

doi: 10.3969/j.issn.1672-4933.2026.02.010

改良版中文数字三联音测试材料 开发及其有效性研究

The Development and Validation of Revised Mandarin Digit Triplet Test Material

钱伟宸^{1*} 曹沁霖^{1*} 黄美萍² 朱珺妍¹ 金字琪¹ 韩谨严³ 黄治物^{1,2}

QIAN Wei-chen, CAO Qin-lin, HUANG Mei-ping, ZHU Jun-yan, JIN Yu-qi, HAN Jin-yan, HUANG Zhi-wu

【摘要】目的 探讨改良版中文数字三联音测试的有效性,提高老年听力筛查的准确性。**方法** 设计开发改良版中文数字三联音测试材料,选取60岁以上老年人203例进行声导抗、纯音听阈测试、安静和噪声条件下的改良版数字三联音测试,分析该测试与纯音听阈测试结果的相关性,得出受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic, ROC)以计算曲线下面积(area under the curve, AUC),最佳截断值及其对应的敏感度、特异度、诊断符合率。**结果** ①改良版数字三联音测试与纯音听阈测试存在显著正相关(安静下 $r=0.86$,噪声下 $r=0.71$, $P=0.001$);②基于较好耳分类,在区分是否存在听力损失($PTA_{0.5-4\text{ kHz}} < 20\text{ dB HL}$ 为不存在)时,安静条件下AUC=0.90,最佳截断值=28.71 dB,特异度=0.96,敏感度=0.75和噪声条件下AUC=0.78,最佳截断值=-9.16 dB,特异度=0.68,敏感度=0.82(P 均 <0.001)。在区分是否存在中度及以上听力损失($PTA_{0.5-4\text{ kHz}} < 35\text{ dB HL}$ 为不存在)时,在安静条件下AUC=0.94,最佳截断值=38.08 dB,特异度=0.95,敏感度=0.78与噪声条件下AUC=0.87,最佳截断值=-6.85 dB,特异度=0.89,敏感度=0.73(P 均 <0.001)。**结论** 改良版中文数字三联音筛查测试在安静与噪声环境下均能有效区分不同程度的老年听力损失,其中安静环境下区分更有效,可作为老年听力筛查的有效工具。

【关键词】 中文数字三联音测试;老年听力损失;听力筛查;言语识别阈**【中图分类号】** R764.43**【文献标识码】** A**【文章编号】** 1672-4933(2026)02-0163-06

【Abstract】 Objective This study aimed to develop and validate a revised Mandarin digit triplet test (DTT) for use in future hearing screening of older adults, with the goal of improving screening accuracy. **Methods** A total of 202 elderly individuals aged 60 years and above were enrolled to undergo tympanometry, pure-tone audiometry, and the revised DTT in both quiet and noise. Correlations between DTT scores and pure-tone thresholds were calculated. Receiver-operating-characteristic (ROC) curves were constructed to obtain the area under the curve (AUC), optimal cut-off, and corresponding sensitivity, specificity, and diagnostic accuracy. **Results** Revised DTT and pure tone audiometry test showed significant positive correlation (quiet: $r=0.86$, noise: $r=0.71$, $P=0.001$). Based on the better ear classification, when distinguishing the presence or absence of hearing loss ($PTA_{0.5-4\text{ kHz}} < 20\text{ dB HL}$ as absence), under quiet conditions AUC=0.90, optimal cut-off=28.71 dB, specificity=0.96, sensitivity=0.75, and under noise conditions AUC=0.78, optimal cut-off=-9.16 dB, specificity=0.68, sensitivity=0.82 (all P values <0.001). When distinguishing the presence or absence of moderate or above hearing loss ($PTA_{0.5-4\text{ kHz}} < 35\text{ dB HL}$ as absence), under quiet conditions AUC=0.94, optimal cut-off=38.08 dB, specificity=0.95, sensitivity=0.78, and under noise conditions AUC=0.87, optimal cut-off=-6.85 dB, specificity=0.89, sensitivity=0.73 (all P values <0.001). **Conclusion** The revised DTT screening test can effectively differentiate varying degrees of age-related hearing loss in both quiet and noisy environments, with better performance in quiet conditions, and can serve as an effective tool for hearing screening in older adults.

