

生物多样性视角下的声景感知与空间结构研究综述

A Review of Soundscape Perception and Spatial Structure from a Biodiversity Perspective

洪昕晨¹ 任 维² 詹开元^{1,2*}
HONG Xinchen¹ REN Wei² ZHAN Kaiyuan^{1,2*}

(1.福州大学建筑与城乡规划学院, 福州 350116; 2.福建农林大学风景园林与艺术学院, 福州 350100)

(1. School of Architecture and Urban-Rural Planning, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian, China, 350116; 2. College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian, China, 350100)

文章编号: 1000-0283(2026)03-0044-10

DOI: 10.12193/j.laing.20251110003

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2025-11-10

修回日期: 2026-01-23

摘要

随着声景观研究的快速发展,相关成果在感知评价与设计应用层面不断累积,但聚焦“空间结构-声景观”关系的研究仍相对有限。基于CNKI与Web of Science检索结果,结合文献计量与LDA主题分析,发现当研究从“Space”(空间)进一步收敛至“spatial structure”(空间结构)时,文献数量显著下降,且主题取向由感知评价逐步转向生态声学、生物多样性与空间结构的耦合机制。进一步选取可获取全文的核心文献进行系统梳理,总结既有研究在空间结构表征上的主要路径,包括宏观景观格局、中微观场地构成、垂直三维特征与物理界面特征,并归纳其常用数据来源与分析方法。基于综合证据,提出一个逐步深入的解释逻辑:空间结构先通过“生境塑造”影响生物群落与生物声源基础,再通过“物理调节”改变声音传播与可听性,最终经由“感知塑造”影响个体对声景观的理解、情绪反应与总体评价。旨在弥补空间结构维度研究不足,为从生态过程到感知体验的声景观研究提供更清晰的综述框架,并为城市规划、绿地管理与生态监测的协同应用提供参考。

关键词

声景观; 空间结构; 生物多样性; 生态声学

Abstract

With the rapid advancement of soundscape research, related findings have accumulated in the areas of perception evaluation and design applications. However, studies focusing on the relationship between “spatial structure and soundscape” remain relatively limited. Based on CNKI and Web of Science search results, combined with bibliometric and LDA thematic analyses, this paper finds that as research narrows from “space” to “spatial structure”, the number of publications decreases significantly. The thematic orientation also shifts from perception evaluation toward Ecoacoustics, biodiversity, and coupling mechanisms with spatial structure. A systematic review of accessible full-text core literature summarizes primary approaches to characterizing spatial structure, including macro-scale landscape patterns, meso- to micro-scale site composition, vertical three-dimensional features, and physical interface characteristics, and identifies common data sources and analytical methods. Based on comprehensive evidence, this paper proposes a progressive explanatory logic: spatial structure first influences biological communities and acoustic sources through “habitat shaping”, then alters sound propagation and audibility via “physical regulation”, and ultimately affects individuals’ understanding, emotional responses, and overall evaluation of soundscapes through “perceptual shaping.” This study aims to address gaps in spatial structure research by providing a clearer review framework for soundscape studies that span ecological processes and perceptual experiences. It also offers reference points for synergistic applications in urban planning, green space management, and ecological monitoring.

Keywords

soundscape; spatial structure; biodiversity; ecoacoustics

洪昕晨

1992年生/男/福建古田人/博士/副教授/研究方向为城市噪声与振动控制、城市声景营造技术

任 维

1988年生/男/浙江宁波人/博士/副教授/研究方向为国土景观保护与生态系统服务、景观感知与评价

詹开元

2000年生/男/浙江丽水人/硕士/研究方向为城市声景、景观感知与评价

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: zky.yue@outlook.com

基金项目:

国家自然科学基金青年项目“基于语义编码的城市森林声景编码机制与优化研究”(编号: 52208052); 福建省自然科学基金青年项目“社会感知视角下城市森林声景的城乡梯度演变研究”(编号: 2023J05108)

随着声景观 (soundscape) 理论在环境心理学、城市规划与景观研究领域的不断发展, 声音逐渐被视为塑造空间体验与环境质量的重要组成部分。围绕声环境感知、空间体验与设计实践的研究在近二十年内迅速增长, 逐步形成了较为系统的研究基础。

从文献计量结果来看, 以“声景观”和“空间”为主题词进行检索, 在中国知网 (CNKI) 数据库中可获得451篇相关文献。通过CiteSpace软件的突现词分析可以发现, 国内学界围绕声环境、空间体验与设计实践已展开持续探索 (图1)。在Web of Science (WoS) 数据库中, 以“space” (空间) 和“soundscape” (声景观) 为主题词, 检索共获得1353篇文献。突现词分析结果显示, 国际研究在声景观与空间关联议题上同样呈现出较高的研究活跃度 (图2)。然而, 当研究视角进一步从空间这一相对宽泛的概念, 收敛至空间结构层面时, 相关研究数量出现显著下降。在WoS数据库中, 以“spatial structure” (空间结构) 和“soundscape”为主题词仅检索到85篇文献, 与“space + soundscape”的1353篇研究相比呈现出数量级上的断崖式差异。这一结果表明, 尽管声景观研究在数量上已较为成熟, 但对空间物理结构特征、形态组织及其作用机制的系统探讨仍明显不足。且“栖息地”“被动声学监控”等突现词的出现, 表明声景观研究已开始关注与生态过程相关的议题, 显示出生物多样性与声景观相结合的研究潜力 (图3)。在国内数据库中, 系统探讨不足的问题同样突出。以“空间结构”和“声景观”为主题词在CNKI中仅检索到2篇文献, 显示国内关于“空间结构-声景观”这一精细化研究方向尚处于起步阶段, 未形成稳定而清晰的研究谱系。因此, 从整体上看, 声景观研究虽已在感知评价与设计应用层面取得较为丰富的成果, 但其在空间结构维度上的理论深化与方法拓展仍存在明显空缺。

为进一步揭示不同研究尺度下声景观研究的主题差异与演化特征, 本文对上述三类文献集合的摘要文本进行提取, 分别进行LDA主题模型分析, 并提取前30个显著主题词 (图4—图6)。从国内声景观研究的主题结构来看, 高频主题词主要集中于“声景观”“评价”“设计”“文化”“舒适度”“公园”“优化”等内容, 整体呈现出以主观感知评价与设计应用为导向的研究特征。这类研究在改善声环境体验和指导景观设计实践方面起到了重要作用, 但对于空间结构要素的定量描述以及其对声景观感知的具体影响路径的关注相对较少。而在WoS数据库中, 以“space + soundscape”为主题词的研究呈现出更加多元的主题取向。除“sound”“space”“perception”“environment”“quality”等经典声景观感知维度外, “biodiversity”“monitoring”“experience”“indices”



