

豆粕品质近红外定量分析实验室模型在线应用

杨增玲 杨钦楷 沈广辉 梅佳琪 黄圆萍 韩鲁佳
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为探究豆粕近红外定量分析模型从实验室到工厂在线应用转移的可行性,以全国采集的 117 个豆粕样品为研究对象,利用偏最小二乘法在实验室建立了豆粕含水率、粗蛋白质量分数的近红外定量分析模型,继而将此模型转移到饲料生产企业进行在线应用。研究结果显示:建立的实验室近红外模型可实现豆粕含水率、粗蛋白质量分数的快速预测,其中,含水率和粗蛋白质量分数的验证集决定系数 R_p^2 分别为 0.83 和 0.86,相对分析误差分别为 2.40 和 2.55,模型效果良好;采用模型校正、样品扩充两种不同方法,将实验室模型转移到饲料生产企业进行在线应用,含水率和粗蛋白质量分数的预测值与实际测量值之间具有很好的吻合性,可以达到在线分析的要求。

关键词: 豆粕; 近红外; 在线应用; 模型转移

中图分类号: S816.42; O657.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)08-0358-06

Online Application of Soybean Meal NIRS Quantitative Analysis Model from Laboratory to Factory

YANG Zengling YANG Qinkai SHEN Guanghui MEI Jiaqi HUANG Yuanping HAN Lujia
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming to explore the feasibility of the online near-infrared quantitative analysis model of soybean meal from laboratory to factory transfer and application. Totally 117 soybean meal samples were collected nationwide and used, the near-infrared quantitative analysis models of moisture and crude protein were established in the laboratory by partial least squares method, two kinds of near-infrared online equipment installation methods were used in feed production enterprises. The laboratory models of near-infrared quantitative analysis of soybean meal quality were transferred to feed production enterprises for online application by two different methods. The results showed that laboratory model can rapidly predict the content of moisture and crude protein in soybean meal (RSD was below 10%), R_p^2 of moisture and crude protein were 0.83 and 0.86, RPD value of moisture and crude protein were 2.40 and 2.55, which meant that the model effect was fine; laboratory models were transferred to feed production enterprises for online analysis by different methods such as model correction and sample expansion, the deviation between the predicted value and the measured value was small and stable. The requirement for online detection can be achieved.

Key words: soybean meal; near infrared spectroscopy; online application; calibration transfer

0 引言

豆粕含有丰富的蛋白质、碳水化合物、维生素和矿物质,是产量最大、使用范围最广的植物性蛋白饲料原料^[1]。由于加工工艺的不同,不同厂家生产的豆粕品质差异较大,在配合饲料生产过程中首先对

豆粕原料的成分含量作出评估,尤其是水分和粗蛋白含量。传统的湿化学检测方法存在耗时长、前处理复杂等缺点,不仅污染环境,还在一定程度上限制了饲料企业的生产效率。因此,实现豆粕品质的在线快速检测不仅有助于生产者及时发现不合格品,还能根据原料品质重组饲料配方,最大程度降低生

收稿日期: 2019-01-28 修回日期: 2019-02-25
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFE0115400,2016YFE0204600)和现代农业(奶牛)产业技术体系建设专项资金项目(CARS-36)
作者简介: 杨增玲(1977—),女,教授,博士生导师,主要从事生物质资源与利用研究,E-mail: yangzengling@cau.edu.cn
通信作者: 韩鲁佳(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事生物质资源与利用研究,E-mail: hanlj@cau.edu.cn

产成本和不必要的经济损失。

近红外光谱结合化学计量学算法是一种快速、绿色、无损的检测技术,被广泛地应用于食品、农业、制药等领域^[2-9],在饲料品质定量分析领域的应用已有 30 多年的历史^[10],国内外研究学者使用近红外光谱分析技术对饲料中水分、粗蛋白、粗纤维、粗脂肪、氨基酸和其他营养指标含量进行了定量分析^[11-17],但大部分研究都是基于实验室近红外仪器进行的离线分析。近年来,随着近红外光谱仪器硬件和化学计量学的发展,以及生产者对在线快速分析的需求,在线近红外光谱分析技术在饲料行业的应用成为研究热点^[18]。很多饲料企业已经建立了稳健的实验室离线近红外定量分析模型,但由于仪器间原理、硬件及使用环境的不同,导致光谱存在差异,无法在生产线上直接使用现有的实验室模型^[19-21]。

