

## • 临床研究 •

## 激活通道数对现代人工耳蜗植入者言语感知影响的初步研究

刘军<sup>1</sup>, 刘天翊<sup>2</sup>, 高珊仙<sup>2,3</sup>, 章佳棋<sup>2</sup>, 于博宇<sup>1</sup>, 辛鑫<sup>1</sup>, 李婉<sup>1</sup>, 谭治平<sup>2</sup>, 董保华<sup>4</sup>, 曾宪海<sup>5</sup>, 银力<sup>2,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>河南省人民医院耳鼻喉科, 郑州 450003; <sup>2</sup>浙江诺尔康神经电子科技股份有限公司, 杭州 311121;

<sup>3</sup>浙江省智能康复与神经电子转化重点实验室, 杭州 311121; <sup>4</sup>杭州未来科技城医院耳鼻喉科, 杭州 311121;

<sup>5</sup>深圳市龙岗区耳鼻咽喉医院, 深圳 518172

**【摘要】目的** 本研究旨在初步探讨不同激活通道数对现代人工耳蜗植入者言语感知的影响。**方法** 纳入2020年11月至2023年11月河南省人民医院耳鼻喉科收治的10例单侧植入诺尔康人工耳蜗的成年语后聋患者, 分别评估其在使用包含8、12、16、22和24个激活通程序时的言语感知表现。评估方法包括在安静及+5 dB信噪比下的普通话言语感知(mandarin speech perception, MSP)短句识别测试、主观聆听清晰度及聆听音质评分。**结果** 在安静环境下, 随着激活通道数的增加, MSP短句识别率、聆听清晰度及音质评分总体呈显著改善趋势( $P<0.05$ ); 而在噪声环境下, 仅MSP短句识别率在12和24通道之间存在显著差异( $P=0.019$ )。**结论** 现代人工耳蜗植入者在安静环境下的言语感知随着激活通道数的增加而逐步改善, 但其在噪声环境下的言语感知与激活通道数之间的确切关系则有待进一步探究。

**【关键词】** 人工耳蜗; 通道; 言语感知

**[DOI]** 10.3969/j.issn.1672-2922.2025.09.007

**Effects of the number of active channels on speech perception in modern cochlear implant recipients**

LIU Jun<sup>1</sup>, LIU Tianyi<sup>2</sup>, GAO Shanxian<sup>2,3</sup>, ZHANG Jiaqi<sup>2</sup>, YU Boyu<sup>1</sup>, XIN Xin<sup>1</sup>, LI Wan<sup>1</sup>, TAN Zhiping<sup>2</sup>, DONG Baohua<sup>4</sup>, ZENG Xianhai<sup>5</sup>, YIN Li<sup>2,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Otolaryngology, Henan Provincial People's Hospital, Zhengzhou 450003, China; <sup>2</sup>Zhejiang Neurotron Biotechnology Co., Ltd, Hangzhou 311121, China; <sup>3</sup>Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Rehabilitation and Translational Neuroelectronics, Hangzhou 311121, China; <sup>4</sup>Department of Otolaryngology, Hangzhou Future S&T City Hospital, Hangzhou 311121, China; <sup>5</sup>Shenzhen Longgang ENT Hospital, Shenzhen 518172, China

**【Abstract】Objective** This study aims to evaluate the effect of manipulating the number of active channels on speech perception in modern cochlear implant recipients. **Methods** Ten postlingually deafened adult patients with unilateral Neurotron cochlear implants who presented to the Department of Otolaryngology, Henan Provincial People's Hospital from November 2020 to November 2023 were enrolled. Their speech outcomes were assessed by measuring speech perception performance with 8, 12, 16, 22 or 24 channels activated and under both quiet and +5 dB signal-to-noise ratio conditions. The assessments included the Mandarin Speech Perception (MSP) sentence recognition test, as well as subjective ratings of sound clarity and sound quality. **Results** As the number of active channels increased, there was a significant overall improvement in MSP sentence recognition, sound clarity, and sound quality ratings in quiet ( $P<0.05$ ). In contrast, significant difference was observed only in MSP sentence recognition scores between 12 and 24 channels in noise ( $P=0.019$ ). **Conclusions** Speech perception in quiet improves with an increasing number of active channels up to 24 in modern cochlear implant recipients. However, the relationship between the number of active channels and speech perception in noise warrants further examination.

