中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(4):265-270
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2025297

向日葵脂肪酸近红外模型构建及应用综述

高宇,于海峰*,牟英男,郭树春,聂惠,梁晨,邵盈,赵令敏,解嘉鑫
(内蒙古农牧业科学院,内蒙古 呼和浩特,010031)

摘要:油酸含量是决定向日葵籽油品质与营养价值的关键因素,高油酸品种培育是向日葵育种的核心目标,而精准快速的脂肪酸检测技术是其重要支撑。本文详细综述了高油酸向日葵育种现状及近红外光谱技术(NIRS)在向日葵籽仁脂肪酸检测中的应用和相关近红外模型构建流程,该技术无需复杂预处理,即可实现脂肪酸组分快速定量测定。综述明确了模型构建思路与应用方向,为向日葵脂肪酸无损高效检测技术研发奠定基础,对推动高油酸向日葵育种具有重要参考价值。

关键词:向日葵;脂肪酸;高油酸育种;近红外模型
中图分类号:S565.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1007-9084(2026)04-0265-06

Review on construction and application of near-infrared models for sunflower fatty acids

GAO Yu, YU Hai-feng*, MU Ying-nan, GUO Shu-chun, NIE Hui, LIANG Chen, SHAO Ying, ZHAO Ling-min, XIE Jia-xin
(*Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Hohhot* 010031, *China*)

Abstract: Oleic acid content is a key factor determining the quality and nutritional value of sunflower seed oil. Breeding of high-oleic acid varieties is a core objective in sunflower breeding, with precise and rapid fatty acid detection technology acting as a critical technical support. This paper comprehensively reviews the breeding status of high-oleic sunflower and the application of near-infrared spectroscopy in detection of fatty acids in sunflower kernels, and also the construction process of related near-infrared spectroscopy models. This technology enables rapid quantitative determination of fatty acid components without complex sample pretreatment. The article clarifies the ideas for model construction and application directions, which lays a foundation for research and development of non-destructive and efficient detection technology for sunflower fatty acids and provides important reference value for promoting high-oleic sunflower breeding.

Key words: sunflower; fatty acid; high oleic acid breeding; near-infrared model

向日葵(*Helianthus annuus* L.)起源于北美洲温带地区,菊科菊亚科向日葵属,距今已有4000多年历史,目前广泛种植于中国、俄罗斯、乌克兰、阿根廷、美国和西班牙等国家,是继大豆、油菜、花生后的世界第四大油料作物,种植面积属俄罗斯最大,我国向日葵种植面积位居世界第6。基于含油量、颗粒型及用途不同,人为地将向日葵分为栽培种和野生种[1],其中栽培种又细分为油用型向日葵、食用型向日葵和观赏型向日葵。向日葵因其耐旱、耐瘠薄、耐盐碱的特性广泛种植于我国北方干旱和半干旱地区,种植类型多为油用型向日葵和食用型向日葵,观赏型向日葵较少。食用型向日葵主要用于磕食,含油量较低(35%以下),蛋白含量高,籽粒大,黑底白条纹;油用型向日葵含油量高(50%~55%),蛋白含量低,外形呈现籽粒短小、黑壳[2],含油量较高的特性使其成为一种高效的榨油原料。研究表明,油用向日葵含有丰富的不饱和脂肪酸,特别是油酸,对降低人体血液中胆固醇有良好作用,且因其油质纯正、口味清淡、芳香可口、健康易被人体吸收的特点,向日葵籽油在全球范围内较受欢迎,是

收稿日期:2025-12-26
基金项目:内蒙古自治区自然科学基金(2024ZD19);国家特色油料产业技术体系(CARS-14-1-02)
作者简介:高宇(1997-),女,研究实习员,研究方向为向日葵分子育种,E-mail: 1591833892@qq.com
* 通讯作者:于海峰(1980-),男,研究员,研究方向为向日葵遗传育种,E-mail: nkyyhf@163.com

很多家庭的首选用油[3]。我国作为油料油脂生产和消费的大国,随着人口数量的急剧增长和生活水平的不断提高,油料油脂供不应求的局面也愈演愈烈,截至2023年我国油料作物自给率虽已达到59.47%,但作为特色油料作物向日葵籽油依旧高度依赖于国外进口,长此以往,对外依存度高和来源单一可能会导致我国油料油脂市场受到冲击,我国食用油安全也会受到威胁[4]。因此,优质向日葵育种工作,不仅能为我们提供更优质、更健康的食用油,而且能保障国家食用油供给安全,具有较大的经济价值和广阔的应用前景。

