

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.057

# 基于高光谱成像技术的面条中马铃薯全粉含量检测

任志尚<sup>1</sup> 彭慧慧<sup>1</sup> 贺壮壮<sup>1</sup> 杜娟<sup>1</sup> 印祥<sup>1</sup> 马成业<sup>1,2</sup>

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000; 2. 山东省高校农产品功能化技术重点实验室, 淄博 255000)

**摘要:** 为了快速检测面条中马铃薯全粉含量, 研究近红外高光谱成像技术定量检测面条中马铃薯全粉含量的可能性, 自制了马铃薯全粉质量分数在 0~35% 内随机均匀分布的 120 个面条样品, 在 900~2 500 nm 范围采集高光谱图像, 随机选取 80 个样品作为校正集, 分别采用原始光谱和经过 6 种预处理方法预处理后的光谱建立了偏最小二乘回归、主成分回归、支持向量机回归模型。结果表明经标准化预处理后用偏最小二乘回归建模效果最好, 校正集决定系数( $R_c^2$ )为 0.865 3, 交叉验证集决定系数( $R_{cv}^2$ )为 0.691 4。用回归系数法在经过标准化预处理后的光谱数据中提取了与全粉含量相关的特征波长, 建立了马铃薯全粉含量偏最小二乘回归简化模型, 校正集决定系数( $R_c^2$ )为 0.868 5, 交叉验证集决定系数( $R_{cv}^2$ )为 0.802 1, 基于特征波长建立的模型效果优于全波段模型, 模型效果得到了一定的提高。以剩余 40 个未参与校正模型建立的样品作为预测集, 基于特征波长建立了标准化-偏最小二乘回归简化预测模型, 预测集决定系数( $R_p^2$ )为 0.854 6, 模型具有较好的预测能力。结果表明利用近红外高光谱成像技术可检测面条中马铃薯全粉含量, 可为马铃薯全粉面条的快速无损检测建立新的方法。

**关键词:** 面条; 马铃薯全粉; 高光谱成像技术; 无损检测

**中图分类号:** TS215; O657.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0466-05

## Detection of Potato Powder Addition in Noodles Based on Hyperspectral Imaging

REN Zhishang<sup>1</sup> PENG Huihui<sup>1</sup> HE Zhuangzhuang<sup>1</sup> DU Juan<sup>1</sup> YIN Xiang<sup>1</sup> MA Chengye<sup>1,2</sup>

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China

2. Key Laboratory of Shandong Provincial Universities for Technologies in Functional Products, Zibo 255000, China)

**Abstract:** In order to quickly and non-destructively detect the content of whole potato powder in potato noodles, the hyperspectral imaging technology was used to quantitatively detect the content of whole potato powder in noodles. Totally 120 noodle samples with a total potato flour content of 0~35% were self-made, and hyperspectral images of the noodles were collected in the 900~2 500 nm spectral range. Totally 80 samples were randomly selected as the calibration set, and the original spectra and the spectra preprocessed by moving average, smoothing S-G, baseline, normalize, standard normalized variate, and multiplicative scattering correction were used to establish the partial least squares regression model, principal component regression model and support vector machine regression model. The results showed that the partial least squares regression modeling effect was the best after the standardized preprocessing method. The coefficient of determination of the calibration set ( $R_c^2$ ) was 0.865 3, the coefficient of determination of the cross validation set ( $R_{cv}^2$ ) was 0.691 4. The characteristic wavelength was extracted from the spectral data preprocessed by normalize by regression coefficient method, and a simplified model of potato powder content PLSR was established. The coefficient of determination of the calibration set ( $R_c^2$ ) was 0.868 5. The validation set determination coefficient ( $R_{cv}^2$ ) was 0.802 1. The results showed that the model based on the characteristic wavelength was better than the full-band model. Using the remaining 40 samples as the prediction set, the Normalize-PLSR simplified prediction model was established based on the characteristic wavelength. The coefficient of determination of the prediction set

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2019JZZY010734)

作者简介: 任志尚(1994—), 男, 硕士生, 主要从事农产品高值化加工研究, E-mail: 1525169572@qq.com

通信作者: 马成业(1978—), 男, 副教授, 博士, 主要从事农产品高值化加工研究, E-mail: mcycn2002@163.com

( $R_p^2$ ) was 0.8456. The model had good prediction ability. The results showed that it was feasible to use hyperspectral imaging technology to detect the total potato flour content in noodles.

