

DOI: 10.20103/j.stxb.202403180554

覃世迪, 冯开道, 孙佳祺, 沈建, 钟国恒, 吕淼品, 何珂. 基于 DNA 宏条形码技术的杭州萧山国际机场家燕春夏食性分析及防治策略. 生态学报, 2024, 44(19): 8854-8864.

Qin S D, Feng K D, Sun J Q, Shen J, Zhong G H, Lü M P, He K. Dietary analysis and prevention suggestions of barn swallows in spring and summer in Hangzhou Xiaoshan International Airport based on DNA metabarcoding technology. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8854-8864.

# 基于 DNA 宏条形码技术的杭州萧山国际机场家燕春夏食性分析及防治策略

覃世迪<sup>1</sup>, 冯开道<sup>2</sup>, 孙佳祺<sup>2</sup>, 沈建<sup>2</sup>, 钟国恒<sup>2</sup>, 吕淼品<sup>2</sup>, 何珂<sup>1,\*</sup>

1 浙江农林大学动物科技学院·动物医学院, 杭州 311300

2 杭州萧山国际机场, 杭州 311207

**摘要:** 2022—2023 年期间, 杭州萧山国际机场累计鉴定鸟击残留物样本 154 例, 涉及 54 种鸟类, 其中家燕 (*Hirundo rustica*) 为出现频率最高的鸟种, 共检测到 9 次, 鸟击风险较高。为降低家燕对飞行安全的威胁, 利用 DNA 宏条形码技术 (DNA metabarcoding technology) 检测肠道内容物, 对机场春夏两季的家燕进行食性分析。同时结合机场调查数据, 有效地掌握了家燕的食源分布。结合机场实地调研数据, 研究结果发现麻蝇科、果蝇科、蚊科、丽蝇科、蝇科和灰蝶科都属于动物性食物, 其中麻蝇科为主要食物, 而滋养食源的相关植物有蔷薇科、禾本科、伞形科、千屈菜科、桑科、榆科、百合科和柏科, 蔷薇科则是主要滋养物。通过  $\alpha$  多样性指数比较发现, 动物性食物多样性在夏季显著高于春季 (Shannon 指数,  $P < 0.05$ ), 群落物种分布更均匀, 而与家燕食源相关的植物丰富度在春季则显著高于夏季 (Chao1 和 Observed\_species 指数,  $P < 0.05$ ), 造成这种差异动态的因素可能是机场区域温度变化。通过  $\beta$  多样性指数比较发现, 动物性食物和食物链相关植物组成差异在春、夏季不明显。针对家燕的食性组成以及食物资源的分布模式, 我们建议机场应提高收割植物籽实频率, 扩大收割面积, 排查家燕营巢区域, 规范水稻、大豆等作物种植, 妥善处理机场垃圾, 定期喷洒杀虫剂, 设立昆虫诱捕装置, 清理植草区虫卵虫蛹, 以降低家燕鸟击事件的发生概率。与传统食性分析相比, 通过 DNA 宏条形码技术比较了不同季节食性, 补充了目前发现的家燕食物组成, 并且对机场的鸟击防范政策实施具有指导意义。

**关键词:** 家燕; DNA 宏条形码; 肠道内容物; 食性分析; 机场鸟击

## Dietary analysis and prevention suggestions of barn swallows in spring and summer in Hangzhou Xiaoshan International Airport based on DNA metabarcoding technology

QIN Shidi<sup>1</sup>, FENG Kaidao<sup>2</sup>, SUN Jiaqi<sup>2</sup>, SHEN Jian<sup>2</sup>, ZHONG Guoheng<sup>2</sup>, LÜ Miaopin<sup>2</sup>, HE Ke<sup>1,\*</sup>

1 College of Animal Science and Technology, College of Veterinary Medicine, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China

2 Hangzhou International Airport, Hangzhou 311207, China

**Abstract:** Between 2022 and 2023, a total of 154 samples containing residues from bird strikes were identified at Hangzhou Xiaoshan International Airport, encompassing 54 distinct avian species. Among these, *Hirundo rustica* emerged as the most frequently detected bird species, with a total of nine occurrences, indicating a significant risk of bird strikes. In order to mitigate the threat posed by barn swallows to aviation safety, DNA metabarcoding technology was employed for the analysis of their gastrointestinal contents and dietary preferences during spring and summer seasons at the airport. By integrating

基金项目: 杭州萧山国际机场鸟情生态环境常规调研项目 (2023—2025 年)

收稿日期: 2024-03-18; 网络出版日期: 2024-07-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: heke@zafu.edu.cn

these findings with data obtained from airport surveys, a comprehensive understanding of the food source distribution of barn swallows was effectively attained. Based on comprehensive field surveys conducted at the airport, our results revealed that Sarcophagidae, Drosophilidae, Culicidae, Calliphoridae, Muscidae and Lycaenidae all constituted animal-based food sources; among these, Sarcophagidae was found to be the primary dietary component. Additionally, the plant families Rosaceae, Gramineae, Apiaceae, Lythraceae, Moraceae, Ulmaceae, Liliaceae and Cupressaceae served as supplementary nourishment sources for barn swallows; notably, Rosaceae was identified as their main nutrient provider. The  $\alpha$  diversity index revealed a significant augmentation in the diversity of animal food during summer compared to spring (Shannon index,  $P < 0.05$ ), accompanied by a more equitable distribution of species within the community. Conversely, the plant richness associated with the dietary sources of barn swallows exhibited a remarkable increase in spring as opposed to summer (Chao1 and Observed\_species index,  $P < 0.05$ ). The temperature fluctuations within the airport vicinity may potentially account for this divergent dynamics. The  $\beta$  diversity index revealed no statistically significant variation in the composition of animal food and food chain-related plants between spring and summer. Based on the dietary composition of barn swallows and the distribution pattern of food resources, we proposed an increase in the frequency of plant seed harvesting at the airport, expansion of the harvesting area, assessment of nesting areas for barn swallows, standardization of rice and soybean crop planting practices, appropriate management of airport waste disposal, regular insecticide spraying, installation of insect trapping devices, and removal of eggs and pupae from grass planting areas. to mitigate bird strike incidents. In comparison with conventional diet analysis methods, this study employed DNA metabarcoding technology to investigate seasonal variations in the diet composition of barn swallows. The approach not only supplements existing knowledge regarding their food preferences but also offers valuable insights for informing bird strike prevention policies at airports.

