

基于 TBSS 分析腰椎间盘突出所致慢性腰痛患者的脑白质结构改变

周慧玲, 陈莉, 钟向凯, 雷婷, 邱志强, 郎栩, 杜勇

(川北医学院附属医院放射科, 四川南充 637000)

【摘要】目的: 采用基于纤维束的空间统计 (TBSS) 定量方法研究腰椎间盘突出症 (LDH) 所致慢性腰痛患者全脑白质改变情况及其与临床特征的关系。**方法:** 根据是否发生腰椎间盘突出, 将对象分为 LDH 患者组 (LDH 组, $n = 31$) 和健康对照组 (HC 组, $n = 31$)。两组对象均行磁共振弥散张量成像 (DTI) 及高分辨 T1 加权成像。采用 TBSS 分析方法计算各差异脑区的各向异性分数 (FA)、平均弥散率 (MD)、轴向弥散率 (AD)、径向弥散率 (RD), 提取差异弥散指标值, 再与各项临床指标进行偏相关分析 ($P < 0.05$)。**结果:** LDH 组小脑中脚、胼胝体、左侧皮质脊髓束、双侧内侧丘系、双侧小脑下脚、右侧小脑上脚、双侧大脑脚、双侧内囊、双侧内囊豆状核后部、双侧辐射冠、双侧丘脑后辐射 (包括视辐射)、双侧矢状束、双侧外囊、双侧扣带回、左侧穹窿/终纹及双侧上纵束区域 FA 值均低于 HC 组; 小脑中脚、胼胝体、双侧内侧丘系、双侧小脑下脚、双侧小脑上脚、左侧大脑脚、左侧内囊后肢、左侧内囊豆状核后部、右侧前辐射、左侧上辐射、双侧扣带回及左侧穹窿/终纹区域 RD 值均高于 HC 组; LDH 组脑白质骨架 MD 值及 AD 值升高的脑区仅局限于小脑中脚。LDH 组左侧穹窿/终纹区域 FA 值、RD 值与病程分别正相关 ($r = 0.446, P = 0.012$) 和负相关 ($r = -0.398, P = 0.027$)。右侧内囊豆状核后部区域 FA 值与日本骨科协会评分 (JOA) 呈正相关 ($r = 0.567, P = 0.001$), 左侧内侧丘系区域、左侧小脑下脚区域 FA 值与汉密尔顿抑郁量表评分 (HAMD) 均呈正相关 ($r = 0.406, P = 0.023; r = 0.405, P = 0.024$)。**结论:** LDH 所致慢性疼痛患者存在广泛的脑白质微结构损害, 穹窿/终纹区域的白质损伤与病程密切相关。

【关键词】 腰椎间盘突出症; 慢性疼痛; 基于纤维束的空间统计; 磁共振成像

【中图分类号】 R445.2; R741.02; R681.5 **【文献标志码】** A

Revealing cerebral white matter structural changes in patients with chronic low back pain caused by Lumbar disc herniation based on TBSS

ZHOU Hui-ling, CHEN Li, ZHONG Xiang-kai, LEI Ting, QIU Zhi-qiang, LANG Xu, DU Yong

(Department of Radiology, Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, Sichuan, China)

【Abstract】Objective: To investigate the relationship between white matter abnormalities and clinical characteristics in patients with chronic low back pain due to lumbar disc herniation (LDH) by using tract based spatial statistics (TBSS). **Methods:** According to the occurrence of lumbar disc herniation, the subjects were divided into LDH patient group (LDH group, $n = 31$) and healthy control group (HC group, $n = 31$). And all underwent magnetic resonance diffusion tensor imaging (DTI) and high-resolution T1-weighted imaging. The fractional anisotropy (FA), mean diffusivity (MD), axial diffusivity (AD), and radial diffusivity (RD) of the brain regions with differences were calculated using TBSS analysis. The diffusion index values that differed between the two groups were then extracted and analyzed by partial correlation with the clinical indexes ($P < 0.05$). **Results:** Compared with the HC group, in the LDH group FA values decreased in the middle cerebellar peduncle, corpus callosum, left corticospinal tract, bilateral medial lemniscus, bilateral inferior cerebellar peduncles, right superior cerebellar peduncle, bilateral cerebral peduncles, bilateral internal capsule, bilateral retrolenticular part of internal capsule, bilateral corona radiata, bilateral posterior thalamic radiations (include optic radiation), bilateral sagittal stratum, bilateral external capsule, bilateral cingulate gyrus, left fornix/ stria terminalis and bilateral superior longitudinal fasciculus. RD values of the middle cerebellar peduncle, corpus callosum, bilateral medial lemniscus, bilateral inferior cerebellar peduncle, bilateral superior cerebellar peduncle, left cerebral peduncle, left posterior limb of internal capsule, left retrolenticular part of internal capsule, right anterior corona radiata, left superior corona radiata, bilateral cingulate gyrus and left fornix/stria termina in LDH group were higher than those in HC group. In LDH group, the increased MD and AD values of white matter skeleton were only confined to the middle cere-

