

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.030

注水肉无损检测技术现状与发展趋势分析*

黄玉萍 陈桂云 夏建春 於海明

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 针对目前市场上注水肉现象加重问题,有必要研究注水肉的检测技术。首先对注水肉的传统检测方法进行简要论述,分析总结了传统方法的弊端;然后对现阶段肉品含水率的4种主要无损检测方法:生物电阻抗法、核磁共振方法、超声波法和近红外光谱法的研究现状及特点进行了总结分析,着重叙述了近红外光谱技术在肉品含水率及品质检测中的研究情况及技术特点,提出了未来技术发展方向。

关键词: 注水肉 近红外光谱 无损检测

中图分类号: TS251.7; O657.33 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)01-0207-09

Status and Trends of Nondestructive Detection Technology for Water-injected Meat

Huang Yuping Chen Guiyun Xia Jianchun Yu Haiming

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: Meat is one of the most important foods in people's daily life, its quality affects our health directly. In recent years, the adulteration incident of water-injected meat continues to occur. The safety issue of meat food has attracted the social attention, so the research of water-injected meat technology is necessary. The traditional inspection methods of water-injected meat were discussed and their disadvantages were analyzed. The nondestructive detection technology was a dominant means for water-injected meat quality detection and supervision system. Then authors summarized the research status and characteristics of four nondestructive testing methods (bioelectrical impedance, nuclear magnetic resonance, ultrasonic technology and near-infrared (NIR) spectroscopy) for moisture content of meat. The application of NIR spectroscopy technique for moisture content detection was specially described. The review indicated that NIR was an effective technique to detect moisture content of meat for it was more sensitive to water. The discussion also focused on future work to improve NIR ability to predict water-injected meat. In conclusion, the paper shows that NIR has a considerable potential to predict water-injected meat quality criteria.

Key words: Water-injected meat NIR spectroscopy Nondestructive detection

引言

近年来,随着国内肉品购销市场的不断开放,一些经营者为了牟取暴利,生产和出售注水肉,严重影响了肉品的卫生质量,威胁到消费者的身体健康。

注水肉是牲畜在宰前或宰后被人为注射一定量的水分,以此增加重量的生肉。水分是影响肉类品质的最重要因素之一,含水率越高,微生物生长繁殖得越快。梁学峰等^[1]对猪肉和牛肉含水率的研究表明,猪肉平均含水率为74.43%,牛肉平均含水率为

收稿日期: 2014-09-13 修回日期: 2014-11-09

* 国家公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201303083)

作者简介: 黄玉萍, 博士生, 主要从事农产品检测与加工技术研究, E-mail: h. y. p_2010@163.com

通讯作者: 於海明, 副教授, 主要从事农业工程研究, E-mail: yuhaiming@njau.edu.cn

75.69%,如表1所示。猪肉和牛肉的含水率频数分布如图1、2所示,猪肉含水率标准值为74.64%,牛肉含水率标准值为75.99%。对理论标准值进行调整后,猪肉含水率标准为小于(等于)76%,牛肉为小于(等于)77%,高于这个含水率标准的猪肉和牛肉均可视为注水肉。

表1 水分含量正态D值检验
Tab.1 D values of moisture content

品种	含水率	平均	样品	标准	标准
	范围/%	值 \bar{X} /%	总数 n	偏差 S	误差 α
猪肉	68.26 ~ 80.31	74.43	459	1.99	0.09
牛肉	70.10 ~ 81.05	75.69	182	1.82	0.13

近些年来注水肉的检测技术正逐渐成为一个研究热点。本文对近年来注水肉检测的方法和技术研究进行归纳分析,重点对无损检测技术在肉品含水率检测中的研究与应用进行阐述。

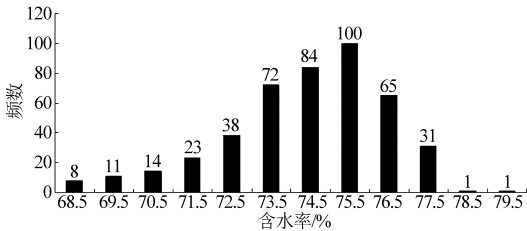


图1 猪肉含水率频数分布

Fig.1 Frequency distribution of moisture content results of pork

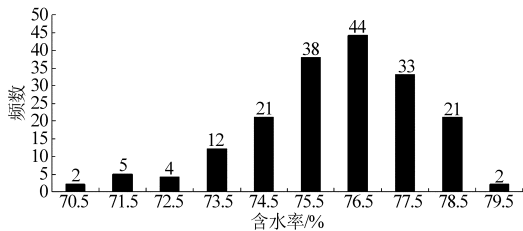


图2 牛肉含水率频数分布

Fig.2 Frequency distribution of moisture content results of beef

1 注水肉主要检测技术

1.1 传统方法

1.1.1 感官检验法

感官检验法主要分为视觉和触觉^[2-4],视觉主要通过观察肉品形态学变化,即:通过观察肉品的外观肌肉颜色是否苍白,切面是否过于湿润、是否可见有水分从肉中向外渗出等现象进行判断;触觉鉴别注水肉,触摸时手感湿润,但不发粘,按压时会有多余水分流出,弹性较差,压痕恢复较慢等特点,据此可以判断为注水肉。感官检验法由于个体感官的差异,每个人判断的结果有可能不同,从而直接影响到