与普通油用向日葵相比,高油酸向日葵油酸含量是其3倍之多,高油酸向日葵凭借油酸含量高,抗氧化性强,不易发生腐败等特点占据向日葵市场[5],因此,高油酸向日葵的筛选及育种在现阶段乃至今后很长一段时间都会是我国重要的育种目标之一。寻找一种可以快速筛选高油酸向日葵品种的技术方法对缩短向日葵育种周期,加快向日葵育种进程,提高向日葵育种效率有重要意义,对减轻科研人员工作负担有一定帮助。

近红外光谱法(NIRS)和气相色谱法(GC)是当前脂肪酸检测最常用的两种技术,GC利用物理分离和化学检测相结合的原理能实现极高准确性的含量测定,是国际公认的基准方法和仲裁方法,但GC在检测时须对样品进行复杂的化学前处理如萃取、甲基化等,容易引入测定误差,对样品破坏性极大,且从样品准备到结果记录通常需要数小时,分析速度慢,分析周期长,主要适用于研发、精准定量、标准制定等工作[6]。而NIRS依赖物理光谱分析,间接测量物质化学键振动,无需对样品进行前处理,样品在使用过后仍可保留,通常1-2分钟即可出结果,主要适用于原料快速筛查和品质监控。

已有科研人员利用NIRS对完整向日葵籽仁、去壳向日葵花籽仁和向日葵花油中的脂肪酸组分和籽仁含油率进行了测定。周菲等人[7]于2013年构建了食用向日葵粗蛋白含量的近红外光谱模型用于粗蛋白含量的测定;Akkaya[8]利用近红外光谱技术对向日葵籽仁脂肪酸组成比例进行了快速有效的测定并比较了不同校准方式的准确性;Prieto[9]利用近红外光谱技术测定饲喂了葵花籽或亚麻籽牛的肉的化学成分、品质特征以及脂肪酸含量。综合国内外研究,虽已在近红外模型构建方面取得一定研究成果,但由于近红外光谱技术在不同作物或同种不同类型作物、不同设备或同种设备不同环境下使用皆不具备通用性,所以现阶段依旧需要融合近红外光谱特征与农学参数,如品种、产区和种植密度,构建具有强环境适应性的专用模型。建立向日葵种质和品种材料的NIRS测定模型,对实现品质性状的快速检测和促进向日葵品质育种具有重要意义。同时,研究前沿正从单一的籽粒成分检测,扩展到覆盖育种筛选、加工过程实时监控乃至副产物资源化利用的全产业链智能决策支持,这标志着近红外光谱技术从实验室工具,发展为驱动向日葵产业提质增效与可持续发展的关键赋能手段。

1 向日葵高油酸育种研究现状

1.1 向日葵脂肪酸概述

脂肪酸是由碳、氢、氧三种元素组成的化合物,其分子结构包含羧基末端和长烃链,常见的脂肪酸以线性烃链为主,分枝或环状烃链较为少见。可根据烃链饱和程度不同,将植物体中的脂肪酸分为三类:(1)饱和脂肪酸,如棕榈酸、硬脂酸,不含碳双键;(2)单不饱和脂肪酸,如油酸,只含有1个碳双键;(3)多不饱和脂肪酸,如亚油酸、亚麻酸,含有2个以上碳双键[10]。日常生活中每人每天对脂肪酸摄入都有一定需求,若人体脂肪酸摄入失衡,可能出现严重缺乏症或病原性内源疾病[11]。

向日葵、大豆、油菜、花生等油料作物是人类蛋白质和脂肪的主要来源,同时也是植物油的主要来源。相关研究认为,植物油中的不饱和脂肪酸同动物油饱和脂肪酸相比,植物油对人类更有益,因为植物油中所含的大量不饱和脂肪酸是人类自身不能合成的,必须从外界摄取。脂肪酸中油酸和亚油酸是两种含量最多的脂肪酸,向日葵研究中经常用油酸和亚油酸之比(O/L)来衡量向日葵的经济价值和营养价值[5],培育高油酸即高O/L值的向日葵品种成为当前向日葵主要的品质育种方向。

