利用近红外光谱及电子鼻技术快速无损鉴别长期冻藏猪肉

赵钜阳，　姚恒喆

（哈尔滨商业大学 旅游烹饪学院，黑龙江 哈尔滨 150028）

摘要：利用可见-近红外光谱技术和电子鼻主成分分析技术对新鲜肉和长期冻藏猪肉分别进行快速无损鉴别。首先通过近红外分析技术采集新鲜肉样(-18 ℃分别贮藏0、3个月)和长期冻藏猪肉(-18 ℃分别贮藏6、9个月)的判别样本光谱图，对样品的光谱值进行直接判别分析，采用不同的预处理方式优化长期冻藏猪肉和新鲜肉的判别模型并分别进行主成分分析。结果显示，所得模型可直接定性判别分析新鲜肉与长期冻藏猪肉。电子鼻分析技术也可有效区分冻藏猪肉和新鲜猪肉，为长期冻藏肉制品的快速无损鉴别提供一定的理论依据。

关键字：长期冻藏猪肉；猪肉；近红外光谱；电子鼻；快速无损检测

中图分类号：TS 207.3　　**文章编号：**1673-1689(2021)03-0089-08　　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2021.03.011

Non-Destructive Identification of Long-Term Frozen Pork by Near Infrared Analysis Technology and Electronic Nose Technique

ZHAO Juyang，　*YAO Hengzhe*

（College of Tourism and Cuisine, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China）

Abstract: Rapid and non-destructive identification of fresh and long-term frozen pork was studied by visible-near infrared spectroscopy and electronic nose principal component analysis. The pork frozen at -18 ℃ for 0 and 3 months represented fresh samples, while those stored for 6 or 9 months represented long-term frozen meat samples. The spectrograms of all samples collected by near-infrared analysis were analyzed directly by discriminant analysis. Different pretreatment methods were used to optimize the discriminant model of long-term frozen pork and fresh pork, and then principal component analysis was carried out respectively. The model could effectively distinguish fresh meat from long-term frozen one. Electronic nose analysis showed that it could distinguish the long-term frozen pork from the fresh. This study provides a theoretical basis for the rapid and non-destructive identification of long-term frozen meat products.

Keywords: long-term frozen meat, pork, near infrared technology, electronic nose, non-destructive testing

收稿日期：2020-04-22

基金项目：哈尔滨商业大学“青年创新人才”支持计划项目(2019CX23)；哈尔滨商业大学博士科研启动项目(2019DS060)；烹饪科学四川省高等学校重点实验室资助项目(PRKX201901)。

作者简介：赵钜阳(1987—)，女，博士，讲师，主要从事大豆蛋白加工、烹饪科学研究。E-mail：zhaojuyang1987@163.com

猪肉由于其营养价值丰富、价格低廉、烹饪方式多样等已成为了人们每日餐食中必不可少的部分,其需求日益见涨。国际肉类组织 2016 年公布的数据中显示,中国畜禽肉类生产量约占世界生产总量的 29%,其中猪肉产量在世界各国中稳居第一(约 50%)[1]。冷冻贮藏是食物常见的储存方式,我国的《诗经》中曾记载,古时候人们就会利用冰以长期保存食物[2]。冷冻食品因其方便、快捷、成本适中的特点更加适合现代人快节奏的生活方式。

然而长期的冻藏会严重破坏畜禽肉的营养和食用品质,同时也会存在微生物大面积地繁殖等卫生问题,若长期冻藏肉及其制品流入市场销售、被食用将会造成很大的食品安全隐患[3-4]。新闻报道了一些不法分子将未经海关检疫部门相关检验的海外长期冻藏肉作为走私品销往市场,这些冻藏肉除品质问题外还有携带传染性病毒的可能,对消费者健康造成严重的潜在威胁,故也被消费者称为“僵尸肉”[5-8]。因此,有必要对可能流入市场的冻藏肉制品进行定性检测,快速鉴别出“僵尸肉”。

检测冻藏肉的新鲜度,常见的理化指标有:水分含量、致病菌菌落数、色泽、嫩度、纹理、持水力、风味等。传统的检测方法费时费力,因此急需可进行快速无损检测冻藏肉新鲜度的方法。近红外光谱能够反映物质的成分及化学性质,同时借助化学计量方法建立化学成分与采集光谱间的定性、定量关系模型才能将光谱的内在深入信息显现出来。在检验新样本时,直接将光谱及化学值输入原模型中,得到其定性、定量信息,即可达到快速无损的检测目的。目前关于近红外研究较为广泛,如食品领域中的茶、牛奶及医药领域等[9-16]。这些研究主要集中于对食品中营养成分的检测,如叶华等[17]利用近红外光谱结合偏最小二乘法分析了果酒中的多酚含量,结果显示该技术可以快速检测果酒总酚含量。赵丽华等[18]利用该技术建立藜麦籽粒粗蛋白质含量,快速检测的模型为高蛋白质藜麦的选育、栽培提供了技术支持。在肉及肉制品加工领域还都局限于新鲜肉制品或新鲜熟制品范围内,如李婷婷[19]、何鸿举[20]等总结了近些年利用近红外光谱分析技术对各种禽、畜、鱼肉掺假成分的分析检测,为后续的研究提供充足的数据支撑和理论参考,同时也为肉品质量提供安全保障。