检测结果的准确性。

1.1.2 实验室检验法

实验室检验法主要有镜检法、熟食率法、试纸法和干燥法^[5-7]。镜检法是将少量肉组织切片放在20倍放大镜下观察,若肉的肌纤维发生肿胀、排列不整齐、断裂,或肌纤维组织间隙明显增大,有少量淡红色液体渗出等现象,即可断定为注水肉。但镜检法操作繁琐,不易切片,需专业人员进行检测等,给检测注水肉带来了一定困难;熟食率法就是用水煮熟后看熟肉率,是在破坏样本的情况下进行的,熟食率大于50%为正常肉,小于50%为注水肉;而试纸法主要看试纸的湿润程度,不超过5mm的为正常肉,大于5mm的为注水肉,试纸法简单易行,但灵敏度不高;干燥法按GB 5009.3—2010规定的水分测定方法,虽然准确可靠,却耗时耗电,且破坏了样本。此外,还有滴水损失法、加压检验法、冰冻法等注水肉检测方法^[8],这些方法都存在一定的人为因素,影响检测结果的准确性。

传统方法不仅破坏了样本,且检测存在一定的主观性,在注水肉类检测中并不可取,只能作为一种辅助手段。

1.2 无损检测技术

无损检测(Non-destructive testing)是利用声、光、磁和电等特性,以不损害被检对象性能为前提,检测被检样品中是否存在缺陷,给出缺陷的大小、性质和数量等信息,进而判定被检样品所处技术状态(如合格与否)的所有技术手段的总称。与传统方法相比,无损检测具有非破坏性、全面性、全程性和可靠性等显著特点。现阶段注水肉无损检测方法主要有生物电阻抗法、核磁共振法、超声波法和近红外光谱法等。

1.2.1 生物电阻抗法

生物阻抗是生物组织一个基本的物理参数,反映生物组织、细胞或整个生物机体电学性质^[9]。生物电阻抗值受多种因素影响,呈现多种特性,其中以频率特性最为显著。方海田等^[10-11]对牛肉样本生物电阻抗值与失水率进行的相关性分析表明,随着频率的升高,生物电阻抗值均呈下降趋势。细胞膜在低频电流通过时显现出绝缘,电流须绕过细胞膜流过,而输入高频电流时,细胞膜显示电容特性,允许电流进入细胞,从而增加了细胞直接载流能力。宰后牛肉样本10d中所测定的生物电阻抗值与失水率之间呈现相关性,且样品频率在5~40kHz时,相关系数 $r=0.12698$,在 $\alpha=0.05$ 水平下显著,在60~200kHz时,生物电阻抗值差异不显著。

Yang等^[12]用生物电阻抗四电极法检测了44个猪

肉样本,30 个样本(17 个正常鲜猪肉,13 个注水肉)作为训练集进行建模,14 个样本作为验证集,通过回归分析得到样本水分决定系数 $R^2 = 0.802$, $P < 0.05$ 。Forrest 等^[13]将生物电阻抗法(1 000 Hz)和近红外光谱法(900 ~ 1 800 nm)两种技术进行比较,分别对屠宰后 24 h 猪胴体的失水率进行检测,生物电阻抗值与失水率相关系数达到 0.5,标准偏差为 2.53%,而近红外光谱法相关系数达到 0.8。

在肉制品加工方面,通过阻抗谱分析脂肪、水分等品质因素是近年来提出的生物阻抗技术的一个新的应用领域。应用生物电阻抗谱检测 PES(pale, 肉色苍白;soft 质地松软;exudative, 切面液汁渗出)肉是通过在细胞外液介质中细胞膜的变化来进行评估的。Guerrero^[14]将生物电阻抗谱应用到西班牙干腌火腿生产中,重点检测分析了 PES 肉,并根据肉品的柔韧性进行筛选分类。高的 pH 值下降速率和低的极限 pH 值将导致较高的肉汁渗出率,防止 PES 肉的 pH 值迅速下降成为研究肉品质量的关键。一旦确定好极限 pH 值,低频生物电阻抗法能更好地检测 PES 肉。

生物电阻抗法虽然操作简便,功能信息丰富^[15],但其阻抗值精度不仅受肉品组成影响,还会受到温度、频率和电极形状^[16]等的影响。

1.2.2 核磁共振法

核磁共振是指具有固定磁矩的原子核,在恒定磁场与交变磁场的作用下发生能级分裂,在有相应电磁波作用时,核能级之间会发生共振跃迁。运用核磁共振对肉类样品质量检测研究,是通过分析样品的纵向弛豫时间 T_1 和横向弛豫时间 T_2 ,从而得到样品内部的信息。而不同的水分分布和含量均会导致 T_1 和 T_2 的变化,且 T_2 比 T_1 更为敏感,因而在肉类水分的研究中均采用横向弛豫时间 T_2 ^[17-21]。

Hazlwood 等^[22-23]早在 1969 年就发现,肉品中水分子的自由运动产生了核磁共振的信号,核磁共振适合肉类组织水分的检测研究,并于 1974 年得出肉组织中至少含有 3 种不同形式的水。肉品中含有与大分子相互作用的水(即结合水)、肌原纤维和网状组织中的水(即不易流动水)和细胞外水(即自由水)3 种状态水,而注水肉中的水多为自由水,利用核磁共振技术检测注水肉可根据 3 种状态水的含量进行判断。Sharifudin 等^[24]运用核磁共振和磁共振成像技术测得生鲜鸡肉中 3 种水分,磁共振成像与核磁共振容积测得蒸煮鸡肉的横向弛豫时间具有高度显著相关性,相关系数 $r = 0.986$ ($p < 0.01$),并根据横向弛豫时间反演谱的积分面积得出水分的相对含量变化。

核磁共振技术和国际上常用的肉品持水率检测方法具有较高的相关性,且具有更高的检测效率和灵敏度。Bertram 等^[25-28]研究了低场核磁共振 T_2 与 Honikels 袋法和离心法所测的猪肉系水力相关系数分别为 0.77 和 0.75,并于次年测得的肌肉组织横向弛豫时间 T_2 与用袋测法获得的滴水损失之间的相关系数达到 0.85。

