

冷鲜猪肉的新鲜度无损检测技术现状 及 THz 检测技术展望

Status of nondestructive detection methods on chilled pork freshness
and prospect of THz spectrum inspection technique

齐 亮^{1,2} 赵 婕^{1,3} 赵茂程¹

QI Liang^{1,2} ZHAO Jie^{1,3} ZHAO Mao-cheng¹

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 南京师范大学分析测试中心, 江苏 南京 210046;
3. 南京工业职业技术学院能源与电气工程学院, 江苏 南京 210023)

(1. Mechanical and Electronic Engineering School, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China;
2. Center for Analysis and Testing, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046, China; 3. School of Energy
and Electrical Engineering, Nanjing Institute of Industry and Technology, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

摘要:综述可见/近红外光谱分析、电子鼻、电子舌、机器视觉、多传感器融合等无损检测技术在肉品新鲜度指标快速检测中的应用,从分子光谱学结合化学计量学的角度论述了基于 THz 波谱分析法无损检测猪肉新鲜度的可行性。

关键词:冷鲜猪肉;新鲜度;无损检测方法;THz 波谱分析法

Abstract: This essay summarizes the application of visible/near infrared spectroscopy, electronic nose, electronic tongue, machine vision and multi-sensor fusion techniques in detecting chilled pork freshness rapidly and nondestructively. The feasibility of THz spectroscopy analysis method used in nondestructively detecting pork freshness attributes is predicted and analyzed by molecular spectroscopy combined with chemometrics.

Keywords: chilled pork; freshness; nondestructive detection methods; THz spectroscopy analysis

肉品在食用前需要经过宰杀、加工、储存、销售等环节,不可避免受到外界微生物的污染,在组织酶和微生物的作用下肉的品质会改变,会产生有害或者有毒的化学产物,因此,新鲜度是评价肉品质好坏的一个重要衡量指标。

基金项目:江苏省高校自然科学研究面上项目(编号:15KJD550001);江苏省高校研究生科研创新计划(编号:KYZZ_0249);高等学校博士学科点科研基金资助项目(编号:20103204110006)

作者简介:齐亮,男,南京师范大学实验师,南京林业大学博士研究生。

通讯作者:赵茂程(1966—),男,南京林业大学教授,博士。
E-mail: mczhao@njfu.edu.cn

收稿日期:2016-05-07

市场上流通的分割猪肉有 3 种存储形态——鲜肉、冷冻肉和冷鲜肉。鲜肉即“热鲜肉”,因为未经过任何降温处理,细菌会大量繁殖,存在安全隐患^[1]。冷冻肉是将宰杀以后的鲜肉送入冷藏间中迅速冷冻至-18℃以下并保持冷冻状态出库上市。冷冻肉细菌少食用安全,但是食用前需要解冻,营养成分随之流失,口味不如鲜肉^[2]。冷鲜肉是指对严格执行检疫制度屠宰后的牲畜胴体迅速冷却,在 24 h 内降为 0~4℃,并在后续加工、流通和销售过程中保持全程封闭,始终处于 0~4℃的冷链之下,这种方法能有效抑制微生物的生长繁殖^[3],兼具热鲜肉和冷冻肉的优点。

冷鲜肉新鲜度检测方法分为有损检测和无损检测方法。有损检测结果精确且可信,重复性好,但样品前处理费时费力,必须在实验室借助专业设备检测,需要专业人员操作,检测效率低^[4-5]。无损检测技术是非破坏性检测,样品一般无需前处理,检测速度快,适用于大规模产业化生产线中的在线检测,易于实现自动化^[6-7]。本文拟探讨冷鲜肉的新鲜度检测指标及无损检测方法,展望 THz 波谱分析法无损检测猪肉新鲜度的可行性。

1 新鲜度指标

新鲜度指标包括感官指标、理化指标、微生物指标等,其衡量方法采用量化评判法^[8]。

1.1 感官指标

感官指标主要包括色泽、组织状态和气味。肉在腐败变质过程中,由于组织成分分解、病理变化,出现一些明显的肌肉组织结构的变化,使肉品发生感官性质无法接受的改变^[9]。通过目测、手触和嗅觉检验等,由具有资质的肉制品

检测师根据标准主观评判。这种检测方法快速简易,不受场地、检测条件限制^[10],但对检验人员的素质水平要求高,具有主观性和片面性。

1.2 微生物指标

微生物指标主要包括菌落总数、大肠菌群和沙门氏菌。随着肉摆放时间的延长,微生物会不断繁殖、不断增加,可以通过微生物的指标判断肉新鲜度的变化。中国 GB/T 9959—2008 标准规定:新鲜可加工食用的猪肉菌落总数≤1×10⁶ CFU/g,大肠菌群≤1×10⁴ MPN/100 g,而沙门氏菌不得检出。