电子鼻模拟生物嗅觉感受,将采集到的气体指纹信息输入电脑中,进行嗅觉信号的处理,即可辨识挥发性气味中是否存在差异[17-23]。电子鼻技术已被广泛地应用于食品、药品、烟草、石油化工、包装材料等研究领域[22-28],如刘瑶等[29]利用电子鼻分析技术检测了不同处理方法在蔬菜贮藏模拟运输过程中的挥发性成分,以筛选出最佳的处理方式有效地保持蔬菜的贮藏品质,延长其货架期。张迪雅等[30]利用该技术对牛肉进行检测,鉴别出不同醛类和醇类物质中的挥发性成分,该技术可对不同部位的牛肉进行快速鉴别检测。同时,电子鼻分析技术还可用于区分掺假肉,如王绪等[31]利用电子鼻结合气相色谱-质谱法对掺假羊肉进行了快速检测。但对于冻藏猪肉贮存时间的检测还鲜有报道。因此,将电子鼻与近红外技术相结合更有利于鉴定“僵尸肉”。

作者应用近红外光谱分析技术及电子鼻分析技术建立新鲜肉与长期冻藏猪肉的快速检测定性模型,从而能够快速、无损、精确检测待检肉样的新鲜度,实现对“僵尸肉”的快速甄选。

1 材料与方法

1.1 材料

实验所用的猪肉均为猪里脊肉,购于哈尔滨市家乐福超市。

1.2 实验仪器与设备

砧板、菜刀:购于哈尔滨市家乐福超市;ANTARIS II 近红外分析仪:购于塞默飞世尔科技(中国)有限公司;JD200-3 电子天平:购于梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;电子鼻:购于上海昂申智能科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备 新鲜肉样品组,将新鲜的猪里脊肉于-18 ℃分别冻藏 0、3 个月,标记为 A 组。长期冻藏猪肉样品组,于-18 ℃分别冻藏 6、9 个月,标记为 B 组。

将 A、B 两组的冻藏猪肉分别置于 4 ℃缓化 24 h,并置于室温中待肉样中心温度与室温相同,拿出沥干水分,剔除筋膜和脂肪。各处理组获取样本 30 个,共 120 个肉样,依次标记为 A-1 至 A-60 和 B-1 至 B-60。

1.3.2 光谱采集、建模及模型评价方法 将每组样品依次放入积分球中采集样品光谱,利用 TQ 软件

导出光谱,并在该软件下浏览所有光谱并进行模型的建立与优化。

使用 TQ Analyst 软件分析光谱,采用偏最小二乘法(PLS)进行建模。

利用主成分分析图,观察预测样本在整体模型中的分布情况来判断模型的好坏。线性判别模型图横纵坐标分别表示到 class1、class2 两类间的距离,判别同一模型中存在的不同样本之间的差异。

1.3.3 *电子鼻气味采集* 首先打开 smart nose 软件,然后开启电子鼻预热 30 min。设置检测参数:清洗时间 120 s、检测时间 120 s、等待时间 10 s、气体流量 1 L/min。依次插入补气针和进样针,每次保存肉样的检测数据后再进行新一轮样品的检测。

1.3.4 *数据分析方法* 本实验中,判别是否为长期冻藏猪肉(或新鲜肉),则需在对新鲜肉(或长期冻藏猪肉)所有光谱建模过程中混入少量(本实验设定数量为 5)长期冻藏猪肉(或新鲜肉)的样本光谱,这些光谱充当了模型预测集的功能,在最后的线性判别图中观察模型中两类样本点的分布情况,直观地反映待检测猪肉的类别。

1)光谱建模区间选择 分别采用不同光谱区间建立样品模型,按照上述样品光谱图差异性,选出最佳建模的区间。

2)光谱预处理及优化方法 光谱采集过程中,为避免一些客观因素产生系统误差影响 NIR 定量分析模型的信息,在建模过程中,可对原始光谱进行预处理进而不断优化所建立的模型。本研究中采用一阶导数(FD)、二阶导数(SD)降噪处理并结合 Savitzky-Golay(S-G)卷积平滑、Norris 导数平滑分别对原始光谱模型进行预处理和优化。

