

颅脑 fMRI 及脊髓弥散张量成像对脊髓型颈椎病 患者术后脊髓功能恢复的预测价值分析

宋彦澄^{1,2} 康立清² 申沧海³ 付兰¹ 刘凤海^{1,2} 冯永健³

¹天津医科大学沧州市中心医院教学医院, 沧州 061000; ²沧州市中心医院磁共振成像科, 沧州 061000; ³沧州市中心医院骨四科, 沧州 061000

通信作者: 康立清; Email: 573769265@qq.com

【摘要】 **目的** 探讨颅脑 fMRI 及脊髓弥散张量成像(DTI)量化参数与脊髓型颈椎病(CSM)患者术前脊髓功能的相关性及对 CSM 术后脊髓功能恢复的预测价值。**方法** 选取 2018 年 1 月至 2018 年 12 月期间行手术治疗的 CSM 患者 87 例(纳入 CSM 组)及年龄、性别、受教育程度与之匹配的健康志愿者 38 例(纳入对照组)。所有患者于术前及术后 6 个月时均进行 fMRI 和 DTI 扫描, 对照组于入选时进行 fMRI 和 DTI 扫描; 所有对象的 fMRI 动作任务均为右手对指动作。入选 CSM 患者术后均给予系统康复干预。术前及术后 6 个月时采用日本骨科学会评分(JOA)系统评估患者脊髓神经功能情况, 术后 6 个月随访时将 JOA 评分改善率 < 50% 的 CSM 患者视为术后恢复不良。**结果** 术前 CSM 组左侧中央前回(PrCG)激活体积(VOA)较对照组显著增加($P < 0.05$), 左侧中央后回(PoCG)VOA 值与对照组无显著差异($P > 0.05$), 脊髓受压节段 FA 值较对照组显著降低($P < 0.05$)。术后 6 个月随访时发现 CSM 患者左侧 PrCG-VOA 值较术前显著减小($P < 0.05$), FA 值较术前显著增加($P < 0.05$)。通过相关性分析发现, 术前 VOA 比值(PrCG/PoCG)、PrCG-VOA、PoCG-VOA 及 FA 值与术前 JOA 评分、术后 JOA 评分改善率间均具有显著相关性($P < 0.05$)。通过受试者工作特征曲线(ROC)分析, 发现 fMRI 及 DTI 量化参数预测术后恢复不良的效能均显著优于常规 MRI 参数; 多因素 Logistic 回归分析显示 VOA 比值与 FA 值是预测 CSM 术后恢复不良的独立危险因素。**结论** 与常规 MRI 比较, 颅脑 fMRI 及脊髓 DTI 能更好地预测 CSM 术后脊髓功能恢复情况, 为科学制订术后康复方案提供参考资料。

【关键词】 脊髓型颈椎病; 功能性磁共振; 皮质重构; 弥散张量成像

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.09.003

Value of brain fMRI and spine DTI in predicting functional outcomes for patients with cervical spondylotic myelopathy

Song Yancheng^{1,2}, Kang Liqing², Shen Canghai³, Fu Lan¹, Liu Fenghai^{1,2}, Feng Yongjian³

¹Cangzhou Central Teaching Hospital, Tianjin Medical University, Cangzhou 061000, China; ²Department of MRI,

³Department of Orthopedic Surgery, Cangzhou Central Hospital, Cangzhou 061000, China

Corresponding author: Kang Liqing, Email: 573769265@qq.com

【Abstract】 **Objective** To explore the correlations relating functional MRI (fMRI) and diffusion tensor imaging (DTI) parameters with pre-operative neurological status and post-operative outcomes for patients with cervical spondylotic myelopathy (CSM). **Methods** Eighty-seven CSM patients treated with surgical decompression and 38 healthy counterparts were enrolled as the CSM and control groups respectively. DTI and fMRI of the cervical spine were performed while the subjects performed a finger-tapping task with their right hands before the operation and 6 months later. The control group was evaluated only when they were enrolled. All of the patients were given systematic rehabilitation treatment after the surgery. The Japanese Orthopaedic Association (JOA) scoring system for CSM was used to evaluate neurological status, and a JOA recovery rate < 50% was defined as a poor recovery. **Results** Compared with the healthy controls, the pre-operative patients showed significantly higher volume of activation (VOA) in the left precentral gyrus (PrCG), but that had decreased significantly 6 months after the surgery. Before the surgery, the patients' fractional isotropy (FA) was significantly less than that of the controls, but it had increased significantly 6 months after the operation. There was no difference in VOA in the left postcentral gyrus (PoCG) between the CSM patients and the controls before the surgery. The VOA ratio (PrCG/PoCG), VOA-PrCG, VOA-PoCG and FA were significantly correlated with both the JOA scores and recovery rates. Receiver operating characteristic (ROC) curve analyses were performed for the predictive ability with respect to surgical out-

