

基于连续分类策略的动物油红外光谱无损识别

邱薇纶¹, 王晓庆²

(1. 湖南警察学院 刑事科学技术学系, 长沙 410138; 2. 湖南省长沙市公安局望城分局, 长沙 410299)

摘要:为实现对市面上常见以及实际案件中出现的动物油样本进行快速无损识别,借助光谱分析技术和机器学习算法,基于连续分类策略,对不同动物油样本在种类及品牌/来源地方面进行区分和认定。收集了247份动物油样本(鸡油、牛油、鹅油、猪油、羊油、鸭油),对其进行红外光谱扫描,采用自动基线校正和峰面积归一化消除样本基线漂移和量纲不一致情况;再分别采用Savitzky-Golay平滑、二项式平滑、邻域平均法、FFT滤波、一阶导数和二阶导数对红外光谱进行预处理,比较了6种预处理方法在降噪方面的差异性,同时构建不同预处理方法下的随机森林、贝叶斯网络以及最小二乘支持向量机3种分类模型,开展各样本“种类—品牌/来源地”的连续分类工作。结果表明,相较于未预处理模型,经过预处理后,模型的识别能力均有提升,其中采用FFT滤波预处理结合随机森林模型可较好区分6种动物油,其对6种动物油样本品牌/来源地的识别准确率由高到低依次为鸡油、牛油、鹅油、猪油、羊油、鸭油;对实际案件中2份检材进行验证性分析,结果与实际情况相符合。红外光谱结合机器学习算法可应用于基于连续分类策略的动物油的快速无损识别。

关键词:动物油;红外光谱;预处理;机器学习;连续分类

中图分类号:TS227;O433

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2023)10-0109-07

Non-destructive recognition of animal oil by infrared spectroscopy based on continuous classification strategy

QIU Weilun¹, WANG Xiaoqing²

(1. School of Forensic Science, Hunan Police College, Changsha 410138, China; 2. Changsha Public Security Bureau Wangcheng Branch of Hunan Province, Changsha 410299, China)

Abstract: To achieve rapid and non-destructive recognition of animal oil samples commonly found in the market and in actual cases, different animal oil samples were distinguished and identified in terms of category and brand/origin by spectral analysis technology and machine learning algorithms based on continuous classification strategy. A total of 247 animal oil (chicken oil, beef tallow, goose oil, lard, duck fat, mutton fat) were collected and scanned by infrared spectra, and automatic baseline correction and peak area normalization were used to eliminate the baseline drift and dimensional inconsistency. The infrared spectra of animal oil was pretreated by Savitzky-Golay smoothing, binomial smoothing, neighborhood average, FFT filter, first-order derivative and second-order derivative, respectively, and the differences of the six pretreatment methods in noise reduction were compared. Besides, the random forest, Bayesian network and least square support vector machine models were constructed with six pretreatment methods respectively to carry out the continuous classification of "category—brand/origin" of all samples. The results showed that the recognition ability of models was improved after pretreatment. The random forest model after FFT filter pretreatment could better distinguish six types of animal oil, the classification accuracy of recognizing the brands/origin of the six animal oil samples from high to low was

chicken oil, beef tallow, goose oil, lard, mutton fat and duck fat. Confirmatory analysis was made on two samples from the actual case, and the results were consistent with the actual situation. Infrared spectroscopy combined with machine

收稿日期:2022-06-05;修回日期:2023-06-06

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2023JJ30221)

作者简介:邱薇纶(1982),女,讲师,硕士,主要从事刑事技术方面的研究工作(E-mail)915177230@qq.com。

learning algorithms can apply to the quick and non - destructive recognition of animal oil based on continuous classification strategy.

