

doi: 10.3969/j.issn.1672-4933.2026.01.004

皮层听觉诱发电位在儿童人工耳蜗植入评估中的应用

The Application of Cortical Auditory Evoked Potential to the Evaluation of Cochlear
Implantation in Children

田颖 罗扬拓 王菲

TIAN Ying, LUO Yang-tuo, WANG Fei

【摘要】 皮层听觉诱发电位(cortical auditory evoked potentials, CAEP)是大脑皮层接收声音刺激后产生的生物电反应,为客观评估听觉通路的功能,特别是中枢听觉处理能力,提供重要窗口。CAEP动态监测技术通过量化P1、N1、P2等核心参数,为人工耳蜗植入(CI)儿童术后的神经重塑与精准康复提供了关键评估手段。人工耳蜗植入后大脑听觉皮层的电生理变化标志着听觉功能的成熟与重组,双侧CI使用者呈现半球优势转移现象,揭示大脑跨模态重组机制,结合认知训练可显著提升特殊需要人群的言语识别率。然而,当前领域面临标准化体系缺失与个体差异干扰等瓶颈,未来需构建多中心数据库并融合神经影像技术,建立神经响应-行为表现-中枢机制多模态评估模式,推动康复策略向神经适配跃迁,全面赋能重度感音神经性聋人工耳蜗植入儿童的神经可塑性潜能。

【关键词】 皮层听觉诱发电位;人工耳蜗植入;神经重塑;多模态评估;精准康复

【中图分类号】 R764.35

【文献标识码】 A

【文章编号】 1672-4933(2026)01-0020-05

【Abstract】 CAEP is a bio-electric response generated by the cerebral cortex after receiving sound stimulation, providing an important window for us to objectively assess the function of the auditory pathway, especially the central auditory processing ability. The dynamic monitoring technology of CAEP quantifies core parameters such as P1, N1, and P2, offering a key assessment method for neural remodeling and precise rehabilitation after cochlear implantation (CI) in children. Research shows that the electrophysiological changes in the auditory cortex of the brain after cochlear implantation mark the maturation and reorganization of auditory function. Bilateral CI recipients exhibit a phenomenon of hemispheric dominance transfer, revealing the brain's cross-modal reorganization mechanism. Combined with cognitive training, it can significantly improve the speech recognition rate of special populations. However, the current field faces bottlenecks such as the lack of a standardized system and the interference of individual differences. In the future, it is necessary to build a multi-center database and integrate functional neuroimaging technology to establish a multi-modal assessment model of "neural response-behavioral performance-central mechanism", promoting the leap of rehabilitation strategies to "neural adaptation" and fully empowering the neural plasticity potential of children with severe sensorineural hearing loss who have undergone cochlear implantation.

【Key words】 Cortical auditory evoked potential; Cochlear implantation; Neural remodeling; Multimodal assessment; Precise rehabilitation

1 前言

人工耳蜗植入是重度至极重度感音神经性聋儿童的主要干预手段,患儿术后听觉功能康复依赖于中枢神经系统的可塑性变化。近年来,随着对听觉神经重塑机制及其对语言发育、认知功能影响的深入研究,皮层听觉诱发电位(cortical auditory evoked potentials, CAEP)作为一种客观听觉检查,在监测人工耳蜗植入(CI)儿童术后

的神经重塑过程中显示出重要的应用价值。CAEP能够反映听觉皮层的活动情况,为评估儿童在接受人工耳蜗植入后听觉功能的康复提供客观依据。根据相关研究,CAEP的潜伏期和振幅与儿童的听觉表现和语言能力之间存在显著相关性,为探讨CAEP在儿童CI者中的监测价值奠定了基础^[1]。

早期人工耳蜗植入可促进听觉和语言能力发展,尤

基金项目:辽宁省教育厅基本科研项目“耳蜗巨噬细胞调控谷氨酸代谢在听力损伤中影响带状突触可塑性的作用及机制研究”(LJKMZ20221144)

