.综述.

脊髓型颈椎病的多模态脑影像学研究进展

郑碧娥¹ 郑力峰² 林建平³ 王诗忠³ ¹福建医科大学附属第一医院康复科,福州 350004;²福建医科大学附属第一医院骨科,福州 350004;³福建医科大学健康学院,福州 350122 通信作者:王诗忠,Email:shzhwang@fjmu.edu.cn

【摘要】 脊髓型颈椎病(CSM)是颈椎退行性变导致颈脊髓受压或/和脊髓供血障碍,继而引起不同程度的功能障碍,是颈椎病中最为严重的一种类型。国内外基于磁共振成像技术的多模态影像学研究发现慢性脊髓压迫不仅造成 CSM 患者脊髓层面损害,相关脑区结构、功能和代谢也存在一系列的异常,且与患者功能障碍和恢复有着密切关系。本文就多模态脑影像学技术在 CSM 患者脑结构、功能重塑和代谢变化的应用研究作一综述,以期为今后 CSM 神经机制的研究提供参考和借鉴。

【关键词】 脊髓型颈椎病; 磁共振成像; 大脑可塑性; 神经功能

基金项目:国家自然科学基金项目(81874501);福建省财政厅专项(2018B039);高校产学研合作项目(2018Y4005)

Funding: General Project of the National Nature Science Foundation of China (81874501); Special Project of Fujian Provincial Finance Department (2018B039); Production-University-Research Cooperation Project in Universities (2018Y4005)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2022.11.018

脊髓型颈椎病(cervical spondylotic myelopathy,CSM)是颈 椎病中最为严重的一种类型,由于颈椎退行性变导致脊髓受压 或/和脊髓供血障碍,出现感觉、运动及大小便等功能障碍,严 重影响患者的身心健康甚至危及生命^[1]。在临床实践上,CSM 患者的症状表现与脊髓损害部位并不一一对应,即使经手术充 分减压后,仍有部分患者功能恢复不甚理想^[2,3]。随着医学影 像技术尤其是磁共振成像(magnetic resonance imaging,MRI)在 临床的推广应用,创伤性脊髓损伤后已被证实会引起患者脊髓 远端的脑结构和功能可塑性变化,且影响神经功能的恢复^[4]。 CSM 是成人最常见的非创伤性脊髓损伤的原因,国内外基于多 模态成像的脑结构、脑功能和脑代谢影像学研究发现 CSM 患者 大脑结构、功能及代谢的变化,并且这些改变与患者功能障碍有 关以及在预后和疗效评估方面提供重要的信息^[5]。因此,本文 将分别从 CSM 的脑结构、功能和代谢改变的影像学研究进展进 行综述,旨在为进一步深入研究 CSM 神经机制提供参考资料。

CSM 的脑结构影像学研究

结构 MRI 能够在活体中无创性地显示解剖结构上的变化, 为探索疾病相关结构改变呈现重要的影像学依据。磁共振扩 散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)和基于体素的形态学 测量(voxel-based morphometry, VBM)是探究脑结构异常变化的 两种重要手段。

→ `DTI

DTI 是在常规 MRI 技术及磁共振扩散加权成像的基础上 发展起来,利用水分子各向异性扩散的成像方法可在活体观察 组织微结构和追踪神经纤维束的走行和完整性^[6]。各向异性 分数(fractional anisotropy,FA)可以反映纤维结构的完整性,表 观扩散系数(apparent diffusion coefficient,ADC)反映纤维细胞膜 或髓鞘破坏的程度,是 DTI 的两个常用参数。

与常规 MRI 相比,DTI 在 CSM 早期诊断及功能恢复预测方 面提供重要信息^[7]。Kara 等^[8]研究报道 DTI 在 T2 加权像未检 测出高信号之前就能敏感地检测轻度受压脊髓的改变,表现为 FA 值降低和 ADC 值增加。DTI 参数还对 CSM 患者神经功能预 后具有预测价值,一般认为术前颈椎的 FA 值较高和 ADC 值较 低提示脊髓损害程度较轻,术后神经功能恢复较好^[7,9]。此外, 应用 DTI 技术显示 CSM 患者脑白质纤维的微结构发生改变。 皮质脊髓束是连接大脑皮质和脊髓的下行运动传导纤维,研究 发现 CSM 患者受损节段以上双侧皮质脊髓束的 FA 值下降和 ADC 值升高,且 FA 值与患者肢体运动障碍程度显著相关^[10]。 脊髓丘脑束和丘脑皮质束是重要的躯体感觉传导纤维,有研究 报道 CSM 患者术前脊髓丘脑束和丘脑皮质束均发生继发性变 性,术后随访发现脊髓丘脑束 FA 值有升高,但丘脑皮质束 FA 值持续降低,提示术后神经损伤继续存在,可为后续选择适当 的康复干预措施提供客观依据^[11]。

