

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2026.01.005

医学影像物理

## 非痴呆型血管性认知障碍的脑功能磁共振成像研究进展

李琼阁<sup>1,2</sup>, 卢洁<sup>1,2</sup>

1. 首都医科大学宣武医院放射与核医学科, 北京 100053; 2. 磁共振成像脑信息学北京市重点实验室, 北京 100053

**【摘要】**非痴呆型血管性认知障碍(VCIND)是血管性认知障碍的早期可干预阶段,其早期精准识别对延缓疾病进展意义重大。静息态功能磁共振成像(fMRI)凭借无创优势,成为解析VCIND脑功能网络异常的关键手段。本文聚焦静息态fMRI多模态分析方法,系统综述了其在VCIND研究的核心进展:局部脑功能分析揭示默认模式网络(DMN)等核心脑区自发活动强度与局部协同性异常;功能连接(FC)分析明确DMN、额顶网络(FPN)跨区域连接损伤及干预后的可塑性变化;复杂网络分析阐释患者脑网络拓扑结构整合效率下降特征。该多维度分析体系为VCIND神经生物学机制阐释提供多层次客观依据,挖掘出潜在临床生物标志物,为疾病早期精准识别与干预治疗提供关键技术支持。本文进一步探讨了技术创新与多模态数据融合在VCIND精准诊疗中的应用前景,为延缓疾病进展、制定个体化干预策略提供新方向。

**【关键词】**非痴呆型血管性认知障碍;功能磁共振成像;图像处理;综述

**【中图分类号】**R318;R816.1

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2026)01-0035-06

## Advances in functional magnetic resonance imaging-based research on vascular cognitive impairment with no dementia

LI Qiongge<sup>1,2</sup>, LU Jie<sup>1,2</sup>

1. Department of Radiology and Nuclear Medicine, Xuanwu Hospital, Capital Medical University, Beijing 100053, China; 2. Beijing Key Laboratory of Magnetic Resonance Imaging and Brain Informatics, Beijing 100053, China

**Abstract:** Vascular cognitive impairment with no dementia (VCIND) is an early modifiable stage of vascular cognitive impairment, and its precise early identification is of great significance for delaying disease progression. Resting-state functional magnetic resonance imaging, by virtue of its non-invasive advantage, has become a pivotal tool for deciphering abnormalities in the brain functional networks of VCIND. This review focuses on the multimodal analytical approaches of resting-state functional magnetic resonance imaging, and systematically summarizes their core advances in VCIND research. Specifically, local brain function analysis reveals abnormalities in spontaneous activity intensity and local coordination in core brain regions such as the default mode network. Functional connectivity analysis clarifies the cross-regional connectivity damages in the default mode network and fronto-parietal network, as well as plastic changes after intervention. Complex network analysis elaborates on the characteristic decrease in the integration efficiency of the brain network topological structure in patients. This multidimensional analytical system provides multi-level objective evidence for the elucidation of the neurobiological mechanisms of VCIND, identifies potential clinical biomarkers, and offers key technical support for the precise early identification and intervention of the disease. Furthermore, the application prospects of technological innovations and multimodal data fusion in the precision diagnosis and treatment of VCIND are discussed, thereby providing a new direction for delaying disease progression and formulating individualized intervention strategies.

**Keywords:** vascular cognitive impairment with no dementia; functional magnetic resonance imaging; image processing; review

**【收稿日期】**2025-07-10

**【基金项目】**国家重点研发计划(2022YFC2406900);宣武医院汇智人才项目(HZ22021ZCLJ005)

**【作者简介】**李琼阁,博士,主管技师,研究方向:磁共振神经影像技术,E-mail: liqiongge@xwhosp.org

**【通信作者】**卢洁,博士,主任医师,研究方向:神经影像学,E-mail: im-aginglu@hotmail.com

### 前言

非痴呆型血管性认知障碍(Vascular Cognitive Impairment With No Dementia, VCIND)是指一类由脑血管病变引起的认知功能下降,但尚未达到痴呆诊断标准,是血管性认知障碍(Vascular Cognitive Impairment, VCI)和血管性痴呆(Vascular Dementia,

