

从城市留野地到自然保护地：鸟类声景的理论与应用

From Urban Green Remnants to Nature Reserves: The Theory and Applications of Avian Soundscape

陈宇昊¹ 陈子豪¹ 杨兰² 魏广鹏³ 张学聪³ 周婷¹ 刘阳^{3*}
CHEN Yuhao¹ CHEN Zihao¹ YANG Lan² WEI Guangpeng³ ZHANG Xuecong³ ZHOU Ting¹ LIU Yang^{3*}

(1.中山大学生命科学学院, 广州 510275; 2.黄龙国家级风景名胜区管理局, 阿坝藏族羌族自治州 623300; 3.中山大学生态学院, 深圳 518107)

(1. School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong, China, 510275; 2. Huanglong National Scenic Area Authority, Ngawa Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Sichuan, China, 623300; 3. School of Ecology, Sun Yat-sen University, Shenzhen, Guangdong, China, 518107)

文章编号: 1000-0283(2026)03-0064-11

DOI: 10.12193/j.laing.20251129001

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2025-11-29

修回日期: 2026-01-26

摘要

鸟类声景是指特定时空尺度下,以鸟类鸣声作为主要生物声成分,并与地理声和人类声相互作用的声景类型,是能够反映生态系统完整性、群落动态及生物多样性的关键指标。鸟类声景的研究立足于声学生态位假说与声学适应性假说,将景观生态学、动物行为学与城市规划等多方面紧密联系起来,近年来已成为揭示鸟类对自然环境及人为干扰的适应机制的热点领域。本研究采用系统综述方法,对2005—2025年间国内外相关文献进行梳理,分析城市留野地与自然保护地中鸟类声景的理论进展与应用现状。文献计量与关键词共现分析显示:(1)该领域发文量呈显著上升趋势,国际研究展现出清晰的演进脉络,从早期侧重评估“人为噪声负面干扰”,逐步转向利用声学指数与机器学习技术进行“生物多样性量化与监测”;而国内研究起步较晚(最早于2011年),且更侧重于探索声景感知体验与其对人类健康的“恢复性效应”;(2)在研究前沿方面,被动声学监测与深度学习技术的融合已成为主流,该方法能够通过自动化流程处理海量声学数据,从而极大地提升鸟类物种识别与生态行为分析的效率;(3)在应用实践层面,鸟类声景已成为风景园林设计的重要资源。以康奈尔鸟类实验室与黄龙国家级风景名胜区内案例分析了将科研数据转化为沉浸式景观体验的可行性,提出鸟类声景研究在城市留野地和自然保护地中呈现出不同的理论关注重点和应用导向。未来研究需进一步解析不同环境梯度下鸟类声景的时空异质性,探索建立基于录音数据的鸟类声景预测模型,同时在景观设计实践中致力于解决人类游憩恢复需求与野生动物声学干扰之间的生态悖论,以实现生态保护与人类福祉的双赢。

关键词

鸟类; 声景; 被动声学监测; 深度学习; 恢复效应

Abstract

An avian soundscape is the soundscape in which bird vocalizations constitute the dominant biophonic component, interacting with geophony and anthrophony within a specific spatiotemporal context. It serves as a vital indicator for assessing ecosystem integrity, community dynamics, and biodiversity. Grounded in the Acoustic Niche Hypothesis and the Acoustic Adaptation Hypothesis, research in this field bridges landscape ecology, ethology, and urban planning, which has recently emerged as a focal area for elucidating the mechanisms by which birds adapt to both natural environments and anthropogenic disturbances. Employing a systematic review, this article analyzes literature published between 2005 and 2025 to examine theoretical advancements and practical applications of avian soundscapes in urban green remnants and nature reserves. Bibliometric and keyword co-occurrence analyses reveal: (1) A significant upward trend in publication volume. International research has followed a clear trajectory, shifting from an early focus on assessing the negative impacts of anthropogenic noise to the use of acoustic indices and machine learning for biodiversity quantification and monitoring. Conversely, domestic research in China, though emerging

基金项目:

广东省林业局生态林业专项资金“南岭国家公园生物多样性综合科学考察”(编号: 2025267); 中山大学中央高校基本科研业务费重点项目“声纹监测技术在生物多样性监测和有害生物防治中的应用”(编号: 09020-31670001); 黄龙自然保护区综合科学考察报告编制项目“黄龙保护地鸟类多样性本底调查”(编号: 77010-71020025)

陈宇昊

2003年生/男/江苏苏州人/在读博士研究生/
研究方向为城市生态学、鸟类生态学

陈子豪

1997年生/男/广东广州人/在读博士研究生/
研究方向为城市生态学

刘阳

1980年生/男/河北石家庄人/博士/教授/研
究方向为动物生态学

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: liuy353@mail.sysu.edu.cn

later (commencing in 2011), places greater emphasis on soundscapes and their restorative effects on human health. (2) Regarding research frontiers, the integration of Passive Acoustic Monitoring (PAM) with deep learning has become the mainstream approach. This synergy enables the automated processing of large-scale acoustic datasets, thereby significantly enhancing the efficiency of species identification and ecological and behavioral analyses. (3) Regarding practical application, the avian soundscape has emerged as a vital resource for landscape architecture. We analyze the feasibility of transforming scientific data into immersive landscape experiences through case studies of the Cornell Lab of Ornithology and the Huanglong National Scenic Area. We suggest that avian soundscape research in urban green remnants and nature reserves is characterized by distinct theoretical emphases and applied research orientations. Future research should further disentangle the spatiotemporal heterogeneity of avian soundscapes across environmental gradients and develop prediction models based on acoustic monitoring data. Furthermore, landscape design practices must address the ecological paradox between human recreational needs and acoustic disturbance to wildlife, aiming to balance ecological conservation and human well-being.

Keywords

bird; soundscape; Passive Acoustic Monitoring; deep learning; restoration

声景 (soundscape) 指的是某一地点在特定时间内可感知到的全部声音, 这些声音通常可归为三类来源: 生物声 (biophony), 如鸟类、两栖类、昆虫发出的鸣叫; 地理声 (geophony), 如风声、雨声等自然物理声; 人类声 (anthrophony), 如交通、工业和日常活动产生的噪声^[1]。以鸟类鸣声为主要生物声成分, 并与地理声和人类声相互作用的声景类型, 即鸟类声景 (avian soundscape), 在城市留野地与各类自然保护区中具有特殊的生态指示意义。对于声景格局的形成与分析, 目前主要有两个主流假说: 声学生态位假说 (Acoustic Niche Hypothesis, ANH) 与声学适应性假说 (Acoustic Adaptation Hypothesis, AAH), 它们指出鸟类声景不仅是声音的简单叠加, 也是物种间通过竞争信号传递空间的结果, 更是物种对自然环境特征长期适应的体现”, 更为通顺^[2]。其中, 声学生态位假说强调不同物种在频率、时间及声学结构维度上的分化, 从而维持共存 (图 1-a, 图 1-b); 而声学适应性假说则关注环境条件 (如城市化干扰) 如何塑造群落层面的物种格局及物种鸣声的可塑性响应 (图 1-c, 图 1-d)^[3-4]。因此, 鸟类声景既体现物种的生态行为, 也反映群落结

