

# 干扰强度和斑块结构对广州城市公园鸟类群落的影响研究\*

黄子峻<sup>1, 2</sup> 佟富春<sup>1</sup> 麦艳仪<sup>1</sup> 何欣瞳<sup>1</sup>  
林嘉莉<sup>1</sup> 杨洪炳<sup>3</sup> 肖以华<sup>2</sup>

(1. 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东广州 510642; 2. 中国林业科学研究院 热带林业研究所, 广东广州 510520;  
3. 中国林业科学研究院 森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

**摘要** 以广州主要城市公园鸟类群落为研究对象, 从中国观鸟记录中心获取 2017—2021 年间广州市主要城市公园的鸟类观测数据, 采用单因素方差分析、聚类分析、相关性分析和冗余分析探究干扰强度和斑块结构对鸟类群落的影响, 揭示影响城市公园鸟类群落组成和物种丰富度的主要环境因子, 研究结果如下: (1) 广州主要城市公园共有鸟类 243 种, 隶属于 19 目 58 科。(2) 高干扰强度下鸟类丰富度显著高于低强度 ( $P < 0.05$ ), 低干扰强度下 Pielou 均匀度指数显著高于中干扰强度和高干扰强度 ( $P < 0.05$ ), 但 Shannon 多样性指数无显著差异。(3) 鸟类丰富度和 Shannon 多样性指数与公园面积、水域斑块数呈正相关, 与绿地破碎度和周长面积比 (PAR) 呈负相关。鸟类食性集团和取食集团的分布不仅受到绿地斑块数和水域斑块数的正向影响, 还受到绿地破碎度、水域破碎度和建筑面积占比率的负面影响。研究表明, 不同的干扰强度和斑块结构均会对城市公园鸟类群落造成显著影响, 在建设城市公园时应综合考虑公园的面积、形状、水域占比、水域斑块数 and 绿地斑块数, 丰富公园的生境异质性。

**关键词** 城市公园; 干扰强度; 斑块结构; 鸟类多样性; 广州

中图分类号: Q958.1、S718.63 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2023) 03-0008-11

## The Effects of Interference Strength and Patch Structure on Bird Communities in Urban Parks of Guangzhou

HUANG Zijun<sup>1,2</sup> TONG Fuchun<sup>1</sup> MAI Yanyi<sup>1</sup> HE Xintong<sup>1</sup>  
LIN Jiali<sup>1</sup> YANG Hongbing<sup>3</sup> XIAO Yihua<sup>2</sup>

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China;  
2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 3. Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract** Taking the bird communities in major urban parks in Guangzhou as the research object, the bird observation data of major urban parks in Guangzhou from 2017 to 2021 were obtained from the China Bird Report platform. One-way ANOVA, cluster analysis, correlation analysis, and redundancy analysis were used to explore the effects of interference strength and patch structure on bird communities, and to reveal the main environmental factors affecting bird communities composition and species richness in urban parks, so as to provide a reference

\* 基金项目: 广东省科技厅林业生态监测网络平台建设 (2021CG632), 国家科技支撑计划 (2015BAD07B06-8), 广东珠江三角洲森林生态系统国家定位观测研究站资助。

第一作者: 黄子峻 (1998—), 男, 在读硕士, 主要从事野生动物保护研究, E-mail: 1535725093@qq.com。

通信作者: 肖以华 (1976—), 男, 副研究员, 主要从事城市森林生态研究, E-mail: jxxiaoyihua@126.com。

for urban park construction and bird protection in Guangzhou. (1) There are 243 species of birds in the main urban parks of Guangzhou, belonging to 19 orders and 58 families. (2) Bird richness under the high interference strength was significantly higher than that under the low interference strength ( $P < 0.05$ ). Pielou evenness index under the low interference strength was significantly higher than that under medium disturbance intensity and high interference strength ( $P < 0.05$ ), but Shannon diversity index was not significantly different. (3) Bird richness and Shannon diversity index were positively associated with park area and water patch number, and negatively correlated with green space fragmentation and perimeters-to-area ratio (PAR). The number of green space patches and water patches had a positive impact on the number of bird species in each diet and foraging guild, however, green space fragmentation, water fragmentation and construction percentage had a negative impact. The results showed that different interference strength and patch structures can significantly affect the bird communities in urban parks. Therefore, when building urban parks, attention should be paid to the park area, shape, percentage of water, number of water patches, green space patches, and enrich the habitat heterogeneity of the parks.

**Key words** urban park; interference strength; patch structure; bird community; Guangzhou

随着城市化的发展, 自然生境逐渐被人造景观所替代, 生境破碎化程度加剧、人为干扰强度增强, 这导致城市鸟类群落组成发生显著改变, 如自然林地中常见的筑地面巢或树洞巢鸟类的种类和数量随城市化程度的上升呈减少趋势<sup>[1]</sup>, 但由于城市中具有丰富的食物资源, 且天敌相对稀少, 因此部分鸟类的密度和多度会随着城市化程度提高而增加<sup>[2]</sup>。城市绿地即城市中被植被部分或完全覆盖的土地, 是城市生态系统的重要组成部分<sup>[3]</sup>。城市公园作为城市绿地的重要组成部分, 能为野生动物提供充足的生存空间和食物资源, 成为城市鸟类的重要栖息地之一<sup>[4-5]</sup>。

广州市位于粤港澳大湾区腹地, 以南亚热带季风常绿阔叶林为主, 森林覆盖率较高, 动植物种类丰富<sup>[6]</sup>。另外, 广州位于我国鸟类东部迁徙路线上, 是东亚-澳大利西亚迁徙路线的重要节点, 是候鸟迁徙的重要交汇地和停歇地<sup>[7]</sup>。以往对广州城市公园鸟类群落的研究更加注重于单一公园鸟类的物种组成和多样性<sup>[8-10]</sup>, 但干扰强度和公园斑块结构对鸟类群落影响的研究却鲜见报道<sup>[11-12]</sup>。

大时空尺度上的鸟类监测需要耗费大量的人力和物力, 亟需整合鸟类系统调查和观鸟记录的数据对城市环境与鸟类群落结构、组成和多样性间的关联性进行全面分析<sup>[13-14]</sup>。中国观鸟记录中心是我国观鸟数据最为齐全的共享平台之一, 诸多学者亦利用此平台共享的鸟类数据, 开展了鸟类迁徙、群落组成、多样性和分布等相关研究<sup>[14-16]</sup>。

