

# 基于近红外光谱法的哈萨克斯坦亚麻籽油品质指标 定量预测模型的建立

杨丽<sup>1</sup>, 王珂<sup>1</sup>, 徐新忠<sup>1</sup>, 徐鑫<sup>2</sup>, 刘海丽<sup>1</sup>, 王东<sup>1</sup>

(1.阿拉山口海关技术中心, 新疆阿拉山口 833418) (2.哈密市市场监督管理局, 新疆哈密 839000)

**摘要:** 为了建立一种快速、准确、高效的针对哈萨克斯坦亚麻籽油酸价、过氧化值及脂肪酸成分的检测方法, 用科学的手段表征其质量安全和品质特征, 该研究在实验中选取代表性样品 116 份, 分别利用碘量法、热乙醇法、气相色谱串联质谱仪对亚麻籽油样品中过氧化值、酸价、棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸含量予以检测, 同时利用近红外成分分析仪建立其特征图谱, 根据偏最小二乘法依次对经过不同预处理后的特征光谱加以拟合, 经回归数据分析, 形成亚麻籽油酸价、过氧化值、棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸的近红外定量预测模型。对模型进行验证和预测精度的评价后, 确定: 各指标相关系数 ( $R$ ) 为 0.960 1~0.985 7, 绝对偏差为 0.039 14~1.246 7, 均方根误差 ( $RMSEP$ ) 为 0.059 21~1.430 2, 表明模型具有良好的预测效果, 可以有效预测哈萨克斯坦亚麻籽油的品质指标。该模型的建立为哈萨克斯坦亚麻籽油酸价、过氧化值及多种脂肪酸成分同时测定提供了快速检测途径, 大大缩短了通关流程时限。

**关键词:** 亚麻籽油; 酸价; 过氧化值; 脂肪酸; 定量模型

文章编号: 1673-9078(2023)11-302-309

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.11.1098

## Establishment of a Quantitative Prediction Model for Quality Indices of Flaxseed Oil in Kazakhstan Based on Near-infrared Spectroscopy

YANG Li<sup>1</sup>, WANG Ke<sup>1</sup>, XU Xinzhong<sup>1</sup>, XU Xin<sup>2</sup>, LIU Haili<sup>1</sup>, WANG Dong<sup>1</sup>

(1.Alashankou Customs Technology Center, Alashankou 833418, China)

(2.Hami Market Supervision and Administration Bureau, Hami 839000, China)

**Abstract:** In order to establish a rapid, accurate, and efficient method for the determination of acid value, peroxide value and fatty acid composition of flaxseed Oil in Kazakhstan, and characterize flaxseed oil's quality, safety and characteristics using scientific means, 116 representative samples were selected in this study. The content of peroxide value, acid value, and the contents of palmitic acid, stearic acid, oleic acid, linoleic acid and linolenic acid of the flaxseed oil samples were determined by iodometry, the hot ethanol metho and GC-MS, while the characteristic spectra were established by using a near-infrared component analyzer. The characteristic spectra after different pretreatments were fitted according to the partial least squares. After the regression analysis, the near-infrared quantitative prediction models for the acid value, peroxide value, and the contents of palmitic acid, stearic acid, oleic acid, linoleic acid and linolenic acid of the flaxseed oil were established. After the model was verified and the prediction accuracy was evaluated, it was concluded that the correlation coefficient ( $R$ ) was 0.960 1~0.985 7, the absolute deviation was 0.039 14~1.246 7, and the root mean square error ( $RMSEP$ ) was 0.059 21~1.430 2, indicating that the model has a good prediction effect and can effectively predict the quality indices of flaxseed oil in Kazakhstan. The establishment of this model provides a fast approach for simultaneous determination of the acid value, peroxide value and multiple fatty acid components of the Kazakhstan linseed oil, which greatly shortens the time duration of the customs clearance.

引文格式:

杨丽,王珂,徐新忠,等.基于近红外光谱法的哈萨克斯坦亚麻籽油品质指标定量预测模型的建立[J].现代食品科技,2023,39(11):302-309

YANG Li, WANG Ke, XU Xinzhong, et al. Establishment of a quantitative prediction model for quality indices of flaxseed oil in kazakhstan based on near-infrared spectroscopy [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(11): 302-309

收稿日期: 2021-09-30

基金项目: 博尔塔拉蒙古自治州科技计划项目 (Zdkj2019031)

作者简介: 杨丽 (1988-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 食品及农产品安全监测, E-mail: 1016364861@qq.com

**Key words:** flaxseed oil; acid value; peroxide value; fatty acids; quantitative prediction model

阿拉山口位于中华人民共和国新疆博尔塔拉蒙古自治州境内,为古代丝路的重要关口之一,是新亚欧大陆桥中国段的西桥头堡。作为全国陆路最大口岸之一成为“一带一路”战略支点,是我国向西开放的门户。2014年阿拉山口口岸获批为“进境粮食指定口岸”,成为新疆仅有的两个进境粮食指定口岸之一。中亚国家的粮食、油料、植物原油品质好,价格低,深受国内粮食加工企业的喜爱,其中中粮集团是最大的进口企业。阿拉山口口岸每年从中亚国家进口大量植物原油,以菜籽原油、葵花籽原油、亚麻籽原油为主,其中以亚麻籽油价值最为突出,为了保证其品质质量安全,前期已针对其酸价、过氧化值及其脂肪酸组分做相关的检测。但涉及检测项目多,耗时时间长,不能满足快速通关的需求。因此,针对亚麻籽油酸价、过氧化值及脂肪酸建立一种快速有效的鉴别方法有十分重要的意义。

