

低场核磁共振技术结合化学计量学方法定性、定量检测注水猪肉

盖圣美¹, 张中会¹, 游佳伟¹, 邹玉峰², 刘登勇^{1,2,*}

(1.渤海大学食品科学与工程学院, 辽宁省食品安全重点实验室, 生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心, 辽宁 锦州 121013; 2.江苏省肉类生产与加工质量安全控制协同创新中心, 江苏 南京 210095)

摘 要: 通过低场核磁共振技术与化学计量学相结合的方法对注水猪肉中的水分进行定性、定量检测。通过肌肉注射的方式向猪肉背最长肌中分别注入0%、5%、10%、15%、20%、25%的去离子水。结果表明, 注水后不易流动水峰面积比(P_{21})显著减小, 自由水弛豫时间(T_{22})、峰面积比(P_{22})显著增加($P < 0.05$)。通过一元线性回归(linear regression, LR)模型对猪肉中的水分含量做定量检测, 得到相关系数 r_p 为0.31, 均方根误差(root mean square error, RMSE)为4.02%, 优化后 r_p 为0.45, RMSE_p为1.79%。在此基础之上, 选取多元线性回归(multiple linear regression, MLR)、偏最小二乘回归预测模型对猪肉中的水分含量进行定量检测, MLR模型得到最优预测结果 r_p 为0.90, RMSE_p为0.57%。综上所述, 低场核磁共振技术结合化学计量学方法可作为注水猪肉定性、定量检测的一种有效方法。

关键词: 注水猪肉; 水分; 低场核磁共振; 定性、定量检测

Qualitative and Quantitative Detection of Water-Injected Pork Using Low-Field Nuclear Magnetic Resonance Combined with Chemometrics

GAI Shengmei¹, ZHANG Zhonghui¹, YOU Jiawei¹, ZOU Yufeng², LIU Dengyong^{1,2,*}

(1. Food Safety Key Lab of Liaoning Province, National & Local Joint Engineering Research Centre of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, College of Food Science and Technology, Bohai University, Jinzhou 121013, China;

2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Meat Production and Processing, Quality and Safety Control, Nanjing 210095, China)

Abstract: In the present paper, the qualitative and quantitative detection of water molecules in water-injected pork were implemented by using low-field nuclear magnetic resonance (NMR) combined with chemometrics. *Longissimus dorsi* muscles were adulterated with 0%, 5%, 10%, 15%, 20% and 25% of deionized water by intramuscular injection. The peak area proportion of immobilized water (P_{21}) in water-injected pork showed a significantly decreasing trend ($P < 0.05$), while the relaxation time (T_{22}) and peak area proportion (P_{22}) of free water increased significantly ($P < 0.05$). Subsequently, a single-variable linear regression (LR) was developed to quantitatively detect the moisture content in pork with r_p (correlation coefficient of prediction set) = 0.31, and RMSE_p (root mean square error of prediction set) = 4.02%. The optimized r_p and RMSE_p were 0.45 and 1.79%, respectively. On this basis, a multiple linear regression (MLR) model and a partial least squares regression (PLSR) model were used to quantitatively predict the moisture content in pork. It turned out that the MLR model had better prediction performance ($r_p = 0.90$, RMSE_p = 0.57%) than the PLSR model. To sum up, low field nuclear magnetic resonance combined with chemometrics can be an effective method for qualitative and quantitative detection of water molecules in water-injected pork.

Keywords: water-injected pork; moisture; low-field nuclear magnetic resonance; qualitative and quantitative detection

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181014-118

中图分类号: TS251.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2020) 04-0243-05

收稿日期: 2018-10-14

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31501410); 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ17046308)

第一作者简介: 盖圣美(1978—)(ORCID: 0000-0002-4061-9217), 女, 高级实验师, 硕士, 研究方向为肉品加工与质量安全控制。E-mail: gaishengmei@126.com

*通信作者简介: 刘登勇(1979—)(ORCID: 0000-0003-4588-9985), 男, 教授, 博士, 研究方向为肉品加工与质量安全控制。E-mail: jz_dyliu@126.com

引文格式:

盖圣美, 张中会, 游佳伟, 等. 低场核磁共振技术结合化学计量学方法定性、定量检测注水猪肉[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 243-247. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181014-118. <http://www.spkx.net.cn>

GAI Shengmei, ZHANG Zhonghui, YOU Jiawei, et al. Qualitative and quantitative detection of water-injected pork using low-field nuclear magnetic resonance combined with chemometrics[J]. Food Science, 2020, 41(4): 243-247. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181014-118. <http://www.spkx.net.cn>

猪肉作为一种传统肉类食品, 在肉及肉制品消费中一直占主体地位, 其掺假、造假相关问题也一直受到广大消费者的关注。猪肉掺假、造假的方法^[1-2]可分为两种: 一种是以次充好, 如用劣质猪肉冒充优质猪肉; 另一种是通过非法手段增加猪肉的质量, 如向猪肉中注水、注胶等。由于注水猪肉几乎无需任何成本、获利高且不存在任何技术门槛, 在掺假、造假猪肉中较为常见。注水处理会使细胞内的营养成分流失, 降低猪肉的食用价值, 同时也加速了肉块腐败变质的速度^[3]。

传统的水分含量测定方法, 如干燥法、蒸馏法、卡尔·费休法等, 普遍存在操作繁琐、测试时间长等特点。因此, 急需一种快速、有效检测水分含量的方法。目前可用于测定/预测水分含量的方法有微波法^[4]、生物电阻抗法^[5]、光谱成像技术, 如近红外光谱成像技术^[6-7]、多光谱成像技术^[8]、高光谱成像技术^[9-12]、低场核磁共振技术^[13-14]等。低场核磁共振技术与其他检测方法相比不仅具有检测速度快、对样品无损伤、无需预处理、实时获得数据等特点, 同时还能反映肉与肉制品中水分子的存在形式及分布状态^[15-16]。

目前低场核磁共振技术在肉品领域的应用还多局限于对样品的定性分析, 在定量检测方面如样品中水分的定量检测还相对较少。利用低场核磁共振技术所获得的峰积分面积与样品中所包含的氢质子数有关^[17]。因此, 可将峰面积的变化应用于样品中水分含量的定量检测。本实验具体内容如下: 1) 利用低场核磁共振技术, 研究注射不同比例去离子水对猪肉内部水分子弛豫特性的影响; 2) 探索水分含量与低场核磁共振技术水分子弛豫特性的关系, 通过建立相关表达式, 对未知样品中的水分作出预测; 3) 对不同预测模型的预测结果进行评价, 确定最优预测模型, 并分析可能对预测结果产生影响的因素。

1 材料与方法

1.1 材料

猪肉背最长肌 辽宁锦州市大润发超市。

1.2 仪器与设备

PQ001型低场核磁共振分析仪 上海纽迈电子科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品处理

选择10条新鲜的猪肉背最长肌, 剔除肌肉表面的脂肪和结缔组织, 沿肌肉走向垂直方向将每条最长肌分切成6块(6 cm×6 cm×4 cm)。对照组不做任何处理, 实验组分别按肉样质量的5%、10%、15%、20%、25%注射去离子水。注水时每个样品取9个注水点, 注水点与注水点间距2 cm, 注水深度2 cm, 使注水位点在样品中均匀分布。注水完成后将肉样于室温条件下静置30 min, 使注射的水分在其中分布均匀。30 min之后用滤纸吸干肉样表面水分, 称量质量, 样品质量相对于注水前增加的百分比, 记为有效注水量。

1.3.2 注水猪肉水分子弛豫信息采集

用取样器(内径1.0 cm)取高度为1.5 cm左右的样品(每个样品精确称量至0.000 1 g)于核磁管中, 加塞后放入低场核磁设备磁体腔中采集 T_2 弛豫信息。每个待测样品重复测定3次, 取平均值作为其有效值。每个注水比例均设置5个平行, 重复以上实验10次, 共获取300个样品的水分弛豫信息。低场核磁共振技术测试参数^[18]: 重复采样等待时间3.5 s; 半回波时间150 μ s; 回波个数3 000; 重复扫描次数16。

