doi:10.11659/jjssx.12E024094

·临床研究·

# 双位点重复经颅磁刺激对主观耳鸣患者脑区功能改变的研究

荆国庆[1,2],文 凤[1,2],余 露[3],韩 祺[1,2],武文婧[1,2],张 杨[1,2] (1.陆军军医大学第一附属医院放射科,重庆 400038;2.陆军军医大学第一附属医院7T磁共振转化医学中心,重庆 400038;3.陆军军医大学第一附属医院耳鼻喉科,重庆 400038)

[摘 要] **目的** 通过静息态功能磁共振成像(rs-fMRI)检测主观耳鸣(ST)患者经"额-颞"双位点重复经颅磁刺激(rTMS)治疗后全脑功能改变的特点。**方法** 纳入45例ST患者,在"额-颞"双位点rTMS治疗前和治疗后2周进行耳鸣严重程度评估及rs-fMRI扫描,并分析ST患者治疗前后的局部一致性(ReHo)、分数低频振幅(fALFF)、度中心度(DC)及基于以上的种子点功能连接(FC)等指标。**结果** 与治疗前相比,ST患者经治疗后2周的耳鸣残疾量表(THI)评分显著降低($P<0.001$)。与治疗前相比,ST患者经治疗后2周右侧顶下小叶的ReHo值降低,右侧颞极的fALFF值升高,右侧颞上回的fALFF值降低,右侧颞中回DC(weighted)和DC(Binarized)值均降低($P<0.05$,*GRF*校正)。分别以上述差异脑区作为种子点进行FC分析,与治疗前相比,治疗后2周右侧颞上回(fALFF)与右侧颞中回间的FC减少,右侧颞中回[DC(weighted)]与右侧枕上回间的FC减少,右侧颞中回[DC(Binarized)]与右侧枕上回间的FC减少($P<0.05$,*GRF*校正)。**结论** "额-颞"双位点rTMS治疗ST患者初步有效,且ST患者在治疗后的听觉和非听觉脑区发生不同程度的局部和脑区间脑功能改变,主要累及默认模式网络及视听觉网络。

[关键词]重复经颅磁刺激;主观耳鸣;局部一致性;分数低频振幅;度中心度;静息状态功能磁共振成像

[中图分类号]R445.2 [文献标志码]A [收稿日期]2024-12-18

## Effect of dual-site repetitive transcranial magnetic stimulation on the changes of brain function in patients with subjective tinnitus

JING Guo-qing[1,2], WEN Feng[1,2], YU Lu[3], HAN Qi[1,2], WU Wen-jing[1,2], ZHANG Yang[1,2] (1. Department of Radiology, the First Hospital Affiliated to Army Medical University, Chongqing 400038, China; 2. 7T Magnetic Resonance Imaging Translational Medical Center, the First Hospital Affiliated to Army Medical University, Chongqing 400038, China; 3.Department of Otolaryngology, the First Hospital Affiliated to Army Medical University, Chongqing 400038, China)

**Abstract: Objective** To detect the characteristics of whole-brain functional changes in patients with subjective tinnitus (ST) after "frontal-temporal" dual-site repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) by resting-state functional magnetic resonance imaging (rs-fMRI). **Methods** A total of 45 ST patients were enrolled, and assessments of tinnitus severity and rs-fMRI scans were performed before and 2 weeks after treatment with "frontal-temporal" dual-site rTMS. Regional homogeneity (ReHo), fractional amplitude of low-frequency fluctuations (fALFF), degree centrality (DC) and seed-based functional connectivity (FC) were analyzed before and after treatment in ST patients. **Results** Tinnitus handicap inventory (THI) score of ST patients 2 weeks after treatment was significantly decreased compared with that before treatment ($P<0.001$). ReHo values of the right inferior parietal lobule decreased, fALFF values of the right temporal pole increased, fALFF values of the right superior temporal gyrus decreased, and DC (weighted) and DC (Binarized) values of the right medial temporal gyrus all decreased in ST patients 2 weeks after treatment compared with those before treatment ($P<0.05$, *GRF* correction). Using the above differential brain regions as seed points for FC analysis, FC values between right superior temporal gyrus (fALFF) and right middle temporal gyrus reduced, FC values between right middle temporal gyrus [(DC(weighted)] and right superior occipital gyrus reduced, and FC values between right middle temporal gyrus [DC(Binarized)] and right superior occipital gyrus reduced 2 weeks after treatment compared with those before treatment ($P<0.05$, *GRF* correction). **Conclusion** "Frontal-temporal" dual-site rTMS is initially effective for ST patients, and the auditory and non-auditory brain regions of ST patients showed different degrees of regional and interbrain function changes, mainly involving default mode network and visual-auditory network.