目前,实现饲料近红外技术在线应用的方法主要有:①通过在线仪器在生产线上取样重新建立定量分析模型,如文献^[18]通过在豆粕生产线上安装在线近红外设备,建立了近红外光谱分析模型,此方法准确,但需要重复繁琐的建模工作。②模型传递,即通过数学的方法将实验室定量分析模型转移到在线仪器上使用,但目前的研究主要集中在实验室阶段的模型转移^[22-23],直接转移到生产企业在线设备的应用少见报道。

因此,本文在饲料生产企业选择两种近红外在线设备安装方式,探索不同方法实现豆粕品质近红外定量分析实验室模型转移到在线应用的可行性。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与制备

在全国范围内采集豆粕样品 117 个。将每个样品分成两份,一份粉碎过 40 目样品筛,供采集近红外光谱用,采集光谱后的样品密封低温保存;另一份按含水率、粗蛋白含量测定的国家标准要求处理后进行实验室化学分析。

1.2 样品实验室化学分析

豆粕样品含水率、粗蛋白含量测定方法参考 GB/T 6435—2014 和 GB/T 6432—2018,每个样品测两次平行,取平均值作为定量分析模型的参考值。

1.3 实验室近红外定量分析模型的建立

采用 SupNIR 光栅型近红外光谱仪(聚光科技股份有限公司)在实验室静态条件下采集样品光谱,建立实验室定量分析模型。光谱采集参数设置

为:光谱范围 1 000 ~ 2 500 nm,光谱分辨率 1 nm,采样间隔 1 nm,扫描次数 32 次。每个样品扫描 3 次,取平均光谱作为样品的光谱。

1.4 设备安装方式及光谱采集

1.4.1 料仓安装方式及光谱采集

仪器光纤探头安装于料仓的侧面位置,测样窗口与样品接触检测,并与装在墙面上的主机通过光纤连接,获得的光谱信息数据通过光纤传输到中控室,然后进行数据处理和监测。上述近红外在线系统安装在北京资源亚太饲料科技有限公司,以下简称资源亚太,如图 1 所示。光谱采集参数同 1.3 节。



图 1 资源亚太近红外光谱在线检测系统

Fig. 1 Online near infrared spectroscopy detection system in Resource Yatai

1. 检测探头 2. 光纤 3. 主机

1.4.2 溜管安装方式及光谱采集

仪器光纤探头安装在豆粕粉碎后输送到配料仓的溜管上,并在紧邻光纤探头的下方设计了自动取样装置,便于样品的同步获取。装在铁架上的主机通过光纤与探头连接,获得的光谱信息数据通过光纤传输到中控室,然后进行数据处理和监测。上述在线系统安装在北京三元禾丰牧业有限公司,以下简称三元禾丰,如图 2 所示。光谱采集参数同 1.3 节。



图 2 三元禾丰近红外光谱在线检测系统

Fig. 2 Online near infrared spectroscopy detection system in Wellhope

1. 主机 2. 光纤 3. 检测探头 4. 取样器

1.5 模型的建立与评价

近红外定量分析模型的建立使用偏最小二乘(Partial least squares, PLS)算法,借助 PLS - Toolbox(美国 Eigenvector Research 公司)在 Matlab R2013b(美国 Mathworks 公司)平台上进行。

首先根据光谱影响值和化学值绝对误差分别对光谱和化学值进行异常值检验,剔除异常样品,结合平滑、变量标准化和去趋势等预处理方法进行光谱预处理^[24-26],采用留一交互验证建立校正模型,避免模型过拟合,并采用独立的验证集进行外部验证。定量分析模型的评价指标主要包括:模型校正集决定系数 R_c^2 、交互验证决定系数 R_{cv}^2 和验证集决定系数 R_p^2 ;校正标准偏差 R_{MSEC} 、交互验证标准偏差 R_{MSECV} 和验证标准偏差 R_{MSEP} ;相对分析误差 R_{PD} 和相对标准偏差 R_{SD} 等。 R_{PD} 和 R_{SD} 的计算公式为

$$R_{PD} = S_D / R_{MSEP} \tag{1}$$

$$R_{SD} = R_{MSEP} / M_{ean} \times 100\% \tag{2}$$

式中 S_D ——参数实验室化学分析值的标准差
 M_{ean} ——参数实验室化学分析值的平均值
参照文献[27-28]的研究对模型进行评价, R_c^2 、 R_{cv}^2 和 R_p^2 越接近 1,校正标准偏差、交互验证标准偏差和验证标准偏差越小,表明校正模型的校正精度和测定精度越高,相对分析误差大于 1.75,相对标准偏差小于 10% 表示模型可应用于定量分析。

