

食用肉类黏弹性检测研究进展

康熙龙, 李岩磊, 董俊, 王文娟, 彭彦昆, 汤修映*

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 肉类是人们生活中不可或缺的食物来源, 为人们提供丰富的营养。肉类的物理特性直接相关于其自身的感官特性, 如硬度和韧度等。食品流变学的知识可以表征出这些特性。一般认为, 食品的力学特性是感官检测评价法的主要内容, 新鲜度和嫩度是肉类及肉制品的重要评价指标之一。食用肉类的黏弹性与新鲜度密切相关, 对于弹性与新鲜度的定量关系的研究具有重要的理论意义和实践价值。本文综述了国内外学者利用质构仪、流变仪、万能试验机等对食用肉类进行的应力松弛试验、蠕变实验等试验以及得到的相应结果, 为食用肉类黏弹性检测研究提供了一定的理论基础, 并对其研究前景进行了展望。

关键词: 食用肉类; 黏弹性; 感官特性; 流变学

Research progress on viscoelasticity detection of edible meat

KANG Xi-Long, LI Yan-Lei, DONG Jun, WANG Wen-Juan, PENG Yan-Kun, TANG Xiu-Ying*

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

ABSTRACT: Meat is a kind of food sources and it is indispensable in people's lives, providing us with a wealth of nutrition. Physical characteristics of meat are directly related to its own organoleptic properties, such as hardness and toughness, etc. Knowledge of food rheology can characterize these properties. Generally it is believed that the mechanical characteristics of the food are the main content of the sensory evaluation method of detection. Freshness and tenderness are important indexes of meat and meat products. Edible meat's viscoelasticity is closely related to the freshness, the study of the quantitative relationship between elasticity and freshness has important theoretical and practical significance. This paper summarized the experiments of stress relaxation, creep, etc of edible meat which were conducted with texture analyzer, rheometer, universal testing machine, etc at home and abroad. The paper provides a theoretical basis for detection of edible meat's viscoelasticity, and prospects its research prospects.

KEY WORDS: edible meat; viscoelasticity; organoleptic properties; rheology

1 引言

食用肉类有很高的营养价值, 在各种类型的宴席上和我们的日常膳食中都占有重要地位。食用肉类可以给我们提供许多优质的蛋白质、丰富的维生素以及大量的多价

不饱和脂肪酸。而且在许多国家, 食用肉类的生产和加工在市场份额中占有很大比例。为响应消费者的各种需求和肉类生产工业对产品质量的期望, 基于肉类流变学性质的研究在科研角度占有很大角色。食品的力学性质由化学组成、分子构造、分子内结合、分子间结合、胶体组织、分

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) and 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, 17 Tsinghua East Road, Beijing 100083, China. E-mail: txying@cau.edu.cn

散状态等因素决定^[1]。食用肉类的黏弹特性是其自身品质的一种体现,根据肉类的品种不同、饲养时间和方法的不同以及新鲜程度的不同,其黏弹性表现也不尽相同。

2 食用肉类的黏弹性与其品质的关系

不同的感知方式适用于评价不同的品质属性,如视觉可以评价色彩、尺寸、外形,嗅觉和味觉可评价成分、气味、口感^[2],听觉则可以判断方位、缺陷、结构致密程度等,而触觉则通过接触感受到来自被接触物体的温度、材料特性、质地等^[3]。一般认为,食品的力学特性是感官检测评价法的主要内容^[4]。

食品是由多元化的复杂的基质构成的,不同的食品可以表现出不同的机械行为^[5],食用肉类亦然如此。根据人们的经验,在挑选肉类时可以用手试试弹性和黏度。新鲜肉外表微干或微湿润,不粘手,经过指压后凹陷能立即恢复;而变质的外表干燥或者粘手,新切面发黏,手按了之后不能恢复原状并留有凹痕。在国标的感官标准评价中也由此方面的类似描述^[6,7]。这些判断标准就反应出了肉类的黏弹性这一重要性质,但这仅是一个定性的感官上的描述,它主要靠经验,存在很大的主观性、片面性和不确定性,实际应用中很难操作。因此,通过揭示黏弹性的定量规律来对食用肉类的品质进行精确判定具有现实意义。

