

## 检测分析

# 近红外光谱无损检测在食用油脂分析中的应用研究进展

曾子琦, 蒋立文, 刘霞, 李跑

(湖南农业大学 食品科学技术学院, 食品科学与生物技术湖南省重点实验室, 长沙 410128)

**摘要:**近红外光谱技术作为一种具有样品前处理简便、快速高效、可以实现多组分同时分析等优点的新型无损分析技术,在食用油脂分析领域扮演着重要角色。对近10年来近红外光谱技术在食用油脂无损检测中的应用进行了总结,概述了近红外光谱技术的分析类型,在食用油脂和食用油脂原料分析方面的应用。通过结合化学计量学方法,近红外光谱技术可以实现不同种类食用油脂的快速鉴别分析,食用油脂的各项理化指标(如游离脂肪酸的含量、碘值、酸值、过氧化值、皂化值等)的快速检测,食用油脂无损掺假检测,食用油脂原料(如玉米、棉籽、油菜籽等)含油量的无损分析。此外,针对当前食用成品油快速无损分析过程中的难题对未来该领域的研究方向进行了展望,以期近红外光谱技术在食用油脂无损分析领域得到更广泛的应用。

**关键词:**近红外光谱;食用油脂;种类鉴别;理化指标分析;掺伪掺假;含油量无损检测

中图分类号:O657.3;TS227 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2018)08-0137-06

## Advance in application of near infrared spectroscopy in nondestructive analysis of edible oil

ZENG Ziqi, JIANG Liwen, LIU Xia, LI Pao

(Hunan Provincial Key Laboratory of Food Science and Biotechnology, College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** Near infrared spectroscopy (NIRS) is a new nondestructive analysis technology which has the advantages of simple pretreatment and enabling high-throughput, multi-analyte detections. In recent years, NIRS played an important role in analysis of edible oil. The applications of NIRS in the nondestructive analysis of edible oil in recent ten years were summarized. The analysis type of NIRS and the applications in edible oil and oilseed were described. Rapid identification and analysis of different kinds of edible oil, rapid analysis of the physicochemical indexes (such as content of free fatty acid, iodine value, acid value, peroxide value, saponification value, etc.), nondestructive adulteration detection of edible oil and nondestructive analysis of oil content in oilseeds (such as corn, cottonseed and rapeseed) could be realized by NIRS combining with chemometrics methods. Furthermore, the future research focuses for the rapid and nondestructive analysis of edible oil products were proposed based on existing problems in this area, in order to discover more extensive application of NIRS in the field of nondestructive analysis of edible oil.

problems in this area, in order to discover more extensive application of NIRS in the field of nondestructive analysis of edible oil.

**Key words:** near infrared spectroscopy; edible oil; kinds identification; physicochemical index analysis; adulteration; oil content nondestructive detection

收稿日期:2017-12-24;修回日期:2018-04-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31601551);湖南农业大学引进人才科学基金项目(15YJ08);湖南农业大学青年科学基金项目(16QN24);湖南农业大学食品科学技术学院青年科学基金项目

