

面粉品质近红外光谱在线检测系统开发与应用

张斌^{1,2}, 沈飞^{1,2}, 章磊³

(1. 南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏南京 210023) (2. 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心, 江苏南京 210023) (3. 南京财经大学信息工程学院, 江苏南京 210023)

摘要: 本研究运用近红外光谱无损检测技术, 开发了一种适用于面粉品质检测的在线测量系统。本系统在硬件平台基础上, 采用 C++Builder 6.0 对 NIR 1.7/S 微型光谱仪进行二次开发, 编写了具有光谱采集、面粉品质预测、模型更新和数据存储等功能的软件。对市售 170 种面粉进行试验, 以面粉水分含量为代表性指标。通过对比不同光谱预处理方法建模结果, 发现不进行任何预处理时的面粉水分偏最小二乘回归 (PLS) 得到的模型精度最高。建模集和验证集决定系数 (R^2) 分别为 0.947, 0.841; 均方根误差 (RMSE) 分别为 0.146%, 0.198%; RPD 值为 2.53。模型导入软件后对 30 份新样品进行外部验证, 预测值与测量值决定系数 (R^2) 为 0.883, 均方根误差为 0.206%。结果表明, 该系统能够初步实现面粉水分的实时预测, 为近红外在线检测技术应用提供了一定的技术参考。

关键词: 在线检测; 近红外光谱; 面粉; 水分; 二次开发

文章编号: 1673-9078(2019)02-247-252

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.2.034

Development and Application of On-line System for Wheat Flour Quality Detection by Near Infrared Spectroscopy

ZHANG Bin^{1,2}, SHEN Fei^{1,2}, ZHANG Lei³

(1.College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China)

(2.Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety, Nanjing 210023, China)

(1.College of Information Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China)

Abstract: In this work, an on-line detection system for flour quality testing was developed by near infrared spectroscopy. C++Builder 6.0 was applied for secondary development of NIR 1.7/S micro spectrometer based on hardware platform. A custom software with functions such as spectral acquisition, flour quality prediction, model update and data storage was also wrote. A total of 170 wheat flour samples collected from the market were subjected to NIR analysis and water content was chosen as the representative index for wheat flour quality. Different spectral pretreatment methods were tried and the spectra without any treatment combined with partial least square (PLS) regression obtained the best performance. The determination coefficient (R^2) of calibration and prediction obtained were 0.947 and 0.841, respectively. The root mean square error (RMSE) of calibration and prediction as well as RPD value were 0.146%, 0.198% and 2.53, respectively. The established model was then imported into the software, and 30 samples were used for external validation. Results indicated that determination coefficient (R^2) between the predicted value and the reference value was 0.883, and the RMSE was 0.206%. In conclusion, the prediction of the moisture of wheat flour by this on-line system is feasible, which can provide a technical reference for the application of on-line NIR spectroscopy technique.

Key words: on-line detection; near infrared (NIR) spectroscopy; wheat flour; water content; secondary development

近红外 (Near-infrared, NIR) 光是一种电磁波, 光谱范围介于可见光和中红外波长之间, 根据美国材

收稿日期: 2018-10-12

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0400401); 国家自然科学基金 (31772061); 江苏省研究生科研与实践创新计划 (KYCX17_1213); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (2014-124)

作者简介: 张斌 (1994-), 男, 硕士, 研究方向: 农产品无损检测技术与装备

通讯作者: 沈飞 (1984-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品无损检测技术与装备

料与试验协会 (ASTM) 定义, 其波长为 780~2526 nm。其技术成本低、检测速度快、无需预处理并且不会对样品造成损伤, 作为一项无损分析技术已广泛应用于食品、烟草、石油和制药等领域^[1]。当近红外电磁辐射穿透样品时, 通过波长给出散射和吸收的光谱响应, 光谱的主要变化体现在样品内部化学成分和光散射特性^[2]。因此, 近红外光谱可以反映样品的一些物理属性和化学组成。

