

论 著 · 头颈部

基于rs-fMRI探究语言区脑动静脉畸形患者语言功能代偿机制

叶嘉骏¹ 郑冬¹ 徐凯¹
曾亚伟¹ 崔洁¹ 李科^{2,*}
1.中国人民解放军总医院第九医学中心放射科
2.中国人民解放军总医院第九医学中心医研部(北京 100010)

【摘要】目的 探讨语言区脑动静脉畸形(AVM)患者语言功能代偿机制。方法 回顾性纳入31例累及左半球语言区的AVM患者(顶叶组5例、额叶组7例、颞叶组19例)及41例匹配的健康对照(HC)。所有受试者接受3.0T静息态功能磁共振成像(rs-fMRI)扫描。计算受试者大脑低频振荡振幅(ALFF)、比率低频振幅(fALFF)、局部一致性(ReHo)和度中心性(DC)。使用双样本t检验比较各亚组与HC的脑功能差异,结果映射至Yeo 7网络模板。结果 顶叶组患者躯体运动网络(SMN)fALFF升高;额顶网络(FPN)、背侧注意网络(DAN)ReHo升高;FPN与默认网络(DMN)ReHo降低。额叶组患者SMN的ALFF与DC升高;视觉网络(VN)DC升高;DAN的ReHo升高。颞叶组患者SMN和DMN的ALFF升高;SMN和DMN的fALFF升高;SMN的DC升高;VN和SMN的ReHo升高;SMN局部ReHo降低。三组均观察到SMN活动的显著增强。结论 语言区AVM患者通过跨网络重组实现语言功能代偿,以SMN为核心枢纽,协同注意控制(DAN)、视觉处理(VN)及认知调配(FPN/DMN)形成代偿网络。以运动系统为中心、辅以其他网络的代偿机制为理解语言可塑性提供了新角度,提示临床可针对性地整合动作执行、注意力训练及视觉提示进行语言功能障碍人群的康复。

【关键词】脑动静脉畸形;语言;脑网络;静息态功能磁共振成像
【中图分类号】R743.4
【文献标识码】A
DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.10.004

Exploring the Language Functional Compensation Mechanism in Patients with Language Area Brain Arteriovenous Malformations Based on rs-fMRI

YE Jia-jun¹, ZHENG Dong¹, XU Kai¹, ZENG Ya-wei¹, CUI Jie¹, LI Ke^{2,*}.
1.Department of Radiology, The Ninth Medical Center, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100010, China
2.Department of Medical Research, The Ninth Medical Center, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100010, China

ABSTRACT
Objective To investigate the language functional compensation mechanism in patients with brain arteriovenous malformations (AVMs) involving the language area. **Methods** Thirty-one patients with AVMs involving the left hemispheric language area (parietal group: 5 cases, frontal group: 7 cases, temporal group: 19 cases) and 41 matched healthy controls (HCs) were retrospectively included. All subjects underwent 3.0T resting-state functional magnetic resonance imaging (rs-fMRI) scanning. The amplitude of low-frequency fluctuation (ALFF), fractional ALFF (fALFF), regional homogeneity (ReHo), and degree centrality (DC) were calculated for each subject. Two-sample t-tests were used to compare brain functional differences between each subgroup and HCs, and the results were mapped onto the Yeo 7-network template. **Results** In the parietal group, fALFF was increased in the somatomotor network (SMN); ReHo was increased in the frontoparietal network (FPN) and dorsal attention network (DAN); ReHo was decreased in the FPN and default mode network (DMN). In the frontal group, ALFF and DC were increased in the SMN; DC was increased in the visual network (VN); ReHo was increased in the DAN. In the temporal group, ALFF was increased in the SMN and DMN; fALFF was increased in the SMN and DMN; DC was increased in the SMN; ReHo was increased in the VN and SMN; local ReHo was decreased in the SMN. Significantly enhanced activity in the SMN was observed across all three groups. **Conclusion** Patients with language area AVMs achieve language functional compensation through cross-network reorganization, with SMN serving as the core hub, synergizing with attention control (DAN), visual processing (VN), and cognitive modulation (FPN/DMN) to form a compensatory network. This compensation mechanism centered on the motor system and supplemented by other networks provides a new perspective for understanding language plasticity, suggesting that clinical rehabilitation for populations with language dysfunction could specifically integrate motor execution, attention training, and visual cues.
Keywords: Brain Arteriovenous Malformation; Language; Brain Network; Resting-state Functional Magnetic Resonance Imaging

