

DOI:10.16781/j.CN31-2187/R.20211261

• 专题报道 •

神经肌肉疾病骨骼肌结构与功能的定量超声研究进展

谢 帅¹, 赵佳琦^{2*}

1. 海军军医大学(第二军医大学)第二附属医院超声诊断科, 上海 200003

2. 同济大学附属上海市第四人民医院超声医学科, 上海 200434

[摘要] 神经肌肉疾病(NMD)是一种异质性疾病,可累及包括运动神经元、感觉神经元、肌肉及神经肌肉接头在内的周围神经系统,严重影响患者的生活质量,且结局不可逆转。早期诊断、早期治疗对NMD治疗策略的制定和患者生活质量的保障非常关键。以往NMD的诊断主要依靠血清肌酸激酶检测、肌电图、神经传导速度测定、基因检测及肌肉活检,但这些方法的诊断效能不高或有创或受基因变异影响。近年来,骨骼肌超声成像越来越多地被用作NMD临床和电生理检查的有益补充,但对于骨骼肌结构与功能的定量评估研究有待深入。本文就定量超声在NMD骨骼肌结构与功能评估中的研究现状进行综述。

[关键词] 神经肌肉疾病; 定量; 骨骼肌; 超声检查; 纹理分析

[中图分类号] R 445.1; R 685 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-1338(2023)02-0155-06

Quantitative ultrasound for skeletal muscle structure and function of neuromuscular diseases: research progress

XIE Shuai¹, ZHAO Jia-qi^{2*}

1. Department of Ultrasound, The Second Affiliated Hospital of Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200003, China

2. Department of Ultrasound, Shanghai Fourth People's Hospital Affiliated to Tongji University, Shanghai 200434, China

[Abstract] Neuromuscular disease (NMD) is a heterogeneous disease that can affect the peripheral nervous system including motor neurons, sensory neurons, muscles and neuromuscular junctions, seriously affecting the quality of life of patients, and its outcome is irreversible. Early diagnosis and treatment are critical to the formulation of NMD treatment strategies and the guarantee of quality of life of patients. In the past, the diagnosis of NMD mainly relied on the determination of creatine kinase, electromyography, the measurement of nerve conduction velocity, genetic testing, and muscle biopsy. However, these methods are not effective or invasive or affected by gene variation. In recent years, skeletal muscle ultrasound imaging has been increasingly used as a useful supplement to clinical and electrophysiological examination of NMD, but the quantitative evaluation of skeletal muscle structure and function needs to be detailed. This article reviews the current research status of quantitative ultrasound in the evaluation of skeletal muscle structure and function of NMD.

[Key words] neuromuscular diseases; quantification; skeletal muscle; ultrasonography; texture analysis

[Acad J Naval Med Univ, 2023, 44(2): 155-160]

神经肌肉疾病(neuromuscular disease, NMD)是一种异质性疾病,可累及包括运动神经元、感觉神经元、肌肉本身及神经肌肉接头在内的周围神经系统,临床表现为运动系统或神经系统损伤相关的多种综合征或畸形^[1],如肌肉萎缩、肌营养不良等,严重影响患者的生活质量,且结局不可逆转。早期诊断、早期治疗对NMD治疗策略的制定和患者生活质量的保障非常关键。以往NMD的诊断主

要依靠血清肌酸激酶检测、肌电图、神经传导速度测定、基因检测及肌肉活检,然而这些诊断方法有其局限性,如肌酸激酶诊断肌营养不良的灵敏度较高但特异度不足,肌电图、神经传导速度测定及肌肉活检为有创检查,基因检测的诊断结果会受患者基因变异影响^[2-4]。近年来,随着高频超声技术的发展,超声检查在NMD诊断评估中的应用价值被广泛认可。

[收稿日期] 2021-12-14 **[接受日期]** 2022-04-29

[基金项目] 国家自然科学基金(81501492),上海市自然科学基金(20ZR1457900)。Supported by National Natural Science Foundation of China (81501492) and Natural Science Foundation of Shanghai (20ZR1457900).

