

# 基于瞬时弹性成像的生物组织弹性测量的研究进展

李岩磊, 赵兴华, 彭彦昆, 李永玉, 汤修映\*

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 我国是肉类消费大国, 消费量占全球肉类消费总量约为 1/4, 肉类食品质量安全问题已成为消费者关注的热点。因此, 发展快速、简易、精确检测肉类质量的方法或设备具有重要意义。近些年, 肉类软组织的力学特性研究成为热点及发展方向。国外的科研人员通过研究振动在软组织中的传播机制和软组织对振动激励的响应特性, 提出了一种基于剪切波的瞬时弹性成像(transient elastography, TE)技术。该技术具有安全、成本低、精度高、容易操作, 可将结果实时显示等优点, 在医学领域得到广泛应用。本文概述了基于剪切波的瞬时弹性成像技术的物理基础、分类及其检测原理, 重点介绍了瞬时弹性成像技术在生物软组织弹性测量中的研究进展与应用情况, 最后对基于剪切波的瞬时弹性成像技术应用于肉类品质检测领域进行展望, 期望该技术能够成为肉类品质检测的新工具。

**关键词:** 瞬时弹性成像; 弹性测量; 生物组织; 剪切波; 杨氏模量

## Recent progress of biological tissue elasticity measurement based on transient elastography technology

LI Yan-Lei, ZHAO Xing-Hua, PENG Yan-Kun, LI Yong-Yu, TANG Xiu-Ying\*

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** Meat consumption in China is huge, which accounts for a quarter of global meat consumption. Meat quality security problem has become a hot attention of the consumers. Therefore, it is of great significance to develop more methods for testing the quality of the meat. In recent years, the mechanical properties of soft tissue have become a hot spot. Different studies have reported on the mechanism of vibration propagation within biological tissue. Transient elastography technology based on shear wave was proposed to measure the elasticity of biological soft tissue. It has been widely used in the medical field in recent years with safety, low cost, high precision, easy to operate, and the result can be real-time display, etc. In this review, the physical basis, classification and detection principle had been summarized. Besides, recent progress as well as applications of instantaneous elastography technology had been introduced, which might provide a practical guidance for future research of meat quality. The technology is expected to become a new tool for meat quality.

**KEY WORDS:** transient elastography; elasticity measurement; biological tissue; shear wave; Young's modulus

基金项目: 国家自然科学基金项目(31571921)、北京市自然科学基金项目(6162015)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China(31571921), the National Natural Science Foundation of Beijing (6162015)

\*通讯作者: 汤修映, 教授, 主要研究方向为农产品无损检测技术与装备, 生物检测仪器研发。E-mail: txying@cau.edu.cn

\*Corresponding author: TANG Xiu-Ying, Professor, College of Engineering, China Agricultural University, No.17, East Road of Tsinghua, Haidian district, Beijing 100083, China. E-mail: txying@cau.edu.cn

## 1 引言

我国是肉类消费大国,随着生活水平的提高,我国人均肉类表观消费量在2012年达到了62.7 kg,全国肉类表观消费总量达到8483万t,占全球消费总量的27.8%,预计到2020年,我国肉类消费以年均2.8%的增速持续增长<sup>[1,2]</sup>。随着人们对食品品质安全的逐渐重视,食品品质检测成为重要的研究方向。根据检测手段和产生效果的不同,目前肉类品质检测技术大体上可分为理化微生物的有损检测、以光谱和图像为代表的无损检测、感官检测等3大类<sup>[3-6]</sup>,经过近些年的发展,这3种检测方法各有优缺点,分别适用于不同的场合,并常常互为补充。近几年,生物组织的力学特性成为研究热点,目前常用的传统的检测肉类食品力学特性的方法多为利用质构仪或万能试验机对肉样进行压缩、拉伸或剪切试验<sup>[6-10]</sup>,这些方法在研究肉及肉制品的力学特性方面取得较大进展,但仍然存在不可逆的污染、破坏、效率低等缺点。

