

· 临床研究 ·

围手术期高压氧治疗对脊髓型颈椎病术后脊髓功能影响的 DTI 研究

申沧海¹ 冯永健¹ 宋彦澄² 刘钢¹ 刘志伟¹ 戴海洋¹¹沧州市中心医院骨四科, 沧州 061000; ²沧州市中心医院磁共振成像科, 沧州 061000

通信作者: 申沧海; Email: shencanghai123@163.com

【摘要】 目的 观察围手术期介入高压氧治疗对脊髓型颈椎病(CSM)患者术后脊髓功能恢复的影响, 并通过弥散张量成像(DTI)技术探讨其作用机制。**方法** 采用随机数字表法将拟接受颈椎后路手术治疗的 80 例 CSM 患者分为高压氧组及对照组, 每组 40 例。2 组患者术后均给予常规治疗及康复训练, 高压氧组在此基础上辅以围手术期高压氧干预。于术前、术后 6 个月随访时采用日本骨科学会(JOA)评分系统评估患者脊髓神经功能情况; 同时于上述时间点 2 组患者进行脊髓常规 MRI 及 DTI 扫描。**结果** 术后 6 个月随访时 2 组患者 JOA 评分均较治疗前有不同程度提高, 并且高压氧组 JOA 评分[(11.30±1.93)分]明显优于对照组水平($P<0.05$)。经 Pearson 相关性分析发现, 80 例 CSM 患者术前 JOA 评分与术前脊髓受压节段各向异性分数(FA)、表观弥散系数(ADC)值均存在显著相关性($P<0.05$); 术后 6 个月随访时入选患者 JOA 评分与术后脊髓 FA、ADC 值仍存在显著相关性($P<0.05$); 随着脊髓损伤程度加重, 其 FA 值逐渐降低, ADC 值逐渐升高。术后 6 个月随访时 2 组患者受损脊髓 FA 值均较术前显著升高, ADC 值均较术前明显降低($P<0.05$); 并且高压氧组脊髓 FA 值(0.726±0.087)显著高于对照组水平($P<0.05$), ADC 值[(1.148±0.079)×10⁻³ mm²/s]显著低于对照组水平($P<0.05$)。**结论** DTI 量化指标能客观显示脊髓微观结构改变, 真实反映脊髓病理状态; 围手术期高压氧治疗能进一步改善 CSM 患者术后脊髓神经功能, 其作用机制可能与改善受损脊髓缺血、缺氧状态、促进脊髓神经细胞及神经纤维修复有关。

【关键词】 高压氧; 脊髓型颈椎病; 单开门椎管扩大成形术; 弥散张量成像

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.11.007

The effect of peri-operative hyperbaric oxygen therapy on the recovery of neurologic function of patients with cervical spondylotic myelopathy: A diffusion tensor imaging studyShen Canghai¹, Feng Yongjian¹, Song Yancheng², Liu Gang¹, Liu Zhiwei¹, Dai Haiyang¹¹Department of Orthopedic Surgery, ²MRI Department, Cangzhou Central Hospital, Cangzhou 061000, China

