



包郁明,李亮,范志影,谷旭,赵维香,朱超,李春红,马莹.一种基于近红外光谱的饲用鸭油特征脂肪酸含量快速测定方法[J].中国农业大学学报,2025,30(01):153-160.

BAO Yuming, LI Liang, FAN Zhiying, GU Xu, ZHAO Weixiang, ZHU Chao, LI Chunhong, MA Ying. A method for quickly predicting fatty acid content of feed duck oil based on near-infrared spectroscopy[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(01): 153-160.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.01.13

一种基于近红外光谱的饲用鸭油特征脂肪酸含量快速测定方法

包郁明¹ 李亮³ 范志影¹ 谷旭¹ 赵维香¹ 朱超¹ 李春红^{2*} 马莹^{1*}

(1. 中国农业科学院 饲料研究所, 北京 100081;

2. 中国农业科学院 农产品加工研究所, 北京 100193;

3. 福斯华(北京)科贸有限公司, 北京 100081)

摘 要 为对饲用鸭油特征脂肪酸进行快速预测,本研究建立了基于近红外光谱预测饲用鸭油棕榈酸、棕榈-烯酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸6种脂肪酸含量的方法。用国标法测试鸭油样品脂肪酸组成,并采集近红外光谱。使用标准正态变换(SNV)等方法对光谱信息进行预处理,筛选出最优光谱预处理方法。采用改进型偏最小二乘法(mPLS),以1-VR(交互验证决定系数)和SECV值(交互验证标准差)为评价指标,建立预测模型。结果表明:1)用验证集样品对模型进行外部独立验证,验证结果的SEP(验证标准差)、SEC(校正标准差)符合AACC 39-00规定的“SEP/SEC $\leq$ 1.2”原则。2)油酸模型、棕榈酸模型、棕榈-烯酸模型、硬脂酸模型、亚油酸模型和亚麻酸模型的 R^2 (外部验证决定系数)分别为0.918、0.889、0.916、0.869、0.979和0.927,表明所建立近红外预测模型可对饲用鸭油的6种脂肪酸含量进行有效预测。本研究建立的饲用鸭油特征脂肪酸快速检测方法能够满足一定程度的快检需求,为评价饲用鸭油质量提供快速、便捷的技术方法和理论参考。

关键词 饲用鸭油; 脂肪酸; 近红外; 快检技术

中图分类号 TS225.1;O657.33

文章编号 1007-4333(2025)01-0153-08

文献标志码

A method for quickly predicting fatty acid content of feed duck oil based on near-infrared spectroscopy

BAO Yuming¹, LI Liang³, FAN Zhiying¹, GU Xu¹, ZHAO Weixiang¹, ZHU Chao¹,
LI Chunhong^{2*}, MA Ying^{1*}

(1. Institute of Feed Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;

3. FOSS (Beijing) Science Technology & Trading Co., Ltd, Beijing 100081, China)

Abstract To rapidly predict characteristic duck oil fatty acid content, this study established a method to predict the content of six fatty acids including palmitic acid, palmitoleic acid, stearic acid, oleic acid, linoleic acid, and linolenic acid based on near-infrared spectroscopy. Gas chromatographic method was used to test the fatty acid composition of samples and collect near-infrared spectra. Standard Normal Variate Transformation (SNV) and other methods were used to preprocess the spectral information, and the optimal spectral preprocessing method was selected. The improved partial least square method (mPLS) was used to establish an optimal near-infrared

收稿日期: 2024-02-19

基金项目: 饲料及畜产品质量安全精准检测关键技术与装备(2023YFD1300018); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2023PT21)

第一作者: 包郁明(ORCID:0009-0006-2532-1208), 副研究员, 主要从事智能化农产品检测研究, E-mail: baoyuming@caas.cn

通讯作者: 李春红(ORCID:0009-0001-3471-0225), 副研究员, 主要从事农产品营养检测研究, E-mail: lichunhong@caas.cn

马莹(ORCID:0009-0009-4464-272X), 研究员, 主要从事饲料、畜牧经济研究, E-mail: maying01@caas.cn;

prediction model with 1-VR (Determination coefficient of SECV) and SECV values (Standard error of cross validation). The results showed that: 1) This model was independently verified with the validation set samples, The SEP (Standard error of prediction) and SEC (Standard error of calibration) of the verification results were in accordance with the "SEP/SEC $\leq$ 1.2" principle stipulated in AACC 39-00. 2) The R^2 of the palmitic acid, palmitoleic acid, stearic acid, oleic acid, linoleic acid, and linolenic was 0.889、0.916、0.869、0.918、0.979 and 0.927, indicating that the established near-infrared prediction model can effectively predict the content of six fatty acids in duck oil. The rapid detection method for characteristic fatty acids in feed duck oil established in this study could meet a certain degree of rapid detection needs, providing a fast and convenient technical method and theoretical reference for evaluating the quality of feed duck oil.

