

# 剪切波弹性成像在肌骨系统及神经病变的研究现状

吉成霞<sup>1,2</sup>, 马淑梅<sup>2</sup>

<sup>1</sup>青海大学研究生学院, 青海 西宁

<sup>2</sup>青海大学附属医院超声医学科, 青海 西宁

收稿日期: 2023年8月19日; 录用日期: 2023年9月14日; 发布日期: 2023年9月19日

## 摘要

剪切波弹性成像(shear wave elastography, SWE)是一种可以实时定量测定生物组织的杨氏模量值, 即组织弹性值, 从而获得与组织退化、损伤和愈合相关的力学性质的定量信息的超声新技术。本文就剪切波弹性成像的基本原理以及其在肌肉、肌腱、周围神经等组织病变生物力学特征定时定量评估中的研究现状进行述评。

## 关键词

剪切波弹性成像, 肌骨, 周围神经病变, 综述

# Current Status of Shear Wave Elastic Imaging in Musculoskeletal System and Neuropathy

Chengxia Ji<sup>1,2</sup>, Shumei Ma<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Qinghai University, Xining Qinghai

<sup>2</sup>Department of Ultrasound Medicine, Affiliated Hospital of Qinghai University, Xining Qinghai

Received: Aug. 19<sup>th</sup>, 2023; accepted: Sep. 14<sup>th</sup>, 2023; published: Sep. 19<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Shear wave elastography (SWE) is a new ultrasonic technology that enables real-time quantitative determination of Young's modulus values, or tissue elasticity values, in biological tissues to obtain quantitative information about mechanical properties related to tissue degradation, damage, and

healing. In this paper, the basic principle of shear wave elastic imaging and its research status in the quantitative evaluation of biomechanical characteristics of muscle, tendon, peripheral nerve and other tissue lesions were reviewed.

## Keywords

Shear Wave Elastic Imaging, Musculoskeletal, Peripheral Neuropathy, Overview

Copyright © 2023 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

剪切波弹性成像技术(shear wave elastography, SWE)是近些年来, 超声技术不断发展, 衍生出的一种新技术, 它将生物学、工程学和医学三者原理相结合, 通过应用力学原理和方法对生物体组织中的力学问题进行实时监测和定量评估[1], 当生物组织发生病理学改变时, 机体的组织硬度随之会发生一系列改变, 但是在病变早期, 传统的灰度和多普勒超声技术很难辨别细微的回声变化。因此, 剪切波弹性成像技术通过检测病变组织早期的硬度变化, 帮助临床诊断疾病和评估治疗效果。它一定程度上弥补常规超声的不足。由于剪切波弹性成像(SWE)具有客观、无创、操作简便、实时动态观察的优点, 在日常超声诊断工作中, 被广泛应用, 同时能够实时动态且客观地反映组织内生物力学信息, 现阶段, SWE 在甲状腺、乳腺、肝脏等实质脏器的应用已经相对成熟[2]。近几年, 随着肌骨超声的不断发展, 许多研究发现, 肌腱的弹性与其功能状态、症状及灰阶超声表现等也具有明显的相关性[3], 比如, 周吉平等[4]研究发现, 足底筋膜炎患者的 VAS 疼痛评分与此患者的足底筋膜的杨氏模量值具有较强相关性(中部:  $r = 0.640$ ,  $P = 0.001$ , 远端:  $r = 0.661$ ,  $P = 0.002$ ), 因此, 近些年来, 剪切波弹性成像在肌骨方面的研究越来越多。本文就剪切波弹性成像在肌肉、肌腱、周围神经病变的生物力学特征定量的应用方面进展进行述评。

