

## 肌肉痉挛评估中剪切波弹性成像的应用研究进展

郭莹莹<sup>1,2)</sup> 俞国俊<sup>2)△</sup>

1)佳木斯大学康复医学院,黑龙江 佳木斯 154007 2)深圳市儿童医院,广东 深圳 513800

**【摘要】** 痉挛是上运动神经元损伤后的常见症状。痉挛的早期干预和治疗有利于改善患者的预后和提高患者的生存质量,能减轻照顾者的压力和其家庭的经济压力。剪切波弹性成像具有实时、准确、无创、经济等优点,可以弥补临床上其他肌肉痉挛评估方法的不足,使患者受益。本文就剪切波弹性成像在肌肉痉挛方面的应用进行综述,并对其未来在痉挛性脑瘫康复中的应用进行展望。

**【关键词】** 痉挛;肌肉硬度;上运动神经元损伤;剪切波弹性成像;痉挛性脑瘫;康复

**【中图分类号】** R746 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1673-5110 (2021) 24-2194-09

### Progress in the application of shear wave elastography in the evaluation of muscle spasm

GUO Yingying<sup>1,2)</sup>, YUN Guojun<sup>1)</sup>

1)Rehabilitation Medical College, Jiamusi University, Jiamusi 154700, China; 2)Shenzhen Children's Hospital, Shenzhen 513800, China

**【Abstract】** Spasm is a common symptom after upper motor neuron injury. Early intervention and treatment of spasm can improve the prognosis and quality of life of patients, and reduce the pressure of caregivers and the economic pressure of patients' families. Shear wave elastography has the advantages of real-time, accurate, non-invasive and economical. This can make up for the deficiency of other clinical evaluation methods of muscle spasm and benefit clinical patients. In this paper, the application of shear wave elastography in muscle spasm is reviewed, and its future application in the rehabilitation of spastic cerebral palsy is prospected.

**【Key words】** Spasm; Muscle stiffness; Shear wave elastography; Upper motor neuron injury; Spastic cerebral palsy; Rehabilitation

痉挛是上运动神经元损伤后的常见症状,常出现在脑卒中、脑出血、脑瘫、多发性硬化症、脊髓损伤、创伤性脑损伤和其他中枢神经系统病变之后,影响患者的康复进程、生活质量和预后。早期干预和治疗可以减轻痉挛照顾者的压力和患者家庭的经济压力。目前临床上对于痉挛的评估主要是临床量表评估、生

物力学评估、电生理学评估以及影像学评估等。改良 Ashworth 痉挛评定量表(modified Ashworth scale, MAS)和改良 Tardieu 量表(modified Tardieu scale, MTS)是临床常用的评估方法,但临床量表对痉挛的评估具有主观性,其信度和效度有限。而生物力学评估、电生理学评估以及影像学评估可以通过客观测量表示肌肉硬度,但具有一定的局限性,如技术复杂、易受操作者影响及费用高等。因此,对痉挛的评估尚需要一个更客观、能定量、易操作、易进行的方法。剪切波弹性成像技术作为一个可以评估肌肉硬度的新兴的超声技术,

基金项目:广东省医学科学技术研究基金项目(编号:A2021035)

作者简介:郭莹莹,Email:913797912@qq.com

△通信作者:俞国俊,Email:103872187@qq.com

具有实时、准确、无创、经济、客观、定量等优点,可以弥补临床上其他肌肉痉挛临床评估方法的不足,满足临床上对痉挛评估的需要,使临床患者受益。因此,本文对剪切波弹性成像技术的原理、在肌肉痉挛评估中的可行性与优势、其成像的影响因素以及剪切波弹性成像在痉挛性脑瘫、脑卒中等肌肉痉挛评估中的应用进行综述,并对其未来在痉挛性脑瘫康复中的应用进行了展望,以期对临床评估肌肉痉挛和痉挛性脑瘫康复提供新思路。

## 1 痉挛

痉挛常会出现在脑卒中、脑出血、脑瘫<sup>[1]</sup>、多发性硬化症、脊髓损伤<sup>[2]</sup>、创伤性脑损伤<sup>[3]</sup>和其他中枢神经系统病变之后<sup>[4]</sup>,进而影响患者的康复进程,导致疼痛、肌肉萎缩和肌肉骨骼畸形<sup>[5]</sup>等继发性问题,最终影响患者的生活质量和预后。而对痉挛状态的评估和痉挛治疗的预后评估<sup>[6]</sup>,可以及早发现和更好地治疗痉挛。

