

DOI: 10.20103/j.stxb.202311152483

肖荣波, 叶梓轩, 岑渝华, 林声伟, 胡珂, 翁雷霆, 饶欣, 黄飞, 王鹏. 声景生态学中的监测时空尺度及其选择. 生态学报, 2024, 44(20): 9159-9172.

Xiao R B, Ye Z X, Cen Y H, Lin S W, Hu K, Weng L T, Rao X, Huang F, Wang P. Spatio-temporal scale and selection in soundscape ecology. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9159-9172.

声景生态学中的监测时空尺度及其选择

肖荣波¹, 叶梓轩¹, 岑渝华¹, 林声伟¹, 胡珂¹, 翁雷霆¹, 饶欣², 黄飞¹, 王鹏^{1,*}

¹ 广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006

² 广东外语外贸大学数学与统计学院, 广州 510420

摘要: 精确的声音采集与监测是声景生态学研究的基础, 但目前声景生态学中的监测时空尺度选择尚不明晰。以 Web of Science 数据库核心合集 2011 年至 2023 年收录的 86 篇研究文献为对象, 梳理与总结了声景生态学监测的空间与时间尺度及其尺度选择。在空间尺度上, 分区布点法和网格布点法是目前使用最多的空间布点方法, 常见的录音设备的最小间距为 200m, 常见的录音设备的平均离地高度为 1.5m, 较低的设备高度适用于探寻近地面灌丛昆虫群落声景, 较高的设备高度适用于记录树冠层的动物声学活动。时间尺度可分为连续与间隔式采样, 其中, 连续采样适合收集短期和精细化时间尺度的音频数据, 触发式连续采样适用于收集特定鸣声物种的声音信息; 间隔采样适合捕捉长期的声学模式变化, 其中每 10min 或 15min 采样 1min 是目前最为主要的方式, 分别占 12.3% 和 7.4%。不同声景生态学研究目标的监测时空尺度选择差异较大, 其中声景格局及其驱动因素研究多使用间隔式采样和网格布点法, 生态环境质量评估多使用间隔式采样和样线布点法, 生物多样性及其声学特征评估多使用连续式采样和随机布点法, 而分区布点法普遍应用于各类研究目标中。目前声景生态学面临空间尺度与生态等级结构的依赖性问题、时间尺度转换及其转换精度问题、时空尺度的合理选择问题, 建议未来研究需聚焦于构建立体式声景监测空间网络、开展声景生态多尺度模拟、强化声景尺度选择的定量评估。

关键词: 声景生态学; 声景监测; 时空尺度; 尺度选择

Spatio-temporal scale and selection in soundscape ecology

XIAO Rongbo¹, YE Zixuan¹, CEN Yuhua¹, LIN Shengwei¹, HU Ke¹, WENG Leiting¹, RAO Xin², HUANG Fei¹, WANG Peng^{1,*}

¹ School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

² School of Mathematics and Statistics, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou 510420, China

Abstract: Precise sound collection and monitoring is the foundation of Soundscape Ecology. However, there is an urgent need to address the lack of systematic summary of spatio-temporal scale selection in Soundscape Ecology. The monitoring spatio-temporal scale of Soundscape Ecology is closely related to its subsequent research conclusions. Choosing different monitoring spatio-temporal scales has a significant impact on the research conclusions. Therefore, choosing a reasonable monitoring spatio-temporal scale is crucial for precisely reflecting the soundscape dynamic and biodiversity. We reviewed and summarized the spatial and temporal scales of Soundscape Ecology and their selection based on 86 research articles from the Core Collection of the Web of Science database between 2011 and 2023. In our review, we extracted and classified the information of spatio-temporal scales, including research objectives, sampling temporal schedule (continuous or interval recording), temporal length, spatial placement, spatial minimum distance (in meters) between devices, and spatial

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1303104); 国家自然科学基金 (51709127); 广州市科技计划基础与应用基础研究项目 (202201010727)

收稿日期: 2023-11-15; 网络出版日期: 2024-07-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangpengdili@163.com

average surface height (in meters) of equipment. With respect to spatial scale, the placements were categorized into zoning, grid, transect, random and special placement method. The choice of placement method depended on the application range and spatial scale, with the zoning and grid placement method were the most commonly used in Soundscape Ecology. The most commonly observed minimum distance between devices was 200 meters, but in order to achieve the best monitoring performance of the equipment, it is necessary to obtain the monitoring range of the equipment based on different models of recording equipment and different environmental factors. The average surface height of the equipment was most commonly 1.5 meters, with lower surface heights suitable for exploring the soundscape of insect communities near ground shrubs and higher surface heights suitable for recording avian acoustic activities in tree canopies. In terms of temporal scale, sampling schedules were divided into continuous recording and interval recording. Continuous recording was suitable for collecting short-term and refined temporal scale data, such as capturing dawn or dusk chorus changes within 4 hours or diel soundscape changes within 72 hours. Triggered continuous recording was suitable for collecting long-term acoustic information of specific vocal species. Interval recording was suitable for capturing long-term acoustic pattern changes, with intervals of 1 in 10 minutes and 1 in 15 minutes being the most commonly used, accounting for 12.3% and 7.4%, respectively. Regarding scale selection, research objectives could be grouped into three categories: studying soundscape pattern and their driving factors, evaluating ecological environment quality, and evaluating biodiversity and its acoustic characteristics. Different soundscape ecological processes exhibited significant differences in spatio-temporal scales selection, but there were also similar selection trends within the same process category. For example, studying soundscape patterns and their driving factors often involves interval recording and grid placement methods, while evaluating ecological environment quality often involves interval recording and transect placement methods. Evaluating biodiversity and its acoustic characteristics often requires continuous recording and random placement methods. The zoning placement method was widely used across various research objectives. At present, Soundscape Ecology requires answering three questions of dependence between spatial scale and ecological hierarchy structure, temporal scale conversion and its conversion accuracy, and reasonable selection of spatio-temporal scale. We encourage future research to focus on building spatial-dimensional monitoring network, conducting soundscape ecology multi-scale simulation study, and strengthening quantitative evaluation of soundscape scale selection.

Key Words: soundscape ecology; soundscape monitoring; spatio-temporal scale; scale selection

声音是自然系统和人类系统之间的重要交互媒介^[1]。1967年 Southworth 将景观中全部声音信息的总和称为“声景”,2014年国际标准化组织(ISO)将声景定义为“人类感知、体验和理解的声学环境”^[2]。2011年 Bryan Pijanowski 和 Almo Farina 结合声学生态学与景观生态学的理论框架,提出了一个新兴的研究方向——声景生态学^[3]。声景生态学以景观中的声音为研究对象,探讨声景的时空分布模式、演变过程和社会生态功能,揭示自然环境、野生动物和人类活动的相互作用关系^[4-5]。依照声音的来源,声景可以划分为生物声、地球物理声和人工声^[3,6],其中生物声是指在特定时间某一位置上的所有生物活动产生的声音,地球物理声是指由风、雨、雷和河流等非生物体在自然过程产生的自然声音,人工声是指由人类活动发出的声音或人工机械设备运转时产生的机械声。

被动声学监测是指使用录音设备记录环境中的声音信号,其作为声景生态学研究中的关键技术得到广泛应用^[5,7]。Ross 等^[7]和 Bradfer-Lawrence 等^[8]梳理了被动声学监测方法,指出其具有可长期监测、非侵入性等特点,是在复杂环境中长期监测濒危鸟类物种^[9]、探究哺乳动物的栖息地选择偏好^[10]等研究的有效工具。相较于传统的生态调查方法,被动声学监测能够在更广阔的时空尺度开展,特别是对于夜间活动或者难以目测观察的野生动物研究时优势更为突出。近年来,被动声学监测技术的进步推动了声景生态学的快速发展。许多国内外学者对声景生态学的研究对象、研究目标和研究方法进行了总结,肖治术等^[5]和王静怡等^[6]概述了

