

应用峰度调整噪声累积暴露量新指标评估家具制造工人的职业性听力损失

辛佳芮¹, 施志豪², 钱佩谊¹, 陈莹琦¹, 高向景³, 周莉芳³, 杨磊¹, 张美辨⁴

1. 杭州师范大学公共卫生学院, 浙江 杭州 310016

2. 宁波大学医学院, 浙江 宁波 315000

3. 浙江省疾病预防控制中心职业健康与辐射防护所, 浙江 杭州 310051

4. 中国疾病预防控制中心职业卫生与中毒控制所, 北京 100050

摘要:

[背景] 职业噪声性听力损失(NIHL)是世界上最普遍的职业病之一。随着工业的发展,工作场所的噪声源变得越来越复杂。

[目的] 应用峰度调整累积噪声暴露量(CNE)来评估家具制造工人非稳态噪声暴露所致的听力损失,为我国噪声测量方法和职业接触限值修订提供依据。

[方法] 通过横断面调查,选择 694 名制造业工人为研究对象,包括 542 名非稳态噪声暴露的家具制造工人以及 152 名稳态噪声暴露的纺织企业和造纸企业工人,其中非稳态噪声组分为枪钉工和木工,稳态噪声组分为织造工、纺纱工和造纸工。收集每个研究对象的高频(3、4、6 kHz)听力损失(HFNIHL)情况和噪声暴露数据。噪声能量指标包括 8 h 等效 A 声级($L_{Aeq,8h}$)、CNE,噪声时域结构测量指标为峰度。峰度调整 CNE 作为一个噪声能量和时域结构的联合指标。

[结果] 研究对象的年龄为(35.64±10.35)岁,工龄为(6.71±6.44)年,男性比例为 75.50%。 $L_{Aeq,8h}$ 为(89.43±6.01) dB(A),81.42%的研究对象暴露于 85 dB(A) 以上的噪声水平,CNE 为(95.85±7.32) dB(A)·年,峰度为 99.34±139.19, HFNIHL 患病率达 35.59%。非稳态噪声组平均峰度高于稳态噪声组平均峰度(125.33±147.17 vs. 5.86±1.94, $t=-21.04$, $P<0.05$)。二元 logistic 回归分析结果显示:校正年龄、工龄、 $L_{Aeq,8h}$ 后,峰度是工人 HFNIHL 的影响因素($OR=1.49$, $P<0.05$)。多元线性回归分析结果显示:年龄、工龄、 $L_{Aeq,8h}$ 和峰度对较差耳在高频 3、4、6 kHz 的噪声性永久听阈位移的影响有统计学意义(均 $P<0.05$)。卡方趋势分析结果显示,在 $CNE\geq 90$ dB(A)·年时, HFNIHL 患病率随峰度的增高而上升($P<0.05$)。非稳态噪声组平均 HFNIHL 患病率高于稳态噪声组(31.7% vs. 22.0%, $P<0.05$)。应用峰度调整后,非稳态噪声组的 CNE 和 HFNIHL 患病率的线性方程与稳态噪声组的方程几乎重合,两组之间的 HFNIHL 患病率平均差值从 9.7%减少到 1.4%($P<0.05$)。

[结论] 噪声峰度是评估 NIHL 的重要参量。峰度调整 CNE 能有效评估工人非稳态噪声暴露所致的职业性听力损失,有望成为一个非稳态噪声暴露测量和评估新指标。

关键词: 峰度; 累积噪声暴露量; 非稳态噪声; 职业性听力损失; 家具制造业

Applying kurtosis-adjusted cumulative noise exposure to assess occupational hearing loss among furniture manufacturing workers XIN Jiarui¹, SHI Zhihao², QIAN Peiyi¹, CHEN Yingqi¹, GAO Xiangjing³, ZHOU Lifang³, YANG Lei¹, ZHANG Meibian⁴ (1. School of Public Health, Hangzhou Normal University, Hangzhou, Zhejiang 310016, China; 2. School of Medicine, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315000, China; 3. Institute of Occupational Health and Radiation Protection, Zhejiang Provincial Center for Disease Control and Prevention, Hangzhou, Zhejiang 310051, China; 4. National Institute of Occupational Health and Poison Control, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100050)

Abstract:

[Background] Occupational noise-induced hearing loss (NIHL) is one of the most prevalent occupational diseases in the world. With the development of industry, noise sources in the workplace have become increasingly complex.



DOI 10.11836/JEOM21265

组稿专家

张美辨(中国疾病预防控制中心职业卫生与中毒控制所), E-mail: zhangmb@niohp.chinacdc.cn

基金项目

浙江省重点研发项目(2015 C03039); 2018 年度浙江省 151 人才工程培养项目(无编号); 2016 年度浙江省卫生创新人才培养项目(无编号); 职业健康标准前期研究项目(20210102); 浙江省医药卫生基金(2019 KY057); 浙江省医药卫生基金(2021 KY120); 浙江省一般科研项目(Y202147694)

作者简介

辛佳芮(1996—),女,硕士生;
E-mail: 875326032@qq.com

通信作者

张美辨, E-mail: zhangmb@niohp.chinacdc.cn

伦理审批

已获取

利益冲突

无申报

收稿日期

2021-06-13

录用日期

2022-03-09

►引用

辛佳芮, 施志豪, 钱佩谊, 等. 应用峰度调整噪声累积暴露量新指标评估家具制造工人的职业性听力损失[J]. 环境与职业医学, 2022, 39(4): 367-373.

►本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21265

Funding

This study was funded.

