截至2022年年底,绿化覆盖率达43%。同时,杭州也是中国经济发展和城市土地扩张最快的城市之一,已经迅速与北京、上海、广州、深圳等城市一起成为中国最大的超一线城市。杭州地处东亚-澳大利西亚鸟类迁徙路线上,鸟类资源丰富。在早期对杭州鸟类的研究中发现,杭州城市园林绿地栖息地的面积、植被盖度、隔离度等因素对鸟类具有较大影响 (陈水华等 2002)。城市化会对鸟类的食物资源利用、取食方式、巢材和巢址选择及惊飞距离等方面产生影响 (兰思思等 2013, 张琴等 2013)。Li 等 (2010) 发现,适度的城市化降低了杭州地区繁殖鸟类的物种多样性,但只对其功能多样性产生了较小影响。随着杭州城市化扩张的加剧,很多鸟类的原始栖息地进一步受到影响,使杭州成为研究城市化对鸟类多样性影响最有价值的地区之一。

在本项研究中,我们对杭州三种不同城市化水平的样地进行鸟类调查,并计算每个样地的鸟类物种丰富度、功能多样性和功能性状加权平均值来评估杭州市三种城市化程度影响下鸟类群落和功能性状的差异。重点关注以下科学问题,(1) 鸟类群落物种丰富度和功能丰富度是如何沿着城市化梯度构建的;(2) 哪些功能性状会影响鸟类对于不同城市化水平生境的适应;(3) 在城市化进程中,应该如何进行城市绿地规划以保持较高的鸟类多样性。我们预

计在中度干扰假说下,在杭州受城市化影响中等的城郊样地可能会拥有较高的鸟类物种丰富度和功能多样性,体征、筑巢和食性等功能性状会影响鸟类对于城市的适应。

1 研究地点

1.1 研究区域概况

杭州市位于浙江省西北部,是浙江省的省会,位于长江三角洲南翼、杭州湾西端 ($29^{\circ}11' \sim 30^{\circ}34' \text{N}$, $118^{\circ}20' \sim 120^{\circ}37' \text{E}$)。杭州属于亚热带季风气候,全年四季分明,光照充足,雨水充沛,春秋季节较短,气候宜人,夏季炎热多雨,冬季寒冷潮湿。京杭大运河和钱塘江两条主要河流穿杭州城区而过,市区内河道纵横交错。截止2023年末,杭州全市常住人口为1252.2万人,其中,城镇人口为1054.3万人,乡村人口为197.9万人。城镇人口占总人口的比重(即城镇化率)为84.2%。

1.2 样点设置

我们在杭州市共选择了45个调查区域,并根据城市化干扰强度将其分为三种干扰强度的栖息地样地:1. 市区样地,基本位于杭州市中心,样地周围通常被建筑物所覆盖,受城市化干扰强度最大;2. 近郊样地,基本位于杭州城郊,样地受到一定的城市化影响但保留了较大面积的原生生境,受城市化干扰强度中等;3. 远郊样地,远离杭州市中心,自然区域最多,样地周围基本不受到城市化的影响,受城市化干扰强度最小。每种不同城市化干扰强度的城市调查区域都由15个样地组成,都包括3个湖泊水域生境样地、5个山地样地和7个绿地样地 (图1)。

2 研究方法

2.1 鸟类调查

鸟类调查分别在2022年11月、2023年1~4月以及6月进行。调查在天气晴朗且无风的日子进行,时间为日出后和日落前的4h。我们对每个样地设计了调查强度相等的1.5 km 样

