

近红外光谱法快速测定单粒油菜籽中 主要不饱和脂肪酸含量的研究

王丽萍, 赵小光, 赵兴忠, 杨晶晶, 陈文杰, 张 新

(陕西省杂交油菜研究中心, 国家油料作物改良中心陕西分中心, 杨陵 712100)

摘要:脂肪酸组分的改良是油菜品质育种的重要目标,单粒油菜籽脂肪酸组分的快速测定可为育种家从后代快速筛选目标组分、缩短育种进程提供重要保障。为探索应用近红外光谱技术检测单粒油菜籽脂肪酸含量的可行性,选取具有代表性的220份油菜籽样品作为实验材料,首先采集单粒样品的近红外光谱,并应用气相色谱法测定单粒油菜籽的脂肪酸含量,然后运用偏最小二乘法构建单粒油菜籽近红外光谱与主要不饱和脂肪酸含量之间的近红外模型。所构建的单粒油菜籽中油酸、亚油酸、亚麻酸、芥酸和神经酸近红外模型的决定系数(R^2)分别为0.933 3、0.893 0、0.824 1、0.942 1、0.914 0,校正均方根误差(RMSECV)分别为6.96%、1.53%、0.87%、6.06%、0.15%。利用30份样品对建立的模型进行外部验证,其预测均方根误差(RMSEP)分别为8.31%、1.84%、0.88%、6.13%、0.16%。结果表明,建立的油酸、亚油酸、亚麻酸、芥酸和神经酸近红外模型的预测性能较好,该方法可用于单粒油菜籽中主要不饱和脂肪酸含量的测定,其准确度能够满足油菜品质育种中间材料和早世代育种材料粗筛的需求。

关键词:单粒油菜籽;近红外模型;脂肪酸;偏最小二乘法

DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001285

中图分类号:O657;TS221 文献标识码:A 文章编号:1003-0174(2026)01-0196-07

网络首发时间:2025-11-27 15:48:19

网络首发地址:<https://link.cnki.net/urlid/11.2864.TS.20251127.1528.012>

Rapid determination of main unsaturated fatty acid contents in single rapeseed by near infrared spectroscopy

Wang Liping, Zhao Xiaoguang, Zhao Xingzhong, Yang Jingjing, Chen Wenjie, Zhang Xin

(Hybrid Rapeseed Research Center of Shaanxi Province,

Shaanxi Branch of National Oil Crop Improvement Center, Yangling 712100)

Abstract: Improvement of fatty acid compositions is an important goal in rapeseed quality breeding. The rapid determination of fatty acid contents in a single rapeseed is an important technical guarantee for breeders to quickly screen target components and shorten the breeding progress. The feasibility of using near infrared (NIR) spectroscopy technology for determination of fatty acid contents in a single rapeseed was investigated. A total of 220 representative rapeseed samples were selected as experimental materials. Firstly, the near infrared spectra of single rapeseed samples were collected, and the fatty acid contents of them were determined by gas chromatography. Then, partial least square (PLS) regression was employed to establish NIR calibration models for the relationship between near infrared spectra and the contents of main unsaturated fatty acids in single rapeseed. The determination coefficients(R^2) of the established NIR models for oleic acid, linoleic acid, linolenic acid, erucic acid and nervonic acid were 0.933 3, 0.893 0, 0.824 1, 0.942 1 and 0.914 0, respectively, and the root mean square errors of cross validation (RMSECV)

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2025NC-YBXM-005),陕西省中央引导地方科技发展专项资金项目(2024ZY-CGZY-21)

收稿日期:2025-03-13

第一作者:王丽萍,女,1979年出生,助理研究员,品质分析检测,421536061@qq.com

were 6.96%, 1.53%, 0.87%, 6.06% and 0.15%, respectively. Furthermore, an external validation of the established models was conducted using 30 independent samples, the root mean square errors of prediction (RMSEP) were obtained as 8.31%, 1.84%, 0.88%, 6.13% and 0.16%, respectively. The results indicated that the developed NIR models exhibited good predictive performance for oleic acid, linoleic acid, linolenic acid, erucic acid and nervonic acid. Therefore, this method could be applied for the determination of main unsaturated fatty acid contents in a single rapeseed, and its accuracy can fully satisfy the requirement for the rough screening of intermediate materials and early-generation breeding materials in rapeseed quality breeding.