人类每天都在使用语言,语言不仅是人类知识的储存库,更是传播信息的主要媒介^[1]。对于人类活动而言,语言是不可或缺的组成部分。语言功能的正常实现需要进行复杂地整合,这涉及到额叶、颞叶和顶叶的各种大脑皮质区域^[2]。不幸的是,许多神经系统疾病在发生发展过程中对大脑语言区产生压迫或者损害,最终导致语言功能障碍,对患者生活产生负面影响,例如脑肿瘤和脑卒中等^[3-4]。

脑动脉畸形(arteriovenous malformation, AVM)是一种先天性中枢神经系统血管发育异常的疾病,特征是脑动脉和静脉直接相连,其间缺乏正常毛细血管网^[5]。然而,与上述疾病不同的是,即使位于语言区未破裂的AVM患者临床表现也罕见语言障碍,其可能原因是AVM出生时就已存在,早于语言形成期。有研究发现在后期的语言学习过程中,其他脑区代偿了语言区或者参与了语言网络,但其具体机制暂不明确,这种现象被称为皮层可塑性,该过程发生了语言重组^[6-8]。这与脑肿瘤或脑卒中等获得性疾病截然相反,因此有人认为涉及语言区的AVM是研究语言重塑的天然模型^[9]。此前邓等人发现,与健康人相比,语言区AVM患者的左侧小脑半球、双侧颞下回以及右侧海马体的局部神经活动变强^[10]。同时有研究发现健康对照组默认模式网络(default mode network, DMN)活动与额叶注意力控制网络之间的预期存在负相关关系,但是语言区AVM患者则表现出对负相关关系的破坏^[6]。此外,任务态功能磁共振成像(task-state functional magnetic resonance imaging, t-fMRI)的研究表明,AVM病变位置的不同对语言功能的影响也不同,从而导致不同的语言重组模式^[9]。

静息态功能磁共振成像(resting-state functional magnetic resonance imaging, rs-fMRI)是一种无创性成像技术,基于血氧水平依赖(blood oxygen level dependent, BOLD)信号的自发波动,这种波动同时发生在不同的大脑区域,可以反应大脑功能变化且高分辨率磁共振在血管类疾病中有良好的应用价值^[11-13]。但是,涉及语言区AVM且语言功能正常患者的rs-fMRI研究较少且指标单一。因此本研究拟应用低频振荡振幅(amplitude of low frequency fluctuation, ALFF)、比率低频振幅(fractional amplitude of low-frequency fluctuation, fALFF)、局部一致性(regional homogeneity, ReHo)和

【第一作者】叶嘉骏,男,硕士研究生,主要研究方向:功能磁共振成像。E-mail: yjj_sdfmu@163.com
【通讯作者】李科,男,主任医师,主要研究方向:功能磁共振成像。E-mail: leeker1974@126.com

度中心性(degree centrality, DC)多角度探究语言区AVM患者大脑语言功能代偿机制。

1 资料与方法

1.1 一般资料 本研究获得了中国人民解放军总医院第九医学中心伦理委员会的批准(编号: LL-LCSY-2024-09), 所有AVM患者和健康对照均来自于本院放射科2019年1月至2024年9月的数据库。

AVM组的纳入标准为: (1)确诊为AVM且病灶涉及左半球语言区: 顶叶包括缘上回(supramarginal gyrus, SMG)和角回(angular gyrus, AG)(见图1), 额叶包括额中回(middle frontal gyrus, MFG)、额下回(inferior frontal gyrus, IFG)和中央前回(precentral gyrus, PCG)(见图2), 颞叶包括颞上回(superior temporal gyrus, STG)、颞

中回(middle temporal gyrus, MTG)、颞下回(inferior temporal gyrus, ITG)和颞极(temporal pole, TP)(见图3)^[7]; (2)年龄16至65岁; (3)右利手; (4)母语为汉语; (5)学历初中及以上; (6)3个月内病灶无破裂; (7)语言功能正常^[14]。本研究纳入3个月内AVM无破裂患者是由于AVM发病率较低且大多破裂后才被发现^[15], 在3个月多数患者出血会被吸收, 临床表现稳定^[9]。排除标准: (1)有其他神经或精神疾病; (2)有颅脑手术史; (3)未顺利完成磁共振扫描。健康对照组(HC)的纳入标准为: (1)年龄和性别与AVM组相近; (2)右利手; (3)母语为汉语; (4)学历初中及以上; (5)语言功能正常。排除标准与AVM组相同。我们根据AVM患者病变所在部位, 将AVM组分为三个亚组: 顶叶组、额叶组和颞叶组。