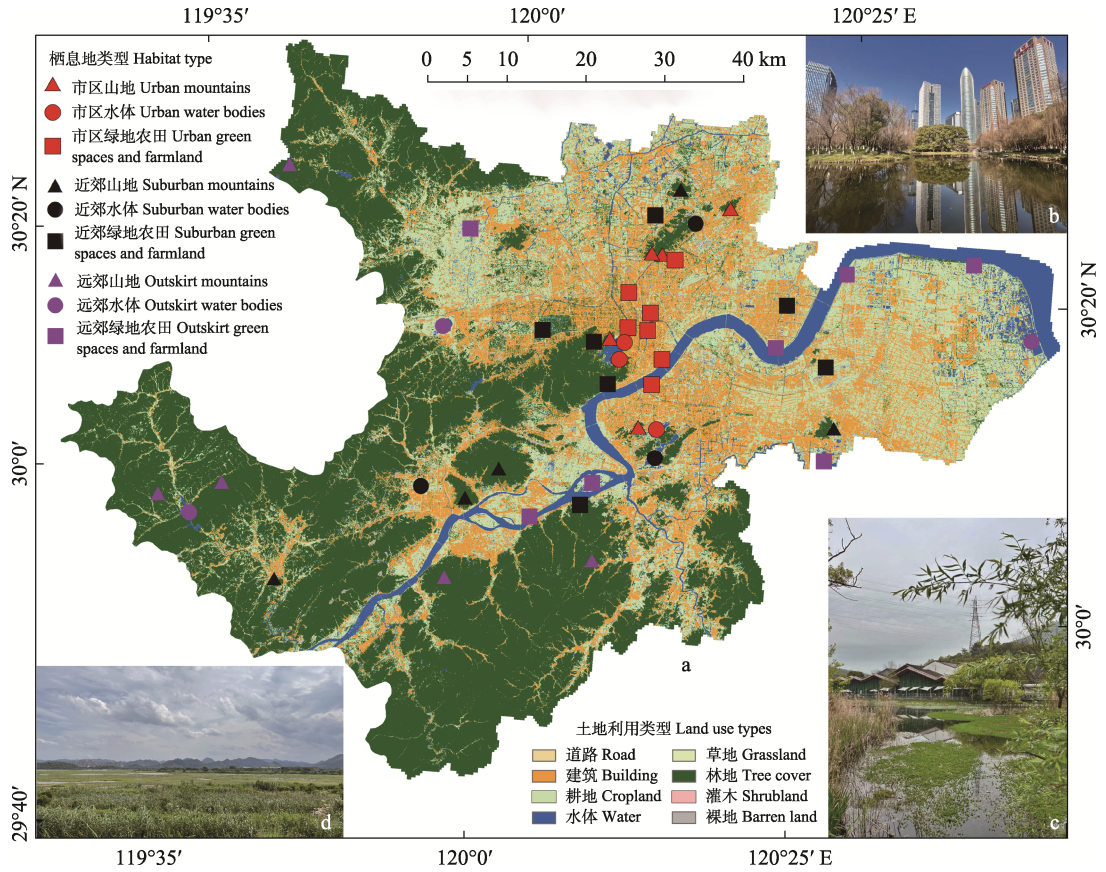


图 1 杭州市鸟类调查位点分布

Fig. 1 Distribution of bird survey sites in Hangzhou City

a. 杭州市 9 区（滨江、上城、拱墅、西湖、钱塘、萧山、临平、富阳、余杭）调查位点分布与栖息地类型；图 b、c 和 d 分别是市区、近郊和远郊生境示意图。

a. Distribution and habitat type of bird survey sites in the 9 districts of Hangzhou City (Binjiang, Shangcheng, Gongshu, Xihu, Qiantang, Xiaoshan, Linping, Fuyang, Yuhang); b, c and d respectively represent schematic diagrams of urban, suburban, and outskirt habitats.

线，并以大约 2 km/h 的速度调查并记录样线两侧看到或听到的鸟类物种和数量。调查者手持望远镜（8 × 42，圣途森林人）和 Canon R5 相机（800 mm 长焦镜头）进行观察和记录。所有的调查都由至少两位经验丰富的调查员进行。鸟种依据《中国鸟类分类与分布名录》（第 4 版，郑光美 2023）进行分类。

2.2 鸟类多样性

使用物种丰富度、功能多样性和功能性状加权平均值来评估不同城市化样地的鸟类群落，并选择功能丰富度（functional richness, FRic）、功能离散度（functional dispersion, FDis）

和二次熵（Rao’s quadratic entropy, RaoQ）指数以及群落功能性状加权平均值（community weighted mean, CWM）对功能多样性进行评估。功能丰富度用于描述群落中的整体功能多样性，代表了物种群落所占据的功能空间的大小（Villéger et al. 2008）。功能离散度，是估计所有物种到群落加权质心的平均距离的指数（Laliberté et al. 2010）。二次熵指数是 Simpson 多样性指数的广义形式，表示群落中随机选择的两个个体在功能上不同的概率（Botta-Dukát 2005）。群落功能性状加权平均值总结了给定群落中每个物种的相对丰度加权的平均性状值

(Garnier et al. 2004)，并且量化了物种组合中功能性状的加权平均值，而二次熵指数是性状分散的度量，二者提供了关于群落功能成分的互补信息 (Ricotta et al. 2011)。

2.3 功能性状选择

选取 29 个功能性状来评估鸟类功能多样性，并计算群落功能性状加权平均值。功能性状包括形态特征：身长、体重、喙长、喙宽、跗骨长、翅长和尾长；食性：脊椎动物、无脊椎动物、食腐、花果、种子和植物；觅食层：空中、林冠层、林中层、林下层、地面和水中；

巢址：地面、灌丛、树冠、岩壁；巢型：洞巢或开放巢；窝卵数以及集群状况：不集群、集小群、集大群。其中，形态特征和窝卵数为连续型变量，食性和觅食层为分类变量，巢址、巢型和集群情况为二元变量。体征数据主要来源于“AVONET”数据集 (Tobias et al. 2022)，觅食数据主要来源于“Elton Traits 1.0”数据集 (Wilman et al. 2014)，生活史数据主要来源于“中国鸟类的生活史和生态学特征 (Chinesebirdsdata)”数据集 (王彦平等 2021) (表 1)。

表 1 功能性状的选择及数据范围

Table 1 Selection of functional traits and data range

类型 Type	功能性状 Functional traits	数据源 Data sources	取值范围 Range
体征 Body features	体重 Mass (g)	AVONET	4.84 - 2 528.97
	体长 Body length (mm)	Chinesebirdsdata	86.75 - 888.00
	喙长 Beak length (mm)	AVONET	7.4 - 138.9
	喙宽 Beak width (mm)	AVONET	2.3 - 20.9
	跗骨长度 Tarsus length (mm)	AVONET	7.2 - 137.9
	翅长 Wing length (mm)	AVONET	43.4 - 441.0
	尾长 Tail length (mm)	AVONET	29.1 - 393.1
食性 Diet	无脊椎动物 Invertebrate (%)		
	脊椎动物 Vertebrate (%)		
	食腐 Scavenge (%)	Elton Traits 1.0	0 - 100
	花果 Nectre fruit (%)		
	种子 Seed (%)		
觅食层 Foraging stratum	植物 Plant (%)		
	空中 Aerial (%)		
	林冠 Canopy (%)		
	林中 Midhigh (%)	Elton Traits 1.0	0 - 100
	林下 Understory (%)		
	地面 Ground (%)		
巢址 Nesting stratum	水中 Water (%)		
	地面 Ground		
	灌丛 Bushes	Chinesebirdsdata	1/0
	树冠 Treetop		
巢型 Nest type	岩壁 Rock cliff		
	洞巢 Cavity nest		
	开放巢 Open nest	Chinesebirdsdata	1/0
集群情况 Cluster situation	不集群 Not clustered		
	集大群 Large group	Chinesebirdsdata	1/0
	集小群 Small group		
窝卵数 Clutch size		Chinesebirdsdata	1 - 10

