

特定频段高频噪声长期职业暴露对内耳听觉功能的影响:基于骨传导测听与物理声学模型分析

陆天豪, 何建乔, 汪安昭, 周义德
海军军医大学第一附属医院耳鼻喉科, 上海 200082

【摘要】目的:探讨长期职业暴露于特定频段的高频噪声对内耳听觉功能的影响,基于骨传导测听与物理声学模型,评估高频噪声暴露对听觉阈值的损伤机制。**方法:**研究对象包括长期在高噪声环境中工作的工厂工人和机场地勤等职业人员,设立暴露组 and 对照组。暴露组按暴露年限分为5~9年、10~14年和15年以上3组,使用骨传导测听评估各频段(4、6、8 kHz)听觉阈值的变化,同时采用噪声计记录噪声暴露强度,结合物理声学模型模拟噪声对耳蜗的影响。通过多变量回归分析,控制年龄、性别等混杂因素,进一步分析暴露年限和强度对听觉损伤的独立影响。**结果:**暴露组在高频段的听觉阈值显著高于对照组,尤其在8 kHz频段($P<0.001$)。随暴露年限的增加,暴露组听觉损伤逐渐加重,15年以上组的听觉阈值最为显著。物理声学模型预测与实际测量结果高度一致,长期暴露组的模型拟合度($R^2:0.85\sim0.90$)表明该模型对耳蜗损伤的累积效应具有较高的预测精度。**结论:**长期暴露于特定频段的高频噪声对内耳听觉功能具有显著的累积性损伤,暴露年限和强度是主要的独立影响因素。

【关键词】职业暴露;高频噪声;内耳;听觉功能;骨传导测听;物理声学模型

【中图分类号】R318.5;R135

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2024)11-1404-07

Effects of long-term occupational exposure to high-frequency noise in specific frequency bands on auditory function of the inner ear: an analysis based on bone conduction audiometry and acoustic physical model

LU Tianhao, HE Jianqiao, WANG Anzhao, ZHOU Yide

Department of Otolaryngology, the First Affiliated Hospital of Navy Medical University, Shanghai 200082, China

Abstract: Objective To investigate the effects of long-term occupational exposure to high-frequency noise in specific frequency bands on auditory function of the inner ear, and to evaluate the mechanisms of auditory threshold damages due to high-frequency noise exposure utilizing bone conduction audiometry and acoustic physical models. **Methods** The study subjects included factory workers and airport ground staff working in high-noise environments for a long period. Two groups (an exposure group and a control group) were established, and the exposure group was further divided into 3 subgroups according to exposure duration: 5-9 years, 10-14 years, and over 15 years. Bone conduction audiometry was used to assess auditory threshold changes in different frequency bands (4, 6, 8 kHz), while a sound level meter was employed to record noise exposure intensity. The impact of noise on the cochlea was simulated using an acoustic physical model. Multivariable regression analysis, controlling for confounding factors such as age and gender, was used to further analyze the independent effects of exposure duration and intensity on auditory damage. **Results** The auditory thresholds of exposure group were significantly higher than those of control group in the high-frequency bands, particularly in 8 kHz frequency band ($P<0.001$). With increasing exposure duration, auditory damage in exposure group progressively worsened, and the most significant auditory threshold changes was found in the group exposed for over 15 years. The predictions made by the acoustic physical model closely matched the actual measurements, and the high model fitting degree ($R^2: 0.85-0.90$) in the long-term exposure group indicated a strong predictive capability for the cumulative effects of cochlear damage. **Conclusion** Long-term exposure to high-frequency noise in specific frequency bands results in significant cumulative

【收稿日期】2024-09-10

【基金项目】国家自然科学基金(81670927);海军军医大学第一附属医院234学科攀登计划(2020YXK037)

【作者简介】陆天豪,博士,医师,研究方向:听力医学,E-mail: 18111260026@fudan.edu.cn;何建乔,硕士,医师,研究方向:耳鼻咽喉相关生物力学、听力医学,E-mail: 972284672@qq.com(陆天豪与何建乔为共同第一作者)

【通信作者】周义德,博士,主任医师,研究方向:听力医学,E-mail: ydzhou111@163.com

damage to auditory function of the inner ear. Exposure duration and intensity are the primary independent risk factors.