基金项目: 国家临床重点专科建设项目 (川卫医改函 [2023] 87 号); 四川省南充市市校科技战略合作专项 (20SXZRKX0011)

作者简介: 周慧玲 (1995 -), 女, 硕士, 住院医师。E-mail: zhouhoujr@outlook.com

通讯作者: 杜勇, 博士, 教授。E-mail: yongdu2005@163.com

bellar peduncle. In the LDH group, FA and RD values of left fornix/stria terminalis region were positively correlated ($r = 0.446$, $P = 0.012$) and negatively correlated ($r = -0.398$, $P = 0.027$) with disease duration, respectively. FA values of right retrolenticular part of internal capsule were positively correlated with Japanese Orthopaedic Association scores (JOA) ($r = 0.576$, $P = 0.001$). FA values of left medial lemniscus ($r = 0.406$, $P = 0.023$), and left inferior cerebellar peduncle region ($r = 0.405$, $P = 0.024$) were positively correlated with Hamilton depression scale (HAMD) scores. **Conclusion:** Patients with LDH-induced chronic pain have extensive cerebral white matter microstructural damage, and white matter damage in the fornix/stria terminalis region is associated with the course of the disease.

【Key words】 Lumbar disc herniation; Chronic pain; Tract based spatial statistics; Magnetic resonance imaging

慢性腰痛是目前全球致残的主要原因之一,给各个阶层人民带来的负担与日俱增^[1]。慢性腰痛的致病因素多样化,椎间盘突出导致腰痛的患者占39%~45%,且发病率呈上升趋势^[1-2]。椎间盘突出症(lumbar disc herniation, LDH)是指在各种因素(椎间盘退行性改变、外力等)共同作用下,椎间盘发生变性,纤维环部分或完全破裂,髓核、纤维环、软骨终板等椎间盘组织向外突出,导致相邻脊神经根刺激或压迫而出现的临床综合征,其主要表现是下腰痛伴或不伴下肢放射性疼痛及麻木^[3-4]。LDH引起疼痛不仅影响外周神经系统,还可能激活大脑相应区域参与疼痛调节和防御^[5-7]。LDH患者右侧前外侧前额叶皮质、右侧颞叶、左侧前运动皮层、右侧尾状核及右侧小脑灰质体积减少,而右侧背侧前扣带回皮质、左侧楔前叶、左侧梭状回和右侧脑干灰质体积增加,额叶及左侧内囊前肢的白质体积减少且白质纤维束异常^[8-10]。但关于LDH所致慢性疼痛引起脑白质结构异常的研究相对较少,仍需进行系统性研究,以探明全脑白质结构改变情况及其与疼痛程度、情绪等临床指标之间的相关性。弥散张量成像技术(diffusion tensor image, DTI)是一种通过测量水分子弥散运动特性间接反映白质纤维束情况的非侵入性成像方式,已被广泛应用于探索脑白质微结构特性^[11]。基于纤维束的空间统计方法(tract based spatial statistics, TBSS)则采用非线性配准方法,规避了基于体素分析(voxel based analysis, VBA)方法平滑处理的步骤,将所有被试DTI指标映射到平均FA骨架上进行量化分析,通过特征性参数反映脑白质微结构的情况。因此,本研究拟采用TBSS分析LDH所致慢性疼痛患者脑白质结构改变情况及其与临床特征的相关性。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取2023年1月至2023年7月川北医学院附属医院收治的31例腰椎间盘突出症患者作为研究对象并纳入LDH组,LDH组纳入标准:(1)明显腰痛,腰椎CT/MRI等影像学检查证实椎间盘突出

