

doi: 10.3969/j.issn.1672-4933.2025.03.011

“普通话七音”在线听力测试系统开发与效果验证

The Development and Effect Verification of Online Hearing-test System Based on Mandarin
Seven-Sound

陈彧^{1,2,3*} 白昱^{2,4*} 张句²

CHEN Yu, BAI Yu, ZHANG Ju

【摘要】目的 验证“普通话七音”在线听力测试系统的实用性,探讨该系统在多样化发音人群中的应用潜力。**方法** 纳入31名受试者(15名健听成人,16名听障成人),年龄19~28岁,平均年龄 21.77 ± 2.43 岁;受试者在安静环境中,通过“普通话七音”在线听力测试系统完成不同发音人测试。**结果** (1)在线测试系统运行顺畅,能够准确记录受试者的反应时间和正确识别率,并能够提供及时的结果反馈,受试者普遍反映使用体验良好;(2)听障组/s/和/c/音节的正确识别率最低;(3)健听组与听障组在反应时间和测试正确率上存在显著差异,健听组表现更优异;(4)健听组的反应时和正确率显著受发音人年龄影响,但未受发音人性别的显著影响;听障组的反应时和正确率均不受发音人年龄和性别的显著影响。**结论** “普通话七音”测试能够有效评估听障患者言语识别的频段缺陷,展现了良好的可用性,可作为听障患者日常听力状况监测工具。

【关键词】 普通话七音;在线听力测试;系统开发;效果验证

【中图分类号】 G766

【文献标识码】 A

【文章编号】 1672-4933(2025)03-0269-07

【Abstract】Objective To develop an online hearing-test system based on "Mandarin Seven-sound Test", and to evaluate the feasibility of the system and the effectiveness "Mandarin Seven-sound Test" across multiple speakers. **Method** 31 participants (15 normal-hearing adults, and 16 deaf adults), with an average age of 21.77 ± 2.43 years old, were included in this study. All the participants completed the "Mandarin Seven-sound Test" recorded by multiple speakers using the online hearing-test system in a quiet environment. **Results** (1) All 31 participants reported that the online hearing-test system operated well, and it could accurately record choices and reaction time, and provide immediate feedback based on results. (2) Hearing-loss participants had the lowest recognition accuracy on/s/and/c/. (3) The reaction time and recognition accuracy measured by the online testing system showed significant differences among different categories of participants: the normal-hearing participants were better than the hearing-loss participants. (4) The reaction times and accuracy of normal-hearing participants were significantly influenced by the age of speakers, but not significantly affected by the gender of speakers. The reaction times and accuracy of hearing-loss participants were not significantly influenced by the age or gender of speakers. **Conclusion** The "Mandarin Seven-sound Test" can effectively detect the frequency bands of hearing deficiency in deaf individuals. The online testing system for the "Mandarin Seven-sound Test" has sufficient capability and could be further used for daily monitoring of hearing conditions of deaf individuals.

【Key words】 Mandarin seven-sound; Online hearing test; System development; Effect verification

1 引言

言语测听是临床上评估听障患者听觉和言语识别能力的常用手段,在验证纯音测听结果、评价沟通技巧,以及测试助听设备效果等方面起重要作用。然而,传统的言语测听程序繁琐、时间金钱成本高,不利于听障患者日

常自我监测与评估。鉴于此,美国康复学家 Daniel Ling^[1] 针对英语母语人群提出了快速言语测听材料林氏六音。林氏六音测试操作简易,结果可靠,常用于听障患者言语识别能力的日常监测,在听觉频段缺陷评估、听觉康复进程监测、言语康复成效评估等方面都具有重要作用^[2,3]。

作者单位:1 东南大学语言与认知研究所 南京 211189

2 天津理工大学聋人工学院 天津 300384

3 国家语言与健康研究中心 上海 200240

4 深圳市龙岗区耳鼻咽喉医院/深圳市耳鼻咽喉研究所 深圳 518172

作者简介:陈彧 博士 教授;研究方向:计算机技术、认知计算、病理语言学

白昱 硕士 研究实习生;研究方向:听力学、计算机技术

通讯作者:张句, E-mail: juzhang@email.tjut.edu.cn

*为共同第一作者

由于不同语言的发音方式不同,林氏六音在不同语言中的频率范围也不相同。因此,部分国家根据其语言特点对林氏六音测试进行了修正^[4,5]。国内学者张华等^[6,7]在普通话版林氏六音的基础上,针对普通话言语频率范围,设计了“普通话七音”快速言语测听材料。在普通话版林氏六音的基础上,通过补充中心频率为6000~8000 Hz的/c/音节,填补普通话版“林氏六音”的频率间隔,实现对普通话言语频率的完整覆盖。“普通话七音”对于我国听障人群的治疗、预后和助听设备技术发展有重大意义。然而,由于长期以来形成的用户惯性,加之“普通话七音”未有相应的应用及推广平台,目前国内在对普通话母语听障患者的听觉和言语识别能力评估和研究时,仍普遍采用林氏六音作为快速言语测听材料^[8~10],从而产生测试结果无法真实反映患者听觉言语感知能力的风险。