**【Key words】** cochlear implant; channels; speech perception

人工耳蜗 (cochlear implant, CI) 是一种植入式听

觉辅助装置, 适用于绝大部分重度及以上感音神经性听力损失且助听器补偿效果不佳者, 能够帮助其重建听觉口语能力、改善生活质量, 进而融入主流社会。尽管大量 CI 植入者在安静环境下已具备较高的言语识别水平, 但与健听人群相比, 他们在相对复杂的听

基金项目: 河南省科技攻关计划 (CKQ2014000010); 杭州市领军型创新创业团队 (TD2022013); 浙江省尖兵领雁计划项目 (2023C03094)

\*通信作者: 银力, Email: yinli@neurotron.com

觉活动(如噪声环境下言语识别、音乐欣赏以及声源定位等)中仍面临巨大挑战。CI 植入者有限的频域分辨率可能是造成这种困境的主要原因之一<sup>[1-2]</sup>。CI 的频域分辨率可能受多种因素影响,其中之一便是 CI 的通道数<sup>[2-3]</sup>。

在探讨通道数对 CI 听声效果的影响之前,有必要明确“通道”一词的定义。CI 植入体的电极系列由一系列金属电极触点组成,这些电极既负责向蜗内发出电刺激,也负责回收电脉冲。注意并非所有电极都可独立工作—能够有效放电并参与听觉编码的电极组合,才被称为一个“通道”;换言之,电极数与通道数并不总是一一对应,单个通道可由一个电极独立放电,或由相邻电极成对协同放电来实现。鉴于此,本文所研究的核心变量为激活通道数,而非单纯的电极数。

早期研究表明,当激活通道数增加至 8~10 个时,CI 植入者的言语识别效果便趋于平台<sup>[4-5]</sup>。然而,CI 领域在此后又经历了一系列技术和理念的革新<sup>[6]</sup>,包括:(1)编码策略不断更新迭代,使得 CI 呈现的听觉信息更为完善;(2)手术技巧日趋完善,强调“微创植入”;(3)电极系列的设计更加纤细、柔软,旨在最大限度保护蜗内精细结构;(4)影像学技术的进步,能够更精准地判断植入电极系列在蜗内的位置;(5)效果评估材料和方法的发展,可以更好地应对可能出现的天花板效应与地板效应;(6)CI 植入的适应证逐步放宽,使得目前的 CI 植入者往往具备更短的听觉剥夺时长、更佳的残余听力水平以及更好的螺旋神经节细胞存活状况。这些进展意味着与早期研究相比,现代 CI 植入者或能更加充分地利用更多通道所带来的频域分辨优势并以此实现相对更优的听声效果,那么早期所得出的有关通道数的结论可能便不再适用。综上所述,目前亟需重新评估通道数与 CI 听声效果之间的关系,以探讨在现代技术背景下,能否通过增加通道数以进一步优化植入者的听声表现。

## 1 资料与方法

**1.1 研究对象** 纳入 2020 年 11 月至 2023 年 11 月河南省人民医院耳鼻喉科收治的 10 例接受单侧诺尔康 CI 植入的成年语后聋患者为研究对象。其中女性 8 例,男性 2 例;平均听觉剥夺时长( $11.60 \pm 6.95$ )年;平均植入年龄( $41.50 \pm 11.76$ )岁;左侧与右侧植入各 5 例;4 例植入体为 CS-10A(TM),6 例植入体为 CS-20A(TM)。纳入标准:(1)母语为汉语普通话;(2)具备至少 6 个月的诺尔康远航言语处理器使用经验;(3)在 CI 助听的情况下,植入侧的扩展版听觉行为分级-II(categories of auditory performance II, CAP-II)评分可达到 6 分及以上,即不依赖唇读可理解交谈内容。排除标准:(1)最常用程序存在必须停用通道的情况(例如电极损坏或未植入等情形),因而无法使用完整 24 个通道;(2)植入侧的对侧在 250~8000 Hz 任一倍频程存在重度以下( $\leq 65$  dB HL)裸耳残余听力;(3)因各种原因无法配合完成声场下言语测试;(4)其他经评估后认为不适宜参与本研究的情况。本研究经杭州未来科技城医院临床研究伦理委员会审核批准[(2025)伦审药/械/试剂/研第(003)号],所有患者对研究知情同意并签署同意书。患者的基本信息见表 1。

