

磁共振成像在脊髓型颈椎病中的应用

曹婉君^{1,2}, 刘 丹^{1,2*}

¹重庆医科大学第五临床学院, 重庆

²重庆医科大学附属永川医院放射科, 重庆

收稿日期: 2026年8月15日; 录用日期: 2026年9月8日; 发布日期: 2026年9月15日

摘 要

脊髓型颈椎病(cervical spondylotic myelopathy, CSM)是成人常见的获得性脊髓功能障碍性疾病, 传统磁共振成像主要用于评估颈髓受压形态及髓内信号改变, 但其影像学表现与临床症状及预后之间并非完全一致。近年来, 脑多模态MRI的发展使CSM的影像学研究由单纯描述局部脊髓受压逐渐拓展至整个中枢神经系统。现有证据表明, 慢性颈髓压迫首先造成局部轴突、髓鞘及微循环损伤, 并可能沿上、下行通路引发华勒变性和跨突触远隔神经退变; 持续的感觉传入和运动传出障碍进一步导致感觉运动网络、丘脑-皮层环路、默认模式网络以及视觉-小脑网络发生结构与功能重组, 同时伴随神经代谢、胶质反应和神经血管耦合异常。减压术后部分异常可出现动态逆转或重新组织, 提示上述改变既包含不可逆神经损伤, 也可能反映适应性或非适应性神经可塑性。此外, 慢性疼痛、颈部功能障碍、情绪状态、认知表现、病程及性别等因素均可影响脑影像指标, 是解释CSM幕上改变时不可忽视的潜在混杂因素。本文以“局部脊髓损伤-远隔神经变性-网络重组-术后恢复”为主线, 整合定量脊髓MRI、结构MRI、弥散成像、功能MRI、磁共振波谱及灌注成像证据, 以期CSM影像生物标志物的建立及精准分层提供参考。

关键词

脊髓型颈椎病, 磁共振成像, 多模态成像, 脑功能重组

Application of Magnetic Resonance Imaging in Cervical Spondylotic Myelopathy

Wanjun Cao^{1,2}, Dan Liu^{1,2*}

¹The Fifth Clinical College of Chongqing Medical University, Chongqing

²Department of Radiology, The Affiliated Yongchuan Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: August 15, 2026; accepted: September 8, 2026; published: September 15, 2026

*通讯作者。

文章引用: 曹婉君, 刘丹. 磁共振成像在脊髓型颈椎病中的应用[J]. 临床医学进展, 2026, 16(9): 1616-1624.
DOI: 10.12677/acm.2026.1693202

Abstract

Cervical spondylotic myelopathy (CSM) is a common cause of acquired spinal cord dysfunction in adults. Conventional magnetic resonance imaging (MRI) is primarily used to assess the morphology of cervical spinal cord compression and intramedullary signal abnormalities; however, imaging findings do not always correspond well with clinical manifestations or prognosis. In recent years, advances in multimodal brain MRI have expanded CSM imaging research from the characterization of localized spinal cord compression to a broader investigation of the entire central nervous system. Current evidence suggests that chronic cervical cord compression initially causes local axonal, myelin, and microvascular injury and may subsequently induce Wallerian degeneration and trans-synaptic remote neurodegeneration along ascending and descending pathways. Persistent disruption of sensory afferent and motor efferent signaling may further lead to structural and functional reorganization of the sensorimotor network, thalamocortical circuits, default mode network, and visual-cerebellar network, accompanied by abnormalities in neural metabolism, glial responses, and neurovascular coupling. Some of these alterations may partially reverse or undergo further reorganization after decompression surgery, suggesting that they reflect a combination of irreversible neural injury and adaptive or maladaptive neuroplasticity. In addition, chronic pain, neck disability, affective status, cognitive performance, disease duration, and sex may all influence cerebral imaging measures and should therefore be considered important potential confounders when interpreting supraspinal alterations in CSM. This review adopts a framework of “local spinal cord injury-remote neurodegeneration-network reorganization-postoperative recovery” to integrate evidence from quantitative spinal cord MRI, structural MRI, diffusion imaging, functional MRI, magnetic resonance spectroscopy, and perfusion imaging, with the aim of facilitating the development of imaging biomarkers and precision stratification in CSM.

Keywords

Cervical Spondylotic Myelopathy, Magnetic Resonance Imaging, Multimodal Imaging, Brain Functional Reorganization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

脊髓型颈椎病(CSM)是由椎间盘退变、骨赘形成、韧带肥厚或骨化等退行性改变造成颈椎管狭窄和慢性颈髓压迫的一组临床综合征,是成人获得性脊髓功能障碍最常见的原因之一[1]。患者可表现为手部精细运动能力下降、肢体麻木无力、步态异常以及膀胱直肠功能障碍等,病程通常具有进行性特点。常规MRI能够清晰显示颈髓受压形态、椎管狭窄以及T2高信号等髓内异常,是CSM诊断和手术规划的核心影像手段[2]。然而,临床实践中常可见明显脊髓压迫而症状相对轻微,或结构改变相似而功能损害程度及术后恢复差异显著的患者[3]。这提示,单纯评价脊髓压迫难以完整反映组织损伤程度及中枢神经系统对慢性压迫的反应。