Key words: single rapeseed; near infrared model; fatty acid; partial least square

油菜是我国第一大油料作物,也是世界上重要的经济作物,在国际农产品贸易中占有重要地位^[1]。菜籽油是优质的植物食用油,含有人体必需的多种脂肪酸,有益于人体健康的油酸、亚油酸质量分数分别达到60%和20%,其中油酸含量可与橄榄油和茶油中的油酸含量相当^[2]。神经酸作为人体有益脂肪酸,是大脑神经细胞和神经组织的核心成分,在大宗植物食用油中,仅菜籽油被报道含有神经酸^[3]。

近红外光谱分析技术目前已达到较为成熟的水平^[4]。它利用有机化学物质在近红外光谱区域的光学特性,快速估测样品中的一种或多种化学成分的含量,具有成本低、分析速度快、样品无需前处理及不使用有害化学药品等优点^[5]。近红外技术在油菜大样本品质检测方面应用广泛,内容涉及油菜品质的各个方面。王耐红等^[6]建立了甘蓝型油菜籽硫苷组分的近红外检测模型,其中,2-羟基-3-丁烯基脱硫硫苷,3-丁烯基脱硫硫苷模型预测性能较好。王芳彬^[7]探讨了利用近红外光谱技术测定油菜秸秆干物质、粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、粗脂肪的可行性,其中干物质和粗蛋白的测定可行性达到要求。李雪等^[8]建立了利用近红外光谱技术测定油菜籽中叶绿素含量的方法,为油菜籽品质快速监测提供了重要的技术支撑。罗丹等^[9]构建了油菜种子发芽数、发芽势、发芽指数及活力指数的近红外模型,验证集样品预测值与测定值具有良好的相关性,能够满足种子生产和储存过程中快速检测需求。

目前近红外光谱技术在大籽粒如大豆^[10]、牡丹籽^[11]、花生^[12]、水稻^[13]单籽粒检测方面取得一定进展,对小籽粒的油菜籽品质测定建立在大样本基础之上,对单籽粒成分测定研究鲜见报道。杨翠玲等^[14]采用近红外光谱法测定单粒油菜芥酸含量,但建模效果不佳,且该方法测定单粒油菜籽神经酸含量鲜见报道。油菜籽脂肪酸组成以油酸、亚油酸和亚麻酸等不饱和脂肪酸为主,饱和脂肪酸含量较低,其中芥酸与油酸含量呈负相关,神经酸与芥酸含量

呈正相关。油菜籽中普遍存在神经酸,被作为神经酸来源的新方向。不饱和脂肪酸是维持人体正常生理代谢的重要营养物质,具有多种生理功能。因此,油菜脂肪酸育种目标是优化油菜籽中5种不饱和脂肪酸含量的比例,提高有益脂肪酸含量,降低有害脂肪酸含量(如芥酸)。本研究建立近红外光谱法测定单粒油菜籽中主要不饱和脂肪酸含量的方法,通过对光谱采集方式、光谱预处理方法、波长范围和建模样本进行优化,获得稳健、准确的近红外模型,旨在为单粒油菜籽品质快速检测提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

实验材料由陕西省杂交油菜研究中心提供,来自不同品种资源、育种材料和陕西省区域试验样品共220份,其详细信息见表1。将样品集按照4:1划分为校正集和预测集,校正集样品用于建立油酸、亚油酸、亚麻酸、芥酸和神经酸的近红外模型,预测集用于评价模型的预测性能。

无水乙醚、石油醚、甲醇、氢氧化钾,均为分析纯。

1.1.2 仪器与设备

MATRIX-I傅里叶变换近红外光谱仪(配有镀金积分球,样品旋转器和4.2 cm石英样品杯,单粒样品台和2.0 cm安瓿瓶,镀金背景和PbS检测器),6890N气相色谱仪。

1.2 方法

1.2.1 采集光谱

光谱采集条件:谱区范围12 000~4 000 cm^{-1} ,分辨率16 cm^{-1} ,扫描次数250次,室温25~26 $^{\circ}\text{C}$ 。实验中移去样品架直接将单粒油菜种子置于光斑中心,改变种子扫描部位,重复扫描3次,取平均光谱进行建模。

