

·综述·

## 超声弹性成像用于冈上肌评估的研究进展\*

葛颖<sup>1</sup> 刘健<sup>2</sup> 苗鹏<sup>3</sup> 白硕<sup>4</sup> 葛瑞东<sup>5,6,7</sup>

超声成像提供了一种非侵入性的方法来观察肌肉骨骼系统的解剖结构和功能。优点包括便携性、低成本以及可实时评估,这些评估可以改变临床决策,并在许多非放射医学专业中得到了很好的应用,包括急诊医学、创伤学、风湿病学、康复医学和麻醉学等<sup>[1]</sup>。弹性成像技术(ultrasound elastography, UE)的发展始于1990年,旨在通过成像评估组织硬度,提供额外的临床相关信息<sup>[2]</sup>。UE过去常被用于评估各种组织,例如肝脏、胸腺、乳腺、前列腺等,近年来越来越多被用于肌肉骨骼领域<sup>[3]</sup>。UE通过测量硬度有助于评估组织或病变的机械力学特性<sup>[4]</sup>。

肩袖由肩胛下肌、冈上肌、冈下肌和小圆肌组成,是维持肩关节稳定的重要结构。退变及创伤均可造成肩袖损伤,其中以冈上肌腱最为多见<sup>[5]</sup>。冈上肌腱损伤的临床表现主要有肩部疼痛、活动受限及功能障碍等,严重影响患者的生存质量。随着关节镜技术不断的发展,冈上肌腱损伤的治疗水平发生了突破性进展,因而对术前明确损伤部位及损伤程度提出了更高的要求,制定完整、系统的诊断资料有利于患者预后和康复。影像学检查在诊断冈上肌腱损伤中发挥着越来越重要的作用,特别是近年来发展起来的多种影像成像技术用于综合分析、评估冈上肌腱损伤情况<sup>[6]</sup>。本文回顾了超声弹性成像评估冈上肌腱的研究进展。

计算机检索中国知网(CNKI)、万方数据库、维普数据库、PubMed数据库、Elsevier SD数据库、Springer 期刊全文数据库、PHMC 期刊全文数据库、Science 数据库从2016—2021发表的相关文章,通过参考文献采用追溯法以保证查全。检索关键词为:超声弹性成像、冈上肌。

纳入标准:所有探讨超声弹性成像的文章;所有探讨超声弹性成像应用于冈上肌腱诊断、评估的文章。排除标准:排除内容陈旧及实验设计不严谨的文献;排除重复多次发表的文章;排除相关性低的文献。

由2名独立研究人员按照设定的纳入和排除标准分别对检索出来的文献设立数据库,阅读题目、摘要和全文对文献进行筛选,如果筛选过程中遇到分歧,2人进行讨论,并参

考第三者意见获得最终决定。最终,搜索关键词总共检索156篇,根据阅读摘要排除文章及排除重复文章116篇,最终纳入到文献的文章有40篇。

### 1 超声弹性技术及常用分类

从物理学上看,UE的目的是定量的测量杨氏模量,它对应着组织硬度的物理参数。为了评估组织的应变或杨氏模量,所有弹性成像技术都依赖于相同的基础:对研究的组织施加外力或脉冲激励,然后跟踪由此产生的相应的改变,联合超声的数字成像技术,评估组织内部情况,直接或间接反映组织内部的物理特性<sup>[2]</sup>。临床应用指南提出<sup>[7]</sup>,根据致使组织形变的原理不同可分为3大类,应变成像技术和超声剪切波弹性成像技术这两种弹性成像技术,在肌骨超声,尤其是肩袖疾病应用中日益广泛<sup>[8]</sup>。