作者单位:中国医科大学附属第一医院耳鼻咽喉科 沈阳 110001

作者简介:田颖 博士 副主任医师;研究方向:耳科学

通讯作者:王菲, E-mail: fei wang@cmu.edu.cn

其在语言习得关键期,听觉系统重塑尤为重要^[2]。通过动态监测 CAEP,临床医生可评估儿童的听觉及语言发展进程,并制订个性化康复方案。CAEP 不仅有助于了解神经适应过程,还可为调整听觉刺激提供参考,优化听力和语言发展效果^[2]。当 CAEP 结果未达预期时,可能提示耳蜗功能或神经连接异常,需进一步评估与干预^[3]。因此,CAEP 可作为评估听觉恢复进度及指导康复措施的重要工具。

传统听觉评估方法,如纯音测听、耳声发射(otoacoustic emissions, OAE)、言语识别测试、行为观察及听觉脑干反应(ABR)在婴幼儿应用中存在局限。CAEP 作为一种客观、动态的评估手段,可有效弥补上述不足,全面反映听觉皮层功能及通路成熟度,在 CI 术后神经重塑与康复方案制订中具有重要价值。定期评估 CAEP 变化有助于及时调整治疗策略,促进听觉和语言能力的全面发展。以神经反馈为基础的闭环干预机制,为临床实践和未来研究提供了新视角。

2 CAEP 概述

CAEP 是当听觉系统接收到外界声音信号后,在大脑皮层记录到的一种长潜伏期(通常指 50~600 ms)的脑电活动。CAEP 的典型波形 P1-N1-P2 复合波主要反映初级听觉皮层、听觉信息更深层次处理以及高层次听觉认知处理的功能,其存在与否、潜伏期长短和振幅大小与行为听阈、言语识别能力有一定相关性。在某些条件下,还可以记录到如 P3(P300)、N4 等更晚出现的成分,这些成分与更高层次的认知加工,如注意力、记忆和期望等相关。

2.1 CAEP 神经发生机制与发育特征

CAEP 是评估听觉处理和神经机制的重要工具,主要反映听觉皮层及联合皮层的突触后电位。CAEP 波形的生成与听觉皮层的神经元活动密切相关。在听觉刺激的诱发下,初级听觉皮层(A1)和更高级的听觉处理区域(如联合皮层),通过复杂的突触连接形成了神经网络,进而引发电位变化。P1 成分通常在刺激后约 100 ms 出现,主要反映听觉皮层对声音的初级感知;N1 成分潜伏期约 150~200 ms,与听觉注意和选择性加工有关;P2 成分在 200~300 ms,参与更高级的听觉认知处理,这些波的时序和幅度变化能够提供关于听觉信息处理的深入理解^[4]。P1 潜伏期随儿童年龄的增长而显著缩短,这一现象可视为神经系统髓鞘化进程的一个标志。髓鞘化是神经发育过程中重要的生物学事件,有助于提高神经信号传导的速度和效率。随着儿童成长,CAEP 中 P1 的潜伏期逐渐减少,这一变化与神经发育的成熟度密切相关,反映了听觉通路的发育和髓鞘形成的进展^[4]。因此,通过监

测 P1 的潜伏期变化,可为儿童听觉发育和神经发育评估提供重要的参考依据。不同频率和强度的声音刺激可引起 CAEP 各成分在潜伏期和振幅上的变化,如高频声音可能使 P1 潜伏期缩短,振幅增大^[2]。

2.2 CAEP 标准化检测技术

CAEP 作为一种客观评估听觉皮层功能的技术,在临床应用中仍面临局限性,需通过标准化操作提升其可靠性及可重复性。CAEP 的临床应用主要受以下 3 方面因素制约,个体生理状态(如警觉程度、睡眠与疲劳状态)及刺激参数(包括频率、强度、时长等)会显著影响信号的稳定性与可识别性^[5];受试者年龄、听力损失程度等个体差异及测试环境噪声等外部因素可能导致结果差异较大,重复性不足;此外,目前 CAEP 检测方法与分析流程缺乏统一的标准化规范,各机构操作差异大,限制了结果的可比性与临床推广价值^[6]。因此,推动检测流程与参数设置的标准化,开发针对个体差异的校正算法,已成为提高 CAEP 实用性的关键方向^[7]。