声景生态学的学科背景、学科特征与学科发展,搭建了声景生态学的概念性框架;边琦等^[11]介绍了声景生态学的主要理论背景、研究对象和应用领域;Buxton 等^[12]发现评估生物多样性和区域声景格局差异是目前声景生态学的研究热点;赵莹等^[4]梳理了声景生态学的数据采集和数据分析方法,总结了目前常用的声学指数和常见声源的声学频率范围。

精确的声音采集与监测是声景生态学研究的基础^[5]。声景在时间尺度上的动态变化以及在环境梯度上的空间异质性^[13],使得声景监测的时空尺度及其选择成为声景生态学研究的关键科学问题。Sugai 等^[14]研究发现被动声学监测具有多样化的监测时空尺度,不同研究目标之间的时空尺度通常存在一定差异,例如在监测鸟类群落多样性时通常选择日出时段^[15-16],而在探究昼夜声景格局时通常选择全天时段^[17-18];Bradfer-Lawrence 等^[8]指出声景生态学的监测时空尺度与其后续得出的研究结论息息相关,选择不同的监测时空尺度对其研究结论的影响较大^[19-20]。合理选择声景生态学的监测时空尺度是准确反映声景动态格局和生物多样性的前提,有利于优化监测设备的布点方案并节省监测成本。尽管很多学者已经关注到声景生态学的时空尺度差异,但对于研究目标与监测时空尺度选择之间仍缺乏系统地总结^[14, 21-22]。因此,本文从声景生态学的监测时空尺度及其选择出发,归纳梳理与总结了国内外声景生态学监测的时空尺度及其研究案例,探讨了声景生态学的监测方法、研究目标与时空尺度之间的关系,以为声景生态学中的监测时空尺度提供选择与参考。

1 文献检索方法

本文聚焦于陆地生态系统的声景监测。基于 Web of Science 核心合集数据库,使用布尔运算符对以下字符串进行高级检索:主题检索 TS=(soundscape AND animal) OR TS=(soundscape index AND biodiversity) OR TS=(acoustic monitoring AND monitoring method) OR TS=(spatiotemporal AND soundscape) NOT TS=(water OR ocean OR fish OR coral reef) NOT TS=(visual OR auditory OR percetion),鉴于声景生态学的学科发展进程^[11, 14],检索了 2011 至 2023 年发表的相关论文,筛选出同时满足陆地声景和声景生态学时空尺度两个关键条件的高度相关文献,共计 86 篇。按声景生态学的监测时空尺度方法进行分类,归纳梳理了研究目标、时间采样方法、时间采样频率、空间布点方法、设备最小间距、设备离地高度等类别,绘制了关于声景生态学时空尺度监测方法研究的总结列表。

2 空间尺度

2.1 水平空间尺度

合理确定监测空间布点是声景监测分析工作的基础。基于生物多样性越高声景越复杂的假设学说,区域的空间自相关性越小,声景的空间差异越大,因此确定监测设备的空间尺度非常重要^[23-24]。参照前人的研究^[14],本文 86 篇统计文献的空间布点方法归类为 6 种(表 1、图 1),分别是分区布点法(35 篇,40.7%)、网格布点法(16 篇,18.6%)、样线布点法(11 篇,12.8%)、随机布点法(6 篇,6.9%)、特殊布点法(4 篇,4.7%)、其他或未知布点法(14 篇,16.3%),其中,使用分区布点法通常会使用“Sample”、“Plot”等区域性词汇,网格布点法使用“Grid”、“Network”等具有网格属性的词汇或在其研究区域的图例中刻画了网格线,样线布点法使用“Transect”等线性词汇,随机布点法的文献使用“Random”等随机性词汇,特殊布点法指在文献统计过程中仅部分研究使用的布点方法,包括同心圆布点法(3 篇,3.6%)和十字布点法(1 篇,1.1%)。

2.1.1 分区布点法

分区布点法是指根据不同环境分区差异将录音设备布设在对应的典型区域进行音频数据收集的方法,适用于比较不同生境或土地利用类型中的物种多样性^[30-33]、环境质量^[34-37]与声景格局^[38-41]差异。分区布点法需要保证监测点位空间分布上的代表性,确保每种环境类型全部覆盖^[42],例如 Dröge 等^[17]在调查声学指数与鸟类多样性之间的关系时,将监测点位依照土地利用类型分类布设,发现声学指数是用于评估热带农业大

尺度景观下的有用工具;Myers 等^[43]在研究希腊橄榄种植园中的鸟类多样性时,将监测点位依照橄榄园的有机管理和传统管理类型分类布设,发现有机橄榄园具有更加异质的植被结构,鸟类群落在有机林中更多并且其声学活动更活跃。

表 1 空间布点方法及其适用范围概述

Table 1 Summary of placement and application range

空间布点方法 Placement	适用范围 Application range	参考文献 References
分区布点法 Zoning	根据不同环境分区差异将录音设备布设在对应的典型区域。常用于比较不同环境类型的生物多样性和声景时空差异。	[17]
非全覆盖型网格布点法 Non full coverage grid	适用于声学监测设备数量不足条件下的宏观或中观声景监测。可以偏离网格中心进行布点,并且在一些难以到达或无法布设的点位可不予布设。	[25]
全覆盖型网格布点法 Full coverage grid	适用于探究监测区域内精细化的声景时空格局差异,常见于城市绿地(微观)。通常将监测点位布设在网格中心。	[26]
样线布点法 Transect	适用于沿着某一路线或环境梯度变化收集声景信息。通常以等距或倍距的形式沿着某一固定路径布设录音设备。	[27]
随机布点法 Random	适用于录音设备数量较少的宏观声景监测。能够最大限度的提高样本之间的空间独立性,避免录音的空间重复。	[15]
同心圆布点法 Concentric circle	与样线布点法类似,适用于在二维平面上探究声景的梯度变化。	[28]
十字布点法 Cross	交叉布设录音设备,组成麦克风矩阵,以探究声音传播过程中的衰减机制。	[29]

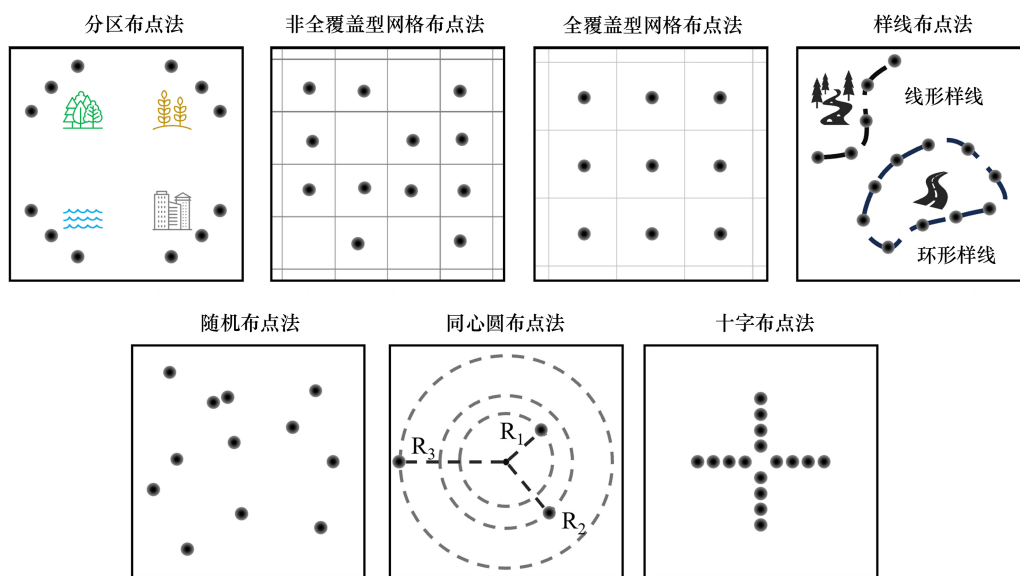


图 1 空间布点方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of placement

同心圆布点法中的 R_1 、 R_2 、 R_3 为监测点位到圆心的距离

2.1.2 网格布点法

根据网格布点法的监测尺度,可以将其分成非全覆盖型网格布点法和全覆盖型网格布点法。非全覆盖型是指将有限的、既定的录音设备平均分布于整个宏观尺度或中观尺度的声景区域,以探究区域内声景格局和生物多样性变化^[23, 44]。非全覆盖型的研究区域面积较大,其网格边距通常 >200m 以保证音频数据的空间独立性^[25]。全覆盖型是指依照录音设备的有效监测范围进行布设,确保区域内声学活动都被有效捕获,以探究微观尺度声景区域的精细化声景时空变化差异^[45-48]。由于大多数动物的鸣声都会在 100m 至 200m 内衰

