

# 近红外光谱结合化学计量法快速无损鉴别燕麦

Rapid and non-destructive identification of different brands and inferior oats by near infrared spectroscopy combined with chemometrics methods

李尚科<sup>1</sup> 杜国荣<sup>1,3</sup> 丁胜华<sup>2</sup> 单 杨<sup>2</sup>

LI Shang-ke<sup>1</sup> DU Guo-rong<sup>1,3</sup> DING Sheng-hua<sup>2</sup> SHAN Yang<sup>2</sup>

蒋立文<sup>1</sup> 刘 霞<sup>1</sup> 李 跑<sup>1,2</sup>

JIANG Li-wen<sup>1</sup> LIU Xia<sup>1</sup> LI Pao<sup>1,2</sup>

(1. 湖南农业大学食品科学与技术学院食品科学与生物技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128;

2. 湖南省农业科学院 湖南省农产品加工研究所, 湖南 长沙 410125;

3. 上海烟草集团有限责任公司技术中心北京工作站, 北京 101121)

(1. College of Food Science and Technology, Hunan Provincial Key Laboratory of Food Science and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Hunan Agricultural Product Processing Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha, Hunan 410125, China; 3. Beijing Work Station, Technology Center, Shanghai Tobacco Group Co., Ltd., Beijing 101121, China)

**摘要:**提出了一种基于近红外光谱技术与化学计量学的燕麦无损鉴别方法。通过近红外光谱仪测定了 5 个品牌与劣质燕麦的光谱曲线,利用连续小波变换方法对光谱进行预处理,然后基于标准偏差与相对标准偏差的变量筛选方法筛选出具有代表的 15 个波数点,最后结合主成分分析法对不同燕麦样品快速鉴别。结果表明:连续小波变换可以有效地消除光谱中的背景干扰,提取光谱有效信息,波长筛选方法可以大大提高主成分分析结果的鉴别能力。通过结合近红外光谱分析技术与化学计量学方法,可对中国国产品牌、进口品牌和劣质燕麦进行准确鉴别。

**关键词:**近红外光谱技术;燕麦片;主成分分析法;连续小波变换;波长筛选

**Abstract:** In order to identify the inferior oat samples, and the samples from different local and imported brands, a nondestructive identification method based on near infrared spectroscopy and chemometrics methods was proposed. Spectra of five different brands of oat samples and inferior samples were obtained. Continuous wavelet transform was used for the baseline elimination. Wavenumber selection based on the standard deviation and relative standard deviation was discussed for impro-

ving the accuracy of the method, and 15 informative wavenumbers were obtained. Principal component analysis method was used for classification. The results showed that the baseline elimination was achieved by continuous wavelet transform method. Acceptable classification can be achieved with the help of principal component analysis and informative wavenumber selection. It shows that the near infrared spectroscopy combined with chemometrics methods can be used to the rapid identification of the oat samples of different brands and inferior.

**Keywords:** near infrared spectroscopy; oats; principal component analysis; continuous wavelet transform; wavelength screening

燕麦(Oats),禾本科植物,燕麦属<sup>[1]</sup>。燕麦富含蛋白质、淀粉、维生素等营养物质,其中麸皮中蛋白质的含量更是高于一般谷物类<sup>[2-3]</sup>。燕麦所含的营养成分对人体有着积极作用,可以降低血糖、降血脂、抗氧化、提高人体免疫力、降低心血管疾病的风险<sup>[4]</sup>。由于生活节奏的加快,燕麦片这类易于烹饪的食品越来越受民众欢迎,但也随之出现了一些不法厂商以次充好,以国内品牌假冒进口品牌,严重损害了消费群体的利益。国内外对于燕麦的研究分析方法常为感官评价法<sup>[5]</sup>和高效液相色谱法<sup>[6]</sup>、气相色谱法<sup>[7]</sup>等化学方法。然而,感官评价法易受到主观上以及外界客观因素的影响;化学方法虽然相较于感官评价法精确度更高,但同样对待检测的样品有所损耗,同时耗费的人力物力也较大。因此,研究和开发检测燕麦的新方法的重要性是不言而喻的。