压迫硬膜囊前缘或椎间孔变窄;(2)疼痛反复发作持续时间 ≥ 3 个月^[12],视觉模拟量表(vision analogue scale, VAS)评分 > 3 分;(3)除椎间盘突出症所致疼痛外无其他病因所致疼痛;(4)1周内未使用解热镇痛类、安眠及激素类药物;(5)均为右利手。LDH组排除标准:(1)既往行腰椎手术;(2)罹患脑外伤、出血、梗塞、中枢脱髓鞘性疾病、肿瘤以及重大躯体疾病;(3)存在酒精药物依赖史或精神病史;(4)疼痛剧烈,无法配合MRI检查;(5)磁共振检查禁忌者或月经期妇女。同期招募31名性别、年龄、文化程度相匹配的健康志愿者作为健康对照组(HC组),HC组纳入标准:(1)无精神或神经系统疾病;(2)无磁共振禁忌症;(3)右利手;(4)自愿参与本研究并签署知情同意书。HC组排除标准:(1)存在酒精药物依赖史及精神病史;(2)磁共振检查禁忌(体内有金属植入物,幽闭恐惧症等);(3)存在其他部位疼痛及其他原因所致疼痛者;(4)女性行经期者。LDH组中,男性14例,女性17例;年龄27~69岁;病程3~240个月;均符合IASP国际疾病分类慢性疼痛分类(International Classification of Diseases, ICD-11)^[12]。HC组中,男性14例,女性17例;年龄25~66岁。所有受试者在检查前均知情同意并签署知情同意书。本研究获得川北医学院附属医院伦理委员会的批准(2023ER248-1)。

1.2 临床评估

LDH组受试者在磁共振检查前进行以下临床量表评估:(1)VAS评分:疼痛程度评估,0(无痛)~10分(剧痛),分数越高疼痛越剧烈;(2)日本骨科协会评分(Japanese Orthopaedic Association scores, JOA):评估腰椎功能及疼痛对生活质量的影 响,分值-6~29分;(3)汉密尔顿焦虑/抑郁量表评分(Hamilton anxiety scale/Hamilton depression scale, HAMA/HAMD):评估受试者的心理状态。HC组受试者由同一名医生进行HAMA/HAMD评估。

1.3 影像学检查

采用Siemens Skyra 3.0 T磁共振成像系统,32通道头部相控阵线圈扫描。DTI数据由以下参数的单次激发平面回波成像序列采集:TR 8 500 ms,TE

92 ms, 梯度方向 30, FOV 240 mm × 240 mm, 矩阵 128 × 128, 体素大小 1.88 mm × 1.88 mm × 3 mm, 层厚 3 mm, 无层间距, 翻转角 90°, 扫描时间 9 min 6 s, b 值取 0 和 1 000 s/mm²。矢状面高分辨三维 T1 加权像采用快速梯度回波成像序列, 扫描参数如下: TR 2 300 ms, TE 3.01 ms, FOV 240 mm × 240 mm, 矩阵 256 × 256, 体素大小 0.94 mm × 0.94 mm × 1 mm, 层厚 1 mm, 无层间距, 翻转角 9°, 扫描层数 176 层, 扫描时间 5 min 21 s。将轴向 T1 加权及 T2 加权液体抑制反转恢复序列作为常规扫描以确保所有被试均无任何大脑结构异常。所有影像数据经目测确定为符合试验处理数据。

1.4 DTI 数据处理及分析

数据格式转换: 采用 dcm2nii 软件进行 Dicom 格式图像转换, 得到 NIFTI 格式。数据预处理: 采用英国牛津大学的脑功能核磁共振研究中心的 FMRIB Software Library (FSL 6.0, <https://fsl.fmrib.ox.ac.uk/fsl/fslwiki/FSL>), 软件及其工具包中的 fslroi 命令得到 b0 图, 使用 bet 命令去除非脑组织并产生去除非脑组织后的 mask; 利用 eddy_correct 命令对 NIFTI 格式的 DTI 数据进行涡流及头动矫正, 以解决因梯度线圈的涡流和头动而产生的图像变形问题。应用 DTIFIT 功能获得各向异性分数 (fractional anisotropy, FA)、平均弥散率 (mean diffusivity, MD)、轴向弥散率 (axial diffusivity, AD)、径向弥散率 (radial diffusivity, RD) 等体素水平的弥散参数图。上述弥散参数图采用 TBSS 分析统计分析: 应用 FSL 软件将 FDT 产生的原始个体 FA 图采用两步法非线性配准到 FMRIB 标准模板 (FMRIB58_FA-1mm), 同时转换到蒙特利尔神经研究所 (montreal neurological institute, MNI) 标准空间; 再生成平均 FA 骨架, 阈值设定为大于 0.2, 将平均骨架映射到标准空间个体 FA 图上得到每个受试者的骨架图, 将 FA 得到的参数写入到 MD、AD、RD 等图以得到其他弥散张量骨架图。