二、VBM

VBM 是基于高分辨力 3D-T1WI 结构成像通过定量分析脑局部的灰质、白质的密度或体积的改变,反映相应解剖结构的差异。多项对照研究显示 CSM 患者脑灰质体积较匹配的健康对照者明显减少,主要区域为初级运动皮质、初级感觉皮质、辅助运动区、小脑和丘脑,与出现手灵巧性降低、书写困难、肢体麻木等临床症状有关^[12-15]。谭永明等^[16]纵向研究 CSM 患者解压术前、术后感觉运动皮质区灰质体积的改变,结果显示术前脊髓受压可导致感觉运动区灰质体积免常,解压术后趋于正常,表明 CSM 患者术前术后感觉运动皮质存在结构性损伤与重塑。学者们推测 CSM 脑结构异常改变的可能原因:慢性脊髓压迫导致长时间感觉输入和运动输出异常以及神经传导束发生

· 1040 ·

逆行性损害,破坏了感觉运动相关神经反射-反馈等控制系统的 完整性和影响神经营养的供应,导致感觉、运动皮质的适应性 变化,表现为有利和(或)不良性的改变;解压术后非永久性损 伤的脊髓存在纤维侧芽生长、感觉运动皮质新突触建立或原有 抑制性突触的解除,感觉和运动信息重新得到有效地传递,使 得维持感觉、运动皮质的结构趋于正常^[10-16]。

上述应用脑结构影像技术研究可从形态学的角度反映慢 性脊髓压迫不仅造成 CSM 患者脊髓损害,还致使白质纤维束和 脑灰质结构发生损伤和重塑,这些发现有助于我们了解 CSM 神 经机制和疾病进展及治疗转归情况。

CSM 的脑功能影像学研究

血氧水平依赖功能 MRI(blood oxygen level-dependent functional MRI, BOLD-fMRI, 简称 fMRI)是以内源性血红蛋白作为对 比剂,利用磁场激发脑神经元活动时血氧饱和度的改变进行图 像采集。大脑的结构和功能紧密相关, 慢性脊髓压迫不仅导致 CSM 患者的脑结构改变, 研究表明还存在脑功能的可塑性变 化。CSM 的脑 fMRI 研究分为任务态 fMRI 和静息态 fMRI。

一、任务态 fMRI

任务态是指在采集 fMRI 数据时,受试者需要完成指定的 任务如运动任务、思维活动及认知活动等,然后对受试者完成 任务时脑区功能活动进行分析。

CSM 脑功能的研究最初是基于任务态 fMRI 发现患者大脑 功能区发生适应性改变,主要是感觉运动区。Dong 等^[17]的研 究显示,在执行相同的伸腕和对指任务时,CSM 患者的感觉运 动皮质激活较健康对照者增强。宋彦澄等^[18]研究发现,CSM 患者在执行手指敲击任务时其对侧中央前回激活量较健康对 照者增强,而中央后回激活较健康对照者减弱,Ryan 等^[19]也报 道了类似的发现。研究者们认为中央前回激活增强可补充运 动网络中部分功能的失活,也可能与 CSM 破坏脊髓内抑制-兴 奋性的平衡使得抑制作用减少有关;中央后回激活减弱可能由 于慢性脊髓压迫影响了本体感觉的反馈机制导致执行任务时 缺乏有效的感觉刺激。宋彦澄等^[20]的后续研究进一步综合了 中央前回与中央后回的双重影响,指出术前中央前回与中央后 回激活的体积比值明显提高了术后患者预后的预测效能,即激 活体积比值≤3.656提示减压术后其功能有较好的恢复,而激 活体积比值>3.656 提示术后可能出现功能恢复不良,应考虑早 期干预,阻止功能的恶化。