Keywords feeding duck oil; fatty acid; near-infrared; rapid detection technology

我国是肉鸭养殖大国,2022年肉鸭出栏量为40.02亿只^[1],鸭油年产量逾百万吨。鸭油中单不饱和脂肪酸含量较高、胆固醇含量相对较低,营养价值较高,是禽饲料及宠物饲料中常用的能量原料^[2-3]。不同来源的油脂特征脂肪酸含量及组成有较大差异^[4-5],特征脂肪酸含量及组成是判断油脂质量优劣尤其是掺假判别的重要指标^[6-7]。

脂肪酸含量传统的检测方法为国标气相色谱方法《GB 5009.168—2016食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》,该方法技术成熟、灵敏度高,但需要气相色谱等大型仪器设备的投入、前处理时间长、对仪器人员等要求高且消耗大量的有机试剂,时效性较差,较难满足企业实际检测需求。

相较色谱检测技术,光谱技术具有快速便携、无试剂污染、操作简单等特点。近红外光谱技术具有操作简单、成本低廉、检测效率高等优点,该技术基于化合物 O-H、N-H、C-H 等含氢基团的近红外合频和倍频吸收近红外光的特点,在一定量代表性样品建立的模型基础上,结合化学计量学可实现对多种成分和理化指标的同时检测^[8]。近红外光谱技术已广泛地应用油脂脂肪酸组成的快速分析进而进行掺假判定^[9],如向娜娜等^[10]用近红外法构建大豆油酸价、过氧化值、脂肪酸组成检测方法,可实现一定程度的原料品质稳定性和安全性的评价;孙超仁等^[11]构建花生油5种特征脂肪酸含量近红外预测模型,可对花生油品质尤其是掺假行为进行快速判定;唐逸芸等^[12]探讨近红外光谱和拉曼光谱融合对提升茶油真伪鉴别方面判别准确率研究。但目前相关研究集中在植物油特征脂肪酸含量测定,饲用动物油脂方面鲜有涉及。而作为近年来使用范围不断扩大,使用量不断增加的饲用鸭油,其应用过程中品质评价引起关注。饲用鸭油特征脂肪酸组

成作为评价其质量尤其是掺假方面的重要因子,其快检方法及预测模型构建方面研究未见报道。本研究基于近红外光谱建立快速检测饲用鸭油特征脂肪酸含量的方法,为现有鸭油脂肪酸检测提供一种快速便捷的参考技术手段。

1 材料与方法

1.1 样品来源

根据国内饲用鸭油产量及使用分布情况,从山东、江苏、安徽等饲用鸭油生产大省的饲用鸭油加工厂、大型饲料生产企业、网络销售渠道鸭油以及自制鸭油等生产、销售、使用等鸭油不同流通环节收集320份饲用鸭油样品。

1.2 仪器设备

DS2500 F型光栅型近红外光谱仪,FOSS;石英玻璃样品池(浆状样品杯);镀金透反射板(0.5 mm光程);化学计量学软件:WinISI 4.12.0版,FOSS。

7890A气相色谱仪,Agilent;FID检测器;HP-88色谱柱(100 m $\times$ 250 μ m, 0.25 μ m)。

1.3 光谱采集及脂肪酸化学值测定

光谱采集:透反射方式采集光谱,将样品注入石英玻璃样品池中,放置在40℃电热板上加热2 min,加盖镀金透反射板,确保样品池石英玻璃与镀金板之间的油样中无气泡;使用近红外光谱仪采集样品光谱,光谱采集范围850~2 500 nm,光谱分辨率6 nm,扫描32次。

脂肪酸化学值测定:按GB 5009.168—2016《食品中脂肪酸的测定》,使用气相色谱仪对饲用鸭油样品进行脂肪酸相对含量测定;每个样品平行测试2次,取平行算数平均值作为检测结果。检测饲用鸭油样品的棕榈酸、棕榈-烯酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸等10余种不同种类脂肪酸含量。试验条

件：高纯氮气，柱流速 1.0 mL/min；进样口温度 250 ℃，分流进样，分流比为 30：1；检测器温度 280 ℃；检测气体：氢气：42 mL/min、空气 450 mL/min、尾吹氮气 30 mL/min。柱箱温度：120 ℃，保持 1 min；以 15 ℃/min 速率升到 180 ℃，保持 10 min；以 3 ℃/min 速率升到 210 ℃，保持 8 min；以 5 ℃/min 升到 230 ℃，保持 10 min。进样量 1 μL。

1.4 近红外光谱预测模型建立方法及内部验证

将 320 个饲用鸭油样品按照按照 Kennard-Stone(KS)法划为定标样品集(288 个样品)、外部验证样品集(32 个样品)，其中 288 个样本用来建立模型，32 个样品用来检验和评估模型。使用 WinISI (4.12.0 版)，选择全光谱范围(850~2 500 nm)对定标样品集光谱建立近红外预测模型。