1.6 实验室模型转移到在线应用的方法

由于实验室模型是在静态条件下建立的,与实际生产存在差异,因此将实验室模型转移到在线应用时需要进行调整与校正,采用以下两种方法对实验室模型进行调整和校正。

模型的斜率/截距校正:其主要应用于饲料生产企业与实验室样品光谱差异不大时,对模型进行微调。具体做法是:在饲料生产企业生产线上采集 15~30 个样品,获取在线近红外定量分析模型的预测值,然后将相同样品在实验室进行化学值的测量,对比近红外预测值与实验室测定值,对模型进行斜率和截距校正,以消除工厂实际条件不同带来的误差。

样品扩充:其主要应用于饲料生产企业与实验

室样品光谱有一定差异时。其具体做法为:首先通过在现场采集不同生产批次的样品和光谱,然后将样品在实验室进行化学值测量,最后将上述光谱对应化学值放入原有模型,对原有模型进行样品扩充,以消除工厂实际条件不同带来的误差。

2 结果与分析

2.1 实验结果

2.1.1 样品近红外光谱

图 3 为在实验室静态条件下采集的豆粕样品近红外光谱图,其中红色谱线是样品的平均光谱。从图中可以看出,光谱曲线平滑,未出现明显异常光谱;另外光谱在 2 400~2 500 nm 范围内噪声较大,数据处理时将此波长范围内的信息剔除。

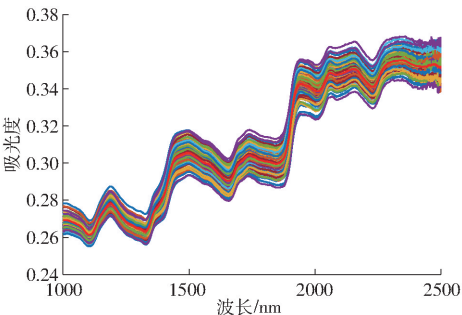


图 3 实验室采集的豆粕光谱图

Fig. 3 Soybean meal spectra acquired in laboratory

2.1.2 样品指标统计分析结果

表 1(表中 n 表示样本数)为豆粕中含水率和粗蛋白质量分数的统计分析结果,从表中可知,各指标在校正集和验证集的含量分布基本一致,验证集的样本都包含在校正集样本中,并且平均值和标准偏差相差不大,说明分集合理,符合近红外定量分析模型的分集要求。另外样品各指标分布范围越广,标准偏差越大说明选择的样品越具有多样性,代表性越强。

表 1 豆粕样品各指标统计分析结果

Tab. 1 Statistical results of soybean meal parameters

指标	校正集($n=85$)			验证集($n=29$)		
	范围	平均值	标准偏差	范围	平均值	标准偏差
含水率/%	7.69~11.46	9.83	0.80	7.71~11.10	9.77	0.81
粗蛋白质量分数/%	44.37~51.65	47.73	1.75	44.75~51.63	47.72	1.79

2.1.3 实验室模型结果

综合考虑模型评价指标,剔除异常值,选用最优光谱预处理方法和潜变量数建立模型,豆粕定量分析模型的光谱预处理方法及模型结果如表 2 所示。从表 2 可知,含水率和粗蛋白质量分数的 R_p^2 分别为 0.83 和 0.86,相对分析误差均大于 2,相对标准偏差小于 5%,验证标准偏差分别为 0.34% 和 0.69%,

说明在实验室建立的定量分析模型可用于豆粕含水率和粗蛋白质量分数的定量分析。

图 4 为实验室定量分析模型的预测值和化学测量值的散点图,散点图可以直观反映模型的效果,拟合线与 1:1 线的重合度越高,模型效果越好。从图中可以看出,样本具有一定的差异,说明模型适用性广。