Correspondence to

ZHANG Meibian, E-mail: zhangmb@niohp.chinacdc.cn

Ethics approval

Obtained

Competing interests

None declared

Received

2021-06-13

Accepted

2022-03-09

► To cite

XIN Jiarui, SHI Zhihao, QIAN Peiyi, et al. Applying kurtosis-adjusted cumulative noise exposure to assess occupational hearing loss among furniture manufacturing workers[J].

Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2022, 39(4): 367-373.

► Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM21265

[Objective] To apply kurtosis-adjusted cumulative noise exposure (CNE) to assess the occupational hearing loss among furniture manufacturing workers, and to provide a basis for revising noise measurement methods and occupational exposure limits in China.

[Methods] A cross-sectional survey was conducted to select 694 manufacturing workers, including 542 furniture manufacturing workers exposed to non-Gaussian noise, and 152 textile manufacturing workers and paper manufacturing workers exposed to Gaussian noise. The job titles involving non-Gaussian noise were gunning and nailing, and woodworking, while those involving Gaussian noise were weaving, spinning, and pulping. High frequency noise-induced hearing loss (HFNIHL) and noise exposure data were collected for each study subject. Noise energy metrics included eight-hour equivalent continuous A-weighted sound pressure level ($L_{Aeq,8h}$) and CNE. Kurtosis was a noise temporal structure metric. Kurtosis-adjusted CNE was a combined indicator of noise energy and temporal structure.

[Results] The age of the study subjects was (35.64 ± 10.35) years, the exposure duration was (6.71 ± 6.44) years, and the proportion of males was 75.50%. The $L_{Aeq,8h}$ was (89.43 ± 6.01) dB(A). About 81.42% of the study subjects were exposed to noise levels above 85 dB(A), the CNE was (95.85 ± 7.32) dB(A)-year, with a kurtosis of 99.34 ± 139.19 , and the prevalence rate of HFNIHL was 35.59%. The mean kurtosis of the non-Gaussian noise group was higher than that of the Gaussian noise group (125.33 ± 147.17 vs. 5.86 ± 1.94 , $t = -21.04$, $P < 0.05$). The results of binary logistic regression analysis showed that kurtosis was an influential factor of workers' HFNIHL after correcting for age, exposure duration, and $L_{Aeq,8h}$ ($OR = 1.49$, $P < 0.05$). The results of multiple linear regression analysis showed that the effects of age, exposure duration, $L_{Aeq,8h}$, and kurtosis on noise-induced permanent threshold shift at frequencies of 3, 4, and 6 kHz of the poor hearing ear were statistically significant (all $P < 0.05$). The results of chi-square trend analysis showed that when $CNE \geq 90$ dB(A)-year, the HFNIHL prevalence rate elevated with increasing kurtosis ($P < 0.05$). The mean HFNIHL prevalence rate was higher in the non-Gaussian noise group than in the Gaussian noise group (31.7% vs. 22.0%, $P < 0.05$). After applying kurtosis-adjusted CNE, the linear equation between CNE and HFNIHL prevalence rate for the non-Gaussian noise group almost overlapped with that for the Gaussian noise group, and the mean difference in HFNIHL prevalence rate between the two groups decreased from 9.7% to 1.4% ($P < 0.05$).

[Conclusion] Noise kurtosis is an effective metric for NIHL evaluation. Kurtosis-adjusted CNE can effectively evaluate occupational hearing loss due to non-Gaussian noise exposure in furniture manufacturing workers, and is expected to be a new indicator of non-Gaussian noise measurement and assessment.

Keywords: kurtosis; cumulative noise exposure; non-Gaussian noise; occupational hearing loss; furniture manufacturing industry

职业噪声性听力损失(noise-induced hearing loss, NIHL)是仅次于老年性听力损失的听觉系统疾病^[1],也是世界上最普遍的职业病之一,在中国是仅次于尘肺的第二大职业病^[2],并有逐年上升的趋势^[3]。非稳态噪声(复杂噪声)是工作场所的主要工业噪声类型^[4],由瞬间高能脉冲性噪声叠加在高斯背景噪声上组成^[5],包含脉冲的持续时间、振幅和峰间间隔等要素,具有复杂的时域结构变化^[6]。稳态噪声暴露具有平稳的振幅变化,属于高斯分布。

工人经常暴露在复杂的噪声环境中,暴露的噪声能量和频谱可能相似,但由于不同的噪声时域结构,工人遭受的听力损失程度不同^[7]。动物实验研究结果表明,复杂噪声导致的听阈位移和耳蜗毛细胞损伤比同等能量的稳态噪声暴露更严重^[8-12],提示噪声的时域结构可作为噪声能量的辅助指标^[13]。这些发现在流行病学调查中得到了证实^[14-15]。噪声时域结构对听力损失的作用,使得现有的国际噪声测量评估标准(如 ISO 1999: 2013)无法准确评估复杂噪声造成的危害^[16]。现有的国际噪声测量评估标准是基于等能量假说,假设暴露强度增加或减少 3 dB,暴露时间减半或翻倍,对听力的影响相等,这意味着听力损失与噪声暴露水

平和暴露时间相关,与噪声能量的时域分布无关,并将噪声能量指标(如等效 A 声级)作为评估 NIHL 的唯一指标。我国颁布的工作场所噪声暴露测量标准(GBZ/T 189.8—2007)和职业接触限值(GBZ 2.2—2007)也是基于等能量假说。这些标准的修订也需考虑噪声时域结构对听力损失的作用。

