

面向低空经济的城市近郊声环境优化：物流无人机噪声的景观干预路径

Soundscape Optimization in Suburban Areas for the Low-Altitude Economy: Landscape Intervention Strategies for Logistics Drone Noise

邵钰涵 蔡轻舟 陆嘉宜*
SHAO Yuhan CAI Qingzhou LU Jiayi*

(同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092)
(College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai, China, 200092)

文章编号: 1000-0283(2026)03-0022-11
DOI: 10.12193/j.laing.20251130002
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2025-11-30
修回日期: 2026-01-15

摘要

随着“低空经济”上升为国家战略, 无人机物流作为其核心载体在提升效率的同时, 也因其特殊的噪声频谱特性对城市声环境构成新挑战。针对无人机噪声特性, 聚焦城市近郊区域, 对物流无人机噪声影响下视觉景观环境特征对公众视听感知的影响机制展开研究。选取中山市坦洲镇为实验场地, 以 DJI FlyCart 30 物流无人机为标准声源, 通过声漫步实验采集 12 个典型场景在不同飞行高度 (20 m、30 m、40 m) 下的视觉环境特征 (植被、天空、建筑及硬质)、听觉环境指标 (等效连续 A 加权声压级、峰度) 和主观感知指标 (满意度、烦恼度、平静度、协调度) 数据, 综合运用声学测量和计算机视觉语义分割技术量化视听环境要素, 并基于多层线性模型构建主观感知关联模型, 解析了视听环境要素对主观感知的影响机制。研究结果发现: 在无人机噪声影响下, 公众满意度与顶层、底层绿化及天空占比成正比; 听觉烦恼度随硬质铺装、底层绿化及天空占比的增加而显著上升, 随顶层绿化占比的增加而降低; 声景平静度仅受听觉要素影响, 与声学峰度和等效声压级呈负相关; 而协调度则主要受底层绿化占比的负面影响。据此, 从区域管控、航线优化、绿化配置和下垫面材质更新 4 个维度, 有针对性地提出规划管控与空间干预策略, 为缓解低空经济发展面临的噪声问题提供理论与实践路径。

关键词

低空经济; 无人机噪声; 视听环境特征; 主观感知; 多层次线性模型; 城市近郊; 物流无人机; 景观干预

Abstract

In light of the emergence of the “low-altitude economy” as a national strategy, logistics drones—its primary operational carriers—are undergoing significant advancements in delivery efficiency. Concurrently, these drones introduce novel challenges to the urban acoustic environment owing to their distinctive noise spectral characteristics. This study concentrates on suburban regions to examine how visual landscape features influence public audiovisual perception in the context of logistics drone noise. Tanzhou Town in Zhongshan City was designated as the experimental site, with the DJI FlyCart 30 utilized as the standardized sound source. A soundwalk experiment was carried out across 12 typical scenarios at three flight altitudes (20 m, 30 m, 40 m), collecting data on visual environmental indicators (vegetation, sky, buildings, hardscape), auditory indicators (A-weighted equivalent continuous sound pressure level, kurtosis), and subjective perception indicators (satisfaction, annoyance, calmness, and coherence). Audiovisual environmental features were quantified using acoustic measurements and computer-vision-based semantic segmentation techniques. A Multilevel Linear Model (MLM) was then developed to examine the mechanisms underlying the influence of audiovisual factors on subjective perception. The results indicate that under the influence of drone noise, public satisfaction is positively correlated with the proportions of top-layer vegetation, bottom-layer vegetation, and sky. Con-

邵钰涵

1984 年生/女/山东烟台人/博士/副教授、博士生导师/研究方向为健康景观、声环境与声景、多感官疗愈

蔡轻舟

2001 年生/男/江苏苏州人/在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划设计

陆嘉宜

1998 年生/女/浙江杭州人/在读博士研究生/研究方向为风景园林规划设计、景观感知、景观特征评估

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 2510355@tongji.edu.cn

基金项目:

国家重点研发计划 (编号: 2023YFC3805303); 上海市科学技术委员会自然科学基金“基于视听交融的上海快速路沿线住区景观对居民心理健康的影响机制及其综合降噪方法” (编号: 24ZR1469800)

versely, auditory annoyance increases with the proportions of hardscape, bottom-layer vegetation, and sky, whereas it decreases with higher top-layer vegetation. Soundscape calmness is influenced solely by auditory factors, showing a negative correlation with acoustic kurtosis and equivalent sound pressure levels. Meanwhile, coherence is primarily negatively affected by the proportion of bottom-layer vegetation. Accordingly, this study proposes targeted planning control and spatial intervention strategies from four dimensions: regional control, flight route optimization, greenery configuration, and ground surface material renewal. These findings provide theoretical and practical pathways to mitigate the noise issues associated with the development of the low-altitude economy.

Keywords

low-altitude economy; drone noise; audiovisual environmental characteristic; subjective perception; Multilevel Linear Model; suburban urban area; logistics drone; landscape intervention; spatial optimization strategy

随着“低空经济”上升为国家战略，无人机作为低空经济运输的重要载体之一，正逐步推动全球范围内的生产生活模式变革^[1]。在众多试点项目中，低空物流被普遍认为是未来短期内最具有商业价值和发展潜力的低空经济板块^[2]。面对日益增长的快递需求和城市交通压力，无人机配送能够显著提升效率，在应急救援、医疗物资运输、跨城急送等特殊场景下，低空物流能够突破地理和时间限制，展现出显著的优势^[3]。

随着政策完善与技术迭代，作为当前低空经济发展重心的低空物流正从局部试点迈向规模化应用阶段。受“市中心研发生产、郊区运营试点”的低空物流布局模式影响^[4]，中国城市近郊区的声环境正面临着新的挑战。多项社会调查显示，与传统交通噪声相比，同等响度下无人机等固定多旋翼飞行器产生的噪声更易引发公众烦躁与心理不适。随着低空试点区域密度的增加，公众对低空噪声的关注度与相关投诉显著增加，亟须对这一新型噪声源进行有效管控，为低空经济可持续发展提供支撑。

近年来，越来越多的声环境研究关注到视觉与听觉等多感官要素对噪声感知的积极作用。大量研究证实视听感官之间存在显著的交互作用，优质的视觉环境体验能够显

著提升个体的声环境满意度^[5]。其中，自然植被不仅具有物理降噪功能，更能通过营造积极的视觉景观来改善主观听觉感受^[6]。作为一种经济高效的环境干预手段，自然景观被广泛应用于缓解城市道路交通与工业噪声^[7]。而低空无人机噪声作为新兴研究领域，目前学界关注点主要集中于声源的物理特性与声波传播路径分析等基础层面。现有研究表明，无人机噪声在频谱上表现出显著的高频纯音成分，且在时域上呈现出强烈的“脉冲性”特征^[8-9]。关于脉冲信号对人的影响已相对成熟，相关研究指出，相较常见的稳态道路交通噪声，具有瞬态突变特征的脉冲噪声（如固定翼螺旋桨噪声、工业冲击声）会诱发人体更剧烈的生理反应，在同等级声压级下会导致更高的噪声烦恼度^[10]。仅有少数研究探讨了无人机噪声背景下的视听感知机制，但仍局限于“有无自然景观”等的二元对比^[11]。