Corresponding author: Shen Canghai, Email: shencanghai123@163.com

【Abstract】 Objective To observe the clinical effect of hyperbaric oxygen therapy on cervical spondylotic myelopathy (CSM) in the peri-operative period, and to explore its neural mechanism. **Methods** Eighty patients who underwent surgical decompression for CSM were randomly divided into a hyperbaric oxygen group ($n=40$) and a control group ($n=40$). Both groups received cervical laminoplasty and systematic rehabilitation treatment after the surgery, while the hyperbaric oxygen group was additionally provided with hyperbaric oxygen therapy in the peri-operative period. The patients' neurological status was evaluated using Japanese Orthopaedic Association (JOA) scores. Both groups received conventional MRI and diffusion tensor imaging (DTI) before and 6 months after the surgery. **Results** After the surgery, both groups gained significant improvement in their average JOA score, with the improvement of the hyperbaric oxygen group significantly greater than in the control group. Pearson correlation analysis showed that the average pre-operative JOA score was significantly correlated with the anisotropic fraction (FA) and the apparent dispersion coefficient (ADC) of the compressed spinal cord. Six months after the surgery such correlation still persisted. During the six months, significant increase was observed in the average FA and significant decrease in the average ADC in both groups, with the average FA of the hyperbaric oxygen group (0.726±0.087) significantly higher at the end of the 6 months than that in the control group. The average ADC (1.148±0.079)×10⁻³ mm²/s was significantly lower. **Conclusions** DTI's quantitative indicators can objectively show changes in the microstructure and pathological state of spinal cords. Exposure to hyperbaric oxygen may relieve ischemia and hypoxia of the spinal cord, promoting the repair of injured neurons and accelerating the regeneration of nerve fibers.

【Key words】 Hyperbaric oxygen; Cervical spine; Spondylosis; Myelopathy; Laminoplasty; Diffu-

sion tensor imaging

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.11.007

脊髓型颈椎病 (cervical spondylotic myelopathy, CSM) 是由颈椎退行性病变引发的慢性脊髓损伤, 通常起病隐匿, 重症者可导致严重四肢功能损伤^[1-2]; 如不及时给予相应治疗, 容易造成脊髓神经功能不可逆损害。脊髓减压手术是解除脊髓压迫及促进神经功能恢复的有效手段, 但并不是所有的 CSM 患者脊髓神经功能在术后都能得到满意恢复。相关研究表明, 当高压氧治疗脊髓损伤性疾病时能迅速改善脊髓受损部位缺氧状态及微循环, 加速脊髓神经细胞及神经纤维修复, 促进神经纤维再生^[3-5]。弥散张量成像 (diffusion tensor imaging, DTI) 是利用水分子弥散运动时的各向异性进行成像, 可反映人体活体组织空间组成信息以及病理状态下各组织成分间水分子交换情况; DTI 能敏感反映病变脊髓中水分子弥散各向异性改变, 并提供活体脊髓细微病理生理结构信息^[6-8]。以往有研究者将 DTI 与传统 MRI 进行比较, 发现 DTI 能更有效在 CSM 早期反映脊髓神经损伤, 从而更好地与 CSM 患者神经功能损伤程度相关联^[9]。近年来 DTI 技术在 CSM 脊髓功能评估及预后分析方面的应用日趋广泛; 基于此, 本研究联合采用日本骨科学会 (Japanese Orthopaedic Association, JOA) 评分及脊髓 DTI 技术观察围手术期高压氧治疗对 CSM 患者术后脊髓神经功能恢复的影响, 并探讨其作用机制。现报道如下。

对象与方法

一、研究对象

选取 2017 年 6 月至 2019 年 3 月期间在河北省沧州市中心医院住院并接受颈椎后路手术治疗的 CSM 患者 80 例, 患者纳入标准包括: ①有脊髓损伤的临床症状及体征, 并经影像学检查证实存在脊髓压迫; ②均行颈椎后路单开门椎管扩大成形术治疗; ③术前、术后 6 个月随访时均行颈椎 DTI 检查; ④患者对本研究知情同意并签署相关文件, 同时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)。患者排除标准包括: ①既往有颈椎手术史; ②合并脊髓外脊髓病变, 包括胸椎黄韧带骨化、胸椎后纵韧带骨化症、多发性硬化等; ③合并脑血管病、运动神经元病、周围神经病、肿瘤或感染等; ④行颈椎前后路联合手术治疗等。采用随机数字表法将上述患者分为高压氧组及对照组, 每组 40 例。2 组患者性别、年龄、受教育程度、病程、术前 JOA 评分等 (详见表 1) 经统计学比较, 发现组间差异均无统计学意义 ($P>0.05$), 具有可比性。

