

# 低场核磁技术结合化学计量学法快速检测掺假牛奶

## Rapid detection of adulterated milk by low-field nuclear magnetic resonance combined with chemometric method

陈亚斌      刘梅红      王松磊      吴龙国      贺晓光      何建国  
CHEN Ya-bin    LIU Mei-hong    WANG Song-lei    WU Long-guo    HE Xiao-guang    HE Jian-guo  
(宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021)  
(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**摘要:**应用低场核磁共振技术结合主成分分析法(PCA)、偏最小二乘判别法(PLS-DA)、线性判别法(LDA)对掺水、食盐、尿素和蔗糖的牛奶及纯牛奶进行测定。结果表明:在主成分得分图中,不同掺假牛奶随掺假物质的掺假比例呈一定规律性分布,并得到了很好的区分。利用 PLS-DA 和 LDA 方法建立不同掺假牛奶的判别模型,对掺水、掺尿素牛奶的判别准确率均为 100%,掺食盐牛奶的判别准确率分别为 83.33%和 100%,掺蔗糖牛奶的判别准确率分别为 73.33%和 76.67%。可见 PCA 法、PLS-DA 法、LDA 法可用于快速处理分析低场核磁共振数据,并且 LDA 法鉴别准确率最高。  
**关键词:**低场核磁技术;掺假牛奶;分析方法;判别模型

**Abstract:** Low field nuclear magnetic resonance (NMR) technique was used in this study to detect adulterated milk (mixed with water, salt, urea and sucrose) and pure milk, combining with principal component analysis method (PCA), partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) and linear discriminant analysis (LDA). The results showed that adulterated milks showed a certain regularity distribution with adulterant proportion in the PCA score plot, and was easy to identify. PLS-DA and LDA were used to establish the discriminant models for all adulterated milks. The accuracy discrimination rates using these two methods to detect milk adulterated with water and urea both were 100%, However, when the two methods were utilized to investigate the milk mixed with salt or, sucrose respectively, the accuracy discrimination rates were 83.33% and 100%, or 73.33% and 76.67%. Thus, PCA, PLS-DA and LDA could be used for the rapidly analysing data of low field NMR, and LDA showed the highest identification accuracy.

**Keywords:** low field nuclear magnetic resonance; adulterated milk; analysis method; discriminant model

目前传统的掺假物质检测方法还存在一些缺陷,检测费时、费力,而且只能测定特定掺假物,无法全面反映样品内部品质的变化,很难满足当今乳品在生产过程中对原料快速、准确检测的需求<sup>[1]</sup>。低场核磁共振技术不仅对掺假物没有限定,还可达到实时在线快速检测的目的<sup>[2]</sup>。该技术在检测速度、准确度和灵敏度上都占有一定的优势<sup>[3]</sup>。

近几年,很多研究者利用低场核磁共振(LF-NMR)技术在食品领域中做了一系列研究,但在掺假方面的研究还较少。邵小龙等<sup>[4]</sup>利用 LF-NMR 技术结合主成分分析方法区分大豆油和 3 种芝麻油,发现低场核磁能够较好地地区分芝麻油和大豆油样品。史然<sup>[5]</sup>利用 LF-NMR 技术结合 PCA 法分析了正常食用油、餐饮废弃油和煎炸大豆油的横向弛豫数据,发现 PCA 法可以较好地地区分不同种类正常食用油及不同程度煎炸油。王乐等<sup>[6]</sup>利用低场核磁技术分别检测了地沟油和食用油中的脂肪含量,发现地沟油的脂肪含量较高,而食用油的脂肪含量几乎为零,因此可利用这一特性检测食用油中的掺假现象。姜潮等<sup>[7]</sup>利用 LF-NMR 结合主成分分析法不同掺假牛奶,但效果不明显。