**Key words:** noodles; potato powder; hyperspectral imaging technology; non-destructive testing

## 0 引言

面条已成为中国两大主要面制品之一。面条的生产在中国已经工业化,消费在中国便利食品中处于前列。目前很多人将蔬菜、水果等和面粉混合,制作营养成分含量高的面条。马铃薯是仅次于小麦、水稻、玉米的世界第四大主要粮食作物<sup>[1]</sup>。马铃薯含有丰富的膳食纤维、蛋白质、维生素 C、矿物质钾等,因其营养丰富具有较高的开发利用价值<sup>[2-3]</sup>,目前市场上有多种马铃薯全粉面条,由于马铃薯全粉的价格较高,可能存在一些商家虚假标注马铃薯全粉含量,目前,针对面条中马铃薯全粉含量的检测还没有合适的检测方法。

高光谱成像(HSI)是一种新兴的技术,它将传统的光谱和数字成像技术集成到一个系统中,使同时提供某一物体的光谱和空间信息成为可能<sup>[4]</sup>。近红外光谱技术只可以检测光谱信息。计算机视觉技术可以呈现样品图像信息,但是不能表征样品的内部成分和结构信息。高光谱成像技术融合了光谱技术和计算机视觉技术,可以同时检测光谱和图像信息,明显优于近红外光谱技术。近年来,近红外高光谱成像技术在食品质量安全评价中的应用得到了广泛的发展<sup>[5]</sup>。在果蔬<sup>[6]</sup>、肉类<sup>[7]</sup>、粮食<sup>[8]</sup>化学成分的检测均有研究报道。在面制品检测研究方面,文献[9]利用可见光/近红外光谱对6个品牌的360个样品方便面进行辨别。用反向传输神经网络法和二乘-支持向量机法建立的模型区分方便面品牌的正确率分别达到98.9%和100%。可见/近红外光谱可以作为一种快速、无损的方法对不同品牌的方便面进行分类。文献[10]利用近红外光谱技术建立了方便面中油脂含量的预测模型,研究表明,利用近红外光谱技术能快速、准确测定油炸方便面油脂含量。文献[11]利用近红外光谱法建立了面条中马铃薯泥含量的预测模型,取得了较好的预测效果。近红外光谱技术已经广泛应用于面制品检测,但是近红外高光谱成像技术在面制品检测方面的研究较少,利用近红外高光谱成像技术检测面条中马铃薯全粉含量的研究未见报道。

本文通过采集不同马铃薯全粉含量的面条高光谱图像,建立定量预测模型,优化建模方法,研究近红外高光谱成像技术定量检测面条中马铃薯全粉含量的可能性、实现马铃薯全粉含量的快速无损检测,

以为市场监管提供一种新的检测方法。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品制备

材料包括马铃薯全粉(甘肃正阳现代农业服务有限公司)、小麦面粉(浙江省粮油食品进出口股份有限公司)。

马铃薯全粉面条制备:将马铃薯全粉和小麦面粉以随机的比例混合,加水和面,醒发,切成面条,自制120个马铃薯全粉质量分数在0~35%之间的面条样品。在自然状态下晾干后密封保存,图1为部分面条样品。



