

三维荧光光谱对食用植物油中煎炸油的检测

陶春先 阮俊 舒顺朋 韩朝霞

上海理工大学光电信息与计算机工程学院上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093

摘要 三维荧光光谱技术是重要的物质分析技术之一。基于三维荧光光谱技术对掺杂煎炸油的食用植物油进行了检测,分析了不同掺杂浓度下的光谱强度、光谱峰值位置和瑞利散射。研究发现发射波长、光谱强度和瑞利散射随着掺杂浓度会发生相应变化。为了更加准确地分析煎炸油对食用植物油的影响,对掺杂过程中的维生素E荧光峰进行了分析。实验发现,维生素E荧光峰的位置随着掺杂浓度变大发生红移,同时荧光强度随着掺杂浓度变大而变小。通过掺杂5%煎炸废弃油的食用油和纯植物油的荧光发射光谱的对比,验证了三维荧光光谱检测具有较高的灵敏度。实验结果表明三维荧光光谱分析技术对食用植物油中是否掺杂煎炸油的检测是可行、有效的。

关键词 光谱学; 三维荧光光谱; 光谱强度; 荧光峰; 煎炸油

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0115001

Detection of Fried Oil in Edible Oil Based on Three-Dimensional Fluorescence Spectroscopy

Tao Chunxian Ruan Jun Shu Shunpeng Han Zhaoxia

Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract Three-dimensional fluorescence spectroscopy is one of the most important techniques to analyze substance. The adulterated edible oil is detected, and Rayleigh scattering, spectral intensity and position of characteristic peak are analyzed through three-dimensional fluorescence spectroscopy. It is found that the Rayleigh scattering, emission wavelength and spectral intensity vary with the increase of concentration of fried oil. In order to exactly analyze the impact of the fried oil on edible oil, the fluorescence peak of vitamin E is discussed. The experimental results show that the redshift of the fluorescence peak of vitamin E is observed and the fluorescence intensity declines with the dosage concentration increasing. The sensitivity and reliability of the three-dimensional fluorescence spectroscopy technique is demonstrated. As the results show, the detection of fried oil in edible oil based on three-dimensional fluorescence spectroscopy is feasible and effective.

Key words spectroscopy; three-dimensional fluorescence spectroscopy; spectral intensity; fluorescence peak; fried oil

OCIS codes 300.6280; 300.6170; 290.5870; 300.2140

1 引言

煎炸油是过氧化值、酸价、水分、羰基价、丙二醛等指标严重超标的伪劣食用油^[1],长期食用容易危害人体健康,甚至会有致癌危险。作为地沟油的一种,煎炸油经过水洗、蒸馏、脱色等加工处理后^[1],或与食用油掺杂后,很难通过感官和一些理化指标进行区分。常规的检测煎炸油的方法有常规油脂理化指标法^[2]、电导率测量法^[3]、薄层色谱法^[4]和荧光分光光度法^[5]等。传统的检测方法存在着一定的缺陷^[6],如误检^[7]、灵敏度低^[6]、检测耗时^[4]。对于煎炸油的检测,需要选取合适有效的检测方法。

收稿日期: 2015-08-20; 收到修改稿日期: 2015-09-07

基金项目: 国家863计划(2013AA030602)、国家自然科学基金(61176085)、上海市自然科学基金(13ZR1427800)

作者简介: 陶春先(1981—),男,博士,讲师,主要从事功能性光学薄膜及其应用等方面的研究。E-mail: tao@usst.edu.cn

三维荧光光谱分析技术因其简便、快捷、灵敏度高、选择性好而应用于生命科学、环境科学、食品科学等各种领域的研究^[8],如水体环境检测^[9-11],食品品质和安全检测^[12-14]等。

