



研究论文 ORIGINAL PAPERS

声学监测与样线法在
森林鸟类监测中的应用比较马士胜^{1,2}, 李 双¹, 任诗超³, 高晓冬^{4*}

- (1. 江苏省环境监测中心, 南京 210019;
2. 南京农业大学生命科学学院, 南京 210014;
3. 江苏省生态环境监测监控有限公司, 南京 210019;
4. 曲阜师范大学生命科学学院, 济宁 273165)

稿件运行过程

收稿日期: 2025-04-29

修回日期: 2025-06-19



摘 要

关键词: 声学监测;
样线调查;
鸟类多样性;
森林鸟类监测

Keywords: Acoustic monitoring;
Transect survey;
Bird diversity;
Forest bird monitoring

中图分类号: Q958; Q959.7

文献标志码: A

文章编号:

2310-1490(2026)-02-0243-09

DOI: 10.12375/ysdwxb.202504027

为评估声学监测技术在森林鸟类调查中的应用效果及其与传统样线法的差异, 本研究于2024年3月—2025年2月在江苏省盱眙铁山寺国家森林公园开展为期1年的对比监测。传统样线法布设6条样线, 每季度开展2次人工调查; 声学监测在每条样线上各布设1套声纹设备, 全天候采集鸟鸣声, 并基于江苏省鸟类名录构建的AI模型进行物种识别与声纹分析。结果显示: (1) 两种方法共记录鸟类114种, 其中共有种70种, 样线法独有28种(共98种), 声学监测独有16种(共86种); (2) 样线法在物种数量统计及目视确认方面具优势, 而声学监测有效补充了普通夜鹰(*Caprimulgus jotaka*)、红角鸮(*Otus sunia*)等夜行性及隐蔽物种的观测结果, 并揭示鸟类活动节律特征; (3) 声学监测提升了数据处理效率, 显著降低了人工辨识强度。研究表明, 传统样线法在特定生境和类群监测中仍不可替代, 而声学监测凭借其全天候、自动化优势拓展了监测的时空维度, 二者协同应用可显著提升森林鸟类多样性监测的准确性和全面性。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(32200407); 江苏省生态环境监测科研基金项目(24A09); 山东省博士后创新项目(SDCX-ZG-202400113)

第一作者简介: 马士胜(1990—), 男, 工程师; 主要从事生物多样性监测和动物生态学研究。E-mail: mashisheng199008@163.com

* 通信作者: 高晓冬, E-mail: gao-xiaodong@163.com

Application Comparison Between Acoustic Monitoring and Transect Method in Forest Birds Monitoring

MA Shisheng^{1,2}, LI Shuang¹, REN Shichao³, GAO Xiaodong^{4*}

(1. Jiangsu Provincial Environmental Monitoring Center, Nanjing 210019, China;

2. College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210014, China;

3. Jiangsu Ecological Environment Monitoring Co., Ltd., Nanjing 210019, China;

4. School of Life Sciences, Qufu Normal University, Jining 273165, China)

Abstract: To evaluate the application effect of acoustic monitoring in forest bird surveys and its differences with the traditional transect method, a one-year comparative monitoring was conducted from March 2024 to February 2025 in Tieshansi National Forest Park, Jiangsu Province. Six avian traditional transects were set up and manual surveys were conducted twice a season. For acoustic monitoring, one avian chirping collection equipment for each transect was utilized to collect the birds voice throughout the day, species identification and acoustic signature analysis were carried out based on an AI model trained on the Jiangsu avifauna checklist. The results showed that a total of 114 species were recorded by the two methods, and 70 were common species, the transect survey recorded 28 unique species (a total of 98 species), while acoustic monitoring recorded 16 unique species (a total of 86 species). The transect method had advantages in species quantity statistics and visual confirmation, whereas acoustic monitoring effectively supplemented the observation results of nocturnal and concealed species such as *Caprimulgus jotaka* and *Otus sunia*, and revealed patterns of avian activity rhythms. Additionally, acoustic monitoring enhanced data processing efficiency and significantly reduced the labor intensity of manual identification. The study indicated that the traditional transect method was still indispensable for the monitoring of specific environments and birds, while acoustic monitoring expanded the spatiotemporal scale through continuous automated monitoring, and the combination of two methods would significantly improve the accuracy and comprehensiveness of forest bird diversity monitoring.

生物多样性是人类社会可持续发展的基础,鸟类作为其关键组成部分,因对环境变化的高度敏感性,常被用作评估区域保护价值和生态环境质量的指示性类群^[1-2]。因此,建立系统性的长期监测体系,对于准确评估生物多样性和实施有效的栖息地保护至关重要。

目前,传统的鸟类多样性调查方法主要包括样线法、样点法和网捕法等^[3]。其中,样线法因操作高效、实施灵活,在森林等生境的鸟类调查中被广泛应用^[4-6]。该方法要求调查者沿固定路线行进,记录两侧所见所闻的鸟类种类与数量,但其调查结果易受调查者经验、天气条件及每日时间窗口的限制,在覆盖度和客观性上存在瓶颈^[7]。面对日益复杂的监测需求,整合与验证新型技术以构建更全面的综合监测体系显得尤为迫切。

