

基于静息态功能磁共振成像的创伤性脑损伤患者功能连接研究

范夏冰^{1,2}, 杨利², 张和华², 李章勇¹, 王伟¹

1. 重庆邮电大学 生物信息学院, 重庆 400065; 2. 陆军军医大学大坪医院 医学工程科, 重庆 400042

[摘要] 目的 探讨基于静息态功能磁共振成像 (Resting-State Functional Magnetic Resonance Imaging, rs-fMRI) 的创伤性脑损伤 (Traumatic Brain Injury, TBI) 患者功能连接。方法 以14例TBI患者和12例健康对照 (Healthy Controls, HC) 为研究对象, 对其rs-fMRI图像进行预处理, 再通过独立成分分析 (Independent Component Analysis, ICA) 得到默认模式网络 (Default Model Network, DMN) 和执行控制网络 (Executive Control Network, ECN), 从两个脑网络中各选取4个脑区作为种子点进行功能连接分析, 最后使用单样本 t 检验、双样本 t 检验以及配对 t 检验探索TBI被试脑损伤后3、6和12个月与HC组的DMN与ECN功能联通性差异及变化情况。结果 TBI患者恢复期三个时间点的功能连接均与HC组有显著差异, DMN-ECN双网络之间的功能联通性与单个网络内部相比变化更为突出。此外, 左侧顶叶为一个关键节点, 可能为TBI的后续治疗提供新方向。结论 TBI后患者大脑静息态脑网络DMN与ECN的功能连接存在显著异常, 这种异常可能是导致患者存在长期认知障碍及其他后遗症的原因。

[关键词] 创伤性脑损伤; 静息态功能磁共振; 功能连接; 默认模式网络; 执行控制网络

Functional Connectivity in Patients with Traumatic Brain Injury Based on Resting-State Functional Magnetic Resonance Imaging

FAN Xiabing^{1,2}, YANG Li², ZHANG Hehua², LI Zhangyong¹, WANG Wei¹

1. School of Bioinformatics, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. Department of Medical Engineering, Daping Hospital of Army Military Medical University, Chongqing 400042, China

Abstract: Objective To explore the functional connection in patients with traumatic brain injury (TBI) based on resting-state functional magnetic resonance imaging (rs-fMRI). Methods The rs-fMRI images of 14 TBI patients and 12 healthy controls (HC) were preprocessed by independent component analysis (ICA) gets default model network (DMN) and executive control network (ECN), four brain regions were selected from each of the two brain networks as seed points for functional connection analysis. Finally, one-sample t -test, two-sample t -test and paired t -test were used to explore the differences and changes of functional connectivity between DMN and ECN at 3, 6 and 12 months after TBI injury compared with HC group. Results The functional connections of TBI patients at three time points during the recovery period were significantly different from that of HC group, and the functional connectivity between DMN and ECN network was more obvious than that within a single network. In addition, the left parietal lobe was a key node, which may provide a new direction for the subsequent treatment of TBI. Conclusion There are significant abnormalities in the functional connection between DMN and ECN in the resting brain network of patients after TBI, which may be the cause of long-term cognitive impairment and other sequelae.

Key words: traumatic brain injury; resting-state functional magnetic resonance imaging; functional connection; default mode network; executive control network

[中图分类号] R197.39

doi: 10.3969/j.issn.1674-1633.2022.06.007

[文献标识码] A

[文章编号] 1674-1633(2022)06-0023-06

引言

近年来创伤性脑损伤 (Traumatic Brain Injury, TBI) 死亡率逐渐增高, 成为一个世界性公共卫生问题。据估计, 全世界每年有 6900 万人患有持续性脑外伤, 其发病率超过

某些更复杂的疾病如乳腺癌等^[1]。美国疾病控制与预防中心发现 2019 年全球 TBI 关联死亡人数为 61000 人^[2]。TBI 患者通常伴有长期后遗症, 包括身体、认知、情感和行为症状, 如头痛、疲劳、易怒和失眠等^[3]。大部分患者的症状在三个月内会有所缓解, 而某些后遗症会持续超过一年。然而, 对于这些后遗症的潜在病理生理学仍然知之甚少。静息态功能磁共振成像 (Resting-State Functional Magnetic Resonance Imaging, rs-fMRI) 用于评估 TBI 患者的皮质功能, 提供对损伤后皮质功能的长期观察, 对神经功能恢复有重

收稿日期: 2021-12-03

基金项目: 陆军军医大学优秀人才培养重点扶持对象资助项目 (B-3267); 陆军军医大学临床科研项目 (2019CXJSC027); 重庆市社会民生科技创新专项 (cstc2016shmszx0099)。

