

- [23] Mayerhoefer ME, Materka A, Langs G, et al. Introduction to radiomics[J]. J Nucl Med, 2020, 61(4): 488-495.
- [24] Kocak B, Baessler B, Cuocolo R, et al. Trends and statistics of artificial intelligence and radiomics research in Radiology, Nuclear Medicine, and Medical Imaging: bibliometric analysis[J]. Eur Radiol, 2023, 33(11): 7542-7555.
- [25] 邱云飞, 王月洋. 结合多分支纹理特征提取和注意力机制的肝脏肿瘤自动分割方法[J]. 信息与控制, 2024, 53(5): 673-688.
- [26] Leonhardi J, Bailis N, Lerche M, et al. Computed tomography embolus texture analysis as a prognostic marker of acute pulmonary embolism[J]. Angiology, 2023, 74(5): 461-471.
- [27] Surov A, Zimmermann S, Hinnerichs M, et al. Radiomics parameters of epicardial adipose tissue predict mortality in acute pulmonary embolism[J]. Respir Res, 2024, 25(1): 356.
- [28] 朱庆焯, 文娣娣, 郑敏文. 射血分数降低的心力衰竭患者心外膜脂肪组织与左心室重构和心肌纤维化的相关性分析[J]. 中国循环杂志, 2025, 40(3): 227-233.
- [29] Berman DS, Lin A. Artificial intelligence for assessment of epicardial adipose tissue on coronary CT angiography[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2023, 16(6): 817-819.
- [30] 陈杨, 吕滨. 基于冠状动脉 CTA 影像组学识别高危斑块的研究进展[J]. 放射学实践, 2024, 39(12): 1679-1682.
- [31] Meyer HJ, Wienke A, Surov A. Computed tomography-defined body composition as prognostic markers for unfavourable outcomes and in-hospital mortality in coronavirus disease 2019[J]. J Cachexia Sarcopenia Muscle, 2022, 13(1): 159-168.
- [32] Shahzadi I, Zwanenburg A, Frohwein LJ, et al. Short-term mortality prediction in acute pulmonary embolism: radiomics values of skeletal muscle and intramuscular adipose tissue[J]. J Cachexia Sarcopenia Muscle, 2024, 15(4): 1430-1440.

(收稿日期: 2024-12-23 修回日期: 2025-06-05)

## · 综述 ·

## 基于 fMRI 的前庭性偏头痛功能脑网络的研究方法

倪政欣, 花孙雨, 余蓝, 王奕超

**【摘要】** 前庭性偏头痛(VM)是一种临床常见的偏头痛类型,无症状时诊断困难。随着静息态功能磁共振成像(rs-fMRI)的广泛运用,人们发现了与前庭通路、疼痛通路等相关的重要脑区及结构,为揭示 VM 的病理生理机制提供了重要依据。本综述通过归纳总结目前相关研究,探讨其研究方法及其 VM 脑网络特征机制,旨在体现脑网络分析技术的发展与研究对 VM 早期诊断、疾病进展预测、评估疗效有着重要的作用,能为 VM 的诊断和治疗提供更精准的线索,为进一步揭示 VM 及其神经机制提供重要线索。

**【关键词】** 磁共振成像;偏头痛;前庭;神经网络**【中图分类号】** R445.2;R255.93;R322.8 **【文献标志码】** A**【文章编号】** 1000-0313(2026)02-0231-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2026.02.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



前庭性偏头痛(vestibular migraine, VM)是一种临床常见的偏头痛类型,常发生于女性,发病年龄在30~40岁之间,但也可以影响其他年龄段。据估计,VM患病率为1%~2.7%<sup>[1-2]</sup>。临床表现以前庭症状为主,眩晕可能发生在偏头痛发作之前、期间、之后,甚至独立发生,可能持续数秒至数小时或数天。VM患者除眩晕症状外,还伴随着头痛、对声音过敏、对光敏感等常见症状,同时还可能出现耳鸣、耳胀等听觉症状,急性发作期间还可能会出现自发性或姿势性眼球震颤。在VM患者处于无症状发作的间隔期,通过前

庭测试对疾病诊断的帮助有限。目前VM的治疗方法通常借鉴了偏头痛的治疗方法,包括避免诱发因素、缓解压力,以及通过药物治疗急性期发作或预防发作等<sup>[3-5]</sup>。目前临床诊断是基于国际头痛疾病分类(the third edition of the international classification of headache disorders, ICHD-3)的标准确定<sup>[6]</sup>。

