

基于磁共振技术的针刺在中风病神经可塑性研究中的应用*

王丽平^{1,2},王雅惠¹,王月¹,刘若一¹,邹忆怀²

1. 北京中医药大学,北京 100029; 2. 北京中医药大学东直门医院,北京 100700

摘要:磁共振技术广泛应用于针刺对中风病的无创性神经可塑性研究中,fMRI、高分辨率 T1 像及 DTI 3 种主要的成像模态在临床研究中相辅相成,发挥着重要作用。针刺可以在功能(局部一致性、低频振幅、体素镜像同伦连接、功能连接、效应连接、脑网络拓扑属性)和结构(灰质体积、白质纤维束各向异性分数)两个方面对中风后的脑组织进行调节,促进中风后的恢复。基于磁共振技术的评价方法为针刺的脑效应机制提供了更加全面、客观的数据支持。现有研究从针刺对局部脑区神经活动的影响逐渐扩展到对同侧半球、对侧半球不同脑区及整体脑网络等的影响,研究的深度、广度不断拓展,但仍存在样本量较少、算法不统一、结果可重复性较低等问题。利用磁共振技术多种成像模态相结合的优势,一个研究中选用多种成像模态相结合,或同一种脑影像技术采用不同分析方法的多模态研究或可作为今后的一个研究思路。

关键词:磁共振技术;针刺;中风病;神经可塑性;静息态功能磁共振;任务态功能磁共振

DOI:10. 16368/j. issn. 1674 - 8999. 2023. 02. 054

中图分类号:R246. 6 **文献标志码:**A **文章编号:**1674 - 8999(2023)02 - 0306 - 06

Application of Acupuncture in Study of Neuroplasticity in Stroke Based on Magnetic Resonance Technology

WANG Liping^{1,2},WANG Yahui¹,WANG Yue¹,LIU Ruoyi¹,ZOU Yihuai²

1. Beijing University of Chinese Medicine,Beijing China 100029; 2. Dongzhimen Hospital of Beijing University of Chinese Medicine,Beijing China 100700

Abstract:Magnetic resonance technology is widely used in the study of non - invasive neuroplasticity of acupuncture on stroke. The three main imaging modalities,fMRI,high - resolution T1 image,and DTI,complement each other and play an important role in clinical research. Studies have confirmed that acupuncture can regulate brain tissue after stroke in terms of both function (local consistency,low - frequency amplitude,voxel mirror homotopy connection,functional connection,effect connection,topological properties of brain network) and structure (gray matter volume,anisotropy fraction of white matter fiber tracts),and promote recovery after stroke. The evaluation method based on magnetic resonance technology provides more comprehensive and objective data support for the brain effect mechanism of acupuncture. Existing studies have gradually expanded from the effects of acupuncture on neural activity in local brain regions to the effects on different brain regions of the ipsilateral and contralateral hemispheres and the overall brain network. The depth and breadth of research continue to expand. However,there are still problems such as small sample size,inconsistent algorithms,and low reproducibility of results. Taking advantage of the advantages of combining multiple imaging modalities of magnetic resonance technology,combining multiple imaging modalities in one study,or the multi - modality research using different analysis methods for the same brain imaging technology can be used as a research idea in the future.

Key words:magnetic resonance technology;acupuncture;stroke;neuroplasticity;resting - state fMRI;task - state fMRI

中风病是我国成年人致死、致残的首位病因,据《中国脑卒中防治报告 2019》显示,我国卒中死亡率为 149. 49/10 万,给国家、社会、家庭及个人带来了沉重的疾病负担^[1-2]。神经可塑性被定义为神经系统通过重组其结构、功能或连接来改变其活动以响应内在或外在刺激的能力,有助于中风后的恢

* 基金项目:国家自然科学基金项目(81873257)

