SWE技术在脊柱疾病中的应用与研究进展

章 旸,罗怡康,王国华*

湖南师范大学附属第一医院(湖南省人民医院)脊柱外科,湖南长沙

收稿日期: 2025年2月5日; 录用日期: 2025年2月28日; 发布日期: 2025年3月6日

摘要

脊柱疾病一直是医学界备受关注的领域,其中包括脊柱侧凸、骨折和椎间盘突出等多种疾病。传统影像 技术在脊柱疾病的诊断和治疗中发挥着重要作用,然而其对于组织弹性特性的捕捉能力有限。近年来, 剪切波超声弹性成像(Shear Wave Elastography, SWE)技术作为一种新兴的医学影像技术,因其能够提 供组织弹性信息和对组织微观结构的敏感性而备受关注。在脊柱领域,这项技术可能为我们提供更加全 面的诊断信息,并且对于指导手术和监测治疗效果也具有参考价值。因此,本综述旨在通过对剪切波弹 性成像技术在脊柱疾病中的应用和进展进行综合分析,探讨其在脊柱疾病领域的作用。

关键词

SWE技术,脊柱,椎间盘,椎旁肌,弹性模量,僵硬度

Application and Research Progress of SWE Technology in Spinal Diseases

Yang Zhang, Yikang Luo, Guohua Wang*

Department of Spine Surgery, The First Affiliated Hospital of Hunan Normal University (People's Hospital of Hunan Province), Changsha Hunan

Received: Feb. 5th, 2025; accepted: Feb. 28th, 2025; published: Mar. 6th, 2025

Abstract

Spinal disorders have long been an area of concern in the medical community, including conditions as diverse as scoliosis, fractures, and disc herniations. Traditional imaging techniques play an important role in the diagnosis and treatment of spinal diseases, but their ability to capture tissue elastic features is limited. In recent years, shear wave elastography (SWE), as a new medical imaging technology, has attracted much attention because of its sensitivity to tissue elastic information and

*通讯作者。

tissue microstructure. In the field of spinal diseases, this technology can provide us with more comprehensive diagnostic information and can also be useful for guiding surgery and monitoring outcomes. Therefore, this review aims to discuss the role of shear-wave elastography in the field of spinal diseases through a comprehensive analysis of its application and progress in spinal diseases.

Keywords

SWE Technology, Spine, Intervertebral Disc, Paravertebral Muscle, Elastic Modulus, Stiffness

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>

CC O Open Access

1. 前言

随着人口老龄化的到来,脊柱疾病作为老年患者多发病,其中包括脊柱侧凸、椎间盘突出、脊柱骨 折、颈椎病、椎旁肌损伤等诸多疾病。患者往往出现颈肩痛、腰背部疼痛、腰腿痛、四肢疼痛、麻木等症 状,难以缓解,甚至出现行走困难及瘫痪。对于这些脊柱疾病,传统的影像学方法往往包括 X 线、CT、 MRI 等,往往着重于椎体、附件、椎间盘、脊髓神经等改变,这些属于脊柱的静态力学观测,而对于椎 旁肌及韧带等这些动态力学观测往往忽视[1]-[3]。限于椎旁肌的无创检测技术条件不足,目前尚缺乏能容 观反映椎旁肌生物力学特性的可靠指标[4]-[6]。近年来以剪切波超声弹性成像(Shear Wave Elastography, SWE)技术为主要代表的超声影像技术逐渐广泛应用于肌肉功能学的评估[7]。剪切波弹性成像(SWE)是一 种无创、定量和实时的软组织刚度成像,被认为比压缩超声弹性成像更具容观性和可重复性。SWE 使用 声辐射力脉冲产生垂直于声束传播的剪切波,引起瞬态位移[8]。每个像素点处的剪切波速与剪切弹性模 量(刚度)直接相关,而剪切弹性模量是组织弹性的绝对度量[9] [10]。SWE 是量化肌肉僵硬变化的有效方 法[11]。最近的研究表明,SWE 可以有效地测量松弛和收缩状态下肌肉的僵硬度[12]。随着 SWE 技术在 脊柱方面的不断应用,现已不仅局限在椎旁肌及韧带的观察,且对于椎间盘、脊柱侧弯、颈椎病、手术 前后的脊柱结构评估均取得较大的成就。本综述主要阐述 SWE 技术的基本原理,分析 SWE 技术在脊柱 疾病的预防和治疗中的优势,并对近年来 SWE 技术在脊柱疾病中的应用及发展进行概述。

2. SWE 技术概述

2.1. SWE 技术的基本原理

SWE 技术的基本原理为使用超声探头发射多点声辐射力脉冲在组织不同深度聚焦产生横向剪切波, 利用"马赫锥"原理,通过定量分析系统可计反映组织内剪切波传播速度的物理量——杨氏模量值。杨 氏模量与剪切波传播速度间的关系为:E=3pc2(E为杨氏模量;p为组织密度;c为剪切波传播速度)[13]。 软组织僵硬度越大,组织密度越大,剪切波传播速度就越快,杨氏模量值就越高[13][14]。SWE 基于对 组织所受应力后变形程度的测量,获取肌肉的弹性模量值。SWE 能够定量、动态评估具体某块肌肉弹性 值的变化,通过评估肌肉的弹性特征,可以获取各种状态下静态肌肉硬度、动态肌肉硬度和主动收缩时 肌肉硬度的变化,用以评估肌肉的功能学变化[11]。

