

doi: 10.3969/j.issn.1672-4933.2024.06.024

# 人工耳蜗植入术后认知功能的神经影像学评估方法

## Neuroimaging Measures of Cognitive Assessment after Cochlear Implantation

夏雨奇 刘玉和

XIA Yu-qi, LIU Yu-he

**【摘要】**神经影像学方法可以对不同脑区进行定位和功能探索,为人工耳蜗植入后认知功能的神经机制提供重要信息。随着脑影像技术的发展,多种客观神经影像学方法用于评估人工耳蜗植入者的皮层功能。本文概述目前人工耳蜗术后常用认知评估的神经影像学方法,总结正电子发射断层成像和单光子发射计算机断层成像、近红外光成像、功能磁共振成像、经颅多普勒超声,以及脑磁图等方法在认知功能评估中的重要作用,旨在为人工耳蜗植入术后认知功能的神经影像学评估提供参考建议。

**【关键词】**人工耳蜗;认知功能;神经影像学评估

**【中图分类号】**R764.3

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1672-4933(2024)06-0662-04

**【Abstract】** Neuroimaging measures can locate and explore different brain regions, and thus provide important information for the neural mechanisms of cognitive function after cochlear implant (CI). With the development of neuroimaging technology, various objective neuroimaging measures have begun to be used to evaluate cortical function of CI users. This article provides an overview of the commonly used neuroimaging measures for cognitive assessment after CI, including positron emission tomography (PET), single photon emission computed tomography (SPECT), functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), functional magnetic resonance imaging (fMRI), transcranial Doppler ultrasonography (TCD), and magnetoencephalography (MEG). The aim is to provide suggestions for neuroimaging assessment of cognitive function after CI.

**【Key words】** Cochlear implant; Cognitive function; Neuroimaging measures

在听力损失与认知功能的关系得到广泛研究后,人工耳蜗(cochlear implant, CI)植入后认知能力的变化引起了研究者的兴趣<sup>[1,2]</sup>。CI植入效果与认知能力之间的关系非常复杂,可能互相影响<sup>[2,3]</sup>。评估CI术后的认知功能对临床决策非常重要。神经心理学测验是现阶段主要使用的认知能力评估方法,其受到受试者年龄、语言背景等诸多因素限制。神经生理学评估方法[脑电图(electroencephalogram, EEG)]是对神经心理学测验的重要补充,EEG时间分辨率高,但空间分辨率很差。神经影像学方法可以弥补EEG在空间分辨率上的缺陷。因此,研究者尝试利用神经影像学方法对CI植入者的认知发展进行客观评估。随着脑影像技术的发展,多种客观神经影像学方法用于评估CI植入者的皮层功能,包括对大脑活动中局部代谢或血流动力学变化进行测量的技术,如功能近红外光成像(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)、功能磁共振成像(functional magnetic resonance

imaging, fMRI)、正电子发射断层成像(positron emission tomography, PET)和单光子发射计算机断层成像(single-photon emission computed tomography, SPECT)、经颅多普勒超声(transcranial doppler ultrasonography, TCD),以及记录大脑神经元集体放电活动的技术,如脑磁图(magnetoencephalography, MEG)等。本文从神经影像学角度总结CI植入者认知功能的评估方法,归纳以上检测方法的原理、优势、不足及在CI植入后的应用等,希望为CI植入术后认知功能的神经影像学评估提供参考建议。

### 1 正电子发射断层成像和单光子发射计算机断层成像

正电子发射断层成像(PET)和单光子发射计算机断层成像(SPECT)可以统称发射型计算机断层成像(emission computed tomography, ECT),依据示踪成分在人体不同组织中不同的集聚浓度而成像。PET和SPECT

基金项目:北京市教育委员会科研计划项目(KZ20231002540)

作者单位:首都医科大学附属北京友谊医院 北京 100050

作者简介:夏雨奇 博士 住院医师;研究方向:耳科听力学

通讯作者:刘玉和, E-mail: liuyuhefeng@163.com

的空间分辨率高,可以用于研究听觉皮层区域的神经元活动<sup>[4]</sup>。二者的区别主要体现在图像质量和适用范围两方面,PET使用的示踪剂是F18-FDG,定位更精准,图像质量更好,但示踪剂也局限了PET在不同领域的应用;而SPECT的示踪剂选取很多,对于不同疾病、不同区域的诊断可选取不同特定药物,达到最佳效果。相比于其他神经影像学方法,PET和SPECT的优点在于对脑区及侧别的定位精准,可以提供很好的定位和偏侧化信息,但其时间分辨率较差,而且相对昂贵、有创(需要注射示踪剂),不适合重复测量。