构与栖息地特征, 更是人类感知自然环境的重要途径之一^[5-7]。

作为跨越景观生态学、动物行为学与城市生态规划的研究议题, 声景研究正逐步从概念性讨论走向方法与应用的结合^[5,8]。城市留野地作为城市生态网络中残存的自然斑块, 常面临噪声、光污染和空间破碎化等环境压力, 其声景往往表现为人类声源与残存生物声的叠加^[9]。在此类环境中, 鸟类可能通过调整鸣唱时间、频率或鸣声结构来应对声学干扰, 因此研究通常关注噪声暴露、栖息地连通性、绿地配置与鸟类鸣声行为之间的关系^[10-11]。相对而言, 在自然保护区的声景中, 生物声通常占主导地位, 其中鸟鸣在日夜与季节尺度上呈现较明确的节律性, 进而能够反映群落动态、繁殖活动强度等生态学过程^[6]。此外, 在远离人类干扰的环境中, 声景结构往往更加稳定, 低背景噪声使得鸟类的声学信号能够完整表达^[12]。因此, 自然保护区的声景不仅记录了物种多样性和行为生态的细微变化, 也为评估生态系统完整性、监测环境敏感物种和识别生境变化提供了高分辨率的信息来源。通过长期的声学监测, 可以揭示群落随气候变化、干扰事件或

林分演替而发生的鸣声特征转变, 从而使声景成为保护区管理与生态评估中潜在的重要补充指标。与此同时, 越来越多的研究指出, 自然声景, 特别是以鸟鸣为主的生物声, 具有明显的恢复性效应, 能够促使人们心理放松、注意力恢复与情绪改善^[13]。这一效应进一步推进了声景研究对与风景园林密切相关的人类健康福祉功能的探索”, 更为通顺。

总体而言, 鸟类声景研究为连接城市生态系统与自然保护地体系提供了一个“听觉”视角: 它既能丰富人类对声景结构与鸟类生态过程的理解, 也为城市规划、保护管理与生态修复提供可操作的监测手段与设计思路。针对这个新兴但是发展迅速的领域, 本文将基于已有文献, 系统梳理该领域的数据来源、方法学进展与应用实践, 并提出当前研究的局限性与未来方向。

1 研究现状

1.1 数据来源与研究方法

为全面梳理国内外关于城市留野地与自然保护区中鸟类声景的理论研究进展及应用现状, 本文采用系统文献综述的方法, 选取科睿唯安 (Web of Science, WoS) 核心合集数

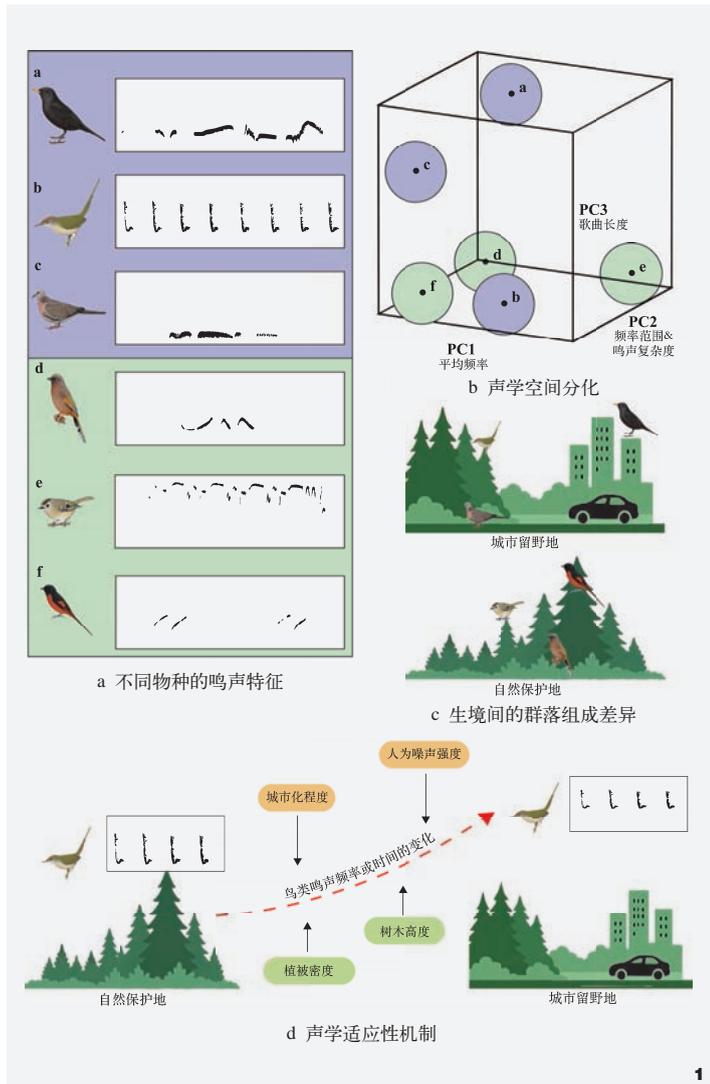


图1 城市留野地和自然保护区鸟类群落声格局形成的机制框架
 Fig. 1 Mechanistic framework of soundscape pattern formation in avian communities across urban green remnants and nature reserves

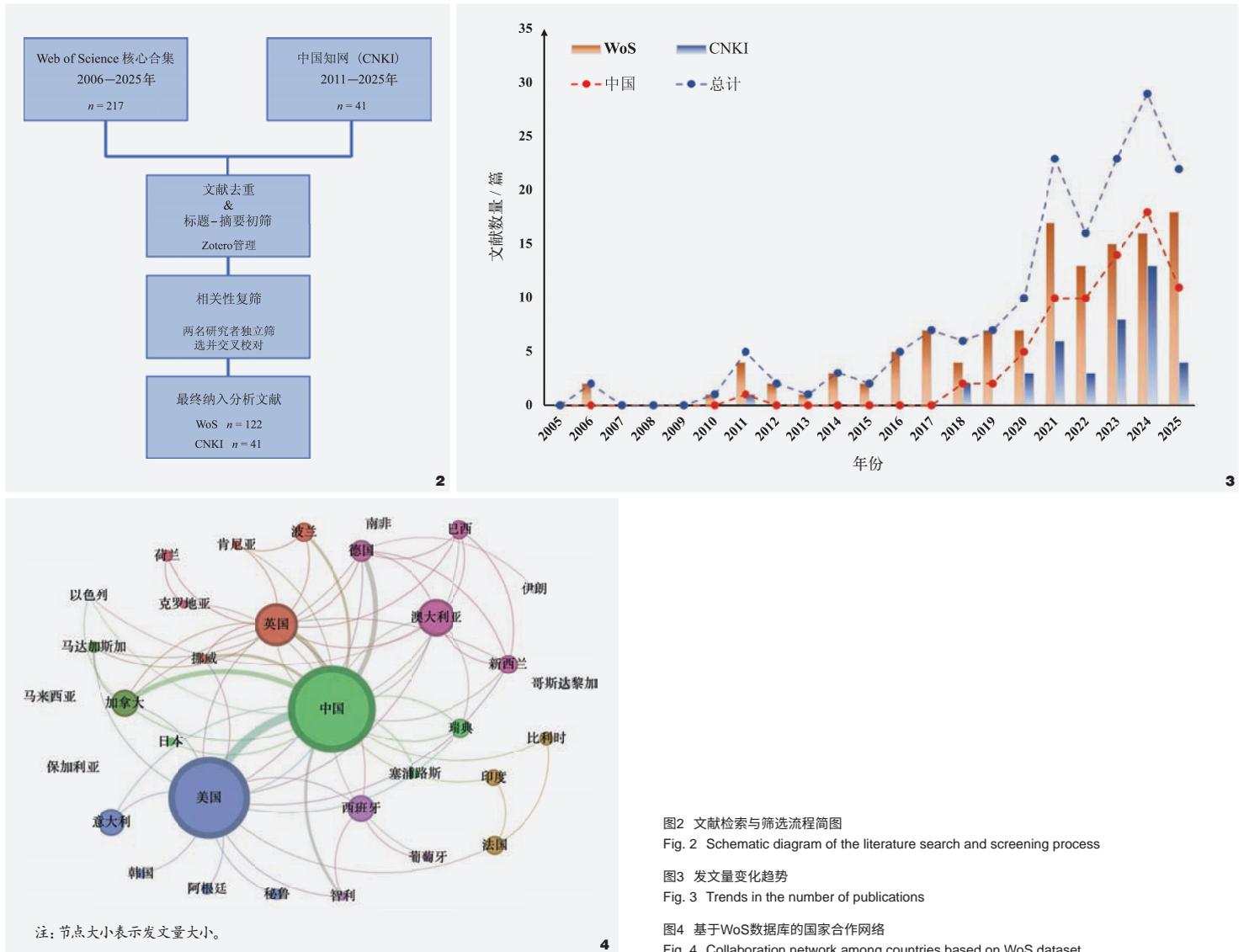
数据库与中国知网 (China National Knowledge Infrastructure, CNKI) 分别代表国际和国内研究的主要文献来源, 选择2005—2025年发表的所有文献。检索词采用“研究对象-研究范畴-空间类型”的组合逻辑进行构建: 在研究对象层面, 使用“bird、avian”及其中文对应词“鸟类”, 以确保检索结果明确聚焦于以鸟类为主体的相关研究, 避免纳入泛生物声或纯人类声景研究; 在研究范畴层面, 除直接使用“soundscape”“声景”外, 同时纳入“bioacoustic、ecoacoustics、acoustic diversity”及其中文对应概念, 以覆盖鸟类声景研究中常见但未明确使用“声景”这一术语的相关研究, 减少检索遗漏; 在空间类型层面, 选取“park、greenspace、