#### 1.1 应变弹性成像

应变弹性成像(strain elastography, SE)显示了诊断、预测(疼痛、治疗效果、能否恢复活动度)和监测肌腱愈合的潜力。SE是对组织进行反复手动压缩以获得轴向应变,利用传感器转化信号经超声彩色编码成像,更好观察软组织和硬组织之间变形的差异。由于SE中的应力不能直接测量,只能对组织的硬度进行定性的评估,也可以通过计算感兴趣区域和周围组织之间应变的比率即应变比(strain ratio, SR)来表示组织的物理特性,这是一个半定量的方法<sup>[9-11]</sup>,SR值越大代表组织硬度越小、弹性越大,同样应变成像弹性模量值(strain elastic modulus, SEM)越大也表示组织硬度越小、弹性越大。与传统超声和MRI方法不同,SE能够测量组织机械力学性能,这可能为标准化肩部检查提供了更有价值的补充诊断信息。研究表明,冈上肌SE检查的可靠性是可以接受的<sup>[12]</sup>。

#### 1.2 超声剪切波弹性成像

剪切波弹性成像(shear wave elastography, SWE)是最近发展起来的一种定量评估肌肉弹性的新技术。该方法测量聚焦超声产生的横向剪切波的速度(shear wave veloci-

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2022.09.022

\*基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助课题(校2020064)

1 北京中医药大学,北京,100029; 2 中日友好医院超声医学科; 3 威海市立医院康复医学科; 4 北京市朝阳区太阳宫社区卫生服务中心康复医学科; 5 中日友好医院康复医学科; 6 北京体育大学运动医学与康复学院; 7 通讯作者

第一作者简介:葛颖,女,本科; 收稿日期:2021-05-20

ty, SWV)或杨氏模量值,直接反映组织的硬度。SWV值越大表示组织硬度越大、弹性越小,同样剪切波成像模量值(shear wave modulus, SWM)越大表示组织硬度越大、弹性越小。SWE在各种实验环境下操作简单有一定优势,成本相对较低<sup>[13]</sup>。实验研究表明,SWE能够测量冈上肌肌肉组织硬度,并且可以在不关注脂肪变性的情况下检测肌肉组织的不同弹性区域<sup>[14]</sup>。

## 2 超声弹性技术用于评估正常冈上肌组织

UE评估正常冈上肌组织可以观察到冈上肌的发育特点、应力对冈上肌产生的作用。Kobayashi等<sup>[15]</sup>研究13—18岁青少年棒球运动员的投掷肩关节周围肌肉组织,结果表明投掷肩关节周围肌肉组织弹性随年龄增长而增加,13—16岁时肩关节周围肌肉组织的弹性呈阶梯状增加,17—18岁时达到峰值。18岁组投掷肩关节冈上肌的剪切波成像弹性模量值(shear elastic modulus, SEM,即该声耦合器应变比与肌肉应变比之比,SEM值越大,组织硬度越小、弹性越大)高于非投掷肩关节。该研究还表明,投掷肩关节冈上肌的低SEM是投掷时发生肩痛的危险因素。Dischler等<sup>[16]</sup>用超声成像测量女大学生游泳运动员,冈上肌腱厚度、评估肌腱病变并用SWE评估冈上肌的SWV,研究发现运动年限与肌腱厚度成正相关,与SWV成负相关,即说明长期竞技运动与冈上肌性能下降有关。

弹性超声评估冈上肌组织的影响因素包括性别以及不同体位、动作、测量区域等。张芹等<sup>[17]</sup>利用SWE观察了正常成人优势手Crass位和改良Crass位、非优势手Crass位和改良Crass位杨氏模量值,发现两两比较差异均无显著性意义;男、女性别间优势手的不同体位及非优势手改良Crass位杨氏模量值比较差异均有显著性意义而非优势手Crass位杨氏模量值差异无显著性意义。Nishishita等<sup>[18]</sup>利用SWE成像研究15例男性在9个不同体位下冈上肌的弹性,发现最大内旋水平外展时45°和90°伸展和最大伸展时的最大内旋的弹性模量均显著高于其他位置(即组织硬度大于其他位置),以此说明这三个位置是冈上肌拉伸效果最好的位置。Yuri等<sup>[19]</sup>在前人研究基础上利用实时超声弹性成像测量12例健康受试者不同区域(6个区域)冈上肌在静息与收缩时SR值,研究发现6个不同区域的SR值无显著性差异。