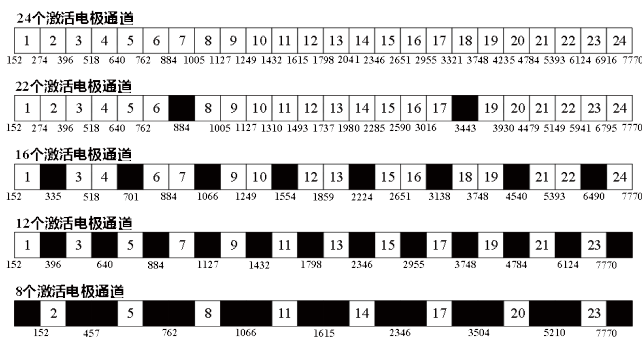
**1.2 研究设计与评估指标** 本研究采用实验性单盲交叉设计,评估指标包括安静和语谱噪声(信噪比为 +5 dB)下的普通话言语感知(mandarin speech perception, MSP)短句识别率<sup>[7]</sup>、聆听清晰度主观评分以及聆听音质主观评分。其中,聆听清晰度被定义为患者自觉能否清楚地听见言语声,而聆听音质则被定义为患者自觉是否喜欢听见的言语声。这两项主观评分均通过 0~10 分视觉模拟量表(visual analogue scale, VAS)进行测量,评分越高则代表患者对聆听清晰度与聆听音质的评价越好。上述评估指标均在急性条件下完成。

表 1 患者的基本信息

编号	性别	耳聋原因	听觉剥夺时长(年)	植入侧别	植入时间	植入年龄(岁)	植入体型号	CAP-II 评分(分)
1	女	先天性	11	右	2022年3月21日	18	CS-10A(TM)	7
2	女	不明原因	10	右	2023年3月30日	37	CS-20A(TM)	7
3	女	药物性	14	右	2020年11月13日	32	CS-10A(TM)	7
4	女	不明原因	9	右	2023年11月1日	38	CS-20A(TM)	6
5	男	药物性	11	左	2023年9月8日	50	CS-20A(TM)	6
6	男	不明原因	6	左	2022年7月29日	55	CS-10A(TM)	7
7	女	不明原因	20	右	2023年5月23日	44	CS-20A(TM)	7
8	女	药物性	25	左	2023年9月17日	54	CS-20A(TM)	6
9	女	药物性	0	左	2022年6月28日	52	CS-10A(TM)	7
10	女	药物性	10	左	2023年11月1日	35	CS-20A(TM)	6

注:CAP-II:扩展版听觉行为分级-II

**1.3 研究方法** 首先使用版本为 1.1.0 的诺尔声软件进行 CI 调试, 以患者最常用的 CI 程序 (24 个通道完全激活) 为基准, 通过尽可能对称分布地停用通道的方式, 另外创建包含 8、12、16 以及 22 个激活通道的程序, 即共 5 种程序用于试验。在操作过程中, 若无法保证剩余的激活通道在空间上对称分布, 则采取“蜗顶偏移”<sup>[6]</sup>策略, 而被停用通道所对应的刺激频带也将被自动分配至相邻通道。这 5 种程序的通道激活与停用以及相应频带情况见图 1。为确保各程序之间的主观响度一致, 采用响度 VAS 测定患者在使用 24 个激活通道程序时对一段固定白噪声的响度感知, 并以此为基准在实景听声模式下分别对另外 4 种程序的整体电刺激上限值进行微调。对于每例患者而言, 所有 5 种程序除激活通道数及整体电刺激上限值可能存在不同外, 其余调试参数均与最常用程序保持一致。在完成调试后, 将上述程序以随机顺序导入至患者日常使用的诺尔康远航言语处理器内, 程序的具体导入顺序对患者保密。



注: 黑色区域代表停用的通道

图 1 所有程序的激活通道及相应频率分配情况 (单位: Hz)