食用肉类是一类典型的复杂黏弹性体,既具有固体的弹性性质,又呈现液体的黏性性质,其力学性质不像完全弹性那样仅用力与变形来描述,还与力的作用时间密切相关^[4]。黏弹性体的性质都可以象征性地用弹性元件和黏性元件表示出来,如图1和图2是最基础的黏弹性体的表示。开尔文模型和麦克斯韦模型虽然可以代表黏弹性体的某些流变规律,但这两个模型与实际的黏弹性体还有一定的差距。为了更确切地用模型表述实际黏弹性体的力学性质,就需要用更多的元件组成所谓的多要素模型。

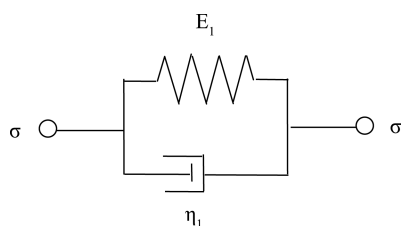


图1 开尔文模型

Fig. 1 Kelvin model

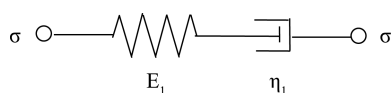


图2 麦克斯韦模型

Fig. 2 Maxwell model

Gross 等^[8]的研究表明:食品材料的物理特性直接关于该材料的感官特性,如硬度、韧度和脆性。这些特性正是消费者的直接感官及其评价质量的标准。而且他们认为,流变学的知识可以表征出这些特性、预测出质量,也可以用于减少在收获、运输和装卸食品时的损失。Pitt 等^[9]的进一步研究表明:食品的物理和机械特性取决于该食品材料的生物化学性质、化学组成和组织结构。

3 食用肉类黏弹特性的国内外研究进展

传统的检测肉类食品黏弹性流变学特征的定量方法常常是利用质构仪或万能试验机对肉样进行压缩试验或剪切试验^[3,10,11]。这些方法在研究食用肉类的黏弹性方面取得了较大的进展。

3.1 畜肉的黏弹性研究

猪牛羊肉是日常生活的主要副食品,在肉类市场占比最大。猪牛羊肉含有丰富的蛋白质及脂肪、碳水化合物、钙、磷、铁等成分,而且含有人们所需要的一切必需氨基酸等特点,深受国际市场青睐。

董欣等^[12]研究了基于黏弹性的猪肉品种分类方法,利用万能试验机采用平板压头对不同种类的猪肉实施应力松弛试验,利用遗传算法识别基于三阶六参数麦克斯韦模型(Maxwell model)的猪肉松弛特性参数:弹性模量 E_1 、 E_2 、 E_3 和应力松弛时间 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 (黏度 $\eta = E \cdot \tau$, 描述黏弹性特征时二者常取其一)。利用该方法,肋腹肉与前肘肉、通脊肉和臀腿肉之间的分类正确率分别高达 98%、96% 和 95%,臀腿肉与前肘肉、通脊肉分类准确率达到 89% 和 78%。Myhan 等^[13]主要针对波兰的猪肉进行研究。选取两种不同品种的处理过的猪肉(该猪肉在波兰的零售商店均有所售),利用质构仪对实验猪肉进行压力测试,在开始和结尾阶段保持猪肉的变形量恒定—即应力松弛实验。被分析的样品中发现:其化学组分和流变性能具有显著的相关性。蒋予箭等^[11]利用物性仪研究了多次压缩下肉的压力-时间变化规律,比较了不同方法的弹性数据与感官值之间的相关性,得出可用一次压缩过程中的最大力来表示猪肉的弹性。刘兴余等^[14]利用国产嫩度计和国外质构仪测试猪肉的剪切力值,建立了冷鲜猪肉和熟猪肉嫩度预测模型。Nobile 等^[15]曾尝试使用广义麦克斯韦模型描述固态食品的应力松弛特性。利用动态力学分析仪对肉进行了应力松弛实验。然后用麦克斯韦模型很好的拟合了测得的实验数据,而且可以较好地预测其黏弹性。日本 Takei 等^[16]利用蠕变测试仪对经过酶处理的牛肉实施压缩试验,利用牛肉蠕变特性,建立了二阶开尔文蠕变模型(Kelvin creep model),获得了牛肉的黏弹性特性参数并对其咀嚼适口性进行了评价。比利时 Van Wezemael 等^[17]研究了牛肉嫩度的感官评价、剪切力值及消费者习惯之间的联系。Bruno 等^[18]依靠动态振荡测试来研究肉的流变性质。