图1 部分面条样品

Fig.1 Some noodle samples

### 1.2 高光谱图像采集

本文采用的高光谱系统包括暗箱(包含可见光与红外的切换机构、底板、支撑架、上下线光源固定座、透射光源、散射光源固定座及遮光外罩,暗箱与位移台匹配使用)、位移台、红外光源(五菱光学,双分支卤素灯光源:400~2500nm)、900~2500nm高光谱成像仪(品牌:Specim,型号:N25E-SWIR)、900~2500nm镜头(品牌:Specim,型号:OLES30,焦距30.7mm)以及一台安装了分析采集软件的计算机。本文采集样品在900~2500nm范围内的高光谱图像,使用系统自带的HSI Analyzer软件提取感兴趣区域,取平均光谱作为样品的光谱数据。

### 1.3 高光谱图像黑白校正

为了提高高光谱数据的准确率并减小光照强度改变对高光谱数据的影响,对采集到的原始高光谱图像进行校正,从而得到光谱相对反射信息,计算公式为<sup>[12]</sup>

$$R_T = \frac{I_{raw} - I_{dark}}{I_{white} - I_{dark}}$$

式中  $R_T$ ——校正后的图像

$I_{raw}$ ——原始高光谱图像

$I_{dark}$ ——黑板标定图像

$I_{white}$ ——白板标定图像

每个获取的图像都是一个三维(3-D)数据立方体,其中包含一组以不同波长依次排列的二维图像<sup>[13]</sup>。高光谱图像可以看作是每个单独像素( $x, y$ )的光谱 $I(l)$ ,也可以看作是每个单独波长 $l$ 的图像 $I(x, y)$ <sup>[14]</sup>。利用五菱光学仪器的光谱分析软件对每个样品的扫描图像进行选择,可以自动得到反射率和波长的光谱数据。利用 The Unscrambler X10.4 软件对光谱的文本文件进行转换,得到以横轴为波长,纵轴为反射率的曲线图像。

从图2中可以看出,所有光谱曲线的波形呈现相同的趋势,在波长高于2251 nm后,光谱呈现不规则的趋势,这是由于扫描过程中的能量过大和降噪效果降低引起的<sup>[15]</sup>,因此本文选用高光谱波长范围为901~2251 nm的波段进行建模。

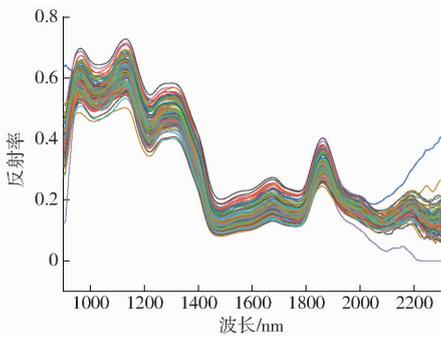


图2 马铃薯面条原始光谱曲线

Fig. 2 Original spectrum curves of potato noodles

#### 1.4 光谱数据处理

在高光谱图像采集过程中,由于环境因素以及高光谱相机暗电流的影响,获得的原始光谱中会包含一些噪声等无用的信息,为了消除这些影响,提高信噪比,需要对原始光谱进行预处理。常用的光谱预处理方法有平滑处理(Smoothing)、标准正态变换(Standard normalized variate, SNV)、多元散射校正法(Multiplicative scattering correction, MSC)、导数法(Derivative)、基线校正(Baseline)、标准化(Normalize)、去趋势(De-trending)等<sup>[16]</sup>。

光谱的定量建模分析即为定量校正,也称多元校正,其原理是在物质浓度(即理化值)与仪器的响应值(即光谱)之间建立一种定量的关联关系<sup>[17]</sup>。对于光谱进行定量分析,常用的方法有偏最小二乘回归(Partial least squares regression, PLSR)、主成分回归(Principal component regression, PCA)、多元线性回归(Multiple linear regression, MLR)、支持向量机回归(Support vector machine regression, SVMR)<sup>[18]</sup>、反向传播神经网络(Back propagation

neural network, BPNN)等。本文通过比较原始全光谱和不同预处理后的全光谱结合不同的建模方法建立的模型效果来筛选出最合适的光谱预处理和建模方法。采用决定系数 $R^2$ 和均方根误差来评价模型效果,一般来说, $R^2$ 越大、均方根误差相对于实测值越小,模型效果越好, $R^2$ 最大值为1,均方根误差最小值为0<sup>[19-20]</sup>。