目前临床上对于痉挛的评估主要是 MAS、MTS 等临床量表评估,动力测定法等生物力学评估,表面肌电图<sup>[7]</sup>等电生理学评估以及磁共振弹性成像(magnetic resonance elastography, MRE)<sup>[8-9]</sup>、超声弹性成像等影像学评估。MAS 和 MTS 是临床中常用的评估方法。与 MAS 相比,MTS 对痉挛的评估更具有优势,能区分挛缩和痉挛<sup>[10-11]</sup>。但 MAS、MTS 对痉挛的评估具有主观性,其信度和效度是有限的<sup>[12-14]</sup>。动力测定法是一种通过客观测量表示被动肌肉硬度的技术,但技术复杂,且受肌肉以外的软组织硬度的影响<sup>[15]</sup>。应变式弹性成像只能半定量分析组织硬度,还需手动施压,易受操作者影响<sup>[16-17]</sup>。磁共振弹性成像能客观地对组织硬度进行定量评估<sup>[18]</sup>,但其设备对场地的要求较高,还有辐射且费用较高<sup>[19-20]</sup>。因此,对痉挛的评估尚需要一个更客观、能定量、易操作、

易进行的方法。

## 2 剪切波弹性成像技术

### 2.1 技术原理

剪切波弹性成像(shear wave elastography, SWE)是一种新兴的超声技术,通过发射声辐射力脉冲激励组织振动并横向传播产生剪切波,随后测量计算组织的剪切波传播速度、杨氏模量及剪切模量,从而评估组织弹性这一生物力学特性<sup>[21-22]</sup>,组织越硬,传播的剪切波速度越快<sup>[23-24]</sup>。在生物力学中,杨氏模量是纵向应力与应变的比值,代表组织轴向变形的趋势,剪切模量是剪切应力与应变的比值<sup>[22]</sup>。弹性模量即杨氏模量(E),与剪切波速度(V)、组织密度( $\rho$ )和剪切模量(G)相关,在各向同性、弹性介质以及不可压缩组织的情况下,其之间的关系为  $E=3G=3\rho V^2$ <sup>[22,25]</sup>。对于各向异性、黏弹性和非均匀性的骨骼肌,剪切波速度是描述剪切波弹性成像技术测量的肌肉硬度更合适的变量<sup>[22,25-27]</sup>,常见的剪切波弹性成像技术有采用机械脉冲的瞬时弹性成像、采用声辐射力脉冲的点剪切波弹性成像及二维剪切波弹性成像<sup>[22]</sup>。

### 2.2 在肌肉痉挛评估中的可行性与优势

剪切波弹性成像技术用于肌肉的痉挛评估有一定的病理基础,有研究表明痉挛性脑瘫是一种以肌肉硬度增加为特征的疾病<sup>[15]</sup>,不仅是由于在主动运动中对抗肌肉的共同收缩而导致主动肌肉硬度的增加,而且也是被动肌肉硬度的增加<sup>[25]</sup>,前者主要由于牵拉反射的过度兴奋而引起肌肉的速度依赖性激活,相比之下,后者是由肌肉的黏弹性属性造成的<sup>[24]</sup>。所以,剪切波弹性成像技术的特点使其可以应用于痉挛性脑瘫的肌肉评估。超声弹性图、剪切波弹性成像测量还可以为肌肉痉挛状态的诊断和随访提供客观的评估,能监测瘫痪肌肉和痉挛肌肉的结构和黏弹性,可以实时量化组织硬度<sup>[27-30]</sup>。剪切波弹性成像技术还可以在

活体内测量单个肌肉的剪切波速度及其硬度改变<sup>[31]</sup>。研究表明超声弹性成像技术在评估活体肌肉硬度方面表现出中等的可靠性<sup>[29]</sup>。

剪切波弹性成像技术用于肌肉痉挛的评估是可行的,且具有一定的优势,能弥补其他痉挛评估方法的不足。剪切波弹性成像技术结合其他痉挛评估方法更有助于提高对肌肉痉挛评估的准确性。

**2.3 剪切波弹性成像的影响因素** 剪切波速度的均值会受超声凝胶、探头及探头施加的压力、肌肉方向,以及不同的机器设置,如频率、放置深度和感兴趣区的大小等因素的影响<sup>[22-32]</sup>。年龄和性别也可能对肌肉硬度有影响,进而影响剪切波弹性成像的结果。肌肉硬度和年龄之间的确切关系还不完全清楚。TANG等<sup>[33]</sup>研究显示,在1 kg负荷下,女性的最大剪切波速度值、最小剪切波速度值和平均剪切波速度值均显著高于男性[(4.49±0.60) m/s vs (3.98±0.68) m/s, (2.55±0.61) m/s vs (2.20±0.63) m/s, (3.51±0.60) m/s vs (3.06±0.58) m/s, *P*值分别为0.003、0.028、0.004], 35~60岁组的最大剪切波速度值和平均剪切波速度值显著高于20~34岁组[(4.11±0.62) m/s vs (4.47±0.70) m/s, (3.17±0.53) vs (3.52±0.69) m/s, *P*值分别为0.045、0.044]。研究表明,性别和年龄会影响肌肉的剪切波速度值。一项用剪切波弹性成像技术评价增龄对松弛和收缩状态下骨骼肌硬度影响的研究表明,肌肉的硬度随着年龄的增长而降低<sup>[34]</sup>。LIU等<sup>[35]</sup>研究了不同年龄段在不同踝关节角度下的剪切模量值,发现踝关节跖屈角度变化时不同年龄段的剪切模量差异无统计学意义(*P*>0.05)。随着踝关节背屈角度的增加,3组间剪切模量差异有统计学意义(*P*<0.01)。LEE等<sup>[36]</sup>用剪切波弹性成像技术测量受试者的股直肌、股二头肌、胫前肌和腓肠肌的硬度时发现性别差异有统计学意义(*P*<0.05)。KOZINC等<sup>[37]</sup>