本研究依托该平台数据, 分析了2017年至2021年期间广州市城市公园的鸟类群落特征, 探讨了广州中心城区不同干扰强度以及斑块结构对鸟类群落的影响, 阐明鸟类种数与斑块结构、干扰强度的关系, 其结果可为城市绿地的鸟类保护提供科学依据, 促进粤港澳大湾区生态文明建设和生物多样性保护目标的实现。

## 1 研究地概况

广州市 (112°57'~114°03'E, 22°26'~23°56'N) 位于广东省中南部, 珠江三角洲北部, 面积 7 434.4 km<sup>2</sup>。据刘月亮等<sup>[17]</sup>统计, 2015年广州市景观格局主要由6部分组成, 面积由大到小分别为林地 3 028.53 km<sup>2</sup>、农田 2 142 km<sup>2</sup>、建设用地 1 435 km<sup>2</sup>、水域 486.11 km<sup>2</sup>、草地 98.96 km<sup>2</sup>、未利用地 4.27 km<sup>2</sup>。广州市目前共有城市公园 245 个, 其中广州市越秀区、天河区和海珠区共 114 个, 且公园类型多样, 涵盖了综合公园、专类公园、社区公园等现行分类标准中所有类型的公园<sup>[18]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 数据收集

由于市中心区对城市公园需求更加敏感<sup>[18]</sup>, 因此选取广州市区人为干扰和公园斑块结构具代表性的3个区域(越秀区、天河区和海珠区)内的城市公园作为研究对象。从中国观鸟记录中心平台收集到2017年至2021年广州市中心城区47处城市公园共2 003条鸟类数据。为保证其准确

性,将观鸟记录小于5次的公园排除出统计范围,并剔除错误、存疑和重复的观鸟记录,并在查阅广州城市绿地相关资料和试验地全面踏查的基础上,选择广州市景观斑块具有代表性的公园。最后共选出16处城市公园,1500条有效鸟类记录,其中,越秀区9处,海珠区4处,天河区3个,详情见表1和图1。

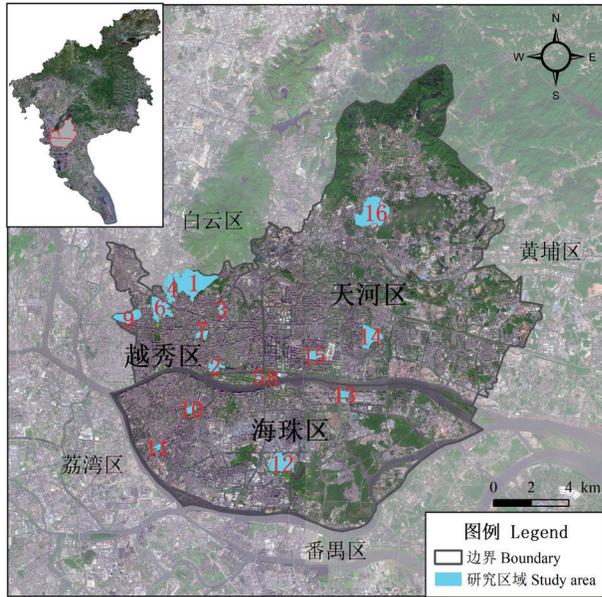
## 2.2 鸟类功能特征数据收集

鸟类分类地位和生态类型参照《中国鸟类观

察手册》<sup>[19]</sup>,鸟类居留型和区系参考《中国动物地理》<sup>[20]</sup>。鸟类取食位置参考 Elton Traits 数据库<sup>[21]</sup>,将取食位置划分为8种类别:地面取食集团、林冠取食集团、水域取食集团、空中取食集团、地面/空中取食集团、水域/地面取食集团、地面/林冠取食集团、多层取食集团。鸟类食性参考《AVONET: morphological, ecological and geographical data for all birds》<sup>[22]</sup>,将食性划分为6种类型:虫食性、杂食性、肉食性、种食性、草食

表1 研究区域信息  
Table 1 Information of study site

编号 ID	公园名称 Park name	面积 /hm <sup>2</sup> Area	地铁路线数 Subway routes	公交线路数 Bus routes	距市中心距离 /km Distance to the city center	记录数 Number of records
1	麓湖公园 Luhu Park	166.91	1	32	4.37	186
2	东山湖公园 Dongshanhu Park	30.79	1	27	3.45	122
3	黄花岗公园 Huanghuagang Park	13.22	2	28	2.88	15
4	广州雕塑公园 Guangzhou Sculpture Park	54.19	1	18	5.63	17
5	传祺公园 Chuanqi Park	8.45	1	6	2.45	6
6	越秀公园 Yuexiu Park	73.29	2	67	5.82	209
7	烈士陵园 Martyrs' Cemetery	17.14	1	30	3.72	51
8	二沙岛艺术公园 Ershadao Art Park	3.14	1	1	2.31	11
9	流花湖公园 Liuhuahu Park	53.32	2	70	7.38	315
10	晓港公园 Xiaogang Park	16.15	1	43	5.66	46
11	庄头公园 Zhuangtou Park	7.33	2	34	8.06	12
12	海珠湖公园 Haizhuhu Park	84.29	1	9	6.53	70
13	广州会展公园 Guangzhou Exhibition Park	20.06	1	4	4.61	28
14	天河公园 Tianhe Park	70.15	2	63	4.53	61
15	珠江公园 Zhujiang Park	27.55	1	10	2.12	21
16	华南国家植物园 South China National Botanical Garden	159.5	1	22	7.33	330



注：公园编号同表 1。  
Note: Park ID as shown in table 1.