近年来,弥散成像、磁化传递、髓鞘水成像及磁共振波谱等定量MRI技术开始直接评估颈髓的轴突、髓鞘和代谢状态;另一方面,脑结构MRI、静息态及任务态fMRI、MRS和ASL研究不断发现CSM患者存在远离受压节段的脑结构和功能异常。近期多项研究显示,CSM相关脑改变并非随机分布,而主要

集中于感觉运动网络、视觉网络、默认模式网络、丘脑和小脑等关键系统[3]。

因此, 本研究从病理生理机制出发, 重新梳理 CSM 多模态 MRI 研究的内在逻辑: 局部机械压迫及缺血首先导致颈髓微结构损伤, 持续的传导通路损害进一步引发远隔神经变性和功能性去传入, 并在此基础上诱导多层次脑结构与功能网络重组; 上述改变还可能随疾病进展及减压治疗而发生动态演变。通过这一病理生理链条, 可更系统地理解不同 MRI 技术及成像指标所反映改变之间的内在联系。

2. 颈髓局部损伤

2.1. 从形态压迫到组织微结构损伤

CSM 首先是一种发生于颈髓局部的慢性机械性和缺血性损伤。传统 T1WI 和 T2WI 能够显示受压程度和髓内信号, 但 T2 高信号本质上可能包含水肿、脱髓鞘、胶质增生、缺血及软化等不同病理过程, 仅凭其存在与否难以准确量化可逆和不可逆损伤比例。

定量 MRI 试图进一步回答脊髓组织本身究竟损伤到什么程度。近期一项系统综述纳入 47 项先进脊髓 MRI 研究, 其中 DTI 应用最广, 其次为磁化传递成像(magnetization transfer, MT)、MRS 及髓鞘水成像(myelin water imaging, MWI); 目前 FA 是临床研究中最具潜力的定量指标之一[4]。另一项纳入 57 项研究的系统综述及 Meta 分析显示, 在最大压迫水平, CSM 患者 FA 总体降低, 而 ADC、MD 和 RD 升高, 其中 FA 与 JOA/mJOA 评分存在中等程度相关[5]。这说明常规 MRI 尚未出现明显异常时, 水分子弥散特征可能已经能够反映轴突排列和髓鞘完整性的改变。

除 DTI 外, MT 和 MWI 主要从大分子结合水或髓鞘水组分间接反映脱髓鞘程度; 脊髓 MRS 则可通过 NAA、Cho 等代谢物评价轴突/神经元完整性和膜代谢。T2 加权成像及高分辨率横断面形态学测量还可用于分析脊髓灰质及特定白质束萎缩[6]。这些方法使 CSM 影像研究从有没有脊髓压迫逐渐转向压迫造成了何种组织损伤。

2.2. 由局部损伤向远隔中枢改变延伸

颈髓并不是独立的解剖单元, 而是连接大脑与外周感觉运动系统的重要中继结构。持续性轴突损伤可沿皮质脊髓束、后索及其他长传导束向远端扩展, 因此颈髓局部病变可能进一步影响脑干、丘脑、基底节以及大脑皮层。

DTI 和纤维束追踪研究为这一过程提供了间接证据。Nakamura 等[7]发现术前较高的纤维束完整性与较好的术后功能恢复有关; Lee 等[8]及 Bhosale 等[9]同样显示白质束保存程度与神经功能结局相关。脑部弥散研究还发现皮质脊髓束及感觉运动相关白质通路存在微结构异常[10]。这些结果共同提示, CSM 的组织损伤可能形成一条从压迫节段向上延伸的病理连续体。

但需要指出, FA、MD 等参数并不对应单一组织病理过程, 其改变可受到轴突损伤、脱髓鞘、水肿以及纤维交叉等多因素影响。因此, 将 DTI 异常直接等同于华勒变性仍需谨慎, 更合理的解释是其反映了与长束损伤相一致的微结构改变。

3. 远隔神经变性与脑结构重塑

3.1. 长传导束损伤与华勒变性

慢性脊髓压迫导致上、下行神经信号长期中断后, 可产生顺行或逆行轴突退变, 并可能通过跨突触机制影响更高级中枢。与这一假设一致, 多中心形态学研究发现 CSM 患者不仅存在颈髓异常, 还伴有大脑灰、白质体积减少, 尤其涉及初级运动和感觉相关区域[11]。Freund 等[12]的定量 MRI 研究亦观察到丘脑等远隔结构改变。

脑白质改变同样支持通路性损伤。既往 DTI 研究发现脑桥、大脑脚、内囊及皮质下白质等皮质脊髓束通路可出现 FA 降低, 并与 JOA 评分相关。弥散谱成像进一步显示, 连接初级运动及初级感觉皮层的白质通路也存在异常[10]。这些结果将局部颈髓损伤与幕上结构异常连接为一条可能的“长束损伤链”。

