

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250121009

引用格式: 胡艺骞, 徐成, 胡涛, 等. 低场核磁共振二维指纹谱技术在肉松种类快速检测中的应用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(12): 238–294.

HU YQ, XU C, HU T, *et al.* Application of low-field nuclear magnetic resonance 2D fingerprint spectroscopy technology in rapid quality detection of pork floss products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(12): 238–294. (in Chinese with English abstract).

低场核磁共振二维指纹谱技术在肉松种类快速检测中的应用研究

胡艺骞¹, 徐成¹, 胡涛¹, 周希韵¹, 胡文涛², 王雪璐^{1,3*}, 姚叶锋^{1,3*}

(1. 上海市磁共振重点实验室, 华东师范大学物理与电子科学学院, 上海 200062; 2. 苏州市食品检验检测中心, 苏州 215104; 3. 华东师范大学医学磁共振与分子影像技术研究院, 上海 200062)

摘要: **目的** 利用低场核磁共振技术实现对市面上常见肉松种类的快速无损检测与识别。**方法** 本研究开发了一种适用于肉松制品种类快速检测的低场核磁共振二维弛豫指纹谱方法, 基于指纹谱色度差异区分肉松种类。**结果** 基于研发的二维弛豫指纹谱技术方法, 可对市面上常见的猪肉、鸡肉、牛肉、鱼肉及其混合肉松进行快速无损区分。随着肉松中不同成分比例的变化, 指纹谱展现出明显的定性变化趋势, 能够有效反映肉松中各类肉类的比例变化, 证实了该技术的精确性。**结论** 本研究方法可以快速无损并精确地区分市面上大部分肉松种类, 能够满足食品行业和政府检测机构的需求, 是一种具有巨大前景的新型检测手段。**关键词:** 低场核磁共振; 肉松制品; 核磁共振指纹谱; 食品安全

Application of low-field nuclear magnetic resonance 2D fingerprint spectroscopy technology in rapid quality detection of pork floss products

HU Yi-Qian¹, XU Cheng¹, HU Tao¹, ZHOU Xi-Yun¹, HU Wen-Tao²,
WANG Xue-Lu^{1,3*}, YAO Ye-Feng^{1,3*}

(1. Shanghai Key Laboratory of Magnetic Resonance, College of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Suzhou Institute for Food Control, Suzhou 215104, China; 3. Institute of Magnetic Resonance and Molecular Imaging in Medicine, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

ABSTRACT: Objective To achieve the identification and rapid detection of commonly found types of meat floss on the market via low-field nuclear magnetic resonance. **Methods** This study developed a low-field nuclear magnetic resonance two-dimensional relaxation fingerprinting technique suitable for the rapid detection of meat floss product types. Based on the colour discrepancy, different types of meat floss products can be distinguished. **Results** The developed two-dimensional relaxation fingerprinting technique can quickly and non-destructively distinguish between commonly available pork, chicken, beef, fish, and their mixed meat floss products. With the change in the

收稿日期: 2025-01-21

第一作者: 胡艺骞(2003—), 男, 主要研究方向为凝聚态物理。E-mail: 1624725594@qq.com

*通信作者: 王雪璐(1988—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为新型原位核磁共振技术研发领域的研究。E-mail: xlwang@phy.ecnu.edu.cn
姚叶锋(1976—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为核磁共振系统和方法的研发与应用。E-mail: yfyao@phy.ecnu.edu.cn

proportion of different components in meat floss, the fingerprint spectrum shows a significant qualitative trend, effectively reflecting the changes in the proportion of various meats in meat floss, which proves the accuracy of this technology. **Conclusion** This research method can rapidly, non-destructively and accurately differentiate most types of meat floss on the market, meeting the needs of the food industry and government testing institutions, making it a promising new detection tool with great potential.

KEY WORDS: low-field nuclear magnetic resonance; meat floss product; nuclear magnetic resonance fingerprint spectroscopy; food safety

0 引言

中国是世界肉类生产和消费大国,肉制品在整体肉类产量中的占比逐年提升,过去 30 年经历了产量的快速增长。目前,肉制品行业正处于转型升级的过度时期,寻求新的增长点,有望保持稳定的增长趋势^[1]。肉松作为我国特有的传统肉干制品之一,具有强大的市场活力^[2]。肉松的品质主要取决于原料肉、加工工艺及贮藏方式。其中,原料肉的种类及品质质量均会对肉松品质产生影响^[3-4]。综合分析肉制品的质量问题主要有以下两种:第一,向价格品质相对较高的肉制品中掺入价格品质相对较低的其他肉质原料或者植物蛋白;第二,将品质只能达到低等级的肉制品宣称高等级的肉制品。面对这些问题,目前主要检测手段包括分子生物学技术、光谱技术、色谱质谱技术、免疫学检测、代谢组学技术等^[5]。其中最为常见的是分子生物学技术^[6-7]和光谱技术^[8-10]。对于上述肉制品质量问题的第一种情形,主要采用分子生物学技术中的主成分分析(principal component analysis, PCA)方法进行鉴定^[11-12]。该方法虽然灵敏度高,但检测成本较高,并且在定量方面存在一定的局限性。如果目标源性成分未在筛查范围内,可能会导致漏判。此外,还可以使用红外光谱和拉曼光谱^[13-14]对植物蛋白和动物蛋白进行分析和鉴别,但这类光谱存在重叠现象,较为复杂,因此需要结合统计学方法进行辅助分析。对于第二种情况,根据 GB/T 23968—2022《肉松质量通则》,需要使用大量试剂分别检测淀粉、脂肪、蛋白质等成分的含量。上述常见检测手段步骤烦琐、检测周期长,并且会破坏原有样品。因此,为了应对日益增长的肉制品检测需求,开发一种新型快速检测技术以辨别肉松的种类及品质具有重要意义。