近几年,无损检测技术逐渐得到研究者的青睐并在食品品质安全检测领域成为前沿课题,目前在医学领域采用无损检测技术检测人体器官病变在临床实践中得到广泛应用,国外发达国家科研人员通过研究振动在软组织中的传播机制和软组织对振动激励的响应特性,提出了一种基于振动的瞬时弹性成像方法,该方法利用超声技术并结合信号处理技术能够实现非接触、快速地测量病患肝脏组织弹性,检测肝脏病变<sup>[11-13]</sup>。生物组织的力学特性如弹性、硬度等由于组织的成分和结构形式的不同而存在差异<sup>[14,15]</sup>。弹性信息是生物组织力学性质研究的重要内容。人体肝脏等组织与肉类都是生物软组织,具有相似的力学特性,因此可以借鉴。本文通过综述医学领域中的瞬时弹性成像技术及其发展现状与应用情况,总结该技术及其相关设备的特性,希望能借鉴该技术将其应用于食品尤其是肉类品质安全检测领域中,为食品安全检测提供一个新的研究思路。

## 2 瞬时弹性成像(transient elastography, TE)技术

### 2.1 物理基础

当有外力作用于生物软组织时,组织会产生变形,组织由于成分和结构形式的变化会产生不同的变形,位移、应变分布和变形速度等都会变化<sup>[16,17]</sup>,检测能够反映生物组织弹性的信息就可以判断人体组织病变或肉类食品的品质。

利用瞬时弹性成像技术测量生物组织弹性,首先需要假设在较短时间内施加负载时组织的力学特性只受瞬时负载影响,此时可以只考虑组织弹性而不考虑粘性,即假

设为弹性体<sup>[18]</sup>。此时,可用力学参数剪切模量 $\mu$ 或杨氏模量 $E$ 作为生物组织力学特性的表征<sup>[19]</sup>,一般将软组织视为不可压缩的材料,泊松比 $\nu$ 可取为0.5,则可得到杨氏模量和剪切模量为 $E=3\mu$ 的关系<sup>[19-22]</sup>。

通过借助振动作用下的组织应变,并结合应变与力学参数的关系,如瞬时弹性成像技术就是通过组织应变幅度、相位等信息测量横波波速从而间接评估组织剪切模量 $\mu$ 。瞬时弹性成像是测量剪切波的波速间接地检测生物组织的剪切模量 $\mu$ 。剪切波又分为横向剪切波和轴向剪切波,这两种波的传播速度相同。根据剪切波在横向和轴向传播时均不影响组织密度,可得到剪切波波速公式<sup>[22]</sup>:

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

$\rho$ 为软组织的密度,可取1000 kg/m<sup>[19]</sup>。上式表明组织中剪切波波速是由其剪切模量决定的。剪切波在组织中的传播速度受组织弹性影响,组织硬度较大时,剪切波传播速度就较快<sup>[12]</sup>。此外,有研究指出目前常使用的超声弹性成像系统,生物组织的粘度不受振动频率影响<sup>[23]</sup>。

### 2.2 瞬时弹性成像方式

根据振动器和超声换能器在生物组织的不同固定位置,将瞬时弹性成像技术分为透射式和反射式两类<sup>[24]</sup>。

#### 2.2.1 透射式瞬时弹性成像

早期的瞬时弹性成像方式为透射式,且同时存在剪切波和压缩波的传播,这两种波的传播速度相差巨大。有研究指出,振动器以50 Hz的频率产生的剪切波的传播速度为1~10 m/s,采用中心频率为5 MHz、传播速度约为1500 m/s的超声波能够检测剪切波引起的生物组织内部的位移变化<sup>[26]</sup>。

图1为透射式瞬时弹性成像系统的原理图。将激励即低频振荡器放置在组织的上方,低频振荡器能够产生低频剪切波,将检测单元即超声换能器(又称超声探头)放置在组织的下方,超声换能器能够发射并接收超声波,低频振荡器和超声换能器均垂直于组织的表面,计算机用于控制整个系统,电子控制系统用于控制低频振荡器的工作和超声波的发射、接收。超声换能器接收的回波信号是其与低频振荡器之间的组织随时间变化的超声射频信号,并结合互相关算法估计组织内部的位移,可得到不同厚度处组织在一定时间内的应变变化图,可以获取剪切波的波速<sup>[22,26,27]</sup>。此外,应变从振源处传播到组织另一侧后反射回去,测量组织应变传播的斜率也可估计出瞬时剪切波的传播速度,即可计算出剪切模量<sup>[26]</sup>。