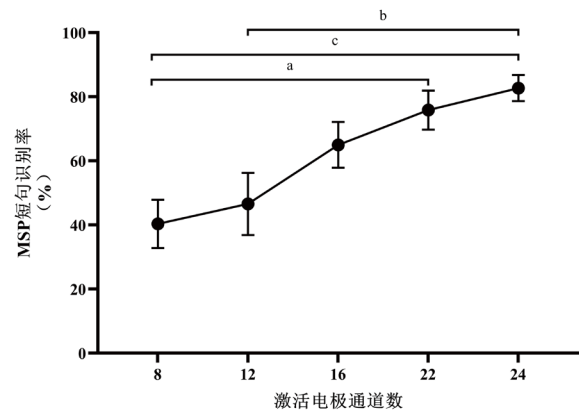
在符合标准的隔音室内对患者在使用这 5 种程序时的言语感知表现分别进行评估。首先进行安静环境下的评估, 使用经校准后的扬声器播放一张 MSP 短句表 (每张表包含 10 句 7 字 MSP 短句), 扬声器放置在患者正前方 (0° 角) 的 1 m 远处, 言语声给声强度固定为 65 dB SPL, 而患者被要求需复述其所听到的内容, 其短句识别率将依照患者所复述的正确字数进行计算。在完整完成一张句表的识别后, 患者需立即对聆听此句表时的清晰度与音质进行评分。接着进行噪声环境下的评估, 除了扬声器在播放短句时附加 60 dB SPL 的语谱噪声外, 其他流程与安静环境下评估相同。当完整完成一种程序的安静及噪声环境下评估后, 则需切换至下一程序并重复上述评估, 直至患者在使用所有 5 种程序时的安静及噪声环境下言语感知表现均被评估完毕。每例患者将完成共 10 轮评估,

获得共 30 项评估数据 (5 种程序 × 2 种测试环境 × 3 种评估指标)。

**1.4 统计学方法** 在所有分析之前, 安静及 +5 dB 信噪比下的 MSP 短句识别率均由百分比转换为合理化反正弦单位<sup>[8]</sup>以尽量减少地板和天花板效应的影响。使用 SPSS 25.0 软件完成统计分析, 自变量为激活通道数, 因变量则包括转换后的 MSP 短句识别率以及原始聆听音质与聆听清晰度评分。若数据满足正态性, 采用单因素重复测量方差分析, 并在 Mauchly 球形假设不成立时报告 Greenhouse-Geisser 修正结果; 否则采用非参数 Friedman 检验。事后比较均采用 Bonferroni 校正。以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

**2 结果**

**2.1 MSP 短句识别率** 在安静环境下, Friedman 检验显示 MSP 短句识别得分总体差异显著 ( $\chi^2=25.130$ ,  $P < 0.001$ )。事后比较表明, 8 和 22、8 和 24 以及 12 和 24 通道之间存在显著差异 ( $P=0.047$ ,  $P < 0.001$ ,  $P=0.001$ ); 而在 +5 dB 信噪比下, Friedman 检验显示 MSP 短句识别得分总体差异显著 ( $\chi^2=12.800$ ,  $P=0.012$ )。事后比较表明, 仅 12 和 24 通道之间存在显著差异 ( $P=0.019$ )。患者在安静下的 MSP 短句识别率随激活通道数的变化趋势见图 2。



注: MSP: 普通话言语感知; 误差线为标准误; <sup>a</sup> $P < 0.05$ , <sup>b</sup> $P < 0.01$ , <sup>c</sup> $P < 0.001$   
图 2 安静下的平均 MSP 短句识别率随激活通道数增加的变化趋势

**2.2 聆听清晰度主观评分** 在安静环境下, 重复测量 ANOVA 显示聆听清晰度主观评分主效应显著 (Greenhouse-Geisser 校正,  $\epsilon=0.500$ ,  $F(1.990, 17.910)=7.780$ ,  $P=0.004$ ,  $\eta_p^2=0.460$ )。事后比较表明, 仅 8 和 24 通道之间存在显著差异 ( $P=0.003$ ); 而在 +5 dB 信噪比下, Friedman 检验显示聆听清晰度主观评分总体差异不显著 ( $\chi^2=8.360$ ,  $P=0.079$ )。患者在安静下的聆听清晰度主观评分随激活通道数的变化趋势见图 3。