表 2 豆粕品质近红外定量分析实验室模型结果

Tab. 2 Results of soybean quality near-infrared quantitative analysis by laboratory model										
指标	预处理方法	主成分分数	校正集				验证集			
			校正集决定系数	校正标准偏差/%	交互验证决定系数	交互验证标准偏差/%	验证集决定系数	验证标准偏差/%	相对分析误差	相对标准偏差/%
含水率	变量标准化、去趋势、平滑、标准化	6	0.91	0.24	0.88	0.28	0.83	0.34	2.40	3.46
粗蛋白质量分数	变量标准化、去趋势、平滑、标准化	5	0.84	0.69	0.80	0.78	0.86	0.69	2.55	1.44

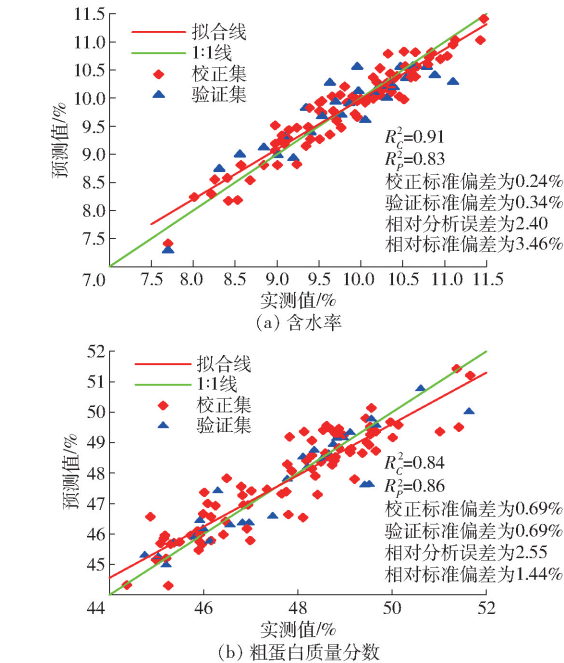


图 4 实验室定量分析模型预测散点图
Fig. 4 Scatter plots of predicted and measured values of laboratory model

2.2 模型斜率/截距校正调整及结果

图 5 中,绿色为在资源亚太生产线上采集的豆粕样品光谱,其余为在实验室静态条件下采集的样品光谱。从图中可以看出,两者光谱差异不大,故而采用斜率/截距校正方法。在资源亚太生产线上采集了 17 个样品作为斜率和截距的校正样品。

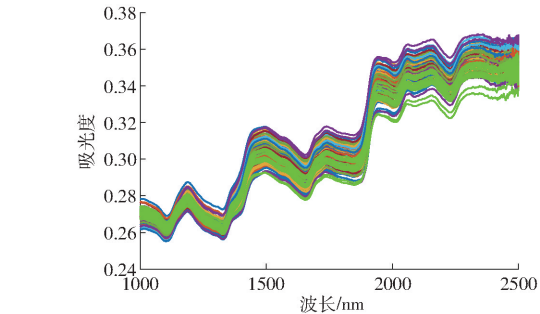


图 5 资源亚太和实验室样品的豆粕光谱图
Fig. 5 Soybean meal spectra acquired in Resource Yatai and laboratory

图 6a、6b 分别为资源亚太在线定量分析模型的含水率和粗蛋白质量分数的预测散点图。从图中可

以看出,模型的拟合线与 1:1 线近似重合,模型预测结果较好。与图 4a 相比,调整后模型的 R_p^2 为 0.89, 大于原来的 0.83; 验证标准偏差为 0.25%, 小于 0.34%; 相对分析误差为 3.02, 大于 2.40; 相对标准偏差为 2.61%, 小于 5%, 说明水分模型在饲料厂经过校正之后比实验室模型的精度更高, 稳定性更好。与图 4b 对比可以看出,模型的 R_p^2 为 0.88, 大于原来的 0.86; 验证标准偏差为 0.61%, 小于 0.69%; 相对分析误差为 2.97, 大于 2.55; 相对标准偏差为 1.27%, 小于 5%, 说明粗蛋白模型在饲料厂校正后比实验室模型的精度更高, 稳定性更好。