本研究拟采用低场核磁共振仪测定纯牛奶及不同掺假牛奶样品的横向弛豫数据,并结合主成分分析(PCA)、偏最小二乘判别(PLS-DA)、线性判别(LDA)法对掺假牛奶样品横向弛豫数据进行分析,旨在为 LF-NMR 技术在掺假牛奶检测方面的应用提供理论支撑。

### 1 材料与方法

#### 1.1 材料和试剂

鲜牛奶:夏进,银川市市售;  
蒸馏水、食盐、蔗糖、尿素:优级纯,上海化学试剂有限公司试剂一厂。

**基金项目:**国家自然科学基金项目(编号:31560481);2011 年度宁夏回族自治区科技攻关计划项目(编号:20110501)  
**作者简介:**陈亚斌,男,宁夏大学在读硕士研究生。  
**通讯作者:**何建国(1960—),男,宁夏大学教授,博士。  
E-mail: hejg@nxu.edu.cn  
**收稿日期:**2016-01-09

1.2 仪器设备

核磁共振分析仪:NM120 型,上海纽迈电子科技有限公司;

电子天平:AR2140 型,上海精密科学仪器有限公司;  
移液枪:Eppendorf 型,北京隆普奇仪器设备有限公司;  
核磁共振专用试管(直径 15 mm,长度 20 cm):上海纽迈电子科技有限公司;

超声波清洗仪:DS-7510DTH 型,上海生析超声仪器有限公司;

磁力搅拌器:B11-1 型,上海思乐仪器有限公司。

1.3 掺假样品制备

(1) 掺水样品的制备:分别准确量取 0,1,2,3,4,5 mL 蒸馏水,分别加入到 10,9,8,7,6,5 mL 纯牛奶中,制成掺水体积分数分别为 0%,10%,20%,30%,40%,50%的掺假牛奶。

(2) 掺食盐样品的制备:用电子天平准确称取 0.0,0.3,0.6,0.9,1.2,1.5 g 食盐溶于 5 mL 蒸馏水中,并加入到45 mL 纯牛奶中制成 6 个梯度的掺假牛奶。

(3) 掺尿素样品的制备:准确称取 4.0 g 尿素溶于 30 mL 蒸馏水中配成尿素溶液。然后分别吸取 0,2,4,6,8,10 mL 尿素溶液加入到 50,48,46,44,42,40 mL 纯牛奶中制成 6 个梯度的掺假牛奶。

(4) 掺蔗糖样品的制备:分别称取 0.0,0.4,0.8,1.2,1.6,2.0 g蔗糖溶于 5 mL 蒸馏水中,加入到 45 mL 纯牛奶中制成 6 个梯度的掺假牛奶。

将制备好的所有样品搅拌均匀后,用移液枪吸取 1 mL 放入核磁专用管中,并将核磁管放入样品槽中进行测定<sup>[8]</sup>。

1.4 样品检测

利用低场核磁中的 Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)硬脉冲序列对样品进行检测,硬脉冲 CPMG 序列是指在自旋回波脉冲序列的基础上,连续不断地施加 180°脉冲,得到较多回波信号的硬脉冲序列。CPMG 脉冲序列检测样品的参数为:脉冲重复序列时间(TW)5 000 ms,回波时间(TE)0.424 ms,采样点数(TD)32 768,采样频率(SW)100.0 kHz,回波数(NECH)5 000,累加次数(NS)8。

每组设定 20 个样本,每个样本连续测定 3 次,并求其平均值。

1.5 数据处理与分析方法

数据处理采用主成分分析(PCA)、偏最小二乘判别(PLS-DA)法和线性判别(LDA)法等化学计量学方法<sup>[9]</sup>,采用 EXCEL、The Unscrambler X10.3 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 低场核磁横向弛豫曲线分析

氢质子在射频磁场作用下产生旋转磁场自旋造成失相位,质子之间和质子周围环境之间的相互作用及横向磁化强度衰减的快慢,反映了质子间能量交换过程,添加不同的尿素、蔗糖、食盐等物质可改变质子之间的相互作用,使质子失相位程度及回复到平衡状态的弛豫时间产生显著差异<sup>[10]</sup>。