2.4 数据处理

为了消除亲水性鸟类的特殊生境偏好偏差, 排除了对水生环境有明显偏好的鸟类, 如鸳鸯 (*Aix galericulata*)、普通鸬鹚 (*Phalacrocorax carbo*) 和白鹭 (*Egretta garzetta*) 等鸟类。为了避免各功能性状之间的影响, 我们首先进行基于 Gower 功能距离的主坐标分析 (principal coordinate analysis, PCoA), 选取 PCoA 分析的前四轴 (解释度超过 80%) 作为新的物种“性状”计算功能多样性。而群落功能性状加权平均值 (CWM) 计算则不经过 PCoA 处理。另外, 巢址、巢型等二元变量在加权计算后进行了百分比转换。在得出群落性状加权平均值后我们首先使用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 研究了市区、近郊和远郊区域不同群落中鸟类功能性状的差异, 并使用 Mann-Whitney *U* 检验对各区域鸟类功能性状差异做了显著性分析。使用 R 中的“FD”包来计算功能多样性和功能加权平均值, 使用“factoextra”包进行主成分分析, 所有计算和分析均在 R 4.1.1 中进行。

3 结果

3.1 鸟类调查结果

在杭州的 3 种不同城市化区域的 45 个样地中, 共记录到 175 种鸟类, 共计 23 574 只, 涉及 17 目 50 科。各个样地的鸟类物种丰富度在 7 到 48 种之间不等, 平均为 24 种。从组成上来看, 雀形目鸟类 100 种, 占总物种数的 57.14%,

数量达到 16 404 只, 占总个体数的 69.59%。其中, 白头鹎 (*Pycnonotus sinensis*) 的数量最多, 达到 3 345 只, 并且在大多数调查地点都有记录。从城市化程度来看, 远郊区域样地无论鸟类物种丰富度 (138 种) 还是鸟类数量 (11 008 只) 都最高, 但是近郊样地鸟类平均功能丰富度和平均物种数最高 (28 种), 而市区样地鸟类分类和功能多样性都低于近郊和远郊区域 (表 2)。

3.2 鸟类功能性状差异

对市区、近郊和远郊区域鸟类群落加权平均功能性状进行主成分分析, 在前两个轴共计 78% 的解释率中, 集群情况、巢址和巢型的贡献最大, 具有最强的解释能力, 其次是食性和取食层, 而体征和窝卵数等性状在该主成分中的贡献较小 (图 2)。

此外, 对杭州市区、近郊和远郊区域鸟类功能性状的加权平均值差异显著性进行了比较, 同样发现食性、觅食层、巢址和集群情况存在显著差异 (图 3)。市区鸟类和近郊鸟类以及市区鸟类和远郊区域鸟类在食性、觅食层、巢址和集群情况等 4 种功能性状上的差异较大, 近郊和远郊区域鸟类只在食腐比例上有显著差异。在体征方面, 市区、近郊和远郊区域鸟类均无显著差异。

3.3 鸟类食性功能性状差异

在城市化梯度下, 不同鸟类群落功能性状加权平均值差异不同。首先从食性上来看, 市区鸟类取食无脊椎动物比例显著低于远郊区

表 2 杭州三种区域鸟类数量、种数以及平均物种丰富度和功能多样性

Table 2 Bird abundance, species richness, average species richness, and functional diversity across three different regions in Hangzhou

区域 Region	总鸟种 Species richness	总个体数 Total individuals (ind)	平均物种丰富度 Average species richness	平均功能丰富度 Average functional richness	平均功能离散度 Average functional dispersion	平均二次熵指数 Average Rao's quadratic entropy
市区 Urban	92	4 648	18	87.70	4.42	21.52
近郊 Suburban	110	7 918	28	372.85	4.48	23.26
远郊 Outskirts	138	11 008	27	308.57	4.89	26.28
总体 Overall	175	23 574	24	256.38	4.60	23.69