1.2.2 脂肪酸化学值的测定

单粒油菜籽脂肪酸含量的测定参照 GB 5009.168—2016 第三法进行分析,并对方法进行了优化。测定过程中通过将待测样品浓缩至 300 μL 和减小分流比为 20:1,提高了进入毛细管柱的样品量,从而改善了单粒油菜籽气相色谱图的质量;为了减少干扰物质的影响,实验中应避免使用塑料试管。

表 1 实验材料的信息汇总

来源	数量	样品名称
品种	30	秦油 2 号、秦优 7 号、浙油 80、高芥 2 号、陕油 28、沔油 737、秦杂油 13、荣密 1 号、盈星 66、绵油 13、鸿油 88、秦优 1618、秦杂油 7 号、秦优 1718、秦优 1806、秦优 797、华春油 1 号、中双 9 号、中双 11 号、秦优 919、秦油 558、秦优 DK4、青杂 5 号、青杂 7 号、秦优 505、秦优 606、郝油 777、中油杂 501、西油 8 号、西油 10 号
陕西省区试材料	30	22XL110、22GL11、22HL101、22HL113、22HL114、23NL201 - 205、23NL209、23HL106、23HL108、23HL109、23ZL108、23XL109、23XL205、23XL213、24GL101、24GL102、24GL104、24GL201、24GL207、24GL210、24NL101、24NL108、24NL201、24NL204、24NL207、24NL301
种质资源	160	20N1 - 1、20N25 - 1、20N29 - 1、20N30 - 1、20N31 - 1、20N32 - 2、20N34 - 1、20N35 - 2、20N45 - 2、20N46 - 1、20N53 - 1、20N58 - 2、20N82 - 1、20N87 - 2、20N88 - 2、20N90 - 1、20N92 - 1、20N95 - 2、20N96 - 1、20N98 - 1、20N99 - 2、20N100 - 1、20N101 - 1、20N102 - 1、20N104 - 1、20N108 - 2、20N114 - 1、20O1148 - 1、20O1148 - 2、20O1164 - 2、20O1165 - 1、20O1167 - 2、20O1169 - 1、20O1172 - 1、20O1172 - 2、20O1174 - 1、20O1190 - 2、20O1191 - 1、20O1193 - 2、20O1195 - 1、20O1195 - 2、20O1196 - 2、20O1200 - 2、20O1203 - 2、20O1209 - 1、20O1213 - 1、20O1220 - 1、20O1221 - 1、20O1226 - 1、20O1233 - 1、21O16 - 2、21O111 - 1、21O110 - 2、21O117 - 1、21O117 - 2、21O132 - 1、21O141 - 1、21O159 - 2、21O171 - 2、21O180 - 2、21N1 - 1、21N14 - 2、21N15 - 1、21N18 - 1、21N19 - 2、21N23 - 2、21N22 - 2、21N28 - 1、21N28 - 2、21N29 - 2、21N31 - 1、21N31 - 2、21N52 - 2、21N89 - 2、21N97 - 1、21N98 - 1、21N99 - 1、22O11 - 1、22O13 - 2、22O17 - 1、22O113 - 2、22O125 - 2、22O126 - 2、22O126 - 3、22O127 - 1、22O128 - 1、22O130 - 1、22O132 - 2、22O134 - 3、22O139 - 2、22O140 - 1、22O143 - 2、22O148 - 1、22O148 - 2、22O153 - 1、22O155 - 3、22O156 - 1、22O158 - 1、22O159 - 3、22O161 - 2、22O161 - 3、22O164 - 2、22N7 - 1、22N11 - 2、22N17 - 2、22N18 - 2、22N31 - 1、22EMS2 - 2、22EMS7 - 1、22EMS10 - 2、22EMS11 - 2、22EMS12 - 1、22EMS25 - 2、23xg3 - 1、23xg5 - 4、23xg17 - 1、14 - 13、98 - 43 - 1、98 - 85、106 - 17 - 13、106 - 13 - 7、102 - 38 - 3、106 - 28 - 4、23C1 - 1、23C3 - 2、23C6 - 1、23C8 - 5、23C25 - 2、23C52 - 1、23C82 - 1、23C118 - 2、23C147 - 1、23C190 - 1、23ZX1 - 1、23ZX27 - 4、23ZX56 - 1、23ZX98 - 1、23ZX118 - 2、23ZX120 - 1、23ZX133 - 1、23ZX148 - 3、23ZX179 - 1、23ZX217 - 2、23A8 - 1、23A36 - 1、23A98 - 1、23A103 - 1、23A131 - 1、23A148 - 4、23A178 - 2、23B4 - 2、23B12 - 3、23B12 - 3、23B25 - 1、23B44 - 1、23B51 - 1、23B62 - 1、23B51 - 1、23B73 - 2、23B85 - 1