鸣声是鸟类进行通讯、繁殖和领域防御的关键行为特征,其物种特异性为通过声音进行辨识提供了基础^[8-11]。近年来,随着通讯工程、人工智能等技术的发展,基于鸟鸣声识别的声学监测技术迅速发展,为野生动物监测带来了革命性变化^[12-13]。该技术能够全天候、自动化地进行数据采集与物种识别,大幅提升了时空覆盖范围与工作效率^[14],但有研究表明声学监测仍需传统调查方法作为补充^[15]。

本研究选取位于秦岭-淮河地理过渡带及气候交汇区的江苏盱眙铁山寺国家森林公园为研究区域,该地区独特的自然条件孕育了丰富的生物多样性^[16-17]。本研究通过并行开展传统样线调查和声学监测,系统对比了两种方法在森林鸟类多样性监测中的效能差异,旨在明确声学监测技术在实际应用中的优势、局限及其对传统方法的补充价值,以期为

优化鸟类监测方案、提升区域生物多样性保护与栖息地管理水平提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

铁山寺国家森林公园地处大别山余脉的玄武岩低山丘陵区(32°13′—32°43′N, 118°11′—118°54′E), 北依淮河, 南邻安徽省来安县, 西靠仇集大涧分水岭, 东至龙山、陵山—獾子岩—大洋山一线, 构成一个相对独立的地理单元。研究区属北亚热带与暖温带过渡性季风气候, 年平均气温 14.9 °C, 无霜期 215 d, 年平均降水量 983.5 mm。公园森林覆盖率为 93.3%, 已记录高等植物 553 种、昆虫 854 种, 前期红外相机监测还记录到野猪 (*Sus scrofa*)、猪獾 (*Arctonyx collaris*)、狗獾 (*Meles meles*)、貉 (*Nyctereutes procyonoides*)、蒙古兔 (*Lepus tolai*)、华南兔 (*L. sinensis*) 和东北刺猬 (*Erinaceus amurensis*) 7 种哺乳动物,

生境复杂多样, 为鸟类提供了良好的栖息条件。

1.2 样线法

传统鸟类监测采用样线法, 根据研究地植被分布、生境类型和前期调查结果, 设置 6 条固定样线 (图 1), 样线长度为 1.5 ~ 2.0 km。调查时间为 2024 年 3 月—2025 年 2 月, 每个季节调查 2 次, 相邻两次调查间隔至少 30 d, 每次调查均在鸟类活动较为频繁的时间段 (06:30—09:00 和 15:00—18:30) 进行。调查过程中, 利用博冠鸿鹄双筒望远镜 (10×42 ED) 进行观察, 并用索尼数码相机 (SONY Alpha 1 微单, FE 200–600 mm F5.6–6.3 G OSS 镜头) 拍摄。所有观测到的鸟类物种均依据《中国鸟类野外手册》^[18]、《中国鸟类分类与分布名录》(第 4 版)^[19] 和《国家重点保护野生动物名录》^[20] 进行辨识与分类。为开展方法对比, 在每条样线上同步布设 1 台声学监测设备 (型号: JSEP-MQ-N2000A, 江苏省生态环境监测监控有限公司, 中国), 用于全天候采集音频数据。

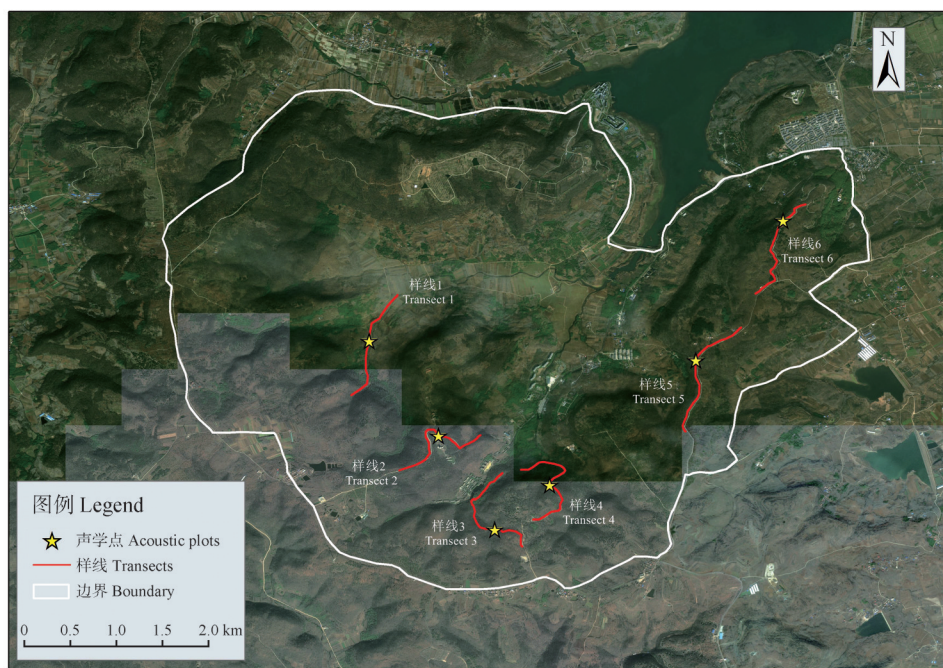


图1 铁山寺国家森林公园声学监测点与样线位置分布

Figure 1 Distribution of acoustic monitoring plots and transects in Tieshansi National Forest Park

