

doi: 10.3969/j.issn.1672-4933.2025.04.005

耳鸣评估检测方法:从临床实践到多模态整合

Methods for Tinnitus Assessment and Detection: From Clinical Practice to Multimodal Integration

宫琴¹ 郑颖芳¹ 朱敏¹ 陈欢² 朱仁骏³

GONG Qin, ZHENG Ying-fang, ZHU Min, CHEN Huan, ZHU Ren-jun

【摘要】 耳鸣是一种病因复杂且具有高度异质性的耳科疑难病症。耳鸣的评估检测一直是临床诊疗和科学研究中的难点。主观量表、心理声学、客观标志物的评估检测方法从不同侧面为耳鸣的评估、诊断、康复效果的研究提供了标准化的辅助手段。本文综述了在临床研究中的耳鸣量表、心理声学和客观标志物在耳鸣临床评估、检测、疗效监测和机理机制研究中的价值,并对耳鸣客观定量诊疗标志物的发展趋势进行了展望。

【关键词】 耳鸣;评估;耳鸣量表;心理声学;客观标志物

【中图分类号】 R764.45

【文献标识码】 A

【文章编号】 1672-4933(2025)04-0367-11

【Abstract】 Tinnitus is a complicated and highly heterogeneous ear disease. The assessment and detection of tinnitus has always been a difficult problem in clinical diagnosis and scientific research. Subjective scales, psychoacoustics and objective markers provide standardized multifaceted for the assessment, diagnosis and rehabilitation of tinnitus. Here, we reviewed and summarized the application of tinnitus scale, psychoacoustics and objective markers in clinical evaluation, matching, efficacy monitoring and mechanism research of tinnitus. We also discussed the outlook of the objective and quantitative diagnosis of tinnitus and its treatment markers.

【Key words】 Tinnitus; Assessment; Tinnitus Scale; Psychoacoustics; Objective marker

1 引言

耳鸣是在无外界声源或电刺激情况下,患者耳内或颅内主观感知到的类似蝉鸣、嘶嘶声、风声、哨声等声音,是由听觉系统和中枢神经系统的不同病理变化累积共同作用的结果^[1]。作为耳科三大难题(耳鸣、耳聋和眩晕)之一,耳鸣病因复杂且具有高度异质性^[2],是科学研究和临床上亟待解决的难题^[3-5]。流行病学调查显示^[6,7],成人耳鸣发病率约15%,其中约3.5%和20%的患者患有重度或中度耳鸣。由于大脑皮层中负责听觉的中枢与情感系统和边缘系统之间紧密关联,因此耳鸣常伴有不良情绪,并与之交织成恶性循环^[8],故重度耳鸣患者大多伴有失眠、精神紧张、烦躁、焦虑等不良心理反应或表现,甚至产生自杀倾向等症^[9]。耳鸣不仅极大影响患者的正常生活,也给社会和医疗系统带来巨大的经济负担^[3]。英国国民医疗服务体系每年花费约7.5亿英镑治疗耳鸣,平均每位耳鸣患者花费约717英镑^[10]。

耳鸣分为继发性耳鸣和原发性耳鸣^[11]。继发性耳鸣也被称为客观性耳鸣,占比较少,其耳鸣声客观存在,检查者也能听到这种声音(如颞下颌关节咯吱声,血管畸形导致的血流杂音)。客观性耳鸣通常伴有确定的病因,通过病因治疗,耳鸣症状往往能够得到很好地干预和控制。原发性耳鸣也被称为主观性耳鸣,是一种神经性耳鸣,没有特定的声源,只能被患者主观感觉到^[12]。长期以来,对主观性耳鸣的评估主要依赖患者主诉的耳鸣主观量表、心理声学相关的行为学检查等指标,近年来神经和影像学参数,以及各种结合人工智能的电生理标志物的突破有望为耳鸣客观定量检测提供潜在工具^[7]。

2014年美国《耳鸣临床应用指南》中指出,应将评估耳鸣严重性和疗效的方法进行统一^[13],并推荐确定出能够对耳鸣严重程度进行有效和实用评估的量表。在该指南中提到的耳鸣评估量表主要包括:耳鸣致残量表(tinnitus handicap inventory, THI)^[14,15]、耳鸣功能指数量

基金项目:“十四·五”国家重点研发计划“诊疗装备与生物医用材料”耳鸣评估诊断治疗设备的研发及产业化(2023YFC2416200)

作者单位:1 清华大学生物医学工程学院 北京 100084

2 安徽工程大学电气工程学院 安徽 241000

3 无锡清耳话声科技有限公司 江苏 214000

作者简介:宫琴 博士 副教授,研究方向:听觉系统的检测康复和认知工程

通讯作者:宫琴, E-mail: gongqin@mail.tsinghua.edu.cn

表(tinnitus functional index, TFI)^[16]、耳鸣问卷(tinnitus questionnaire, TQ)^[17,18]、耳鸣反应问卷(tinnitus reaction questionnaire, TRQ)^[19,20]、耳鸣影响问卷(tinnitus effects questionnaire, TEQ)^[13]和耳鸣残疾问卷(tinnitus handicap questionnaire, THQ)^[21]。这些量表用于量化耳鸣的严重程度及其对患者生活质量的影响。

2019年《欧洲多学科耳鸣指南:诊断、评估和治疗》(european multidisciplinary tinnitus guidelines)列举了7个核心耳鸣评估量表及其关键信息^[22],除了包括美国《耳鸣临床应用指南》中指出的THI、TFI、TQ、TRQ和THQ外,还包括耳鸣严重指数量表(tinnitus severity index, TSI)^[22]和耳鸣严重程度量表(tinnitus severity questionnaire, TSQ)^[22]。临床应用中还有3个未列在上述指南中的量表,分别为视觉模拟量表(visual analog scale, VAS)^[23,24]、耳鸣评价量表(tinnitus evaluation questionnaire)TEQ^[25,26](注意与tinnitus effects questionnaire, TEQ区分),以及匹兹堡睡眠质量指数量表(pittsburgh sleep quality index, PSQI)^[27]。

2 常用评估耳鸣的主要量表

2.1 耳鸣致残量表(THI)

THI是目前国际公认的耳鸣评估工具,是被《耳鸣临床应用指南》推荐为首选的量表^[28]。THI量表在通过日常行为表现综合评估耳鸣对患者的注意力、睡眠、情绪、认知以及生活质量等方面的影响。

THI量表包含功能、情感和严重性3个维度共25项问题^[29]。其中功能性用于评估耳鸣对患者日常实际生活能力和社会功能的影响。它聚焦于耳鸣如何干扰患者完成基本生活任务、参与社会活动及维持正常生活节奏的能力等11项问题,反映了耳鸣在现实生活中对患者生活能力和社会功能的“破坏性”。情感维度用于评估耳鸣对患者心理、情绪和健康的负面影响,聚焦于耳鸣引发的情感痛苦和情绪困扰,如负面情绪激发、焦虑与紧张、抑郁、愤怒等9项问题。严重性维度用于评估患者对耳鸣的灾难化认知与失控感的严重程度,5项问题。THI量表总分范围为0~100分。McCombe等^[30]根据THI评分将耳鸣等级划分为5级,1级为轻微对应2~16分;2级为轻度对应18~36分;3级为中度对应38~56分;4级为重度对应58~76分;5级为灾难性对应78~100分。THI评分下降 ≥ 7 分,视为具有临床意义的有效改善(患者可感知的明显好转);THI评分降低 ≥ 20 分,视为显著改善(生活质量明显提高)^[31]。如果THI评分降低 < 7 分,视为无效或轻微改善。在实际应用中,学者不但采用THI量表作为疗效的观察指标^[32],而且进一步分析THI量表与其他结果的相关性或通过THI量表分析影响疗效的相关因素。

2.2 耳鸣功能指数量表(TFI)

TFI是被《耳鸣临床应用指南》提出的用于评估耳鸣严重程度及耳鸣使患者产生消极影响的量表之一^[13],旨在全面评估耳鸣对患者日常生活多维度各方面功能的影响。

TFI量表覆盖8个维度(用8个亚量表表示)共25个条目,每个亚量表评估耳鸣对不同功能领域的影响^[16]。8个维度分别为:侵入性(intrusiveness)、控制感(sense of control)、认知干扰(cognitive interference)、睡眠干扰(sleep disturbance)、听觉困难(auditory difficulties)、放松干扰(relaxation interference)、生活质量影响(quality of life impact)和情绪困扰(emotional distress)。TFI总分范围为0~100分,得分越高表示耳鸣对患者生活质量的影响越大。根据TFI评分将耳鸣等级划分为5级^[16],1~17分为轻微;18~31分为轻度;32~53分为中度;54~72分为严重;73~100分为非常严重。TFI评分下降 ≥ 13 分,视为具有临床意义的有效改善(患者可感知明显好转);TFI评分下降 ≥ 20 分,视为显著改善(生活质量明显提高);TFI评分降低幅度小于13分,视为无效或轻微改善^[31]。在临床研究应用中,有学者采用TFI量表来评估不同耳鸣治疗方法的疗效^[33]。

