

基于近红外光谱技术的紫薯贮藏期间花青素含量检测

田潇瑜 黄星奕 白峻文 吕日琴 孙兆燕

(江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013)

摘要: 紫薯采后贮藏过程中,受环境因素影响,紫薯花青素会逐渐发生降解,导致紫薯色泽变化,营养品质下降。应用近红外光谱技术对贮藏期间的紫薯花青素含量变化进行了分析,建立了快速无损检测模型。实验采集了不同贮藏时间紫薯样本(120个)的近红外光谱,基于全波长范围 $4\,000 \sim 10\,000\text{ cm}^{-1}$ 结合不同光谱信号预处理方法(数据卷积平滑、一阶求导、标准正态变量变换(SNV))建立紫薯花青素的PLS(偏最小二乘)、SNV-PLS、iPLS(区间偏最小二乘)、GA-PLS(遗传算法-偏最小二乘)定量预测模型。结果显示,全波段经SNV为最优的原始光谱预处理方法。对经SNV预处理的光谱进行iPLS/GA特征波段筛选,所建立的GA-PLS模型预测效果最佳,预测集决定系数 R_p^2 和均方根误差为0.913 6和7.239 8 mg/(100 g),剩余预测偏差为3.339 7。研究结果表明,应用近红外光谱技术可以较好地检测紫薯花青素含量,研究结果可为紫薯加工原料智能筛选以及贮藏品质监测提供一种可靠手段。

关键词: 紫薯; 花青素; 近红外光谱; 偏最小二乘回归; 遗传算法

中图分类号: O657.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0350-06

Detection of Anthocyanin Content of Purple Sweet Potato during Storage Period Based on Near Infrared Spectroscopy

TIAN Xiaoyu HUANG Xingyi BAI Junwen LÜ Riqin SUN Zhaoyan

(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Anthocyanin in purple sweet potato is easy to degrade due to environmental factors during the storage, resulting in changes of purple sweet potato color and reduction of nutritional quality. The changes of anthocyanin in purple sweet potato during storage were analyzed by using near-infrared spectroscopy, and rapid and nondestructive testing model was established. The near-infrared spectra of 120 purple sweet potato samples were collected at different storage times (0 d, 2 d, 4 d, 6 d, 8 d, 10 d, 12 d, 14 d, 16 d, 18 d, 22 d and 30 d). In the spectral region between $4\,000\text{ cm}^{-1}$ and $10\,000\text{ cm}^{-1}$, statistical mathematical models of anthocyanins in purple sweet potato were established with different preprocessing methods (Savitzky-Golay, first derivation and standard normal variate) using the partial least squares (PLS, SNV-PLS, iPLS and GA-PLS) methods. The results showed that standard normal variate (SNV) transformation was the best preprocessing approach. The iPLS and GA methods were used to select characteristic wavelengths, and the GA-PLS model was the best among the models developed, the R_p^2 and root mean square error of validation values were 0.913 6 and 7.239 8 mg/(100 g), the residual predictive deviation value was 3.339 7. The optimal prediction model was verified, where the R_p^2 and root mean square error were 0.831 4 and 10.766 3 mg/(100 g), respectively, and the residual sum was -10.041 7 mg/(100 g). These results confirmed the feasibility of using near-infrared spectroscopy for the non-destructive detection of anthocyanin of purple sweet potato, which can provide a reliable method for intelligent screening of raw materials of purple sweet potato and quality monitoring during storage.

Key words: purple sweet potato; anthocyanin; near-infrared spectroscopy; partial least squares; genetic algorithm

收稿日期: 2018-08-24 修回日期: 2018-10-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0401302)和江苏省博士后科研计划项目(1501068C)

作者简介: 田潇瑜(1987—),女,讲师,博士,主要从事农产品无损检测研究,E-mail: tianxiaoyu@163.com

通信作者: 黄星奕(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事农产品、食品品质无损检测研究,E-mail: h_xingyi@163.com

