



王春媛, 齐景伟, 安晓萍, 刘娜, 王园, 王步钰. 基于 NIR 定量模型快速预测发酵麸皮中还原糖和可溶性蛋白成分的含量[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(8): 190-203.

WANG Chunyuan, QI Jingwei, AN Xiaoping, LIU Na, WANG Yuan, WANG Buyu. Rapid prediction of reducing sugar and soluble protein content in fermented bran based on NIR quantitative analysis model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(8): 190-203.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.08.16

基于 NIR 定量模型快速预测发酵麸皮中还原糖和可溶性蛋白成分的含量

王春媛^{1,2} 齐景伟^{1,2*} 安晓萍^{1,2} 刘娜^{1,2} 王园^{1,2} 王步钰^{2,3}

(1. 内蒙古农业大学 动物科学学院, 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古自治区草食家畜饲料技术研究中心/国家乳业技术创新中心奶牛繁育与养殖技术研究中心, 呼和浩特 010018;

3. 内蒙古农业大学 计算机与信息工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要 为建立一种能快速预测发酵麦麸还原性糖和可溶性蛋白含量的定量分析模型, 本研究以发酵麦麸为样本, 采用 3,5-二硝基水杨酸比色法(3,5-dinitrosalicylic acid, DNS)和 BCA 蛋白浓度测定法分别测定样品的还原性糖和可溶性蛋白含量; 利用近红外光谱技术(Near infrared spectrum instrument, NIR)结合偏最小二乘法(Partial least squares regression, PLS), 比较预处理方法、最佳波长及主成分因子的决定系数 R^2 , 建立发酵麦麸还原性糖和可溶性蛋白含量的 NIR 快速检测定量模型。结果表明: 1) 发酵麦麸还原性糖定量模型的预处理方法使用一阶导数(First derivative, FD)+二阶导数(Second derivative, SD)+标准正态变换(Standard normal variate, SNV), 光谱范围为 908~1 670 nm, 主因子数为 7 时, 模型效果最优, 其决定系数 R_c^2 为 0.904 8, 校正均方根误差(Square error corrected, SEC)为 1.576 1, 相对分析误差(Relative percentage difference, RPD)为 3.240 8; 外部验证集决定系数 R_p^2 为 0.954 9 且还原糖活性成分的验证集样本的测定值与 NIR 光谱预测值的 P 值为 0.959 5 >0.05 。2) 发酵麦麸可溶性蛋白定量模型的预处理方法使用一阶导数(First derivative, FD)+二阶导数(Second derivative, SD)+标准正态变换(Standard normal variate, SNV), 光谱范围为 908~1 670 nm, 主因子数为 10 时, 模型效果最优, 其决定系数 R_c^2 为 0.938 2, 校正均方根误差(Square error corrected, SEC)为 2.003, 相对分析误差(Relative percentage difference, RPD)为 4.021 9; 外部验证集决定系数 R_p^2 为 0.994 4, 且可溶性蛋白活性成分的验证集样本测定值与 NIR 光谱预测值的 P 值为 0.901 9 >0.05 。综上, 建立的 NIR 光谱定量模型稳定性和准确性较好, 且预测准确度良好, 可用于快速预测发酵麦麸样品的还原性糖和可溶性蛋白含量。

关键词 近红外光谱法; 化学计量学; 定量分析模型; 活性成分; 发酵麸皮

中图分类号 S03

文章编号 1007-4333(2024)08-0190-14

文献标志码 A

Rapid prediction of reducing sugar and soluble protein content in fermented bran based on NIR quantitative analysis model

WANG Chunyuan^{1,2}, QI Jingwei^{1,2*}, AN Xiaoping^{1,2}, LIU Na^{1,2}, WANG Yuan^{1,2}, WANG Buyu^{2,3}

(1. College of Animal Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. Inner Mongolia Autonomous Region Forage Technology Research Center for Herbivorous Livestock/Dairy Cow Breeding and Breeding Technology Research Center of National Dairy Technology Innovation Center, Hohhot 010018, China;

3. College of Computer and Information Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

收稿日期: 2023-10-17

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0023-3, 2021ZD0024-4); 国家乳业技术创新中心创新能力建设重点项目(2022-科研攻关-2); 内蒙古自治区科技计划项目(2022YFSJ0029, 2022YFHH0072)

第一作者: 王春媛(ORCID:0009-0006-0602-4590), 硕士研究生, E-mail: 1300829961@qq.com

通讯作者: 齐景伟(ORCID:0000-0003-1572-0468), 教授, 主要从事智慧养殖及生物饲料技术创新方面研究, E-mail: Qijingwei@imau.edu.cn

Abstract This study aims to establish a quantitative analysis model that can quickly predict the content of reducing sugars and soluble proteins in fermented wheat bran (FWB). FWB was taken as the study material, and the reducing sugar and soluble protein contents of the samples were determined by the colorimetric method of 3, 5-dinitrosalicylic acid (3, 5-dinitrosalicylic acid, DNS) and the BCA protein concentration assay (Bicinchoninic Acid Assay, BCA), respectively. Using Near infrared spectrum instrument (NIR) combined with Partial least squares regression (PLS), the pre-processing method, the optimal wavelength and the coefficient of determination R^2 of the principal component factors were compared, and a quantitative model for the rapid detection of NIR in the content of reducing sugars and soluble proteins in FWB were established. The results showed that: 1) The pretreatment method of quantitative model of reduced sugar in fermented wheat bran used First derivative (FD)+ Second derivative (SD)+ Standard normal variate (SNV). When the spectral range was 908-1 670 nm and the number of principal factors was 7, the model had the best performance. The determination coefficient Rc^2 was 0.904 8, and the square error corrected (SEC) was 1.576 1. The Relative percentage difference (RPD) was 3.240 8. The determination coefficient Rp^2 of the external validation set was 0.954 9, and the P value between the measured values of the validation set samples of reducing sugar active ingredients and the predicted values of NIR spectra was 0.959 5>0.05. 2) The pretreatment method for quantitative model of fermented wheat bran soluble protein was First derivative (FD)+ Second derivative (SD)+ Standard normal variate (SNV). When the spectral range was 908-1 670 nm and the number of principal factors was 10, the model had the best performance. The determination coefficient Rc^2 was 0.938 2, and the corrected square error corrected (SEC) was 2.003. The Relative percentage difference (RPD) was 4.021 9. The coefficient of determination (Rp^2) of the external validation set was 0.994 4, and the P value between the measured values of the validation set samples and the predicted values of the NIR spectra of the soluble active components was 0.901 9>0.05. To sum up, established NIR spectral quantitative model in the study has good stability and accuracy, and can be used to rapidly predict the contents of reducing sugar and soluble protein in FWB samples.

