

下腰痛患者脑网络的动态功能连接

贾润慧¹,汪新柱¹,陈晓飞¹,董馥闻¹,周晟¹,俞连春²,陈祁青³

1. 甘肃省中医院放射影像科,甘肃兰州 730050; 2. 兰州大学物理科学与技术学院,甘肃兰州 730000; 3. 甘肃省中医院脊柱骨科,甘肃兰州 730050

【摘要】目的:探究下腰痛(LBP)患者脑网络功能连接的动态变化。**方法:**对20例LBP患者及20例健康志愿者进行静息态脑功能核磁共振扫描,采用连接数熵(CNE)比较LBP患者与健康志愿者大脑的动态功能连接变化,分析LBP患者各独立脑区的功能灵活性与年龄和日本骨科协会(JOA)量表评分的相关性。**结果:**全脑水平,LBP患者CNE低于正常人($P<0.05$),显著改变的脑区集中在额叶皮层、颞叶皮层、皮质下核团及部分枕叶皮层。脑区水平,LBP患者中AAL 15($r=-0.5255$, $P=0.0208$)、AAL 32($r=-0.5292$, $P=0.0198$)、AAL 41($r=-0.5469$, $P=0.0154$)、AAL 62($r=0.6015$, $P=0.0064$)、AAL 76($r=-0.5133$, $P=0.0246$)、AAL 89($r=0.4619$, $P=0.0465$)和AAL 90($r=0.5085$, $P=0.0262$)与年龄有临床相关性。LBP患者AAL 17($r=-0.4991$, $P=0.0296$)、AAL 47($r=0.4814$, $P=0.0369$)、AAL 82($r=-0.5548$, $P=0.0137$)、AAL 90($r=-0.5621$, $P=0.0123$)与临床JOA量表评分有相关性。**结论:**LBP患者全脑功能网络的功能灵活性是降低的。CNE动态功能连接的测量不仅为量化大脑活动的时间与空间行为提供了一个新的框架,而且可以探索LBP脑功能变化的机理。

【关键词】下腰痛;磁共振成像;动态功能连接;功能灵活性

【中图分类号】R445.2;R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)09-1084-06

Dynamic functional connectivity of brain networks in patients with low back pain

JIA Runhui¹, WANG Xinzhu¹, CHEN Xiaofei¹, DONG Fuwen¹, ZHOU Sheng¹, YU Lianchun², CHEN Qiqing³

1. Department of Radiology, Gansu Provincial Hospital of TCM, Lanzhou 730050, China; 2. School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Department of Orthopaedic Spine, Gansu Provincial Hospital of TCM, Lanzhou 730050, China

Abstract: Objective To explore the dynamic functional connectivity of brain networks in low back pain (LBP) patients. **Methods** The resting-state functional magnetic resonance imaging was performed on 20 LBP patients and 20 normal controls. The dynamic functional connectivity between LBP patients and normal controls was compared using connectivity number entropy (CNE), and the correlations between functional flexibility of each independent brain region in LBP patients and age and JOA scale score were also analyzed. **Results** The CNE of LBP patients was lower than that of normal controls at the whole brain level ($P<0.05$), and the brain regions with significant changes were concentrated in frontal cortex, temporal cortex, subcortical nucleus mass and part of occipital cortex. Locally, some brain regions such as AAL 15 ($r=-0.5255$, $P=0.0208$), AAL 32 ($r=-0.5292$, $P=0.0198$), AAL 41 ($r=-0.5469$, $P=0.0154$), AAL 62 ($r=0.6015$, $P=0.0064$), AAL 76 ($r=-0.5133$, $P=0.0246$), AAL 89 ($r=0.4619$, $P=0.0465$) and AAL 90 ($r=0.5085$, $P=0.0262$) had clinical relevance to age, and others brain regions, including AAL 17 ($r=-0.4991$, $P=0.0296$), AAL 47 ($r=0.4814$, $P=0.0369$), AAL 82 ($r=-0.5548$, $P=0.0137$) and AAL 90 ($r=-0.5621$, $P=0.0123$), were correlated with JOA scale score. **Conclusion** The functional flexibility of brain networks in LBP patients is reduced at the whole brain level. The measurement of CNE for evaluating dynamic functional connectivity not only provides a new framework for quantifying spatial and temporal behaviors of brain activity, but also can be used to explore the mechanism of brain function changes in LBP patients.

