

合肥新桥国际机场鸟类-昆虫捕食网络及其对鸟击防范工作的新启示

王瑜^① 薛委委^② 邱兵涛^② 朱晨^③ 万霞^{①*}

① 安徽大学资源与环境工程学院 合肥 230601; ② 合肥新桥国际机场 合肥 231271; ③ 浙江大学生命科学学院 杭州 310058

摘要: 鸟类在机场区域活动造成的鸟击是机场运行安全的隐患之一, 掌握机场环境中鸟类-昆虫的捕食关系对于理解鸟击的成因具有重要意义。本研究以合肥新桥国际机场为例, 构建了其中 21 种鸟类与所食昆虫间的捕食网络, 描述了该网络的结构特征: 与零模型相比, 网络表现为较低的连接度 (0.147)、加权嵌套性 (15.287) 和生态位重叠度 (0.205), 及较高的网络稳健性 (0.621)、物种特化程度 (0.745) 和明显的模块化 (0.601), 表明网络中鸟类与昆虫的互作较为特化, 不同鸟类可能捕食特定的昆虫类群。节点水平分析显示, 网络中的关键鸟种为白鹭 (*Egretta garzetta*)、大白鹭 (*Ardea alba*)、凤头麦鸡 (*Vanellus vanellus*)、斑嘴鸭 (*Anas zonorhyncha*) 和喜鹊 (*Pica serica*), 这些物种的中心性指数高于其他鸟类物种, 与该机场鸟击发生的高风险鸟种存在一致性; 对网络稳健性影响较大的昆虫包括步甲科、蝼蛄科、蟋蟀科以及粉蝶科物种, 可通过管理控制这些物种的种群数量减少鸟类在机场的活动频率。本研究揭示了合肥新桥国际机场生态系统中部分鸟类和昆虫的捕食网络关系, 为机场鸟击防范工作提供了新的视角。

关键词: 鸟击; 鸟类与昆虫的关系; 捕食网络; 网络关键物种

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2025) 06-825-14

Bird-Insect Predation Network and Its Implications for Bird Strike Prevention at Hefei Xinqiao International Airport

WANG Yu^① XUE Wei-Wei^② QIU Bing-Tao^② ZHU Chen^③ WAN Xia^{①*}

① School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601; ② Hefei Xinqiao International Airport, Hefei 231271; ③ College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: [Objectives] The safe operation of airports is an important guarantee for air transportation and social traffic. Bird activity is one of the main factors threatening airport safety, and bird strikes can lead to serious aircraft damage and even casualties. Therefore, clarifying the ecological habits and predation relationships of birds in the airport area is of great significance for formulating effective bird strike prevention

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 32370502, 31872276);

* 通讯作者, E-mail: wanxia@ahu.edu.cn;

第一作者介绍 王瑜, 女, 硕士研究生; 研究方向: 动物生态学; E-mail: 2683854080@qq.com。

收稿日期: 2024-12-26, 修回日期: 2025-05-19 DOI: 10.13859/j.cjz.202524292 CSTR: 32109.14.cjz.24292

measures. Hence, this study constructs and analyzes the bird-insect predation network at Hefei Xinqiao International Airport. **[Methods]** We collected the struck bird samples from the perimeter and internal protective facilities of Hefei Xinqiao International Airport between October 2020 and September 2022. After dissecting and identifying these samples, we selected and recorded insects from the stomach contents. Species identification was conducted with reference to relevant books and reference. Insects were classified and counted at the family level. We used complete insects as individual records and, to avoid repetition, pieced together insect fragments and counted insects based on single body parts. Data were statistically analyzed in Excel. Network-level and species-level indicators were calculated, and the network robustness under different disturbances was analyzed by the “bipartite” package in R 4.4.1, and the key species of the network were identified. **[Results]** A total of 21 bird species samples were collected, and insects belonging to 39 families of 9 orders were detected. We recorded 120 types of 1 630 bird-insect predation interactions, generating a bipartite network (Fig. 2). Network-level analysis indicated that compared to the null model (Table 1), the network showed decreased connectance (0.147), weighted nestedness (15.287), and niche overlap (0.205), which suggested fewer connections between birds and insects and more independent interspecies interactions in the network. However, the robustness (0.621), species specialization (0.745), and modularity (0.601) were high, indicating a higher level of specialization in species interactions and a more stable network. The network comprised four modules, within which the interactions were intensive (Fig. 3). Node-level analysis revealed that key bird species in the network were *Egretta garzetta*, *Ardea alba*, *Vanellus vanellus*, *Anas zonorhyncha*, and *Pica serica*, which showed the centrality indices higher than other birds (Appendix 1). Insects significantly affecting the network stability included species of Carabidae, Grylloidalpidae, Cricotidae, and Pieridae (Appendix 2). On the basis of species degree, we obtained bird species extinction curves by removing insects from both directions. Compared with the random network, the interaction network showed decreased robustness after removal of insects with high species degree first. **[Conclusion]** In the man-made ecosystem of an airport, the bird-insect predation network has high modularity and specialization, being stable. Different bird species may target specific insect groups for predation. Key bird species in the network were identified, and changes in important insect species in the network can cause drastic changes in bird populations. It is recommended that future airport bird prevention work focus on these species, control insect populations from the perspective of species interaction networks, and reduce the distribution of birds near airports.

Key words: Bird strike; Relationship between bird and insect; Predation network; Key species of a network

机场的安全运营是航空运输和社会交通的重要保障 (Fu et al. 2024)，鸟类活动是威胁机场安全的主要因素之一，鸟击事件可能导致飞机严重损坏甚至人员伤亡 (DeVault et al. 2016, van Gasteren et al. 2019)。因此，明确机场区域鸟类的生态习性和捕食关系对于制定有效的鸟击防范措施具有重要意义 (Tefera et al. 2022)。目前，关于机场鸟类群落的研究主要探讨鸟类

的群落多样性及其影响因素，例如，鸟类的物种多样性、功能多样性和谱系多样性在机场周边的不同时空尺度下展现出一定的差异性 (苗可儿等 2023, 周雨桐等 2023)。目前大多数研究只考虑鸟类群落的动态变化，忽略了食物网对鸟类多样性动态变化的影响。食物资源是吸引特定鸟类种群进入机场区域的重要因素 (Coghlan et al. 2013)，而昆虫在大多数鸟类的

食物中占有重要地位 (Nyffeler et al. 2018)。机场鸟类与昆虫的相关性分析表明, 两者的物种和种群数量在不同地点呈现出一定的空间同步性 (孙晓慧 2022)。通过对对比分析鸟类肠道内容物, 探究不同季节以及不同生境的食物组成, 能够揭示鸟类的摄食习性和觅食模式 (Liu et al. 2019, 覃世迪等 2024), 这对进一步研究鸟类与昆虫的捕食关系对鸟击防范的作用具有重要意义。

