

# 基于 rs-fMRI 的脑默认模式网络研究进展

吕静, 张仪, 韩英妹, 李一杰, 胡赛琴, 王丰

**【摘要】** 默认模式网络(DMN)是目前已知人脑静息态(即非执行任务时)起主要作用的脑区集合。先前的研究证实了 DMN 是一组由空间分离但功能连接密切相关的脑区组成。这也是随着静息态功能磁共振成像(rs-fMRI)技术的发展,对人脑复杂网络研究的重要突破。目前,基于 rs-fMRI 的 DMN 研究在多个领域已达到一定的深度及广度。此外,传统中医针灸在 DMN 的研究中特色鲜明,体现了针灸神经影像交叉学科的独特性。本文对目前 rs-fMRI 技术在 DMN 的研究进展进行综述,旨在为神经影像学领域脑网络功能的研究提供借鉴。

**【关键词】** 默认模式网络;静息态;功能磁共振成像;功能连接;脑网络

**【中图分类号】** R445.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2024)02-0272-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2024.02.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



默认模式网络(default-mode network, DMN)概念是由圣路易斯华盛顿大学(Washington University in St Louis)Raichle 教授<sup>[1]</sup>首次定义的。1997 年 Shulman 等<sup>[2]</sup>首次发现人类大脑皮层中有一组区域在执行任务时其活性持续降低,而在安静休息时其活性明显增强,最重要的发现是它们在各种任务中均表现为持续低活性。基于这一重要发现,研究者们对此产生了极大的兴趣,开启了对 DMN 的研究之路。笔者分别对 Shulman 等<sup>[2]</sup>在 1997 年发表的文章(Common Blood Flow Changes across Visual Tasks: II. Decreases in Cerebral Cortex)及 Raichle 教授<sup>[1]</sup>2015 年发表的文章(The Brain's Default Mode Network)进行了文献相关检索,发现基于这两篇文献衍生了系列 DMN 研究文献,突出了 DMN 在人脑网络功能研究中的重要地位和前沿性(图 1~2)。

获取 DMN 的方法最初是利用 PET 技术,发展至今,研究者们大多利用脑电图(electroencephalography, EEG)技术、脑磁图技术(magnetoencephalograph, EMG)及无辐射无创性的静息态功能磁共振成像(rs-fMRI)技术为主要研究工具。多模态研究能够对各种检查方法取长补短,是未来探索脑功能网络的重要方式。目前,在神经影像领域,研究的热点有向静息态转变的趋势<sup>[3]</sup>,本综述重点关注在 rs-fMRI 技术下展开的对 DMN 的研究。基于人脑网络系统的复杂性,对 DMN 的研究也一直不断扩展,本文将从 5 个方面进

行概述。

## DMN 的 rs-fMRI 研究机制

### 1. 传统研究机制

传统的 MRI 技术在不断探索中逐步更新,开发了血氧水平依赖功能性磁共振成像(BOLD-fMRI)技术。包括任务态(task-based)和静息态两种模式。相较于经典的 task-fMRI,rs-fMRI 揭示了不同的静息状态网络、网络特定的功能及不同的空间属性<sup>[5]</sup>。以下简述 3 种基于 rs-fMRI 的最常用于 DMN 的功能连接(function connectivity, FC)分析方法。

基于种子点的分析(seed-based analysis)方法:在 DMN 研究中利用先前经验一般把后扣带回皮质(PCC)设为种子点或感兴趣区域(ROI),通过该种子点与全脑中所有其他体素的线性相关性进行分析<sup>[6]</sup>。Lang 等<sup>[7]</sup>应用该方法做了帕金森病(Parkinson's disease, PD)患者轻度行为障碍(mild behavioral impairment, MBI)的皮质体连通性研究,发现较高的 MBI 评分与左侧尾状头与背侧前扣带皮层和左侧额中回的较低连接之间存在关系。较高的 MBI 认知评分还与右尾状头与前扣带皮层、楔前叶和左侧缘上回的连接性降低以及与左海马体和右小脑半球的连接性增加有关。

独立成分分析(independent component analysis, ICA)法:ICA 是利用数学算法将全脑体素的信号分解成空间和时间上相互独立的成分<sup>[8]</sup>。Venkataraman 等<sup>[9]</sup>使用 ICA 从 fMRI 数据中提取了包括 DMN 在内的功能网络,研究脑功能网络与艾滋病毒感染患者睡眠质量的相关性,发现 DMN 等网络与匹兹堡睡眠质量指数(Pittsburghsleepqualityindex, PSQI)合并后