减^[49],全覆盖型的网格边距通常 $\leq 200\text{m}$ 。非全覆盖型与全覆盖型网格布点法的主要区别是网格尺度^[14]及其设备在单个网格内能够覆盖的监测范围比例。全覆盖型通常将监测点位布设在网格中心附近,多用于地形较为规整的城市绿地^[45, 48];而非全覆盖型由于网格面积较大,可以偏离网格中心进行布点,并且在一些难以到达或无法布设的点位可不予布设^[15, 50]。

2.1.3 样线布点法

样线布点法沿着某一固定的路径进行布设,通常的做法是将多台设备等距或者倍距地布设在两条及以上的样线中^[27, 51],适用于沿着某一路线或环境梯度变化收集环境声音信息,例如探究海拔梯度的声景变化^[52]、生境梯度的声景变化^[53]以及污染源对周边声环境的梯度影响^[54]等,例如 Deichmann 等^[27]以 100m、250m、500m、750m 和 1000m 的倍距布设了两条样线,发现热带森林中的鸟类物种丰富度随距天然气开采矿井的距离而增加。而传统的样线法是使用单台录音设备代替人工样线调查,匀速沿样线行进获取环境中的动态录音,例如 Jeliazkov 等^[55]在研究直翅目昆虫的丰度年变化趋势以及物种空间分布信息时,将一台录音设备布设在汽车顶部,沿着 27 条环形公路行布设了 270 条样线,每条样线长度为 2km,样线的间距为 1km 以保证声学信息的独立性。

2.1.4 随机布点法

随机布点法适用于录音设备数量较少、研究区域面积较大的宏观尺度声景监测^[14-15, 56]。随机布点法能够最大限度的提高样本之间的空间独立性,避免录音的空间重复。在使用随机布点法时,可以按照区域随机或方向随机的方式进行监测布点布设,例如 Shamon 等^[16]在研究声学指数和景观梯度之间的相关性关系时,先将区域按照植被结构和土壤组分进行区域划分,然后在每个划分的区域内随机选择两个点位进行监测;Lawson 等^[57]在研究不同土地利用类型对昼夜声景影响时,先在其研究区域内计算出不同土地利用类型的覆盖面积,然后根据覆盖面积的大小选择需要放着设备的数量,具体的放置方式是在区域内的先布设一个录音器,然后随机选择一个方向前进 500m 布设第二个录音器,依此类推。

2.1.5 特殊布点法

同心圆布点法,类似于样线布点法,适用于在二维平面上研究声景的梯度变化^[28],例如 Hao 等^[58]在探究广州市城市化梯度对国家森林公园内声景的影响时,以市中心为圆心,标刻出广州市三个国家森林公园内 9 个点位的半径距离,发现鸟鸣声受城市景观的显著影响。

十字布点法,Raynor 等^[29]在研究草原上的风力发电设施对当地近地鸟类群落的影响时,采用东西、南北两个朝向垂直布设 8 个录音设备,组成一个简单的麦克风矩阵,以探究发电涡轮机噪声传播过程中的衰减对当地近地鸟类的影响。

2.1.6 轮换布点

轮换布点指将录音设备按照一定规律在监测点位之间进行轮换工作,适用于自动声学录音设备数量小于需要监测的研究点位数情况^[14]。举例来说,Do 等^[59]在研究声学指数与不同生境类型中的声景观和植被结构的关系时,使用 20 台声学设备在 8 个不同的栖息地类型中,首先让 20 台设备在单个栖息地采样 6 天,然后将这 20 台设备转移至下一个栖息地内进行音频数据的收集,依此类推,在 4 个月内共收集到 143 个有效声学记录。然而,轮换布点不能在所有的监测点位同时记录音频数据,因此可能会由于天气或者季节变化导致不同监测点位存在时间上的数据偏差。

总体而言,分区布点法适用于比较不同环境类型的生物多样性和声景时空差异;网格布点法适用于捕获宏观或微观区域内的声景格局变化;样线布点法和同心圆布点法适用于沿着某一路线或环境梯度变化收集环境声音信息;随机布点法适用于避免重复录音的宏观声学监测。在使用上述空间布点方法时,可以考虑采用轮换布点的方法,确保每个监测点位能够获得足够的监测时长和监测规模的声学数据。

2.2 垂直空间尺度

设备离地高度的确定是声景监测中的重要环节,通常依照其研究对象而定。录音设备的平均离地高度从

0m 至 20m 不等^[18, 60],其中 1.5m 是最常见的设备平均离地高度,在本文统计的文献中,共有 55 篇报道了其录音设备的布设离地高度,其中,有 42 篇 (76.4%) 文献的设备布置平均高度介于 1m 至 2m 之间,有 24 篇 (43.6%) 文献的平均高度为 1.5m(图 2)。较低的录音设备离地高度适用于探寻近地面灌丛中的昆虫群落的声景^[29],例如 van 等^[60]将录音设备放置在低矮的岩石或地面上,以调查 11 种蟋蟀之间的声生态位。而较高的录音设备离地高度适用于记录树冠层的动物声学活动,例如 Rodriguez 等^[18]发现林下层和树冠层之间的微生境异质性会导致群落的显著变化,进而导致二者的声景差异。声景生态学的研究对象大多聚焦于生物声,只有少数对人工声和地球物理声研究,例如 Bellisario 等^[54]将设备布设在离地约 1.2m 高的三脚架上以探究军事演习中的枪声响亮声学事件对周边草原生态效益的影响、Sánchez-Giraldo 等^[61]将设备布设在离地 1.5m 处以探究降雨对声学指数的影响,发现声学复杂性指数 (Acoustic complexity index, ACI) 和生物声学指数 (Bioacoustic index, BIO) 对降雨干扰的敏感性最低,是在高强度和高频率降雨下能可靠使用的声学指数的结论。此外,有研究将设备布置在较高的 7m 至 10m 的植被稀疏的树干或支架上,以减少录音设备被盗的概率^[62]。

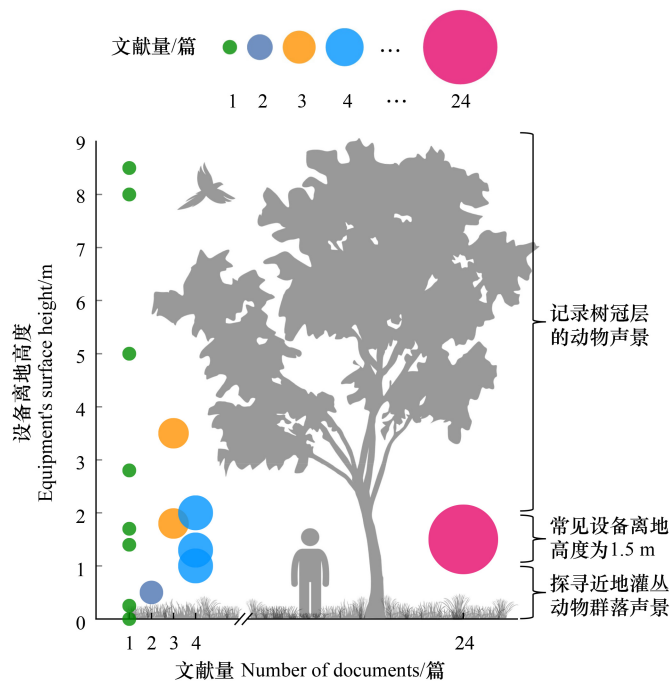


图 2 设备离地高度统计

Fig.2 Statistic of equipment's surface height

2.3 监测设备的布设距离

合理的设备间距是避免空间自相关导致的声景信息伪复制的关键^[22, 63]。目前,有许多研究表明声音传播并且被录音设备有效检测的半径为 100m^[23, 27, 46, 64];在监测两栖类动物时,声景监测设备有效监测半径约为 100m^[59, 65];而鸟类鸣声的有效监测半径介于 100m 至 200m 之间^[18, 26, 66]。目前有许多研究讨论了声学监测与人工样点法调查鸟类生物多样性时监测半径的大小^[66-68],例如 Budka 等^[64]在调查草地和农田的鸟类多样性时,发现声学样点法比固定半径 (50m、100m) 的人工样点法检测到的鸟类物种数更多,认为声学监测在 100m 半径范围内与人类调查具有等效性。