本研究基于已有的景观降噪理论及无人机物理声学特征，聚焦无人机飞行高度产生的差异噪声影响下视听环境特征要素对主观感知的影响，通过实证研究，探索影响无人机噪声主观感知的关键视听环境指标，构建关联关系，并针对性提出适应低空经济发展需求的声环境优化与景观干预策略。

1 研究设计与方法

1.1 场地选取

研究聚焦未来低空经济发展潜力最大的城市近郊区，这一选择遵循“从易到难”的渐进式发展路径^[12]，具有前瞻性。研究区域锚定在中国低空经济发展的核心区域——粤港澳大湾区，并进一步将实验场地设于大湾区关键节点城市中山市的坦洲镇。该镇紧邻中国首批探索低空商业化运营的珠海市，是低空物流试运营与产业辐射的前沿区域。

基于研究目标与可行性，经研究团队实地考察，最终选定坦洲镇的华特亚无人机学校及周边公共空间作为实验区域（图1）。该区域在空间布局与区位条件上高度契合未来近郊区低空物流辐射的典型特征^[13]。根据不同的视听环境属性，本研究最终选取12个点位，开展后续实验。

1.2 研究方法

1.2.1 指标选取

研究通过构建涵盖视听环境特征和景观听觉感知的评价体系，对无人机噪声背景下，不同景观空间特征及公众听觉感知进行量化，具体的指标库见表1。

(1) 视觉环境特征指标。选取人类视域范围内的景观要素占比作为表征环境视觉



图1 无人机声漫步实验点位
Fig. 1 Experimental points of UAV soundwalk

表1 指标选取
Tab. 1 Selection of indicators

类别 Category	指标 Indicator	定义 Definition	
客观指标	视觉环境特征	顶层植被占比 (V_t)	以乔木树冠为主的顶层植物像素数量占图像总像素数量的比例
		中层植被占比 (V_n)	以灌木为主的中层植物像素数量占图像总像素数量的比例
		底层植被占比 (V_b)	以草本及地被植物为主的底层植物像素数量占图像总像素数量的比例
		天空占比 (S_k)	天空区域 (包含云层) 像素数量占图像总像素数量的比例
		建筑占比 (B_d)	人工建筑立面及构筑物像素数量占图像总像素数量的比例
		硬质铺装占比 (P_v)	道路、广场等硬质铺装地面像素数量占图像总像素数量的比例
主观指标	听觉感知	等效连续 A 加权声压级 (L_{Aeq})	在规定的测量时间内, 声级能量的平均值, 经 A 计权修正以模拟人耳对频率的响应特性
		峰度 (K_u)	描述声波信号概率密度分布“陡峭”程度的 4 阶统计量, 常用于表征无人机噪声的时间不稳定性与脉冲特征
		满意度 (S)	对声景感受到的满意程度
		平静度 (T)	对声景感受到的平静程度
		协调度 (H)	对声景感受到的协调程度
		烦恼度 (A)	对声景感受到的烦恼程度

特征的核心指标。基于预调研结果及无人机运行环境特点, 将景观视觉要素划分为植被 (V)、天空 (S_k)、建筑 (B_d) 及硬质铺装 (P_v)

4类。同时考虑到无人机噪声的传播特性, 研究进一步将植被要素细分为: 顶层植被 (乔木为主) (V_t)、中层植被 (灌木为主) (V_n) 及

底层植被 (草坪为主) (V_b)^[14], 以探究不同高度的植被结构对无人机噪声传播与感知的差异化影响。

(2) 听觉环境特征指标。选取等效连续A加权声压级 (L_{Aeq}) 与峰度 (K_0) 作为描述声环境物理特征的关键指标。等效连续A加权声压级作为声景相关标准 (ISO 12913系列/国家标准) 中的核心参数, 用于表征实验时段内声环境能量的平均水平及声强变化^[15]。峰度用于描述声信号概率密度分布的陡峭程度, 是衡量声音时间结构中脉冲特性的重要指标^[16]。本研究基于原始音频波形数据计算声学峰度。针对多旋翼无人机, 该指标能有效刻画旋翼高速旋转时周期性切割空气产生的脉冲性噪声及其时间结构上的瞬态突变特征。峰度能更敏感地反映无人机噪声区别于稳态交通背景声的高脉冲行为特征^[17]。

(3) 主观感知指标。该类指标关注个体心理反馈。本研究综合主流声景理论与特定场景需求确定评价维度: 参考声景国际标准 (ISO 12913) 及感知情感质量 (PAQs) 模型^[18-20], 选取平静度 (T) 表征环境恢复性; 针对无人机噪声的高致烦特性, 依据ISO 15666标准^[18]引入烦恼度 (A); 依据Brown提出的声景规划理论^[19], 选取协调度 (H) 评价声景一致性; 并以满意度 (S) 作为总体环境接受度的综合指标。

1.2.2 实验设计

(1) 实验设备。实验选用DJI FlyCart 30物流系列多旋翼无人机作为声源, 该机型采用4轴8桨旋翼设计, 具备“多旋翼、高载重”的典型特征, 符合未来城市近郊长距离低空物流运输对飞行器的性能要求^[20]。此类运行模式具有在配送末端低空运行的特点^[21], 其产生的噪声容易被公众感知, 是研究无人机与人居环境交互影响的关键载体。

(2) 实验变量与分组。鉴于无人机噪声在起降、悬停以及超低空飞行阶段对公众感

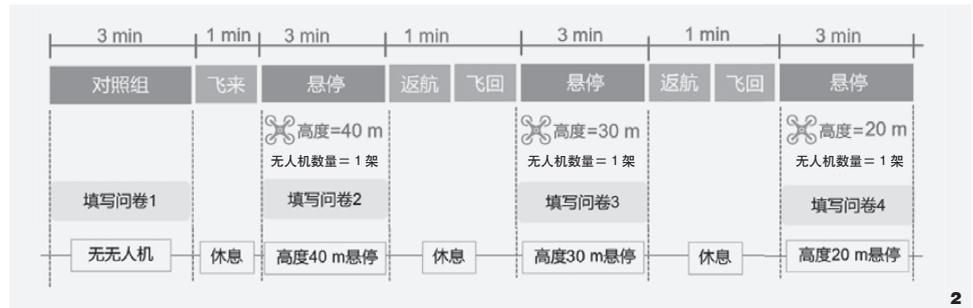


图2 无人机高度实验设计
Fig. 2 Experimental design of UAV flight altitude

知的影响最为显著^[17], 本研究重点关注不同飞行高度下的无人机噪声对感知的影响。参考实验物流无人机的运行高度范围和城市中物流无人机的低空作业高度区间^[22], 进行预实验, 在保证运行安全和无人机噪声差异可辨的情况下, 最终以20 m、30 m、40 m三个梯度设置飞行高度实验组, 并以无人机运行状态作为对照组, 开展实验 (图2)。实验于2025年6月9日—6月14日, 择取无雨、微风 (风速 <5 m/s), 且光照均匀时段进行。

