

剪切波弹性成像评估骨骼肌生物力学特征的应用进展

李元子(综述) 杜丽娟(审校)

摘 要 剪切波弹性成像作为一种经济、无创、精确定量的影像学方法,可以评估健康及疾病状态下的骨骼肌生物力学特征,为疾病的诊断提供可靠参考。本文就剪切波弹性成像的基本原理和其在骨骼肌力学特征的评估应用、局限性及进展进行综述。

关键词 弹性成像;剪切波;弹性模量;骨骼肌;生物力学

[中图法分类号]R445.1;R318.01

[文献标识码]A

Application progress of shear wave elastography in the skeletal muscle mechanical properties assessment

LI Yuanzi, DU Lijuan

Department of Ultrasound, Beijing Tiantan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100070, China

ABSTRACT Shear wave elastography is an economic, noninvasive and accurate quantitative imaging method. It can assessing the mechanical properties of skeletal muscle in healthy or diseased states, and providing effective reference for diagnosis. In this paper, the basic principle, clinical application, limitations and application progress of shear wave elastography in skeletal muscle mechanical properties assessment are reviewed.

KEY WORDS Elastography; Shear wave; Elasticity modulus; Skeletal muscle; Mechanical properties

骨骼肌是人体运动的动力器官,异常的肌肉状态或疾病会对人体活动产生极大影响,因此有关骨骼肌生物力学特征的研究十分重要。目前常用的骨骼肌检查方法包括肌电图、超声、MRI 及肌张力计等。但肌电图不提供任何肌肉力学信息;MRI 对仪器要求高、价格高昂且有辐射,不能实时反映肌肉组织的弹性变化;肌张力计通过测量肌肉组织内的运动来评估其力学性质中的弹性和粘性,不适用于深层肌肉^[1]。剪切波弹性成像(shear wave elastography, SWE)费用低廉、操作简便,还能实时动态反映肌肉内部弹性,在临床及科研方面已广泛应用,本文就其评估骨骼肌生物力学特征的应用进展进行综述。

一、SWE 的基本原理及分类

SWE 包括一维瞬时弹性成像(one-dimensional transient elastography, 1D-TE)、点剪切波弹性成像(point shear wave elastography, p-SWE)和二维剪切波弹性成像(two-dimension shear wave elastography, 2D-SWE),其基本原理均基于对组织所受应力后变形程度的测量。SWE 可以通过肌肉活动、负荷和扭

矩观察其硬度变化,通过分析肌肉的弹性相关参数,进一步获取病变肌肉的组织信息。SWE 为骨骼肌疾病的无创诊断提供了新思路,并可用于康复过程中肌肉功能的监测。目前最常用的弹性成像技术是 2D-SWE,可以实时测量骨骼肌剪切波速度或杨氏模量值,并生成定量的二维弹性图像。

二、SWE 在正常人群骨骼肌生物力学特征评估中的应用

1. 评估骨骼肌主动收缩与肌力:骨骼肌收缩特性由肌节长度决定,Lieber 等^[2]发现当病理状态下肌节长度不均匀时,肌肉收缩功能也将受到影响,Bouillard 等^[3]发现食指与小指外展活动等距收缩过程中肌肉弹性模量值与主动肌力呈正向线性相关(均 $P < 0.05$),且相较于肌电图可以更准确地估测肌力。Kim 等^[4]应用 SWE 评估正常人群的三角肌、冈上肌及冈下肌,发现弹性模量值与关节扭矩在上述肩袖肌肉和各超声平面中均呈明显正向线性相关(均 $r^2 > 0.8$, 均 $P < 0.001$),提示应用 SWE 可无创评估肌肉活动状况,有助于创伤后评估及指导康复。