Keywords near infrared spectroscopy; stoichiometric method; quantitative analysis model; active ingredient; fermented bran

麸皮是谷物加工的主要副产物,我国每年产出的小麦麸皮在2 000万 t以上^[1]。麸皮是麦粒的外层,约占整个麦粒的15%,小麦麸皮由13.18%蛋白质、14.25%淀粉、3.4%脂肪、3.8%矿物质和55.60%非淀粉碳水化合物组成^[2-3]。木聚糖是小麦麸皮中碳水化合物的主要成分,约占小麦麸皮的20%,是制备小麦麸皮还原性糖的良好资源。目前麸皮大部分用作动物饲料,不仅经济利用效益低,而且食用和商用价值均较低^[4-5]。近年来,研究发现麦麸不仅具有对人体必不可少的生理作用,包括降血糖、抗氧化、抗炎^[6]、抗肿瘤和免疫调节作用^[7-8],同时也可以提高畜禽的生长性能、改善动物产品品质和提高生产效益^[9]。还原糖是指能够被还原的糖,包括葡萄糖和果糖。发酵麸皮中还原糖含量不仅反映了乙醇的生产和发酵状态,而且也反映了发酵麸皮中的微生物代谢活性^[10],从而间接的反应发酵过程。麦麸蛋白质含量丰富,且氨基酸构成比例

均衡,包含人体所有必需氨基酸,是一种优质蛋白质资源^[11]。小麦麸皮蛋白可以制备成抗氧化活性较高的小分子小麦麸皮多肽,具有多种生物功效^[12-13]。相关研究证实,畜禽对饲料的偏爱程度与其营养物质种类和含量相关,故对麦麸中营养物质的快速检测尤为重要^[14-15]。然而,在传统的饲料生产过程中,发酵料的测定依赖于工人或常规的物理和化学方法,还原糖在试剂中溶解度较小,所测结果偏低;蛋白质的测定需要浓硫酸等危险试剂,这些检测方法存在着耗时、及操作复杂等问题,难以满足通过快速简便准确测定发酵过程中的活性成分含量的需求。

近年来,光谱学技术因其简单、快速、无损和低成本的优势^[16],已被用于以快速和无损的方式评价食品的质量,如核桃^[17]、苹果^[18]、桃果^[19]。特别是近红外(Near infraredred, NIR)光谱定量分析技术的研究最为广泛。NIR通过主成分分析、人工神经网络

和偏最小二乘法(Partial least-square method, PLS)等化学计量学方法,建立物质光谱与待测成分含量的线性或非线性预测模型,从而实现对物质中待测成分的快速定量检测^[20]。据报道,近红外光谱可用于水稻水分和蛋白质含量的高精度测量^[20-24]。祁梅等^[25]利用NIR技术建立麦冬5种代表性成分的PLS定量分析模型,结果表明预测结果准确,可用于麦冬5种成分含量的快速测定。Xie等^[26]建立基于全波段和PLS的近红外模型预测油炸和烘烤马铃薯片中丙烯酰胺含量。魏尊苗等^[27]利用近红外光谱技术建立了关于粗脂肪、蛋白质、淀粉和总糖的油莎豆的品质检测。但目前还没有针对发酵麦麸的营养指标建立快速预测方法相关研究。

因此,本研究首先借助近红外光谱技术,建立发酵麦麸中还原力和可溶性蛋白质含量的快速检测方法,并进一步通过光谱预处理及特征波段筛选等方法优化模型,增强检测准确性。本研究为实现高效便捷的发酵麦麸特征营养成分含量的检测提供参考和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料及仪器

麸皮、玉米和豆粕采购自当地市场(呼和浩特);商业复合菌(枯草芽孢杆菌1:地衣芽孢杆菌1:植物乳杆菌1:产阮假丝酵母3)购买于市场、纤维素酶(酶活10 000 U)购自下盛夏(北京)生物技术有限公司;DNS试剂(上海科丰化学试剂有限公司),均为分析纯。

便携式近红外光谱仪(MicroNIR Onsite) VIAVI Solutions公司;智力光照培养箱 宁波东南仪器有限公司;高速粉碎机 浙江屹立工贸有限公司;电热鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司;Epoch2 酶标仪(微孔板分光光度计)美国伯腾仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样品的制备与处理

发酵麸皮的制备参考杜涓等^[28];以小麦麸皮(80.46%)为原料,以豆粕粉(9.32%)、玉米粉(10.22%)为辅料,料水比1:1.16;加入1 000 U/g 0.1%的复合菌,2 g纤维素酶,于28℃下发酵4 d,每12 h取样,为保证样品的均匀性,把收集到的麸皮样本烘干后用高速粉碎机粉碎后过筛,共得到发

酵麸皮样本310份。

1.2.2 还原糖及可溶性蛋白的测定

发酵产物还原糖含量采用DNS显色法测定^[28],建立标准曲线方程 $y=0.8384x+0.0266$ 。以1:20的料水比称取发酵麸皮粉末,80℃热水提取40 min,冷却后离心,取上清稀释相应倍数。取稀释样液1.0 mL,DNS试剂2 mL,摇匀,沸水浴加热5 min,立即取出,用流水迅速冷却试管。然后加12 mL蒸馏水定容并摇匀后,在540 nm波长处测定吸光度。

采用BCA蛋白浓度测定试剂盒测定发酵产物的可溶性蛋白含量。

1.2.3 近红外光谱测定条件

本试验使用VIAVI Solutions公司便携式近红外光谱仪(MicroNIR Onsite)对发酵麸皮样品进行近红外光谱扫描。为保证仪器的稳定性,开机后预热30 min;在采集过程中,使样品粉末自然填满样品容器,保证样品表面平整。仪器先以白板作为参比,在采集样品光谱过程中,保持垂直照射并避光检测,以漫反射方式设置光谱扫描波长范围为908~1 676 nm,测定单个样品的近红外光谱数据3~5次,积分时间为50 ms,对光谱值进行均值化处理,用于建模分析。通过内部交叉验证的方法,对异常样本剔除并采取逐一回收的方式,剔除时观察模型评价指标,判断是否剔除,以保证最大程度的减小异常样本对模型预测能力的影响,提高构建发酵麸皮还原糖和蛋白含量预测模型的精准度。

1.2.4 校正集和验证集样品的选择

样品按4:1的比例随机分为校正集和验证集,校正集用于建立测定样品中还原糖和可溶性蛋白定量校正模型,验证集用于验证所建立校正模型的预测能力。

1.2.5 近红外光谱数据建模预处理方法

近红外光谱易受到样品的杂散光以及噪音信号等影响,为保证谱图基线平稳和所建立校正模型的准确性,需对原始光谱进行预处理^[29]。本研究采用预处理方法有无光谱处理(None)、去趋势(Detrend)、标准正规变换(SNV)、二阶导数(SD)、一阶导数(FD)及4种方法任意组合。

1.2.6 特征光谱波段的选择

偏最小二乘法(Partial least squares, PLS)可以处理全光谱信息,但这些信息中包含了过多的冗余

信息,通过特征波长的筛选可有效地降低建模的复杂性,提高了模型的预测精度^[30]。因此,在建立模型时,需要找到能充分反映出样品中各指标成分的最佳建模波段来改善模型性能,提高计算速度。当RMSEC、SEC最小, R^2 、RPD值最大时,对应的波段为最优特征波段。

1.2.7 主成分因子数的选择

通过PLS建立NIR分析模型时,主因子数也对模型预测准确度有较大影响。主成分太小,则导致建模信息不全,模型预测能力相对较差;数值太大,所建模型包含太多的噪音,会出现过拟合现象,当验证集预测标准偏差最小时,对应的主成分最佳^[31-32]。

1.2.8 模型的质量评价

首先用内部交叉验证法检验模型的稳健性,通过校正集的決定系数(Correction determination coefficients, R_c^2)和校正标准差(Standard error of the calibration, SEC)来判断模型的质量,一般校正決定系数 R_c^2 越大,近红外分析结果与化学分析结果越吻合,可信度越高。用验证集的決定系数(Determination coefficient, R_p^2)和预测均方根误差(Root mean square error of prediction, SEP)来判断模型的精确性,当 R_p^2 越大,SEP 越小,说明定标模型的准确度越高,则模型预测性能越好。最后根据相对分析误差(Relative percent deviation, RPD)对预测精度进行进一步的评价。当RPD值 <2.5 时,说明比较困难用该模型进行定量分析,故无法用近红外光谱技术进行分析;若 $2.5 \leq \text{RPD} < 3$,说明模型对该成分进行定量分析是可行,但其精度有待进一步提高;若RPD值 ≥ 3 ,说明建立的定标模型预测