【Key words】 Mandarin digit triplet test; Age-related hearing loss; Hearing screening; Speech recognition threshold

1 引言

听力损失是老年人常见的感觉障碍之一。据世界卫生组织(world health organization, WHO)报道,全球超过

15亿人存在听力损失,其中4.3亿人在较好耳中有中度及以上听力损失,而这一群体中超过58%为60岁及以上老年人^[1]。听力损失不仅影响老年人的言语交流、情感和社交

基金项目:上海市科委科技创新行动计划“基于耳蜗突触病变神经标志物的隐性听力损失早期诊断临床研究”(22Y11902000)

作者单位:1 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

2 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 200011

3 上海交通大学安泰经济与管理学院 上海 200030

作者简介:钱伟宸 本科;研究方向:听力与言语康复学

曹沁霖 本科;研究方向:听力与言语康复学

通讯作者:黄治物, E-mail: huangzw086@163.com

*为共同第一作者

互动^[2],还可能造成认知能力^[3,4]和避险能力^[5]下降,引发焦虑、抑郁等心理问题,造成社会隔离^[6]、平衡障碍^[7]等危害。老年听力损失的康复治疗会产生巨大的社会和家庭经济负担^[8,9]。随着人口老龄化的加剧,老年听力损失问题愈发凸显,其防治工作迫在眉睫。防治老年听力损失的关键在于早期发现,而听力筛查是实现早期发现的重要环节^[10]。

数字三联音测试是一种适合老年人自主筛查的方法,采用3个数字(通常为单音节)组成的数字串作为测试材料,如5-9-6,通过自适应方式评估受试者言语识别阈,从而判别听力损失情况的听力筛查方法^[11],能够有效区分不同程度的听力损失^[12]。最早由Smits等提出,并在电话听力筛查中进行验证,随后作为荷兰国家听力筛查方式推广使用^[13]。目前,已开发了十几种语言版本的数字三联音测试^[14~16],国际康复听力学委员会建议开发多语言版本数字三联音测试,根据各国语言语音学特点进行优化,以提高测试的准确性^[17]。中文版数字三联音测试最早于2012年由首都医科大学附属北京同仁医院与英国南安普顿大学合作开发^[18],开展了电话听力筛查、网页版筛查等研究。但当前中文版数字三联音测试材料未考虑中文语音学特点,如1和7的韵母都为*/i/*,*/i/*前的辅音易发生感知混淆^[19~21];同时虽然老年人群是重点筛查对象,但中文数字三联音测试在老年人群听力筛查的应用也尚待深入研究^[22,23]。本研究基于中文语音学特点和中文数字声学特性,拟开发一套中文数字三联音测试材料,在老年听力筛查中验证,探讨其有效性。

2 材料与方法

2.1 研究对象

在上海市招募年龄 ≥ 60 岁,可以使用普通话交流的老年人,排除患有阿尔兹海默症、帕金森症、多发性硬化、脑中风、脑肿瘤等明确或可能影响认知功能疾病及存在听神经瘤、中耳炎、突发性耳聋等耳科疾病受试者。所有受试者入组后均进行声导抗、纯音听阈测试、改良版中文数字三联音测试。测试均在隔声室内进行。根据2021年WHO听力损失分级标准进行分组^[24],按较好耳500、1000、2000、4000 Hz 4个频率点纯音听阈平均值(pure-tone threshold average, PTA) < 20 dB HL为正常, $20 \leq \text{PTA} < 35$ dB HL为轻度听力损失, $35 \leq \text{PTA} < 50$ dB HL为中度听力损失, $50 \leq \text{PTA}$ 为中重度及以上听力损失。本研究获得上海交通大学医学院附属第九人民医院医学伦理委员会批准(SH9H-2023-T388-2),并已获得所有受试者书面知情同意。本研究严格遵循赫尔辛基宣言。

2.2 测试材料

中文数字中单音节数字有0~10,其中1和7发音接

近,易发生感知混淆^[21,25]。从频率覆盖性来看,通过对数字发音进行声学特征分析,7的频率范围为363~6154 Hz,显著宽于1的332~2510 Hz;从声韵调覆盖性来看,7除了和1韵母相同,还包含*/q/*这一声母,该音素具有独特的频谱特征和能量分布模式。鉴于此,本研究将1从实验语料库中剔除,以消除因声母差异导致的频谱干扰,确保后续声学参数分析的一致性。汉语是一种声调语言,声调有辨义作用,0~9中只有0的声调是二声,有可能为0的识别提供额外线索。基于此,本研究增加同为二声的数字10。