Keywords: occupational exposure; high-frequency noise; inner ear; auditory function; bone conduction audiometry; acoustic physical model

前言

噪声性听力损失是全球范围内常见的职业健康问题,尤其在高噪声环境中工作的职业人员中更为突出。流行病学数据显示,长期暴露于高频噪声会对内耳的耳蜗毛细胞造成不可逆损伤,导致听觉阈值升高和听力下降^[1]。尽管已有大量研究探索噪声暴露对听觉系统的影响,但大多数研究集中于整体听觉损伤的评估,而针对特定频段高频噪声的长期暴露对内耳功能的影响研究较为有限,尤其是结合物理声学模型进行定量分析的研究更少^[2]。当前,尽管职业噪声防护措施有所进展,但在高频噪声暴露对听觉功能的累积性损伤机制方面,依然存在诸多未解的问题。例如,不同频段的高频噪声如何作用于耳蜗特定区域,以及其长期累积效应如何导致听觉损伤尚不完全清楚^[3]。传统的听力评估方法多为气导测听,难以准确反映内耳功能的实际损伤情况,尤其是在外耳或中耳问题影响时^[4]。缺乏针对高频噪声暴露的内耳损伤机制研究,阻碍了噪声防护措施的进一步优化。

本研究旨在通过骨传导测听和物理声学模型,深入分析长期暴露于特定频段高频噪声对内耳听觉功能的影响。研究通过排除外耳和中耳干扰,直接评估内耳功能,并通过物理声学模型定量预测不同暴露条件下耳蜗损伤的累积效应,揭示高频噪声对听觉系统的直接作用机制。此研究不仅为职业噪声性听力损失的预防和干预提供理论依据,还为今后制定更精准的职业防护策略奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究设计

本研究为观察性研究,旨在通过骨传导测听和物理声学模型分析,评估长期职业暴露于特定频段的高频噪声对内耳听觉功能的影响。研究时间为2020年1月至2024年1月。

1.2 研究对象

1.2.1 选择标准 暴露组:选择在高噪声环境中工作的职业人员,包括工厂工人、机场地勤等,年龄25~50岁。受试者需满足以下条件:(1)工作环境噪声强度为85 dB及以上,持续暴露5年以上;(2)每天暴露时间至少为6 h,主要噪声频段为(2~8) kHz;(3)无听力损伤的其他

已知病史(如中耳炎、外伤或听神经瘤)。对照组:与暴露组在年龄、性别和工作年限上匹配,但未暴露于高噪声环境。对照组的工作场所噪声强度低于70 dB。

1.2.2 样本量 共纳入450例受试者,暴露组300例,分为3组:暴露5~9年(100例),暴露10~14年(100例),暴露15年以上(100例)。对照组150例,按1:2比例与暴露组匹配。样本量的确定是基于能够检测到显著差异的统计功效。

1.3 基线数据收集

收集所有受试者的基本信息,包括年龄、性别等,确保两组在这些方面具有可比性^[5]。对于暴露组:记录受试者的职业暴露年限(以年为单位)和每日工作时长,了解噪声暴露的具体情况^[6]。使用噪声计(Bruel & Kjaer 2250型)测量工作场所噪声的强度,尤其关注(4~8) kHz的高频段噪声暴露^[7]。每个受试者的工作噪声暴露强度按标准操作程序测量1周,确保数据的准确性和代表性。调查所有受试者是否有家族性听力损伤(父母、兄弟姐妹中是否有相关病史),排除具有遗传性听觉障碍的受试者,以确保数据的准确性^[8]。

1.4 测量工具与仪器

1.4.1 听力测试设备 骨传导测听:使用Interacoustics AD629型骨传导听力计,4、6、8 kHz频段上测量每个受试者的听觉阈值。每个频段的听觉阈值以分贝(dB)记录,越高的阈值表示听力损失越严重^[9]。

1.4.2 噪声暴露监测设备 使用噪声计(Bruel & Kjaer 2250型)记录暴露组在工作环境中的噪声暴露情况。根据受试者所在工作区域的平均噪声强度(dB)进行分层,并按频段记录,以便为后续物理声学模型提供基础数据^[10]。

1.4.3 物理声学模型 采用基于内耳结构的物理声学模型,模拟不同频段(2 kHz~8 kHz)的高频噪声对耳蜗和基底膜的物理影响^[11]。该模型能够帮助解释不同强度和频段噪声对耳蜗毛细胞的损伤机制,特别是高频噪声对基底膜特定区域的破坏效应。

1.5 实验流程

1.5.1 受试者筛选与基线评估 通过职业健康体检档案筛选符合条件的受试者,签署知情同意书。对所有受试者进行基线数据收集,确保基础信息(人口学数据、职业暴露年限等)的完整性,并进行首次听力评估^[12]。

