



•研究报告•

基于取食行为探究北京居民区鸟类的食源特征及多样性

殷鲁秦^{1,2}, 王成^{1,2*}, 韩文静^{1,2}

1. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 2. 国家林业和草原局城市森林研究中心, 北京 100091

摘要: 城市是鸟类的重要栖息地, 城市绿地中占比最大的为居住绿地, 是容纳鸟类的重要生境。对于鸟类生存来说, 食物的种类和数量是关键的限制因子。本研究从鸟类的食物偏好入手, 旨在构建北京居住区鸟类的食源关系, 探究鸟类在居住区中取食的影响因素。研究选取40个居住小区作为调查样地, 于2020年6月至2021年5月每月调查1次, 采用广义线性模型评估鸟类在居住区中取食的影响因素, 并对鸟类的食源多样性指数与多度、分布范围进行线性回归。结果表明: (1)本研究共记录到取食行为的鸟种共14科35种2,242只, 丰富度为春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季, 多度为春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季, Shannon-Wiener多样性指数为秋季 > 春季 > 冬季 > 夏季。(2)鸟类的食源依次为昆虫(33.87%)、翅果(18.33%)、浆果(9.77%)、球果(8.16%)、草籽(5.17%)等。(3)鸟类对植物的直接利用高达60.4%, 间接利用为39.6%, 食源植物Shannon-Wiener多样性指数为秋季(3.1612) > 冬季(2.9651) > 春季(2.9203) > 夏季(2.1763)。(4)食源树种是影响鸟类在居住区中取食最关键的外界环境因素, 食源越丰富的鸟种, 其种群数量越大, 分布范围越广泛。居住区的食源植物具有类型丰富、种类繁多、从早春到晚秋覆盖全物候的特点, 在规划设计时应多配置北京乡土树种以及金银木(*Lonicera maackii*)等观果植物, 减少绿篱配置, 倡导低干扰的近自然园林养护管理措施。

关键词: 鸟类食性; 居住区; 食物来源; 食源植物; 鸟类多样性; 北京

殷鲁秦, 王成, 韩文静 (2023) 基于取食行为探究北京居民区鸟类的食源特征及多样性. 生物多样性, 31, 22473. doi: 10.17520/biods.2022473.

Yin LQ, Wang C, Han WJ (2023) Food source characteristics and diversity of birds based on feeding behavior in residential areas of Beijing. Biodiversity Science, 31, 22473. doi: 10.17520/biods.2022473.

Food source characteristics and diversity of birds based on feeding behavior in residential areas of Beijing

Luqin Yin^{1,2}, Cheng Wang^{1,2*}, Wenjing Han^{1,2}

1 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091

2 Urban Forest Research Center, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091

ABSTRACT

Aims: Urban areas can provide important habitats for birds. Residential green spaces can play an important role in urban green spaces and may provide valuable resources for urban birds. Food diversity and quantity can be one of the factors that could be limiting bird survival. Therefore, by considering the food preferences of birds, this study aims to determine the relationship between birds and their food sources in Beijing residential areas. Furthermore, this study seeks to determine what factors may influence bird feeding behavior in residential areas.

Methods: Forty residential areas were selected as survey plots and surveyed monthly from June 2020 to May 2021. Shannon-Wiener diversity index was used for evaluating bird diversity, and the distribution was defined as the numbers of residential areas where birds fed. A generalized linear model was used to evaluate the influencing factors of bird feeding in residential areas, and linear regression was performed on the diversity index, abundance and the distribution

收稿日期: 2022-08-18; 接受日期: 2022-11-15

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2022SY006)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wch8361@163.com

of bird feeding sources.

Results: (1) The feeding behavior of 2,242 birds (35 species, 14 families) were recorded. We observed that bird richness was at its highest in spring, followed by autumn, winter and summer, then abundance was at its highest in spring, followed by winter, autumn and summer, and the Shannon-Wiener diversity index was at its highest in autumn, followed by spring, winter, summer. (2) A decrease in food sources was observed in the following: insects (33.87%), samara (18.33%), berries (9.77%), cones (8.16%) and grass seeds (5.17%). (3) The direct utilization of plants by birds was 60.4%, while the indirect utilization was 39.6%. The Shannon-Wiener diversity index of food source plants decreased in autumn (3.1612), winter (2.9651), spring (2.9203) and summer (2.1763). (4) The species of food source was the most critical environmental factor that determined birds feeding behavior in residential areas. Birds with more abundant food sources had larger populations and wider distribution ranges.

Conclusion: Plant species in residential areas can be highly diverse and can offer a wide range of food sources for multiple species of birds throughout their entire phenology between the early spring and autumn. It is necessary to plant more native tree species and fruiting plants, reduce hedgerows, and advocate near-natural management measures with low disturbance.

Key words: bird diet; residential area; food source; food source plant; bird diversity; Beijing

城市是鸟类的重要栖息地, 城市中的鸟类可以作为重要的指示物种(Sandström et al, 2006)。城市绿地作为城市生态系统的重要组成部分, 是鸟类及其他动物的重要生境(庄艳美等, 2012)。其中, 居住绿地在城市绿地中占比最大, 是人类与鸟类共同生存的环境, 是人工环境和自然环境的复合体, 小区中的植物是人工选择的结果, 因此鸟类多样性可能不同于公园等其他城市绿地。近年来, 对城市鸟类多样性的研究主要集中在城市公园(王勇等, 2014; 杨刚, 2015)、森林公园(张皖清和董丽, 2015)、绿化带(隋金玲等, 2007)、湿地(李相逸等, 2018)等城市公共绿地, 而对居住绿地鲜有研究。

鸟类对生境的选择依赖于食物、水和生境空间等因素(刘旭等, 2018), 其中食物的种类和数量是限制鸟类生存的根本因子(范喜顺等, 2005)。鸟类偏好食源树种, 在北温带地区, 野生果肉是许多鸟类秋季迁徙时的重要食物来源(Gallinat et al, 2020), 候鸟会选择食物资源丰富的区域作为迁徙的中转停歇地(高洁等, 2022)。

北京作为高度城市化地区和鸟类迁徙路线上的重要节点, 公共绿地的植物配置将直接影响到鸟类的食物来源, 而居住绿地又占比最大, 因此有必要探究居住区的鸟类与食物资源的关系。本研究将从鸟类的食物偏好入手, 构建鸟类的食源关系, 探究在居住区中鸟类取食的影响因素, 以期为营建鸟语花香的森林社区、构建鸟类友好型城市提供科学支撑。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究地点

北京市(115°24'–117°30' E, 39°38'–41°05' N)地处华北平原的北部, 属暖温带半湿润半干旱季风气候, 四季分明, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥。本研究在中心城区的五环路范围内沿8个地理方向随机选取40个居住小区(图1), 各小区之间至少间隔1 km, 以减少相互影响。

1.2 食源情况调查

2020年6月至2021年5月, 选择晴朗无风的上午(夏季6:00–9:00、冬季8:00–11:00), 沿小区人行道以1–1.5 km/h的步速无重复遗漏地调查所有小区, 每月调查1次, 累计调查12次。采用直接计数法进行连续观测, 记录鸟类取食行为的数据。由于麻雀

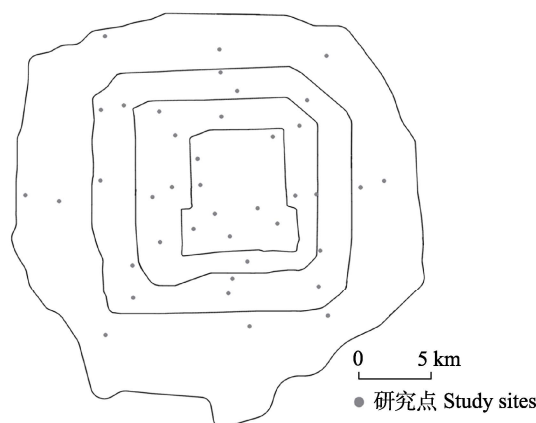


图1 研究点位置分布图

Fig. 1 Distribution of study sites

(*Passer montanus*)属于城市适生种(刘娜娜等, 2018), 长期适应人类生活环境(张淑萍等, 2006), 在小区中广泛分布, 较少受到食源的限制, 对小区的环境特征、食源植物等不敏感, 指示作用不明显, 且数量过多属于离群值, 故本研究中不涉及麻雀。对居住小区的乔、灌木进行全面调查, 记录种类、数量、物候等特征。

根据取食的植物器官和实际观测情况, 将食物来源划分为花(花芽、花)、叶(叶芽、嫩叶)、果肉(核果、浆果、梨果、聚花果)、种子(翅果、荚果、球果、聚合蓇葖果、蓇葖果、蒴果)、草籽、树液、昆虫及小动物和人工食物(猫粮、投喂物)等8种类型(何海燕等, 2021)。将食源植物利用类型划分为直接利用和间接利用, 分别指鸟类直接取食该植物的花、叶、果实和种子等植物器官或间接取食停留在该植物表面的昆虫等(王玲等, 2016)。按照食性将鸟种分为虫食性、植食性和杂食性3类(王勇等, 2014; Souza et al, 2019)。