选择6位普通话二甲及以上的发音人(3男3女),让其佩戴AKG C544头戴式话筒,在隔声室录制普通话中单音节数字0~10的发音,音频设置22050 Hz采样率和16位采样精度。

录音完成后,由10名语音学专业人员对数字发音进行评分,评分规则从语速是否适中、语气是否自然、声音是否清晰、音质好坏、发音(包括韵母、声母和声调3方面)是否准确等5个维度以1~5分进行打分,并求和,按照总分由高到低排序,最终筛选出1份得分最高的作为代表发音。

选取24名(12男12女)被试,年龄18~25岁,无耳科病史,耳镜及听力学检查正常,纯音听阈测试250~8000 Hz各频率听阈均 ≤ 15 dB HL,在隔声室里完成安静和噪声条件下数字识别测试。安静下数字识别测试给声强度分别设定为40、35、30、25、20、15、10、5、0、-5 dB HL,噪声下数字识别测试噪声选用言语谱噪声,固定给声强度为65 dB SPL,信号声分别设定为63、61、59、57、55、53、51、49、47、45 dB SPL。不同强度下每个数字随机出现1次,要求受试者在0~10(排除1)这10个数字中选择听到的数字。按照右耳安静环境下、左耳安静环境下、右耳噪声环境下、左耳环境噪声下顺序测试。

通过对测试结果进行平均计算获得各数字在不同给声条件下或不同信噪比下的平均言语识别率,绘制曲线图(见图1)。使用MATLAB软件pchip函数对曲线进行保形插值,获得正确率为50%时的言语强度或信噪比,作为各数字均衡前的言语识别阈值。安静环境下各数字的言语识别阈值分别为8.4、3.9、3.6、5.0、5.0、3.2、5.0、3.9、1.9、8.5 dB A,噪声下各数字的言语识别阈值分别为-13.1、-16.9、-14.0、-16.7、-11.5、-12.8、-15.5、-17.7、-15.0、-11.4 dB SNR。通过将该数字的言语识别阈值减去所有数字的平均言语识别阈值,计算出校正因子(Factor): $\text{Factor} = \text{SRT}_i - \overline{\text{SRT}}$ ^[26,27]。安静环境下各数字的校正因子分别为3.5、-0.9、-1.2、0.2、0.2、-1.6、0.2、-0.9、-3.0、3.7 dB,噪声环境下各数字的校正因子分别为1.4、-2.4、0.5、-2.3、2.9、1.7、-1.0、-3.2、-0.6、3.1 dB。将校正

因子应用于数字的原始音频声音强度,以对齐所有数字的50%正确识别概率,使语音材料均衡化。

2.3 测试方法

本研究分别进行了安静和噪声环境下中文数字三联音测试。采用自适应的方法获得相应中文数字三联音识别阈。共测试23组,前3组步距为4 dB,后20组步距为2 dB。最终结果为后19组数据给声强度的均值。

安静下改良版中文数字三联音测试初始给声强度设置为纯音听阈测试500、1000、2000、4000 Hz 4个频率点听阈的平均值阈上10 dB。随机出现1组数字,如果回答正确即降低给声强度,回答错误则增加给声强度。

噪声环境下改良版中文数字三联音测试初始信噪比为0 dB。测试过程中噪声给声强度固定为60 dB SPL,自适应变化信号声强度。随机出现1组数字,如果回答正确即降低信噪比,回答错误即增加信噪比。噪声在数字开始前500 ms开始,在数字结束后500 ms结束。

其中1组数字为3个不同数字随机组成,每个数字播放间隔为200 ms,测试过程中每个数字在不同位置出现的概率基本一致。本研究采用javascript搭建了基于web浏览器的测试平台,实现上述测试自动化评估过程。测试设备为ThinkPad X1和ThinkBook 14+笔记本电脑+SENNHEISER HDA300耳机,测试前经过专业校准,测试时双耳给声。