**Keywords:** repetitive transcranial magnetic stimulation; subjective tinnitus; regional homogeneity; fractional amplitude of low-frequency fluctuations; degree centrality; resting-state functional magnetic resonance imaging

耳鸣是指在没有任何外界刺激条件下耳内或颅内产生的异常声音感觉[1]。耳鸣分客观和主观两大类,其中主观耳鸣(subjective tinnitus,ST)占75%~80%,仅表现为耳鸣的主观感觉,并不能被他人感知或设备察觉,其病因及机制尚不明确,现有疗法以症状管理为主[2-4]。重复经颅磁刺激(repetitive transcranial

[基金项目]重庆市自然科学基金面上项目(cstc2020jcyj-msxmX0072)

[通信作者]张 杨,E-mail:zhangyang9981@tmmu.edu.cn

magnetic stimulation,rTMS)通过神经调控作用逐渐应用于ST的治疗,但疗效机制及多靶点协同效应仍需深入探究[5-7]。静息状态功能磁共振成像(resting-state functional magnetic resonance imaging,rs-fMRI)是揭示耳鸣神经重塑的重要工具,但现有研究多局限于治疗定位和短期效应评估,缺乏系统分析rTMS干预前后脑网络动态变化的研究[8-11]。

本研究基于前期研究[12]确认的"额-颞"双位点对ST患者进行rTMS治疗,通过纵向rs-fMRI监测,系统分析治疗前后患者局部脑区活动及全脑功能连接(functional connectivity,FC)变化。旨在阐明双靶点神经调控的协同作用机制,为建立基于脑功能重塑的个体化治疗模式提供影像学证据。

## 1 资料与方法

### 1.1 临床资料

本研究经过陆军军医大学第一附属医院伦理委员会批准[伦理批号:(A)KY202205],所有受试者均对研究内容知情并签署知情同意书。本研究于2022年2月至2023年6月共招募在陆军军医大学第一附属医院耳鼻喉科确诊的ST患者48例,其中3例ST患者因过度头部运动(>2.5 mm)而被排除。最终纳入45例ST患者,其中男21例,女24例;年龄18~60岁,平均(37.56±12.12)岁;受教育程度0~16年,平均(12.42±4.58)年;病程(28.98±17.11)个月;平均听阈(11.29±4.36)dB HL;焦虑自评量表评分(36.56±5.31)分;抑郁自评量表评分(37.02±4.50)分。纳入标准:①由耳鼻喉科高年资医师参照《2012耳鸣专家共识及解读》[13]及《耳鸣临床应用指南》[14]诊断为ST;②发病≥6个月;③年龄18~60岁;④可正常沟通,听力正常。排除标准:①客观耳鸣、全身器质性疾病致耳鸣;②有听觉过敏、高声恐怖、中耳和耳蜗前庭疾病;③有听神经占位病变及中枢神经系统疾病;④有精神、心理疾病史;⑤有严重的噪声暴露史;⑥有严重的吸烟、酗酒、神经精神类药物滥用史及耳毒性药物史;⑦既往进行过rTMS治疗;⑧有MRI扫描及rTMS治疗禁忌。