横向弛豫是指在  $x, y$  平面上,横向磁矩由最大值逐渐消失的过程<sup>[11]</sup>。一般情况下认为横向磁矩衰减到磁化强度 37% 的时间称为横向弛豫时间<sup>[12]</sup>。

图 1 为纯牛奶及 4 种掺假牛奶的横向弛豫曲线,不同牛奶样品弛豫速度的差别主要在 0~800 ms 时间段内,原则上这个时间段可以很好地区分不同牛奶样品的弛豫信号,但是夹杂在其中的随机噪音会严重干扰弛豫信号的稳定性。因此需要借助化学计量学方法对不同样品横向弛豫数据进行处理分析。

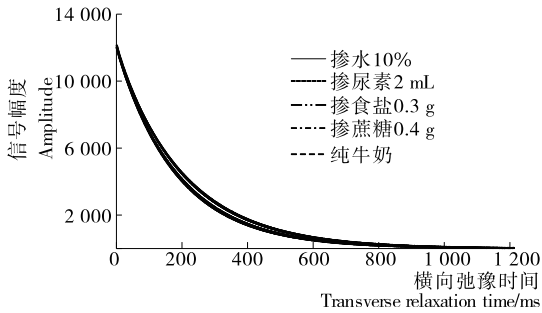


图 1 纯牛奶及 4 种掺假牛奶的低场核磁横向弛豫曲线  
Figure 1 CPMG relaxation spectra of pure milk and 4 adulterated milk samples

2.2 纯牛奶及 4 种掺假牛奶的 PCA 分析

从横向弛豫曲线图(图 1)来看,肉眼很难区分掺假牛奶之间的差异。采用 PCA 法对原始数据进行降维,从冗余信息中提取有效信息,将其转化成较为直观的主成分得分图,见图 2。

图 2 中包含了 PC1 和 PC2 的贡献率。PC1 和 PC2 最能反映氢质子的弛豫行为。通常只要总贡献率超过 85% 就可以应用<sup>[13]</sup>,贡献率越大,说明选出的主成分能够很好地代替原来较多的冗余数据信息。图 2(a)~(d)是用 PCA 法分析横向弛豫数据的结果,每个圆圈代表这组样本的整体特性,两个样品之间间距越大,则它们之间的品质差距就越明显。图 2(a)为掺水牛奶样本的主成分得分图,PC1 和 PC2 的得分贡献分别为 96% 和 3%,累积贡献率为 99%,较好地区分出了不同掺水比例的牛奶样品,并且组内样本之间的差异较小。不同掺水比例的样品在 PC1 轴上呈规律性偏移,且掺水比例越大与纯牛奶差异就越大。图 2(b)为掺尿素牛奶样本的主成分得分图,PC1 和 PC2 的得分贡献率分别为 98% 和 1%,累积贡献率为 99%,纯牛奶与掺不同比例尿素的牛奶在 PC1 轴上可以得到很好的区分,各组样品由左向右呈规律性分布,且组内样本差异都较小。图 2(c)为掺食盐牛奶样本的主成分得分图,PC1 和 PC2 的得分贡献率分别为 90% 和 10%,累积贡献率达 100%,随着食盐添加量的增加,各组样品并没有依次从左向右分布,如掺加 0.6 g 食盐的样品分布在掺加 0.9 g 食盐样品的右侧,但不同比例的样品依然可以较好地区分出来。图 2(d)为掺蔗糖牛奶样本的主成分得分图,PC1 和 PC2 的得分贡献率分别为 91% 和 5%,累计贡献率为 96%,在 PC1 轴上仅部分掺假牛奶被区分,添加不同质量蔗糖的样品分布出现了重叠,且组内样本之间的差异较