VM的发病可能涉及神经元兴奋性异常、血管异常、化学介质失调、基因遗传因素以及大脑网络连接的异常等,这些因素可能相互作用导致VM患者独特的临床表现,同时这些机制与无先兆偏头痛所表现出的认知功能受损有一定相似性<sup>[7-9]</sup>。近年来,功能脑网络的研究逐渐成为认知神经科学和神经影像学的重要方向。所谓功能脑网络指的是在静息或任务状态下,空间上分布但在时间上协同活动的一组脑区集合。通过

作者单位:215009 江苏,南京中医药大学附属苏州市中医医院放射科

作者简介:倪政欣(1986-),男,福建建宁人,硕士,副主任医师,主要从事神经影像诊断工作。

通讯作者:王奕超, E-mail: 113208376@qq.com

静息态功能磁共振成像(resting-state functional magnetic resonance imaging, rs-fMRI), 研究者能够揭示这些脑区之间的功能连接特性, 从而识别出一系列具有特定功能的脑网络<sup>[10-12]</sup>。自 Biswal 等于 1995 年首次提出静息态功能连接以来, 脑网络研究迅速发展, 形成了多个经典的静息态功能网络, 包括默认模式网络、中央执行网络和突显网络等。这些网络在信息处理、感知觉整合、注意力调控、情绪与认知功能中发挥重要作用。深入了解这些关键网络的结构与功能, 为揭示 VM 的病理生理机制提供了重要依据<sup>[13-14]</sup>。因此, 笔者通过本篇综述, 归纳总结目前关于 VM 的相关研究, 探讨其研究方法和 VM 脑网络特征的相关机制。

### 基于种子点的分析(Seed-based analysis)

基于种子点的分析是一种由 Biswal 等于 1995 年引入的静息态网络识别技术, 属于模型驱动的方法。该方法首先选定一个感兴趣的脑区或种子点作为研究的感兴趣区域(region of interest, ROI), 然后测量该区域与大脑其他体素间的线性相关性, 从而构建出基于种子的功能连接(functional connectivity, FC)图。例如, 折霞等<sup>[15]</sup>研究人员采用体素形态学分析(voxel-based morphometry, VBM)来确定大脑灰质体积减少区域作为 ROI, 进一步分析发现在 VM 患者中, 左侧初级躯体感觉皮层(S1)/顶下小叶(inferior parietal lobule, IPL)与左侧顶岛前庭皮质(parieto-insular vestibular cortex, PIVC)间的 FC 显著增加。同样, Chen 等<sup>[16]</sup>选取丘脑作为 ROI, 发现丘脑与多个脑区之间的 FC 发生变化, 尤其是丘脑与疼痛和前庭通路的 FC 降低, 而丘脑与视觉通路的 FC 增强。

值得注意的是基于种子点的分析方法并非用于构建完整的大脑功能网络结构, 而是聚焦于某一预设脑区(即种子点)与全脑其他区域之间的功能连接模式。它主要用于探讨特定脑区在网络中的功能角色, 例如该区域在网络内或网络间交互中的功能改变。因此, 该方法在研究某一感兴趣区域的网络参与特征方面具有优势, 但无法全面反映大脑整体网络的拓扑结构, 容易忽视那些与预设种子点无直接联系却在疾病过程中起重要作用的脑区<sup>[17-19]</sup>。因此, 为了更全面地理解大脑的功能网络, 研究者们开始采用不同的脑区划分方法如基于解剖学或功能学的分割方法。这些方法包括 AAL90、HOA112、Dosenbach160、Power264 等图谱, 它们能够更细致地将大脑划分为不同的区域进行深入分析, 覆盖大脑的全部区域。

### 图论分析(Graph theory)

图论源自网络科学, 是一种涉及数学模型的脑网

络研究方法。图论分析中研究的焦点是脑网络中的节点(Node)和边(Edge)构成的复杂拓扑结构。节点通常是通过解剖学或功能学的大脑区域划分来定义, 使用诸如 AAL90、HOA112、Dosenbach160、Power264 等标准化脑区分割模板。这些模板利用标准化空间坐标(x, y, z)进行精准定位, 越是细致的脑区划分, 其得到的结果越精确, 但相应的计算时间也更长。如前所述, rs-fMRI 研究中不同脑区间的功能连接是通过计算时间序列之间的皮尔逊相关系数来度量的。皮尔逊相关系数的取值范围在-1~1 之间, 不同的值代表着不同程度的相关性。以这些不同脑区间的相关系数构成的矩阵, 通过阈值化处理(确定网络的稀疏程度), 进而构建出代表不同脑区之间的功能连接(即脑网络的边)<sup>[20]</sup>。

