

面粉中非法添加滑石粉的近红外多光谱检测

邓佳岷, 王伟, 赵昕, 鹿瑶

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为检测面粉中非法过量添加的超量滑石粉, 提出一种近红外多光谱定量检测方法。首先, 选取三种品牌面粉, 分别制备滑石粉质量分数为 0%、0.5%、1%、3%、5%、10%、15% 和 20% 的样本, 采集样本在 900~1700 nm 的原始光谱, 随滑石粉质量分数增大, 样本光谱曲线在 1160~1700 nm 范围内幅值逐渐下降, 足量掺杂滑石粉的样本光谱曲线在 1393 nm 出现与纯滑石粉光谱曲线一致的微小吸收峰。对比 7 种不同预处理方法所对应全波长模型的预测效果, 选取标准正态变量为建模最优预处理方法。采用三种变量优选方法提取最优波长并分别建立面粉中滑石粉含量的多光谱定量检测模型。研究结果表明: 竞争自适应重加权采样 (CARS) 方法对应多光谱模型的检测效果最好, 验证集 R^2_p 为 0.998, RMSEP 为 0.282%; 而连续投影算法 (SPA) 方法选择的波长数量最少且彼此间共线性最小; 三种波长优选方法所构建多光谱模型的检测限均可达 0.5%, 可为便携式或在线式检测仪器的开发提供理论基础。

关键词: 面粉; 滑石粉; 近红外检测; 多光谱预测模型

文章编号: 1673-9078(2019)11-270-276

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.11.037

Near Infrared Multispectral Detection of Talc Content in Flour

DENG Jia-min, WANG Wei, ZHAO Xin, LU Yao

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to detect excessive talc powder illegally added in flour, a near infrared multi-spectral quantitative detection method was proposed. Firstly, the samples with 0%, 0.5%, 1%, 3%, 5%, 10%, 15% and 20% talc powder mass fraction were prepared. The original spectra of the samples within the wavelength range of 900~1700 nm was acquired. With the increase of talc powder mass fraction, the amplitude of the sample spectrum curve decreased gradually in the range of 1160~1700 nm, and small absorption peaks appeared at 1393 nm in the spectrum curve of the samples with sufficient doping talc powder as compared with that of pure talc powder. By comparing the prediction results of the full-wavelength model corresponding to seven different pretreatment methods, the standard normal variables were selected as the optimal pretreatment method. Furthermore, three variable optimization methods were used to extract the optimal wavelengths and then the corresponding multispectral quantitative detection models for talc content in flour were established. The results showed that the competitive adaptive re-weighted sampling (CARS) method had the best detection effect among the three multispectral models. The verification set R^2_p was 0.998 and RMSEP was 0.282%. The continuous projection algorithm (SPA) method had the least number of wavelengths and the smallest collinearity among them. The detection limits of the three multi-spectral models corresponding to the three wavelength selection methods can all reach 0.5%, which can provide a theoretical basis for the development of portable or on-line testing instruments.

Key words: wheat flour; talc; near infrared detection; multispectral prediction model

面粉是人们日常饮食的主要构成, 是面条、饺子、包子、面包等主食的基本原料, 其安全与品质日益受到社会的广泛关注^[1,2]。在面粉工业中, 通常需要加入一定量的添加剂, 例如为改善粉碎机磨粉时的摩擦性能, 添加一定量的滑石粉^[3]。然而一些不法厂家为降

收稿日期: 2019-06-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31772062); “十三五” 国家重点研发计划项目 (2018YFC1603506); 中国农业大学 2019 “URP” 科研训练计划项目

作者简介: 邓佳岷 (1998-), 男, 本科, 研究方向: 农产品无损检测技术

通讯作者: 王伟 (1975-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品与食品品质安全无损检测技术和仪器设备研制

低成本谋取暴利, 会向面粉中添加过量的滑石粉等。过量的滑石粉不仅破坏了小麦粉本身的多种维生素等营养物质, 食用后会刺激口腔, 导致口腔溃疡, 引发肠胃系统病变, 产生肾硅酸盐结石^[4,5]。同时滑石粉中还含有汞、砷、铅等重金属, 造成肝脏负担, 引起中毒, 更严重的会危及生命^[6-10]。因此, 面粉中滑石粉的掺杂检测方法是当前需要解决的重要食品安全问题之一^[11]。

现行国标 GB 5009.269-2016 《食品安全国家标准 食品中滑石粉的测定》中基于滑石粉与氢氟酸反应生成溶于水的镁盐的化学特性, 利用原子吸收光谱测定镁的含量, 再根据镁含量间接计算滑石粉的含量^[12]。

