

• 临床研究 • doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2025.04.013

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20250217.1728.010\(2025-02-18\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20250217.1728.010(2025-02-18))

轻度创伤性脑损伤后认知障碍及焦虑症状的早期脑功能改变*

王云玲¹,袁文欢²,渠倬然¹,罗琳^{1△}

(1. 内蒙古科技大学包头医学院第一附属医院医学影像科/包头医学院医学影像研究所, 内蒙古包头 014000;2. 兰州大学第二医院核磁共振科, 兰州 730030)

[摘要] **目的** 观察轻度创伤性脑损伤(mTBI)急性期患者的局部自发脑活动特点,并探讨急性期的发病机制。**方法** 选取 2021 年 7 月至 2022 年 6 月就诊于内蒙古科技大学包头医学院第一附属医院急诊科和蒙医骨伤科的 38 例急性期 mTBI 患者作为 mTBI 组,选取同期社区性别、年龄相匹配的 39 例健康者作为对照组。采集磁共振数据及收集临床评估量表数据,比较两组间大脑活动低频振幅(ALFF)及局部一致性(ReHo)差异,提取组间明显差异脑区的 ALFF 值及 ReHo 值分别与临床量表分数进行相关性分析,通过受试者工作特征(ROC)曲线评估明显差异脑区的 ALFF 值及 ReHo 值用于鉴别二者的诊断效能。**结果** mTBI 组右侧尾状核及右侧补充运动区 ALFF 值明显降低,左背外侧额上回 ReHo 值升高,右眶部额下回 ReHo 值降低($P<0.05$)。mTBI 组左背外侧额上回 ReHo 值与患者创伤后焦虑自评量表(SAS)得分呈负相关,与抽象及定向得分呈正相关($P<0.05$),而右侧补充运动区的 ALFF 值与命名得分呈正相关($P<0.05$)。右侧尾状核及右侧补充运动区 ALFF 值,左背外侧额上回及右眶部额下回 ReHo 值鉴别二者的效能较高,ROC 曲线下面积分别为 0.749、0.760、0.794、0.798($P<0.05$)。**结论** 右侧尾状核、右侧补充运动区、左背外侧额上回及右眶部额下回的局部自发脑活动异常改变可能与 mTBI 早期患者认知障碍及焦虑症状的神经病理机制有关。

[关键词] 轻度创伤性脑损伤;急性期;静息态功能磁共振;低频振幅;局部一致性
[中图法分类号] R651.15 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2025)04-0868-06

Early brain function changes in cognitive impairment and anxiety symptoms after mild traumatic brain injury*

WANG Yunling¹,YUAN Wenhuan²,QU Zhuoran¹,LUO Lin^{1△}

(1. Department of Medical Imaging, the First Affiliated Hospital of Baotou Medical College, Inner Mongolia University of Science and Technology/Institute of Medical Imaging, Baotou Medical College, Baotou, Inner Mongolia 014000, China; 2. Department of NMR, Lanzhou University Second Hospital, Lanzhou, Gansu 730030, China)

[Abstract] **Objective** To observe the characteristics of local spontaneous brain activity in patients with mild traumatic brain injury (mTBI) in acute stage, and to explore the pathogenesis of the acute stage. **Methods** From July 2021 to June 2022, 38 patients with acute mTBI who were admitted to the Department of Emergency and Department of Bone and Traumatology, the First Affiliated Hospital of Baotou Medical College, Inner Mongolia University of Science and Technology were selected as the mTBI group, and 39 healthy patients matching gender and age in the community were selected as the control group. Magnetic resonance data and clinical assessment scale data were collected to compare the differences of low-frequency amplitude (ALFF) and local consistency (ReHo) of brain activity between the two groups, and to extract the ALFF and ReHo values of brain areas with significant differences between the two groups for correlation analysis. The ALFF and ReHo values of the significantly different brain areas were evaluated by receiver operating characteristic (ROC) curves to distinguish the diagnostic efficacy of the two groups. **Results** In the mTBI group, the ALFF value of the right caudate nucleus and the right supplementary motor area was significantly decreased, the ReHo value of the left dorsolateral superior frontal gyrus was increased, and the ReHo value of the right orbital inferior frontal gyrus was decreased ($P<0.05$). In the mTBI group, the ReHo value of left dorsolateral superior frontal gyrus was negatively correlated with self-rating anxiety scale (SAS) scores after trauma, and positively correlated with abstract and orientation scores ($P<0.05$), while the ALFF value of the