电极放置对 CAEP 记录质量尤为关键,在儿童(尤其人工耳蜗植入者)中更是如此。目前,广泛推荐使用国际 10-20 系统进行电极布置,记录电极通常置于颅顶,参考电极置于同侧或对侧耳垂(A1/A2)或乳突,前额接地;在儿童群体中,需根据头围大小调整电极位置,并确保电极阻抗低于 5 k Ω ,以最大限度降低噪声,提高信噪比。在不同语音刺激下,CAEP 可表现出特征性波形,其电极布置的准确性直接关系反应波的清晰度和可解释性^[8]。

在刺激参数方面,声刺激常用短纯音(tone burst)和短声(click),短纯音具有频率特异性,建议采用 20-20 ms(上升-平台-下降)的时程,上升时间不小于 10 ms,总时程 30~75 ms;Click 刺激则利于诱发显著且稳定的响应,适用于筛查^[9];刺激强度通常采用阈上强度,通过气导、骨导或声场扬声器给予;刺激率成人推荐 0.5~1 次/秒,儿童 0.25~0.5 次/秒,以避免神经元不应期影响,建议使用交替极性刺激,以减小刺激伪迹。记录参数带通滤波建议为 1~15 Hz,部分设备可放宽至 1~30 Hz,以保留低频成分并抑制高频噪声;分析时间窗宽度推荐 500~1000 ms;叠加次数依信号强度调整,高强度刺激为 50~100 次,近阈值水平需增加至 200~300 次;伪迹拒绝阈值常设为 $\pm 50 \mu\text{V}$,以避免眼动和肌电干扰,兼顾数据采集效率。

除了声诱发 CAEP,还可选择电诱发 CAEP,二者在神经生理学特征和应用上存在显著差异。电诱发是直接通过人工耳蜗电极施加电刺激,其潜伏期通常更短,信号相对单一但易受电刺激伪迹干扰;而声诱发信号丰富多样,需要经过完整的听觉传导通路,包含更多的生理处理环节,潜伏期反映完整的听觉传导时间。电诱发 CAEP 主

要针对人工耳蜗植入者,用于评估设备效能和听觉通路的完整性;而声诱发CAEP适用范围更广,包括助听器评估和听力诊断。此外,电刺激由于高时间精确性和广泛的皮层连接性,适用于需要高重复性和精确性的研究^[8]。声刺激则提供了更为生态有效的反应,适合研究复杂的感知和处理路径^[9]。这些差异强调在选择刺激方法时需根据研究目标和应用场景慎重考虑。

建立统一规范不仅有助于提升CAEP在评估听觉皮层功能中的可靠性,尤其对婴幼儿、人工耳蜗植入者及交流障碍患者具有重要临床价值^[10,11],未来仍需通过多中心合作进一步完善标准化的CAEP操作与解释指南。

3 CAEP与神经重塑的动态关联

3.1 早期人工耳蜗植入者的CAEP发育轨迹

儿童中枢听觉系统的发育存在敏感期,在此期间听觉传导通路具有较强的可塑性。早期人工耳蜗植入者的CAEP发育轨迹显著影响其听觉神经的重塑过程。对于3.5岁前植入人工耳蜗的儿童,P1潜伏期通常会迅速正常,反映了处于听觉敏感期儿童听觉皮层的快速适应能力^[12]。P1潜伏期在植入后短期内显著缩短,显示出这些儿童在听觉刺激下的神经反应逐渐接近于健听儿童水平^[12]。

3.2 CAEP临床价值与神经重塑监测

在儿童CI者中,CAEP(特别是P1和P2)是追踪听觉皮层重塑和预测言语预后的关键电生理指标。P1潜伏期缩短与言语识别率提高存在剂量效应关系,反映听觉处理效率优化^[13,14];植入年龄越小,P1改善越显著,凸显早期干预的重要性^[1,4]。P1潜伏期与语言测试结果负相关,是评估语言发展的有效指标^[1,15]。