## 2. 剪切波弹性成像的原理

剪切波弹性成像技术(SWE)采用“马赫锥”原理, 通过发射声辐射脉冲对组织施加压力产生剪切波, 剪切波在组织传播速度值可以经彩色编码转换为实时彩色图像, 从而反映组织的硬度。硬度的大小可以用颜色的不同来体现, 红色图像表示组织硬度高, 绿色图像表示组织硬度低[4]。SWE 产生剪切波不受外力影响, 在一定程度上, 它具有客观、有效、准确且重复性好的优点, 因而越来越多的国内外学者应用 SWE 评估肌腱及韧带正常及损伤后的力学特性[5]。在软组织中, 横波传播速度也称为剪切波速度(单位: m/s), 是弹性模量值之一。杨氏模量  $= 3\rho c^2$ , 其中  $\rho$  表示组织密度,  $c$  表示剪切波速度, 但是肌纤维由于走行交错导致肌腱和韧带的弹性分布是不均匀的, 具备各向异性组织的杨氏模量则不适用于这个公式[6]。SWE 结合常规超声可提高超声检查对肌肉骨骼系统早期病变的诊断准确率, 对疾病的鉴别诊断和临床疗效评估也起到积极作用。

## 3. SWE 在正常人群肌肉、肌腱生物力学特征评估中的应用

近年来, SWE 因其具有量化与客观的评估的优势, 在肌肉硬度评估方面的应用日益普遍。SWE 技术可获得不同状态下某一块肌肉的硬度值, 可用于研究正常人群影响肌肉硬度的因素, 或者研究在不同

的病理因素下肌肉弹性值的差异, 进而评估肌肉状态[7]。刘晓[8]等学者通过研究健康个体被动肌肉僵硬与年龄相关因素, 并测量不同年龄组的剪切模量值, 招募了 86 名健康志愿者, 分别分为儿童组、中年组和老年组, 研究结论发现, 首先, 年龄对被动肌肉僵硬的影响只有在达到一定程度的拉伸后才会变得明显, 其次在评估肌肉疾病的被动肌肉僵硬时, 应考虑年龄。Wang 等[9]研究发现, 右臂的三角肌(Deltoid muscle, MD)弹性均高于左臂( $P < 0.0001$ )。这可能是由于右臂更常用。此外, 在  $R90^\circ$  时三角肌弹性高于  $R0^\circ$  ( $P < 0.0001$ ), 在  $L90^\circ$  时高于  $L0^\circ$  ( $P < 0.0001$ )。这可能是由于手臂  $90^\circ$  活动性外展期间三角肌的强烈收缩。Olchoway [10]使用 SWE 确定健康成年个体中咬肌僵硬的参考值, 同时, 此研究表明咬肌硬度值随年龄增长而增大, 相关系数约为 0.35,  $P < 0.0001$ 。左右咬肌具有相似的硬度。Ham 等[11]学者用 SWE 技术研究了比较 37 名年轻女性早期卵泡期(月经)和排卵期之间休息和收缩期间的肌肉僵硬, 肌肉因素随着雌二醇的波动而改变; 肌肉在排卵期间, 其杨氏模量值没有明显升高, 当肌肉处于收缩状态时, 雌二醇的水平达到峰值, 由此, 可见性激素(尤其是雌激素)的水平影响肌肉, 肌腱和韧带等软组织的机械性能。上述研究表明, SWE 是一种具有可靠性、高度可重复性的测量肌肉硬度的新技术, 可用于肌骨超声方面的补充诊断。此外, 在正常机体组织内肌腱是非常坚硬的, 但是受到外界的伤害或者慢性刺激时, 其弹性值会发生不同程度的改变。Hsiao [12]等人研究检测了三个不同年龄组的健康髌腱的杨氏模量值, 结果表明随着年龄的增长, 剪切波的速度有明显降低。该研究同时表明, 在传统的超声技术描述可见的异常之前, 剪切波弹性成像在检测老化肌腱方面有潜在的诊断价值。