2.2. SWE 技术在脊柱疾病中相较传统影像技术的优势

在脊柱疾病的诊疗过程中,传统的影像技术主要包括 X 线、CT、MRI 等。它们主要从形态学方面进

行观察,对于特定解剖结构进行细微分析,但在疾病预测、实时监测、精准测量等方面存在不足。X 线对于特定的解剖结构难以显影,如椎间盘、脊髓神经等,CT 是临床中常用的检测方式,不仅评价的客观性较高,而且检查时间短,简单便捷,重复性好[15],对椎间盘、椎体、神经显影好,但是其也存在辐射暴露风险,且对于椎旁肌的评估精确度低[16]。MRI 成像相对比较全面,也可用于评价椎旁肌,但操作复杂、价格昂贵、无法即时反馈,且在椎旁肌观测上,需要沿肌肉边缘划定感兴趣区域,这往往存在一定的主观性从而会造成结果的差异,因为对于肌肉成分的微小变化肉眼不能进行清晰的分辨[17],对于脂肪浸润率的微观变化 MRI 成像也无法进行定量测量[18]。并且 X 线、CT、MRI 均无法准确定量出肌肉功能的变化。SWE 技术可以实时、定量监测椎旁肌的弹性模量值,其弹性模量值可以客观可靠地反映椎旁肌的功能变化[19]。作为较为新颖的测量技术,可以提供定量的组织弹性数据,可精确测量组织硬度,便于疾病的分级与监测,可实时监测、即时反馈。近年来 SWE 技术在脊柱方面不断应用,现已不仅局限在椎旁肌及韧带的观察,且对于椎间盘退变、神经受压、脊柱侧弯等方面均取得较大的进展,在脊柱疾病的预测、预防方面具有显著优势。

3. SWE 技术在脊柱疾病中的研究进展

3.1. 体内外观测椎间盘退变

SWE技术可以用于测量椎间盘(IVD)的弹性特性,帮助评估其健康状况以及可能存在的退行性变化。 剪切波超声弹性成像是一种较新颖的测量技术,通过测量剪切波传播速度(SWS)来评估软组织的弹性模 量。Vergari 等[14]选择体外观测方法来验证 SWS 可用于评估 IVD 力学性能。通过对牛尾 IVD 进行压缩 测试,最终得出 SWE 可用于评估体外椎间盘刚度的测量,且可重复性好。此项研究证实了 SWE 技术在 椎间盘中应用的可靠性,为 SWE 技术研究椎间盘退变提供了基础。验证体外评估椎间盘可行性后,很多 学者开始评估体内 IVD 力学性能及退变程度。Galinie 等[20]验证了 SWE 技术可用于评估无症状年轻人 的纤维环,观察患者椎间盘情况,尤其指出在 BMI < 24 kg/m² 的受试者中可信程度高,而在 BMI > 24 kg/m²(超重)的受试者中,测量具有不确定性。该技术可以深入了解椎间盘的微观结构和机械性能,可用 于椎间盘病变的早期检测或随访。而通过对纤维环进行测量,评估 IVD 的退变程度,对于我们动态监测 患者脊柱的退变提供了便利。Vergari 等[21]则进一步验证了 IVD 横波弹性成像的可行性和可靠性。成人 颈椎间盘既往测量显示,平均 SWS 为 3.0 ± 0.4 m/s; 年轻人的 SWS (22~30 岁为(3.3 ± 0.3) m/s)高于老年 人(50 岁以上为(2.7 ± 0.3) m/s)。Vergari 的研究中,儿童腰椎间盘产生了相似的平均值(2.9 ± 0.5) m/s,虽 然标准偏差表明儿童腰椎 IVD 的受试者间变异性更高,但两个人群的极值相似。