目前,国内已有利用计算机技术构建的专门服务于中国听障患者的在线听力自测平台^[11,12]。尽管通过在线平台得到的自我听力测试结果可能与专业听力评估存在一定差距,但这类工具在初步听力筛查和持续监测方面仍显示出有效性,为临床治疗提供了有价值的辅助信息,有助于听障患者监测自身听力状况,帮助医生更好地理解 and 跟踪患者听力状况,从而优化治疗与康复方案^[13~16]。

针对国内听障患者群体对普通话快速听力检测工具的迫切需求,本研究团队开发了一款基于微信小程序的“普通话七音”在线测试平台。本研究考察该测试系统及“普通话七音”对我国听障患者群体开展听力快速检测方面的有效性和实用性。

2 方法

2.1 受试者

听障组受试者来自天津理工大学聋人工学院。纳入标准:①具备正常认知能力,无精神疾病史的在校听力障碍大学生;②双耳听力损失均大于65 dB,经常性配戴人工耳蜗和/或助听器;③日常交流方式以汉语普通话为主,具有一定言语识别能力。

同时招募健听受试者作为对照组参与测试。纳入标准:①具备正常认知能力,无精神疾病史的在校健听大学生;②无听力语言疾病史或听力系统疾病,双耳纯音气导

阈值≤25 dB HL(参考2021WHO听力分级标准);③母语为汉语普通话。根据以上标准,本研究共纳入50例受试者,平均年龄21~23岁,健听组(25例)与听障组(25例)年龄和性别分布基本均衡。健听组男女比例为15:10,平均年龄21.40±2.16岁;听障组男女比例12:13,平均年龄22.52±2.73岁。听障组双耳听阈:左耳平均89.68±16.12 dB HL,右耳平均90.36±17.12 dB HL。

2.2 测试材料

自编“普通话七音”在线测试系统测试材料由36个成词单音节组成。为确保测试内容接近汉语自然语言状态,以更适合识别反馈,并丰富测试项目的语言材料形式,该系统为每个测试音位提供5个拼读音节^[2]。在普通话、上海普通话、厦门方言等版本的林氏六音中,/m/音位及其拼读音节/mo/、/mi/的中心频率具有显著差异^[2,6,7,17]。“普通话七音”在线测试系统为/m/音位提供一个拼读音节,以提高该音位测试结果的有效性。所有拼读音节均为成词单音节,且均可在《现代汉语常用字表》中找到对应常用字,内容见表1、2。

针对这些单字词,邀请专业人员绘制风格统一的系列图片。邀请某幼儿园30名2.5~4岁儿童开展图片指认测试,证明绘制图片简洁易懂、生动有趣,可以胜任低龄儿童的听觉言语识别能力测试工作。同时,邀请8名发音人在环境噪声小于30 dB的专业录音室录制测试材料,采样频率为44100 Hz、16位、单声道。发音人采用自然发音方式,以适中速度和音量循环发音3次,由专业人员现场监听以确保质量。录制完成后,采用Praat 5.3软件对音频进行分割,挑选最佳质量的录音文件作为入库测试音频。发音人入选标准:①儿童(10岁)、青年(25岁)、中年(40岁)、老年(60岁)各一男一女;②母语为汉语北方方言,普通话口语标准,无明显方言特征,成年发音人需通过国家普通话水平测试,且达到一级乙等及以上标准;③无口腔疾病(如龋齿、正畸)或其他可能对发音质量产生干扰的因素,无任何语言或语音发声障碍,如结巴、喉音异常、发音鼻化等;④听力正常,双耳纯音气导阈值≤20 dB HL(参考2021WHO听力分级标准),无听力系统疾病史;⑤发音清晰、节奏感好,能够准确控制音强、音长,并保持一致的语速和语调,能够根据录音指导要求反复调整发音状态,保持较高的合作度和稳定的录音表现。

表1 “普通话七音”在线测试字表(/m/, /sh/, /c/, /s/)

