基于定量MRI评估颈髓损伤后颈旁肌水肿面积占比与颈椎结构损伤的关系

侯小华[1],王伟杰[2],孙　麟[1*]([1]山西医科大学第三医院,山西白求恩医院(山西医学科学院)同济山西医院骨科,太原　030032;[2]太原理工大学机器人科学与工程学院;[*]通讯作者,E-mail:sunlin@sxbqeh.com.cn)

摘要: 目的　探讨定量MRI在评估颈髓损伤后颈旁肌水肿面积中的应用价值,并分析其与颈椎结构性损伤的相关性。　方法　回顾性纳入91例颈脊髓损伤(CSCI)患者,分为骨折脱位组与无骨折脱位组。在T2WI上利用3D Slicer手动将颈旁肌按照不同肌肉功能及位置分为颈后深层肌群、颈后浅层肌群、胸锁乳突肌群及颈前肌群4个分区(分别为Zone Ⅰ、Zone Ⅱ、Zone Ⅲ、Zone Ⅳ区),定量计算各区域水肿面积及占比,比较组间及分区内肌肉水肿面积占比差异,采用Spearman相关分析评估肌水肿比例与损伤节段相关结构损伤数量的关系。　结果　骨折脱位组全肌群水肿比例显著高于无骨折脱位组(P<0.001),且全瘫患者高于非全瘫患者(P=0.004)。4分区中,Zone Ⅰ(颈后深层肌群)水肿比例最高(vs Zone Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ,P<0.001)。亚组分析显示,在无骨折脱位组中,Zone Ⅰ水肿比例与MRI显示的相关结构损伤数量呈显著正相关(r_s=0.685,P<0.001)。　结论　定量MRI能够有效评估颈髓损伤后颈旁肌水肿面积及其区域分布特征,并可反映颈旁肌水肿程度与颈椎结构性损伤的相关性。

关键词: 颈椎;　脊髓损伤;　水肿;　颈旁肌;　磁共振成像;　图像定量分析

中图分类号: R681.5　**文献标识码:** A　**文章编号:** 1007-6611(2026)08-0960-08　**DOI:**10.13753/j.issn.1007-6611.2026.08.013

Quantitative MRI assessment of paraspinal muscle edema area and its correlation with structural injury in patients with cervical spinal cord injury

HOU Xiaohua[1], WANG Weijie[2], SUN Lin[1*] ([1]*Department of Orthopedics, Third Hospital of Shanxi Medical University, Shanxi Bethune Hospital, Shanxi Academy of Medical Sciences, Tongji Shanxi Hospital, Taiyuan 030032, China*; [2]*College of Robotics Science and Engineering, Taiyuan University of Technology*; [*]*Corresponding author, E-mail: sunlin@sxbqeh.com.cn*)

Abstract: *Objective*　To investigate the application value of quantitative MRI in assessing the area of paraspinal muscle edema after cervical spinal cord injury (CSCI), and analyze its correlation with structural injury to the cervical spine. *Methods*　A total of 91 patients with CSCI were retrospectively enrolled and divided into a fracture-dislocation group and a non-fracture-dislocation group. On T2-weighted imaging (T2WI), the paraspinal muscles were manually segmented into four zones (Zones Ⅰ-Ⅳ) using 3D Slicer software, based on muscle function and anatomical location: deep posterior cervical muscles (Zone Ⅰ), superficial posterior cervical muscles (Zone Ⅱ), sternocleidomastoid (Zone Ⅲ), and anterior cervical muscles (Zone Ⅳ). The edema area and its proportion within each zone were quantitatively calculated. Differences in the proportion of edematous muscle area were compared between the two groups and among the four zones. Spearman correlation analysis was performed to evaluate the correlation between the proportion of edematous muscle and the number of structural injuries at the involved segments. *Results*　The overall edema proportion across all muscle groups was significantly higher in fracture-dislocation group than that in non-fracture-dislocation group (P<0.001), and was higher in patients with complete paralysis than in those with incomplete paralysis (P=0.004). Among the four zones, Zone Ⅰ (deep posterior cervical muscle group) exhibited the highest proportion of edema, which was significantly higher than those of Zones Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ (P<0.001). Subgroup analysis revealed that, the edema proportion in Zone Ⅰ was significantly positively correlated with the number of structural injuries detected on MRI in non-fracture-dislocation group (r_s=0.685, P<0.001). *Conclusion*　Quantitative MRI can effectively assess the area and zonal distribution of cervical paraspinal muscle edema after CSCI and reveal the correlation between the degree of paraspinal muscle edema and the structural injury to the cervical spine.