3.2. 辅助诊断脊柱侧弯

SWE 技术可用于测量脊柱侧凸患者的纤维环,对脊柱侧凸的诊断提供参考。SWE 技术可用于无创测 量纤维环体内剪切波速度(SWS),这是一个与纤维环力学性能相关的参数。Langlais 等[22]指出特发性脊 柱侧弯患者纤维环僵硬度较健康人更大,椎间盘受累更明显。然而,现在对于脊柱侧凸的评估并不仅局 限在纤维环的力学变化上。既往研究指出,青少年特发性脊柱侧凸(AIS)所致的脊柱畸形可诱发肋骨畸形, 这种骨骼畸形会对胸壁肌肉(包括肋间肌)产生直接影响,导致严重病例的个体呼吸障碍[23]。Pietton [24] 等将 SWE 技术用于测量健康儿童和 AIS 儿童的肋间肌剪切波速度。他们指出两组在呼吸暂停期间的 SWS 均显著高于正常呼吸(p < 0.01)。在呼吸暂停或正常呼吸方面,两组之间未观察到显著差异。无论是健康 个体还是脊柱侧凸的患者,SWE 技术在其生物力学评估是可行的。由此可见,SWE 技术可作为脊柱侧凸 诊断的重要辅助手段。此外,SWE 技术也能对于脊柱侧弯术后恢复情况及手术预后提供参考。对于神经 肌肉性脊柱侧弯(NMS),非融合手术(FBF)后对于椎间盘硬度没有既定的标准。Gaume 等[25]纳入了 19 例 进行 FBF 手术的 NMS 患者,使用 SWE 技术评估非融合固定术(FBF)后腰椎间盘的机械反应,并与健康 对照组进行比较。分别测量 L3/L4、L4/L5 和 L5/S1 的椎间盘纤维环的横波速度(SWS),在健康受试者中, 平均 SWS (所有椎间盘水平合并)为(7.5±2.6) m/s。在 NMS 患者中, SWS 显著高于(9.9±1.4) m/s (p<0.05)。 研究表明,接受 FBF 治疗的 NMS 患者在治疗后腰椎间盘硬度显著增加,从而可以判断脊柱侧弯固定的 疗效及预后情况。SWE 技术可成为评估脊柱硬度方面的有效辅助手段。

3.3. 测量椎旁肌刚度

剪切波弹性成像(SWE)技术可以精确测量椎旁肌及韧带的弹性特征,从而通过评估椎旁肌的僵硬 度来判断脊柱疾病的严重程度并预测疾病的发生与进展。椎旁肌肉在脊柱疾病的发生与发展中扮演着 至关重要的角色,某些关键椎旁肌对于脊柱稳定性及病理状态的影响尤为显著。例如,脊柱最内侧的 多裂肌,作为附着面积最大的椎旁肌,负责控制脊柱节段间的旋转运动与剪切力,对脊柱的核心稳定 性起着重要作用[3]。多裂肌不仅参与脊柱三轴运动,维持节段稳定和正常生理曲度,还能够调节各椎 体间负荷与压力的均匀分布。随着多裂肌的退变,其收缩力量下降,可能导致脊柱力学紊乱,从而引发 脊柱不稳定和其他相关疾病。因此,椎旁肌的结构与功能评估对于研究脊柱退变及脊柱失稳具有重要 意义。Moreau 等[26]对 10 名健康个体进行 SWE 测量,评估了 L2-L3 和 L4-L5 右侧多裂肌的弹性模量, 并验证了该技术在被动伸展与静息姿势下的可重复性和可靠性。研究发现, SWE 技术能够有效测量腰 椎多裂肌的弹性模量,并且这种测量方法可以方便地应用于临床常规检测。此外,Sadeghi 等[27]使用 SWE 技术对健康个体在不同姿势下的多裂肌刚度进行评估。研究考虑了三种姿势: 俯卧、坐起和抬起 右臂坐起,分析了剪切模量的变化及其可重复性。结果显示,腰椎多裂肌在不同姿势下的刚度显著变 化,从俯卧(16.15 kPa)到坐起(27.28 kPa),再到右臂抬起、坐起(45.02 kPa),证明了姿势对肌肉刚度的 显著影响。Masaki 等[28]进一步研究了腰竖脊肌和腰多裂肌在不同体位下的弹性模量变化。研究表明, 腰竖脊肌在屈曲 - 侧屈位时的刚度显著高于静息、屈曲或屈曲 - 旋转位。而腰多裂肌在屈曲、屈曲 -侧屈和屈曲-旋转位的刚度相似,然而在静息位时显著降低。这表明,腰竖脊肌在侧屈位时拉伸效果 更为显著,而腰多裂肌则在躯干屈曲位置受到更有效的拉伸。长期处于侧屈、屈曲等体位时,腰多裂肌 和竖脊肌的牵拉将导致肌肉僵硬度增加,进而可能引发腰椎及椎旁肌的相关疾病。此外,脊柱区域的 肌肉刚度对于维持脊髓功能至关重要,可能与多种脊髓肌肉骨骼疾病的发生密切相关。然而,尽管有 这些发现,现有研究的样本量相对较小,尚无法得出不同姿势下腰椎肌肉刚度的普遍结论。为了解决 这一问题, Ma 等[29]使用 SWE 技术和组织超声触诊系统(TUPS)对 64 名健康个体的胸部和腰椎区域进 行背部肌肉刚度测量。结果显示,在L4水平,背部肌肉的僵硬度在胸部和腰椎区域最大(p<0.05)。另 外,研究还发现男性的背部肌肉刚度在躺下和站立姿势下均明显大于女性(p<0.03),且站立姿势的 SWE 刚度明显大于平躺姿势(p<0.001)。这表明,腰椎旁肌的僵硬度受体位及性别差异影响较大,这一发现 可为未来脊柱侧弯、腰痛等患者的研究提供参考。Koppenhaver 等[30]对 120 名无症状个体进行了腰椎 旁肌的僵硬度测量,并使用方差分析(ANOVA)对性别、肌肉状况进行了统计比较。结果表明,竖脊肌 的静息剪切模量约为4 kPa,而腰椎多裂肌的静息剪切模量约为6 kPa。剪切模量在肌肉收缩过程中显 著增加,且根据性别、BMI 和活动水平的不同,椎旁肌的僵硬度呈现显著差异。男性和更活跃的个体 通常椎旁肌的僵硬度更高,而老年男性、BMI 较高及长期活动较大的人群更容易出现腰椎旁肌的损伤 而导致脊柱疾病的发生。在使用 SWE 技术与 MRI 成像技术评估 2 型和 3 型脊髓性肌萎缩症(SMA)患 者的一项研究中, Karacabey [31]等指出, 在上肢肌肉中, 病程较长的患者肱三头肌 SWE 值最高(r=0.67, p=0.003)。在下肢肌肉中, 髂腰肌的 SWE 值显着高于臀大肌(p<0.001), 且 SWE 值与椎旁肌肉的 MRI 评分呈正相关(r=0.49, p=0.045; r=0.67, p=0.003)。由此证明 SWE 技术是一种替代的无创实用方法,

