

doi: 10.3969/j.issn.1672-4933.2026.01.007

电刺激皮层听觉诱发电位P1-N1在无残余听力患者中的初步观察

Preliminary Observation of Electrically Evoked Cortical Auditory Potential P1-N1 in Patients with No Residual Hearing

谢宇非 潘滔[#] 马芙蓉[#]

XIE Yu-fei, PAN Tao, MA Fu-rong

【摘要】目的 通过观察无残余听力患者的人工耳蜗植入(CI)术后电刺激皮层听觉诱发电位(cortical auditory evoked potential, CAEP),为该类患者提供行CI证据。**方法** 选取术前主客观听力检测均显示无残余听力的5名(6耳)无残余听力语前聋儿童,于开机后进行电刺激P1-N1 CAEP测试,对植入6月以上患者记录听觉行为分级-II(CAP-II)、言语可懂度分级标准(SIR)量表得分。**结果** 5名患者(6耳)术后均能够在不同刺激强度下记录到典型的P1-N1波形反应,部分患儿还可引出P2波。P1波潜伏期范围为37.3~125.8 ms, N1波潜伏期范围为150.8~205.4 ms。植入6月以上的3名患者CAP-II得分均≥6分, SIR得分均≥3分,表明其具备较好的听觉言语发育和沟通能力。**结论** 初步验证无残余听力患儿听觉通路的完整性。多数无残余听力患儿可以植入人工耳蜗。

【关键词】 人工耳蜗植入;皮层听觉诱发电位;无残余听力

【中图分类号】 R764.43

【文献标识码】 A

【文章编号】 1672-4933(2026)01-0035-05

【Abstract】 Objective To provide evidence for cochlear implantation (CI) in patients with no residual hearing by observing electrically evoked cortical auditory evoked potentials (CAEP) after CI surgery. **Methods** Five children (six ears) with prelingual deafness and no residual hearing, as confirmed by preoperative objective and subjective hearing tests, were selected. Electrically evoked P1-N1 CAEP testing was conducted after device activation. For patients implanted for more than six months, scores from the Categories of Auditory Performance-II (CAP-II) and the Speech Intelligibility Rating (SIR) scale were recorded. **Results** Typical P1-N1 waveform responses were recorded in all five patients (six ears) at various stimulation levels, with P2 waves also observed in some children. The P1 latency ranged from 37.3 to 125.8 ms, and the N1 latency from 150.8 to 205.4 ms. The three patients implanted for more than six months achieved CAP-II scores ≥6 and SIR scores ≥3, indicating favorable auditory and speech development as well as communication abilities. **Conclusion** This study preliminarily verifies the integrity of the auditory pathway in these patients. The majority of children with no residual hearing can undergo cochlear implantation.

【Key words】 Cochlear implant; Cortical auditory evoked potential; Residual hearing

1 引言

人工耳蜗植入的前提是具有完整的听觉传导通路。这一点需植入前检测语前聋儿童的残余听力确认。对植入前无残余听力的患者,通常依据病史、影像学对其听觉传导通路的完整性进行判断,但这两种方法无法证实患者是否具有完整的听觉传导通路。因此该类患者人工耳蜗植入后效果具有不确定性^[1,2]。有学者通过术中植入前电诱发听性脑干反应(electrically evoked auditory brainstem response, EABR)探索无残余听力患者的听觉通路情况,发

现EABR的波V引出率与有残余听力患者无明显差异,CI术后听觉效果优于术前,表明多数术前无残余听力患者的听觉通路可能是完整的^[3]。目前,缺少评价听觉传导通路完整性及其听觉皮层可塑性的客观方法。

皮层听觉诱发电位(CAEP)是一种长潜伏期听觉诱发反应,其P1-N1波反映听觉传导通路直至听觉皮层的功能^[4]。其中,P1波潜伏期反映外周至中枢听觉通路所有突触延迟的总和,与儿童的语言能力具有较强相关性^[5,6]。P1波潜伏期越短提示听觉皮层发育成熟度越

基金项目:中国残联听力语言残疾预防与康复专项课题(2024CDPFHS-01)

