北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

街道绿地降噪频谱特征的时空异质性

李朦朦 孟琪 康健 周小慧

Spatiotemporal heterogeneity of noise reduction spectral characteristics in street green spaces

Li Mengmeng, Meng Qi, Kang Jian, Zhou Xiaohui

引用本文:
李朦朦, 孟琪, 康健, 周小慧. 街道绿地降噪频谱特征的时空异质性[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(12):135–144. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240386
Li Mengmeng, Meng Qi, Kang Jian, Zhou Xiaohui. Spatiotemporal heterogeneity of noise reduction spectral characteristics in street green spaces[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12):135–144. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240386

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240386

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于质量异质性的太原城市公园绿地可达性与公平性评价
Evaluation of accessibility and fairness of urban park green spaces in Taiyuan, Shanxi Province of northern China based on quality heterogeneity
北京林业大学学报, 2025, 47(9): 129–142. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240167

黄河流域生态系统服务价值时空异质性及驱动因素分析
Spatiotemporal heterogeneity and driving factors of ecosystem service value in the Yellow River Basin
北京林业大学学报, 2024, 46(6): 70–81. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230226

板栗冠层光合特性的空间异质性研究
Spatial heterogeneity of photosynthetic characteristics in Chinese chestnut canopy
北京林业大学学报, 2020, 42(10): 71–83. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200059

北京园林树木秋色盛期的空间异质性及其对热环境差异的响应
Spatial heterogeneity in leaf coloring date and the phenological response to thermal environment variations of Beijing landscape trees
北京林业大学学报, 2024, 46(1): 119–130. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210546

现代气候、古气候和生境异质性对新疆不同生长型种子植物多样性的影响
Effects of current climate, paleoclimate and habitat heterogeneity on diversity of seed plants with different growth forms in Xinjiang of northwestern China
北京林业大学学报, 2025, 47(10): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250231

上海城市街道小气候要素与绿化布局关系测析
Determination and analysis of the relationship between microclimate elements and greening structures in the city streets of Shanghai: taking Xuhui District and Yangpu District as examples
北京林业大学学报, 2021, 43(4): 124–131. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20170359

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240386

街道绿地降噪频谱特征的时空异质性

李朦朦[1] 孟 琪[1] 康 健[2] 周小慧[3]
（1. 哈尔滨工业大学建筑与设计学院，寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室，黑龙江 哈尔滨 150001；2. 英国伦敦大学学院环境设计与工程学院，伦敦 WC1H 0NN；3. 中国建筑设计研究院有限公司，北京 100044）

摘要:【目的】街道绿地降噪效果在时间维度上受叶片掉落过程中能见度变化的影响，在空间维度上受植物配置结构的影响。本研究旨在揭示能见度连续变化条件下，不同植物配置街道绿地降噪效应的频谱特征及其时空异质性规律。**【方法】**以街道绿地植物为研究对象，在道路旁和绿地后方设置测点，采集不同能见度阶段的声压级数据，并计算降噪效果。通过相关性分析提取叶片掉落动态过程中，绿地降噪效果的影响因素，并构建乔灌木胸径、高度与降噪效果之间的线性模型。**【结果】**（1）随着交通噪声频率的增加，街道绿地降噪效果呈“波动（< 200 Hz）—稳定（200 ~ 2 000 Hz）—上升（> 2 000 Hz）”趋势，能见度对绿地降高频（> 2 000 Hz）交通噪声效果的影响更显著。（2）不同植物配置下，能见度变化对降噪效果的影响不同，整体呈现随能见度增加降噪效果降低的趋势。（3）垂直方向结构复杂度对提升街道绿地降噪效果较为重要。能见度为低与中时，绿地对高频噪声的衰减效果优于中低频，而能见度为高时，绿地对低频噪声的衰减效果较好。（4）能见度低时，绿地降噪效果主要受绿篱宽度及乔灌木胸径、高度等因素影响；其中叶片掉落动态过程中，绿地降噪效果的主要影响因素为乔灌木胸径、高度。**【结论】**街道绿地植物降噪呈现显著的时空异质性，能见度对降噪效果的影响在不同类型绿地中差异性明显。本研究丰富了街道绿地植物降噪的理论基础，并为面向噪声控制的城市景观设计提供了科学依据。

关键词：街道绿地；植物降噪；频谱特征；时空异质性；植物配置
中图分类号：TU984 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)12−0135−10
引文格式：李朦朦，孟琪，康健，等. 街道绿地降噪频谱特征的时空异质性 [J]. 北京林业大学学报，2025，47(12)：135−144.
Li Mengmeng, Meng Qi, Kang Jian, et al. Spatiotemporal heterogeneity of noise reduction spectral characteristics in street green spaces[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12): 135−144.

Spatiotemporal heterogeneity of noise reduction spectral characteristics in street green spaces

Li Mengmeng[1] Meng Qi[1] Kang Jian[2] Zhou Xiaohui[3]
(1. School of Architecture and Design, Harbin Institute of Technology, Key Laboratory of Cold Region Urban and Rural Human Settlement Environment Science and Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China;
2. University College London, UCL Institute for Environmental Design and Engineering, London WC1H 0NN, UK;
3. China Architecture Design & Research Group, Beijing 100044, China)

Abstract: [**Objective**] The noise reduction effect of street green spaces is influenced temporally by changes in optical poropsity during leaf-shedding and spatially by the plant configuration structures. This study aims to reveal the spectral characteristics and spatiotemporal heterogeneity of noise reduction in street green spaces with different plant configurations under continuously varying optical porosity conditions.

收稿日期: 2024−11−19 **修回日期:** 2025−11−17
基金项目: 国家自然科学基金项目（52308089、52478083）。
第一作者: 李朦朦，副研究员。主要研究方向：植物降噪。Email：mengmeng.li@hit.edu.cn 地址：150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街 92 号哈尔滨工业大学建筑与设计学院。
责任作者: 孟琪，教授。主要研究方向：建筑与环境声学。Email：mengq@hit.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

［**Method**］Taking street greenery vegetation as the research subject, measurement points were established along the roadside and behind the green belt to collect sound pressure level data at different stages of leaf-fall (representing varying porosity) and to calculate the noise reduction effect. Through correlation analysis, factors influencing noise reduction during the dynamic leaf-shedding process were identified. Subsequently, a linear model was developed to relate noise reduction to the DBH and height of trees and shrubs. ［**Result**］(1) As traffic noise frequency increased, the noise reduction effect of street green spaces exhibited a trend of “fluctuation (< 200 Hz) - stabilization (200−2 000 Hz) - increase (> 2 000 Hz)”. Optical porosity has a more pronounced impact on the attenuation of high-frequency (> 2 000 Hz) traffic noise in our measurements. (2) The influence of porosity variation on noise reduction differed among plant configurations, with a general trend of decreasing noise reduction effectiveness as porosity increased. (3) The complexity of the vertical structure was relatively important for enhancing the noise reduction effect of street green spaces. Under low to medium porosity conditions, green spaces attenuated high-frequency noise more effectively than mid-to-low frequency noise. In contrast, under high porosity conditions, they provided better attenuation of low-frequency noise. (4) At low porosity, the noise reduction effect of green spaces was primarily influenced by hedge width, and the DBH and height of trees and shrubs. During the dynamic process of leaf shedding, the key factors affecting noise reduction were the DBH and height of trees and shrubs. ［**Conclusion**］Noise reduction by street green space plants showed significant spatiotemporal heterogeneity, and the influence of optical porosity on noise reduction effect varied significantly among different types of green spaces. This study enriches the theoretical foundation of noise reduction by street greening and provides a scientific basis for control-oriented urban landscape design.