### 1.2 仪器与检查方法

采用西门子(Siemens Magnetom Trio 3.0 T)磁共振扫描仪和八通道头部相控阵线圈扫描,所有受试者先行常规头颅磁共振平扫,再进行静息态脑功能成像,具体参数见表1。

**表1 磁共振扫描序列具体参数**

| 参数 | T2 | T1 | 3D-T1结构像 | rs-fMRI |
|---|---|---|---|---|
| 采集序列 | TSE | GRE | 3D-MPRAGE | EPI |
| 扫描方位 | 轴位 | 轴位 | 矢状位 | 轴位 |
| 重复时间(ms) | 3 500.0 | 300.0 | 1 900.0 | 2 000.0 |
| 回波时间(ms) | 113.0 | 2.9 | 2.5 | 30.0 |
| 翻转角(°) | 140 | 70 | 9 | 90 |
| 矩阵 | 320×320 | 320×320 | 256×256 | 64×64 |
| 视野($mm^2$) | 240×240 | 240×240 | 250×250 | 192×192 |
| 层厚(mm) | 5.0 | 5.0 | 1.0 | 3.0 |
| 层数 | 21 | 21 | 176 | 36 |
| 体素大小($mm^3$) | 0.8×0.8×5.0 | 0.8×0.8×5.0 | 1.0×1.0×1.0 | 3.0×3.0×3.0 |
| 采集次数 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 扫描时间(s) | 92 | 75 | 266 | 488 |

### 1.3 rTMS治疗方案

所有患者均为右利手,均接受"额-颞"双位点rTMS治疗方案,包括先高频刺激左侧背外侧前额叶皮质(20 Hz,20串,25 s串间隔,1 000次/天),然后低频刺激左侧颞顶皮质(1 Hz,1 000次/天),共2 000次/天。以肌电图为基础确定患者的静息态运动阈值,每次治疗强度为静息态运动阈值的110%。受试者连续10个工作日接受10次治疗。所有受试者均在rTMS治疗前及治疗后2周进行耳鸣残疾量表(tinnitus handicap inventory,THI)评分。THI评分至少降低7分被认为是有效的治疗方法[15]。

### 1.4 数据处理

rs-fMRI数据预处理:运用基于MATLAB 2020b平台的DPABI V8.0软件[16]进行。局部一致性(regional homogeneity,ReHo)分析:经过带通滤波后,使用给定体素的时间序列与其26个最近邻的肯德尔一致性系数进行图像计算[17]。分数低频振幅(fractional amplitude of low-frequency fluctuations,fALFF)分析:高斯核平滑后,将每个体素的时间序列变换到频域,fALFF的计算方法为ALFF除以整个可探测频带的值[18]。度中心度(degree centrality,DC)分析:使用DPABISurf(SI Methods)进行顶点到顶点的相关分析,以计算超过$r$>0.25阈值的正FC作为DC度量的加权和进一步对DC度量图进行z标准化和平滑[19]。基于种子点的FC分析:提取组间大脑区域的ReHo、fALFF和DC差异脑区,并将其定义为种子点。以种子点的平均时间序列作为参考,计算每个种子点的平均信号变化与大脑中其他体素的时间序列之间的*Pearson*相关系数。

### 1.5 统计学分析

利用SPSS 27.0软件进行统计分析,计量资料组间比较进行正态性检验和方差齐性检验后采用配对样本$t$检验,以$P$<0.05为差异有统计学意义。采用

DPABI软件分别对治疗前后的ReHo、fALFF、DC和FC图进行配对样本$t$检验，以年龄、性别、受教育程度为协变量，多重比较采用*GRF*校正，阈值设置为体素水平$P<0.001$，团块水平$P<0.05$。

## 2 结果

### 2.1 “额-颞”双位点rTMS治疗效果评价

ST患者在“额-颞”双位点rTMS治疗前及治疗后2周的THI评分分别为(46.49±23.77)分、(31.78±20.66)分，与治疗前相比，ST患者经治疗后2周的THI评分降低，差异有统计学意义($P<0.001$)。

