

基于近红外光谱的冷鲜肉-解冻肉的判别研究

王文秀, 彭彦昆*

(中国农业大学工学院, 国家农产品加工技术装备研发分中心, 北京 100083)

摘要: **目的** 利用近红外光谱对冷鲜肉和解冻肉进行判别研究。**方法** 利用 385~935 nm 的近红外光谱系统, 采集冷鲜肉与解冻肉表面的反射光谱数据, 采用 Savitzky-Golay(S-G)平滑和标准变量正态变换(SNVT)方法对光谱数据进行预处理。然后利用主成分分析法(PCA)实现数据降维, 提取主成分后结合两种状态的肉的理化指标(L^* 值, a^* 值, pH, 蒸煮损失和嫩度), 分别利用 Fisher 判别法、贝叶斯判别法两种判别分析方法对冷鲜肉和解冻肉进行判别研究。**结果** 两种判别分析方法, 均取得较好的分类效果, 尤其是 Fisher 判别法, 校正集的回判正确率为 96.67%, 验证集的正确率为 100%。**结论** 近红外光谱技术应用于冷鲜肉和解冻肉的鉴别是可行的。**关键词:** 近红外; 冷鲜肉; 解冻肉; 判别研究

Discrimination of fresh and frozen-thawed meat based on near infrared spectroscopy

WANG Wen-Xiu, PENG Yan-Kun*

(National Research and Development Center for Agro-processing Equipment, College of Engineering,
China Agricultural University, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Objective To discriminate fresh and frozen-thawed pork using near infrared spectroscopy. **Methods** Reflectance spectroscopy data were obtained from the fresh and frozen-thawed pork surface of 385~935 nm by use of near-infrared spectroscopy system. The Savitzky-Golay (S-G) smooth and standard normal variables transform (SNVT) were carried out as pre-treatment methods of the spectral data. Then principal component analysis (PCA) for data dimension reduction was used. Two discriminant analysis methods including Fisher discriminant method and Bayes discriminant method were used in the experiment to discriminate the samples based on the extracting principal components combined with their physical and chemical indexes (L^* value, a^* value, pH value, cooking loss and tenderness). **Results** Both the used discriminant analysis methods had good results, especially the Fisher discriminant method. The identify accuracy of the calibration was 96.67%, and the validation was 100%. **Conclusion** It is feasible for the near infrared spectroscopy to be applied for identification of fresh and frozen-thawed meat.

KEY WORDS: near infrared spectroscopy; fresh pork; frozen-thawed pork; discrimination

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201003008)

Fund: Supported by Agro-Scientific Research in the Public Interest (201003008)

*通讯作者: 彭彦昆, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为农畜产品品质安全无损检测关键技术与装备。E-mail: ypeng@cau.edu.cn

*Corresponding author: PENG Yan-Kun, Professor, Ph.D, Supervisor, National Research and Development Center for Agro-processing Equipment, College of Engineering, China Agricultural University, No.17, Qinghua East Road, Haidian District, Beijing 100083, China. E-mail: ypeng@cau.edu.cn

1 引言

冷鲜肉又叫冷却肉、排酸肉,是指严格执行兽医检疫制度,对屠宰后的牲畜胴体迅速进行冷却处理,使胴体温度在24 h内降为0~4℃,并在后续加工、流通和销售过程中始终处于0~4℃范围内的生鲜肉。由于冷鲜肉的生产从原料加工到销售始终处于低温控制下,因此大多数微生物的生长繁殖被抑制。并且冷鲜肉经历了较为充分的成熟过程,营养更为丰富,质地柔软有弹性,滋味鲜美^[1]。然而近年来却出现了一些不法商贩,把解冻肉当作冷鲜肉卖给消费者,从中获取不正当的利益。解冻肉经历过低温冷冻冷藏处理,冰晶的生长使细胞受到破坏,解冻过程也造成了大量营养物质的流失。因此能有效地对二者进行区分对规范肉类加工行业具有非常重要的意义。