	/i/	/e/	/ei/	/ui/	/ao/	/ou/	/ie/	/üe/	/an/	/en/	/in/	/un/	/uo/	/eng/	/ing/	/ian/	/uan/	/iong/
/m/	蜜		眉		猫				满	门							面	
/sh/		蛇		水		手			山					绳				
/c/							鞋	雪			心					星		熊
/s/	丝								伞			笋	锁				蒜	

表2 “普通话七音”在线测试字表(/u/, /a/, /i/)

	/b/	/d/	/t/	/l/	/h/	/j/	/zh/	/ch/	/y/	/w/
/u/		肚	兔	鹿	壶		猪			
/a/	爸		塔					叉	鸭	蛙
/i/	鼻	笛		梨		鸡			衣	

2.3 测试工具及程序

“普通话七音”在线测试系统采用微信小程序原生框架MINA搭建前端,利用其封装接口实现网络请求、本地存储及音频播放等功能;后端基于Python语言的Django框架开发,负责处理网络请求和数据库交互,数据存储采用MySQL。系统前后端与数据库均部署于阿里云服务器ECS,支持多终端访问。测试流程中,前端通过费雪-耶茨(Fisher-Yates shuffle)算法预生成乱序数组以确定音频播放顺序^[18],并调用Math.random函数实时随机化选项位置及干扰项内容,确保测试序列、选项分布和干扰项的完全随机化。

测试开始前,受试者可调整刺激给声强度(60~80 dB)。正式测试时,系统根据预设参数(发音人性别、年龄等)从8名发音人的无噪音语音库中抽取材料,生成288个试次(36×8)。每个试次播放后,受试者需从4幅图片中选择答案,仅允许1次重听机会,正确判断得1分,全程耗时约30分钟。测试结束后,数据经确认自动存储至服务器,支持受试者随时终止测试或拒绝上传数据。测试在环境噪声≤30 dB的安静房间内进行,配备联想Y700笔记本电脑(17.3英寸屏,1920×1080分辨率)及JBL扬声器,设备置于受试者正前方70 cm处。

2.4 统计学方法

应用R语言(version 4.2.2)对数据进行统计学分析。统计方法根据正态性检验结果而定,符合正态分布数据采用独立样本 t 检验。不同发音人条件下测试数据使用多因素方差分析比较。

3 结果

本实验共得到14400条数据(健听组、听障组各7200条),根据所有数据反应时平均值±3倍标准差的标准(健听组: $\bar{x}=3195.40$, $s=1214.56$, range=-448.28~6839.08;听障组: $\bar{x}=4781.48$, $s=3358.32$, range=-8139.8~14856.44),去除健听组数据62条,听障组数据138条。

3.1 “普通话七音”在线测试系统区分效度验证

根据保留数据,分别针对听障组、健听组受试者的测试正确率和反应时间开展独立样本 t 检验,以验证系统的区分效度。两组受试者中健听组数据更集中,听障组数据较分散;同时,两组受试者的平均反应时($t=-13.33$, $P<0.001$)和平均正确率($t=10.57$, $P<0.001$)均具有显著差异,见图1。检验结果表明健听组的平均反应时和正确率明显优于听障组。“普通话七音”在线测试系统能够有效区分听障组和健听组,具有良好的区分效度。对听障组数据进一步分析,以听障组受试者的正确率为因变量,编号为自变量,开展单因素方差分析,结果表明不同受试者的正确识别率存在显著差异($F(24, 150)=19.47$, $P<0.001$),进一步证明测试系统和测试材料具有良好的区分效度。

3.2 “普通话七音”在线测试系统内容效度验证

根据保留数据可以得到健听组和听障组受试者的音素正确识别率混淆矩阵,如表3所示。健听组各目标音素的识别正确率均在99.7%以上,其中/m/, /a/和/i/音素识别正确率达到100%。相较之下,听障组受试者各音节的识别正确率均低于健听组,反映经过人工助听的听障患者在听觉能力方面仍然低于健听群体的事实。听障组对/s/, /c/的识别正确率最低,分别为91.41%和91.95%。

由于听障组/s/, /c/音素识别正确率与其他音素存在较大差异,为评估测试系统和测试材料的内容效度,以听障组音素识别正确率为因变量,音素为自变量,开展单因素方差分析,结果表明不同音素识别正确率无显著差异,