通过对正常人冈上肌组织的测量,超声弹性成像被证明是一种可靠的测量方法。Shimoyama等<sup>[20]</sup>的研究通过两名独立研究人员分别使用SE测量22例健康男性斜方肌及冈上肌组织硬度,均发现斜方肌SR明显大于冈上肌。

## 3 超声弹性技术用于评估病理冈上肌组织

### 3.1 粘连性肩关节囊炎

Yun等<sup>[21]</sup>采用SWE与SE比较肩周炎和对照组的速度、应变比与硬度,发现与正常肩相比,有肩症状参与者的SWV和硬度都更高,SR更低。Wada等<sup>[22]</sup>根据冻结肩病情进展程度将肩周炎患者分组:冻结肩进行期及冻结期。就冻结肩进行期而言,此研究发现与无症状患者相比,肩周炎患者冈上肌腱的SWE值增大,而冻结期则无显著性表现,但SWE值减小,该研究表明冻结肩的肩袖肌腱可能出现了可逆的硬度变化。

### 3.2 冈上肌腱病

Brage等<sup>[23]</sup>对经MRI证实的冈上肌腱病变患者和健康对照肩进行了冈上肌腱SE、MRI和常规超声检查。研究发现,患者组的原始SE数据变量和SR值都比对照组大,即患者冈上肌腱硬度小于正常对照组,并且发现肌腱厚度与SE值无关,原始SE数据变量与DASH评分(上肢功能评分)之间存在正相关的关系。Hackett等<sup>[23]</sup>利用SWE对冈上肌腱正常受试者和冈上肌腱病患者进行评估,研究发现正常冈上肌腱的SWV大于冈上肌腱病变患者,这也证明患者冈上肌腱硬度小于正常对照组。有一项研究使用SE的彩色成像来评估肌腱的弹性,Liu等<sup>[24]</sup>将绿色代表组织硬度低而红色代表组织硬度高。他们发现肌腱病变组的肌腱呈红色的比例比对照组要高。但在Vasishita等<sup>[4]</sup>的研究中,使用正常肌腱与病变肌腱的SR,他们的研究表明有无肌腱病变的肌腱弹性相似。我们很容易发现上述研究存在不一致的结果,这可能与选取样本等有一定的联系,所以可能还需要进一步的研究。

有一项研究观察了康复训练前后冈上肌弹性的变化。Brage等<sup>[25]</sup>让单侧冈上肌腱炎患者进行为期12周的康复训练,使用SE观察冈上肌,研究发现训练前后SE值无显著变化,但患者自我报告的结果有显著改善,进一步的研究应该探索SE检测在不同肌腱病阶段的亚组肌腱修复和长期训练后的变化的能力。

### 3.3 肩袖撕裂术前、术后评估

肩袖撕裂会对冈上肌组织特性造成影响。Giambi等<sup>[26]</sup>研究SWE测量冈上肌肌肉弹性模量,通过轴向拉伸肌腱来测量肌肉的延伸性和硬度,结果表明肩袖撕裂组SWE模量小于正常组(即肩袖撕裂组组织硬度小于正常组),同时发现SWE模量与冈上肌肌肉伸长呈负相关,与脂肪含量呈正相关。Yoo等<sup>[27]</sup>回顾性研究肩袖损伤患者,利用SWE成像发现撕裂症状超过1年的冈上肌腱明显比撕裂症状小于1年的冈上肌腱僵硬。Baumer等<sup>[28]</sup>评估冈上肌和肌腱在被动和主动活动条件下的SWE图像,研究表明冈上肌和肌腱的平均SWV与年龄呈正相关。与无症状受试者相比,肩袖撕裂患者在主动状态下肌肉和肌腱的平均SWV较低,但在被动状态下无差异。