3.2. 皮层及皮质下结构的继发性改变

远隔结构异常并不局限于直接连接脊髓的初级感觉运动皮层。Woodworth 等[13]发现 CSM 患者额上回、楔前叶和前扣带皮层变薄, 同时壳核体积减少, 其改变程度与神经功能和颈部功能障碍相关。Jütten 等[14]还观察到大脑及小脑体积减少与临床严重程度之间的关系。

Muhammad 等[15]进一步指出, 不同脑区的结构异常可能对应不同临床表型: 前额叶、前运动区及辅助运动区皮层变薄更常与精细运动受损相关, 而视觉皮层改变与步态障碍关系更为突出。这意味着脑萎缩并非单纯的全局性退变, 而可能具有一定的通路及功能特异性。

脑干同样处于局部脊髓损伤与高级脑网络之间的重要位置。Filimonova 等[16]发现延髓体积与最大压迫水平的脊髓横截面积及 C2 水平 FA 相关, 病程较长者延髓体积更小。这一结果进一步支持长期颈髓损伤可能向头侧产生远隔结构效应。纵向研究显示, CSM 的脑结构改变不能简单理解为单向进行性萎缩。Liu 等[17]发现患者术前左侧尾状核及右侧丘脑灰质体积降低, 而减压术后脑干、小脑后叶以及舌回、楔前叶、后扣带回等区域呈现不同方向的变化。这种空间异质性提示, 减压后可能同时存在不可逆神经损伤、继发退变以及活动依赖性结构可塑性。

因此, 在解释 VBM 或皮质厚度结果时, 体积下降并不一定等于神经退变、体积升高也并不一定等同于代偿。灰质体积还可能受到突触密度、胶质细胞、血管及组织含水量等多种因素影响, 结构影像需要与功能、代谢及纵向临床数据联合解释。

4. 功能去传入与脑功能网络重组

颈髓压迫持续破坏躯体感觉传入及皮质脊髓束运动传出, 可改变感觉运动皮层所接受的外周信息及其输出效率。静息态 fMRI 显示, 这种功能去传入并非简单表现为脑活动普遍下降, 而是呈现区域性增强与减弱并存的复杂模式。

Zhao 等[18]观察到左侧初级运动皮层及双侧额上回 zALFF 升高, 而楔前叶及距状皮层降低; Zhou 等[19]则发现中央前回、中央后回及辅助运动区 zALFF 增高, 并且部分改变与 C2 水平 FA 异常相关。Fan 等[20]的动态分析显示, 丘脑和壳核静态 ALFF 升高, 而双侧中央后回动态 ALFF 降低, 说明 CSM 不仅影响平均活动水平, 也可改变区域活动随时间的稳定性。ReHo 研究进一步表明局部神经同步性具有可逆成分。Tan 等[21]发现术前中央前、后回 ReHo 异常在减压术后呈相反方向变化。Takenaka 等[22]也发现术前感觉运动区及视觉区域 ALFF 异常在术后减弱。上述结果提示, 局部 BOLD 改变既可能来源于损伤, 也可能反映皮层重新分配神经资源的过程。

任务态 fMRI 为理解这种重组提供了另一个视角。Holly 等[23]和 Bhagavatula 等[24]发现, CSM 患者进行手部运动任务时感觉运动皮层激活范围扩大, 并在减压后逐渐接近健康对照。Cronin 等[25]进一步发现脊髓压迫体积与 M1、S1、小脑、壳核、尾状核及丘脑等多个区域的激活体积相关。

传统观点常将这种激活范围扩大解释为代偿性募集, 即当脊髓传导效率降低时, 大脑动员更多皮层资源维持运动输出。但激活增强并不必然代表有利的神经可塑性。一方面, 严重患者可能需要更大范围的皮层参与才能完成相同任务; 另一方面, 持续的过度募集也可能意味着网络效率下降。这一点可从术后变化得到印证。Dong 等[26]发现同侧 M1、S1 及前运动相关区域的激活可随减压和临床改善发生重新调整; Ryan 等[27]则发现 M1 及 SMA 的 VOA 或 %BOLD 与 mJOA 评分相关。因此, 更合理的理解是:

CSM 引起的皮层募集处于不断变化的损伤与适应的平衡, 而不是单一方向的代偿。

区域脑活动改变最终体现为网络层面的重新组织。Wang 等的研究显示, 随着症状加重, 感觉运动网络内部完整性逐渐下降, 但感觉运动区域与小脑、脑干、皮质下结构及视觉空间网络之间的耦合增强[28]。这一现象提示, CSM 可能同时存在“主通路内部失连接”和“辅助系统跨网络募集”。减压术后的纵向 FC 研究亦显示, 小脑与额叶及初级感觉运动区域之间的连接增强可与神经功能改善相关[29]。因此, 小脑可能不仅承担运动协调作用, 还参与受损感觉运动系统的重新校准。