但操作复杂,耗时,需有经验的检测人员进行测定,同时使用的氢氟酸有剧毒,操作过程需要进行安全防护,产生的废液也会造成环境负担。其他常用检测方法有感官鉴定法、灰分法、化学法、X 射线衍射分析、EDTA 滴定法等,这些方法检出限高,样品前处理复杂,所需试剂种类多消耗大,检测过程长,耗时耗力^[4,13,14],或所采用检测仪器昂贵、工序复杂^[6,7]。

近红外光谱技术因其快速无损、绿色无污染的技术特点,于 1960 年代开始用于食品淀粉、蛋白等成分的快速定性定量检测研究。国内虽有利用近红外光谱对面粉中滑石粉含量的研究,但大多致力利用 400~2500 nm 宽范围光谱数据,构建包含所有波长的全光谱检测模型^[1,5,11,15],一方面所包含数据量大、模型计算时间长,另一方面相邻波长数据的强相关性也易导致数据冗余以及模型的过拟合。更重要的是,因所构建模型包含的波长过多,不适宜研制简洁、易于实现和成本低廉的便携式快检仪器。而近红外多光谱检测模型的开发,对于后续研制依托有限波长 LED 光源和以光电管(或光电倍增管)为探测器的简易、易于获得、成本低廉并适于现场快检应用的便携式检测仪器具有重要意义。文献^[16]虽然分别尝试采用相关系数法(CCM)和连续投影算法(SPA)选取优化波长以构建多光谱检测模型,但前者所选所有波长均位于可见光范围,而后者所选取的 8 个波长中,除了 666 nm 波长外,其余 7 个均位于 1000~2300 nm 的近红外波长范围,即两算法所选取优化波长所处的光谱范围几乎完全错开,因此其所构建检测模型的可靠性有待进一步商榷;而且仅仅选取单一面粉品种作为样品,难以保障所构建模型的适用性。

综合上述,本文选取三种品牌面粉,采集样本在 900~1700 nm 这一较窄波段范围的原始光谱,采用多种波长优选方法提取建模最优波长变量,并构建相应的多光谱简化模型并对其性能进行比较,以便为研制脱离成品光谱仪的价格低廉的、简易、易于实现并具有现场快检能力的面粉中滑石粉含量的便携式检测仪器提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

从当地某大型超市购买了三种不同品牌面粉(a、b、c)用于样本制备,选用不同品牌的面粉是为了所建模型的通用性。具体方法是 0%用的面粉 a,配 0.5%用的面粉 b,配 1%用的面粉 c,配 3%用的面粉 a,配 5%用的面粉 b,如此类推。实验中使用精度为 0.01 g

的电子天平配制获得滑石粉质量分数为 0%、0.5%、1%、3%、5%、10%、15%和 20%的样本。每个质量分数配制 27 份样本,共获得 27×8=216 份,再按 2:1 随机划分为校正集和验证集,则验证集有 216/3=72 份,训练集有 72×2=144 份。

1.2 近红外光谱数据采集

实验使用 NIRQuest 512 型近红外光谱仪采集光谱数据,采集模式为积分球漫反射模式。数据光谱范围为 900~1700 nm,光谱分辨率为 3.1 nm,扫描次数为 64 次,积分时间为 6 ms。同时采集白参考和黑参考数据,用以对采集的样本数据进行反射率校正,校正公式如下所示。

$$R_c = \frac{R_0 - R_d}{R_w - R_d} \quad (1)$$

式中: R_0 : 原始的高光谱图像; R_c : 校正后的图像; R_d : 黑参考数据; R_w : 白参考数据。

1.3 光谱预处理方法

近红外光谱数据中通常包括由数据采集过程中的物理特性而引入的与内部成分信息无关的干扰信息,如光程差异、样本表面颗粒大小不均导致的杂散光、外部环境光变化、暗电流噪声等^[17]。因此,本实验选取了 7 种光谱预处理方法对数据进行去噪处理,通过对比不同预处理的效果,选取最优预测模型。7 种预处理方法分别为基线校正(baseline correction, BLC)、归一化(normalisation, NOR)、移动平均平滑(moving average smoothing, MAS)、标准正态变量(standard normal variate, SNV)、多元散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)、一阶导数(Savitzky-Golay first derivative, SGD₁)和 Savitzky-Golay 二阶导数(Savitzky-Golay second derivative, SGD₂)。