2.3 耳鸣反应问卷(TRQ)

TRQ是用于评估耳鸣患者心理障碍,量化耳鸣所带来的心理烦恼,重点关注与焦虑相关的病理性情绪模式。涵盖评估耳鸣对患者整体心理和情绪影响的总体痛苦程度(general distress)、衡量耳鸣对患者日常活动(如工作、学习、社交)的干扰程度(interference)、评估耳鸣的响度、频率以及对患者生活质量影响的严重程度(severity)和用于考察患者是否因耳鸣而采取回避或逃避某些活动的行为(avoidance)的4个维度^[34]。

TRQ量表通常包含26个条目,总分范围为0~104分,分数越高,表明耳鸣对患者的心理影响越严重^[19]。其分级标准为:1~20分为轻微影响;21~40分为轻度困扰;41~60分为中度困扰; ≥ 61 分为重度困扰。在研究应用中,TRQ量表用于分析耳鸣与心理健康的相关性^[35],采用治疗前后TRQ总分的变化率来判断疗效^[35],TRQ总分降低 $\geq 50\%$ 或TRQ总分下降 ≥ 20 分为显著;TRQ总分降低为20~49%或总分下降在10~19分为有效;TRQ总分降低 $< 20\%$ 或增加,或总分下降 < 10 分或增加为无效。

2.4 耳鸣残疾问卷(THQ)

THQ是一种用于耳鸣产生主观障碍程度的标准化工具^[21]。THQ通常包含27个问题,涵盖耳鸣对患者的社交、情绪和行为的影响,耳鸣与听力的关系,患者对耳鸣治疗效果的期望这三大方面,总分范围为0~108分。常

见的分级标准是,1~16分为轻微影响;17~36分为轻度影响;37~56分为中度影响;≥57分为重度影响。THQ在临床上用于评估耳鸣的残疾程度;帮助制定个性化治疗方案;监测治疗效果(如治疗前后评分变化),部分学者采用THQ监测耳鸣掩蔽方法的疗效^[36]。治疗前后THQ总分降低≥50%视为显著改善,THQ总分降低20~49%视为有效改善,THQ总分降低<20%且等级无变化视为稳定,THQ总分增加大于20%且等级加重视为恶化^[37]。

2.5 耳鸣评价量表(TEQ)

TEQ主要针对病程≥6个月的慢性原发性耳鸣患者,尤其适用于需要快速评估严重程度及疗效的临床场景^[38]。TEQ共包含6个题目体现6个核心维度,系统评估耳鸣对患者生活的多维影响,围绕耳鸣出现的环境、持续时间、对睡眠的影响、对工作/学习的影响、对情绪的影响及患者对耳鸣严重性的总体感受等6个方面。总分范围为1~21分,根据耳鸣严重程度划分为5个等级,总分越高表示耳鸣对生活的影响越严重。1~6分为I级,表示轻微影响;7~10分为II级,表示轻度影响;11~14分为III级,表示中度影响;15~18分为IV级,表示重度影响;19~21分为V级,表示极重度影响。治疗后TEQ总分降低≥3分(基于最小临床有意义值)或总分降低≥15%(最小有效百分数)视为轻度有效;TEQ总分降低≥6分或总分降低≥30%视为显效,患者生活质量明显提高;TEQ总分降低≥9分视为治愈^[38,39]。

2.6 视觉模拟评分量表(VAS)

VAS是一种患者快速评估自身对耳鸣响度和耳鸣困扰程度的量化主观感受的简易评估工具^[23,24]。VAS量表常见评估维度包括:耳鸣响度(VAS for loudness, VAS_L);评估患者感知的耳鸣声音大小;耳鸣困扰程度(VAS for annoyance, VAS_A);评估耳鸣对患者的生活、情绪的影响。根据VAS评分将耳鸣等级划分为5级,其中:1~2分为轻微,3~4分为轻度,5~6分为中度,7~8分为重度,9~10分为剧烈。VAS在临床应用中可用于对耳鸣响度和困扰程度的快速评估。部分学者采用VAS联合THI分析短期多元复合声对慢性主观性耳鸣患者的治疗效果^[40]。相对原始基线,VAS降低≥30%,被认为反映了患者可感知的有效改善;如果VAS降低≥50%,则被认为显效;如果VAS降低<30%,则视为无效^[41,42]。

2.7 匹兹堡睡眠质量指数量表(PSQI)

在耳鸣临床中,PSQI用于评估耳鸣对个体最近1个月睡眠质量影响程度的量表,包含19个自评项目和5个由床伴或室友评定的项目,涵盖7个与睡眠相关的维度,包括:主观睡眠质量(subjective sleep quality),睡眠潜伏期(sleep latency),睡眠持续时间(sleep duration),睡眠效

率(sleep efficiency),睡眠障碍(sleep disturbances),催眠药物使用情况(use of sleeping medication)以及日间功能障碍(daytime dysfunction)。

PSQI总分范围为0~21分^[43]。分数越高表示睡眠质量越差,0~5分表明睡眠质量良好;6~10分表明睡眠质量一般;11~15分表明睡眠质量较差;16~21分表明睡眠质量极差^[27]。PSQI在耳鸣临床中,应用于耳鸣对群体睡眠质量影响的流行病学调查,筛查因耳鸣引发的失眠或其他睡眠障碍,用于评估耳鸣治疗效果^[44]。以PSQI得分减分率作为患者临床疗效评价指标,PSQI得分减分率=(治疗前PSQI总分-治疗后PSQI总分)/治疗前PSQI总分×100%。临床痊愈:PSQI得分减分率≥85%;显效:50%≤PSQI得分减分率<85%;有效:20%≤PSQI得分减分率<50%;无效:PSQI得分减分率<20%^[45,46]。

2.8 耳鸣评估量表总结

目前,耳鸣主观评估量表在耳鸣研究和临床中得到应用。首先,其为医生提供了标准化评估框架,使不同医疗机构和研究者之间的结果具有可比性,促进耳鸣治疗方案的优化。其次,量表评分可作为疗效监测的敏感指标,为动态调整个性化耳鸣干预措施提供依据。最后,患者可自行记录耳鸣变化,不但实现自我管理,而且提高治疗依从性。因此,目前评估量表成为连接患者主观体验与临床干预的核心工具,在耳鸣的临床评估、治疗监测和研究中扮演至关重要的角色。

尽管耳鸣主观量表已广泛应用,但任何一个指南中均未说明每种量表的纳入标准和临床应用情况,且每种耳鸣量表各有侧重点。现有量表在维度覆盖、适用人群、心理测量学属性及临床实用性等方面存在一定差异,合理选择量表对耳鸣精准评估至关重要。另外,所有主观量表很大程度上受到非耳鸣本身因素的情绪、精神状况、个体因素、外界环境的影响,尤其是目前尚无一个量表能定量、全面地对耳鸣的严重程度和疗效进行诊断评估。陈红胜等^[47]的评价方法为:THI评分下降≥20分以上视为有效;VAS评分下降≥2分以上视为有效。蔡跃新等^[48]将THI评分下降≥7分视为有效。Kutyba等^[49]的评价方法为:THI评分下降≥20分或TFI评分下降≥13分视为有效。Chen等^[50]采用的评价方法为THI分数降低17分及以上,或减少至16分为有效。Boecking等^[31]的评价方法为:THI评分下降≥7分^[51]或TFI评分下降≥13分^[16]视为有效。Henry^[52]的评价方法为TFI下降≥13分视为有效。不同学者通过量表分数前后变化是否达到各自定义的显著性差异进行疗效评估。由于研究者们采用侧重点不同的主观量表,且各自使用量表判断疗效的分数界定值也不统一,因此,并不能基于主观量表对声疗法的疗效进行定量、客

观的评价。

3 耳鸣心理声学检测评估指标

第二大类评估主要通过心理声学(行为学)方法进行耳鸣检测,也称为耳鸣匹配。音调、响度、最小掩蔽级和残余抑制^[53]是国际公认的描述耳鸣特征的心理声学指标,也称为行为学指标。心理声学方法的主要目的是:①确定耳鸣的听觉属性,即对个体来说,其听起来像什么;②确定外界声音对耳鸣的潜在影响,即当外界声音施加到耳鸣患者的耳朵时,外界声音是否会影响耳鸣的听觉属性。