1.3 挥发性盐基总氮指标

猪肉在腐败过程中,受酶和细菌的作用,蛋白质分解产生氨以及胺类等碱性含氮物质。此类物质具有挥发性,称为挥发性盐基氮(TVBN)。其含量越高,表明猪肉新鲜度越低,其为猪肉新鲜度的主要参考指标^[9]。中国 GB/T5009.44—2003 规定:新鲜可加工食用的猪肉 TVBN 含量≤15 mg/100 g。

1.4 K 值

在宰后的肉品中,三磷酸腺苷会自动分解:
三磷酸腺苷(ATP)→二磷酸腺苷(ADP)→磷酸腺苷(AMP)→次黄嘌呤核苷酸(IMP)→肌苷酸(HxR)→次黄嘌呤(Hx)^[11]

据 ATP 分解过程,测定 K 值的指标方程式(1):
$$K = \frac{HxR + Hx}{ATP + ADP + AMP + IMP + HxR + Hx} \times 100\%, \tag{1}$$

式中:
K——样品的 K 值,%;
HxR——样品中 HxR 含量,μg;
Hx——样品中 Hx 含量,μg;
ATP——样品中 ATP 含量,μg;
ADP——样品中 ADP 含量,μg;
AMP——样品中 AMP 含量,μg;
IMP——样品中 IMP 含量,μg。

肉品越是新鲜,K 值越低,反之 K 值越高。K 值最先由日本学者提出并用于评价鱼肉的新鲜度,现在 K 值已被广泛地用于鱼肉和鸡肉的新鲜度检测中,也有人^[12-13]尝试将 K 值应用在猪肉的新鲜度指标中。

1.5 pH 值

牲畜屠宰后,肌肉中肌糖分解,乳酸和磷酸逐渐聚集,肉的 pH 值下降;细菌在肉表面不断扩散繁殖,肌肉中蛋白质在细菌酶的作用下,被分解为氨和胺类化合物等碱性物质,使肉趋于碱性,pH 值会增高。所以肉的 pH 值有一个先降后升的过程。新鲜肉的 pH 值在 5.8~6.8;次新鲜肉 pH 值在 6.3~6.6;变质的肉 pH 值在 6.7 以上^[14]。可以通过测定肉的 pH 值,判断肉的新鲜度^[15]。

1.6 聚胺类化合物

鲜肉中不含或微含聚胺类化合物。当肉组织稍发生分

解变化时,肉中蛋白质由于酶和细菌的作用逐级分解,最终形成腐胺、尸胺、酪胺、色胺和组胺等毒性聚胺化合物,此类物质易于检出^[9]。

钮伟民等^[16]将同一样品的尸胺检测结果分别与挥发性盐基氮测定结果、微生物测定结果和感官指标进行了比较,发现尸胺的数值变化和微生物数量变化的对应关系最为吻合。Wang Qi 等^[17]发现猪肉中的三甲胺随存储时间的递增而增加,和挥发性盐基氮的测定结果趋势相同。

1.7 各指标的比较

猪肉新鲜度的各项指标随肉品质的变化而发生改变。表 1 对各项新鲜度指标与肉品质变化的联系紧密性、测量的便捷性、精确性和重复性四个方面进行了比较。其中,中国关于猪肉新鲜度的国家标准中仅包括感官指标,微生物指标和挥发性盐基总氮指标^[8, 10, 18]。从指标的测量方法上可以看出,感官指标依靠人的主观判断,具有较高的便捷性,但是指标受主观因素影响大,所以测量的精确性和重复性差,无法实现评判结果与新鲜度的紧密联系^[9, 19]。微生物指标通过显微镜视野范围内的人工计数法获得^[20-21],pH 值通过 pH 计测量,它们都是物理测量方法,与化学测量方法相比具有一定的便捷性。微生物分布具有不均匀性^[22],在微生物数量较多时人工计数无法精确,所以精确性和重复性不够高,与新鲜度相关性一般。pH 计结果精确可靠,但肉的 pH 值变化过程是先降后升,新鲜肉和次新鲜肉的 pH 值范围具有重叠性^[14],不能将两种肉准确区分开,所以与新鲜度的对应关系一般。挥发性盐基总氮指标通过半微量定氮法测定^[23],K 值和聚胺类化合物通过高效液相色谱测定^[16, 24],它们都属于化学测量方法,过程耗时长,结果精确可信,所测量的新鲜度化学成分含量与新鲜度指标紧密联系。可见,如果引入多种新鲜度指标,综合评价猪肉的新鲜度,将能起到取长补短的效果。

