

doi: 10.3969/j.issn.1004-4957.2020.10.002

我国油料产品品质的近红外光谱 快速检测技术研究进展

李雪^{1,2}, 王督^{1,3,4}, 白艺珍^{1,2,4}, 喻理^{1,2,4}, 岳晓凤^{1,2,4}, 张文^{1,3,4},
张良晓^{1,3,4*}, 李培武^{1,3,4}

- (1. 中国农业科学院油料作物研究所, 湖北 武汉 430062; 2. 农业农村部油料作物生物学与遗传改良重点实验室, 湖北 武汉 430062; 3. 农业农村部油料作物风险评估重点实验室(武汉), 湖北 武汉 430062; 4. 农业农村部油料及制品质量监督检验测试中心, 湖北 武汉 430062)

摘要: 近红外光谱技术是一种快速无损检测技术, 具有操作简单、检测成本低、无需化学试剂、绿色环保, 以及可实现多品质参数同步检测等优点。该文综述了我国油料和食用植物油品质的近红外光谱速测技术研究进展, 包括油料含油量、粗蛋白含量、脂肪酸含量等品质指标, 食用油的理化指标, 以及脂肪酸和食用油的真实性鉴别, 并对油料产品品质的近红外光谱速测技术的发展前景进行了展望。

关键词: 近红外光谱(NIRS); 品质检测; 油料; 食用油; 真实性鉴别

中图分类号: O657.72; TQ610.495 文献标识码: A 文章编号: 1004-4957(2020)10-1189-07

Research Progress of Near Infrared Spectroscopy in Rapid Determination on Quality of Oilseed Products in China

LI Xue^{1,2}, WANG Du^{1,3,4}, BAI Yi-zhen^{1,2,4}, YU Li^{1,2,4}, YUE Xiao-feng^{1,2,4},
ZHANG Wen^{1,3,4}, ZHANG Liang-xiao^{1,3,4*}, LI Pei-wu^{1,3,4}

- (1. Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China; 2. Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Oil Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430062, China; 3. Laboratory of Quality and Safety Risk Assessment for Oilseed Products(Wuhan), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430062, China; 4. Quality Inspection and Test Center for Oilseed Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430062, China)

Abstract: Near infrared spectroscopy (NIRS) is a rapid and nondestructive detection technique, which has the advantages of simple operation, low cost, no chemical reagent consumption and simultaneous detection of various quality parameters. In this review, research progress of near infrared spectroscopy(NIRS) technique in rapid determination on quality of oilseed and edible vegetable oils in China was reviewed, including oil content, crude protein content, fatty acid content and other quality parameters of oilseeds, as well as physicochemical properties, fatty acids and authenticity identification of edible oils. Moreover, the development prospects of NIRS technique in rapid determination of oilseed products quality were also anticipated.

Key words: near infrared spectroscopy(NIRS); quality detection; oilseeds; edible oil; authentication

我国是油料生产和消费大国, 主要包括油菜籽、大豆、花生、葵花籽、胡麻、芝麻等^[1]。油料及制品含有丰富的营养功能成分, 如蛋白质、脂肪酸、植物甾醇、多酚、维生素等, 为人类健康提供了必需的能量供给和营养物质^[2]。因此, 油料产品的质量安全问题引起了消费者的广泛关注。目前, 油料品质的检测主要采用传统方法, 如索氏提取法、杜马斯定氮法、紫外光谱法、气相色谱法、液相色谱法及色谱-质谱联用技术等, 该类方法需要化学试剂, 且操作复杂、耗时长、成本高, 无法满足现

收稿日期: 2020-04-23; 修回日期: 2020-06-10

基金项目: 国家重点研发计划专项(2017YFC1601700); 国家自然科学基金委面上项目(31871886); 国家农产品质量安全风险评估重大项目(GJFP2019003); 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-12)

* 通讯作者: 张良晓, 博士, 研究员, 研究方向: 油料质量安全与风险评估, E-mail: zhanglx@caas.cn

场快速无损检测的需要^[3-4]。与传统方法相比,近红外光谱技术是一种绿色、无损的快速检测技术,具有操作简单、检测成本低、无需化学试剂、绿色环保,以及可实现多品质参数同步检测等优点,广泛应用于油料品质的无损快速检测^[5-6]。

