

山茶油多元掺假近红外模型的建立与研究

姚婉清*, 彭梦侠, 陈梓云, 张家蔓, 林量谦, 甘海昌

(嘉应学院化学与环境学院, 梅州 514015)

摘要: **目的** 建立基于近红外光谱结合偏最小二乘法的山茶油、花生油和玉米油多元掺假模型。**方法** 通过对比不同建模光谱波段、预处理方法对模型进行优化研究, 确定最优的山茶油、花生油和玉米油多元掺假模型。**结果** 所建模型性能指数均大于 0.99, 校正集和预测集的均方差在 0.6 以内。经未知掺假样品的外部验证, 预测值与实测值之间有良好的相关性, 二元掺假模型预测值的相对误差在 1%以内, 三元掺假在 6%以内, 验证结果良好。**结论** 近红外光谱结合偏最小二乘法的检测技术快速、有效、环保, 可用于定量检测山茶油的掺假。

关键词: 山茶油; 掺假检测; 近红外光谱; 多元掺假; 模型优化

Establishment and study of camellia oil multiple adulteration near-infrared model

YAO Wan-Qing¹, PENG Meng-Xia, CHEN Zi-Yun, ZHANG Jia-Man,
LIN Liang-Qian, GAN Hai-Chang

(School of Chemistry and Environment, Jiaying University, Meizhou 514015, China)

ABSTRACT: Objective To establish a multiple adulteration model of camellia oil, peanut oil and corn oil based on near-infrared spectroscopy combined with partial least squares method. **Methods** The model was optimized by comparing different spectral bands and pretreatment methods. The optimal multiple adulteration model of camellia oil, peanut oil and corn oil was determined. **Results** The performance indexes of the models were all greater than 0.99, and the mean variance of the correction set and prediction set was within 0.6. After the external verification of unknown adulteration samples, there was a good correlation between the predicted value and the measured value. The relative error of the predicted value of the binary adulteration model was within 1%, the ternary adulteration was within 6%, and the verification results are good. **Conclusion** Near-infrared spectroscopy combined with partial least square method is fast, effective and environmentally friendly, which can be used for quantitative detection of adulteration of camellia oil.

KEY WORDS: camellia oil; near infrared spectroscopy; adulteration detection; multiple adulteration; model optimization

基金项目: 2018 广东省大学生创新创业项目、2019 年嘉应学院重点科研项目(2019KJZ02)

Fund: Supported by the 2018 Guangdong University Student Innovation and Entrepreneurship Project, and 2019 Key Research Projects of Jiaying University (2019KJZ02)

*通讯作者: 姚婉清, 硕士, 主要研究方向为应用化学、分析化学, 化学教学及研究。E-mail: 627744294@qq.com

*Corresponding author: YAO Wan-Qing, Master, School of Chemistry and Environment, Jiaying University, Meizhou 514015, China. E-mail: 627744294@qq.com

1 引言

山茶油是从山茶科油茶树种子中榨取所得,又名茶籽油、茶油,是我国特有的木本植物油脂,其脂肪酸组成、物理和化学常数与橄榄油相似,被誉为是“东方橄榄油”^[1]。国标规定山茶油中人体生长和生理活动必须的不饱和脂肪酸(油酸达 70%以上,亚油酸达 10%以上)含量达 68%~88%,高于其他天然植物油^[2]。山茶油其他功能性成分,对于心血管系统的维护、人体免疫力的提高、胆固醇的降低和高血压的预防等有明显的疗效^[3]。同时山茶油在食品、医药、化妆品、化工等行业有很高的营养价值和应用潜力^[4]。

