

听觉诱发电位在人工耳蜗领域的研究态势

Research Landscape of Auditory Evoked Potentials in Cochlear Implants

李利玲 陈丹 陈愈彬 谭静芊 王健艳 罗佳 杨洛盈 李鹏

LI Li-ling, CHEN Dan, CHEN Yu-bin, TAN Jing-qian, WANG Jian-yan, LUO Jia, YANG Luo-ying, LI Peng

【摘要】目的 本研究通过文献计量学方法,系统分析1999~2025年听觉诱发电位(AEP)在人工耳蜗(CI)领域的研究现状、热点及发展趋势,为该领域的科研布局与临床实践提供参考。**方法** 基于Web of science核心合集数据库检索相关文献,运用VOS viewer和citespace等工具对纳入的568篇文献进行年度分布、国家/机构合作、核心作者、高被引文献及关键词共现与突现分析。**结果** 该领域年发文量呈波动上升趋势,2022年与2024年为发文高峰期。多伦多大学和美国为核心研究力量。高被引文献集中于听觉发育关键期、电生理评估标准等主题。关键词分析表明,该领域研究从初期的电刺激和神经机制探讨,逐步演进至听力保留、腔内电耳蜗图等精细技术及多学科交叉方向。**结论** AEP在CI领域的研究从基础机制向临床应用与多模态评估拓展,未来需进一步融合神经认知与大数据,以实现精准的术前预测和全程康复管理。

【关键词】 听觉诱发电位;人工耳蜗;文献计量学;可视化分析;研究热点

【中图分类号】 R764.35

【文献标识码】 A

【文章编号】 1672-4933(2026)01-0007-05

【Abstract】Objective This study aims to systematically analyze the research status, hotspots, and development trends of auditory evoked potentials (AEPs) in the field of cochlear implants (CIs) from 1999 to 2025 using bibliometric methods, so as to provide a reference for scientific research planning and clinical practice. **Methods** Relevant publications were retrieved from the Web of science Core Collection. Using tools such as VOSviewer and CiteSpace, 568 included articles were analyzed in terms of annual distribution, country/institution collaboration, core authors, highly-cited literature, as well as keyword co-occurrence and burst detection. **Results** The annual publication output showed a fluctuating upward trend, with peaks in 2022 and 2024. The University of Toronto and the United States were identified as the most productive institution and country, respectively. Highly-cited literature focused on critical periods in auditory development and electrophysiological assessment standards. A Keyword analysis revealed that research has evolved from initial explorations of electrical stimulation and neural mechanisms to more refined techniques, such as hearing preservation and intracochlear electrocochleography, reflecting a shift toward multidisciplinary integration. **Conclusion** Research on AEPs in the CI field is transitioning from basic mechanisms to clinical applications and multimodal assessment. Future efforts should further integrate neurocognitive and big data technologies to achieve more precise preoperative prediction and comprehensive rehabilitation management.

【Key words】 Auditory evoked potentials; Cochlear implants; Bibliometrics; Visual analysis; Research hotspots

1 引言

人工耳蜗植入(CI)是重建重度至极重度感音神经性聋患者听觉功能的有效干预手段,其疗效不仅依赖于精准的手术操作,更与术前评估、术中功能监测及术后康复调机密切相关^[1]。听觉诱发电位(auditory evoked potentials, AEPs)作为客观评估听觉通路功能的电生理技术,在此全流程管理中扮演重要角色,为无法配合主观

测听的特殊人群(如婴幼儿)提供了关键的诊断依据^[2]。然而,AEP技术在CI领域的应用仍面临诸多挑战与机遇。当前的研究重点与难点在于如何将不同的AEP技术(如耳蜗电图(electrocochleography, ECoChG)、电诱发听觉脑干反应(electrically evoked auditory brainstem response, EABR)、皮层听觉诱发电位(cortical auditory evoked potential, CAEP))更精准地应用于术前残余听力评估,术

