

# 近红外光谱分析技术在五类蔬菜理化特性分析中的应用

韩霜<sup>1</sup>, 张平平<sup>1</sup>, 童未名<sup>2</sup>, 陈迈<sup>1</sup>, 朱祝军<sup>1</sup>, 吴建国<sup>1\*</sup>, 朱志玉<sup>1\*</sup>

(1. 浙江农林大学农业与食品科学学院, 浙江省农产品品质改良技术研究重点实验室, 浙江农林大学生物种业研究中心, 浙江临安 311300; 2. 金华市婺城区农林局植保测报土肥站, 浙江金华 321000)

**摘要** 近红外光谱技术是一种具有无损、快速、低成本等诸多特点的新型分析检测技术, 国内外学者关于近红外光谱技术在蔬菜理化特性检测上的应用研究已经持续多年。概述近年来近红外光谱分析技术在 5 种不同类型的蔬菜理化特性检测中的应用, 并对其在蔬菜理化特性检测方面的应用前景进行分析与展望, 提出光谱的稳定性对构建的数学模型的稳定性和适用性具有很大的影响, 今后近红外光谱分析技术的研究可以向着资源共享以提高利用率方向发展。

**关键词** 近红外光谱; 蔬菜; 理化特性; 校正

**中图分类号** TS 255.7 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)32-0014-03

## Application of Near-infrared Spectroscopy in Analysis of Physical and Chemical Properties on Five Kinds of Vegetables

HAN Shuang-shuang<sup>1</sup>, ZHANG Ping-ping<sup>1</sup>, TONG Wei-ming<sup>2</sup> et al (1. College of Agriculture and Food Science, Zhejiang A&F University, Zhejiang Provincial Agricultural Product Quality Improvement Technology Research Key Laboratory, Biology Center of Zhejiang A & F University, Lin'an, Zhejiang 311300; 2. Plant Protection, Forecasting and Soil Fertilizer Station, Agricultural and Forestry Bureau of Wucheng District in Jinhua, Jinhua, Zhejiang 321000)

**Abstract** Near-infrared spectroscopy Technology is a new type of analysis and detection technology with many features such as non-destructive, fast and low-cost. The research on the application of near-infrared spectroscopy in the detection of physical and chemical properties of vegetables has been conducted for many years by the scholars in the world. The application of near-infrared spectroscopy in the detection of physical and chemical properties of these five different types of vegetables was summarized in recent years, and looked ahead its application prospects in the physical and chemical properties of vegetables. And made the point of view that the stability of the spectrum has a great influence on the stability and applicability of the mathematical model constructed and the research on near-infrared spectroscopy technology can be developed toward resource sharing to improve the utilization rate in the future.

**Key words** Near-infrared spectroscopy; Vegetable; Physicochemical properties; Calibration

我国是以植物性食物为主的国家, 在我国居民膳食中, 蔬菜的构成比例高达 33.7%。常见蔬菜含有人体所需要的多种维生素、矿物质、碳水化合物、纤维素、有机酸、芳香物质等营养成分。据国际粮农组织 1990 年及 2009 年的统计, 人体必需的  $V_C$ 、 $V_A$  分别有 90%、60% 来自蔬菜, 中国年人均鲜菜占有量约为 279.4 kg, 明显超过世界年人均鲜菜占有量, 蔬菜的地位日趋重要。

随着蔬菜地位的提高, 人们对蔬菜品质的要求呈现多元化倾向, 不仅要求有菜吃, 还要求品种多样, 营养丰富, 新鲜无污染, 蔬菜的理化特性引起广大科研工作者和消费者的广泛关注。传统的蔬菜理化特性检测过程工程量大, 耗时久, 成本高, 无法满足蔬菜品种快速筛选的要求, 蔬菜理化特性无损检测应运而生, 前人已经研究出一些蔬菜无损检测技术, 包括利用蔬菜的电学特性、光学特性、声波振动特性以及核磁共振技术、机器视觉技术、电子鼻技术和撞击技术等。近红外光谱分析技术利用光学特性, 对蔬菜理化特性进行高精度、高效率的检测。