作者简介:曾子琦(1997),女,在读本科,专业为食品科学与工程(E-mail) 971911583@qq.com。

通信作者:李跑,讲师,博士(E-mail) lipao@mail.nankai.edu.cn。

食用油脂中含有大量脂肪酸,其中脂肪酸又可

分为饱和脂肪酸以及不饱和脂肪酸(如油酸、亚油酸、 $\alpha$ -亚麻酸等),且不同种类油脂的脂肪酸种类及含量各不相同,因此其销售价格也存在着较大差异。然而有些不法商家为了个人利益销售过期、酸败的食用油脂或是在食用油脂中掺伪掺假欺骗消费者,因此食用油脂的品质成为大家广泛关注的焦点。目前,对食用油脂的质量评定主要是通过化学法分析理化指标。此外,结合仪器分析的方法可以实现对食用油脂品质更加快速准确的分析,这些方法主要可分为以下3大类<sup>[1-8]</sup>。第一类是电化学方法。邓鹏等<sup>[9]</sup>利用Nafion修饰的玻碳电极对食用油脂的过氧化物含量进行了检测分析,结果表明油脂的过氧化物浓度在一定范围内与峰电流有良好的线性关系。因此,电化学方法能够对食用油脂的品质进行快速地检测分析。第二类方法是色谱分析法。Li等<sup>[10]</sup>为了测定食用油脂中的饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸的含量,采用反相高效液相色谱对其进行了分析检测。结果表明,所有的游离脂肪酸均具有良好的定量结果,相关系数高达0.999 4,可以实现食用油脂品质的分析。但是该类方法依旧对待测样品具有一定的破坏性,存在一定缺陷。第三类方法是光谱分析方法。为了测定食用油脂中的饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸以及多不饱和脂肪酸的含量,Dong等<sup>[11]</sup>研究利用激光共焦显微拉曼光谱结合化学计量学的方法对食用油脂中的脂肪酸组成进行了快速分析。该方法通过采用导数预处理和偏最小二乘法(PLS)建立了脂肪酸定量分析模型,结果表明饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸的

定量分析模型决定系数均大于0.99,表明所建立的模型具有较好的预测能力,可以实现对食用油脂脂肪酸组成的快速无损分析。然而在分析包含了荧光组分的样品时,需选用不同的激发波长以避免荧光干扰,因此依旧存在一定的局限性。近红外光谱属于分子振动光谱的一种,主要测量的是待测样品中含氢基团振动的倍频以及合频吸收,且不同物质的不同基团或不同化学环境中的同一基团的近红外光谱信号存在明显差异,因此可以实现对不同食用油脂的定性定量分析。

与其他分析方法相比,近红外光谱技术具有操作简单、定性定量准确、特别是快速无损等优点,因此可以在不破坏待测样品的前提下,应用于食用油脂种类的鉴别、掺伪掺假中。但是近红外光谱解释性较差,必须结合化学计量学方法才能进行分析。本文对近10年来近红外光谱技术在食用油脂无损分析中的应用进行了总结与评述,并针对当前快速无损分析过程中的难题对该领域未来的研究方向进行了展望。

## 1 近红外光谱的分析类型

近红外光谱技术依据检测方式可分为透射、漫透射及漫反射3种形式。现阶段对于液体食用油的分析主要采用透射和漫透射2种形式,而对于食用油脂原料的分析往往采用漫反射的形式。此外,近红外光谱技术依据分光的形式又可分为傅里叶变换型、色散型(光栅、棱镜)以及滤光片型,这3种类型的主要特点及应用如表1所示。

表1 滤光片型、色散型以及傅里叶变换型近红外光谱技术优缺点及其应用

项目	滤光片型	色散型	傅里叶变换型
分辨率	较差	较高	很高
优点	仪器体积小,可作为专用的便携式仪器	采用全谱分析,信息量大,通过合理结合化学计量学方法可以对未知样品进行某些性质的预测	分辨率、信噪比、灵敏度等性能均优于其余两者,扫描速度更快
缺点	得不到连续的光谱,信息量少,对温度较为敏感	光栅等部件易磨损,仪器的抗震性能差,图谱易受到杂光干扰	干涉仪是仪器的核心,其稳定性和抗震性还需不断优化
应用	应用较少	现用于油脂过氧化值的测定	目前使用最广泛,可用于食用油脂各项指标的测定

## 2 近红外光谱技术在食用油脂无损分析中的应用

### 2.1 近红外光谱技术用于食用油脂种类的无损鉴别分析

目前,有大量关于近红外光谱技术应用于食用油脂成分及种类鉴别分析方面的报道。吴双等<sup>[12]</sup>采用激光近红外光谱结合竞争性自适应重加权采样

(CARS)、连续投影算法(SPA)和CARS-SPA这3种算法提取了特征波长,应用SVM建模并对食用植物油样品进行了分析,结果表明该方法能实现对多种食用植物油的快速无损鉴别。刘翠玲等<sup>[13]</sup>采用近红外光谱技术结合聚类分析方法建立了4种植物油(大豆油、芝麻油、花生油、玉米油)的混合食用油

