

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.040

葵花籽油过氧化值激光诱导荧光快速检测技术研究

马劭瑾 李永玉 彭彦昆 闫 帅 刘亚超
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 葵花籽油极易被氧化产生多种自由基、有毒聚合物等,因此葵花籽油产销链中过氧化值现场实时检测技术及装置研发具有重要意义。以设计便携式检测装置为目的,搭建了基于激光诱导荧光光谱的食用油过氧化值快速检测系统,建立了葵花籽油过氧化值定量预测模型,并进行了外部实验验证。结果表明,基于自行搭建的检测系统采集的80个不同过氧化值葵花籽油原始光谱,经SG平滑加MSC预处理结合CARS算法筛选荧光特征波长后建立的过氧化值PLS定量预测模型效果最佳, R_c^2 和 R_p^2 分别为0.9995和0.9972,校正集均方根误差和验证集均方根误差分别为0.0088 g/(100 g)和0.0227 g/(100 g)。同时选取10个未参与建模的葵花籽油样品对模型进行外部验证,预测值与理化测定值的 R^2 为0.9681,均方根误差为0.0411 g/(100 g),在低于国标限0.25 g/(100 g)的残差绝对值均在0.08 g/(100 g)以下。结果表明,自行设计的激光诱导荧光检测系统可以较高的精度实现对葵花籽油过氧化值的快速检测,为后续便携式整机设计和食用油氧化预警系统构建提供技术支持。

关键词: 葵花籽油; 过氧化值; 激光诱导荧光光谱; 快速检测

中图分类号: S-3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)12-0386-07 OSID: 

Laser Induced Fluorescence System for Assessment of PV of Sunflower Oil

MA Shaojin LI Yongyu PENG Yankun YAN Shuai LIU Yachao
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: With the aim to develop a rapid and nondestructive method to assess oxidation level of sunflower oil, fluorescence spectra were collected by a self-developed 365 nm laser induced fluorescence (LIF) system. Both thermal oxidation at 60°C and room-temperature degradation were implemented to obtain sunflower oil with different peroxide values (PV). Fluorescence peaks at about 440 nm, 495 nm, 520 nm and 680 nm were identified. Sunflower oil with lower PVs had lower fluorescence intensities. A control part was designed in order to detect the fluorescence response at different spectral acquisition times. In contrast to the LIF spectra acquired from 10 s to 60 s (with a interval of 10 s), the spectra acquired at 1 s appeared to have the strongest response, and therefore it was used in the following part. After SG smoothing of the original LIF spectra, three different pre-processing methods were operated to correct the spectra. Top six normalized weights were extracted for evaluating the correlation between fluorophore in sunflower oil and PV. The peaks for hydroperoxides, chlorophyll and vitamin E had a very close association with the PV. The best partial least squares regression resulted in R_c^2 of 0.9995 and R_p^2 of 0.9972 and RMSEC of 0.0088 g/(100 g) and RMSEP of 0.0227 g/(100 g) for MSC pre-processing. The accuracy of the proposed LIF system was validated by using an independent set of samples with an R^2 of 0.9681 and RMSE of 0.0411 g/(100 g). The absolute residual values below the national standard limit were all below 0.08 g/(100 g). These findings demonstrated that the proposed LIF system could be used to detect PV of sunflower oil with high accuracy, thus providing technical support for subsequent design of portable device and construction of edible oil oxidation warning system.

Key words: sunflower oil; peroxide value; laser induced fluorescence spectra; fast detection

收稿日期: 2020-12-20 修回日期: 2021-01-12
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0101205)
作者简介: 马劭瑾(1997—),女,博士生,主要从事农畜产品品质安全无损检测技术研究,E-mail: msj19970731@126.com
通信作者: 李永玉(1971—),女,副教授,博士生导师,主要从事农畜产品光学无损快速检测技术研究,E-mail: yyli@cau.edu.cn

0 引言

葵花籽油含丰富的亚油酸、油酸、不饱和脂肪酸等营养物质,在世界食用油中产量位居第二^[1]。近些年来,我国葵花籽油的消费量也不断增加。但是葵花籽油中的高不饱和和脂肪酸含量也导致其更易被氧化,在售卖或家庭使用过程中都很容易发生氧化变质^[2]。变质的葵花籽油会产生多种自由基、氢过氧化物和有毒聚合物,容易引发多种疾病。在植物油食品安全国家标准中明确规定,食用植物油过氧化值不能超过 0.25 g/(100 g),在各地食品安全抽检信息中植物油过氧化值超标等频见报道。

