

DOI: 10.20103/j.stxb.202403140531

王熠, 肖新标, 韩健, 徐圣辉, 金学松. 铁路噪声对鸟类声信号的掩蔽. 生态学报, 2024, 44(22): 10247-10257.

Wang Y, Xiao X B, Han J, Xu S H, Jin X S. Masking of bird acoustic signals by railway noise. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10247-10257.

铁路噪声对鸟类声信号的掩蔽

王 熠¹, 肖新标^{1,*}, 韩 健², 徐圣辉¹, 金学松¹

¹ 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 成都 610031

² 西南交通大学机械工程学院, 成都 610031

摘要: 铁路沿线是人类和自然之间相互作用的重要生态交错区, 铁路的不断延伸改变了非人类物种的自然环境, 并且对它们的声环境产生了显著影响。考虑铁路噪声源强特性及地形地貌特征, 基于 CadnaA 噪声仿真平台, 建立铁路列车噪声传播预测模型, 分析铁路噪声在沿线区域的传播规律、影响范围和频谱分布特性。基于掩蔽效应理论和临界比率, 研究铁路噪声对鸟类声信号传播的掩蔽程度, 并构建考虑多个因素影响下鸟类通信距离计算模型, 计算并分析了鸟类探测、区分、识别、舒适交流四种听觉行为的最大传播距离。计算结果显示: 铁路噪声在很大程度上会影响鸟类声信号的传播, 鸟类各种听觉行为的传播距离明显减少。相关研究结果可为铁路工程的生态影响、生物声学研究和环保设计提供指导和参考。

关键词: 铁路噪声; 鸟类声环境; 生物声学; 通信距离; 听觉行为

Masking of bird acoustic signals by railway noise

WANG Yi¹, XIAO Xinbiao^{1,*}, HAN Jian², XU Shenghui¹, JIN Xuesong¹

¹ State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

² School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Abstract: The ecological interaction between human and nature along the railway is important. The continuous extension of the railway has changed the natural environment of non-human species and had a significant impact on their acoustic environment. Considering the strong characteristics of railway noise and the characteristics of topography and geomorphology, a prediction model of railway train noise propagation was established to analyze the propagation law, influence range and spectrum distribution characteristics of railway noise along the railway based on the CadnaA noise simulation platform. Based on the theory of masking effect and the critical ratio, the masking degree of railway noise on the propagation of bird acoustic signals was studied, and a calculation model of bird communication distance was constructed under the influence of multiple factors. The maximum propagation distance of four auditory behaviors of bird detection, discrimination, recognition and comfortable communication was calculated and analyzed. The calculation results showed that the railway noise affected the propagation of bird acoustic signals to a large extent, and the propagation distance of various auditory behaviors of birds decreased significantly. The relevant results can provide guidance and reference for the ecological impact of railway engineering, bioacoustics research and environmental protection design.

Key Words: railway noise; bird acoustic environment; bioacoustics; communication distance; auditory behavior

随着铁路交通基础设施的大规模建设以及铁路交通工程技术和速度的提升, 近年来铁路交通不断向自然

基金项目: 国家自然科学基金 (U1934203); 浙江省交通投资集团有限公司智慧交通研究分公司科技计划 (202205)

收稿日期: 2024-03-14; **网络出版日期:** 2024-08-22

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

生态区域腹地延伸,使铁路及其沿线区域成为人与自然的重要交界区域。道路影响域进一步扩大,对原本脆弱的生态系统构成威胁^[1-4],导致栖息于该环境中的野生动物受到日益加剧的人类干扰。其中,鸟类是受铁路噪声污染影响最为严重的物种之一。噪声会掩盖鸟类的声信号,而声信号在鸟类交流沟通、吸引配偶、领地守护、警告捕食者等方面起着关键作用^[5-7]。掩盖交流信号和其他重要的生物声音(例如捕食者接近的声音)将对个体、物种行为和种群产生重大不利影响。Gomes^[8]认为,噪声会降低鸟类声音的有效传播距离,导致其在噪声中减弱或消失。此外,噪声会降低声信号被正确接收的概率,从而对鸟类之间的交流产生影响^[9-10]。

近年来,人为噪音作为一种干扰动物声学交流的因素受到越来越多的关注,尤其是由交通引起的噪音污染。刘刚^[11]通过噪声回放试验技术,使用不同声压级道路交通噪声,对画眉鸟(*Garrulax canorus*)进行了室内干扰实验,分析得出了道路交通噪声对画眉鸟的典型生物节律以及退避行为的影响规律。蔡超^[12]采用室内实验的方法,研究分析了道路交通噪声不同声压级和不同频率因子对金丝雀(*Serinus canaria*)幼鸟习鸣质量的影响,并通过设置这些因素的不同组合进行实验,得出了道路交通噪声各种因子影响下金丝雀幼鸟习鸣质量的各指标变化情况。王艳雯等^[13]比较了沈阳市区和近郊不同噪声水平下树麻雀繁殖期的鸣唱特征,研究结果发现,在城市嘈杂的噪声环境中,树麻雀(*Passer montanus*)提高了鸣唱最低频率,且最低频率的增加与噪声水平呈正相关关系。另外,最高频率、频宽和主峰峰频也显著提高。

目前,国外学者已经对栖息于道路沿线一定范围内的鸟类进行了大量的野外观察,并对由道路噪声引起的鸟类行为异常进行了描述统计。研究发现,道路噪声对鸟类产生了负面影响,导致它们出现一些异常行为^[14-15]。除了描述统计之外,学者们还开始初步探讨道路交通量和噪声暴露与鸟类异常行为之间的关系。他们通过收集相关数据并进行分析,发现随着交通量增加和噪声暴露程度提高,鸟类异常行为也呈现出逐渐增多的趋势^[16-17]。Marten^[18]在纽约达奇斯县的开阔地、有叶和无叶落叶混交林以及针叶林中测量了声音传播情况,获得了在距离地面不同高度处的过量衰减(Excess Attenuation)随频率变化的曲线图,并提出了根据鸟类鸣叫源强和声音衰减计算鸟类通信距离的方法。Dooling等^[19]系统阐述了人为噪音对鸟类听觉系统产生的四种影响,并从鸟类的角度考虑掩蔽效应,回顾了它们在嘈杂环境中最大化沟通所采用的行为和听觉策略,并提出一种评估噪音风险的方法。Brumm^[20]选择研究在城市地区鸣叫音调较高的两种鸟类—大山雀(*Parus major*)和黑鹂(*Oriolus hosii*),计算它们在不同水平的城市噪音和自然森林栖息地下的通信距离。研究结果发现鸟类提高鸣叫音高可能不是为了减少信号掩蔽而进行的适应,相比之下调整声音振幅具有更显著的影响。