图论分析为我们提供了一种直观的工具, 以可视化和深入理解大脑网络的复杂结构, 并能对其拓扑特性进行精确度量<sup>[21]</sup>。通过计算诸如节点的度、中心性指标(如度中心性、介数中心性、特征向量中心性等)、聚类系数、特征路径长度等指标, 我们不仅能评估脑网络的全局特性, 也能揭示其局部特征。这其中就包括了小世界网络的特性: 特征路径长度、聚类系数、归一化特征路径长度、归一化聚类系数和小世界程度等<sup>[22]</sup>。富人俱乐部则是指那些重要节点之间形成的紧密、强力的联系, 这些富人节点通常构成了网络的结构核心和功能枢纽。研究富人俱乐部就是找寻网络中那些较少部分却占有较大部分边(连接)的富人节点。为了测试脑网络的鲁棒性, 研究者们也会模拟节点或连接的移除(如随机或有针对性的攻击), 观察这些变化对网络功能和效率的影响<sup>[23]</sup>。

Liu 等<sup>[24]</sup>在研究女性偏头痛患者的全脑网络拓扑属性时发现, 偏头痛患者的脑网络中出现了 3 个失调的模块化社区网络。这些社区网络包括参与疼痛处理的前额叶皮层、前扣带回皮层、丘脑区, 参与感觉运动调节的颞岛叶皮层, 以及参与视觉投射的枕叶皮层。这一发现表明偏头痛患者的脑网络改变不仅局限于局部的异常, 而且波及到了整个脑的拓扑结构。

尽管图论分析可系统量化脑网络的拓扑特征, 但其结果对脑区分割方案和网络构建参数(如相关阈值、稀疏程度)高度敏感, 且不同研究采用的标准不一, 导致研究者之间的可重复性和结果一致性存在挑战。此外, 图论指标本身的生物学意义仍在探索中, 部分指标解释性较差, 限制其临床应用。

### 独立成分分析(ICA)

独立成分分析(independent component analysis, ICA)是一种从盲源分离技术衍生出的数据驱动的信

号分析方法<sup>[25]</sup>。与基于种子点或图论分析等基于先验区域的方法不同,ICA不依赖于预先定义的兴趣区域。其目标是将大脑中混合在一起的信号源分解为独立的成分,每个成分代表大脑中某个特定的功能性网络或活动模式<sup>[26-27]</sup>。实际操作中ICA通常采用最小描述长度(minimum description length,MDL)来估计独立分量(independent component,IC)的数量,并使用infomax算法进行群体级的独立分量分析。为了确保结果的可靠性与稳定性,通常在ICASSO中进行数百次重复计算,然后利用组ICA逆向重构算法,获得每个受试者的独立成分时间序列和空间分布。在剔除生理噪声、运动信号及成像伪影的影响后,通过目测方法挑选出空间相关系数较高的独立成分进行后续分析。具体的挑选标准包括:空间分布的峰值坐标主要位于灰质中;与血管、白质、脑室和边缘区域的重叠极少;时间序列以低频信号为主;时间序列的动态范围较高。挑选出的独立成分可以根据既往研究进行归类,划分出不同类型的静息态子网络<sup>[28-29]</sup>。

基于ICA的子网络间功能连接(functional network connectivity,FNC)通过组间比较,有助于揭示不同群体之间的功能网络差异。例如,Li等<sup>[30]</sup>在研究VM患者时,发现感觉运动网络中双侧内侧扣带回和副扣带回之间存在显著的功能连接改变。这种改变可能导致超敏反应,表现为患者的畏光或畏声症状。同时,听觉网络和默认模式网络、突显网络之间的功能连接变化,可能增强了患者对前庭感觉处理的敏感性。Zhang等<sup>[31]</sup>在比较VM患者与无先兆偏头痛(migraine without aura,MwoA)患者时,发现VM患者的背侧注意网络与后部内侧视觉网络、感觉运动网络以及侧视觉网络间的功能连接减少,而左右前顶叶网络间的功能连接增加。这些研究结果表明ICA不仅能够揭示大脑中不同网络间复杂的功能连接模式,还能帮助我们更深入地了解特定神经疾病背后的神经网络改变。