为消除光谱信号的基线漂移、随机噪音等因素造成的影响，根据不同组分特性，对饲用鸭油定标样品集光谱分别采用标准正态变换(SNV)、多元散射校正(MSC)、导数处理方法(一阶导数、二阶导数)^[13-15]等方法进行光谱预处理。通过主成分分析剔除异常样品光谱。

采用改进偏最小二乘法(mPLS, WinISI 软件中可以剔除异常化学值及异常光谱的偏最小二乘化学计量学算法)，对处理后的饲用鸭油定标样品集光谱建立 6 种脂肪酸近红外预测模型，以最低 SECV 值

(交互验证标准差，建模过程中进行交互验证时所获得的近红外预测值与化学分析值间标准差)和最高 1-VR/ R^2 (交互验证决定系数，建模过程中进行交互验证时所获得的近红外预测值与化学分析值间决定系数)确定各脂肪酸的最佳近红外预测模型。

1.5 预测模型外部验证评价

建立的 6 种脂肪酸预测模型，需要用验证集评价预测模型性能。根据 AACC 39-00 标准，比较外部验证样品的化学分析值与近红外预测值的 SEP(预测标准差，验证样品集的近红外预测值与化学分析值间标准差)与模型 SEC(校正标准差，建立的最佳预测模型对定标样品集进行预测，所获得的近红外预测值和化学分析值间的标准差)之间的比值、以及 R^2 (验证集近红外预测值与化学分析值间决定系数)评判模型的预测性能和可靠性。

2 结果与分析

2.1 饲用鸭油脂肪酸化学值测定

饲用鸭油样品定标集、验证集的不同脂肪酸化学分析结果见表 1。校正集样品各脂肪酸含量变化范围涵盖了验证集的变异，表明样品集的划分均匀、合理，具有代表性。比较各脂肪酸含量分布，可以看出符合近红外光谱建模条件中样品含量分布范围广的要求。

表 1 饲用鸭油特征脂肪酸含量
Table 1 The fatty acid compositions and contents in feed duck oil

指标 Parameter	样品集 Sample	样品量/个 Sample size	最小值/% Min	最大值/% Max	标准偏差/% Std
棕榈酸 C16:0	定标集	288	21.0	26.8	1.18
	验证集	32	21.3	25.6	1.02
棕榈-烯酸 C16:1	定标集	288	1.46	3.99	0.632
	验证集	32	1.56	3.88	0.627
硬脂酸 C18:0	定标集	288	4.59	7.99	0.726
	验证集	32	4.60	7.89	0.698
油酸 C18:1	定标集	288	37.2	46.8	2.11
	验证集	32	37.9	46.0	1.82
亚油酸 C18:2	定标集	288	16.0	27.9	2.69
	验证集	32	16.7	27.6	2.47
亚麻酸 C18:3n-3	定标集	288	0.633	1.72	0.213
	验证集	32	0.680	1.63	0.227

2.2 饲用鸭油样品脂肪酸组分近红外预测模型建立

2.2.1 饲用鸭油样品近红外光谱图及异常光谱去除

饲用鸭油样品的近红外原始光谱如图1所示。鸭油光谱中的1 170 nm处吸收峰为脂肪烃基C-O伸缩振动的四级倍频、1 210 nm附近吸收峰为C-H伸缩振动的二级倍频、1 395和1 415 nm处吸收峰为亚甲基中的C-H键的合频伸缩振动吸收信息、1 700~1 800 nm区域为甲基、亚甲基以及双键中C-H一级倍频的吸收;在2 175 nm附近的吸收峰为双键的合频吸收^[16]。

光谱扫描过程中,根据主成分分析计算出近红外光谱GH值(WinISI软件均以Global H“标准化的马氏距离”表示,简称“GH”),剔除GH>3.0的异常光谱^[17]。本研究识别到4个异常光谱,剔除异常光谱(后经理化分析为“非鸭油”类异常样品),消除异常样品光谱对模型预测的影响。