表 1 入选时 2 组患者一般资料情况比较

组别	例数	性别		年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)
		男	女	
高压氧组	40	28	12	59.75 $\pm$ 6.45
对照组	40	26	14	59.26 $\pm$ 6.71

组别	例数	受教育程度 (年, $\bar{x} \pm s$)	病程 (月, $\bar{x} \pm s$)	JOA 评分 (分, $\bar{x} \pm s$)
高压氧组	40	8.72 $\pm$ 2.8	10.81 $\pm$ 6.64	7.45 $\pm$ 2.17
对照组	40	8.80 $\pm$ 3.0	10.79 $\pm$ 6.45	7.38 $\pm$ 2.21

二、治疗方法

2 组患者均行颈椎后路单开门椎管扩大成形术治疗, 根据病变范围确定开门椎节数; 采用磨钻磨除铰链侧椎板外侧缘骨皮质, 形成 V 形骨槽; 开门侧用磨钻沿椎板关节突内侧缘磨透椎板内外层皮质并显露硬脊膜; 将开门侧椎板板向铰链侧, 使椎板呈开门状, 开门角度约 45°~60°。2 组患者术后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干预; ②术后 24 h 颈部伤口辅以超短波理疗, 每天 1 次, 每次 20 min, 治疗 10 次为 1 个疗程; ③术后 8 h 行轴位翻身, 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 行四肢关节及手指、足趾主动训练, 关节屈伸活动 50~60 次为 1 组, 每天训练 10~12 组; 术后 3 d 时指导患者佩戴颈围下床活动, 并根据其恢复情况辅以四肢肌力训练、手指功能训练、步行功能训练、坐位-站立位平衡训练、膀胱和直肠功能训练及日常生活活动能力训练; 术后 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。

高压氧组在上述干预基础上辅以围手术期高压氧治疗。术前 1 周即开始给予高压氧干预, 采用 GY3200 型高压氧舱, 先用净化空气加压至 0.2 MPa, 患者吸氧方式为面罩吸氧, 升压时间 25 min, 吸氧时间 60 min, 中间休息 10 min 改吸舱内空气, 待吸氧结束减压 25 min 后患者出舱, 每次总治疗时间为 120 min, 每天治疗 1 次, 共治疗 7 d。从术后 2 d 开始继续给予高压氧治疗, 治疗方式及时间同术前, 每天治疗 1 次, 治疗 10 d 为 1 个疗程, 术后共治疗 2 个疗程。

三、DTI 数据采集

于术前、术后 6 个月随访时采集 2 组 CSM 患者 DTI 数据, 选用美国 GE 公司产 MR 750 3.0T 超导型磁共振扫描仪行 DTI 序列扫描 (横轴位扫描 $C_1 \sim C_7$ 水平), 采用单次激励自旋回波成像序列, 视野 (field of view, FOV) 20 mm $\times$ 20 mm, 重复时间 (time of repetition, TR)

8000 ms, 回波时间 (time of echo, TE) 98.3 ms, 层厚 4 mm, 层间距 0 mm, 矩阵 96×96, 激励次数 4, 弥散敏感梯度方向为 15, 弥散加权系数 $b=1000 \text{ s/mm}^2$ 。

采用 GE AW4.6 工作站进行 DTI 图像分析, DTI 原始数据选用 Functool 9.4.05 软件进行后处理, 选择 Diffusion Tensor, 使用 Correct 程序对图像进行校正, 每个横轴位层面可分别获得各向异性分数 (fractional anisotropy, FA) 图及表观弥散系数 (apparent diffusion coefficient, ADC) 图。术前选取脊髓受压最严重层面, 术后 6 个月随访时选取相同层面。在 b0 图像上手动选取横轴位脊髓为感兴趣区域 (region of interest, ROI), 注意避开脊髓周围脑脊液; 然后分别在每个层面 FA 及 ADC 图上记录相应 ROI 的 FA 值与 ADC 值 (图 1)。