在评估复杂噪声暴露造成的危害时,仅凭噪声能量是不够的,噪声暴露的时域结构在 NIHL 评价中也发挥了不容忽视的作用^[17]。已有证据表明,峰度能够间接衡量复杂噪声的脉冲性成分,是时域结构的一个敏感指标^[18],峰度的引入可将非稳态噪声中脉冲的持续时间、振幅和峰间间隔等时域结构要素融合成一个易于计算的指标^[6]。为了弥补等能量假说对非稳态噪声评价的不足,已有研究揭示通过时域结构指标(峰度)调整能量指标累积噪声暴露量(cumulative noise exposure, CNE)合成一个新的联合评估指标,可有效评估非稳态噪声所致的听力损失^[15, 19]。目前,关于应用峰度调整 CNE 新指标来评估不同行业非稳态噪声所致听力损失的人群调查正越来越引起相关领域研究人员的关注^[20]。

本研究通过横断面调查,选择家具制造业中存在

非稳态噪声暴露的典型工种,与纺织业和造纸业中暴露于稳态噪声的工种进行比较,描述不同工种包含时域结构的噪声暴露特征,明确噪声时域结构(峰度)是NIHL的一个影响因素,分析峰度与听力损失之间的剂量-反应关系,并合成一个新的非稳态噪声暴露评估指标,即峰度调整的CNE(CNE'),探索CNE'在评估与非稳态噪声暴露相关的NIHL中的作用。

1 对象与方法

1.1 研究对象

采用横断面调查方法,选择6家家具制造企业542名家具制造业工人作为非稳态噪声暴露人群,同时选择3家纺织企业和2家造纸企业共152名工人作为稳态噪声暴露人群,共694名制造业工人作为研究对象。6家家具制造企业的工作制度均为三班制,工人在工作时间(8 h)暴露于生产噪声中,随后16 h在比较安静的环境下休息。

研究对象的纳入标准:(1)在其目前的噪声暴露岗位上工作至少一年;(2)没有服用耳毒性药物史;(3)没有服兵役或射击活动史;(4)未使用听力保护装备;(5)没有糖尿病史;(6)没有同时暴露于噪声、耳毒性有机溶剂和重金属的情况。

所有研究对象均被告知研究目的和研究程序,并签署知情同意书。本研究方案经浙江省疾病预防控制中心伦理委员会批准(批准号:ZJCDC-T-043-R-20141211)。

家具制造企业工艺流程简述如下:备料和/或开料→木工细作(精切、打孔、开榫等)→枪钉→涂装→晾晒→包装,其中枪钉工和木工暴露于非稳态噪声。

纺织企业工艺流程简述如下:配好的色棉→清花→梳棉→精梳→并条→纺纱(粗纱、细纱)→织造(络筒)→打包后成为产品,其中纺纱工和织造工均暴露于稳态噪声。

造纸企业工艺流程简述如下:制浆(废纸和/或木浆)→水力碎浆机→浆池→纤维分离机→浆池→压力筛→多盘浓缩机→双盘磨→成浆池→造纸(面浆抄前池→冲浆泵→压力筛→流浆箱→叠网部→压榨部→烘干部→压光机→底涂布刮刀→桥箱→面涂布刮刀→桥箱→光泽缸→冷缸→卷纸机→分切机→包装入库),其中造纸工暴露于稳态噪声。

1.2 调查内容

1.2.1 个体噪声 8 h 等效 A 声级(eight-hour equivalent continuous A-weighted sound pressure level, $L_{Aeq,8h}$)采

用个体噪声数字录音器(ASV5910-R,杭州爱华仪器有限公司,中国)记录工人噪声暴露波形,频率响应范围为20 Hz~20 kHz,8 h 工作时间佩戴在工人肩部,每2 s对噪声进行采集。 $L_{Aeq,8h}$ 可由个体噪声数字录音器直接导出。

1.2.2 CNE CNE由 $L_{Aeq,8h}$ 和工龄计算得来,综合考虑了噪声能量和时间参数,可以量化接噪工人的噪声能量暴露水平,计算公式如下:

$$V_{CNE} = L_{Aeq,8h} + 10 \lg t \quad (1)$$

式中: V_{CNE} 为累积噪声暴露量,dB(A)·年; $L_{Aeq,8h}$ 为个体噪声等效A声级,dB(A); t 为接噪工龄,年。

1.2.3 峰度 峰度定义为噪声分布的四阶中心矩与二阶中心矩的平方之比,是表示噪声时域结构的一个敏感指标。根据个体噪声数字录音器记录的噪声波形,采用MATLAB R2017软件(MathWorks,美国)计算每个接噪工人的峰度均值。峰度的计算公式如下:

$$\beta = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (2)$$

式中: x_i 为第*i*个声压振幅值; $\bar{x}$ 为样本均数; β 为噪声暴露峰度,无单位。

非稳态噪声由瞬时高爆发的脉冲噪声叠加在高斯噪声背景上组成,在工业环境下高能脉冲噪声水平通常不超过140 dB^[21]。制造业劳动卫生学预调查发现撞击、冲压、锻造和铆接等工种峰度值特别高,进而针对家具制造企业进行劳动卫生学调查,确定枪钉工和木工暴露于非稳态噪声。

噪声峰度越大,表示噪声的脉冲性越高。理论上,稳态噪声的峰度为3;当峰度>3时,为非稳态噪声。由于在真实的工业噪声环境中,标准的稳态噪声环境比较少见,准高斯噪声环境较为多见,参考Davis等^[22]的研究,本研究以平均峰度为10作为临界值,平均峰度<10为稳态噪声或准高斯噪声,平均峰度≥10为非稳态噪声(复杂噪声)。