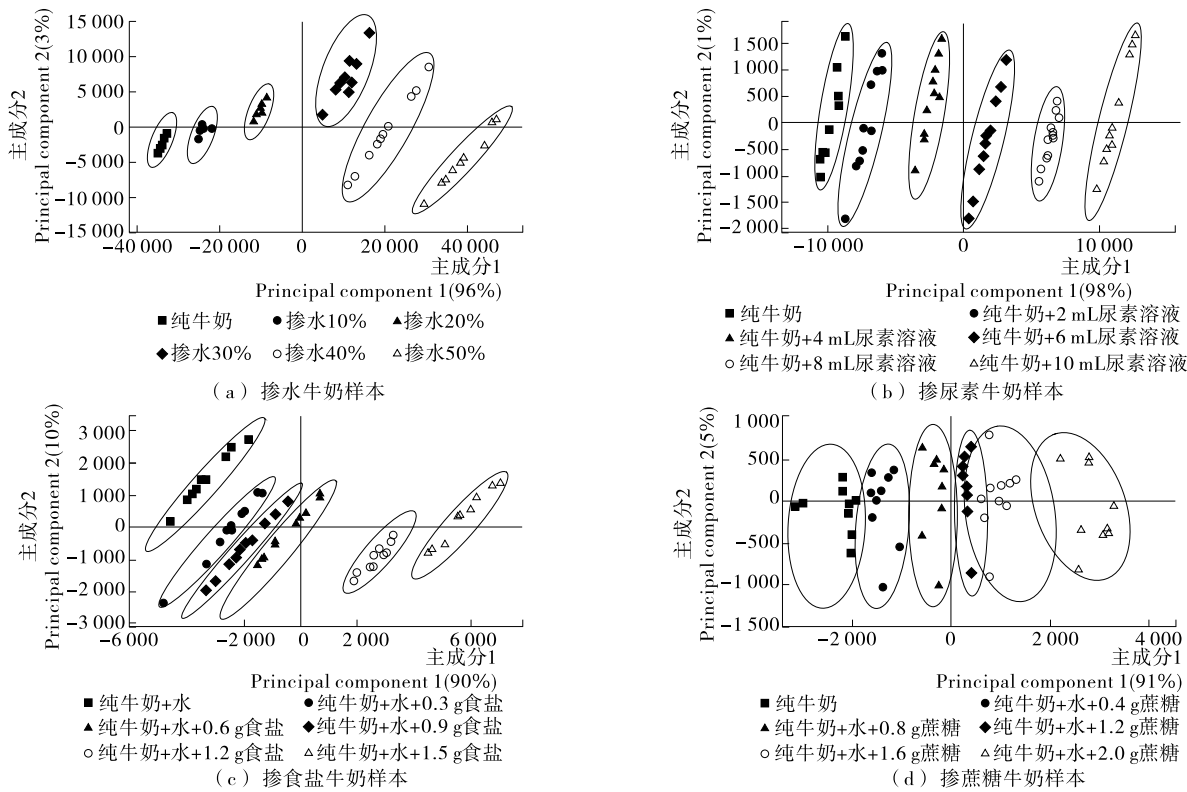


图 2 纯牛奶及不同掺假牛奶的横向弛豫信号主成分分析图

Figure 2 Scatter plot of principal component 2 versus principal component 1 scores from a principal component analysis performed on pure milk and different adulterated milks

大,无法准确区分。因此可以说明低场核磁共振技术结合 PCA 法可以很好地区分纯牛奶和掺水、掺尿素、掺食盐的掺假牛奶,并可以表征添加量对牛奶品质的影响,但对掺蔗糖的牛奶仅结合 PCA 法不能完全准确地区分出来。