市场上销售的山茶油品质不一,甚至有些不法商家掺入低价食用油以次充好,损害了消费者利益^[5]。目前,对山茶油品质的检验主要按照 GB/7 11765-2018《油茶籽油》山茶油的特征指标脂肪酸组成及含量作为判定依据,采用液相色谱、气相色谱、气相质谱、核磁共振等方法,成本较高,耗时且破坏样品^[6,7]。近红外光谱技术(near infrared spectroscopy, NIR)是光谱测量技术与化学计量学学科的有机结合,在多个领域内成为行业产品质量评定的标准技术^[8]。近年近红外光谱检测技术在食用油品质指标和掺假鉴别上也有相关的研究^[9],如对橄榄油^[10]、芝麻油^[11,12]、山茶油^[13]、火麻油^[14]、菜籽油^[15]等的品质指标对比和掺假鉴定分析。针对食用油无损掺假鉴别,国内外学者研究较多的是橄榄油掺假的定性和定量鉴别,且已有一定的应用,这些为山茶油的掺假研究奠定了基础。经查阅大量的文献,针对山茶油掺假近红外模型无损检测的研究主要集中在二元体系,即掺入一种食品油,同时掺入 2 种食品油以上的多元体系掺假的研究较少。如莫欣欣等^[16]采用近红外光谱结合最小二乘支持向量机建模方法,对油茶籽油掺有菜籽油和花生油的三元体系样本进行建模,菜籽油、花生油和总掺伪量的预测集性能指数和预测均方根误差分别为 0.963, 0.982, 0.993 和 2.1%, 1.5%, 1.8%, 说明此方法可用于油茶籽油的三元体系掺假定量检测。

本研究利用近红外光谱结合化学计量学方法中的偏最小二乘法(partial least square, PLS),对掺有花生油、玉米油的山茶油二元/三元掺假样品进行定量检测分析,通过对不同建模特征波段范围和光谱预处理方法进行优化研究,建立预测性能较优的掺假山茶油近红外光谱模型,为山茶油多元体系掺假鉴定提供一种便捷、高效、批量、绿色的定量分析方法。

2 材料与方法

2.1 实验样本

实验所用的山茶油、玉米油和花生油均由当地食品药品监督管理局检验所推荐购买。实验分别配制掺入不同质量比例的玉米油和花生油的二元体系茶油掺假样品,掺入质量比

例在 2%~55%范围内,比例梯度约为 2%,混合均匀。2 种二元体系山茶油掺假样品量各有 44 个,随机选取各 34 个作为建模训练集 10 个为预测集。

配制掺入不同质量比的花生油、玉米油的三元体系山茶油样品 74 个,玉米油与花生油的质量比例在 2%~55%范围内,比例梯度约为 2%,混合均匀。样品随机分配为训练集和预测集,具体见表 1。

2.2 实验仪器

ME104E/02 电子天平(上海梅特勒-托利多仪器有限公司); NICOLET IS 10 傅立叶变换红外光谱仪(美国尼高力仪器公司); TQ Analyst 9.0 软件、Ominic 9.0 软件(美国赛默飞世尔科技公司)。

2.3 近红外光谱采集

采用 Antaris 透射分析模块采集样品光谱,编辑 RESULT-Integration 光谱采集 workflow 直接对样品进行近红外光谱的采集:光谱分辨率 8 cm^{-1} ,扫描次数 64 次,扫描波数 $10000\sim 4000\text{ cm}^{-1}$,4 倍增益,以空白背景作为参比。样品置于 6 mm 玻璃样品管容积的 2/3,每个样品平行扫描采集 5 张光谱(同一样品重新装样),取其平均光谱为样品光谱,保存,待分析。

2.4 数据处理

将采集的光谱图导入 TQ Analyst 9.0 软件,首先采用偏最小二乘法在不同波段范围分别建立二元/三元掺假山茶油预测模型,比较模型精度确定最优建模特征波段;其次,采用不同的光谱预处理方法对所建模型进行优化并确定最佳预处理方法。最后,基于未参与建模样品的外部验证效果对模型的预测能力进行评判。

定量分析模型的精度衡量标准主要有校正集性能指数(correlation coefficient, R_c)、校正均方差(root mean square error of calibration, RMSEC);预测集性能指数(prediction coefficient, R_p),预测均方根误差(root mean square error of prediction, RMSEP);交叉验证集性能指数(cross-validation coefficient, R_{cv})和交叉验证均方差(root mean square error of cross validation, RMSECV),所建模型不但要有较高的性能指数,较小的 RMSEC、RMSEP 和 RMSECV,而且 3 种均方差之间的差要尽可能小,这样所建模型精度越高,预测能力越好。