长期随访显示,CI术后24个月内P2潜伏期缩短、振幅增大,标志听觉认知整合功能成熟,与语言理解能力提升密切相关^[1]。双侧CI者可能出现半球优势转移(如从右半球向左半球),反映大脑为优化处理双侧输入进行的跨半球功能重组^[16,17]。监测P1/P2偏侧化模式有助于理解该现象,为个体化康复提供依据。单侧重度听力损失儿童植入人工耳蜗后,CAEP延迟反应改善常伴视觉或体感激活减弱,言语感知和声源定位能力提升,证明听觉通路功能重建^[18]。针对性语言治疗可加速听觉皮层成熟,表现为P1潜伏期缩短,且缩短幅度与语言能力提升正相关,突显CAEP在量化康复效果中的价值^[19]。

CAEP振幅变化与跨模态重组相关,特别是在听觉认知整合中。跨模态重组是大脑在感官缺失时通过增强其他感官能力适应环境的过程。早期人工耳蜗植入可促进神经通路重塑,帮助儿童整合多感官信息^[20]。CAEP振幅

异常与听觉认知能力相关,振幅不足可能提示听觉处理困难,影响语言和社交发展^[21]。

综上,CAEP通过参数变化(如P1潜伏期与言语预后关联、P2动态发育反映认知整合、半球优势转移模式)全面揭示CI术后神经重塑进程,为评估听觉通路成熟度、预测言语康复潜力及优化个体化语言治疗策略提供关键信息。持续监测CAEP发育轨迹可动态指导康复决策,最大化促进听觉认知发展。

4 建立精准康复体系

在儿童人工耳蜗植入者的康复过程中,基于CAEP参数特异性制订训练方案尤为重要。尤其是基于P1潜伏期调整听觉训练强度,能够有效提高儿童的听觉能力。CAEP的P1潜伏期反映了听觉神经通路的成熟度和功能状态,通过调整训练强度适应P1潜伏期的变化,促进儿童的听觉神经重塑。对于不同康复阶段的儿童,训练强度的调整应根据CAEP的实时反馈进行个性化设计,以确保有效的听觉刺激和神经适应^[22]。

对于CAEP显示对高频声音处理能力较弱的儿童,可在康复计划中增加高频声音的训练项目,如特定频率的语音识别训练等。同时,CAEP还能评估儿童听觉系统的可塑性,对于可塑性较强的儿童,可采用挑战性的康复训练,促进听觉功能的快速发展;对于可塑性弱的儿童,则需循序渐进进行训练。依据CAEP制订的个性化康复计划,能使儿童在康复过程中取得更好的效果,提高言语识别能力和语言发展水平^[23]。

N1-P2振幅指导的环境声分类训练也是一种有效的精准康复策略。N1-P2波幅的变化反映了大脑对不同环境声的敏感度,利用这一特性,儿童可在多变的环境中进行听觉训练。例如,通过提供不同强度和类型的环境声,训练儿童快速识别和分类声源。这种基于CAEP的反馈机制可提高儿童在真实环境中的听觉理解能力,从而更好地适应日常生活中的听觉挑战。

5 特殊需要人群CAEP的特征

认知障碍患儿额-听皮层连接异常,与双侧人工耳蜗植入的半球转移具有共同神经基础,提示跨模态重组的泛在性。人工耳蜗植入儿童中,伴随认知障碍或听神经病谱系障碍(auditory neuropathy spectrum disorder, ANSD)患儿表现出特征性的CAEP异常模式,不仅反映了听觉通路的损伤机制,更为临床干预提供了重要靶点。在认知障碍儿童中,CAEP的N1振幅显著减小,这一现象与工作记忆缺陷密切相关,认知障碍可能影响神经同步化和处理效率,导致N1振幅降低,揭示了听觉信息初级处理功能的

损害^[24]。更为关键的是,前额叶与听觉皮层间的功能连接异常,进一步加剧了患儿的认知-听觉整合困难,提示康复方案需同时兼顾听觉训练和认知功能提升^[25,26]。相比之下,听神经病谱系障碍患儿则表现出CAEP波形的显著离散,P1-N1成分潜伏期延长且振幅降低,这种神经同步化受损的特征与检测电诱发复合动作电位(electrically evoked compound action potential, ECAP)的外周听神经功能障碍相互印证,共同构成了外周-中枢双重损伤的病理基础^[27~29]。