效果良好,可用于实际检测^[33-34]。

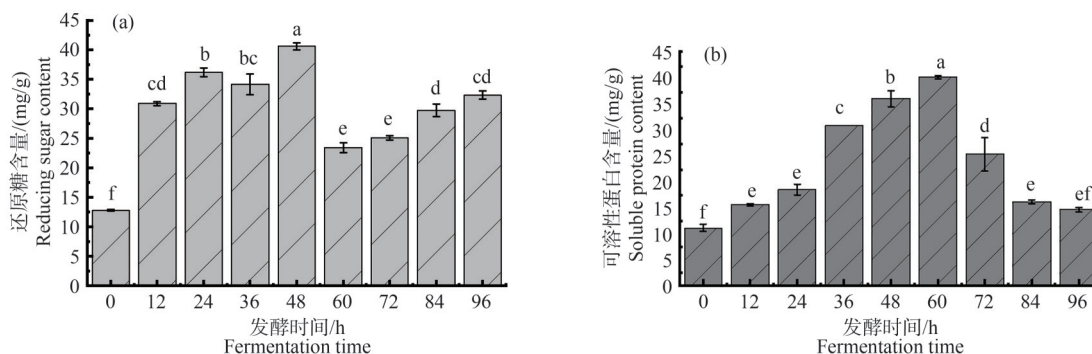
1.3 数据处理

使用Origin2021作图;采用Excel 2019进行数据汇总处理;以SAS 9.2各样本中发酵麸皮还原糖和蛋白质进行统计分析,使用近红外光谱仪自带软件MicroNIR TM Pro v3.1对近红外光谱图进行处理和模型建立,用IBM SPSS Statistics 25分析显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 麸皮样品化学值

由图1可知,随发酵时间的延长,麸皮中的还原糖呈先上升后下降再上升的趋势,0~48 h还原糖含量由12.82 mg/g上升至40.61 mg/g($P < 0.001$),在60~72 h显著下降随后缓慢上升;可溶性蛋白呈先上升后下降的趋势,其中发酵时间为0~48 h时可溶性蛋白由11.18 mg/g上升至40.45 mg/g($P < 0.001$);发酵到60 h之后,可溶性蛋白的含量均随着发酵进行显著下降($P < 0.05$)还原糖是发酵体系中微生物可以直接利用的碳源,其在发酵过程中的含量变化趋势直接反映微生物的生长情况。本试验中说明发酵12 h以上时,发酵麦麸中的微生物大量繁殖,并分泌糖化酶,酶分解淀粉使得发酵体系中的还原糖含量急剧上升。发酵48 h之后,一方面糖化酶活力下降,另一方面还原糖被微生物用于乙醇发酵。在84 h蛋白被分解利用还原糖含量升高。麸皮在发酵过程中,蛋白质被蛋白酶分解成多肽和一些小分子物质,增加了蛋白质的溶解性,所以可溶性蛋白质的含量增加;而在发酵后期可溶性蛋白更多地被降解成氨基酸和小肽物质,从而造成后期



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),相同小写字母表示差异不显著($P > 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$), the same lowercase letters indicated that the difference was not significant ($P > 0.05$).

图1 发酵时间对麸皮的还原糖(a)和可溶性蛋白(b)的含量影响

Fig. 1 Effect of fermentation time on reducing sugar(a) and soluble protein(b) content of bran

可溶性蛋白含量呈下降趋势。

建立模型的关键因素是建模所用的定标集化学值是否覆盖广泛,一个覆盖范围广的定标集能够提高检测模型的精度和稳定性^[35]。由表1可知,试验所选取的发酵麸皮样品中还原糖含量范围为12.82~40.61 mg/g,可溶性蛋白含量范围为11.18~40.45 mg/g,覆盖广泛,能够较好的满足模型构建的需求,基于此建立的近红外光谱模型更具有普适性。因此,选取的发酵麦麸样品可用于建立其还原糖和可溶性蛋白的近红外光谱预测模型。

表1 发酵麸皮样品中还原糖和蛋白含量的测定

Table 1 Determination of reducing sugar and protein in fermented bran samples

指标 Parameter	还原糖 Reducing sugar		可溶性蛋白 Soluble protein	
	建模集 Modeling set	验证集 Prediction set	建模集 Modeling set	验证集 Prediction set
样本数 Number of samples	239	64	179	45
最大值/(mg/g) Max	40.61	39.29	40.45	27
最小值/(mg/g) Min	18.63	12.82	11.18	13.68
平均值/(mg/g) Average	31	25.67	23.03	20.25
标准差 Standard deviation	5.12	6.69	8.08	4.68
变异系数 Variation coefficient	16.51	26.05	35.08	23.11

2.2 麸皮样品的近红外原始光谱

239个发酵麸皮还原糖样品的原始光谱反射率曲线如图2(a)所示,179个可溶性蛋白样品原始光谱反射率曲线如图2(b)所示,由图中可以看出近红外

光谱图走向基本一致,但响应信号存在一定差异,说明样品中的各成分含量存在差异。在1 200 nm和1 450 nm附近拥有较为明显的吸收峰,这与发酵麸皮中大量含氢基团振动有关。

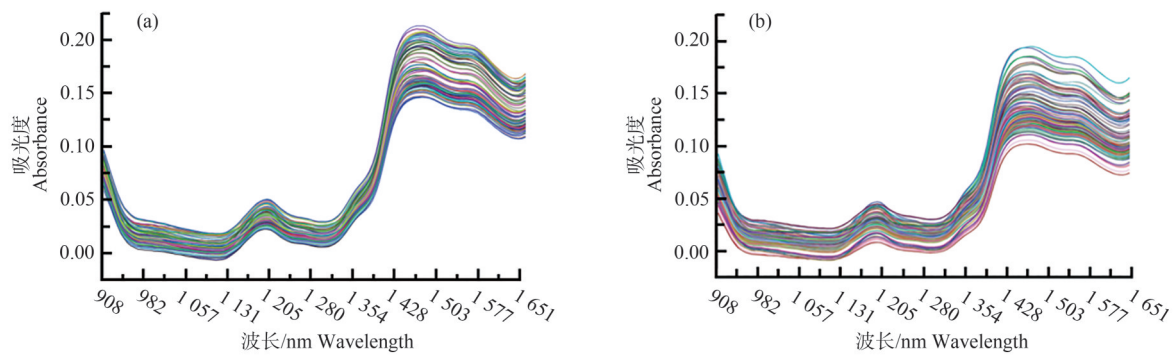


图2 发酵麸皮还原糖(a)和可溶性蛋白(b)模型的NIR原始光谱图

Fig. 2 NIR raw spectrogram of the fermented bran reducing sugar (a) and soluble protein (b) models

2.3 光谱预处理方法的选择

由图2可以看出,原始光谱存在明显的基线漂移情况,为确保模型的预测性能,需要对其进行预处理。光谱数据预处理方法包括无处理(None)、去趋势化(Detrend)、标准正态变换(SNV)、二阶导数(SD)、一阶导数(FD) 5种单一预处理方法,或上述2~3种预处理方法随机组合的方法。其中,SEC越小, R_c^2 越接近1,RPD越大,表明所建立模型的预测效果更好、适用性更强(图3)。表2和表3为最终筛选最佳预处理方法建立定量模型。其中还原糖和可溶性蛋白模型选择一阶导数(FD),二阶导数(SD)和标准正态(SNN)变换获得的PLS模型最优。其模型的决定系数 R_c^2 分别为0.854 8和0.833 2,验证均方差SEC分别为1.947和3.29,且2种模型的RPD均 >2 ,说明模型具备较高的可靠性,其中还原糖模型RPD为2.624 >2.500 能够用于还原糖含量的实际检测,而可溶性蛋白模型RPD为2.448 6 <2.500 ,说明该模型预测结果可达到粗估的效果,但预测精度需进一步提高。