* 基金项目:内蒙古自治区教育厅项目(NJZY23021);内蒙古自治区包头市卫生健康科技计划项目(wsjkj005)。△ 通信作者, E-mail: byll117@sina.com。

right supplementary motor area was positively correlated with named scores ($P<0.05$). The ALFF value of the right caudate nucleus and the right supplementary motor area, the ReHo value of the left dorsolateral superior frontal gyrus and the right orbital inferior frontal gyrus were more effective in distinguishing them, and the area under the ROC curve were 0.749, 0.760, 0.794, 0.798, respectively ($P<0.05$). **Conclusion** The abnormal changes of local spontaneous brain activity in the right caudate nucleus, the right supplementary motor area, the left dorsolateral superior frontal gyrus and the right orbital inferior frontal gyrus may be related to the neuropathological mechanism of cognitive impairment and anxiety symptoms in early mTBI patients.

[Key words] mild traumatic brain injury; acute stage; resting-state functional magnetic resonance imaging; low-frequency fluctuation; regional homogeneity

创伤性脑损伤是导致人身致残的主要原因,影响超过 50% 的世界人口,已经成为一项重大的世界公共卫生问题^[1-3],其中轻度创伤性脑损伤(mild traumatic brain injury, mTBI)占 80% 以上^[4]。mTBI 会导致患者出现恶心、呕吐、头晕、健忘、意识丧失等临床症状,多数患者短期内症状消失,但 30%~50% 的患者症状会持续半年以上,甚至更长^[4-5],从而导致患者早期痴呆、精神异常及认知功能下降等,严重影响患者的工作和生活。因此, mTBI 早期诊断及治疗至关重要。然而,其早期潜在的神经病理学机制尚未完全阐明,因此急需探讨 mTBI 急性期的发病机制,为患者治疗决策提供客观的理论依据。

静息态功能磁共振(resting state-functional MRI, rs-fMRI)成像是基于血氧水平依赖(blood oxygenation level-dependent, BOLD)信号,无需研究对象进行任何操作且无创,可用于探索大脑内在的自发活动^[6],因此被广泛地用于各种疾病的神经机制研究,同时成为研究 mTBI 最有前景的工具之一。利用 rs-fMRI 寻找 mTBI 急性期客观的影像标志物,不仅有助于理解 mTBI 急性期的病理生理机制,还有助于寻找 mTBI 急性期诊断及鉴别诊断的生物标志物。低频振幅(amplitude of low-frequency fluctuation, ALFF)和区域一致性(regional homogeneity, ReHo)是 rs-fMRI 检测大脑自发活动的两种方法。ALFF 通过检测研究对象静息状态下 BOLD 信号的波动,反映神经元局部自发活动的强度^[7-8]。ReHo 通过评估单个体素与其相邻体素在时间序列上的同步性,直观地反映全脑体素在局部脑区功能活动状态的一致性^[9]。与 ReHo 相比, ALFF 测量了低频信号的强度。因此,两者结合可以更好地检测局部自发脑功能活动。既往 mTBI 相关机制的研究多集中于 ALFF 或 ReHo 单一方法,缺少将两者结合起来的研究,且既往研究很少聚焦于急性期 mTBI。本研究选取 mTBI 急性期的患者作为研究对象,比较 mTBI 急性期的患者与健康者之间的 ALFF 及 ReHo 差异,探索 mTBI 急性期的发病机制,现报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取 2021 年 7 月至 2022 年 6 月就诊于内蒙古科技大学包头医学院第一附属医院急诊科和蒙医骨伤

科的 38 例急性期 mTBI 患者作为 mTBI 组。纳入标准:(1)年龄 18~60 岁;(2)头颅受伤<7 d;(3)格拉斯哥昏迷评分为 13~15 分;(4)经评估为 mTBI(恶心、呕吐、眩晕及迷失方向等精神状态改变,意识丧失<0.5 h,健忘<24 h);(5)CT 及 MRI 成像为阴性。排除标准:(1)既往有 mTBI 病史、脑部手术史、任何精神类疾病史;(2)使用任何抗精神类药物、镇静药物史;(3)吸毒或酗酒史;(4)MRI 禁忌证。选取同期社区性别、年龄相匹配的 39 例健康者作为对照组。本研究经内蒙古科技大学包头医学院第一附属医院伦理委员会批准,患者均知情同意。