Key words: animal oil; infrared spectroscopy; pretreatment; machine learning; continuous classification

快速无损检验是物证分析中较为重要的研究内容之一,当面对现场提取的多种痕量物证时,如何在短时间内获取物证的关键信息,挖掘与案件相关联的线索,并在不破坏物证的前提下满足二次复检需要,成为执法人员所面临的问题之一。

动物油是日常生活中常见的油脂,在食物烹饪、美容保健以及药品生产方面均有应用^[1]。动物油也是案件现场常见的痕量物证之一,通过对现场提取到的油样开展分析研究,可以在推断当事人职业(譬如厨师、美容师)、饮食习惯(譬如习惯摄入猪油)、生活习性等方面提供线索信息,为犯罪事实的认定和嫌疑人生活特征的刻画提供一定依据,进而为推进案件的顺利侦破提供一定方向。

当前针对动物油开展的相关检验研究较少,采用的方法有色谱-质谱联用^[2-5]、同位素分析^[6-7]等。齐安安等^[2]借助热脱附/气相色谱-质谱联用法对鸡油、牛油、羊油和猪油进行了判别和分类,所建立的模型验证结果正确率为100%。Heidari等^[3]采用气相色谱-质谱联用技术对12种橄榄油和3种猪油样品进行了鉴定,同时也预测了掺入少量猪油的橄榄油样品,实验结果较为理想。郭莲仙等^[6]运用气相色谱-质谱联用仪、气相色谱-同位素比值质谱仪和元素分析-同位素比值质谱仪对猪油和鸡油的脂肪酸组成及其全油和脂肪酸的稳定碳同位素比值进行了研究,并建立了基于 $\delta^{13}\text{C}$ 的痕量动物油和植物油的高灵敏的检验方法。上述方法能够保证检验结果的精确性,但是耗时相对较长,且实验成本相对较高,这在快速筛查方面显得“力不从心”。光谱分析技术作为经典的检验方法,具有样品用量较少,分析速度较快,实验成本低,不需要专门培训人员即可掌握应用操作等优点。光谱分析在动物油检验方面有一些应用,但主要集中对样本谱图之间差异性的直观比较^[8-9],未能将其与机器学习算法结合起来智能化识别并区分不同样本。

随机森林(Randomforests, RF)、贝叶斯网络(Bayesian network, BN)和最小二乘支持向量机(Least square support vector machine, LSSVM)是3种机器学习算法。RF是决策树的集合,通过将数据集划分为多个子数据集进行训练,每个子数据集可以被看成“专家”,多个专家共同就某一分类问题进

行决策分类^[10],从而获得更为准确和稳定的预测结果。RF算法不仅可用于分类结果分析,还能根据属性重要度进行特征选择,降低模型的复杂度^[11]。BN是一种概率图模型,又称信念网络,它借助有向图将训练集与待测样本之间的特征关系转变为网络,而后挖掘多个特征之间存在的关系,进而实现分类问题。BN算法广泛用于概率推理,具有非常广泛的适用性,能够实现从大量样本数据中进行机器学习^[12]。LSSVM是基于支持向量机的改进算法,它不单纯追求损失函数最小化,有效避免了在小样本条件下的过拟合现象^[13],它加快了最优解的求取速度,具有强大的非线性映射能力和泛化能力^[14]。

本研究借助红外光谱分析技术和机器学习算法,对市面上常见以及实际案件中出现过动物油样本进行了快速无损识别,通过对比6种光谱数据预处理方法结合3种机器学习算法模型对不同种类动物油的识别能力,建立动物油红外光谱识别模型,并进行了实例验证,同时基于连续分类策略,采用此模型对不同样本的品牌/来源地进行区分和认定,以期动物油的智能化无损识别提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

从市场收集常见的6种动物油共计270份样本,其中:247份动物油样本作为训练和测试样本,包括45份猪油样本、48份牛油样本、48份鸭油样本、46份鹅油样本、40份鸡油样本和20份羊油样本,基本信息见表1;23份样本作为验证样本,包括9份猪油样本、8份牛油样本、6份鹅油样本,基本信息见表2。

表1 训练和测试样本的基本信息

样本	品牌	来源地	数量(份)
猪油	璞匠(黑猪油)	成都	11
	金恩凡提	温州	9
	金锣(土猪油)	池州	12
	南食召(黑猪脊髓油)	温州	13
牛油	宏鑫源	宁夏	15
	金锣	北京	12
	伊味源	宁夏	10
	肖老五	重庆	11