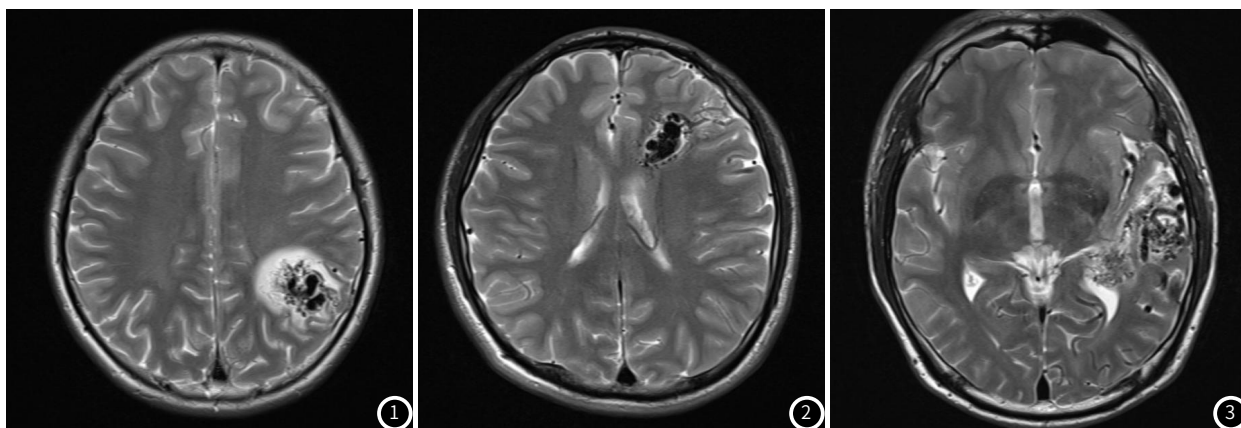


图1 顶叶组典型病例(T2)。图2 额叶组典型病例(T2)。图3 颞叶组典型病例(T2)。

1.2 仪器与方法 所有参与者的磁共振图像来自于—台西门子公司3.0 T 磁共振扫描仪(Trio)并且使用12通道头部线圈进行采集。参与者都被要求佩戴降噪耳塞以减少噪音的影响, 并且我们使用了侧向固定夹来保持参与者头部固定以减少头动。每一位参与者都在扫描前进行了培训, 要求他们不能睁眼和不要思考。我们提取了参与者的三维T1结构像和rs-fMRI功能像, 其中三维T1加权图像采用磁化准备快速梯度回波(magnetization prepared rapid gradient echo imaging, MP-RAGE)序列进行采集, 具体参数如下: 重复时间(repetition time, TR)= 2300 ms, 回波时间(echo time, TE)= 2.98 ms, 翻转角(flip angles, FA)= 9°, 视野(field of view, FOV)= 256 mm×256 mm, 矩阵= 256×240, 体素大小= 1×1×1 mm³, 层厚=1mm, 层间距= 0.5mm, 层数=176。rs-fMRI功能像采用回波平面成像(echo planar imaging, EPI)序列进行采集, 具体参数如下: 重复时间(TR)= 2000 ms, 回波时间(TE)= 30 ms, 翻转角(FA)= 90°, 视野(FOV)= 210 mm×210 mm, 矩阵= 64×64, 体素大小= 3.3×3.3×4mm³, 层厚= 4 mm, 层间距= 0 mm, 层数= 210。

1.3 fMRI数据处理 所有受试者的磁共振图像数据都基于MATLAB R2020b使用DPARSF 8.1(data processing assistant for resting-state fMRI advanced edition)工具包进行预处理。具体预处理步骤如下: (1)将数据从DICOM转换为NIFTI格式, 去除前10个时间点以保证数据稳定; (2)进行时间层和头动校正, 排除任意方向头动>2mm及2°的受试者图像; (3)通过DAETEL(diffeomorphic anatomical registration through exponentiated lie algebra)模板对T1结构像进行分割; (4)将rs-fMRI数据通过已完成分割的T1结构像配准至蒙特利尔神经学研究所(montreal neurological institute, MNI)标准脑模板中且重采样至3 mm×3 mm×3 mm; (5)去除线性漂移; (6)通过线性回归的方法去除脑白质信号、脑脊液信号和头动参数(基于Friston-24)等协变量; (7)在计算 ALFF/fALFF和DC 之前(但在 ReHo 之后)采用全宽半高值为6mm的高斯核进行空间平滑。