1.2 高油酸向日葵育种研究进展

上个世纪末,联合国粮农组织针对向日葵油酸相对含量不同将其分为三大类:(1)低油酸向日葵:油酸含量14%~39%;(2)中油酸向日葵:油酸含量42%~72%;(3)高油酸向日葵:油酸含量75%~91%[12]。随着2013年第二次技术革命提出品种品质化的概念,许多优质向日葵品种陆续推广上市,但直到目前我国种植的向日葵品种油酸含量并不高,当今市面依旧以传统向日葵为主,亚油酸占比约为60%,油酸仅占30%左右,根据油酸含量分类主要为低油酸向日葵。随着社会发展和生活质量的提高,

如今人们不只是看向日葵产量高低,对向日葵品质也愈来愈重视,同时也意识到向日葵中油酸、亚油酸等不饱和脂肪酸对人体的益处,社会对高油酸向日葵的需求也越来越大,在科研人员的不断探索中,高油酸向日葵育种研究有了飞速的进展,目前高油酸向日葵育种方式主要采用三种:杂交育种、诱变育种和基因工程技术。

1.2.1 杂交育种 杂交育种是指不同基因型个体作为亲本进行杂交,在其杂种后代中选择优良性状的纯种进行培育,杂交育种是目前较为成熟、有效的育种方式。我国向日葵杂交育种工作开始于20世纪50年代,先后引进过一批如先进生产者和匈牙利1号等当时的优良向日葵品种和其他普通向日葵品种。直到20世纪70年代我国才利用向日葵"三系"配套系统自主培育了第一批杂交油葵,自此我国向日葵杂交育种工作正式起步。我国向日葵育种工作相比国外起步较晚,尤其近年来人们对品质的需求愈加旺盛,所以培育品质高、抗性强的优质向日葵品种成为向日葵育种工作的重点。如今,我国将向日葵培育目标转向高油酸培育,目的是迎合市场需求,满足市场需要。如,巴彦淖尔市作为全国最大的向日葵生产基地,肩负起改善品质及发展特色油料的任务,其作物所通过杂交育种培育的LJ199油葵品种油酸含量较高,该品种在试品区表现优异,是理想选育品种,具有广阔的市场前景[13,14]。

1.2.2 诱变育种 诱变育种是指利用物理或化学诱变剂,诱导向日葵遗传物质发生突变,从大量突变体中筛选出具有高油酸等优良性状的新个体,经过培育选育出新的高油酸向日葵种质。相比于传统杂交育种技术,诱变育种虽没有其使用广泛,但诱变育种更为高效、直接且不依赖于现有品种基因库。国内也有一些相关研究报道,如包建忠等人利用^{60}coγ射线对6个向日葵品种进行辐射诱变,选育出4个价值较高的新材料[15];刘彩月等人利用甲基磺酸乙酯(ethyl methyl sulfone,EMS)化学诱变方法,筛选到2份稳定遗传的高油酸突变体材料[16];曲颖利用重离子束辐射诱变技术同时结合杂交育种技术,选育出的油用型向日葵杂交种—近葵1号,该品种含油量较高、稳产性好,2019年通过国家非主要农作物品种登记[17]。虽然诱变育种周期较短,但诱变育种具有不确定性且诱变过程难以把控。

1.2.3 基因工程技术 利用基因工程技术选育高油酸向日葵是通过RNA干扰技术抑制向日葵体内将"油酸"转化为"亚油酸"的酶,这个关键酶称为△12-脂肪酸去饱和酶,研究学者首先克隆出编码△12-脂肪酸去饱和酶的基因(如*FAD2*)再利用RNA干扰(RNAi)技术构建DNA载体,识别并沉默*FAD2*基因的表达,使酶无法合成,将构建好的载体导入向日葵细胞中,筛选出成功转化且只沉默目标基因的向日葵细胞,从而培育出高油酸向日葵。值得一提的是,随着基因工程技术的快速发展,已有研究学者在其他作物上如花生[18]、大豆[19]、油菜[20]等通过RNA干扰技术抑制*FAD2*基因的表达来提高油酸含量,但该技术目前在向日葵方面应用较少,相关研究也为利用基因工程技术选育高油酸向日葵奠定良好基础。