1.3 声学监测

声学监测的技术流程主要包括样本库构建、鸣声采集、特征提取、AI 识别、数据确认和统计分析 6 个部分。

(1) 样本库构建: 首先整合江苏省鸟类名录^[21–22] 及研究区潜在分布鸟种 (中国观鸟记录中心), 并从

xeno-canto 等公共声学数据库中获取对应鸟类的鸣声数据。基于此, 构建一个专用于本研究的鸣声识别样本库, 该库共包含 485 种鸟类, 以及虫鸣等 10 类环境噪声, 以此为后续 AI 模型训练与识别提供基础数据。

(2) 鸣声采集: 6 台声学监测设备以触发式录音

模式进行全天候自动采集。设备采集半径约100 m,具全向型指向,内置4G模块可将数字音频信号实时传输至服务器。其主要技术参数为:灵敏度 ≥ -20 dB (0 dB = 1 V/Pa@1 kHz),信噪比 ≥ 70 dB;动态量程(0 dB增益下)30~100 dB,防护等级IP66,并由太阳能电池板与锂电池联合供电。

(3)特征提取:对采集的原始音频,首先采取基于注意力机制的单通道时域分离模型进行声纹分离,以提取目标鸟类的纯净鸣声片段;随后,对分离后的鸟鸣声进行梅尔倒谱系数特征提取,具体过程包括预加重、分帧加窗、快速傅里叶变换、梅尔滤波器组滤波、取对数和离散余弦变换等;最终提取每帧信号的梅尔倒谱系数作为描述鸟鸣声深层声学特征的特征向量序列。

(4)AI识别:将梅尔倒谱特征向量序列输入预训练的卷积神经网络模型进行物种识别,并通过语图样本集的建立和计算对模型进行训练,进一步提高识别准确率。训练过程采用交叉熵损失函数和Adam优化器,应用数据增强策略以提升模型鲁棒性。模型输出为输入鸟鸣声属于各预设鸟种的概率分布(置信度得分)。基于对独立验证集的统计分析,置信度阈值设定为70%(此阈值下识别准确率约90%),本研究以此阈值筛选初判有效数据。

(5)数据确认:所有AI初识别的结果(置信度 $\geq 70\%$)均由具备专业鸟类学背景或丰富野外听音辨鸟经验的研究人员进行人工复核与最终确认,以保证物种鉴定准确性。

(6)统计分析:为系统解析典型夏候鸟的日活动与月活动节律,本研究选取6种杜鹃科(Cuculidae)(大杜鹃 *Cuculus canorus*、小杜鹃 *C. poliocephalus*、四声杜鹃 *C. micropterus*、大鹰鹃 *Hierococcyx sparverioides*、红翅凤头鹃 *Clamator coromandus* 和噪鹃 *Eudynamis scolopaceus*)及2种鸱鸃科(Strigidae)(红角鸱 *Otus sunia* 和日本鹰鸱 *Ninox japonica*)鸟类为研究对象。鸣声数量统计方式为:每小时划分为60个1 min时段,单一时段内出现 ≥ 1 次超阈值鸣声记录即记为1条鸣声数量。日活动节律以每小时的平均鸣声数量表征;月活动规律则将每月分为上半月(X-1)和下半月(X-2),通过比较各半月单元内的小时平均鸣声数量进行分析。

1.4 数据分析

对样线法和声学监测所获数据进行统一处理与

分析。首先,依据各物种记录数量占总个体数的比例,将其划分为优势种($> 10\%$)、常见种($1\% \sim 10\%$)和偶见种($< 1\%$)。为量化鸟类群落结构特征,采用Shannon-Wiener多样性指数(H')评估物种多样性,采用Simpson优势度指数(C)衡量优势度,采用Pielou均匀度指数(J_e)反映物种个体数分布的均匀程度。为比较两种监测方法在物种检出上的异同,计算了Jaccard相似性指数(J)和Sørensen相似性指数(D)。各指数的计算公式如下:

Shannon-Wiener多样性指数

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

式中: S 为物种总数; P_i 为第 i 个物种个体数量占有物种总个体数的比例。

Simpson优势度指数

$$C = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (2)$$

式中: S 、 P_i 同式(1)。

Pielou均匀度指数

$$J_e = H'/H'_{\max} \quad (3)$$

式中: H' 为实际观测的Shannon-Wiener指数; $H'_{\max}$ 为最大均匀条件下多样性指数,即 $\ln S$ 。

Jaccard相似性指数

$$J = |A \cap B| / |A \cup B| \quad (4)$$

式中: A 为样线调查物种集合; B 为声学调查物种集合。

Sørensen相似性指数

$$D = (2 \cdot |A \cap B|) / (|A| + |B|) \quad (5)$$

式中: A 、 B 同式(4)。

物种累积曲线利用Python软件计算并绘制拟合曲线和置信区间。使用Origin 2018和Excel进行数据统计分析和作图。

2 结果

2.1 样线调查结果

样线调查记录到鸟类12目34科98种,共3476只。根据优势度划分标准,未出现优势种;常见种有白头鹎(*Pycnonotus sinensis*, 9.52%)、暗绿绣眼鸟(*Zosterops simplex*, 4.80%)、燕雀(*Fringilla montifringilla*, 4.72%)等29种;其余69种为偶见种。在分类群组成上,雀形目(Passeriformes)物种数(70种, 71.43%)和个体数(3010只, 86.59%)均占绝对优势;鹰形