3.2 禽肉及鱼虾等的黏弹性研究

中国有“无鸡不成宴”的说法,国内对鸡肉和鸭肉制品的生产与消费有悠久的历史。近年来,再加上国家对传统餐饮行业的重视程度逐渐增加,现代化快餐业的迅速成长,消费者收入水平和消费偏好都在发生变化,这些因素无疑会促进国内鸡、鸭、鱼、虾肉等的消费市场不断兴旺。

佟月英等^[3,19]利用万能试验机压缩试验获取鸡肉的压力-位移曲线,并通过理化方法测得挥发性盐基氮(TVB-N,新鲜度指标)含量,研究了压力、回弹量、功耗比等与新鲜度的相关性,建立了基于力学参数的鸡肉新鲜度预测模型。美国 Qiang 等^[20]利用球形压痕法(压头为球头)实施应力松弛试验,采用三阶广义麦克斯韦模型,同时结合有限元分析法对鸡胸脯肉的黏弹特性进行了研究,并把肉样厚度也作为影响因素加以考虑。李振兴等^[21]利用物性仪压缩试验研究了鱼肉弹性参数与新鲜度的关系,建立了基于最大力、压力所做功的鱼肉新鲜度偏最小二乘(PLSR)预测模型。DILEEP 等^[22]针对冷冻贮藏对带鱼肉的理化指标和动态黏弹性的影响进行了研究。选取了不同贮藏时间的带鱼作实验材料,利用流变仪分别测得带鱼的动态黏弹性数据,然后分析挥发性盐基氮、肌球蛋白重链的浓度和动态黏弹性之间的关系。得到了不同的冷冻贮藏时间对带鱼肉的黏弹性的影响。Campus 等^[23]针对高压处理后金头鲷鱼的应力松弛特性和肌肉组织结构的变化进行了研究。利用质构仪,通过应力松弛实验,得到了金头鲷鱼的应力松弛模型。经过分析,其应力松弛模型与三阶麦克斯韦模型获得了最佳拟合。而且应力松弛试验能够成功的评估在高压处理过的鲷鱼的肌肉组织变化。另外,进一步分析表明,高压处理对鱼肉的肌肉组织有较好的影响,而对鱼肉的系水力有负面的影响。李立杰等^[24]利用质构仪和平底柱形探头进行压缩试验,利用应力松弛特性,建立了南美对虾虾肉的四要素伯格斯模型,获得了其黏弹性模型参数值。

3.3 肉制品的黏弹性研究

肉制品是指以新鲜食用肉类为主要原料,经选料、修正、腌制、调味、成形、熟化(或不熟化)和包装等工艺制成的肉类加工食品。如香肠、酱卤肉、火腿、培根等。随着科学技术的不断进步,肉类加工业正在突飞猛进地发展,肉制品的消费趋势日渐攀升^[25]。因此,对肉制品的检测研究愈来愈显得重要。

李小燕等^[26]针对青岛波尼亚公司4号猪肉火腿,利用流变仪采用平底柱形探头进行单轴向压缩实验,研究了基于应力松弛曲线的该型号火腿的流变学特性,采用四要素伯格斯模型(Burgers model)进行建模,得到了该型号火腿的黏弹性特性参数:弹性模量 E_1 、 E_2 ,黏度(黏性模量) η_1 、 η_2 及破断强度,并结合感官评定结果得到该型号火腿弹性适中、硬度大和肉嫩度好的结论。伊朗 Savadkoobi 等^[27]和意大利 Bruno 等^[18]利用流变仪和平板压头实施动态振动,