1.2.3 光谱预处理方法

在采集样品近红外光谱时,谱图中夹杂有高频随机噪声、基线漂移、信号本底、光谱散射等信息,因此,光谱分析时,采用光谱散射处理和数学处理 2 种方法进行组合以滤除噪声。数据预处理方法主要包括矢量归一化(VN)、多元散射校正(MSC)、线性补偿差减法(COE)、直线差减法(SLS)、最大-最小归一法(MMN)、一阶导数(FD)、二阶导数(SD)或者方法的组合。通过光谱预处理方法减弱以至消除各种非目标因素的影响,确保模型的可靠性和准确性。

2 结果与分析

2.1 样品化学值的分析

利用气相色谱法测定单粒油菜籽油酸、亚油酸、亚麻酸、芥酸和神经酸化学值见表 2。其中油酸和芥酸的变异幅度大,质量分数范围分别为 7.14% ~ 85.08%、0.00% ~ 60.96%,亚油酸、亚麻酸次之,质量分数范围分别为 1.50% ~ 27.79%、2.82% ~ 16.02%,神经酸变异幅度最小,质量分数范围为 0.00% ~ 1.48%,平均值为 0.64%。所选样品代表性强,基本覆盖了待测油菜籽样品各主要不饱和脂肪酸组分的变化范围。

表 2 单粒油菜种子脂肪酸组分质量分数分布

脂肪酸组分	样品数量	最小值 /%	最大值 /%	平均值 /%	标准差 /%
C18:1	220	7.14	85.08	37.85	26.19
C18:2	220	1.50	27.79	12.76	4.45
C18:3	220	2.82	16.02	8.52	2.02
C22:1	220	0.00	60.96	27.02	24.67
C24:1	220	0.00	1.48	0.64	0.49

2.2 单粒与多粒油菜籽近红外光谱比较

利用近红外光谱仪采集单粒和多粒油菜籽的近红外光谱由图 1 可见。单粒与多粒油菜籽的近红外光谱在吸收峰的位置和变化趋势上基本一致,但吸收峰的强度明显不同,单粒油菜籽的吸收峰强度较弱,这是由于单粒表面积小,大部分入射光直接透过了样品窗,分析光加载样品的信息量有限,因此单粒油菜籽近红外模型的建立受限。

2.3 单粒油菜籽脂肪酸组成气相色谱图

单粒油菜籽经样品前处理后在气相色谱仪上进行测定获得单粒油菜籽的气相色谱图由图 2 可见。单粒油菜籽的各脂肪酸组分在 27 min 内实现完全分离且各色谱峰峰形良好,响应值高,能够满足气相色谱准确定量分析的要求。色谱图中脂肪酸出峰顺序