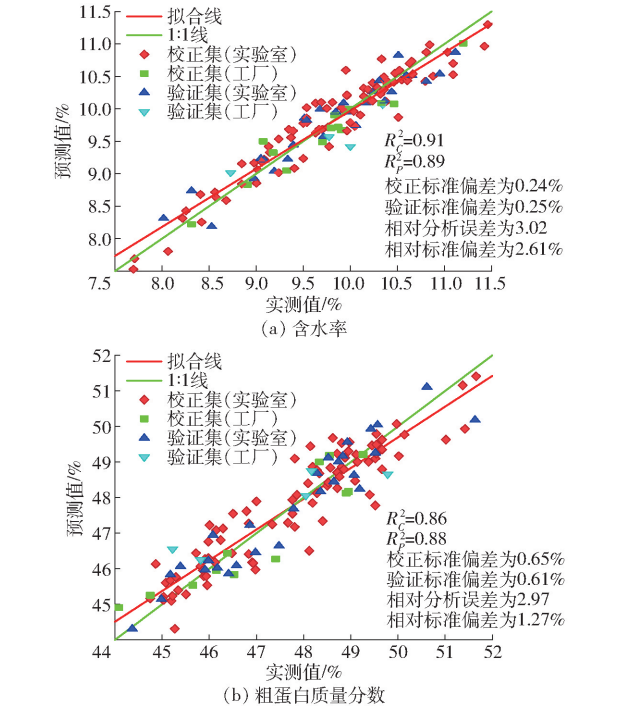


图 6 资源亚太在线定量分析模型预测散点图
Fig. 6 Scatter plots of predicted and measured values of online NIRS model in Resource Yatai

图 7 为模型校正前后在资源亚太生产线上的预测值与实测值的残差散点图,从图中可以看出,模型在经过截距校正之后,预测结果的波动范围较小,与实测值的结果更加吻合。

2.3 模型样品扩充及结果

图 8 中,绿色为在三元禾丰生产线上采集的豆粕样品光谱,其余为实验室静态条件下采集的样品

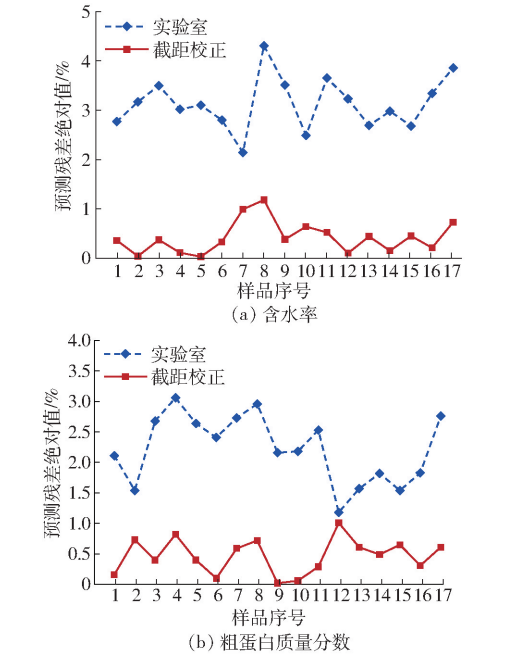


图 7 资源亚太定量分析模型预测值与实测值的残差散点图

Fig.7 Residual plots of predicted and measured values of NIRS model in Resource Yatai

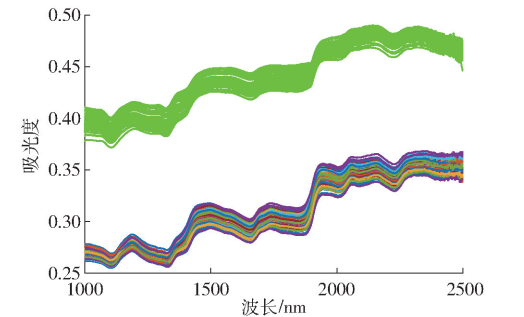


图 8 三元禾丰和实验室样品的豆粕光谱图

Fig. 8 Soybean meal spectra acquired in Wellhope and laboratory

光谱。从图中可以看出,三元禾丰与实验室样品光谱有一定差异。仪器光纤探头安装在豆粕粉碎后输送到配料仓的溜管上,样品是在重力作用下流过溜管,样品状态较松散,故样品间空隙较大,因此样品的光谱与实验室扫描的光谱相比,有一定差异,故而采用样品扩充的方法。在三元禾丰生产线上采集了 77 个样品作为样品扩充并对模型进行调整。