#### 4. SWE 评价肌肉、肌腱的损伤、退行性病变及痉挛

SWE 提供与传统超声相辅相成的诊断信息, 它对常规肌骨超声诊断疾病有补充作用。王迪等人[13]研究发现剪切波弹性成像技术评价肩周炎的诊断效能优于传统二维超声( $AUC_{弹性} = 0.939 > AUC_{二维} = 0.727$ )。Kronlage [14]等人通过 SWE 定量测量肌强直症延迟肌肉松弛的持续时间。他们在 6 例肌强直肌疾病患者和 6 例健康志愿者中, 强直肌疾病的杨氏模量值显著高于健康志愿者。此研究提示剪切波弹性成像技术用于非侵入性地估计肌肉弹性, 并间接估计肌肉力量。Kolb 等人[15]的研究结果表明, 横向定向 SWE 可以通过显示异质性模式和增加发炎肌肉的绝对 SWV 值来作为诊断肌炎的成像生物标志物。此外, Di Matteo 等[16]的对系统性红斑狼疮患者股四头肌超声特诊研究发现, SLE 患者和健康受试者之间股四头肌厚度没有差异, 但是超声对肌肉回声性和僵硬的评估有助于早期发现 SLE 患者的肌肉受累, 说明 SWE 可用于定量评估系统性红斑狼疮患者肌肉生物力学特征, 这为系统性红斑狼疮的诊断及疗效评价提供了新的依据。跟腱是人体内最强壮和最厚的肌腱, 具有浅表位置, 与周围组织具有良好的鉴别性, 特别适合于 USE 评估[17]。Otter 等人[18]首次证明, 与年龄/性别匹配的非痛风参与者相比, 痛风患者的跟腱表现出显著较低的僵硬。同时在此前研究[19]中发现, 正常人的跟腱中 SWV 较痛风患者跟腱中的 SWV 值高。因此, 痛风相关的炎症可能会改变组织弹性。临床上, 可利用横波弹性成像(SWE)的超声成像提供了一种量化肌腱硬度变化的非侵入性方法。Leong 等[20]用超声波弹性成像对 43 名男子排球运动员的上斜方肌进行测量, 结果显示被动运动中仅在肩外展  $0.001^\circ$  时, 肩袖肌腱病患者的弹性值高于健康运动员, 而任何主动运动中, 肩袖肌腱病变运动员的弹性值均高于健康运动员。通过上述学者的研究, SWE 技术可检测肌肉损伤程度并且为病变治疗及预后提供重要参考依据。Itoigawa 等人[21]通过研究冈上肌撕裂患者关节镜下肩袖修复术后的评估结果显示, 肩袖撕裂后造成的肌肉回缩, 很大程度上增加了关节镜下肩袖修复的难度, 而相比于 MRI, SWE 可更好地评估冈上肌肌腱的弹性值, 并表明其中冈上肌后深部与杨氏模量的相关性最高, 表明该技术可用于术前及术后评估。Lin [22]等人的一项排球运动员研究中, SWE 评估的上斜方肌硬度增加与肩袖肌腱病有关。这些作者认为, 上斜方肌剪切模量增加的运动员发生肩袖肌腱病的风险可能更高, 因此, 应用于上斜方肌的 USE 可用于预防和康复目的。另一项研究

发现[23], 三角肌软化与常规 US 评估的肌腱病严重程度相关。此外, 王俊广等人[24]研究发现剪切波弹性成像技术可以评估糖尿病冻结肩患者肩关节韧带和关节囊的弹性, 有助于糖尿病冻结肩的诊断

## 5. 跟腱病变及冈上肌肌腱

跟腱病是使用超声弹性成像(USE)研究最多的肌腱损伤, 包括跟腱的急性断裂和慢性损伤的诊断及病情评估, 以及断裂术后修复期的预后随诊。与传统超声相比, USE 可能会提高肌腱病的敏感性和诊断准确性, 并且可以在常规超声成像中可见之前检测到病理变化。占小梅等人[25]研究健康成年人的跟腱厚度随着年龄增长而增加, 跟腱近段的硬度随着年龄的增长而降低, 并可以通过 SWE 进行评价。Yamamoto 等人[26]对兔子跟腱横断肌腱的实验室研究发现愈合部位, SWV 降低, 肌腱随着时间的推移明显变硬。家族性高胆固醇血症(FH)是一种遗传性代谢紊乱, 跟腱增厚是其特征之一[27], 此外研究表明, 成人 FH 患者的跟腱比非 FH 患者的跟腱更柔软, 并且使用超声评估软腱提高了 FH 诊断的准确性[28]。同时, 肌骨超声中, 肩关节也是研究较成熟的关节, 肩关节也是易受损伤和病变的大关节, 比如, 粘连性关节炎, 肩袖损伤等。其中, 以冈上肌损伤最多见。Deng 等人[29]研究冈上肌发现, 肌腱病、部分撕裂组和全层撕裂组冈上肌腱 SWV, 均低于对侧正常冈上肌腱(均  $< 0.05$ )。此外, 研究还发现 SWV 的临界阈值为 4.83 m/s, 用于识别部分撕裂引起的肌腱病性撕裂, 此研究还发现用于识别部分冈上肌撕裂和全层撕裂的临界阈值为 4.08 m/s。此外, Hatta [30]等人验证得出皮下组织对冈上肌肌腱的杨氏模量值无影响。王占星等人[31]通过 SWV、弹性模量值及联合检测评估冈上肌肌腱炎患者预后的曲线下面积分别为 0.851、0.776、0.951, 联合检查价值最高。因而, 可得出结论超声弹性成像在诊断冈上肌肌腱炎中价值较高, 能够提高诊断灵敏度、特异度, 且在患者预后评估中亦具有良好价值, 便于指导临床早期治疗。

