

文章编号: 2095-4980(2025)02-0116-07

## 基于太赫兹超材料对不同脑功能区识别研究

张娟<sup>1a</sup>, 陈宇<sup>1b</sup>, 穆宁<sup>1b,2</sup>, 周萌<sup>\*1b</sup>, 郑靖民<sup>\*1c</sup>

(1.陆军军医大学第一附属医院 a.医学心理科; b.神经外科; c.医务处, 重庆 400038; 2.重庆大学, 重庆 400044)

**摘要:** 神经系统疾病的精准诊断和个性化治疗对改善患者预后至关重要。太赫兹(THz)超材料因其独特的光谱特性, 成为研究脑组织不同功能区的重要工具。采用 THz 超材料对大脑组织切片进行检测, 重点分析杏仁核、运动皮层、听皮层、海马体、下丘脑和丘脑等关键功能区。通过测量各区域的谐振频率和振幅变化, 验证 THz 超材料在识别不同脑区的能力。各脑功能区的谐振频率和振幅均发生显著变化, 其中海马体谐振峰的共振幅度  $\Delta A$  变化最大, 从 7.62% 上升至 20.35%; 运动皮层、听皮层和杏仁核的共振频率偏移显著, 偏移量  $\Delta f$  达到  $(369 \pm 4.4)$  GHz, 下丘脑区域偏移 23.77 GHz。这些差异与各脑区的生物物理特性密切相关。研究表明, THz 超材料能够有效区分脑功能区的频谱特性。

**关键词:** 脑功能区; THz 超材料; 共振频率; 传输振幅

中图分类号: R739.4; O441.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024548

## Research on the identification of different brain functional regions based on terahertz metamaterials

ZHANG Juan<sup>1a</sup>, CHEN Yu<sup>1b</sup>, MU Ning<sup>1b,2</sup>, ZHOU Meng<sup>\*1b</sup>, ZHENG Jingmin<sup>\*1c</sup>

(1a.Department of Medical Psychology; 1b.Department of Neurosurgery; 1c.Department of Medical Affairs, First Affiliated Hospital of Army Medical University, Chongqing 400038, China; 2.Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Precise diagnosis and personalized treatment of neurological diseases are crucial for improving patient outcomes. Terahertz(THz) metamaterials, due to their unique spectral properties, have become essential tools for studying different functional areas of brain tissue. THz metamaterials are employed to detect brain tissue sections, with a focus on analyzing key functional areas such as the amygdala, motor cortex, auditory cortex, hippocampus, hypothalamus, and thalamus. By measuring the resonant frequencies and amplitude changes in each area, the ability of THz metamaterials to identify different brain regions is verified. The resonant frequencies and amplitudes in each brain functional area have undergone significant changes. Among them, the hippocampus shows the largest change in resonance peak amplitude( $\Delta A$ ), increasing from 7.62% to 20.35%. The motor cortex, auditory cortex, and amygdala show significant resonance frequency shifts, with a shift amount( $\Delta f$ ) reaching  $(369 \pm 4.4)$  GHz, while the hypothalamus shows a shift of 23.77 GHz. These differences are closely related to the biophysical properties of each brain area. The study indicates that THz metamaterials can effectively distinguish the spectral characteristics of brain functional areas.

**Keywords:** brain functional areas; terahertz metamaterials; resonant frequency; transmission amplitude

大脑是人体中最复杂的器官之一, 负责调控运动、感知、情感、认知等多种生理功能<sup>[1]</sup>。随着神经科学的发展, 研究者们逐渐认识到大脑不是一个单一的功能单元, 而是由多个具有特定的结构和功能的区域构成, 包括初级运动皮层、初级感觉皮层、海马体、杏仁核和前额叶等<sup>[2-4]</sup>。这些脑功能区的精确识别对于深入理解大脑复

收稿日期: 2024-09-29; 修回日期: 2024-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(82173388); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTB2023NSCQ-MSX0524); 国家教育部光电信息技术科学重点实验室基金资助项目(2024KFKT003)

\*通信作者: 周萌 email:1203554981@qq.com; 郑靖民 email:zhengjingmin@tmmu.edu.cn

杂机制、规划神经外科手术以及改善神经精神疾病治疗至关重要<sup>[5]</sup>。如，在神经外科手术中，对脑功能区的精确定位是手术成功的关键。外科医生在手术过程中必须避免损伤关键功能区，以最大限度地减少术后并发症和功能障碍。特别是在癫痫切除和肿瘤切除等手术中，术前影像学评估的准确性直接影响手术计划和结果<sup>[6-7]</sup>。此外，脑功能区的精准识别可推动人工智能和人机交互领域发展，为构建更智能、高效的认知计算模型和人机交互界面提供重要思路<sup>[8]</sup>。