不仅发现男性的剪切模量高于女性,而且平行探头位置高于垂直探头位置(相对于肌纤维方向),身体优势侧高于非优势侧。这些研究表明年龄和性别会影响弹性成像的结果,同时这种差异可能只有在肌肉达到一定的拉伸程度才明显,肌肉硬度和年龄之间的确切关系还不完全清楚。因此,在实践中应针对不同人群制定不同的参考值、对结果进行标准化。感兴趣区域的大小也会影响测量的重复性。LIU等<sup>[38]</sup>就感兴趣区域大小对剪切波弹性成像测量重复性的影响进行了研究,结果表明在使用不同感兴趣区域大小的情况下,重复性极好,较大的感兴趣区域具有更好的重复性。

### 3 剪切波弹性成像在肌肉痉挛评估中的应用

**3.1 在痉挛性脑瘫中的评估** 脑性瘫痪的常见表现是痉挛和肌肉无力,痉挛型脑瘫是其主要分型,占脑瘫人群的75%~80%<sup>[39]</sup>。对痉挛型脑性瘫痪的有效治疗和干预可以很大程度上提高脑瘫患儿的活动能力、康复预后和生活质量。

**3.1.1 肌肉痉挛的评估:** 痉挛性脑瘫的常见改变就有肌肉硬度的改变,肌肉僵硬是痉挛性脑瘫的一个重要治疗靶点<sup>[40]</sup>。BRANDENBURG等<sup>[25]</sup>应用剪切波弹性成像技术测量了脑瘫患儿和发育正常的儿童在足底屈曲不同角度时的腓肠肌的剪切模量,研究发现脑瘫儿童在不同足底屈曲角度的剪切模量值均显著高于对照组(*P*<0.05)。LEE等<sup>[31]</sup>研究也表明剪切波弹性成像技术可以非侵入性地研究脑瘫患者的肌肉特性。BILGICI等<sup>[41]</sup>测得的脑瘫组和健康组的腓肠肌的剪切波速度值分别为(3.17±0.81) m/s和(1.45±0.25) m/s,脑瘫组明显高于健康组(*P*<0.001),且痉挛型脑瘫儿童的剪切波速度值与MAS评分之间存在显著的相关性(*P*<0.001)。VOLA等<sup>[15]</sup>研究也获得同样的结果,脑瘫儿童的剪切波弹性成像值高于



健康组 ( $P < 0.001$ ), 且剪切波弹性成像值和 MAS 评分之间有显著的相关性, 相关系数为 0.74。剪切波弹性成像在脑瘫患儿和正常儿童之间的差异, 以及剪切波弹性成像的结果与 MAS 评分的相关性表明该技术可以用于脑瘫儿童的痉挛评估。

3.1.2 康复疗效的评估: 关于痉挛性脑瘫的治疗有传统的手法治疗, 还有肉毒素治疗和冲击波治疗等手段。临床实践中缺乏合适的客观测量工具评估肌肉痉挛干预和治疗方法的有效性, 这是监测脑性瘫痪治疗情况的问题之一。剪切波弹性成像技术可作为一种跟踪工具, 与临床结论相结合判断痉挛性脑瘫的严重程度以及康复治疗的短期和长期疗效<sup>[19]</sup>, 且该技术无创、客观、可行、简便, 可用于脑瘫患者治疗前、治疗中(如肉毒毒素注射疗法)痉挛状态的临床评估和治疗后的疗效评价<sup>[41]</sup>。

有研究应用剪切波弹性成像技术定量评估监测脑瘫儿童肉毒毒素治疗后肌肉硬度的改变以及持续时间<sup>[42]</sup>, 发现尽管踝关节活动范围或痉挛程度没有明显改变, 剪切波弹性成像技术仍能检测到注射肉毒毒素 A 前后脑瘫患儿腓肠肌被动肌肉硬度的差异。由于研究的局限性, 对被动肌肉硬度改变的临床意义尚不清楚。继续努力促进对异常被动肌肉僵硬形成机制的理解, 以及确定被动肌肉硬度改变的临床意义, 这对于针对性地预防或确定异常被动肌肉僵硬的发展至关重要。