通信作者: 张和华, 高级工程师, 主要研究方向为生物医学信号检测与处理、战创伤智能诊断相关算法。

通信作者邮箱: zhanghehua@vip.163.com

要意义^[4]。

关于 rs-fMRI 研究表明, TBI 患者的默认模式网络 (Default Model Network, DMN) 中功能连接降低, 其他静息状态网络 (包括额顶叶和运动网络) 中存在异常的功能连接, 随着大脑功能恢复其功能连通性会改善^[5-6]。DMN 被广泛认为其负责维持自我意识、内省和自发认知等系列高阶认知过程^[7]。执行控制网络 (Executive Control Network, CN) 主要包括背外侧前额叶皮层、前扣带回皮层和后扣带回皮层等, 涉及参与目标导向的行动和抑制过程、情绪和知觉等。DMN 中的自发血氧活动与执行控制网络 (Executive Control Network, ECN) 呈负相关, 且相关证据显示这些网络之间的动态交互有助于维持或恢复意识^[8]。了解 DMN 与 ECN 的反相关性在意识早期恢复中的作用对于确定新的治疗靶点和制定预后措施有重要意义^[9]。目前对于 TBI 患者 DMN 与 ECN 反相关性研究, 大多为横断面设计, 主要关注急性、慢性 TBI 患者功能连接改变、脑区平均灰质体积改变等^[10-11]。虽然有纵向研究报告 TBI 患者在损伤后恢复数月及 2 年期间, 其功能连接性、灰质体积等发生了变化^[6], 但仍需要系统性、前瞻性的纵向研究, 以便更好地了解 TBI 恢复的动态特性。

功能连接是通过线性时间相关性在两个感兴趣脑区之间建立连接^[12], 本文拟采用基于种子点的功能连接方法, 研究 TBI 后一年恢复期内的不同时间点 (3、6 和 12 个月), DMN 和 ECN 两个静息态脑网络内和网络间的功能连接随时间的变化, 以期揭示 TBI 认知可塑性的相关机制。

1 材料与方法

1.1 临床资料

被试数据来自公共数据集^[13], 包括 14 例 TBI 患者和 12 例年龄、性别与之匹配的正常对照 (Healthy Controls, HC), 具体信息如表 1 所示。所有被试均无相关神经系统病史, 没有药物和酒精成瘾史, 无镇静剂使用史, 没有肝、肾功能衰竭等病史, 没有 MRI 检查禁忌证。如果患者有其他伴随损伤 (例如骨科损伤或脊髓损伤), 导致患者在 MRI 环境中很难保持静止, 则排除患者。数据采集和后续研究都得到了宾夕法尼亚州立大学研究保护办公室的批准。具有签署医疗文件或独立判断能力的被试都签署了知情同意书, 存在一定程度认知障碍的被试则由其家属签署。TBI 患者在外伤后大约 3、6 和 12 个月 (session-1, session-2 和 session-3) 各做了一次 rs-fMRI 扫描检查, 格拉斯哥昏迷评分 (Glasgow Coma Scale, GCS) 用于评价患者的 TBI 严重程度。GCS 是医学上评估患者昏迷程度的方法, 得分值越高, 意识状态越好, 已被证明是判断颅脑损伤严重程度和死亡率的良好预后指标^[14]。本研究中 TBI 患者的 GCS 评分平均值在 7.92 左右, 即为中度 TBI 患者。

1.2 方法

1.2.1 数据采集

TBI 患者在 3、6 和 12 个月进行一次 rs-fMRI 扫描, 其中 1 个 TBI 被试和 6 个正常被试使用 Philips Achieva 3 T 扫

描仪进行扫描, 另外 13 个 TBI 被试和 6 个正常被试使用西门子 Magnetom Trio 3 T 扫描仪, TBI 病例和 HC 组分开接受扫描, 扫描前充分告知被试保持静止, 以减少头动的影响。以 1.0 mm 的各向同性空间分辨率采集大脑的高分辨率 T1 加权解剖图像, 即结构像。使用回波平面成像 (Echo Planar Imaging, EPI) 检查功能成像的血氧水平依赖响应。成像参数为重复时间 (Repetition Time, TR) 2000 ms, 回波时间 (Echo Time, TE) 30 ms, 翻转角度 (Flip Angle, FA) 90°, 视野 (Field of View, FOV) 240 mm × 240 mm, 采集矩阵 80 × 80, 层厚 4 mm。