四、疗效观察分析

于术前、术后 6 个月随访时分别采用 JOA 评分对 2 组患者脊髓神经功能进行评定, 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。术前根据 JOA 实测评分将入选 CSM 患者脊髓功能状态分为轻度损伤 (JOA 评分 13~16 分)、中度损伤 (JOA 评分 9~12 分) 及重度损伤 (JOA 评分 ≤ 8 分) 3 个水平^[10]。

五、数据处理及统计学分析

本研究所得计量资料以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示, 采用 SPSS 18.0 版统计学软件包进行数据分析, 计量资料经正态分布及方差齐性检验后组间比较采用独立样本 t 检验, 术前、术后随访时组内比较采用配对样本 t 检验; 轻度、中度及重度损伤各组患者数据比较采用方差分析, 采用 Pearson 线性相关分析比较术前、术后 DTI 参数与 JOA 评分间的相关性, $P<0.05$ 表示差异具有统计学意义或具有显著相关性。

结 果

一、入选患者脊髓 DTI 参数与脊髓功能评分间的

相关性分析

术前轻度、中度及重度损伤 CSM 患者其脊髓 FA 值 3 组间差异具有统计学意义 ($F=22.825, P<0.001$), 进一步两两比较发现各组间差异亦具有统计学意义 ($P<0.05$)。轻度、中度及重度损伤 CSM 患者其脊髓 ADC 值 3 组间差异具有统计学意义 ($F=18.792, P<0.001$), 进一步两两比较发现各组间差异亦具有统计学意义 ($P<0.05$), 具体数据见表 2; 表中数据显示, 随着脊髓损伤程度加重, FA 值逐渐降低, 而 ADC 值逐渐升高。经 Pearson 线性相关分析发现, 所有 CSM 患者术前脊髓受压节段 FA 值、ADC 值与术前 JOA 评分均存在显著相关性 ($P<0.001$); 术后 6 个月随访时, 发现患者脊髓 FA 值、ADC 值与术后 JOA 评分仍存在显著相关性 ($P<0.001$), 其中 FA 值与 JOA 评分呈显著正相关, ADC 值与 JOA 评分呈显著负相关。具体数据见表 3。

表 2 不同损伤程度 CSM 患者脊髓 FA、ADC 值比较 ($\bar{x} \pm s$)

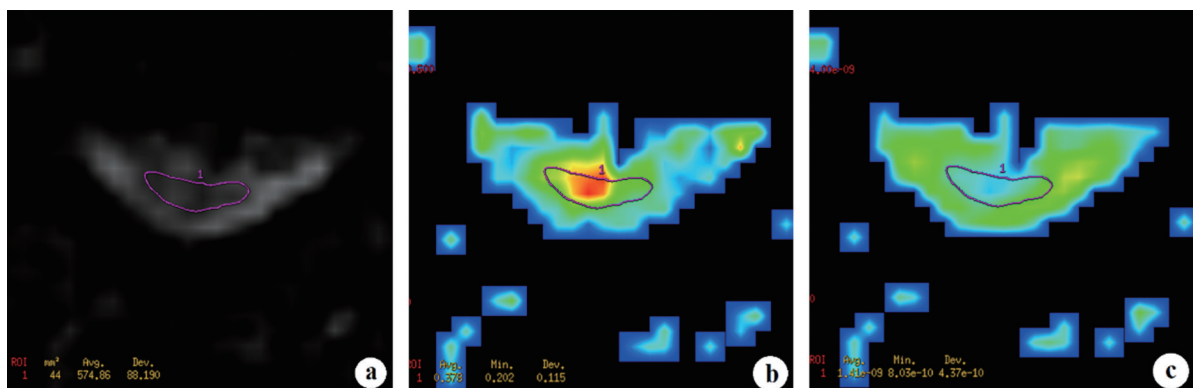
组别	例数	受损脊髓 FA 值	受损脊髓 ADC 值 ($\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$)
轻度损伤组	29	0.630±0.086	1.123±0.101
中度损伤组	27	0.412±0.098 ^a	1.378±1.204 ^a
重度损伤组	24	0.259±0.078 ^{ab}	1.530±0.093 ^{ab}