物种间的捕食关系构成种间互作网络, 对互作网络的研究是理解群落结构和生态系统功能的重要手段 (Ritchie et al. 2009, Laws 2017)。网络分析可以反映物种间的营养相互作用, 确定该区域对网络结构和稳定性影响较大的关键物种, 及预测关键物种丧失对整个生态系统的功能可能造成的影响 (de Mendonca et al. 2010, Delmas et al. 2019)。互作网络的不同结构参数可以用来解释网络的复杂结构, 反映了网络的稳定性程度。例如, 网络中的模块化代表了特定物种间紧密的相互作用, 有利于维持网络整体的稳定性 (Carstensen et al. 2016, Wang et al. 2023)。当环境中发生突发性干扰时, 具有较高的连接度和嵌套性的网络会具有更强的抗干扰能力 (Baumgartner 2020)。其中, 相互作用泛化的鸟类 (generalist) 个体可能会选择不同的食物资源, 这有助于减少个体间的竞争压力, 提高其种群在群落中的稳定性 (Maldonado et al. 2017)。而且, 物种间的相互作用同时受到生态位过程和中性过程的影响, 因此即便广适性物种之间的性状匹配度较低, 它们仍可能频繁发生生态互作。而且, 在考虑中性过程的影响后, 生态位过程的变化规律显示, 泛化物种之间即使性状匹配程度较低, 仍可能形成相互作用 (Peralta et al. 2020)。同时, 网络中的中心物种对网络起到关键支撑作用, 如果中心物种受到干扰或消失, 可能会深度影响整个网络的稳定性 (Delmas et al. 2019)。目前, 生态网络分析已成为研究生物多样性、物种共存以及生态系统稳定性的重要工具 (Mougi et al. 2012, Liao

et al. 2022, Zhu et al. 2023), 但对于机场这种特殊的人工生态系统下鸟类与昆虫的捕食网络研究较少。探究鸟类与昆虫的捕食网络结构和物种特征将有助于掌握二者间的关系, 明确不同昆虫对鸟类的影响程度。

本研究构建了合肥新桥国际机场的鸟类-昆虫捕食网络, 计算了网络水平和物种水平的相关指标, 模拟了不同扰动下网络的稳健性变化, 明确了网络的结构特征, 以识别该网络中的关键物种, 为帮助机场制定有效的管理策略及减少鸟击事件发生提供了新的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于中国安徽省合肥市西北方向的合肥新桥国际机场 ($31^{\circ}59'47''$ N, $116^{\circ}59'35''$ E)。该区域属于亚热带季风性湿润气候, 年均温 15.7°C , 年均降水量 1 000 mm。机场周边分布有农田、林地、河流和水塘等多种类型生境, 机场内主要为跑道路面和草坪, 生物资源较为丰富, 吸引众多鸟类到此栖息或觅食。

1.2 样本采集与鉴定

研究所用样本是由合肥新桥国际机场提供的来自机场围界及内部防护设施上的鸟撞标本, 时间跨度为 2020 年 10 月至 2022 年 9 月间, 每月到机场收集一次。根据《中国鸟类观察手册》(刘阳等 2021) 和《中国鸟类分类与分布名录》(第 4 版, 郑光美 2023) 对鸟类样本进行鉴定。

此后取出鸟类嗉囊和肌胃中的内容物, 使用生理盐水冲洗, 以去除胃液和其他可能干扰分析的物质。筛选出未消化食物中的昆虫, 在体视显微镜 (奥林巴斯 SZ61) 下进行观察和记录, 根据《昆虫识别图鉴》(韩永植等 2017)、《中国昆虫生态大图鉴》(张巍巍等 2011) 及 Chapman 等 (1991) 的鉴定方法鉴定物种。将昆虫以科级进行分类后计数, 完整的昆虫作为一条记录; 为避免重复计数, 对于昆虫碎片或

片段，尽量对其进行拼接，根据昆虫单一部位进行计数。

1.3 数据分析

在 R 4.4.1 中采用 “vegan” 包对 24 个月份收集到的鸟类物种数量绘制物种累积曲线，以评估物种采样的完整性 (Dixon 2003)。

为了描述调查到的鸟类与昆虫之间的捕食网络，在 Excel 表格中建立了鸟类和昆虫的相互作用矩阵。在这个矩阵中，鸟类物种为列，昆虫为行，将检测到的昆虫数量作为两者相互作用的次数。

为分析网络的结构特征，采用 R 语言中的 “bipartite” 程序包计算以下网络级指标。为了分析系统中的泛化或冗余度，用连接度 (connectance) 计算网络连接程度，它由检测到的连接数与潜在的连接数之间的比值来表示 (Dunne et al. 2002)。采用网络特化水平指数 (specialization, H_2) 计算网络的互补特化程度，其取值范围 $0 \sim 1$ ，0 表示完全泛化，1 表示完全特化 (Blüthgen et al. 2006, 2008)。采用加权嵌套性 (weighted nestedness metric based on overlap and decreasing fill, WNODF) 计算网络嵌套程度，该值越趋近于 100 表示嵌套程度越高 (Almeida-Neto et al. 2011)。用模块性 (modularity) 计算网络模块化，检验网络中是否存在模块，取值范围为 $0 \sim 1$ ，该值越高代表产生模块的趋势越强 (Mello et al. 2011, Dormann et al. 2014)。采用生态位重叠度指数 (niche overlap) 计算网络的生态位重叠，该指数取值范围 $0 \sim 1$ ，0 表示生态位没有重叠，1 表示完全重叠 (Hernandez-Davila et al. 2022)。利用该包中 “nullmodel” 函数的 “r2dtable” 方法构建了 1 000 个随机网络，此方法保持每个节点 (即网络中的每个个体) 的连接数不变而对网络进行随机化，生成新的随机网络 (Patefield 1981, Dormann et al. 2009)。通过随机化检验计算 P 值，显著水平设置为 $P < 0.05$ ，以确定观察到的网络特征是否具有显著性。

为了分析不同节点在网络中的重要性，使

用 “bipartite” 包的 “specieslevel” 函数计算了以下物种级别指标。采用物种特化水平指数 (species specialization, d') 计算网络中每个节点的特化程度，取值范围为 $0 \sim 1$ ，0 为最泛化，1 为最特化 (Blüthgen et al. 2006)。采用中心性的相关指标识别关键节点 (Delmas et al. 2019)：用物种度 (species degree) 计算每个节点与多少其他节点种类发生相互作用，其中，具有更多互作的节点将更有可能影响更多的节点 (Hernández-Davila et al. 2022)；用介数中心性 (betweenness centrality, BC) 函数描述一个节点在一对其他节点的互作路径上出现的频率，高介数中心性值的节点作为重要连接器维持网络的模块化 (Freeman 1977)；使用接近中心性 (closeness centrality, CC) 函数计算某个节点与这个网络中所有其他节点的接近程度，表明其对整个网络的影响 (Freeman et al. 1979)。

通过 “bipartite” 包中的 “robustness” 函数 (稳健性指数, R) 和绘制物种灭绝曲线，分析网络结构的稳健性。稳健性用来衡量网络对于物种灭绝的抵抗能力，其取值范围为 $0 \sim 1$ ，0 代表第一个物种灭绝，另一个营养级的物种全部灭绝；1 代表直到最后一个物种灭绝，另一个营养级的物种也不会灭绝。物种灭绝曲线基于两个方向模拟灭绝，即物种度从高到低逐一剔除物种和从低到高逐一剔除物种 (Pastor et al. 2012)。