而在实际的声景生态学研究,由于不同研究项目的录音设备监听范围和研究区域的环境因素差异,声学录音设备最小间距大小不一,从 40m 到 5350m 不等^[15, 51],本文对设备的最小间距进行了统计梳理,得出其常见的设备最小间距为 200m(表 2)。针对不同型号的录音设备和不同的环境因素,可以在实验开始前对录

音设备的监听性能进行预测试,具体的方法是使用录音设备从不同距离接收声源,以此探测出录音设备的最佳监测范围^[26]。

表 2 设备最小间距统计

Table 2 Statistic of devices' distance

设备最小间距 Devices' distance/m	文献量 Number of documents	文献占比 Percentage/%	设备最小间距 Devices' distance/m	文献量 Number of documents	文献占比 Percentage/%
<100	8	9.3	500	7	8.1
100	2	2.3	(500,1000)	1	1.2
(100,200)	3	3.5	1000	6	7.0
200	12	14.0	>1000	4	4.7
(200,500)	8	9.3	ND	35	40.6

3 时间尺度

由于时间的连续性,录音的获取具有多样化的时间监测模式,不同的时间采样模式适用于捕捉不同的关键声学事件^[69]。本文将统计的 86 篇声景生态学文献的时间采样模式分为连续式采样和间隔式采样,其中连续式采样为 40 篇,间隔式采样为 46 篇,分别占比 46.5% 和 53.5%。Francomano 等^[19]解释了监测时间尺度与监测目标之间的关系(图 3)。Cifuentes 等^[70]认为声学多样性指数(Acoustic diversity index, ADI)、声学均匀度指数(Acoustic evenness index, AEI)和归一化差异声景指数(Normalized difference soundscape index, NDSI)可以很好地用于间隔式采样,但这些声学指数在使用连续式采样时更加具有可靠性。然而没有任何一个单一的声学指数能够独立充分地表征环境声景,使用多指数结合的方法能够更好地表示环境中声景的不同方面^[71-72]。

从整体上看,连续式采样适用于收集短期或精细化时间尺度的音频数据^[8, 70],例如声景昼夜模式变化^[73-74]、鸟类的黎明黄昏合唱^[75-77]、监测濒危鸟类物种信息^[78]等;间隔式采样适合用于捕捉长期的声景模式变化^[8, 20],例如季节声景格局^[38, 79]、动物声景的雨旱季模式变化^[52, 80]等。

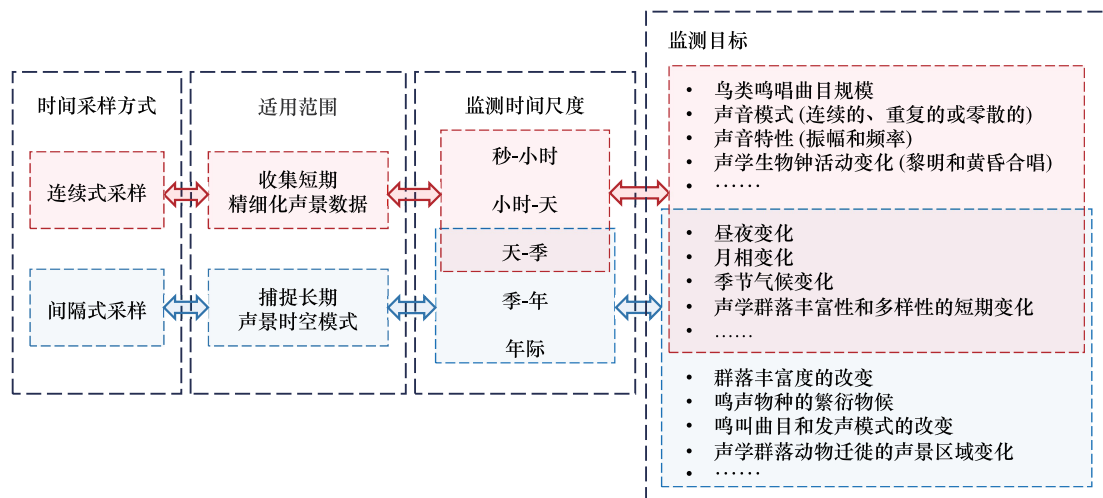


图 3 时间采样方式与监测目标关系

Fig.3 Relationship between sampling schedule and monitoring objectives

3.1 连续式采样

连续式采样可以提供非常丰富且有价值的音频数据,其采样时长是决定数据是否具有稳定性的关键。

Scarpelli 等^[71]认为连续 30min 的监测录音数据能够充分用于表征小范围的声景(例如单一物种的鸣叫)。Bradfer-Lawrence 等^[22]建议使用连续式采样,认为声学指数的标准误差方差在有效记录 120h 的录音后逐渐稳定。声景生态学研究使用了广泛的连续式采样时长,连续采样时长从 3min 至 120h 不等^[81-82],梳理发现 4h 以内连续式采样多用于监测动物声学模式^[31, 83]和黎明黄昏合唱变化^[73],72h 以内连续式采样多用于监测声景昼夜变化^[77, 82]。而连续长时间(季、年)监测在一些特定的研究项目中是必须的,例如罕见动物鸣声的声学监测^[9, 78]。连续式采样在长时间监测时,电池和数据存储是目前较大的挑战,比较好的解决办法是使用触发式连续采样。触发式连续采样是指录音设备只接收达到某一声压级阈值的声音,适用于收集特定鸣声物种的声音信息。当录音设备附近出现该物种的鸣声活动时,录音设备会根据预先设定的特定物种鸣声的声音阈值进行触发式监测,从而有效地减少收集数据中非目标物种的声音比例。例如 Amichai 等^[84]在研究耶路撒冷西墙的雨燕(*Apus apus*)的昼夜节律活动时,连续录音的声音触发阈值设置为 12dB,达到触发阈值后记录 8s 的录音用于后续分析,发现人造光源通过吸引夜间飞蛾活动显著提高雨燕的夜间的捕食活动性。

3.2 间隔式采样

间隔式采样一直是声学家们讨论的热点问题之一^[8, 85]。间隔式采样按照事先预设的时间规则进行录音,由监测时长和间隔时长的比组成,例如每 5min 记录其时段内的 1min,本文记为 1/5(min)。间隔式采样的指示性效果受到监测时长和间隔时长的显著影响,过宽的时间采样间隔可能会导致罕见声音的丢失^[85-86],而过窄又会浪费过多的分析时间和经济成本^[19]。合理选择间隔式采样频率有利于快速分析和处理大型音频数据集,从而有效监测目标生物的声音^[71]。声景生态学研究使用了广泛的间隔式采样方法,时间频率从 1/120(min)至 15/20(min)不等^[41, 87],其中,1/10(min)和 1/15(min)是比较常见的间隔时间频率,分别占比 12.3%和 7.4%,梳理后发现超半数(56.8%)研究的监测时长介于间隔时长的 10%—30%。Metcalf 等^[85]发现以更高的时间分辨率进行采样能够更好的评估物种丰富度,例如 1/5(min)和 12/60(min),二者都是在 60min 内采样 12 分钟,但 1/5(min)的时间分辨率更高,能够捕捉到更多的生物多样性信息。但时间分辨率并不是越高越好,许多学者与研究认为最短的间隔采样时长不应小于 1min^[19, 85],因为过短的间隔采样时长可能会降低发声动物的鸣声检测率,从而导致生物多样性评估的误差增加。相较于连续式采样,间隔式采样是能够提高电池寿命、减少数据存储卡更换频率的有效方法^[8, 19, 70]。总的来看,间隔式采样是能够在分析长时间序列过程中有效节省设备存储和维护成本的方法,但间隔式采样会导致声学信息的延迟获取^[8, 22],进而增加监测声景的总体时长。