ICA方法虽然无需预设感兴趣区,能自动分离多个静息态网络,但其结果受模型中独立成分个数设定及算法选择影响较大。此外,独立成分的识别与分类过程依赖主观判断,可能带来人为偏差。此外,ICA未必适用于样本量较小或群体异质性较大的研究场景。

### 动态功能连接(dFC)

动态功能连接(dynamic functional connectivity,dFC)专注于探索静息状态下大脑网络的动态特性,而非环境刺激或任务状态下的功能连接。rs-fMRI获取的数据反映了大脑在静息状态下的活动,检查时长通常在6~10 min不等。通过分析整个检查时间序列,

我们能够捕捉到脑网络功能连接的动态变化,从而加深对正常认知功能及脑部疾病导致的网络变化的理解。

#### 1. 滑动窗口(sliding window correlation,SWC)

SWC是动态功能连接分析中一种简单而常用的技术。SWC通过选择一个特定大小的时间窗口,计算窗口内两个信号之间的相关系数。随后,这个窗口会按固定的偏移量滑动,整个过程在整个扫描时长内重复进行。通过对成对的兴趣区域进行SWC分析,研究者们通常利用诸如k-means算法的聚类方法,来确定扫描期间出现的不同“状态”及其转换时间<sup>[32-34]</sup>。这种无监督学习方法需要较大的数据量支持,在小样本数据分析中,k-means算法与SWC技术联合使用,能够研究疾病脑网络的时变性<sup>[35-36]</sup>。应用滑动窗口技术可以揭示多个时间窗口内的时变性网络连接,从而展现大脑网络的多种状态<sup>[37-38]</sup>。此技术还可以与图论分析或ICA结合使用,帮助识别大脑在不同任务或认知状态下,或与疾病相关的动态网络模式<sup>[39]</sup>。例如,Chen等运用滑动窗口技术和聚类分析方法对ICA得出的子网络进行动态功能网络分析,发现VM患者的外侧视觉网络-腹侧注意网络、视觉网络-默认模式网络、视觉网络-左额顶叶网络的FNC增加,而腹侧注意网络-听觉网络的FNC减少。此外,与健康对照组(healthy controls,HC)相比,VM患者的平均停留时间和状态2下的分数窗口增加,平均停留时间与头痛冲击测试-6项(headache impact test-6,HIT-6)得分呈正相关,分数窗口与头晕障碍量表(dizziness handicap inventory,DHI)得分呈正相关<sup>[40]</sup>。然而,SWC的结果强烈依赖于窗口长度的选择,使用统一的窗口长度可能无法捕捉脑网络的真实动态配置。

#### 2. 动态独立成分分析(dynamic independent component analyses,dyn-ICA)

动态独立成分分析是另一种评估动态功能连接的方法。与传统的ICA不同,dyn-ICA专注于处理个体在静息态下的时间序列数据,以提取不同的独立非高斯随机变量,即时间成分(circuit)<sup>[41]</sup>。每个时间成分被假设对应于一种特定的脑状态,这些状态可能包括思考、浅睡眠、情绪、认知状态,甚至可能是疾病本身的潜在病理状态,反映了不同子网络间以及网络内的连接模式<sup>[42-43]</sup>。通过分离出的独立时间成分和空间分布,dyn-ICA允许研究人员探索大脑功能网络的动态变化。这种方法有助于识别随时间变化的大脑活动模式,从而为理解大脑功能和网络的动态变化提供深入的洞察。dyn-ICA可揭示大脑网络随时间变化的状态转换,适用于研究动态脑机制。但其在分离时间成分时对数据质量和算法稳定性要求较高,且时间维度分

解的生理意义仍需进一步验证。此外,与静态分析相比,其分析复杂度更高、解释难度也相应提升。笔者在针对 VM 组的 dyn-ICA 研究中,分离出 20 个时间成分,并分析了它们的频率和变异性。结果表明 VM 组在 circuit06 和 circuit16 上的频率显著高于 HC 和 MwoA 组,这部分时间成分主要反映了突显网络和突显-额顶网络的异常活跃。此外,这些时间因子中的空间连接特征与临床表现存在相关性,例如突显网络中右前额叶皮层与左侧缘上回的连接强度与疼痛感知的负相关性。