注: 与轻度损伤组比较, ^a $P<0.05$; 与中度损伤组比较, ^b $P<0.05$

表 3 手术前、后入选患者脊髓 FA、ADC 值与 JOA 评分相关性分析

分析指标	术前 JOA 评分		术后 JOA 评分	
	r 值	P 值	r 值	P 值
术前 FA 值	0.775	<0.001	-	-
术前 ADC 值	-0.721	<0.001	-	-
术后 FA 值	-	-	0.751	<0.001
术后 ADC 值	-	-	-0.706	<0.001

二、手术前、后 2 组患者 JOA 评分及 DTI 数据比较
手术前、后高压氧组及对照组 JOA 评分、脊髓 FA 值、ADC 值详见表 4; 表中数据显示, 术后 6 个月随访



注: a-沿着受压脊髓手动选取感兴趣区域 (b0 图像); b-获取相应层面脊髓 FA 值 (FA 图); c-获取相应层面脊髓 ADC 值 (ADC 图)

图 1 受压脊髓 FA 与 ADC 值测量方法

时高压氧组、对照组 JOA 评分均较术前明显改善 ($P<0.05$); 并且术后 6 个月随访时高压氧组及对照组脊髓 FA 值均较术前显著升高 ($P<0.05$), ADC 值均较术前明显降低 ($P<0.05$)。通过进一步组间比较发现, 术前高压氧组、对照组 JOA 评分、脊髓 ADC 值及 FA 值组间差异均无统计学意义 ($P>0.05$); 术后 6 个月随访时, 发现高压氧组 JOA 评分、脊髓 FA 值均显著高于对照组水平 ($P<0.05$), ADC 值则明显低于对照组水平 ($P<0.05$), 具体数据见表 4。

表 4 手术前、后 2 组患者 JOA 评分及脊髓 FA、ADC 值比较 ($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	JOA 评分 (分)	脊髓 FA 值	脊髓 ADC 值 ($\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$)
高压氧组				
手术前	40	7.45 $\pm$ 2.17	0.459 $\pm$ 0.094	1.355 $\pm$ 0.122
手术后	40	11.30 $\pm$ 1.93 ^{ab}	0.726 $\pm$ 0.087 ^{ab}	1.148 $\pm$ 0.079 ^{ab}
对照组				
手术前	40	7.38 $\pm$ 2.21	0.455 $\pm$ 0.102	1.360 $\pm$ 0.108
手术后	40	9.61 $\pm$ 1.79 ^a	0.636 $\pm$ 0.093 ^a	1.223 $\pm$ 0.087 ^a

注: 与组内治疗前比较, ^a $P<0.05$; 与对照组术后比较, ^b $P<0.05$

讨 论

本研究结果显示, 术后 6 个月随访时高压氧组及对照组 JOA 评分均较术前明显改善, 表明颈椎减压手术能促进 CSM 患者脊髓功能恢复; 另外术后随访时高压氧组 JOA 评分明显优于对照组水平, 提示围手术期高压氧治疗能更显著改善 CSM 患者术后脊髓神经功能。

椎间盘退变是 CSM 最早也是最基本病理改变之一; 随着退变进展, 患者颈椎生物力学特点发生改变, 椎体后缘骨赘形成, 后纵韧带、黄韧带退变增生, 椎管容积逐渐减小; 在静态压迫、动态刺激等多种因素共同作用下最终导致脊髓缺血、缺氧而出现功能障碍。目前认为手术减压是阻止 CSM 疾病进展的有效方法, 理论上颈椎减压手术能扩大狭窄椎管, 释放受压脊髓并解除压迫, 增加脊髓神经组织血液供应, 改善脊髓缺血、缺氧状态, 促进脊髓神经组织修复及神经功能恢复^[11-12]。但是在临床实践中发现, 并不是所有 CSM 患者经手术治疗后都能获得满意神经功能恢复, 因此如何改善术后脊髓神经功能是临床医师及 CSM 患者极为关注的重要问题。