VaD)的早期阶段<sup>[1-2]</sup>。根据中国认知与老龄化研究显示, VCIND是中国最常见的轻度认知障碍(Mild Cognitive Impairment, MCI)亚型, 占有MCI病例的42%<sup>[3]</sup>。加拿大健康与老龄化研究发现, 约50%的VCIND患者在5年的随访中会发展为痴呆<sup>[4]</sup>。因此, 早期有效的干预对于延缓VCIND发生进一步的认知下降至关重要。识别和干预高风险个体的能力取决于有效的生物标志物, 探究有效的生物标志物对延缓VCIND的疾病进程、优化干预策略具有重要意义。

静息态功能磁共振成像(functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)是一种不需要执行特定任务, 通过监测血氧水平依赖(Blood Oxygen Level-Dependent, BOLD)信号来获取脑内自发性神经活动的信号的神经影像学技术, 具有无创、易行、高空间分辨率等优势<sup>[5-6]</sup>。基于fMRI的计算指标, 可以量化脑内不同脑区之间的协同性、网络整合与分离程度, 以及信息传递效率等<sup>[7]</sup>, 为系统揭示VCIND脑功能的异常改变提供有力工具。近年来, 随着神经影像技术的发展, fMRI分析已从单一指标向多维度整合发展。低频振幅(Amplitude of Low-Frequency Fluctuation, ALFF)与功能连接(Functional Connectivity, FC)的联合应用可同时揭示局部脑区活动异常与跨区域协同障碍, 而脑网络拓扑属性分析则能从系统层面阐释全局信息整合效率的下降。这些技术进步不仅能够为VCIND的神经机制研究提供多层次证据, 更为挖掘可用于早期诊断、干预疗效预测的生物标志物奠定了基础。

本文将系统梳理fMRI的相关计算指标, 及其在VCIND患者脑功能研究中的应用, 总结其作为生物标志物的潜在价值, 探讨其在疾病早期识别、进展预测和干预效果评估中的作用, 为VCIND的早期发现和干预提供新的思路和方法。

## 1 fMRI概述

fMRI的核心原理是BOLD效应, 这一效应基于神经元活动与局部血流动力学之间的耦合关系<sup>[8]</sup>。当神经元活动增加时, 局部脑区的代谢需求上升, 氧气和葡萄糖消耗增多。为了满足神经元的代谢需求, 局部的脑血管扩张, 血流量显著增加。这种血流量的增加通常超过代谢需求, 从而使局部血液中氧合血红蛋白浓度上升, 而脱氧血红蛋白浓度下降, 以供应更多氧气。由于脑组织中的氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白对磁场的敏感性不同, 脱氧血红蛋白是顺磁性的, 会引起局部磁场的非均匀性, 从而降低磁共振信号强度; 而氧合血红蛋白是抗磁性的, 不影响磁场均匀性。血液中脱氧血红蛋白浓度的下降会减

少局部磁场的非均匀性, 导致磁共振信号增强, 产生BOLD信号, 从而获取到神经元活动的信息<sup>[9-10]</sup>。

根据实验设计和研究目的, fMRI可分为任务态fMRI和静息态fMRI。任务态fMRI是指被试在扫描过程中执行特定的任务(如语言、记忆、视觉或运动任务), 通过比较任务条件与基线条件下的BOLD信号变化, 研究特定认知功能相关的脑区激活模式<sup>[11]</sup>。1995年, Biswal等<sup>[12]</sup>发现, 即使被试在静息状态下, 脑区之间仍然存在显著的功能相关性, 从而提出静息态fMRI的概念<sup>[13]</sup>。静息态fMRI的出现为研究内在功能网络的特性提供了新视角, 并迅速成为神经科学研究的热点。静息态fMRI指被试处于静息、不执行特定任务的状态, 通过分析脑内不同区域之间的低频波段(0.01~0.1 Hz)BOLD信号的时间序列相关性, 研究脑功能网络的内在特性<sup>[14]</sup>。与任务态fMRI相比, 静息态fMRI具有简便易行、不限于特定任务状态等优点, 因而广泛应用于疾病相关脑功能网络的研究, 尤其适用于老年患者及认知障碍群体, 是无创研究脑功能生物标志的重要技术方法。