可用于评估 SMA 患者的各项肌肉受累程度,更好地了解节段性受累的发病机制。椎旁肌在脊柱稳定性中起着至关重要的作用,但脊柱筋膜的作用同样不可忽视。Creze 等[32]在研究中指出,胸腰筋膜(TLF)和竖脊肌腱膜(ESA)在脊柱的生物力学中扮演着重要角色,它们可能是引发腰痛的潜在源头。胸腰筋膜通过包裹和支撑脊柱相关肌肉,尤其是椎旁肌,对脊柱的稳定性具有重要影响。因此,脊柱筋膜的变化或损伤可能在一定程度上影响脊柱的力学性能,导致脊柱失稳和相关疾病的发生。Blain 等[33]教授进一步研究了胸腰筋膜与椎旁肌的关系,认为胸腰筋膜封装腰椎旁肌(LPM),并通过这种封装创建了腰椎旁肌隔室(PMC)。他们提出,通过拉伸背阔肌以张紧胸腰筋膜可能会增加 PMC 内的刚度,从而影响脊柱的稳定性。为了验证这一假设,Blain 等使用 SWE 技术在俯卧位和原位测量了多裂肌和竖脊肌的刚度,并得出了可行性结论。在进一步的实验中,当背阔肌被拉伸时,研究发现腰椎旁肌的 SWE 值显著增加,这表明胸腰筋膜的张力变化确实会影响腰椎旁肌的僵硬度。通过统计分析,Blain 等发现,竖脊肌的 SWE 测量可靠性明显高于多裂肌,而在坐位时,竖脊肌的刚度较静息位更为显著。值得注意的是,尽管背阔肌拉伸可以改变胸腰筋膜的张力,但并未导致腰椎旁肌刚度的显著变化,这表明脊柱筋膜和椎旁肌之间的相互作用需要更为细致的分析。

为了更好地评估 SWE 技术在脊柱疾病中的实际应用,我们团队进行了小规模的临床试验,采用回顾 性研究的方法,收集自 2022 年 1 月至 2023 年 2 月在我院微创经椎间孔腰椎间融合术(MIS-TLIF)与经椎 间孔腰椎间融合术(TLIF)治疗的单节段腰椎管狭窄症患者 61 例,其中 MIS-TLIF 组 31 例,TLIF 组 30 例。 使用 SWE 技术分别测量术前、术后 1 周、术后 3 个月的手术部位腰椎多裂肌弹性模量值。SWE 弹性模 量组内对比: MIS-TLIF 组术前、术后 1 周、术后 3 个月差异显著(p < 0.05),其中术后 1 周明显低于术前 (p < 0.05),术后 3 个月的弹性模量水平明显低于术前和术后 1 周;TLIF 组术前、术后 1 周、术后 3 个月 的弹性模量对比差异具有统计学意义(p < 0.05),其中术后 1 周的弹性模量明显低于术前(p < 0.05),术后 3 个月的弹性模量水平明显低于术前(p < 0.05),术后 1 周和术后 3 个月的弹性模量对比无明显差异(p > 0.05)。SWE 弹性模量值组间对比:术前与术后 1 周,两组无差异(p > 0.05);术后 3 个月,MIS-TLIF 组 明显低于 TLIF 组(p < 0.05)。在此试验中我们认为 SWE 技术可无创、实时、定量评估腰椎多裂肌功能, 而 SWE 弹性模量值表明 MIS-TLIF 与 TLIF 在治疗单节段腰椎管狭窄症患者中,MIS-TLIF 对腰椎多裂肌 切伤更小,功能恢复更好,故 SWE 技术可以为腰椎退行性疾病患者的诊治方案制定、临床疗效评估和术 后康复训练提供参考。综上所述,SWE 是评估腰椎旁肌刚度的可靠工具,椎旁肌及脊柱筋膜对脊柱稳定 有着不可替代的作用,但脊柱筋膜在脊柱疾病的发生发展中极易被忽视,将 SWE 技术运用于脊柱筋膜层 面的研究未来可能成为热点。