图1 CNKI关键词突现分析图 (声景观+空间)

Fig. 1 CNKI keyword salience analysis map (soundscape + spatial)

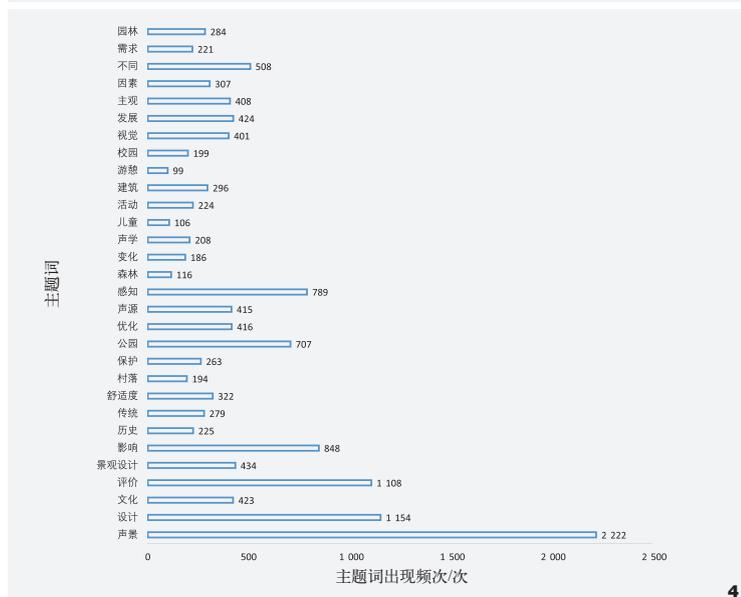
图2 WoS关键词突现分析图 (声景观+空间)

Fig. 2 WoS keyword salience analysis map (soundscape + spatial)

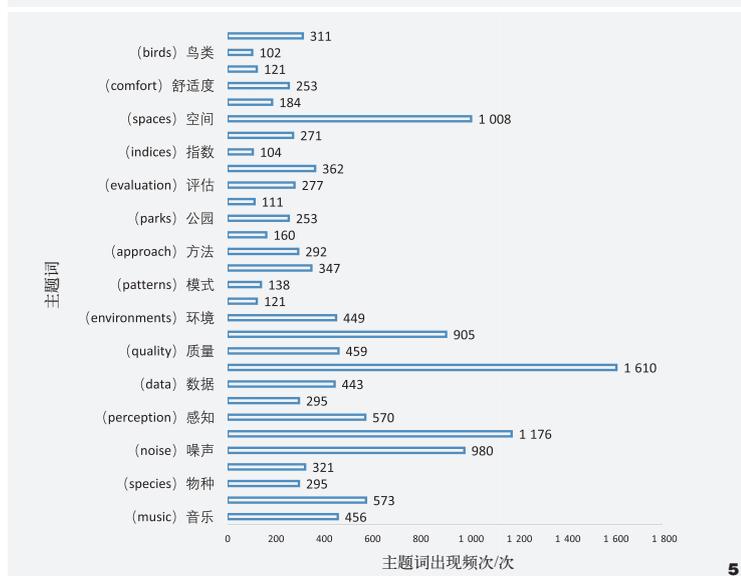
“urban”“parks”等关键词逐渐显现, 反映出国际研究开始将声景观议题与生态环境、多样性特征及城市空间类型相结合。然而, 在这一阶段, 空间更多被视为研究情境或类型变量, 其内部结构特征



3



4



5

图3 WoS关键词突现分析图 (声景观 + 空间结构)

Fig. 3 WoS keyword salience analysis map (soundscape + spatial structure)

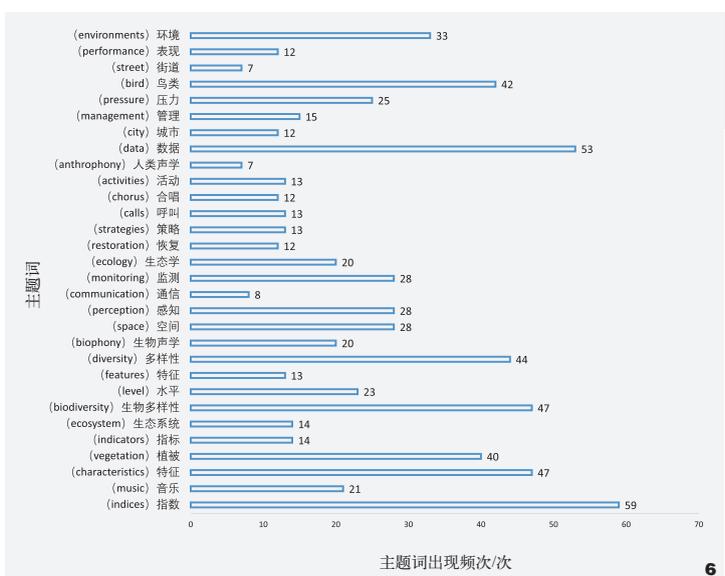
图4 国内“声景观 + 空间”研究的主题结构特征

Fig. 4 Thematic structural characteristics of domestic "soundscape + space" research

仍缺乏清晰而一致的表征方式。相比之下, 当研究进一步聚焦于“spatial structure + soundscape”的85篇文献时, 主题结构发生了显著变化。“indices”“biodiversity”“biophony”“anthrophony”“ecosystem”“monitoring”“vegetation”“pressure”“restoration”等关键词的频繁出现, 表明该研究分支已明显转向生态声学与空间结构耦合机制的探讨。其中, 生物多样性相关术语如 biodiversity、biophony、bird 等与声学指标 indices、indicators 的同步出现, 揭示出声景观研究正在从以人为中心的主观感知评价, 逐步向基于生物多样性特征的声景观结构解析拓展。

尽管如此, 综合文献计量结果与主题分析仍可发现, 现有声景观研究在以下几个方面存在明显不足: (1) 多数研究将空间视为背景或场所类型进行分类, 缺乏对空间结构要素如形态特征、尺度关系、连通性及植被配置等的系统量化。(2) 生物多样性相关的研究大多集中在生态声学监测或指标的建立, 这些研究通常将其与人类的声景观感知联系起来, 但主要聚焦于自然声音的范畴, 尚未进行深入和细致的研究。(3) 关于“生物多样性特征如何通过空间结构影响声景观感知”的作用机制, 现有研究仍缺乏统一的分析框架和系统综述。