作者单位:北京大学第三医院 北京 100191

作者简介:谢宇非 博士 住院医师;研究方向:人工耳蜗电生理

通讯作者:潘滔, E-mail: pantao6422@163.com;马芙蓉, E-mail: furongma@126.com

[#] 为共同通讯作者

高^[7]。对难以配合主观测听的低龄儿童,CAEP是一种检测听觉皮层成熟度、评估听觉系统完整性的潜在有效方式^[8]。本研究拟通过对无残余听力患者CI术后的电刺激CAEP反应进行观察,探讨电刺激CAEP在评估无残余听力患儿听觉通路完整性中的价值。

2 方法

本研究纳入2019年7月~2022年8月于北京大学第三医院及小桔灯儿童康复教育中心进行语言训练或术后调机的CI术后患者共5名(6耳)。纳入标准:(1)语前聋儿童;(2)手术侧术前主客观听力检测均显示无残余听力;(3)植入体为澳大利亚Cochlear公司产品;(4)内耳及蜗神经解剖结构未见明显异常。受试者的年龄、植入年龄、开机时间见表1。单侧植入者3例,双侧植入者2例,其中1例双侧植入患者因时间原因仅行右耳检测。

表1 受试者年龄、植入年龄及开机时间

基本特征	最小值	最大值	平均值±标准差/中位数(四分位距)
测试年龄(岁)	1.5	14.8	4.1(7.5)
植入年龄(岁)	0.9	14.7	1.3(7.3)
开机时间(月)	1.0	34.8	16.5±15.2

注:当样本符合正态分布时用平均值±标准差表示,不符合正态分布时用中位数(四分位距)表示

与患儿监护人签定知情同意后开始测试。

使用Bio-logic® Navigator® Pro听觉诱发电位仪,通过言语处理器连接至患者体内的人工耳蜗植入体。刺激信号由Custom Sound™ EP 4.0软件生成,通过programming pod与受试者的言语处理器同步,最终经体内植入体传递至耳蜗。AEP(Ver 7.0.0)作为记录软件。记录电极(正极)置于前额正中发际处,参考电极置于对侧乳突,接地电极置于眉间。确保所有电极与皮肤间的阻抗低于10 kΩ后开始测试。

采用双极刺激模式,以MP1电极作为参考。刺激信号为脉冲宽度200 μs、刺激速率0.9 Hz。刺激目标极为#20电极。刺激强度单位为电流级(current level, CL)。触发方式设置为外触发,记录窗口宽度533 ms,带通滤波1~70 Hz。每个强度下的波形至少叠加100次,且每个测试条件均重复记录2次,以验证波形的一致性^[9]。每个CAEP波形记录2次。测试过程中播放无声动画片使患儿保持清醒、安静状态。因患儿全程仅接收电刺激信号,测试在普通安静环境下进行,无需隔音环境。取第一个重复性佳的正波为P1波,将最小可引出P1波的刺激强度记录为阈值。取位于P1后方的负波记为N1波,N1波后的正波记为P2波^[4]。记录阈上20 CL的P1、N1和P2的潜

伏期及振幅。收集患儿的CAP-Ⅱ(0~9分)及SIR得分(1~5分),分别对应语言的接收与发能力^[10],得分越高代表能力越强。

本研究获得北京大学第三医院伦理委员会批准,伦理批件号:(2020)医伦审第(022-01)号。

3 结果

1号受试者为4.2岁男童,右侧耳术前各项听力检测提示无残余听力,左侧耳术前在500、1000、2000、4000 Hz残余听力均为110 dB HL。患儿于2.0岁行右侧CI,术后规律语训。于开机后26.5月(2.2年)行电刺激CAEP测试及CAP-Ⅱ、SIR量表测试,电刺激CAEP波形见图1(a)。受试者自80 CL电刺激强度起可引出清晰P1-N1-P2波形。100 CL电刺激强度下,P1波潜伏期66.5 ms,N1波潜伏期152.3 ms,P2波潜伏期251.8 ms,P1-N1振幅7.0 μV,N1-P2振幅9.7 μV。CAP-Ⅱ得分7分,SIR得分5分。

2号受试者为4.1岁男童,双耳术前各项听力检测提示均无残余听力,于1.2岁行双侧同期CI,术后规律语训。于开机后34.8月(2.9年)行电刺激CAEP测试及CAP-Ⅱ、SIR量表测试。该患儿因时间原因仅行右耳检测,波形见图1(b)。受试者自100 CL电刺激强度起可引出清晰P1-N1-P2波形。120 CL电刺激强度下,P1波潜伏期87.3 ms,N1波潜伏期150.8 ms,P2波潜伏期235.6 ms,P1-N1振幅6.4 μV,N1-P2振幅8.5 μV。CAP-Ⅱ得分6分,SIR得分3分。