1.2 方法

1.2.1 研究方式

使用飞利浦 3.0T 扫描仪(Achieva 3.0 T X, 荷兰)采集磁共振数据,采用 T1 加权 3D 快速回波序列获得全脑结构图像。扫描参数:重复时间 7.6 ms,翻转角 8°,回波时间 3.7 ms,层厚 2 mm,层数 150,扫描视野 24 cm×24 cm,体素为 3 mm×3 mm×3 mm,矩阵为 256×256。rs-fMRI 扫描采用平面回波成像序列,TR=2 000 ms,TE=30 ms,FOV=220 mm×220 mm,矩阵=64×64,翻转角=90°,总共 185 个时间点。扫描过程用泡沫垫固定研究对象的头部,以减少头动,并告知研究对象闭眼保持清醒状态。

1.2.2 数据处理

数据预处理及分析使用 Matlab R2017b 及 DPABI 软件包^[10]。首先,采用 DPABI 的 DPARSF 5.3 进行所有数据预处理。(1)删除所有研究对象数据的前 10 个时间点;(2)校正:时间层及头动校正,剔除头动>2 mm 或旋转>2°的研究对象;(3)图像配准且分割:采用非线性配准方法使 T1 加权结构像和 fMRI 像配准后分割;(4)去除干扰性协变量:回归脑白质、脑脊液信号及 24 个头动参数;(5)空间标准化:将所有头动校正之后的功能像标准化到蒙特利尔神经科学研究所(Montreal Neurological Institute, MNI)标准的脑空间模板,重采样图像体素为 3 mm×3 mm×3 mm。

ALFF 计算:首先将空间标准化后的数据用 6 mm 半高全宽的高斯滤波器进行平滑。然后,采用快速傅里叶转换得到频域功率谱,再对功率谱(0.01~0.08 Hz)进行平方根。平均平方根即为 ALFF,然后转化为 Z 分数进行标准化,获得标准化的 ALFF 值。

ReHo 计算: 首先将空间标准化后的数据进行 0.01~0.08 Hz 的滤波。然后利用 KCC 计算全脑每个体素与其相邻体素(26 个)时间序列的局部同步性, 得到每个研究对象的全脑 ReHo 数据, 进一步通过 Z 分数标准化, 获得标准化的 ReHo 值。最后采用 6 mm 半高全宽的高斯滤波器进行数据平滑, 以提高信噪比。

1.3 统计学处理

采用 SPSS26.0 及 R3.6.3 软件进行数据分析, 计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 比较采用 t 检验; 计数资料以例数或百分比表示, 比较采用 χ^2 检验; Pearson 检验分析相关性, 受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线分析诊断效能, 以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 两组一般资料比较

