

• 综 述 •

剪切波超声弹性成像在脑卒中后痉挛肢体中的应用及研究进展*

梁翠娟, 农飞玉, 韦意飞, 陈华德 综述, 龙耀斌[△] 审校

(广西医科大学第二附属医院康复医学科, 广西南宁 530007)

[摘要] 痉挛是由于上运动神经元受损后速度依赖性肌肉张力增加及对牵张反射异常兴奋的运动障碍, 其治疗依赖于对痉挛的精准评估。剪切波超声弹性成像作为一种新兴的痉挛评估方法, 具有实时、使用范围广泛、操作简单、经济等优点, 能克服其他肌肉痉挛评估技术在临床应用中的不足。该文就剪切波超声弹性成像在脑卒中后痉挛评估和痉挛康复疗效中的应用进行了综述, 并对其在脑卒中后痉挛康复中的应用进行了展望。

[关键词] 脑卒中后痉挛; 剪切波超声弹性成像; 康复; 综述

DOI: 10.3969/j.issn.1009-5519.2024.10.027 **中图法分类号:** R445.1

文章编号: 1009-5519(2024)10-1747-05 **文献标识码:** A

**Application and research progress of shear wave ultrasonic elastography
in spastic limbs after stroke***

LIANG Cuijuan, NONG Feiyu, WEI Yifei, CHEN Huade, LONG Yaobin[△]
(Department of Rehabilitation, the Second Affiliated Hospital of Guangxi
Medical University, Nanning, Guangxi 530007, China)

[Abstract] Spasticity is a movement disease caused by increased velocity dependent muscle tone and abnormal excitation of stretch reflex after damage to upper motor neurons, and its treatment depends on accurate evaluation of spasticity. One newly developed technique for assessing spasticity is shear wave ultrasonic elastography. It may overcome the drawbacks of other clinical muscle spasm evaluation approaches and offers the benefits of real-time, wide range of application, simplicity of operation, and economy. Therefore, this article reviewed the application of shear-wave ultrasonic elastography in the evaluation and rehabilitation of spasticity after stroke, and prospects its application in rehabilitation of spasticity after stroke.

[Key words] Post-stroke spasticity; Shear wave elastography; Rehabilitation; Review

脑卒中是三大致死性疾病之一^[1], 随着脑卒中治疗的不断进步, 脑卒中后死亡率不断下降, 但痉挛的发生率并没有显著降低^[2-3]。有研究显示, 脑卒中后痉挛在第 3 个月的发生率为 45%, 1 年后的发生率为 35%^[4]。目前, 有学者认为脑卒中后痉挛主要是脊髓上驱动、脊髓节段处理及周围机械结构改变等联合影响所致^[5]。痉挛的出现, 说明患者运动功能开始恢复。但随着痉挛的加重, 患者可能会产生疼痛、僵硬、压疮、肌肉萎缩、关节僵硬、运动受限等症状, 对日常生活及生存质量造成影响, 给家庭和社会带来更大的压力^[5-6]。脑卒中患者痉挛的发展常以屈肌模式为主, 而屈肌模式主要影响抗重力肌肉^[6]。在上肢, 痉挛模式常表现为肩内收、前臂旋前及肘、腕关节和手指屈曲^[7]。在下肢, 痉挛模式则表现为髋关节内收、膝关节伸展、足底屈踝和足内翻^[7]。目前, 对于痉挛发生的可能程度尚无明确的指标或检测方法。因此,