**作者单位:** 150040 黑龙江哈尔滨,黑龙江中医药大学研究生院(吕静、张仪、韩英妹、李一杰、胡赛琴);150040 黑龙江哈尔滨,黑龙江中医药大学附属第一医院 CT 磁共振科(王丰)

**作者简介:** 吕静(1990—),女,黑龙江肇东人,硕士研究生,住院医师,主要从事腧穴特异性影像学研究工作。

**通讯作者:** 王丰, E-mail: wfwzmy123@163.com

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(81973930);黑龙江中医药大学研究生创新科研项目(2023yjsxcx012)

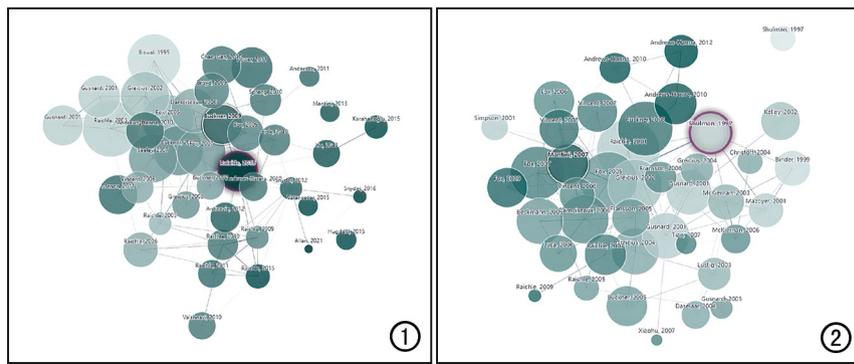


图1 检索文献 The Brain's Default Mode<sup>[1]</sup>的关系网图。图2 检索文献 NetworkCommon Blood Flow Changes across Visual Tasks: II, Decreases in Cerebral Cortex<sup>[2]</sup>的关系网图(均检索于2022年11月13日,获得1995—2021年的相关文献信息)。

显示出更高的拟合度,表明在睡眠不佳时 DMN 等脑功能网络会发生改变,并可通过 PSQI 评分来衡量。

基于图论理论(graph theory)的分析方法:图论理论是一种建立人脑内部复杂网络功能数学模型的分析方法,主要研究节点和边的关系<sup>[10]</sup>。通过对大脑连接进行全面的图论分析,对 DMN 网络的构建及网络交互进行探索<sup>[11]</sup>。Xu 等<sup>[12]</sup>使用图论理论研究主观认知下降(subjective cognitive decline, SCD)的脑功能连接,选择的共识连接和判别性节点图指标主要分布在前额叶和额叶皮质以及皮质下区域,对应 DMN 和额顶叶控制网络(frontal parietal control network, FPN)、节点效率和节点最短路径在所选节点图指标中表现出最显著的判别能力。

## 2. 联合中医针刺研究机制

针刺是中医的一种治疗手段,以人体穴位为载体。腧穴是人体穴位的总称,位于人的体表并与经络脏腑相连接。腧穴可划分为十四经穴、奇穴和阿是穴。针刺不同穴位功效作用各不相同,这就产生了经穴效应特异性<sup>[13]</sup>,也是针刺科研的重点。随着 rs-fMRI 技术的成熟,很多学者利用针刺腧穴引起脑效应发生改变的机制,包括对脑网络的调节,对不同疾病或健康人进行一系列的研究,均取得了一定的成果。有学者运用电针刺三阴交穴,对女性经前期综合征(premenstrual syndrome, PMS)患者进行治疗,发现针刺可以对患者异常 DMN 进行调节,从而起到治疗作用<sup>[14]</sup>。也有学者研究发现针刺对功能性便秘(functional constipation, FC)患者 DMN 的功能连接也有显著的调节作用,特别是角回和楔前叶的功能连接,认为其可能是针刺治疗 FC 起效的部分中枢机制<sup>[15]</sup>。目前,中医针刺联合研究的广度及深度较传统研究有一定差距,日后仍需要大力发展,为临床及科研提供中医思维。