低场核磁共振(low field-nuclear magnetic resonance, LF-NMR)指纹谱技术是近几年来逐渐兴起的新技术之一,并最先在医学领域得到应用,用于监测人体组织的变化^[15-16]。该技术通过使用专门设计的核磁共振弛豫指纹谱脉冲序列,同步测量样品的纵向弛豫(T_1)和横向弛豫(T_2)信息的二维弛豫信号,从而得到与样品本质属性相关的二维弛豫谱。其核心优势在于能够监测并放大受多变量影响的核磁共振信号,即样品的整体弛豫特征。这种通过弛豫谱技术

获得的弛豫特征具有高度独特性,有望成为样品的自有特征,用于区分其他类似样品。在食品领域,该技术^[17-18]也已经在食用油^[19-21]、白酒^[22]、生兽肉^[23-25]等食品的检测中发挥巨大作用。杜蘅等^[26]尝试使用低场核磁共振指纹谱技术通过观测食用油中 H^1 的 T_1/T_2 弛豫信号差异,并结合主成分分析方法(principal component analysis, PCA)对食用油种类和食用油掺伪情况进行区分和判断。国外也存在利用食用油中 H^1 的 T_1/T_2 弛豫信号分析食用油中脂肪酸成分^[27]和研究初榨橄榄油最佳储存方案的案例^[28]。然而,使用二维 LF-NMR 指纹谱技术对肉松制品种类进行快速检测识别的研究报告还鲜见报道。

本研究旨在探索适用于肉松制品快速检测的二维 LF-NMR 弛豫指纹谱技术方法,并将其应用于肉松种类及品质检测领域^[29-31]。利用该方法,通过对市面上常见肉松(包括鸡肉松、牛肉松、猪肉松和鱼肉松)进行系统研究,尝试建立三维坐标系置信区间,以期为后续的鉴别工作提供参考依据,并在肉类及肉制品质量安全筛查中得到广泛应用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

猪、鸡、牛、鱼 4 种肉松均于市场中采购。核磁管(北京欣维尔玻璃仪器有限公司)。

1.2 仪器与设备

VTMR20-010V-I 低场核磁共振仪[磁场强度为 (0.5 ± 0.05) T,苏州纽迈分析仪器股份有限公司];FPS20 弛豫指纹谱系统(用于肉制品 T_1 、 T_2 弛豫测量以及弛豫指纹谱数据采集,苏州纽迈分析仪器股份有限公司);ATX224 电子天平(精度 0.1 mg,日本岛津公司)。

1.3 实验方法

对于每个肉制品样品:取 1 g 放入 10 mm 核磁管中,将肉压缩至 1 cm 处,充分预热后放入低场核磁共振仪进行实验。

肉松 T_1 弛豫谱测量方法:采样反转恢复(inversion recovery, IR)序列。实验参数:频率偏置:13000 Hz,采样点数:1 024,累加次数:4 次,90°脉冲脉宽:2.96 μ s,180°脉冲脉宽:4.80 μ s,谱宽:333.333 kHz,等待时间:2 s,反转时间个数:40。

肉松 T2 弛豫谱测量方法: 采样序列 (carr-purcell-meiboom-gill, CPMG)。实验参数: 频率偏置: 13000 Hz, 采样点数: 1024, 累加次数: 4 次, 90°脉冲脉宽: 2.96 μs , 180°脉冲脉宽: 4.80 μs , 谱宽: 333.333 kHz, 等待时间: 2 s, 回波时间: 0.2 ms, 回波个数: 3000。

肉松弛豫指纹谱数据采集方法: 采样核磁共振弛豫指纹谱脉冲序列。实验参数: τ_1 代表弛豫时间, 实验中选取为 100、150、200、250、300、400、500 μs , n 代表重复次数, 实验中选取了 1~2500 之间 18 个值, 即[3、5、10、20、40、80、100、150、200、250、300、400、500、700、900、1200、1500、2500], τ_2 代表一固定弛豫时间, 为 100 μs 。频率偏置: 1260 Hz, 采样点数: 1024, 累加次数: 40 次, 90°脉冲脉宽: 2.8 μs , 180°脉冲脉宽: 5.2 μs , 谱宽: 100 kHz, 等待时间: 2 s。本研究使用这些已经确定的参数进行所有后续实验。

1.4 数据处理

采用 FPS20 弛豫指纹谱系统生成二维指纹谱, 采用 Origin 2024 版本软件绘制三维坐标系图。

由此获得肉制品的二维弛豫曲面 $f(\tau_1, n)$, 归一化后为 $f_n(\tau_1, n)$ 。

以四类肉松样品的二维弛豫数据平均强度生成本文中的参考曲面 $f_{ref}(x, y)$ 。

其曲面函数为: $f_{ref}(x, y) = 18.54 - 17.11x - 6.667y + 6.41x^2 + 4.15xy + 0.3606y^2 - 1.232x^3 - 1.024x^2y - 0.08823xy^2 + 0.04467y^3 + 0.1212x^4 + 0.1138x^3y + 0.02533x^2y^2 - 0.02851xy^3 + 0.003422y^4 - 0.00484x^5 - 0.004637x^4y - 0.002608x^3y^2 + 0.001928x^2y^3 + 0.001074xy^4 + 0.0000372y^5$

