

DOI:10.11798/j.issn.1007-1520.202525356

· 耳科疾病专栏 ·

扩展高频测听在早期职业噪声性 听力损失检测中的临床应用

庞彤¹, 卜鑫惠¹, 边盼盼¹, 程世红¹, 王艳芬², 徐百成¹

(兰州大学第二医院 1. 耳鼻咽喉头颈外科; 2. 健康管理中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: **目的** 本研究旨在利用扩展高频测听(EHFA)比较特定单位普通职工与职业性噪声暴露职工的语频及扩展高频听力情况,探索将EHFA用于早期职业噪声性暴露人群听力诊断的临床价值。**方法** 将2023年参加兰州大学第二医院职业病体检的119例职工(男95例,女24例;年龄23~67岁)纳入研究,并按噪声暴露工龄分类。所有受试者均进行常规耳科查体、声导抗检查、0.125~8 kHz的常规纯音测听(PTA)检查和9~16 kHz EHFA检查。使用SPSS 29.0.1.0软件进行数据分析。**结果** 扩展高频阈值(9~16 kHz)与持续噪声作业工龄显著相关,去除年龄影响后,在左耳11.2 kHz、右耳9 kHz、右耳10 kHz、右耳11.2 kHz与右耳12.5 kHz中扩展高频阈值与持续噪声作业工龄仍有显著相关性。**结论** EHFA是一种评估高频及超高频听力损失的有效手段,可以对噪声暴露人群可能的早期听力损失进行监控,对噪声性听力损失(NIHL)等职业病的早期发现有重要临床意义。

关键词: 噪声性听力损失;扩展高频测听;职业病诊断;毛细胞

中图分类号: R764.43*3

Clinical application of extended high-frequency audiometry in the early detection of occupational noise-induced hearing loss

PANG Tong¹, BU Xinhui¹, BIAN Panpan¹, CHENG Shihong¹, WANG Yanfen², XU Baicheng¹

(1. Department of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery, the Second Hospital of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Health Management Center, the Second Hospital of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: **Objective** To compare the speech frequency and extended high-frequency hearing thresholds between regular employees and those exposed to occupational noise using extended high-frequency audiometry (EHFA), and to evaluate the clinical value of EHFA in the early diagnosis of hearing impairment among occupational noise-exposed populations. **Methods** A total of 119 employees (95 males and 24 females; aged 23 to 67 years) who underwent occupational health examinations at the Second Hospital of Lanzhou University in 2023 were enrolled in the study and classified according to their noise exposure working years. All participants underwent routine otologic examinations, tympanometry, conventional pure-tone audiometry from 0.125 to 8 kHz, and EHFA from 9 to 16 kHz. Data analysis was performed using SPSS 29.0.1.0 software. **Results** The extended high-frequency thresholds (9–16 kHz) demonstrated a significant correlation with the duration of sustained occupational noise exposure. After removing the influence of age, the extended high-frequency thresholds in the left ear at 11.2 kHz, the right ear at 9, 10, 11.2, and 12.5 kHz still had a significant correlation with the duration of continuous noise exposure. **Conclusion** EHFA is an effective method for assessing hearing loss in the high and ultra-high frequency ranges. It can monitor possible early hearing loss in noise-exposed populations and has significant clinical significance for the early detection of occupational diseases such as noise-induced hearing loss.

