

研究报告

应用低场核磁共振技术快速鉴别冻融肉

季美泉¹,徐瑞平¹,丁涛¹,费晓庆¹,刘芸¹,王心怡²,林宏¹,邓晓军³,韩芳⁴,李贤良⁵,张文国⁶,郭桂萍⁶,黄键⁶
(1. 南京海关动植物与食品检测中心,江苏南京 210019;2. 东南大学成贤学院,江苏南京 210088;
3. 上海海关动植物与食品检验检疫技术中心,上海 200002;4. 合肥海关技术中心,安徽合肥 230000;
5. 重庆海关技术中心,重庆 400020;6. 南通海关综合技术中心,江苏南通 226001)

摘要:目的 利用化学计量学方法结合低场核磁共振(LF-NMR)对冻融肉快速鉴别进行研究。方法 利用 LF-NMR 选择 CPMG 序列对 111 个长白猪里脊肉样品采集核磁信号,通过对核磁信号数据的反演,将获得的 12 个变量采取主成分分析方式提取出 4 个主成分,并建立判别研究模型。结果 模型按照鲜肉组、微冻融肉组和冻融肉组分析,使用回代法验证的正确率为 95.5%,使用交叉验证的正确率为 94.6%。结论 LF-NMR 具有简单、快速的优点,可用于冻融肉的判别分析,为监管部门提供了可靠有效的依据。

关键词:冻融肉;低场核磁共振;主成分分析法;判别研究;快速检测

中图分类号:R155 文献标识码:A 文章编号:1004-8456(2023)01-0001-07

DOI:10.13590/j.cjfh.2023.01.001

Rapid identification of freezing-thawing meat using low field nuclear magnetic resonance technique

JI Meiquan¹, XU Ruiping¹, DING Tao¹, FEI Xiaoqing¹, LIU Yun¹, WANG Xinyi², LIN Hong¹,
DENG Xiaojun³, HAN Fang⁴, LI Xianliang⁵, ZHANG Wenguo⁶, GUO Guiping⁶, HUANG Jian⁶

(1. Testing Center of Animal, Plant and Food, Nanjing Customs, Jiangsu Nanjing 210019, China;
2. Chengxian College of Southeast University, Jiangsu Nanjing 210088, China; 3. Testing Center of
Animal, Plant and Food, Shanghai Customs, Shanghai 200002, China; 4. Technology Center, Hefei
Customs, Anhui Hefei 230000, China; 5. Technology Center, Chongqing Customs, Chongqing 400020,
China; 6. Technology Center, Nantong Customs, Jiangsu Nantong 226001, China)

Abstract: Objective To study the rapid identification of freezing-thawing meat by stoichiometry combined with low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR). **Methods** CPMG sequences were selected by LF-NMR to collect 111 NMR signals from pork tenderloin. Through the inversion of NMR signal data, four principal components were extracted from 12 variables by principal component analysis, and the discriminant research model was established. **Results** According to the analysis of fresh meat, slightly freezing-thawing meat and freezing-thawing meat, the accuracy of the model was 95.5% verified by back generation method, and it was 94.6% by cross-verification. **Conclusion** LF-NMR is simple and rapid, and can be used for discriminant analysis of freezing-thawing meat, which provides a reliable and effective basis for the supervision department.

Key words: Free-thawing meat; low field nuclear magnetic resonance; principal component analysis; discriminant research; rapid detection

鲜肉比冻融肉更有市场价值,近年来常出现把解冻肉当作冷鲜肉销售牟利的现象,扰乱了正常的

市场秩序,损害了消费者的利益,增加了食品安全的风险^[1-3]。研究快速可靠的新鲜肉和冻融肉鉴别技术,对规范生鲜肉行业具有重要意义。

作为检验检疫部门,需要快速区分新鲜肉和冻融肉,从而保障肉类食品的有序销售。但由于新鲜肉和冻融肉在形状、外观、颜色和纹理等方面相似,难以区分。目前主要的分析方法包括微观冰晶形貌法、高分辨质谱法、光谱技术等^[4-6]。这些方法的

收稿日期:2022-12-28

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1603501);海关总署科研项目(2021HK193)