1.5 统计学分析

采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析。计数资料以 [n(%)] 表示, 组间比较行 χ^2 检验; 采用 Shapiro-Wilk 检验方法对两组计量资料进行正态性评估, 正态分布的计量资料以 ($\bar{x} \pm s$) 表示, 组间比较采用 *t* 检验; 非正态分布的计量资料则以 [M (P₂₅, P₇₅)] 表示, 组间比较采用曼-惠特尼 *U* 检验。LDH 组和 HC 组各个弥散参数图的差异比较, 应用 FSL 软件中的 randomize 命令对 FA、MD、AD、RD 等骨架图逐一进行非参数置换检验 (置换次数 10 000 次), 采用无阈值聚类增强校正 (threshold-free cluster enhance-

ment, TFCE) 进行多重比较校正 ($P < 0.01$, FWE 校正); 将 TBSS 有差异结果与 JHU 标准白质纤维束模板 (JHU ICBM-DTI-81 White-Matter Labels) 进行对比以确定差异脑区。将 TBSS 获得的差异脑区作为感兴趣区 (region of interest, ROI), 提取 LDH 组的弥散张量指标 (包括 FA 值、MD 值、AD 值、RD 值), 与疼痛病程、VAS 评分、JOA 评分和 HAMA/HAMD 评分进行偏相关分析, 将性别、年龄及受教育年限作为协变量。P < 0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组人口学及临床资料比较

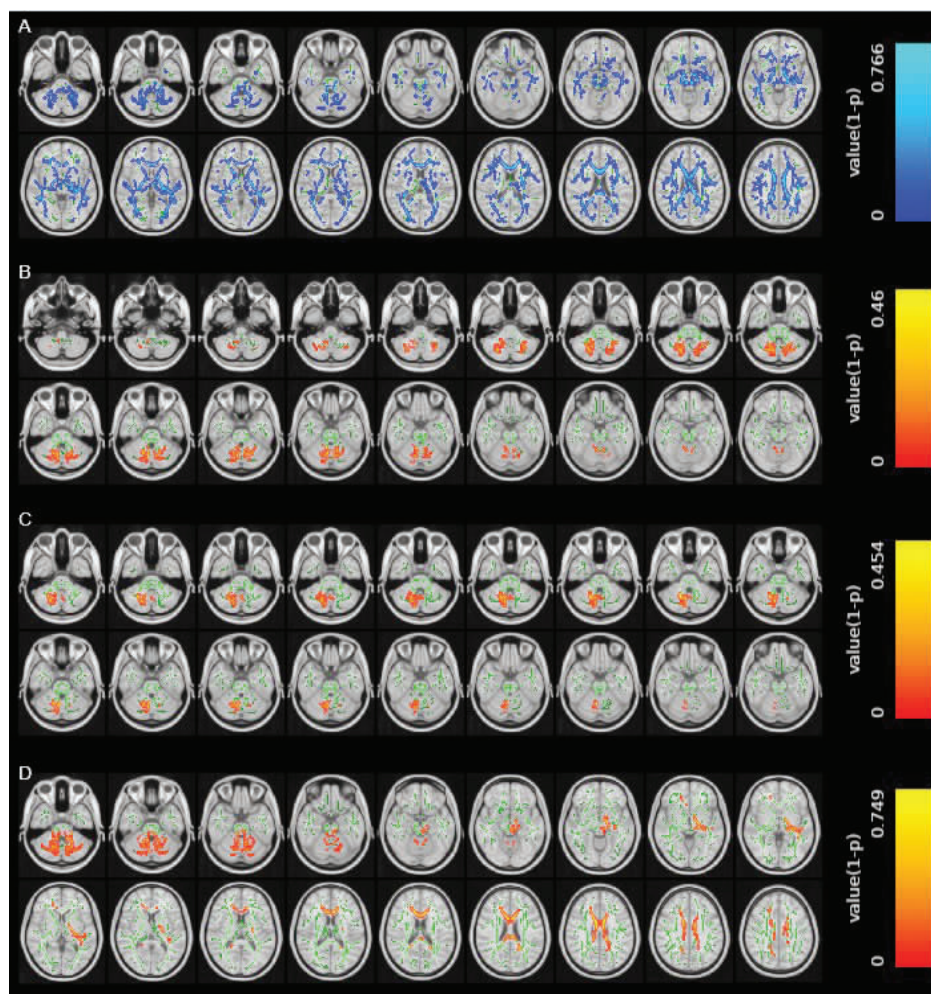
LDH 组与 HC 组性别、年龄及受教育年限差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。LDH 组的病程为 (44.97 ± 57.48) 个月, VAS 评分 (6.35 ± 1.17) 分, JOA 评分 (20.16 ± 4.70) 分。LDH 组 HAMD ($P < 0.001$) 及 HAMA ($P < 0.001$) 评分高于 HC 组。见表 1。