早在 1982 年, Norris^[3]等首次利用近红外光谱技术检测对谷物的蛋白质含量进行无损分析。如今, 近

红外光谱技术已经成为小麦和谷物加工业中是一种公认的检测技术,用于常规质量评估^[4]。目前国外已经将近红外光谱技术进行在线应用,特别是在水果品质方面^[5-7]。近红外在线检测技术对近红外光谱仪和样品模型的要求较高,能够在准确采集到光谱的同时,对样品进行准确的定量分析。因此需要一种特定的分析软件,从而实现光谱的采集,并能够给出实时的分析结果。目前国内大多针对近红外光谱技术的化学计量软件适用于光谱采集后定性定量分析模型的建立,无法实现采集光谱的同时给出样品的信息。特定软件的开发成为将近红外光谱技术推向在线应用下一步需要解决的关键问题。郭志明^[8]等人设计了一种果蔬品质快速检测装置,同时基于 Windows 系统和 Android 平台开发了专用分析软件,并利用 USB 与蓝牙双通讯,进行果蔬光谱采集与品质检测;李龙^[9]等人开发了一种苹果内外品质无损检测分级系统,并在 Windows 系统基于 OpenCV 库编写算法,利用 C++ 科学计算库 (Gnu Scientific Library, GSL) 编写光谱处理软件,实现苹果内外品质快速检测目的;陈通^[10]等人同样利用 Android 平台对微型近红外光谱仪进行二次开发,并以水蜜桃为试验对象,检测了其可溶性固形物含量。

面粉是人们日常膳食结构中的主要原料之一,我国每年平均生产 1.1 亿吨左右。因此,本研究以面粉为对象,拟开发一种适用于面粉品质在线检测系统,实现面粉品质的实时监控。旨在为近红外光谱在线检测技术的应用提供技术参考。

1 在线检测系统硬件设计

本研究采用的在线近红外光谱检测系统主要由光谱仪、在线平台、集成光源的漫反射探头、光纤、光电传感器以及电脑等部分构成(图1)。如图所示,漫反射探头与光谱仪采用光纤连接,并置于在线平台上方,用于提供光源与反射光谱采集,其中在线平台所提供的最大传送速度为 0.15 m/s,可根据不同情况进行调节;检测时,将面粉样品平铺于直径为 10 cm,高度为 1.5 cm 的圆柱形样品池中,由在线平台中传送带进行传送,经过光电传感器时,触发采集命令,经过一定的延迟(延迟时长为当前运送速度下样品从传感器到探头下方所需的时间),样品刚好传送至探头正下方,光谱仪开始采集面粉样品光谱;采集到的面粉漫反射光信息传输到光谱仪中,经过处理,将光信号转化为电信号后通过 USB 数据线传送给电脑,将电信号转换为数字信号,通过所开发软件进行光谱显示与面粉品质信息的预测。

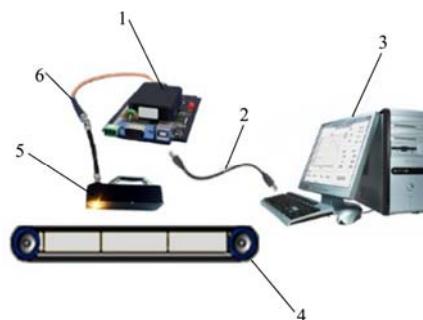


图1 面粉品质在线近红外检测系统

Fig.1 On-line detection system for flour quality

注: 1.光谱仪 (Spectrometer), 2.USB 数据线 (USB data cable), 3.PC 机 (Personal computer), 4.在线平台 (Online platform), 5.漫反射探头 (Diffuse reflection detector), 6.光纤 (Fiber)。