复^[3]。一项 Cochrane 系统评价显示,针刺可以改善中风患者神经功能障碍;一项回顾性队列研究发现,针刺可有效降低中风复发的可能^[4-5]。针刺通过周围性刺激所引发的中枢性效应已成为目前的研究热点。随着磁共振技术的不断发展,针刺对于中风患者神经可塑性的探讨进入相对客观的可视化阶段。本研究以临床研究中常用磁共振成像模态为位点,着眼于针刺对中风患者在功能和结构不同层面的脑效应,以期发现、总结针刺在中风病神经可塑性研究中的应用价值。

1 中风病神经可塑性研究的常用磁共振成像模态

磁共振成像是一种空间分辨率高、非侵入性的影像技术,有助于对目标组织形成客观的形态学认识,可设置不同的扫描方式、扫描参数,具有多种成像模态相结合的优势。在针刺对中风病神经可塑性的研究中,磁共振成像的常用成像模态主要有侧重于功能的功能磁共振成像 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) 和侧重于结构的高分辨率 T1 结构像、弥散张量成像 (diffusion tensor imaging, DTI)^[6]。其中, fMRI 采用血氧水平依赖技术 (blood oxygen level – dependent, BOLD) 绘制不同条件下大脑神经活动的时空分布图,以其高分辨率、无辐射性等优势逐渐成为研究人员首选的技术手段;高分辨 T1 结构像侧重于研究灰质形态学特征;DTI 主要通过测量脑组织中水分子布朗运动的差异来评估白质微结构变化及纤维束的完整性。3 种成像模态的侧重点各有不同,在临床研究中相辅相成,发挥重要作用。

2 基于 fMRI 的神经可塑性研究

根据是否设计实验范式,可将 fMRI 分为静息态功能磁共振和任务态功能磁共振。前者指扫描期间无需被执行任何任务,后者指扫描期间被试需要接受或执行研究者设计的任务。针刺与 fMRI 相结合的任务态常用实验范式有组块设计、单一组块设计、改良组块设计、非重复事件相关设计以及重复测量设计等^[7],通过不同的扫描与实验设计探讨针刺后即刻脑效应或针刺疗程后效应。基于 fMRI 的神经可塑性的探索常用分析方法大体分为两类:一类是侧重描述大脑局部 BOLD 信号特征(局部一致性、低频振幅等)的指标;另一类是侧重于不同脑区之间功能连接分析和脑网络拓扑属性的表征。

2.1 局部一致性 (regional homogeneity, ReHo)

ReHo 分析利用肯德尔和谐系数 (Kendall's coefficient concordance, KCC),以体素方式来评估给定体素与其邻近体素时间序列的一致性^[8]。中风患者健侧相关脑区 ReHo 值呈现不一样的变化,研究显示,患侧 ReHo 值增加,健侧减少,且健侧 ReHo 的变化与病情严重程度有关^[9-11]。ReHo 还与中风患者肢体功能评分 (Fugl – Meyer assessment, FMA) 具有显著相关性,可以作为评估脑卒中后康复治疗有效性的工具^[11]。研究表明,针刺单穴 (阳陵泉) 即刻效应、针刺配穴 (曲池和足三里) 15 min 后效应及针刺组穴 (百会、风池、曲池、合谷、足三里、阳陵泉、悬钟、三阴交) 疗程效应,均可调整中风患者双侧额、顶叶等脑区的 ReHo 值^[10,12-13]。有研究者在组穴、疗程相同的情况下进一步比较普通针刺与电针两种不同针刺方法对中风患者大脑 ReHo 的影响,结果显示,电针组治疗后,额、顶叶等脑区 ReHo 信号变化更明显^[14]。

2.2 低频振幅 (amplitude of low – frequency fluctuation, ALFF)

