

【文献研究】

# 早期压力性损伤识别方法研究进展

冯尘尘<sup>1</sup>,王蒙蒙<sup>2</sup>,唐秀美<sup>2</sup>,周煜<sup>2</sup>,赵淑珍<sup>1</sup>

(1.四川大学华西医院 门诊部,四川 成都 610041;2.四川大学华西临床医学院 护理系,四川 成都 610041)

**【摘要】目的** 综述国内外最新的早期压力性损伤识别方法,为临床提供参考,提出未来研究方向。**方法** 查阅并整理国内外有关早期压力性损伤识别方法的文献,根据文献结果进行总结。**结果** 结合压力性损伤发生机制,主要介绍了高频超声、热成像技术、皮下湿度监测、近红外光谱4种已应用于国内外临床的早期识别方法的原理与应用现状,同时介绍了报道较少的磁共振弹性成像与超声弹性成像技术。**结论** 可将以上技术应用于我国患者,比较其与传统评估方式在预测性、经济性、可操作性上的优劣。此外,未来研究需针对特定特点的患者,形成不同检测技术的结果评价标准,以更好地指导临床护理。对尚未在临床展开应用的技术,应积极开展多学科合作,产生新的专利或产品,实现研究的转化与应用。

**【关键词】** 压力性损伤; 早期识别; 综述

**【中图分类号】** R471 **【文献标识码】** A **【DOI】** 10.16460/j.issn1008-9969.2019.03.020

压力性损伤 (pressure injuries, PI) 是发生在皮肤和(或)潜在皮下软组织的局限性损伤,通常发生在骨隆突处或皮肤与医疗设备接触处<sup>[1]</sup>。早期压力性损伤尚无明确统一定义,大多都认为是 I 期或 II 期压力性损伤,因其皮肤表现不明显,不能及时识别与处理,导致压力性损伤进展<sup>[2-3]</sup>。压力性损伤不仅会影响患者预后,还会造成严重卫生经济损失<sup>[4]</sup>。研究显示,已发生的压力性损伤中,I 期占 36.80%<sup>[5]</sup>。由于大多 I 期压力性损伤是可逆的,因此早期识别压力性损伤,及时采取预防措施,避免损伤进一步发展尤为重要<sup>[6]</sup>。目前临床识别 I、II 期压力性损伤主要通过视觉观察、指压法,但这些方法可能受到患者原始皮肤颜色等影响,准确性有限,而且传统方式难以发现在皮肤出现变化之前受压组织的变化,预测性不足<sup>[7-8]</sup>。近年来,高频超声、热成像技术、皮下湿度监测、近红外光谱等技术在早期压力性损伤识别中的应用越来越多,较少的研究报道了超声弹性成像与磁共振弹性成像,国内主要有近红外光谱技术应用于早期压力性损伤识别的报道,其他技术未见用于国内临床,本文旨在对以上早期压力性损伤识别方法的研究进展进行综述。

## 1 压力性损伤形成的机制

**1.1 概述** 压力性损伤是局部和全身因素综合作用所引起的皮肤组织的变性和坏死。自 20 世纪 70 年代以来,压力性损伤发生机制的研究重点开始从力学因素转移至损伤发生过程中的生物学因素,如

血管对缺血的敏感性、内皮细胞变化、血栓形成等,相关学说有缺血缺氧性损伤、缺血再灌注损伤等<sup>[9]</sup>。本文主要介绍以上 2 种机制。

**1.2 缺血缺氧性损伤机制** 缺血缺氧性损伤是压力性损伤形成的经典学说,该机制认为压力性损伤形成的实质是局部组织长期受压,血液循环障碍,导致组织持续缺血缺氧,从而引起组织皮肤破损和坏死<sup>[10]</sup>。在这个过程中,组织发生的病理变化包括血小板聚集、微血栓形成、能量代谢障碍、细胞水肿,这些变化最终导致细胞功能结构异常而变性坏死<sup>[11]</sup>。

**1.3 缺血再灌注损伤机制** 缺血再灌注损伤是指缺血的组织器官恢复血流后反而导致组织器官损伤进一步加重的现象。在这一过程中会产生大量氧自由基,出现中性粒细胞聚集、能量缺乏等现象,这些均会损伤组织细胞。氧自由基主要通过自由基的氧化还原作用、增加白细胞与内皮细胞粘附作用、趋化因子作用等途径损害组织细胞;中性粒细胞主要通过产生氧自由基、释放炎性递质、促进血栓形成等途径加重原有缺血性损伤;能量缺乏是由于持续的外力作用引起组织细胞的变形,从而导致细胞代谢障碍<sup>[11]</sup>。