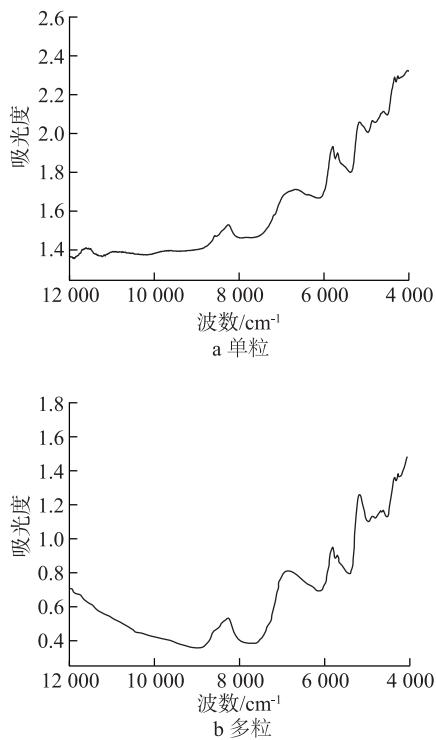
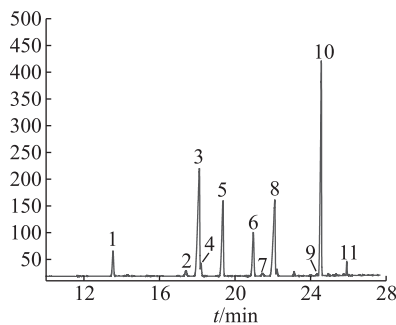


图1 油菜籽近红外光谱图

从左到右依次为棕榈酸(C16:0)、硬脂酸(C18:0)、顺式油酸(C18:1n9t)、反式油酸(C18:1n9c)、亚油酸(C18:2)、亚麻酸(C18:3)、花生酸(C20:0)、花生烯酸(C20:1)、二十二碳烷酸(C22:0)、芥酸(C22:1)、神经酸(C24:1)。

2.4 建立模型

基于单粒样品近红外光谱和相应的化学值,利用近红外软件 OPUS 7.0 采用偏最小二乘法(PLS)建立样品光谱与组分含量之间的关系模型,建模过程中对波长范围、光谱预处理方法和主成分数进行优化,通过比较不同模型的建模效果确定最优的建模



注:1为C16:0;2为C18:0;3为C18:1n9t;4为C18:1n9c;5为C18:2;6为C18:3;7为C20:0;8为C20:1;9为C22:0;10为C22:1;11为C24:1。

图2 单粒油菜籽气相色谱图

参数。以相关系数(R^2)、内部验证均方根误差(RMSECV)、预测均方根误差(RMSEP)和相对分析误差(RPD)作为评价模型优劣的指标, R^2 表示近红外预测值与化学值线性相关密切程度,RMSECV是建模过程中交叉验证所得的近红外预测值与化学值的标准偏差,RMSEP是模型进行外部验证过程中近红外预测值与化学值的标准偏差,RPD是样本标准差(SD)与预测均方根误差(RMSEP)的比值,对于近红外模型而言,相关系数越接近1越好,均方根误差越接近0越好,RPD的值越大,相应模型的稳健性和预测性能越好。