1.4 模型建立与评估

实验采用偏最小二乘回归方法(partial least squares regression, PLSR)建立面粉中滑石粉含量的预测模型。PLSR 方法是近红外光谱分析中使用最广泛的经典线性回归建模方法之一^[18]。PLSR 是典型相关分析、多元线性回归和主成分分析的集成,在输入变量数量较多且呈高度相关的情况下,所建模型具有较好可靠性和鲁棒性的多元统计分析方法。PLSR 对自变量和因变量矩阵同时进行分解变换,生成新的数量较少且相互正交的变量,成为潜变量(latent variables, LVs),潜变量按照方差百分比从大到小排列^[19,20]。

实验中最优潜在变量数的确定是基于校正集交叉验证预测误差最小的原则。采用校正集的决定系数 (determination coefficient of calibration set, R_c^2)、预测均方根误差 (root mean square error of calibration set, RMSEC) 和偏差 (bias of calibration set, $bias_c$)、五折交叉验证集的决定系数 (determination coefficient of cross-validation, R_{cv}^2)、预测均方根误差 (root mean square error of cross-validation, RMSECV) 和偏差 (bias of cross-validation, $bias_{cv}$)、以及验证集的决定系数 (determination coefficient of prediction set, R_p^2)、预测均方根误差 (root mean square error of prediction set, RMSEP) 和偏差 (bias of prediction set, $bias_p$) 对回归模型的预测效果进行评估。

1.5 最优波长选择

1.5.1 竞争自适应重加权采样

竞争自适应重加权采样方法 (competitive adaptive reweighted sampling, CARS) 是一种基于达尔文进化论“适者生存”的原则进行变量优选的方法^[21]。它以全波长 PLS 模型中每个波长对应的绝对回归系数为标准, 选取保留系数较大的变量, 删除较小的变量。对获得的不同变量子集做交叉验证, 当对应的交叉验证结果最小时为最终选取的最优波长结果。

1.5.2 连续投影算法

连续投影算法 (successive projections algorithm, SPA) 也是一种多变量建模中常用的变量优选方法。它的选取原理为对建模变量进行迭代循环做正交子空间投影计算, 选取共线性最小的波长子集。同样地, 对选取的波长子集做多元线性回归, 验证集预测标准偏差最小所对应的波长子集为选取的最优波长结果^[22]。

1.5.3 无信息变量消除

无信息变量消除 (uninformative variable elimination, UVE) 是分析化学领域中应用最广泛的变量优选方法之一^[23]。它的选取原理为去除建模信息量小于噪声的变量。它定义 PLS 模型中每个波长对应的系数向量的平均值与标准偏差的商为稳定性。通过稳定性的大小对该波长变量进行评选。

1.6 数据分析软件

实验中对光谱数据进行不同预处理是在化学计量学软件 Unscrambler X 10.1 (Camo ASA, 奥斯陆, 挪威) 中实现的。模型的建立评估以及 3 种波长优选方法的应用实现在 MATLAB r2013b (MathWorks, 美国) 中进行。

2 结果与分析

2.1 原始光谱分析

近红外反射光谱数据首先被转换为吸收光谱数据, 以便更好地对原始光谱特征进行分析。纯面粉和滑石粉以及不同掺杂含量的样本的吸收光谱曲线如图 1 所示。面粉样本在 900~1160 nm 范围内的吸光度值几乎为 0, 无吸收特征。因此之后的数据分析只针对 1160~1700 nm 范围的光谱。由图 1a 得面粉在 1160~1700 nm 范围内存在明显的吸收特征, 而无机物滑石粉在该范围的光谱特征为 0, 仅存在 1393 nm 波长出现微小的吸收值, 该吸收可能是滑石粉结晶水中 O-H 键的振动导致的。图 1b 表明随着掺杂样本中滑石粉质量分数的增大, 样本在 1160~1700 nm 范围内的整体光谱曲线的幅值逐渐下降。且在掺杂质量分数为 20% 样本的光谱曲线中, 1393 nm 附件处表现出新的微小吸收峰特征, 这是由于滑石粉质量分数增大导致的。