图 9a、9b 分别为三元禾丰在线定量分析模型的含水率和粗蛋白质量分数的预测散点图。从图中可以看出,模型的拟合线与 1:1 线近似重合,模型预测结果较好。与图 4a 相比,调整后模型的 R_p^2 为 0.90, 大于 0.83;验证标准偏差为 0.26%, 小于 0.34%;相对分析误差为 3.29, 大于 2.40;相对标准偏差为 2.54%, 小于 5%, 说明含水率模型在样品扩充后比实验室模型的精度更高,稳定性更好。与图 4b 相比,调整后模型的 R_p^2 为 0.88, 大于 0.86;验证标准

偏差为 0.70%, 近似于 0.69%;相对分析误差为 2.71, 大于 2.55;相对标准偏差为 1.50%, 小于 5%, 说明粗蛋白含量模型在样品扩充后比实验室模型的精度更高,稳定性更好。

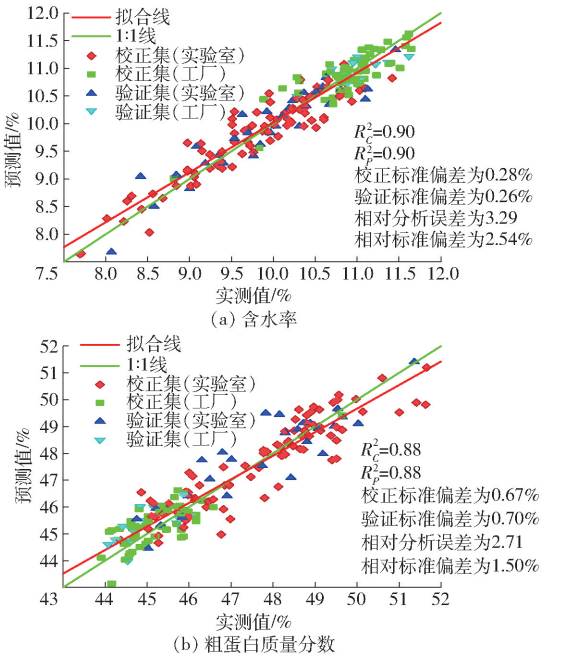


图 9 三元禾丰在线定量分析模型预测散点图

Fig. 9 Scatter plots of predicted and measured values of online NIRS model in Wellhope

图 10 为样品扩充前后在三元禾丰生产线上的预测值与实测值的残差散点图。从图中可以看出,使用实验室模型直接预测的误差较大;实验室模型经截距校正后的预测结果虽然更加精确,但模型的

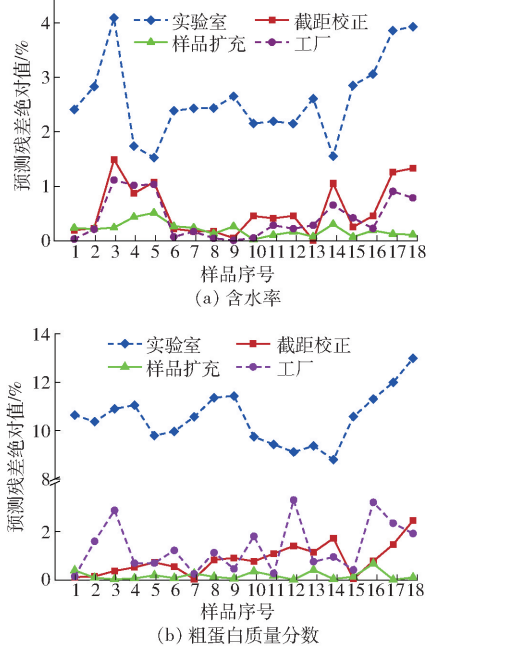


图 10 三元禾丰定量分析模型预测值与实测值的残差散点图

Fig. 10 Residual plots of predicted and measured values of online NIRS model in Wellhope

稳定性较差;仅使用饲料厂 77 个样品建立的模型也存在稳定性较差的问题,尤其是粗蛋白质量分数模型,预测残差起伏波动明显;样品扩充的结果精确性高,波动性小。分析原因,可能是因为样品扩充增加了样品的变异范围,使得模型的预测结果更加稳定。