1.4 电子鼻分析

电子鼻各个阵列中的传感器对不同类型的化学风味物质的敏感度不同,所以不同样品的传感器响应高低各不同。本实验中所用电子鼻拥有 14 根传感器,每根传感器对应的敏感物质不同。判别指数 DI 值可直观地判断传感器阵列的优化程度。DI 值越大表明区分效果越理想,当 DI 值大于 80%时实验数据有效。PCA 是一种将传感器采集的信息数据转换降维的分类方法,综合了向量分析以及相关矩阵,从而最大程度上体现不同样品之间的差异。主成分得分图中,不同类型样品间距离越远越好,平行样品间的距离越小越好。

2 长期冻藏猪肉判别模型结果与分析

2.1 长期冻藏猪肉判别模型特征波段的选择

长期冻藏猪肉判别模型的建立共采集 65 组样本光谱(见图 1),其中 60 组 A 样本,并随机选择 5 组 B 样本(B-1、B-3、B-4、B-5、B-8)作为判别分析。之后对原始光谱进行特征波段筛选,在 4 000~5 400 nm、5 400~6 400 nm、6 400~7 400 nm、7 400~8 400 nm、8 400~10 000 nm 5 个光谱区间下分别进行建模,根据模型中样本点的离散分布情况,即新鲜肉样本("class1")与长期冻藏猪肉样本("class2")的分度,最终选择如图 2 所示在 6 400~7 400 nm 下所得模型,进行下一步模型优化(其余波段未显示)。

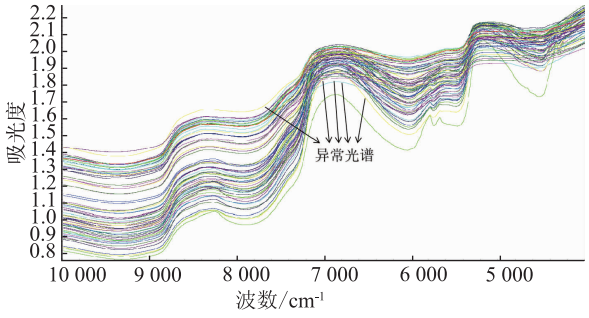


图 1 长期冻藏猪肉判别模型组 65 个样本的全波段原始光谱图

Fig. 1 Full-band original spectra of 65 samples of the long-term frozen meat discrimination model group

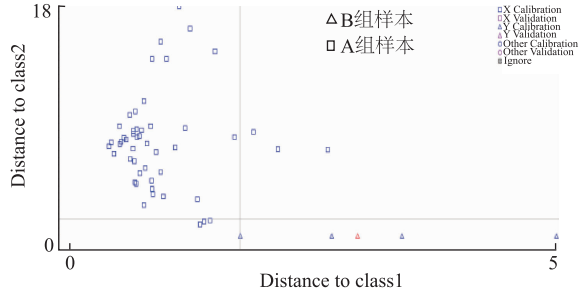


图 2 6 400~7 400 nm 波长范围内的长期冻藏猪肉判别模型图

Fig. 2 Discrimination model of long-term frozen meat in the wavelength range of 6 400~7 400 nm

2.2 长期冻藏猪肉判别模型优化

2.2.1 *剔除异常光谱优化长期冻藏猪肉判别模型* 图 1 的原始光谱图中,存在偏离中心的异常样本光谱图(已用箭头标注),将其剔除以提高模型的判别

相关性。但用于判别分析模型的 5 个样本图起到判别分析的作用,因此即使偏离中心,也不可剔除。依次剔除了模型中明显偏离中心的光谱。剔除后,依据 2.1 中建模所用光谱区间的选择结果 6 400~7 400 nm 对剔除异常光谱后的样本进行建模,结果如图 3 所示。

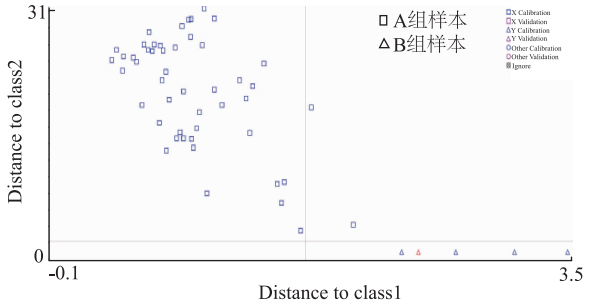
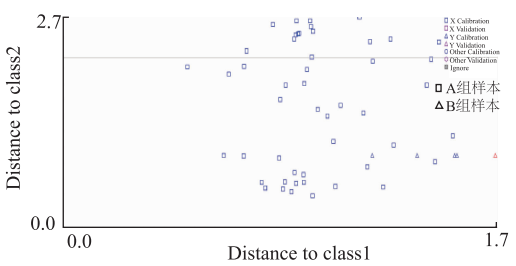


图 3 长期冻藏猪肉判别模型剔除异常光谱后的判别模型

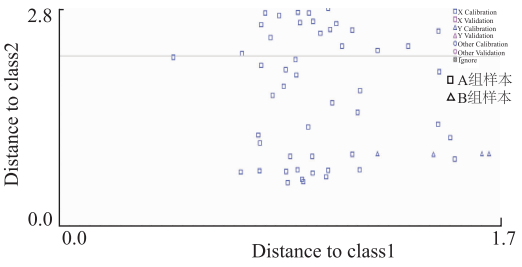
Fig. 3 Discriminant model of long-term frozen meat discrimination model after removing the abnormal spectra