袁利文等<sup>[1]</sup>对油茶籽油等食用油中的特征脂肪酸成分进行分析检测,建立了快速有效的区分不同种类的植物油气相色谱法。何小三等<sup>[2]</sup>利用气相色谱仪结合近红外光谱仪对茶油实验样本进行了模型建立及模型验证,最终得到能定量测定茶油脂肪酸组分的近红外光谱法。Zhao等<sup>[3]</sup>通过对食用植物油中脂肪酸进行理化分析,建立了食用植物油营养品质评价模型。Su等<sup>[4]</sup>测量了7种油的Vis-NIR光谱。采用多元方法结合预处理方法建立四种脂肪酸的定量分析模型。最终建立了一种基于棕榈酸、硬脂酸、花生酸和山萘酸定量分析的食用油质量快速检测方法。Akkaya等<sup>[5]</sup>利用近红外光谱法结合MPLS和PLS建立葵花籽中脂肪酸的预测方法,确定各脂肪酸的相关系数,其中,油酸和亚油酸相关系数均在0.995以上。

目前,国内外学者主要利用近红外光谱技术对植物油酸价、过氧化值、脂肪酸等进行快速测定<sup>[6-9]</sup>,或者利用近红外光谱技术检测植物油特征值鉴别油脂种类<sup>[10,11]</sup>,在其他食品种类鉴别中也有一定的应用<sup>[12]</sup>。而对于将上述方法用于中亚国家进口亚麻籽油快速鉴别和特征指标、质量等级指标定量分析的研究未见相关报道。

亚麻籽油脂肪酸的主要成分是棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸。本文以进口哈萨克斯坦亚麻籽原油为研究对象,利用现代分析手段和多种统计学方法建立基于脂肪酸组成的特性识别方法,基于酸价、过氧化值质量安全指标,建立一种快速、准确、高通量的检测方法,用科学的手段表征中亚国家亚麻籽油

的质量安全和品质特征,促进进口食用油产品的质量提升,维护贸易的可持续发展,为经济发展和一带一路经济带建设产生积极而现实的意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料、试剂原料

亚麻籽油样品,均来自阿拉山口口岸进口样品中取样;异辛烷(色谱纯),上海西格玛奥德里奇贸易有限公司;氢氧化钾、硫酸氢钠、淀粉、酚酞,均为分析纯,天津市致远化学试剂有限公司;异辛烷、冰乙酸、无水乙醇,均为分析纯,天津市光复科技发展有限公司;硫代硫酸钠标准品、氢氧化钾标准品、37种脂肪酸甲酯混标,北京北纳创联生物技术有限公司

### 1.2 仪器与设备

聚四氟乙烯酸碱两用滴定管;DA7250近红外成分分析仪,铂金埃尔默仪器公司;ISQ LT气相色谱串联质谱仪,赛默飞世尔仪器公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 光谱数据的采集

选取代表性样品116份,每份样品取50 mL,装入洁净的容器中,制成待测样品。注入近红外成分分析仪对其进行全光谱扫描,波段范围为950~1650 nm,每份样品重复测量2~3次,经均值化处理后得到亚麻籽油样品近红外光谱谱图。样品集光谱如图1所示。

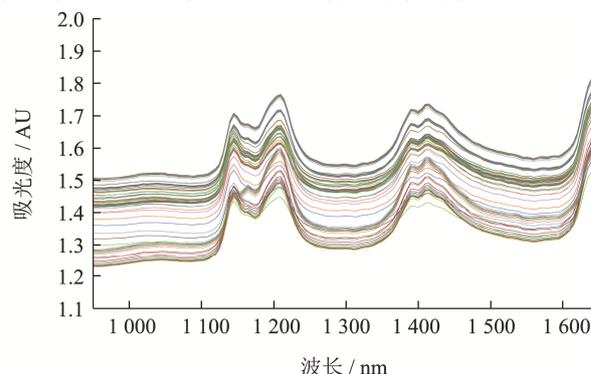


图1 亚麻籽油样品的近红外光谱谱图

Fig.1 Near-infrared spectrum of flaxseed oil

#### 1.3.2 特征参数的测定及数据库的建立

利用碘量法、热乙醇法测定亚麻籽油中的过氧化值、酸价,建立116份亚麻籽油样品的过氧化值、酸价数据库;试样经气相色谱串联仪分析,利用面积归一化法定量测定棕榈酸、亚油酸、硬脂酸、亚麻酸、