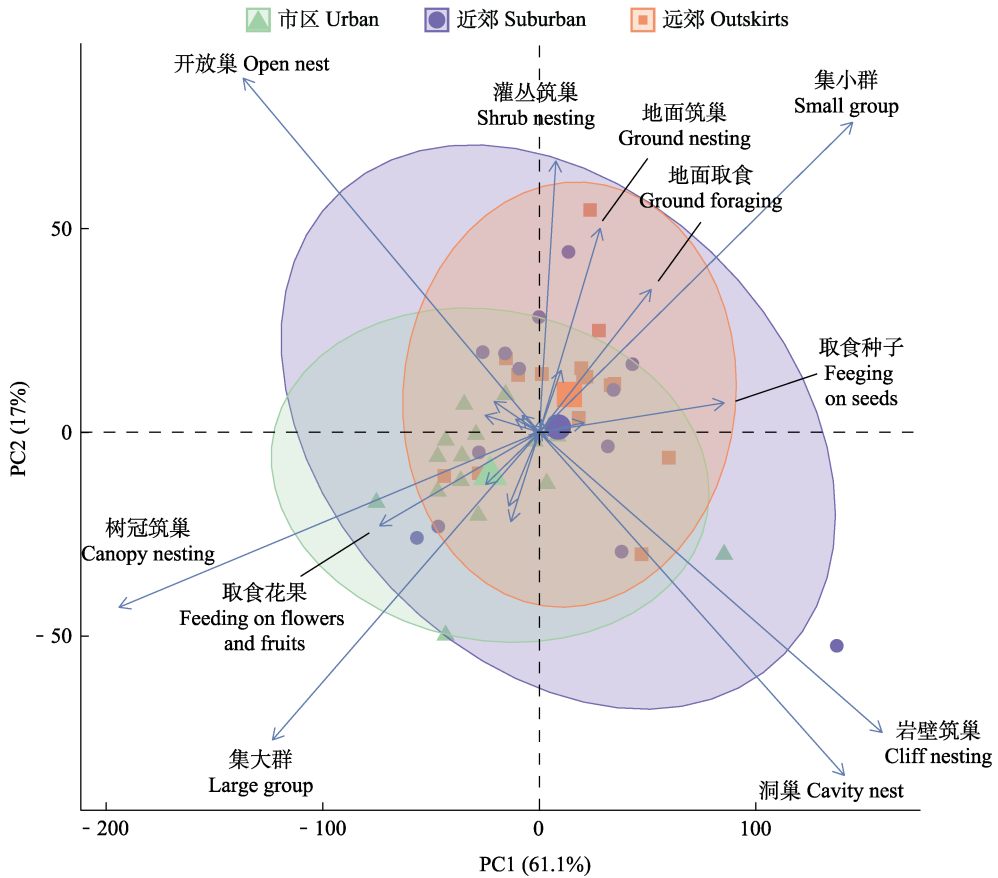


图 2 杭州市市区、近郊和远郊区域鸟类群落加权平均功能性状主成分分析

Fig. 2 Principal component analysis of community weighted mean functional traits of birds in urban, suburban, and outskirt areas of Hangzhou City

域，取食花果比例显著高于近郊和远郊区域；远郊区域鸟类食腐比例显著高于近郊；三种城市化梯度区域鸟类在取食脊椎动物、种子和植物比例上均无显著差异。在觅食层方面，除了市区鸟类在空中觅食比例显著高于近郊和远郊区域外，三种城市化梯度区域鸟类在其他觅食层均无显著差异（图 4）。

3.4 鸟类巢址功能性状差异

不同城市化梯度下鸟类的巢址选择也有显著差异。市区和近郊鸟类在地面和灌丛筑巢比例显著低于远郊区域；市区鸟类树冠筑巢比例显著高于近郊和远郊区域，崖壁筑巢比例显著低于近郊（图 5）。由于本研究去除了水鸟，所有区域在水面筑巢的比例均为 0。

3.5 鸟类集群情况功能性状差异

在集群情况方面，近郊和远郊区域鸟类集小群的比例显著高于市区鸟类，市区鸟类集大群的比例则显著高于近郊和远郊（图 6）。在不集群鸟类比例上，三者并没有显著差异。

4 讨论

从市区到近郊再到远郊，鸟类物种丰富度随着城市化梯度的下降而上升，近郊和远郊地区的物种丰富度和功能多样性高于市区。近郊并没有表现出最高的鸟类物种丰富度，但拥有最高的功能丰富度。远郊拥有最高的物种丰富度、二次熵指数 (RaoQ) 和功能离散度 (FDis)，但是近郊功能丰富度 (FRic) 最高。本研究的

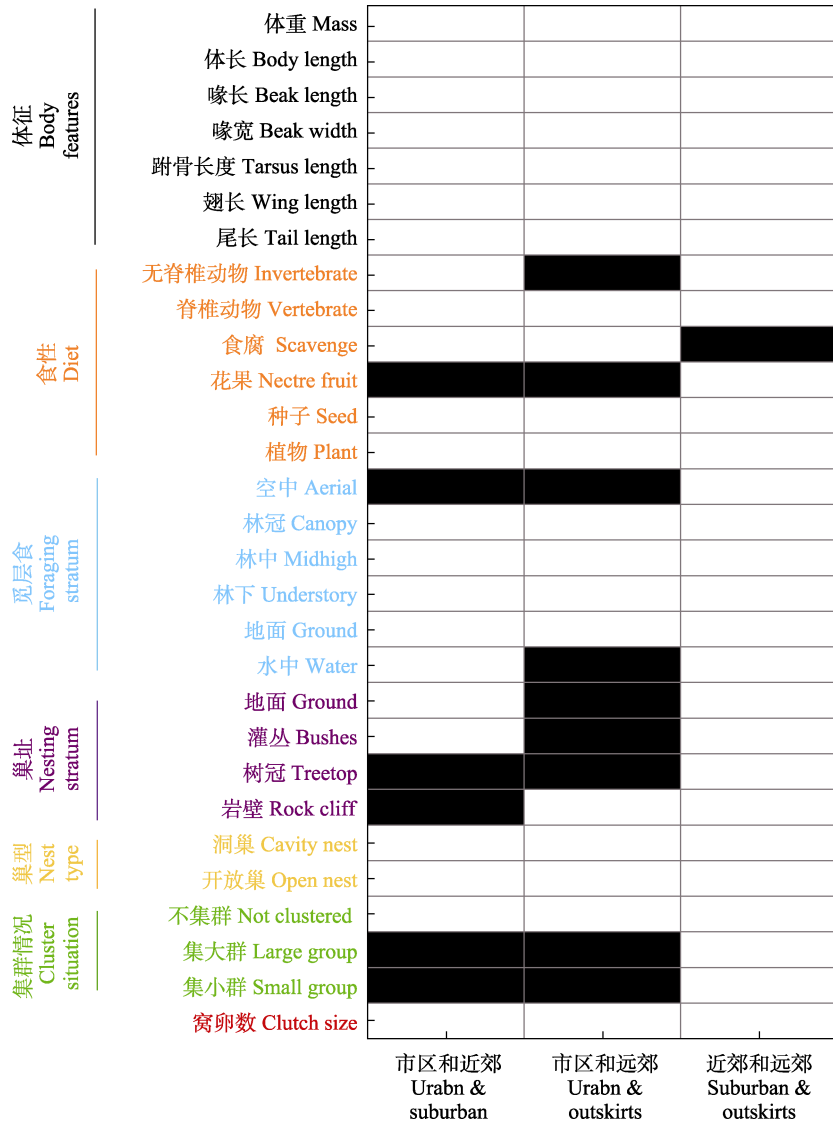


图 3 杭州三种城市化干扰强度下，鸟类群落加权平均功能性状差异显著性

Fig. 3 The significant differences in the community weighted mean functional traits of birds under three levels of urbanization intensity in Hangzhou