将实验所获得的二维弛豫曲面 $f_n(\tau_1, n)$ 与参考曲面 $f_{ref}(x, y)$ 相减, 即可获得肉松 τ_2 分布指纹谱。

2 结果与分析

2.1 常见肉松样品的一维低场 NMR 弛豫曲线

本研究对市面上常见 4 类肉松(鸡肉松、牛肉松、猪肉松、猪肉松)

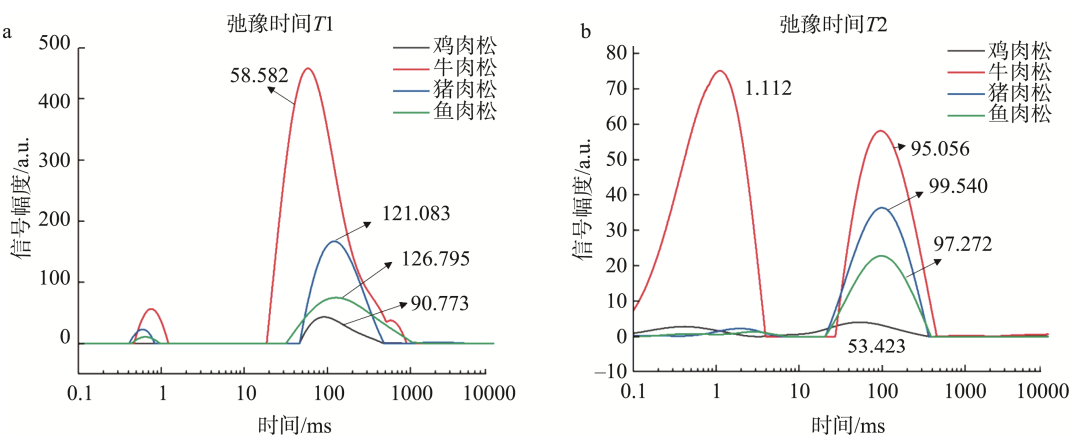
进行了—维 T1 和 T2 LF-NMR 弛豫曲线测量。弛豫时间曲线及数值分别如图 1 所示。可以看出, 这 4 种肉松的弛豫曲线虽然存在一定差异, 但整体上较为接近, 缺乏显著的分度。因此, 仅凭样品的 T1、T2 弛豫曲线, 本研究很难快速且准确地判定不同种类的肉松。因此, 本研究需要寻找更为有效且具有更高区分度的方法来鉴别这 4 种肉松。

2.2 二维指纹谱实验参数调节

核磁共振指纹谱技术主要分为两个部分: 首先, 通过设计特定的核磁共振弛豫指纹谱脉冲序列对众多样品进行测试, 并通过特定的数据处理方法建立标准的平均参考数据库。其次, 将待测样品与这个标准参考数据库进行比较, 生成一系列指纹谱图, 并分析不同样品指纹谱图之间的差异。在指纹谱图中, 样品的差异会通过颜色的差异来显现。

为了评价方法的可靠性, 本研究对肉制品的稳定性进行了测试。本研究选取了鲜牛肉同一部位制备 3 个不同质量标样样品(样品 1: 0.56 g; 样品 2: 3.26 g; 样品 3: 1.02 g), 保证温度一致的情况下, 每个样本进行 3 次重复实验, 累计获得 9 个数据点。对获得的 9 组核磁共振指纹谱数据进行分析显示(如图 2 所示), 在统一测试环境下, 不同质量样本的指纹谱特征参数具有较好一致性。也就是说, 在保证测试环境相同的情况下, 样品的数据具有一定的可靠性。

其次, 为探究水分含量对检测结果的影响, 本研究构建了水分梯度系列样本: 取 1 g 标准肉松样品, 分别添加 0.2、0.4、0.8、1.0、1.2、1.5、2.0 mL 去离子水(精确至 ± 0.02 mL), 经均质化处理并封装于标准核磁管中进行测定。图 3 展示了不同含水量样本的指纹谱特征及三维参数空间分布。数据分析显示, 随水相体积增加(0.2~2.0 mL 区间), 指纹谱呈现连续色度迁移现象, 其颜色沿红-蓝光谱轴产生梯度变化。在三维参数空间中, 数据点分布呈现