实验流程分为以下阶段: (1) 背景基线感受阶段。被试者在工作人员带领下前往目标实验点位, 在没有无人机的情况下进行3 min的声漫步体验, 同时填写感知问卷。(2) 噪声暴露阶段。无人机以2 m/s的速度飞往指定点位正上方悬停。实验共设置40 m、30 m和20 m三个悬停高度, 无人机飞至指定高度, 悬停时长为3 min, 其间被试者感受声环境并填写感知问卷; 随后, 无人机返航, 被试者提交感知问卷并休息1 min。休息结束后, 再次呼叫无人机以下一个高度进行测试。重复上述步骤, 直至完成所有三个高度的实验及问卷填写。

1.3 实验数据采集

数据采集工作主要分为客观环境数据采

集与主观感知数据采集两部分。

1.3.1 视听环境客观数据采集

视觉数据: 使用Insta360 X3全景相机采集实验点位高分辨率全景图像。仪器架设于各观测点中心, 三脚架高度设定为1.6 m (模拟人眼平均视高)。

听觉数据: 利用AWA6290型1级 (Class 1) 多功能声级计对声环境进行测量。设置时间计权为“快 (Fast)”档, 频率计权为A计权, 采样频率设为48 kHz以保留完整声学细节, 并同步录制WAV格式原始时域信号。仪器传声器架设高度为1.6 m, 并佩戴防风罩以减少风噪干扰。在每个观测点位, 设备与受试者的主观评价同步启动, 连续记录包含基准背景声及无人机不同高度下的声压级数据及原始音频文件, 每个测量点重复实验三次, 取每个实验组对应的3 min区间内的平均值作为该点位的噪声测量值。

1.3.2 主观感知数据采集

主观数据采集采用问卷调查模式, 采集受试者在每个点位的不同高度梯度下即时主观感知评价。问卷主要包含三部分: (1) 参与者基本信息; (2) 当前实验点位的基本信息; (3) 基于4项指标对声环境感受进行评

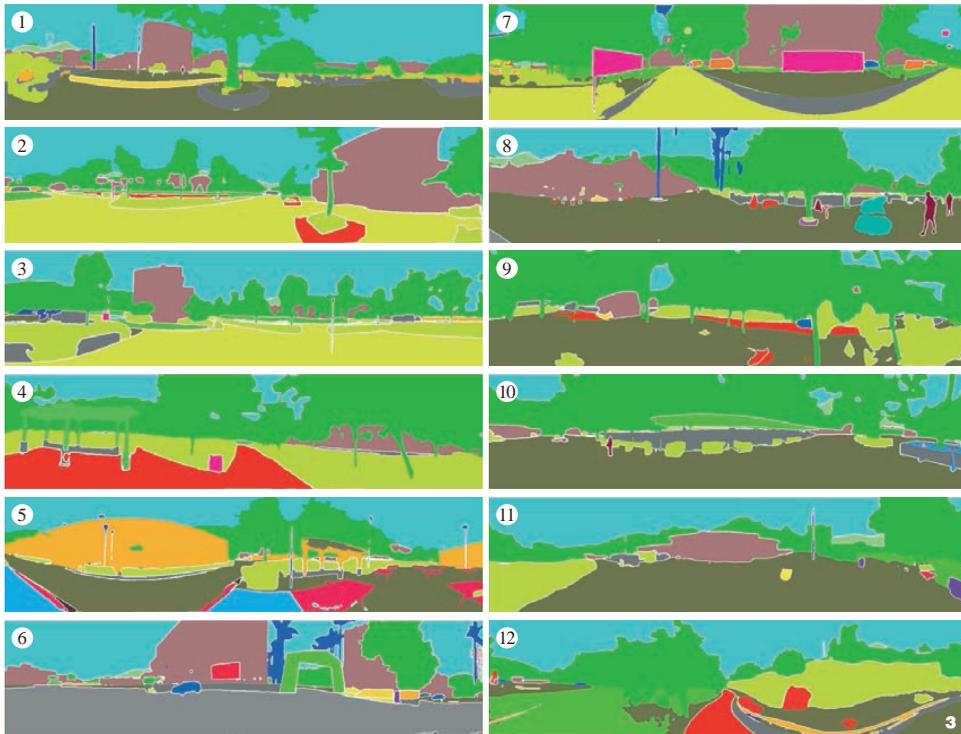


图3 语义分割掩膜
Fig. 3 Semantic segmentation masks

价, 采用7级李克特量表(1为完全不认可, 7为完全认可)。

为控制因个体差异导致的实验误差, 在当地大学城和附近社区共招募受试者30名, 参与完整的实验流程, 参与者均具有良好的视力、听力条件, 不存在色弱、听力障碍等问题。实验共回收问卷1 401份, 其中有效问卷1 134份, 男女比例约2:1, 专业与非专业人员比例为1:3, 年龄范围为18~50岁, 样本量与效应量符合同类研究要求^[23]。

2 数据分析

2.1 视听环境客观数据分析

2.1.1 视觉环境特征量化

视觉环境特征量化基于ComfyUI视觉 workflow展开, 采用OneFormer语义分割模型架构, 选用ADE20K场景解析数据集的预训练权重进

行推理, 该模型通过Transformer架构实现像素级分类, 可以精准识别景观要素并生成高精度语义掩膜。随后, 利用Adobe Photoshop的直方图统计功能对各类标签的像素数量进行提取以计算, 结果如图3所示。

2.1.2 听觉环境特征提取

将声级计同步录制的原始音频数据导入AWA6290系列数据传输与分析软件进行后处理。依据实验设计的体验时长, 针对每个高度梯度和对照组, 在分析软件中截取180 s的稳定时间段作为有效分析样本。基于内置的声学分析模块进行基于原始波形的时候计算, 输出等效连续A加权声压级(L_{Aeq})与声学峰度(K_f)。其中, 峰度指标的计算基于四阶中心矩算法, 相较于现场直读, 该方法能利用高采样率原始信号精准量化无人机噪声

的脉冲特性。

2.2 主观感知数据分析

为确保后续数据分析的稳健性, 研究首先基于注意力检测试题、异常值和逻辑一致性检验对收回问卷进行数量清洗; 同时开展基础统计检验^[24], 依据偏度与峰度系数检验数据正态性, 采用方差膨胀因子(VIF)进行自变量共线性诊断(阈值 $VIF < 10$), 并对所有自变量实施标准化处理以消除量纲差异^[25]。

本实验采用被试内重复测量设计, 旨在有效控制受试者个体间的听觉敏感度与审美偏好差异, 提升统计功效。由于同一受试者对不同场景进行了多次评价, 数据呈现出评价与个体、环境相互嵌套的层级结构, 不满足常规线性回归的独立性假设, 故本研究选用多层线性模型(Multilevel Linear Model, MLM)^[25]进行假设检验, 以处理层级数据的相互依赖性, 具体步骤如下:

(1) 构建零模型(不含预测变量)计算组内相关系数(ICC), 预分析显示 $ICC > 0.7$, 表明超70%总方差源于被试个体差异, 证实采用MLM控制个体随机效应的必要性;