手术解除脊髓压迫后,随着患者功能逐渐恢复,执行任务 所需的资源减少,任务态 fMRI 研究显示脑功能活动渐趋于正 常化^[17-18]。但也有研究发现,CSM 患者术后运动、感觉相关皮 质的激活仍持续增强,以补充部分功能的缺失^[19,21-22]。

二、静息态 fMRI

静息态 fMRI 是指受试者在清醒、安静、不进行任何任务的 状态下进行 fMRI 扫描,可避免或减少因实验设计的差异导致 脑功能活动的差异,具有较实用和重复性强的优点。大脑是一 个复杂的信息处理网络系统,不同的功能区域相互协作,共同 构成一个网络来发挥其功能。静息态下大脑皮质存在特定的 功能网络,目前发现约有 10 个,包括感觉运动网络、默认网络 和视觉网络等^[23]。局部一致性(regional homogeneity, ReHo)、 低频振幅(amplitude of low-frequency fluctuations, ALFF)、功能连 接、图论方法是常用的静息态 fMRI 数据处理分析方法。

通过 ReHo 和 ALFF 分析可评估局部神经元自发性活动, Re-Ho 值反映某脑区自发神经元活动的一致性, ALFF 值则反映自发 神经元活动的强弱。Tan 等^[24]在研究中发现 CSM 患者术前左侧 中央前、后回的 ReHo 值降低和右侧顶上小叶的 ReHo 值增高,减 压术后3个月再行静息态 fMRI 检查分析显示左侧中央前、后回 和右侧顶上叶的 ReHo 值趋于正常,表明 CSM 患者感觉运动网络 内神经元活动存在适应性的变化:但分析 CSM 患者相关脑区 Re-Ho 值与临床症状严重程度包括改良日本骨科协会评分(modified Japanese Orthopaedic Association, mJOA)和颈椎功能障碍指数的 相关性均无统计学意义。吴开富等^[25]基于 ALFF 分析显示 CSM 患者相对于健康对照者存在多个脑区的 ALFF 值异常,研究指出 右侧颞中回、左侧中央旁小叶的 ALFF 值增高可能与增强神经元 自发性活动募集更多神经资源对患者已损害脑区功能进行代偿 有关, 左内侧额上回 ALFF 值降低可能与患者对负性情绪的管理 能力下降有关, 左侧眶额回、尾状核 ALFF 下降与患者的认知功 能损害有关。这些特定脑区神经元活动异常一定程度上阐释了 CSM 患者伴有情绪障碍和认知损害的神经机制。值得注意是, 有研究报道 CSM 患者记忆损害、情绪低落和焦虑等对功能恢复 和疼痛缓解也会产生不良的影响[26,27]。

脑功能连接分析可以反映脑部不同区域神经活动之间的 相关性。周纯等^[28]按 mJOA 评分将纳入的 CSM 患者分为轻中 度组(12~17分)和重度组(<12分),结果显示与健康对照组及 轻中度组相比,重度组患者右侧丘脑与双侧中央旁小叶、中央 前回之间功能连接均减弱,而与后扣带回、内侧前额叶、角回之 间功能连接增强,说明大脑皮质视听觉感知介导运动功能的代 偿活动具有一定限度,随着神经功能损害加重,需要募集更多 脑区进行代偿。一些研究表明 CSM 患者的默认网络和视觉网 络功能连接也存在异常改变^[29.31],说明脊髓与脑功能网络作为 一个互相关联的整体,CSM 涉及了多个脑功能网络参与适应、 代偿脊髓损害和减压后功能恢复。

图论分析方法通过构建一个由许多节点(脑区)和边(脑区 之间的结构和功能连接)构成的复杂脑网络模型,是当前脑科 学研究的热点。基于图论的功能连接强度分析可以评价大脑 的内在功能性,Zhou 等^[32,33]研究报道 CSM 患者的感觉运动网 络发生内在功能重塑,表现为脑盖整合区明显的功能连接强度 降低,运动前区、初级躯体感觉区和顶骨整合区的功能连接强 度增加;后续研究结合三维伪连续动脉自旋标记技术发现 CSM 患者感觉运动网络还存在局部脑血流量改变,并指出可依据左 侧中央旁小叶、右侧中央旁小叶/辅助运动区和右侧中央后回 的脑血流值异常增加区分 CSM 患者与健康受试者。小世界属 性被认为是高效的网络拓扑结构,兼具较高的聚类系数和较短 的路径长度,以较低的成本实现信息传输的网络模式^[34]。Zhao 等^[31]分析 CSM 患者脑功能网络的拓扑属性的变化,结果显示 特征路径长度减少,整体效率提高以加快信息在网络中的传递 速度和效率,提示小世界属性发生改变。Kuang 等^[35]基于脑灰 质体积构建的脑结构协方差网络,分析也显示 CSM 患者异常的 小世界属性,表明皮质损伤和重塑并存。