Keywords: Noise-induced hearing loss; Extended high-frequency audiometry; Occupational disease diagnosis; Hair cells

基金项目:国家自然科学基金地区科学基金项目(82460222);2023年甘肃省重点研发计划项目(23YFFA0040)。

第一作者简介:庞彤,女,在读硕士研究生。

通信作者简介:徐百成,男,博士,主任医师。

噪声性听力损失 (noise-induced hearing loss, NIHL) 是世界上仅次于老年性听力损失的第二大获得性听力损失。当持续暴露于噪声环境时,感音毛细胞受到不可逆损伤,最终会导致永久性感音神经性听力丧失^[1-2]。在人类工业化大背景下,职业人群中 NIHL 的发病逐年增加。目前临床上诊断噪声性听力损失最常用的听力评估方法是纯音测听 (pure tone audiometry, PTA), 测听的频率范围为 0.125 ~ 8 kHz, 而扩展高频测听 (extended high-frequency audiometry, EHFA) 可以测量人类听觉系统 9 ~ 20 kHz 的听觉阈值。本研究选择对普通职工与职业性噪声暴露职工的常规语频听力与扩展高频听力进行比较分析,了解噪声暴露相关人群的 EHFA 特征,并探究 EHFA 在 NIHL 早期诊断中的价值和临床意义。

1 资料与方法

1.1 研究对象

纳入 2023 年在我院参加职业病体检且工作环境接触噪声与无噪声接触史的特定单位职工。排除标准:接触过耳毒性物质或服用过耳毒性药物的职工,接受耳镜检查鼓膜异常的职工,有外耳或中耳病史的职工,家族性听力障碍,鼓室曲线未引出或引出为 B/C 型曲线的职工。最终纳入 119 例受试者进行听力检测,其中男 95 例,女 24 例;无噪声暴露史的职工 30 例,有噪声接触史的职工 89 例;年龄 23 ~ 67 岁,工龄 3 个月至 15 年。检查项目包括常规耳科检查、声导抗 PTA 和 EHFA 检查。本研究经兰州大学第二医院伦理委员会批准 (项目编号: 2025A-665)。

1.2 资料与方法

1.2.1 听力检测方法 经过常规耳科查体,确认所有受试者外耳道清洁、鼓膜完整。向所有受试者介绍音频测量的过程与原理,并获得知情同意。测听设备为丹麦声阻抗仪 AT225,纯音听阈测试仪 (丹麦麦迪森公司 Madsen622 型);纯音听阈气导耳机 TDH39,高频听阈气导耳机 HDA300。测试从受试者主观听力较好耳开始,无主观差异则从左耳开始测量。

1.2.2 声导抗测试 本研究所有受试者均接受 226 Hz 探测音声导抗测试,测试压力范围为 -400 ~ +300 daPa。根据 Jerger 分类标准^[3],静态声导纳值 0.30 ~ 1.60 mmho 且鼓室图峰压位于 -100 ~

+50 daPa 提示为 A 型鼓室图。所有入组受试者的鼓室图均符合 A 型标准,表明中耳功能均正常。

1.2.3 PTA 与 EHFA 常规 PTA 使用 TDH39 耳机,测试频率为 0.125、0.25、0.5、1、2、4、8 kHz,各频率耳机的最大输出分别为 80、105、115、120、120、120、105 dB HL,最小输出为 -10 dB HL。EHFA 使用 HDA300 耳机,测试频率为 9、10、11.2、12.5、14、16 kHz,各频率耳机的最大输出强度分别为 65、75、80、65、60、40 dB HL,最小输出为 -10 dB HL。当受试者对耳机在该频率的最大输出强度仍无反应时,听阈记为该频率耳机的最大输出强度 +5 dB。

1.2.4 判断方法 根据 WHO 世界卫生组织 2021 年发布的听力损失程度分级,0.5、1、2、4 kHz 4 个频率的听阈均值 ≥ 26 dB HL 时,判定为不同级别的听力损失;根据国际标准化组织 (ISO 389-5, 2006) 的定义,扩展高频听力异常指单耳或双耳 (8 ~ 16 kHz) 的 1 个或多个频率听力阈值超过 25 dB HL^[4]。