2.3 纯牛奶及 4 种掺假牛奶的 PLS-DA 判别分析

为了确保模型的准确性,选择 6 个主成分因子数来建立训练集(90 个样本)类别值与掺假牛奶低场核磁横向弛豫数据的回归预测模型。利用建立的预测模型计算验证集(30 个样本)的类别值  $Y_p$ 。判别方法为当  $Y_i - 0.5 < Y_p < Y_i + 0.5$ ,  $Y_i$  为预设的类别值(0, 1, 2, 3, 4, 5),且样本偏差  $< 0.5$  时,即可判断此样本属于该类,否则不属于该类。掺水牛奶样品中纯牛奶,掺水 10%, 20%, 30%, 40%, 50% 的牛奶的类别值分别设为 0, 1, 2, 3, 4, 5。其它 3 种掺假牛奶也依次按照掺水牛奶样品的类别值进行设置。

利用 PLS-DA 法建立的掺假牛奶判别模型的预测值与

实际测量值的相关系数都超过了 0.93,并且训练集均方根误差和预测集均方根误差都较小,说明所建立的预测模型可以很好地预测未知样本。因此可以用该模型对未参与建模的预测集样本进行分析,结果见图 3。由图 3(a)、(b)可知,掺水、掺尿素不同比例的牛奶样品全部得到了准确判定,并且每个样本偏差都较小,因此掺水、掺尿素牛奶的判别模型对掺水牛奶样品的判别准确率为 100%。由图 3(c)可知,掺食盐 0.9 g (R16~R20) 的牛奶样品未得到准确判别,掺食盐牛奶的判别模型对掺食盐牛奶样品的判别准确率为 83.33%。由图 3(d)可知,样本偏差较大,其中 R4、R5、R7、R9、R25、R27、R29、R30 未能准确识别出来。掺蔗糖牛奶的判别模型对掺蔗糖牛奶样品的判别准确率为 73.33%。

用所建立的 PLS-DA 模型对 30 个验证集样品进行了预测,结果见表 1。不同掺假牛奶的校正集均方根偏差在 0.098~0.442,验证集均方根偏差在 0.109~0.475,并且 4 种

表 1 掺假牛奶样品的 PLS-DA 判别模型分析结果

Table 1 The analysis results with PLS-DA model of adulterated milk samples

| 掺假类型  | 校正集     |       |       | 验证集     |       |        |
|-------|---------|-------|-------|---------|-------|--------|
|       | $R^2_c$ | RMSEE | 判别率/% | $R^2_p$ | RMSEP | 预测率/%  |
| 掺水牛奶  | 0.997   | 0.098 | 100   | 0.996   | 0.109 | 100.00 |
| 掺尿素牛奶 | 0.985   | 0.210 | 100   | 0.984   | 0.225 | 100.00 |
| 掺食盐牛奶 | 0.949   | 0.384 | 100   | 0.945   | 0.411 | 83.33  |
| 掺蔗糖牛奶 | 0.933   | 0.442 | 100   | 0.927   | 0.475 | 73.33  |