表 1 HC 组及 LDH 组临床资料比较 [$\bar{x} \pm s, n(\%)$, M (P₂₅, P₇₅)]

资料	LDH 组 (n=31)	HC 组 (n=31)	$\chi^2/t/U$ 值	P 值
性别			0.000	1.000
男	14(45.16)	14(45.16)		
女	17(54.84)	17(54.84)		
年龄(年)	51.00(41.00, 56.00)	50.00(45.00, 54.00)	-0.310	0.757
受教育年限(年)	9.00(6.00, 9.00)	9.00(9.00, 12.00)	-1.810	0.070
病程(月)	25.00(7.00, 60.00)			
VAS(分)	7.00(5.00, 7.00)			
JOA(分)	20.16 ± 4.70			
HAMD(分)	6.00(2.00, 8.00)	0.00(0.00, 2.00)	-5.534	<0.001
HAMA(分)	5.00(4.00, 7.00)	0.00(0.00, 1.00)	-5.837	<0.001

2.2 两组脑白质结构比较

与 HC 组相比, LDH 组小脑中脚、胼胝体、左侧皮质脊髓束、双侧内侧丘系、双侧小脑下脚、右侧小脑上脚、双侧大脑脚、双侧内囊、双侧内囊豆状核后部、双侧辐射冠、双侧丘脑后辐射 (包括视辐射)、双侧矢状束、双侧外囊、双侧扣带回、左侧穹窿/终纹及双侧上纵束 FA 值下降 (TFCE 校正, $P < 0.01$), 且 LDH 组无 FA 值升高的脑白质区域。LDH 组小脑中脚 MD 值及 AD 值高于 HC 组 (TFCE 校正, $P < 0.01$), 小脑中脚、胼胝体、双侧内侧丘系、双侧小脑下脚、双侧小脑上脚、左侧大脑脚、左侧内囊后肢、左侧内囊豆状核后部、右侧前辐射、左侧上辐射、双侧扣带回及左侧穹窿/终纹 RD 值也高于 HC 组 (TFCE 校正, $P < 0.01$); LDH 组无 MD 值、AD 值及 RD 值降低的脑白质区域。见图 1。



绿色为平均 FA 骨架

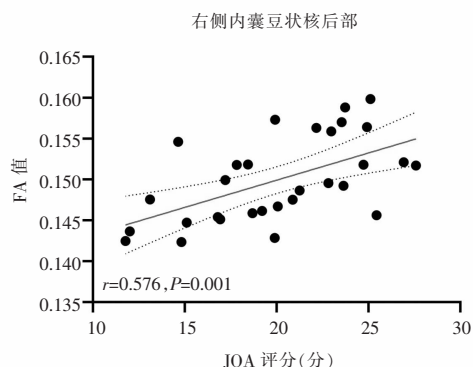
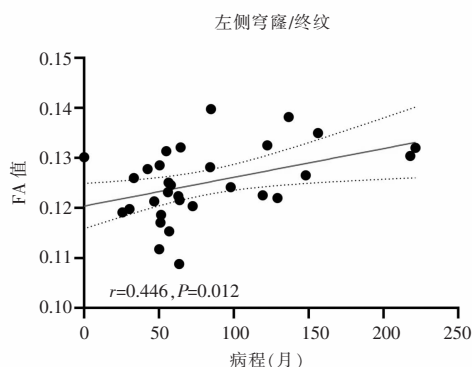
图 1 LDH 组与 HC 组各项弥散张量指标值差异脑区(TFCE 校正, $P < 0.01$)

A. LDH 组 FA 值降低的脑区(蓝色);B-D. LDH 组 MD 值(B)、AD 值(C)、RD 值(D)升高的脑区(红色)。

2.3 LDH 组患者脑白质结构与临床量表的偏相关分析

提取 LDH 组显著差异脑区的 FA 值、MD 值、AD 值、RD 值与病程、VAS、JOA、HAMD 及 HAMA 评分进行偏相关分析。左侧穹窿/终纹区域白质骨架 FA 值与病程呈正相关($r = 0.446, P = 0.012$);右侧内囊豆状核后部区域白质骨架的 FA 值中存在 1 个离散度较大的奇异点,剔除奇异点后该区域 FA 值