## DMN 结构及功能

DMN 被喻为一种“暗”能量。既往已有大量研究证实在任务执行中该网络间的信息传递较微弱,不起主要作用;然而在无任务状态下,即人在静息状态下,如闭眼休息、安静思考或走神时,DMN 网络间信息的传递显著提高,DMN 此时是起主要作用的<sup>[16]</sup>,这就是“暗”的体现。DMN 实际上是一组功能连接密切,以解剖位置定义的大脑区域集合。对其解剖结构的认识随着研究的深入而不断完善,最早发现在任务状态下,活动减少的脑区几乎总是包括后扣带回(posterior cingulate, PCC)和相邻的楔前叶(precuneus)<sup>[17]</sup>。在此基础之上又有研究进一步证实了该网络是一个皮质网络,内侧前额叶皮质(medial prefrontal cortex, mPFC),包括腹内侧前额叶皮质(vmPFC)及背内侧前额叶皮质(dmPFC)也是该网络的重要组成部分<sup>[18]</sup>。在后续的相关研究中有学者在后扣带回皮质(posterior cingulate cortex, PCC)中勾画 ROI,利用 fMRI 的功能连接分析方法将与 PCC 之间具有高度时间相关性的区域认为是构成 DMN 的脑区集合(图 3),这些脑区主要包括前扣带回皮质(anterior cingulate cortex, ACC)、压后皮质(retrosplenial cortex, Rsc)、内侧颞叶(medial temporal lobe, MTL)以及两侧顶下小叶,并且与海马(hippocampus)的关系也较密切<sup>[19]</sup>。在众多脑网络中,DMN 扮演得角色是:人无需在某方面提供注意的条件下,大脑自发的进行着内在有关自我信息、思考他人、自传记忆、未来模拟以及对空间场景识别模拟等任务。有研究者认为这是一种内在意识支持下的活跃<sup>[20]</sup>。

对以往研究成果进行总结发现,从 DMN 内部系统进行功能划分是科学有效的。DMN 可分为两部分:功能中心(hubs)和子系统(subsections)。有研究证实了 PCC、楔前叶、mPFC 及角回(angular gyrus)在功能中心中占核心地位<sup>[21]</sup>。DMN 根据解剖位置不同,功能也不尽相同。有学者对 DMN 内部进行了划分,进一步揭示了不同区域的功能分工,笔者总结了相关内容,详见表 1。总的来说,DMN 的功能主要以从事自我参照的心理活动、不受干扰下的思想活动以及对外界环境的监测活动等有关,以维持身体内部的稳定状态。综合现有的研究结果发现在人类大脑网络中 DMN 的功能从未关闭,始终相应地保持增强或减弱。

表 1 DMN 内部各区域功能

脑区	Brodmann 分区	功能
后扣带回	23、31	主要负责疼痛及记忆重现事件 <sup>[22]</sup>
楔前叶	7	涉及视觉、感觉运动和注意力的信息 <sup>[23]</sup>
腹内侧面额叶皮层	10	处理与自我信息有关的决策,包括记忆及未来 <sup>[24]</sup>
角回	39	连接注意力、感知力、对时间空间的认知行动及部分回忆 <sup>[25]</sup>
背内侧面额叶皮层	8、9	涉及思考他人的行为及想法等社会导向问题 <sup>[24]</sup>
侧面颞叶皮层	21	对社会语言的含义和知识进行搜索 <sup>[26]</sup>
前颞极	38	对抽象事物的搜索、理解等,如自然界 <sup>[26]</sup>
海马	—	负责记忆,包括过去及新的记忆以及对未来的想象 <sup>[27]</sup>
海马旁回	—	负责对外部的空间以及不熟悉的场景进行识别和模拟 <sup>[27]</sup>
顶下小叶	39、40	整合自身躯体感觉、听觉及视觉的信息 <sup>[28]</sup>