### 2.2 “额-颞”双位点rTMS治疗前后的脑功能局部改变

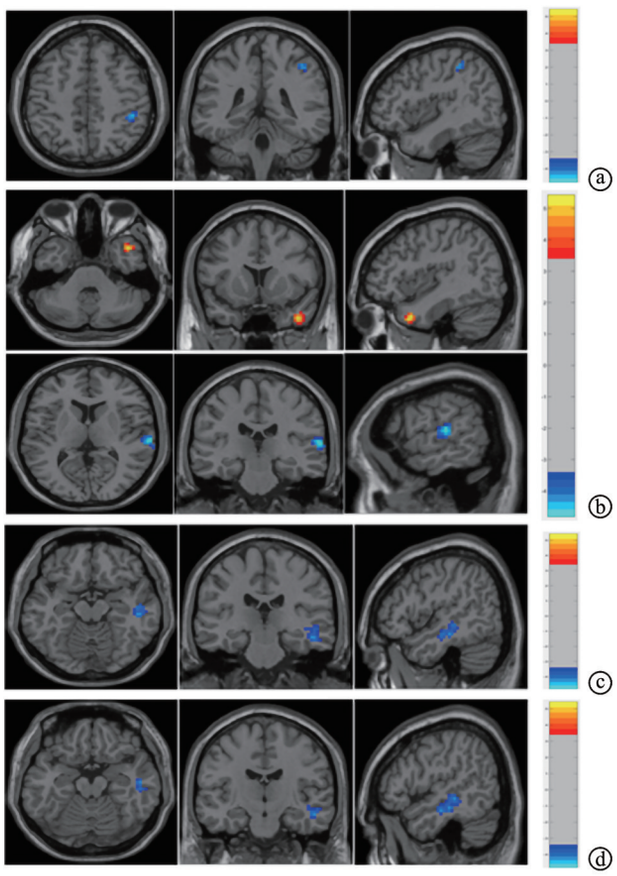
与治疗前相比，ST患者经过“额-颞”双位点rTMS治疗后2周右侧顶下小叶ReHo值降低，右侧颞极fALFF值升高，右侧颞上回fALFF值降低，右侧颞中回DC(weighted)、DC(Binarized)值降低，差异有统计学意义($P<0.05$，*GRF*校正)，见图1、表2。

### 2.3 基于上述改变为种子点的全脑FC分析改变

与治疗前相比，右侧颞上回(fALFF)与右侧颞中回间的FC减少，右侧颞中回[DC(weighted)]与右侧枕上回间的FC减少，右侧颞中回[DC(Binarized)]与右侧枕上回间的FC减少，差异有统计学意义($P<0.05$，*GRF*校正)，见表3、图2。

## 3 讨论

研究表明，ST与中枢神经系统特定区域的兴奋性增加有关[20]。除了与听觉相关的脑区之外，诸如额叶皮层、海马体和杏仁核等非听觉区域也被认为与耳鸣的产生和持续有关。特别是额叶皮层被认为在情绪调节方面起着关键作用，刺激这一区域能够增强额




a：右侧顶下小叶ReHo值降低(冷色)；b：右侧颞极fALFF值升高(暖色)，右侧颞上回fALFF值降低(冷色)；c、d：右侧颞中回DC(Binarized)、DC(weighted)值均降低(冷色)