1.2.4 CNE' 为了应用峰度评估非稳态噪声暴露,Zhao等^[14]修正了公式(1),联合峰度和噪声能量形成一个新的暴露评估指标CNE',其计算公式如下:

$$V_{CNE'} = L_{Aeq,8h} + \frac{\ln(\beta) + 1.9}{\lg 2} \lg t \quad (3)$$

式中: $V_{CNE'}$ 是复杂噪声经峰度调整后的累积噪声暴露量,dB(A)·年; $L_{Aeq,8h}$ 为个体噪声等效A声级,dB(A); β 为噪声暴露峰度,无单位; t 为接噪工龄,年。

1.2.5 听力测试 接噪工人脱离噪声环境 16 h 后, 听力测试人员在体检车上一个背景噪声 < 25 dB(A) 的隔音室中, 检查接噪工人双耳 0.5、1、2、3、4、6、8 kHz 七个频率的纯音气导听阈。初次听力测试出现以下情况者需要在一个月内复检 3 次: 任一耳朵在 0.5、1 和 2 kHz 频率的听力阈值大于 20 dB, 或任一耳朵在 3、4 和 6 kHz 频率的听力阈值大于 25 dB。两次检查间隔时间至少 3 d, 各频率偏差应 ≤ 10 dB, 最终采用每一频率 3 次检查中最小阈值进行计算, 以排除暂时性听阈位移的影响。按照 ISO 1999: 2013 标准附录 A 中的数据对每名接噪工人的纯音气导听阈进行年龄、性别校正。在高频 3、4、6 kHz 的噪声性永久听阈位移(noise-induced permanent threshold shift at frequencies of 3, 4, and 6 kHz, NIPTS₃₄₆) 的计算公式如下:

$$N_{\text{NIPTS}_{346}} = \frac{H_{\text{HL}_{3\text{kHz}}} + H_{\text{HL}_{4\text{kHz}}} + H_{\text{HL}_{6\text{kHz}}}}{3} \quad (4)$$

式中: $N_{\text{NIPTS}_{346}}$ 为高频 3、4、6 kHz 的噪声性永久听阈位移, 单位为 dB; H_{HL} 为听力损失阈值, 单位为 dB。

高频听力损失(high frequency noise-induced hearing loss, HFNIHL) 定义为较差耳的 NIPTS₃₄₆ > 30 dB^[14-16]。

1.3 技术路线

采用以下步骤分析时域结构(峰度)及其能量联合指标(CNE')对 HFNIHL 的作用: (1) 比较非稳态噪声工种与稳态噪声工种之间的峰度差异及其工种分布; (2) 分析 HFNIHL 患病率的关键因素, 尤其是峰度的 OR 值和回归贡献程度; (3) 分析不同 CNE 分层下, 峰度和 HFNIHL 患病率之间的剂量-反应关系; (4) 分析 CNE' 与 HFNIHL 患病率的剂量-反应关系, 并观察非稳态噪声组 CNE' 和 HFNIHL 患病率之间线性方程与稳态噪声组线性方程的重叠程度, 基于噪声等能量假说来判定峰度调整噪声能量的效果; 重叠程度越高, 说明峰度调整效果越好。

1.4 统计学分析

采用 t 检验比较非稳态噪声工种与稳态噪声工种之间峰度的差异, 采用二元 logistic 回归分析计算 NIHL 各影响因素的 OR 值, 采用多元线性回归分析观察各因素对较差耳 NIPTS₃₄₆ 的贡献程度。在 < 90、90~95、95~100、≥ 100 dB(A)·年的每个 CNE 分层下, 采用 χ^2 趋势分析不同峰度之间的患病率的差异。采用 χ^2 检验分析调整前后复杂噪声与稳态噪声患病率差值的比较。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

1.5 质量控制

通过面对面的访谈进行问卷调查, 并在调查结束

当天, 对所有问卷进行审核, 如果发现错漏项, 于次日重新询问相应对象, 及时更正或补充。采用 Epidata 3.1 软件于调查当日以双录入的形式建立数据库, 结束后随机抽取 10% 的资料进行审查, 以保证数据录入质量。

2 结果

2.1 不同工种个体噪声的暴露特点和 HFNIHL 流行病学特征

表 1 显示研究对象的年龄为 (35.64±10.35) 岁, 工龄为 (6.71±6.44) 年, 男性比例为 75.50%。 $L_{\text{Aeq},8\text{h}}$ 为 (89.43±6.01) dB(A), 81.42% 的研究对象暴露于 85 dB(A) 以上的噪声水平, CNE 为 (95.85±7.32) dB(A)·年, 峰度为 99.34±139.19。 HFNIHL 患病率为 35.59%。高噪声暴露水平的工人比例因工种而异, 94.59% 的纺纱工和造纸工暴露于 85 dB(A) 以上的噪声水平; 另外, 82.50% 的织造工、80.67% 的枪钉工和 77.05% 的木工暴露于 85 dB(A) 以上的噪声水平。纺纱、织造和造纸工 CNE 均在 100 dB(A)·年以上, 木工和枪钉工 CNE 均低于 100 dB(A)·年。造纸工的 HFNIHL 患病率最高, 为 45.95%, 其次是织造、纺纱和枪钉工, 分别为 40.00%、36.49% 和 36.13%, 木工的 HFNIHL 患病率最低, 为 33.11%。枪钉工的噪声峰度最高, 为 214.35, 其次是木工, 峰度为 55, 纺纱、织造或造纸工的峰度最低, 均低于 10。非稳态噪声组平均峰度为 125.33±147.17, 高于稳态噪声组平均峰度 5.86±1.94, 两组噪声峰度的差异存在统计学意义 ($t=-21.04, P<0.05$)。