续表 1

样本	品牌	来源地	数量(份)
鸭油	金锣	聊城	17
	石榴镇	漳州	13
	弘胜	郑州	18
鹅油	朗德	昆明	9
	农家	六安	15
	滋滋有味	镇江	12
	高桥程四	扬州	10
鸡油	金锣	北京	11
	青藤	石家庄	7
	金锣	武汉	12
	金锣	池州	10
羊油	那牧纯	呼和浩特	11
	泳佳	银川	9

表 2 验证样本的基本信息

样本	品牌	来源地	数量(份)
猪油	璞匠(黑猪油)	成都	9
牛油	金锣	北京	8
鹅油	朗德	昆明	6

Nicolet is10 型傅里叶变换红外光谱仪(ATR 附件), Thermo Scientific 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 红外光谱扫描

采用傅里叶变换红外光谱仪对样品扫描。检测

参数: DTGS 检测器, KBr 窗片^[15]; 光谱测量范围 $650 \sim 4\,500 \text{ cm}^{-1}$; 扫描次数 64 次; 光谱分辨率 1 cm^{-1} ; FTIR 标准线性度 (ASTM E1421) 小于 0.1% T; 信噪比 50 000:1。

1.2.2 光谱数据预处理

采集各动物油样本的红外光谱图后, 采用自动基线校正和峰面积归一化消除样本基线漂移和量纲不一致的情况; 再分别采用 Savitzky - Golay (SG) 平滑^[16]、二项式平滑 (Binomial smoothing, BS)^[17]、邻域平均法 (Neighbourhood averaging, NAS)^[18]、FFT 滤波 (FFT filtering)^[19]、一阶导数 (First - order derivative, FD)^[20] 和二阶导数 (Second - order derivative, SD)^[21] 对红外光谱图进行预处理, 借助主成分分析比较这 6 种预处理方法在降噪和消除噪声方面的差异性。

1.2.3 模型的建立

各样本光谱数据经 6 种方法预处理后, 通过主成分分析提取有效成分, 基于这些有效成分, 借助 RF、BN 和 LSSVM 构建分类模型 (训练集与测试集数量比 7:3), 模型参数为: $n_estimators$ 默认 100, max_depth 默认 10, min_sample_leaf 默认 5。