2 近红外光谱技术研究意义及应用现状

近红外光谱技术(near infrared spectroscopy,NIRS)是依靠物质在光谱区的特性,利用近红外光谱仪快速测定出样品中化学特性及成分含量的一种新型物理测定技术,近红外光谱波长在780~2526 nm的区域范围内[21],具有波粒二象性,物质组分不相同,光谱特性也不相同,因此NIRS广泛应用于样品中组分定性定量分析。NIRS的检测信号源于生物体内含氢基团(OH、NH、CH)的振动吸收——向日葵脂肪酸分子中含有大量CH_2、CH_3基团,这些基团的振动频率会在近红外区域形成特定光谱,因此根据特定光谱可以反推脂肪酸含量。现代近红外技术已在药物鉴别、石油化工产品检测、肉类乳制品果蔬粮食农副产品检测、油料作物成分含量测定等多方面领域广泛应用,在产品定性定量及识别方面具有很高的稳定性。NIRS能从其他分析技术中脱颖而出的原因主要有以下几个方面:(1)NIRS一次分析的同时能对样品的多种组分进行测定,具有分析速度快,检测效率高的优点;(2)技术分析时对样品无损伤,样品在检测过后依旧可以用于其他分析;(3)NIRS不局限于样品状态,可检测固体、液体等不同状态的物质,适用范围较广,样品无需预处理。当然,NIRS也存在一些局限性:(1)在近红外区域,不同的化合物质可能具有相似的吸收特征,可能会导致交叉干扰;(2)近红外光谱仪也存在单色光谱带较宽、波长分辨率差、因温度敏感得不到连续光谱的可能性[22,23]。

国外在1982年就有油用向日葵籽粒脂肪和蛋白质含量近红外模型建立的相关报道,但我国建立向日葵近红外模型的相关报道最早在2013年,周

菲[7]等人首先建立了食用型向日葵蛋白质含量的近红外模型,以57份食用型向日葵为测试对象将籽仁粉碎后用半微量凯氏法测定蛋白质含量,对照近红外光谱,结合偏最小二乘法建立了向日葵蛋白质含量的近红外模型,通过对比原始光谱采用多元散射校正(MSC)、一阶导数(FD)、二阶导数(SD)和变量标准化(SNV)等数据处理方式,发现“一阶导数+多元散射校正(FD+MSC)”的数据处理方式所构建的近红外光谱模型预测效果最佳。2015年周菲[24]等人对比了向日葵籽仁、籽粒、籽粒粉末粗蛋白含量测定的近红外模型,分析了三种模型检测的精确度和可行性,对比发现向日葵完整籽仁和籽粒粉末预测准确度高,而带壳籽粒的模型预测准确度相对较低。2020年汪磊[25]选取154份向日葵,利用近红外光谱技术和化学计量手段建立籽仁品质性状指标的近红外模型,测定品质性状包括籽仁粗脂肪、粗蛋白、油酸、亚油酸,相比于最小偏二乘法建模,采用改进偏最小二乘法效果最佳,能够满足向日葵品质成分的快速测定。2021年周菲[26]选取50份具有代表性的油用向日葵建立其籽仁脂肪、亚油酸、油酸、棕榈酸和硬脂酸含量的近红外光谱模型,所建模型中可快速预测脂肪、油酸、亚油酸含量,但因硬脂酸和棕榈酸误差大,只可用于初步预测。

3 向日葵脂肪酸近红外模型构建流程

近红外光谱检测法因其简单方便以及对籽仁无损伤的优点而得到广泛应用,但首先需要针对具体的性状建立近红外光谱分析模型,模型的建立能大大减少后期对品质指标的分析时间,满足作物初选要求,缩短作物育种周期,提高作物育种进程,是从大量预选材料中筛选高油酸材料的重要途径。基于所建模型不具有通用性,所以需针对不同的仪器建立不同的模型。取样后采用气相色谱法来测定向日葵籽仁不同脂肪酸含量,利用近红外光谱分析仪建立向日葵籽仁脂肪酸含量的定标模型,可以实现向日葵籽仁无损伤的早期筛选,对于加快向日葵品质高油酸性状选择以及选育适合不同加工需求的向日葵专用品种具有重要意义。图1为近红外模型构建流程图。

3.1 材料选择

材料的选择是模型成功的基础,应选择差异、范围较大且具有代表性的样本,如来自不同产地、不同品种、不同成熟度的向日葵籽仁样品。样品数量越多越好,至少在80~150份,油酸或亚油酸含量分布尽可能覆盖未来可能遇到的所有范围。