2 结果

2.1 鸟类-昆虫捕食网络的构建

共收集 21 种常见鸟类物种样本 115 只，隶属于 8 目 17 科。其中，13 种鸟类属于雀形目，鸻形目和鹳形目各有 4 种鸟类。采样累计曲线趋于平稳 (图 1)。胃容物分析共检测到昆虫 9 目 39 科，其中半翅目种类最多，共 9 科；直翅目有 8 科，鞘翅目 7 科，其余还包括双翅目、鳞翅目、膜翅目、革翅目、蜻蜓目及脉翅目。共记录到 21 种鸟类与昆虫的 120 种 1 630 次捕食相互作用，生成二分网络 (图 2)。其中，互

作次数最多的是八哥 (*Acridotheres cristatellus*) 与飞虱科 (Delphacidae), 共有 752 次互作; 其次是蚊䴕 (*Jynx torquilla*) 与蚁科 (Formicidae), 发生了 194 次互作。

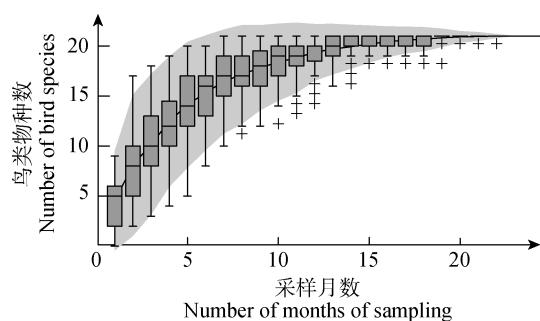


图 1 鸟类物种累积曲线

Fig. 1 Accumulation curve of bird species

浅灰色区域表示 95% 的置信区间, 箱型图表示该月鸟类物种数的分布情况, 加号表示离群值, 曲线趋于平缓表明达到统计要求。The light gray area indicates the 95% confidence interval. The boxplot shows the distribution of bird species for the month. The plus signs represent outliers. The curve flattening suggests that statistical requirements are met.

2.2 网络水平分析

与零模型生成的随机网络相比 (表 1), 该捕食网络的连接度 (0.147)、加权嵌套性 (15.287) 和鸟类的生态位重叠度 (0.205) 较低 ($P < 0.05$), 而网络特化水平 (0.745) 和模块性 (0.601) 较高 ($P < 0.05$), 表明网络结构较为特化。捕食网络检测到网络中有 4 个模块 (图 3), 将这 4 个模块从左到右分别记为第 1 模块、第 2 模块、第 3 模块和第 4 模块。第 1 模块中 11 种鸟类与 15 科昆虫存在较为紧密的捕食关系; 第 2 模块为最大的模块, 斑嘴鸭 (*Anas zonorhyncha*)、白鹭 (*Egretta garzetta*)、池鹭 (*Ardeola bacchus*)、大白鹭 (*Ardea alba*)、凤头麦鸡 (*Vanellus vanellus*) 和牛背鹭 (*Bubulcus coromandus*) 与 18 科昆虫相互关联; 第 3 模块为最小的模块, 仅一种鸟类八哥与 2 科昆虫飞虱科和蚜科 (Aphididae) 发生

互作; 第 4 模块为家燕 (*Hirundo rustica*)、丘鹛 (*Scolopax rusticola*) 和蚊䴕与姬蜂科 (Ichneumonidae)、叶甲科 (Chrysomelidae)、蚁科以及蝇科 (Muscidae) 昆虫发生互作。

2.3 节点水平分析

在调查的 21 种鸟类中, 八哥和蚊䴕的物种特化水平指数最高, 而丘鹛的特化程度最低, 说明它是食性较为泛化的捕食者。从物种度来看, 白鹭和大白鹭的物种度最高, 与 18 个科的昆虫进行互作, 扇尾沙锥 (*Gallinago gallinago*)、田鹨 (*Anthus richardi*) 和蚊䴕各仅与 1 科昆虫发生互作, 对网络稳定性影响最低。计算发现, 介数中心性相对较高的是凤头麦鸡 (0.119)、白鹭 (0.118) 和大白鹭 (0.118), 而这 3 个物种与喜鹊 (*Pica serica*)、斑嘴鸭和棕背伯劳 (*Lanius schach*) 的接近中心性相同, 均为 0.054, 表明这些物种与网络中的其他节点的接近程度相同, 对整个网络的影响较大(附录 1)。

对于低营养级的昆虫 (附录 2), 飞虱科的特化水平最高, 其次是蚁科 (0.897) 和草蛉科 (0.884), 蚜科 (0.165) 的昆虫最为泛化。步甲科 (Carabidae) 昆虫物种度最高, 具有最多的相互作用种类, 并且其无论是介数中心性还是接近中心性均为最高, 表明步甲科作为鸟类的猎物在该捕食网络中具有重要地位。

2.4 网络稳健性分析

在网络级指标中计算的鸟类 (高营养级) 稳健性为 0.621, 昆虫 (低营养级) 为 0.747。通过 3 种方式剔除低营养级的昆虫得到高营养级鸟类的物种灭绝曲线 (图 4), 曲线下方面积表示模拟灭绝情境下网络的稳健性。当从物种度最少的昆虫科开始剔除时, 曲线斜率为 14.604 (图 4a), 与随机剔除的结果 (图 4b) 相比, 网络的稳健性更高, 当剔除昆虫节点比例少于 80% 时, 网络稳健性无明显变化, 网络较为稳定。从物种度最高的昆虫科依次剔除时, 斜率为 1.049 (图 4c), 稳健性低于随机模式。