目前国内外对荧光光谱法检测食用油有了一定的研究。Sikorska等^[15]用同步荧光光谱法对不同种类的植物油进行实验,确定了植物油的荧光光谱中含有维生素和叶绿素两个荧光峰;Poulli等^[16]通过同步荧光检测法实现了橄榄油、玉米油、大豆油等的掺假鉴别;贾艳华等^[17]利用同步荧光光谱法结合红外吸收光谱法对经过高温处理后的食用油进行研究,发现煎炸过的食用油在370~380 nm附近的荧光峰消失;赵守敬等^[18]对加热前后的5种植物油进行荧光光谱实验,探究了加热时间对食用油的氧化程度,发现植物油的荧光特性可作为区分其类型及加热变化的主要依据;陈明惠等^[19]通过三维荧光光谱法,将动物油及不同种类的植物油进行混合作为地沟油样品,在实验检测中发现其表现出比纯植物油更多的荧光峰。尽管对煎炸油已有了相当的研究,但目前仍需要解决检测过程中的专一性指标问题。

煎炸油是经过重复高温使用的食用油。食用油初次使用时,高温使得其中的物质发生氧化反应,原有的荧光物质发生变质,因此可以通过检测其荧光光谱的变化来检测食用植物油中掺入的煎炸油,同时三维荧光光谱分析法具有较强的指纹性,能较好地反映激发波长和发射波长同时变化时的荧光强度信息。本文根据上述特性,对食用油及相应的掺伪样品进行荧光检测,通过在食用植物油中掺入不同浓度的煎炸油,分析三维荧光光谱的变化,提出一种煎炸油检测方法。

2 三维荧光原理

使用的三维荧光光谱仪的测试原理如图1所示。三维荧光检测利用的是光致发光机理。食用油中具有荧光特性的物质有维生素E、生育三烯酚和叶绿素等。当以紫外光或可见光照射食用油时,其中的荧光物质接收了光子的能量,电子发生能级跃迁进入激发态,由于不稳定随后跃迁回基态并发射出光子,一旦停止光的入射,发光现象也会随之立即消失,具有这种性质的出射光称之为荧光。三维荧光光谱由激发光谱和发射光谱构成,在三个维度(激发波长,发射波长,荧光强度)上能够同时表现出荧光强度随激发和发射波长的变化信息。三维荧光光谱图与二维图形相比,记录的荧光信息更完整,能够更全面地反映荧光物质的荧光强度和荧光位置的整体变化。本文利用植物油中的荧光特性物质作为实验的理论基础,通过三维荧光光谱来分析不同植物油样品中荧光物质的变化。基于不同物质荧光特性的不同,实现并建立一种鉴别煎炸废弃油的有效方法。

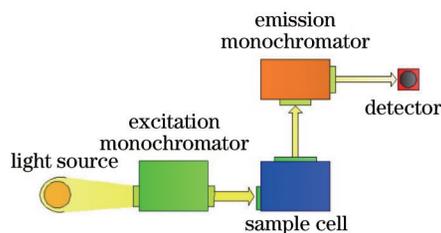


图1 荧光光谱仪测试原理图

Fig.1 Schematic diagram of fluorescence spectrometer

3 实验

3.1 仪器、试剂及样品

实验使用的测试仪器为HORIBA Dual-FL-UV-800荧光光谱仪。设计的试样共有食用植物油和煎炸油两大类。其中食用植物油共4种,分别为大豆油(金龙鱼),花生油(金龙鱼),葵花籽油(福临门),调和油(福临门),煎炸油取样于小吃摊上煎炸油条所用油。

3.2 测试方法

取规格为10 mm×10 mm×45 mm的石英比色皿作为实验样品容器,按照表1进行实验样品的配制并各取4 mL装入试管中,贴上相应标签。

表 1 实验样品及其配比

Table 1 Experimental samples and proportions

No.	Component	Type	Concentration of fried oil /% (volume fraction)
S1	Edible oil	Qualified	0
S2	Fried oil, edible oil	Unqualified	5
S3	Fried oil, edible oil	Unqualified	10
S4	Fried oil, edible oil	Unqualified	30
S5	Fried oil, edible oil	Unqualified	50
S6	Fried oil, edible oil	Unqualified	70
S7	Fried oil	Unqualified	100