临床上包括功能性磁共振成像(Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)、脑电图(Electroencephalography, EEG)、脑磁图(Magnetoencephalography, MEG)及神经电生理技术中的颅内脑电图(Intracranial Electroencephalography, IIEEG)和脑深部电刺激(Deep Brain Stimulation, DBS)在内的多种技术被用于术中功能区的识别<sup>[9-10]</sup>。然而，这些技术在临床应用中各有局限性。fMRI尽管在术前评估中无创且具高分辨力，但因其对磁场环境和扫描时间的要求，难用于术中实时监测<sup>[11]</sup>。EEG具备高时间分辨率和成本优势，但其空间分辨率较低，且术中伪影可能影响信号准确性<sup>[12]</sup>。MEG结合了EEG和MRI的优势，但其高昂的成本和操作的复杂性限制了其在术中的应用<sup>[13]</sup>。神经电生理技术如IIEEG和DBS可以提供高精度的术中识别，但由于不同患者的个体差异，确定理想的刺激参数需要经过不断的调整和大量的回访，这给患者带来一定的负担<sup>[14]</sup>。因此，尽管现有技术识别脑组织功能区方面各有所长，但关于精确度、实时性等存在的局限性，在神经外科手术的应用中仍面临很大挑战。

太赫兹(Terahertz, THz)波是位于0.1~10 THz频率范围内的电磁波，处于微波和红外之间，具有光子能量低及水敏感等独特物理特性，在生物医学诊断、分子识别和脑科学研究等领域得到了广泛应用<sup>[15-18]</sup>。太赫兹超材料作为一种人工设计的材料，通过其微纳米结构精确调控太赫兹波的传播、散射和吸收等，已发展成为一种多功能的传感平台，特别是在只有痕量或薄膜分析物可供研究的情况下，它们在超快器件中的实现也已被研究，并被发现有前途的<sup>[19-20]</sup>。几乎所有THz超材料中观察到的现象都围绕其频谱中出现的谐振峰<sup>[21]</sup>，如：太赫兹超材料能够精准显示肿瘤病变区域与健康组织的差异，为手术导航提供支持<sup>[22]</sup>，在阿尔茨海默病等退行性疾病的研究中，太赫兹超材料能够检测 $\beta$ -淀粉样蛋白的积累情况，助力疾病的早期诊断<sup>[23]</sup>。

基于此，本研究基于太赫兹超材料对脑组织不同区域进行检测，探索其在功能区识别中的潜力。通过结合太赫兹超材料的高灵敏优势，评估其对感觉加工区、运动控制区、语言处理区以及情绪认知调控区等功能区域的光谱特性和识别能力，揭示各功能区在光学参数上的差异。旨在为未来神经外科手术提供高精度、实时、无创的辅助技术，并为神经科学领域的基础研究和临床应用开辟新路径。

## 1 研究方法

### 1.1 实验动物

选取健康成年雄性C57BL/6小鼠作为实验模型，体重在18~20 g。实验动物购自陆军军医大学动物实验中心，并在实验前进行为期一周的适应性饲养，以减少实验过程中的应激反应。饲养环境严格按照标准条件控制：温度维持在(22±2) °C，相对湿度控制在(55±10)%，实行12 h的昼夜节律循环，确保饲料和水源的充足供应。为保障动物福利并降低实验过程中的疼痛，所有小鼠在实验操作前均需通过麻醉处理。在整个实验过程中，严格遵守实验动物伦理规范，确保所有操作符合伦理审查委员会的批准和指导原则。

### 1.2 组织切片制备

实验小鼠经麻醉后进行开颅手术以获取完整大脑组织，随即置入切片模具，从前囟后3 mm处冠状面切割。同时，为保证实验结果的稳定性和可靠性，应尽量保持切片厚度的稳定。因此实验中选用冰冻切片机(Leica, CM1860UV)对新鲜脑组织沿冠状面进行切片，该切片机的切片精确度可达1  $\mu$ m。课题组前期已验证切片厚度选择60  $\mu$ m最佳<sup>[24]</sup>。切片后，迅速将新鲜组织片贴合至太赫兹超材料表面并确保组织平展无折叠，随后置于含有Neurobasal完全培养基的孔板中以暂时维持生理活性。鉴于脑组织易碎和水化，每片仅用于单一功能区检测，并须在5 min内完成以保持组织完整性和活性，确保功能区识别的准确性。