核磁共振技术不仅能测出肉品中的水分含量,还能充分而准确地反映肉品中水分的空间分布和水分的传输特性^[29-31]。Bertram 等^[32-34]都利用核磁共振技术对猪肉的水分分布和流动性进行了研究。此外,他还运用低场核磁共振横向弛豫时间 T_2 研究了 PES 肉与 DFD(dark, 颜色深暗;firm, 质地坚硬;dry, 切面干燥)肉品品质,在样品冷藏的条件下,每隔 1 ~ 2 个月检测其水分分布与水分活性,并得出肉中的自由水的含量对鲜肉品质有较大影响。姜晓文等^[35]用低场核磁共振仪检测了宰后猪肉样品水分分布的变化情况,并得出自由水横向弛豫时间 T_{23} (100 ms 以上)积分面积与滴水损失之间的相关系数为 -0.86。核磁共振技术在检测物料内部水分分布和传输特性上已十分成熟,不仅广泛应用于肉制品中,在谷物、食品等物料中应用也十分普遍^[36-37]。

核磁共振作为一种水分测定的新技术,能够检测出肉品中水分的多项信息,但因核磁共振仪器设备制造成本较高而限制了其在线肉品检测中的广泛应用。

1.2.3 超声波法

超声波是指频率高于 16 kHz^[38-39],且不引起人类听觉的机械弹性波。低强度超声波(频率 100 ~ 200 kHz)通常应用于食品分析检测领域^[40-42],其方向性好,穿透能力强,易于获得较集中的声能,且不会影响检测对象的性质^[43]。超声波技术在检测肉品组分中的应用已经相当成熟,Simal 等^[44]用超声波技术测定发酵肉制品的成分,根据不同温度下的超声波速度来检测分析肉品中的脂肪、水分和蛋白的含量,得到的解释方差分别为 97.6%、95.6% 和 98%。Micklander 等^[45]分析得出猪肉的保水性与肌肉结构组织有关,建立了猪肉超声波波谱的持水性预测模型,对屠宰初期的猪肉胴体进行分级。超声波技术在肉类腌制品中,若强度较低则无法促进腌制剂的扩散,起不到改善品质的目的,若强度较高又会导致肌肉蛋白质的变性而降低肉品品质。Cárcel 等^[46]研究了高强度超声波对肉类腌制品的影响,并分析了高强度超声波对样品水分的影响。

超声技术以快速、精确,不具破坏性且能应用于非透明体系等优点广泛应用于肉品检测中。然而,

超声波对气泡非常敏感,会使超声波强度大为衰减,且气泡的存在会降低其他组分的超声波信号。

1.2.4 近红外光谱法

近红外光谱(Near infrared spectroscopy, NIRS)分析技术是利用波长在 780~2 526 nm 范围内的透射及反射光谱,对研究对象进行定性和定量分析。根据近红外光谱理论,在 750、940、1 420、1 910 nm 波长,水基团将发生一级倍频、二级倍频、三级倍频及合频的能量跃迁,在其近红外光谱图上,有明显的吸收峰。因此,利用近红外光谱进行含水率测定,一直是检测研究人员关注的研究领域。

20 世纪 70—80 年代,国外学者就开始关注近红外反射光谱与水分、蛋白质、脂肪之间的相关性研究^[47-50]。自 Karl Norris 1986 年成功使用近红外光谱技术和多元线性回归分析测定农产品的水分、蛋白质和脂肪含量后,近红外光谱技术在农产品检测与应用中逐渐受到人们的关注。近红外光谱技术不仅可以用来对鲜肉、冷冻肉或熟肉中蛋白质、脂肪等成分的分析测定,还可以对肉色、嫩度、新鲜度和保水性等感官特征进行评价,也可对肉的产地、真伪等做出鉴定和判断^[51-55]。

近年来,近红外光谱技术在肉类水分检测方面已经有了显著进展,见表 2。2000 年,Brøndum 等^[56]开发了针对豪猪肉持水能力及脂肪含量预测的近红外光谱模型,进行了利用近红外光谱预测豪猪肉持水能力预测的尝试。Prevolnik 等^[57]将近红外光谱技术用于表征猪肉持水能力的 3 个参数的预测,认为将近红外光谱用于在线检测猪肉持水能力,

尽管仍需进一步改进,但其突出的优点使其具有巨大的应用潜力。Tøgersen 等^[58]采用近红外光谱技术对冷冻牛肉的脂肪、蛋白质及水分含量进行在线测定,脂肪的预测均方根误差为 0.48%~1.11%,含水率的均方根误差为 0.43%~0.97%,蛋白质的均方根误差在 0.41%~0.47% 之间。

利用近红外光谱进行新鲜肉品含水率的检测是一个较新的研究领域,近几年国内才开始有少量的研究报道。姬瑞勤等^[59-60]于 2006 年在多层生物组织模型下,提出了一种利用近红外光谱技术定量无损检测鲜肉含水率的方法;两年后又以猪鲜肉为样品,采用近红外离散式光源,应用基于稳态空间分辨方法的漫反射方式测量鲜肉含水率,得到了比较好的实验结果,相关系数均达到 0.90 以上。用变异系数和组内相关系数检验测量的可靠性,变异系数小于(等于)5%,组内相关系数达到 0.83,表明方法稳定可靠。张海云等^[61-62]用近红外光谱对生鲜猪肉的含水率进行检测,经平滑滤波、多元散射校正和一阶导数预处理对原始光谱进行降噪处理,分析比较了多元线性回归和偏最小二乘回归法(PLSR)建立的生鲜猪肉含水率的预测模型,得到其预测相关系数分别为 0.839 和 0.810。并于同年 10 月,利用径向基核函数的支持向量机算法建立了支持向量机预测模型,并与 PLSR 建模法进行比较,支持向量机所建模型对训练集和测试集进行预测的相关系数分别为 0.96 和 0.87,均方根误差分别为 0.32 和 0.67,而 PLSR 所建模型的相关系数分别为 0.83 和 0.89,均方根误差分别为 0.71 和 0.65。