其中的食用植物油包括大豆油,花生油,葵花籽油和调和油。

测试条件为:激发波长范围为 200~700 nm,测试步长为 2 nm,发射波长范围为 248~830 nm,测试步长为 1.16 nm;进行激发实验时,激发波长以 300 nm 为起始波长,700 nm 为终止波长,并以 5 nm 为间隔进行多次实验,实验过程中的激光功率保持不变。

基于上述实验参数,分别对实验样品进行三维荧光光谱的扫描测试。

4 测试结果及分析

植物油的主要成分是脂肪酸甘油三酯、维生素和类胡萝卜素等。由于甘油三酯的主要结构为脂肪酸基团,因此其物理性质与化学性质主要由脂肪酸决定^[20]。脂肪酸由饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸组成,且绝大多数为偶碳直链,不饱和脂肪酸也以顺式结构为主。所以,植物油的荧光发光中心主要集中在维生素、色素和脂肪酸等具有 C = O 基团的物质中^[15]。通过三维荧光光谱实验探究其中荧光强度的变化规律,从而确定检测煎炸油的指标。

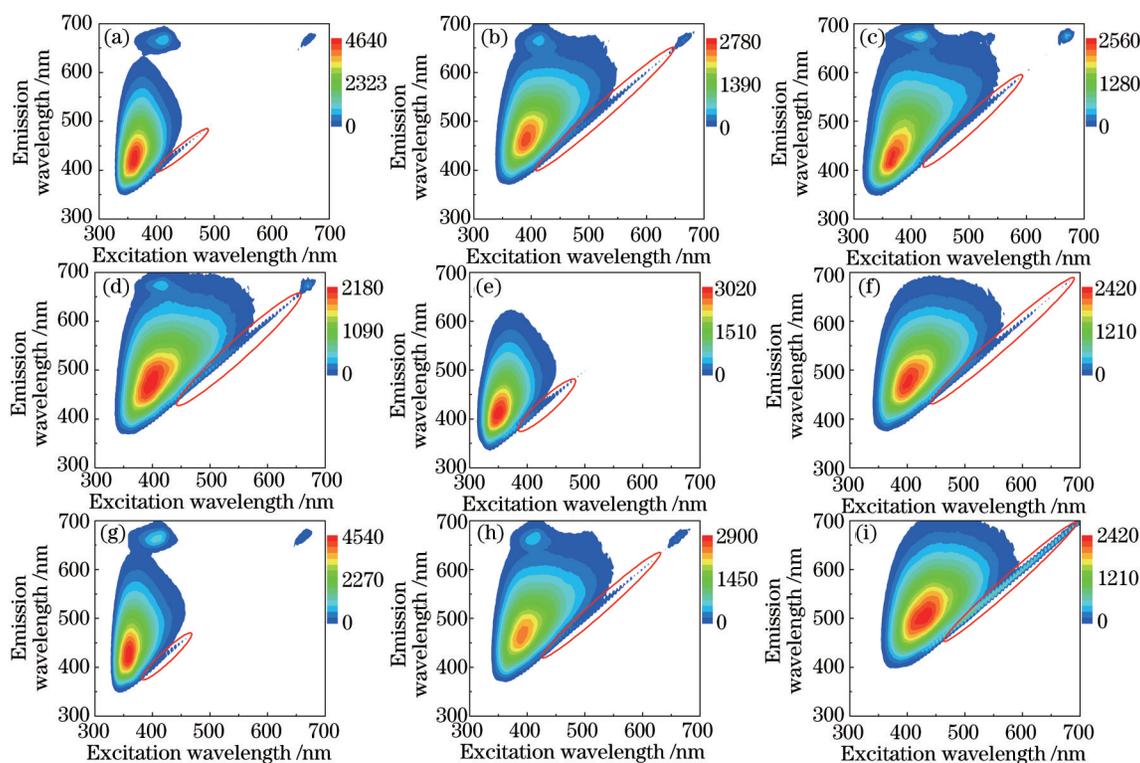


图 2 各实验样品的三维荧光光谱图。(a) (c) (e) (g) (i) 分别为大豆油、花生油、葵花籽油、调和油、煎炸油;(b) (d) (f) (h) 分别为大豆油、花生油、葵花籽油、调和油与煎炸油以 1:1 体积掺杂的实验样品