**基金项目:**国家自然科学基金(编号:31601551,31671931);湖南省自然科学基金(编号:2019JJ50240)

**作者简介:**李尚科,男,湖南农业大学在读硕士研究生。

**通信作者:**李跑(1989—),男,湖南农业大学讲师,博士。

E-mail: lipao@mail.nankai.edu.cn

**收稿日期:**2018-12-15

近红外光谱技术是电磁波技术,主要介于中红外光谱区和可见光谱区之间。近红外光谱技术拥有成本较低、效率高、检测简易、重现性优等特点,已然发展成为一种新型的研究与分析手段<sup>[8]</sup>,在食品领域主要应用于食品溯源<sup>[9-10]</sup>、品种分析<sup>[11-15]</sup>、构成成分检测<sup>[16-19]</sup>等方面。国内外应用近红外技术对燕麦的相关研究中,赵秀芳等<sup>[20]</sup>基于近红外漫反射光谱对不同生长周期及相应品种燕麦稻秆的纤维含量进行了检测。得出多元散射校正十二阶导数+平滑处理3种预处理方法的结合使预测结果达到最优值的结论。阴佳鸿等<sup>[21]</sup>测试了不同含水量的燕麦种子。结果显示,采用多元散射校正预处理方法,所建的近红外定量模型最佳,对预测集和校准集样本的鉴别率可以达到100%。Albanell等<sup>[22]</sup>通过近红外光谱技术来测定燕麦无麸质面粉及面团含有的谷蛋白含量。结果表明,在决定系数分别为985%和7%时,燕麦无麸质面粉和面团中的谷蛋白含量的定量模型达到最优。然而,在关于不同品牌、劣质燕麦的鉴别等研究基本没有。

在近红外光谱中明显的基线漂移和光谱信息重叠的主要原因 是样品的固有特性,光散射,杂散光和仪器本身的响应。因此,原始光谱的预处理是有效的<sup>[23]</sup>。连续小波变换(Continuous wavelet transform, CWT)可以对数据进行压缩、平滑降噪、减少基线漂移和识别重叠信号<sup>[24-26]</sup>。另外,冗余波长是近红外模型不稳定的主要原因<sup>[27]</sup>。波长筛选可以很好消除此影响。本研究前期<sup>[28]</sup>提出了一种基于标准偏差(Standard deviation, SD)与相对标准偏差(Relative standard deviation, RSD)的变量筛选方法,通过结合近红外光谱,有效实现了不同厂家药品阿奇霉素的快速鉴别。因此,本试验拟基于 CWT 技术与变量筛选方法对 5 种国内外品牌燕麦和劣质燕麦的近红外光谱进行处理,实现了对不同品牌以及劣质燕麦的有效鉴别分析。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验样品

2 种国产燕麦产品:分别是产自山西省山阴县的 A 燕麦品牌、产自内蒙古的 B 燕麦品牌,每个品牌收集了 3 个不同批次,对同一批次的燕麦再细分为 5 个样品,共 30 个样品;

3 种进口燕麦产品(C 品牌、D 品牌和 E 品牌):不同批次各买 3 种,依旧对同一批次燕麦分为 5 个样品,共 45 个样品,最后在购得未经加工过的燕麦记为 F 劣质燕麦<sup>[29]</sup>。

## 1.2 仪器与设备

近红外光谱仪: QuasIR 4000 型, 美国 Galaxy Scientific 公司;

MATLAB:R2010b 型,美国 Natick 公司;

电子天平:AB104-N 型,上海第二天平仪器厂。

### 1.3 光谱采集

在波数范围为  $12\,000\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$  间,最小间隔约为  $4\text{ cm}^{-1}$ ,采用积分球漫反射模式采集全部光谱,共采集 2 098 个数据点。同一样品测量 3 次,采集 3 条平行光谱,取平均值作为该样本的原始光谱。

### 1.4 光谱预处理与聚类分析

利用 CWI 消除背景噪声的干扰,并选用了“Haar”小波基,尺度参数为 25。此外,在平均值 $\geq 1\%$ 的波长基础上,选取  $SD \geq 5\%$  与 RSD 较大的波长点作为特征波数。最后运用主成分分析法(Principal compoent analysis, PCA)用于聚类分析。因此,对 6 类燕麦样品进行聚类分析采用 PCA 方法。

