

# 近红外光谱技术在甘薯品质检测方面的应用研究进展

何鸿举<sup>1</sup>, 王婧茹<sup>1</sup>, 刘红<sup>2</sup>, 陈岩<sup>1</sup>, 王玉玲<sup>3</sup>, 欧行奇<sup>3</sup>, 张勉<sup>3,\*</sup>, 刘鸿杰<sup>4</sup>, 郭景丽<sup>5</sup>

(1.河南科技学院食品学院, 河南 新乡 453003; 2.海南师范大学化学与化工学院, 海口市热带特色药食同源植物研究与开发重点实验室, 海南 海口 571158; 3.河南科技学院生命科技学院, 河南 新乡 453003; 4.广西大学化学化工学院, 广西南宁 530004; 5.河南心连心化学工业集团股份有限公司, 河南 新乡 453700)

**摘要:**甘薯是一种药食兼用且低热量的块根状食物, 其富含多种人体必需的营养物质和生物活性成分, 可用于预防多种疾病。甘薯品质的优劣直接影响其产品质量、分类分级及经济价值。快速、高效的检测技术在保障甘薯品质和安全方面可发挥重要作用。基于近红外光谱(near-infrared spectroscopy, NIRS)技术快速检测分析甘薯品质的研究已有不少报道。本文全面综述了NIRS技术在甘薯理化组分(蛋白质、淀粉、糖类、水分等)、活性成分(黄酮类物质、类胡萝卜素等)、制品掺假以及其他(品种鉴定、重金属、微生物污染等)等方面的研究及应用进展, 同时提出了NIRS技术在甘薯品质检测应用方面的发展趋势和研究重点, 以期为进一步完善NIRS在甘薯品质快速评价研究和相关快检设备研发方面提供更多借鉴。

**关键词:**近红外光谱; 甘薯; 品质; 检测

## Recent Advances in the Application of Near-Infrared Spectroscopy in Quality Detection of Sweet Potato

HE Hongju<sup>1</sup>, WANG Jingru<sup>1</sup>, LIU Hong<sup>2</sup>, CHEN Yan<sup>1</sup>, WANG Yuling<sup>3</sup>, OU Xingqi<sup>3</sup>, ZHANG Mian<sup>3,\*</sup>, LIU Hongjie<sup>4</sup>, GUO Jingli<sup>5</sup>

(1. School of Food Science, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China; 2. Haikou Key Laboratory of Research and Development on Topical and Special Medicine and Edible Plant, College of Chemistry and Chemical Engineering, Hainan Normal University, Haikou 571158, China; 3. School of Life Science and Technology, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China; 4. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 5. Henan Xinlianxin Chemical Industry Co., Ltd., Xinxiang 453700, China)

**Abstract:** Sweet potato is a kind of low-calorie root food that has also been used for medicinal purpose. It is rich in a variety of essential nutrients and bioactive ingredients for the human body, and can be used to prevent various diseases. The quality of sweet potato directly affects its product quality, classification and quality grading and economic value. Rapid and efficient detection technologies play an important role in ensuring the quality and safety of sweet potato. Many studies on the rapid detection and analysis of sweet potato quality based on near-infrared spectroscopy (NIRS) have been reported. This paper comprehensively summarizes recent progress in the application of NIRS in the detection of the general chemical components (protein, starch, sugar, and water), active components (flavonoids and carotenoids), adulterants, heavy metals and microbial contamination in sweet potato as well as in its varietal identification. Moreover, this paper proposes future trends and research priorities for the application of NIRS in the quality detection of sweet potato. This review is expected to provide more references for further improvement of rapid quality assessment of sweet potato by NIRS and for the development of related fast testing equipment.

**Keywords:** near-infrared spectroscopy; sweet potato; quality; detection

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221030-307

中图分类号: TS207.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)21-0341-10

收稿日期: 2022-10-30

基金项目: 河南省科技攻关项目(222102110113); 河南科技学院横向科研项目(2021410707000060);

海口市重点科技计划项目(2021-034)

第一作者简介: 何鸿举(1983—)(ORCID: 0000-0001-7112-5909), 男, 副教授, 博士, 研究方向为农产品/食品质量分析与快速检测。E-mail: hongju.he@hist.edu.cn

\*通信作者简介: 张勉(1978—)(ORCID: 0000-0001-7290-3274), 男, 副教授, 博士, 研究方向为天然活性物质的分离鉴定。E-mail: kane35@163.com

引文格式:

何鸿举, 王婧茹, 刘红, 等. 近红外光谱技术在甘薯品质检测方面的应用研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 341-350. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221030-307. <http://www.spkx.net.cn>

HE Hongju, WANG Jingru, LIU Hong, et al. Recent advances in the application of near-infrared spectroscopy in quality detection of sweet potato[J]. Food Science, 2023, 44(21): 341-350. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221030-307. <http://www.spkx.net.cn>

甘薯 (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) 是一种重要的块根类粮食作物, 富含淀粉、糖类化合物、膳食纤维、黄酮类化合物、多酚类化合物等多种营养和生物活性成分, 具有良好的保健功效, 如抗肿瘤、抗氧化、降血脂、降血糖等<sup>[1-2]</sup>。随着生活物资的不断丰富和生活品质的逐步提高, 消费者越来越注重健康饮食。甘薯作为一种低热量兼具高保健性能的食品广受消费者青睐, 其品质的优劣日益受到关注。甘薯品质一般涉及诸如水分含量、淀粉含量、各种糖类物质、重金属是否超标及掺假等方面。目前用于甘薯品质的常规检测方法有高效液相色谱法<sup>[3]</sup>、比色法<sup>[4]</sup>、直接蒸馏法<sup>[5]</sup>等, 这些方法虽然可以对甘薯组分含量进行精确测定, 但操作复杂、对样品有一定破坏作用, 且对多组分检测仍存在局限性, 无法满足甘薯品质的现场实时快速检测需求。对此, 许多科研工作者开展了对检测方法的相关研究, 其中近红外光谱 (near-infrared spectroscopy, NIRS) 技术作为一种快速、高效、便捷的无损检测手段, 在甘薯品质分析方面具有很大的应用潜力。

NIRS技术作为光谱技术的一个重要分支, 已成功应用于谷物的品质指标测定<sup>[6]</sup>。NIRS波长 (780~2 526 nm) 介于可见光和中红外光之间, 主要记录含氢基团 (C—H、N—H、O—H) 振动的倍频和合频吸收, 其不同波长处会出现不同的吸收峰<sup>[7]</sup>。利用NIRS技术检测分析食品品质主要基于光谱信息挖掘并结合多种化学计量学方法, 以构建高精度高稳定性数学模型。目前常用的化学计量学算法主要是偏最小二乘回归 (partial least squares, PLS), 其涵盖了主成分回归 (principal components regression, PCR) 与多元线性回归 (multiple linear regression, MLR) 两种, PLS可以通过理化数据关联到光谱矩阵分解过程中, 从而降低光谱维度, 可以有效地解决变量数量多、变量之间存在多重相关性的问题<sup>[8]</sup>。除PLS之外, 支持向量机 (support vector machine, SVM)、极限学习机 (extreme learning machine, ELM) 等方法也被用于挖掘光谱数据。评价NIRS技术建立的定量分析模型的参数主要有相关系数 (correlation coefficient,  $r$ ) 或决定系数 (determination coefficient,  $R^2$ )、校正集 $r$ 或 $R^2$  ( $r_c$ 或 $R_c^2$ )、交叉验证集 $r$ 或 $R^2$  ( $r_{cv}$ 或 $R_{cv}^2$ )、预测集 $r$ 或 $R^2$  ( $r_p$ 或 $R_p^2$ )、校正均方根误差 (root-mean-square error of calibration, RMSEC)、交叉验证均方根误差 (root-mean-square error of cross-validation, RMSECV)、预测均方根误差 (root-mean-square error

of prediction, RMSEP) 以及标准偏差 (standard error prediction, SEP)、剩余预测偏差 (residual prediction deviation, RPD) 等。其中, 模型的相关系数 $r$ 或决定系数 $R^2$ 越接近1, 模型性能越好。RMSECV和RMSEP越小, 模型的内部交叉验证和外部预测能力越好, 或SEP越小且接近于0, 同时RPD大于2.5, 模型的预测效果越好<sup>[9]</sup>。