探寻一种客观性检测和测量痉挛的方法至关重要, 不仅可提供及时的治疗, 还能阻挡疾病的进一步发展。

当前痉挛的常用评定方法包括主观评估和客观评估 2 种。主观评估主要通过评定者活动患者的肢体来完成, 包括改良 Tardieu 量表、临床痉挛指数 (CSI)、改良 Ashworth 量表等^[8], 这些临床评估分级粗, 且具有较大的主观性, 易受到多种因素影响, 如评定者、评定方法、评定部位、不同的评定标准等因素所致的评估结果往往不同^[8]。且这些主观性评估不能直接测量痉挛, 因其无法区分神经性张力增高和非神经机械特征传播所致过度紧张的肢体^[9]。此外, 这些评估以关节为单位进行评估, 不能准确判断痉挛来自哪块肌肉或肌腱^[10]。相比之下, 客观评估则是利用专门的仪器和设备进行评估, 其中剪切波超声弹性成像 (SWE) 因具有应用范围广、费用相对低廉、操作简便等优点, 成为康复领域评估四肢肢体痉挛程度及其康

* 基金项目: 广西壮族自治区自然科学基金面上项目 (2022GXNSFAA035511); 广西壮族自治区医疗卫生重点学科建设项目 (桂卫科教发 [2022]4 号)。

[△] 通信作者, E-mail: long232316@163.com。

复疗效的前沿技术和研究热点,对康复领域具有重要的意义^[11-12]。因此,本文就 SWE 的技术原理及其在脑卒中后痉挛中的临床应用进行综述,并对其在脑卒中后痉挛康复中的潜在应用进行展望,旨在促进其临床应用,指导脑卒中后痉挛的康复。

1 SWE 概况

SWE 是由美国学者 RUDENKO 等^[13]提出的一种可视化技术,其可利用剪切波技术对组织硬度进行定量评估。近年来,SWE 被逐渐用于肌肉骨骼系统。杨氏模量是生物力学中反应组织硬度的物理量,越硬的组织,其杨氏模量越大^[14]。在各向同性、弹性介质及不可压缩组织的情况下, $E=3G=3\rho V^2$ [E 为弹性模量即杨氏模量, V 为剪切波速度(SWV), ρ 为组织密度, G 为剪切模量]^[15-16]。因此,组织越硬,剪切波传播速度越快^[14-16]。但骨骼肌是各向异性、黏弹性和非均匀性的组织,所以,弹性模量只能作为骨骼肌在相同试验条件下相对弹性的客观指标^[17]。

SWE 的原理是在组织内通过发射声辐射脉冲产生“推力”,其可在不同组织深度上连续聚焦引起组织微粒振动,从而形成沿声辐射脉冲传播方向的剪切波。借助超快速成像技术,SWE 可利用组织多普勒技术对组织运动的速度进行量化测量,实时、准确地记录由于剪切波在传播过程中产生的组织运动状况,最终根据互相关算法计算出剪切波通过组织各个质点的传播速度,从而测出组织的 SWV。同时,SWE 还将 SWV 进行彩色编码并叠加于二维解剖图像上,创建实时 SWV 图^[18]。因此,SWE 可作为一项定量指标来分析肌肉结构和功能的变化。

2 SWE 在脑卒中后上肢痉挛中的应用

大量研究表明,与下肢相比,上肢痉挛发生率明显增加,康复难度大^[19-20]。这是由于上肢功能以精细动作为主,其涉及的大脑皮质支配区域较下肢更为广泛,一旦发生损伤则易损伤到支配上肢的大脑皮层。因此,对痉挛上肢进行客观的量化评估及如何提高康复疗效一直是临床研究的热点。

脑卒中后高位神经中枢抑制减弱,对脊髓的控制能力降低,从而导致脊髓牵张反射活跃。在静态情况下出现抗重力肌的肌张力增高,导致屈肘和屈腕等上肢屈肌肌群痉挛^[21]。目前,对上肢痉挛患者功能障碍的评估以主观量表评估为主,这些评估方法主观性强且敏感性较差^[22]。痉挛常导致肌肉硬度增加,因此,通过检测肌肉硬度变化,有助于评估痉挛的变化。目前,大量研究表明,SWE 可用于评价肌肉僵硬程度^[22-23],而评估肌肉僵硬程度对康复治疗的选择和调整、康复效果和预后的评估具有重要意义^[23]。