任务态和静息态 fMRI 为我们探究 CSM 脑功能活动提供强 有力的手段,清晰地反映了 CSM 患者相关脑功能变化的特征, 表现为相关脑区异常激活、局部神经元活动适应性变化和脑功 能网络异常,这些改变与患者功能障碍和恢复有关。

CSM 的脑代谢影像学研究

磁共振波谱(magnetic resonance spectroscopy, MRS)是利用 MRI 现象及化学位移作用,探测活体内的 N-乙酰天门冬氨酸 (N-acetyl aspartate, NAA)、肌酸(creatine, Cr)、肌醇、胆碱复合物 等物质的代谢水平和代谢速率。NAA 主要由神经元的线粒体 产生,是神经元密度和生存能力的标志物; Cr 在各种病理状态 下较为稳定,一般被用作内标准来比较其它代谢产物的变化; 肌醇主要存在于神经胶质细胞中,其峰值增高提示胶质细胞增 生;胆碱复合物是神经元细胞膜的重要成分,峰值增加反映神 经髓鞘破坏。

前期研究显示,CSM 患者颈脊髓受压部位的 NAA/Cr 比值 明显低于健康对照者^[36]。近年来,利用脑 MRS 检查发现 CSM 患者运动皮质区 NAA/Cr 比值显著降低,表明脊髓压迫还会引 起大脑运动皮质区神经元继发损伤^[37]。Aleksanderek 等^[38,39] 一项前瞻性研究招募 28 例 CSM 患者和 10 例健康对照者分别 进行脑 MRS、任务态 fMRI 和 DTI 检查共 2次(间隔 6 个月),术 后6个月随访显示 CSM 患者功能障碍明显改善, DTI 检查提示 微结构损害得到好转,以及执行右手手指敲击时感觉运动皮层激 活增加,但患者运动皮质区 NAA/Cr 比值仍低于健康对照者,提 示术后神经元线粒体代谢障碍可能持续存在。因此,作者认为大 脑结构和功能重塑参与 CSM 术后神经功能恢复,而不是神经元 代谢异常的逆转。由于 NAA/Cr 比值受 NAA 和 Cr 含量的双重 影响, Goncalves 等^[40] 仅分析 CSM 患者感觉运动皮质 NAA 含量 变化与神经功能恢复的关系, MRS 观察到患者运动皮质 NAA 值 在术后6周、6个月时均较术前下降.感觉皮质 NAA 值仅在术后 6个月有较术前降低,与之一致的是 mJOA 评分显示患者运动和 感觉功能分别在术后6周、6个月开始改善,表明患者功能恢复 的时间进程可能受到相应皮质区域代谢物变化的影响。

一些研究还报道 CSM 患者脑区其他代谢物含量的异常。 Gohmann 等^[41]研究发现 CSM 病程较长患者(>6个月)运动皮 质区的肌醇值、肌醇/Cr 比值相对于病程较短组(≤6个月)显 著降低,且肌醇值对 CSM 症状持续时间的预测比 mJOA 评分更 加准确。作者推测 CSM 病程短组肌醇增加可能与早期反应性 胶质增生伴亚急性神经炎症有关,随着病程的进展,胶质增生 减少肌醇值随之降低。Craciunas 等^[42]研究显示 CSM 患者运动 皮质区的胆碱复合物值较健康对照者明显增加,认为可能是脊 髓组织炎症随着神经纤维束逆行性扩散到运动皮质区引起神 经髓鞘破坏;但研究并未发现 NAA 值、肌醇值等其它代谢物含 量的异常,这可能与纳入 CSM 患者病程长短不同有关。

由此,基于 MRS 的研究表明 CSM 患者运动、感觉相关皮质 存在代谢异常,与脑结构和功能影像学研究相对应,可为 CSM 大脑重塑机制研究提供神经组织的生化代谢变化依据。