1.3 鸟类多样性指数计算

本研究分析了鸟类群落的丰富度、多度、密度(D)和Shannon-Wiener多样性指数(H')。其中物种丰富度为记录到取食行为的鸟类物种数, 多度即记录到的个体数。

$$D = N / S \quad (1)$$

式中, D 为某个小区中记录到取食行为的鸟类密度, N 为某个小区中记录到取食行为的鸟类总数量, S 为居住小区的总面积(ha)。

$$H' = -\sum_{i=1}^R P_i \ln P_i \quad (2)$$

式中, R 为居住小区中记录到取食行为的鸟类物种数, P_i 为某个小区中记录到第 i 种取食行为的鸟类数量占鸟类总数的比例。

鸟类食源多样性指数: 借鉴蝴蝶蜜源植物网络中的伙伴多样性指数(partner diversity) (韩丹等, 2021), 计算了鸟类食源多样性指数, 即每个物种食物来源的Shannon-Wiener指数, 较高的值表明了该物种的食物来源广泛。具体计算公式如下:

$$FD = -\sum_{i=1}^R F_i \ln F_i \quad (3)$$

式中, R 为记录到取食行为的鸟类物种数, F_i 为某鸟种第 i 种食物来源的数量占该鸟种食物总数的比例。

1.4 环境影响因子获取

结合居住区的特点, 本研究选取了以下10个影响鸟类取食的环境因子(附录1): (1)小区面积: 在影像图上勾勒小区边界并测量面积(ha)。(2)建成时间: 根据实地调查或从网上查阅相关数据。(3)建筑密度: 在影像图上勾勒建筑边界并测量面积(单位: ha)。建筑密度 = 建筑占地面积/小区面积。(4)平均层数: 调查小区中建筑物的层数, 并按照占地面积进行加权平均。(5)容积率(plot ratio): 依据《建筑工程建筑面积计算规范》(GB/T50353-2013)进行计算, 容积率 = 总建筑面积/净用地面积, 用来反映小区开发强度。(6)周长面积比(perimeter-area ratio, PAR): 周长面积比 = 小区周长/小区面积(李相逸等, 2018)。(7)树冠覆盖率: 对居住小区的影像图进行人工目视解译, 勾绘出树冠的覆盖范围, 计算公式为树冠覆盖率 = 树冠覆盖面积/小区面积(李彤等, 2021)。(8)食源树种丰富度: 统计居住小区中食源树种的物种数。(9)食源树种覆盖率: 统计小区中食源树种的总覆盖面积, 食源树种覆盖率 = 食源树种总覆盖面积/小区面积。(10)食源树种Shannon-Wiener多样性指数:

$$H' = -\sum_{i=1}^n T_i \ln T_i \quad (4)$$

式中, n 为居住小区中食源树种的物种数, T_i 为某个小区中记录到第 i 个食源树种数量占食源树种总量的比例。

1.5 数据分析

1.5.1 食源特征分析

利用R软件的sankeyD3程序包绘制桑基图, 反映鸟类与食物类型和取食地点的关系, 同时对不同季节也构建关系图。利用circlize程序包绘制弦图, 反映鸟类不同季节对不同生活型植物的利用情况。计算不同季节的鸟类和食源的Bray-Curtis相似性系数, 比较不同季节之间的差异。

1.5.2 影响因素分析

为避免各环境因子之间的多重共线性, 首先检验了Pearson相关性系数(r)。结果显示小区面积与周长面积比、平均层数与容积率、树冠覆盖率与食源

树种树冠覆盖率、食源树种丰富度与食源树种 Shannon-Wiener 多样性指数之间的相关系数均大于 0.7 (附录2), 考虑到小区面积和周长面积比反映了小区不同的特征, 分析时仅去除了平均层数、树冠覆盖率和食源树种丰富度3个因子。将每个小区的鸟类多样性作为响应变量(附录3), 对计数数据物种丰富度构建符合Poisson分布的广义线性模型, 密度和 Shannon-Wiener 多样性指数构建一般线性模型, 建模前对所有数据进行标准化处理。采用小样本校正后的赤池信息量准则(Akaike information criterion, corrected, AICc)进行模型评价, 利用MuMIn程序包中的“dredge”函数进行模型排序和选择, $\Delta AICc \leq 2$ 的模型被认为是最优模型(Mortelliti et al, 2010)。利用“model.avg”函数对最优模型进行模型平均, 计算每个因子的参数估计值及标准误。

自身食性的影响采用基于Bray-Curtis距离的非度量多维标度排序(non-metric multidimensional scaling, NMDS)进行分析, 应力函数值stress小于0.2说明排序模型合理。进一步对鸟类的食源多样性指数和多度、分布范围进行一般线性回归。分析过程利用vegan和lme4程序包完成。

2 结果

2.1 居住区有取食行为的鸟类群落特征

本研究共记录到14科35种2,242只鸟类有取食行为, 占调查到鸟类种数(50种)的70%, 其中留鸟16种(占种数的45.71%)、旅鸟15种(42.86%)、夏候鸟1种(2.86%)、冬候鸟4种(11.43%)。灰喜鹊(*Cyanopica cyanus*, 376只)、白头鹎(*Pycnonotus sinensis*, 281只)、珠颈斑鸠(*Spilopelia chinensis*, 147只)和喜鹊(*Pica pica*, 107只)是小区中数量最多的留鸟。燕雀(*Fringilla montifringilla*)是北京地区典型的集群过冬的冬候鸟, 共记录到414只。黄腰柳莺(*Phylloscopus proregulus*, 222只)和黄眉柳莺(*P. inornatus*, 214只)在春秋迁徙季集中过境时记录到的数量也较多。

物种数在迁徙季时最多, 依次为春季28种(占种数的80%)、秋季25种(71.4%)、冬季16种(45.7%)、夏季9种(25.7%)。鸟类数量从多到少依次为春季(999只)、冬季(659只)、秋季(504只)、夏季(80只)。根据所有小区的总体数据计算出的鸟类群落的

Shannon-Wiener 多样性指数依次为秋季(2.3959) > 春季(2.3732) > 冬季(2.0342) > 夏季(1.8285)。

2.2 居住区鸟类的食源特征

2.2.1 鸟类的食源构成

鸟类的食源主要为昆虫(33.87%)、翅果(18.33%)、浆果(9.77%)、球果(8.16%)、草籽(5.17%)、聚花果(4.37%)等(图2)。昆虫主要依附在国槐(*Styphnolobium japonicum*)、绦柳(*Salix matsudana* 'Pendula')、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、榆树(*Ulmus pumila*)等高大乔木上, 为虫食性鸟类提供食物; 翅果主要来源于元宝枫(*Acer truncatum*)、白蜡(*Fraxinus chinensis*)和榆树, 前两者主要在秋冬季为燕雀等植食性的冬候鸟提供食物, 榆树则在早春提供食物; 浆果主要来自金银木(*Lonicera maackii*)、蔷薇科的小浆果和柿树(*Diospyros kaki*), 为白头鹎、灰喜鹊等杂食性鸟类提供食物; 球果则来自圆柏(*Juniperus chinensis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等松柏类树种, 主要取食者为灰喜鹊等杂食性鸟类; 喜鹊、珠颈斑鸠等地面觅食的鸟类则常在草地觅食草籽; 桑树(*Morus alba*)和构树(*Broussonetia papyrifera*)的聚花果富含充足的水分和糖分, 在5月和6月深受灰喜鹊、白头鹎的青睐。此外, 投喂物也是鸟类的重要食源。

2.2.2 鸟类不同季节的食源构成

记录到的鸟类取食行为的频次依次为: 春季(44.60%) > 冬季(29.39%) > 秋季(22.44%) > 夏季(3.57%) (图3)。春季主要来自于元宝枫、榆树等翅果和植物嫩芽以及高大乔木的昆虫; 夏季育雏时均以捕食昆虫为主; 秋季主要来自于金银木、柿树等植物果实; 冬季则主要依赖于松柏类的种子和元宝枫、白蜡的翅果(图4)。

不同季节的食源植物存在一定差异, 春季和秋季的Bray-Curtis相似性系数最高(0.4725), 其次为冬春季(0.4655)和秋冬季(0.4291), 夏季与其他季节的相似性系数均低于0.2。这与鸟类相似性存在一致性, 春季和秋季旅鸟过境, 相似性系数高达0.5756 (表1)。