与对照组比较, mTBI 组蒙特利尔认知评估(Montreal cognitive assessment, MoCA)量表得分更

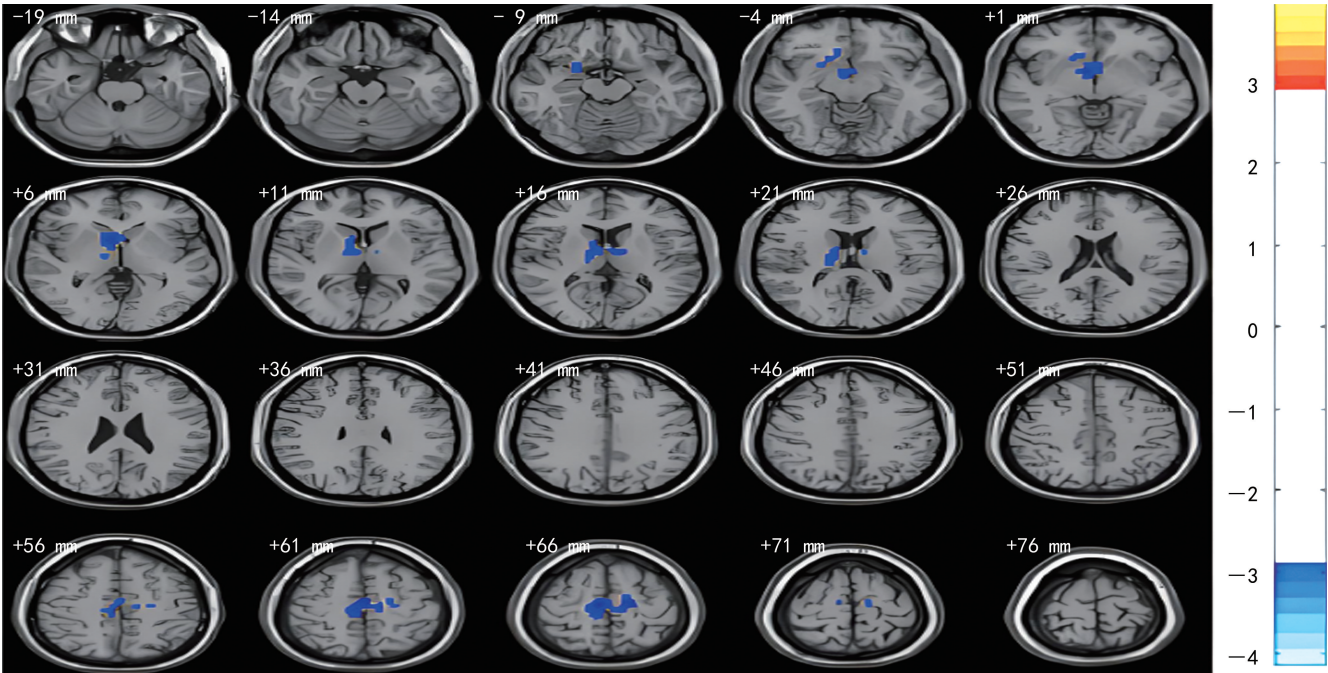
低, 焦虑自评量表(self-rating anxiety scale, SAS)、抑郁自评量表(self-rating depression scale, SDS)得分更高, 差异有统计学意义($P < 0.05$), 见表 1。

表 1 两组一般资料比较

项目	mTBI 组 (<i>n</i> =38)	对照组 (<i>n</i> =39)	χ^2/t	<i>P</i>
男/女(<i>n</i> / <i>n</i>)	21/17	19/20	0.330	0.570
年龄($\bar{x} \pm s$, 岁)	41.11 $\pm$ 11.35	38.54 $\pm$ 11.17	0.010	0.920
受教育年限($\bar{x} \pm s$, 年)	11.95 $\pm$ 5.02	12.62 $\pm$ 4.51	0.400	0.530
MoCA 量表($\bar{x} \pm s$, 分)	19.29 $\pm$ 5.21	27.23 $\pm$ 0.93	-9.360	<0.001
SAS($\bar{x} \pm s$, 分)	54.55 $\pm$ 13.94	36.62 $\pm$ 4.88	7.570	<0.001
SDS($\bar{x} \pm s$, 分)	54.34 $\pm$ 13.66	34.44 $\pm$ 4.15	8.700	<0.001

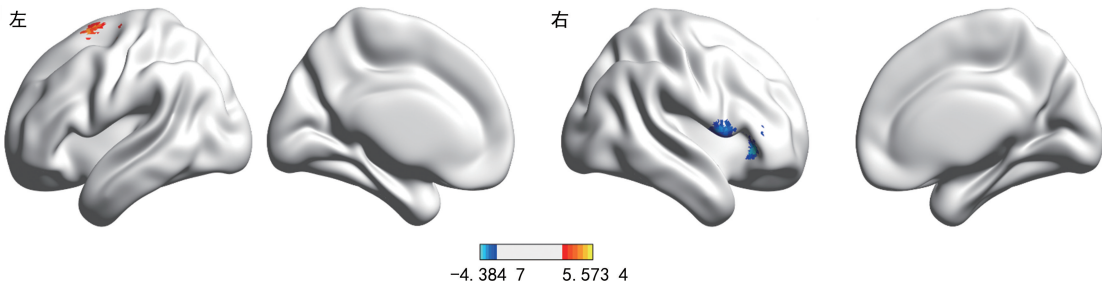
2.2 影像学结果

ALFF 分析结果显示, mTBI 组右侧补充运动区、右侧尾状核 ALFF 值更低($P < 0.05$), 见图 1。ReHo 分析结果显示, mTBI 组左背外侧额上回 ReHo 值升高, 右眶部额下回 ReHo 值降低 (GRF 校正, $P < 0.05$), 见图 2。



mTBI 组右侧尾状核及右侧补充运动区 ALFF 值明显降低; 色带: 数值代表 T 值, 颜色越蓝代表 T 值越小, 即该脑区 ALFF 值减低程度越多; 每个图层的厚度为 5 mm。