## 2 早期压力性损伤识别方法研究进展

随着对压力性损伤形成机制的深入研究,越来越多的技术通过检测组织细胞的病理变化来识别早期压力性损伤。目前主要通过检测组织水肿、皮下温度、组织厚度、密度变化来进行识别<sup>[12-15]</sup>。

### 2.1 高频超声

**2.1.1 原理** 超声成像是基于一战时期航海的声呐理论发展而来,当声音穿过物体时,传感器捕捉回声并确认与物体的距离和物体的内部结构,高频超声

**【收稿日期】** 2018-10-08

**【作者简介】** 冯尘尘(1992-),女,重庆永川人,硕士研究生,护师。

**【通信作者】** 赵淑珍(1967-),女,重庆人,本科学历,主任护师。

E-mail: ssszszzs@126.com

是指中心频率在 10 MHz 以上的超声,其主要通过检测组织细胞的水肿来识别早期压力性损伤。

**2.1.2 应用现状** 高频超声常用于慢性溃疡愈合、皮肤黑色素瘤等皮肤检查,超声扫描低回声可显示压力性损伤的位置,并在出现肉眼可见症状前提示组织损伤和组织水肿<sup>[16-17]</sup>。1项研究<sup>[18]</sup>对 50 例血管外科住院患者的足跟和(或)骶尾部皮肤进行评估,术前至少每隔 1 d 由专科护士使用欧洲压力性损伤分期系统对患者进行常规皮肤评估,同时还使用 EPISCANI-200 高频超声扫描仪(Longport Inc, USA)进行评估,研究者将超声扫描图像与常规皮肤评估结果比较显示,评估者未能评出皮肤完整的红斑损伤,而超声扫描图像则显示存在潜在的皮肤损伤。该研究认为高频超声可辅助临床皮肤评估,提供肉眼不可见的潜在组织损伤信息。Lucas 等<sup>[19]</sup>实验发现,超声扫描较低回声说明皮下组织富含更多水分,有水肿的可能,从而更容易出现皮肤完整性受损。高频超声还可以通过预计真皮厚度、密度和低回声像素与总像素比值来确定早期受压损伤的个体<sup>[20]</sup>。与视觉观察法相比,高频超声检查能更早的发现隐匿性的损害,或是发现肉眼不能查见的损害。但是高频超声图像的质量会影响其预测性<sup>[21]</sup>,高质量的图像必须能近似看出表皮、真皮和皮下组织之间的层边缘结构。已报道的研究描述可由经过培训并获得资格认证的护士进行图像采集,培训合格标准是研究人员能完全正确地按照推荐的图像采集程序进行操作(包括正确摆放患者体位、准确放置探针位置、能在床旁进行优质图像扫描),并能进行演示,图片结果则需由专业的读片人员解读<sup>[21]</sup>。

## 2.2 热成像技术

**2.2.1 原理** 有研究认为体温变化可以作为预测压力性损伤发生的重要标志<sup>[12-14]</sup>。热成像技术通过捕获人体发射的热辐射来量化人体表面温度,从而产生数字图像,图像颜色代表不同的温度<sup>[22]</sup>,暖色系颜色代表温度高,冷色系颜色代表温度低。

**2.2.2 应用现状** 近年来热成像技术越来越多的应用于医疗保健领域,如雷诺氏病、压力性损伤的评估、预防、愈合监测等<sup>[15,23-24]</sup>。Judy 等<sup>[25]</sup>使用智能红外线成像设备 TMI ImageMed [Trillennium Medical Imaging, Inc(TMI), Holland, Ohio]确定有压力性损伤风险的患者,并将这些数据与 Braden 评分进行比较,研究证实该设备不仅能早期识别出压力性损伤,并且能精确地确定损伤的解剖位置,这为临床上提供精准治疗提供了依据。2016 年全球医学工程物理交流/美国卫生保健交流会议上有学者提议将热成