### 1.3 实验装置

采用日本Advantest公司生产的TAS7500SP型太赫兹时域光谱仪(图1a)，系统在透射式测量模式下的动态范围约为70 dB，频率分辨率最低达3.8 GHz。太赫兹波由光电导天线发射并经由一个抛物面金镜( $f=50.8$  mm)准直，然后被另一个抛物面金镜( $f=101.6$  mm)聚焦到贴合有脑组织切片的太赫兹超材料，焦点处的光斑直径约为2 mm。太赫兹波在穿过样品后首先由一个抛物面金镜( $f=101.6$  mm)准直，之后被另一个抛物面金镜( $f=50.8$  mm)聚焦到接收端的光电导天线。由于空气中的水分子在太赫兹波段内有较强的吸收峰，会严重降低测量结果的信噪比。因

此,为减小空气中水分的干扰,实验过程中使用空气压缩机向光路充干燥空气,使实验环境中的相对湿度保持在5%以下。为确保数据的有效性,每个脑功能区重复测量3次。

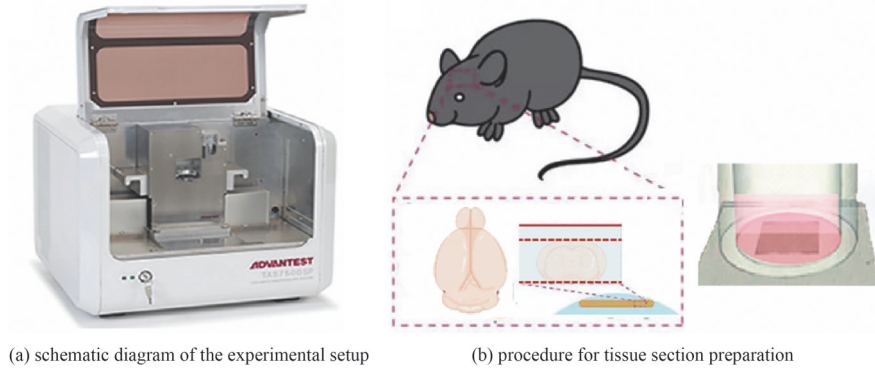


Fig.1 Experimental equipment and flowchart of sample processing  
图1 实验设备及样品处理流程图

#### 1.4 太赫兹光谱分析

采用太赫兹时域光谱(Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS)系统对超材料光谱特性进行测量和分析。以石英基底作为背景,测量未包含超材料结构的透射信号,记录为背景信号  $E_{\text{background}}(\omega)$ ,空白超材料信号仅包含超材料结构且未加样品的中心区域透射信号,记录为空白超材料信号  $E_{\text{bare}}(\omega)$ 。将实验组织切片平整地贴至超材料中心检测区域(方形检测区),确保与超材料充分接触以保证测量精确度;在样品固定后,测量其透射信号,记录为样品信号  $E_{\text{sample}}(\omega)$ 。使用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)将背景信号、空白超材料信号和样品信号从时域转换到频域后,分别计算透射率。

空白超材料透射率:

$$T_{\text{bare}}(\omega) = \frac{|E_{\text{bare}}(\omega)|}{|E_{\text{background}}(\omega)|} \quad (1)$$

样品透射率:

$$T_{\text{sample}}(\omega) = \frac{|E_{\text{sample}}(\omega)|}{|E_{\text{background}}(\omega)|} \quad (2)$$

透射谱谐振峰谷值的共振频率偏移量  $\Delta f$  的计算公式为:

$$\Delta f = f_{\text{sample}} - f_{\text{bare}} \quad (3)$$

式中  $f_{\text{sample}}$  和  $f_{\text{bare}}$  分别为样品与空白超材料的谐振峰谷值频率。该偏移量用于分析样品对超材料谐振特性的影响。

为减少仪器波动对实验结果的影响,每个样品重复测量3次,计算其平均值作为最终结果:

$$\overline{\Delta f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta f_i \quad (4)$$