基金项目:国家自然科学基金“基于SIRT1/IL-6-STAT3-NF- κ B信号通路介导的非菌性炎症在老年性耳聋中的作用机制研究”(82371158);国家自然科学基金“ROS-Caspase-3-Dicer通路在钴诱导耳蜗细胞毒性损伤中的作用及分子机制”(82071050);中山大学附属第三医院临床研究专项基金“咽鼓管球囊扩张术联合吹张术改善鼻咽癌放疗后分泌性中耳炎患者咽鼓管功能的临床研究”(YHJH202304)

作者单位:中山大学附属第三医院 广州 510630

作者简介:李利玲 博士在读;研究方向:耳科学

通讯作者:李鹏, E-mail: lipeng25@mail.sysu.edu.cn

中电极植入效果判断及术后听觉与言语功能康复效果的客观评估^[3]。

文献计量学分析能够基于海量文献数据,通过定量与可视化手段,揭示某一领域的研究力量分布、核心知识基础、热点主题与演进趋势^[4]。本研究旨在运用该方法,对AEP在CI领域的研究图景进行宏观描绘,以期为科研方向的选择和临床实践的优化提供有价值的参考依据。

2 材料和方法

2.1 检索策略

本研究的数据检索在Web of Science核心合集数据库中。检索式设计如下:TS=[(auditory evoked potential OR "AEP" OR "ECochG" OR "EABR" OR "CAEP")] AND (cochlear implant),以涵盖与人工耳蜗相关的各类听觉诱发电位研究文献。检索时间1999年1月1日~2025年8月1日。文献类型为研究论文、综述及在线发表文章,排除社论、会议摘要等非研究性文献,以确保分析数据的代表性与学术质量。

2.2 分析工具与方法

本研究采用文献计量学方法,综合利用多种工具开展多维度分析。运用R语言进行数据清洗与基础统计,分析内容包括年发文量、国家/地区分布、机构合作关系及期刊来源等基本特征。借助VOS viewer(版本1.6.20)构建国家与机构合作网络、作者合作网络以及关键词共现

网络,以可视化形式展现领域内的科研合作及主题关联。最后,通过Citespace(版本6.3.R1)进行关键词实现分析及术语聚类分析,以识别研究热点及演进路径,系统揭示该领域的发展动态与前沿趋势。

3 结果

3.1 发文趋势与总体概况

本研究共纳入有效文献568篇。年度分布显示,该领域发文量整体呈波动上升趋势,其中2022年与2024年发文量最高,均为47篇。2005年文献年均被引频次达7.28,为历年最高,显示出该时期成果具有显著的学术影响力。从机构分布来看,多伦多大学以72篇居于首位。国家分析表明,美国在该领域的发文量及国际合作频次均位列第一,显示出其领先的科研实力与广泛的合作网络。

3.2 发文作者和期刊分析

核心作者分析显示,Lenarz T以23篇发文量居于首位,Buchman CA(22篇)、Sharma A(21篇)和Gordon KA(20篇)紧随其后,构成了该领域高产作者群体(图1A-B)。期刊分布分析表明,《Otolology & Neurotology》刊载相关论文62篇,位列第一;《Hearing Research》(49篇)与《Ear and Hearing》(48篇)也是该领域的重要发表阵地,反映出这些期刊对本研究方向的高度关注(图1C-D)。