3.2 向日葵籽仁光谱采集

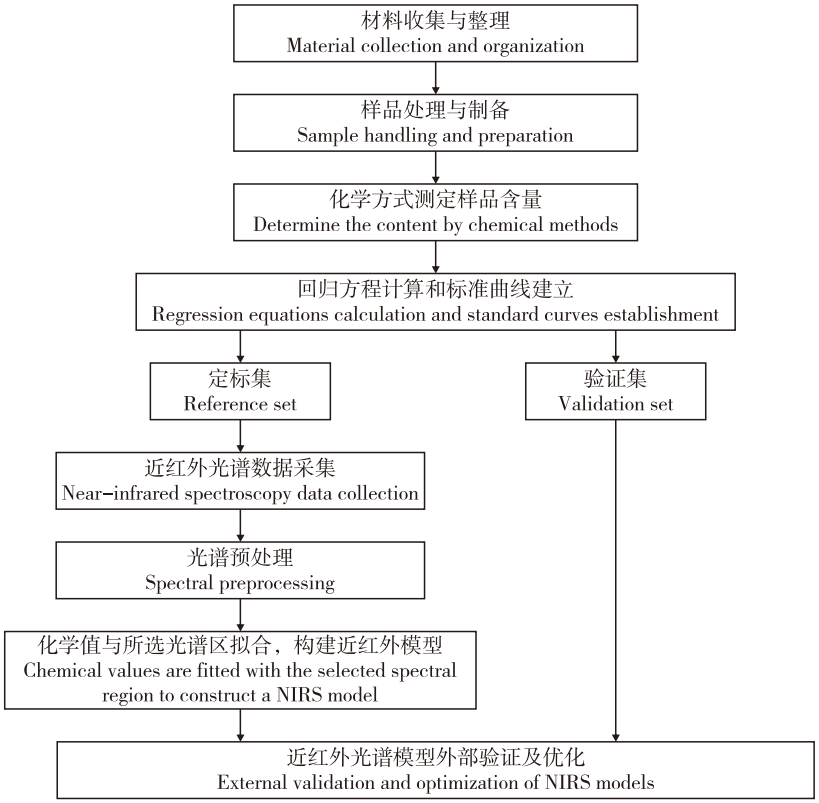


图1 近红外模型构建流程图

Fig. 1 Near-infrared model building flowchart

利用近红外光谱仪对向日葵材料进行光谱采集时首先需将近红外光谱仪预热,调整环境温度,按照近红外光谱仪操作流程在工作软件中校准仪器、选择工作流程和调整光谱仪参数。其次,从每个株系中随机挑选适量向日葵仁先置于恒温环境48 h以上,再装入样品杯进行光谱采集。注意采集光谱时,要将向日葵籽仁铺满整个样品杯,测脂肪酸时近红外波长通常设定在950 ~ 1650 nm之间,因为在此范围内脂肪酸吸收特征更为明显。最后多次重复装样扫描,获取平均光谱用于近红外模型建立。

3.3 向日葵籽仁脂肪酸含量测定及标准曲线绘制

参照油料种籽含油量测定法(残余法)提取的花生脂肪[27],取样品加入甲醇钠甲酯化处理,采用气相色谱仪进行脂肪酸分析。根据标准品利用面积归一化法计算各种脂肪酸的相对含量。每个样品重复测定3次取均值为脂肪酸含量标准值。

利用气相色谱仪按照低浓度到高浓度对每个标准工作液进行进样分析,每个浓度点进样3次,取平均值。以标准工作液中目标脂肪酸浓度为横坐标(X轴),以气相色谱测得对应峰面积为纵坐标(Y轴)建立向日葵脂肪酸含量标准曲线,得到标准曲线方程Y=aX+b(Y:峰面积;X:向日葵脂肪酸浓度;a:斜率;b:截距),同时软件会给出标准曲线线性关系评价指标-相关系数(R^2),R^2>0.999表明浓度与响应值之间有良好线性关系。