comes. The largest area under the ROC curve was observed for the VOA ratio (0.805), followed by FA (0.740), and the VOA-PrCG (0.715). The fMRI and DTI showed better potential for predicting functional outcomes than with standard MRI parameters. Multivariate logistic regression revealed that the VOA ratio and FA were independently associated with poor outcomes. **Conclusions** fMRI and DTI parameters may be more valuable than conventional MRI results for neurological assessment and prognosis with CSM patients. They can also provide references for making up rehabilitation plans.

【Key words】 Cervical spondylotic myelopathy; Functional magnetic resonance imaging; Cortical reorganization; Diffusion tensor imaging

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.09.003

脊髓型颈椎病 (cervical spondylotic myelopathy, CSM) 是一种以慢性脊髓压迫伴神经功能障碍为特点的颈椎退行性疾病,其自然病程多呈恶性发展趋势,对于保守治疗无效或神经功能障碍进行性加重的患者,通过外科手术解除脊髓压迫是控制脊髓损害持续进展的首选方法^[1]。磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 是评价脊髓或软组织情况的首选影像学检查方法;以往研究通过任务态功能性磁共振成像 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) 发现 CSM 患者存在感觉及运动皮质功能重构^[2]。相关脊髓弥散张量成像 (diffusion tensor imaging, DTI) 研究表明,各向异性分数 (fractional anisotropy, FA) 与 CSM 患者术前临床症状严重程度、脊髓受压程度等均具有显著相关性^[3]。基于此,本研究选用对指任务-颅脑 fMRI 和脊髓 DTI 检查方法,探讨影像学指标变化与术前脊髓功能受损程度、术后脊髓功能改善情况间的相关性,以期为临床预测 CSM 患者转归及制订术后康复方案提供参考资料。

对象与方法

一、研究对象

选取 2018 年 1 月至 2018 年 12 月期间在河北省沧州市中心医院治疗的 CSM 患者作为研究对象。患者纳入标准包括:①存在 CSM 典型症状及体征,并经影像学检查证实存在脊髓压迫;②术前均行颈椎常规 MRI、颈髓 DTI 及右手对指任务-颅脑 fMRI 检查;③均为右利手,入选时意识清楚,能配合 fMRI 检查;④均行颈椎后路单开门椎管减压手术治疗;⑤术后均获得半年以上随访;⑥患者对本研究均知情同意并签署知情同意书。患者排除标准包括:①合并脑血管病、运动神经元病、周围神经病、肿瘤或感染等;②有颈椎外伤史;③患者意识不清或不能配合动手任务等。共有 87 例符合上述入选标准的 CSM 患者纳入本研究,其中男 55 例,女 32 例;年龄 45~79 岁,平均 (61.4±11.2) 岁;病程 3~24 个月,平均 (10.8±12.3) 个月。另外本研究同期选取年龄、性别、受教育程度与 CSM 患者相匹配的 38 例健康志愿者纳入对照组,其中男 23 例,女 15 例;年

龄 44~77 岁;平均 (60.2±10.7) 岁。本研究经河北省沧州市中心医院伦理委员会审批 (项目编号:172302149)。

二、治疗方法

所有 CSM 患者均由同一组外科团队行颈椎后路单开门椎管减压手术治疗,根据病变范围确定开门椎节数,铰链侧采用磨钻磨除椎板外侧缘骨皮质,保留松质骨及内层骨皮质,形成骨槽;开门侧采用磨钻沿椎板关节突内侧缘,将椎板完全切断,显露硬脊膜;将开门侧椎板板向铰链侧,使椎板呈开门状。术后患者均给予系统康复干预,包括:①术后 1~3 d 给予激素、脱水治疗及神经营养治疗;②术后 24 h 颈部伤口辅以超短波治疗,每天 1 次,每次 20 min,治疗 10 次为 1 个疗程;③术后 8 h 开始进行轴位翻身,并辅以颈部肌肉等长收缩训练,颈部肌肉每收缩 10 s 则休息 10 s,反复收缩 10 次为 1 组,每天训练 10~12 组;术后 24 h 进行四肢关节及手指、足趾主动功能训练,关节屈伸活动 50~60 次为 1 组,每天训练 10~12 组;术后 3 d 时佩戴颈围下床活动,根据患者恢复情况辅以四肢肌力训练、步行功能训练、膀胱和直肠功能训练、坐位-站立位平衡训练、手指功能训练及日常生活活动能力训练等;④术后第 8 周去除颈围,并在之前康复干预基础上增加颈椎屈伸训练,反复屈伸 20~30 次为 1 组,每天训练 4~6 组^[4-5]。