BILGICI 等<sup>[43]</sup>对 A 型肉毒毒素注射后脑瘫患儿腓肠肌硬度变化的研究发现, 注射前、注射后的剪切波速度值分别为  $(3.20 \pm 0.14)$  m/s 和  $(2.45 \pm 0.21)$  m/s, 差异有统计学意义 ( $P < 0.001$ ), 剪切波速度值和 MAS 评分呈正相关。BERTAN 等<sup>[44]</sup>也对痉挛性脑瘫患儿注射肉毒毒素 A 后的腓肠肌弹性成像值进行了研究, 研究组是注射肉毒毒素 A 同时接受居家锻炼计划, 对照组仅接受家庭锻炼计划, 并在治疗前

和治疗后 1 个月和 3 个月分别进行了弹性成像的评估, 仅在治疗后 1 个月, 研究组腓肠肌弹性成像差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ ), 对照组腓肠肌弹性成像差异无统计学意义, 且这些弹性成像测量值与临床参数之间存在显著相关性 ( $P < 0.05$ ), 表明剪切波弹性成像技术结合临床参数的测量可能有助于区分将在临床上受益的患者, 特别是在治疗的早期阶段。DAĞ 等<sup>[45]</sup>对下肢在注射肉毒毒素 A 前后腓肠肌的硬度变化的研究也发现同样的结果, 脑瘫患儿治疗前后的剪切波弹性成像值差异有统计学意义 ( $P < 0.01$ ), 同时还与 MAS 评分呈正相关。这些研究表明应用剪切波弹性成像技术定量测量肌肉硬度, 可为评估脑瘫患儿的痉挛状态和治疗效果提供重要信息, 从而为临床医生对这些患儿的评估和随访提供更客观的数据。

CORRADO 等<sup>[24]</sup>通过使用剪切波弹性成像技术评估体外冲击波治疗脑瘫儿童的比目鱼肌挛缩的疗效, 证实了散焦体外冲击波在减少脑瘫儿童肌肉挛缩中的有效性, 说明剪切波弹性成像技术在脑瘫中的应用不仅可以观察痉挛状态和治疗效果, 还可以确定和选择有效的治疗手段。

### 3.2 在脑卒中后肌肉痉挛的评估

3.2.1 肌肉痉挛的评估: 研究表明剪切波弹性成像技术可以用于定量评估脑卒中痉挛肌肉的硬度变化<sup>[46]</sup>。GAO 等<sup>[47]</sup>研究也支持这一观点, 并发现痉挛肌肉的剪切波速度值和相应肢体的被动关节活动范围呈负相关。LENG 等<sup>[48]</sup>也发现脑卒中后患者的患侧痉挛肌肉的杨氏模量值明显高于非患侧, 其被动肌肉硬度可以用剪切波弹性成像技术进行量化。该研究还探究了剪切波弹性成像与 Neuroflexor 的生物力学模型的相关性, 结果表明两者的结果相关, 且两者联合应用可以更好地量化痉挛肌肉的硬度, 这有助于为卒中后患者设计合适的干

预措施。

**3.2.2 康复疗效的评估:**一项前瞻性研究<sup>[49]</sup>对 7 例接受肉毒毒素 A (botulinum neurotoxin A, BoNT-A) 注射治疗的卒中后上肢痉挛患者的弹性成像值进行研究,观察了注射前、注射后以及注射后平均 22 d 肱二头肌的轴向应变比、横向应变比和剪切波速度等超声弹性参数,还进行了治疗前后的 MAS 和 TS 评估,结果表明治疗前后的弹性成像值差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ ),超声弹性参数与 MAS、TS 具有相关性 (相关系数为  $0.55 \pm 0.95$ ,  $P < 0.05$ ),说明剪切波弹性成像可以用于脑卒中后上肢痉挛治疗的疗效评估。LIU 等<sup>[50]</sup>对 60 例脑卒中伴上肢痉挛患者的痉挛肱二头肌和正常肱二头肌进行剪切波弹性成像分析,比较了痉挛侧与正常侧肱二头肌在康复治疗前后的剪切波速度值和杨氏模量值,发现正常侧与痉挛侧肱二头肌在康复治疗前 ( $P < 0.01$ ) 与康复治疗后 ( $P < 0.05$ ) 的剪切波速度、杨氏模量差异均有统计学意义,并均与 MAS 评分相关。剪切波弹性成像技术可作为定量指标分析脑卒中后肌肉结构和功能的变化,并可作为康复治疗前后的评估手段。