式中:  $n$  为测量次数;  $\Delta f_i$  为每次测量的频率偏移值。

透射谱谐振峰谷值的共振振幅上移量  $\Delta A$  的计算公式为:

$$\Delta A = A_{\text{sample}} - A_{\text{bare}} \quad (5)$$

式中:  $A_{\text{sample}}$  为样品共振振幅谷值;  $A_{\text{bare}}$  为空白超材料的谐振峰谷值。

#### 1.5 统计学分析

对于符合正态分布的离散型数值变量,结果以均值 $\pm$ 标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示,组间差异采用单因素方差分析(Analysis of Variance, ANOVA)或独立样本  $t$  检验进行分析。对于非正态分布的数值变量,结果以中位数(四分位距) $[M(P_{25}, P_{75})]$ 表示,组间差异则使用非参数检验。以  $t=0.05$  为显著性水平,  $p < 0.05$  则认为具有统计学显著差异。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 太赫兹超材料参数

采用前期课题组已发表的太赫兹超材料作为基底，对脑组织切片进行检测<sup>[25]</sup>。该超材料在先前研究中通过 CST 仿真和胶质瘤细胞分型识别应用验证了其高灵敏度和可靠性，为本研究的脑组织检测提供了技术支持。该超材料由 2 个双分裂的半圆形 (Split Ring Resonators, SRR) 合并形成一个单一的、扩大的双环 SRR，其 4 个分裂间隙不对称排列，如图 2 所示。这种设计能够增强局域共振效应，从而显著提高检测灵敏度。

THz 超材料基底采用 500  $\mu\text{m}$  厚的石英玻璃 (介电常数  $\epsilon=3.85$ )，金属阵列通过投影步进光刻技术制造，随后通过磁控溅射沉积了 10 nm 的钛层和 150 nm 的金层，其直流电导率为  $4.56 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。整个金属阵列的物理尺寸为  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ，超材料单元格以周期性为  $42 \mu\text{m} \times 26 \mu\text{m}$  ( $P_x=42 \mu\text{m}$ ,  $P_y=26 \mu\text{m}$ ,  $P_z=500 \mu\text{m}$ ) 沿  $x$  和  $y$  方向排列。其中，谐振器臂的线宽  $w=3 \mu\text{m}$ ，分裂间隙尺寸  $d=2 \mu\text{m}$ ，环形半径  $r=10 \mu\text{m}$ ，以及分裂间隙中心距离  $c=2 \mu\text{m}$ 。通过实验验证，该超材料在 2.16 THz 处具有显著谐振峰，覆盖有效工作频率范围为 1.5~2.6 THz，这种几何参数优化后的设计能够在目标频段内表现出高质量因子的谐振峰，便于脑组织切片的光谱特性分析。

### 2.2 组织切片检测实验

下丘脑、丘脑、海马体、皮层等，如图 3(a) 所示，是神经疾病诊治的核心环节<sup>[26]</sup>。其中下丘脑作为调控内分泌和自主神经功能的中枢，常与肥胖症、睡眠障碍等内分泌失调相关疾病密切相关；丘脑是感觉信息传递的枢纽，其损伤可能导致感觉异常或意识障碍等神经系统问题；海马体在学习和记忆中发挥核心作用，与阿尔茨海默症等记忆障碍性疾病紧密联系；运动皮层负责身体运动的控制，异常可能引发帕金森病、脑卒中后遗症等运动功能障碍；听皮层参与听觉处理，与听觉相关神经疾病密不可分；杏仁核则是情绪和情感调控的中心，在焦虑症、抑郁症和创伤后应激障碍等情绪性神经疾病中扮演重要角色<sup>[27-28]</sup>。在进行生物切片之前，首先对空白 THz 超材料进行检测，结果如图 3(b) 所示，该超材料在 2.16 THz 处具有一个较大的谐振峰。随后，对脑组织切片的功能区进行识别，并利用透射式 THz 光谱技术对这些切片进行测量，将目标功能区精确定位于光斑中心。如图 4 所示，当脑组织切片贴合至 THz 超材料，不同脑功能区谐振峰共振频率均向左偏移，共振振幅增加。为验证不同脑功能区谐振峰变化是否具有显著性差异，采用单因素方差分析 (ANOVA) 或独立样本  $t$  检验对不同脑功能区的谐振峰共振频率和共振幅度进行分析，结果显示各脑功能区之间均存在显著性差异。其中，谐振峰谷值的差异为  $F=643.515$ ,  $p<0.001$ ，共振频率的差异为  $F=7\ 073.669$ ,  $p<0.001$ ，见表 1。