2.4 统计学方法

采用SPSS 26.0统计软件进行数据分析。对连续变

量描述统计表示为 $\bar{x} \pm SD$ 。为评估数据的分布特性,确保的统计方法的适用性,本研究对数据进行正态性检验。采用小样本量(2000例以下)广泛使用的正态性检验方法(shapiro-wilk test),以评估较好耳听阈、“安静条件下言语识别阈(speech recognition threshold_quiet, SRT_Q)和噪声条件下言语识别阈(speech recognition threshold_noise, SRT_N)3个变量的数据分布。如数据符合正态分布,则用皮尔逊相关系数(pearson correlation coefficient)分析中文数字三联音测试结果和纯音听阈的相关性;如数据不符合正态分布,则使用斯皮尔曼等级相关系数(spearman's rank correlation coefficient)分析中文数字三联音测试结果和纯音听阈的相关性。

以受试者较好耳PTA ≥ 20 、35、50 dB HL作为界限绘制ROC曲线,并计算相应的AUC值、约登指数,得出最大约登指数对应的敏感度、特异度、最佳截断值和诊断符合率,以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

3 结果

本研究共纳入203名受试者,其中男81人,女122人,平均年龄 69.36 ± 6.21 岁(60~91岁)。健听组23人,轻度听力损失组78人,中度听力损失组64人,中重度及以上听力损失组38人(见表1)。

3.1 测试材料的信度评估

复测信度指同一受试者在条件一致、间隔固定且较短的时间内重复接受同一测验时,两次得分之间的一致性。

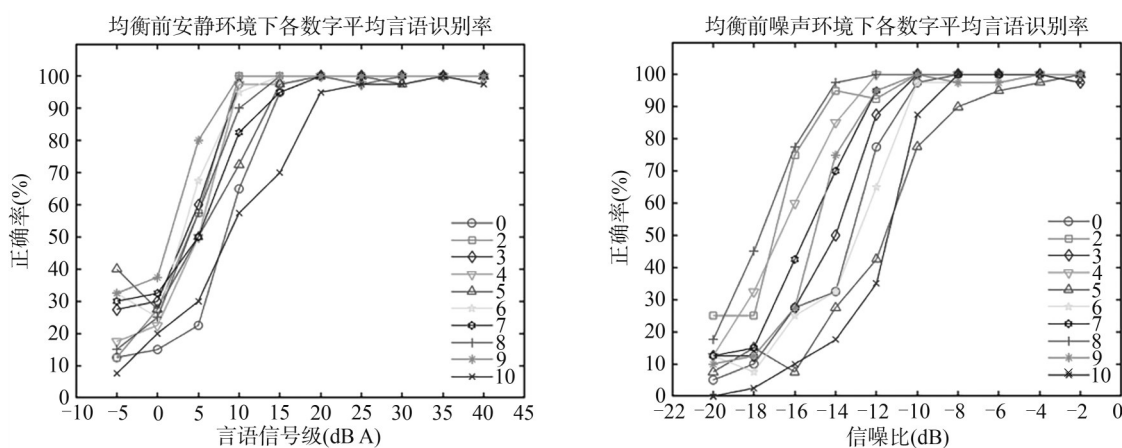


图1 各数字的心理测量函数曲线

表1 受试者基本情况

	健听	轻度	中度	中重度及以上
总数(男/女)	23(6/17)	78(27/51)	64(28/36)	38(20/18)
年龄(岁)	64.74 ± 3.83	68.46 ± 5.37	71.49 ± 6.70	74.03 ± 7.04
较好耳听阈(dB HL)	15.38 ± 2.98	26.48 ± 3.77	48.18 ± 5.15	56.15 ± 5.79

本研究在开发测试材料时采用经修订的Smits公式^[28,29]。记录相邻2周20名复测受试者安静条件下改良版中文数字三联音测试的变异性为2.98 dB,高于中文数字三联音测试的2.66 dB。噪声条件下,变异性为1.0 dB,低于中文数字三联音测试的1.2 dB。

3.2 改良版中文数字三联音测试结果与纯音听阈相关性分析

本研究分析了受试者较好耳纯音平均听阈(PTA)与安静和噪声环境下改良版中文数字三联音测试结果的相关性。结果显示,较好耳PTA值与安静和噪声环境下的测试结果均存在显著正相关($P<0.001$),相关系数 r 分别为0.86和0.71(见图2,图3)。