1.1 在线平台模块

为了模拟工业生产流水线,本实验使用传动皮带,对样品进行模拟在线运动。皮带上方固定漫反射探头,距离样品池约 1 cm;皮带上方设有暗箱,盖住探头与样品池,减少杂散光干扰(图1中未显示)。样品池经传送皮带传送到漫反射探头下方时触发样品光谱采集,经光谱仪转换传输给 PC 机并保存数据。

1.2 光谱仪模块

本实验采用德国 INSION 公司的 NIR 1.7/S 微型近红外光谱仪,该光谱仪有效波段为: 910~1900 nm,分辨率为 16 nm,波长重复性为 0.1 nm,信噪比为 5000:1。NIR 1.7/S 超紧凑型近红外光纤光谱仪集成光学技术大大简化传统光纤光谱仪,从而降低成本。且该光谱仪所有的光学元器件集成在一块基底材料上 (One-chip design),具有良好的抗震性、重复性和较宽的工作温度范围,适合面粉工业生产中恶劣的环境。

1.3 光源及探头模块

光源质量决定了采集到的光谱信息质量,发光强度及稳定性决定了光谱的稳定性,因此拥有一个稳定的光源是面粉品质在线近红外检测系统的关键。根据不同样品的需求,需要特定的发光范围。本实验采用 D0-IS30 反射积分球探头(上海昊量光电设备有限公司,上海),该探头采用卤钨灯,最大功耗 10 W,色温 2850 K,发光范围为 350 nm~2500 nm,同时包含了可见光波段以及近红外波段。反射探头内部集成垂直方向反射探测的积分球,能够在提供光源的同时采集漫反射光谱信息,并具有高度的稳定性,能够满足本系统需求。

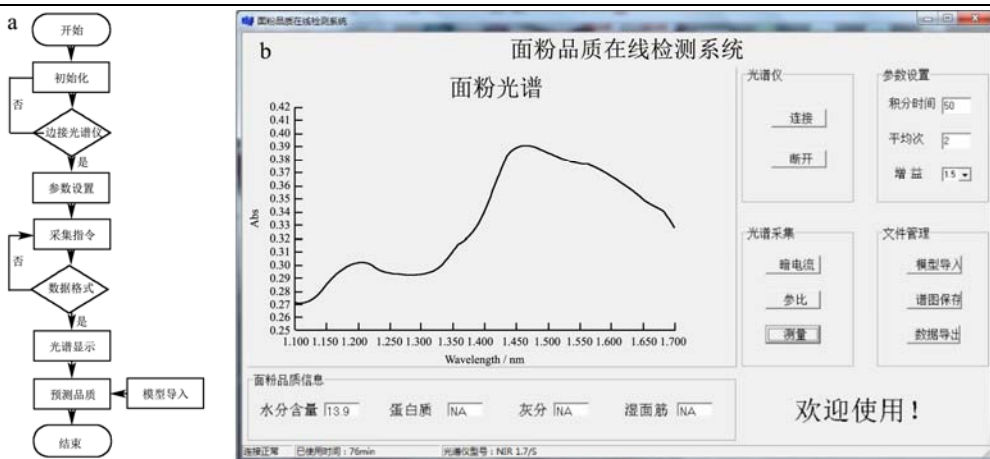


图2 (a) 软件设计流程图; (b) 面粉品质在线检测系统专用软件

Fig.2 (a) Software design flow chart; (b) the software for flour quality on-line detection by NIR

2 近红外在线检测专用软件设计

本系统软件使用 C++ 语言进行编写, 采用 C++Builder 软件对德国 INSION 公司的 NIR 1.7/S 型号光谱仪进行二次开发, 将厂家提供的驱动安装在 PC 机终端, 利用 USB 数据线通过 C++Builder 中 MSComm 控件实现光谱仪与上位机进行通讯。光谱仪的控制由厂家提供的可编程仪器标准命令 (Standard Commands for Programmable Instruments, SCPI) 实现。其流程如图 2a 所示, 分为四个步骤: 光谱仪连接、光谱仪设置、光谱采集、品质预测。接通电源, 光谱仪开始初始化, 接着连接光谱仪, 连接失败会提示重新连接。当光谱仪连接成功后设置采集参数, 然后开始采集光谱, 并判断是否采集成功, 若成功则利用导入的模型计算出面粉品质, 实现预测功能。软件主要具有参数设置功能、光谱采集功能、图谱实时显示功能以及品质预测功能, 如图 2b 所示。