中国道路生态学研究尚处于起步阶段,主要关注路网对物种生境的分割、破坏作用以及道路对生物迁徙的隔离效应等方面,以满足工程施工需要^[21-22]。然而,铁路噪声对鸟类的影响是一个研究相对较少的领域。尽管道路交通噪声已经得到广泛关注和研究,但铁路噪声作为另一种重要的环境噪声源,其对鸟类生态系统的影响仍然存在许多未知之处。国外学者已经进行了大量有关噪声对鸟类行为和生理影响的研究,但这些研究多数限于道路交通噪声和城市环境噪声^[23-24],铁路噪声影响鸟类的相关研究则寥寥无几。

总体而言,在了解并深入探索铁路噪声对鸟类能力和行为模式产生何种影响方面还有很大空白需要填补。进一步开展相关科学实验与调查将有助于研究人员更好地理解并采取有效控制措施来保护各种珍稀物种,维护它们所依赖的自然环境中复杂而脆弱的平衡状态。本文从铁路交通噪声角度出发,探究铁路噪声与鸟类声信号之间的掩蔽关系。在此基础上,考虑地形地貌因素,建立车外噪声传播的预测模型,结合鸟类通信距离计算模型,计算在不同因素影响下鸟类的最大交流距离,深入探究鸟类之间沟通交流的机制与限制,并对其生态习性和行为模式做出进一步研究和分析。

1 鸟类通信距离计算模型

1.1 频谱特性

铁路运行速度是衡量一个国家交通发展水平的重要指标之一。随着科技的不断进步,铁路运行速度也在

不断提升。为了保证铁路列车在运行过程中不会对周围环境和人们造成噪音污染,相关部门已经对不同速度级的列车车外噪声声源识别做了测试^[25],并分析了其频谱特征,如图 1 所示。

图 1 给出了速度 80—350km/h 时,车外通过噪声的频谱图,分析频率范围为中心频率 31.5—8000Hz 的 1/3 倍频带。根据图 1 所示,随着速度的增加,车外噪声频谱的峰值频率逐渐上升,显著频段主要集中在 500—4000Hz 范围内。

典型鸟类听觉曲线^[26]如图 2 所示,表示鸟类在每个频率下能听到的最低声音水平。该听觉曲线由国外专家 Dooling 收集 38 种鸟类的行为可听性曲线,又通过包括生理记录的数据扩展另外 10 种鸟类。其中包括雀形目 Passeriforme(雀形目)鸟类 20 种、Strigiformes(鸮形目)鸟类 13 种、Non-Passeriformes(非雀形目)鸟类 15 种共 48 种鸟类的行为可听性曲线,其中有 20 种鸟类分布在我国各个区域,且涵盖雀形目、鸮形目、非雀形目三大类鸟类物种。每个物种的数据都用多项式函数拟合,以提供描述特定物种在听觉范围内的最小可听声压的连续曲线。

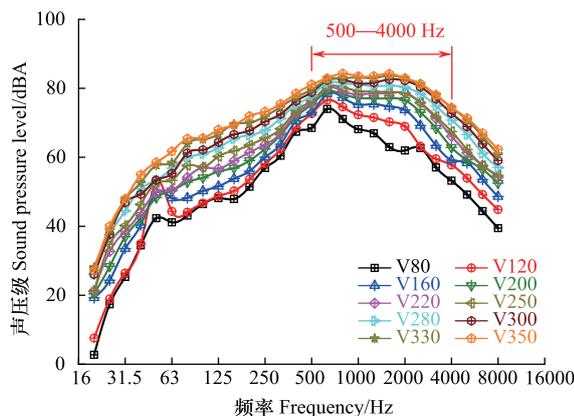


图 1 铁路噪声频谱特性

Fig.1 Spectral characteristics of railway noise

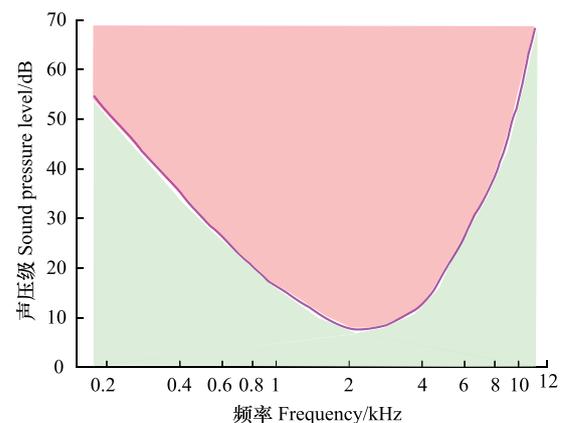


图 2 典型鸟类听觉曲线^[26]

Fig.2 Typical bird hearing curve^[26]

由图 2 可知,鸟类在 1000—4000Hz 频率范围内具有最佳听力,在更高和更低频率时则表现较差。此外,鸟类发声的大部分能量也集中在该频率区间。而铁路噪声显著频率主要集中在 500—4000Hz,与鸟类听觉和发声频率范围存在显著重叠。因此相比于道路交通噪声、城市噪声等其他环境噪声,铁路交通噪声对于鸟类声信号掩蔽效应更严重^[27]。

1.2 掩蔽效应

掩蔽是指一个声音因为另一个声音的干扰而导致检测、辨别或识别该声音所需阈值增加的过程。最简单的掩蔽实验是通过测量存在宽带噪声中纯音的声音检测阈值来进行。在这种实验中,噪声通常以频谱级(即每赫兹的声能)来描述,而不是用声压级总值描述。掩蔽实验表明,信号频率区域内的噪声对掩蔽信号起到至关重要作用,相比之下落在其它频带上的噪声能量的贡献较小^[28]。