丘脑是躯体感觉信息进入皮层的重要中继站, 同时参与运动、认知及感觉整合, 因此可能是颈髓损伤向高级中枢扩散的重要节点。Peng 等[30]发现术前丘脑与舌回、楔叶及小脑之间的 FC 增强, 而减压后丘脑与中央前回、旁中央小叶、脑桥及颞叶等区域连接发生重新组织。Zhou 等[31]进一步发现丘脑-皮层连接具有频段依赖性: 不同低频范围内, 丘脑与感觉运动及颞叶区域的连接方向并不一致。丘脑改变并不限于功能连接。部分结构 MRI 研究显示丘脑体积降低, 而 MRS 还发现丘脑 NAA/Cr、Cho/Cr 和 Ins/Cr 异常[32][33]。结构、功能和代谢证据的汇合提示, 丘脑可能并非被动受到远隔损伤, 而是 CSM 中枢网络重塑的重要枢纽。

默认模式网络(default mode network, DMN)传统上与自我相关加工、内隐认知、记忆及注意资源分配有关。CSM 研究发现, DMN 既可出现局部活动下降, 也可表现出网络连接及全局效率增强[34]。这种局部减弱与网络增强的现象可能反映长期感觉运动负荷增加后, 大脑重新配置有限资源。图论研究进一步发现, CSM 患者小世界属性、全局效率以及多个关键节点的拓扑特征发生改变, 异常区域涉及 DMN、后扣带皮层、中央后回、壳核和舌回等[35]。

动态功能连接则提示这种网络异常并非静态存在。Zhao 等[36]识别出多种功能状态, CSM 患者在涉及执行控制、显著性和默认网络交互的特定状态中驻留时间增加。这说明慢性脊髓损伤可能不仅改变“哪些区域连接”, 还改变脑网络在不同状态视觉相关脑区是 CSM 研究中较为稳定但机制仍存在争议的一类发现。Chen 等[37]报道枕叶 ALFF 及 ReHo 异常; 视觉皮层 FC 研究还发现 BA19、BA7 与距状皮层、舌回、梭状回、楔前叶和小脑之间的连接改变。Zhao 等[38]进一步发现小脑向次级视觉皮层的有效信息流增强, 并与较好的术后结局相关。

视觉网络改变可能与多种机制有关。步态控制高度依赖视觉、前庭和本体感觉输入, 当脊髓本体感觉传导受损后, 视觉信息权重可能增加; 另一方面, 慢性疼痛、注意负荷以及疾病严重程度也可能影响视觉网络。因此, 视觉皮层活动增强不宜简单称为视觉代偿。

在伴步态异常的患者中, 尾状核与角回、楔前叶及后扣带皮层等 DMN 区域连接增强, 并与脊髓功能指标相关[39], 进一步提示步态障碍可能涉及基底节、视觉空间系统及默认网络等多个系统协同变化。态之间切换的方式。

5. 神经代谢、胶质反应与脑灌注改变

MRS 为结构和 BOLD 信号之外的生物学解释提供了重要补充。NAA 通常被视为神经元/轴突完整性的候选指标。Kowalczyk 等[40]发现 CSM 患者 M1 区域 NAA/Cr 降低并与神经功能损害相关; Gohmann 等[41]进一步观察到 M1 区域 NAA 和 Cr 变化, 提示慢性脊髓损伤可能伴有远隔脑代谢异常。纵向研究表明, 代谢恢复和临床恢复并不一定同步。Aleksanderek 等[42]发现不同严重程度患者 M1 代谢模式存在差异, 并且部分患者即使术后临床症状改善, NAA/Cr 异常仍然持续。Goncalves 等[43]则发现运动皮层 NAA 变化与术后运动功能恢复具有一定一致性。这些结果提示, 代谢异常可能反映传统结构和功能成像不易捕捉的细胞层面状态, 并有望帮助区分短期功能补偿与持续性组织损伤。

Ins 及 Ins/Cr 常被用于间接反映胶质细胞活动。部分 CSM 研究发现 Ins 与病程相关, 并观察到丘脑

或小脑等区域 Ins 异常[32] [33] [41], 因此提出慢性压迫可能伴随远隔胶质反应甚至神经炎症。然而, 目前证据不足以将脑神经炎症确立为 CSM 的独立核心机制。首先, Ins 并非炎症特异性代谢物; 其次, 现有 CSM 脑 MRS 研究样本普遍有限, 且缺乏与炎症分子、PET 炎症示踪剂或组织学结果的一一验证。因此, 更稳妥的表述是: 现有代谢证据提示可能存在胶质及炎症相关反应, 但其生物学特异性和临床意义仍有待验证。这一区分能够避免将影像学相关性过度推导为确定的病理机制。

ASL 研究表明, CSM 还可能影响脑血流调控。Zhou 等[44]发现感觉运动皮层 CBF 异常, 并与 JOA 评分、手指灵活性及运动表现相关。Wei 等[45]将 ASL 与 rs-fMRI 联合分析后发现, 全脑灰质 CBF-FCS 耦合降低, 同时额叶、丘脑、距状皮层及感觉运动区呈现区域性异常。