3号受试者为2.5岁男童,双侧耳术前各项听力检测提示无残余听力,于11月行双侧同期CI,术后规律语训。于开机后19.2月(1.6年)行双耳电刺激CAEP测试及CAP-Ⅱ、SIR量表测试,电刺激CAEP波形见图1(c,d)。受试者右耳可引出清晰P1-N1波形,P2波不稳定,左耳可引出P1-N1-P2波形,以N1-P2为主要波形。140 CL电刺激强度下,右耳P1波潜伏期49.3 ms,N1波潜伏期181.5 ms,P1-N1振幅17.2 μV;120 CL电刺激强度下,左耳P1波潜伏期50.8 ms,N1波潜伏期163.3 ms,P2波潜伏期245.5 ms,P1-N1振幅13.8 μV,N1-P2振幅13.8 μV。CAP-Ⅱ得分6分,SIR得分3分。

4号受试者为1.5岁男童,左耳术前各项听力检测提示无残余听力,右耳术前存在250~500 Hz残余听力:100~120 dB HL。患儿于1.3岁行左侧CI,术后1月开机。于开机后1月行左耳电刺激CAEP测试,波形见图1(e)。受试者自100 CL电刺激强度起可引出P1-N1波形。110 CL电刺激强度下,P1波潜伏期120.5 ms,N1波潜伏期184.1 ms,P1-N1振幅13.0 μV。该患儿因开机时间短,暂未行CAP-Ⅱ及SIR评分,下同。