图 1 研究区域分布示意  
Fig. 1 Location of study site

性和果食性。

### 2.3 斑块结构数据获取

利用奥维互动地图将各个公园中的生境类型划分为 3 类，分别为绿地（林地、灌草丛和草地）、水域（河流、池塘、湖泊）和建设用地（居住地和交通过地）3 类，量化各公园内 3 种斑块类型的面积和周长，统计各个公园中绿地斑块数量和水域斑块数量，并计算不同生境类型面积占比和每个公园的周长面积比（PAR）。

### 2.4 数据分析与处理

2.4.1 干扰强度划分 对每个城市公园周边的地铁线路数（半径 1 km 范围内）、公交线路数（半径 500 m 范围内）进行标准化处理。并测量每个公园距广州市行政中心（广州市人民政府）的距离，如表 1 所示。以这 3 种指标量化各个公园所处位置的干扰强度，并以此进行聚类分析，划分干扰强度水平<sup>[23]</sup>。标准化公式为：

$$S_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \dots \dots \dots (1)$$

式中， $S_i$  为参数的标准化值， $x_i$  为参数  $x$  在第  $i$  个公园的测量值， $x_{\max}$  为参数  $x$  的最大值， $x_{\min}$  为参数  $x$  的最小值。

2.4.2 景观破碎度 采用景观破碎度描述各个公园的景观破碎程度：

$$C_i = \frac{\sum N_i}{A_i} \dots \dots \dots (2)$$

式中， $C_i$  为景观  $i$  的破碎度， $\sum N_i$  为景观  $i$  的斑块数， $A_i$  为景观  $i$  的总面积。

2.4.3 鸟类物种指数 鸟类物种指数采用 Shannon-Wiener 指数 ( $H'$ )、Pielou 指数 ( $J$ )、Gleason 指数 ( $G$ )、Sorensen 相似性指数 ( $X$ ):

$$H' = \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \dots \dots \dots (3)$$

$$J = \frac{H'}{H_{\max}} \dots \dots \dots (4)$$

$$G = \frac{S}{\ln A} \dots \dots \dots (5)$$

$$H_{\max} = \ln S \dots \dots \dots (6)$$

$$X = \frac{2S_{AB}}{S_A + S_B} \dots \dots \dots (7)$$

式中， $S$  为物种数， $S_A$  为  $A$  区域的鸟类物种数， $S_B$  为  $B$  区域的鸟类物种数， $S_{AB}$  为  $AB$  区域共有的鸟类物种数， $P_i$  为物种  $i$  的个体数与总个体数的比值， $H_{\max}$  为理论上最大多样性指数值， $A$  为研究区域总面积。

2.4.4 数据处理 数据统计和整理采用 Excel 2019；采用 Estimate 9.1.0 对 16 处城市公园的抽样水平进行检验，将 Estimate 计算结果中的基于多度的物种估计值（ACE）和基于盖度的物种估计值（Incidence-based coverage estimator, ICE）的平均值作为物种数的估计值；采用 SPSS 26.0 对城市公园干扰强度进行聚类分析（系统聚类），对不同干扰强度的鸟类群落指标进行单因素方差分析（One-Way ANOVA），对鸟类群落指标和斑块结构之间进行 Spearman 相关性分析；采用蒙特卡洛置换检验斑块结构对鸟类食性集团和取食集团的影响，并使用 Canoco 5.0 对三者进行冗余分析；不符合正态分布的数据用  $\ln(x+1)$  进行转化，转化后仍不符合正态分布的数据使用非参数检验进行分析。显著性水平设定为 ( $P < 0.05$ )。制图采用 Origin 2021。

## 3 结果与分析

### 3.1 城市公园鸟类群落结构

16 处公园共统计鸟类 18 目 58 科 243 种。其中麓湖公园记录的鸟类物种数最多，共 150 种，二沙岛艺术公园最少，仅 21 种。本研究中各个公园的实际物种数与估计值的比例均高于 60%，表

明抽样接近充分，调查效果较好。

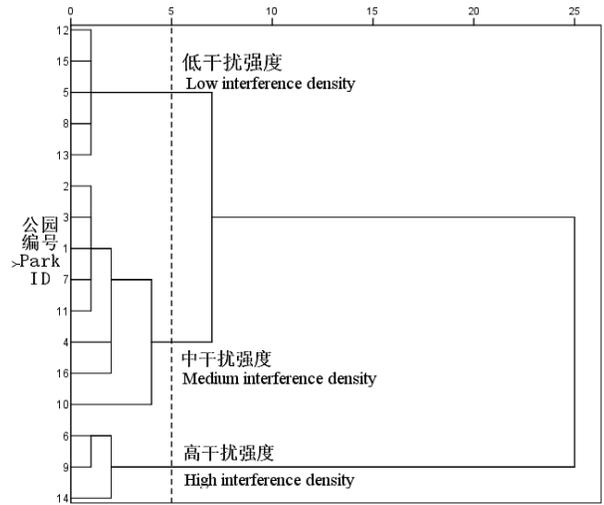
### 3.2 城市公园斑块结构特征

研究选取的城市公园面积介于 3.14~166.91 hm<sup>2</sup> 之间 (平均 50.00 ± 12.73 hm<sup>2</sup>)；周长面积比 (PAR) 介于 3.83~24.86 之间 (平均 10.27 ± 1.42)；绿地面积介于 2.82~136.95 hm<sup>2</sup> 之间 (平均 36.54 ± 10.38)；水域面积 0~49.25 hm<sup>2</sup> (平均 9.73 ± 3.44)；建筑用地面积介于 0.72~19.03 hm<sup>2</sup> (平均 4.07 ± 1.19)。16 处城市公园中麓湖公园面积、周长和绿地面积最大，分别为 166.91 hm<sup>2</sup>、6.85 km 和 136.95 hm<sup>2</sup>，最小是二沙岛艺术公园，分别为 3.14 hm<sup>2</sup>、0.78 km 和 2.82 hm<sup>2</sup>；二沙岛艺术公园的 PAR 最大，为 24.86，华南国家植物园的 PAR 最小 (3.83)；海珠湖公园的水域面积最大 (58.43 hm<sup>2</sup>)，传祺公园和二沙岛艺术公园无水域斑块；华南国家植物园的建设用地面积最大 (19.03 hm<sup>2</sup>)，二沙岛艺术公园的建设用地面积最小 (0.32 hm<sup>2</sup>)。

### 3.3 城市公园干扰强度特征

聚类分析结果表明，广州市中心城区的城市公园所处位置的干扰强度可量化为 3 个等级 (图 2)，由高到低分别为高干扰强度、中干扰强度和低干扰强度。高干扰强度周边以居民区为主，交

通发达，公交线路密集，距离市中心较近。中干扰强度各项参数都处于中等水平。低干扰强度交通不发达，地铁和公交线路较少，距离市中心相对较远 (表 4)。



注：公园编号同表 1。  
Note: Park ID as showed in Figure 1.