## 2 结果与讨论

### 2.1 燕麦的原始光谱特征及主要化学键推断

由图 1 可知,谱线大致趋势一致,大部分谱线重合,具有相似的吸收峰。同时,发现 6 种不同燕麦样品在一定波数范围内有差异,11 200~10 800,10 400~9 800,8 600~7 800,7 200~6 400,6 000~5 400,5 300~5 000,4 950~4 500,4 500~4 200  $\text{cm}^{-1}$  分别属于 CH 的第 3 倍频和 OH 的第 2 倍频、NH 的第 2 倍频、CH 第 2 倍频、NH 的第 2 倍频和 OH 的第 1 倍频、CH 的第 1 倍频、CO 的第 2 倍频和 OH 的组合频和 NH 的第 1 倍频、NH 和 OH 的组合频、CH+CH 的组合频。然而光谱仍存在明显的背景干扰和基线漂移。因此无法确定燕麦样品中所存在的差异是由哪一具体物质引起的。

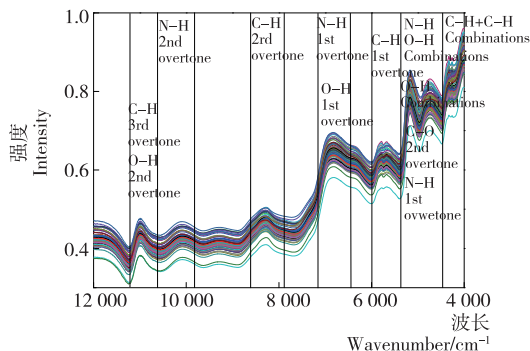


图 1 6 类燕麦原始光谱图

Figure 1 Original spectra of six varieties of oat samples

## 2.2 基于全部燕麦原始数据的 PCA 分析

为了区分不同品牌的燕麦以及劣质燕麦,采用 PCA 方法对原始光谱数据进行聚类分析。由于前 2 个主成分(PC1 和 PC2)的方差贡献率之和在 90% 以上,故选取 PC1 和 PC2 进行 PCA 分析。图 2 代表了不同品牌燕麦和劣质燕麦直接测量的聚类分析结果,由图 2 可知,E 跟 F 和 A 组分被有效地分隔开来,D 与 F 也未重叠,然而其他组分均有一定程度的重叠,可能是背景干扰和基线漂移导致的。因此,仅使用原始光谱进行聚类分析无法实

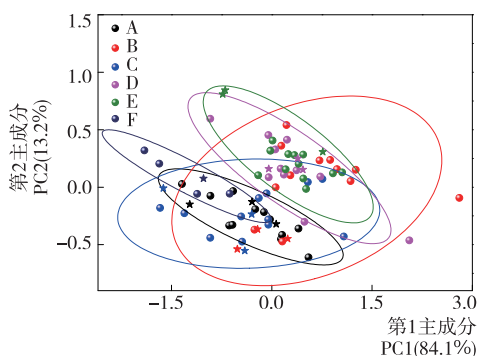


图 2 6 类燕麦原始光谱的 PCA 图

Figure 2 PCA result of the six varieties of oat  
original Spectra

现对不同品牌燕麦以及劣质燕麦的准确鉴别分析。

### 2.3 基于连续小波变换后的光谱及主要物质初推

为了消除其他因素对数据信息的影响,采取了 CWT 的预处理方法来消除背景干扰和基线漂移。图 3 为 CWT 处理后的光谱。与图 1 相比较可知,经 CWT 处理后变动的背景被有效地消除,有效信息被成功提取出来。可知,CWT 预处理确实具有除去背景干扰和减少基线漂移的功能。