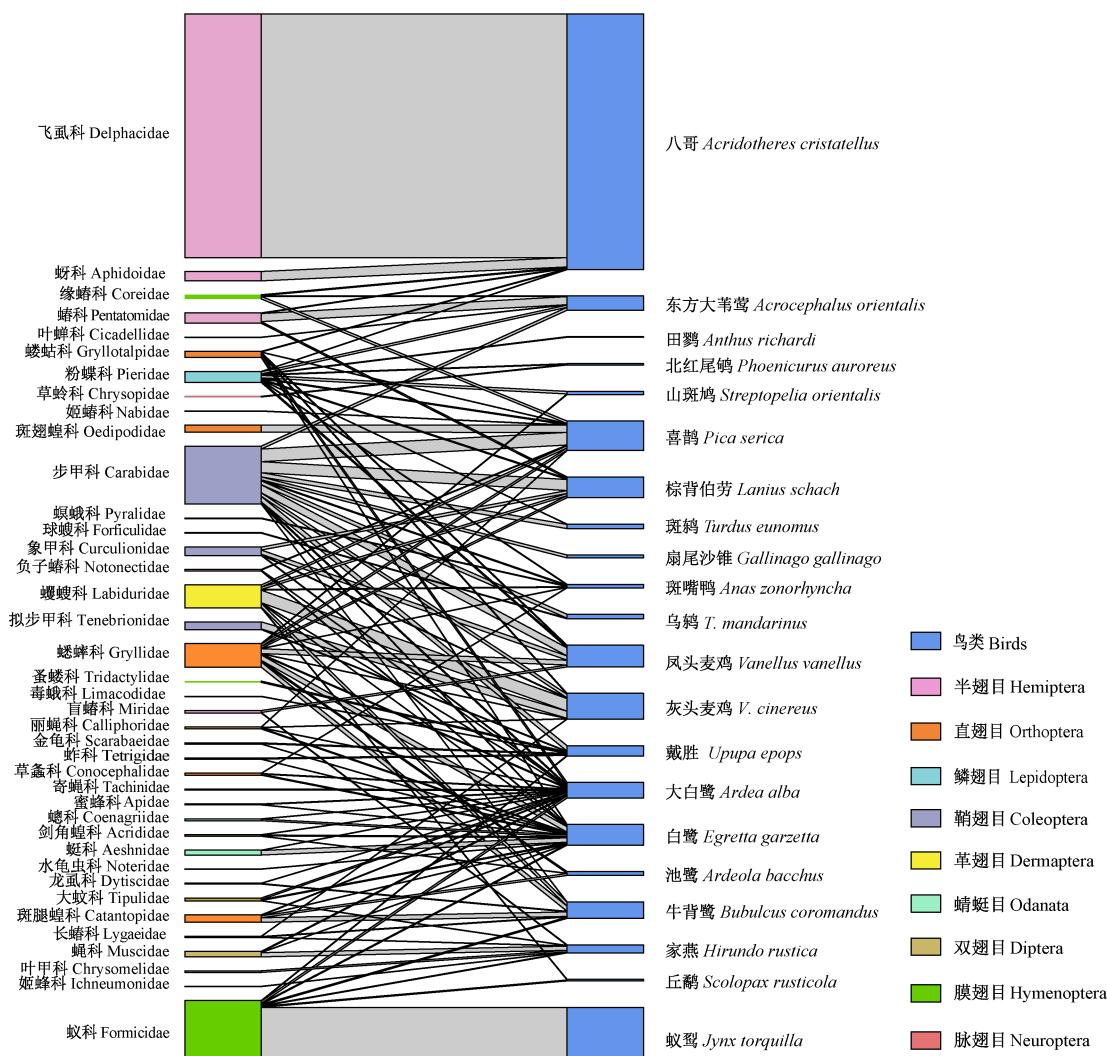


图 2 合肥新桥国际机场 21 种鸟类与昆虫的捕食网络

Fig. 2 Predation network between 21 bird species and insects at Hefei Xinqiao International Airport

左侧方格表示昆虫科，其高度表示检测到的昆虫个体数；右侧方格表示鸟类物种，其高度表示该鸟类与昆虫的互作次数。连线表示两者间的相互作用，其宽度表示它们的互作频率。

The left grids represent insect families, with the height indicating the number of detected insect individuals. The right grids represent bird species, with the height indicating the number of interactions between birds and insects. The lines connecting them represent their interactions, with the width of the lines indicating the frequency of interactions.

表 1 网络水平指标

Table 1 Network-level indicators

网络类型 Network type	连接度 Connectance	网络特化水平 Specialization	加权嵌套性 Weighted nestedness metric based on overlap and decreasing fill	模块性 Modularity	生态位重叠度 Niche overlap	
					昆虫 Insect	鸟类 Bird
实测网络 Observed network	0.147	0.745	15.287	0.607	0.126	0.205
随机网络 Random network	0.285 ± 0.008	0.044 ± 0.004	49.913 ± 3.063	0.069 ± 0.005	0.620 ± 0.046	0.822 ± 0.036

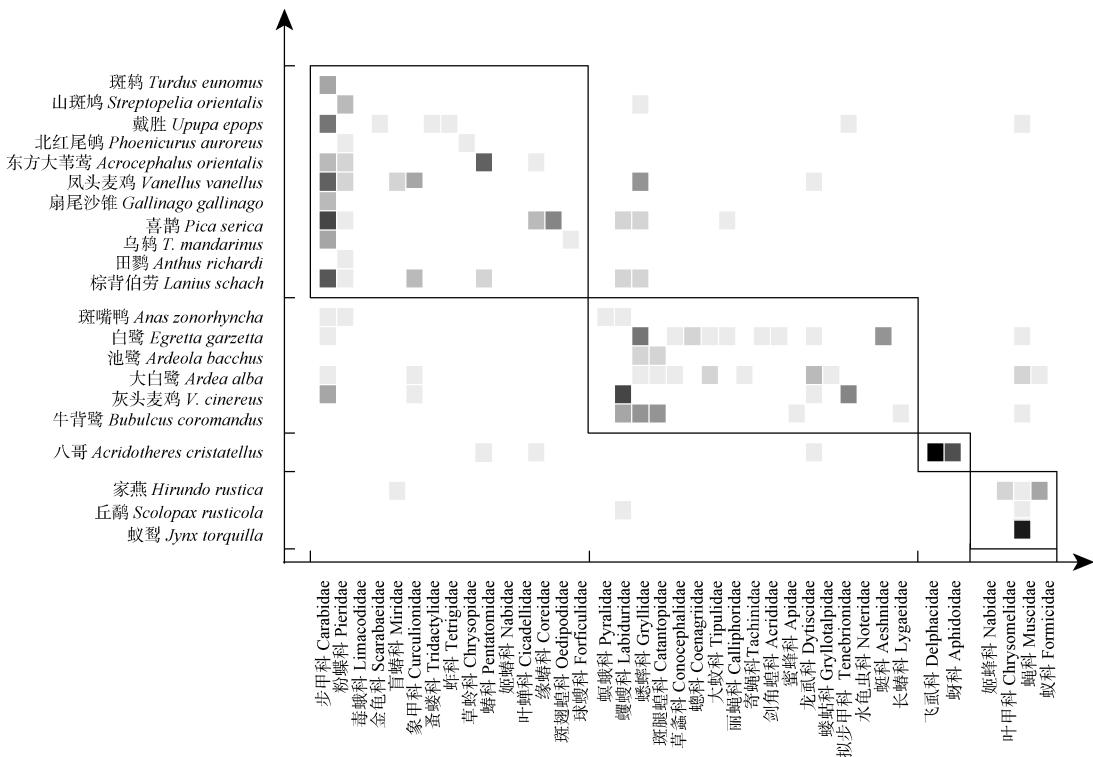


图3 合肥新桥国际机场鸟类-昆虫捕食网络的4个模块

Fig. 3 Four modules of bird-insect interactions at Hefei Xinqiao International Airport

图中按照从左到右的顺序, 将这4个模块分别记作第1模块、第2模块、第3模块和第4模块。

The four modules from left to right are respectively labeled as Module 1, Module 2, Module 3, and Module 4.