表1 TBI组与HC组的一般临床资料比较

参数	TBI (n=14)	HC (n=12)
年龄/岁	26.07 ± 6.5	32.00 ± 11.50
受教育年限/年	13.42 ± 2.43	12.92 ± 1.73
性别、(男/女)	7/7	6/6
GCS评分/分	7.92 ± 4.90	
session-1	2.93 ± 0.83	—
session-2	6.00 ± 1.46	
session-3	11.79 ± 1.97	
损伤机制		
机动车事故	7	
跌落	4	—
被车辆撞倒	3	
弥漫性轴索损伤	7	
全血肿和/或出血*	13	
左侧血肿和/或出血	5	
右侧血肿和/或出血	3	
双侧血肿和/或出血	4	—
初步临床表现		
额叶血肿和/或出血	12	
颞叶血肿和/或出血	6	
顶叶血肿和/或出血	4	
枕叶血肿和/或出血	2	

注: *13名报告有颅内血肿和/或出血的受试者中, 有1人没有记录这一发现的位置。

1.2.2 预处理

使用 SPM 对被试的 rs-fMRI 数据 (TBI 和 HC 的每个 session 为一组) 进行预处理。为避免磁场饱和效应, 删除每一组数据的前六个图像。采用时间层校正纠正数据层之间的时间差, 排除头部平移运动大于 3 mm 的被试数据, 并将所有被试的功能像配准到标准空间, 最后使用 6 mm 的高斯滤波核来平滑功能像并提高图像信噪比。

1.2.3 独立成分分析

独立成分分析 (Independent Component Analysis, ICA) 是一种主要由数据驱动的方法, 它已被发现能够捕捉到 fMRI 时间进程的复杂性, 并产生一致的空间 (统计上不同的) 成分。ICA 方法的优势在于, 独立分量内所有显著加权的体素都是高度相关的, 可用于识别多个静息态脑网络, 并进一步量化静息态脑网络的功能连接^[15]。使用 ICA 将预处理后的 rs-fMRI 图像进行分解。采用“最小描述长度” (Minimum Description Length, MDL) 准则, 对最佳分解成分数量进行评估。

1.2.4 识别DMN和ECN静息态脑网络

本研究采用的 DMN 与 ECN 先验脑网络模板来自斯坦福大学实验室^[16]。计算 DMN 与 ECN 先验模板与独立分量之间的空间相关性，选择空间相关系数最大的分量，作为 DMN 和 ECN 静息态脑网络。DMN 网络内的功能区域，分别为楔前叶 (Precuneus, PREC)、内侧前额叶皮层 (Medial Prefrontal Cortex, mPFC)、左侧角回 (Left Angular Gyrus, LAG)、右侧角回 (Right Angular Gyrus, RAG)。ECN 网络内的功能区域分别为：左侧三角部额下回 (Left Frontal Inferior Triagle, LF)、左侧顶叶 (Left Parietal Lobe, LP)、右侧三角部额下回 (Right Frontal Inferior Triagle, RF)、右侧顶叶 (Right Parietal Lobe, RP)。选取这 8 个功能区域作为感兴趣区 (Region of Interest, ROI)，其峰值点坐标具体如表 2 所示。

表2 DMN和ECN网络内各ROI的坐标

网络	ROI	HC	TBI
DMN	PREC	(12, -52, 8)	(-6, -55, 29)
	mPFC	(3, 53, 26)	(-3, 41, 14)
	LAG	(-30, -79, 35)	(-45, -73, 32)
	RAG	(48, -64, 23)	(45, -70, 38)
ECN	LF	(-48, 23, 29)	(-45, 11, 38)
	LP	(-42, -64, 44)	(-42, -67, 38)
	RF	(48, 23, 38)	(48, 35, 26)
	RP	(48, -61, 38)	(45, -49, 27)

注：DMN：默认模式网络；ECN：执行控制网络；PREC：楔前叶；mPFC：内侧前额叶皮层；LAG：左侧角回；RAG：右侧角回；LF：左侧三角部额下回；LP：左侧顶叶；RF：右侧三角部额下回；RP：右侧顶叶。

1.2.5 计算功能连接

对预处理后的功能像进行带通滤波 (0.01~0.08 Hz)，以 6 mm 的球面半径创建 ROI^[17]。计算各个 ROI 的时间序列的皮尔逊相关系数，最后利用 Fisher z 变换将相关系数转化为 z 值，提高正态性^[18]。整个过程的流程如图 1 所示。

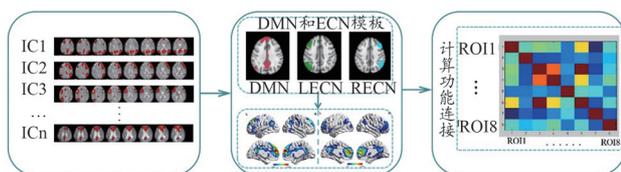


图1 总体流程图

注：IC：独立成分，DMN：默认模式网络，LECN：左侧执行控制网络，RECN：右侧执行控制网络，ROI：感兴趣区。

1.2.6 统计学分析

对每一组得到的 z 值进行单样本 t 检验，得到组内有显著功能联通性的脑区 ($P < 0.05$ ，错误发现率校正)。采用双样本 t 检验，比较 TBI 每次扫描 (每个 session) 与 HC 组间存在显著功能连接差异的脑区 ($P < 0.05$ ，错误发现率校正)。采用配对 t 检验，得到 TBI 三次扫描之间存在显著功能连接差异的脑区 ($P < 0.05$ ，错误发现率校正)，探究 TBI 患者脑功能连接随时间的变化。