在噪音环境中进行交流时的舒适感是一个普遍存在且被广泛研究的现象。人们对于能够清晰听到彼此声音的体验非常重视,因为这种情况下,他们可以更轻松的理解对方所说的话语,并且交流过程更加顺畅。然而,在背景噪音水平显著增加的情况下,如来自电视或洗衣机等噪声源,语言感知就会受到不利影响。有关背景噪音对语言感知影响的研究表明,在高噪音环境中进行交流时,人们需要付出更大努力才能理解和传达信息。这是因为背景噪音对语言信号产生掩蔽,使得接收者难以分辨出真正想要传达的信息。例如,在喧闹餐厅内交谈时,其他说话者产生的噪声与同伴语言信号水平相近,导致难以清晰听到彼此的声音。这种情况下的交流仍在进行,但不再被认为是舒适的,因为它需要说话者和听者双方付出更大的努力。

1.3 临界比率

听力阈值下纯音的功率与背景噪声每赫兹功率之间的比率被称为临界比 (Critical Ratio) 或信噪比^[29]。临界比实际上反映了接收者在特定环境中辨别和理解声音的能力。当背景噪声较低时, 临界比越高, 意味着纯音信号相对于噪声更容易被分辨出来, 并且接收者更容易理解其中包含的信息。而当背景噪声增加时, 如果纯音信号与噪声水平接近甚至低于其水平, 则会导致临界比降低, 从而使得接收者难以准确地分辨和理解所听到的声音。

$$CR = 10 \log_{10} \frac{P_0}{P} \quad (1)$$

式中, P_0 为纯音的功率; P 为背景噪声的每赫兹功率 (频谱级)。

目前已经获得了 14 种鸟类的行为临界比率数据, 包括雀形目: 褐头牛鹂 (*Molothrus ater*)、金丝雀 (*Serinus canaria*)、欧洲椋鸟 (*European starling*)、火雀 (*Lagonosticta senegala*)、大山雀 (*Parus major*)、红肩黑鸟 (*Agelaius phoeniceus*)、歌带鸫 (*Melospiza melodia*)、沼泽带鸫 (*Melospiza georgiana*)、斑胸草雀 (*Taeniopygia guttata*), 非雀形目: 鸽子 (*Columba*)、虎皮鹦鹉 (*Melopsittacus undulatus*)、鸡尾鹦鹉 (*Nymphicus hollandicus*)、橙额鹦鹉 (*Cyanoramphus malherbi*), 鸮形目: 仓鸮 (*Tyto alba*)^[30]。

图 3 给出了这些鸟类的中位数临界比率函数以及相应的人类文献值。由图 3 可见, 鸟类的临界比率存在物种差异, 有些接近于人类的敏感性水平, 而其他则远低于中位数曲线。中值函数呈现出典型信号噪声比增加约 2—3dB/倍频程的模式, 这一特征在哺乳动物 (包括人类) 领域已被广泛认可 (大约为 3dB/倍频程斜率)。

通过分析鸟类听觉范围内的临界掩蔽比函数, 可以了解到不同频率声音在特定背景噪声条件下是否能够被鸟类察觉。鸟类临界掩蔽比函数描述了当一个声音信号出现时, 在不同频率上需要多大强度才能使其被鸟类注意到。通过与实际环境中存在的各种背景噪声进行对比, 可以推断出某个特定频率下所需鸟类鸣叫强度与该背景噪声水平之间的关系, 并估计在给定的背景噪声水平下, 这些信号可能被检测到的距离。

考虑到鸟类和人类在探测、辨别和识别听力水平之间的信噪比差异相似, 可以合理地假设鸟类具有四种与交流相关的不同水平的听力, 每一种都需要不同的临界比。从简单的声音探测到声音的区分, 再到识别带有特定信息的特定声音信号, 在每个层次上, 随着听觉任务变得越来越困难, 噪声掩蔽效应可能会增加, 并且每一步都需要更高的临界比 (约为 2—3dB)。若要进行清晰而舒适的交流, 则需要更大程度上提高所需临界比^[31]。

1.4 计算模型

通过鸟类临界比率函数, 利用鸟类声信号的幅值和频率、森林中声音的过度衰减、铁路噪声频谱以及处于噪声影响中鸟类的屏蔽阈值为变量, 构建一个工程化的计算模型, 用于预测两只鸟之间的交流距离。该模型涵盖了探测、区分、识别和舒适交流四种不同听觉行为。

$$A = 20 \log_{10} \frac{D_{\max} + EA \times D_{\max}}{D_0} + \frac{EA \times D_{\max}}{100} \quad (2)$$

式中, A 为声信号从源强度到听觉阈值的衰减量; D_{\max} 为最大通信距离; D_0 为测量源强度的距离 (1m); EA 为过量衰减量。

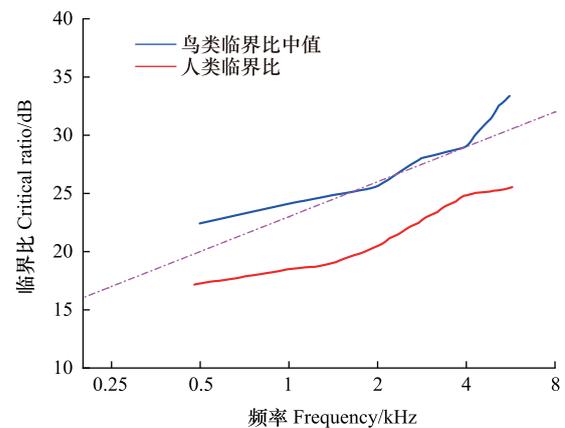


图 3 鸟类和人类的临界比率^[30]

Fig.3 The critical ratio of birds and humans^[30]

本文选取鸟鸣的峰值频率为 2000Hz,临界比率函数中值为 27dB,并且鸟类通过开放区域以 100dB 的峰值声压级发声^[32],超过球形扩散引起的损失,根据不同的栖息地条件,采用相应的过量衰减减值 EA 来求解方程,从而得到鸟类不同听觉行为下的最大通信距离。