2.1 SWE 在上肢痉挛肌肉评估中的应用 随着人们对脑卒中后上肢痉挛的重视不断提高,SWE 也越来越多地用于脑卒中患者上肢肌肉功能康复评定。在上肢痉挛患者中最常评估的是肱二头肌,依次为肱肌、指浅屈肌、指深屈肌、桡侧腕屈肌、尺侧腕屈肌

等^[24]。有研究结果显示,脑卒中后偏瘫肢体的肱二头肌和肱肌的 SWV 在不同角度和速度的被动牵张下均比非受累侧更高,并且深肱肌的硬度变化较浅肱二头肌在被动伸肘过程中更明显^[25]。表明 SWV 能提供对痉挛肌群更加精确的定位,且对痉挛程度量化是可行的。此外,一些研究探讨了上肢肌肉在不同的角度杨氏模量中的差异,如程杨等^[26]研究发现,患侧肱二头肌、肱肌、肱桡肌的杨氏模量较健侧在拉伸位上明显增加($P<0.05$);仅患侧肱肌杨氏模量在防水位上明显低于健侧($P<0.05$);同时还发现,改良 Ashworth 肌张力分级与患侧肱二头肌、肱肌、肱桡肌杨氏模量呈正相关。RASOOL 等^[27]指出,在屈肘角度为 120° 、 150° 时痉挛的肱二头肌杨氏模量较健侧大($P<0.05$)。MATHEVON 等^[28]纳入 9 例改良 ASHWORTH 量表为 0 分的参与者的亚组分析结果显示,在 90° 的肘关节位置,轻瘫肌肉的剪切模量降低,但在完全伸展时未见改变。表明上肢肌肉的僵硬程度与屈肘的角度密切相关。

此外,一些学者将 SWV 与上肢功能的相关指标进行了相关性分析,发现 SWV 与改良 Ashworth 量表、改良 Tardieu 量表等评分显著相关,但与 Fugl-Meyer 评分的相关性存在争议。例如,LEE 等^[29]发现,患者在静息状态下患侧肱二头肌平均 SWV 值比健侧高 69.5%,回波强度高 15.5%,健患两侧肱二头肌 SWV 的差异与脑卒中后回声强度、时间及 Fugl-Meyer 评分的差异密切相关。YAŞAR 等^[17]通过测量前臂痉挛的脑卒中患者发现,偏瘫侧腕屈肌、指屈肌弹性指数及弹性比值均较健侧明显增加($P<0.05$);屈肌 Tardieu 角与痉挛的指深屈肌弹性指数、弹性比值及指浅屈肌弹性指数呈负相关($r=-0.418$ 、 -0.469 、 -0.435)。WU 等^[30]采用 SWE 对 31 例脑卒中患者屈肘 0° 、 90° 时的 SWV 分析后发现,患侧 SWV 均明显大于健侧,且在 90° 时患侧 SWV 与改良 Ashworth 量表、改良 Tardieu 量表均呈正相关,与运动功能障碍呈负相关。但 GALVÃO 等^[31]持不同看法,研究发现,肱桡肌、肱二头肌痉挛的弹性模量值与改良 Ashworth 量表评分显著相关,而与 Fugl-Meyer 量表评分无关。上述研究结果的差异可能与肘关节角度、发生脑卒中时间、治疗方式等不同有关。总之,SWV 与测量上肢痉挛相关指标存在一定的相关性,提示 SWE 可作为研究脑卒中受损肌肉变化机制和成为临床检查评估肌肉力学特性的工具。

2.2 SWE 在痉挛上肢康复疗效评估中的应用 痉挛的治疗方式也随着脑卒中康复治疗不断发展而日益增多。但目前仍缺少可定量评估痉挛疗效的方法。因此,SWE 作为一种能实时监测和定量评估患者痉挛变化的工具,为临床医生评估患者痉挛的康复疗效提供了重要的参考价值。以往的研究发现,高 SWV 与脑卒中后上肢痉挛程度和功能受损有关^[30]。表明 SWV 可作为疾病发展和后续治疗的量化指标。