本文全面综述了NIRS技术在甘薯品质检测方面的应用研究进展, 主要包括理化组分 (如蛋白质、淀粉、糖类物质及水分)、活性成分 (如黄酮类物质、类胡萝卜素) 和掺假检测等方面, 以期在现有研究基础上, 为进一步完善NIRS技术在甘薯检测中的工业化应用提供方法借鉴。具体综述内容如图1所示。

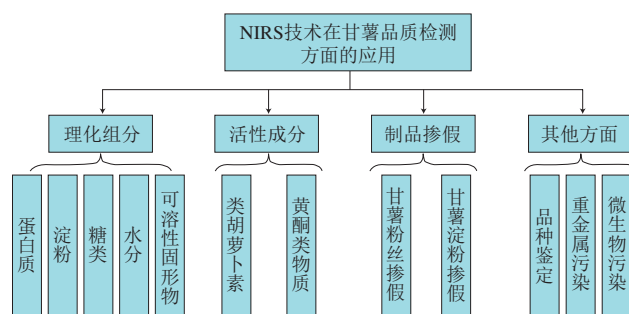


图1 NIRS技术在甘薯品质检测方面的应用研究内容

Fig.1 Application of NIRS in quality detection of sweet potato

## 1 NIRS技术用于检测甘薯理化组分

### 1.1 蛋白质

甘薯块根和茎叶中的蛋白质因富含氨基酸、生物价较高等优势, 在营养保健方面具有巨大的应用潜力<sup>[10]</sup>。甘薯块根加工中, 蛋白质含量与产品营养品质呈正相关<sup>[11]</sup>。基于蛋白质中N—H基团在近红外波段的光谱吸收, NIRS技术可用于测定甘薯蛋白质含量。唐忠厚等<sup>[12]</sup>通过获取预处理10 000~4 000  $\text{cm}^{-1}$ 范围内的光谱信息, 采用PLS分别构建了甘薯叶和甘薯块根中粗蛋白的预测模型, 结果显示5 450.1~4 599.6  $\text{cm}^{-1}$ 范围的光谱信息经线性补偿差减法预处理后构建的PLS模型预测甘薯叶中粗蛋白效果较好, 而6 101.9~4 248.6  $\text{cm}^{-1}$ 范围的光谱信息经直线差减法预处理后构建的PLS模型预测甘薯块根中粗蛋白效果较好, 尽管两个预测模型的 $R^2$ 均大于0.96, RMSE也很小 (0.1%~0.5%之间), 但该研究缺少对单独样品进行模型验证。与之不同, Magwaza等<sup>[13]</sup>采集了更宽范围的

可见NIRS信息(400~2 500 nm)预测甘薯块根蛋白质含量,在多种光谱预处理方法中,二阶导数预处理效果最佳;经波段筛选发现,1 600~2 200 nm区域最适合用于预测甘薯蛋白质含量( $R_p^2=0.96$ , RMSEP=0.29%),使用独立样本进行验证,模型预测效果接近于唐忠厚等<sup>[12]</sup>研究结果。王洋洋<sup>[14]</sup>采集了900~1 700 nm的生鲜甘薯光谱数据,并基于连续投影算法(successive projections algorithm, SPA)筛选最优波长建立优化的PLS预测模型,对甘薯蛋白质的预测性能良好( $r_p=0.911$ , RMSEP=1.029 mg/g)。近几年NIRS技术用于研究甘薯蛋白质含量的报道较少,在NIRS最佳光谱预处理方法和光谱区间方面依然需要进行深入研究,以强化NIRS技术快速检测甘薯蛋白含量的可行性和适用性。

## 1.2 淀粉

甘薯中淀粉的含量和性质是决定其产品品质的重要指标之一,其中直链淀粉的含量与甘薯根块蒸煮品质和甘薯淀粉类食品品质有直接关联。淀粉的含量可以用来评估淀粉的应用潜力和加工酶的效率,还可以结合糊化特性影响甘薯的黏度等<sup>[15]</sup>。淀粉颗粒的大小和分布也会影响变性淀粉质量。Lu Guoquan等<sup>[16-17]</sup>先后采集1 100~2 500 nm和900~1 700 nm两个波段的NIRS信息,构建甘薯中直链淀粉含量、直链淀粉百分比、总淀粉含量及热特性等指标的PLS预测建模,结果显示淀粉各指标的 $R^2$ 均较高( $R^2=0.85\sim0.92$ ),SEP值均相对较小。唐忠厚等<sup>[18-19]</sup>分别对甘薯中抗性淀粉含量和块根淀粉含量进行NIRS分析,结果显示,基于一阶导数-矢量归一法预处理NIRS光谱构建的PLS模型预测块根淀粉含量性能优于预测抗性淀粉含量。卜晓朴等<sup>[20]</sup>尝试使用Savitzky-Golag(S-G)平滑结合一阶求导预处理350~1 100 nm范围的光谱信息,构建PLS模型预测生鲜紫薯中的淀粉特性(熟化黏度,以峰值扭矩表示),也获得了较好结果( $r=0.92$ , RMSEP=0.053 Nm)。Diaz等<sup>[21]</sup>对酶法加工和未加工的红薯淀粉进行MLR建模预测,经S-G平滑结合二阶求导预处理光谱(400~2 500 nm)后,预测性能良好且预测精度有所提高。在紫薯粉加工过程中碘蓝值与其品质呈负相关,与直链淀粉含量呈正相关。卜晓朴等<sup>[22]</sup>分析利用350~1 100 nm波段的光谱信息构建PLS模型预测市售紫薯粉的碘蓝值,间接评估紫薯粉中的直链淀粉含量,效果良好( $r>0.96$ , RMSE<7.2)。王洋洋<sup>[14]</sup>采用多元散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)法预处理900~1 700 nm的光谱信息,通过逐步回归(stepwise regression, SR)法筛选最优波长建立MLR模型预测生鲜甘薯的淀粉含量,取得了较好的结果( $r_p=0.970$ , RMSEP=0.374 g/100 g)。综上,NIRS技术在预测甘薯中的淀粉含量及其热特性方面潜力巨大,但对于抗性淀粉的预测研究较少。

## 1.3 糖类

甘薯块根中的糖类化合物占比相对较大,主要影响

甘薯及其制品的食用品质,如糖类化合物含量对酒精发酵工艺有影响<sup>[23]</sup>;还原糖含量对甘薯的品质育种有重要意义<sup>[24]</sup>;总糖含量是评价甘薯风味口感和内部品质的重要指标之一;可溶性糖含量与紫薯的甜度有关<sup>[15]</sup>等。因此,快速检测甘薯糖类物质很有必要。唐忠厚等<sup>[19]</sup>构建针对甘薯根块中蔗糖、葡萄糖和果糖的NIRS预测模型,经一阶导数处理光谱后,3种糖预测各自获得两个最佳吸收光谱区,基于最佳光谱波段构建的PLS模型预测性能非常好( $R_c^2$ 和 $R_{cv}^2$ 均为0.99)。高丽等<sup>[25]</sup>利用MSC法预处理12 000~4 000  $\text{cm}^{-1}$ 范围内的光谱信息后,筛选出最优波长构建的优化PLS模型预测甘薯还原糖含量的性能大幅度提高( $R^2$ 提高12.6%,RMSEP降低36.6%)。He Hongju等<sup>[26]</sup>将900~1 700 nm的甘薯块光谱转化成Kubelka-Munk光谱后,利用SR法结合相关系数法筛选出14个最优波长,将其构建PLS模型预测甘薯还原糖含量,预测效果( $r_p=0.952$ , RMSEP=0.264 g/100 g)优于高丽等<sup>[25]</sup>的研究。除此之外,NIRS技术还被用于研究紫薯中的糖类物质含量。卜晓朴等<sup>[27]</sup>基于350~1 100 nm范围的波长构建紫薯中总糖的PLS预测模型,经过筛选波长优化模型后,预测效果明显提升( $r_p$ 提高11.7%,RMSEP降低69.8%)。在相同波段内采用同样的光谱预处理方法,卜晓朴等<sup>[20]</sup>又构建了紫薯中可溶性糖的PLS预测模型,优化后的模型预测性能也大幅提升( $r$ 提高11.2%,RMSEP降低72.5%)。王洋洋<sup>[14]</sup>将900~1 700 nm的甘薯光谱数据通过回归系数(regression coefficient, RC)法筛选最优波长,构建MLR模型预测甘薯还原糖含量,预测效果较好( $r_p=0.915$ , RMSEP=0.355 g/100 g)。总体而言,NIRS技术快速检测甘薯中各种糖类物质的效果整体良好,采用不同的光谱预处理后模型性能有不同程度的提升。