**3.3 其他** 剪切波弹性成像技术还有在其他疾病导致的肌肉痉挛及肌肉硬度增加方面的应用。一项用剪切波弹性成像技术测量 Duchenne 肌营养不良症 (Duchenne muscular dystrophy, DMD) 患者下肢肌肉组织弹性的研究发现,与健康儿童相比,DMD 儿童股直肌、股外侧肌、大收肌和臀大肌的肌肉硬度偏高<sup>[51]</sup>,说明剪切波弹性成像技术可作为一种非侵入性工具监测疾病早期的肌肉硬度变化。另外,在以痉挛为常见症状的多发性硬化症中,超声弹性成像技术作为一种客观工具,在早期或晚期评估和量化多发性硬化症的肌肉痉挛方面,并在监测其抗痉挛治疗效果方面,都是比较有前景的。

## 4 不足与展望

**4.1 不足** 弹性成像在肝脏、乳腺和甲状腺成像等领域的临床应用存在共识指南,但对于剪切波弹性成像在肌肉骨骼方面还没形成这样的共识<sup>[52]</sup>。在颜色编码、换能器放置、研究过程中的关节姿势、施加压力和测量前的调节方面缺乏标准化,使剪切波弹性成像技术在肌肉骨骼领域中的进一步发展受到限制<sup>[53]</sup>。杨氏模量和剪切波速度均能反映组织的弹性信息,但其单位是不一样的,杨氏模量是 kPa,剪切波速度是 m/s,研究中要注意术语的使用<sup>[16]</sup>。此技术用于临床时需建立规范性数据,并就术语达成共识。另外,在剪切波弹性成像技术用于临床前,还需要进一步的技术进步和对图像采集的更好理解,以克服各种因素对结果的干扰<sup>[21]</sup>。

**4.2 展望** 首先,剪切波弹性成像的特点使其应用于肌肉骨骼方面非常有价值。未来需要通过进一步的、更多的研究对剪切波弹性成像的应用逐渐进行标准化,促进其在肌肉骨骼方面的发展。另外,剪切波弹性成像在痉挛性脑瘫方面的应用也是值得进一步研究的。研究表明,有必要为不同年龄段的儿童进行特定的肌张力评估,并测试这些评估在临床患儿中的有效性和可靠性<sup>[54]</sup>。未来可以探讨剪切波弹性成像技术测得的肌肉硬度和肌肉张力的关系,以期为痉挛性脑瘫的肌张力评估提供客观量化的指标。影响剪切波弹性成像的因素很多,在剪切波弹性成像技术应用于痉挛性脑瘫的肌肉评估时,需要更多的努力标准化方法和程序,以提高这一测量的可靠性<sup>[23]</sup>。

剪切波弹性成像与临床常用的痉挛评估量表(如 MAS)之间存在相关性,其弹性成像的特点可以弥补其他评估方法的不足,可以定量分析肌肉的硬度、判断痉挛状态,有助于研究者探究各种干预措施对痉挛治疗的效果以及各种痉挛治疗手段及其剂量的选择。剪切