### 关于前庭通路的脑网络研究进展

近年来,前庭系统在前庭性偏头痛(vestibular migraine, VM)发病机制中的作用受到越来越多的关注。功能神经影像学研究表明前庭通路的功能异常与脑网络的重构密切相关。传统研究多采用前庭热刺激、电刺激或冷水灌耳等方式激活前庭系统,结合 PET 或 fMRI 技术观察相关脑区的代谢和激活模式<sup>[44]</sup>。这些研究为揭示前庭通路关键节点奠定了基础,也为脑网络层面的分析提供了结构和功能参照。

在 Russo 等<sup>[45]</sup>对 VM 患者进行的热刺激研究中发现双侧岛叶皮质、丘脑、小脑和脑干区域显著激活,提示脑干前庭神经核与疼痛传入系统可能协同参与 VM 的发生。此外,Shin 等<sup>[46]</sup>利用<sup>18</sup>F-FDG PET 观察到 VM 发作期患者颞顶岛区及双侧丘脑代谢水平升高,反映出前庭-丘脑-皮层通路被高度激活。这一结论在后续冷水灌耳实验中亦得到印证:VM 患者在前庭刺激后表现出丘脑背内侧和外侧核显著激活,提示前庭通路与疼痛通路之间可能存在交互调控<sup>[47]</sup>。

随着脑网络分析方法的发展,越来越多研究开始尝试从网络层面解析前庭系统的功能异常。例如,图论分析中,前额叶、丘脑、小脑等脑区常作为高参与度节点出现在模块划分结构中,反映出其在前庭-多感觉整合过程中的枢纽地位。ICA 方法揭示了 PIVC、岛后前庭皮质(posterior insular cortex, PIC)等前庭皮层在默认模式网络、突显网络与感知觉网络之间存在连接强度变化,提示前庭输入可能重塑大脑多个网络间的耦合模式。动态功能连接分析则显示 VM 患者在视觉网络、腹侧注意网络与突显网络之间的连接具有更高变异性,这些网络的核心节点如 PIVC、顶下小叶第 2 区(parietal operculum area 2, OP2)被认为是人类前庭皮层的关键区域,可能在不同脑状态之间调节前庭感知与疼痛感知的交互。

Leong 等<sup>[48]</sup>利用光遗传学 fMRI 技术划分出 4 条前庭通路:包括前庭-丘脑-皮层通路、前庭-中脑-海马通路、前庭-小脑通路与前庭-动眼反射通路,均可作为

静息态脑网络研究中的结构参考。Frank 与 Ibitoye 等<sup>[49-51]</sup>则通过 fMRI 与解剖结合方式进一步明确 PIVC、PIC、OP2+ 等区域在前庭皮层中的边界与功能。这些区域在 VM 相关脑网络研究中频繁出现,构成前庭信息向上传递并调控感知与注意的关键节点。

综上所述,前庭通路相关脑区不仅在局部激活水平上发生改变,其在多个静息态功能网络中的连接方式也存在动态重构。这提示我们前庭功能障碍可能通过影响脑网络的整体拓扑结构,参与 VM 的临床症状产生与维持。未来研究可进一步结合结构磁共振、功能成像及动态网络分析,深入探讨这些关键区域之间的网络角色与交互机制,以期更准确揭示前庭性偏头痛的神经机制。

### 小结与展望

本文综述了几种主要的神经影像学方法在前庭性偏头痛研究中的应用。基于种子点的分析侧重于探究特定脑区的功能连接;图论分析聚焦于网络的拓扑结构;独立成分分析旨在将大脑数据分解为独立成分,以揭示原始的大脑默认网络;而动态功能连接分析关注于脑网络随时间的变化及不同状态之间的演化。这些方法各自具有独特的侧重点,能够相互补充,从而从多个角度深入探索大脑网络的复杂性。不同的功能连接分析方法各具优势,应结合具体研究问题加以选择。若关注特定脑区(如前庭皮层、丘脑等)与全脑的连接特征,基于种子点的分析更为适用;若研究目标为探索全脑网络拓扑特征,则应选择图论分析;若希望识别多个静息态网络并观察其间交互,ICA 是合适的无监督方法;而若聚焦于网络连接的时变性或状态转换,则需采用 SWC 或 dyn-ICA 等动态分析方法。实际研究中多种方法的联合应用也逐渐成为趋势,有助于更全面地理解疾病的脑功能异常特征。