微型光谱仪与 PC 机通讯完毕后, 设置好采集参数, 即可采集光谱数据。当软件发送暗背景采集命令时, 光谱仪会进行暗电流光谱采集, 同时返回强度值记为 D_{λ} ; 发送参比采集命令时, 光谱仪会进行白板光谱采集, 并返回强度值, 记为 R_{λ} ; 发送样品采集命令时, 光谱仪返回样品光谱强度, 记为 S_{λ} ; 由于厂家在设置参比光谱采集时已自动将暗背景光谱扣除, 因此需要第一步采集暗背景光谱。可根据返回的光强度值计算出样品吸光度 (A), 反射率 (R), 计算公式如下:

$$R = \frac{S_{\lambda} - D_{\lambda}}{R_{\lambda} - D_{\lambda}} \quad (1)$$

$$A = \log_{10} \frac{1}{R} \quad (2)$$

其中: R 代表反射率, S_{λ} 代表样品光强度值, D_{λ} 代表暗背景强度值, R_{λ} 代表参比光强度值, A 代表吸光度值。

3 检测系统稳定性测试

为了评价本系统仪器的稳定性, 在仪器、人员、环境和程序一定的情况下, 进行固定时间间隔内的重复测试, 并以光谱之间的一致性来评价仪器的稳定性。本次的重复性实验对同一份面粉样品在 60 min 内每 10 min 进行一次在线光谱采集, 共采集六条光谱, 所使用的样品与环境、操作人员及软件均一致。通过计算每条光谱各波长点吸光度的标准偏差以及每条光谱与第一次采集的光谱的相关系数来衡量光谱的重复性。

如图 3 所示, 1000~1680 nm 波段吸光度的标准偏差较为稳定, 且最大值为 0.0019, 在 1680~1900 nm 波段吸光度标准偏差波动较大, 可能由于该波段处于光谱仪采集范围边缘, 存在噪音, 但最大值仅为 0.0058; 冯帮^[11]等研究表明, 在 1000~1600 nm 范围内, 标准偏差最大为 0.0021, 具有较高的重复精度。同时, 图 4 给出了每条光谱与第一条光谱的相关系数, 相关系数表明变量之间线性相关程度, 在本研究中用于评价两光谱之间的相似度, 一般相关系数小于等于 1, 越接近 1 越图谱越相似, 相关系数计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ji} - \bar{x}_j)(y_{ki} - \bar{y}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ji} - \bar{x}_j)^2 \sum_{i=1}^n (y_{ki} - \bar{y}_k)^2}} \quad (3)$$

其中: R 代表相关系数, x_{ji} , y_{ki} 是 j, k 两个谱图第 i 点的吸光度, \bar{x}_j , \bar{y}_k 是 j, k 两个谱图在各个波数的均值, n 代表了波长点个数。

从图中可以明显看出, 之后五次采集的光谱与第一次采集的光谱相关系数均大于 0.9998, 表明有较好的相似度。综上所述, 本系统利用所开发软件来控制 NIR 1.7/S 光谱仪具有较好的稳定性和重复性。

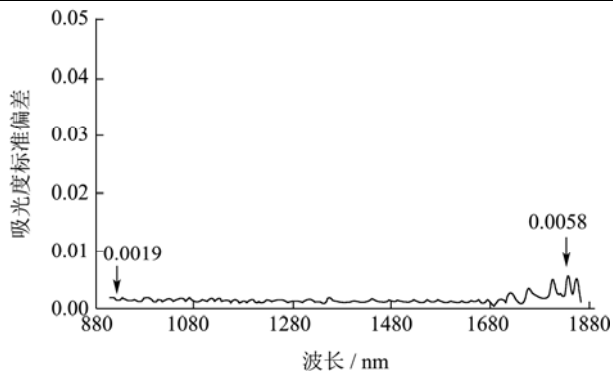


图3 60 min 内每 10 min 采集光谱各波长点处吸光度标准偏差

Fig.3 The standard deviation of absorbance at each wavelength point of the spectrum collected every 10 minutes in 60 minutes