2.2.2 近红外光预测模型的建立

在近红外光谱分析中,由于受到仪器、样品背景或其他因素影响,常出现谱图的偏移或漂移现象,

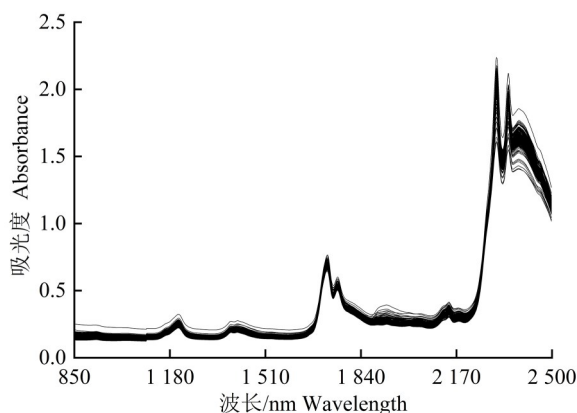


图1 饲用鸭油样品近红外光谱图

Fig. 1 Original NIR spectrum of feed duck oil

象,会影响到定量分析模型的质量和未知样品预测结果的准确性。因此,建模前需对光谱数据进行预处理,减弱多种非目标因素对光谱的影响^[18]。

本文分别采用无预处理、标准正态变换(SNV)、多元散射校正(MSC)、导数处理方法(一阶导数、二阶导数)等方法组合对饲用鸭油校正集近红外光谱进行光谱预处理^[18]。不同光谱预处理后的光谱图见图2。

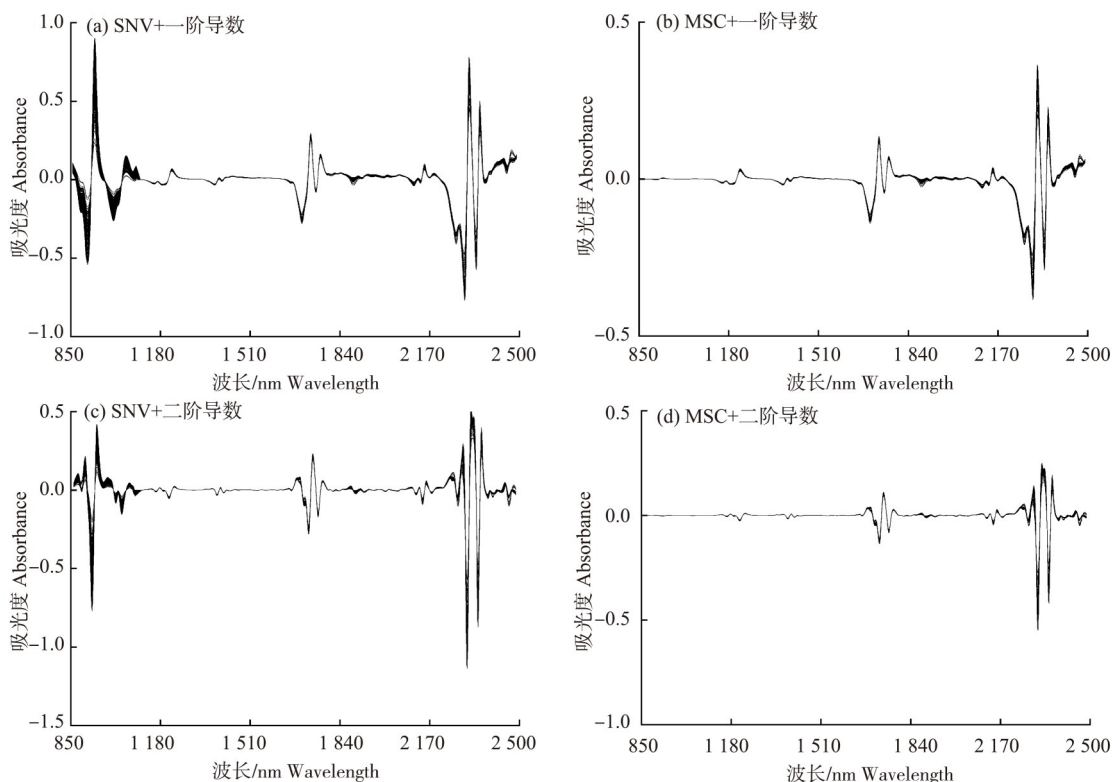


图2 饲用鸭油不同预处理后光谱图

Fig. 2 Pre-processed NIR spectrum of feed duck oil

使用不同光谱预处理后的光谱,采用改进偏最小二乘法(mPLS),结合内部交互验证的方式建立定标模型,通过预测模型预测定标样品集光谱所得预测值结果,剔除预测值与化学值的绝对差大于定标平均误差 2 倍的化学值异常样品,以最低 SECV(交互验证标准差)值和最高 $1-VR/R^2$ (交互验证决定系数)确定最佳定标模型。经不同光谱预处理结合改进偏最小二乘法所得预测模型结果见表 2,所选最佳模型见表 3。

表 2 不同光谱预处理所得预测模型信息比较
Table 2 Comparison of prediction model information obtained from different spectral preprocessing