黑色表示差异显著，白色表示差异不显著。Black indicates significant differences, while white indicates no significant differences.

杭州城市鸟类功能丰富度水平证明了中度干扰假说。之前的研究表明，城市化发展显著降低了鸟类物种丰富度、物种多样性、功能丰富度和功能多样性，在城市化程度越高的社区，鸟类群落之间的功能相似性越大 (Li 2010)。本研究在不同城市化梯度中选取了相同结构的生境类型样地，在控制了生境类型等因素后，近

郊和远郊区域鸟类功能分散度和功能丰富度仍远高于市区，说明近郊和远郊区域可能受人为干扰较小，在生境质量和样地面积等方面更有优势。但同时，杭州市区绿化率较高，在城市化发展的同时市区保留了较为完整的绿地、山地和湖泊生境，这也使得杭州市区鸟类多样性保持在了相对较高的水平。

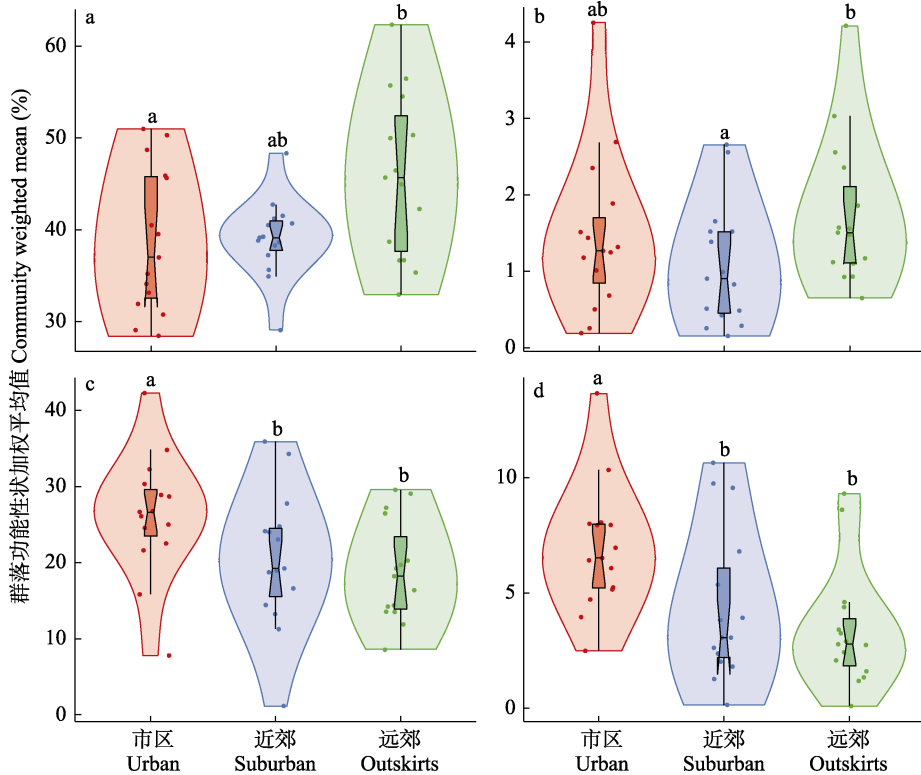


图 4 杭州三种不同城市化梯度样地鸟类食性、觅食层群落加权平均值对比

Fig. 4 Comparison of community weighted mean (CWM) values of bird dietary preferences and foraging strata under three different levels of urbanization intensity in Hangzhou

a. 取食无脊椎动物比例; b. 食腐比例; c. 取食花果比例; d. 空中取食比例。不同字母表示差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。
 a. Proportion of invertebrate feeding; b. Proportion of scavenging; c. Proportion of fruit and flower feeding; d. Proportion of aerial feeding. Different letters indicate statistically significant differences ($P < 0.05$).

城市鸟类通常表现出更强的杂食性 (Lancaster et al. 1979), 以及食花果和种子等偏好 (Chace et al. 2006)。杂食性鸟类丰富度受到建筑物异质性等城市特征的影响 (Lakatos et al. 2022), 鸟类群落功能相似性随住宅密度的增加而显著增加, 随花蜜植物密度的增加而显著降低 (Luck et al. 2011)。本项研究得出了相似的结论, 市区鸟类取食水果和花果的比例高于近郊和远郊样地, 而取食无脊椎动物的比例低于近郊和远郊样地, 这一结果很可能和杭州市区的植被结构有关。城市地区的灌木覆盖会对食虫物种丰度产生明显的正向影响 (Pellissier et al. 2012)。杭州市区绿化率较高, 但是园林绿化的灌木覆盖比例较低, 而园林绿