近红外光(near infrared, NIR)是介于可见光和中红外光之间的电磁波, 其波长范围为 780~2 526 nm, 波数范围为

12 820~3 959  $\text{cm}^{-1}$ , 主要信息是含氢基团  $X-H$  ( $X = C, N, O, S$ ) 振动的倍频和合频吸收, 其中包含大多数类型有机化合物的组成和分子结构的信息。在近红外光谱区, 蔬菜中含有的水、糖、蛋白质、脂肪、淀粉和纤维等化合物均有其相应的特征吸收波长, 而且符合比尔定律, 因此, 可以通过待测样品对近红外光的吸收值来计算对应的成分含量, 从而完成样品中某种化学组分的分析。且因近红外光谱检测技术具有实时、快速、无损、环保和多组分同时分析等特点, 在蔬菜理化特性检测中得到广泛的应用。

蔬菜根据其食用部位不同, 大致可以分为根菜类、茎菜类、叶菜类、花菜类、果菜类 5 类。除了矿物质、维生素、纤维等营养物质, 蔬菜的大小、颜色、形状、收获时间、病害和农药残留, 都是很重要的检测对象。

### 1 在根菜类蔬菜理化特性分析中的应用

根菜类蔬菜是指以变态的肥大根部作为食用部分的蔬菜, 如萝卜、胡萝卜、芜菁等。

Takizawa 等<sup>[1]</sup>使用近红外光谱技术非破坏性检验日本萝卜的黑心病和内部缺陷, 选用一阶导数(first derivative, 1st D), 通过逐步前项选择方法计算选定 Vis/NIR 波长, 用作线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)、偏最小二乘法结合判别分析(partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA)和神经网络(artificial neural network, ANN)的分类参数。

欧文娟等<sup>[2]</sup>基于化学计量学, 利用可见-近红外反射光谱快速检测有机胡萝卜、绿色胡萝卜和无公害胡萝卜。采用主成分分析结合线性判别分析鉴别样本的准确率为 100%,

**基金项目** 杭州市科技项目(20140932H31); 浙江省“三农六方”项目(2045210244); “浙江省省级现代种业发展工程”农作物种质保护项目(2015004)。

**作者简介** 韩霜(1990—), 女, 安徽阜南人, 硕士研究生, 研究方向: 园艺作物遗传育种。\*通讯作者, 吴建国, 教授, 博士, 从事蔬菜遗传育种等研究; 朱志玉, 农艺师, 硕士, 从事园艺作物遗传育种等研究。

**收稿日期** 2018-07-19

为质量检验机构提供一个可行的检测方法。郭泽慧<sup>[3]</sup>采用偏最小二乘回归(PLS)搭配一阶导数(1st D)处理建立了预测萝卜根中硫苷含量的定标方程,采用主成分回归(principal component regression, PCR)搭配一阶导数(1st D)建立了预测萝卜叶中硫苷含量的定标方程,为萝卜种质资源的评价提供了新方法。

## 2 在茎菜类蔬菜理化特性分析中的应用

茎菜类蔬菜是以肥大的变态茎作为食用部分的蔬菜,按生长状况可分为地上茎和地下茎。地上茎,即可食部分生长在地上,如茼蒿、紫菜苔等。地下茎,即可食部分生长在地下,这类又分为块茎,如山药、芋头、马铃薯等;根茎,如藕、姜等;球茎,如慈菇等;鳞茎,如大蒜、洋葱等;嫩茎,如竹笋、茭白等。

