

便携式水产品多品质参数拉曼检测装置设计与试验

张雷蕾^{1,2} 滕官宏伟^{1,2} 朱 诚^{1,2}

(1. 中国计量大学生命科学学院, 杭州 310018; 2. 浙江省海洋食品品质及危害物控制技术重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 水产品在捕捞后极易发生腐败变质,传统的品质检测系统体积大、移动不便、操作复杂,不利于实际应用推广。为了满足水产品品质快速、实时、无损的检测需求,基于拉曼光谱技术,研发了便携式水产品多品质参数检测装置。该装置的硬件系统主要包括光源模块、光谱采集模块、系统控制处理模块、电源模块、通信模块。采用标准正态变量变换、Whittaker平滑算法、自适应迭代重加权惩罚最小二乘算法对该硬件系统采集的拉曼光谱数据进行平滑和背景扣除处理,结合国标方法采集到的鲳鱼颜色 b^* 、硫代巴比妥酸标准理化值(TBA值)、挥发性盐基氮(Total volatile basic nitrogen, TVB-N)含量,建立了鱼肉品质多指标偏最小二乘定量预测模型。鲳鱼颜色 b^* 、TBA值、TVB-N含量的验证集相关系数分别为0.907、0.897、0.915,验证集均方根误差分别为1.315、0.104 mg/(100 g)、2.875 mg/(100 g)。基于MFC基础类库完成实时分析控制软件设计,将预测模型植入软件内,交叉编译下载到检测装置中,实现水产品多品质参数指标一键检测。最后对装置的稳定性进行了测试,18条鲳鱼样品的颜色 b^* 、TBA值、TVB-N含量的装置预测值与标准理化值的相关系数分别为0.927、0.883、0.904,均方根误差分别为1.139、0.271 mg/(100 g)、1.896 mg/(100 g)。结果表明,便携式水产品多品质参数拉曼检测装置可以实现鲳鱼颜色 b^* 、TBA值、TVB-N含量的多指标实时无损检测。

关键词: 水产品; 无损检测; 便携式装置; 拉曼光谱

中图分类号: TS254.3; S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S2-0478-06

Development of Portable Device for Detection on Multi-quality Parameters of Aquatic Products by Raman Spectroscopy

ZHANG Leilei^{1,2} TENG Guanhongwei^{1,2} ZHU Cheng^{1,2}

(1. College of Life Sciences, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

2. Key Laboratory of Marine Food Quality and Hazard Controlling Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aquatic products are easy to be corrupted and deteriorated after fishing. However, due to the large volume, inconvenient movement, and complicated operation, it is difficult to be applied for conventional detection devices. In order to meet the needs of rapid detection of aquatic products, a portable multi-quality parameter detection device for aquatic products based on Raman spectroscopy was developed. The hardware system of the device was mainly composed of a light source module, a spectrum acquisition module, a system control processing module, a touch screen, a power module, and a communication module. The Raman spectral data of samples collected by the hardware system of the device, and the collected spectral data was smoothed and background subtracted by standard normal variate transformation, Whittaker smoothing algorithm, adaptive iterative reweighted penalty least squares algorithm. At the same time, according to the national standard method, the standard physicochemical values of pomfret color b^* , thiobarbituric acid (TBA) and total volatile base nitrogen (TVB-N) were collected, combined with spectral data, partial least squares regression quantitative prediction model for aquatic product quality was established. The results showed that the correlation coefficients of the validation color of b^* , TBA and TVB-N were 0.907, 0.897 and 0.915, respectively. The root mean square error of the verification set was 1.315, 0.104 mg/(100 g) and 2.875 mg/(100 g). The

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-09-20

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LQ18F050003)和国家重点研发计划项目(2017YFF0211302)

作者简介: 张雷蕾(1987—),女,讲师,博士,主要从事食品品质安全光学无损检测研究,E-mail: zhangleilei@cjlu.edu.cn

通信作者: 朱诚(1963—),男,教授,博士,主要从事食品污染物安全检测研究,E-mail: pzhch@cjlu.edu.cn

prediction model was implanted into the portable device software system to realize one-key detection of multi-quality parameter indicators of aquatic products. Finally, the accuracy of portable device was verified. The correlation coefficients between the predicted values of b^* , TBA and TVB-N of 18 pomfret samples and standard values were 0.927, 0.883 and 0.904, and the root mean square errors were 1.139, 0.271 mg/(100 g) and 1.896 mg/(100 g), respectively. The results showed that the portable device can realize the multi-index real-time non-destructive detection of pomfret.