2.2 影响 HFNIHL 患病率的关键因素

表 2 显示了对 HFNIHL 患病率影响因素的二元 logistic 回归分析结果以及影响较差耳 NIPTS₃₄₆ 的多元线性回归分析结果。采用二元 logistic 回归分析对年龄、工龄、 $L_{\text{Aeq},8\text{h}}$ 进行校正后, 峰度是 HFNIHL 的影响因素, $OR=1.23$; 各因素的 OR 排序为: $OR_{\text{年龄}} > OR_{L_{\text{Aeq},8\text{h}}} > OR_{\text{工龄}} > OR_{\text{峰度}}$ (均 $P<0.05$)。多元线性回归分析结果显示, 年龄、工龄、 $L_{\text{Aeq},8\text{h}}$ 和峰度对较差耳 NIPTS₃₄₆ 的影响有统计学意义 (均 $P<0.05$)。

2.3 峰度与 HFNIHL 患病率的剂量-反应关系

图 1 显示, HFNIHL 患病率随着 CNE 的增加而升高。卡方趋势分析结果显示, 除 CNE < 90 dB(A)·年时, 在 90 dB(A)·年 ≤ CNE < 95 dB(A)·年、95 dB(A)·年 ≤ CNE < 100 dB(A)·年、100 dB(A)·年 ≤ CNE 的水平下, HFNIHL 患病率随着峰度的增加而升高 ($P<0.05$)。卡方分析结果显示, CNE < 90 dB(A)·年时, 不同峰度水平的 HFNIHL 患病率差异无统计意义 ($\chi^2=4.211, P>0.05$)。

表 1 不同工种工人一般信息、噪声暴露和 HFNIHL 患病情况
Table 1 General information, noise exposure, and HFNIHL prevalence among workers of different job titles

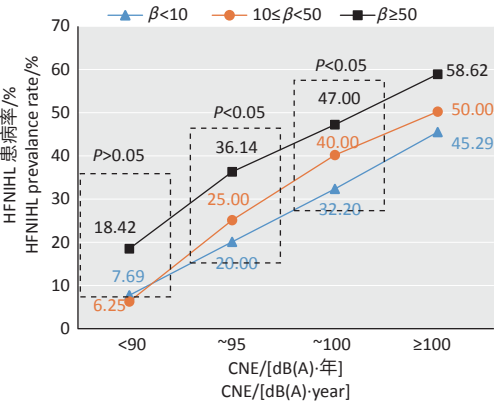
噪声类型 Type of noise	工种 Type of job	例数 <i>n</i>	男性 Male <i>n</i> (%)	年龄/年 Age/years $\bar{x} \pm s$	工龄/年 Exposure duration/years $\bar{x} \pm s$	$L_{Aeq,8h}$ /dB(A) $\bar{x} \pm s$	$L_{Aeq,8h}$ >85 dB(A) 占比 (Proportion)/%	CNE/[dB(A)·年] CNE/[dB(A)·year] $\bar{x} \pm s$	峰度 Kurtosis $\bar{x} \pm s$	HFNIHL 患病率 (Prevalence rate)/%	NIPTS ₃₄₆ /dB $\bar{x} \pm s$
稳态噪声 Gaussian noise	织造工 Stamping	40	31(77.50)	32.75±8.23	6.23±4.12	93.34±10.22	82.50	100.41±9.81	6.30±1.98	40.00	25.77±12.91
	纺纱工 Weaving	74	11(14.86)	32.97±8.48	6.03±5.11	95.22±5.17	94.59	101.38±6.07	5.55±1.84	36.49	25.72±12.11
	造纸工 Pulping	37	22(59.46)	48.03±10.55	14.32±9.00	90.02±3.70	94.59	100.63±4.27	6.00±2.03	45.95	28.61±13.72
	小计 Subtotal	151	64(42.38)	36.60±11.04	8.12±7.01	93.45±6.92	91.39	100.94±6.89	5.86±1.94*	39.47	26.44±12.71
非稳态噪声 Non-Gaussian noise	枪钉工 Gunning and nailing	238	222(93.28)	31.71±8.85	4.80±5.00	88.66±5.00	80.67	93.64±6.84	214.35±170.61	36.13	27.13±13.29
	木工 Woodworking	305	238(78.03)	38.23±10.18	7.50±6.81	88.04±5.35	77.05	95.05±6.71	55.86±69.82	33.11	26.24±13.86
	小计 Subtotal	543	460(84.71)	35.37±10.14	6.32±6.23	88.31±5.21	78.64	94.44±6.80	125.33±147.17*	34.44	26.63±13.61
总计 Total		694	524(75.50)	35.64±10.35	6.71±6.44	89.43±6.01	81.42	95.85±7.32	99.34±139.19	35.59	26.59±13.41

[注] NIPTS₃₄₆: 在 3、4 和 6 kHz 的频率上, 噪声导致的永久性听阈位移。稳态噪声的峰度与非稳态噪声的峰度比较, *: $P < 0.05$ 。
[Note] NIPTS₃₄₆: Noise-induced permanent threshold shift at 3, 4, and 6 kHz frequencies. Comparison between Gaussian and Non-Gaussian noise kurtosis, *: $P < 0.05$.