这提示部分 BOLD 改变可能不仅取决于神经元活动, 还受到血流动力学状态影响。因此, 当研究以 ALFF、ReHo 或 FC 作为“神经活动”替代指标时, 应认识到 BOLD 本身是神经活动和血管反应的耦合结果。将 ASL 与 fMRI 联合可能有助于区分真正的神经活动变化与神经血管反应差异。

6. 减压术后的动态重组及影像学生物标志物

从临床角度看, 识别 CSM 脑改变并不是最终目的, 更重要的问题是这些改变能否帮助判断疾病严重程度、选择手术时机并预测术后恢复。

现有纵向研究已经提供了一些候选指标。脊髓 DTI 及纤维束完整性与术后功能改善相关[7]-[9]; 术前特定脑区 ALFF 与上肢功能恢复存在关联[46]; 视觉皮层与额上回之间的 FC 可能与术后 10 秒测试改善相关[47]; 小脑与感觉运动区 FC 变化与神经功能恢复相关[28]; 运动皮层 NAA 变化及部分灌注指标同样与临床结局存在联系[43]-[45]。

现有研究大量停留在相关性层面, 而真正达到第三层级的指标仍很有限。小样本研究中得到的 AUC 或相关系数不能直接视为成熟的临床预测工具。在进入临床前, 需要进行独立外部验证, 并证明其在 mJOA、年龄、病程和常规 MRI 等传统变量基础上具有额外增益。

未来更有前景的方向可能不是寻找单一“最佳指标”, 而是将局部脊髓微结构、脑结构、功能网络、代谢及临床信息整合为多维表型。例如, 脊髓 FA 用于反映传导束组织完整性, 感觉运动网络 FC 反映功能重组能力, MRS 或 ASL 则提供代谢和血流状态信息, 多层信息的联合可能比任何单一参数更加接近患者真实的神经功能储备。

7. 总结

CSM 的影像学认识正在经历由“局部脊髓压迫”向“全中枢神经系统疾病网络”转变。慢性机械性压迫首先造成颈髓轴突、髓鞘及微循环损伤; 长期传导异常可能进一步诱发华勒样变性和跨突触远隔改变, 并通过持续的感觉传入和运动输出受限, 引起感觉运动网络、丘脑-皮层环路、默认模式网络以及视觉-小脑系统的重新组织。与此同时, 神经元代谢、胶质活动和脑血流调节也可能参与这一动态过程。这一框架能够解释为什么 CSM 患者的脑影像改变呈现明显的空间和方向异质性: 部分改变可能代表不可逆神经损伤, 部分是为维持功能而产生的适应性募集, 还有部分可能来源于低效或非适应性网络重塑。减压术后的纵向变化进一步说明, 这些过程并非静止不变。

但目前仍不宜将所有脑 MRI 异常直接归因于 CSM 本身。慢性疼痛、情绪状态、认知负荷、性别、病程及其他临床异质性因素均可能对脑影像结果产生独立影响。未来研究应由单纯的患者与健康对照比较转向更精细的临床表型分层和纵向因果分析。在临床转化层面, 研究重点也应由不断增加新的成像参数, 逐步转向标准化、自动化和实际临床效用验证。以常规 MRI 为基础, 逐步整合经多中心验证的脊髓微结构指标, 并在特定临床场景中引入脑网络、代谢和灌注信息, 可能是更加现实的路径。

最终, 多模态 MRI 的价值并不在于证明 CSM 患者大脑也发生了变化, 而在于能否利用从脊髓到脑的多层级信息, 更准确地识别组织损伤程度、评价中枢神经功能储备、预测可逆性, 并为患者选择更合适的治疗时机和个体化管理方案。