2 车外噪声计算

2.1 铁路噪声传播预测模型

为了分析列车车外噪声传播特性,采用分段计算的方法计算铁路噪声辐射声级。该方法先将铁路线划分为若干小段,并将每一段简化为点声源以形成有限长的系列点声源,如图 4 所示。铁路被分为多个小段(k),每个小段的长度为 $0.01 S_k < l_k < 0.5 S_k$ 。其中, S_k 指的是预测点 O 与 k 中点之间的距离,单位为 m ; S_j 指的是预测点 O 与线声源之间的距离,单位为 m ; S_0 为 S_j 的水平投影,单位为 m 。

$L_{r,k}$ 为各小段对预测点 O 的影响,其公式为:

$$L_{r,k} = L_{m,E,k} + 19.2 + 10 \times \lg(l_k) + D_{l,k} + D_{S,k} + D_{L,k} + D_{BM,k} + D_{Korr,k} + S \quad (3)$$

式中: $L_{m,E,k}$ 为每小段(k)铁路辐射噪声级, $dB(A)$; l_k 为每小段(k)的长度, m ; $D_{l,k}$ 为方向性引起的声压级修正值, $dB(A)$; $D_{S,k}$ 为几何发射衰减减值, $dB(A)$; $D_{L,k}$ 为空气吸收引起的衰减减值, $dB(A)$; $D_{BM,k}$ 为地面吸收和气候影响引起的修正值, $dB(A)$; $D_{Korr,k}$ 为传播路径的影响值, $dB(A)$; S 为当铁路噪声对预测点的影响,相对小于其他噪声源时进行的修正值, $dB(A)$ 。

然后通过逐个计算每个点声源对环境敏感点作用的声级后,按能量叠加原理合成得到敏感点处总的计权等效 A 声级 $L_{r,tot}$,其计算公式见(4)。最终与背景值相叠加以获得预测值并进行达标分析。基于此原理,利用噪声预测软件建立车外噪声传播预测模型,并使用该软件进行铁路环境噪声的预测、评价及降噪方案研究,该方法具有合理性^[33]。

$$L_{r,tot} = 10 \times \lg\left(\sum_{i=1}^{i=k} 10^{0.1 \times L_{r,i}}\right) \quad (4)$$

式中: i 为铁路线路划分的总段数; k 为第 k 段。

利用地图软件获取典型线路区段的地形数据,包括等高线和道路信息等数据,如图 5 所示。根据列车对数、列车种类、运行速度、位置关系及车外声源源强频谱等参数,基于 CadnaA 噪声仿真平台,建立不同速度级别列车车外噪声预测模型,并在铁路断面上距离轨道中心线不同距离处布置声学评价点,如图 6 所示。

本文以速度 200km/h 列车车外声源识别结果作为模型的输入声源,通过计算绘制出周围声环境受铁路

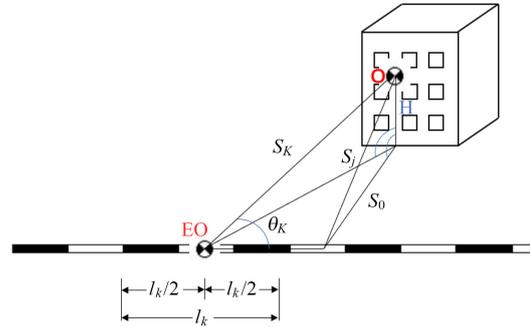


图 4 预测点噪声模拟计算示意图

Fig.4 Schematic diagram of noise simulation calculation for predicted point noise

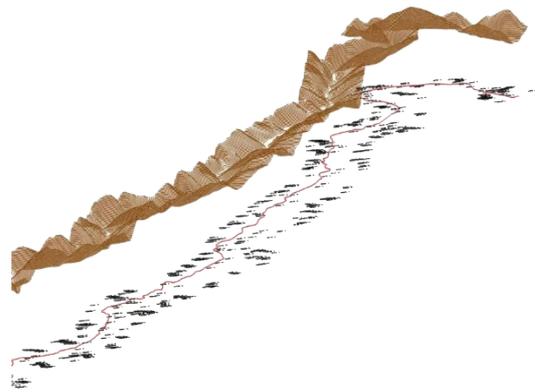


图 5 某地区地形高程

Fig.5 Elevation of a certain area



图 6 铁路噪声预测模型示意图

Fig.6 Diagram of a noise prediction model for railway noise

噪声影响的噪声地图,如图 7 所示。图 7 中,不同颜色的标记反映了不同区域受到铁路噪声影响程度的差异。深红色标记表示该区域受到严重干扰,而浅黄色或绿色标记则意味着较轻微的干扰。

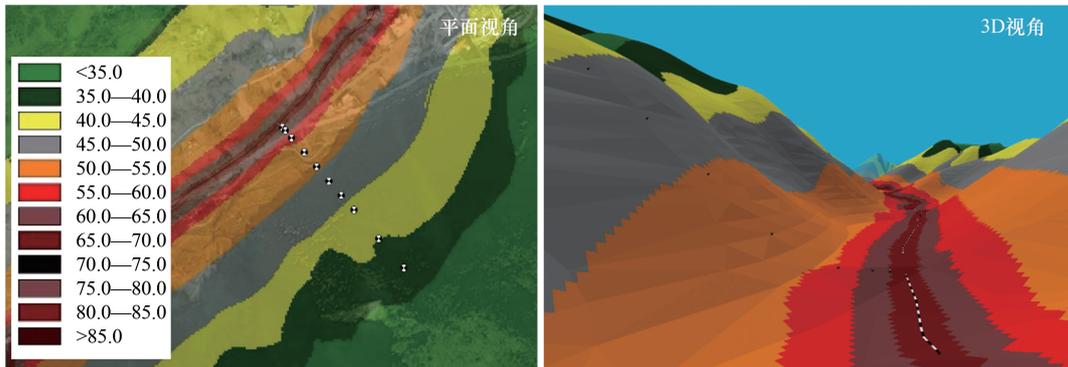


图 7 典型线路区段铁路噪声地图

Fig.7 Railway noise map for typical line sections

2.2 模型验证

利用我国铁路噪声源强数据建立了相应的噪声预测模型,再将评价点预测结果与 ISO3095—2013 标准测试数据进行对比,以验证模型的准确性,结果如图 8 所示。由图 8 可知,在列车通过时段,车外噪声的模型预测结果与实测结果吻合较好,误差保持在 2dB 以下,验证了该模型的准确性。在列车通过时段之外,即列车驶来和列车驶离后,由于模型无法完全考虑实际声环境中的地形场景以及其他建筑物等因素的影响,导致预测值与实测值之间存在一定误差。尽管如此,由于列车在通过时段之外的车外噪声水平较低,其影响较小且可以忽略不计。