目(Accipitriformes)物种数(9种,9.18%)位列其次; 鸽形目(Columbiformes)个体数(202只,5.81%)仅次于雀形目。从居留型来看,留鸟40种(40.82%),夏候鸟26种(26.53%),冬候鸟21种(21.43%),旅鸟11种(11.22%);在动物地理区系组成上,东洋界物种最多(40种,40.82%),其次为广布种(35种,35.71%)和古北界(23种,23.47%)。记录到12种国家二级重点保护野生动物,分别是凤头蜂鹰(*Pernis ptilorhynchus*)、黑冠鹃隼(*Aviceda leuphotes*)、凤头鹰(*Accipiter trivirgatus*)、赤腹鹰(*A. soloensis*)、松雀鹰(*A. virgatus*)、雀鹰(*A. nisus*)、苍鹰(*A. gentilis*)、灰脸鵟鹰(*Buteo indicus*)、普通鵟(*Buteo japonicus*)、红

隼(*Falco tinnunculus*)、仙八色鸫(*Pitta nympha*)和画眉(*Garrulax canorus*)。

鸟类群落结构呈现明显的季节性动态(表1)。物种丰富度春季最高(69种),秋季(58种)和夏季次之(55种),冬季最低(41种);个体数量则从春季到冬季逐季递减,分别为1183、846、726、721只。多样性指数显示(表1),Shannon-Wiener指数在春、夏和秋三季均为3.61,冬季较低(3.38);Simpson优势度指数夏、秋季略高(0.97),春、冬季略低(0.96);Pielou均匀度指数则以冬季最高(0.91),夏季(0.90)、秋季(0.89)和春季(0.85)依次略降。

表1 铁山寺国家森林公园不同季节鸟类多样性

Table 1 Bird diversity in Tieshansi National Forest Park in different seasons

季节 Season	物种数/种 Species number	个体数/只 Number	Shannon-Wiener多样性指数 Shannon-Wiener index	Simpson优势度指数 Simpson dominance index	Pielou均匀度指数 Pielou evenness index
春季Spring	69	1183	3.61	0.96	0.85
夏季Summer	55	846	3.61	0.97	0.90
秋季Autumn	58	726	3.61	0.97	0.89
冬季Winter	41	721	3.38	0.96	0.91

2.2 声学监测结果

2.2.1 物种识别结果

经AI模型初筛(置信度≥70%)及人工审核,在110421条鸣声记录中,确认有效记录为100263条,审核准确率为90.80%,声学监测共记录鸟类12目32科86种鸟类。鸣声数前五的物种分别为大鹰鹃(22419条)、大山雀(*Parus minor*,11790条)、红角鸮(10509条)、白头鹎(5742条)和环颈雉(*Phasianus colchicus*,4748条)。监测到的物种数呈现显著的季

节性差异(表2),其中春季监测到的物种数最多,达81种(占总物种数的94.16%);冬季最少,仅33种(占38.37%)。在分类群组成上,雀形目鸟类在物种数上占绝对优势,累计监测到61种(占70.93%)。记录到10种国家二级重点保护野生动物,分别是小鸺鹠(*Centropus bengalensis*)、日本鹰鸮、红角鸮、长耳鸮(*Asio otus*)、赤腹鹰、松雀鹰、雀鹰、红隼、仙八色鸫和画眉。

表2 两种监测方法结果对比

Table 2 Comparison of results from two monitoring methods

季节 Season	物种数/种 Species number			共同物种数/种 Number of shared species	独有物种数/种 Number of unique species		相似性指数 Similarity coefficient	
	样线调查 Transect survey	声学监测 Acoustic monitoring	总计 Total		样线调查 Transect survey	声学监测 Acoustic monitoring	Jaccard	Sørensen
春季Spring	69	81	97	53	16	28	0.55	0.71
夏季Summer	55	55	72	38	17	17	0.53	0.69
秋季Autumn	58	51	74	35	23	16	0.47	0.64
冬季Winter	41	33	51	23	18	10	0.45	0.62
总计Total	98	86	114	70	28	16	0.61	0.76

2.2.2 典型夏候鸟活动节律

声学监测数据清晰地揭示了所选8种典型夏候鸟(6种杜鹃科及2种鸱鹟科鸟类)的活动节律,在日尺度和月尺度上均表现出显著规律(图2,图3)。日活动模式存在明显类群差异(图2)。其中,小杜鹃、大鹰鹃、四声杜鹃和红翅凤头鹃的鸣叫活动呈现典型的晨昏双峰模式,高峰主要集中在04:00—08:00及16:00—20:00;大杜鹃和噪鹃除晨昏活动高峰外,日间持续活跃,呈不明显的单峰和双峰模式;作为夜行性物种,红角鸮和日本鹰鸮的鸣叫活动主要集中于夜间(20:00—次日04:00)。月活动规律显示,不同物种的繁殖期鸣叫高峰在时间上形成连续序列(图3),在杜鹃科鸟类中,大鹰鹃鸣叫活动高峰期最早,出现在4月下旬;大杜鹃和四声杜鹃的高峰期紧随其后,在5月下旬;小杜鹃和噪鹃的高峰期在6月上旬;而红翅凤头鹃最晚,至7月上旬方达到高峰期。鸱鹟科鸟类的活动高峰期也呈现先后差异,红角鸮的高峰期(4月上旬)明显早于日本鹰鸮(5月上旬)。