2 新鲜度无损检测方法

2.1 可见/近红外光谱分析

在波长为 500~2 500 nm 的可见/近红外光谱范围内有蛋白质、脂肪和水的吸收峰。水分在 980,1 440,1 960 nm 附近有较强的吸收峰;在 1 510,1 980 nm 处为蛋白质吸收峰;在 1 760,2 310 nm 是脂肪物质的吸收峰。在肉品新鲜程度变化过程中,蛋白质、脂肪和水分含量变化将影响肉品的吸

表 1 猪肉新鲜度的各种指标比较				
Table 1 Comparison of pork freshness attributes				
指标名称	中国国家标准	测量便捷性	与新鲜度对应关系	测量精确性和重复性
感官指标	有	快速	一般	差
微生物指标	有	一般	一般	一般
TVBN	有	慢	紧密	精确
K 值	——	慢	紧密	精确
pH 值	——	一般	一般	精确
聚胺类化合物	——	慢	紧密	精确

收系数、散射系数,并从光谱的变化中表现出来^[25]。

Liao Yi-tao 等^[26]采集猪肉切面的可见/近红外漫反射光谱(350~1 000 nm),经过校正后应用偏最小二乘回归法建立猪肉 pH 值在线检测模型。模型的预测相关系数 R 为 0.906,预测均方根误差(RMSEP)为 0.125,结果表明可见/近红外光谱可用于预测猪肉 pH 值。Huang Qi-ping 等^[27]在 1 280,1 440,1 660 nm 3 个特征波段采集了肉样的红外多光谱图像,用神经网络算法建立预测 TVBN 的数学模型,模型预测 TVBN 值的 RMSEP 为 6.943 9 mg/100 g, R 为 0.832 5。Wang Fang-rong 等^[28]在 380~780 nm 可见光波段采集猪肉的光谱数据,用人工神经网络建模,实现了 3 种新鲜度的分类区分,其中,新鲜肉的辨识率为 95.83%,次鲜肉 87.50%,腐败肉 91.67%。孙宏伟等^[29]采用近红外光谱分析原理,设计了便携式生鲜猪肉多品质参数检测装置,实现了新鲜度的现场快速检测,将红外光谱分析技术工业实用化。

2.2 电子鼻

组成肉的氨基酸成分在细菌的分解作用下释放出 H_2S 气体,这种气体的气味令人不悦。随着猪肉腐败程度的加深, H_2S 气体的释放程度会越强。可以使用气体传感器组成电子鼻采集这种气味,通过传感器的输出电流值测定样本的 TVBN 值, R^2 为 0.906^[30]。进一步利用主成分分析和概率神经网络建立新鲜度识别模型,以存储天数 of 新鲜度评价指标,测试样本的新鲜度识别率达到 100%^[31]。借鉴成人鼻腔的特殊结构及其嗅觉原理,常志勇等^[32]设计出具有仿生意义的气体室,并加入气敏传感器组成阵列,用仿生电子鼻系统检测猪肉新鲜度,准确率达 96.45%。

气敏材料与待测气体反应后颜色会发生变化,颜色会随气体量的增多而增强,这就是气体可视化技术^[33]。Huang Xiao-wei 等^[34]发现天然色素气体可视化传感器阵列的扫描图像和待测肉品的生物胺指数以及细菌总数都有较好的相关性, R^2 分别为 0.73 和 0.87。

2.3 电子舌

肉品腐败变质,电导率会发生改变。电子舌是一种测量电导率的电子电路^[35]。测量电导率有两种方式,一种是将肉品制备成肉浸液,测量液体的电导率,测量原理:当肉的鲜度降低时,微生物生长繁殖使蛋白质、脂肪等组织成分分解,由大分子分解成小分子物质,如氨基酸、胺类、吡啶、有机酸等,使得肉浸液直流导电性能增大,肉品新鲜程度越低,肉浸液的电导率越大^[36];另一种是将传感器电极插入肉品中,采用阻抗测量仪直接测量肉品的交流阻抗,测量原理:在贮藏过程中,猪肉中的酶自溶,细胞膜被破坏,猪肉细胞膜的破损程度会反映在肉品的等效电容上,并且随着细胞膜的损坏,细胞内能导电的物质在细胞间渗透,肉品的等效电阻也会改变^[37]。测量的频率范围有 0.10~250.00 kHz^[37] 和 0.02~200.00 kHz^[38],都属于低频信号。相比较而言,前一种方法需将样品剁碎,制成肉浸液,前处理过程复杂,且耗时;后一种方法速度快,但重复性差,需要在样品的不同部位测量多次,测量过程费时。