3.4. 评估脊柱韧带结构与功能

SWE 技术提供了一种新方式,可以无创和定量地评估脊柱韧带的功能负荷和刚度。腰椎的棘间韧带和棘上韧带在维持脊柱稳定方面发挥着重要作用,但目前对其动态生物力学知之甚少。Yancey 等[34]使用 SWE 技术测量了尸体躯干、离体韧带和健康志愿者在腰椎屈曲与伸直时棘间/棘上韧带复合体的长度,获得了剪切波速度测量值。他们认为,尸体的棘上/棘间韧带复合体在腰椎(23%~43%)和胸椎(0%~50%)的平均剪切波速度增加,这对应腰椎(19%~63%)和胸椎(3%~8%)从伸展到屈曲的棘突间距离的同趋势增加。而健康个体显示腰椎(L2~L3 为 195%)和胸椎(T10~T11 为 31%)从伸展到屈曲的剪切波速度增加,对应腰椎(L2~L3 为 93%)和胸椎(T10~T11 为 11%)从伸展到屈曲的棘突间距离同趋势增加。由此可见,在腰椎屈曲时,棘间/棘上韧带的 SWE 数值更高,韧带的功能负荷及刚度更大。相较传统的影像技术来说,SWE可以作为一种非侵入性技术来量化韧带的结构与功能,并为实时和动态评估韧带负荷提供了可能。

3.5. 评估脊柱手术疗效和预后

SWE 技术可对手术前后脊柱稳定性与神经受压程度进行评估,从而对手术患者疗效、预后提供参考价值。Burulday 等[35]使用 B 型超声、SE 和 SWE 技术,对接受了单侧脊柱减压手术的腰椎间盘突出症患者进行观察,比较他们术前和术后两侧坐骨神经受累情况。结果显示,与非患侧相比,患侧坐骨神经的横截面积(CSA)、直径、SWE 值显著升高。尽管如此,患侧坐骨神经的 CSA、直径和 SWE 值均在手术后有所下降,但在非患侧并没有明显差异。由此可见,腰椎减压手术可降低患者坐骨神经的直径、CSA 和僵硬度。

4. SWE 技术的不足

尽管剪切波弹性成像技术(SWE)在脊柱疾病的诊断中展现了广泛的应用潜力,但仍存在一些不足之处。首先,SWE 技术的精确度高度依赖于操作者的经验和技术水平。操作人员经验不足或技术不熟练,可能导致数据采集的准确性下降,进而影响结果的可靠性。因此,操作者培训和标准化操作流程的建立显得尤为重要。其次,脊柱的解剖结构复杂,涵盖椎体、椎间盘、脊髓神经、韧带和椎旁肌[36]等多种组织。由于这些结构在空间上的位置和性质差异,SWE 技术在精准分析这些脊柱结构时面临较大的挑战。此外,脊柱大部分由骨性结构组成,而骨组织的超声传播特性与软组织存在显著差异,这使得 SWE 在骨性结构弹性成像方面的应用受到限制。再者,由于超声检查的特性,患者的体位变化和呼吸运动对结果可能产生较大影响,容易导致运动伪影和数据偏倚[37] [38]。尽管 SWE 技术在软组织成像、动态力学观察和脊柱疾病的预测方面显示出一定优势。然而,受限于操作难度、对体位和呼吸运动的敏感性、深部组织穿透力不足等因素,SWE 技术在目前仍难以取代传统影像学检查来作为常规辅助检查的手段。

5. 展望

SWE 技术作为一种先进的超声检查技术,通过测量特定区域内剪切波传播速度来评估组织的弹性及 硬度。其既往常规应用在肝脏、乳腺、心血管、肿瘤、肌肉等疾病方面[39]-[43],近年来随着研究的深入, 在脊柱疾病领域的应用也越来越广泛。如对于椎间盘退变的评估、脊柱侧凸、脊柱畸形的测量、脊柱手 术前后组织硬度的对比、术后康复及手术疗效的评估、骨质疏松、脊椎骨折患者的组织硬度差异等等问 题取得重大的突破,对脊柱疾病预测、诊断、治疗、手术指导、手术方式选择、治疗成效带来了极大的帮 助和参考价值[44]-[47]。随着 SWE 技术的不断发展,未来可能出现 3D-SWE 技术[48],能极大减轻人为 因素、技术层面、结果偏倚上的干扰,从而使 SWE 技术更精确便捷地应用于脊柱疾病中,发挥巨大的临 床推动作用,帮助临床医生解决实际问题,甚至成为脊椎疾病领域新的辅助检查手段。

基金项目

湖南省教育厅科学研究项目(项目编号: 21C0041)。

参考文献

- [1] Nakama, S., Nitanai, K., Oohashi, Y., Endo, T. and Hoshino, Y. (2003) Cervical Muscle Strength after Laminoplasty. *Journal of Orthopaedic Science*, **8**, 36-40. <u>https://doi.org/10.1007/s007760300006</u>
- [2] 叶添文, 贾连顺. 颈椎周围肌肉系统病变与颈椎病的关系[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2005(2): 140-142.
- [3] Karlsson, A., Leinhard, O.D., Åslund, U., West, J., Romu, T., Smedby, Ö., *et al.* (2016) An Investigation of Fat Infiltration of the Multifidus Muscle in Patients with Severe Neck Symptoms Associated with Chronic Whiplash-Associated Disorder. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, **46**, 886-893. <u>https://doi.org/10.2519/jospt.2016.6553</u>
- [4] 房敏, 严隽陶. 颈部软组织病变在颈椎发病中的作用[J]. 中国骨伤, 2001(2): 30-31.