常规耳鸣匹配法(tinnitus matching)主要通过听觉测试,确定患者耳鸣的音调(频率)、响度(强度)等参数,为后续治疗(如声疗法^[13]等)提供依据,是目前临床上用于检测耳鸣特征的一种诊断技术。耳鸣匹配法的第一步是进行耳鸣音调匹配。根据患者主诉,如高音蝉鸣或低音嗡嗡声,选择最接近的测试频率(如4000、1000 Hz),以阈上5~10 dB SL(感觉级)播放纯音,让患者对比耳鸣声与测试音是否相似^[54]。通过大步长增减频率(如1/2倍频程步进)逐步逼近匹配,然后小步长(如1/30倍频程步进)确认匹配,最后找到与耳鸣音调接近的频率,记录匹配结果。部分患者的耳鸣可能是窄带噪声而非纯音,在匹配时需尝试不同声音类型^[55]。若耳鸣为多主诉音调或复杂声音,则需分别匹配主要成分。第二步是耳鸣响度匹配,在已匹配的音调频率点上,从阈上5~10 dB SL(感觉级)的初始强度开始调整强度,逐渐增加或减少音量(1 dB步进),直到患者认为响度与耳鸣一致,最后记录匹配响度。耳鸣响度通常较低(多数人匹配在5~15 dB SL),但主观感知可能受情绪影响,要避免过强声音导致不适或暂时性阈移。第三步是可选的其他参数匹配,若耳鸣类似噪声,需测试窄带噪声的带宽,即带宽匹配,或者测定完全掩蔽耳鸣所需的最小噪声强度掩蔽曲线(Feldmann),即掩蔽曲线。

3.1 耳鸣音调匹配

耳鸣音调是通过呈现纯音或窄带噪声确定的,匹配过程中,要求受试者选择与耳鸣最像的声音频率作为耳鸣的主调,结果以赫兹(Hz)为单位记录。若纯音无法匹配,则给予窄带噪声,其匹配的中心频率即为耳鸣的主调^[56]。耳鸣的音调匹配是对耳鸣进行量化检测的重要环节,也是声治疗中最关键的一个指标。找到耳鸣主调及模式(耳鸣频带宽度)后,声治疗通过给予相应掩蔽或切迹处理的刺激声,促进相关神经的抑制效应和阻断异常同步活动,从而抑制耳鸣的感知^[56]。耳鸣音调匹配越准确,声治疗效果越好^[57]。

为了使耳鸣音调匹配的量化检测趋向于简便自动化,Mahboubi等^[58]探索了常规耳鸣匹配法、单项选择法

和滑动选择法,其中单项选择法是在0.25~12 kHz范围内设置9个点供患者听取辨识,选出其中最接近自己耳鸣的声音。滑动选择法则是在0.02~20 kHz范围内设置一个滑动尺,每次滑动改变25 Hz,患者选择与自己耳鸣最接近的声音,因耗时较长,患者更愿意首选单项选择法,其次才是滑动选择法。但当耳鸣位点高于8 kHz时,滑动选择法更准确。

Henry等^[59,60]采用倍频程法、二元法和主观指导法进行耳鸣音调匹配。耳鸣的倍频程匹配法是耳鸣音调匹配的一种特殊方法,主要用于解决患者在传统纯音匹配过程中可能出现的倍频程混淆问题。由于听觉系统对高频音的感知能力下降,多频成分或噪声样耳鸣导致本身出现谐波失真,患者在选择耳鸣匹配频率时,可能会错误地将耳鸣匹配到实际频率的2倍(高八度)或1/2倍(低八度)频率上。耳鸣倍频程匹配法的第一步是按照常规耳鸣匹配法匹配耳鸣频率,然后向上播放高八度,询问患者是否更像耳鸣,或向下播放低八度声音,询问患者是否更像耳鸣。如果患者认为高八度或低八度声音比原始匹配频率更接近耳鸣,则修正匹配结果。

二元法音调匹配首先进行单耳初步匹配,然后通过双侧耳匹配和双耳同步刺激的双耳匹配验证,以防止单耳匹配可能忽略双侧耳鸣的交互作用或中枢听觉处理异常,使得匹配结果更符合实际听觉场景,提高复杂病例采用声治疗的有效性。

主观指导法音调匹配是通过患者的主观反馈、由听力师或耳科医生执行,最后确定耳鸣的主频(音调)和响度的测试方法。第一步,首先根据患者描述选择频率起点,若患者无法描述频率起点,采用扫频法从1 kHz→2 kHz→4 kHz→8 kHz播放1~2秒短纯音,让患者选择与自身耳鸣最接近的频率。若没有找到最接近的频率,则按照相同方法,从1 kHz向低频方向进行扫频,让患者选择最接近的频率。然后选择二分法,以2 kHz为分界线,步进规则按照高频区步长1/6倍频程、低频区步长1/3倍频程进行精细匹配。对于非纯音的耳鸣患者,选择窄带噪声(narrowband noise, NBN)进行匹配,其中心频率等于匹配的纯音频率,带宽则选择更接近耳鸣声学特征的带宽模式。第二步进行响度匹配,在匹配的频率下,从阈上10 dB(SL)开始,每次增减5 dB~1 dB,直至患者认为响度与耳鸣一致。第三步针对双侧耳鸣进行双耳验证,分别匹配各耳的耳鸣音调后,尝试双耳同时播放,观察是否需要调整平衡。

Henry等^[59,60]采用倍频程法、二元法和主观指导法进行耳鸣音调匹配可精确匹配到1/3倍频程,结果表明二元法匹配结果可靠性更大,用一个具体范围表示耳鸣音调

匹配的结果可能比确定一个具体耳鸣位点更恰当。

3.2 耳鸣响度匹配测试

耳鸣的响度大小是耳鸣的重要特征之一,确定耳鸣音调后,通过询问患者对所给刺激声是否接近于耳鸣声响度来确定的,即耳鸣响度为目标测试音声压级与耳鸣听阈的声压级的差值,可作为耳鸣严重程度和评估疗效的指标。常见的耳鸣响度匹配方法有二种,第一种是临床常用的耳鸣阈上响度匹配,即感觉级测试。测试时需反复调节测试音,使患者找出与耳鸣声相当的测试声强度,此强度数值与耳鸣频率处纯音听阈之差即为耳鸣响度^[8]也被称之为耳鸣阈上响度。另一种数字评定量表类似于视觉模拟评分法(VAS_L),着重于反映耳鸣对患者的影响,让患者在0~10分给自己的耳鸣响度评分。

3.3 最小掩蔽级(minimum masking level, MML)

在耳鸣音调下,所给刺激声刚好掩蔽患者耳鸣声的最小掩蔽声强度级,即最小掩蔽级MML。通过最小掩蔽级测试可以得到掩蔽曲线,耳鸣掩蔽曲线是绘制不同频率声音掩蔽耳鸣所需的最小强度,可以反映耳鸣的声学特征和听觉通路异常。根据Feldmann的研究^[61],掩蔽曲线可分为5种类型,即汇聚型(图1)、背离型(图2)、重叠型(图3)、分离型(图4)和抵抗型(图5)。汇聚型(convergent type)的掩蔽曲线在耳鸣频率附近急剧下降,形成“V”形或“U”形凹陷,耳鸣频率处MML可比相邻频率低20~40 dB HL,仅需在耳鸣频率附近较小的强度即可掩蔽。这种掩蔽曲线提示耳鸣可能源于毛细胞功能障

碍或突触病变的外周听觉系统损伤,常见于噪声性聋、突发性聋伴耳鸣。背离型(divergent type)掩蔽曲线在耳鸣频率附近显著升高,形成“Λ”形峰值,耳鸣频率处需更高强度才能掩蔽,其他频率掩蔽声强较低。这种掩蔽曲线可能反映中枢听觉通路抑制功能丧失(如听觉皮层异常兴奋),常见于慢性耳鸣或中枢性耳鸣患者。重叠型(congruent type)掩蔽曲线与纯音听阈曲线平行,两者间距大致恒定(几乎重叠或两曲线差值≤10 dB),掩蔽声强随频率变化趋势与听力损失一致。这种掩蔽曲线可能提示耳鸣与听力损失共同源于外周病变,掩蔽机制可能依赖残余听力。分离型(distance type)掩蔽曲线与听阈曲线形态不一致,但两者保持固定间隔(如全程相差30 dB)。掩蔽声强不随耳鸣频率特异性变化。这种掩蔽曲线可能反映中枢增益异常,如听觉系统整体敏感性升高。常见于长期耳鸣伴听觉过敏患者。抵抗型(persistent type)掩蔽曲线的任何频率和强度的掩蔽声均无法完全掩蔽耳鸣,仅能部分抑制,曲线呈平坦或杂乱无规律,提示可能如丘脑或皮层重组导致顽固性高度中枢化耳鸣。