2.4 机器视觉

猪肉的新鲜度感官指标中包括色泽的评价^[10]。猪肉的色泽主要是由肌红蛋白的化学特性决定。当猪被屠宰、刚切开时,肌肉表面的肌红蛋白尚未与氧结合,猪肉呈现暗红色;当在空气中与氧接触后,肌红蛋白成为氧和肌红蛋白,从而显示为鲜红色;但在空气中久置后肌红蛋白变成变性肌红蛋白,使肉色显示为暗褐色。因此可以根据肌肉表面颜色表征猪肉的新鲜程度,机器视觉检测方法就是根据猪肉色泽的变化检测肉质新鲜度,并能够甄别出肉品变质早期时的表面局部腐败。

肖珂等^[39]采用可见光图像检测方法,利用 RGB 图像空间中的 R 层的面积区域,作为新鲜度分类特征值。汪希伟等^[40]用 365 nm 紫外灯照射五花肉切片的切面,获得紫外荧光图像,观测到荧光产物随存储时间增加而增加,这些图像是全波段范围内的黑白或彩色二维图像。高光谱图像可以将样品在一个波段区间内的所有波段灰度图像融合在一起,形成三维图像^[41]。张雷蕾等^[42]在 470~1 000 nm 可见光波长范围内,建立了肉品的反射高光谱图像预测猪肉挥发性盐基氮(TVBN)和 pH 值的模型,准确率达到 97%。Tao Fei-fei 等^[43]在 472~1 000 nm 波段范围内,建立了高光谱散射图像预测猪肉菌落总数数学模型($R=0.94$)。Wang Xi-wei 等^[44]用面扫描取代线扫描方法获取猪肉的高光谱图像,获取时间快,克服了线扫描方式传送带抖动对图像质量的影响。Barbin D F 等^[45]在近红外波段(900~1 700 nm)用全波段扫描方法获得猪肉的高光谱图像信息,建立了猪肉的 pH 值和失水率的预测模型,相关系数(R^2)分别为 0.87 和 0.83。高光谱图像具有三维特性,建模所需的数据量比其他无损检测法要大,建模复杂度也高,引入新的有效数学建模方法以提高检测精度、可靠性及检测速度具有更加重要的意义^[46]。

2.5 多传感器融合

多传感器数据融合技术应用在猪肉无损检测中会比单一检测方法更精确、全面。Huang Lin 等^[47]用近红外光谱、机器视觉和电子鼻技术组合分析猪肉新鲜度,通过主成分分析和神经网络建模技术,获得了比单一检测方法更高的精度(R^2 为 0.952 7, RMSEP 为 2.73 mg/100 g);Li Huan-huan 等^[48]将高光谱图像和色度计检测结合起来,建立了 TVBN 预测模型(R 为 0.932, RMSEP 为 5.518 mg/100 g)。但利用这种技术检测时间比单一的检测方法长,削弱了无损检测的快速优势。

2.6 无损检测新鲜度指标比较

由表 2 可知,所有无损检测方法都没有涉及感官指标,可能是感官指标是一个主观评分值,客观性差,以此作为评价无损检测可靠性和可用性的依据不足。随着肉制品新鲜度无损检测方法的进一步研究,会有更多的新鲜度指标成为上述无损检测方法的检测对象,也会出现更多新的无损检测方法。

2.7 无损检测方法需注意的问题

(1) 与有损检测方法相比,无损检测多为间接测量,采用

表 2 无损检测方法对应的新鲜度指标比较[†]

Table 2 Comparison of nondestructive detection methods in pork freshness attributes

无损检测方法	感官指标	微生物指标	TVBN	K 值	pH 值	聚胺类化合物
红外及可见光			✓		✓	
光谱分析						
电子鼻		✓	✓			✓
电子舌		✓	✓			
机器视觉		✓	✓	✓	✓	
多传感器融合			✓			

[†] ✓ 表示该无损检测方法能够检测的新鲜度指标。

化学计量学方法,通过一定数量的试验样本建立无损检测数据与新鲜度指标之间的关系模型。无损检测方法的可靠性和可信度依赖于关系模型,为了使模型优秀,原始数据需要准确可靠。因此,用于建模的样本要 尽可能全面、所有样本的试验条件和方法要保持一致。