Keywords: low back pain; magnetic resonance imaging; dynamic functional connectivity; functional flexibility

【收稿日期】2021-03-23

【基金项目】国家自然科学基金(81760877);甘肃省青年科技基金(17JR5RA049)

【作者简介】贾润慧,副主任医师,研究方向:脑功能磁共振成像,E-mail: jrhlzh@163.com

【通信作者】周晟,研究生导师,主任医师,研究方向:针灸影像学,E-mail: lzzs@sina.com

前言

下腰痛(Low Back Pain, LBP)是以腰背部疼痛为主要表现,或伴有下肢放射痛的综合征^[1]。在全球,LBP是导致残疾的主要原因^[2]。随着人口的老齡化,LBP将是影响我国人群健康的重大疾病,会造成严重的社会经济负担^[1]。诸多研究表明,中枢神经系

统的可塑性在LBP的发展和维持中起着至关重要的作用^[3]。既往研究多探索LBP患者的脑功能网络的静态改变^[4],所谓静态是指整个时间段内脑网络处在一个固定的状态,但是大脑始终在不断调整连接模式来处理瞬息万变的外部刺激,其功能连接(Functional Connection, FC)是随时间变化的,所以动态功能连接(Dynamic Functional Connectivity, dFC)可以更好地反应大脑处理信息的效率。连接数目熵^[5-7](Connectivity Number Entropy, CNE)作为衡量dFC的指标,兼具全脑及局部脑区的功能灵活性。本研究采用连接数目熵来探索LBP患者dFC的变化。

1 资料与方法

1.1 一般资料

纳入2017年10月至2018年1月于甘肃省中医院就诊的LBP患者20例,其中,男12例,女8例;年龄26~54岁,平均年龄(44.5±3.4)岁;体质量(62.53±3.75) kg;右利手。纳入标准:①根据临床症状和影像[计算机断层摄影术(Computed Tomography, CT)或核磁共振(Magnetic Resonance Imaging, MRI)检查证实为L4-5椎间盘突出压迫神经根所致]明确诊断为腰腿疼患者,病程2个月~1年;②实验前未使用解热镇痛、安眠、激素类药物,或使用过已停2周;③所有研究对象视力、听力和语言功能正常,体内无金属植入物,既往无心、肺、肝、肾等重要器官疾病史,无精神疾病史,无明确脑卒中或其他颅脑疾病史,无MRI检查禁忌症者;④焦虑自评量表(Self-rating anxiety scale, SAS)及抑郁自评量表(Self-rating depression scale, SDS)评定为正常者。正常对照组纳入同年龄段健康志愿者20例,其中,男11例,女9例;年龄24~52岁,平均年龄(43.4±3.6)岁;体质量(60.11±4.27) kg;右利手。LBP组与对照组年龄、性别及体质量差异均无统计学意义($P>0.05$)。该研究经甘肃省中医院伦理委员会批准(2017-060-01),全部受试者均签署知情同意书。

1.2 LBP患者评价

患者入院后临床治疗前行MRI检查,以避免治疗对疾病状态下脑网络的干预。由一位主治医师对LBP患者行日本骨科协会(Japanese Orthopaedic Association Scores, JOA)下腰痛疾患疗效评定表测试。

1.3 静息态数据采集

采用美国GE 3.0T Signa HDxt磁共振扫描仪,8HD高分辨率头线圈。采取仰卧位扫描,辅助垫固定头部,佩戴静音耳塞,叮嘱受试者闭眼,保持清醒状态,避免有任何的主动思维活动。扫描序列为T₂-weight回波平面成像序列,参数:层厚6.0 mm, TE 40 ms, TR 2 000 ms,

翻转角90°,矩阵96×96,视野240 mm×240 mm, NEX=1.0,共扫描22层,扫描时间为10 min,得到300个时间点。

1.4 数据处理

基于SPM12和DPABI两个工具箱处理数据。首先,数据经过时间层校正和头动校正,参考层为中间层。LBP组2例因头动幅度大于3 mm被排除,头动幅度的衡量标准为平动大于3 mm或者转动大于3°。然后,校正过的图像被标准化到MNI空间,并被重采样为分辨率等于3 mm。随后,用半峰全宽值等于4 mm的高斯核对图像进行空间平滑,用0.01~0.08 Hz的低通滤波器滤波,最后用线性回归消除白质与脑脊液中的协变量。根据常用的自动解剖标记(AAL 90)模板,把人脑分成90个感兴趣区域^[8]。将预处理好的数据按照AAL 90模板提取出对应90个脑区的时间序列信号,每个脑区的信号由该脑区内所有体素信号平均得到。