Key words: aquatic products; non-destructive detection; portable device; Raman spectroscopy

0 引言

水产品是世界大宗商品贸易中重要的组成部分^[1],其品质安全与消费者营养健康息息相关。由于自身特性和生长环境,水产品具有极易被污染的特殊性,质量安全风险比一般食品高。水产品在储藏、加工、运输和销售过程中,极易在自身酶解和微生物的作用下腐败变质。而在我国水产品产业生产分散、规范化和标准化不足的现状下,对其监管存在着较多困难。传统水产品品质检测方法主要包括感官检测、生物学方法检测、理化检测等。其中,感官评价的结果易受主观因素的影响,重复性差;而微生物及理化检验方法操作复杂、耗时且具有破坏性^[2-4]。

拉曼光谱是由分子极化率变化诱导产生的,反映了分子振动与转动能级的情况^[5],对于水分子等极性基团具有较弱的拉曼活性,适用于含水生物系统的在线分析,在水产品品质安全监测方面有着广泛的应用潜力^[6-8]。国内外研究人员在利用拉曼光谱检测水产品方法方面开展了实验研究。文献[9]利用拉曼光谱,结合主成分分析法,对来自不同种类(马鲛鱼、欧洲凤尾鱼、红鲮鱼、蓝鳍金枪鱼、大西洋鲑鱼和飞鱼)分别在新鲜、一次解冻、二次解冻条件下的鱼肉进行判别分析。文献[10]通过鱼肉肌肉组织的拉曼光谱的层次聚类分析,从而对胡萝卜素喂养鲑科鱼、淡水养殖、咸水养殖等不同种类鱼肉进行鉴定。但这些均属于检测方法实验研究。相关的便携式检测装置方面的研究主要集中在生鲜肉^[11-12]、农产品^[13-15]等。随着我国食品安全监管体系的不断完善,开展便携式水产品检测装置的研究具有较高的应用价值^[16-17]。

本文基于拉曼光谱技术,针对反映水产品品质的指标参数,研发便携式水产品多品质参数无损检测装置,将水产品颜色 b^* 、TBA 值、TVB-N 含量预测模型植入分析控制软件,以实现对水产品品质的快速实时无损检测。

1 水产品多品质无损检测装置设计

1.1 检测装置原理

便携式水产品多品质无损检测装置工作原理如

图 1 所示。激光器发出稳定的 785 nm 的激光,照射到待测水产品表面,再由拉曼探头获取样品表面反射光,进入光谱仪进行分光,并将光信号转换为数字信号,ARM 控制处理器根据内置的水产品多品质参数预测模型对数字信号进行运算处理,将检测结果显示到 LCD 显示器上,同时自动将结果保存^[18-19]。