图 2 广州市城市公园所处位置的干扰强度聚类分析  
Fig. 2 Cluster analysis of interference intensity at the location of of urban parks in Guangzhou

表 2 广州市城市公园鸟类物种数  
Table 2 Bird Species of urban parks in Guangzhou

公园名称 Park name	实际物种数 Species	估计值 Estimation	比值 /% Ratio	公园名称 Park name	实际物种数 Species	估计值 Estimation	比值 /% Ratio
麓湖公园 Luhu Park	150	235	63.97	流花湖公园 Liuhuahu Park	137	178	76.97
东山湖公园 Dongshanhu Park	72	86	83.72	晓港公园 Xiaogang Park	58	95	61.05
黄花岗公园 Huanghuagang Park	33	50	66.00	庄头公园 Zhuangtou Park	34	44	77.27
广州雕塑公园 Guangzhou Sculpture Park	57	79	72.15	海珠湖公园 Haizhuhu Park	86	106	81.13
传祺公园 Chuanqi Park	22	30	73.33	广州会展公园 Guangzhou Exhibition Park	54	71	76.06
越秀公园 Yuexiu Park	137	167	82.04	天河公园 Tianhe Park	67	88	76.14
烈士陵园 Martyrs' Cemetery	52	82	63.41	珠江公园 Zhujiang Park	43	50	86.00
二沙岛艺术公园 Ershadao Art Park	21	22	95.45	华南国家植物园 South China National Botanical Garden	147	161	91.30

### 3.4 不同干扰强度下的鸟类群落

高干扰强度 3 个公园共统计鸟类 17 目 52 科 186 种, Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ) 为 4.05, Pielou 均匀度指数 ( $J$ ) 为 0.78, 相似性系数 ( $X$ ) 为 0.61; 中干扰强度 8 个公园共统计鸟类 17 目 56 科 192 种,  $H'$  为 4.13,  $J$  为 0.79,  $X$  为

0.59; 低干扰强度 5 个公园共统计鸟类 13 目 42 科 107 种,  $H'$  为 3.88,  $J$  为 0.83,  $X$  为 0.52。

由表 5 可知, 高干扰强度中平均鸟类丰富度以及虫食性、杂食性、种食性、地面取食集团、林冠取食集团、地面 / 林冠取食集团的平均物种数均显著高于低干扰强度 ( $P < 0.05$ ), 但不同

表 3 广州市城市公园斑块结构特征  
Table 3 Patch structure characteristics of urban parks in Guangzhou

公园名称 Park name	Per/km	PAR	绿地 Green space				水域 Water				建设用地 construction	
			Are/hm <sup>2</sup>	PER/%	PAT	FRA	Are/m <sup>2</sup>	PER/%	PAT	FRA	Are/hm <sup>2</sup>	PER/%
麓湖公园 Luhu Park	6.85	4.10	136.95	82.05	69	0.50	22.19	13.29	7	0.32	7.77	4.66
东山湖公园 Dongshanhu Park	3.17	10.29	7.94	25.79	18	2.27	21.95	71.29	2	0.09	0.90	2.92
黄花岗公园 Huanghuagang Park	1.58	11.95	10.46	79.12	68	6.50	0.30	2.27	3	10.00	2.46	18.61
广州雕塑公园 Guangzhou Sculpture Park	4.82	8.89	46.45	85.72	45	0.97	0.53	0.98	1	1.89	7.21	13.31
传祺公园 Chuanqi Park	1.19	14.13	7.50	88.76	20	2.67	0.00	0.00	0	0.00	0.95	11.24
越秀公园 Yuexiu Park	4.73	6.46	61.20	83.50	81	1.32	5.25	7.16	7	1.33	6.84	9.33
烈士陵园 Martyrs' Cemetery	2.24	13.05	12.89	75.20	37	2.87	1.98	11.55	5	2.53	2.27	13.24
二沙岛艺术公园 Ershadao Art Park	0.78	24.86	2.82	89.81	13	4.61	0.00	0.00	0	0.00	0.32	10.19
流花湖公园 Liuhuahu Park	3.55	6.65	25.91	48.59	65	2.51	26.02	48.80	3	0.12	1.39	2.61
晓港公园 Xiaogang Park	1.72	10.64	12.40	76.78	26	2.10	3.03	18.76	2	0.66	0.72	4.46
庄头公园 Zhuangtou Park	1.36	18.61	4.94	67.39	17	3.44	0.50	6.82	1	2.00	1.89	25.78
海珠湖公园 Haizhuhu Park	3.80	4.50	30.74	36.47	31	1.01	49.25	58.43	1	0.02	4.30	5.10
广州会展公园 Guangzhou Exhibition Park	2.56	12.75	16.17	80.63	42	2.60	1.90	9.45	2	1.05	1.99	9.91
天河公园 Tianhe Park	3.88	5.53	54.02	77.01	23	0.43	9.92	14.14	3	0.30	6.21	8.85
珠江公园 Zhujiang Park	2.23	8.08	25.68	93.21	42	1.64	1.00	3.63	3	3.00	0.87	3.16
华南国家植物园 South China National Botanical Garden	6.11	3.83	128.56	80.60	36	0.28	11.91	7.47	3	0.25	19.03	11.93

注：公园编号同图 1, Are- 面积, Per- 周长, PAR- 周长面积比, PER- 占比率, PAT- 斑块数, FRA- 破碎度。  
Note: Park ID as showed in Figure 1, Are-Area, Per-Perimeter, PAR-Perimeters-to-area ratio, PER-Percentage, FRA-Fragmentation.