Keywords: cervical spine; spinal cord injury; edema; cervical paraspinal muscles; magnetic resonance imaging; quantitative image analysis

颈部解剖结构层次丰富,组织毗邻关系复杂。其中,颈旁肌群在维持颈椎稳定以及参与头颈部运动方面发挥着至关重要的作用[1,2]。当颈髓受到损伤时,由于肌肉神经支配通路中断,受累肌肉会逐

基金项目:国家自然科学基金资助项目(81870976)

作者简介:侯小华,男,1998-09生,在读硕士,E-mail:houxiaohua_0918@163.com

收稿日期:2026-05-09

渐出现一系列功能障碍，最终导致肌肉萎缩及脂肪沉积，从而进一步影响颈椎的稳定性[3-5]。以往研究大多围绕脂肪浸润等慢性结构变化进行量化评估，受试对象多为老年人或者颈椎手术后的病人[6,7]。但是，在损伤初期，特别是急性期或者亚急性期内发生的炎症性水肿变化，尚未得到充分的量化分析。

近年来，定量MRI的发展为肌肉组织客观评估提供了新手段。基于信号强度（signal intensity，SI）的定量分析可在一定程度上提高影像评估的一致性与可比性[8,9]。然而，SI易受设备平台及扫描参数影响，不同扫描条件下的原始信号缺乏直接可比性[10]，针对这一局限，现有研究通过引入内部参考或标准化方法对信号进行校正，以降低系统误差[11,12]。此外定量MRI也被用来评价运动后肌肉水肿以及一些全身性疾病导致的肌肉变化，显示出良好的应用潜力[13,14]。但用它来评估颈部两侧肌肉急性水肿的空间分布以及定量分析还较少见。

C1-2节段颈旁肌通常不直接参与损伤节段的神经支配，其肌肉结构在颈髓损伤中相对较少受到直接影响。同时该区域解剖位置稳定、运动负荷较低。因此，本研究选取C1-2节段相对正常肌肉作为标准化参考，以降低个体间及扫描参数差异带来的系统偏倚。

基于前述研究背景，本研究采用定量MRI技术，以C1-2节段正常肌肉作为参考区域，对SI进行相对标准化处理，以降低不同扫描条件带来的系统误差。将颈髓损伤后颈旁肌水肿进行分区域测量，主要观察水肿面积及其占总肌肉面积的比例，同时对比骨折脱位与否对肌肉水肿面积比例造成的影响。在此之上，进一步分析不同功能区水肿分布特点及其和结构性损伤负荷之间的关系，通过肌肉水肿面积比例来评价急性颈髓损伤，可以更加客观地对急性颈髓损伤进行诊断，并有助于认识肌肉反应和结构损伤之间的联系。

1 材料与方法

1.1 一般资料

研究设计为单中心回顾性分析，纳入2015年1月至2025年12月期间在本院因颈脊髓损伤住院并接受手术治疗的患者。纳入标准：①年龄18~80岁；②发病至就诊或入院后48 h内完成颈椎MRI检查，扫描序列包括轴位及矢状位T2加权像，且为高分辨率薄层扫描（层厚≤3mm）；③确诊为C3~C7节段颈髓损伤；④图像质量达标，无影响肌群分割的运动伪影或金属伪影。排除标准：①有颈椎手术史；②合并颈椎肿瘤、感染或炎症性疾病（包括强直性脊柱炎、类风湿关节炎等）或严重脊柱畸形；③已知神经肌肉疾病或全身代谢性肌病；④脊髓损伤平面在C2以上或T1以下；⑤MRI图像质量差无法进行肌肉分割或量化评估；⑥缺少分组或统计所需的临床或影像资料。依据上述标准筛选研究对象，并收集其基本人口学及临床资料，包括性别、年龄、身高、体重，以及吸烟史、糖尿病史和高血压病史等信息。所有入组患者均在术前完成颈椎MRI检查。本研究经山西白求恩医院机构伦理审查委员会批准（伦理批件编号：LYLL-2025-004/PJ45）。

1.2 MRI采集与评估

MRI扫描在Siemens MAGNETOM Skyra 3.0 T磁共振系统（Siemens Healthineers，Erlangen，Germany）上进行，该平台具备良好的软组织对比度，可用于评估颈部肌肉及脊髓结构。首先采用梯度回波（GRE）序列获取颈椎多平面定位像。参数为：TR=7 ms，TE=2.6 ms，层厚5 mm，层间距1 mm，FOV（mm^2）=300×300，分辨率（mm^2）=0.59×0.59，NEX=2，采集时间约18 s。获取冠状位、矢状位及轴位图像以提供解剖参考。随后进行标准化颈椎MRI扫描，包括矢状位及轴位T2加权序列。轴位扫描根据病变节段或椎间盘水平（C1-T1）定位。