2.3 影响鸟类范围预测

车外各环境敏感点预测值如图 9 所示,速度为 200km/h 的铁路列车在运营过程中,距离铁路沿线附近 25—600m 范围内昼夜 24h 等效连续 A 声级 L_{dn} 为 45.4—64.4dBA,最大声级 L_{max} 为 60.8—91.7dBA。

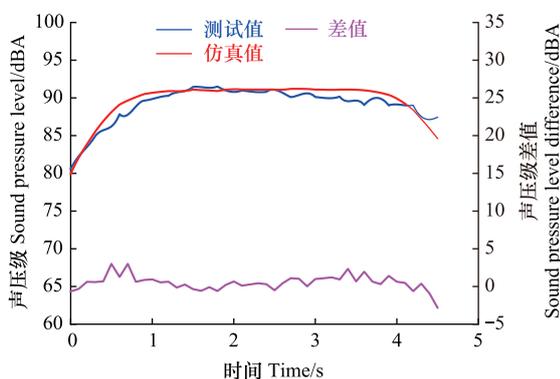


图 8 车外噪声预测模型验证

Fig.8 Verification of external noise prediction model

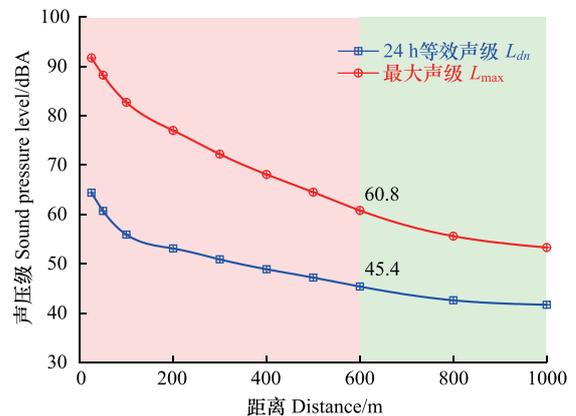


图 9 环境敏感点预测值

Fig.9 Predicted value of environmental sensitive points

国内专家认为:考虑到铁路运行噪声具有间歇性和相对稳定性特点,可采用等效声级 L_{eq} 和最大声级 L_{max} 作为铁路噪声对鸟类影响的评价指标^[34]。评价限值的确定,综合考虑目前区域的噪声水平现状,并参考国外学者的研究成果,当等效连续 A 声级 L_{dn} 超过 50dBA 或巢内的噪声最大声级 L_{max} 超过 60dBA 时,将对鸟类繁殖栖息造成影响^[35],反之,则噪声对鸟类的影响是可控的。因此,速度为 200km/h 的铁路列车运行产生的噪

声可能会对鸟类造成一定程度上的影响,影响范围垂直距离约 600m。

3 影响鸟类通信距离关键因素分析

3.1 沿铁路断面距离

为研究沿铁路断面不同距离处噪声值对鸟类通信距离的影响,采用速度 200km/h 的列车车外声源识别结果作为模型的声源输入,在车外噪声预测模型中布置不同间隔距离的预测点,并设置测点高度为 10m,以获取各个位置的噪声值。将预测点噪声数值代入鸟类通信距离计算模型中,计算出不同听觉行为下的最大通信距离,如图 10 和图 11 所示。

从图 10 可以看出,随着距离的增加,噪声水平逐渐减小,使得鸟类通信距离随之增加。在远离铁路 600m 以外区域,探测、区分和识别三种听觉行为的最大距离增长速度明显提升,在距离铁路 1000m 处分别可达 105m、95.2m 和 85.9m。但是,由于舒适交流所需临界比较高,其最大通信距离增长速度相对缓慢,在 1000m 处仅有 37.4m。

图 11 显示了在距离铁路断面 500m 处两只鸟进行交流的最大可能通信距离。在该位置处,由于受到铁路噪声的影响,两只鸟之间能够舒适地进行交流的最远距离为 15m。当鸟类之间的距离增加至 44.6m 和 51.3m 时,它们仍然能够区分和识别同种鸟类的声音,而能探测到另一只鸟的叫声距离,最远可达 58.5m。

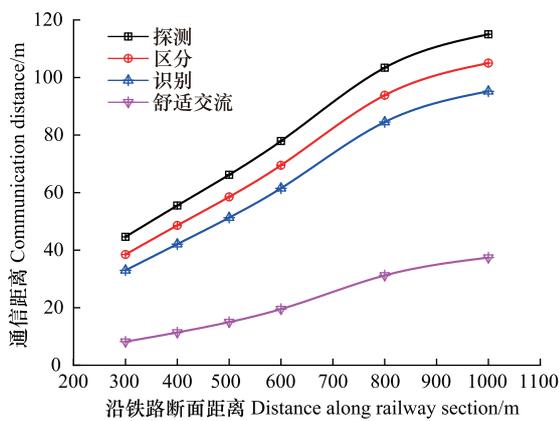


图 10 鸟类通信距离变化-距离因素

Fig.10 Variation in bird communication distance-distance factor

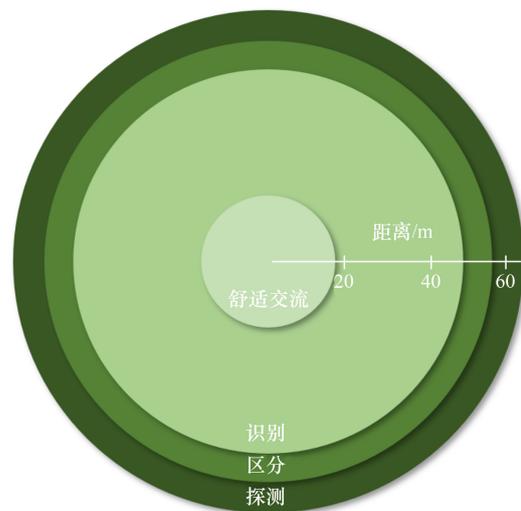


图 11 通信距离同心圆

Fig.11 Communication distance concentric circles

但是,在自然环境中,图 11 所示的通信距离“极限”不可能呈现完全同心的形态。在实际环境中,信号传输的声动力学在空间和时间上都表现出高度可变性,这取决于栖息地类型的分布和特征、气象条件以及呼叫者和接收者在优化通信过程中采取的行为策略。因此,鸟类周围通信区域的形状和大小会根据该区域的物理条件、物种特定的听力能力、信号特征以及声学通信中采用的缓解策略而变化。