**图1 “额-颞”双位点rTMS治疗前与治疗后2周ReHo、fALFF、DC差异脑区**

**表2 “额-颞”双位点rTMS治疗前与治疗后2周ReHo、fALFF、DC有差异的脑区**

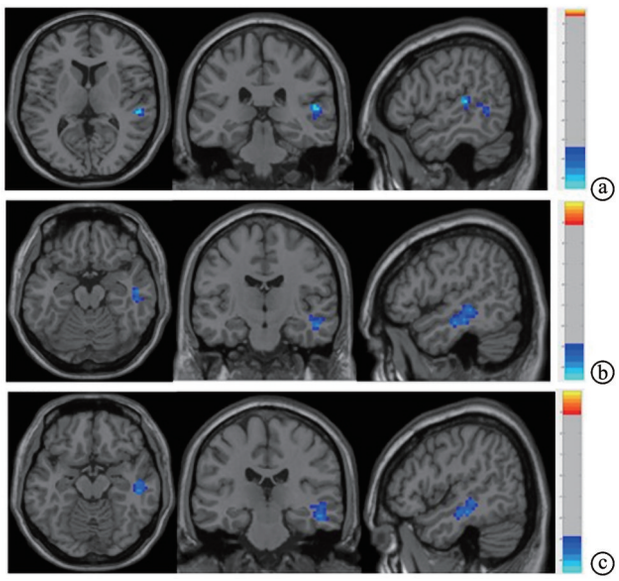
| 指标 | 脑区 | 半球 | MNI坐标 | | | 体素 | $t$ | $P$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | x | y | z | | | |
| ReHo差异 | 顶下小叶 | 右 | 45 | −36 | 48 | 69 | −4.535 2 | <0.05 |
| fALFF差异 | 颞极 | 右 | 42 | 12 | −36 | 42 | 4.996 1 | <0.05 |
| | 颞上回 | 右 | 63 | −24 | 9 | 67 | −5.197 3 | <0.05 |
| DC(weighted)差异 | 颞中回 | 右 | 51 | −15 | −18 | 103 | −3.967 1 | <0.05 |
| DC(Binarized)差异 | 颞中回 | 右 | 48 | −24 | −15 | 103 | −3.902 4 | <0.05 |

MNI：蒙特利尔神经科学研究所

**表3 “额-颞”双位点rTMS治疗前与治疗后2周基于种子点FC差异的脑区**

| 脑区 | 半球 | MNI坐标 | | | 体素 | $t$ | $P$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | x | y | z | | | |
| 种子点：右侧颞上回(fALFF)<br>颞中回 | 右 | 54 | −30 | 9 | 54 | −5.539 0 | <0.05 |
| 种子点：右侧颞中回[DC(weighted)]<br>枕上回 | 右 | 30 | −84 | 27 | 27 | −5.056 8 | <0.05 |
| 种子点：右侧颞中回[DC(Binarized)]<br>枕上回 | 右 | 30 | −84 | 27 | 31 | −5.274 1 | <0.05 |

MNI：蒙特利尔神经科学研究所




a:右侧颞上回(fALFF)与右侧颞中回的FC减少(冷色);b:右侧颞中回[DC(weighted)]与右侧枕上回的FC减少(冷色);c:右侧颞中回[DC(Binarized)]与右侧枕上回的FC减少(冷色)

**图2 “额-颞”双位点rTMS治疗前与治疗后2周FC的差异**

叶-纹状体-丘脑门控机制的活动,有助于缓解耳鸣伴随的情绪困扰[21]。先前的研究表明,相较于仅针对听觉皮层的单位点rTMS,针对两个脑区的双位点rTMS治疗,能更显著地改善听觉症状[22]。我们的早期研究还发现,与正常志愿者相比,ST患者在颞中回的功能活动增加,而在内侧额回的神经元活动减少[11]。基于此,本研究对ST患者的左侧颞顶皮质(代表听觉皮层)和左侧背外侧前额叶皮质(代表非听觉皮层)进行了rTMS治疗,并采用了双位点低频和高频刺激[23],经过2周的治疗,患者耳鸣症状得到了显著改善,表明了“额-颞”双位点rTMS治疗的有效性。