指标 Parameter	预处理 Pretreatment	棕榈酸 C16:0	棕榈-烯酸 C16:1	硬脂酸 C18:0	油酸 C18:1	亚油酸 C18:2	亚麻酸 C18:3n-3
SEC	无	0.400	0.311	0.401	0.722	0.497	0.070
	SNV+一阶导数	0.389	0.197	0.265	0.354	0.274	0.060
	SNV+二阶导数	0.323	0.185	0.253	0.325	0.187	0.045
	MSC+一阶导数	0.349	0.216	0.289	0.365	0.256	0.059
	MSC+二阶导数	0.328	0.202	0.247	0.387	0.210	0.055
SECV	无	0.441	0.355	0.413	0.819	0.539	0.076
	SNV+一阶导数	0.449	0.259	0.342	0.548	0.337	0.074
	SNV+二阶导数	0.414	0.252	0.337	0.423	0.266	0.062
	MSC+一阶导数	0.471	0.268	0.363	0.456	0.310	0.072
	MSC+二阶导数	0.415	0.264	0.314	0.510	0.284	0.069
1-VR (R^2)	无	0.915	0.581	0.502	0.790	0.946	0.829
	SNV+一阶导数	0.929	0.869	0.827	0.927	0.979	0.860
	SNV+二阶导数	0.946	0.892	0.876	0.942	0.986	0.875
	MSC+一阶导数	0.916	0.852	0.724	0.938	0.972	0.862
	MSC+二阶导数	0.936	0.852	0.897	0.920	0.976	0.868

表 3 最佳预测模型相关信息
Table 3 Information of the best prediction model

脂肪酸 Fatty Acid	棕榈酸 C16:0	棕榈-烯酸 C16:1	硬脂酸 C18:0	油酸 C18:1	亚油酸 C18:2	亚麻酸 C18:3n-3
最佳预处理方法 Best pretreatment	SNV+二阶	SNV+二阶	MSC+二阶	SNV+二阶	SNV+二阶	SNV+二阶

2.2.3 最佳近红外预测模型指标评价

为验证建立预测模型的稳定性和准确性,除了通过内部交叉验证定量评估模型自身以外,还需用验证集样品对预测模型进行外部独立验证进行评价,以验证样品化学分析值与近红外光谱法预测值的差异在可接受的范围内。

本研究使用含有 32 个饲用鸭油样品的验证集对预测模型进行验证评估,采用气相色谱法测定上述样本的 6 种脂肪酸含量,构建的 6 种脂肪酸近红外预测模型进行近红外光谱检测。

使用外部验证样品的化学值与近红外检测值的 SEP、定标集的 1.2 倍 SEC 间的关系评判模型,AACC 39-00 标准中描述:具有良好预测能力的近红外验证结

果应符合“SEP/SEC $\leq$ 1.2”的原则^[19]。由表 4 可以看出,6 种脂肪酸模型预测模型的验证结果符合 AACC 39-00 的原则;外部验证样品的化学分析值与近红外检测值之间偏差在可接受的范围内。

由图 3 可知,验证样品 6 种主要脂肪酸近红外检测值与化学分析值之间具有较好的相关性,其中验证样品的亚油酸均匀地分布在回归线两侧,其外部验证决定系数(R^2)最高,达到 0.979;亚麻酸、油酸、棕榈-烯酸外部验证决定系数次于亚油酸,均在 0.910~0.920;验证结果相对较差的为棕榈酸和硬脂酸,决定系数未达到 0.900,这可能与验证样品的 2 种脂肪酸分布不均匀有关,棕榈酸浓度分布集中在中高含量范围,硬脂酸集中在中低含量范围。

表4 最佳近红外预测模型指标评价信息
Table 4 Evaluation of information of the best near-infrared prediction model

指标 Parameter	棕榈酸 C16:0	棕榈-烯酸 C16:1	硬脂酸 C18:0	油酸 C18:1	亚油酸 C18:2	亚麻酸 C18:3n-3
SEC	0.323	0.185	0.247	0.325	0.187	0.045
SEP	0.352	0.206	0.273	0.352	0.207	0.048
SEP/SEC	1.08	1.11	1.10	1.08	1.11	1.07

