

doi: 10.3969/j.issn.1672-4933.2026.03.018

老年性聋听觉康复训练虚拟现实平台的开发

The Development of a Virtual Reality(VR) Platform for Auditory Rehabilitation Training in Presbycusis

王闻多^{1,2} 苏玥滢³ 顾聿⁴ 项垣诚^{1,2} 韩生轩³ 汪涵^{1,2} 张丽萍^{1,2}

WANG Wen-duo, SU Yue-ying, GU Yu, XIANG Yuan-cheng, HAN Sheng-xuan, WANG Han, ZHANG Li-ping

【摘要】老年性聋的传统康复手段能在一定程度上改善听力损失情况,但存在噪声环境下效果有限、训练依从性差等局限性。目前,听觉可塑性原理为听觉康复提供了理论支持,虚拟现实技术通过构建沉浸性、交互性的训练环境,模拟真实场景的声学复杂性,为突破上述局限提供了新思路。本文基于听觉可塑性理论,探究虚拟现实技术的神经机制,分析其在临床听觉康复转化过程中的优势及限制,为后续老年性聋康复平台的设计提供思路。

【关键词】虚拟现实技术;老年性聋;听觉康复;听觉可塑性

【中图分类号】R764.43

【文献标识码】A

【文章编号】1672-4933(2026)03-0306-06

【Abstract】The conventional training methods for age-related hearing loss rehabilitation can improve hearing loss to some extent, but there are limitations in complex noisy environments and training adherence. Currently, the principle of auditory plasticity provides theoretical support for auditory rehabilitation. Virtual reality (VR) technology, by constructing immersive and interactive training environments that simulate the acoustic complexity of real-world scenarios, offers a novel approach to overcome these limitations. This article reviews latest relevant research papers, based on auditory plasticity theory, explores the neural mechanisms of VR technology. It analyzes its advantages and limitations in the process of clinical transformation for auditory rehabilitation, providing insights for the future design of age-related hearing loss rehabilitation platforms.

【Key words】Virtual reality technology; Age-related hearing loss; Hearing rehabilitation; Auditory plasticity

1 引言

老年性聋(age-related hearing loss, ARHL)是指随年龄增长引起的听力下降,通常表现为双耳对称渐进性下降的感音神经性聋^[1]。ARHL不仅影响老人日常交流,亦能导致社会孤立,进而对患者的生活质量及心理健康等造成消极影响^[2,3]。我国第2次全国残疾人抽样调查数据显示,ARHL患者约1364.497万人,约占听力损失人群的66.87%^[4]。1990~2021年调查报告提示,我国ARHL患病率和疾病负担位居全球第一,预测在未来15年内仍将继续上升^[5]。目前对该疾病的管理主要是听损预防保护及使用助听设备,药物治疗及基因疗法的有效性尚待论证^[6]。尽管助听设备可有效改善ARHL患者的生活质量,但仍存在噪声环境下言语识别能力有限的问题^[7,8]。人

类听觉系统具有可塑性,通过针对性的听觉训练可改善噪声下的言语识别能力^[9,10],为临床开发新型听觉康复策略提供了有效理论依据。随着虚拟现实(virtual reality, VR)技术的面世,多项研究证实其在听力康复中的可行性^[11,12],因此,VR技术融合听觉训练有望成为ARHL患者改善噪声下言语能力的重要方向。

2 VR技术在听觉康复中的理论基础

2.1 听觉可塑性理论

听觉可塑性是指听觉系统的神经元为适应瞬时环境影响引起的变化,通常表现为行为的改变^[13]。这种变化可发生在多个时间维度(从短期适应到部分听损引起的长期重组),其程度受声音信息的输入(自下而上的过程)

基金项目:上海交通大学医学院医学技术学院AI课程培育项目(YX2025235);上海市高等教育学会重点项目(2QZD2412)