脂定性识别模型,结果表明近红外光谱技术可以通过建立定性识别模型实现食用油脂种类的鉴别分析。

Yang等<sup>[14]</sup>采用傅里叶变换红外光谱、近红外光谱和拉曼光谱对10种不同种类的食用油脂进行了鉴别分析,应用线性判别分析和规范变量分析对不同食用油脂的光谱数据进行了处理,结果表明通过结合这两类分析方法,3种光谱均可用于食用油脂的无损鉴别分析。一维以及二维光谱均可用于对物质组分的定性定量分析,但二维光谱将光谱信号从一维扩张到二维上,其分辨率较一维光谱的高,因此可以区分出一维光谱上被覆盖的小峰和弱峰,图像的输出信息量更大,更有利于进行鉴别分析。Chen等<sup>[15]</sup>利用傅里叶变换近红外光谱仪结合在一定温度范围内使用的二维相关光谱对大豆油、棕榈油以及芝麻油进行了鉴别分析,并且实现了不同厂家食用油的鉴别分析,结果表明二维近红外光谱可以作为不同种类甚至是不同产地来源的植物油的无损鉴别方法。此外,为了发展一种快速准确的初榨橄榄油品种和产地鉴别方法,Galtier等<sup>[16]</sup>利用近红外光谱分别结合4种不同的化学计量学算法(SIMCA、PLS2-DA、PLS2-DA结合SIMCA、PLS1-DA)对5种不同来源的初榨橄榄油进行了鉴别分析,并且对这4种算法进行了比较。结果表明PLS-DA的方法优于SIMCA,且PLS1-DA可以实现对不同来源的初榨橄榄油100%的鉴别分析。

## 2.2 近红外光谱技术用于食用油脂理化指标的快速无损分析

食用油脂的过氧化值、游离脂肪酸含量、碘值等理化指标能反映出油脂的品质。然而传统的检测方法需要将待测样品进行预处理以提取出待测组分,需要消耗较多的化学试剂,成本较高且对环境污染严重,因此不能实现快速无损分析。而近红外光谱操作简单且不会破坏待测样品组分,结合化学计量学方法即可实现对食用油脂理化指标的快速无损分析<sup>[17-18]</sup>。表2归纳了近红外光谱技术对食用油脂各项理化指标适用性。目前,利用近红外光谱技术检测一些常用的理化指标(如游离脂肪酸含量、碘值、酸值、过氧化值等)已有大量的研究,关于食用油脂的皂化值和极性组分测定的研究比较少。

常见的酸值分析方法是滴定法,但该方法需要消耗大量的化学试剂,且样品颜色较深时难以准确判断滴定终点。为了实现对花生油品质的快速无损分析,Rao等<sup>[23]</sup>采用近红外光谱技术结合PLS建模对花生油的酸值进行了分析,结果得到PLS分析模

型的相关系数为0.9725,交叉验证误差为0.308。预测集的相关系数和标准误差分别为0.9379和0.333。此外,实验采用PLS-DA算法对合格的花生油和不合格的花生油进行快速无损鉴别,结果表明鉴别分析的正确率高达96.55%。

表2 近红外光谱技术对食用油脂各项理化指标分析的适用性

理化指标	是否适用	应用	相关文献
游离脂肪酸含量	适用	多	[19-21]
碘值	适用	多	[19,21-22]
酸值	适用	多	[23]
过氧化值	适用	多	[19,24-26]
皂化值	适用	较少	[27]
极性组分	适用	少	[28]