表 2 工人 HFNIHL 影响因素的回归分析结果
Table 2 Regression analysis results of critical factors influencing HFNIHL of workers

指标 Indicator	二元 logistic 回归分析 ^a Binary logistic regression analysis ^a		多元线性回归分析 ^b Multiple linear regression analysis ^b	
	OR (95%CI)	<i>P</i>	<i>b</i>	<i>P</i>
性别 Sex	1.21(0.84~1.75)	> 0.05	—	—
年龄 Age	1.56(1.33~1.82)	< 0.01	2.06	< 0.01
工龄 Exposure duration	1.48(1.30~1.70)	< 0.01	2.13	< 0.01
$L_{Aeq,8h}$	1.55(1.34~1.80)	< 0.01	3.23	< 0.01
峰度 Kurtosis	1.32(1.15~1.52)	< 0.01 ^c	2.13	< 0.01

[注] a: 以是否患 HFNIHL 为分类应变量; b: NIPTS₃₄₆ 为连续应变量; c: 校正年龄、工龄和 $L_{Aeq,8h}$ 。性别: 男、女, 以女性为参照; 年龄(岁): < 30、30~< 40、40~< 50、50~< 60、60~< 70、≥ 70; 工龄(年): < 5、5~< 10、10~< 15、15~< 20、≥ 20; $L_{Aeq,8h}$ [dB(A)]: < 80、80~< 85、85~< 90、90~< 95、95~< 100、≥ 100; 峰度: < 10、10~< 25、25~< 50、50~< 100、≥ 100。
[Note] a: Having HFNIHL or not is a categorical dependent variable; b: NIPTS₃₄₆ is a continuous dependent variable; c: The model is adjusted for age, exposure duration, and $L_{Aeq,8h}$. Sex: male and female, with female as reference; Age (years): < 30, 30~< 40, 40~< 50, 50~< 60, 60~< 70, ≥ 70; Exposure duration (years): < 5, 5~< 10, 10~< 15, 15~< 20, ≥ 20; $L_{Aeq,8h}$ [dB(A)]: < 80, 80~< 85, 85~< 90, 90~< 95, 95~< 100, ≥ 100; Kurtosis: < 10, 10~< 25, 25~< 50, 50~< 100, ≥ 100.



[注] 当 $CNE \geq 90$ dB(A)·年时, 每个 CNE 分层下, HFNIHL 患病率随着峰度 (β) 的增加而升高 ($P < 0.05$)。
[Note] When $CNE \geq 90$ dB(A)·year, HFNIHL prevalence rate elevates with increasing kurtosis (β) under each CNE stratum ($P < 0.05$).

图 1 每个 CNE 分层下峰度和 HFNIHL 患病率之间的趋势
卡方分析

Figure 1 Chi-square test for trend between kurtosis and HFNIHL prevalence under each CNE stratum

2.4 CNE'与 HFNIHL 患病率的剂量-反应关系

图 2A 显示, 非稳态噪声组的患病率 (Y) 和 $CNE(X)$ 之间的线性回归方程为 $Y=2.6126X-216.52$ ($R^2=0.9951$), 稳态噪声的患病率 (Y) 与 $CNE(X)$ 之间的线性回归方程为 $Y=2.2056X-187.53$ ($R^2=0.9930$)。非稳态噪声组的平均 HFNIHL 患病率 (31.7%) 高于稳态噪声组 (22.0%, $P < 0.05$)。图 2B 表明, 进行峰度调整 $CNE'(CNE')$ 后, 两个

线性方程几乎是重叠的,非稳态噪声组和稳态噪声组之间的 HFNIHL 患病率的平均差值从 9.7% 减少到 1.4%,差异具有统计学意义($P < 0.05$)。

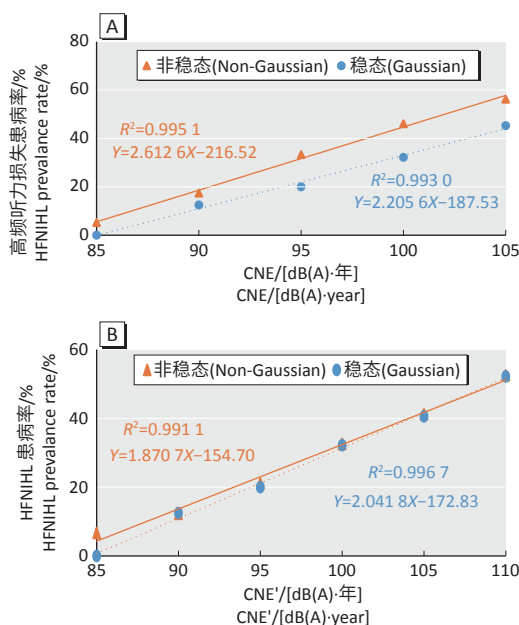


图2 CNE (A) 及 CNE' (B) 与 HFNIHL 患病率之间的线性关系
Figure 2 Linear relationship between HFNIHL prevalence rate and CNE (A) or CNE' (B)

3 讨论

本研究应用峰度作为噪声时域结构的量化指标,在联合噪声能量及暴露时间的指标后,应用于家具制造业非稳态 NIHL 的评估,结果发现应用带有峰度的联合指标,可更好地评估非稳态噪声职业暴露所导致的听力损失,为建立非稳态噪声与职业性听力损失之间的剂量-反应关系提供基础依据。

本研究 5 个工种中 81.42% 的制造业工人暴露于高于 85 dB(A) 的噪声水平, $L_{Aeq,8h}$ 为 (89.43 ± 6.01) dB(A),工龄为 (6.71 ± 6.44) 年,峰度为 99.34 ± 139.19 , HFNIHL 患病率达 35.59%。这些结果表明制造业工人听力损失高风险水平与噪声强度高、暴露时间和噪声时域结构的复杂性等因素有关。我国制造业噪声暴露特点与其他国家类似。伊朗绝大多数接触噪声的人群暴露于 90.29 dB(A) 的噪声水平^[23]; 在韩国,高达 90% 的工作场所噪声水平超过 85 dB(A)^[24]; 大约有 3000 万的美国工人暴露于高于 85 dB(A) 的噪声水平^[25]。