作者简介:季美泉 男 工程师 研究方向为食品分析与食品掺假鉴别 E-mail:jimeiquandeyx@163.com

通信作者:费晓庆 男 高级工程师 研究方向为食品分析与食品掺假鉴别 E-mail:dii01208@163.com

设备成本较高、前处理流程相对复杂,使得鉴别流程繁琐、时间长、成本高。因此,如何快速、有效鉴别冻融肉是目前本领域技术人员亟待解决的难点问题,同时也是本领域研究的热点和重点。

本文利用一种快速、无损的分析检测技术——低场核磁共振(Low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR),通过测定肉品中氢原子核在磁场中的弛豫特性来确定肉品中水分的不同状态^[7-11],结合化学计量学方法,建立鲜肉、微冻融肉和冻融肉的 LF-NMR 分类判别模型^[12-13]。利用 LF-NMR 弛豫特性对冻融程度进行研究,通过主成分分析法(Principal component analysis, PCA)选择最佳变量,在保留原始变量主要信息的前提下,将多变量的信息进行数据转换和降维^[14-18];通过 Fisher 判别函数(Fisher discriminant analysis, FDA)对 PCA 获得的 4 个主成分进行有效利用并建立一定的 FDA 对样品进行分类判断,为监管部门简便、快速地判断冻融肉提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 主要仪器与材料

Q001-20-025V 型低场核磁共振仪(苏州纽迈分析仪器股份公司)。

从农贸市场购入 9 批当天屠宰的新鲜长白猪的里脊肉,9 批猪肉均来自不同的屠宰场,每批均购买 2 条里脊肉,共计 18 条,并随机将其编 1~18 号。去除表面的脂肪和结缔组织后,留取 500 g 左右长条状备用。

1.2 方法

1.2.1 样品制备

将每块鲜猪里脊肉去除前端 1 cm 肉后,再切一块 1 cm 厚肉片,从中心取肉块约 4 g,置于样品瓶中作为对照样品,其中 1 号里脊取了 2 块样品作为平行样考察,其余编号里脊均取 1 块样品。

剩余样品放入 -18°C 冷库中冷冻,3 d 后取出,置于 4°C 冷藏柜中解冻一晚(12 h)后取出,分别将每一份里脊肉去除前端 1 cm 肉后,再切一块 1 cm 厚肉片,从中心取肉块约 4 g,置于样品瓶中,作为样品,重复上述步骤,共计 6 次;其中 15 号样品冷冻第 6、12、18 天时取出解冻,共计冻融 3 次,并在冻融第 6 次时将肉去除前端 1 cm 肉后,再切一块 1 cm 厚肉片,从中心取肉块约 4 g,置于样品瓶中,作为样品待测,共计取样 1 次;16~18 号样品冷冻第 3、6、18 天时取出解冻,共计冻融 3 次,在冻融第 1、2、6 次时将肉去除前端 1 cm 肉,再切一块 1 cm 厚肉片,从中心

取肉块约 4 g,置于样品瓶中,作为样品待测,共计取样 3 次。

1.2.2 LF-NMR 检测

检测试样在放入仪器的样品管前均用 32°C (仪器工作温度)水浴处理 15 min。

CPMG (Carr-Purcell-Meiboom-Gill sequence) 序列检测参数:射频延时(RFD)=0.08 ms,前放档位(PRG)=1,模拟增益(RG)=20.0 db,数字增益(DRG)=3,主频(SF)=21 MHz,采样频率(SW)=100 kHz,采样点数(TD)=1 000 062,等待时间(TW)=20 000 ms,回波时间(TE)=0.5 ms,回波个数(NECH)=10 000,累加次数(NS)=4。

采用仪器自带的数据处理功能对测量数据进行多组分反演和单组分反演,得到每个肉样品的横向弛豫谱及相对应的弛豫谱参数的值。

反演参数:选用 SIRT 反演方法,弛豫时间点数量=1 000,弛豫时间最小值=0.01 ms,弛豫时间最大值=10 000 ms,选择数据数量=200,迭代次数=100 000。