2.2.2 不同预处理方式优化长期冻藏猪肉判别模型 虽然缩小了建模波段,过滤去除了部分无效信息,但仍需对模型进行优化处理以选出判别效果最佳的模型,故需要对光谱进行如平滑、去除光谱噪音等预处理。首先,对剔除异常光谱后的模型进行 FD、SD 降噪处理,再分别结合 S-G 卷积平滑或 Norris 导数平滑处理模型,判别模型如图 4 所示。结果显示,经 FD 降噪不平滑处理的模型难以清晰的区分出两类样本点(见图 4(a));经过 FD 降噪结合 S-G 卷积平滑处理后的判别模型(见图 4(b))效果极差,样本点混淆在一起,不能直观判别样本类型,判别模型失去意义;经过 FD 降噪结合 Norris 导数平滑处理后的判别模型(见图 4(c))的区分性与原始模型(见图 3)相当,都能直观地从总体样本中区分随机挑选的 5 个 B 组长期冻藏猪肉样本,但比较两者的判别图纵坐标值,发现原始模型纵坐标最大值(31)大于处理后模型组纵坐标最大值(9)(见图 4(c)),表明原始模型中新鲜肉与预测集长期冻藏猪肉的距离更大,因此原始模型判别分析效果更好;经 SD 降噪不平滑处理模型(见图 4(d))和经 SD 降噪结合 S-G 卷积平滑处理的模型(见图 4(e))中,预测的长期冻藏猪肉样本点同新鲜肉样本点在横坐标上分布一致,表明其到新鲜肉的距离区分度不强,以上两种模型不能从新鲜肉样中很好地区分出长期冻藏猪肉样本;经过 SD 降噪结合 Norris 导数平滑处理后的判别模型(见图 4(f)),在样品分类分布图中仅有一个样本点混入,在一定程度上能区分出长期冻藏猪肉样本点。

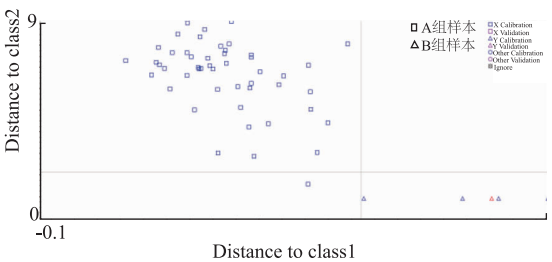
综上,经 FD 降噪结合 Norris 导数平滑处理的判别模型优于其余预处理方法,但与原始模型相比,原始判别模型中新鲜肉与长期冻藏猪肉间的距离更大,因此最终选择不经降噪、平滑处理的原始



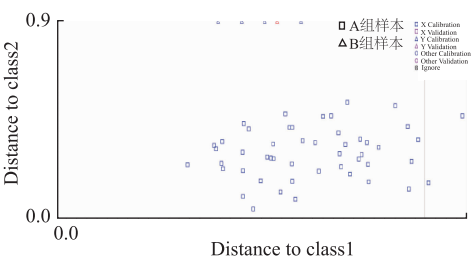
(a)FD降噪不平滑处理



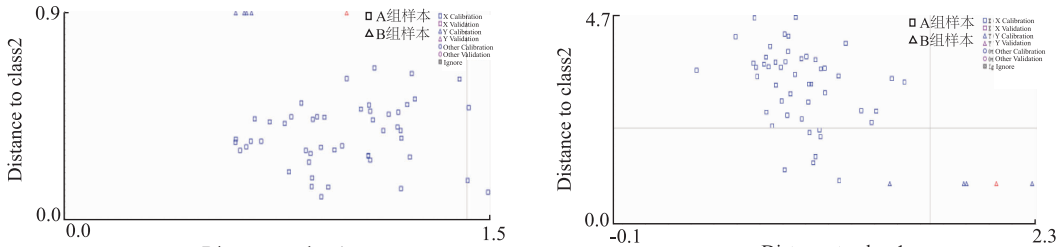
(b)FD降噪结合S-G卷积平滑处理



(c)FD降噪结合Norris导数平滑处理



(d)经SD降噪不平滑处理



(e)SD降噪结合S-G卷积平滑处理　(f)SD降噪结合Norris导数平滑处理

图 4　不同预处理方式的长期冻藏猪肉判别模型图

Fig. 4　Discriminant model of long-term frozen meat discrimination model after different pretreatment methods