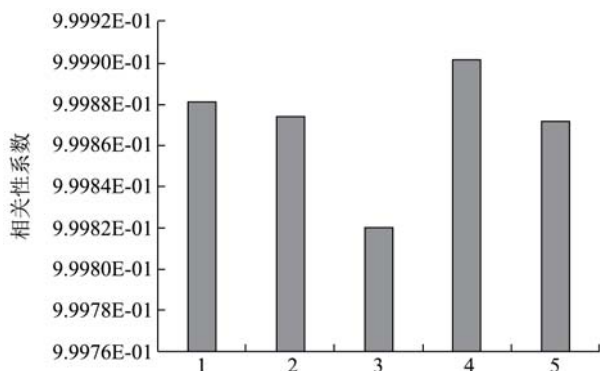


图4 每条光谱与第一次采集的光谱的相关性系数

Fig.4 Correlation coefficient between each spectrum and the first acquired spectrum

4 面粉品质试验测试

评价面粉品质主要有水分含量、灰分、湿面筋含

表1 面粉水分测定结果

Table 1 Statistics results of the moisture of flour

样本集	最小值/%	最大值/%	平均值/%	标准偏差/%
建模集 (n=94)	11.56	15.01	13.46	0.64
预测集 (n=46)	11.90	14.69	13.44	0.50
外部验证集 (n=30)	11.93	14.14	13.32	0.57

4.2 面粉近红外光谱分析

图5为面粉样品原始光谱图,从图中可以看出,不同种类面粉呈现不同样光谱,但每条光谱的变化趋势相近,且在980、1195、1450 nm 波长点处都具有较强的吸收峰。文献^[12]表明在1450 nm 处存在水分一倍频的伸缩振动,具有较强的水分吸收峰,在980 nm 处存在水分二倍频吸收峰;在1350 nm~1480 nm 是O-H 键、C-H 键的一倍频复合吸收。此外,从图中可以明显看出1780 nm 后出现明显噪音,因此在进行模型建立时,选取910~1780 nm 波段进行建模。

量、稳定时间和降落数值等指标。也有不少学者利用近红外光谱技术,检测面粉的灰分、湿面筋含量和水分等指标。结果表明利用近红外光谱技术对水分含量的检测较为精确,因此本实验拟采用面粉的水分含量为代表性指标,进行面粉品质在线近红外检测试验。

4.1 光谱信息采集及理化指标测定

市购170种面粉,主要来自江苏、山东、安徽、河南等其他地区,包含高中低三种筋度,比如馒头粉、饺子粉、面条粉、面包粉、蛋糕粉等,囊括了市面上大多知名品牌。根据国标《GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定》中第一法直接干燥法测定面粉水分含量。面粉水分含量的统计结果如表1所示,建模集与预测集的样本范围、均值和标准偏差相当,具有一定的代表性。

利用本实验设计的基于近红外光谱技术的在线检测系统,对170种面粉样品进行光谱采集。将面粉样品平铺于样品池中,并刮平上表面,待扫描光谱。接通电源,启动光谱仪,设置光谱仪积分时间50 ms,平均采集次数2次,采集波段910~1860 nm,启动传送皮带,设置传送皮带速度为0.15 m/s,当样品经过漫反射探头正下方时,采集面粉光谱,每份样品采集三次取平均光谱为代表光谱。在样品光谱采集前,需在相同参数下测量暗电流光谱与标准白板的光谱,同时在采集标准白板光谱时,同样将白板置于距离探头1 cm 位置处,确保和样品采集方法一致。