2 结果

2.1 ICA分析结果

通过 ICA 分析得到 HC 组、TBI 组与先验模板空间相关性最大的分量。如图 2 所示，在 HC 组中与 DMN 先验模板空间相关性最大的分量为第 18 个成分，与左侧执行控制网络 (Left Executive Control Network, LECN) 先验模板空间相关性最大的分量为第 17 个成分，与右侧执行控制网络 (Right Executive Control Network, RECN) 空间相关性最大的为第 6 个成分。在 TBI 组中与 DMN 先验模板空间相关性最大的分量为第 17 个成分，与 LECN 先验模板空间相关性最大的分量为第 18 个成分，与 RECN 空间相关性最大的为第 4 个成分。

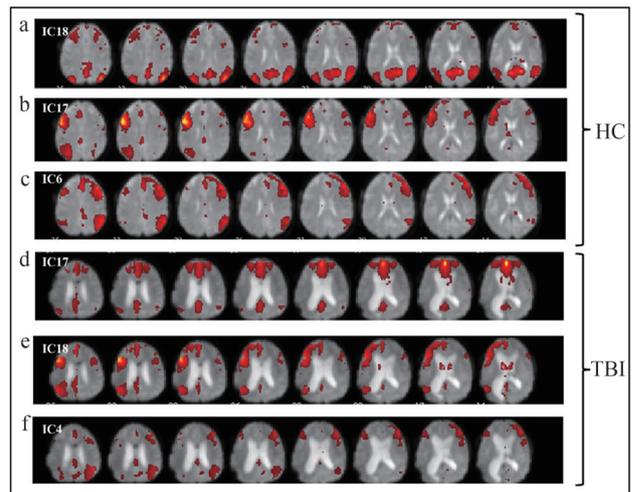


图2 ICA结果

注：a. HC组与DMN模板相关性最大的第18个独立成分；b. HC组与LECN模板相关性最大的第17个独立成分；c. HC组与RECN模板相关性最大的第6个独立成分；d. TBI组与DMN模板相关性最大的第17个独立成分；e. TBI组与LECN模板相关性最大的第18个独立成分；f. HC组与RECN模板相关性最大的第4个独立成分。

2.2 静息态脑网络识别

得到 HC 组和 TBI 组的 DMN 和 ECN 静息态脑网络，其空间分布如图 3 所示。

2.3 统计分析

2.3.1 单样本 t 检验

通过单样本 t 检验得到有统计学意义的各节点间的功能连接，并计算各节点间功能连接的平均值，结果如表 3 所示。图 4 为 HC 组和 TBI 三个阶段的功能连接矩阵图。

2.3.2 双样本 t 检验

将 TBI 后三个时期的功能连接值与 HC 组进行双样本 t 检验，分别得到这三组与 HC 组在 DMN 内、ECN 内、DMN-ECN 网络间的有显著差异的功能连接，见图 5。

在 DMN 中，TBI-ses1、TBI-ses2 组与 HC 组有显著功能连接差异的为 PREC-RAG 和 mPFC-RAG；TBI-ses2 组与 HC 组有显著功能连接差异的为 mPFC-RAG。在 ECN 中，TBI-ses1 组与 HC 组有显著功能连接差异的为 LF-LP、LP-RF、LP-RP 和 RF-RP；TBI-ses2 组与 HC 组有显著功能连接