波弹性成像技术在痉挛性脑瘫康复中的应用及其应用价值也是值得探究的。

## 5 参考文献

- [1] GRAHAM H K, ROSENBAUM P, PANETH N, et al. Cerebral palsy [J]. *Nat Rev Dis Primers*, 2016, 2: 15082–15107. DOI: 10.1038/nrdp. 2015. 82.
- [2] MARCANTONI M, FUCHS A, LÖW P, et al. Early delivery and prolonged treatment with nimodipine prevents the development of spasticity after spinal cord injury in mice [J]. *Sci Transl Med*, 2020, 12 (539) : eaay0167–eaay 0177. DOI: 10.1126/scitranslmed.aay0167.
- [3] SYNNOT A, CHAU M, PITT V, et al. Interventions for managing skeletal muscle spasticity following traumatic brain injury [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2017, 11 (11) : Cd008929–Cd009009. DOI: 10.1002/14651858. CD008929.pub2.
- [4] DIETZ V, SINKJAER T. Spasticity [J]. *Handb Clin Neurol*, 2012, 109: 197–211. DOI: 10.1016/ b978-0-444-52137-8.00012-7.
- [5] CHA Y, ARAMI A. Quantitative Modeling of Spasticity for Clinical Assessment, Treatment and Rehabilitation [J]. *Sensors*, 2020, 20 (18) : 5046–5067. DOI: 10.3390/s20185046.
- [6] DE VISSER M. Evidence for treatment of spasticity in motor neuron disease [J]. *Lancet Neurol*, 2019, 18 (2) : 130–131. DOI: 10.1016/ s1474-4422(18)30493-9.
- [7] HU B, ZHANG X, MU J, et al. Spasticity assessment based on the Hilbert-Huang transform marginal spectrum entropy and the root mean square of surface electromyography signals: a preliminary study [J]. *Biomed Eng Online*, 2018, 17 (1) : 27–46. DOI: 10.1186/ s12938-018-0460-1.
- [8] DEBERNARD L, ROBERT L, CHARLEUX F, et al. Analysis of thigh muscle stiffness from childhood to adulthood using magnetic resonance elastography (MRE) technique [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2011, 26 (8) : 836–840. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2011.04.004.
- [9] DEBERNARD L, ROBERT L, CHARLEUX F, et al. Characterization of muscle architecture in children and adults using magnetic resonance elastography and ultrasound techniques [J]. *J Biomech*, 2011, 44 (3) : 397–401. DOI: 10.1016/ j.jbiomech.2010.10.025.
- [10] BANKY M, WILLIAMS G. Tardieu Scale [J]. *J Physiother*, 2017, 63 (2) : 126. DOI: 10.1016/j. jphys. 2017. 01.002.
- [11] GLINSKY J. Tardieu Scale [J]. *J Physiother*, 2016, 62 (4) : 229–229. DOI: 10.1016/j.jphys. 2016.07.007.
- [12] YAM WKL L M. Interrater Reliability of Modified Ashworth Scale and Modified Tardieu Scale in Children With Spastic Cerebral Palsy [J]. *J Child Neurol*, 2006, 21 (12) : 1031–1035. DOI: 10.1177/7010.2006.00222.
- [13] MESEGUER-HENAREJOS A B, SÁNCHEZ-MECA J, LÓPEZ-PINA J A, et al. Inter- and intra-rater reliability of the Modified Ashworth Scale: a systematic review and meta-analysis [J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2018, 54 (4) : 576–590. DOI: 10.23736/s1973-9087.17.0479 6-7.
- [14] MUTLU A, LIVANELIOGLU A, GUNEL M K. Reliability of Ashworth and Modified Ashworth scales in children with spastic cerebral palsy [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2008, 9 (1) : 44–51. DOI: 10.1186/1471-2474-9-44.
- [15] VOLA E A, ALBANO M, DI LUISE C, et al. Use of ultrasound shear wave to measure muscle stiffness in children with cerebral palsy [J]. *J Ultrasound*, 2018, 21 (3) : 241–247. DOI: 10.1007/s40477-018-0313-6.
- [16] SNOJ Z, WU C H, TALJANOVIC M S, et al. Ultrasound Elastography in Musculoskeletal



- Radiology: Past, Present, and Future [J]. *Semin Musculoskelet Radiol*, 2020, 24 (2) : 156–166. DOI:10.1055/s-0039-3402746.
- [17] INAMI T, KAWAKAMI Y. Assessment of individual muscle hardness and stiffness using ultrasound elastography [J]. *J Phys Fit Sports*, 2016, 5 (4) : 313–317. DOI: 10.7600/jpfs.5.313.
- [18] SCHRANK F, WARMUTH C, GÖRNER S, et al. Real-time MR elastography for viscoelasticity quantification in skeletal muscle during dynamic exercises [J]. *Magn Reson Med*, 2020, 84 (1) : 103–114. DOI: 10.1002/mrm.28095.
- [19] LALLEMANT-DUDEK P, VERGARI C, DUBOIS G, et al. Ultrasound shearwave elastography to characterize muscles of healthy and cerebral palsy children [J]. *Sci Rep*, 2021, 11 (1) : 3577–3583. DOI: 10.1038/s41598-021-82005-w.
- [20] BRANDENBURG J E, EBY S F, SONG P, et al. Feasibility and reliability of quantifying passive muscle stiffness in young children by using shear wave ultrasound elastography [J]. *J Ultrasound Med*, 2015, 34 (4) : 663–670. DOI: 10.7863/ultra.34.4.663.
- [21] DAVIS L C, BAUMER T G, BEY M J, et al. Clinical utilization of shear wave elastography in the musculoskeletal system [J]. *Ultrasonography*, 2019, 38 (1) : 2–12. DOI: 10.14366/usg.18039.
- [22] BASTIJNS S, DE COCK A M, VANDEWOUDE M, et al. Usability and Pitfalls of Shear-Wave Elastography for Evaluation of Muscle Quality and Its Potential in Assessing Sarcopenia: A Review [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2020, 46 (11) : 2891–2907. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2020.06.023.
- [23] BOULARD C, MATHEVON L, ARNAUDEAU L F, et al. Reliability of Shear Wave Elastography and Ultrasound Measurement in Children with Unilateral Spastic Cerebral Palsy [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2021, 47 (5) : 1204–1211. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2021.01.013.
- [24] CORRADO B, ALBANO M, CAPRIO M G, et al. Usefulness of point shear wave elastography to assess the effects of extracorporeal shockwaves on spastic muscles in children with cerebral palsy: an uncontrolled experimental study [J]. *MTL*, 2019, 9 (1) : 124–130. DOI: 10.32098/mltj.01.2019.04.
- [25] BRANDENBURG J E, EBY S F, SONG P, et al. Quantifying passive muscle stiffness in children with and without cerebral palsy using ultrasound shear wave elastography [J]. *Dev Med Child Neurol*, 2016, 58 (12) : 1288–1294. DOI: 10.1111/dmcn.13179.
- [26] CREZE M, NORDEZ A, SOUBEYRAND M, et al. Shear wave sonoelastography of skeletal muscle: basic principles, biomechanical concepts, clinical applications, and future perspectives [J]. *Skeletal Radiol*, 2018, 47 (4) : 457–471. DOI: 10.1007/s00256-017-2843-y.
- [27] MATHEVON L, MICHEL F, AUBRY S, et al. Two-dimensional and shear wave elastography ultrasound: A reliable method to analyse spastic muscles? [J]. *Muscle Nerve*, 2018, 57 (2) : 222–228. DOI: 10.1002/mus.25716.
- [28] YAŞAR E, ADIGÜZEL E, KESIKBURUN S, et al. Assessment of forearm muscle spasticity with sonoelastography in patients with stroke [J]. *Br J Radiol*, 2016, 89 (1068) : 20160603–20160633. DOI: 10.1259/bjr.20160603.
- [29] MILLER T, YING M, SAU LAN TSANG C, et al. Reliability and Validity of Ultrasound Elastography for Evaluating Muscle Stiffness in Neurological Populations: A Systematic Review and Meta-Analysis [J]. *Phys Ther*,