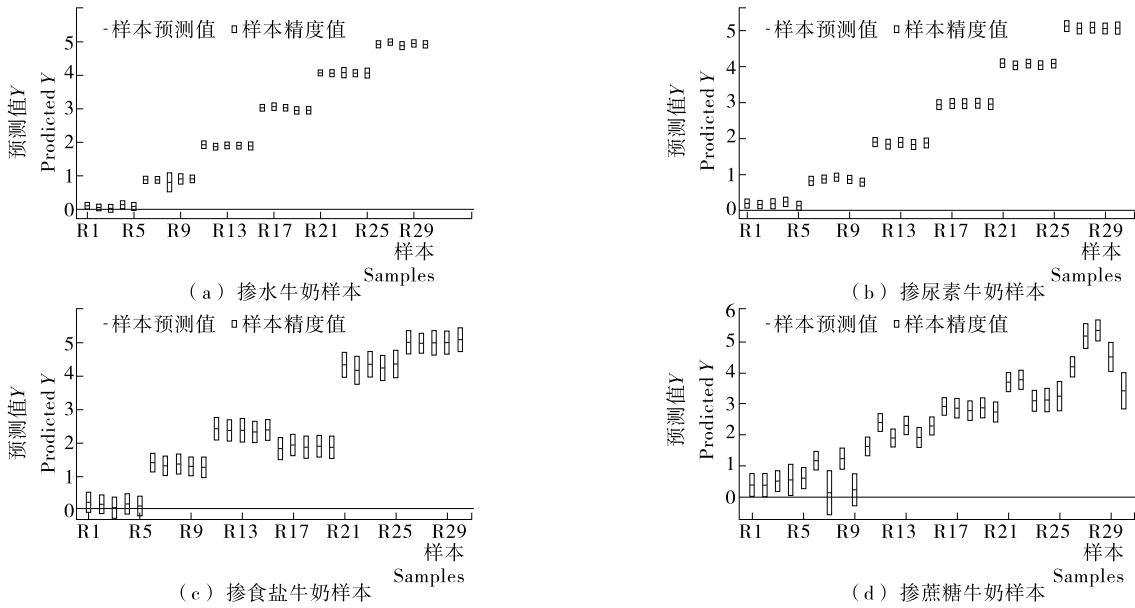


图 3 掺假牛奶验证集样本的预测结果

Figure 3 The prediction result of adulterated milk test set samples

未知样品的预测识别率分别为 100%，100%，83.33%，73.33%，说明所建立的模型对掺水、掺尿素样品的类别识别效果较好。对掺食盐与蔗糖的牛奶识别率较低，一方面是因为这两种掺假物质中所含氢质子过少，其弛豫行为不明显；另一方面模型均方根偏差相对较大，所建立的模型稳定性不够好。

2.4 纯牛奶及 4 种掺假牛奶的 LDA 判别分析

为了确保模型准确性，选择 6 个主成分因子数建立模型。使用 90 个校正集样本建立各类掺假牛奶的线性判别分析模型，识别正确率均为 100%。用所建立的 LDA 模型对每种掺假牛奶各 30 个验证集样品进行了预测，结果见表 2~5。4 种未知样品的预测识别率分别为 100%，100%，100%，76.67%，表明所建立的模型对不同掺假牛奶识别效果较好。表 2~5 为不同掺假牛奶 LDA 判别结果。

3 结论

本研究采用低场核磁技术结合主成分分析、偏最小二乘判别分析和线性判别分析法对不同掺假牛奶进行鉴别。主成分分析能将掺水、掺尿素、掺食盐牛奶很好地区分出来，但

表 2 掺水牛奶的 LDA 判别结果<sup>†</sup>

Table 2 The result of blending water milk samples discriminated by LDA

| 序号    | 实际类别 | 预测类别 | 判别准确率/% |
|-------|------|------|---------|
| 1~5   | 0    | 0    | 100     |
| 6~10  | 1    | 1    |         |
| 11~15 | 2    | 2    |         |
| 16~20 | 3    | 3    |         |
| 21~25 | 4    | 4    |         |
| 26~30 | 5    | 5    |         |

<sup>†</sup> 0~5 代表不同掺假物的添加比例。

表 3 掺尿素的牛奶的 LDA 判别结果<sup>†</sup>

Table 3 The result of blending urea milk samples discriminated by LDA

| 序号    | 实际类别 | 预测类别 | 判别准确率/% |
|-------|------|------|---------|
| 1~5   | 0    | 0    | 100     |
| 6~10  | 1    | 1    |         |
| 11~15 | 2    | 2    |         |
| 16~20 | 3    | 3    |         |
| 21~25 | 4    | 4    |         |
| 26~30 | 5    | 5    |         |