注:—表示无相应的 Brodmann 分区。

## DMN 与其它脑网络的关联

DMN 是静息下的默认模式网络,也有学者因其与任务正激活网络(task-positive network, TPN)恰恰相反,将其命名为“任务负激活网络”(task-negative network, TNN)。但 2013 年, Buckner<sup>[29]</sup>对命名中的“默认”和“负任务”提出了质疑,认为 DMN 不仅仅只是静息下的激活增强,在其他一些特定的、目标指向的任务中也有一定程度的正激活,比如对过去的回忆任务或是对将要发生的事加以想象的任务以及对社会工作记忆、心理理论等任务。这一结论打破了对 DMN 的传统认知,也开启了对 DMN 相关脑网络的进一步研究。Fox 等<sup>[30]</sup>提出 DMN 与外部注意系统(external attention system, EAS)存在反相关的竞争关系。EAS 主要包括背侧注意网络(dorsal attention network, DAN)和额顶叶控制网络(frontal parietal control network, FPN)。主要涉及脑区有:背外侧前额叶和顶叶皮层、背侧前扣带回、前岛叶(额盖区域),均和外部注意力、认知控制功能相关<sup>[31]</sup>。DMN 被证实与 DAN 两者之间一个激活时,另一个网络会受到抑制,体现两者的竞争关系<sup>[32]</sup>。有研究发现, FPN 与 DMN 并不始终保持拮抗关系, FPN 可以根据不同任务灵活的与 DMN、DAN 耦合,作为两个网络之间的皮质中介,用来支持目标向导的认知过程<sup>[33]</sup>。DMN 同大脑其它网络之间的正常协同,是许多认知过程重要的神经基础。Spreng 等<sup>[34]</sup>,基于解剖上 FPN 位于 DMN 与 DAN 的交叉区域,进一步证实了 FPN 在功能上是二者的动态平衡中介。这种不同网络之间竞争抑制及耦合支持的关系,为大脑复杂信息传递提供了更多的便利及效率。Mooneyham 等<sup>[35]</sup>在研究走神的脑网络功能连接时发现, DMN 与执行控制网络(execution control network, ECN)之间存在功能连接正相关,这一发现表明了不同网络之间可以相互合作,存在一定的交互作用。还有研究指出突显网络(salience network, SN)在多个感觉和认知领域的显著性加工以及

DMN 和 ECN 之间的转换中起着至关重要的作用<sup>[36]</sup>。最近,有研究者提出了情绪和执行控制交互的动态脑网络模型的假说,其中包括了 SN 与 ECN、DMN、感知觉网络之间的动态交互,共同完成情绪和认知控制信息的加工和资源转化<sup>[37]</sup>。这有待于今后进一步的证实,也为复杂脑网络关系的研究提供了新的方向。

## DMN 与神经精神疾病的相关性

近年来, DMN 对疾病状态下的脑功能研究起到了重要作用,在神经精神疾病的研究方向一直是 rs-fMRI 研究的热点之一<sup>[38]</sup>。此外,针刺在各种神经精神疾病中起到的预防及治疗作用越来越受到国内外认可,也激起了国内外学者的研究热情。病理状态下 DMN 的主要异常表现:(1)认知任务执行中, DMN 正常抑制障碍,对“注意”形成干扰;(2)DMN 与 TPN 正常的拮抗功能改变;(3)DMN 正常功能连接性改变,导其整体性破坏;(4)DMN 正常活动模式的破坏。阿尔兹海默病(Alzheimer's Disease, AD)是一种神经退行性疾病, Yildirim 等<sup>[39]</sup>在研究 AD 患者中 DMN 的功能连接时发现在患病过程中 DMN 连接性是进行性损害的, DMN 子系统在 AD 的临床前和前驱期显示出不同的连接模式,并且 DMN 连接的损害可能与其他网络中的不同连接模式有关,表明与 DMN 相关的功能连接变化可能是 AD 的潜在生物标志物。精神分裂症(Schizophrenia)也是 DMN 相关疾病的研究热点之一。Jafri 等<sup>[40]</sup>研究精神分裂症患者静息脑网络之间的功能连接,发现 DMN 与其他静息脑网络连接增强,可能与注意力分散、幻觉体验有关; DMN 与 TPN 负性连接性增强,这可能与认知活动激烈的矛盾冲突有关,该研究还发现 ACC 的抑制减弱会导致注意控制能力减弱。Yu 等<sup>[41]</sup>对伴或不伴幻听觉的精神分裂症患者的神经影像学改变进行研究,使用全局功能连接密度(gFCD)分析以评估 DMN 的功能连接变化,发现与不伴有幻听觉的对照组比较,患有幻听觉的精神分裂症患者 DMN 中并在后扣带和背内侧面额叶

