

方 瑶, 谢天铎, 郭 渭, 等. 基于近红外光谱的金鲳鱼新鲜度快速检测技术[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(1): 213-218.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.01.028

基于近红外光谱的金鲳鱼新鲜度快速检测技术

方 瑶¹, 谢天铎², 郭 渭¹, 白雪冰¹, 李振波¹, 李鑫星¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 挥发性盐基氮(Total volatile basic nitrogen, TVB-N)是动物性食品的新鲜度指标。传统的 TVB-N 检测技术工序繁杂, 对鱼肉具有不可逆的破坏性。本研究拟用近红外光谱技术进行金鲳鱼肉质新鲜度的检测, 采用一阶微分(1st Der)、二阶微分(2nd Der)、多元散射校正(Multiplicative scatter correction, MSC)、标准正态变换(Standard normal variate transform, SNV)对金鲳鱼鱼肉的近红外光谱数据进行预处理, 通过比较预测结果, 确定多元散射校正为最优预处理方法。分别采用偏最小二乘法(PLS)和主成分回归法(PCR)建立金鲳鱼肉质 TVB-N 的预测模型, 最终确立了基于 MSC 和 PLS 的最佳模型, 其中预测集均方根误差(RMSEP)为1.845 4, 决定系数(R^2)为0.884 1。由研究结果看出, 基于近红外光谱建立的金鲳鱼肉质预测模型具有较高的精度, 可为快速检测金鲳鱼的肉质新鲜度提供理论依据。

关键词: 近红外光谱; 新鲜度; 金鲳鱼; 挥发性盐基氮; 偏最小二乘法; 多元散射校正

中图分类号: O657.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2021)01-0213-06

Rapid detection technology of pomfret freshness based on near infrared spectroscopy

FANG Yao¹, XIE Tian-hua², GUO Wei¹, BAI Xue-bing¹, LI Zhen-bo¹, LI Xin-xing¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The total volatile basic nitrogen (TVB-N) is the freshness index of animal food. The traditional TVB-N detection technology is complicated and has irreversible damage to fish. In this study, near-infrared spectroscopy was used to detect the meat freshness of pomfret. The first order differential (1st Der), second order differential (2nd Der), standard normal variate transform (SNV), multiplicative scatter correction (MSC) were used to preprocess the near infrared spectrum data. The MSC was determined as the optimal pretreatment method by comparing the predicted results. Partial least squares (PLS) and principal component regression (PCR) were used to establish the TVB-N prediction model. The best model was the prediction model based on MSC and PLS. RMSEP of the model was 1.845 4, and R^2 was 0.884 1. The results show that the prediction model of pomfret meat freshness based on near-infrared spectroscopy has high accuracy, which provides theoretical basis for rapid detection of pomfret meat freshness.

Key words: near infrared spectroscopy; freshness; pomfret; total volatile basic nitrogen; partial least squares; multiplicative scatter correction

收稿日期: 2020-05-29

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD0701003); 北京市创新创业项目

作者简介: 方 瑶(1999-), 女, 安徽合肥人, 本科生, 研究方向为农业信息化技术。(E-mail) cau_fangyao@foxmail.com

通讯作者: 李鑫星, (E-mail) lxxcau@cau.edu.cn

金鲳鱼产于沿海地区, 其肉质鲜美、营养价值高^[1], 但是在捕获、运输、加工、消费过程中, 由于金鲳鱼内源酶降解、微生物分解等作用, 使其肉质新鲜度下降^[2], 导致其商品价值降低, 甚至会引发食品安全问题。可见, 对金鲳鱼进行肉质新鲜度的检测