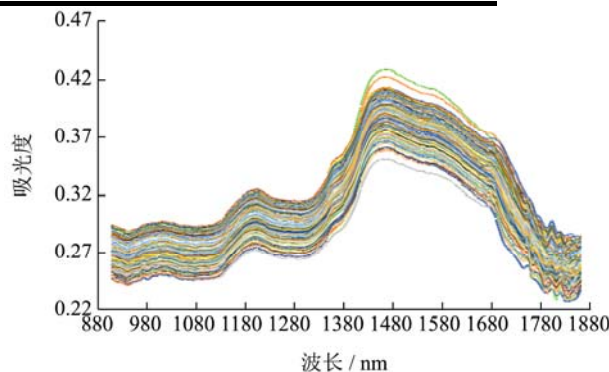


图5 170 面粉近红外光谱原始谱图

Fig.5 Raw near infrared spectra of 170 flour samples

表2 不同预处理方法的面粉水分含量 PLS 模型建模结果

Table 2 The calibration result of PLS model by different pretreatment methods

预处理方法	校正集		交互验证集		RPD	Slope	Offset	Factor	剔除
	R_c^2	RMSEC/%	R_{cv}^2	RMSECV/%					
None	0.947	0.146	0.801	0.289	2.20	0.947	0.713	13	1
MSC	0.947	0.146	0.796	0.299	2.13	0.947	0.719	12	1
MSC+S-G	0.905	0.195	0.762	0.295	2.16	0.905	1.273	12	1
MSC+1 st	0.945	0.148	0.752	0.317	2.01	0.945	1.962	13	1
SNV	0.945	0.149	0.801	0.283	2.25	0.945	0.745	12	1
Baseline	0.945	0.148	0.766	0.309	2.06	0.945	0.739	12	1

4.3 面粉水分偏最小二乘法模型建立及分析

考虑到存在异常样品，因此根据马式距离计算出离群值，剔除 1 个异常样本。将剩余 169 份样品划分为 139 份建模样品，30 份外部验证样品，利用 Kennard-Stone 算法，将 139 份建模样品按 2:1 划分为 93 份建模样品集，46 份预测样品集。

由于近红外光谱仪的内在原因，在面粉近红外光谱采集过程中，会存在着光散射、基线漂移、高频随机噪声等无效信息，影响模型的精确性。因此利用多元散射校正 (Multiplicative Scatter Correction, MSC), S-G 卷积平滑 (Savitzky-Golay Smoothing), 一阶微分 (1st Derivative, 1st), 标准正态变换 (Standard Normal Variate Transformation, SNV) 和基线校正 (Baseline) 等预处理方法对面粉原始光谱进行预处理。将预处理后的数据根据偏最小二乘回归 (Partial Least Squares Regression, PLS) 算法建立模型，同时依据决定系数 R^2 , 均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 以及验证集标准偏差与预测标准偏差的比值 (Ratio of Standard Deviation of the Validation set to Standard Error of Prediction, RPD) [13] 对模型性能进行评价。

对表 2 中的结果进行分析，发现不进行预处理和五种预处理过的模型 R_c^2 均大于 0.9，但是经过 MSC 和 1st 处理过的模型 R_{cv}^2 较小，且模型的 RPD 值较低，因此该模型不予应用；同时观察经 MSC 和 S-G 卷积平滑处理过的模型斜率 (Slope) 较低，偏移值 (Offset) 较大，预测能力较差，不利于面粉水含量在线预测；其他四种处理的建模结果均具有较高的 R_c^2 与 RPD，均方根误差也较低，Collrell 等人表明 [14]，决定系数越高，交互验证集均方根误差越低且拥有较少因子数的模型较好。同时四种处理方法所建模型的 RMSECV 与 RMSEC 相差不大，表明模型没有过拟合。因此将四种模型进行校正集验证，进一步评价模型的精确性与鲁棒性。