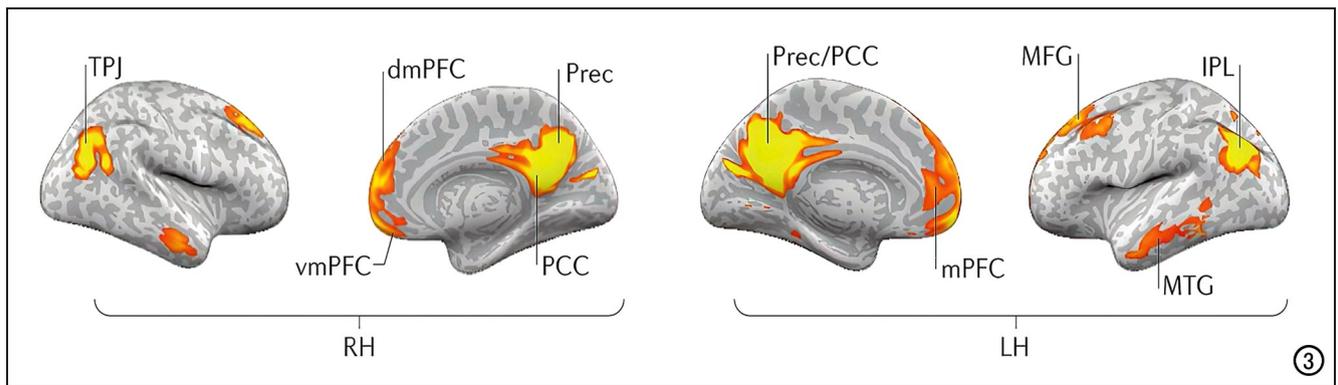


图 3 引自 Yeshurun 等 2021 年发表的文献(The default mode network: where the idiosyncratic self meets the shared social world)中部分功能连接空间分布在左右大脑半球的 DMN 区域图<sup>[15]</sup>。注: TPJ=颞顶联合区、dmPFC=背内侧前额叶皮层、vmPFC=腹内侧前额叶皮层、Prec/PCC=楔前叶/后扣带回、MFG=额中回、MTG=颞中回、IPL=顶下小叶。

皮层以及右顶叶、左枕叶、和左颞叶的功能连接有明显差异。在一项较为新颖的关于抑郁症(depression)的研究中,Kitzbichler 等<sup>[42]</sup>研究了炎症与抑郁症患者 DMN 改变的相关性,发现 C 反应蛋白与楔前叶、后扣带皮层和内侧前额叶皮层的质子密度(proton density, PD)显著相关;与楔前叶、后扣带回、内侧前额叶皮层与海马体之间的功能连接也显著相关,表明 DMN 微观结构和连接的影响可能介导对抑郁症的炎症作用。Pereira 等<sup>[43]</sup>研究了高功能自闭症(autism spectrum disorders, ASD)皮质结构和 DMN 功能连接的差异,发现 ASD 患者在几个大脑区域(包括扣带回,颞叶和杏仁核)的灰质减少,皮质厚度减少和皮质表面积增大,PCC 与 DMN 执行控制部分区域之间的连接性降低,前内侧前额叶皮层与感觉运动部分区域之间的功能连接增加。该研究表明这些结构和连接异常的结合可能有助于解释高功能 ASD 的一些核心行为。近年来针刺治疗偏头痛的研究已趋于成熟。贾菁楠等<sup>[44]</sup>运用基于“根结”理论辨经选穴的方法对偏头痛患者进行针刺治疗,得出与治疗前相比治疗后偏头痛患者 DMN 内的左侧海马旁回(PHC)与前内侧前额叶皮层(amPFC)、背内侧前额叶皮层(dmPFC)、颞旁回(LTC)功能连接较治疗前减弱,针刺治疗后偏头痛发作频率及 VAS 评分等均降低,证实了针刺对偏头痛的治疗作用及针刺对 DMN 的调节作用。总的来说 DMN 在神经精神疾病中随着研究的深入,疾病谱也在不断的扩展,其本质也在不断的深入探索。

### 多学科融合研究

目前 DMN 的研究领域涉及多种学科。以认知神经学科为首的科研带动了其它相关学科的融入,包括心理学、电生理学、病理生理学、基因组学及针灸学等

等。王茹彬<sup>[45]</sup>研究 DMN 在认知神经科学中的作用中提出,认知神经学和认知心理学的研究仅仅只是揭示了部分的脑活动,而脑内大量的能量消耗主要来自于功能显著的大脑内在的自发活动,这种发现可能会孕育着神经科学的重大发现。在电生理学方面,现在利用同步脑电—功能磁共振融合技术<sup>[46]</sup>,来结合各自时间分辨率和空间分辨率的优势,在探索 DMN 中显然更有优势。Cantou 等<sup>[47]</sup>讨论了通过使用 fMRI 和 EEG 研究神经的可塑性,提出了包括 DMN 在内的静息脑网络的变化性。病理生理学是许多疾病的研究基础,如与 HIV 感染相关的脑网络功能的异常等研究,对其在认知功能的诊断上意义重大<sup>[48]</sup>。然而,从基因的角度研究 DMN 可能是未来做科研的一个新方向,李志鹏<sup>[49]</sup>在基于 ELP4 基因研究儿童良性癫痫综合征(benign childhood epilepsy with centrotemporal spikes, BECTS)时发现,DMN 中 BECTS 组的高风险型组较低风险型组丘脑与双侧颞中回和 PCC 的功能连接增强,提示高风险型 BECTS 较低风险型丘脑与 DMN 的功能连接增强,这可能与 BECTS 发作时的精神和心理异常有关。针灸学是中医的一门特色学科,有着浓厚中国传统医学的色彩,与现代医学的交叉融合,又使其更具特色。针灸神经影像学便是新时代产生的新兴交叉学科。在该科研领域备受关注。一项 meta 分析发现 DMN 内的大脑区域与针刺响应区域在很大程度上重叠<sup>[50]</sup>,这表明了 DMN 受针刺的调节。Li 等<sup>[51]</sup>研究针刺慢性腰疼患者,结果显示与健康对照组比较,腰痛组中 DMN 内部功能连接减少,而经过针刺治疗后,患者基本可以恢复到正常 DMN 的功能连接水平。综上所述,多学科融合对全面探索 DMN 的病理生理机制等具有重要意义。