目前,用于区分冷鲜肉和解冻肉的方法有酶法、DNA法、光镜法、生物成像法和感官评价法^[2]。几种不同的分析鉴别方法有各自的优缺点,但是目前尚没有单独的方法能够作为鉴别二者的最优方法。近红外光谱技术具有快速、简便、低成本的优点,在农畜产品品质安全检测方面有独到的优势,具有很大的实用和推广价值^[3]。冻藏过程中由于温度的波动使肉发生一些物理化学变化,包括颜色、蒸煮损失和嫩度,这些变化可以通过近红外光谱技术检测到。Thyholt等^[4]利用可见/近红外波段,对鲜牛肉与解冻牛肉进行识别,证实了可见/近红外光谱分析技术对于识别冷鲜肉和解冻肉的可行性。国内利用近红外光谱鉴别冷鲜肉和解冻肉鲜有报道。张学文等^[5]利用Fiss光谱数据对市场购买的鲜猪肉进行鲜/解冻肉的分类,并对猪肉新鲜度的类别和等级进行识别。然而,由于性别、年龄、宰前因素、宰后处理等的影响,使光谱法的精度和稳定性有待提高。利用光谱数据与理化指标结合的评价方法,可以减少误差,提高准确性。

本文将基于近红外光谱系统,分别获取冷鲜肉和解冻肉的反射光谱数据,并结合理化指标(L^* 值, a^* 值, pH, 蒸煮损失和嫩度),对冷鲜肉和解冻肉进行判别研究。利用光谱数据与理化指标相结合的综合评价方法,避免了单独使用一种方法评价的错判几率,提高了判别冷鲜肉和解冻肉的准确性。

2 材料与方法

2.1 实验材料

实验材料为屠宰后经过24 h排酸的同一品种不同新鲜猪(分别购自北京大红门肉类食品有限公司和北京鹏程肉类食品有限公司)胴体上的背最长肌。取样时每个猪胴体上取2个样品,分3次购买完成。将其置于蓄冷储运箱后立即运至实验室,均匀分割为8 cm×4 cm×2.5 cm的肉块,共获得40个样品。其中20个样品作为冷鲜肉立即进行实验。另外20个样品用低密度的聚乙烯塑料袋包好,置于-18℃冰柜中冻藏3 d后取出,采用流水解冻法解冻后进行实验。同时为了更加直观地观察冷冻解冻对猪肉品质的影响,编号时将相邻的两块肉其中一块作为冷鲜肉,另一块做冷冻解冻处理。

2.2 实验仪器

所使用的近红外光谱系统是由光源系统、信号采集系统和测距系统组成。光源系统由卤钨灯(HL-2000型, Ocean optics, 美国)和光源稳定器组成。信号采集系统由可见/近红外光谱仪(USB4000型, Ocean optics, 美国)、光纤探头、计算机和光谱仪操控软件(SpectraSuite)构成。光纤探头通过Y型光纤与光源的输出端和光谱仪的输入端连接。该系统的光谱范围为340~1000 nm, 光谱分辨率为0.3 nm, 采样间隔为0.22 nm。测距系统可以实现距离的微调,从而保证光纤探头到样品表面的距离一致。整个检测系统置于一个封闭的暗箱内,避免外界光的干扰。

2.3 实验方法

2.3.1 光谱数据采集

利用上述近红外光谱采集系统,采集340~1000 nm范围猪肉样本表面的反射光谱。采集样品光谱前,先打开电源采集标准校正白板:调节样品与探头之间的距离和积分时间使其光谱曲线不饱和,采集保存为白参考,再关闭电源采集其黑参考并保存。光谱仪参数设置为平均次数:6次,平滑度:0,积分时间:69 ms。实验时先用滤纸沾取样品表面的水分,以防表面残留的水分对光谱曲线产生影响。对每个样品表面分别在3个不同部位采集光谱,计算其平均值作为该样品的光谱曲线。