近红外光谱区介于可见光与中红外光谱区之间,波长范围为 780~2 500 nm,其中 780~1 100 nm 为近红外长波,1 100~2 500 nm 为近红外短波^[7-8]。近红外光谱主要是含氢基团伸缩和弯曲振动的倍频与合频吸收,通过透射和漫反射两种方式获得,用于分析固体、液体、气体等不同状态样品的物理化学性质^[9-12]。近红外光谱仪通常由光源、单色仪、检测器组成。常用光源包括钨卤素灯和发光二极管阵列,检测器包括 InGaAs 和 InSb 检测器^[13-14]。近红外光谱速测包括:首先,选择足量的代表性样品,采集样品原始光谱。由于背景及噪声干扰,泛音和组合谱带产生的近红外光谱宽广且高度重叠,导致从光谱中提取与油料品质相关的信息困难。因此,需要采用化学计量学方法对光谱数据进行预处理,去除光谱数据的冗余信息^[15]。其次,建立油料品质指标的预测模型。波长选择对模型建立至关重要,通过消除不相关或非线性的变量,获得鲁棒性良好的模型^[16]。最后,评价预测模型和进行未知样品测定。一般采用决定系数(Coefficient of determination, R^2),预测相关系数(Correlation coefficients for prediction, R_p),验证相关系数(Correlation coefficients for calibration, R_c),预测均方根误差(Root mean square error of prediction, RMSEP)和交叉验证均方根误差(Root mean square error of cross-validation, RMSECV)等参数评价预测模型。 R^2 是预测值与化学方法测定值样本集(校准、交叉验证或预测)性能的量度, RMSEP 和 RMSECV 是预测集和交叉验证集预测值和化学方法测定值之间差异的量度^[17]。通常 R^2 、 R_p 、 R_c 越大, RMSEP 和 RMSECV 越小,则模型性能越好^[18]。近红外光谱技术与化学计量学方法相结合已广泛应用于油料产品品质的速测。本文综述了我国油料和食用植物油品质的近红外光谱速测技术研究进展,包括油料含油量、粗蛋白含量、脂肪酸含量等品质指标,以及食用油的理化指标的测定,脂肪酸和食用油真实性的鉴别,并对油料产品品质的近红外光谱速测技术的发展前景进行了展望。

1 近红外光谱技术在油料品质中的应用

1.1 油料含油量与粗蛋白质含量的测定

含油量、粗蛋白质含量是油料最重要的品质指标。近年来,基于近红外光谱的油料中含油量与粗蛋白质含量的快速检测方法得到快速发展,并已经广泛应用于油菜籽、大豆、芝麻等主要油料。陈斌等^[19]采用微型近红外光谱仪测定油菜籽含油量,采用不同预处理方法优选波长和优化参数,结合偏最小二乘回归和最小二乘支持向量机方法建模,两种化学计量学方法建立的模型 R_p 分别为 0.933 0、0.919 2, RMSEP 分别为 0.007 5、0.005 5。证明微型近红外光谱仪可用于油菜籽含油量的检测,同时为微型近红外光谱仪测定其他油料作物的品质指标提供了参考。李英等^[20]通过采集油菜籽的近红外光谱对其含油量进行预测,得到 Q 值为 0.512,相关系数(R)为 0.73。李殿平等^[21]利用近红外光谱技术对大豆籽粒中的含油量和粗蛋白质含量进行快速无损检测,相关系数与经典测定含油量的索氏提取法与粗蛋白质的凯氏定氮法结果相比,偏差均小于 1.36 个百分点,实现了近红外光谱技术测定大豆籽粒中的含油量和粗蛋白质含量。温冰消等^[22]利用近红外光谱技术检测了鲜食大豆中的含油量和可溶性粗蛋白含量。王丽萍等^[23]通过近红外漫反射光谱法检测了粉末和完整大豆中的含油量和粗蛋白质含量,构建的粉末大豆和完整大豆的含油量和粗蛋白质含量模型的 R^2 大于 0.87,从而达到很好的预测性能,实现了近红外漫反射光谱法预测粉末和完整大豆的含油量和粗蛋白质含量。赵影等^[24]利用近红外谷物分析仪对大豆中的粗蛋白质含量进行检测,与凯氏定氮法结果相比较,偏差均小于 1 g/100 g,相对误差均小于 2%,研究结果显示近红外光谱法预测大豆中粗蛋白质含量的效果良好,可用于大豆中粗蛋白质含量的检测。鄧建军^[25]利用 LD 近红外芝麻脂肪检测仪选用不同的预处理方法优选特征波长,结合随机森林算法建立了芝麻含油量的近红外模型,最优模型的 R_c 和 R_p 分别为 0.963 8、0.929 5,校正均方根误差(Root mean square error of calibration, RMSEC)和 RMSEP 分别为 0.009 4、0.012 5。表明 LD 近红外芝麻脂肪检测仪可快速测定芝麻含油量。刘盼等^[26]利用改进的偏最小二乘法建立了芝麻中含油量和粗蛋白质含量的近红外模型,测得预测值和化学值的相关系数良好,分别为 0.970 2 和 0.975 6。研究结果表明近红外光谱技术可以实现芝麻中含油量和粗蛋白质含量的快速测定。