作者单位:1 上海交通大学医学院附属第九人民医院耳鼻咽喉头颈外科 上海 200023

2 上海交通大学医学院医学技术学院听力与言语康复系 上海 200125

3 上海交通大学医学院 上海 201318

4 上海交通大学机械与动力工程学院机械与动力类 上海 200240

作者简介:王闻多 本科在读;研究方向:助听效果评估及开发,噪声环境下感知研究及以人为听力咨询本土化研究

通讯作者:张丽萍,E-mail: Liping_zhang0814@163.com

与高层次认识信息决策(自上而下过程)共同调控^[10]。自下而上机制强调语言处理从输入简单语音信号(如音位、单音节字等)逐步上升到复杂语言信息(如语义、语境),这些语言输入可激发听觉系统可塑性,从而高效分析听觉场景并准确识别各种声音。在此过程中,听觉系统的神经元通过调整其阈值与动态范围,对比增益控制抑制背景噪声对听觉特征编码的影响,进而优化声音信号的时间结构和声谱特征^[14]。而自上而下机制主要是高层次认知信息对低层次语音信号的调节^[15]。其中,注意力作为信息资源选择和分配的调控器,通过忽略无关信息,有效提取关键信息,减少噪声的影响^[16]。注意力受目标任务及预期目标等因素的影响,通过自上而下的机制调控。此外,感知学习作为另一种调节因素,通过练习对感官刺激的检测、辨别或识别实现感知能力准确性的提升^[10]。迄今为止,关于听觉语音感知中的可塑性机制仍存在争议,与之有关的各类模型在Zhang等^[17]的综述系统梳理。但无论自上而下还是自下而上的机制,语音信息的刺激都有助于听觉系统进行快速调整和适应^[17]。在过去40年,多项关于听觉感知训练的研究均证实听觉训练可促使听觉皮层以及皮层下结构产生可塑性变化^[18,19]。这意味着基于听觉可塑性理论,临床可通过听觉康复训练进行听损康复。

2.2 VR技术增强听觉可塑性的机理

2.2.1 多模态整合 多模态整合的理论基础在听觉领域源于听觉系统的跨模态可塑性,其是神经元从某一感觉输入被剥夺后向另一个感觉模态的适应性变化^[20]。这种机制涉及大脑皮层有高度连接功能的多模态整合联想区域^[20,21],为感官区域提供自上而下的异模态输入^[22]。Aller等^[23]让14名参与者观看并聆听演讲者说出单句的视频片段,通过控制视听言语信号的获得性发现听觉与视觉语音信号之间存在显著相关性,当听觉语言缺失时(即无声唇读时)仍能观察到视觉皮层的听觉同步,视觉语言使视觉区域的听觉信号实现了更强的相位锁定。这一现象被解读为语音感知过程中的跨模态预测机制^[23]。因此,VR技术以其提供同步多感官(视觉、听觉等)的训练优势,在听觉康复训练中具有潜在应用价值。但是,多模态整合和多感官VR的文献证据不一。跨模态重组(如增强长期听障者听觉皮层的视觉输入)可能会对人工耳蜗植入后言语识别能力产生负面影响^[24]。在多感官VR中也认为冗余刺激可能会增加用户带来额外认知负担,并使其在多感官信息不一致时,对虚拟环境的目的感到不知所措和/或分心^[25,26]。

2.2.2 空间化音频对听觉场景分析与注意调节的影响 空间听觉依赖于空间中感知声音定位线索的编码,在

背景噪声中进行交流、理解声音来源(声音定位)至关重要。然而,传统的听觉康复训练包括辅音识别训练^[27]、噪音下句子训练^[18]、工作记忆训练^[19]、注意力训练^[19]等,鲜有涉及空间听觉训练。而VR技术突破了这一局限,其多通道扬声器方便了声源的灵活设置(如立体声渲染),头显设备有利于空间任务的设计,故而使空间听觉训练成为可能。Parmar等^[28]在Both Ears(BEARS)项目中设计了3款游戏训练空间听力与噪声中语音感知。目标游戏通过视听提示进行声音定位、靶心目标识别并引导手柄指向目标;噪音游戏在虚拟咖啡馆环境中通过旋转头部动态与环境互动,定位正在说话的角色。与此同时需在背景声中准确识别言语声并完成送餐等任务;音乐游戏需完成多种音高、音色和节奏辨别任务。Johnston等^[29]基于双耳空间音频的渲染技术,通过VR游戏干预有效减少了孤独症青少年的听觉过敏,为VR借助空间化音频进行听觉康复训练提供了有力证据。

2.2.3 沉浸式环境增强情感参与 沉浸式虚拟现实(immersive virtual reality, iVR)强调沉浸感^[30]、存在感及人机交互为特征,能够充分激发用户的感官,使其与物理环境隔离,引导大脑做出与虚拟世界相同的反应,这一现象亦称为普罗透斯效应^[31]。iVR带来的高参与度在治疗环境中尤其有益,如对言语和语言康复,能提供真实、受控且适应性强的康复环境^[32],认作为听力康复的新途径。例如,iVR区别于传统听力康复训练的触觉系统,通过纳入振动、力反馈、风、热、空中触觉和电触觉反馈^[30],不仅提供真实感官反馈,还能通过情感触觉增强情感参与。Zhou等^[33]通过系统综述和荟萃分析,认为有形用户界面(tangible user interfaces, TUIs)具有真实、直观、非侵入性、以触觉作为优先媒介、情感表达具象化(embodiment)等优势,在情感教育、沟通等方面展现出潜力,有望突破传统听觉训练的局限。