## 2 fMRI数据分析方法

fMRI数据分析的核心在于从复杂的BOLD信号中提取反映脑功能特征的量化指标。随着fMRI技术的不断进步, 其研究范围逐步从单一脑区的活动扩展到更复杂的脑网络特性分析, 分析方法主要包括局部脑功能分析、FC分析和复杂网络分析3类。

### 2.1 局部脑功能分析

局部脑功能分析旨在评估大脑某一特定区域的自发活动强度。fMRI通常通过测量特定脑区的时间序列信号波动来研究局部脑功能活动。最常见的分析指标包括ALFF、部分低频振幅(fraction ALFF, fALFF)和局部一致性(Regional Homogeneity, ReHo), 用于评估特定脑区的自发神经活动强度和局部同步性<sup>[15-16]</sup>。ALFF和fALFF是静息态fMRI中常用的局部脑功能指标, 用于衡量特定脑区的神经活动强度<sup>[15]</sup>。ALFF通过计算BOLD信号在0.01~0.1 Hz频段的波动幅度, 直接反映局部神经元群体的自发活动强度。其原理是基于神经元活动与血流动力学的耦合关系, 低频波动幅度越大, 提示该脑区的代谢需求与神经兴奋性越高, 是反映局部脑活动最基础的指标之一<sup>[17]</sup>。fALFF是通过将ALFF值除以全频段信号振幅, 剔除高频噪声(如生理运动伪影)的干扰, 更精准地反映低频波动的相对占比<sup>[18]</sup>。ReHo是评估脑区内相邻体素时间序列一致性的指标, 用于反映脑区的局部功能协调能力。ReHo通过计算某一脑区内部相邻体素BOLD信号时间序列的肯德尔系数,

评估局部神经元活动的同步性。ReHo 值降低提示局部脑区功能协调能力下降<sup>[19]</sup>。局部脑功能分析方法能够在神经科学的研究中揭示脑区的活跃程度及其可能的功能异常。

## 2.2 FC分析

FC分析通过评估不同脑区之间的同步活动或相互耦合关系来研究大脑网络的组织和功能,即相关性,反映不同脑区之间的功能交互和信息传递<sup>[20]</sup>。主要包括种子点FC分析、独立成分分析(Independent Component Analysis, ICA)、动态FC(dynamic FC, dFC)分析等<sup>[21-23]</sup>。种子点FC分析通过选取感兴趣区域(Region Of Interest, ROI)作为种子点,计算其与全脑其他体素之间的时间序列相关性,用于探索脑区间的功能连接变化<sup>[24]</sup>。该方法操作简便,但结果依赖种子点的选择。ICA是一种数据驱动的分析方法,可分离出独立的脑网络成分,分析各网络内和网络间的功能连接模式<sup>[24]</sup>。ICA无需预设感兴趣区,通过数学算法将复杂的BOLD信号分解为多个独立的功能网络成分,可以客观识别脑网络内的连接异常。dFC分析采用滑动窗口技术捕捉FC随时间的动态变化,量化脑网络在不同状态间的转换效率<sup>[25]</sup>。FC分析有助于了解大脑网络的拓扑结构及其在静息状态下的活动模式,尤其是在神经疾病或病理状态下的功能改变。不仅可以揭示大脑不同区域之间的协同作用,还能揭示大脑异常连接的模式,从而为临床疾病的诊断和干预提供潜在的生物标志。

## 2.3 复杂网络分析

复杂网络分析是一种将大脑视为由多个节点(脑区)和边(FC)构成的图论学方法,旨在研究大脑功能网络的组织和拓扑结构<sup>[26]</sup>。运用图论学指标,如小世界属性、全局效率、局部效率、模块化、中心性等<sup>[27]</sup>,可以量化大脑网络的整体结构特征及每个脑区在大脑网络中的重要性。小世界属性衡量网络是否同时具备高效的局部信息处理和高效的全局信息整合。健康脑网络通常表现出典型的小世界特性,该属性受损提示网络整合效率下降<sup>[28]</sup>。全局效率是网络节点间信息传递整体效率的倒数。高全局效率表示信息能在网络中快速、高效地全局传播。局部效率衡量网络对局部故障的鲁棒性,反映节点邻居间信息传递的效率<sup>[29]</sup>。模块化量化网络被划分为内部连接紧密、相互连接稀疏的子模块的程度。高模块化反映功能分化良好。模块化降低提示网络更加“碎片化”,子系统间隔离减弱<sup>[30]</sup>。中心性包括度中心性、介数中心性、特征向量中心性,该指标可以识别网络中具有重要枢纽作用的节点<sup>[31]</sup>。复杂网络分析能够揭示大脑的宏观结构和功能网络的整体特