reserve、refuge”及其中文对应词, 作为对“城市留野地”与“自然保护区”的操作性表述, 以覆盖城市与非城市背景下鸟类声景研究的主要空间类型。

截至研究完成检索的日期, 综述在WoS中使用检索式 (bird OR avian AND (soundscape OR bioacoustics OR ecoacoustics OR acoustic diversity) AND (park OR greenspace OR reserve OR refuge) 共获得217篇文献, 在CNKI中使用检索式 (鸟类) AND (声景 OR 声景观 OR 生物声学 OR 生态声学 OR 声学多样性) AND (公园 OR 绿地 OR 绿地空间 OR 保护地 OR 自然保护区 OR 自然保护区 OR 野生动物保护区) 共获得41篇文献 (涵盖期刊论文、学位论文及国内会议文献)。初筛阶段通过阅读题名与摘要, 剔除以下类型文献: (1) 研究对象并非以鸟类为主, 而是以其他动物为主或仅量化整体声景的研究; (2) 仅关注人类声景感知、噪声暴露与影响, 且未涉及鸟类声学特征或生态意义的研究; (3) 以纯技术算法或信号处理为核心, 未与具体生态或应用场景相结合的研究。复筛阶段由两名研究者独立进行全文判断, 并对筛选结果进行交叉校对后, 最终纳入用于分析的文献包括WoS核心合集数据库文献122篇, CNKI文献41篇 (图2)。后续使用VOSviewer和Gephi对纳入的文献进行国家与地区合作网络构建、关键词共现网络构建与关键词聚类分析, 并进行可视化呈现; 同时使用CiteSpace进行关键词实现分析及可视化, 时间切片设置为一年, g-index的scale factor (k) 设定为默认的25^[14]。鉴于中英文数据库在文献结构、关键词标注及引文格式等方面存在差异, 本文分别对WoS与CNKI文献构建知识图谱, 用于对比国际与国内的研究主体结构与演化特征, 而不直接合并进行分析, 以避免由数据库差异引入的系统性偏差。

1.2 研究发展趋势与国家与地区分析

从研究发展趋势来看, 2006—2015年, 国内外开始关注城市留野地与自然保护区中鸟类声景相关的学术研究”, 但是研究数量较为有限, 总体呈现低位波动状态, 仅偶有零星文献发表, 说明该领域在这一阶段尚处于概念探索与理论引介阶段; 自2016年起, 文献数量开始出现明显增长, 尤其是在WoS数据中增长更为突出, 表明国际上关于这些区域中的鸟类声景、生物声学逐渐受到重视; 进入2020年以后, WoS与CNKI的文献数量呈现显著上升的趋势 (图3)。通过对WoS数据库的文献计量分析发现, 中国 (含港澳台) 学者在该领域的研究产出占据主导地位, 发文量约占全球总量的27%, 且与其他主流研究国家形成了较为紧密的合作网络。美国紧随其后, 贡



献了23.8%的研究成果，其次是英国、澳大利亚和加拿大，则分别贡献了11.5%、9.8%、6.6%的产出(图4)。然而，尽管中国研究产出量大，但是其文献的平均被引水平(以引用量为计)显著低于美国，这提示中美两国在研究影响力与学术话语权上存在明显的差异。这种研究格局的形成，可能源于美国在生物声学领域具有较早的理论与方法积累，对声景生态学等概念的系统化推广发挥了重要作

用^[515]。美国研究者不仅在理论构建上处于领先行列，而且率先将自动录音、长期监测与统计与计算方法结合，用以研究鸟类鸣唱、噪声干扰及景观声学格局的影响^[16-17]。近10年来计算生物声学深度学习技术迅速发展，这使得海量录音数据的自动化处理和大幅度比较成为可能，从而提升了基于声学的多样性研究效率与影响力，而美国在长期生态监测、开源数据集与跨学科合作网络方面的优

势加速了其研究成果被引用与扩散^[18-19]。

另一方面，中国近年来在城市生态治理、自然保护地管理与绿地规划等方面持续加大投入，同时，声学监测设备成本的下降与研究团队的快速扩充也共同推动了相关研究成果的显著增长^[20]。在国家层面的合作结构上，本文构建的国家共现网络呈现出若干明显特征：(1)中国目前处于全球合作网络的核心位置，与欧美的主要研究国家保持着较