## 1.4 水分

水分是甘薯最基本的品质指标,水分与脂肪含量、硒含量呈正相关<sup>[28]</sup>。水分含量直接影响甘薯的贮藏效果,水分含量高,甘薯不易保存,即使在冷藏温度下也容易发生变质<sup>[29]</sup>。在近红外区域,水分中的O—H键在980 nm和1 450 nm波长处有明显的特征吸收峰,借此可进行NIRS信息分析。Diaz等<sup>[21]</sup>对酶法加工的甘薯水分建立了基于二阶导数+S-G预处理的全波段MLR预测模型(400~2 500 nm),模型表现良好但仍有待提高( $R_p^2=0.85$ , SEP=0.035 g/g)。Sun Yue等<sup>[30]</sup>采用多元散射校正预处理在371~1 023 nm范围的光谱信息,构建MLR模型预测生鲜紫薯的含水量,获得了较好的结果( $R_p^2=0.9359$ , RMSEP=2.8583%)。高丽等<sup>[25]</sup>采用一阶导数联合MSC法预处理12 000~4 000  $\text{cm}^{-1}$ 波段光谱后,使用协同区间矩阵法选择最佳光谱区构建甘薯中水分含量的PLS预测模型,预测效果( $R_p^2=0.974$ , RMSEP=1.154%)明显好于Diaz等<sup>[21]</sup>的研究,这可能与

不同的波段区间选择和预处理方法有关。Heo等<sup>[11]</sup>构建针对蒸干紫薯水分含量的预测模型,光谱数据经预处理后基于最佳光谱波段构建的PLS模型预测性能非常好( $R_p^2=0.9521$ )。此外,卜晓朴等<sup>[22]</sup>对市售紫薯粉中的水分含量进行PLS模型预测研究,模型效果也表现良好。总之,NIRS技术在甘薯水分含量方面的应用研究较少,但已报道的研究结果证明NIRS检测甘薯水分含量具有可行性,且所建模型性能存在很大提升空间。

### 1.5 可溶性固形物

可溶性固形物可促进薯的风味口感,是评价紫薯内部品质的重要指标之一。除了预测总糖,卜晓朴等<sup>[27]</sup>还挖掘350~1100 nm范围的光谱信息构建新鲜紫薯中可

溶性固形物的PLS预测模型,结果显示原始光谱经过S-G+一阶求导预处理后,预测性能明显提升,竞争性自适应加权算法(competitive adaptive weighting algorithm, CARS)筛选出的28个最优波长也明显提高了预测效率。许建东<sup>[32]</sup>对甘薯中可溶性固形物含量进行NIRS分析,结果显示,基于标准正态变换(standard normal variate, SNV)法预处理的光谱数据,采用RC法筛选最优波长构建的ELM模型预测性能良好( $r_p=0.8199$ , RMSEP=1.1941)。NIRS技术实现了对甘薯可溶性固形物的预测,可指导新鲜紫薯品质的快速无损分选。

NIRS用于检测甘薯理化组分的具体结果详见表1。

表1 NIRS技术用于检测甘薯理化指标  
Table 1 Application of NIRS for detection of general chemical composition of sweet potato

理化指标	研究对象	仪器类型	光谱范围	光谱预处理方法	最优波长/ 波段筛选方法	最优波长/波段	建模方法	模型性能	参考文献
蛋白质	甘薯叶及块根	VECTOR22/N型傅里叶变换近红外反射光谱仪	10 000~4 000 $\text{cm}^{-1}$	叶粗蛋白: 线性补偿差减法 块根粗蛋白: 直线差减法	OPTIMIZE 程序自动优化	叶粗蛋白: 5 450.1~4 599.6 $\text{cm}^{-1}$ 块根粗蛋白: 6 101.9~4 248.6 $\text{cm}^{-1}$	PLS	叶粗蛋白: $R_c^2=0.966$ RMSEC=0.255% $R_{cv}^2=0.984$ RMSECV=0.448% 块根粗蛋白: $R_c^2=0.993$ RMSEC=0.126% $R_{cv}^2=0.986$ RMSECV=0.178% $R_c^2=0.98$ RMSEC=0.26% $R_p^2=0.96$ RMSEP=0.29% RPD=4.00	[12]
蛋白质	甘薯粉	NIRSystems model XDS 光谱分析仪	400~2 500 nm	2 <sup>nd</sup> Der	相关系数法	1 600~2 200 nm	PLS		[13]
蛋白质	新鲜甘薯	HSL-eNIR-400-1700型高光谱成像系统	900~1 700 nm	—	SPA	900.5、903.8、912.1、915.4、 922.0、931.8、935.1、941.7、 1 063.5、1 147.4、1 392.6、1 451.9、 1 680.0、1 698.3、1 699.9 nm	PLS	$r_p=0.911$ RMSEP=1.029 mg/g	[14]
淀粉	甘薯粉	Foss NIRSystems 5000型 近红外扫描单色仪	1 100~2 500 nm	None	—	—	PLS	$R^2_{\text{直链淀粉含量}}=0.897$ $R^2_{\text{直链淀粉比例}}=0.911$ $R^2_{\text{总淀粉含量}}=0.857$ $R^2_{\text{热特性}}=0.876\sim0.917$	[16]
淀粉	甘薯粉	Foss NIRSystems 5000型 近红外扫描单色仪	900~1 700 nm	None	—	—	PLS	$R^2_{\text{糊化开始温度}}=0.85$ $R^2_{\text{糊化峰值温度}}=0.89$ $R^2_{\text{糊化温度范围}}=0.86$ SEP=1.371~2.234 $^{\circ}\text{C}$	[17]
淀粉	甘薯原淀粉	NIRSystem 5000型 近红外反射光谱仪	900~1 700 nm	SNV	—	—	PLS	$R^2=0.90$ $R_p^2=0.89$	[18]
淀粉	甘薯粉	VECTOR22/N型 傅里叶变换近 红外反射光谱仪	12 000~4 000 $\text{cm}^{-1}$	矢量归一法 +1 <sup>st</sup> Der	OPTIMIZE 程序自动优化	10 001~4 246.5 $\text{cm}^{-1}$	PLS	$R_c^2=0.998$ RMSEC=0.431% $R_{cv}^2=0.997$ RMSECV=0.489%	[19]
淀粉	新鲜紫薯	AVS-DESKTOP-USB2-EXT-12V 型可见/近红外光纤光谱仪	350~1 100 nm	S-G+1 <sup>st</sup> Der	CARS	42个	PLS	$r_c=0.9207$ RMSEC=0.0515 Nm $r_p=0.9195$ RMSEP=0.0526 Nm	[20]
淀粉	甘薯粉	FOSS-NIR Systems XDS 快速光谱分析仪	400~2 500 nm	S-G+2 <sup>nd</sup> Der	—	—	MLR	酶法加工: $R_c^2=0.90$ SEC=0.034 g/g $R_p^2=0.97$ SEP=0.019 g/g 未加工: $R_c^2=0.92$ SEC=0.021 g/g $R_p^2=0.91$ SEP=0.021 g/g	[21]
淀粉	紫薯粉	AVS-DESKTOP-USB2-EXT-12V 型可见/近红外光纤光谱仪	350~1 100 nm	SNV	—	—	PLS	$r_c=0.9687$ RMSEC=7.0256 $r_p=0.9673$ RMSEP=7.1848	[22]
淀粉	新鲜甘薯	HSL-eNIR-400-1700型 高光谱成像系统	900~1 700 nm	MSC	SR	915.4、923.6、925.2、936.8、938.4、 948.3、956.5、994.4、1 014.1、1 103.0、 1 139.1、1 297.1、1 313.5、1 514.6、 1 534.4、1 539.4、1 549.3、1 630.3 nm	MLR	$r_p=0.970$ RMSEP=0.374 g/100 g	[23]