3 结束语

以 117 个全国采集的豆粕样品为研究对象,建立实验室定量分析模型,在饲料生产企业选择两种近红外在线设备安装方式,探索不同方法实现豆粕

品质近红外实验室定量分析模型转移到在线应用的可行性。研究结果显示:建立的实验室近红外模型可实现豆粕含水率、粗蛋白质量分数的快速预测(相对标准偏差小于 10%),其中,含水率和粗蛋白质量分数的 R_p^2 分别为 0.83 和 0.86,相对分析误差分别为 2.40 和 2.55,模型效果良好;采用模型校正、样品扩充两种不同方法,将实验室转移到饲料生产企业进行在线应用,含水率和粗蛋白质量分数的预测值与实际测量值之间具有很好的吻合性,可以达到在线分析的要求。

参 考 文 献

[1] PIERNA J A F, VINCKE D, DARFENNE P, et al. Line scan hyperspectral imaging spectroscopy for the early detection of melamine and cyanuric acid in feed[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2014, 22(2):103–112.

[2] RAMIREZ M I, RIVERO D, FERNANDEZ B E, et al. Optimization of NIR calibration models for multiple processes in the sugar industry[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2016, 159: 45–57.

[3] MUNIR M T, YUA W, YOUNG B R, et al. The current status of process analytical technologies in the dairy industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 43(2): 205–218.

[4] PRAJAPATI P, SOLANKI R, MODI V, et al. A brief review on NIR spectroscopy and its pharmaceutical applications[J]. *International Journal of Pharmaceutical Chemistry and Analysis*, 2016, 3(3): 117–123.

[5] BLASCO J, LORENTE D, CORTES V, et al. Application of near infrared spectroscopy to the quality control of citrus fruits and mango[J]. *NIR News*, 2016, 27(7): 4–7.

[6] MAGWAZA L S, OPARA U L, NIEUWOUDT H, et al. NIR spectroscopy applications for internal and external quality analysis of citrus fruit—a review[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(2):425–444.

[7] 彭彦昆, 杨清华, 王文秀. 基于近红外光谱的猪肉水分在线检测与分级[J/OL]. *农业机械学报*, 2018,49(3):347–353. PENG Yankun, YANG Qinghua, WANG Wenxiu. On-line detection and classification of pork moisture based on near-infrared spectra[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2018,49(3):347–353. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180343&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.043. (in Chinese)

[8] 孙旭东, 刘燕德, 李轶凡, 等. 鸭梨黑心病和可溶性固形物含量同时在线检测研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(1):227–233. SUN Xudong, LIU Yande, LI Yifan, et al. Simultaneous and online detection of blackheart and soluble solids content for ‘Yali’ pear by visible-near infrared transmittance spectroscopy[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2016, 47(1): 227–233. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160130&journalid=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.030. (in Chinese)

[9] 薛俊杰, 韩鲁佳, 杨增玲, 等. 玉米秸秆饲料营养成分 NIRS 在线检测[J/OL]. *农业机械学报*, 2016,47(7):216–223. XUE Junjie, HAN Lujia, YANG Zengling, et al. On-line measurement of nutrient content of corn stover using NIRS[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* 2016, 47(7):216–223. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160730&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.030. (in Chinese)

[10] NORRIS K H, BARNES R F, MOORE J E, et al. Predicting forage quality by infrared reflectance spectroscopy[J]. *Journal of Animal Science*, 1976, 43(4): 889–897.

[11] BALASTRERI C, BARETTA D, PAULINO A T. Near-infrared spectroscopy and multivariate analysis for the determination of nutritional value of soybean meal and maize bran[J]. *Analytical Letters*, 2016, 49(10): 155–158.

[12] 卢利军, 庄树华, 李爱军, 等. 应用近红外技术测定黄豆粕中水分、蛋白质和粗脂肪[J]. *分子科学学报*, 2001, 17(2): 115–120. LU Lijun, ZHUANG Shuhua, LI Aijun, et al. Determinating contents of moisture protein and rude fat in soybean meal by near infrared technology[J]. *Journal of Molecular Science*, 2001, 17(2): 115–120. (in Chinese)

[13] 庄树华, 张广利, 卢利军. 近红外光谱法快速测定豆粕蛋白质含量[J]. *中国油料*, 1991(2): 75–78. ZHUANG Shuhua, ZHANG Guangli, LU Lijun. Detection of crude protein in soybean meal with near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 1991(2): 75–78. (in Chinese)