差异的为 LP-RF、LP-RP 和 RF-RP；TBI-ses3 组与 HC 组有显著功能连接差异的为 LP-RF 和 LP-RP。

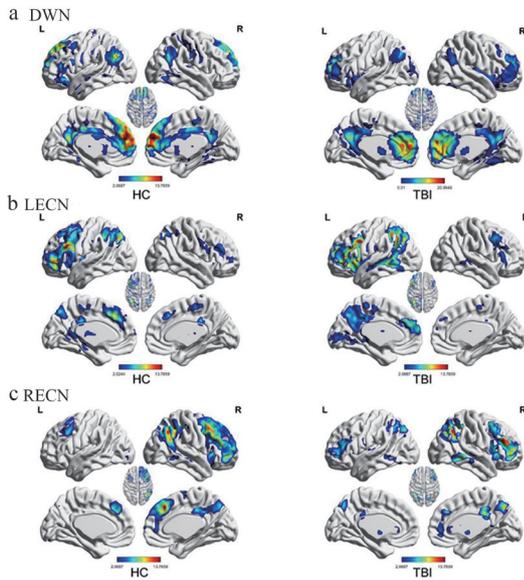


图3 HC和TBI两组DMN和ECN空间分布图

注：a. HC和TBI组默认模式网络；b. HC和TBI组左侧执行控制网络；c. HC和TBI组右侧执行控制网络。

表3 单样本t检验结果

网络	ROI-ROI	HC	TBI-ses1	TBI-ses2	TBI-ses3
DMN	PREC-mPFC	0.5618	0.5884	0.6153	0.6688
	PREC-LAG	0.7148	0.6739	0.6844	0.8427
	PREC-RAG	0.8879	0.5413	0.6511	0.7154
	mPFC-LAG	0.4586	0.2875	0.3393	0.4861
	mPFC-RAG	0.7298	0.2718	0.3548	0.3908
	LAG-RAG	0.7348	0.7094	0.9761	0.8316
ECN	LF-LP	0.7585	0.4367	0.5939	0.5249
	LF-RF	0.7009	0.4293	0.5512	0.6132
	LF-RP	0.4349	0.3235	0.4338	0.4904
	LP-RF	0.6914	0.2650	0.3265	0.3690
	LP-RP	1.0701	0.5133	0.5700	0.5438
RF-RP	0.6725	0.1754	0.3691	0.4536	
DMN-ECN	PREC-LF	0.3613	0.3692	0.4380	0.4372
	PREC-LP	0.4186	0.8600	0.8568	0.9134
	PREC-RF	0.3924	0.0499*	0.1801*	0.2193*
	PREC-RP	0.5279	0.5591	0.5930	0.7018
	mPFC-LF	0.4739	0.3149	0.4368	0.3756
	mPFC-LP	0.7100	0.4507	0.4521	0.5712
	mPFC-RF	0.5758	0.2147*	0.3773	0.3516
	mPFC-RP	0.6350	0.3466	0.4898	0.5073
	LAG-LF	0.5531	0.4057	0.4552	0.4284
	LAG-LP	0.5263	0.9956	1.2151	1.2048
	LAG-RF	0.5125	0.1507	0.2671	0.2508*
LAG-RP	0.4737	0.4867	0.5334	0.5735	
RAG-LF	0.3602	0.2726	0.4343	0.4130	
RAG-LP	0.5480	0.7596	0.8527	0.9167	
RAG-RF	0.4137	0.3811	0.4538	0.4632	
RAG-RP	0.8041	0.5014	0.6419	0.7652	

注：*未通过错误发现率校正；DMN：默认模式网络；ECN：执行控制网络；PREC：楔前叶；mPFC：内侧前额叶皮层；LAG：左侧角回；RAG：右侧角回；LF：左侧三角部额下回；LP：左侧顶叶；RF：右侧三角部额下回；RP：右侧顶叶。

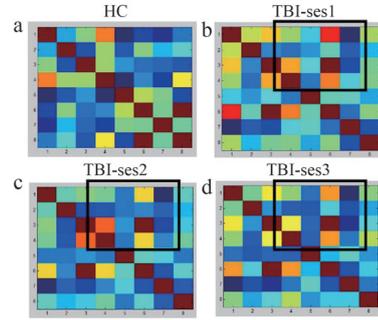


图4 各组功能连接矩阵图

注：a. HC组功能连接矩阵；b. TBI后3个月功能连接矩阵；c. TBI后6个月功能连接矩阵；d. TBI后12个月功能连接矩阵。

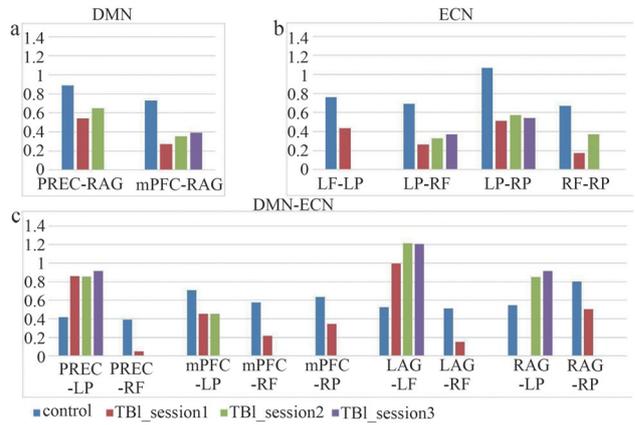


图5 双样本t检验结果

注：a. DMN网络内TBI与HC组有显著差异的功能连接；b. ECN网络内TBI与HC组有显著差异的功能连接；c. DMN-ECN之间两组具有显著差异的功能连接。