2.5 留鸟-昆虫捕食网络分析

根据鸟类居留型筛选出网络中的留鸟及其捕食的昆虫, 构建留鸟-昆虫捕食网络(以下简称“留鸟捕食网络”), 并对该网络的网络水平指标和昆虫节点水平指标进行计算。留鸟捕食网络具有较低的连接度、加权嵌套性和生态位重叠度, 以及较高的网络特化水平和模块性(表2)。此网络中的蝼蛄科特化水平指数最低, 被广泛捕食; 粉蝶科的物种度和中心性指数最高, 步甲科次之(表3), 表明它们在网络中具有重要地位。

3 讨论

3.1 合肥新桥国际机场鸟类-昆虫捕食网络结构特征

本研究构建的鸟类-昆虫捕食网络与零模

型生成的随机网络相比, 网络连接度较低, 表明网络中的实际连接比潜在连接少, 其原因可能是采样强度不足导致某些相互作用未被检测

(Chacoff et al. 2012)。本研究中, 由于鸟类样本的获取条件不可控制, 从生态学角度出发, 只有当其被确认为在机场防护措施中意外死亡时才会被收集, 所以本研究获得的样本基本是机场内常见的鸟类。因此, 这可能比其他网络研究的采样强度要低, 且解剖过程中有很大一部分鸟类样本的胃和嗉囊是空的, 其原因可能是未抵达机场草坪就遭遇不幸或者在机场内没有成功捕到猎物。

而有研究指出, 网络特化水平指数和物种特化水平指数受到采样强度的影响较小, 在不同大小的网络中表现较为稳定(Blüthgen et al. 2006)。因此, 它们可以较好地反映网络的特化

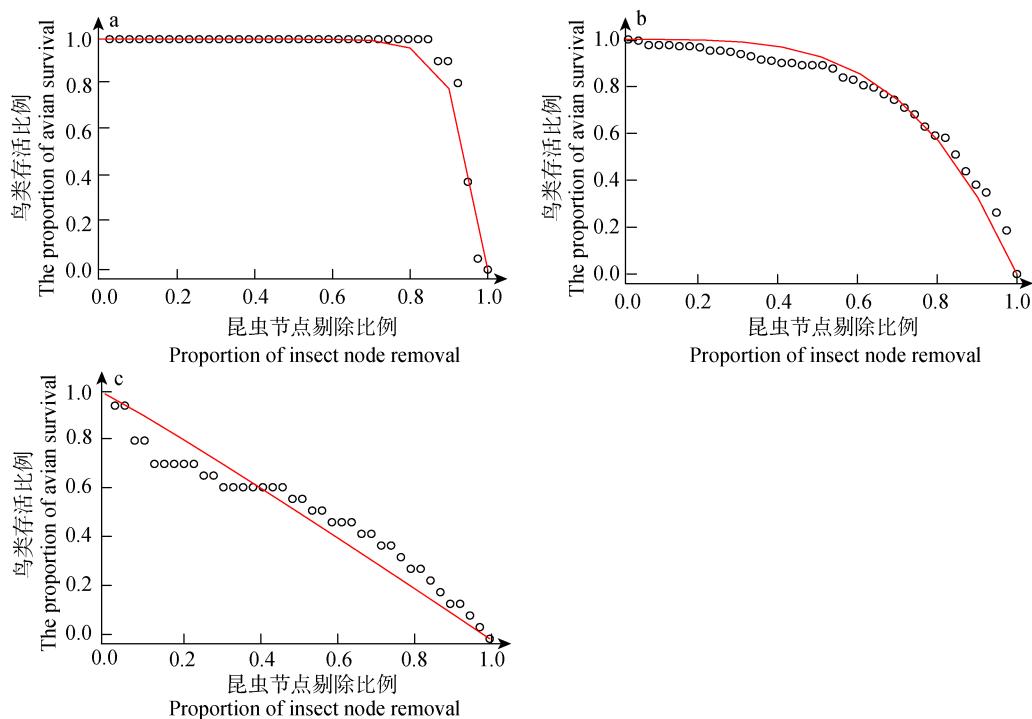


图 4 不同情景下模拟的鸟类物种灭绝曲线

Fig. 4 Bird extinction curves under different scenarios

a. 从物种度最低的昆虫节点开始剔除；b. 模拟随机剔除昆虫节点；c. 从物种度最高的昆虫节点开始剔除。

a. Removal of insect nodes from the lowest species degree; b. Random removal of insect nodes; c. Removal of insect nodes from the highest species degree.

表 2 留鸟捕食网络水平指标

Table 2 Resident bird predation network-level indicators

网络类型 Network type	连接度 Connectance	网络特化水平 Specialization	加权嵌套性 Weighted nestedness metric based on overlap and decreasing fill	模块性 Modularity	生态位重叠度 Niche overlap	
					昆虫 Insect	鸟类 Bird
留鸟网络 Resident bird network	0.292	0.788	19.259	0.298	0.328	0.224
随机网络 Random network	0.418 ± 0.027	0.020 ± 0.007	62.754 ± 5.183	0.024 ± 0.005	0.878 ± 0.072	0.951 ± 0.037

表 3 留鸟捕食网络昆虫节点水平指标

Table 3 Insect node indicators in the resident bird predation network

昆虫 Insect family	物种特化水平指数 Species specialization	物种度 Species degree	介数中心性 Betweenness centrality	接近中心性 Closeness centrality
粉蝶科 Pieridae	0.571	5	0.388	0.078
步甲科 Carabidae	0.727	3	0.287	0.073
蝼蛄科 Gryllotalpidae	0.015	2	0.095	0.073
缘蝽科 Coreidae	0.261	2	0.095	0.073

续表3

昆虫 Insect family	物种特化水平指数 Species specialization	物种度 Species degree	介数中心性 Betweenness centrality	接近中心性 Closeness centrality
蟋蟀科 Gryllidae	0.430	3	0.037	0.070
蠼螋科 Labiduridae	0.432	2	0.037	0.070
蝽科 Pentatomidae	0.273	2	0.061	0.065
丽蝇科 Calliphoridae	0.324	1	0.000	0.065
姬蝽科 Nabidae	0.324	1	0.000	0.065
水龟虫科 Notonectidae	0.361	1	0.000	0.065
斑翅蝗科 Oedipodidae	0.622	1	0.000	0.065
象甲科 Curculionidae	0.577	1	0.000	0.054
蚜科 Aphididae	0.053	1	0.000	0.053
飞虱科 Delphacidae	0.813	1	0.000	0.053
草蛉科 Chrysopidae	0.884	1	0.000	0.042

特征。相比于零模型，网络特化水平指数较高，表明这些鸟类和昆虫之间的互作具有较强的选择性。研究发现，雀形目鸟类在繁殖季节倾向于捕食提供必需营养和能量的昆虫，而放弃了质量较差的昆虫(Zurdo et al. 2023)。本研究中，白鹭、大白鹭和池鹭等夏候鸟与直翅目昆虫互作相对频繁，这可能是由于直翅目、鞘翅目、膜翅目和鳞翅目等昆虫蛋白质含量丰富，很多鸟类会在昆虫高发季节选择它们作为食物(Nyffeler et al. 2018, Davies et al. 2022)，因此网络中步甲科、蝼蛄科、蟋蟀科和粉蝶科等昆虫在鸟类食物选择中占有重要地位，应当加强对这些昆虫的数量控制。

拮抗网络往往表现出一定的模块性，物种在模块内部的连接更加密切。通过观察本研究网络的模块化结构发现，第2个模块中的鸟种食性相似且较为广泛，其中的捕食者主要来自鹳形目(Ciconiiformes)的鹭科(Ardeidae)，它们之间的亲缘关系较近，具有类似的相互作用表现。研究指出，受系统发育影响，模块内部常由近缘物种所组成，且模块内的物种趋于拥有相似的性状(Braga et al. 2021, 李海东等2021)。第1个模块中鸟类主要为雀形目鸟类，与第2模块中的鸟类相比体型较小，大多以鞘翅目甲虫、半翅目的蝽类以及直翅目的昆虫为