通常医生会建议肩袖撕裂严重的患者进行修补手术,超

声弹性成像技术可以测量术前冈上肌组织的性能。Yuri<sup>[29]</sup>将32例患者在休息位和在肩胛平面外展60°等长收缩时,用实时超声弹性成像测量撕裂的冈上肌的肌肉硬度,计算两种体位下测量的SR值的差异,并根据改良的Goutallier分期评估脂肪变性。研究发现SR值的差异与改良的Goutallier分期显著相关,实时组织弹性成像可以在术前测量肌肉的收缩特性,因此可作为肌肉功能恢复的预测工具。有研究发现手术后冈上肌组织特性的变化。Hatta等<sup>[30]</sup>研究12例伴有肩袖撕裂的新鲜冷冻尸体肩,根据已建立的SWE方法<sup>[31]</sup>测量冈上肌4个解剖区域的被动硬度,每个标本在孟肱关节外展30°处接受修复手术,最终发现在中等-大型撕裂的肩关节中,肩袖修复后冈上肌硬度增加。Itoigawa等<sup>[32]</sup>研究了38例全层冈上肌撕裂需要关节镜下肩袖修复的患者术前MRI脂肪浸润的Goutallier期,以及冈上肌4个区域的SWE模量。为了在手术中测量冈上肌肌腱的硬度,将冈上肌腱轴向拉伸,并记录每次变形所受的力。研究结果表明冈上肌腱的硬度与PD区肌肉的SWE模量的相关性最高。

关节镜下肩袖修复术(arthroscopic rotator cuff repair, ARCR)后经常发生再撕裂,而肌腱的高硬度可能是原因之一。Itoigawa等<sup>[33]</sup>用SWE测量ARCR后冈上肌和肌腱的硬度变化,并比较了复发性撕裂患者和肩袖愈合患者的冈上肌硬度。将患者分为愈合的肩袖组和复发性撕裂组,评估各组间各时间点的SWE值差异。研究表明愈合组术后1个月冈上肌的SWE值低于术前、术后4、5、6个月,也低于再撕裂组(即愈合组硬度较小)。在ARCR术后1个月增加的SWE值可能预测术后复发的肩袖撕裂。

超声弹性成像观察肩袖撕裂后的冈上肌组织与观察区域、体位以及病变程度有关。Hatta等<sup>[31]</sup>将尸体肩关节(25例完好无损、20例肩袖撕裂)用于研究。首先使用SWE测量冈上肌4个解剖区域(anterior-superficial(AS), posterior-superficial(PS), anterior-deep(AD), and posterior-deep(PD) muscular regions)的被动硬度,对肌肉在30N和60N载荷下的延伸性之间的相关性进行了评估。研究发现SWE模量与肌肉延展性呈显著负相关。AD区冈上肌在30N和60N的SWE模量与延展性相关性最强。定量SWE评估与尸体冈上肌肌腱的延展性高度相关。Lin等<sup>[34]</sup>进行了一项肩部超声回顾性研究,包括88例患者,利用冈上肌SWV评估,肌腱和肌肉按肌腱病变/撕裂加重(1—4级)和脂肪浸润加重(0—3级)进行分级。试验证明了肌腱各亚组之间的肌肉SWV差异有显著性意义,其中3级肌腱(定义为部分撕裂并伴有中重度肌腱病变叠加)与其他肌腱亚组之间的肌肉SWV差异有显著性意义。

### 3.4 肩峰撞击征

有2项研究都发现肩峰撞击征患者的患侧冈上肌SR值

高于健侧(即患侧冈上肌组织硬度小)。Demirel等<sup>[35]</sup>的测量是放射科医生在患者肩处于中立位置时进行的,发现有撞击综合征一侧冈上肌的SR值高。Kocyigit等<sup>[36]</sup>将25例经磁共振成像诊断为肩峰撞击征的单侧肩痛患者纳入研究,23例(92%)患者肌腱的实时超声弹性成像(real-time sonoelastography, RTSE)表现为病理变化,患肩的SR值明显更高。同时发现SR值与肩关节功能评分之间无显著相关性。