Jantra 等<sup>[4]</sup>研究一种基于可见光和近红外光谱的无损检测方法,可以用于检测洋葱和大蒜的干物质和可溶性固形物含量。采用偏最小二乘法(PLS)建立的预测模型表明,在赤道和肩部获取的光谱数据的预测性能优于根部位置。这些结果表明手持式光谱仪可以很好地检测洋葱和大蒜的品质,为生产提供依据。国外学者评价了近红外反射光谱在波长 350~2 500 nm 对完整绿芦笋进行分类的能力<sup>[5-6]</sup>,采用偏最小二乘法(PLS)结合判别分析(PLS2DA)建立校正模型,能很好地预测完整绿芦笋的质构参数、采购处理方法和贮藏时间,校正模型  $R_p^2$  介于 0.55~0.67,交叉验证模型  $R_p^2$  介于 0.60~0.74。Liu 等<sup>[7]</sup>采用偏最小二乘法(PLS)结合 Savitzky Golay 平滑算法,筛选出检测芥菜中 ANN 的最适波长(1702~2349nm),所建模型用于预测的验证决定系数  $R_p^2$  和验证均方根误差(root mean square error of prediction, RMSEP)分别为 0.962 和 0.380 mg/g,表明近红外光谱模型稳定性较好,验证效果较好,可以用于块茎芥菜品质的无损检测。Rady 等<sup>[8]</sup>为了研究马铃薯糖分含量对压榨工业的影响,使用近红外光谱反射技术对 2 种马铃薯的葡萄糖和蔗糖含量进行预测。在 900~1 685 nm 波长范围内,利用偏最小二乘回归(PLS)方法建立了葡萄糖和蔗糖的预测模型。预测结果与实际含量相似性达到 82%。

孟庆琰等<sup>[9]</sup>对马铃薯全粉蛋白质进行无损检测,运用偏最小二乘回归系数选择特征波长建立的马铃薯全粉蛋白质校正和验证模型优于全波段和特征波段建立的模型。孙旭东等<sup>[10]</sup>探讨马铃薯全粉还原糖含量快速检测方法。经过变量筛选和 RBF 核函数参数优化,建立的马铃薯全粉还原糖含量 LSSVM 校正模型预测结果最优,提高了 LSSVM 校正模型的预测精度,克服了近红外光谱变量与还原糖含量间非线性因素的影响。龚海燕等<sup>[11]</sup>利用近红外光谱技术来快速鉴定铁棍山药和非铁棍山药。根据近红外光谱结合一致性检验,光谱一致性指数 CI 在 4 以下的为铁棍山药,光谱一致性在 4 以上的为非铁棍山药。张拥军等<sup>[12]</sup>采用偏最小二乘法(PLS)分别建立莲藕水分、粗纤维、质构和糖度的模型,其中质构的 PLS 模型最理想,模型的相关系数大于 0.97;粗纤维、糖度和水分的 PLS 模型的相关系数均大于 0.88,实现了莲藕

品质指标的快速无损检测。涂静等<sup>[13]</sup>采用多元散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)、一阶导数(1st D)和平滑等结合对原始光谱进行预处理,搭配联合区间偏最小二乘法(SiPLS)建立的预测莲藕淀粉含量的模型,可以满足实际应用要求。宋夏钦等<sup>[14]</sup>采用傅里叶变化近红外光谱技术与偏最小二乘法(PLS)建立雷笋品质参数的校正模型,可以快速检测雷竹笋的硬度、色差和水分含量。周竹等<sup>[15]</sup>为了提高应用近红外光谱技术无损检测雷竹竹笋硬度的精度,采用正态能量变换(standard normal variate transformation, SNV)、去趋势变换(detrend)、一阶导数(1st D)、二阶导数(second derivative, 2nd D)等方法对原始光谱进行处理,建模结果显示,标准正态变量变换预处理建立的 PLS 模型最优,该模型的校正集的  $R^2$  和验证集的  $R_p^2$  分别从无预处理时的 0.920、0.895 提高到 0.928、0.901;RMSEC(校正均方根误差, root mean standard error of calibration) 和 RMSEP 则分别从无预处理时的 0.653、0.739 N/cm<sup>2</sup> 下降为 0.619、0.718 N/cm<sup>2</sup>。此外,建模所用因子数也从 19 减少到 18,而其他预处理方法的改善效果不佳。