近红外光谱法检测油料含油量和粗蛋白质含量表现出良好的准确度和预测性能，从而为快速准确测定油料含油量和粗蛋白质含量提供了技术支撑。

1.2 油料脂肪酸含量的测定

油菜籽、花生、紫苏、向日葵籽仁中含有丰富的不饱和脂肪酸，营养价值高，利用近红外光谱技术可实现油料脂肪酸含量的快速测定。原喆等^[27]建立了油菜籽中油酸、芥酸、棕榈酸、硬脂酸、亚油酸、亚麻酸、花生酸等10种脂肪酸的近红外模型，所建模型的预测结果良好，可用于油菜籽中脂肪酸的测定。张晓科等^[28]选取自然风干的花生作为实验材料，采集其近红外光谱，并测定其油酸、亚油酸、棕榈酸含量，建立的近红外模型 R^2 分别为0.8916、0.9085、0.7921，RMSECV分别为2.62、2.00、0.525。模型效果良好，因此可以更好地实现高油酸花生品种的选育。张鹤^[29]采用改进偏最小二乘法回归技术建立了花生中油酸、亚油酸、棕榈酸模型。商志伟等^[30]构建了基于近红外光谱技术的紫苏中棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、 α -亚麻酸的模型。汪磊等^[31]利用近红外光谱技术测定了向日葵籽仁中油酸、亚油酸、饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸的含量，并采用改进偏最小二乘法建立了最优模型，结果显示相关系数和决定系数均较高，可实现向日葵籽仁中油酸、亚油酸、饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸含量的预测。与此同时，近红外光谱还在单粒样品中脂肪酸含量的测定上取得了突破，李建国等^[32]建立了单粒花生中主要脂肪酸含量的近红外模型，油酸、亚油酸、棕榈酸的预测结果 R^2 分别为0.907、0.918、0.824，RMSECV分别为3.463、2.824、0.782。单粒花生中主要脂肪酸含量模型的建立为高效选定高油酸花生提供了方法与依据。

1.3 油料其它品质参数的测定

近红外光谱技术不仅用于油料作物中含油量、粗蛋白质含量和脂肪酸含量的快速测定，还用于糖类、维生素、叶绿素、总酚等营养指标的检测。秦利等^[33]利用近红外光谱仪结合偏最小二乘法实现了花生籽仁中蔗糖含量的测定， R^2 为0.822，校正标准误差为0.386，交叉检验标准误差为0.480。结果表明可利用近红外光谱技术替代化学测定方法预测花生籽仁中的蔗糖含量。王潇潇等^[34]选取去皮豆粕、膨化豆粕、发酵豆粕及膨化大豆4种大豆制品共160个样品，利用近红外光谱技术测定其蔗糖、棉籽糖及水苏糖含量，结果表明去皮豆粕、膨化豆粕及膨化大豆的构建模型效果良好，但测得发酵大豆中各种寡糖含量的误差较大，因此模型的建立适用于除发酵大豆之外的其他3种大豆制品中寡糖的测定。刘婷等^[35]利用反相高效液相色谱法测定了自然风干花生种子中维生素E的含量，同时利用近红外光谱仪采集其近红外光谱，并采用一阶导数和多元散射校正的预处理方法建立了花生种子中维生素E的近红外模型，测得 R^2 为88.34，RMSECV为0.423，实现了利用近红外光谱技术对花生中维生素E含量的测定。原喆^[27]建立了油菜籽中维生素E总量的近红外模型。李雪等^[36]建立了基于近红外光谱油菜籽中叶绿素含量的模型，结果显示 R^2 为0.9446，RMSECV为1.36。表明所建模型可以很好地预测油菜籽中的叶绿素含量。汪丹丹^[37]选取具有代表性的332份油菜籽样品，利用近红外光谱技术检测油菜籽中的总酚含量，模型评价结果 R^2 为0.9728，RMSECV为124.54，测定结果显示近红外光谱技术作为一种快速无损检测技术可用于菜籽中总酚含量的预测。

2 近红外光谱技术在食用油品质中的应用

2.1 食用油理化指标的测定

碘值是测定油脂不饱和度的指标，酸价、过氧化值可用于确定食用油氧化酸败的程度。作为油脂中的重要化学指标，可以利用近红外光谱技术对其实现快速检测。秦修远等^[38]利用近红外光谱仪分析棕榈油碘值，通过竞争性自适应重加权算法(Competitive adaptive reweighted sampling, CARS)选择变量优化模型，得到 R_p 、 R_c 、RMSEP、RMSEC分别为0.9806、0.9814、0.0406、0.0398，结果显示近红外光谱法可用作棕榈油碘值的快速测定，也为其他食用油中碘值的测定提供了方法参考。周小华等^[39]采用移动窗口偏最小二乘法选择光谱区间，结合偏最小二乘法建立花生油酸价模型，结果显示 R_p 、 R_c 分别为0.9969、0.9932，RMSEP、RMSECV分别为0.1315、0.24776，实现了近红外光谱技术快速测定花生油酸价。张欣等^[40]测定花生油酸价和过氧化值，通过选择最佳预处理方法建立了近红外模型，得到酸价和过氧化值的建模结果 R^2 分别为93.88、91.93，RMSECV分别为0.074、1.23。表

明所建模型能满足花生油过氧化值和酸价的测定。彭博等^[41]通过去趋势技术联用算法的预处理方法与粒子群算法的参数优化方法相结合,利用近红外光谱技术测定了 61 份植物油的过氧化值,预测集和校正集的相关系数均大于 90%。表明近红外光谱技术可实现植物油中过氧化值的预测。曹小华等^[42]建立了近红外光谱技术快速测定大豆油中过氧化值的模型。