注: a. 4 种肉松 T1 弛豫曲线; b. 4 种肉松 T2 弛豫曲线。

图 1 4 种肉松的 T1 弛豫曲线和 T2 弛豫曲线

Fig.1 T1 and T2 relaxation curves for 4 kinds of meat floss

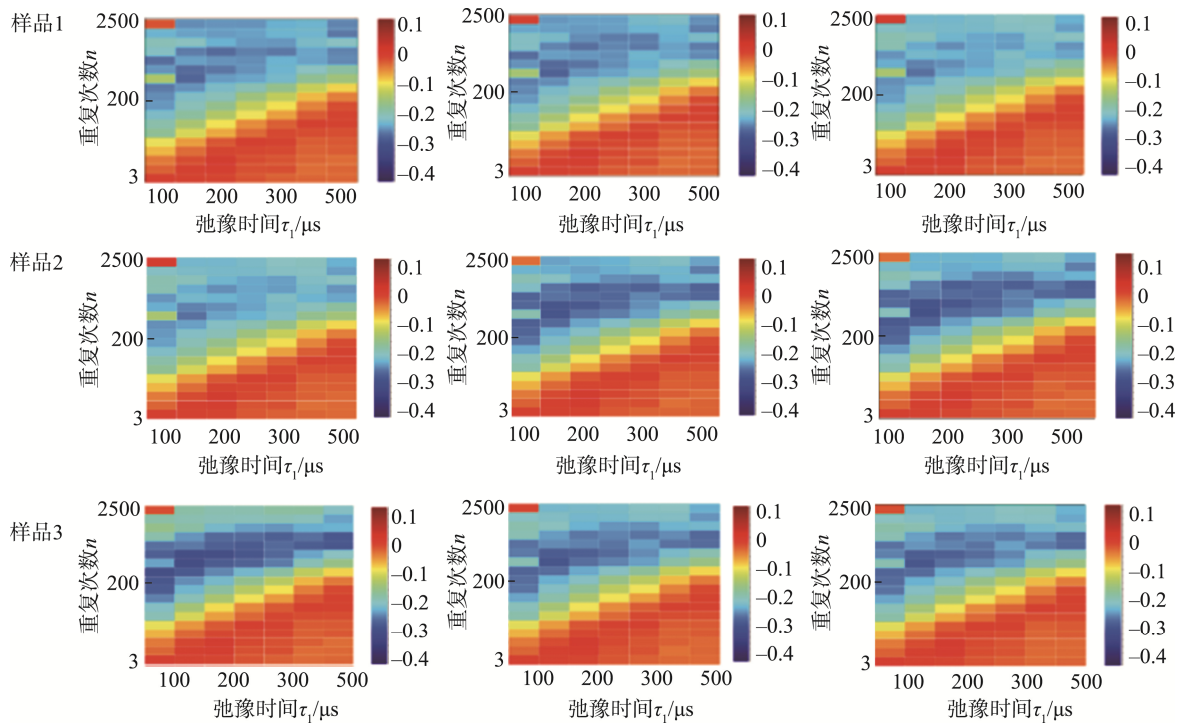


图 2 样品 1、样品 2 及样品 3 的弛豫指纹谱图
Fig.2 Relaxation fingerprint spectra of Sample 1, Sample 2, and Sample 3

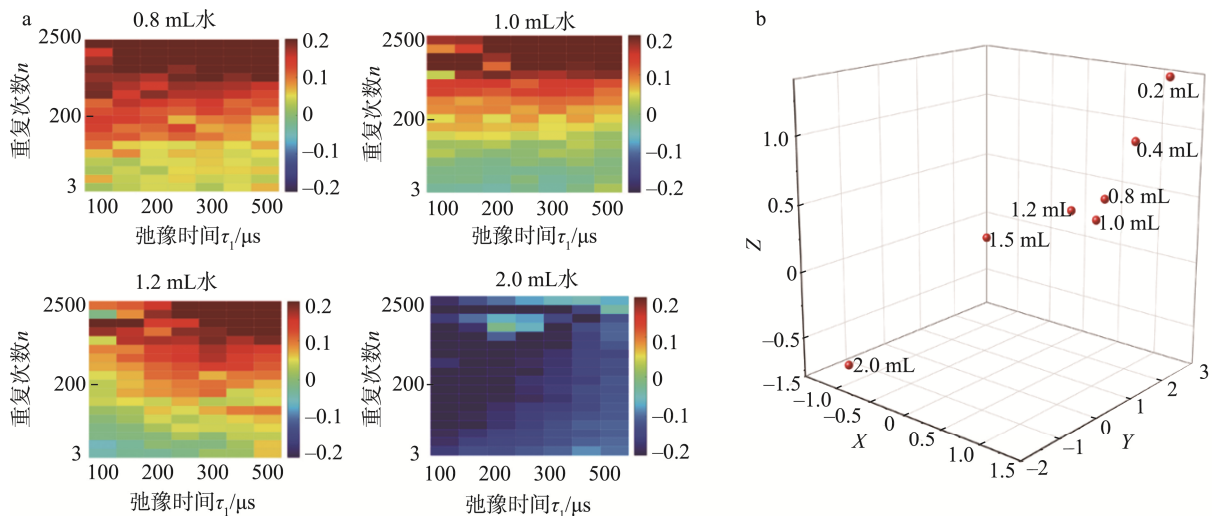


图 3 不同体积去离子水与 1 g 猪肉松掺杂在三维坐标系的标识、部分指纹谱图
Fig.3 Three-dimensional parametric mapping and selected relaxation fingerprint spectra of pork floss incorporated with varied volumes of deionized water (1 g matrix basis)

两阶段位移特征: 当含水量在 0.2~1.0 mL 区间时, 位移向量与水分增量呈近似线性关系; 而在 1.2~2.0 mL 区间则表现出不同斜率特征。因此, 为了确保样品测量的稳定性, 需要严格控制样品的含水量。

随后, 为了得到差异性较大的实验参数, 本研究需要调整的两个参数分别是 D0(两段采样序列间的等待时间/ms)和 D3(反转信号回复时间/ms)。基于经验, 本研究保持 D0=1500 ms 不变, 以确保两段采样序列之间有足够的等待时间, 并调整 D3 的值来进行实验。本研究分别设定