Key words: street greenspace; noise reduction by plants; spectral characteristics; spatio-temporal heterogeneity; planting design

随着科技进步与城市交通系统的快速发展，交通噪声问题日益凸显，严重影响城市居民的生活质量与健康[1]。目前，我国主要依赖隔声屏来控制交通噪声，但因其建设成本高、防护距离有限，且可能割裂城市空间景观，其应用范围受到限制。相比之下，街道绿地作为噪声污染源与人类日常活动空间之间的重要屏障[2−3]，不仅有助于改善城市生态环境[4−6]，其降噪功能也日益受到学术界与工程实践的关注[7−8]。

在植物配置方面，已有研究[9]表明不同植物物种的降噪能力存在显著差异。叶片覆盖面积[10]、叶形[11]、与声源之间夹角[12]、振动速度[13]、冠幅[14]和含水量[15]等因素均显著影响降噪效果。例如，Aylor[16]指出叶面密度大、叶片宽厚的物种对噪声衰减效果较为明显；Guo 等[17]研究发现，在相同宽度的街道绿地中，刺槐（*Robinia pseudoacacia*）的降噪效果优于杨树（*Populus* spp.）和柳树（*Salix* spp.）。木质结构特征如胸径[18]、树皮粗糙度[19]、针阔叶类型[18]等因素也显著影响降噪效果。Li 等[20]发现树皮厚度及树皮粗糙度大的物种具有更好的降噪性能，Lai 等[21]发现树干大小与降噪效果呈线性相关。尽管相关研究对植物配置因素进行了系统分析，但多数基于现场实测数据。然而，实测数据源自不同绿地，其植物长势各异，致使在分析影响因素时无法排除其他植物参数的干扰。

在林带结构层面，种植方式[21−22]、垂直结构[8, 23]、林带宽度、高度以及种植间距[24−26]等也是影响街道绿地降噪效果的重要因素。一项在德国、法国、英国不同城市进行的街道绿地降噪效果研究表明，即使宽度较窄（1.3 ~ 2.5 m），枝叶密实的垂直型绿地仍具备显著的降噪能力[27]。张秦英等[28]的研究也证实了乔灌层宽度是影响降噪效果的最主要因素。此外，胸径、枝下高、高度、叶面积指数、冠幅等也是影响绿地降噪效果最主要的林带形状特征参数[29−30]。袁玲[31]发现不同绿地结构的降噪频谱特征之间存在显著差异；在宽度与种植密度相同的条件下，随着叶片覆盖度增加，高频声的吸收和散射效率有所提升[32]。然而，现有实测研究多采用声压级作为衡量降噪效果的评价指标，侧重于构建基于植物林带形状特征参数的降噪效果预测模型，而对频谱特征的关注不足，未能充分利用植物不同结构对不同频率噪声的差异化衰减特性。

研究[33−34]表明，冬夏两季街道绿地降噪效果差异显著，反映出叶片覆盖度在植物降噪过程中的关键作用。然而，由于街道绿地植物结构复杂，单一指标（如叶片或枝干）难以全面表征其声学特性。能见度作为一个复合指标，可有效反映植物枝干及叶片

覆盖度的情况，有助于准确描述植物的综合特性，进而建立植物与降噪性能之间的联系[24,35]。能见度概念最早由 Eyring[36]提出，定义为从林带边缘沿垂直方向行走至无法被看见的距离。研究[24]发现能见度与植物带降噪效果呈负对数关系，即能见度越高（叶片覆盖密度越小），降噪效果越差。然而，不同植物配置下绿地的降噪效果差异显著[9,17]。现有研究在评估能见度对降噪效果的影响时，尚未依据植物配置情况对绿地进行分类与探讨，导致不同研究中能见度对降噪效果影响的重要性存在较大差异。现有研究多聚焦于茂叶期与落叶期的对比，而叶片动态凋落过程中能见度对降噪效果影响的研究仍较为缺乏。

基于此，本研究选取叶片凋落这一动态过程，针对不同植物配置的街道绿地开展降噪效果测试。以叶片凋落过程中能见度的变化表征时间维度，以植物配置表征空间维度，通过比较 3 类植物配置情况下连续变化的能见度对降噪效果频谱特征的影响，解析其时空异质性。最终量化对街道绿地植物降噪效果具有显著影响的因素，为面向噪声控制的街道绿地植物景观设计提供科学依据和实践指导。

1　研究区概况与研究方法

1.1　样地选取

为避免因交通拥堵导致的不同测试日期间声源波动、道路与绿地之间停放车辆对声传播的阻挡，以及绿地后方场地噪声干扰等潜在因素的影响，研究选取位于两条城市交通主干道之间的次干道作为噪声源，在满足一定车流量的同时，测试期间（18：00—20：00）内又无交通拥堵现象，确保了声源的相对稳定性。研究选取位于中学校园前的街道绿地为研究对象，满足测试期间内场地无噪声干扰，且该道路与绿地之间无车辆停放，有效控制了车辆遮挡对声传播的影响。此外，所选街道绿地为同一时期建设，树龄、地面材质、绿地宽度以及绿地与道路之间的距离等因素一致，可有效避免其他因素对本研究的潜在干扰，准确评估不同类型绿地空间能见度对降噪效果的影响。最后，鉴于植物物候特征对绿地能见度的决定性影响，本研究特选取过渡季长、叶片掉落现象显著的严寒地区作为观测场地。基于上述原因，研究选取哈尔滨市保健路旁的街道绿地为测试场地。