3.4 残余抑制(residual inhibition, RI)

通过外部提供适合的频率、强度和时间的掩蔽声刺激,耳鸣可能被抑制而减轻或消失,这种现象称为残余抑制^[62]。将MML增加10 dB呈现给耳鸣患者若干时间,停止给声后,询问患者耳鸣的改变情况。耳鸣声减小则实验呈阳性,反之则为阴性^[63]。残余抑制通过给予受影响区域的阈上声音刺激,短暂消除中枢听觉系统兴奋-抑制

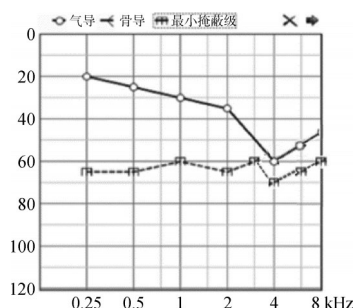


图1 Feldmann曲线(最小掩蔽曲线) I型(汇聚型)

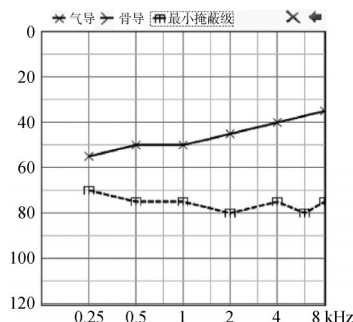


图2 Feldmann曲线(最小掩蔽曲线) II型(背离型)

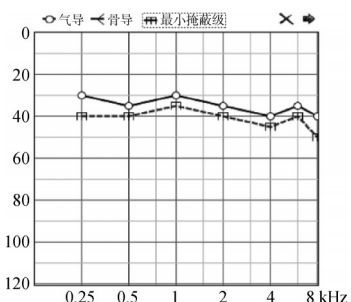


图3 Feldmann曲线(最小掩蔽曲线) III型(重叠型)

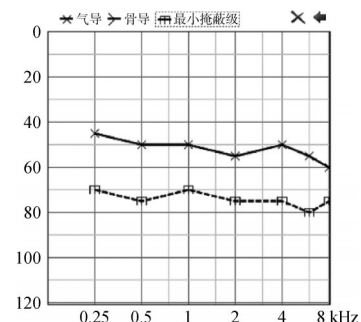


图4 Feldmann曲线(最小掩蔽曲线) IV型(分离型)

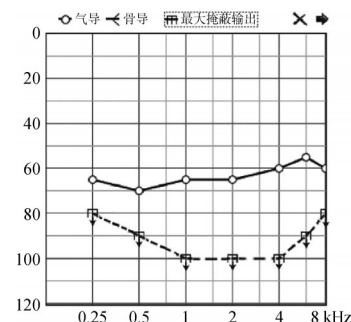


图5 Feldmann曲线(最小掩蔽曲线) V型(抵抗型)

的不平衡,恢复丘脑皮层、侧支突触的功能^[62]。不同患者的残余抑制时间不同,有的可长达数十分甚至几小时,有的短至数秒,有的无残余抑制现象,也有个别患者感觉耳鸣响度增加。RI 实验呈阳性且抑制耳鸣大于 30 秒的患者更适合使用声疗法^[64]。

3.5 耳鸣心理声学检测评估总结

耳鸣的心理声学检测是临床常用的方法,由于耳鸣的复杂性和结果的多变性,选择合适的检测方法和获得准确的检测结果为临床诊疗提供重要参考依据。目前一些耳鸣检测方法的可靠性和结果的准确性仍是临床需要面对的问题,依据行为学指标对疗效的判断标准暂不统一,这可能是因为行为学指标仅依赖于患者自身对耳鸣响度的感觉,而主观感知耳鸣响度的评级受到情绪和认知等因素的影响^[23]。许轶等^[65]采用的评价方法为:自觉耳鸣声或主频耳鸣声消失视为痊愈,耳鸣声或主频耳鸣声强度减弱 > 20 dB 视为显效,减弱 10 ~ 20 dB 视为有效,耳鸣声强度减弱不足 10 dB 甚至没有减轻,反而加重视为无效。但大多数患者耳鸣本身的阈上响度在 5-15dB 之间,因此以主频耳鸣声强度减弱不足 10 dB 视为无效的评价方法有待商榷和大数据量的临床验证。杨毓梅^[66]等采用的评价方法为:耳鸣降至 0dB 为治愈;耳鸣较治疗前降低 20 ~ 30dB 为显效;耳鸣较治疗前降低 5 ~ 15dB 为减轻;耳鸣同治疗前为无效。与主观量表的评价方法类似。基于行为学指标对耳鸣疗效的判断标准并不统一,无法基于行为学指标对声疗法的疗效进行客观量化的评价。目前还没有研究匹配行为学测量值相对应的耳鸣严重程度。表 1 从目的、方法、临床适用范围和不足对耳鸣心理声学检测评估方法进行了对比。

4 耳鸣客观定量评估的潜在指标

除主观量表和心理声学指标外,客观定量检测是耳鸣评估的第三类方法。耳鸣的客观定量评估是临床研究和精准治疗的关键,目前还没有明确有效的客观定量耳

鸣评估方法,关于如何量化耳鸣的严重程度,尚无共识^[67,68]。但是目前神经和影像技术广泛被应用于监测大脑活动,帮助诊断脑部神经等疾病并判断治疗效果,为耳鸣的客观定量评估提供了可能性。

4.1 耳鸣神经电生理参数

脑电信号反映了大脑内神经网络的同步激活模式,这些信号是由神经元群体间的内在通信及其相互作用所调制。基于静息态自发脑电的研究发现,耳鸣患者睁眼脑电图(electroencephalogram, EEG)相对功率^[69]显示 α 和 β 波活动较低,静息态闭眼 EEG 相对功率呈现出 α 活动和 γ 活动较低(图 6(a))。耳鸣患者静息态绝对功率^[70]频谱能量在 $\delta \sim \gamma$ 频带上高于正常被试(图 6(b))。基于绝对功率^[71]反映的耳鸣困扰与右侧额叶区的 β 波和 γ 波有关,与颞顶叶的 δ 波有关。

基于诱发脑电的研究发现,与非耳鸣患者相比,耳鸣患者 N1 振幅降低^[72]。耳鸣患者的 δ 、 θ 和 β 波段相对功率

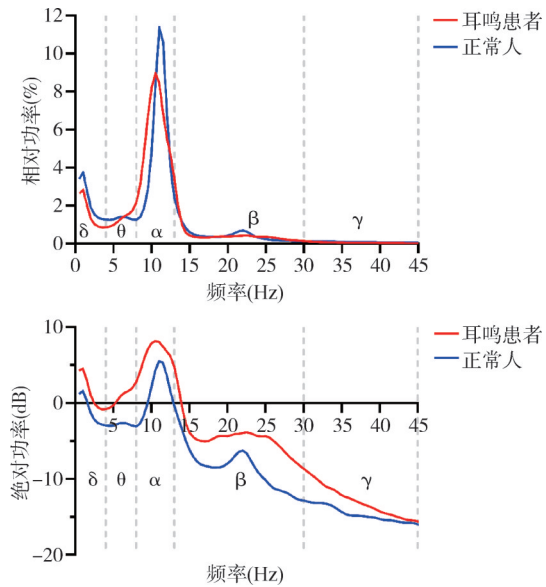


图 6 耳鸣患者和正常人被试组 EEG 功率对比, (a)相对功率;(b)绝对功率

表 1 耳鸣心理声学检测评估方法对比

检测方法	目的	方法	适用范围	不足
耳鸣音调匹配	确定患者感知到耳鸣声音的频率(音调)	倍频程法、二元法、主观指导法	耳鸣量化检测的重要环节,为声音治疗提供频率参考	部分患者(如宽频噪声耳鸣)难以匹配;结果受听力损失影响
耳鸣响度匹配	测量患者感知到的耳鸣响度(通常以分贝为单位)	耳鸣阈上响度匹配,即感觉级测试;数字评定量表法	量化耳鸣的主观强度,评估严重程度及疗效	响度与痛苦程度不一定相关,可能受患者主观判断影响,取决于情绪和认知因素
最小掩蔽级	确定完全掩蔽耳鸣所需的最小外部声音强度,通常用白噪声或窄带噪声	最小掩蔽级测试(5种典型掩蔽曲线)	反映耳鸣声学特征和听觉通路异常	部分患者无法被掩蔽,结果可能受听力损失类型影响
残余抑制 RI 时间	评估短暂暴露于掩蔽噪声后,耳鸣响度降低或消失的持续时间	残余抑制实验	阳性结果可能预示声音治疗效果较好,无抑制可能提示中枢性耳鸣机制	部分患者无残余抑制,结果可能因测试条件(如噪声参数)而异