食用油存放时间越长,其发生氧化酸败的程度就越高,因此过氧化值就越高。国际上最常用的测定方法是碘量法,虽然此法操作简单,但结果易受到溶液浓度、温度等外界因素的影响,且无法实现快速无损分析,而近红外光谱技术刚好能解决这些问题<sup>[24]</sup>。为了对食用油脂的氧化程度进行快速无损分析,Da Costa等<sup>[25]</sup>将不同品牌的30份过期大豆油和20份非过期大豆油分为训练样品组(15份非过期大豆油、20份过期大豆油)和测试样品组(5份非过期大豆油、10份过期大豆油),并采用近红外光谱技术和化学计量学工具建立的两种模型(SPA-DA、PLS-DA)分别对油样的过氧化值进行了分析,实验得到这两种模型对过期油和非过期油的正确分类率分别是96%和98%。此外,毕艳兰等<sup>[26]</sup>利用傅里叶近红外光谱技术结合化学计量学方法对食用植物油建立了过氧化值的定量分析模型,结果表明经过一阶导数结合单位长度归一化处理的光谱数据再采用PLS建立的分析模型效果最好,其中定标集和验证集的相关系数均为0.995,表明近红外光谱技术可以实现食用植物油过氧化值的快速无损分析。Mba等<sup>[19]</sup>利用傅里叶变换近红外光谱结合PLS对不同厂家的棕榈油和菜籽油按照不同比例制成混合油样进行建模分析,实验得到油脂样品的碘值、游离脂肪酸含量以及过氧化值的校准模型预测系数分别为0.98、0.9927和0.9927,结果表明利用傅里叶变换近红外光谱技术可以对食用油脂的理化指标进行快速无损分析,且结果准确率高。

除了针对植物油理化指标的检测,国内外也有许多关于近红外光谱用于动物油脂理化指标检测的相关研究<sup>[20]</sup>。为了提高便携式近红外光谱仪检测模型的预测性能,Foca等<sup>[22]</sup>进行了大量研究。首先分别考虑整个光谱范围和不同的信号预处理方法

计算 PLS 多元校正模型,然后选择最佳的信号预处理方法,采用两步变量选择过程:在第一步中使用区间 PLS 变量选择算法计算一组校正模型,在第二步中全面考虑第一步结果以选择最佳的校准模型。结果表明虽然 PLS 多元校正模型测得的相关系数的值不到 0.85,但是作为一种便携式检测方法,近红外光谱能够较为准确预测猪脂肪样本的碘值与脂肪酸含量,说明近红外光谱是一种便捷的无损分析方法。Adewale 等<sup>[21]</sup>利用傅里叶变换近红外光结合 PLS 回归算法对 4 种不同动物油脂中的碘值和游离脂肪酸含量进行了定量分析。利用一阶导数和二阶导数进行光谱预处理,结果表明傅里叶变换近红外光谱能有效地测定碘值和游离脂肪酸的含量,且适用于各种动物油脂的质量控制分析。

### 2.3 近红外光谱技术用于食用油脂无损掺假检测

食用油脂掺假中最常见的就是在高档油脂中加入一些廉价的油脂。但是由于食用油脂成分复杂,传统的方法很难分辨出劣质油脂的成分及含量。近红外光谱技术是目前发展起来的一种较先进的分析技术,国内外有着大量关于这项技术应用于食用油脂掺假的研究。山茶油具有很高的营养价值和药用价值,因此其价格高,然而在我国市场山茶油掺假的现象层出不穷。Wang 等<sup>[29]</sup>利用衰减全反射红外光谱和光纤近红外漫反射光谱作为快速有效的分类和量化技术对山茶油掺伪掺假进行了研究。山茶油主要成分为油酸,而大豆油主要成分为亚油酸,这两者存在较大差别。实验采用近红外光谱技术结合化学计量学方法(PLS、SIMCA)对山茶油样品进行了鉴别分析,结果表明实验所测的山茶油中掺入了廉价的大豆油。Karunathilaka 等<sup>[30]</sup>利用傅里叶变换近红外结合单变量的一致性指数和多元监督的 SIMCA 模型对特级初榨橄榄油以及掺假样本进行测定,结果表明该法能实现特级初榨橄榄油和一些商业性掺假特级初榨橄榄油的无损鉴别分析。黄油的成分包括脂肪、水及其他少量矿物质等,其中主要成分脂肪含量的高低是表征黄油质量好坏的一个重要指标。Dvořák 等<sup>[31]</sup>利用近红外光谱对来自捷克和其他国家的黄油样品进行了分析,建立了脂肪含量和干物质的校正模型,从而实现了黄油样品中脂肪含量以及干物质的快速无损分析。结果表明捷克市场和其他国家黄油样品并无较大差异,利用实验建立的脂肪含量和干物质校正模型得到的黄油中脂肪的含量可以将黄油样品分为纯黄油和掺假黄油。