## 4 超声弹性成像技术与MRI技术评估的联合应用

超声弹性成像与MRI之间也存在一些联系,MRI技术测量的冈上肌肌肉的体积脂肪分数也可预测延伸性和硬度。Krepkin等<sup>[37]</sup>的试验表明冈上肌腱T2值与SWV之间存在显著的负相关关系。Giambi等<sup>[26]</sup>研究表明使用SWE测量弹性模量结合定量MRI测量体积脂肪分数能够更好地测量冈上肌的伸展性。UE在评估冈上肌腱病与MRI评估也存在一定的联系。Brage<sup>[38]</sup>将利用SE对经MRI诊断为冈上肌腱病患者及无症状受试者进行评估,研究发现组内、组间原始数据变量、应变比评估冈上肌有较好的可靠性。Lee等<sup>[39]</sup>根据MRI表现对冈上肌腱进行分级(0级,正常;1级,轻度肌腱炎;2级,中度肌腱炎;3级,明显的肌腱病变),再利用实时超声弹性成像技术评估冈上肌硬度,研究认为在肩袖肌腱病变患者中,MRI肌腱病变分级与超声弹性成像评估的硬度相关。

## 5 超声弹性成像技术评估冈上肌的局限性

超声弹性成像存在一些局限性。首先包括常规超声的局限性,如阴影、混响、杂波伪影,或徒手超声系统的操作者依赖性。其次,弹性成像容易受到压力影响,利用外部刺激的方法(如应变弹性成像)进行的测量是最具挑战性的。这些模式下的测量是高度主观的,因为很难通过操作者的手动压缩和生理运动的固有变化来控制施加应力的大小。感兴趣区的选择也取决于操作者,可能会引入可变性<sup>[2]</sup>。此外,其结果的准确性和稳定性受到局部脂肪厚度的影响,对于深层的肌肉,常常难以获得其剪切波杨氏模量值<sup>[40]</sup>。

## 6 小结

弹性超声成像作为一种新技术,对于冈上肌形态、功能的评估有应用前景,UE可以作为肩周炎、冈上肌腱撕裂、冈上肌腱炎,以及肩峰撞击综合征等疾病的辅助诊断方法。当然,UE也存在一些局限性,除了常规超声的局限性,UE还受到压力、局部脂肪厚度及操作的影响。

## 参考文献

- [1] Tat J, Tat J, Theodoropoulos J. Clinical applications of ultrasonography in the shoulder for the orthopedic surgeon: a