D3=1000、1100、200、300、400 和 500 ms, 并对 4 种肉松进行测量。结果表明, 当参数 D0=1500, D3=200 时, 这 4 种肉松的指纹谱相较于其他参数组合具有更高的区分度(如图 4 所示)。在这个参数设置下, 鸡肉松的指纹谱整体呈现浅绿色, 猪肉松呈现红色, 鱼肉松呈现浅蓝色, 而牛肉松则呈现蓝色, 且顶部颜色较深。本研究认为, 这一参数组合能够有效反映猪肉松、鸡肉松、牛肉松和鱼肉松之间的指纹谱差异。因此, 在后续实验中本研究选取参数 D0=1500, D3=200。

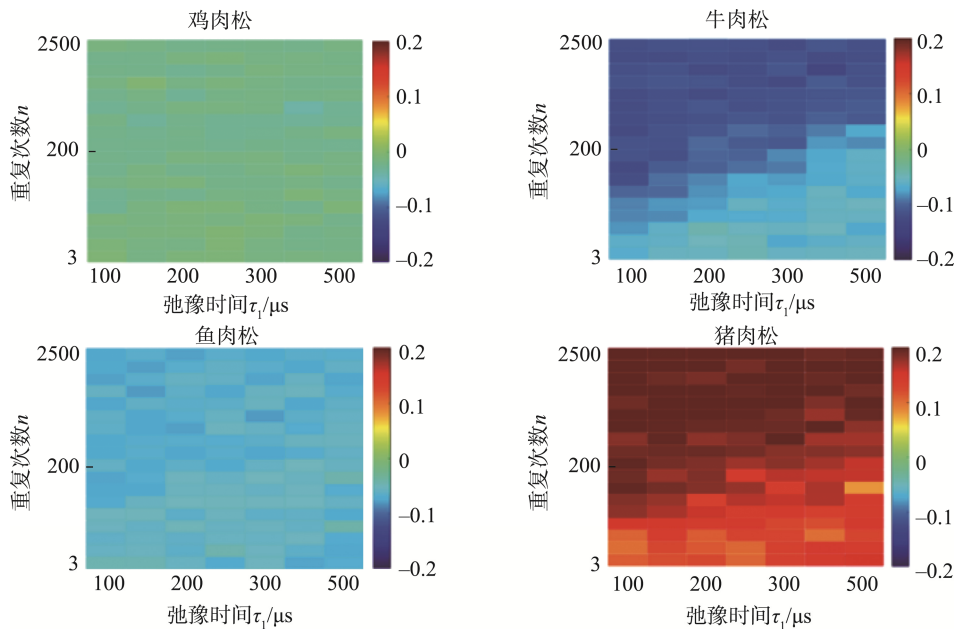


图 4 $D_0=1500$, $D_3=200$ 时 4 种肉松指纹谱图
Fig.4 4 kinds of meat floss fingerprints when $D_0=1500$, $D_3=200$

2.3 不同种类肉松鉴别

本研究采购了市场上常见的猪肉松、鸡肉松、牛肉松和鱼肉松, 包括 9 个品牌的猪肉松、6 个品牌的鸡肉松、5 个品牌的牛肉松和 5 个品牌的鱼肉松, 总计 25 种样品。在预设的参数 $D_0=1500$ 和 $D_3=200$ 下, 将这些样品(每种样品取 1 g 装入核磁管)放入低场核磁仪器进行测量。

如 1.4 部分描述, 通过采用特定的数据处理方法, 本研究将每种肉松的检测数据点整合到三维坐标系中, 并在此基础上生成了置信度为 60% 的置信椭圆(如图 5 所示), 3 个维度分别为 X 、 Y 、 Z , 代表指纹谱中的 3 个特征区域。从三维坐标系的可视化图中可以清晰地看出, 不同种类的肉松样本数据点具有明显的分布特征。猪肉松的数据点主要集中在坐标系的上部左侧, 形成一个相对密集的区域; 鸡肉松的数据点则集中在坐标系的下部右侧, 明显分布在另一端。不同类型的牛肉松样本数据点分别分布在两侧: 一种牛肉松的数据点主要集中在左上角, 靠近猪肉松的区域, 而另一种牛肉松的数据点则位于右下角, 接近鸡肉松的区域。此外, 鱼肉松的数据点则位于右下角, 接近鸡肉松和一种牛肉松之间的区域。这些分布特征表明, 不同品种的肉松在三维坐标系中的位置差异较为明显, 具有较好的区分度。通过这样的分析, 本研究可以初步判定不同类型肉松之间存在可识别的区别, 从而为进一步的肉松分类和品质检测提供数据支持和理论依据。

除了对单独品种的肉松进行研究外, 本研究也尝试对混合肉松进行研究。本研究选取了市场上销量广泛且生产量较大的猪肉松和鸡肉松来进行混合肉松的检测。实验中, 本研究以 1 g 总肉松质量为基准, 选取了猪肉松品牌 1

和鸡肉松品牌 1 作为样品, 设置了猪肉松的质量比例分别为 1:9、2:8、3:7、4:6、5:5、6:4、7:3、8:2、9:1, 将这些样品分别装入核磁管并混合均匀后, 放入低场核磁共振仪器进行测量, 并得到了如下部分实验结果。