3.2 列车速度

在车外噪声预测模型中,输入速度范围为 160—350km/h 的列车车外声源数据,计算得到距离轨道中心线 500m 处测点在不同列车速度下的噪声分布情况,具体测点噪声值如图 12 所示。考虑鸟类听力最敏感频段为 2000Hz,故选取车外各测点噪声值的 2000Hz 作为分析频段。列车速度对鸟类通信距离的影响如图 13 所示。

随着列车速度的提高,噪声逐渐增大,且主峰频率向高频移动,铁路噪声对鸟类鸣叫的掩蔽作用变得更加严重。速度从 160km/h 增加到 350km/h,鸟类探测发声距离从 65.8m 减小至 38.8m,舒适交流距离由 17.9m

减小至 8.3m。可以看出,在列车高速行驶过程中,由于铁路噪声的干扰作用越来越明显,鸟类之间声信号接收和交流愈发困难。

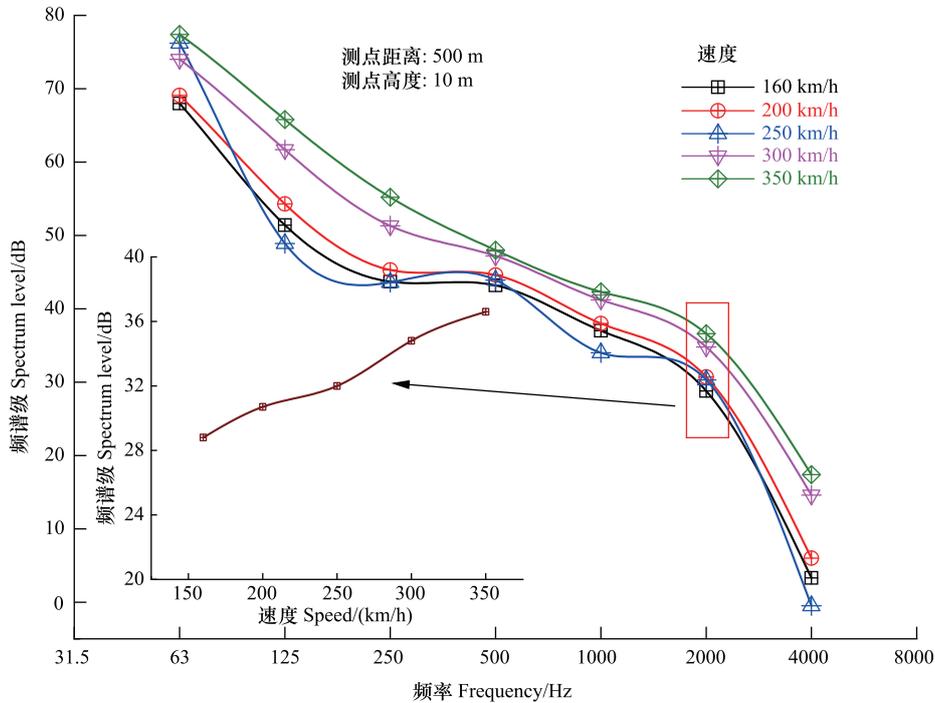


图 12 500m 处测点噪声频谱级
Fig.12 Noise spectrum level at 500m

3.3 栖息高度

鸟类栖息高度受到鸟的种类、栖息地以及植被情况等条件的影响。为探究铁路噪声在垂直高度方向上对鸟类通信距离的影响,利用车外噪声预测模型进行了模拟计算,获取了不同高度处的噪声分布情况,噪声预测值及对应高度的过量衰减量如表 1 所示。从表 1 可以看出不同高度处的噪声值差别不大,而导致图 14 所示鸟类通信距离在不同高度间存在差异的主要原因是过量衰减量 EA 的变化。

当声源靠近地面(15cm 和 1m)时,所有频率都比在更高的高度时衰减得更多,低于 2000Hz 的声音被过度衰减,靠近地面的声音传输差可能不仅是由于与地面的相互作用,还可能与地空界面的微气象事件有关,如空气湍流和温度梯度^[36]。随着高度的增加,声音衰减趋势逐渐趋于平稳,但是在接近树冠顶部时声音衰减反而增加。这一现象也反映在鸟类各种听觉行为中通信距离的变化上。

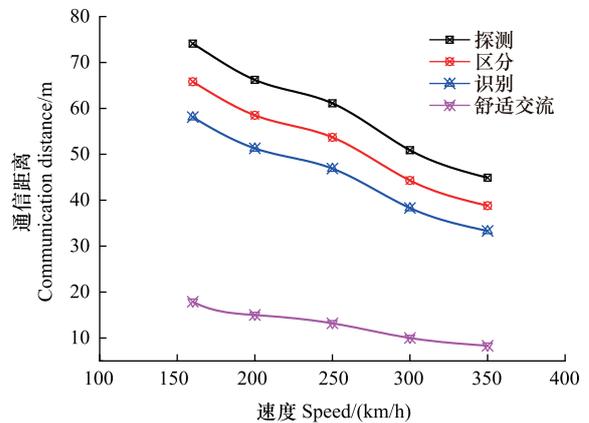


图 13 鸟类通信距离变化—速度因素
Fig.13 Variation in bird communication distance-speed factor

表 1 栖息高度 VS. 噪声预测(有叶落叶林)

Table 1 Habitat height VS. Noise prediction (Deciduous forest)

高度 Height/m	0.15	1	2	5	10
声压级 Sound pressure level/dB	29.7	30.3	30.3	30.6	30.7
过量衰减量 Excess attenuation/(dB/100m)	15.85	8.05	7.85	4.05	11.9