2 结果与讨论

2.1 6 种动物油的红外光谱图

6 种动物油样本的红外光谱图如图 1 所示。

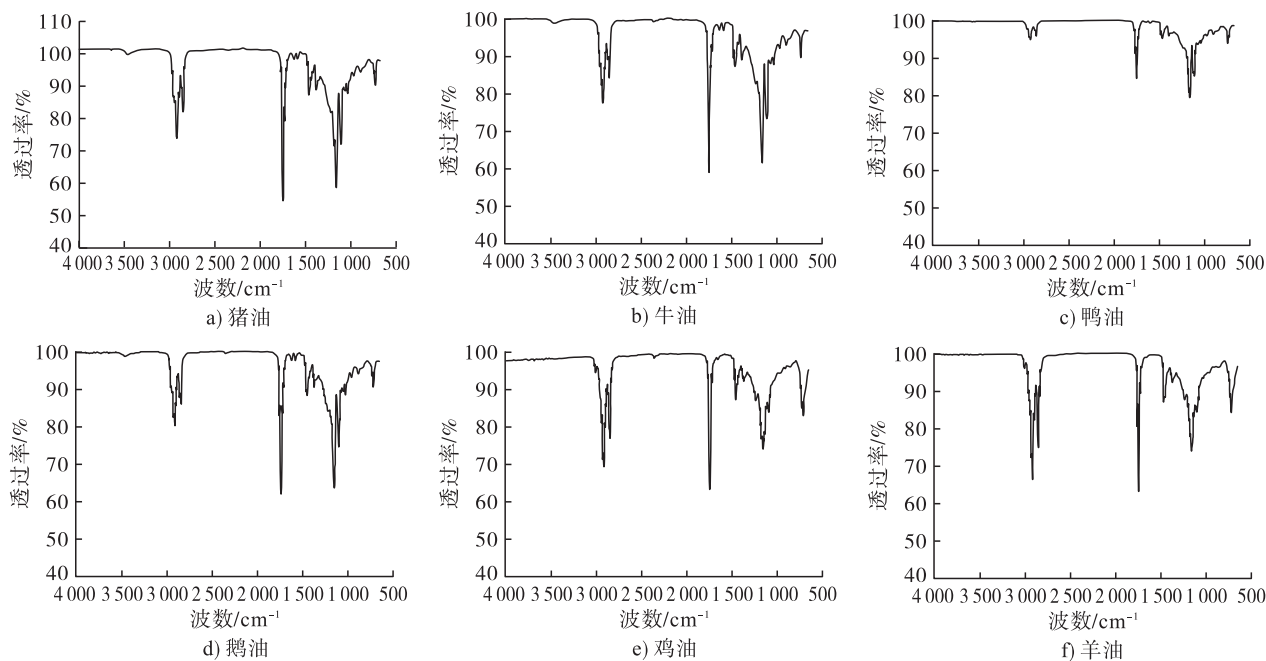


图 1 6 种动物油样本的红外光谱图

由图 1 可知, 不同动物油红外光谱的谱峰位置、数量及走向基本相似。在波数为 $2\,800 \sim 2\,900 \text{ cm}^{-1}$ 处均有 1 个左低右高的双峰, 为甲基和亚甲基

伸缩振动峰; 在波数为 $1\,740 \text{ cm}^{-1}$ 处均有 1 个强峰, 为羰基的伸缩振动峰; 在波数为 $1\,460 \text{ cm}^{-1}$ 处均有 1 个尖峰, 是甲基弯曲振动峰; 在波数为 $1\,150 \text{ cm}^{-1}$

处均有 1 个宽峰,为 C—O—C 的伸缩振动峰;在波数为 720 cm^{-1} 处均有 1 个尖峰。不同动物油红外光谱谱峰的峰强和相对峰高存在一定差异。动物油主要成分是脂肪酸甘油酯,其包含甲基、亚甲基、羰基等基团,红外光谱可以有效将这些信息“映射”出来,但是仅凭光谱技术很难准确区分不同油样,因此要借助机器学习算法,构建数学分类模型来开展不同油样的准确识别与分类。

2.2 光谱数据降维

实验获取的光谱数据有 3 350 维度,这其中包含很多高频噪声、冗余和干扰数据,这在建模过程中会增加计算时间与复杂度,而且干扰信息的存在会降低模型的精度与识别能力,因此降维显得十分有必要。主成分分析能够在尽可能多地保留原始信息前提下,削弱乃至消除噪声、冗余及无关信息,因此实验借助主成分分析,比较和讨论了 SG 平滑、BS、NAS、FFT 滤波、FD 和 SD 6 种预处理方法的差异性。表 2 为不同预处理方法下提取到的主成分个数及累积方差贡献率。

表 2 不同预处理方法下提取到的主成分个数及累积方差贡献率

预处理方法	主成分个数	累积方差贡献率/%
未预处理	6	99.69
SG 平滑	7	99.86
BS	6	99.72
NAS	6	99.74
FFT 滤波	6	99.76
FD	24	95.86
SD	42	94.94

累积方差贡献率是所有提取到的特征成分对总体样本的解释能力,即其对原始样本信息的可解释度。由表 2 可知,经 SG 平滑处理后,提取到的主成分累积方差贡献率最高,为 99.86%,代表这 7 个主成分包含了 99.86% 的原始数据信息。经 BS、NAS 以及 FFT 滤波 3 种方法处理后提取到的主成分累积方差贡献率均在 99.7% 左右,而经过导数处理后提取到的主成分个数相对较多,但累积方差贡献率相对较低,分别为 95.86% (FD) 和 94.94% (SD)。

2.3 动物油种类识别

2.3.1 RF 模型

不同预处理方法下 RF 模型对样本的总体识别准确率见图 2。

由图 2 可知,相较于未预处理模型,经过预处理后各样本的分类准确率均有一定提升,即模型的识别能力均有提升。其中经 FFT 滤波处理后,模型对训练集和测试集均实现了 100% 的准确识别,其次