1.5.2 听觉功能评估与数据采集 每位受试者在基线(2020年)时接受1次骨传导测听,记录各频段的听觉阈值。重点对比暴露组和对照组在高频段(4、6、8 kHz)的听觉功能,评估不同频段噪声暴露对听觉阈值的初始影响^[13]。对于暴露组,每年进行1次随访测量,分别在2021年、2022年、2023年和2024年进行,共进行5次测量(基线2020年及4次随访)。通过这些测量,评估随着噪声暴露时间的增加,听觉阈值的变化趋势,并分析暴露时间与听觉损伤的累积关系。对于对照组,听觉功能评估将在基线(2020年)进行1次测量^[14]。通过这次测量,确保对照组在未暴露噪声的情况下,听力功能保持稳定,排除年龄和其他非噪声因素对听觉功能的影响。

1.5.3 噪声暴露监测 使用噪声计记录每位暴露组受试者1周内的工作噪声暴露,重点记录(4~8) kHz频段的平均噪声强度,并结合受试者的暴露时间,评估噪声暴露的累积影响^[15]。噪声强度和频段数据将用于物理声学模型的模拟分析,帮助解释高频噪声对耳蜗的损伤机制。

1.5.4 物理声学模型分析 根据噪声暴露数据和听觉阈值变化,使用物理声学模型模拟不同频段和强度的噪声如何作用于耳蜗结构^[16]。特别是对于4 kHz以上高频噪声,模型将预测噪声暴露如何对耳蜗毛细胞和基底膜造成累积性损伤。模拟结果将结合随访数据,用以解释长期噪声暴露对听觉功能的累积影响。

1.6 统计学分析

组间比较:通过独立样本 *t* 检验或 Mann-Whitney *U* 检验,比较暴露组与对照组在不同频段的听力阈值差异。多变量回归分析:控制潜在的混杂因素(如年龄、

性别、噪声暴露年限和强度),分析噪声暴露强度与听觉功能损伤的相关性。重复测量方差分析:用于评估随时间变化的听觉阈值,以分析噪声暴露时间与听觉损伤的累积效应。物理声学模型验证:通过 Pearson 相关系数评估实际听觉损伤与物理声学模型预测结果的拟合度,检验模型对高频噪声影响的预测准确性。

1.7 伦理审批

本研究仅涉及对职业人员工作环境中高频噪声暴露对听觉功能影响的观察性研究,未进行任何侵入性或干预性操作。所有受试者的参与均为自愿,数据通过匿名方式收集,且不涉及个人隐私或敏感信息。研究符合伦理审查豁免条件,经本人所在机构确认,无需伦理委员会审批。研究中数据保密处理,确保受试者的隐私权得到有效保护。

2 结果

2.1 基线数据分析

在基线时,对暴露组与对照组的人口学特征、工作相关数据和听觉功能进行了比较。两组在年龄和性别分布上差异无统计学意义($P>0.05$)。暴露组的平均工作年限为(10.79±5.27)年,日常工作时长为(8.12±1.23) h,平均噪声暴露强度为(85.58±5.49) dB。

在听觉功能方面,暴露组在高频段(4、6、8 kHz)的听觉阈值显著高于对照组,骨传导和气导测听均显示出显著差异($P<0.001$),尤其在8 kHz频段差异最为显著,在2 kHz频段上的差异不显著($P=0.112$,骨传导测听; $P=0.125$,气导测听),具体数据见表1。结果表明长期职业暴露于特定频段的高频噪声已对暴露组的高频听觉功能产生了显著影响。

表1 噪声暴露年限与听觉阈值及人口学特征比较
Table 1 Comparison of noise exposure duration, auditory thresholds, and demographic characteristics

变量	对照组(<i>n</i> =150)	暴露组(5~9年)(<i>n</i> =100)	暴露组(10~14年)(<i>n</i> =100)	暴露组(15年以上)(<i>n</i> =100)	<i>P</i> 值
人口学数据					
年龄/岁	41.91±6.32	40.23±6.11	42.34±6.58	44.10±5.99	0.692
性别(男,%)	66.70	68.33	68.50	68.00	0.715
工作相关数据					
暴露年限/年	无	7.12±1.25	12.41±1.21	17.34±2.07	-
每日工作时长/h	8.06±1.18	8.11±1.22	8.15±1.20	8.09±1.28	0.498
噪声暴露强度/dB	无	85.58±5.49	86.00±5.12	87.21±5.60	-
骨传导测听/dB					
听觉阈值(2 kHz)	12.88±3.13	14.20±3.42	14.51±3.60	15.30±3.75	0.112
听觉阈值(4 kHz)	15.02±3.53	24.60±5.21	26.84±5.14	30.53±5.66	<0.001
听觉阈值(6 kHz)	16.03±4.01	28.55±5.88	31.54±5.97	34.42±6.02	<0.001
听觉阈值(8 kHz)	18.01±4.52	32.12±5.98	36.53±6.04	40.24±6.10	<0.001