<sup>†</sup> 0~5 代表不同掺假物的添加比例。

表 4 掺食盐牛奶的 LDA 判别结果<sup>†</sup>

Table 4 The result of blending salt milk samples discriminated by LDA

| 序号    | 实际类别 | 预测类别 | 判别准确率/% |
|-------|------|------|---------|
| 1~5   | 0    | 0    | 100     |
| 6~10  | 1    | 1    |         |
| 11~15 | 2    | 2    |         |
| 16~20 | 3    | 3    |         |
| 21~25 | 4    | 4    |         |
| 26~30 | 5    | 5    |         |

<sup>†</sup> 0~5 代表不同掺假物的添加比例。

掺蔗糖牛奶不易区分出来。偏最小二乘判别分析和线性判别分析以 90 个校正集样品进行建模，通过模型分别对不同掺假牛奶的 30 个验证集样品进行预测，掺水牛奶、掺尿素牛奶、掺食盐牛奶、掺蔗糖牛奶的正确识别率分别为 100%，100%，83.33%，73.33%。线性判别分析对掺水牛奶、掺尿素牛奶、掺食盐牛奶、掺蔗糖牛奶的正确识别率分别为 100%，100%，100%，100%，76.67%。从试验结果可以看出，线性判别分

表 5 掺蔗糖牛奶的 LDA 判别结果<sup>†</sup>

Table 5 The result of blending sucrose milk samples discriminated by LDA

| 序号    | 实际类别 | 预测类别 | 判别准确率/% |
|-------|------|------|---------|
| 1~4   | 0    | 0    |         |
| 5     | 0    | 1    |         |
| 6     | 1    | 1    |         |
| 7     | 1    | 0    |         |
| 8     | 1    | 1    |         |
| 9     | 1    | 0    |         |
| 10    | 1    | 1    |         |
| 11~15 | 2    | 2    | 76.67   |
| 16~20 | 3    | 3    |         |
| 21~22 | 4    | 4    |         |
| 23~24 | 4    | 3    |         |
| 25    | 4    | 4    |         |
| 26    | 5    | 4    |         |
| 27~29 | 5    | 5    |         |
| 30    | 5    | 4    |         |

<sup>†</sup> 0~5 代表不同掺假物的添加比例。

析法识别正确率高于偏最小二乘判别法识别正确率,后者识别正确率相对较低是因为该方法需要较多的样本量,而此试验中样本数量偏少,且模型均方根误差偏大,没能反映出该算法的优点。综上,低场核磁共振技术结合主成分分析、偏最小二乘判别分析及线性判别分析在掺假牛奶类别鉴定中具有良好的应用性能,可为评判鲜牛奶质量标准提供一定的理论依据。

参考文献

[1] 李太平, 马双青, 常建军. 西宁市市场售鲜牛奶的掺假调查[J]. 中国奶牛, 2003(4): 53-54.

(上接第 50 页)

[15] 章超桦, 平野敏行, 铃木健, 等. 鲫的挥发性成分[J]. 水产学报, 2000, 24(4): 354-358.

[16] 冯倩倩, 胡飞, 李平凡. SPME—GC—MS 分析罗非鱼体中挥发性风味成分[J]. 食品工业科技, 2012, 33(6): 67-70.

[17] 刘玉平, 陈海涛, 孙宝国. 鱼肉中挥发性成分提取与分析的研究进展[J]. 食品科学, 2009, 30(23): 447-451.

[18] 孙静, 黄健, 侯云丹, 等. 顶空固相微萃取—气质联用分析大眼金枪鱼肉的挥发性成分[J]. 食品科学, 2011, 32(22): 230-233.

[19] 卢春霞, 翁雨萍, 王宏海, 等. 3 种网箱养殖鱼类的主体风味成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(10): 163-169.

[20] 张青, 王锡昌, 刘源. 顶空固相微萃取—气相色谱—质谱—嗅觉测量联用初探鲢肉的挥发性风味物质[J]. 水产学报, 2009, 33(4): 692-696.