续表1

理化指标	研究对象	仪器类型	光谱范围	光谱预处理方法	最优波长/ 波段筛选方法	最优波长/波段	建模方法	模型性能	参考文献
糖类	甘薯粉	VECTOR22/N型 傅里叶变换近红外反射光谱仪	10 000~4 000 cm <sup>-1</sup>	1 <sup>st</sup> Der	OPTIMIZE 程序自动优化	蔗糖: 6 101.7~5 449.9 cm <sup>-1</sup> 4 601.3~4 246.5 cm <sup>-1</sup> 葡萄糖: 10 001.1~7 497.9 cm <sup>-1</sup> 6 101.7~4 246.5 cm <sup>-1</sup> 果糖: 10 001.1~7 497.9 cm <sup>-1</sup> 5 453.7~4 246.5 cm <sup>-1</sup>	PLS	蔗糖: R <sup>2</sup> <sub>c</sub> =0.992 RMSEC=0.429% R <sup>2</sup> <sub>cv</sub> =0.991 RMSECV=0.490% 葡萄糖: R <sup>2</sup> <sub>c</sub> =0.994 RMSEC=0.291% R <sup>2</sup> <sub>cv</sub> =0.99 RMSECV=0.321% 果糖: R <sup>2</sup> <sub>c</sub> =0.993 RMSEC=0.203% R <sup>2</sup> <sub>cv</sub> =0.994 RMSECV=0.224%	[19]
糖类	新鲜紫薯	AVS-DESKTOP-USB2-EXT-12V 型可见/近红外光纤光谱仪	350~1 100 nm	S-G+1 <sup>st</sup> Der	CARS	42个	PLS	r <sub>c</sub> =0.964 4 RMSEP=0.263 9 mg/g r <sub>p</sub> =0.951 5 RMSEP=0.310 0 mg/g	[20]
糖类	新鲜甘薯	AntarisII型 傅里叶变换近红外光谱仪	12 000~4 000 cm <sup>-1</sup>	MSC	协同区间矩阵	5 600.3~4 805.4 cm <sup>-1</sup>	PLS	R <sup>2</sup> <sub>c</sub> =0.885 RMSEP=0.270% SEP=0.273%	[25]
糖类	新鲜甘薯	HSL-eNIR-400-1700型 高光谱成像系统	900~1 700 nm	Kubelka-Munk	SR+RC	971.7, 1 150.2, 1 152.6, 1 192.3, 1 295.7, 1 324.3, 1 371.8, 1 379.7, 1 440.4, 1 608.6, 1 613.7, 1 643.7, 1 673.4, 1 689.0 nm	PLS	r <sub>p</sub> =0.952 RMSEP=0.264 g/100 g	[26]
糖类	新鲜紫薯	AvaSpec-2048x14型 可见-近红外光纤光谱仪	350~1 100 nm	S-G+1 <sup>st</sup> Der	CARS	361.8, 367.7, 388.3, 420.1, 592.7, 594.9, 650.1, 650.6, 700.8, 796.2, 808.0, 811.4, 861.0, 898.7, 920.8, 921.3, 956.9, 957.5, 958.1, 958.6, 959.2, 971.2, 975.3, 976.7, 977.2, 977.8, 978.8, 979.4, 993.6, 997.4, 1 008.2, 1 013.1, 1 016.4, 1 018.5, 1 020.1, 1 035.3, 1 035.8, 1 057.9, 1 069.8, 1 070.8, 1 079.9, 1 080.4 nm	PLS	r <sub>c</sub> =0.955 5 RMSEC=0.140 0% r <sub>p</sub> =0.925 3 RMSEP=0.244 3%	[27]
糖类	新鲜甘薯	HSL-eNIR-400-1700型 高光谱成像系统	900~1 700 nm	—	RC	900.5, 910.4, 917.0, 925.2, 933.5, 949.9, 969.7, 1 084.9, 1 195.1, 1 226.3, 1 326.7 nm	MLR	r <sub>p</sub> =0.915 RMSEP=0.355 g/100 g	[14]
水分	甘薯粉	FOSS-NIR Systems XDS 快速光谱分析仪	400~2 500 nm	S-G+2 <sup>nd</sup> Der	—	—	MLR	R <sup>2</sup> <sub>c</sub> =0.82 SEC=0.039 g/g R <sup>2</sup> <sub>p</sub> =0.85 SEP=0.035 g/g	[21]
水分	紫薯粉	AVS-DESKTOP-USB2-EXT-12V 型可见/近红外光纤光谱仪	350~1 100 nm	SNV	—	—	PLS	r <sub>c</sub> =0.939 7 RMSEC=0.558 9% r <sub>p</sub> =0.921 9 RMSEP=0.596 5%	[22]
水分	新鲜甘薯	AntarisII型 傅里叶变换近红外光谱仪	12 000~4 000 cm <sup>-1</sup>	MSC+1 <sup>st</sup> Der	协同区间矩阵	10 402.2~9 607.6 cm <sup>-1</sup> 9 606.8~8 805.4 cm <sup>-1</sup> 8 003.1~7 204.8 cm <sup>-1</sup>	PLS	R <sup>2</sup> <sub>c</sub> =0.974 RMSEP=1.154% SEP=1.168%	[25]
水分	新鲜紫薯	Vis-NIR高光谱 反射成像系统	371~1 023 nm	MSC	RC	623, 642, 646, 703, 709, 817, 840, 885, 957 nm	MLR	R <sup>2</sup> <sub>p</sub> =0.935 9 RMSEP=2.858 3%	[30]
水分	蒸干紫薯	ImSpector N17E 高光谱成像系统	900~1 700 nm	S-G+1 <sup>st</sup> Der+MSC	—	961.12, 1 065.50, 1 083.93, 1 173.23, 1 233.89 nm	PLS	R <sup>2</sup> <sub>c</sub> =0.955 4 RMSEC=3.675 0% R <sup>2</sup> <sub>cv</sub> =0.952 5 RMSECV=3.794 1% R <sup>2</sup> <sub>p</sub> =0.952 1 RMSEP=4.144 6%	[31]
可溶性 固形物	新鲜紫薯	AvaSpec-2048x14型 可见-近红外光纤光谱仪	350~1 100 nm	S-G+1 <sup>st</sup> Der	CARS	388.3, 416.5, 417.1, 417.7, 418.9, 419.5, 446.9, 447.6, 449.3, 507.1, 507.6, 508.2, 530.3, 530.9, 532.0, 568.5, 569.0, 570.2, 589.2, 590.4, 672.9, 813.0, 813.6, 829.2, 849.3, 861.0, 897.6, 943.3 nm	PLS	r <sub>c</sub> =0.947 0 RMSEC=0.600 6 °Brix r <sub>p</sub> =0.943 1 RMSEP=0.878 7 °Brix	[27]
可溶性 固形物	新鲜甘薯	ASD Fieldspec 3型 便携式光谱仪	300~2 500 nm	SNV	RC	482, 518, 567, 605, 654, 739, 782, 875, 913, 957, 992, 1 019, 1 034, 1 082, 1 110, 1 146, 1 199, 1 296, 1 360, 1 386, 1 423, 1 526, 1 598, 1 670, 1 695, 1 730, 1 746, 1 812, 1 838, 1 868, 1 906, 1 959, 2 006, 2 044, 2 207, 2 384 nm	ELM	r <sub>p</sub> =0.819 9 RMSEP=1.194 1	[32]