ReHo 着眼于脑区内时间序列的相似性,ALFF 则侧重于衡量脑区活动的幅度,反映局部自发脑活动的强度^[15]。研究发现,ALFF 对生理噪声比较敏感,因此研究者提取了低频振幅比率 fALFF,即 ALFF 值除以整个频段的振幅均值^[16]。临床上,中风患者 ALFF/fALFF 的相关研究主要有经典频段 (0.01 ~ 0.08 Hz) 到 slow – 5 亚频段 (0.01 ~ 0.27 Hz)、slow – 4 亚频段 (0.27 ~ 0.73 Hz) 等。在上述 3 个不同频段的研究中,中风患者表现出了不同的自发脑活动^[11,17]。动物实验显示,电针百会、神庭两个穴位可以逆转缺血性大鼠 ALFF 的异常^[18]。临床试验表明,针刺顶点中线 (MS5)、左顶颞前斜线 (MS6) 和左顶颞后斜线 (MS7) 的头针治疗可以增强患侧角回、相邻颞上回、颞中回的 ALFF 值^[19],而顶区、顶前区头针联合体针 (肩髃、臂臑、手三里、外关、髀关、血海、承扶、委中、阳陵泉、悬钟) 治疗 4 周可以减少发病后 fALFF 差异脑区^[20]。

2.3 体素镜像同伦连接 (voxel – mirrored homotopic connectivity, VMHC)

双侧大脑半球之间同源对称脑区的神经活动高度同步^[21],VMHC 就是基于此理论分析方法,侧重于分析双侧大脑半球间对称区域神经活动相关性^[22]。中风患者双侧大脑半球间的同伦功能发生改变,VMHC 呈现降低变化^[23-24]。同时,VMHC 还可以预测中风患者功能恢复^[25]。针刺手足十二针组穴 (曲池、内关、合谷、阳

陵泉、足三里、三阴交)2周可以改善上肢FMA总分,与双侧小脑扁桃体的VMHC呈正相关^[24]。头针取顶点中线(MS5)、左顶颞前斜线(MS6)和左顶颞后斜线(MS7)治疗6d,增加了双侧以BA6和BA8为主的额叶区域的VMHC值^[19]。

2.4 功能连接 功能连接展示了不同脑区间基于血氧水平依赖信号的神经活动的时间相关性^[26]。基于感兴趣区的一般线性模型和基于数据驱动的独立成分分析是静息态功能磁共振最常见的分析方法。研究的角度从定义一个感兴趣区,观察其与全脑体素的功能连接,到定义多个感兴趣区,观察感兴趣区之间的功能连接,从特定脑网络到全脑功能网络连接模式^[27]。早期阶段,中风患者双侧初级感觉运动皮层之间的功能连接减少,静息态功能磁共振的功能连通性可以作为评估中风严重程度标志物,以预测患者后期的恢复情况^[28]。以梗死侧辅助运动区、海马旁回为感兴趣区的研究显示,头针治疗可以增强急性缺血性中风患者视觉和认知运动网络的功能连接^[29]。针刺阳陵泉可以增加中风患者双侧初级运动区的功能连接,对运动皮层连接组(双侧初级运动区、双侧辅助运动区、双侧运动前区)也有一定的调节作用^[30-31]。头针取病灶侧顶颞前斜线治疗14d不仅可以增强中风患者双侧辅助运动区的功能连接,而且会使额叶皮层与对侧基底节的功能连接有所提高^[32]。以双侧SMA、M1、PCG、PMd、PMv为感兴趣区的研究发现,针刺组穴(百会、双侧风池、双侧悬钟、双侧曲池、双侧合谷、双侧足三里、双侧三阴交)4周可以使半球间异常的功能连接接近正常水平,使双侧M1降低的功能连接增加^[33]。

2.5 图论分析 图论分析通过量化脑网络属性来描述复杂网络的拓扑结构,可以更好地了解神经系统疾病的恢复过程^[34]。在fMRI数据分析中,把感兴趣脑区定义为节点,脑区之间的连接为点与点之间的边,构建连接矩阵,如果两个节点之间的连接矩阵中的相关系数达到设定阈值,则为脑网络的边缘。进而对包括聚类系数、特征路径长度、网络效率等指标在内的整体脑网络进行定量分析,同时利用节点度值、介数中心度等指标对节点(脑区)进行核心节点、连接枢纽的衡量。以AAL90为模板构建脑网络的研究显示,中风患者的最短路径长度较短,整体效率较高,功能性脑网络有随机化的趋势^[35]。以运动执行网络21个感兴趣区为节点的图论分析发现,在中风恢复过程中,患侧初级运动区和对侧小脑网络