目前食用油过氧化值的传统检测方法主要为化学滴定法,具有操作复杂、耗时较长、需采用有毒化学试剂等缺点,而且不能满足快速实时的需求。为克服传统化学手段在食用油产销链中品质监测的局限性,诸多学者进行了食用油氧化指标快速检测方法的研究^[3-8]。其中,荧光光谱以其灵敏度高、能直接反映食用油中与氧化机制直接相关的如酚类物质和维生素 E 等荧光物质的特性,在食用油氧化程度评估方面得到迅速发展。诸多研究者均基于三维荧光光谱^[9-11],或者从三维荧光光谱中提取合适的波长间隔,探究同步荧光光谱与氧化食用油的相关关系^[12-20]。三维荧光光谱能够同时反映荧光强度随激发、发射波长的变化,但也因此具有较慢的扫描速度,且获取三维荧光光谱的荧光分光光度计体积较大、价格昂贵,并不具备食用油品质安全监测所需的高效性与便捷性。激光诱导荧光(Laser induced fluorescence, LIF)光谱则可以弥补上述荧光检测方法的不足,可以实现食用油过氧化值的现场实时监测,然而基于激光诱导荧光对食用油过氧化值进行定量检测的相关研究尚未见报道。

本文针对食用油易被氧化产生多种自由基、氢过氧化物和有毒聚合物等特性,根据食用油在产销链中品质监测的实用需求,基于激光诱导荧光光谱搭建食用油快速检测系统,编写相关采集控制软件,并以葵花籽油为研究对象,确定荧光响应时间等光谱采集参数,基于自行搭建系统采集不同过氧化值葵花籽油的荧光光谱,探讨不同预处理对荧光光谱的校正效果,建立葵花籽油过氧化值实时定量预测模型,最终实现对葵花籽油过氧化值的无损、快速检测。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

葵花籽油样品购于物美超市,分为生产日期 2019 年 11 月 4 日和 2020 年 6 月 10 日两批次。为

制备不同氧化程度葵花籽油样品,将购买的葵花籽油分别放置于 60℃ 恒温箱和 25℃ 的室温环境中保存。60℃ 恒温箱中,加热氧化样品每隔 6 h 取样一次,室温氧化处理样品每隔 5 d 取样一次,共制备 90 个不同氧化程度葵花籽油样品。

1.2 过氧化值(PV)的标准理化值测定方法

参照 GB 5009.227—2016 中的滴定法,每个葵花籽油样品平行测定 3 次取平均值作为过氧化值的标准理化值。

2 葵花籽油荧光光谱检测系统搭建

以食用油品质安全现场实时监测技术装置研发为目的,自行搭建了基于激光诱导荧光光谱的葵花籽油检测系统,主要包括光源部分、样品室、光谱采集部分、供电部分以及控制部分,如图 1 所示。光源部分包括紫外 LED 光源、滤光片与准直透镜。LED 光源功率为 3 W,中心波长为(365 ± 10) nm,LED 激发光源发出的紫外光经过窄带滤光片和准直透镜平行照射到样品室内的样品。样品室在相邻两侧进行开孔设计,用于进行直角荧光检测,并且可以保证在放入比色皿后,激发光入射和发射光出射的位置均位于比色皿中部。样品室配有遮光盖,可以确保在比色皿放入后进行光谱采集时不受外界杂散光的影响。光源系统与样品室采用一体化设计,从而避免比色皿放入或取出时检测系统发生晃动。光谱采集部分主要包括光纤与波长范围为 200 ~ 1 100 nm 的光谱仪(USB2000 + 型),光谱分辨率为 1 nm。激发样品产生的荧光信号,经垂直于入射光方向安装的光纤探头传入光谱仪中,再由光谱仪通过 USB 接口将数据传输到计算机。供电部分主要是由小型恒流 LED 电源驱动器与电源组成。控制部分置于样品室下方,分别设计光源和光谱仪基座以确保光源部分与光谱采集部分的高度以及样品室入射光与出射光高度的一致性。为后期整机设计的内部空间利用率考虑,光源基座的上层布置激光诱导荧光检测系