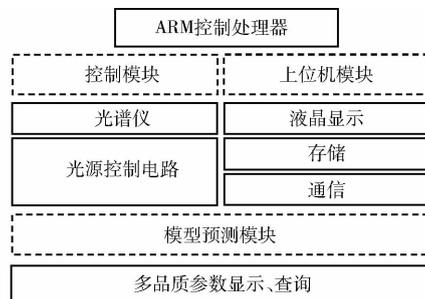


图 1 系统工作原理框图

Fig. 1 Schematic of system

1.2 便携式水产品多品质无损检测装置硬件

设备硬件主要由光源模块、光谱采集模块、系统控制处理模块、触摸屏、电源模块、通信模块组成。装置结构如图 2 所示。

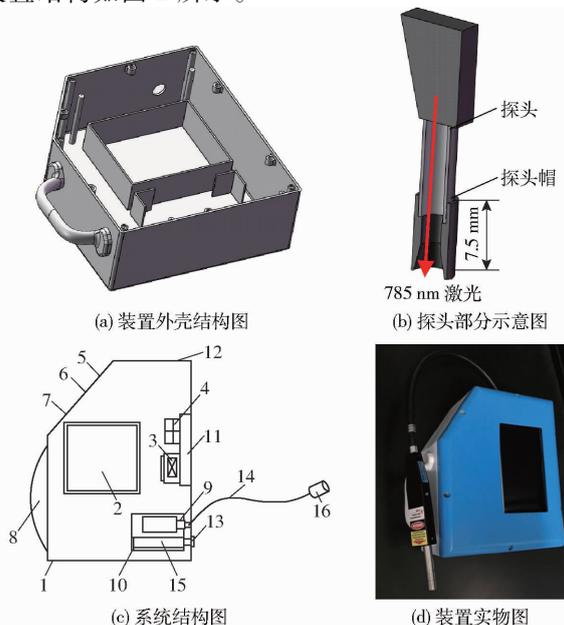


图 2 便携式水产品多品质参数检测装置

Fig. 2 Portable multi-quality aquatic products device

1. 机体
2. LCD 显示器
3. 微处理器
4. 锂电池
5. 耐磨层
6. 耐腐蚀层
7. 屏蔽层
8. 手柄
9. 拉曼光谱仪
10. 安装座
11. 安装板
12. 壳体
13. 接口
14. Y 型分叉光纤
15. 激光器
16. 拉曼探头

1.2.1 光源模块

光源模块是检测装置的重要部分,由于水产品的不稳定性,选用高输出功率的稳光谱激光器模块(Laser785-5HSO)。可提供光谱仪所需的窄线宽、稳光谱和稳功率的激光输出,中心波长在785 nm,最大可调功率为450 mW,具有抑制待测样品荧光等特性,从而可以保证检测系统的精度和鲁棒性。内置PD和TEC制冷模块使得光源模块具有良好的光谱特性和功率特性,体积小,供电电压为5 V,可通过本装置自带锂电池电源供电。

1.2.2 光谱采集模块

光谱采集模块由拉曼探头以及微型光谱仪组成,反射光经检测探头进入光谱仪分光,将光信号转换为电信号,并传输给系统控制处理单元。光谱仪采用可选择配置狭缝和光栅类型的微型拉曼光纤光谱仪(USB2000+, Ocean Optics),它是基于2048像元硅基CCD线阵传感器的微型光谱仪,光谱探测范围为200~1100 nm,尺寸为89 mm×63 mm×34 mm,具有低杂散光的全光谱分析、高信噪比和最高0.1 nm(FWHM)光学分辨率,满足装置便携式、性能优异的要求。

光谱采集探头采用非侵入式拉曼光纤探头。为使系统各模块间能独立更换,提高装置使用寿命,光纤采用定制Y型光纤(数值孔径0.22),统一使用SAM905标准接口,一端与光纤探头连接,另一端与光谱仪的输入端和激光器的输出端连接,探头得以灵活移动。探头部分如图2b所示,设计了一个凹入式采集探头帽,探头帽的材质为橡胶,可以紧密贴合在样品表面,避免外界光源以及杂散光对光谱信号的干扰,同时探头帽高度设计为7.5 mm,保证焦距。

1.2.3 系统控制处理模块

控制单元不仅要实现对光谱仪以及光源模块控制,还要对采集数据进行处理、保存,并最终显示在上位机显示屏,因此需要选用接口较多、功能强大、运算速度快的处理器。本文选用基于ARM9的32位嵌入式微型处理器S3C2440,采用“核心板+底板”结构,核心板搭载S3C2440芯片,底板包含各种外围电路。其外围电路USB接口用于连接开发板和光谱仪,LCD触摸屏用来实现人机交互和检测结果显示。SD卡用来对光谱数据和预测结果存储。

1.2.4 供电及通信模块

电源模块承担为激光光源、光谱仪以及控制电路供电的任务,由于检测装置全部采用标准5 V供电电压,因此供电模块选择了容量为20 000 mA·h的可充电锂电池,在脱离电源的情况下可独立工作