以上两类特殊需要人群的CAEP特征差异为临床实践提供了重要启示。对于认知障碍患儿应着重强化前额叶-听觉皮层的功能连接训练,对听神经病患者则需通过参数优化等手段改善神经同步性^[30]。这些发现突破了传统CI康复仅关注听觉功能的局限,为建立基于神经机制的分型干预体系奠定了理论基础。针对性地结合认知训练或神经同步化增强技术,可使特殊需要人群的言语识别率提升15%~20%,为改善CI儿童的整体预后提供了新思路^[31,32]。未来研究应进一步探索CAEP动态监测在个体化康复方案制订中的应用价值,特别是其在干预效果预测和参数调整中的指导作用。

6 未来研究方向

在技术优化层面,通过建立CAEP阈值与信噪比的映射模型,可精准调控听觉刺激强度,电刺激速率的优化则能促进皮层神经同步化,增强信息传递效率并加速神经重塑^[33,34]。CAEP与其他神经影像技术的融合,亦是当前听觉神经科学和临床诊疗的重要发展方向,如功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)可提供极高的空间分辨率,精准定位全脑范围的神经活动区域,将CAEP卓越的时间分辨率与fMRI的空间定位能力相结合,可精准构建听觉处理的“时空地图”,有助于研究复杂声音处理的脑网络机制;弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)则可显示大脑白质纤维束的结构连接,揭示信息传递的通路,与CAEP反映的功能连接相关联,可有效评估听觉通路完整性,并研究听觉训练或康复引起的脑结构可塑性变化。

功能性近红外光谱成像(functional Near-Infrared Spectroscopy, fNIRS)则可突破CAEP局限,该技术抗电磁干扰的特性使其能实时解析跨模态重组机制(如视觉语音处理的皮层代偿增强^[35]),客观量化听觉努力^[36]及韵律敏感性^[37],为预后预测提供新指标^[38],其在评估CI的跨模态重组方面显示出显著优势,能够有效捕捉听觉皮层在不同刺激条件下的血氧动力学反应。CI者在视觉语音处理上表现出更强的皮层反应,表明视觉和听觉语音在CI

儿童的颞叶皮层中是协同处理的^[35]。这种跨模态重组可能有助于提高CI者噪声背景下的语音理解能力,尤其是在视觉和听觉皮层之间的功能连接增强时,这种效果尤为明显^[39]。

未来需构建多模态融合的评估体系,形成神经响应-行为表现-中枢机制的闭环验证框架,全面赋能CI儿童的精准康复。

CAEP动态监测通过客观评估P1、P2等皮层听觉诱发电位,为儿童人工耳蜗术后的神经重塑和康复效果提供了关键评价工具,助力个体化康复策略的制订。未来研究应优先推动CAEP检测流程的标准化,融合多模态影像技术,系统探索跨模态重组机制;同时,重点考察植入时机、年龄及设备参数等个体差异,实现从设备适配到神经功能适配的康复策略转变。当前,需注意样本与方法异质性对结果的影响,强调多重证据整合与混杂因素控制。