3 结果与分析

3.1 谱图分析和特征波段的选择

图 1 所示是所有样品在 $10000\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 波数的近红外谱图,其中,由于样本在 $4400\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 属于高吸收区,吸收强度可能与成分比例之间存在非线性关系,因此,建模忽略此波段。 $5750\sim 6000\text{ cm}^{-1}$ 谱带是脂肪烃, CH_2 , CH_3

以及 C=CH 伸缩振动的一级倍频, 8200 cm^{-1} 谱带附近是二级倍频, 而油酸和亚油酸结构中均含有以上 4 种基团。 $7000\sim 7200\text{ cm}^{-1}$ 谱带是脂肪酸 O-H 的一级倍频^[17]。近红外光谱属于分子振动光谱, 波段、光谱波峰或波谷等都与样

品内部化学成分的官能团有关^[18], 不同食用油的脂肪酸组成和含量不同, 因此, 不同比例的掺假山茶油样品脂肪酸的组成和含量不同, 吸收峰强度也不同, 这也是掺假山茶油定量分析的依据。

表 1 多元体系掺假山茶油样品的统计结果
Table 1 Statistical results of adulterated camellia oil samples in multiple systems

掺假类型	混合体系	样品数	山茶油质量分数/%
玉米油	训练样品集	34	50.00~98.00
	预测样品集	10	55.88~94.40
花生油	训练样品集	34	50.00~98.00
	预测样品集	10	52.50~94.70
花生油和玉米油	训练样品集	58	45.00~95.00
	预测样品集	16	45.10~85.70

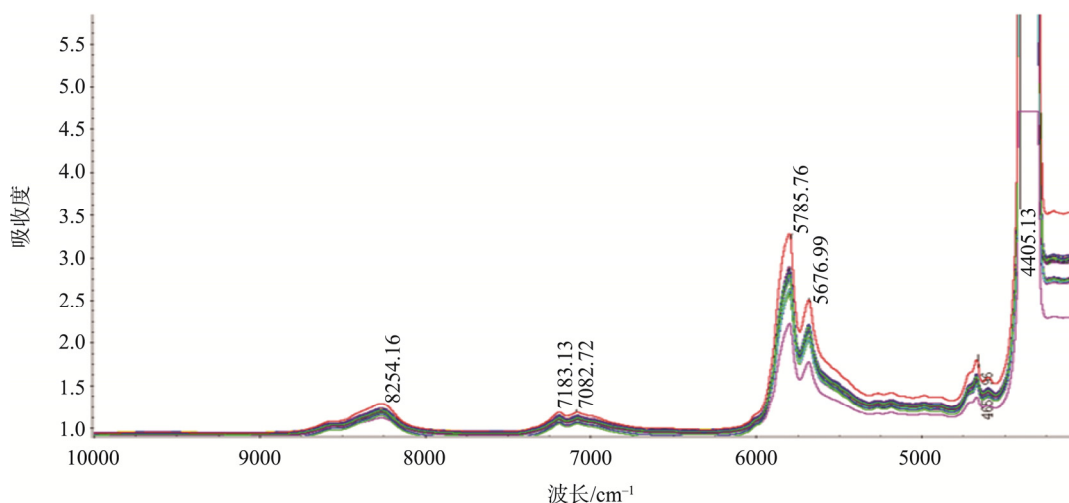


图 1 所有样品的近红外光谱图

Fig.1 Near infrared spectroscopy of all samples

建模波段如果过宽, 会夹杂其他冗长信息, 不同成分分子存在差异, 因此为提高模型精度, 掺假模型的最佳建模波段也不相同。综合考虑各种样品主要成分在近红外的吸收情况, 采用 PLS 回归方法建立模型, 通过反复调整建模波段并对比衡量标准, 最终选择表 2 所列最佳波段作为掺假山茶油上鉴别的特征波长, 模型校正集和交互验证的结果见表 2, 性能指数均大于 0.998, 均方差不超过 1。

3.2 预处理方法的选择

样品本身物理性质、环境因素、高频仪器自身噪音等因素会影响样品红外谱图的采集, 引起基线漂移和光谱重现性较差等问题, 因此需采用预处理方法消除噪声^[19]。一阶导数和二阶导数可降低光谱峰的偏移和飘移, SG(Savitzky-Golay filter)和 Nd(Norris-derivative filter)滤波可对光谱进行平滑处理。在选择最佳光谱波段的基础上, 对样品进行不同的预处理, 采用 PLS 方法分别建立多元掺