Fig.2 Three-dimensional fluorescence spectra of samples. (a) (c) (e) (g) (i) Soybean oil, peanut oil, sunflower oil, blend oil and fried oil respectively; (b) (d) (f) (h) mixture of soybean oil, peanut oil, sunflower oil, blend oil with fried oil with volume ratio of 1:1 respectively

图2为不同食用油及其掺杂样品的三维荧光光谱图,图中红线标记为瑞利散射。实验结果表明,不同的食用植物油表现出了相似的荧光特性。与食用植物油的光谱图相比,掺有煎炸油的实验样品的荧光特征峰发生了明显变化,其对应的激发波长和发射波长也有明显的差异。另外,从光谱图中可知,掺有煎炸油的实验样品的瑞利散射更加明显。

4.1 瑞利散射

实验结果表明,煎炸油及掺有其成分的实验样品的三维荧光光谱会产生明显的瑞利散射,食用植物油则表现得十分微弱。瑞利散射是指当粒子尺度远小于入射光波长时各方向上散射光强度不一致的光学现象。瑞利散射现象的存在说明煎炸油中存在粒径尺寸远小于光波波长的物质。实验结果的比较说明煎炸油中含有大量容易带来瑞利散射的物质。文献[6]表明新鲜食用植物油的平均粒径为390~4800 nm,而高温使用过的食用植物油的粒径为0.21~5 nm,相对于植物油,煎炸油含有粒径较小的物质,容易带来瑞利散射。图2显示,瑞利散射在煎炸油掺杂体积为50%时明显大于原植物油,且绝大部分荧光发射的能量集中在激发和出射波长500 nm以下。因此,为了探究瑞利散射强度与浓度的关系,选择波长为532 nm的激发光对应的荧光发射谱。图3是在不同掺杂浓度下从532 nm激发光中得到的最大出射能量。从图3可以看出,随着掺杂浓度的增加,瑞利散射强度呈现变大的趋势,但是在某些浓度的位置出现异常。这可能存在以下原因:1)煎炸油中微小颗粒不是均匀弥散的;2)煎炸油与原植物油没有完全混合均匀。这就导致了取样时在样品池中颗粒浓度发生差异。

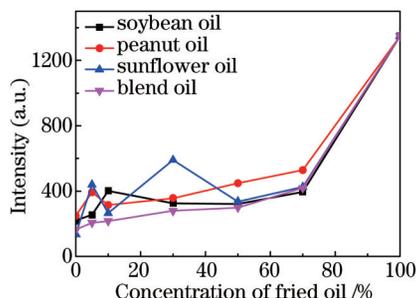


图3 瑞利散射强度随煎炸油含量的变化

Fig.3 Change of intensity of Rayleigh scattering with concentration of fried oil

4.2 荧光峰分析

实验结果表明,煎炸油掺杂含量的不同,会造成实验样品荧光特征峰的强度及位置发生明显的变化。荧光特征峰的强度代表实验样品中相应荧光物质的浓度,通过图4可知,食用植物油中所含的荧光物质与煎