PET和SPECT与CI的兼容性较好,除了在CI植入术前进行检测预测术后效果,也被用于探索临床CI植入后的听觉感知和脑功能变化。PET已用于针对CI植入者的多项研究,特别是用于神经可塑性研究<sup>[5-8]</sup>。CI植入者的语音识别能力与初级和关联听觉皮层的激活之间存在正相关<sup>[9]</sup>。Mortensen<sup>[6]</sup>用PET测量了CI植入者被动聆听时脑血流变化,发现不同语言理解能力的CI植入者用于语音处理的不同网络,颞叶和左前下额叶皮层的激活是实现言语理解的先决条件。SPECT也被证明是客观评估CI植入者语音理解能力的工具,可以观察到不同CI植入者的不同皮层激活程度<sup>[10]</sup>。SPECT、EEG都与CI植入者的认知能力密切相关,PET/SPECT和EEG的结合可以提供良好的时间和空间分辨率,通过观察皮层激活模式的差异,可以更好地研究CI植入者言语处理的不同策略<sup>[5]</sup>。

## 2 功能近红外光谱成像

功能近红外光谱成像(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)是一种光学的、非侵入性的神经成像技术,可以测量皮质血流动力学活性。fNIRS将近红外光(波长650~950 nm)照射到头部,利用生物组织对光的吸收和散射特性,实时检测神经元激活后大脑组织中氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的浓度变化,从而推测大脑皮层的神经活动及对应的认知功能。对CI植入者进行fNIRS测量的主要优点包括安全无创、非侵入性、不产生额外噪声、与CI植入体兼容性好、可重复测量等。此外,相比于事件相关电位(event related potential, ERP),fNIRS的空间分辨率更高,并且对受试者的头部和身体运动伪迹的容忍度更高<sup>[11]</sup>。但是,fNIRS只能探测2~3 cm深度的大脑皮层活动,对于大脑深部神经核难以探测。

2010年,Sevy等<sup>[12]</sup>首次应用fNIRS作为研究CI儿童听觉皮层可塑性的有效工具。此后,fNIRS越来越多地被应用到CI植入者皮层处理神经模式的研究。fNIRS具有检查CI儿童语言相关认知功能方面的潜力<sup>[13]</sup>。fNIRS也可以用于研究CI植入者大脑皮层功能连接的动态变化,

从而考察不同脑区信息加工的过程。Wang等<sup>[14]</sup>利用fNIRS评估CI植入儿童与语音情感相关的大脑皮层的神经活动,结合言语能力评估量表研究CI术后听觉皮层的发育轨迹。此外,EEG和fNIRS的结合应用可以实现对CI植入者大脑功能的信息补充。Ling-Chia Chen等<sup>[15]</sup>基于EEG和fNIRS,研究了CI植入后视觉和听觉处理过程中皮层活动的变化,从而得出CI植入者听觉和视觉的适应能力。fNIRS适合重复测量的特性也使其适用于CI植入后的纵向追踪,有利于探究CI植入者认知能力的变化。

## 3 脑磁图

脑磁图(magnetoencephalography, MEG)是无创伤性地探测大脑电磁生理信号的一种脑功能成像技术,具有毫秒级的时间分辨率<sup>[16]</sup>。MEG测量神经元在颅外产生的磁场,与神经元活动直接相关。MEG的时间分辨率较好,MEG测量的人类皮层活动已被证明可以跟踪语言信息的时间规律性<sup>[17]</sup>。MEG信号由切向头皮的神经元内电流产生,而EEG信号由轴突外电流产生,因此MEG和EEG在某种程度上具有互补性。MEG的信号不受脑组织导电率和颅骨厚度等影响,相比于EEG在对活动的神经元的定位精度和测量信号的灵敏度上有很大优势,但MEG设备昂贵,检查费用高<sup>[18]</sup>。由于MEG测量的是磁场,MEG与CI植入体的兼容性差。MEG监测CI植入者的神经活动存在难度,需要用独特的射频屏蔽实验装置及无磁性植入体<sup>[19]</sup>。因此,CI植入后的MEG研究非常罕见且成极高,目前多为CI植入前进行MEG检查,用于预测术后效果。