4 声景研究目标与监测时空尺度选择

声景生态学研究不仅关注于生物声、地球物理声和人工声的时空格局,同样也重视环境中声音的耦合机制原理以及其对人类、野生动物和自然环境的影响^[5, 7]。声景研究目标与其对应所选用的时空尺度密切相关。参照前人的研究^[8, 12],将统计的 86 篇声景生态学文献的研究目标划分为 3 类,分别是研究声景格局及其驱动因素(33 篇,38.4%)、评估生态环境质量(27 篇,31.4%)和评估生物多样性及其声学特征(26 篇,30.2%)。针对 86 篇统计梳理的文献绘制了声景生态学研究目标及其时空尺度选择(图 4),发现不同声景生态学过程的监测时空尺度选择差异较大,研究目标、生态过程与其后续研究所使用的时空尺度密切相关,呈现出较为常见的模式。

空间尺度上,样点布点法适用于本文囊括的所有研究目的;网格布点法适用于研究区域内的声景格局及其驱动因素^[45];样线布点法适用于评估某一梯度的生态环境质量^[27];随机布点法适用于评估宏观地理区域生物多样性和声景格局^[42];在特殊布点法中,同心圆布点法适用于评估声景格局^[28]和生物多样性^[58],十字布点法适用于评估栖息地生态环境质量^[29]。

时间尺度上,间隔式采样适用于研究长时间尺度的声景格局及其驱动因素,例如探究区域的声景模式^[53]以及植被结构对声景的驱动影响^[26, 44, 59, 88];连续式采样适用于评估短时间尺度动物声学特征及生物多样性,

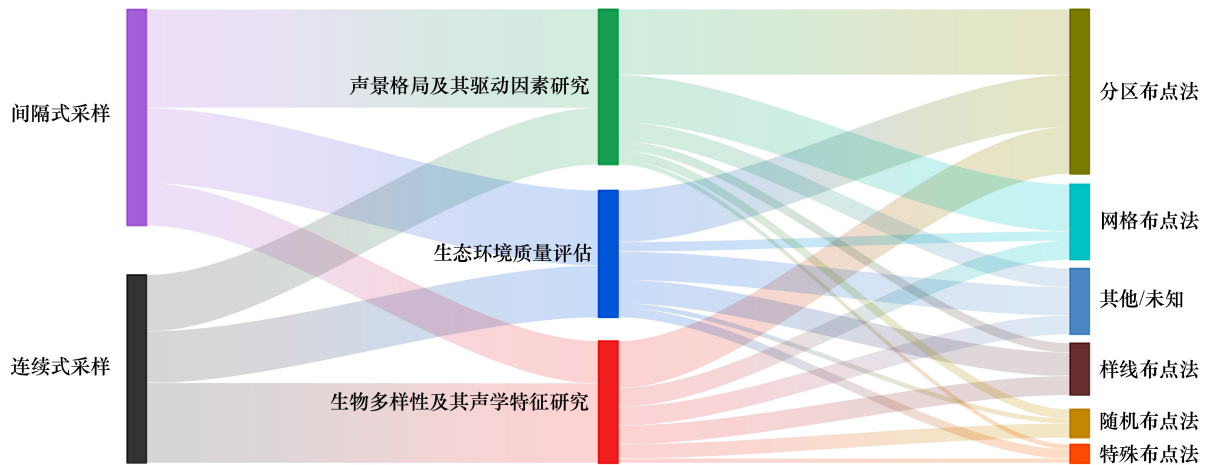


图 4 研究目标与时空尺度选择

Fig.4 Relationship between research objectives and spatiotemporal scale

例如研究声学动物的昼夜节律^[74]以及生物群落间的共存与竞争习性^[31, 83]。

总的来说,声景格局及其驱动因素研究多使用间隔式采样和网格布点法,例如 Rodriguez 等^[18]发现热带森林动物声景的时空异质性,时间上昼夜周期声景分布不均匀,空间上冠层声景比林下声景更加复杂;生态环境质量评估多使用间隔式采样和样线布点法,例如 Deichmann 等^[27]发现热带森林中的鸟类物种丰富度随距天然气开采矿井的距离而增加;生物多样性及其声学特征研究多使用连续式采样和随机布点法,例如 Furnas 等^[15]通过在日出前、时、后的 5 分钟连续录音,发现加州北部常见的 32 种鸟类的种群数量在 20 年内呈逐年下降的趋势。

5 局限与展望

准确捕获生物多样性信息和生态系统变化一直是全球生态监测的核心问题之一^[89]。2024 年 1 月生态环境部印发的《中国生物多样性保护战略与行动计划(2023—2030 年)》,明确指出“需要完善生物多样性和生态质量监测网络”,并且把声景监测列为重要的监测手段之一。国内外已建立了若干区域性的声景监测网络,例如日本建立的 Cyberforest 森林声景监测网络、美国的声景生态学研究项目,中国台湾林业研究所建立的亚洲声景监测网络和中国科学院植物研究所建立的钱江源国家公园声景监测平台。目前国内针对城市绿地声景^[26]、自然保护区声景^[38]和声景的城乡梯度变化^[58]等区域开展了相关研究,随着国内声景监测站点和数据库的增加,各项研究数据之间的可比性会变得越来越重要。监测数据的代表性、一致性、及时性和有效性是亟需关注的关键问题,需要建立科学有效的时空监测标准与方法,为声景时空格局、耦合机制其对人类、野生动物和自然环境影响的研究提供有效信息。综合国内外声景生态学中的监测时空尺度研究进展,本文认为还存在以下一些问题亟待进一步探究:

(1) 声景生态学的空间尺度依赖机理还不明晰。生态系统的格局与功能之间存在着密切的相互作用关系,并且其关系会随着空间尺度的变化而变化,例如某一生态过程在细尺度上显示出斑块效应,而在粗尺度上则显示出边缘效应^[90]。声景生态学具有明显的空间尺度效应,不同的生态等级结构需要考虑不同的尺度,因此需要对尺度效应进行更加全面的刻画,并揭示空间尺度依赖的机理,以准确地反映格局与功能之间的相互作用关系。

(2) 声景监测的时间转换关系与方法研究较为薄弱。声景监测某一尺度上的研究结果和结论难以直接适用于其他尺度,需要将不同尺度上观察到的现象和结论联系起来,以便系统地认识声景生态演化过程^[91]。例如生物多样性的检出率随着监测时间积累趋于稳定^[23],但短期连续、长期间隔式采样对物种检出率效果可

能存在一定差异。此外,尽管已有一些研究致力于阐述声景时空尺度的动态变化^[19, 22, 63],声景生态学尺度转换精度的研究尚未得到重视,例如利用某一尺度上所获得的信息准确上推或下推其他时间尺度的特征仍然是目前所面临的问题,需要更多研究加以阐明尺度转换之间的规律与关系。

(3)声景生态学的监测时空尺度选择标准存在挑战。将声景监测的时空分布模式与生态环境中的动态变化过程联系起来是声景生态学研究的基础^[12, 92],但目前少有文献明确区分其声景的研究目标^[8]。本文通过对声景生态学的监测时空尺度文献的梳理,发现监测时空尺度及其选择之间可能存在着定量联系,与声景生态学研究在具体科学问题相对应的最佳监测时空尺度还尚不明晰。建立监测时空尺度和尺度选择之间的定量关系有利于更好地指导生态声景的监测规划,但在具体实际监测中如何选择最佳尺度依然存在挑战。

尺度是生态学研究的核心问题之一,声景生态学作为一门新兴的生态学分支,其它相关学科的理论与方法尤其是景观生态中“格局-过程-功能”的尺度效应,可以为声景生态学的尺度研究提供借鉴,尤其是探究声景时空变化特征、驱动因素以及生态学过程的尺度效应方面,应该受到足够重视。为了进一步深化声景生态学的发展,今后声景监测的时空尺度研究建议从以下几个方面进行重点突破。