1.3 统计学分析

应用软件 IBM SPSS Statistics (Version 26, IBM) 对数据进行统计分析,用判别分析法(结合主成分分析)建立检测冻融肉的模型。

2 结果

2.1 样品横向弛豫图谱

里脊肉样品横向弛豫谱一般由 3 个峰组成,这 3 个峰对应着水的 3 种不同状态,从左到右依次是结合水、不易流动水和自由水。横向弛豫谱中包含了 12 个特征变量,即多组分反演数据中的总峰面积,3 个峰的峰起始时间、峰顶点时间、峰结束时间和峰面积百分比,以及单组分反演得到的总弛豫时间。9 批猪的鲜里脊肉样品的横向弛豫谱见图 1。由图 1 可知,不同猪的里脊鲜肉未冷冻时的横向弛豫谱参数基本一致。由此说明不同批次的长白猪的里脊肉横向弛豫谱数据受个体差异影响较小。

同一块鲜里脊肉在经过冷冻后随着时间变化不易流动水的比例也在变化,见图 2;同一块鲜里脊肉在经过冷冻后随着时间变化结合水的弛豫时间和比例、自由水的时间和比例也在变化,见图 3。这表明结合水逐渐变为自由水,从肌原纤维内排出到肌原纤维之间,然后到猪肉表面作为自由水损失。冻融次数的增加引起了肌肉的破裂和纤维间隙的增加。