## 6. SWE 对临床治疗的疗效效果评价

剪切波弹性成像技术不仅在疾病的诊断中发挥了极大的作用, 为临床疾病的发现提供了依据, 同时, 它在疾病的发展与转归中有检测的积极影响。Gatz [32]等人通过剪切波弹性成像研究比较了偏心运动(EE)与偏心运动+等距运动(ISO)在跟腱病(AT)中的结果, 显示 EE 和 EE + ISO 可改善组织弹性特性, 但在 3 个月的短期随访期间, 与单独使用 EE 组相比, EE+ISO 两组结合没有额外的治疗效果。Itoigawa [33]等人怀疑关节镜下肩袖修复术(ARCR)后经常发生再撕裂, 与肩袖硬度的变化密切相关。因此, 他们通过剪切波弹性成像随访术前及术后 6 个月肩袖的硬度变化, 发现手术后 1 个月, 复撕裂组肌肉的 SWE 值大于愈合组( $P < 0.05$ )。于是, 便预测 ARCR 后 1 个月 SWE 值升高可能预示着术后肩袖撕裂的复发。为临床术后的提供干预措施提供了一定的依据。

## 7. SWE 在外周神经系统中的应用

### 7.1. 腕管综合征

腕管综合征(carpal tunnel syndrome, CTS)是上肢最常见的压迫性神经病变, 由腕部腕管中正中神经卡压引起。近些年以来, 许多学者也通过剪切波弹性成像对 CTS 引起正中神经的硬度变化进行了研究。Skantarci 等人[34]在研究中发现, CTS 组腕管入口的正中神经僵硬度明显高于对照组(66.7 kPa vs. 32.0 kPa), SWE 的临界值为 40.4 kPa, 腕管综合征诊断准确率为 91.7%。这与 Orman, Zhang [35]研究的结果一致。CT 中腕管压力升高被证明会影响正中神经内的血液循环, 并且已知神经的长期水肿会引发成纤维细胞侵袭, 导致神经内瘢痕组织积聚, 并增加其硬度[36]。沈素红等人[37]研究发现 CTS 组患侧神经 E 明显高于健侧, 表明 E 可以作为诊断 CTS 的一个可靠指标, 但中度组和重度组之间 E 没有差异, 分析原因可能是神经纤维化达到一定程度后 E 的变化幅度减小所致, 也可能和本研究的样本量较小有关。WU 等



人[38]研究表明腕管综合征患者腕管入口和腕管远端正中神经横截面积(CSA)和硬度显著高于健康人群,同时,此研究还发现腕管综合征患者的 CSA 和神经僵硬与电生理严重程度呈正相关。未来的研究应该验证这些实验数据是否以及如何转化为现实生活中的临床实践。

## 7.2. 糖尿病周围神经病变

糖尿病可影响周围神经的微结构,从而引起糖尿病周围神经损伤,是糖尿病患者的常见并发症之一,迪基奇[39]等人将实验对象分为三组,即 2 型糖尿病并发糖尿病周围神经病变、无神经病变的糖尿病患者和非糖尿病对照组,然后使用 SWE 来确定三组患者的胫神经硬度。确诊糖尿病神经病变患者的神经硬度明显高于非神经病变糖尿病患者和健康对照组。这与应变弹性成像(SE)研究得出结果一致。Wang [40]等人研究发现,当将 SWE 与多伦多临床评分系统(TCSS)联合用于诊断糖尿病周围神经病变(DPN)时,最有效的参数是 EMax,而且灵敏度可达为 100.00%。宋扬等人[41]探究 DPN 组股神经、隐神经的 C mean 均大于非 DPN 组及对照组;非 DPN 组股神经、隐神经 Cmean 均大于对照组。该结果表明,随着糖尿病周围神经的受累,神经硬度逐渐增加。然而目前,SWE 在周围神经病变中的应用缺乏分期诊断标准。因此,需要进一步的研究来确定 SWE 分期诊断 DPN 的标准。进而,为临床的早诊断、早分期、早治疗提供有效而客观的依据。