1.5 连接数目熵

连接数目熵的计算基于分时间窗口方法。Preti等^[9]统计发现多数研究者采用20~60 s的时间窗口长度。时间窗口长度选为15个时间点(30 s),步进为2个时间点,得到143个时间窗口。在每个时间窗口内计算功能连接矩阵,将功能连接矩阵二值化为邻接矩阵,并构建静态脑网络。根据阈值的选择原则^[7],采用较低的阈值0.7来二值化关联矩阵,以保证构建的网络中存在足够的节点与边来反应dFC。然后,对每一个脑区统计它与其它89个脑区的连接数目,即对邻接矩阵的每一行(或列)求和,得到一个时间窗口内每个脑区与其他脑区连接数目,对其他窗口也是如此计算。对某个脑区 k ,统计其连接数目在所有时间窗口内的分布,用 p_i 表示某个连接数目出现的概率。最后利用信息熵公式计算连接数目熵:

$$H_k = -\sum p_i \cdot \log_2 p_i \quad (1)$$

每个脑区得到一个对应的熵 H_k ,把90个脑区的熵平均,得到一个被试全脑水平的熵值:

$$H_{\text{brain}} = \frac{1}{90} \sum_{k=1}^{90} H_k \quad (2)$$

1.6 统计学方法

应用SPSS 18.0软件进行统计学分析,符合正态性分布的定量资料用均数±标准差表示,使用双样本 t 检验,然后用Bonferroni方法对双样本 t 检验的显著性标准做校正来控制假阳性率。计数资料组间比较采用 χ^2 检验。LBP组的90个脑区连接数目熵分别与年龄和JOA量表评分进行Pearson相关分析。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 连接数目熵的统计结果

在全脑水平, LBP患者CNE值显著低于正常人 ($P<0.05$) (图1和图2)。与正常人对, 37个脑区存在显著性差异, 主要集中在额叶皮层(额中回、眶部

额中回、岛盖部额下回、眶部额下回、中央前回、补充运动区)、颞叶皮层(颞横回、颞上回、颞中回、颞下回、梭状回、海马旁回)、皮质下核团(包括丘脑、壳核、苍白球、海马、杏仁核)及部分枕叶皮层(枕中回、舌回), 见表1。