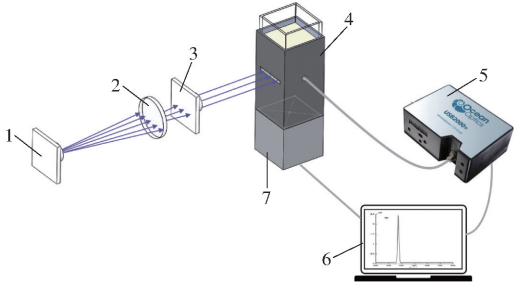


图 1 激光诱导荧光检测系统

Fig. 1 Laser induced fluorescence detection system

1. 紫外 LED 光源 2. 滤光片 3. 准直透镜 4. 样品室 5. 光谱仪 6. 计算机 7. 控制部分

统的光源部分,下层采用中空设计,用于放置开发板。葵花籽油过氧化值检测系统实物如图 2 所示。

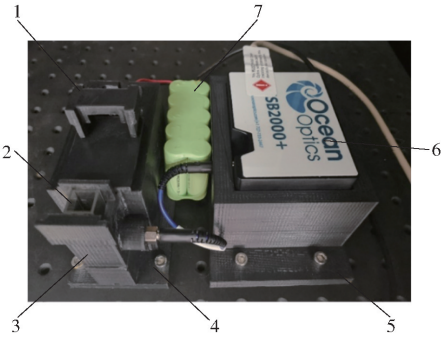


图 2 葵花籽油过氧化值检测系统实物图

Fig.2 Physical drawing of sunflower oil PV testing device
1. 样品室遮光盖 2. 比色皿 3. 样品室 4. 光源基座 5. 光谱仪基座 6. 光谱仪 7. 电池

物质的荧光强度会随着照射时间的增加而下降,即存在荧光褪色效应^[21-22]。葵花籽油荧光光谱采集时间越长,其强度可能越低。为减小荧光褪色效应对实验结果造成的不利影响,基于 LabVIEW 编写了检测系统荧光采集控制软件,实现对光谱采集时间的控制,软件工作流程如图 3 所示。比色皿放入样品室后,在外力作用下触发控制部分,控制部分会发送信号给计算机开始计时并根据预先设定的时间间隔和总时长自动采集和保存光谱数据,达到设定总时长光谱采集自动停止并以 .txt 格式保存。通过 Matlab 软件对光谱数据进行预处理后建立模型,并将最优过氧化值模型以 .m 文件格式导出。当对未知葵花籽油样品进行预测时,利用 LabVIEW 调用最优模型文件进行实时过氧化值预测。

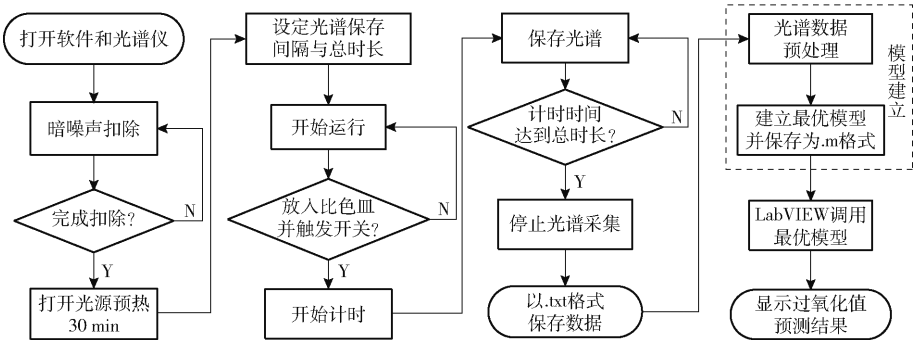


图 3 激光诱导荧光光谱采集系统软件工作流程图

Fig.3 Block diagram of software in LIF spectrum acquisition system

为确保系统可靠性,样品室中放入空白比色皿采集了光谱响应,如图 4a 所示。仅在光源 365 nm 处存在峰值,说明背景光谱无其他信号干扰。基于自行搭建的激光诱导荧光检测系统采集不同氧化程度的葵花籽油荧光光谱如图 4b 所示。可以看到,当葵花籽油受到 365 nm 紫外光照射时,在 440、495、520、680 nm 附近产生荧光特征峰,且随着过氧化值增加,其荧光强度呈现递减趋势。在 400 ~ 600 nm 范围内荧光强度的衰减最显著,其中 520 nm 附近的荧光特征峰应该是由葵花籽油中的维生素 E 产生的^[23]。680 nm 附近叶绿素的荧光光谱强度随氧化程度的增加而降低,即葵花籽油中的叶绿素也会随着氧化的进行而被破坏。以上说明,基于自行搭建的激光诱导荧光检测系统能够较好地反映荧光光谱强度随葵花籽油过氧化值的变化,而且完全可以检测到国家标准限定值 0.25 g/(100 g) 以下的葵花籽油过氧化值。