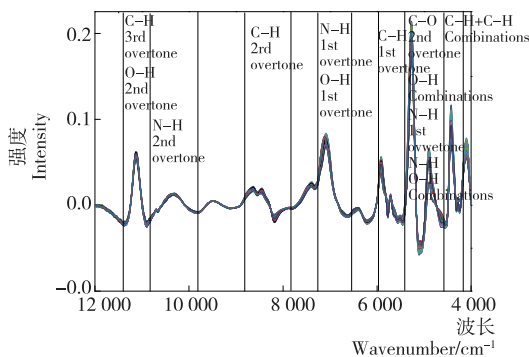


图 3 连续小波变换处理后的光谱

Figure 3 Spectra after CWT

由图 3 可知,通过 CWT 预处理后,光谱的特征谱峰增多且突出,复杂信号信息被解析出来。较高吸收峰在  $11\ 100\text{ cm}^{-1}$  左右,对应为蛋白质和  $\text{CH}_3$  伸缩振动吸收波段; $10\ 400\text{ cm}^{-1}$  左右存在波峰峰值较低,出现吸收峰对应为 ROH 和  $\text{H}_2\text{O}$  伸缩振动吸收波段;在  $8\ 000\sim 8\ 700\text{ cm}^{-1}$  波段中出现了连续的小波峰,存在 2 个峰值对应为  $\text{CH}$ 、 $\text{CH}_2$ 、 $\text{CH}_3$ 、 $\text{HC}=\text{CH}$  等官能团的伸缩振动吸收波段;在  $7\ 100\text{ cm}^{-1}$  左右同样存在较高的峰值,该处峰值表明了 ROH 的第 2 倍频伸缩振动和  $\text{CH}_2$  官能团伸缩振动和变形振动的存在;在  $5\ 900\text{ cm}^{-1}$  处也出现了较明显的吸收峰,且该吸收峰范围内近红外光谱谱线存在一定程度的差异,而该处对应的官能团为  $\text{CH}_3$  第 2 倍频伸缩振动吸收波段,说明了在  $5\ 900\text{ cm}^{-1}$  左右含有碳氢

官能团的物质存在差异,可能原因在于碳水化合物、蛋白质、脂质类物质含量和种类存在差异导致的。

4 500 ~ 5 400  $\text{cm}^{-1}$  范围中存在连续的强吸收峰, 5 300  $\text{cm}^{-1}$  左右的峰值对应为淀粉的信息。图 3 中看出, 5 050  $\text{cm}^{-1}$  左右同样含有含量较高的反向吸收峰, 对应为蛋白质信息, 而 4 600 ~ 5 050  $\text{cm}^{-1}$  波段中出现明显的不重合, 在 4 900  $\text{cm}^{-1}$  处的波峰存在较大的差异, 该处对应为蛋白质的吸收波段, 推测是该处的蛋白质含量或种类存在较明显差异导致; 在 4 700  $\text{cm}^{-1}$  左右同样存在反向波峰, 与之对应的结构为氨基酸的信息, 且在 4 700  $\text{cm}^{-1}$  处近红外光谱谱线存在十分明显的差异, 推测是可能是该处氨基酸种类以及含量差异导致; 在 4 500  $\text{cm}^{-1}$  左右存在  $\text{HC}=\text{CH}$  的官能团吸收峰; 而在 4 300  $\text{cm}^{-1}$  存在 1 个明显的差异较大的反向连续小波峰, 对应了  $\text{CH}_2$  官能团的伸缩和变形振动, 在 4 100  $\text{cm}^{-1}$  左右处还存在 1 个吸收波峰, 对应为淀粉的吸收波段。结合图 1 与图 3 可以发现, 燕麦的主要吸收峰位于蛋白质、氨基酸、淀粉和含有  $\text{CH}$  以及  $\text{OH}$  官能团物质处, 主要差异是由蛋白质及氨基酸含量跟种类差异所导致。

## 2.4 基于 CWT 处理后的 PCA 分析

为进一步提高聚类分析的结果,将经过 CWT 处理过的光谱进行 PCA 分析得到图 4。由图 4 可知,CWT 预处理后的结果优于图 2 中不经过预处理的。劣质燕麦与品牌燕麦被完全有效地鉴别开来,并且差异还十分显著。因此可以推断出劣质燕麦与品牌燕麦在成分构成上存在较大的差异。而经过 CWT 处理后其他品牌未获得良好的鉴别结果。结果表明:在使用 CWT 处理变动的背景被有效地消除后,可以使劣质燕麦与品牌燕麦完全鉴别开来,然而国产品牌与进口品牌的燕麦仍无法实现较好地鉴别。