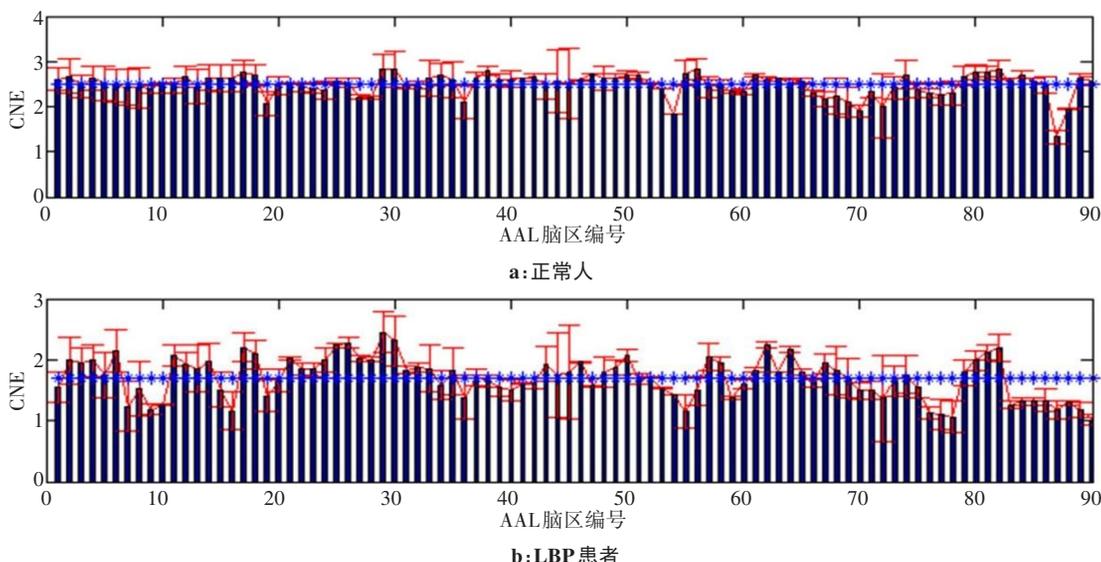


图1 CNE在脑区水平的差异

Fig.1 Comparison of connectivity number entropy (CNE) of brain regions

柱状图的长度代表相应脑区在每组被试中的平均值, 蓝色星号代表两组被试90个脑区的平均CNE, LBP患者的平均CNE显著低于正常人 ($P<0.05$)

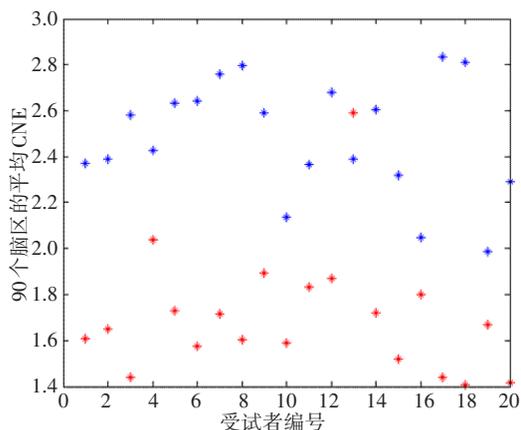


图2 正常人与LBP患者90个脑区平均CNE的对比

Fig.2 Comparison of the average CNE of 90 brain regions between normal controls and LBP patients

蓝色代表正常人, 红色代表LBP患者, 正常人的平均CNE显著高于LBP患者 ($P<0.05$)

2.2 相关性分析

在全脑水平, LBP患者AAL 90的平均CNE值与年龄和JOA量表评分无统计学差异(图3、图4)。在脑区水平, LBP患者的AAL 15、AAL 32、AAL 41、AAL 62、AAL 76、AAL 89、AAL 90脑区与年龄差异

有统计学意义 ($P<0.05$), 其中, AAL 62、AAL 89、AAL 90与年龄呈正相关, AAL 15、AAL 32、AAL 41、AAL 76与年龄呈负相关, 见表2。LBP患者的AAL 17、AAL 47、AAL 82、AAL 90脑区与JOA量表评分差异有统计学意义 ($P<0.05$), 其中, AAL 47与JOA量表评分呈正相关, AAL 17、AAL 82、AAL 90与JOA量表评分呈负相关, 见表3。

3 讨论

3.1 LBP动态脑功能网络改变的分析

大脑熵反映的是神经信息交流的空间和时间的双重信息, 是沟通大脑FC静态与动态的桥梁^[10]。信息熵是衡量一个系统的不确定程度或混乱程度, 而CNE就是基于信息熵的定义, 来反映大脑FC的灵活性^[8]。大量研究表明, 神经系统的动力学存在“临界”理论, 服从幂律分布, 被称为雪崩现象^[11]。当大脑处于临界状态时, 具有最优的神经交流和信息处理能力^[12]。而CNE恰好可以作为临界动力学的一个指标, 其数值高意味着大脑动态接近临界点, 具有较高的功能连接灵活性, 反之亦然^[5]。

Shew等^[12]认为临界状态是可以作为健康神经

表1 正常人与LBP患者AAL脑区CNE的差异性
Tab.1 Difference of CNE in AAL brain regions between normal controls and LBP patients