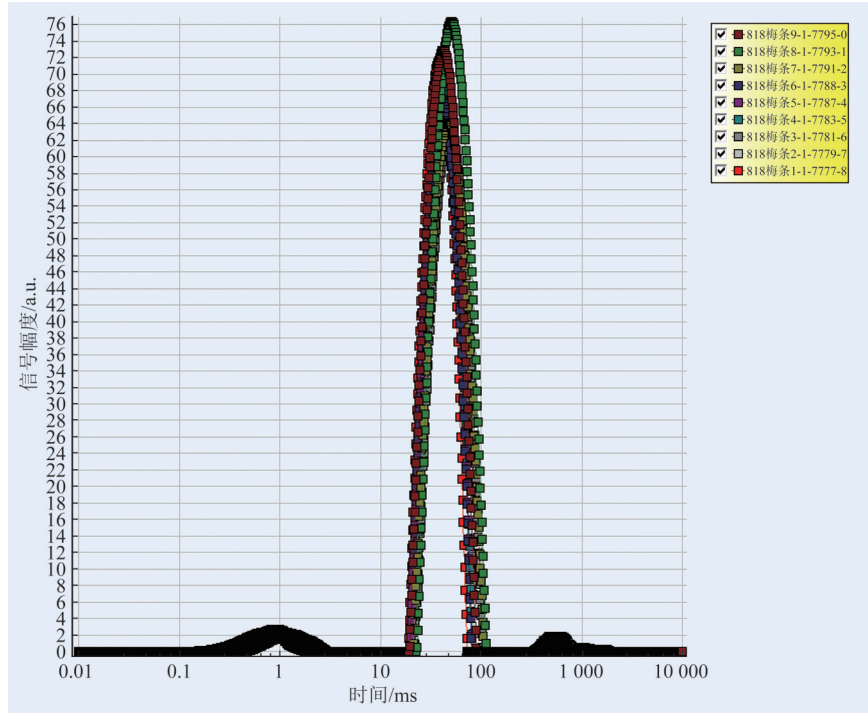


图1 9批猪的鲜里脊肉样品的横向弛豫谱

Figure 1 Transverse relaxation spectra of fresh meat samples from 9 pigs

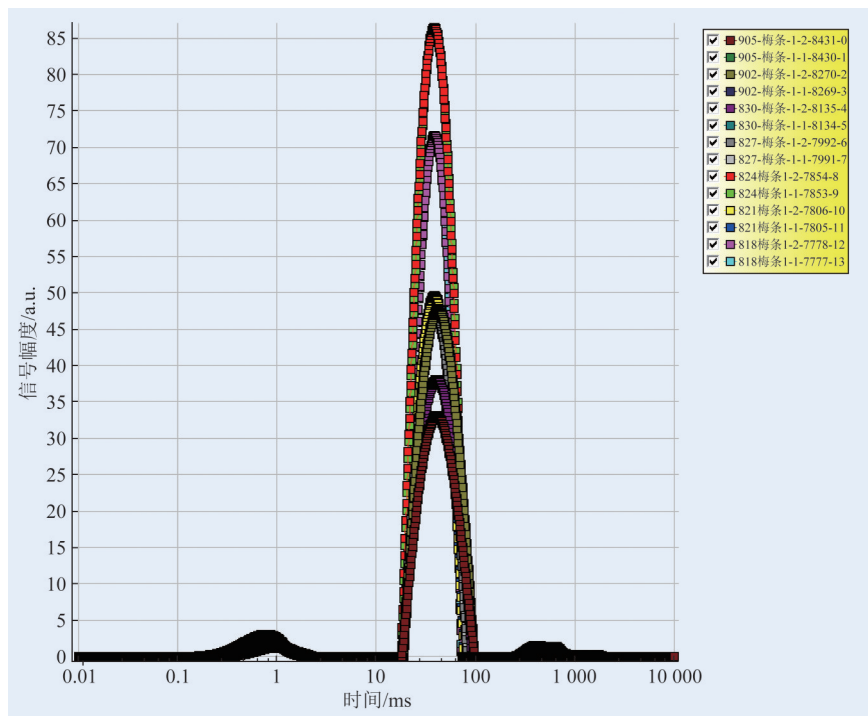


图2 猪肉样品随冷冻时间的横向弛豫谱

Figure 2 Transverse relaxation spectra of pork samples with freezing time

2.2 LF-NMR 数据的组成分析

根据本实验反演数据的 12 个特征变量,主成分分析的计算结果中,新变量所代表的方差(即其对应的特征值)贡献率和由原变量变换为新变量的线性变换系数是分析的重点。一般认为,在主成分分析中,如果前几个新变量的累积方差贡献率达到 85%,则表明这些主成分包含了全部测量指标所具有的主要信息^[10]。

本次研究中,前 4 个主成分积累的方差贡献率已经达到 93.825%(表 2),因此选取前 4 个主成分来代表全部 12 个变量,如表 3 所示。表 1~3 分别给出了原始数据的公因子方差、主成分解释的总方差和成分矩阵的计算结果。图 4 为前 3 个主成分得分图。

2.3 基于主成分分析建立冻融肉的判别模型

判别分析的特点是根据已掌握的每个类别的

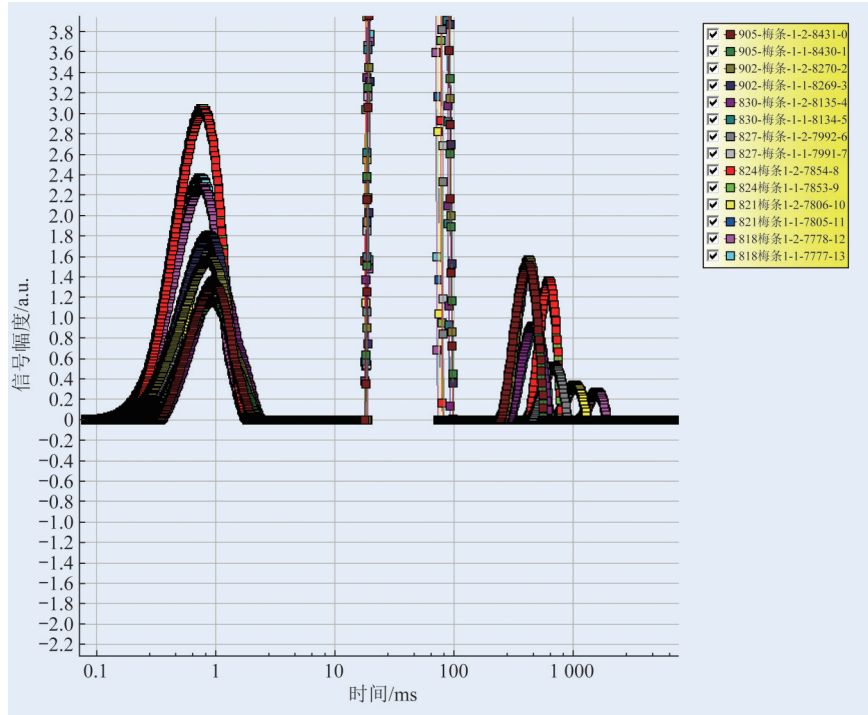


图3 猪肉样品随冷冻时间的横向弛豫谱(局部)