由于全光谱数据量非常庞大,其中还包含一些无效信息或者重复信息,这些信息会降低校正模型的准确性和稳定性,所以需要对光谱信息进行优化,提取特征波长,用提取的特征波长建立校正模型。常用的特征波长提取方法有逐步回归法、无信息变量消除法、回归系数法、竞争性自适应加权法、连续投影算法、遗传算法、无信息变量消除法、随机蛙跳及间隔随机蛙跳法等<sup>[21]</sup>。本实验特征波长提取采用回归系数法。回归系数在回归方程中表示自变量 $x$ 对因变量 $y$ 影响大小。回归系数越大表示 $x$ 对 $y$ 影响越大,回归系数法是根据回归系数绝对值的大小来选择特征波长。

## 2 结果与讨论

### 2.1 全波段模型效果评价

为了定量分析面条中马铃薯全粉含量,随机选取80个样品作为校正集,分别建立了基于原始光谱和平均移动(Moving average)平滑处理、S-G平滑(Smoothing S-G)、基线校正、标准化、标准正态变换、多元散射校正法预处理后的光谱的PLSR、PCR、SVMR模型,结果如表1所示。

从表中可以看出,基于原始光谱建立的PLSR模型 $R_c^2$ 为0.8257,说明预测值和实际值的相关性较好,PCR模型 $R_c^2$ 为0.7539,SVMR回归模型 $R_c^2$ 为0.7766,预测值与实际值没有很强的相关性。其均方根误差分别为0.0410%、0.0357%、0.0341%,都接近于0,说明模型的预测误差较小、精度较高。PLSR模型明显优于其他两种模型。文献[22]在研究红树叶中的氮含量时,也对比了PLSR和SVMR的建模效果,结果表明在使用所有波段时,PLSR是精度最高的方法。偏最小二乘法集主成分分析、典型相关分析和多元线性回归分析3种分析方法的优点于一身。它与主成分分析法都试图提取出反映数据变异的最大信息,但主成分分析法只考虑一个自变量矩阵,而偏最小二乘法还有一个响应矩阵,因此具有预测功能。

经过标准化预处理建立的PLSR模型的 $R_c^2$ 提高到0.8653,均方根误差降低到0.0360%, $R_{cv}^2$ 也提

高到 0.691 4, 均方根误差降低到 0.055 7%, 模型效果和精度得到了显著提高, 其他预处理方法效果都不好。在 PCR 和 SVMR 模型中, 经过基线校正预处理建立的模型  $R_c^2$  有了显著提高, 但效果仍然不如 PLSR 模型。所以最优的模型为经过标准化预处理建立的 PLSR 模型。