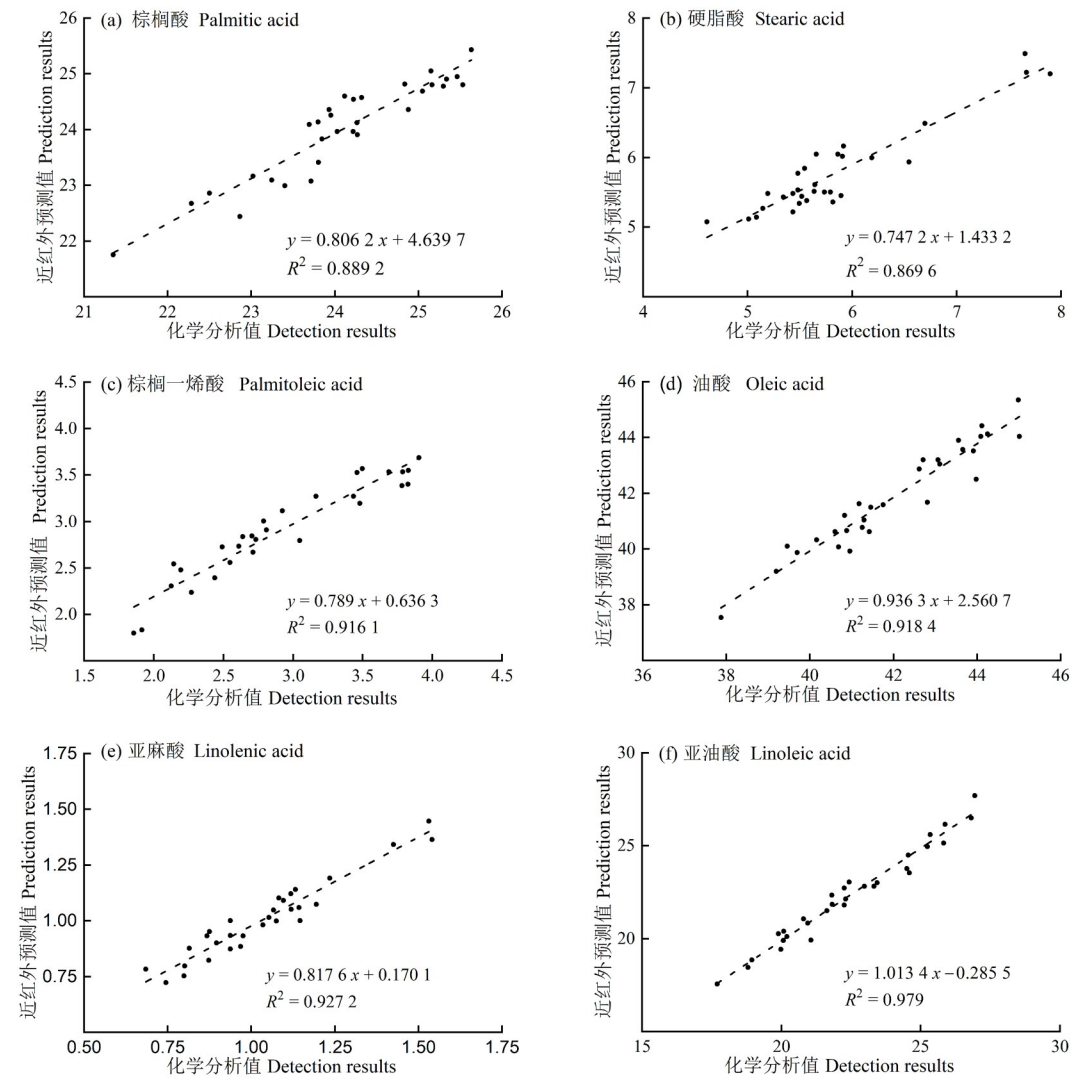


图3 饲用鸭油化学分析值和近红外预测值散点图
Fig. 3 Scatter plot of chemical analysis values and near-infrared prediction values of feed duck oil

3 讨论

鸭油是鸭产品的副产物,具备一定的营养价值及适口性,是宠物料和禽料常用的能量原料^[1]。脂肪酸组成是判定油质量尤其是掺假判定的重要因子,传统脂肪酸检测方法过程复杂、效率较低,已有

多个研究证实了近红外技术在油料样品快速预测的可行性^[6-7]。本研究验证了近红外技术在饲用鸭油品质评价中的可行性,是近红外技术与饲用油行业具体问题结合应用的一次深度实践。

在样品采集方面,丰富的真实样品有利于提高模型构建性能^[12]。采样范围涵盖山东、辽宁、安徽

等鸭油生产使用大省,采样环节涉及从产品生产厂家到集团化饲料生产企业、也包括网络渠道购置鸭油及自炼鸭油,采样方式连续6个月采样,并剔除感官检验、理化检验异常的异常样品,以保证样品来源范围广、涵盖变化范围宽、质量有一定程度保证,有利近红外光谱技术与化学分析方法联用,一定程度上能够提高模型预测的合理性和稳健性。

在评价指标选择上,本研究选择了相对脂肪酸含量作为评价评标^[4,6]。近红外分析方法分析预测依赖于传统化学分析方法,化学值测定的准确性决定模型检验的可靠性与适用性。虽然在理论上绝对脂肪酸更符合 Lambert-Beer 定律^[15],但绝对脂肪酸含量由粗脂肪和相对脂肪酸含量乘积得来,对于油料样品来讲,粗脂肪标准检测方法不仅提出了油脂,还提出了易溶于石油醚的其他有机物;且经过感官、理化分析筛选后的样品粗脂肪含量近100%,因此本研究选择相对脂肪酸作为标准法的参照因子。但随着检测技术的发展,尤其是不依赖于实物标品的低成本、高效准确的绝对脂肪酸检测方法建立,绝对脂肪酸含量指标引入是否会提高模型的预测性能有待进一步研究。