## 3 在叶菜类蔬菜理化特性分析中的应用

叶菜类是以肥嫩菜叶、叶柄作为食用部分的蔬菜,这类蔬菜生长期短,适应性强,一年四季都有供应。常见的叶菜有普通叶菜,如小白菜、油菜、菠菜等;结球叶菜,如大白菜、卷心菜等;香辛叶菜,如大葱、韭菜、香菜等。

Bala 等<sup>[16]</sup>建立了用傅里叶变换近红外光谱(FT-NIR)无损估计完整油菜籽粒中总酚和粗纤维含量的校准模型。采用传统的化学方法对 115 个芥菜型油菜总酚和粗纤维含量进行定量分析,利用偏最小二乘法(PLS)和校正模型,对其近红外光谱的傅里叶变换与所得数据进行相关分析,得到总酚和粗纤维的最佳模型。Kramchote 等<sup>[17]</sup>使用近红外光谱快速鉴定甘蓝的质量,选取 500~1 000 nm 的波长范围,使用一阶和二阶导数 2 种方式来增强偏最小二乘回归建立的校正模型,建立了水分、可溶性固形物和抗坏血酸的近红外光谱检测模型。金同铭等<sup>[18]</sup>用近红外光谱法对我国主要产地的大白菜不同品种及不同成熟期的粗蛋白、中性纤维、还原糖及  $V_c$  进行检测,检测结果指出近红外法测值与化学法测值的相关系数  $R^2$  分别为 0.994、0.978、0.974 和 0.981,可以在实践中应用。王多加等<sup>[19]</sup>运用傅里叶变换近红外光谱仪,以二阶导数处理光学数据,用偏最小二乘法(PLS)进行统计分析,对 58 个外观形状不同的生菜样品建立硝酸盐含量快速检测模型。其预测结果与国标方法相比相关系数为 0.981 9,检测相对误差为 0.56%~6.79%。胡东<sup>[20]</sup>使用一阶导数(1st D)对韭菜在 350~2 500 nm 波段的光谱进行预处理,把预处理后的光谱数据作为变量建立 Boosting 分类模型,校正集和预测集分类精度均为 1,可以识别韭菜样本表面的农药种类。

## 4 在花菜类蔬菜理化特性分析中的应用

花菜类是以菜的花部作为食用部分的蔬菜,常见的有花椰菜、金针菜、青花菜、紫菜蔓、朝鲜蓟和芥蓝等。

Chen 等<sup>[21]</sup>评估了近红外反射光谱(NIRS)预测芥蓝中叶黄色和 $\beta$ -胡萝卜素含量的能力,使用偏最小二乘法(PLS)建立的模型效果最佳,校正方程 $R^2$ 分别为0.983和0.982,表明近红外光谱可以用于测定芥蓝中的类胡萝卜素。Sahamishirazi 等<sup>[22]</sup>采用改进的偏最小二乘回归法建立近红外光谱的定标方程,用以检测花椰菜的硫代葡萄糖苷含量,使用预测系数( $R^2$ )和偏好测定比值(RPD)对校准结果进行分型,证明近红外光谱具有良好的潜力,可以用于大样本的定量和定性。

## 5 在果菜类蔬菜理化特性分析中的应用

果菜类是以果实或种子作为食用部分的蔬菜,这类果菜可分为:茄果类,如番茄、茄子、辣椒等;瓜类,如黄瓜、冬瓜、南瓜、丝瓜等,这类蔬菜耐热耐旱;荚类,如毛豆、豇豆荚等。