注: 1<sup>st</sup> Der.一阶导数; 2<sup>nd</sup> Der.二阶导数; None.无预处理; GA.遗传算法 (genetic algorithm); fi-SVM.前向区间支持向量机 (forward interval SVM); LS-SVM.最小二乘支持向量机 (least squares SVM); KNN. K近邻 (K nearest neighbor); LDA.线性判别分析 (linear discriminant analysis)。—.文献未提及, 下同。

## 2 NIRS技术用于检测甘薯活性成分

活性成分是指食用后对人体及各种生物具有生理促进作用的物质,甘薯中常见的活性成分有黄酮类物质、类胡萝卜素及多酚类物质等。检测甘薯活性成分的方法有溶液直接提取法、高效液相色谱法、可见光光度计法、光谱技术等<sup>[33-34]</sup>。研究证明利用理化实验与NIRS技术相结合检测甘薯活性成分具有可行性。

### 2.1 黄酮类物质

甘薯中黄酮类物质具有抗氧化、抗突变、抗衰老、抗肿瘤及改善肝功能等多种生理功能,其中对于花青素的研究相对较多。花青素含量对甘薯产品品质的评价有指导性作用<sup>[35]</sup>。研究显示,NIRS技术对花青素的研究主要集中于枸杞蓝莓<sup>[36]</sup>、黑枸杞浆果<sup>[37]</sup>、葡萄果皮<sup>[38]</sup>、花茶<sup>[39]</sup>、高粱籽粒<sup>[40]</sup>及甘薯中。衣申艳等<sup>[41]</sup>运用NIRS技术,在1 100~2 498 nm范围内选用最佳光谱预处理方法、最佳谱区范围和主因子数,对甘薯块根中的黄酮含量进行建模预测,效果良好( $R_c^2=0.903$ , RMSEC=0.172%)。卜晓朴等<sup>[22]</sup>对市售紫薯粉的NIRS采取SNV预处理后构建花青素的PLS预测模型,模型性能较预处理前表现更好( $r_p=0.946$ , RMSEP=0.191 8 mg/g)。这可能是因为样品原始光谱经过SNV预处理后,450 nm波长附近的紫色特征峰和可见光区529 nm波长附近的花青素特征峰更加显著<sup>[42]</sup>。随后,基于相同的波段信息(350~1 100 nm),卜晓朴等<sup>[27]</sup>又对生鲜紫薯中的花青素

进行NIRS光谱预测研究,原始光谱经SG卷积平滑和一阶求导预处理后,利用CARS筛选出特征波长,构建PLS预测模型,结果和预测市售紫薯粉花青素相似,效果依然良好( $r_p=0.942$ , RMSEP=0.225 9 mg/g)。原始光谱经SG卷积平滑预处理后在410 nm波长处出现花青素特征峰<sup>[43]</sup>,经一阶求导预处理后在670 nm波长处出现了与色素有关的新特征吸收峰<sup>[44]</sup>,这些预处理可能增强了模型的预测性能。紫薯在贮藏期间及干燥过程中,花青素的含量也会发生变化,田潇瑜等<sup>[45]</sup>通过GA挖掘经SNV预处理的10 000~4 000  $\text{cm}^{-1}$ 范围内的光谱数据,发现7 590~7 200  $\text{cm}^{-1}$ 波段区间构建的PLS模型预测紫薯中花青素含量效果良好( $R_p^2=0.913$ , RMSEP=7.239 8 mg/100 g)。Peng Jing等<sup>[46]</sup>通过支持向量机算法,在400~1 050 nm范围内对干燥过程中紫薯花青素含量进行建模预测,效果良好( $R_p^2=0.866\sim 0.891$ , RMSEP=0.193~0.229 mg/g)。Liu Yunhong等<sup>[47]</sup>使用MSC预处理对371~1 023 nm范围的光谱信息构建MLR模型,预测生鲜紫薯在干燥过程中的花青素含量,也获得了较好结果( $R_p^2=0.866$ , RMSEP=0.302 mg/g)。Tian Xiaoyu等<sup>[48]</sup>对微波干燥及对流热风干燥两种不同干燥方式下的紫薯花青素含量进行建模预测,在400~1 000 nm范围内,采用CARS法筛选最优波长建立PLS模型, $R^2$ 均在0.85以上,这和预测生鲜紫薯、市售紫薯粉中的花青素含量结果相近,具体见表2。尽管相关研究较少,但均可证明NIRS技术可用于快速预测紫薯中的花青素含量,未来有很大的应用潜力。

表2 NIRS技术用于检测甘薯活性成分

Table 2 Application of NIRS for detection of active ingredient in sweet potato

生物活性物质	研究对象	检测仪器类型	光谱范围	光谱预处理方法	最优波长/ 波段筛选方法	最优波长/ 波段	建模方法	模型性能	参考文献
花青素	紫薯粉	AVS-DESKTOP-USB2-EXT-12V型 可见/近红外光纤光谱仪	350~1 100 nm	SNV	—	—	PLS	$r_c=0.975$ RMSEC=0.105 2 mg/g $r_p=0.946$ RMSEP=0.191 8 mg/g	[22]
花青素	生鲜紫薯	AvaSpec-2048x14型 可见-近红外光纤光谱仪	350~1 100 nm	SNV+1 <sup>st</sup> Der	CARS	388.3、416.5、417.1、417.7、418.9、419.5、 446.9、447.6、449.3、507.1、507.6、508.2、 530.3、530.9、532.0、568.5、569.0、570.2、 589.2、590.4、672.9、813.0、813.6、829.2、 849.3、861.0、897.6、943.3 nm	PLS	$r_c=0.947$ RMSEC=0.206 2 mg/g $r_p=0.942$ RMSEP=0.225 9 mg/g	[27]
花青素	生鲜紫薯	AntarisIFT-NIR型 近红外光谱仪	10 000~4 000 $\text{cm}^{-1}$	SNV	GA	7 590~7 200 $\text{cm}^{-1}$	PLS	$R_p^2=0.913$ RMSEP=7.239 8 mg/100 g RPD=3.339 7	[45]
花青素	生鲜紫薯	Vis-NIR光谱仪	400~1 050 nm	SVM	—	670~1 000 nm	PLS	$R_p^2=0.866\sim 0.917$ RMSEP=0.193~0.229 mg/g	[46]
花青素	生鲜紫薯	Vis-NIR高光谱成像系统	371~1 023 nm	MSC	RC	623、660、666、700、729、761、 801、837、892、957 nm	MLR	$R_p^2=0.866$ RMSEP=0.302 mg/g	[47]
花青素	生鲜紫薯	推扫式高光谱成像系统	400~1 000 nm	—	CARS	—	PLS	对流热风干燥: $R_c^2=0.887$ RMSEC=0.286 2 mg/g $R_p^2=0.846$ RMSEP=0.302 6 mg/g 微波干燥: $R_c^2=0.878$ RMSEC=0.219 0 mg/g $R_p^2=0.858$ RMSEP=0.241 0 mg/g	[48]
黄酮	甘薯粉	NIRSystem 5000型 近红外反射光谱分析仪	1 100~2 498 nm	OPUS分析软件自动优化	—	—	PLS	$R_c^2=0.903$ RMSEC=0.172% $R_{cv}^2=0.851$ RMSECV=0.214%	[41]

## 2.2 类胡萝卜素

类胡萝卜素具有清除自由基、保护皮肤、预防癌症及视黄斑退化等多种生理功能，同时含有类胡萝卜素的甘薯因其低廉、易种植等特点而受到研究者的关注。关于NIRS技术预测甘薯中类胡萝卜素的研究成果甚少，但该技术对果蔬、作物中类胡萝卜素含量的测定具有可行性<sup>[49-50]</sup>，这些研究结果可为NIRS技术用于研究甘薯中的类胡萝卜素提供方法参考。