油酸等成分；建立 116 份亚麻籽油样品的 5 种脂肪酸的数据库。

### 1.3.3 模型的建立

将亚麻籽油样本随机分成两组，80 份为预测样品组，36 份为验证样品组，分别用于模型的建立和模型的验证<sup>[13]</sup>。模型的建立：使用 Unscrambler 9.7 分析软件对样品的初始光谱进行预处理，结合马氏距离剔除特异性样品，同时使用偏最小二乘法分别对经过预处理后的光谱数据加以拟合<sup>[14]</sup>，经回归分析，建立亚麻籽油酸价、过氧化值、棕榈酸、硬脂酸、亚麻酸、油酸、亚油酸的近红外定量预测模型。

### 1.3.4 模型评价

用验证组的样品对上述建立的亚麻籽油的酸价、过氧化值及 5 种脂肪酸的近红外模型进行验证和评价。通过统计分析软件，将验证组样品中的酸价、过氧化值及 5 种脂肪酸测定数据与已建立的与其相对应的酸价、过氧化值及 5 种脂肪酸的近红外模型预测值进行了对比分析，并通过对比其实测值与预测值之间的相关系数 R、预测值均方根误差 (RMSEP) 及绝对

偏差等，对已建立的模型进行验证和预测精度的综合评价<sup>[13]</sup>。加之，利用传统分析方法和近红外模型对亚麻籽油的特征指标进行分析测定，通过对比两种分析手段的实际检测时长对所建立的模型进行评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 亚麻籽油品质指标含量的测定

#### 2.1.1 亚麻籽油酸价、过氧化值的数据库建立

根据 GB 5009.227 和 GB 5009.229 中的实验方法对亚麻籽油全集、定标集、验证集样本中的酸价、过氧化值进行分析测定，结果见表 1。由表 1 可知，样本中酸价范围为 0.23~3.9 mg/g，过氧化值范围为 0.003 4~0.25 g/100 g。样本中过氧化值和酸价含量的 RSD 为 31.63%~42.82%，本试验中所收集的亚麻籽油酸价、过氧化值含量变化幅度较大、覆盖面较为广泛，样品间的离散程度大，有利于模型的建立和预测。因此，该数据库可以为亚麻籽油酸价、过氧化值模型的建立提供有效的数据支撑。

表 1 亚麻籽油质量指标数据分析

Table 1 Data analysis of quality index data of flaxseed oil

项目	质量指标	实测样本数/份	最大值	最小值	平均值	RSD/%
全集	酸价/(mg/g)	116	3.90	0.23	1.4	35.61
	过氧化值/(g/100 g)	116	0.25	0.003 4	0.068	34.74
定标集	酸价/(mg/g)	80	3.9	0.23	1.3	35.16
	过氧化值/(g/100 g)	80	0.22	0.003 4	0.058	33.79
验证集	酸价/(mg/g)	36	3.9	0.26	1.8	31.63
	过氧化值/(g/100 g)	36	0.25	0.005 6	0.076	42.82

### 2.1.2 脂肪酸的 GC-MS 数据采集

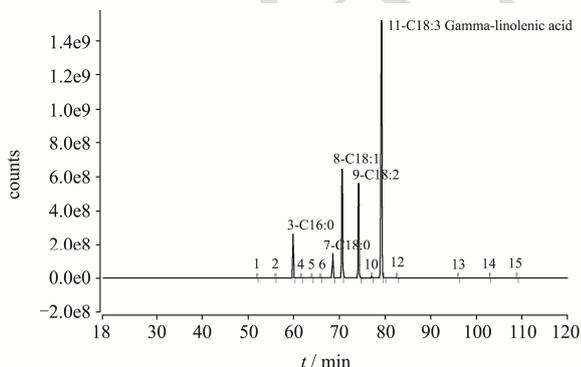


图 2 典型样品的气相色谱串联质谱仪谱图

Fig.2 GC-MS spectrum of typical sample

按照 GB 5009.168 中的处理方法，将处理好的亚麻籽油样品注入气相色谱串联仪进行分析测定，分离结果见图 2，由图 2 可知，棕榈酸等 5 种脂肪酸都得到彻底分离，且峰型良好。利用面积归一法定量测定，结果见表 2，由表 2 可知，亚麻籽油的脂肪酸组

成及含量满足亚麻籽油的特征指标的要求，其中棕榈酸的含量范围为 4.02%~6.99%，硬脂酸范围为 3.00%~4.69%，油酸范围为 14.10%~19.60%，亚油酸范围为 12.50%~19.92%，亚麻酸范围为 45.30%~69.80%，且重复性好。

### 2.2 光谱预处理方法的选择

为了提高光谱分析的准确性，采用了不同的预处理办法在全光谱范围内对校正集光谱原始数据进行预处理，包括一阶导数 (1st)、二阶导数 (2st)、标准正变量变换 (SNV)、Savitsky-Golay (SG) 平滑、基线矫正等，以消除仪器噪声、基线漂移、样品不均和光散射的影响<sup>[15]</sup>，以交叉验证确定主成分。通过评估校正模型的相关系数  $R_C$ 、预测模型的相关系数  $R_p$ 、校正均方根误差  $RMSEC$  和预测均方根误差  $RMSEP$  四个参数，以确定最佳的预处理方案，以提高模型的准确性和可靠性。结果见表 3。