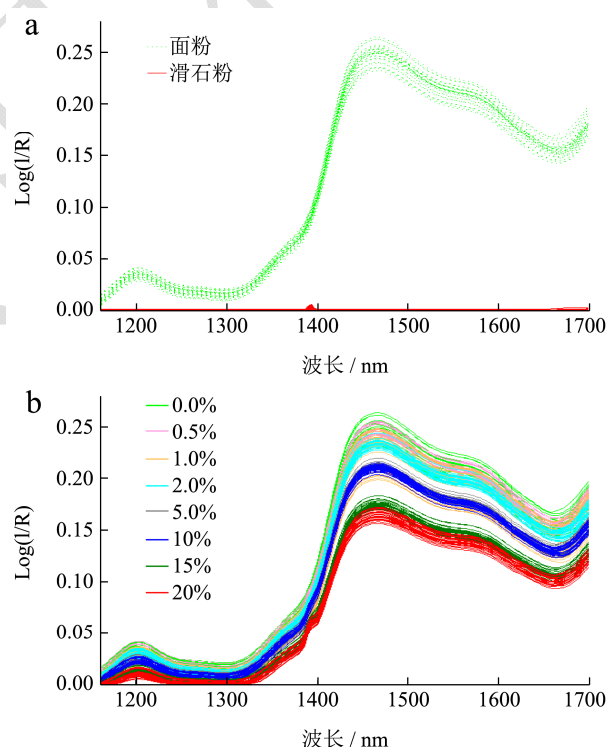


图 1 纯样本和掺杂样本的原始吸收光谱曲线

Fig.1 Original absorption spectra curves of pure samples and doped samples

2.2 预处理与全波长模型

基于 7 种预处理方法对应的全波长 PLSR 模型的预测结果如表 1 所示。与无预处理方法的模型结果相比, MAS 对应模型效果略低, BLC 模型结果相近, 表明 MAS 和 BLC 预处理方法对光谱数据中噪声的去

除效果较差。SGD₁ 和 SGD₂ 对应模型决定系数等结果与无预处理对应模型结果相近,但最优潜变量数最小。NOR、SNV 和 MSC 均提高了模型的预测结果,SNV 对应模型的验证集决定系数最高,对应模型最好,且

潜变量数最小,为面粉中滑石粉质量分数预测的最优预处理方法。原因可能在于,近红外光谱 SNV 预处理方法能够较好的消除固体颗粒大小,表面散射以及光程变化对漫反射光谱的影响。

表 1 不同预处理方法对应全波长模型的预测结果

Table 1 Prediction results of different pretreatment methods corresponding to the full wavelength model										
预处理方法	LVs	校正集			交叉验证集			验证集		
		R^2_c	RMSEC/%	$bias_c$ /%	R^2_{cv}	RMSECV/%	$bias_{cv}$ /%	R^2_p	RMSEP/%	$bias_p$ /%
NON	8	0.998	0.416	-0.005	0.998	0.454	-0.013	0.995	0.510	-0.066
BLC	8	0.998	0.394	-0.002	0.998	0.419	-0.008	0.996	0.464	0.000
MAS	8	0.997	0.494	-0.006	0.997	0.534	-0.007	0.994	0.571	-0.108
SGD1	6	0.998	0.422	-0.004	0.998	0.433	-0.008	0.995	0.486	-0.027
SGD2	6	0.998	0.379	-0.000	0.998	0.416	-0.012	0.997	0.408	-0.049
NOR	8	0.999	0.340	0.000	0.999	0.359	-0.003	0.997	0.371	0.067
SNV	7	0.999	0.302	0.000	0.999	0.318	-0.001	0.997	0.405	-0.023
MSC	7	0.999	0.280	0.000	0.999	0.296	-0.001	0.996	0.424	-0.071

表 2 CARS、SPA 和 UVE 的波长选择结果

Table 2 Results of wavelength selection of CARS, SPA and UVE		
波长优选方法	数量/个	波长/nm
CARS	9	1203, 1390, 1393, 1397, 1407, 1411, 1414, 1428, 1588
SPA	6	1161, 1323, 1390, 1404, 1545, 1602
UVE	13	1368, 1372, 1376, 1379, 1386, 1390, 1393, 1397, 1404, 1407, 1411, 1414, 1418