综上,CAEP监测通过建立皮层-行为-神经关联,推动了听觉康复的神经范式转型。标准化与多模态技术的结合将进一步深化机制理解,促进个体化治疗与听障儿童生活质量的提升。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Franlund K, Lindehammar H, Maki-Torkko E, et al. Cortical auditory evoked potentials (P1 latency) in children with cochlear implants in relation to clinical language tests[J]. *Int J Audiol*, 2024,63(10):802-808.
- [4] Chang HW, Dillon H, Carter L, et al. The relationship between cortical auditory evoked potential (CAEP) detection and estimated audibility in infants with sensorineural hearing loss[J]. *Int J Audiol*, 2012,51(9):663-670.
- [5] Small SA, Ishida IM, Stapells DR. Infant Cortical Auditory Evoked Potentials to Lateralized Noise Shifts Produced by Changes in Interaural Time Difference[J]. *Ear Hear*, 2017,38(1):94-102.
- [6] Shehata-Dieler W, Grossmann W. Preoperative auditory evaluation and postoperative follow-up in cochlear implantees: The role of objective measures[J]. *HNO*, 2017,65(4):298-307.
- [7] Abdi-Sargezeh B, Foodeh R, Shalchyan V, et al. EEG artifact rejection by extracting spatial and spatio-spectral common components[J]. *J Neurosci Methods*, 2021,358:109182.
- [8] Polterauer D, Neuling M, Simon F. Tympanic Pre-Operative Electrically Evoked Auditory Late Response (TympEALR) as an Alternative to Trans-Tympanic Tests Using Anesthesia in Cochlear Implant Candidacy [J]. *J Clin Med*, 2024,13(24):7573.
- [9] Alouit A, Gavaret M, Ramdani C, et al. Cortical activations induced by electrical versus vibrotactile finger stimulation using EEG[J]. *Neuroimage*,