Sirisomboon 等<sup>[23]</sup>在使用近红外光谱技术检测番茄质构特性时,采用多元散射校正(MSC)对光谱进行预处理,建立的校正模型 $R^2$ 为0.95,最低标准误差为0.35n,偏差为0.19n。Kavdir 等<sup>[24]</sup>用可见光和近红外光谱学方法测量不同品种的酸黄瓜的硬度、表皮和果肉的颜色、干物质含量,采用偏最小二乘法(PLS)建立校正模型。酸黄瓜的硬度、表皮颜色、果肉颜色、干物质最好的 PLS 校正模型决定系数( $R^2$ )分别为0.70、0.89、0.34、0.65。根据使用的仪器不同,可以正确区分81%~100%样品采收后的储存时间。Sánchez 等<sup>[25]</sup>使用近红外反射光谱非破坏性测量432个甜瓜果浆的颜色。对于参数 $a^*$ 、 $b^*$ 、 $c^*$ 和 $h^*$ ,得到决定系数 $R^2$ 和交叉验证误差均方根(RMSECV)分别为 $a^*$ (0.96, 2.16  $\mu\log(1/R)$ ),  $b^*$ (0.85, 3.25  $\mu\log(1/R)$ ),  $c^*$ (0.82, 3.76  $\mu\log(1/R)$ )和 $h^*$ (0.96, 3.64  $\mu\log(1/R)$ )。这些表明,用近红外法测定蔬菜的营养成分具有与化学法相近似的准确性和精密性。

王凡等<sup>[26]</sup>基于可见-近红外漫透射原理,将平均光谱结合15点SG卷积平滑(SG-Smooth)、标准正态变量变换(SNV)、多元散射校正(MSC)、一阶导数(1st D)等方法,自行搭建番茄可见-近红外漫透射多品质检测系统。马兰等<sup>[27]</sup>应用近红外漫反射光谱技术对番茄可溶性固形物含量进行非破坏性的检测分析,比较10种不同的光谱预处理方法对偏最小二乘法(PLS)模型的影响。结果表明,常数偏移消除是适合建立近红外光谱无损检测番茄可溶性固形物含量PLS模型的最优光谱预处理方法。刘燕德等<sup>[28]</sup>为了消除光谱中无关信息和噪音的影响,比较一阶导数(1st D)、二阶导数(2nd D)、平滑(Smoothing)算法、标准正态变量变换(standard normal variate transformation, SNV)、去趋势算法(De-trending)、多元散射校正(MSC)及一阶导数加多元散射校正(1st D+MSC)7种预处理方法的优化效果,建立了辣椒可溶性固形物和 $V_c$ 含量的近红外光谱检测方法。其中,最优SSC模型所对应的预处理方法为1st D+MSC,其校正集 $R^2$ 为0.994, RMSEC为0.119°Brix,验证集 $R_p^2$ 为0.956, RMSEP为0.309°Brix。最优 $V_c$ 模型所对应的预处理方法为SNV,其校正集 $R^2$ 为0.949, RMSEC为106.96 mg/kg,验证集 $R_p^2$ 为0.812, RMSEP为201.89 mg/kg。

## 6 展望

国内外学者关于近红外光谱技术在蔬菜理化特性检测上的应用研究已经持续多年,该方法准确度高,检测速度快(取得一个样品的光谱数据后可立刻得到定量分析结果,整个过程只需几秒),既无损又环保,是一种非常值得推广的绿色分析方法。

模型的建立是近红外光谱分析技术的关键,它直接影响近红外光谱分析的工作效率和质量,而光谱的稳定性对构建的数学模型的稳定性和适用性具有很大的影响。因此,确定出一个规范的光谱采集方法至关重要。通过不断深入研究,确定不同蔬菜品种对应的光谱采集方法,增加仪器状态、环境温度、样品采收标准、检测参数等条件的稳定性,可以增强光谱的稳定性,提高数学模型的稳定性和适用性。

目前,近红外光谱在蔬菜理化特性检测中的应用研究大多停留在实验室阶段,如何高效地利用现有的NIRS模型数据库资源也是急需解决的问题。在网络建立相应的平台,实现模型维护、模型传递、专业化软件开发等共享机制,必然成为研究的热点问题。