(2) 构建包含所有主效应的全模型, 纳入声学指标(L_{Aeq} 、峰度)与视觉指标(顶/中/底层绿化、天空开放度、建筑占比、硬质占比), 采用限制性最大似然法(REML)估计固定效应, 通过回归系数及显著性分析, 量化各指标对主观感知的独立影响效应。

2.3 主观感知关联模型构建

本研究基于MLM, 进一步构建主观感知量化关联方程, 依据奥卡姆剃刀原则筛选结构最简且解释力最优的拟合模型。为保障关联模型稳健性与参数估计准确性, 实施严格统计检验:(1)引入VIF进行自变量多重共线

性诊断, 以 $VF < 10$ 为阈值排除冗余变量干扰; (2) 基于限制性最大似然法估计固定效应, 通过标准误、Z统计量及显著性水平检验回归系数, 保留对主观感知具有统计学显著影响的视听环境要素 ($p < 0.05$); (3) 提取通过检验的截距与固定效应非标准化系数 (β), 构建主观感知线性预测方程用于量化评估。

3 结果分析

3.1 研究场地视听环境及感知特征

3.1.1 视觉环境特征分析

基于图像语义分割技术对12个测点的视觉要素进行量化分析(图4)。总体而言, 场地视觉构成呈现出以人工硬质景观为主导的特征。在各类视觉元素中, 硬质铺装占比最高(31.1%), 天空要素(21.6%)次之, 顶层绿化(18.9%)位居第三; 相比之下, 中、底层绿化及建筑要素的视觉占比相对较低(均未超过10%), 且在各点位间分布不均。

在空间分布特征上, 各点位的视觉构成呈现出显著的异质性。就植被要素而言, 总体比例最高的点位4的最高(63.9%)和点位9(64.5%), 前者顶层和底层绿化占比较高, 视野相对开阔; 后者顶层绿化(34.2%)和中层绿化(24.5%)优势明显, 点位内植物郁闭度高; 12个点位中, 植被覆盖率最低的是点位6和点位7的(10.0%), 底层绿化尤为匮乏(0.9%)。对比硬质铺装占比, 点位5的占比最高(47.3%), 点位6和点位7次之(38.2%), 区域内硬质化程度较高; 而建筑要素则主要集中在点位6、点位7(21.7%)和点位2(16.6%), 点位5和点位9的建筑遮挡最少(约2%)。而分析天空要素占比, 点位1最高(31.9%), 其次是点位2和点位3, 均在25%左右; 占比最低的是点位9, 仅占到整体的2.1%。

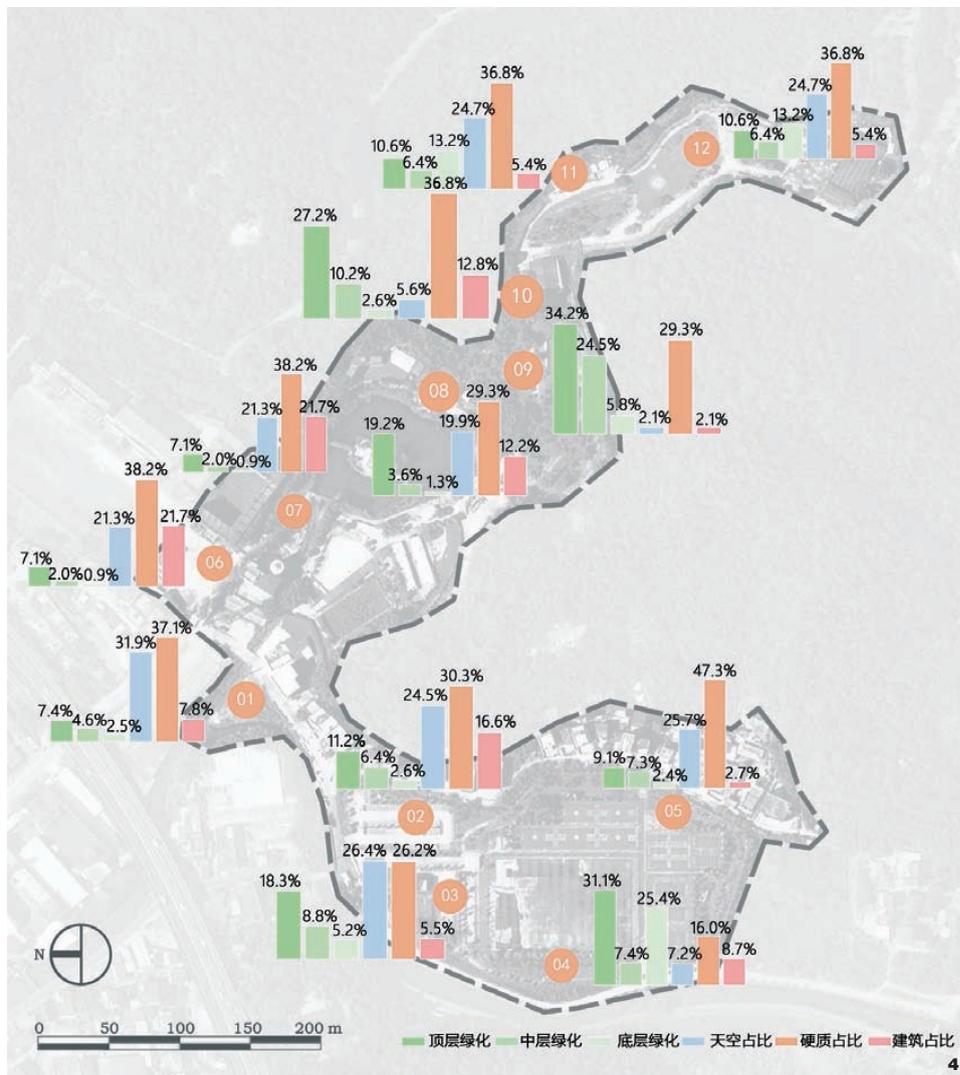


图4 各点位视觉要素占比
Fig. 4 Proportion of visual elements at each measurement point

3.1.2 听觉环境特征分析

基于实测数据的统计结果对12个测点的听觉环境指标进行量化分析(图5)。总体而言, 场地声环境受无人机飞行高度的影响显著, 随着无人机飞行高度的下降呈现出阶梯上升的趋势。在相对稳定的平均68.3 dBA的背景声环境下(对照组), 近地飞行(20m)的平均等效声级最高(79.5 dBA), 平均信噪比可达10.9 dB; 30m高度次之(75.9 dBA), 平均信噪

比为6.8 dB; 40m高度位居第三(73.2 dBA), 平均信噪比为3.2 dB。三个实验组别声压级差异均高于人耳可察觉的最小分贝差异值3 dBA^[26], 使得无人机噪声在背景环境中极具凸显性, 形成了强烈的听觉干扰。在空间分布层面, 受所在点位客观环境影响, 尽管飞行高度一致, 但不同点位的声压级仍表现出较为显著的差异。以20m实验组为例, 其中受无人机噪声影响最大是点位1, 声压级最高达到了