所有图像在分析前均进行质量评估，仅纳入满足以下条件者：①包含完整T2序列；②无明显运动伪影；③具备可用于信号标准化的参考区域。所有纳入图像均未见影响诊断的严重伪影。

1.3 影像学诊断流程与评价方法

术前依据颈椎X线或CT判断有无骨折脱位。骨折脱位的诊断标准为：X线或CT提示椎体、椎弓根、关节突或椎板等部位骨皮质连续性中断或可见骨折线；椎体发生向前、向后或旋转错位，甚至关节突交锁；或伴有棘突间距增大、关节突间隙异常、椎体排列异常等提示节段稳定性下降的表现。据此将患者分为骨折脱位组（fracture-dislocation，FD）与无骨折脱位组（non-fracture-dislocation，non-FD）。

前纵韧带损伤、椎间盘损伤及后方韧带复合体损伤均依据MRI进行诊断。前纵韧带损伤在矢状

位T2加权像上表现为韧带低信号连续性中断，韧带走行区内可见条带状或局限性高信号，常合并椎前软组织肿胀或血肿。椎间盘损伤表现为T2加权像上椎间盘信号异常或结构紊乱，纤维环完整性受损，可伴椎间盘突出或脱出，以及终板损伤或椎间隙高度改变。后方韧带复合体损伤表现为相应韧带区条带状或片状高信号，韧带结构模糊或断裂，可伴椎间隙增大或后方张力带损伤。

所有影像学检查均由两位经过培训的脊柱外科医生独立盲法阅片，意见不一致时经讨论达成共识。

1.4　颈部肌肉MRI定量测量与参数获取

使用3D Slicer软件（version 5.6.0）进行颈椎MRI轴位图像肌肉分割及定量分析，所有图像均遵循相同标准流程，由两位经过统一培训的研究员完成。

依据颈部肌肉所在部位及功能分为4个区域：Zone Ⅰ为颈后深层肌群，主要由多裂肌以及颈半棘肌组成；Zone Ⅱ为颈后浅层肌群，主要由头夹肌、颈夹肌、颈最长肌以及斜方肌组成；Zone Ⅲ是胸锁乳突肌区；Zone Ⅳ是颈部前方肌肉，以颈长肌为代表。

为获得正常肌肉信号强度参考值，选取C1-2节段颈部肌肉作为参考区域。排除筋膜及脂肪等非肌肉组织后，在连续3个层面共随机选取12个感兴趣区（region of interest，ROI）进行测量。分别记录各ROI的信号强度最大值与最小值，并计算其平均最大值和平均最小值，以此作为正常肌肉信号强度的参考阈值范围。将高于正常肌肉平均最大信号强度的区域定义为水肿信号区，同时避开血管等高信号结构。

在矢状位T2加权像上，按以下优先级判定损伤最严重层面。首先，合并骨折脱位者，以骨折脱位最为显著的层面作为目标层面。其次，无骨折脱位但存在明确神经受压者，选取椎管狭窄程度最重、脊髓受压最明显的层面作为目标层面。再次，骨折及椎管狭窄均不明确者，综合脊髓内高信号改变范围及韧带损伤分布情况，选取病变最为集中的层面。对于累及多个颈椎节段的患者，根据以下标准确定其主要损伤节段。以神经功能缺损水平（感觉或运动平面）为依据，结合影像学所见（骨折、椎管狭窄、脊髓信号改变及韧带损伤分布）进行综合判定。若上述标准不能明确归入单一节段，则以损伤最严重层面所在的椎体水平作为主要损伤节段。后续统计分析中，每位患者仅归入一个主要损伤节段。所有层面及节段判定均由两位研究者独立完成，意见不一致时经协商达成一致。选定目标层面后，在该轴位图像上按各肌肉功能分区逐一标注ROI，获取各区域面积及信号强度。将信号强度高于正常肌肉上限阈值的像素判定为水肿区域，计算各分区水肿面积。

本研究主要分析以下颈部肌肉定量参数：肌肉水肿面积比例，其计算公式为：肌肉水肿面积比例=肌肉水肿面积/总肌肉面积×100%。该指标反映了单位肌肉组织中水肿受累的范围，其升高在病理学上主要与毛细血管通透性增加、组织间液体渗出以及静脉回流受阻等因素有关。此外，神经损伤导致的肌肉失神经支配亦可影响细胞代谢，进一步加重水分潴留，从而表现为影像学上的高信号水肿区域扩大。