## 参考文献

- [1] TAKIZAWA K, NAKANO K, OHASHI S, et al. Development of nondestructive technique for detecting internal defects in Japanese radishes[J]. Journal of food engineering, 2014, 126(1): 43-47.
- [2] 欧文娟, 孟耀勇, 张平丽, 等. 可见-近红外光谱结合化学计量学认证有机胡萝卜、绿色胡萝卜和无公害胡萝卜(英文)[J]. 激光生物学报, 2015, 24(1): 46-54.
- [3] 郭泽慧. 萝卜硫苷组分近红外定标模型的构建[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017.
- [4] JANTRA C, SLAUGHTER D C, LIANG P S, et al. Nondestructive determination of dry matter and soluble solids content in dehydrator onions and garlic using a handheld visible and near infrared instrument[J]. Postharvest biology and technology 2017, 133: 98-103.
- [5] SÁNCHEZ M T, PÉREZ-MARÍN D, FLORES-ROJAS K, et al. Use of near-infrared reflectance spectroscopy for shelf-life discrimination of green asparagus stored in a cool room under controlled atmosphere[J]. Talanta, 2009, 78(2): 530-536.
- [6] FLORES-ROJAS K, SÁNCHEZ M T, PÉREZ-MARÍN D, et al. Quantitative assessment of intact green asparagus quality by near infrared spectroscopy[J]. Postharvest biology and technology, 2009, 52(3): 300-306.
- [7] LIU Z Y, LIU B, PAN T, et al. Determination of amino acid nitrogen in tuber mustard using near-infrared spectroscopy with waveband selection stability[J]. Spectrochimica acta part A: Molecular and biomolecular spectroscopy, 2013, 102(2): 269-274.
- [8] RADY A M, GUYER D E. Evaluation of sugar content in potatoes using NIR reflectance and wavelength selection techniques[J]. Postharvest biology and technology, 2015, 103: 17-26.
- [9] 孟庆琰, 何建国, 刘贵珊, 等. 基于近红外光谱技术的马铃薯全粉蛋白质无损检测[J]. 食品科技, 2015(3): 287-291.
- [10] 孙旭东, 董小玲. 近红外光谱快速检测马铃薯全粉还原糖[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 262-268.
- [11] 龚海燕, 白雁, 宋瑞丽, 等. 近红外光谱结合聚类分析鉴别铁棍山药和白玉山药[J]. 中国医院药学杂志, 2010, 30(9): 735-737.
- [12] 张拥军, 陈华才, 蒋家新, 等. 莲藕成分的近红外光谱分析模型的建立[J]. 中国食品学报, 2008, 8(6): 122-127.
- [13] 涂静, 张慧, 黄敏, 等. 莲藕淀粉含量的近红外光谱无损检测方法[J]. 食品与生物技术学报, 2013, 32(9): 972-977.
- [14] 宋夏钦, 王琪, 王丽, 等. 基于近红外光谱技术的雷竹笋品质指标快速检测方法研究[J]. 中国食品学报, 2013, 13(9): 190-195.
- [15] 周竹, 郑剑, 王允祥, 等. 雷竹笋硬度的近红外光谱检测模型优化[J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(6): 875-882.
- [16] BALA M, SINGH M. Non destructive estimation of total phenol and crude fiber content in intact seeds of rapeseed-mustard using FTNIR[J]. Industrial crops and products, 2013, 42: 357-362.