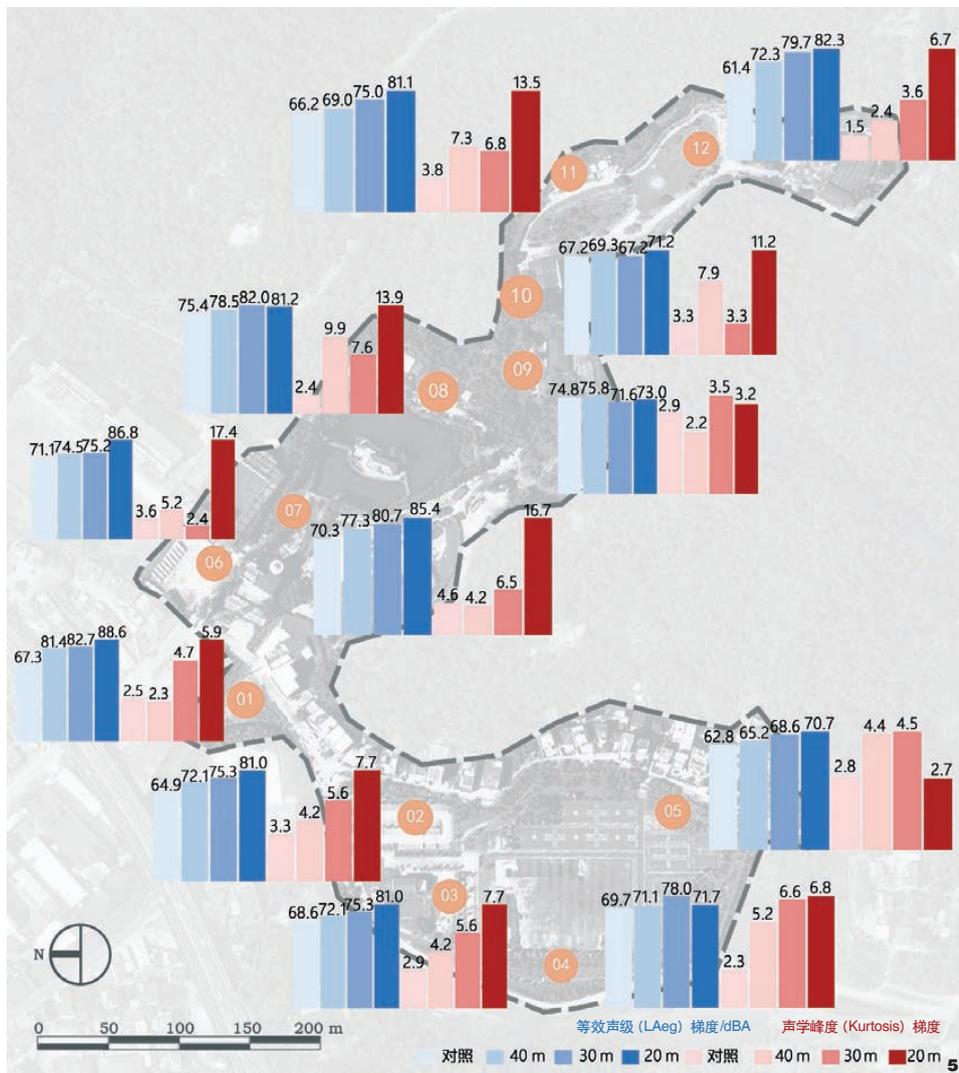


图5 各点位在不同梯度下的声学数据
Fig. 5 Acoustic data at each measurement point across different gradients

88.6 dBA, 相较对照组增加了21.3 dBA, 其次是点位6和点位7, 分别为86.8 dBA和85.4 dBA, 这些点位均为硬化程度较高的开敞空间, 受噪声源影响较为直接, 声波在地面反射与多径叠加效应明显^[27]; 受影响最小的是点位9 (73 dBA)、4 (71.7 dBA) 和10 (71.2 dBA), 相较各自的对照组环境噪声分别增加了1.8 dBA、2 dBA和4 dBA, 区域内顶层植被覆盖率高, 对无人机噪声的传播起到一定的阻碍作用。

对比各点位的声学峰度指标, 点位6最高, 达到17.4, 声场表现出高强度的脉冲特性; 其次是点位7和点位8, 峰度值分别高达16.7和13.9, 显著高于稳态交通噪声的峰度特征; 峰度最低的是对照组的点位12 (1.5), 声场最为平稳。总体来看, 随着无人机高度的降低, 场地声环境已由连续平稳转变为高度非平稳状态, 这种包含高强度瞬态脉冲成分的声场环境, 在听觉感知上具有比稳态噪声

更强的冲击力与侵扰性。

3.1.3 主观感知特征分析

为确保主观感知数据统计分析的可靠性, 本研究先对数据的分布特征、逻辑效率及变量独立性进行系统检验 (表2)。正态性检验显示, 除声学指标保留高值特征外, 其余变量偏度与峰度系数在合理阈值内 ($|Skewness| < 2$, $|Kurtosis| < 3$), 满足线性模型分析的正态分布假设。其次, Pearson相关分析表明, 客观噪声指标与主观感知评价有显著对应关系且符合心理声学规律, 主观维度逻辑自洽, 证实数据有良好建构效度。最后, 多重共线性诊断 (VIF) 中, 自变量VIF值均小于临界值10.0, 存在必要性, 予以保留。综上, 本研究数据分布特征与逻辑效率良好, 各解释变量无严重多重共线性, 满足后续分析建模的数据前提。

受试者对无人机噪声环境下声环境的总体感知评价结果显示, 相较于对照组, 实验组的各项主观评价指标均呈现出显著的下降趋势。对无人机飞行高度和主观感知指标进行相关性分析发现 (表3), 无人机飞行高度与满意度和平静度呈明显的正相关, 与烦恼度呈负相关。

对比各实验组别, 对照组背景声环境的满意度平均值为4.36, 随着无人机高度的下降, 满意度的持续衰减, 20 m高度实验组的听觉满意度仅为2.94, 远低于量表中的中值水平; 而平静度感知受无人机噪声影响最为严重, 自40 m实验组至30 m实验组, 平静度评价呈断崖式下降, 自2.84降至2.06; 而烦恼度的感知则随着高度的降低显著攀升, 自2.29 (对照组) 提升至4.28 (20 m实验组)。高频、瞬态的无人机噪声极大地破坏了研究场地内原有的宁静氛围与心理恢复性潜能, 成为负面感

表2 变量间相关性系数 (逻辑效度检验)
Tab. 2 Correlation coefficients between variables (logical validity test)