总结与展望

综上所述,基于多模态脑影像学研究表明 CSM 慢性脊髓压迫 时继发脊髓远端的脑结构重塑、脑功能重塑和脑代谢变化,并与患 者功能障碍和恢复有着密切关系,这些发现有助于我们了解 CSM 功能障碍的神经机制以及探索新的诊疗策略提供重要的信息。 CSM 的多模态脑影像研究还存在局限与不足:①现有的研究大多应用单一的脑影像学和横断面研究,缺乏多模态脑影像 学特征以及因果关系还不能明确;②由于 mJOA 等评估患者的 临床症状量表具有一定的主观性,用于分析患者功能障碍和脑 异常改变的关系缺乏客观指标;③部分研究结果不一致可能是 受样本量、纳入受试者的异质性、实验范式不同、MRI 的采集及 分析方法的差异等因素的影响。

CSM 因其发病隐匿,致残率高,受到国内外学者的重视,早 期诊断和早期临床干预是提高患者预后的关键。未来研究可 着重于以下方面:①通过融合多模态脑影像学特征、结合临床 症状量表和客观检测功能障碍指标以及开展纵向研究明确因 果关系,促使我们更深入地了解 CSM 复杂的神经机制和寻找潜 在预测病情演变及治疗后转归的影像学标志物,为更好地制定 临床诊疗决策提供参考;②基于脑影像学研究 CSM 手术治疗前 后大脑的改变已受到广泛关注,其它治疗手段(如康复训练、无 创神经调控技术等)改善 CSM 患者功能障碍潜在的中枢效应 机制有待探讨;③此外,今后的研究应进一步完善实验设计及 方法,扩大样本量,以期获得更可靠的研究结果。

参考文献

- Baron EM, Young WF. Cervical spondylotic myelopathy: a brief review of its pathophysiology, clinical course, and diagnosis [J]. Neurosurgery, 2007, 60 (Suppl 1): S35-S41. DOI: 10. 1227/01. NEU. 0000215383.64386.82.
- [2] Karadimas SK, Gatzounis G, Fehlings MG. Pathobiology of cervical spondylotic myelopathy[J]. Eur Spine J, 2015, 24 (Suppl 2): 132-138. DOI: 10.1007/s00586-014-3264-4.
- [3] Tetreault LA, Dettori JR, Wilson JR, et al. Systematic review of magnetic resonance imaging characteristics that affect treatment decision making and predict clinical outcome in patients with cervical spondylotic myelopathy[J]. Spine, 2013, 38: S89-S110. DOI: 10.1097/BRS. 0b013e3182a7eae0.
- [4] Freund P, Weiskopf N, Ward NS, et al. Disability, atrophy and cortical reorganization following spinal cord injury [J]. Brain, 2011, 134(6): 1610-1622. DOI:10.1093/brain/awr093.
- [5] 舒雨晴,何来昌.MRI 在脊髓型颈椎病中的研究进展[J]. 国际医学放射学杂志, 2021, 44 (2): 202-206. DOI: 10. 19300/j. 2021. Z18336.
- [6] Basser PJ, Pajevic S, Pierpaoli C, et al. In vivo fiber tractography using DT-MRI data[J]. Magn Reson Med, 2015, 44(4):625-632. DOI:10. 1002/1522-2594(200010)44:4<625::AID-MRM17>3.0.CO;2-0.
- [7] Shabani S, Kaushal M, Budde MD, et al. Diffusion tensor imaging in cervical spondylotic myelopathy: a review [J]. J Neurosurg Spine, 2020, (1):1-8. DOI:10.3171/2019.12.SPINE191158.
- [8] Kara B, Celik A, Karadereler S, et al. The role of DTI in early detection of cervical spondylotic myelopathy: a preliminary study with 3-T MRI
 [J]. Neuroradiology, 2011, 53 (8): 609-616. DOI: 10.1007/s00234-011-0844-4.
- [9] Jones JGA, Cen SY, Lebel RM, et al. Diffusion tensor imaging correlates with the clinical assessment of disease severity in cervical spondylotic myelopathy and predicts outcome following surgery[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2013, 34(2):471-478. DOI: 10.3174/ajnr.A3199.
- [10] 占雅如,何来昌,谭永明,等.基于 DTI 的脊髓型颈椎病患者皮质脊髓束逆行性损害的研究[J].中国临床医学影像杂志,2020,31
 (4):238-242. DOI:10.12117/jccmi.2020.04.003.
- [11] 吴开富,何来昌,谭永明.脊髓型颈椎病患者减压术后躯体感觉传

· 1042 ·

导纤维损伤的纵向研究[J].磁共振成像,2019,10(11):830-834. DOI:10.12015/issn.1674-8034.2019.11.007.