内的区域中心性显著增加^[36]。针刺阳陵泉即刻效应可以提高中风患者聚类系数,调节全脑功能网络核心节点,增加功能网络、核心节点的局部效率^[37]。

2.6 效应连接 功能连接显示的是脑区之间的相关性,无法体现脑区之间的信息流动。效应连接侧重于观察一个脑区对另一个脑区的影响,揭示脑区之间的信息流动,主要的分析方法有动态因果模型(DCM)及格兰杰因果模型分析(GCA)^[38]。与健康人相比,中风患者效应连接存在异常,主要表现为患侧到健侧M1的效应连接减弱,而健侧M1、SMA到患侧M1的效应连接值增加^[39]。随着运动功能的恢复,患侧到对侧M1的效应连接增强^[40]。针刺阳陵泉可双向增强中风患者小脑和初级感觉运动皮质之间的效应连接,翻转左侧额顶叶网络的信息输入为输出,默认模式网络的信息输出为输入,同时调节其他特定脑网络之间的效应连接强度和方向^[41-42]。

3 基于结构像的神经可塑性研究

3.1 基于高分辨T1结构像的神经可塑性研究 高分辨T1结构像侧重于研究灰质形态学变化,常用的分析方法为基于体素的形态学变化(Voxel-based morphometry, VBM)。VBM是利用高分辨率结构像,对受试者局部灰质浓度进行体素水平的比较^[43]。研究发现,中风后与病变直接或间接相关的双侧大脑区域的灰质体积减小,与运动和认知功能相关的几个脑区灰质体积增加^[44]。灰质体积结构的重塑可促进运动功能的恢复,研究发现,针刺组穴(百会、风池、曲池、合谷、阳陵泉、足三里、三阴交、悬钟)4周可以促进中风患者额叶和默认模式网络脑区结构重组,主要表现为病变侧脑区灰质体积增加,健侧减少^[45]。针刺右侧顶颞前斜线治疗右侧基底节梗死患者2周,可以促进双侧小脑、部分感觉皮层的灰质重构^[46]。

3.2 基于DTI的神经可塑性研究 DTI主要通过测量脑组织中水分子布朗运动的差异来评估白质微结构变化,用于预测中风后运动功能的恢复以及监测神经康复干预的效果^[47]。分子各向异性数(fractional anisotropy, FA)是DTI影像中使用最广泛的标量,主要分析方法有基于体素的分析(voxel-based analysis, VBA)、基于特定纤维束的分析和基于纤维束示踪的空间统计方法(tract-based spatial statistics, TBSS)。TBSS避免了VBA在平滑、配准等过程中存在的不足以及手动选择感兴趣区的可重复性问题,是目前临床中常用的分析方法^[48]。DTI可以用

来评估中风后皮质脊髓束(corticospinal tract, CST)的完整性。中风后,随着运动功能的恢复,双侧 CST 的 FA 均会增加,荟萃分析显示,中风患者 FA 值与上肢运动恢复之间存在很强的相关性^[49-50]。研究表明,针刺中风患者组穴(上星、百会、印堂、内关、三阴交)2 周增加了梗死区、大脑脚等感兴趣区的 FA 值;电针(曲池、外关)4 周同样可以增加梗死区、大脑脚以及病灶侧内囊后肢的 FA 值^[51-52];病灶侧顶颞前斜线采用头针治疗 14 d 可使同侧额叶运动相关脑区 FA 值增加^[32]。

4 机遇与挑战

基于磁共振技术的针刺在中风患者神经可塑性的研究从针刺对局部脑区神经活动的影响,逐渐扩展到对同侧半球、对侧半球不同脑区及整体脑网络等的影响,研究的深度与广度在横向和纵向上均呈现不断拓展的趋势。不同的针刺方式、方法如单穴、组穴、电针、头针等也会产生不同的影响,还有研究者观察了真穴、假穴脑效应变化的异同^[31,53]。今后的研究中,新的数据分析方法如动态功能连接、动态脑网络、动态效应连接、机器学习、个体化分析等,都可以引入针刺对中风患者神经可塑性的探索领域。借助这些新技术、新方法,针刺对中风患者神经可塑性的命题将会更加客观地展现在研究者面前。但目前对于针刺中风患者神经可塑性的研究存在样本量较少、算法不统一、结果可重复性较低等问题。利用磁共振技术多种成像模态相结合的优势,一个研究中选用多种成像模态相结合或者同一种脑影像技术采用不同的分析方法所形成的多模态研究逐渐被越来越多的研究者所采纳^[19,54]。