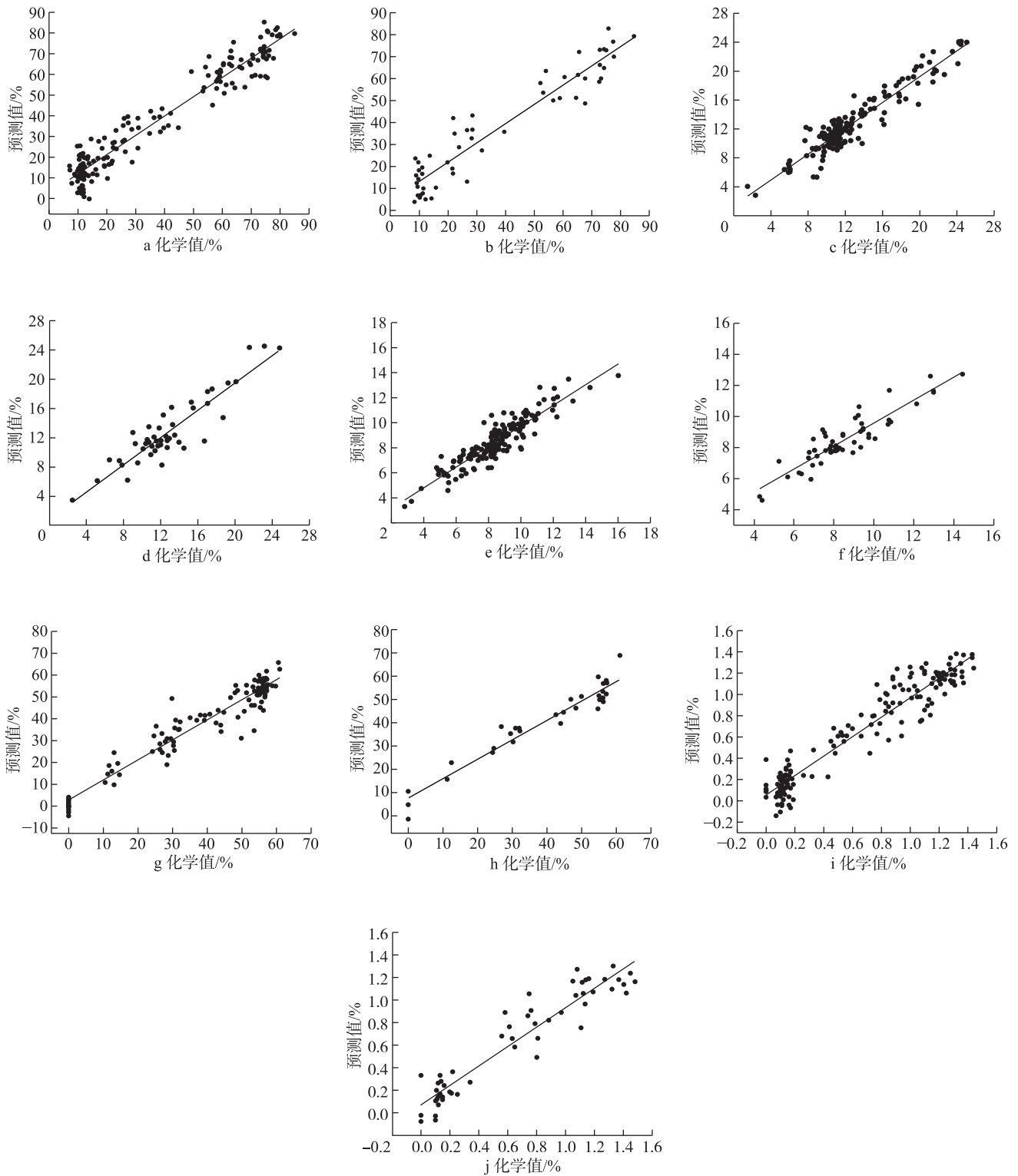
单粒油菜籽油酸、亚油酸、亚麻酸、芥酸和神经酸近红外校正模型最佳光谱预处理方式、 R^2 和RMSECV由表3可见,预测值与化学值的散点图由图3可见,油酸、亚油酸、亚麻酸、芥酸和神经酸分别为图3a、图3c、图3e、图3g和图3i图。其中油酸、芥酸的 R^2 分别为0.9333、0.9421,RMSECV分别为6.96%、6.06%。油酸和芥酸的线性相关系数均在0.9以上,但RMSECV值较大,是由于油酸和芥酸模型建模样品含量变异范围大,油酸最小值7.14%,最大值85.08%,只通过建立1个模型准确预测各个区间的油酸含量难度较高,可通过增加校正集样品数量并进行分段建模对模型进一步优化。亚油酸、亚麻酸和神经酸模型的 R^2 分别为0.8930、0.8241和0.9140,RMSECV分别为1.53%、0.87%和0.15%,3个模型线性关系良好,校正集样品的预测标准偏差均在可接受的范围内,能够满足油菜低世代育种中品质快速筛选的需求。

2.5 模型的外部验证

为了评价建立的单粒油菜籽脂肪酸近红外模型的预测性能,选择30份样品作为预测集对模型进行外部验证。其预测结果见表3和图3,油酸、亚油酸、亚麻酸、芥酸和神经酸对应为图3b、图3d、图3f、图3h和图3j。油酸和芥酸的 R^2 分别为0.9009和0.9409,RMSEP分别为8.31和6.13,RPD分别为3.18和4.12;亚油酸、亚麻酸和神经酸的 R^2 分别为