- [20] RUSSAKOVSKY O, DENG J, SU H, et al. ImageNet large scale visual recognition challenge[J]. *Int. J. Comput Vision*, 2015, 115(3): 211 – 252.
- [21] PAN S J, YANG Q. A survey on transfer learning[J]. *Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2010, 22(10): 1345 – 1359.
- [22] CHERIYADAT A M. Unsupervised feature learning for aerial scene classification[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 439 – 451.
- [23] YANG Y, NEWSAM S. Spatial pyramid co-occurrence for image classification[C] // *IEEE International Conference on Computer Vision*. IEEE, 2011: 1465 – 1472.
- [24] LIN K, YANG H F, CHEN C S. Flower classification with few training examples via recalling visual patterns from deep CNN [C] // *IPPR Conference on Computer Vision, Graphics, and Image Processing (CVGIP)*, 2015.
- [25] SCHMIDHUBER J. Deep learning in neural networks: an overview[J]. *Neural Network*, 2014, 61: 85 – 117.
- [26] CHEN N, XING C, ZHANG X, et al. Space-borne earth-observing optical sensor static capability index for clustering[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(10): 5504 – 5518.
- ~~~~~

(上接第363页)

- [14] FONTAINE J, HERR J, SCHIRMER B. Near-infrared reflectance spectroscopy enables the fast and accurate prediction of the essential amino acid contents in soy, rapeseed meal, sunflower meal, peas, fishmeal, meat meal products, and poultry meal [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(1): 57 – 66.
- [15] FERREIRA D S, GALAO O F, PALLONE J A L, et al. Comparison and application of near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopy for determination of quality parameters in soybean samples[J]. *Food Control*, 2014, 35(1): 227 – 232.
- [16] FAN Xia, TANG Shichuan, LI Guozhen, et al. Non-invasive detection of protein content in several types of plant feed materials using a hybrid near infrared spectroscopy model[J]. *PIOS One*, 2016, 11(9): e163145.
- [17] AURELI R, UEBERSCHLAG Q, KLEIN F, et al. Use of near infrared reflectance spectroscopy to predict phytate phosphorus, total phosphorus, and crude protein of common poultry feed ingredients[J]. *Poultry Science*, 2016, 96(1): 160 – 168.
- [18] 王乐, 史永革, 李勇, 等. 在线近红外过程分析技术在豆粕工业生产上的应用[J]. *中国油脂*, 2015, 40(1): 91 – 94.
- WANG Le, SHI Yongge, LI Yong, et al. Application of online near-infrared process analytical technology in industrial production of soybean meal[J]. *China Oils and Fats*, 2015, 40(1): 91 – 94. (in Chinese)
- [19] BOUVERESSE E, MASSART D L. Standardisation of near-infrared spectrometric instruments: a review[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 1996, 11(1): 3 – 15.
- [20] FEARN T. Standardisation and calibration transfer for near infrared instruments: a review[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2001, 9(4): 229 – 244.
- [21] 高云, 高建芹, 王小天. 油菜籽品质指标近红外数学模型的仪器间转移优化[J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(3): 292 – 295.
- [22] BELLON V, VIGNEAU J L, SEVILA F. Infrared and near-infrared technology for the food industry and agricultural uses: on-line applications[J]. *Food Control*, 1994, 5(1): 21 – 27.
- [23] GONZALEZMARTIN I, ALVAREZGACIA N, HERNANDEZANDALUZ J L. Instantaneous determination of crude proteins, fat and fibre in animal feeds using near infrared reflectance spectroscopy technology and a remote reflectance fibre-optic probe[J]. *Animal Feed Science & Technology*, 2006, 128(1 – 2): 165 – 171.
- [24] 褚小立. 化学计量学方法与分子光谱分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [25] MODRONO S, SOLDADO A, MARTINEZ F A, et al. Handheld NIRS sensors for routine compound feed quality control: real time analysis and field monitoring[J]. *Talanta*, 2017, 162: 597 – 603.
- [26] SISOUANE M, CASCANT M M, TAHIRI S, et al. Prediction of organic carbon and total nitrogen contents in organic wastes and their composts by infrared spectroscopy and partial least square regression[J]. *Talanta*, 2017, 167: 352 – 358.
- [27] PREECE S L M, AUVERMANN B. W, MACDONALD J C, et al. Predicting the heating value of solid manure with visible and near-infrared spectroscopy[J]. *Fuel*, 2013, 106(2): 712 – 717.
- [28] WILLIAM P. Near-infrared technology-getting the best out of light[M]. Nanaimo: PDK Grain, 2007.