#### 2.2.2 反射式瞬时弹性成像

由于在医学上透射式瞬时弹性成像不适用于临床实际测量与应用,Sandrin等<sup>[27]</sup>又提出了反射式瞬时弹性成像,如图2所示。与透射式系统的差别在于,反射式是将超声换能器与低频振荡器连接且固定在低频振荡器下端,随振

荡器同时动作, 实际上就是将超声换能器作为振动源, 由于超声换能器自身振动会造成测量振动幅度时有误差, 因此, 不能直接测得剪切波在组织中的绝对位移值, 可以用实验中所测得的位移值减去超声换能器自身振动的位移值得到剪切波的绝对位移值<sup>[28]</sup>。或者选择合适的参考平面来补偿误差, 为进一步减小计算误差, 补偿后可以再利用求导的方法计算应变<sup>[22,27]</sup>。

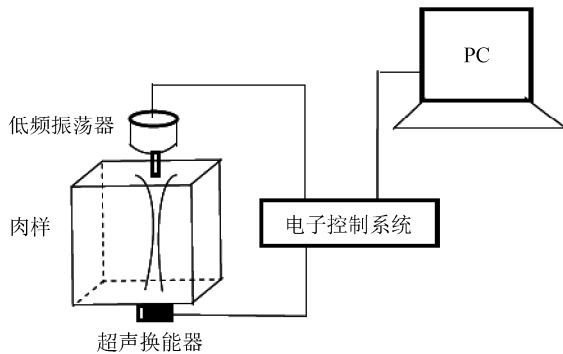


图 1 透射式瞬时弹性成像系统的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of transmit mode system

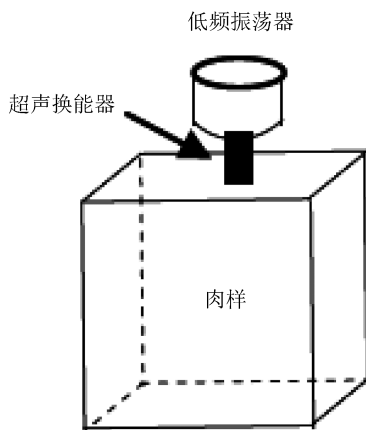


图 2 反射式结构简图

Fig. 2 Structure diagram of reflection mode system

### 3 瞬时弹性成像技术的研究进展与应用

根据振动源的位置可分为外部振动源和内部振动源两种, 内部振动源由于难度大, 很少被采用。Fink 等<sup>[25,27,29,30]</sup>提出了几种低频(10~500 Hz)振动下检测生物组织粘弹性的方法, 结果表明剪切波传播速度和衰减受组织边界产生的反射波、振动器尺寸产生的衍射效果和低频压缩波的影响, 会产生偏差。为了避免产生偏差, 他们又提出了低频瞬时外部激励, 通过对牛肉进行试验并结合互相关算

法检测牛肉组织的振动位移, 测量剪切波的轴向传播速度, 得到了精确的弹性和粘性值。Catheline 等<sup>[25,31]</sup>比较了外部振源低频(10~300 Hz)振动下施加脉冲振动和连续振动时组织振动的情况。他们采用透射式瞬时弹性成像系统以 10 cm×10 cm×7 cm 的仿体为试验对象, 结果证明, 施加脉冲振动可以降低反射波、衍射、压缩波等对测量结果的不良影响, 得到的剪切波传播速度等测量结果较传统的连续振动更加精确, 从而确定了瞬时弹性成像最佳的激励方式是脉冲振动。不同于在纵向检测剪切波的传播速度, Zheng 等<sup>[32,33]</sup>在此基础上又提出了一种通过测量剪切波的横向传播速度测量组织弹性的方法。原理为在距离振动源一定距离的组织表面上设置两条超声线, 利用这两条超声线检测剪切波经过这段距离所用的时间, 然后计算剪切波的传播速度, 用于组织的剪切模量计算。