三、影像学检查

采用美国 GE 公司产 Discovery MR750 型成像设备及 8 通道头颈联合线圈。所有患者于术前、术后均行颈椎常规 MRI 序列扫描、右手对指任务-颅脑 fMRI 扫描及颈髓 DTI 扫描,对照组采用与 CSM 患者相同的 fMRI 及 DTI 扫描方法。颈椎常规 MRI 扫描序列包括矢状位 T1WI、T2WI 及轴位 T2WI。fMRI 采用梯度回波-回波平面成像序列,重复时间 (time of repetition, TR) 2000 ms,回波时间 (time of echo, TE) 35 ms,反转角 90°,视野 (field of view, FOV) 240 mm×240 mm,矩阵 64×64,连续扫描 30 层,层厚 4.0 mm,层间距 0 mm。fMRI 任务设计采用 Block 方案,嘱患者根据屏幕提示依次进行四指向拇指对指运动,频

率约 1 次/秒。以 TR 2000 ms 为 1 个时间点,开始阶段给予 12 个时间点的适应时间,然后以 10 个时间点为 1 个组块,任务组块、休息组块交替进行,每个组块执行 6 次,共计 132 个时间点,扫描时间为 4 min 24 s。DTI 成像采用单次激励自旋回波成像序列,横轴位扫描 C_{1-7} 水平,FOV 20 mm × 20 mm,TR 6000 ms,TE 83 ms,层厚 4.0 mm,层间距 0 mm,矩阵 96×96,激励次数 4,扩散敏感梯度方向选择 15,扩散加权系数 $b = 1000 \text{ s/mm}^2$ 。

四、图像后处理及量化指标分析

颈髓 T_2 WI 横轴位选取脊髓受压最严重层面,测量其横截面积 (cross-sectional area, CSA),并于 T_2 WI 矢状位记录脊髓高信号情况。fMRI 图像在 Matlab 7.14(R2012a)平台上使用 SPM12 软件进行预处理,包括时间、头动校正、脑空间坐标系标准化、空间平滑等,对每个像素进行统计学分析并建立统计参数图,确定激活像素。设定激活范围阈值为 10 个像素,即连续激活像素达到 10 个以上区域考虑为有意义的激活区域。记录每位患者执行对指任务时左侧大脑半球中央前回 (precentral gyrus, PrCG)、中央后回 (postcentral gyrus, PoCG) 激活体积 (volume of activation, VOA),并计算两者比值及加和,将加和结果视为初级感觉运动皮质 (somatosensory motor cortex, SMC) VOA 值。DTI 图像后处理采用 Functool 9.4.05 软件,采用 Correct 程序对图像进行校正,选取脊髓受压最严重层面,在 b0 图像上沿脊髓边缘勾画感兴趣区 (region of interest, ROI),并于 FA 图像上记录所勾画 ROI 的平均 FA 值。

五、临床效果评定

于术前、术后 6 个月时采用日本骨科学会评分系统 (Japanese Orthopaedic Association Scores, JOA) 评估入选 CSM 患者脊髓神经功能恢复情况,JOA 满分为 17 分,包括上肢运动功能 4 分,下肢运动功能 4 分,上肢、下肢及躯体感觉功能各 2 分,膀胱功能 3 分,完全异常为 0 分,计算患者术后 JOA 评分改善率,JOA 评分改善率 = (术后随访时 JOA 评分 - 术前 JOA 评分) / (17 - 术前 JOA 评分) × 100%,将 JOA 改善率 ≥ 50% 的患者归入恢复良好组, < 50% 的患者归入恢复不良组^[6]。

六、统计学分析

选用 SPSS 18.0 版统计学软件包进行数据分析,正态分布计量资料以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示,单因素两样本比较采用 t 检验,计数资料比较采用 χ^2 检验,采用 Pearson 线性相关分析比较常规 MRI、fMRI、DTI 参数与术前 JOA 评分、术后 JOA 评分改善率间的相关性,采用多因素 Logistic 回归分析 CSM 手术预后不良的独立危险因素, $P < 0.05$ 表示差异具有统计学意义或具有显著相关性。