近年来高压氧在脑出血、脑外伤及脑神经损伤等颅脑疾病治疗中均得到广泛应用, 其临床疗效也获得普遍认可^[13-14]。大量文献报道, 高压氧能有效改善脊髓损伤部位缺血、缺氧状态及微循环, 在保护脊髓神经细胞方面具有明显优势^[3-5]。既往研究发现, 无论 CSM 脊髓减压手术动作如何轻柔, 均会对患者脊髓及

神经根功能造成影响, 手术过程中的减压操作会导致脊髓受到刺激, 而手术后的缺血再灌注损伤及反应性水肿也会进一步加重脊髓受损, 从而给患者术后神经功能恢复带来不利影响^[5]。张咏等^[15]对 CSM 患者术前行为期 1 周的高压氧干预, 通过体感诱发电位及 JOA 评分评估术后脊髓功能恢复情况, 结果显示术前高压氧干预能促进术后患者神经功能恢复。吴秀芸^[16]对 1 例颈椎前路减压植骨内固定术后其神经系统症状仍无明显改善患者给予高压氧治疗, 发现经 2 个疗程 (20 d) 治疗后患者双上肢麻木及疼痛症状减轻; 经 3 个疗程治疗后患者下肢肌力明显改善。山瑞荣等^[17]对 31 例行颈椎后路全椎板减压植骨融合内固定 CSM 患者术后给予 14 d 高压氧治疗, 发现有效率高达 93.5%。为进一步促进 CSM 患者脊髓神经功能恢复, 本研究高压氧组于术前给予 1 周高压氧干预, 并于术后继续给予 20 d 高压氧治疗。术后 6 个月随访时发现高压氧组及对照组脊髓功能均较术前明显改善, 并且高压氧组 JOA 评分明显优于对照组, 提示围手术期高压氧治疗能进一步改善 CSM 患者术后脊髓神经功能, 其治疗机制可能包括: ①高压氧能迅速提高受损脊髓氧分压, 增加血氧浓度, 进而纠正受损脊髓缺血、缺氧状态; ②高压氧能增加毛细血管血氧弥散范围, 使脊髓受损部位获得充足氧供, 从而减少神经细胞、神经纤维坏死、凋亡, 加速神经细胞及神经纤维修复; ③高压氧具有改善局部微循环、加速酸性代谢产物清除、减轻钙超载等多种效应, 能保护神经细胞并加速神经纤维修复、毛细血管再生; ④高压氧能促使脊髓血管收缩、渗出减少, 从而减轻脊髓肿胀等^[15-18]。

DTI 是主要用于研究神经系统纤维束弥散各向异性, 并通过三维成像显示纤维束走行的成像技术, 能显示损伤后神经纤维束受压、变形、移位及断裂等情况^[19]。FA 值是弥散张量各向异性成分与整个弥散张量的比值, 脊髓 FA 值与脊髓纤维束致密性、完整性及方向性密切相关, 水分子沿纤维束走行方向的弥散程度越高, 则 FA 值越大; 当脊髓受压发生纤维束中断、完整性破坏时, 病变区域水分子弥散各向异性程度减弱, 出现 FA 值降低^[19-21]。ADC 值反映弥散梯度磁场施加方向上水分子弥散特点, ADC 值增加提示脊髓组织内所含自由水分子增多^[20-22]。本研究对 CSM 患者脊髓 DTI 参数与 JOA 评分进行相关性分析, 发现术前、术后脊髓 FA、ADC 值均与 JOA 评分具有显著相关性, 其中 FA 值与 JOA 评分呈显著正相关, ADC 值与 JOA 评分呈显著负相关; 即随着脊髓损伤程度加重, 患者脊髓 FA 值逐渐降低, ADC 值则逐渐升高。