AAL分区	位置	Mricro命名	P值	AAL分区	位置	Mricro命名	P值
1	中央前回	Precentral_L	<0.001	52	枕中回	Occipital_Mid_L	<0.001
7	额中回	Frontal_Mid_L	<0.001	55	梭状回	Fusiform_L	<0.001
8	额中回	Frontal_Mid_R	<0.001	56	梭状回	Fusiform_R	<0.001
9	眶部额中回	Frontal_Mid_Orb_L	<0.001	61	顶下缘角回	Parietal_Inf_L	<0.001
10	眶部额中回	Frontal_Mid_Orb_R	<0.001	74	豆状壳核	Putamen_R	<0.001
12	岛盖部额下回	Frontal_Inf_Oper_R	<0.001	75	豆状苍白球	Pallidum_L	<0.001
15	眶部额下回	Frontal_Inf_Orb_L	<0.001	76	豆状苍白球	Pallidum_R	<0.001
16	眶部额下回	Frontal_Inf_Orb_R	<0.001	77	丘脑	Thalamus_L	<0.001
20	补充运动区	Supp_Motor_Area_R	<0.001	78	丘脑	Thalamus_R	<0.001
34	内侧旁扣带回	Cingulum_Mid_R	<0.001	79	颞横回	Heschl_L	<0.001
37	海马	Hippocampus_L	<0.001	80	颞横回	Heschl_R	<0.001
38	海马	Hippocampus_R	<0.001	82	颞上回	Temporal_Sup_R	<0.001
39	海马旁回	ParaHippocampal_L	<0.001	83	颞上回	Temporal_Pole_Sup_L	<0.001
40	海马旁回	ParaHippocampal_R	<0.001	84	颞上回	Temporal_Pole_Sup_R	<0.001
41	杏仁核	Amygdala_L	<0.001	85	颞中回	Temporal_Mid_L	<0.001
42	杏仁核	Amygdala_R	<0.001	86	颞中回	Temporal_Mid_R	<0.001
47	舌回	Lingual_L	<0.001	89	颞下回	Temporal_Inf_L	<0.001
48	舌回	Lingual_R	<0.001	90	颞下回	Temporal_Inf_R	<0.001
51	枕中回	Occipital_Mid_L	<0.001				

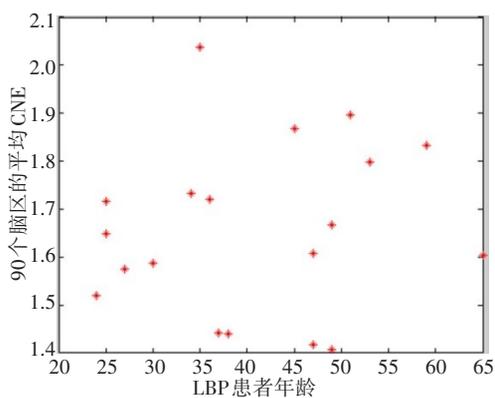


图3 LBP患者90个脑区平均CNE与LBP患者年龄的对比

Fig.3 Comparison of the average CNE in 90 brain regions and age in LBP patients

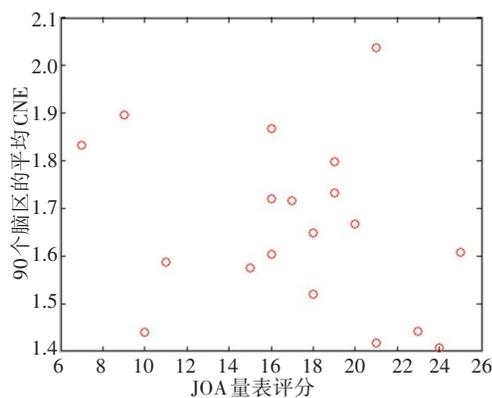


图4 LBP患者90个脑区平均CNE与JOA量表评分的对比

Fig.4 Comparison of the average CNE of 90 brain regions and JOA scale scores in LBP patients

系统的标志,可能在无意识或患病者的大脑中消失。已有文章表明,多种神经精神疾病(精神分裂症、癫痫、抑郁症等)^[13]及脑血管疾病(烟雾病)^[6]都与动态功能连接的异常相关,表现出与正常人的偏离,而且其偏离程度与认知障碍程度密切相关。在本研究中,LBP患者全脑CNE值是低于正常人的,且dFC的差异脑区主要集中在额叶皮层(额中回、眶部额中回、岛盖部额下回、眶部额下回、中央前回、补充运动区)、颞叶皮层(颞横回、颞上回、颞中回、颞下回、梭