3.3 引文分析

高被引文献构成了本领域的知识基础(表1)。

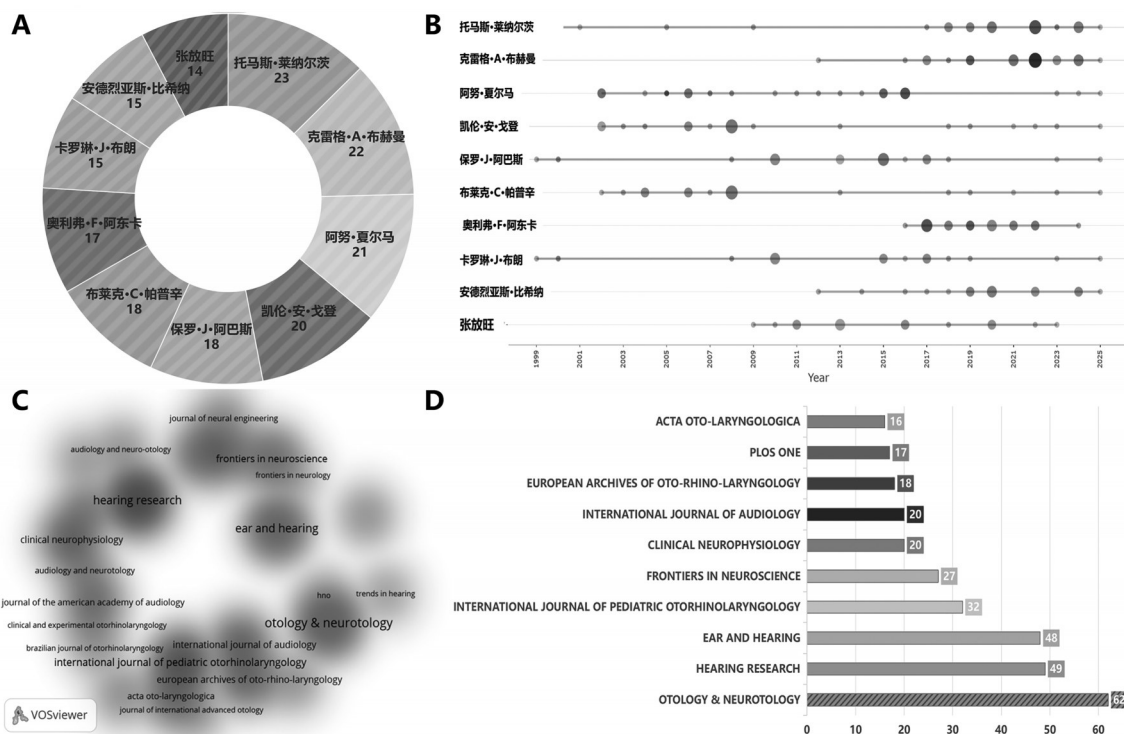


图1 作者与期刊发文产出

Sharma 等^[5]研究居于核心地位,该研究通过 CAEP 的 P1 潜伏期首次明确了听觉系统发育存在约 3.5 年的关键敏感期,为儿童人工耳蜗植入时机的选择提供了重要的电生理依据。Sharma 团队后续研究进一步揭示了早期植入所诱发的中枢听觉通路快速可塑性及跨模式重组现象,深化了对听觉剥夺后大脑补偿机制的认识^[6,7]。Wunderlich 等^[8]系统描绘了婴幼儿 CAEP 反应的正常发育轨迹,为临床评估建立了可靠的参考标准。Brown 等^[9]关于 EAP/EABR 阈值与行为水平相关性的研究侧重于成人编程策略,其提出的生理指标辅助(mapping and programming, MAP)拟合的方法,显著促进了从基础神经机制向临床精准干预的转化,成为连接理论与实践的桥梁。

3.4 研究热点与前沿分析

关键词共现与聚类分析清晰揭示了该领域的知识结构与前方向(图 2)。高频关键词如 cochlear implant 和 children 表明,研究长期聚焦儿童群体的植入效果评估与听觉功能发展。聚类分析识别出 7 个代表性方向:#0 electrocochleography(电耳蜗图)、#1 hearing loss(听力损失)、#2 electrical stimulation(电刺激)、#3 hearing preservation(听力保留)、#4 thresholds(阈值)、#5 cochlear implants(人工耳蜗)。这些聚类结果不仅印证了听觉诱发电位在人工

耳蜗疗效评估与康复管理中的核心地位,同时反映出该领域正持续扩展其外延,呈如下趋势。从外周听觉干预逐步向中枢神经机制深入,并与心理社会因素、特殊环境致伤机制等跨学科方向不断融合。