表3 单粒油菜籽各脂肪酸组分近红外模型参数

脂肪酸组分	校正集			预测集		
	光谱预处理方法	R^2	RMSECV/%	R^2	RMSEP/%	RPD
C18:1	SLS	0.9333	6.96	0.9009	8.31	3.18
C18:2	VN	0.8930	1.53	0.8080	1.84	2.28
C18:3	FD + VN	0.8241	0.87	0.8150	0.88	2.33
C22:1	MMN	0.9421	6.06	0.9409	6.13	4.12
C24:1	MSC	0.9140	0.15	0.8970	0.16	3.13



注:a 和 b 分别为 C18:1 校正集和预测集, c 和 d 分别为 C18:2 校正集和预测集, e 和 f 分别为 C18:3 校正集和预测集, g 和 h 分别为 C22:1 校正集和预测集, i 和 j 分别为 C24:1 校正集和预测集。

图 3 单粒油菜籽脂肪酸校正模型及外部验证散点图

0.808 0、0.815 0 和 0.897 0, RMSEP 分别为 1.84%、0.88% 和 0.16%, RPD 分别为 2.28、2.33 和 3.13。说明亚油酸、亚麻酸和神经酸 3 个模型具有较高的

准确度, 而油酸和芥酸模型预测准确度较差, 少数样品预测偏差较大, 降低了模型的整体预测性能, 这 2 个模型仅能用于油菜样品的粗筛。

3 讨论

近红外光谱法在单粒油菜籽脂肪酸组分测定中的应用,使油菜脂肪酸育种得以在单粒水平上筛选目标组分,有望进一步缩短脂肪酸组分改良的育种周期。近红外光谱技术已应用于单粒油菜籽油酸、亚油酸、亚麻酸和芥酸的测定,但鲜有该技术在神经酸含量检测方面的应用。油酸和芥酸的近红外模型的内部交叉验证及外部验证的决定系数均在0.9以上,但是模型的预测均方根误差较高,证明这2个模型仅能用于粗测,准确度有待进一步提高。因此,需要增加校正集样品的数量提高建模样品的代表性,从而提高近红外模型的准确性。Niewitetzki等^[15]较早开展单粒油菜籽脂肪酸含量的测定,与其相比,本研究建立的油酸模型准确度略低,可能是由于建模样品的区间范围较大,虽拓宽了模型的检测范围,同时也降低了模型的预测性能;而亚油酸和亚麻酸近红外模型准确度(其决定系数分别为0.808 0、0.815 0)高于Niewitetzki等^[15]建立的近红外模型准确度(其决定系数分别为0.79、0.59)。油菜籽神经酸含量虽然比较低,但所建的近红外模型线性关系良好,能够为高神经酸育种中低世代材料的快速筛选提供参考。有报道提出芥菜型油菜神经酸含量更高^[16],目前参与建模的样品未涉及该类型油菜,后期应向模型添加此类样品,以拓宽检测范围,增加模型的稳定性。

4 结论

通过优化单粒油菜籽近红外光谱采集参数和单粒油菜籽主要不饱和脂肪酸组分化学值的测定方法,应用近红外光谱技术结合偏最小二乘法建立了单粒油菜籽油酸、亚油酸、亚麻酸、芥酸和神经酸的近红外预测模型。结果表明,5个近红外模型的决定系数均为0.8以上,且RPD均大于2,说明各模型的预测准确度较好。其中油酸和芥酸近红外模型预测均方根误差较高,需通过增加样品数量和分段建模等手段进一步优化。本研究利用近红外光谱技术实现了在单粒水平上对油菜籽主要不饱和脂肪酸组分的快速、准确测定,进一步提高了油菜品质育种的筛选效率。

参考文献

[1] 温娟. 甘蓝型油菜籽有益脂肪酸组分的种子胚和母体植株 QTL 定位[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 1
Wen J. Mapping QTLs controlling beneficial fatty acids based on the embryo and maternal plant genomes in *Brassica napus*