## 小结与展望

对 DMN 不同深度及广度的探索,是人类研究复杂灵活脑网络工程的一部分。基于 rs-fMRI 的研究免去了复杂任务刺激导致的脑活动差异<sup>[52]</sup>,具有对患者的状态要求较低,简单易行、信息稳定、更接近生理状态及可重复性高的显著优势<sup>[53]</sup>,已成为脑功能网络研究的有力工具。现今基于 rs-fMRI 的研究热点已经不只局限于患者与健康人群之间 DMN 的差异,同时也关注于一类疾病下不同亚型患者之间的脑功能连接差异性<sup>[54]</sup>。未来 rs-fMRI 结合针灸学等多学科交叉融合研究定会为中医诊疗及中医国际地位的提升提供强有力的客观化依据,使得中医针灸成为人类脑网络工程研究中不可或缺的一部分。

## 参考文献:

- [1] Raichle ME. The brain's default mode network[J]. *Annu Rev Neurosci*, 2015, 38: 433-447.
- [2] Shulman GL, Fiez JA, Corbetta M, et al. Common blood flow changes across visual tasks: II. Decreases in cerebral cortex[J]. *J Cogn Neurosci*, 1997, 9(5): 648-663.
- [3] Raimondo L, Oliveira LAF, Heij J, et al. Advances in resting state fMRI acquisitions for functional connectomics [J/OL]. *NeuroImage*, 2021, 243: e118503 [2021 Nov]. DOI: 10.1016/j.neuroimage.
- [4] Ogawa S, Lee TM, Kay AR, et al. Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1990, 87(24): 9868-9672.
- [5] Smitha KA, Akhil Raja K, Arun KM, et al. Resting state fMRI: A review on methods in resting state connectivity analysis and resting state networks[J]. *Neuroradiol J*, 2017, 30(4): 305-317.
- [6] Rashid B, Dev SI, Esterman M, et al. Aberrant patterns of default-mode network functional connectivity associated with metabolic syndrome: A resting-state study[J]. *Brain Behav*, 2019, 9(12): e01333. DOI: 10.1002/brb3.1333. Epub 2019 Sep 30.
- [7] Lang S, Yoon EJ, Kibreb M, et al. Mild behavioral impairment in Parkinson's disease is associated with altered corticostriatal connectivity[J/OL]. *Neuroimage Clin*, 2020, 26: e102252 [2020 Mar 27]. DOI: 10.1016/j.nicl.2020.102252.
- [8] Kumar U, Arya A, Agarwal V. Neural network connectivity in ADHD children: an independent component and functional connectivity analysis of resting state fMRI data[J]. *Brain Imaging Behav*, 2021, 15(1): 157-165.
- [9] Venkataraman A, Zhuang Y, Marsella J, et al. Functional MRI correlates of sleep quality in HIV [J/OL]. *Nat Sci Sleep*, 2021, 13: e291-e301 [2021 Mar 2]. DOI: 10.2147/NSS.S291544.
- [10] Sporns O. Graph theory methods: applications in brain networks [J]. *Dialogues Clin Neurosci*, 2018, 20(2): 111-121.
- [11] Chen L, Chen Y, Zheng H, et al. Changes in the topological organization of the default mode network in autism spectrum disorder[J]. *Brain Imaging Behav*, 2021, 15(2): 1058-1067.
- [12] Xu X, Li W, Tao M, et al. Effective and accurate diagnosis of subjective cognitive decline based on functional connection and graph theory view[J/OL]. *Front Neurosci*, 2020, 14: e577887 [2020 Sep 29]. DOI: 10.3389/fnins.2020.577887.
- [13] 尹涛, 滕雨可, 曾芳. 针灸神经影像学研究现状与展望[J]. *生命科学*, 2022, 34(5): 517-524.
- [14] 廖海, 刘慧梅, 陈文福. 针刺治疗调节女大学生经前期综合征默认网络及代谢的静息态 fMRI 研究[D]. 广西医科大学附属肿瘤医院, 2021.