2.3 不同波长优选方法对比

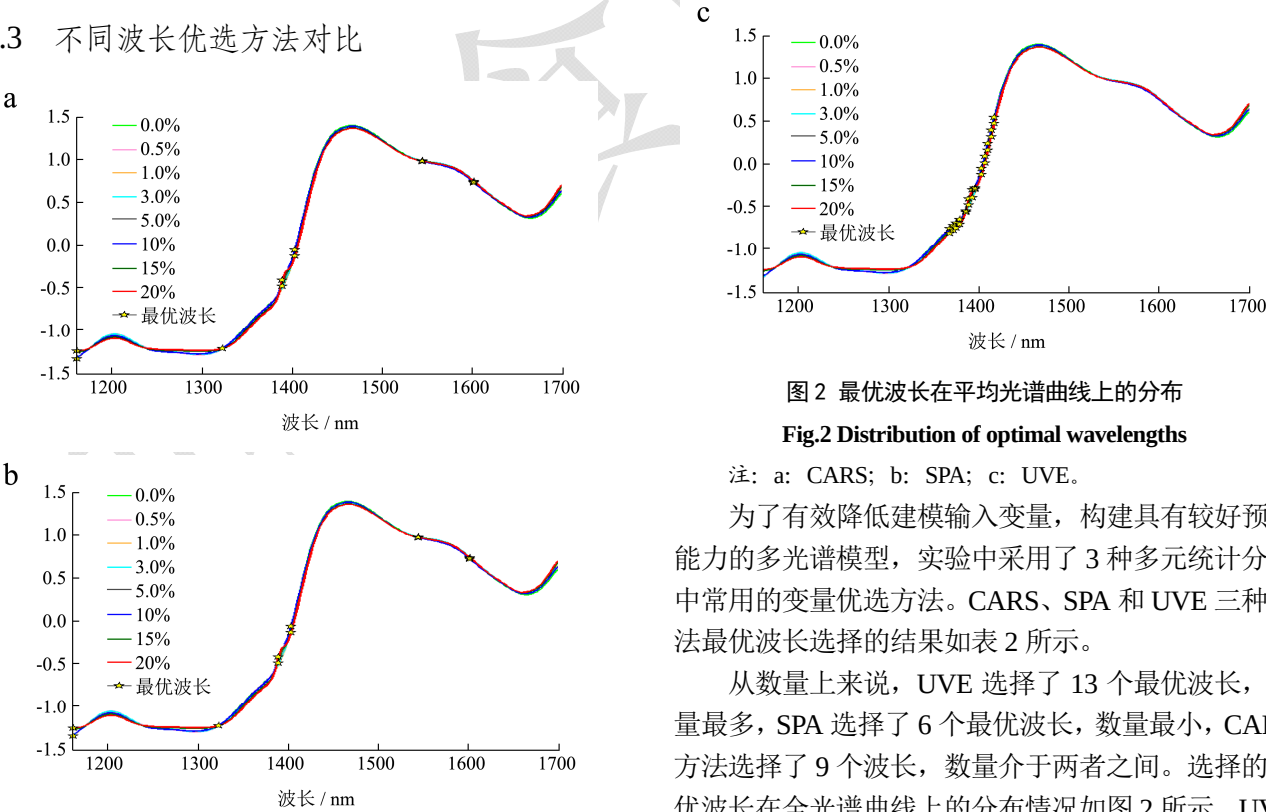


图 2 最优波长在平均光谱曲线上的分布

Fig.2 Distribution of optimal wavelengths

注: a: CARS; b: SPA; c: UVE。

为了有效降低建模输入变量,构建具有较好预测能力的多光谱模型,实验中采用了 3 种多元统计分析中常用的变量优选方法。CARS、SPA 和 UVE 三种方法最优波长选择的结果如表 2 所示。

从数量上来说,UVE 选择了 13 个最优波长,数量最多,SPA 选择了 6 个最优波长,数量最小,CARS 方法选择了 9 个波长,数量介于两者之间。选择的最优波长在全光谱曲线上的分布情况如图 2 所示。UVE

方法选择的波长分布情况最密集，变量之间相关性较高，SPA 方法选择的波长分布最分散，变量之间相关性较低，CARS 选择波长变量的分布密集情况介于两者之间。原始可能是 SPA 方法基于投影算法选择共线性最低的变量。结果表明 CARS、SPA 和 UVE 三种方法中，SPA 方法在降低建模变量个数方面效果最好，CARS 次之。选取的最优波长中 1404 和 1600 nm 附近处波长变量出现的次数最多。其中有研究表明 1411 nm 波长与水有关^[24]，可能与滑石粉中结晶水有关。