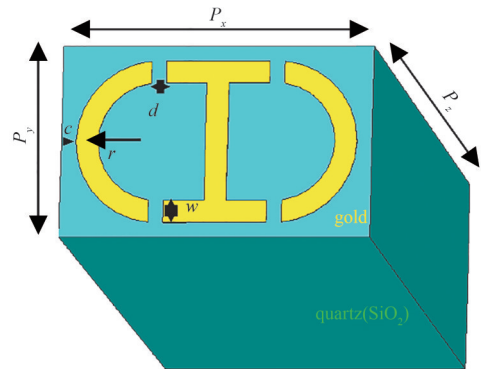


Fig.2 Structure parameters of THz metamaterial  
图 2 THz 超材料结构参数

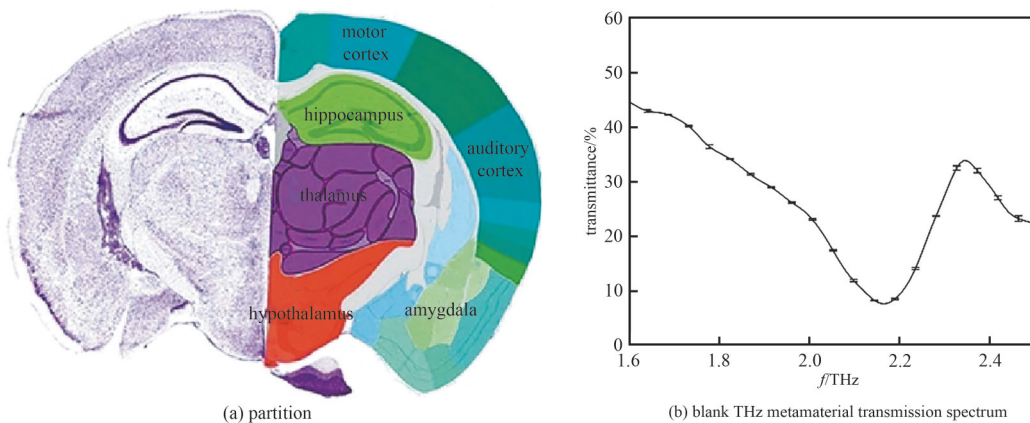


Fig.3 Brain functional area and THz metamaterial transmission spectrum

图 3 脑功能区及 THz 超材料透射谱

进一步分析不同脑组织切片功能区谐振峰的共振频率和共振幅度变化。首先，从不同脑功能区谐振峰共振频率角度看，贴合有脑组织功能区组织切片均向左发生偏移，其中谐振峰共振频率最大偏移量达到 374.72 GHz。大脑皮层 (运动皮层和听皮层) 和杏仁核区域谐振峰谷值偏移量达到  $(369 \pm 4.4) \text{ GHz}$ ，而下丘脑区域则偏移 23.77 GHz，

如图 5a 所示。从谐振峰共振幅度角度看, 相较于空白 THz 超材料, 海马体谐振峰谷值的共振幅度  $\Delta A$  变化最大, 从 7.62% 上升至 20.35%, 上升量达到 12.73%; 如图 5(b) 所示, 向上位移变化依次为下丘脑<运动皮层<丘脑<杏仁核<听皮层<海马体。据文献报道, 共振频率和振幅变化与待测物质折射率和损耗系数相关, 表明不同脑功能区谐振峰变化与其组织折射率和损耗系数有关<sup>[25,29-30]</sup>。大脑皮层和杏仁核的谐振峰共振频率显著左移, 表明这些区域折射率较高, 可能与细胞内成分变化或细胞排列调整相关<sup>[31]</sup>。运动皮层与听皮层的谐振频率相似, 但幅度差异显著, 反映了不同皮层因功能不同其细胞类型组成具有差异性<sup>[32]</sup>。海马体的谐振峰共振幅度最大, 表明其损耗系数较高, 这可能与其丰富的神经细胞、胶质细胞及高含水量有关, 导致在太赫兹频段的光吸收和散射特性增强<sup>[33]</sup>。

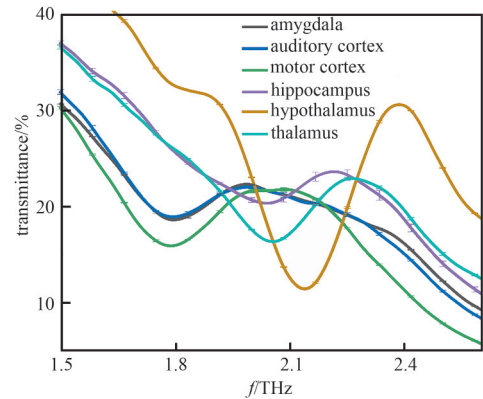


Fig.4 THz resonance frequency and transmission amplitude of different brain functional areas