如图 3 所示,关键词突现分析进一步揭示了不同时期研究热点的演进路径。早期研究(1999~2011 年)聚焦基础机制探索,如 electrical stimulation(电刺激,强度 8.65)和 auditory nerve(听觉神经)。中期阶段(2006~2016 年)转向临床应用研究,sensorineural hearing loss(感音神经性耳聋,强度 7.97)和 speech perception(言语感知)成为关注重点。近年来(2017~2025 年),研究前沿体现出显著的技术精细化与领域交叉特征,hearing preservation(听力保留,强度 8.87)和 intracochlear electrocochleography(腔内电耳蜗图,强度 7.02)等关键词的持续突现,标志着该领域向保留残余听力、精准植入评估及多模态信号处理等创新方向持续深化。

4 讨论

4.1 该领域发展脉络与现状

本研究基于文献计量学方法,系统梳理了 1999 年~2025 年 AEP 在 CI 领域的研究进展,初步揭示了该领域的

表 1 人工耳蜗与听觉诱发电位研究中的关键高被引文献

标题	作者	发表时间(年)	被引次数	关键词
The influence of a sensitive period on central auditory development in children with unilateral and bilateral cochlear implants	Sharma A	2005	385	敏感期;P1 潜伏期
The relationship between EAP and EABR thresholds and levels used to program the nucleus 24 speech processor: Data from adults	Brown CJ	2000	201	人工耳蜗编程、生理-行为相关性
Maturation of the cortical auditory evoked potential in infants and young children	Wunderlich JL	2006	194	CAEP 成熟;拓扑组织
Deprivation-induced cortical reorganization in children with cochlear implants	Sharma A	2007	166	皮层重组;跨模式可塑性
Rapid development of cortical auditory evoked potentials after early cochlear implantation	Sharma A	2002	164	快速发育;神经可塑性