## 2.3 其他活性成分

除了以上两类活性成分，甘薯中含有的矿物质元素、维生素类及多酚类物质均具有提高免疫力、抗衰老、预防冠心病等多种良好的生理保健功能。目前对于甘薯中活性成分的检测仍多采用传统的理化方法，而利用NIRS技术检测甘薯其他活性成分的研究极少。试图了解NIRS检测活性成分检测原理，可参考该技术在谷物检测中的应用研究<sup>[51-53]</sup>，因为谷物活性成分中含氢基团的振动在NIRS区有显著的特征吸收。

## 3 NIRS技术用于检测甘薯制品掺假

面对市面上的高利润诱惑，一些不法商家为了降低成本，会对甘薯粉状制品掺假或者利用甘薯粉掺假，这不利于甘薯及其制品市场的稳定发展。常见的掺假检测方法有差示扫描量热法、分光光度计法及光谱法等<sup>[54-55]</sup>。Ding Xiaoxiao等<sup>[56]</sup>利用NIRS技术，结合化学计量学方法选择最优波长，对紫薯粉掺白薯粉样品建立识别模型。结果显示该技术对紫薯粉掺假样品的识别率可达100%，具体见表3。陈嘉等<sup>[57]</sup>利用SNV结合一阶导数预处理12 000~4 000 cm<sup>-1</sup>波段光谱，并使用fi-SVM筛选光谱变量构建掺假判别模型，对甘薯粉丝掺假的定性正确识别率也达到100%。对于掺入木薯淀粉的甘薯粉丝，筛选出

11个最优光谱子区间构建的预测模型 $r$ 提升了16.46%，RMSEP下降了35.96%；对于掺入玉米淀粉的甘薯粉丝，筛选出14个最优光谱子区间构建的预测模型 $r$ 提升了17.07%，RMSEP下降了51.58%。研究建议可以先用SVM模型进行定性分析，再使用fi-SVM模型进行定量预测。除了NIRS被用于甘薯制品掺假研究，中红外光谱技术也被用于甘薯粉掺假研究。Liu Jia等<sup>[58]</sup>利用傅里叶变换中红外光谱（Fourier transform mid-infrared spectroscopy, FT-MIR）技术对掺入莲藕粉的甘薯淀粉样品建立PLS预测模型，结果显示，经过一阶导数预处理后建立的优化模型对掺入莲藕粉的甘薯粉样品能够实现定性、定量分析（ $R_{cv}^2=0.9898$ , RMSECV=3.56%）。总之，光谱技术用于甘薯粉掺假研究具有可行性，NIRS技术定性识别精度效果令人满意，但定量检测精度有待提高，MIR光谱应用潜力有待开发。

## 4 NIRS技术用于鉴别甘薯品种、产地和检测重金属、微生物污染

除了以上3个方面，NIRS技术在甘薯品质的其他方面（如品种鉴定、重金属、微生物污染）也有应用研究。Su Wenhao等<sup>[59]</sup>利用965~1 645 nm范围的光谱建立偏最小二乘判别分析（partial least square-discriminant analysis, PLS-DA）模型对甘薯品种分类鉴别，正确率可达100%。郑艺蕾<sup>[60]</sup>利用高光谱成像系统对不同产地的紫薯样品建立PLS预测模型，结果显示，光谱数据经过主成分分析（principal component analysis, PCA）处理后建立的优化模型能够对紫薯样品产地鉴别定性分析（误判率低于4.598%）。这些研究结果对于将NIRS技术应用于甘薯品种筛选具有重要意义。农产品重金属残留问题与食品安全、

表3 NIRS技术用于检测甘薯粉掺假  
Table 3 Application of NIRS for detection of adulterants in sweet potato

掺假方式	研究对象	仪器类型	光谱范围	光谱预处理方法	最优波长/波段 筛选方法	建模方法	模型性能	参考文献	
紫薯粉掺白薯粉	甘薯粉	U-4100型分光光度计	700~2 500 nm	SNV	—	KNN和LDA	正确识别率100%	[56]	
甘薯粉丝掺假	甘薯淀粉	MPA近红外光谱仪	12 000~4 000 cm <sup>-1</sup>	1 <sup>st</sup> Der+SNV	fi-SVM	SVM	掺入木薯淀粉: 12 385.3~12 281.2, 10 418.2~10 310.2, 9 299.6~9 191.6, 8 964.0~8 520.4, 7 174.3~7 066.3, 5 943.9~5 835.9, 5 608.3~5 500.3, 4 937.2~4 829.2, 4 601.6~4 381.7, 4 266.0~4 046.1, 3 818.6~3 710.6 cm <sup>-1</sup> 掺入玉米淀粉: 12 246.5~12 126.9, 11 486.6~11 363.2, 10 977.5~10 854.0, 9 704.6~9 581.2, 9 450.0~9 326.6, 8 304.4~8 181.0, 8 049.9~7 926.4, 7 413.4~7 290.0, 7 031.6~6 908.2, 6 395.2~6 144.4, 6 013.3~5 762.6, 5 631.4~4 998.9, 4 867.7~4 617.0, 4 485.9~3 598.7 cm <sup>-1</sup>	定性正确识别率100% 掺入木薯淀粉: $r_1=0.92$ RMSEP=11.20 掺入玉米淀粉: $r_1=0.96$ RMSEP=7.49	[57]
莲藕粉掺甘薯淀粉	甘薯淀粉	Elmer Spectrum 2000 FT-IR光谱仪	4 000~500 cm <sup>-1</sup>	1 <sup>st</sup> Der	—	PLS	$R_c^2=0.9924$ RMSEC=3.11% $R_{cv}^2=0.9898$ RMSECV=3.56%	[58]	

表4 NIRS技术用于甘薯品种、产地和重金属、微生物污染的检测应用

Table 4 Application of NIRS for varietal and geographical origin identification, and heavy metal and microbial contamination detection in sweet potato

目的	研究对象	仪器类型	光谱范围	光谱预处理方法	最优波长/波段筛选方法	最优波长/波段	建模方法	模型性能	参考文献
品种鉴定	新鲜甘薯	推扫式近红外高光谱成像系统	964~1 645 nm	OSC	—	—	PLS-DA	正确识别率100%	[59]
产地鉴定	新鲜紫薯	GaiaSorter盖亚高光谱成像分选仪	400~1 000 nm	PCA	—	—	LS-SVM	误判率小于4.598%	[60]
重金属污染	甘薯茎及叶	NIRSystems 5000型 近红外漫反射光谱分析仪	1 100~2 498 nm	—	—	—	PLS	镉: $r_{CV}=0.5957$ ; RMSECV=0.065 5 铜: $r_{CV}=0.6568$ ; RMSECV=14.602 2 锌: $r_{CV}=0.5356$ ; RMSECV=2.858 5	[61]
微生物污染	紫薯粉	Antaris II型 傅里叶变换近红外光谱仪	10 000~4 000 $cm^{-1}$	SNV+2 <sup>nd</sup> Der	—	—	PLS	$r_c=0.99213$ RMSEC=0.251 (lg (CFU/g)) $r_p=0.97537$ RMSEP=0.445 (lg (CFU/g))	[62]

注: OSC.正交信号校正 (orthogonal signal correction)。

人体健康息息相关,其中甘薯重金属残留问题也不容忽视。徐庆贤等<sup>[61]</sup>利用NIRS技术对甘薯叶和茎中铬、铜、锌含量进行快速预测研究。结果显示甘薯叶与茎组织中这些重金属含量差异明显,用于建模的数据变异幅度较大,结果导致模型的准确性和稳定性不是很理想,因此还需要对定标建模样本的代表性、均匀性以及化学值等方面进行深入研究,以提高模型检测性能。微生物污染也是影响甘薯品质的重要因素。曹海燕等<sup>[62]</sup>对紫薯半干面中的菌落总数建立了SNV-二阶导数-PLS预测模型,该模型的 $r_p=0.97537$ , RMSEP=0.445 (lg (CFU/g)),结果显示NIRS技术在面制品菌落总数检测领域具有较高的应用能力。同时基于SNV预处理,结合马氏距离可100%鉴别紫薯半干面新鲜程度,NIRS技术在这些方面的具体应用结果详见表4。