## 4 磁共振成像技术及功能磁共振成像

磁共振成像技术(magnetic resonance imaging, MRI)主要利用组织水分子中的氢原子核处于磁场中发生的核磁共振现象对组织结构进行成像<sup>[20]</sup>。MRI包括结构磁共振成像(structure magnetic resonance imaging, sMRI)和功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)。sMRI主要用于探测脑结构和形态,基于体素的形态学测量(voxel-based morphometry, VBM)、基于皮层的形态学测量(surface-based morphometry, SBM)和弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)是常用的测量大脑解剖变化的MRI技术<sup>[21]</sup>。VBM可用于评估灰质的体积或浓度,SBM可用于评估皮层或皮层下结构,DTI用于分析白质结构的完整性。MRI的DTI可通过微观结构和代谢评估听觉神经通路<sup>[22]</sup>。

fMRI是利用MRI检测大脑接收声音刺激后血流和

氧合水平,从而反映听觉皮层相应区域的活跃程度。fMRI的空间分辨率高,可以在CI植入前测量脑结构及脑功能,有助于预测CI植入后语言能力的康复情况。fMRI一般分为任务态fMRI(受试者接收外界刺激或执行特性任务)和静息态fMRI(受试者保持清醒,不执行特定任务)。fMRI可以对大脑形态、灌注、代谢和功能等方面进行研究,具有良好的空间分辨率,有利于不同脑区功能的研究。但是,fMRI测量到的信号仅通过血流动力学与神经元活动间接相关,而且fMRI在采集图像数据过程中设备扫描的机械噪声可能会影响数据质量。同时,fMRI要求被试者长时间处于嘈杂、封闭的空间,在低龄儿童中难以进行。此外,fMRI和MEG一样,通过磁性工作,由于CI的语音处理器包含与扫描仪不兼容的金属部件成分,现阶段CI植入者进行fMRI和MEG有一定危险性。目前fMRI已用于CI植入前脑区功能评估,并预测CI术后效果<sup>[23]</sup>。

## 5 经颅多普勒超声

经颅多普勒超声(transcranial doppler ultrasonography, TCD)是检测脑血管功能的无创技术,测量静息和认知任务期间大脑中、前、后动脉和基底动脉的血流速度。TCD检测对认知过程中的脑血流变化较为敏感,尤其在评估视觉和语言任务时,是认知功能评估较为客观的方法<sup>[24]</sup>。近年来,研究者提出功能经颅多普勒超声(functional transcranial doppler ultrasonography, fTCD)作为替代fMRI测量成人和儿童言语期间脑偏侧化的可靠方法。fTCD可以通过比较特定认知任务期间大脑动脉的血流速度变化评估偏侧化,已用于研究语前聋CI儿童的语言偏侧化优势<sup>[25]</sup>。TCD装置便携,价格便宜,适用于儿童,可以测量静息状态和认知任务状态下大脑主要动脉的血流,因此fTCD在CI的认知评估中有很大的临床应用价值。

## 6 小结

CI术后效果与认知能力关系密切,评估CI植入后的认知能力具有重要意义。评估CI植入后认知功能的神经影像学方法包括PET、SPECT、fNIRS、MEG、fMRI、fTCD等,不同方法各有其优缺点及适用场景。神经影像学方法可以弥补神经心理学和神经生理学的不足,从而形成对CI植入者认知能力全面、整体的认识。未来CI植入后认知能力的发展变化仍需进一步研究,了解神经心理学、神经生理学和神经影像学评估方法之间的相关性,以期临床决策提供依据。