像技术应用于压力性损伤的早期诊断<sup>[26]</sup>。有学者<sup>[27]</sup>报道了一种名为 Thermo Shot F30S (NEC Avio Infrared Technologies, Tokyo, Japan) 的便携式热像仪,使用该仪器进行拍照,医务人员可以简单、轻松、客观地观察到伤口及周围皮肤的温度情况。在其研究中,存在压力性损伤的区域温度较低,而温度较低的皮肤均在 7 d 后损伤加重,研究认为便携式热像仪可成为压力性损伤评估的辅助工具。但是以上研究样本量均较少,但需要进一步扩大样本量来确认其有效性。热成像技术的优点是无创性,操作相对简便,信息可实时获取,是一种快速检测方法,可由经过培训的护士进行<sup>[25]</sup>。但未见有关该技术具体的评价指标的报道,尚无统一判断标准。

## 2.3 皮下湿度(subepidermal moisture, SEM)监测

**2.3.1 原理** 细胞凋亡、坏死和炎症过程会导致血管渗漏和其他改变,这些变化会改变受损组织的底层结构,引起间质液(皮下水分)的变化<sup>[28]</sup>。当皮下湿度变化时,组织的电特性(生物阻抗)会发生变化,因此可以通过阻抗光谱法检测阻抗的电信号,形成光谱图,反映皮下湿度的变化,从而来判断皮肤内部组织是否发生损伤。

**2.3.2 应用现状** Kim 等<sup>[3]</sup>研究探讨表皮下湿度与早期压力性损伤的关系。由伤口护士使用 SEM 扫描仪(NOVA Technology Corporation, 75 Congress St, Portsmouth, New Hampshire, USA)收集 29 名老年人 12 周的数据,每周测 1 次不同部位的皮下湿度值,同时对皮肤状况进行肉眼观察评估,SEM 数值范围在 0~999,值越高,皮下湿度越高,皮肤损伤风险越高。另外有学者<sup>[29]</sup>对 SEM 扫描仪(The SEM Scanner Model 200)的有效性进行了研究,3 名操作者采用不同的 SEM 扫描仪评估 31 名志愿者胸骨、骶骨、足跟上的皮肤。结果显示各操作人员之间的一致性较好,不同操作者和不同仪器的组内相关系数均超过 0.80。这说明不同操作者、不同 SEM 扫描仪均具有较高的可靠性及一致性。研究显示,指压变白皮肤如果 SEM 数值继续增加,则可能会出现指压不变白斑,即发生 I 期压力性损伤,如果数值增加 50,提示应该采取积极的预防措施<sup>[3]</sup>。对于正常浅色皮肤,如果 SEM 数值增加 100,1 周后出现皮肤红斑的风险增加 26%,发生 I 期压力性损伤的风险增加 32%<sup>[30-31]</sup>。不同研究采用 SEM 测量了不同的解剖部位,各研究报道所测得的正常皮肤、I 期压力性损伤皮下湿度值并不相同,但是 SEM 值越高,压力性损伤风险越大是一致结论,目前尚未统一标准能够说明 SEM 测量值高于多少即可预示压力性损伤的发生风险或压力

性损伤已经发生,这有待未来进一步统一研究人群特点,进行多中心的研究,以确定判定值,从而更好地指导临床实践。

#### 2.4 近红外光谱法

2.4.1 原理 在压力性损伤形成中,血流速度、血氧变化等因素对于损伤的形成有重要作用。多数学者认为,血氧饱和度对检测早期损伤有重要意义<sup>[32-33]</sup>。在检测血氧饱和度的众多技术中,近红外光谱法具有无创、便捷的特点,越来越受到重视<sup>[34]</sup>。其原理是人体组织的不同成分对近红外波段(波长700~900 nm)的吸收特性不同,使用近红外波段照射人体组织,不同成分吸收近红外光数值不同,从而可以检测血液中氧合血红蛋白和还原血红蛋白含量来计算出局部组织的氧饱和度。

2.4.2 应用现状 2011年,王岩通过近红外线光谱法监测在压力作用下人体组织的血氧变化,创新性地将该技术运用于压力性损伤领域<sup>[34]</sup>。李增勇等<sup>[32]</sup>应用近红外光谱法监测受压状态下压力性损伤易患组织血氧状况,认为血氧参数是评价压力性损伤风险的良好指标,张龙<sup>[35]</sup>研究发现应加强对压力性损伤高危患者易患压力性损伤部位的血氧监测,尤其是当血氧饱和度降至60%时应引起高度重视,加强护理措施。也有学者将其与Braden量表结合使用,认为近红外光谱法能较好用于压力性损伤评估,联合使用Braden量表可提高压力性损伤诊断的准确性<sup>[35-36]</sup>。该技术可由护士进行操作。