与 JOA 评分呈正相关($r = 0.576, P = 0.001$) ($n = 30$);左侧内侧丘系区域白质骨架 FA 值与 HAMD 评分呈正相关($r = 0.406, P = 0.023$);左侧小脑下脚区域白质骨架 FA 值与 HAMD 值呈正相关($r = 0.405, P = 0.024$)。左侧穹窿/终纹区域 RD 值与病程呈负相关($r = -0.398, P = 0.027$)。见图 2 及图 3。



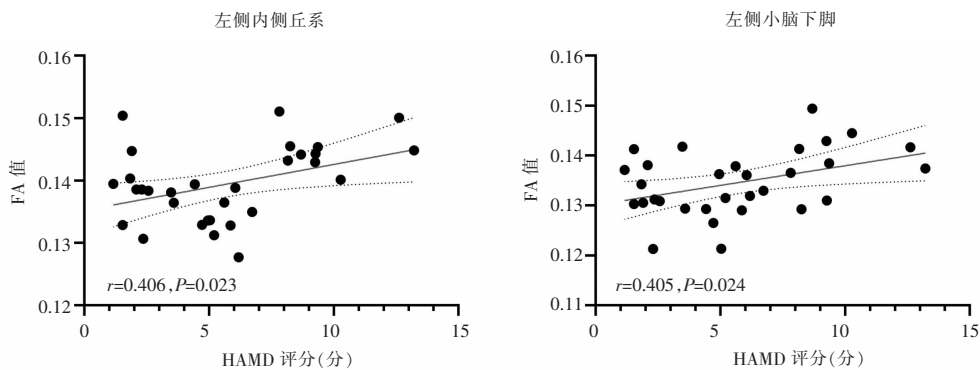


图 2 LDH 患者显著差异脑白质骨架区域 FA 值与临床量表测值的相关关系

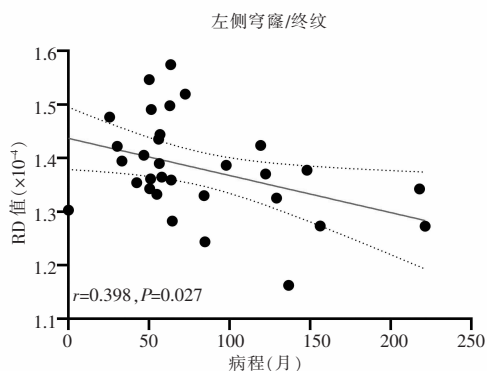


图 3 LDH 患者显著差异脑白质骨架区域 RD 值与临床量表测值的相关关系

3 讨论

本研究表明,LDH 组患者存在广泛的脑区白质骨架的 FA 值降低和 RD 值升高,主要包括小脑、胼胝体、内侧丘系、内囊、内囊豆状核后部、辐射冠、扣带回、穹窿/终纹等;小脑中脚 MD 值及 AD 值升高。此外,LDH 患者病程与左侧穹窿/终纹的 FA 值和 RD 值存在相关性,JOA 评分与右侧内囊豆状核后部的 FA 值有关,HAMD 评分则与左侧内侧丘系及左侧小脑下脚的 FA 值相关。

TBSS 方法通过提取分析白质骨架上的弥散指标间接判定白质微结构的损伤程度。DTI 测度中的 FA 值可评估水分子在组织内的扩散方向一致性,间接反映白质纤维束的完整性、髓鞘形成、轴突的形态及密度,FA 值降低可反映髓鞘损伤或丢失、轴突的损伤、神经胶质增生、细胞水肿及神经纤维炎症等;MD 值是忽略弥散方向的平均弥散率,衡量水分子在组织内部的总体扩散能力,当细胞间隙增宽时可导致 MD 值增高,可反映髓鞘的损伤和轴突的丢失;RD 值为垂直轴突方向的弥散张量值,其升高主要与髓鞘损伤或脱失有关;AD 值反映平行于轴突方向的弥散张量值,与轴突的密度及完整性密切相关^[13-16]。本研究中,LDH 患者存在多个脑区的 FA 值及 RD 值异常,可能间接反映了 LDH 患者存在广泛的髓鞘完整性的破坏及丢失、胶质增生等现象;而