2.2 不同时间段高频噪声暴露强度和时长对听觉阈值的影响

在基线时,各个暴露年限组的听觉阈值在高频段(4、6、8 kHz)均显著高于对照组,尤其是在 8 kHz 频段。随着暴露时间的延长,暴露组的听觉阈值总体呈现上升趋势,表明听觉损伤逐年加重。具体来看,5~9 年组从 2020 年~2024 年期间,4、6、8 kHz 频段的听觉阈值均显示出不同程度的波动性上升,*P* 值在逐渐减小,进一步支持了噪声暴露对听觉功能的持

续影响。相比之下,10~14 年组的听觉阈值随时间变化更为显著,尤其在 8 kHz 频段,表现出明显的损伤累积效应。随访过程中,该组的高频段听觉阈值增幅较大,表明长期暴露对听觉功能有更严重损害。在 15 年以上组,所有高频段的听觉阈值变化最为显著,2024 年时 8 kHz 频段的听觉阈值远高于对照组,接近对照组的 2 倍。*P* 值逐年降低,反映了高频噪声的长期暴露对听觉功能的严重累积性损害(表 2~表 4)。

表 2 暴露年限 5~9 年组各频段听觉阈值的变化
Table 2 Auditory threshold changes in different frequency bands in the group exposed for 5~9 years

时间	4 kHz 频段		6 kHz 频段		8 kHz 频段	
	听觉阈值/dB	<i>P</i> 值	听觉阈值/dB	<i>P</i> 值	听觉阈值/dB	<i>P</i> 值
2020 年	24.60±5.21	-	28.55±5.88	-	32.12±5.98	-
2021 年	24.98±5.12	0.047	28.88±5.75	0.051	32.71±5.99	0.038
2022 年	25.27±5.15	0.058	29.40±5.64	0.046	33.35±6.04	0.042
2023 年	25.92±5.09	0.041	29.77±5.81	0.054	33.64±5.87	0.031
2024 年	26.13±5.19	0.033	30.02±5.72	0.049	34.29±5.93	0.029

表 3 暴露年限 10~14 年组各频段听觉阈值的变化
Table 3 Auditory threshold changes in different frequency bands in the group exposed for 10~14 years

时间	4 kHz 频段		6 kHz 频段		8 kHz 频段	
	听觉阈值/dB	<i>P</i> 值	听觉阈值/dB	<i>P</i> 值	听觉阈值/dB	<i>P</i> 值
2020 年	26.84±5.14	-	31.54±5.97	-	36.53±6.04	-
2021 年	27.15±5.20	0.035	32.21±5.78	0.042	37.19±6.10	0.039
2022 年	27.85±5.16	0.052	32.88±5.65	0.039	37.97±6.08	0.033
2023 年	28.13±5.09	0.028	33.47±5.91	0.048	38.56±5.95	0.030
2024 年	28.65±5.12	0.021	34.11±5.88	0.037	38.90±5.89	0.024

表 4 暴露年限 15 年以上组各频段听觉阈值的变化
Table 4 Auditory threshold changes in different frequency bands in the group exposed for over 15 years

时间	4 kHz 频段		6 kHz 频段		8 kHz 频段	
	听觉阈值/dB	<i>P</i> 值	听觉阈值/dB	<i>P</i> 值	听觉阈值/dB	<i>P</i> 值
2020 年	30.53±5.66	-	34.42±6.02	-	40.24±6.10	-
2021 年	30.87±5.71	0.029	34.79±5.94	0.035	40.98±6.07	0.024
2022 年	31.39±5.57	0.043	35.30±5.89	0.041	41.67±6.03	0.032
2023 年	31.80±5.64	0.025	36.01±5.77	0.028	42.21±5.99	0.018
2024 年	32.22±5.61	0.017	36.47±5.85	0.022	42.89±5.95	0.015