1.3 统计学分析

所有符合要求的数据录入软件 Excel 2013,应用 SPSS Statistics 29.0.1.0 软件进行统计学分析。定量资料采用 $\bar{x} \pm s$ 描述,符合正态分布的组间比较采用 t 检验;不符合正态分布时,组间比较采用 Kruskal-Wallis 检验;为了明确年龄和工龄在扩展高频阈值变化中各自独立产生的影响,采用了多变量线性回归模型;为了去除年龄在统计中产生的影响以达到独立分析工龄对听力阈值变化影响的目的,采用了偏相关检验分析;定性资料,检出率及构成比用 (%) 进行描述,组间比较采用 χ^2 检验,以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 一般情况

参与研究的 119 例中,所有受试者的语频平均听阈均值均 ≤ 25 dB HL,但扩展高频听阈异常者 (≥ 25 dB HL) 114 例 (95.7%)。对各频率双耳听阈进行比较,在 0.125、0.25、0.5、8、9、11.2、12.5、14 kHz 频率,右耳比左耳高 2 ~ 6 dB HL ($P < 0.05$)。根据中国职业性噪声性聋的诊断标准 (GBZ 49-2014) 规定所观察对象的最低连续噪声作业工龄为 3 年^[5],将参与研究职工按是否在噪声下工作及在噪声下工作的时长分为无噪声组、低噪声组 (1 年 \leq 工龄 < 3 年)、中噪声组 (3 年 \leq 工龄 < 10 年) 和高噪声组 (工龄 ≥ 10 年),其中无噪声组 30 例,年龄

(34.80 ± 9.17)岁;低噪声组 25 例,年龄(26.40 ± 2.80)岁,工龄(1.42 ± 0.55)年;中噪声组 37 例,年龄(33.16 ± 7.54)岁,工龄(5.74 ± 1.85)年;高噪声组 27 例,年龄(40.41 ± 9.88)岁,工龄(16.30 ± 8.26)年。组间年龄和工龄差异均具有统计学意义($P < 0.001$)。

2.2 语频 PTA 情况

对语频 PTA 数据进行分组分析后发现,仅左耳 0.25 kHz 的听力阈值在不同分组间存在统计学差异($P < 0.05$),而其余测试频率在各组间的比较差异均无统计学意义(表 1、2)。

2.3 EHFA 情况

对左、右耳扩展高频的检出率(在该频率的最大输出强度内能作出反应)进行分析,结果显示检出率随频率上升而下降;对左右耳扩展高频异常率(阈值 > 25 dB HL)进行分析,双耳扩展高频阈值随频率升高呈上升趋势;左右耳之间的检出率及异常率差异均无统计学意义(表 3)。

对扩展高频的测听数据进行分组后分析,结果显示左耳中,9、10、11.2、12.5、14 kHz 听力阈值组

间比较差异均具有统计学意义(P 均 < 0.05)。(表 4);右耳中,9、10、11.2、12.5、16 kHz 听力阈值组间比较差异均具有统计学意义(P 均 < 0.05)。(表 5)。

使用多变量线性回归模型明确年龄和工龄在扩展高频阈值变化中各自独立产生的影响,结果显示在左右耳扩展高频中,年龄均与各频率阈值显著相关($P < 0.05$);在左耳 11.2kHz 及右耳 9、10、11.2、12.5、14 kHz 中,标准化系数 Beta 分别为 0.200、0.256、0.268、0.401、0.335、0.240,工龄与听阈显著相关($P < 0.05$),见表 6、7。

使用偏相关检验分析研究左右耳扩展高频去除年龄在统计中产生的影响后与工龄的相关性,结果显示在左耳 11.2 kHz 及右耳 9、10、11.2、12.5 kHz 中,未去除年龄影响时的零阶相关系数分别为 0.460、0.431、0.495、0.562、0.516,去除年龄影响后的仅受工龄影响的偏相关系数为 0.273、0.237、0.281、0.384、0.329,上述频率听阈与工龄显著相关($P < 0.05$),但相关性较未去除年龄影响时的相关性有一定程度的降低(偏相关系数降低),见表 8、9。