表 1 基于原始及预处理光谱建立的 3 种模型效果

Tab.1 Effects of three models based on original and preprocessed spectra

建模方法	预处理	校正集		交叉验证集	
		$R_c^2$	均方根误差/%	$R_{CV}^2$	均方根误差/%
PLSR	无	0.825 7	0.041 0	0.654 0	0.058 5
	Moving average	0.821 4	0.041 5	0.668 2	0.057 0
	Smoothing S-G	0.820 2	0.041 7	0.674 2	0.056 8
	Baseline	0.822 5	0.041 4	0.745 1	0.050 2
	Normalize	0.865 3	0.036 0	0.691 4	0.055 7
	SNV	0.813 2	0.042 4	0.695 8	0.054 7
	MSC	0.825 5	0.041 0	0.738 6	0.051 0
PCR	无	0.753 9	0.035 7	0.736 1	0.037 9
	Moving average	0.753 9	0.035 7	0.741 4	0.037 9
	Smoothing S-G	0.753 9	0.035 7	0.730 3	0.038 4
	Baseline	0.805 8	0.031 7	0.764 3	0.035 4
	Normalize	0.734 8	0.037 1	0.666 2	0.043 3
	SNV	0.688 5	0.040 2	0.609 1	0.045 1
	MSC	0.694 7	0.039 8	0.638 6	0.044 7
SVMR	无	0.776 6	0.034 1	0.718 7	0.038 4
	Moving average	0.776 3	0.034 1	0.718 5	0.038 4
	Smoothing S-G	0.776 3	0.034 1	0.718 5	0.038 4
	Baseline	0.785 2	0.034 5	0.707 5	0.039 4
	Normalize	0.696 7	0.040 2	0.557 4	0.048 2
	SNV	0.749 2	0.036 4	0.565 4	0.047 5
	MSC	0.753 8	0.036 0	0.556 0	0.048 0

如图 3 所示, 经过标准化预处理后, 原始光谱曲线的噪声、基线漂移、共线性现象消除效果较好。所以, 特征波长建模和预测模型采用标准化处理后的光谱数据进行 PLSR 建模。

### 2.2 特征波长建模

图 4 为标准化预处理后的光谱数据建立的 PLSR 模型的回归系数图, 利用回归系数法提取了马铃薯全粉质量分数的 17 个特征波长。基于特征波长建立了 Normalize - PLSR 简化模型, 模型效果如图 5 所示, 校正集决定系数  $R_c^2$  为 0.868 5, 均方根误差 (RMSEC) 为 0.035 6%, 交叉验证集决定系数  $R_{CV}^2$  为 0.802 1, 均方根误差 (RMSECV) 为 0.044 2%。相对于基于全波长建立的模型, 基于特征波长建立的模型预测效果有了一定的提高, 均方根误差也有所降低, 提高了模型的稳定性。而且极大地简化了模型, 提高了模型的预测效率。大量学者的研究都

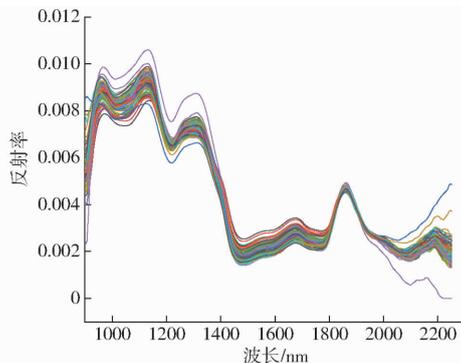


图 3 经标准化预处理后的样本光谱曲线

Fig.3 Spectral curves of sample after standardized pretreatment

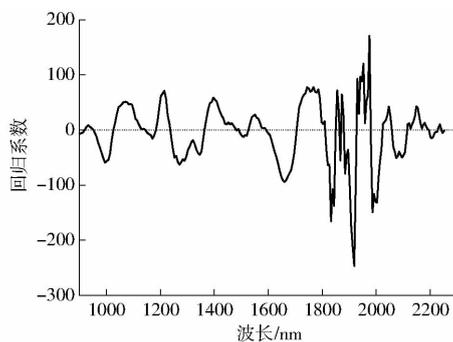


图 4 样品回归系数

Fig.4 Sample regression coefficient diagram

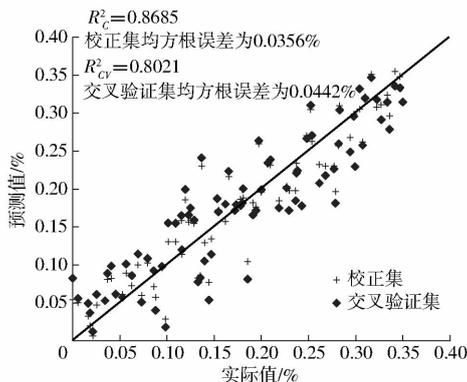


图 5 Normalize - PLSR 简化模型效果

Fig.5 Effect of Normalize - PLSR simplified model

表明合适的特征波长提取方法可以提取相关信息, 去除无用信息和干扰信息, 提高模型的效果<sup>[14]</sup>。说明通过回归系数法提取出来的特征波长可以有效地与面条中马铃薯全粉含量的特征信息进行拟合。