2.2.3 鸟类对不同生活型植物的利用

40个小区共有乔木22,628株, 主要的食源树种共计14,674株, 使用量高达64.85%, 其中使用较多

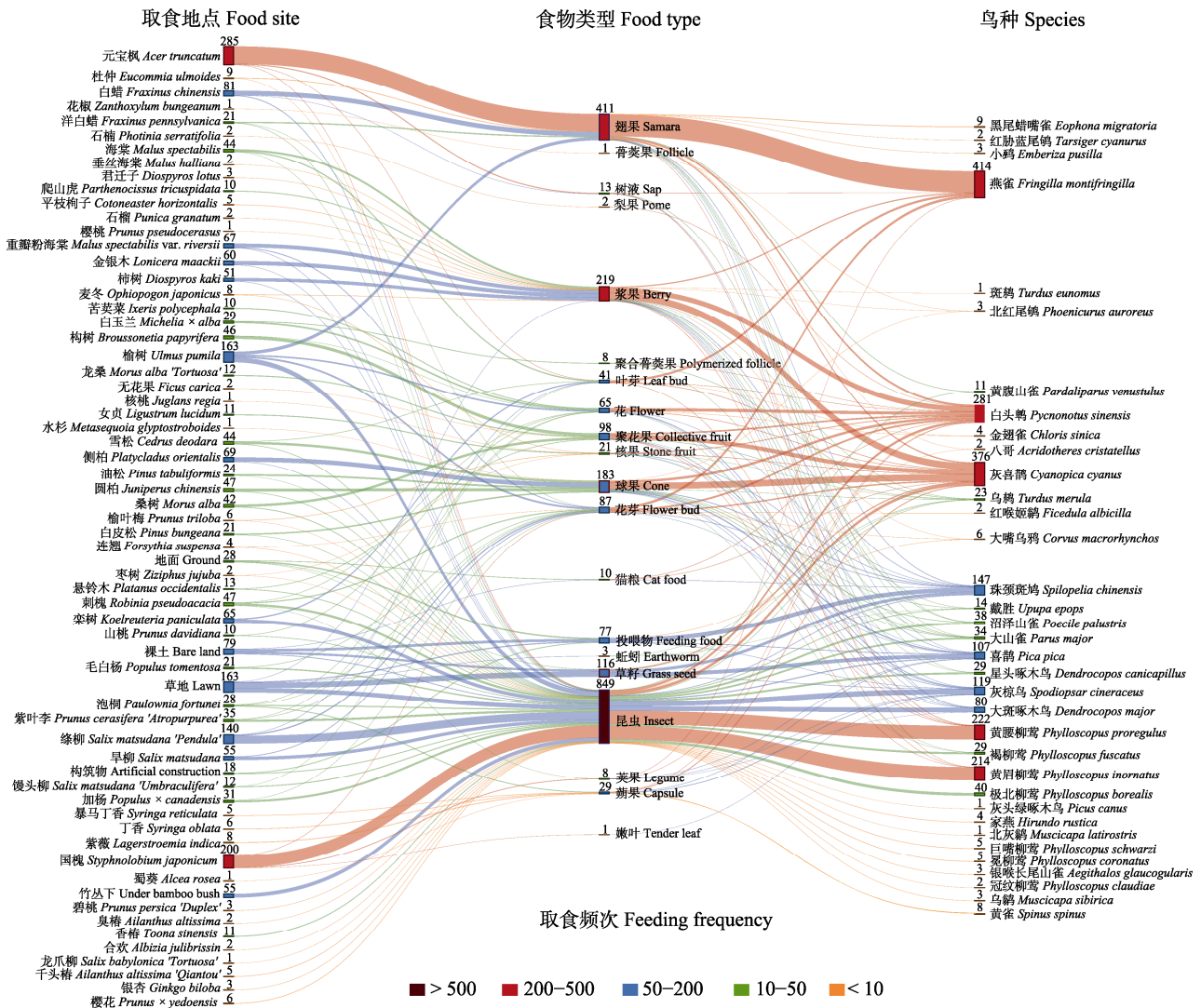


图2 北京居住区鸟类食源关系图。图中的数字表示取食行为频次。
Fig. 2 Relationship between birds and food sources in residential areas of Beijing. The number indicates the feeding frequency.

的为国槐、圆柏、绦柳、白蜡、元宝枫等北京常见乡土树种。直接取食植物器官的占总取食频次的60.4%，依托于植物的间接利用占比39.6%。根据不同的植物生活型，乔木贡献占比高达84.77%，各利用方式依次为：乔木直接利用(51.12%)、乔木间接利用(33.65%)、草本直接利用(4.95%)、灌木直接利用(3.90%)、草本间接利用(3.09%)、竹类间接利用(2.62%)、藤本直接利用(0.48%)、灌木间接利用(0.19%)，藤本植物未记录到间接利用方式。

在各季节中均是利用乔木最多，春季直接利用略多于间接利用，秋季间接利用略多于直接利用，而冬季间接利用明显减少；灌木主要为秋冬季节的直接利用；而草本直接利用主要在秋冬季节，间接

利用主要在春夏季节(图5)。基于所有小区的数据计算食源植物Shannon-Wiener多样性指数，依次为秋季(3.1612) > 冬季(2.9651) > 春季(2.9203) > 夏季(2.1763)，在食物匮乏的秋冬季，鸟类的食源更加丰富。

2.3 鸟类在居住区中取食的影响因素

2.3.1 外界环境因素的影响

通过模型选择，包含食源树种覆盖率和食源树种Shannon-Wiener多样性指数的模型是预测取食行为鸟类的丰富度($\Delta AICc = 0$, $R^2 = 0.5729$)和Shannon-Wiener多样性指数($\Delta AICc = 0$, $R^2 = 0.2516$)的最佳模型，而密度的最佳模型仅包括食源树种覆盖率($\Delta AICc = 0$, $R^2 = 0.2352$) (表2)，小区面积、



表1 北京居住区不同季节食源植物、鸟类的Bray-Curtis相似性系数

Table 1 Bray-Curtis similarity coefficients of food source plants or birds during different seasons in residential areas of Beijing

季节 Season	食源植物 Food source plant			鸟类 Bird		
	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
春季 Spring	0.0738	0.4725	0.4655	0.1389	0.5756	0.4789
夏季 Summer		0.1524	0.1115		0.2641	0.2027
秋季 Autumn			0.4291			0.4789

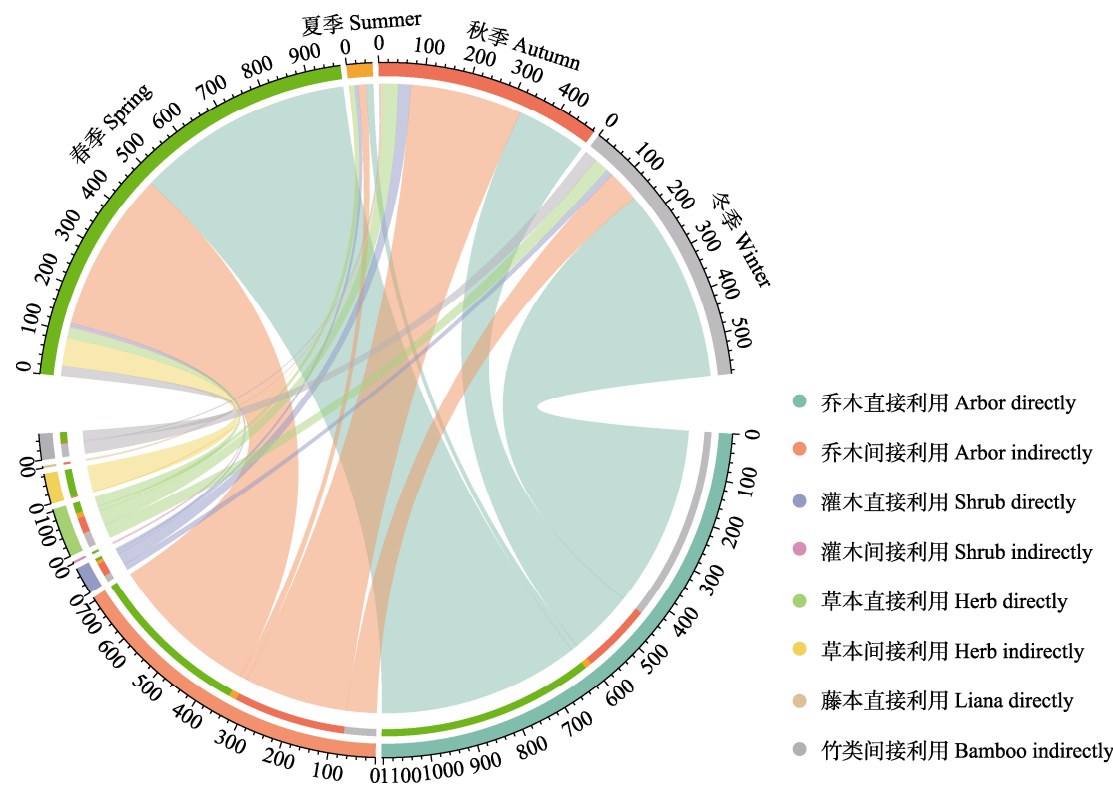


图5 不同季节鸟类对不同生活型植物的利用方式关系图。图中的数字刻度表示取食行为的频次。

Fig. 5 Plant utilization of different life forms by birds in different seasons. The numerical scale in the figure indicates the feeding frequency.

表2 基于取食行为的鸟类多样性与环境因子的模型选择

Table 2 Model selection relating bird diversity based on feeding behavior and environmental factors

响应变量 Response variables	模型 Model	自由度 df	$\Delta AICc$	权重 Weight	R^2
物种丰富度 Species richness	CFST + SFST	3	0	0.1518	0.5729
	CFST + SFST + PAR	4	0.0188	0.1504	0.5936
	CFST + SFST + CY	4	1.2920	0.0796	0.5786
	CFST + SFST + AREA	4	1.3209	0.0784	0.5692
物种密度 Species density	CFST	3	0	0.1447	0.2352
	CFST + SFST	4	0.5466	0.1101	0.2516
	CFST + SFST + AREA	5	1.7703	0.0597	0.2572
Shannon-Wiener多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	CFST + SFST	4	0	0.1129	0.2516
	CFST + SFST + CY	5	0.9647	0.0697	0.2516
	SFST	3	1.1036	0.0650	0.0358
	CFST + SFST + PAR	5	1.2596	0.0601	0.2431
	CFST + SFST + CY	5	1.9831	0.0419	0.2431
	CFST + SFST + BD	6	1.9843	0.0419	0.2253

CFST: 食源树种覆盖率; SFST: 食源树种Shannon-Wiener多样性指数; PAR: 周长面积比; CY: 建成时间; AREA: 小区面积; BD: 建筑密度。
CFST, Coverage of food source tree; SFST, Shannon-Wiener diversity index of food source tree; PAR, Perimeter-area ratio; CY, Completed year; AREA, Residential area; BD, Building density.