计算ALFF和fALFF: 对0.01-0.1 Hz范围内信号的功率谱进行开方, 获得ALFF。随后将ALFF除以整个频段的ALFF, 获得fALFF。

计算ReHo: 使用肯德尔和谐系数计算全脑所有体素与其相邻26个体素在同一时间序列中的肯德尔系数, 获得所有体素的ReHo值, 随后的标准化是将其除以所有体素ReHo值的均值。

计算DC: 计算每个体素与脑内所有其他体素之间的时间相关性, 得到皮尔逊相关系数矩阵。为了去除时间相关性较低的体素, 皮尔逊相关系数阈值被设置为大于0.25。本研究每个体素的DC值是指该体素与脑内其他体素连接总和的加权值^[16]。最后对以上所有指标进行Fisher-Z转换以增加正态性。

1.4 统计学分析 我们使用DPABI 8.1 工具包和SPSS 26进行统计分析。利用DPABI 8.1工具包对AVM亚组和HC进行双样本t检验, 以性别、年龄和平均头动参数(mean FD_Jenkinson)作为协变量, 计算出各亚组与HC间的差异脑区, 差异脑区是经高斯随机场校正(gaussian random field, GRF)校正后(体素水平 $P < 0.001$, 团块水平 $P < 0.05$, 双尾, 体素数>20)的脑区, 并将其投射在基于rs-fMRI生成的Yeo 7脑网络图谱上, 其包括视觉网络(visual network, VN)、躯体运动网络(somatomotor network, SMN)、背侧注意网络(dorsal attention network, DAN)、腹侧注意网络(ventral attention network, VAN)、边缘网络(limbic network, LN)、额顶网络(frontoparietal network, FPN)及默认网络(default mode network, DMN)^[17]。使用SPSS 26进行统计分析。对于参与者的年龄, 若符合正态分布则以($\bar{x} \pm s$)表示, 采用独立样本t检验; 若不符合正态分布则以 $M(Q_1, Q_3)$ 表示, 采用Mann-Whitney U检验。对于参与者的性别, 采用卡方检验。

2 结果

2.1 人口统计信息 我们根据标准筛选出72名参与者, 所有参与者头动均值<0.2mm。所有参与者被分为AVM组31人(20名男性、右利手)和健康对照组41人(21名男性、右利手), 两组在年龄(Mann-Whitney U 检验, $P=0.412$)和性别(卡方检验, $P=0.259$)上

没有差异。AVM组的主要临床表现有：头疼(10人)、癫痫(6人)、头晕(5人)及无症状(10人)。AVM三个亚组的具体数据如下：顶叶组(5人、1名男性)、额叶组(7人、5名男性)和颞叶组(19人、14名男性)，三组与对照组在年龄和性别上没有差异(见表1)。

2.2 顶叶组各静息态指标显著差异脑区 SMN中fALFF升高，FPN、DAN中ReHo升高，FPN、DMN中ReHo降低(见表2)。

表1 各组人口统计信息

组别	例数	性别(男:女)	年龄(岁)
健康对照组	41	21: 20	28(24,41)
AVM	31	20: 11	28(19,43)
P值		0.259	0.412
顶叶组	5	1: 4	25(20,37)
P值		0.187	0.384
额叶组	7	5: 2	29(19,43)
P值		0.321	0.860
颞叶组	19	14: 5	28(17,43)
P值		0.101	0.509

表3 额叶组各静息态指标显著差异脑区

差异脑区	MNI峰值点坐标			T值	体素
	X	Y	Z		
ALFF升高的脑区					
SMN	-9	-15	48	6.15354	283
DC升高的脑区					
SMN	-12	-18	48	8.51405	455
VN	-21	-87	15	5.41685	27
	39	-51	-15	4.57871	20
ReHo升高的脑区					
DAN	45	3	27	6.10073	42