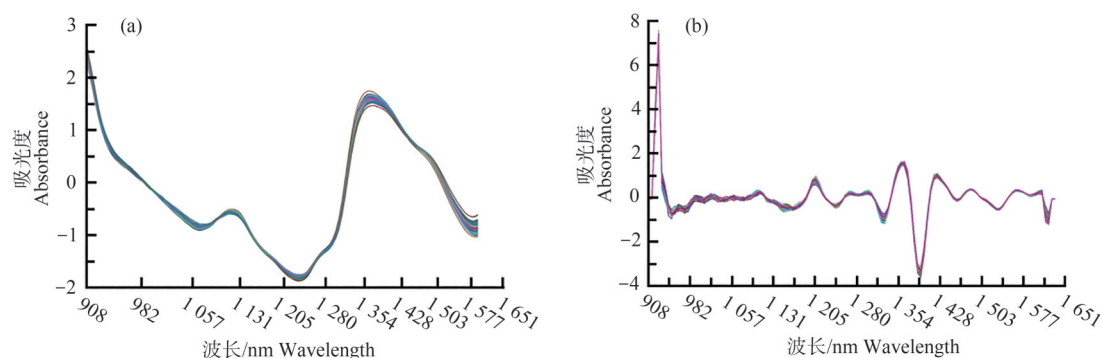


图 3 发酵麸皮还原糖(a)和可溶性蛋白(b)模型的 NIR 预处理光谱图

Fig. 3 NIR pretreatment spectrogram of fermented bran reducing sugar (a) and soluble protein (b) models

表 2 光谱预处理方法对还原糖模型的影响

Table 2 Effects of spectral pretreatment methods on restore sugar model

预处理 Pretreatment	样本数 Number of samples	SEC	Rc^2	RPD
None	239	4.739 7	0.139 0	1.077 7
FD	239	4.463 3	0.236 5	1.144 4
SD	239	4.433 0	0.246 8	1.152 3
SNV	239	2.679 3	0.724 9	1.906 6
Detrend	239	4.507 3	0.221 4	1.133 3
FD+SD	239	4.254 1	0.306 4	1.200 7
FD+SNV	239	2.767 7	0.706 4	1.845 6
FD+Detrend	239	4.589 8	0.192 6	1.112 9
FD+SD+SNV	239	1.947 0	0.854 8	2.624 0
FD+SD+Detrend	239	4.262 4	0.303 7	1.198 4
FD+SNV+Detrend	239	2.956 9	0.664 9	1.727 4
FD+SD+SNV+Detrend	239	1.947 5	0.854 6	2.622 8
FD+SNV+SD	239	2.064 8	0.836 6	2.473 9
FD+Detrend+SD	239	4.254 1	0.306 4	1.200 7
SD+FD	239	4.506 3	0.221 7	1.133 5
SD+SNV	239	2.632 8	0.734 3	1.934 0
SD+Detrend	239	4.442 8	0.243 5	1.150 0
SD+FD+SNV	239	2.684 4	0.723 8	1.902 9
SD+FD+Detrend	239	4.507 2	0.221 4	1.133 3
SD+FD+SNV+Detrend	239	2.693 3	0.722 0	1.896 5
SD+SNV+FD	239	2.686 5	0.723 4	1.901 5
SD+Detrend+FD	239	4.506 2	0.221 8	1.133 6
SNV+Detrend+FD	239	2.625 5	0.735 8	1.945 5
SNV+Detrend+SD	239	2.436 9	0.772 4	2.096 0
SNV+Detrend	239	2.699 0	0.720 8	1.892 6
SNV+FD	239	2.621 1	0.736 7	1.948 9
SNV+SD	239	2.436 9	0.772 4	2.096 0
Detrend+SD	239	4.481 7	0.230 2	1.139 7
Detrend+FD	239	4.433	0.246 8	1.152 3

表2 (续)

预处理 Pretreatment	样本数 Number of samples	SEC	Rc^2	RPD
Detrend+SNV	239	2.823 6	0.694 5	1.809 1
Detrend+SNV+FD	239	2.752 2	0.709 7	1.855 9
Detrend+SNV+SD	239	4.119 1	0.738 6	1.955 8

表3 光谱预处理方法对可溶性蛋白模型的影响

Table 3 Effects of spectral pretreatment methods on soluble protein model

预处理 Pretreatment	样本数 Number of samples	SEC	Rc^2	RPD
None	179	5.745 6	0.491 3	1.402 1
FD	179	5.541 3	0.526 9	1.453 8
SD	179	5.348 8	0.559 2	1.506 1
SNV	179	5.745 6	0.491 3	1.402 1
Detrend	179	5.552 4	0.525	1.450 9
FD+SD	179	5.756 8	0.489 4	1.399 4
FD+SNV	179	5.084 7	0.601 6	1.584 4
FD+Detrend	179	5.485 3	0.536 4	1.468 7
FD+SD+SNV	179	3.289 9	0.833 2	2.448 7
FD+SD+Detrend	179	5.743	0.491 8	1.402 7
FD+SNV+Detrend	179	4.622 8	0.670 7	1.742 7
FD+SD+SNV+Detrend	179	3.290 0	0.833 2	2.448 6
FD+SNV+SD	179	3.493 5	0.812	2.306 1
FD+Detrend+SD	179	5.756 8	0.489 4	1.399 4
SD+FD	179	5.248 4	0.575 6	1.534 9
SD+SNV	179	3.955 9	0.758 9	2.036 5
SD+Detrend	179	5.320 8	0.563 8	1.514 1
SD+FD+SNV	179	3.603 5	0.799 9	2.235 6
SD+FD+Detrend	179	5.248 1	0.575 6	1.535 1
SD+FD+SNV+Detrend	179	3.610 7	0.799 1	2.231 2
SD+SNV+FD	179	3.561 9	0.804 5	2.261 7
SD+Detrend+FD	179	5.248 7	0.575 5	1.534 9
SNV+Detrend+FD	179	4.632 2	0.669 4	1.739 1
SNV+Detrend+SD	179	3.496 6	0.811 6	2.304
SNV+Detrend	179	5.096 4	0.599 8	1.580 7
SNV+FD	179	4.601	0.673 8	1.750 9
SNV+SD	179	3.496 6	0.811 6	2.304
Detrend+SD	179	5.530 7	0.528 7	1.456 6
Detrend+FD	179	0.528 7	0.559 2	1.506 1
Detrend+SNV	179	6.136 4	0.419 8	1.312 8
Detrend+SNV+FD	179	5.166 9	0.588 7	1.559 2
Detrend+SNV+SD	179	4.119 1	0.738 6	1.955 8

2.4 最适波段的选择

变量数过多会增加预测模型复杂度,过少则易遗漏细节信息,因此采用特征波长提取能够提高其准确度与精度^[36]。建模区间的筛选是将还原糖光谱区间划分为 6 个子区间(908.1~1 676.2 nm、908.1~945.27 nm、945.27~1 075.35 nm、1 075.35~1 341.7 nm、1 341.7~1 577.09 nm、1 577.09~1 676.2 nm);建模区间的筛选是将可溶性蛋白光谱区间划分为 5 个子区间(908.1~1 676.2 nm、908.1~

1 261.18 nm、1 261.18~1 397.45 nm、1 397.45~1 546.12 nm、1 546.12~1 676.2 nm),通过比较不同波段所建立模型的校正样品预测标准偏差(Standard error of calibration, SEC)、决定系数(Determination coefficient, Rc^2)和相对分析误差(Relative percent deviation, RPD)筛选最优波段参与建模。由表 4 可知,还原糖及可溶性蛋白最优波段为 908.1~1 676.2,且 RPD>2.5,模型具备较高可靠性,能够用于模型分析。

表 4 建模波段对还原糖和可溶性蛋白模型性能的影响

Table 4 Influence of modeling bands on model performance of reducing sugars and soluble proteins