表2 亚麻籽油脂肪酸组成数据分析

Table 2 Data analysis of fatty acid composition of flaxseed oil

项目	脂肪酸组成	保留时间/min	特征指标/%	最小值/%	最大值/%	平均值/%	RSD/%
全集	棕榈酸 (C16:0)	59.93	3.70~7.90	4.02	6.99	5.13	12.82
	硬脂酸 (C18:0)	68.60	2.00~7.00	3.00	4.69	3.58	9.13
	油酸 (C18:1)	70.65	9.50~30.00	14.10	19.60	17.44	4.12
	亚油酸 (C18:2)	74.27	12.00~20.00	12.50	19.92	15.75	8.11
	亚麻酸 (C18:3)	79.26	45.00~70.00	45.30	69.80	55.66	10.26
定标集	棕榈酸 (C16:0)	59.98	3.70~7.90	4.05	6.69	5.14	12.35
	硬脂酸 (C18:0)	68.63	2.00~7.00	3.00	4.69	3.61	9.14
	油酸 (C18:1)	70.66	9.50~30.00	14.60	19.20	17.41	3.80
	亚油酸 (C18:2)	74.22	12.00~20.00	12.59	19.39	15.79	7.77
	亚麻酸 (C18:3)	79.23	45.00~70.00	45.60	69.30	55.77	9.61
验证集	棕榈酸 (C16:0)	59.91	3.70~7.90	4.02	6.99	5.10	14.04
	硬脂酸 (C18:0)	68.58	2.00~7.00	3.03	4.09	3.52	8.95
	油酸 (C18:1)	70.65	9.50~30.00	14.10	19.60	17.45	4.79
	亚油酸 (C18:2)	74.30	12.00~20.00	12.50	19.92	15.70	8.94
	亚麻酸 (C18:3)	79.29	45.00~70.00	45.30	69.80	55.43	11.72

表3 基于不同预处理的亚麻籽油品质指标模型结果

Table 3 Results of quality index model in flaxseed oil based on different spectral pretreatments

指标	预处理方法	主成分数	RMSEC	$R_c$	RMSEP	$R_p$
酸价	SG+SNV+1st	2	0.917 4	0.955 7	1.163 9	0.936 1
过氧化值	SG+SNV+1st	1	0.042 88	0.985 3	0.059 77	0.924 7
棕榈酸	SG+2st	9	0.599 6	0.951 1	0.650 4	0.920 8
硬脂酸	SG+1st	8	0.323 1	0.985 1	0.296 7	0.956 4
油酸	SG+减去一条直线	7	0.619 8	0.943 8	0.774 0	0.922 9
亚油酸	SG+SNV	10	1.203 6	0.986 9	1.337 3	0.966 0
亚麻酸	SG+SNV	10	1.785 1	0.942 5	1.800 9	0.921 5

模型  $R$  值越接近于 1、校正均方根误差  $RMSEC$  和预测均方根误差  $RMSEP$  越小,且  $RMSEP$  的值大于  $RMSEC$  的值,说明模型预测能力越好<sup>[15]</sup>。样本经过不同的光谱预处理,结果显示,采用 SG 平滑结合 SNV 结合一阶导数预处理方法,酸价和过氧化值模型相关系数  $R$  较高,均大于 0.92,均方根误差较低,  $RMSEC$  的值均小于  $RMSEP$  的值,模型具有良好的预测效果,这与陈凤香等<sup>[16]</sup>的研究结果相似。采用 SG 平滑结合二阶导数进行预处理,棕榈酸模型相关系数  $R > 0.92$ ,  $RMSEC = 0.599 6$ ,  $RMSEP = 0.650 4$ ;采用 SG 平滑结合一阶导数预处理,硬脂酸模型定标结果相关系数  $R > 0.95$ ,  $RMSEC = 0.323 1$ ,  $RMSEP = 0.296 7$ ;采用 SG 平滑结合减去一条直线预处理,油酸模型相关系数  $R > 0.92$ ,  $RMSEC = 0.619 8$ ,  $RMSEP = 0.774 0$ ;模型有很好的预测效果,这与吴静珠等<sup>[17]</sup>的研究结果相似,采用 SG 平滑结合 SNV 预处理,亚油酸与亚麻酸模型定标结果相关系数  $R > 0.92$ ,  $RMSEC$  分别为 0.986 9、

0.945 2,  $RMSEP$  分别为 0.966 0、0.921 5;亚油酸和亚麻酸模型均有良好的预测效果,这与张辉等<sup>[18]</sup>的研究结果相似。综上所述,经过不同的光谱预处理后,亚麻籽油酸价、过氧化值、棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸定标模型的预测稳定性较好,可用于亚麻籽油的快速检测。