第一,加快构建立体式声景监测空间网络。声景生态学的系统研究依赖于大量的监测数据和有效的监测方法。搭建立体式生态声学监测空间网络将有助于更全面、准确地了解声景生态的空间分布和变化规律,并且为声景监测的空间尺度效应提供更加科学的声源描述。另外,如何划分具有生态学意义的空间尺度对声景生态学至关重要,目前仍缺乏用于描述空间尺度的量化指标,例如监测点位密度。此外,植被结构^[63]和海拔^[52, 93]等环境因子对声景监测的空间尺度具有驱动作用,Chen等^[94]建议以植被覆盖类型作为空间尺度的分类标准,用以探寻声景的“格局-过程-功能”之间的关系。未来需要更多研究致力于揭示水平与垂直空间尺度的声学耦合关系,为建立高效的声学监测空间网络提供决策依据。

第二,深化声景生态的多尺度模拟研究。选择过粗或过细的尺度都会导致幸存者偏差或局部效应,进而影响研究结果的准确性,需要根据研究目标确定涉及的监测时间尺度范围(秒、分、时、天、月、季、年)。未来需要更多聚焦于声景生态多时间尺度转换的阈值研究,以更好地把握尺度的动态变化机制,为声景生态学的研究提供更加准确的科学依据。

第三,强化声景尺度选择的定量评估。自然界的许多现象都具有特定的尺度特征,只有在特定尺度上对其考察和研究,才能揭示其内在规律。评估生物多样性、区域环境差异和声景时空格局需要探究声学指数与声景之间的关系,进而确定监测尺度。未来需要更多的学者致力于时空尺度与监测目标之间的定量评估,明确声景生态学的研究导向,探索具有针对性、原真性的监测和表征自然生态系统声音多样性的常用思路,以提高声景生态学尺度选择的科学性和可应用性。

参考文献(References):

- [1] Morrison C A, Auniş A, Benkő Z, Brotons L, Chodkiewicz T, Chylarecki P, Escandell V, Eskildsen D P, Gamero A, Herrando S, Jiguet F, Kálás J A, Kamp J, Klvaňová A, Kmecl P, Lehtikoinen A, Lindström Å, Moshøj C, Noble D G, Øien I J, Paquet J Y, Reif J, Sattler T, Seaman B S, Teufelbauer N, Trautmann S, van Turnhout C A M, Voříšek P, Butler S J. Bird population declines and species turnover are changing the acoustic properties of spring soundscapes. *Nature Communications*, 2021, 12: 6217.
- [2] Aletta F, Kang J, Axelsson Ö. Soundscape descriptors and a conceptual framework for developing predictive soundscape models. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 149: 65-74.
- [3] Pijanowski B C, Farina A, Gage S H, Dumyahn S L, Krause B L. What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecology*, 2011, 26(9): 1213-1232.
- [4] 赵莹, 申小莉, 李晟, 张雁云, 彭任华, 马克平. 声景生态学研究进展和展望. *生物多样性*, 2020, 28(7): 806-820.
- [5] 肖治术, 崔建国, 王代平, 王志陶, 罗金红, 谢捷. 现代生物声学的学科发展趋势及中国机遇. *生物多样性*, 2023, 31(1): 5-27.
- [6] 王静怡, 李春明, 林婴伦, 李大锋. 声景生态学数据分析与应用. *生态学报*, 2022, 42(21): 8928-8934.
- [7] Ross S R P J, O'Connell D P, Deichmann J L, Desjonquères C, Gasc A, Phillips J N, Sethi S S, Wood C M, Burivalova Z. Passive acoustic

- monitoring provides a fresh perspective on fundamental ecological questions. *Functional Ecology*, 2023, 37(4): 959-975.
- [8] Bradfer-Lawrence T, Desjonqueres C, Eldridge A, Johnston A, Metcalf O. Using acoustic indices in ecology: guidance on study design, analyses and interpretation. *Methods in Ecology and Evolution*, 2023, 14(9): 2192-2204.
- [9] Towsey M, Znidarsic E, Broken-Brow J, Indraswari K, Watson D M, Phillips Y, Truskinger A, Roe P. Long-duration, false-colour spectrograms for detecting species in large audio data-sets. *Journal of Ecoacoustics*, 2018, 2(1): 1.
- [10] Zwerts J A, Yannick Wieggers J N, Sterck E H M, Marijke van Kuijk M. Exploring spatio-temporal variation in soundscape saturation of an African tropical forest landscape. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108712.
- [11] 边琦, 王成, 郝泽周. 生物声音监测研究在生物多样性领域的应用. *应用生态学报*, 2021, 32(3): 1119-1128.
- [12] Buxton R T, McKenna M F, Clapp M, Meyer E, Stabenau E, Angeloni L M, Crooks K, Wittemyer G. Efficacy of extracting indices from large-scale acoustic recordings to monitor biodiversity. *Conservation Biology*, 2018, 32(5): 1174-1184.
- [13] 董仁才, 吕晨璨, 翁辰, 张永霖. 景感生态学原理及应用. *生态学报*, 2022, 42(10): 4236-4244.
- [14] Sugai L S M, Desjonquères C, Silva T S F, Llusia D. A roadmap for survey designs in terrestrial acoustic monitoring. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2020, 6(3): 220-235.
- [15] Furnas B J, Callas R L. Using automated recorders and occupancy models to monitor common forest birds across a large geographic region. *The Journal of Wildlife Management*, 2015, 79(2): 325-337.
- [16] Shamon H, Paraskevopoulou Z, Kitzes J, Card E, Deichmann J L, Boyce A J, McShea W J. Using ecoacoustics metrics to track grassland bird richness across landscape gradients. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106928.
- [17] Dröge S, Martin D A, Andriafanomezantsoa R, Burivalova Z, Fulgence T R, Osen K, Rakotomalala E, Schwab D, Wurz A, Richter T, Kreft H. Listening to a changing landscape: acoustic indices reflect bird species richness and plot-scale vegetation structure across different land-use types in north-eastern Madagascar. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106929.
- [18] Rodriguez A, Gasc A, Pavoine S, Grandcolas P, Gaucher P, Sueur J. Temporal and spatial variability of animal sound within a neotropical forest. *Ecological Informatics*, 2014, 21: 133-143.
- [19] Francomano D, Gottesman B L, Pijanowski B C. Biogeographical and analytical implications of temporal variability in geographically diverse soundscapes. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 105845.
- [20] Gage S H, Wimmer J, Tarrant T, Grace P R. Acoustic patterns at the Samford Ecological Research Facility in South East Queensland, Australia: the Peri-Urban SuperSite of the Terrestrial Ecosystem Research Network. *Ecological Informatics*, 2017, 38: 62-75.
- [21] 马海港, 范鹏来. 被动声学监测技术在陆生哺乳动物研究中的应用、进展和展望. *生物多样性*, 2023, 31(1): 32-42.
- [22] Bradfer-Lawrence T, Gardner N, Bunnefeld L, Bunnefeld N, Willis S, Dent D. Guidelines for the use of acoustic indices in environmental research. *Methods in Ecology and Evolution*, 2019, 10(10): 1796-1807.
- [23] de Camargo U, Roslin T, Ovaskainen O. Spatio-temporal scaling of biodiversity in acoustic tropical bird communities. *Ecography*, 2019, 42(11): 1936-1947.
- [24] Sueur J, Farina A, Gasc A, Pieretti N, Pavoine S. Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation. *Acta Acustica United with Acustica*, 2014, 100(4): 772-781.
- [25] Budka M, Sokołowska E, Muszyńska A, Staniewicz A. Acoustic indices estimate breeding bird species richness with daily and seasonally variable effectiveness in lowland temperate Białowieża forest. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110027.
- [26] Hao Z Z, Wang C, Sun Z K, Konijnendijk C, Zhao D X, Sun B Q, Xu X H, Bian Q, Bai Z T, Wei K Y, Zhao Y L, Pei N C. Soundscape mapping for spatial-temporal estimate on bird activities in urban forests. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 57: 126822.
- [27] Deichmann J L, Hernández-Serna A, Delgado C J A, Campos-Cerqueira M, Aide T M. Soundscape analysis and acoustic monitoring document impacts of natural gas exploration on biodiversity in a tropical forest. *Ecological Indicators*, 2017, 74: 39-48.
- [28] Latifi M, Fakheran S, Moshtaghi M, Ranaie M, Tussi P M. Soundscape analysis using eco-acoustic indices for the birds biodiversity assessment in urban parks (case study: Isfahan City, Iran). *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(6): 629.
- [29] Raynor E J, Whalen C E, Brown M B, Powell L A. Grassland bird community and acoustic complexity appear unaffected by proximity to a wind energy facility in the Nebraska Sandhills. *The Condor*, 2017, 119(3): 484-496.
- [30] Sarker M A R, McKnight D T, Ryder D, Walcott A, Ocock J F, Spencer J A, Preston D, Brodie S, Bower D S. The effect of inundation on frog communities and chorusing behaviour. *Ecological Indicators*, 2022, 145: 109640.
- [31] Bradfer-Lawrence T, Bunnefeld N, Gardner N, Willis S G, Dent D H. Rapid assessment of avian species richness and abundance using acoustic indices. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106400.
- [32] Brownlie K, Monash R, Geeson J, Fort J, Arnould J. Developing a passive acoustic monitoring technique for Australia's most numerous seabird, the Short-tailed Shearwater (*Ardenna tenuirostris*). *Emu*, 2020, 120(2): 123-134.