为探究荧光褪色效应对葵花籽油荧光强度的影响,基于自行搭建的系统每隔 10 s 自动采集过氧化值为 0.12 g/(100 g) 的葵花籽油荧光光谱,共连续采集荧光光谱 7 条。葵花籽油激光诱导荧光光谱随

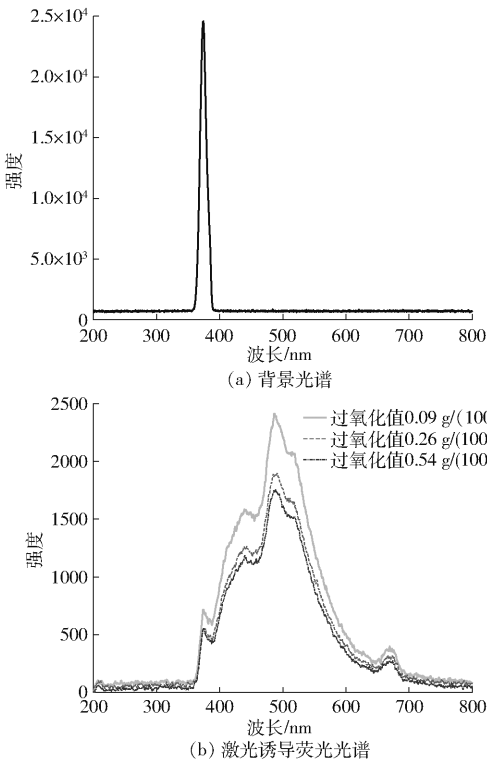


图 4 背景光谱与葵花籽油荧光光谱

Fig.4 Background spectrum and sunflower oil fluorescence
时间的荧光响应如图 5 所示。1 s 时在 430 ~ 468 nm

和 480 ~ 520 nm 范围内的光谱强度明显高于 10 s 至 60 s 时的光谱强度。因此,在后续的研究中均将荧光光谱采集时间设定为 1 s。

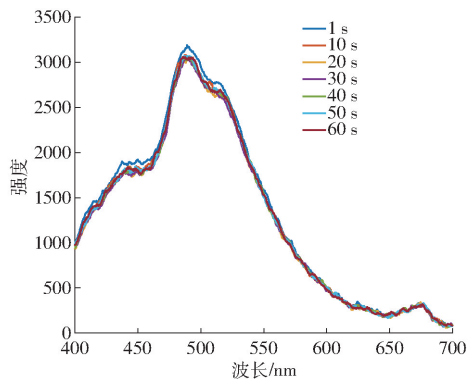


图 5 葵花籽油 LIF 光谱随光谱采集时间的变化曲线
Fig. 5 Change of LIF spectrum of sunflower oil with spectral acquisition time

3 结果与讨论

3.1 葵花籽油过氧化值理化分析

通过不同氧化处理制备得到 80 个葵花籽油样品并测定其过氧化值标准理化值。80 个样品过氧化值范围为 0.03 ~ 1.19 g/(100 g), 平均值为 0.39 g/(100 g), 中位数为 0.30 g/(100 g)。