1.2　绿地结构调查

研究通过现场观察与测量的方式记录各绿地空间的结构特征，鉴于街道绿地的降噪效果主要受测试点周围 4 m 范围内植物参数的影响[37]，因此本研究在测试点 4 m 范围内对绿地空间的形状特征参数进行了测量与记录。研究采用无人机于 50 m 高度拍摄获取场地的航拍图（图 1）。研究街道总长 190 m，街道绿地（以丁香 *Syringa oblata* 为主）宽为 5.5 m，共选取了 10 个空间进行测试，其中空间 4 为空白对照组。本研究依据街道绿地的植物配置差异来表征其空间维度特征，并据此将所选绿地样本划分为 3 种类型。类型 1：街道绿地由单一高灌木组成（空间 1 ~ 3）；类型 2：街道绿地由高灌木与绿篱（小叶女贞 *Ligustrum quihoui*）组成（空间 5 ~ 7）；类型 3：街道绿地由高灌木与行道树（白杨 *Populus alba*）组成（空间 8 ~ 10）。表 1 显示了各空间绿地的形状特征参数，图 2 为街道绿地的断面图。

1.3　数据采集

为避免风速、地面反射等因素对研究结果的影响，测试日期选择为刚下过大雨后风速低于 2 m/s 的晴天。在测试场地叶片掉落的动态过程中，研究依据叶片掉落程度，基于 Eyring[36]提出的能见度概念，研究在叶片掉落动态过程中，通过人眼观测林带叶片掉落程度，分别选取能见度水平不同的 10 月 7 日（叶片尚未掉落，能见度低，12.3 ℃）、19 日（部分叶片掉落，能见度中等，9.8 ℃）和 31 日（叶片掉落较多，能见度高，9.1 ℃）进行测试，并以街道绿地的能见度差异来表征其时间维度特征。测试当天的航拍图（拍摄高度为 50 m）如图 3 所示，测试时间为 18：00—20：00。

本研究不同测试日期之间的最大温差为 3.2 ℃，该温差引起的声速理论差异（以测试日期的平均声速为依据）约为 0.57%。进一步分析不同测试日期之间空气湿度差异对声速理论值的影响，发现差异约为 0.08%。因此，本研究中不同测试日期之间温度、湿度的影响可忽略不计。此外，为避免风对测试结果的干扰，本研究所有测试均严格参照室外声环境测试标准（ISO10847:1997），在风速低于 2 m/s 的晴天内进行。测试仪器为 2 台 BSWA801（测试精度：

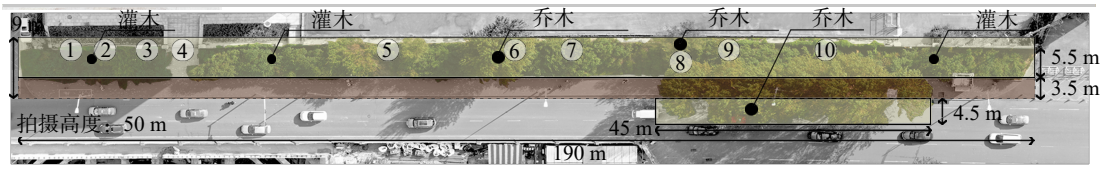


图 1　测点分布示意图

Fig. 1　Schematic diagram of measurement point distribution

表 1 街道绿地不同测点形状特征参数

Tab. 1 Characteristic parameters of different measurement point in tree belts

测点	枝干高/m	灌木胸径/cm	植株数	绿篱宽/cm	空隙长/m	灌木高度/m	乔木胸径/cm	乔木高/m
1	1.104	4.17	5		1.19	4.30		
2	0.817	5.10	5		0.99	3.92		
3	0.668	6.25	5		0.81	3.36		
4					5.00			
5	0.754	5.95	7	74.3		3.40		
6	0.368	3.20	6	189.0		2.80	36.50	12.53
7	0.459	5.75	5	118.0		2.97		
8	1.254	3.40	8		1.23	3.35	31.30	19.74
9	1.444	3.15	5			3.25	39.50	20.04
10	0.791	3.95	4			2.39	30.50	19.92

注：枝干高是指垂直方向最低叶片至地面之间的平均距离，即垂直方向可看到的枝干高度；植株数是指以噪声测量点连线为中心左右各2 m（4.0 m × 5.5 m）范围内的植株数量；所有数据均为均值。

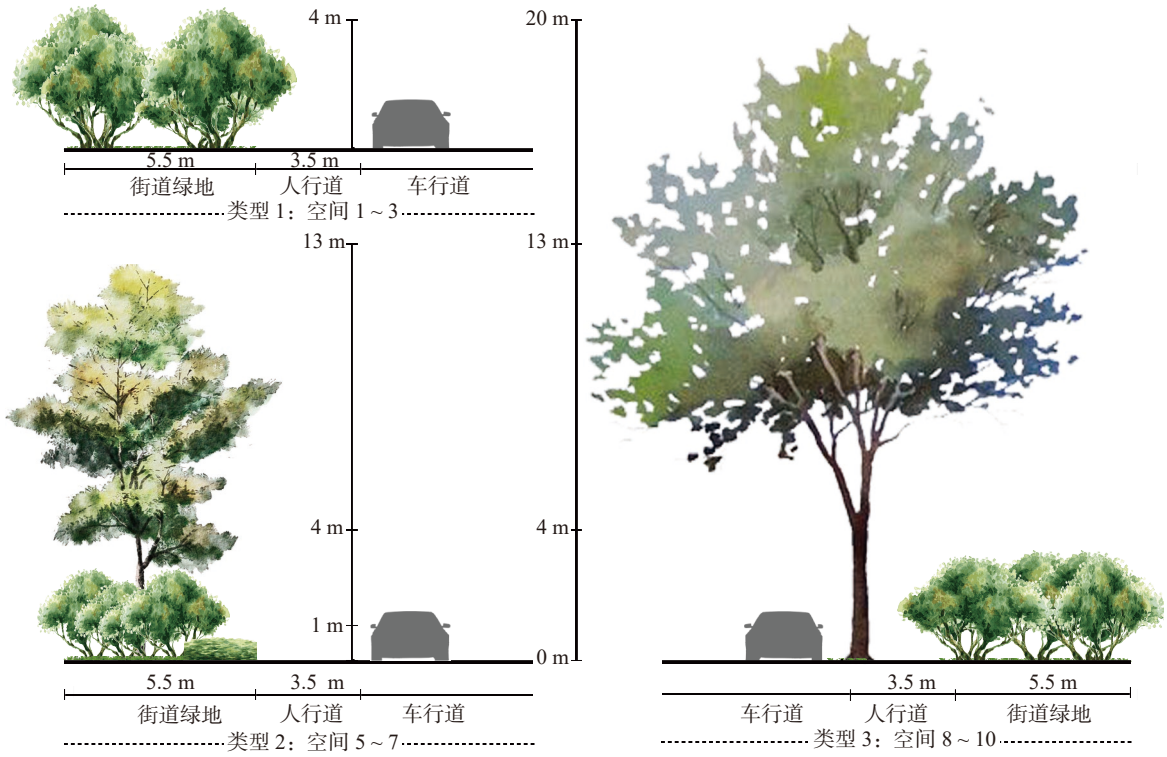


图 2 街道绿地断面图

Fig. 2 Section view of street green space

0.1 dB）多功能声级计，测试前使用校准器校准。测试时 2 台声级计同时进行，其中 1 台放置于距离道路 0 m 处的位置，另 1 台放置于距离道路 9 m 处的位置，其中 3.5 m 为人行道，5.5 m 为绿地。2 台 801 声级计的测试高度均为 1.5 m，每个空间测试时间为 2 min（采样频率：1 s^{-1}，共 120 个数据），共 10 组数据。