状回、海马旁回)、皮质下核团(包括丘脑、壳核、苍白球、海马、杏仁核)及部分枕叶皮层(枕中回、舌回)。额叶主要负责机体对外部刺激注意力的唤起,将外部信息的改变与自我平衡的需求进行有效的整合,最终形成相应的行为决策^[14]。颞叶主要负责听觉信息处理,也与记忆和情感有关。而枕中回与舌回主要负责视觉信息处理。皮层下核团部分区域与边缘系统重叠,主要负责情感的生成和协调、学习和记忆。这就提示LBP患者的功能灵活性在全脑水平是

表2 LBP患者CNE与年龄的关系

Tab.2 Relationship between CNE and age in LBP patients

AAL脑区	中文名称	英文名称	r值	P值
90个脑区平均			0.130 5	0.594 4
AAL 15	眶部额下回	Frontal_Inf_Orb_L	-0.525 5	0.020 8
AAL 32	前扣带和旁扣带脑回	Cingulum_Ant_R	-0.529 2	0.019 8
AAL 41	杏仁核	Amygdala_L	-0.546 9	0.015 4
AAL 62	顶下缘角回	Parietal_Inf_R	0.601 5	0.006 4
AAL 76	豆状苍白球	Pallidum_R	-0.513 3	0.024 6
AAL 89	颞下回	Temporal_Inf_L	0.461 9	0.046 5
AAL 90	颞下回	Temporal_Inf_R	0.508 5	0.026 2

表3 LBP患者CNE与JOA量表评分的关系

Tab.3 Relationship between CNE and JOA scale score in LBP patients

AAL脑区	中文名称	英文名称	r值	P值
90个脑区平均			-0.271 5	0.260 8
AAL 17	中央沟盖	Rolandic_Oper_L	-0.499 1	0.029 6
AAL 47	舌回	Lingual_L	0.481 4	0.036 9
AAL 82	颞上回	Temporal_Sup_R	-0.554 8	0.013 7
AAL 90	颞下回	Temporal_Inf_R	-0.562 1	0.012 3

背离临界状态的,表现出与正常人的偏离,而这种偏离现象多考虑是与LBP患者在信息处理、听觉、视觉及语言等认知功能出现了一定程度的受损,且在情绪上出现消极的态度有关。

3.2 脑功能网络各独立脑区与年龄、JOA量表评分的相关性分析

本研究结果显示,LBP患者整个脑区平均CNE值与年龄无统计学差异,但部分脑区诸如AAL 15(左侧眶部额下回)、AAL 32(右侧前扣带和旁扣带脑回)、AAL 41(左侧杏仁核)、AAL 62(右侧顶下缘角回)、AAL 76(右侧豆状苍白球)、AAL 89(左侧颞下回)、AAL 90脑区(右侧颞下回)与年龄出现统计学差异,其中,AAL 62、AAL 89、AAL 90与年龄呈正相关,AAL 15、AAL 32、AAL 41、AAL 76与年龄呈负相关。先前研究表明^[15],在正常人全脑区域,具有高灵活性的区域主要在高阶联合皮层,如前额叶皮层(LPFC)、外侧顶叶皮层和外侧颞叶皮层。相比之下,视觉、听觉和感觉区域表现出较低的灵活性。此外,还观察到右侧前额叶皮层的灵活性在成熟过程中有所提高,但由于正常衰老而降低,而左侧顶叶皮层则恰恰相反。而本文研究发现,在LBP患者中,右侧顶下缘角回、双侧颞下回是随着衰老其灵活性是逐渐升高的。顶下缘角回具有引导空间感的能力^[16]。颞下回参与情绪的调节。提示人越老患上LBP,肢体的空间

定位能力好,且情绪调节的灵活性越接近临界状态,反而不会出现消极的情绪。这一点不排除是人类患病时心理因素的影响,有待于进一步研究。左侧眶部额下回、右侧前扣带回和旁扣带回、左侧杏仁核和右侧豆状苍白球是随着衰老其灵活性是逐渐下降的。眶额叶皮层介导人类许多认知过程,如奖赏与惩罚评估、决策与预测等神经活动^[17]。前扣带回和旁扣带回与认知相关的功能是选择性注意和冲突管理^[18]。杏仁核是大脑网络中与压力、恐惧和焦虑相关的关键组成部分。苍白球参与享乐转换的执行^[19]。55岁以后的人在许多认知领域都会出现衰退^[20]。所以,额叶皮层、前扣带回和旁扣带回、杏仁核和苍白球是随着衰老其灵活性是逐渐下降的。