食用油脂中一类重要的组成成分是脂肪酸,可以分为顺式脂肪酸和反式脂肪酸或饱和脂肪酸和不

饱和脂肪酸。食用油脂中的反式脂肪酸会引发心脑血管疾病,威胁人体健康。所以较好的油脂里面顺式脂肪酸较多,而劣质油如地沟油等的反式脂肪酸较多,但由于地沟油廉价,被很多不法商家掺入高价食用油中,会对社会及个人造成很大的危害。因此,需要对食用油脂中的顺式脂肪酸、反式脂肪酸以及饱和脂肪酸的含量等进行分析。Mossoba 等<sup>[32]</sup>用傅里叶变换近红外光谱对 30 多种市售的食用油脂饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸和反式脂肪酸含量进行了快速的分析,结果表明此方法与气相色谱法测定的结果具有一致性,且由于气相色谱对样品具有破坏性,所以近红外光谱技术可以替代耗时较长的气相色谱以实现食用油脂脂肪酸含量的快速无损分析。

### 3 近红外光谱技术在食用油脂原料无损分析中的应用

近红外光谱还可以用来无损检测食用油脂原料的含油量。Wan 等<sup>[33]</sup>利用近红外光谱结合 PLS 建立的分析模型对油菜籽的含油量进行了分析,采用一阶和二阶导数、矢量归一化以及多元散射校正对实验获得的光谱数据进行预处理,通过分析模型对近红外光谱技术和其他化学提取方法进行了比较,得到近红外光谱预测结果与化学萃取方法的相关校准系数、交叉验证系数和外部验证系数分别为 0.98、0.97 和 0.96,且外部验证的平均相对误差和平均绝对误差分别为 0.78 和 2.02%。结果表明近红外光谱技术与化学萃取技术具有一致性,且近红外光谱技术可以实现油菜籽含油量的快速无损检测。商连光等<sup>[34]</sup>利用近红外漫反射光谱结合 PLS 建立了无损分析模型,并对大量棉籽的含油量进行了测定。实验获得的光谱数据同样采用一阶导数和多元散射校正进行预处理。结果表明,模型测得棉籽含油量的预测值与化学值之间的误差范围为 0.1%~1.7%。因此,近红外光谱技术能够快速无损检测棉籽的含油量。在玉米含油量的研究中,玉米籽粒的不规则性会带来测量误差,崔志立等<sup>[35]</sup>利用短波近红外的透射能力强等特点研制出一种新的无损检测仪,采用较长的光程对玉米的含油量进行分析。实验得到校正集的相关系数为 0.957 9,检验集的相关系数为 0.968 8。结果表明这种仪器性能非常好,简单方便且不破坏玉米籽粒,能准确无损地检测玉米含油量。大量研究表明近红外技术可以应用于食用油脂原料含油量的无损分析。原料种子的含油量决定榨油的出油率,育种方面也会选择含油量高的种子进行培育。