参考文献

- [1] Gibson, J., Nouri, A., Krueger, B., *et al.* (2018) Degenerative Cervical Myelopathy: A Clinical Review. *The Yale Journal of Biology and Medicine*, **91**, 43-48.
- [2] Khan, A.F., Haynes, G., Mohammadi, E., Muhammad, F., Hameed, S. and Smith, Z.A. (2023) Utility of MRI in Quantifying Tissue Injury in Cervical Spondylotic Myelopathy. *Journal of Clinical Medicine*, **12**, Article 3337. <https://doi.org/10.3390/jcm12093337>
- [3] Rafati Fard, A., Mowforth, O.D., Yuan, M., Myrtle, S., Lee, K.S., Banerjee, A., *et al.* (2024) Brain MRI Changes in Degenerative Cervical Myelopathy: A Systematic Review. *eBioMedicine*, **99**, Article 104915. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2023.104915>
- [4] Khan, A.F., Mohammadi, E., Haynes, G., Hameed, S., Rohan, M., Anderson, D.B., *et al.* (2024) Evaluating Tissue Injury in Cervical Spondylotic Myelopathy with Spinal Cord MRI: A Systematic Review. *European Spine Journal*, **33**, 133-154. <https://doi.org/10.1007/s00586-023-07990-0>
- [5] Mohammadi, M., Roohollahi, F., Farahbakhsh, F., Mohammadi, A., Mortazavi Mamaghani, E., Kankam, S.B., *et al.* (2025) Diffusion Tensor Imaging in Diagnosing and Evaluating Degenerative Cervical Myelopathy: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Global Spine Journal*, **15**, 267-283. <https://doi.org/10.1177/21925682241263792>
- [6] Martin, A.R., Tetreault, L., Nouri, A., Curt, A., Freund, P., Rahimi-Movaghar, V., *et al.* (2021) Imaging and Electrophysiology for Degenerative Cervical Myelopathy [AO Spine RECODE-DCM Research Priority Number 9]. *Global Spine Journal*, **12**, 130S-146S. <https://doi.org/10.1177/21925682211057484>
- [7] Nakamura, M., Fujiyoshi, K., Tsuji, O., Konomi, T., Hosogane, N., Watanabe, K., *et al.* (2012) Clinical Significance of Diffusion Tensor Tractography as a Predictor of Functional Recovery after Laminoplasty in Patients with Cervical Compressive Myelopathy. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **17**, 147-152. <https://doi.org/10.3171/2012.5.spine1196>
- [8] Lee, J.W., Kim, J.H., Park, J.B., Park, K.W., Yeom, J.S., Lee, G.Y., *et al.* (2011) Diffusion Tensor Imaging and Fiber Tractography in Cervical Compressive Myelopathy: Preliminary Results. *Skeletal Radiology*, **40**, 1543-1551. <https://doi.org/10.1007/s00256-011-1161-z>
- [9] Bhosale, S., Ingale, P., Srivastava, S. and Bhide, P. (2019) Diffusion Tensor Imaging as an Additional Postoperative Prognostic Predictor Factor in Cervical Myelopathy Patients: An Observational Study. *Journal of Craniovertebral Junction and Spine*, **10**, 10-13. https://doi.org/10.4103/jcvjs.jcvjs_77_18
- [10] Wang, C., Holly, L.T., Oughourlian, T., Yao, J., Raymond, C., Salamon, N., *et al.* (2021) Detection of Cerebral Reorganization Associated with Degenerative Cervical Myelopathy Using Diffusion Spectral Imaging (DSI). *Journal of Clinical Neuroscience*, **86**, 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2021.01.011>
- [11] Wang, C., Sanvito, F., Oughourlian, T.C., Islam, S., Salamon, N., Holly, L.T., *et al.* (2023) Structural Relationship between Cerebral Gray and White Matter Alterations in Degenerative Cervical Myelopathy. *Tomography*, **9**, 315-327. <https://doi.org/10.3390/tomography9010025>
- [12] Freund, P., Boller, V., Emmenegger, T.M., Akbar, M., Hupp, M., Pfender, N., *et al.* (2024) Quantifying Neurodegeneration of the Cervical Cord and Brain in Degenerative Cervical Myelopathy: A Multicentre Study Using Quantitative Magnetic Resonance Imaging. *European Journal of Neurology*, **31**, e16297. <https://doi.org/10.1111/ene.16297>
- [13] Woodworth, D.C., Holly, L.T., Mayer, E.A., Salamon, N. and Ellingson, B.M. (2019) Alterations in Cortical Thickness and Subcortical Volume Are Associated with Neurological Symptoms and Neck Pain in Patients with Cervical Spondylosis. *Neurosurgery*, **84**, 588-598. <https://doi.org/10.1093/neuros/nyy066>
- [14] Jütten, K., Mainz, V., Schubert, G.A., Fabian Gohmann, R., Schmidt, T., Ridwan, H., *et al.* (2021) Cortical Volume Reductions as a Sign of Secondary Cerebral and Cerebellar Impairment in Patients with Degenerative Cervical Myelopathy. *NeuroImage: Clinical*, **30**, Article 102624. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2021.102624>
- [15] Muhammad, F., Weber, K.A., Rohan, M. and Smith, Z.A. (2024) Patterns of Cortical Thickness Alterations in Degenerative Cervical Myelopathy: Associations with Dexterity and Gait Dysfunctions. *Brain Communications*, **6**, fcae279. <https://doi.org/10.1093/braincomms/fcae279>
- [16] Filimonova, E., Vasilenko, I., Kubetsky, Y., Prokhorov, O., Abdaev, M. and Rzaev, J. (2023) Brainstem and Subcortical Regions Volume Loss in Patients with Degenerative Cervical Myelopathy and Its Association with Spinal Cord Compression Severity. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, **233**, Article 107943.