虽然ST的潜在机制可能与外周听觉系统的损伤有关,但其发病机制远不止局限于听觉系统,其很可能是由多个脑区之间复杂的相互作用所致。本研究采用rs-fMRI技术对ST患者治疗前后大脑功能的变化进行观察,结果显示,与治疗前相比,治疗后2周ST患者的ReHo、fALFF、DC(weighted)和DC(Binarized)均出现了显著变化。ReHo的变化主要集中在右侧顶下小叶,表明自发神经活动在区域内部和区域之间均出现了平衡的改善。这可能是由于与耳鸣相关的初级听觉皮层的异常神经活动被传递到了包括额叶、顶叶和边缘系统区域在内的网络中[24]。fALFF的差异主要在右侧颞极和右侧额上回,反映了治疗后这些区域自发神经活动强度的显著变化。DC(weighted)和DC(Binarized)的差异在右侧颞中回最为显著。上述结果表明,在双位点rTMS治疗后,脑内和脑区之间神经功能均发生了显著变化。这种治疗逐渐恢复了ST患者的脑功能,显著改善了耳鸣症状。

本研究治疗部位主要位于左侧的“额-颞”双区,而ReHo、fALFF和FC的变化几乎都发生在右侧大脑半球。其原因可能归结于大脑的感觉系统通常以交叉的方式运作。有研究表明,耳鸣能够引发额叶、岛叶和边缘系统等参与情绪和记忆的区域活动的变化[6]。右侧大脑半球所观察到的变化不仅可能与听觉处理有关,还可能反映了耳鸣对情绪和认知的影响。研究表明,耳鸣存在偏侧化效应,耳鸣患者的情绪反应往往更为强烈[25]。这些功能可能主要集中在右侧大脑半球,因此,刺激左侧可能会在右侧大脑半球引发更显著的功能变化,这进一步支持了“额-颞”双位点rTMS治疗的潜在疗效。大脑中的听觉和视觉感官处理并非相互独立,相反,它们通过多个网络协同工作[26]。本研究发现经过治疗后,视觉和听觉之间的连接中断可能有所改善,表明感觉系统的平衡得到了恢复。颞中回与枕回之间的异常功能连接可能与ST患者的空间注意力变化有关。rTMS治疗可能增强了对外部刺激的敏感度,并减少了对耳鸣的内部注意力。

对于ST患者而言,在“额-颞”双位点rTMS治疗前后,其大脑内部和大脑不同区域的神经功能均发生了显著变化,主要涉及默认模式网络(default mode network,DMN)和听觉视觉网络。其中,顶下小叶是DMN的关键节点,通过其强大的代谢和神经活动,参与并调节与自我相关的信息处理,包括记忆、情绪处理和认知功能,对大脑的休息和觉醒周期起着重要作用[27]。双位点rTMS治疗后该区域的神经活动同步性减弱,被视为脑功能重组的一个标志,原因可能与神经元之间的连接性或神经递质传递效率的改变有关[24]。颞叶中的颞上回、颞中回和颞极在视听觉模式网络中各自有不同的作用;颞上回靠近耳朵,主要用于对听觉信息进行初步加工;颞极是颞叶前端的部分,主要用于存储记忆;颞中回接收枕叶输入的信息,可能是视觉加工的更高级区域[28]。这些脑区在视听觉模式网络中协同工作,处理和解释来自听觉和视觉的信息,并参与记忆的形成和处理[29]。本研究发现,ST患者经过“额-颞”双位点rTMS治疗后,颞极自发活动增强,而颞上回活动减少,颞中回与其他脑区的连接强度或数量有所减少,这些改变可能导致局部脑区的功能活动模式发生变化。因此,我们推测“额-颞”双位点rTMS可能通过DMN脑功能重组和改变听觉相关皮质局部脑区的功能活动模式来改善耳鸣症状,但其潜在机制仍需进一步研究。

然而本研究仍存在一些局限性。首先,由于样本量有限和ST的异质性,不允许我们进行更复杂的多变

量或多亚组分析。其次,由于样本量较小,未观察到ST患者的THI评分降低与rs-fMRI之间的相关性,未来需要进一步扩大样本量,以验证观察到的差异之间的相关性,从而预测疗效。最后,一个疗程的治疗时间应在考虑患者耐受性的同时逐渐增加,更长的治疗周期可能有利于耳鸣症状的长期恢复。