本研究发现,LBP患者整个脑区的平均CNE值与JOA量表评分无统计学差异,但是部分脑区如AAL 17、AAL 47、AAL 82、AAL 90脑区与JOA量表评分有统计学差异。其中,AAL 47(左侧舌回)与JOA量表评分呈正相关,AAL 17(左侧中央沟盖)、AAL 82(右侧颞上回)、AAL 90(右侧颞下回)与JOA量表评分呈正相关。JOA下腰痛评分系统是由日本矫形外科协会于1993年提出的一套用于评价腰椎间盘突出症、腰椎滑脱等腰椎疾病的疗效评价系统^[21]。由于该标准评定简单易行,得到广泛推广,并且被应用于腰椎间盘突出症等引起的下腰痛的治疗评价^[22]。JOA评分(0~29分)越低表明功能障碍越明显。舌回在视觉记忆、思维流畅度、语义关联等功能中起重要作用^[23]。随着LBP患者JOA评分越低,舌回的CNE值越低,提示LBP患者功能障碍越明显,舌回的灵活性越偏离临界状态,推测舌回是对认知障碍的代偿。李坤华等^[24]发现在T₂DM患者中,舌回是参与认知障碍的重要脑区,且认知障碍越明显,舌回的代偿越明显。颞上回主要参与听觉性语言中枢。颞下回在工作记忆中起着关键作用。中央沟盖是位

于额顶叶交界区,是连接额眼区与其他脑区的地方。随着LBP患者JOA评分越低,AAL 17、AAL 82、AAL 90的CNE值越高,越接近临界状态,提示LBP患者功能障碍越明显,其语言、记忆及视觉等认知功能是不受影响的。但是由于JOA评分系统存在主观性及非特异性^[25],所以关于JOA评分的相关性分析需要谨慎,有待于进一步验证。

综上所述,本研究通过CNE的分析显示LBP患者的dFC灵活性低于正常人,归因于LBP患者出现多种认知及情绪的异常;LBP患者部分脑网络与年龄及JOA量表评分存在相关性,揭示了LBP患者的全脑功能网络内在的功能灵活性。这项研究不仅为量化大脑活动的时间与空间行为提供一个新的框架,而且还探索了LBP疾病脑功能变化的机理。然而本研究病例数量较少,在统计过程中可能会受到其他噪声信号的影响。有待后续研究中扩大样本量,并与神经生理病理学研究相结合,从而为LBP脑功能研究寻找更科学、准确的方法。