## 5 结 语

综述国内外的研究成果发现,NIRS技术在甘薯品质检测方面具有良好的应用潜力,尤其在甘薯理化组成方面应用研究较多,而活性成分及其他方面的研究相对较少,这可能与含量低有很大关系。NIRS技术的优势明显,应用前景可观,开发基于NIRS的快检装备已是未来发展趋势。为进一步完善NIRS技术在甘薯品质检测方面的应用,以及提升所建模型的稳定性和适用性,建议从以下几个方面改进并开展更深入研究:1)甘薯品种繁多、组分差异较大,需针对不同检测需求或目标采集代表性样本以获得可靠光谱信息构建模型;检测过程人为误差尽量降至最低,避免模型预测结果误差较大;2)NIRS预处理方法的合理选择、最优波段/波长的科学筛选可明显简化模型运算,提高模型预测效率,针对甘薯不同品质指标选择匹配的处理方式尤为重要;3)PLS算法仍然是NIRS技术建模时应用最广泛、最有效的算法,MLR算法在合适条件下也有应用潜力,应基于PLS或MLR深入挖掘线性模型在甘薯生产应用上的可用性和适用性,为进一步开发专用的甘薯检测设备做充分铺垫。

## 参考文献:

- ALAM M K. A comprehensive review of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam): revisiting the associated health benefits[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 115: 512-529. DOI:10.1016/j.tifs.2021.07.001.
- 张子依,陈锦瑞,刘荣瑜,等.甘薯及其主要成分体内生物活性研究进展[J].中草药,2020,51(12):3308-3317. DOI:10.7501/j.issn.0253-2670.2020.12.025.
- LIU X F, ZHOU Y, REN Y P, et al. Improved sample treatment for the determination of flavonoids and polyphenols in sweet potato leaves by ultra performance convergence chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2019, 169: 245-253. DOI:10.1016/j.jpba.2019.03.003.
- WANG H, YANG Q, FERDINAND U, et al. Isolation and characterization of starch from light yellow, orange, and purple sweet potatoes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2010, 160: 660-668. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2020.05.259.
- LI X, LIU M, HUANG T, et al. Antifungal effect of nerol via transcriptome analysis and cell growth repression in sweet potato spoilage fungi *Ceratocystis fimbriata*[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 171: 111343. DOI:10.1016/j.postharvbio.2020.111343.
- ZHU M, LONG Y, CHEN Y, et al. Fast determination of lipid and protein content in green coffee beans from different origins using NIR spectroscopy and chemometrics[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 102: 104055. DOI:10.1016/j.jfca.2021.104055.
- 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. DOI:10.1016/j.tifs.2015.10.002.
- 陈亮亮,朱亚东,李梦姣,等.基于近红外高光谱成像快速预测牛肉中猪肉掺入量[J].海南师范大学学报(自然科学版),2022,35(4):402-406. DOI:10.12051/j.issn.1674-4942.2022.04.008.
- HE H J, CHEN Y, LI G, et al. Hyperspectral imaging combined with chemometrics for rapid detection of talcum powder adulterated in wheat flour[J]. Food Control, 2023, 144: 109378. DOI:10.1016/j.foodcont.2022.109378.
- NGUYEN T H L, NGOAN L D, BOSCH G, et al. Ileal and total tract apparent crude protein and amino acid digestibility of ensiled and dried cassava leaves and sweet potato vines in growing pigs[J]. Animal Feed Science and Technology, 2012, 172(3/4): 171-179. DOI:10.1016/j.anifeedsci.2011.11.009.
- SUN M, MU T, ZHANG M, et al. Nutritional assessment and effects of heat processing on digestibility of Chinese sweet potato protein[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2012, 26(1/2): 104-110. DOI:10.1016/j.jfca.2012.03.008.



- [12] 唐忠厚, 李洪民, 马代夫. 甘薯蛋白质含量近红外反射光谱分析模型应用研究[J]. 中国食品学报, 2008(4): 169-173. DOI:10.3969/j.issn.1009-7848.2008.04.028.
- [13] MAGWAZA L, NAIDOO S, LAURIE S, et al. Development of NIRS models for rapid quantification of protein content in sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) LAM.][J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 72: 63-70. DOI:10.1016/j.lwt.2016.04.032.
- [14] 王洋洋. 基于高光谱成像技术快速预测生鲜甘薯品质研究[D]. 新乡: 河南科技学院, 2022: 25-48. DOI:10.27704/d.cnki.gnhkj.2022.000058.
- [15] 李鑫, 王雨生, 陈海华. 海藻酸钠结合超低温冷冻处理对甘薯淀粉颗粒结构和性质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(3): 47-53. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210112-135.
- [16] LU Guoquan, HUANG Huahong, ZHANG Dapeng. Prediction of sweetpotato starch physiochemical quality and pasting properties using near-infrared reflectance spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2006, 94(4): 632-639. DOI:10.1016/j.foodchem.2005.02.006.
- [17] LU Guoquan., HUANG Huahong, ZHANG Dapeng. Application of near-infrared spectroscopy to predict sweet potato starch thermal properties and noodle quality[J]. Journal of Zhejiang University Science B, 2006, 7(6): 475-481. DOI:10.1631/jzus.2006.B0475.
- [18] 唐忠厚, 李洪民, 陆国权. 基于近红外光谱的甘薯抗性淀粉含量的快速测定方法[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(6): 426-429. DOI:10.3969/j.issn.1000-4440.2011.06.050.
- [19] 唐忠厚, 李洪民, 李强, 等. 基于近红外光谱技术预测甘薯块根淀粉与糖类物质含量[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(6): 1260-1265. DOI:10.3969/j.issn.1000-4440.2013.06.013.
- [20] 卜晓朴, 李永玉, 闫帅. 基于可见-近红外光谱的生鲜紫薯食味品质快速无损检测[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(11): 2703-2709. DOI:10.3969/j.issn.2095-0381.2018.11.026.
- [21] DIAZ J T, VEAL M W, CHINN M S. Development of NIRS models to predict composition of enzymatically processed sweet potato[J]. Industrial Crops and Products, 2014, 59: 119-124. DOI:10.1016/j.indcrop.2014.05.012.
- [22] 卜晓朴, 李永玉. 基于可见-近红外光谱技术对市售紫薯粉的品质评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(11): 2697-2702. DOI:10.3969/j.issn.2095-0381.2018.11.025.
- [23] CHU C Y, SEN B, LAY C H, et al. Direct fermentation of sweet potato to produce maximal hydrogen and ethanol[J]. Applied Energy, 2012, 100: 10-18. DOI:10.1016/j.apenergy.2012.06.023.
- [24] LIU Y, CHEN Q, ZHOU M, et al. Sweet potato study in China: stress response mechanisms, molecular breeding, and productivity[J]. Journal of Plant Physiology, 2020, 254: 153283. DOI:10.1016/j.jplph.2020.153283.
- [25] 高丽, 潘从飞, 陈嘉, 等. 甘薯水分和还原糖协同向量NIR快速检测方法[J]. 食品科学, 2017, 38(22): 205-210. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201722031.
- [26] HE Hongju, WANG Yangyang, ZHANG Mian, et al. Rapid determination of reducing sugar content in sweet potatoes using NIR spectra[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 111: 104641. DOI:10.1016/j.jfca.2022.104641.
- [27] 卜晓朴, 彭彦昆, 王文秀, 等. 生鲜紫薯花青素等多品质参数的可见-近红外快速无损检测[J]. 食品科学, 2018, 39(16): 227-232. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201816033.
- [28] ONWUDE D I, HASHIM N, ABDAN K, et al. Combination of computer vision and backscattering imaging for predicting the moisture content and colour changes of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) during drying[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150: 178-187. DOI:10.1016/j.compag.2018.04.015.
- [29] 中国标准出版社第一编辑室. 淀粉及淀粉制品标准汇编[G]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 523-531.
- [30] SUN Yue, LIU Yunhong, YU Huichun, et al. Non-destructive prediction of moisture content and freezable water content of purple-fleshed sweet potato slices during drying process using hyperspectral imaging technique[J]. Food Analytical Methods, 2017, 10(5): 1535-1546. DOI:10.1007/s12161-016-0722-0.
- [31] HEO S, CHOI J Y, KIM J, et al. Prediction of moisture content in steamed and dried purple sweet potato using hyperspectral imaging analysis[J]. Food Science and Biotechnology, 2021, 30(6): 783-791. DOI:10.1007/s10068-021-00.
- [32] 许建东. 基于光谱与成像技术的甘薯品质检测研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2021: 19-49. DOI:10.27285/d.cnki.gsxn.2021.000136.
- [33] GE J, HU Y, WANG H, et al. Profiling of anthocyanins in transgenic purple-fleshed sweet potatoes by HPLC-MS/MS[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(14): 4995-5003. DOI:10.1002/jsfa.8379.
- [34] JIANG T, MA, Y, SUI L, et al. Degradation of anthocyanins and polymeric color formation during heat treatment of purple sweet potato extract at different pH[J]. Food Chemistry, 2018, 274: 460-470. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.07.141.
- [35] HUANG Y, ZHOU S, ZHAO G, et al. Destabilisation and stabilisation of anthocyanins in purple-fleshed sweet potatoes: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 116: 1141-1154. DOI:10.1016/j.tifs.2021.09.013.
- [36] RIBERA-FONSECA A, NOFERINI M, ROMBOLÁ A D. Non-destructive assessment of highbush blueberry fruit maturity parameters and anthocyanins by using a visible/near infrared (vis/NIR) spectroscopy device: a preliminary approach[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2016, 16(1): 174-186. DOI:10.4067/S0718-95162016005000014.
- [37] LI Y, ZOU X, SHEN T, et al. Determination of geographical origin and anthocyanin content of black goji berry (*Lycium ruthenicum* Murr.) using near-infrared spectroscopy and chemometrics[J]. Food Analytical Methods, 2017, 10(4): 1034-1044. DOI:10.1007/s12161-016-0666-4.
- [38] ZHANG N, LIU X, JIN X, et al. Determination of total iron-reactive phenolics, anthocyanins and tannins in wine grapes of skins and seeds based on near-infrared hyperspectral imaging[J]. Food Chemistry, 2017, 237: 811-817. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.06.007.
- [39] HUANG X, ZOU X, ZHAO J, et al. Measurement of total anthocyanins content in flowering tea using near infrared spectroscopy combined with ant colony optimization models[J]. Food Chemistry, 2014, 164: 536-543. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.05.072.
- [40] DYKES L, HOFFMANN L, PORTILLO-RODRIGUEZ O, et al. Prediction of total phenols, condensed tannins, and 3-deoxyanthocyanidins in sorghum grain using near-infrared (NIR) spectroscopy[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 60(1): 138-142. DOI:10.1016/j.jcs.2014.02.002.
- [41] 衣申艳, 陆国权. 甘薯黄酮含量近红外反射光谱分析模型的构建及其应用[J]. 光谱实验室, 2013, 30(2): 860-864. DOI:10.3969/j.issn.1004-8138.2013.02.082.
- [42] 李长新. 紫色小白菜花青素理化性质研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011: 16-32.
- [43] 高彦祥, 许正虹. 紫甘薯色素研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2005(1): 1-6. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2005.01.001.
- [44] TOLEDO-MARTIN M, GARCIA-GARCIA E C, FONT M, et al. Application of visible/near-infrared reflectance spectroscopy for predicting internal and external quality in pepper[J]. Journal of