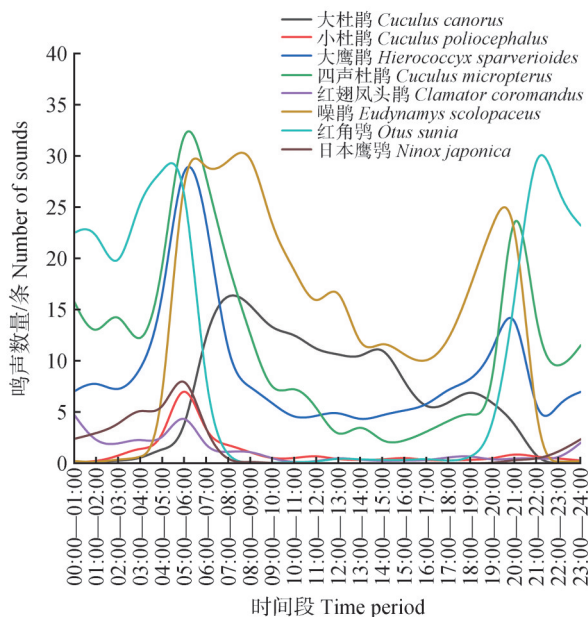
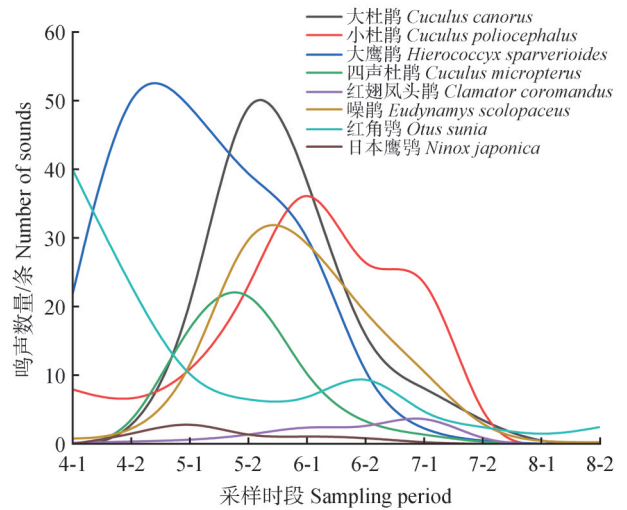


图2 典型夏候鸟日活动节律

Figure 2 Diurnal activity rhythm of typical summer migratory birds

2.3 两种监测方法对比

两种监测方法共记录鸟类114种,隶属14目(附录A,表2)。从总体监测效能来看,样线法记录物种数更多(98种,占85.96%),声学监测次之(86种,占75.44%),两者共有70种,重叠率为61.40%。两种方法在物种检出上表现出明显的互补性与类群特异性。声学监测独有物种16种,主要为鸣声特征显著



横坐标中的4-1、4-2分别代表4月上半月和4月中半月,以此类推。

On the x-axis, "4-1" and "4-2" represented the first and second half of April, respectively, with other labels following the same convention.

图3 典型夏候鸟月活动节律

Figure 3 Monthly activity rhythm of typical summer migratory birds

但行踪隐蔽的类群,如夜行性的普通夜鹰(*Caprimulgus jotaka*)、红角鸮、长耳鸮和日本鹰鸮等。样线调查独有物种28种,以视觉识别为主、鸣叫不活跃或不甚鸣叫的物种为代表,尤其包括多种鹰形目猛禽,如苍鹰、灰脸鵟鹰、普通鵟和凤头蜂鹰等。

两种方法的监测动态存在显著差异。声学监测记录的物种数季节波动更大,在鸣叫活跃的春季监测到的物种数(81种)多于样线法(69种),且在春季记录中夏候鸟和旅鸟的比例更高;但其他季节均低于或等于样线法。与此对应,两种方法物种组成的相似性(Jaccard指数和Sørensen指数)从春季至冬季呈逐季递减趋势。

两种方法的物种累计曲线(图4)显示,样线调查的物种数40次重复后趋于平缓,物种数接近饱和;而声学监测的物种数则在约150 d后接近饱和,表明后者需要更长的连续监测周期以获取稳定的物种名录。

3 讨论与结论

本研究结合声学监测和传统样线调查,在铁山寺国家森林公园共记录鸟类114种,物种组成以雀形目、鹰形目和鸱形目(Cuculiformes)等典型森林鸟类为主,反映了研究区森林生态系统的鸟类区系特征。研究地处于东洋界与古北界的生物地理区交汇带,其鸟类群落呈现显著的南北区系特征融合的特

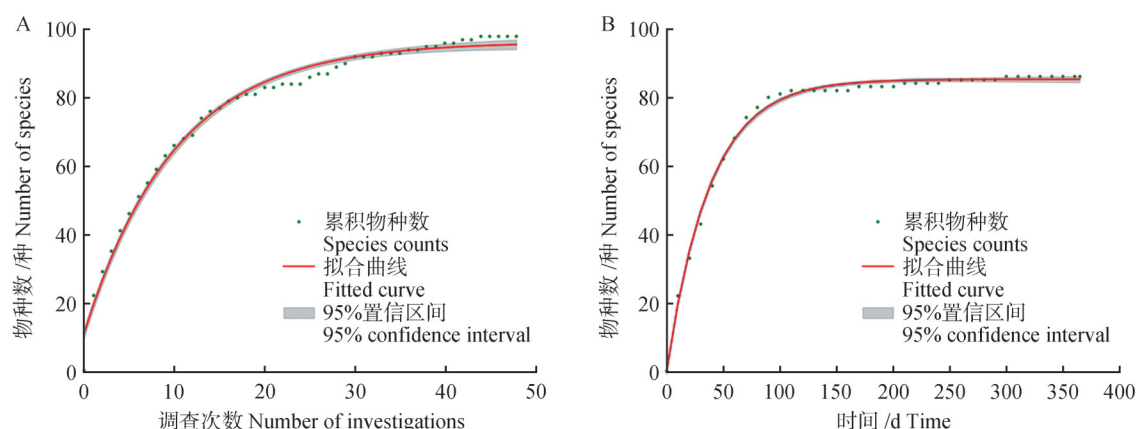


图4 样线调查(A)与声学监测(B)物种累积曲线

Figure 4 Species accumulation curves of transect survey (A) and acoustic monitoring (B)