2.2.4 现实互动的促进与维持 传统言语语言治疗的主要挑战是难以将临床环境中的技能推广到现实生活中^[34]。治疗通常涉及结构化、脱离语境的任务,如命名图片或重复孤立词汇,这些任务不能反映日常沟通中的动态变化,故而个体在临床显示有所进步,但在自发对话或社交环境中难以应用^[35]。VR技术一方面可增强泛化,使用户在情境丰富且可变的环境中的练习,以保持和迁移;另一方面有潜力改善老年人的高保真记忆,从而维持听觉康复训练效果。Luca等^[36]的实验纳入30名因首次缺血性卒中导致非流畅性失语症患者(平均年龄51.2±11.3岁),随机分配为接受传统言语和认知训练的对照组(n=15)和接受BTS-Nirvana半沉浸式VR训练的实验组(n=15)。训练后,实验组在Token测试、阅读、命名和计算方

面的进步优于对照组,且在6个月随访时继续维持。Wais等^[37]开发了一款VR空间导向游戏,通过头戴式VR(head-mounted display, HMD VR),参与者以迷宫游戏的第一人称视角、穿越虚拟的城市或村庄并完成任务。48名认知能力等同的老人(平均年龄 68.7 ± 6.4 岁)随机分配为VR干预组(电脑游戏)或安慰剂对照组(玩iPad游戏),均参与持续4周、12小时的训练。治疗后,VR组的长期记忆检索任务的诱饵辨别指数(lure discrimination index, LDI)显著增加($P=0.001$),而对照组无显著变化($P=0.84$),表明空间导航游戏训练可通过VR有效改善老年人在高保真度长期记忆检索能力。

3 VR技术在听觉康复中的临床依据

3.1 VR辅助听觉康复训练与传统听觉训练的效果差异

关于VR技术在听觉康复与传统听觉训练中的效果差异主要从空间听觉和认知负荷两个方面展开。在空间听觉方面,传统的听觉训练方法通常在单一维度评估空间听觉,由于说话者的数量有限,因此发声角度也存在局限,而VR环境可使用扬声器阵列呈现声音刺激,使声源设置更加灵活。在Valzolgher等^[38]对单侧人工耳蜗植入者进行的VR环境空间训练和Alzahrer等^[39]利用VR系统对单侧听力损失患者进行的视听空间训练中,受试者配戴VR头显后,均可以看到由13个扬声器组成的虚拟阵列,从左侧 -72° 到右侧 $+72^\circ$,呈半圆形排列,以最大限度地提高视觉提示的使用效率,但两项研究分别只纳入17名和19名受试者,在样本量上仍属小规模,限制了实验结果的统计效力,未来研究需向更大样本量的随机对照试验推进,为VR听觉康复的临床转化提供更具说服力的证据。Shim等^[40]VR空间听觉训练使用3~9个虚拟扬声器(耳部水平前置 120° 范围),以验证不同难度等级间的效果差异,但局限于前方 120° 水平范围,缺乏垂直方向与后方声源,无法真实模拟现实听觉场景。Oldenburg大学VR实验室^[41]通过球形多扬声器阵列(29个全频率扬声器和4个低频扬声器)更好地模拟复杂声学环境,提升实验室生态效度,但其对空间、硬件设备要求较高,难以推广到临床或家庭康复中应用。

在认知负荷方面,Frei等^[42]通过改变测试句长(单句/双句),调节受试者认知负荷,对比听觉训练与VR环境下沉浸式视听训练后言语感知能力的影响,发现VR环境下受试者表现更稳定,说明多感官环境可能促进有效的资源分配,减轻认知负荷。同时,研究假设高认知负荷的训练任务更贴近真实听力场景,因此可能促进迁移效果,提升噪音环境中的言语理解能力。在VR沉浸式训练后,受