征,为研究大脑网络的组织方式和网络异常提供重要的理论支持。

## 3 fMRI在VCIND的研究进展

### 3.1 应用局部脑功能分析在VCIND的研究进展

大量研究发现VCIND患者的广泛脑区发生了ALFF/fALFF和ReHo的差异性改变。ALFF的相关研究发现,VCIND患者在默认模式网络(Default Mode Network, DMN)核心区域(如后扣带皮层、内侧前额叶和楔前叶)表现出脑功能的下降,这与患者的记忆和执行功能损害密切相关<sup>[32-33]</sup>。此外,颞叶等语言中枢脑区域的ALFF增强可能反映代偿机制<sup>[34]</sup>。同时,一些研究指出,ALFF变化与简易精神状态检查(Mini-Mental State Examination, MMSE)、蒙特利尔认知评估量表(Montreal Cognitive Assessment scale, MoCA)等认知功能评分显著相关<sup>[35]</sup>。fALFF能更有效地排除噪声干扰,准确地反映脑活动的真实变化,有关fALFF的VCIND研究进一步验证了上述ALFF结果,提示ALFF/fALFF作为VCIND认知损害的潜在生物标志的可能性<sup>[36]</sup>。

ReHo研究同样揭示了VCIND患者局部功能协调性的广泛受损。ReHo的相关研究发现,在DMN、注意网络和执行控制网络(Executive Control Network, ECN)中,VCIND患者的ReHo值显著下降,提示这些脑网络的局部功能整合能力减弱<sup>[35,37]</sup>。一项研究表明,ReHo降低与患者的认知障碍程度显著相关,提示ReHo可以作为预测VCIND进展的早期标志<sup>[38]</sup>。此外,部分研究结合临床干预治疗措施发现,认知训练能够改善患者在部分脑区的ReHo变化,提示ReHo的可塑性和临床干预价值<sup>[39]</sup>。

ALFF/fALFF和ReHo分别从脑活动强度和脑活动一致性两个不同角度揭示了VCIND患者的脑功能异常。这两种方法在某些脑区的异常趋势具有一致性(如DMN区域的功能减弱),但也在如语言网络等脑区表现出差异性。结合分析这两种局部脑功能指标能够提供更全面的脑功能信息,为理解VCIND患者大脑自发活动的变化和神经生理学机制提供了有力工具,进而为早期诊断和干预提供生物标志。

### 3.2 应用FC分析在VCIND的研究进展

基于FC的分析方法,VCIND引起功能脑网络连接机制的广泛损伤和网络属性的改变,累及到多个脑网络。基于种子点FC的研究发现,VCIND患者的DMN和额顶网络(Fronto-Parietal Network, FPN)的核心区域与其他脑区的功能连接显著降低。这种连接异常与患者的记忆力减退、执行功能下降密切相关<sup>[40-41]</sup>。跨网络FC的研究表明,结合临床干预治疗,

VCIND患者的脑功能网络之间的连接增强,网络内的FC降低,表明干预措施可以导致患者脑功能的耦合和解耦的信息转换,从而影响信息整合,提示FC作为临床研究的生物标志物的价值<sup>[42]</sup>。

ICA研究进一步证实了VCIND患者大尺度固有网络的功能连接异常。ICA的相关研究显示,VCIND患者在DMN、注意网络(Saliency Network, SN)等多个脑网络的连接强度发生改变<sup>[43-44]</sup>。其中,DMN内的连接强度减弱与记忆损伤相关,SN的功能下降可能影响执行功能和情绪调节<sup>[45-46]</sup>。通过ICA分析,研究发现VCIND患者在DMN与SN之间的网络交互功能异常,提示注意力分配和信息处理能力受损<sup>[44]</sup>。