强度的平均 Shannon 多样性指数和果食性、肉食性、水域取食集团、水域/地面取食集团、多层取食集团的平均物种数之间无显著差异 ( $P>0.05$ )。Pielou 均匀度指数随着干扰强度的增加而下降,且低干扰强度显著高于高干扰强度和中干扰强度 ( $P<0.05$ )。

### 3.5 斑块结构对鸟类群落的影响

如表 6 所示,鸟类丰富度与公园面积 ( $P<0.01$ )、水域占比率 ( $P<0.01$ )、水域斑块数呈 ( $P<0.05$ ) 正相关关系,但与绿地破碎度、周长面积比 (PAR) 呈极显著的负相关关系 ( $P<0.01$ )。Shannon-Wiener 多样性指数与公园面积 ( $P<0.01$ )、绿

表 4 广州市城市公园不同干扰强度的特征比较

Table 4 Comparison of characteristics of different interference intensity of urban parks in Guangzhou

干扰强度 Interference density	地铁线路数 Subway routes	公交线路数 Bus routes	距市中心距离 /km Distance to the city center	平均面积 /hm <sup>2</sup> Average area	样本数量 Number of samples
高	2.00 ± 0.00a	66.67 ± 2.03a	4.47 ± 2.79a	65.59 ± 6.20a	3
中	1.25 ± 0.16b	29.25 ± 2.69b	4.45 ± 1.14a	58.15 ± 23.49a	8
低	1.00 ± 0.00b	6.00 ± 1.64c	7.48 ± 0.80a	28.70 ± 14.54a	5
<i>F</i>	8.396	41.732	4.212	0.648	/
<i>P</i>	0.01	0.00	0.04	0.539	/

注: 不同的小写字母表示同一指标不同等级下具有显著差异 ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences in the same index at different levels ( $P<0.05$ ).

表 5 广州市城市公园不同干扰强度下鸟类群落特征

Table 5 Avian community traits for different interference intensity of urban parks in Guangzhou

指标 Community Indicators	高 High	中 Medium	低 Low	<i>F</i>	<i>P</i>
<i>S</i>	113.67 ± 23.33a	75.38 ± 16.59ab	45.20 ± 11.98b	-	0.11
<i>H'</i>	3.74 ± 0.12a	3.52 ± 0.13a	3.30 ± 0.18a	-	0.27
<i>J</i>	0.80 ± 0.02b	0.85 ± 0.01b	0.91 ± 0.02a	6.244	0.01
INV	65.33 ± 18.26a	41.88 ± 9.56ab	21.20 ± 6.09b	3.075	0.08
FRU	5.67 ± 0.33a	3.63 ± 0.78a	2.00 ± 0.77a	3.556	0.06
VER	13.33 ± 4.37a	8.75 ± 3.03a	7.00 ± 2.51a	-	0.53
OMN	20.33 ± 1.76a	15.75 ± 2.86ab	10.40 ± 1.29b	-	0.12
GRA	6.33 ± 0.67a	4.38 ± 0.53ab	3.00 ± 0.71b	4.759	0.03
GRF	47.67 ± 9.21a	31.63 ± 7.06ab	19.20 ± 5.44b	-	0.12
CAF	15.67 ± 4.63a	9.25 ± 2.28ab	3.20 ± 1.59b	4.126	0.04
WAF	8.67 ± 3.72a	5.00 ± 1.71a	6.40 ± 2.73a	-	0.62
GR/CAF	6.67 ± 1.67a	5.25 ± 0.73ab	2.80 ± 0.20b	4.433	0.03
WA/GRF	4.33 ± 1.86a	2.50 ± 0.85a	2.20 ± 0.73a	-	0.44
MLF	29.00 ± 7.81a	19.75 ± 4.52a	10.40 ± 1.83a	-	0.62

注: *S*- 鸟类丰富度, *H'*-Shannon-Wiener 多样性指数, *J*-Pielou 均匀度指数, INV- 虫食性, FRU- 果食性, OMN- 杂食性, VER- 肉食性, GRA- 种食性; GRF- 地面取食; CAF- 林冠取食, WAF- 水域取食, GR/CAF- 地面/林冠取食, WA/GRF- 水域/地面取食, MLF- 多层取食。不同的小写字母表示同一指标不同等级下具有显著差异 ( $P<0.05$ )。

Note: *S*-Birds richness, *H'*-Shannon-Wiener diversity index, *J*-Pielou evenness index, INV- Invertivore, FRU- Frugivore, OMN- Omnivore, VER- vertebrates and fish and carrion, GRA- Granivore; GRF-Ground foraging; CAF-Canopy foraging, WAF-Water foraging, GR/CAF-Ground/Canopy foraging, WA/GRF-Water/Ground foraging, MLF-multiple foraging. Different lowercase letters indicate significant differences in the same index at different levels ( $P<0.05$ ).

地斑块数 ( $P<0.05$ )、水域斑块数 ( $P<0.05$ ) 呈正相关关系, 但与绿地破碎度和 PAR 呈极显著的负相关关系 ( $P<0.01$ )。Pielou 均匀度指数与公园面积、水域占比率和水域斑块数呈极显著的负相关关系 ( $P<0.01$ )，Gleason 指数与公园面积和水域占比率呈显著的正相关关系 ( $P<0.05$ )。

由 Gleason 指数与公园面积的非线性拟合可

知：当公园面积在  $40 \text{ hm}^2$  以下时，鸟类丰富度随着公园面积呈线性增长，在  $40\sim 60 \text{ hm}^2$  趋于平缓；公园面积大于  $60 \text{ hm}^2$  后鸟类丰富度达到平衡。由鸟类丰富度与周长面积比 (PAR) 的非线性拟合可知：鸟类物种数丰富度随着周长面积比增大而减小 (图 3)。

表 6 鸟类群落指标与斑块结构的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of bird community indicators with patch structure

斑块结构 Patch structure	$S$	$H'$	$J$	$G$
公园面积 Area	0.905**	0.952**	-0.638**	0.524*
绿地占比率 Green space percentage	-	-	-	-
绿地斑块数 Green space patches	-	0.543*	-	-
绿地破碎度 Green space fragmentation	-0.768**	-0.799**	-	-
水域占比率 Water percentage	0.644**	-	-0.713**	0.585*
水域斑块数 Water patches	0.561*	0.512*	-0.694**	-
水域破碎度 Water fragmentation	-	-	-	-
建筑占比率 Construction percentage	-	-	-	-
PAR	-0.876**	-0.901**	0.641**	-

注：\* $-P<0.05$ ，\*\* $-P<0.01$ ； $S$ -物种丰富度， $H'$ -Shannon-Wiener 多样性指数， $J$ -Pielou 均匀度指数， $G$ -Gleason 指数，PAR-周长面积比。

Note:  $S$ -Species richness,  $H'$ -Shannon-Wiener diversity index,  $J$ -Pielou evenness index,  $G$ -Gleason index, PAR-Perimeter to area ratio.