0 引言

紫薯果肉内部呈深紫色,富含蛋白质、淀粉、维生素、膳食纤维以及花青素等多酚类物质,属于营养价值和功能价值兼备的粮食作物^[1-3],是近年来发展起来的具有特定保健功能的新型食品资源^[4]。多项研究表明,紫薯花青素具有抗氧化性^[5],对机体有降血脂^[6]、保护肝脏功能^[7]等生理活性,是一种重要的抗氧化剂^[8-9];相比于红甘蓝、葡萄皮、接骨木和紫玉米中的花青素有更好的自由基清除活性^[10]。此外,紫薯花青素对饮料和糕点食品类的染色能力较强,还可作为食品天然着色剂,在多个国家被允许用于食品着色^[11]。

紫薯在采后运输和实际生产中,因其新鲜薯块组织脆嫩、含水率高、呼吸旺盛等特点,其花青素对温度、光照、酸碱性以及氧化还原剂等因素敏感^[12],不适宜的贮藏条件易导致多酚类有益成分变化,花色苷降解,引起食品色泽的变化^[13],造成营养品质下降。对紫薯原料收储运环节的花青素含量加以检测,可以实现紫薯加工环节前的原料筛选,指导紫薯产品标准化和规模化。

花青素检测方法有很多,比如液相色谱法(HPLC)^[14]、分光光度计法^[15]、光谱技术^[16]、机器视觉技术^[17]等。相较于常规理化检测方法,光谱技术具有检测速度快、无损伤等特点,尤其是近红外光谱能够反映分子基团倍频、合频振动信息,实现特征组分的定量和定性分析。目前已有针对农作物内花青素的红外光谱检测研究,如近红外光谱技术检测蓝莓总黄酮、花青素^[18],可见及近红外光谱检测牡丹叶片花青素含量^[19],还有应用高光谱成像技术测定紫薯切片干燥过程中的花青素含量及分布^[20],但是目前对紫薯贮藏过程中花青素变化快速检测研究较少。本文研究恒温恒湿贮藏条件下,应用近红外光谱技术检测紫薯贮藏过程中花青素的变化情况,构建快速检测花青素含量的模型,对比得到稳定可靠的预测模型,实现贮藏过程中紫薯品质监测。

1 材料与方法

1.1 原材料处理

实验所用紫薯原料品种为徐紫薯1号,购于江苏省镇江市京口区欧尚超市,选取大小适中、表面无破损划伤割伤、无虫洞、形状统一的新鲜紫薯,清洗干净。将新鲜紫薯放恒温恒湿箱中在温度20℃、相对湿度45%条件下贮藏30 d。采取简单随机取样法,在不同贮藏时间(第0、2、4、6、8、10、12、14、16、18、22、30天)进行取样,每个贮藏时间取10个样

品,共计120个样品,进行紫薯近红外光谱采集及花青素含量理化测定。

1.2 花青素含量测定

采用改进的pH示差法^[21]测定紫薯花青素含量。称取约1.5 g样品于研钵中,加入少许石英砂和少许1% HCl-乙醇溶液充分研磨,用提取溶剂分次冲洗研钵并转移至离心管,并用提取溶液定容至30 mL,超声30 min,取出冷却至室温(20℃),再在离心机5 000 r/min的条件下离心10 min,取出。分别取上层清液1 mL于2支试管,分别加入pH值1.0、pH值4.5的缓冲液3 mL,充分摇匀后分别在530 nm及700 nm波长处测定吸光度。进行3次平行实验。花青素总含量以滤液中矢车菊素-3-葡萄糖甙含量计算,其计算公式为

$$O = [A_{530, \text{pH}1.0} - A_{700, \text{pH}1.0} - (A_{530, \text{pH}4.5} - A_{700, \text{pH}4.5})] \frac{M_w D_F}{EL} \tag{1}$$

式中 O ——总花青素质量浓度,mg/mL
 A ——各pH值下不同波长所测吸光度
 M_w ——矢车菊素-3-葡萄糖甙的分子量,取449.2
 D_F ——稀释倍数
 E ——矢车菊素-3-葡萄糖甙的分子吸光率常数,取26 900
 L ——比色皿光程,取1 cm

1.3 近红外光谱采集与预处理

使用Antaris II FT-NIR型近红外光谱仪(美国赛默飞世尔公司)采集紫薯样品的漫反射光谱。光谱采集条件:以仪器内置背景为参比,波数范围为4 000~10 000 cm^{-1} ,扫描次数为16次,分辨率为8 cm^{-1} ,每条光谱包含1 557个变量。每个样品采集其赤道区4点的光谱曲线,求其平均光谱作为原始光谱。