表3 基于取食行为的鸟类多样性与环境因子平均模型的参数估计

Table 3 Parameter estimation of the average model relating bird diversity based on feeding behavior to environmental factors

响应变量 Response variables	环境因子 Environmental factors	参数估计 Estimate	标准误 SE	P
物种丰富度 Species richness	CFST	0.3885	0.1141	< 0.001***
	SFST	0.5979	0.1749	< 0.001***
	PAR	-0.0918	0.1684	0.5909
	CY	0.0227	0.0707	0.7528
	AREA	0.0248	0.0776	0.7538
物种密度 Species density	CFST	8.9247	2.5447	< 0.001***
	SFST	2.1968	2.9115	0.4577
	AREA	-0.6399	1.8525	0.7342
Shannon-Wiener多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	CFST	0.2340	0.1696	0.1768
	SFST	0.5013	0.1594	0.0023**
	CY	0.0322	0.0928	0.7326
	PAR	-0.0665	0.1527	0.6672
	AREA	0.0138	0.0681	0.8434
	BD	0.0282	0.1034	0.7877

缩写含义见表2。The meaning of the abbreviation is shown in Table 2. ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

周长面积比、建成时间和建筑密度仅被包括在部分模型中。对上述模型进行模型平均, 食源树种覆盖率($P < 0.001$)和食源树种Shannon-Wiener多样性指数($P < 0.001$)是影响取食行为鸟类丰富度的关键环境因子, 食源树种覆盖率($P < 0.001$)是影响取食行为鸟类密度的关键环境因子, 食源树种Shannon-Wiener多样性指数($P = 0.0023$)是影响取食行为鸟类Shannon-Wiener多样性指数的关键环境因子(表3)。综上, 食源树种是影响鸟类在居住区中取食最关键的外界环境因素, 而小区特征的影响不显著。

2.3.2 自身食性因素的影响

NMDS排序图表明, 虫食性和杂食性的鸟种较为聚集且存在部分重叠, 而植食性的鸟种较为分散(stress = 0.1247) (图6)。相似食性的鸟种排序聚集说明食性是影响鸟类取食重要的内在因素。白头鹎、灰喜鹊、大斑啄木鸟(*Dendrocopos major*)、喜鹊等食源丰富度较高, 取食多种食源植物, 其中白头鹎、灰喜鹊、大斑啄木鸟食源多样性指数也较高即食性广泛, 而乌鶇(*Muscicapa sibirica*)等10种鸟类仅观测到1种食源(附录4)。线性回归分析表明, 鸟类多度和所分布的小区数量均与鸟类食源多样性指数呈显著的正相关且解释率较高($R^2 = 0.3455$, $P < 0.001$; $R^2 = 0.7044$, $P < 0.001$) (图7)。表明食源越丰

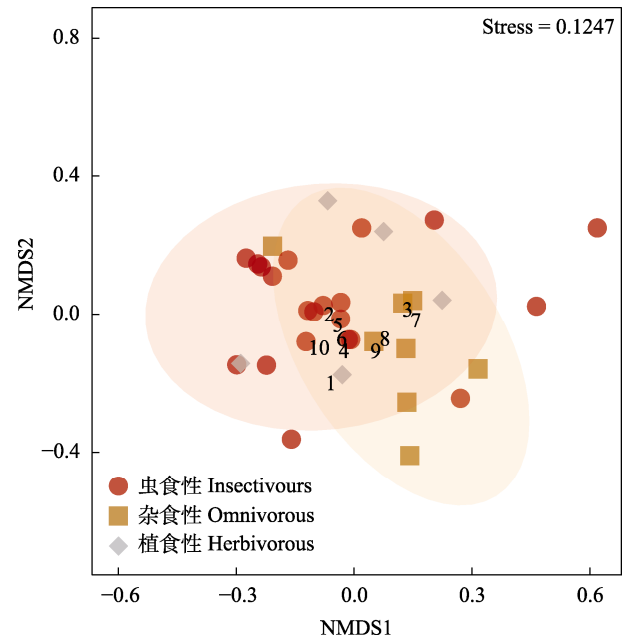


图6 基于取食行为的北京居住区鸟种排序图。图中数字表示前10位的取食地点, 椭圆表示95%的置信区间。1: 元宝枫; 2: 国槐; 3: 草地; 4: 榆树; 5: 绦柳; 6: 白蜡; 7: 裸土地; 8: 侧柏; 9: 重瓣粉海棠; 10: 栾树。

Fig. 6 Ranking map of bird species based on feeding behavior in residential areas of Beijing. Number indicates top 10 feeding sites, and ovals indicate 95% confidence intervals. 1, *Acer truncatum*; 2, *Styphnolobium japonicum*; 3, Lawn; 4, *Ulmus pumila*; 5, *Salix matsudana* 'Pendula'; 6, *Fraxinus chinensis*; 7, Bare land; 8, *Platycladus orientalis*; 9, *Malus spectabilis* var. *riversii*; 10, *Koelreuteria paniculata*.

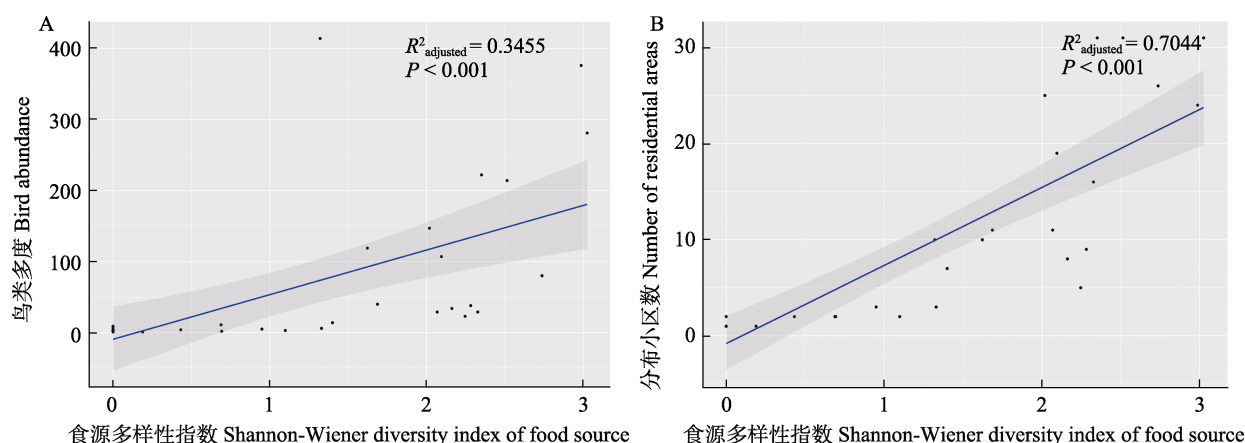


图7 北京居住区鸟类多度(A)、分布小区数(B)与食源多样性指数的线性回归。灰色区域表示拟合线的置信区间。

Fig. 7 Relationship between bird abundance (A), number of residential areas (B) and Shannon-Wiener diversity index of food source in residential areas of Beijing. Gray areas indicate confidence intervals for the fitted lines.

富、食性越广泛的鸟种, 其种群数量越大、分布范围越广泛, 更能够适应城市居住区的复杂环境, 而食源越单一的鸟种, 数量越少、分布越集中, 对特定的食物依赖度越高。

3 讨论

3.1 在居住区中取食的鸟类群落特征

北京共有鸟类503种(<http://yllhj.beijing.gov.cn/ztxx/ysdw/ml/>), 中心城区448种(<http://www.birdreport.cn/>), 常见鸟类约100种(关翔宇, 2016), 本研究共调查到50种鸟类, 占中心城区鸟类种数的11.16%, 基本覆盖了取食城市绿化植物的常见鸟类。但与Huang等(2015)在城市公园中的114种、隋金玲等(2007)在绿化隔离带的131种相比, 鸟种数较低, 推测是由于小区植被人工化程度高、生境单一、缺少水域等。小区受人为干扰大, 多为麻雀、白头鹎、珠颈斑鸠、喜鹊等适应人类环境、分布广泛的鸟种, 印证了高度城市化地区鸟类以与人类伴生的物种为主(Kornélia et al, 2021)。

与徐诗等(2021)在某社区中的研究结果相类似, 鸟种在春季和秋季迁徙期较多。夏季记录到的鸟种数少于其他季节, 推测原因是: (1)夏季繁殖期鸟类以取食昆虫为主(隋金玲等, 2006), 例如家燕(*Hirundo rustica*)等夏候鸟为空中捕食, 对植物的依赖度较低; (2)冬季城市环境是重要的越冬场所, 物种丰富度在冬季显著升高(Tzortzakaki et al, 2018), 例如大山雀(*Parus major*)等许多留鸟在夏季会到近

郊山地或森林中进行繁殖育雏, 而秋冬季食物匮乏时则会到城区游荡觅食; (3)夏季鸟类更易寻找到食物, 取食活动时间短且常隐蔽在树冠中不易观测, 因此记录到的物种数和数量较少。

3.2 鸟类食源特征及人为活动的影响

鸟类的食物具有种间特异性和时空特异性(李翔等, 2018), 其食物来源与动植物的物候相关联, 对植物的利用在11月至次年3月达到高峰。食物可获得性决定了鸟类分布(Ferger et al, 2014), 各季节的鸟类种类和数量与盛花期和盛果期的乔木种类变化趋势相同, 即使同一季节, 盛花盛果乔木上的鸟类较多(史慧灵等, 2016), 植物的结果期不同也使得鸟类对果实的利用存在差异(Gallinat et al, 2020), 当鸟类无法获得成熟的果实时, 则会取食平时不吃的未成熟的果实, 来确保营养和能量的获取(Mercedes, 1977)。植物的果肉能够吸引众多的食果鸟(Zhu et al, 2022), 它们的体重与可获得的果实丰度正相关(González-Varo et al, 2021)。此外, 初春植物体内各种组织开始活跃, 燕雀、啄木鸟类、山雀类等鸟类会通过吸食元宝枫树干分泌出的树液来补充养分。

鸟类对昆虫的取食集中在4-10月的昆虫活跃期, 繁殖期鸟类靠捕捉昆虫育雏, 如, 迁徙过境的柳莺类、鹟类等虫食性鸟类, 春季在槐树和各类柳树上取食, 秋季在紫叶李(*Prunus cerasifera* 'Pissardii')、榆树、栎树(*Koelreuteria paniculata*)等易受虫害的树种上取食。大斑啄木鸟、星头啄木鸟

(*Dendrocopos canicapillus*)等攀禽也在刺槐、泡桐(*Paulownia tomentosa*)和榆树等高大乔木上取食天牛、小蠹、吉丁虫、象甲等各类蛀干害虫。研究表明,食虫鸟的体型大小与其所食节肢动物的体型大小正相关,鞘翅目是被鸟类利用最多的节肢动物,其次是蛛形目、膜翅目和鳞翅目(Katerina et al, 2017),甚至枯死木上大量的鳞翅目昆虫幼虫亦是鸟类的食物来源(范喜顺等, 2005)。今后有待将鸟类的食性与具体的昆虫种类进行关联。