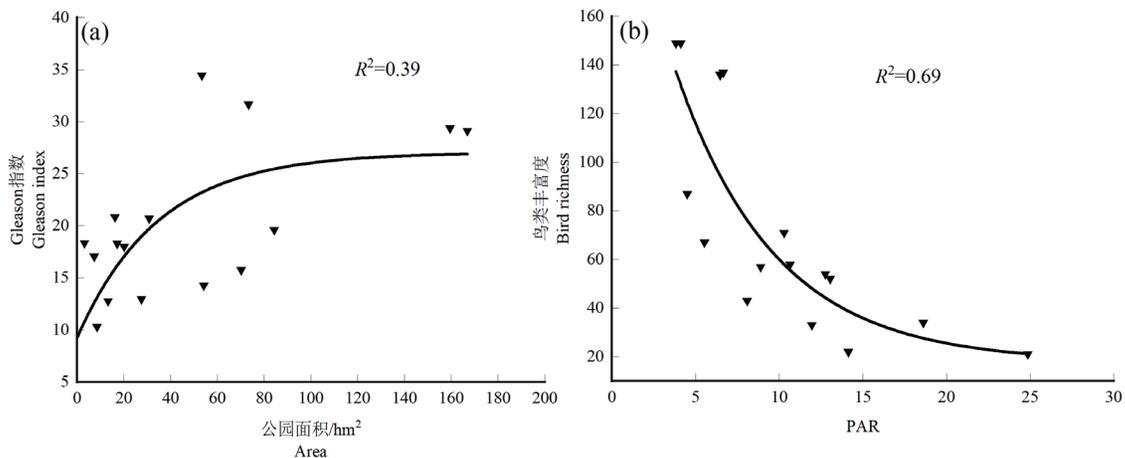


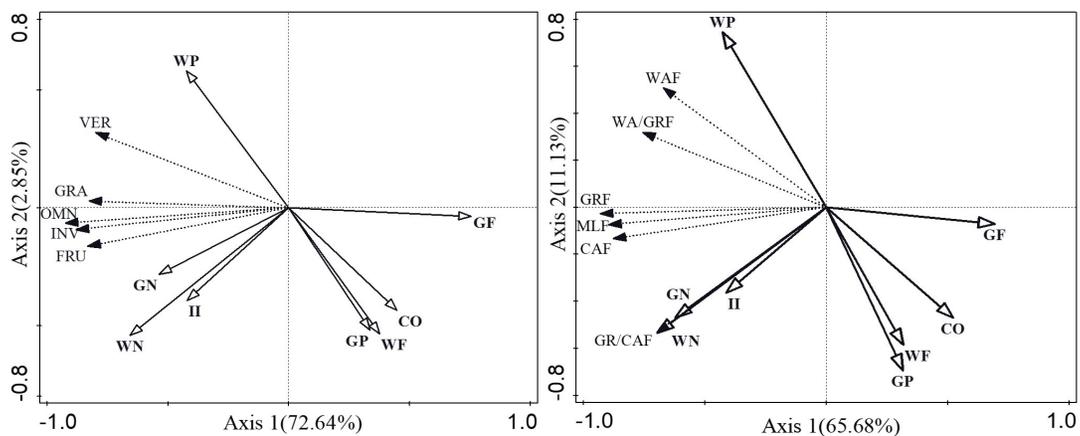
图 3 Gleason 指数 - 公园面积和鸟类丰富度 - PAR 的拟合关系

Fig.3 Fitting relationship of Gleason index vs park area and bird richness vs PAR

### 3.6 斑块结构对鸟类食性集团和鸟类取食集团的影响

绿地破碎度 ( $F=10.0$ )、绿地斑块数 ( $F=6.8$ ) 和绿地占比率 ( $F=4.7$ ) 对鸟类食性集团分布具有显著影响 ( $P<0.05$ )。水域占比率、水域斑块数和绿地破碎度是影响鸟类食性集团分布的主要因素 (图 4), 肉食性鸟类种数与水域占比率呈正相关, 但与建筑占比率、绿地占比率和水域破碎度呈负相关; 虫食性、果食性、种食性和杂食性鸟类种数与绿地斑块数和绿地占比率呈正相关。

水域斑块数 ( $F=7.5$ ) 和水域占比率 ( $F=5.9$ ) 对鸟类取食集团分布具有极显著影响 ( $P<0.01$ ), 绿地破碎度 ( $F=4.3$ ) 和绿地斑块数 ( $F=3.2$ ) 对鸟类取食集团分布具有显著的影响 ( $P<0.05$ )。由图 4 可知, 水域占比率、水域斑块数和绿地占比率是影响鸟类取食集团分布的主要因素。水域取食集团和水域/地面取食集团鸟类种数与水域占比率呈正相关, 林冠取食集团、地面取食集团和多层取食集团种数与水域斑块数和绿地斑块数和干扰强度呈正相关。



注: CO- 建设用地面积占比率、GF- 绿地破碎度、GN- 绿地斑块数、GP- 绿地占比率、II- 干扰强度、WF- 水域破碎度、WN- 水域斑块数、WP- 水域占比率; FRU- 果食性、GRA- 种食性、INV- 虫食性、OMN- 杂食性、VER- 肉食性; WAF- 水域取食集团、WA/GRF 水域/地面取食集团、GRF- 地面取食集团、CAF- 林冠取食集团、GR/CAF- 地面/林冠取食集团、MLF- 多层取食集团。

Note: CO-Construction percentage, GF-Green space fragmentation, GN-Number of green space patches, GP- green space percentage, II-interference intensity, WF-water fragmentation, WN- Number of water patches, WP-Water percentage;FRU- Frugivore, GRA-Granivore, INV- Invertivore, OMN- Omnivore, VER- vertebrates and fish and carrion;GRF- Ground foraging, CAF- Canopy foraging, WAF- Water foraging, WA/GRF- Water/Ground foraging, GR/CAF- GR/CAF-Ground/Canopy foraging, MLF- multiple foraging.