DMN-ECN之间，TBI-ses1组与HC组有显著功能连接差异的为PREC-LP、PREC-RF、mPFC-LP、mPFC-RF、mPFC-RP、LAG-LP、LAG-RF和RAG-RP；TBI-ses2组与HC组有显著功能连接差异的为PREC-LP、mPFC-LP、LAG-LP和RAG-LP，TBI-ses3组与HC组有显著功能连接差异的为PREC-LP、LAG-LP和RAG-LP。

图6为TBI后与HC组比较存在显著差异的功能连接分布情况，三个时期涉及的LP的功能连接与HC组相比几乎全部都存在显著差异。

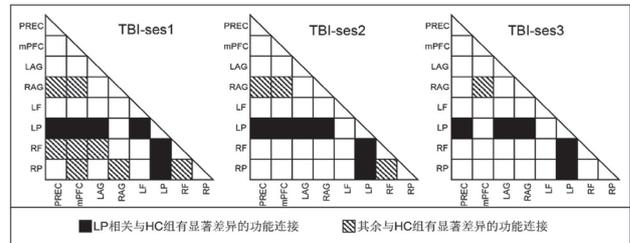


图6 TBI三个时期与HC组相比存在的显著差异分布情况

注：PREC：楔前叶；mPFC：内侧前额叶皮层；LAG：左侧角回；RAG：右侧角回；LF：左侧三角部额下回；LP：左侧顶叶；RF：右侧三角部额下回；RP：右侧顶叶。

2.3.3 配对t检验

图7配对t检验的结果显示TBI-ses1到TBI-ses3有四组节点间功能连接的变化有统计学意义，分别为ECN内的

LF-RP、RF-RP 和 DMN-ECN 之间的 LAG-LP 和 RAG-RP。

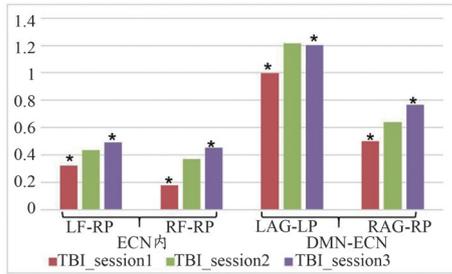


图7 配对t检验结果

注：*有显著差异的组；LAG：左侧角回；RAG：右侧角回；LF：左侧三角部额下回；LP：左侧顶叶；RF：右侧三角部额下回；RP：右侧顶叶。

3 讨论

本研究基于 rs-fMRI，分析 TBI 患者恢复期 1 年各时期 DMN 和 ECN 功能连接情况，发现 TBI 后 1 年内患者的大脑功能连通持续异常，并且随着时间推移变化。

单样本 t 检验的结果显示，虽然 TBI 后大脑功能连接网络发生了变化，但长达一年的时间里，TBI 患者的 DMN、ECN 这两个脑网络功能连接分布几乎一致（图 4），只是强度发生了一些变化，这说明 TBI 后 DMN 与 ECN 的功能连接异常具有一定规律，这种规律可能解释 TBI 后长期存在的后遗症。

双样本 t 检验的结果显示 TBI 患者在一年内三个时期与 HC 组相比，DMN 内 ROI 之间的功能连接值均减小。这验证了目前的一个普遍共识，TBI 后 DMN 内的功能连通性降低，这可能是由连接该网络不同节点的白质通路的轴突损伤所致^[19]。从图 5b 可以看出 ECN 内的节点间的功能连接值也同样降低，而 ECN 对于较高水平的认知和执行功能至关重要，涉及一系列与冲动控制、决策、工作记忆、认知灵活性、错误检测和冲突解决相关的高级过程^[20]，这可能解释了 TBI 患者恢复期可能出现的易怒、记忆力下降等症状。有研究表明 DMN 与 ECN 之间存在一种拮抗关系，这种拮抗关系与认知功能相关^[21]，图 5 中与 HC 组相比，大部分发生异常变化的功能连接并不存在于 DMN 与 ECN 单网络内部，而是集中于 DMN-ECN 两个网络之间。这可能为 TBI 后患者出现的认知障碍提供了一种解释。

图 6 为 TBI 后与 HC 组的功能连接的显著差异按时间变化顺序排列的情况，本研究首次发现在 TBI 后 3、6 和 12 个月与 LP 这个节点相关的功能连接均与 HC 组有显著差异。而 LP 与视觉空间任务，语言理解和语言产生有关^[22]，LP 持续的功能联通性异常可能会导致患者产生失语症，这一发现可能能够为 TBI 预后及后遗症的治疗提供新思路。另外，人类语言、书写和阅读等功能的优势半球多数为左半球，本研究被试的 LP 出现持续异常说明了这点。图 6 还可以看出 TBI 后 3 个月时与 HC 组相比，有显著差异的功能连接节点最多，这说明 TBI 后初期患者大脑的功能联通情况极差，可能是代偿作用的影响，6 个月有显著