### 2.5 基于 SD 和 RSD 的波长筛选和主要差异物质的推断

通过筛选出光谱的特征波长可以极大增加模型的稳健性。一般认为  $SD \leq 5\%$  是由人为误差引起的波动,所以在平均值  $\geq 1\%$  的波长基础上,剔除那些  $SD \leq 5\%$  的波

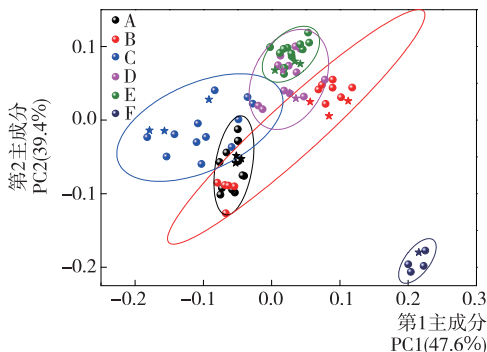


图 4 小波变换处理后的 PCA 图

Figure 4 PCA result after CWT

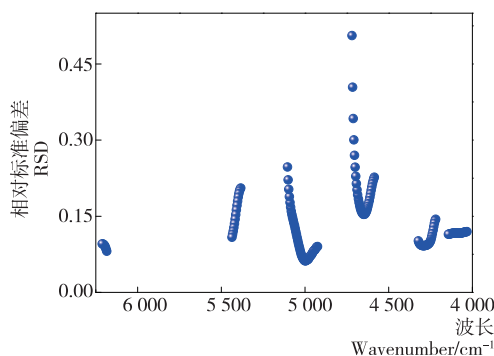


图5 小波变换处理后的 RSD 图

Figure 5 RSD result after CWT

长,对全部波数进行了一次初筛,有效波数范围缩小到  $6\,500\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 。

由图5可知,RSD值均 $\leq 0.5$ ,且15个点落在  $4\,600\sim 4\,750$ ,  $5\,050\sim 5\,150$ ,  $5\,300\sim 5\,400\text{ cm}^{-1}$ 附近。结合图3可知,  $4\,600\sim 4\,750\text{ cm}^{-1}$ 对应的波长处为氨基酸的信息;在  $5\,050\sim 5\,150\text{ cm}^{-1}$ 处对应的为 CONH、蛋白质信息;  $5\,300\sim 5\,400\text{ cm}^{-1}$ 对应为淀粉信息。由此可推测出不同燕麦品牌间的差异可能源于蛋白质、氨基酸、淀粉含量和种类的不同。

## 2.6 基于特征波长的 PCA 分析

从图4可知,通过CWT预处理后可以很好地鉴别劣质燕麦与品牌燕麦,而中国燕麦与进口燕麦仍无法准确鉴别。首先剔除  $SD\leq 5\%$ 的波数点,在此类波长点下的波动究其原因应该是因为之前重复试验中操作的误差引起的,然后再挑选RSD值较高的波数来聚类分析。因为RSD值越大,所选样本差别也会相应增加。最后,可以只通过几个或几十波数便可得到较优的聚类结果。因此选取15个波数点进行分析,图6代表了只通过15个波数点的聚类分析结果。

结合图4、6可知,劣质的燕麦的确与A、B、C、D、E类品牌存在很大差异,可能是劣质燕麦片未经过精加工,添加营养物质等导致的。同时,A、B燕麦品牌与C、D、E燕麦品牌没有重叠部分,且A、B是国产燕麦,C、D、E是进口燕麦。说明国产燕麦和进口燕麦之间也存在一定程度上的差异,可能是由于燕麦不同生长环境和加工过程所导致的。无法鉴定出2种国产燕麦,A和B,并且无法鉴定出3种进口燕麦,C、D和E。说明进口燕麦品牌之间、国产燕麦品牌之间在营养成分上大同小异,并无本质区别。因此,当使用了背景扣除和波长筛选预处理,通过对燕麦片近红外光谱分析实现了劣质燕麦、国产品牌燕麦、进口品牌燕麦片的鉴别分析。