(2) 化学计量学中的关系模型多数是线性模型,具有稳定、不易出现过拟合的优点;也可以采用非线性函数拟合无损检测数据与新鲜度指标的关系,如神经网络等。有时会出现过拟合现象,即拟合后的最佳模型对校正集有较高的相关系数和较低的残差,对于预测集的样本预测结果却很差。所以不能片面追求校正集的建模结果最优,而应该着重验证模型的预测效果是否良好,以增加无损检测方法的可靠性。

3 基于 THz 波谱分析技术的猪肉新鲜度无损检测方法展望

太赫兹波 (THz) 指频率在 0.1~10.0 THz (波长在 3 mm~30 μm) 范围内的电磁辐射。从频率上看,该波段位于毫米波和红外线之间,属于远红外波段;从能量上看,在电子和光子之间。THz 波的多元化特性使得很多化学分子在 THz 波段下表现出比在其它波段下所不具备的分子运动特性^[49]。猪肉的骨骼肌化学组成包括水分、蛋白质、脂类、非蛋白含氮物、碳水化合物和无机成分,部分化学成分具有相应的 THz 特性。

3.1 猪肉中化学成分的 THz 特性

水分对 THz 波辐射吸收强烈,可以通过测量肉的水分含量来检测食物腐败情况^[50]。水在 THz 频率范围内,没有特征吸收峰,吸收强度会随着频率的增加稳定增强,究其原因,普遍认同这是由于水分子的集体平移导致它对太赫兹无特征吸收^[51]。

蛋白质分子属于生物大分子,在其太赫兹吸收波谱中由于受到展宽和重叠的影响,无法分辨出特征波谱结构,即没有明显的吸收特征峰。但是根据试验分析可知,这些物质的吸收量与 THz 波穿过物质的多少成正比。因此,可以根据吸收谱线值的变化推导出样品中蛋白质含量的变化^[52]。

核苷酸类(如 ADP、ATP)及其相关物质(如 IMP)属于生物小分子,在太赫兹波段的吸收主要是由于其分子自身的转动、振动或分子集团的整体振动,其太赫兹波谱特征结构较为明晰^[53]。嘌呤多晶体在 0.2~2.5 THz 波段存在多个吸收峰^[54]。

3.2 THz 检测新鲜度模型的建立

上述论述表明,核苷酸、DNA、氨基酸、蛋白质等生物分子对 THz 波具有灵敏的波谱响应,不同的生物分子在 THz 波段下有不同的图谱,可以将肉品的 THz 波谱结合化学计量学方法,建立猪肉样品的波谱数据与肉品新鲜度指标的数学关系模型,并用 THz 波谱测定未知样品的新鲜度指标,实现猪肉新鲜度的快速无损检测。

建立模型并检测新鲜度的基本步骤:

① 收集样本,测定其 THz 波谱,同时用常规理化分析法测定其参考数据(如 TVBN、K 值);

② 选取代表性样本,将其波谱和对应的参考数据组成校正集。其余样本组成验证集;

③ 预处理校正集的波谱,剔除界外样本,选取不同的建模方法(如主成分分析、偏最小二乘回归、支持向量机、人工神经网络等),以得到优秀的校正模型;

④ 通过验证集样本对模型进行统计验证,确定 THz 波谱检测模型的最终参数;

⑤ 用验证后的模型快速无损检测未知样品的新鲜度。

4 结论

在冷鲜猪肉新鲜度检验的中国国家标准中,仅包括感官指标、微生物指标和挥发性盐基总氮 3 种,这已不能满足对肉品新鲜度的精确要求,同时引入多个新鲜度指标(如 K 值、pH 值和聚胺类化合物等),对同一样本的不同部位进行全面检测将是肉制品安全的研究重点。和新鲜度有损检测方法相比,无损检测方法快速易操作,能实现在线检测。研究人员正将工业产品检测中已经成熟的检测技术逐步应用于肉品新鲜度检测中,无损检测的方法和检测指标越来越丰富,检测精度在不断提升。

在已有的猪肉新鲜度无损检测方法中,尚没有对 THz 波谱检测方法的深入研究。从影响猪肉新鲜度相关化学成分的 THz 波谱特性角度看,用 THz 波谱无损快速检测冷鲜猪肉的新鲜度是可行的,并可以进一步开发出专用于快速检测肉制品新鲜度的 THz 无损检测设备。

参考文献

[1] 翁丽华, 徐幸莲, 周光宏, 等. 肠杆菌科细菌在热鲜肉上生长预测模型的建立与验证[J]. 南京农业大学学报, 2013, 36(1): 125-130.