2 结果与分析

以空白对照组（空间 4）为基准，叶片掉落动态过程中各街道绿地空间降噪效果的频谱特征分析显示（图 4），同一类型绿地各空间降噪效果无显著差异，而不同类型绿地之间，降噪效果差异显著。此外，低能见度条件下，各绿地空间降噪效果差异显著，而中、高能见度下，各绿地空间降噪效果较为相似。尽管绿地空间降噪效果呈现显著的时空异质性，但不同绿地空间降噪效果的频谱特征呈现相似的变化趋势。不同能见度条件下降噪效果随频率的增加呈“波动（< 200 Hz）—稳定（200 ~ 2 000 Hz）—上升（> 2 000 Hz）”趋势，且能见度对高频（> 2 000 Hz）噪声的衰减作用更显著。

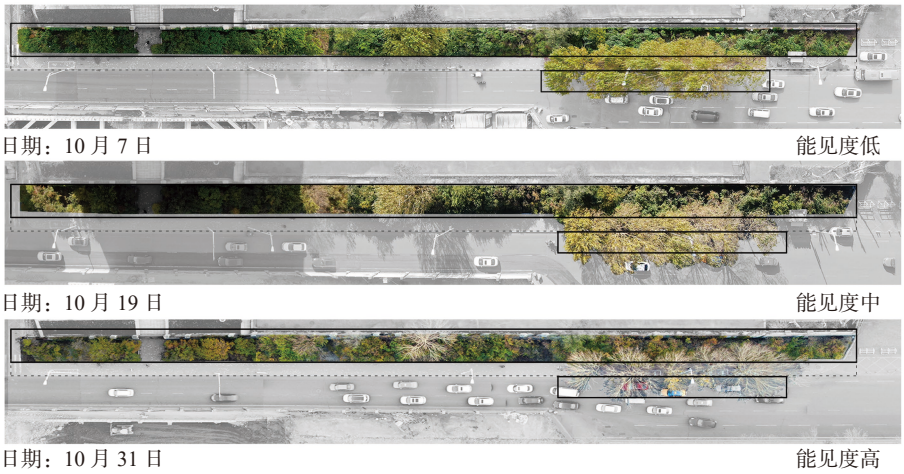


图 3　叶片掉落过程中测试场地航拍

Fig. 3　Aerial photography of the measurement site during leaf-shedding process

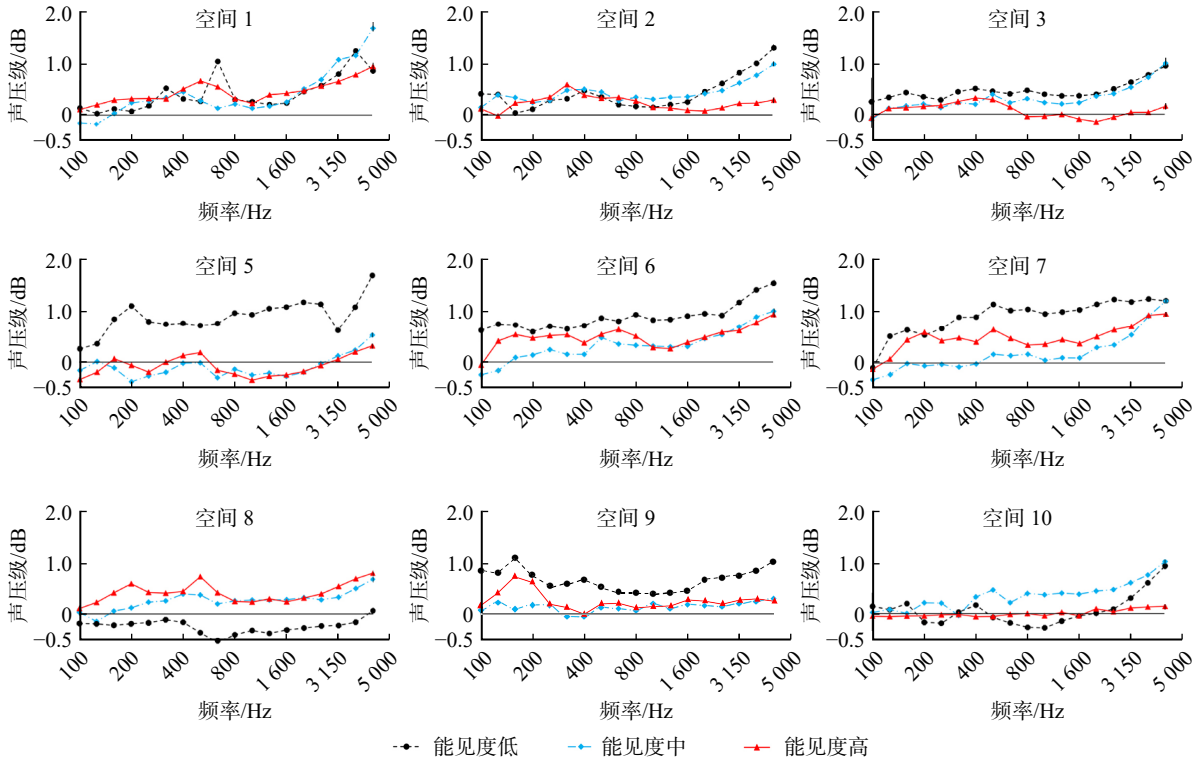


图 4　叶片掉落动态过程中各街道绿地空间降噪频谱特征

Fig. 4　Noise reduction spectrum features of street green spaces during leaf-shedding process