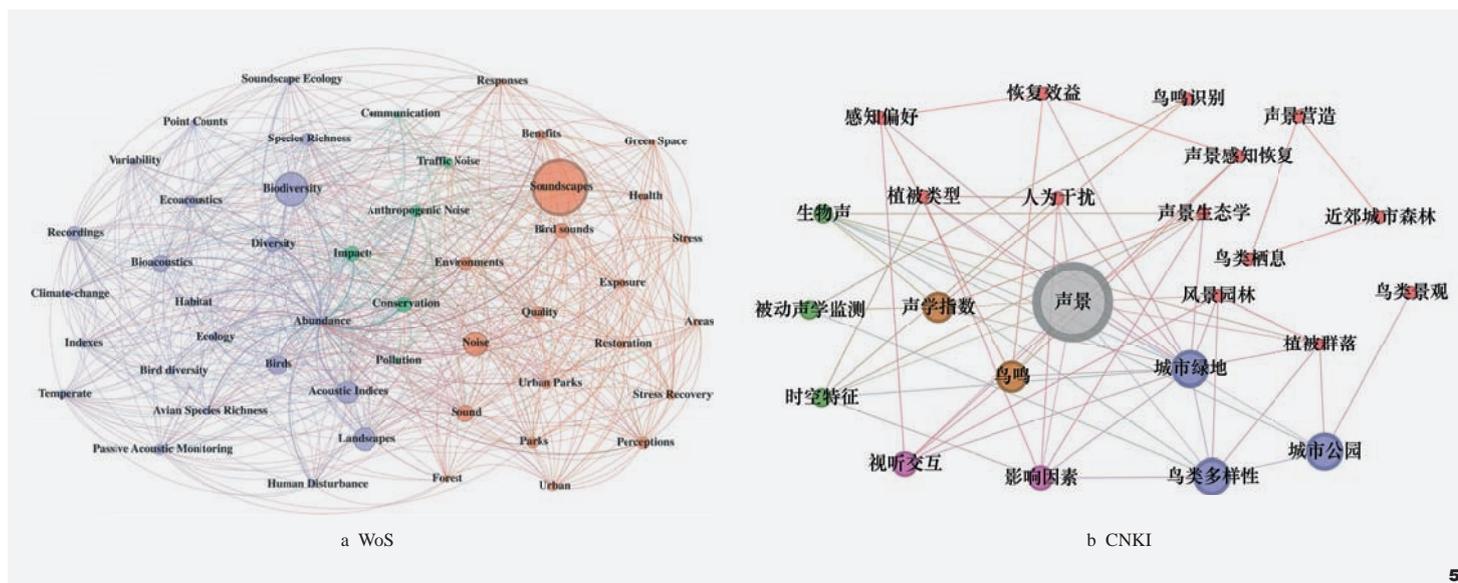


图5 关键词共现网络与聚类分析
Fig. 5 Keyword co-occurrence network and clustering analysis

为紧密的合作联系；(2) 该领域研究的高产出国家仍以欧美国家为主导，反映了其长期的研究积累与成熟的学术网络；(3) 马来西亚、印度、伊朗等人口较多的发展中地区近年来逐渐进入该研究领域，但在合作网络中的位置相对边缘，与主流科研国家之间的连接程度仍较弱。

1.3 关键词共现网络与聚类分析

研究通过关键词共现网络分析，揭示了城市留野地与自然保护区中鸟类声景领域的热点分布与演变趋势。在VOSviewer软件中，以“关键词”为节点类型，采用计量统计方法分别考察了WoS和CNKI数据库中关键词的共现频次及关联强度。结果表明，除文献检索关键词外，在国际研究领域（WoS数据），高频关键词主要包括“biodiversity”（总连接强度 $TLS = 231$ ），“acoustic indices”（ $TLS = 153$ ），“landscapes”（ $TLS = 144$ ），“noise”（ $TLS = 115$ ），“birds”（ $TLS = 106$ ）；而在国内研究领域（CNKI

数据），核心关键词则聚焦于“城市绿地”（ $TLS = 21$ ），“鸟类多样性”（ $TLS = 12$ ），“鸟鸣”（ $TLS = 11$ ），“时空特征”（ $TLS = 10$ ）。总体网络（图5）呈现显著的多学科交叉特征，体现了生态学、声学、景观生态学与环境生物学等领域的深度融合。关键词聚类结果进一步表明研究主题的结构性差异。就国际研究领域而言，网络由48个关键节点与668条连接构成，可分为三个主要簇：第1个类别（橙色簇）侧重城市公园声景的恢复性效应，关注人类健康与体验改善；第2个类别（绿色簇）探讨噪声与声景的相互关系，以及城市化对鸟类声景的影响；第3个类别（紫色簇）聚焦声学指标与被动声学监测技术的发展，利用声学量化指标评估鸟类多样性与群落结构。在国内研究（CNKI）数据中，网络由24个关键节点与64条链接组成，主要可划分为5个类别：第1个类别（红色簇）关注城市绿地中的声景感知、恢复性效应及声景营建；第2个类别（紫色簇）强调城市公园中的鸟类多

样性研究；第3个类别（绿色簇）关注通过被动声学监测探究鸟类声景的时空特征；第4个类别（橙色簇）关注量化鸟类声景整体情况的声学指数（规模较小）；第5个类别（品红色簇）则涉及公园鸟类声景中的视听交互（规模较小）。

总体来看，发表于国内数据库的研究在主题上已基本对接国际前沿，但在成果数量与学术影响力方面仍显不足，且样本中学位论文占比较高。其原因之一在于，研究者往往倾向于将核心成果发表于国际影响力更高的期刊，从而使国内数据库未能充分呈现中国在该领域的真实研究产出。以上结果表明该领域的理论与方法论在国际合作框架下发展迅速，但面向本土情景的应用探索与理论深化仍需进一步加强。总体而言，关键词聚类格局显示，公园和保护地内的鸟类声景研究正从早期以理论构建为主的阶段，逐渐迈向以人类福祉与恢复生态学为导向的应用型研究。

1.4 关键词突现分析

基于 CiteSpace 软件进行的关键词突现识别与分析，能够精准捕捉特定时期内学者关注的激增点，从而揭示公园与自然保护地鸟类声景研究的动态演变路径与前沿趋势。基于 WoS 数据库的分析结果（图 6-a）表明，国际研究呈现出从关注“负面干扰”向“感知体验”再到“生态监测”演进的清晰脉络。2005—2025 年，共识别出 22 个显著突现的关键词。具体而言，第一阶段（2006—2018 年）研究重心一方面聚焦于人为噪声对自然声环境的侵扰，其中，“噪声 (noise)”（强度 1.06）、“人为噪声 (anthropogenic noise)”（强度 1.12）、“噪声污染 (noise pollution)”（强度 1.25）相继突现，反映了学界早期对于自然声景负面影响及压力来源的高度关注；另一方面则关注鸟类声景在多样性监测方面的应用，如“生物多样性监测 (biodiversity monitoring)”（强度 0.71）、“录音 (recordings)”（强度 2.67）、“多样性 (diversity)”（强度 0.83）这些关键词相继突现。第二阶段（2019 年至今）出现了明显的人本主义转向，关键词如“效益 (benefits)”（强度 0.94）、“感知 (perceptions)”（强度 1.29）集中涌现，这一变化揭示了研究视角开始从单纯的噪声控制转向城市环境中的声景感知、恢复性效应及多感官交互研究，同时对于“环境噪声 (ambient noise)”（强度 0.64）、“人类干扰 (human disturbance)”（强度 1.16）对鸟类声景的影响进行了更深层次的讨论。

相比之下，基于 CNKI 数据库的分析（图 6-b）则展现了不同的演进特征。国内该领域起步相对较晚，2005—2025 年识别出 9 个突现关键词，且主要发现于 2018 年之后，与国际早期关注噪声不同，国内研究起步即聚焦于鸟类声景的健康效应，2018—2022 年，“声景感知恢复”（强度 0.87）、“恢复效益”（强度 0.92）及“感知偏好”（强度 0.89）等关键词的高频出现，凸显了国内学者对城市留野地的鸟类声景在改善公共健康与人居环境方面的重视。而自 2023 年以来，“声景生态学”（强度 0.51）与“时空特征”（强度 0.77）的突现，则预示着国内研究正逐步深化，并开始探索声景生态学机制及其时空分布规律，展现出与国际前沿接轨的趋势。