5 结语

磁共振技术使得针刺对中风病无创性神经可塑性的研究得以实现,现有研究主要在功能和结构两个方面进行探讨。功能方面,针刺可以调节中风后脑组织 ReHO、ALFF 等局部指标,同时会对脑区功能的整合、大尺度脑网络的拓扑属性以及效应连接产生不同的脑效应。结构方面,针刺可促进灰质体积和白质纤维束分子各向异性分数的重构,促进中风损伤后的恢复。综上,基于磁共振技术的评价方法为针刺的脑效应机制提供了更加全面、客观的数据支持。

参考文献:

[1] WANG Y J, LI Z X, GU H Q, et al. China stroke statistics 2019; a re-

port from the national center for healthcare quality management in neurological diseases, China national clinical research center for neurological diseases, the Chinese stroke association, national center for chronic and non - communicable disease control and prevention, Chinese center for disease control and prevention and institute for global neuroscience and stroke collaborations [J]. Stroke Vasc Neurol, 2020, 5 (3) : 211 - 239.

[2] 《中国脑卒中防治报告 2019》编写组. 《中国脑卒中防治报告 2019》概要[J]. 中国脑血管病杂志, 2020, 17 (5) : 272 - 281. Report on stroke prevention and treatment in China, 2019 Writing Group. Brief report on stroke prevention and treatment in China, 2019 [J]. Chin J Cerebrovasc Dis, 2020, 17 (5) : 272 - 281.

[3] MATEOS - APARICIO P, RODRIGUEZ - MORENO A. The impact of studying brain plasticity[J]. Front Cell Neurosci, 2019, 13 : 66.

[4] SHIH C C, LIAO C C, SUN M F, et al. A retrospective cohort study comparing stroke recurrence rate in ischemic stroke patients with and without acupuncture treatment[J]. Medicine, 2015, 94 (39) : e1572.

[5] YANG A, WU H M, TANG J L, et al. Acupuncture for stroke rehabilitation[J]. Cochrane Database Syst Rev, 2016, 2016 (8) : CD004131.

[6] 尹大志. 多模态磁共振成像数据分析方法研究与应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2014. YIN D Z. A study of data analysis and applications of ultimodal magnetic resonance imaging[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.

[7] 闫岩, 谭晓婵, 王宇, 等. 基于 fMRI 的针刺治疗卒中临床试验的方法学评价[J]. 上海针灸杂志, 2021, 40 (10) : 1280 - 1292. YAN Y, TAN X C, WANG Y, et al. Methodological evaluation of clinical trials of acupuncture treatment of stroke based on fMRI [J]. Shanghai J Acupunct Moxibustion, 2021, 40 (10) : 1280 - 1292.

[8] ZANG Y F, JIANG T Z, LU Y L, et al. Regional homogeneity approach to fMRI data analysis[J]. NeuroImage, 2004, 22 (1) : 394 - 400.

[9] ZHU J F, JIN Y Y, WANG K, et al. Frequency - dependent changes in the regional amplitude and synchronization of resting - state functional MRI in stroke[J]. PLoS One, 2015, 10 (4) : e0123850.

[10] 付彩红, 宁艳哲, 张勇, 等. 针刺阳陵泉对中风偏瘫病人局部一致性影响的静息态 fMRI 研究[J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2019, 17 (11) : 1623 - 1629. FU C H, NING Y Z, ZHANG Y, et al. Effect of acupuncture at Yanglingquan (GB34) on brain regional homogeneity in stroke patients with hemiplegia by functional magnetic resonance imaging[J]. Chin J Integr Med Cardio Cerebrovasc Dis, 2019, 17 (11) : 1623 - 1629.