Figure 3 Transverse relaxation spectrum of pork samples with freezing time (local)

表1 原始数据公因子方差

Zscore		初始	提取
峰 1	起始时间	1.000	0.801
	顶点时间	1.000	0.919
	结束时间	1.000	0.775
	面积百分比	1.000	0.703
峰 2	起始时间	1.000	0.920
	顶点时间	1.000	0.913
	结束时间	1.000	0.853
	面积百分比	1.000	0.916
峰 3	起始时间	1.000	0.983
	顶点时间	1.000	0.991
	结束时间	1.000	0.983
	面积百分比	1.000	0.938

表3 成分得分系数矩阵

Zscore	成分			
	1	2	3	
峰 1	起始时间	-0.090	0.257	0.063
	顶点时间	-0.123	0.217	0.032
	结束时间	-0.128	0.142	0.050
	面积百分比	0.098	-0.188	-0.152
峰 2	起始时间	0.093	0.255	-0.188
	顶点时间	0.014	0.299	-0.278
	结束时间	-0.149	0.012	-0.012
	面积百分比	0.136	0.081	-0.223
峰 3	起始时间	0.133	0.104	0.260
	顶点时间	0.123	0.114	0.310
	结束时间	0.105	0.114	0.376
	面积百分比	-0.139	-0.066	0.226

表2 主成分解释的总体方差

成分	总计	初始特征值		提取载荷平方和		
		方差百分比/%	累积/%	总计	方差百分比/%	累积/%
1	6.180	51.496	51.496	6.180	51.496	51.496
2	2.698	22.480	73.977	2.698	22.480	73.977
3	1.818	15.151	89.128	1.818	15.151	89.128
4	0.564	4.698	93.825	0.564	4.698	93.825
5	0.345	2.872	96.697			
6	0.172	1.436	98.133			
7	0.122	1.014	99.147			
8	0.051	0.421	99.568			
9	0.031	0.254	99.822			
10	0.016	0.131	99.953			
11	0.005	0.040	99.993			
12	0.001	0.007	100.000			

组件图

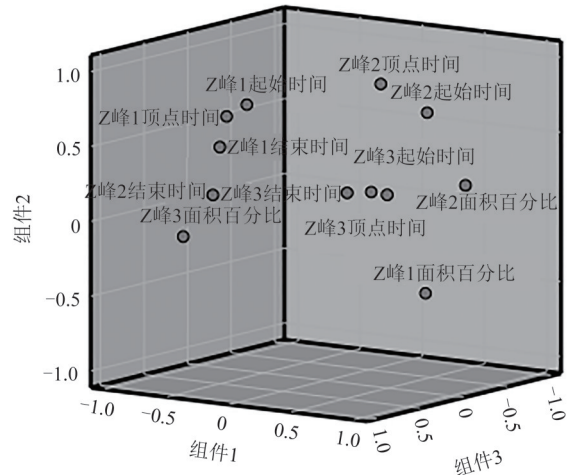


图4 前三个主成分得分图

Figure 4 Scores of the first three principal components

若干样本的数据信息,总结出客观事物分类的规律性,建立判别公式和判别准则,当遇到新的样本时,

根据总结出来的判别公式和判别准则,就能判别该样本所属的类别。使用判别分析的关键点有两点,一是测量样品的各种属性在各类别之间是否存在显著差异;二是哪些属性适合用来判别分类。实验将分为鲜肉组(新鲜未冻融)、轻微冻融肉组(冻融1~2次)和冻融肉组3组(冻融3次及以上)。