- systematic review[J]. *Orthopaedics & Traumatology Surgery & Research*, 2020, 106(6): 1141—1151.
- [2] Gennissou JL, Deffieux T, Fink M, et al. Ultrasound elastography: principles and techniques[J]. *Diagnostic and Interventional Imaging*, 2013, 94(5): 487—495.
  - [3] Shimoyama D, Shitara H, Hamano N, et al. Reliability of shoulder muscle stiffness measurement using strain ultrasound elastography and an acoustic coupler[J]. *Journal of Medical Ultrasonics*, 2021, 48(1): 91—96.
  - [4] Vasishta A, Kelkar A, Joshi P, et al. The value of sonoelastography in the diagnosis of supraspinatus tendinopathy—a comparison study[J]. *Br J Radiol*, 2019, 92(1095): 20180951.
  - [5] Ahmad A, Bandpei MAM, Gilani SA, et al. Reliability of musculoskeletal ultrasound imaging to measure supraspinatus tendon thickness in healthy subjects[J]. *J Phys Ther Sci*, 2017, 29(8): 1394—1398.
  - [6] 王叶红,李冰,王卫明,等.多模态超声在冈上肌腱损伤关节镜术前诊断的应用价值[J]. *川北医学院学报*, 2020, 35(5): 794—797.
  - [7] Bamber J, Cosgrove D, Dietrich CF, et al. EFSUMB guidelines and recommendations on the clinical use of ultrasound elastography. Part 1: Basic principles and technology[J]. *Ultraschall Med*, 2013, 34(2): 169—184.
  - [8] 任晓霞,邓荷萍,陆博,等.超声弹性成像技术在肌腱疾病诊断中的应用[J]. *中华医学超声杂志(电子版)*, 2019, 16(3): 176—180.
  - [9] Dietrich CF, Barr RG, Farrokh A, et al. Strain elastography: how to do it?[J]. *Ultrasound Int Open*, 2017, 3(4): E137—149.
  - [10] Garra BS. Elastography: history, principles, and technique comparison[J]. *Abdom Imaging*, 2015, 40(4): 680—697.
  - [11] Prado-Costa R, Rebelo J, Monteiro-Barroso J, et al. Ultrasound elastography: compression elastography and shear-wave elastography in the assessment of tendon injury[J]. *Insights Imaging*, 2018, 9(5): 791—814.
  - [12] Brage K, Hjarbaek J, Boyle E, et al. Discriminative and convergent validity of strain elastography for detecting tendinopathy within the supraspinatus tendon: a cross-sectional study[J]. *JSES International*, 2020, 4(2): 310—317.
  - [13] Kim K, Hwang HJ, Kim SG, et al. Can shoulder muscle activity be evaluated with ultrasound shear wave elastography?[J]. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 2018, 476(6): 1276—1283.
  - [14] Gilbert F, Klein D, Weng AM, et al. Supraspinatus muscle elasticity measured with real time shear wave ultrasound elastography correlates with MRI spectroscopic measured amount of fatty degeneration[J]. *BMC Musculoskeletal Disord*, 2017, 18(1): 549.
  - [15] Kobayashi E, Matsumoto H, Hayashi I, et al. Age-related changes in muscle elasticity around the shoulder joint in young male baseball players: a prospective longitudinal study[J]. *J Orthop Sci*, 2020, 25(4): 582—587.
  - [16] Dischler JD, Baumer TG, Finkelstein E, et al. Association between years of competition and shoulder function in collegiate swimmers[J]. *Sports Health*, 2017, 10(2): 113—118.
  - [17] 张芹,徐大华,许华宁,等.实时剪切波弹性成像检测正常成人冈上肌肌腱杨氏模量值的初步研究[J]. *临床超声医学杂志*, 2016, 18(9): 608—610.
  - [18] Nishishita S, Hasegawa S, Nakamura M, et al. Effective stretching position for the supraspinatus muscle evaluated by shear wave elastography in vivo[J]. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 2018, 27(12): 2242—2248.
  - [19] Yuri T, Kuwahara Y, Fujii H, et al. Functions of the subregions of the supraspinatus muscle[J]. *Clinical Anatomy*, 2017, 30(3): 347—351.
  - [20] Shimoyama D, Shitara H, Hamano N, et al. Reliability of shoulder muscle stiffness measurement using strain ultrasound elastography and an acoustic coupler[J]. *J Med Ultrason* (2001), 2021, 48(1): 91—96.
  - [21] Yun SJ, Jin W, Cho NS, et al. Shear-wave and strain ultrasound elastography of the supraspinatus and infraspinatus tendons in patients with idiopathic adhesive capsulitis of the shoulder: a prospective case-control study[J]. *Korean Journal of Radiology*, 2019, 20(7): 1176—1185.
  - [22] Wada T, Itoigawa Y, Yoshida K, et al. Increased stiffness of rotator cuff tendons in frozen shoulder on shear wave elastography[J]. *Journal of Ultrasound in Medicine*, 2019, 39(1): 89—97.
  - [23] Hackett L, Aveledo R, Lam PH, et al. Reliability of shear wave elastography ultrasound to assess the supraspinatus tendon: an intra and inter-rater in vivo study[J]. *Shoulder Elbow*, 2020, 12(1): 18—23.
  - [24] Liu J, Zhan W, Zhou M, et al. Ultrasound elastography of the supraspinatus tendon guided by US-MRI virtual navigation[J]. *Technol Health Care*, 2015, 23 (Suppl 2): S263—268.
  - [25] Brage K, Juul-Kristensen B, Hjarbaek J, et al. Strain elastography and tendon response to an exercise program in patients with supraspinatus tendinopathy: an exploratory study[J]. *Orthop J Sports Med*, 2020, 8(12): 2325967120965185.
  - [26] Giambini H, Hatta T, Rezaei A, et al. Extensibility of