2.3.2 理化指标的测定

采集完光谱数据后, 立即采用标准方法对样品的理化指标, 包括 L^* 值、 a^* 值、pH、蒸煮损失和嫩度进行测定。

利用便携式精密色差计(HP-200, 上海汉谱光电科技有限公司)测定样本的 L^* 、 a^* 值。测量时, 保证仪器的测量孔和被测物紧贴, 避免晃动漏光, 影响测试数据。将仪器测量孔置于猪肉表面, 每个样本在不同肌肉部位测量 6 次, 平均值作为该样本的最终标准参照值。

利用 pH 计(METTLER TOLEDO FE20, 北京连博永通科技有限公司)测量样品的 pH。测定前对 pH 计进行校正, 每个样品测量 3 个不同的位置, 取 3 次的平均值作为该样品的最终 pH 参考值。

将肉块称重后密封包装, 然后在 80 ℃水浴加热至肉块中心温度达到 70 ℃, 取出冷却至室温, 破坏包装, 取出肉块, 用滤纸吸干表面水分, 称重。蒸煮损失率计算如下:

蒸煮损失率(%) = (蒸煮前肉重-蒸煮后肉重) / 蒸煮前肉重×100%

按照《肉嫩度的测定剪切力测定法》(NY/T1180-2006), 将样品用密封袋包裹在 80 ℃的水浴中加热, 保证肉块中心温度均达到 70 ℃左右, 然后将加热好的肉块取出用密封袋密封在 4 ℃下冷却保存 12 h。对每个肉块沿着肌纤维方向钻取 3 条直径为 3 cm 的肉柱, 由于剪切力的测定结果极易受影响, 需保证切块大小均匀, 蒸煮时间严格控制, 钻取肉柱时严格与肌纤维方向平行, 尽量避开脂肪和结缔组

织。用肉类嫩度剪切仪(C-LM3B 型, 东北农业大学工程学院)对每条肉柱进行垂直于肌纤维的剪切实验, 分别得到最大剪切力值, 求其平均值得到该样本的最大剪切力值^[6-10]。

2.4 数据分析方法

采用数据分析软件 MATLAB7.0(美国 Mathworks 公司)对数据进行处理和分析。从光谱采集区域提取样品的反射光谱数据, 首先利用 Savitzky-Golay(S-G) 9 点平滑和标准正态变量变换(SNVT)进行预处理。由于光谱数据较多, 若直接使用会降低识别的速度与效率, 因此通过主成分分析法(PCA)方法对光谱数据进行降维, 减少运算量。利用提取的主成分, 结合各自的理化指标, 分别利用 Fisher 判别法和贝叶斯判别法对冷鲜肉和解冻肉进行判别研究。

3 结果与讨论

3.1 理化指标结果

冷冻贮藏会在肉的内部形成大块冰晶, 由于冰晶的大小和分布不均匀会使肉品在解冻过程中流出大量的汁液, 严重影响肉的品质, 导致风味的下降、汁液的流失、脂肪氧化、脱水、嫩度下降、颜色和 pH 变化等。结合实验室条件, 最终选定了 L^* 值, a^* 值, pH, 蒸煮损失和嫩度 5 个理化指标^[11-13]。测定结果如下表所示。其中表 2 详细列出各个肉块蒸煮前后的质量变化及剪切力情况, 1-20 号为冷鲜肉, 21-40 号为解冻肉。

表 1 样品各指标分析
Table 1 Quality traits of samples for quality values

理化指标	冷鲜肉				解冻肉			
	最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差
L^* 值	47.22	51.59	49.57	1.07	40.12	53.02	47.73	4.53
a^* 值	6.18	10.04	8.10	1.33	7.86	9.97	8.74	0.77
pH	5.32	5.72	5.55	0.15	5.46	5.90	5.67	0.16
蒸煮损失(%)	13.25	16.18	14.80	0.85	14.89	19.70	17.28	1.28
剪切力(N)	19.56	35.48	24.65	4.09	13.91	25.78	20.32	2.75