更高,耳鸣响度与 δ 波活动增强有关^[73]。基于相对功率^[74]反映的高度痛苦的耳鸣患者表现出更高层次的 θ 波段活动;在耳鸣耳对侧额电极位置的 δ 和 γ 波中观察到相对较高的相关性。耳鸣患者的N1和P2波潜伏期更短^[69],左颞下回事件相关电位(event-related potential, ERP)减少。耳鸣组P300峰值幅度显著低于正常组^[75]。

由于主观性耳鸣是听觉系统中神经同步性和自发放电率增加的结果,因此,脑电图分析有可能成为监测耳鸣声治疗效果的客观方法。耳鸣的脑电生物标志物,如 γ/α 频段功率比、失匹配负波(mismatch negativity, MMN)振幅、P300成分、长潜伏期听觉诱发电位(auditory long latency response, ALR)、听觉稳态反应(Auditory steady-state response, ASSR)、 θ - γ 相位-振幅耦合参数被提出有望成为反映耳鸣特征的生物标志物。

4.1.1 γ/α 频段功率比(frontal γ/α ratio) 耳鸣患者静息状态下,额叶和颞叶的 γ 波段(30~80 Hz)功率显著升高,而 α 波段(8~12 Hz)功率降低,导致其额叶 γ/α 比值显著高于健康对照组^[76](图7),该比值在注意力转移任务中的动态变化,可作为评估耳鸣严重程度的潜在指标。

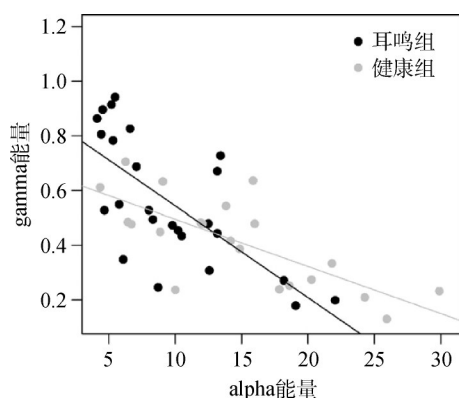


图7 耳鸣受试者与健康对照组 γ/α

这一现象可通过同步化抑制丧失模型(synchrony loss and inhibition model, SLIM)得到解释,耳鸣患者的听觉皮层抑制性中间神经元(如 γ -氨基丁酸(gamma-aminobutyric acid, GABA)能神经元)功能下降,导致 γ 频段活动增强和 α 频段活动减弱,形成异常的神经同步^[77]。注意力-耳鸣交互模型(attention-tinnitus interaction)发现^[78],耳鸣患者的额叶 γ/α 比值在注意力转移任务中显著降低,表明注意力调控可能通过抑制异常神经振荡,缓解耳鸣感知。

4.1.2 失匹配负波(MMN)振幅 MMN是大脑对偏差刺激的自动反应(潜伏期150~250 ms),耳鸣患者在接近耳鸣频率的声刺激下,MMN振幅显著降低^[79]。提示听觉皮层对特定频率的差异检测能力受损,这可能与神经可

塑性异常相关,有可能作为耳鸣频率特异性神经编码异常的指标。

4.1.3 P300成分改变 P300是认知加工相关的晚期成分(潜伏期300 ms左右),耳鸣患者表现为潜伏期延长^[80](反映注意力资源分配障碍),地形图分布异常(额叶活动增强,颞叶活动减弱)^[81]。这些现象与耳鸣导致的注意力捕获现象一致。P300参数与耳鸣问卷(如THI)评分相关,有可能用于疗效评估^[82]。

4.1.4 长潜伏期听觉诱发电位(ALR) 在耳鸣患者中,ALR(N1-P2复合波,潜伏期100~200 ms)的P2幅值降低(反映听觉皮层整合功能异常)。提示神经同步性下降的潜伏期变异增大,这有可能是源于丘脑-皮层环路信息传递效率降低^[69]。

4.1.5 听觉稳态反应(ASSR) 部分耳鸣患者在耳鸣匹配频率附近的ASSR幅值显著降低,可能反映耳蜗或听觉脑干通路的功能受损^[83]。但部分患者ASSR幅值反而增强(尤其在低频),可能反映中枢听觉系统(如脑干、丘脑)的代偿性过度兴奋^[84]。

高频特异性异常:噪声性耳鸣患者常在4 kHz及以上频率的ASSR幅值下降更明显,与外周毛细胞损伤相关^[85]。脑干传导延迟:耳鸣患者的ASSR波潜伏期(如40 Hz ASSR)可能延长^[86],提示听觉脑干通路(如耳蜗核、下丘)的神经传导效率下降。

4.1.6 θ - γ 相位-振幅耦合(跨频段振荡) 耳鸣患者表现出 θ (4~7 Hz)与 γ 波段相位-振幅耦合增强,尤其在颞叶和扣带回。可能反映记忆-情绪环路对耳鸣信号的过度整合(如海马-杏仁核-听觉皮层通路)^[87]。

4.2 耳鸣的影像学参数

耳鸣是一种复杂的听觉感知障碍,其神经机制涉及外周听觉系统(如耳蜗)和中枢神经系统(如听觉皮层、非听觉脑区)的异常活动^[88]。影像学参数可能反映耳鸣潜在的生物标志物及相关神经机制。

4.2.1 脑磁图(magnetoencephalography, MEG) N1m振幅出现增强现象 耳鸣组较对照组N1m振幅显著增大($P<0.01$),与耳鸣持续时间呈正相关($r=0.42$),可能反映了中枢增益上调^[89]。

4.2.2 功能性MRI(functional magnetic resonance imaging, f-MRI) 耳鸣患者的初级听觉皮层(A1)和次级听觉皮层(A2)在静息状态下异常活跃,可能与中枢增益机制相关^[90]。耳鸣患者的前扣带回(anterior cingulate cortex, ACC)功能异常,左侧前扣带回的低频振幅(amplitude of low frequency fluctuation, ALFF)值与耳鸣严重程度(THI评分)呈正相关,可能成为评估耳鸣严重程度的神经影像学标志物^[91]。

4.2.3 正电子发射型计算机断层显像(positron emission computed tomography, PET)代谢成像 高代谢状态:PET显示耳鸣患者听觉皮层和边缘系统(如杏仁核)葡萄糖代谢率升高,提示神经元过度兴奋^[92]。GABA神经元的抑制功能下降,使用Flumazenil PET可发现耳鸣患者GABA受体分布异常,表明抑制性神经递质功能受损^[93]。

耳鸣的脑磁图(MEG)、f-MRI和PET代谢成像等影像学生物标志物有可能揭示耳鸣所涉及的听觉系统、边缘系统和认知网络的复杂神经交互作用。

4.3 耳鸣听觉电生理参数

4.3.1 耳鸣频谱 通过窄带噪声匹配主调频率,70%的患者匹配频率与最大听力损失区一致^[57]。Heijneman等^[94]对耳鸣频谱与听力图的关系研究认为,耳鸣频谱能提供听力图不能提供的信息,且能区分不同类型的耳鸣,有助于患者选择不同的治疗方式。

4.3.2 畸变产物耳声发射(distortion product otoacoustic emission, DPOAE)频谱 耳鸣的主调常与听阈最高处或正常听阈变为异常听阈的频率相一致,应用DPOAE的敏感性和频率特异性对耳蜗功能进行检测^[95],同时对耳鸣匹配结果进行评估。听力正常的耳鸣患者DPOAE振幅升高,表明耳鸣可能是由于传出神经纤维活动减少使外毛细胞的能动性增加而产生^[96]。

4.3.3 听性脑干反应ABR的I波振幅 听性脑干反应ABR的I波振幅可用于评估耳鸣,监测耳鸣的变化,判断耳鸣检测是否准确。Bramhall等^[97]在研究听性脑干反应(ABR)与耳鸣的关系中发现,ABR中I波振幅与耳鸣相关,其均值降低。