**Key Words:** barn swallows; DNA metabarcoding; intestinal contents; diet analysis; bird strike

鸟击是指飞机等航空器在起飞、飞行和降落的过程中与正在周围飞行的鸟类或蝙蝠发生撞击引起航空器机身损坏,发生的严重飞行事故。全球每年都会有多起鸟击事件发生,带来巨大的经济损害和人身伤害<sup>[1]</sup>。研究表明,大约 72% 的民用飞机鸟击发生在起飞和降落时离地高度  $\leq 152$  m 的范围内<sup>[2]</sup>,这通常是机场附近鸟类活动以及觅食的主要区域。据中国民用航空局机场司报告,2015 年有明确飞行阶段的鸟击事件共 1174 起;其中起飞、初始爬升、进近、着陆四个低高度阶段共发生鸟击 1122 起,占 95.97%,2015 年国内因鸟击造成经济损失约合 11963.2 万元人民币<sup>[3]</sup>。机场吸引鸟类的因素有很多,如机场草坪及起飞区一般平坦宽阔,远离城市中心,人类活动也不会过于频繁,为鸟类提供良好的栖息繁殖环境<sup>[4]</sup>;机场周围铺设种植有大量植被,为一些节肢动物、啮齿动物提供了优越的生存空间,这导致机场及周边区域食物资源丰富<sup>[5]</sup>。提高了鸟类在这些区域的觅食机会和它们进入机场空域的可能性。这些因素都可能成为鸟击事故的诱因,为飞行安全加剧隐患。

由于鸟类行为活动和类群数量的差异,不同鸟类对于鸟击的风险影响也同样存在差异。在澳大利亚墨尔本机场,黑背钟鹊 (*Cracticus tibicen*) 被报道会对飞机起飞造成风险<sup>[6]</sup>;而美国皮埃蒙特国际机场对加拿大黑雁 (*Branta canadensis*) 进行鸟击威胁评估,同样发现其影响鸟击的发生<sup>[7]</sup>。据中国民航司最新公布数据(2022 年),大天鹅 (*Cygnus cygnus*)、灰雁 (*Anser anser*) 等 368 种鸟类属于我国机场的高危鸟击物种,严重威胁机场安全<sup>[8]</sup>。在 2022—2023 年杭州萧山国际机场春、夏两季共送测 154 例鸟击残留物样本,共鉴定出 54 种鸟类,其中家燕 (*Hirundo rustica*) 共检测到 9 次,为检测频次最高的鸟击高风险物种。家燕是一种小型的雀形目 (Passeriformes),种群数量十分庞大,据统计全球分布大概有 290000000—487000000 只成熟个体<sup>[9]</sup>。该物种在我国普遍分布,是我国最常见的鸟类之一,并且其生存密度大,一般在人类活跃的建筑物和人类活动频繁的区域筑巢<sup>[10]</sup>。据我国各地机场报告,在重庆、咸阳、天津等地的机场鸟击事件中均检测到家燕的存在,并将其列为潜在的鸟击高风险鸟种之一<sup>[11-13]</sup>。

为减少航空器发生鸟击概率,保证乘客安全,降低维护成本,许多机场都积极采取鸟击防范措施。目前使用的措施包括但不限于驯养猛禽、恐怖眼、煤气炮、声波驱鸟、猎枪捕杀等方法<sup>[14]</sup>,但煤气炮等声波驱鸟器会随着鸟类与驱鸟器之间的距离增加而逐渐下降<sup>[15]</sup>。为了找到生态与鸟击防范的平衡,赵云龙等通过分析机场土壤以及草丛动物的群落特征,找到鸟类食物组成,从而为机场鸟击防范提供更好的建议<sup>[16]</sup>。通过切断鸟类食物链,减少机场对鸟类的吸引力,同样也是控制机场及其周边地区鸟类数量,降低机场鸟击事件发生频率的一种途径<sup>[17]</sup>。为更好地探索鸟类食物链,白小甜等对 5 种鸟类食源进行检测,发现了植物种子、螺类和节肢动物<sup>[18]</sup>;黄涛则在 19 种鸟类食物组成中发现多种植物与节肢动物<sup>[4]</sup>;徐洁等在 41 种鸟类体内鉴定出昆虫、豆科和禾本科种子<sup>[17]</sup>。这些研究结果表明鸟类在机场的主要食源是植物和节肢动物,为后续鸟类食性研究提供了方向。王国秀等研究了机场草坪昆虫与鸟类食性之间的关系,发现所捕获鸟类 93% 以上均是捕食机场草坪中的草籽及以草为食的昆虫<sup>[19]</sup>。为了更全面地了解家燕食性,我们同时对可能滋养动物性食源的相关植物组分进行分析。

本研究采用 DNA 宏条形码技术(DNA metabarcoding technology),分析杭州萧山国际机场春、夏两季家燕的食性,针对动物源(节肢动物)和食物链中相关植物进行分析,拟研究:(1)春、夏两季家燕的食物组成多样性;(2)比较不同季节家燕的食物多样性差异;(3)结合机场的植被和昆虫调查报告,为杭州萧山机场家燕相关的鸟击防范提供可行性建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

杭州萧山国际机场位于浙江省杭州市萧山区境内,距市中心 27 km,周边地势平坦,与钱塘江毗邻。年平均气温 16.8 °C,年平均降雨量 1440.5 mm,年平均日照时数 1804.6 h,年平均无霜期 263 d。

根据机场工作人员在 2022—2023 年调查,记录的动物有 3 门 6 纲 15 目 40 科,常见有麻蝇科、果蝇科、丽蝇科、蝇科、蚊科和灰蝶科,主要出现在机场草坪区域;植物有 3 门 5 纲 34 目 59 科,常见的草本主要以禾本科、蔷薇科、伞形科、千屈菜科、桑科、榆科、百合科和柏科等为主,主要种植区域为飞行区以及机场边缘草坪。

### 1.2 实验材料

本实验所用的家燕样本全部来自杭州萧山国际机场飞行区内,由机场鸟防人员采集并保存在 -20 °C 冰柜。采样时间为 2023 年 3 月到 2023 年 8 月,根据浙江省气候特征,采样季度分为春夏两个季节(3—5 月 8 只,其中 3 月 3 只,5 月 5 只;8 月 7 只,共 15 只)。从萧山机场取得的家燕样本保存于冰盒中保持 4 °C 低温运送至实验室,解剖后取出盲肠内容物,-80 °C 冰箱保存。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 总 DNA 提取

利用通用型柱式基因组提取试剂盒(康为世纪)对家燕肠道内容物进行 DNA 提取,利用 Nanodrop 测定 DNA 样品浓度和纯度。15 个样品都满足条件:浓度达到 100 ng/μL, A260/A280 达到 1.8 后,进行后续扩增。

#### 1.3.2 PCR 扩增

本研究利用线粒体细胞色素 C 氧化酶亚基 I (Cytochrome c oxidase, COI) 基因条形码的 ANML 引物(LC01940;5'-GGT CAA CAA ATC ATA AAG ATA TTG G-3', CO1-CFMRa;5'-GGW ACT AAT CAA TTT CCA AAT CC-3')分析动物性食性(主要基于节肢动物)<sup>[20]</sup>,利用植物叶绿体 Rubisco 大亚基(Rubisco large subunit, *rbcL*)的条形码引物(Z1aF;5'-ATG TCA CCA CCA ACA GAG ACT AAA GC-3', hp2R;5'-CGT CCT TTG TAA CGA TCA AG-3')分析相关植物组成<sup>[21]</sup>。

PCR 扩增体系和程序如下:

PCR 反应体系:5×reaction buffer 5 μL,5×GC buffer 5 μL,dNTP(2.5 mmol/L) 2 μL,上游引物(10 μmol/L) 1 μL,下游引物(10 μmol/L) 1 μL,模板 DNA 2 μL,Q5 超保真 DNA 聚合酶 0.25 μL,补 ddH<sub>2</sub>O 至 25 μL。