表 2 各样品蒸煮损失和剪切力数值
Table 2 Data of cooking loss and shear force of fresh and frozen-thawed pork

编号	蒸煮前质量(g)	蒸煮后质量(g)	蒸煮损失(%)	剪切力(N)	编号	蒸煮前质量(g)	蒸煮后质量(g)	蒸煮损失(%)	剪切力(N)
1	88.622	76.011	14.23	20.51	21	86.342	72.717	15.78	18.14
2	85.886	72.849	15.18	21.51	22	82.878	69.137	16.58	18.64
3	86.358	74.916	13.25	21.35	23	85.198	72.512	14.89	20.09
4	84.162	72.673	13.65	22.35	24	82.024	67.957	17.15	20.59
5	80.163	68.844	14.12	23.16	25	78.685	64.097	18.54	13.91
6	84.184	70.832	15.86	24.16	26	82.086	67.204	18.13	21.41
7	88.465	75.5845	14.56	21.54	27	86.358	70.425	18.45	19.39
8	90.446	77.051	14.81	22.54	28	88.369	72.595	17.85	19.89
9	92.493	79.017	14.57	27.96	29	79.587	63.908	19.7	22.17
10	81.185	68.049	16.18	25.85	30	80.002	66.770	16.54	21.11
11	87.789	73.804	15.93	35.48	31	84.265	69.628	17.37	25.78
12	93.633	78.905	15.73	33.75	32	91.652	76.456	16.58	24.92
13	90.613	77.692	14.26	19.56	33	88.387	72.327	18.17	17.22
14	87.029	74.340	14.58	20.56	34	85.005	72.076	15.21	17.72
15	78.998	66.659	15.62	24.82	35	78.014	65.774	15.69	21.47
16	86.621	72.614	16.17	25.82	36	84.354	69.769	17.29	21.97
17	89.842	77.282	13.98	22.18	37	86.451	71.313	17.51	19.67
18	85.719	73.813	13.89	27.12	38	82.491	68.740	16.67	22.14
19	87.025	74.537	14.35	25.87	39	85.005	68.84	19.01	23.34
20	92.358	78.523	14.98	26.79	40	90.124	73.118	18.87	16.89

由上表可以看出, 相邻的两块肉样, 在冷冻解冻处理前后, L^* 值和 a^* 值和 pH 值没有发现有规律的变化。但是, 蒸煮损失却有明显的增加趋势, 它是衡量肌肉持水性的重要指标, 它的高低与宰后肌肉蛋白的溶解性有关, 尤其是肌浆蛋白。冻结使蛋白质变性, 从而使蛋白胶体性质遭到破坏, 蒸煮损失率提高。肌肉的剪切力是反映肉嫩度高低的指标, 是肌肉中结缔组织的含量与性质及肌原纤维蛋白的化学结构状态的总体反映。肉的嫩度有所下降, 这可能是冷冻解冻处理使肉品的细胞结构发生变化, 肌纤维发生断裂, 肌肉结构破坏, 断裂成小片。

3.2 光谱数据预处理结果

在采集的原始光谱曲线中, 由于两端噪声的信

号强度远大于有效信息的强度, 所以在进行光谱数据处理前, 将该部分信号去掉。图 1 为 385~935 nm 范围内的原始反射光谱曲线。

为消除光谱采集过程中随机非目标因素对光谱的影响, 提高精度, 首先要对光谱进行预处理。S-G 平滑可以有效地消除基线漂移、倾斜等因素造成的影响。SNVT 是原始光谱减去该光谱的平均值后, 再除以该光谱数据的标准偏差, 实质是使原光谱数据标准正态化。图 2、图 3 分别为 S-G 平滑和 SNVT 处理后的光谱曲线。