传统的静态FC分析假设脑功能连接在整个扫描过程中保持稳定,而dFC分析则强调FC随时间的动态变化特性<sup>[27]</sup>。目前国内外尚无有关dFC研究,主要研究集中在VCI中,尚无VCIND的相关研究。VCI患者的dFC模式发生异常,表现为从高效整合状态向低效分离状态的转移增加<sup>[47]</sup>。这种异常可能反映了大脑在处理任务或刺激时的灵活性下降。且部分研究表明VCI患者的DMN和FPN的动态功能连接灵活性显著降低,提示这些网络在认知调控中的适应性受损<sup>[48]</sup>。结合VCI的研究结果,可以推测dFC有望作为VCIND认知功能变化的潜在预测标志。

FC分析能够揭示VCIND患者脑区间的异常连接模式,为理解其认知障碍的神经生物学基础提供重要的信息。通过FC的研究,能够帮助识别与认知衰退相关的大脑网络,为VCIND的临床诊断提供潜在的神经标志。

### 3.3 应用复杂网络分析在VCIND的研究进展

应用复杂网络分析方法,为VCIND脑功能机制的研究提供了网络连接的高阶结构信息<sup>[49]</sup>。小世界属性反映了脑网络的高效信息整合能力。相关研究表明,VCIND患者的脑功能网络小世界属性降低,表明患者脑功能网络的平衡性受到损害,影响了局部处理与全局整合的协调<sup>[50]</sup>。全局效率是衡量整个脑网络信息传递能力的指标,研究发现,VCIND患者的全局效率显著降低,表明患者脑功能在全脑范围内的远距离连接受损。局部效率是局部网络的连接效率,相关研究发现VCIND患者的局部效率能够维持在和正常人相似的水平,提示局部脑区连接能力发生的代偿性结果维持了局部效率的稳定<sup>[51]</sup>。模块化是指脑网络中不同模块间功能分工的程度。有研究表明VCIND患者脑功能网络的模块化结构受到破坏,表现为模块划分的完整性下降,网络间的分离性减弱,且这种改变与认知控制和记忆加工能力下降相关<sup>[52]</sup>。

复杂网络分析通过提供更为全面的视角,揭示了VCIND患者的大脑网络拓扑结构的异常。这些网络指标能够有效地描述大脑信息处理和传递的效率,为VCIND的早期诊断和治疗提供新的方向。

## 4 问题与挑战

尽管脑fMRI在VCIND研究中具有重要的应用价值,能够揭示VCIND患者脑功能网络的变化,然而其应用仍面临许多问题和挑战。这些问题主要集中在数据质量、分析方法的复杂性、临床转化等方面。

第一,样本异质性与个体差异。患者在认知功能表现、病理背景及临床进展方面存在差异。这种样本的异质性给fMRI数据分析带来了挑战。为了解决这一问题,研究者们通常通过增加样本量和多中心研究,使用标准化的评估工具和筛选标准,有效减少样本异质性带来的影响<sup>[53]</sup>。对群体进行分层分析和个体化分析,也有助于揭示不同因素对VCIND患者脑功能的影响,提高结果的可靠性<sup>[54]</sup>。

第二,fMRI数据的噪声与伪影。fMRI扫描过程中,头部运动、呼吸、心跳等生理性信号可能引入噪声,影响数据的质量。现有的头动校正和噪声去除方法对fMRI的噪声处理有所改善,但如何进一步消除这些伪影和干扰依然是一个挑战。

第三,FC分析方法的多样性与复杂性。FC分析是fMRI研究的关键方法之一,但它涉及多个方法,如种子区相关性分析、独立成分分析和图论方法等。这些方法的选择会影响结果的解释,且不同的分析方法往往得出不同的结论。方法学的标准化和多方法、多尺度的综合分析,可以帮助提高结果的准确性和稳定性,提高不同研究结果之间的可比性。

第四,临床转化与实用性不足。尽管fMRI揭示了VCIND患者脑功能网络的变化,但如何将这些结果转化为临床诊断和干预工具仍是一个挑战。目前,fMRI技术主要停留在研究阶段,缺乏广泛的临床应用标准和系统化的流程。如何使fMRI的研究成果能够切实地应用于VCIND的早期诊断、临床评估及个体化治疗,仍然是未来研究的一个重要方向。