PCR 扩增程序:98 °C 预变性 2 min,98 °C 变性 15 s,55 °C 退火 30 s,72 °C 延伸 30 s,25 个循环,72 °C 延伸 5 min;10 °C 保存。

将扩增产物送至南京派森诺生物科技有限公司,采用 TruSeq Nano DNA LT 文库准备试剂盒(Illumina)建库,然后使用 MiSeq 试剂盒 V3 (600 cycles)在 PE250 平台进行双端测序。

## 1.4 数据处理

### 1.4.1 原始数据处理

针对测序后得到的原始序列采取下列步骤进行处理,便于后续分析:

(1)使用 cutadapt(v 2.3)切除序列的引物片段;

(2)使用 V-search(v 2.13.4)对原始测序数据进行拼接、质控并去除其中的冗余序列,然后鉴定并去除嵌合体获得高质量序列;

(3)使用 QIIME2 (2019.4) 在 97% 相似度水平对高质量序列聚类、获得 OTU (Operational Taxonomic Units),然后基于 NCBI 本地核酸序列数据库(V20230627)进行物种注释分析,并进行抽平处理,最后统计各样本物种注释结果中科水平 OTU 数量。

### 1.4.2 春夏两季分析

将所有样本分为春(Spr)、夏(Sum)两组,对两组间进行差异分析:

(1)结合机场实地调研数据进行物种筛选,使用 pheatmap 包(v 1.0.12)数据绘制平均丰度前 15 位的科水平热图,观察在不同样本中靠近正值颜色的物种并运用 Mann-Whitney 秩和检验和 Benjamini & Hochberg 矫正,筛选出春、夏两季相对丰度较高的动植物并比较两季间差异;

(2)使用 QIIME2(2019.4)计算  $\alpha$  多样性指数(Chao1、Observed\_species、Shannon 和 Simpson 指数),采用 Kruskal-Wallis 秩和检验对春、夏两季间进行显著性检验;

(3)使用 Bray-Curtis distances 算法计算样本间的差异距离,利用 R 软件 ape 包(v 5.8)对结果进行 PCoA 分析,结合多元方差分析 Adonis 对春、夏两季进行显著性分析。

(4)利用桑基图对家燕在不同季节的食物组成关系进行可视化(<https://www.genescloud.cn/>)。

## 2 结果与分析

### 2.1 测序结果

使用 Illumina 平台成功地对 15 个 *ANML* 和 15 个 *rbcL* 扩增片段进行高通量测序。测序文库分别产生了 1963952 和 1628958 条原始序列,经质量筛选以及降噪处理后分别减少到 1567609 和 1473209 条序列。经抽平后,最终保留了 470 个动物和 308 个植物 OTU 供后续分析(图 1)。

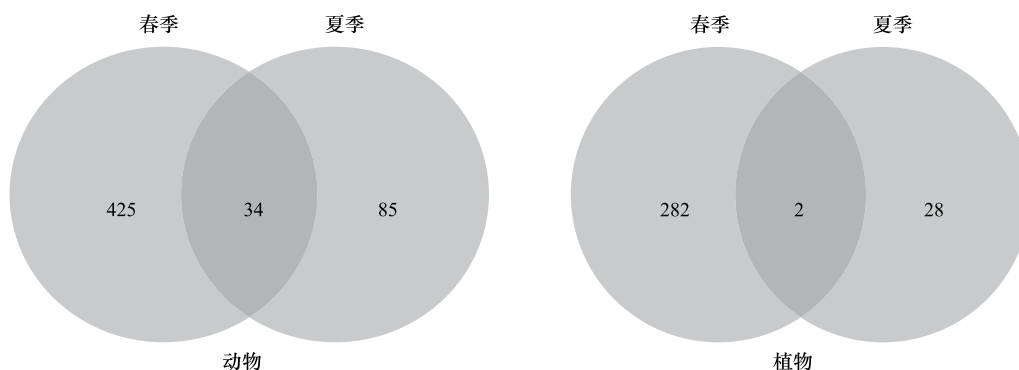


图 1 家燕两季动物性食物和食物链相关植物 OTU 分布

Fig.1 Distribution of OTU in animal food and food-chain related plants in two seasons of the barn swallow

OTU: 操作分类单元

### 2.2 家燕食性组成和丰度

家燕的动物性食物有 1 门 3 纲 7 目 48 科 59 属 94 种。本研究对科水平进行分析,选取相对丰度前 15 的科作为分析对象(图 2)。比例前 3 的科分别是麻蝇科(26.36%)、蝇科(13.13%)和蚊科(12.64%)。

家燕食物链中相关植物有 2 门 4 纲 17 目 21 科 26 属 27 种。同样对相对丰度前 15 的科进行分析(图 2)。比例前 3 的科分别是蔷薇科(23.97%)、千屈菜科(12.47%)和石蒜科(7.56%)。结合机场调查数据,发现丰度前 15 的动物性食物中麻蝇科、蚊科、蝇科、丽蝇科、灰蝶科和果蝇科在机场飞行区内部被调查到;而能滋养食物的植物中丰度前 15 的蔷薇科、千屈菜科、伞形科、禾本科、柏科、桑科和榆科在机场内存在。