基于上述发现, 本文将生物多样性作为连接空间结构与声景观感知的关键线索, 重点探讨空间结构如何在不同尺度上影响声景



6

图5 国际“声景观 + 空间”研究的主题结构特征

Fig. 5 Thematic structural characteristics of international "soundscape + space" research

图6 国际“声景观 + 空间结构”研究的主题结构特征

Fig. 6 Thematic structural characteristics of international "soundscape + space structure" research

观体验。研究在文献计量与主题演化分析的基础上,对核心文献进行系统梳理,归纳空间结构的量化方法与声学指标的应用,并从机制层面整合“生境塑造-物理调节-感知塑造”的作用逻辑:空间结构既会通过改变栖息条件影响生物声源的多样性,也会通过形态与材质条件影响声音的传播呈现,最终塑造人们对声景观的评价。本文旨在弥补现有研究中对空间结构要素关注不足的问题,为理解声景观的生态基础及其空间组织机制提供更清晰的研究视角与理论支持。

1 研究范式梳理

深入分析85篇文献中78篇可获取全文的相关研究,基于一致的数据提取与编码,系统梳理其中涉及生物多样性表征、声学指标与空间结构处理的研究内容,并将结果汇总为表格以开展进一步统计,从而为讨论空间结构与生物多样性如何共同影响声景观感知提供证据基础。

(1)如图7所示,从研究情境、对象与方法组合来看,现有研究呈现明显的跨场景扩展:自然森林与保护区、城市环境与公园仍是最主要的研究载体,但海洋/水下生态以及室内、实验室与虚拟场景也占有一定比例,并覆盖全球/多区域尺度、历史文化遗产与乡村偏远地区等多样情境。这一分布提示,该领域并非仅围绕城市噪声或公园体验推进,而是在更广泛的环境系统中寻求声景与空间关系的共性机制。研究对象以生物个体与群落、自然生态生境为核心,同时延伸至城市人居空间及工程设备等议题,显示研究视角正从单一体验问题走向生态过程与人类使用并存的复合框架。方法上,客观与主观路径并行推进,被动声学监测与AI、空间技术的组合日益常见,这可能意味着研究正

在从短时、点位式描述转向连续、可追踪的过程。理论支撑以声景观生态学与基础生态学为主,并吸收环境心理与感知理论,反映出生态解释与体验评价逐步融合的趋势,为后续机制讨论提供了清晰入口。

(2)从文献是否纳入生物多样性表征来看,相关研究虽已占据多数,但仍有较大比例未将其明确纳入,或在表征方式上呈现不够清晰。这一现象可能并非简单遗漏,而更像是两类研究传统并存:一类延续声环境与声景观评价路径,更关注体验与治理;另一类接近生态声学传统,将声音作为生态状态的外显信号。进一步看,在已纳入生物多样性的研究中,生物声占比、声音组成与特定类群最常见,而直接关注生物行为与活动的研究相对较少。这提示当前研究更倾向于采用易获取、可规模化的代理指标来表征生物多样性,但对于空间结构如何改变物种活动与发声策略的过程证据仍相对薄弱。据此可以推断,当前对“空间结构-生物多样性-声景观感知”关系的阐释,整体仍以相关性证据与间接指标为主。不同研究之间出现口径不一致,很大程度上与生物多样性在研究所对应的表征层面不同有关,例如将声音组成、特定类群与活动行为等指标并列使用而缺少统一界定。

(3)声学指标体系的使用呈现出指数化与标准化倾向。具体来说:声学指数类指标出现频率最高,复杂性与多样性相关指标紧随其后,传统声压级仍被较多采用。这种组合可以理解作为一种功能分工:声压级更适合反映干扰压力与治理目标,指数类指标更适合描述声景观结构及其生态信息,两者共同承担从物理量到生态与感知解释的桥梁功能。但也应看到,指标数量增加并不必然带来解释力提升,反而可能出现可比性不足

的问题^[1],例如相同指标在不同情境下对应的生态含义不一致,或不同指标表达相近概念而难以对齐^[2]。只有在口径与尺度更清晰的前提下,指标体系才能更可靠地支撑对空间结构-生物多样性-声景观感知关系的综合解释。综上,统计结果表明该领域正在由评价导向逐步走向机制导向。

2 空间结构对“生物多样性-声景观感知”关系的影响机制

2.1 空间结构要素的系统量化方法

系统梳理78篇文献中涉及生物多样性的51篇文献后发现,既有研究在刻画声景观感知的空间结构时,主要采用了4类维度:宏观景观格局、中微观场地构成、垂直三维特征以及物理界面特征。不同研究通常从上述维度中选取指标组合,用以描述空间结构差异并解释其对生物声与声景观体验的影响。

在宏观景观尺度上,既有研究通常借助GIS描述区域绿地格局,重点关注绿地是否被道路与建设用地分割、不同绿地之间是否保持联系,以及相对受干扰较小的核心绿地所占比例。此类信息可以反映一个区域为野生动物提供连续活动空间的能力,从而影响自然声出现的稳定性与连续性^[3]。一般而言,绿地网络越连续、联系越紧密,动物迁移与活动越容易维持,自然声更可能稳定出现。相反,当绿地高度破碎时,活动空间被切割,物种分布更零散,自然声也更可能呈现间断与局部化^[4]。需要指出的是,宏观尺度分析更擅长揭示总体格局特征,但对具体场地内部的细部差异与局地过程的解释能力相对有限。而在中微观场地尺度上,研究关注具体空间内部的构成与邻近关系,通常从空间形态与地表要素两方面展开:一方面,通过描述空间的开敞与围合特征、通道与边