- <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2023.107943>
- [17] Liu, M., Tan, Y., Zhang, C. and He, L. (2021) Cortical Anatomy Plasticity in Cases of Cervical Spondylotic Myelopathy Associated with Decompression Surgery: A STROBE-Compliant Study of Structural Magnetic Resonance Imaging. *Medicine*, **100**, e24190. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000024190>
 - [18] Zhao, R., Guo, X., Wang, Y., Song, Y., Su, Q., Sun, H., *et al.* (2022) Functional MRI Evidence for Primary Motor Cortex Plasticity Contributes to the Disease's Severity and Prognosis of Cervical Spondylotic Myelopathy Patients. *European Radiology*, **32**, 3693-3704. <https://doi.org/10.1007/s00330-021-08488-3>
 - [19] Zhou, F., Gong, H., Liu, X., Wu, L., Luk, K.D. and Hu, Y. (2014) Increased Low-Frequency Oscillation Amplitude of Sensorimotor Cortex Associated with the Severity of Structural Impairment in Cervical Myelopathy. *PLOS ONE*, **9**, e104442. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104442>
 - [20] Fan, N., Zhao, B., Liu, L., Yang, W., Chen, X. and Lu, Z. (2022) Dynamic and Static Amplitude of Low-Frequency Fluctuation Is a Potential Biomarker for Predicting Prognosis of Degenerative Cervical Myelopathy Patients: A Preliminary Resting-State fMRI Study. *Frontiers in Neurology*, **13**, Article 829714. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.829714>
 - [21] Tan, Y., Shao, Z., Wu, K., Zhou, F. and He, L. (2024) Resting-State Brain Plasticity Is Associated with the Severity in Cervical Spondylotic Myelopathy. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **25**, Article No. 450. <https://doi.org/10.1186/s12891-024-07539-2>
 - [22] Takenaka, S., Kan, S., Seymour, B., Makino, T., Sakai, Y., Kushioka, J., *et al.* (2020) Resting-State Amplitude of Low-Frequency Fluctuation Is a Potentially Useful Prognostic Functional Biomarker in Cervical Myelopathy. *Clinical Orthopaedics & Related Research*, **478**, 1667-1680. <https://doi.org/10.1097/corr.0000000000001157>
 - [23] Holly, L.T., Dong, Y., Albistegui-Dubois, R., Marehbian, J. and Dobkin, B. (2007) Cortical Reorganization in Patients with Cervical Spondylotic Myelopathy. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **6**, 544-551. <https://doi.org/10.3171/spi.2007.6.6.5>
 - [24] Bhagavatula, I.D., Shukla, D., Sadashiva, N., Saligoudar, P., Prasad, C. and Bhat, D.I. (2016) Functional Cortical Reorganization in Cases of Cervical Spondylotic Myelopathy and Changes Associated with Surgery. *Neurosurgical Focus*, **40**, E2. <https://doi.org/10.3171/2016.3.focus1635>
 - [25] Cronin, A.E., Detombe, S.A., Duggal, C.A., Duggal, N. and Bartha, R. (2021) Spinal Cord Compression Is Associated with Brain Plasticity in Degenerative Cervical Myelopathy. *Brain Communications*, **3**, fcab131. <https://doi.org/10.1093/braincomms/fcab131>
 - [26] Dong, Y., Holly, L.T., Albistegui-Dubois, R., Yan, X., Marehbian, J., Newton, J.M., *et al.* (2008) Compensatory Cerebral Adaptations before and Evolving Changes after Surgical Decompression in Cervical Spondylotic Myelopathy. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **9**, 538-551. <https://doi.org/10.3171/spi.2008.10.0831>
 - [27] Ryan, K., Goncalves, S., Bartha, R. and Duggal, N. (2018) Motor Network Recovery in Patients with Chronic Spinal Cord Compression: A Longitudinal Study Following Decompression Surgery. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **28**, 379-388. <https://doi.org/10.3171/2017.7.spine1768>
 - [28] Wang, C., Ellingson, B.M., Oughourlian, T.C., Salamon, N. and Holly, L.T. (2022) Evolution of Brain Functional Plasticity Associated with Increasing Symptom Severity in Degenerative Cervical Myelopathy. *eBioMedicine*, **84**, Article 104255. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2022.104255>
 - [29] Wang, C., Ellingson, B.M., Islam, S., Laiwalla, A., Salamon, N. and Holly, L.T. (2021) Supraspinal Functional and Structural Plasticity in Patients Undergoing Surgery for Degenerative Cervical Myelopathy. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **35**, 185-193. <https://doi.org/10.3171/2020.11.spine201688>
 - [30] Peng, X., Tan, Y., He, L. and Ou, Y. (2020) Alterations of Functional Connectivity between Thalamus and Cortex before and after Decompression in Cervical Spondylotic Myelopathy Patients: A Resting-State Functional MRI Study. *NeuroReport*, **31**, 365-371. <https://doi.org/10.1097/wnr.0000000000001346>
 - [31] Zhou, F., Wu, L., Liu, X., Gong, H., Luk, K.D. and Hu, Y. (2015) Characterizing Thalamocortical Disturbances in Cervical Spondylotic Myelopathy: Revealed by Functional Connectivity under Two Slow Frequency Bands. *PLOS ONE*, **10**, e0125913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125913>
 - [32] Zheng, J., Zhang, Y., Zhao, B., Wang, N., Gao, T. and Zhang, L. (2025) Metabolic Changes of Thalamus Assessed by 1H-MRS Spectroscopy in Patients of Cervical Spondylotic Myelopathy Following Decompression Surgery. *Frontiers in Neurology*, **15**, Article 1513896. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1513896>
 - [33] Zhang, L., Zhang, Y.J., Wang, N., *et al.* (2025) Changes to Dorsal Thalamic Metabolites and Thalamocortical Tract Fiber Injury in Patients with Cervical Spondylotic Myelopathy. *Magnetic Resonance in Medical Sciences*, **24**, Article mp.2024-0079. <https://doi.org/10.2463/mrms.mp.2024-0079>
 - [34] Zhao, R., Su, Q., Chen, Z., Sun, H., Liang, M. and Xue, Y. (2020) Neural Correlates of Cognitive Dysfunctions in Cervical Spondylotic Myelopathy Patients: A Resting-State fMRI Study. *Frontiers in Neurology*, **11**, Article 596795.