[2] 王丹竹, 田科雄. 冷冻肉品质与时间和温度变化的关系[J]. 中国畜禽种业, 2012, 8(8): 24-26.

[3] 张振江, 方海田, 刘慧燕. 冷却肉肌肉保水性及其影响因素[J]. 肉类研究, 2008(12): 15-19.

[4] 王新惠, 白婷, 李俊霞, 等. 发酵肉制品中组胺含量测定方法的比较[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 37-39.

[5] 童宝宏, 许正华, 孙军, 等. 贮藏温度对绞切加工猪肉肉糜新鲜度的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 21-24.

[6] 孔宪琴, 黄素珍. 肉品品质的无损检测方法[J]. 肉类研究, 2008(8): 66-69.

[7] 姜秋. 新型无损检测技术在肉品品质检测中的应用[J]. 肉类工业, 2012(8): 44-47.

[8] 中国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 9959.2—2008 分割鲜、冻猪瘦肉[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[9] 黄蓉, 刘敦华. 猪肉新鲜度评价指标、存在问题及应对措施[J]. 肉类工业, 2010(6): 43-46.

[10] 中国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 22210—2008 肉与肉制品感官评定规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[11] 欧阳芳芳, 王建辉, 陈奇, 等. 草鱼贮藏期间肌肉 ATP 关联物及 K 值的动态变化[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 137-140.

[12] 张婷玉, 陶乐仁, 蔡梅艳, 等. 软冷冻和臭氧处理对猪肉的保鲜效果比较[J]. 食品科学, 2014, 35(10): 304-308.

[13] CHENG Wei-wei, SUN Da-wen, PU Hong-bin, et al. Integration of spectral and textural data for enhancing hyperspectral prediction of K value in pork meat[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 72: 322-329.

[14] 张亚芬, 张晓辉. 肉品检验中 pH 值测定的意义[J]. 吉林农业, 2014(3): 47.

[15] 刘文营, 田寒友, 邹昊, 等. 猪肉 pH 值与滴水损失的关系分析[J]. 肉类研究, 2014(9): 4-6.

[16] 钮伟民, 皓小波, 孙秀兰, 等. 基于尸胺含量变化的猪肉新鲜度评价方法[J]. 食品与生物技术学报, 2011, 30(3): 359-362.

[17] WANG Qi, XIE Yun-fei, ZHAO Wei-jun, et al. Rapid microchip-based FAIMS determination of trimethylamine, an indicator of pork deterioration[J]. Analytical Methods, 2014, 6(9): 2 965-2 972.

[18] 中华人民共和国卫生部. GB/T 5009.44—2003 肉与肉制品卫生标准的分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.

[19] 李淑云. 农贸市场猪肉的感官检查要点[J]. 畜牧兽医科技信息, 2014(2): 44, 45.

[20] 中华人民共和国卫生部. GB 4789.2—2010 食品微生物学检验 菌落总数测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[21] 中华人民共和国卫生部. GB 4789.3—2010 食品微生物学检验 大肠菌群计数[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[22] 王平, 王玉华, 吕娜. 鲜猪肉在室温贮藏过程中品质的变化研究[J]. 农产品加工: 学刊, 2014(10): 65-66.

[23] LIU Guo-qing, ZHANG Li-li, ZONG Kai, et al. Effects of spices essential oils on the spoilage-related microbiota in chilled pork stored in antimicrobial pack[J]. Food Science and Technology Research, 2012, 18(5): 695-704.

[24] OZOGUL F, TAYLOR K, QUANTICK P C, et al. A rapid HPLC-determination of ATP-related compounds and its application to herring stored under modified atmosphere[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2000, 35(6): 549-554.

[25] 安泉鑫, 陈莉, 庞林江, 等. 近红外光谱技术在食品中的应用进展[J]. 食品与机械, 2012, 28(5): 239-242.

[26] LIAO Yi-tao, FAN Yu-xia, CHENG Fang. On-line prediction of pH values in fresh pork using visible/near-infrared spectroscopy with wavelet de-noising and variable selection methods[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(4): 668-675.

[27] HUANG Qi-ping, CHEN Quan-sheng, LI Huan-huan, et al. Non-destructively sensing pork's freshness indicator using near infrared multispectral imaging technique[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 154: 69-75.

[28] WANG Fang-rong, JIN Li-sheng, ZHANG Tie-qiang, et al. Research on meat species and freshness identification method based on spectral characteristics[J]. Optik, 2013, 124(23): 5 952-5 955.