受人为活动影响,人工投喂在维持鸟类多样性上具有重要作用,例如小米、玉米等谷物为食谷鸟珠颈斑鸠提供了全年的口粮。居民的友好行为为鸟类提供了食源,在食物匮乏期实现与植物食源的互补,灰喜鹊等鸟在深冬也会取食流浪猫的猫粮。

3.3 鸟类对不同生活型植物的利用

居住区的食源植物具有类型丰富、种类繁多、从早春到晚秋覆盖全物候、供给期长的特点。木本植物的丰富度和多样性显著影响鸟类多样性(Yang et al, 2015),乔木是利用率最高的树种,由于利用期长,花芽、叶芽、果实等全物候均可作为食物。同时多数鸟类喜欢在冠大荫浓的树上采食(隋金玲等, 2006),隐蔽性强增加了取食安全性。利用灌木或草本的较少,这与绿化配置方式和养护管理方式有关,灌木多为高度修剪的绿篱,金银木等丛生型灌木也常过度修剪,规则式或频繁修剪不易形成花与果实(洗丽铎等, 2020)。自生草本地被是维持生物多样性的的重要因素(李晓鹏等, 2018; 李晓鹏和董丽, 2020; 陈颖等, 2021),可全年为鸟类提供丰富的节肢动物、植物和种子(Cabodevilla et al, 2021),枯枝落叶层也有利于维持较高的鸟类多样性(Shwartz et al, 2008)。而小区中多是人工种植的草或草坪,自生草本也作为杂草被清理,调查中发现苦苣菜(*Ixeris polycephala*)就吸引了成群的灰椋鸟(*Spodiopsar cineraceus*)前来取食花瓣。

春夏季频繁使用杀虫剂也减少了灌木层和本层的昆虫。鸟类对昆虫的偏好依次为鲜活、新鲜死亡和死后干燥的个体(Stafford et al, 2003),早园竹(*Phyllostachys propinqua*)易遭受蚜虫、竹螟等虫害,却吸引了灰喜鹊、灰椋鸟成群觅食。过分依赖杀虫剂也间接杀灭了食虫鸟(范喜顺等, 2005),同时农药包覆在种子上有潜在毒性,例如鹁鸪

(*Fringilla monticola*)就会避开被杀虫剂处理的种子(Lopez-Antia et al, 2014),因此避免过度使用杀虫剂有助于提高鸟类多样性。

3.4 鸟类在居住区中取食的影响因素

食源树种是影响鸟类取食最关键的外界环境因素,虽然研究表明高度城市化使得鸟类食源更窄(Peneaux et al, 2021),但居住区绿地碎片化、异质性较高(Jiao et al, 2021),人工种植的食源植物为鸟类提供了丰富的食源。鸟类多样性与食源树种物种数之间存在正相关(谭丽凤和杨昌尚, 2010; 史慧灵等, 2016),但密度仅受食源树种量的影响,与种类无关,即使种类单一但量多时也会吸引鸟类,例如灰喜鹊常集群在松柏林中觅食。以往的研究中,鸟类多样性与绿地面积常呈正相关(Huang et al, 2015; Callaghan et al, 2018),鸟类更倾向于占据城市公园(Tiwary & Urfi, 2016),但本研究中面积效应不显著,可能是由于小区与大型城市公园绿地相比规模较小,相较于鸟类的活动范围,小区只是其中一部分或仅作为取食的餐厅。此外当拥有充分的食物供给时,面积就不再是影响鸟类丰富度的主要因素(李相逸等, 2018)。本研究中用建筑密度反映城市化程度和人类干扰强度,多数研究表明鸟类多样性与建筑物比例呈现负相关或不显著(郭诗怡等, 2022),随着建筑密度的增加,鸟类的丰富度以及虫食性鸟的丰度下降,而城市适应者和杂食性物种却增加(Amaya-Espinel et al, 2019)。小区中鸟类多为城市适应者和开拓者(Geschke et al, 2018),且以杂食性为主,但其取食不存在明显的空间异质性,可能是由于研究区是用地类型均质的高度城市化地区。

鸟类自身的习性对其取食行为有显著影响。研究中珠颈斑鸠、白头鹎等食性较广的鸟种受具体树种的影响较小,广泛分布在各个小区,更能够适应城市居住区的复杂环境,表现出较强的环境适应能力(孙丰硕等, 2016)。食性窄的鸟种对食源植物选择性强,可选择的范围较小(何海燕等, 2021),在小区中数量少、分布集中。例如白蜡、元宝枫较多的小区会吸引成群的燕雀、黑尾蜡嘴雀(*Eophona migratoria*)越冬。

3.5 居住区绿化植物配置与养护管理的建议

居住区植物配置时,要做到乔灌木科学配置、优化时空布局、乡土树种协调发展。配置杨、柳、

榆、槐等乡土树种以及金银木等观果植物作为引鸟树种,适当减少观赏性高而生态价值较低的绿篱、观花灌木和小乔木。增加野化灌木层,为在不同生态位生活的多种鸟类提供适合的栖息条件(彭子嘉等, 2020)。这与北京市新一轮百万亩造林绿化工程(http://yllhj.beijing.gov.cn/zwgk/fgwj/qtwj/201911/t20191130_766897.shtml)提出的“复层、异龄、混交、多功能”相契合。植被养护管理时,在注重景观营造的同时更要营建近自然的生物栖息地。与传统绿地相比,近自然绿地具有更显著的生物多样性(王沫等, 2022)。高度修剪的人工化栽培方式的绿篱、花灌木不利于鸟类微生境的营造,地被层的杂草是种子、昆虫等食物的载体,丰富了食物链。有研究显示公园管理程度与鸟类丰富度呈明显的负相关(Shwartz et al, 2008),因此在小区内有必要倡导低干扰的近自然园林养护管理措施,合理除草、适度修剪、避免过度用药、提倡生物防治。

本研究探究了北京居住区鸟类的食源特征,揭示了绿化植物为鸟类直接或间接地提供食物,人类的投喂行为也是鸟类度过食物匮乏期的重要补充。小区在绿化建设时配置食源树种、减少绿篱使用,采取低干扰的近自然园林养护管理措施,有利于营造鸟语花香的森林社区,建设鸟类友好型城市。本研究是基于鸟类取食行为开展的,而实际鸟类对生境的选择还依赖于是否能提供安全的筑巢场所、停息的庇护所等,今后有待进一步在鸟类植物生境偏好、夜栖地选择等方面开展相关研究。

参考文献

- Amaya-Espinel JD, Hostetler M, Henríquez C, Bonacic C (2019) The influence of building density on neotropical bird communities found in small urban parks. *Landscape and Urban Planning*, 190, 103578.
- Cabodevilla X, Mougeot F, Bota G, Mañosa S, Cuscó F, Martínez-García J, Arroyo B, Madeira MJ (2021) Metabarcoding insights into the diet and trophic diversity of six declining farmland birds. *Scientific Reports*, 11, 21131.
- Callaghan CT, Major RE, Lyons MB, Martin JM, Kingsford RT (2018) The effects of local and landscape habitat attributes on bird diversity in urban greenspaces. *Ecosphere*, 9, e02347.
- Chen Y, Dai XA, Zhang QF, Zhou KX, Hu FL (2021) Characteristics and utilization potential of spontaneous vegetation in Shanghai Chemical Industry Park. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 19(5), 9–15. (in Chinese with English abstract) [陈颖, 戴兴安, 张庆费, 周开叙, 胡芳亮 (2021) 上海化工区自生植被特征与利用潜力. *中国城市林业*, 19(5), 9–15.]
- Fan XS, Hu DF, Chen HZ, Su X, Wang F (2005) Study on the restrictive factors for bird survival in cultivation areas of North China Plain. *Arid Zone Research*, 22, 4497–4502. (in Chinese with English abstract) [范喜顺, 胡德夫, 陈合志, 苏鑫, 王峰 (2005) 华北平原耕作区鸟类生存制约因子初步研究. *干旱区研究*, 22, 4497–4502.]
- Ferger SW, Schleuning M, Hemp A, Howell KM, Böhning-Gaese K (2014) Food resources and vegetation structure mediate climatic effects on species richness of birds. *Global Ecology and Biogeography*, 23, 541–549.
- Gallinat AS, Primack RB, Lloyd-Evans TL (2020) Can invasive species replace native species as a resource for birds under climate change? A case study on bird–fruit interactions. *Biological Conservation*, 241, 108268.
- Gao J, Li DH, Jiang HB, Deng GY, Zhang CF, He CG, Sun P (2022) Reasons why white cranes use farmland as transit feeding habitat. *Biodiversity Science*, 30, 22093. (in Chinese with English abstract) [高洁, 李德浩, 姜海波, 邓光怡, 张超凡, 何春光, 孙鹏 (2022) 白鹤利用农田作为中转取食生境的原因. *生物多样性*, 30, 22093.]
- Geschke A, James S, Bennett AF, Nimmo DG (2018) Compact cities or sprawling suburbs? Optimising the distribution of people in cities to maximise species diversity. *Journal of Applied Ecology*, 55, 2320–2331.
- González-Varo JP, Onrubia A, Pérez-Méndez N, Tarifa R, Illera JC (2021) Fruit abundance and trait matching determine diet type and body condition across frugivorous bird populations. *Oikos*, 2021, 511.
- Guan XY (2016) List of 100 common birds in Beijing. *Forest & Humankind*, (2), 158–159. (in Chinese) [关翔宇 (2016) 北京100种常见鸟类名录. *森林与人类*, (2), 158–159.]
- Guo SY, Kaoru S, Yoshihiro N, Cao Y (2022) The mechanism of urban built environment impact on avian diversity—A systematic review. *Chinese Landscape Architecture*, 38(2), 71–76. (in Chinese with English abstract) [郭诗怡, 斎藤馨, 夏原由博, 曹洋 (2022) 城市建成环境对鸟类多样性的影响机制研究评述及展望. *中国园林*, 38(2), 71–76.]
- Han D, Wang C, Yin LQ (2021) Characteristics of butterfly-nectar plant network in Beijing's urban parks and identifying important nectariferous plant species. *Acta Ecologica Sinica*, 41, 8892–8905. (in Chinese with English abstract) [韩丹, 王成, 殷鲁秦 (2021) 北京城市蝴蝶蜜源植物网络特征及重要蜜源植物识别. *生态学报*, 41, 8892–8905.]
- He HY, Wang N, Dong L (2021) A case study to investigate the foraging pattern of urban birds on edible plants in Beijing. *Chinese Journal of Zoology*, 56, 491–499. (in Chinese with English abstract) [何海燕, 王楠, 董路 (2021) 北京城市鸟类对食源植物利用规律. *动物学杂志*,