化植物中的可取食水果花蜜植物密度大于远郊区域。本研究没有在取食脊椎动物、植物和食腐等取食类型方面发现明显差异。此外, 发现近郊食种子鸟类的比例较大, 这与近郊存在大量农田的情况相符, 但是这一结果并不显著。我们认为, 城市化很可能通过改变食物资源来影响鸟类的取食, 因此城市绿地规划对于生物多样性保护至关重要, 城市园林绿化植物类别的选用可能直接影响到动物的食物来源, 进而影响生物多样性水平。

杭州市区洞巢鸟类的比例并不显著大于近郊或者远郊区域, 这可能由于杭州城市内的绿地公园建立时间较短, 大多绿地公园缺乏粗树或枯木提供洞巢, 而且也不像许多欧洲城镇那

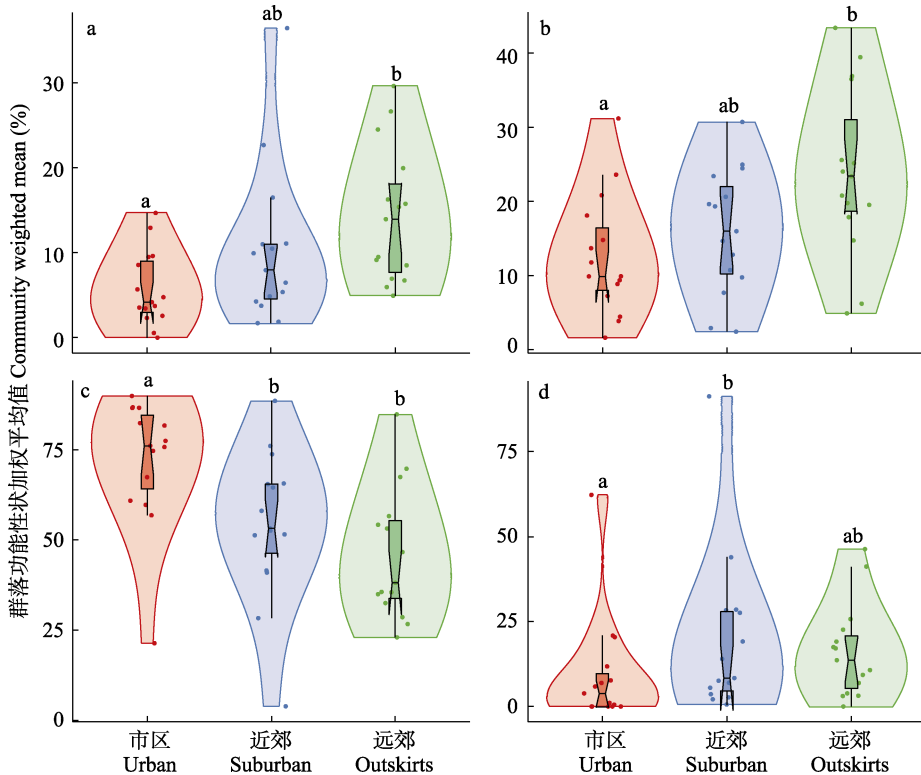


图 5 杭州三种不同城市化梯度样地鸟类巢址群落加权平均值对比

Fig. 5 Comparison of community weighted mean (CWM) values of bird nest-site preferences under three different levels of urbanization intensity in Hangzhou

a. 地面筑巢比例; b. 灌丛筑巢比例; c. 树冠筑巢比例; d. 岩壁筑巢比例。不同字母表示差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。

a. Proportion of ground nesters; b. Proportion of shrub nesters; c. Proportion of canopy nesters; d. Proportion of cliff nesters. Different letters indicate statistically significant differences ($P < 0.05$).

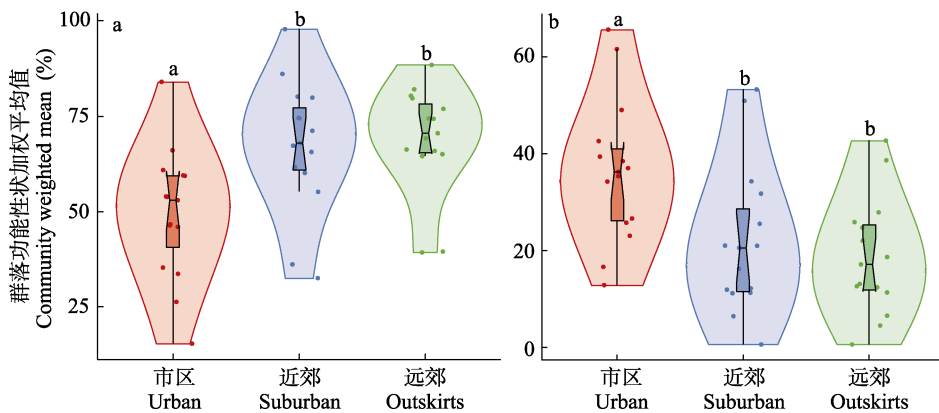


图 6 杭州三种不同城市化梯度样地鸟类群落集群情况群落加权平均值对比

Fig. 6 Comparison of community weighted mean (CWM) values of bird clustering behavior under three different levels of urbanization intensity in Hangzhou

a. 集小群比例; b. 集大群比例。不同字母表示差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。

a. Proportion of small groups; b. Proportion of large groups. Different letters indicate statistically significant differences ($P < 0.05$).