[作者简介] 谢 帅,硕士生. E-mail: 793244633@qq.com

*通信作者(Corresponding author). Tel: 021-55603550, E-mail: qiqiblue67@163.com

相较于CT等影像学技术,超声具有无创、无痛、无电离辐射等优势,还可用于床旁检查,并能够动态观察骨骼肌肉系统的运动特征^[5-6]。越来越多的证据表明,超声可以反映骨骼肌疾病诊疗过程中肌肉组织形态学、血流灌注、弹性质地随时间的变化^[7-8],然而常规超声不可避免地存在各向异性伪像及操作者的主观局限性,因此,探索定量超声或将有助于实现NMD骨骼肌结构与功能的客观评估。本文就定量超声在NMD骨骼肌结构与功能评估中的研究现状进行综述。

1 定量超声在NMD骨骼肌结构形态中的应用研究

超声作为一种无创、无电离辐射的实时成像技术,重复性好,其因高分辨率及便携化、智能化发展而被用于床旁急危重症的诊疗和远程会诊^[9]。临床医师根据NMD患者的病史及体格检查结果申请进行的针对性超声检查能够获得不依赖于医师主观经验的影像诊断结论,因此超声检查是NMD早期救治和预后、随访评估的主要方法,能够减少伤残及死亡的发生。

1.1 骨骼肌定量超声成像的特点 超声探头发射的高频率声波在人体内不同声学特性的组织之间转换时会改变方向,部分声波被反射回探头表面,并以像素形式显示在屏幕上,也可以偏离探头,甚至分散在组织层,这取决于声波的角度和组织的声阻抗差异^[10]。肌内膜和肌束膜与肌纤维的声阻抗差别较大,肌纤维间、肌束间的界面声波反射较为强烈,在2D灰阶高频超声图像上可观察到骨骼肌呈线状强回声的肌束与呈低回声的肌纤维斑驳交错,纵切面显示出平行、规律排列的纤维条索样形态^[11]。正常骨骼肌在横断面超声图像上表现为“满天星”征象,即黑色背景下的低回声肌纤维与白色星点状高回声筋膜相间排列^[12],动态扫查中还可以观察到肌纤维的运动方向和舒缩角度。

在NMD中,肌肉组织学改变的共性特点主要是肌纤维退化、纤维化和脂肪浸润,在2D灰阶超声成像模式下表现为以下3种特征^[13]:(1)随着超声波的衰减,回声弥漫性增加,骨深部反射消失;(2)超声波不衰减而弥漫性回声增强;(3)呈斑片状、条纹状或虫蛀样外观。第1种模式最常发生于肌营养不良,主要表现为回声均匀增加、低回声的肌肉主体相对保留,呈磨玻璃外观^[14]。当病情

进展时,肌肉浅层会反射大部分回声,因此浅部回声水平最高,非常明亮,深部则为回声减低的黑色区域。光束的这种衰减意味着传输到深层的声波较少,因此深层变暗部位的图像无参考意义。根据肌营养不良的类型,肌肉变化可能发生在整个肌肉区域,或只出现在特定区域,可能只影响某些肌肉或仅影响部分肌肉,如面肩肱型肌营养不良。另外,营养不良的肌肉是否合并萎缩也可以通过高频超声检查初步判断。有学者应用高频超声在较年轻的进行性假肥大性肌营养不良患者中未发现肌肉萎缩,而在面肩肱型肌营养不良患者特定的肌肉如股直肌或斜方肌中发现了肌肉萎缩^[15]。随着病程的延长,部分NMD的骨骼肌去神经或部分无神经支配,或在神经再支配仍不完全的情况下,如森德兰Ⅲ~Ⅴ级神经创伤,超声显示肌肉呈斑片状弥漫性回声增强,同时这种类型的肌肉萎缩通常很容易通过超声检出^[16]。去神经支配(如前角细胞疾病)会导致肌肉尺寸减小,皮下脂肪增加,从而使肌肉内不均匀散射的条纹状或斑点状回声增加。通常,一些剩余的运动单位保留在去神经支配的骨骼肌内,导致超声图像中出现低回声黑色区域,呈虫蛀样外观^[17]。