表 2 近红外光谱预测肉类含水率统计

Tab. 2 Prediction of moisture content in meat and meat products by NIR spectroscopy

文献序号	肉类品种	检测参数	校正决定系数	交叉检验标准误差	预测误差	相对分析误差
63	牛肉/猪肉(切碎)	含水率	0.71/0.87	1.23/1.09	0.94/1.03	
64	羊肉(完整/切碎)	含水率	0.56/0.76	15.5/10.4		1.25/1.88
65	猪肉(完整)	含水率	0.8	0.0058	0.0063	
66	牛肉(完整/切碎)	含水率	0.07/0.08	15.2/33.1		0.99/2.81
	猪肉(完整/切碎)	含水率	0.55/0.76	15.5/10.3		1.25/1.89
	家禽(完整/切碎)	含水率	0.45/0.99	15.9/6.9		1.11/4.80
67	牛肉(切碎)	含水率	0.92	0.87		3.62
68	羊肉(完整)	含水率	0.67	0.69		1.57
69	猪肉红肠(切碎/均匀)	含水率	0.97/0.98	0.99/0.79	1.00/0.76	5.48/7.21
70	干腌猪肉香肠(完整/均匀)	含水率	0.93/0.98	1.03/0.53	0.97/0.41	3.43/8.12
71	牛肉(均匀)	含水率	0.86		0.37	1.87
72	发酵猪肉香肠(接触探针/远程探头)	含水率	0.997/0.998		0.675/0.622	
73	蒸香肠(有/无塑料套管)	含水率	0.96/0.97		0.79/0.76	
74	干腌火腿(接触探针/远程探头)	含水率	0.899/0.929	4.17/3.51		3.15/3.74
75	发酵猪肉香肠(FT-NIR/Diode array/Luminar 5030)	含水率	0.978/0.974/0.969	1.93/2.11/2.28		6.7/6.2/5.7
76	猪肉	含水率	0.90	0.6		2.13

高光谱成像技术是最近20年才发展起来的光电检测技术,融合了光谱信息技术和图像信息技术。在肉品颜色、pH值、嫩度、大理石花纹等检测应用中取得了一定成果^[77-83]。高光谱成像技术在检测肉品含水率方面近几年才有研究报道,Liu等^[84]等利用高光谱图像技术(波长1 000~2 500 nm)预测猪肉腌制过程中含水率的变化,分别用吸光度(AS)、反射率(RS)和Kubelka-Munk spectra(KMS)进行PLS建模,测试光谱转换对预测含水率的影响,得出RS-PLS模型要优于其他两个,模型判别准确率为0.969,并根据所建模型对肉块进行可视化分析,得出猪肉腌制过程中,不同时间段肉块的水分迁移和分布。Kamruzzaman等^[85]和Douglas等^[86]运用高光谱图像成像技术(波长900~1 700 nm)预测肉品(分别为羔羊肉和猪肉)的化学成分:水分、脂肪和蛋白质,将得出的光谱信息进行PLS建模,获得了较高的决定系数,根据其图像信息对水分、脂肪和蛋白质进行可视化分析,得出水分分布浓度图、脂肪分布浓度图和蛋白质分布浓度图。Iqbal等^[87]采用近红外高光谱成像技术预测煮熟切片火鸡腿的水分、颜色和pH值,通过PLS回归分析得出水分、颜色和pH值的特征波段分别为9个、9个和8个,进行PLS建模得出 R^2 分别为0.88、0.81和0.74,交叉验证均方差分别为2.51、0.02和0.35。随着无损检测技术的不断发展,高光谱成像也逐渐成为热门技术,不但广泛应用于肉品水分检测中,在鱼类、虾类和蔬菜等水分的研究中也越来越受到人们的青睐^[88-91]。

高光谱成像技术不仅能表征待测物的外部图像特征,还能以单个或多个像素来获取光谱特性,能充分解析各种理化性质,但高光谱成像技术也存在数据量庞大,数据波段间相关性强而导致数据冗余量大,影响模型的预测速度和精度,且在选择最佳特征波段算法上也需进一步提高。

受检测深度的限制,近红外漫反射法采集的水分含量信息主要集中在肉类样本表面,样品深层水分含量信息采集困难,会影响到建模的精度和稳定性。但是,近红外光谱法操作简单,对仪器灵敏度要求低,相较于其他无损检测方法,技术比较成熟,在

肉品水分测定方面具有一定的优势。另外,对于肉品尤其是猪肉来说,脂肪的大量存在会对其含水率的判断产生一定的影响。因此,当根据含水率对注水猪肉进行判别时,必须考虑脂肪含量的因素。在利用近红外光谱检测猪肉含水率的同时,可以对其脂肪含量进行测量。

2 注水肉检测技术的发展趋势

注水肉检测技术中,传统方法存在着主观性强、可重复性差以及破坏性检测等缺点,但可作为一种辅助手段。无损检测技术具有快速、方便、无需破坏样品以及不需要化学试剂等优势,是一种绿色环保的检测手段,是现代检测技术未来的发展方向,具有广阔的应用前景。其中,近红外光谱技术在农产品品质无损检测中得到了国内外研究者广泛认同,且在利用近红外光谱技术肉类品质检测方面已经积累了一定的经验,并取得了一些成果。采用近红外光谱技术对肉品含水率进行检测,是控制肉类掺假(注水肉)的有效手段,对提高肉品品质和确保肉食品安全具有十分重要的作用。

目前,肉品含水率的近红外光谱检测技术主要处于应用研究阶段,还未有实际的生产应用。在以后的研究中,应着重将注水肉近红外检测技术向在线检测应用的方向发展,并加强多种肉品品质指标的检测方法研究,减少环境因素(温度、光线等)对肉品含水率的影响。