## 2.3 特征参数的定量预测模型的建立

### 2.3.1 亚麻籽油过氧化值定量预测模型的建立和优化

实验建模集样本数为 80 个,实验中剔除异常样本后得到有效样本数为 75 个,预测集样本数为 36 个,采用 SG 平滑结合 SNV 结合一阶导数进行预处理,利用偏最小二乘 (PLS) 算法建立了亚麻籽油过氧化值的定量预测模型,亚麻籽油过氧化值的校正模型预测值与实测值结果如图 3 所示。

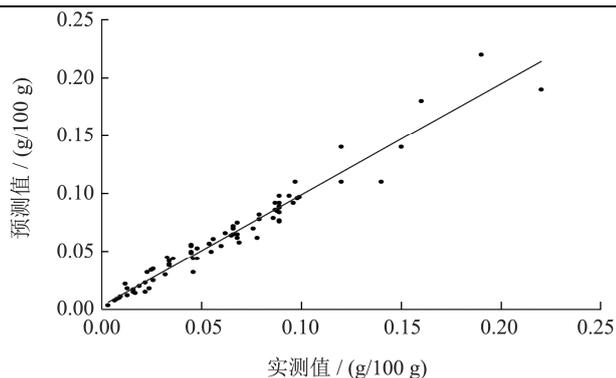


图3 亚麻籽油过氧化值定量预测模型

Fig.3 Quantitative prediction models of peroxide value of flaxseed oil

### 2.3.2 亚麻籽油酸价定量预测模型的建立和优化

实验建模集有效样本数为 80 个, 实验中剔除异常样本后得到有效样本数为 78 个, 预测集样本数为 36 个, 采用采用 SG 平滑结合 SNV 结合一阶导数进行预处理, 利用偏最小二乘 (PLS) 算法建立了亚麻籽油酸价的定量预测模型, 亚麻籽油酸价的校正模型预测值与实测值结果如图 4 所示。

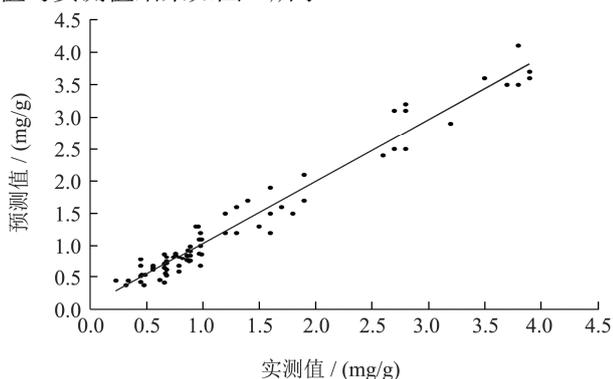


图4 亚麻籽油酸价定量预测模型

Fig.4 Quantitative prediction models of acid value of flaxseed oil

### 2.3.3 亚麻籽油脂肪酸定量预测模型的建立和优化

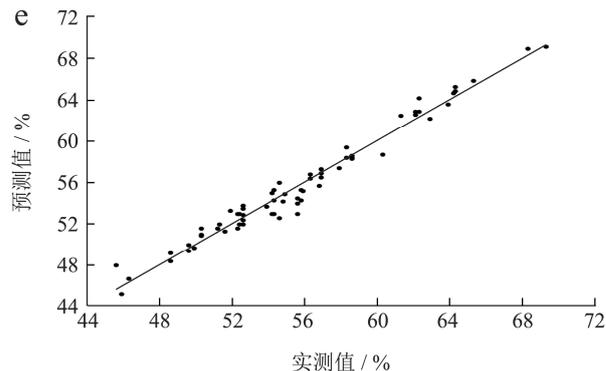
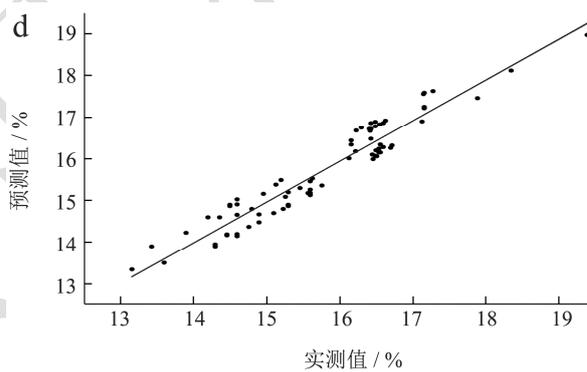
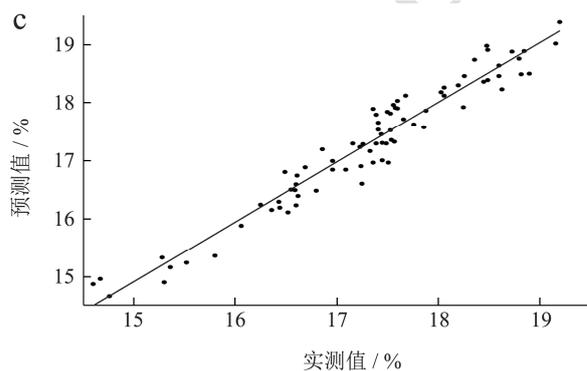
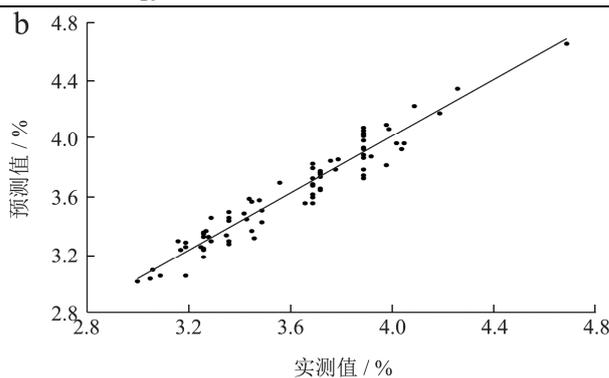
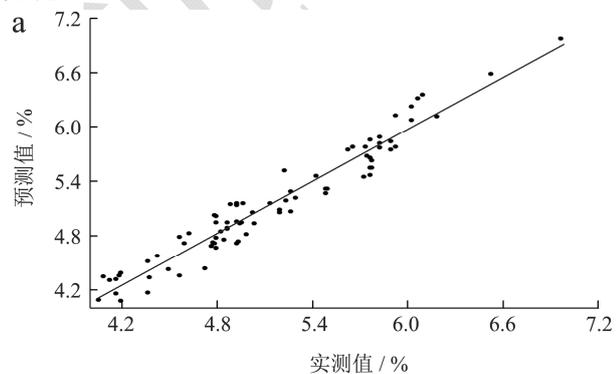