3.2 葵花籽油荧光光谱预处理及分析

采集光谱前先将自行搭建的食用油激光诱导荧光检测系统预热 30 min, 积分时间设定为 100 ms, 设

置光谱采集时间为 1 s, 每个样品采集 3 次光谱, 取 3 次的平均值作为该样品的原始光谱。80 个葵花籽油样品的原始光谱如图 6a 所示。

因原始荧光光谱噪声较大, 采用 SG (Savitzky - Golay) 滤波对其进行平滑。葵花籽油的粘度会随着氧化程度的加深而逐渐增加, 可能导致各个样品之间的光程产生差异。此外, 不同葵花籽油样品的光谱基线会发生不同程度的漂移。为减小上述干扰对建模结果造成的不利影响, 分别对原始荧光光谱进行多元散射校正 (Multiplication scattering correction, MSC)、光路长度估计与校正^[24] (Optical path-length estimation and correction, OPLEC)、标准正态变量变换 (Standard normal variable transform, SNV) 预处理。MSC 预处理以所有样品光谱的平均光谱作为理想值, 将每个光谱相对于平均光谱的变化分为偏移 (斜率) 变化和平移 (截距) 变化, 根据此来校正原始光谱, 校正后的光谱如图 6b 所示。可以看出, 经过 MSC 预处理后的光谱较好地消除了不同葵花籽油光谱的基线漂移。OPLEC 利用正交投影的性质, 将光散射效应从原始光谱中分离出来, 仅保留与化学成分有关的光谱变化。从图 6c 可以看出, 荧光光谱在 450 ~ 700 nm 范围内被分为等间隔的几段。SNV 预处理是在各个波长点的光谱值满足正态分布的前提下进行的, 对原始光谱数据进行了标准化, 处理后的荧光光谱变化趋势与 MSC

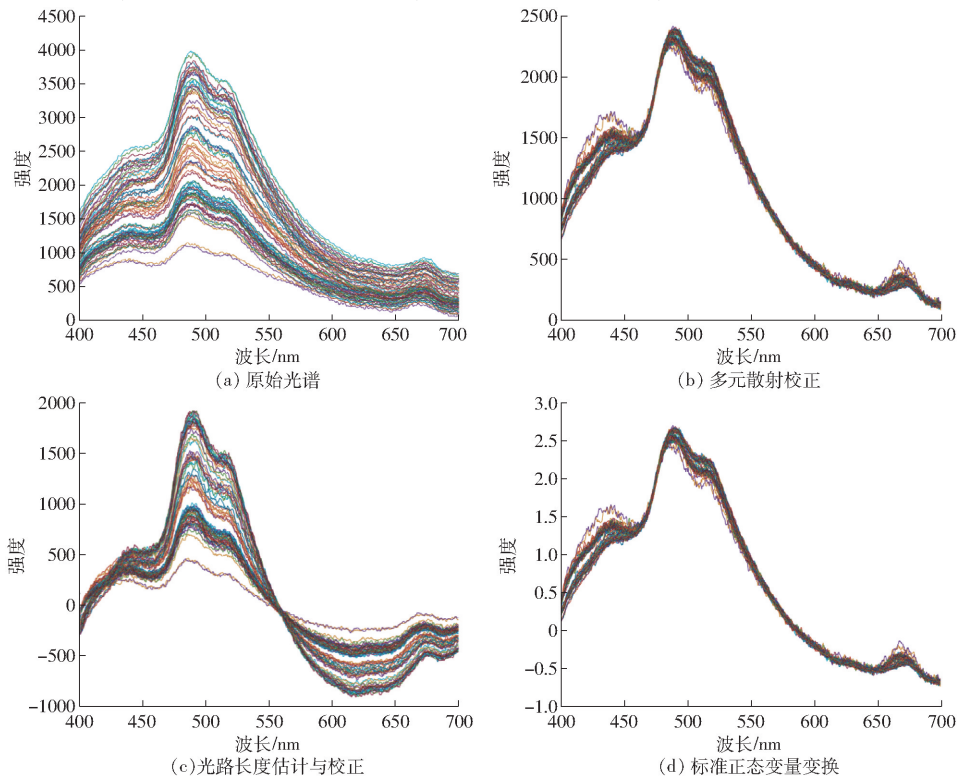


图 6 葵花籽油预处理 LIF 光谱

Fig. 6 Pre-processed LIF spectra of sunflower oil

类似,如图 6d 所示。

利用 CARS^[25] (竞争自适应重加权) 算法对葵花籽油原始光谱的波长进行筛选,提取标准化权重最大的前 6 个,其由大到小排列为 440、580、495、680、520、458 nm。其中,440、680、520 nm 处对应的荧光特征物质为共轭氢过氧化物、叶绿素和维生素 E (或它的衍生物)。可以看出在氧化过程中,葵花籽油中共轭氢过氧化物产生的荧光信号与过氧化值最为相关,而叶绿素和维生素 E 的含量也间接反映过氧化值的变化。

3.3 葵花籽油过氧化值预测模型建立

利用 SPXY (Sample set partitioning based on joint X-Y distance) 算法,将 80 个葵花籽油样品按 3:1 划分为校正集和预测集,经不同的预处理光谱并结合 CARS 筛选波长后,选取合适的潜变量个数建立 PLS 回归模型。原始光谱和 3 种预处理后的光谱建模得到的预测均方根误差随潜变量个数的变化如图 7 所示。原始光谱、MSC 和 OPLEC 预处理建模选取的最佳潜变量个数分别为 10、7、9。经 SNV 预处理后的荧光光谱共线性加剧,最终选取的潜变量个数为 5。