表 3 所示，不进行预处理和其他三种预处理方法

所建模型的预测及决定系数 R_p^2 均大于 0.8，其中不进行预处理的 PLS 模型的 R_p^2 最高为 0.841；并且拥有最高的 RPD 与最低的 RMSEP，分别为：2.53 和 0.198%；当 $RPD < 1.5$ 时，模型不可靠；当 $1.5 < RPD < 2$ 时，模型具有一定预测能力；当 $2 < RPD < 2.5$ 时，模型具有良好的预测能力；当 $RPD > 2.5$ 时，模型的预测能力非常好 [15]。同时，采用原始光谱建模的偏差 (Bias) 相较于采用其他三种预处理方法所建模型的偏差差异较小。综上所述，不采用预处理方法所建的 PLS 模型最佳，具有很好的预测能力，因此将该模型导入所开发的软件中，进行外部验证。

表3 不同预处理方法的面粉水分含量 PLS 模型验证结果

Table 3 The prediction result of PLS model by different pretreatment methods

预处理方法	验证集		RPD	Bias
	R_p^2	RMSEP/%		
None	0.841	0.198	2.53	-0.021
MSC	0.828	0.206	2.43	-0.001
SNV	0.811	0.223	2.24	0.046
Baseline	0.836	0.201	2.49	-0.024

4.4 面粉品质在线近红外光谱检测系统验证

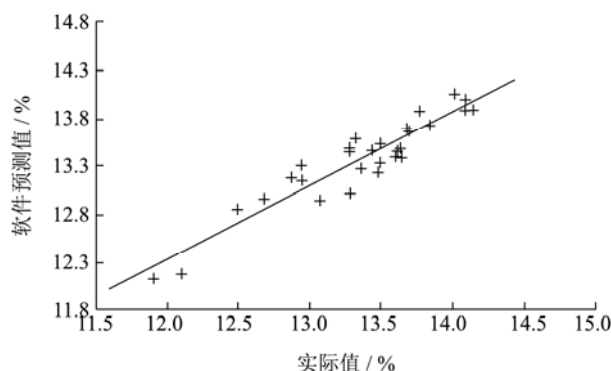


图6 面粉水分测定值与软件预测值相关性

Fig.6 Correlation between reference value and prediction value of flour moisture

表4 外部验证集面粉水分测量值与预测值误差结果

Table 4 The reference values and prediction errors of external prediction sets

绝对误差/%			相对误差/%			RMSE/%	R^2
Max	Min	Mean	Max	Min	Mean		
0.364	0.007	0.178	2.91%	0.05%	1.35%	0.206	0.883

取30份面粉样品对在线检测系统进行外部验证。启动在线检测系统,将建好的模型导入所编写的软件中,对30份样品进行光谱扫描,扫描条件与上文设置参数相同。并记录软件所预测的面粉水分含量,与实际所测量的面粉水分含量进行对比。结果如表4所示,预测值与真实值的绝对误差最小值为0.007,相对误差最小值为0.05%;决定系数 R^2 为0.857,均方根误差为0.206%。外部验证结果表明具有较高的预测能力,能够应用于面粉水分在线检测。图6为面粉水分测定值与软件预测值相关性图。

5 结论

本研究所开发的面粉品质在线近红外检测软件具有一定的预测能力,软硬件都具有一定的适配能力,参数均可调节,对于不同情况可以根据实际需要进行适配,在将来可能满足面粉在线监测的需求。本研究初步试验结果得到的建模集和验证集决定系数(R^2)分别为0.947,0.841;均方根误差(RMSE)分别为0.146%,0.198%;RPD值为2.53。对30份样品进行外部验证测试,预测值与测量值决定系数(R^2)为0.883,均方根误差为0.206%,表明模型具有较好的稳定性与预测能力,同时该软件还具有模型更新功能,便于后期维护和其他指标的添加,为在线近红外检测技术的实际应用提供了一定的技术支持。