差异的功能连接在减少；到 12 个月时，除与 LP 相关的组，其余与 HC 组几乎没有显著差异，这可能说明经过一年的恢复后，除 LP 外，大部分节点间的功能连接都几乎恢复正常。这再次验证 LP 为 TBI 恢复期的关键节点。

从图 7 可以看出，TBI 后 3~6 个月，6~12 个月这两个区间 DMN 和 ECN 的功能连接情况没有显著变化，但比较 3 个月和 12 个月的功能连接发现仍有四组节点间的功能连通性发生变化，这说明 TBI 后，患者恢复期脑内的功能连接并非稳定不变，只是变化相对缓慢。其次我们发现这四组节点分布在 ECN 内和 DMN-ECN 之间，这验证了双样本 t 检验的结果，即在 TBI 后的恢复期 ECN 确实起到了重要作用。

TBI 会导致各种后遗症，且存在的时间长、影响大。以往的研究往往针对某个单独脑网络来进行分析，本研究选择 DMN 与 ECN 两个脑网络，探究 TBI 患者单网络内和双网络间的功能连接变化，并对患者脑损伤后 1 年内三个时间点的脑网络功能连接进行纵向比较分析，对 TBI 患者恢复及后续诊疗具有一定的意义。但仍存在以下局限性：① 使用公共数据集，被试样本有待扩充；② 本研究为静息态下的功能研究，任务态下的功能活动仍值得探讨。

4 结论

本研究选择 DMN 与 ECN 两个与认知功能紧密相关的脑网络，分析 TBI 后患者大脑功能连通性变化。发现 DMN 与 ECN 双网络间的功能连接异常在 TBI 后恢复期较为明显，且功能联通性随时间推移发生缓慢变化。值得注意的是，本研究发现 LP 可能是脑损伤恢复期的关键节点，对该脑区的深入研究能够为 TBI 的预后与后期治疗提供新思路。

[参考文献]