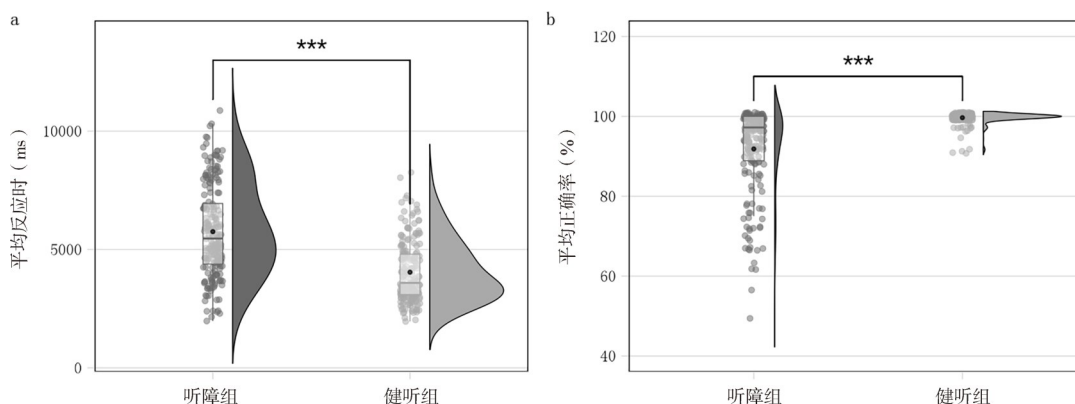


图1 听障组、健听组受试者平均反应时、平均正确率分布(a 平均反应时分布;b 平均正确率分布)

*** $P<0.001$

表3 音素识别正确率(%)混淆矩阵

音素	健听组							听障组						
	/m/	/sh/	/ɕ/	/s/	/u/	/a/	/i/	/m/	/sh/	/ɕ/	/s/	/u/	/a/	/i/
/m/	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	94.61	0.77	0.43	0.94	1.88	0.68	0.68
/sh/	0.10	99.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.12	93.77	1.23	2.15	0.61	0.31	0.82
/ɕ/	0.00	0.00	99.90	0.00	0.10	0.00	0.00	0.82	2.24	91.95	2.45	1.12	0.20	1.22
/s/	0.10	0.10	0.00	99.70	0.10	0.00	0.00	1.64	3.07	1.74	91.41	1.43	0.31	0.41
/u/	0.10	0.00	0.00	0.10	99.70	0.00	0.10	0.61	0.81	0.61	0.30	97.06	0.20	0.40
/a/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	1.32	0.20	0.20	1.02	0.81	96.04	0.41
/i/	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	2.04	0.31	1.12	0.41	2.55	0.00	93.58

测试系统和测试材料具有较好的一致性和内容效度。

3.3 健听组与听障组平均反应时和正确率分析

3.3.1 健听组与听障组——正确率的差异 以入库测试音频发音人年龄、性别2个因素为自变量,分别对健听组和听障组的正确率开展方差分析。如图2所示,针对健听组数据的方差分析结果显示,只有发音人年龄($F(3, 192)=2.83, P<0.05, \eta_p^2=0.04$)报告了显著的主效应,且发音人年龄和性别的交互效应不显著。事后多重比较表明,健听组受试者倾听儿童发音人音频时正确率显著低

于青年和老年(儿童 vs 青年: $t=-2.67, P<0.01$; 儿童 vs 老年: $t=-2.09, P<0.05$)。如图3所示,针对听障组数据的方差分析结果显示,听障组测试正确率未受发音人年龄、性别的显著影响。听障组受试者在倾听儿童和老年音频时的平均正确率低于青年和中年。

3.3.2 健听组和听障组反应时的差异 以入库测试音频发音人年龄与性别2个因素为自变量,分别对健听组和听障组的反应时数据开展方差分析。如图4所示,健听组只有发音人年龄($F(3, 192)=2.77, P<0.05, \eta_p^2=0.04$)报告

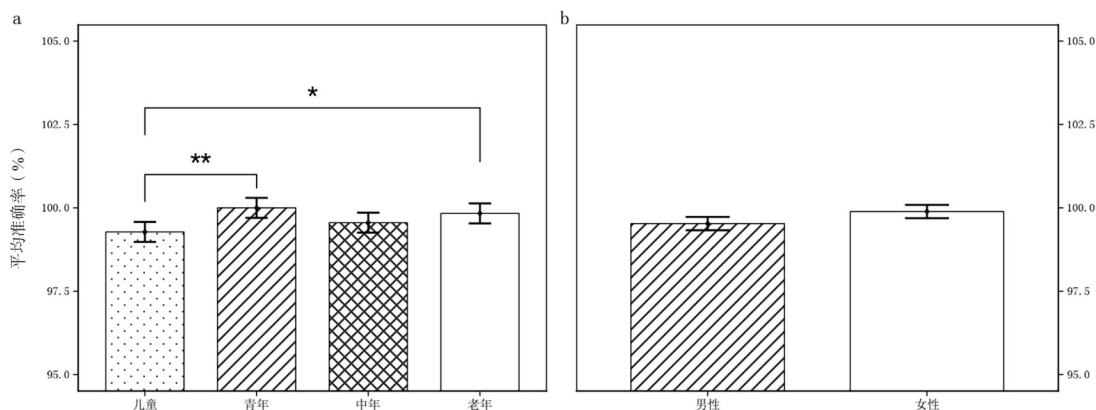


图2 健听组正确率分析结果(a发音人年龄;b发音人性别)