1.3.3 一元线性回归(linear regression, LR)模型建立

称取不同质量的去离子水于色谱瓶中, 之后将色谱瓶放入核磁管, 采集去离子水的 T_2 弛豫信息。以去离子水质量为横坐标, 峰面积为纵坐标, 建立去离子水质量与峰面积标准曲线。低场核磁共振技术测试参数: 重复采样等待时间15 000 ms; 半回波时间800 μ s; 回波个数13 000; 重复扫描次数16。

1.3.4 PLSR、MLR模型的建立

所有的猪肉样品分为校准集、验证集两组, 注水比例为0%、5%、15%、25%的样品作为校准集, 用来建立预测模型。注水比例10%、20%的样品作为验证集, 用来评价预测模型的准确性。取校准集猪肉样品的核磁数据作为自变量, 水分含量作为因变量, 用Unscrambler 9.7数据分析软件对数据进行拟合分析, 得到偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)、多元线性回归(multiple linear regression, MLR)预测模型。取验证集猪肉样品的核磁数据代入PLSR、MLR预测模型, 得到验证集中猪肉水分含量的预测值。预测模型的评价从校

准集相关系数 r_c 、均方根误差 (root mean square error, RMSE_c)、验证集相关系数 r_p 、RMSE_p 4 个方面考虑。相关系数 r 和RMSE分别根据式 (1) 和式 (2) 计算:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}} \quad (1)$$

式中: r 为相关系数; n 为猪肉样本数; y_i 为猪肉样品真实水分含量; \bar{y} 为 y_i 的平均值; \hat{y}_i 为猪肉样品预测水分含量; $\bar{\hat{y}}$ 为 \hat{y}_i 的平均值。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

式中: y_i 为猪肉样品真实水分含量; \hat{y}_i 为预测水分含量; n 为样本数。

1.3.5 水分含量的测定

参照GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》^[19]。将待测样品放入干燥至质量恒定的称量瓶, 于105℃恒温鼓风干燥箱中干燥4 h后, 放入干燥器内冷却0.5 h后称量, 重复以上操作至质量恒定。样品中水分含量按式 (3) 计算:

$$\text{水分质量分数}/\% = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad (3)$$

式中: m_0 为烘干前猪肉样品的质量; m_1 为烘干至质量恒定时样品的质量。

1.4 数据处理

用系统自带反演软件对CPMG衰减曲线进行反演拟合, 得到弛豫时间、峰面积、峰面积比等弛豫数据; 采用SPSS 19.0对相关数据进行统计分析, 用Duncan法对数据进行多重比较; 通过Unscrambler 9.7数据分析软件建立预测模型。

2 结果与分析

2.1 注水猪肉有效注水量、水分含量

表1 猪肉注水量、水分含量的测定

Table 1 Water injection ratio and water content of water-injected pork

指标	实际注水/%					
	0	5	10	15	20	25
有效注水量/%	0.00±0.00 ^a	2.59±0.63 ^b	4.49±1.16 ^c	5.88±1.20 ^d	7.68±1.65 ^e	8.39±1.90 ^e
水分质量分数/%	74.97±0.69 ^a	76.98±0.93 ^b	78.24±0.88 ^c	78.60±0.67 ^{cd}	78.61±1.27 ^{cd}	79.25±0.96 ^d

注: 同行不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

从表1可以看出, 有效注水量的变化率随实际注水量的增加有所减小, 当实际注水量分别20%、25%时, 有效注水量不再发生显著性变化 ($P < 0.05$)。这说明当注水量小于20%时, 肉块对外来水分的吸附速率比较高, 随着注水比例进一步增加, 肉块吸附水的速率下降^[8]。25%组的有效注水量和20%组相比, 虽然统计差异不显著, 但是仍然呈增加的趋势。正常猪肉的平均水分质量分数为74.97%, 注水后猪肉的平均水分质