2. 评估骨骼肌被动拉伸与肌张力:被动拉伸是评估肌张力

的常用方法,通常应用等速运动的测力装置通过被动拉伸肌肉-肌腱单元完成。应用SWE可以观察肌肉-肌腱单元弹性模量值随着长度变化而变化的规律。Ward等^[5]研究发现松弛状态下肌肉静息弹性模量值综合了被动肌力-肌肉长度关系的参数和肌肉各向异性程度的函数,肌肉解剖横截面积越小,弹性模量值增加的幅度越大,且与增加的被动肌力呈正相关。有关被动运动时的肌力研究^[6]可更精准地显示骨骼肌运动特征,运动曲线及部分参数可为肌肉疾病的诊断提供更可靠的临床指标。

3. 评估松弛状态下骨骼肌长度及角度:松弛状态的肌肉长度为松弛长度,当肌肉长度超过某一松弛长度时,肌肉从松弛状态开始紧张,骨骼肌弹性模量值开始增加,此时的关节角度为松弛角^[7],松弛角有助于临床医师了解肌肉耐受被动力影响能力。由于活体肌肉与神经、筋膜、肌腱等连接,为处于多关节、多肌肉协同拮抗状态下的复合结构,故不同肌肉的松弛角均不同。Hirata等^[8]研究表明人体小腿三头肌松弛状态下的踝关节角度各不相同,当膝关节保持伸展时,腓肠肌内侧头的松弛角出现于跖屈位而比目鱼肌松弛角出现于背屈位,说明SWE可以确定肌肉松弛状态下的关节角度。临床能更好地通过松弛角判断肌肉处于松弛或紧张状态。

4. 评估静态拉伸后的骨骼肌变化:静态拉伸通常是作为运动前的热身程序,即将肢体活动到肌肉感受到拉伸的状态并维持该姿势,其可以降低肌肉刚度,增加关节的活动范围。Akagi等^[9-10]研究显示,在2 min内进行3组踝关节背屈静态拉伸后,腓肠肌的弹性模量值明显降低。Hirata等^[11]提出静态拉伸可以减低肌束刚度,并改变松弛角,伸展后腓肠肌内侧头的松弛角明显向背屈方向移动,导致被动背屈时扭矩-关节角度关系的变化。以上研究对运动与康复训练均有较好的指导作用。

三、SWE在骨骼肌相关疾病诊疗中的应用

1. 肌肉退行性变:骨骼肌的结构功能会随年龄增长发生变化,SWE可以观察老龄化对骨骼肌硬度的改变。Hsiao等^[12]研究表明老年人骨骼肌弹性模量值减低,可能与老龄化引起胶原纤维减少和组织化生的缺失有关。Eby等^[13]研究发现肱二头肌的弹性模量值与年龄呈正相关($P<0.05$),即肌肉硬度随年龄增长而增加。Evie等^[14]通过检查胸大肌、前三角肌、肱二头肌等上肢肌肉,发现肌肉平均弹性模量值随年龄增长而增加,且肌肉内弹性分布的不均匀性增加。但Alfuraih等^[15]研究发现腓肠肌和比目鱼肌的弹性模量值随年龄增长而减少或不发生变化,因此骨骼肌弹性模量值与年龄的相关性可能具有肌肉选择性,尚不明确是否有其他影响因素。

2. 中枢神经系统疾病导致肌张力改变:神经系统疾病如脑卒中、脊髓感染或损伤、脑瘫等均会引起肌肉的强直与挛缩,帕金森病也会引起肌僵直,导致患者行动不便,严重影响生活质量。SWE可以量化病理情况下肌肉的力学特性。研究^[16]提示脑卒中、脊髓损伤和脑瘫患者腓肠肌长度缩短,肌肉硬度增加,其机制可能与细胞外基质的纤维化有关^[17]。Chardon等^[16]应用SWE获取帕金森病患者在踝关节被动匀速背屈运动下腓肠肌

弹性模量-踝关节角度的曲线,发现其松弛角小于正常对照组($P<0.05$),说明帕金森病患者较正常成人在被动拉伸过程中更早出现肌紧张状态,为临床量化肌强直程度提供可行性。