经扫描获得的近红外光谱数据由于受到高频随机噪声、基线漂移、样品背景的影响,会降低所建模型的可靠性和稳定性。因此处理数据前,可对采集的光谱数据进行合理的预处理,减弱甚至消除噪声对建模数据的影响。常用的预处理包括标准正态变量变换(SNV)、数据卷积平滑(S_G)、多元散射校正(MSC)以及一阶求导等方法,以提高信噪比和灵敏度。同时,由于近红外光谱变量个数较多,为提高运算速度,去除冗余信息,进一步降低输入变量个数,可采用遗传算法(GA)、联合区间等方法。

1.4 数据处理方法

将120个样本随机划分为校正集(90个)和预测集(30个),结合光谱数据与花青素标定值,采用

PLS(偏最小二乘法)、SNV-PLS、iPLS(区间偏最小二乘)、GA-PLS 建立花青素的定量预测模型。模型性能一般根据决定系数(R^2)评价,包括校正集决定系数 R_c^2 、预测集决定系数 R_p^2 、预测决定系数 R_p^2 和均方根误差,还增加了剩余预测偏差(Residual predictive deviation,RPD),用以衡量预测模型的稳定性。

2 结果与分析

2.1 贮藏期间紫薯花青素含量变化分析

紫薯贮藏期间花青素含量统计结果如表 1 所示,整体来看,贮藏期间紫薯花青素含量下降趋势显著。贮藏开始时新鲜紫薯花青素含量(质量比)均值达到 83.497 8 mg/(100 g),随着贮藏时间的延长,花青素含量下降趋势有所减缓,当贮藏至 30 d 时,花青素含量降至 14.637 7 mg/(100 g)。这主要由于在贮藏过程中,花青素的稳定性容易受到温度、光照、氧气等因素的影响,使其发生降解,其内部酚类物质也发生变化导致抗氧化活性相应下降^[22]。观察样品外表,发现其色泽和质地均发生变化,这是由于紫薯内部花色苷和多酚类化合物发生缩合反应,而其反应产物不稳定会进一步降解成无色或棕色的化合物^[4],也是紫薯品质下降的主要原因^[13]。

表 1 贮藏期间花青素含量统计分析					
Tab.1 Statistics analysis of anthocyanins contents					
贮藏 时间/d	花青素质量比/(mg·(100 g) ⁻¹)				变异 系数
	最小值	最大值	平均值	标准差	
0	67.453 9	98.230 3	83.497 8	9.073 2	0.108 7
2	60.230 4	93.700 7	75.479 8	10.407 6	0.137 9
4	47.937 9	91.812 2	62.582 8	12.584 9	0.201 1
6	36.869 9	76.550 4	56.843 8	13.980 4	0.245 9
8	31.994 8	78.537 2	54.345 3	13.032 8	0.239 8
10	29.498 4	55.182 8	42.021 7	8.678 1	0.206 5
12	26.926 8	49.957 4	37.502 1	7.471 6	0.199 2
14	17.593 0	36.875 3	27.186 7	6.532 4	0.240 3
16	12.704 9	36.769 4	25.883 6	7.712 6	0.298 0
18	10.085 4	37.465 4	19.465 3	7.851 4	0.403 4
22	7.908 4	23.776 6	15.533 8	5.509 7	0.354 7
30	7.937 9	19.737 3	14.637 7	3.211 0	0.219 4

2.2 近红外光谱分析

贮藏过程不同时间采集的紫薯样本光谱如图 1(图中 R 表示反射率)所示,由图 1a 可知,随着紫薯贮藏时间的增加,紫薯的光谱变化趋势基本保持一致,但由于其内部相应基团含量的变化使吸收强度有所变化。从原始光谱图中可以看到 3 个明显的特征峰,分别位于 5 000、6 900、8 400 cm^{-1} 附近。5 200 cm^{-1} 和 8 400 cm^{-1} 附近主要是水分的吸收峰,