## 3 结论

本试验利用近红外光谱技术与化学计量学方法辅助用于燕麦片的快速分析,结果表明:单纯使用原始光谱

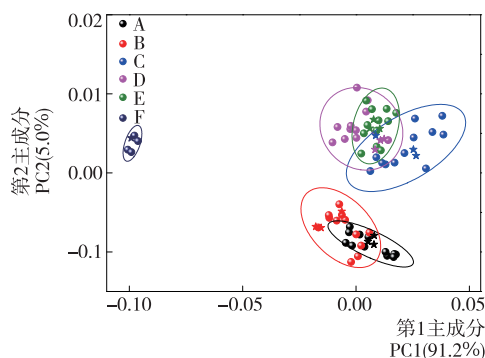


图6 CWT和波长筛选后的PCA图

Figure 6 PCA result after CWT and wavelength screening

的确很难鉴别不同品牌以及伪劣的燕麦片,在CWT预处理和波长筛选的帮助下,可以推断出不同品牌燕麦之间的差异是由蛋白质、氨基酸、淀粉类物质含量和结构的差异导致的。同时,通过PCA方法获得了满意的聚类分析结果,鉴别出国产燕麦、进口燕麦以及劣质燕麦三者之间的差异。然而,仍无法实现国产燕麦品牌之间以及进口燕麦品牌之间的良好鉴别。还需要结合更多的计量学方法加以讨论。

## 参考文献

- [1] 郑殿升. 中国燕麦的多样性[J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(3): 249-252.
- [2] 田斌强, 赵莉君, 谢笔钧. 燕麦淀粉研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(21): 287-291.
- [3] MIRMOGHATAIE L, KADIVAR M, SHAHEDI M. Effects of succinylation and deamidation on functional properties of oat protein isolate[J]. Food Chemistry, 2009, 114(1): 127-131.
- [4] MOHAMED A, BIRESAW G. Oats protein isolate: thermal, rheological, surface and functional properties[J]. Food Research International, 2009, 42(1): 107-114.
- [5] 顾军强, 钟葵, 王立, 等. 不同燕麦品种用于加工燕麦片的适宜性评价[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(3): 18-24.
- [6] 张维库, 续洁琨, 赵莹, 等. 液相色谱法测定燕麦麸皮芦丁的含量[J]. 亚太传统医药, 2010, 6(10): 40-41.
- [7] 王超群, 张晖, 钱海峰, 等. 基于气相色谱定量检测面粉中燕麦粉的添加量[J]. 现代食品科技, 2016(11): 316-322.
- [8] JAN U P, DIETMA R K, REINHOLD C. On-line application of near infrared (NIR) spectroscopy in food production[J]. Trends in Food Science and Technology, 2015, 46(2): 211-230.
- [9] 李娟, 梁漱玉. 近红外快速无损检测食用油品质的研究进展[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 225-228.
- [10] TAN Zong, LOU Ting-ting, HUANG Zhi-xuan, et al. Single-Drop raman imaging exposes the trace contaminants in milk[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,