参考文献

- [1] Porep J U, Kammerer D R, Carle R. On-line application of near infrared (NIR) spectroscopy in food production [J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 46(2): 211-230
- [2] Zhang B, Dai D, Huang J, et al. Influence of physical and biological variability and solution methods in fruit and vegetable quality nondestructive inspection by using imaging and near-infrared spectroscopy techniques: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(12): 2099-2118
- [3] Norris K. Use of near-infrared reflectance spectroscopy and dye-binding techniques for estimating protein in oat groats [J]. Cereal Chem, 1982, 59: 333-335
- [4] Caporaso N, Whitworth M B, Fisk I D. Near-Infrared spectroscopy and hyperspectral imaging for non-destructive quality assessment of cereal grains [J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2018, 53(8): 667-687
- [5] Xie L J, Wang A C, Xu H R, et al. Applications of Near-infrared systems for quality evaluation of fruits: A review [J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(2): 399-419
- [6] Sun T, Lin H J, Xu H R, et al. Effect of fruit moving speed on predicting soluble solids content of 'Cuiguan' pears (*Pomaceae pyrifolia* Nakai cv. Cuiguan) using PLS and LS-SVM regression [J]. Postharvest Biology & Technology, 2009, 51(1): 86-90
- [7] 刘燕德,施宇,蔡丽君,等.基于CARS算法的脐橙可溶性固形物近红外在线检测[J].农业机械学报,2013,44(9):138-144
- [8] LIU Yan-de, SHI Yu, CAI Li-jun, et al. On-line NIR detection model optimization of soluble solids content in navel orange based on CARS [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural, 2013, 44(9): 138-144
- [9] 郭志明,陈全胜,张彬,等.果蔬品质手持式近红外光谱检测系统设计及试验[J].农业工程学报,2017,33(8):245-250
- [10] GUO Zhi-ming, CHEN Quan-sheng, ZHANG Bin, et al. Design and experiment of handheld near-infrared spectrometer for determination of fruit and vegetable quality [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(8): 245-250
- [11] 李龙,彭彦昆,李永玉.苹果内外品质在线无损检测分级系统设计及试验[J].农业工程学报,2018,34(9):267-275
- [12] LI Long, PENG Yan-kun, LI Yong-yu. Design and experiment on grading system for online non-destructive detection of internal and external quality of apple [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(9): 267-275
- [13] 陈通,陆道礼,陈斌.基于Android平台微型近红外光谱仪的开发与应用[J].食品工业,2016,9:159-162
- [14] CHEN Tong, LU Dao-li, CHEN Bin. Development and application of a miniature near infrared spectrometer based on an android OS [J]. The Food Industry, 2016, 9: 159-162
- [15] 冯帮,陈斌,颜辉.便携式近红外光谱检测系统的开发[J].现代仪器与医疗,2014,2:12-16
- [16] FENG Bang, CHEN Bin, YAN Hui. Development of portable

- near infrared spectrum detection system [J]. Modern Instruments, 2014, 2: 12-16
- [12] Shen F, Zhang B, Cao C, et al. On-line discrimination of storage shelf-life and prediction of postharvest quality for strawberry fruit by visible and near infrared spectroscopy [J]. Journal of Food Process Engineering, 2018
- [13] 褚小立.近红外光谱分析技术实用手册[M].北京:机械工业出版社.2016,3:128-129
CHU Xiao-li. Practical manual for near infrared spectroscopy [M]. Beijing: China Machine Press, 2016, 3: 128-129
- [14] Collell C, Gou P, Arnau J, et al. Non-destructive estimation of moisture, water activity and NaCl at ham surface during resting and drying using NIR spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2011, 129(2): 601-607
- [15] Beghi R, Giovenzana V, Marai S, et al. Rapid monitoring of grape withering using visible near-infrared spectroscopy [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2015, 95(15): 3144-3149

现代食品科技