十分必要。

GB 2722-1981《鲜肉卫生标准》中以挥发性盐基氮(TVB-N)^[3]作为评价鱼肉、羊肉等肉质新鲜度的重要指标。目前,鱼类肉质新鲜度的检测方法有人工感官评定法和理化检测法。人工感官评定法较为主观且不易量化,存在误判的可能性,会导致新鲜度品质评价失误^[4]。传统的理化检测方法对肉质具有不可逆的破坏性,且存在耗时长、费用高、专业性强等问题,不适于快速无损检测。近年来,随着光谱技术的发展,光谱无损检测逐渐成为一种非接触检测技术^[5]。近红外光谱(NIR)^[6-8]是一种介于可见光波段和中红外光波段间的电磁波,可反映含氢基团的倍频信息和合频信息。动物肉中含有丰富的有机化合物,且不同有机化合物的氢基团含量有差异,当肉质在自身内源酶降解^[9]或微生物分解作用下发生腐败时,其内部蛋白质等有机化合物含量会发生变化,使其所含氢基团的倍频信息和合频信息随之发生改变。由此可见,通过建立基于近红外光谱的 TVB-N 定量模型,可以评价肉质的新鲜度。近年来,国内外许多学者使用近红外光谱实现了肉质品质的检测^[10-12]。杨勇等^[13]建立了近红外光谱和 TVB-N 值与 pH 值的变化模型,实现了鹅肉新鲜度的近红外检测。郑晓春等^[14]采用近红外光谱建立了牛肉品质检测系统。彭彦昆等^[15]通过近红外光谱结合多点检测,实现了猪肉水分含量的测定与划分。然而,目前很少有学者将近红外光谱用于鱼肉的新鲜度检测中。

为了采用近红外光谱法建立金鲳鱼肉质新鲜度的检测模型,本研究以挥发性盐基氮作为金鲳鱼肉质的评价指标,采集 8 d 内不同腐败程度的金鲳鱼鱼肉的近红外光谱信息,并用凯氏定氮法测定鱼肉中挥发性盐基氮含量。此外,本研究用不同预处理方法对金鲳鱼鱼肉的近红外光谱数据进行预处理,并确定最佳预处理方法;分别采用偏最小二乘法(PLS)和主成分回归法(PCR)建立金鲳鱼 TVB-N 含量的预测模型,以确定最佳建模方法。

1 材料与方法

1.1 试验材料

同一批次的金鲳鱼购于青岛当地海鲜市场,从捕捞到运输历时 2 d,运输时金鲳鱼保持冰鲜状态。金鲳鱼鱼体规格为 500~1 000 g,共 20 尾。在洁净的工作台上处理鱼肉,室温为 15 ℃。取金鲳鱼背部鱼

肉,去除鱼刺、鱼皮后用绞肉机粉碎,制成鱼糜并分装于保鲜袋中,于 4 ℃ 恒温生化培养箱中保存。每天取 10 个鱼糜样品,采集近红外光谱数据,同时测定挥发性盐基氮含量,共测定 80 个样品,历时 8 d。

1.2 仪器与设备

近红外光谱数据使用美国 UNITY 公司生产的 SpectreStar XT2600 近红外光谱仪采集。挥发性盐基氮含量的测定使用 FOSS 公司生产的 Kjeltec™ 8400 凯氏定氮仪。离心机型号为 LSC-50H,转速为 0~4 000 r/min。

1.3 近红外光谱数据的采集

将鱼糜样品装入测量皿中,轻轻按压样品使其完全覆盖玻璃表面,按压后鱼糜样品的厚度约为 2~3 cm。近红外光谱仪的分辨率为 1 nm,扫描范围为 680~2 600 nm,扫描温度为 4 ℃,环境温度为 15 ℃。每个样品连续测量 3 次,获得 3 份近红外光谱数据,取其平均值。测量近红外光谱数据后,迅速测量挥发性盐基氮含量,以保证测量的近红外光谱数据和挥发性盐基氮含量对应的鱼肉新鲜度一致。

1.4 挥发性盐基氮含量的测定

鱼肉中挥发性盐基氮含量的测定采用凯氏定氮法,具体参照 GB 5009.228-2016《食品安全国家标准食品中挥发性盐基氮的测定》^[16]。取(10.00±0.10) g 鱼糜样品至 50 ml 离心管中,再添加 0.6 mol/L 高氯酸溶液至总体积为 25 ml,充分混合。然后加 0.6 mol/L 高氯酸溶液并定容至 40 ml。使用型号为 LSC-50H 离心机,于 4 000 r/min 离心 10 min 后过滤混合液。取 20 ml 上清液于消化管中,测定 TVB-N 含量。每个样品均测量 3 次,取 3 次测量的均值。TVB-N 含量按以下公式计算:

$$X = \frac{(V - V') \times 0.14}{m} \times F$$

式中: X 为样品中的 TVB-N 含量(mg/g), V 为样品消耗的 0.010 0 mol/L 标准酸体积(ml), V' 为空白对照消耗的 0.010 0 mol/L 标准酸体积(ml), m 为样品质量(g), F 为样品稀释系数,0.14 表示 1 ml HCl 标准溶液中的 TVB-N 量(mg)。