表 1 左耳语频频率分组后听力阈值比较 (dB HL, $\bar{x} \pm s$)

组别	0.125 kHz	0.25 kHz	0.5 kHz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
无噪声组	16.67 ± 6.21	12.83 ± 5.36	10.00 ± 4.15	8.33 ± 4.61	9.00 ± 4.43	12.00 ± 9.97	14.67 ± 12.99
低噪声组	17.80 ± 6.47	17.40 ± 6.47	12.20 ± 5.61	10.60 ± 5.65	9.40 ± 5.27	15.40 ± 13.69	16.00 ± 11.90
中噪声组	16.48 ± 7.82	16.67 ± 7.07	12.96 ± 6.83	11.85 ± 5.91	10.19 ± 6.86	18.33 ± 10.56	20.37 ± 17.76
高噪声组	16.26 ± 6.32	15.59 ± 6.38	11.43 ± 5.41	9.87 ± 5.27	9.12 ± 5.23	15.34 ± 12.10	16.18 ± 13.79
H	2.877	8.350	3.809	6.251	0.928	6.699	2.907
P	0.411	0.039	0.283	0.100	0.819	0.082	0.406

注:无噪声组 30 例,低噪声组 25 例,中噪声组 37 例,高噪声组 27 例。下同。

表 2 右耳语频频率分组后听力阈值比较 (dB HL, $\bar{x} \pm s$)

组别	0.125 kHz	0.25 kHz	0.5 kHz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
无噪声组	13.17 ± 5.33	11.33 ± 5.71	10.50 ± 4.22	9.00 ± 4.03	9.50 ± 5.31	12.50 ± 8.17	12.83 ± 10.88
低噪声组	12.60 ± 6.14	12.80 ± 5.22	10.20 ± 4.44	8.60 ± 6.21	6.80 ± 5.38	12.40 ± 11.28	13.00 ± 10.80
中噪声组	13.15 ± 4.63	11.85 ± 4.83	10.93 ± 4.81	11.30 ± 4.30	11.30 ± 7.92	17.59 ± 13.82	17.22 ± 18.67
高噪声组	12.77 ± 5.28	11.30 ± 5.02	10.46 ± 4.46	9.83 ± 5.12	8.99 ± 6.06	14.41 ± 12.51	13.99 ± 12.40
H	0.634	5.660	0.311	4.716	6.232	2.600	0.943
P	0.889	0.129	0.958	0.194	0.101	0.457	0.815

表 3 左右耳扩展高频听阈的检出率及异常率 [耳(%)]

项目	9 kHz	10 kHz	11.2 kHz	12.5 kHz	14 kHz	16 kHz
检出率						
左耳	118(99.16)	118(99.16)	118(99.16)	117(98.32)	107(89.92)	54(45.38)
右耳	117(98.32)	118(99.16)	117(98.32)	114(95.80)	101(84.87)	40(33.61)
χ^2	0.338	0.000	0.338	1.325	1.373	3.446
P	0.561	1.000	0.561	0.250	0.241	0.063

续表 3

项目	9 kHz	10 kHz	11.2 kHz	12.5 kHz	14 kHz	16 kHz
异常率						
左耳	19(26.32)	34(28.57)	42(35.30)	35(29.41)	72(60.50)	101(84.87)
右耳	21(17.65)	35(29.41)	46(38.66)	49(41.18)	82(68.91)	104(87.39)
χ^2	0.120	0.020	0.288	3.606	1.840	0.317
<i>P</i>	0.729	0.886	0.591	0.058	0.175	0.574

表 4 左耳扩展高频频率分组后听力阈值比较 (dB HL, $\bar{x} \pm s$)