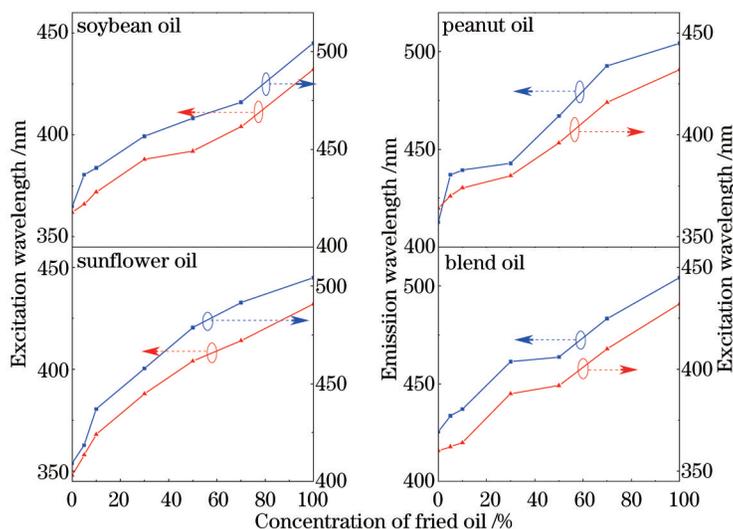


图4 激发波长、发射波长随煎炸油含量的变化曲线

Fig.4 Change of excitation and emission wavelength with concentration of fried oil

炸油中所含的荧光物质不同,两种荧光物质在混合过程中相互影响,因此造成图5中荧光特征峰的强度随着掺杂浓度的增加呈现无规律变化的现象。而通过图4可知,随着煎炸油掺杂量的增加,激发波长和发射波长逐渐向长波长方向移动。该光谱变化表明掺杂煎炸油对食用植物油的荧光特征峰有明显影响,说明光谱位置作为探测依据具有极大参考价值。

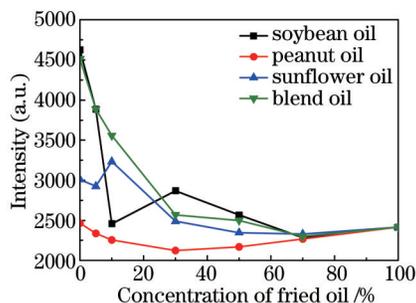


图5 荧光特征峰强度随煎炸油掺杂浓度的变化

Fig.5 Change of characteristic fluorescence peak intensity with concentration of fried oil

4.3 荧光物质分析

掺杂实验结果表明,煎炸油中含有不同于食用植物油的荧光物质。而在掺杂浓度不同的条件下,荧光物质对应的荧光特征峰也发生变化。因此可以通过观察荧光特征峰的变化来确定其中荧光物质的变化,从而确定检测煎炸油的指标。

从图2可知,4种食用植物油的荧光特征峰集中在 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=348\sim362\text{ nm}/409\sim425\text{ nm}$ 处,其荧光强度集中在2467~4625。文献表明食用植物油中在 $\lambda_{ex}=365\text{ nm}$, $\lambda_{em}=445\text{ nm}$ 处产生荧光峰的荧光物质为维生素E^[15]。与Sikorska等对食物中的维生素E进行提取、皂化、纯化等前处理不同,该研究无需预处理而直接对食用油样品进行测试。虽然食用植物油中的其他物质会对维生素E的荧光峰产生影响^[21],导致实验测得的荧光特征峰相对预处理的样品发生偏移,但是以此作为特征光谱对食用油品质检测未发现有利影响。

从煎炸油的光谱图可知,煎炸油存在一个相对食用植物油较弱的荧光特征峰。实验测得煎炸油在 $\lambda_{ex}=432\text{ nm}$, $\lambda_{em}=504\text{ nm}$ 处有荧光峰,其强度为 $I=2415$ 。这说明食用植物油在高温过程中产生了其他荧光物质。通过三维荧光光谱图的比较可知,食用植物油在初次使用过程中,高温会使其中的维生素E发生分解和氧化作用,同时生成单环二聚酸、双环二聚酸等含有碳氧基团的荧光物质^[17]。