5号受试者为14.8岁女童,双耳术前各项听力检测提

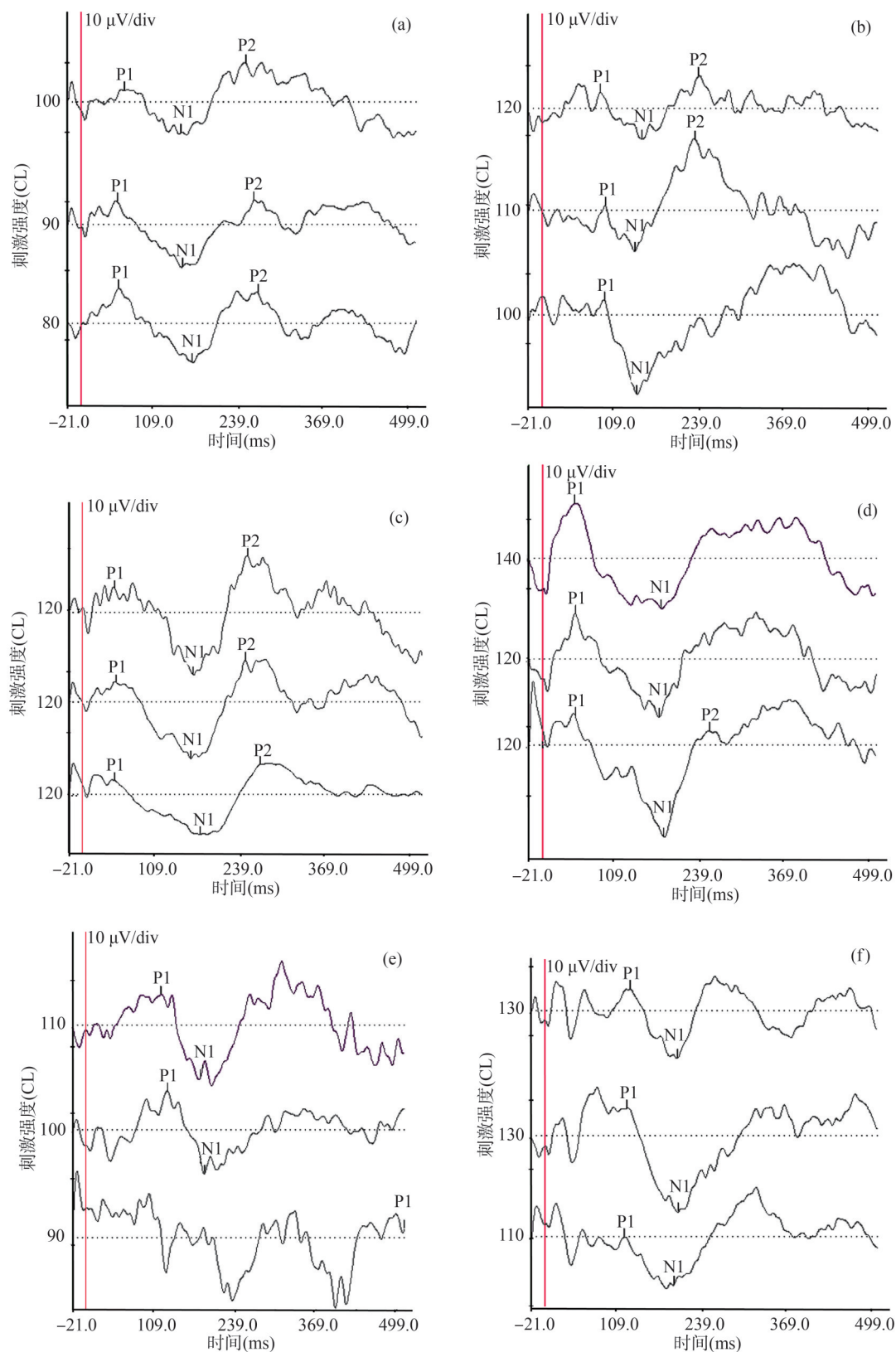


图1 各受试者电刺激CAEP波形

注:图a、b、e、f分别对应1、2、4、5号受试者波形,图c、d分别对应3号受试者的左耳及右耳波形。每个测试波形中,横坐标为时间(ms),纵坐标为刺激强度(CL)。纵坐标中每段分隔代表10 μ V标尺。

示均无残余听力,家长诉右耳助听器听力较左侧佳,左侧助听无反应,且右耳颈静脉球高位,最终于14.7岁行左侧CI,术后1月开机时行左耳电刺激CAEP测试,波形见图1(f)。受试者自110 CL电刺激强度起可引出清晰P1-N1波形,P2波欠稳定。130 CL电刺激强度下,P1波潜伏期125.8 ms,N1波潜伏期205.4 ms,P1-N1振幅16.9 μ V。

4 讨论

CAEP的P1-N1波能够反映整体听觉通路直至初级听觉皮层的功能,是良好的评估听觉中枢发育的指标^[11]。人工耳蜗植入依赖于听觉通路的完整性。残余的螺旋神经节细胞数量为CI术前关注的重点。对极重度感音神经性聋患儿而言,评估CI术前听觉传导通路是否完整的最佳方式为检查有无残余听力。有残余听力表明患儿术前具有良好的听觉传导通路。具有残余听力的患者术前残余听力越好,术后言语发育越好^[2,12]。

对术前无残余听力的语前聋儿童,病史、影像学检查为判断听觉传导通路完整性的常用手段。影像学检查能够明确内耳及蜗神经结构是否存在显著异常、中枢通路是否存在占位性病变等,但无法验证螺旋神经节细胞的残余数量以及中枢通路可能存在的其他神经相关问题。而植入前EABR虽能够检测螺旋神经节至脑干通路的电活动,但为有创检测、难以判断脑干直至听觉皮层通路的完整性,有时会出现假阴性^[13,14]。王斌等^[3]发现术前无残余听力患者的植入前EABR的波V易引出,但其他波形相较术前有残余听力者分化欠佳,且无残余听力患者的术后听觉效果异质性大。也有学者通过植入后听力及言语量表评分对比有残余听力者及无残余听力者的听力及言语康复效果,结论仍存在争议^[12,15,16]。当无依据证明听觉通路是否完整时,患者能否植入昂贵的人工耳蜗并取得满意疗效,对医生和患者均存在额外风险。

植入后电刺激CAEP相较植入前电生理测试无创,通过处理器或拟合软件直接将电信号传递给耳蜗内电极。相较于声刺激电生理测试而言,植入后电刺激的优点在于简便易行、能更好控制刺激特征、无刺激延迟^[17,18]。局限性在于仅能用于CI术后患者。本研究首次通过在无残余听力患者中进行植入后电刺激CAEP测试,判断听觉传导通路的完整性以及听觉皮层发育的情况,为无残余听力患者行CI提供证据。