点,是研究鸟类生态适应机制的理想区域。声学监测作为先进的长期监测手段,在发现珍稀物种、监测鸟类多样性和研究鸟类行为与环境关系等方面应用广泛^[23-24]。本研究表明,声学监测共记录到鸟类86种,其中16种为独有物种,有效补充了传统调查的盲区,印证了其在珍稀物种发现、多样性监测及行为研究中的应用价值^[23-24]。

3.1 两种监测方法的优势与局限

传统样线调查作为鸟类调查的基础方法,可同时兼顾视觉与听觉观测,对视觉特征明显但不甚鸣叫的物种(如本研究中仅由样线法记录到的多种鹰形目猛禽)仍具不可替代性,并能提供准确的个体数量数据。此外,本研究中样线调查物种数多于声学监测,且能兼顾物种数量统计,凸显人工调查优势。然而,样线调查结果易受调查者经验、天气及偶然性等因素影响^[25],需投入大量专业人员进行专业系统培训与实地工作^[26],在大尺度监测中成本与操作难度较高。相比之下,声学监测通过自动化设备持续收集数据并利用模型快速识别,显著降低了主观偏差及对调查者即时辨识能力的要求^[27]。其在处理大鹰鹞、大山雀和白头鹀等高频鸣叫物种时效率优势明显,避免了传统人工方法所需的繁重抽样鉴定过程^[28]。更重要的是,声学监测在探测夜行性及遇见率低(如鸱形目Strigiformes、夜鹰目Caprimulgiformes鸟类)的物种方面展现出独特价值^[29-30],有效拓展了监测时空维度。

3.2 监测效能的季节性差异与节律研究

两种方法的监测效能呈现明显的季节性差异。春季,鸟类进入繁殖期后鸣叫活跃,声学监测记录的物种数(81种)甚至超过样线法,凸显了其在繁殖季

鸟类监测中的高效性。此外,声学监测的全天候优势补充了样线调查未记录到的夏候鸟和过境旅鸟。两种监测方法在冬季的物种检出率均最低,这与鸟类活动减弱趋势一致,客观反映了研究区鸟类群落的季节性动态^[31-33]。此外,声学监测持续产生的数据为揭示鸟类活动节律提供了全新视角。本研究不仅验证了大杜鹃、小杜鹃等物种鸣叫活动随气温升高的季节性增强趋势^[34-36],同时揭示了小杜鹃、大鹰鹞等物种繁殖季鸣叫活动高度集中于黎明和傍晚,这与其吸引配偶或保卫领域的目的^[37-38]相符;而大杜鹃和噪鹛的日节律较均匀,此种间差异可能与其生态位特化及求偶信号传播策略相关。此外,声学监测有效克服了夜行性鸟类活动时间特殊、隐蔽性强等难以监测的问题^[39]。这些细节是传统调查难以系统获取的。

3.3 声学监测的技术挑战与改进方向

尽管优势显著,但声学监测仍面临若干技术挑战。其识别精度高度依赖训练数据库的完备性与地域适用性。鸟类鸣声存在地理变异和种群差异^[40],需在目标区域积累本地鸟类鸣声样本构建多样化模型。善于效鸣的鸟类(如棕背伯劳 *Lanius schach*、乌鸫 *Turdus mandarinus*)及鸣声高度相似的近缘种(如某些鹀科 *Emberizidae* 鸟类)对识别准确度构成挑战。本研究发现昆虫鸣声(2~8 kHz)被误识别为蝗莺科(*Locustellidae*)鸟类,此为该技术普遍难点之一^[41]。此外,声学监测的物种探测能力受设备灵敏度、监测范围、鸟类发声行为和生境复杂性等多重因素限制,导致其总体物种检出率在本研究中仍低于样线法。

3.4 综合监测体系的构建

综上所述,传统样线调查与声学监测具显著互

补性。本研究两者监测物种重叠率达61.40%,同时各有相当比例的独有物种,充分证明单一方法的局限性。样线调查在直接观测、数量统计和特殊类群调查中不可或缺;而声学监测则以自动化、全天候、大范围覆盖及夜行性物种监测等优势,开辟了研究新途径。因此,整合两种方法构建综合监测体系,是未来鸟类多样性研究与保护监测的优化方向。这种融合不仅能最大限度地提升物种检出率,获取更全面的物种名录,更能深化对鸟类活动节律、时空分布等生态信息的理解,从而为生物多样性评估、保护地管理及生态研究提供更坚实、多维的数据支撑。

参考文献:

- [1] KATI V I, SEKERCIOGLU C H. Diversity, ecological structure, and conservation of the landbird community of Dadia Reserve, Greece[J]. *Diversity and Distributions*, 2006, 12(5): 620-629.
- [2] NEATE-CLEGG M H C, HORNS J J, ADLER F R, *et al.* Monitoring the world's bird populations with community science data[J]. *Biological Conservation*, 2020, 248: 108653.
- [3] 蔡音亭, 干晓静, 马志军. 鸟类调查的样线法和样点法比较: 以崇明东滩春季盐沼鸟类调查为例[J]. *生物多样性*, 2010, 18(1): 44-49.
CAI Y T, GAN X J, MA Z J. A comparison of line transect and point count surveys: A case study of spring saltmarsh birds at Chongming Dongtan [J]. *Biodiversity Science*, 2010, 18(1): 44-49.
- [4] 许龙, 张正旺, 丁长青. 样线法在鸟类数量调查中的运用[J]. *生态学杂志*, 2003, 22(5): 127-130.
XU L, ZHANG Z W, DING C Q. Line transect methods in avian census[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(5): 127-130.
- [5] CRAIG M D. A comparison of species counts and density estimates derived from area searches, line transects and point counts in the jarrah forest of south-western Australia[J]. *Corella*, 2004, 28(2): 55-59.
- [6] RAMAN T R S. Assessment of census techniques for interspecific comparisons of tropical rainforest bird densities: A field evaluation in the Western Ghats, India[J]. *Ibis*, 2003, 145(1): 9-21.
- [7] 张倩雯, 龚粤宁, 宋相金, 等. 红外相机技术与其他几种森林鸟类多样性调查方法的比较[J]. *生物多样性*, 2018, 26(3): 229-237.
ZHANG Q W, GONG Y N, SONG X J, *et al.* Comparing the effectiveness of camera trapping to traditional methods for biodiversity surveys of forest birds[J]. *Biodiversity Science*, 2018, 26(3): 229-237.
- [8] 肖华, 张雁云. 鸟类鸣声研究[J]. *生物学通报*, 2009, 44(3): 11-13.
XIAO H, ZHANG Y Y. Study on bird song[J]. *Bulletin of Biology*, 2009, 44(3): 11-13.
- [9] XIA C W, DENG Z Q, LLOYD H, *et al.* The function of three main call types in common cuckoo[J]. *Ethology*, 2019, 125(9): 652-659.
- [10] BARDELI R, WOLFF D, KURTH F, *et al.* Detecting bird sounds in a complex acoustic environment and application to bio-acoustic monitoring[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31(12): 1524-1534.
- [11] 雷富民. 鸟类鸣声在鸟类系统学研究中的作用初探[J]. *动物分类学报*, 1999, 24(4): 461-466.
LEI F M. Avian systematics based on bird vocalization[J]. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 1999, 24(4): 461-466.
- [12] STOWELL D, WOOD M D, PAMUŁA H, *et al.* Automatic acoustic detection of birds through deep learning: The first bird audio detection challenge[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2019, 10(3): 368-380.
- [13] WARE L N, MAHON C L, MCLEOD L, *et al.* Artificial intelligence (BirdNET) supplements manual methods to maximize bird species richness from acoustic data sets generated from regional monitoring[J]. *Canadian Journal of Zoology*, 2023, 101(12): 1031-1051.
- [14] 张雪莹, 张浩林, 韩莹莹, 等. 基于深度学习的野生动物监测与识别研究进展[J]. *野生动物学报*, 2022, 43(1): 251-258.
ZHANG X Y, ZHANG H L, HAN Y Y, *et al.* Research progress of the wildlife monitoring and identification based on deep learning[J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2022, 43(1): 251-258.
- [15] 白皓天, 余上, 潘新园, 等. AI辅助识别的鸟类被动声学监测在城市湿地公园中的应用[J]. *生物多样性*, 2024, 32(8): 24188.
BAI H T, YU S, PAN X Y, *et al.* AI-assisted recognition for passive acoustic monitoring of birds in urban wetland parks[J]. *Biodiversity Science*, 2024, 32(8): 24188.
- [16] 杨财根. 低碳经济视野下森林公园旅游开发研究: 以铁山寺森林公园为例[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(20): 8601-8603.
YANG C G. Tourism development of forest park in the view of low carbon economy: Study of Tieshan Temple Forest Park[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(20): 8601-8603.
- [17] 王行政, 汤庚国, 彭志. 盱眙铁山寺自然保护区植物区系及植物资源分析研究[J]. *江苏林业科技*, 2007, 34(3): 29-33.
WANG X Z, TANG G G, PENG Z. Studies on flora of Tieshan Temple Nature Protection Area, Xuyi and plant resources[J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2007, 34(3): 29-33.
- [18] 约翰·马敬能. 中国鸟类野外手册: 马敬能新编版[M]. 李一凡, 译. 北京: 商务印书馆, 2022.
MACKINNON J. Guide to the Birds of China: MacKinnon New Edition[M]. LI Y F, trans. Beijing: The Commercial Press, 2022.
- [19] 郑光美. 中国鸟类分类与分布名录[M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2023.
ZHENG G M. A checklist on the classification and distribution of the birds of china [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2023.
- [20] 国家重点保护野生动物名录(2021年2月1日修订)[J]. *野生动物学报*, 2021, 42(2): 605-640.