- [12] Wang L, Yu B, Li Q, et al. Sensorimotor cortex atrophy in patients with cervical spondylotic myelopathy[J]. Neuroreport, 2018, 29(10):826-832. DOI:10.1097/WNR.00000000001039.
- [13] Woodworth DC, Holly LT, Mayer EA, et al. Alterations in cortical thickness and subcortical volume are associated with neurological symptoms and neck pain in patients with cervical spondylosis [J]. Neurosurgery, 2019, 84(3):588-598. DOI:10.1093/neuros/nyv066.
- [14] Bernabéu-Sanz Á, Mollá-Torró JV, López-Celada S, et al. MRI evidence of brain atrophy, white matter damage, and functional adaptive changes in patients with cervical spondylosis and prolonged spinal cord compression[J]. Eur Radiol, 2020, 30 (1): 357-369. DOI: 10.1007/ s00330-019-06352-z.
- [15] Liu M, Tan Y, Zhang C, et al. Cortical anatomy plasticity in cases of cervical spondylotic myelopathy associated with decompression surgery: a strobe-compliant study of structural magnetic resonance imaging[J]. Medicine, 2021, 100(1):e24190. DOI:10.1097/MD.00000000024190.
- [16] 谭永明,周福庆,刘志礼,等.脊髓型颈椎病患者解压术后大脑皮层 结构重塑的 MRI 研究[J].临床放射学杂志,2016,35(9):1315-1319. DOI:10.13437/j.cnki.jcr.2016.09.005.
- [17] Dong Y, Holly LT, Albistegui-Dubois R, et al. Compensatory cerebral adaptations before and evolving changes after surgical decompression in cervical spondylotic myelopathy[J]. J Neurosurg Spine, 2008, 9(6): 538-551.
- [18] 宋彦澄,康立清,申沧海,等.任务态 fMRI 对脊髓型颈椎病严重程 度及手术预后的评价[J].中国组织工程研究,2020,24(21):3341-3346. DOI:10.3969/j.issn.2095-4344.2703.
- [19] 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: 379-388. DOI:10.3171/2017.7. spine1768
- [20] 宋彦澄,康立清,申沧海,等.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[J].中华物理医学与康复杂志,2019,41(9):651-656. DOI:10.3760/cma.j. issn.0254-1424.2019.09.003.
- [21] Bhagavatula ID, Shukla D, Sadashiva N, et al. Functional cortical reorganization in cases of cervical spondylotic myelopathy and changes associated with surgery [J]. Neurosurg Focus, 2016, 40(6): E2. DOI: 10.3171/2016.3.focus1635.
- [22] Fouad K, Tetzlaff W, Rehabilitative training and plasticity following spinal cord injury [J]. Exp Neurol, 2012, 235 (1): 91-99. DOI: 10. 1016/j.expneurol.2011.02.009.
- Biswal B, Yetkin FZ, Haughton VM, et al. Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain using echo-planar MRI[J].
 Magn Reson Med, 1995, 34 (4): 537-541. DOI: 10.1002/mrm. 1910340409.
- [24] Tan Y, Zhou F, Wu L, et al. Alteration of regional homogeneity within the sensorimotor network after spinal cord decompression in cervical spondylotic myelopathy: a resting-state fMRI study[J]. Biomed Res Int, 2015, 2015;647958. DOI:10.1155/2015/647958.
- [25] 吴开富,刘萌,何来昌,等.脊髓型颈椎病患者大脑功能改变的初步 磁共振研究[J].临床放射学杂志,2021,40(5):850-854. DOI:10. 13437/j.cnki.jcr.2021.05.004.
- [26] Hoshimaru M, Neuropsychological improvement in patients with cervical spondylotic myelopathy after posterior decompression surgery [J]. Neurol Med Chir, 2010, 50(7):554-559. DOI:10.2176/nmc.50.554.
- $\label{eq:27} \end{tabular} Zong Y, Xue Y, Zhao Y, et al. Depression contributed an unsatisfactory surgery outcome among the posterior decompression of the cervical spondylotic myelopathy patients: a prospective clinical study[J]. Neu-$

rol Sci,2014,35(9):1373-1379. DOI:10.1007/s10072-014-1714-8.