## 8. 总结

实时剪切波弹性成像技术是对传统超声的补充诊断方法,与传统超声检查技术是相辅相成的,可在普通二维超声和彩色多普勒超声的基础上,再现肌肉、肌腱、周围神经组织的弹性变化情况。便于早期发现微小病变,对预后评估和病情监测起到重要的临床作用,为临床的诊疗工作提供有效依据和参考,同时也是诊断各种创伤及评估肌肉、肌腱及神经状况时作为传统超声的补充。此外,SWE 对康复理疗疗效的评价、传统医学的量化研究也有潜在和深远的意义,是肌骨超声未来一种很有前景的诊断新技术。

## 参考文献

- [1] 刘博姬,徐辉雄. 剪切波弹性成像在肌肉、肌腱、周围神经病变生物力学定量评估中的应用进展[J]. 肿瘤影像学, 2022, 31(1): 11-15.
- [2] Szczepanek-Parulska, E., Woliński, K., Stangierski, A., et al. (2013) Comparison of Diagnostic Value of Conventional Ultrasonography and Shear Wave Elastography in the Prediction of Thyroid Lesions Malignancy. *PLOS ONE*, **8**, e81532. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081532>
- [3] Klauser, A.S., Miyamoto, H., Tamegger, M., et al. (2013) Achilles Tendon Assessed with Sonoelastography: Histologic Agreement. *Radiology*, **267**, 837-842. <https://doi.org/10.1148/radiol.13121936>
- [4] 周吉平. 小腿三头肌-跟腱-足底筋膜的生物力学特性的定量研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州中医药大学, 2020.
- [5] Winn, N., Baldwin, J., Cassar-Pullicino, V., et al. (2020) Characterization of Soft Tissue Tumours with Ultrasound, Shear Wave Elastography and MRI. *Skeletal Radiology*, **49**, 869-881. <https://doi.org/10.1007/s00256-019-03363-1>
- [6] 林晓君,李振洲,王慧芳. 剪切波弹性成像在肌肉骨骼系统检测中的应用进展[J]. 临床超声医学杂志, 2018, 20(12): 835-837.
- [7] 尚怡然,陈胜江. 剪切波弹性成像技术在肌肉评价中的应用现状[J]. 实用临床医学, 2020, 21(6): 100-103.
- [8] Liu, X., Yu, H.K., Sheng, S.Y., et al. (2021) Quantitative Evaluation of Passive Muscle Stiffness by Shear Wave Elastography in Healthy Individuals of Different Ages. *European Radiology*, **31**, 3187-3194. <https://doi.org/10.1007/s00330-020-07367-7>
- [9] Wang, L., Guo, X., Tan, L. and Chen, Q. (2021) Quantitative Assessment of Normal Middle Deltoid Muscle Elasticity at Various Arm Abduction Using Ultrasound Shear Wave Elastography. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 12479. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92074-6>
- [10] Olchow, A., Więckiewicz, M., Malysa, A. and Olchow, C. (2021) Determination of Reference Values of the Masse-