本研究观察了5名(6耳)无残余听力患者术后的CAEP反应,并对3名患者进行术后CAP-II及SIR量表评估,发现均能够记录典型的P1-N1波形反应,部分患儿能够记录P2波,表明其CAEP主波可能正在由儿童的P1-N1波逐渐向成熟的N1-P2波发育。其中,1~3号患者均

为应用1.5年及以上人工耳蜗植入患者,2、3号患者均行双侧同期CI。3名患者术后的CAP-II评分均在6分及以上,SIR评分在3分及以上,表明3名患者术后能够和熟悉的人进行交流,听觉发育良好。笔者对3号患者进行了双侧电刺激CAEP记录,发现其波形具有相似性,P1波潜伏期接近,表明双侧的听觉传导通路直至初级听觉皮层的发育较为对称。另外,1~3号患者均在2岁及之前行CI手术,植入时间早于第二部分研究所得植入年龄节点3.54岁,听觉刺激时间长,也是术后言语发育佳的原因之一。

4、5号患者由于开机时间短,虽未对其进行CAP-II、SIR评分,但均在一定刺激强度内诱发了P1-N1波形反应,表明其术前存在完整的听觉传导通路,电刺激CAEP可作为开机时检测无残余听力患者听觉传导通路是否完整的无创、客观手段。其中,5号患者植入时间较晚,且无残余听力,故14.8岁时的CAEP主要波形并非N1-P2(青春期及成年人的主要波形),仍是儿童的P1-N1波形。El-Hakim等^[11]通过对CI术后6月~5年的儿童进行二分法检验,发现术前无残余听力患者和术前存在20%残余听力患者术后言语评分量表不存在显著差异。该研究也同样验证,完整的听觉通路能够为人工耳蜗电刺激听觉系统、促使语言发育提供良好的潜能。当无内耳或听神经结构异常时,无残余听力患者较有残余听力患者CI术中引出EABR的阈值更高,但二者波V的引出率并无统计学差异^[19]。该结果表明,多数术前检测无残余听力的患者虽然可能螺旋神经节残余细胞更少,但仍具有完整的听觉通路。

通过观察无残余听力患者进行植入后CAEP反应的病例系列研究发现,部分无残余听力的语前聋患儿可能存在完整的听觉通路。对语前聋、术前无残余听力的儿童而言,如无病史、影像学禁忌——无证据表明此类患者无残余螺旋神经节、听神经破坏(如听神经切除术),无残余听力仍属于CI适应征^[20]。应术前告知无残余听力患者术后语言发育差的可能,充分知情同意后行CI手术,使儿童获得听觉系统发育的机会。在开机时或开机早期,尚无行为学或客观证据表明患儿具有听力或完整听觉通路时,电刺激CAEP为早期检测听觉传导通路完整性的有效、无创、客观手段。

术前常规检测难以证实无残余听力患者听觉传导通路的完整。学者正在探索术前建立检出率更高、无创的电生理评估方法,以便了解听觉系统完整性,为此类患者植入提供进一步的临床依据。