量分数在76.98%~79.25%之间, 均明显高于正常猪肉 ($P < 0.05$)。

2.2 注射去离子水对猪肉水分子弛豫图谱的影响

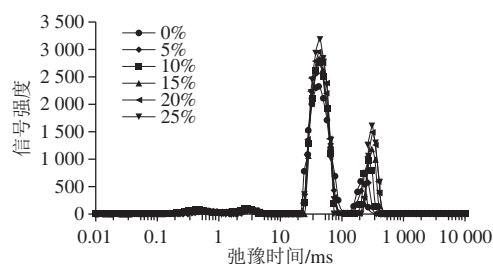


图1 注水猪肉多组分拟合横向弛豫图谱

Fig. 1 Distribution of multi-exponentially fitted T_2 relaxation time spectra of water-injected pork

肉与肉制品中的水分子主要以自由水、不易流动水和结合水3种形式存在, 对于不同存在形式的水分子, 其流动性也会存在一定差异, 自由水流动性最强、不易流动水次之、结合水流动性最差, 而低场核磁共振技术中的横向弛豫时间 (T_2 值) 可反映肉与肉制品中水分子流动性的强弱^[20-22]。结合水 (T_{2b}) 的 T_2 值在0~10 ms之间, 不易流动水 (T_{21}) 的 T_2 值在30~60 ms之间, 而自由水 (T_{22}) 的 T_2 值在100~400 ms之间^[23-24]。因此, 根据 T_2 值大小的不同, 可以对肉与肉制品中水分子的存在形式作出定性判断, 而根据峰面积的大小则可以反映样品中对应组分的多少^[25]。如图1所示, 通过测量不同比例注水猪肉水分子的横向弛豫时间发现, 注水猪肉水分子横向弛豫图谱上存在4个明显的水分群, 与注胶虾^[26]中水分分布情况一致。图中4个峰从左到右依次代表紧密结合水 (T_{2b})、结合水 ($T_{2b'}$)、不易流动水 (T_{21})、自由水 (T_{22})^[27]。结果表明, 与正常猪肉相比, 注水猪肉不易流动水、自由水对应峰变化比较明显。其中, 不易流动水的弛豫时间无显著变化 ($P > 0.05$), 而峰面积比显著减小 ($P < 0.05$), 自由水的弛豫时间、峰面积比均显著增加 ($P < 0.05$)。

2.3 低场核磁共振技术结合化学计量学方法预测猪肉中的水分含量

图1可以直观地反映注水猪肉中水分子的存在形式及分布状态, 但还不能根据弛豫图谱对样品中的水分进行定量分析。多组分弛豫图谱中信号峰的积分面积与样品中所包含的氢质子数有关^[17], 因此可通过建立峰面积与水分含量关系模型对猪肉中的水分含量定量分析。

通过采集不同质量去离子水的核磁信号, 可得到去离子水质量与峰面积的关系。随着去离子水质量的增加, 峰面积也随之增大。对峰面积 (Y) 与去离子水质量 (X) 进行线性拟合, 得到回归方程 $E_0: Y = 14\,084X + 148.8$, $r_c = 1$, 可知去离子水质量与峰面积具有较好的拟合性, 说明利用低场核磁共振技术定量检测样品中的水分具有一定的可行性。

2.3.1 利用LR模型预测猪肉中的水分含量

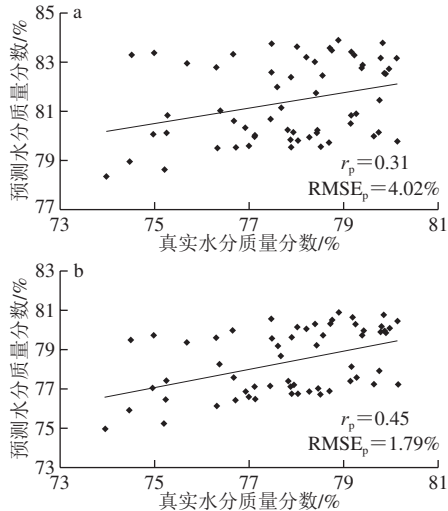


图2 根据猪肉中水分子的总峰面积 (a) 和不易流动水与自由水峰面积 (b) 预测猪肉中的水分含量

Fig. 2 Prediction of moisture content in pork based on total peak area (a) and peak areas of immobilized and free water (b)