3 结束语

注水肉对消费者的健康生活和饮食安全影响重大,所以对注水肉进行有效的检测在当前显得十分重要与紧迫。上述研究表明,无损检测技术以其独特的优势在注水肉检测中具有很大的发展空间。利用生物电阻抗、核磁共振、超声波和近红外光谱等无损检测技术,可实现对注水肉快速无损检测。近年来,近红外光谱技术在肉品品质检测中得到了极大的发展,也取得了一定研究成果。采用近红外光谱法进行注水肉的检测和判断,将会成为注水肉检测技术的重点研究方向。

参 考 文 献

- 1 梁学峰,吕平平,张学全.猪肉牛肉水分含量标准的研究与制定[J].肉类工业,2001,243(8):38-43.
Lian Xuefeng, Lü Pingping, Zhang Xuequan. Research the moisture content standards of pork and beef [J]. Meat Industry, 2001, 243(8):38-43. (in Chinese)
- 2 李巧玲,刘景艳.市场鲜猪肉掺假状况的调查监测[J].食品科学,2004,25(10):273-276.
Li Qiaoling, Liu Jingyan. Investigation and detection of adulterated pork from markets [J]. Food Science, 2004, 25(10):273-276. (in Chinese)
- 3 徐炳成,马艳菲,林鹏超,等.病死肉、变质肉和注水肉的鉴别方法[J].畜牧与饲料科学,2010,31(10):90-92.

- Xu Bingcheng, Ma Yanfei, Lin Pengchao, et al. Identification methods of deteriorated meat and water injected meat[J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2010,31(10):90-92. (in Chinese)
- 4 昂琼, 马尖措太. 检验注水牛羊肉的方法[J]. *当代畜牧*, 2013(7):64.
- 5 张木兰. “注水猪肉”的危害及检测方法[J]. *现代畜牧兽医*, 2005(6):27.
- 6 李凤林, 张红梅. 注水猪肉吸水性状检测与观察报告[J]. *河北农业科技*, 1998(1):31-32.
- 7 李学武. 注水猪肉的检测方法初探[J]. *动物科学与动物医学*, 1999(2):32-33.
- 8 王建华, 陈华, 马淑玲, 等. 浅谈注水肉的检验[J]. *河南畜牧兽医*, 2006,27(5):35.
- 9 丁强, 王忠义, 黄岚, 等. 生物阻抗技术及其在肉品质检测中的应用[J]. *传感器与微系统*, 2009,28(3):4-7.
- Ding Qiang, Wang Zhongyi, Huang Lan, et al. Electrical bioimpedance measurement technology and its application in detection of meat quality[J]. *Transducer and Micro System Technologies*, 2009,28(3):4-7. (in Chinese)
- 10 方海田, 刘慧燕, 德力格尔桑. 牛宰后肌肉生物电阻抗值与失水率的变化及相互关系的研究[J]. *肉类研究*, 2008(2):26-28.
- Fang Haitian, Liu Huiyan, De Ligeersang. The variations and relationships of bio-impedance and water lose rate in bovine muscles[J]. *Meat Research*, 2008(2):26-28. (in Chinese)
- 11 方海田, 刘慧燕, 德力格尔桑. 牛宰后肌肉生物电阻抗值、pH值、失水率的变化及相互关系的研究[J]. *食品科学*, 2008, 29(6):116-119.
- Fang Haitian, Liu Huiyan, De Ligeersang. Variations and mutual relationships of bio-impedance value, pH value and water loss rate of bovine muscles[J]. *Food Science*, 2008,29(6):116-119. (in Chinese)
- 12 Yang Yang, Zhong Yiwang, Qiang Ding. Moisture content prediction of porcine meat by bioelectrical impedance spectroscopy[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013,58(3):819-825.
- 13 Forrest J C, Morgan M T, Borggaard C, et al. Development of technology for the early post mortem prediction of water holding capacity and drip loss in fresh pork[J]. *Meat Science*, 2000, 55(1):115-122.
- 14 Luis Guerrero. Green hams electrical impedance spectroscopy (EIS) measures and pastiness prediction of dry cured hams[J]. *Meat Science*, 2004,66(2):289-294.
- 15 孙永文, 韩建国. 便携式生物电阻抗测量系统设计[J]. *计算机测量与控制*, 2005,13(7):645-646.
- Sun Yongwen, Han Jianguo. Design of portable electrical bio-impedance measurement system[J]. *Computer Measurement & Control*, 2005,13(7):645-646. (in Chinese)
- 16 彭见林, 李慧勤, 高瑞萍, 等. 电阻抗技术在肉品质控制中的应用[J]. *食品科学*, 2011,32(5):326-330.
- Peng Jianlin, Li Huiqin, Gao Ruiping, et al. A review on applications of electrical impedance technology in quality control of meat[J]. *Food Science*, 2011,32(5):326-330. (in Chinese)
- 17 夏佑林, 吴季辉, 刘琴, 等. 生物大分子多维核磁共振[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999:33-37.
- 18 田建广, 夏照帆, 杜择涵. 生物核磁共振[M]. 上海: 第二军医大学出版社, 2001:20-30.
- 19 赵喜平. 核磁共振成像[M]. 北京: 科学出版社, 2004:158-176.
- 20 祝耀初, 陶冠军, 丁绍东. 食品科学中核磁共振技术的应用(续)[J]. *食品与发酵工业*, 1994(2):57-62,78.
- Zhu Yaochu, Tao Guanjun, Ding Shaodong. Application of nuclear magnetic resonance techniques in food science[J]. *Food and Fermentation Industries*, 1994(2):57-62,78. (in Chinese)
- 21 Jean-Louis Damez, Sylvie Clerjon. Quantifying and predicting meat and meat products quality attributes using electromagnetic waves: an overview[J]. *Meat Science*, 2013,95(4):879-896.
- 22 Hazlwood C F, Nichols B L. Evidence for the existence of a minimum of two phases so ordered water in skeletal muscle[J]. *Nature*, 1969, 222:24-32.
- 23 Hazlwood C F, Chang D C, Niclols B L, et al. Nuclear magnetic resonance transverse relaxation times of water protons in skeletal muscle[J]. *Biophysical Journal*, 1974, 14(8):583-606.
- 24 Sharifudin Md Shaarani, Kevin P Nott, Laurance D Hall. Combination of NMR and MRI quantitation of moisture and structure changes for convection cooking of fresh chicken meat [J]. *Meat Science*, 2006, 72(3):398-403.
- 25 Bertram H C, Andersen H J, Karlsson A H. Comparative study of low-field NMR relaxation measurements and two traditional methods in the determination of water holding capacity of pork[J]. *Meat Science*, 2001, 57(2):125-132.
- 26 Bertram H C, Sune D, Anders H K, et al. Continuous distribution analysis of T_2 relaxation in meat-an approach in the determination of water-holding capacity[J]. *Meat Science*, 2002,60(3):279-285.
- 27 杨赫鸿, 李沛军, 孔保华, 等. 低场核磁共振技术在肉品科学研究中的应用[J]. *食品工业科技*, 2012,33(13):400-405.
- Yang Hehong, Li Peijun, Kong Baohua, et al. Application of low field nuclear magnetic resonance in meat science[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012,33(13):400-405. (in Chinese)
- 28 夏天兰, 刘登勇, 徐幸莲, 等. 低场核磁共振技术在肉与肉制品水分测定及其相关品质特性中的应用[J]. *食品科学*, 2011,32(21):253-256.
- Xia Tianlan, Liu Dengyong, Xu Xinglian, et al. Application of low-field nuclear magnetic resonance in determining water contents and other related quality characteristics of meat and meat products[J]. *Food Science*, 2011,32(21):253-256. (in Chinese)
- 29 Ruiz-Cabrera M A, Gou P, Foucat L, et al. Water transfer analysis in pork meat supported by NMR imaging [J]. *Meat Science*,