[11] YIN D Z, LUO Y L, SONG F, et al. Functional reorganization associated with outcome in hand function after stroke revealed by regional homogeneity[J]. Neuroradiology, 2013, 55 (6) : 761 - 770.

[12] CHEN S Q, CAI D C, CHEN J X, et al. Altered brain regional homogeneity following contralateral acupuncture at Quchi (LI 11) and Zusanli (ST 36) in ischemic stroke patients with left hemiplegia: an fMRI study[J]. Chin J Integr Med, 2020, 26 (1) : 20 - 25.

[13] WU P, ZENG F, YIN C X, et al. Effect of acupuncture plus conventional treatment on brain activity in ischemic stroke patients: a regional homogeneity analysis[J]. J Tradit Chin Med, 2017, 37 (5) :

650 – 658.

[14]谢西梅,米欣晶. 不同针刺方法对缺血性中风患者静息态脑 Reho 信号的影响[J]. 河南中医,2019,39(4):633 – 636.

XIE X M,MI X J. The influence of different acupuncture methods on reho signals in resting brain of patients with ischemic stroke[J]. Henan Tradit Chin Med,2019,39(4):633 – 636.

[15]ZANG Y F,HE Y,ZHU C Z,et al. Altered baseline brain activity in children with ADHD revealed by resting – state functional MRI[J]. Brain Dev,2007,29(2):83 – 91.

[16]ZOU Q H,ZHU C Z,YANG Y H,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.

[17]李晓琳,徐敏杰,曹云,等. 卒中后失语静息态脑功能成像亚频段低频振幅脑活动研究[J]. 中国康复理论与实践,2021,27(5):497 – 503.

LI X L,XU M J,CAO Y,et al. Frequency – dependent alterations in amplitude of low – frequency fluctuations in resting – state functional magnetic resonance imaging of post stroke aphasia[J]. Chin J Rehabil Theory Pract,2021,27(5):497 – 503.

[18]WEN T,ZHANG X F,LIANG S X,et al. Electroacupuncture ameliorates cognitive impairment and spontaneous low – frequency brain activity in rats with ischemic stroke[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2018,27(10):2596 – 2605.

[19]LIU H C,JIANG Y J,WANG N N,et al. Scalp acupuncture enhances local brain regions functional activities and functional connections between cerebral hemispheres in acute ischemic stroke patients[J]. Anat Rec (Hoboken),2021,304(11):2538 – 2551.

[20]欧芳元,黄俊浩,易小琦,等. 静息态 fMRI 比率低频振幅技术在针刺治疗脑梗死的研究[J]. 中国医学计算机成像杂志,2019,25(3):236 – 241.

OU F Y,HUANG J H,YI X Q,et al. Resting – state fMRI derived fractional amplitude low – frequency fluctuation in patients of cerebral infarction with acupuncture treatment[J]. Chin Comput Med Imaging,2019,25(3):236 – 241.

[21]SALVADOR R,SUCKLING J,SCHWARZBAUER C,et al. Undirected graphs of frequency – dependent functional connectivity in whole brain networks [J]. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 2005,360(1457):937 – 946.

[22]ZUO X N,XING X X. Test – retest reliabilities of resting – state FMRI measurements in human brain functional connectomics; a systems neuroscience perspective [J]. Neurosci Biobehav Rev, 2014,45: 100 – 118.

[23]TANG C Z,ZHAO Z Y,CHEN C,et al. Decreased functional connectivity of homotopic brain regions in chronic stroke patients; a resting state fMRI study[J]. PLoS One,2016,11(4):e0152875.

[24]江澜. 基于大脑双侧性联接的中风偏瘫针刺调控效应机制的研究[D]. 北京:北京中医药大学,2020.

JIANG L. Study on the mechanism of acupuncture regulation effect of stroke hemiplegia based on bilateral cerebral connectivity [D]. Beijing:Beijing University of Chinese Medicine,2020.