通过上述方法可获得各区域颈部肌肉的形态学及信号学定量指标，并将其用于后续统计学分析。

1.5　统计学分析

本研究所有统计学分析均在SPSS软件27.0（IBM公司）中完成。所有检验均采用双侧检验，$P<0.05$视为差异有统计学意义。连续变量经Shapiro-Wilk检验均不符合正态分布，故以中位数和四分位数间距M（P25，P75）描述，两组间比较（包括骨折脱位组与无骨折脱位组的整体及不同节段亚组比较、全瘫与非全瘫患者间的比较）均采用Mann-Whitney U检验。分类变量以例数（%）表示，组间比较采用卡方检验或Fisher确切概率法。同一受试者4个肌肉分区（Zone Ⅰ~Ⅳ）间的总体比较采用Friedman检验，两两比较采用Wilcoxon符号秩检验。采用Spearman秩相关分析评估结构性损伤数量与各分区及全肌群水肿面积占比的相关性。

2　结果

2.1　一般资料与影像学特征

本研究共纳入91例颈髓损伤患者，整体以中老年男性为主，研究对象平均年龄为（52.3±14.6）岁，年龄范围为18~80岁。患者中吸烟及饮酒史较为常见，部分患者存在完全性瘫痪状态（见表1），提示其神经功能受损程度存在一定差异。

在影像学表现为无骨折脱位的53例患者中，仍可观察到较高比例的椎间盘及后方韧带复合体损

表1 研究对象基线人口学及临床特征
Table 1 Baseline demographic and clinical characteristics of the study subjects

因素	例数(%)	因素	例数(%)
性别		吸烟史	
男	76(83.5)	有	45(49.5)
女	15(16.5)	无	46(50.5)
饮酒史		全瘫	
有	27(29.7)	有	14(15.3)
无	64(70.3)	无	77(84.7)
损伤节段		颈椎骨折-脱位(FD)	
C3-4	23(25.3)	是	38(41.8)
C4-5	29(31.9)	否	53(58.2)
C5-6	25(27.5)		
C6-7	14(15.4)		

伤，而前纵韧带损伤相对较少。进一步按结构性损伤数量分层显示，大多数患者存在1~2个结构性损伤，仅少数患者未见明确结构性异常或存在多发损伤，提示该亚组仍具有较明显的隐匿性结构损伤负荷(见表2)。

表2 无骨折脱位颈髓损伤患者韧带及结构性损伤情况
Table 2 Ligamentous and structural injuries in patients with cervical spinal cord injury without fracture dislocation

变量	例数(%)	变量	例数(%)
结构性损伤		椎间盘损伤	
0个	3(5.7)	是	46(86.8)
1个	15(28.3)	否	7(13.2)
2个	23(43.4)	后方韧带复合体水肿	
3个	12(22.6)	是	35(66.0)
前纵韧带损伤		否	18(34.0)
是	16(30.2)		
否	37(69.8)		

2.2 图像分割及水肿识别示例

正常肌肉信号参考范围取自C1-C2节段(见图1A)。在轴位T2WI上，颈旁肌群依据解剖位置和功能划分为颈后深层肌群、颈后浅层肌群、胸锁乳突肌群及颈前肌群4个分区(分别为Zone Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ)，椎体作为解剖参考标识(见图1B)。各分区内可见高信号区域与正常信号区域，其中高信号区代表水肿受累区域(见图1C)。

水肿信号的分布呈现明显的区域选择性：Zone Ⅰ(颈后深层肌群)内高信号最为集中，多数病例呈弥漫性改变；Zone Ⅱ及Zone Ⅲ内高信号区域相对分散，范围较小；Zone Ⅳ内高信号最为少见，仅个别病例可见局限性轻度信号升高。总体而言，水肿受累程度由后向前递减，以颈后深层肌群最为突出(见图1C)。

2.3 整体及节段性肌肉水肿的组间差异及其与神经功能的关系

本研究共纳入91例下颈椎损伤患者，骨折脱位组38例，无骨折脱位组53例。因各观察值均不服从正态分布，故采用Mann-Whitney *U*检验进行两组间比较。

如表3所示，骨折脱位组全肌群水肿面积占比显著高于无骨折脱位组(P<0.001)，进一步根据损伤节段进行分层分析。C3-4节段骨折脱位组肌肉水肿面积占比高于无骨折脱位组(P=0.003)；C4-5节段骨折脱位组肌肉水肿面积占比高于无骨折脱位组(P=0.002)；C5-6节段骨折脱位组肌肉水肿面积占比高于无骨折脱位组(P<0.001)，且两组间差异最大；C6-7节段骨折脱位组肌肉水肿面积占比亦高于无骨折脱位组(P=0.016，见表4)。