为 SG 平滑处理,模型对训练集和测试集分别实现了 98.66% 和 98.57% 的准确识别。经 FD 处理后,模型识别性能相对最低,训练集和测试集识别准确率分别为 95.30%, 87.14%。FFT 滤波通过对信号的频谱分析可以定位并过滤其他无关频率的噪声,从而实现去除噪声的目的^[22-23]。FFT 滤波处理能使模型在计算离散傅里叶变换所需要的乘法次数大大减少,特别是被处理的样本维度及样本数越多,计算量节省就越显著。SG 平滑主要是基于最小二乘拟合,用拟合值代替原始数值,从而平滑原数据序列,去除高频噪声^[24],相较于 FFT 滤波器,其处理效果相对较低。通过显著性分析得知,不同预处理方法对各样本的总体识别无显著差异($p > 0.05$)。

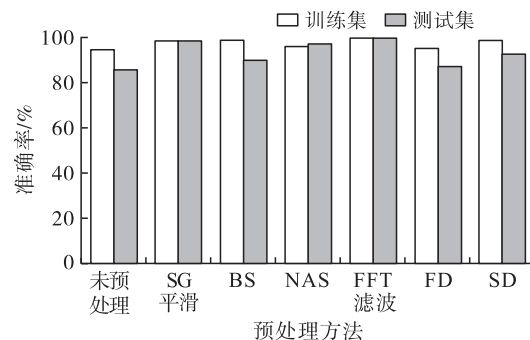


图 2 RF 模型对各样本的总体识别分类结果

2.3.2 BN 模型

不同预处理方法下 BN 模型对样本的总体识别准确率见图 3。

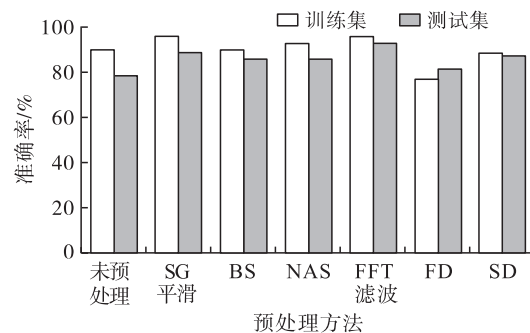


图 3 BN 模型对各样本的总体识别分类结果

由图 3 可知,不同预处理方法下 BN 模型的识别性能既有提升也有下降。经 FFT 滤波处理后模型的识别性能最佳,对训练集和测试集的识别准确率分别达到 97.32% 和 94.29%,其次为 SG 平滑处理,对训练集和测试集的识别准确率分别达到 97.32% 和 90.00%。FD 预处理降低了模型的识别能力,分析认为,经过一阶微分后明显丢失了光谱数据的细微差异,导致模型在识别不同种类样本时候出现了较为严重的误判情况。而 SD 有较好的区分效果,分析认为,通过两次求导后原始谱图中的重叠

峰、宽大峰、弱小峰之间的细微差异实现了很好的分离,被掩盖谱图的斜率变化特征被挖掘出来,从而将样本图谱间的差异更为明显地表示出来。与 RF 模型相比,BN 模型对各样本的总体识别能力相对较弱。

2.3.3 LSSVM 模型

不同预处理方法下 LSSVM 模型对样本的总体识别准确率见图 4。

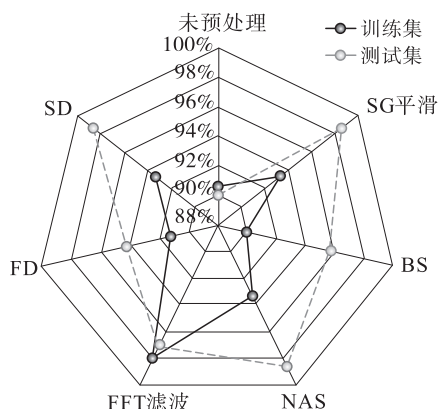


图 4 LSSVM 模型对各样本的总体识别分类结果

由图 4 可知,不同预处理方法下 LSSVM 模型的识别性能均有提升。经 FFT 滤波处理后模型的识别准确率较理想,对训练集和测试集的识别准确率分别达到 97.99% 和 97.14%,其次为 SG 平滑预处理,模型对训练集和测试集的识别准确率分别达到 93.29% 和 98.57%。相比于 BS、NAS 预处理后模型识别性能相对更高,分析认为,借助设备获取样本光谱信息的同时,由于光照、温度、设备自身情况,真实样本的数据中往往会掺杂很多噪声,其中加性高斯