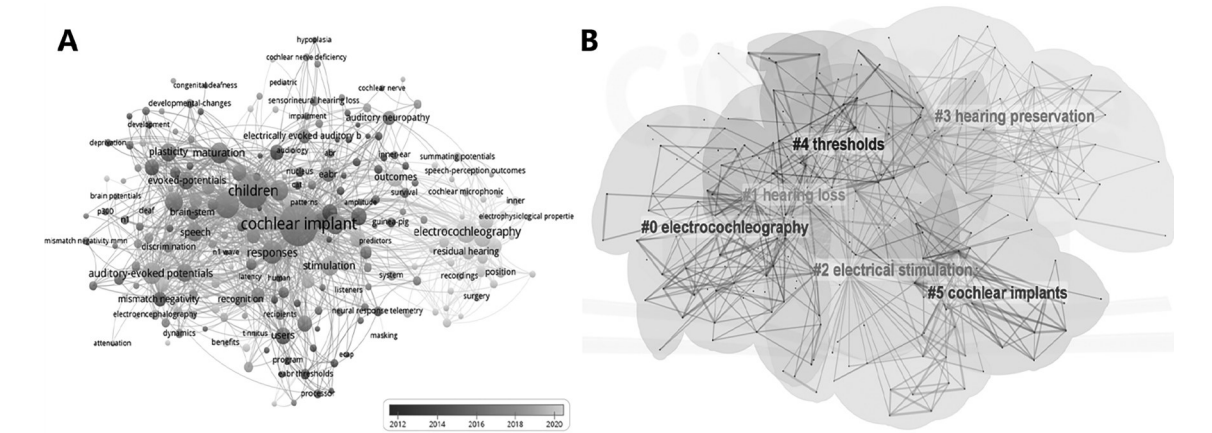


图 2 关键词分析

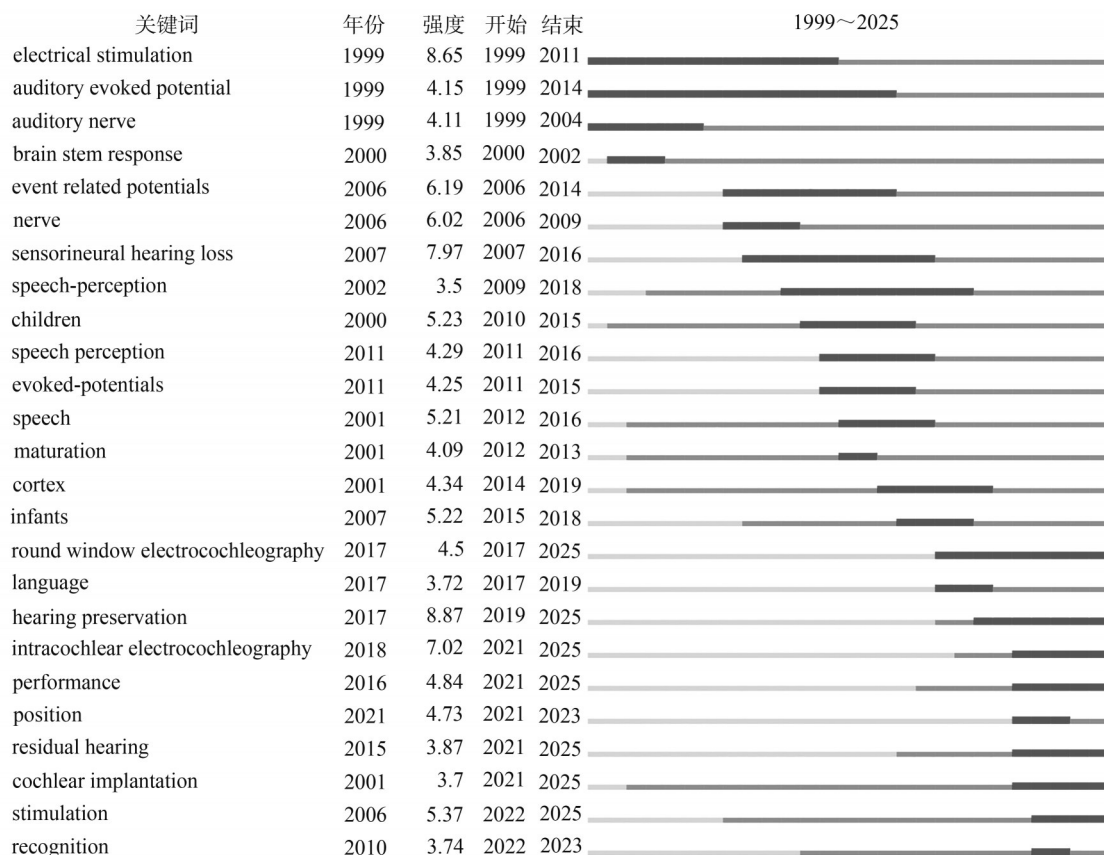


图3 实现强度最高的25个关键词

知识结构、发展脉络与研究动态。分析显示,该领域的研究发展可分为3个阶段。早期研究主要关注EABR、EAP等生理指标与行为阈值之间的关系,属于基础探索阶段。随后,研究重点逐渐转向听觉皮层发育与神经可塑性等中枢机制的探讨。近年来,该领域进一步呈现出与神经认知科学、公共卫生以及心理健康等多学科交叉融合的发展趋势。早期研究为人工耳蜗术后调机提供了重要依据^[5],Sharma团队围绕敏感期开展的系列工作,通过CAEP的P1成分评估儿童听觉皮层成熟程度,为临床中儿童植入时机的选择提供了有益参考^[6,7]。

4.2 研究分布与国际合作

该领域已形成一批具有较高影响力的核心作者群体,以北美和欧洲的研究机构为主导,显示出较强的国际合作特征。这一现状既反映了发达国家在该领域的积累与优势,也提示我国研究者可进一步深化国际交流,积极融入全球研究网络。此外,相关高水平成果多发表于《Ear and Hearing》《Hearing Research》等专业期刊,这些出版物为本领域的重要学术交流平台。