2.2 在脂肪酸中的应用

近红外光谱技术不仅用于油料中脂肪酸的检测,还用于食用油中脂肪酸含量的测定。吴静珠等^[43]通过组合间隔偏最小二乘法优选变量,建立了食用油中油酸含量测定的近红外模型, R^2 、RMSECV、RMSEP 分别为 0.995 0、1.037 2、0.924 6,表明所建模型的预测结果良好。李希熙^[44]采集了 145 个菜籽油的近红外光谱,建立了菜籽油中油酸、亚麻酸、棕榈酸、硬脂酸、花生一烯酸和芥酸的近红外预测模型,模型拟合精度良好。由此可见,近红外光谱技术为菜籽油中多种脂肪酸的同时测定提供了一种快速无损的方法。赵志伟^[45]采用偏最小二乘法建立了白檀果实油中油酸、亚油酸、棕榈酸的近红外模型,结果显示具有较高的验证决定系数和较低的验证均方差。预测模型能对白檀果实油中油酸、亚油酸、棕榈酸含量进行快速测定。何小三等^[46]利用近红外光谱技术结合偏最小二乘法实现了茶油中脂肪酸含量的测定。郝勇等^[47]分别将棕榈油和菜籽油以一定比例掺入山茶油中配制 76 份山茶油混合油,利用偏最小二乘回归法建立了山茶油混合油中油酸和亚油酸的测定模型,结果表明近红外光谱技术可用于山茶油混合油中油酸和亚油酸的测定。

2.3 在食用植物油真实性鉴别中的应用

山茶油、核桃油、橄榄油等食用油因其营养价值高受到消费者青睐,但由于其价格高,一些不法商贩在利益驱使下,将廉价食用油掺入山茶油、核桃油、橄榄油等高价食用油中。为了维护消费者的合法权益,保障食用油产业健康发展,亟需建立食用油真实性鉴别技术,尤其是以近红外光谱为代表的食用油真实性快速鉴别技术。表 1 综述了近红外光谱技术在食用油掺伪鉴别中的应用。

表 1 近红外光谱技术在食用油掺伪鉴别中的应用
Table 1 Application of NIR in the adulterated identification of edible oils

Specie	Adulteration level	Spectral range(nm)	Model	Performance	Reference
山茶油	一元	1 000 ~ 2 500	主成分 - 支持向量机法	Accuracy: 96.38%	[48]
橄榄油	一元	1 000 ~ 2 500	迭代保留信息变量 - 联合区间 偏最小二乘法	R_c : 0.999 2, R_p : 0.997 2, RMSECV: 0.005 6, RMSEP: 0.014 0	[49]
大豆油	一元	1 000 ~ 2 500	主成分分析法	Accuracy: 100%	[50]
芝麻油	一元	1 350 ~ 1 800	支持向量机法	Accuracy: 100%	[51]
稻米油	多元	1 350 ~ 1 800	支持向量机回归法	$R > 0.99$, 均方根误差 (MSE) $< 5.55 \times 10^{-4}$	[52]
花生油	多元	1 350 ~ 1 800	支持向量机法	$R > 99.04\%$, $MSE < 6.99 \times 10^{-4}$	[53]
火麻油	多元	1 000 ~ 2 500	最小二乘支持向量机法	$R^2 > 0.90$	[54]
亚麻籽油	多元	1 000 ~ 2 500	单类偏最小二乘法	Accuracy: 95.8%	[55]
山茶油	一元、二元、三元	350 ~ 1 800	偏最小二乘 - 线性判别分析	Accuracy: 100%	[56]
核桃油	一元、二元、多元	833 ~ 2 500	偏最小二乘法	$R_c > 0.99$, $R_{cv} > 0.99$	[57]
芝麻油、 油茶籽油	二元、三元、 多元	1 350 ~ 1 800	支持向量机回归、组合 区间偏最小二乘法	$R > 0.99$	[58]
山茶油	二元、三元	1 000 ~ 2 500	偏最小二乘法	$R_c > 0.99$, $R_p > 0.99$, $R_{cv} > 0.99$	[59]
芝麻油	掺入香精	833 ~ 2 500	极限学习机算法	Accuracy: 100%	[60]

褚璇等^[48]利用近红外光谱技术对纯山茶油和掺有葵花籽油的山茶油进行检测,采用主成分 - 支持向量机法能够对纯山茶油和掺有葵花籽油的山茶油进行判别分析,准确率分别为 96.38% 和 94.20%。韩蔚强^[49]实现了近红外光谱技术鉴别特级初榨橄榄油中玉米油的掺伪,采用迭代保留信息变量结合联合区间偏最小二乘法建立模型,测定 R_c 、 R_p 分别为 0.999 2 和 0.997 2, RMSECV、RMSEP 分别为 0.005 6 和 0.014 0。所建模型能够准确预测特级初榨橄榄油中玉米油的掺伪。蔡立晶等^[50]利用近红外光谱技术准确判别纯大豆油与掺有猪油的大豆油。陈洪亮^[51]采用 K - SVD 算法优选波长特征变量,与支持向量机方法相结合测定芝麻油的掺假和掺假油的种类,纯芝麻油、芝麻油掺杂大豆油或者菜籽油的准确判别率为 100%。近红外光谱已经成功应用于山茶油、橄榄油、大豆油和芝麻油等食用油的掺