2 研究前沿方向与应用实践

2.1 被动声学监测与深度学习技术的深度融合趋势

随着声学传感器成本的持续下降以及深度学习模型在生物声学领域中的迅猛发展，基于被动声学监测 (Passive Acoustic Monitoring, PAM) 与深度学习技术集成的自动化生物多样性监测框架，已成为当前研究的核心前沿^[21]。相较于传统的人为主动录音方法，PAM 系统可实现 24 小



图6 关键词突现分析
Fig. 6 Keyword burst analysis

时不间断、全天候地录制特定范围内的鸟类声景数据，有些设备甚至能够通过无线网络将数据直接传输至实验室内，不仅最大限度减少了对栖息地的干扰，还显著拓展了长时间、大尺度的鸟类多样性监测的可行性^[19]。然而，PAM 生成的海量音频文件若完全依赖人工验证几乎不可行，因此必须引入机器学习模型构建自动化分析流程^[22]。近年来，神经网络技术的兴起进一步推动了深度学习在声学数据处理中的应用，使得声场景分类与鸟鸣识别的效率与准确率实现了质的提升^[23]。在国内研究中，郝泽周等^[2]率先提出“被动声学监测+人工智能”（PAM+AI）的城市鸟类声学数据分析流程和研究框架，将声场景分类/声音事件

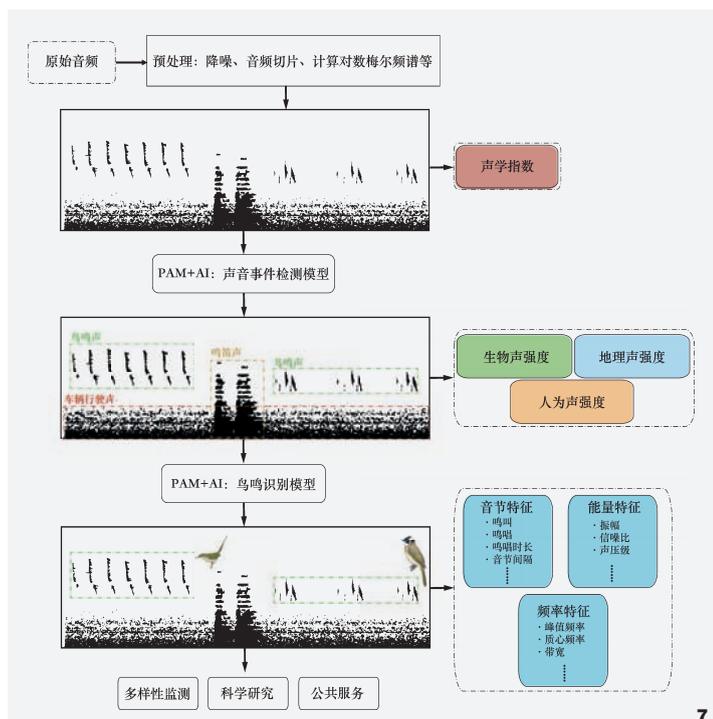


图7 “被动声学监测+人工智能” (PAM+AI) 的数据分析框架
Fig. 7 Analytical framework for “Passive Acoustic Monitoring + Artificial Intelligence” (PAM+AI) approach

检测模型与鸟类声纹识别整合为完整的自动化管线(图7)。这一流程已然成为Llusia、Pijanowski等^[24,25]提出的声景观分析学(Soundscape Analytics)的一种实践应用趋势,其不仅能够做到高通量、高精度的物种识别,而且可以从长时间的鸟类声景中自动提取每个声音事件的起止时间,获得物种水平的高分辨率录音,从而探究单一物种的鸣声特征在声景变化中的响应,更能进一步直接关联到鸟类行为、种群的栖息地利用及群落结构等关键指标,相比传统声学指数具有更直接的生态学解释力。此外,深度学习鸟鸣识别模型的部署使非专业的调查人员也能在无需声学知识背景的情况下完成自动物种识别,从而显著降低了生态监测的技术门槛,对城市留野地和自然保护区内的工作人员与管理者而言,这类技术可作为传统样线调查的有力补充,还能为自然教育、科普传播提供丰富的声学素材。

国内外已有多项研究初步探索了PAM+AI在不同场景的可行性与应用潜力。例如,白皓天等^[26]在城市湿地公园中将PAM+AI的识别结果与人为调查数据进行对比,发现声学监测在捕捉夜行性鸟类的鸣声方面具有无法替代的优势;高翔等^[27]则在自然保护区内部署相同流程,揭示了不同区域间鸟类群落组成的差异性、季节变化与活动节律等问

题,为保护区管理提供了新的监测维度。国际上, Mosikidi等^[28]在南非国家公园内应用类似流程,提高了对受威胁鸟类的监测能力,并为保护区的长期鸟类名录补齐了重要空白。此外, PAM+AI框架还推动了对城市绿地中鸟类声景生态过程的深入理解,以Hao等^[29]为例,其通过基于深度学习的“物种识别+声场景分类”方法分析城市化梯度下人为噪声对鸟类声景的影响,为探讨鸟类在噪声干扰下的适应性策略提供了前所未有的证据,也为声学适应性假说提供了更深入的验证。

PAM与深度学习技术的融合正推动生物声学监测走向标准化、精细化与应用化,为各类保护地的生态管理、长期监测及生态景观建设提供了强大的技术基础。不过这一框架仍存在若干需要正视的技术局限,首先,训练数据的分布偏移会导致模型从开发域(如使用全球数据进行模型训练)拓展至新域(如特定地区的鸟鸣识别任务)时性能显著下降,进而造成识别准确率下降^[30]。其次,标签噪声与人工标注的错误在训练集中普遍存在,会削弱监督学习模型的训练效果并增加分类错误率^[31]。以及在实地录音中,往往伴随背景噪声与多个信号源重叠的问题,这些声学复杂性会降低声音事件检测与物种分类的可靠性^[32]。通过对这些技术局限的持续改进和方法优化,鸟类声景观监测的精度和应用范围有望得到进一步提升。

2.2 风景园林层面的恢复性效应与典型案例

城市留野地与自然保护区不仅能够提供相对温和的水热条件,为鸟类提供遮蔽、取食、筑巢与栖息的场所,从而对各类人为干扰起到一定的缓冲作用,同时也是居民活动的场所,其通过为居民提供调节、维持和文化等生态服务增进公民的健康福祉^[33-34]。当前各类恢复性环境研究逐渐将鸟类声景观纳入关注范围,越来越多的研究发现自然环境声,尤其是环境中的鸟类鸣声能够帮助人类从认知疲劳或是情绪压力中恢复^[35]。例如,鸟鸣声通常被认为具备较高的“软吸引力”(soft fascination),可以在不消耗认知资源的前提下引起注意,支持了心理恢复的注意力恢复理论(Attention Restoration Theory, ART)^[36]。鸟鸣声与其他自然声组成的平静自然声景观也被认为具有较高的恢复性效益,同心理恢复的压力缓解理论(Stress Reduction Theory, SRT)下的“低激发”(low arousal)的放松状态相契合^[37]。进一步而言,人类对自然声景观的感知并非完全由物理特征主导,而是深受主观认知与语意联想的影响。在这些恢复理论的基础下,国内外研究者开始从鸟类声景观的视角探究生态景观设计与心理健康干预。多项研究通过对自然声音健康效益的综合分析指出,自然声景观中的