试者言语识别阈下降约0.6 dB(听觉训练仅下降0.12 dB),说明参与者对背景噪音的容忍度更高,认知负荷的真实性与训练效果相关。针对康复效果的评估,除前述传统听觉测试方式,还包括VR环境任务完成率和主观问卷。Владими́рова Т Ю等^[43]开发了基于VR技术的听力评估平台,对比老年听障者使用VR前后在言语清晰度、空间听觉、声音质量上的差异与自我认知。Дайхес НА等^[44]对68例慢性感音神经性听力损失患者利用VR空间与言语听力诊断康复系统ReviAudio进行持续7天训练。两项研究均采用SSQrus问卷进行自评,后者补充纯音测听和言语测听,弥补了前述实验评估方式为主观问卷自评,结果可能受心理因素干扰的不足之处。Shim等^[40]同时采用真实声场、VR环境下的声音定位测试和韩语版言语、空间与听力质量量表及视觉模拟量表,评估受试者空间听觉能力及训练前后日常生活中的听力体验和声音定位能力的主观改善程度。综上,现有的VR听觉康复训练在空间听觉和认知负荷适应性方面较传统训练有优势,但是仍存在样本量小,场景难迁移等问题。

3.2 VR辅助听觉康复训练与传统听觉训练效率与依从性差异

VR测试环境能够克服传统的基于实验室环境的研究限制^[45],增强了实验的重复性^[28],减少对额外资源和复杂设备的需求,且通过构建语音和噪声声场,以模拟真实世界的声学条件^[45],提高对真实场景的适用性。在依从性方面,Ockelmann等^[46]通过自适应算法为54名老年听力损失者生成基于其初始认知评估结果的个性化训练计划,其中训练任务被嵌入互动性强、结合视觉反馈的积分制游戏界面,这种游戏化和个性化的听觉认知训练可以更好地改善患有轻中度听力损失老年人噪声下的言语理解能力,而基于VR设备的场景化、游戏化康复训练模型Both Ears (BEARS)^[28]已在听力损失儿童康复训练中尝试应用,目前尚无在成人方面的听觉康复训练研究,未来可将研究拓展到老年性聋康复训练模型构建中。同时,基于VR技术的家庭康复培训有利于最大限度地减少所需的临床就诊次数^[40]、时间和交通成本。

3.3 VR辅助听觉康复训练与其他新兴训练形式的比较

目前,新兴的听觉脑机接口辅助训练是一种通过听觉脑机接口实时监测脑电信号,反馈训练者状态,以辅助进行听觉与认知训练的训练形式^[47]。听觉脑机接口可以做到戴后持续监测听觉神经反应,然而尚未有可以集成于系统内的康复训练形式。目前与其配套的康复技术仍依赖外界传统听力康复,脑机接口的应用主要位于康复流程的数据采集阶段,VR环境主要用于训练阶段,两者

互不冲突。Parmar等^[28]尝试将脑机接口检测与VR训练相结合,开发了一套为增强双侧人工耳蜗使用者空间听力而设计的虚拟现实游戏,正在通过非盲、多中心随机对照试验验证干预措施的有效性。

基于计算机的视听结合训练是双任务训练中的一种,是新兴的康复训练形式,根据Völter等^[48]研究,20名参与者经过基于计算机的听觉训练后,在噪声($P=0.004$)、语音追踪($P=0.004$)和音素分化(元音: $P=0.001$;辅音: $P=0.02$)方面,句子理解能力相较于标准治疗均有显著提升,语音跟踪在标准治疗后的效果相较于基于计算机的训练效果更好($P=0.007$)。成本分析显示,标准治疗下参与者需要与治疗师每周面对面120分钟,而计算机治疗只需要每周30分钟,且对于人工耳蜗使用者来说,每次参加标准治疗平均的通勤时间约 78 ± 58 分钟,使用计算机进行治疗能节省大量时间成本。VR设备与计算机相同,可以做到让患者在家接受康复训练,大量节省时间。此外,Wu等^[49]通过一项纳入66个随机对照实验的网络荟萃分析得出结论,在多种技术辅助非药物干预认知训练形式的全局认知康复效果比较中,VR辅助训练以75.8%的SUCRA值排名前列,其次是手机辅助训练(67.7%)和平板辅助训练(59.0%),表明其在改善认知功能方面效果较强。

双任务训练是一种整合视觉、听觉和动作信息的训练方式,目的是使参与者在面对日常生活中复杂的自然环境时,更好地完成视觉、听觉信息与身体动作的动态整合。由于人工高度可控的实验室环境(如消音室或无回声室)中得到的研究结果,与真实世界中的日常表现缺乏关联性,而VR设备可以做到在对刺激特性保持实验控制的同时提供对现实生活的模拟,VR设备适合被应用于此场景,用于提供更真实的数据^[50],但尚未有研究者进行过有效性研究,未来可进行其与非VR环境下的同类型测试的有效性对比。