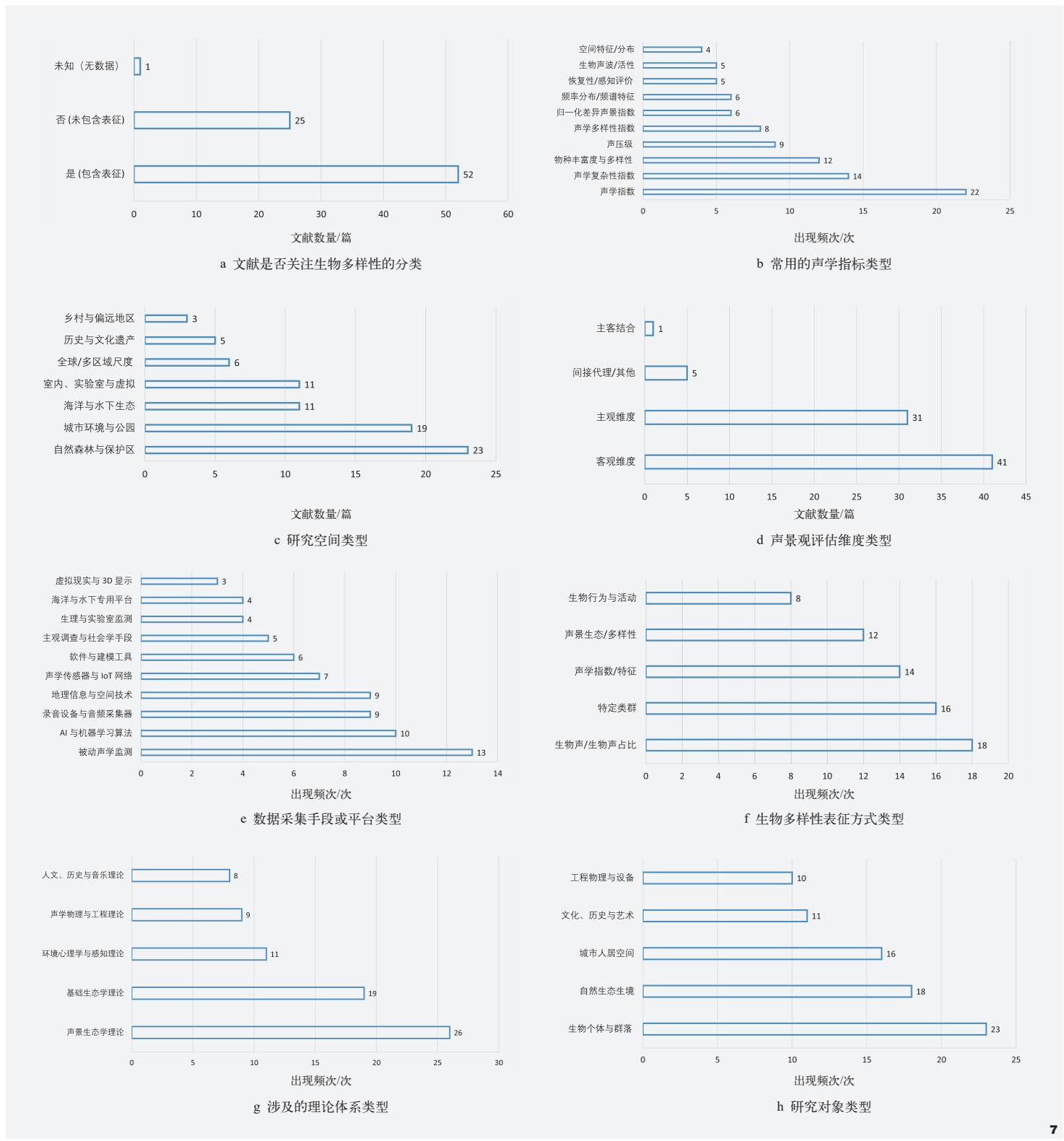


图7 核心文献样本的研究特征统计概况 (n=78)
Fig. 7 Statistical overview of research characteristics in core literature samples (n=78)

界的组织方式，解释声音在场地内更倾向于扩散还是更容易被削弱；另一方面，通过统计建筑、硬质铺装、水体与植被等地表要素的比例与布局，分析不同空间组成对噪声反射、吸收与遮挡的可能影响。同时，研究常比较监测点位与道路、施工等噪声来源的距离，或与水体、林缘等生态要素的距离，以解释声景观差异的空间来源。在密度城市环境中，仅依赖较为粗糙的场地指标可能难以捕捉关键的细微差别，因此部分研究会进一步强调边界与过渡带特征如边界形态与缓冲空间，以更好解释“边缘-内部”在噪声影响与自然声保留上的差异。总体而言，宏观尺度研究主要刻画区域层面的绿地连续性与生态基础，为自然声出现提供背景解释。中微观尺度研究则更直接对应具体场地的空间组成与噪声影响路径，有助于解释人们在现场所感受到的声景观差异。如果通过整合宏观格局与中微观构型的分析，则可以有效弥补单一尺度的局限性^[5]，从而为解析“空间结构-声景观感知”的关系提供更为多维且完整的理论支撑。

垂直结构的表征已从以往的概括性描述，逐步转向对三维形态特征的定量刻画，并尝试将其与生态声学过程联系起来。在指标选择上，既有研究主要从三类信息入手：(1) 植被的基本几何特征，如树高、冠层高度与林木密度等；(2) 垂直方向的空间空隙特征，如林冠开口程度、林窗比例与垂直通透性等；(3) 垂直结构的复杂程度，如不同高度层级的分布差异与分层多样性等，用以反映植被在三维空间中的层次与异质性。在数据获取与分析方法方面，激光雷达(LiDAR)是当前较常用的三维数据来源，可用于构建冠层高度等空间信息，并较为完整地还原植被的立体结构^[6-7]。在此基础上，部分研究结

合声学传播的模拟或分层观测，例如在不同高度布设传感器，以分析声音在不同高度层位中的衰减与变化规律^[8]；也有研究引入统计或机器学习方法，用于评估不同垂直结构变量对声学多样性指标的相对贡献，从而识别可能更关键的结构要素^[9-10]。尽管垂直结构的量化手段不断丰富，但仍存在若干局限。首先，现有研究多以静态结构指标为主，容易忽略生物在垂直空间中的行为调整^[11]，例如在噪声压力下改变活动高度或鸣叫位置^[12]，从而限制了对复杂声景观形成过程的解释。其次，LiDAR等数据往往以俯视视角获取，与人类听觉体验或动物活动所处的近地视角并不完全一致，可能带来一定的尺度与视角偏差^[13]。此外，在结构高度复杂的生境中，部分三维指标的变化未必能在声景观指标上表现出同等幅度的响应，导致模型关系呈现不稳定或指标响应变弱甚至趋于饱和的情况。未来研究有必要加强跨尺度数据的整合，并引入季节变化、物候过程等动态信息，以提升对声景观感知与生态过程之间联系的解释力。