组别	9 kHz	10 kHz	11.2 kHz	12.5 kHz	14 kHz	16 kHz
无噪声组	10.00 \pm 12.53	14.33 \pm 13.50	14.50 \pm 12.34	16.00 \pm 13.48	27.50 \pm 13.26	41.00 \pm 7.92
低噪声组	13.40 \pm 16.57	14.40 \pm 12.36	16.60 \pm 14.20	15.40 \pm 18.59	32.60 \pm 24.24	32.80 \pm 15.14
中噪声组	21.85 \pm 12.10	26.67 \pm 13.41	35.93 \pm 16.17	35.74 \pm 16.61	44.63 \pm 19.10	41.48 \pm 11.88
高噪声组	13.99 \pm 14.58	18.24 \pm 15.30	21.85 \pm 17.62	22.48 \pm 18.95	33.99 \pm 19.32	38.36 \pm 11.39
<i>H</i>	15.024	11.953	25.269	19.243	12.572	7.185
<i>P</i>	0.002	0.008	<0.001	<0.001	0.006	0.066

表 5 右耳扩展高频频率分组后听力阈值比较 (dB HL, $\bar{x} \pm s$)

组别	9 kHz	10 kHz	11.2 Hz	12.5 kHz	14 kHz	16 kHz
无噪声组	13.83 \pm 14.66	17.17 \pm 14.54	15.67 \pm 13.31	15.67 \pm 14.55	25.83 \pm 9.57	41.67 \pm 6.21
低噪声组	7.40 \pm 10.22	13.40 \pm 10.97	16.20 \pm 13.87	12.40 \pm 18.04	31.20 \pm 23.86	34.00 \pm 13.54
中噪声组	19.63 \pm 9.61	26.48 \pm 9.62	28.15 \pm 11.060	24.44 \pm 11.37	38.15 \pm 18.08	39.44 \pm 14.14
高噪声组	11.68 \pm 13.35	18.24 \pm 13.65	18.91 \pm 14.65	15.71 \pm 15.72	30.13 \pm 18.20	37.02 \pm 11.80
<i>H</i>	20.203	13.095	13.436	11.344	7.434	8.136
<i>P</i>	<0.001	0.004	0.004	0.010	0.059	0.043

表 6 左耳年龄和工龄在阈值变化中各自独立产生的影响

项目	9 kHz	10 kHz	11.2 kHz	12.5 kHz	14 kHz	16 kHz
年龄						
标准系数 Beta	0.526	0.466	0.339	0.335	0.276	0.435
<i>P</i>	<0.001	<0.001	0.002	0.002	0.016	<0.001
工龄						
标准系数 Beta	0.096	0.149	0.200	0.080	0.186	-0.156
<i>P</i>	0.289	0.145	0.047	0.484	0.102	0.184

表 7 右耳年龄和工龄在阈值变化中各自独立产生的影响

项目	9 kHz	10 kHz	11.2 kHz	12.5 kHz	14 kHz	16 kHz
年龄						
标准系数 Beta	0.295	0.363	0.260	0.284	0.260	0.361
<i>P</i>	0.007	<0.001	0.010	0.007	0.021	0.003
工龄						
标准系数 Beta	0.256	0.268	0.401	0.335	0.240	-0.041
<i>P</i>	0.019	0.009	<0.001	0.001	0.033	0.730

表 8 左耳扩展高频去除年龄影响后与工龄的关系

项目	9 kHz	10 kHz	11.2 kHz	12.5 kHz	14 kHz	16 kHz
零阶 <i>r</i>	0.384	0.458	0.460	0.357	0.301	0.109
工龄偏相关 <i>r</i>	0.098	0.215	0.273	0.175	0.106	-0.092
<i>P</i>	0.289	0.019	0.003	0.059	0.255	0.323
95% <i>CI</i>	-0.203 ~ 0.351	-0.091 ~ 0.464	0.004 ~ 0.502	-0.072 ~ 0.400	-0.061 ~ 0.256	-0.202 ~ 0.005