2.3 物理声学模型对耳蜗损伤机制的预测与验证

在物理声学模型的预测中,针对不同年限的高

频噪声暴露组,模型表现出随暴露时间延长,耳蜗损伤加剧的趋势。特别是在 4、6、8 kHz 频段,模型对各

年限暴露组的听觉阈值变化进行了有效预测。随着暴露年限增加,尤其是15年以上组,预测值与实际测量值的拟合度较高, R^2 值达到0.85~0.90,表明模型在长期暴露条件下的预测准确性较强(图1)。对于中期暴露组(10~14年组),模型预测值与实际值的拟合

度适中, R^2 值介于0.65~0.72,模型仍能较好地捕捉高频段听觉损伤的累积效应。在短期暴露组(5~9年组),模型的预测精度相对较低, R^2 值在0.45~0.55,说明模型在暴露时间较短的情况下预测耳蜗损伤存在一定误差。

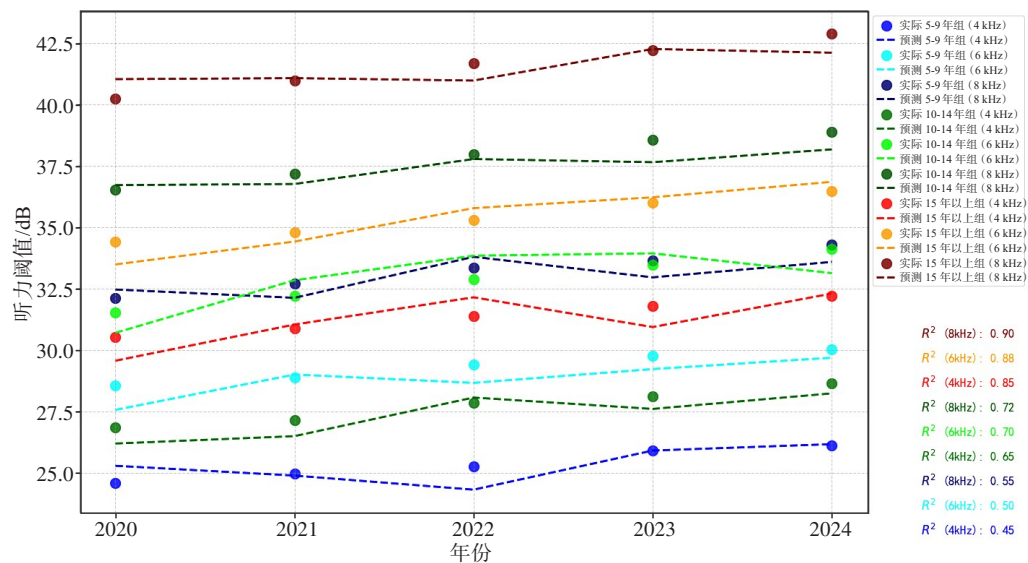


图1 实际与预测听觉阈值比较(散点图+拟合曲线)
Figure 1 Actual vs predicted auditory thresholds (Scatter plot + Fitted curve)

2.4 多变量回归分析

多变量回归分析显示,暴露强度和暴露年限对听觉损伤具有显著正相关性(图2)。对于5~9年组,暴露强度的回归系数为0.12(95%CI:0.10~0.15),而暴露年限的回归系数为0.09(95%CI:0.06~0.13),均为显著正相关。对于10~14年组,暴露强度的回归系数为0.17(95%CI:0.14~0.21),而暴露年限的回归系数为0.11(95%CI:0.08~0.14),表明随着暴露年限和强度的增加,听觉损伤加重。对于15年以上组,暴露强度的回归系数为0.24(95%CI:0.19~0.28),暴露年限的回归系数为0.16(95%CI:0.12~0.19),进一步表明长期暴露与听觉损伤的显著相关性。相对而言,年龄和性别对听觉损伤的影响较小。在各暴露组中,年龄的回归系数在0.03~0.07,性别的回归系数在-0.01~0.01,且置信区间多跨过0,表明这些因素在统计学上无显著影响。

3 讨论

3.1 长期职业暴露对听觉功能的总体影响

本研究通过严谨的实验设计和数据分析,验证了长期暴露于高频噪声对内耳听觉功能的显著损伤,尤其是在4、6、8 kHz等高频段,表现出显著的听觉阈值升高。暴露组与对照组的对比显示,暴露年