4 老年听障者的康复参与瓶颈与VR的转化潜力

4.1 老年听障者康复参与的主要障碍

尽管听力损失严重影响生活质量,老年听障者的康复参与率仍维持在较低水平(14.6%~33.1%)^[51],这源于主观体验和客观条件的共同制约。在主观层面,动机缺乏是主要障碍。听觉康复训练内容无聊枯燥,难以激发听障者的兴趣与坚持训练的动机^[52]。Ravichandran等^[53]有关听力学中数字健康干预(digital health interventions, DHIs)参与的系统性综述提到,Ferguson等^[54]纳入59名首次使用助听器的听障者(平均年龄65.3岁),研究移动

健康教育方案(mobile hearing health educational resource, m2Hear)进行日常干预的可行性。用户版移动应用评定量表(user version of the mobile application rating scale, uMARS)结果显示,方案娱乐性和趣味性得分较高(分别为3.48/5, 4.19/5),用户依从性良好。证明娱乐性的改善和用户兴趣的提升可增强参与动机。此外,听觉康复训练过程中的低效益感知也会造成动机不足,进而阻碍康复参与。若DHIs的效果未能满足用户期望,参与度可能会降低^[53]。Philips等^[55]让16名参与者(平均年龄68岁)在4周内自由使用针对人工耳蜗植入用户的平板电脑应用程序(my hearing app, MHA),后续通过随访得出,MHA能够提供足够的反馈信息增强用户自我效能感,激发其参与动机。在客观层面,康复训练服务的可及性差,显著降低老年听障者的康复依从性。地理可及性弱导致的访问不便影响听力康复服务获得的核心障碍^[56]。Fuentes-López等^[57]通过实验量化了这一影响。其选取来自卫生服务分布存在差异约2个地区455名老年助听器使用者进行访谈和问卷调查,分析数据(患者住所与随访中心之间的距离)发现,该地理距离增加2倍对应放弃康复的风险增加35%,且住所与医疗中心的距离越远,老年听障者康复进程中中断的风险越大。

4.2 VR技术应用于康复训练的转化潜力

VR技术应用于康复训练,可有效改善训练枯燥、效益感知低导致的康复参与动机缺乏。Li等^[58]将20名老年人随机分为不接受干预的对照组和接受VR多任务训练(每周3次,每次45分钟VR运动游戏)的干预组。干预前后测试结果表明,干预组的工作记忆和推理能力均显著改善,而对照组无明显变化,参与者内在动机量表及玩家需求满足体验在干预期内得分较高且不变。提示VR技术使康复训练引入游戏化元素,以趣味化的方式引导用户达成目标,并通过实时反馈和激励机制提升效益感知,增强了老年人康复参与动机。Lee等^[59]通过对25名参与VR康复的膝关节术后康复患者的开放式问卷进行定性分析,得出基于VR的康复训练通过动态匹配任务难度与患者个人能力,避免了挫败和倦怠并激发了兴趣,实验中高达96%的受试者具有长期训练意向。

基于VR的远程康复模式的有效性和可行性已得到证实,这种模式能提升康复服务可及性,进而增强康复依从性。Mohamed等^[60]开展了一项准实验研究,将70名体弱老人随机分为对照组(不接受任何干预)和干预组(居家进行持续4个月的基于VR的康复游戏)。结果显示干预组和对照组老人的总体能评分分别为9.69和6.70,干预组的体能表现远优于对照组。体现了居家VR康复系统能显著改善体弱老人的运动能力。远程康复措施在解

决患者出行不便导致的康复服务获得障碍方面具有潜在作用^[61]。VR技术的引入使得远程康复得以实现,从而提高了康复训练服务的可及性,康复进程中中断风险减小,且远程VR康复方案切实可行、效果良好。

4.3 VR技术转化应用的局限性

虽然VR技术已展现出强大的康复训练领域转化潜力,但其在老年群体康复中的深度应用仍面临局限。首先,生理不适(如晕动症)或设备不适配造成的身体负担是老年人群采用VR康复的重大障碍,因此相关研究中的适应性训练有必要,未来的研发与实践应致力于推动VR设备的轻量化迭代^[62]。其次,技术适应问题也是影响VR转化应用的重要瓶颈。相关领域大多研究发现,老年受试者对VR技术缺乏经验,不适应科技手段,造成参与积极性较低。设备复杂性可能影响老年人的长期康复参与度。未来的老年康复VR平台设计应注重打造简洁易用的用户界面,提供渐进式引导,确保老年人能顺利地适应VR技术^[62]。