## 5 总结与展望

VCIND作为VCI和VaD的高危状态,其早期诊断和干预对于延缓疾病进展具有重要意义。基于fMRI的研究为揭示VCIND患者的脑功能异常提供重要的理论依据和技术手段。通过fMRI的局部脑功能活动分析、FC分析以及复杂网络分析,研究者发现VCIND患者脑网络整合与分离能力的异常特征,并探索了其认知功能损害之间的关联,为VCIND的

早期诊断提供了潜在的神经生物学标志。

尽管现阶段的研究仍然面临着样本异质性、方法学标准化不足及临床转化应用有限等挑战,但随着成像技术的不断进步和分析方法的优化,基于fMRI的研究将为VCIND的神经机制探索提供更深入的理解,并为个体化诊疗方案的开发奠定科学基础。

## 【参考文献】

- [1] Le Couteur DG, Wahl D, Naismith SL. Comorbidity and vascular cognitive impairment-no dementia (VCI-ND)[J]. *Age Ageing*, 2017, 46(5): 705-707.
- [2] Stephan BC, Matthews FE, Khaw KT, et al. Beyond mild cognitive impairment: vascular cognitive impairment, no dementia (VCIND)[J]. *Alzheimers Res Ther*, 2009, 1(1): 4.
- [3] Jia JP, Zhou AH, Wei CB, et al. The prevalence of mild cognitive impairment and its etiological subtypes in elderly Chinese[J]. *Alzheimers Dement*, 2014, 10(4): 439-447.
- [4] Rockwood K, Wentzel C, Hachinski V, et al. Prevalence and outcomes of vascular cognitive impairment. Vascular Cognitive Impairment Investigators of the Canadian Study of Health and Aging [J]. *Neurology*, 2000, 54(2): 447-451.
- [5] Raimondo L, Oliveira LA, Heij J, et al. Advances in resting state fMRI acquisitions for functional connectomics[J]. *Neuroimage*, 2021, 243: 118503.
- [6] Barkhof F, Haller S, Rombouts S. Resting-state functional MR imaging: a new window to the brain[J]. *Radiology*, 2014, 272(1): 29-49.
- [7] Allen EA, Damaraju E, Plis SM, et al. Tracking whole-brain connectivity dynamics in the resting state[J]. *Cereb Cortex*, 2014, 24(3): 663-676.
- [8] Glover GH. Overview of functional magnetic resonance imaging[J]. *Neurosurg Clin N Am*, 2011, 22(2): 133-139.
- [9] Logothetis NK. The underpinnings of the BOLD functional magnetic resonance imaging signal[J]. *J Neurosci*, 2003, 23(10): 3963-3971.
- [10] Buxton RB. The physics of functional magnetic resonance imaging (fMRI)[J]. *Rep Prog Phys*, 2013, 76(9): 096601.
- [11] Crow AJD, Thomas A, Rao Y, et al. Task-based functional magnetic resonance imaging prediction of postsurgical cognitive outcomes in temporal lobe epilepsy: a systematic review, meta-analysis, and new data[J]. *Epilepsia*, 2023, 64(2): 266-283.
- [12] Biswal B, Yetkin FZ, Haughton VM, et al. Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain using echo-planar MRI[J]. *Magn Reson Med*, 1995, 34(4): 537-541.
- [13] Hu J, Hua Y, Li CQ, et al. Resting-State functional magnetic resonance imaging reveals the effects of rTMS on neural activity and brain connectivity after experimental stroke[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2024, 30(11): e70104.
- [14] Motlaghian SM, Belger A, Bustillo JR, et al. Nonlinear functional network connectivity in resting functional magnetic resonance imaging data[J]. *Hum Brain Mapp*, 2022, 43(15): 4556-4566.
- [15] 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.
- [16] Zang YF, Jiang TZ, Lu YL, et al. Regional homogeneity approach to fMRI data analysis[J]. *Neuroimage*, 2004, 22(1): 394-400.
- [17] Liu XN, Wang SQ, Zhang XQ, et al. Abnormal amplitude of low-frequency fluctuations of intrinsic brain activity in Alzheimer's disease [J]. *J Alzheimers Dis*, 2014, 40(2): 387-397.
- [18] Li YF, Zhao WM, Li XY, et al. Abnormal amplitude of low-frequency fluctuations associated with sleep efficiency in major depressive disorder[J]. *J Psychiatr Res*, 2024, 173: 41-47.
- [19] Wang TY, Li SM, Jiang GH, et al. Regional homogeneity changes in patients with primary insomnia[J]. *Eur Radiol*, 2016, 26(5): 1292-1300.
- [20] van den Heuvel MP, Hulshoff Pol HE. Exploring the brain network: a review on resting-state fMRI functional connectivity [J]. *Eur Neuropsychopharmacol*, 2010, 20(8): 519-534.
- [21] Sun FT, Miller LM, D'Esposito M. Measuring interregional functional connectivity using coherence and partial coherence analyses of fMRI data[J]. *Neuroimage*, 2004, 21(2): 647-658.