3.4 栖息地

在森林等复杂环境中,由于植被和地形的遮挡作用,声音传播会受到更多的阻碍。Marten^[18]进行了大量实验,对不同植被环境下声音的衰减规律进行了分析,并探讨了高度、频率和栖息地等因素对声音传播的影响。表 2 中列出了在不同栖息地环境下声音传播过程中的过量衰减值。鸟类各听觉行为的最大通信距离大小随栖息地过量衰减值的变化如图 15 所示。

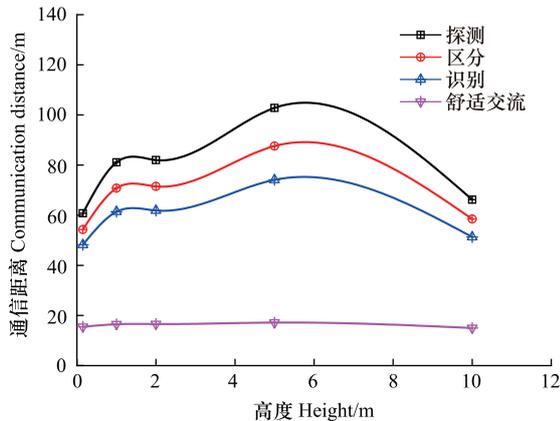


图 14 鸟类通信距离变化-栖息高度因素

Fig.14 Variation in bird communication distance-habitat height factor

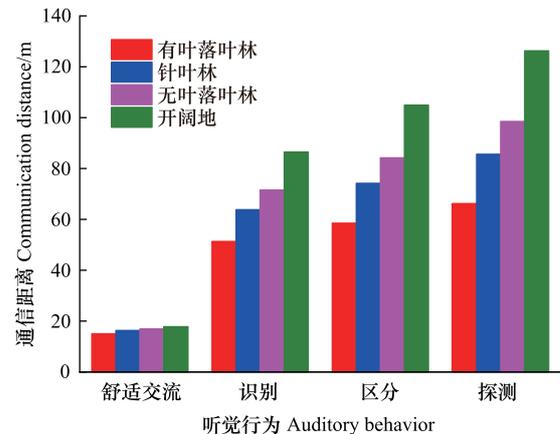


图 15 鸟类通信距离变化—栖息地因素

Fig.15 Variation in bird communication distance-habitat factors

表 2 栖息地 VS. 过量衰减值(高度 10m)

Table 2 Habitat VS. Excess Attenuation value (height 10m)

栖息地 Habitat	开阔地 Open ground	无叶落叶林 Leafless deciduous forest	针叶林 Coniferous forest	有叶落叶林 Deciduous forest with leaves
过量衰减值 Excess Attenuation/(dB/100m)	1.8	4.5	6.6	11.9

从图 15 可以看出,当声音从开阔地穿过无叶落叶森林传播至有叶落叶森林时,声音衰减显著增加,导致鸟类各种听觉行为的最大距离逐渐缩小。在开阔地区,鸟类能够探测到鸣声的最大距离为 104.9m。然而,在有叶落叶林中,由于树木对声波的吸声作用,声音衰减更为严重,探测距离仅能达到 58.5m。因此,在这种情况下,许多鸟类会采用更高频率、更短距离的叫声来进行通信。相反,在开阔地带或水面上,则可以使用低频率、长距离传输效果更好的叫声。

不论栖息环境如何变化,鸟类舒适交流距离并无明显差异,均维持在约 17m 左右。这种稳定性表明了鸟类对于维持社会联系和信息传递的重要性有着共同的认知。无论是在茂密的森林中、广袤的草原上还是繁忙喧嚣的城市中,鸟类都能够找到合适且相对安全的距离来与同类进行互动。

4 结论

本文通过建立列车车外噪声预测模型,绘制了列车穿越山地时的噪声地图,并对车外不同距离的噪声辐射情况进行了预测。基于鸟类通信距离计算模型,分析了各种因素对鸟类听觉行为最大距离的影响。根据研究结果得出以下结论:

(1) 分析铁路车外噪声频谱特性及典型鸟类听觉曲线,铁路噪声与鸟类发声和听觉频率存在显著重叠,铁路噪声对鸟类鸣叫声信号有很大的掩蔽作用。

(2) 列车速度从 160km/h 提高至 350km/h,符合 $L_{dn} = 50\text{dBA}$, $L_{max} = 60\text{dBA}$ 评价标准的鸟类栖息边界线从 600m 上升至 2000m。随着列车运营次数和趟数的增多,铁路噪声可能会对铁路沿线 2 公里范围内的鸟类产生影响。此外,随着列车速度的提高,铁路噪声也相应增大,对鸟类叫声的掩蔽效果也越加强烈,进而导致鸟

类的四种听觉行为的最大交流距离逐渐减小。

(3) 在森林等复杂环境中,由于植被和地形的遮挡作用,声音传播会受到更多的阻碍。比较了四种不同森林对鸟类交流距离的影响,鸟类最大通信距离与森林植被的过量衰减系数 EA 呈负相关。在不同高度处铁路噪声值大小相差不大,但各高度处过量衰减值 EA 存在差异,也间接影响了鸟类各听觉行为的通信距离变化。

由于本论文研究方向(铁路噪声的生态学影响)尚处于起步阶段,暂未能对仿真结果做试验验证。但相关研究内容有助于更好地理解鸟类之间沟通交流的机制与限制,并对其生态习性和行为模式做出进一步研究和分析,为铁路工程的生态影响、生物声学研究和环保设计提供指导和参考。

参考文献(References):