图8 将鸟类声景融入室内展陈与户外景观设计的示例
Fig. 8 Integration of avian soundscape into architectural exhibits and landscape design

鸟鸣声不仅能提高不同人群的愉悦度, 还能显著提升认知表现并缓解心理压力^[39]。而Ferraro等^[39]通过播放鸟类合唱的实验, 证明了在保护地中增加鸟鸣声的丰富度, 可以直接提升游客感知生物多样性的程度与幸福感; 相反地, 声景中交通噪声等人为声源会显著削弱景观的审美评价与情感效价^[40]。

而随着鸟类声学方面的研究不断突破, 声学科研成果也逐渐从理论数据转化为具体的工程实践与景观营造策略。康奈尔大学鸟类学实验室(Cornell Lab of Ornithology, USA)作为全球鸟类声学研究的枢纽, 其访客中心的建筑与景观设计是将海量声学数据转化为公共景观体验的典范。其中, 由设计师林璠(Maya Lin)创作的“声音之环”(sound ring)

装置利用特殊的木质共鸣腔体结构, 将实验室数据库中存储的濒危与灭绝物种声音实体化, 构建了具有深层生态叙事功能的沉浸式鸟类声景空间; 同时, 访客中心内部专业的声学分析软件被转化为交互式可视终端, 将抽象的鸟鸣声转换为直观的频谱图, 为公众提供了“可见可听”的科普界面(图8-a)。此外, 中心外围还规划了长达8 046.72 m的观鸟徒步通道, 涵盖森林、湿地、池塘等多种生境(图8-b), 引导游客亲身聆听自然^[41]。这种“数据可视化-软件科普化-概念艺术化”的全流程设计, 有效地打破了科研工作与公众认知之间的壁垒。与此同时, 国内的风景园林实践也开始了将鸟类声景资源融入景观设计的探索。同济大学研究团队基于

“生物多样性感知与智能协同保护”的研究成果, 在黄龙国家级风景名胜区内打造了集科研监测与自然教育于一体的“声纹栈道”(图8-c)。通过数字化方法, 结合声音展亭与多媒体交互终端, 利用定向声学装置与可视化屏显技术, 向游客动态展示数据库中的珍稀物种鸣声及其频谱特征。这种设计不仅在最小化生态干扰的前提下实现了游客的感官增强, 更通过互动式媒体技术, 为游客提供了从“被动观赏”转向“主动感知”的沉浸式生物多样性科普体验^[42]。

3 讨论与展望

随着PAM技术与声景生态学的发展, 城市留野地到自然保护区中的鸟类声景研究正

逐渐从现象描述走向机制解析、模式预测与设计应用的综合路径。尽管城市留野地与自然保护区在生态连续体概念上并非截然分离,但由于所处地的人类活动强度、管理目标与社会功能的显著差异,鸟类声景研究在这两类空间中呈现出不同的理论关注重点与应用导向,主要体现在研究问题设置、鸟类声景的功能定位及技术应用目标等方面。

在城市留野地中,鸟类声景研究更侧重于揭示鸟类对城市化干扰的适应机制及其生态后果。相关研究往往将声景作为反映人为噪声的声学遮蔽、生境破碎化和植被结构变化的综合指标,用以检验声学适应性假说以及鸟类行为可塑性等理论问题^[10-11,43]。在进一步的应用层面上,城市留野地中的鸟类声景研究更强调声景质量评估、恢复效应及其在风景园林设计与公众健康中的潜在价值,为城市绿地规划、噪声缓解与生态景观营造提供依据^[44-45]。相比之下,自然保护区中的鸟类声景研究更关注声景作为生物多样性状态与生态完整性的指示性功能。在这一情境下,PAM与深度学习技术被广泛用于长期监测物种活动节律、群落结构变化,进而服务于濒危物种保护、保护成效与早期预警等管理目标^[27-28,46]。其理论贡献主要体现在自然条件下鸟类声学行为、群落构建及时空差异性的认识,而应用实践则更多指向保护地监测体系建设与科学管理决策支持。

因此,未来研究不仅需要关注鸟类声景在不同环境中的差异及其生态驱动机制,也需要发展基于鸟类声景数据的预测工具,并在实践层面探索如何将其纳入景观设计与管理决策之中。整体而言,鸟类声景研究正迈向跨尺度、跨学科、面向应用的综合框架,从而在城市留野地与自然保护区构成的生态连续体中,为生物多样性保护与公民福祉提

升提供新的思路。

3.1 研究不同环境下的鸟类声景异质性及其驱动力

已有研究表明,声景在不同尺度上表现出强烈的空间—时间异质性^[47]。植被结构、地形、人类噪声暴露等多种因素共同塑造了不同鸟类鸣声的频谱分布与时序模式,例如城市化与植被结构会共同塑造鸟类的鸣声频率,从而导致城市留野地与自然保护区在组成上呈现出显著差异^[11,48]。

为此,未来研究应从样地特征(如植被结构、环境噪声等)与景观格局(如城市化水平、斑块性质等)等不同维度出发,并采取多尺度的被动声学监测设计,解析环境因子对不同声学生态位的鸟类鸣唱适应性的作用路径,从理论层面进一步探究鸟类声景组成的影响因素^[46]。

3.2 借助录音数据和生态规律预测声景变化

随着PAM录音设备成本的持续下降,布设网格化或阵列化录音的声学监测网络已成为现实^[49]。下一步的挑战是将这些建立于位点的观测转化为面域级的声景预测能力:即通过建立基于声学指数或具体声音事件强度、环境协变量(如植被、用地类型、噪声源位置等)与时间因子的统计或机器学习模型,实现用少量代表点预测更大范围内的鸟鸣声学特征格局与不确定性。一些研究已经提出用于声景预测的概念框架与操作流程,而通过设定目标(如声景感知评分、声景多样性等)与明确约束(如天气、季节等)后,预测模型可用于监测网络优化与早期预警^[50-51]。为提高泛化能力,还应该结合物种水平的声学信息、声学指数的组合使用以及明确的模型验证策略,并关注模型在不同

生态与城市格局中的可迁移性与不确定性来源^[52]。最终目标是形成“少量代表性监测位点+统计/机器学习预测”的工作流,进而为管理者提供相对低成本、高价值的鸟类声景信息。

3.3 基于生态感知的实践设计实现声景保护与恢复

鸟类声景的重要应用是与风景园林实践对接,将生态保护与公众恢复性需求并列列为设计目标。景观设计应把“声景质量”作为可操作的设计指标,可以通过多层次的植被结构设计创造声学屏障:在步道与观赏点之间规划合适的距离与视觉遮挡以降低噪声暴露,并利用地形与硬质景观材料调整声音传播路径,在必要时结合定向声学装置与解说来引导感知^[53]。与此同时,需要将声景感知以定期问卷、行为观察或听觉实验等方式纳入访客调研以评估设计效果,并在管理上保持对区域关键鸟类栖息地的保护措施。将声景恢复性作为衡量城市绿地与保护地恢复效应的一个维度,有助于实现生态服务与公众福祉的双重收益。