AŞKIN 等^[32]采用 SWE 评价了肱二头肌注射 BoNT-A 的效果,发现注射后 4 周肌肉僵硬程度降低。LIU 等^[33]发现,痉挛型肱二头肌康复治疗前后 SWV、杨氏模量比较,差异有统计学意义($P < 0.05$)。此外,国内一些学者发现,通过 SWE 评估患者的治疗更具有时效性和敏感性。朱兴国等^[34]研究表明,试验组患者康复治疗后的指浅屈肌、指深屈肌、桡侧腕屈肌、掌长肌和旋前圆肌的 SWV 较治疗前均明显下降,且明显低于对照组。黄珊珊等^[35]发现,使用 SWE 动态评估动留针法治疗脑卒中后痉挛性偏瘫患者,其上肢痉挛效果的价值较改良 Ashworth 量表更加敏感。以上研究从方法学上论证了 SWE 对脑卒中后上肢肌肉痉挛的评估是有效且可靠的,而且 SWE 还可评估具体肌肉的硬度变化,值得在未来推广应用。

3 SWV 在脑卒中后下肢痉挛中的应用

脑卒中后下肢痉挛常以伸肌痉挛为主要表现。有学者认为,当下肢处于静息状态时脊髓 I、II 组传入神经介导的促进作用增强,是下肢痉挛的机制之一^[36]。另外,由于网状脊髓束轴突在脊髓内的广泛分布,痉挛会导致在站立和行走过程中出现异常肌肉协同作用,导致异常步态^[37-38]。而且随着痉挛的进一步加剧,导致患者步行不能,可能出现压疮、静脉血栓及坠积性肺炎等并发症。因此,准确识别及早期干预下肢痉挛具有重要意义。

3.1 SWV 在下肢痉挛肌肉评估中的应用 目前,评估下肢痉挛患者,临床上主要以腓肠肌、胫骨前肌、比目鱼肌、趾长屈肌、拇长屈肌、趾长伸肌等为主^[24]。郭云怀等^[39]发现,在脑卒中痉挛患者中患侧腓肠肌杨氏模量比健侧和正常对照组都高。KESIKBURUN 等^[40]研究表明,脑卒中后痉挛患者腓肠肌弹性模量与改良 Ashworth 量表评估结果相关。还有研究显示,脑卒中痉挛的小腿三头肌弹性值大于健侧及正常组同侧($P < 0.001$)^[41]。表明 SWE 可定量测量脑卒中痉挛小腿三头肌的硬度。以上研究表明,SWE 可定量评估脑卒中后下肢痉挛肌肉的硬度变化,客观评估肌张力的变化。另外,有一些研究发现,随着踝关节角度的改变,下肢肌肉的 SWV 和杨氏模量值也会发生变化,如有研究发现,与健康对照组相比,脑卒中患者在 80% 的活动度时胫骨前肌和趾长伸肌剪切模量降低,患侧内外侧腓肠肌剪切模量增加^[42]。表明腓肠肌可能在脑卒中后痉挛中优先受到影响。据文献报道,与健侧相比,患侧内侧腓肠肌的 SWV 从跖屈到背屈变化的速率更大^[43]。此外,蒋明霞等^[44]研究表明,随着踝关节的变化,尤其是从中立位到背曲的改变过程中,对照组和卒中组健侧、患侧腓肠肌内侧头的杨氏模量进一步增大。总之,SWE 可作为一种可靠、客观地检测下肢肌肉痉挛的方法,为痉挛下肢肌张力的测定提供了一种新的量化依据。