综上所述,"额-颞"双位点rTMS有望成为治疗ST的有效方法。本研究发现ST患者"额-颞"双位点rTMS治疗后在听觉和非听觉部分脑区发生不同程度的局部和整体脑功能活动改变,主要累及DMN及视听觉网络。这些脑区有望作为脑内神经影像学评价ST患者"额-颞"双位点rTMS治疗效果的潜在靶点。

## [参考文献]


[1] Henton A, Tzounopoulos T. What's the buzz? The neuroscience and the treatment of tinnitus[J]. Physiol Rev, 2021, 101(4): 1609-1632. doi: 10.1152/physrev.00029.2020.

[2] Baguley D, McFerran D, Hall D. Tinnitus [J]. Lancet, 2013, 382(9904): 1600-1607. doi: 10.1016/S0140-6736(13)60142-7.

[3] Langguth B, Kreuzer PM, Kleinjung T, et al. Tinnitus: causes and clinical management[J]. Lancet Neurol, 2013, 12(9): 920-930. doi: 10.1016/S1474-4422(13)70160-1.

[4] Meijers S, Stegeman I, van der Leun JA, et al. Analysis and comparison of clinical practice guidelines regarding treatment recommendations for chronic tinnitus in adults: a systematic review[J]. BMJ Open, 2023, 13(9): e072754. doi: 10.1136/bmjopen-2023-072754.

[5] Lefaucheur JP, Aleman A, Baeken C, et al. Evidence-based guidelines on the therapeutic use of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS): an update (2014-2018)[J]. Clin Neurophysiol, 2020, 131(2): 474-528. doi: 10.1016/j.clinph.2019.11.002.

[6] Poeppl TB, Langguth B, Lehner A, et al. Brain stimulation-induced neuroplasticity underlying therapeutic response in phantom sounds[J]. Hum Brain Mapp, 2018, 39(1): 554-562. doi: 10.1002/hbm.23864.

[7] Voytenkov VB, Ekusheva EV, Bedova MA, et al. Transcranial magnetic stimulation for tinnitus treatment[J]. Vopr Kurortol Fizioter Lech Fiz Kult, 2021, 98(5): 74-79. doi: 10.17116/kurort20219805174.

[8] Husain FT, Khan RA. Review and perspective on brain bases of tinnitus[J]. J Assoc Res Otolaryngol, 2023, 24(6): 549-562. doi: 10.1007/s10162-023-00914-1.

[9] Lan LP, Liu Y, Wu YQ, et al. Specific brain network predictors of interventions with different mechanisms for tinnitus patients [J]. EBioMedicine, 2022, 76: 103862. doi: 10.1016/j.ebiom.2022.103862.

[10] Yang SF, Yang D, Gou C, et al. Brain alterations in patients with intractable tinnitus before and after rTMS: a resting-state functional magnetic resonance imaging study[J]. Clin Neurol Neurosurg, 2023, 227: 107664. doi: 10.1016/j.clineuro.2023.107664.

[11] 刁晴晴,张雪君. 基于静息态功能磁共振成像分析脑梗死患者功能连接强度[J]. 影像技术, 2023, 35(2): 34-40. doi: 10.3969/j.issn.1001-0270.2023.02.07.

[12] Han Q, Zhang Y, Liu DH, et al. Disrupted local neural activity and functional connectivity in subjective tinnitus patients: evidence from resting-state fMRI study[J]. Neuroradiology, 2018, 60(11): 1193-201. doi: 10.1007/s00234-018-2087-0.

[13] 金 昕. 2012耳鸣专家共识及解读[J]. 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2012, 47(9): 709-712. doi: 10.3760/cma.j.issn.1673-0860.2012.09.002

[14] 贺 璐,王国鹏,彭 哲,等. 耳鸣临床应用指南[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2015, 23(2): 116-139. doi: 10.3969/j.issn.1006-7299.2015.02.004.