[29] 孙宏伟, 彭彦昆, 林琬. 便携式生鲜猪肉多品质参数同时检测装置研发[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 268-273.

[30] 杨秀娟, 邓斌, 张曦, 等. H₂S 气体传感器判定猪肉新鲜度研究[J]. 云南农业大学学报, 2014, 29(2): 258-261.

[31] 周红标, 张宇林, 李珊, 等. 基于电子鼻的猪肉新鲜度的检测[J]. 现代食品科技, 2013(6): 1 386-1 389.

[32] 常志勇, 陈东辉, 佟月英, 等. 基于人体嗅觉特征的猪肉新鲜度仿生电子鼻检测技术[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2012(S1): 131-134.

[33] ZHANG Xia-hong, LU Si-si, CHEN Xi. A visual pH sensing film using natural dyes from Bauhinia blakeana Dunn[J]. Sensors and Actuators B-chemical, 2014, 198(3): 268-273.

[34] HUANG Xiao-wei, ZOU Xiao-bo, SHI Ji-yong, et al. Determination of pork spoilage by colorimetric gas sensor array based on natural pigments[J]. Food Chemistry, 2014, 145(4): 549-554.

[35] 王兴亚, 庞广昌, 李阳. 电子舌与真实味觉评价的差异性研究进展[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 213-216.

[36] 王笑丹, 孙永海, 胡铁军, 等. 基于神经网络的冷却猪肉新鲜度测定[J]. 食品工业科技, 2005, 26(5): 173-175.

[37] 石丽敏, 黄岚, 梁志宏. 阻抗特性评价猪肉的新鲜度[J]. 食品科学, 2013, 34(11): 13-18.

[38] NGUYEN H B, NGUYEN L T. Rapid and non-invasive evaluation of pork meat quality during storage via impedance measurement[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 50(8): 1 718-1 725.

[39] 肖珂, 段晓霞, 高冠东. 基于图像特征的猪肉新鲜度无损检测方法[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(4): 111-113, 122.

[40] 汪希伟, 赵茂程, 居荣华, 等. 基于紫外荧光成像对包装鲜猪肉存储时间预测研究[J]. 包装与食品机械, 2011, 29(6): 5-8.

[41] 刘燕德, 张光伟. 高光谱成像技术在农产品检测中的应用[J]. 食品与机械, 2012, 28(5): 223-226, 242.

[42] 张雷蕾, 李永玉, 彭彦昆, 等. 基于高光谱成像技术的猪肉新鲜度评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 254-259.

[43] TAO Fei-fei, PENG Yan-kun. A nondestructive method for prediction of total viable count in pork meat by hyperspectral scattering imaging[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015,

8(1): 17-30.

[44] WANG Xi-wei, ZHAO Mao-cheng, JU Rong-hua, et al. Visualizing quantitatively the freshness of intact fresh pork using acousto-optical tunable filter-based visible/near-infrared spectral imagery[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 99(7): 41-53.

[45] BARBIN D F, ELMASRY G, SUN Da-wen, et al. Predicting quality and sensory attributes of pork using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Analytica Chimica Acta, 2012, 719(10): 30-42.

[46] CHEN Quan-sheng, ZHANG Yan-hua, ZHAO Jie-wen, et al. Nondestructive measurement of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in salted pork in jelly using a hyperspectral imaging technique combined with efficient hypercube processing algorithms[J]. Analytical Methods, 2013, 5(22): 6 382-6 388.

[47] HUANG Lin, ZHAO Jie-wen, CHEN Quan-sheng, et al. Non-destructive measurement of total volatile basic nitrogen (TVB-N) in pork meat by integrating near infrared spectroscopy, computer vision and electronic nose techniques[J]. Food Chemistry, 2014, 145(7): 228-236.

[48] LI Huan-huan, CHEN Quan-sheng, ZHAO Jie-wen, et al. Nondestructive detection of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in pork meat by integrating hyperspectral imaging and colorimetric sensor combined with a nonlinear data fusion [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2015, 63(1): 268-274.

[49] FERGUSON B, ZHANG Xi-Cheng. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.

[50] 杨航, 赵红卫, 张建兵, 等. 生物组织脱水过程的太赫兹时域光谱[J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(3): 263-267.

[51] 刘畅, 岳凌月, 王新柯, 等. 利用太赫兹反射式时域光谱系统测量有机溶剂的光学参数[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(6): 1 471-1 475.

[52] MARKELZ A G, ROITBERG A, HEILWEIL E J. Pulsed terahertz spectroscopy of DNA, bovine serum albumin and collagen between 0. 1 and 2. 0 THz[J]. Chemical Physics Letters, 2000, 320(1/2): 42-48.