- [22] McKeown MJ, Sejnowski TJ. Independent component analysis of fMRI data: examining the assumptions[J]. *Hum Brain Mapp*, 1998, 6(5/6): 368-372.
- [23] Hutchison RM, Womelsdorf T, Allen EA, et al. Dynamic functional connectivity: promise, issues, and interpretations[J]. *Neuroimage*, 2013, 80: 360-378.
- [24] Joel SE, Caffo BS, van Zijl PCM, et al. On the relationship between seed-based and ICA-based measures of functional connectivity[J]. *Magn Reson Med*, 2011, 66(3): 644-657.
- [25] Treves IN, Kucyi AK, Tierney AO, et al. Dynamic functional connectivity signatures of focused attention on the breath in adolescents [J]. *Cereb Cortex*, 2025, 35(2): bhaf024.
- [26] Baghernezhad S, Daliri MR. Age-related changes in human brain functional connectivity using graph theory and machine learning techniques in resting-state fMRI data[J]. *GeroScience*, 2024, 46(5): 5303-5320.
- [27] Jia CY, Long QF, Ernst T, et al. Independent component and graph theory analyses reveal normalized brain networks on resting-state functional MRI after working memory training in people with HIV[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2023, 57(5): 1552-1564.
- [28] Cheng S, Tong HHY, Zhang CQ, et al. Disorganization of small-world functional brain networks in first-episode, treatment-naïve adolescents with major depressive disorder[J]. *Brain Behav*, 2025, 15(2): e70323.
- [29] Callow DD, Smith JC. Physical fitness, cognition, and structural network efficiency of brain connections across the lifespan [J]. *Neuropsychologia*, 2023, 182: 108527.
- [30] Gallen CL, D'Esposito M. Brain modularity: a biomarker of intervention-related plasticity[J]. *Trends Cogn Sci*, 2019, 23(4): 293-304.
- [31] Royer J, Bernhardt BC, Larivière S, et al. Epilepsy and brain network hubs[J]. *Epilepsia*, 2022, 63(3): 537-550.
- [32] Lei Y, Li YJ, Ni W, et al. Spontaneous brain activity in adult patients with moyamoya disease: a resting-state fMRI study[J]. *Brain Res*, 2014, 1546: 27-33.
- [33] 郭会映, 孙芳, 倪玲, 等. 非痴呆型血管性认知功能障碍的结构及静息态功能磁共振研究[J]. *临床放射学杂志*, 2014, 33(5): 657-661.
- [34] 林海龙, 薛蕴菁, 康正武, 等. 静息态fMRI在无痴呆型血管性认知障碍基线脑活动变化中的初步研究[J]. *临床放射学杂志*, 2013, 32(8): 1070-1074.
- [35] Lin HL, Xue YJ, Kang ZW, et al. Amplitude of low-frequency fluctuation in patients with VCIND based on resting-state functional MRI [J]. *Journal of Clinical Radiology*, 2013, 32(8): 1070-1074.
- [36] Wei ZY, Yue JH, Li XL, et al. A mini-review on functional magnetic resonance imaging on brain structure of vascular cognitive impairment [J]. *Front Neurol*, 2023, 14: 1249147.
- [37] Hu LY, Chen JX, Li XB, et al. Disruptive and complementary effects of depression symptoms on spontaneous brain activity in the subcortical vascular mild cognitive impairment[J]. *Front Aging Neurosci*, 2024, 16: 1338179.
- [38] Diciotti S, Orsolini S, Salvadori E, et al. Resting state fMRI regional homogeneity correlates with cognition measures in subcortical vascular cognitive impairment[J]. *J Neurol Sci*, 2017, 373: 1-6.
- [39] Huang D, Guo YL, Guan XY, et al. Recent advances in arterial spin labeling perfusion MRI in patients with vascular cognitive impairment [J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2023, 43(2): 173-184.
- [40] Lin RZ, Dai YL, Xu JF, et al. Electroacupuncture improves vascular cognitive impairment no dementia: a randomized clinical trial[J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2024, 33(8): 107788.
- [41] Sun YW, Qin LD, Zhou Y, et al. Abnormal functional connectivity in patients with vascular cognitive impairment, no dementia: a resting-state functional magnetic resonance imaging study[J]. *Behav Brain Res*, 2011, 223(2): 388-394.
- [42] Lin CJ, Tu PC, Chern CM, et al. Connectivity features for identifying cognitive impairment in presymptomatic carotid stenosis[J]. *PLoS One*, 2014, 9(1): e85441.
- [43] Li QG, Xing Y, Zhu ZD, et al. Effects of computerized cognitive