食。这些鸟类不仅在系统发育上有一定相关性，而且大多属于本地留鸟和冬候鸟，样本获得时间大多在秋冬季，在食物资源相对紧缺的环境下形成了一定的模块。由于模块化可以促进资源分配，减少种间竞争(冯志荣等 2023)，因此，该模块可能是本地区长期物种共存的结果。本研究中，虽然模块中的鸟类共用相同的昆虫资源，但网络的生态位重叠度并不高。最优觅食理论认为，营养生态位宽度将随着食物资源的可用性减少而扩大，此时次优食物会被纳入觅食范围，物种的生态位重叠度也可能会随之增加(MacArthur et al. 1966, Braga et al. 2021)。因此，本网络中鸟类的生态位重叠较低，不同鸟类物种间的食物组成存在差异，可能是昆虫资源总体较为丰富的原因，这可能会增加鸟撞防范工作的难度。

任何与物种损失相关的变化，尤其是大的、负面的变化，都会导致稳健性的下降(Gilbert 2009)。但是不同重要等级的物种丧失对网络稳健性下降程度的影响是不同的。模拟结果表明，当模拟昆虫从具有较少互作的物种向具有较多互作的物种剔除时，网络前期表现出较强的稳健性，可能是这些首先灭绝的昆虫物种只是少部分鸟类的食物选择之一，鸟类对昆虫的捕食具有多样性，部分昆虫物种丧失时鸟类会选择

其他昆虫替代 (习新强等 2022)。从相反方向剔除昆虫得到的曲线几乎为线性下降, 表明在这种情况下对网络造成的影响较大, 这些昆虫的逐个消失会对鸟类生存产生较大的威胁。但是, 模拟的结果并不具备完全的可靠性, 一个物种消失后网络中的相互作用关系可能会重新配置, 且没有考虑其他物种的作用可能会对网络互作造成的影响 (Hernández-Davila et al. 2022)。即使如此, 这些昆虫在鸟类食物中也占据着重要地位, 对维持整个网络的稳定具有关键作用, 降低它们在机场内的出现概率可能会削弱网络的稳健性, 鸟类为维持生存可能会转移觅食地点, 减少到机场的活动。

3.2 留鸟与候鸟对捕食网络的影响

鸟类对昆虫的捕食是动态性的, 随着时间的变化网络中的物种也在变化, 尤其是季节性的鸟类迁徙导致物种的迁入迁出, 但留鸟作为本地物种是稳定存在的。通过进一步的网络分析发现, 本地留鸟与所食昆虫构建的子网络呈现出连接度、加权嵌套性、生态位重叠度较低, 而网络特化水平和模块性较高的显著特点。这与总网络的结构特征相似, 表明留鸟捕食网络的结构在候鸟加入后依旧保持原有特征的倾向, 而候鸟的季节性补充可能是维持网络稳定性的重要因素。在种子传播网络中, 迁徙的食果鸟类起着重要作用, 它们往往在很长的时间尺度内决定了网络的结构 (Ohkawara et al. 2022), 而在本研究中候鸟迁徙期的停留觅食行为增强了其对昆虫资源利用的强度, 可能也对本地网络作出了重要贡献。

对于节点水平指标, 留鸟捕食网络节点水平指标分析显示, 粉蝶科、步甲科的中心性指数较高, 蝗虫科的接近中心性指数较高, 它们作为关键类群同样包含在总网络中, 表明无论候鸟是否存在, 这些昆虫都是网络中的核心环节。有研究指出, 多层网络内的候鸟和留鸟中介性和网络结构的贡献相似 (Faustino et al. 2024), 而本研究中的候鸟和留鸟是捕食网络的共同驱动力, 少数候鸟 (如白鹭) 具有较高的

中心性值。因此, 凭借留鸟长期捕食的稳定性, 网络整体的特征得以保持不变; 而候鸟的存在会导致植物-鸟类相互作用网络的结构和大小发生变化 (Ramos-Robles et al. 2016), 其集群飞行活动是机场鸟击事件发生的重要因素。鉴于此, 对机场鸟类捕食网络的研究是有意义的, 后续可通过持续监测深入研究不同居留型的鸟类对网络结构的影响。

3.3 对机场鸟击防范工作的启示

各中心性指标表明了这些网络中的关键物种, 综合各指标的结果来看, 网络中重要的昆虫包括步甲科、蝼蛄科、蟋蟀科以及粉蝶科的物种, 它们为大量鸟类提供了食物来源, 在网络中扮演重要的互作节点, 如果这些物种受到威胁, 可能会更快地将影响带到整个网络 (Delmas et al. 2019)。若要减少鸟类在机场附近的出现, 可以通过首先控制这些昆虫的种群数量来实现, 以削弱鸟类在机场区域的食物资源, 从而降低鸟类的活动频率, 最终减少鸟击风险。

从捕食者角度来看, 凤头麦鸡、白鹭、大白鹭、斑嘴鸭和喜鹊是关键物种, 它们在维持网络的结构和功能的过程中具有重要贡献, 如果这些物种的种群发生较大的变化也会对网络产生不小的影响。在中国民用航空局发布的《运输机场鸟击航空器防范危险鸟种目录》(中国民用航空局 2022)中, 斑嘴鸭属于 3 级危险鸟种, 白鹭、大白鹭和凤头麦鸡属于 2 级危险鸟种, 这些与分析结果中的关键物种重合。因此, 应重点关注这些鸟类物种, 根据网络模块内的信息制定针对性的管理策略。具体而言: 对于白鹭、大白鹭和斑嘴鸭等鸟类, 应首要减少蠼螋科、蟋蟀科、斑腿蝗科和蜓科等昆虫的出现频率; 对于凤头麦鸡和喜鹊等物种, 管理重点应放在控制步甲科、粉蝶科和蝗科等昆虫的数量上。同时, 建议密切监测这些鸟类的栖息地状况, 以便最大限度地减少它们在机场周边的活动频率。通过针对性的生态管理措施, 可有效降低鸟类在机场区域的活动频率, 从而减少鸟

击风险, 保障机场运行安全。

由于受到样本数据的限制, 本研究没有对网络特征的季节性变化进行分析, 并且昆虫的鉴定级别有待进一步细化, 如通过 DNA 条形码来促进对物种多样性及其相互作用对象的理解 (Yin et al. 2022)。因此, 后续需要加强对鸟类捕食网络的持续监测, 并结合 DNA 鉴定方法来研究鸟类-昆虫捕食网络的时间动态变化及其影响因素, 评估已实施的不同时段栖息地管理计划的有效性。