样提供了适宜的人工巢箱 (Marzluff 2001, Jokimäki et al. 2016)。城市中地面筑巢鸟类物种的丰度往往较低 (Jokimäki 1999)。本研究也发现, 杭州市区、近郊和远郊的四种不同巢址鸟类比例均有显著差异, 巢址可能是最能区分城市和远郊样地鸟类的功能性状之一。杭州市区鸟类在地面或灌丛筑巢的比例显著低于近郊和远郊区域, 这一方面是因为市区绿地公园内地被植被较少、灌木层比例较低, 从而降低了城市鸟类地面和灌丛筑巢的适宜性, 另一方面由于人类活动和流浪猫的威胁, 鸟类在地面和灌丛筑巢的危险性随之提高。

本研究发现, 杭州市区鸟类集小群的比例相对较低, 而集大群的比例则相对较高。社会性可以提高鸟类在城市地区的生存能力和利用城市环境的能力 (Kark et al. 2007)。我们认为, 中国城市化发展情况下, 城市生境作为一种新的陌生环境, 对于更大集群的鸟类来说更加容易适应。鸟类集群情况和社会性相关, 集群规模越大, 同种鸟在一起学习其他鸟类经验, 例如取食或躲避捕食的机会就越多。群体觅食提高了食物定位和沟通食物来源的能力, 并有利于对抗、躲避捕食者和减少竞争。群体行动有利于鸟类探索未知环境和获取新鲜资源的尝试。所以, 集大群的社交属性强的鸟类更容易适应城市生活。

在城市化的背景下, 应当根据不同城市化水平区域采取有针对性的城市规划和管理措施, 尽力提高城市生态系统中的物种多样性。首先在人口最密集、城市化发展水平最高的市区, 应当提升城市绿化覆盖率和绿地公园设计管理水平。城市绿地公园作为人工栖息地, 对鸟类多样性的保护具有重要意义。在绿化覆盖率一定的情况下, 城市绿地应更多地从保护生物多样性的角度来进行规划和管理。我们对城市绿地管理提出了三方面的建议: 根据当地原生植物生境进行景观设计, 应增加灌木覆盖度以利于鸟类觅食、躲避和筑巢; 在园林绿化植物选择上, 挑选更适于鸟类栖息和觅食的植物

种类, 如选择不同季节的食源植物等; 保留和保护古树和枯木, 二者对于维持当地生态系统至关重要。对于可筑巢树木较少的绿地公园提供人工巢箱。其次, 在城市向远郊区域不可避免的扩张过程中, 应尽可能保留湿地、林地和绿地等远郊生境的多样性, 保留远郊样地之间重要的连接通道, 使远郊区域和城市绿地之间相互连通, 利于物种的扩散和迁徙。最后, 在城市化发展过程中, 应当制定鸟类及其他野生动物的持续监测机制, 设立固定的监测样线, 对比当地城市和周围远郊区域鸟类群落及多样性变化, 关注城市鸟类的发展趋势, 并据此调整城市园林规划和发展规划。

致谢 感谢杭州市生态环境局的支持。中国科学院动物研究所温知新、张凯等人在数据分析与调查中给予了重要帮助, 特此致谢!

参 考 文 献

- Angold P G, Sadler J P, Hill M O, et al. 2006. Biodiversity in urban habitat patches. *Science of the Total Environment*, 360(1/3): 196–204.
- Blair R B. 1996. Land use and avian species diversity along an urban gradient. *Ecological Applications*, 6(2): 506–519.
- Blair R B, Johnson E M. 2008. Suburban habitats and their role for birds in the urban-rural habitat network: points of local invasion and extinction? *Landscape Ecology*, 23(10): 1157–1169.
- Botta-Dukát Z. 2005. Rao's quadratic entropy as a measure of functional diversity based on multiple traits. *Journal of Vegetation Science*, 16(5): 533–540.
- Callaghan C T, Bino G, Major R E, et al. 2019. Heterogeneous urban green areas are bird diversity hotspots: insights using continental-scale citizen science data. *Landscape Ecology*, 34(6): 1231–1246.
- Chace J F, Walsh J J. 2006. Urban effects on native avifauna: a review. *Landscape and Urban Planning*, 74(1): 46–69.
- Clergeau P, Croci S, Jokimäki J, et al. 2006. Avifauna homogenisation by urbanisation: analysis at different European latitudes. *Biological Conservation*, 127(3): 336–344.
- Croci S, Butet A, Clergeau P. 2008. Does urbanization filter birds on