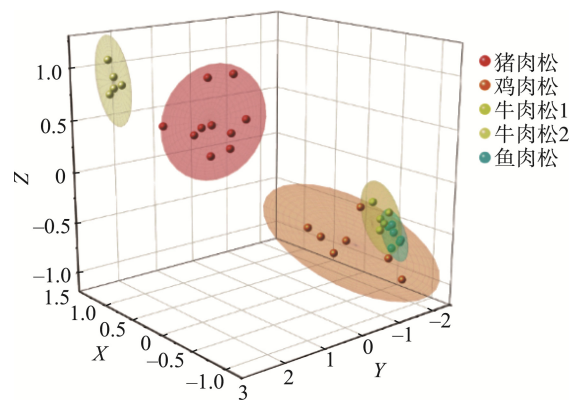


图 5 4 种肉松在三维坐标系中的置信区间
Fig.5 Confidence intervals of the 4 kinds of meat floss in the three-dimensional coordinate system

从图 6 中可以看出, 混合肉松的弛豫指纹谱呈现出明显的变化。当猪肉松的比例较高时, 指纹谱的整体颜色趋向于猪肉松的典型红色, 这反映了猪肉松特有的物理和化学特性。随着猪肉松比例的逐渐降低和鸡肉松比例的不断增加, 指纹谱的颜色会由红色逐渐过渡为黄色, 最终转变为绿色, 并最终趋向于纯鸡肉松的蓝色。这种色彩变化正好与肉松中猪肉松和鸡肉松的相对含量变化相对应。通过对比混合肉松样品与纯肉松样品的弛豫指纹谱, 可以初步判断猪肉松中是否掺入了其他肉类, 尤其是鸡肉松。然而,

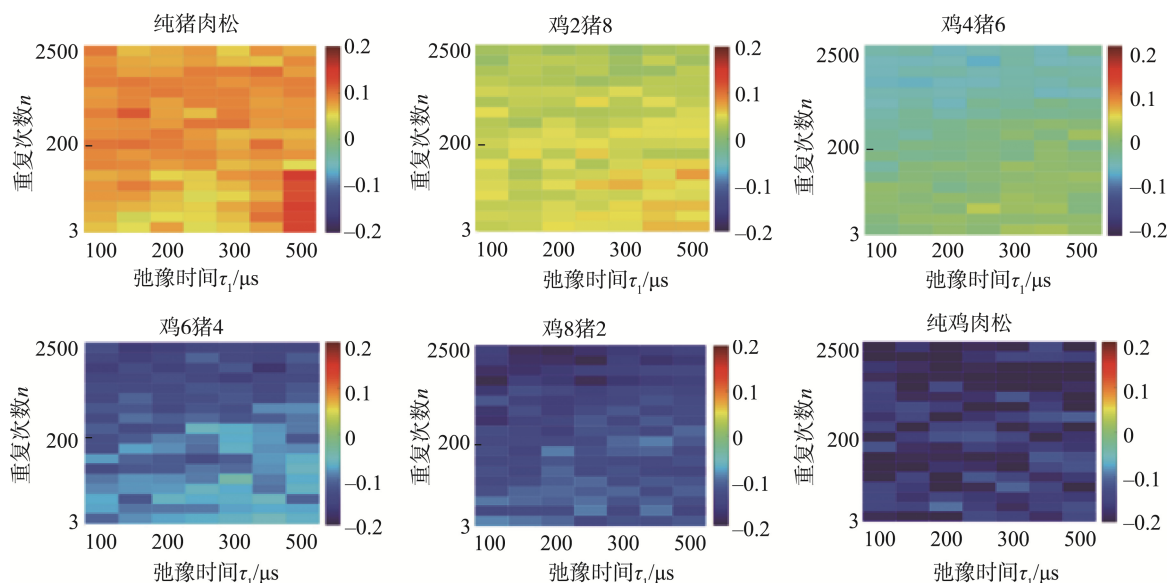


图 6 猪鸡混合肉松指纹谱集
Fig.6 Fingerprints of the mixed pork and chicken floss

需要注意的是, 单纯依赖弛豫指纹谱分析, 虽然可以检测到混入了其他种类的肉松, 但仍然难以准确识别混合肉松中各成分的具体比例。为了提高分析的精度, 本研究对这些样品进行了三维空间特征坐标系的绘制(如图 7 所示)。在三维坐标系中, 本研究通过最小二乘法拟合数据点, 观察到了不同混合比例下的数据点呈现出良好的线性关系, 决定系数 $R^2=0.97186$, 拟合效果较好。随着猪肉松占比的下降, 鸡肉松占比的上升, 数据点的分布逐渐从纯猪肉松的位置移动到纯鸡肉松的位置, 并且这些数据点始终保持在一条直线附近。通过这种三维空间坐标的分析方法, 本研究能够更精确地确定肉松样品中猪肉松和鸡肉松的比例, 进而有效识别肉制品中的混合情况。