- [33] Hilje B, Stack S, Sánchez-Azofeifa A. Lianas abundance is positively related with the avian acoustic community in tropical dry forests. *Forests*, 2017, 8(9): 311.
- [34] Sun Y F, Wang S Z, Feng J W, Ge J P, Wang T M. Free-ranging livestock changes the acoustic properties of summer soundscapes in a Northeast Asian temperate forest. *Biological Conservation*, 2023, 283: 110123.
- [35] Rappaport D I, Swain A, Fagan W F, Dubayah R, Morton D C. Animal soundscapes reveal key markers of Amazon forest degradation from fire and logging. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(18): e2102878119.
- [36] Burivalova Z, Purnomo, Wahyudi B, Boucher T M, Ellis P, Truskinger A, Towsey M, Roe P, Marthinus D, Griscom B, Game E T. Using soundscapes to investigate homogenization of tropical forest diversity in selectively logged forests. *Journal of Applied Ecology*, 2019, 56(11): 2493-2504.
- [37] Tucker D, Gage S H, Williamson I, Fuller S. Linking ecological condition and the soundscape in fragmented Australian forests. *Landscape Ecology*, 2014, 29(4): 745-758.
- [38] Hou Y N, Yu X W, Yang J Y, Ouyang X, Fan D P. Acoustic sensor-based soundscape analysis and acoustic assessment of bird species richness in Shennongjia National Park, China. *Sensors*, 2022, 22(11): 4117.
- [39] Hayashi K, Erwinsyah, Lelyana V D, Yamamura K. Acoustic dissimilarities between an oil palm plantation and surrounding forests: analysis of index time series for beta-diversity in South Sumatra, Indonesia. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106086.
- [40] Righini R, Pavan G. A soundscape assessment of the Sasso Fratino Integral Nature Reserve in the Central Apennines, Italy. *Biodiversity*, 2020, 21(1): 4-14.
- [41] Machado R B, Aguiar L, Jones G. Do acoustic indices reflect the characteristics of bird communities in the savannas of Central Brazil? *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162: 36-43.
- [42] Dein J, Rüdiger J. Landscape influence on biophony in an urban environment in the European Alps. *Landscape Ecology*, 2020, 35(8): 1875-1889.
- [43] Myers D, Berg H, Maneas G. Comparing the soundscapes of organic and conventional olive groves: a potential method for bird diversity monitoring. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 642-649.
- [44] Ng M L, Butler N, Woods N. Soundscapes as a surrogate measure of vegetation condition for biodiversity values: a pilot study. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 1070-1080.
- [45] Bian Q, Wang C, Sun Z K, Yin L Q, Jiang S S, Cheng H, Zhao Y L. Research on spatiotemporal variation characteristics of soundscapes in a newly established suburban forest park. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 78: 127766.
- [46] Zhao Y J, Xu S W, Huang Z L, Fang W Q, Huang S J, Huang P L, Zheng D L, Dong J Y, Chen Z R, Yan C, Zhong Y K, Fu W C. Temporal and spatial characteristics of soundscape ecology in urban forest areas and its landscape spatial influencing factors. *Forests*, 2022, 13(11): 1751.
- [47] Campos I B, Fewster R, Landers T, Truskinger A, Towsey M, Roe P, Lee W, Gaskett A. Acoustic region workflow for efficient comparison of soundscapes under different invasive mammals' management regimes. *Ecological Informatics*, 2022, 68: 101554.
- [48] Benocci R, Potenza A, Bisceglie A, Roman H E, Zambon G. Mapping of the acoustic environment at an urban park in the city area of Milan, Italy, using very low-cost sensors. *Sensors*, 2022, 22(9): 3528.
- [49] Eldridge A, Guyot P, Moscoso P, Johnston A, Eyre-Walker Y, Peck M. Sounding out ecoacoustic metrics: Avian species richness is predicted by acoustic indices in temperate but not tropical habitats. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 939-952.
- [50] Zhang C S, Luo L, Xu W L, Ledwith V. Use of local Moran's I and GIS to identify pollution hotspots of Pb in urban soils of Galway, Ireland. *The Science of the Total Environment*, 2008, 398(1/2/3): 212-221.
- [51] McGrann M C, Bradley W, Matthew K, Kasia K, Erik M, Furnas B J. Using an acoustic complexity index to help monitor climate change effects on avian diversity. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109271.
- [52] Boullhesen M, Vaira M, Barquez R M, Akmentins M S. Soundscapes of the Yungas Andean forest: identifying the acoustic footprint of an anuran assemblage. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2023, 29: 100903.
- [53] Verhelst T E, Vangansbeke P, De Frenne P, D'Hont B, Ponette Q, Willems L, Verbeeck H, Calders K. Forest edge structure from terrestrial laser scanning to explain bird biophony characteristics from acoustic indices. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2023, 9(5): 615-627.
- [54] Bellisario K, Jessup L, VanSchaik J, Dunning J B, Graupe C, Savage D, Pijanowski B C. Time-series forecasting offers novel quantitative measure to assess loud sound event in an urban park with restored prairie. *Ecological Informatics*, 2023, 75: 102100.
- [55] Jeliakov A, Bas Y, Kerbirou C, Julien J F, Penone C, Le Viol I. Large-scale semi-automated acoustic monitoring allows to detect temporal decline of bush-crickets. *Global Ecology and Conservation*, 2016, 6: 208-218.
- [56] Campos I B, Fewster R, Truskinger A, Towsey M, Roe P, Vasques Filho D, Lee W, Gaskett A. Assessing the potential of acoustic indices for protected area monitoring in the Serra do Cipó National Park, Brazil. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106953.