长期冻藏猪肉判别模型(见图 3)。

2.2.3　长期冻藏猪肉判别模型主成分分析　为进一步判别所得模型的效果,将上一步所得的最优模型(不经降噪、平滑处理)再进行主成分分析。分析模型中的不同样本点在 2D 或 3D 主成分分析图中所在象限及坐标值,以便看出各个样品在某一主成分上是否存在差异,坐标值差异越小,则表明样品间无明显差异。将最优模型进行主成分分析,分别得到 2D 主成分分析图(见图 5)和 3D 主成分分析图(见图 6)。如图 5 所示,长期冻藏猪肉主要分布在第二、三象限,而新鲜肉主要集中在第一、四象限,结合横纵坐标值可发现所选判别模型中,两类样本在PC1 上区分性较强,在 PC2 上区分性较弱。因此该判别模型具有一定的应用价值。

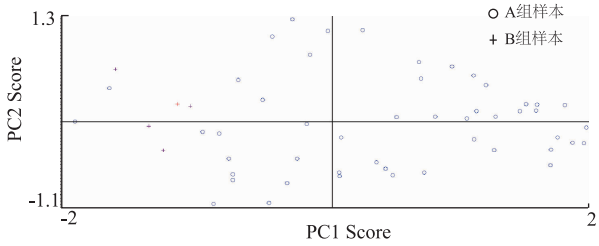
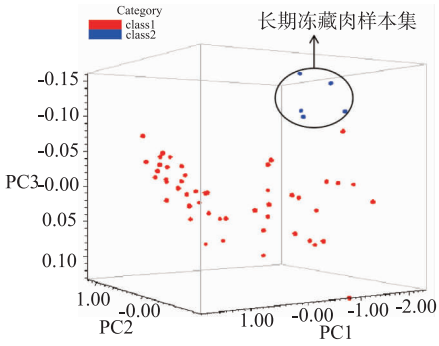


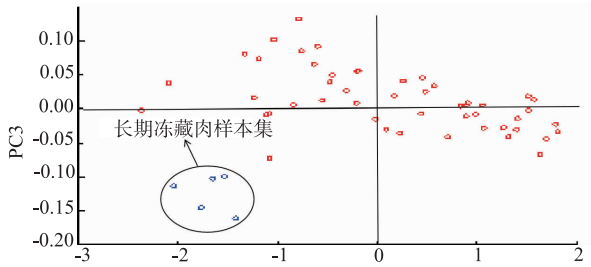
图 5　未经降噪、平滑处理的长期冻藏猪肉判别模型 2D 主成分分析图

Fig. 5　2D principal component analysis of the long-term frozen pork discrimination model without noise reduction and smoothing

由模型的 3D 分布图及 *XZ* 平面图 (见图 6)也可观察到两类样本点的分布情况,由图 6(a)可以发现在 3D 分布图中长期冻藏猪肉与新鲜肉样本差异明显。在 3D 投影 *XZ* 平面图中可直观发现长期冻藏猪肉的样本点主要集中于第三象限,新鲜肉样本点主要分布于第一、二、四象限,且长期冻藏猪肉的样本点在横纵坐标值上都可与新鲜肉样品点明显区分开,这表明两类样本点在 PC3 和 PC1 上差异较大(见图 6(b))。因此该模型具有良好的判别效果。



(a)3D主成分分析图



(b)*XZ*投影图

图 6　未经降噪、平滑处理的长期冻藏猪肉判别模型 3D 主成分分析图和 3D 主成分分析图的 *XZ* 投影图

Fig. 6　*XZ* projection diagrams of 3D principal component analysis and 3D principal component analysis of the long-term frozen pork discrimination model without noise reduction and smoothing

3　新鲜肉判别模型结果与分析

3.1　新鲜肉判别模型特征波段的选择

同长期冻藏猪肉判别模型建立的方法类似,采

集65 组样本光谱(见图 7)其中 60 组 B 样本,随机选择 5 组 A 样本作为判别分析。在不同波段下进行建模,根据模型中样本点的离散分布情况,选择光谱区间为 8 400~10 000 nm 所建立的模型能较好从长期冻藏猪肉样本中区分出新鲜肉(见图 8)。故在 8 400~10 000 nm 光谱区间基础上进行进一步的模型优化。

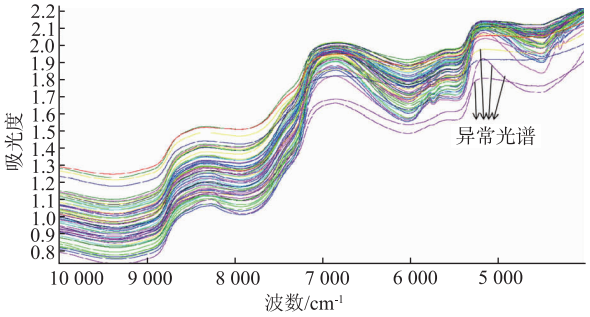


图 7　新鲜肉判别模型组 65 个样本的全波段原始光谱图

Fig. 7　Full-band original spectra of 65 samples of fresh meat discrimination model group