2.5 其他方法 有研究将超声弹性成像技术应用于早期压力性损伤的监测,该技术能非侵入性地量化皮肤和皮下软组织的硬度变化,而组织的硬度变化在压力性损伤的发展中起着关键作用<sup>[37]</sup>,但是相关研究报道较少。另有研究者将磁共振弹性成像(magnetic resonance elastography, MRE)用于压力性损伤监测,MRE是通过测量机械引起的剪切波来测量软组织力学性能的一种磁共振成像技术<sup>[38-39]</sup>。有学者<sup>[40]</sup>采用磁共振(MR)兼容压痕和MR弹性成像(MRE)相结合的方法,研究了大鼠深部组织损伤的力学特性,该装置能在MRI监测下控制细胞变形程度,监测伤口的发展,并通过MRE技术量化组织的力学特性和潜在的变化。该研究证实了细胞变形对于组织损伤的影响,为监测早期压力性损伤提供了新的思路。但是MRE在早期压力性损伤中的应用尚处于动物试验阶段,尚未有成熟产品应用于临床。

### 3 展望

随着对压力性损伤发生机制研究的深入,研究者也越来越多地基于压力性损伤发生机制,提出了

多种早期识别压力性损伤的技术方法,同时通过研究证实了高频超声、热成像和皮下湿度等在早期识别压力性损伤的作用,从而帮助及早发现组织损伤,及时采取预防措施,避免进一步的损害。高频超声可以直观看到皮下组织情况,直接判断组织损伤,对设备和操作者技术要求相对更高。而热成像、皮下湿度监测、近红外线光谱操作相对简单,所得指标可以预测压力性损伤发生风险,但是目前尚无明确的测量值能反映压力性损伤的风险程度或压力性损伤的发生,只能提示测量值与压力性损伤的发生之间存在一定的趋势,提醒临床人员应该及时采取预防措施。若经济条件允许,有必要将以上新技术应用于我国临床,与传统方式进行比较,验证其有效性,比较不同识别技术的预测性、经济性、可操作性,以帮助更早地识别压力性损伤,避免进一步发展。由于以上几种技术的结果评价尚无统一标准,未来亟需确定不同特点人群使用不同技术的评价统一标准,以更好地指导临床实践。此外,针对尚未在临床上展开应用的技术,应该积极开展多学科合作,根据基础研究发明新的专利或产品,实现知识的转化与应用。

#### [参 考 文 献]

- [1] Edsberg L E, Black J M, Goldberg M, et al. Revised National Pressure Ulcer Advisory Panel Pressure Injury Staging System: Revised Pressure Injury Staging System[J]. J Wound Ostomy Continence Nurs, 2016,43(6):585-597.DOI:10.1097/WON.0000000000000281.
- [2] 胡婉平,李银英,杨春梅,等. 综合护理干预对早期压力性损伤预防的作用[J]. 中国伤残医学, 2018,26(13):98-99. DOI: 10.13214/j.cnki.cjotadm.2018.13.064.
- [3] Kim C, Park S, Ko J W, et al. The Relationship Of Subepidermal Moisture and Early Stage Pressure Injury by Visual Skin Assessment[J]. J Tissue Viability, 2018,27(3):130-134. DOI:10.1016/j.jtv.2018.05.002.
- [4] Schuurman J, Schoonhoven L, Defloor T, et al. Economic Evaluation of Pressure Ulcer Care: A Cost Minimization Analysis of Preventive Strategies[J]. Nurs Econ, 2009, 27(6):390-400, 415.PMID:20050490.
- [5] 张玲玲. 某三级教学医院住院患者压疮现患率研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [6] Jan Y K, Brienza D M. Technology for Pressure Ulcer Prevention[J]. Top Spinal Cord Inj Rehabil, 2006, 11(4):30-41. <https://doi.org/10.1310/26R8-UNHJ-DXJ5-XG7W>.
- [7] Papanikolaou P, Lyne P, Anthony D. Risk Assessment Scales for Pressure Ulcers: A Methodological Review[J]. Int J Nurs Stud, 2007,44(2):285-296. DOI:10.1016/j.ijnurstu.2006.01.015.
- [8] Anthony D, Parboteeah S, Saleh M, et al. Norton, Waterlow and Braden Scores: A Review of the Literature and a Comparison Between the Scores and Clinical Judgement[J]. J Clin Nurs, 2008, 17(5):646-653.DOI:10.1111/j.1365-2702.2007.02029.x.
- [9] 宁翠霞,毕越英. 压疮的基础实验研究进展[J]. 现代中西医结合杂志,2017,26(27):3075-3078.DOI:10.3969/j.issn.1008-