### 2.3 预测模型建立

以其余的 40 个面条样品作为预测集, 基于特征波长建立了面条中马铃薯全粉质量分数的 Normalize - PLSR 简化预测模型。预测集样本实际值和预测值的散点图如图 6 所示,  $R_p^2 = 0.854 6$ , 预测集均方根误差 (RMSEP) 为 0.032 3%, 预测值与实际值有较好的线性关系, 但是也有个别样品偏离回归线较远, 模型可以较好地预测面条中马铃薯全

粉含量。

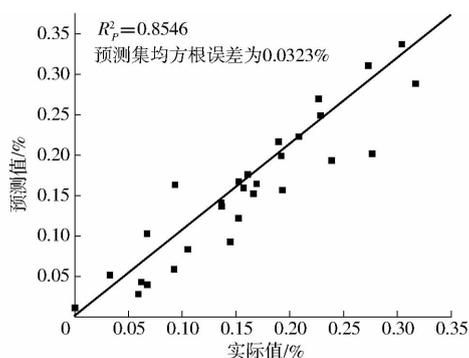


图6 Normalize-PLSR 预测模型效果

Fig.6 Effect of Normalize-PLSR prediction model

### 3 结论

(1) 本文利用近红外高光谱成像技术对面条中

马铃薯全粉含量进行检测,首先获取面条样品的高光谱图像数据并进行校正,然后提取样品的光谱数据,对光谱数据进行预处理,并结合不同的化学计量学建模方法,筛选出最优的光谱预处理方法和建模方法。所建立的模型具有较好的预测效果。

(2) 利用回归系数法提取了与全粉含量相关的特征波长,结合最优的光谱预处理方法和建模方法建立了简化校正模型,结果不仅极大地简化了模型,而且提高了模型的预测效率。

(3) 利用未参与校正模型建立的40个面条样品建立了预测模型,用来验证模型的外部预测效果,结果表明预测模型取得了较好的效果,利用近红外高光谱成像技术检测面条中马铃薯全粉含量是可行的。