#### 4 前景与展望

快速有效保证食用油脂的品质安全是我国面临的一个重大难题。近红外光谱技术因其简便高效,在种子含油量的检测、食用油脂的各项理化指标分析、掺伪掺假检验、产地来源及种类等快速无损鉴别分析领域有着很好的应用前景,然而至今并没有将该技术广泛应用于成品食用油销售市场,其主要原因在于成品食用油的分析需要拆开其外包装,因此并不能实现真正意义上的无损分析。因此,还需进一步研究利用近红外光谱技术在不拆开成品食用油包装的前提下进行食用油脂成分的分析,这将为我国油脂行业提供了一种更快速、先进的检测工具。其次,近红外光谱技术向着便携、方便的方向发展,要求其仪器小巧、简单、稳定,目前已有利用智能手机实现近红外分析的技术产生。实现近红外光谱技术在食用油脂分析领域中的广泛应用需要这些小型便携式检测设备的普及。综上所述,近红外光谱技术在食用油脂无损分析领域的发展前景不容小觑。

#### 参考文献:

- [1] LIU X P, WANG H Y, GUO Y L. Preliminary study on fast analysis of edible vegetable oils by ambient flame ionization - mass spectrometry [J]. *J Instr Anal*, 2017, 36(1):37-41.
- [2] MENG X, YE Q, NIE X, et al. Iodine value determination of edible oils using ATR - FTIR and chemometric methods [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2017, 119(9):1-7.
- [3] WANG N, MA T, YU X, et al. Determination of peroxide values of edible oils by ultraviolet spectrometric method [J]. *Food Anal Methods*, 2015, 9(5):1-6.
- [4] JEDRKIEWICZ R, GROMADZKA J, KONIECZKA P, et al. Novel fast analytical method for indirect determination of MCPD fatty acid esters in edible oils and fats based on simultaneous extraction and derivatization [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2017, 409(17):1-12.
- [5] JIMÉNEZ - CARVELO A M, GONZÁLEZ - CASADO A, CUADROS - RODRÍGUEZ L. A new analytical method for quantification of olive and palm oil in blends with other vegetable edible oils based on the chromatographic fingerprints from the methyl - transesterified fraction [J]. *Talanta*, 2017, 164: 540 - 547.
- [6] RUEPA A, SEIQVER I, OLALLA M, et al. Characterization of fatty acid profile of argan oil and other edible vegetable oils by gas chromatography and discriminant analysis [J]. *J Chem*, 2014(38):1-8.
- [7] BINETTI G, DEL C L, RAGONE R, et al. Cultivar classification of apulian olive oils; use of artificial neural networks for comparing NMR, NIR and merceological data [J]. *Food Chem*, 2017, 219:131-138.
- [8] YU X, LI Q, SUN D, et al. Determination of peroxide value of edible oils by FTIR spectroscopy using polyethylene film [J]. *Anal Methods*, 2015, 7(7):1727-1731.
- [9] 邓鹏, 薛文通, 宋康, 等. 循环伏安法测定油脂中过氧化物含量的研究[J]. *中国食物与营养*, 2008(4):26-29.
- [10] LI G, YOU J, SUO Y, et al. A developed pre - column derivatization method for the determination of free fatty acids in edible oils by reversed - phase HPLC with fluorescence detection and its application to *Lycium barbarum* seed oil [J]. *Food Chem*, 2012, 125(4):1365-1372.
- [11] DONG J, JINGZHU W U, CHEN Y, et al. Rapid determination of edible oil fatty acids using confocal laser microscopy Raman spectroscopy [J]. *Imag Sci Photo Chem*, 2017, 35(2):147-152.
- [12] 吴双, 涂斌, 郑晓, 等. 基于特征波长提取的激光近红外光谱快速鉴别食用植物油种类[J]. *中国油脂*, 2017, 42(4):72-75.
- [13] 刘翠玲, 位丽娜, 赵薇, 等. 近红外光谱技术在食用油种类鉴别及定量分析中的应用[J]. *中国酿造*, 2014, 33(11):149-151.
- [14] YANG H, IRUDAYARAJ J, PARADKAR M M. Discriminant analysis of edible oils and fats by FTIR, FT - NIR and FT - Raman spectroscopy [J]. *Food Chem*, 2005, 93(1):25-32.
- [15] CHEN B, TIAN P, LU D L, et al. Feasibility study of discriminating edible vegetable oils by 2D - NIR [J]. *Anal Methods*, 2012, 4(12):4310-4315.
- [16] GALTIER O, ABBAS O, DREAU Y L, et al. Comparison of PLS1 - DA, PLS2 - DA and SIMCA for classification by origin of crude petroleum oils by MIR and virgin olive oils by NIR for different spectral regions [J]. *Vib Spectrosc*, 2011, 55(1): 132-140.
- [17] 任静, 黄亚茹, 葛赞. 近红外光谱分析技术及其在油脂领域的应用 [J]. *日用化学品科学*, 2012, 35(8): 22-26.
- [18] 朱雨田, 李锦才, 高素君, 等. 近红外光谱技术在食用油快速检测领域中的研究进展 [J]. *中国油脂*, 2017, 42(7):140-143.
- [19] MBA O, ADEWALE P, DUMONT M J, et al. Application of near - infrared spectroscopy to characterize binary blends of palm and canola oils [J]. *Ind Crops Pro*, 2014, 61:472-478.
- [20] 吴晓红, 程欲晓, 杨勇, 等. 近红外光谱法快速测定动植物油脂中游离脂肪酸含量 [J]. *理化检验: 化学分册*, 2013(9):1025-1028.
- [21] ADEWALE P, MBA O, DUMONT M J, et al. Determination of the iodine value and the free fatty acid content of waste animal fat blends using FT - NIR [J]. *Vib Spec-*