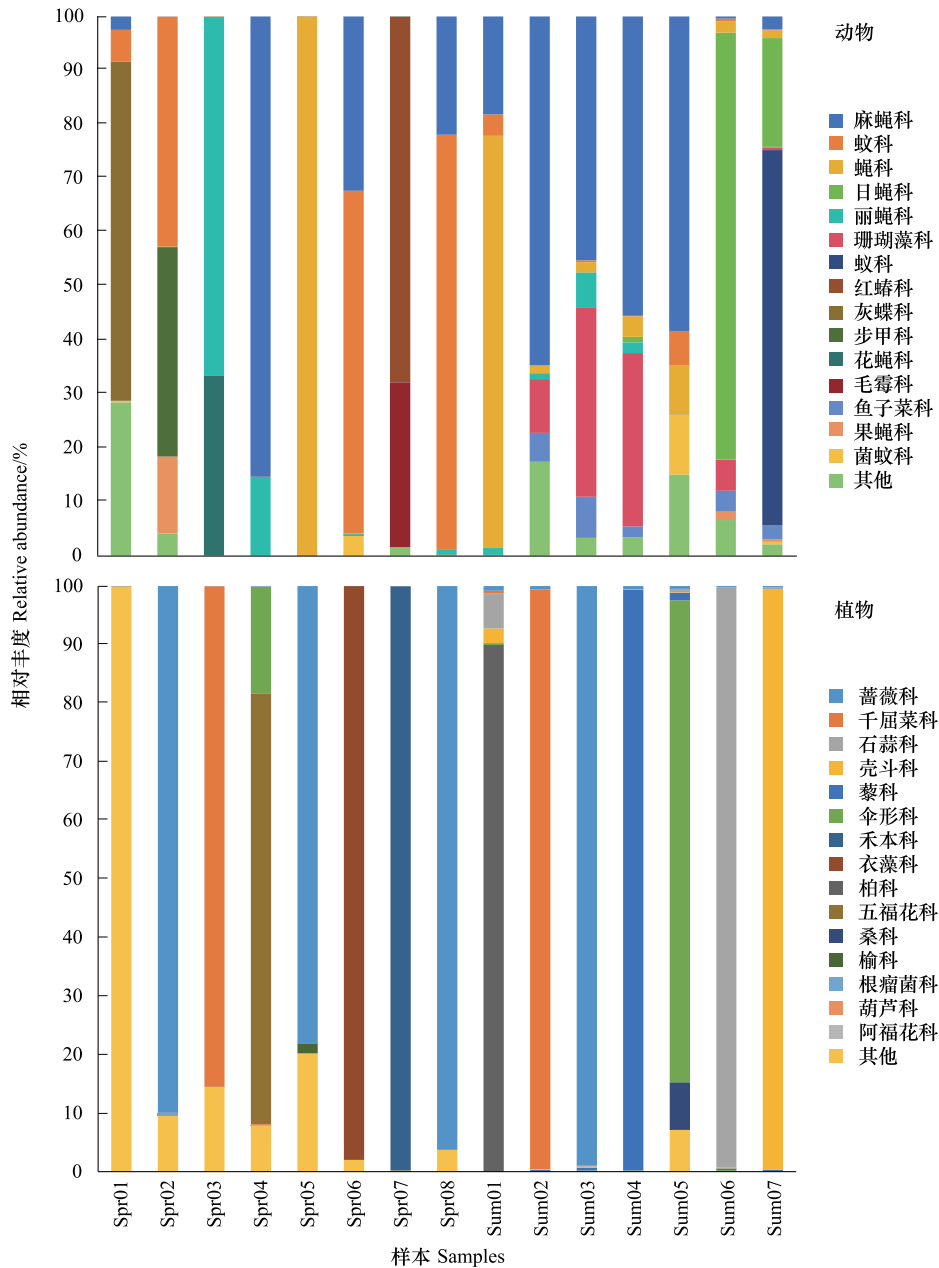


图 2 不同样本家燕动物性食物和食物链相关植物科级相对丰度

Fig.2 Relative abundance of animal food and food-chain related plants at the family level in different samples of barn swallows

Spr 01: 春季 1 号样品; Spr 02: 春季 2 号样品; Spr 03: 春季 3 号样品; Spr 04: 春季 4 号样品; Spr 05: 春季 5 号样品; Spr 06: 春季 6 号样品; Spr 07: 春季 7 号样品; Spr 08: 春季 8 号样品; Sum 01: 夏季 1 号样品; Sum 02: 夏季 2 号样品; Sum 03: 夏季 3 号样品; Sum 04: 夏季 4 号样品; Sum 05: 夏季 5 号样品; Sum 06: 夏季 6 号样品; Sum 07: 夏季 7 号样品

### 2.3 家燕食物组成多样性分析

通过动物食源  $\alpha$  多样性指数分析(图 3),发现春季家燕的 Chao1、Observed\_species 平均值均高于夏季,说明春季动物性食物丰富度更高,但不具有显著性( $P > 0.05$ )。而夏季家燕的 Shannon 和 Simpson 指数的平均值均高于春季,其中 Shannon 指数具有显著差异性( $P < 0.05$ )。这说明夏季动物性食物的多样性比春季高,群落物种分布更均匀。通过对食源相关植物的  $\alpha$  多样性指数分析(图 3),发现春季家燕 Chao1、Observed\_species、Shannon 和 Simpson 指数的平均值均高于夏季,其中 Chao1 和 Observed\_species 指数表现出显著性差异( $P < 0.05$ )。这说明春季家燕肠道内容物中植物丰富度更高,滋养动物食源的相关植物种类更多。

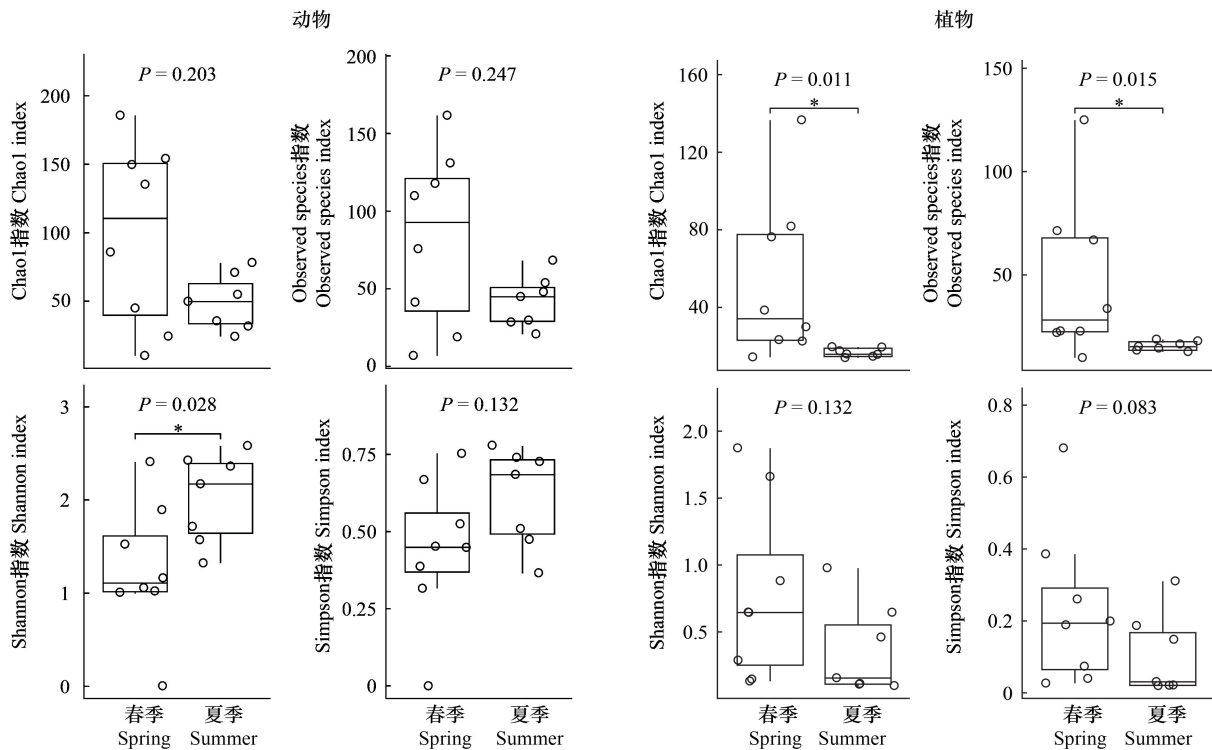


图 3 家燕两季动物性食物和食物链相关植物  $\alpha$  多样性差异检验

Fig.3 Differences in alpha diversity of animal food and food-chain related plants between two seasons in the barn swallow

对动物食源  $\beta$  多样性指数进行分析并通过检验后(图 4),发现样本之间相对分散,这说明家燕的动物食物组成随着季节更替发生变化,但不存在显著差异( $P > 0.05$ )。而在相关植物  $\beta$  多样性指数分析中(图 4),样本相对集中,发现春、夏两季的食物链相关植物未随着季节更替发生较大变化,物种组成结构比较稳定,也不存在显著差异( $P > 0.05$ )。