- 2004,67(1):169-178.
- 30 Hullberg A, Bertram H C. Relationships between sensory perception and water distribution determined by low-field NMR T2 relaxation in processed pork-impact of tumbling and RN-allele[J]. *Meat Science*,2005,69(4):709-720.
- 31 朱丹实, 吴晓菲, 刘贺, 等. 水分对生鲜肉品质影响[J]. *食品工业科技*,2013,34(16):363-366.
Zhu Danshi, Wu Xiaofei, Liu He, et al. Effect of water on quality of fresh meat[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013,34(16):363-366. (in Chinese)
- 32 Bertram H C, Schafer A, Rosenfold K, et al. Physical changes of significance for early post mortem water distribution in porcine *M. longissimus*[J]. *Meat Science*,2004,66(4):915-924.
- 33 Bertram H C, Ida K Straadt, Jens A Jensen, et al. Relationship between water mobility and distribution and sensory attributes in pork slaughtered at an age between 90 and 180 days[J]. *Meat Science*, 2007, 77(2): 190-195.
- 34 Bertram H C, Rikke H, Henrik J. Development in myofibrillar water distribution of two pork qualities during 10-month freezer storage[J]. *Meat Science*, 2007, 75(1): 128-133.
- 35 姜晓文, 韩剑众. 生鲜猪肉持水性的核磁共振研究[J]. *食品工业科技*,2009,30(7):128-130,133.
Jiang Xiaowen, Han Jianzhong. LF-NMR studies of water-holding capacity in fresh meat[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2009,30(7):128-130,133. (in Chinese)
- 36 Prabal K Ghosh, Digvir S Jayas, Marco L Gruwel, et al. A magnetic resonance imaging study of wheat drying kinetics[J]. *Biosystems Engineering*,2007, 97(2):189-199.
- 37 Alessia Lodi, Amir M Abduljalil, Yael Vodovotz. Characterization of water distribution in bread during storage using magnetic resonance imaging[J]. *Magnetic Resonance Imaging*,2007, 25(10):1449-1458.
- 38 冷雪娇, 章林, 黄明. 超声波技术在肉品加工中的应用[J]. *食品工业科技*,2012,33(10):394-397,401.
Leng Xuejiao, Zhang Lin, Huang Ming. Application of the ultrasound technique in meat processing[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012,33(10):394-397,401. (in Chinese)
- 39 Ana Cristina Soria, Mar Villamiel. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*,2010,21(7): 323-331.
- 40 朱建华, 杨晓泉, 熊捷. 超声波技术在食品工业中的最新应用进展[J]. *酿酒*,2005,32(2):54-57.
Zhu Jianhua, Yang Xiaoquan, Xiong Jian. The hitherto application of ultrasonic technology on food industry[J]. *Liquor Making*, 2005,32(2):54-57. (in Chinese)
- 41 刘芳, 赵峰. 超声波技术在食品生产检测和食品安全检测中的应用进展[J]. *福建分析测试*,2008,17(4):27-31.
Liu Fang, Zhao Feng. Development of ultrasonic technology used in food production inspection and food safety analysis[J]. *Fujian Analysis & Testing*,2008,17(4):27-31. (in Chinese)
- 42 赵峰, 杨江帆, 林河通. 超声波技术在食品加工中的应用[J]. *武夷学院学报*,2010,29(2):21-26,99.
Zhao Feng, Yang Jiangfan, Lin Hetong. Ultrasound and its application in food industry[J]. *Journal of WuYi University*, 2010, 29(2):21-26,99. (in Chinese)
- 43 Coupland J N. Low intensity ultrasound [J]. *Food Research International*, 2004, 37(6):537-543.
- 44 Simal S, Benedetto J, Clemente G, et al. Ultrasonic determination of the composition of a meat-based product[J]. *Journal of Food Engineering*,2003,58(3): 253-257.
- 45 Micklander E, Bertram H C, Marno H, et al. Early post-mortem discrimination of water-holding capacity in pig longissimus muscle using new ultrasound method[J]. *LWT -Food Science and Technology*, 2005, 38(5):437-445.
- 46 Cárcel J A, Benedito J, Bon J, et al. High intensity ultrasound effects on meat brining[J]. *Meat Science*,2007,76(4):611-619.
- 47 Linda M Reida, Colm P O'Donnellb, Gerard Downey. Recent technological advances for the determination of food authenticity [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2006,17(7): 344-353.
- 48 Prieto N, Andrés S, Giraldez F J, et al. Potential use of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for the estimation of chemical composition of oxen meat samples[J]. *Meat Science*, 2006, 74(3):487-496.
- 49 Blanco M, Villarroya I. NIR spectroscopy: a rapid-response analytical tool[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2002, 21(4): 240-250.
- 50 Elaine Lanza. Determination of moisture, protein, fat and calories in raw pork and beef by near infrared spectroscopy[J]. *Journal of Food Science*,1983,48(2): 471-474.
- 51 Prieto N, Roehle R, Lavín P, et al. Application of near infrared reflectance spectroscopy to predict meat and meat products quality: a review[J]. *Meat Science*, 2009, 83(2):175-186.
- 52 Prieto N, Ross D W, Navajas E A, et al. On-line application of visible and near infrared reflectance spectroscopy to predict chemical-physical and sensory characteristics of beef quality[J]. *Meat Science*,2009, 83(1):96-103.
- 53 Prieto N, Andres S, Giraldez F J, et al. Ability of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to estimate physical parameters of adult steers (oxen) and young cattle meat samples[J]. *Meat Science*,2008, 79(4):692-699.
- 54 Prieto N, Andres S, Giraldez F J, et al. Discrimination of adult steers (oxen) and young cattle ground meat samples by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS)[J]. *Meat Science*,2008,79(1):198-201.