- trose, 2014, 72(72):72-78.
- [22] FOCA G, FERRARI C, ULRICI A, et al. Iodine value and fatty acids determination on pig fat samples by FT-NIR spectroscopy [J]. *Food Anal Methods*, 2016, 9(10):1-16.
- [23] RAO Y, XIANG B, ZHOU X, et al. Quantitative and qualitative determination of acid value of peanut oil using near-infrared spectrometry [J]. *J Food Eng*, 2009, 93(2):249-252.
- [24] 王立琦,张礼勇,朱秀超.大豆油脂过氧化值的近红外光谱分析[J].*食品科学*,2010,31(6):205-207.
- [25] DA COSTA G B, FERNANDES D D, GOMES A A, et al. Using near infrared spectroscopy to classify soybean oil according to expiration date [J]. *Food Chem*, 2016, 196:539-543.
- [26] 毕艳兰,鲍丹青,田原,等.利用傅里叶近红外技术快速测定食用植物油的过氧化值[J].*中国油脂*,2009,34(3):71-74.
- [27] YASUSHI E, MISAKO T, KENICHIRO K. Rapid determination of iodine value and saponification value of fish oil by near infrared spectroscopy [J]. *J Food Sci*, 2010, 70(2):C127-C131.
- [28] CERTZ C, FIEBIG H J, HANCOCK J N S. FT-near infrared(NIR) spectroscopy - Screening analysis of used frying fats and oils for rapid determination of polar compounds, polymerized triacylglycerols, acid value and anisidine value [DGF C - VI 21a(13)] [J]. *Eur J Lipid Sci Tech*, 2013, 115(10):1193-1197.
- [29] WANG L, LEE F S C, WANG X, et al. Feasibility study of quantifying and discriminating soybean oil adulteration in camellia oils by attenuated total reflectance MIR and fiber optic diffuse reflectance NIR [J]. *J Agric Food Chem*, 2005, 53(16):6201-6206.
- [30] KARUNATHILAKA S R, KIA A F, SRIGLEY C, et al. Nontargeted, rapid screening of extra virgin olive oil products for authenticity using near-infrared spectroscopy in combination with conformity index and multivariate statistical analyses [J]. *J Food Sci*, 2016, 81(10):2390-2397.