- 2021, 101 (1) : pzaa188–pzaa235. DOI: 10.1093/ptj/pzaa188.
- [30] QUACK V, BETSCH M, HELLMANN J, et al. Evaluation of Postoperative Changes in Patellar and Quadriceps Tendons after Total Knee Arthroplasty-A Comprehensive Analysis by Shear Wave Elastography, Power Doppler and B-mode Ultrasound [J]. *Acad Radiol*, 2020, 27 (6) : e148–e157. DOI: 10.1016/j.acra.2019.08.015.
- [31] LEE S S, GAEBLER-SPIRA D, ZHANG L Q, et al. Use of shear wave ultrasound elastography to quantify muscle properties in cerebral palsy [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2016, 31 (2016) : 20–28. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2015.10.006.
- [32] ROMINGER M B, KÄLIN P, MASTALERZ M, et al. Influencing Factors of 2D Shear Wave Elastography of the Muscle-An Ex Vivo Animal Study [J]. *Ultrasound Int Open*, 2018, 4 (2) : E54–E60. DOI: 10.1055/a-0619-6058.
- [33] TANG X, WANG L, GUO R, et al. Application of ultrasound elastography in the evaluation of muscle strength in a healthy population [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2020, 10 (10) : 1961–1972. DOI: 10.21037/qims-20-439.
- [34] ŞENDUR H N, CINDIL E, CERIT M N, et al. Evaluation of effects of aging on skeletal muscle elasticity using shear wave elastography [J]. *Eur J Radiol*, 2020, 128: 109038–109043. DOI: 10.1016/j.ejrad.2020.109038.
- [35] LIU X, YU H K, SHENG S Y, et al. Quantitative evaluation of passive muscle stiffness by shear wave elastography in healthy individuals of different ages [J]. *Eur Radiol*, 2021, 31 (5) : 3187–3194. DOI: 10.1007/s00330-020-07367-7.
- [36] LEE Y, KIM M, LEE H. The Measurement of Stiffness for Major Muscles with Shear Wave Elastography and Myoton: A Quantitative Analysis Study [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2021, 11 (3) : 524–532. DOI: 10.3390/diagnostics11030524.
- [37] KOZINC Ž, ŠARABON N. Shear-wave elastography for assessment of trapezius muscle stiffness: Reliability and association with low-level muscle activity [J]. *PloS one*, 2020, 15 (6):e0234359–e0234372. DOI: 10.1371/journal.pone.0234359.
- [38] LIU X, YU H K, SHENG S Y, et al. Measurement consistency of dynamic stretching muscle stiffness evaluated using shear wave elastography: comparison among different stretched levels and ROI sizes [J]. *Med Ultrason*, 2021, 23 (1) : 55–61. DOI: 10.11152/mu-2731.
- [39] LINDÉN O, HÄGGLUND G, ROBBY-BOUSQUET E, et al. The development of spasticity with age in 4, 162 children with cerebral palsy: a register-based prospective cohort study [J]. *Acta Orthop*, 2019, 90 (3) : 286–291. DOI: 10.1080/17453674.2019.1590769.
- [40] BAR-ON L, SLANE L C. Shear wave elastography for the assessment of muscle stiffness in children with CP: insights and challenges [J]. *Dev Med Child Neurol*, 2016, 58 (12):1209–1210. DOI: 10.1111/dmcn.13206.
- [41] BILGICI M C, BEKCI T, ULUS Y, et al. Quantitative assessment of muscular stiffness in children with cerebral palsy using acoustic radiation force impulse (ARFI) ultrasound elastography [J]. *J Med Ultrason (2001)*, 2018, 45 (2) : 295–300. DOI: 10.1007/s10396-017-0824-3.
- [42] BRANDENBURG J E, EBY S F, SONG P, et al. Quantifying Effect of Onabotulinum Toxin A on Passive Muscle Stiffness in Children with Cerebral Palsy Using Ultrasound Shear Wave Elastography [J]. *Am J Phys Med Rehabil*,