### 参 考 文 献

- [1] ARUN K B, CHANDRAN J, DHANYA R, et al. A comparative evaluation of antioxidant and antidiabetic potential of peel from young and matured potato[J]. Food Bioscience, 2015, 9(4):36-46.
- [2] 仇干, 胥心, 邓云. 紫马铃薯全粉-小麦粉混粉的理化特性研究[J]. 食品研究与开发, 2017(3):15-19.  
QIU Gan, XU Xin, DENG Yun. Study on physicochemical properties of purple potato powder and wheat flour blends[J]. Food Research and Development, 2017(3):15-19. (in Chinese)
- [3] VALCARCEL J, REILLY K, GAFFNEY M, et al. Total carotenoids and L-ascorbic acid content in 60 varieties of potato grown in Ireland[J]. Potato Research, 2015, 58(1):29-41.
- [4] JIN H, LI L, CHENG J. Rapid and non-destructive determination of moisture content of peanut kernels using hyperspectral imaging technique[J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(10):2524-2532.
- [5] YANG Q, SUN D W, CHENG W. Development of simplified models for nondestructive hyperspectral imaging monitoring of TVB-N contents in cured meat during drying process[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 192(1):53-60.
- [6] 程丽娟, 刘贵珊, 万国玲, 等. 可见/近红外高光谱成像技术对长枣中葡萄糖含量的无损检测[J]. 发光学报, 2019, 40(8):1055-1063.  
CHENG Lijuan, LIU Guishan, WAN Guoling, et al. Non-destructive detection of glucose content in Lingwu jujube by Vis/NIR hyperspectral imaging technology[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2019, 40(8):1055-1063. (in Chinese)
- [7] 王伟, 姜洪喆, 贾贝贝, 等. 基于高光谱成像的生鲜鸡肉糜中大豆蛋白含量检测[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(12):357-364.  
WANG Wei, JIANG Hongzhe, JIA Beibei, et al. Detection of soybean protein content in fresh minced chicken meat using hyperspectral imaging[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12):357-364. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20191241&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191241&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.041. (in Chinese)
- [8] ERKINBAEV C, DERKSEN K, PALIWAL J. Single kernel wheat hardness estimation using near infrared hyperspectral imaging[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 98:250-255.
- [9] LIU F, HE Y. Classification of brands of instant noodles using Vis/NIR spectroscopy and chemometrics[J]. Food Research International, 2008, 41(5):562-567.
- [10] 陈洁, 魏立立, 王春, 等. 傅里叶变换近红外光谱快速检测方便面油脂含量[J]. 粮食与油脂, 2010(2):41-43.  
CHEN Jie, WEI Lili, WANG Chun, et al. Rapid determination of oil content in instant noodles by Fourier transform near-infrared reflectance spectroscopy[J]. Cereals and Oils, 2010(2):41-43. (in Chinese)
- [11] 吕都, 董楠, 王梅, 等. 近红外光谱法预测面条中马铃薯泥含量模型的建立和应用[J]. 食品与机械, 2019, 35(8):55-58, 95.  
LÜ Du, DONG Nan, WANG Mei, et al. Establishment and application of prediction model for content determination of mashed potato in noodles by NIR spectroscopy[J]. Food and Machinery, 2019, 35(8):55-58, 95. (in Chinese)
- [12] 朱梦远, 杨红兵, 李志伟. 高光谱图像和叶绿素含量的水稻纹枯病早期检测识别[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(6):1898-1904.  
ZHU Mengyuan, YANG Hongbing, LI Zhiwei. Early detection and identification of rice sheath blight disease based on hyperspectral image and chlorophyll content[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(6):1898-1904. (in Chinese)
- [13] ZHANG X, LIU F, HE Y, et al. Application of hyperspectral imaging and chemometric calibrations for variety discrimination of maize seeds[J]. Sensors, 2012, 12(12):17234-17246.

- [17] LEITNER J, HINTERSTOISSER B, WASTYN M, et al. Sugar beet cellulose nanofibril-reinforced composites[J]. *Cellulose*, 2007, 14(5): 419 - 425.
- [18] CHEN W, YU H, LIU Y, et al. Isolation and characterization of cellulose nanofibers from four plant cellulose fibers using a chemical-ultrasonic process[J]. *Cellulose*, 2011, 18(2): 433 - 442.
- [19] ROMAN M, WINTER W T. Effect of sulfate groups from sulfuric acid hydrolysis on the thermal degradation behavior of bacterial cellulose[J]. *Biomacromolecules*, 2004, 5(5): 1671 - 1677.
- [20] 王能, 丁恩勇. 酸碱处理后纳米微晶纤维素的热行为分析[J]. *高分子学报*, 2004, 1(6): 925 - 928.  
WANG Neng, DING Enyong. Thermal behavior of nanocrystalline cellulose treated by acid or alkali [J]. *ACTA Polymerica Sinica*, 2004, 1(6): 925 - 928. (in Chinese)
- [21] WANG N, DING E, CHENG R. Thermal degradation behaviors of spherical cellulose nanocrystals with sulfate groups[J]. *Polymer*, 2007, 48(12): 3486 - 3493.
- [22] LI R, FEI J, CAI Y, et al. Cellulose whiskers extracted from mulberry: a novel biomass production[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 76(1): 94 - 99.
- [23] LAPASIN R, PRICL S, TRACANELLI P. Carboxymethyl starch: a rheological study[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1992, 46(10): 1713 - 1722.
- [24] 崔少宁, 于斌, 卜令玲, 等. 纳米纤维素对普通玉米淀粉糊化特性和流变特性的影响[J]. *粮食与油脂*, 2016, 29(11): 6 - 9.  
CUI Shaoning, YU Bin, BU Lingling, et al. Effect of nanocrystalline cellulose on pasting and rheological properties of common corn starch[J]. *Cereals & Oils*, 2016, 29(11): 6 - 9. (in Chinese)
- [25] WU D, WANG J, ZHANG M, et al. Rheology of carbon nanotubes-filled poly (vinylidene fluoride) composites[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(19): 6705 - 6713.
- [26] ZHOU C, WANG Q, WU Q. UV-initiated crosslinking of electrospun poly (ethylene oxide) nanofibers with pentaerythritol triacrylate: effect of irradiation time and incorporated cellulose nanocrystals[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 87(2): 1779 - 1786.
- [27] 刘梦媛. 壳聚糖的烷基化修饰与凝血性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2018.
- [28] PERESSINI D, BRAVIN B, LAPASIN R, et al. Starch-methylcellulose based edible films: rheological properties of film-forming dispersions[J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 59(1): 25 - 32.