- [15] 侯丽恺. 基于独立成分分析探讨针刺对功能性便秘患者默认网络功能连接的影响[D]. 成都中医药大学, 2020.
- [16] Smallwood J, Bernhardt BC, Leech R, et al. The default mode network in cognition: a topographical perspective[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2021, 22(8): 503-513.
- [17] Andreasen NC, O'Leary DS, Cizadlo T, et al. Remembering the past: two facets of episodic memory explored with positron emission tomography[J]. *Am J Psychiatr*, 1995, 152(11): 1576-1585.
- [18] Gusnard DA, Akbudak E, Shulman GL, et al. Medial prefrontal cortex and self-referential mental activity: relation to a default mode of brain function[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2001, 98(7): 4259-4264.
- [19] Buckner RL, Andrews-Hanna JR, Schacter DL. The brain's default network; anatomy, function, and relevance to disease [J/OL]. *Ann N Y Acad Sci*, 2008, 1124: e1-e38 [2008 Mar; 1124]. DOI: 10.1196/annals.1440.011.
- [20] Vanhaudenhuyse A, Demertzi A, Schabus M, et al. Two distinct neuronal networks mediate the awareness of environment and of self[J]. *J Cogn Neurosci*, 2011, 23(3): 570-578.
- [21] You Y, Bai L, Dai R, et al. Altered hub configurations within default mode network following acupuncture at ST36: a multimodal investigation combining fMRI and MEG [J/OL]. *PloS one*, 2013, 8(5): e64509 [2013 May 17]. DOI: 10.1371/journal.pone.0064509.
- [22] Nielsen FA, Balslev D, Hansen LK. Mining the posterior cingulate; segregation between memory and pain components[J]. *NeuroImage*, 2005, 27(3): 520-532.
- [23] Cavanna AE, Trimble MR. The precuneus: a review of its functional anatomy and behavioural correlates[J]. *Brain*, 2006, 129(Pt 3): 564-583.
- [24] Zhang Q, Weber MA, Narayanan NS. Medial prefrontal cortex and the temporal control of action[J]. *Int Rev Neurobiol*, 2021, 158: 421-441. [2020 Dec 15]. DOI: 10.1016/bs.irn.2020.11.004.
- [25] Seghier ML. The angular gyrus: multiple functions and multiple subdivisions[J]. *Neuroscientist*, 2013, 19(1): 43-61.
- [26] Clark RE. Current topics regarding the function of the medial temporal lobe memory system [J]. *Curr Top Behav Neurosci*, 2018, 37: 13-42. DOI: 10.1007/7854\_2017\_481.
- [27] Zeidman P, Maguire EA. Anterior hippocampus: the anatomy of perception, imagination and episodic memory[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2016, 17(3): 173-182.
- [28] Igelström KM, Graziano MSA. The inferior parietal lobule and temporoparietal junction: a network perspective [J/OL]. *Neuropsychologia*, 2017, 105: e70-e83 [2017 Jan 3]. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2017.01.001.
- [29] Buckner RL. The brain's default network; origins and implications for the study of psychosis [J]. *Dialogues Clin Neurosci*, 2013, 15(3): 351-358.