在肌萎缩侧索硬化患者中,外周运动神经元损伤累及肌肉可以表现为上述任何一种超声图像特征,具体取决于疾病所处的阶段和特定肌肉的去神经支配程度。在初期,最常见的表现是部分肌肉回声轻度增强,少数肌肉萎缩。随着病情发展,表现为更大范围的肌肉萎缩,呈高回声及强回声。实时超声能观察到约50%的肌萎缩侧索硬化患者发病时出现的肌肉自发性收缩^[18]。

1.2 骨骼肌定量超声图像的视觉评估 目前,高分辨率超声检查是骨骼肌肉疾病首选的影像学诊断方法,对肌肉形态结构的识别不逊于MRI^[19]。探头扫查肌肉并通过对图像或视频的直观分析可获得肌肉的整体回声水平、均匀度、形态结构等解剖信息,例如以皮下脂肪层为参照,很容易识别肌肉结构;与健侧相比,能够发现明显异常的肌肉。然而,人体内骨骼肌的结构各有不同,肌肉和结缔组织含量的比例亦不相同,也会随着体重、年龄、优势手和营养状况等的变化而发生改变。文献报道,在儿童和青少年时期,即使肌肉直径增加,肌肉回声也不会改变;但在50岁以上人群中,由于肌肉含量减少,回声灰度级逐渐增加,这与年龄相关的肌肉

内纤维化加重有关^[20]。因此,对肌肉回声灰度级别的视觉评价较强依赖于患者自身状况和观察者的主观经验。

为了使肌肉超声的视觉评估结果更加客观,Heckmatt等^[21]根据肌肉与皮下脂肪回声灰度级、是否存在明显的肌肉结构、声衰减导致深层骨骼或筋膜的可见性降低,设计了一个4点主观视觉分级量表,即正常的肌肉结构及回声为Ⅰ级,增强的肌肉回声伴明显的骨骼回声为Ⅱ级,肌肉灰度级明显增加伴骨骼回声减低为Ⅲ级,肌肉灰度级显著增加伴骨骼回声消失为Ⅳ级。该评分标准对NMD的诊断灵敏度为71%~76%。

能量多普勒超声成像可以显示肌肉内的血流流动状态。在静息状态下肌肉通常表现出低水平的肌肉内血流,运动时肌肉内血流加速;在肌肉疾病中,肌肉内血流发生改变,如在肌肉炎症中血流信号增加、在肌营养不良中血流信号减少。但彩色多普勒血流成像对于肌肉内血流信号不如超声造影灵敏,且超声造影可用于骨骼肌组织血流灌注的定量研究^[22];此外,应用新型超声造影剂六氟化硫微泡(商品名为声诺维)和低机械指数的实时动态超声造影技术能有效定量骨骼肌群的微循环变化、评价糖尿病患者下肢肌群微血管床的分布情况,可作为活体定量肌肉组织绝对血流量及血管密度的新方法^[23]。

1.3 骨骼肌定量超声图像的计算机辅助评估 计算机技术的日新月异推动了超声图像计算机自动处理分析研究的发展,一些学者已将计算机辅助定量识别应用于实验或临床分析^[24-25],期望借助计算机辅助诊断技术提高影像临床判读结果的一致性及准确率,为体内组织定量分析提供新的有力工具。

针对NMD肌肉的变化,在超声图像上选择感兴趣区域(region of interest, ROI),应用计算机技术对平均回声值及校准后向散射技术对后向散射水平进行量化分析。平均回声值法用于量化评估超声图像中肌肉回声的灰度值,可精确测量肌肉的回声水平^[26]。该方法主要通过超声系统固有的计算机软件完成,或采用脱机处理程序离线分析保存的图像。除了平均回声值法,还可以对ROI进行后向散射水平分析,以评估肌肉组织反射回超声换能器的信号量(单位为dB)。为了减少计算机分析对设备的依赖性,超声波信号还可通过使用组织模

拟器、1个固定的ROI和逐步增加的总体增益来校准,允许用户建立超声波灰度级与后向散射值之间的关系^[27],即校准后向散射技术。该技术不仅能够测量骨骼肌的超声信号量,而且因为校准功能可在不同的超声系统之间具有较平均回声值法更好的可重复性。与骨骼肌超声图像视觉评估的定性或半定量分析方法相比,肌肉回声强度的定量方法将超声识别儿童NMD的灵敏度从67%~81%提高到87%~92%,并可获得小腿及足部肌肉厚度和回声强度的正常参考值^[12]。