- 56, 491–499.]
- Huang Y, Zhao Y, Li S, Gadow K (2015) The effects of habitat area, vegetation structure and insect richness on breeding bird populations in Beijing urban parks. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14, 1027–1039.
- Jiao M, Xue H, Yan J, Zheng Z, Wang J, Zhao C, Zhang L, Zhou W (2021) Tree abundance, diversity and their driving and indicative factors in Beijing's residential areas. *Ecological Indicators*, 125, 107462.
- Katerina S, Bonny K, Samuel J, Jana S, Vojtech N (2017) Diet of land birds along an elevational gradient in Papua New Guinea. *Scientific Reports*, 7, 44018.
- Kornélia K, Purger JJ, Batáry P (2021) Urbanization shapes bird communities and nest survival, but not their food quantity. *Global Ecology and Conservation*, 26, e01475.
- Li T, Jia BQ, Wang C, Qiu EF, Li XT (2021) Village human habitat forest canopy coverage and regional difference analysis in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 41, 5598–5610. (in Chinese with English abstract) [李彤, 贾宝全, 王成, 邱尔发, 李晓婷 (2021) 北京市域乡村人居林树冠覆盖及其区域差异分析. *生态学报*, 41, 5598–5610.]
- Li X, Li YB, Wu QM, Sui Y, Liu XY, Paiyizulamu S, He FY, Xia DX (2018) Suggestion on provisioned food in bird week based on diet characteristic guild. *Chinese Journal of Wildlife*, 39, 366–372. (in Chinese with English abstract) [李翔, 李祎斌, 吴庆明, 隋媛, 刘新宇, 沙力瓦·拍依祖拉木, 何富英, 夏丹霞 (2018) 基于食性集团的爱鸟周人工投食建议. *野生动物学报*, 39, 366–372.]
- Li XP, Dong L, Guan JH, Zhao F, Wu SJ (2018) Temporal and spatial characteristics of spontaneous plant composition and diversity in a Beijing urban park. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 581–594. (in Chinese with English abstract) [李晓鹏, 董丽, 关军洪, 赵凡, 吴思佳 (2018) 北京城市公园环境下自生植物物种组成及多样性时空特征. *生态学报*, 38, 581–594.]
- Li XP, Dong L (2020) Species composition and community types of autophytes in different parks in Beijing. *Landscape Architecture*, 27(4), 42–49. (in Chinese with English abstract) [李晓鹏, 董丽 (2020) 北京不同公园自生植物物种组成特征及群落类型. *风景园林*, 27(4), 42–49.]
- Li XY, Cao L, Ma C, Li WR (2018) Research on avian abundance and their correlation with environmental variables at coastal wet-land in Tianjin. *Landscape Architecture*, 25(6), 107–112. (in Chinese with English abstract) [李相逸, 曹磊, 马超, 李维榕 (2018) 天津滨海滩涂湿地鸟类丰富度与环境因子的关系研究. *风景园林*, 25(6), 107–112.]
- Liu NN, Shou DY, Da LJ (2018) Biodiversity pattern and species group classification of park birds along urbanization gradient in Shanghai. *Chinese Journal of Ecology*, 37, 3676–3684. (in Chinese with English abstract) [刘娜娜, 寿丹艺, 达良俊 (2018) 上海公园绿地鸟类多样性的城市化梯度格局及类群划分. *生态学杂志*, 37, 3676–3684.]
- Liu X, Zhang WH, Li YH, Gao PJ, Li L, Wang T (2018) Planning and restoration of bird habitats in a wetland park: A case study of the Liuli River Wetland Park in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 4404–4411. (in Chinese with English abstract) [刘旭, 张文慧, 李咏红, 高鹏杰, 李黎, 王彤 (2018) 湿地公园鸟类栖息地营建研究——以北京琉璃河湿地公园为例. *生态学报*, 38, 4404–4411.]
- Lopez-Antia A, Ortiz-Santaliestra ME, Mateo R (2014) Experimental approaches to test pesticide-treated seed avoidance by birds under a simulated diversification of food sources. *Science of the Total Environment*, 496, 179–187.
- Mercedes SF (1977) Ecological and nutritional effects of food scarcity on a tropical frugivorous bird and its fruit source. *Ecology*, 58, 73–85.
- Mortelliti A, Fagiani S, Battisti C, Capizzi D, Boitani L (2010) Independent effects of habitat loss, habitat fragmentation and structural connectivity on forest-dependent birds. *Diversity and Distributions*, 16, 941–951.
- Peneaux C, Grainger R, Lermite F, Machovsky-Capuska GE, Gaston T, Griffin AS (2021) Detrimental effects of urbanization on the diet, health, and signal coloration of an ecologically successful alien bird. *Science of the Total Environment*, 796, 148828.
- Peng ZJ, Gao T, Shi CZ, Chen YY, Bi J, Qiu L (2020) The relationships between vegetation structure, habitat characteristics and bird diversity in campus green spaces. *Chinese Journal of Ecology*, 39, 3032–3042. (in Chinese with English abstract) [彭子嘉, 高天, 师超众, 陈颖媛, 毕骄, 邱玲 (2020) 校园绿地植被结构、生境特征与鸟类多样性关系. *生态学杂志*, 39, 3032–3042.]
- Sandström UG, Angelstam P, Mikusinski G (2006) Ecological diversity of birds in relation to the structure of urban green space. *Landscape and Urban Planning*, 77, 39–53.
- Shi HL, Bai HT, Wu LZ, Wu ZL, Fu W, Lei Y (2016) The effect of urban space structure on bird diversity in Kunming. *Sichuan Journal of Zoology*, 35, 774–780. (in Chinese with English abstract) [史慧灵, 白皓天, 吴良早, 吴兆录, 傅伟, 雷苑 (2016) 昆明城市绿地结构对鸟类多样性的影响. *四川动物*, 35, 774–780.]
- Shwartz A, Shirley S, Kark S (2008) How do habitat variability and management regime shape the spatial heterogeneity of birds within a large Mediterranean urban park? *Landscape and Urban Planning*, 84, 219–229.
- Souza F, Valente-Neto F, Severo-Neto F, Bueno B, Ochoa-Quintero JM, Laps RR, Bolzan F, de Oliveira Roque F (2019) Impervious surface and heterogeneity are opposite drivers to maintain bird richness in a Cerrado city. *Landscape and Urban Planning*, 192, 103643.
- Stafford JM, Brewer LW, Gessaman JA (2003) Avian food selection with application to pesticide risk assessment: Are dead and desiccated insects a desirable food source? *Environmental Toxicology and Chemistry*, 22, 1335–1339.
- Sui JL, Zhang X, Hu DF, Li K, Wang MZ, Fu RH (2007)