近些年来, 随着超声弹性成像技术的快速发展, 基于一维瞬时弹性的测量技术由于其优越性也得到飞速发展并由此生产了一些成熟的产品, 如法国 Echosens 公司研发的 Fibroscan 超声弹性成像仪器就是应用瞬时弹性成像技术和肝脏弹性与肝纤维化间的相关性检测肝脏硬度。该仪器对病患舒适、安全, 成本低、精度高、容易操作, 还能将结果实时显示, 在医学临床上得到广泛应用<sup>[34]</sup>。该仪器存在不具备自动引导定位功能的缺点, 需要操作人员准确地找到测量部位<sup>[35,36]</sup>。Pichon 等<sup>[37,38]</sup>利用该系统测量了 16 个供体肝脏的弹性, 对比分析了病理结果, 最终成功移植了 12 个供体肝脏。尽管只是进行了小样本量的研究, 但为肝移植供体肝脏的质量评价提供了新的思路。一项 Meta 分析<sup>[39]</sup>(包括 18 项研究)研究了 2772 例慢性乙肝患者, 研究中将诊断结果分为 F2(中度肝纤维化)、F3(重度肝纤维化)、F4(肝硬化)等级, 结果表明瞬时弹性成像对定量诊断肝病变具有较好的准确性。肉类食品的新鲜度、嫩度、系水力、多汁性等品质指标都与组织力学特性紧密相关<sup>[40,41]</sup>, 既可以将力学特性作为独立的品质指标, 也可以研究肉类食品的弹性等力学参数与以上品质指标的定量关系, 并借鉴以上所述分级方式, 将肉类食品品质划分等级, 如将新鲜度这一指标划分为不同等级, 通过使用瞬时弹性成像技术测量其弹性即可判断新鲜度等级。

Ganne-Carrie 等<sup>[42,43]</sup>也认为瞬时弹性成像技术精确度高, 有较高的实用价值, 采用该技术检测的肝脏弹性和肝纤维化有显著的相关性。郑永平等<sup>[44]</sup>自行研制了实时 B 超图像引导下的瞬时弹性成像系统, 所使用的激励器以 50 Hz 的频率振动, 激励器的轴心上安装 B 型超声探头。他们应用该系统以自制的不同弹性的仿体代替人体组织为对象, 进行了弹性检测试验, 仿体有标准仿体(以 A1、A2 标号)和他们自制的琼脂/明胶仿体(以 B1-B6 标号), 每种仿体的弹性不同。试验结果表明, 与现有的系统和力学检测得到的结果非常符合, 振动频率在 50~400 Hz 之间变化时, 仿

体的杨氏模量变化也比较大。可见, 振动频率这一参数起到非常重要的作用。此外, 郑永平等还利用该系统初步检测了正常人体肝脏的弹性, 利用超声探头作为激励源提供脉冲振动, 并通过 B 型超声探头准确地定位肝脏位置, 使用 M 模超声检测剪切波在肝脏中的传播速度, 最终计算得到杨氏模量为  $(7.5 \pm 2.1)$  kPa, 使用 Fibroscan 成像系统得到的杨氏模量为 5.8 kPa, 结果与 Fibroscan 相比存在差异, 他们认为还需要进一步研究。

低频振动的频率和压力大小是影响成像结果的重要因素, 但是研究这方面的内容较少。罗葆明<sup>[45]</sup>和邱少东等<sup>[46]</sup>均通过进行超声弹性成像实验得出振动频率和压力影响弹性成像结果的结论, 但是不能定量分析其对结果的影响。李秋萍等<sup>[47]</sup>为了研究振动频率对成像结果的影响, 采用外部激励提供不同频率的振动并保持恒定的振幅, 研究了仿体模型的应变信息即弹性图像。她认为不同的振动频率下组织的粘性影响组织最大应变幅值的变化, 而弹性体的复模量不会受振动频率影响。因此, 若需要研究软组织的粘弹性特性, 则需要进一步研究利用瞬时弹性成像技术提取粘性信息。此外, 有研究证明, 当振动频率增加时, 生物组织的粘性特性逐渐表现出来, 同时剪切波速也随之增加<sup>[22]</sup>。Zhang 等<sup>[48]</sup>在振动频率 80~220 Hz 下研究了剪切波在牛肝脏中的传播特性, 发现当振动频率达到 175 Hz 时, 粘度代替剪切模量成为影响剪切波传播速度的主要因素, 测量的牛肝组织剪切模量为 2.2 kPa, 粘度为 2 Pa·s。