4.3 技术创新与多学科交叉融合

近年来,AEP技术在CI领域的应用呈现出显著的技

术创新与跨学科融合趋势。在技术层面,AEP的功能正逐步由术中监测向术前预测与术后评估全方位拓展^[10]。当前ECochG和EABR等技术已被广泛应用于术中监测电极植入位置和听神经反应特性,显著提高了手术的精准性与安全性。随着信号处理技术和计算模型的进步,研究者开始探索将多模态AEP指标(如听觉脑干响应、皮层诱发电位等)与机器学习算法相结合,旨在构建个体化的术前听力学预后预测模型^[11,12]。这类模型有望从电生理响应特性中提取具有临床预测价值的特征,从而为患者筛选、干预时机选择和康复方案制订提供量化依据,推动CI临床实践向精准医学模式转变。

在跨学科融合方面,AEP评估的范畴已不仅局限于基础听觉通路功能评估,而是逐步拓展至认知神经科学和心理健康等交叉领域^[13]。如失匹配负波(MMN)和P300等与认知加工密切相关的事件相关电位成分,为客观评估CI使用者的听觉场景分析、言语理解中的认知努力及工作记忆等高级功能提供了新途径^[14]。对于儿童CI使用者,这些认知电位有助于揭示听觉重建过程中的中枢代偿与重组机制,为制定涵盖听觉与认知发展的综合康复策略提供理论支持。此外,AEP与神经影像学(如

fMRI、fNIRS)及行为测听技术的结合,促成了电生理—脑成像—行为多模态评估框架的建立,进一步提升了CI术后听觉功能重塑机制的系统认知^[15-17]。

4.4 研究挑战与展望

尽管AEP在CI领域的应用取得了显著进展,其在转化医学与长期效益评估中仍面临重要挑战。首先,加强从基础研究到临床应用的转化是当前的关键问题。动物实验与临床研究之间仍存在明显脱节,未来需更多开展以临床需求为导向的动物模型研究,如构建噪声性聋、老年性聋以及遗传性聋等不同病因的听力损失模型,系统探讨电刺激参数对听觉通路兴奋性、神经保护与突触可塑性的影响^[18,19]。通过这些研究,可深化对CI作用下神经编码机制的理解,也可为新型刺激策略和听觉修复模式开发提供实验依据。其次,推动长期、系统性的随访研究与多中心数据平台建设极具迫切性。目前大多数研究仍基于横断面设计或短期随访,缺乏对CI使用者10年甚至更长时间段的听觉通路发育、适应与退化过程的纵向观测。构建统一标准化协议、涵盖多中心和大样本的长期随访数据库,结合人工智能分析方法对AEP动态变化轨迹进行建模,将有助于揭示听觉系统与大脑可塑性随年龄、听觉经验变化的规律,明确影响CI长期使用效果的因素,为个体化康复策略调整和终身听觉健康管理提供数据支撑^[20,21]。

综上所述,AEP在CI领域的研究正逐步形成监测—预测—评估一体化技术体系,并不断融合神经科学、计算建模与大数据科学等多学科前沿方法。未来应持续着力于打通基础与临床研究的转化路径,构建跨维度、长周期的研究资源平台,为提升CI患者的听觉重建效果和生活质量提供科学技术支撑。