- Relationship between bird communities and environment factors at green belts in the urban area of Beijing. *Journal of Beijing Forestry University*, 29(5), 121–126. (in Chinese with English abstract) [隋金玲, 张香, 胡德夫, 李凯, 王民中, 付瑞海 (2007) 北京绿化隔离地区鸟类群落与环境因子关系研究. *北京林业大学学报*, 29(5), 121–126.]
- Sui JL, Zhang ZX, Hu DF, Wang MZ, Fu RH (2006) Studies on bird-feed trees at green belts of Beijing urban area. *Scientia Silvae Sinicae*, 42(12), 83–89. (in Chinese with English abstract) [隋金玲, 张志翔, 胡德夫, 王民中, 付瑞海 (2006) 北京市区绿化带内鸟类食源树种研究. *林业科学*, 42(12), 83–89.]
- Sun FS, Liu Y, Qi L, Cao H, Sui JL (2016) Characteristics of bird community in Beijing urban greenland in winter. *Scientia Silvae Sinicae*, 52(5), 134–141. (in Chinese with English abstract) [孙丰硕, 刘焱, 齐磊, 曹翰, 隋金玲 (2016) 北京城市绿地冬季鸟类群落特征. *林业科学*, 52(5), 134–141.]
- Tan LF, Yang CS (2010) Study on bird-feed trees in parks of Liuzhou urban area in winter. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 38, 19428–19430. (in Chinese with English abstract) [谭丽凤, 杨昌尚 (2010) 柳州城市公园冬季鸟类食源树种调查研究. *安徽农业科学*, 38, 19428–19430.]
- Tiwary NK, Urfi AJ (2016) Spatial variations of bird occupancy in Delhi: The significance of woodland habitat patches in urban centres. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, 338–347.
- Tzortzakaki O, Kati V, Kassara C, Tietze DT, Giokas S (2018) Seasonal patterns of urban bird diversity in a Mediterranean coastal city: The positive role of open green spaces. *Urban Ecosystems*, 21, 27–39.
- Wang L, Ding ZF, Hu JM, Yin WY, Hu HJ (2016) Bird preference to food source trees in urban green space, Guangzhou, China. *Sichuan Journal of Zoology*, 35, 838–844. (in Chinese with English abstract) [王玲, 丁志锋, 胡君梅, 尹五元, 胡慧建 (2016) 广州城市绿地中鸟类对食源树种的偏好. *四川动物*, 35, 838–844.]
- Wang M, Liu C, Li XL, Gao JH, Li X, Dong L (2022) Biodiversity characteristics in near-natural community parks: A case study in the central area of Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 42, 8254–8264. (in Chinese with English abstract) [王沫, 刘畅, 李晓璐, 高俊宏, 李霞, 董丽 (2022) 近自然社区公园的生物多样性特征研究——以北京市中心城区为例. *生态学报*, 42, 8254–8264.]
- Wang Y, Xu J, Yang G, Li HQ, Wu SY, Tang HM, Ma B, Wang ZH (2014) The composition of common woody plant species and their influence on bird communities in urban green areas. *Biodiversity Science*, 22, 196–207. (in Chinese with English abstract) [王勇, 许洁, 杨刚, 李宏庆, 吴时英, 唐海明, 马波, 王正寰 (2014) 城市公共绿地常见木本植物组成对鸟类群落的影响. *生物多样性*, 22, 196–207.]
- Xian LH, Xu BY, Weng SF, Feng ZJ (2020) Application of food source tree species and the construction of ecological landscape in urban green space of Guangzhou. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 40(2), 142–147. (in Chinese with English abstract) [洗丽铨, 徐彬瑜, 翁殊斐, 冯志坚 (2020) 广州城市园林绿地食源树种应用及其生态景观营造. *中南林业科技大学学报*, 40(2), 142–147.]
- Xu S, Wang C, Han D, Sun BQ, Zhao YL (2021) Bird community composition and its seasonal variation in comprehensive communities in Beijing: A case study of Chinese Academy of Forestry. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 19(1), 25–30. (in Chinese with English abstract) [徐诗, 王成, 韩丹, 孙宝强, 赵伊琳 (2021) 北京综合性社区鸟类群落构成及其季节变化——以中国林业科学研究院社区为例. *中国城市林业*, 19(1), 25–30.]
- Yang G, Wang Y, Xu J, Ding YZ, Wu SY, Tang HM, Li HQ, Wang XM, Ma B, Wang ZH (2015) The influence of habitat types on bird community in urban parks. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 4186–4195. (in Chinese with English abstract) [杨刚, 王勇, 许洁, 丁由中, 吴时英, 唐海明, 李宏庆, 王小明, 马波, 王正寰 (2015) 城市公园生境类型对鸟类群落的影响. *生态学报*, 35, 4186–4195.]
- Yang G, Xu J, Wang Y, Wang XM, Pei EL, Yuan X, Li HQ, Ding YZ, Wang ZH (2015) Evaluation of microhabitats for wild birds in a Shanghai urban area park. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14, 246–254.
- Zhang SP, Zheng GM, Xu JL (2006) Habitat use of urban tree sparrows in the process of urbanization: Beijing as a case study. *Biodiversity Science*, 14, 372–381. (in Chinese with English abstract) [张淑萍, 郑光美, 徐基良 (2006) 城市化对城市麻雀栖息地利用的影响: 以北京市为例. *生物多样性*, 14, 372–381.]
- Zhang WQ, Dong L (2015) Study of bird preference to plant habitat and species in Beijing urban park. *Chinese Landscape Architecture*, 31(8), 15–19. (in Chinese with English abstract) [张皖清, 董丽 (2015) 北京城市公园中鸟类对植物生境及种类的偏好研究. *中国园林*, 31(8), 15–19.]
- Zhu C, Li W, Gregory T, Wang DR, Ren P, Zeng D, Kang Y, Ding P, Si XF (2022) Arboreal camera trapping: A reliable tool to monitor plant–frugivore interactions in the trees on large scales. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 8, 92–104.
- Zhuang YM, Kong FH, Yin HW, Zhang LL, Sun ZR (2012) A review on the urban green space pattern affecting avian community. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 36(3), 131–136. (in Chinese with English abstract) [庄艳美, 孔繁花, 尹海伟, 张琳琳, 孙振如 (2012) 城市绿地空间格局对鸟类群落影响的研究进展. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 36(3), 131–136.]

(责任编辑: 吴永杰 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 北京市40个居住小区环境参数

Appendix 1 Environmental parameters of 40 residential areas in Beijing
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022473-1.pdf>

附录2 外界环境因子的Pearson相关性(r)分析结果

Appendix 2 External Pearson correlations coefficients (r) among environmental factors
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022473-2.pdf>

附录3 北京市居住小区基于取食行为的鸟类多样性参数

Appendix 3 Bird diversity parameters based on feeding behavior in residential areas of Beijing
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022473-3.pdf>

附录4 北京市居住小区有取食行为的鸟类名录

Appendix 4 Bird list of feeding behavior in residential areas of Beijing
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022473-4.pdf>

附录1 北京市40个居住小区环境参数
Appendix 1 Environmental parameters of 40 residential areas in Beijing

小区编号 No.	面积 Area (ha)	建成时间 Completed year	建筑密度 Building density	平均层数 Average floors	容积率 Plot ratio	周长面积比 Perimeter- area ratio	树冠覆盖率 Tree coverage	食源树种丰富度 Food source tree richness	食源树种覆盖率 Coverage of food source tree	食源树种Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon- Wiener index of food source tree
1	3.70	1994	0.2633	7.75	2.04	0.0253	0.4255	20	0.4169	2.2821
2	4.51	2009	0.2350	15.66	3.68	0.0259	0.4752	25	0.5192	2.0487
3	5.83	2001	0.3788	9.4	3.56	0.0167	0.2997	22	0.1834	2.3589
4	5.57	2008	0.1975	16.3	3.22	0.0200	0.3687	24	0.2858	2.0684
5	0.89	1999	0.5927	8.72	5.17	0.0476	0.1012	7	0.0810	1.5391
6	5.57	2003	0.2163	13.62	2.95	0.0208	0.3101	27	0.2288	2.5749
7	6.46	2001	0.2556	12.32	3.15	0.0155	0.3199	28	0.3161	2.6543
8	3.41	1996	0.4275	5.43	2.32	0.0235	0.1804	22	0.1018	2.4807
9	3.75	2005	0.2205	6.00	1.32	0.0210	0.1424	8	0.1225	0.6921
10	4.49	2001	0.2290	16.48	3.77	0.0224	0.3895	19	0.3486	2.2490
11	7.52	2010	0.2046	18.77	3.84	0.0156	0.2267	22	0.1954	2.5499
12	6.56	2000	0.1872	14.5	2.71	0.0156	0.2834	19	0.1771	2.1895
13	9.41	2007	0.1990	16.55	3.29	0.0131	0.2190	24	0.1780	2.3129
14	7.31	2008	0.2188	5.63	1.23	0.0165	0.2762	25	0.2769	2.6778
15	5.88	2005	0.2818	6.76	1.9	0.0175	0.3042	23	0.2732	2.1791
16	6.67	2004	0.2814	6.85	1.93	0.0159	0.1364	22	0.0698	2.3220
17	2.62	1996	0.3686	4.20	1.55	0.0262	0.1143	14	0.0934	2.2547
18	9.45	2008	0.3124	14.46	4.52	0.0136	0.2093	27	0.1298	2.7751
19	4.03	2002	0.3002	9.53	2.86	0.0239	0.2564	20	0.1527	2.2318
20	2.25	1988	0.3619	4.93	1.78	0.0305	0.2987	15	0.3040	1.7801
21	5.72	1992	0.3153	9.87	3.11	0.0198	0.2534	22	0.2790	2.5014
22	3.94	1980	0.3768	4.47	1.68	0.0256	0.1705	18	0.1946	1.8542
23	2.99	2004	0.2706	9.53	2.58	0.0244	0.2978	18	0.2514	2.3932
24	2.09	2005	0.1870	18.38	3.44	0.0289	0.1409	10	0.0936	1.5873

小区编号 No.	面积 Area (ha)	建成时间 Completed year	建筑密度 Building density	平均层数 Average floors	容积率 Plot ratio	周长面积比 Perimeter- area ratio	树冠覆盖率 Tree coverage	食源树种丰富度 Food source tree richness	食源树种覆盖率 Coverage of food source tree	食源树种Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon- Wiener index of food source tree
25	0.78	1993	0.4481	6.00	2.69	0.0491	0.1192	14	0.0954	1.8861
26	3.63	1992	0.4554	4.59	2.09	0.0248	0.2042	14	0.2334	2.0742
27	3.20	2003	0.3356	10.57	3.55	0.0229	0.3015	11	0.3475	1.6242
28	5.36	2006	0.3329	12.03	4.00	0.0209	0.2841	18	0.2425	2.1078
29	4.60	1975	0.2259	3.96	0.89	0.0214	0.5110	25	0.5397	2.3425
30	6.29	2004	0.2032	7.69	1.56	0.0186	0.3478	24	0.2246	2.3045
31	3.82	1985	0.2777	3.19	0.89	0.0227	0.5517	20	0.5358	2.0794
32	3.64	2004	0.3603	8.99	3.24	0.0232	0.2047	19	0.1718	2.1877
33	6.99	1996	0.2155	6.00	1.29	0.0207	0.3680	29	0.3789	2.5521
34	13.31	2008	0.2479	18.23	4.52	0.0128	0.3098	23	0.2472	2.4393
35	5.87	2007	0.2542	15.47	3.93	0.0170	0.2770	17	0.1809	1.8788
36	5.87	2008	0.3484	6.65	2.32	0.0207	0.5224	21	0.3192	2.0324
37	5.79	1988	0.2514	8.15	2.05	0.0177	0.1257	26	0.1036	2.4261
38	6.27	2008	0.3187	6.27	2.00	0.0165	0.2773	22	0.1800	2.5253
39	4.67	2002	0.2869	15.4	4.42	0.0220	0.3054	22	0.2285	2.5480
40	12.69	2008	0.2316	13.03	3.02	0.0125	0.2914	26	0.2342	2.6093