3.3 主成分分析结果

主成分分析法通过将原变量线性组合为少数新变量, 并且保证得到的新的变量能够表达原变量的

数据特征,达到数据降维的目的。另外,PCA能够实现数据表达坐标系统转换,消除变量之间的共线性,有利于提高判别准确性^[14]。

在本实验中,由于所得到的近红外光谱数据较多,若直接使用会降低识别的速度与效率,因此通过PCA方法对光谱数据进行降维,降低运算量。图4中横轴表示第一主成分(PC1,贡献率为76.20%)的得分,纵轴为第二主成分(PC2,贡献率为8.37%)的得分。从图4中看出通过两个主成分能够描述两种状态的肉的特征,已能够初步将样品分为两类。由于前4个主

成分的贡献率已经达到了93.05%,大于85%。因此,利用前4个主成分结合5个理化指标,用于后续的判别分析。

3.4 判别分析结果

将样品按照3:1的比例分为校正集和验证集,其中校正集30个样品(15个冷鲜肉,15个解冻肉),验证集10个(5个冷鲜肉,5个解冻肉)。

3.4.1 Fisher判别

Fisher判别分析的基本思想是投影,在输入的高维样本空间里找到低维度某(几)个方向,将原自变量

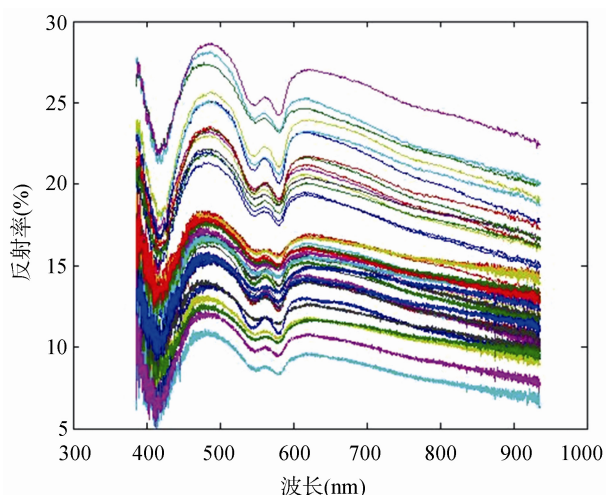


图1 原始光谱
Fig. 1 Original spectrum

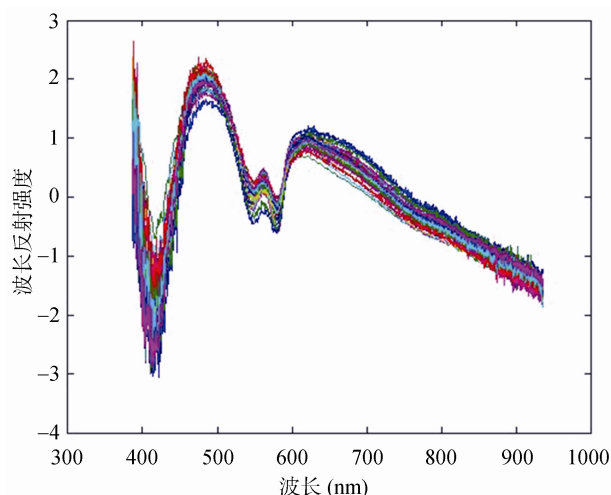


图3 SNVT处理后的光谱
Fig. 3 Spectrum after SNVT

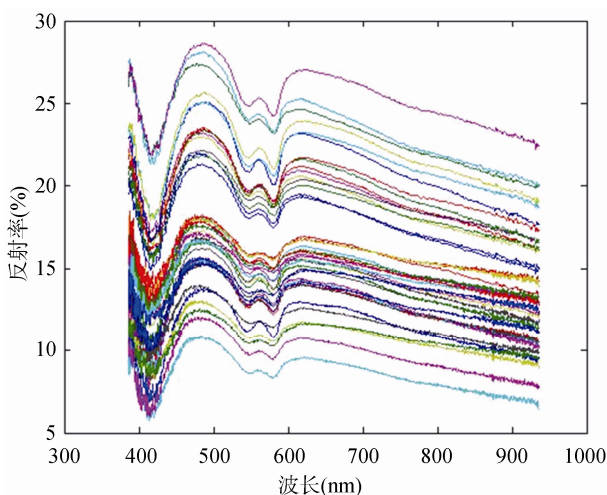


图2 经过S-G平滑后的光谱
Fig. 2 Spectrum after S-G smooth

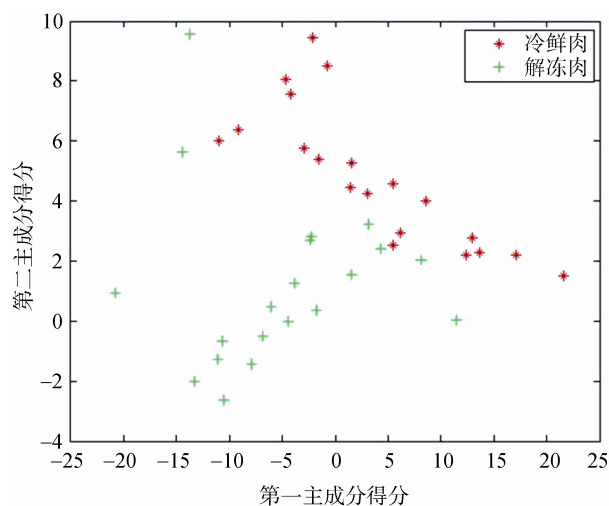


图4 PCA主成分得分图
Fig. 4 Principal component scores plot

组合进行投影。设有 k 个总体, $G_1, G_2, \dots, G_k$, 首先构建线性判别函数:

$$U(X)=u_1 X_1+u_2 X_2+\dots+u_p X_p \quad (1)$$