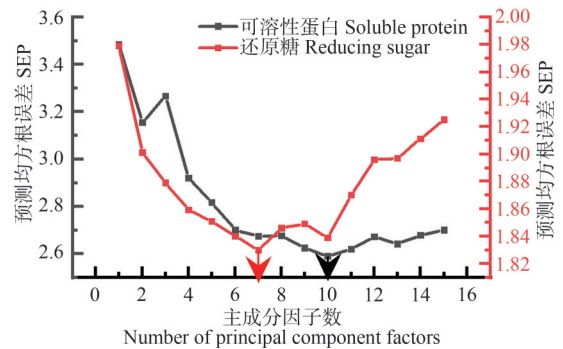
还原糖波段 Reducing sugar waveband	SEC	Rc^2	RPD	可溶性蛋白波段 Soluble protein waveband	SEC	Rc^2	RPD
908.1~1 676.2	1.95	0.85	2.62	908.1~1 676.2	3.30	0.83	2.45
908.1~945.27	3.64	0.49	1.40	908.1~1 261.18	3.74	0.79	2.16
945.27~1 075.35	5.04	0.03	1.02	1 261.18~1 397.45	6.31	0.39	1.28
1 075.35~1 341.7	2.98	0.66	1.72	1 397.45~1 546.12	6.82	0.29	1.18
1 341.7~1 577.09	4.14	0.35	1.24	1 546.12~1 676.20	7.88	0.05	1.03
1 577.09~1 676.2	2.39	0.78	2.14				

2.5 还原糖和蛋白 SEP 随主成分数的变化图

在建模过程中,模型的主因子数是模型的关键参数之一。主因子数过低,模型的拟合度不足、性能不佳;主因子数过高,模型则容易出现过拟合。因此,合适的主因子数对定量分析模型性能至关重要。一般情况下,以 SEP 为指标,当验证集预测标准偏差最小时,对应的主成分数最佳^[37]。不同主因子下,模型的 SEP 值如图 4 所示。由图 4 可以看出,可溶性蛋白模型主因子数为 10 时模型的 SEP 值降至最低,随后随着主因子数增加模型的 SEP 值平缓上升;而还原糖模型主因子数为 7 时模型的 SEP 值降至最低,随后随着主因子数增加模型的 SEP 值逐步上升。因此,还原糖和可溶性蛋白模型的最佳主因子数为 7 和 10。

2.6 定标模型的建立

以筛选的最优光谱预处理方法,最适波段和最佳主因子数作为参数评价指标,对模型进行智能优化,然后采用 PLS 法建立定量分析模型。各模型实测值与预测值的相关性见图 5,模型的建模结果如



红色折线为还原糖含量,黑色折线为可溶性蛋白。

The red broken line shows the reducing sugar content and the black broken line shows the soluble protein.

图 4 不同主因子数随 SEP 值变化图

Fig. 4 The number of different principal factors varies with SEP value

表 5 所示。发酵麸皮的还原糖和可溶性蛋白定量模型的 Rc^2 分别为 0.904 8 和 0.938 2。

2.7 定标模型的外部验证及评价

还原糖和可溶性蛋白模型外部验证集预测值

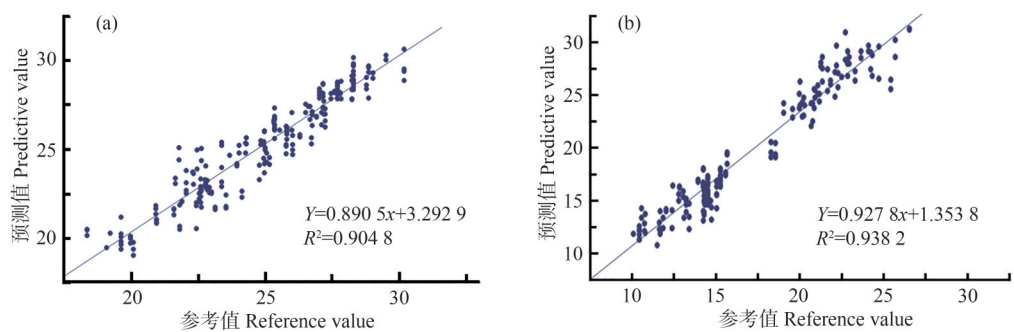


图5 还原糖(a)和可溶性蛋白(b)组分的NIR定量模型的实测值与预测值相关性

Fig. 5 Correlation between measured and predicted values of NIR quantitative models for reducing sugar (a) and soluble protein (b) fractions

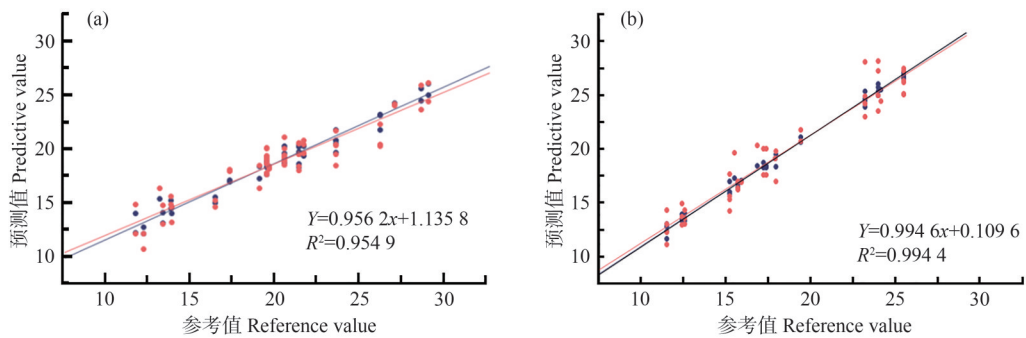
表5 发酵麸皮还原糖及可溶性蛋白定量分析模型结果

Table 5 Results of Ferry bran reducing sugar and soluble protein quantitative analysis model

指标 Parameter	样本数 Number	光谱区间 Spectral interval	主因子数 Number of principal factors	R_c^2	SEC	SECV	SEC/SECV	RPD
还原糖 Reducing sugar	239	908.1~1 676.2	7	0.904 8	1.576	1.826	0.863	3.241
可溶性蛋白 Soluble protein	179	908.1~1 676.2	10	0.938 2	2.003	2.583	0.776	4.022

和实测值相关关系图如图6所示。2种模型决定系数 R^2 分别为0.954 5和0.994 4均 >0.80 ,验证集样

品的预测值与实测值均围绕在 $Y=x$ 的参考线附近,二者十分接近模型性能理想。



其中红色数据点为预测值,蓝色数据点为参考值。

Where the red data points are the predicted values and the blue data points are the reference values.

图6 还原糖(a)和可溶性蛋白(b)组分的NIR定量模型的参考值与预测值相关性

Fig. 6 Reference and predicted values of NIR quantitative models for reducing sugar (a) and soluble protein (b) fractions were correlated

将验证集($n=20$)样品 NIR 光谱输入定量模型,得出预测值,同时借助 SPSS 统计学软件将对应预测值与实测值的比值与数值 1 作显著性分析,结

果如表 7 和表 8 所示,二者不存在显著差异(P 分别为 0.959 5 和 0.901 9)。说明所建立的发酵麸皮 2 个活性成分定量模型稳定性和准确性较好,且模型

表7 还原糖模型外部验证与评价

Table 7 External verification and evaluation of reducing sugar model

样本编号 Number	测定值 Measured value	预测值 Predictive value	相对误差 Relative error	标准偏差 Standard deviation
1	39.288 8	37.770 4	-3.864 7	1.073 7
2	36.230 0	36.361 6	0.363 3	0.093 1
3	28.882 4	28.389 0	-1.708 5	0.348 9
4	28.000 0	27.049 7	-3.393 9	0.671 9
5	27.583 4	27.246 2	-1.222 3	0.238 4
6	26.878 3	26.878 3	0	0
7	26.232 1	26.524 8	1.115 7	0.206 9
8	26.232 1	25.164 3	-4.070 4	0.755
9	24.658 1	24.830 4	0.698 6	0.121 8
10	24.658 1	26.047 7	5.635 3	0.982 6
11	26.232 1	25.969 8	-0.999 9	0.185 5
12	26.232 1	26.878 3	2.463 6	0.457 0
13	26.232 1	26.151 4	-0.307 6	0.057 0
14	26.232 1	27.037 6	3.070 8	0.569 6
15	34.924 6	34.872 3	-0.149 8	0.037 0
16	23.992 3	24.625 0	2.637 2	0.447 4
17	30.315 6	31.233 1	3.026 5	0.648 8
18	15.96 2	16.399 2	2.739 0	0.309 1
19	25.969 8	26.021 3	0.198 3	0.036 4
20	37.770 4	38.778 6	2.669 4	0.712 9