表9 右耳扩展高频去除年龄影响后与工龄的关系

项目	9 kHz	10 kHz	11.2 kHz	12.5 kHz	14 kHz	16 kHz
零阶 <i>r</i>	0.431	0.495	0.562	0.516	0.355	0.183
工龄偏相关 <i>r</i>	0.237	0.281	0.384	0.329	0.164	-0.01
<i>P</i>	0.010	0.002	<0.001	<0.001	0.075	0.994
95% <i>CI</i>	0.018 ~ 0.448	0.037 ~ 0.500	0.198 ~ 0.555	0.151 ~ 0.478	0.027 ~ 0.298	-0.100 ~ 0.102

3 讨论

NIHL 病变的早期病理改变主要局限于距离前庭膜和圆窗膜最近的耳蜗底回^[6],其显著特征为外毛细胞的损伤程度明显重于内毛细胞^[7]。Békésy 学说解释了这一选择性损伤模式:声波在基底膜上的传播呈现行波特性的,其中高频声波的最大振幅集中于耳蜗底回。当噪声暴露导致毛细胞损伤时,由于耳蜗底回外毛细胞首先接受高强度声波刺激,且其结构特性使其更易受损,因此临床上表现为高频听力阈值的早期改变^[8];也有研究认为在噪声暴露时,毛细胞和蜗神经之间的突触首先受到影响^[9]。NIHL 可能会引起早期海马体损伤,导致记忆与认知下降^[10],亦有可能引起与内耳损伤有关的耳鸣与听觉过敏^[11]。

一些研究表明,在成人的早期 NIHL 中 EHFA 可作为重要指标^[6,12]。对于青年人娱乐性噪声引起的早期听力损失,EHFA 阈值的变化也能起到预警作用^[4],有学者研究 EHFA 阈值与嘈杂环境中言语感知能力有关,也可能是年龄相关性听力损失的敏感预测指标^[13],Yeend 等^[14]研究也得出相似结论。有研究表明 EHFA 可先于常规 PTA 判断 5 岁以上儿童由耳毒性药物引起的早期听力损失^[15],越来越多的研究表明,扩展高频 PTA 阈值可以作为听力损失的早期预警指标。

本研究对各频率双耳听阈进行比较,发现在覆盖低频到扩展高频的多个频率上右耳的听力阈值比左耳高 2 ~ 6 dB HL,而左右耳扩展高频阈值的检出率和异常率无统计学差异。我们推测是由于常用耳或惯用手的不同以及噪声的不对称性暴露引起此差异。有研究显示左右耳听力阈值之间确有差异,与本研究结果相符^[16-17];但此前 Škerková 等^[18]亦有相关报道,并未在研究中检测出左右耳阈值的差异,听力损失的阈值与耳的侧别是否有确切差异还需进一步探索研究。

本研究对噪声暴露人群进行扩展高频听力分析,发现尽管这些受试者常规 PTA 阈值均处于正常

水平,但扩展高频听力检测已显示出噪声暴露导致的早期听力损害。EHFA 的检出率随频率上升而下降;阈值随频率升高呈上升趋势。在按是否接触噪声与接触噪声工龄长短分组分析后,发现常规语频听力阈值与分组并无显著的统计学关系,但扩展高频听力阈值与接触噪声工龄显著相关。表明接触噪声的时间越长,扩展高频阈值上升越明显。职业噪声暴露的累积效应假说支持了我们的分析结果^[19-20]。