2.4 多光谱预测模型

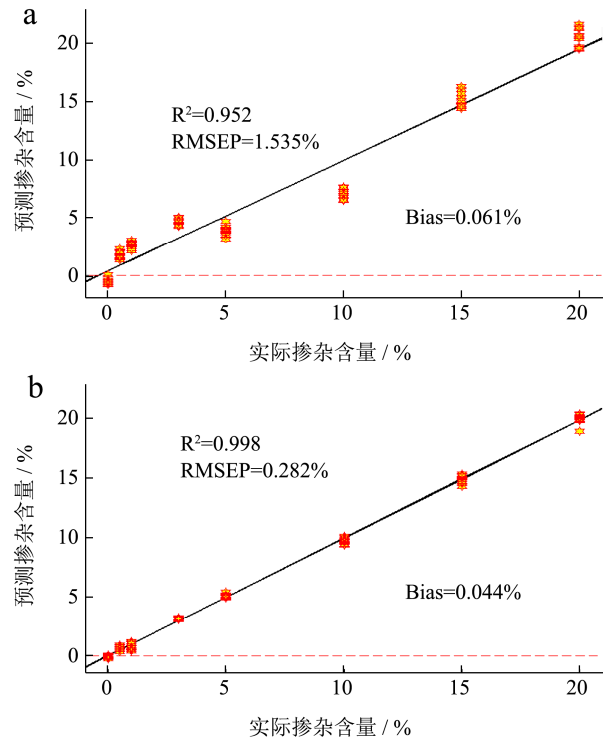


表 3 CARS、SPA 和 UVE 所选最优波长对应的多光谱模型预测结果

Table 3 Prediction results of multi-spectral models corresponding to optimal wavelengths selected by CARS, SPA and UVE										
波长优选方法	LVs	校正集			交叉验证集			验证集		
		R^2_c	RMSEC/%	$bias_c$ /%	R^2_{cv}	RMSECV/%	$bias_{cv}$ /%	R^2_p	RMSEP/%	$bias_p$ /%
UVE	2	0.973	1.595	-0.010	0.973	1.600	-0.012	0.952	1.535	0.061
CARS	6	0.999	0.233	-0.000	0.999	0.260	-0.009	0.998	0.282	-0.044
SPA	5	0.995	0.712	-0.001	0.994	0.742	0.002	0.988	0.769	0.026

3 结论

提出了一种从面粉中检测过量掺入无机物滑石粉的近红外光谱检测方法。从原始吸收光谱曲线可见，在 900~1700 nm 波长范围，纯滑石粉除了在 1393 nm 处出现微小吸收值外，在其它波长范围的光谱特征为 0；随掺杂滑石粉质量分数的增大，面粉样本在 1160~1700 nm 范围的整体光谱曲线幅值逐渐下降；过量掺杂滑石粉样本在 1393 nm 附近同样表现出新的微

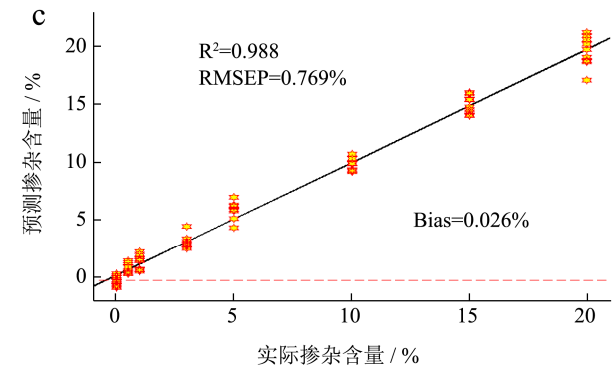


图 3 UVE、CARS 和 SPA 对应多光谱模型对验证集的预测结果

Fig.3 Prediction results of validation set by multi-spectral model corresponding to UVE, CARS and SPA methods

利用 CARS、SPA 和 UVE 所选最优波长下光谱数据建立多光谱 PLS 模型，不同模型的预测结果如表 3 所示。虽然 UVE 方法选择的最优波长数量最多，但其建模潜变量数最小数量为 2，CARS 方法对应的建模潜变量数为 6 多于 SPA 方法对应的建模潜变量数。UVE 方法对应模型的决定系数最低，均方根误差最高，偏差绝对值最大，模型预测效果最差，CARS 方法对应模型的决定系数最高，均方根误差最低，偏差的绝对值较低，模型的预测效果最好。结果表明，三种方法中 CARS 挑选的最优波长对应的预测模型效果最好。3 种方法对应模型对验证集的预测结果如图 3 所示。图 3 中三个模型对滑石粉质量分数大于等于 0.5% 的样本的预测值大于 0，表明 3 个多光谱模型的检测限均可达到 0.5%。实际生活中，面粉中滑石粉的掺杂质量分数一般大于 0.5%，表明所建多光谱模型具有较好的实际应用价值。

小吸收峰。通过对比基线校正 (BLC)、归一化 (NOR)、移动平均平滑 (MAS) 标准正态变量 (SNV)、多元散射校正 (MSC)、Savitzky-Golay 一阶导数 (SGD₁) 和 Savitzky-Golay 二阶导数 (SGD₂) 7 种预处理方法，选取了 SNV 为实验中掺杂滑石粉面粉样本近红外光谱数据的最优预处理方法。通过对竞争自适应重加权采样方法 (CARS)、连续投影算法 (SPA)、无信息变量消除 (UVE) 三种变量优选方法选取特征波长，并据此分别建立了面粉中滑石粉含量的近红外多光谱