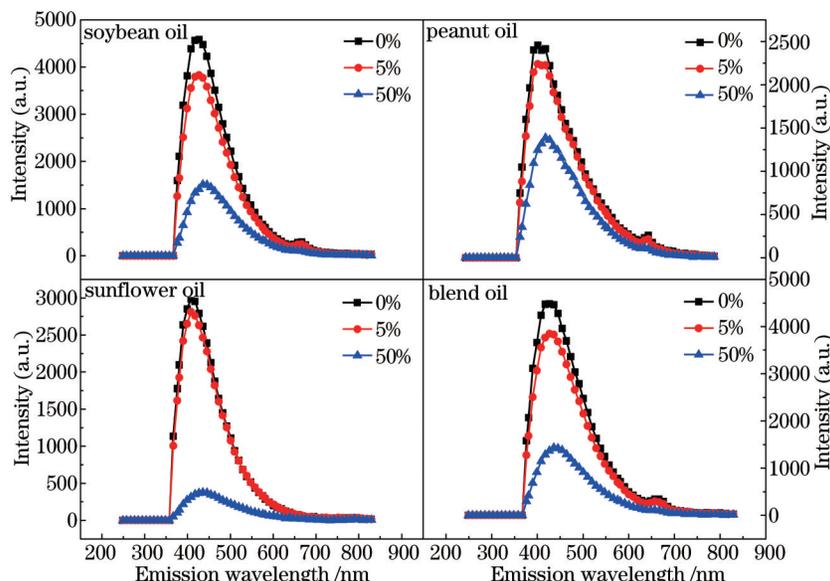


图6 各实验样品在 $\lambda_{ex}=356\text{ nm}$ 的荧光发射对比图

Fig.6 Fluorescence emission spectra of samples at $\lambda_{ex}=356\text{ nm}$

对不同食用植物油进行多次发射光谱测试发现,4种食用植物油样品的荧光强度达到最大时的激发波

长存在着微小差别,分别为362 nm(大豆油),364 nm(花生油),348 nm(葵花籽油),360 nm(调和油)。选取中间值356 nm的激发光进行发射光谱实验,以此观察荧光发射峰的变化。综合不同掺杂量的样品,从图6、图7可以发现,食用植物油的荧光发射峰强度最大,煎炸油的荧光发射峰强度最小,随着实验样品中煎炸油掺杂含量的增加,荧光强度有明显的衰减,且荧光峰对应的发射波长逐渐向长波长方向移动,同时维生素E的荧光强度随着掺杂浓度的增加也逐渐下降,说明其变化能够作为判断煎炸油的有效指标。

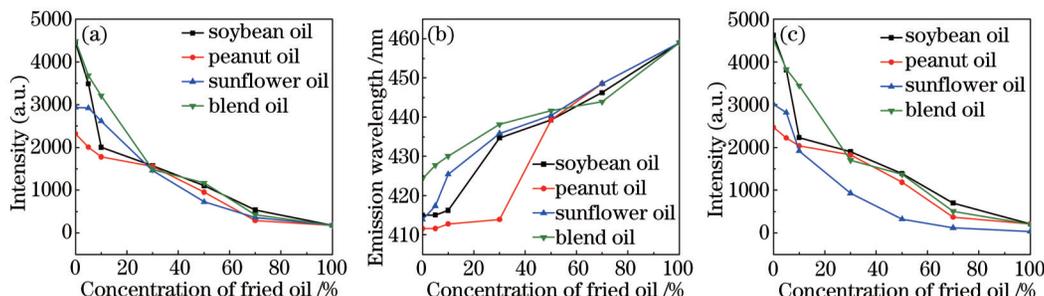


图7 (a) 荧光发射峰强度; (b) 发射波长; (c) 维生素E荧光强度随煎炸油掺杂浓度的变化

Fig.7 Variation in (a) intensity of fluorescence emission peak; (b) emission wavelength; (c) fluorescence intensity of vitamin E with concentration of fried oil

4.4 荧光检测灵敏度

灵敏度表示对微量煎炸废弃油掺杂的检测能力。定义三维荧光光谱仪检测煎炸油的灵敏度为

$$S = \frac{|I_i - I_0|}{I_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中 I_i 为实验样品中某荧光物质的荧光强度, I_0 为标准样品中相应物质的荧光强度。

选取维生素E作为煎炸油的检测指标。由于各种食用植物油之间存在细微差别,因此维生素E的光谱位置均不相同。分别选取最大荧光发射峰对应的激发波长和发射波长,观察不同掺杂浓度下该位置荧光强度的变化,如图7(c)所示。利用(1)式计算4种食用植物油在掺杂体积为5%时的灵敏度,分别为 $S_{\text{soybean oil}}=17.6\%$, $S_{\text{peanut oil}}=10.0\%$, $S_{\text{sunflower oil}}=6.5\%$, $S_{\text{blend oil}}=15.2\%$,说明三维荧光光谱检测方法能够将掺杂低至5%的样品与食用植物油进行区分,验证了该方法检测煎炸油的高灵敏度。