本研究分析了年龄和工龄在阈值变化中各自独立产生的影响,结果显示虽然年龄对扩展高频阈值变化产生影响,但在部分阈值中工龄仍与阈值呈显著相关,这说明扩展高频阈值的变化受持续噪声作业时长即工龄的影响。在控制年龄带来的混杂影响后,进一步分析接触噪声工龄与扩展高频听阈的关联性,结果显示,排除年龄因素的影响后,部分频率的听阈仍与工龄呈显著相关,这一发现证实职业噪声暴露时间与听力损失之间存在独立于年龄的显著关联。值得注意的是,在调整年龄因素后,工龄与扩展高频听阈的相关性强度有所减弱,结合多变量回归分析模型中的结果来看,这表明年龄因素是影响扩展高频听阈的重要混杂变量,其与噪声暴露可能通过协同作用加速高频听力的衰退。表明在运用 EHFA 评估早期噪声听力损失时,需考虑到年龄与噪声暴露对阈值的复合效应。以上结果说明在 NIHL 的早期检出中,仅有常规频率的 PTA 是远远不够的,若能加入 EHFA,扩大筛查范围,做到早期检出,进而做到早期预防和治疗,将大大降低 NIHL 在职业人群中的影响。

在现有扩展高频相关研究中,学者们聚焦于青年人及正常人群的扩展高频阈值^[17-18,21],Jilek 等^[22]也对不同年龄阶段的正常人群的扩展高频阈值做了相关研究,有研究也将扩展高频畸变产物耳声发射应用于临床^[23],但至今对于 EHFA 的阈值缺乏国际共识的详细标准,且少有研究针对扩展高频应用于 NIHL 早期听力筛查做出可靠的阈值标准。由于仪器校准困难,检测耗时费力,无可靠诊断标准使得 EHFA 在噪声暴露相关的职业病早期筛查中难以广泛应用。在本研究中,14 kHz 及 16 kHz 的检出率较

低,原因可能为仪器设备的限制;且接噪人群工作环境复杂,噪声暴露存在广泛,时长和强度难于以客观标准量化,限制了我们对噪声与扩展高频听阈之间关系的深入探索,这不仅是本文研究的局限性,也是未来在临床广泛开展扩展高频检测与研究的难点。在后续的研究中,我们将致力于收集个体化的噪声强度数据,构建更精确的累积噪声暴露模型,从而能够更清晰、更有力地揭示职业噪声对听觉系统,特别是对扩展高频听阈的特定影响。

综上所述,本研究结果证实了在噪声性听力损伤人群中扩展高频听阈变化早于8 kHz以下常频听阈变化,表明EHFA有利于发现早期的听力损失,可以作为早期噪声性听力损伤的诊断及监测的有效方法,为未来在职业病早期筛查乃至临床广泛开展EHFA提供了一定的理论依据。

参考文献:

- [1] Xu K, Xu B, Gu J, et al. Intrinsic mechanism and pharmacologic treatments of noise-induced hearing loss[J]. *Theranostics*, 2023, 13(11): 3524–3549.
- [2] Lough M, Plack CJ. Extended high-frequency audiometry in research and clinical practice[J]. *J Acoust Soc Am*, 2022, 151(3): 1944.
- [3] Guidelines for screening for hearing impairment and middle-ear disorders. Working group on acoustic immittance measurements and the committee on audiologic evaluation. American speech-language-hearing association[J]. *ASHA Suppl*, 1990(2): 17–24.
- [4] Le Prell CG, Spankovich C, Lobarina E, et al. Extended high-frequency thresholds in college students; Effects of music player use and other recreational noise[J]. *J Am Acad Audiol*, 2013, 24(8): 725–739.
- [5] 张璟, 杨爱初, 郑倩玲, 等. 职业性噪声聋2014与2007版诊断标准对比研究[J]. *中国职业医学*, 2017, 44(1): 55–59.
- [6] Mishra SK, Aryal S, Patro C, et al. Extended high-frequency hearing loss and suprathreshold auditory processing: The moderating role of auditory working memory[J]. *Ear Hear*, 2025, 46(5): 1369–1378.
- [7] Rubel EW, Furrer SA, Stone JS. A brief history of hair cell regeneration research and speculations on the future[J]. *Hear Res*, 2013, 297: 42–51.
- [8] Hudspeth AJ. Integrating the active process of hair cells with cochlear function[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2014, 15(9): 600–614.
- [9] Liberman MC, Epstein MJ, Cleveland SS, et al. Toward a differential diagnosis of hidden hearing loss in humans[J]. *PLoS One*, 2016, 11(9): e0162726.
- [10] Paciello F, Pisani A, Rinaudo M, et al. Noise-induced auditory damage affects hippocampus causing memory deficits in a model of

early age-related hearing loss[J]. *Neurobiol Dis*, 2023, 178: 106024.