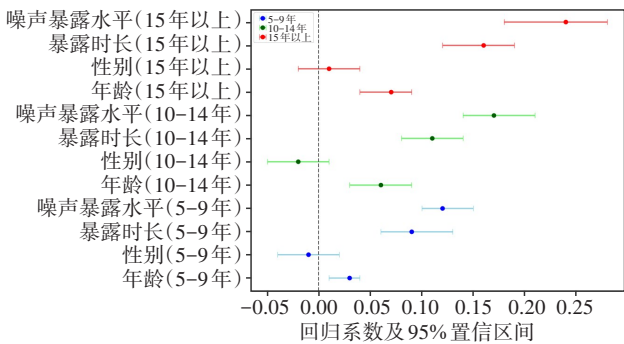


图2 听觉损伤的多变量回归分析
Figure 2 Multivariable regression analysis of auditory damage

限越长,听觉功能的损伤越严重^[17],尤其在15年以上暴露组中,听觉损伤程度最为显著,提示高频噪声对耳蜗毛细胞的累积性损伤不容忽视。分析表明,暴露组的听觉阈值上升幅度与年限和暴露强度密切相关。长期高频噪声暴露不仅会加速耳蜗内毛细胞的功能衰退,还会对基底膜产生不可逆损伤^[18]。随着噪声暴露时间的延长,这种损伤累积效应逐步加重,导致听觉损伤逐年加深。这种现象在暴露时间较长的受试者中尤为突出,表明高噪声环境下的长期职业暴露对听觉健康造成了严重威胁^[19]。这些研究结

果与既有的文献一致,进一步验证了高频噪声对内耳听觉功能的不可逆损伤作用。结合本研究的多变量回归分析,可以明确暴露年限和强度是听觉损伤的主要独立因素,提示职业防护措施的迫切性^[20]。通过有效的噪声监控和职业保护,或能有效减少这一风险。

研究表明长期暴露于高频噪声对听觉功能的损伤具有明显的累积效应,尤其在暴露超过15年的组中听觉阈值显著升高^[21]。多变量回归分析进一步确认,暴露年限和暴露强度是导致听觉损伤的关键因素,远高于年龄和性别等混杂变量。这一发现强调长期高频噪声暴露的潜在危害,提示需加强职业保护和噪声控制,以减少听觉功能的持续损伤。

3.2 骨传导测听对内耳功能评估的优势

本研究利用骨传导测听排除了外耳和中耳的干扰,直接评估内耳功能的变化,从而对高频噪声暴露造成的听觉损伤进行了更为精确的分析^[22]。骨传导测听结果显示,暴露组在4 kHz和8 kHz高频段的听觉阈值明显升高,表明这些频段的内耳损伤最为突出^[23]。这与高频噪声对耳蜗基底膜特定区域的累积性损伤理论一致。相比于传统的气导测听,骨传导测听能够有效避免外耳和中耳问题对听觉评估的干扰,特别适用于暴露于高频噪声的职业人群。

研究表明骨传导测听的高敏感性使其成为评估内耳功能损伤的重要手段,尤其在分析职业噪声暴露的具体听觉影响方面具有显著优势^[24]。通过这种精准的测量手段,本研究不仅能够量化听觉损伤的程度,还为进一步探索噪声暴露对内耳毛细胞和基底膜的长期损伤机制提供了重要数据支撑。基于此,骨传导测听在今后职业健康领域中的应用潜力值得进一步推广,为预防噪声性听力损失提供了可靠的评估工具。

3.3 物理声学模型在噪声损伤机制研究中的应用价值

本研究中引入的物理声学模型在评估噪声暴露对耳蜗损伤的机制方面表现出极高的应用价值。模型通过模拟不同频段的高频噪声对耳蜗,特别是基底膜的物理作用,准确预测了高频噪声对耳蜗的损伤程度^[25]。有研究发现4、6、8 kHz频段的噪声对内耳毛细胞和基底膜的损伤尤为显著,这与长期噪声暴露后测得的听觉阈值变化趋势高度一致^[26],尤其是在长期暴露组(15年以上),模型的预测值与实际听觉损伤测量结果拟合度较高,显示出模型在评估长时间暴露的听觉损伤时具有良好的预测精度。

通过物理声学模型的应用,本研究不仅能够解释

高频噪声对耳蜗毛细胞的直接损伤机制,还为噪声暴露引发的累积性损伤提供了量化依据。模型成功模拟了噪声对耳蜗结构的物理冲击,特别是对高频段的损伤,验证了其在不同暴露强度和年限条件下的可靠性。这为职业噪声暴露损伤的预测和干预提供了理论支持,提示可以依据模型预测结果优化噪声防护策略,减少长期噪声暴露带来的听觉损伤风险。

物理声学模型的应用不仅局限于损伤评估,还为随访研究提供了重要工具。通过长期追踪不同噪声暴露强度下的听觉损伤,模型能够更好地预测未来损伤的进程,帮助制定有效的职业保护措施,从而在噪声暴露的预防与治疗方面发挥指导作用。