2.1　街道绿地植物降噪的时间异质性

通过对比叶片掉落动态过程中街道绿地的降噪效果(图 5)，发现能见度对降噪效果的影响在不同类型绿地中显著不同。在类型 1 绿地中，能见度对降噪效果的影响不明显，主要由于该绿地内部结构空隙较大，削弱了植物对噪声的阻挡作用。在类型 2 绿地中，能见度对降噪效果的影响最为显著。该类绿地垂直结构复杂，大量叶片处于声波传播路径中，从而增强了降噪效果。在类型 3 绿地中，能见度对降噪效果的影响波动较大，主要原因是道路与绿地间的乔木树冠向下散射交通噪声，导致噪声分布不均匀。在频谱特征方面，类型 1 绿地在不同能见度下的降噪效果频谱特征趋势相似。频率低于 1 600 Hz 时，能见度对降噪影响不显著；频率高于 1 600 Hz 时，在中、低能见度条件下，降噪效果随着频率上升而显著增强。类型 2 绿地在不同能见度下的降噪效果随着频率的增加略有提升。值得注意的是，在大部分频率范围内，其降噪效果随能见度提高呈先下降再上升的趋势。类型 3 绿地在不同能见度下降噪效果的频谱特征变化趋势不明显。

2.2　街道绿地植物降噪空间异质性分析

不同类型绿地降噪效果对比显示(图 6)，在低

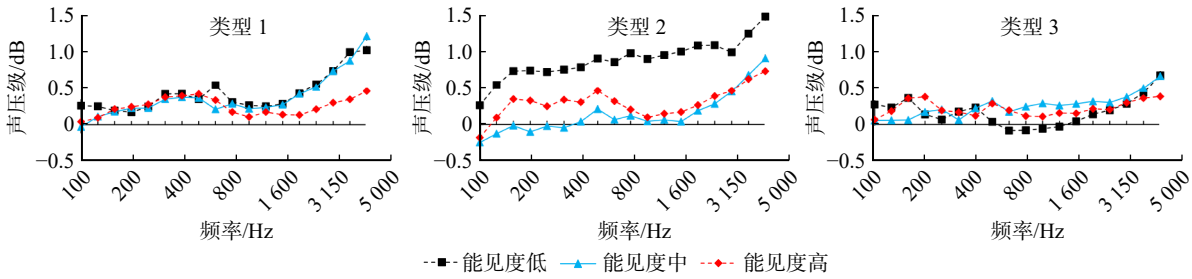


图 5 街道绿地植物降噪的时间异质性

Fig. 5 Temporal heterogeneity in noise reduction by street green space

能见度条件下，各类型绿地降噪效果差异性明显。其中类型 2 绿地因其更复杂的垂直结构，在叶片茂盛时能高效吸收与散射声波，故降噪效果最佳。随着叶片的掉落，在中、高能见度条件下，各类型绿地降噪效果间的差异随之减弱，表明叶片是导致绿地降噪效果差异的主导因素。此外，从频谱特征来看，不同能见度条件下，噪声衰减的优势频段存在显著差异。具体而言，在中、低能见度条件下，各类绿地对高频噪声的衰减效果更佳，主要得益于叶片在该频段起主导衰减作用。在高能见度条件下，由于密集的枝干对低频声波的多重散射效应更显著，因此，各类绿地对低频噪声的衰减效果更好。

2.3 街道绿地植物降噪的影响因素

低能见度条件下植物形态特征参数与降噪效果之间的 Pearson 相关性分析显示(表 2)，灌木胸径、高度和绿篱宽度呈显著正相关($P < 0.05$)，乔木胸径、高度与绿地降噪效果之间均呈极显著正相关($P < 0.01$)，仅空隙长与降噪效果呈显著负相关($P < 0.05$)。绿地降噪效果随乔灌木胸径增大而增强；垂直方向上的分层结构有利于提升降噪效果，绿篱宽度增加有助于增强绿地降噪效果；乔灌木高度对降噪效果也产生积极影响，高度增加可提升降噪效果。

叶片掉落动态过程中，植物形态特征参数与降噪效果的 Pearson 相关性分析显示(图 7)，灌木胸径、高度与绿地降噪效果之间呈显著负相关($P < 0.05$)，乔木胸径、高度与绿地降噪效果之间呈显著正相关($P < 0.01$)。与低能见度条件下绿地降噪效果的主要影响因素进行对比分析后发现，灌木胸径、高度对降噪效果的影响由显著正相关转为显著负相关。这一转变主要源于叶片掉落后，胸径、高度较大的灌木冠层更为稀疏，形成较多的空隙与松散结构，削弱了对交通噪声的阻隔能力，导致降噪效果显著降低。此外，乔木胸径、高度对降噪效果的影响虽仍保持显著正相关，但相关系数有所提高。其原因在于，胸径、高度较大的乔木仍保留木质主干与复杂的枝干结构，能够在叶片掉落后继续发挥降噪作用；同时，叶片掉落削弱了树冠对声波的向下散射效应[29]，反而在一定程度上提升了绿地的整体降噪效果。为进一步探究叶片掉落动态过程中乔灌木胸径、高度对降噪效果的影响，本研究分别构建了上述 4 种植物特征参数(标准化处理)与其降噪效果的线性回归模型，以表征其对降噪效果的影响(图 8)，可以看出，与灌木胸径、高度相比，乔木胸径、高度对降噪效果的影响更显著。

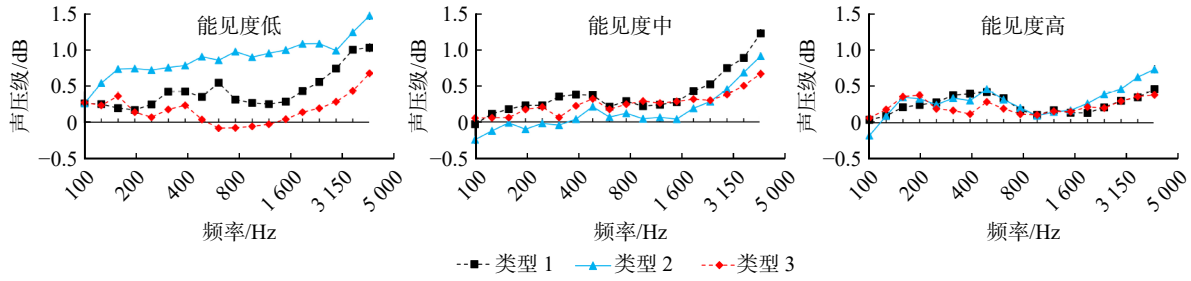


图 6 街道绿地植物降噪的空间异质性

Fig. 6 Spatial heterogeneity in noise reduction by street green space

表 2 植物林带形状特征参数与降噪效果的相关性

Tab. 2 Correlation between characteristic parameters of tree belt and noise reduction

项目	灌木胸径	绿篱宽度	空隙长	灌木高度	乔木胸径	乔木高度
噪声衰减	0.194*	0.439*	−0.233*	0.285*	0.310**	0.284**