3.4 向日葵脂肪酸近红外模型构建

每份样本应按照一定比例(3:1)分为2份,分别为定标集和验证集,定标集用于近红外光谱模型的建立,验证集用于建模后准确度的验证。在建立向日葵脂肪酸近红外光谱模型前先对光谱进行预处理,光谱预处理方式包括多元散射校正、导数法(一阶导数和二阶导数)、变量标准化、平滑处理、直线相减等,除此之外还需进行波长/波数范围、维度等模型参数的优化操作。建模需剔除超样和过剩的样品,运用聚类分析,设定马氏距离(Global H, GH)值进行检测,若GH>3.0则表示样品为超常样品;若GH<0.8则表示该样品只是中心样品相似品为过剩样品,超常样品和过剩样品均需剔除[5]。

利用近红外光谱仪中自带软件构建模型,将所有向日葵样品的化学测定值及原始光谱导入软件。并将化学值与所选光谱区域进行拟合,利用偏最小二乘法(partial least squares, PLS)进行模型构建。通过反复计算去除异常值,对比模型的决定系数(R^2)和内部交叉验证均方差(RMSECV),筛选最优模型。模型优劣可用以下数据结果评估:(1)决定系数(R^2)越接近1越好,表明模型解释方差的能力强。(2)RMSEP(预测均方根误差)/RMSECV(交叉验证均方根误差)应尽可能小,并且与RMSEC(校准均方根误差)数值接近,说明模型无过拟合,预测能力强。(3)相对分析误差(RPD):RPD = SD / RMSEP(SD为验证集样本化学值的标准偏差)。若RPD > 2.5则表明模型可用于初步筛选;若RPD > 5.0则表明模型可用于精确定量分析;若RPD > 8.0则表明模型性能极佳[28]。

3.5 近红外模型外部验证

选用未参与建模的向日葵材料对所建近红外模型进行外部验证。利用所建模型对向日葵样品的脂肪酸含量进行扫描,记录近红外光谱(NIR)的预测值。再利用本研究所采用的化学检测方法对本份样品的上述脂肪酸指标进行检测,每个样品重复测定3次,取均值为标准值。比较每份材料NIR预测值与化学值的相关性和准确性,以验证所构建近红外模型的置信水平[29]。

4 小结

育种与种子科学研究是近红外光谱模型价值最高、应用最为成熟的领域,利用近红外光谱技术构建向日葵脂肪酸含量的快速检测模型,是实现高通量育种筛选、现代智能机械化品质控制的关键支撑技术。虽然近红外模型在其他油料作物如花生中已广泛应用,但在向日葵脂肪酸含量测定方面的相关报道较少,本文综述了向日葵脂肪酸近红外模型研究目的、研究意义、研究方法与研究进展的相关内容,拟实现向日葵近红外模型的建立与应用。根据相关研究,可高效应用的向日葵脂肪酸近红外模型,高度依赖于数量充足且具有代表性的样本合集、GC提供的脂肪酸含量精准数值以及精准的数据处理算法与方式,才能从复杂的数据中提取到脂肪酸相关信息。目前,针对主要脂肪酸成分(如油酸、亚油酸),近红外模型在满足科研初步筛选需求的同时,展现了其快速、无损、环保和高效率的巨大优势。然而,该技术的广泛应用仍面临若干挑战。如近红外模型普适性较差,不同品牌仪器需在特定的群体或环境下使用,往往难以直接适用于新品种、新季节的样品;其次,模型构建的初始成本高,近红外光谱建模难,一般需采集大量有代表性样品,建模难度大数据处理复杂,一种模型通常仅适用于一

定范围和年限。近红外光谱易受温度等环境影响的固有特征对检测操作的标准化提出了更为严苛的要求。NIRS已经成功解决了作物、食品领域中检测速度慢、样品损伤严重、检测单一等难点,未来近红外模型依旧是向日葵品质控制方面的研究重点,模型将集中于向样本检测精准化、数据处理简单化、设备携带微型化、数据融合智能化方向发展。且其可能远不止用于“快速检测”,更可与育种、农学、互联网技术深度融合,成为驱动高油酸向日葵产业精细化、智能化发展的关键技术支撑,也为实验室成果向田间应用的转化提供技术保障。

参考文献:

[1] 郭树春,李素萍,孙瑞芬,等. 世界及我国向日葵产业发展总体情况分析[J]. 中国种业,2021(7):10-13.

[2] 冯九焕. 中国食用向日葵育种国产化历程及研究进展[J]. 西北植物学报,2022,42(10):1779-1800.