- the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(9): 3114-3125. DOI:10.1002/jsfa.7488.
- [45] 田潇瑜, 黄星奕, 白竣文, 等. 基于近红外光谱技术的紫薯贮藏期间花青素含量检测[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 350-355. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.040.
- [46] PENG Jing, WANG Ke, MA Chen, et al. Determination of anthocyanin and moisture content of purple sweet potatoes during drying process by their optical properties in the 400–1 050 nm range[J]. Food Chemistry, 2021, 359: 129811. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.129811.
- [47] LIU Yunhong, SUN Yue, XIE Anguo, 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. DOI:10.1007/s12161-017-0950-y.
- [48] TIAN Xiaoyu, AHETO J H, BAI Junwen, et al. Quantitative analysis and visualization of moisture and anthocyanins content in purple sweet potato by vis-NIR hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(2): e15128. DOI:10.1111/jfpp.15128.
- [49] MARTÍNEZ-VALDIVIESO D, FONT R, BLANCO-DÍAZ M, et al. Application of near-infrared reflectance spectroscopy for predicting carotenoid content in summer squash fruit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 108: 71-79. DOI:10.1016/j.compag.2014.07.003.
- [50] TILAHUN S, SEO M H, HWANG I G, et al. Prediction of lycopene and  $\beta$ -carotene in tomatoes by portable chroma-meter and VIS/NIR spectra[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 136: 50-56. DOI:10.1016/j.postharvbio.2017.10.007.
- [51] LASTRAS C, REVILLA I, GONZÁLEZ-MARTÍN M I, et al. Prediction of fatty acid and mineral composition of lentils using near infrared spectroscopy[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 102: 104023. DOI:10.1016/j.jfca.2021.104023.
- [52] 王姣姣, 刘浩, 任贵兴. 豌豆品质性状近红外模型建立及区域差异分析[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(4): 779-787; 801. DOI:10.13430/j.cnki.jpgr.2014.04.015.
- [53] 刘敏轩, 王赟文, 韩建国. 高粱籽粒中多酚类物质的傅立叶变换近红外光谱分析[J]. 分析化学, 2009, 37(9): 1275-1280. DOI:10.3321/j.issn:0253-3820.2009.09.005.
- [54] 王绍清, 高峡, 兰巧峰, 等. 掺假藕粉中木薯淀粉和甘薯淀粉的鉴别-差示扫描量热法[J]. 食品工业科技, 2015, 36(13): 325-328; 333. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.13.059.
- [55] HE H J, CHEN Y, LI G, et al. Hyperspectral imaging combined with chemometrics for rapid detection of talcum powder adulterated in wheat flour[J]. Food Control, 2023, 144: 109378. DOI:10.1016/j.foodcont.2022.109378.
- [56] DING Xiaoxiao, NI Yongnian, KOKOT S. NIR spectroscopy and chemometrics for the discrimination of pure, powdered, purple sweet potatoes and their samples adulterated with the white sweet potato flour[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2015, 144: 17-23. DOI:10.1016/j.chemolab.2015.03.004.
- [57] 陈嘉, 高丽, 叶发银, 等. 基于近红外光谱与支持向量机的甘薯粉丝掺假快速检测[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(11): 211-218. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.019234.
- [58] LIU Jia, WEN Yu, DONG Nan, et al. Authentication of lotus root powder adulterated with potato starch and/or sweet potato starch using Fourier transform mid-infrared spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 3103-3109. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.05.155.
- [59] SU Wenhao, BAKALIS S, SUN Dawen. Chemometrics in tandem with near infrared (NIR) hyperspectral imaging and Fourier transform mid infrared (FT-MIR) microspectroscopy for variety identification and cooking loss determination of sweet potato[J]. Biosystems Engineering, 2019, 180: 70-86. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2019.01.005.
- [60] 郑艺蕾. 基于高光谱和太赫兹光谱的甘薯品质检测方法研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2020: 13-24. DOI:10.27147/d.cnki.ghdju.2020.000076.
- [61] 徐庆贤, 沈恒胜, 林斌, 等. 利用近红外漫反射光谱(NIRS)技术建立甘薯茎叶重金属预测模型[J]. 福建农业学报, 2011, 26(3): 440-445. DOI:10.3969/j.issn.1008-0384.2011.03.021.
- [62] 曹海燕, 潘王盈, 施永清, 等. 近红外光谱技术快速检测紫薯干平面中菌落总数及新鲜度[J]. 中国食品学报, 2016, 16(10): 160-166. DOI:10.16429/j.1009-7848.2016.10.022.