- [5] Taljanovic, M.S., Gimber, L.H., Becker, G.W., Latt, L.D., Klauser, A.S., Melville, D.M., *et al.* (2017) Shear-Wave Elastography: Basic Physics and Musculoskeletal Applications. *RadioGraphics*, **37**, 855-870. <u>https://doi.org/10.1148/rg.2017160116</u>
- [6] Bercoff, J., Tanter, M. and Fink, M. (2004) Supersonic Shear Imaging: A New Technique for Soft Tissue Elasticity Mapping. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, **51**, 396-409. https://doi.org/10.1109/tuffc.2004.1295425
- [7] Kuo, W., Jian, D., Wang, T. and Wang, Y. (2013) Neck Muscle Stiffness Quantified by Sonoelastography Is Correlated with Body Mass Index and Chronic Neck Pain Symptoms. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **39**, 1356-1361. https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2012.11.015
- [8] Hug, F., Tucker, K., Gennisson, J., Tanter, M. and Nordez, A. (2015) Elastography for Muscle Biomechanics: Toward the Estimation of Individual Muscle Force. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 43, 125-133. <u>https://doi.org/10.1249/jes.00000000000049</u>
- [9] Lin, L., Yu, Y., Fan, J., Guo, P., Xia, C., Geng, X., et al. (2022) Increased Stiffness of the Superficial Cervical Extensor Muscles in Patients with Cervicogenic Headache: A Study Using Shear Wave Elastography. Frontiers in Neurology, 13, Article ID: 874643. <u>https://doi.org/10.3389/fneur.2022.874643</u>
- [10] Ozturk, A., Grajo, J.R., Dhyani, M., Anthony, B.W. and Samir, A.E. (2018) Principles of Ultrasound Elastography. Abdominal Radiology, 43, 773-785. <u>https://doi.org/10.1007/s00261-018-1475-6</u>
- [11] Ferraioli, G., Barr, R.G., Farrokh, A., Radzina, M., Cui, X.W., Dong, Y., et al. (2022) How to Perform Shear Wave Elastography. Part I. Medical Ultrasonography, 24, 95-106. <u>https://doi.org/10.11152/mu-3217</u>
- [12] Cui, X., Li, K., Yi, A., Wang, B., Wei, Q., Wu, G., et al. (2022) Ultrasound Elastography. Endoscopic Ultrasound, 11, 252-274. <u>https://doi.org/10.4103/eus-d-21-00151</u>
- [13] 牛旺, 史铁梅, 张原溪. 实时剪切波弹性成像技术在骨骼肌中的应用进展[J]. 中国医学影像技术, 2017, 33(10): 1583-1586.
- [14] Vergari, C., Rouch, P., Dubois, G., Bonneau, D., Dubousset, J., Tanter, M., et al. (2014) Intervertebral Disc Characterization by Shear Wave Elastography: An in Vitro Preliminary Study. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 228, 607-615. <u>https://doi.org/10.1177/0954411914540279</u>
- [15] Sinelnikov, A., Qu, C., Fetzer, D.T., Pelletier, J., Dunn, M.A., Tsung, A., et al. (2016) Measurement of Skeletal Muscle Area: Comparison of CT and MR Imaging. European Journal of Radiology, 85, 1716-1721. https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2016.07.006
- [16] Hu, Z., He, J., Zhao, F., Fang, X., Zhou, L. and Fan, S. (2011) An Assessment of the Intra- and Inter-Reliability of the Lumbar Paraspinal Muscle Parameters Using CT Scan and Magnetic Resonance Imaging. *Spine*, 36, E868-E874. <u>https://doi.org/10.1097/brs.0b013e3181ef6b51</u>
- [17] Berry, D.B., Padwal, J., Johnson, S., Parra, C.L., Ward, S.R. and Shahidi, B. (2018) Methodological Considerations in Region of Interest Definitions for Paraspinal Muscles in Axial MRIs of the Lumbar Spine. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 19, Article No. 135. <u>https://doi.org/10.1186/s12891-018-2059-x</u>
- [18] Bok, D.H., Kim, J. and Kim, T. (2016) Comparison of MRI-Defined Back Muscles Volume between Patients with Ankylosing Spondylitis and Control Patients with Chronic Back Pain: Age and Spinopelvic Alignment Matched Study. *European Spine Journal*, 26, 528-537. <u>https://doi.org/10.1007/s00586-016-4889-2</u>
- [19] Lacourpaille, L., Hug, F., Guével, A., Péréon, Y., Magot, A., Hogrel, J., et al. (2014) Non-Invasive Assessment of Muscle Stiffness in Patients with Duchenne Muscular Dystrophy. *Muscle & Nerve*, **51**, 284-286. https://doi.org/10.1002/mus.24445
- [20] Galinié, P., Eyssartier, C., Sauret, C., Tordjman, M., Pissonier, M., Carlier, R., et al. (2023) In-Vivo Characterization of the Lumbar Annulus Fibrosus in Adults with Ultrasonography and Shear Wave Elastography. Medical Engineering & Physics, 120, Article ID: 104044. <u>https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2023.104044</u>
- [21] Vergari, C., Dubois, G., Vialle, R., Gennisson, J., Tanter, M., Dubousset, J., et al. (2015) Lumbar Annulus Fibrosus Biomechanical Characterization in Healthy Children by Ultrasound Shear Wave Elastography. European Radiology, 26, 1213-1217. <u>https://doi.org/10.1007/s00330-015-3911-0</u>
- [22] Langlais, T., Vergari, C., Pietton, R., Dubousset, J., Skalli, W. and Vialle, R. (2018) Shear-Wave Elastography Can Evaluate Annulus Fibrosus Alteration in Adolescent Scoliosis. *European Radiology*, 28, 2830-2837. <u>https://doi.org/10.1007/s00330-018-5309-2</u>
- [23] Dreimann, M., Hoffmann, M., Kossow, K., Hitzl, W., Meier, O. and Koller, H. (2014) Scoliosis and Chest Cage Deformity Measures Predicting Impairments in Pulmonary Function: A Cross-Sectional Study of 492 Patients with Scoliosis to Improve the Early Identification of Patients at Risk. *Spine*, **39**, 2024-2033. https://doi.org/10.1097/brs.00000000000000001
- [24] Pietton, R., David, M., Hisaund, A., Langlais, T., Skalli, W., Vialle, R., et al. (2021) Biomechanical Evaluation of Intercostal