2 定量超声在NMD骨骼肌功能中的应用研究

骨骼肌是完成人体运动最大的器官,NMD的肌肉损伤范围及严重程度将影响肌肉的结构和运动功能。多模态超声成像对于综合评估NMD中肌肉的解剖位置、形态结构、血流分布、运动功能等有重要价值^[28],实时超声造影还能获得动态图像,通过连续观察造影剂灌注不同时刻超声图像中血管束几何形状和排列分布的变化,能对肌肉活性功能状态进行直观、准确的评估。

2.1 骨骼肌定量超声图像纹理分析 国内学者认为,从主观视觉的角度看,超声图像纹理是把一幅声像图区域中的信息理解成具有一定均匀性的整体视觉感观,从客观上把1幅声像图看成1个矩阵,或是拥有2个不同自变量的单一函数,因此任一超声图像的ROI都可以通过计算机软件写成1个以该区间内容为自变量的函数,同时赋值以满足该函数的属性要求并与该ROI内的综合纹理视觉感观相匹配^[29]。

实现上述目标的核心技术之一是计算机辅助纹理特征提取,即从超声图像区域中提取有效的纹理信息,通过若干个信息量计算得到一个矢量,获得超声图像ROI内准确的纹理参量后进行数学几何参量的统计学分析。虽然通过测量超声图像中的肌肉回声强度及厚度定量评估与随访进行性假肥大性肌营养不良有一定的实用价值,但未进一步探讨肌肉运动状态下纹理变化的数学几何特征。周翔等^[30]曾对肌肉萎缩患者采集单幅肌肉图像并尝试进行纹理分析,基于后向散射回波幅度和角度关系提取分维数、共生矩阵的相关系数、角二矩、反差和灰阶的方差与偏度,用这些纹理特征参量表征超声图像上肌纤维的粗糙程度、复杂性、均匀性等能

定量分析超声图像上肉眼难以分辨的肌肉萎缩纹理特征的细节变化,具有相当的应用价值,但目前尚缺乏大样本病例对照研究。

纹理特征分析还被广泛应用于超声图像的肌肉成分分析。多项研究评估了肌肉组织的第一特征(肌肉回声强度),然而二阶特征、高阶特征和小波的应用越来越多^[31-32]。这些更复杂的纹理特征不仅体现了肌肉组成的特征,而且较少受到设备参数或脂肪组织厚度等混杂因素的影响。研究表明,对NMD肌肉ROI提取的高阶特征进行纹理分析具有可行性,因为这些高阶特征不是基于灰度级别,而是基于像素强度的空间变化,通过计算相邻像素的相对关系反映超声图像上肌肉的微观结构^[33]。Sogawa等^[34]和Paris等^[35]的研究表明,纹理特征分析能够较准确地区分神经源性疾病和肌源性疾病,如可以区分肌萎缩侧索硬化患者的骨骼肌与健康对照的骨骼肌。赵佳琦等^[36]通过开展计算机视觉定量识别骨骼肌纹理的一系列实验研究和初步临床实践,验证了自主研发的骨骼肌损伤超声图像纹理定量分析的强度界面多级分解法,并采用结构化信息极大分解的计算机图像处理专利技术实现了人工智能技术对超声造影图像上肌肉坏死区域模糊边缘的分割。

2.2 骨骼肌定量超声图像的动态分析 获取骨骼肌超声静态图像信息在NMD的定量诊断和评估方面已初见成效,而超声实时动态成像还能在视频序列中捕捉肌肉的运动状态信息。

从20世纪90年代起,有学者开始利用超声定量评估肌肉的功能状态,并将分析结果应用于生物力学领域。Zheng等^[37]首次提出肌声图(sonomyography)概念,其原理与肌电图类似,利用超声仪器记录骨骼肌在收缩和舒张状态时的超声图像或信号强度并分析肌肉的结构参数随时间的变化情况,以评估肌肉的功能状态。在2D超声图像中,定量超声主要采用骨骼肌横断面积、横断面厚宽比、肌纤维长、厚度和羽状角等结构参数表述肌肉的运动功能。