图 4 鸟类食性和取食集团与斑块结构的 RDA 分析

Fig.4 RDA analysis of bird diet and foraging guilds and patch structure

## 4 结论与讨论

4.1 广州市中心城区城市公园的鸟类群落受周边区域的显著影响, 鸟类丰富度和 Shannon 多样性指数随干扰强度的上升呈先增加后减少的趋势, 中干扰强度的鸟类总丰富度和总 Shannon 多样性指数最高, 其次为高干扰强度, 低干扰强度均为最低。中干扰强度包含的公园数量较多, 景观异质性较高, 因此鸟类总丰富度和总 Shannon 多样性指数最高<sup>[24]</sup>。

在高干扰强度下, 鸟类丰富度和 Shannon 多样性指数的平均值最高, 中干扰强度次之, 低干扰强度最低。高干扰强度中越秀公园、流花湖公园和天河公园建立时间较长, 其人工景观和次生林相对稳定, 郁闭度较高, 为鸟类提供长期且稳定的栖息环境, 但植被组成和景观类型相似, 景观异质性较低, 且处于高干扰强度区域, 鸟类群落组成趋于同质化<sup>[25-26]</sup>。因此高干扰强度的鸟类丰富度和 Shannon 多样性指数的平均值最高。研究表明生态位较广的鸟类可以更好地适应干扰,

且其密度和多度会随着干扰强度的提高而增大，逐渐成为区域优势种，Pielou 均匀度指数会随着干扰强度的增加而降低<sup>[26]</sup>；因此低干扰强度中鸟类群落较均匀。

高干扰强度中，虫食性鸟类和林冠取食鸟类的种数高于低干扰强度，造成这一变化的原因是部分广食性昆虫和入侵昆虫的数量和种群分布范围会随着干扰强度的提升而提升，为鸟类提供更加丰富的食物资源<sup>[27]</sup>。此外，高干扰强度说明公园的易达性较高，意味着该强度中的3个公园可以吸引更多的游客，会带来大量的食物、种子和谷粒等生活垃圾，为一些杂食性鸟类、种食性鸟类和地面取食鸟类提供了充足的食物资源<sup>[28]</sup>。

除了上述因素外，在本文中观鸟记录中心的报告数也是影响鸟类丰富度的潜在因素之一。报告数随着干扰强度的增加而增加，即交通越发达，离市中心越近的公园，干扰强度越大，报告数越多，这也一定程度上导致了鸟类丰富度以及部分鸟类食性集团和取食集团的物种数随干扰强度增加。

4.2 Pielou 均匀度与公园面积为负相关关系，但鸟类丰富度、Shannon 多样性指数和 Gleason 指数均与城市公园面积呈正相关。其原因是面积大的城市公园可提供更高的微生境多样性和景观异质性，能为鸟类提供充足的食物，满足鸟类多样的生境需求<sup>[29]</sup>。本研究表明，公园面积达到 60 hm<sup>2</sup> 以上，Gleason 指数将趋于平衡，该结论与李慧等<sup>[12]</sup>认为广州中心城区的城市公园面积在 65 hm<sup>2</sup> 左右且形状比较规则（方形或圆形）最佳相一致。

鸟类对不同生境类型斑块具有一定的选择性，公园中水体及湿地植物可为鸟类提供更为多样的觅食场所和栖息环境，适当增加水域占比率和水体斑块数能够在一定程度上提高公园中鸟类的丰富度<sup>[30]</sup>。较高的绿地破碎度和周长面积比（PAR）会导致鸟类丰富度和 Shannon 多样性降低，其原因可能是生境破碎化和较大的周长会增加边缘效应的影响，造成鸟类栖息地的丧失和生物资源的过度利用，种群原有生境面积减少，从而导致鸟类丰富度降低<sup>[31]</sup>。

在城市化程度较高的地区，面积更大、形状更为规则的城市公园拥有更高的鸟类丰富度和多样性，因为大面积的城市公园可为鸟类提供多样化的栖息地，促进了物种 - 面积关系的持久性<sup>[32]</sup>。绿地斑块数对 Shannon 多样性指数具有显著的正向

影响，破碎化的绿地斑块可以增加景观的连通性和异质性，这不仅为鸟类提供复杂且相互连通的栖息生境，还为特有物种提供适宜栖息条件<sup>[33-34]</sup>。周长面积比（PAR）是影响城市公园鸟类 Pielou 均匀度指数关键因素，因为生境异质性随着斑块边缘长度的增加而提高，导致 PAR 高的斑块具有较高的均匀性<sup>[11]</sup>。

4.3 景观斑块被认为是影响鸟类群落多样性、鸟类食性集团和取食集团最显著的因素之一<sup>[35]</sup>。水域斑块是影响鸟类食性和取食位置的重要因素，其不仅通过吸引水鸟，直接提高鸟类的多样性，还为林鸟提供生活必需的饮水和沐浴资源，所以水域斑块的占比率和数量是影响鸟类食性集团和取食集团分布格局的关键驱动因素之一<sup>[36-37]</sup>。绿地斑块是城市中果实和昆虫的重要分布区域，是决定陆生鸟类生存的重要因子，斑块中的乔木层和灌木层能直接或间接地为陆生鸟类提供觅食、栖息、运动和繁殖场所<sup>[38]</sup>；因而，绿地斑块的数量对杂食性鸟类和地面取食等鸟类存在显著的正向影响。在水域占比率高的城市公园中，视野开阔，有利于肉食性鸟类觅食，且公园中肉食性鸟类和水域取食等鸟类主要为水鸟，因此水域占比率是影响肉食性鸟类、水域取食、水域 / 地面取食鸟类丰富度的重要因素。

4.4 综上所述，在高度城市化的区域，干扰强度的增加会导致鸟类物种群落均质化。研究表明，公园面积、公园形状、水域斑块和绿地斑块是影响鸟类丰富度和多样性的重要因素，绿地斑块和水域斑块是影响鸟类食性集团和取食集团分布的重要环境因子。在干扰强度较高的地区，公园面积是限制公园建设的主要瓶颈，因此，综合鸟类多样性保护等生态因素与土地利用等经济因素以及以往文献可知，广州市中心城区的公园面积应在 65 hm<sup>2</sup> 左右较佳。在建设公园过程中应营造不同景观类型来满足不同鸟类栖息和觅食环境，如通过乡土树种营造复杂的林层环境，增大水域面积占比，在其边缘配置合适的乡土湿地植物，增加水域的斑块数量，适当减少面积分散放置等。