综合上述两部分分析,认为动物性食物多样性在夏季更高(Shannon 指数, $P < 0.05$ ),滋养动物食源的相关植物多样性在春季更高(Chao1 和 Observed\_species 指数, $P < 0.05$ ),家燕在动物(节肢动物)食性组成和食物链相关植物上春、夏两季差异不明显(Adonis 检验, $P > 0.05$ )。

### 2.4 家燕食物组成差异

对本研究家燕动物性食物组成中前 15 丰度的科进行分析,发现春季出现麻蝇科、果蝇科、蚊科、丽蝇科、蝇科、灰蝶科、花蝇科、步甲科和红蝽科共计 9 科;夏季存在麻蝇科、蝇科、菌蚊科、日蝇科和蚁科共计 5 科(图 5)。经过 Mann-Whitney 秩和检验和 Benjamini & Hochberg 矫正后发现在  $P < 0.05$  显著性水平上,两季间的动物性食物不存在显著差异,但丽蝇科、蝇科、花蝇科、步甲科、日蝇科和蚁科在  $P < 0.1$  的显著性水平上存在一定差异。结合机场飞行区内实地调研报告,本研究认为机场飞行区内容易吸引家燕进场捕食的主要动物性食物

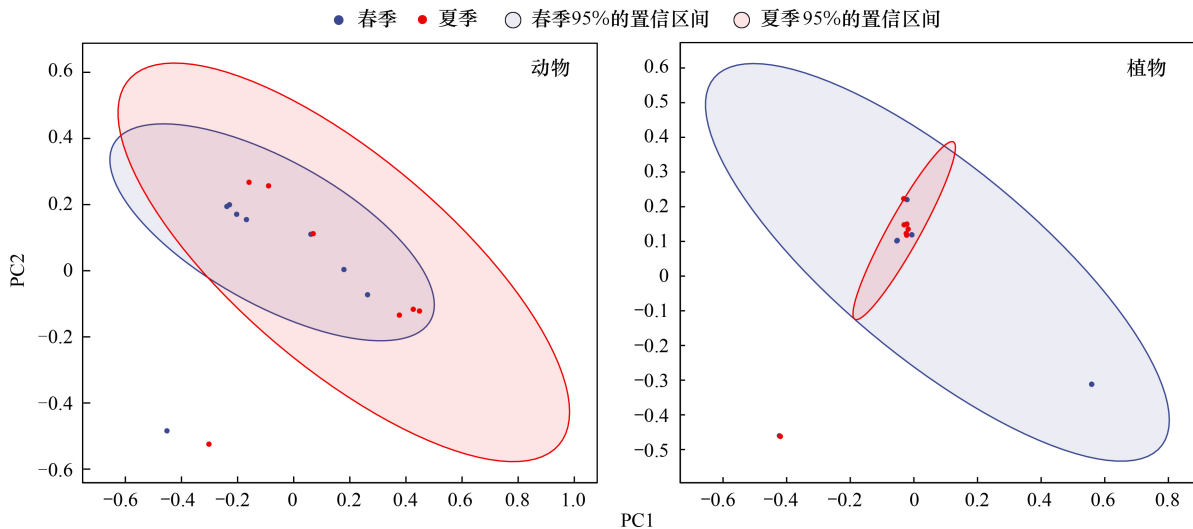


图4 家燕两季动物性食物和食物链相关植物组成 PcoA 分析

Fig.4 PcoA analysis of animal food and plant composition associated with the food chain in two seasons of the barn swallow

是麻蝇科、果蝇科、蚊科、丽蝇科、蝇科、灰蝶科,其中麻蝇科占优势地位。结合季节观察(图6),发现食物中灰蝶科、花蝇科、步甲科和红蜻科主要出现在春季;日蝇科和蚁科则只在夏季出现。随着季节变化,家燕捕食的蚊科和丽蝇科减少,而灰蝶科、花蝇科、步甲科、红蜻科则逐渐消失;麻蝇科、蝇科和菌蚊科增多,且出现日蝇科和蚁科2种新的动物食物。春季蚊科出现频率最高,夏季麻蝇科最高。

针对滋养动物食源的前15丰度的科级植物,春季发现蔷薇科、禾本科、千屈菜科、榆科、五福花科、葫芦科和阿福花科共计7科;夏季发现蔷薇科、伞形科、千屈菜科、桑科、柏科、石蒜科、壳斗科和藜科共计8科(图5)。经过 Mann-Whitney 秩和检验和 Benjamini & Hochberg 校正后发现植物中的伞形科、千屈菜科、榆科和葫芦科在两季间存在显著差异( $P < 0.05$ )。结合机场实地数据,认为主要的食物链相关植物是蔷薇科、禾本科、伞形科、千屈菜科、桑科、榆科、百合科和柏科,其中蔷薇科占优势地位。结合季节分析,发现禾本科、榆科、五福花科、阿福花科和葫芦科只在春季检测到,桑科、柏科、壳斗科、石蒜科和藜科则只出现在夏季。春季蔷薇科出现频率最高,夏季石蒜科最高。随着春、夏季节变化,蔷薇科植物减少,禾本科、榆科、五福花科、葫芦科和阿福花科比例逐渐降低直至零;而伞形科和千屈菜科则在夏季食物比重逐渐增加,且出现桑科、柏科、壳斗科、石蒜科和藜科5种新的相关植物(图6)。

### 3 讨论

#### 3.1 DNA 宏条形码应用于食性分析

在以往的研究中,探究鸟类的食性及其差异采用许多不同分析方法。如利用解剖镜对胃内容物直接鉴别<sup>[17-18]</sup>;直接观察鸟类摄食行为<sup>[22]</sup>;对食团中的残余成分进行鉴定<sup>[23-24]</sup>;通过粪便中的动植物残片进行鉴定<sup>[25]</sup>。这些传统方法都可以直接观察到鸟类食性,但常规形态学鉴定存在一定局限性,不能全面完整地了解鸟类的食性,这个缺陷在DNA宏条形码技术中可以得以克服<sup>[26]</sup>。DNA宏条形码技术通过高通量测序彻底改变了对鸟类食性、食物组成多样性以及物种相对丰度的研究方法<sup>[27]</sup>,可以更加高效地实现对鸟类的食源鉴定,如Liu H等利用该技术对越冬丹顶鹤(*Grus japonensis*)食性进行分析,并对其补饲条件提供有效指导<sup>[28]</sup>;Zhao X等则通过这种技术对灰鹤(*Grus grus*)的植物性食物组成进行鉴定,完善了保护区内该物种的补饲措施<sup>[21]</sup>。目前有机场开始应用该技术,如南京禄口机场对飞行区出现鸟类进行食性鉴定<sup>[17]</sup>;成都双流国际机场挑选5种优势鸟类进行食性分析<sup>[18]</sup>,从而针对性地清除食物诱因,减少鸟击事件的发生。