3.2 SWV 在痉挛下肢康复疗效评估中的应用 随着 SWE 技术的不断发展,SWE 在痉挛下肢康复疗效

评估中逐步得到应用。阮坚等^[41]通过 SWE 对 30 例脑卒中患者康复治疗 3 周的疗效进行评估,发现患侧腓肠肌内侧头、外侧头、比目鱼肌的杨氏模量最大值,以及 CSI、改良 Ashworth 量表评分均低于治疗前($P < 0.05$);且治疗前后患侧腓肠肌内侧头、外侧头、比目鱼肌的杨氏模量最大值与 CSI 存在相关性($P < 0.05$),而与改良 Ashworth 量表评分无关。另外,YOLDAŞ 等^[45]评估了腓肠肌在体外冲击波治疗下即刻、治疗 2 周和治疗 4 周时的僵硬程度情况,发现杨氏模量均降低。王季等^[46]通过 SWE 对脑卒中后痉挛患者进行针刺联合康复治疗对腓肠肌影响的评估后发现,试验组患者 CSI 评分和杨氏模量均明显低于对照组($P < 0.05$),且 CSI 评分与杨氏模量呈正相关($r = 6.384, P < 0.05$)。表明通过对痉挛肌肉组织弹性和硬度的变化进行量化,SWE 可更直观地呈现脑卒中后痉挛患者的肌肉状态,可作为一种监测和评估脑卒中后下肢痉挛偏瘫患者病情和康复疗效的新方法。

4 小结与展望

SWE 是一种可靠、客观的检测脑卒中后肢体肌肉痉挛的方法,为痉挛肢体肌肉肌张力的测定提供一种新的量化依据。SWE 不仅能更准确、客观地评估肌张力的细微变化,还能更好地评定临床抗痉挛疗效,以及指导治疗。但 SWE 在应用中仍存在以下不足:(1)由于脑卒中发病后一段时间才出现痉挛,所以,SWE 不能评估脑卒中后急性期肌肉僵硬情况,而学者最常用的时间为脑卒中后 1~6 个月^[33];(2)剪切波传播速度会随着探头声速方向与肌纤维排列的夹角发生改变^[47],因此,在应用过程中应考虑声速方向对结果的影响;(3)同一肌肉在横纵切面的杨氏模量及 SWV 不一样,且纵切面的可信度更高^[48];(4)SWE 测量痉挛存在一定的局限性,因目前 SWV 的最大值为 16 m/s,大约占受试者最大自主收缩速度的 70%^[49];(5)操作者施加压力会使肌肉结构变形并产生影响导致 SWV 的改变,因此,SWE 操作高度依赖于操作者,操作者的经验水平会对结果产生影响;(6)SWE 反映的是组织硬度,若组织出现出血、钙化等病理状态,结果也会随之改变;(7)年龄和性别也会对结果造成影响^[50]。总之,尽管 SWE 有一些不足之处,但 SWE 相对其他客观评估方法拥有良好的前景,操作简便,且具有时效性。相信今后随着研究的深入和技术的发展,SWE 定能在诊断疾病、判断疗效、随访等方面为临床医生提供更多的信息,在肌肉评估方面将会有更大的应用价值。

参考文献

- [1] GBD 2017 Causes of Death Collaborators. Global, regional, and national age-sex-specific mortality for 282 causes of death in 195 countries and territories, 1980 - 2017: A systematic analysis for the