随着一维瞬时弹性成像技术的逐渐成熟, 二维瞬时弹性成像技术也得到研究人员的重视并取得了实质性进展。二维瞬时弹性成像技术在检测生物组织弹性特性上更具有前景, 其原理同样是测量组织在低频振动下剪切波传播造成的组织位移从而得到其弹性系数。李秋萍等<sup>[47,49]</sup>采用二维动态编程算法计算仿体模型在不同频率振动下的位移, 使用此算法计算了仿体模型的横向和纵向的位移, 得到了更加准确的应变图, 也就是能够表征更为精确的弹性信息。目前的二维超声成像系统采用超高速成像来检测剪切波在生物组织二维空间中的传播规律。Sandrin 等<sup>[30]</sup>使用 10000 帧/s 的超高速超声成像系统测量了仿体中低频剪切波的传播情况, 成功重建了仿体的剪切模量分布图。

#### 4 结论与展望

近几年来, 医学领域的科研人员在人体组织病变检测方面进行了大量的研究, 提出了多种测量软组织弹性等力学特性的方法, 其中基于剪切波的瞬时弹性成像技术得到迅速发展, 在医学临床上得到广泛应用, 如上文提到的 Fibroscan 超声弹性成像系统。相信在不久的将来, 能够利用瞬时弹性成像技术获取杨氏模量的三维图像。基于剪切波的瞬时弹性成像技术还可以定量测量由肌纤维排列方向造成的组织弹性的各向异性<sup>[50]</sup>, 因此, 应用该技术深入地

测量肉类力学特性对于肉类品质检测具有很大的应用潜力。基于剪切波的弹性测量技术能够测量组织局部来表征其整体弹性特征, 测量过程中受激励器尺寸的影响较小, 在检测肉类等食品时操作者将超声探头放置在肉样感兴趣部位的外表面即可, 待剪切波传播到感兴趣部位即可检测到肉样振动情况。

基于剪切波的瞬时弹性成像技术是超声弹性测量技术中的一种新的诊断技术, 在临床上还存在一定的局限性, 如操作者控制振荡器的压力大小、位置和振动频率都影响最终诊断结果; 还没有形成确切的量化标准; 器官本身的搏动; 另外, 设备本身振动和噪音等因素都可能会影响结果的准确度。在借鉴该技术并将其应用于肉类食品的力学特性研究时, 需要开发精度高、工作稳定的实验设备, 还需要深入研究影响检测结果的各种因素。如果能采用基于剪切波的瞬时弹性成像技术系统研究揭示肉类食品的力学特性参数及其与肉类食品的关键品质指标之间的精确定量关系, 必将为肉类食品力学特性的研究提供极大帮助。该技术为肉类食品品质检测提供了新的思路, 相信随着研究力度的不断加大, 检测标准的逐步规范, 该技术在更多的领域中得到应用, 并表现出它的优越性。