其中, $U(X)$ 为建立的线性判别函数, $u_1, u_2, \dots, u_p$ 为各个变量的系数, $X_1, X_2, \dots, X_p$ 为变量。

以同一类间的距离尽可能小, 不同类间距离最大为原则确定判别函数的系数 $u=(u_1, u_2, \dots, u_p)^T$ 。对于新的判定样品, 将其指标带入判别函数, 根据判定规则可实现对待测样品的判定^[15]。

将分选出的 30 个样品作为训练集, 利用 Matlab 建立判别函数, 如式(2)所示。对验证集中 10 个样品正确率达 100%, 对校正集样本进行回判, 1 个冷鲜肉被判为解冻肉, 正确率为 96.67%。

$$F=-0.033 A_1-0.132 A_2+0.142 A_3-0.025 A_4-0.068 A_5+0.039 A_6+0.089 A_7-0.039 A_8-0.972 A_9 \quad (2)$$

其中, F 为建立的判别函数, A_i 为用于创建函数的各个变量, i 为各变量的序号。

3.4.2 贝叶斯判别法

贝叶斯决策是在不完全情报下, 对部分未知的状态用主观概率估计, 然后用贝叶斯公式对发生概率进行修正, 最后再利用期望值和修正概率做出最优决策^[16]。例如假定一个具有两个类 ω_1, ω_2 的情况, 贝叶斯分类规则可以描述为:

$$\text{if } P(\omega_1|x) > P(\omega_2|x) \quad \text{then } x \in \omega_1 \quad (3)$$

$$\text{if } P(\omega_2|x) > P(\omega_1|x) \quad \text{then } x \in \omega_2 \quad (4)$$

首先利用样本集创建一个朴素贝叶斯分类器对象, 利用该对象对待判样本进行分类。判别结果为: 验证集中 5 个解冻肉全部判别正确, 5 个冷鲜肉中有 1 个判误, 总体正确率为 90%。对校正集样本进行回判, 有 1 个冷鲜肉和 1 个解冻肉判别错误, 总体正确率为 93.33%。