LDH 患者的 MD 值及 AD 值异常只存在于小脑中脚区域的白质纤维,表明大部分水平走行的轴突完整性得以保留。此外,外周疼痛的损伤可引起相应部位的神经炎症,从而激活外周及中枢神经胶质细胞介导的中枢神经系统可塑性改变和中枢敏化^[17],进而导致神经纤维上的轴突及髓鞘改变,弥散指标 RD 值升高,垂直轴突方向的水分子弥散增加,髓鞘对水分子横向弥散的限制作用降低,则进一步诱使 FA 值下降,发现局灶性脱髓鞘改变^[14,18-19]。本研究发现 LDH 患者内囊、放射冠、丘脑后幅射及上纵束区域存在 FA 值和(或)RD 值异常,提示慢性疼痛感觉异常^[20]与白质局灶性脱髓鞘改变相关。

LDH 患者病程与左侧穹窿/终纹区域白质微结构异常具有相关性。穹窿/终纹作为“神经矩阵”的组成结构,可能与疼痛感知存在联系,共同参与疼痛信号的处理与解读^[6,21]。本研究中,LDH 患者左侧穹窿/终纹 FA 值与病程呈正相关、RD 值与病程呈负相关,长期的疼痛使患者脑内疼痛感知及处理区域出现适应性改变或神经重塑性改变。当神经发生重塑性改变时,神经胶质增生,原有的白质微结构成分重组或解构,从而导致 FA 值、RD 值等弥散指标的改变,与付君言等^[22]研究结论基本一致。

本研究中,LDH 患者 HAMD/HAMA 评分高于健康志愿者,说明 LDH 患者由于长期疼痛困扰而更容易出现情绪障碍问题,与 Scherder 等研究^[23-24]类似。持续疼痛和情绪压力共同作用下的脑内神经纤维呈反应性改变可反映脑内疼痛和情绪处理中的功能性重组^[25-26]。本研究还发现 LDH 患者左侧内侧丘系及小脑下脚 FA 值与 HAMD 评分呈正相关,与 Scherder^[23]和李木子等^[27]研究结论存在差异,究其原因可能为:(1)慢性疼痛和抑郁状态受多种因素影响,隶属于高度异质性疾病,不同患者在疾病表型、病程及脑结构和功能改变上不尽相同,进而导致了 FA 值与 HAMD 评分的关联性存在偏移;(2)本研究样本量较小,可能存在统计偶然性,后续仍需进一步开展前瞻性试验以进一步证实相关结论。

内囊豆状核后部包含了上行感觉纤维及下行运动纤维。本研究中,LDH 患者 JOA 评分与右侧内囊豆状核后部 FA 值呈正相关,且外周 LDH 压迫的神经根磁共振弥散研究中患侧神经 FA 值与 JOA 评分呈正相关^[28],JOA 评分越低的 LDH 患者,腰椎健康状况越差,感觉纤维和运动纤维的损伤可能越严重,外周与中枢神经改变具有一定的一致性。

综上,LDH 所致慢性疼痛患者存在广泛的脑白质微结构损害,以垂直走行的髓鞘丢失及破坏为主,损伤区域主要覆盖感官、情感及认知成分相关区域,在一定程度解释了慢性疼痛的中枢神经机制。