Muscles in Healthy Children and Adolescent Idiopathic Scoliosis: A Preliminary Study. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **47**, 51-57. <u>https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2020.09.011</u>

- [25] Gaume, M., Loiselet, K., Chekir, H., Langlais, T., Boddaert, N., Stricker, S., *et al.* (2023) Evidence of Spinal Stiffening Following Fusionless Bipolar Fixation for Neuromuscular Scoliosis: A Shear Wave Elastography Assessment of Lumbar Annulus Fibrosus. *European Spine Journal*, **33**, 1617-1623. <u>https://doi.org/10.1007/s00586-023-08013-8</u>
- [26] Moreau, B., Vergari, C., Gad, H., Sandoz, B., Skalli, W. and Laporte, S. (2016) Non-Invasive Assessment of Human Multifidus Muscle Stiffness Using Ultrasound Shear Wave Elastography: A Feasibility Study. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 230, 809-814. https://doi.org/10.1177/0954411916656022
- [27] Sadeghi, S., Quinlan, K., Eilertson, K.E., Billy, G.G., Bible, J., Sions, J.M., et al. (2019) Changes in Shear Modulus of the Lumbar Multifidus Muscle during Different Body Positions. *Journal of Biomechanical Engineering*, 141, Article ID: 081003. <u>https://doi.org/10.1115/1.4043443</u>
- [28] Masaki, M., Ji, X., Yamauchi, T., Tateuchi, H. and Ichihashi, N. (2019) Effects of the Trunk Position on Muscle Stiffness That Reflects Elongation of the Lumbar Erector Spinae and Multifidus Muscles: An Ultrasonic Shear Wave Elastography Study. *European Journal of Applied Physiology*, **119**, 1085-1091. <u>https://doi.org/10.1007/s00421-019-04098-6</u>
- [29] Ma, C.Z., Ren, L., Cheng, C.L. and Zheng, Y. (2020) Mapping of Back Muscle Stiffness along Spine during Standing and Lying in Young Adults: A Pilot Study on Spinal Stiffness Quantification with Ultrasound Imaging. *Sensors*, 20, Article No. 7317. <u>https://doi.org/10.3390/s20247317</u>
- [30] Koppenhaver, S.L., Scutella, D., Sorrell, B.A., Yahalom, J., Fernández-de-las-Peñas, C., Childs, J.D., et al. (2019) Normative Parameters and Anthropometric Variability of Lumbar Muscle Stiffness Using Ultrasound Shear-Wave Elastography. *Clinical Biomechanics*, 62, 113-120. <u>https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2019.01.010</u>
- [31] Karacabey, B.N., Bayramoğlu, Z., Coşkun, O., Sarı, Z.N.A., Özkan, M.U., Yıldız, E.P., et al. (2023) Shear Wave Elastography in Patients with Spinal Muscular Atrophy Types 2 and 3. Neuropediatrics, 54, 273-278. <u>https://doi.org/10.1055/a-2021-0403</u>
- [32] Creze, M., Soubeyrand, M., Nyangoh Timoh, K. and Gagey, O. (2018) Organization of the Fascia and Aponeurosis in the Lumbar Paraspinal Compartment. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 40, 1231-1242. <u>https://doi.org/10.1007/s00276-018-2087-0</u>
- [33] Blain, M., Bedretdinova, D., Bellin, M., Rocher, L., Gagey, O., Soubeyrand, M., et al. (2018) Influence of Thoracolumbar Fascia Stretching on Lumbar Back Muscle Stiffness: A Supersonic Shear Wave Elastography Approach. *Clinical Anatomy*, **32**, 73-80. <u>https://doi.org/10.1002/ca.23266</u>
- [34] Yancey, M., Rbil, N., Chatterjee, A., Lin, H., Wyles, H.L., Ko, L.M., et al. (2023) Ultrasound Shear Wave Elastography Quantitatively Assesses Tension Changes of Supraspinous/Interspinous Ligament Complex under Varied Loads. International Journal of Spine Surgery, 17, 502-510. <u>https://doi.org/10.14444/8479</u>
- [35] Burulday, V., Çelebi, U.O., Öğden, M., *et al.* (2022) Preoperative and Postoperative Ultrasound Elastography Findings of the Sciatic Nerve in Patients with Unilateral Lumbar Foraminal Disc Herniation: A Pre-Test and Post-Test Design. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, 26, 1923-1929.