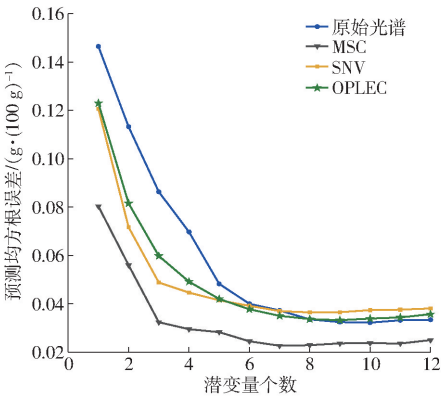


图 7 预测均方根误差随潜变量个数的变化曲线
Fig. 7 Plot of RMSEP vs number of latent variables

基于最佳潜变量个数建立的葵花籽油过氧化值 PLS (偏最小二乘) 回归预测模型如表 1 所示。经 OPLEC、SNV、MSC 预处理后的建模结果均与原始光谱相差不大,这也说明自行搭建的食用油过氧化值激光诱导荧光光谱采集系统比较稳定可靠。其中经 OPLEC、SNV 预处理后的葵花籽油过氧化值预测模型决定系数略小于原始光谱,均方根误差略大于原始光谱。只有经 MSC 预处理后预测模型其校正集决定系数 R_c^2 、预测集决定系数 R_p^2 分别为 0.999 5、0.997 2,均方根误差分别为 0.008 8、0.022 7 g/(100 g),优于原始光谱,其散点图如图 8 所示。MSC 预处理从“加法效应”和“乘法效应”两个出发点分别校正光谱在截距和斜率上发生的畸

变,因此较其他两种预处理方法具有更佳的校正效果。

表 1 不同预处理方法的过氧化值模型结果

Tab. 1 Results of PV model built on different pre-processing methods

预处理方法	潜变量个数	校正集均方根		验证集均方根	
		R_c^2	误差/ ($\text{g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$)	R_p^2	误差/ ($\text{g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$)
原始光谱	10	0.999 6	0.007 3	0.996 0	0.032 2
MSC	7	0.999 5	0.008 8	0.997 2	0.022 7
OPLEC	9	0.998 0	0.007 0	0.992 4	0.033 3
SNV	5	0.999 2	0.011 6	0.984 1	0.037 0

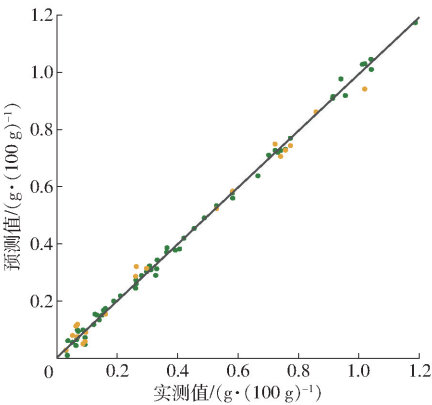


图 8 最优过氧化值预测模型结果

Fig. 8 Results of optimal PV prediction model

3.4 葵花籽油过氧化值快速检测系统外部验证

选取 10 个未参与建模的葵花籽油样品对过氧化值定量预测模型进行外部验证。过氧化值预测值与理化测定值的 R^2 为 0.968 1,均方根误差为 0.041 1 g/(100 g),如图 9a 所示。过氧化值在 0.30~0.80 g/(100 g) 范围内的预测残差较小,在低于国标限 0.25 g/(100 g) 的残差绝对值均在 0.08 g/(100 g) 以下,如图 9b 所示。结果显示,利用激光诱导荧光技术结合 PLS 回归模型能够以较高的精度和准确性实现对葵花籽油过氧化值的快速检测。

4 结束语

针对食用油在产销链中品质监测的实用需求,搭建了基于激光诱导荧光光谱的食用油过氧化值快速检测系统,建立了葵花籽油过氧化值定量预测模型并进行了外部验证。结果表明,经 SG 平滑加 MSC 预处理结合 CARS 算法筛选荧光特征波长后建立的过氧化值 PLS 定量预测模型效果最佳, R_c^2 和 R_p^2 分别为 0.999 5 和 0.997 2,校正集均方根误差和验证集均方根误差分别为 0.008 8 g/(100 g) 和 0.022 7 g/(100 g)。同时,选取 10 个未参与建模的