图 4 不同脑功能区 THz 共振频率和传输幅度

表 1 不同脑功能区谐振峰共振幅度和共振频率差异分析

Table1 Analysis of resonance amplitude and resonance frequency of resonance peaks in different brain functional areas

zones	resonance amplitude/%				resonance frequency/THz			
	average value±standard error	<i>F</i>	<i>p</i>		average value±standard error	<i>F</i>	<i>p</i>	
hypothalamus	11.43±0.07				2.14±0.00			
thalamus	16.36±0.13				2.06±0.00			
hippocampus	20.19±0.57	643.515	<0.001		2.04±0.00	7 073.669	<0.001	
motor cortex	15.94±0.04			1.79±0.00				
auditory cortex	18.94±0.33			1.79±0.01				
amygdala	18.69±0.31			1.80±0.00				

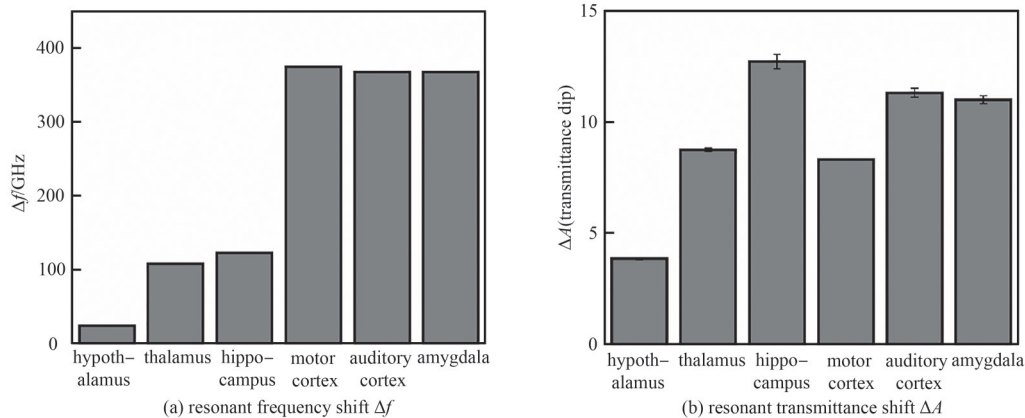


Fig.5 Frequency and amplitude changes of THz resonance peaks in different brain functional areas

图 5 不同脑功能区 THz 谐振峰频率和幅度变化

### 3 结论

本研究利用太赫兹(THz)超材料对大脑组织切片不同功能区进行检测, 验证 THz 超材料识别不同脑区的能力。结果表明, 各脑功能区的谐振频率和振幅均发生显著变化。其中海马体谐振峰的共振幅度  $\Delta A$  变化最大, 从 7.62% 上升至 20.35%; 运动皮层、听皮层和杏仁核的共振频率偏移显著, 偏移量  $\Delta f$  达到  $(369 \pm 4.4)$  GHz, 而下丘脑区域则偏移 23.77 GHz。这些差异与各功能区的生物物理特性密切相关, 反映了不同脑区在微观结构和成分上的变化。具体而言, 大脑皮层和杏仁核的谐振峰共振频率红移最为显著, 表明其相对折射率较高, 可能与细胞成分或排列的变化有关; 海马体则表现出最大的谐振幅度变化, 显示其损耗系数较高, 提示该区域在 THz 频段具有较强的光吸收和散射特性, 可能与其丰富的神经细胞和较高的水合作用有关。综上所述, THz 超材料为研究脑组织的功能区提供了一种新的视角, 可为神经系统疾病的精准诊断和个性化治疗提供重要依据。