- [1] Dewan MC, Rattani A, Gupta S, et al. Estimating the global incidence of traumatic brain injury[J]. *J Neurosurg*, 2018, 130(43):1-18.
- [2] National Center. Health statistics mortality data on CDC WONDER[EB/OL]. (2020-12-08)[2021-08-15]. <https://wonder.cdc.gov/mcd.html>.
- [3] Bell C, Hackett J, Hall B, et al. Symptomatology following traumatic brain injury in a multidisciplinary clinic: experiences from a tertiary centre[J]. *Br J Neurosurg*, 2018, 32(5):1-6.
- [4] D-Arcy RCN, Lindsay DS, Song XW, et al. Long-term motor recovery after severe traumatic brain injury: beyond established limits[J]. *J Head Trauma Rehabil*, 2016, 31(5):50-58.
- [5] Andrew RM, Patrick SFB, Faith MH. Functional magnetic resonance imaging of mild traumatic brain injury[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2015, 49:8-18.
- [6] 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.
- [7] 刘浩,周星帆,陈宇辰,等.基于功能连接的急性脑干梗死默认功能网络研究[J].中国医疗设备,2018,33(12):73-76.
- [8] Qin P,Wu XH,Huang ZR,*et al*.How are different neural networks related to consciousness[J].*Ann Neurol*,2015,78(4):594-605.
- [9] Threlkeld ZD,Bodien YG,Rosenthal ES,*et al*.Functional networks reemerge during recovery of consciousness after acute severe traumatic brain injury[J].*Cortex*,2018,106:299-308.
- [10] Li FF,Lu LY,Shang SA,*et al*.Disrupted functional network connectivity predicts cognitive impairment after acute mild traumatic brain injury[J].*CNS Neurosci Ther*,2021,15(4):1840-1854.
- [11] Song J,Li J,Chen LX,*et al*.Altered gray matter structural covariance networks at both acute and chronic stages of mild traumatic brain injury[J].*Brain Imaging Behav*,2021,15(4):1840-1854.
- [12] 张玉莲,付丽媛,李辉,等.静息态功能磁共振在MRI阴性颞叶癫痫患者脑功能连接的研究[J].中国医疗设备,2021,36(7):14-17.
- [13] Roy A,Bernier RA,Wang JL,*et al*.The evolution of cost-efficiency in neural networks during recovery from traumatic brain injury[J].*PLoS One*,2017,12(4):e0170541.
- [14] Wendling KDS,Hefele A,Muensterer O,*et al*.Trauma scores and their prognostic value for the outcome following pediatric polytrauma[J].*Front Pediatr*,2021,9:721585.
- [15] Wang SS,Chen B,Yu YL,*et al*.Altered resting-state functional network connectivity in profound sensorineural hearing loss infants within an early sensitive period: a group ICA study[J].*Hum Brain Mapp*,2021,42(13):4314-4326.
- [16] Stanford Learning Lab.Functional imaging in neuropsychiatric disorders Lab[EB/OL].[2021-08-15].http://findlab.stanford.edu/functional_ROIs.html.
- [17] Amir J,Nair JKR,Del CD Raquel,*et al*.Atypical resting state functional connectivity in mild traumatic brain injury[J].*Brain Behav*,2021,11(8):2261-2273.
- [18] 李逢芳,路丽彦,胡蓝月,等.急性期轻度创伤性脑损伤患者的静息态自发脑活动及功能连接异常[J].临床放射学杂志,2020,39(9):1699-1703.
- [19] Sours C,George EO,Zhuo JC,*et al*.Hyper-connectivity of the thalamus during early stages following mild traumatic brain injury[J].*Brain Imaging Behav*,2015,9(3):550-563.
- [20] Ware AL,Biekman B,Hachey R,*et al*.A preliminary high-definition fiber tracking study of the executive control network in blast-induced traumatic brain injury[J].*J Neurotrauma*,2019,36(5):686-701.
- [21] Hellyer PJ,Shanahan M,Scott G,*et al*.The control of global brain dynamics: opposing actions of frontoparietal control and default mode networks on attention[J].*J Neurosci*,2014,34(2):451-461.
- [22] Bao B,Wei HF,Luo PB,*et al*.Parietal lobe reorganization and widespread functional connectivity integration in upper-limb amputees: a rs-fMRI study[J].*Front Neurosci*,2021,15:704079.
- 本文编辑 崔丽君
-
- 上接第14页
- [20] Uygun I,Okur MH,Arayici Y,*et al*.Magnetic compression ostomy for simple tube colostomy in rats-magnacolostomy[J].*Adv Clin Exp Med*,2012,21(3):301-305.
- [21] 张苗苗,吉琳,盖敬慈,等.磁压榨技术用于大鼠结肠造瘘的可行性研究[J].医疗卫生装备,2021,42(9):25-28.
- [22] 刘仕琪,赵静儒,高亚,等.磁吻合技术在小儿外科领域中的应用[J].科学通报,2020,65(13):1264-1273.
- [23] 李宇,张谱丰,马锋,等.胆肠、胰肠双磁吻合在胰十二指肠切除术中的应用[J].肝胆胰外科杂志,2020,32(7):395-402.
- [24] Graves CE,Co C,Hsi RS,*et al*.Magnetic compression anastomosis (magnamosis): first-in-human trial[J].*J Am Coll Surg*,2017,225(5):676-681.
- [25] Liu XM,Yan XP,Zhang HK,*et al*.Magnetic anastomosis for biliojejunostomy: first prospective clinical trial[J].*World J Surg*,2018,42(12):4039-4045.
- [26] 严小鹏,刘雯雁,李涤尘,等.消化外科手术的内镜化途径:磁吻合联合内镜[J].世界华人消化杂志,2014,22(19):2716-2721.
- [27] 任斯宇,张家辉,李益行,等.磁锚定技术的研究现状及临床应用分析[J].中华普通外科杂志,2020,35(4):343-345.
- [28] 张苗苗,吉琳,邓博,等.用于肾移植术后输尿管狭窄再通的磁吻合器的设计及实验验证[J].中国医疗设备,2021,36(8):51-53.
- [29] 张苗苗,吉琳,牟星宜,等.磁吻合研究现状与发展趋势[J].中国医疗设备,2020,35(11):45-48.
- [30] 严小鹏,史爱华,王善佩,等.磁压榨技术治疗复杂性胆道狭窄的临床应用探索[J].中华肝胆外科杂志,2019,25(3):237-240.
- [31] 叶丹,邱明龙,高慧敏,等.磁压榨技术治疗小儿食管闭锁和狭窄的临床应用探索[J].中华小儿外科杂志,2020,41(4):370-374.
- [32] 邓博,徐庶钦,王方舟,等.磁压榨技术治疗输尿管远端梗阻的实验研究[J].中国临床解剖学杂志,2021,39(3):319-322.
- [33] Uygun I,Okur MH,Cimen H,*et al*.Magnetic compression ostomy as new cystostomy technique in the rat: magnacystostomy[J].*Urology*,2012,79(3):738-742.
- [34] 邱明龙,高慧敏,叶丹,等.磁体差异性结构设计在磁压榨技术中的应用分析[J].中国医疗设备,2019,34(3):1-4.
- [35] 严小鹏,任冯刚,刘雯雁,等.磁锚定技术联合磁压榨技术实现超微创胃造瘘[J].中华实验外科杂志,2016,33(2):291-294.
- 本文编辑 崔丽君