#### 参考文献

- 程广燕, 刘珊珊, 杨祯妮, 等. 中国肉类消费特征及 2020 年预测分析[J]. 中国农村经济, 2015, 2: 76-82.  
Cheng GY, Liu SS, Yang ZN, *et al.* Characteristics and forecast analysis in 2020 of meat consumption in China [J]. Chin Rural Econ, 2015, 2: 76-82.
- 陈琼, 王济民. 我国肉类消费现状与未来发展趋势[J]. 中国食物与营养, 2013, 19(6): 43-47.  
Chen Q, Wang JM. Current situation and future trends of meat consumption in China [J]. Chin Food Nutr, 2013, 19(6): 43-47.
- 龚艳, 汤晓艳, 王敏, 等. 近红外光谱法对鸡肉品种的快速无损鉴别[J]. 食品科学, 2015, 36(16): 148-152.  
Gong Y, Tang XY, Wang M, *et al.* Rapid and nondestructive identification of chicken breeds by near infrared spectroscopy [J]. Food Sci, 2015, 36(16): 148-152.
- 付妍, 郭培源, 孙梅, 等. 肉品品质检测技术综述[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2012, 30(1): 69-73.  
Fu Y, Guo PY, Sun M, *et al.* Study on meat quality detection techniques [J]. J Beijing Technol Business Univ (Nat Sci Ed), 2012, 30(1): 69-73.
- 刘魁武, 成芳, 应义斌. 猪肉品质检测的研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 239-242.  
Liu KW, Cheng F, Ying YB. Research progress in pork quality determination [J]. T CSAE, 2008, 24(1): 239-242.
- 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.  
Li LT. Physical properties of foods [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001.
- 李振兴, 刘钟栋. 鱼肉弹性与其新鲜度相关性的研究[J]. 郑州工程学院学报, 2003, 12(4): 37-39.  
Li ZX, Liu ZD. The relationship between the freshness and elasticity of fish [J]. J Zhengzhou Technol Univ, 2003, 12(4): 37-39.