通过DNA宏条形码技术揭示了萧山机场家燕的食性,食性分析结果与机场内部发现的麻蝇科、蝇科和蚊

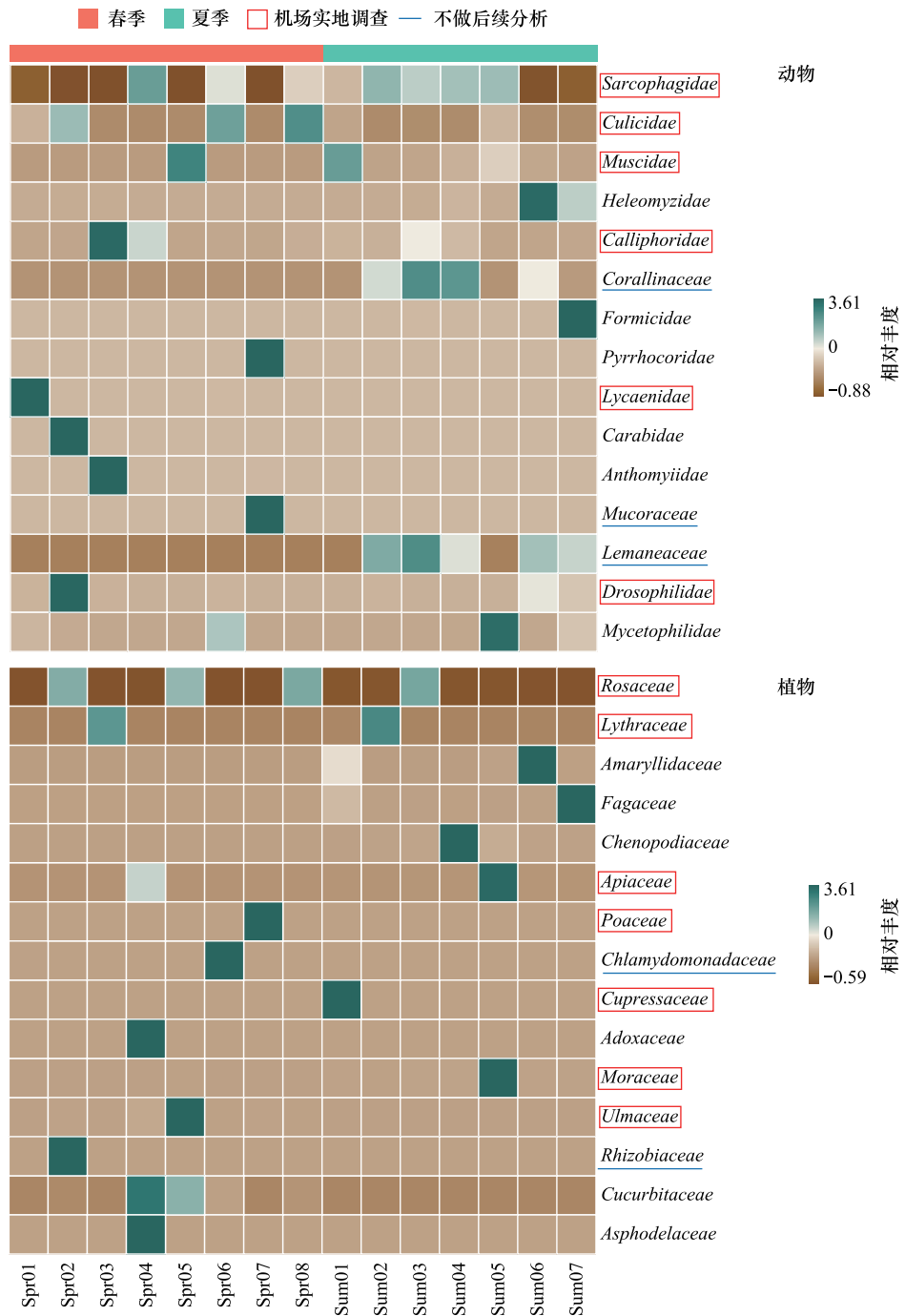


图 5 家燕两季动物性食物和食物链相关植物组成热图

Fig.5 Heat map of animal food and plant composition associated with food chain in two seasons of the barn swallow

Sarcophagidae: 麻蝇科; Culicidae: 蚊科; Muscidae: 蝇科; Heleomyzidae: 日蝇科; Calliphoridae: 丽蝇科; Corallinaceae: 珊瑚藻科; Formicidae: 蚁科; Pyrrhocoridae: 红蝽科; Lycaenidae: 灰蝶科; Carabidae: 步甲科; Anthomyiidae: 花蝇科; Mucoraceae: 毛霉科; Lemaneaceae: 鱼子菜科; Drosophilidae: 果蝇科; Mycetophilidae: 蕈蚊科; Rosaceae: 蔷薇科; Lythraceae: 千屈菜科; Amaryllidaceae: 石蒜科; Fagaceae: 壳斗科; Chenopodiaceae: 藜科; Apiaceae: 伞形科; Poaceae: 禾本科; Chlamydomonadaceae: 衣藻科; Cupressaceae: 柏科; Adoxaceae: 五福花科; Moraceae: 桑科; Ulmaceae: 榆科; Rhizobiaceae: 根瘤菌科; Cucurbitaceae: 葫芦科; Asphodelaceae: 芦荟科。其中 Corallinaceae(珊瑚藻科)、Lemaneaceae(鱼子菜科)和 Mucoraceae(毛霉科)不属于节肢动物, Chlamydomonadaceae(衣藻科)和 Rhizobiaceae(根瘤菌科)不属于植物范畴,因此不列入后续结果分析



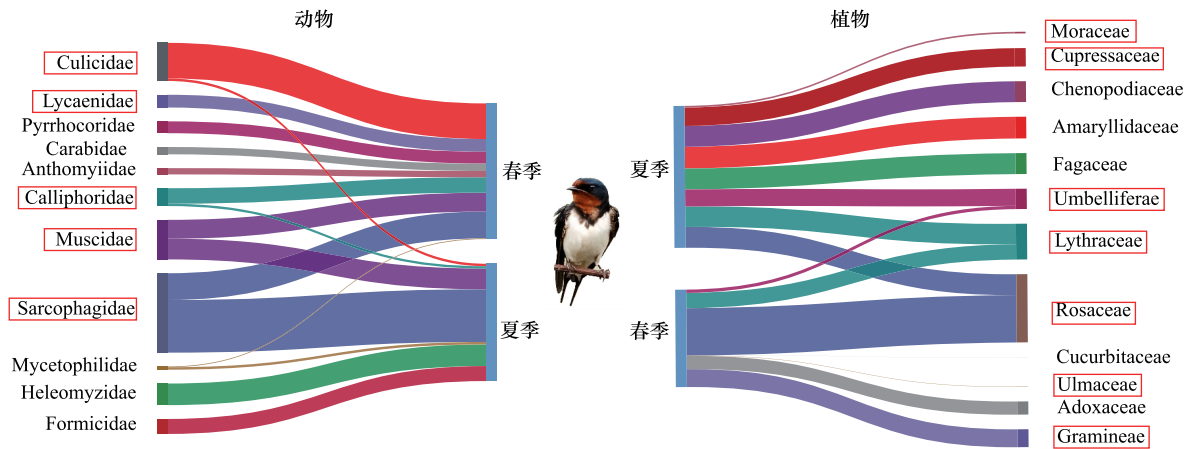


图6 家燕两季动物性食物和食物链相关植物流向趋势

Fig.6 Trends of animal food and food-chain related plant flow in two seasons of the barn Swallow