2 结果与分析

2.1 金鲳鱼鱼肉样品中 TVB-N 含量

从表 1 可以看出,试验期间表征金鲳鱼肉质新鲜度的 TVB-N 含量升高趋势明显。在贮藏 1 d 时,金

鲳鱼鱼肉的平均 TVB-N 含量为 0.166 7 mg/g。随着贮藏时间的增加,金鲳鱼肉质的腐败程度加重,当贮藏时间为 8 d 时,平均挥发性盐基氮含量达到 0.318 7 mg/g。在贮藏过程中,金鲳鱼鱼肉的平均挥发性盐基氮含量增加速率变快,表明随着时间的增加,金鲳鱼肉质的腐败速度加快,这是由于在鱼肉腐败的过程中,微生物的生长速率、内源酶的降解速率随着贮藏时间的增加而不断上升^[17]。由表 1 还可以看出,随着挥发性盐基氮含量上升,部分贮藏时间内金鲳鱼鱼肉样品中挥发性盐基氮含量的标准差呈上升趋势,可能由于不同鱼个体之间存在差异,随着贮藏时间的增加,环境等因素使不同鱼个体之间的差异逐渐拉大,最终造成不同鱼肉的腐败程度存在差异。

表 1 金鲳鱼鱼肉样品中挥发性盐基氮 (TVB-N) 含量

Table 1 The content of total volatile basic nitrogen (TVB-N) in pomfret meat samples

| 贮藏时间 (d) | 挥发性盐 基氮含量 (mg/g) | 平均挥发性 盐基氮含量 (mg/g) | 挥发性盐基氮 含量标准差 (mg/g) |
|-------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1 | 0.152 3~0.185 3 | 0.166 7 | 0.006 8 |
| 2 | 0.170 9~0.216 7 | 0.192 0 | 0.007 2 |
| 3 | 0.186 4~0.219 0 | 0.207 0 | 0.005 9 |
| 4 | 0.174 5~0.220 2 | 0.211 1 | 0.007 8 |
| 5 | 0.217 2~0.270 5 | 0.238 4 | 0.010 7 |
| 6 | 0.207 5~0.308 0 | 0.264 5 | 0.029 0 |
| 7 | 0.259 3~0.304 1 | 0.288 0 | 0.009 2 |
| 8 | 0.271 2~0.339 3 | 0.318 7 | 0.012 8 |

2.2 原始红外光谱预处理

如图 1 所示,金鲳鱼鱼肉样品的近红外光谱原始曲线的变化趋势基本保持一致。但是,由于金鲳鱼鱼肉内部含氢基团含量的变化,使得整体光谱曲线的吸光度存在差异。从图 1 的金鲳鱼鱼肉近红外光谱原始曲线中可以看到 3 个吸收峰,分别在 1 500 nm、2 000 nm 和 2 500 nm 附近。

受仪器特性及环境干扰等因素影响,原始光谱包含较大噪声,所以本试验尽量控制金鲳鱼鱼肉近红外光谱数据采集过程中环境变量的一致性,如温度、湿度、光照条件等。即使在去除了外界干扰的情况下,金鲳鱼鱼肉的原始近红外光谱也会不可避免地受到基线漂移、随机噪声等信息的干扰,会使模型出现误差,最终导致模型的预测精度下降。由此可