采用 Medcalc 15.1 版软件绘制受试者工作特征曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC),并计算曲线下面积 (area under the curve, AUC) 及预测界值,如 $AUC > 0.5$ 则提示具有预测价值,该值越大表明预测效果越好,如 AUC 为 0.5~0.7 时提示有较低预测价值,0.7~0.9 时提示有中等预测价值,0.9 以上时则提示有较高预测价值。

结 果

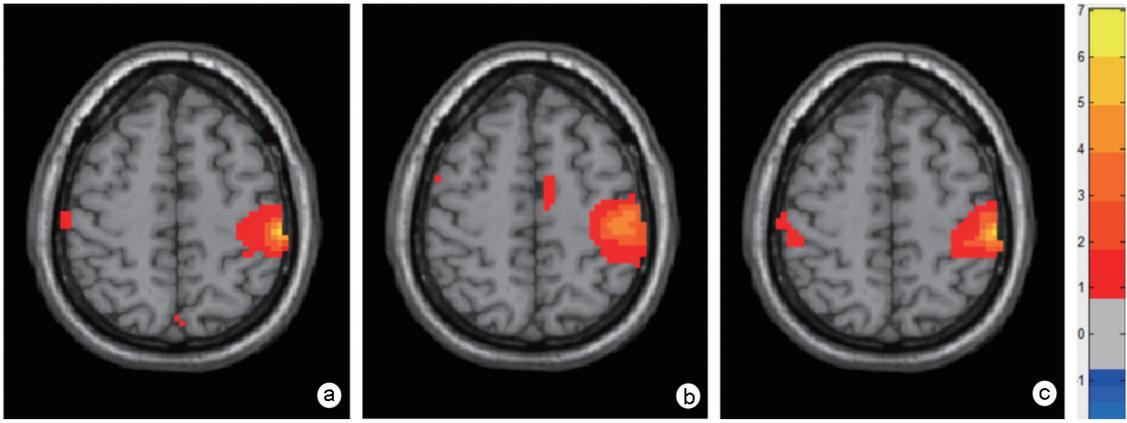
一、对照组与 CSM 组皮质 VOA 值及脊髓 FA 值分析

入选 CSM 患者术前 JOA 评分为 (8.45 ± 2.86) 分,术后 6 个月随访时 JOA 评分为 (13.26 ± 2.21) 分,其间差异具有统计学意义 ($t = 4.360, P < 0.05$),提示患者术后脊髓神经功能较术前显著改善。与对照组比较,术前 CSM 患者左侧 PrCG-VOA 值显著增大 ($t = 4.260, P < 0.05$),左侧 PoCG-VOA 值有降低趋势,但差异无统计学意义 ($t = 1.725, P = 0.087$);CSM 患者左侧 SMC (PrCG+PoCG) 的 VOA 值有增高趋势,但差异无统计学意义 ($t = 1.689, P = 0.094$)。术后 6 个月随访时,发现 CSM 患者左侧 PrCG-VOA 值较术前显著减小 ($t = 3.124, P = 0.002$);左侧 PoCG-VOA 值较术前有增大趋势,但差异无统计学意义 ($t = 1.170, P = 0.243$);CSM 患者左侧 SMC (PrCG+PoCG) 的 VOA 值较术前有减小趋势,但差异无统计学意义 ($t = 1.292, P = 0.198$),具体情况见图 1。入选 CSM 患者术前脊髓受压节段 FA 值较对照组显著降低 ($t = 4.785, P < 0.001$),术后 6 个月随访时发现 CSM 患者 FA 值较术前显著增高 ($t = 3.256, P = 0.001$),具体数据见表 1。

表 1 对照组与 CSM 组手术前、后左侧 PrCG、PoCG-VOA 值及脊髓 FA 值分析

| 组别 | 例数 | 手术前 | | | | 术后 6 个月时 | | | |
|-------|----|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| | | PrCG-VOA 值 (mm ³) | PoCG-VOA 值 (mm ³) | SMC-VOA 值 (mm ³) | FA 值 | PrCG-VOA 值 (mm ³) | PoCG-VOA 值 (mm ³) | SMC-VOA 值 (mm ³) | FA 值 |
| 对照组 | 38 | 405.78±93.58 | 342.35±81.94 | 748.12±175.48 | 0.915±0.132 | - | - | - | - |
| CSM 组 | 87 | 502.28±125.12 ^a | 312.37±92.53 | 814.65±213.27 | 0.456±0.175 ^a | 446.40±110.37 ^b | 328.36±87.84 | 774.76±183.67 | 0.723±0.146 ^b |