分别研究了去骨鸡肉香肠和 Bologna 香肠的动黏弹性特性,分别获得了表征香肠动黏弹性的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 。波兰 Myhan 等^[28]实施应力松弛试验,分别建立了香肠制品的三要素非线性应力松弛模型,获得了香肠的黏弹性特性参数。美国 Lu 等^[29]应用单向和二维压缩试验研究了牛肉香肠的弹性变化规律,研究表明牛肉香肠在大变形条件下呈现出非线性弹性特征。阿根廷生产的低脂鸡肉香肠的应力松弛特性。Andres 等^[30]研究了为降低鸡肉香肠脂肪含量而不改变其自身的韧性和品质。利用质构仪对鸡肉香肠进行了一系列实验。实验发现并联的七要素麦克斯韦模型与一个纯弹性元素模型所结合的模式表现出与实验数据非常吻合,而且得到结论:广义的麦克斯韦模型能够充分预测低脂肪香肠的松弛时间。Chattong 等^[31]利用流变仪对泰国鸵鸟肉香肠的动态黏弹特性进行了研究。发现处理过的样品的蠕变曲线很好的符合四要素伯格斯模型,而且温度和保温时间显著影响样品的黏弹性性质。

4 总结与展望

根据前述分析,黏弹特性是肉类的重要物性性质之一,也是其感官评价的重要内容,甚至可以认为它是决定肉类品质的主要指标^[32],因为黏弹性与肉类的生化变化、变质情况有着密切联系^[33,34],肉类的内部组织状态等内在因素都可从肉的黏弹性得到体现^[35],肉类诸多品质指标如新鲜度、嫩度、系水力、多汁性、质地、营养成分(如蛋白质、脂肪含量)等都与黏弹性流变学性质密切相关。

上述实验均是使用质构仪、流变仪或者万能试验机实施的实验。另有学者尝试从其他途径对肉品的黏弹性进行研究。苑学霞等^[36]研发了一种肉质弹性强度检测仪,通过测定一定时间下打击力的变化情况来确定肉品的弹性程度。这些方法在实验过程中,要么探头压缩接触肉样品,要么把肉剪切掉,对样品产生不可逆的污染或破坏,降低了肉制品后期的食用价值。

此外,国内外还有学者^[37-39]利用剪切波频散超声振动方法,通过剪切波的传播特性来建立软组织的黏弹性模型,目前主要在医学检测领域应用。另外, Hung 等^[40]利用气流打击和激光测距结合的原理,采集大量的成熟期桃子的数据,根据多元回归分析来检测成熟的桃子的优劣。这些方法和思路都克服了上述实验的污染或破坏的缺点。因此,在食用肉类的黏弹性检测方面若能够引入这些理论,达到无损检测的目的,将具有重大的实际意义。

参考文献

- [1] 李云飞. 食品物性学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2013.
Li YF. Physical properties of foods [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2013.
- [2] Hansen T, Petersen MA, Byrne DV. Sensory based quality control utilising an electronic nose and GC-MS analyses to predict end-product quality