## 参考文献

- [1] MCKINNEY M L. Effects of urbanization on species

- richness: a review of plants and animals[J]. *Urban Ecosystems*, 2008, 11(2): 161-176.
- [2] 陈水华, 丁平, 郑光美, 等. 城市鸟类群落生态学研究展望[J]. *动物学研究*, 2000(2): 165-169.
- [3] MARSELLE M R, STADLER J, KORN H, et al. Biodiversity and health in the face of climate change Springer-Link[M]. Berlin: Springer, 2019: 251-281.
- [4] PEI N, WANG C, JIN J, et al. Long-term afforestation efforts increase bird species diversity in Beijing, China[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 29: 88-95.
- [5] BENITO J F, ESCOBAR M A H, VILLASENOR N R. conservation in the city: how does habitat structure influence the abundance of individual bird species in a Latin American Metropolis?[J]. *Gayana*, 2019, 83(2): 114-125.
- [6] 郭亚男, 王刚涛, 梁丹, 等. 广州市植物多样性现状调查与分析[J]. *热带亚热带植物学报*, 2021, 29(3): 229-243.
- [7] 郑孜文, 张春兰, 胡慧建. 广州地区鸟类资源本底调查及其整体特征分析[J]. *动物学杂志*, 2008(1): 122-133.
- [8] 郭乐东, 孙松, 李哲泓, 等. 广东树木公园鸟类多样性及群落结构变化特征[J]. *野生动物学报*, 2022, 43(1): 121-130.
- [9] 佟富春, 肖以华. 广州海珠湖公园夏季鸟类调查及其保护建议[J]. *广东园林*, 2015, 37(5): 70-73.
- [10] 杨亚婷, 任荣荣, 佟富春. 广州天河公园鸟类的初步调查[J]. *广东园林*, 2018, 40(4): 10-13.
- [11] 丁志锋, 梁健超, 陈本亮, 等. 广州市园林鸟类物种和功能多样性的变化[J]. *四川动物*, 2016, 35(5): 759-764.
- [12] 李慧, 洪永密, 邹发生, 等. 广州市中心城区公园鸟类多样性及季节动态[J]. *动物学研究*, 2008(2): 203-211.
- [13] LI X, LIANG L, GONG P, et al. Bird watching in China reveals bird distribution changes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(6): 649-656.
- [14] 周文莹, 张入匀, 李艳朋, 等. 粤港澳大湾区不同类型湿地水鸟群落物种多样性和越冬水鸟栖息地重要性评价[J]. *湿地科学*, 2021, 19(2): 178-190.
- [15] 李秀明, 程瑞梅, 肖文发, 等. 水鸟监测: 历史与现状及其在中国未来发展的建议[J]. *湿地科学*, 2020, 18(6): 633-645.
- [16] 王荣兴, 李冬梅, 张淑霞, 等. 中国西南不同湿地类型水鸟多样性评价[J]. *生态毒理学报*, 2018, 13(4): 120-133.
- [17] 刘月亮, 成方龙, 李芳, 等. 广州市景观格局演变特征及驱动因素交互探测[J]. *资源与产业*, 2019, 21(4): 68-80.
- [18] 赵胤程, 覃盟琳, 史倩倩. 基于空间句法的城市公园绿地可达性分析: 以广州市中心城区为例[J]. *地理信息世界*, 2022, 29(2): 40-45.
- [19] 刘阳, 陈水华. 中国鸟类观测手册[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2021: 8-9.
- [20] 张祖荣. 中国动物地理[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 281-315.
- [21] WILMAN H, BELMAKER J, SIMPSON J, et al. Elton-Traits 1.0: species-level foraging attributes of the world's birds and mammals[J]. *Ecology*, 2014, 95(7): PP 2027-2027.
- [22] TOBIAS J A, SHEARD C, PIGOT A L, et al. AVONET: morphological, ecological and geographical data for all birds[J]. *Ecology Letters*, 2022, 25(3): 581-597.
- [23] 刘娜娜, 寿丹艺, 达良俊. 上海公园绿地鸟类多样性的城市化梯度格局及类群划分[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(12): 3676-3684.
- [24] 王茜, 刘智存, 刘天宇, 等. 城市鸟类多样性研究中的多维度探索研究进展[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(10): 2058-2063.
- [25] 陈雷, 孙冰, 谭广文, 等. 广州公园植物群落物种组成及多样性研究[J]. *生态科学*, 2015, 34(5): 38-44.
- [26] MCKINNEY M L. Urbanization as a major cause of biotic homogenization[J]. *Biological Conservation*, 2006, 127(3): 247-260.
- [27] 叶水送, 方燕, 李恺. 城市化对昆虫多样性的影响[J]. *生物多样性*, 2013, 21(3): 260-268.
- [28] 王彦平. 鸟类对城市化的适应性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [29] MICHAEL L M. Effects of urbanization on species richness: a review of plants and animals[J]. *Urban Ecosystems*, 2008, 11(2): 161-176.
- [30] 杨刚. 多尺度下的城市公园生境格局对鸟类群落的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [31] 赵焯. 景观生态安全格局视角下城市生物多样性保护研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- [32] ABAL C A A G, MANCER R N J. Bird species richness across a Northern Andean city: effects of size, shape, land cover, and vegetation of urban green spaces[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 64: 127243.
- [33] 叶辛. 城市景观格局对鸟类群落结构的作用机制[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [34] 武晶, 刘志民. 生境破碎化对生物多样性的影响研究综述[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1946-1952.
- [35] 朱光, 王雪, 张文文, 等. 城市景观格局对鸟类群落的影响: 以南京溧水区为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(3): 327-333.
- [36] XIE S, MARZLUFF J M, SU Y, et al. The role of urban water bodies in maintaining bird species diversity within built area of Beijing[J]. *Sci Total Environ*, 2022, 806(2): 150430.
- [37] 段智利, 牛晓楠, 熊晴帆, 等. 广东省惠州市建成区湿地鸟类多样性及保护热点区域分析[J]. *林业与环境科学*, 2021, 37(6): 22-29.
- [38] 杨刚, 许洁, 王勇, 等. 城市公园植被特征对陆生鸟类集团的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(14): 4824-4835.