假鉴别。

近年来,近红外光谱技术在食用油多元掺假鉴别上取得了突破。涂斌等^[52]利用激光近红外光谱技术结合支持向量机回归法实现了稻米油的掺伪鉴别。曾路路等^[53]通过近红外光谱技术对花生油中掺杂的餐饮废弃油、大豆油、玉米油、菜籽油进行检测,既能实现纯花生油与掺假花生油100%的正确分类,又能实现掺假量的预测。李颖等^[54]建立了近红外光谱技术结合最小二乘支持向量机法对火麻油的掺伪鉴别模型,通过CARS选取特征变量,结果显示火麻油中掺假玉米油、大豆油、葵花籽油、花生油的 R^2 均大于0.90。所建模型能够实现火麻油中玉米油、大豆油、葵花籽油、花生油的掺假。Yuan等^[55]利用正交校正的偏最小二乘判别分析选取了亚麻籽油的184个特征波长,建立了基于近红外光谱的单类偏最小二乘多元目标掺伪鉴别模型。结果显示当掺伪量 $\geq 5\%$ 时,亚麻籽油的正确判别率达到100%,掺假亚麻籽油的正确判别率达95.8%,为食用植物油多元掺伪快速鉴别提供了一种新的思路和技术支撑。孙通等^[56]利用近红外光谱技术结合偏最小二乘-线性判别分析对山茶油中掺入花生油、大豆油、菜籽油和混合油进行检测,子窗口重排分析的波长变量筛选方法能够对纯山茶油样本和掺假的山茶油样本进行100%正确分类,可实现山茶油的掺伪鉴别。彭星星等^[57]对掺入菜籽油、大豆油和玉米油的核桃油进行鉴别,当核桃油掺入其中1种、2种或3种油时其预测结果均良好, R_c 、交叉验证集性能指数(R_{cv})均大于0.99,表明近红外光谱技术可实现核桃油中菜籽油、大豆油和玉米油的掺假鉴别。俞雅茹^[58]建立了芝麻油和油茶籽油的二元、三元和多元掺伪模型。姚婉清等^[59]利用近红外光谱技术对山茶油中掺入花生油、玉米油和花生油与玉米油的二元和三元掺假进行建模,所建模型效果良好,可以实现对山茶油的多元掺假判别。张亦婷等^[60]对纯正芝麻油和掺有芝麻香精的豆油、菜籽油和玉米油进行掺伪研究,采用近红外光谱法与极限学习机模式识别算法相结合成功预测了纯正芝麻油与假冒芝麻油,预测正确率为100%。与此同时,对食用油不同等级间的掺伪鉴别研究也是近年的研究热点。

3 近红外光谱技术在油料产品品质检测中的应用前景与展望

随着社会发展和人民生活水平的提高,人们对优质营养健康食用油料油脂的需求越来越大。油料和食用油的品质检测在优良油料品质选育、优质食用油开发和生产中发挥着重要作用。近红外光谱技术作为快速无损检测技术,具有快速、无损、稳定性高、不消耗化学试剂,以及可实现多组分同时检测的优点,在油料和食用油品质检测中广为应用。近红外光谱技术已广泛用于油料含油量、粗蛋白质含量、脂肪酸含量等品质指标的检测以及食用油真实性鉴别。近年来,近红外光谱技术与成像技术相结合的近红外高光谱成像技术,成为油料油脂品质指标检测与食用油真实性鉴别的新发展方向。同时,近红外光谱技术在酚类物质、甾醇、维生素等特异品质指标检测上取得突破,通过优化和开发新型化学计量学方法进行样品识别、变量选择、模型应用域评估,近红外光谱在快速测定油料与食用油的特异品质中发挥着更重要作用。此外,近红外光谱仪小型化、智能化、便携化也是今后发展的重要方向,开发信噪比高、稳定性好的近红外光谱仪,实现现场或在线检测,从而节省时间、提高效率,对发挥近红外光谱优势,促进油料产业高质量发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] Huang F H, Niu Y X. *Food. Nutr. China*(黄凤洪, 钮琰星. 中国食物与营养), **2003**, (11): 9-11.
- [2] Yang R N, Zhang L X, Li P W, Yu L, Mao J, Wang X P, Zhang Q. *Trends Food Sci. Technol.*, **2018**, 74: 26-32.
- [3] Li X, Zhang L X, Zhang Y, Wang D, Wang X F, Yu L, Zhang W, Li P W. *Trends Food Sci. Technol.*, **2020**, 101: 172-181.
- [4] Hou Q J, Ju X R, He R. *J. Chin. Cereals Oils Assoc.* (后其军, 鞠兴荣, 何荣. 中国粮油学报), **2015**, 30(7): 135-140.
- [5] Jin D, Zhang D K, Wang S K, Chen X, Li Y X, Xu H R. *Guangdong Chem. Ind.* (金丹, 张大奎, 王守凯, 陈兴, 李懿轩, 许浩然. 广东化工), **2018**, 45(3): 118-119.
- [6] Lu M J. *J. Clin. Med. Lit.* (路茂菊. 临床医药文献杂志), **2018**, 5(29): 181.
- [7] Chu X L, Yuan H F, Lu W Z. *Prog. Chem.* (褚小立, 袁洪福, 陆婉珍. 化学进展), **2004**, 16(4): 528-541.
- [8] Hussain N, Sun D W, Pu H B. *Trends Food. Sci. Technol.*, **2019**, 91: 598-608.