变量 Variable	顶层绿化 Upper-layer greenery	中层绿化 Middle-layer greenery	底层绿化 Ground-layer greenery	天空占比 Sky pro- portion	建筑占比 Building proportion	硬质占比 Hardscape proportion	等效 声级 L_{Aeq}	峰度 k_u	听觉 满意度 Auditory satisfaction	听觉 烦恼度 Auditory annoyance	听觉 平静度 Auditory tranquility	听觉 协调度 Auditory harmony
顶层绿化	1	0.70**	0.43**	-0.41**	-0.23**	-0.49**	-0.04	-0.03	0.35**	-0.26**	-0.11**	-0.01
中层绿化	0.70**	1	0.08*	-0.40**	-0.47**	-0.12**	-0.12**	-0.21**	0.27**	-0.17**	-0.08*	-0.00
底层绿化	0.43**	0.08*	1	0.37**	-0.46**	-0.81**	-0.11**	-0.12**	0.37**	-0.20**	0.01	-0.05
天空占比	-0.41**	-0.40**	0.37**	1	-0.35**	-0.44**	0.01	-0.17**	0.08*	0.01	0.12**	-0.01
建筑占比	-0.23**	-0.47**	-0.46**	-0.35**	1	0.33**	0.20**	0.31**	-0.30**	0.11**	-0.02	0.04
硬质占比	-0.49**	-0.12**	-0.81**	-0.44**	0.33**	1	-0.04	0.14**	-0.32**	0.27**	-0.01	0.02
等效声级	-0.04	-0.12**	-0.11**	0.01	0.20**	-0.04	1	0.55**	-0.28**	0.37**	-0.15**	-0.24**
峰度	-0.03	-0.21**	-0.12**	-0.17**	0.31**	0.14**	0.55**	1	-0.27**	0.31**	-0.21**	-0.17**
听觉满意度	0.35**	0.27**	0.37**	0.08*	-0.30**	-0.32**	-0.28**	-0.27**	1	-0.24**	0.34**	0.25**
听觉烦恼度	-0.26**	-0.17**	-0.20**	0.01	0.11**	0.27**	0.37**	0.31**	-0.24**	1	0.07*	-0.17**
听觉平静度	-0.11**	-0.08*	0.01	0.12**	-0.02	-0.01	-0.15**	-0.21**	0.34**	0.07*	1	0.29**
听觉协调度	-0.01	-0.00	-0.05	-0.01	0.04	0.02	-0.24**	-0.17**	0.25**	-0.17**	0.29**	1

注: * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$ 。

表3 无人机飞行高度与主观感知相关性分析
Tab. 3 Relationship between UAV flight altitude and subjective perception

变量 Variable	高度 Height	满意度 Satisfaction	烦恼度 Annoyance	平静度 Tranquility	协调度 Harmony
高度	皮尔逊相关性	1	0.441**	-0.498**	0.75***
	显著性 (双尾)	—	0.007	0.002	< 0.001

注: * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, *** 表示 $p < 0.001$ 。

知的主要来源。此外, 值得一提的是受试者对协调度的感知在无人机介入瞬间 (即从对照组到40 m实验组) 就发生了最大幅度的跌落, 自4.25降至3.02; 但在各实验组间协调度感知的差异并不明显, 这表明无人机协调感知的破坏是“存在即发生”的, 而非单纯依赖声级强度的线性增加。

横向对比12个实验点位, 在20 m实验组中, 点位5的听觉烦恼度最高 (5.73), 点位7 (5.60) 和点位1 (5.45) 次之, 结合前文视觉要素分析, 点位5为硬质广场 (硬质占比47.3%), 点位1为开敞空间 (天空占比31.9%)。这些区域缺乏中高层植被的视觉遮蔽与心理缓冲, 导致受试者直接暴露于视听双重干扰

之下, 从而放大了对噪声的负面评价。而点位12、点位9则表现出了较强的抗干扰能力, 即在同等噪声暴露下, 两个点位的满意度一直保持较高的评价水平, 且烦恼度较低, 前者景观美学价值较高, 产生了显著的视觉遮蔽效应, 提高了心理容忍阈值; 后者背景声环境分贝值较高, 无人机噪声影响较不明显。

3.2 关键影响指标与主观感知预测模型构建

本研究采用MLM对视听环境特征与4类主观感知要素 (满意度、烦恼度、平静度、协调度) 的关联进行整体分析。建模前, 经检验模型残差分布符合正态假设且无明显自相关性; 通过VIF检验, 确保所有保留自变量

$VIF < 10$, 排除了多重共线性干扰。基于MLM分析结果 (表4), 本研究剔除显著性水平较低 ($p > 0.05$) 的无效指标, 分别构建了针对4类主观感知的拟合预测模型。

(1) 满意度模型。排除多元回归后显著性较不明显的建筑与硬质铺装要素, 最终构建以听觉满意度为因变量, 以顶层绿化、底层绿化、天空占比、等效声级及峰度作为自变量的模型, 见公式 (1), 模型拟合优度AC为2318.9969。

$$S = 3.776 - 0.282L_{Aeq} - 0.104K_u + 0.437V_t + 0.305V_b + 0.291S_k \quad (1)$$

经检验该模型各保留自变量的统计显著性均符合要求 ($p < 0.05$), VIF值均小于10。

表4 基于MLM的指标显著性分析表
Tab. 4 Significance analysis of indicators based on MLM

自变量 Independent variable	听觉满意度 (S) Auditory satisfaction	听觉烦恼度 (A) Auditory annoyance	听觉平静度 (T) Auditory tranquility	听觉协调度 (H) Auditory harmony	
截距	3.776 ($p < 0.001$)	3.319 ($p < 0.001$)	2.696 ($p < 0.001$)	3.576 ($p < 0.001$)	
声学指标	等效声级 (L_{Aeq})	-0.282 ($p < 0.001$)	0.504 ($p < 0.001$)	-0.087 ($p = 0.047$)	-0.313 ($p < 0.001$)
	声学峰度 (K_u)	-0.104 ($p = 0.019$)	0.261 ($p < 0.001$)	-0.207 ($p < 0.001$)	Ns ($p = 0.129$)
视觉指标	顶层植被占比 (V_t)	0.437 ($p < 0.001$)	Ns ($p = 0.249$)	ns	ns
	中层植被占比 (V_m)	Ns ($p = 0.086$)	Ns ($p = 0.359$)	ns	ns
	底层植被占比 (V_b)	0.305 ($p < 0.001$)	0.261 ($p = 0.001$)	ns	-0.235 ($p = 0.011$)
	天空占比 (S_k)	0.291 ($p < 0.001$)	0.189 ($p = 0.027$)	ns	ns
	建筑占比 (B_d)	ns	ns	ns	ns
	硬质占比 (P_s)	ns	0.659 ($p < 0.001$)	ns	ns

其中, 视觉变量中的顶层绿化、底层绿化及天空占比均呈显著正相关; 而听觉变量中的等效声级与声学峰度均呈显著负相关。由模型可知, 自然视觉要素能显著提升满意度, 而噪声的等效声级与峰度均对听觉满意度产生负面影响。

(2) 烦恼度模型。排除 $VF > 10$ 的变量以及显著性较不明显的顶层绿化与建筑要素, 最终构建以听觉烦恼度为因变量, 以硬质铺装、底层绿化、天空占比、等效声级及峰度为自变量的模型, 见公式 (2), 模型拟合优度AIC为2 527.2602。

$$A = 3.319 + 0.504L_{Aeq} + 0.261K_u + 0.659P_s + 0.189S_k + 0.261V_b \quad (2)$$