贮藏期间紫薯样品逐渐失水收缩,因此含水率降低导致了光谱吸收强度降低,当贮藏时间达到 30 d 时,此处的光谱吸收峰与新鲜状态已有较明显的差异。吸收峰 6 900 cm^{-1} 附近可能是 C—H、—CH₂ 基团发生变化导致的^[18],同样该波数附近也存在水的吸收峰。而 4 300~5 000 cm^{-1} 波段是一个较为明显的特征指纹区,C—H 基团以及 O—H 基团的合频振动处于此波段内^[23],可能是由于贮藏过程中紫薯内的化学成分在相关酶的作用下发生变化,使其含氢官能团变化^[24]。另外薯类淀粉发生降解,从而导致糖类化合物的变化^[25]。紫薯原始光谱经预处理后的光谱曲线如图 1b 所示,经过 SNV 校正后可有效消除光强衰弱引起的噪声,使原始光谱数据标准正态化,同时也能够较好地保留紫薯的全波段光谱信息^[26]。

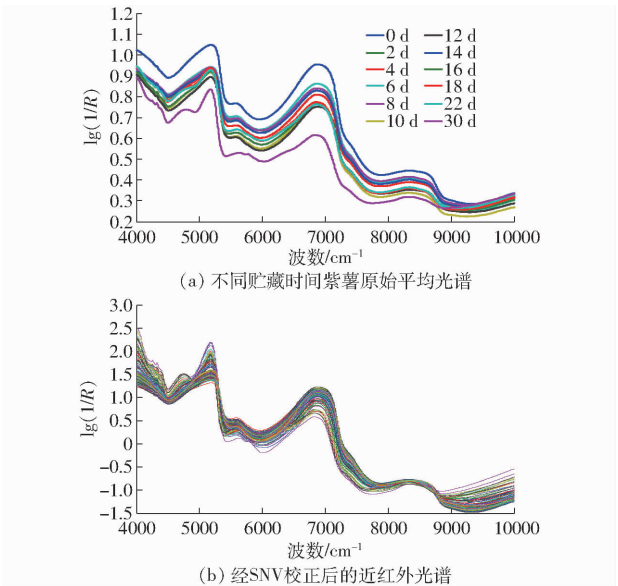


图 1 紫薯近红外光谱
Fig.1 Near infrared spectra of purple sweet potato at different storage times

2.3 紫薯花青素预测模型

2.3.1 全波段预测模型

首先建立基于全波段的偏最小二乘回归预测模型,并对原始光谱进行 S_G 平滑(设置窗口参数为 11)、一阶求导(D1)、标准正态变量变换(SNV)等预处理,构建的模型预测结果如表 2 所示。

由表 2 可知,预测效果较好的是原始光谱经 S_G 平滑、SNV 预处理的 PLS 模型,其预测集决定系数和预测集均方根误差分别为 0.857 3、0.846 4 和 9.932 5、9.932 6 mg/(100g),且剩余预测偏差大于 2,模型精度较好^[27]。而经一阶求导建立的预测模型,其均方根误差较高,预测的偏差较大,对应剩余预测偏差小于 2.0,因此所构建的预测模型稳息有限,

表 2 基于全波段的花青素预测模型结果分析

Tab.2 Result of prediction model of anthocyanin content based on full range of wavelength						
建模方法	主成分数	R_c^2	校正集均方根误差/ ($\text{mg} \cdot (100\text{g})^{-1}$)	R_v^2	预测集均方根误差/ ($\text{mg} \cdot (100\text{g})^{-1}$)	剩余预测偏差
PLS	12	0.900 2	6.860 9	0.836 1	10.303 1	2.346 8
S_G-PLS	13	0.913 0	6.406 2	0.857 3	9.932 5	2.434 3
D1-S_G-PLS	6	0.833 6	8.855 1	0.777 2	12.346 4	1.958 4
SNV-PLS	11	0.894 3	7.058 1	0.846 4	9.932 6	2.434 3