Umbelliferae: 伞形科; Gramineae: 禾本科; 机场实地调查发现的物种用红色方框表示

科等物种实际分布情况匹配,并且这些物种在飞行区及草坪土壤等区域都能准确找到。其次还对蔷薇科、禾本科等这些滋养动物食源的植物进行检测,通过与实地调查数据进行核实,确定这些植物的生长区域,为萧山机场的家燕食源分布提供了指导方向,让机场鸟击防范工作更顺利进行。并且通过春、夏季节的比较,更加准确地获得食性来源的动态变化和丰富度,同时对机场可能存在的其他家燕食源进行了补充。让机场可以更灵活地调节在不同季节的工作重心。

在机场区域调查中,未记录到如花蝇科、日蝇科、菌蚊科、蚁科、步甲科和红蝽科等动物性食物。检测到的五福花科、葫芦科、阿福花科、石蒜科、壳斗科和藜科等植物也没有记录。但分析这些物种的可能存在性后,我们认为这些食物(花蝇科、菌蚊科、蚁科、步甲科、日蝇科等动物性食物和五福花科、阿福花科)可能是潜在食物诱因,需要对机场及周边区域的这些物种进行清除。

这些物种可能存在的场所有:花蝇科的灰地种蝇(*Delia platura*)主要寄生在飞行区的禾本科等植物上<sup>[29]</sup>;菌蚊科的布菌蚊属主要围绕机场周围的食用菌类分布<sup>[30]</sup>;蚁科的细颚猛蚁属通常在土壤中构巢,群落数量庞大<sup>[31]</sup>;步甲科的大步甲属主要捕食在机场出现的鳞翅目幼虫和蜗牛<sup>[32]</sup>;红蝽科的地红蝽(*Pyrrhocoris sibiricus*)主要以农田中谷物、豆类为食<sup>[33]</sup>;日蝇科可能由于机场及居民区垃圾堆放聚集。在植物性食物层次,五福花科的荚蒾(*Viburnum dilatatum*)适应力强,对于土壤、气候要求低<sup>[34]</sup>;葫芦科和石蒜科分别鉴定为南瓜(*Cucurbita moschata*)和韭菜(*Allium tuberosum*),存在于机场外;阿福花科的芦荟(*Aloe vera*)可能作为观赏绿植和盆栽;壳斗科的乔木物种在机场周边不存在;藜科基本为碱蓬属植物,只能生存在盐碱环境中<sup>[35]</sup>。

### 3.2 萧山机场家燕防范建议

本研究结合实地调研发现,蔷薇科、禾本科、伞形科、千屈菜科、桑科、榆科、百合科和柏科植物是滋养萧山机场家燕食源的主要植物,也是机场动物(主要是节肢动物)觅食的优先选择。这些植物在飞行区、机场草坪及周边区域都存在分布。首先,蔷薇科、伞形科、千屈菜科和百合科的果实、花朵、叶片及种子都可能会作为家燕动物食源的滋养成分,因此不仅需要对其分布区域进行收割工作,还应对机场周边范围进行进一步的排查,如附近的沟渠、建筑,扩大对这些植物的收割面积。将割下的杂草连同其种子清除出机场外,这样不仅能减少其种子数量和密度,降低次年在机场区域萌发的新草数量,切断家燕食物链中的植物性因素;还能防止其作为肥料对其余植物进行营养补充。其次,桑科、榆科和柏科经常作为一些昆虫的生长环境,如叶甲、蜘蛛等,并且这些昆虫在机场也存在分布,所以应对其进行铲除,可迫使这些动物食源远离机场,减轻鸟击威胁。第三,禾本科中存在部分下属物种作为粮食作物,如水稻,所以也应该由机场相关部门与当地政府沟通,改变机场周边

农作物的耕种模式,减少水稻的种植面积,并且安排工作人员对机场内部存在的禾本科植物进行调查筛选,减少机场外围昆虫的觅食概率,从而使家燕因食物缺乏,迁移到更远的地方进行觅食。

为遏制动物食源的滋养环节,2020 年萧山机场对南飞行区进行大规模草种筛选,狗牙根 (*Cynodon dactylon*) 因本土原生、高度低于 30 cm、结籽少、抗病虫害能力强等特点成为主要保留物种,完成筛选工作后,发现家燕的活动频次减少 61.73%<sup>[36]</sup>,有效降低了家燕的鸟击威胁。所以后续对机场其余土面区的草种筛选工作应保持进行,能有效保证机场飞行区的飞行安全。

根据动物性食性分析,萧山机场家燕的捕食对象主要为麻蝇科、果蝇科、蚊科、丽蝇科、蝇科和灰蝶科等。在这些昆虫中,麻蝇科、果蝇科、丽蝇科和蝇科喜食腐败动植物或粪便,其幼虫大多滋生在废料、腐败的生活垃圾、粪便以及小型脊椎动物尸体中,为减少这些物种的数量,机场废弃物处理工作需要更加重视,及时清理垃圾,避免因温度氧气充足导致细菌滋生,从而引发腐败,这有助于降低机场区域内蝇类物种以及密度,减少家燕因觅食造成聚集和穿越飞行区的概率。还应该加强对机场周边垃圾场的排查工作并及时进行铲除,因其中富含大量生活垃圾,能为各种昆虫提供充足养分,供其大量繁殖,从而吸引家燕捕食,提高家燕经过飞行区的概率,使鸟击威胁加剧。其次,对蚊科这种趋光性昆虫,可利用灯光诱捕。第三,灰蝶科喜寄生在豆科等农作物中,所以应减少机场附近大豆的种植面积,使其种群数量减少,降低家燕在飞行区附近捕食的几率。

#### 4 结论

(1) 结合机场调研数据,发现麻蝇科、果蝇科、蚊科、丽蝇科、蝇科和灰蝶科属于家燕动物性食物,其中麻蝇科是主要食物;结合报告发现蔷薇科、禾本科、伞形科、千屈菜科、桑科、榆科、百合科和柏科属于滋养家燕食源的相关植物,其中蔷薇科为主要植物。

(2) 通过  $\alpha$  多样性指数分析,发现家燕春季食物链相关植物多样性更高,而夏季动物性食物多样性更高。而对  $\beta$  多样性指数进行分析,发现动物(节肢动物)食性和食物链相关植物组成上,春、夏两季的家燕不存在明显差异。