参 考 文 献

- Almeida-Neto M, Ulrich W. 2011. A straightforward computational approach for measuring nestedness using quantitative matrices. *Environmental Modelling & Software*, 26(2): 173–178.
- Baumgartner M T. 2020. Connectance and nestedness as stabilizing factors in response to pulse disturbances in adaptive antagonistic networks. *Journal of Theoretical Biology*, 486: 110073.
- Blüthgen N, Fründ J, Vázquez D P, et al. 2008. What do interaction network metrics tell us about specialization and biological traits? *Ecology*, 89(12): 3387–3399.
- Blüthgen N, Menzel F, Blüthgen N. 2006. Measuring specialization in species interaction networks. *BMC Ecology*, 6: 9.
- Braga M P, Janz N, Nylin S, et al. 2021. Phylogenetic reconstruction of ancestral ecological networks through time for pierid butterflies and their host plants. *Ecology Letters*, 24(10): 2134–2145.
- Carstensen D W, Sabatino M, Morellato L P C. 2016. Modularity, pollination systems, and interaction turnover in plant-pollinator networks across space. *Ecology*, 97(5): 1298–1306.
- Chacoff N P, Vázquez D P, Lomáscolo S B, et al. 2012. Evaluating sampling completeness in a desert plant-pollinator network. *Journal of Animal Ecology*, 81(1): 190–200.
- Chapman A, Rosenberg K V. 1991. Diets of four sympatric Amazonian woodcreepers (Dendrocolaptidae). *The Condor*, 93(4): 904–915.
- Coghlani M L, White N E, Murray D C, et al. 2013. Metabarcoding avian diets at airports: implications for birdstrike hazard management planning. *Investigative Genetics*, 4(1): 27.
- Davies S R, Vaughan I P, Thomas R J, et al. 2022. Seasonal and ontological variation in diet and age-related differences in prey choice, by an insectivorous songbird. *Ecology and Evolution*, 12(8): e9180.
- de Mendonça Santos G M, Aguiar C M L, Mello M A R. 2010. Flower-visiting guild associated with the Caatinga flora: trophic interaction networks formed by social bees and social wasps with plants. *Apidologie*, 41(4): 466–475.
- Delmas E, Besson M, Brice M H, et al. 2019. Analysing ecological networks of species interactions. *Biological Reviews*, 94(1): 16–36.
- DeVault T L, Blackwell B F, Seamans T W, et al. 2016. Identification of off airport interspecific avian hazards to aircraft. *The Journal of Wildlife Management*, 80(4): 746–752.
- Dixon P. 2003. VEGAN, a package of R functions for community ecology. *Journal of Vegetation Science*, 14(6): 927–930.
- Dormann C F, Fründ J, Blüthgen N, et al. 2009. Indices, graphs and null models: analyzing bipartite ecological networks. *The Open Ecology Journal*, 2(1): 7–24.
- Dormann C F, Strauss R. 2014. A method for detecting modules in quantitative bipartite networks. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(1): 90–98.
- Dunne, J. A., R. J. Williams, et al. 2002. Food-web structure and network theory: The role of connectance and size. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99:12917–12922.
- Faustino I A T, MacGregor-Fors I, Flores M J, et al. 2024. Disentangling the complexity of plant-bird relationships: From monolayer to multilayer network perspectives. *Food Webs*, 40: e00359.
- Freeman L C. 1977. A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, 40(1): 35–41.
- Freeman L C, Roeder D, Mulholland R R. 1979. Centrality in social networks: ii. experimental results. *Social Networks*, 2(2): 119–141.
- Fu H X, Wang C Y, Benani N, et al. 2024. Bird detection and overall bird situational awareness at airports. *Ornithology Research*,

- 32(4): 280–295.
- Gilbert A J. 2009. Connectance indicates the robustness of food webs when subjected to species loss. *Ecological Indicators*, 9(1): 72–80.
- Hernández-Dávila O A, Laborde J, Sosa V J, et al. 2022. Interaction network between frugivorous birds and zoochorous plants in cloud forest riparian strips immersed in anthropic landscapes. *Avian Research*, 13: 100046.
- Laws A N. 2017. Climate change effects on predator-prey interactions. *Current Opinion in Insect Science*, 23: 28–34.
- Liao J B, Bearup D, Strona G. 2022. A patch-dynamic metacommunity perspective on the persistence of mutualistic and antagonistic bipartite networks. *Ecology*, 103(6): e3686.
- Liu W, Wu Y J, DuBay S G, et al. 2019. Dung-associated arthropods influence foraging ecology and habitat selection in Black-necked Cranes (*Grus nigricollis*) on the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecology and Evolution*, 9(4): 2096–2105.
- MacArthur R H, Pianka E R. 1966. On optimal use of a patchy environment. *The American Naturalist*, 100(916): 603–609.
- Maldonado K, Bozinovic F, Newsome S D, et al. 2017. Testing the niche variation hypothesis in a community of passerine birds. *Ecology*, 98(4): 903–908.
- Mello M A R, Marquitti F M D, Guimarães P R, et al. 2011. The modularity of seed dispersal: differences in structure and robustness between bat- and bird-fruit networks. *Oecologia*, 167(1): 131–140.
- Mougi A, Kondoh M. 2012. Diversity of interaction types and ecological community stability. *Science*, 337(6092): 349–351.
- Nyffeler M, Şekercioğlu Ç H, Whelan C J. 2018. Insectivorous birds consume an estimated 400–500 million tons of prey annually. *The Science of Nature*, 105(7): 47.
- Ohkawara K, Kimura K, Satoh F. 2022. Long-term dynamics of the network structures in seed dispersal associated with fluctuations in bird migration and fruit abundance patterns. *Oecologia*, 198(2): 457–470.
- Pastor J M, Santamaría S, Méndez M, et al. 2012. Effects of topology on robustness in ecological bipartite networks. *Networks and Heterogeneous Media*, 7(3): 429–440.
- Patefield W M. 1981. Algorithm AS 159: an efficient method of generating random $R \times C$ tables with given row and column totals. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 30(1): 91–97.
- Peralta G, Perry G L W, Vázquez D P, et al. 2020. Strength of niche processes for species interactions is lower for generalists and exotic species. *Journal of Animal Ecology*, 89(9): 2145–2155.
- Ramos-Robles M, Andresen E, Díaz-Castelazo C. 2016. Temporal changes in the structure of a plant-frugivore network are influenced by bird migration and fruit availability. *PeerJ*, 4: e2048.
- Ritchie E G, Johnson C N. 2009. Predator interactions, mesopredator release and biodiversity conservation. *Ecology Letters*, 12(9): 982–998.
- Tefera T, Ejigu D, Tassie N. 2022. Avian diversity and bird-aircraft strike problems in Bahir Dar International Airport, Bahir Dar, Ethiopia. *BMC Zoology*, 7(1): 36.
- van Gasteren H, Krijgsveld K L, Klauke N, et al. 2019. Aeroecology meets aviation safety: early warning systems in Europe and the Middle East prevent collisions between birds and aircraft. *Ecography*, 42(5): 899–911.
- Wang G H, Huang Y, Yao W, et al. 2023. Structure and characteristics of the plant-frugivore bird network from the Guilin Botanical Garden. *PeerJ*, 11: e15028.
- Yin Y, Yao L F, Hu Y, et al. 2022. DNA barcoding uncovers cryptic diversity in minute herbivorous mites (Acari, Eriophyoidea). *Molecular Ecology Resources*, 22(5): 1986–1998.
- Zhu C, Li W D, Campos-Arceiz A, et al. 2023. The reliability of regional ecological knowledge to build local interaction networks: a test using seed-dispersal networks across land-bridge islands. *Proceedings Biological Sciences*, 290(2003): 20231221.
- Zurdo J, Reverter M, Barrero A, et al. 2023. Prey choice in insectivorous steppe passerines: New insights from DNA metabarcoding. *Global Ecology and Conservation*, 48: e02738.
- 冯志荣, 陈有城, 彭艳琼, 等. 2023. 生态网络分析: 从集合群落到集合网络. *生物多样性*, 31(8): 131–142.
- 韩永植, 郑丹丹(译). 2017. 昆虫识别图鉴. 郑州: 河南科学技术出版社.