随着脑网络分析技术的不断进步,我们已经开始揭示 VM 患者中一些关键的结构和通路,如前庭皮质中枢和前庭-中脑-丘脑-皮层通路等,这些发现与 VM 的病理生理学机制密切相关。研究还表明 VM 患者的内部前庭通路与多个感觉通路(如痛觉、听觉等)的信号处理存在失调,这可能与前庭症状的发生直接相关。

然而,目前基于 rs-fMRI 的 VM 脑功能网络研究仍存在诸多挑战。首先,多数研究样本量较小,研究设计存在差异,缺乏统一的标准化流程;其次,不同研究所采用的分析方法及参数设定(如脑区分割模板、连接阈值)不尽一致,影响结果的可重复性与可比性。此外,统计方法方面也存在差异,如多重比较校正策略和网络构建阈值标准不统一,限制了结果的推广应用。

通过本文梳理发现,目前针对 VM 的脑网络研究仍处于初步阶段,尤其在前庭系统功能网络重构的机制理解上尚不深入。未来研究可从以下方面进一步深入:①加强多中心合作,扩大样本规模;②联合 rs-fMRI、结构磁共振成像(structural magnetic resonance imaging, sMRI)、弥散磁共振成像(diffusion magnetic resonance imaging, dMRI)等多模态影像数据,以更全面揭示结构-功能耦合特征;③结合机器学习或深度学习技术,从大数据中挖掘诊断标志物;④推动纵向随访研究,明确脑网络指标的动态演变过程及其与疾病进展、治疗反应之间的关系<sup>[52-54]</sup>。功能脑网络分析技术凭借其对于复杂脑功能整合模式的刻画能力,在阐明 VM 神经机制、发现新型生物标志物及推动精准诊断方面具有广阔前景。其与结构成像技术的融合将为识别 VM 的核心异常通路提供更强的神经影像学依据。