* $P<0.05$, ** $P<0.01$,下同

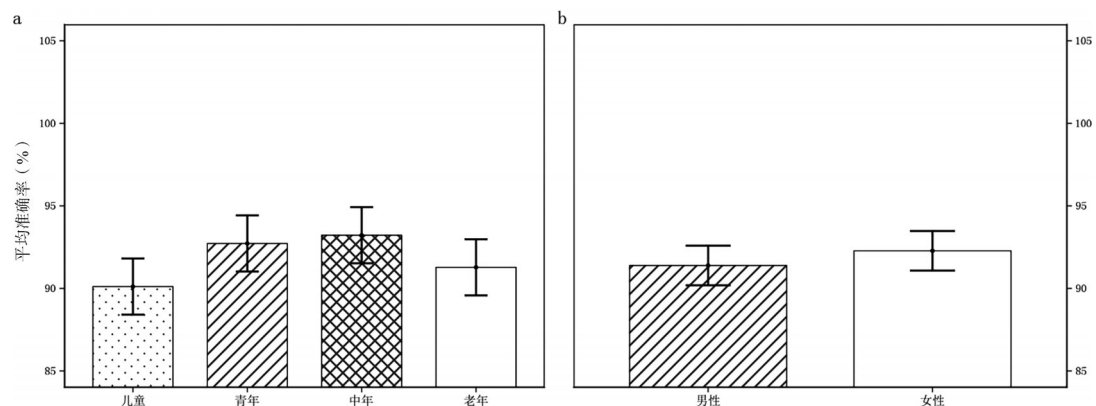


图3 听障组正确率分析结果(a发音人年龄;b发音人性别)

了显著的主效应,且发音人年龄和性别的交互效应不显著。事后多重比较表明,健听组在倾听不同年龄发音人音频时,青年音频所需反应时显著低于儿童(青年 vs 儿童; $t=-2.81, P<0.01$)。针对听障组数据的方差分析结果显示,听障组受试者的反应时未受发音人年龄、性别的显著影响。图5中可以看出,听障组受试者对儿童的平均反应时长于其他组,且倾听老年所需反应时略长于青年和中年。

4 讨论

本研究通过验证“普通话七音”在线测试系统区分效度和内容效度,为其作为快速语言能力评估工具的有效性提供支持。在区分效度方面,该系统能够有效区分健听组和听障组,在听障组内,受试者正确率有显著差异,表明系统具有较好的区分效度,能够有效区分不同群体间以及群体内部个体的能力差异。在内容效度方面,通过对听障组实验数据分析发现,不同音素的正确识别率间无显著差异,表明测试材料在整体上具有较好的内容效度,即能够全面地评估受试者的识别能力,而不偏向于

某些特定音素。

此外,研究发现听障组对/s/、/c/所在音节的识别正确率最低,分别为91.41%和91.95%。鉴于现有助听设备补偿听力范围大多为200~8000 Hz,而“普通话七音”中/s/音位中心频率约为8000~11000 Hz^[7];笔者认为,现有助听设备补偿范围无法覆盖/s/的中心频率,可能是导致听障组受试者/s/识别正确率低的主要原因。作为在普通话版林氏六音的基础上新添加的音素,/c/音位的中心频率约为6000~8000 Hz^[7],达到当前大多数助听设备补偿范围的上限,可能是导致听障组受试者对该音素识别正确率较低的原因之一。听障组受试者对于/c/音位的正确识别率较低,反映出在使用普通话版林氏六音对以普通话为母语的听障患者开展测试时,由于其存在6000~8000 Hz的频率缺口^[7],可能无法全面客观反映听障患者的言语感知能力,对准确评估其言语识别能力、康复成效、助听设备调试和使用效果造成一定影响。结果表明,“普通话七音”在普通话版林氏六音的基础上添加/c/音素,对于弥补林氏六音的缺陷,帮助听障患者更好地监测言语识别能力、评估助听设备效果具有重要