JOA 作为一个功能性评分量表, 其结果数据并不能真实反映脊髓病理状态; 而 DTI 量化指标能显示脊

髓微观结构改变,反映脊髓真实病理状态,因此本研究同时引入 DTI 指标对患者脊髓情况进行评估。术后 6 个月随访时,发现高压氧组脊髓 FA 值较对照组显著升高,ADC 值较对照组明显降低,表明高压氧组术后脊髓神经细胞缺血、缺氧状态较对照组明显改善,受损细胞膜得到及时修复,细胞通透性降低,细胞内、外间隙水分子流动性显著减弱,故 FA 值较对照组显著升高,ADC 值较对照组明显降低;另外高压氧组神经纤维也获得更好修复与再生,水分子垂直于脊髓纤维束方向的弥散程度显著降低,即各向同性显著降低,而沿脊髓纤维束方向的各向异性弥散程度明显增强,也会表现 FA 值显著升高,ADC 值明显降低,提示高压氧组受损脊髓微观结构获得更好重塑,脊髓病理状态得到明显纠正。

综上所述,本研究结果表明,DTI 量化指标能客观显示脊髓微观结构改变,真实反映脊髓病理状态;围手术期高压氧干预能进一步改善 CSM 患者术后脊髓神经功能,其作用机制可能与改善受损脊髓缺血、缺氧状态、促进脊髓神经细胞及神经纤维修复有关。需要指出的是,由于本研究样本量较小,上述结果数据还需大样本研究进一步验证。

参 考 文 献

- [1] Nicholson KJ, Millhouse PW, Pflug E, et al. Cervical sagittal range of motion as a predictor of symptom severity in cervical spondylotic myelopathy[J]. *Spine*, 2018, 43 (13): 883-889. DOI: 10.1097/BRS.0000000000002478.
- [2] Zhang JT, Li JQ, Niu RJ, et al. Predictors of cervical lordosis loss after laminoplasty in patients with cervical spondylotic myelopathy[J]. *Eur Spine J*, 2017, 26 (4): 1205-1210. DOI: 10.1007/s00586-017-4971-4.
- [3] Tofuku K, Koga H, Yone K, et al. Conservative treatment with hyperbaric oxygen therapy for cervical spondylotic amyotrophy[J]. *Spinal Cord*, 2011, 49 (6): 749-753. DOI: 10.1038/sc.2010.185.
- [4] Yang R, Guo L, Huang L, et al. Epidemiological characteristics of traumatic spinal cord injury in Guangdong, China[J]. *Spine*, 2017, 42 (9): E555-561. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001896.
- [5] 范少地, 罗卓荆, 杨卫红, 等. 高压氧对颈椎管狭窄术后脊髓再灌注损伤及神经根性水肿的预防与治疗作用[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2005, 27 (5): 280-282. DOI: 10.3760/j.issn.0254-1424.2005.05.009.
- [6] 李翔, 陆昶骥, 胡勇, 等. 磁共振弥散张量成像对脊髓型颈椎病患者术后神经功能恢复的预测作用[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2019, 29 (5): 385-393. DOI: 10.3969/j.issn.1004-406X.2019.05.01.
- [7] Maki S, Koda M, Kitamura M, et al. Diffusion tensor imaging can predict surgical outcomes of patients with cervical compression myelopathy[J]. *Eur Spine J*, 2017, 26 (9): 2459-2466. DOI: 10.1007/s00586-017-5191-7.
- [8] Liu Y, Kong C, Cui L, et al. Correlation between diffusion tensor imaging parameters and clinical assessments in patients with cervical spondylotic myelopathy with and without high signal intensity[J]. *Spinal Cord*, 2017, 55 (12): 1079-1083. DOI: 10.1038/sc.2017.75.