注：**表示在$P < 0.01$水平上极显著相关，*表示在$P < 0.05$水平上显著相关（双侧检验）。下同。

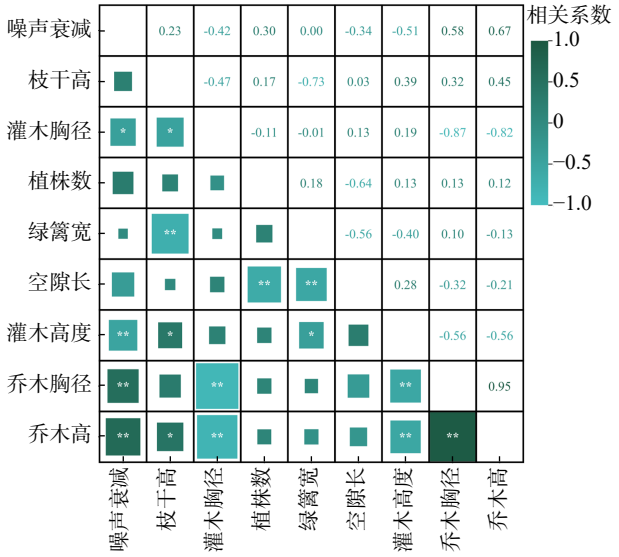


图 7　植物参数与降噪效果的相关性热力图

Fig. 7　Correlation between characteristic parameters of tree belt and noise reduction

3　讨　　论

本研究发现，能见度对交通噪声衰减存在负向影响，即能见度越高，降噪效果越差，这一结果进一步验证了 Fang 等[24]提出的能见度与降噪效果呈负对数关系的结论。值得注意的是，本研究进一步揭示了 3 种类型绿地空间中能见度对降噪效果的影响存在明显差异，为相关研究提供了新思路。在垂直结构复杂的类型 2 绿地中，能见度对降噪效果的影响更为显著，这与 Lai[21]、Eyring[36]等的研究结论一致。而在类型 1 绿地中，能见度对降噪效果的影响较弱，与前人研究[24]存在差异，主要归因于其内部存在较大空隙，削弱了能见度变化对噪声衰减的作用。因此，在实际绿化设计中，可通过增加垂直结构复杂度的方式，提升街道绿地的降噪效果。例如采用“灌木 + 绿篱”的配置方式，优选高度 > 1.5 m，叶面积较大的灌木树种（如丁香等），并搭配密枝型绿篱植物（如小叶女贞等）。

本研究首次在叶片动态掉落过程中，系统观测到能见度对降噪效果的连续性变化规律，弥补了以往研究多局限于“茂叶”与“落叶”两种典型状态的不足。此外，本研究发现街道绿地降噪效果的频谱

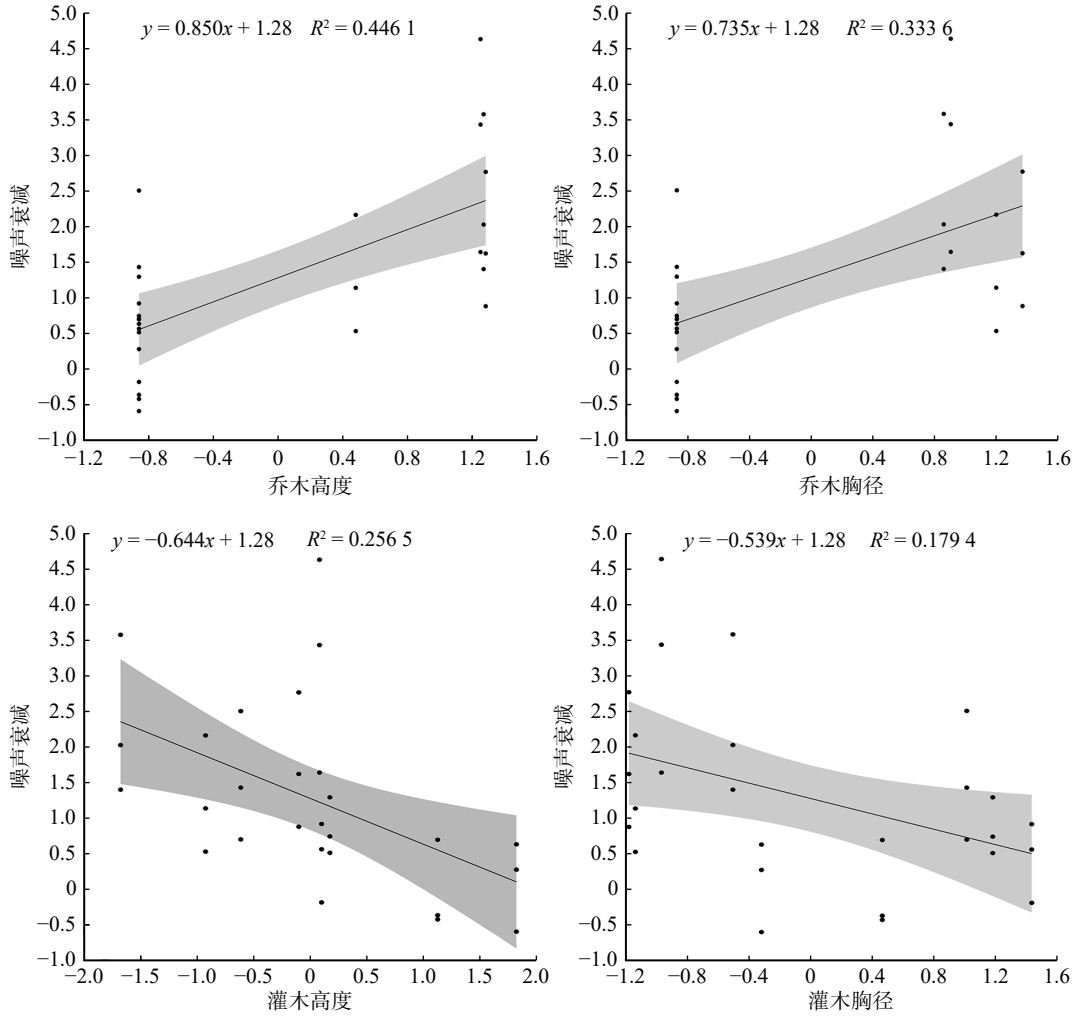


图 8　植物参数对降噪效果的影响

Fig. 8　The influence of plant parameters on noise reduction effect

特征呈现“波动—稳定—上升”的趋势，这与袁玲[31]发现的不同绿地结构降噪频谱特征存在差异的研究结论相一致。进一步分析表明，能见度对中高频段噪声的衰减效果更为显著，Yang 等[32]关于叶片覆盖度提高可增强绿地对高频声吸收和散射效率的结论也佐证了本研究结果，进一步证实了此频率范围内，叶片对降噪效果的主导作用[10]。因此，为有效控制交通噪声，建议依据植物不同结构的降噪频谱特征，结合目标区域交通噪声的频谱分布规律，有针对性地选择植物物种并优化配置模式。例如，选用叶片大且厚实的植物以有效控制 2 000 Hz 以上高频噪声，选用胸径与树皮粗糙度较大的植物以控制 500 ~ 2 000 Hz 中频噪声，通过种植地被植物提升街道绿地对 500 Hz 以下低频噪声的衰减能力。