图 1 ALFF 指标差异脑区图



mTBI 组左背外侧额上回 ReHo 值升高, 右眶部额下回 ReHo 值降低; 色带: 数值代表 T 值, 颜色越蓝代表 T 值越小, 即该脑区 ReHo 值减低程度越多。

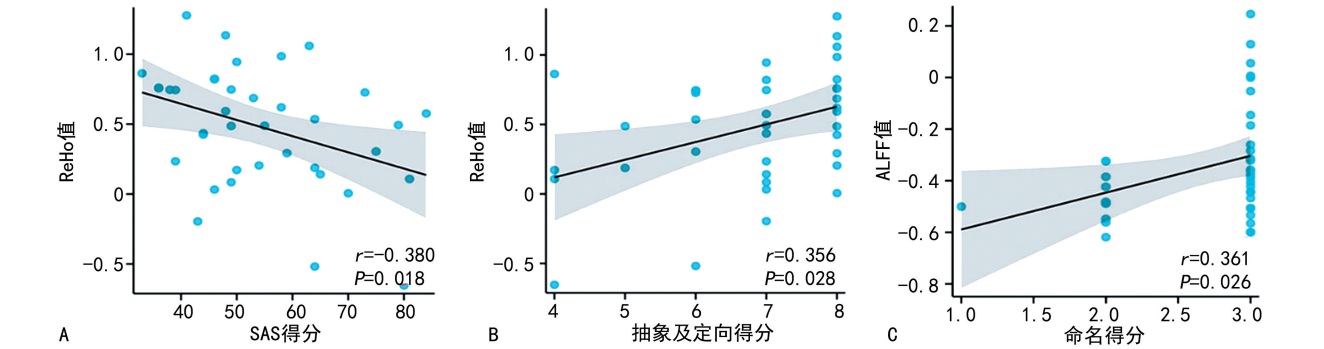
图 2 ReHo 指标差异脑区图

2.3 差异脑区的相关性分析

mTBI 组左背外侧额上回 ReHo 值与 SAS 得分呈负相关,与抽象及定向得分呈正相关($P<0.05$),而右侧补充运动区的 ALFF 值与命名得分呈正相关($P<0.05$),见图 3。

2.4 ROC 曲线

ROC 曲线分析结果显示,右侧尾状核 ALFF 值区分 mTBI 组与对照组的曲线下面积为 0.749($P<0.05$),右侧补充运动区 ALFF 值为 0.760($P<0.05$),左背外侧额上回 ReHo 值为 0.794($P<0.05$),右眶额部下 ReHo 值为 0.798($P<0.05$),见图 4。



A:mTBI 组左背外侧额上回 ReHo 值与 SAS 得分的相关性;B:mTBI 组左背外侧额上回 ReHo 值与抽象及定向得分的相关性;C:mTBI 组右侧补充运动区的 ALFF 值与命名得分的相关性。