- 李海东, 吴新卫, 肖治术. 2021. 种间互作网络的结构、生态系统功能及稳定性机制研究. 植物生态学报, 45(10): 1049–1063.
- 刘阳, 陈水华. 2021. 中国鸟类观察手册. 长沙: 湖南科学技术出版社.
- 苗可儿, 钱薇雅, 张俊, 等. 2023. 功能、谱系多样性在机场鸟类群落研究中的应用——以扬州泰州国际机场为例. 动物学杂志, 58(2): 182–197.
- 孙晓慧. 2022. 呼和浩特白塔国际机场昆虫多样性及与鸟类的关系. 呼和浩特: 内蒙古大学硕士学位论文.
- 覃世迪, 冯开道, 孙佳祺, 等. 2024. 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, 44(19): 8854–8864.
- 习新强, 公欣桐, 张尚云, 等. 2022. 川西北高寒草甸“传粉昆虫-植物-食草昆虫”互作网络的结构与稳健性. 中国科学: 生命科学, 52(3): 449–458.
- 张巍巍, 李元胜. 2011. 中国昆虫生态大图鉴. 重庆: 重庆大学出版社.
- 郑光美. 2023. 中国鸟类分类与分布名录. 4 版. 北京: 科学出版社.
- 中国民用航空局. 2022. 运输机场鸟击航空器防范危险鸟种目录. 1–50. [EB/OL]. https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202205/t20220523_213368.html.
- 周雨桐, 徐嘉晖, 胡东方, 等. 2023. 南京禄口国际机场鸟类群落功能和谱系多样性及鸟击防范研究. 南京师范大学学报: 自然科学版, 46(3): 69–78.

附录 1 鸟类各节点水平指标

Appendix 1 Bird species-level indicators

鸟类 Bird species	物种特化水平指数 Species specialization	物种度 Species degree	介数中心性 Betweenness centrality	接近中心性 Closeness centrality
白鹭 <i>Egretta garzetta</i>	0.617	18	0.118	0.054
大白鹭 <i>Ardea alba</i>	0.446	18	0.118	0.054
喜鹊 <i>Pica serica</i>	0.574	10	0.088	0.054
灰头麦鸡 <i>Vanellus cinereus</i>	0.687	8	0.064	0.052
戴胜 <i>Upupa epops</i>	0.538	7	0.060	0.049
家燕 <i>Hirundo rustica</i>	0.808	7	0.008	0.040
牛背鹭 <i>Bubulcus coromandus</i>	0.561	7	0.095	0.052
斑嘴鸭 <i>Anas zonorhyncha</i>	0.402	6	0.088	0.054
八哥 <i>Acridotheres cristatellus</i>	0.969	6	0.013	0.045
凤头麦鸡 <i>V. vanellus</i>	0.529	6	0.119	0.054
棕背伯劳 <i>Lanius schach</i>	0.440	6	0.088	0.054
东方大尾莺 <i>Acrocephalus orientalis</i>	0.691	5	0.045	0.051
池鹭 <i>Ardeola bacchus</i>	0.587	3	0.000	0.041
斑鸫 <i>Turdus eunomus</i>	0.405	2	0.045	0.051
山斑鸠 <i>Streptopelia orientalis</i>	0.610	2	0.031	0.048
北红尾鸲 <i>Phoenicurus auroreus</i>	0.747	2	0.000	0.040
丘鹬 <i>Scolopax rusticola</i>	0.264	2	0.021	0.042
乌鸫 <i>T. mandarinus</i>	0.487	2	0.000	0.045
扇尾沙锥 <i>Gallinago gallinago</i>	0.391	1	0.000	0.045
田鹨 <i>Anthus richardi</i>	0.528	1	0.000	0.040
蚁鵙 <i>Jynx torquilla</i>	0.951	1	0.000	0.036

附录 2 昆虫各节点水平指标

Appendix 2 Insect family-level indicators

昆虫 Insect family	物种特化水平指数 Species specialization	物种度 Species degree	介数中心性 Betweenness centrality	接近中心性 Closeness centrality
步甲科 Carabidae	0.611	13	0.247	0.034
粉蝶科 Pieridae	0.527	10	0.123	0.027
蟋蟀科 Gryllidae	0.474	10	0.064	0.032
蠼螋科 Labiduridae	0.583	8	0.056	0.032
蚁科 Formicidae	0.897	7	0.075	0.031
蝼蛄科 Gryllotalpidae	0.310	6	0.142	0.033
斑腿蝗科 Catantopidae	0.659	4	0.003	0.028
丽蝇科 Calliphoridae	0.290	4	0.034	0.031
象甲科 Curculionidae	0.501	4	0.021	0.029
草螽科 Conocephalidae	0.420	3	0.017	0.029
大蚊科 Tipulidae	0.457	3	0.037	0.030
负子蝽科 Notonectidae	0.304	3	0.025	0.030
剑角蝗科 Acrididae	0.414	3	0.001	0.028
蝇科 Muscidae	0.721	3	0.037	0.030
长蝽科 Lygaeidae	0.360	3	0.019	0.025
蝽科 Pentatomidae	0.686	3	0.011	0.023
缘蝽科 Coreidae	0.293	3	0.018	0.024
蟾科 Coenagrionidae	0.462	2	0.001	0.028
金龟科 Scarabaeidae	0.488	2	0.017	0.028
龙虱科 Dytiscidae	0.399	2	0.001	0.027
盲蝽科 Miridae	0.506	2	0.022	0.024
蜜蜂科 Apidae	0.389	2	0.001	0.028
拟步甲科 Tenebrionidae	0.658	2	0.008	0.024
蜓科 Aeshnidae	0.628	2	0.001	0.028
蚱科 Tetrigidae	0.488	2	0.017	0.028
螟蛾科 Pyralidae	0.715	1	0.000	0.020
毒蛾科 Limacodidae	0.480	1	0.000	0.021
姬蜂科 Ichneumonidae	0.517	1	0.000	0.020
姬蜂科 Ichneumonidae	0.517	1	0.000	0.020
寄蝇科 Tachinidae	0.517	1	0.000	0.026
水龟虫科 Noteridae	0.377	1	0.000	0.026
叶甲科 Chrysomelidae	0.696	1	0.000	0.020
蚤蝼科 Tridactylidae	0.622	1	0.000	0.021
草蛉科 Chrysopidae	0.884	1	0.000	0.016
飞虱科 Delphacidae	0.938	1	0.000	0.020
姬蝽科 Nabidae	0.324	1	0.000	0.022
蚜科 Aphididae	0.165	1	0.000	0.020
叶蝉科 Cicadellidae	0.433	1	0.000	0.020
斑翅蝗科 Oedipodidae	0.663	1	0.000	0.022
球螋科 Forficulidae	0.674	1	0.000	0.018