假体系的山茶油掺假预测模型, 所建模型的校正集、预测集和交叉验证集的结果见表 3、表 4 和表 5。由表可知, 不同预处理方法建立的模型性能指数都达到 0.99 以上, 均方差也在较低的范围, 预测效果均没有明显差别。但是细比之下, 各模型还是有优劣之分。采用原光谱或者原光谱+SG 平滑得到的模型预测效果相对比较差, 单独采用一阶导数或者二阶导数处理, 虽然可提高光谱分辨率, 但模型预测能力也不佳, 说明 SG 和 Nd 平滑处理可提高信噪比, 减少随机噪音。另外, 由表还发现, 相同阶数情况下, Nd 平滑方法优于 SG 平滑。通过预测模型的精度衡量标准, 掺有玉米油、花生油的二元体系山茶油掺假模型最优预处理方法都是一阶导数+Nd, 二阶导数处理的图谱使光谱差异更明显, 但也放大了噪声信息, 反而使预测能力下降, 而掺有玉米油和花生油的三元体系山茶油掺假模型采用二阶导数+Nd 的预处理方法, 所建模型的预测能力较高。

表 2 最佳波段所建掺假模型结果
Table 2 Results of the adulteration model of the optimal band

掺假类型	波段/cm ⁻¹	R_c	$RMSEC$	R_p	$RMSEP$	R_{CV}	$RMSECV$
玉米油	4844.31~4466.33	0.9998	0.269	0.9995	0.592	0.9997	0.466
	5900.00~5700.00						
花生油	8570.11~7914.43	0.9996	0.434	0.9996	0.534	0.9990	0.662
	4690.03~4574.32						
	5222.29~4697.75						
花生油和玉米油	6503.27~6316.85	0.9993	0.517	0.9985	0.536	0.9983	0.789
	5114.29~4882.88						
	6618.50~5129.72						
	7328.17~6633.93						
	8639.53~7875.86						

表 3 不同光谱预处理的掺入玉米油的山茶油掺假样品建模结果比较

Table 3 Comparing of models established in different spectral pretreatments for camellia oil adulterated with corn oil

光谱预处理	R_c	$RMSEC$	$RMSEP$	R_{CV}	$RMSECV$
原光谱	0.9995	0.446	0.679	0.9991	0.613
原光谱+SG	0.9995	0.448	0.680	0.9991	0.616
一阶导数	0.9996	0.397	0.713	0.9992	0.570
一阶导数+SG	0.9996	0.394	0.718	0.9993	0.553
一阶导数+Nd	0.9998	0.269	0.584	0.9997	0.366
二阶导数	0.9997	0.369	0.771	0.9985	0.791
二阶导数+SG	0.9998	0.304	0.699	0.9994	0.513
二阶导数+Nd	0.9998	0.274	0.588	0.9996	0.380

表 4 不同光谱预处理的掺入花生油的山茶油掺假样品建模结果比较

Table 4 Comparing of models established in different spectral pretreatments for camellia oil adulterated with peanut oil

光谱预处理	R_c	$RMSEC$	$RMSEP$	R_{CV}	$RMSECV$
原光谱	0.9990	0.649	1.61	0.9984	0.828
原光谱+SG	0.9995	0.469	0.736	0.9988	0.730
一阶导数	0.9994	0.488	0.750	0.9993	0.567
一阶导数+SG	0.9995	0.470	0.665	0.9993	0.542
一阶导数+Nd	0.9996	0.416	0.520	0.9993	0.504
二阶导数	0.9994	0.453	0.849	0.9990	0.553
二阶导数+SG	0.9995	0.421	0.568	0.9992	0.581
二阶导数+Nd	0.9996	0.447	0.526	0.9990	0.562