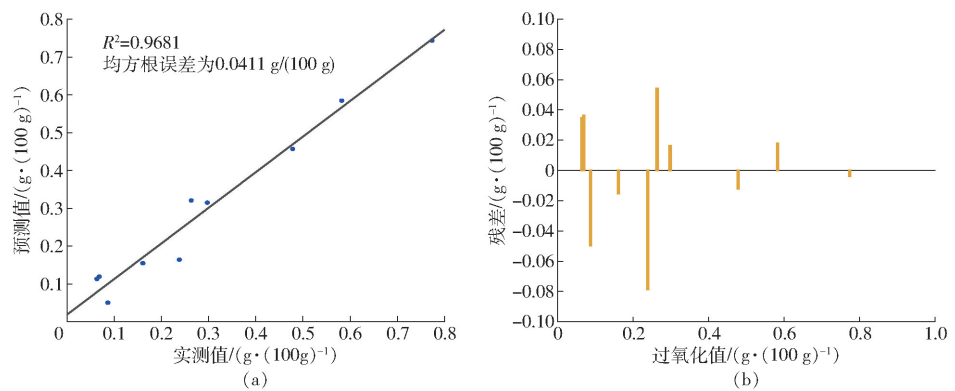


图 9 预测模型外部验证结果

Fig. 9 External verification results of prediction model

葵花籽油样品对过氧化值定量模型进行外部验证,过氧化值预测值与理化测定值拟合的 R^2 为 0.968 1,均方根误差为 0.041 1 g/(100 g),在低于国标限 0.25 g/(100 g) 的残差绝对值均在 0.08 g/(100 g) 以下。结果表明,所搭建系统可以实现对葵花籽油过氧化值的无损、快速、实时预测,为后续便携式整机设计和食用油氧化预警系统构建提供技术支持。

参 考 文 献

[1] ŠKORIĆ D, JOCIĆ S, SAKAČ Z, et al. Genetic possibilities for altering sunflower oil quality to obtain novel oils[J]. Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 2008, 86(4): 215–221.

[2] 何雅雯, 李孟俊, 于修烛, 等. 不同食用油氧化稳定性比较研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(3): 44–49.

HE Yawen, LI Mengjun, YU Xiuzhu, et al. Comparison of oxidative stabilities of different edible oils[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(3): 44–49. (in Chinese)

[3] 杜馨, 孙晓荣, 刘翠玲, 等. 拉曼光谱结合偏最小二乘法对食用油品质快速检测研究[J]. 中国酿造, 2019, 38(12): 171–174.

DU Xin, SUN Xiaorong, LIU Cuiling, et al. Rapid detection of edible oil quality by Raman spectroscopy combined with partial least squares[J]. China Brewing, 2019, 38(12): 171–174. (in Chinese)

[4] WOJCICKI K, KHMELINSKII I, SIKORSKI M, et al. Near and mid infrared spectroscopy and multivariate data analysis in studies of oxidation of edible oils[J]. Food Chemistry, 2015, 187(15): 416–423.

[5] 李雪, 曹君, 白新鹏, 等. 同步荧光法监控人乳脂质替代品氧化过程[J]. 分析化学, 2018, 46(4): 543–549.

LI Xue, CAO Jun, BAI Xinpeng, et al. Monitoring of oxidation process of human milk lipid substitutes by molecular fluorescence spectroscopy[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2018, 46(4): 543–549. (in Chinese)

[6] 张微微, 孙艳辉, 顾海洋, 等. 基于同步荧光光谱与化学计量学快速分析花生油氧化规律[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(10): 3113–3117.

ZHANG Weiwei, SUN Yanhui, GU Haiyang, et al. Application of synchronous fluorescence spectroscopy and chemometric models for rapid evaluating peanut oil oxidative stability[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(10): 3113–3117. (in Chinese)

[7] VINCENT R, RIZA D F A, GIAMETTA F, et al. Thermal oxidation assessment of Italian extra virgin olive oil using an UltraViolet (UV) induced fluorescence imaging system [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 237: 118373.

[8] LIU H, CHEN Y, SHI C, et al. FT-IR and Raman spectroscopy data fusion with chemometrics for simultaneous determination of chemical quality indices of edible oils during thermal oxidation[J]. LWT—Food Science and Technology, 2019, 119: 108906.