白噪声会掩盖真实样本光谱信号,而 NAS 对加性高斯白噪声有较好的平滑作用,通过 NAS 平滑处理可以有效实现降噪目的。LSSVM 模型对各样本的识别能力略强于 BN 模型,弱于 RF 模型。

综上,对比 6 种预处理方法结合 3 种分类模型的识别准确率得出,FFT 滤波预处理结合 RF 算法构建的识别模型在区分不同动物油样本方面相对更为理想。因此,以 FFT 滤波预处理结合 RF 模型进行品牌/来源地识别及验证性分析。

2.4 动物油品牌/来源地识别

基于连续分类策略,采用 FFT 滤波预处理结合 RF 模型,对同类样本的品牌/来源地进行识别与区分,6 种动物油样本品牌/来源地间的区分结果见图 5 和表 3。

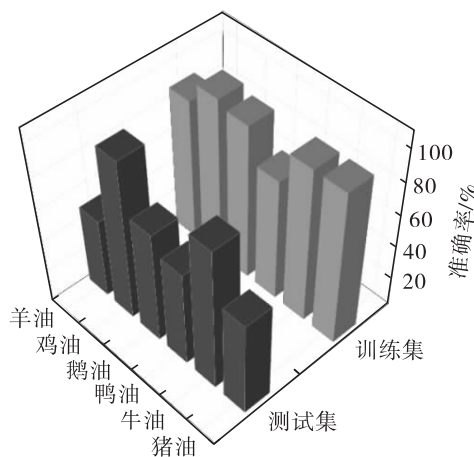


图 5 FFT 滤波预处理结合 RF 模型对各样本品牌/来源地的总体识别分类结果

表 3 FFT 滤波预处理结合 RF 模型对各样本品牌/来源地的识别结果

样本	品牌	来源地	识别结果			
			璞匠(黑猪油)	金恩凡提	金锣(土猪油)	南食召(黑猪脊膘油)
猪油	璞匠(黑猪油)	成都	10			1
	金恩凡提	温州		9		
	金锣(土猪油)	池州			12	
	南食召(黑猪脊膘油)	温州	3		1	9
牛油	品牌	来源地	识别结果			
			宏鑫源	金锣	伊味源	肖老五
牛油	宏鑫源	宁夏	15			
	金锣	北京		12		
	伊味源	宁夏			10	
	肖老五	重庆		2		9
鸭油	品牌	来源地	识别结果			
			金锣	石榴镇	弘胜	
鸭油	金锣	聊城	17			
	石榴镇	漳州	8	5		
	弘胜	郑州	3		15	

续表 3

样本	品牌	来源地	识别结果			
			朗德	农家	滋滋有味	高桥程四
鹅油	朗德	昆明	7	2		
	农家	六安	1	14		
	滋滋有味	镇江		1	11	
	高桥程四	扬州				10
	品牌	来源地	识别结果			
			金锣	青藤	金锣-武汉	金锣-池州
鸡油	金锣	北京	11			
	青藤	石家庄		7		
	金锣-武汉	武汉			12	
	金锣-池州	池州				10
	品牌	来源地	识别结果			
			那牧纯	泳佳		
羊油	那牧纯	呼和浩特	9	2		
	泳佳	银川	2	7		