2.3 额叶组各静息态指标显著差异脑区 SMN中ALFF升高，SMN、VN中DC升高，DAN中ReHo升高(见表3)。

2.4 颞叶组各静息态指标显著差异脑区 SMN、DMN中ALFF、fALFF升高，SMN中DC升高，VN、SMN中ReHo升高，SMN中ReHo降低(见表4)。

表2 顶叶组各静息态指标显著差异脑区

差异脑区	MNI峰值点坐标			T值	体素
	X	Y	Z		
fALFF升高的脑区					
SMN	-36	-18	57	4.93409	20
ReHo升高的脑区					
FPN	27	48	18	5.04642	34
DAN	-54	3	24	5.71363	26
ReHo降低的脑区					
FPN	-45	-51	48	-6.52287	163
DMN	0	-69	36	-5.64273	114

表4 颞叶组各静息态指标显著差异脑区

差异脑区	MNI峰值点坐标			T值	体素
	X	Y	Z		
ALFF升高的脑区					
SMN	-36	-12	15	7.83503	1591
DMN	-57	-42	6	4.93936	23
DC升高的脑区					
SMN	-33	-33	21	9.17516	912
fALFF升高的脑区					
DMN	-42	21	6	6.80073	82
SMN	-39	-39	12	5.48853	30
ReHo升高的脑区					
VN	30	-51	-9	5.73148	35
SMN	9	-24	57	5.22304	25
ReHo降低的脑区					
SMN	-60	-21	6	-5.78246	67

3 讨 论

本研究使用rs-fMRI研究了语言区AVM患者语言功能代偿机制，目的是探究当语言区受到损伤后，大脑是如何代偿以保证语言功能正常。结果显示，与HC相比，顶叶组的SMN、FPN、DAN与DMN，额叶组的SMN、VN、DAN与颞叶组的SMN、DMN、VN的大脑神经活动发生改变。这表明大脑会调用其他脑区代偿语言功能，不同脑叶的语言区AVM会导致不同脑区参与代偿而且SMN可能是一个核心的功能代偿脑区。

对于顶叶组而言，AVM侵占了负责语义和语音处理的AG和SMG，而AG和SMG共同构成顶下小叶(inferior parietal lobule, IPL)^[18]。IPL作为韦尼克区的构成部分承担着语言处理等高阶认知功能的形成过程，同时也参与多个脑网络，处理多种感觉信息，如视觉和听觉等信息，继而把汇集到的信息转化为行为^[19]。尽管

IPL的多种作用可能会被AVM所影响致使语言功能无法正常运行，但是其他脑区可能代偿其功能。SMN出现了fALFF的升高，其内神经活动的增强可能表明感觉整合和运动功能执行强化以补偿IPL的功能缺失继而辅助语言处理^[20]。FPN和DAN分别发挥着认知与注意力控制的作用^[21]，两者ReHo的升高则表示大脑可能通过分配更多认知和注意力资源以满足语义理解与语音处理。有趣的是，FPN中ReHo出现了矛盾性的降低，我们推测该区域可能因病灶的占据而功能失调。DMN作为一组广泛分布于顶叶、颞叶和额叶皮质相互连接的大脑区域，这些区域在需要高度注意力的任务中其活动通常会减弱^[22]。该组患者DMN的ReHo降低，其内的神经元局部一致性功能活动下降也正与DAN 的注意力强化以调整语言功能所相吻合。

与顶叶组患者相似的是,额叶组患者也出现了SMN和DAN的活动增强,这可能表明当额叶所负责的语言功能,如语言生成、流畅性和短期记忆等^[23],受损时,感觉整合、运动及注意力资源也会被调配以支撑受损语言功能的正常运转,这再次强调了SMN在代偿中的重要作用。同时,DC的增高则直接印证了SMN已成为核心的信息枢纽。值得注意的是,VN中DC的升高不仅表明该组患者可能依赖视觉识别,如文字、唇读及手势^[24],辅以语言理解和表达,而且也同SMN类似发挥着枢纽作用。