## 参考文献：

- [ 1 ] WEIN S, MALLONI W M, TOMÉ A M, et al. A graph neural network framework for causal inference in brain networks[J]. *Scientific Reports*, 2021,11(1):8061. doi:10.1038/s41598-021-87411-8.
- [ 2 ] EPSTEIN R A, BAKER C I. Scene perception in the human brain[J]. *Annual Review of Vision Science*, 2019(5):373-397. doi:10.1146/annurev-vision-091718-014809.
- [ 3 ] WEI Pengxu, BAO Ruixue, LYU Zeping, et al. Weak but critical links between primary somatosensory centers and motor cortex during movement[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2018(21):1. doi:10.3389/fnhum.2018.00001.
- [ 4 ] GOGOLLA N. The insular cortex[J]. *Current Biology:CB*, 2017,27(12):R580-R586. doi:10.1016/j.cub.2017.05.010.
- [ 5 ] GLASSER M F, COALSON T S, ROBINSON E C, et al. A multi-modal parcellation of human cerebral cortex[J]. *Nature*, 2016,536(7615):171-178. doi:10.1038/nature18933.
- [ 6 ] 都恩环, 黄佳文, 杨玉洁, 等. 精准医疗技术临床应用现状综述[J]. *中国卫生资源*, 2020,23(3):265-270. (DU Enhuan, HUANG Jiawen, YANG Yujie, et al. Review on the clinical application of precision medical technology[J]. *Journal of Chinese Health Resources*, 2020,23(3):265-270.) doi:10.13688/j.cnki.chr.2020.19462.
- [ 7 ] DU Peng, CHEN Hongyi, LYU Kun, et al. A survey of radiomics in precision diagnosis and treatment of adult gliomas[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2022,11(13):3802. doi:10.3390/jcm11133802.
- [ 8 ] MACPHERSON T, CHURCHLAND A, SEJNOWSKI T, et al. Natural and artificial intelligence: a brief introduction to the interplay between AI and neuroscience research[J]. *Neural Networks: the Official Journal of the International Neural Network Society*, 2021(144):603-613. doi:10.1016/j.neunet.2021.09.018.
- [ 9 ] HALLETT M, DELROSSO L M, ELBLE R, et al. Evaluation of movement and brain activity[J]. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 2021,132(10):2608-2638. doi:10.1016/j.clinph.2021.04.023.
- [ 10 ] ELLIS D G, WHITE M L, HAYASAKA S, et al. Accuracy analysis of fMRI and MEG activations determined by intraoperative mapping[J]. *Neurosurgical Focus*, 2020,48(2):E13. doi:10.3171/2019.11.Focus19784.
- [ 11 ] WANG Tao, YAN Shaozhen, LU Jie. The effects of noninvasive brain stimulation on cognitive function in patients with mild cognitive impairment and Alzheimer's disease using resting-state functional magnetic resonance imaging: a systematic review and meta-analysis[J]. *CNS Neuroscience & Therapeutics*, 2023,29(11):3160-3172. doi:10.1111/cns.14314.
- [ 12 ] LI Rihui, YANG Dalin, FANG Fang, et al. Concurrent fNIRS and EEG for brain function investigation: a systematic, methodology-focused review[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2022,22(15):5865. doi:10.3390/s22155865.
- [ 13 ] ENGEMANN D A, KOZYNETS O, SABBAGH D, et al. Combining magnetoencephalography with magnetic resonance imaging enhances learning of surrogate-biomarkers[J]. *ELife Journal*, 2020(9):e54055. doi:10.7554/eLife.54055.
- [ 14 ] MIVALT F, KREMEN V, SLADKY V, et al. Electrical brain stimulation and continuous behavioral state tracking in ambulatory humans[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2022,19(1):016019. doi:10.1088/1741-2552/ac4bfd.
- [ 15 ] POULIN M, GIANNACOPOULOS S, SKOROBOGATIY M. Surface wave enhanced sensing in the terahertz spectral range: modalities, materials, and perspectives[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019,19(24):5505. doi:10.3390/s19245505.
- [ 16 ] LAJEVARDIPOUR A, VILAGOSH Z, APPADOO D, et al. Spectroscopy of excised skin patches exposed to THz and far-IR radiation[J]. *Biomedical Optics Express*, 2021,12(7):4610-4626. doi:10.1364/boe.424267.
- [ 17 ] ZHU Yiming. Editorial: terahertz technologies for biosensing and biomedical analysis[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2023(11):1268427. doi:10.3389/fbioe.2023.1268427.
- [ 18 ] PU Z, WU Y, ZHU Z, et al. A new horizon for neuroscience: terahertz biotechnology in brain research[J]. *Neural Regeneration Research*, 2025:309-325. doi:10.4103/nrr.Nrr-d-23-00872.
- [ 19 ] BANERJEE S, AMITH C S, KUMAR D, et al. Ultra-thin subwavelength film sensing through the excitation of dark modes in THz metasurfaces[J]. *Optics Communications*, 2019(453):124366. doi:10.1016/j.optcom.2019.124366.
- [ 20 ] LEE S, BAEK S, KIM T T, et al. Metamaterials for enhanced optical responses and their application to active control of terahertz waves[J]. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 2020,32(35):e2000250. doi:10.1002/adma.202000250.
- [ 21 ] LEE S H, SHIN S, ROH Y, et al. Label-free brain tissue imaging using large-area terahertz metamaterials[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2020(170):112663. doi:10.1016/j.bios.2020.112663.
- [ 22 ] WU Limin, XU Degang, WANG Yuye, et al. Horizontal-scanning attenuated total reflection terahertz imaging for biological tissues[J]. *Neurophotonics*, 2020,7(2):025005. doi:10.1117/1.NPh.7.2.025005.
- [ 23 ] WANG Xinke, ZHANG Yan. Potential terahertz therapeutic strategy for the prevention or mitigation of Alzheimer's disease pathology[J]. *Light: Science & Applications*, 2023,12(1):254. doi:10.1038/s41377-023-01289-x.