本研究发现，在低能见度条件下，乔灌木胸径、高度、绿篱宽度与降噪效果呈显著正相关，进一步证实了绿地结构复杂性对噪声衰减的重要作用。其中，绿篱宽度对降噪效果的影响最显著，这与张秦英等[28]提出的木质层宽度主导降噪效果的观点一致。此外，本研究量化了空隙长对降噪效果的影响，明确了水平结构连续性在噪声衰减中的重要作用。因此，在街道绿地设计中应注重保持水平结构的连续与完整，避免出现过大空隙，并优先考虑增加绿篱宽度以提升整体降噪性能。

目前植物降噪研究主要依赖模拟与实测两类方法。模拟方法常将植物简化为圆柱的树干与球状的冠幅，难以准确反映植物的真实状态；实测方法则由于植物生长受环境因素影响显著，难以有效控制变量。本研究提出的测试方法，既能获取植物真实状态下的降噪数据，又具备良好的变量控制能力，为相关研究提供了新的思路。然而，本研究仅对以灌木为主的街道绿地进行了初步探索，未来可进一步拓展至不同宽度、不同植物物种组成的绿地类型，系统研究其降噪效果的时空异质性。此外，结合遥感、GIS 等技术整合绿地空间分布、植被覆盖等信息，有望深入揭示街道绿地降噪的内在机制。

4 结　　论

本研究提出了一种在叶片动态掉落过程中测量绿地降噪效果的方法，通过长期跟踪同一绿地的声学数据并采用标准化植物配置样地，既能精确捕捉降噪效能的时序变化，又可有效控制植物形态参数的干扰。该方法弥补了传统测试手段的局限，为城市绿地声学设计提供了新的量化评估工具。主要结论如下。

（1）街道绿地降噪效果具有明显的频谱特征。不同能见度下降噪效果随频率的增加呈“波动（< 200 Hz）—稳定（200 ~ 2 000 Hz）—上升（> 2 000 Hz）”趋势，且能见度对高频（> 2 000 Hz）噪声的衰减作用更显著。

（2）街道绿地降噪效果呈现显著的时空异质性。不同类型街道绿地降噪效果均随着能见度的增加而降低，其中绿地结构完整性对降噪效果具有决定性的影响。类型 1 绿地空间因存在内部空隙导致降噪能力显著降低，类型 2 绿地空间在低能见度条件下表现出最佳降噪性能，其复杂的垂直结构能有效衰减 315 ~ 5 000 Hz 范围内的交通噪声。类型 3 绿地空间受行道树树冠散射声波的影响，不同能见度下绿地降噪效果波动明显。

（3）植物形态参数与降噪效果显著相关（$P < 0.05$）。低能见度条件下，乔灌木胸径、高度，绿篱宽度等参数与降噪效果呈显著正相关，而空隙长则呈显著负相关。叶片掉落动态过程中，灌木胸径、高度与降噪效果呈显著负相关，乔木胸径、高度与降噪效果呈显著正相关。对于 5 m 宽街道绿地，为维持低能见度条件下的降噪效果，建议采用高灌木结合绿篱的种植方式，保持一定种植密度并避免内部空隙，优先选用胸径较大的灌木；综合考虑叶片掉落动态过程的降噪效果时，则应选用胸径与高度较大的乔木。

综上所述，本研究丰富了街道绿地植物降噪的理论体系，并为城市噪声控制的景观设计提供了科学依据。未来通过持续探索与技术创新，有望为城市噪声环境改善提供更加系统、高效的景观规划解决方案。

参 考 文 献

[1] Wang A J, Frishman W H. Literature review: effects of environmental noise on the cardiovascular health[J]. Cardiology in Review, 2025, 33: 39936928.

[2] 李亚楠, 黄绍荣, 格日乐图, 等. 长江三角洲地区 11 个县 (市、区) 城市道路林带降噪能力及其影响因素 [J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(2): 251−258.
Li Y N, Huang S R, Geril, et al. Noise attenuation ability and its affecting factors of green belts of 11 areas in the Yangtze River Delta[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2020, 37(2): 251−258.

[3] 唐丽玉, 黄子晴, 苏宏霖. 顾及绿视率的街道可步行性评价 [J]. 西部人居环境学刊, 2025, 40(1): 58−64.
Tang L Y, Huang Z Q, Su H L. Evaluation of street walkability considering green view index[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2025, 40(1): 58−64.

[4] White M P, Elliott L R, Grellier J, et al. Associations between green/blue spaces and mental health across 18 countries[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 8903.

[5] 谢晓阳, 崔雅君, 邱尔发, 等. 2010—2020 年北京市行道树结构特征变化分析 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(1): 78−88.
Xie X Y, Cui Y J, Qiu E F, et al. Analysis on changes of street tree structure in Beijing from 2010 to 2020[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(1): 78−88.

[6] Chen Y, Ge Y, Yang G, et al. Inequalities of urban green space area and ecosystem services along urban center-edge gradients[J]. Landscape and Urban Planning, 2022, 217: 104266.

[7] Feng L, Wang J, Liu B, et al. Does urban green space pattern affect green space noise reduction? [J] Forests, 2024, 15(10): 1719.

[8] 金邑霞, 徐丽华, 马仁锋, 等. 杭州快速路、主次干道植物群落降噪功能比较研究 [J]. 中国环境管理, 2018, 10(5): 43−49.
Jin Y X, Xu L H, Ma R F, et al. Comparison on the noise reduction of plant community in expressway, primary and secondary road of Hangzhou[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2018, 10(5): 43−49.

[9] 孙琳苒, 石力匀. 植物配置设计对城市绿地生态服务功能的影响: 以郑州市为例 [J]. 西南大学学报 (自然科学版), 2025, 47(3): 141−149.
Sun L R, Shi L Y. The impact of urban green space planting design on ecological service functions: a case study of Zhengzhou City[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2025, 47(3): 141−149.

[10] Oquendo-Di C V, Navacerrada M Á, Ruia-Garcia L, et al. Evaluating the acoustic absorption of modular vegetation systems: laboratory and field assessments using an impedance gun[J]. Buildings, 2025, 15: 389.