- <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.596795>
- [35] Cao, Y., Zhan, Y., Du, M., Zhao, G., Liu, Z., Zhou, F., *et al.* (2021) Disruption of Human Brain Connectivity Networks in Patients with Cervical Spondylotic Myelopathy. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **11**, 3418-3430. <https://doi.org/10.21037/qims-20-874>
- [36] Zhao, G., Zhan, Y., Zha, J., Cao, Y., Zhou, F. and He, L. (2023) Abnormal Intrinsic Brain Functional Network Dynamics in Patients with Cervical Spondylotic Myelopathy. *Cognitive Neurodynamics*, **17**, 1201-1211. <https://doi.org/10.1007/s11571-022-09807-0>
- [37] Chen, Z., Wang, Q., Liang, M., Zhao, R., Zhu, J., Xiong, W., *et al.* (2018) Visual Cortex Neural Activity Alteration in Cervical Spondylotic Myelopathy Patients: A Resting-State fMRI Study. *Neuroradiology*, **60**, 921-932. <https://doi.org/10.1007/s00234-018-2061-x>
- [38] Zhao, R., Song, Y., Guo, X., Yang, X., Sun, H., Chen, X., *et al.* (2021) Enhanced Information Flow from Cerebellum to Secondary Visual Cortices Leads to Better Surgery Outcome in Degenerative Cervical Myelopathy Patients: A Stochastic Dynamic Causal Modeling Study with Functional Magnetic Resonance Imaging. *Frontiers in Human Neuroscience*, **15**, Article 632829. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.632829>
- [39] Wu, X., Wang, Y., Chang, J., Zhu, K., Zhang, S., Li, Y., *et al.* (2023) Remodeling of the Brain Correlates with Gait Instability in Cervical Spondylotic Myelopathy. *Frontiers in Neuroscience*, **17**, Article 1087945. <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1087945>
- [40] Kowalczyk, I., Duggal, N. and Bartha, R. (2012) Proton Magnetic Resonance Spectroscopy of the Motor Cortex in Cervical Myelopathy. *Brain*, **135**, 461-468. <https://doi.org/10.1093/brain/awr328>
- [41] Gohmann, R.F., Blume, C., Zvyagintsev, M., Mainz, V., Clusmann, H., Wiesmann, M., *et al.* (2019) 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. *European Journal of Radiology*, **116**, 55-60. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2019.04.009>
- [42] Aleksanderek, I., Stevens, T.K., Goncalves, S., Bartha, R. and Duggal, N. (2017) Metabolite and Functional Profile of Patients with Cervical Spondylotic Myelopathy. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **26**, 547-553. <https://doi.org/10.3171/2016.9.spine151507>
- [43] Goncalves, S., Stevens, T.K., Doyle-Pettypiece, P., Bartha, R. and Duggal, N. (2016) N-Acetylaspartate in the Motor and Sensory Cortices Following Functional Recovery after Surgery for Cervical Spondylotic Myelopathy. *Journal of Neurosurgery: Spine*, **25**, 436-443. <https://doi.org/10.3171/2016.2.spine15944>
- [44] Zhou, F., Huang, M., Wu, L., Tan, Y., Guo, J., Zhang, Y., *et al.* (2018) Altered Perfusion of the Sensorimotor Cortex in Patients with Cervical Spondylotic Myelopathy: An Arterial Spin Labeling Study. *Journal of Pain Research*, **11**, 181-190. <https://doi.org/10.2147/jpr.s148076>
- [45] Wei, W., Wang, T., Abulizi, T., Li, B. and Liu, J. (2021) Altered Coupling between Resting-State Cerebral Blood Flow and Functional Connectivity Strength in Cervical Spondylotic Myelopathy Patients. *Frontiers in Neurology*, **12**, Article 713520. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.713520>
- [46] Hrabálek, L., Hok, P., Hlušík, P., Čecháková, E., Wanek, T., Otruba, P., *et al.* (2018) Longitudinal Brain Activation Changes Related to Electrophysiological Findings in Patients with Cervical Spondylotic Myelopathy before and after Spinal Cord Decompression: An fMRI Study. *Acta Neurochirurgica*, **160**, 923-932. <https://doi.org/10.1007/s00701-018-3520-1>
- [47] Takenaka, S., Kan, S., Seymour, B., Makino, T., Sakai, Y., Kushioka, J., *et al.* (2019) Towards Prognostic Functional Brain Biomarkers for Cervical Myelopathy: A Resting-State fMRI Study. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 10456. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46859-5>