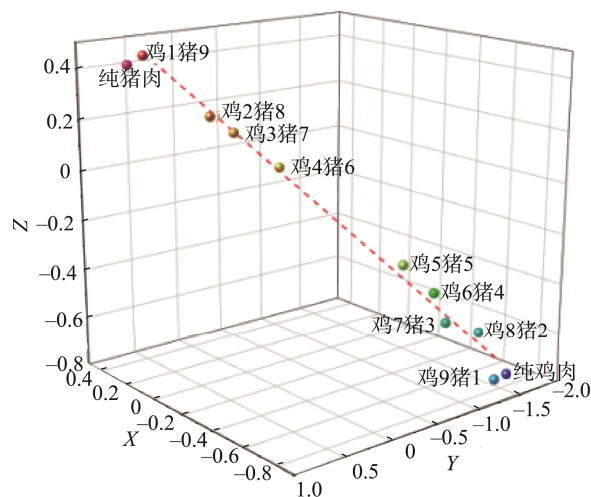


图 7 猪鸡混合肉松在三维坐标系中的标识
Fig.7 Identifications of mixed pork and chicken floss in the three-dimensional coordinate system

3 结 论

本研究以市场上常见的肉松产品为对象, 开发了一套基于低场核磁共振技术的二维指纹谱分析方法。该方法能够有效区分猪肉松、鸡肉松、牛肉松和鱼肉松, 并且具有显著的区分能力, 尤其能够识别不同混合比例的肉松样本。随着肉松中不同成分比例的变化, 指纹谱展现出明显的定性变化趋势, 能够有效反映肉松中各类肉类的比例变化。总体而言, 本研究提出的方法操作直观、快速且简便, 具备高效性和高性价比, 为市场上的肉松产品检测提供了一种成本效益高的解决方案。同时, 该方法符合快速、准确、无损和环保的要求, 能够满足食品行业和政府检测机构的需求。预计该技术将在食品检测领域得到广泛应用, 并具有良好的发展前景。

参考文献

- [1] 涂宝峰. 浅析肉制品行业现状与肉制品加工的发展趋势[J]. 肉类工业, 2022(9): 1-5.
TU BF. Analysis of the current situation of meat industry and the development trend of meat processing [J]. Meat Industry, 2022(9): 1-5.
- [2] 丁小山. 中国肉类进口贸易格局分析[J]. 现代商业, 2022(31): 56-60.
DING XS. Analysis of China's meat import trade pattern [J]. Modern Business, 2022(31): 56-60.
- [3] 刘兴义, 夏文云, 盖圣美, 等. 肉松品质研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(16): 5547-5553.
LIU XY, XIA WY, GAI SM, et al. Progress in the quality of meat floss [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(16): 5547-5553.
- [4] 路宇轩, 翟睿, 吴帆, 等. 肉类掺假检测方法及研究进展[J]. 计量学报, 2023, 44(6): 1000-1008.
LU YX, ZHAI R, WU F, et al. Methods of meat adulteration and progress of research [J]. Journal of Metrology, 2023, 44(6): 1000-1008.
- [5] 王柏辉, 周晋尧, 周霞, 等. 肉及肉制品真实性鉴别技术的研究进展[J]. 食品工业, 2022, 43(9): 239-243.