5 h。采用Wi-Fi通信模块实现数据的无线传输,能够及时将现场检测数据传输到实验室,实现数据共享,及时备份数据。

1.3 便携式水产品品质多指标检测软件开发

便携式水产品品质多指标检测装置软件基于Windows CE 6.0系统开发,主要包括光学信号采集、光谱数据保存处理、界面显示、数据库查询等功能^[20]。为了实现上位机界面清晰、简洁,基于MFC(Microsoft foundation classes)基础类库完成实时分析控制软件设计,交叉编译下载到检测装置中,实现水产品品质一键检测。光学信号采集模块对光谱仪积分时间、采集次数进行设置,控制光谱仪的信号采集。在水产品检测时,采集的光谱数据通常存在较多的干扰信号,光谱数据保存处理模块对采集的数据进行平滑、背景扣除处理,通过软件内植入的预测模型预测水产品多品质检测结果,显示在软件界面上,并对样品检测结果编号、自动保存。上位机界面包括谱图显示、参数设置、一键检测按键、检测结果显示、数据库查询,如图3所示。

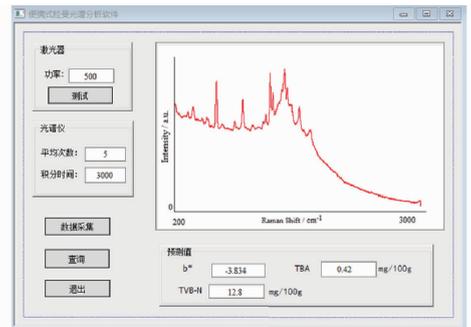


图3 软件界面

Fig.3 Interface of software

2 水产品多品质参数预测模型建立

2.1 材料与方法

新鲜鲳鱼购买于杭州市江干区高沙农贸市场,共60条,其中45条用于模型建立的校正集,15条用于验证集,把鲳鱼样品分为12组,分别用无菌密封袋包装并编号。由于鲳鱼在捕捞后,通常会用碎冰覆盖,冰鲜贮藏,为了模拟鲳鱼贮藏、运输、销售环境,将第1组设为新鲜组,不进行冷藏;其它组样品置于4℃冷藏,每天取一组样品,采集光谱信息及理化值。

2.2 拉曼光谱的采集与标准理化值测定

打开自行设计的便携式水产品多品质拉曼检测装置,预热15 min。检测装置积分时间设置为3000 ms,光谱采集平均次数为2次,光谱采集范围为400~2800 cm⁻¹。选取鲳鱼头部、腹部、尾部3个位置,每个位置分别采集5个点的拉曼光谱数据,

取光谱平均值。

采集完鲳鱼光谱信息后立即使用标准方法对鲳鱼的品质进行测定,检测方法如下:

颜色用 HP-200 型精密色差仪(上海汉普光电科技有限公司)检测。鲳鱼身体呈现银白色,上部微呈青灰色,中部和腹部呈银白色,表面含有较多水分,光线反色率对亮度值 L^* 有较大影响;影响红度值 a^* 的呈色物质极少,而 a^* 的研究多集中在肌红蛋白和血红蛋白含量较高的鱼类身上,一般不作参考。因此本研究选用影响程度较小的 b^* 值(黄蓝色)建立偏最小二乘预测模型。将采集完光谱的鲳鱼切成尺寸为 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 左右的肉块,在不同部位进行 5 次平行测量,取平均值。