必须注意的是,风景园林在利用声景资源时面临着潜在的生态悖论,即人类在追求自然声景恢复性效应的同时,其游憩活动产生的“声学足迹”可能反向干扰野生动物的栖息与发声行为,进而导致声景质量退化^[9]。然而,当前对鸟类声景的利用和干预性设计成效的系统量化评估仍较为缺失。因此,未来的景观实践亟须借助上述的长期声学监测数据与鸟类声景预测模型,为声景设计的成效评估与风险控制提供定量支撑,进而在最大化人类健康福祉与最小化对野生动物声景干扰之间寻求动态平衡,以实现人与自然的双重“恢复”。

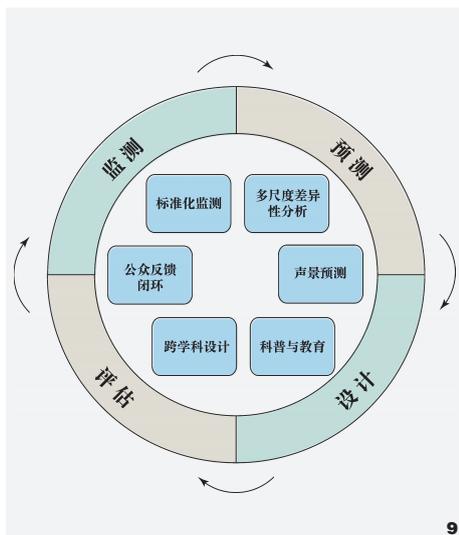


图9 城市留野地与自然保护地中鸟类声景的“监测-预测-设计-评估”的闭环应用体系

Fig. 9 Closed-loop application framework of "monitoring - prediction - design - evaluation" for avian soundscape in urban green remnant and nature reserves

3.4 未来研究

综上所述，尽管近年来鸟类声景研究在城市留野地与自然保护地中均取得了快速进展，但通过本综述的系统梳理可以发现，当前研究仍存在若干亟待突破的共性不足。首先，不同研究多聚焦于特定空间类型或单一尺度，缺乏在城市留野地和自然保护地这一生态连续体框架下的系统比较，限制了对鸟类声景形成机制及其尺度依赖性的整体认识。其次，现有研究仍以描述性分析与相关性检验为主，基于被动声学监测的预测模型和情景模拟应用相对不足，鸟类声景信息在管理决策中的转化路径尚不清晰。再次，在应用层面，城市绿地与自然保护地中的鸟类声景研究与生态监测和恢复性效益评价往往分别展开，缺乏将声景数据同时服务于生物多样性保护与公众感知评估的综合研究框架。因此，未来有必要推动鸟类声景研究从“描述-解释”的研究手段，进一步走向

“监测-预测-设计-评估”的闭环研究范式（图9）。为了促成这一转变，研究提出以下关键研究及应用方向。

（1）多尺度差异性分析：通过不同尺度范围的研究探索环境因子对鸟类声景的驱动机制，从声学生态位与物种适应性的角度揭示影响鸟类声景变化的底层逻辑。

（2）指标与标准化：推动PAM+AI的标准化框架，实现从布设到数据分析的标准化流程，建立涵盖全国城市留野地与自然保护地的鸟类声景统一化监测网络。

（3）构建预测系统：在试点保护区或城市群中基于被动声学监测网络的布设，依托环境栅格与机器学习模型进行声景预测，并通过长期监测验证评估其稳健性。

（4）公众服务与科普：城市公园或保护区通过开放数据、声景导览与互动装置，将声学监测结果转化为公众可感知的教育资源；

（5）跨学科共创：鼓励生态学家、设计师、工程师共建试验地，结合声学指标量化、游客体验研究与设计干预创建鸟鸣景观设计。

（6）建立多维度的公众感知评估体系：建立涵盖主观感知、恢复性、情感连结和身心健康的公众感知评估体系，设置长期跟踪研究、访谈与问卷等方法了解公众对鸟鸣景观设计的反馈。

最终，鸟类声景将不仅作为生态保护的重要指标，也成为提升公众福祉的“可操作产品”。在这一过程中，公众感知的持续反馈将推动理论深化，并驱动设计与管理策略的迭代和完善。

注：图1中的鸟类图鉴图片来源于Bird of the World，其余部分为作者基于文献与数据分析原创绘制；图8-a、8-b中的图片来源于Cornell Lab of Ornithology官方网站，8-c中的图片来源于黄龙国家级风景名胜区政府网站；其余图片均由作者绘制。

参考文献

- [1] GASC A, FRANCOMANO D, DUNNING J B, et al. Future Directions for Soundscape Ecology: The Importance of Ornithological Contributions[J]. *The Auk*, 2017, 134(1): 215-228.
- [2] 郝泽周, 张承云, 李乐, 等. 城市鸟类多样性被动声学监测与评价技术应用[J]. *生物多样性*, 2024, 32(10): 17-32.
- [3] KRAUSE B L. The Niche Hypothesis: a Virtual Symphony of Animal Sounds, the Origins of Musical Expression and the Health of Habitats[J]. *The Soundscape Newsletter*, 1993, 6(5): 6-10.
- [4] SLABBEKOORN H, PEET M. Birds Sing at a Higher Pitch in Urban Noise[J]. *Nature*, 2003, 424(6946): 267.
- [5] PIJANOWSKI B C, VILLANUEVA-RIVERA L J, DUMYAHN S L, et al. Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape[J]. *BioScience*, 2011, 61(3): 203-216.
- [6] STOBBE E, SUNDERMANN J, ASCONE L, et al. Birdsongs Alleviate Anxiety and Paranoia in Healthy Participants[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 16414.
- [7] 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(1): 43-57.
- [8] SUEUR J, FARINA A. Ecoacoustics: The Ecological Investigation and Interpretation of Environmental Sound[J]. *Biosemiotics*, 2015, 8(3): 493-502.
- [9] FRANCIS C D, BARBER J R. A Framework for Understanding Noise Impacts on Wildlife: An Urgent Conservation Priority[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(6): 305-313.
- [10] JOB J R, KOHLER S L, GILL S A. Song Adjustments by an Open Habitat Bird to Anthropogenic Noise, Urban Structure, and Vegetation[J]. *Behavioral Ecology*, 2016, 27(6): 1734-1744.
- [11] HAO Z Z, ZHANG C Y, LI L, et al. Anthropogenic Noise and Habitat Structure Shaping Dominant Frequency of Bird Sounds Along Urban Gradients[J]. *iScience*, 2024, 27(2): 109056.
- [12] BUXTON R T, MCKENNA M F, MENNITT D, et al. Noise Pollution is Pervasive in U.S. Protected Areas[J]. *Science*, 2017, 356(6337): 531-533.
- [13] RATCLIFFE E, GATERSLEBEN B, SOWDEN P T. Bird Sounds and Their Contributions to Perceived Attention Restoration and Stress Recovery[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2013, 36: 221-228.
- [14] CHEN C M. CiteSpace II: Detecting and Visualizing Emerging Trends and Transient Patterns in Scientific Literature[J]. *Journal of the American Society for*