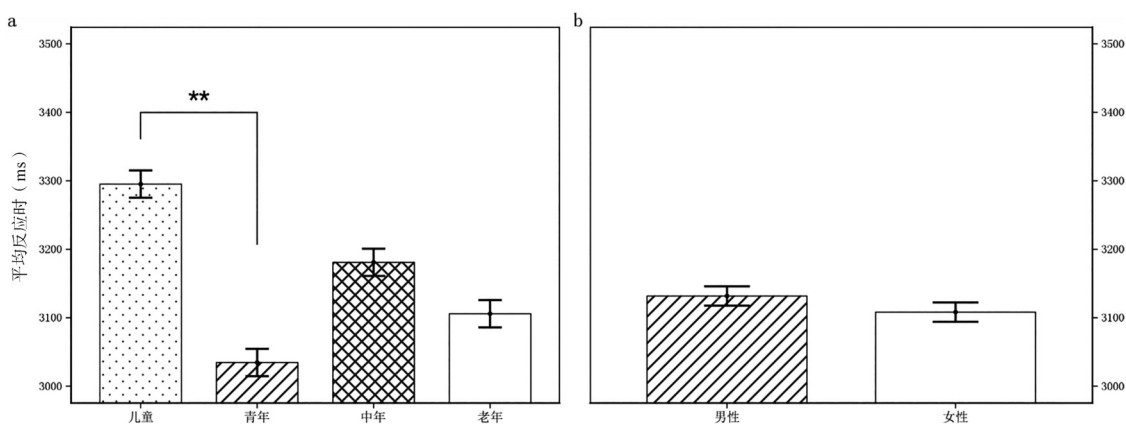


图4 健听组反应时分析结果(a发音人年龄;b发音人性别)

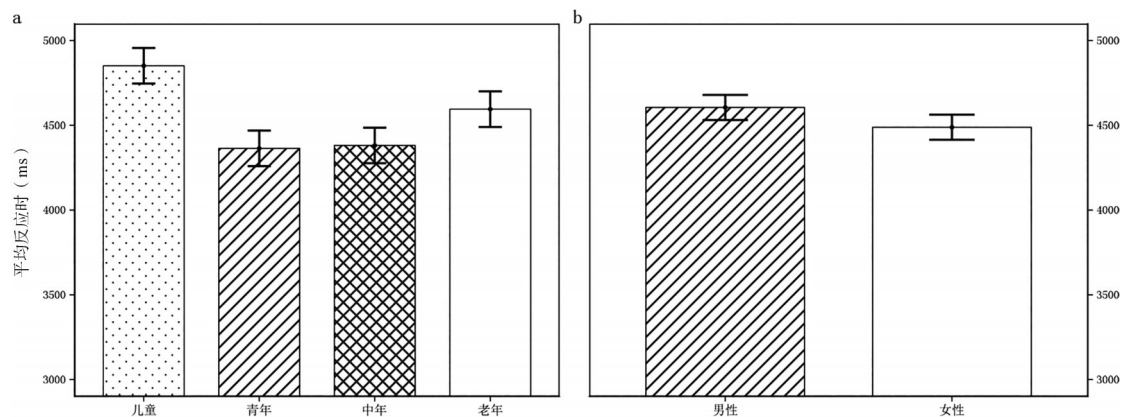


图5 听障组反应时分析结果(a发音人年龄;b发音人性别)

作用。

听力损失会导致患者听觉神经发生生理学改变,使其听觉能力进一步下降^[19~22]。当前人工辅听设备受技术限制,提供的听觉线索有限,听障患者对声音高低、音调、频率等感知与辨别较健听群体不灵敏。因此,除了音素本身的发音特点,对听障患者言语测试结果的可能影响因素是发音人的差异。本研究结果中,健听组数据显著受发音人年龄影响,而听障组数据无显著差异,表明健听群体对不同年龄发音人的语音特征更为敏感。健听组倾听儿童音频时的正确率显著低于其他组,反应时显著高于其他组;听障组的反应时和正确率尽管不受年龄和性别的影响,但同样出现相似表现。相较于成人,儿童的基频范围高,且基频与共振峰会随年龄增加而呈下降趋势;10~15岁儿童的基频和共振峰频率会出现快速下降;到15岁时,基频范围和共振峰值接近于成人,且男性语音特征较女性变化更显著^[23~26]。本研究2名儿童发音人年龄均为10岁,处于个体嗓音和语音发展变化的重要阶段,其语音特征与成人存在显著差异。这可能是健听组及听障组对儿童发音人音频的正确率更低、反应时更长的原因。此外,听障组受试者在倾听老年音频时表现出比倾听青年和中年音频时更低正确率和更长的反应时。造成这种现象的原因可能是老年人的音质低于年轻人。Xue等^[27]将老年与青年的声音进行对比发现,老年人语音的声学参数(平均基频、基频范围、颤音百分比等)均显著低于青年人;该研究还指出,老年女性的基频降低更显著。Soltani等^[28]在对全年龄段语音基频的研究中指出,衰老对男性与女性的基频有显著影响,男性基频受影响的主要原因为发声器官老化,而女性基频变化不仅受发声器官老化的影响,还有雌激素与孕激素的影响。老年人语音质量会因肺、喉部会厌软骨等器官功能减退出现下降^[29~31]。尽管本研究老年发音人的健康状况良好,但结果表明,听障组受试者在处理老年发音人音频时,所需反应时仍长于青年和中年。这一结果提示,本研究所涉及的老年发音人语音质量可能也因年龄原因有所下降,使得听障组受试者更难快速有效地处理老年发音人语音。