3. 肌肉损伤:运动性或创伤性肌肉损伤会导致肌肉硬度的改变。Lv等^[18]对家兔大腿后肌肉进行加压损伤,发现受伤区域的肌肉组织均较周边组织明显变硬,原因可能是损伤后肌肉血管分布增加,肌细胞肥大与细胞间液渗出增加,炎症反应导致白细胞增多渗出加重。Lacourpaille等^[19]采用偏心运动的方法,发现经过1 h锻炼后肱二头肌的弹性模量值明显增加($P<0.05$),分析原因可能与偏心收缩期间肌肉内钙含量升高有关。

四、SWE的局限性及注意事项

随着临床需求的日益增加,SWE也在不断发展,但仍有其局限,如依赖操作者手法、忽视肌肉肌腱组织各向异性特性的数据差异性较大、感兴趣区的界定具有一定主观性等。有关弹性成像的研究在组内往往有较好的一致性和可靠性,但由于不同厂商的设备因为设计和设置并未统一,故研究者间的数据无法进行比较。因此操作过程中应注意以下几点。①手法:在保证图像清晰的前提下,将探头压力降至最小^[20],可以通过超声观测局部有无挤压变形。②声束角度:各向异性伪像是肌骨超声中最常见也最重要的伪像,只有当探头平面基本平行于肌纤维时,测量出的弹性模量值才与杨氏模量值相关,平行于纤维束方向的剪切波波速度也显著增高^[21]。因此在操作前需熟知不同肌肉的解剖结构,注意探头位置及相对肌纤维的方向,探头与肌纤维方向之间的角度应 $<20^\circ$,以保证数值的可信度^[22-23]。③感兴趣区:其大小应与所测组织相适应,减少混杂组织,因为肌肉组织的不均质性,建议多次测量取平均值,方可得到更可靠的结果。④可重复性:不同个体间肌肉硬度可能差异较大,平均弹性模量值变化通常为2~3倍^[24]。因此为了进行可重复测量,必须在严格标准化和可重复的关节位置进行评估。⑤其他:当结果中包含具体弹性数据时,应注明所使用的设备名称和型号。

五、展望与总结

SWE在分析肌肉生物力学特征方面有较好的应用前景,但仍有一定的局限性,今后需要规范肌骨弹性成像的专业用语与标准,进一步降低伪像和衰减效应影响,增加测值的可靠性和可重复性。总之,SWE在测量骨骼肌力学特性方面有良好的发展潜力,有望为临床提供一种可靠的骨骼肌力学特性定量评估新方法。

参考文献

- [1] Hug F, Tucker K, Gennissou JL, et al. Elastography for muscle biomechanics: toward the estimation of individual muscle force [J]. Exerc Sport Sci Rev, 2015, 43(3): 125-133.
- [2] Lieber RL, Roberts TJ, Blemker SS, et al. Skeletal muscle mechanics, energetics and plasticity [J]. J Neuroeng Rehabil, 2017, 14(1): 108.
- [3] Bouillard K, Nordez A, Hug F. Estimation of individual muscle force using elastography [J]. PLoS One, 2011, 6(12): e29261.
- [4] Kim K, Hwang HJ, Kim SG, et al. Can shoulder muscle activity be