图5 亚麻籽油棕榈酸(a)、硬脂酸(b)、油酸(c)、亚油酸(d)、亚麻酸(e)定量预测模型

Fig.5 Quantitative prediction models of palmitic acid, stearic acid, oleic acid, linoleic acid and linolenic acid of flaxseed oil

实验建模样本数为 80 个, 分别对棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸 5 种模型中的异常样本进行剔

除, 剔除后得到有效样本数为 75、78、79、76、78 个; 预测样本数为 36 个, 分别采用 SG 平滑结合二阶导数、SG 平滑结合一阶导数、SG 平滑结合减去一条直线、SG 平滑结合 SNV 进行预处理, 利用偏最小二乘(PLS)算法建立了亚麻籽油棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸的定量预测模型, 样品均匀分布于回归线的两侧, 亚麻籽油棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸的校正模型预测值与实测值结果如图 5 所示。

## 2.4 模型验证

表 4 亚麻籽油特征指标定量预测模型分析

Table 4 Analysis of quantitative prediction model for the characteristic indexes of flaxseed oil

特征指标	绝对偏差	R	RMSEP
酸价	0.75	0.979 2	0.909 4
过氧化值	0.039 14	0.975 5	0.059 21
棕榈酸	0.587 8	0.963 7	0.642 5
硬脂酸	0.218 1	0.962 9	0.275 7
油酸	0.618 6	0.969 3	0.692 7
亚油酸	0.924 7	0.960 1	1.237 2
亚麻酸	1.246 7	0.985 7	1.430 2

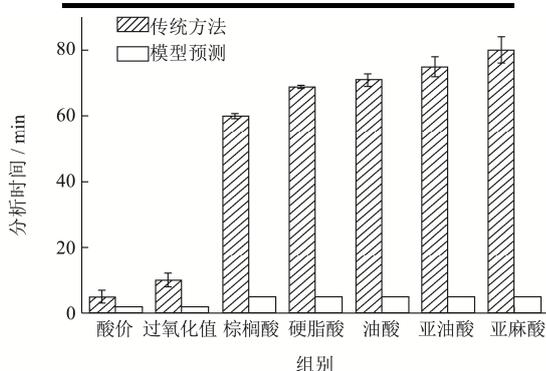


图 6 传统分析与近红外定量预测模型分析时间的比较

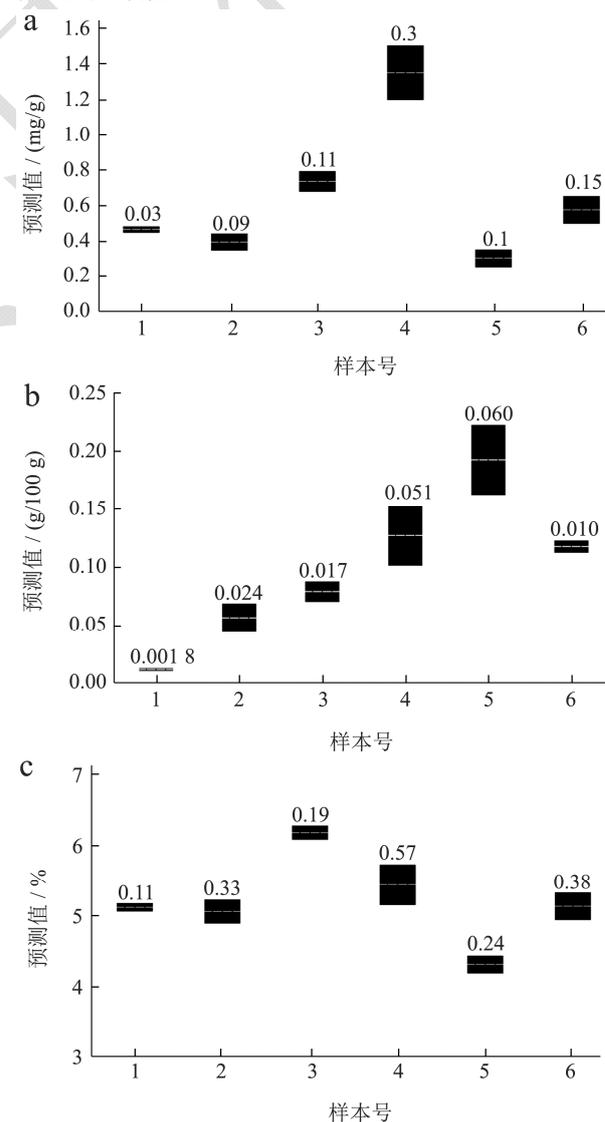
Fig.6 Comparison of analysis time between traditional analysis method and near-infrared quantitative prediction model