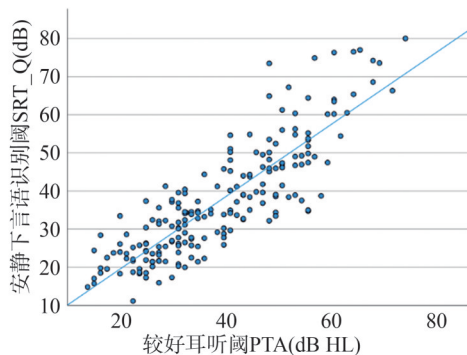


图2 受试者较好耳的纯音平均听阈与安静环境下中文数字三联音测试结果相关性

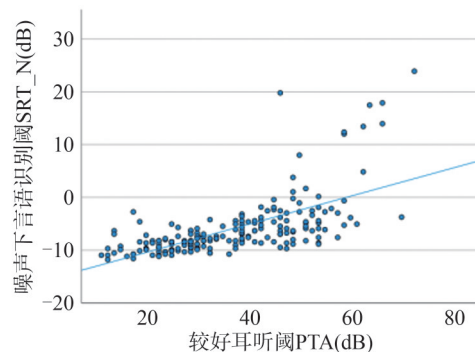


图3 受试者较好耳的纯音平均听阈($PTA_{0.5\sim 4\text{ kHz}}$)与噪声下中文数字三联音测试结果相关性

3.3 改良版中文数字三联音测试对筛查听力损失效能评估的ROC曲线分析

ROC曲线分析结果显示,安静和噪声环境下改良版中文数字三联音测试筛查听力是否异常的AUC分别为0.90和0.78,最佳截断值分别为28.71 dB和-9.16 dB,敏感度分别为0.75和0.82,特异度分别为0.96和0.68;中度及以上听力损失组的AUC分别为0.94和0.87,最佳截断值分别为38.08 dB和-6.85 dB,敏感度分别为0.78和0.73,特异度分别为0.95和0.89。不同测试条件下不同听力损失程度对应的95%置信区间(95% confidence interval, 95% CI),诊断符合率等数据见表2、图4、图5、图6。

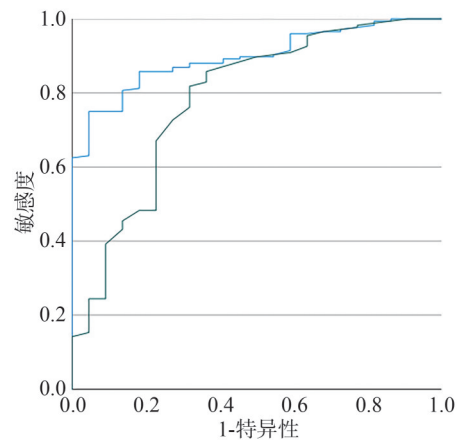


图4 改良版中文数字三联音测试筛查轻度听力的ROC曲线分析(截断值:20 dB HL)

4 讨论

4.1 改良版中文数字三联音测试在老年听力筛查应用中的有效性

4.1.1 改良版中文数字三联音测试筛查结果与纯音听阈的相关性 纯音听阈测试是临床诊断听力损失的金标准,本研究结果显示,安静和噪声环境下改良版中文数字三联音测试结果均与纯音听阈存在显著正相关($P<0.001$)。与大多数中文数字三联音研究结果基本一致(相关系数 $r\geq 0.7$),安静环境下改良版中文数字三联音测试结

表2 安静下和噪声环境下改良版中文数字三联音测试对较好耳听力损失分级的效能参数

测试方法	PTA	AUC	95%CI	最佳截断值	特异度	敏感度	最大约登指数	P	诊断符合率
SRT_Q	>20	0.90	0.85~0.95	28.71	0.96	0.75	0.71	<0.001*	0.76
	>35	0.94	0.92~0.97	38.08	0.95	0.78	0.73	<0.001*	0.86
	>50	0.92	0.88~0.96	46.53	0.90	0.86	0.75	<0.001*	0.86
SRT_N	>20	0.78	0.67~0.90	-9.16	0.68	0.82	0.50	<0.001*	0.79
	>35	0.87	0.83~0.92	-6.85	0.89	0.73	0.62	<0.001*	0.79
	>50	0.84	0.77~0.91	-6.19	0.75	0.83	0.59	<0.001*	0.75