- 2017, 65(30): 6 274-6 281.
- [11] 郭成, 马月, 梁梦醒, 等. 基于近红外光谱结合波长优选检测单颗葡萄的 SSC 含量[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 39-43.
- [12] TURZA S, TOTH A, VARADI M. Multivariate classification of different soyabean varieties[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 1998, 6(1): 183-187.
- [13] 王茜, 吴习字, 庞兰, 等. 枇杷内部品质近红外光谱无损检测[J]. 食品与机械, 2016, 32(5): 67-70, 97.
- [14] 陈建, 陈晓, 李伟, 等. 基于近红外光谱技术和人工神经网络的玉米品种鉴别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(8): 1 806-1 808.
- [15] ESTCBAN D, GONZALEZ J M, PIZARRO C. An evaluation of orthogonal signal correction methods for the characterisation of arabica and robusta coffee varieties by NIRS[J]. Analytica Chimica Acta, 2004, 514(1): 57-67.
- [16] 莫欣欣, 孙通, 刘木华, 等. 基于近红外光谱的食用植物油中反式脂肪酸含量快速定量检测及模型优化研究[J]. 分析化学, 2017, 45(11): 1 694-1 702.
- [17] DE M M, MANUELIAN C L, TON S, et al. Prediction of sodium content in commercial processed meat products using near infrared spectroscopy[J]. Meat Science, 2017, 125(2 017): 61-65.
- [18] 管骁, 饶立, 刘静, 等. 结合数据融合技术与近红外光谱的休闲苹果脆片综合品质评价[J]. 食品与机械, 2016, 32(12): 45-49.
- [19] 赵昕, 张任, 王伟, 李春阳. 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.
- [20] 赵秀芳, 李卫建, 黄伟, 等. 燕麦干草品质的近红外光谱定量分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(9): 2 094-2 097.
- [21] 阴佳鸿, 毛培胜, 黄鸾, 等. 不同含水量劣变燕麦种子活力的近红外光谱分析[J]. 红外, 2010, 31(7): 39-44.
- [22] ALBANELL E, MINARRO B, CARRASCO N. Detection of low-level gluten content in flour and batter by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS)[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 56(2): 490-495.
- [23] LI Pao, DU Guo-rong, MA Yan-jun, et al. A novel multivariate calibration method based on variable adaptive boosting partial least squares algorithm[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2018, 176(176): 157-161.
- [24] JORDAN D, MIKSAD R W, POWERS E J. Implementation of the continuous wavelet transform for digital time series analysis[J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(3): 1 484-1 494.
- [25] 陈达, 苏庆德, 邵学广, 等. 近红外光谱技术用于复杂植物样品中无机离子测定的新方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(12): 1 540-1 542.
- [26] 梁逸曾, 吴海龙, 沈国励, 等. 分析化学计量学的若干新进展[J]. 中国科学: B 辑 化学, 2006, 36(2): 93-100.
- [27] CHEN Da, SHAO Xue-guang, HU Bin, et al. Simultaneous wavelength selection and outlier detection in multivariate regression of near-infrared spectra [J]. Analytical Sciences, 2005, 21(2): 161-166.
- [28] LI Pao, DU Guo-rong, CAI Wen-sheng, et al. Rapid and non-destructive analysis of pharmaceutical products using near-infrared diffuse reflectance spectroscopy[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2012, 70(21): 288-294.
- [29] 张初, 刘飞, 何勇, 等. 近红外光谱技术用于豆浆粉品牌与劣质豆浆粉的鉴别[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1 826-1 830.

(本文系 2018 年湖南省研究生创新论坛二等奖论文)

(上接第 65 页)

- [6] GAO Ya-li, GU Yan-xiang, WEI Yun. Determination of Polymer Additives-Antioxidants and Ultraviolet (UV) Absorbers by High-Performance Liquid Chromatography Coupled with UV Photodiode Array Detection in Food Simulants[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(24): 12 982-12 989.
- [7] SANCHIS Y, YUSA V, COSCOLLA C. Analytical strategies for organic food packaging contaminants [J]. Journal of Chromatography A, 2017, 1 490: 22-46.
- [8] YANG Jin-ling, LI Yong-xin, WANG Yu, et al. Recent advances in analysis of phthalate esters in foods[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2015, 72: 10-26.
- [9] SZCZEPANSKA N, KUDŁAK B, NAMIESNIK J. Recent advances in assessing xenobiotics migrating from packaging material: A review [J]. Analytica Chimica Acta, 2018, 1 023: 1-21.
- [10] ARVANITOYANNIS I S, KOTSANOPOULOS K V. Migration Phenomenon in Food Packaging: Food-Package Interactions, Mechanisms, Types of Migrants, Testing and Relative Legislation: A Review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(1): 21-36.
- [11] 刘宇飞, 李忠海, 黎继烈, 等. 塑料食品包装材料中常用抗氧化剂迁移研究进展[J]. 食品与机械, 2012(6): 251-255.
- [12] FERNANDES A R, ROSE M, CHARLTON C. 4-Nonylphenol (NP) in food-contact materials: Analytical methodology and occurrence[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2008, 25(3): 364-372.
- [13] 周文苑, 王军. 烷基酚聚氧乙烯醚的毒性和法规现状 (英)[J]. 日用化学品科学, 1998(4): 20-23.
- [14] SAJIKI J, MIYAMOTO F, FUKATA H, et al. Bisphenol A (BPA) and its source in foods in Japanese markets[J]. Food Additives and Contaminants, 2007, 24(1): 103-112.
- [15] 杨婷, 张钦发, 李佳媛, 等. 影响聚丙烯塑料中抗氧化剂 BHT 向食品中迁移规律因素研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(12): 4 716-4 722.