- 2018, 97 (7) : 500–506. DOI: 10.1097/phm.0000000000000907.
- [43] CEYHAN BILGICI M, BEKCI T, ULUS Y, et al. Quantitative assessment of muscle stiffness with acoustic radiation force impulse elastography after botulinum toxin A injection in children with cerebral palsy [J]. *J Med Ultrason*, 2018, 45(1): 137–141. DOI: 10.1007/s10396-017-0780-y.
- [44] BERTAN H, ONCU J, VANLI E, et al. Use of Shear Wave Elastography for Quantitative Assessment of Muscle Stiffness After Botulinum Toxin Injection in Children With Cerebral Palsy [J]. *J Ultrasound Med*, 2020, 39 (12) : 2327–2337. DOI:10.1002/jum.15342.
- [45] DAÇ N, CERIT M N, ŞENDUR H N, et al. The utility of shear wave elastography in the evaluation of muscle stiffness in patients with cerebral palsy after botulinum toxin A injection [J]. *J Med Ultrason*, 2020, 47 (4) : 609–615. DOI:10.1007/s10396-020-01042-6.
- [46] LEHOUX M C, SOBCZAK S, CLOUTIER F, et al. Shear wave elastography potential to characterize spastic muscles in stroke survivors: Literature review [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2020, 72: 84–93. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2019.11.025.
- [47] GAO J, HE W, DU L J, et al. Quantitative Ultrasound Imaging to Assess the Biceps Brachii Muscle in Chronic Post-Stroke Spasticity: Preliminary Observation [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2018, 44(9): 1931–1940. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2017.12.012.
- [48] LENG Y, WANG Z, BIAN R, et al. Alterations of Elastic Property of Spastic Muscle With Its Joint Resistance Evaluated From Shear Wave Elastography and Biomechanical Model [J]. *Front Neurol*, 2019, 10: 736–744. DOI: 10.3389/fneur.2019.00736.
- [49] GAO J, RUBIN J M, CHEN J, et al. Ultrasound Elastography to Assess Botulinum Toxin A Treatment for Post-stroke Spasticity: A Feasibility Study [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2019, 45 (5) : 1094–1102. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2018.10.034.
- [50] LIU J, PAN H, BAO Y, et al. The Value of Real-Time Shear Wave Elastography before and after Rehabilitation of Upper Limb Spasm in Stroke Patients [J]. *Biomed Res Int*, 2020, 2020: 6472456–6472462. DOI: 10.1155/2020/6472456.
- [51] PICCHIECCHIO A, ALESSANDRINO F, BORTOLOTTI C, et al. Muscle ultrasound elastography and MRI in preschool children with Duchenne muscular dystrophy [J]. *Neuromuscul Disord*, 2018, 28 (6) : 476–483. DOI:10.1016/j.nmd.2018.02.007.
- [52] MACKINTOSH S, YOUNG A, LEE A, et al. Considerations in the application of two dimensional shear wave elastography in muscle [J]. *Sonography*, 2019, 7 (1) : 13–21. DOI: 10.1002/sono.12204.
- [53] VAN HOLSBEECK M, SOLIMAN S, VAN KERKHOVE F, et al. Advanced Musculoskeletal Ultrasound Techniques: What Are the Applications? [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2021, 216 (2) : 436–445. DOI: 10.2214/AJR.20.22840.
- [54] 刘银龙, 吴刚, 朱好辉, 等. 超声剪切波弹性成像技术对成年人中脑硬度的定量评估研究 [J]. *中国实用神经疾病杂志*, 2020, 23(21): 1912–1917. DOI:10.12083/SYSJ.2021.01.004.

(收稿 2021–11–01)

本文引用信息: 郭莹莹, 俞国俊. 肌肉痉挛评估中剪切波弹性成像的应用研究进展 [J]. *中国实用神经疾病杂志*, 2021, 24(24): 2194–2202. DOI: 10.12083/SYSJ.2021.24.025

Reference information: GUO Yingying, YUN Guojun. Progress in the application of shear wave elastography in the evaluation of muscle spasm [J]. *Chinese Journal of Practical Nervous Diseases*, 2021, 24(24): 2194–2202. DOI: 10.12083/SYSJ.2021.24.025