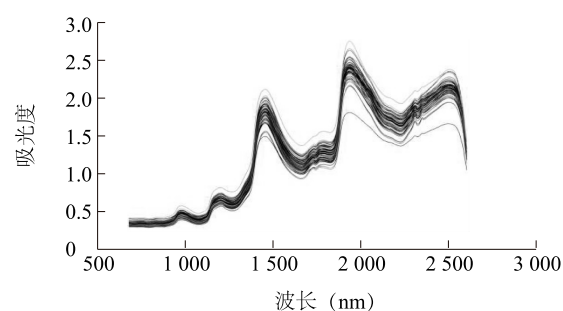


图 1 金鲳鱼鱼肉近红外光谱原始曲线

Fig.1 Original curve of near-infrared spectrum of pomfret meat

见,对原始光谱数据进行预处理十分必要。本研究分别使用 4 种不同预处理方法[一阶微分 (1st Der), 二阶微分 (2nd Der), 多元散射校正 (Multiplicative scatter correction, MSC), 标准正态变换 (Standard normal variate transform, SNV)]对金鲳鱼鱼肉近红外光谱数据进行预处理。经过预处理的光谱既有效消除了噪声的影响,又保留了原始光谱的有效信息。图 2、图 3 分别为经 1stDer、MSC 处理后的光谱曲线,可见用不同方法预处理后的光谱曲线间差异明显。

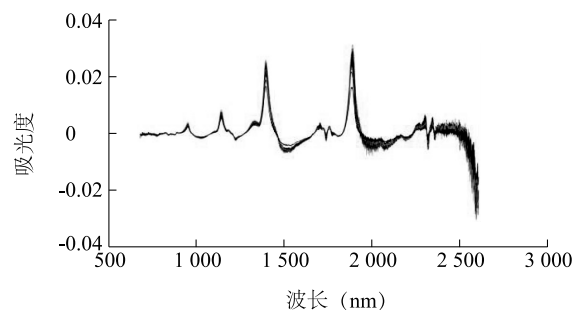


图 2 金鲳鱼鱼肉近红外光谱一阶微分预处理后曲线

Fig.2 Near infrared spectra of pomfret after first order differential pretreatment

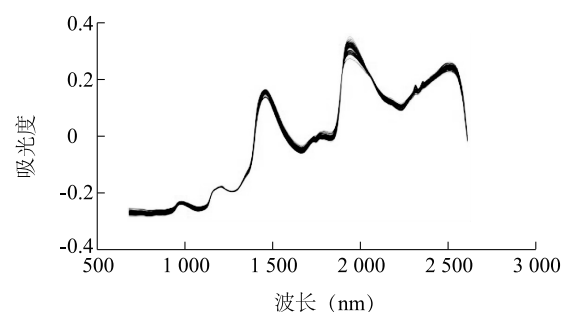


图 3 金鲳鱼鱼肉近红外光谱多元散射校正预处理后曲线

Fig.3 Near infrared spectra of pomfret after multiplicative scatter correction

为了比较不同预处理方法的效果,以 $RMSEP$ 、 R^2

作为指标来选择最佳预处理方法。基于不同预处理方法的金鲳鱼鱼肉近红外光谱预处理结果见表 2, 近红外光谱预处理方法^[18-20]的适用范围和处理结果见表 3。从表 2 可以看出, 未经预处理的近红外光谱预测集决定系数为 0.439 2, 而用不同方法预处理后的近红外光谱预测集的决定系数均大于 0.439 2, 说明预处理可使模型更加准确。研究结果还表明, 不同预处理方法对建立模型有不同的影响, 用一阶微分和多元散射校正处理的结果明显优于用二阶微分和标准正态

变换处理的结果。一阶微分校正预测处理后的预测集的 R^2 和多元散射校正预测处理后的预测集的 R^2 相差 0.185 8, 多元散射校正的 $RMSEP$ 远小于一阶微分, 二者的差值为 1.223 5, 说明多元散射校正预处理的效果在 4 种方法中最佳。这是由于在多元散射校正预处理过程中, 将近红外光谱数据减去其线性平移量后除以回归系数, 使预处理后的光谱不仅能够消除基线漂移的影响, 还能有效消除散射的影响, 达到了提高光谱信噪比的目的。