用验证集的 36 个亚麻籽油样品进行验证, 通过比较预测值和实测值的相关因子、绝对差值和预测均方根误差, 对模型进行验证和预测精度的评价。并且结果见表 4。总体上, 建模效果均较好, 其中, 过氧化值建模效果最优, 各指标相关系数(R)介于 0.960 1~0.985 7, 绝对偏差为 0.039 14~1.246 7, 均方根误差(RMSEP)为 0.059 21~1.430 2, 表明模型有较好的预测效果, 可预测亚麻籽油的酸价、过氧化值、棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸值。在此基础上, 比较了传统检测方法和近红外分析法对亚麻籽油的酸价、过氧化值、棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸的检测时长。结果见图 6。由图 6 可知, 近红外

预测模型大大缩短了分析时间, 尤其是用于亚麻籽油脂肪酸的测定时, 分析时间缩短为原来的 1/16。

## 2.5 实际样品测试

从不参与建模的进口亚麻籽油样品中随机选择 6 个样品, 编号为 1~6, 进行红外光谱采集并分析, 可快速测出样品中酸价、过氧化值、棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸值。结果见图 7, 其中方块面积代表样品预测值与实测值的误差, 方块中位虚线代表近红外模型预测值。可以看出, 酸价模型预测误差范围为 0.03~0.30, 过氧化值模型预测误差范围为 0.001 8~0.060, 棕榈酸模型预测误差范围为 0.11~0.57, 硬脂酸模型预测误差范围为 0.04~0.32, 油酸模型预测误差范围为 0.18~1.02, 亚油酸模型预测误差范围为 0.36~1.51, 亚麻酸模型预测误差范围为 0.62~3.90, 满足实际样品检测需求, 表明该模型可有效预测亚麻籽油的酸价、过氧化值、棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸值。