利用斑点追踪技术,超声波视频可以显示肌肉萎缩患者正常和异常的肌肉收缩模式,但定量超声最有价值的动态应用是在怀疑有运动神经元疾病的患者中检测肌肉自发性收缩^[38]。由于定量超声提取骨骼肌肌束的面积即屏幕上显示的肌肉切面更

大,为4~6 cm,因此超声对提取肌束的灵敏性可能高于临床观察或针式肌电图。研究表明在运动神经元疾病患者中,有10%~30%的亚临床累及或肌电图阴性的肌肉会出现自发性收缩^[39-40];结合静态和动态骨骼肌超声检查的回声改变和肌电图的自发性收缩,25%的初诊肌萎缩侧索硬化患者得以确诊^[41-42]。

3 小结

骨骼肌定量超声在NMD的临床工作及科学研究中的作用较为显著。定量超声技术在NMD相关骨骼肌损伤的诊断中具有广阔的应用前景,有望成为临床评估NMD疾病进展的一种客观、可靠的方法。然而,定量超声技术不可避免地受到软件和硬件条件限制,其推广应用仍较为困难。相信随着研究的进一步深入及超声技术、计算机技术的不断进步,骨骼肌定量超声在NMD中的临床应用价值将不断提升。

[参考文献]

- [1] MUSTEAȚĂ M. Diagnosis and management of neuromuscular diseases[J/OL]. *Practica Veterinararo*, 2018, 4: 25. DOI: 10.26416/PV.33.4.2018.2104.
- [2] IFTIKHAR M, FREY J, SHOHAN M J, MALEK S, MOUSA S A. Current and emerging therapies for Duchenne muscular dystrophy and spinal muscular atrophy[J/OL]. *Pharmacol Ther*, 2021, 220: 107719. DOI: 10.1016/j.pharmthera.2020.107719.
- [3] GRIMMA, PRELL T, DÉCARD B F, SCHUMACHER U, WITTE O W, AXER H, et al. Muscle ultrasonography as an additional diagnostic tool for the diagnosis of amyotrophic lateral sclerosis[J]. *Clin Neurophysiol*, 2015, 126: 820-827.
- [4] 傅晓娜,刘爱杰,杨海坡,魏翠洁,丁娟,王爽,等.靶向捕获二代测序技术在遗传性肌病诊断中的应用[J]. *中华儿科杂志*, 2015, 53: 741-746.
- [5] MAH J K, VAN ALFEN N. Neuromuscular ultrasound: clinical applications and diagnostic values[J]. *Can J Neurol Sci*, 2018, 45: 605-619.
- [6] VAN ALFEN N, GIJSBERTSE K, DE KORTE C L. How useful is muscle ultrasound in the diagnostic workup of neuromuscular diseases?[J]. *Curr Opin Neurol*, 2018, 31: 568-574.
- [7] GOSELINK R J M, SCHREUDER T H A, MUL K, VOERMANS N C, ERASMUS C E, VAN ENGELEN B G M, et al. Muscle ultrasound is a responsive biomarker in facioscapulohumeral dystrophy[J/OL].