分别选取猪肉样品中水分子的总峰面积、不易流动水和自由水峰面积之和代入回归方程 E_0 中, 得到猪肉中水分含量的预测值 y_1 、 y_2 , 水分含量的真实值 x 通过干燥法获得。预测值 y_1 、 y_2 与真实水分含量 x 的关系如图2所示。由图2可知, 基于总峰面积预测得到的猪肉水分含量与真实水分含量相关系数 r_p 为0.31, 而基于不易流动水和自由水峰面积预测水分含量与真实水分含量相关系数 r_p 为0.45, 且后者相对于前者有较小的RMSE_p值。由此可知, 通过不易流动水和自由水峰面积预测猪肉中的水分含量可得到相对较好的预测结果, 这与陈琳莉等^[28]在研究低场核磁共振法测定不同肉类水分含量中所得结果一致。

2.3.2 利用PLSR、MLR模型预测猪肉中的水分含量

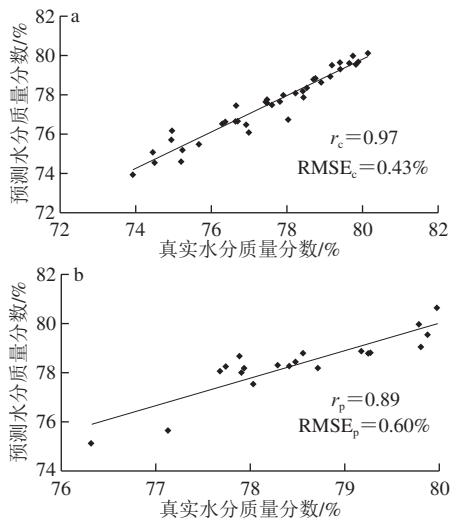


图3 注水猪肉PLSR模型建立 (a) 和验证 (b) 的散点分布图

Fig. 3 Scatter plots of training (a) and validation (b) set for PLSR model

通过LR模型对猪肉样品中的水分含量进行预测发现, RMSE_p值最小可以达到1.79%, 而相关系数 r_p 值最高仅为0.45, 可见猪肉水分含量预测模型需经进一步的改进。PLSR、MLR预测模型是比较常见的多元数据分析方法, 其预测精度会随着相关变量和观察值的增加而提高。近年来, PLSR、MLR建模逐渐被应用到食品领域^[29-31]。本实验在LR模型的基础之上, 通过PLSR、MLR建模的方法对注水猪肉中的水分进行定量检测。

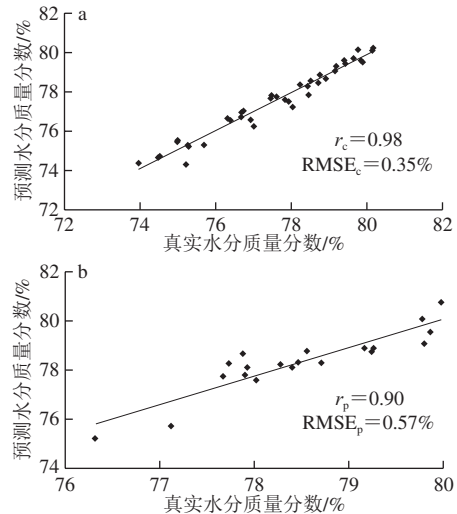


图4 注水猪肉MLR模型建立 (a) 和验证 (b) 的散点分布图

Fig. 4 Scatter plots of training (a) and validation (b) set for MLR model

由图3和图4可以看出, PLSR、MLR校正集相关系数 r_c 均在0.95以上, 说明真实水分含量与预测水分含量有较好的相关性, RMSE_c值均在0.5%以下, 说明模型有较高的预测精度。PLSR、MLR验证集结果表明, 真实水分含量与预测水分含量相关系数 r_p 均在0.85以上, RMSE_p值均不超过0.60%, 这说明低场核磁共振结合PLSR、MLR模型可以准确地预测注水猪肉中的水分含量。进一步比较PLSR、MLR模型发现, 无论是校准集还是验证集, MLR模型都有更高的 r 和更小的RMSE, 这说明MLR模型有相对较好的预测效果。

综上所述, LR模型相对于PLSR、MLR而言, 建模过程简单, 但预测精度偏低。PLSR、MLR模型虽然需要采集一部分样品的信息作为训练样本, 但预测精度相比LR模型有很大提高。进一步比较PLSR、MLR模型发现, MLR模型的预测结果较好。