经检验该模型各保留自变量的统计显著性均符合要求 ($p < 0.05$), VF 值均小于10。该模型中硬质铺装占比表现出极高的显著性, 是导致烦恼度增加的主要视觉因素。值得注意的是, 底层绿化和天空占比在本模型中呈正向影响。

(3) 平静度模型。排除所有多元回归后显著性不明显 ($p > 0.05$) 的视觉环境指标, 最终构建以听觉平静度为因变量, 仅以等效声级和峰度为自变量的模型, 见公式 (3),

模型拟合优度AIC为2 354.9564。

$$T = 2.696 - 0.087L_{Aeq} - 0.207K_u \quad (3)$$

经检验该模型各保留自变量的统计显著性均符合要求 ($p < 0.05$), VF 值均小于10。由模型可知, 在无人机噪声环境下, 视觉景观对平静度的恢复作用失效。对比可知, 代表声音脉冲特性的峰度的标准化系数约为等效声级的2.4倍, 均对听觉平均度产生负面影响, 但峰度的影响更为强烈。

(4) 协调度模型。排除显著性较不明显 ($p > 0.05$) 的顶层绿化、天空占比等要素, 最终构建以听觉协调度为因变量, 以等效声级和底层绿化为自变量的模型, 见公式 (4), 模型拟合优度AIC为2 788.2591:

$$H = 3.576 - 0.313L_{Aeq} - 0.235V_b \quad (4)$$

经检验该模型各保留自变量的统计显著性均符合要求 ($p < 0.05$), VF 值均小于10。由模型可知, 等效声级与底层绿化对听觉协调感会产生负面影响, 值得注意的是, 底层绿化并未起到协调作用, 反而产生了负面影响, 揭示了自然景观与噪声之间的认知冲突现象。

4 讨论

研究分析结果表明, 在无人机噪声环境

下, 视觉景观对主观感知的调节作用呈现出显著的分离特征。

顶层、底层绿化及天空占比均能显著提升满意度, 丰富的自然景观能有效激发提供心理补偿机制, 抵消部分噪声带来的负面评价^[28]。除听觉环境特征外, 视觉要素中硬质铺装比重是导致烦恼度升高的最主要因素, 这可能与硬质界面的声反射增强作用有关^[29]。而与传统认知不同的是, 研究发现底层绿化和天空占比的增加反而会增加人们的烦恼度, 仅有增加顶层绿化比重能显著降低烦恼。据此推测, 在低空场景下视听感知具有特殊性, 即开阔的天空视野会导致声源的“视觉暴露”, 从而加剧心理烦躁^[30]。

在平静度模型中, 所有的视觉环境指标变量均未呈现显著性, 说明在高强度、高频次的无人机噪声面前, 常规的视觉感知的掩蔽机制基本失效。值得注意的是, 代表声音脉冲特性的峰度对平静度的影响力较声压级更为显著, 这说明无人机特有的瞬态冲击噪声是影响声环境平静感的关键因素, 物理降噪手段仍是维护环境宁静的根本方法, 而视觉景观调节主要在心理层面发挥辅助缓冲作用。

协调度模型回归分析揭示了底层绿化在主观感知建模中的复杂性与二元特征。地表植被作为自然景观基底虽能显著提升听觉满意度, 却对声环境协调性产生显著抑制效应。这种悖论源于开敞草坪空间中缺乏上层乔木郁闭遮挡时, 单一水平绿化界面反而增强了空中无人机的视觉显著性。剧烈的视听觉不协调诱发深层认知冲突, 进而导致声环境整体协调感下降。

综上所述, 基于本研究得出的视听环境特征与主观感知交互模型, 针对受低空物流噪声影响的城市近郊区域, 提出以下4项规划管控与空间干预策略:

(1) 划定噪声高敏感管控区域。平静度模型有力地证明了在高强度无人机脉冲噪声的胁迫下, 视觉环境要素的调节的局限性。故针对0类和1类声环境功能区, 应根据脉冲噪声敏感程度, 划定噪声高敏感区域, 从规划层面, 根据无人机的脉冲传播特性划定核心保护区域, 或设置固定时段的“无人机禁飞区”和设置物理隔离屏障, 对噪声源进行严格管控, 以确保核心宁静区的声环境质量。

(2) 优化无人机航线布局。研究表明, 对于无人机噪声而言, 声学峰度特性对平静度的负面影响权重远高于等效声压级。因此, 在航线规划层面, 除了优先选择河流、主干道等背景噪声较高的区域进行航线规划外, 应将“脉冲抑制”作为核心管控指标, 建议在靠近居住区等敏感路段时, 严格限制无人机的机动变轨与急加减速行为, 保持平稳巡航状态以降低声音的时间突变性。同时, 依据声传播随高度衰减的规律, 在非起降阶段应设定最低巡航高度, 利用距离衰减效应直接降低到达地面的声能量与脉冲强度。

(3) 构建复合绿化视听屏障。对比满意

度、烦恼度和协调度模型可以发现, 顶层绿化(V_t)能显著提升满意度, 而单一的底层绿化(V_b)和天空占比(S_k)则分别会降低协调感, 增加声景的烦恼度。因此在低空航线下方的公共空间以及周边影响区域, 在策略上应优先采用“乔-灌-草”复层种植模式, 避免单一的大草坪铺设, 配置高郁闭度, 大冠幅的乔木体系, 利用茂密的树冠层对上方无人机空域形成物理与视觉的双重遮挡, 在削减物理声能传播的同时, 降低声源的视觉显著性和噪声烦恼, 提升声景满意度。

(4) 实施下垫面材质更新。烦恼度模型显示, 硬质铺装占比(P_v)是导致公众烦恼度上升的最关键视觉因素, 这与硬质界面产生的声反射增强效应密切相关^[31]。因此在低空物流频繁区域, 应最大程度减少大面积硬质广场, 采用透水沥青、多孔吸声材料替代传统石材以减少地面声反射, 同时结合高绿视率的心理补偿机制, 从物理降噪与心理调节双重维度提升整体满意度。

5 结论

随着低空经济上升为国家战略, 无人机物流等新兴业态正在重塑城市空间格局, 但其引发的特殊噪声污染也为人居环境带来了前所未有的挑战。本研究基于声漫步法开展对照实验, 采用MLM模型深入解析了景观视听环境特征对无人机噪声主观感知的差异化影响机制, 为未来低空经济的政策制定以及低空航路周边的景观优化提供科学依据。

本研究初步揭示了低空噪声环境下的视听交互机理与感知特征, 但受限于实验条件与研究边界, 在以下方面仍有待后续研究予以拓展。首先, 本研究的实验样本与场景存在一定的局限性。样本主要为身心健康青年群体, 未涵盖老年人、儿童等噪声敏感人

群, 实验场景仅聚焦城市近郊绿地及单一旋翼无人机。未来研究应拓展样本人口学广度, 纳入多元低空交通噪声源, 验证研究结论在不同群体与复杂声环境下的普适性。其次, 研究在主观感知指标的选取和测量方面精细度与客观性不足。受限于实验设计, 本研究主要采用主观量表进行评价, 后续研究可进一步引入神经生理表征指标, 从生理客观层面解析视听交互的神经心理机制。此外, 研究对视觉环境要素的量化主要侧重于绿化的垂直结构占比, 尚未深入考量植物群落的微观特征对噪声感知的潜在调节作用, 未来可进一步细化景观评价指标体系, 探究不同植物配置模式的声景优化效益, 为精细化的低空噪声景观干预提供理论支撑。 