参考文献

- [1] Hartvigsen J, Hancock MJ, Kongsted A, *et al.* What low back pain is and why we need to pay attention [J]. *Lancet*, 2018, 391(10137):2356-2367.
- [2] Geurts JW, Willems PC, Kallewaard JW, *et al.* The impact of chronic discogenic low back pain: costs and patients' burden [J]. *Pain Research & Management*, 2018, 2018:4696180.
- [3] Fardon DF, Williams AL, Dohring EJ, *et al.* Lumbar disc nomenclature: version 2.0: recommendations of the combined task forces of the North American Spine Society, the American Society of Spine Radiology and the American Society of Neuroradiology [J]. *The Spine Journal: Official Journal of the North American Spine Society*, 2014, 14(11):2525-2545.
- [4] 中华医学会疼痛学分会脊柱源性疼痛学组. 腰椎间盘突出症诊疗中国疼痛专家共识 [J]. *中国疼痛医学杂志*, 2020, 26(1):2-6.
- [5] Baliki MN, Chialvo DR, Geha PY, *et al.* Chronic pain and the emotional brain: specific brain activity associated with spontaneous fluctuations of intensity of chronic back pain [J]. *The Journal of Neuroscience*, 2006, 26(47):12165-12173.
- [6] Ng SK, Urquhart DM, Fitzgerald PB, *et al.* The relationship between structural and functional brain changes and altered emotion and cognition in chronic low back pain brain changes: a systematic review of MRI and fMRI studies [J]. *The Clinical Journal of Pain*, 2018, 34(3):237-261.
- [7] Davis KD, Moayed M. Central mechanisms of pain revealed through functional and structural MRI [J]. *Journal of Neuroimmune Pharmacology*, 2013, 8(3):518-534.
- [8] Luchtmann M, Steinecke Y, Baecke S, *et al.* Structural brain alterations in patients with lumbar disc herniation: a preliminary study [J]. *PLoS One*, 2014, 9(3):e90816.
- [9] 胡海, 石林, 陈莉, 等. 椎间盘源性下腰痛患者脑灰质体积改变的 MRI 研究 [J]. *放射学实践*, 2017, 32(8):812-815.
- [10] 王雪梅, 杜勇, 陈莉. DTI 对腰椎间盘突出症患者脑白质改变的研究 [J]. *中国医疗器械信息*, 2019, 25(20):137-138.
- [11] Wang D, Luo Y, Mok VCT, *et al.* Tractography atlas-based spatial statistics: statistical analysis of diffusion tensor image along fiber pathways [J]. *NeuroImage*, 2016, 125:301-310.
- [12] Treede RD, Rief W, Barke A, *et al.* A classification of chronic pain for ICD-11 [J]. *Pain*, 2015, 156(6):1003-1007.
- [13] De Santis S, Drakesmith M, Bells S, *et al.* Why diffusion tensor MRI does well only some of the time: variance and covariance of white matter tissue microstructure attributes in the living human brain [J]. *NeuroImage*, 2014, 89(100):35-44.
- [14] Liu J, Zhu J, Yuan F, *et al.* Abnormal brain white matter in patients with right trigeminal neuralgia: a diffusion tensor imaging study [J]. *The Journal of Headache and Pain*, 2018, 19(1):46.
- [15] Porcu M, Cocco L, Puig J, *et al.* Global fractional anisotropy: effect on resting-state neural activity and brain networking in healthy participants [J]. *Neuroscience*, 2021, 472:103-115.
- [16] Yano R, Hata J, Abe Y, *et al.* Quantitative temporal changes in DTI values coupled with histological properties in cuprizone-induced demyelination and remyelination [J]. *Neurochemistry International*, 2018, 119:151-158.
- [17] Ji RR, Nackley A, Huh Y, *et al.* Neuroinflammation and central sensitization in chronic and widespread pain [J]. *Anesthesiology*, 2018, 129(2):343-366.
- [18] DeSouza DD, Hodaie M, Davis KD. Abnormal trigeminal nerve microstructure and brain white matter in idiopathic trigeminal neuralgia [J]. *Pain*, 2014, 155(1):37-44.
- [19] Squarcina L, Houenou J, Altamura AC, *et al.* Association of increased genotypes risk for bipolar disorder with brain white matter integrity investigated with tract-based spatial statistics [J]. *Journal of Affective Disorders*, 2017, 221:312-317.
- [20] 李丹, 范好欣, 卜岗, 等. 基于扩散张量成像对颈椎源性疼痛患者脑白质微结构异常的研究 [J]. *临床放射学杂志*, 2022, 41(5):810-814.
- [21] Bubb EJ, Metzler-Baddeley C, Aggleton JP. The cingulum bundle: anatomy, function, and dysfunction [J]. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2018, 92:104-127.
- [22] 付君言, 唐焯, 潘磊, 等. 特发性快速眼动睡眠行为障碍脑白质结构的弥散张量成像研究 [J]. *中国临床神经科学*, 2022, 30(5):493-501, 566.
- [23] Scherder RJ, Kant N, Wolf ET, *et al.* Sensory function and chronic pain in multiple sclerosis [J]. *Pain Research & Management*, 2018, 2018:1924174.
- [24] De Ridder D, Vanneste S, Smith M, *et al.* Pain and the triple network model [J]. *Frontiers in Neurology*, 2022, 13:757241.
- [25] Sheng J, Liu S, Wang Y, *et al.* The link between depression and chronic pain: neural mechanisms in the brain [J]. *Neural Plasticity*, 2017, 2017:9724371.
- [26] Kuner R, Flor H. Structural plasticity and reorganisation in chronic pain [J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2017, 18(2):113.
- [27] 李木子, 隋汝波, 张霏霏, 等. 卒中后抑郁患者小脑弥散张量改变的临床研究 [J]. *中风与神经疾病杂志*, 2016, 33(5):397-401.
- [28] El Basset ASA, Saeed AHM, Tawfik MH, *et al.* Value of diffusion tensor imaging and tractography in unilateral lumbar disc prolapse [J]. *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*, 2021, 52(1):25.

(收稿日期:2023-12-07

修回日期:2024-03-12)