PLSR 定量检测模型并对模型的预测效果进行对比,进一步综合三种变量优选方法所选择波长的数量、波长分布密集情况进行分析的结果表明: CARS 方法对应多光谱预测模型的效果最好,验证集决定系数 R_p^2 为 0.998,均方根误差 RMSEP 为 0.282%;而 SPA 方法选择的波长数量最少且彼此间共线性最小;依托三种波长优选方法所构建的多光谱模型的检测限均可达 0.5%,对实际面粉中添加过量滑石粉的情况具有较好的检测应用价值,研究结果可为今后便携式或在线式检测仪器的开发提供了理论基础。

参考文献

- [1] 孙晓荣,刘翠玲,吴静珠,等.基于近红外光谱无损快速检测面粉品质的研究[J].北京工商大学学报(自然科学版),2011,29(4):68-70
SUN Xiao-rong, LIU Cui-lin, WU Jing-zhu, et al. Research of rapid and undamaged assessment of flour quality using near infrared spectroscopy [J]. Journal of Beijing Technology & Business University, 2011, 29(4): 68-70
- [2] 董秀丽,刘翠玲,吴胜男.小麦面粉中不安全因素测定方法的研究进展[J].北京工商大学学报(自然科学版),2012,30(6): 80-84
DONG Xiu-li, LIU Cui-ling, WU Sheng-nan. Research progress of insecurity determination in wheat flour [J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2012, 30(6): 80-84
- [3] 薛笑莉,周激.面粉及面制品中滑石粉、石膏、碳酸钙含量的测定[J].山西化工,2003,2:33-34,61
XUE Xiao-li, ZHOU Ji. Determination of the contents of talcum powder, gypsum and calcium carbonate in the wheat flour and wheat flour products [J]. Shanxi Chemical Industry, 2003, 2: 33-34, 61
- [4] 付秀华,李闻达,夏毅,等.小麦粉中掺杂滑石粉的太赫兹光谱检测[J].中国粮油学报,2013,28(3):110-112, 122
FU Xiu-hua, LI Wen-da, XIA Yan, et al. The detection of talc in wheat powder based on terahertz time-domain spectroscopy [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(3): 110-112, 122
- [5] 刘翠玲,董秀丽,孙晓荣,等.近红外光谱快速检测小麦面粉中滑石粉含量研究-基于 PLS[J].农机化研究,2013,35(7): 183-187
LIU Cui-ling, DONG Xiu-li, SUN Xiao-rong, et al. The research of detection of talc-containing flour based on near-infrared spectroscopy using PLS [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(7): 183-187
- [6] 赵延华,韩旭.傅里叶变换-红外光谱法快速测定面粉中滑石粉[J].理化检验(化学分册),2011,47(2):208-210
ZHAO Yan-hua, HAN Xu. Rapid determination of talc powder in flour by FT-IR [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2011, 47(2): 208-210
- [7] 张宝月,李九生.基于太赫兹光谱的小麦粉中滑石粉测定技术[J].中国粮油学报,2010,25(7):113-116
ZHANG Bao-yue, LI Jiu-sheng. Diagnostic techniques of talc powder in flour based on the THz spectroscopy [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2010, 25(7): 113-116
- [8] 由健,刘成雁,林雪征.面粉中滑石粉的 X 射线检验法[J].科协论坛(下半月),2009,1:85-86
YOU Jian, LIU Cheng-yan, LIN Xue-zheng. X-ray examination of talcum powder in flour [J]. Science & Technology Association Forum, 2009, 1:85-86
- [9] 魏峰,霍军生,徐宇洋.面粉中滑石粉含量的检测[J].黄山学院学报,2008,10(5):48-49
WEI Feng, HUO Jun-sheng, XU Yu-yang, et al. Determination of talcum power contents in wheat flour [J]. Journal of Huangshan University, 2008, 10(5): 48-49
- [10] 金凤,王冬,许志强,等.面粉中滑石粉的现场快速检测方法及其装置研究[J].食品与发酵工业,2008,3:160-163
JIN Feng, WANG Dong, XU Zhi-qiang, et al. Rapid detection method of talc powder in flour [J]. Food & Fermentation Industries, 2008, 3:160-163
- [11] 刘翠玲,董秀丽,孙晓荣,等.基于 BP 神经网络检测面粉中滑石粉含量的研究[J].北京工商大学学报(自然科学版),2012,30(5):77-80
LIU Cui-ling, DONG Xiu-li, SUN X R, et al. Rapid determination of talc-containing flour based on BP neural network [J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2012, 30(5): 77-80
- [12] GB 5009.269-2016 《食品安全国家标准 食品中滑石粉的测定》[S]
GB 5009.269-2016 《National Food Safety Standard General Rules for Determination of Talcum Powder in Food》[S].
- [13] 杨彦丽,林立,周谔非,等.微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法测定面粉中滑石粉的含量[J].化学分析计量,2011,20(3):62-64
YANG Yan-li, LIN Li, ZHOU An-fei, et al. Determination of talcum powder in flour by microwave digest-ICP-AES [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2011, 20(3): 62-64
- [14] 王承明,潘峰,高滢,等.面粉中滑石粉的 X 射线衍射分析[J].分析科学学报,2006,6:651-654
WANG Cheng-ming, PAN Feng, GAO Yin, et al. X-ray