- [24] WU Limin,WANG Yuye,LIAO Bin,et al. Temperature dependent terahertz spectroscopy and imaging of orthotopic brain gliomas in mouse models[J]. Biomedical Optics Express, 2022,13(1):93–104. doi:10.1364/boe.445597.
- [25] MU Ning,ZHANG Chiben,YANG Chuanyan,et al. Terahertz meta-biosensor for subtype detection and chemotherapy monitoring of glioma cells[J]. Materials & Design, 2024(246):113294.
- [26] FISCHL B,SERENO M I. Microstructural parcellation of the human brain[J]. NeuroImage, 2018(182):219–231. doi:10.1016/j.neuroimage.2018.01.036.
- [27] NEUDORFER C,ELIAS G J B,JAKOBS M,et al. Mapping autonomic,mood and cognitive effects of hypothalamic region deep brain stimulation[J]. Brain:a Journal of Neurology, 2021,144(9):2837–2851. doi:10.1093/brain/awab170.
- [28] ZHAO Zhiying,YAO Shuxia,LI Keshuang,et al. Real-time functional connectivity-informed neurofeedback of amygdala-frontal pathways reduces anxiety[J]. Psychotherapy and Psychosomatics, 2019,88(1):5–15. doi:10.1159/000496057.
- [29] 丛梦杨,石文洁,邱建峰. 高灵敏度太赫兹超材料对于生物组织切片的研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024,22(4):378–384. (CONG Mengyang,SHI Wenjie, QIU Jianfeng. Terahertz metamaterials with high sensitivity for biological tissue slices study[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024, 22(4): 378–384.) doi:10.11805/TKYDA 2023420.
- [30] ZHANG Jin,MU Ning,LIU Longhai,et al. Highly sensitive detection of malignant glioma cells using metamaterial-inspired THz biosensor based on electromagnetically induced transparency[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2021(185):113241. doi:10.1016/j.bios.2021.113241.
- [31] 李泽安. 根据脑灰白质密度差评估创伤性急性硬膜下血肿患者的预后[D]. 长春:吉林大学, 2023. (LI Ze'an. Assessing the prognosis of patients with traumatic acute subdural hematoma based on the difference in gray white matter density in the brain[D]. Changchun,China:Jilin University, 2023.) doi:10.27162/d.cnki.gilin.2023.006799.
- [32] CALLAWAY E M,DONG H W,ECKER J R,et al. A multimodal cell census and Atlas of the mammalian primary motor cortex[J]. Nature, 2021(598):86–102. doi:10.1038/s41586-021-03950-0.
- [33] CHEN Xinyue,HUANG Yin,HUANG Liangfeng,et al. A brain cell atlas integrating single-cell transcriptomes across human brain regions[J]. Nature Medicine, 2024,30(9):2679–2691. doi:10.1038/s41591-024-03150-z.

#### 作者简介:

张娟(1983–),女,硕士,主管技师,主要研究方向为神经精神疾病的精准诊疗、心理创伤治疗的神经机制研究.email:zhangjuan@tmmu.edu.cn.

陈宇(2000–),女,学士,实验员,主要研究方向为太赫兹光谱检测.

穆宁(1990–),女,硕士,副研究员,主要研究方向为胶质瘤光学诊疗.

周萌(1998–),女,硕士,研究实习员,主要研究方向为胶质瘤基础研究.

郑靖民(1989–),男,硕士,副研究员,主要研究方向为胶质瘤基础研究.