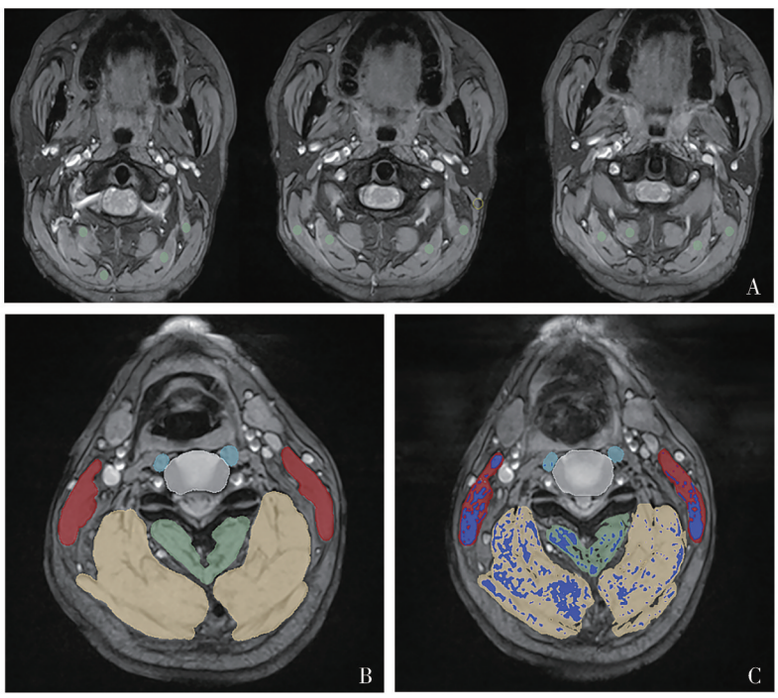
在神经功能方面，共有全瘫患者14例，非全瘫患者77例。结果显示，全瘫组全肌群水肿占比明显高于非全瘫组(Z=-2.882，P=0.004)，提示肌肉水肿程度不仅与结构性损伤相关，同时也可能与神经功能损害程度亦存在一定关联。

2.4 分区水肿分布模式分析

采用Friedman检验比较4个分区的水肿面积占比，结果显示，不同分区之间的差异具有统计学意义(χ^2=47.874，df=3，P<0.001)。根据秩均值排序，Zone Ⅰ最高(3.24)，其次为Zone Ⅲ(2.49)、Zone Ⅱ(2.26)，Zone Ⅳ最低(2.01，见表5)。

进一步行Wilcoxon符号秩检验进行两两比较，结果显示，Zone Ⅰ与Zone Ⅱ、Zone Ⅲ、Zone Ⅳ之间的差异均有统计学意义(校正后P均<0.01)；而Zone Ⅱ与Zone Ⅲ、Zone Ⅱ与Zone Ⅳ、Zone Ⅲ与Zone Ⅳ之间的差异均无统计学意义(校正后P>0.05，见表6)。

综合上述不同分区的水肿面积占比比较结果可见，总体的统计学差异主要源于Zone Ⅰ的水肿面积占比显著高于其他3个分区，而Zone Ⅱ、Zone Ⅲ、Zone Ⅳ之间该指标的差异并不显著。这提示颈后深层肌群(Zone Ⅰ)是水肿最为集中的区域。



注：A. 正常肌肉信号参考值取自C1-2节段3个横断面，绿色区域示随机选取的12个感兴趣区（ROI）。B. 颈部肌肉参数测量感兴趣区标注：白色部分为椎体（VA）；绿色部分为Zone Ⅰ（颈后深层肌群）；黄色部分为Zone Ⅱ（颈后浅层肌群）；红色部分为Zone Ⅲ（胸锁乳突肌区）；蓝色部分为Zone Ⅳ（颈前肌群）。C. 颈椎MRI轴位图像中颈旁肌群划分以及水肿标示：白色代表VA区域；浅绿色为正常肌肉（Zone Ⅰ），黄色为Zone Ⅱ，红色为Zone Ⅲ，浅蓝色为Zone Ⅳ；深蓝色表示水肿肌肉区域。

图1　颈椎轴位MRI图像中颈部肌肉感兴趣区分区、正常肌肉参考信号采样及水肿肌肉分割示意图

Figure 1　Schematic diagram of region-of-interest segmentation of cervical muscles, normal muscle reference signal sampling, and edematous muscle segmentation on axial cervical MRI

表3　骨折脱位组与无骨折脱位组整体颈部肌群水肿面积占比比较

Table 3　Comparison of the overall cervical muscle edema area proportion between fracture-dislocation group and non-fracture-dislocation group