定性较差。且 SNV-PLS 模型所选用的潜变量(LV)数较少,故后续实验数据均采用 SNV 校正处理。

2.3.2 基于特征波长的预测模型分析

为了进一步降低变量个数,提高运算效率和模型稳定性,本研究采用了区间偏最小二乘(iPLS)、

遗传算法-偏最小二乘法(GA-PLS)对特征波段的筛选,预测结果如表 3 所示。应用 iPLS 函数将全光谱划分为 20 个区间,经计算得到第 2 区间(4 400 ~ 4 790 cm^{-1})的均方根误差最小,该区间内含有 C—H 基团以及 O—H 基团的合频振动信息,也是不同

表 3 基于特征波段的花青素预测模型结果分析

Tab.3 Result of prediction model of anthocyanin content based on selected wavelength							
建模方法	变量数	波数/ cm^{-1}	R_c^2	校正集均方根误差/ ($\text{mg} \cdot (100\text{g})^{-1}$)	R_v^2	预测集均方根误差/ ($\text{mg} \cdot (100\text{g})^{-1}$)	剩余预测偏差
iPLS	103	4 400 ~ 4 790	0.817 2	9.278 8	0.572 7	16.280 4	1.485 2
siPLS	415	4 000 ~ 4 790	0.923 1	6.017 2	0.904 8	7.687 7	3.145 1
GA-PLS	129	7 200 ~ 7 590	0.916 0	6.289 5	0.913 6	7.239 8	3.339 7
GA-siPLS	101	8 400 ~ 8 800	0.915 8	6.300 6	0.875 0	8.732 3	2.768 9

贮藏期间紫薯的主要特征区间。然而单个区间的信息有限,其预测效果较差。基于此建立的 siPLS(组合区间偏最小二乘)模型,联合了 3 个区间(4 000 ~ 4 790 cm^{-1} 、7 200 ~ 7 590 cm^{-1} 、8 400 ~ 8 800 cm^{-1})的变量,还包含了 C—H、—CH₂基团特征信息以及水的特征峰,因此预测精度大大提高,其预测集决定系数和均方根误差为 0.904 8 和 7.687 7 $\text{mg}/(100\text{g})$,剩余预测偏差达到 3 以上。研究对比采用了遗传算法,分别从全波段和优化的联合区间中进行变量筛选,将变量从1 557 个降低至 129、101 个,预测效果都优于全波段建模。综合表 2、3 的预测结果,对花青素含量预测最佳的模型为 GA-PLS 模型,其预测集决定系数 R_v^2 和均方根误差为 0.913 6 和 7.239 8 $\text{mg}/(100\text{g})$,剩余预测偏差达到 3.339 7,如图 2 所示。

对比结果表明,siPLS 和 GA-PLS 模型均能够简化模型,优选的波长信息也均包含了特征基团对应的吸收峰,不仅提高了模型预测精度,而且剩余预测偏差均达到 3 以上,模型具备较高的鲁棒性。

2.4 模型验证

为检验所建模型的稳定性和可靠性,重新采集样本进行模型验证。验证实验采用与建模时相同品种和贮藏条件的紫薯样品,采集不同贮藏时间(0 ~ 20 d)的紫薯样品,共采集 35 个样本。经近红外光谱扫描并进行 SNV 预处理和 GA 遗传算法提取特征波长,代入 GA-PLS 模型预测,不同贮藏时间紫

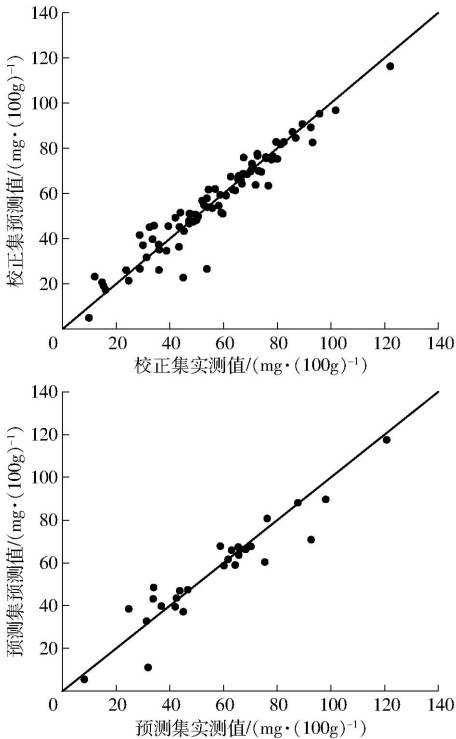


图 2 花青素 GA-PLS 模型实测值和预测值相关性
Fig.2 Correlation between predicted values of GA-PLS model and actual values of anthocyanin contents