- the supraspinatus muscle can be predicted by combining shear wave elastography and magnetic resonance imaging-measured quantitative metrics of stiffness and volumetric fat infiltration: a cadaveric study[J]. *Clinical Biomechanics*, 2018, 57: 144—149.
- [27] Yoo SJ, Lee S, Song Y, et al. Elasticity of torn supraspinatus tendons measured by shear wave elastography: a potential surrogate marker of chronicity?[J]. *Ultrasonography*, 2020, 39(2): 144—151.
- [28] Baumer TG, Dischler J, Davis L, et al. Effects of age and pathology on shear wave speed of the human rotator cuff[J]. *J Orthop Res*, 2018, 36(1): 282—288.
- [29] Yuri T, Mura N, Yuki I, et al. Contractile property measurement of the torn supraspinatus muscle using real-time tissue elastography[J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2018, 27(9): 1700—1704.
- [30] Hatta T, Giambini H, Hooke AW, et al. Comparison of passive stiffness changes in the supraspinatus muscle after double-row and knotless transosseous-equivalent rotator cuff repair techniques: a cadaveric study[J]. *Arthroscopy*, 2016, 32(10): 1973—1981.
- [31] Hatta T, Giambini H, Itoigawa Y, et al. Quantifying extensibility of rotator cuff muscle with tendon rupture using shear wave elastography: a cadaveric study[J]. *Journal of Biomechanics*, 2017, 61: 131—136.
- [32] Itoigawa Y, Maruyama Y, Kawasaki T, et al. Shear wave elastography can predict passive stiffness of supraspinatus musculotendinous unit during arthroscopic rotator cuff repair for presurgical planning[J]. *Arthroscopy*, 2018, 34(8): 2276—2284.
- [33] Itoigawa Y, Wada T, Kawasaki T, et al. Supraspinatus muscle and tendon stiffness changes after arthroscopic rotator cuff repair: a shear wave elastography assessment[J]. *J Orthop Res*, 2020, 38(1): 219—227.
- [34] Lin DJ, Burke CJ, Abiri B, et al. Supraspinatus muscle shear wave elastography (SWE): detection of biomechanical differences with varying tendon quality prior to grayscale morphologic changes[J]. *Skeletal Radiol*, 2020, 49(5): 731—738.
- [35] Demirel A, Baykara M, Koca TT, et al. Ultrasound elastography-based assessment of the elasticity of the supraspinatus muscle in impingement syndrome: does elastography has any diagnostic value?[J]. *Clin Rheumatol*, 2018, 37(6): 1661—1665.
- [36] Kocyigit F, Kuyucu E, Kocyigit A, et al. Investigation of biomechanical characteristics of intact supraspinatus tendons in subacromial impingement syndrome: a cross-sectional study with real-time sonoelastography[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2016, 95(8): 588—596.
- [37] Kreplin K, Bruni M, Raya JG, et al. Quantitative assessment of the supraspinatus tendon on MRI using T2/T2\* mapping and shear-wave ultrasound elastography: a pilot study[J]. *Skeletal Radiol*, 2017, 46(2): 191—199.
- [38] Brage K, Hjarback J, Kjaer P, et al. Ultrasonic strain elastography for detecting abnormalities in the supraspinatus tendon: an intra- and inter-rater reliability study[J]. *BMJ Open*, 2019, 9(5): e027725.
- [39] Lee SU, Joo SY, Kim SK, et al. Real-time sonoelastography in the diagnosis of rotator cuff tendinopathy[J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2016, 25(5): 723—729.
- [40] 许惊飞,王劲松,付少娥.超声弹性成像技术评估肌肉硬度的研究进展[J]. *中国康复医学杂志*, 2021, 36(1): 114—118.