- [9] Wang J H, Wang J, Wang Y F, Han D H. *Food Sci.* (王加华, 王军, 王一方, 韩东海. 食品科学), **2014**, 35(18): 136–140.
- [10] Chu X L, Shi Y Y, Chen P, Li J Y, Xu Y P. *J. Instrum. Anal.* (褚小立, 史云颖, 陈瀑, 李敬岩, 许育鹏. 分析测试学报), **2019**, 38(5): 603–611.
- [11] Lohumi S, Lee S, Lee H, Cho B K. *Trends Food. Sci. Technol.*, **2015**, 46: 85–98.
- [12] Pasquini C. *Anal. Chim. Acta*, **2018**, 1026: 8–36.
- [13] Fu X P, Ying Y B. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, **2016**, 56(11): 1913–1924.
- [14] Fakayode S O, Baker G A, Bwambok D K, Bhawawet N, Elzey B, Siraj N, Macchi S, Pollard D A, Perez R L, Duncan A V, Warner I M. *Appl. Spectrosc. Rev.*, **2019**. doi: 10.1080/05704928.2019.1631176.
- [15] Zareef M, Chen Q S, Hassan M M, Arslan M, Hashim M M, Ahmad W, Kutsanedzie F Y H, Agyekum A A. *Food Eng. Rev.*, **2020**, 12(2): 173–190.
- [16] Yin L H, Zhou J M, Chen D D, Han T T, Zheng B S, Younis A, Shao Q S. *Spectrochim. Acta A*, **2019**, 221: 117208.
- [17] Teixeira A M, Sousa C. *Food Chem.*, **2019**, 277: 713–724.
- [18] Kutsanedzie F Y H, Guo Z M, Chen Q S. *Food Rev. Int.*, **2019**, 35(6): 536–562.
- [19] Chen B, Lu B, Lu D L. *Mod. Food Sci. Technol.* (陈斌, 卢丙, 陆道礼. 现代食品科技), **2015**, 31(8): 286–293.
- [20] Li Y, Chen H, Zhou Y, Sun X M, Ge H X. *Shaanxi J. Agric. Sci.* (李英, 陈浩, 周游, 孙晓敏, 葛红心. 陕西农业科学), **2015**, 61(11): 37–38.
- [21] Li D P, Wang G Y. *Mod. Agric. Sci. Technol.* (李殿平, 王桂艳. 现代农业科技), **2015**, (9): 297, 304.
- [22] Wen B X, Liu W G, Li H Q, Liu T, Gao Y, Li S X, Yang W Y. *Mol. Plant Breed*(温冰消, 刘卫国, 李虹桥, 刘婷, 高阳, 李淑贤, 杨文钰. 分子植物育种), **2018**, 16(12): 4062–4067.
- [23] Wang L P, Chen W J, Zhao X Z, Zhang X. *Soybean Sci.* (王丽萍, 陈文杰, 赵兴忠, 张新. 大豆科学), **2019**, 38(2): 280–285.
- [24] Zhao Y, Wang W H, Teng J Q, Gao F X, Han G X, Wang Y, Kuang N S. *Grain Storage*(赵影, 王文和, 滕娇琴, 高凤香, 韩桂新, 王宇, 匡乃绅. 粮食储藏), **2018**, 47(4): 37–39, 44.
- [25] Zhi J J. *Wavelength Determination and Application of Near Infrared Sesame Fat Detector on LD*. Zhenjiang: Jiangsu University(鄧建军. LD 近红外芝麻脂肪检测仪波长的确定及应用研究. 镇江: 江苏大学), **2016**.
- [26] Liu P, Zhang Y X, Li D H, Wang L H, Gao Y, Zhou R, Zhang X R, Wei X. *Chin. J. Oil Crop Sci.* (刘盼, 张艳欣, 黎冬华, 王林海, 高媛, 周璐, 张秀荣, 魏鑫. 中国油料作物学报), **2016**, 38(6): 722–729.