3.5 讨论

据以上结果可知, 利用 Fisher 判别法和贝叶斯分类器判别法, 对解冻肉的判别正确率均优于冷鲜肉, 这可能是由于冷冻解冻过程中温度波动、处理方法等因素, 使解冻肉发生明显的区别于冷鲜肉的变化。此外, Fisher 线性判别分析的总体效果优于贝叶斯判别法。从两种判别方法的原理角度对此进行分析, Fisher 判别函数找到的投影方向, 使类间散布矩阵和类内散布矩阵的比值最大。从而在这些投影方向上, 能够最好的区分训练集中属于不同类别的样本。而贝

叶斯判别法中的独立性假定使其无法表达实际数据中属性间存在的相依关系, 即没有使用类间信息, 获得的仅仅是对各个类别训练样本集分布的一种参数化的近似表达。因此使用 Fisher 判别分析的正确率高于贝叶斯分类器分析得到的正确率。

4 结论

本文利用近红外技术在 385~935 nm 范围对冷鲜肉和解冻肉采集其反射光谱曲线, 经过 S-G 平滑和 SNVT 预处理后, 利用前 4 个主成分结合理化指标, 分别利用 Fisher 判别分析法和贝叶斯判别法对冷鲜肉和解冻肉进行判别研究。结果表明利用近红外光谱结合理化指标用于鉴别冷鲜肉和解冻肉是可行的, 两种方法均取得了较好的判别结果, 其中 Fisher 判别法的分类结果最好(校正集的回判正确率为 96.67%, 验证集为 100%)。由于解冻肉经过冷冻解冻处理, 蛋白溶解度、脂肪氧化程度等均不同于冷鲜肉, 因此在以后的研究中, 可以考虑其他的理化指标结合光谱数据, 并且从增加样品数量和分析比较其他判别方法(如 BP 人工神经网络等)角度提高判别的精度和稳定性, 为近红外光谱技术应用于鉴别冷鲜肉和解冻肉打下良好的基础。

参考文献

- [1] 卢智, 朱俊玲, 马偕珍. 冷却肉的加工现状和发展趋势[J]. 肉类工业, 2004, (3): 8-11.
Lu Z, Zhu JL, Ma LZ. Status quo and development trend of chilled meat [J]. Meat Ind, 2004, (3): 8-11.
- [2] Ballin NZ, Lametsch R. Analytical methods for authentication of fresh vs. thawed meat-A review[J]. Meat Sci, 2008, 80(2): 151-158.
- [3] 彭彦昆, 张雷蕾. 农畜产品品质安全光学无损检测技术的进展和趋势[J]. 食品安全质量检测学报, 2012, 3(6): 561-568.
Peng YK, Zhang LL. Advancement and trend of non-destructive detection technology for assessing agro-products quality and safety[J]. J Food Safe Qual, 2012, 3(6): 561-568.
- [4] Thyholt K, Isaksson T. Differentiation of frozen and unfrozen beef using near-infrared spectroscopy[J]. J Sci Food Agric, 1997, 73(4): 525-532.
- [5] 张学文, 张立福, 黄长平, 等. 基于 FISS 成像光谱数据的鲜-解冻肉识别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 30(8): 2187-2190.
Zhang XW, Zhang LF, Huang CP, et al. Fresh and Frozen-Thawed Meat Discrimination Based on FISS Imaging Spectral Data[J].