图 3 差异脑区的相关性分析

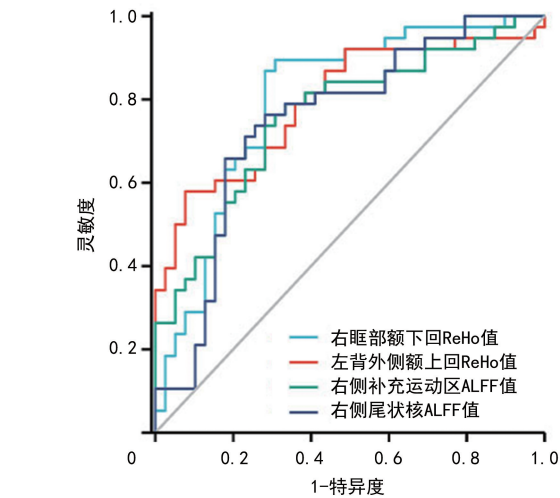


图 4 差异脑区的 ROC 曲线

3 讨论

mTBI 被认为是一种非严重伤,但 mTBI 的长期影响结果可能比最初诊断的结果更为严重。然而,mTBI 在 CT 和 MRI 成像中为阴性。随着影像技术的快速发展,rs-fMRI 解决了这一困境。目前,mTBI 急性期的发病机制尚未完全阐明。但过去的理论认为其与电解质代谢紊乱^[11]、局部生化反应^[12]及神经炎症反应等有关。近年来,神经影像研究发现 mTBI 急性期发病与异常的脑功能活动有关^[13-14]。但这些研究多集中于 ALFF 或 ReHo 单一方法且亚急性、慢性期的研究,缺少将两者结合起来进行急性期的研究。ALFF 和 ReHo 都是通过 BOLD 信号进行研究大脑的自发活动,ALFF 反映了单个体素时间过程的波动幅度,ReHo 反映了相邻体素的局部同步,ALFF 可能比 ReHo 更有用地检测全脑自发神经元活动,ReHo 可能比 ALFF 更敏感地检测局部脑功能异常。

因此,ALFF(全局分析能力)和 ReHo(局部分析能力)结合可能比单独使用一种方法研究人脑自发神经元活动更全。ALFF 和 ReHo 两种方法结合已经成功地应用于自闭症^[15]、轻度认知障碍^[16-18]等研究。因此本研究采用了 ALFF 和 ReHo 两种方法结合研究了急性期 mTBI 脑功能活动。这将是 mTBI 不同时期的脑功能研究的补充,有助于从脑功能成像的角度理解 mTBI 的神经机制。

人类的补充运动区位于额上回,是认知与行动联系的关键脑区,通过控制认知进行指导行为,目前该脑区的功能尚未完全阐明。一项基于结构和功能的研究表明,mTBI 患者急性期右侧补充运动区功能及结构连接均降低^[19]。本研究发现 mTBI 患者右侧补充运动区 ALFF 值明显降低,并与命名得分呈正相关。因此,ALFF 值及远程功能连接异常可能是因结构异常导致。未来需要大量的结构和功能 MRI 同时进行研究,以确定两者之间是否存在耦合关系。

本研究还发现右眶额部下回的 ReHo 值降低。该脑区属于眶额叶皮层的一部分^[20],而眶额叶皮质在认知、决策及情绪调节发挥着重要的作用^[21-22]。WANG 等^[23]研究发现,mTBI 早期患者双侧眶额叶皮层激活,ReHo 值降低,并与患者的情绪调节有关。此外,一项结构成像研究发现,mTBI 的运动员较正常者眶额叶皮质厚度变薄。因此,mTBI 后眶额叶皮层结构和功能可能受损。此外,一项重度脑损伤研究证实了脑皮质变薄与神经元丢失有关^[24]。同时,一项抑郁症研究证实了神经纤维网的丢失与脑皮质体积的差异有关^[25],故推测 mTBI 后也具有相同的发病机制。

左背外侧额上回属于背外侧前额叶的一部分。本研究发现背外侧前额叶脑活动升高,这与部分研

究^[26]结果相反。推测这种结果可能与研究对象选择、研究对象症状严重程度及研究对象病程差异有关。本研究选取的大部分患者在背外侧前额叶可能处于应对 mTBI 后的功能代偿期。但随着患者的康复,脑活动可能会降低。PUIG 等^[27]研究证明,mTBI 后大脑异常脑活动的改变会随着患者的康复逐渐恢复到正常水平,但这一观点还需大量的纵向研究来证明。本研究发现,背外侧前额叶的 ReHo 值与患者创伤后 SAS 得分呈负相关,提示背外侧前额叶可能存在机体的代偿机制,以减轻创伤后患者的情绪等症状。同时,一项抑郁研究表明,患者背外侧前额叶呈高活动状态^[28],这提示在 mTBI 伴有抑郁症状的患者中可能存在与抑郁症患者相同的机制。LEUNG 等^[29]研究证明,在背外侧前额叶通过短期重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation,rTMS)治疗可以改善患者创伤后情绪障碍及头痛。rTMS 在背外侧前额叶通过前额叶皮质的下行纤维,沿中脑-丘脑-扣带回通路产生“自上而下的抑制作用”。由此可见背外侧前额叶可作为治疗靶点,以改善患者创伤后头痛及情绪障碍。此外,有研究表明,mTBI 患者常表现出弥漫性轴索损伤^[30-31],这可能表现出与情绪和认知功能相对应的椎管缺损。rTMS 为恢复椎管上功能缺损提供了一个很好的选择^[32]。未来的研究需要进一步评估这一领域的治疗相关效益。此外,背外侧前额叶脑活动升高也可能提示 mTBI 后情绪或认知损害处于早期阶段,如果及时地进行治疗及干预,能避免未来情绪及认知功能进一步降低。