垂直结构与物理界面虽然都涉及三维空间特征，但两者的关注重点与作用方式并不相同。前者主要描述植被等要素在空间内部的层次与复杂程度，强调“空间内部被如何填充”；后者则强调空间边界的形态与构成，关注“空间被怎样围合、哪些方向更开放”。因此，在声景观研究中，物理界面更直接对应声音的传播路径与外部噪声的进入方式，是解释“同一声源在不同场所听起来为何不同”的重要结构因素^[14]。从既有研究的指标使用来看，物理界面的表征多集中在边界形态及其围合程度上^[15-16]。常见做法包括用高宽关系、开敞程度、边界闭合程度以及边界形态的复杂程度等指标，描述空间对声音

的“收束”或“扩散”趋势，并据此推断噪声渗透与声场组织的差异。部分研究还结合空间通达性与路径组织等分析思路，识别哪些方向更易成为噪声进入的通道，或哪些边界更可能形成有效的屏蔽^[15-16]。与此同时，也会把建筑界面、屏障设施、地形起伏等作为关键边界条件纳入考虑，以更贴近真实场景中“边界如何影响声音”的过程。在方法手段上，物理界面的研究既包含基于空间数据的统计与空间分析，也包括针对典型场景的声传播模拟，用于理解不同边界形态下反射、绕行与衰减的可能规律，并在空间上呈现声环境特征的差异分布^[17]。总体而言，研究表明：空间边界不仅是视觉上的分隔，也会通过改变声音的传播方式，影响生物声是否更易被听清，以及外部噪声是否更容易侵入。不过，从研究现状看，物理界面的量化仍存在明显不足。首先，许多研究更重视边界“形状与比例”的描述，而对边界材料差异的关注相对有限，导致难以区分硬质建筑表面与柔性生态界面在吸收与反射上的不同作用^[15]。其次，现有分析多以静态结构为主，较少考虑季节变化或植被生长带来的边界特性变化，从而可能低估界面在不同时间尺度上的波动影响^[18-19]。此外，物理界面往往还承载场所意义与使用方式，这可能改变人们对噪声的容忍度与对环境的整体判断，但相关因素在量化研究中常被弱化或遗漏^[20]。

每个维度都涵盖了不同的空间特征及其对生态过程和声景观感知的影响。宏观景观格局侧重于大尺度的生态系统完整性，中微观场地构型则关注具体场地内的空间关系与声场影响；垂直形态深入研究了植被的三维复杂性对声景观的扩散与生态位分化的作用；而物理界面则探讨了空间边界在声波传播中的物理约束和声景观的影响机制。尽管

现有的量化方法取得了重要进展,但在处理复杂环境与动态变化时仍面临一些局限。

2.2 生境塑造

生境塑造路径强调一种较为清晰的因果关系:空间结构通过改变栖息条件与生态过程,影响鸟类、昆虫等发声生物能否长期停留、繁殖与活动,进而影响发声物种的组成及其声音在时间与空间上的分布^[21-23]。因此,声景观中生物声的丰富程度并非自然出现,也不仅取决于个体偏好,而在很大程度上取决于空间环境所提供的生存条件^[24]。换言之,空间结构先影响生物群落的形成与稳定性,生物群落再决定可被感知的自然声音基础。

(1) 在较大的空间尺度上,生境面积、破碎化程度与连通性通常被认为是影响生物多样性的关键因素^[25-26]。一般而言,面积较大的绿地更容易形成相对稳定的内部区域,资源供给更连续,外界干扰也较难深入,从而更有利于多种生物长期存在。相反,当绿地被道路与建设用地切割为较多小斑块时,栖息地之间的联系减弱,物种迁移与扩散受限,部分对环境敏感的物种更容易减少或消失。同时,连通性不仅决定生物能否到达某一生境,也影响不同斑块之间是否能够形成更稳定的活动与补充关系。当廊道、绿带或连续绿地维持斑块间联系时,更有利于维持区域物种组成的完整性与稳定性^[27]。由此,宏观格局通过改变生境是否足够连续、是否易受外界干扰等条件,影响自然声源出现的潜力与稳定性。

(2) 在局地尺度与三维空间层面,植被的层次结构与环境异质性会进一步影响生物活动的类型与强度。具有较丰富层次的植被结构(如乔木、灌木与地被层共同构成的立

体空间)能够提供更差异化的栖息与活动位置,使不同物种在高度、隐蔽性与资源利用上形成分化,从而提高共存的可能性^[28-29]。对声景观而言,这种结构差异往往会转化为更丰富的声音组成:不同类群在不同位置与时段以不同方式发声,使环境声在节律与层次上更为多样。简言之,垂直结构越清晰、空间层次越丰富,生物声更可能呈现出更稳定且更具层次感的表现。

(3) 生境塑造不仅涉及绿量多少,也与生境类型及其管理方式密切相关。森林、湿地、灌丛等不同生境类型对应不同的微气候、食物资源与栖息条件,从而吸引不同的发声类群^[30]。在城市环境中,即使某处具备一定植被覆盖,如果周边干扰强、硬质空间占比高、生态联系不足,也可能难以维持稳定且多样的生物群落,进而使生物声表现为声源较少、类型较单一或时段不稳定^[31]。因此,空间结构对生物声景观的影响,往往体现为对生态承载能力的塑造:更连续、更稳定、层次更丰富的生境,更可能支撑更稳定且多样的自然声源供给。

总体而言,生境塑造路径表明,空间结构并非声景观的简单背景,而是生物声能否持续、丰富出现的重要前提。若目标在于提升声景观的自然性与恢复性体验,相关空间策略应优先面向生境条件的改善,例如增加有效生境面积、提升绿地连续性与连接性、优化植被层次结构,并尽可能降低破碎化与边缘干扰,从而为更多发声物种提供可持续的栖息与活动空间。

2.3 物理调节机制

与“生境塑造”主要解释“声源是否存在、是否充足”不同,物理调节机制关注的是:在声源条件相近的情况下,空间的形态

与材料仍会显著影响声音的传播方式与可听性,从而改变人们对声景观的整体体验。空间结构在这一过程中相当于对声音进行“筛选与重组”:其影响声音在传播过程中的衰减、扩散与清晰度,同时决定外部噪声进入与扩散的程度。因此,声景观质量的差异往往不只是“有没有自然声”,更取决于自然声能否被保留并清晰呈现,以及噪声是否被控制在可接受范围内。