注:与对照组比较, a $P < 0.05$;与组内手术前比较, b $P < 0.05$



注:a 为对照组执行右手对手任务时激活图;b 为 CSM 患者术前左侧 SMC 激活图,可见激活体积较对照组增加;c 为 CSM 患者术后 6 个月时左侧 SMC 激活图,可见激活体积较术前减小,仍较对照组增加

图 1 对照组与 CSM 患者手术前、后 SMC 激活体积分析

二、MRI 指标与术前 JOA 评分、术后 JOA 评分改善率间的相关性分析

通过 Pearson 线性相关分析发现,术前 CSM 患者 PrCG-VOA、PoCG-VOA、VOA 比值(PrCG/PoCG)、FA、CSA 值与术前 JOA 评分、术后 JOA 评分改善率间均具有显著相关性($P < 0.05$);其中 VOA 比值与术后 JOA 评分改善率间的相关系数绝对值最大,CSA 与术后 JOA 评分改善率间的相关系数绝对值最小,具体数据见表 2。

表 2 MRI 各量化参数与术前 JOA 评分、术后 JOA 评分改善率间的相关性分析

| MRI 量化指标 | 术前 JOA 评分 | | 术后 JOA 评分改善率 | |
|----------|-----------|--------|--------------|--------|
| | r 值 | P 值 | r 值 | P 值 |
| PrCG-VOA | -0.698 | <0.001 | -0.367 | <0.001 |
| PoCG-VOA | 0.645 | <0.001 | 0.341 | 0.001 |
| VOA 比值 | -0.788 | <0.001 | -0.442 | <0.001 |
| FA 值 | 0.739 | <0.001 | 0.378 | <0.001 |
| CSA | 0.417 | <0.001 | 0.307 | 0.004 |

三、MRI 指标预测 CSM 术后恢复不良的 ROC 曲线分析

本研究根据随访时 JOA 评分改善情况将入选

CSM 患者分为恢复良好组及恢复不良组,2 组患者 VOA 比值、PrCG-VOA、FA、CSA 组间差异均具有统计学意义($P < 0.05$),而年龄、性别、病程、脊髓高信号、PoCG-VOA、SMC-VOA 组间差异均无统计学意义($P > 0.05$),具体数据见表 3。通过 ROC 曲线分析 MRI 各量化指标预测术后恢复不良的 AUC、界值、敏感度和特异度详见表 4、图 2,可见 VOA 比值、FA、PrCG-VOA、CSA 预测术后恢复不良的 AUC 值逐渐减弱。

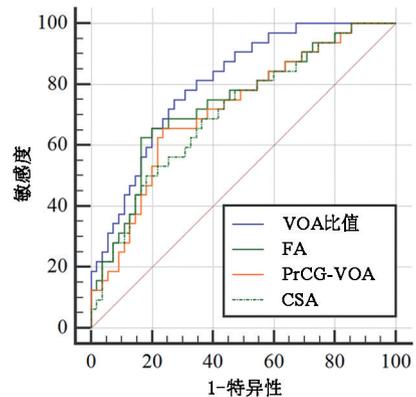


图 2 MRI 量化指标预测 CSM 术后恢复不良的 ROC 曲线分析

表 3 恢复良好组与恢复不良组术前临床及影像学指标比较

| 组别 | 例数 | 年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$) | 性别 | | 病程 (月, $\bar{x} \pm s$) | 脊髓高信号 | | CSA ($\text{cm}^2, \bar{x} \pm s$) |
|-------|----|-----------------------------|----|-------|-----------------------------|-------|-------|---|
| | | | 男 | 女 | | 有 | 无 | |
| 恢复良好组 | 56 | 60.85±6.36 | 35 | 21 | 10.47±6.85 | 24 | 32 | 0.574±0.184 |
| 恢复不良组 | 31 | 62.62±6.81 | 20 | 11 | 11.19±7.52 | 19 | 12 | 0.437±0.178 |
| 统计值 | | -1.205 | | 0.035 | -1.038 | | 2.712 | 3.405 |
| P 值 | | 0.232 | | 0.852 | 0.302 | | 0.100 | 0.001 |

| 组别 | 例数 | PrCG-VOA ($\text{mm}^3, \bar{x} \pm s$) | PoCG-VOA ($\text{mm}^3, \bar{x} \pm s$) | SMC-VOA ($\text{mm}^3, \bar{x} \pm s$) | VOA 比值 ($\bar{x} \pm s$) | FA($\bar{x} \pm s$) |
|-------|----|--|--|---|-------------------------------|-----------------------|
| 恢复良好组 | 56 | 467.17±118.04 | 319.45±81.14 | 797.15±172.09 | 2.637±0.805 | 0.482±0.131 |
| 恢复不良组 | 31 | 562.63±107.45 | 300.52±73.32 | 827.78±181.03 | 3.957±1.136 | 0.364±0.112 |
| 统计值 | | -3.672 | 1.114 | -0.640 | -5.112 | 4.030 |
| P 值 | | <0.001 | 0.269 | 0.524 | <0.001 | <0.001 |