3 结论

本研究表明, 通过多组分弛豫图谱可以直观地反映正常猪肉、注水猪肉中水分分布的差异, 而通过建立回归预测模型则可对猪肉中的水分做定量检测。统计结果表明, 注水后不易流动水峰面积比 (P_{21}) 显著减

小, 自由水弛豫时间 (T_{22})、峰面积比 (P_{22}) 显著增加 ($P < 0.05$)。基于水分质量与峰面积关系所建立的LR模型 ($r_p=1$) 对猪肉中的水分含量做了定量检测, 得到 r_p 为0.31, RMSE_p 为4.02%, 优化后 r_p 为0.45, RMSE_p 为1.79%。在此基础上建立了PLSR、MLR预测模型, 结果发现其对水分含量预测精度比LR模型明显提高, 而通过比较PLSR、MLR两种预测模型发现, MLR预测模型相对于PLSR模型有更好的预测结果 (r_p 为0.90, RMSE_p 为0.57%)。综上所述, 低场核磁共振技术结合化学计量学可作为注水猪肉定性、定量检测的一种有效方法。

参考文献:

- [1] PENG G J, CHANG M H, FANG M, et al. Incidents of major food adulteration in Taiwan between 2011 and 2015[J]. Food Control, 2016, 72: 145-152. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.07.043.
- [2] NASREEN S, AHMED T. Food adulteration and consumer awareness in Dhaka City, 1995-2011[J]. Journal of Health Population & Nutrition, 2014, 32(3): 452-464.
- [3] 刘登勇, 艾迎飞, 吕超, 等. 注水肉检测方法研究进展[J]. 肉类工业, 2012(1): 54-56.
- [4] JI G, LIU X G, GUO H P, et al. Study of water-injected pork and pork freshness using microwave techniques[C]. Guangzhou: Proceedings of the 9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, 2010: 614-617. DOI:10.1109/ISAPE.2010.5696540.
- [5] YANG Y, WANG Z Y, DING Q, et al. Moisture content prediction of porcine meat by bioelectrical impedance spectroscopy[J]. Mathematical & Computer Modelling, 2013, 58(3/4): 813-819. DOI:10.1016/j.mcm.2012.12.020.
- [6] KESTENS V, CHAROUD J. Online measurement of water content in candidate reference materials by acousto-optical tuneable filter near-infrared spectrometry (AOTF-NIR) using pork meat calibrants controlled by Karl Fischer titration[J]. Food Chemistry, 2008, 106(4): 1359-1365. DOI:10.1016/j.foodchem.2007.01.081.
- [7] COLLELL C, GOU P, PICOUE P, 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. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.01.022.
- [8] LIU J X, CAO Y, WANG Q, et al. Rapid and non-destructive identification of water-injected beef samples using multispectral imaging analysis[J]. Food Chemistry, 2016, 190: 938-943. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.06.056.
- [9] LIU D, SUN D W, QU J H, et al. Feasibility of using hyperspectral imaging to predict moisture content of porcine meat during salting process[J]. Food Chemistry, 2014, 152(2): 197-204. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.11.107.
- [10] MA J, SUN D W, PU H B. Spectral absorption index in hyperspectral image analysis for predicting moisture contents in pork *longissimus dorsi* muscles[J]. Food Chemistry, 2016, 197(Pt A): 848-854. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.11.023.
- [11] KAMRUZZAMAN M, MAKINO Y, OSHITA S. Parsimonious model development for real-time monitoring of moisture in red meat using hyperspectral imaging[J]. Food Chemistry, 2016, 196(3): 1084-1091. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.10.051.
- [12] WU D, SHI H, WANG S J, et al. Rapid prediction of moisture content of dehydrated prawns using online hyperspectral imaging system[J]. Analytica Chimica Acta, 2012, 726(9): 57-66. DOI:10.1016/j.aca.2012.03.038.
- [13] SØRLAND G H, LARSEN P M, LUNDBY F, et al. Determination of total fat and moisture content in meat using low field NMR[J]. Meat Science, 2004, 66(3): 543-550. DOI:10.1016/S0309-1740(03)00157-8.
- [14] PEREIRA F M V, COLNAGO L A. Determination of the moisture content in beef without weighing using benchtop time-domain nuclear magnetic resonance spectrometer and chemometrics[J]. Food Analytical Methods, 2012, 5(6): 1349-1353. DOI:10.1007/s12161-012-9383-9.