- [57] Lawson J, Whitworth A, Banks-Leite C. Soundscapes show disruption across the diel cycle in human modified tropical landscapes. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109413.
- [58] Hao Z Z, Zhan H S, Zhang C Y, Pei N C, Sun B, He J H, Wu R C, Xu X H, Wang C. Assessing the effect of human activities on biophony in urban forests using an automated acoustic scene classification model. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109437.
- [59] Do Nascimento L A, Campos-Cerqueira M, Beard K H. Acoustic metrics predict habitat type and vegetation structure in the Amazon. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106679.
- [60] van der Mescht A, Pryke J S, Gaigher R, Samways M J. Sympatric bush cricket species co-exist across a complex landscape by optimising both acoustic and ecological space. *Bioacoustics*, 2022, 31(3): 241-260.
- [61] Sánchez-Giraldo C, Bedoya C L, Morán-Vásquez R A, Isaza C V, Daza J M. Ecoacoustics in the rain: understanding acoustic indices under the most common geophonic source in tropical rainforests. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2020, 6(3): 248-261.
- [62] Metcalf O C, Barlow J, Devenish C, Marsden S, Berenguer E, Lees A C. Acoustic indices perform better when applied at ecologically meaningful time and frequency scales. *Methods in Ecology and Evolution*, 2021, 12(3): 421-431.
- [63] Mitchell S L, Bicknell J E, Edwards D P, Deere N J, Bernard H, Davies Z G, Struebig M J. Spatial replication and habitat context matters for assessments of tropical biodiversity using acoustic indices. *Ecological Indicators*, 2020, 119: 106717.
- [64] Budka M, Jobda M, Szałański P, Piórkowski H. Acoustic approach as an alternative to human-based survey in bird biodiversity monitoring in agricultural meadows. *PLoS One*, 2022, 17(4): e0266557.
- [65] Campos-Cerqueira M, Mena J L, Tejada-Gómez V, Aguilar-Amuchastegui N, Gutierrez N, Aide T M. How does FSC forest certification affect the acoustically active fauna in Madre de Dios, Peru? *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2020, 6(3): 274-285.
- [66] Yip D A, Leston L, Bayne E M, Sólymos P, Grover A. Experimentally derived detection distances from audio recordings and human observers enable integrated analysis of point count data. *Avian Conservation and Ecology*, 2017, 12(1): art11.
- [67] Sedláček O, Vokurková J, Ferenc M, Djomo E N, Albrecht T, Hořák D. A comparison of point counts with a new acoustic sampling method: a case study of a bird community from the montane forests of Mount Cameroon. *Ostrich*, 2015, 86(3): 213-220.
- [68] Kułaga K, Budka M. Bird species detection by an observer and an autonomous sound recorder in two different environments: forest and farmland. *PLoS One*, 2019, 14(2): e0211970.
- [69] 岑渝华, 王鹏, 陈庆春, 张承云, 余上, 胡珂, 刘阳, 肖荣波. 城市绿地动物声景的时空特征及其驱动因素. *生物多样性*, 2023, 31(1): 39-60.
- [70] Cifuentes E, Vélez Gómez J, Butler S J. Relationship between acoustic indices, length of recordings and processing time: a methodological test. *Biota Colombiana*, 2021, 22(1): 26-35.
- [71] Scarpelli M D A, Liquet B, Tucker D, Fuller S, Roe P. Multi-index ecoacoustics analysis for terrestrial soundscapes: a new semi-automated approach using time-series motif discovery and random forest classification. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2021, 9: 738537.
- [72] Sethi S S, Bick A, Ewers R M, Klinck H, Ramesh V, Tuanmu M N, Coomes D A. Limits to the accurate and generalizable use of soundscapes to monitor biodiversity. *Nature Ecology & Evolution*, 2023, 7: 1373-1378.
- [73] Kułaga K, Budka M. Nocturnal singing by diurnal birds in a temperate region of central Europe. *Journal of Ornithology*, 2020, 161(4): 1143-1152.
- [74] Budka M, Skierczyńska A, Antczak M, Osiejuk T S. Nocturnal singing by diurnal birds in Afrotropical Highlands. *Journal of Ornithology*, 2021, 162(2): 435-445.
- [75] Alquezar R D, Macedo R H, Sierro J, Gil D. Lack of consistent responses to aircraft noise in dawn song timing of bird populations near tropical airports. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2020, 74(7): 88.
- [76] Quiroz-Oliva M, Sosa-López J R. Vocal behaviour of Sclater's Wrens, a duetting Neotropical songbird: repertoires, dawn chorus variation, and song sharing. *Journal of Ornithology*, 2022, 163(1): 121-136.
- [77] Burivalova Z, Maeda T M, Purnomo, Rayadin Y, Boucher T, Choksi P, Roe P, Truskinger A, Game E T. Loss of temporal structure of tropical soundscapes with intensifying land use in Borneo. *The Science of the Total Environment*, 2022, 852: 158268.
- [78] Sakhri A, Maimour M, Rondeau E, Doghmane N, Harize S. An energy-efficient WMSN-based system for endangered birds monitoring. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, 55(8): 77-82.
- [79] Müller S, Mitesser O, Oschwald L, Scherer-Lorenzen M, Potvin C. Temporal soundscape patterns in a Panamanian tree diversity experiment: polycultures show an increase in high frequency cover. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 808589.
- [80] Oliveira E G, Ribeiro M C, Roe P, Sousa-Lima R S. The Caatinga Orchestra: acoustic indices track temporal changes in a seasonally dry tropical forest. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107897.
- [81] Turner A, Fischer M, Tzanopoulos J. Sound-mapping a coniferous forest-Perspectives for biodiversity monitoring and noise mitigation. *PLoS One*,

- 2018, 13(1): e0189843.
- [82] Towsey M, Wimmer J, Williamson I, Roe P. The use of acoustic indices to determine avian species richness in audio-recordings of the environment. *Ecological Informatics*, 2014, 21: 110-119.
- [83] Hart P J, Ibanez T, Paxton K, Tredinnick G, Sebastián-González E, Tanimoto-Johnson A. Timing is everything: acoustic niche partitioning in two tropical wet forest bird communities. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2021, 9: 753363.
- [84] Amichai E, Kronfeld-Schor N. Artificial light at night promotes activity throughout the night in nesting common swifts (*Apus apus*). *Scientific Reports*, 2019, 9: 11052.
- [85] Metcalf O C, Barlow J, Marsden S, Gomes de Moura N, Berenguer E, Ferreira J, Lees A C. Optimizing tropical forest bird surveys using passive acoustic monitoring and high temporal resolution sampling. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2022, 8(1): 45-56.
- [86] Heath B E, Sethi S S, Ewers R M, Picinali L. How index selection, compression, and recording schedule impact the description of ecological soundscapes. *Ecology and Evolution*, 2021, 11(19): 13206-13217.
- [87] Ghadiri Khanaposhtani M, Gasc A, Francomano D, Villanueva-Rivera L J, Jung J, Mossman M J, Pijanowski B C. Effects of highways on bird distribution and soundscape diversity around Aldo Leopold's shack in Baraboo, Wisconsin, USA. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 192: 103666.
- [88] He X L, Deng Y, Dong A R, Lin L X. The relationship between acoustic indices, vegetation, and topographic characteristics is spatially dependent in a tropical forest in southwestern China. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109229.
- [89] Schmeller D, Böhm M, Arvanitidis C, Barber-Meyer S, Brummitt N, Chandler M, Chatzinikolaou E, Costello M, Ding H, Garcia Moreno J, Gill M, Haase P, Jones M, Julliard R, Magnusson W, Martin C, McGeoch M, Mihoub J B, Pettorelli N, Belnap J. Building capacity in biodiversity monitoring at the global scale. *Biodiversity and Conservation*, 2017, 26(12): 2765-2790.
- [90] 危小建, 辛思怡, 张颖艺, 龙英豪, 张茜. 不同格网尺度下生态系统服务价值空间分异及其影响因素差异——以大南昌都市圈为例. *生态学报*, 2023, 43(18): 7585-7597.
- [91] 孙宝娣, 崔丽娟, 李伟, 康晓明, 张曼胤. 湿地生态系统服务价值评估的空间尺度转换研究进展. *生态学报*, 2018, 38(8): 2607-2615.
- [92] Sugai L S M, Silva T S F, Ribeiro J W, Llusia D. Terrestrial passive acoustic monitoring: review and perspectives. *BioScience*, 2019, 69(1): 15-25.
- [93] Burivalova Z, Towsey M, Boucher T, Truskinger A, Apelis C, Roe P, Game E T. Using soundscapes to detect variable degrees of human influence on tropical forests in Papua New Guinea. *Conservation Biology*, 2018, 32(1): 205-215.
- [94] Chen Z, Zhu T Y, Liu J, Hong X C. Before becoming a world heritage: spatiotemporal dynamics and spatial dependency of the soundscapes in kulangsu scenic area, China. *Forests*, 2022, 13(9): 1526.