- Neurology, 2020, 94: e1488-e1494. DOI: 10.1212/WNL.00000000000009211.
- [8] LIMBERG J K, CASEY D P, TRINITY J D, NICHOLSON W T, WRAY D W, TSCHAKOVSKY M E, et al. Assessment of resistance vessel function in human skeletal muscle: guidelines for experimental design, Doppler ultrasound, and pharmacology[J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2020, 318: H301-H325.
- [9] 王涛,刘绍祖,张兴文. 远程超声的临床应用现状及展望[J]. *临床超声医学杂志*, 2021, 23: 306-308.
- [10] CLOUTIER G, DESTREMPES F, YU F, TANG A. Quantitative ultrasound imaging of soft biological tissues: a primer for radiologists and medical physicists[J/OL]. *Insights Imaging*, 2021, 12: 127. DOI: 10.1186/s13244-021-01071-w.
- [11] STOCK M S, THOMPSON B J. Echo intensity as an indicator of skeletal muscle quality: applications, methodology, and future directions[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2021, 121: 369-380.
- [12] SIMON N G, NOTO Y I, ZAIDMAN C M. Skeletal muscle imaging in neuromuscular disease[J]. *J Clin Neurosci*, 2016, 33: 1-10.
- [13] SIMON N G, RALPH J W, LOMEN-HOERTH C, PONCELET A N, VUCIC S, KIERNAN M C, et al. Quantitative ultrasound of denervated hand muscles[J]. *Muscle Nerve*, 2015, 52: 221-230.
- [14] ABRAHAM A, DRORY V E, FAINMESSER Y, ALGOM A A, LOVBLOM L E, BRIL V. Muscle thickness measured by ultrasound is reduced in neuromuscular disorders and correlates with clinical and electrophysiological findings[J]. *Muscle Nerve*, 2019, 60: 687-692.
- [15] PILLEN S, BOON A, VAN ALFEN N. Muscle ultrasound[J]. *Handb Clin Neurol*, 2016, 136: 843-853.
- [16] EBERT S E, BRENZY K, CARTWRIGHT M S. Neuromuscular ultrasound as an initial evaluation for suspected myopathy: a case report[J/OL]. *Muscle Nerve*, 2019, 59: E31-E32. DOI: 10.1002/mus.26434.
- [17] ALBAYDA J, VAN ALFEN N. Diagnostic value of muscle ultrasound for myopathies and myositis[J/OL]. *Curr Rheumatol Rep*, 2020, 22: 82. DOI: 10.1007/s11926-020-00947-y.
- [18] TSUJI Y, NOTO Y I, SHIGA K, TERAMUKAI S, NAKAGAWA M, MIZUNO T. A muscle ultrasound score in the diagnosis of amyotrophic lateral sclerosis[J]. *Clin Neurophysiol*, 2017, 128: 1069-1074.
- [19] HEYMSFIELD S B, ADAMEK M, JIA G, THOMAS D M. Assessing skeletal muscle mass: historical overview and state of the art[J]. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*, 2014, 5: 9-18.
- [20] TICINESI A, MESCHI T, NARICI M V, LAURETANI F, MAGGIO M. Muscle ultrasound and sarcopenia in older individuals: a clinical perspective[J]. *J Am Med Dir Assoc*, 2017, 18: 290-300.
- [21] HECKMATT J Z, PIER N, DUBOWITZ V. Real-time ultrasound imaging of muscles[J]. *Muscle Nerve*, 1988, 11: 56-65.
- [22] IVANOSKI S, VASILEVSKA NIKODINOVSKA V. Future ultrasound biomarkers for sarcopenia: elastography, contrast-enhanced ultrasound, and speed of sound ultrasound imaging[J]. *Semin Musculoskelet Radiol*, 2020, 24: 194-200.
- [23] 郑德仲,张泉,查道刚,胡锋,杨莉,刘伊丽. 对比超声定量大鼠后肢骨骼肌绝对血流量的研究[J]. *临床超声医学杂志*, 2011, 13: 1-3.
- [24] 闵加艳,邹建中. 纹理分析在二维超声图像中的应用[J]. *中国介入影像与治疗学*, 2012, 9: 389-391.
- [25] 赵佳琦,徐琪,章建全,黄禾菁,刁宗平. 骨骼肌超声诊断迈向人工智能新领域: 计算机辅助骨骼肌损伤超声定量诊断[J]. *第二军医大学学报*, 2017, 38: 1217-1224.
- ZHAO J Q, XU Q, ZHANG J Q, HUANG H J, DIAO Z P. Ultrasound diagnosis of skeletal muscle promoted by artificial intelligence: a quantitative evaluation of injured skeletal muscle by computer-aided ultrasonographic texture analysis[J]. *Acad J Sec Mil Med Univ*, 2017, 38: 1217-1224.
- [26] CHIARAMONTE R, BONFIGLIO M, CASTORINA E G, ANTOCI S A M. The primacy of ultrasound in the assessment of muscle architecture: precision, accuracy, reliability of ultrasonography. *Physiatrist, radiologist, general internist, and family practitioner's experiences*[J]. *Rev Assoc Med Bras*, 2019, 65: 165-170.
- [27] LÓPEZ-LÓPEZ S, PAREJA-GALEANO H, ALMAZÁN-POLO J, COTTERET C, TÉLLEZ-GONZÁLEZ P, CALVO-LOBO C, et al. Quantitative ultrasound changes in echotexture and functional parameters after a multicomponent training program in pre-frailty individuals: a pilot randomized clinical trial[J/OL]. *Healthcare*, 2021, 9: 1279. DOI: 10.3390/healthcare9101279.
- [28] 陈明珍,姜凡,单永,洪永锋,刘学,肖洪波,等. 多模态超声成像在脑卒中患者腓肠肌痉挛评估中的应用[J]. *中国康复理论与实践*, 2021, 27: 791-796.
- [29] 徐琪. 一种新的纹理描述方法及其应用[D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [30] 周翔,张青萍,乐桂蓉. 肌肉高频超声成像及其纹理分析[J]. *中国超声医学杂志*, 2001, 17: 70-72.
- [31] PARIS M T, MOURTZAKIS M. Muscle composition analysis of ultrasound images: a narrative review of texture analysis[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2021, 47: 880-895.
- [32] SHIN Y, YANG J, LEE YH, KIM S. Artificial