[25]SHAN Y,WANG Y S,ZHANG M,et al. Homotopic connectivity in early pontine infarction predicts late motor recovery[J]. Front Neurol,2018,9:907.

[26]FRISTON K J. Functional and effective connectivity: a review [J]. Brain Connect,2011,1(1):13 – 36.

[27]史安平,于瀛,胡博,等. 全脑功能连接模式分析研究及临床应用进展[J]. 中国介入影像与治疗学,2021,18(7):430 – 433.

SHI A P,YU Y,HU B,et al. Research advancements of whole – brain functional connectivity patterns and clinical application[J]. Chin J Interv Imaging Ther,2021,18(7):430 – 433.

[28]PUIG J,BLASCO G,ALBERICH – BAYARRI A,et al. Resting – state functional connectivity magnetic resonance imaging and outcome after acute stroke[J]. Stroke,2018,49(10):2353 – 2360.

[29]LIU H C,CHEN L P,ZHANG G F,et al. Scalp acupuncture enhances the functional connectivity of visual and cognitive – motor function network of patients with acute ischemic stroke [J]. Evid Based Complement Alternat Med,2020,2020:8836794.

[30]NING Y Z,LI K S,FU C H,et al. Enhanced functional connectivity between the bilateral primary motor cortices after acupuncture at Yanglingquan (GB34) in right – hemispheric subcortical stroke patients; a resting – state fMRI study[J]. Front Hum Neurosci,2017,11:178.

[31]耿花蕾. 基于运动皮层连接组的中风偏瘫针刺效应机制的多模态磁共振研究[D]. 北京:北京中医药大学,2021.

GENG H L. Multi – modal MRI study on acupuncture effect mechanism of stroke hemiplegia based on motor cortex connection group [D]. Beijing:Beijing University of Chinese Medicine,2021.

[32]姜思竹. 基于静息态 fMRI 和 DTI 探讨头针治疗脑卒中偏瘫的机制研究[D]. 北京:北京中医药大学,2017.

JIANG S Z. Study on the mechanism of scalp acupuncture treatment of stroke hemiplegia based on resting fMRI and DTI [D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine,2017.

[33]LI Y X,WANG Y,LIAO C X,et al. Longitudinal brain functional connectivity changes of the cortical motor – related network in subcortical stroke patients with acupuncture treatment [J]. Neural Plast,2017,2017:5816263.

[34]MAZROOYISEBDANI M,NAIR V A,LOH P L,et al. Evaluation of changes in the motor network following BCI therapy based on graph theory analysis[J]. Front Neurosci,2018,12:861.

[35]ZHU Y F,BAI L,LIANG P P,et al. Disrupted brain connectivity networks in acute ischemic stroke patients[J]. Brain Imaging Behav,2017,11(2):444 – 453.

[36]WANG L,YU C S,CHEN H,et al. Dynamic functional reorganization of the motor execution network after stroke[J]. Brain,2010,133(Pt 4):1224 – 1238.

[37]韩笑. 基于全脑功能网络的针刺干预中风病的脑效应机制研究[D]. 北京:北京中医药大学,2019.

HAN X. Study on the brain effect mechanism of acupuncture intervention on stroke based on whole brain function network [D]. Beijing:Beijing University of Chinese Medicine,2019.

[38]FRISTON K J. Functional and effective connectivity in neuroimaging: a synthesis[J]. Hum Brain Mapp,1994,2(1/2):56 – 78.

[39]温雅. 慢性皮层下脑梗死患者运动网络效应连接和功能连接的

变化[D].天津:天津医科大学,2018.

WEN Y. Effective and functional connectivity changes of motor network in chronic subcortical stroke[D]. Tianjin:Tianjin Medical University,2018.

[40] PENG Y M, LIU J C, HUA M H, et al. Enhanced effective connectivity from ipsilesional to contralesional M1 in well-recovered subcortical stroke patients[J]. Front Neurol, 2019, 10: 909.

[41] XIE Z J, CUI F Y, ZOU Y H, et al. Acupuncture enhances effective connectivity between cerebellum and primary sensorimotor cortex in patients with stable recovery stroke[J]. Evid Based Complement Alternat Med, 2014, 2014: 603909.