[53] 张希成, 许景周. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 238.

[54] SHEN Y C, UPADHYA P C, LINFIELD E H, et al. Temperature-dependent low-frequency vibrational spectra of purine and adenine[J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(14): 2 350-2 352.

(上接第 200 页)

[11] 刘加友, 王振斌. 微生物酵素食品研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(1): 273-276.

[12] 王小萱. 健康产业后起之秀-酵素产业可持续发展提速快行[N]. 中国食品报, 2015-12-11(001).

[13] 王晓宇, 杜国荣, 李华. 抗氧化能力的体外测定方法研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2012, 31(3): 248.

[14] 陆颖影, 胡国勇, 王兴鹏. 肠道菌群与相关代谢性及消化系统疾病的关系[J]. 国际消化病杂志, 2015, 35(2): 126-128.

[15] 董银卯, 何聪芬, 王领, 等. 火龙果酵素生物活性的初步研究[J]. 食品科技, 2009, 34(3): 192-196.

[16] 金寒冰, 方丽, 赖蓓蕾, 等. 苦苣多酚超声辅助提取及抗氧化研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 211-215.

[17] 朱晓宦, 吴向阳, 仰榴青, 等. 马齿苋粗多糖的提取及清除羟自由基活性作用[J]. 江苏大学学报: 医学版, 2007, 17(1): 57-60.

[18] 宋阳, 王亚琼, 赵丽恋, 等. 基于淀粉酶活性检测的麦芽质量评价方法[J]. 药学进展, 2010, 34(9): 411-417.

[19] 刘文信, 姜开荣. 发酵醪液中糖、有机酸、乙醇的 HPLC 分析[J]. 化学工程师, 2013(3): 27-28.

[20] KADER A A. Flavor quality of fruits and vegetables[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2008, 88(11): 1 863-1 868.

[21] 董霞. 啤酒中有机酸类物质的研究——啤酒有机酸与口感关系的初步研究[D]. 江苏: 江南大学, 2004: 3-4.

[22] 张旭晖, 王恬, 冀凤杰, 等. 有机酸化剂对断奶仔猪生长性能和肠道健康的影响[J]. 动物营养学报, 2012, 24(3): 507-514.

[23] BRUL S, COOTE P. Preservative agents in foods. Mode of action and microbial resistance mechanisms[J]. Int. J. Food Microbiol., 1999, 50(1/2): 1-17.

[24] 李志华. 泡菜中五种有机酸的高效液相色谱分离分析[D]. 湖南: 湖南师范大学, 2011: 9-13.

(上接第 218 页)

[50] SHI Bo-lin, ZHAO Lei, ZHI Rui-cong, et al. Optimization of electronic nose sensor array by genetic algorithms in Xihu-Longjing Tea quality analysis[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(3/4): 752-758.

[51] QIN Zi-han, PANG Xue-li, CHEN Dong, et al. Evaluation of Chinese tea by the electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry: Correlation with sensory properties and classification according to grade level[J]. Food Research International, 2013, 53(2): 864-874.

[52] 甘芝霖, 刘远方, 杨阳, 等. 基于电子鼻技术的信阳毛尖茶品质评价[J]. 食品工业科技, 2013, 34(2): 54-57.

[53] 周颖, 刘任, 谭婷, 等. 电子鼻对不同加工处理工夫红茶香气聚类的方法评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(5): 1 611-1 618.

[54] SHARMA P, GHOSHA A, TUDU B, et al. Monitoring the fermentation process of black tea using QCM sensor based electronic nose[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 219(5): 146-157.

[55] 戴悦雯, 支瑞聪, 赵镭, 等. 基于龙井茶香气风味特性的品质判定[J]. 食品科学, 2015, 36(10): 110-113.

[56] TUDU B, GHOSH S, BAG A K, et al. Incremental FCM technique for black tea quality evaluation using an electronic nose [J]. Fuzzy Information and Engineering, 2015, 7(3): 275-289.

[57] 杨春兰, 薛大为, 鲍俊宏. 黄山毛峰茶贮藏时间电子鼻检测方法研究[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(4): 676-681.

[58] KATAYAMA S, TAKEUCHI H, TANIGUCHI H, et al. Odor analysis of green tea by sensors[C]// Proceedings of 2004 International Conference-CHA (tea) Culture and Science. Tokyo: Tencon IEEE Region 10 Conference, 2004: 642-646.

[59] 王俊, 崔绍庆, 陈新伟, 等. 电子鼻传感技术与应用研究进展[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 160-167.