尽管对耳鸣进行客观定量评估的技术方法和标准尚未建立,但各国学者基于神经电生理、影像学 and 听觉电生理等研究工具,从不同角度探索了耳鸣客观定量的评估方法和潜在的评估参数。表2从技术/参数、生物标志物、临床应用和缺陷不足等方面,对比了耳鸣客观定量的评估方法。

5 总结

耳鸣评估是一个多维度、系统化的过程。由于耳鸣病因复杂,涉及耳蜗病变、中枢神经重塑及心理社会因素,导致耳鸣评估需要多维度多模态的整合。

尽管耳鸣主观量表已广泛应用于临床,但主观量表很大程度上受非耳鸣本身因素(如:情绪、精神状况、个体因素、外界环境等)的影响。耳鸣应用指南中也未说明每种量表的纳入标准和全面的临床应用情况,且每种耳鸣量表各有侧重点。因此,目前尚无一个量表能客观、定量地对耳鸣的严重程度和疗效进行诊断评估。

表2 耳鸣客观定量评估方法对比

检测方法	技术/参数	生物标志物	临床应用	不足
神经电生理参数	静息态自发脑电;诱发脑电;事件相关电位	γ/α 频段功率比、失匹配负波(MMN)振幅、P300成分、长潜伏期听觉诱发电位(ALR)、ASSR幅值、 θ - γ 相位-振幅耦合参数	监测耳鸣,声治疗效果的客观方法	设备普及率低; EEG/MEG价格贵,维护费用高,患者可及性低。信号采集标准化:数据集中参数不统一,噪声干扰大,肌电、眼动伪迹难以完全消除,尤其耳鸣患者可能伴随焦虑(增加肌电活动)且静息态和任务态结果差异大。
		影像学生物标志物	脑磁图(MEG)、f-MRI和PET代谢成像	评估耳鸣严重程度和疗效的潜在生物标志物及相关神经机制
听觉电生理参数	耳鸣频谱; DPOAE频谱; 听性脑干反应	耳鸣频谱; DPOAE振幅; ABR的I波振幅	能区分不同类型的耳鸣;评估监测耳鸣的变化	分析工具存在差异,缺乏标准化临床流程。

依赖于患者自身对耳鸣音调、响度和残余抑制等主观感知的行为学评价指标也受到情绪和认知因素的影响,且基于行为学指标对耳鸣严重程度和疗效的判断标准并不统一,同时也缺乏耳鸣行为学指标与耳鸣量表相关性、一致性的深入研究。因此,无法完全基于行为学指标对耳鸣进行定量、客观评价。

客观定量评估是耳鸣临床研究和精准治疗的关键,但缺乏明确、有效的评估方法,且客观标志物(如EEG/MEG)也尚未形成标准化临床流程,尤其是客观标志物与耳鸣量表、行为学参数指标之间缺乏定量、客观的相关性标准和应用指南。因此,有研究者结合两类或三类多模态评价指标,对耳鸣严重程度和疗效进行综合评估。Therdphaothai^[98]、Shim^[99]、Haab^[100]等采用主观量表结合行为学参数的评价方法,Okamoto^[66]、Teismann^[101]、Stein^[102]、陈泓钰^[103]等结合了主观量表与脑电的客观评价方法。未来将整合听力学、电生理学、影像学、心理学及中医辨证等多学科、多模态诊疗技术,建立精准的病因诊断体系,并制定个性化治疗方案。特别在发病早期(0~3个月急性期)开展全面评估与干预,以显著提升临床疗效。

参考文献

- [1] Langguth B, Ridder DD, Schlee W, et al. Tinnitus: Clinical Insights in Its Pathophysiology-A Perspective[J]. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology: JARO*, 2024, 25(3):249-258.
- [2] Baguley D, McFerran D, Hall D. Tinnitus[J]. *The Lancet*, 2013, 382(9904):1600-1607.
- [3] McFerran J D, Stockdale D, Holme R, et al. Why Is There No Cure for Tinnitus?[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2019, 13(6):802-815.
- [4] Watts EJ, Fackrell K, Smith S, et al. Why Is Tinnitus a Problem? A Qualitative Analysis of Problems Reported by Tinnitus Patients[J]. *Trends in Hearing*, 2018, 22: 2331216518812250.
- [5] Kleinjung T, Langguth B. Avenue for Future Tinnitus Treatments[J]. *Otolaryngologic Clinics of North America*, 2020, 53(4):667-683.
- [6] Negrila-Mezei A, Enache R, Sarafoleanu C. Tinnitus in elderly population: clinic correlations and impact upon QoL[J]. *Journal of Medicine and Life*, 2011, 4(4):412-416.
- [7] Langguth B, Kreuzer MP, Kleinjung T, et al. Tinnitus: causes and clinical management[J]. *The Lancet. Neurology*, 2013, 12(9): 920-930.
- [8] 谭君颖, 张剑宁, 李明. 耳鸣心理声学特征与一般环境声掩蔽耳鸣效果的关系[J]. *听力学及言语疾病杂志*, 2015, 23(1):69-72.
- [9] Bhatt JM, Bhattacharyya N, Lin HW. Relationships between tinnitus and the prevalence of anxiety and depression[J]. *The Laryngoscope*, 2017, 127(2):466-469.
- [10] Stockdale D, McFerran D, Brazier P, et al. An economic evaluation of the healthcare cost of tinnitus management in the UK[J]. *BMC health services research*, 2017, 17(1):577-586.
- [11] Linnett S. The epidemiology of tinnitus[J]. *Audiological Medicine*, 2004, 2(1):8-17.
- [12] Coles ARR. Epidemiology of tinnitus: (1) prevalence[J]. *The Journal of Laryngology, Rhinology, and Otolaryngology*, 2011, 98(S9):7-15.
- [13] Tunkel DE, Bauer CA, Sun GH, et al. Clinical practice guideline: tinnitus[J]. *Otolaryngology--Head and Neck Surgery*, 2014, 151(S2): S1-S40.
- [14] Newman CW, Jacobson GP, Spitzer JB. Development of the Tinnitus Handicap Inventory[J]. *Archives of Otolaryngology--Head & Neck Surgery*, 1996, 122(2):143-148.
- [15] Aksoy S, Firat Y, Alpar R. The Tinnitus Handicap Inventory: a study of validity and reliability[J]. *The International Tinnitus Journal*, 2007, 13(2):94-98.
- [16] Meikle MB, Henry JA, Griest SE, et al. The tinnitus functional index: development of a new clinical measure for chronic, intrusive tinnitus [J]. *Ear and Hearing*, 2012, 33(2):153-176.
- [17] Hallam RS, Jakes SC, Hinchcliffe R. Cognitive variables in tinnitus annoyance[J]. *The British Journal of Clinical Psychology*, 1988, 27(3): 213-222.
- [18] Kam ACS, Cheung APP, Chan PYB, et al. Psychometric properties of a Chinese (Cantonese) version of the Tinnitus Questionnaire[J]. *International Journal of Audiology*, 2009, 48(8):568-575.
- [19] Wilson PH, Henry J, Bowen M, et al. Tinnitus reaction questionnaire: psychometric properties of a measure of distress associated with tinnitus[J]. *Journal of Speech and Hearing Research*, 1991, 34(1): 197-201.
- [20] Tyler RS, Baker LJ. Difficulties experienced by tinnitus sufferers[J]. *The Journal of Speech and Hearing Disorders*, 1983, 48(2): 150-154.
- [21] Kuk FK, Tyler RS, Russell D, et al. The psychometric properties of a tinnitus handicap questionnaire[J]. *Ear and Hearing*, 1990, 11(6): 434-445.
- [22] Cima RFF, Mazurek B, Haider H, et al. A multidisciplinary European guideline for tinnitus: diagnostics, assessment, and treatment[J]. *HNO*, 2019, 67(Suppl 1):10-42.
- [23] Adamchic I, Langguth B, Hauptmann C, et al. Psychometric evaluation of visual analog scale for the assessment of chronic tinnitus[J]. *American Journal of Audiology*, 2012, 21(2): 215-225.
- [24] Raj-koziak D, Gos E, Świerniak W, et al. Relationship Between Tinnitus Loudness Measure by Visual Analogue Scale and Psychoacoustic Matching of Tinnitus Loudness[J]. *Otology & Neurotology*, 2019, 40(40):16-21.
- [25] 刘蓬, 李明. 对耳鸣疗效评价的思考[J]. *中华耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2008, 43(9):710-713.
- [26] 刘蓬, 龚慧涵, 阮紫娟. 耳鸣严重程度评估方法的研究[J]. *中华耳科学杂志*, 2009, 7(3):186-190.
- [27] Buysse DJ, Reynolds CF, Monk TH, et al. The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research [J]. *Psychiatry Research*, 1989, 28(2): 193-213.
- [28] Baguley D, Andersson G, McFerran D, et al. Tinnitus: A Multidisciplinary Approach[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2013. 1-336.
- [29] Newman CW, Sandridge SA, Jacobson GP. Psychometric adequacy of the Tinnitus Handicap Inventory (THI) for evaluating treatment outcome[J]. *Journal of the American Academy of Audiology*, 1998, 9(2):153-160.
- [30] McCombe A, Baguley D, Coles R, et al. Guidelines for the grading of tinnitus severity: the results of a working group commissioned by the British Association of Otolaryngologists, Head and Neck Surgeons, 1999[J]. *Clinical Otolaryngology and Allied Sciences*, 2001, 26(5): 388-393.
- [31] Boecking B, Brueggemann P, Kleinjung T, et al. All for One and One for All? - Examining Convergent Validity and Responsiveness of the German Versions of the Tinnitus Questionnaire (TQ), Tinnitus Handicap Inventory (THI), and Tinnitus Functional Index (TFI) [J]. *Frontiers in Psychology*, 2021, 12(5): 37-47.
- [32] 梁才全, 查旭东, 王天宇, 等. 声掩蔽疗法对舰艇官兵耳鸣患者的效果评价[J]. *海军医学杂志*, 2023, 44(3):222-226.
- [33] Eça FT, Rosa C, Santos JM, et al. Assessing the efficacy of a novel bone conduction tinnitus suppression device: a 30-day pilot study on clinical and audiological outcomes[J]. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 2025, (prepublish):1-6.
- [34] McNeill C, Távora-vieira D, Alnafjan F, et al. Tinnitus pitch, masking, and the effectiveness of hearing aids for tinnitus therapy[J]. *International Journal of Audiology*, 2012, 51(12):914-919.
- [35] Wilson P H, Henry J, Bowen M, et al. Tinnitus reaction questionnaire: psychometric properties of a measure of distress associated with tinnitus[J]. *Speech Hear Res*, 1991, 34(1):197-201.
- [36] Tyler Richard S, Christina S, Haihong J, et al. Tinnitus Activities Treatment with Total and Partial Masking[J]. *Journal of the American*