- ter Muscle Stiffness in Healthy Adults Using Shear Wave Elastography. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **18**, Article 9371. <https://doi.org/10.3390/ijerph18179371>
- [11] Ham, S., Kim, S., Choi, H., Lee, Y.J. and Lee, H. (2020) Greater Muscle Stiffness during Contraction at Menstruation as Measured by Shear-Wave Elastography. *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*, **250**, 207-213. <https://doi.org/10.1620/tjem.250.207>
- [12] Hsiao, M.Y., Chen, Y.C., Lin, C.Y., Chen, W.S. and Wang, T.G. (2015) Reduced Patellar Tendon Elasticity with Aging: *In vivo* Assessment by Shear Wave Elastography. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **41**, 2899-2905. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2015.07.008>
- [13] 王迪. 剪切波弹性成像技术对肩周炎相关结构机械性能的定量评估[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 吉林大学, 2023.
- [14] Kronlage, C., Grimm, A., Romano, A., *et al.* (2021) Muscle Ultrasound Shear Wave Elastography as a Non-Invasive Biomarker in Myotonia. *Diagnostics*, **11**, Article 163. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11020163>
- [15] Kolb, M., Ekert, K., Schneider, L., *et al.* (2021) The Utility of Shear-Wave Elastography in the Evaluation of Myositis. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **47**, 2176-2185. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2021.04.010>
- [16] Di Matteo, A., Smerilli, G., Cipolletta, E., *et al.* (2022) Muscle Involvement in Systemic Lupus Erythematosus: Multimodal Ultrasound Assessment and Relationship with Physical Performance. *Rheumatology*, **61**, 4775-4785. <https://doi.org/10.1093/rheumatology/keac268>
- [17] Paluch, Ł., Nawrocka-Laskus, E., Wiecek, J., *et al.* (2016) Use of Ultrasound Elastography in the Assessment of the Musculoskeletal System. *Polish Journal of Radiology*, **81**, 240-246. <https://doi.org/10.12659/PJR.896099>
- [18] Otter, S., Payne, C., Jones, A.M., Webborn, N. and Watt, P. (2020) Differences in Achilles Tendon Stiffness in People with Gout: A Pilot Study. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **21**, Article No. 658. <https://doi.org/10.1186/s12891-020-03598-3>
- [19] Payne, C., Watt, P., Cercignani, M., *et al.* (2018) Reproducibility of Shear Wave Elastography Measures of the Achilles Tendon. *Skeletal Radiology*, **47**, 779-784. <https://doi.org/10.1007/s00256-017-2846-8>
- [20] Leong, H.T., Hug, F. and Fu, S.N. (2016) Increased Upper Trapezius Muscle Stiffness in Overhead Athletes with Rotator Cuff Tendinopathy. *PLOS ONE*, **11**, e0155187. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155187>
- [21] Itoigawa, Y., Maruyama, Y., Kawasaki, T., *et al.* (2018) Shear Wave Elastography Can Predict Passive Stiffness of Supraspinatus Musculotendinous Unit during Arthroscopic Rotator Cuff Repair for Presurgical Planning. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, **34**, 2276-2284. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2018.01.059>
- [22] Lin, Y.H., Chiou, H.J., Wang, H.K., *et al.* (2015) Management of Rotator Cuff Calcific Tendinosis Guided by Ultrasound Elastography. *Journal of the Chinese Medical Association*, **78**, 603-609. <https://doi.org/10.1016/j.jcma.2015.05.006>
- [23] Hou, S.W., Merkle, A.N., Babb, J.S., *et al.* (2017) Shear Wave Ultrasound Elastographic Evaluation of the Rotator Cuff Tendon. *Journal of Ultrasound in Medicine*, **36**, 95-106. <https://doi.org/10.7863/ultra.15.07041>
- [24] 王俊广. 高频超声联合剪切波弹性成像定量分析诊断糖尿病冻结肩的价值[D]: [硕士学位论文]. 济宁: 济宁医学院, 2023.
- [25] 占小梅, 崔晓颖, 陈秀, 等. 剪切波弹性成像评价健康成年人跟腱硬度的研究[J]. 中国现代医生, 2023, 61(20): 27-31.
- [26] Yamamoto, Y., Yamaguchi, S., Sasho, T., *et al.* (2017) Quantitative US Elastography Can Be Used to Quantify Mechanical and Histologic Tendon Healing in a Rabbit Model of Achilles Tendon Transection. *Radiology*, **283**, 408-417. <https://doi.org/10.1148/radiol.2016160695>
- [27] Defesche, J.C., Gidding, S.S., Harada-Shiba, M., *et al.* (2017) Familial Hypercholesterolaemia. *Nature Reviews Disease Primers*, **3**, Article No. 17093. <https://doi.org/10.1038/nrdp.2017.93>
- [28] Zhang, L., Yong, Q., Pu, T., *et al.* (2018) Grayscale Ultrasonic and Shear Wave Elastographic Characteristics of the Achilles' Tendon in Patients with Familial Hypercholesterolemia: A Pilot Study. *European Journal of Radiology*, **109**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2018.10.003>
- [29] Deng, H., Mi, Y., Lu, B. and Ping, X. (2021) Application of Virtual Touch Tissue Imaging Quantification in Diagnosis of Supraspinatus Tendon Injury. *Journal of X-Ray Science and Technology*, **29**, 881-890. <https://doi.org/10.3233/XST-210865>
- [30] Hatta, T., Giambini, H., Uehara, K., *et al.* (2015) Quantitative Assessment of Rotator Cuff Muscle Elasticity: Reliability and Feasibility of Shear Wave Elastography. *Journal of Biomechanics*, **48**, 3853-3858. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.09.038>
- [31] 王艺星, 王佳佳, 吴晓倩, 等. 超声弹性成像在冈上肌肌腱炎诊断中的临床价值[J]. 影像研究与医学应用, 2022, 6(24): 103-105.