表 4 MRI 各量化指标预测 CSM 术后恢复不良的 ROC 曲线分析

| MRI 量化指标 | AUC | 95%可信区间 | 界值 | 敏感度 (%) | 特异度 (%) |
|----------|-------|-------------|--------|---------|---------|
| VOA 比值 | 0.805 | 0.706-0.882 | 3.656 | 75.00 | 72.73 |
| PrCG-VOA | 0.715 | 0.609-0.807 | 543.68 | 65.62 | 76.36 |
| FA | 0.740 | 0.635-0.828 | 0.386 | 83.64 | 62.50 |
| CSA | 0.707 | 0.600-0.800 | 0.471 | 68.75 | 63.64 |

四、CSM 患者术后恢复不良的多因素分析

本研究按预测界值将 VOA 比值、FA 及 CSA 分成 2 个等级并赋值,将常规 MRI、fMRI 以及 DTI 量化指标各选 1 个纳入多因素 Logistic 回归分析,结果显示 VOA 比值与 FA 值是预测 CSM 术后恢复不良的独立危险因素,详见表 5。

表 5 入选 CSM 患者恢复不良独立危险因素的 多变量 Logistic 回归分析

| 变量 | 偏回归系数 | 标准误 | Wald 值 | OR 值 | 95%可信区间 | P 值 |
|--------|--------|-------|--------|-------|--------------|--------|
| VOA 比值 | 1.775 | 0.478 | 13.786 | 5.899 | 2.312-15.053 | <0.001 |
| FA | 0.965 | 0.414 | 5.426 | 2.624 | 1.165-5.908 | 0.020 |
| CSA | 0.019 | 0.506 | 0.001 | 1.019 | 0.378-2.749 | 0.970 |
| 常数项 | -4.568 | 0.899 | 25.829 | 0.010 | - | <0.001 |

讨 论

脊髓是中枢神经系统重要组成部分,各种原因引起的脊髓损伤均可能对大脑功能产生影响^[7]。fMRI 能通过探测大脑神经元活动时通过该区域血流量变化所致局部磁场性质改变,从而发现脊髓损伤后大脑皮质功能重组。本研究选取右手对指任务并观察 CSM 患者皮质功能变化,该运动任务主要激活左侧初级运动皮质及初级感觉皮质,分别位于左侧 PrCG 及左侧 PoCG^[8]。本研究结果显示,入选 CSM 患者术前左侧 PoCG-VOA 与对照组比较无显著差异,而术前左侧 PrCG-VOA 较对照组显著增加($P<0.05$),提示 CSM 患者术前存在皮质运动功能过代偿现象^[2,9]。Ryan 等^[10]通过任务态 fMRI 研究发现,CSM 患者在执行运动任务时其对侧 PrCG 与 PoCG 激活表现呈现相反趋势,即对侧 PrCG 激活增强, PoCG 激活则减弱;Kriz 等^[11]发现,CSM 患者在执行运动任务时会出现对侧初级运动皮质过度激活,以弥补运动网络中部分功能缺失;Gallo 等^[12]进一步指出这种初级运动皮质过度激活还可能与脊髓内抑制性中间神经元受损而失去抑制作用有关。CSM 患者对侧 PoCG 激活减弱反映了脊髓受压后感觉传导通路传导至皮质网络的信号出现衰减;感觉传导通路受损会影响本体感觉反馈机制,由于执行对指任务时缺乏有效的感觉刺激,其初级感觉皮质会出现激活减弱^[13]。本研究于术后 6 个月随访时

发现 CSM 患者左侧 PrCG-VOA 较术前显著减小,但仍大于对照组;左侧 PoCG-VOA 较术前增大,但仍小于对照组。上述结果提示术后 CSM 患者大脑运动、感觉皮质激活程度趋于正常,表明手术解除脊髓压迫后,其脊髓运动功能逐渐恢复,这与临床术后 JOA 评分升高具有一致性,该现象也提示 CSM 患者运动、感觉功能异常主要源于脊髓局部损伤,而非非皮质本身受损。