- 55 Liu Yongliang, Brenda G Lyon, William R Windham, et al. Prediction of color, texture, and sensory characteristics of beef steaks by visible and near infrared reflectance spectroscopy. A feasibility study [J]. *Meat Science*, 2003, 65(3): 1107 - 1115.
- 56 Jesper Brøndum, Lars Munck, Poul Henckel, et al. Prediction of water-holding capacity and composition of porcine meat by comparative spectroscopy [J]. *Meat Science*, 2000, 55 (2): 177 - 185.
- 57 Maja Prevolnik, Marjeta Candek-Potokar, Dejan Skorjanc. Predicting pork water-holding capacity with NIR spectroscopy in relation to different reference methods [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 98(3): 347 - 352.
- 58 Tøgersen G, Arnesen J F, Nilsen B N, et al. On-line prediction of chemical composition of semi-frozen ground beef by non-invasive NIR spectroscopy [J]. *Meat Science*, 2003, 63(4): 515 - 523.
- 59 姬瑞勤, 王忠义, 黄岚, 等. 鲜肉深层水分的无损检测方法研究 [J]. *现代科学仪器*, 2006(1): 119 - 121.
Ji Ruiqin, Wang Zhongyi, Huang Lan, et al. Study of measurement methods for detecting the water content in deep layer of fresh meat [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2006(1): 119 - 121. (in Chinese)
- 60 姬瑞勤, 黄岚, 刘莉, 等. 鲜肉水分近红外漫反射方法及实验研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(8): 1767 - 1771.
Ji Ruiqin, Huang Lan, Liu Li, et al. Method for measuring water content in fresh meat using diffusion reflectance near infrared spectroscopy and experiment [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(8): 1767 - 1771. (in Chinese)
- 61 张海云, 彭彦昆, 王伟. 生鲜猪肉水分含量的快速无损检测 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2012, 3(1): 23 - 26.
Zhang Haiyun, Peng Yankun, Wang Wei. Rapid non-destructive detection of water content in fresh pork [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2012, 3(1): 23 - 26. (in Chinese)
- 62 张海云, 彭彦昆, 王伟, 等. 基于光谱技术和支持向量机的生鲜猪肉水分含量快速无损检测 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(10): 2794 - 2798.
Zhang Haiyun, Peng Yankun, Wang Wei, et al. Rapid nondestructive detection of water content in fresh pork based on spectroscopy technique combined with support vector machine [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(10): 2794 - 2798. (in Chinese)
- 63 Tøgersen G, Isaksson T, Nielsen B N, et al. On-line NIR analysis of fat, water and protein in industrial scale ground meat batches [J]. *Meat Science*, 1999, 51(1): 97 - 102.
- 64 Cozzolino D, Murray I, Scaife J R, et al. Study of dissected lamb muscles by visible and near infrared reflectance spectroscopy for composition assessment [J]. *Animal Science*, 2000, 70(3): 417 - 423.
- 65 Chan D E, Walker P N, Mills E W. Prediction of pork quality characteristics using visible and near-infrared spectroscopy [J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45(5): 1519 - 1527.
- 66 Cozzolino D, Murray I. Effect of sample presentation and animal muscle species on the analysis of meat by near infrared reflectance spectroscopy [J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2002, 10(1): 37 - 44.
- 67 Tøgersen G, Arnesen J F, Nielsen B N, et al. On-line prediction of chemical composition of semi-frozen ground beef by non-invasive NIR spectroscopy [J]. *Meat Science*, 2003, 63(4): 515 - 523.
- 68 Andrés S, Murray I, Navajas E A, et al. Prediction of sensory characteristics of lamb meat samples by near infrared reflectance spectroscopy [J]. *Meat Science*, 2007, 76(3): 509 - 516.
- 69 Ortiz-Somovilla V, España-España F, Gaitán-Jurado A J, et al. Proximate analysis of homogenized and minced mass of pork sausages by NIRS [J]. *Food Chemistry*, 2007, 101(3): 1031 - 1040.
- 70 Gaitán-Jurado A J, Ortiz-Somovilla V, España-España F, et al. Quantitative analysis of pork dry-cured sausages to quality control by NIR spectroscopy [J]. *Meat Science*, 2008, 78(4): 391 - 399.
- 71 Ripoll G, Albertí P, Panea B, et al. Near-infrared reflectance spectroscopy for predicting chemical, instrumental and sensory quality of beef [J]. *Meat Science*, 2008, 80(3): 697 - 702.
- 72 Carles Collell, Pere Gou, Pierre Picouet, et al. Feasibility of near-infrared spectroscopy to predict aw and moisture and NaCl contents of fermented pork sausages [J]. *Meat Science*, 2010, 85(2): 325 - 330.
- 73 Pitiporn Ritthiruangdej, Ronnarit Ritthiron, Hideyuki Shinzawa, et al. Non-destructive and rapid analysis of chemical compositions in Thai steamed pork sausages by near-infrared spectroscopy [J]. *Food Chemistry*, 2011, 129(2): 684 - 692.
- 74 Carles Collell, Pere Gou, Jacint Arnau, et al. Non-destructive estimation of moisture, water activity and NaCl at ham surface during resting and drying using NIR spectroscopy [J]. *Food Chemistry*, 2011, 129(2): 601 - 607.
- 75 Carles Collell, Pere Gou, Jacint Arnau, et al. NIR technology for on-line determination of superficial aw and moisture content during the drying process of fermented sausages [J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(3): 1750 - 1755.
- 76 Prieto N, López-Campos Ó, Aalhus J L, et al. Use of near infrared spectroscopy for estimating meat chemical composition, quality traits and fatty acid content from cattle fed sunflower or flaxseed [J]. *Meat Science*, 2014, 98(2): 279 - 288.
- 77 Barbin D, Elmasry G, Sun D W, et al. Near-infrared hyperspectral imaging for grading and classification of pork [J]. *Meat Science*, 2012, 90(1): 259 - 268.
- 78 Kim M S, Chen Y R, Mehl P M. Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system for food quality and safety [J]. *Transactions of the ASAE*, 2001, 44 (3): 721 - 729.
- 79 Naganathan G K, Grimes L M, Subbiah J, et al. Partial least squares analysis of near-infrared hyperspectral images for beef tenderness prediction [J]. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 2008, 2(3): 178 - 188.