- from raw materials [J]. *Meat Sci*, 2005, (4): 621–634.
- [3] 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.
- [4] 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- Li LT. *Physical properties of foods* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004.
- [5] Gunasekaran S, Ak MM. Dynamic oscillatory shear testing of foods—selected applications [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2000, 11(3): 115–127.
- [6] 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. The evaluation index and affecting factors of beef quality [J]. *China Anim Husb Vet Med*, 2007, 34(2): 33–35.
- [7] 赵进辉, 袁海超, 刘木华, 等. 基于最小二乘支持向量回归的鹅肉弹性的可见-近红外光谱测定[J]. *核农学报*, 2012, 26(8): 1154–1158.
- Zhao JH, Yuan HC, Liu MH, *et al.* Determination of elasticity of goose meat using visible-near infrared spectroscopy and LSSVR [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2012, 26(8): 1154–1158.
- [8] Gross MO, Rao VNM, Smit CJB. Rheological characterization of low-methoxyl pectin gel by normal creep and relaxation [J]. *Texture Stud*, 1980, 11: 271–289.
- [9] Pitt RE, Chen HL. Time-dependent aspects of the strength and rheology of vegetative tissue [J]. *Trans ASAE*, 1983, 26: 1275–1280.
- [10] Alvarez D, Xiong YL, Castillo M. Textural and viscoelastic properties of pork frankfurters containing canola-olive oils, rice bran, and walnut [J]. *Meat Sci*, 2012, 92: 8–15.
- [11] 蒋予箭, 周雁. 肉类弹性测定方法的研究[J]. *食品科学*, 2002, 23(4): 99–101.
- Jiang YJ, Zhou Y. The study of meat elasticity measurement method [J]. *Food Sci*, 2002, 23(4): 99–101.
- [12] 董欣, 宋刘洋, 权龙哲, 等. 基于肉质流变学特性的猪肉品种分类算法研究[J]. *东北农业大学学报*, 2013, 44(5): 107–110.
- Dong X, Song LY, Quan LZ, *et al.* Study on pork mechanics rheological properties based on the method of stress relaxation [J]. *J Northeast Agric Univ*, 2013, 44(5): 107–110.
- [13] Myhan R, Markowski M, Daszkiewicz T, *et al.* Non-linear stress relaxation model as a tool for evaluating the viscoelastic properties of meat products [J]. *J Food Eng*, 2015, 146(146): 107–115.
- [14] 刘兴余, 金邦荃, 詹巍, 等. 猪肉嫩度测定方法的改进[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(1): 167–172.
- Liu XY, Jin BQ, Zhan W, *et al.* Improved method of measuring meat tenderness in pork [J]. *Sci Agric Sin*, 2007, 40(1): 167–172.
- [15] Nobile MAD, Chillo S, Mentana A, *et al.* Use of the generalized Maxwell model for describing the stress relaxation behavior of solid-like foods [J]. *J Food Eng*, 2007, 78(3): 978–983.
- [16] Takei R, Hayashi M, Umene S, *et al.* Changes in physical properties of enzyme-treated beef before and after mastication [J]. *J Texture Stud*, 2014, 46(1): 3–11.
- [17] Wezemael LV, Smet SD, Øydis Ueland, *et al.* Relationships between sensory evaluations of beef tenderness, shear force measurements and consumer characteristics [J]. *Meat Sci*, 2014, 97(3): 310–315.
- [18] Bruno M, Moresi M. Viscoelastic properties of Bologna sausages by dynamic methods [J]. *J Food Eng*, 2004, 63(3): 291–298.
- [19] 佟月英, 陈东辉, 石志标, 等. 鸡肉的力学参数与其新鲜度关系的数学模型[J]. *农机化研究*, 2010, (3): 174–176, 201.
- Tong YY, Chen DH, Shi ZB, *et al.* The mathematical model between mechanical parameters and freshness chicken [J]. *Agric Mech Res*, 2010, (3): 174–176, 201.
- [20] Qiang B, Greenleaf J, Oyen M, *et al.* Estimating material elasticity by spherical indentation load-relaxation tests on viscoelastic samples of finite thickness [J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2011, 58(7): 1418–1429.
- [21] 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, 24(4): 37–39.
- Li ZX, Liu ZD. The study of correlation between meat elasticity and its freshness [J]. *J Zhengzhou Inst Technol*, 2003, 24(4): 37–39.
- [22] Dileep AO, Shamasundar BA, Binsi PK, *et al.* Effect of ice storage on the physicochemical and dynamic viscoelastic properties of ribbonfish (*Trichiurus spp*) meat [J]. *J Food Sci*, 2005, 70(55555): 217–222.
- [23] Campus M, Addis MF, Cappuccinelli R, *et al.* Stress relaxation behaviour and structural changes of muscle tissues from Gilthead Sea Bream (*Sparus aurata*, L.) following high pressure treatment [J]. *J Food Eng*, 2010, 96(2): 192–198.
- [24] 李立杰, 柴春祥, 鲁晓翔. 南美白对虾肉流变学模型的建立[J]. *食品科学*, 2014, 35(11): 62–65.
- LI LJ, Chai CX, Lu XX. Rheological modeling of *Penaeus vannamei* meat [J]. *Food Sci*, 2014, 35(11): 62–65.
- [25] 苏丹, 赖雪雷, 康建波. 肉制品加工研究进展与新技术应用[J]. *农产品加工(创新版)*, 2011, 4: 51–58, 69.
- Su D, Lai XL, Kang JB. Advances in meat processing and application of new technologies [J]. *Process Agric Prod (Innov Ver)*, 2011, 4: 51–58, 69.
- [26] 李小燕, 高昕, 许加超, 等. 新型低温循环加热火腿的组织构造和流变学特性[J]. *农产品加工(学刊)*, 2008, (7): 41–43, 46.
- Li XY, Gao X, Xu JC, *et al.* Rheological and structural properties of new low temperature meat product with cyclic heating [J]. *Acad Period Farm Prod Process*, 2008, (7): 41–43, 46.
- [27] Savadkoobi S, Shamsi K, Hoogenkamp H, *et al.* Mechanical and gelling properties of comminuted sausages containing chicken MDM [J]. *J Food Eng*, 2013, 117(3): 255–262.
- [28] Myhan R, Markowski M, Daszkiewicz T, *et al.* Non-linear stress relaxation model as a tool for evaluating the viscoelastic properties of meat products [J]. *J Food Eng*, 2015, 146(146): 107–115.
- [29] Lu R, Chen YR. Characterization of nonlinear elastic properties of beef products under large deformation [J]. *Trans ASAE*, 1998, 41(1): 163–171.
- [30] Andrés SC, Zaritzky NE, Califano AN. Stress relaxation characteristics of low-fat chicken sausages made in Argentina [J]. *Meat Sci*, 2008, 79(3): 589–94.
- [31] Chattong UAA. Dynamic viscoelastic characterisation of ostrich-meat yor (Thai sausage) following pressure, temperature and holding time regimes [J]. *Meat Sci*, 2009, 81(3): 426–432.
- [32] Cassens RC. Historical perspectives and current aspects of pork meat quality in the USA [J]. *Food Chem*, 2000, 69(4): 357–363.
- [33] Hambrecht E, Eissen JJ, Newman DJ, *et al.* Preslaughter handling effects on pork quality and glycolytic potential in two muscles differing in fiber