- [27] Yuan Z. *Study on the Detection Technology of Oilseeds and Oils Based on Near Infrared Spectroscopy*. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (原喆. 基于近红外光谱的油料油脂检测技术研究. 北京: 中国农业科学院), **2018**.
- [28] Zhang X K, Wang S S, Qu W H. *Agric. Dev. Equip.* (张晓科, 王珊珊, 曲伟华. 农业开发与设备), **2017**, (7): 76–77.
- [29] Zhang H. *The Establishment of Near-infrared Model of Peanut Fatty Acids and the Screening of High Oleic Germplasm*. Jilin: Jilin Agricultural University(张鹤. 花生脂肪酸近红外模型的建立及高油酸种质的筛选. 吉林: 吉林农业大学), **2017**.
- [30] Shang Z W, Zhao Y, Shen Q, Wang X P, Xu J, Yang S, Tian S G, Wen H. *Spectrosc. Spectral Anal.* (商志伟, 赵云, 沈奇, 王仙萍, 徐静, 杨森, 田世刚, 温贺. 光谱学与光谱分析), **2017**, 37(12): 3719–3724.
- [31] Wang L, Tan M L, Fu C L, Wang W, Wang L J, Yin Z Y, Yan X C. *Chin. J. Oil Crop Sci.* (汪磊, 谭美莲, 傅春玲, 汪魏, 王力军, 尹紫艳, 严兴初. 中国油料作物学报), **2020**, 42(1): 1–7.
- [32] Li J G, Xue X M, Zhang Z H, Wang Z H, Yan L Y, Chen Y N, Wan L Y, Kang Y P, Huai D X, Jiang H F, Lei Y, Liao B S. *Acta Agron. Sin.* (李建国, 薛晓梦, 张照华, 王志慧, 晏立英, 陈玉宁, 万丽云, 康彦平, 淮东欣, 姜慧芳, 雷永, 廖伯寿. 作物学报), **2019**, 45(12): 1891–1898.
- [33] Qin L, Liu H, Du P, Dong W Z, Huang B Y, Han S Y, Zhang Z X, Qi F Y, Zhang X Y. *Chin. J. Oil Crop Sci.* (秦利, 刘华, 杜培, 董文召, 黄冰艳, 韩锁义, 张忠信, 齐飞艳, 张新友. 中国油料作物学报), **2016**, 38(5): 666–671.
- [34] Wang X X, Li J T, Sun X L, Han M M, Chen Y Q, Zhang L Y. *Spectrosc. Spectral Anal.* (王潇潇, 李军涛, 孙祥丽, 韩苗苗, 陈义强, 张丽英. 光谱学与光谱分析), **2018**, 38(1): 58–61.
- [35] Liu T, Wang C T, Tang Y Y, Hu D Q, Wang X Z, Wu Q, Sun Q X, Wang Z W, Song G S, Shi C R, Yin D M. *Shandong Agric. Sci.* (刘婷, 王传堂, 唐月异, 胡东青, 王秀贞, 吴琪, 孙全喜, 王志伟, 宋国生, 石程仁, 殷冬梅. 山东农业科学), **2018**, 50(6): 163–166.
- [36] Li X, Yang R N, Yuan Z, Wang D, Zhang L X, Zhang W, Zhang Q, Li P W. *Chin. J. Oil Crop Sci.* (李雪, 杨瑞楠, 原喆, 王督, 张良晓, 张文, 张奇, 李培武. 中国油料作物学报), **2019**, 41(1): 126–129.
- [37] Wang D D. *Research on Determination of Nutritional Components in Rapeseed and Sesame Based on Metabolomics*. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences(汪丹丹. 基于代谢组学的油菜和芝麻特质营养成分分析. 北京: 中国农业科学院), **2019**.
- [38] Qin X Y, Zhai Y Y, Li X Y, Gong Y. *Chin. J. Anal. Lab.* (秦修远, 翟媛媛, 李晓云, 龚隼. 分析实验室), **2017**, 36(7): 790–793.