薯花青素预测结果和实际标定值对比分析结果如图 3 所示。预测结果表明,花青素含量预测决定系数 R_p^2 和均方根误差为 0.831 4 和 10.766 3 $\text{mg}/(100\text{g})$ 。预测结果低于原模型结果,这主要因为贮藏环境因

素、紫薯样本之间的差异性影响,同时紫外分光光度计的仪器误差以及测定过程中的人为误差也会影响花青素含量的测定。

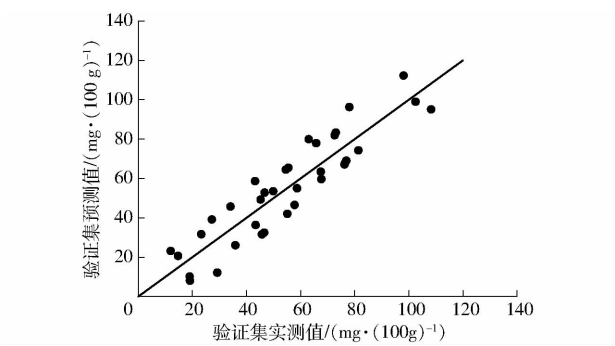


图 3 花青素实测值与预测值相关性
Fig.3 Correlation between predicted values and actual values of anthocyanin contents

由图 4 可以看出,花青素残差分布分散,其残差和为 $-10.0417\text{ mg}/(100\text{g})$,这主要是因为验证模型采样选取了整个贮藏过程不同时间的紫薯,其花青素含量本身具有较大差异,分布范围较广,离散性较大。经计算,验证集的剩余预测偏差为 2.3504 ,说明该预测模型稳定性较好,可以实现对贮藏期间紫薯花青素含量的快速检测。

3 结束语

以贮藏期间的紫薯为研究对象,应用近红外光谱

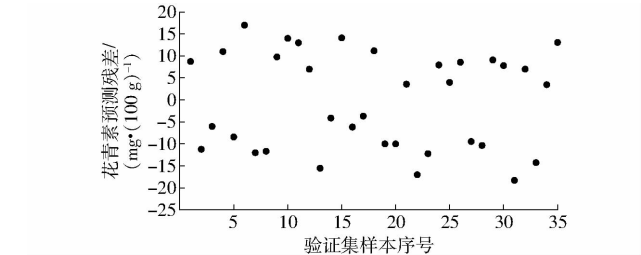


图 4 验证集样本花青素预测残差分布
Fig.4 Distribution of residual error of validation samples anthocyanins contents

技术对其花青素含量变化进行了分析,建立了快速无损检测模型。研究基于全波段($4\,000\sim10\,000\text{ cm}^{-1}$)并结合不同光谱信号预处理方法(S_G 平滑、一阶求导、标准正态变量变换(SNV))建立紫薯花青素含量的偏最小二乘(PLS)定量预测模型,优选出 SNV 法为最优的原始光谱预处理方法。对经 SNV 预处理的光谱进行 iPLS、GA 特征波长筛选,所建立的 GA-PLS 模型预测效果最佳,预测集决定系数 R_v^2 和均方根误差为 0.9136 和 $7.2398\text{ mg}/(100\text{g})$,剩余预测偏差为 3.3397 。对最佳预测模型进行验证,35 个未知样本花青素含量的预测决定系数和均方根误差分别为 0.8314 和 $10.7663\text{ mg}/(100\text{g})$,残差和为 $-10.0417\text{ mg}/(100\text{g})$ 。研究结果表明,应用近红外光谱技术可以较好地预测紫薯花青素含量,为紫薯原料品质评价提供方法依据。

参 考 文 献

[1] 蔡湛,兰余,赵淑娟,等.紫薯的抗氧化及活性成分研究[J].粮食与油脂,2015(1):43-48.
CAI Zhan, LAN Yu, ZHAO Shujuan, et al. Study on composition analysis and antioxidant activity of purple sweet potato [J]. Cereals & Oils, 2015(1):43-48. (in Chinese)