- [8] 佟月英, 陈东辉, 石志标, 等. 鸡肉的压力特性曲线与其新鲜度的关系[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(2): 492–495.  
Tong YY, Chen DH, Shi ZB, *et al.* Relationship between pressure characteristic curve and freshness of chicken [J]. *J Jilin Univ (Eng Technol Ed)*, 2010, 40(2): 492–495.
- [9] 蒋予箭, 周雁. 肉类弹性测定方法的研究[J]. 食品科学, 2002, (4): 99–102.  
Jiang YJ, Zhou Y. Research of measurement method of meat elasticity [J]. *Food Sci*, 2002, (4): 99–102.
- [10] Maria B, Mauro M. Viscoelastic properties of Bologna sausages by dynamic methods [J]. *J Food Eng*, 2004, 63: 291–298.
- [11] Hye WL, Young EC, Seung UK, *et al.* Predicting liver-related events using transient elastography in chronic hepatitis C patients with sustained virological response [J]. *Gut Liver*, 2016, 10(3): 429–436.
- [12] 张凯, 李征, 陈红. 瞬时弹性成像诊断肝纤维化的研究进展[J]. 中国全科医学, 2013, 16(10): 3630–3632.  
Zhang K, Li ZH, Chen H. Recent advances of transient elastography for diagnosis of liver fibrosis [J]. *Chin General Med*, 2013, 16(10): 3630–3632.
- [13] Ferraioli G, Tinelli G, Bello BD, *et al.* Performance of liver stiffness measurements by transient elastography in chronic hepatitis [J]. *World J Gastroenterol*, 2013, 19(1): 49–56.
- [14] Greenleaf JF, Fatemi M, Insana M. Selected methods for imaging elastic properties of biological tissues [J]. *Annu Rev Biomed Eng*, 2003, 5: 57–78.
- [15] Ophir J, Alam SK, Garra B, *et al.* Elastography: Imaging the elastic properties of soft tissues with ultrasound [J]. *J Med Ultrasonics*, 2002, 29: 155–171.
- [16] 田莉莉. 甲状腺占位性病变的实时超声弹性成像表现[J]. 中国医药指南, 2015, 13(8): 189.  
Tian LL. Appearance of thyroid nodules on real-time elastosonography [J]. *Chin Med Guide*, 2015, 13(8): 189.
- [17] Rago T, Santini F, Scutari M, *et al.* Elastography: new developments in ultrasound for predicting malignancy in thyroid nodules [J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 2007, 92(8): 2917–2922.
- [18] Ophir J, Alam SK, Garra B, *et al.* Elastography: ultrasonic estimation and imaging of the elastic properties of tissues [J]. *P I Mech Eng*, 1999, 213: 203–233.
- [19] 黄燕平, 郑永平. 基于超声的组织弹性测量之剪切波传播法[J]. 中国医疗设备, 2011, 26(10): 1–12.  
Huang YP, Zheng YP. Department of health technology and informatics [J]. *Chin Med Devices*, 2011, 26(10): 1–12.
- [20] Carstensen EL, Parker KJ, Lerner RM. Elastography in the management of liver disease [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2008, 34(10): 1535–1546.
- [21] Parker K, Huang S, Musulin R, *et al.* Tissue response to mechanical vibrations for "sonoelasticity imaging" [J]. *Ultrasound Med Biol*, 1990, 16(3): 241–246.
- [22] 李添捷, 郑永平, 汪源源. 生物组织弹性的测量与成像: 基于振动的超声检测方法综述[J]. 中国医疗器械信息, 2013, 3(17): 7–16.  
Li TJ, Zheng YP, Wang YY. Measurement and imaging of biological tissue elasticity: A review of the vibration-based ultrasound methods [J]. *Chin Med Dev Inform*, 2013, 3(17): 7–16.
- [23] Carstensen EL, Parker KJ, Lerner RM. Elastography in the management of liver disease [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2008, 34(10): 1535–1546.
- [24] 黄爱军. 超声瞬时弹性成像数据采集系统的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.  
Huang AJ. The research of data acquisition system for ultrasonic transient elastography [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [25] Catheline S, Wu F, Fink M. A solution to diffraction biases in sonoelasticity: the acoustic impulse technique [J]. *J Acoust Soc Am*, 1999, 105(5): 2941–2950.
- [26] 刘宝亮. 基于超声瞬时弹性成像技术的生物组织弹性特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.  
Liu BL. Biological tissues elastic properties study based on ultrasound transient elastography [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [27] Sandrin L, Tanter M, Gennisson JL, *et al.* Shear elasticity probe for soft tissues with 1-D transient elastography [J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2002, 49(4): 436–446.
- [28] 朱颖. 生物组织黏弹性信息的超声定量测量方法研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2015.  
Zhu Y. The research of ultrasonic quantitative measurement methods for biological tissue viscoelasticity [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2015.
- [29] Montaldo G, Tanter M, Bercoff J, *et al.* Coherent planewave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography [J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2009, 56(3): 489–506.
- [30] Sandrin L, Tanter M, Catheline S, *et al.* Shear modulus imaging with 2-D transient elastography [J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2002, 49(4): 426–435.
- [31] Catheline S, Thomas JL, Wu F, *et al.* Diffraction field of a low frequency vibrator in soft tissues using transient elastography [J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 1999, 46(4): 1013–1019.
- [32] Wang CZ, Guo JY, Zheng YP. Muscle elasticity measurement using ultrasound at isometric step contraction [J]. *World Congress of Biomechanics (WCB)*, Singapore. IFMBE Proceedings, 2010, 31: 965–968.
- [33] Wang CZ, Zheng YP. Development of a vibro-ultrasound method for skeletal muscle stiffness assessment under high-levels of isometric contraction [J]. *International Tissue Elasticity Conference (ITEC)*, Arlington, Texas, USA, 2011, 12(15): 95.
- [34] 罗建文, 邵金华, 白净, 等. 瞬时弹性成像用于肝纤维化的无创评价[J]. 中华肝脏病杂志, 2006, 14(5): 395–397.  
Luo JW, Shao JH, Bai J, *et al.* Using noninvasive transient elastography for the assessment of hepatic fibrosis [J]. *Chin J Hepatol*, 2006, 14(5): 395–397.
- [35] Sandrin L, Fourquet B, Hasquenoph JM, *et al.* Transient elastography: a new noninvasive method for assessment of hepatic fibrosis [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2003, 29(12): 1705–1713.
- [36] Foucher J, Chanteloup E, Vergniol J, *et al.* Diagnosis of cirrhosis by transient elastography (Fibro Scan): a prospective study [J]. *Gut*, 2006, 55(3): 403–408.
- [37] Pichon N, Loustaud-Ratti V, Clavel M, *et al.* Value of liver stiffness measured by transient elastography in the liver transplant pre-operative evaluation of the potential deceased liver donors: preliminary study [J]. *Clin Transplant*, 2011, 25: E205–E210.