颞叶作为语言功能的重要区域,是大脑语言网络的核心组成部分,不仅承担语音感知和语言理解,而且负责语义加工及记忆^[25],因此,广泛的脑功能改变可能与其在语言功能中的关键作用有关。该组SMN所有静息态指标的变化正表明该网络与颞叶功能联系紧密,如与颞叶协调完成语言记忆^[26],也反映了大脑高度依赖运动系统进行语言代偿。VN中ReHo的升高提示视觉策略是颞叶语言功能另一重要的代偿途径。DMN在多种复杂的认知活动中其活动会增强,这些认知活动包括语言和语义记忆^[22]。同时,DMN也会整合并传播语言和语义记忆表征^[27]。在一项中风失语症患者的语言康复研究中,人们发现DMN功能连接(functional connectivity, FC)的增加是由于其内部神经活动与功能性可塑性增强,这些增强促进了语言功能的恢复^[28]。本研究中颞叶组患者DMN中ALFF和fALFF升高,同样表明了其内部神经活动增强,可能反映DMN正在参与语言功能。同时,AVM侵占了颞叶致使其相关的语言功能包括语言理解和语义记忆受到影响^[25],DMN神经活动增强也可能反映其代偿了颞叶语言功能以保证患者语言功能正常。然而,在不注意外部刺激的情况下,即休息或者安静清醒状态,DMN会在其内部产生思维过程,导致DMN处于活跃状态^[29],因而也可能出现ALFF和fALFF增高。

本研究仍然存在一定的局限性:一是由于AVM疾病特点,如发病率低、发病部位散在,因此纳入的患者数量有限。二是大多数患者确诊时,AVM已经破裂,即使本研究已排除近期AVM破裂的情况,但出血即使被吸收仍会影响结果的准确性。

本研究使用多个静息态指标分析了语言区AVM患者的脑功能改变,并得到结论如下:运动相关的网络,如SMN,活动显著增强,而注意力或认知相关网络,如FPN、DMN,则出现了活动增强或降低的调整。这提示大脑可能通过调动其他非损伤脑区的网络资源以补偿可能受损的语言功能。正是这种跨网络的、以运动系统为核心,辅以注意力、认知和视觉执行增强,以及对DMN资源的策略性调整,共同构成了一个强大的代偿网络,使得语言功能在AVM存在下得以维持正常。本研究为理解大脑可塑性和语言功能的神经基础提供了重要见解,也提示在相应的临床康复中,可以尝试利用和强化这些代偿网络,如结合作、注意力及视觉提示的语言训练来帮助语言障碍患者改善语言功能。

参考文献

- [1] Kirby S, Tamariz M. Cumulative cultural evolution, population structure and the origin of combinatoriality in human language[J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2022, 377 (1843): 20200319.
- [2] Li T, Zhu X, Wu X, et al. Continuous theta burst stimulation over left and right supramarginal gyri demonstrates their involvement in auditory feedback control of vocal production[J]. *Cerebral Cortex*, 2023, 33 (1): 11–22.
- [3] Brady MC, Kelly H, Godwin J, et al. Speech and language therapy for aphasia following stroke[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2016, 2016 (6): CD000425.
- [4] Zhang H, Ille S, Sogger L, et al. Elucidating the structural-functional connectome of language in glioma-induced aphasia using nTMS and DTI[J]. *Hum Brain Mapp*, 2022, 43 (6): 1836–1849.
- [5] Solomon RA, Connolly ES Jr. Arteriovenous malformations of the brain[J]. *N*