5 结 论

探索了一种快速检测食用植物油中掺入煎炸油的方法。利用三维荧光光谱技术分析了不同掺杂浓度下食用植物油的光谱强度、光谱位置,并研究了瑞利散射的变化;分析了不同掺杂浓度下维生素E荧光峰的变化,同时验证了三维荧光光谱检测煎炸油的灵敏性。确定了三维荧光光谱技术检测煎炸油的有效性。

由实验结果可知,判断植物油中是否掺入了煎炸油,有以下依据:掺入煎炸油后的食用植物油中维生素E含量要比纯食用植物油低;煎炸油中含有食用植物油所没有的荧光物质;煎炸油相对食用植物油含有更多小粒径的物质。

因此,在实际利用荧光检测煎炸油的应用中,可以根据荧光光谱等高线图上的荧光峰位置和瑞利散射来初步判断是否含有煎炸油,再利用二维荧光发射光谱图中荧光峰强度的改变进一步确认。综合以上方法,可以有效地检测煎炸油。

参 考 文 献

- 1 徐中海,柳一鸣,刘劭钢,等. 泔水油的4项理化指标分析[J]. 中国公共卫生, 2002, 18(5): 105.
- 2 Xu Yanxia, Ni Xiaoying, Yang Jin. Status and outlooks on detection index and technique of gutter oils[J]. Food & Machinery, 2014, 30(5): 283-287.
许艳霞,倪小英,杨进. 地沟油检测指标及方法研究现状与展望[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 283-287.
- 3 Wang Feiyan, Yu Xiuzhu, Lü Manman, et al.. Fast qualitative and semi-quantitative analysis of hogwash oil by conductivity[J]. Food Science, 2011, 32(18): 304-307.
王飞艳,于修焯,吕曼曼,等. 基于电导率的地沟油快速定性分析与半定量分析[J]. 食品科学, 2011, 32(18): 304-307.