5 总结与展望

本文基于听觉可塑性理论,梳理VR技术背后的神经机制,探讨其在老年性聋听觉康复领域中展现的潜力与当前存在的局限性。然而,目前研究多停留在行为学效果验证层面,未来需借助与VR设备兼容的便携式神经影像技术,以探究VR特异性重塑老年性聋听障者大脑网络的机制,从而优化干预方案。同时,为克服现有临床研究在样本规模、长期疗效验证等方面的不足^[39,40,43],需采取高级别的循证医学设计,开展多中心、大样本的随机对照实验,以验证VR辅助康复的长期效果。VR与人工智能、远程医疗技术的交叉融合,为实现个性化训练,克服技术适应性与设备舒适度等方面的挑战^[62]提供新思路,这一举措可降低设备使用成本与技术门槛,提升老年用户的接受度与长期依从性。若使VR听觉康复从研究走向广泛应用,参考健康技术评估(health technology assessment, HTA)框架^[63],建立针对听力师、康复治疗师的培训体系,从而提升各环节对新兴康复技术的认知与接受度。

参考文献

[1] Zheng Q, Xu Z, Li N, et al. Age-related hearing loss in older adults: Etiology and rehabilitation strategies[J]. *Frontiers in neuroscience*, 2024, 18: 1428564.

[2] Rutherford BR, Brewster K, Golub JS, et al. Sensation and psychiatry: linking age-related hearing loss to late-life depression and cognitive decline[J]. *American Journal of Psychiatry*, 2018, 175(3): 215-224.

[3] Ciorba A, Bianchini C, Pelucchi S, et al. The impact of hearing loss on the quality of life of elderly adults[J]. *Clinical interventions in aging*, 2012,7: 159-163.

[4] 于丽玫,孙喜斌,魏志云,等.全国老年听力残疾人群现状调查研究[J]. *中国听力语言康复科学杂志*, 2008,6(3): 63-65.

[5] Anargul A, Song Y, Yan X, et al. Disease burden and future trend predictions of age-related hearing loss in China and worldwide from 1990 to 2021[J]. *Beijing da xue xue bao. Yi xue ban= Journal of Peking University. Health sciences*, 2025, 57(3): 545-553.

[6] Lin FR. Age-related hearing loss[J]. *New England Journal of Medicine*, 2024, 390(16): 1505-1512.

[7] Humes LE, Rogers SE, Main AK, et al. The acoustic environments in which older adults wear their hearing aids: insights from datalogging sound environment classification[J]. *American Journal of Audiology*, 2018, 27(4): 594-603.

[8] Cosetti MK, Lalwani AK. Is cochlear implantation safe and effective in the elderly?[J]. *Laryngoscope*, 2015, 125(6): 1279-1281.

[9] Hewitt D. Age-related hearing loss and cognitive decline: You haven't heard the half of it[J]. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2017, 9: 112.

[10] Irvine DRF. Plasticity in the auditory system[J]. *Hearing research*, 2018, 362: 61-73.

[11] Daikhes NA, Vladimirova TY, Sapozhnikov YM, et al. The effectiveness of auditory training using virtual reality technologies in persons with chronic sensorineural hearing loss[J]. *Vestnik Otorinolaringologii*, 2021, 86(6): 17-21.

[12] Vladimirova TY, Aizenshtadt LV, Kurenkov AV, et al. Virtual reality in rehabilitation of sensorineural hearing loss in adults[J]. *Science and Innovations in Medicine*, 2019, 4(4): 8-11.

[13] Hare C, Shinn J, Musiek F. Plasticity, Auditory Training, and Auditory Processing Disorders [J]. *Seminars in Hearing*, 2002, 23(4): 263-275.

[14] Auerbach BD, Gritton HJ. Hearing in complex environments: auditory gain control, attention, and hearing loss[J]. *Frontiers in neuroscience*, 2022, 16: 799787.

[15] Gilbert CD, Sigman M. Brain states: top-down influences in sensory processing[J]. *Neuron*, 2007, 54(5): 677-696.

[16] Kaya EM, Elhilali M. Modelling auditory attention[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2017, 372(1714): 20160101.

[17] Zhang X, Wu YC, Holt LL. The learning signal in perceptual tuning of speech: Bottom up versus top-down information[J]. *Cognitive Science*, 2021, 45(3): e12947.

[18] Yusof Y, Mukari SZMS, Dzulkifli MA, et al. Efficacy of a newly developed auditory-cognitive training system on speech recognition, central auditory processing and cognitive ability among older adults with normal cognition and with neurocognitive impairment[J]. *Geriatrics & Gerontology International*, 2019, 19(8): 768-773.