本研究结果表明 $L_{Aeq,8h}$ 是 HFNIHL 最主要的危险因素,峰度、工龄和年龄是影响 HFNIHL 的重要因素。多元线性回归分析显示,噪声暴露指标中, $L_{Aeq,8h}$ 和峰度均对 NIPTS 产生回归贡献。这说明除了目前公认的噪声暴露水平和噪声暴露时间外,噪声的时域结构(峰度)也是 NIHL 的一个重要的危险因素。这与本团队发

表的相关综述分析结果一致^[4,7],非稳态噪声较稳态噪声会导致更大的听力损失,暴露于非稳态噪声的工人患 HFNIHL 的风险高于无噪声暴露的工人(总体加权 $OR=4.46$) 以及稳态噪声的工人(总体加权 $OR=2.20$)。目前噪声能量仍然是决定 NIHL 发展的主要因素。然而,在评估复杂噪声暴露造成的危害时,仅有噪声能量是不够的。噪声暴露的时间结构也在 NIHL 评估中发挥了重要作用,这种作用也越来越受到重视^[18]。本研究的结果也进一步证明了峰度在评估复杂噪声所致听力损失中的重要性。

为了控制噪声能量对 HFNIHL 的影响,本研究对 CNE 进行了分层分析。结果显示,在绝大多数的 CNE 水平上, HFNIHL 患病率随峰度的增加而增加。噪声自身时域结构特性在对听力损失的结果方面起到了关键作用。动物实验研究结果显示^[26-27],对于固定的噪声暴露水平,噪声引起的听力损失与峰度之间存在剂量-反应关系,永久性阈值位移或外/内毛细胞损伤程度随着峰度值的增加而增加^[28]。本研究结果进一步说明了在相同噪声能量的情况下,非稳态噪声暴露比稳态噪声暴露导致更严重的听力损失,暴露于复杂噪声的工人 HFNIHL 患病率高于暴露于稳态噪声工人。这与本团队职业流行病学调查结果一致,在噪声暴露 CNE 水平一致的情况下,非稳态噪声暴露的制造业工人的 HFNIHL 患病率高于稳态噪声暴露的工人^[28]。这些结果提示暴露于具有高度复杂时域结构的噪声(峰度 ≥ 50) 对工人的听力损失有重大影响,可能导致职业暴露人群中 NIHL 的高患病率^[18]。

考虑到时域结构对听力损失的影响,本研究利用峰度对 CNE 进行了调整。结果显示,在用峰度调整后,复杂噪声的 HFNIHL 患病率和 CNE' 之间的线性方程几乎与稳态噪声的方程重合,且线性关系良好。复杂噪声导致的 HFNIHL 患病率与稳态噪声导致的 HFNIHL 患病率差值从 9.7% 降至 1.4%。结果提示非稳态噪声导致的听力损失患病率要明显高于稳态噪声,而峰度可以区分稳态噪声与非稳态噪声导致的听力损失,并且经过峰度调整后,复杂噪声与稳态噪声的剂量反应方程接近重叠^[15,18]。这一结果表明,基于等能量假说,峰度可作为一个辅助参量来调整 CNE,调整后的新联合指标可评估不同噪声类型所导致的 NIHL 风险。Zhao 等^[14]对纺织厂和金属加工厂进行调查,发现通过将峰度参量对 CNE 计算公式的暴露时间部分进行调整,可以使非稳态噪声和稳态噪声与听力损失患病率之间的两个剂量-反应曲线几乎重叠,说明峰度调整的

有效性。Xie 等^[15]发现与 CNE 相比,使用峰度调整后的 CNE 时,高频听阈位移与 CNE 之间的相关性提高。本研究用 694 名家具制造业工人数据进一步证实了上述研究的结果。鉴于噪声时域结构已成为噪声导致听力损失的一个新的重要影响因素,我国针对非稳态噪声的职业接触限值和测量方法的修订需要考虑噪声时域结构的作用。

综上所述,本研究可得出以下三个结论:(1)噪声峰度作为噪声时域结构敏感指标,是评估 NIHL 的重要参量;(2)在噪声暴露 CNE 水平一致条件下,非稳态噪声暴露比稳态噪声暴露会导致更严重的听力损失;(3)CNE'作为一个新的联合暴露指标,能有效评估工人非稳态噪声暴露所致的职业性听力损失,为我国针对非稳态噪声的职业接触限值和测量方法的修订提供科学依据。考虑到本次研究对象的平均工龄约为 6 年,对于 NIHL 发展的缓慢进程而言是一个较短的时间,尚需纳入暴露工龄更长的制造业工人,来验证 CNE'在评估非稳态噪声所致职业性听力损失中的作用。