的预测准确度良好。

3 讨 论

小麦麸皮为小麦加工后的副产品,具有悠久的历史。麦麸中有效成分丰富,包括膳食纤维、麦麸蛋白、酚类(阿魏酸、黄酮类和木酚素等)、植酸和 γ -氨基丁酸等,具有抗氧化、降糖、降脂、抗癌、促进肠道蠕动等作用^[38]。但成分测定方法前处理过程繁琐,且溶剂会造成环境污染。因此,开发快速、可靠、无损检测麸皮含量的方法尤为重要。本研究中所采集的麸皮样品来自不同发酵时间段,时间跨度较长,并且样品的活性成分含量变化幅度大,覆盖

面广泛,有利NIRS与化学分析方法联用,一定程度上能够提高模型预测的准确性和可靠程度。为了进一步优化模型,人们采用NIRS与多元线性回归法(MLR)、主成分回归法(PCR)、改进偏最小二乘回归法(MPLS)和偏最小二乘回归法(PLS)相结合使预测的结果更为可靠^[39-40]。本研究应用NIRS与偏最小二乘法(PLSR)建立麸皮还原糖和可溶性蛋白含量的近红外模型,通过选择不同波段,不同主成分因子,采用不同预处理方式及组合对模型进行优化,发现全谱图FD+SD+SNV处理所得的模型结果最优,通过交叉验证评价模型预测效果,最终得到准确度较高的还原糖和可溶性蛋白含量的预

表8 可溶性蛋白模型外部验证与评价
Table 8 External verification and evaluation of soluble protein model

样本编号 Number	测定值 Measured value	预测值 Predictive value	相对误差 Relative error	标准偏差 Standard deviation
1	27.00	27.89	3.332 2	0.636 2
2	25.00	25.02	0.119 2	0.021 1
3	14.53	14.05	-3.303 5	0.339 4
4	17.70	16.90	-4.519 8	0.565 7
5	13.68	13.23	-3.320 8	0.321 3
6	14.68	15.01	2.248 0	0.233 3
7	14.53	13.40	-7.750 6	0.796 5
8	17.70	18.71	5.724 4	0.716 6
9	19.50	20.28	4.000 0	0.551 5
10	25.59	25.02	-2.199 2	0.398 0
11	27.00	26.38	-2.274 1	0.434 2
12	24.82	24.55	-1.087 8	0.190 9
13	19.14	18.12	-5.329 2	0.721 2
14	17.70	17.16	-3.050 8	0.381 8
15	19.78	19.87	0.455 0	0.063 6
16	14.53	14.05	-3.303 5	0.339 4
17	14.68	15.02	2.316 1	0.240 4
18	13.68	13.23	-3.289 5	0.318 2
19	19.78	19.87	0.455 0	0.063 6
20	21.24	20.78	-2.165 7	0.325 3

测模型。用优化后的模型的预测值对20个未参与建模的检验样本的化学值进行配对 t 检验, $P=0.959\ 5$ 、 $P=0.901\ 9>0.05$ (置信区间为95%),说明2种方法得到的检测结果无显著差异,这与陆登俊^[41]的研究结果一致。而田丽梅等^[42]利用NIRS技术对燕麦粗蛋白质进行预测发现,在950~1 650 nm全波段对光谱进行SNV+MSC+Detrend+FD预处理,模型的 R^2 和RPD分别可以达到0.88和3.00,说明对光谱进行预处理使十分必要的。苏鹏飞等^[43-44]利用近红外光谱技术结合常规分析方法,建立了高粱水分和淀粉含量的快检模型,可用于实际生产分析检测,提高样品分析效率。这也从侧面佐

证了通过近红外光谱技术可以快速准确的检测样品成分含量。利用近红外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将直接决定模型检验的可靠性与适用性。因此,通过改进传统的还原糖和可溶性蛋白含量测试方法,提高原始数据准确度的同时,在一定程度上也能够提高近红外技术预测的准确度,增强模型预测能力。本研究,用于建模的样品还原糖和可溶性蛋白含量范围为12.82~40.61 mg/g和11.18~40.45 mg/g,可覆盖大部分麸皮还原糖和可溶性蛋白含量范围。通过适当增加样品数量,或者对样品还原糖和可溶性蛋白含量进行分段建模,可建立适用范围更广、精

确度更高的模型。本研究对比了不同波段及全波段的影响发现,在908~1 670 nm时,模型的预测效果最优,但是否可以使用部分相关性显著的波长段或者波长段组合通过不同的数据处理方式建立相关性更高的近红外光谱模型,还有待进一步研究。除此之外,主因子数是模型的关键参数之一,唐保山等^[45]利用近红外光谱技术对五倍子主成分的含量进行快速检测时,以相关系数(Rc^2 、 Rp^2)和误差(SEC、SEP和RPD)评估模型预测性能,确定了五倍子中水分、单宁酸和没食子酸含量的近红外模型最佳因子数为9、10和5。

4 结 论

本研究以FD+SD+SNV光谱预处理,基于PLSR优选出全波段光谱区域主成分变量数为7和10,成功构建近红外法测定麸皮还原糖和可溶性蛋白含量。还原糖PLSR定量模型 Rc^2 、SEC、SEP、 Rp^2 和RPD分别为0.904 8、1.576 1、2.408 9、0.954 9和2.791 4;可溶性蛋白PLSR定量模型 Rc^2 、SEC、SEP、 Rp^2 和RPD分别为0.938 2、2.003、1.547 3、0.994 4和2.970 4,模型预测准确性高。本研究表明近红外光谱法结合合适的化学计量学技术可快速准确预测麸皮还原糖和可溶性蛋白含量,此外,该模型可以实时检测发酵过程中麦麸有效成分的动态变化,有望为麸皮质量评价提供新的技术支撑。