- [1] Wiącek J, Polak M, Filipiuk M, Kucharczyk M, Dawidowicz Ł. Do railway lines affect the distribution of woodland birds during autumn? *PLoS One*, 2020, 15(4): e0231301.
- [2] Roy S. Ecological consequences of railway infrastructure development: a case study of the belgrade-novi sad corridor. *Opportunities and Challenges in Sustainability*, 2023, 2(3): 116-129.
- [3] 殷宝法, 淮虎银, 张懿锂, 周乐, 魏万红. 青藏铁路、公路对野生动物活动的影响. *生态学报*, 2006, 26(12): 3917-3923.
- [4] 匡星, 白明洲, 王连俊, 许兆义, 金立新. 铁路建设项目对生态环境影响评价体系探析. *铁道学报*, 2009, 31(2): 125-131.
- [5] 陈顺良, 邵华平, 陈伟庚, 曹可可. 铁路噪声对“小鸟天堂”鸟类影响的研究. *铁路技术创新*, 2014(3): 80-82.
- [6] Shannon G, McKenna M F, Angeloni L M, Crooks K R, Fristrup K M, Brown E, Warner K A, Nelson M D, White C, Briggs J, McFarland S, Wittemyer G. A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2016, 91(4): 982-1005.
- [7] de Framond L, Brumm H. Long-term effects of noise pollution on the avian dawn chorus: a natural experiment facilitated by the closure of an international airport. *Proceedings Biological Sciences*, 2022, 289(1982): 20220906.
- [8] Gomes L, Solé M, Sousa-Lima R S, Baumgarten J E. Influence of anthropogenic sounds on insect, anuran and bird acoustic signals: a meta-analysis. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 827440.
- [9] Patricelli G L, Blickley J L. Avian communication in urban noise: causes and consequences of vocal adjustment. *The Auk*, 2006, 123(3): 639-649.
- [10] Tilgar V, Hein K, Viigipuu R. Anthropogenic noise alters the perception of a predator in a local community of great tits. *Animal Behaviour*, 2022, 189: 91-99.
- [11] 刘刚, 刘芳博, 鲁世伟. 道路噪声与画眉鸟退避率的定量关系. *生态学杂志*, 2018, 37(12): 3685-3690.
- [12] 蔡超. 道路噪声对鸟类习鸣质量的影响因子研究——以金丝雀为例[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [13] 王艳雯, 王佳宇, 苗浩宇, 张娟, 杨阳, 万冬梅, 殷江霞. 城市噪声使树麻雀鸣唱的最低频率升高. *动物学杂志*, 2020, 55(4): 440-448.
- [14] Forman R T T, Reineking B, Hersperger A M. Road traffic and nearby grassland bird patterns in a suburbanizing landscape. *Environmental Management*, 2002, 29(6): 782-800.
- [15] Cooke S C, Balmford A, Johnston A, Newson S E, Donald P F. Variation in abundances of common bird species associated with roads. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(7): 1271-1282.
- [16] Arévalo J E, Newhard K. Traffic noise affects forest bird species in a protected tropical forest. *Revista De Biología Tropical*, 2011, 59(2): 969-980.
- [17] Kroeger S B, Hanslin H M, Lennartsson T, D'Amico M, Kollmann J, Fischer C, Albertsen E, Speed J D M. Impacts of roads on bird species richness: a meta-analysis considering road types, habitats and feeding guilds. *The Science of the Total Environment*, 2022, 812: 151478.
- [18] Marten K, Marler P. Sound transmission and its significance for animal vocalization. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 1977, 2(3): 271-290.
- [19] Dooling R J, Blumenrath S H. Avian sound perception in noise. Brumm H. *Animal Communication and Noise*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013: 229-250.
- [20] Nemeth E, Brumm H. Birds and anthropogenic noise: are urban songs adaptive? *The American Naturalist*, 2010, 176(4): 465-475.
- [21] 宗跃光, 周尚意, 彭萍, 刘超, 郭瑞华, 陈红春. 道路生态学研究进展. *生态学报*, 2003, 23(11): 2396-2405.
- [22] 崔纲, 王云. 我国道路生态学的发展现状及趋势. *公路工程*, 2016, 41(3): 85-88.
- [23] Parris K M, McCarthy M A. Predicting the effect of urban noise on the active space of avian vocal signals. *The American Naturalist*, 2013, 182(4): 452-464.

- [24] Nemeth E, Brumm H. Blackbirds sing higher-pitched songs in cities: adaptation to habitat acoustics or side-effect of urbanization? *Animal Behaviour*, 2009, 78(3): 637-641.
- [25] 谭晓明, 杨志刚, 吴晓龙, 何娇, 张代娇, 彭勇. CIT500 车外噪声源频谱分解模型的试验研究. *铁道学报*, 2017, 39(7): 32-37.
- [26] Dooling R J, Lohr B, Dent M L. Hearing in birds and reptiles. Dooling R J, Fay R R, Popper A N, eds. *Springer Handbook of Auditory Research*. New York, NY: Springer New York, 2000: 308-359.
- [27] Lohr B, Wright T F, Dooling R J. Detection and discrimination of natural calls in masking noise by birds: estimating the active space of a signal. *Animal Behaviour*, 2003, 65(4): 763-777.
- [28] Dooling R J, Dent M L, Lauer A M, Ryals B M. Functional recovery after hair cell regeneration in birds. Salvi R J, Popper A N, Fay R R, eds. *Springer Handbook of Auditory Research*. New York, NY: Springer New York, 2008: 117-140.
- [29] Southall B L, Schusterman R J, Kastak D. Masking in three pinnipeds: underwater, low-frequency critical ratios. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, 108(3 Pt 1): 1322-1326.
- [30] Dooling R J, Popper A N. Some lessons from the effects of highway noise on birds////Proceedings of Meetings on Acoustics. Dublin, Ireland. *Acoustical Society of America*, 2016: 010004.
- [31] Kunc H P, Schmidt R. The effects of anthropogenic noise on animals: a meta-analysis. *Biology Letters*, 2019, 15(11): 20190649.
- [32] Brackenbury J H. Power capabilities of the avian sound-producing system. *Journal of Experimental Biology*, 1979, 78(1): 163-166.
- [33] 娄金秀, 马建华. 基于 Cadna/A 的高层建筑环境噪声垂直分布仿真. *噪声与振动控制*, 2014, 34(3): 136-138, 181.
- [34] 辜小安. 铁路噪声对鸟类栖息繁殖影响初探. *铁道劳动安全卫生与环保*, 1999, 26(2): 82-84.
- [35] Jack J, Rytwinski T, Fahrig L, Francis C M. Influence of traffic mortality on forest bird abundance. *Biodiversity and Conservation*, 2015, 24(6): 1507-1529.
- [36] Morton E S. Ecological sources of selection on avian sounds. *The American Naturalist*, 1975, 109(965): 17-34.