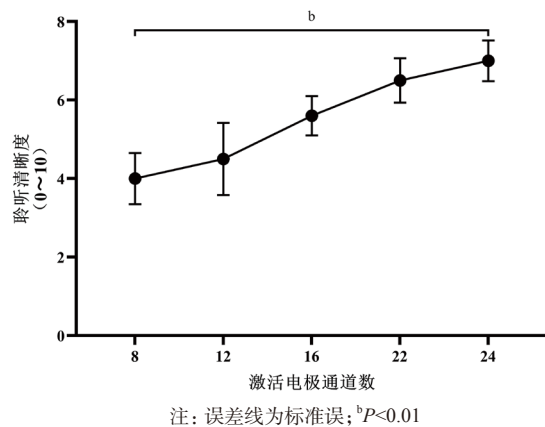


图3 安静下的平均聆听清晰度主观评分随激活通道数增加的变化趋势

**2.3 聆听音质主观评分** 在安静环境下, Friedman 检验显示聆听音质主观评分总体差异显著 ( $\chi^2=21.950$ ,  $P<0.001$ )。事后比较表明, 8 和 22 以及 8 和 24 通道之间存在显著差异 ( $P=0.024$ ,  $P=0.001$ ); 而在 +5 dB 信噪比下, Friedman 检验显示聆听音质主观评分总体差异不显著 ( $\chi^2=4.190$ ,  $P=0.381$ )。患者在安静下的聆听音质主观评分随激活通道数的变化趋势见图 4。

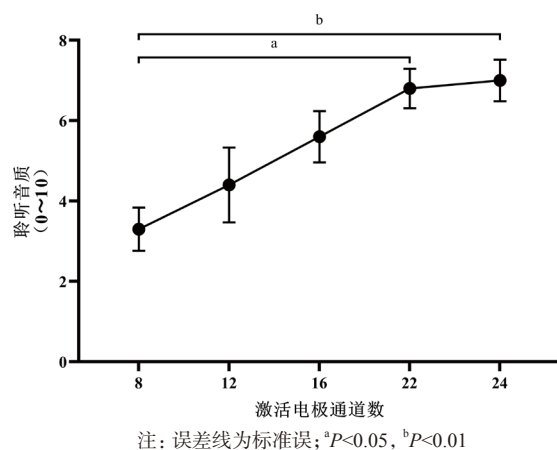


图4 安静下的平均音质主观评分随激活通道数增加的变化趋势

### 3 讨论

“究竟需要多少通道才能帮助 CI 植入者实现最佳听觉感知? ”, 长期以来一直是 CI 相关领域的研究热点。早在 21 世纪初, 以 Fishman 等<sup>[4]</sup>和 Friesen 等<sup>[5]</sup>为代表的研究便发现 CI 植入者的言语识别表现在达到 8~10 个通道后便通常不会再出现显著提升。然而, 自 2017 年起, 在意识到 CI 的技术进步使得现代 CI 植入者或能更加充分地利用更多通道所带来的频域分辨优势后, Schwartz-Leyzac 等<sup>[9]</sup>和 Croghan 等<sup>[6]</sup>便试图重新审视通道数对植入者听声效果的影响, 美国范德堡大学的 Berg 及其团队自 2019 年起更是陆续发表了 7 篇针对现代 CI 植入者的通道数与听声表现的相关研究<sup>[10-16]</sup>。这些最新研究表明对于现代 CI 植入者而言,

将通道数增加至 8 以上仍然有望进一步提升其在安静及复杂听觉环境下的听声效果。基于上述发现, 本研究选用了目前市面上通道数最多的诺尔康 CS-10A (TM) 与 CS-20A (TM) 植入体, 以 8 个通道作为起始条件, 初步评估了在现代 CI 技术背景下激活通道数对植入者言语感知的影响。结果表明, 安静环境下的 MSP 短句识别率、聆听清晰度主观评分及聆听音质主观评分均随着通道数从 8 增加至 24 而显著提升; 而在 +5 dB 信噪比下, 上述指标则几乎未能随着通道数的增加而获得统计学意义上的改善。尽管如此, 这一发现仍在总体上支持“增加通道数可能有助于改善频域分辨率, 进而提升 CI 植入后效果”的假设。