参考文献 References

- [1] 包成龙,许晓燕,刘博文. 小麦麸皮营养成分和综合利用[J]. 粮食与油脂, 2014, 27(8): 58-60
Bao C L, Xu X Y, Liu B W. Nutrient composition and comprehensive utilization of Wheat bran [J]. *Food and Oil*, 2014, 27(8): 58-60 (in Chinese)
- [2] Chen Z W, Mense A L, Brewer L R, Shi Y C. Wheat bran layers: composition, structure, fractionation, and potential uses in foods [J]. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2023:1-24
- [3] Boudouma D. Chemical composition of the durum wheat bran produced by industrial algerian mills [J]. *Livestock Research for Rural Development*, 2009, 21(10)
- [4] 龙志礼,刘小郡,李坚强,吴骏威. 麦麸的营养组分及功能性成分的提取[J]. 粮食加工, 2021, 46(5): 28-32
Long Z L, Liu X J, LI J Q, Wu J W. Extraction of nutritional components and functional components from wheat bran [J]. *Food Processing*, 2021, 46(5): 28-32 (in Chinese)
- [5] 宋硕. 小麦麸皮的综合利用研究进展[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(16): 171-173
Song S. Research progress of comprehensive utilization of wheat bran [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2020, 26(16): 171-173 (in Chinese)
- [6] 李全宏,陶国琴,付才力,蔡同一. 麦麸中生理活性物质研究与应用进展[J]. 食品科学, 2004, 25(8): 196-200
Li Q H, Tao G Q, Fu C L, Cai T Y. Research and application of physiological active substances in wheat bran [J]. *Food Science*, 2004, 8: 196-200 (in Chinese)
- [7] 武晓艳,叶钰怡,任文凯,李兆栋,印遇龙,吴鸿. 植物多糖研究进展:功能活性及潜在机制[J]. 中国科学:生命科学, 2023, 53(6): 808-824
Wu X Y, Ye Y Y, Ren W K, Li Z D, Yin Y L, Wu H. Research progress of plant polysaccharides: functional activities and potential mechanisms [J]. *Science China Life Sciences*, 2019, 53(6): 808-824 (in Chinese)
- [8] 程卓,吴娜娜,丁文平,谭斌. 不同来源的谷物麸皮水溶性膳食纤维理化和功能性质研究[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(3): 62-70
Cheng Z, Wu N N, Ding W P, Tan B. Study on physicochemical and functional properties of water-soluble dietary fiber from cereal bran from different sources [J]. *Grain, Oil and Food Science and Technology*, 2023, 31(3): 62-70 (in Chinese)
- [9] 陈正萍. 发酵麸皮营养品质改善及其在动物饲料中的应用探究[J]. 中兽医学杂志, 2021(10): 83-84
Chen Z P. Improvement of nutritional quality of fermented bran and its application in animal feed [J]. *Chinese Journal of Veterinary Medicine*, 2021(10): 83-84 (in Chinese)
- [10] Huang X, Fan Y, Lu T, Kang J, Chen J. Composition and metabolic functions of the microbiome in fermented grain during light-flavor baijiu fermentation [J]. *Microorganisms* 2020, 8: 1281
- [11] 李静. 麦麸营养成分的提取与应用研究进展[J]. 现代面粉工业, 2022, 36(2): 14-18
Li J. Research progress on extraction and application of nutrients from wheat bran [J]. *Modern Flour Industry*, 2022, 36(2): 14-18 (in Chinese)
- [12] 孙媛,蔡迪,向琴,严汪汪,钟振声. 麦麸中四种蛋白的Osborne法提取分离及性能研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(9): 136-139, 203
Sun Y, Cai D, Xiang Q, Yan W W, Zhong Z S. Extraction, separation and properties of four proteins from wheat bran by osborne method [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(9): 136-139, 203 (in Chinese)
- [13] 路清宇. 黑小麦麸皮抗氧化肽的制备及其特性研究[D]. 河南:河南工业大学, 2021
Lu Q Y. Black wheat bran antioxidant peptide research [D]. Henan: Henan University of Technology, 2021 (in Chinese)
- [14] 杨荣,朱双红,王华朗,韩垂旺,宋增延,王立志,张旭娟. 大米加工主要副产品资源在畜禽饲料中的应用[J]. 广东饲料, 2018, 27(9): 39-42
Yang R, Zhu S H, Wang H L, Han C W, Song Z Y, Wang L Z, Zhang X J. Application of main by-product resources of rice processing in livestock and poultry feed [J]. *Guangdong Feed*, 2018, 27(9): 39-42
- [15] Zhang Y C, Luo M, Fang X Y, Zhang F Q, Cao M H. Energy value of rice, broken rice, and rice bran for broiler chickens by the regression method [J]. *Poultry Science*, 2021, 100(4): 100972
- [16] 肖勇生,包珍,张良,黄安全,王训斌. 米糠蛋白肽的制备及其生物活性研究进展[J]. 食品工业, 2022, 43(2): 243-246
Xiao Y S, Bao Z, Zhang L, Huang A Q, Wang X B. Preparation and bioactivity of rice bran protein peptides [J]. *Food Industry*, 2002, 43(2): 243-246 (in Chinese)
- [17] Chen Z G, Li X, Fan X J. Method for the discrimination of the variety of

- potatoes with Vis/NIR spectroscopy[J]. *Guang pu xue yu guang pu fen xi* = *Guang pu*, 2016, 36(8): 2474-2478
- [18] Abasi S, Minaei S, Jamshidi B, Fathi D, Khoshtaghaza M H. Rapid measurement of apple quality parameters using wavelet de-noising transform with Vis/NIR analysis[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 252
- [19] Zhai Z, Jin Z, Li J, Zhang R. Machine learning for detection of walnuts with shriveled kernels by fusing weight and image information [J]. *Journal of Food Process Engineerin.* 2020, 43(12)
- [20] Xuan G, Gao C., Shao Y. Spectral and image analysis of hyperspectral data for internal and external quality assessment of peach fruit [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2022, 272:121016
- [21] 吉海彦, 严衍禄. 化学计量学方法处理傅里叶变换近红外漫反射光谱定量测定谷物成分[J]. 计算机与应用化学, 1996(2): 119-122
Ji H Y, Yan Y L. Quantitative determination of grain composition by Fourier transform near infrared diffuse reflection spectroscopy using stoichiometric method[J]. *Computer and applied chemistry*, 1996(2): 119-122 (in Chinese)
- [22] Hosaka Y. Evaluation of taste of rice by means of near infrared[C]. In: Proceeding of international symposium on agricultural mechanization and international cooperation in high technology era. Tokyo, Japan: The Japanese Society of Agricultural Machinery, 1987, 357-360
- [23] Iwamoto M, Kwang C R, Suzuki T, Uozumi J. Near infrared reflectance analysis for determing moisture, protein and ash contents in home-grown wheat flours[J]. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, 1984, 31(1)
- [24] Kawamura S, Takekura K, Itoh K. Accuracy in determination of rice constituent contents using near-infrared transmission spectroscopy and improvement in the accuracy [J]. *Journal of the Japanese Society of agricultural machinery*, 2002, 64(1)
- [25] 祁梅, 顾志荣, 李芹, 王安红, 葛斌. 近红外漫反射光谱法快速测定麦冬多指标成分含量[J]. 中国中医药信息杂志, 2023, 30(3): 114-120
Qi M, Gu Z R, Li Q, Wang A H, Ge B. Near-infrared diffuse reflection spectrum method for rapid determination of dwarf lilyturf index component content more [J]. *Chinese journal of Chinese medicine information*, 2023, 30(3): 114-120 (in Chinese)
- [26] Xie C, Wang C, Zhao M, Zhao L. Prediction of acrylamide content in potato chips using near-infrared spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2023, 301:122982
- [27] 魏尊苗, 陈欣, 程艳, 刘佳遥, 王占海, 许方达, 牟忠生. 基于近红外光谱技术的油莎豆品质检测及相关性分析[J]. 特产研究, 2023, 45(3): 120-124
Wei Z M, Chen X, Cheng Y, Liu J Y, Wang Z H, Xu F D, Mu Z S. Based on near infrared spectrum technology, oil of bean quality detection and correlation analysis[J]. *Journal of specialty research*, 2023, 45(3): 120-124 (in Chinese)
- [28] 杜涓, 安晓萍, 刘娜, 王瑞芳, 王园, 齐景伟. 分级醇沉发酵麸皮多糖的成分分析与抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(5): 58-62
Du J, An X P, Liu N, Wang R F, Wang Y, Qi J W. Grade alcohol fermentation of bran polysaccharides composition analysis and antioxidant activity research [J]. *Journal of food science and technology*, 2020, 9(5): 58-62 (in Chinese)
- [29] 曾志恒, 曾辉, 程翔, 杨雷, 施肖莹, 戴建清. 双孢蘑菇发酵液还原糖和总糖的含量测定[J]. 中国食用菌, 2018, 37(6): 40-43, 49
Zeng Z H, Zeng H, Cheng Y, Yang L, Shi X K, Dai J Q. Agaricus bisporus fermented liquid of reducing sugar and total sugar content determination [J]. *China's edible fungus*, 2018, 5(6): 40-43, 49 (in Chinese)
- [30] 王欣. 近红外分析中光谱预处理方法的研究与应用进展[J]. 科技资讯, 2013, 336(15): 2
Wang X. Research and application progress of spectral pretreatment methods in near-infrared analysis [J]. *Information Science and Technology*, 2013, 336(15): 2 (in Chinese)
- [31] Li J M, Jin S, Bao C H, Sun Y, Li W Z. Rapid determination of lignocellulose in corn stover based on near-infrared reflectance spectroscopy and chemometrics methods [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 321
- [32] 宋珊. 蜂蜜品质中近红外光谱检测技术研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2014
Song S. Study on near infrared spectroscopy detection technology of honey quality[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2014 (in Chinese)
- [33] 范林宏, 何林, 谭超群, 田瑶, 张春玲, 吴纯洁, 黄永亮. 基于便携式近红外光谱技术快速检测川贝母掺伪问题[J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(3): 131-138
Fan L L, He L, Tan C Q, Tian Y, Zhang C L, Wu C J, Huang Y L. Rapid detection based on portable near infrared spectrum technology unibract fritillary bulb adulteration problem [J]. *Chinese journal of experimental formulas of Chinese medicine*, 2022, 28(3): 131-138 (in Chinese)
- [34] 左旭丽, 潘秀珍, 耿泽宇, 任晓红, 马威, 冯安芳, 李卫东. 经19种光谱预处理筛选建立3种连翘叶茶近红外定性定量模型[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(19): 6431-6440
Zuo X L, Pan X Z, Geng Z Y, Reng X H, Ma W, Feng A H, Li W D. Three near-infrared qualitative and quantitative models of forsythia leaf tea were established by 19 kinds of spectral pretreatment screening [J]. *Journal of food safety and quality testing*, 2022, 13(19): 6431-6440. (in Chinese)
- [35] 任顺成, 曹悦, 常云彩. 近红外光谱技术对马铃薯掺假淀粉的检测[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(5): 156-159
Ren S C, Cao Y, Chang Y C. Detection of adulterated starch in potato by near infrared spectroscopy [J]. *Food and Oil*, 2021, 34(5): 156-159 (in Chinese)
- [36] 商连光, 李军会, 王玉美, 李玉华, 王丹, 熊敏, 华金平. 棉籽油含量近红外无损检测分析模型与应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(3): 609-612
Shang L G, Li J H, Wang Y M, Li Y H, Wag D, Xiong M, Hua J P. Analysis model and application of near infrared nondestructive detection of cottonseed oil content [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(3): 609-612 (in Chinese)
- [37] Yang F C, Hou H R, Sun Z Y. Quantitative model optimizing of milk powder protein and fat by near infrared spectroscopy [J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41(11): 253-258
- [38] 梁婷婷, 王倩, 邹葭霜, 杨晓铭, 高雪艳, 钱桂英, 顾利芳, 陆惠明. 麦麸有效成分及提取工艺研究进展[J/OL]. 特产研究, 2024: 1-8. [2023-10-16]. <http://doi.org/10.16720/j.cnki.tcyi.2023.232>
Liang T T, Wang Q, Zou J S, Yang X M, Gao X Y, Qian G Y, Gu L F, Lu H M. Research progress on effective components and extraction technology of wheat bran [J/OL]. *Specialty Research*, 2024: 1-8
- [39] 王储, 麻冬梅, 李跃, 屈新月, 李智林, 胡倩楠, 乔霞月, 孙彦. 检测燕麦干草主要营养成分含量的近红外光谱分析模型[J]. 草地学报, 2022, 30(10): 2645-2651
Wang C, Ma D M, Li Y, Qu X Y, Li Z L, Hu Q N, Qiao J Y, Sun Y. A near-infrared spectroscopy model for the determination of main nutrients