(1) 空间的屏蔽与缓冲能力决定外部噪声能否被有效削弱。在城市环境中,交通噪声常常构成主要干扰。当场地边界具有连续植被带、一定宽度的缓冲空间,或由地形与构筑物形成遮挡时,噪声更难以直接渗透到内部,内部空间更可能维持相对稳定的听觉背景^[32]。相反,边界开口过多、与道路直接连通、缺少过渡带时,噪声更易进入并扩散,使声景观更接近城市底噪^[33]。由此可见,空间结构不仅划分视觉边界,也在声学意义上影响“主要听到什么”。

(2) 空间的开敞或围合会改变声音的扩散方式及相应的听觉感受。开敞空间中声音传播更直接,外部噪声更容易进入并向更大范围扩散,自然声也更容易被背景噪声稀释。而围合较强的空间如林下空间或被植被与构筑物包围的活动点,往往能削弱噪声的直达传播,使声音在局部更集中、更具场所感,并更容易形成安静与舒适的体验^[34]。这类差异在一定程度上与空间几何特征相关,例如围合程度与开敞程度等,它们影响声音是否更易被“收束”或更易扩散。

(3) 边界形态与地形起伏会改变噪声进入与传播路径,从而影响声景观的稳定性。边界更曲折、结构更复杂时,噪声的直线传播更容易被打断,进入过程中的能量损失增加。地形起伏同样可能形成遮挡,使某些方

向的噪声较难侵入。因此，边界与地形不仅具有形态意义，也在过程层面影响不同声源在场地中的可达性与相对占比。

(4) 材料与界面类型会通过反射与吸收差异影响声音的清晰度与听觉质感。硬质表面如混凝土与硬铺装更易产生反射，使噪声叠加并增强^[35]。柔性界面如草地、土壤与灌木则更有利于削弱部分声能，使环境声更柔和，并提高自然声被辨识的可能性^[36]。因此，仅讨论空间形态而忽略材料差异，往往难以解释形态相近场地的声景观体验差别。

(5) 持续的背景噪声会通过掩蔽作用降低自然声的可分辨性。尤其在低频交通噪声占主导时，人耳更难从背景中辨认较细微或较高频的生物声信号，即使声源并未减少，仍可能表现为自然性与丰富度下降，并削弱恢复性体验^[37]。由此可见，物理调节机制不一定改变声源本身，但会显著改变声音能否有效呈现与被清晰感知。

综上，空间结构通过削弱噪声进入、调节声音扩散、改变界面反射与吸收条件，并降低掩蔽效应等过程，塑造人们实际听到的声音组合及其清晰程度，从而影响声景观体验质量。该机制与生境塑造路径相互补充：前者强调声音如何呈现并被听见，后者强调声源是否稳定与多样；二者共同构成空间结构影响声景观的关键解释路径。

2.4 空间结构对感知的塑造

空间结构对声景观的作用并不止于“声源是否丰富”或“声音是否被削弱”，其最终影响还体现在人们对环境的整体感知与评价上。即便自然声或噪声水平相近，不同空间仍可能带来截然不同的体验。这表明，空间结构不仅改变人们“听到什么”，也会影响人们“如何理解这些声音”以及“如何判断场

所品质”。因此，感知层面的机制关注的是：空间通过可见线索与场所特征影响注意力分配与意义判断，从而塑造声景观的情绪反应与总体评价。

(1) 空间的开敞与围合特征会影响舒适度与安全感，并间接改变对声景的评价。开阔空间通常视野更大、方向感更强，但也可能带来较强的暴露感。当外部噪声较明显时，人们更容易把环境理解为“更接近城市背景”，从而降低对声景的正向评价。相对而言，适度围合的空间如林下路径或被植被包围的停留点，更容易提供稳定的环境感，使人更倾向于形成“可停留、较放松”的判断，并更容易将声环境体验为舒适或具有恢复性^[38]。需要强调的是，关键并非围合越强越好，而是空间能够提供适度遮蔽与清晰的使用边界，使个体获得相对可控的停留体验。

(2) 边界与过渡空间会影响人们对声音来源的解释方式，从而改变声景观评价。具有明确过渡带的场所，例如由林带、绿化缓冲区逐步进入内部空间，更容易形成“从城市到绿地”的感受，使人对偶发噪声的敏感度降低。而缺少过渡、与道路直接相连或开口过多的空间更容易让人持续保持“处于城市噪声环境”的判断，从而放大噪声的不适感^[39]。换言之，空间结构不仅影响噪声能否进入，也影响噪声被理解为“干扰”还是“背景”，这种差异体现在满意度与舒适度评价上。

(3) 空间层次与要素组合会影响注意力分配，进而影响对声景丰富度与自然性的感受。若空间单一、重复，人们更容易把注意力集中在突出的干扰声上。而当空间具有一定变化与层次，如不同景观单元的组合、动线与节点的节奏变化，更容易引导注意力转

向更具意义的自然声^[40]。尤其在视觉上能够识别到自然要素时，人们更倾向于把听到的声音纳入“自然场景”的解释框架，从而提升对声景的正向评价。这种“视觉线索提供解释背景”的作用，有助于理解为何部分研究中视觉环境与声景评价呈现一致趋势。

(4) 空间的可达性与停留条件也会影响声景观体验的形成。步道组织、节点设置与停留空间的舒适性，会影响人们是快速经过还是愿意停留观察。停留时间越长，个体越可能对环境声进行更细致的辨识，并形成更稳定的评价。若缺乏遮阴、座椅等停留条件，或动线过于贴近噪声来源，即便存在一定自然声，也不易形成良好的整体体验^[41]。反之，将主要活动点布置在相对安静且声环境稳定的位置，更容易提升“友好、放松、适宜停留”的总体感受。

(5) 背景尺度的空间格局会放大或削弱上述感知机制。若更大范围内道路密度高、硬质空间占比大，城市底噪较强，即便局部空间做了优化，人们仍可能持续感知到噪声压力并降低评价^[42]。反之，当周边绿地连续、背景噪声较低时，局部空间的围合、边界与材料优化更容易转化为可感知的改善^[43]。总体而言，空间结构对感知的塑造体现为：其不仅影响声音本身，也通过影响注意力与意义判断改变人们对声景的解释与情绪反应。只有将空间形态、边界组织与停留条件与更大尺度背景共同考虑，才能使生态与声学层面的改善更有效地转化为可被感知的声景品质提升。