表 2 基于不同预处理方法的金鲳鱼鱼肉近红外光谱预处理结果

Table 2 Pretreatment results of near infrared spectra of pomfret based on different pretreatment methods

| 预处理方法 | 主因子数 (个) | 训练集 | | 预测集 | |
|----------------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | | R^2 | $RMSEC$ | R^2 | $RMSEP$ |
| 原始近红外光谱 | 2 | 0.382 2 | 2.654 8 | 0.439 2 | 3.121 4 |
| 一阶微分 (1 st Der) | 9 | 0.999 2 | 0.128 8 | 0.805 5 | 1.809 4 |
| 二阶微分 (2 nd Der) | 6 | 0.833 2 | 1.387 2 | 0.726 8 | 2.502 9 |
| 标准正态变换 (SNV) | 4 | 0.752 4 | 1.570 1 | 0.769 0 | 2.048 4 |
| 多元散射校正 (MSC) | 2 | 0.954 9 | 0.924 6 | 0.991 3 | 0.585 9 |

R^2 为决定系数, 用来描述模型的预测值与真实值之间的线性程度, R^2 越接近 1, 代表模型预测值与真实值之间的线性相关度越强。 $RMSEC$ 为校正均方根误差; $RMSEP$ 为预测集均方根误差, 用于计算模型真实值与预测值之间的偏差, $RMSEP$ 越接近 0, 表示误差越小。

表 3 近红外光谱预处理方法的适用范围和处理结果

Table 3 Application scope and results of near-infrared spectrum pretreatment methods

| 预处理方法 | 公式 | 适用范围 | 处理结果 |
|----------------------------|---|----------------|--|
| 一阶微分 (1 st Der) | $X_{i,1st} = \frac{X_i - X_{i+g}}{g}$ | 主要用于消除基线偏移的影响 | 1 st Der 和 2 nd Der 均有效地消除了金鲳鱼鱼肉近红外光谱基线漂移的干扰 |
| 二阶微分 (2 nd Der) | $X_{i,2st} = \frac{X_i + X_{i+g} - 2X_{i+g/2}}{g^2}$ | 主要用于消除基线漂移的影响 | |
| 标准正态变换 (SNV) | $X_{i,SNV} = \frac{x_{i,k} - \bar{x}_i}{\sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2}}$ | 主要用于解决光谱散射的影响 | 有效消除了金鲳鱼鱼肉近红外光谱表面散射及光程变化对光谱的影响 |
| 多元散射校正 (MSC) | $X_{i,MSC} = \frac{(X_i - b_i)}{m_i}$ | 适用于现阶段多波长的定标建模 | 显著地消除了金鲳鱼鱼肉光谱散射的影响 |

一阶微分公式中, $X_{i,1st}$: 一阶微分变换后的光谱, X_i : 谱图数据中 i 波数下的透过率, g : 窗口宽度。二阶微分公式中, $X_{i,2st}$: 二阶微分变换后的光谱, X_i : 谱图数据中 i 波数下的透过率, g : 窗口宽度。标准正态变换公式中, $X_{i,SNV}$: 标准正态变换后的光谱, $x_{i,k}$: 第 i 样品光谱的平均值, $k=1, 2, \dots, m$, 其中 m 为波长点数, $i=1, 2, 3, \dots, n$, 其中 n 为校正样本数。多元散射校正公式中, $X_{i,MSC}$: 多元散射校正后的光谱, X_i : 光谱数据矩阵, m_i 、 b_i : 各样品近红外光谱 X_i 与平均光谱 \bar{X} 进行一元线性回归后得到的相对偏移系数、平移变量。

2.3 金鲳鱼鱼肉新鲜度检测模型的建立和分析

将 80 个金鲳鱼样品数据划分为校正集和预测集 (其中校正集包含 60 个样品, 预测集包含 20 个样品), 建立金鲳鱼鱼肉新鲜度检测模型。现阶段常用的建模方法主要有偏最小二乘法 (PLS)、主成分回归法 (PCR)、多元线性回归法 (MLR)、人工神经网络法 (ANN) 等, 不同建模方法的适用范围不同。