在模型优化层面,为减弱非目标因素对光谱的影响,本研究选用构建模型常用的标准正态变换(SNV)、多元散射校正(MSC)、导数处理方法(一阶导数、二阶导数)对光谱信息进行预处理,以最低SECV(交互验证标准差)值和最高1-VR/R²(交互验证决定系数)为评级指标^[16,18],确定6种脂肪酸最优光谱预处理方法为棕榈酸(SNV+二阶)、棕榈-烯酸(SNV+二阶)、硬脂酸(MSC+二阶)、油酸(SNV+二阶)、亚油酸(SNV+二阶)、亚麻酸(SNV+二阶)。在本研究中,选用的是常规光谱预处理方法,为提高模型预测性能,数据增强变换、平滑算法等更多光谱预处理方法在模型方面的应用有待进一步研究^[8]。

在模型应用方面,本研究构建模型已在青岛上药科技、亚太中慧等一定范围内开放共享,为进一步提升模型在实际生产中的适用性及实用性,在模型入厂校正阶段,厂家需不断增补代表性样品数量、确定适宜样品指标范围,构建更符合各厂需求的预测模型,提高模型在实际生产中的适用性。

4 结 论

本研究采集320份饲用鸭油样品近红外光谱谱图,按照90:10的比例分为样品训练集和外部测试集,经过不同预处理方法比对,筛选出6种脂肪酸的

预处理方法,构建了饲用鸭棕榈酸、棕榈-烯酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸6种脂肪酸含量的近红外预测模型,外部验证集与样品实测值相关系数分别为0.889、0.916、0.869、0.918、0.979和0.927,建立近红外预测模型可对饲用鸭油的6种脂肪酸含量进行有效预测。

参考文献 References

- [1] 侯水生,刘灵芝. 2022年水禽产业现状、未来发展趋势与建议[J]. 中国畜牧杂志, 2023, 59(3): 274-280
Hou S S, Liu L Z. Current status, future development trends and suggestions of waterfowl industry in 2022[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2023, 59(3): 274-280 (in Chinese)
- [2] 王晓晓,李珂,万乃宝,张伟. 饲用鸭油对猪的营养价值评定[J]. 饲料工业, 2013, 34(14): 52-54
Wang X X, Li K, Wan N B, Zhang W. Evaluation of nutritional value of duck oil for pigs[J]. *Feed Industry*, 2013, 34(14): 52-54 (in Chinese)
- [3] 郑艳玲,孙建凤,曹维伟,李朝云,顾甜甜,陈焱,袁涛,肖发沂. 不同饲用油脂营养价值的评定及其对肉鸭生长性能的影响[J]. 饲料研究, 2023, 46(18): 20-24
Zheng Y L, Sun J F, Cao W W, Li Z Y, Gu T T, Chen Y, Yuan T, Xiao F Y. Evaluation on nutritional value of different dietary oils and their effect on growth performance of meat duck [J]. *Feed Research*, 2023, 46(18): 20-24 (in Chinese)
- [4] 黄立兰. 不同来源饲用油脂的脂肪酸组成分析[J]. 饲料与畜牧, 2016(8): 43-45
Huang L L. Analysis of fatty acid composition of feed oils from different sources[J]. *Animal Agriculture*, 2016(8): 43-45 (in Chinese)
- [5] 刘宏超,武英利,杨莹,郭丽丽,于勇,李俊. 饲用油脂品质初步调查分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(11): 3280-3285
Liu H C, Wu Y L, Yang Y, Guo L L, Yu Y, Li J. Investigation and analysis on the quality of feed oil[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2019, 10(11): 3280-3285 (in Chinese)
- [6] 李雪,王督,白艺珍,喻理,岳晓凤,张文,张良晓,李培武. 我国油料产品品质的近红外光谱快速检测技术研究进展[J]. 分析测试学报, 2020, 39(10): 1189-1195
Li X, Wang D, Bai Y Z, Yu L, Yue X F, Zhang W, Zhang L X, Li P W. Research progress of near infrared spectroscopy in rapid determination on quality of oilseed products in China [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2020, 39(10): 1189-1195 (in Chinese)
- [7] 孙伟健,聂灿军. 脂肪酸在饲料原料油脂掺假辨析中的应用[J]. 粮食与饲料工业, 2011(10): 56-59
Sun W J, Nie C J. Applications of fatty acids in the analysis of adulterated feedstuffs oil[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2011(10): 56-59 (in Chinese)
- [8] 褚小立,陈瀑,李敬岩,刘丹,许育鹏. 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 L, Chen P, Li J Y, Liu D, Xu Y P. Progresses and perspectives of near infrared spectroscopy analytical technology [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2020, 39(10): 1181-1188 (in Chinese)
- [9] 陈喆,王督,汪雪芳,喻理,马飞,张良晓,李培武. 食用油中掺入低价动物油脂鉴别方法的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(22): 8912-8917
Chen Z, Wang D, Wang X F, Yu L, Ma F, Zhang L X, Li P W. Research progress on identification methods of low-priced animal oil mixed in edible oils[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(22): 8912-8917 (in Chinese)