- Global Burden of Disease Study 2017[J]. *Lancet*, 2018,392(10159):1736-1788.
- [2] SARFO F S, ULASAVETS U, OPARE-SEM O K, et al. Tele-rehabilitation after stroke: An updated systematic review of the literature[J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2018, 27(9): 2306-2318.
- [3] WISSEL J, VERRIER M, SIMPSON D M, et al. Post-stroke spasticity: Predictors of early development and considerations for therapeutic intervention[J]. *PM R*, 2015,7(1):60-67.
- [4] SCHINWELSKI M J, SITEK E J, WAŹ P, et al. Prevalence and predictors of post-stroke spasticity and its impact on daily living and quality of Life[J]. *Neurol Neurochir Pol*, 2019, 53(6):449-457.
- [5] 陈楠, 华艳, 白玉龙. 卒中后痉挛状态发生机制的研究进展[J]. *中国康复理论与实践*, 2021, 27(5):588-594.
- [6] CAO D, ZHANG X, LIU M, et al. Efficacy and safety of manual acupuncture for the treatment of upper limb motor dysfunction after stroke: Protocol for a systematic review and meta-analysis[J]. *PLoS One*, 2021, 16(11):e0258921.
- [7] BETHOUX F. Spasticity management after stroke[J]. *Phys Med Rehabil Clin N Am*, 2015, 26(4):625-639.
- [8] CHA Y, ARAMI A. Quantitative modeling of spasticity for clinical assessment, treatment and rehabilitation [J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20(18):5046.
- [9] ROOTS J, TRAJANO G S, FONTANAROSA D. Ultrasound elastography in the assessment of post-stroke muscle stiffness: A systematic [J]. 2022, 13(1):67.
- [10] 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.
- [11] 郭莹莹, 贲国俊. 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.
- [12] LIU J, QIAN Z H, WANG K Y, et al. Non-invasive quantitative assessment of muscle force based on ultrasonic shear wave elastography [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2019, 45(2): 440-451.
- [13] RUDENKO O V, SARVAZYAN A P, EMELI-ANOV S Y. Acoustic radiation force and streaming induced by focused nonlinear ultrasound in a dissipative medium[J]. *J Acoust Soc Am*, 1996, 99(5):2791-2798.
- [14] 赵绍智, 蒋添雨, 刘志翔, 等. 基于超声波压缩波测量软组织杨氏模量[J]. *中国医疗设备*, 2019, 34(2):35-37.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] RI S J, GLAESS-LEISTNER S, WISSEL J. Early brain imaging predictors of post-stroke spasticity [J]. *J Rehabil Med*, 2021, 53(3): jrm00169.
- [20] TEDESCO TRICCAS L, KENNEDY N, SMITH T, et al. Predictors of upper limb spasticity after stroke? A systematic review and meta-analysis[J]. *Physiotherapy*, 2019, 105(2):163-173.
- [21] 张珍, 杨傲然, 张晓颖, 等. 脑卒中后偏瘫患者上肢肌痉挛发生的危险因素分析及预测模型构建[J]. *疑难病杂志*, 2022, 21(6):604-608.
- [22] ALORAINI S M, ALYOSUF E Y, ALORAINI L I, et al. Assessment of spasticity: An overview of systematic reviews[J]. *Physical Therapy Reviews*, 2022, 27(4):290-303.
- [23] 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.