- 
- [32] Gatz, M., Betsch, M., Dirrichs, T., *et al.* (2020) Eccentric and Isometric Exercises in Achilles Tendinopathy Evaluated by the VISA-A Score and Shear Wave Elastography. *Sports Health*, **12**, 373-381. <https://doi.org/10.1177/1941738119893996>
- [33] Itoigawa, Y., Wada, T., Kawasaki, T., *et al.* (2020) Supraspinatus Muscle and Tendon Stiffness Changes after Arthroscopic Rotator Cuff Repair: A Shear Wave Elastography Assessment. *Journal of Orthopaedic Research*, **38**, 219-227. <https://doi.org/10.1002/jor.24469>
- [34] Kantarci, F., Ustabasioglu, F.E., Delil, S., *et al.* (2014) Median Nerve Stiffness Measurement by Shear Wave Elastography: A Potential Sonographic Method in the Diagnosis of Carpal Tunnel Syndrome. *European Radiology*, **24**, 434-440. <https://doi.org/10.1007/s00330-013-3023-7>
- [35] Zhang, C., Li, M., Jiang, J., *et al.* (2017) Diagnostic Value of Virtual Touch Tissue Imaging Quantification for Evaluating Median Nerve Stiffness in Carpal Tunnel Syndrome. *Journal of Ultrasound in Medicine*, **36**, 1783-1791. <https://doi.org/10.1002/jum.14213>
- [36] Rempel, D., Dahlin, L. and Lundborg, G. (1999) Pathophysiology of Nerve Compression Syndromes: Response of Peripheral Nerves to Loading. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, **81**, 1600-1610. <https://doi.org/10.2106/00004623-199911000-00013>
- [37] 沈素红, 耿丰勤, 付卓, 等. 腕管综合征正中神经病变多模态超声与神经电生理的对比研究[J]. 中国超声医学杂志, 2023, 39(6): 688-692.
- [38] Wu, H., Zhao, H.J., Xue, W.L., *et al.* (2022) Ultrasound and Elastography Role in Pre- and Post-Operative Evaluation of Median Neuropathy in Patients with Carpal Tunnel Syndrome. *Frontiers in Neurology*, **13**, Article 1079737. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.1079737>
- [39] Dikici, A.S., Ustabasioglu, F.E., Delil, S., *et al.* (2017) Evaluation of the Tibial Nerve with Shear-Wave Elastography: A Potential Sonographic Method for the Diagnosis of Diabetic Peripheral Neuropathy. *Radiology*, **282**, 494-501. <https://doi.org/10.1148/radiol.2016160135>
- [40] Wang, F., Zheng, M., Hu, J., *et al.* (2021) Value of Shear Wave Elastography Combined with the Toronto Clinical Scoring System in Diagnosis of Diabetic Peripheral Neuropathy. *Medicine*, **100**, e27104. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000027104>
- [41] 宋扬, 张宇虹, 张颖, 等. 二维超声及二维剪切波弹性成像评价 2 型糖尿病患者下肢周围神经病变[J]. 中国临床医学影像杂志, 2023, 34(1): 56-60.