* $P<0.05$

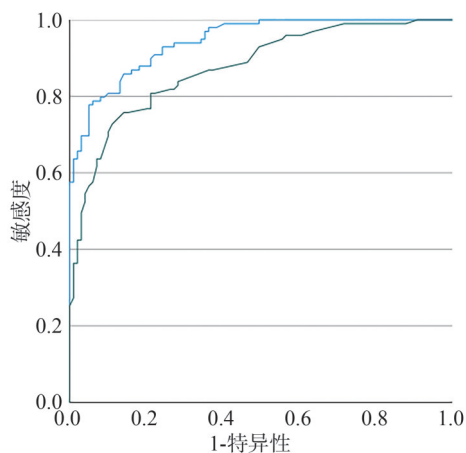


图5 改良版中文数字三联音测试筛查中度听力的ROC曲线分析(截断值:35 dB HL)

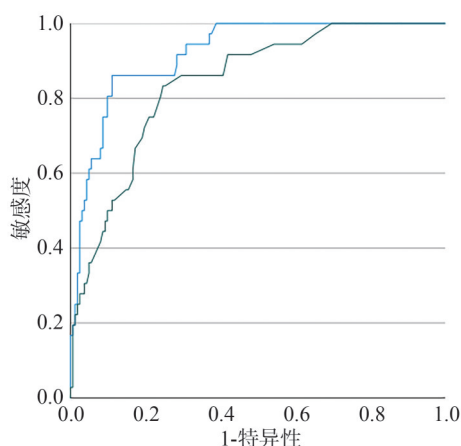


图6 改良版中文数字三联音测试筛查重度听力的ROC曲线分析(截断值:50 dB HL)

果与纯音听阈存在高度相关($r=0.86$),噪声下改良版中文数字三联音测试结果与纯音听阈存在中等相关($r=0.71$)。由此表明,改良版的中文数字三联音测试结果可预测老年听力损失的情况。

4.1.2 改良版中文数字三联音测试筛查老年听力损失的ROC曲线分析 ROC曲线被定义为对于可能或将会存在混淆的两种条件或自然状态,需要试验者、专业工作者作出精细判别,或者准确决策的一种定量方法,目前已广泛应用于临床诊疗和人群筛检研究。AUC值在0.5~0.7表示诊断价值较低,0.7~0.9提示诊断价值中等,0.9以上认为诊断价值较高。

由此可见,改良版中文数字三联音测试在安静条件下显示出较高的筛查价值(AUC均达到0.89以上),且能够有效区分不同听力损失程度。噪声条件下的AUC略低(均大于0.7),提示噪声条件下改良版中文数字三联音

测试结果对于听力损失判别有一定价值。因此,改良版中文数字三联音测试来预测老年听力损失情况。

4.1.3 改良版中文数字三联音测试对筛查老年听力损失效能的敏感度、特异度分析。敏感度也称真阳性率,是指试验结果为阳性,按照金标准确诊为“患病”的患者比例。敏感度越高,代表被遗漏的病例越少。特异性又称为真阴性率,是指试验结果为阴性,而按照金标准确诊为“无病”的病例数所占比例。特异性越高,代表误诊病例越少。

安静条件下改良版中文数字三联音测试筛查轻度及以上听力损失敏感度为0.75,特异度为0.96;安筛查中度听力损失敏感度和特异度分别为0.78、0.95。

针对中文版数字三联音测试的研究,元贝尔^[13]等探究基于互联网的噪声下中文数字三联音测试发现听力损失的有效性,分析了50例受试者(健听者34名,听力损失患者16例)数据,结果显示以 $PTA>25$ dB HL 敏感度为0.94、特异性为0.94, $r=0.85$ 。古鑫^[17]等探讨利用噪声下中文数字三联音测试预测不同程度听力损失的实用性和有效性,分析了164例受试者(健听者70名,听力损失患者94例)数据,结果显示以 $PTA>25$ dB HL 作为听力异常标准时,敏感度为0.96、特异性为1, $r=0.89$ 。改良版中文数字三联音测试与相关研究之间的差异推测可能原因:①由于本研究的参与者均为60岁以上老年人,而以上研究涵盖了不同年龄段受试者,平均年龄小的受试者中健听者占比更大。而相较于年轻人,该测试材料针对老年群体中表现出略低的敏感度和特异度,且易存在SRT与PTA不一致情况;②研究数据健听组听阈与听障组的听阈区分度较高,因此敏感度和特异度较高。后期笔者将对对比改良版与传统版中文数字三联音测试结果在老年听力损失筛查中的差异,以验证中文数字三联音测试优化的意义。