组别	n	水肿面积（mm^2）	肌群面积（mm^2）	水肿占比（%）
骨折脱位组	38	1 346.76（719.27，1 930.9）	14 128.98（11 766.05，16 602.58）	8.397（4.60，12.64）
无骨折脱位组	53	299.49（143.25，487.86）	12 202.43（10 424.65，13 610.74）	2.312（1.07，4.00）
U		277.00	584.00	284.00
P		<0.001	0.001	<0.001

表4　不同颈椎损伤节段骨折脱位组与无骨折脱位组肌肉水肿面积占比比较

Table 4　Comparison of the proportion of edematous muscle area between the fracture-dislocation group and the non-fracture-dislocation group at different cervical injury segments

损伤节段	组别	n	全肌群水肿占比（%）	U	P
C3-4	骨折脱位组	8	12.75（7.33，13.54）	14.000	0.003
	无骨折脱位组	15	2.82（0.66，5.01）		
C4-5	骨折脱位组	9	8.44（4.42，16.34）	25.000	0.002
	无骨折脱位组	20	2.20（0.97，3.53）		
C5-6	骨折脱位组	11	8.21（5.49，10.04）	10.000	<0.001
	无骨折脱位组	14	2.29（0.79，3.87）		
C6-7	骨折脱位组	10	6.09（0.42，7.99）	3.000	0.016
	无骨折脱位组	4	0.23（0.18，2.10）		

表5 不同颈部肌群分区肌肉水肿面积占比的比较
Table 5 Comparison of proportion of muscle edema area among different cervical muscle zones

分区	平均秩
Zone Ⅰ	3.24
Zone Ⅱ	2.26
Zone Ⅲ	2.49
Zone Ⅳ	2.01
n	91
χ^2	47.874
df	3
P	<0.001

表6 不同颈部肌群分区肌肉水肿面积占比的两两比较结果
Table 6 Pairwise comparison of the proportion of edematous muscle area among different cervical muscle zones

比较组别	Z	P
Zone Ⅰ vs Zone Ⅱ	−5.921	<0.001
Zone Ⅰ vs Zone Ⅲ	−2.846	0.004
Zone Ⅰ vs Zone Ⅳ	−5.248	<0.001
Zone Ⅱ vs Zone Ⅲ	−1.897	0.058
Zone Ⅱ vs Zone Ⅳ	−1.400	0.162
Zone Ⅲ vs Zone Ⅳ	−1.709	0.088

2.5 水肿参数与结构损伤数量的相关性分析

为探究无骨折脱位患者肌肉水肿程度与其结构损伤负荷的关系，在无骨折脱位组（n=53）中使用Spearman等级相关分析，分别计算不同区域以及整个肌群水肿率与结构损伤数目间的关系。结果显示，Zone Ⅰ的水肿面积占比与结构损伤数量呈较强正相关（r_s=0.685，P<0.001），相关性强度高于其他分区；全肌群水肿面积占比与结构损伤数量亦呈正相关（r_s=0.388，P=0.004）；Zone Ⅲ的水肿面积占比与结构损伤数量呈弱正相关（r_s=0.292，P=0.034）。Zone Ⅱ的水肿面积占比与结构损伤数量呈正相关趋势，但差异无统计学意义（r_s=0.244，P=0.078）；Zone Ⅳ的水肿面积占比与结构损伤数量呈弱负相关但无统计学意义（r_s=−0.064，P=0.651，见表7）。

从整体上看，在无骨折脱位患者中，颈旁肌群水肿程度与结构损伤数量具有一定的联系，而Zone Ⅰ的相关性最为显著，可能成为反映该组患者潜在结构性损伤负荷的敏感影像指标。

表7 无骨折脱位患者水肿面积占比与结构损伤数量的相关性分析 （n=53）
Table 7 Correlation between edema area proportion and structural injury count in the non-fracture-dislocation group （n=53）

分析参数	r_s（95% CI）	P
Zone Ⅰ水肿面积占比	0.685（0.502，0.809）	<0.001
Zone Ⅱ水肿面积占比	0.244（−0.036，0.489）	0.078
Zone Ⅲ水肿面积占比	0.292（0.015，0.527）	0.034
Zone Ⅳ水肿面积占比	−0.064（−0.336，0.218）	0.651
全肌群水肿面积占比	0.388（0.124，0.601）	0.004

3 讨论

急性颈髓损伤后，临床评估通常聚焦于骨性结构及韧带损伤，而肌肉受累往往容易被忽视。本研究基于定量MRI对颈旁肌水肿进行分区测量，系统分析其空间分布特征及临床关联性。结果提示，肌肉水肿可能与骨折脱位、神经功能受损程度及潜在结构性损伤负荷有关，颈旁肌水肿可能是急性颈椎损伤中一种重要的软组织影像学表现，可为急性期损伤评估提供补充信息。