- the basis of their biological traits. *The Condor*, 110(2): 223–240.
- Diamond J M. 1986. Natural selection: Rapid evolution of urban birds. *Nature*, 324(6093): 107–108.
- Diaz S, Cabido M. 2001. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(11): 646–655.
- Diaz S, Lavorel S, Chapin F S, et al. Functional diversity—at the crossroads between ecosystem functioning and environmental filters // Canadell J G, Pataki D E, Pitelka L F. *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Berlin, Heidelberg: Springer, 81–91.
- Fahrig L. 2013. Rethinking patch size and isolation effects: the habitat amount hypothesis. *Journal of Biogeography*, 40(9): 1649–1663.
- Gallé R, Batáry P. 2019. Trait-based paradise—about the importance of real functionality. *Community Ecology*, 20(3): 314–316.
- Garnier E, Cortez J, Billès G, et al. 2004. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession. *Ecology*, 85(9): 2630–2637.
- Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. 2008. Global change and the ecology of cities. *Science*, 319(5864): 756–760.
- James Reynolds S, Ibáñez-Álamo J D, Sumasgutner P, et al. 2019. Urbanisation and nest building in birds: a review of threats and opportunities. *Journal of Ornithology*, 160(3): 841–860.
- Jokimäki J. 1999. Occurrence of breeding bird species in urban parks: Effects of park structure and broad-scale variables. *Urban Ecosystems*, 3(1): 21–34.
- Jokimäki J, Suhonen J, Jokimäki-Kaisanlahti M L, et al. 2016. Effects of urbanization on breeding birds in European towns: Impacts of species traits. *Urban Ecosystems*, 19(4): 1565–1577.
- Kark S, Iwaniuk A, Schalmitzek A, et al. 2007. Living in the city: can anyone become an ‘urban exploiter’? *Journal of Biogeography*, 34(4): 638–651.
- Lakatos T, Chamberlain D E, Garamszegi L Z, et al. 2022. No place for ground-dwellers in cities: a meta-analysis on bird functional traits. *Global Ecology and Conservation*, 38: e02217.
- Laliberté E, Legendre P. 2010. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology*, 91(1): 299–305.
- Lancaster R K, Rees W E. 1979. Bird communities and the structure of urban habitats. *Canadian Journal of Zoology*, 57(12): 2358–2368.
- Li P, Ding P, Feeley K, et al. 2010. Patterns of species diversity and functional diversity of breeding birds in Hangzhou across an urbanization gradient. *Chinese Birds*, 1(1): 1–8.
- Luck G W, Smallbone L T. 2011. The impact of urbanization on taxonomic and functional similarity among bird communities. *Journal of Biogeography*, 38(5): 894–906.
- Marzluff J M. 2001. *Worldwide urbanization and its effects on birds. Avian Ecology and Conservation in an Urbanizing World*. Boston, MA: Springer, 19–47.
- Mason N W H, Mouillot D, Lee W G, et al. 2005. Functional richness, functional evenness and functional divergence: the primary components of functional diversity. *Oikos*, 111(1): 112–118.
- McKinney M L. 2006. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biological Conservation*, 127(3): 247–260.
- 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.
- Petchey O L, Gaston K J. 2006. Functional diversity: back to basics and looking forward. *Ecology Letters*, 9(6): 741–758.
- Ricotta C, Moretti M. 2011. CWM and Rao’s quadratic diversity: a unified framework for functional ecology. *Oecologia*, 167(1): 181–188.
- Seto K C, Sánchez-Rodríguez R, Fragkias M. 2010. The new geography of contemporary urbanization and the environment. *Annual Review of Environment and Resources*, 35: 167–194.
- Simkin R D, Seto K C, McDonald R I, et al. 2022. Biodiversity impacts and conservation implications of urban land expansion projected to 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(12): e2117297119.
- Tobias J A, Sheard C, Pigot A L, et al. 2022. AVONET: morphological, ecological and geographical data for all birds. *Ecology Letters*, 25(3): 581–597.
- Villéger S, Mason N W H, Mouillot D. 2008. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. *Ecology*, 89(8): 2290–2301.
- Wilman H, Belmaker J, Simpson J, et al. 2014. EltonTraits 1.0: Species-level foraging attributes of the world’s birds and

- mammals. *Ecology*, 95(7): 2027.
- Zhou Y R, Varquez A C G, Kanda M. 2019. High-resolution global urban growth projection based on multiple applications of the SLEUTH urban growth model. *Scientific Data*, 6(1): 34.
- 陈水华, 丁平, 范忠勇, 等. 2002. 城市鸟类对斑块状园林栖息地的选择性. *动物学研究*, 23(1): 31–38.
- 兰思思, 张琴, 黄秦, 等. 2013. 杭州城市环境中白头鹎的繁殖生态. *动物学研究*, 34(3): 182–189.
- 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.
- 张琴, 兰思思, 黄秦, 等. 2013. 城市化对鸟类的影响: 从群落到个体. *动物学杂志*, 48(5): 808–816.
- 郑光美. 2023. 中国鸟类分类与分布名录. 4 版. 北京: 科学出版社.

云南普洱发现白化赤麂

Albino Red Muntjac *Muntiacus vaginalis* Found in Puer, Yunnan, China

2020 年 7 月 18 日、8 月 8 日以及 2021 年 1 月 22 日和 26 日, 在云南省南部普洱市糯扎渡省级自然保护区思茅港镇茨竹林村那卡村民小组 (22°42'44" N, 100°24'14" E) 布设的一台红外相机先后 4 次拍摄到白化赤麂 (*Muntiacus vaginalis*) 影像 (图 1)。该红外相机布设于以思茅松 (*Pinus kesiya*) 为主的原始林针阔混交林林下, 海拔 1 442 m。赤麂头颅与身体尺寸均大于小鹿 (*M. reevesi*), 脸部狭长、眉间距较宽, 额部无明显簇毛, 具有明显较大眶前腺, 额腺显著较长相互交叉在一起成深“v”形 (刘少英等 2019)。根据所拍摄动物影像体现出来的身体特征, 结合该地区无小鹿分布 (Smith et al. 2009), 将之鉴定为白化赤麂。本次调查所拍摄的白化赤麂无双角, 由此确定为成年雌性个体。

野生白化兽类动物在国内外均有发现报道, 2021 年 5 月 7 日云南省丽江永胜县出现白化赤麂, 为当地山林承包人救护 1 只野生雌性赤麂放归自然顺利生产的 1 只白化赤麂幼崽 (刘皋等 2021)。此次糯扎渡省级自然保护区在野外环境中利用红外相机拍摄到成年白化赤麂雌性个体的拍摄时间比国内首次报道云南省发现白化赤麂幼崽早 10 个月左右。

(下转第 878 页)

基金项目 中国海油海洋生态环境与生态保护公益基金会支持的 2021 年《秘境之眼》红外相机调查项目;

* 通讯作者, E-mail: liufang.caf@foxmail.com;

第一作者介绍 张留栓, 男, 硕士研究生; 研究方向: 野生动植物保护与利用; E-mail: zhangliushuan2019@126.com。

收稿日期: 2021-12-10, 修回日期: 2022-04-15 DOI: 10.13859/j.cjz.202321312