L[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015: 1

- [2] 熊秋芳, 张效明, 文静, 等. 菜籽油与不同食用植物油营养品质的比较: 兼论油菜品质的遗传改良[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(6): 122 - 128
Xiong Q, Zhang X, Wen J, et al. Comparison of nutritional values between rapeseed oil and several other edible vegetable oils: discussion of rapeseed quality genetic improvement[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(6): 122 - 128
- [3] 蒲定福, 冯自伟, 郑仁健, 等. 神经酸来源新方向的探讨[J]. 中国油脂, 2021, 46(8): 76 - 80
Pu D, Feng Z, Zheng R, et al. Discussion on the new source of nervonic acid[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(8): 76 - 80
- [4] 褚小立, 陈瀑, 李敬岩, 等. 近红外光谱分析技术的最新进展与展望[J]. 分析测试学报, 2020, 39(10): 1181 - 1188
Chu X, Chen P, Li J, et al. Progresses and perspectives of near infrared spectroscopy analytical technology[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2020, 39(10): 1181 - 1188
- [5] 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
Shao C, Zhao Y, Lu L, et al. Progress in the application of near-infrared spectroscopy for rapid analysis[J]. Chemistry, 2024, 87(8): 898 - 912
- [6] 王耐红, 张敏, 王瑞, 等. 甘蓝型油菜硫苷组分近红外检测模型的建立[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(3): 35 - 41
Wang N, Zhang M, Wang R, et al. The construction of a near infrared inspection model for glucosinolate constituent contents in *Brassica napus* L[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2015, 37(3): 35 - 41
- [7] 王芳彬. 基于 CNCPS 和近红外光谱技术评定油菜秸秆营养价值[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016: 54
Wang F. Evaluation of nutritional values of rape straw based on CNCPS and near infrared reflectance spectroscopy[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016: 54
- [8] 李雪, 杨瑞楠, 原喆, 等. 油菜籽叶绿素含量近红外光谱快速检测[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(1): 126 - 129
Li X, Yang R, Yuan Z, et al. Rapid detection of chlorophyll content in rapeseed based on near infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(1): 126 - 129
- [9] 罗丹, 赵永国, 吕艳, 等. 基于近红外光谱的油菜种子活力速测技术研究[J/OL]. 分子植物育种, 2023: 1 - 18 (2023 - 12 - 07). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=FZZW20231205008&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
Luo D, Zhao Y, Lyu Y, et al. Study on NIR - based rapid

- detection of seed vigor in rapeseed[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 2023;1-18 (2023-12-07). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=FZZW20231205008&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [10] Han S I, Chae J H, Bilyeu K, et al. Non-destructive determination of high oleic acid content in single soybean seeds by near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2014, 91(2):229-234
- [11] 刘慧春, 周江华, 张加强, 等. 油用牡丹单粒种子含油量 NIRS 模型的建立[J]. *核农学报*, 2022, 36(6):1137-1144
Liu H, Zhou J, Zhang J, et al. Establishment of NIRS model for oil content in single seed of oil peony[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(6):1137-1144
- [12] 韩宏伟, 王传堂, 符明联, 等. 11 个单粒花生脂肪酸近红外定量分析模型构建[J]. *中国油料作物学报*, 2023, 45(2):407-412
Han H, Wang C, Fu M, et al. Establishment of 11 near infrared analytical models for main fatty acids in individual single peanut kernels[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2023, 45(2):407-412
- [13] 程维民. 基于近红外光谱的单粒水稻理化特性与食味品质关联性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023:104
Cheng W. Study on the association between physicochemical properties of individual rice grains and eating quality based on near-infrared spectroscopy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023: 104
- [14] 杨翠玲, 陈文杰, 张文学, 等. 近红外光谱和纸层析法分析单粒油菜籽脂肪酸的研究[J]. *西北农业学报*, 2005, 14(6):72-77
Yang C, Chen W, Zhang W, et al. Study on analysis of fatty acid in single rapeseed by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) and reversed phase chromatography (RPC)[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2005, 14(6):72-77
- [15] Niewietzki O, Tillmann P, Becker H C, et al. A new near-infrared reflectance spectroscopy method for high-throughput analysis of oleic acid and linolenic acid content of single seeds in oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(1):94-100
- [16] 范一铭, 吴金锋, 李洪戈, 等. 芥菜型油菜种子中神经酸、芥酸和油酸含量的遗传分析[J]. *中国油料作物学报*, 2024, 46(4):781-794
Fan Y, Wu J, Li H, et al. Genetic analysis of nervonic acid, erucic acid and oleic acid content in seed of *Brassica juncea*[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2024, 46(4):781-794.