由于神经网络需要大量训练数据, 而本研究仅有 80 个数据, 数据量不能够满足人工神经网络的要求, 因此本研究数据不适于建立依靠大量神经元之间相互连接而形成的运算模型。每个数据含有 1 920 个维度, 若直接使用多元线性回归建模会导致模型的生成速度过慢。由于 PLS、PCR 都是适用于预测数据量较大变量的建模方法, 因此本研究采用 PLS、

PCR,对经过预处理的近红外光谱数据进行建模,得到金鲳鱼鱼肉新鲜度的近红外光谱预测模型,最终的建模效果见表4。

由表4可以看出,通过PLS获得的 $RMSEP$ 略小于通过PCR得到的 $RMSEP$ 且两者间相差不大,其值均为1.800 0左右,说明PLS、PCR这2种建模方法建立的模型的预测结果与真实值均较为接近。通过PLS建立的模型的 R^2 大于通过PCR建立的模型,说明通过PLS建立的模型的预测值与真实值之间具有更强的线性回归关系。PLS法提取的主成分因子数为9个,PCR法提取的主成分因子数为23个,可见PLS在提取的主成分因子数比PCR少的情况下能够得到更精确的预测结果,效率更高,更适用于建立快速检测模型。PLS相对较优的原因可能是PCR通过创建组件来解释预测变量中观察到的变异性,而不考虑响应变量,PLS则将响应变量考虑在内,且PLS算法含有典型的相关分析,兼具MLR的优点,因此往往能够使模型用更少的组件来适应响应变量以达到更精确的预测值。综合分析可知,基于PLS的金鲳鱼新鲜度的预测模型优于基于PCR的预测模型。

表4 基于不同建模方法的预测模型效果比较

Table 4 Effect comparison of prediction models based on different modeling methods

| 建模方法 | 主因子数 (个) | 训练集 | | 预测集 | |
|------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | | R^2 | $RMSEC$ | R^2 | $RMSEP$ |
| PLS | 9 | 0.999 2 | 0.083 3 | 0.884 1 | 1.845 4 |
| PCR | 23 | 0.911 8 | 1.252 6 | 0.821 4 | 1.872 0 |

PLS:偏最小二乘法,PCR:主成分回归法, R^2 :决定系数, $RMSEC$:校正均方根误差, $RMSEP$:预测集均方根误差。

2.4 金鲳鱼鱼肉新鲜度检测模型可靠性验证

选取多元散射校正法进行金鲳鱼鱼肉近红外光谱数据的预处理,用偏最小二乘法建立金鲳鱼鱼肉新鲜度的近红外光谱预测模型。用最小二乘法拟合预测值与真实值间的回归曲线,训练集与预测集的最终拟合结果见图4。结果表明,基于MSC和PLS的金鲳鱼鱼肉新鲜度的近红外光谱预测模型训练集、预测集的决定系数(R^2)分别为0.936 1、0.884 7,说明金鲳鱼鱼肉新鲜度的预测值和真实值之间具有显著的相关性,该模型的可靠性较高。

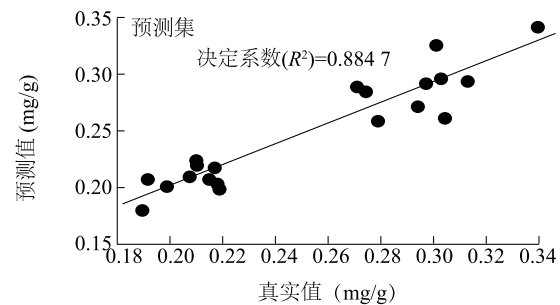
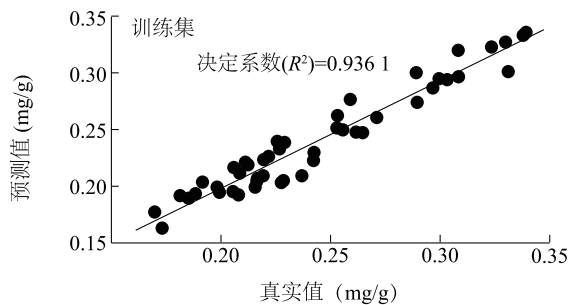