尽管本研究中发音人性别对受试者正确率、反应时均无显著影响,但仍存在受试者对男性发音人正确率略低于对女性的现象,并且受试者均在倾听男声时花费更长时间。女性发音人的声音或音调更易被识别^[32,33],本研究表明,受试者倾听女性音频时表现更好。

上述结果表明,尽管听障组的反应时和正确率未受发音人人口统计学特征影响,但在临床或日常生活中,需要尽量避免采用儿童和老年人所发语音开展“普通话七

音”测试,或更为谨慎地对待采用两类发音人语音开展测试。本研究结果对理解听障患者在处理不同发音人声音特征时的差异具有重要意义。进一步研究可以探究听障患者对于不同发音人声音特征的感知差异,以及差异对其在社会、家庭、工作中的影响,为个性化训练和干预提供参考。

5 结论

“普通话七音”在线测试系统借助微信小程序的跨平台特性,成功实现了在iOS和Android操作系统上的无缝运行,使其能够适应多样化的用户需求和应用场景。该系统能够帮助用户随时随地快速检测,及时了解自身的听力状况和听觉康复进展,提升康复效率,节约医疗成本。此外,该系统具备一定数据分析功能,能够为专业人员在助听设备的调整和优化上提供实用的数据支持。该系统凭借其精确的数据记录能力,有效揭示了健听群体与听障患者之间及听障患者个体的听觉感知差异。系统的高可靠性和准确性为研究人员提供了宝贵的数据支持,并有助于其在实际应用中的普及。

鉴于本研究在时间、测试环境和样本规模方面的限制,笔者未进行重复测量,未将声调因素纳入“普通话七音”测试中。未来研究将扩大研究规模,利用在线平台开展广泛的声调测试数据收集、评估“普通话七音”测试中融入声调变化的实用性,探索声调测试对于“普通话七音”评估体系的潜在贡献和实际意义,为进一步研究和临床应用奠定基础。

参考文献

- [1] Ling D. Speech and the hearing-impaired child: Theory and practice[M]. United States: Alex Graham Bell Assn for Deaf, Inc, 2002: 300.
- [2] 王非凡, 于珏, 马良, 等. 上海普通话版“林氏六音”频率范围分析[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2019, 27(6): 600-603.
- [3] 申敏, 李炬, 韩睿, 等. 调机对人工耳蜗植入儿童听觉言语能力的影响个案报告[J]. 中国听力语言康复科学杂志, 2020, 18(6): 464-468.
- [4] Agung KB, Purdy SC, Kitamura C. The Ling Sound Test revisited[J]. Australian and New Zealand Journal of Audiology, 2005, 27(1): 33-41.
- [5] Hung YC, Ma YC. Effective use of the Six Sound Test[J]. The Hearing Journal, 2016, 69(7): 16-17.
- [6] Li A, Zhang H, Sun W. The frequency range of “The Ling Six Sounds” in standard Chinese[A]. In: ISCA. Interspeech 2017[C]. Sweden: ISCA, 2017: 1864-1868.
- [7] 孙雯, 张华, 李爱军, 等. 普通话版“林氏六音”频率范围的确立[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2018, 26(2): 120-125.
- [8] Hung YC, Lee YJ, Tsai LC. Validation of the Chinese Sound Test:

- Auditory performance of hearing aid users[J]. American Journal of Audiology, 2018, 27(1): 37-44.
- [9] 郑宇扬, 杨宇, 胡旭君. 噪声下普通话数字串听力筛查测试材料的开发与验证[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2023, 31(4): 318-323.
- [10] Zuo Y, Wang Y, Liu S, et al. Tone evaluation of Ling sound test in Mandarin tone version[J]. Technology and Health Care, 2023, 31(2): 607-620.
- [11] 陈丽, 戴燕琼, 唐亮, 等. 家庭康复微信小程序对功能性构音障碍患儿的影响[J]. 中国儿童保健杂志, 2020, 28(8): 947-949.
- [12] 罗琼, 虞晓颖, 沈颖, 等. 听力宝APP与纯音听力计测听结果的比较[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2021, 29(2): 154-157.
- [13] Lin HYH, Chu YC, Lai YH, et al. A smartphone-based approach to screening for sudden sensorineural hearing loss: Cross-sectional validity study[J]. JMIR mHealth and uHealth, 2020, 8(11): e23047.
- [14] Oremule B, Abbas J, Saunders G, et al. Mobile audiometry for hearing threshold assessment: A systematic review and meta-analysis[J]. Clinical Otolaryngology, 2024, 49(1): 74-86.
- [15] Lubner RJ, Barbarite E, Kondamuri N, et al. Hearing vital signs: Mobile audiometry in the emergency department for evaluation of sudden hearing loss[J]. Otolaryngology-Head and Neck Surgery, 2020, 163(5): 1025-1028.
- [16] Rodrigues LC, Ferrite S, Corona AP. Validity of hear test smartphone-based audiometry for hearing screening in workers exposed to noise[J]. Journal of the American Academy of Audiology, 2021, 32(2): 116-121.
- [17] Li A, Li ZQ. Spectral analysis of sibilant fricatives and the Ling Sound Test for speakers of Chinese dialects[A]. In: ISCA. ICPHS Full Papers [C]. French: ISCA, 2019. 3026-3030.
- [18] Yadav M, Gautam PR, Shokeen V, et al. Modern Fisher-Yates Shuffling based random interleaver design for SCFDMA-IDMA systems[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 97(1): 63-73.
- [19] Cai J, Liu Y, Yao M, et al. A neurophysiological study of musical pitch identification in Mandarin-speaking cochlear implant users[J]. Neural Plasticity, 2020, 2020: 1-11.
- [20] Jasmin K, Dick F, Holt LL, et al. Tailored perception: Individuals' speech and music perception strategies fit their perceptual abilities[J]. Journal of Experimental Psychology: General, 2020, 149(5): 914-934.
- [21] 古鑫, 刘博, 刘子夜, 等. 成年人工耳蜗植入者对音乐音色感知的特点与分析[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2016, 24(6): 597-601.
- [22] Zhang F, Benson C, Fu QJ. Cortical encoding of pitch contour changes in cochlear implant users: A mismatch negativity study[J]. Audiology and Neurotology, 2013, 18(5): 275-288.
- [23] Spazzapan EA, Marino V, CDC, Fabbro EM. Smoothed cepstral peak analysis of Brazilian children and adolescents speakers[J]. Journal of Voice, 2022, S0892199722000303.
- [24] Vorperian HK, Kent RD, Lee Y, et al. Corner vowels in males and females ages 4 to 20 years: Fundamental and F1-F4 formant frequencies[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 146(5): 3255-3274.
- [25] Kent RD, Eichhorn JT, Vorperian HK. Acoustic parameters of voice in typically developing children ages 4-19 years[J]. International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology, 2021, 142: 110614.
- [26] Demirci AN, Köse A, Aydınli FE, et al. Investigating the cepstral acoustic characteristics of voice in healthy children[J]. International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology, 2021, 148: 110815.
- [27] Xue SA, Deliyski D. Effects of aging on selected acoustic voice parameters: Preliminary normative data and educational implications [J]. Educational Gerontology, 2001, 27(2): 159-168.
- [28] Soltani M, Ashayeri H, Modarresi Y, et al. Fundamental frequency changes of Persian speakers across the life span[J]. Journal of Voice, 2014, 28(3): 274-281.
- [29] Gois ACB, Pernambuco LDA, Lima KCD. Factors associated with voice disorders among the elderly: A systematic review[J]. Brazilian Journal of Otorhinolaryngology, 2018, 84(4): 506-513.
- [30] Kost KM, Sataloff RT. Voice disorders in the elderly[J]. Clinics in Geriatric Medicine, 2018, 34(2): 191-203.
- [31] Ryu CH, Han S, Lee M, et al. Voice changes in elderly adults: prevalence and the effect of social, behavioral, and health status on voice quality[J]. Journal of the American Geriatrics Society, 2015, 63(8): 1608-1614.
- [32] Weston PSJ, Hunter MD, Sokhi DS, et al. Discrimination of voice gender in the human auditory cortex[J]. NeuroImage, 2015, 105: 208-214.
- [33] Wang X, Xu L. Mandarin tone perception in multiple-talker babble and speech-shaped noise[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2020, 147(4): EL307-EL313.

收稿日期 2024-07-25

责任编辑 薛 静