- Information Science and Technology, 2006, 57(3): 359-377.
- [15] FARINA A, PIERETTIN N. The Soundscape Ecology: A New Frontier of Landscape Research and its Application to Islands and Coastal Systems[J]. *Journal of Marine and Island Cultures*, 2012, 1(1): 21-26.
- [16] BLUMSTEIN D T, MENNILL D J, CLEMINS P, et al. Acoustic Monitoring in Terrestrial Environments Using Microphone Arrays: Applications, Technological Considerations and Prospectus[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(3): 758-767.
- [17] SUGAI L S M, SILVA T S F, RIBEIRO J W J, et al. Terrestrial Passive Acoustic Monitoring: Review and Perspectives[J]. *BioScience*, 2019, 69(1): 15-25.
- [18] STOWELL D. Computational Bioacoustics with Deep Learning: A Review and Roadmap[J]. *PeerJ*, 2022, 10: e13152.
- [19] XIE J J, ZHONG Y J, ZHANG J G, et al. A Review of Automatic Recognition Technology for Bird Vocalizations in the Deep Learning Era[J]. *Ecological Informatics*, 2023, 73: 101927.
- [20] LIU J X, XU J, WU Z C, et al. Soundscape Preference of Urban Residents in China in the Post-pandemic Era[J]. *Frontiers in Psychology*, 2021, 12: 750421.
- [21] MORALES G, VARGAS V, ESPEJO D, et al. Method for Passive Acoustic Monitoring of Bird Communities Using UMAP and a Deep Neural Network[J]. *Ecological Informatics*, 2022, 72: 101909.
- [22] XIE J J, XIE S S, LIU Y, et al. Decoding Nature's Melody: Significance and Challenges of Machine Learning in Assessing Bird Diversity via Soundscape Analysis[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2025, 59(1): 10.
- [23] KAHL S, WOOD C M, EIBL M, et al. BirdNET: A Deep Learning Solution for Avian Diversity Monitoring[J]. *Ecological Informatics*, 2021, 61: 101236.
- [24] LLUSIA D. The Limits of Acoustic Indices[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2024, 8(4): 606-607.
- [25] PIJANOWSKI B C, FUENZALIDA F R, BANERJEE S, et al. Soundscape Analytics: A New Frontier of Knowledge Discovery in Soundscape Data[J]. *Current Landscape Ecology Reports*, 2024, 9(4): 88-107.
- [26] 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): 113-124.
- [27] 高翔, 刘小龙, 张佳蕊, 等. 基于AI辅助识别的北京百花山鸟类多样性被动声学监测[J]. *生态学杂志*, 2026, 45(1): 346-352.
- [28] MOSIKIDI T, LE MAITRE N, STEENHUISEN S L, et al. Passive Acoustic Monitoring Detects New Records of Globally Threatened Birds in a High-elevation Wetland (Free State, South Africa)[J]. *Bird Conservation International*, 2023, 33: e80.
- [29] HAO Z Z, ZHANG C Y, LI L, et al. Can Urban Forests Provide Acoustic Refuges for Birds? Investigating the Influence of Vegetation Structure and Anthropogenic Noise on Bird Sound Diversity[J]. *Journal of Forestry Research*, 2024, 35(1): 33.
- [30] LAUHA P, SOMERVUO P, LEHIKONEN P, et al. Domain-specific Neural Networks Improve Automated Bird Sound Recognition Already with Small Amount of Local Data[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022, 13(12): 2799-2810.
- [31] ASSARZADEH M, ATUFI P, EIBL M, et al. Investigating Misclassification in Bird Sounds: The Adverse Effect of Label Noise on BirdNET[J]. *Ecological Informatics*, 2025, 92: 103494.
- [32] BERMANT P C. BioCPPNet: Automatic Bioacoustic Source Separation with Deep Neural Networks[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 23502.
- [33] GILBERT O L. *The Ecology of Urban Habitats*[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1991.
- [34] ZHANG Z K, HUANG G L. How do Urban Parks Provide Bird Habitats and Birdwatching Service? Evidence from Beijing, China[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(19): 3166.
- [35] KAPLAN R, KAPLAN S. *The Experience of Nature*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [36] PAYNE S R. The Production of a Perceived Restorativeness Soundscape Scale[J]. *Applied Acoustics*, 2013, 74(2): 255-263.
- [37] RATCLIFFE E, GATERSLEBEN B, SOWDEN P T. Predicting the Perceived Restorative Potential of Bird Sounds Through Acoustics and Aesthetics[J]. *Environment and Behavior*, 2020, 52(4): 371-400.
- [38] BUXTON R T, PEARSON A L, ALLOU C, et al. A Synthesis of Health Benefits of Natural Sounds and Their Distribution in National Parks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(14): e2013097118.
- [39] FERRARO D M, MILLER Z D, FERGUSON L A, et al. The Phantom Chorus: Birdsong Boosts Human Well-being in Protected Areas[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2020, 287(1941): 20201811.
- [40] BENFIELD J A, BELL P A, TROUP L J, et al. Aesthetic and Affective Effects of Vocal and Traffic Noise on Natural Landscape Assessment[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2010, 30(1): 103-111.
- [41] Visit Us[EB/OL]. (2025-11-27)[2025-11-29]. <https://www.birds.cornell.edu/home/visit/>.
- [42] 新闻详情-黄龙景区官方网站[EB/OL]. [2025-11-24]. <https://www.huanglong.com/cn/news/detail/channelCode=jqxw&cid=48466>.
- [43] 赵伊琳, 白梓彤, 王成, 等. 城市公园春季声景观与植被结构的关系[J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 8040-8051.
- [44] 朱玉洁, 翁羽西, 孙丹玫, 等. 声景对自然和城市环境恢复性效益的影响[J]. *建筑科学*, 2021, 37(2): 63-69, 76.
- [45] 聂玮, 李红梅, 赵瑾瑜, 等. 城市绿地常见鸟鸣感知偏好和恢复效益研究[J]. *淮阴工学院学报*, 2022, 31(5): 81-89.
- [46] XU X Q, SUN X Y, XIE H B. Passive Long-term Acoustic Sampling Reveals Multiscale Temporal Ecological Pattern and Anthropogenic Disturbance of Campus Forests in a High Density City[J]. *Forests*, 2025, 16(8): 1289.
- [47] ZHUO D B, YAN C G, XIE W H, et al. Spatiotemporal Heterogeneity of Forest Park Soundscapes Based on Deep Learning: A Case Study of Zhangjiajie National Forest Park[J]. *Forests*, 2025, 16(9): 1416.
- [48] HE X L, DENG Y, DONG A R, et al. The Relationship Between Acoustic Indices, Vegetation, and Topographic Characteristics is Spatially Dependent in a Tropical Forest in Southwestern China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109229.
- [49] HAO Z Z, WANG C, SUN Z K, et al. Soundscape Mapping for Spatial-temporal Estimate on Bird Activities in Urban Forests[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 57: 126822.
- [50] MITCHELL A, ALETTA F, OBERMAN T, et al. A Conceptual Framework for the Practical Use of Predictive Models and Soundscape Indices: Goals, Constraints, and Applications[J]. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2023, 268(6): 2108-2118.
- [51] HOLGATE B, MAGGINI R, FULLER S. Mapping Ecoacoustic Hot Spots and Moments of Biodiversity to Inform Conservation and Urban Planning[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107627.
- [52] SETHI S S, BICK A, EWERS R M, et al. Limits to the Accurate and Generalizable Use of Soundscapes to Monitor Biodiversity[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2023, 7(9): 1373-1378.
- [53] GUO X, LIU J, ALBERT C, et al. Audio-visual Interaction and Visitor Characteristics Affect Perceived Soundscape Restorativeness: Case Study in Five Parks in China[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 77: 127738.