3 未来研究方向

未来研究可在跨尺度、多部门协同治理框架下推进。将声景观研究从以“声压级控制”或“主观评价”为主的单一议题，提升为

连接空间规划决策、生态过程表征、人群健康效应评估与治理措施优化的综合研究对象。

首先, 应加强声景指标体系与城市空间规划工具的耦合, 将声景质量评价与土地利用强度、道路网络结构、绿地连通格局、慢行系统组织与公共空间停留行为等关键空间变量协同纳入规划分析, 使“声景质量”能够转译为可操作的空间策略与管控条款。

其次, 治理目标应兼顾“降低干扰”与“提升品质”。仅降低噪声往往不足以带来更好的声环境体验, 更重要的是在控制噪声的同时提高自然声的可感知性与场所的恢复性。对应的策略可包括: 通过道路噪声管理、边界屏蔽与界面材料优化降低外部干扰; 同时通过植被层次优化、水体与栖息空间营造、活动空间与动线调整等方式, 增强自然声在空间中的呈现与稳定性。这一方向在城市绿地、公园边界与休闲步道等典型场景中具有较强的应用价值, 也更容易与公共健康目标形成对接。

从生态协同角度看, 声景研究应更明确地和生物多样性保护与栖息地管理结合。声景的自然性与多样性往往反映生态质量, 而生态干预也会改变声景表现。未来可围绕植被结构、绿地连通性与城市森林管理等关键因素, 进一步检验其对鸟类、昆虫等重要类群活动与发声的影响, 并关注声景在季节尺度上的稳定性与变化规律。尤其是“声景—鸟类行为—栖息地选择”的研究链条, 有助于解释城市生物多样性维持的空间条件, 并为保护与修复优先区的识别提供依据。

在技术路径上, 生态声学在生态监测、退化识别与恢复评估中的潜力仍有待系统释放。连续声学监测可用于跟踪森林退化、火灾扰动等事件后的生态变化, 并为修复成效提供动态证据; 结合物种识别、声源定位与

智能算法, 可进一步提升对物种活动与空间使用的推断能力, 为多场景、长时间尺度的生态管理提供支持。总体而言, 协同视角下的研究应强调跨尺度整合与可转译应用, 使声景观在规划设计、治理实践与生态管理之间发挥更稳定的连接作用。

4 结语

综上所述, 本文基于文献计量、主题演化与核心文献梳理, 揭示了声景观研究在“空间结构”维度上的明显缺口: 尽管相关研究数量持续增长, 但多数工作仍停留在空间类型描述或感知评价层面, 针对空间结构要素及其作用链条的系统讨论相对不足。通过对“spatial structure + soundscape”核心文献的归纳可以看出, 国际研究正在由以人为中心的评价导向, 逐步转向将声景观与生物多样性、生态过程及空间组织机制相结合的综合视角, 而国内研究在该方向仍处于起步阶段, 亟须形成更稳定的研究框架与方法谱系。

在此基础上, 本文进一步将既有研究中零散的解释路径整合为“逐步深入”的分析逻辑: 空间结构首先通过生境条件塑造生物群落与生物声源的基础, 其次通过形态与界面材料等特征改变声音的传播与可听性, 最终通过空间线索与场所判断影响个体对声景观的理解、情绪反应与总体评价。该逻辑强调, 声景观既是生态与声学过程的结果, 也是一种被人解释与体验的环境品质; 只有同时关注“声源—传播—感知”三个层面, 才能更完整地解释不同空间中声景观差异的来源。

面向未来, 声景观研究有必要进一步加强跨尺度整合与跨学科协同: 在城市规划与景观设计中, 将声景质量与道路系统、绿地格局、慢行网络及停留空间组织联动; 在生态保护与管理中, 把声学监测与生物多样性

保护、栖息地修复评估结合; 在方法层面, 推动声学数据、空间数据与感知数据的融合, 以形成更可验证、可转译、可应用的研究体系, 从而为宜居城市建设与生态系统健康提供更具有操作性的科学支撑。

注: 文中图片均由作者绘制。

参考文献

- [1] METCALF O C, NUNES C A, ABRAHAMS C, et al. The Efficacy of Acoustic Indices for Monitoring Abundance and Diversity in Soil Soundscapes[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 169: 112954.
- [2] BRADFER-LAWRENCE T, DESJONQUERES C, ELDRIDGE A, et al. Using Acoustic Indices in Ecology: Guidance on Study Design, Analyses and Interpretation[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2023, 14(9): 2192-2204.
- [3] KIRK H, SOANES K, AMATI M, et al. Ecological Connectivity as a Planning Tool for the Conservation of Wildlife in Cities[J]. *MethodsX*, 2023, 10: 101989.
- [4] PĂTRU-STUPARIU I, MUSTĂŢE M, NIŢĂ M R, et al. Landscape Fragmentation and Connectivity as Key Variables on Occurrence of Human-wildlife Interactions[J]. *Annals of Forest Research*, 2024, 67(1): 55-76.
- [5] LIU J, HUANG Y J, CHEN Z, et al. Multi-scale Effects of Landscape Pattern on Soundscape Perception in Residential Green Spaces[J]. *Forests*, 2023, 14(12): 2323.
- [6] HANSEN F, BARTON D N, VENTER Z S, et al. Utilizing LiDAR Data to Map Tree Canopy for Urban Ecosystem Extent and Condition Accounts in Oslo[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108007.
- [7] 陆灯盛, 蒋先姝, 李云鹤, 等. 基于激光雷达数据的森林生物量估测研究[J]. *遥感学报*, 2025, 29(6): 2035-2064.
- [8] BROWNING E, GIBB R, GLOVER-KAPFER P, et al. Passive Acoustic Monitoring in Ecology and Conservation[R]. Woking: WWF-UK, 2017.
- [9] KEEN S C, ODOM K J, WEBSTER M S, et al. A Machine Learning Approach for Classifying and Quantifying Acoustic Diversity[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2021, 12(7): 1213-1225.
- [10] ZHAO Y L, SUN Z K, BAI Z T, et al. How Vegetation Structure Shapes the Soundscape:

- Acoustic Community Partitioning and Its Implications for Urban Forestry Management[J]. *Forests*, 2025, 16(4): 669.
- [11] JAIN M, BALAKRISHNAN R. Does Acoustic Adaptation Drive Vertical Stratification? A Test in a Tropical Cricket Assemblage[J]. *Behavioral Ecology*, 2012, 23(2): 343-354.
- [12] ERBE C, DENT M L, GANNON W L, et al. The Effects of Noise on Animals[M]// *Exploring Animal Behavior Through Sound: Volume 1*. Cham: Springer International Publishing, 2022: 459-506.
- [13] SENF C. Seeing the System from Above: The Use and Potential of Remote Sensing for Studying Ecosystem Dynamics[J]. *Ecosystems*, 2022, 25(8): 1719-1737.
- [14] GRINFEDER E, LORENZI C, HAUPERT S, et al. What Do We Mean by “Soundscape”? A Functional Description[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 894232.
- [15] BALDERRAMA A, KANG J, PRIETO A, et al. Effects of Façades on Urban Acoustic Environment and Soundscape: A Systematic Review[J]. *Sustainability*, 2022, 14(15): 9670.
- [16] YILMAZ N G, LEE P J, IMRAN M, et al. Role of Sounds in Perception of Enclosure in Urban Street Canyons[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 90: 104394.
- [17] WU H P, JIAN K, JIN H. Effects of Urban Street Spatial Parameters on Sound Propagation[J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2019, 46(2): 341-358.
- [18] GAUDON J M, MCTAVISH M J, HAMBERG J, et al. Noise Attenuation Varies by Interactions of Land Cover and Season in an Urban/Peri-urban Landscape[J]. *Urban Ecosystems*, 2022, 25(3): 811-818.
- [19] HAO Z Z, WANG C, SUN Z K, et al. Vegetation Structure and Temporality Influence the Dominance, Diversity, and Composition of Forest Acoustic Communities[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 482: 118871.
- [20] ZHAO W, RUI Q X, ZHU X, et al. Effect of Soundscape on Place Attachment for Historical Blocks: A Case Study of Harbin, China[J]. *Buildings*, 2023, 13(3): 607.
- [21] WOLTZ J M, ISAACS R, LANDIS D A. Landscape Structure and Habitat Management Differentially Influence Insect Natural Enemies in an Agricultural Landscape[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 152: 40-49.
- [22] TOBISCH C, ROJAS-BOTERO S, UHLER J, et al. Plant Species Composition and Local Habitat Conditions as Primary Determinants of Terrestrial Arthropod Assemblages[J]. *Oecologia*, 2023, 201(3): 813-825.
- [23] MUDERERE T, MURWIRA A, TAGWIREYI P, et al. Landscape Structure Influences Avian Species Diversity in Tropical Urban Mosaics[J]. *BioRxiv*, 2018: 388702.
- [24] 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.
- [25] WILSON M C, CHEN X Y, CORLETT R T, et al. Habitat Fragmentation and Biodiversity Conservation: Key Findings and Future Challenges[J]. *Landscape Ecology*, 2016, 31(2): 219-227.
- [26] BATTISTI C, GALLITELLI L, SCALICI M, et al. Habitat Fragmentation, Connectivity Conservation and Related Key-Concepts: Temporal Trends in Their Recurrences on Web of Science (1960-2020)[J]. *Land*, 2022, 11(2): 230.
- [27] SHTILERMAN E, STONE L. The Effects of Connectivity on Metapopulation Persistence: Network Symmetry and Degree Correlations[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2015, 282(1806): 20150203.
- [28] OLIVEIRA B F, SCHEFFERS B R. Vertical Stratification Influences Global Patterns of Biodiversity[J]. *Ecography*, 2019, 42(2): 249.
- [29] ISHII H, AZUMA W, NABESHIMA E. The Need for a Canopy Perspective to Understand the Importance of Phenotypic Plasticity for Promoting Species Coexistence and Light-use Complementarity in Forest Ecosystems[J]. *Ecological Research*, 2013, 28(2): 191-198.
- [30] DO NASCIMENTO L A, CAMPOS-CERQUEIRA M, BEARD K H. Acoustic Metrics Predict Habitat Type and Vegetation Structure in the Amazon[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106679.
- [31] BIELLA P, BANI L, CAPRIO E, et al. Biodiversity-friendly Practices to Support Urban Nature Across Ecosystem Levels in Green Areas at Different Scales[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2025, 105: 128682.
- [32] CICHA M. The Effect of a Vegetation Buffer on Sound Levels[J]. 2022.
- [33] OZTURK Z S, KANG J, ALETTA F. Soundscape Research in Streets: A Scoping Review[J]. *Sustainability*, 2025, 17(8): 3329.
- [34] KIM M J, YANG H S, KANG J. A Case Study on Controlling Sound Fields in a Courtyard by Landscape Designs[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 123: 10-20.
- [35] FEDIUK R, AMRAN M, VATIN N, et al. Acoustic Properties of Innovative Concretes: A Review[J]. *Materials*, 2021, 14(2): 398.
- [36] OQUENDO-DI COSOLA V, NAVACERRADA M Á, RUIZ-GARCÍA L, et al. Evaluating the Acoustic Absorption of Modular Vegetation Systems: Laboratory and Field Assessments Using an Impedance Gun[J]. *Buildings*, 2025, 15(3): 389.
- [37] GRINFEDER E, SUEUR J, MCWALTER R, et al. Auditory Perception of Biodiversity by Human Listeners[J]. *Frontiers in Psychology*, 2025, 16: 1552329.
- [38] LIU J, LIU F, TONG H R, et al. Differences in Soundscape Perception of Plants Space in Urban Green Space and the Influence of Factors: The Case of Fuzhou, China[J]. *Forests*, 2024, 15(3): 417.
- [39] REY-GOZALO G, BARRIGÓN MORILLAS J M, MONTES GONZÁLEZ D, et al. Influence of Green Areas on the Urban Sound Environment[J]. *Current Pollution Reports*, 2023, 9(4): 746-759.
- [40] LIN J S, ZHANG M Q, WANG Y Y, et al. Factors Influencing Natural and Cultural Soundscape Interactions on Perceptual Experiences in Forested-Historical Interface Areas[J]. *Buildings*, 2025, 15(22): 4103.
- [41] 刘江, 韩海娟, 陈铸. 历史街区生态系统文化服务提升的景感设计实践框架与评价指标体系研究[J]. *景观设计学(中英文)*, 2024, 12(6): 62-83.
- [42] REY GOZALO G, SUÁREZ E, MONTENEGRO A L, et al. Noise Estimation Using Road and Urban Features[J]. *Sustainability*, 2020, 12(21): 9217.
- [43] KORPILO S, NYBERG E, VIERIKKO K, et al. Landscape and Soundscape Quality Promote Stress Recovery in Nearby Urban Nature: A Multisensory Field Experiment[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2024, 95: 128286.