3.3 模型的建立

选择最佳建模特征波段, 最佳光谱预处理方法, 采用偏最小二乘法(PLS)建立二元和三元掺假山茶油的最优 NIR 模型, 所建模型的校正集、预测集和交互验证结果见表 6, 分别掺入玉米油、花生油、玉米油和花生油的二元和三元掺假山茶油模型预测效果是: 校正集性能指数 R_c 分别为 0.9999、0.9999、0.9998, $RMSEC$ 分别为 0.205、0.246、0.288; 预测集性能指数 R_p 分别是 0.9987、0.9989、0.9998, $RMSEP$ 分别为 0.584、0.520、0.505; 交叉验证集性能指数 R_{CV} 分别为 0.9996、0.99976、0.9995, $RMSECV$ 分别 0.416、0.385、0.431。由以上数据可知, 所建 3 个掺假模型各性能指数均最佳, 均方根误差较小, 模型的预测精度高, 有较好的预测效果。

3.4 模型的验证

将随机分配的未参与建模的各 10 个二元掺假山茶油样品, 以及 16 个三元掺假山茶油样品导入所建 PLS 模型中, 预测山茶油或者掺假油的含量, 以此验证模型的预测能力。外部验证结果见表 7~9, 掺入玉米油的山茶油掺假样品(含山茶油质量分数为 49.88%~94.90%), 预测的山茶油质量分数为 49.63%~94.80%, 相对误差为 -0.92%~0.07%; 掺入花生油的山茶油掺假样品(含山茶

油质量分数为 52.50%~94.77%), 预测的山茶油质量分数为 52.66%~93.86%, 相对误差为 -0.96%~-0.05%; 掺入玉米油和花生油的三元掺假山茶油样品, 预测的掺入玉米油含量相对误差为 -3.58%~4.56%, 预测的掺入花生油含量相对误差为 -5.26%~5.75%。所建二元掺假模型验证集样品预测值和真值之间的相关性较高, 而三元掺假模型的预测准确度稍微较低, 但是相对误差绝对值也在 6% 以内。结果表明, 所建多元掺假模型可很好地预测体系中的掺假量。

4 结 论

分别以掺入不同质量比例的玉米油或花生油的二元掺假山茶油样品, 玉米油和花生油的三元掺假山茶油样品为研究对象, 应用傅里叶变换近红外透射光谱结合化学计量学中偏最小二乘法分别建立定量分析模型。分析了不同的建模特征光谱波长和光谱预处理方法对模型精度的影响, 建立了预测效果较好、具有实用意义的掺假定量模型。通过未知掺假样品的外部验证, 模型所得的预测值相对误差较小, 与真值没有显著性差异。说明近红外光谱结合偏最小二乘法能实现定量分析多元体系掺假山茶油中山茶油或者掺假油的含量, 为山茶油掺假提供了一种快速有效、批量绿色检测的定量分析模型。

表 5 不同光谱预处理的掺入玉米、花生油的山茶油掺假样品建模结果比较

Table 5 Comparing of models established in different spectral pretreatments for camellia oil adulterated with corn oil and peanut oil

光谱预处理	R_c	$RMSEC$	$RMSEP$	R_{CV}	$RMSECV$
原光谱	0.9971	1.01	0.652	0.9945	1.37
原光谱+SG	0.9973	1.01	0.652	0.9950	1.37
一阶导数	0.9988	0.670	0.693	0.9965	1.14
一阶导数+SG	0.9992	0.544	0.541	0.9978	0.917
一阶导数+Nd	0.9994	0.486	0.455	0.9986	0.719
二阶导数	0.9900	1.94	2.15	0.9730	3.18
二阶导数+SG	0.9990	0.619	0.653	0.9972	1.03
二阶导数+Nd	0.9996	0.402	0.505	0.9991	0.593

表 6 多元体系掺假样品最优条件建模结果

Table 6 Model performance of optimal conditions for adulterated samples in multiple mixtures

掺假类型	预处理方法	波段/ cm^{-1}	R_c	$RMSEC$	R_p	$RMSEP$	R_{CV}	$RMSECV$
玉米油	一阶导数 +Nd	4844.31~4466.33	0.9999	0.205	0.9987	0.584	0.9996	0.416
		5900.00~5700.00						
		8570.11~7914.43						
花生油	一阶导数 +Nd	4690.03~4574.32	0.9999	0.246	0.9989	0.520	0.9997	0.385
		5222.29~4697.75						
		6503.27~6316.85						
花生油和 玉米油	二阶导数 +Nd	5114.29~4882.88	0.9998	0.288	0.9998	0.505	0.9995	0.431
		6618.50~5129.72						
		7328.17~6633.93						
		8639.53~7875.86						