综上所述,mTBI 患者的 MoCA 量表评分明显低于健康者,且患者左背外侧额上回 ReHo 值与抽象及定向得分呈正相关,右侧补充运动区 ALFF 值与患者的命名得分呈正相关。这进一步验证了既往关于 mTBI 患者较健康者认知缺陷的观点。本研究也存在一定的局限性:(1)本研究样本量较小,今后需扩大样本量;(2)本研究是横断性研究,mTBI 患者的 fMRI 特征与病程的关系不明,应进一步纵向观察脑活动改变与病程之间的关系;(3)本研究仅局限于 fMRI 的结果,未经病理验证,未来可进行动物实验,通过病理检测大脑组织验证 fMRI 结果。

参考文献

- [1] MAAS A,MENON D K,ADELSON P D,et al. Traumatic brain injury: integrated approaches to improve prevention, clinical care, and research[J]. *Lancet Neurol*, 2017, 16(12): 987-1048.
- [2] 汪家文,李佳洁,吴君,等. 肠道菌群通过 NLRP3 介导神经炎症调节 rmTBI 导致的记忆功能障碍[J]. *重庆医学*, 2023, 52(20): 3048-3054.
- [3] LIU Y,LU L,LI F,et al. Neuropathological mechanisms of mild traumatic brain injury: a perspective from multimodal magnetic resonance imaging[J]. *Front Neurosci*, 2022, 16: 923662.
- [4] NELSON L D, TEMKIN N R, DIKMEN S, et al. Recovery after mild traumatic brain injury in patients presenting to US level I trauma centers: a transforming research and clinical knowledge in traumatic brain injury (TRACK-TBI) study[J]. *JAMA Neurol*, 2019, 76(9): 1049-1059.
- [5] STEYERBERG E W, WIEGERS E, SEWALT C, et al. Case-mix, care pathways, and outcomes in patients with traumatic brain injury in CENTER-TBI: a European prospective, multicentre, longitudinal, cohort study[J]. *Lancet Neurol*, 2019, 18(10): 923-934.
- [6] 王梦星,郑翔宇,姚旭峰,等. 静息态功能 MRI 评价储尿状态下原发性单症状夜间遗尿患儿脑功能[J]. *中国医学影像技术*, 2022, 38(4): 502-505.
- [7] WANG P, LI R, LIU B, et al. Altered static and temporal dynamic amplitude of low-frequency fluctuations in the background network during working memory states in mild cognitive impairment[J]. *Front Aging Neurosci*, 2019, 11: 152.
- [8] LI H, JIA X, LI Y, et al. Aberrant amplitude of low-frequency fluctuation and degree centrality within the default mode network in patients with vascular mild cognitive impairment[J]. *Brain Sci*, 2021, 11(11): 1534.
- [9] 邹文锦,陈宁宁,李小岳,等. 对比单相抑郁与双相障碍抑郁期患者脑自发性神经元活动[J]. *中国医学影像技术*, 2022, 38(10): 1458-1463.
- [10] YAN C G, WANG X D, ZUO X N, et al. DPA-BI: data processing & analysis for (resting-state) brain imaging [J]. *Neuroinformatics*, 2016, 14(3): 339-351.
- [11] ASHINA H, PORRECA F, ANDERSON T, et al. Post-traumatic headache: epidemiology and pathophysiological insights[J]. *Nat Rev Neurol*, 2019, 15(10): 607-617.
- [12] BARKHOUDARIAN G, HOVDA D A, GIZA C C. The molecular pathophysiology of concussive brain injury: an update[J]. *Phys Med Rehabil Clin N Am*, 2016, 27(2): 373-393.
- [13] SHI J, TENG J, DU X, et al. Multi-modal analysis of resting-state fMRI data in mTBI patients and association with neuropsychological outcomes[J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 639760.