虽然本研究的发现与自 2017 年起的最新研究结果存在一定相似性, 但并不完全一致, 主要区别在于后者过分强调了“电极-蜗轴距离”这一因素对于 CI 频域分辨率的影响。在 Croghan 等<sup>[6]</sup>所选取的 10 例受试者中, 有 9 例植入的是近蜗轴电极, 故他们据此推测更近的电极-蜗轴距离可强化通道增多所带来的频域分辨优势; 而 Berg 及其团队更是比较了在使用不同类型电极系列的情况下通道数与言语识别表现之间的关系, 他们发现对于近蜗轴电极植入者, 更多的通道数往往意味着更好的言语识别表现<sup>[10,15]</sup>; 而对于外侧壁电极<sup>[12]</sup>、中阶电极<sup>[14,16]</sup>或穿阶的近蜗轴电极<sup>[12]</sup>植入者, 其言语识别表现则通常在激活通道数达到 8 个时便趋于稳定, 与早期研究结论一致。尽管近蜗轴电极的设计可能在一定程度上减轻因相邻通道的刺激电场重叠而导致的通道间干扰现象, 因而从理论上具备相对较好的频域分辨率; 但值得注意的是, 检验电极-蜗轴距离与 CI 植入者听声效果相关性的证据尚存争议: Fitzgerald 等<sup>[17]</sup>发现电极-蜗轴距离与植入者的频率分辨能力之间并不存在线性关系; Medina 等<sup>[18]</sup>报告电极-蜗轴距离与植入者在术后 12 个月时听声表现无关; 甚至 Berg 等<sup>[11]</sup>也有研究指出某些情况下更远的电极-蜗轴距离反而与更好的音乐主观感知相关。本研究所用的 CS-10A (TM) 与 CS-20A (TM) 植入体均为外侧壁电极, 但植入者在安静环境下的言语感知表现依然随着通道数的增加而得到显著改善。结合上述证据与本研究的结果, 提示“电极-蜗轴距离”可能并非是影响 CI 植入者能否从额外通道中获益的决定性因素。

此外, 一些以健听人群为研究对象的 CI 模拟实验指出, 相较于安静环境, 复杂聆听环境下的言语感知可能依赖于更多的频域通道<sup>[19-20]</sup>。然而, 本研究却发现, 在 +5 dB 信噪比下, 不同通道数的各项评估指标间却未能展现出与安静环境下同等显著的差异。究其原因, 这可能是因为 +5 dB 信噪比的测试条件难度偏高

而导致了地板效应,以至于限制了言语感知表现的区分度。这也提示后续研究可引入更敏感的评估指标,例如噪声下言语识别阈,以更精确地反映噪声下言语感知能力随通道数的变化趋势。

本研究仍难以完全克服早期及最新研究中普遍存在的局限性,包括(1)样本量偏小:参与此类研究的患者通常不会超过 20 例,故面临统计检验效能不足以及检验结果外推性差的风险;(2)急性试验设计:患者对新程序的熟悉度欠佳,难以反映长期使用的真实效果;(3)评估维度单一:评估指标仅限于单纯的言语感知,而未涉及声调识别、音乐欣赏、声源定位等其他听觉活动。值得一提的是,与一些先前研究的报告<sup>[4,21]</sup>类似,本研究也观察到患者随通道数变化的言语感知表现存在一定个体差异,例如对于 4 号患者,其 +5 dB 信噪比下的 MSP 短句识别率在通道数为 8 个时便已达到最大,而随着通道数继续增加反而出现下降。其可能原因在于不同 CI 植入者为达成最优听声效果所需的通道数并不一致,这可能取决于其自身的螺旋神经节细胞存活数量及分布位置<sup>[22]</sup>。这一发现提示在进行相关研究时,应充分意识到患者的个体差异对整体趋势的影响。