由图 5 可知,FFT 滤波预处理结合 RF 模型对不同样本的识别能力存在一定差异。鸡油的品牌/来源地识别准确率最高,训练集和测试集均实现了 100% 的准确识别,其次为牛油、鹅油、猪油、羊油,鸭油识别准确率最低。结合表 3 可知,在牛油样本中,来自宏鑫源(宁夏)、金锣(北京)和伊味源(宁夏)的样本实现了 100% 的准确识别,2 份肖老五(重庆)样本被误判为金锣(北京)。在鹅油样本中,高桥程四(扬州)样本实现了 100% 的准确识别,2 份朗德(昆明)和 1 份滋滋有味(镇江)样本被误判为农家(六安),1 份农家(六安)被误判为朗德(昆明)。在猪油样本中,金恩凡提(温州)和金锣(池州)样本实现了 100% 的准确识别,4 份南食召(温州)样本中 3 份被误判为璞匠(成都),1 份被误判为金锣(池州),1 份璞匠(成都)样本被误判为南食召(温州)。在羊油样本中,2 份那牧纯(呼和浩特)样本被误判为泳佳(银川),2 份泳佳(银川)样本被误判为那牧纯(呼和浩特)。在鸭油样本中,金锣(聊城)的样本实现了 100% 的准确识别,3 份弘胜(郑州)品牌和 8 份石榴镇(漳州)样本被误判为金锣(聊城)。

2.5 验证性分析

采用本文建立的实验模型,开展验证性分析,结果发现,在 23 份验证样本中,9 份猪油(品牌为璞匠)、6 份鹅油(品牌为郎德)被 100% 准确识别,7 份牛油(品牌为金锣)被准确识别,1 份被误判为羊油样本。

另外,对 X 地公安机关送检的 2 份油样(JC-1 和 JC-2),借助 Nicolet is10 型傅里叶变换红外光谱

仪采集获取其光谱数据,采用 FFT 滤波对数据进行预处理,结合 RF 算法构建数学分类模型,JC-1 被划归为猪油样本,JC-2 被划归为鸡油样本,这与实际情况相符合。

3 结论

本研究借助光谱分析技术与机器学习算法对市面上常见以及实际案件中出现过的动物油样本进行了快速无损的识别,实现了对不同样本在种类及品牌/来源地方面的区分和认定。在数据预处理方面,比较了 SG 平滑、BS、NAS、FFT 滤波、FD 和 SD 6 种去噪方法的差异性,发现 FFT 滤波在去噪方面具有优越性;在模型建立方面,发现 FFT 滤波预处理结合 RF 模型实现了对所有样本的准确识别。基于连续分类策略,在实现对不同种类样本区分的前提下,采用 FFT 滤波结合 RF 模型进一步开展对各样本在品牌/来源地的区分,区分效果较好,且该方法的实际验证结果良好。

参考文献:

- [1] 樊雨梅,汝文文,廖峰,等. 驴油与 3 种常见动物油脂品质比较研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(2): 109 - 112, 126.
- [2] 齐安安,周小平,雷春妮,等. 化学计量学结合气质联用法对 4 种食用动物油判别模型的构建[J]. 分析测试学报, 2018, 37(8): 955 - 961.
- [3] HEIDARI M, TALEBPOUR Z, ABDOLLAHPOUR Z, et al. Discrimination between vegetable oil and animal fat by a metabolomics approach using gas chromatography - mass spectrometry combined with chemometrics[J]. J Food Sci Technol, 2020, 57: 3415 - 3425.
- [4] YU J F, SUO D C, LEI X Y, et al. Multiresidue