[15] Zeman F, Koller M, Figueiredo R, et al. Tinnitus handicap inventory for evaluating treatment effects: which changes are clinically relevant?[J]. Otolaryngol Head Neck Surg, 2011, 145(2): 282-287. doi: 10.1177/0194599811403882.

[16] Yan CG, Wang XD, Zuo XN, et al. DPABI: Data processing & analysis for (resting-state) brain imaging[J]. Neuroinformatics, 2016, 14(3): 339-351. doi: 10.1007/s12021-016-9299-4.

[17] Zang YF, Jiang TZ, Lu YL, et al. Regional homogeneity approach to fMRI data analysis[J]. Neuroimage, 2004, 22(1): 394-400. doi: 10.1016/j.neuroimage.2003.12.030.

[18] Zou QH, Zhu CZ, Yang YH, et al. An improved approach to detection of amplitude of low-frequency fluctuation (ALFF) for resting-state fMRI: fractional ALFF[J]. J Neurosci Methods, 2008, 172(1): 137-141. doi: 10.1016/j.jneumeth.2008.04.012.

[19] Buckner RL, Sepulcre J, Talukdar T, et al. Cortical hubs revealed by intrinsic functional connectivity: mapping, assessment of stability, and relation to Alzheimer's disease[J]. J Neurosci, 2009, 29(6): 1860-1873. doi: 10.1523/JNEUROSCI.5062-08.2009.

[20] Park KW, Kullar P, Malhotra C, et al. Current and emerging therapies for chronic subjective tinnitus[J]. J Clin Med, 2023, 12(20): 6555. doi: 10.3390/jcm12206555.

[21] Fellows LK, Farah MJ. Ventromedial frontal cortex mediates affective shifting in humans: evidence from a reversal learning paradigm[J]. Brain, 2003, 126(8): 1830-1837. doi: 10.1093/brain/awg180.

[22] Noh TS, Kyong JS, Park MK, et al. Dual-site rTMS is more effective than single-site rTMS in tinnitus patients: a blinded randomized controlled trial[J]. Brain Topography, 2020, 33(6): 767-775. doi: 10.1007/s10548-020-00797-y.

[23] Denton AJ, Finberg A, Ashman PE, et al. Implications of transcranial magnetic stimulation as a treatment modality for tinnitus[J]. J Clin Med, 2021, 10(22): 5422. doi: 10.3390/jcm10225422.

[24] Jablonowski J, Rose M. The functional dissociation of posterior parietal regions during multimodal memory formation[J]. Hum Brain Mapp, 2022, 43(11): 3469-3485. doi: 10.1002/hbm.25861.

[25] Chen Q, Lv H, Wang ZD, et al. Lateralization effects in brain white matter reorganization in patients with unilateral idiopathic tinnitus: a preliminary study[J]. Brain Imaging Behav, 2022, 16(1): 11-21. doi: 10.1007/s11682-021-00472-1.

[26] Shams L, Seitz AR. Benefits of multisensory learning[J]. Trends Cogn Sci, 2008, 12(11): 411-417. doi: 10.1016/j.tics.2008.07.006.

[27] Talwar P, Kushwaha S, Chaturvedi M, et al. Systematic review of different neuroimaging correlates in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease [J]. Clin Neuroradiol, 2021, 31(4): 953-967. doi: 10.1007/s00062-021-01057-7.

[28] Herlin B, Navarro V, Dupont S. The temporal pole: from anatomy to function-a literature appraisal [J]. J Chem Neuroanat, 2021, 113: 101925. doi: 10.1016/j.jchemneu.2021.101925.

[29] Bagnis A, Celeghin A, Diano M, et al. Functional neuroanatomy of racial categorization from visual perception: a meta-analytic study [J]. Neuroimage, 2020, 217: 116939. doi: 10.1016/j.neuroimage.2020.116939.


(编辑:杨 颖)