[42] 付彩红. 针刺阳陵泉对中风偏瘫静息脑网络响应特征的多元Granger因果分析研究[D]. 北京:北京中医药大学, 2016.

FU C H. Multivariate granger causal analysis of the response characteristics of acupuncture at Yanglingquan to the resting brain network of stroke hemiplegia [D]. Beijing: Beijing University of Chinese Medicine, 2016.

[43] ASHBURNER J, FRISTON K J. Voxel-based morphometry—the methods[J]. NeuroImage, 2000, 11(6): 805–821.

[44] FAN F M, ZHU C Z, CHEN H, et al. Dynamic brain structural changes after left hemisphere subcortical stroke[J]. Hum Brain Mapp, 2013, 34(8): 1872–1881.

[45] WU P, ZHOU Y M, LIAO C X, et al. Structural changes induced by acupuncture in the recovering brain after ischemic stroke[J]. Evid Based Complement Alternat Med, 2018, 2018: 5179689.

[46] 郎奕, 李匡时, 杨嘉颐, 等. 针刺顶颞前斜线对脑梗死偏瘫患者脑灰质重塑的影响[J]. 针刺研究, 2020, 45(2): 141–147.

LANG Y, LI K S, YANG J Y, et al. Effect of acupuncture at the anterior oblique parietotemporal line on gray matter remodeling in patients with hemiplegia of cerebral infarction [J]. Acupunct Res, 2020, 45(2): 141–147.

[47] PUIG J, BLASCO G, SCHLAUG G, et al. Diffusion tensor imaging as a prognostic biomarker for motor recovery and rehabilitation after stroke[J]. Neuroradiology, 2017, 59(4): 343–351.

[48] ABHINAV K, YE H F C, PATHAK S, et al. Advanced diffusion MRI fiber tracking in neurosurgical and neurodegenerative disorders and neuroanatomical studies: a review [J]. Biochim Biophys Acta BBA Mol Basis Dis, 2014, 1842(11): 2286–2297.

[49] KUMAR P, KATHURIA P, NAIR P, et al. Prediction of upper limb motor recovery after subacute ischemic stroke using diffusion tensor imaging: a systematic review and meta-analysis [J]. J Stroke, 2016, 18(1): 50–59.

[50] LU Q H, HUANG G L, CHEN L, et al. Structural and functional reorganization following unilateral internal capsule infarction contribute to neurological function recovery [J]. Neuroradiology, 2019, 61(10): 1181–1190.

[51] SHEN Y X, LI M, WEI R P, et al. Effect of acupuncture therapy for postponing Wallerian degeneration of cerebral infarction as shown by diffusion tensor imaging [J]. J Altern Complement Med, 2012, 18(12): 1154–1160.

[52] 廖少钦. 电针促进缺血性脑卒中上肢功能恢复的DTI评价[D]. 福州:福建中医药大学, 2015.

LIAO S Q. Electric acupuncture advanced effects on ischemia stroke upper limb function recovery of the DTI evaluation[D]. Fuzhou: Fujian University of Traditional Chinese Medicine, 2015.

[53] 陈纳纳. 针刺组穴对脑梗死后偏瘫患者脑功能观察研究[D]. 广州:广州中医药大学, 2017.

CHEN N N. Observation on the brain function in patients with hemiplegia treated by multiple acupuncture points [D]. Guangzhou: Guangzhou University of Chinese Medicine, 2017.

[54] NAKASHIMA A, MORIUCHI T, MITSUNAGA W, et al. Prediction of prognosis of upper-extremity function following stroke-related paralysis using brain imaging [J]. Journal of physical therapy science, 2017, 29(8): 1438–1443.

收稿日期:2022-09-15

作者简介:王丽平(1990-),女,山东济宁人,博士研究生,研究方向:中医药防治脑病。

通信作者:邹忆怀(1965-),男,北京人,博士研究生导师,研究方向:中医药防治脑病。E-mail: zouyihuai2004@163.com

编辑:吴楠