- in oat hay[J]. *Acta Pratacularica Sinica*, 2022, 30(10): 2645-2651
- [40] 陈积山, 朱瑞芬, 张强, 杜优颖, 孔晓蕾. 建立近红外特征波长模型快速测定羊草常规营养成分的研究[J]. *草地学报*, 2019, 27(4): 867-873
- Chen J S, Zhu R F, Zhang Q, Du Y Y, Kong X L. Establishment of near-infrared characteristic wavelength model for rapid determination of conventional nutrients in *Leymus chinensis* [J]. *Journal of Grassland Science*, 2019, 27(4): 867-873
- [41] 陆登俊. 近红外光谱法测定糖品中还原糖含量的技术研究[D]. 广西: 广西大学, 2004
- Lu D J. Study on technology of determination of reducing sugar content in sugar products by near infrared spectroscopy [D]. Guangxi: Guangxi University, 2004 (in Chinese)
- [42] 田丽梅, 陈菲, 林炎丽, 倪奎奎, 杨富裕. 近红外光谱检测燕麦饲草青贮营养品质研究[J]. *草地学报*, 2023, 31(12): 3841-3850
- Tian L M, Chen F, Lin Y L, Ni K K, Yang F F. Nutrient quality of oat forage silage detected by near-infrared spectroscopy[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 31(12): 3841-3850
- [43] 苏鹏飞, 张武岗. 基于 NIR 高粱淀粉含量快检技术的开发研究[J]. *酿酒科技*, 2022(2): 107-110
- Su P F, Zhang W G. Development of rapid detection technology of sorghum starch content based on NIR[J]. *Brewing Technology*, 2022(2): 107-110
- [44] 苏鹏飞, 刘丽丽, 闫宗科, 张攀峰, 张武岗. 基于近红外高粱水分的快速分析研究[J]. *酿酒*, 2021, 48(1): 87-90
- Su P F, Liu L L, Yan Z K, Zhang P F, Zhang W G. Rapid analysis of water content in sorghum based on near-infrared spectroscopy [J]. *Brewing Wine*, 2021, 48(1): 87-90
- [45] 唐保山, 刘义稳, 和锐, 邹勇, 谢山宇, 张弘. 基于近红外光谱法对五倍子主成分含量的快速检测[J]. *林产化学与工业*, 2024, 44(1): 89-96
- Tang Baoshan, Liu Yiwen, He Rui, Zou Yong, Xie Shanyu, Zhang Hong. Rapid determination of principal component content of Gallnut based on near-infrared spectroscopy [J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2024, 44(1): 89-96

责任编辑: 秦梅



第一作者简介: 王春媛, 内蒙古农业大学硕士研究生, 专业方向: 主要从事智慧养殖及生物饲料技术创新方面的教学与科研工作。本科在校期间曾获得数次二等奖学金和1次国家励志奖学金, 并在2021年获得内蒙古自治区三好学生荣誉称号。研究生在校期间获得一等奖学金和校级党建活动优秀奖, 参与“功能性复合微生态制剂的创制与应用”、“反刍动物功能性复合生物饲料研制与应用创新”、“智慧养殖虚拟仿真平台建设项目”等课题项目。



通讯作者简介: 齐景伟, 教授(博士/博士生导师)。现任内蒙古农业大学副校长, 国家乳业技术创新中心—奶牛繁育与养殖技术中心主任, 智慧畜牧内蒙古自治区高等学校重点实验室主任, 内蒙古自治区草食家畜饲料工程技术研究中心主任, 内蒙古自治区“草原英才”工程高层次创新人才团队带头人, 自治区科技厅“十四五”规划农牧业领域主要起草人, 数字农业产业推进方阵发起单位专家委员会委员, 内蒙古饲料工业协会副理事长。主持国家级、自治区级科研项目20余项。获得内蒙古自治区科技进步一等奖1项、三等奖2项、自然科学三等奖1项、自治区农牧业丰收三等奖1项, 自治区教学成果一等奖1项; 获国家发明专利5项、软件著作权66项; 出版专著4部, 教材2部; 发表论文150余篇, 其中SCI和EI收录20余篇。