## 参考文献

- [1] Lin FR, Yaffe K, Xia J, et al. Hearing loss and cognitive decline in older adults [J]. *JAMA Intern Med*, 2013, 173(4): 293-299.
- [2] Kral A, Dorman MF, Wilson BS. Neuronal Development of Hearing and Language: Cochlear Implants and Critical Periods[J]. *Annual Review of Neuroscience*, 2019(42): 47-65.
- [3] O'Neill ER, Kreft HA, Oxenham AJ. Cognitive factors contribute to speech perception in cochlear-implant users and age-matched normal-hearing listeners under vocoded conditions [J]. *J Acoust Soc Am*, 2019, 146(1): 195.
- [4] Abraham T, Feng J. Evolution of Brain Imaging Instrumentation[J]. *Seminars in Nuclear Medicine*, 2011, 41(3): 202-219.
- [5] Kessler M, Schierholz I, Mamach M, et al. Combined Brain-Perfusion SPECT and EEG Measurements Suggest Distinct Strategies for Speech Comprehension in CI Users With Higher and Lower Performance[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2020, 14: 787.
- [6] Mortensen MV, Mirz F, Gjedde A. Restored speech comprehension linked to activity in left inferior prefrontal and right temporal cortices in postlingual deafness[J]. *Neuroimage*, 2006, 31(2): 842-852.
- [7] Petersen B, Gjedde A, Wallentin M, et al. Cortical plasticity after cochlear implantation[J]. *Neural Plast*, 2013, 2013: 318521.
- [8] Strelnikov K, Rouger J, Demonet JF, et al. Does brain activity at rest reflect adaptive strategies? Evidence from speech processing after cochlear implantation[J]. *Cereb Cortex*, 2010, 20(5): 1217-1222.
- [9] Green KM, Julyan PJ, Hastings DL, et al. Auditory cortical activation and speech perception in cochlear implant users: effects of implant experience and duration of deafness[J]. *Hear Res*, 2005, 205(1-2): 184-192.
- [10] Allen A, Barnes A, Singh RS, et al. Perfusion SPECT in cochlear implantation and promontory stimulation[J]. *Nuclear Medicine Communications*, 2004, 25(5): 521-525.
- [11] Piper SK, Krueger A, Koch SP, et al. A wearable multi-channel fNIRS system for brain imaging in freely moving subjects[J]. *Neuroimage*, 2014, 85 Pt 1(1): 64-71.
- [12] Sevy AB, Bortfeld H, Huppert TJ, et al. Neuroimaging with near-infrared spectroscopy demonstrates speech-evoked activity in the auditory cortex of deaf children following cochlear implantation[J]. *Hear Res*, 2010, 270(1-2): 39-47.
- [13] Alemi R, Wolfe J, Neumann S, et al. Motor Processing in Children With Cochlear Implants as Assessed by Functional Near-Infrared Spectroscopy[J]. *Percept Mot Skills*, 2024, 131(1): 74-105.
- [14] Wang Y, Liu L, Zhang Y, et al. The Neural Processing of Vocal Emotion After Hearing Reconstruction in Prelingual Deaf Children: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Brain Imaging Study[J]. *Front Neurosci*, 2021, 15: 705741.
- [15] Chen LC, Stropahl M, Schonwiesner M, et al. Enhanced visual adaptation in cochlear implant users revealed by concurrent EEG-fNIRS[J]. *Neuroimage*, 2017, 146: 600-608.
- [16] Gross J. Magnetoencephalography in Cognitive Neuroscience: A Primer [J]. *Neuron*, 2019, 104(2): 189-204.
- [17] Meng Q, Hegner YL, Giblin I, et al. Lateralized Cerebral Processing of Abstract Linguistic Structure in Clear and Degraded Speech [J]. *Cereb Cortex*, 2021, 31(1): 591-602.

- [18] Saliba J, Bortfeld H, Levitin DJ, et al. Functional near-infrared spectroscopy for neuroimaging in cochlear implant recipients[J]. *Hear Res*, 2016, 338: 64-75.
- [19] Pantev C, Dinnesen A, Ross B, et al. Dynamics of auditory plasticity after cochlear implantation: a longitudinal study[J]. *Cereb Cortex*, 2006, 16(1): 31-36.
- [20] Basser PJ, Mattiello J, Lebihan D. MR diffusion tensor spectroscopy and imaging[J]. *Biophys J*, 1994, 66(1): 259-267.
- [21] Mansfield P, Maudsley AA. Medical imaging by NMR[J]. *Br J Radiol*, 1977, 50(591): 188-194.
- [22] Wu C, Huang L, Tan H, et al. Diffusion tensor imaging and MR spectroscopy of microstructural alterations and metabolite concentration changes in the auditory neural pathway of pediatric congenital sensorineural hearing loss patients[J]. *Brain Res*, 2016, 1639: 228-234.
- [23] Song Q, Qi S, Jin C, et al. Functional Brain Connections Identify Sensorineural Hearing Loss and Predict the Outcome of Cochlear Implantation[J]. *Front Comput Neurosci*, 2022, 16: 825160.
- [24] Bakker MJ, Hofmann J, Churches OF, et al. Cerebrovascular function and cognition in childhood: a systematic review of transcranial Doppler studies[J]. *BMC Neurol*, 2014, 14: 43.
- [25] Chilosi AM, Comparini A, Cristofani P, et al. Cerebral lateralization for language in deaf children with cochlear implantation[J]. *Brain Lang*, 2014, 129: 1-6.

收稿日期 2024-09-08  
责任编辑 蒋 春

### 本期测试题:

#### 一、单项选择题

- 1、哪项神经影像学评估方法是记录大脑神经元集体放电活动?  
A. fNIRS    B. fMRI    C. PET    D. MEG
- 2、以下哪项神经影像学评估方法是有创的?  
A. PET    B. fMRI    C. fNIRS    D. TCD

#### 二、多项选择题

fNIRS 用于 CI 术后认知功能评估有哪些优势?

- A. 非侵入性    B. 与 CI 植入体兼容性好    C. 可重复测量    D. 可测量深部核团

#### 三、判断题

fMRI 可以对大脑形态、灌注、代谢和功能等方面进行研究。( )

### 上期答案:

#### 一、单项选择题

1. D

#### 二、多项选择题

1. ABCD

#### 三、填空题

1. 标准刺激(或重复刺激)    偏差刺激
2. P1