在 SPSS 平台上建立冻融肉的判别模型。FDA 系数、组质心处的函数值及分类函数系数分别见表 4、5、6,合并的典则判别函数图见图 4。

表 4 Fisher 判别函数系数

REGR factor score	函数	
	1	2
1 for analysis 1	1.618	0.296
2 for analysis 1	1.497	-0.406
3 for analysis 1	0.241	1.233
4 for analysis 1	0.487	-0.347
(常量)	0.000	0.000

表 5 组质心处的函数

分组	函数	
	1	2
0	2.979	1.561
1	1.667	-1.274
2	-1.833	0.185

表 6 分类函数系数

REGR factor score	分组		
	0	1	2
1 for analysis 1	5.283	2.321	-2.911
2 for analysis 1	3.825	3.013	-2.818
3 for analysis 1	2.644	-1.169	-0.214
4 for analysis 1	0.909	1.255	-0.957
(常量)	-6.754	-3.301	-2.795

由此,得到基于 LF-NMR 数据的冻融肉鉴别模型为:

$$Y_0=5.283F_1+3.825F_2+2.644F_3+0.909F_4-6.754;$$

$$Y_1=2.321F_1+3.013F_2-1.169F_3+1.255F_4-3.301;$$

$$Y_2=-2.911F_1-2.818F_2-0.214F_3-0.957F_4-2.795;$$

比较 Y_0 、 Y_1 以及 Y_2 的值大小;

当 Y_0 值最大时,该样品为鲜肉类(新鲜未冻融);

当 Y_1 值最大时,该样品为微冻融肉类(冻融 1 至 2 次);

当 Y_2 值最大时,该样品为冻融肉类(冻融 3 次及以上);

其中:

$$F_1=-0.090T_{11}-0.123T_{12}-0.128T_{13}+0.098\lambda_1+0.093T_{21}+0.014T_{22}-0.149T_{23}+0.136\lambda_2+0.133T_{31}+0.123T_{32}+0.105T_{33}-0.139\lambda_3;$$

$$F_2=0.257T_{11}+0.217T_{12}+0.142T_{13}-0.188\lambda_1+$$

$$0.255T_{21}+0.299T_{22}+0.012T_{23}+0.081\lambda_2+0.104T_{31}+0.114T_{32}+0.114T_{33}-0.066\lambda_3;$$

$$F_3=0.063T_{11}+0.032T_{12}+0.050T_{13}-0.152\lambda_1-0.188T_{21}-0.278T_{22}-0.012T_{23}-0.223\lambda_2+0.260T_{31}+0.310T_{32}+0.376T_{33}+0.226\lambda_3;$$

$$F_4=-0.548T_{11}+0.102T_{12}+0.643T_{13}+0.776\lambda_1+0.250T_{21}+0.340T_{22}+0.222T_{23}-0.310\lambda_2+0.138T_{31}+0.142T_{32}+0.147T_{33}+0.253\lambda_3;$$

式中: T_{11} 、 T_{12} 、 T_{13} 分别为样品 LF-NMR 检测数据反演后得到的横向弛豫谱中峰 1(左侧峰)的起始时间、顶点时间和结束时间; T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 分别为样品 LF-NMR 检测数据反演后得到的横向弛豫谱中峰 2(中间峰)的起始时间、顶点时间和结束时间; T_{31} 、 T_{32} 、 T_{33} 分别为样品 LF-NMR 检测数据反演后得到的横向弛豫谱中峰 3(右侧峰)的起始时间、顶点时间和结束时间; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为峰 1、峰 2、峰 3 占总峰面积的百分比。

由此可以看出,通过对 LF-NMR 数据进行反演处理,并结合 PCA 获得并筛选其中的 3 个主成分作为变量进行模型建立,从而获得了能够满足分类需要的判别模型,该模型具有良好的组间距离,可以实现冻融肉、微冻融肉、鲜肉的分类判别,见图 5。