- Academy of Audiology, 2021, 32(8):501-509.
- [37] Jun HJ, Yoo IW, Hwang SJ, et al. Validation of a Korean Version of the Tinnitus Handicap Questionnaire[J]. *Clinical and Experimental Otorhinolaryngology*, 2015, 8(3): 198-201.
- [38] 刘蓬. 耳鸣评价量表的研发思路[J]. *中国听力语言康复科学杂志*, 2018, 16(5):330-333.
- [39] 刘蓬, 郑芸. 耳鸣评价量表的临床应用[J]. *中国听力语言康复科学杂志*, 2018, 16(6):411-415.
- [40] 潘庆春, 李蓓, 冯焱源. 短期多元整合声对慢性主观性耳鸣患者的疗效及对大脑皮层神经活动的影响[J]. *中华耳科学杂志*, 2025, 23(2): 228-233.
- [41] Langguth B, Goodey R, Azevedo A, et al. Consensus for tinnitus patient assessment and treatment outcome measurement: Tinnitus Research Initiative meeting, Regensburg, July 2006[J]. *Progress in Brain Research*, 2007, 166(10):525-536.
- [42] Langguth B, Kleinjung T, Schlee W, et al. Tinnitus Guidelines and Their Evidence Base[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2023, 12(9): 3087-3112.
- [43] 王香香, 熊海霞, 张培丽, 等. 听力正常者耳鸣严重程度影响因素初步分析[J]. *听力学及言语疾病杂志*, 2025, 33(2):140-144.
- [44] 陈红, 张小莉, 沈晓辉, 等. 声刺激联合认知行为治疗慢性耳鸣的初步探讨[J]. *中国耳鼻咽喉颅底外科杂志*, 2024, 30(2):77-84.
- [45] 田亚云, 李刚, 王铭维, 等. 脉冲电磁场治疗原发性失眠临床疗效分析[J]. *中国现代神经疾病杂志*, 2023, 23(8):709-715.
- [46] 徐鸥, 齐培, 祝绮莎. 认知行为疗法联合虚拟现实技术治疗青少年失眠症患者的效果研究[J]. *中国全科医学*, 2022, 25(11):1378-1382.
- [47] 陈红胜, 陆小净, 梅凌云, 等. 早期噪声性听力损失伴耳鸣患者的掩蔽效果分析[J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2015, 29(1):75-78.
- [48] 蔡跃新, 孙映凤, 杨海弟, 等. 个性化切迹音乐治疗主观性耳鸣的初步观察[J]. *中华耳科学杂志*, 2017, 15(4):465-470.
- [49] Kutyba J, Gos E, Jędrzejczak WW, et al. Effectiveness of tinnitus therapy using a mobile application[J/OL]. *European archives of otorhino-laryngology*, 2021, 279(3):1257-1267.
- [50] Chen Q, Lv H, Wang Z, et al. Pretreatment intranetwork connectivity can predict the outcomes in idiopathic tinnitus patients treated with sound therapy[J]. *Human Brain Mapping*, 2021, 42(14): 4762-4776.
- [51] Zeman F, Koller M, Figueiredo R, et al. Tinnitus handicap inventory for evaluating treatment effects: which changes are clinically relevant? [J/OL]. *Otolaryngology--Head and Neck Surgery*, 2011, 145(2): 282-287.
- [52] Henry JA, Griest S, Thielman E, et al. Tinnitus Functional Index: Development, validation, outcomes research, and clinical application [J]. *Hearing Research*, 2016, 334(6):58-64.
- [53] Henry JA, Zaugg TL, Schechter MA. Clinical guide for audiologic tinnitus management II: Treatment[J]. *American Journal of Audiology*, 2005, 14(1):49-70.
- [54] Tyler RS, Conrad-arnes D. The determination of tinnitus loudness considering the effects of recruitment[J]. *Journal of Speech and Hearing Research*, 1983, 26(1):59-72.
- [55] Norena A, Micheyl C, Chéry-croze S, et al. Psychoacoustic characterization of the tinnitus spectrum: implications for the underlying mechanisms of tinnitus[J]. *Audiology & Neuro-Otology*, 2002, 7(6):358-369.
- [56] Roberts LE, Moffat G, Bosnyak DJ. Residual inhibition functions in relation to tinnitus spectra and auditory threshold shift[J/OL]. *Acta Oto-Laryngologica. Supplementum*, 2006, 12(556):27-33.
- [57] 田如如, 刁明芳, 田芳洁, 等. 定制音乐对慢性特发性耳鸣疗效的初步分析[J]. *中华耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2017, 52(5):343-348.
- [58] Mahboubi H, Ziai K, Brunworth J, et al. Accuracy of tinnitus pitch matching using a web-based protocol[J/OL]. *The Annals of Otolology, Rhinology, and Laryngology*, 2012, 121(10):671-674.
- [59] Henry JA, Flick CL, Gilbert A, et al. Comparison of two computer-automated procedures for tinnitus pitch matching[J]. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 2001, 38(5):557-566.
- [60] Henry JA, Flick CL, Gilbert A, et al. Comparison of manual and computer-automated procedures for tinnitus pitch-matching[J]. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 2004, 41(2):121-138.
- [61] Feldmann H. Homolateral and contralateral masking of tinnitus by noise-bands and by pure tones[J]. *Audiology*, 1971, 10(3):138-144.
- [62] Roberts LE. Residual inhibition[J]. *Progress in Brain Research*, 2007, 166(10):487-495.
- [63] Roberts LE, Moffat G, Baumann M, et al. Residual inhibition functions overlap tinnitus spectra and the region of auditory threshold shift[J/OL]. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology: JARO*, 2008, 9(4):417-435.
- [64] Fournier P, Cuvillier AF, Gallego S, et al. A New Method for Assessing Masking and Residual Inhibition of Tinnitus[J]. *Trends in Hearing*, 2018, 22(2): 1-19.
- [65] 许轶, 周慧芳, 杨东. 耳鸣掩蔽曲线与掩蔽治疗效果关系的临床观察 [J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2009, 23(13):588-590.
- [66] 杨毓梅, 彭玉成, 叶青, 等. 耳鸣测定法评价耳鸣疗效[J]. *临床耳鼻咽喉科杂志*, 2001, 15(07):320-321.
- [67] Kamalski DM, Hoekstra CE, Van Zanten BG, et al. Measuring disease-specific health-related quality of life to evaluate treatment outcomes in tinnitus patients: a systematic review[J]. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 2010, 143(2):181-185.
- [68] Hoare DJ, Gander PE, Collins L, et al. Management of tinnitus in English NHS audiology departments: an evaluation of current practice [J]. *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, 2012, 18(2):326-334.
- [69] Houdayer E, Teggi R, Velikova S, et al. Involvement of cortico-subcortical circuits in normoacoustic chronic tinnitus: A source localization EEG study[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2015, 126(12): 2356-2365.
- [70] 黄海云, 蔡跃新, 冯学技, 等. 基于脑电信号的耳鸣患者静息态频谱图及注意力研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2021, 38(3):492-497.
- [71] Riha C, Güntensperger D, Kleinjung T, et al. Accounting for Heterogeneity: Mixed-Effects Models in Resting-State EEG Data in a Sample of Tinnitus Sufferers[J]. *Brain Topography*, 2020, 33(4): 413-424.
- [72] Delb W, Strauss DJ, Low YF, et al. Alterations in Event Related Potentials (ERP) associated with tinnitus distress and attention[J/OL]. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 2008, 33(4):211-221.
- [73] Moazami-goudarzi M, Michels L, Weisz N, et al. Temporo-insular enhancement of EEG low and high frequencies in patients with chronic tinnitus. QEEG study of chronic tinnitus patients[J]. *BMC neuroscience*, 2010, 11(1):40-52.