- Engl J Med*, 2017, 376 (19): 1859–1866.
- [6] Rousseau PN, La Piana R, Chai XJ, et al. Brain functional organization and structure in patients with arteriovenous malformations[J]. *Neuroradiology*, 2019, 61 (9): 1047–1054.
- [7] Deng X, Yin H, Zhang Y, et al. Impairment and plasticity of language-related white matter in patients with brain arteriovenous malformations[J]. *Stroke*, 2022, 53 (5): 1682–1691.
- [8] Ding D, Starke RM, Liu KC, et al. Cortical plasticity in patients with cerebral arteriovenous malformations[J]. *Journal of Clinical Neuroscience*, 2015, 22 (12): 1857–1861.
- [9] Deng X, Wang B, Zong F, et al. Right-hemispheric language reorganization in patients with brain arteriovenous malformations: a functional magnetic resonance imaging study[J]. *Hum Brain Mapp*, 2021, 42 (18): 6014–6027.
- [10] Deng X, Wang M, Zhang Y, et al. Resting-state functional alterations in patients with brain arteriovenous malformations involving language areas[J]. *Hum Brain Mapp*, 2023, 44 (7): 2790–2801.
- [11] Raimondo L, Oliveira LAF, Heij J, et al. Advances in resting state fMRI acquisitions for functional connectomics[J]. *Neuroimage*, 2021, 243: 118503.
- [12] 郭雪丽, 王雄信, 张新颖. 高分辨率核磁共振在急性脑梗塞颅内动脉狭窄评估中的应用价值研究. *罕少疾病杂志*. 2025 (02): 32–4.
- [13] 赵致平, 刘金军. CT和MRI联合诊断颅脑动静脉畸形的价值研究. *中国CT和MRI杂志*. 2017 (10): 30–2, 54.
- [14] Li M, Jiang P, Wu J, et al. Altered Brain Structural Networks in Patients with Brain Arteriovenous Malformations Located in Broca's Area. *Neural Plast*. 2020; 2020: 8886803.
- [15] El-Ghanem M, Kass-Hout T, Kass-Hout O, et al. Arteriovenous Malformations in the Pediatric Population: Review of the Existing Literature. *Interventional Neurology*. 2016; 5 (3–4): 218–25.
- [16] Shan A, Zhang H, Gao M, et al. Aberrant voxel-based degree centrality and functional connectivity in Parkinson's disease patients with fatigue. *CNS Neurosci Ther*. 2023; 29 (9): 2680–9.
- [17] Yeo BT, Krienen FM, Sepulcre J, et al. The organization of the human cerebral cortex estimated by intrinsic functional connectivity. *J Neurophysiol*. 2011; 106 (3): 1125–65.
- [18] Graves WW, Purcell J, Rothlein D, et al. Correspondence between cognitive and neural representations for phonology, orthography, and semantics in supramarginal compared to angular gyrus. *Brain Struct Funct*. 2023; 228 (1): 255–71.
- [19] Xing Y, Fu S, Li M, et al. Regional Neural Activity Changes in Parkinson's Disease-Associated Mild Cognitive Impairment and Cognitively Normal Patients. *Neuropsychiatr Dis Treat*. 2021; 17: 2697–706.
- [20] Chai Z, Yang B, Qu X, et al. Alterations in surface-based amplitude of low-frequency fluctuations primary open-angle glaucoma link to neurotransmitter profiling and visual impairment severity. *Brain Imaging Behav*. 2025; 19 (1): 159–74.
- [21] Spadone S, Wyczesany M, Della Penna S, et al. Directed Flow of Beta Band Communication During Reorienting of Attention Within the Dorsal Attention Network. *Brain Connect*. 2021; 11 (9): 717–24.
- [22] Smallwood J, Bernhardt BC, Leech R, et al. The default mode network in cognition: a topographical perspective. *Nature Reviews Neuroscience*. 2021; 22 (8): 503–13.
- [23] Caciagli L, Paquola C, He X, et al. Disorganization of language and working memory systems in frontal versus temporal lobe epilepsy. *Brain*. 2023; 146 (3): 935–53.
- [24] Lian W, Zhang L, Wang A, et al. The Default Mode Network and Visual Network Functional Connectivity Changes in Noise-Induced Hearing Loss Patients: A Resting-State fMRI Study. *Brain Behav*. 2025; 15 (4): e70465.
- [25] Braunsdorf M, Blazquez Freches G, Roumazeilles L, et al. Does the temporal cortex make us human? A review of structural and functional diversity of the primate temporal lobe. *Neurosci Biobehav Rev*. 2021; 131: 400–10.
- [26] Delgado-Alvarado M, Ferrer-Gallardo VJ, Paz-Alonso PM, Caballero-Gaudes C, Rodríguez-Oroz MC. Interactions between functional networks in Parkinson's disease mild cognitive impairment. *Scientific Reports*. 2023; 13 (1).
- [27] Abrams DA, Kochalka J, Bhide S, et al. Intrinsic functional architecture of the human speech processing network. *Cortex*. 2020; 129: 41–56.
- [28] Sihvonen AJ, Leo V, Ripollés P, et al. Vocal music enhances memory and language recovery after stroke: pooled results from two RCTs. *Ann Clin Transl Neurol*. 2020; 7 (11): 2272–87.
- [29] Buckner RL, Andrews-Hanna JR, Schacter DL. The brain's default network: anatomy, function, and relevance to disease. *Ann N Y Acad Sci*. 2008; 1124: 1–38.

(收稿日期: 2025-07-07)

(校对编辑: 赵望淇、姚丽娜)