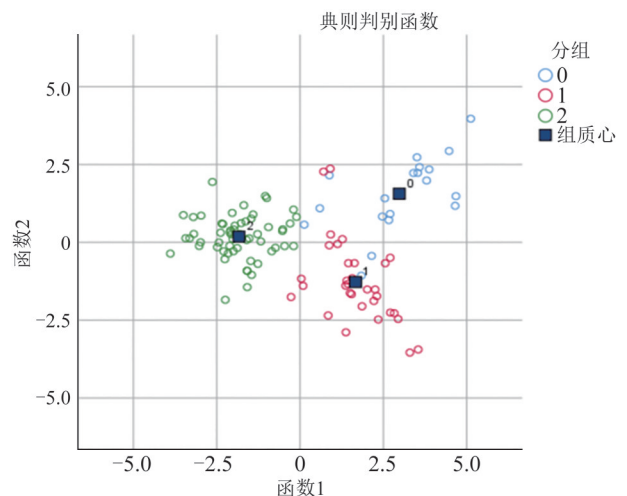


图 5 Fisher 判别函数合并图

Figure 5 Merge diagram of Fisher discriminant functions

从表 7 可以看出,上述判别模型对原始个案总的判别正确率达 95.5%,尤其对于对照组,没有 1 例错判。与原始个案相比,交叉验证个案对照组依然维持了 100% 的正确率,总的正确判别率依然达 94.6%。两种验证方法的数据接近,也说明该模型稳定,即利用 LF-NMR 技术结合 Fisher 判别对冻融肉进行判别是可行的,可以满足实际检测的需求。

表7 判别研究分类结果

Table 7 Classification results of discriminant studies

分组	预测组成员信息				总计	
	0	1	2			
回代验证		0	16	2	1	19
	计数	1	2	30	0	32
		2	0	0	60	60
	百分比/%	0	84.2	10.5	5.3	100.0
		1	6.3	93.8	0.0	100.0
		2	0.0	0.0	100.0	100.0
交叉验证		0	15	2	2	19
	计数	1	2	30	0	32
		2	0	0	60	60
	百分比/%	0	78.9	10.5	10.5	100.0
		1	6.3	93.8	0.0	100.0
		2	0.0	0.0	100.0	100.0

3 结论

本研究采用 LF-NMR 技术结合化学计量学方法,建立了长白猪里脊肉的鲜肉、微冻融肉和冻融肉的 LF-NMR 判别分析模型以及鲜肉、微冻融肉和冻融肉的 LF-NMR 分类判别模型。首先利用 LF-NMR 结合主成分判别,根据 FDA 交叉验证样品集中的鲜肉、微冻融肉和冻融肉总的正确判别率达到 94.6%。上述结果表明,LF-NMR 技术结合主成分分析、判别研究识别鲜肉、微冻融肉和冻融肉是可行的,为冻融肉的快速检测提供了新的思路,也对提高我国原料肉质量控制具有重要意义。

参考文献

- [1] 涂婷,汤晓艳,汤舒越,等.不同贮藏与冻融方式对猪肉中氨基酸含量的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(20):174-179.
TU T, TANG X Y, TANG S Y, et al. The effect of different storage and freeze-thaw method on the amino acids profile in pork [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(20): 174-179.
- [2] 陈俊文,刘巧瑜,李湘鑫,等.解冻方式、反复冻融对猪肉品质的影响[J].食品工业,2021,42(4):14-17.
CHEN J W, LIU Q Y, LI X L, et al. Effects of freezing methods and repeated freezing-thawing on pork quality [J]. The Food Industry, 2021, 42(4): 14-17.
- [3] 章杰,彭新书,何航.反复冻融对猪肉营养成分的影响[J].食品与发酵工业,2018,44(2):166-171.
ZHANG J, PENG X S, HE H. Effect of freeze-thaw cycles on nutritional components in pork [J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(2): 166-171.
- [4] 何启川,杨敏莉,王秀娟,等.基于超高效液相色谱-四极杆-静电场轨道阱高分辨质谱法结合化学计量学鉴别新鲜和反复冻融牛肉[J].食品安全质量检测学报,2021,12(16):6324-6331.
HE Q C, YANG M L, WANG X J, et al. Identification of fresh and frozen-thawed beef based on ultra performance liquid chromatography-quadrupole-orbitrap high resolution mass spectrometry combined with chemometrics [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(16): 6324-6331.