【参考文献】

- [1] HOY D, MARCH L, BROOKS P, et al. The global burden of low back pain: estimates from the global burden of disease 2010 study[J]. *Ann Rheum Dis*, 2014, 73(6): 968-974.
- [2] JAMES S L, ABATE D, ABATE K H, et al. Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 354 diseases and injuries for 195 countries and territories, 1990-2017: a systematic analysis for the global burden of disease study 2017[J]. *Lancet*, 2018, 392(10159): 1789-1858.
- [3] YU R, GOLLUB R L, SPAETH R, et al. Disrupted functional connectivity of the periaqueductal gray in chronic low back pain[J]. *Neuroimage Clin*, 2014, 6: 100-108.
- [4] 温玉蓉. 电针治疗下腰痛的脑功能磁共振研究[D]. 兰州: 甘肃中医药大学, 2016.
WEN Y R. Brain function of fMRI on low back pain using electroacupuncture [D]. Lanzhou: Gansu University of Chinese Medicine, 2016.
- [5] SONG B, MA N, LIU G, et al. Maximal flexibility in dynamic functional connectivity with critical dynamics revealed by fMRI data analysis and brain network modelling[J]. *J Neural Eng*, 2019, 16(5): 056002.1-056002.12.
- [6] LEI Y, SONG B, CHEN L, et al. Reconfigured functional network dynamics in adult moyamoya disease: a resting-state fMRI study[J]. *Brain Imaging Behav*, 2020, 14(3): 715-727.
- [7] 宋本申. 大脑临界行为与动态功能及其在烟雾病中的应用[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
SONG B S. Criticality and dynamic functional connectivity in human brain and application in moyamoya disease[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [8] ZALESKY A, FORNITO A, COCCHI L, et al. Time-resolved resting-state brain networks[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2014, 111(28): 10341-10346.
- [9] PRETI M G, BOLTON T A, VAN DE VILLE D. The dynamic functional connectome: state-of-the-art and perspectives [J]. *Neuroimage*, 2017, 160: 41-54.
- [10] YIN D, LIU W, ZELJIC K, et al. Dissociable changes of frontal and parietal cortices in inherent functional flexibility across the human life span[J]. *J Neurosci*, 2016, 36(39): 10060-10074.
- [11] TAGLIAZUCCHI E, BALENZUELA P, FRAIMAN D, et al. Criticality in large-scale brain fMRI dynamics unveiled by a novel point process analysis[J]. *Front Physiol*, 2012, 3: 15.
- [12] SHEW W L, YANG H, YU S, et al. Information capacity and transmission are maximized in balanced cortical networks with neuronal avalanches[J]. *J Neurosci*, 2011, 31(1): 55-63.
- [13] COCCHI L, GOLLO L L, ZALESKY A, et al. Criticality in the brain: a synthesis of neurobiology, models and cognition[J]. *Prog Neurobiol*, 2017, 158: 132-152.
- [14] 刘涵静, 邓钰, 周福庆. 慢性腰腿痛患者岛叶功能连接的静息态磁共振成像研究[J]. *临床放射学杂志*, 2019, 38(11): 2015-2020.
LIU H J, DENG Y, ZHOU F Q. Insular functional connectivity in patients with chronic low back-related leg pain: a resting state magnetic resonance imaging study[J]. *Journal of Clinical Radiology*, 2019, 38(11): 2015-2020.
- [15] YIN D, LIU W, ZELJIC K, et al. Dissociable changes of frontal and parietal cortices in inherent functional flexibility across the human life span[J]. *J Neurosci*, 2016, 36(39): 10060-10074.
- [16] VAN DIJK K R, HEDDEN T, VENKATARAMAN A, et al. Intrinsic functional connectivity as a tool for human connectomics: theory, properties, and optimization[J]. *J Neurophysiol*, 2010, 103(1): 297-321.
- [17] WOLOSZYN L, SHEINBERG D L. Neural dynamics in inferior temporal cortex during a visual working memory task[J]. *J Neurosci*, 2009, 29(17): 5494-5507.
- [18] MITCHELL R L. Linear increases in BOLD response associated with increasing proportion of incongruent trials across time in a colour Stroop task[J]. *Exp Brain Res*, 2010, 203(1): 193-204.
- [19] LI J, WANG Z, HWANG J, et al. Anatomical brain difference of subthreshold depression in young and middle-aged individuals[J]. *Neuroimage Clin*, 2017, 14: 546-551.
- [20] HEDDEN T, GABRIELI J D. Insights into the ageing mind: a view from cognitive neuroscience[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2004, 5(2): 87-96.
- [21] TOYONE T, TAKAHASHI K, KITAHARA H, et al. Visualisation of symptomatic nerve roots. Prospective study of contrast-enhanced MRI in patients with lumbar disc herniation[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1993, 75(4): 529-533.
- [22] AHSAN K, NAJMUS-SAKEB K, HOSSAIN A, et al. Discectomy for primary and recurrent prolapse of lumbar intervertebral discs[J]. *J Orthop Surg (Hong Kong)*, 2012, 20(1): 7-10.
- [23] ZHANG L, QIAO L, CHEN Q, et al. Gray matter volume of the lingual gyrus mediates the relationship between inhibition function and divergent thinking[J]. *Front Psychol*, 2016, 7: 1532.
- [24] 李坤华, 张清, 伍建林, 等. 2型糖尿病认知功能障碍患者静息态脑网络的度中心度改变[J]. *中国医学影像学杂志*, 2020, 28(7): 488-492.
LI K H, ZHANG Q, WU J L, et al. Altered degree centrality of resting-state brain network in type 2 diabetes with cognitive impairment[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging*, 2020, 28(7): 488-492.
- [25] CONRAD B P, SHOKAT M S, ABBASI A Z, et al. Associations of self-report measures with gait, range of motion and proprioception in patients with lumbar spinal stenosis[J]. *Gait Posture*, 2013, 38(4): 987-992.

(编辑:陈丽霞)