- 8849.2017.27.040.
- [10] 李小寒,尚少梅.基础护理学[M].北京:人民卫生出版社,2017:167.
- [11] 王艳艳,姜丽萍,张恩,等.压疮发生的生物力学和循环代谢机制研究进展[J].护理学杂志(外科版),2010,25(8):93-96. DOI:10.3870/hlxzz.2010.08.093.
- [12] Yusuf S, Okuwa M, Shigeta Y, et al. Microclimate And Development of Pressure Ulcers and Superficial Skin Changes [J]. *Int Wound J*,2015,12(1):40-46. DOI:10.1111/iwj.12048.
- [13] 张诗怡,赵体玉,乐霄,等.微环境与压力性损伤关系的研究进展[J].中华护理杂志,2017,52(8):1001-1006. DOI:10.3761/j.issn.0254-1769.2017.08.021.
- [14] 蒋金龙,何桥,冯慧.小儿术中体温升高与压力性损伤的关系探讨及护理[J].护士进修杂志,2017,32(19):1806-1808. DOI:10.16821/j.cnki.hsjx.2017.19.025.
- [15] Andersen E S, Karlsmark T. Evaluation of Four Non-invasive Methods for Examination and Characterization of Pressure Ulcers[J]. *Skin Res Technol*, 2008, 14(3):270-276. DOI:10.1111/j.1600-0846.2008.00290.x.
- [16] Kuhn C, Angehrn F. Use of High-resolution Ultrasound to Monitor the Healing of Leg Ulcers: A Prospective Single-Center Study[J]. *Skin Res Technol*, 2009, 15(2):161-167. DOI:10.1111/j.1600-0846.2008.00342.x.
- [17] Jasaitiene D, Valiukeviciene S, Linkeviciute G, et al. Principles of High-frequency Ultrasonography for Investigation of Skin Pathology[J]. *J Eur Acad Dermatol Venereol*, 2011, 25(4):375-382. DOI:10.1111/j.1468-3083.2010.03837.x.
- [18] Porter-Armstrong A P, Adams C, Moorhead A S, et al. Do High Frequency Ultrasound Images Support Clinical Skin Assessment?[J]. *ISRN Nursing*, 2013,2013:1-5. DOI:10.1155/2013/314248.
- [19] Lucas V S, Burk R S, Creehan S, et al. Utility of High-frequency Ultrasound: Moving Beyond the Surface to Detect Changes In Skin Integrity[J]. *Plast Surg Nurs*, 2014, 34(1):34-38. DOI:10.1097/PSN.0000000000000031.
- [20] Burk R S, Schubert C M, Pepperl A, et al. High-frequency Ultrasound[J]. *J Wound Ostomy Continence Nurs*, 2017,44(5):434-439. DOI:10.1097/WON.0000000000000354.
- [21] Grap M J, Burk R S, Lucas V, et al. Use of High Frequency Ultrasound to Detect Changes in Skin Integrity: An Image Evaluation Validation Procedure[J]. *Intensive Crit Care Nurs*, 2015, 31(3):141-147. DOI:10.1016/j.iccn.2014.08.002.
- [22] Calado C R, Calado F A R, Caput G, et al. Porosity and Delamination Defect Detection in Ceramic Materials by Active Infrared Thermography and Optical Digital Microscopy [J]. *Materials Science Forum*,2014,798/799:671-676. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.798-799.671.
- [23] Schlager O, Gschwandtner M E, Herberg K, et al. Correlation of Infrared Thermography and Skin Perfusion in Raynaud Patients and in Healthy Controls[J]. *Microvasc Res*, 2010, 80(1):54-57. DOI:10.1016/j.mvr.2010.01.010.
- [24] Farid K J, Winkelman C, Rizkala A, et al. Using Temperature of Pressure-related Intact Discolored Areas of Skin to Detect Deep Tissue Injury: An Observational, Retrospective, Correlational Study[J]. *Ostomy Wound Manage*, 2012, 58(8):20-31.