- List of national key protected wild animals in China (revised on February 1, 2021) [J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2021, 42 (2): 605–640.
- [21] 鲁长虎. 江苏鸟类[M]. 北京: 中国林业出版社, 2015.
LU C H. Birds of Jiangsu[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2015.
- [22] 江苏省陆栖脊椎动物名录(2024)[Z/OL]. (2024-04-22)[2025-03-11]. https://lyj.jiangsu.gov.cn/art/2024/4/22/art_7235_11237494.html.
Jiangsu terrestrial vertebrate checklist (2024) [Z/OL]. (2024-04-22)[2025-03-11]. https://lyj.jiangsu.gov.cn/art/2024/4/22/art_7235_11237494.html.
- [23] 赵莹, 申小莉, 李晟, 等. 声景生态学研究进展和展望[J]. 生物多样性, 2020, 28(7): 806–820.
ZHAO Y, SHEN X L, LI S, *et al.* Progress and outlook for soundscape ecology [J]. *Biodiversity Science*, 2020, 28 (7): 806–820.
- [24] 谭娟, 朱丹丹, 王卿, 等. 被动声学技术在城市公园绿地鸟类多样性监测中的应用: 以上海闵行区春申公园为例[J]. 生物多样性, 2024, 32(10): 24262.
TAN J, ZHU D D, WANG Q, *et al.* Application of passive acoustic technology in monitoring bird diversity in urban park green space: A case study of Chunshen Park in Minhang District, Shanghai[J]. *Biodiversity Science*, 2024, 32(10): 24262.
- [25] VERNER J. Assessment of counting techniques[M]. JOHNSTON R F. Current ornithology. New York: Plenum Press, 1985: 247–302.
- [26] 吴飞, 杨晓君. 样点法在森林鸟类调查中的运用[J]. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2240–2244.
WU F, YANG X J. Application of point count method in forest birds survey [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27 (12): 2240–2244.
- [27] VENIER L A, MAZEROLLE M J, RODGERS A, *et al.* Comparison of semiautomated bird song recognition with manual detection of recorded bird song samples [J]. *Avian Conservation and Ecology*, 2017, 12(2): 120202.
- [28] BUDKA M, SOKOŁOWSKA E, MUSZYŃSKA A, *et al.* Acoustic indices estimate breeding bird species richness with daily and seasonally variable effectiveness in lowland temperate Białowieża Forest[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110027.
- [29] ZUBEROGITIA I, MARTÍNEZ J E, GONZÁLEZ-OREJA J A, *et al.* Maximizing detection probability for effective large-scale nocturnal bird monitoring [J]. *Diversity and Distributions*, 2020, 26(8): 1034–1050.
- [30] ALCOCER I, LIMA H, SUGAI L S M, *et al.* Acoustic indices as proxies for biodiversity: A meta-analysis [J]. *Biological Reviews*, 2022, 97(6): 2209–2236.
- [31] KNIGHT E C, HANNAH K C, FOLEY G J, *et al.* Recommendations for acoustic recognizer performance assessment with application to five common automated signal recognition programs [J]. *Avian Conservation and Ecology*, 2017, 12(2): 14.
- [32] CAMPOS I B, LANDERS T J, LEE K D, *et al.* Assemblage of focal species recognizers-AFSR: A technique for decreasing false indications of presence from acoustic automatic identification in a multiple species context [J]. *PLoS One*, 2019, 14 (12): e0212727.
- [33] EVENS R, KOWALCZYK C, NOREVIK G, *et al.* Lunar synchronization of daily activity patterns in a crepuscular avian insectivore [J]. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(14): 7106–7116.
- [34] 岑渝华, 王鹏, 陈庆春, 等. 城市绿地动物声景的时空特征及其驱动因素[J]. 生物多样性, 2023, 31: 22359.
CEN Y H, WANG P, CHEN Q C, *et al.* Spatiotemporal characteristics and influencing factors of animal soundscape in urban green spaces[J]. *Biodiversity Science*, 2023, 31: 22359.
- [35] GARSON P J, HUNTER M L, Jr. Effects of temperature and time of year on the singing behaviour of wrens *Troglodytes troglodytes* and great tits *Parus major* [J]. *Ibis*, 1979, 121 (4): 481–487.
- [36] THOMAS R J. Two tests of a stochastic dynamic programming model of daily singing routines in birds [J]. *Animal Behaviour*, 1999, 57(2): 277–284.
- [37] 黄婉萍, 徐姝婷, 梁伟, 等. 大鹰鹃鸣声的日节律[J]. 动物学杂志, 2017, 52(6): 945–953.
HUANG W P, XU S T, LIANG W, *et al.* Daily vocal pattern of large hawk cuckoo (*Hierococcyx sparveriioides*) [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2017, 52(6): 945–953.
- [38] PUSWAL S M, MEI J J, WANG M, *et al.* Daily and seasonal patterns in the singing activity of birds in east China [J]. *Ardea*, 2022, 110(1): 5–14.
- [39] VIRANI M Z. Diet composition of sokoke scops owl *Otus ireneae* in Arabuko-Sokoke Forest [J]. *Scopus*, 2008, 27: 6–9.
- [40] SLABBEKOORN H, SMITH T B. Bird song, ecology and speciation [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2002, 357: 493–503.
- [41] RAJAN S C, ATHIRA K, JAISHANKER R, *et al.* Rapid assessment of biodiversity using acoustic indices [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2019, 28: 2371–2383.

附录 Supplementary Material

附录 A 铁山寺国家森林公园鸟类名录

Supplementary A Bird list of Tieshansi National Forest Park

<http://dx.doi.org/10.12375/ysdwxb.202504027f1a>