- 4 Wei Lige. The Adulteration Detection of Fried Waste Oil in Edible Oil[D]. Henan: Henan University of Technology, 2013: 2-8.
韦利革. 食用油脂中掺入煎炸废弃油的检测和评判[D]. 河南: 河南工业大学, 2013: 2-8.
- 5 Liu Wei, Yin Pinghe, Zhao Ling. Distinguishing hogwash fat by determination of sodium dodecylbenzene sulfonate with fluorescence spectrum analysis[J]. *China Oils and Fats*, 2005, 30(5): 24-26.
刘 薇, 尹平河, 赵 玲. 荧光法测定十二烷基苯磺酸钠鉴别泔水油的研究[J]. *中国油脂*, 2005, 30(5): 24-26.
- 6 Wang Rongrong. Study on Illegal Cooking Oil Based on the Technologies of Three-Dimensional Fluorescence Spectrum and Dynamic Light Scattering[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013: 17-27.
汪荣荣. 基于三维荧光光谱技术与动态光散射技术的地沟油检测研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013: 17-27.
- 7 曹文明, 薛 斌, 杨波涛, 等. 地沟油检测技术的发展与研究[J]. *粮食科技与经济*, 2011, 36(1): 41-44.
- 8 Liu Zhihong, Cai Ruxiu. Progresses and applications of three-dimensional fluorescent spectroscopy[J]. *Journal of Analytical Science*, 2000, 16(6): 516-523.
刘志宏, 蔡汝秀. 三维荧光光谱技术分析应用进展[J]. *分析科学学报*, 2000, 16(6): 516-523.
- 9 Tian Guangjun, Yang Zichen. WT-SVD feature of three dimensional fluorescence spectra of mineral oil[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(6): 063001.
田广军, 杨子臣. 矿物油三维荧光光谱的小波变换奇异值特征[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(6): 063001.
- 10 Yin Gaofang, Zhao Nanjing, Hu Li, *et al.*. Classified measurement of phytoplankton based on characteristic fluorescence of photosynthetic pigments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0930005.
殷高方, 赵南京, 胡 丽, 等. 基于色素特征荧光光谱的浮游植物分类测量方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0930005.
- 11 Wang Yutian, Xu Jing, Zhou Yanling. Study on mineral oil identification based on a dimension reduction method of three dimensional fluorescence spectra[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(12): 1215002.
王玉田, 徐 婧, 周艳岭. 基于三维荧光光谱降维处理的矿物油识别研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1215002.
- 12 Du Yangfeng. The Detection Method of Mycotoxin in Food Based on Three-Dimensional Fluorescence Spectrometry[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011: 2-6.
杜阳锋. 基于三维荧光光谱的食品中真菌毒素检测方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2011: 2-6.
- 13 Zhu Zhuowei, Que Lizhi, Wu Yamin, *et al.*. Identification of Chinese liquors by three-dimensional fluorescence spectra combined with PARAFAC and genetic algorithm[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0615002.
朱焯炜, 阙立志, 吴亚敏, 等. 三维荧光光谱结合 PARAFAC 和 GA 对中国白酒品牌的鉴别[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0615002.
- 14 Xiao Haibin, Zhao Jinhui, Liu Muhua, *et al.*. Application study of three-dimensional fluorescence spectroscopy combined with PLSR for carbaryl residues in duck meat[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(4): 043001.
肖海斌, 赵进辉, 刘木华, 等. 三维荧光光谱技术结合 PLSR 在鸭肉中西维因残留检测的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(4): 043001.
- 15 Sikorska E, Górecki T, Khmelinskii I V, *et al.*. Classification of edible oils using synchronous scanning fluorescence spectroscopy[J]. *Food Chemistry*, 2005, 89(2): 217-225.
- 16 Poulli K I, Mousdis G A, Georgiou C A. Rapid synchronous fluorescence method for virgin olive oil adulteration assessment[J]. *Food Chemistry*, 2007, 105(1): 369-375.
- 17 Jia Yanhua, Xu Xiaoxuan, Yang Renjie, *et al.*. Spectra study on quality change of frying edible oils by synchronous scan fluorescence spectra[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(11): 1717-1720.
贾艳华, 徐晓轩, 杨仁杰, 等. 煎炸食用油质量变化的同步荧光光谱研究[J]. *光子学报*, 2006, 35(11): 1717-1720.
- 18 Zhao Shoujing, Chen Bin, Lu Daoli. Study on oxidation pattern of heated vegetable oil based on fluorescence spectrometry[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2012, 27(3): 104-109.
赵守敬, 陈 斌, 陆道礼. 基于荧光光谱法的植物油加热氧化规律[J]. *中国粮油学报*, 2012, 27(3): 104-109.
- 19 Chen Minghui, Li Hao, Chen Rong. Study on three-dimensional fluorescence spectroscopy of hogwash oil[J]. *Optical Instrument*, 2014, 36(1): 6-10.
陈明惠, 李 昊, 陈 荣. 三维荧光光谱检测地沟油[J]. *光学仪器*, 2014, 36(1): 6-10.
- 20 Zhao Mouming, Liu Tongxun, Li Xiaoli, *et al.*. Study on the physicochemical property of vegetable oils and the processing technology of proportion oil[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, 1996, 24(8): 119-124.
赵谋明, 刘通讯, 李小丽, 等. 植物油脂理化特性及调和油加工技术的研究[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 1996, 24(8): 119-124.
- 21 Fan Mingtao, Wu Shouyi, Ma Haile. Research progress in determination method of vitamin E[J]. *Journal of Jiangsu University*, 2002, 23(1): 54-57.
樊明涛, 吴守一, 马海乐. 维生素 E 测定方法的研究进展[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2002, 23(1): 54-57.

栏目编辑: 吴秀娟