- 80 吴建虎, 彭彦昆, 江发潮, 等. 牛肉嫩度的高光谱法检测技术[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 135 - 138, 150.
Wu J H, Peng Y K, Jiang F C, et al. Hyperspectral scattering profiles for prediction of beef tenderness[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 135 - 138, 150. (in Chinese)
- 81 吴建虎, 彭彦昆, 陈菁菁, 等. 基于高光谱散射特征的牛肉品质参数的预测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(7): 1815 - 1819.
Wu J H, Peng Y K, Chen J J, et al. Prediction of beef quality level assessment using a hyperspectral imaging technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(7): 1815 - 1819. (in Chinese)
- 82 Qiao J, Ngadi M O, Wang N, et al. Pork quality and marbling level assessment using a hyperspectral imaging system[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(1): 10 - 16.
- 83 高晓东, 吴建虎, 彭彦昆, 等. 基于高光谱成像技术的牛肉大理石花纹的评估[J]. 农产品加工学刊, 2009(10): 33 - 37.
Gao X D, Wu J H, Peng Y K, et al. Analysis of beef marbling grade using hyperspectral imaging technology[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2009(10): 33 - 37. (in Chinese)
- 84 Liu Dan, Sun Dawen, Qua Jiahuan, et al. Feasibility of using hyperspectral imaging to predict moisture content of porcine meat during salting process[J]. Food Chemistry, 2014, 152: 197 - 204.
- 85 Kamruzzaman Mohammed, ElMasry Gamal, Sun Da-wen, et al. Non-destructive prediction and visualization of chemical composition in lamb meat using NIR hyperspectral imaging and multivariate regression[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 16: 218 - 226.
- 86 Barbin D F, ElMasry G, Sun Dawen, et al. Non-destructive determination of chemical composition in intact and minced pork using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Food Chemistry, 2013, 138(2 - 3): 1162 - 1171.
- 87 Iqbal Abdullah, Sun Da-wen, Allen Paul. Prediction of moisture, color and pH in cooked, pre-sliced turkey hams by NIR hyperspectral imaging system[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 117(1): 42 - 51.
- 88 Mostafa Khojastehnazhand, Mohammad Hadi Khoshtaghaza, Barat Mojaradi, et al. Comparison of visible-near infrared and short wave infrared hyperspectral imaging for the evaluation of rainbow trout freshness[J]. Food Research International, 2014, 56: 25 - 34.
- 89 He Hongju, Di Wu, Sun Dawen. Non-destructive and rapid analysis of moisture distribution in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets using visible and near-infrared hyperspectral imaging[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2013, 18: 237 - 245.
- 90 Di Wua, Hui Shia, Songjing Wangc, et al. Rapid prediction of moisture content of dehydrated prawns using online hyperspectral imaging system[J]. Analytica Chimica Acta, 2012, 726: 57 - 66.
- 91 Min Huang, Qingguo Wang, Min Zhang, et al. Prediction of color and moisture content for vegetable soybean during drying using hyperspectral imaging technology[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 128: 24 - 30.