由于 CSM 患者术前左侧 PrCG 与 PoCG 激活表现具有负相关性,为更好地反映激活信号差异与临床预后间的关系,本研究采用 VOA 比值(PrCG/PoCG)对术后恢复情况进行预测,通过线性相关分析发现入选患者术前左侧 PrCG-VOA、PoCG-VOA、VOA 比值均与术前 JOA 评分、术后 JOA 评分改善率间存在显著相关性;并以 VOA 比值与术前 JOA 评分、术后 JOA 评分改善率间的相关性最显著,提示 VOA 比值能较好地反映 CSM 患者术前脊髓损伤程度及预测术后恢复情况。

常规 MRI 对椎管狭窄程度及脊髓信号强度的评估无法反映损伤后脊髓微观改变^[14],且由于患者个体耐受情况差异,导致影像学表现类似的患者在临床症状及脊髓功能评分方面可能存在明显差异^[15]。DTI 基于弥散加权成像原理,通过检测白质纤维束中水分子扩散情况,能直观反映脊髓损伤后局部白质纤维束完整性,提供活体脊髓细微病理生理结构信息。FA 值是 DTI 反映水分子扩散各向异性的重要指标,该指标同时也能反映白质纤维束髓鞘化程度及对水分子弥散的限制情况,是较常规 MRI-CSA 值及脊髓高信号更敏感的量化指标,在评估 CSM 患者脊髓损伤程度、预测远期恢复方面具有重要作用^[16]。本研究结果显示,入选 CSM 患者术前 FA 值较正常人减低,且与临床 JOA 评分具有正相关性,即临床症状越严重的 CSM 患者其 FA 值下降趋势越显著,与既往研究结果基本一致^[17],表明脊髓损伤后白质纤维束的失完整性是造成患者功能障碍的重要因素。术后 6 个月随访时发现入选 CSM 患者 JOA 评分较术前显著改善,脊髓 FA 值较术前显著增加,进一步证明 DTI 参数变化可反映脊髓神经功能改善情况。

大脑皮质 fMRI 激活信号是基于脊髓损伤后的继发改变;与颅脑影像学检查比较,DTI 可直接观察并定量评估脊髓功能损伤程度,但由于脊髓具有纵径较长而横截面积较小、骨组织环绕影响磁场均匀性及易受周围脑脊液伪影干扰等特点,DTI 成像在脊髓损伤中的应用目前还存在一定争议^[18]。本研究 ROC 曲线分析结果显示,术前 VOA 比值、PrCG-VOA、FA、CSA 对 CSM 患者手术预后均具有中等强度预测价值,其中 FA 的预测效能优于 PrCG-VOA 及 CSA,但低于 VOA 比值。VOA 比值综合了 PrCG 过度代偿与 PoCG 传导

受阻后部分激活缺失的双重相关因素,具有较 PrCG-VOA 更高的敏感性,可提高 fMRI 针对 CSM 的预测效能。另外 ROC 结果显示 VOA 比值的 AUC 大于 FA 值的 AUC,进一步证明 VOA 比值是较 FA 值更好的预后评估指标。对于 VOA 比值 ≤ 3.656 的患者,提示经脊髓减压术后其脊髓功能有较好恢复,这对于树立患者治疗信心及提高患者术后康复干预依从性均具有积极作用;而对于 VOA 比值 > 3.656 的患者,则提示即使手术治疗后配合系统康复干预,患者脊髓功能仍可能恢复不良,这对临床改进术后康复措施提出了更高要求,例如术后增加电针、高压氧等治疗手段等,这部分 CSM 患者的术后康复干预也是今后重点研究的方向之一^[19]。

综上所述,本研究结果表明,VOA 比值、FA 值均是预测 CSM 患者减压术后恢复不良的独立危险因素;需要指出的是,本研究由于样本量偏小,且 CSM 患者临床表现及脑网络本身均具有一定复杂性或变异性,上述结论还有待多中心、大样本量、长期随访研究进一步论证。