- [31] DVOŘÁK L, LUŽOVÁ T, ŠUSTOVÁK. Comparison of butter quality parameters available on the Czech market with the use of FT-NIR technology [J]. *Mljekarstvo*, 2016, 66(1):73-80.
- [32] MOSSOBA M M, AZIZIAN H, TYBURCZY C, et al. Rapid FT-NIR analysis of edible oils for total SFA, MUFA, PUFA, and *trans* FA with comparison to GC [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2013, 90(6):757-770.
- [33] WAN L S, SUN H Q, NI Z B, et al. Rapid determination of oil quantity in intact rapeseeds using near-infrared spectroscopy [J]. *J Food Pro Eng*, 2018, 41(1):e12594.
- [34] 商连光,李军会,王玉美,等.棉籽油分含量近红外无损检测分析模型与应用[J].*光谱学与光谱分析*,2015,35(3):609-612.
- [35] 崔志立,谢锦春,王南,等.近红外单籽粒玉米油分无损测定仪器研制[J].*光谱学与光谱分析*,2005,25(11):1807-1809.
- (上接第136页)
- 参考文献:**
- [1] 张维农,刘大川.向日葵籽资源的综合开发[J].*武汉工业学院学报*,2002(1):29-30,35.
- [2] 高荣丽,陶冠军,杨严俊.葵花籽粕的综合利用[J].*食品工业科技*,2006,27(7):138-140.
- [3] 董聪,李芳,王琳,等.超声波预处理葵花籽粕蛋白制备抗氧化多肽的研究[J].*食品研究与开发*,2015,36(24):10-14.
- [4] 郭婷婷,万楚筠,黄凤洪,等.葵花籽粕酶法制备多肽的湿热预处理研究[J].*中国油脂*,2017,42(11):61-64.
- [5] 加列西·马那甫,德娜·吐热汗,景伟文.葵花籽粕蛋白质、绿原酸分步提取工艺参数优化[J].*分子科学学报*,2014,30(2):112-117.
- [6] 徐姗姗,阮美娟,李广鹏.葵花籽粕多肽的提取工艺研究[J].*食品工业科技*,2012,33(20):245-247.
- [7] 刘刚,王春燕,宋阳成.葵花籽粕中蛋白质提取工艺的优化[J].*长春师范学院学报(自然科学版)*,2011,30(3):82-85.
- [8] 刘文静,张雪,李鑫一,等.葵花籽粕中热变性蛋白粉制备工艺的研究[J].*粮食与油脂*,2017,30(11):79-82.
- [9] 李彩云,康健,刘晓娜,等.微波超声辅助优化葵花籽粕绿原酸的提取工艺[J].*中国油脂*,2016,41(2):88-91.
- [10] 杜延兵,裘爱泳,逯昕.葵花粕中绿原酸提取工艺的研究[J].*中国油脂*,2006,31(2):37-40.
- [11] 张海容,史振华.响应面法优化超声波辅助提取沙棘籽粕中黄酮工艺[J].*中国油脂*,2017,42(3):117-121.
- [12] 闵巍巍,张作法.黄酮类化合物的药理作用[J].*蚕桑通报*,2007,38(4):101-103.
- [13] 曹伟国,刘志勤,邵云,等.黄酮类化合物药理作用的研究进展[J].*西北植物学报*,2003,23(12):2241-2247.
- [14] 张斌,许莉.超声萃取技术研究与应用进展[J].*浙江工业大学学报*,2008,36(5):558-561.
- [15] 熊科,夏延斌,刘蓉,等.响应面法优化超声波强化提取醇溶性 $\beta$ -胡萝卜素[J].*食品科学*,2008,29(3):140-144.
- [16] 蔡文,谭兴和,张喻,等.超声辅助提取蜜柑皮总黄酮的工艺优化研究[J].*农产品加工*,2014(5):1-4.