#### 参考文献:

- [1] Formeister E J, Rizk H G, Kohn M A, et al. The epidemiology of vestibular migraine: a population-based survey study[J]. *Otology & Neurology*, 2018, 39(8): 1037-1044.
- [2] Lempert T, Neuhauser H. Epidemiology of vertigo, migraine and vestibular migraine[J]. *J Neurology*, 2009, 256(3): 333-338.
- [3] Shi S, Wang D, Ren T, et al. Auditory manifestations of vestibular migraine[J]. *Frontiers in Neurology*, 2022, 13: 944001.
- [4] Stolte B, Holle D, Naegel S, et al. Vestibular migraine[J]. *Cephalalgia*, 2015, 35(3): 262-270.
- [5] 中国卒中学会卒中与眩晕分会, 中国医师协会神经内科医师分会眩晕专业委员会. 前庭性偏头痛评估与管理中国多学科专家共识[J]. *中华内科*, 2019, 58(2): 133-140.
- [6] Ettiln DA. The international classification of headache disorders (beta version)[J]. *Cephalalgia*, 2013, 33(9): 629-808.
- [7] Lempert T, Olesen J, Furman J, et al. Vestibular migraine: diagnostic criteria (update)[J]. *J Vestibular Research*, 2022, 32(1): 1-6.
- [8] Espinosa-Sanchez JM, Lopez-Escamez JA. New insights into pathophysiology of vestibular migraine[J]. *Frontiers in Neurology*, 2015, 6: 12.
- [9] 王理想, 张道培, 宋艳坤, 等. 前庭性偏头痛与睡眠障碍共病机制的研究进展[J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2022, 36(2): 149-152. DOI: 10.13201/j.issn.2096-7993.2022.02.016.
- [10] 李美琴, 李晓舒, 朱婉秋, 等. 无先兆偏头痛脑灰质结构改变及认知功能下降的相关性研究[J]. *放射学实践*, 2020, 35(3): 329-333.
- [11] 吕静, 张仪, 韩英妹, 等. 基于 rs-fMRI 的脑默认模式网络研究进展[J]. *放射学实践*, 2024, 39(2): 272-277.
- [12] 朱翠婷, 鞠奕, 赵性泉. 基于磁共振影像学的前庭性偏头痛发病机制研究进展[J]. *中国医学前沿杂志(电子版)*, 2021, 13(4): 16-20.
- [13] 韩淋, 张凯, 方琪. 前庭性偏头痛的临床听前庭功能及磁共振成像特点研究现状[J]. *中国实用神经疾病杂志*, 2022, 25(11): 1447-1452.
- [14] Biswal B, Zerrin Yetkin F, Haughton VM, et al. Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain using echoplanar MRI[J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 1995, 34(4): 537-541.
- [15] Zhe X, Zhang X, Chen L, et al. Altered gray matter volume and functional connectivity in patients with vestibular migraine[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2021, 15: 683802.
- [16] Chen Z, Xiao L, Liu H, et al. Altered thalamo-cortical functional connectivity in patients with vestibular migraine: a resting-state fMRI study[J]. *Neuroradiology*, 2022, 64(1): 119-127.
- [17] Kelly Jr RE, Hoptman MJ, Lee S, et al. Seed-based dual regression: an illustration of the impact of dual regression's inherent filtering of global signal[J]. *J Neuroscience Methods*, 2022, 366: 109410.
- [18] Langner R, Camilleri JA. Meta-analytic connectivity modelling (MACM): A tool for assessing region-specific functional connectivity patterns in task-constrained states[M]// *Brain Network Dysfunction in Neuropsychiatric Illness: Methods, Applications, and Implications*. Cham: Springer International Publishing, 2021: 93-104.
- [19] Coppola G, Di Renzo A, Tinelli E, et al. Resting state connectivity between default mode network and insula encodes acute migraine headache[J]. *Cephalalgia*, 2018, 38(5): 846-854.
- [20] 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]. *Neuroradiology J*, 2017, 30(4): 305-317.
- [21] Zhu J, Zhuo C, Liu F, et al. Distinct disruptions of resting-state functional brain networks in familial and sporadic schizophrenia[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 23577.
- [22] Dosenbach NU F, Fair DA, Miezin FM, et al. Distinct brain networks for adaptive and stable task control in humans[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(26): 11073-11078.
- [23] Liu J, Zhao L, Lei F, et al. Disrupted resting-state functional connectivity and its changing trend in migraine sufferers[J]. *Human Brain Mapping*, 2015, 36(5): 1892-1907.
- [24] Liu J, Zhao L, Li G, et al. Hierarchical alteration of brain structural and functional networks in female migraine sufferers[J]. *PloS one*, 2012, 7(12): e51250.
- [25] Van Den Heuvel MP, Pol HEH. Exploring the brain network: a review on resting-state fMRI functional connectivity[J]. *Eur Neuropsychopharmacology*, 2010, 20(8): 519-534.
- [26] Androulakis XM, Krebs KA, Jenkins C, et al. Central executive and default mode network intranet work functional connectivity patterns in chronic migraine[J]. *J Neurological Disorders*, 2018, 6(5): 156-162.
- [27] Han L, Lu J, Chen C, et al. Altered functional connectivity within and between resting-state networks in patients with vestibular migraine[J]. *Neuroradiology*, 2023, 65(3): 591-598.
- [28] Beckmann CF, Smith SM. Probabilistic independent component analysis for functional magnetic resonance imaging[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2004, 23(2): 137-152.
- [29] Yeo BTT, Krienen FM, Sepulcre J, et al. The organization of the human cerebral cortex estimated by intrinsic functional connectivity[J]. *J Neurophysiology*, 2011, 106(3): 1125-1165.
- [30] Li ZY, Si LH, Shen B, et al. Altered brain network functional