- [10] 向娜娜,赵江涛,陈丽,王晓琼,陈林,夏超笃.大豆油脂肪酸近红外模型的建立和品质鉴定[J].中国饲料,2021(5):72-77
Xiang N N, Zhao J T, Chen L, Wang X Q, Chen L, Xia C D. The establishment of fatty acid by near infrared model and quality identification of soybean oil[J]. *China Feed*, 2021(5):72-77 (in Chinese)
- [11] 孙超仁,王凤玲,王玉玮,王雪青,黄璜.基于特征脂肪酸变化对花生油掺伪快速鉴别方法研究[J].食品与发酵工业,2023,49(3):296-300
Sun C R, Wang F L, Wang Y W, Wang X Q, Huang H. Rapid identification of adulteration in peanut oil based on the changes of characteristic fatty acid[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(3):296-300 (in Chinese)
- [12] 唐逸芸,吕慧英,王微娜,石林英,光品宇,唐忠海,范伟.基于光谱融合的茶油真伪快速鉴别研究[J].食品安全质量检测学报,2023,14(20):33-45
Tang Y Y, Lv H Y, Wang W N, Shi L Y, Guang P Y, Tang Z H, Fan W. Rapid identification of Camellia oil authenticity based on spectral fusion[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(20):33-45 (in Chinese)
- [13] Barnes R J, Dhanoa M S, Lister S J. Standard normal variate transformation and de-trending of near-infrared diffuse reflectance spectra[J]. *Applied Spectroscopy*, 1989, 43(5):772-777
- [14] Geladi P, MacDougall D, Martens H. Linearization and scatter-correction for near-infrared reflectance spectra of meat[J]. *Applied Spectroscopy*, 1985, 39(3):491-500
- [15] Norris K, Williams P. Optimization of mathematical treatments of raw near-infrared signal in the measurement of protein in hard red spring wheat. I. Influence of particle size[J]. *Cereal Chemistry*, 1984, 61(2):158-165
- [16] Carvalho L C, Leite M L, Morais C L M, Lima K M G, Teixeira G H A. Non-destructive assessment of the oxidative stability of intact macadamia nuts during the drying process by near-infrared spectroscopy[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 103:101-107
- [17] Garrido-Varo I A, Garcia-Olmo J, Fearn T. A note on mahalanobis and related distance measures in WinISI and The Unscrambler[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2019, 27(4):253-258
- [18] Rinnan A, van den Berg F, Engelsen S B. Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2009, 28(10):1201-1222
- [19] AACC 39-00. Near-infrared methods--guidelines for model development and maintenance[S]. US:American Association of Cereal Chemists, 2002

责任编辑:秦梅



第一作者简介:包郁明,中国农业科学院饲料研究所副研究员,从事农产品检测工作,研究方向为智能化检测技术。关注常规仪器比对联用及数据融合在科技创新中的作用,如建立小角X射线散射仪-原子力显微镜联合分析方法等,为科技创新提供多维分析视角,在实验室能力建设、方法标准化研究、快检方法构建方面具备一定经验。参研项目6项,支撑发表文章13篇,参与授权专利3件、获批行业标准2件。主要社会兼职:科技部仪器查重评议入库专家、中国仪器仪表学会农业仪器分会副秘书长、中国仪器仪表学会近红外分会理事等。



通讯作者简介:李春红,副研究员,中国农业农产品加工研究所中心实验室光谱平台负责人,长期从事仪器分析工作。结合光谱、物性、材料等仪器,解析农产品中主要营养成分(蛋白质、脂肪、矿物元素等)在贮藏加工中的理化性质和营养价值变化。发表文章12篇,授权专利3件,支撑获得省部级奖项1项。



通讯作者简介:马莹,研究员,研究生导师,中国农业科学院饲料研究所所长。中国饲料工业协会副会长、中国仪器仪表学会农业仪器应用技术分会委员会主任委员、饲料产业技术创新战略联盟理事长。主要从事饲料、畜牧产业经济研究和畜牧业管理工作。主持“饲料及畜产品质量安全精准检测关键技术与装备-主动侦查技术研究”等课题,获神农中华农业科技奖科学普及奖、全国农牧渔业丰收奖农业推广合作奖、北京市农业技术推广奖一等奖各一项。主编专著3部、译著1部。以第一作者或通讯作者公开发表论文14篇,其中中文核心期刊论文8篇,主笔起草饲料生产企业审查办法、全国奶业发展规划等重要文件、报告、规章制度等200多个。