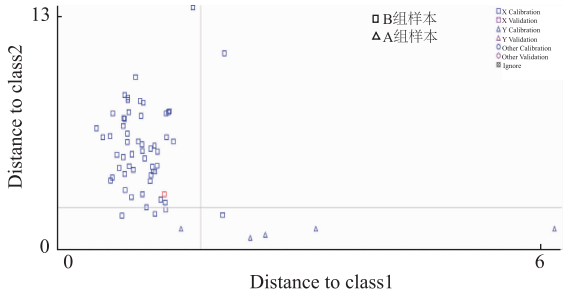


图 8　8 400~10 000 nm 波长范围内的新鲜肉原始判别模型图

Fig. 8　Original discrimination model of fresh meat in the wavelength range of 8 400~10 000 nm

3.2　新鲜肉判别模型优化

3.2.1　*剔除异常光谱优化模型*　同长期冻藏猪肉模型异常光谱剔除方法一致,剔除新鲜肉判别模型中的异常光谱，再根据 3.1 中针对建模所用光谱区间的选择结果对剔除异常光谱后的样本进行建模,结果如图 9 所示。

3.2.2　*不同预处理方式优化新鲜肉判别模型*　与长期冻藏猪肉模型优化方法相同,对剔除异常光谱后的模型进行 FD、SD 降噪处理，并结合 S-G 卷积平滑或 Norris 导数平滑处理。对比分析发现所有处理方法也均不如未经处理的判别模型效果。

3.2.3　*模型主成分分析*　将未经降噪、平滑处理的新鲜肉判别模型进行主成分分析得到其 2D 主成分分析图(见图 10)和 3D 主成分分析图及其 *XZ* 投影图(见图 11)。图 10 中新鲜肉样本点主要集中在第 4 象限,长期冻藏猪肉主要分布在所有象限,两类样本点在横坐标(PC1)上差异显著。由 3D 主成分分析图的 *XZ* 投影图(见图 11(b))展示的两类样本在 PC1 和 PC3 的区别,可以看出长期冻藏猪肉样本和新鲜肉样本在 PC1 上有明显区分，这与其 2D 分布图所展现的信息一致。进一步说明未经降噪、平滑处理的新鲜肉判别模型可以起到新鲜肉定性分析的作用。

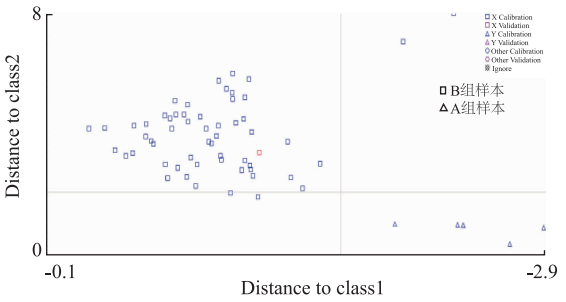


图 9　新鲜肉判别模型剔除异常光谱后的判别模型

Fig. 9　Discriminant model of the fresh meat discriminant model after removing the abnormal spectra

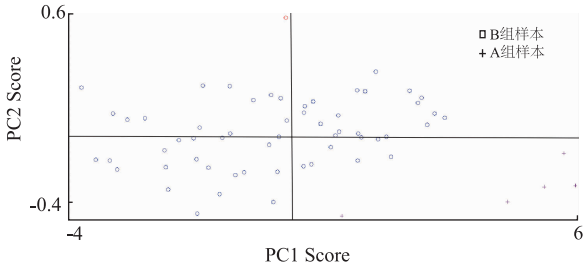
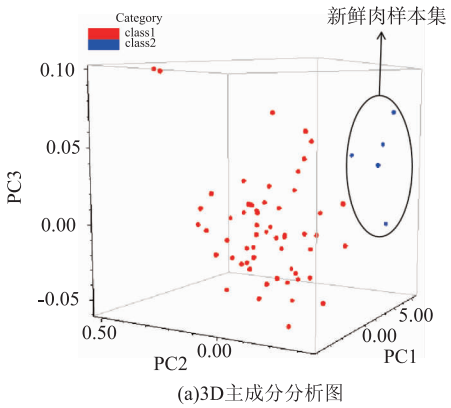
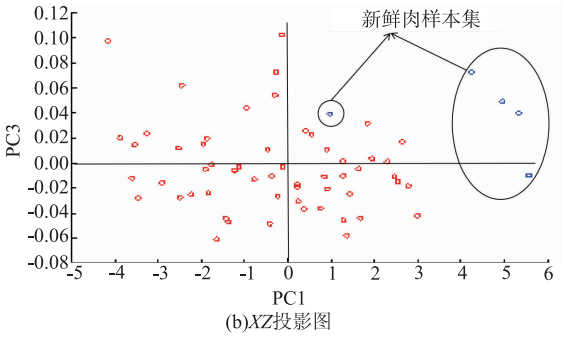