- type composition [J]. *J Anim Sci*, 2005, 83(4): 900–907.
- [34] Barton PA. Some experience on measuring the meat quality of pig carcasse [J]. *Acta Agri c Scandinavica Suppl*, 1999, 21: 61–70.
- [35] Ryu YC, Choi YM, Kim BC. Variations in metabolic contents and protein denaturation of the longissimus dorsi muscle in various porcine quality classifications and metabolic rates [J]. *Meat Sci*, 2005, 71(3): 522–629.
- [36] 苑学霞, 吕潇, 张勇, 等. 肉质弹性强度检测仪: 中国, 201020554652.7 [P]. 2011.04.27.
- Fan XX, Lv X, Zhang Y, *et al*. Meat elasticity strength tester: China: 201020554652.7 [P]. 2011.04.27.
- [37] Sinkus R, Bercoff J, Tanter M, *et al*. Nonlinear viscoelastic properties of tissue assessed by ultrasound [J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2006, 53(11): 2009–2018.
- [38] Shi Y, Xie H, Shandasani V, *et al*. Urba. Phase aberration in shear wave dispersion ultrasound vibrometr [C]. *IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS2011*: 2408–2411.
- [39] Hertzberg Y, Huger M, Navon G, *et al*. Rapid method for assessing relative tissue stiffness using MR acoustic radiation force imaging [J]. *Int J Imag Syst Technol*, 2014, 24(1): 103–110.
- [40] Hung YC, Prussia SE, Ezeike GOI. Nondestructive firmness sensing using a laser air-puff detector [J]. *Postharvest Biol Technol*, 1991, 16: 15–25.

(责任编辑: 白洪健)

作者简介



康熙龙, 硕士研究生, 主要研究方向为无损检测技术及装备。

E-mail: ikangxilong@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