- [38] 刘建华. 瞬时弹性成像在预测肝移植早期预后的应用研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2014.  
Liu JH. The assessment of early prognosis after liver transplantation by transient elastography [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2014.
- [39] Chon YE, Choi EH, Song KJ, *et al.* Performance of transient elastography for the staging of liver fibrosis in patients with chronic hepatitis B: a meta-analysis [J]. PLoS One, 2012, 7(9): 1–7.
- [40] 余梅, 毛华明, 黄必志. 牛肉品质的评定指标及影响牛肉品质的因素[J]. 中国畜牧兽医, 2007, 34(2): 33–35.  
Yu M, Mao HM, Huang BZ. Evaluation indexes and factors that influence the quality of beef [J]. Chin Anim Husb Veter, 2007, 34(2): 33–35.
- [41] 彭彦昆, 张海云. 生鲜肉品质安全无损检测技术研究进展[J]. 中国食物与营养, 2011, 17(10): 5–10.  
Peng YK, Zhang HY. Advancement of nondestructive detection technology of meat quality and safety [J]. Chin Food Nutr, 2011, 17(10): 5–10.
- [42] Ganne-Carrie N, Ziol M, De Ledinghen V, *et al.* Accuracy of liver stiffness measurement for the diagnosis of cirrhosis in patients with chronic liver diseases [J]. Hepatology, 2006, 44(6): 1511–1517.
- [43] Huang RG, Jiang N, Yang RG, *et al.* Fibroscan improves the diagnosis sensitivity of liver fibrosis in patients with chronic hepatitis B [J]. Exp Ther Med, 2016, 11(5): 1673–1677.
- [44] 郑永平, 麦德民, 黄铮铭, 等. 实时B超引导下的瞬时弹性肝纤维化评估[J]. 中国医疗设备, 2011, 26(1): 34–37.  
Zheng YP, Mai DM, Huang ZM, *et al.* Liver fibrosis assessment using transient elastography guided with real-time B-mode ultrasound imaging [J]. Chin Med Equ, 2011, 26(1): 34–37.
- [45] 罗葆明, 曾婕, 欧冰, 等. 乳腺超声弹性成像检查压力与压放频率对诊断结果影响[J]. 中国医学影像技术, 2007, 23(8): 1152–1154.  
Luo BM, Zeng J, Ou B, *et al.* Effects of pressure and compression frequency on diagnosis of breast masses by ultrasonic elastography [J]. Chin J Med Imaging Technol, 2007, 23(8): 1152–1154.
- [46] 邱少东, 陈菲, 曾碧丹, 等. 压力大小及压放频率对正常睾丸超声弹性声像图影响的析因设计研究[J]. 中国临床医学影像杂志, 2013, 24(5): 349–352.  
Qiu SD, Chen F, Zeng BD, *et al.* Influence of pressure and frequency in testicle UE sonogram in healthy person: a factorial design research [J]. J Chin Clin Med Imaging, 2013, 24(5): 349–352.
- [47] 李秋萍, 陈科, 林江莉. 压放频率对超声弹性成像结果的影响研究[J]. 实验科学与技术, 2015, 13(4): 202–206.  
Li QP, Chen K, Lin JL. Influence of compression frequency on ultrasound elastography [J]. Exp Sci Technol, 2015, 13(4): 202–206.
- [48] Zhang M, Castaneda B, Wu Z, *et al.* Congruence of imaging estimators and mechanical measurements of viscoelastic properties of soft tissues [J]. Ultrasound Med Biol, 2007, 33(10): 1617–1631.
- [49] Rivaz H, Boctor E, Foroughi P, *et al.* Ultrasound elastography: a dynamic programming approach [J]. IEEE Trans Med Image, 2008, 27(10): 1373–1377.
- [50] Gennisson JL, Catheline S, Chaffai S, *et al.* Transient elastography in anisotropic medium: application to the measurement of slow and fast shear wave speeds in muscles [J]. J Acoust Soc Am, 2003, 114(1): 536–541.

(责任编辑: 杨翠娜)

## 作者简介



李岩磊, 博士研究生, 主要研究方向为无损检测技术及装备。

E-mail: ilianlei@163.com



汤修映, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品无损检测技术及装备, 生物检测仪器研发。

E-mail: txying@cau.edu.cn