本研究结果显示，合并骨折脱位患者颈旁肌水肿范围及比例在总体及各节段层面均高于无骨折脱位组，这一结果与既往关于颈椎外伤多伴随高能量损伤机制的认识基本一致[15-18]。但本研究进一步通过“面积占比”的定量分析提示，该类损伤可能不仅局限于骨与韧带结构，也涉及周围肌群的受累。从机制上推测，骨折脱位通常提示较高能量外力作用及节段不稳定状态[15]；椎体移位、关节突交锁及韧带损伤可能导致局部生物力学失衡，使颈旁肌长期处于异常受力状态[16]；同时，局部微循环障碍与静脉回流受阻可能促进组织间液积聚[17]；神经牵拉或短暂去神经支配亦可能进一步加重肌肉代谢紊乱与炎症反应[18]。上述因素可能共同参与肌肉水肿的形成过程。

在神经功能层面，全瘫患者肌肉水肿程度高于非全瘫患者，提示肌肉水肿可能与神经损伤严重程度相关。既往研究主要关注慢性期肌肉脂肪浸润及结构退变，并证实其与神经功能障碍及疼痛存在相关性[15]，而急性期炎症性水肿的定量研究相对较少。本研究结果提示，急性期肌肉水肿这一动态影像学指标可能反映整体损伤负荷，并进一步拓展了

MRI在急性颈椎损伤评估中的应用价值。

在空间分布方面，颈后肌群水肿主要集中于Zone Ⅰ，而其他区分差异不明显，提示水肿可能具有区域选择性。在无骨折脱位患者中，Zone Ⅰ水肿比例与结构性损伤数量呈一定正相关（r_s=0.685），而Zone Ⅱ及Zone Ⅳ相关性相对较弱，提示即使在无明显骨性不稳定的情况下，深层肌群仍可能在一定程度上反映潜在结构性损伤负荷。

从解剖及生物力学角度分析，Zone Ⅰ主要由颈后深层稳定肌群组成，在维持颈椎稳定性及控制剪切力方面具有重要作用[19-21]。多裂肌作为核心稳定结构，在脊柱旋转及节段稳定中发挥关键作用[22]，其功能下降可能增加椎间盘及关节突应力负荷[23]。此外，Zone Ⅰ筋膜相对致密，炎症渗出或组织液更易局部滞留，因此MRI表现为更明显的水肿信号。本研究还发现，Zone Ⅳ水肿面积占比与结构性损伤数量呈弱负相关但无统计学意义（r_s=-0.064，P=0.651）。由于Zone Ⅳ位于颈椎前方，在后伸型损伤中并非主要受力区域，且血供丰富、筋膜间隙较宽，渗出液不易局限潴留，因此其对潜在结构性损伤的敏感性相对较低。这一结果进一步提示，Zone Ⅰ可能是反映结构性损伤负荷较为敏感的区域。

本研究仍存在一定局限性。首先，本研究为单中心回顾性研究，样本量相对有限，可能影响结果的推广性。其次，MRI检查时间窗口不完全一致，未能分析急性期肌肉水肿的动态变化。再次，本研究主要采用水肿面积及面积占比进行评价，尚未结合T2 mapping或Dixon脂肪分数等多模态MRI技术，也未纳入肌肉功能、电生理及长期随访资料，因此影像学表现与功能恢复之间的关系仍需进一步研究。未来可开展多中心、大样本前瞻性研究，结合多时间点随访及T2 mapping、Dixon等多模态MRI技术，进一步评估急性期肌肉损伤的动态演变及组织成分变化，并将影像学指标与临床功能评分及预后相结合，以进一步验证颈旁肌水肿在急性颈椎损伤评估及预后预测中的临床应用价值。

总体而言，本研究提示颈旁肌水肿可能与骨折脱位及神经功能损伤存在一定关联，并呈现明显区域选择性，其中Zone Ⅰ表现较为敏感。定量MRI有望为急性颈椎损伤提供补充性的软组织信息，在传统骨性结构评估基础上提供额外参考，从而为临床决策提供支持。

参考文献：

[1] Blouin JS, Siegmund GP, Carpenter MG, *et al*. Neural control of superficial and deep neck muscles in humans[J]. J Neurophysiol, 2007,98(2):920-928.

[2] Elliott JM, Pedler AR, Jull GA, *et al*. Differential changes in muscle composition exist in traumatic and nontraumatic neck pain[J]. Spine (Phila Pa 1976),2014,39(1):39-47.