[21] 施文正, 王锡昌, 陶宁萍, 等. 致死方式对养殖草鱼肉挥发性成分的影响[J]. 水产学报, 2011, 35(3): 456-465.

[22] 施文正, 王锡昌, 杨薇, 等. 基于电子鼻的养殖草鱼不同部位挥发性成分分析[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(6): 505-507.

[23] Shahidi F. 肉制品与水产品的风味[M]. 李洁, 朱国斌, 译. 北京: 中国轻工业出版社, 2001: 62-78.

[24] 陈桂平. 草鱼低温贮藏期间质构及风味物质变化研究[D]. 长

[2] CHALAND B, MARIETTE F, MARCHAL P, et al. Nuclear magnetic resonance relaxometric characterization of fat and water states in soft and hard cheese[J]. Journal of Dairy Research, 2000, 67(4): 609-618.

[3] HULLBERG A, BERTRAM H C. Relationships between sensory perception and water distribution determined by low-field NMR T(2) relaxation in processed pork - impact of tumbling and RN(-) allele [J]. Meat Science, 2005, 69(4): 709-720.

[4] 邵小龙, 张蓝月, 冯所兰. 低场核磁技术检测芝麻油掺假[J]. 食品科学, 2014, 35(20): 110-113.

[5] 史然. 油脂 LF-NMR 检测条件的优化及在油脂品质监测中的应用[D]. 上海: 上海理工大学, 2013: 5-15.

[6] 王乐, 黎勇, 胡建华. 核磁共振法鉴别食用植物油掺伪餐饮业废油脂[J]. 中国油脂, 2008, 33(10): 75-77.

[7] JIANG Chao, HAN Jian-zhong, FAN Jia-li, et al. Rapid detection of adulterated milk by low field-nuclear magnetic resonance coupled with PCA method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9): 340-344.

[8] 刘颖, 曹佳佳, 章浩伟, 等. 低场核磁共振技术快速检测鲜乳水分方法研究[J]. 食品科学, 2014, 35(14): 93-96.

[9] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2004: 135-165.

[10] 林向阳. 核磁共振及成像技术在面包制品加工与储藏过程中的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2006: 8-10.

[11] LUCAS T, WAGENER M, BAREY P, et al. NMR assessment of mix and ice cream: Effect of formulation on liquip water and ice[J]. International Dairy Journal, 2005, 15(10): 1 064-1 073.

[12] 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): 1 449-1 458.

[13] 阮榕生. 核磁共振技术在食品和生物体系中的应用[M]. 北京: 中国轻工出版社, 2009: 1-36.

沙: 湖南农业大学, 2014.

[25] CHA Yong-jun, BAEK H, HSIEH C Y. Volatile components in flavor concentrates from crayfish processing waste[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 1992, 58(2): 239-248.

[26] 黄骆镡, 黄克, 肖如武. 水产品腥味物质形成机理的研究进展[J]. 广东化工, 2009, 36(9): 146-161.

[27] 施文正. 草鱼肉挥发性成分及其影响因素的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2010: 31-32.

[28] 何宛雯. 水产品中多环芳烃含量测定方法[J]. 科学之友, 2013(10): 32-33.

[29] ALASLVA C, TAYLOR K D, SHAHIDI F. Comparison of volatiles of cultured and wild sea bream (Sparus aurata) during storage in ice by dynamic headspace analysis/gas chromatography—mass spectrometry[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(7): 2 616-2 622.

[30] 刘源, 周光宏, 徐幸莲, 等. 南京盐水鸭挥发性风味化合物的研究[J]. 食品科学, 2006, 27(1): 166-171.

[31] 高瑞昌, 苏丽, 黄星奕, 等. 水产品风味物质的研究进展[J]. 水产科学, 2013, 32(1): 59-62.

[32] KUBOTA K, MATSUFUSA K, YAMANISHI T, et al. Cooked odor of amarectic krills[J]. Nippon Nogeikagaku Kaishi, 1980(54): 1-5.