- [36] Suo, M., Zhang, J., Sun, T., Wang, J., Liu, X., Huang, H., et al. (2023) The Association between Morphological Characteristics of Paraspinal Muscle and Spinal Disorders. Annals of Medicine, 55, Article ID: 2258922. https://doi.org/10.1080/07853890.2023.2258922
- [37] Zemzemi, C., Catheline, S. and Turquier, F. (2021) Shear Wave Elastography Biases in Abdominal Wall Layers Characterization. *Physics in Medicine & Biology*, **66**, Article ID: 205006. <u>https://doi.org/10.1088/1361-6560/ac29cd</u>
- [38] Bouchet, P., Gennisson, J., Podda, A., Alilet, M., Carrié, M. and Aubry, S. (2018) Artifacts and Technical Restrictions in 2D Shear Wave Elastography. Ultraschall in der Medizin-European Journal of Ultrasound, 41, 267-277. https://doi.org/10.1055/a-0805-1099
- [39] Althoff, A.D., Vance, K., Plain, M., Reeves, R.A., Pierce, J., Gwathmey, F.W., et al. (2023) Evaluation of Achilles Tendon Stiffness as Measured by Shear Wave Elastography in Female College Athletes Compared with Nonathletes. Sports Health: A Multidisciplinary Approach, 16, 12-18. <u>https://doi.org/10.1177/19417381231153657</u>
- [40] He, H., Wu, X., Jiang, M., Xu, Z., Zhang, X., Pan, J., et al. (2023) Diagnostic Accuracy of Contrast-Enhanced Ultrasound Synchronized with Shear Wave Elastography in the Differential Diagnosis of Benign and Malignant Breast Lesions: A Diagnostic Test. Gland Surgery, 12, 54-66. <u>https://doi.org/10.21037/gs-22-684</u>
- [41] Bian, J., Li, J. and Liu, Y. (2023) Diagnostic Accuracy of Shear Wave Elastography for Endometrial Cancer: A Metaanalysis. *Medicine*, 102, e32700. <u>https://doi.org/10.1097/md.00000000032700</u>
- [42] Soundararajan, R., Dutta, U., Bhatia, A., Gupta, P., Nahar, U., Kaman, L., *et al.* (2023) Two-Dimensional Shear Wave Elastography: Utility in Differentiating Gallbladder Cancer from Chronic Cholecystitis. *Journal of Ultrasound in Medicine*, 42, 1577-1585. <u>https://doi.org/10.1002/jum.16178</u>

- [43] Caenen, A., Bézy, S., Pernot, M., Nightingale, K.R., Vos, H.J., Voigt, J., et al. (2024) Ultrasound Shear Wave Elastography in Cardiology. JACC: Cardiovascular Imaging, 17, 314-329. <u>https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2023.12.007</u>
- [44] Ličen, U. and Kozinc, Ž. (2022) Using Shear-Wave Elastography to Assess Exercise-Induced Muscle Damage: A Review. Sensors, 22, Article No. 7574. <u>https://doi.org/10.3390/s22197574</u>
- [45] Nakamura, M. and Akagi, R. (2022) Ultrasonic Shear-Wave Elastography: A Novel Method for Assessing Musculoskeletal Soft Tissue and Nerves. *Clinical Neurophysiology*, **140**, 163-164. <u>https://doi.org/10.1016/j.clinph.2022.05.006</u>
- [46] Horvat, U. and Kozinc, Ž. (2024) The Use of Shear-Wave Ultrasound Elastography in the Diagnosis and Monitoring of Musculoskeletal Injuries. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 52, 15-26. <u>https://doi.org/10.1615/critrevbiomedeng.2023049807</u>
- [47] Zimmer, M., Kleiser, B., Marquetand, J. and Ateş, F. (2023) Shear Wave Elastography Characterizes Passive and Active Mechanical Properties of Biceps Brachii Muscle in Vivo. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 137, Article ID: 105543. <u>https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105543</u>
- [48] Plut, D. (2022) Editorial Comment: Expanding the Clinical Applications of 2D Shear-Wave Elastography. American Journal of Roentgenology, 218, 543. <u>https://doi.org/10.2214/ajr.21.26932</u>