图 10　未经处理的新鲜肉判别模型的 2D 主成分分析图

Fig. 10　2D principal component analysis of untreated fresh meat discriminant model



(a)3D主成分分析图



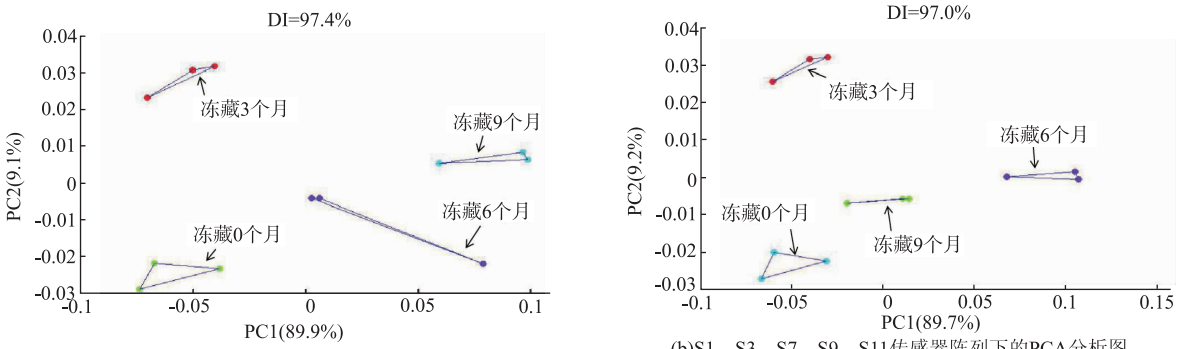
(b)*XZ*投影图

图 11　未经处理的新鲜肉判别模型的 3D主成分分析图及其 *XZ* 投影图

Fig. 11　3D principal component analysis and *XZ* projection of the untreated fresh meat discriminant model

4 电子鼻主成分分析

基于 1.4 中电子鼻传感器阵列的优化方法,选择两组 DI 值较高的传感器阵列组合用于主成分分析(PCA),一组为 S1、S7、S8、S9 和 S14,另一组为 S1、S3、S7、S9 和 S11。根据得出的 2 组较优传感器阵列,对采集的气味指纹图谱进行主成分分析,分别得到如下图 12 所示的电子鼻主成分分析图,两者累计方差贡献率分别为 97.4%和 97.0%,意味着 PCA 降维得出的 2 个主成分能反应样品气味的综合信息。由图可知,无论哪组传感器阵列,4 组样品间都有明显的间距,说明电子鼻能够有效区分新鲜肉和长期冻藏猪肉,电子鼻的稳定性和重复性较好。选择第 1 组传感器阵列时,冻藏 0、3、9 个月份的样本之间平行性较好,样本点分布集中,冻藏 3 组内部平行性较差,相互间距离较大。当选择第 2 组传感器阵列时,样品间区分性和样品内部平行性都较为理想。因此选择第 2 组传感器阵列作为直接定性判别分析冻藏猪肉的传感器阵列。



(a)S1、S7、S8、S9、S14传感器阵列下的PCA分析图　(b)S1、S3、S7、S9、S11传感器阵列下的PCA分析图

图 12　S1、S7、S8、S9、S14 和 S1、S3、S7、S9、S11 传感器阵列下的 PCA 分析图

Fig. 12　PCA analysis charts under S1, S7, S8, S9, S14 and S1, S3, S7, S9, S11 sensor arrays

5 结　语

作者对样品的光谱值进行判别分析,所得模型可直观地显示出不同样本的分布情况。建模过程中发现,不经降噪、平滑处理的长期冻藏猪肉和新鲜肉定性判别分析模型效果最佳,能够有效将新鲜肉与长期冻藏猪肉区分开。其次采用气味指纹图谱技术采集冻藏不同时间下肉样的化学风味物质,选择 S1、S3、S7、S9、S11 传感器阵列,结果显示电子鼻可将 4 个冻藏月份的肉样区分开。因此,近红外光谱技术和电子鼻分析技术均可起到直接定性判别新鲜肉和长期冻藏猪肉的作用。该研究结果有望在冻藏食品的无损检测领域被广泛应用,为食品无损检测奠定了一定的基础。

参考文献:

[1] 孙振. 中国肉类局部均衡模型研究[D]. 北京:中国农业科学院,2016.
[2] 何加伟. 基于高光谱图像技术的冷冻食品品质的无损检测研究[D]. 天津:天津商业大学,2016.
[3] 张秋,肖平辉. 从“僵尸肉”事件谈肉制品安全风险管理[J]. 肉类研究,2016,30(10):49-52.
[4] 刘国信.“僵尸肉”不必“撕”,“走私肉”须严打[J]. 四川畜牧兽医,2015,42(9):18.