图4 挥发性盐基氮(TVB-N)真实值和预测值间的相关性

Fig.4 Correlation between the true and predicted values of TVB-N

3 结论

本研究采用TVB-N含量作为评价金鲳鱼鱼肉新鲜度的指标,采集金鲳鱼鱼肉的近红外光谱数据,并将原始金鲳鱼鱼肉的近红外光谱数据作为模型输入,建立金鲳鱼鱼肉新鲜度的定量评价模型。采用多元散射校正(MSC)预处理采集的金鲳鱼鱼肉近红外光谱数据,提高了鱼肉光谱数据的信噪比。使用PLS建立了金鲳鱼鱼肉新鲜度和NIR的预测模型,模型提取的主因子数为9,预测集的 $RMSEP$ 为1.845 4, R^2 为0.884 1。本研究结果表明,基于MSC

和PLS的金鲳鱼鱼肉新鲜度预测模型具有较高的预测精度,适合快速无损检测金鲳鱼鱼肉的新鲜度。

参考文献:

- [1] 戴梓茹,钟秋平,林美芳,等. 金鲳鱼营养成分分析与评价[J]. 食品工业科技, 2013, 34(1):347-350.
- [2] 薛 鹏,葛诗琪,徐锦华,等. 杂交鲟和金鲳鱼块非冻贮藏过程鲜度变化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(8):70-79.
- [3] 赵永强,李 娜,李来好,等. 鱼类鲜度评价指标及测定方法的研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2016, 31(4):456-462.
- [4] 邱洪涛,孙 裴,侯金波,等. 基于Caffe的猪肉新鲜度分级的

- 设计与实现[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(2):461-468.
- [5] 曾斯杰,刘 红,王友法,等. 近红外光谱在食品工业应用的研究进展[J]. 中国调味品, 2019, 44(7):179-183.
- [6] 褚小立,陆婉珍. 近五年我国近红外光谱分析技术研究与应用进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10):2595-2605.
- [7] 陈 超,柳 琦,李 钊,等. 红外光谱技术在食品安全检测中的研究与应用[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(14):219-224.
- [8] 青 丹,张 娜,李玉静. 现代近红外光谱方法在食品检测中的应用[J]. 粮食流通技术, 2018(13):103-105.
- [9] 王文秀,彭彦昆,王 凡,等. 局部偏最小二乘法结合可见-近红外光谱预测猪肉挥发性盐基氮[J]. 食品科学, 2019, 40(14):339-345.
- [10] 郭丽丽,花 锦,张梨花,等. 基于近红外技术测定不同鲜肉中挥发性盐基氮含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(11):2739-2743.
- [11] 何鸿举,朱亚东,王 慧,等. 近红外光谱技术在生鲜禽肉质量检测中应用的研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(21):317-323.
- [12] 姜洪喆,王 伟,杨 一,等. 近红外光谱分析技术在鸡肉品质检测中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(11):4298-4304.
- [13] 杨 勇,杨庆余,林 巍,等. 近红外光谱技术快速测定鹅肉嫩度[J]. 食品科学, 2014, 35(8):259-262.
- [14] 郑晓春,李永玉,彭彦昆,等. 基于可见/近红外光谱的牛肉品质无损检测系统改进[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊1):332-339.
- [15] 彭彦昆,杨清华,王文秀. 基于近红外光谱的猪肉水分在线检测与分级[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3):347-353.
- [16] 李江华. 肉与肉制品中水分含量的测定[J]. 肉类研究, 2018, 32(2):前插 13-前插 14.
- [17] 胡云峰,王雅迪,唐裕轩. 猪肉糜在贮藏过程中的变化规律及新鲜度快速测定方法的研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(15):178-182.
- [18] 宋相中,唐 果,张录达,等. 近红外光谱分析中的变量选择算法研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(4):1048-1052.
- [19] 白铁成,王 涛,陈佑启,等. 南疆沙尘区骏枣叶片水分含量检测的近红外光谱预处理方法对比[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(4):1323-1328.
- [20] 王骏超,葛俊锋. NIRS 数据样本选择与预处理方法综述[J]. 国外电子测量技术, 2019(3):1-7.

(责任编辑:徐 艳)