- WANG BH, ZHOU JY, ZHOU X, *et al.* Progress on the authenticity identification technology of meat and meat products [J]. Food Industry, 2022, 43(9): 239–243.
- [6] 张悦, 王静怡. 分子生物学技术在食品微生物检验中的应用[J]. 现代食品, 2020(1): 101–102.
ZHANG Y, WANG JY. The application of molecular biology techniques in food microbial testing [J]. Modern Foods, 2020 (1): 101–102.
- [7] 陈小利, 王鑫伟. 现代分子生物学技术在食品、药品微生物检测中的应用分析[J]. 食品安全导刊, 2021(30): 132–133.
CHEN XL, WANG XW. Analysis of the application of modern molecular biology technology in the microbial detection of food and drugs [J]. China Food Safety Magazine, 2021(30): 132–133.
- [8] 杨佳硕, 邵怡璐, 曾佐凤, 等. 拉曼光谱法快速检测猪肉脯中的掺伪鸡肉[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(23): 9–15.
YANG JS, SHAO YL, ZENG ZF, *et al.* Rapid detection of pork meat by Raman spectroscopy [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(23): 9–15.
- [9] 唐雪梅, 王朗, 李备, 等. 拉曼光谱在食品安全检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(23): 51–58.
TANG XM, WANG L, LI B, *et al.* Application of raman spectroscopy in food safety detection [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(23): 51–58.
- [10] 杨红欣, 唐兴萍, 杨正明, 等. 多光谱技术在食品无损检测中的应用进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 350–357.
YANG HX, TANG XP, YANG ZM, *et al.* Progress in nondestructive testing of food [J]. Food Industry Science and Technology, 2024, 45(8): 350–357.
- [11] 项爱丽, 段晓然, 梅汝蕃, 等. 基于 PCR 检测技术鉴别羊肉掺假的研究进展[J]. 食品工业, 2022, 43(6): 267–270.
XIANG AIL, DUAN XR, MEI RF, *et al.* Progress in identifying mutton adulteration based on PCR detection technology [J]. The Food Industry, 2022, 43(6): 267–270.
- [12] 易艳, 刘明东, 蒋子敬, 等. 基于分子生物学原理技术检测肉制品中动物源性成分研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(4): 288–294.
YI Y, LIU MD, JIANG ZJ, *et al.* Research progress of detecting animal origin components in meat products based on molecular biology principle technology [J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49 (4): 288–294.
- [13] 柴迎慧, 俞玥, 宋嘉慧, 等. 近红外光谱技术结合化学计量学用于畜禽肉制品品质分析的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(10): 3098–3105.
CHAI YH, YU Y, SONG JH, *et al.* Progress in near-infrared spectroscopy combined with stoichiometry for quality analysis of livestock and poultry meat products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(10): 3098–3105.
- [14] 许岩. 近红外光谱分析在食品检测中的主要应用[J]. 食品安全导刊, 2024(12): 164–166.
XU Y. Main applications of NIR spectral analysis in food detection [J]. China Food Safety Magazine, 2024(12): 164–166.
- [15] MA D, GULANI V, SEIBERLICH N, *et al.* Magnetic resonance fingerprinting [J]. Nature, 2013, 495: 187–192.
- [16] HAMILTON JI, JIANG Y, CHEN YN. *et al.* MR fingerprinting for rapid quantification of myocardial T1, T2, and proton spin density [J]. Magnetic Resonance in Medical Sciences, 2017, 77: 1446–1458.
- [17] KIRTIL E, OZTOP MH. 1H Nuclear magnetic resonance relaxometry and magnetic resonance imaging and applications in food science and processing [J]. Food Engineering Reviews, 2016, 8: 1–22.
- [18] 周凝, 刘宝林, 王欣. 核磁共振技术在食品分析检测中的应用[J]. 食品工业科技, 2011(1): 325–329.
ZHOU N, LIU BL, WANG X. Application of NMR technology in food analytical detection [J]. Food Industry Technology, 2011(1): 325–329.
- [19] JIANG XM, YANG DH, XIANG GQ, *et al.* Determination of cis/trans fatty acid contents in edible oils by 1H NMR spectroscopy in association with multivariate calibration [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 105: 104195.
- [20] 邱千, 廖晓燕, 邱国福. 核磁共振定量碳谱测定食用油脂肪酸组成综合实验设计[J]. 实验科学与技术, 2022, 20(6): 120–125.
QIU Q, LIAO XY, QIU GF. Comprehensive experimental design of fatty acid composition in edible oil by quantitative carbon spectroscopy [J]. Experimental Science and Technology, 2022, 20 (6): 120–125.
- [21] 卢海燕, 王欣, 赵婷婷, 等. “地沟油”常见检测方法及其低场核磁共振法的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2013, 4(5): 1428–1436.
LU HY, WANG X, ZHAO TT, *et al.* Research progress of common detection method and low-field NMR of “gutter oil” method [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2013, 4(5): 1428–1436.
- [22] 张榆, 夏阿林. 基于低场核磁共振的白酒品牌判别分析[J]. 中国酿造, 2021, 40(10): 207–209.
ZHANG Y, XIA AL. Discriminant analysis of liquor brands based on low-field nuclear magnetic resonance [J]. China Brewing, 2021, 40(10): 207–209.
- [23] 许建梅, 杨芳, 林卿, 等. 基于低场核磁共振横向弛豫谱的注水肉检测模型建立[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 226–232.
XU JM, YANG F, LIN Q, *et al.* A water injection meat detection model based on low-field NMR transverse relaxation spectrum [J]. Food Industry Technology, 2021, 42(11): 226–232.
- [24] 吴艺影, 章倩汝, 韩剑众, 等. 基于低场核磁共振技术的注胶肉快速检测[J]. 肉类研究, 2013, 27(3): 26–29.
WU YY, ZHANG QR, HAN JZ, *et al.* Rapid detection of glue-injected meat based on low-field NMR technology [J]. Meat Research, 2013, 27 (3): 26–29.
- [25] 朱莹莹, 赵瑜, 张丽, 等. 低场核磁共振技术对驴肉食品的掺伪鉴别[J]. 苏州市职业大学学报, 2020, 31(4): 16–19.
ZHU YY, ZHAO Y, ZHANG L, *et al.* Identification of differentiation of donkey meat foods by low-field NMR technology [J]. Journal of Suzhou Vocational University, 2020, 31(4): 16–19.
- [26] 杜衡, 胡毓元, 盖争艳, 等. 低场核磁共振技术在油脂掺伪鉴别中的应用[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(3): 105–110, 116.
DU H, HU YY, GAI ZY, *et al.* Application of low-field NMR in oil adulteration discrimination [J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2019, 34(3): 105–110, 116.
- [27] CASTEJÓN D, MATEOS-APARICIO I, MOLERO MD, *et al.* Evaluation and optimization of the analysis of fatty acid types in edible oils by 1 H-NMR [J]. Food Analytical Methods, 2014, 7: 1285–1297.
- [28] ALONSO-SALCES, ROSA MARÍA, *et al.* 1H-NMR fingerprinting and supervised pattern recognition to evaluate the stability of virgin olive oil during storage [J]. Food Control, 2021, 123: 107831.
- [29] 黄志明. 对复杂体系物质靶向检测的核磁共振方法研究与应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
HUANG ZM. Research and application of nuclear magnetic resonance method for the targeted detection of complex systems [D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [30] 李毅, 辛家祥, 朱晶, 等. 核磁共振指纹谱技术在掺杂食用油检测上的应用[J]. 生物加工过程, 2020, 18(4): 505–511
LI Y, XIN JX, ZHU J, *et al.* Application of nuclear magnetic resonance fingerprinting for the detection of doped edible oils [J]. Bioprocessing Process, 2020, 18(4): 505–511.
- [31] HUANG ZM, XIN JX, SUN SS, *et al.* Rapid identification of adulteration in edible vegetable oils based on low-field nuclear magnetic resonance relaxation fingerprints, Foods, 2021, 10(12), 3068.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)