- Intelligence in musculoskeletal ultrasound imaging[J]. *Ultrasonography*, 2021, 40: 30-44.
- [33] NODERA H, SOGAWA K, TAKAMATSU N, HASHIGUCHI S, SAITO M, MORI A, et al. Texture analysis of sonographic muscle images can distinguish myopathic conditions[J]. *J Med Invest*, 2019, 66(3.4): 237-247.
- [34] SOGAWA K, NODERA H, TAKAMATSU N, MORI A, YAMAZAKI H, SHIMATANI Y, et al. Neurogenic and myogenic diseases: quantitative texture analysis of muscle US data for differentiation[J]. *Radiology*, 2017, 283: 492-498.
- [35] PARIS M T, BELL K E, AVRUTIN E, MOURTZAKIS M. Ultrasound image resolution influences analysis of skeletal muscle composition[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2020, 40: 277-283.
- [36] 赵佳琦,章建全,赵璐璐,宋家琳,潘倩,盛建国,等.不同消融功率致兔骨骼肌急性微波热损伤修复的超声影像演变特征[J/CD]. *中华医学超声杂志(电子版)*, 2016, 13: 780-789.
- [37] ZHENG Y P, CHAN M F, SHI J, CHEN X, HUANG Q H. Sonomyography: monitoring morphological changes of forearm muscles in actions with the feasibility for the control of powered prosthesis[J]. *Med Eng Phys*, 2006, 28: 405-415.
- [38] GIJSBERTSE K, GOSELINK R, LASSCHE S, NILLESEN M, SPRENGERS A, VERDONSCHOT N, et al. Ultrasound imaging of muscle contraction of the tibialis anterior in patients with facioscapulohumeral dystrophy[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2017, 43: 2537-2545.
- [39] JOHANSSON M T, ELLEGAARD H R, TANKISI H, FUGLSANG-FREDERIKSEN A, QERAMA E. Fasciculations in nerve and muscle disorders—a prospective study of muscle ultrasound compared to electromyography[J]. *Clin Neurophysiol*, 2017, 128: 2250-2257.
- [40] BOKUDA K, SHIMIZU T, KIMURA H, MORISHIMA R, KAMIYAMA T, KAWATA A, et al. Relationship between EMG-detected and ultrasound-detected fasciculations in amyotrophic lateral sclerosis: a prospective cohort study[J]. *Clin Neurophysiol*, 2020, 131: 259-264.
- [41] DUARTE M L, IARED W, OLIVEIRA A S B, DOS SANTOS L R, PECCIN M S. Ultrasound versus electromyography for the detection of fasciculation in amyotrophic lateral sclerosis: systematic review and meta-analysis[J]. *Radiol Bras*, 2020, 53: 116-121.
- [42] BARNES S L, SIMON N G. Clinical and research applications of neuromuscular ultrasound in amyotrophic lateral sclerosis[J]. *Degener Neurol Neuromuscul Dis*, 2019, 9: 89-102.

[本文编辑] 商素芳