- [14] VEDAEI F, NEWBERG A B, ALIZADEH M, et al. Resting-state functional MRI metrics in patients with chronic mild traumatic brain injury and their association with clinical cognitive performance[J]. *Front Hum Neurosci*, 2021, 15:768485.
- [15] YUE X, ZHANG G, LI X, et al. Brain functional alterations in prepubertal boys with autism spectrum disorders[J]. *Front Hum Neurosci*, 2022, 16:891965.
- [16] ZHANG L, LI Y, BIAN L, et al. Analysis of factors affecting cranial nerve function of patients with vascular mild cognitive impairment through functional magnetic resonance imaging under artificial intelligence environment[J]. *Front Public Health*, 2021, 9:803659.
- [17] YUE J, HAN S, LIU X, et al. Functional brain activity in patients with amnesic mild cognitive impairment: an rs-fMRI study[J]. *Front Neurol*, 2023, 14.
- [18] TANG X, GUO Z, CHEN G, et al. A multimodal meta-analytical evidence of functional and structural brain abnormalities across Alzheimer's disease spectrum[J]. *Ageing Res Rev*, 2024, 95:102240.
- [19] DALL'ACQUA P, JOHANNES S, MICA L, et al. Functional and structural network recovery after mild traumatic brain injury: a 1-year longitudinal study[J]. *Front Hum Neurosci*, 2017, 11:280.
- [20] YAN R, TAO S, LIU H, et al. Abnormal alterations of regional spontaneous neuronal activity in inferior frontal orbital gyrus and corresponding brain circuit alterations: a resting-state fmri study in somatic depression[J]. *Front Psychiatry*, 2019, 10:267.
- [21] KLEIN-FLUGGE M C, BONGIOANNI A, RUSHWORTH M. Medial and orbital frontal cortex in decision-making and flexible behavior[J]. *Neuron*, 2022, 110(17):2743-2770.
- [22] ROLLS E T. The orbitofrontal cortex and emotion in health and disease, including depression[J]. *Neuropsychologia*, 2019, 128:14-43.
- [23] WANG X, XIE H, COTTON A S, et al. Early changes in cortical emotion processing circuits after mild traumatic brain injury from motor vehicle collision[J]. *J Neurotrauma*, 2017, 34(2):273-280.
- [24] BIGLER E D. Volumetric MRI findings in mild traumatic brain injury (mTBI) and neuropsychological outcome [J]. *Neuropsychol Rev*, 2023, 33(1):5-41.
- [25] 倪立桐, 齐琦, 马珩钞, 等. 基于多模态影像学的轻度创伤性脑损伤脑功能评估的研究进展[J]. *解放军医学院学报*, 2024, 45(7):805-810.
- [26] XIONG K L, ZHANG J N, ZHANG Y L, et al. Brain functional connectivity and cognition in mild traumatic brain injury[J]. *Neuroradiology*, 2016, 58(7):733-739.
- [27] PUIG J, ELLIS M J, KORNELSEN J, et al. Magnetic resonance imaging biomarkers of brain connectivity in predicting outcome after mild traumatic brain injury: a systematic review[J]. *J Neurotrauma*, 2020, 37(16):1761-1776.
- [28] 陈丽梅, 郭春蕾, 李小娇, 等. 难治性与非难治性抑郁症的静息态脑功能磁共振 ReHo 特征初步比较[J]. *磁共振成像*, 2021, 12(3):10-14.
- [29] LEUNG A, METZGER-SMITH V, HE Y, et al. Left dorsolateral prefrontal cortex rTMS in alleviating mTBI related headaches and depressive symptoms[J]. *Neuromodulation*, 2018, 21(4):390-401.
- [30] SUN C, QI L, CHENG Y, et al. Immediate induction of varicosities by transverse compression but not uniaxial stretch in axon mechanosensation[J]. *Acta Neuropathol Commun*, 2022, 10(1):7.
- [31] BRETT B L, GARDNER R C, GODBOUT J, et al. Traumatic brain injury and risk of neurodegenerative disorder[J]. *Biol Psychiatry*, 2022, 91(5):498-507.
- [32] LEUNG A, SHUKLA S, YANG E, et al. Diminished supraspinal pain modulation in patients with mild traumatic brain injury[J]. *Mol Pain*, 2016, 12:1744806916662661.

(收稿日期:2024-06-16 修回日期:2024-11-20)

(编辑:袁皓伟)