[11] Sultan T, Shahid S, Rasheed J, et al. Investigation of tree characteristics for traffic noise abatement[J]. Environment Protection Engineering, 2024, 50(1): 43−70.

[12] Horoshenkov K V, Khan A, Benkreir A H. Acoustic properties of low growing plants [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 133: 2554.

[13] Li M, Kang J. Influence of leaf physical properties on single-leaf vibrational response to sound[J]. Forests, 2020, 11: 115.

[14] Wickramathilaka N , Ujang U , Azri S. Improving traffic-noise-mitigation strategies with LiDAR-based 3D tree-canopy analysis[J]. Geomatics & Environmental Engineering, 2024, 18(3): 81−103.

[15] Ttal E, Cote N, Shimizu T, et al. Analysis of environmental and seasonal effects on sound absorption by green wall systems [C]// Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics. Amsterdam: Elsevier, 2019: 3482−3489.

[16] Aylor D. Sound transmission through vegetation in relation to leaf area density, leaf width, and breadth of canopy[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1972, 51: 411−414.

[17] Guo X, Peng H, Wang L. The effects of traffic noise attenuation by green belts[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(12): 2567−2571.

[18] Meng Q, Evgrafova O, Li M. A predictive model for traffic noise reduction effects of street green spaces with variable widths of coniferous vegetation[J]. Forests, 2025, 16: 238.

[19] Salam S, Zdemir E, Zden Z, et al. The effects of some chemical compounds on the sound absorbing ability of tree bark[J/OL]. Biologia Futura, 2025, 1−9 [2025−03−16]. https://doi.org/10.1007/s42977-024-00248-w.

[20] Li M, van Renterghem T, Kang J, et al. Sound absorption by tree bark[J]. Applied Acoustics, 2020, 165: 107328.

[21] Lai F O, Ghosh S. Urban cities and road traffic noise: reduction through vegetation[J]. Applied Acoustics, 2017, 120: 15−20.

[22] 张俊杰, 易梦, 唐国鑫, 等. 道路绿地与街旁游园生态效益研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 2025, 31(10): 1647−1661.
Zhang J J, Yi M, Tang G X, et al. Review of the multiple ecological benefits of road green space and streetside park[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2025, 31(10): 1647−1661.

[23] 祝遵凌, 杜丹, 韩笑. 7 种阔叶植物群落降噪的临界达标宽度 [J]. 城市环境与城市生态, 2012, 25(3): 22−25.
Zhu Z L, Du D, Han X. Critical width of seven broad-leaved plant communities for noise reduction to standard[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2012, 25(3): 22−25.

[24] Fang C F, Ling D L. Investigation of the noise reduction provided by tree belts[J]. Landscape and Urban Planning, 2003, 63: 187−195.

[25] Nadeem A, Shahid S, ALI J A S. Measurement of noise levels in pakistani residential societies at source and receiver locations[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2024, 33: 5229−5238.

[26] 王淑芬, 任杰. 北京高架轨道交通沿线绿地噪声衰减效果研究 [J]. 中国园林, 2012, 28(9): 68−71.
Wang S F, Ren J. Noise attenuation effect of green vegetation on Beijing viaduct rail traffic system[J]. Chinese Landscape Architecture, 2012, 28(9): 68−71.

[27] van Renterghem T, Attenborough K, Maennel M, et al. Measured light vehicle noise reduction by hedges[J]. Applied Acoustics, 2014, 78(4): 19−27.

[28] 张秦英, 崔海南, 马蕙, 等. 不同配置模式带状绿地降噪效应研究 [C]//中国园艺学会观赏园艺专业委员会, 国家花卉工程技术研究中心. 中国观赏园艺研究进展 2015. 北京: 中国林业出版社, 2015: 738−741.
Zhang Q Y, Cui H N, Ma H, et al. Investigation of the noise reduction provided by vegetation belt in different design styles [C]//China Horticultural Society, Ornamental Horticulture Committee, National Engineering Research Center for Floriculture. Advances in ornamental horticulture of China, 2015. Beijing: China Forestry Publishing House, 2015: 738−741.

[29] 李朦朦, Timothy van Renterghem, 孟琪, 等. 面向城市交通噪声控制的树种筛选与种植策略 [J]. 应用声学, 2024, 43(4): 843−853.
Li M M, van Renterghem T, Meng Q, et al. Tree species selection and planting strategy for reducing urban traffic noise[J]. Journal of Applied Acoustics, 2024, 43(4): 843−853.

[30] 李冠衡, 熊健, 徐梦林, 等. 北京公园绿地边缘植物景观降噪能力与视觉效果的综合研究 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(3):

93−104.
Li G H, Xiong J, Xu M L, et al. Comprehensive study on the noise reduction ability and the visual effect on the edge of green space of Beijing urban park[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(3): 93−104.

［31］ 袁玲. 植物结构对交通噪声衰减频谱特性的影响 [J]. 噪声与振动控制, 2008(5): 154−156,167.
Yuan L. Influence of plant issue structure on the spectrum characteristics of traffic noise attenuation[J]. Noise and Vibration Control, 2008(5): 154−156,167.

［32］ Yang H S, Kang J, Cheal C. Random-incidence absorption and scattering coefficients of vegetation[J]. Acta Acustica United with Acustica, 2013, 99(3): 379−388.

［33］ 陈雷, 张丽微, 杨善云等. 夏冬两季城郊公路绿化带的降噪效果差异分析 [J]. 环境工程学报, 2017, 11(9): 5320−5325.
Chen L, Zhang L W, Yang S Y, et al. Variation analysis of noise-reduction effect by green belts of suburban road in summer and winter[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(9): 5320−5325.

［34］ Tashakor S, Chamani A, Moshtaghie M. Noise pollution prediction and seasonal comparison in urban parks using a coupled GIS- artificial neural network model[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(2): 303.

［35］ 刘洋, 汪坤, 祝遵凌. 高速公路不同植物带不同时期降噪效果研究: 以苏北里下河地区为例 [J]. 中外公路, 2014, 34(5): 9−12.
Liu Y, Wang K, Zhu Z L. Research on noise reduction effects of different plant belts on highways at different stages: a case study of Lixiahe Area in Northern Jiangsu Province[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(5): 9−12.

［36］ Eyring C F. Jungle acoustics[J]. Journal of the acoustical society of America, 1946, 18(2): 250−270.

［37］ Li M, Wu Y, Sun S, et al. A distribution strategy for measuring points of street green space reducing traffic noise[C]//Berardi U. Multiphysics and multiscale building physics. Singapore: Springer, 2024.

（责任编辑 范 娟
责任编委 李 雄）