(3) 为减少家燕鸟击事件的发生,应及时收割蔷薇科等植物的未成熟草籽,并将其清理出飞行区;其次清除机场及周边区域的柏科等植物;第三规范周边禾本科植物的种植规模。同时,按时处理机场废弃物,加强对机场周边垃圾场的管理,定期对植草区的枯木等杂物进行清除,加强草种管理,注意草坪修剪,以及定期喷洒药物减少昆虫数量。这些措施将有助于切断家燕食源,有效预防鸟击事故的发生。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Hu Y Y, Xing P, Yang F, Feng G, Yang G S, Zhang Z W. A birdstrike risk assessment model and its application at Ordos Airport, China. *Scientific Reports*, 2020, 10: 19627.
- [ 2 ] Dolbeer RA. Population increases of large birds in North America: pose challenges for aviation safety. *Human-Wildlife Interactions*, 2020, 14(3): 345-357.
- [ 3 ] 中国民用航空局机场司. 2015 年度中国民航鸟击航空器信息分析报告. 中国: CAA, CAST 机场研究所, 2016.
- [ 4 ] 黄涛. 基于 DNA 宏条形码技术分析双流机场鸟击高危鸟类食性[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
- [ 5 ] Conkling T J, Belant J L, DeVault T L, Martin J A. Impacts of biomass production at civil airports on grassland bird conservation and aviation strike risk. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2018, 28(5): 1168-1181.
- [ 6 ] Steele W K, Weston M A. Sex and age bias in Australian magpies struck by aircraft. *Birds*, 2023, 4(4): 295-302.
- [ 7 ] Rutledge M E, Moorman C E, Washburn B E, Deperno C S. Evaluation of resident Canada goose movements to reduce the risk of goose-aircraft collisions at suburban airports. *The Journal of Wildlife Management*, 2015, 79(7): 1185-1191.
- [ 8 ] 中国民用航空局机场司. 运输机场鸟击航空器防范危险鸟种目录. 中国: CAA. 2022.
- [ 9 ] International Union for Conservation of Nature. IUCN Red list of threatened species. International union for conservation of nature and natural resource cambridge. UK: IUCN, 2019.
- [ 10 ] Kim M, Chung O S, Lee J K. The relationship between nest location selection of Barn swallows (*Hirundo rustica*) and human activity and residence. *Scientific Reports*, 2023, 13: 23008.

- [11] 吴雪, 杜杰, 李晓娟等, 廖文波. 重庆江北机场鸟类群落结构及鸟击防范. 生态学杂志, 2015, 34(7): 2015-2024.
- [12] 郑佳, 贾晓东, 杨兴中. 咸阳国际机场鸟类群落调查及鸟击防范措施. 生态学杂志, 2015, 34(6): 1607-1613.
- [13] 柳毅, 徐焕然, 袁红, 何宾, 赵树兰, 多立安. 天津滨海国际机场鸟类群落结构及多样性特征. 生态学杂志, 2017, 36(3): 740-746.
- [14] Geringer M B, Lima S L, DeVault T L. Evaluation of an avian radar system in a Midwestern landscape. Wildlife Society Bulletin, 2016, 40(1): 150-159.
- [15] 金麟雨, 李舒萌, 赵小英, 刘泰杉, 范陈, 李东来. 煤气炮和声波驱鸟器有效距离的评估. 应用生态学报, 2021, 32(1): 326-332.
- [16] 赵云龙, 唐思贤, 王群, 樊玉杰, 赵艳民, 杨志彪. 上海虹桥机场土壤及草丛动物群落特征和鸟类关系研究. 生态学报, 2004, 24(6): 1219-1224.
- [17] 徐洁, 高晋, 刘进伟, 吴聪, 王琪, 郑慧, 王备新. 南京禄口国际机场昆虫月际发生规律及其与鸟类关系. 生态学杂志, 2018, 37(7): 2045-2050.
- [18] 白小甜, 罗方梅, 伍懿, 罗锋, 罗概, 何兴成, 冉江洪. 成都双流国际机场 5 种优势鸟类的食性及食源分析. 四川动物, 2022, 41(5): 565-572.
- [19] 李典谟. 昆虫与环境: 中国昆虫学会 2001 年学术年会论文集. 北京: 中国农业科技出版社, 2001: 501-505.
- [20] Jusino M A, Banik M T, Palmer J M, Wray A K, Xiao L, Pelton E, Barber J R, Kawahara A Y, Gratton C, Peery M Z, Lindner D L. An improved method for utilizing high-throughput amplicon sequencing to determine the diets of insectivorous animals. Molecular Ecology Resources, 2019, 19(1): 176-190.
- [21] Zhao X Y, Jiang H M, Xu N, Zhao Y Q, Zhao F J, Xu R F, Liu H Y. Molecular diet analysis of common cranes (*Grus grus*) under supplementary feeding based on fecal DNA metabarcoding. Ecosphere, 2023, 14(8): e4631.
- [22] 赵伊伦, 陈梦羽, 缪宁, Timothy Moermond. 四川大学望江校区 5 种常见留鸟的食性及其季节差异. 四川动物, 2017, 36(5): 576-581.
- [23] 李晓娟, 周材权, 胡锦涛, 王勃, 黄五洋. 南充高坪机场短耳鸮越冬期的食性分析和习性观察. 动物学杂志, 2007, 42(6): 120-124.
- [24] 李晓京, 鲍伟东, 孙来胜. 北京市区越冬长耳鸮的食性分析. 动物学杂志, 2007, 42(2): 52-55.
- [25] 黄建, 郭玉民. 秋季林甸停歇地白头鹤的食性分析. 野生动物学报, 2015, 36(1): 76-79.
- [26] Hebert P D N, Cywinska A, Ball S L, DeWaard J R. Biological identifications through DNA barcodes. Proceedings Biological Sciences, 2003, 270(1512): 313-321.
- [27] O'Rourke D R, Bokulich N A, Jusino M A, MacManes M D, Foster J T. A total crapshoot? Evaluating bioinformatic decisions in animal diet metabarcoding analyses. Ecology and Evolution, 2020, 10(18): 9721-9739.
- [28] Liu H Y, Xu W, Xu N, Zhang W W, Jiang H M, Zhao Y Q, Lu C H, Zhu Y, Xu P. Fecal DNA metabarcoding reveals the dietary composition of wintering Red-crowned Cranes (*Grus japonensis*). Avian Research, 2023, 14(04): 647-655.
- [29] Nava-Ruiz P, Meraz-Álvarez R, Valdez-Carrasco J, Chávez-López O, Bautista-Martínez N. Parasitoids of *Delia planipalpis* (Meigen) And *Delia Platura* (stein) (diptera, Anthomyiidae) in Mexico. ZooKeys, 2021, 1046: 177-187.
- [30] Catalogue of Life China: Annual Checklist, Beijing, China. The Biodiversity Committee of Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [31] Kadoorie Farm and Botanic Garden. Report of Rapid Biodiversity Assessments at Chebaling National Nature Reserve. Hong Kong: KFBC, 2003.
- [32] 于晓东, 周红章, 罗天宏. 东灵山地区大步甲属物种分布和季节变化的多样性格局. 生态学报, 2002, 22(10): 1724-1733.
- [33] 赵瑞. 地红蜡特殊取食行为及其偏好性研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2022.
- [34] 施晓梦, 田丽媛, 王雪芬, 冯永平, 张珏. 8 种荚蒾属植物在杭州地区的适应性评价. 特种经济动植物, 2023, 26(9): 62-68.
- [35] 彭木, 向智文, 周防震, 黄秀芳, 闫少鹏. 碱蓬属植物对根际土壤理化性质和酶活性的影响. 东北林业大学学报, 2023, 51(2): 104-110.
- [36] 钟国恒, 吕淼品. 杭州萧山国际机场百灵科鸟类活动规律及防范效果分析. 浙江林业科技, 2021, 41(5): 104-109.