综上所述,未来研究应扩大样本量、采用更敏感的指标、充分考虑患者个体因素,并将评估指标拓展至其他听觉维度,其研究结果有望从电极设计的角度为优化 CI 植入者的听声效果提供宝贵经验。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] Aronoff JM, Stelmach J, Padilla M, et al. Interleaved processors improve cochlear implant patient's spectral resolution[J]. *Ear Hear*, 2016, 37(2): 85-90.
- [2] Feng L, Oxenham AJ. Auditory enhancement and the role of spectral resolution in normal-hearing listeners and cochlear-implant users[J]. *J Acoust Soc Am*, 2018, 144(2):552-566.
- [3] Won JH, Humphrey EL, Yeager KR, et al. Relationship among the physiologic channel interactions, spectral-ripple discrimination, and vowel identification in cochlear implant users[J]. *J Acoust Soc Am*, 2014, 136(5): 2714-2725.
- [4] Fishman KE, Shannon RV, Slattery WH. Speech recognition as a function of the number of electrodes used in the SPEAK cochlear implant speech processor[J]. *J Speech Lang Hear Res*, 1997, 40(5): 1201-1215.
- [5] Friesen LM, Shannon RV, Baskent D, et al. Speech recognition in noise a function of the number of spectral channels: comparison of acoustic hearing and cochlear implants[J]. *J Acoust Soc Am*, 2001, 110(2): 1150-1163.
- [6] Croghan NBH, Duran SI, Smith ZM. Re-examining the relationship between number of cochlear implant channels and maximal speech intelligibility[J]. *J Acoust Soc Am*, 2017, 142(6): EL537-EL543.
- [7] Fu QJ, Zhu MM, Wang XS. Development and validation of the Mandarin speech perception test[J]. *J Acoust Soc Am*, 2011, 129(6): EL267-EL273.
- [8] Studebaker GA. A "rationalized" arcsine transform[J]. *J Speech Hear Res*, 1985, 28(3): 455-462.
- [9] Schvartz-Leyzac KC, Zwolan TA, Pfungst BE. Effects of electrode deactivation on speech recognition in multichannel cochlear implant recipients[J]. *Cochlear Implants Int*, 2017, 18(6): 324-334.
- [10] Berg KA, Noble JH, Dawant BM, et al. Speech recognition as a function of the number of channels in perimodiolar electrode recipients[J]. *J Acoust Soc Am*, 2019, 145(3): 1556-1564.
- [11] Berg K, Noble J, Dawant B, et al. Musical sound quality as a function of the number of channels in modern cochlear implant recipients[J]. *Front Neurosci*, 2019, 13(999): 1-14.
- [12] Berg KA, Noble JH, Dawant BM, et al. Speech recognition with cochlear implants as a function of the number of channels: effects of electrode placement[J]. *J Acoust Soc Am*, 2020, 147(5): 3646-3656.
- [13] Berg KA, Noble JH, Dawant BM, et al. Speech recognition as a function of the number of channels for an array with large inter-electrode distances[J]. *J Acoust Soc Am*, 2021, 149(4): 2752-2763.
- [14] Berg KA, Noble JH, Dawant BM, et al. Speech recognition as a function of the number of channels for mid-scala electrode array recipients[J]. *J Acoust Soc Am*, 2022, 152(1): 67-79.
- [15] Gifford RH, Sunderhaus LW, Holder JT, et al. Speech recognition as a function of the number of channels for pediatric cochlear implant recipients[J]. *JASA Express Lett*, 2022, 2(9): 094403.
- [16] Berg KA, Chen C, Noble JH, et al. Effects of the number of channels and channel stimulation rate on speech recognition and sound quality using precurved electrode arrays[J]. *Am J Audiol*, 2023, 32(2): 403-416.
- [17] Fitzgerald MB, Shapiro WH, McDonald PD, et al. The effect of perimodiolar placement on speech perception and frequency discrimination by cochlear implant users[J]. *Acta Otolaryngol*, 2007, 127(4): 378-383.
- [18] Medina GNE, Borel S, Nguyen Y, et al. Is electrode-modiolus distance a prognostic factor for hearing performances after cochlear implant surgery?[J]. *Audiol Neurootol*, 2013, 18(6): 406-413.
- [19] Dorman MF, Loizou PC, Fitzke J, et al. The recognition of sentences in noise by normal-hearing listeners using simulations of cochlear-implant signal processors with 6-20 channels[J]. *J Acoust Soc Am*, 1998, 104(6): 3583-3585.
- [20] Shannon RV, Fu QJ, Galvin J 3rd. The number of spectral channels required for speech recognition depends on the difficulty of the listening situation[J]. *Acta Otolaryngol Suppl*, 2004, 552(Suppl): 50-54.
- [21] Perreau A, Tyler RS, Witt SA. The effect of reducing the number of electrodes on spatial hearing tasks for bilateral cochlear implant recipients[J]. *J Am Acad Audiol*, 2010, 21(2): 110-120.
- [22] Nadol JB Jr, Young YS, Glynn RJ. Survival of spiral ganglion cells in profound sensorineural hearing loss: implications for cochlear implantation[J]. *Ann Otol Rhinol Laryngol*, 1989, 98(6): 411-416.

(收稿日期: 2025-07-21)