(上接第 470 页)

- [14] TAO F F, PENG Y K, LI Y Y. Feature extraction method of hyperspectral scattering images for prediction of total viable count in pork meat[J]. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2015, 8(4): 95 - 105.
- [15] LIU D, SUN D W, ZENG X A. Recent advances in wavelength selection techniques for hyperspectral image processing in the food industry[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2014, 7(2): 307 - 323.
- [16] CHU X L, YUAN H F, LU W Z. Progress and application of spectral data pretreatment and wavelength selection methods in NIR analytical technique[J]. *Progress in Chemistry*, 2004, 16(4): 528 - 542.
- [17] 陈李品, 于繁千惠, 陶然, 等. 基于高光谱成像技术预测牡蛎干制加工过程中的水分含量[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(7): 261 - 268.  
CHEN Lipin, YU Fanqianhui, TAO Ran, et al. Prediction of moisture content in oyster drying process based on hyperspectral imaging[J]. *J. Chin. Inst. Food Sci. Tech.*, 2020, 20(7): 261 - 268. (in Chinese)
- [18] DING D, LIANG K, LI B, et al. Combining hyperspectral imaging and feature wavelength extraction methods for the rapid discrimination of red meat[J]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2020, 87(2): 296 - 302.
- [19] 邹小波, 陈正伟, 石吉勇, 等. 基于近红外高光谱图像的黄瓜叶片色素含量快速检测[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(5): 152 - 156.  
ZOU Xiaobo, CHEN Zhengwei, SHI Jiyong, et al. Rapid detection of cucumber leaves pigments based on near infrared hyperspectral image technology[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(5): 152 - 156. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20120526&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120526&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.05.026. (in Chinese)
- [20] 赵茂程, 杨君荣, 陆丹丹, 等. 基于高光谱成像的青梅酸度检测方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(9): 318 - 323.  
ZHAO Maocheng, YANG Junrong, LU Dandan, et al. Detection method of greengage acidity based on hyperspectral imaging [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(9): 318 - 323. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170940&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170940&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.040. (in Chinese)
- [21] 徐红梅, 文江, 钟文杰, 等. 基于相关系数与光谱差异法的草莓光谱特征信息提取[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(3): 295 - 301.  
XU Hongmei, WEN Jiang, ZHONG Wenjie, et al. Feature information extraction of strawberry hyperspectral data based on correlation coefficient method and spectral difference analysis[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2017, 38(3): 295 - 301. (in Chinese)
- [22] AXELSSON C, SKIDMORE A K, SCHLEF M, et al. Hyperspectral analysis of mangrove foliar chemistry using PLSR and support vector regression[J]. *International Journal for Remote Sensing*, 2013, 34(5 - 6): 1724 - 1743.