改良版中文数字三联音可有效筛查老年听力损失。同时,测试结果在安静条件下优于噪声条件下,主要原因为听力损失老年人噪声下言语识别能力与纯音听阈不成比例下降,且噪声条件下言语识别能力退化早于并重于听阈减退,很多听阈正常的老年人噪声条件下言语识别能力也存在下降情况^[30]。

4.2 改良版中文数字三联音测试的后续发展与应用

常用的临床诊断试验一般不同时具有较高的敏感性和特异性,使用单一的诊断试验不能准确诊断或排除患者,联合试验可提高诊断试验的敏感性和特异性。安静条件下改良版中文数字三联音测试虽然筛查效能更好,但在实际运用场景中,由于部分筛查场景,如家庭、社区等面临环境噪声、测试设备及耳机声输出等影响,导致测试结果不准确,而噪声条件下改良版中文数字三联音测试可以减弱外界噪声对测试结果的影响,同时在区分中度及以上听

力损失时显示出一定诊断价值, AUC 均达到 0.84 以上。因而在我国社区的老年听力筛查中可联合安静和噪声条件下改良版中文数字三联音测试施行两步法筛查。

两步法筛查具体为: 第一步: 在安静环境中进行快速筛查, 评估受试者在安静环境下的言语识别能力, 通过经实验得出的正常值、异常值声强度进行基础筛查。第二步: 未通过第一步测试的受试者进入噪声环境下筛查, 通过经实验得出的正常值、异常值声强度, 评估受试者在噪声环境下的言语识别能力, 进一步提高测试准确性。应用前期实验基础测得的正常值, 两步法可更高效、准确地完成听力筛查。

4.3 改良版中文数字三联音测试的局限性

本研究中只从频率覆盖和声韵调覆盖性上改良了语音测试材料中 1 和 7 之间的频谱干扰。中文语音学特征在中文数字三联音测试中仍有许多方面需改进与提升。如传统中文数字三联音的数字材料只保证在三联音的每个位置出现的概率相同, 但从中文语音学特征上考虑, 仍有改进空间。