参 考 文 献

- [1] 陈雄生,贾连顺,袁文,等.脊髓型颈椎病自然史规律研究[J].中国矫形外科杂志,2002,10(13):1301-1304. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8478.2002.z1.016.
- [2] Rindler RS, Chokshi FH, Malcolm JG, et al. Spinal diffusion tensor imaging in evaluation of preoperative and postoperative severity of cervical spondylotic myelopathy: systematic review of literature[J]. World Neurosurg, 2017, 99: 150-158. DOI: 10.1016/j.wneu.2016.11.141.
- [3] Wang K, Chen Z, Zhang F, et al. Evaluation of DTI parameter ratios and diffusion tensor tractography grading in the diagnosis and prognosis prediction of cervical spondylotic myelopathy[J]. Spine, 2017, 42(4): E202-210. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001784.
- [4] 曹俊明,杨大龙,申勇,等.康复治疗对脊髓型颈椎病患者椎板成形手术效果的影响[J].中华物理医学与康复杂志,2009,31(7): 468-471. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2009.07.012.
- [5] 王波,刘海鹰,王会民,等.椎板扩大成形术后早期颈椎功能训练结合红外线治疗脊髓型颈椎病[J].中华物理医学与康复杂志,2006,28(11): 779-780. DOI: 10.3760/j.issn: 0254-1424. 2006. 11. 018.
- [6] Oichi T, Oshima Y, Taniguchi Y, et al. Cervical anterolisthesis: a predictor of poor neurological outcomes in cervical spondylotic myelopathy

- patients after cervical laminoplasty [J]. Spine, 2016, 41(8): E467-473. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001277.
- [7] Kaas JH, Qi HX, Burish MJ, et al. Cortical and subcortical plasticity in the brains of humans, primates, and rats after damage to sensory afferents in the dorsal columns of the spinal cord [J]. Exp Neurol, 2008, 209(2): 407-416. DOI: 10.1016/j.expneurol.2007.06.014.
- [8] Kandel ER. A new intellectual framework for psychiatry [J]. Am J Psychiatry, 1998, 155(4): 457-469. DOI: 10.1176/ajp.155.4.457.
- [9] Holly LT, Dong Y, Albigestegui-DuBois R, et al. Cortical reorganization in patients with cervical spondylotic myelopathy [J]. J Neurosurg Spine, 2007, 6(6): 544-551. DOI: 10.3171/spi.2007.6.6.5.
- [10] Ryan K, Goncalves S, Bartha R, et al. Motor network recovery in patients with chronic spinal cord compression: a longitudinal study following decompression surgery [J]. J Neurosurg Spine, 2018, 28(4): 379-388. DOI: 10.3171/2017.7.SPINE1768.
- [11] Kriz J, Kozak J, Zedka M. Primary motor cortex inhibition in spinal cord injuries [J]. Neuro Endocrinol Lett, 2012, 33(4): 431-441. DOI: 10.1155/2012/832757.
- [12] Gallo A, Esposito F, Sacco R, et al. Visual resting-state network in relapsing-remitting MS with and without previous optic neuritis [J]. Neurology, 2012, 79(14): 1458-1465. DOI: 10.1212/WNL.0b013e31826d5eea.
- [13] Kowalczyk I, Duggal N, Bartha R. Proton magnetic resonance spectroscopy of the motor cortex in cervical myelopathy [J]. Brain, 2012, 135(2): 461-468. DOI: 10.1093/brain/awr328.
- [14] 李晶,宋小燕,鲁燕莉.颈椎病患者 MRI T₂WI 髓内有高信号与无高信号的比较研究[J].中华物理医学与康复杂志,2002,24(10): 577-579. DOI: 10.3760/j.issn:0254-1424.2002.10.001.
- [15] 马迅,陈辉,曹凯,等.不同影像学特点的脊髓型颈椎病的手术治疗[J].中华骨科杂志,2014,34(10): 983-991. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-2352.2014.10.001.
- [16] Ries M, Jones RA, Dousset V, et al. Diffusion tensor MRI of the spinal cord [J]. Magn Reson Med, 2000, 44(6): 884-892.
- [17] Vedantam A, Jirjis MB, Schmit BD, et al. Diffusion tensor imaging of the spinal cord: insights from animal and human studies [J]. Neurosurgery, 2014, 74(1): 1-8. DOI: 10.1227/NEU.000000000000171.
- [18] 孔超,陈学明,关骅,等.脊髓型颈椎病患者颈脊髓磁共振扩散张量成像的特点及临床意义[J].中国脊柱脊髓杂志,2016,26(11): 977-983. DOI: 10.3969/j.issn.1004-406X.2016.11.04.
- [19] 申沧海,高增升,王力国,等.高压氧治疗肌萎缩型颈椎病的疗效观察[J].中华物理医学与康复杂志,2016,38(3): 229-230. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2016.03.021.

(修回日期:2019-06-05)

(本文编辑:易浩)