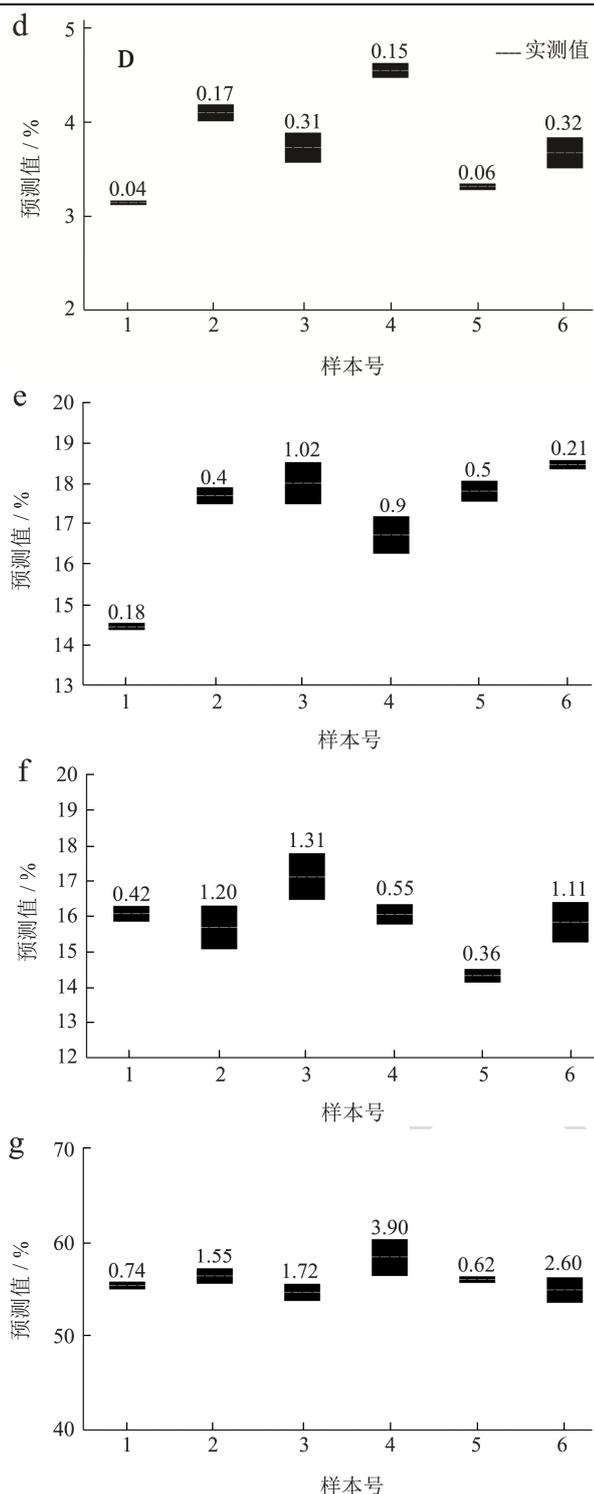


图7 亚麻籽油酸价(a)、过氧化值(b)、棕榈酸(c)、硬脂酸(d)、油酸(e)、亚油酸(f)、亚麻酸(g)预测图

Fig.7 Prediction chart of palmitic acid, stearic acid, oleic acid, linoleic acid and linolenic acid of flaxseed oil

### 3 结论

进口哈萨克斯坦亚麻籽油中酸价、过氧化值、棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚麻酸、亚油酸的近红外定量模型的建立，一方面改进了传统检测方法中费时长、

成本高和人为操作误差大等弊端；另一方面，在很大程度上降低了大量化学试剂对人体的危害。加之，近红外成分分析仪采集的数据还具备再现性好、稳定性高等优势。利用 DA7250 型近红外成分分析仪扫描与测定进口哈萨克斯坦亚麻籽油中酸价、过氧化值和 5 种脂肪酸成分，分析流程简便，易操作，利于推广应用，为进口食用油质量监管提供了一种快捷、简单、精准的参考方式。

### 参考文献

- [1] 袁利文.植物油中主要脂肪酸含量的分析[J].中国检验检疫, 2018,26(1):18-21.
- [2] 何小三,李博,符树根,等.茶油脂肪酸组分近红外模型构建研究[J].南方林业科学,2018,46(5):13-23.
- [3] ZHAO Xuemei, XIANG Xia, HUANG Jiazhang, et al. Studying the evaluation model of the nutritional quality of edible vegetable oil based on dietary nutrient reference intake [J]. ACS Omega, 2021, 6(10): 6691-6698.
- [4] SU Ning, PAN Fangfang, WANG Liusan, et al. Rapid detection of fatty acids in edible oils using Vis-NIR reflectance spectroscopy with multivariate methods [J]. Biosensors, 2021, 11(8): 261-261.
- [5] Akkaya M R. Prediction of fatty acid composition of sunflower seeds by near-infrared reflectance spectroscopy [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(6): 2318-2325.
- [6] LI Xue, ZHANG Liangxiao, ZHANG Yong, et al. Review of NIR spectroscopy methods for nondestructive quality analysis of oilseeds and edible oils [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 101(prepublish): 172-181.
- [7] Diego Galvan, Ailey Aparecida Coelho Tanamati, Federico Casanova, et al. Compact low-field NMR spectroscopy and chemometrics applied to the analysis of edible oils [J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130476-130476.
- [8] Yao Li Zhang, Can Gong, Xing Li Pei, et al. Rapid quantitative determination of triglycerides in edible oils by matrix-assisted laser desorption/ionisation Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry using pencil graphite combined with 2,5-dihydroxybenzoic acid as matrix [J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2018, 431: 56-62.
- [9] Huan Liu, Yi Chen, Ce Shi, et al. FT-IR and Raman spectroscopy data fusion with chemometrics for simultaneous determination of chemical quality indices of edible oils during thermal oxidation [J]. LWT - Food Science and

- Technology, 2020, 119(C): 108906-108906.
- [10] 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.
- [11] 刘梦婷,周玮婧,侯靖.食用植物油掺伪鉴别技术研究进展[J].湖北农业科学,2018,57(22):5-13.
- [12] CUI Pengdi, ZHAO Jing, LIU Ming, et al. Non-invasive detection of medicines and edible products by direct measurement through vials using near-infrared spectroscopy: A review [J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 115(1): 103687.
- [13] 张书阅,熊安然,潘予琮,等.燕麦草常规营养成分含量近红外预测模型的建立[J].动物营养学报,2022,34(2):1334-1342.
- [14] 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.
- [15] 廉小亲,汤燊淼,吴静珠,等.基于近红外的兰州百合品质定量建模方法研究[J].食品科技,2020,45(7):298-302.
- [16] 陈凤香,包杰,朱天仪.近红外光谱法快速测定葵花籽毛油的酸价和过氧化值[J].粮食与油脂,2021,34(9):151-152,162.
- [17] 吴静珠,刘翠玲,李慧,等.近红外光谱技术在食用油种类鉴别及脂肪酸含量检测中的应用[J].北京工商大学学报,2010,28(5):56-59.
- [18] 张辉,吴迪,李想,等.近红外光谱快速检测食用油必需脂肪酸[J].农业工程学报,2012,28(7):266-270.