TBA 值可以体现脂肪氧化程度,采用硫代巴比妥酸法测定,每条鲳鱼进行 3 次平行测量,取平均值

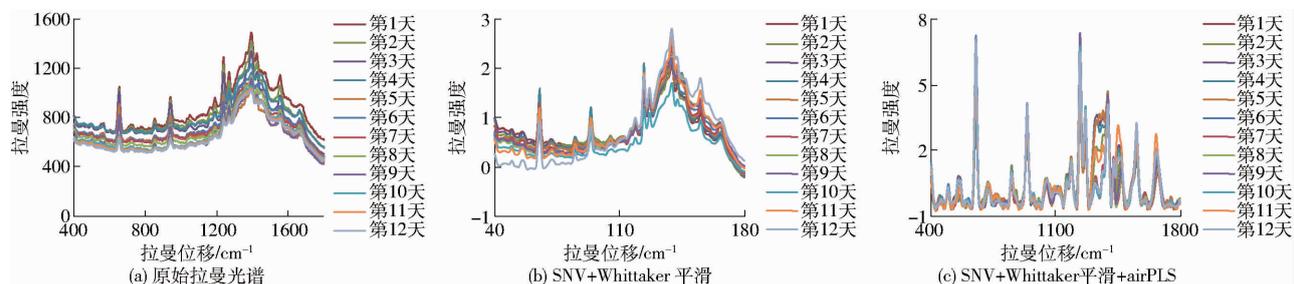


图 4 样品不同预处理后的拉曼光谱曲线

Fig. 4 Raman spectral after different pretreatments

从图 4a 可以看出,随着贮藏时间的增加,水产品光谱强度呈下降趋势,由于蛋白质不断分解,脂肪氧化,导致品质下降,逐渐腐败变质。分析特征峰可知,TVB-N 是蛋白质分解而产生的氨以及胺类等碱性含氮物质,可以由 $652, 940, 1\ 269\text{ cm}^{-1}$ 处 3 个蛋白质的特征峰,以及 $1\ 661\text{ cm}^{-1}$ 处反映 NH_2 带振动、 N-H 带振动、 NH_3^+ 单自由度系统的振动特征峰表示。TBA 值的变化由 $1\ 239\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 393\text{ cm}^{-1}$ 处的特征峰表示。 $1\ 239\text{ cm}^{-1}$ 处代表了 $\text{C}=\text{C}$ 结构,它的强度随着贮藏时间的增加而下降,标志着不饱和脂肪酸中 $\text{C}=\text{C}$ 键的减少。 $1\ 393\text{ cm}^{-1}$ 处代表了 COO^- 对称结构,它的强度随贮藏时间的上升而下

作为样本的最终参考标准。

TVB-N 含量根据 GB 5009.228—2016 中的自动凯氏定氮仪法测定。利用 K1100 型全自动凯氏定氮仪(济南海能仪器股份有限公司),每条鲳鱼进行 3 次平行测量,取平均值。

2.3 光谱预处理

利用 Matlab R2015b 软件对光谱数据进行分析和预处理。依次采用标准正态变量变换(Standard normal variate transformation, SNV)、Whittaker 平滑算法、自适应迭代重加权惩罚最小二乘算法(Adaptive iterative reweighted penalty least squares, airPLS)对所采集的拉曼光谱数据进行数据平滑和背景扣除处理^[21-22]。选取 $400 \sim 1\ 800\text{ cm}^{-1}$ 范围的光谱数据,经过 SNV、Whittaker 平滑和 airPLS 处理效果如图 4 所示。

降,可代表脂肪氧化。 $1\ 555\text{ cm}^{-1}$ 处代表了水分子的弯曲振动。

2.4 水产品多品质参数预测模型建立

基于 SNV、Whittaker 平滑算法、airPLS 预处理后的拉曼光谱数据分别建立了鲳鱼色差 b^* 、TBA 值、TVB-N 含量(质量比)的偏最小二乘定量预测模型(Partial least squares regression, PLSR),采用交叉验证的方法,选取标准误差最小时的主因子数。模型预测结果如图 5 所示。

结果显示,颜色 b^* 、TBA 值、TVB-N 含量的校正集相关系数(Correlation coefficient of calibration, R_c)分别为 0.936、0.925、0.943,校正集均方根误差分别为

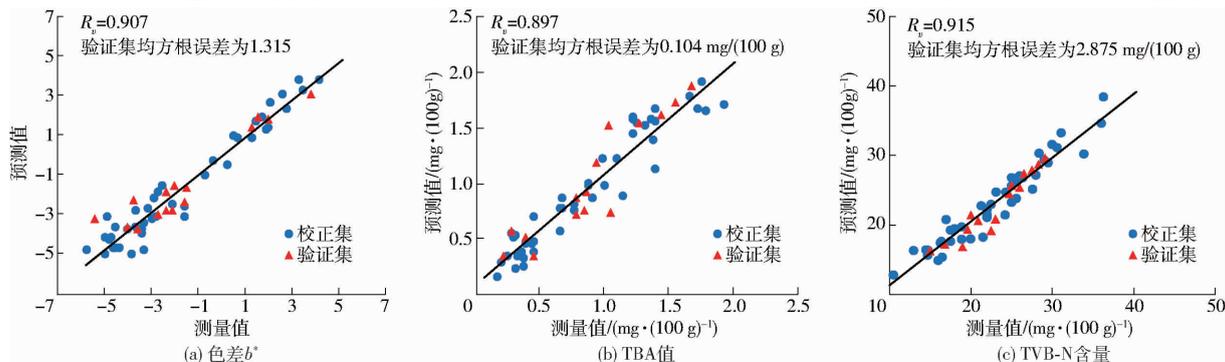


图 5 模型预测结果

Fig. 5 Model prediction results

0.886、0.086 mg/(100 g)、2.663 mg/(100 g);验证集相关系数(Correlation coefficient of validation, R_v)分别为0.907、0.897、0.915,验证集均方根误差分别为1.315、0.104 mg/(100 g)、2.875 mg/(100 g)。建模结果表明,自行设计的便携式水产品多指标拉曼检测装置所建立的颜色 b^* 、TBA 值、TVB-N 含量预测模型效果较好,能够定量预测待测水产品指标参数。