参考文献

- [1] Dazert S, Thomas JP, Loth A, et al. Cochlear Implantation [J]. Dtsch Arztebl Int, 2020, 117(41):690-700.
- [2] Da Hora LCD, Muniz LF, Venâncio LGA, et al. Cortical Auditory Evoked Potentials in Children with Prenatal Exposure to Zika Virus[J]. Viruses, 2022, 14(9):1923-1934.
- [3] Skarżyński PH, Lorens A, Walkowiak A, et al. Multi-Frequency Intraoperative Monitoring of Hearing Preservation during Cochlear Implantation[J]. Life (Basel), 2022, 12(5):636-646.
- [4] Hassan W, Duarte AE. Bibliometric analysis: A few suggestions[J]. Curr Probl Cardiol, 2024, 49(8):102640-102646.
- [5] Sharma A, Dorman MF, Kral A. The influence of a sensitive period on central auditory development in children with unilateral and bilateral cochlear implants[J]. Hear Res, 2005, 203(1-2):134-143.
- [6] Sharma A, Dorman MF, Spahr AJ. Rapid development of cortical auditory evoked potentials after early cochlear implantation[J]. Neuroreport, 2002, 13(10):1365-1368.
- [7] Sharma A, Gilley PM, Dorman MF, et al. Deprivation-induced cortical reorganization in children with cochlear implants[J]. Int J Audiol, 2007, 46(9):494-499.
- [8] Wunderlich JL, Cone-Wesson BK, Shepherd R. Maturation of the cortical auditory evoked potential in infants and young children[J]. Hear Res, 2006, 212(1-2):185-202.
- [9] Brown CJ, Hughes ML, Luk B, et al. The relationship between EAP and EABR thresholds and levels used to program the nucleus 24 speech processor: data from adults[J]. Ear Hear, 2000, 21(2):151-163.
- [10] Lévi-Strauss J, Benghanem S, Hermann B, et al. Added Value of Late Auditory Evoked Potentials in the Multimodal Prognostication of Patients With Disorders of Consciousness[J]. Crit Care Med, 2025, 53(9): e1736-e1747.
- [11] Shew MA, Pavelchek C, Michelson A, et al. Machine Learning Feasibility in Cochlear Implant Speech Perception Outcomes-Moving Beyond Single Biomarkers for Cochlear Implant Performance Prediction[J]. Ear Hear, 2025, 46(5):1266-1281.
- [12] 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.
- [13] Quatre R, Schmerber S, Attyé A. Improving rehabilitation of deaf patients by advanced imaging before cochlear implantation[J]. J Neuroradiol, 2024, 51(2):145-154.
- [14] Tao DD, Zhang YM, Liu H, et al. The P300 Auditory Event-Related Potential May Predict Segregation of Competing Speech by Bimodal Cochlear Implant Listeners[J]. Front Neurosci, 2022, 16:888596-888606.
- [15] Alemi R, Wolfe J, Neumann S, et al. Audiovisual integration in children with cochlear implants revealed through EEG and fNIRS[J]. Brain Res Bull, 2023, 205:110817-110839.
- [16] Layer N, Weglage A, Müller V, et al. The timecourse of multisensory speech processing in unilaterally stimulated cochlear implant users revealed by ERPs[J]. Neuroimage Clin, 2022, 34:102982-102999.
- [17] Walia A, Shew MA, Varghese J, et al. Improved Cochlear Implant Performance Estimation Using Tonotopic-Based Electrocochleography [J]. JAMA Otolaryngol Head Neck Surg, 2023, 149(12):1120-1129.
- [18] Pasdelou MP, Byelyayeva L, Malmström S, et al. Ototoxicity: a high risk to auditory function that needs to be monitored in drug development[J]. Front Mol Neurosci, 2024, 17:1379743-1379761.
- [19] Lazard DS, Doelling KB, Arnal LH. Plasticity After Hearing Rehabilitation in the Aging Brain[J]. Trends Hear, 2023, 27: 23312165231156412-23312165231156424.
- [20] Frosolini A, Franz L, Caragli V, et al. Artificial Intelligence in Audiology: A Scoping Review of Current Applications and Future Directions[J]. Sensors (Basel), 2024, 24(22):7126-7137.
- [21] Lin A, Ye J, Qi C, et al. Bridging artificial intelligence and biological sciences: a comprehensive review of large language models in bioinformatics[J]. Brief Bioinform, 2025, 26(4):357-368.

收稿日期 2025-08-29

责任编辑 蒋 春