- [24] ROOTS J, TRAJANO G S, FONTANAROSA D. Ultrasound elastography in the assessment of post-stroke muscle stiffness: A systematic review[J]. *Insights Imaging*, 2022, 13(1): 67.
- [25] EBY S F, ZHAO H, SONG P F, et al. Quantifying spasticity in individual muscles using shear wave elastography[J]. *Radiol Case Rep*, 2017, 12(2): 348-352.
- [26] 程杨杨, 王涌, 蔡叶华, 等. 剪切波弹性成像技术对脑卒中偏瘫患者肌张力和肌肉硬度的评估价值研究[J]. *现代生物医学进展*, 2022, 22(7): 1239-1242.
- [27] RASOOL G, WANG A B, RYMER W Z, et al. Shear waves reveal viscoelastic changes in skeletal muscles after hemispheric stroke[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2018, 26(10): 2006-2014.
- [28] MATHEVON L, MICHEL F, AUBRY S, et al. Reliability of 2D ultrasound imaging associated with transient shear wave elastography method to analyze spastic gastrocnemius medialis muscle architecture and viscoelastic properties[J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 2015, 58 Suppl 1: e75.
- [29] LEE S S, SPEAR S, Rymer Z W. Quantifying changes in material properties of stroke-impaired muscle [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2015, 30(3): 269-275.
- [30] WU C H, HO Y C, HSIAO M Y, et al. Evaluation of post-stroke spastic muscle stiffness using shear wave ultrasound elastography[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2017, 43(6): 1105-1111.
- [31] GALVÃO S, DE OLIVEIRA L F, DE LIMA R, et al. Shear wave elastography of the brachioradialis spastic muscle and its correlations with biceps brachialis and clinical scales[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2022, 97: 105687.
- [32] AŞKIN A, KALAYCI Ö T, BAYRAM K B, et al. Strain sonoelastographic evaluation of biceps muscle intrinsic stiffness after botulinum toxin-A injection [J]. *Top Stroke Rehabil*, 2017, 24(1): 12-17.
- [33] LIU J, PAN H J, 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.
- [34] 朱兴国, 周婷, 史进军, 等. 体外冲击波治疗对脑卒中患者上肢肌张力及运动神经元兴奋性影响的临床研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2023, 38(4): 500-503.
- [35] 黄珊珊, 冉海涛, 苟春雁. 剪切波弹性成像动态评估动留针法治疗脑卒中后痉挛性偏瘫患者上肢痉挛效果[J]. *中国医学影像技术*, 2022, 38(10): 1540-1544.
- [36] MARQUE P, SIMONETTA-MOREAU M, MAUPAS E, et al. Facilitation of transmission in heteronymous group II pathways in spastic hemiplegic patients[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2001, 70(1): 36-42.
- [37] ZAAIMI B, EDGLEY S A, SOTEROPOULOS D S, et al. Changes in descending motor pathway connectivity after corticospinal tract lesion in macaque monkey[J]. *Brain*, 2012, 135(Pt 7): 2277-2289.
- [38] MCPHERSON J G, STIENEN A H, DROGOS J M, et al. Modification of spastic stretch reflexes at the elbow by flexion synergy expression in individuals with chronic hemiparetic stroke [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2018, 99(3): 491-500.
- [39] 郭云怀, 马力, 李忠举, 等. 实时剪切波弹性成像技术评估脑卒中后下肢肌张力的研究[J]. *中国现代医学杂志*, 2017, 27(24): 81-84.
- [40] KESIKBURUN S, YAŞAR E, ADIGÜZEL E, et al. Assessment of spasticity with sonoelastography following stroke: A feasibility study [J]. *PM R*, 2015, 7(12): 1254-1260.
- [41] 阮坚, 潘永寿, 皮永前, 等. 剪切波弹性成像定量评价脑卒中患者小腿三头肌硬度的比较研究[J]. *医学影像学杂志*, 2021, 31(10): 1769-1772.
- [42] LE SANT G, NORDEZ A, HUG F, et al. Effects of stroke injury on the shear modulus of the lower leg muscle during passive dorsiflexion[J]. *J Appl Physiol (1985)*, 2019, 126(1): 11-22.
- [43] JAKUBOWSKI K L, TERMAN A, SANTANA R V C, et al. Passive material properties of stroke-impaired plantarflexor and dorsiflexor muscles [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2017, 49: 48-55.
- [44] 蒋明霞, 陈轩静, 胡锦涛, 等. 超声剪切波弹性成像对脑卒中患者腓肠肌硬度变化的定量评估[J]. *数理医药学杂志*, 2019, 32(9): 1283-1285.
- [45] YOLDAŞ A Ş, KUTLAY S, DÜSÜNCELİ A E, et al. Does extracorporeal shock wave therapy decrease spasticity of ankle plantar flexor muscles in patients with stroke: A randomized controlled trial[J]. *Clin Rehabil*, 2021, 35(10): 1442-1453.

peribiliary plexus in pig livers donated after circulatory death [J]. *PLoS One*, 2014, 9 (2): e88521.