- [9] 申沧海, 徐宝山, 杨强, 等. MRI T2 加权像与扩散张量成像量化指标对脊髓型颈椎术后脊髓功能恢复的预测价值[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2017, 39 (7): 492-497. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2017.07.003.
- [10] 王琨, 陈士跃, 陈智, 等. 弥散张量成像参数比值对脊髓型颈椎病临床症状及预后的评估价值[J]. *第二军医大学学报*, 2015, 36 (3): 268-275. DOI: 10.3724/SP.J.1008.2015.00268.
- [11] Takeshima Y, Matsuoka R, Nakagawa I, et al. Surgical outcome of laminoplasty for cervical spondylotic myelopathy in an elderly population-potentiality for effective early surgical intervention; a Meta-analysis[J]. *Neurol Med Chir*, 2017, 57 (7): 366-373. DOI: 10.2176/nmc.ra.2016-0302.
- [12] Passias PG, Marascalchi BJ, Boniello AJ, et al. Cervical spondylotic myelopathy: National trends in the treatment and peri-operative outcomes over 10 years[J]. *J Clin Neurosci*, 2017, 42: 75-80. DOI: 10.1016/j.jocn.2017.04.017.
- [13] Muir ER, Cardenas DP, Duong TQ. MRI of brain tissue oxygen tension under hyperbaric conditions[J]. *Neuroimage*, 2016, 133: 498-503. DOI: 10.1016/j.neuroimage.
- [14] Meng XE, Zhang Y, Li N, et al. Hyperbaric oxygen alleviates secondary brain injury after trauma through inhibition of TLR4/NF- κ B signaling pathway[J]. *Med Sci Monit*, 2016, 22: 284-288. DOI: 10.12659/MSM.894148.
- [15] 张咏, 韩杨, 唐宇军, 等. 颈椎疾病患者术前高压氧预处理对神经功能恢复的影响[J]. *中国医药导报*, 2013, 10 (8): 28-29, 35. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7210.2013.08.012.
- [16] 吴秀芸. 高压氧综合治疗颈椎前路减压植骨内固定术后一例[J]. *中华航海医学与高气压医学杂志*, 2009, 16 (6): 339. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1009-6906.2009.06.007.
- [17] 山瑞荣, 王钧. 高压氧治疗对颈椎管狭窄术后功能恢复的价值[J]. *陕西医学杂志*, 2007, 36 (10): 1415. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7377.2007.10.067.
- [18] Asamoto S, Sugiyama H, Doi H, et al. Hyperbaric oxygen (HBO) therapy for acute traumatic cervical spinal cord injury[J]. *Spinal Cord*, 2000, 38 (9): 538-540. DOI: 10.1038/sj.sc.3101023.
- [19] Vedantam A, Rao A, Kurpad SN, et al. Diffusion tensor imaging correlates with short-term myelopathy outcome in patients with cervical spondylotic myelopathy[J]. *World Neurosurg*, 2017, 97: 489-494. DOI: 10.1016/j.wneu.2016.03.075.
- [20] Wen CY, Cui JL, Liu HS, et al. Is diffusion anisotropy a biomarker for disease severity and surgical prognosis of cervical spondylotic myelopathy? [J]. *Radiology*, 2014, 270 (1): 197-204. DOI: 10.1148/radiol.13121885.
- [21] Rao A, Soliman H, Kaushal M, et al. Diffusion tensor imaging in a large longitudinal series of patients with cervical spondylotic myelopathy correlated with long-term functional outcome[J]. *Neurosurgery*, 2018, 83 (4): 753-760. DOI: 10.1093/neuros/nyx558.
- [22] Yang YM, Yoo WK, Bashir S, et al. Spinal cord changes after laminoplasty in cervical compressive myelopathy: a diffusion tensor imaging study[J]. *Front Neurol*, 2018, 9: 696. DOI: 10.3389/fneur.2018.00696.eCollection.2018.

(修回日期: 2019-10-20)

(本文编辑: 易 浩)