- evaluated with ultrasound shear wave elastography? [J]. Clin Orthop Relat Res, 2018, 476(6): 1276–1283.
- [5] Ward SR, Winters TM, O' Connor SM, et al. Non-linear scaling of passive mechanical properties in fibers, bundles, fascicles and whole rabbit muscles [J]. Front Physiol, 2020, 20(11): 211.
- [6] Koo TK, Hug F. Factors that influence muscle shear modulus during passive stretch [J]. J Biomech, 2015, 48(12): 3539–3542.
- [7] Hirata K, Kanehisa H, Miyamoto N. Association between medial gastrocnemius muscle-tendon unit architecture and ankle dorsiflexion range of motion with and without consideration of slack angle [J]. PLoS One, 2021, 16(3): e0248125.
- [8] Hirata K, Kanehisa H, Miyamoto ME, et al. Evidence for intermuscle difference in slack angle in human triceps surae [J]. J Biomech, 2015, 48(6): 1210–1213.
- [9] Akagi R, Takahashi H. Acute effect of static stretching on hardness of the gastrocnemius muscle [J]. Med Sci Sports Exerc, 2013, 45(7): 1348–1354.
- [10] Akagi R, Takahashi H. Effect of a 5-week static stretching program on hardness of the gastrocnemius muscle [J]. Scand J Med Sci Sports, 2014, 24(6): 950–957.
- [11] Hirata K, Kanehisa H, Miyamoto N. Acute effect of static stretching on passive stiffness of the human gastrocnemius fascicle measured by ultrasound shear wave elastography [J]. Eur J Appl Physiol, 2017, 117(3): 493–499.
- [12] Hsiao MY, Chen YC, Lin CY, et al. Reduced patellar tendon elasticity with aging: in vivo assessment by shear wave elastography [J]. Ultrasound Med Biol, 2015, 41(11): 2899–2905.
- [13] Eby SF, Cloud BA, Brandenburg JE, et al. Shear wave elastography of passive skeletal muscle stiffness: influences of sex and age throughout adulthood [J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2015, 30(1): 22–27.
- [14] Evie C, Julie H, Cheryl AS, et al. Identifying predictors of upper extremity muscle elasticity with healthy aging [J]. J Biomech, 2020, 103(4): 109687.
- [15] Alfuraih AM, Tan AL, O' Connor P, et al. The effect of ageing on shear wave elastography muscle stiffness in adults [J]. Aging Clin Exp Res, 2019, 31(12): 1755–1763.
- [16] Chardon MK, Suresh NL, Dhaher YY, et al. In-vivo study of passive musculotendon mechanics in chronic hemispheric stroke survivors [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2020, 28(4): 1022–1031.
- [17] Xia R, Muthumani A, Mao ZH, et al. Quantification of neural reflex and muscular intrinsic contributions to parkinsonian rigidity [J]. Exp Brain Res, 2016, 234(12): 3587–3595.
- [18] Lv F, Tang J, Luo Y, et al. Muscle crush injury of extremity: quantitative elastography with supersonic shear imaging [J]. Ultrasound Med Biol, 2012, 38(5): 795–802.
- [19] Lacourpaille L, Nordez A, Hug F, et al. Time-course effect of exercise-induced muscle damage on localized muscle mechanical properties assessed using elastography [J]. Acta Physiol (Oxf), 2014, 211(1): 135–146.
- [20] Olchowicz C, Więckiewicz M, Luca MS, et al. Potential of using shear wave elastography in the clinical evaluation and monitoring of changes in masseter muscle stiffness [J]. Pain Res Manag, 2020, 2020(12): 4184268.
- [21] Laurent D, Walsh L, Amir M, et al. Relationship between tendon structure, stiffness, gait patterns and patient reported outcomes during the early stages of recovery after an Achilles tendon rupture [J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 20757.
- [22] Cortez CD, Hermitte L, Ramain A, et al. Ultrasound shear wave velocity in skeletal muscle: a reproducibility study [J]. Diagn Interv Imaging, 2016, 97(1): 71–79.
- [23] Miyamoto N, Hirata K, Kanehisa H, et al. Validity of measurement of shear modulus by ultrasound shear wave elastography in human pennate muscle [J]. PLoS One, 2015, 10(4): e0124311.
- [24] MacDonald D, Wan A, McPhee M, et al. Reliability of abdominal muscle stiffness measured using elastography during trunk rehabilitation exercises [J]. Ultrasound Med Biol, 2016, 42(4): 1018–1025.

(收稿日期: 2020-04-28)

超声及影像学专业常用术语中英文对照

CDFI (color Doppler flow imaging) —— 彩色多普勒血流成像
 CT (computed tomography) —— 计算机断层成像
 CTA —— CT 血管造影
 PET (positron emission tomography) —— 正电子发射计算机断层显像
 DSA (digital subtraction angiography) —— 数字减影血管造影技术
 MRI (magnetic resonance imaging) —— 磁共振成像
 MRA (magnetic resonance angiography) —— 磁共振血管造影
 今后本刊将在文中直接使用以上专业术语的英文缩写, 不再注明英文全称。

本刊编辑部