- diffraction analysis of talc powder in flour [J]. Journal of Analytical Science, 2006, 6: 651-654
- [15] 孙晓荣,刘翠玲,吴静珠,等.基于近红外光谱无损快速检测面粉品质的研究[J].北京工商大学学报(自然科学版), 2011,29(4):68-70
- SUN Xiao-rong, LIU Cui-ling, WU Jing-zhu, et al. Research of rapid and undamaged assessment of flour quality using near infrared spectroscopy [J]. Journal of Beijing Technology & Business University, 2011, 29(4):68-70
- [16] 邹博睿.基于 NIRS 技术的面粉中滑石粉含量检测技术研究[D].哈尔滨:黑龙江大学,2018
- ZOU Bo-rui. Research on detection technology of talc content in flour based on NIRS technology [D]. Harbin: Postgraduate Dissertation of Heilongjiang University, 2018
- [17] 赵昕,张任,王伟,等.基于近红外光谱快速定量检测面粉中曲酸的方法建立[J].食品科学,2018,39(8):249-255
- ZHAO Xin, ZHANG Ren, WANG Wei, et al. Using near-infrared (NIR) spectroscopy for rapid, quantitative detection of kojic acid in wheat flour [J]. Food Science, 2018, 39(8): 249-255
- [18] Zhao X, Wang W, Ni X Z H, et al. Evaluation of near-infrared hyperspectral imaging for detection of peanut and walnut powders in whole wheat flour [J]. App. Sciences, 2018, 8(7): 1076
- [19] Wold S, Sjöström M, Eriksson L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2001, 58(2): 109-130
- [20] Abdi H. Partial least square regression (PLS regression) [J]. Encyclopedia for Research Methods for the Social Sciences, 2003, 6(4): 792-795
- [21] Jia B B, Yoon S C, Zhuang H, et al. Prediction of pH of fresh chicken breast fillets by VNIR hyperspectral imaging [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 208: 57-65
- [22] Pontes M J C, Galvao R K H, Araújo M C U, et al. The successive projections algorithm for spectral variable selection in classification problems [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2005, 78(1-2): 11-18
- [23] Yan K L. Determination of diesel cetane number by consensus modeling based on uninformative variable elimination [J]. Analytical Methods, 2012, 4(1): 254-258
- [24] Barbedo J G, Guarienti E M, Tibola C S. Detection of sprout damage in wheat kernels using NIR hyperspectral imaging [J]. Biosystems Engineering, 2018, 175: 124-132
-
- (上接第 284 页)
- [22] 竹尾忠一,周静舒,李生富.中国红茶香气构成的特征[J].蚕桑茶叶通讯,1984,9(2):34-36
- ZHU Wei-zhongyi, ZHOU Jing-shu, LI Sheng-fu. Characteristics of aroma composition of Chinese black tea [J]. Communication of Silkworm and Mulberry Tea, 1984, 9(2): 34-36
- [23] 王华夫,竹尾忠一.祁门红茶的香气特征[J].茶叶科学,1993, 13(1):61-68
- WANG Hua-fu, ZHU Wei-zhongyi. Aroma characteristics of Qimen black tea [J]. Tea Science, 1993, 13(1): 61-68
- [24] 赵常锐.祁红特征香气成分研究[D].合肥:安徽农业大学, 2010
- ZHAO Chang-rui. Research on characteristic aroma components of Qihong [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2010
- [25] XIAO Z, WANG H, NIU Y, et al. Characterization of aroma compositions in different chinese congou black teas using GC-MS and GC-O combined with partial least squares regression [J]. Flavour and Fragrance Journal, 2017, 32(4): 265-276
- [26] Zhu J, Chen F Wang L, et al. comparison of aroma-active volatiles in oolong tea infusions using GC-O factometry, GC-FPD, and GC-MS [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(34): 7499-7510
- [27] Elena N, Elena G, Laura V, et al. Volatile composition of functional 'a la piedra' turrón with propolis [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 45(3): 569-577
- [28] Du X, Finn C E, Qian M C. Volatile composition and odour-activity value of thornless 'black diamond' and 'marion' blackberries [J]. Food Chemistry, 2009, 119(3): 1127-1134