[9] MANZANO J D, PEÑA A M D L, MERÁS I D. Front-face fluorescence combined with second-order multiway classification, based on polyphenol and chlorophyll compounds, for virgin olive oil monitoring under different photo- and thermal-oxidation procedures[J]. Food Analytical Methods, 2019, 12(6): 1399–1411.

[10] GUZMÁN E, BAETEN V, PIERNA J A F, et al. Evaluation of the overall quality of olive oil using fluorescence spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2015, 173(15): 927–934.

[11] GU H, SUN Y. Enhancing the fluorescence spectrum of frying oil using a nanoscale probe[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2019, 218: 27–32.

[12] CAO J, LI C, LIU R, et al. Combined application of fluorescence spectroscopy and chemometrics analysis in oxidative deterioration of edible oils[J]. Food Analytical Methods, 2016, 10(3): 649–658.

- [13] POULLI K I, MOUSDIS G A, GEORGIOUS C A. Monitoring olive oil oxidation under thermal and UV stress through synchronous fluorescence spectroscopy and classical assays[J]. Food Chemistry, 2009, 117(3):499–503.
- [14] 孙艳辉, 李双芳, 郭玉宝, 等. 基于荧光光谱技术的菜籽油氧化状态智能评价[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(1): 137–141.
SUN Yanhui, LI Shuangfang, GUO Yubao, et al. Intelligent evaluation of rapeseed oil oxidation state based on fluorescence spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(1): 137–141. (in Chinese)
- [15] 孙艳辉, 蔡华珍, 贾小丽, 等. 菜籽油热氧化过程中荧光光谱特征的变化研究[J]. 分析化学, 2013, 41(9):1373–1377.
SUN Yanhui, CAI Huazhen, JIA Xiaoli, et al. Fluorescence spectroscopy characteristics of rapeseed oil during thermal oxidation[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2013, 41(9): 1373–1377. (in Chinese)
- [16] GU H, SUN Y, LIU S, et al. A feasibility study of the rapid evaluation of oil oxidation using synchronous fluorescence spectroscopy[J]. Food Analytical Methods, 2018, 11(12): 3464–3470.
- [17] BOTOSO A P, CHÈNÉ C, KAROUI R. Front face fluorescence spectroscopy combined with PLS–DA allows to monitor chemical changes of edible vegetable oils during storage at 60°C[J]. Eur. J. Lipid Sci. Technol., 2021, 123: 2000088.
- [18] ZHANG W, LV R, SUN Y, et al. Fast evaluation peanut oil quality by synchronous fluorescence spectroscopy and statistical analysis[J]. Agricultural Science, 2021, 12: 565–574.
- [19] SIKORSKA E, ROMANIUK A, KHMELINSKII I, et al. Characterization of edible oils using synchronous scanning fluorescence spectroscopy[J]. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2003, 12(SI 2):108–112.
- [20] SIKORSKA E, WÓJCICKI K, KOZAK W, et al. Front-face fluorescence spectroscopy and chemometrics for quality control of cold-pressed rapeseed oil during storage[J]. Foods, 2019, 8(12): 1399–1411.
- [21] 朱磊磊, 冯爱明, 金尚忠, 等. 拉曼光谱检测中荧光抑制方法及其应用分析[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 58–69.
ZHU Leilei, FENG Aiming, JIN Shangzhong, et al. Fluorescence suppression methods in Raman spectroscopy detection and their application analysis[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 58–69. (in Chinese)
- [22] 姚志湘, 粟晖, 韩莹, 等. 荧光褪色效应与拉曼光谱基线干扰消除[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(7): 2034–2039.
YAO Zhixiang, SU Hui, HAN Ying, et al. Fluorescence fading effect and Raman spectrum baseline interference cancellation [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(7): 2034–2039. (in Chinese)
- [23] GONÇALVES R P, MARÇO P H, VALDERRAMA P. Thermal edible oil evaluation by UV–Vis spectroscopy and chemometrics[J]. Food Chemistry, 2014, 163(15):83–86.
- [24] CHEN Z, MORRIS J, MARTIN E. Extracting chemical information from spectral data with multiplicative light scattering effects by optical path-length estimation and correction[J]. Analytical Chemistry, 2006, 78(22): 7674–7681.
- [25] LI H, LIANG Y, XU Q, et al. Key wavelengths screening using competitive adaptive reweighted sampling method for multivariate calibration[J]. Analytica Chimica Acta, 2009, 648(1):77–84.