[3] Smith AC, Albin SR, Abbott R, *et al*. Confirming the geography of fatty infiltration in the deep cervical extensor muscles in whiplash recovery[J]. Sci Rep,2020,10(1):11471.

[4] O'Leary S, Falla D, Elliott JM, *et al*. Muscle dysfunction in cervical spine pain: implications for assessment and management[J]. J Orthop Sports Phys Ther,2009,39(5):324-333.

[5] Li Z, Zhang Y, Lin Y, *et al*. The role of paraspinal muscle degeneration in cervical spondylosis[J]. Eur Spine J, 2025,34(3):1187-1197.

[6] Liao Y, Lin X, Su W, *et al*. MRI-based assessment paraspinal extensor muscle fatty infiltration in acute cervical spinal cord injury patients: a retrospective study[J]. BMC Musculoskelet Disord,2024,25(1):702.

[7] Paliwal M, Weber KA 2nd, Smith AC, *et al*. Fatty infiltration in cervical flexors and extensors in patients with degenerative cervical myelopathy using a multi-muscle segmentation model[J]. PLoS One,2021,16(6):e0253863.

[8] Hooijmans MT, Schlaffke L, Bolsterlee B, *et al*. Compositional and functional MRI of skeletal muscle: a review[J]. J Magn Reson Imaging,2024,60(3):860-877.

[9] Engelke K, Chaudry O, Gast L, *et al*. Magnetic resonance imaging techniques for the quantitative analysis of skeletal muscle: state of the art[J]. J Orthop Translat, 2023,42:57-72.

[10] Shinohara RT, Sweeney EM, Goldsmith J, *et al*. Statistical normalization techniques for magnetic resonance imaging[J]. Neuroimage Clin,2014,6:9-19.

[11] Reinhold JC, Dewey BE, Carass A, *et al*. Evaluating the impact of intensity normalization on MR image synthesis[C]//Angelini ED, Landman BA, eds. Medical Imaging 2019: Image Processing. Bellingham, WA: SPIE, 2019: 109493H.

[12] Fatania K, Mohamud F, Clark A, *et al*. Intensity standardization of MRI prior to radiomic feature extraction for artificial intelligence research in glioma: a systematic review[J].Eur Radiol, 2022,32(10):7014-7025.

[13] May DA, Disler DG, Jones EA, *et al*. Abnormal signal intensity in skeletal muscle at MR imaging: patterns, pearls, and pitfalls[J]. Radiographics, 2000,20(Spec No):S295-S315.

[14] Ross L, Lindqvist A, Costello B, *et al*. Using magnetic resonance imaging to map the hidden burden of muscle involvement in systemic sclerosis[J]. Arthritis Res Ther,2022,24(1):84.

[15] Fortin M, Yuan Y, Battié MC. Factors associated with paraspinal muscle asymmetry in size and composition in a general population sample of men[J]. Phys Ther, 2013, 93(11): 1540-1550.

[16] He J, Wu T, Ding C, *et al*. The fatty infiltration into cervical paraspinal muscle as a predictor of postoperative outcomes: a controlled study based on hybrid surgery[J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2023, 14: 1128810.

[17] Klyne DM, Barbe MF, Hodges PW. Relationship between systemic inflammation and recovery over 12 months after an acute episode of low back pain[J]. Spine J, 2022, 22(2): 214-225.

[18] Sun C, Xiang H, Wu X, *et al*. The influence of anterior cervical discectomy and fusion surgery on cervical muscles and the correlation between related muscle changes and surgical efficacy[J]. J Orthop Surg Res, 2024, 19(1): 187.

[19] Suo M, Zhang J, Sun T, *et al*. The association between morphological characteristics of paraspinal muscle and spinal disorders[J]. Ann Med, 2023, 55(2): 2258922.

[20] Peng Q, Zhang Y, Yang S, *et al*. Morphologic changes of cervical musculature in relation to chronic nonspecific neck pain: a systematic review and meta-analysis[J]. World Neurosurg, 2022, 168: 79-88.

[21] Hou X, Lu S, Wang B, *et al*. Morphologic characteristics of the deep cervical paraspinal muscles in patients with single-level cervical spondylotic myelopathy[J]. World Neurosurg, 2020, 134: e166-e171.

[22] Anderson JS, Hsu AW, Vasavada AN. Morphology, architecture, and biomechanics of human cervical multifidus[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2005, 30(4): E86-E91.

[23] Xu G, Li C, Sheng Z. Biomechanical effects of altered multifidus muscle morphology on cervical spine tissues[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2025, 13: 1524844.

（责任编辑：马艳霞）