表 7 掺入玉米油的山茶油模型的外部验证结果

Table 7 Performance of external validation of model of camellia oil adulterated with corn oil

样品编号	山茶油真值/%	山茶油预测值/%	绝对误差/%	相对误差/%
4	94.90	94.80	-0.1	-0.11
7	86.62	86.54	-0.8	-0.92
19	82.40	82.27	-0.13	-0.16
22	75.48	75.53	0.05	0.07
28	64.45	64.34	-0.11	-0.17
31	58.30	58.21	-0.09	-0.15
35	49.88	49.63	-0.25	-0.50
39	68.35	68.23	-0.12	-0.18
41	80.06	80.02	-0.04	-0.05
43	88.90	88.76	-0.14	-0.16

表 8 掺入花生油的山茶油模型的外部验证结果

Table 8 Performance of external validation of model of camellia oil adulterated with peanut oil

样品编号	山茶油真值/%	山茶油预测值/%	绝对误差/%	相对误差/%
11	94.77	93.86	-0.91	-0.96
12	84.86	84.12	-0.74	-0.88
23	75.09	74.97	-0.12	-0.16
26	70.89	70.17	-0.72	-0.92
29	59.95	59.92	-0.03	-0.05
34	52.50	52.66	0.16	0.30
38	83.83	83.42	-0.41	-0.49
39	79.90	79.36	-0.54	-0.68
42	64.00	63.80	-0.2	-0.31
44	55.88	55.86	-0.02	-0.04

表 9 掺入玉米油和花生油的山茶油模型的外部验证结果

Table 9 Performance of external validation of model of camellia oil adulterated with corn oil and peanut oil

样品编号	玉米油			花生油		
	真值/%	预测值/%	相对误差/%	真值/%	预测值/%	相对误差/%
4	22.22	22.88	2.97	29.89	29.52	-1.23
15	27.36	27.79	1.57	27.56	26.11	-5.26
23	40.66	40.68	0.49	9.93	9.72	-2.11
28	10.33	10.10	-2.22	34.84	34.55	-0.83
31	19.41	19.41	0.00	25.64	25.53	-0.43
32	9.60	9.70	1.04	31.78	32.11	-1.04
45	17.55	16.75	4.56	23.13	24.46	5.75
49	32.01	31.38	1.96	12.55	12.35	-1.59
55	17.58	17.69	0.62	17.72	17.22	-2.82
57	17.58	17.41	-0.97	14.91	15.44	3.55
59	18.75	18.55	-1.06	9.52	10.01	5.15
60	5.10	5.13	0.59	14.06	14.7	4.55
64	5.77	5.65	-2.07	10.60	11.02	3.96
67	8.64	8.33	-3.58	4.99	4.84	-3.00
70	28.81	28.51	1.04	24.35	24.76	1.68
72	39.20	38.54	-1.68	14.59	15.00	2.81