- [74] Balkenhol T, Wallhäusser-franke E, Delb W. Psychoacoustic tinnitus loudness and tinnitus-related distress show different associations with oscillatory brain activity[J]. *PLoS One*, 2013, 8(1):e53180-e53193.
- [75] Asadpour A, Alavi A, Jahed M, et al. Cognitive Memory Comparison Between Tinnitus and Normal Cases Using Event-Related Potentials[J/OL]. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 2018, 12(10):48-94.
- [76] Lorenz I, Müller N, Schlee W, et al. Loss of alpha power is related to increased gamma synchronization-A marker of reduced inhibition in tinnitus?[J]. *Neuroscience Letters*, 2009, 453(3):225-228.
- [77] Weisz N, Dohrmann K, Elbert T. The relevance of spontaneous activity for the coding of the tinnitus sensation[J]. *Progress in Brain Research*, 2007, 166(10):61-70.
- [78] Feng X, Bao X, Huang H, et al. Frontal gamma-alpha ratio reveals neural oscillatory mechanism of attention shifting in tinnitus[J]. *iScience*, 2025, 28(3): 111929-111943.
- [79] Sendesen E, Erbil N, Türkyilmaz MD. The mismatch negativity responses of individuals with tinnitus with normal extended high-frequency hearing-is it possible to use mismatch negativity in the evaluation of tinnitus?[J]. *European archives of oto-rhino-laryngology*, 2022, 279(7):3425-3434.
- [80] Santos Filha VAV dos, Matas CG. Late Auditory evoked potentials in individuals with tinnitus[J]. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 2010, 76(2):263-270.
- [81] Cardon E, Vermeersch H, Joossen I, et al. Cortical auditory evoked potentials, brain signal variability and cognition as biomarkers to detect the presence of chronic tinnitus[J]. *Hearing Research*, 2022, 420(3):108489-108500.
- [82] Singh R, Chatterjee N, Chatterjee I. Exploring P300 Responses in Tinnitus: Linking Cognitive and Audiological Assessments[J]. *Indian Journal of Otolaryngology and Head and Neck Surgery*, 2025, 77(3): 1392-1400.
- [83] Sadeghijam M, Moossavi A, Akbari M, et al. Effect of tinnitus distress on auditory steady-state response amplitudes in chronic tinnitus sufferers[J]. *Journal of Clinical Neuroscience*, 2022, 97(1):49-55.
- [84] Diesch E, Andermann M, Flor H, et al. Interaction among the components of multiple auditory steady-state responses: enhancement in tinnitus patients, inhibition in controls[J]. *Neuroscience*, 2010, 167(2):540-553.
- [85] Herdman AT, Stapells DK. Auditory steady-state response thresholds of adults with sensorineural hearing impairments[J]. *International Journal of Audiology*, 2003, 42(5):237-248.
- [86] Ghasemahmad Z, Mahmoudian S, Gavazzi D, et al. Enhanced 40 and 80 Hz Auditory Steady State Responses in Idiopathic Tinnitus[A/OL]. <http://medrxiv.org/lookup/doi/10.1101/2024.03.02.24303654>. 2025-05-10.
- [87] De Ridder D, Vanneste S, Langguth B, et al. Thalamocortical Dysrhythmia: A Theoretical Update in Tinnitus[J]. *Frontiers in Neurology*, 2015, 6(6):124-137.
- [88] Adjamian P, Hall DA, Palmer AR, et al. Neuroanatomical abnormalities in chronic tinnitus in the human brain[J]. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2014, 45(9):119-133.
- [89] Sereda M, Adjamian P, Edmondson-jones M, et al. Auditory evoked magnetic fields in individuals with tinnitus[J]. *Hearing Research*, 2013, 302(4):50-59.
- [90] Mühlau M, Rauschecker JP, Oestreicher E, et al. Structural brain changes in tinnitus[J]. *Cerebral Cortex*, 2006, 16(9):1283-1288.
- [91] Chen YC, Zhang J, Li XW, et al. Aberrant spontaneous brain activity in chronic tinnitus patients revealed by resting-state functional MRI[J]. *NeuroImage. Clinical*, 2014, 6(9):222-228.
- [92] Arnold W, Bartenstein P, Oestreicher E, et al. Focal metabolic activation in the predominant left auditory cortex in patients suffering from tinnitus: a PET study with [18F] deoxyglucose[J]. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec*, 1996, 58(4):195-199.
- [93] Isler B, Von Burg N, Kleinjung T, et al. Lower glutamate and GABA levels in auditory cortex of tinnitus patients: a 2D-JPRESS MR spectroscopy study[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1):4068-4082.
- [94] Heijneman KM, De Kleine E, Wiersinga-post E, et al. Can the tinnitus spectrum identify tinnitus subgroups?[J/OL]. *Noise & Health*, 2013, 15(63): 101-106.
- [95] Lonsbury-martin BL, Martin GK. The clinical utility of distortion-product otoacoustic emissions[J/OL]. *Ear and Hearing*, 1990, 11(2): 144-154.
- [96] Sztuka A, Pospiech L, Gawron W, et al. DPOAE in estimation of the function of the cochlea in tinnitus patients with normal hearing[J/OL]. *Auris, Nasus, Larynx*, 2010, 37(1): 55-60.
- [97] Bramhall NF, Konrad-martin D, Mcmillan GP. Tinnitus and Auditory Perception After a History of Noise Exposure: Relationship to Auditory Brainstem Response Measures[J/OL]. *Ear and Hearing*, 2018, 39(5): 881-894.
- [98] Therdphaothai J, Atipas S, Suvansit K, et al. A Randomized, Controlled Trial of Notched Music Therapy for Tinnitus Patients[J/OL]. *The Journal of International Advanced Otology*, 2021, 17(3): 221-227.
- [99] Shim HJ, Kwak MY, An YH, et al. Feasibility and Safety of Transcutaneous Vagus Nerve Stimulation Paired with Notched Music Therapy for the Treatment of Chronic Tinnitus[J/OL]. *Journal of Audiology & Otology*, 2015, 19(3): 159-167.
- [100] Haab L, Lehser C, Corona-strauss FI, et al. Implementation and Long-Term Evaluation of a Hearing Aid Supported Tinnitus Treatment Using Notched Environmental Sounds[J/OL]. *IEEE journal of translational engineering in health and medicine*, 2019, 7:1600109-1600109.
- [101] Teismann H, Okamoto H, Pantev C. Short and intense tailor-made notched music training against tinnitus: the tinnitus frequency matters [J/OL]. *PLoS ONE*, 2011, 6(9):e24685-e24693.
- [102] Stein A, Engell A, Lau P, et al. Enhancing inhibition-induced plasticity in tinnitus--spectral energy contrasts in tailor-made notched music matter[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(5): 1-18.
- [103] 陈泓钰, 张心苑, 郑亿庆, 等. 音乐联合认知行为治疗主观性耳鸣疗效及静息态脑电的源定位分析[J]. *中华耳科学杂志*, 2020, 18(6): 1045-1049.

收稿日期 2025-05-19
责任编辑 蒋 春