- [28] 周纯,刘萌,刘天水,等.多模态磁共振成像评估脊髓型颈椎病的初步研究[J].磁共振成像,2020,11(9):747-751. DOI:10.12015/ issn.1674-8034.2020.09.006.
- [29] 彭新级,欧阳涛,谭永明.脊髓型颈椎病患者解压术前后丘脑-皮质 功能改变的静息态 fMRI 研究[J]. 临床放射学杂志,2019,38(7): 1164-1168. DOI:10.13437/j.enki.jer.2019.07.003.
- [30] Chen Z, Zhao R, Wang Q, et al. Functional connectivity changes of the visual vortex in the vervical vpondylotic vyelopathy patients: a restingstate fMRI study[J]. Spine, 2020, 45(5): E272-279. DOI: 10.1097/ BRS.000000000003245.
- [31] Zhao R, Su Q, Chen Z, et al. Neural Correlates of Cognitive dysfunctions in cervical spondylotic myelopathy patients: a resting-state fMRI study[J]. Front Neurol, 2020, 11:596795. DOI: 10.3389/fneur.2020. 596795.
- [32] Zhou FQ, Tan YM, Wu L, et al. Intrinsic functional plasticity of the sensory-motor network in patients with cervical spondylotic myelopathy
 [J]. Sci Rep, 2015, 5:9975. DOI: 10.1038/srep09975.
- [33] Zhou FQ, Huang M, Wu L, et al. Altered perfusion of the sensorimotor cortex in patients with cervical spondylotic myelopathy: an arterial spin labeling study [J]. J Pain Res, 2018, 11: 181-190. DOI: 10.2147/ JPR.S148076.
- [34] Bullmore E, Sporns O. Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems [J]. Nat Rev Neurosci, 2009, 10(3):186-198. DOI:10.1038/nrn2575.
- [35] Kuang C, Zha Y, Liu C, et al. Altered topological properties of brain structural covariance networks in patients with cervical spondylotic myelopathy[J]. Front Hum Neurosci, 2020, 14:364. DOI: 10.3389/ fnhum.2020.00364.
- [36] Holly LT, Freitas B, Mcarthur DL, et al. Proton magnetic resonance spectroscopy to evaluate spinal cord axonal injury in cervical spondylotic myelopathy[J]. J Neurosurg Spine, 2009, 10(3):194-200. DOI: 10.3171/2008.12.SPINE08367.
- [37] Kowalczyk I, Duggal N, Bartha R. Proton magnetic resonance spectroscopy of the motor cortex in cervical myelopathy[J]. Brain, 2012, 135 (Pt2):461-468. DOI:10.1093/brain/awr328.
- [38] Aleksanderek I, Stevens TK, Goncalves S, et al. Metabolite and functional profile of patients with cervical spondylotic myelopathy [J]. J Neurosurg Spine, 2017, 26 (5): 547-553. DOI: 10.3171/2016.9. SPINE151507.
- [39] Aleksanderek I, McGregor SM, Stevens TK, et al. Cervical spondylotic myelopathy: metabolite changes in the primary motor cortex after surgery[J]. Radiology, 2017, 282 (2): 817-825. DOI: 10.1148/radiol. 2016152083.
- [40] Goncalves S, Stevens TK, Doyle-Pettypiece P, et al. N-acetylaspartate in the motor and sensory cortices following functional recovery after surgery for cervical spondylotic myelopathy [J]. J Neurosurg Spine, 2016,25(4):436-443. DOI:10.3171/2016.2. spine15944.
- [41] Gohmann RF, Blume C, Zvyagintsev M et al. Cervical spondylotic myelopathy: changes of fractional anisotropy in the spinal cord and magnetic resonance spectroscopy of the primary motor cortex in relation to clinical symptoms and their duration [J]. Eur J Radiol, 2019, 116 (1):55-60. DOI:10.1097/BSD.00000000000248.
- [42] Craciunas SC, Gorgan MR, Ianosi B, et al. Remote motor system metabolic profile and surgery outcome in cervical spondylotic myelopathy
 [J]. J Neurosurg Spine, 2017, 26(6):668-678. DOI:10.3171/2016.
 10.spine16479.

(修回日期:2022-09-20) (本文编辑:汪 玲)