[3] 尚学燕,代方平,杨俊霞,等. 高油酸油葵品种筛选研究[J]. 基层农技推广,2025,13(1):34-38.

[4] 严茂林,葛玮玮,张翔,等. 我国油料产业形势分析与发展对策[J]. 中国油脂,2023,48(6):8-18.

[5] 张鹤. 花生脂肪酸近红外模型的建立及高油酸种质的筛选[D]. 长春:吉林农业大学,2017.

[6] 王玉杰,冯素萍,齐丹. 气相色谱法检测海南花生种质中脂肪酸的含量及分析[J]. 湖北农业科学,2017,56(22):4348-4350.

[7] 周菲,王文军,黄绪堂,等. 食用向日葵子仁蛋白质含量近红外光谱模型的建立[J]. 作物杂志,2013(6):73-75.

[8] Akkaya M R. Prediction of fatty acid composition of sunflower seeds by near-infrared reflectance spectroscopy [J]. J Food Sci Technol, 2018, 55(6): 2318-2325. DOI:10.1007/s13197-018-3150-x.

[9] Prieto N, López-Campos, Aalhus J L, et al. Use of near infrared spectroscopy for estimating meat chemical composition, quality traits and fatty acid content from cattle fed sunflower or flaxseed[J]. Meat Sci, 2014, 98(2): 279-288. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.06.005.

[10] 王雯怡. FAD2基因家族影响植物油含量差异的分子机制研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2019.

[11] 郭阳. 东北红松松籽油的提取及其微胶囊的制备[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2017.

[12] 张冰月. 向日葵杂交种纯度的分子鉴定及高油酸种质选育[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2024.

[13] 王晓敏,贺生智,仲莉恩. 巴彦淖尔市向日葵产业全产业链发展现状分析[J]. 山西农经,2025(8):111-113.

[14] 张明. 国内外向日葵育种概况及动向[J]. 黑龙江农业科学,2010(6):149-151.

[15] 包建忠,刘春贵,孙叶,等. 观赏向日葵辐射诱变育种研究初报[J]. 江苏农业科学,2006(4):73-74.

[16] 刘彩月. 胡麻EMS突变体库的构建及抗ALS类除草剂与高油酸突变体的鉴定分析[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2023.

[17] 曲颖,周利斌,卯旭辉,等. 油用型向日葵新品种近葵1号的选育[J]. 中国种业,2023(1):101-103.

[18] 迟晓,陈明娜,潘丽娟,等. 花生高油酸育种研究进展[J]. 花生学报,2014,43(4):32-38.

[19] 蔡一荣. 农杆菌介导的高油酸大豆遗传转化方法的建立[D]. 长春:东北师范大学,2006.

[20] 熊兴华. 甘蓝型油菜高油酸基因工程研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2003.

[21] 高荣强,范世福. 现代近红外光谱分析技术的原理及应用[J]. 分析仪器,2002(3):9-12.

[22] 崔虎亮,张亚楠,贺霞,等. 近红外光谱技术测定油料种子脂肪酸的研究进展[J]. 中国种业,2020(2):13-18.

[23] 邵晨阳,赵一墨,鹿莉莉,等. 近红外光谱快速分析技术的应用研究进展[J]. 化学通报,2024,87(8):898-912.

[24] 周菲,黄绪堂,王文军,等. 食用向日葵粗蛋白含量近红外光谱模型的建立及可行性分析[J]. 宁夏农林科技,2015,56(7):35-37+47.

[25] 汪磊,谭美莲,傅春玲,等. 利用近红外技术预测向日葵籽仁品质性状[J]. 中国油料作物学报,2020,42(1):147-153.

[26] 周菲,王文军,刘岩,等. 向日葵籽仁脂肪和脂肪酸含量近红外光谱模型的建立[J]. 作物杂志,2021(2):200-206.

[27] 李培武,陈小媚,张文. 油料种籽含油量的测定残余法. 中华人民共和国行业标准,NY/T 1285-2007.

[28] 陈方方,厉奔,王飞,等. 近红外光谱用于药物生产中离子液体监测[J]. 光学学报(网络版),1-20[2025-09-22].

[29] 纪红昌,胡畅丽,邱晓臣,等. 花生籽仁品质性状高通量表型分析模型的构建[J]. 作物学报,2023,49(3):869-876.

(责任编辑:郭学兰)