附录2 外界环境因子的Pearson相关性(r)分析结果
Appendix 2 External Pearson correlations coefficients (r) among environmental factors

	小区面积 Area	建成时间 Completed year	建筑密度 Building density	平均层数 Average floors	容积率 Plot ratio	周长面积 比 Perimeter- area ratio	树冠覆盖率 Tree coverage	食源树种丰富度 Food source tree richness	食源树种覆 盖率 Coverage of food source tree
建成时间 Completed year	0.4227								
建筑密度 Building density	-0.4907	-0.2833							
平均层数 Average floors	0.4206	0.6015	-0.4602						
容积率 Plot ratio	0.1782	0.5034	0.1591	0.7745					
周长面积比 Perimeter-area ratio	-0.7861	-0.3475	0.6476	-0.2988	0.0586				
树冠覆盖率 Tree coverage	0.1604	-0.0646	-0.3701	0.0138	-0.1773	-0.2518			
食源树种丰富度 Food source tree richness	0.6507	0.0991	-0.4860	0.1558	-0.0989	-0.6288	0.4189		
食源树种覆盖率 Food source tree coverage	0.0367	-0.2648	-0.3051	-0.0816	-0.2461	-0.1203	0.9014	0.3212	
食源树种 Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index of food source tree	0.5405	0.0887	-0.2227	0.1499	0.0529	-0.4890	0.2044	0.8262	0.1189

附录3 北京市居住小区基于取食行为的鸟类多样性参数
Appendix 3 Bird diversity parameters based on feeding behavior in residential areas of Beijing

小区编号 No.	位置 Location	物种丰富度 Species richness	物种多度 Species abundance	物种密度 Species density (ind./ha)	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index
1	39°58' N, 116°23' E	10	62	16.7554	2.1536
2	39°54' N, 116°19' E	10	56	12.4280	2.0713
3	39°53' N, 116°22' E	7	24	4.1180	1.7983
4	39°54' N, 116°29' E	10	49	8.7918	1.9998
5	39°54' N, 116°21' E	2	5	5.5982	0.5004
6	39°52' N, 116°19' E	10	82	14.7324	1.7748
7	40°0' N, 116°23' E	13	274	42.3842	1.8690
8	39°55' N, 116°21' E	10	26	7.6141	2.0378
9	39°48' N, 116°17' E	2	24	6.3934	0.5117
10	39°57' N, 116°18' E	10	141	31.4194	1.0552
11	39°50' N, 116°18' E	8	56	7.4499	1.7473
12	39°59' N, 116°28' E	13	45	6.8622	1.4691
13	39°58' N, 116°27' E	5	14	1.4881	1.2700
14	39°49' N, 116°24' E	14	108	14.7650	2.1134
15	39°49' N, 116°28' E	7	45	7.6493	1.5511
16	39°50' N, 116°28' E	3	6	0.8996	0.8676
17	39°52' N, 116°19' E	3	5	1.9066	0.9503
18	39°52' N, 116°28' E	9	66	6.9847	1.6046
19	39°56' N, 116°25' E	7	38	9.4347	1.7044
20	39°54' N, 116°27' E	6	20	8.8988	1.4950
21	39°57' N, 116°19' E	13	77	13.4584	2.3615
22	39°57' N, 116°23' E	9	51	12.9524	1.6775
23	39°54' N, 116°20' E	8	89	29.7514	1.3769
24	39°54' N, 116°12' E	1	1	0.4775	0.0000
25	39°54' N, 116°26' E	3	6	7.7023	1.0114
26	39°52' N, 116°22' E	2	3	0.8267	0.6365
27	39°51' N, 116°24' E	6	34	10.6214	1.3824
28	39°53' N, 116°24' E	4	8	1.4937	1.3209
29	39°57' N, 116°26' E	5	32	6.9632	0.7155
30	39°54' N, 116°31' E	5	25	3.9742	1.1642
31	39°53' N, 116°26' E	13	120	31.4042	1.8049
32	39°57' N, 116°26' E	7	37	10.1647	1.5666
33	40°0' N, 116°17' E	11	90	12.8770	1.5322
34	39°54' N, 116°14' E	9	120	9.0147	1.4424
35	39°50' N, 116°23' E	6	18	3.0690	1.7540
36	39°56' N, 116°20' E	11	67	11.4159	2.0368
37	39°54' N, 116°22' E	7	19	3.2837	1.7326
38	39°52' N, 116°23' E	12	80	12.7553	2.0678
39	39°51' N, 116°23' E	7	46	9.8539	1.3560
40	39°54' N, 116°16' E	13	173	13.6361	2.0753

附录4 北京市居住小区有取食行为的鸟类名录

Appendix 4 Bird list of feeding behavior in residential areas of Beijing

鸟种 Species	学名 Scientific name	科 Family	居留型 Residence type	食性 Diet	食源丰富度 Food source richness	食源多样性 Food source diversity	出现小区数 Number of residential areas where birds appear
珠颈斑鸠	<i>Spilopelia chinensis</i>	鸠鸽科 Columbidae	R	H	14	2.0185	25
戴胜	<i>Upupa epops</i>	戴胜科 Upupidae	R	In	5	1.4000	7
星头啄木鸟	<i>Dendrocopos canicapillus</i>	啄木鸟科 Picidae	R	In	13	2.3273	16
大斑啄木鸟	<i>Dendrocopos major</i>	啄木鸟科 Picidae	R	In	26	2.7371	26
灰头绿啄木鸟	<i>Picus canus</i>	啄木鸟科 Picidae	R	In	1	0.0000	1
灰喜鹊	<i>Cyanopica cyanus</i>	鸦科 Corvidae	R	O	30	2.9869	24
喜鹊	<i>Pica pica</i>	鸦科 Corvidae	R	O	20	2.0952	19
大嘴乌鸦	<i>Corvus macrorhynchos</i>	鸦科 Corvidae	R	O	4	1.3297	3
黄腹山雀	<i>Pardaliparus venustulus</i>	山雀科 Paridae	P	In	2	0.6890	2
沼泽山雀	<i>Poecile palustris</i>	山雀科 Paridae	R	In	13	2.2820	9
大山雀	<i>Parus major</i>	山雀科 Paridae	R	In	12	2.1618	8
白头鹎	<i>Pycnonotus sinensis</i>	鹎科 Pycnonotidae	R	O	38	3.0255	31
家燕	<i>Hirundo rustica</i>	燕科 Hirundinidae	S	In	1	0.0000	1
银喉长尾山雀	<i>Aegithalos glaucogularis</i>	长尾山雀科 Aegithalidae	R	In	1	0.0000	1
褐柳莺	<i>Phylloscopus fuscatus</i>	柳莺科 Phylloscopidae	P	In	10	2.0679	11
巨嘴柳莺	<i>Phylloscopus schwarzi</i>	柳莺科 Phylloscopidae	P	In	3	0.9503	3
黄腰柳莺	<i>Phylloscopus proregulus</i>	柳莺科 Phylloscopidae	P	In	24	2.3512	31
黄眉柳莺	<i>Phylloscopus inornatus</i>	柳莺科 Phylloscopidae	P	In	24	2.5140	31
极北柳莺	<i>Phylloscopus borealis</i>	柳莺科 Phylloscopidae	P	In	7	1.6875	11
冕柳莺	<i>Phylloscopus coronatus</i>	柳莺科 Phylloscopidae	P	In	1	0.0000	1
冠纹柳莺	<i>Phylloscopus claudiae</i>	柳莺科 Phylloscopidae	P	In	2	0.6931	2
八哥	<i>Acridotheres cristatellus</i>	椋鸟科 Sturnidae	R*	O	4	0.6931	2
灰椋鸟	<i>Spodiopsar cineraceus</i>	椋鸟科 Sturnidae	P、W	O	10	1.6226	10
乌鸫	<i>Turdus merula</i>	鸫科 Turdidae	R	O	11	2.2462	5
斑鸫	<i>Turdus eunomus</i>	鸫科 Turdidae	W	O	1	0.1885	1
乌鶺鴒	<i>Muscicapa sibirica</i>	鶺鴒科 Muscicapidae	P	In	1	0.0000	2
北灰鶺鴒	<i>Muscicapa latirostris</i>	鶺鴒科 Muscicapidae	P	In	1	0.0000	1
红胁蓝尾鸲	<i>Tarsiger cyanurus</i>	鶺鴒科 Muscicapidae	P	In	2	0.0000	1
红喉姬鶺鴒	<i>Ficedula albicilla</i>	鶺鴒科 Muscicapidae	P	In	2	0.0000	1

鸟种 Species	学名 Scientific name	科 Family	居留型 Residence type	食性 Diet	食源丰富度 Food source richness	食源多样性 Food source diversity	出现小区数 Number of residential areas where birds appear
北红尾鸂	<i>Phoenicurus aureus</i>	鸂科 Muscicapidae	P	In	3	1.0986	2
燕雀	<i>Fringilla montifringilla</i>	燕雀科 Fringillidae	W	H	10	1.3205	10
黑尾蜡嘴雀	<i>Eophona migratoria</i>	燕雀科 Fringillidae	R	H	1	0.0000	2
金翅雀	<i>Chloris sinica</i>	燕雀科 Fringillidae	R	H	2	0.4315	2
黄雀	<i>Spinus spinus</i>	燕雀科 Fringillidae	W	H	1	0.0000	1
小鹀	<i>Emberiza pusilla</i>	鹀科 Emberizidae	P	H	1	0.0000	1

多居留型的鸟种仅标注北京地区最普遍的情况。R: 留鸟; *为逃逸留鸟; S: 夏候鸟; W: 冬候鸟; P: 旅鸟; O: 杂食性; H: 植食性; In: 虫食性。

Bird species marked with the most common residence type in Beijing. R, Resident birds; * for runaway resident birds; S, Summer migratory birds; W, Winter migratory birds; P, Passing birds; O, Omnivorous; H, Herbivorous; In, Insectivorous.