参考文献

- [1] ŚLIWIŃSKA-KOWALSKA M, ZABOROWSKI K. WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review on environmental noise and permanent hearing loss and tinnitus[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2017, 14(10): 1139.
- [2] ZHANG X, NI Y, LIU Y, et al. Screening of noise-induced hearing loss (NIHL)-associated SNPs and the assessment of its genetic susceptibility[J]. *Environ Health*, 2019, 18(1): 30.
- [3] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 2019 年我国卫生健康事业发展统计公报[EB/OL]. [2021-09-01]. http://www.gov.cn/guoqing/2021-04/09/content_5598657.htm.
National Health Commission of the People's Republic of China. 2019 China's Health and Health Care Development Statistics Bulletin [EB/OL]. [2021-09-01]. http://www.gov.cn/guoqing/2021-04/09/content_5598657.htm.
- [4] ZHOU J, SHI Z, ZHOU L, et al. Occupational noise-induced hearing loss in China: a systematic review and meta-analysis[J]. *BMJ Open*, 2020, 10(9): e039576.
- [5] HAMERNIK RP, QIU W. Energy-independent factors influencing noise-induced hearing loss in the chinchilla model[J]. *J Acoust Soc Am*, 2001, 110(6): 3163-3168.
- [6] QIU W, MURPHY WJ, SUTER A. Kurtosis: a new tool for noise analysis[J]. *Acoust Today*, 2020, 16(4): 39-47.
- [7] 邱伟, 张美辨, 徐维超, 等. 峰度在评估复杂噪声所引起听力损失中的应用[J]. *中华耳科学杂志*, 2016, 14(6): 701-707.
QIU W, ZHANG MB, XU WC, et al. The application of the kurtosis metric in evaluating hearing trauma from complex noise exposures[J]. *Chin J Otol*, 2016, 14(6): 701-707.
- [8] LEI SF, AHROON WA, HAMERNIK RP. The application of frequency and time domain kurtosis to the assessment of hazardous noise exposures[J]. *J Acoust Soc Am*, 1994, 96(3): 1435-1444.
- [9] QIU W, HAMERNIK RP, DAVIS RI. The value of a kurtosis metric in estimating the hazard to hearing of complex industrial noise exposures[J]. *J Acoust Soc Am*, 2013, 133(5): 2856-2866.
- [10] DAVIS RI, QIU W, HAMERNIK RP. Role of the kurtosis statistic in evaluating complex noise exposures for the protection of hearing[J]. *Ear Hear*, 2009, 30(5): 628-634.
- [11] HAMERNIK RP, QIU W, DAVIS B. The effects of the amplitude distribution of equal energy exposures on noise-induced hearing loss: the kurtosis metric[J]. *J Acoust Soc Am*, 2003, 114(1): 386-395.
- [12] QIU W, HAMERNIK RP, DAVIS B. The kurtosis metric as an adjunct to energy in the prediction of trauma from continuous, nonGaussian noise exposures[J]. *J Acoust Soc Am*, 2006, 120(6): 3901-3906.
- [13] ZHANG M, XIE H, ZHOU J, et al. New metrics needed in the evaluation of hearing hazard associated with industrial noise exposure[J]. *Ear Hear*, 2021, 42(2): 290-300.
- [14] ZHAO YM, QIU W, ZENG L, et al. Application of the kurtosis statistic to the evaluation of the risk of hearing loss in workers exposed to high-level complex noise[J]. *Ear Hear*, 2010, 31(4): 527-532.
- [15] XIE HW, QIU W, HEYER NJ, et al. The use of the kurtosis-adjusted cumulative noise exposure metric in evaluating the hearing loss risk for complex noise[J]. *Ear Hear*, 2016, 37(3): 312-323.
- [16] Acoustics—Estimation of noise-induced hearing loss: ISO 1999: 2013[S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2013.
- [17] ZHANG M, QIU W, XIE H, 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 Hear*, 2021, 42(6): 1782-1796.
- [18] DAVIS RR, CLAVIER O. Impulsive noise: a brief review[J]. *Hear Res*, 2017, 349: 34-36.
- [19] QIU W, ZHANG M, HU W, et al. Application of the kurtosis metric to the assessment of hearing loss associated with occupational noise exposure[J]. *China CDC Wkly*, 2021, 3(18): 390-393.
- [20] SUTER AH. Occupational hearing loss from non-Gaussian noise[J]. *Semin Hear*, 2017, 38(3): 225-262.
- [21] SHI Z, ZHOU J, HUANG Y, et al. Occupational hearing loss associated with non-Gaussian noise: a systematic review and meta-analysis[J]. *Ear Hear*, 2021, 42(6): 1472-1484.
- [22] DAVIS RI, QIU W, HEYER NJ, et al. The use of the kurtosis metric in the evaluation of occupational hearing loss in workers in China: implications for hearing risk assessment[J]. *Noise Health*, 2012, 14(61): 330-342.
- [23] SOLTANZADEH A, EBRAHIMI H, FALLAHI M, et al. Noise induced hearing loss in Iran: (1997-2012): systematic review article[J]. *Iran J Public Health*, 2014, 43(12): 1605-1615.
- [24] KIM KS. Occupational hearing loss in Korea[J]. *J Korean Med Sci*, 2010, 25(5): S62-S69.
- [25] STUCKEN EZ, HONG RS. Noise-induced hearing loss: an occupational medicine perspective[J]. *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg*, 2014, 22(5): 388-393.
- [26] HAMERNIK RP, QIU W, DAVIS B. Hearing loss from interrupted, intermittent, and time varying non-Gaussian noise exposure: the applicability of the equal energy hypothesis[J]. *J Acoust Soc Am*, 2007, 122(4): 2245-2254.
- [27] QIU W, DAVIS B, HAMERNIK RP. Hearing loss from interrupted, intermittent, and time varying Gaussian noise exposures: the applicability of the equal energy hypothesis[J]. *J Acoust Soc Am*, 2007, 121(3): 1613-1620.
- [28] ZHANG M, GAO X, QIU W, et al. The role of the kurtosis metric in evaluating the risk of occupational hearing loss associated with complex noise — Zhejiang Province, China, 2010-2019[J]. *China CDC Wkly*, 2021, 3(18): 378-382.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 汪源)