- training on functional brain networks in patients with vascular cognitive impairment and no dementia[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2024, 30(6): e14779.
- [43] Ding H, Xu Y, Li X, et al. Aberrant default mode network in patients with vascular cognitive impairment, no dementia[J]. *J Clin Exp Med*, 2018, 11: 1984-1993.
- [44] Shi QL, Chen HY, Jia Q, et al. Altered granger causal connectivity of resting-state neural networks in patients with leukoaraiosis-associated cognitive impairment-a cross-sectional study[J]. *Front Neurol*, 2020, 11: 457.
- [45] Menon V. 20 years of the default mode network: a review and synthesis [J]. *Neuron*, 2023, 111(16): 2469-2487.
- [46] Deming P, Cook CJ, Meyerand ME, et al. Impaired salience network switching in psychopathy[J]. *Behav Brain Res*, 2023, 452: 114570.
- [47] Fu ZN, Caprihan A, Chen JY, et al. Altered static and dynamic functional network connectivity in Alzheimer's disease and subcortical ischemic vascular disease: shared and specific brain connectivity abnormalities[J]. *Hum Brain Mapp*, 2019, 40(11): 3203-3221.
- [48] Mu RH, Yang P, Qin XY, et al. Aberrant baseline brain activity and disrupted functional connectivity in patients with vascular cognitive impairment due to cerebral small vessel disease[J]. *Front Neurol*, 2024, 15: 1421283.
- [49] Bullmore E, Sporns O. Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2009, 10(3): 186-198.
- [50] Lei Y, Song BS, Chen L, et al. Reconfigured functional network dynamics in adult moyamoya disease: a resting-state fMRI study[J]. *Brain Imaging Behav*, 2020, 14(3): 715-727.
- [51] Wang JF, Chen Y, Liang HZ, et al. The role of disturbed small-world networks in patients with white matter lesions and cognitive impairment revealed by resting state function magnetic resonance images (rs-fMRI)[J]. *Med Sci Monit*, 2019, 25: 341-356.
- [52] Zhang QH, Liu X, Gao SL, et al. Multimodal magnetic resonance imaging on brain structure and function changes in vascular cognitive impairment without dementia[J]. *Front Aging Neurosci*, 2023, 15: 1278390.
- [53] Kayvanrad A, Arnott SR, Churchill N, et al. Resting state fMRI scanner instabilities revealed by longitudinal phantom scans in a multi-center study[J]. *Neuroimage*, 2021, 237: 118197.
- [54] Dubois J, Adolphs R. Building a science of individual differences from fMRI[J]. *Trends Cogn Sci*, 2016, 20(6): 425-443.

(编辑:薛泽玲)