参考文献

- [1] Lin FR. Age-Related Hearing Loss[J]. *New England Journal of Medicine*, 2024, 390(16): 1505-1512.
- [2] 贺祖宏, 李明, 邹圣宇, 等. 老年性聋的发病机制及干预研究进展[J]. 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2020, 55(11): 1105-1110.
- [3] 任燕, 汪婷, 周敏, 等. MoCA 和 MMSE 量表在老年性聋认知评估中的应用比较[J]. 中国听力语言康复科学杂志, 2022, 20(2): 107-111.
- [4] 鄢慧琴, 李海涛, 李小帅, 等. 年龄相关性听力损失对认知功能与声源定位的影响[J]. 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2023, 58(8): 812-816.
- [5] 黄治物, 吴皓. 年龄相关性听力损失研究进展与临床干预策略[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2022, 42(9): 1182-1187.
- [6] Jayakody DMP, Almeida OP, Speelman CP, et al. Association between speech and high-frequency hearing loss and depression, anxiety and stress in older adults[J]. *Maturitas*, 2018, 110: 86-91.
- [7] López-Torres Hidalgo J, Gras CB, Lapeira JT, et al. Functional status of elderly people with hearing loss[J]. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 2009, 49(1): 88-92.
- [8] Li FF, Fu ZY, Han K, et al. Trends and driving factors of age-related hearing loss and severity over 30 years: a cross-sectional study[J]. *BMC Geriatr*. 2025, 25(1):387-387.
- [9] Yin L, Liu J, Zhang J, Tang L, et al. Economic burden due to hearing loss among individuals in Hebei, China[J]. *BMC Public Health*, 2025, 25(1):1080.
- [10] 全国耳聋治聋技术指导组, 中华医学会耳鼻咽喉头颈外科学分会, 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志编辑委员会, 等. 老年听力损失诊断与干预专家共识(2019)[J]. 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2019, 54(3): 166-173.
- [11] 李炎姬, 古鑫, 李玉玲, 等. 噪声下数字言语测试的发展历史和临床应用[J]. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2021, 28(6): 356-359.
- [12] 傅新星, 李炎姬, 古鑫, 等. 成人听力障碍筛查量表和噪声下数字言语测试在听力损失患者中的应用[J]. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2021, 28(6): 340-343.
- [13] Smits C, Merkus P, Houtgast T. How we do it: The Dutch functional hearing-screening tests by telephone and internet[J]. *Clinical Otolaryngology*, 2006, 31(5): 436-440.
- [14] Ceccato JC, Duran MJ, Swanepoel W, et al. French Version of the Antiphasic Digits-in-Noise Test for Smartphone Hearing Screening[J]. *Front Public Health*, 2021, 9:725080.
- [15] Potgieter JM, Swanepoel W, Myburgh HC, et al. The South African English Smartphone Digits-in-Noise Hearing Test: Effect of Age, Hearing Loss, and Speaking Competence[J]. *Ear Hear*. 2018, 39(4):656-663.
- [16] Smits C, Watson CS, Kidd GR, et al. A comparison between the Dutch and American-English digits-in-noise (DIN) tests in normal-hearing listeners[J]. *Int J Audiol*. 2016, 55(6):358-65.
- [17] Akeroyd MA, Arlinger S, Bentler RA, et al. International Collegium of Rehabilitative Audiology (ICRA) recommendations for the construction of multilingual speech tests[J]. *Int J Audiol*, 2015, 54(Suppl 2): 17-22.
- [18] 元贝尔, 张天博, 傅新星, 等. 基于互联网的成人听力筛查材料特征值的建立[J]. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2018, 32(3): 202-205.
- [19] Wang MD, Bilger RC. Consonant confusions in noise: a study of perceptual features[J]. *J Acoust Soc Am*, 1973, 54(5): 1248-1266.
- [20] 史媛媛, 刘加, 刘润生. 一种改进的线性区分分析方法及其在汉语数码语音识别上的应用[J]. 电子学报, 2002, 30(7): 959-963.
- [21] 刘雅琦, 王隼佳, 余俊毅. 声学特征与普通话辅音声母的感知混淆[J]. 声学学报, 2024, 49(6): 1284-1296.
- [22] GBD 2019 Hearing Loss Collaborators. Hearing loss prevalence and years lived with disability, 1990-2019: findings from the Global Burden of Disease Study 2019[J]. *Lancet*, 2021, 397(10278):996-1009.
- [23] Tsai Do BS, Bush ML, Weinreich HM, et al. Clinical Practice Guideline: Age-Related Hearing Loss[J]. *Otolaryngol Head Neck Surg*, 2024, Suppl. 2:S1-S54.
- [24] World Health Organization. World report on hearing[R/OL]. Geneva: World Health Organization, 2021(2021-03-03) [2024-03-10]. <https://www.who.int/publications/i/item/world-report-on-hearing>.
- [25] 古鑫, 李炎姬, 傅新星. 噪声下数字言语测试在听力筛查中的应用研究[J]. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2021, 28(6): 344-347.
- [26] Brand T, Kollmeier B. Efficient adaptive procedures for threshold and concurrent slope estimates for psychophysics and speech intelligibility tests[J]. *J Acoust Soc Am*. 2002, 111(6):2801-2810.
- [27] Smits C, De Sousa KC, Swanepoel W. An analytical method to convert between speech recognition thresholds and percentage-correct scores for speech-in-noise tests[J]. *J Acoust Soc Am*. 2021, 150(2):1321.
- [28] Smits C, Kapteyn TS, Houtgast T. Development and validation of an automatic speech-in-noise screening test by telephone[J]. *Int J Audiol*. 2004, 43(1): 15-28.
- [29] Smits C, Theo Goverts S, Festen JM. The digits-in-noise test: assessing auditory speech recognition abilities in noise[J]. *J Acoust Soc Am*. 2013, 133(3): 1693-1706.
- [30] Mussoi BS, Warren A, Benedict J, et al. Contributions of Behavioral and Electrophysiological Spectrotemporal Processing to the Perception of Degraded Speech in Younger and Older Adults[J]. *J Speech Lang Hear Res*. 2025, 68(6):2992-3010.

收稿日期 2025-09-17

责任编辑 蒋 春