3 试验

为了验证检测装置的可靠性与稳定性,另取 18 条鲳鱼样品进行测试,分别用标准理化方法和本装置测定鲳鱼颜色、TBA 值、TVB-N 含量,每个样品检测 5 次,将两者得到的结果进行比较分析,本装置测试结果如表 1 所示。

表 1 装置测试结果
Tab.1 Result of device tests

检测参数	样本数量	R_p	验证集均方根误差
b^*	18	0.927	1.139
TBA 值	18	0.883	0.271 mg/(100 g)
TVB-N 含量	18	0.904	1.896 mg/(100 g)

结果表明,该装置各参数的预测值相对稳定,检

测稳定性良好。整个检测装置尺寸为 190 mm × 170 mm × 70 mm,质量 2.1 kg,便于携带。便携式水产品品质多指标拉曼检测装置可以实现鲳鱼颜色 b^* 、TBA 值、TVB-N 含量的现场快速无损实时监测。

4 结束语

利用拉曼光谱检测含水生物系统的优势,针对水产品品质特征,研发了便携式水产品品质多指标拉曼检测装置,装置可通过锂电池供电,体积小,便于携带。基于该检测装置,采集鲳鱼拉曼光谱数据,利用归一化 SNV、Whittaker 平滑、airPLS 算法对采集的拉曼光谱数据进行数据平滑和背景扣除处理,建立了鲳鱼色差 b^* 、TBA 值、TVB-N 含量的偏最小二乘定量预测模型。基于 Windows CE 6.0 系统开发了便携式水产品品质多指标检测软件,将预测模型植入软件内,实现水产品品质参数无损实时监测。并对装置的检测精度和稳定性进行了测试,色差 b^* 、TBA 值、TVB-N 含量的相关系数分别为 0.927、0.883、0.904,均方根误差分别为 1.139、0.271 mg/(100 g)、1.896 mg/(100 g)。结果表明,该装置检测稳定性良好。

参 考 文 献

- [1] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2018[M]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018: 40-41.
- [2] 高亚文, 欧昌荣, 汤海青, 等. 光谱技术在水产品鲜度评价中的应用[J]. 核农学报, 2016, 30(11): 2210-2217. GAO Yawen, OU Changrong, TANG Haiqing, et al. Spectroscopic techniques for assessing freshness of aquatic products[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(11): 2210-2217. (in Chinese)
- [3] 黄星奕, 管超, 丁然, 等. 基于嗅觉可视化和近红外光谱融合技术的海鲈鱼新鲜度评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 277-282. HUANG Xingyi, GUAN Chao, DING Ran, et al. Freshness evaluation of sea bass using multi-sensor information fusion based on olfactory visualization and NIR spectroscopy technique[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 277-282. (in Chinese)
- [4] 李培, 牛智有, 朱明, 等. 基于 SPME-GC-MS 和电子鼻的鱼粉挥发性物质分析[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 397-405. LI Pei, NIU Zhiyou, ZHU Ming, et al. Analysis of volatile compounds in fish meal based on SPME-GC-MS and electronic nose[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 397-405. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200745&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.045. (in Chinese)
- [5] YASEEN T, SUN D W, CHENG J H. Raman imaging for food quality and safety evaluation: fundamentals and applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 62: 177-189.
- [6] 翟晨, 彭彦昆, CHAO Kuanglin, 等. 农畜产品安全无损检测扫描式拉曼光谱成像系统设计[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 279-284. ZHAI Chen, PENG Yankun, CHAO Kuanglin, et al. Design of line-scan Raman imaging system for nondestructive detection of agricultural and livestock products safety[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 279-284. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161234&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.034. (in Chinese)
- [7] 蓝蔚青, 张楠楠, 刘书成, 等. 近红外光谱技术在水产品检测中的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(11): 3399-3403. LAN Weiqing, ZHANG Nannan, LIU Shucheng, et al. Progress in the application of near-infrared spectroscopy in the detection of aquatic products[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(11): 3399-3403. (in Chinese)