- [39] Zhou X H, Zhang M, Xiang B R. *Sci. Technol. Cereals Oils Foods*(周小华, 张玫, 相秉仁. 粮油食品科技), **2017**, 25(2): 62-64.
- [40] Zhang X, Tang Y Y, Wang X Z, Wu Q, Sun Q X, Wang Z W, Liu T, Wang C T. *Shandong Agric. Sci.*(张欣, 唐月异, 王秀贞, 吴琪, 孙全喜, 王志伟, 刘婷, 王传堂. 山东农业科学), **2018**, 50(6): 167-170.
- [41] Peng B, Tu B, Chen Z, Zheng X. *J. Wuhan Polytech. Univ.*(彭博, 涂斌, 陈志, 郑晓. 武汉轻工大学学报), **2016**, 35(1): 13-16, 42.
- [42] Cao X H, Liu J H. *Guangdong Feed*(曹小华, 刘娟花. 广东饲料), **2017**, 26(5): 35-39.
- [43] Wu J Z, Shi R J, Chen Y, Liu C L. *J. Chin. Cereals Oils Assoc.*(吴静珠, 石瑞杰, 陈岩, 刘翠玲. 中国粮油学报), **2015**, 30(2): 118-121.
- [44] Li X X. *Studies on the Fast Evaluation Method to Rapeseeds Oil Quality Based on Near Infrared Reflectance Spectroscopy*. Wuhan: Huazhong Agricultural University(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. 武汉: 华中农业大学), **2015**.
- [45] Zhao Z W. *NIR Calibration Model Building of Oil Content and Components of Symplocos Paniculata Fruit*. Changsha: Central South University of Forestry and Technology(赵志伟. 白檀果实油含量及组分近红外定标模型构建. 长沙: 中南林业科技大学), **2015**.
- [46] He X S, Li B, Fu S G, He Y C, Cao B, Fu Y X, Liu Y X, Hua X J, Lei X L. *South China Forestry Sci.*(何小三, 李博, 符树根, 贺义昌, 曹冰, 付宇新, 刘易鑫, 华小菊, 雷小林. 南方林业科学), **2018**, 46(5): 13-19, 23.
- [47] Hao Y, Wu W H, Shang Q Y, Geng P. *Acta Opt. Sin.*(郝勇, 吴文辉, 商庆园, 耿佩. 光学学报), **2019**, 39(9): 1-6.
- [48] Chu X, Wang W, Zhao X, Jiang H Z, Wang W, Liu S Q. *Spectrosc. Spectral Anal.*(褚璇, 王伟, 赵昕, 姜洪喆, 王伟, 刘声泉. 光谱学与光谱分析), **2017**, 37(1): 75-79.
- [49] Han W Q. *Study on Quality Identification and Doping Analysis of Olive Oil Based on Near Infrared Spectroscopy Technique*. Zhenjiang: Jiangsu University(韩蔚强. 基于NIRS技术的橄榄油品质鉴别及掺杂分析方法研究. 镇江: 江苏大学), **2016**.
- [50] Cai L J, Cai L J, Li W Y, Zhao X Y, Shang T Y. *Hubei Agric. Sci.*(蔡立晶, 蔡立娟, 李文勇, 赵肖宇, 尚廷义. 湖北农业科学), **2015**, 54(1): 175-177.
- [51] Chen H L. *Study on Detection Method of Sesame Oil Adulteration Based on Near Infrared Spectroscopy and Pattern Analysis*. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics(陈洪亮. 基于近红外光谱与模式分析的芝麻油掺伪检测方法研究. 南京: 南京财经大学), **2019**.
- [52] Tu B, Song Z Q, Zheng X, Zeng L L, Yin C, He D P, Qi P S. *Spectrosc. Spectral Anal.*(涂斌, 宋志强, 郑晓, 曾路路, 尹成, 何东平, 亓培实. 光谱学与光谱分析), **2015**, 35(6): 1539-1545.
- [53] Zeng L L, Tu B, Yin C, Zheng X, Song Z Q, He D P, Qi P S. *J. Chin. Cereals Oils Assoc.*(曾路路, 涂斌, 尹成, 郑晓, 宋志强, 何东平, 亓培实. 中国粮油学报), **2016**, 31(8): 126-130, 137.
- [54] Li Y, Chen Y S, Lü L, Wang S Y, Wang W, Fu C L. *J. Fuzhou Univ. : Nat. Sci. Ed.*(李颖, 陈元胜, 吕靓, 汪少芸, 王武, 付才力. 福州大学学报: 自然科学版), **2018**, 46(4): 574-579.
- [55] Yuan Z, Zhang L X, Wang D, Jiang J, Harrington P B, Mao J, Zhang Q, Li P W. *LWT*, **2020**, 125: 109247.
- [56] Sun T, Wu Y Q, Li X Z, Xu P, Liu M H. *Acta Opt. Sin.*(孙通, 吴宜青, 李晓珍, 许朋, 刘木华. 光学学报), **2015**, 35(6): 350-357.
- [57] Peng X X, Chen W M, Qiao Q H, Gao R X, Yin Z R, Xu H D. *J. Chin. Cereals Oils Assoc.*(彭星星, 陈文敏, 乔茜华, 高瑞雄, 尹梓如, 徐怀德. 中国粮油学报), **2015**, 30(12): 106-113.
- [58] Yu Y R. *Study on Detection of Adulterated Sesame Oil and Tea Seed Oil by Near Infrared Spectroscopy*. Wuhan: Wuhan Polytechnic University(俞雅茹. 芝麻油和油茶籽油掺伪近红外光谱法检测研究. 武汉: 武汉轻工大学), **2018**.
- [59] Yao W Q, Peng M X, Chen Z Y, Zhang J M, Lin L Q, Gan H C. *J. Food Saf. Qual.*(姚婉清, 彭梦侠, 陈梓云, 张家蔓, 林量谦, 甘海昌. 食品安全质量检测学报), **2020**, 11(2): 493-499.
- [60] Zhang Y T, Liu C L, Wei L N. *Food Sci. Technol.*(张亦婷, 刘翠玲, 位立娜. 食品科技), **2016**, 41(9): 257-261.

(责任编辑: 龙秀芬)