参考文献

- [1] 应向东, 应跃跃. 我国山茶油质量现状及对策研究[J]. 中国科技投资, 2012, (33): 136-137.
Ying XD, Ying YY. Study on the quality status and countermeasures of camellia oil in China [J]. China Sci Technol Invest, 2012, (33): 136-137.
- [2] 原姣姣, 王成章, 陈虹霞, 等. 不同品种油茶籽的含油率和脂肪酸组成分析研究[J]. 中国油脂, 2012, 37(1): 75-79.
Yuan JJ, Wang CZ, Chen HX, *et al.* Analysis and study on oil content and fatty acid composition of camellia oil seeds of different varieties [J]. China Oils Fats, 2012, 37(1): 75-79.
- [3] 张志英. 山茶油抗氧化防辐射活性成分及其机理的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
Zhang ZY. Study on antioxidant and radiation-preventing active ingredients and mechanism of camellia oil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [4] 李雪, 谭运寿, 马贵刚, 等. 山茶籽油研究应用进展[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(11): 191-196.
Li X, Tan YS, Ma GG, *et al.* Research and application progress of camellia oil [J]. J Chin Cere Oils Assoc, 2017, 32(11): 191-196.
- [5] 黄娇丽. 山茶油掺伪检验方法研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
Huang JL. Study on adulteration test method of camellia oil [D]. Nanning: Guangxi University, 2014.
- [6] 刘燕德, 谢庆华. 山茶油品质检测方法现状研究[J]. 食品工业, 2016, 37(6): 253-257.
Liu YD, Xie QH. Research on the current status of quality detection methods for camellia oil [J]. Food Ind, 2016, 37(6): 253-257.
- [7] 严衍禄, 陈斌, 朱大洲, 等. 近红外光谱分析的原理、技术与应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2013.
Yan YL, Chen B, Zhu XD, *et al.* Principle, technology and application of near infrared spectroscopy [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2013.
- [8] 张严. 近红外光谱技术快速鉴别与检测食用油掺伪研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015.
Zhang Y. Rapid identification and detection of adulteration of edible oil by near infrared spectroscopy [D]. Zhengzhou: Henan University of technology, 2015.
- [9] 姚婉清, 彭梦侠, 刘婷. 近红外光谱结合化学计量学方法在化学分析中的应用[J]. 嘉应学院学报, 2018, (5): 17-27.
Yao WQ, Peng MX, Liu T. Application of near-infrared spectroscopy combined with chemometrics in chemical analysis [J]. J Jiaying Univ, 2018, (5): 17-27.
- [10] Mendes TO, Rocha RA, Porto BLS, *et al.* Quantification of extra-virgin olive oil adulteration with soybean oil: A comparative study of NIR, MIR, and Raman spectroscopy associated with chemometric approaches [J]. Food Anal Method, 2015, 8(9): 2339-2346.
- [11] Yang RJ, Xun XS, Wang BH. Adulteration of sesame oil with corn oil detected by use of two-dimensional infrared correlation spectroscopy and multivariate calibration [J]. Spectrosc Lett, 2016, 49(5): 355-361.
- [12] Fadzllillah NA, Che-Man YB, Rohman. NIR spectroscopy combined with chemometric for analysis of sesame oil adulterated with corn oil [J]. Int J Food Prop, 2014, 17(6): 275-1282.
- [13] 褚璇, 王伟, 赵昕, 等. 红外光谱和特征光谱的山茶油掺假鉴别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(1): 75-79.
Zhu X, Wang W, Zhao X, *et al.* Identification of adulteration of camellia oil by infrared and characteristic spectra [J]. Spectrosc Spectr Anal, 2017, 37(1): 75-79.
- [14] 李颖, 元胜, 吕靓, 等. 基于近红外特征变量筛选对火麻油掺杂的快速检测[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018, 46(4): 574-579.
Li Y, Yuan S, Lu L, *et al.* Rapid detection of hemp oil doping based on near-infrared characteristic variable screening [J]. J Fuzhou Univ (Nat Sci Ed), 2018, 46(4): 574-579.
- [15] 李希熙. 基于近红外光谱技术的菜籽油品质快速评价方法的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
Li XX. Study on rapid evaluation method of rapeseed oil quality based on near infrared spectroscopy [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [16] 莫欣欣, 周莹, 孙通, 等. 可见/近红外光谱的油茶籽油三元体系掺假检测模型优化[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(12): 3881-3884.
Mo XX, Zhou Y, Sun T, *et al.* Optimization of detection model for adulteration of camellia oil ternary system by visible/near-infrared spectroscopy [J]. Spectrosc Spectr Anal, 2016, 36(12): 3881-3884.
- [17] 陆婉珍. 现代近红外光谱分析技术(第二版)[M]. 北京: 中国石化出版社, 2006.
Lu WZ. Modern near infrared spectroscopy analysis technology (second edition) [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2006.
- [18] 沃克曼, 文依. 近红外光谱解析实用指南[M]. 褚小立, 许玉鹏, 田高友, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007.
Jerry W, Jr. Lois W. Practical guide for near infrared spectral analysis [M]. Chu XL, Xu YP, Yian GY, translate. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [19] 褚小立. 化学计量学方法与分子光谱分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
Chu XL. Chemometrics and molecular spectroscopy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



姚婉清, 硕士, 主要研究方向为应用化学、分析化学, 化学教学及研究工作。
E-mail: 627744294@qq.com