[19] Kawata NYS, Nouchi R, Oba K, et al. Auditory cognitive training improves brain plasticity in healthy older adults: Evidence from a randomized controlled trial[J]. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2022, 14: 826672.

[20] Kral A, Sharma A. Crossmodal plasticity in hearing loss[J]. *Trends Neurosci*, 2023, 46(5): 377-393.

[21] Wolff A, Berberian N, Golesorkhi M, et al. Intrinsic neural timescales: temporal integration and segregation[J]. *Trends in cognitive sciences*, 2022, 26(2): 159-173.

[22] Michail G, Senkowski D, Niedeggen M, et al. Memory load alters perception-related neural oscillations during multisensory integration [J]. *Journal of Neuroscience*, 2021, 41(7): 1505-1515.

[23] Aller M, Økland HS, MacGregor LJ, et al. Differential auditory and visual phase-locking are observed during audio-visual benefit and silent lip-reading for speech perception[J]. *Journal of Neuroscience*, 2022, 42(31): 6108-6120.

[24] Doucet ME, Bergeron F, Lassonde M, et al. Cross-modal reorganization and speech perception in cochlear implant users[J].

- Brain, 2006, 129(12): 3376-3383.
- [25] De BP, Lindeman R. Performance effects of multi-sensory displays in virtual teleoperation environments [M]. 2013:41-48.
- [26] Melo M, Gonçalves G, Monteiro P, et al. Do multisensory stimuli benefit the virtual reality experience? A systematic review[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2020, 28(2): 1428-1442.
- [27] Han JS, Park JM, Kim Y, et al. Effect of hearing rehabilitation therapy program in hearing aid users: a prospective randomized controlled study[J]. Clinical and experimental otorhinolaryngology, 2022, 15(2): 144-152.
- [28] Parmar BJ, Salorio-Corbetto M, Picinali L, et al. Virtual reality games for spatial hearing training in children and young people with bilateral cochlear implants: the "Both Ears (BEARS)" approach[J]. Frontiers in Neuroscience, 2024, 18: 1491954.
- [29] Johnston, Daniel, Hauke Egermann, and Gavin Kearney. The use of binaural based spatial audio in the reduction of auditory hypersensitivity in autistic young people. International journal of environmental research and public health. 2022, 19(19): 12474.
- [30] Gao Y, Spence C. Enhancing Presence, Immersion, and Interaction in Multisensory Experiences Through Touch and Haptic Feedback[J]. Virtual Worlds, 2025, 4(1): 33.
- [31] Martin CA, Biancardi B, Buisine S. A theoretical review of the Proteus effect: understanding the underlying processes [J]. Front Psychol, 2024, 15: 1379599.
- [32] Vaezipour A, Aldridge D, Koenig S, et al. Rehabilitation supported by immersive virtual reality for adults with communication disorders: semistructured interviews and usability survey study[J]. JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies, 2023, 10: e46959.
- [33] Zhou N, Devleminck S, Geurts L. Tangible affect: A literature review of tangible interactive systems addressing human core affect, emotions and moods[C]. Proceedings of the 2024 ACM Designing Interactive Systems Conference. 2024. 424-440.
- [34] Castro N, Nadeau SE, Kendall DL. The challenge of achieving greater generalization in phonological treatment of aphasia[J]. Aphasiology, 2022, 36(2): 170-197.
- [35] Stark BC. Speech and Language Rehabilitation for Neurogenic Communication Disorders: The Potential Role of Immersive Virtual Reality Interventions[J]. Perspectives of the ASHA Special Interest Groups, 2025, 10(5): 1399-1413.
- [36] De Luca R, Leonardi S, Maresca G, et al. Virtual reality as a new tool for the rehabilitation of post-stroke patients with chronic aphasia: an exploratory study[J]. Aphasiology, 2023, 37(2): 249-259.
- [37] Wais PE, Arioli M, Anguera-Singla R, et al. Virtual reality video game improves high-fidelity memory in older adults[J]. Scientific reports, 2021, 11(1): 2552.
- [38] Valzolgher C, Bouzaid S, Grenouillet S, et al. Training spatial hearing in unilateral cochlear implant users through reaching to sounds in virtual reality[J]. European Archives of Oto-Rhino-Laryngology, 2023, 280(8): 3661-3672.
- [39] Alzahr M, Valzolgher C, Verdelet G, et al. Audiovisual training in virtual reality improves auditory spatial adaptation in unilateral hearing loss patients[J]. Journal of Clinical Medicine, 2023, 12(6): 2357.