注: 文中图片均由作者自绘/摄。

参考文献

- [1] 覃睿. 再论低空经济: 概念定义与构成解析[J]. 中国民航大学学报, 2023, 41(6): 59-64.
- [2] 毕马威中国. 低空经济的黄金时代: 解构行业生态, 助力企业绘就增长蓝图[R/OL]. [2025-11-30]. <https://kpmg.com/cn/zh/home/insights/2025/10/the-golden-age-of-low-altitude-economy.html>.
- [3] GARG V, NIRANJAN S, PRYBUTOK V, et al. Drones in Last-mile Delivery: A Systematic Review on Efficiency, Accessibility, and Sustainability[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 123: 103831.
- [4] 上海市人民政府办公厅. 关上海市人民政府办公厅关于印发《上海市低空经济产业高质量发展行动方案(2024-2027年)》的通知[Z/OL]. (2024-08-16)[2025-11-30]. <https://www.shanghai.gov.cn/gwkw/search/content/da714ee861614ef2abae9a2b7ca317b6>.
- [5] DONY C C, DELMELLE E M, DELMELLE E C. Re-conceptualizing Accessibility to Parks in Multimodal Cities: A Variable-width Floating Catchment Area (VFCA) Method[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 143: 90-99.
- [6] PENG Y, MI K, WANG H T, et al. Most Suitable Landscape Patterns to Preserve Indigenous Plant Diversity Affected by Increasing Urbanization: A

- Case Study of Shunyi District of Beijing, China[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 38: 33-41.
- [7] VAN RENTERGHEM T. Guidelines for Optimizing Road Traffic Noise Shielding by Non-deep Tree Belts[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 69: 276-286.
- [8] SINIBALDI G, MARINO L. Experimental Analysis on the Noise of Propellers for Small UAV[J]. *Applied Acoustics*, 2013, 74(1): 79-88.
- [9] KAPOOR R, KLOET N, GARDI A, et al. Sound Propagation Modelling for Manned and Unmanned Aircraft Noise Assessment and Mitigation: A Review[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(11): 1424.
- [10] FAN Y R, LIANG J, CAO X D, et al. Effects of Noise Exposure and Mental Workload on Physiological Responses During Task Execution[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(19): 12434.
- [11] GREEN M C, LOTINGA M J B, TORIJA A J. Shaping Future Soundscapes: Affective Impact of Unmanned Aircraft Systems Noise in Urban Environments[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2025, 158(4): 2763-2778.
- [12] 樊一江, 李卫波. 我国低空经济阶段特征及应用场景研究[J]. *中国物价*, 2024(4): 98-103.
- [13] LI Z L, LI S, LU J, et al. Air Route Network Planning Method of Urban Low-altitude Logistics UAV with Double-layer Structure[J]. *Drones*, 2025, 9(3): 193.
- [14] DOBBS C, ESCOBEDO F J, ZIPPERER W C. A Framework for Developing Urban Forest Ecosystem Services and Goods Indicators[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 99(3-4): 196-206.
- [15] OBERMAN T, LATINI A, ALETTA F, et al. Human Sounds and Associated Tonality Disrupting Perceived Soundscapes in Protected Natural Areas[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 28759.
- [16] ZHANG M B, QIU W, XIE H W, et al. Applying Kurtosis as an Indirect Metric of Noise Temporal Structure in the Assessment of Hearing Loss Associated with Occupational Complex Noise Exposure[J]. *Ear & Hearing*, 2021, 42(6): 1782-1796.
- [17] SCHÄFFER B, PIEREN R, HEUTSCHI K, et al. Drone Noise Emission Characteristics and Noise Effects on Humans—A Systematic Review[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(11): 5940.
- [18] CLARK C, GJETLAND T, LAVIA L, et al. Revising ISO/TS 15666—The Noise Annoyance Standard[C]// *Proceedings of the International Commission on Biological Effects of Noise*. Stockholm: Karolinska Institutet, 2021.
- [19] BROWN A L. A Review of Progress in Soundscapes and an Approach to Soundscape Planning[J]. *The International Journal of Acoustics and Vibration*, 2012, 17(2): 73-81.
- [20] DJI Enterprise. DJI FlyCart 30 Uncrewed Aircraft Flight Manual[R]. Shenzhen: SZ DJI Technology Co., Ltd., 2024.
- [21] DJI 企业版. 关于 DJI FlyCart 30, 你需要知道的 30 件事[EB/OL]. (2024-04-02)[2025-11-30]. <https://enterprise-insights.dji.com/blog/30-things-to-know-about-dji-flycart30>.
- [22] SCOZZARO G, DELAHAYE D, VELA A E. Noise Abatement Trajectories for a UAV Delivery Fleet[C]// *Proceedings of the 9th SESAR Innovation Days*. Athens: SESAR Joint Undertaking, 2019: 1-8.
- [23] LOTINGA M J B, GREEN M C, TORIJA A J. Human Perception and Response to Sound from Unmanned Aircraft Systems Within Ambient Acoustic Environments[J]. *npj Acoustics*, 2025, 1: 2.
- [24] MURRAY L, NGUYEN H, LEE Y F, et al. Variance Inflation Factors in Regression Models with Dummy Variables[C]// *24th Annual Conference Proceedings of Conference on Applied Statistics in Agriculture*. Manhattan, Kansas: Kansas State University, 2012: 161-177.
- [25] SHALABH. Chapter 9: Multicollinearity[Z]. Kanpur: Indian Institute of Technology Kanpur.
- [26] Environmental Protection Agency Office of Noise Abatement and Control U S. Information on Levels of Environmental Noise Requisite to Protect Public Health and Welfare with an Adequate Margin of Safety, March 1974[M]. Washington: U.S. Government Printing Office, 1974.
- [27] KANG J. Sound Propagation in Street Canyons: Comparison Between Diffusely and Geometrically Reflecting Boundaries[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, 107(3): 1394-1404.
- [28] MASOUDINEJAD S, HARTIG T. Window View to the Sky as a Restorative Resource for Residents in Densely Populated Cities[J]. *Environment and Behavior*, 2020, 52(4): 401-436.
- [29] YANG H S, KANG J, KIM M J. An Experimental Study on the Acoustic Characteristics of Outdoor Spaces Surrounded by Multi-residential Buildings[J]. *Applied Acoustics*, 2017, 127: 147-159.
- [30] MITCHELL A, ERFANIAN M, SOELISTYO C, et al. Effects of Soundscape Complexity on Urban Noise Annoyance Ratings: A Large-scale Online Listening Experiment[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(22): 14872.
- [31] VIOLLON S, LAVANDIER C. Multidimensional Assessment of the Acoustic Quality of Urban Environments[C]// *Conf. Proceedings "Inter-noise"*. Nice: French Acoustical Society, 2000: 2279-2284.