- [5] 崔晓颖,赵鑫琦,刘春云,等.冰晶形貌对反复冻融肉体系稳定性影响的研究进展[J].食品科学,2022,43(11):214-221.
CUI X Y, ZHAO X Q, LIU C Y, et al. Research progress on the effect of ice crystal morphology on the stability of repeated freeze-thaw meat system [J]. Food Science, 2022, 43(11): 214-221.
- [6] 王勇峰,郎玉苗,黄必志,等.光谱技术鉴别冷鲜肉和冻融肉的研究进展[J].黑龙江畜牧兽医,2017(11):68-71.
WANG Y F, LANG Y M, HUANG B Z, et al. Update on identification of Fresh and frozen-thawed meat by using spectral imaging technology [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2017(11): 68-71.
- [7] 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.
- [8] HAN M Y, WANG P, XU X L, et al. Low-field NMR study of heat-induced gelation of pork myofibrillar proteins and its relationship with microstructural characteristics[J]. Food Research International, 2014, 62: 1175-1182.
- [9] 盖圣美,游佳伟,张中会,等.低场核磁共振技术在肉类品质安全分析检测中的应用[J].食品安全质量检测学报,2018,9(20):5294-5300.
GAI S M, YOU J W, ZHANG Z H, et al. Application of low field nuclear magnetic resonance technology in the quality and safety analysis and detection of meat [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(20): 5294-5300.
- [10] 王佳慧,艾竹君,冯蔚旭,等.应用低场核磁共振技术检测注水肉的探讨[J].农产品加工,2018(22):42-45,51.
WANG J H, AI Z J, FENG W X, et al. Discussion on detection of water-injected meat using low field nuclear magnetic resonance technique [J]. Farm Products Processing, 2018(22): 42-45, 51.
- [11] 孙文彬,罗欣,张一敏,等.低场核磁共振在肉与肉制品水分测定与分析中的应用研究进展[J].食品科学,2019,40(15):346-351.
SUN W B, LUO X, ZHANG Y M, et al. A review of the application of low field nuclear magnetic resonance in detection and analysis of water in meat and meat products [J]. Food Science, 2019, 40(15): 346-351.
- [12] 张国文,倪永年,朱志怀.化学计量学:光度法在食品多组份分析中的应用评述[J].食品科学,2003,24(11):156-160.
ZHANG G W, NI Y N, ZHU Z H. Review of application chemometrics in simultaneous spectro-photometric analysis of food multicomponents [J]. Food Science, 2003, 24(11): 156-160.
- [13] 张文彤,董伟.SPSS统计分析高级教程(第3版)[M].北京:高等教育出版社,2018:241.
ZHANG W T, DONG W. SPSS Advanced Course of SPSS Statistical Analysis (3rd press) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2018: 241.
- [14] 庞之列,何栩晓,李春保.一种基于LF-NMR技术的不同含水量猪肉检测方法研究[J].食品科学,2014,35(4):142-145.
PANG Z L, HE X X, LI C B. A method for detection of water content in pork using low-field nuclear Magnetic resonance (LF-NMR) [J]. Food Science, 2014, 35(4): 142-145.

- [15] 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.
GAI S M, ZHANG Z H, YOU J W, 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.
- [16] 王佳慧, 艾竹君, 冯蔚旭, 等. 应用低场核磁共振技术检测注水肉的探讨[J]. 农产品加工, 2018(22): 42-45, 51.
WANG J H, AI Z J, FENG W X, et al. Discussion on detection of water-injected meat using low field nuclear magnetic resonance technique[J]. Farm Products Processing, 2018(22): 42-45, 51.
- [17] 甄少波, 刘奕忍, 郭慧媛, 等. 低场核磁共振分析猪肉宰后成熟过程中的水分变化[J]. 食品工业科技, 2017, 38(22): 66-70.
ZHEN S B, LIU Y R, GUO H Y, et al. Analysis of moisture changes of pork during postmortem aging by low-field NMR[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(22): 66-70.
- [18] 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 T L, LIU D Y, XU X L, et al. Application of low-field nuclear magnetic resonance in determining water contents and other related quality characteristics of meat and meat products: a review[J]. Food Science, 2011, 32(21): 253-256.