- [30] Fox MD, Snyder AZ, Vincent JL, et al. The human brain is intrinsically organized into dynamic, anticorrelated functional networks [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102(27): 9673-9678.
- [31] Fornito A, Harrison BJ, Zalesky A, et al. Competitive and cooperative dynamics of large-scale brain functional networks supporting recollection [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109(31): 12788-12793.
- [32] Hampson M, Driesen N, Roth JK, et al. Functional connectivity between task-positive and task-negative brain areas and its relation to working memory performance [J]. *Magn Reson Imaging*, 2010, 28(8): 1051-1057.
- [33] Spreng RN, Stevens WD, Chamberlain JP, et al. Default network activity, coupled with the frontoparietal control network, supports goal-directed cognition [J]. *NeuroImage*, 2010, 53(1): 303-317.
- [34] Spreng RN, Sepulcre J, Turner GR, et al. Intrinsic architecture underlying the relations among the default, dorsal attention, and frontoparietal control networks of the human brain [J]. *J Cogn Neurosci*, 2013, 25(1): 74-86.
- [35] Mooneyham BW, Mrazek MD, Mrazek AJ, et al. States of mind: characterizing the neural bases of focus and mind-wandering through dynamic functional connectivity [J]. *J Cogn Neurosci*, 2017, 29(3): 495-506.
- [36] Liu B, Wen L, Ran Q, et al. Dysregulation within the salience network and default mode network in hyperthyroid patients: a follow-up resting-state functional MRI study [J]. *Brain Imaging Behav*, 2020, 14(1): 30-41.
- [37] 罗跃嘉. 焦虑与执行功能的脑网络与教育转化 [J]. *教育家*, 2022, (26): 60-62.
- [38] 肖慧思, 李嘉慧, 潘智林, 等. 基于动态脑功能连接分析的神经精神疾病研究进展 [J]. *医疗卫生装备*, 2020, 41(3): 92-97, 108.
- [39] Yildirim E, Soncu Büyükişcan E. Default mode network connectivity in Alzheimers disease [J]. *Turk Psikiyatri Derg*, 2019, 30(4): 279-286.
- [40] Jafri MJ, Pearlson GD, Stevens M, et al. A method for functional network connectivity among spatially independent resting-state components in schizophrenia [J]. *NeuroImage*, 2008, 39(4): 1666-1681.
- [41] Yu H, Ying W, Li G, et al. Exploring concomitant neuroimaging and genetic alterations in patients with and patients without auditory verbal hallucinations: a pilot study and mini review [J/OL]. *J Int Med Res*, 2020, 48(7): e0300060519884856. DOI: 10.1177/0300060519884856.
- [42] Kitzbichler MG, Aruldass AR, Barker GJ, et al. Peripheral inflammation is associated with micro-structural and functional connectivity changes in depression-related brain networks [J]. *Mol Psychiatry*, 2021, 26(12): 7346-7354.
- [43] Pereira AM, Campos BM, Coan AC, et al. Differences in cortical Structure and functional MRI connectivity in high functioning autism [J/OL]. *Front Neurol*, 2018, 9: e539 [2018 Jul 10]. DOI: 10.3389/fneur.2018.00539.
- [44] 贾菁楠, 闫超群, 齐晓环, 等. 基于功能磁共振初探针刺对偏头痛患者默认模式网络的影响 [J]. *中国针灸*, 2021, 41(10): 1074-1078.
- [45] 王如彬. 大脑暗能量与默认模式网络对认知神经科学带来的机遇和挑战 [C]. 第三届全国神经动力学学术会议, 中国甘肃敦煌, 2016.
- [46] 王凯, 严瀚莹, 邹凌. 基于实时约束独立成分分析方法的核磁脑电信号去噪研究 [J]. *生物医学工程学杂志*, 2019, 36(1): 7-15, 23.
- [47] Cantou P, Platel H, Desgranges B, et al. How motor, cognitive and musical expertise shapes the brain: Focus on fMRI and EEG resting-state functional connectivity [J/OL]. *J Chem Neuroanat*, 2018, 89: e60-e68 [2017 Sep 6]. DOI: 10.1016/j.jchemneu.2017.08.003.
- [48] 赵晶, 李宏军, 员达, 等. HIV 相关脑痴呆 BOLD fMRI 运动功能成像 [J]. *放射学实践*, 2011, 26(10): 1028-1031.
- [49] 李志鹏. 基于 ELP4 基因多态性的 BECTS 的多模态影像学研究 [D]. 广东: 南方医科大学, 2017.
- [50] Chae Y, Chang DS, Lee SH, et al. Inserting needles into the body: a meta-analysis of brain activity associated with acupuncture needle stimulation [J]. *J Pain*, 2013, 14(3): 215-222.
- [51] Li J, Zhang JH, Yi T, et al. Acupuncture treatment of chronic low back pain reverses an abnormal brain default mode network in correlation with clinical pain relief [J]. *Acupunct Med*, 2014, 32(2): 102-108.
- [52] Zuo XN, Di Martino A, Kelly C, et al. The oscillating brain: complex and reliable [J]. *NeuroImage*, 2010, 49(2): 1432-1445.
- [53] 刘佳惠, 王东岩. 静息态功能磁共振成像在针刺脑效应研究中的应用进展 [J]. *上海针灸杂志*, 2021, 40(11): 1390-1394.
- [54] 谢非, 龚晓亮, 陆言, 等. 默认模式网络在精神疾病诊断中的研究进展 [J]. *中国医学物理学杂志*, 2022, 39(6): 695-700.

(收稿日期: 2023-01-28 修回日期: 2023-05-07)