- [15] SOBOLEV A P, CIRCI S, MANNINA L. Advances in nuclear magnetic resonance spectroscopy for food authenticity testing[M]// Advances in food authenticity testing. Duxford: Woodhead Publishing, 2016: 147-170.
- [16] RNM P, GAMR L. Nuclear magnetic resonance and water activity in measuring the water mobility in Pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*) fish[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 58(1): 59-66. DOI:10.1016/S0260-8774(02)00334-5.
- [17] LONG C, TIAN Y Q, SUN B H, et al. Rapid, accurate, and simultaneous measurement of water and oil contents in the fried starchy system using low-field NMR[J]. Food Chemistry, 2017, 233: 525-529. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.04.147.
- [18] 盖圣美, 张中会, 邹玉峰, 等. 利用低场核磁共振检测分析注水猪肉水分子弛豫特性[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(6): 1980-1986.
- [19] 卫生部. 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [20] PEARCE K L, ROSENVOLD K, ANDERSEN H J, et al. Water distribution and mobility in meat during the conversion of muscle to meat and ageing and the impacts on fresh meat quality attributes: a review[J]. Meat Science, 2011, 89(2): 111-124. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.04.007.
- [21] BERTRAM H C, SCHÄFER A, ROSENVOLD 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. DOI:10.1016/S0309-1740(03)00188-8.
- [22] 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.
- [23] BERTRAM H C, KARLSSON A H, ANDERSEN H J. The significance of cooling rate on water dynamics in porcine muscle from heterozygote carriers and non-carriers of the halothane gene—a low-field NMR relaxation study[J]. Meat Science, 2003, 65(4): 1281-1291. DOI:10.1016/S0309-1740(03)00038-X.
- [24] BERTRAM H C, ERSEN H J. Applications of NMR in meat science[J]. Annual Reports on NMR Spectroscopy, 2004, 53(4): 157-202. DOI:10.1016/S0066-4103(04)53003-X.
- [25] SHAO J H, DENG Y M, JIA N, et al. Low-field NMR determination of water distribution in meat batters with NaCl and polyphosphate addition[J]. Food Chemistry, 2016, 200: 308-314. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.01.013.
- [26] LI M, LI B, ZHANG W J. Rapid and non-invasive detection and imaging of the hydrocolloid-injected prawns with low-field NMR and MRI[J]. Food Chemistry, 2018, 242: 16-21. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.08.086.
- [27] TAN M Q, LIN Z Y, ZU Y X, et al. Effect of multiple freeze-thaw cycles on the quality of instant sea cucumber: emphatically on water status of by LF-NMR and MRI[J]. Food Research International, 2018, 109: 65-71. DOI:10.1016/j.foodres.2018.04.029.
- [28] 陈琳莉, 李侠, 张春晖, 等. 低场核磁共振法测定五种肉类中不同状态水分含量[J]. 分析科学学报, 2015, 31(1): 90-94.
- [29] MA J, PU H, SUN D W. Predicting intramuscular fat content variations in boiled pork muscles by hyperspectral imaging using a novel spectral pre-processing technique[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 94: 119-128. DOI:10.1016/j.lwt.2018.04.030.
- [30] MOREIRA L F P P, FERRARI A C, MORAES T B, et al. Prediction of beef color using time-domain nuclear magnetic resonance (TD-NMR) relaxometry data and multivariate analyses[J]. Magnetic Resonance in Chemistry, 2016, 54(10): 800-804. DOI:10.1002/mrc.4456.
- [31] WANG J X, FAN L F, WANG H H, et al. Determination of the moisture content of fresh meat using visible and near-infrared spatially resolved reflectance spectroscopy[J]. Biosystems Engineering, 2017, 162: 40-56. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2017.07.004.