[5] 叶毅飞,胡健声,朱声涛. 应用全自动荧光酶联免疫法检测肉类中的大肠杆菌 O157[J]. 畜牧兽医科技信息,2016(8):27.
[6] 林涛,刘真真,冯小军,等. 全自动荧光酶免疫分析仪检测冻肉产品中致病菌的研究[J]. 食品科技,2007(7):216-219.
[7] 张婷. 不同贮藏温度下牛肉新鲜度及品质变化研究[D]. 西安:陕西师范大学,2016.
[8] 杨潇,郭登峰,王祖文,等. 基于电子鼻的猪肉冷冻储藏期的无损检测方法[J]. 食品与发酵工业,2018,44(3):247-252.
[9] PATRIZIA F,SILVIA D L,REMO B,et al. Near infrared (NIR) spectroscopy-based classification for the authentication of Darjeeling black tea[J]. **Food Control**,2019,100:292-299.
[10] LORENZO D B,CHRISTIAN H. New approach to optimize near-infrared spectra with design of experiments and determination of milk compounds as influence factors for changing milk over time[J]. **Food Chemistry**,2016,212:552-560.
[11] GAMAL E,DA-WEN S,PAUL A. Non-destructive determination of water-holding capacity in fresh beef by using NIR hyperspectral imaging[J]. **Food Research International**,2008,23(6):193-197.
[12] 孙永海,万鹏,于春生. 基于 BP 神经网络的大米含水量近红外检测方法[J]. 中国粮油学报,2008,23(6):200-204.
[13] 闫龙,蒋春志,于向鸿,等. 大豆粗蛋白、粗脂肪含量近红外检测模型建立及可靠性分析[J]. 大豆科学,2008,27(5):833-837.
[14] 许倩,朱秋劲,叶春,等. 近红外光谱分析技术快速检测冰温贮藏牛肉品质[J]. 肉类研究,2015,29(3):23-26.
[15] 王婉娇,王松磊,贺晓光,等. 冷鲜羊肉冷藏时间和水分含量的高光谱无损检测[J]. 食品科学,2015,36(16):112-116.
[16] 王梦东,王胜鹏. 适用于 3 类茶的定性分类及主要内含成分定量分析的近红外预测模型的建立[J]. 华中农业大学学报,2015,34(1):123-127.
[17] 刘亭利,胡国清. 电子鼻的应用综述[J]. 传感器世界,2007(8):6-10.
[18] 叶华,袁雷明,张海宁,等. 近红外光谱结合共识模型快速检测果酒的总酚含量[J]. 光谱学与光谱分析,2020,40(3):777-781.
[19] 赵丽华,巩元勇,张洁,等. 近红外光谱法快速测定藜麦籽粒粗蛋白含量[J]. 食品工业科技,2000,41(15):233-236.
[20] 李婷婷,张桂兰,赵杰,等. 肉及肉制品掺假鉴别技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报,2018,9(2):409-415.
[21] 何鸿举,蒋圣启,王洋洋,等. 在线近红外光谱系统快速检测整块鸡胸肉菌落总数含量[J]. 食品工业科技,2020,41(16):232-237.
[22] 邹慧琴,刘勇,林辉,等. 电子鼻技术及应用研究进展[J]. 传感器世界,2011,17(11):6-11.
[23] 万赐晖,贾文珅,王纪华,等. 基于人工神经网络算法的电子鼻系统在食品无损检测中的应用[J]. 食品与机械,2016,32(10):221-225.
[24] 董士霞,耿奥博. 电子鼻技术应用进展及在环境检测中的应用展望[J]. 山东化工,2020,49(1):48-49.
[25] 白娟,张瑶,汪雪瑞,等. 基于电子舌和电子鼻对鲜肉粉风味的分析[J]. 食品与发酵工业,2019,45(3):270-274.
[26] 杨潇,郭登峰,王祖文,等. 基于电子鼻的猪肉冷冻储藏期的无损检测方法[J]. 食品与发酵工业,2018,44(3):247-252.
[27] 王晓宇,赵军宁,吴萍 等. 基于电子鼻技术对川姜黄整体气味与主要化学成分相关性的初步研究[J]. 中药材,2019(12):2850-2855.
[28] GUPTA A,SHETH M. Chemical stability of cottonseed and groundnut oil used for frying bhajias and its sensory qualities[J]. **Journal of Microbiology Biotechnology & Food Sciences**,2015,4(3):198-202.
[29] 刘瑶,徐冬颖,刘婧,等. 基于电子鼻的运输振动蔬菜气味品质检测[J]. 北方园艺,2019(18):100-109.
[30] 张迪雅,谢丹婷,李晔. 应用电子鼻和 GC-MS 比较牛肉不同部位的挥发性物质组成[J]. 食品工业科技,2017,38(21):241-246.
[31] 王绪,李璐,王佳奕,等. 电子鼻结合气相色谱 - 质谱法对宁夏小尾寒羊肉中鸭肉掺假的快速检测[J]. 食品科学,2017,38(20):222-228.