[2] 温桃勇,刘小强.紫色甘薯营养成分和药用价值研究进展[J].安徽农业科学,2009,37(5):1954-1956.
WEN Taoyong, LIU Xiaoqiang. Research progress on nutritive components and medicinal value of purple sweet potato [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(5):1954-1956. (in Chinese)

[3] REYES L F, MILLER J C, CISNEROS-ZEVALLOS L. Antioxidant capacity, anthocyanins and total phenolics in purple- and red-fleshed potato (*Solanum tuberosum*, L.) genotypes[J]. American Journal of Potato Research, 2005, 82(4):271-277.

[4] 高林,刘妍,廖小军,等.紫薯泥产品开发和贮藏期品质研究[J].食品研究与开发,2016,37(16):193-197.
GAO Lin, LIU Yan, LIAO Xiaojun, et al. Development of purple sweet potato processed products and its qualities on storage life[J]. Food Research and Development, 2016, 37(16):193-197. (in Chinese)

[5] 罗春丽,王林,李杏,等.紫薯花青素体外抗氧化及对 H_2O_2 诱导 HepG2 细胞氧化损伤的保护作用[J].食品科学,2015,36(17):225-230.
LUO Chunli, WANG Lin, LI Xing, et al. Antioxidant activities and protective effect of anthocyanins from purple sweet potato on HepG2 cell injury induced by H_2O_2 [J]. Food Science, 2015, 36(17):225-230. (in Chinese)

[6] 张慢,潘丽军,姜绍通,等.紫薯花青素降血脂及抗氧化效果[J].食品科学,2014,35(19):246-250.
ZHANG Man, PAN Lijun, JIANG Shaotong, et al. Hypolipidemic and antioxidant effects of anthocyanins from purple sweet potato in rats [J]. Food Science, 2014, 35(19):246-250. (in Chinese)

[7] YOSHIMOTO M, OKUNO S, YAMAGUCHI M, et al. Antimutagenicity of deacylated anthocyanins in purple-fleshed sweetpotato[J]. Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan, 2001, 65(7):1652-1655.

[8] MATSUI T, EBUCHI S, KOBAYASHI M, et al. Anti-hyperglycemic effect of diacylated anthocyanin derived from *Ipomoea batatas* cultivar ayamurasaki can be achieved through the alpha-glucosidase inhibitory action[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(25):7244-7248.

[9] LI J, SONG H, DONG N, et al. Degradation kinetics of anthocyanins from purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) as affected by ascorbic acid[J]. Food Science & Biotechnology, 2014, 23(1):89-96.

[10] WANG S M, YU D J, SONG K B. Quality characteristics of purple sweet potato (*Ipomoea batatas*) slices dehydrated by the addition of maltodextrin[J]. Horticulture, Environment and Biotechnology, 2011, 52(4):435.