- [40] Shim L, Lee J, Han JH, et al. Feasibility of virtual reality-based auditory localization training with binaurally recorded auditory stimuli for patients with single-sided deafness[J]. Clinical and Experimental Otorhinolaryngology, 2023, 16(3): 217-224.
- [41] Hohmann V, Paluch R, Krueger M, et al. The virtual reality lab: Realization and application of virtual sound environments[J]. Ear and Hearing, 2020, 41: 31S-38S.
- [42] Frei V, Giroud N. Immersive auditory-cognitive training improves speech-in-noise perception in older adults with varying hearing and working memory[J]. npj Science of Learning, 2025, 10(1): 12.
- [43] Владимирова ТЮ, Куренков АВ, Айзенштадт ЛВ. Речевые и пространственные характеристики слуха в старших возрастных группах при использовании технологии виртуальной реальности [J]. Вестник оториноларингологии, 2021, 86(1): 20-24.
- [44] Дайхес НА, Владимирова ТЮ, Сапожников ЯМ, et al. Эффективность слуховых тренировок с использованием технологий виртуальной реальности у лиц с хронической сенсоневральной тугоухостью[J]. Вестник оториноларингологии, 2021, 86(6): 17-21.
- [45] Sladen DP, Diedesch AC, Zeitler DM. Localization and Speech-in-Noise Performance in a Virtual Reality Test Environment: A Pilot Study of Adults With Single-Sided Deafness Using a Cochlear Implant [J]. American Journal of Audiology, 2024, 33(3): 981-990.
- [46] Ockelmann J, Scherpiet S, Stropahl M, et al. Personalized and gamified auditory-cognitive training improves naturalistic speech-in-noise comprehension in older adults with hearing loss[J]. npj Science of Learning, 2025, 10(1): 80.
- [47] Haumann S, Bauernfeind G, Teschner MJ, et al. Epidural recordings in cochlear implant users[J]. Journal of neural engineering, 2019, 16(5): 056008.
- [48] Völter C, Stöckmann C, Schirmer C, et al. Tablet-based telerehabilitation versus conventional face-to-face rehabilitation after cochlear implantation: prospective intervention pilot study[J]. JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies, 2021, 8(1): e20405.
- [49] Wu Y, Ning X, Zhong Q, et al. Effectiveness of Technology-Assisted Nonpharmacological Interventions for Cognitive Impairment in Older Adults: A Systematic Review and Network Meta-Analysis[J]. Asian Journal of Psychiatry, 2025, 104815.
- [50] Lau ST, Pichora-Fuller MK, Li KZH, et al. Effects of hearing loss on dual-task performance in an audiovisual virtual reality simulation of listening while walking[J]. Journal of the American Academy of Audiology, 2016, 27(7): 567-587.
- [51] Nieman CL, Lin FR. Increasing access to hearing rehabilitation for older adults[J]. Current Opinion in Otolaryngology & Head and Neck Surgery, 2017, 25(5): 342-346.
- [52] Sweetow RW, Sabes JH. Auditory training and challenges associated with participation and compliance[J]. Journal of the American Academy of Audiology, 2010, 21(9): 586-593.
- [53] Ravichandran A, Ferguson MA, Mulders WHAM, et al. Understanding engagement with digital health interventions designed for adults with hearing loss and tinnitus: a mixed-method systematic review[J]. Translational Behavioral Medicine, 2025, 15(1): ibaf028.
- [54] Ferguson MA, Maidment DW, Gomez R, et al. The feasibility of an m-health educational programme (m2Hear) to improve outcomes in first-time hearing aid users[J]. Int J Audiol, 2021, 60(S1): S30-S41.
- [55] Philips B, Smits C, Govaerts PJ, et al. Empowering Senior Cochlear Implant Users at Home via a Tablet Computer Application[J]. Am J Audiol, 2018, 27(3S): 417-430.
- [56] Barnett M, Hixon B, Okwiri N, et al. Factors involved in access and utilization of adult hearing healthcare: A systematic review[J]. Laryngoscope, 2017, 127(5): 1187-1194.
- [57] Fuentes-López E, Galaz-Mella J, Ayala S, et al. Association between the home-to-healthcare center distance and hearing aid abandonment among older adults[J]. Frontiers in Public Health, 2024, 12: 1364000.
- [58] Li X, Niksirat K S, Chen S, et al. The Impact of a Multitasking-Based Virtual Reality Motion Video Game on the Cognitive and Physical Abilities of Older Adults[J]. Sustainability, 2020, 12(21): 9106.

(下转 314 页)