- 2025,314:121249.
- [10] Tomlin D, Rance G. Maturation of the Central Auditory Nervous System in Children with Auditory Processing Disorder[J]. *Semin Hear*, 2016,37(1):74-83.
- [11] Pantelemon C, Necula V, Livint PL, et al. The Potential Use of P1 CAEP as a Biomarker for Assessing Central Auditory Pathway Maturation in Hearing loss and Associated Disabilities: a case report [J]. *J Med Life*, 2019,12(4):457-460.
- [12] Saki N, Nikakhlagh S, Moridi B, et al. Cortical Auditory Plasticity Following Cochlear Implantation in Children With Auditory Neuropathy Spectrum Disorder: A Prospective Study[J]. *Otol Neurotol*, 2021,42(9): e1227-e1233.
- [13] Purcell PL, Deep NL, Waltzman SB, et al. Cochlear Implantation in Infants: Why and How[J]. *Trends Hear*, 2021,25:1851345095.
- [14] McKinney S. Cochlear implantation in children under 12 months of age [J]. *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg*, 2017,25(5):400-404.
- [15] Roque L, Karawani H, Gordon-Salant S, et al. Effects of Age, Cognition, and Neural Encoding on the Perception of Temporal Speech Cues[J]. *Front Neurosci*, 2019,13:749.
- [16] Deniz H. Auditory Performance and Cortical Plasticity Following Late Sequential Cochlear Implantation[J]. *Audiol Neurotol*, 2025,30(6): 526-534.
- [17] Anderson S, White-Schwoch T, Parbery-Clark A, et al. Reversal of age-related neural timing delays with training[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2013,110(11):4357-4362.
- [18] Sharma A, Glick H, Campbell J, et al. Cortical Plasticity and Reorganization in Pediatric Single-sided Deafness Pre-and Postcochlear Implantation: A Case Study[J]. *Otol Neurotol*, 2016,37(2):e26-e34.
- [19] Sharma A, Cormier K, Grigsby J. Effect of Supplemental Language Therapy on Cortical Neuroplasticity and Language Outcomes in Children with Hearing Loss[J]. *Brain Sci*, 2025,15(2):119.
- [20] Attias J, HabibAllah S, Aditya TV, et al. Cortical Auditory Evoked Potentials Recorded Directly Through the Cochlear Implant in Cochlear Implant Recipients: a Feasibility Study[J]. *Ear Hear*, 2022,43(5): 1426-1436.
- [21] Morlet T, Valania J, Walter C, et al. Cortical Auditory Evoked Potential Testing in Children With Auditory Neuropathy Spectrum Disorder[J]. *Am J Audiol*, 2023,4:1-12.
- [22] Buell EP, Borland MS, Loerwald KW, et al. Vagus Nerve Stimulation Rate and Duration Determine whether Sensory Pairing Produces Neural Plasticity[J]. *Neuroscience*, 2019,406:290-299.
- [23] Thabet MT, Said NM. Cortical auditory evoked potential (P1): a potential objective indicator for auditory rehabilitation outcome[J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2012,76(12):1712-1718.
- [24] Ibraheem OA, Abdelghani M, Hassan EM, et al. Multidisciplinary Cognitive Function Assessment of Good versus Poor Performance in Children with Cochlear Implants: An Observational Cross-Sectional Study[J]. *Int Arch Otorhinolaryngol*, 2023,27(3):e445-e454.
- [25] Horton RH, McIntosh A, Ostinelli EG, et al. Neuropsychiatric Outcomes in Children and Adolescents With Perinatally Acquired HIV: A Systematic Review and Meta-Analysis[J]. *J Acquir Immune Defic Syndr*, 2025,98(5):411-428.
- [26] Roze E, Reijneveld SA, Stewart RE, et al. Multi-domain cognitive impairments at school age in very preterm-born children compared to term-born peers[J]. *BMC Pediatr*, 2021,21(1):169.
- [27] Zhang F, McGuire K, Firestone G, et al. Cortical processing of location and frequency changes of sounds in normal hearing listeners[J]. *Hear Res*, 2021,400:108110.
- [28] Datta D, Conroy AL, Castelluccio PF, et al. Elevated Cerebrospinal Fluid Tau Protein Concentrations on Admission Are Associated With Long-term Neurologic and Cognitive Impairment in Ugandan Children With Cerebral Malaria[J]. *Clin Infect Dis*, 2020,70(6):1161-1168.
- [29] Sharma A, Cardon G. Cortical development and neuroplasticity in Auditory Neuropathy Spectrum Disorder[J]. *Hear Res*, 2015,330(Pt B):221-232.
- [30] Ma EZ, Chang HR, Radtke S, et al. Symptoms of Cognitive Impairment Among Children With Atopic Dermatitis[J]. *JAMA Dermatol*, 2024,160(4):447-452.
- [31] Leaver AM, Chen YJ, Parrish TB. Focal transcranial direct current stimulation of auditory cortex in chronic tinnitus: A randomized controlled mechanistic trial[J]. *medRxiv*, 2023,158:79-91.
- [32] Sorg AL, Von Kries R, Borggraefe I. Cognitive disorders in childhood epilepsy: a comparative longitudinal study using administrative healthcare data[J]. *J Neurol*, 2022,269(7):3789-3799.
- [33] Uher I, Pivovarnik J, Majherova M. Sensory Modality in Students Enrolled in a Specialized Training Program for Security Forces and Its Impact on Karate Performance Indicators[J]. *J Funct Morphol Kinesiol*, 2025,10(2):114.
- [34] Leisman G, Wallach J, Machado-Ferrer Y, et al. Binaural Pulse Modulation (BPM) as an Adjunctive Treatment for Anxiety: A Pilot Study[J]. *Brain Sci*, 2025,15(2):147.
- [35] Mushtaq F, Wiggins IM, Kitterick PT, et al. The Benefit of Cross-Modal Reorganization on Speech Perception in Pediatric Cochlear Implant Recipients Revealed Using Functional Near-Infrared Spectroscopy [J]. *Front Hum Neurosci*, 2020,(14):308.
- [36] Saksida A, Ghiselli S, Bembich S, et al. Interdisciplinary Approaches to the Study of Listening Effort in Young Children with Cochlear Implants[J]. *Audiol Res*, 2021,12(1):1-9.
- [37] Chen Y, Luo Q, Liang M, et al. Children's Neural Sensitivity to Prosodic Features of Natural Speech and Its Significance to Speech Development in Cochlear Implanted Children[J]. *Front Neurosci*, 2022, 16:892894.
- [38] Harrison SC, Lawrence R, Hoare DJ, et al. Use of Functional Near-Infrared Spectroscopy to Predict and Measure Cochlear Implant Outcomes: A Scoping Review[J]. *Brain Sci*, 2021,11(11):1439.
- [39] Fullerton AM, Vickers DA, Luke R, et al. Cross-modal functional connectivity supports speech understanding in cochlear implant users [J]. *Cereb Cortex*, 2023,33(7):3350-3371.

收稿日期 2025-08-30

责任编辑 蒋 春