3.4 预防措施与职业防护的必要性

本研究验证了长期暴露于高频噪声对听觉功能的严重损伤,尤其是在暴露年限较长和噪声强度较大的情况下,听觉阈值的显著上升表明听力损伤的不可逆性^[27]。因此职业防护措施的实施迫在眉睫。噪声环境下,持续的暴露不仅导致短期听力受损,更会造成耳蜗内毛细胞的长期退化,增加听力下降的风险。在实际操作中,噪声环境的定期监测是降低风险的第一步。通过量化和分析工作环境中的噪声水平,企业可以根据噪声强度与暴露时间合理调整工作安排,避免长时间高强度暴露。推广耳部防护设备如隔音耳塞、耳罩等,可以有效减少耳蜗暴露于高频噪声的时间和强度,从而降低听觉损伤的严重程度^[28]。本研究结果还表明噪声暴露的累积效应显著,因此减少暴露时间和加强定期健康检查尤为重要。通过更严谨的职业噪声管理制度,可以显著降低职业噪声性听力损失的发生率,保障工人长期听力健康。

【参考文献】

- [1] de Kort SR, Porcedda G, Slabbekoorn H, et al. Noise impairs the perception of song performance in blue tits and increases territorial response[J]. *Anim Behav*, 2024, 215: 131-141.
- [2] Nepal A, Godavarthi E, Ajit A, et al. Auditory spatial perception as a function of recreational noise exposure in gen-Z adults with normal hearing[J]. *Indian J Otolaryngol Head Neck Surg*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12070-024-05000-3>.
- [3] Sethunga SM, Bodhika JA, Abey Suriya UI, et al. Classification of the level and the type of hearing loss based on the analysis of audiograms of workers exposed to high level of occupational noise[J]. *Ruhuna J Sci*, 2022, 13(1): 61-69.
- [4] Ni JS, Ji F, Lu SQ, et al. An auditory convolutional neural network for underwater acoustic target timbre feature extraction and recognition[J]. *Remote Sens*, 2024, 16(16): 3074.
- [5] Maguinness C, Schall S, Mathias B, et al. Prior multisensory learning can facilitate auditory-only voice-identity and speech recognition in noise[J]. *Q J Exp Psychol (Hove)*, 2024: 17470218241278649.
- [6] Jostrup E, Nyström M, Tallberg P, et al. Effects of auditory and visual white noise on oculomotor inhibition in children with attention-deficit/hyperactivity disorder: protocol for a crossover study[J]. *JMIR Res Protoc*, 2024, 13: e56388.