- Spectrosc Spectr Anal, 2011, 30(8): 2187–2190.
- [6] 张海云, 彭彦昆, 王伟. 生鲜猪肉水分含量的快速无损检测[J]. 食品安全质量检测学报, 2012, 3(1): 23–26.
- Zhang HY, Peng YK, Wang W. Rapid non-destructive detection of water content in fresh pork[J]. J Food Safe Qual, 2012, 3(1): 23–26.
- [7] 胡耀华, 熊来怡, 蒋国振, 等. 基于可见光和近红外光谱鲜猪肉蒸煮损失和嫩度检测的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 30(11): 2950–2953.
- Hu YH, Xiong LY, Jiang ZG, *et al.* Measurement of Cooking Loss and Tenderness of Fresh Pork Using Visible/Near Infrared Spectroscopy[J]. Spectrosc Spectr Anal, 2012, 3(1): 2950–2953.
- [8] 廖宜涛, 樊玉霞, 伍学千, 等. 猪肉 pH 值的可见近红外光谱在线检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 30(3): 681–684.
- Liao YT, Fan YX, Wu XQ, *et al.* Online Determination of pH in Fresh Pork by Visible/Near-Infrared Spectroscopy[J]. Spectrosc Spectr Anal, 2012, 30(3): 681–684.
- [9] 赵杰文, 翟剑妹, 刘木华, 等. 牛肉嫩度的近红外光谱法检测技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(4): 640–642.
- Zhao JW, Zhai JM, Liu MH, *et al.* The Determination of Beef Tenderness Using Near-Infrared Spectroscopy[J]. Spectrosc Spectr Anal, 2006, 26(4): 640–642.
- [10] 侯瑞锋, 黄岚, 王忠义, 等. 用近红外漫反射光谱检测肉品新鲜度的初步研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(12): 2193–2196.
- Hou RF, Huang L, Wang ZY, *et al.* The Preliminary Study for Testing Freshness of Meat by Using Near-Infrared Reflectance Spectroscopy[J]. Spectrosc Spectr Anal, 2006, 26(12): 2193–2196.
- [11] 夏秀芳, 孙宝华, 郭园园, 等. 反复冷冻-解冻对猪肉品质特性和微观结构的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(3): 982–988.
- Xia XF, Sun BH, Guo YY, *et al.* Effect of Freeze-Thawing Cycles on the Quality Properties and Microstructure of Pork Muscle[J]. Sci Agric Sinica, 2009, 42(3): 982–988.
- [12] 吕玉, 臧明武, 史智佳, 等. 解冻和加工过程中冷冻猪肉保水性的研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(1): 148–152.
- Lv Y, Zang MW, Shi ZJ, *et al.* Study on Water-holding Capacity of Frozen Pork in Thawing and Processing[J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2012, 12(1): 148–152.
- [13] 余小领, 李学斌, 闫利萍, 等. 不同冻结和解冻速率对猪肉保水性和超微结构的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 261–265.
- Yu XL, Li XB, Yan LP, *et al.* Effects of different freezing and thawing rate on water-holding capacity and ultrastructure of pork[J]. Trans CSAE, 2007, 23(8): 261–265.
- [14] Juneja J. Common factors, principal components analysis and the term structure of interest rates[J]. Int Rev Financ Anal, 2012, 24: 48–56.
- [15] 周健, 成浩, 叶阳. 基于近红外的 Fisher 分类法识别茶叶原料品种的研究[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 1117–1121.
- Zhou J, Cheng H, Ye Y. Recognition for Raw Material Cultivar of Manufactured Tea With Fisher Diseriminant Classification With Principal Components Analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 1117–1121.
- [16] 邓波. 基于贝叶斯判别准则的地下矿山开采安全评价法[J]. 采矿技术, 2011, (5): 32–34.
- Deng B. Safety assessment method of underground mining based on Bayesian criterion[J]. Mining Technol, 2011, (5): 32–34.

(责任编辑: 赵静)

作者简介



王文秀, 硕士生, 主要研究方向为农畜产品品质安全无损检测技术。
E-mail: Godlovexiu@163.com



彭彦昆, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为农畜产品品质安全无损检测技术与装备。
E-mail: ypeng@cau.edu.cn