- [47] DUTKOWSKI P, POLAK W G, MUIESAN P, et al. First comparison of hypothermic oxygenated PERfusion versus static cold storage of human donation after cardiac death liver transplants: An international-matched case analysis [J]. *Ann Surg*, 2015, 262(5):764-770.
- [48] VAN RIJN R, VAN LEEUWEN O B, MATTON A P M, et al. Hypothermic oxygenated machine perfusion reduces bile duct reperfusion injury after transplantation of donation after circulatory death livers [J]. *Liver Transpl*, 2018, 24(5):655-664.
- [49] PATRONO D, SURRA A, CATALANO G, et al. Hypothermic oxygenated machine perfusion of liver grafts from Brain-Dead donors [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1):9337.
- [50] CZIGANY Z, MICHALSKI C W, MULLER X, et al. A multicenter randomized-controlled trial of hypothermic oxygenated perfusion (HOPE) for human liver grafts before transplantation [J]. *J Hepatol*, 2023, 79(3):e114-e116.
- [51] MULLER X, MOHKAM K, MUELLER M, et al. Hypothermic oxygenated perfusion versus normothermic regional perfusion in liver transplantation from controlled donation after circulatory death: First international comparative study [J]. *Ann Surg*, 2020, 272(5):751-758.
- [52] VAN LEEUWEN O B, BODEWES S B, LANTINGA V A, et al. Sequential hypothermic and normothermic machine perfusion enables

safe transplantation of high-risk donor livers [J]. *Am J Transplant*, 2022, 22(6):1658-1670.

- [53] VAN LEEUWEN O B, DE VRIES Y, FUJIYOSHI M, et al. Transplantation of high-risk donor livers after Ex situ resuscitation and assessment using combined hypo- and normothermic machine perfusion: A prospective clinical trial [J]. *Ann Surg*, 2019, 270(5):906-914.
- [54] MARONI L, MUSA N, RAVAIOLI M, et al. Normothermic with or without hypothermic oxygenated perfusion for DCD before liver transplantation: European multicentric experience [J]. *Clin Transplant*, 2021, 35 (11): e14448.
- [55] IWATA H, NAKAJO T, KANEKO H, et al. Combined use of subnormothermic extracorporeal support and hypothermic oxygenated machine perfusion for liver graft after cardiac death in Pigs [J]. *Transplant Proc*, 2023, 55 (4):1021-1026.
- [56] RAYAR M, BEAUREPAIRE J M, BAJEUX E, et al. Hypothermic oxygenated perfusion improves extended criteria donor liver graft function and reduces duration of hospitalization without extra cost: The PERPHO study [J]. *Liver Transpl*, 2021, 27(3):349-362.
- [57] BOTEON Y L, HESSHEIMER A J, BRÜGGENWIRTH I M A, et al. The economic impact of machine perfusion technology in liver transplantation [J]. *Artif Organs*, 2022, 46(2): 191-200.

(收稿日期:2023-12-17 修回日期:2024-02-22)

(上接第 1751 页)

- [46] 王季, 张志杰, 陈亮波, 等. 实时剪切波超声弹性成像技术在评估针刺治疗脑中风后肌痉挛的临床应用 [J]. *四川中医*, 2016, 34(12):171-173.
- [47] CORTEZ C D, 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.
- [48] CHINO K, KAWAKAMI Y S, TAKAHASHI H. Tissue elasticity of in vivo skeletal muscles measured in the transverse and longitudinal planes using shear wave elastography [J]. *Clin*

Physiol Funct Imaging, 2017, 37(4):394-399.

- [49] LEE S S M, JAKUBOWSKI K L, SPEAR S C, et al. Muscle material properties in passive and active stroke-impaired muscle [J]. *J Biomech*, 2019, 83:197-204.
- [50] TANG X Y, WANG L Y, GUO R Q, 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.

(收稿日期:2023-10-30 修回日期:2024-03-11)