- [7] 刘亚奇, 吴拔栋, 赵国超, 等. TDI 发动机润滑油挤压高频噪声影响因素试验研究[J]. 车用发动机, 2024(3): 46-49.
Liu YQ, Wu HD, Zhao GC, et al. Influencing factors of high-frequency noise from lube oil squeezing of turbocharged DI engine[J]. Vehicle Engine, 2024(3): 46-49.
- [8] Tawfik S, Hassan DM, Mahmoud NM. Evaluation of central auditory processing in individuals with occupational noise exposure[J]. QJM, 2023, 116(S1): hcad069.261.
- [9] 陈道成, 姚鼎鼎, 赵文静, 等. 噪声环境下双耳重放信号方位角听觉定位补偿算法[J]. 声学学报, 2024, 49(3): 611-619.
Chen DC, Yao DD, Zhao WJ, et al. A horizontal sound localization compensation algorithm for rendering binaural signals in noisy environment[J]. Acta Acustica, 2024, 49(3): 611-619.
- [10] 曾航. 骨传导虚拟声源距离定位性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2024.
Zeng H. Analysis of virtual sound sources distance localization of bilateral bone conduction stimulation[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2024.
- [11] 王雪梅, 陈佳慧, 张睿, 等. 儿童单侧聋植入人工耳蜗术后听觉功能评估[J]. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2024, 38(5): 436-441.
Wang XM, Chen JH, Zhang R, et al. Assessment of auditory perception of children with single-sided deafness after cochlear implantation[J]. Journal of Clinical Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery, 2024, 38(5): 436-441.
- [12] 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志编辑委员会. 先天性外中耳畸形患者骨传导助听器应用专家共识[J]. 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2024, 59(3): 197-203.
Editorial Board of Chinese Journal of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery. Expert consensus on the application of bone-conducted hearing device in patients with congenital middle and external ear malformations[J]. Chinese Journal of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery, 2024, 59(3): 197-203.
- [13] 巩丰媛, 党梓怡, 黄凤月, 等. 航空机务人员噪声性听力损失的现状调查[J]. 中国听力语言康复科学杂志, 2024, 22(1): 58-60.
Gong FY, Dang ZY, Huang FY, et al. Investigation of the current situation of noise-induced hearing loss among aviation crews[J]. Chinese Scientific Journal of Hearing and Speech Rehabilitation, 2024, 22(1): 58-60.
- [14] 张宁, 林莹, 徐飞. 豚鼠发育不同时期噪声间隙听性脑干反应研究[J]. 中华耳科学杂志, 2023, 21(5): 677-684.
Zhang N, Lin Y, Xu F. Gap in noise induced auditory brainstem responses in Guinea Pigs at different developmental stages [J]. Chinese Journal of Otology, 2023, 21(5): 677-684.
- [15] 王菲. BDNF 通过 PI3K/AKT/mTOR 调控自噬保护噪声诱导耳蜗带状突触损害的研究[D]. 沈阳: 中国医科大学, 2023.
Wang F. BDNF regulates autophagy via the PI3K/AKT/mTOR signaling pathway to protect against noise-induced cochlear ribbon synapse damage[D]. Shenyang: China Medical University, 2023.
- [16] 韩政元, 洪德轩, 周琪, 等. 航空兵部队飞机噪声对地勤人员听觉功能的影响与防护[J]. 华南国防医学杂志, 2022, 36(8): 670-674.
Han ZY, Hong DX, Zhou Y, et al. The impact and protection of aircraft noise on the auditory function of ground personnel in aviation forces [J]. Military Medical Journal of South China, 2022, 36(8): 670-674.
- [17] Asady H, Fuente A, Pourabdian S, et al. Acoustical role of ear canal in exposure to the typical occupational noise levels[J]. Med J Islam Repub Iran, 2021, 35: 58.
- [18] 刘桂龙. 听觉纹状体长时程响应特征及功能研究[D]. 广州: 南方医科大学, 2022.
Liu GL. Characteristics and functions of long sustained lasting response in auditory striatum [D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2022.
- [19] 鲍黄蕾, 肖永涛, 罗琼. 重复经颅磁刺激对耳鸣患者听觉处理功能的影响[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2022, 30(1): 41-45.
Bao HL, Xiao YT, Luo Q. Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation on auditory processing in tinnitus patients[J]. Journal of Audiology and Speech Pathology, 2022, 30(1): 41-45.
- [20] Yin DM, Ren LJ, Li JY, et al. Long-term moderate noise exposure enhances the medial olivocochlear reflex[J]. Auris Nasus Larynx, 2020, 47(5): 769-777.
- [21] Bohn V, Morata TC, Roggia S, et al. Temporary and permanent auditory effects associated with occupational coexposure to low levels of noise and solvents[J]. Int J Environ Res Public Health, 2022, 19(16): 9894.
- [22] Megha KN, Kappadi S, Kaverappa GM, et al. Effects of aging versus noise exposure on auditory system in individuals with normal audiometric thresholds[J]. J Int Adv Otol, 2021, 17(4): 335-342.
- [23] Samelli AG, Rocha CH, Kamita MK, et al. Evaluation of subtle auditory impairments with multiple audiological assessments in normal hearing workers exposed to occupational noise [J]. Brain Sci, 2023, 13(6): 968.
- [24] Alimohammadi I, Kanrash FA, Vosoughi S, et al. Study of the relationship between hearing loss and cognitive performance at chronic exposure to noise[J]. Iran Red Crescent Med J, 2020, 22(11): e102092.
- [25] Kuang D, Yu YY, Tu C. Bilateral high-frequency hearing loss is associated with elevated blood pressure and increased hypertension risk in occupational noise exposed workers[J]. PLoS One, 2019, 14(9): e0222135.
- [26] Hayes SH, Manohar S, Majumdar A, et al. Noise-induced hearing loss alters hippocampal glucocorticoid receptor expression in rats[J]. Hear Res, 2019, 379: 43-51.
- [27] Miao L, Zhang J, Yin LH, et al. Hearing loss and hypertension among noise-exposed workers: a pilot study based on baseline data[J]. Int J Environ Health Res, 2023, 33(8): 783-795.
- [28] Wu PZ, O'Malley JT, de Gruttola V, et al. Primary neural degeneration in noise-exposed human cochleas: correlations with outer hair cell loss and word-discrimination scores[J]. J Neurosci, 2021, 41(20): 4439-4447.

(编辑: 黄开颜)