- [25] Judy D D, Brooks B B, Fennie K P M, et al. Improving the Detection of Pressure Ulcers Using the TMI ImageMed System[J]. *Adv Skin Wound Care*, 2011,24(1):18-24. DOI:10.1097/01.ASW.0000392925.83594.50.
- [26] Sanchis-Sánchez E, Sanchis-Sánchez C, Sánchez-Lorente M M, et al. Use of Thermography in the Diagnosis of Pressure Ulcers Category I: A Protocol Proposal: 2016 Global Medical Engineering Physics Exchanges/Pan American Health Care Exchanges (Gmepe / Pahce), 2016[C].
- [27] Yamamoto T, Yamamoto N, Azuma S, et al. Handy Thermography For Bedside Evaluation Of Pressure Ulcer[J]. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*, 2013,66(7):e205-e206. DOI:10.1016/j.bjps.2013.02.005.
- [28] Moore Z, Patton D, Rhodes S, et al. Subepidermal Moisture (SEM) and Bioimpedance: A Literature Review of a Novel Method for Early Detection of Pressure-induced Tissue Damage (Pressure Ulcers)[J]. *Int Wound J*,2017,14(2):331-337. DOI:10.1111/iwj.12604.
- [29] Clendenin M, Jaradeh K, Shamirian A, et al. Inter-operator and Inter-device Agreement and Reliability of the SEM Scanner[J]. *J Tissue Viability*, 2015,24(1):17-23. DOI:10.1016/j.jtv.2015.01.003.
- [30] Bates-Jensen B M, McCreath H E, Kono A, et al. Subepidermal Moisture Predicts Erythema And Stage I Pressure Ulcers In Nursing Home Residents: A Pilot Study[J]. *J Am Geriatr Soc*,2007, 55(8):1199-2205. DOI:10.1111/j.1532-5415.2007.01261.x.
- [31] Bates-Jensen B M, McCreath H E, Pongquan V, et al. Subepidermal Moisture Differentiates Erythema and Stage I Pressure Ulcers in Nursing Home Residents[J]. *Wound Repair Regen*, 2008, 16(3):189-197. DOI:10.1111/j.1524-475X.2008.00359.x.
- [32] 李增勇,王岩,辛青,等.压疮易患组织的血氧参量近红外光谱法监测及压力影响分析[J].光谱学与光谱分析, 2011, 31(6):1490-1493. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2011)06-1490-04.
- [33] 张龙,陈丽莉,孙熠. ICU 患者压疮易患部位组织血氧变化的近红外光谱法监测分析[J]. 护理学杂志, 2012,27(24):4-7. DOI:10.3870/hlxzz.2012.24.004.
- [34] 王岩.基于近红外光谱法的人体组织压力影响分析及压疮风险评估建模[D]. 济南:山东大学, 2011.
- [35] 张龙.应用近红外光谱对 ICU 患者压疮易患部位的血氧参数检测及影响因素分析[D].温州:温州医学院, 2013.
- [36] 姜丽萍,张龙,陈丽莉,等.应用 Braden 量表联合近红外光谱仪评估 ICU 患者压疮发生的研究[J]. 中华护理杂志, 2014, 49(8):901-904. DOI:10.3761/j.issn.0254-1769.2014.08.001.
- [37] Schäfer G, Dobos G, Lünemann L, et al. Using Ultrasound Elastography to Monitor Human Soft Tissue Behaviour During Prolonged Loading: A Clinical Explorative Study[J]. *J Tissue Viability*, 2015,24(4):165-172. DOI:10.1016/j.jtv.2015.06.001.
- [38] Muthupillai R, Ehman R L. Magnetic resonance elastography[J]. *Nat Med*,1996;2(5):601-603.
- [39] Ophir J. Elastography a Quantitative Method for Imaging the Elasticity of Biological Tissues[J]. *Ultrason Imaging*, 1991,13(2):111-134. DOI:10.1177/016173469101300201.
- [40] Nelissen J L, de Graaf L, Traa W A, et al. A MRI-compatible Combined Mechanical Loading and MR Elastography Setup to Study Deformation-induced Skeletal Muscle Damage in Rats[J]. *PLOS ONE*, 2017,12(1):e169864. DOI:10.1371/journal.pone.0169864.