- [11] 付红岩, 李自强, 姚晶, 等. 金属离子和食品添加剂对紫甘薯花色苷稳定性的影响[J]. 食品工业科技, 2007, 34(11): 67–69.
FU Hongyan, LI Ziqiang, YAO Jing, et al. Effect of metal ions and food additives on stability of anthocyanins pigment from purple sweet potato[J]. Science and Technology of Food Industry, 2007, 34(11): 67–69. (in Chinese)
- [12] 李杰, 李喜宏, 张继明, 等. 紫薯最适贮藏保鲜温度研究[J]. 食品科技, 2017, 42(12): 56–59.
LI Jie, LI Xihong, ZHANG Jiming, et al. Research of different storage temperatures on fresh-keeping of purple potato[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(12): 56–59. (in Chinese)
- [13] PATRAS A, BRUNTON N P, O'DONNELL C, et al. Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2010, 21(1): 3–11.
- [14] JIE L, LI X D, YUN Z, et al. Identification and thermal stability of purple-fleshed sweet potato; anthocyanins in aqueous solutions with various pH values and fruit; juices[J]. Food Chemistry, 2013, 136(3–4): 1429–1434.
- [15] XU Z, WU J, ZHANG Y, et al. Extraction of anthocyanins from red cabbage using high pressure CO₂[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(18): 7151–7157.
- [16] 李艳肖, 黄晓玮, 邹小波, 等. 蚁群-遗传算法优化近红外光谱检测花茶花青素含量的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(6): 1679–1686.
LI Yanxiao, HUANG Xiaowei, ZOU Xiaobo, et al. Application of ACO-iPLS and GA-iPLS for wavelength selection in NIR spectroscopy[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2014, 5(6): 1679–1686. (in Chinese)
- [17] 雷静. 基于计算机视觉技术的番茄花青素含量检测[J]. 农机化研究, 2018, 40(3): 193–197.
LEI Jing. Study on the detection of tomato anthocyanin content based on computer vision technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(3): 193–197. (in Chinese)
- [18] 刘小路, 薛璐, 鲁晓翔, 等. 近红外光谱技术快速无损检测蓝莓总黄酮、花青素的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 58–61.
LIU Xiaolu, XUE Lu, LU Xiaoxiang, et al. Fast non-destructive testing of total flavonoids and anthocyanins in blueberries by near-infrared spectroscopy[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(16): 58–61. (in Chinese)
- [19] 刘秀英, 申健, 常庆瑞, 等. 基于可见/近红外光谱的牡丹叶片花青素含量预测[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 319–324.
LIU Xiuying, SHEN Jian, CHANG Qingrui, et al. Prediction of anthocyanin content in peony leaves based on visible /near-infrared spectra[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 319–324. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150947&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.047. (in Chinese)
- [20] LIU Y, SUN Y, XIE A, et al. Potential of hyperspectral imaging for rapid prediction of anthocyanin content of purple-fleshed sweet potato slices during drying process[J]. Food Analytical Methods, 2017, 10(12): 3836–3846.
- [21] FARAH S H, LI W, TRUST B. Measurement of anthocyanins and other phytochemicals in purple wheat[J]. Food Chemistry, 2008, 109(4): 916–924.
- [22] WANG Y, LIU F, CAO X, et al. Comparison of high hydrostatic pressure and high temperature short time processing on quality of purple sweet potato nectar[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 16: 326–334.
- [23] 邹小波, 崔雪平, 石吉勇, 等. 基于近红外与中红外光谱技术的淀粉回生度检测[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 341–346.
ZOU Xiaobo, CUI Xueping, SHI Jiyong, et al. Detection of retrogradation degree of starch based on near-infrared and mid-infrared spectroscopy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 341–346. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180342&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.042. (in Chinese)
- [24] 宁坚刚, 魏永生, 耿薇, 等. 全谱直读电感耦合等离子体发射光谱法测定青海蕨麻中矿质元素[J]. 食品科技, 2012, 37(10): 253–256.
NING Jian'gang, WEI Yongsheng, GENG Wei, et al. Determination of mineral elements in roots of *Potentilla anserine* L. from Qinghai by inductively coupled plasma optical emission spectrometer[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(10): 253–256. (in Chinese)
- [25] 李庆波, 张鲁, 汪日燕, 等. 葡萄糖水溶液浓度的近红外光谱测量法: 人体血糖浓度无创伤测量方法基础研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2004, 23(6): 602–606.
LI Qingbo, ZHANG Lu, WANG Riyan, et al. Near-infrared spectroscopic measurement of glucose concentrations in an aqueous matrix-fundamental study on noninvasive measurement method of human blood glucose concentration[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2004, 23(6): 602–606. (in Chinese)
- [26] 惠光艳, 孙来军, 王佳楠, 等. 可见-近红外光谱的小麦硬度预测模型预处理方法的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(7): 2111–2116.
HUI Guangyan, SUN Laijun, WANG Jia'nan, et al. Research on the pre-processing method of wheat hardness prediction model based on visible-near infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(7): 2111–2116. (in Chinese)
- [27] 焦爱权, 徐学明, 金征宇. 基于近红外及中红外光谱融合技术快速检测黄酒中的总酚含量及其抗氧化能力[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(4): 357–363.
JIAO Aiquan, XU Xueming, JIN Zhengyu. Comparison and joint use of FT-NIR and ATR-IR spectroscopy for the determination of total antioxidant capacity and total phenolic content of Chinese rice wine[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2016, 35(4): 357–363. (in Chinese)