- connectivity patterns in patients with vestibular migraine diagnosed according to the diagnostic criteria of the Bárány Society and the International Headache Society[J]. *J Neurology*, 2022, 269(6):3025-3035.
- [31] Zhang B, Wu D, Guo Y, et al. Altered large-scale internetwork functional connectivity in patients with vestibular migraine and migraine without aura [J]. *Neuroscience Letters*, 2023, 800: 137123.
- [32] Shi Y, Zeng W, Nie W, et al. Multi-channel hierarchy functional integration analysis between large-scale brain networks for migraine: an fMRI study [J]. *NeuroImage: Clinical*, 2020, 28: 102462.
- [33] Vakamudi K, Trapp C, Talaat K, et al. Real-time resting-state functional magnetic resonance imaging using averaged sliding windows with partial correlations and regression of confounding signals[J]. *Brain Connectivity*, 2020, 10(8):448-463.
- [34] Wang Y, Zhao X, Zhou W, et al. Dynamic weighted "small-world" graphical network establishment for fNIRS time-varying brain function analysis[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2021, 69:102902.
- [35] Mancho-Fora N, Montalà Flaquer M, Farràs Permanyer L, et al. Resting-state functional dynamic connectivity and healthy aging: A sliding-window network analysis[J]. *Psicothema*, 2020, 32(3): 337-345.
- [36] Jalilianhasanpour R, Ryan D, Agarwal S, et al. Dynamic brain connectivity in resting state functional MR imaging[J]. *Neuroimaging Clinics*, 2021, 31(1):81-92.
- [37] Zhang J, Cui H, Yang H, et al. Dynamic changes of large-scale resting-state functional networks in major depressive disorder [J]. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 2021, 111:110369.
- [38] 王康程, 吴国榕, 侯鑫等. 从群体到个体脑功能网络的分割及应用 [J]. *科学通报*, 2016, 61(27):3022-3035.
- [39] Filippi M, Spinelli EG, Cividini C, et al. Resting state dynamic functional connectivity in neurodegenerative conditions: a review of magnetic resonance imaging findings[J]. *Frontiers in neuroscience*, 2019, 13:657.
- [40] Chen Z, Liu H, Wei X, et al. Aberrant dynamic functional network connectivity in vestibular migraine patients without peripheral vestibular lesion[J]. *Eur Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 2023, 280(8):3691-3701.
- [41] Nieto-Castanon A. Handbook of functional connectivity magnetic resonance imaging methods in CONN [M]. Boston: Hilbert Press, 2020.
- [42] Friston KJ, Buechel C, Fink GR, et al. Psychophysiological and modulatory interactions in neuroimaging[J]. *Neuroimage*, 1997, 6(3):218-229.
- [43] McLaren DG, Ries ML, Xu G, et al. A generalized form of context-dependent psychophysiological interactions (gPPI): a comparison to standard approaches [J]. *Neuroimage*, 2012, 61(4): 1277-1286.
- [44] Klingner CM, Volk GF, Flatz C, et al. Components of vestibular cortical function[J]. *Behavioural Brain Research*, 2013, 236(1): 194-199.
- [45] Russo A, Marcelli V, Esposito F, et al. Abnormal thalamic function in patients with vestibular migraine[J]. *Neurology*, 2014, 82(23):2120-2126.
- [46] Shin JH, Kim YK, Kim HJ, et al. Altered brain metabolism in vestibular migraine: comparison of interictal and ictal findings [J]. *Cephalalgia*, 2014, 34(1):58-67.
- [47] 于焕新, 李海艳, 印志娟, 等. 前庭性偏头痛神经网络的功能性核磁研究[J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2017, 31(12):906-909.
- [48] Leong ATL, Gu Y, Chan YS, et al. Optogenetic fMRI interrogation of brain-wide central vestibular pathways[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(20):10122-10129.
- [49] Frank SM, Greenlee MW. The parieto-insular vestibular cortex in humans: more than a single area? [J]. *J Neurophysiology*, 2018, 120(3):1438-1450.
- [50] Ibitoye RT, Mallas EJ, Bourke NJ, et al. The human vestibular cortex: functional anatomy of OP2, its connectivity and the effect of vestibular disease[J]. *Cerebral Cortex*, 2023, 33(3):567-582.
- [51] Huang J, Wilkins A. The functional network of the visual cortex is altered in migraine[J]. *Vision*, 2021, 5(4):57.
- [52] Priesol AJ, Cao M, Brodley CE, et al. Clinical vestibular testing assessed with machine-learning algorithms[J]. *JAMA Otolaryngology-Head & Neck Surgery*, 2015, 141(4):364-372.
- [53] Kabade V, Hooda R, Raj C, et al. Machine learning techniques for differential diagnosis of vertigo and dizziness: a review[J]. *Sensors*, 2021, 21(22):7565.
- [54] Du Y, Ren L, Liu X, et al. Machine learning method intervention: determine proper screening tests for vestibular disorders[J]. *Auris Nasus Larynx*, 2022, 49(4):564-570.

(收稿日期:2024-12-19 修回日期:2025-07-18)