- [11] Kujawa SG, Liberman MC. Adding insult to injury: Cochlear nerve degeneration after “temporary” noise-induced hearing loss[J]. *J Neurosci*, 2009, 29(45): 14077–14085.
- [12] Badri R, Siegel JH, Wright BA. Auditory filter shapes and high-frequency hearing in adults who have impaired speech in noise performance despite clinically normal audiograms[J]. *J Acoust Soc Am*, 2011, 129(2): 852–863.
- [13] Motlagh Zadeh L, Silbert NH, Sternastay K, et al. Extended high-frequency hearing enhances speech perception in noise[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2019, 116(47): 23753–23759.
- [14] Yeend I, Beach EF, Sharma M. Working memory and extended high-frequency hearing in adults: Diagnostic predictors of speech-in-noise perception[J]. *Ear Hear*, 2019, 40(3): 458–467.
- [15] Knight KR, Kraemer DF, Winter C, et al. Early changes in auditory function as a result of platinum chemotherapy: Use of extended high-frequency audiometry and evoked distortion product otoacoustic emissions[J]. *J Clin Oncol*, 2007, 25(10): 1190–1195.
- [16] Oppitz SJ, Silva L, Garcia MV, et al. High-frequency auditory thresholds in normal hearing adults[J]. *Codas*, 2018, 30(4): e20170165.
- [17] 董新宇, 林颖, 高前进, 等. 青年人群扩展高频听力调查及其特征分析[J]. *听力学及言语疾病杂志*, 2025, 33(2): 156–160.
- [18] Škerková M, Kovalová M, Rychly T, et al. Extended high-frequency audiometry: Hearing thresholds in adults[J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2023, 280(2): 565–572.
- [19] Liberman MC, Kujawa SG. Cochlear synaptopathy in acquired sensorineural hearing loss: Manifestations and mechanisms[J]. *Hear Res*, 2017, 349: 138–147.
- [20] Kurabi A, Keithley EM, Housley GD, et al. Cellular mechanisms of noise-induced hearing loss[J]. *Hear Res*, 2017, 349: 129–137.
- [21] 夏红艳, 郑海峰, 刘浩强, 等. 正常青中年人扩展高频听阈参考基线[J]. *中华耳科学杂志*, 2020, 18(6): 1024–1028.
- [22] Jilek M, Štuta D, Syka J. Reference hearing thresholds in an extended frequency range as a function of age[J]. *J Acoust Soc Am*, 2014, 136(4): 1821–1830.
- [23] 刘嘉, 丁艳, 胡亚, 等. 扩展高频畸变产物耳声发射在纯音听阈正常的耳鸣患者中的临床应用[J]. *中国耳鼻咽喉颅底外科杂志*, 2023, 29(4): 31–34.

(收稿日期:2025-09-03)

本文引用格式: 庞彤, 卜鑫惠, 边盼盼, 等. 扩展高频测听在早期职业噪声性听力损失检测中的临床应用[J]. *中国耳鼻咽喉颅底外科杂志*, 2025, 31(6): 11–16. DOI:10.11798/j.issn.1007-1520.2025253556

Cite this article as: PANG Tong, BU Xinhui, BIAN Panpan, et al. Clinical application of extended high-frequency audiometry in the early detection of occupational noise-induced hearing loss[J]. *Chin J Otorhinolaryngol Skull Base Surg*, 2025, 31(6): 11–16. DOI:10.11798/j.issn.1007-1520.2025253556