5 结论

本研究初步验证了无残余听力患儿听觉通路的完整性。多数无残余听力患儿可以植入人工耳蜗。

参考文献

- [1] El-Hakim H, Abdolell M, Mount RJ, et al. Influence of age at implantation and of residual hearing on speech outcome measures after cochlear implantation: binary partitioning analysis[J]. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl*, 2002, 189(111):102-108.
- [2] Chiossi JSC, Hyppolito MA. Effects of residual hearing on cochlear implant outcomes in children: A systematic-review[J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2017, 100:119-127.
- [3] 王斌, 曹克利, 魏朝刚, 等. 人工耳蜗术前电刺激听觉脑干诱发电位评估残余听力及术后效果分析[J]. *中国耳鼻咽喉头颈外科*, 2022, 29(10):630-633.
- [4] Sharma A, Dorman MF, Spahr AJ. Rapid development of cortical auditory evoked potentials after early cochlear implantation [J]. *Neuroreport*, 2002, 1365-1368.
- [5] Xiong S, Jiang L, Wang Y, et al. The Role of the P1 Latency in Auditory and Speech Performance Evaluation in Cochlear Implanted Children[J]. *Neural Plast*, 2022, 2022:6894794.
- [6] Cone B, Whitaker R. Dynamics of infant cortical auditory evoked potentials (CAEPs) for tone and speech tokens[J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2013, 77(7):1162-1173.
- [7] Alvarenga KdF, Vicente LC, Lopes RCF, et al. Development of P1 cortical auditory evoked potential in children presented with sensorineural hearing loss following cochlear implantation: a longitudinal study[J]. *Codas*, 2013, 25(6):521-526.
- [8] 张帆, 何白慧, 沈佳丽, 等. 人工耳蜗植入术中电诱发听性脑干反应检测及其临床意义[J]. *中国听力语言康复科学杂志*, 2022, 20(4): 277-280.
- [9] 谢宇非, 潘滔, 马芙蓉, 等. 人工耳蜗植入儿童皮层听觉诱发电位与听觉言语能力的相关性研究[J]. *中国听力语言康复科学杂志*, 2024, 22(4):361-365.
- [10] Wang L, Shen M, Liang W, et al. Validation of the Mandarin versions of CAP and SIR [J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2020, 139:110413.
- [11] Sharma A, Campbell J, Cardon G. Developmental and cross-modal plasticity in deafness: evidence from the P1 and N1 event related potentials in cochlear implanted children[J]. *Int J Psychophysiol*, 2015, 95(2):135-144.
- [12] Li Y, Zhou X, Jin X, et al. Residual Hearing Improves Early Auditory Perception and Speech Intelligibility in Mandarin-Speaking Children with Cochlear Implants[J]. *J Int Adv Otol*, 2022, 18(4):291-296.
- [13] Nikolopoulos TP, Mason SM, Gibbin KP, et al. The prognostic value of promontory electric auditory brain stem response in pediatric cochlear implantation[J]. *Ear Hear*, 2000, 21(3):236-241.
- [14] 陈鱼, 王悦, 王巍. 电诱发听性脑干反应在人工耳蜗植入中的应用[J]. *中国听力语言康复科学杂志*, 2023, 21(02):221-224.
- [15] Bansal R, Kumar R, Sikka K, et al. Impact of residual hearing on outcomes of cochlear implantation in paediatric population: An Ambispective Cohort study [J]. *J Laryngol Otol*, 2025, 139(12):1202-1207.
- [16] Pignac S, Sygal N, Biglari M, et al. Determining cochlear implant candidacy in children with residual hearing: A scoping review[J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2024, 177:111855.
- [17] Bardy F, Van Dun B, Dillon H. Bigger Is Better: Increasing Cortical Auditory Response Amplitude Via Stimulus Spectral Complexity[J]. *Ear Hear*, 2015, 36(6):677-687.
- [18] Martins KVC, Gil D. Cortical Auditory Evoked Potentials with Simple (Tone Burst) and Complex (Speech) Stimuli in Children with Cochlear Implant[J]. *Int Arch Otorhinolaryngol*, 2017, 21(4):351-357.
- [19] 金毅, 冯永, 梅凌云, 等. 不同脉宽条件下人工耳蜗植入者术中电诱发听性脑干反应检测的特点分析[J]. *中国耳鼻咽喉颅底外科杂志*, 2016, 111(3):207-212.
- [20] 人工耳蜗植入工作指南(2013)[J]. *中华耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2014, 49(02):89-95.

收稿日期 2025-08-31

责任编辑 蒋 春

(上接 34 页)

- [18] Tao DD, Fan Y, Galvin JJ 3rd, et al. Effects of Masker Intelligibility and Talker Sex on Speech-in-Speech Recognition by Mandarin Speakers Across the Lifespan[J]. *Ear Hear*, 2025, 46(4): 1085-1094.
- [19] Tao DD, Fu QJ, Galvin JJ 3rd, et al. The development and validation of the Closed-set Mandarin Sentence (CMS) test[J]. *Speech Commun*, 2017, 92: 125-131.
- [20] Brungart DS, Simpson BD, Ericson MA, et al. Informational and energetic masking effects in the perception of multiple simultaneous talkers[J]. *J Acoust Soc Am*, 2001, 110(5 Pt 1): 2527-2538.
- [21] Fu QJ, Zhu M, Wang X. Development and validation of the Mandarin speech perception test[J]. *J Acoust Soc Am*, 2011, 129(6): EL267-273.
- [22] Schvartz-Leyzac KC, McClaskey CM, Dias JW, et al. Contributions of Auditory Nerve Density and Synchrony to Speech Understanding in Older Cochlear Implant Users[J]. *J Assoc Res Otolaryngol*, 2025, 26(3): 317-329.

收稿日期 2025-08-30

责任编辑 蒋 春