- [8] KOBAYASHI Y, MAYER S G, PARK J W. FT-IR and Raman spectroscopies determine structural changes of tilapia fish protein isolate and surimi under different comminution conditions[J]. *Food Chemistry*, 2017, 226:156-164.
- [9] VELIOĞLU H M, TEMİZ H T, BOYACI I H. Differentiation of fresh and frozen-thawed fish samples using Raman spectroscopy coupled with chemometric analysis[J]. *Food Chemistry*, 2015, 172: 283-290.
- [10] RAŠKOVIĆ B, HEINKE R, R SCH P, et al. The potential of Raman spectroscopy for the classification of fish fillets[J]. *Food Analytical Methods*, 2016, 9(5): 1301-1306.
- [11] 魏文松, 彭彦昆. 手持式生鲜肉品质参数无损检测装置研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(增刊): 324-331. WEI Wensong, PENG Yankun. Research on hand-held device for nondestructive detection of meat quality parameters[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(Supp.): 324-331. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s050&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.050. (in Chinese)
- [12] 孙宏伟, 彭彦昆, 林琬. 便携式生鲜猪肉多品质参数同时检测装置研发[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(20):268-273. SUN Hongwei, PENG Yankun, LIN Wan. Development of a portable device for simultaneous detection on multi-quality attributes of fresh pork[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(20):268-273. (in Chinese)
- [13] 刘亚超, 李永玉, 彭彦昆, 等. 便携式大米多品质参数无损检测仪设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(8):351-357. LIU Yachao, LI Yongyu, PENG Yankun, et al. Portable rapid nondestructive detecting instrument for multi-quality parameters of rice[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8):351-357. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190838&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.038. (in Chinese)
- [14] FU X, HE X, XU H, et al. Nondestructive and rapid assessment of intact tomato freshness and lycopene content based on a miniaturized Raman spectroscopic system and colorimetry[J]. *Food Analytical Methods*, 2016, 9(9): 1-8.
- [15] 王凡, 李永玉, 彭彦昆, 等. 便携式马铃薯多品质参数局部透射光谱无损检测装置[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(7):348-354. WANG Fan, LI Yongyu, PENG Yankun, et al. Hand-held device for non-destructive detection of potato quality parameters[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7):348-354. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180742&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.042. (in Chinese)
- [16] SCHEIER R, SCHEEDER M, SCHMIDT H. Prediction of pork quality at the slaughter line using a portable Raman device [J]. *Meat Science*, 2015, 103: 96-103.
- [17] NEKVAPIL F, BREZESTEAN I, BARCHEWITZ D, et al. Citrus fruits freshness assessment using Raman spectroscopy[J]. *Food Chemistry*, 2018, 242: 560-567.
- [18] MAIWALD M, ANDR M LLER, SUMPFF B, et al. A portable shifted excitation Raman difference spectroscopy system; device and field demonstration[J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2016, 47(10): 1180-1184.
- [19] JAAFREH S, BREUCH R, GNTHER K, et al. Rapid poultry spoilage evaluation using portable fiber-optic Raman spectrometer[J]. *Food Analytical Methods*, 2018, 11(8): 2320-2328.
- [20] 张冬松, 陈芳圆. Windows CE6.0 嵌入式高级编程[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
- [21] 杨桂燕, 李路, 陈和, 等. 基于广义 Whittaker 平滑器的拉曼光谱基线校正方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(9):368-376. YANG Guiyan, LI Lu, CHEN He, et al. Baseline correction method for Raman spectra based on generalized Whittaker smoother[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9):368-376. (in Chinese)
- [22] 董晶晶, 吴静珠, 陈岩, 等. 基于拉曼光谱的食用调和油原料组分快速定量检测方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(增刊):417-421, 428. DONG Jingjing, WU Jingzhu, CHEN Yan, et al. Rapid quantitative determination of raw material components in blended edible oil based on Raman spectroscopy[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(Supp.):417-421, 428. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s064&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.064. (in Chinese)