- determination of 19 anabolic steroids in animal oil using enhanced matrix removal lipid cleanup and ultrahigh performance liquid chromatography - tandem mass spectrometry[J]. *Anal Meth*, 2021, 13:2374 - 2383.
- [5] 时秋娜,刘占芳,朱军,等. 全二维气相色谱 - 质谱法检测动植物油[J]. *中国油脂*,2017,42(6):138 - 142.
- [6] 郭莲仙,梁福睿,赵祖国,等. 基于稳定碳同位素技术的痕量动物油和植物油的区分检验研究[J]. *化学研究与应用*,2014,26(8):1232 - 1236.
- [7] 李安,马红枣,潘立刚,等. 稳定同位素比值质谱法鉴别猪油中掺杂石蜡的研究初探[J]. *中国油脂*,2017,42(3):88 - 90,94.
- [8] 郭鹏程,薛靖虹,陈相柏. 激光拉曼光谱检测灵芝孢子油[J]. *光谱学与光谱分析*,2018,38(4):1129 - 1132.
- [9] 杨扬,殷乐,尹芳华,等. 几种食用油的核磁共振光谱特征与地沟油的快速检测[J]. *中国油脂*,2015,40(7):45 - 50.
- [10] 刘倩莹. 基于拉曼光谱技术的可燃液体快速检测研究[D]. 山东 烟台:烟台大学, 2021.
- [11] 杨思节. 基于拉曼光谱的海水微塑料快速识别方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [12] 王鹏,徐建良. 基于贝叶斯网络的信息系统风险评估研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*,2022,52(5):131 - 138.
- [13] 刘胜道,何保委,赵文春,等. 利用最小二乘支持向量机求解潜艇内外磁场映射模型[J]. *国防科技大学学报*,2020,42(6):77 - 81.
- [14] 盛文娟,胡正彬,杨宁,等. 基于优化最小二乘支持向量机的温度稳定光纤布拉格光栅传感解调[J]. *激光与光电子学进展*,2022,59(3):94 - 102.
- [15] 邱薇纶,周燕舞,石孟良. 基于数据融合策略植物油光谱模式的识别[J/OL]. *中国油脂*,2022:20220510 [2022 - 06 - 05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1099.TS.20220510.1008.004.html>.
- [16] LIU H S,ZHANG Z W, YANG Y P, et al. Identification terahertz spectra for the dyestuffs based on principal component analysis and Savitzky - Golay filter [J]. *Optik*,2018,172: 668 - 673.
- [17] MARCHAND P, MARMET L. Binomial smoothing filter: a way to avoid some pitfalls of least - squares polynomial smoothing[J]. *Rev Sci Instrum*, 1998, 54 (8) : 1034 - 1041.
- [18] 张永刚. 超限邻域平均算法在肺部 CT 图像除噪中的应用[J]. *中央民族大学学报(自然科学版)*,2022,31(2):47 - 51.
- [19] 郑海明,吴浩,李广杰. 基于频谱校正的傅里叶变换滤波差分吸收光谱监测实验研究[J]. *动力工程学报*,2014,34(8):628 - 632.
- [20] 何欣龙,王继芬. 牛顿插值多项式 - 导数光谱无损检测车用保险杠[J]. *激光技术*,2020,44(3):333 - 337.
- [21] 侯伟,王继芬,张蕾萍,等. 药品安全视域下安眠镇静类药物光谱模式识别研究[J]. *激光与光电子学进展*,2022,59(5):28 - 35.
- [22] 万留杰,甄超,邱宗甲,等. 基于 FFT 滤波高精度光声二次谐波检测技术的研究[J]. *光谱学与光谱分析*,2020,40(10):2996 - 3001.
- [23] 张胜利,李伟. 基于窗函数与 FFT 算法的信号谐波分析[J]. *工业控制计算机*,2019,32(5):35 - 36,38.
- [24] 赵安新,汤晓君,张钟华,等. 优化 Savitzky - Golay 滤波器的参数及其在傅里叶变换红外气体光谱数据平滑预处理中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*,2016,36(5):1340 - 1344.
-
- (上接第 80 页)
- [6] KESSERWAN F, AHMAD M N, KHALIL M, et al. Hybrid CaO/Al₂O₃ aerogel as heterogeneous catalyst for biodiesel production[J/OL]. *Chem Eng J*, 2020, 385: 123834 [2022 - 07 - 20]. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123834>.
- [7] DAWOOD S, KOYANDE A K, AHMAD M A, et al. Synthesis of biodiesel from non - edible (*Brachycton populneus*) oil in the presence of nickel oxide nanocatalyst: parametric and optimisation studies[J/OL]. *Chemosphere*, 2021, 278: 130496 [2022 - 07 - 20]. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130469>.
- [8] TEO S H, TAUFIQ - YAP Y H, RASHID U, et al. Hydrothermal effect on synthesis, characterization and catalytic properties of calcium methoxide for biodiesel production from crude *Jatropha curcas* [J]. *Rsc Adv*, 2014, 5(6):4266 - 4276.