- [10] 徐世涛,陈云娇,侯读成,等.利用微生物降解烟梗中细胞壁物质的响应曲面优化[J].食品工业,2017,38(2):45-49.
- [11] 闫克玉.烟草化学[M].郑州:郑州大学出版社,2002:50.
- [12] LENDVAY A T.Upgraded tobacco stem material and its method of preparation;US4244381[P].1981-01-13.
- [13] KERITSIS G D,SUN H H,WRENN S E.Process for enzymatic treatment of tobacco materials;EP0185486 [P].1986-06-25.
- [14] 程向红,王培锋,彭玉富,等.烟梗主要化学成分特征及其与巴豆醛释放量的关系[J].中国烟草科学,2018,39(1):85-90.
- [15] SCHLOTZHAUER W S,MARTIN R M,SNOOK M E,et al.Pyrolytic studies on the contribution of tobacco leaf constituents to the formation of smoke catechols[J].Journal of agricultural & food chemistry,1982,30(2):372-374.
- [16] 张素文.烟梗木质素降解工艺研究[D].广州:华南理工大学,2016:1,5.
- [17] 王小飞,常岭,王相凡,等.造纸法再造烟叶原料烟梗木质素的弱碱脱除研究[J].食品工业,2013,34(9):10-12.
- [18] 孙德城,龙明海,石志发,等.梗丝在卷烟减害降焦及提质中的应用[J].安徽农业科学,2017,45(14):83-86.
- [19] 英美烟草(投资)有限公司.减少烟草中含氮化合物和木质素的方法:CN03825007.1[P].2005-11-09.
- [20] 侯轶,刘超,李友明,等.碱性离子液体提取后烟梗纤维形态及抄造性能的变化[J].华南理工大学学报(自然科学版),2016,44(6):35-40.
- [21] 徐维华,罗登山.卷烟工艺规范[M].北京:中国轻工业出版社,2016:74.
- [22] 朱高承,解广雷,陈可金,等.一种立式双仓螺旋浸梗机[J].科技创新导报,2016(16):45-46.
- [23] 李军,武小松,安浩,等.一种增大浸梗机内烟梗回潮时间跨度的方法[J].中国高新区,2017(4):68.
- [24] 王学军,赵序勇,王广超.小分子团水浸梗工艺研究[J].科技创新导报,2016(4):6-7.
- [25] 上烟办.行业重点科技项目“梗丝再造工艺、装备及应用研究”通过国家局科技成果鉴定[N].东方烟草报,2016-10-17(001).
- [26] 谷超林,崔龙吉,刘文春,等.再造梗丝与普通梗丝使用性能对比研究[J].安徽农业科学,2018,46(18):171-173,193.
- [27] Roger Zygmunt de La Burde.Method of preventing the shrinkage of puffed tobacco and product obtained thereby;US3409027[P].1968-11-05.
- [28] ZI W H,PENG J H,ZHANG X L,et al.Optimization of waste tobacco stem expansion by microwave radiation for biomass material using response surface methodology[J].Journal of the taiwan institute of chemical engineers,2013,44(4):678-685.
- [29] 高锐,黄志强,王松峰,等.烟梗微波膨胀条件优化及其对烟梗化学成分和物理结构的影响[J].河南农业科学,2013,42(11):50-54.
- [30] JOSEFSSON T,LENNHOLM H,GELLERSTEDT G.Changes in cellulose supramolecular structure and molecular weight distribution during steam explosion of aspen wood[J].Cellulose,2001,8(4):289-296.
- [31] 张文军,周桂园,秦瑜,等.造纸法再造烟叶原料提升品质技术研究进展[J].工业技术创新,2017,4(1):174-176.
- [32] 赵春雷,苏瑶,寇霄腾,等.预处理方法对再造烟叶中烟梗品质的影响[J].食品与机械,2017,33(5):211-215.
- [33] 宋光富,李刚,李东亮,等.蒸汽爆破对烟梗化学成分含量及显微结构的影响[J].烟草科技,2013(1):42-45.
- [34] 李力,李东亮,冯广林,等.蒸汽爆破技术在烟梗加工中的应用[J].烟草科技,2013(1):42-45.
- [35] TISCHER P C S F,SIERAKOWSKI M R,WESTFAHL H,et al.Nano-structural reorganization of bacterial cellulose by ultrasonic treatment[J].Biomacromolecules,2010,11(5):1217-1224.
- [36] XU Y J,YAN Y,YUE X P,et al.Effects of ultrasonic wave pretreatment on the fibrillation of cellulose fiber[J].Tappi journal,2014,13(4):37-43.
- [37] 任世学,方桂珍.超声波处理对碱木素官能团含量的影响[J].中国造纸,2005,24(4):20-22.
- [38] 阮昕,李彪,侯读成,等.超声波耦合酶反应去除烟梗中果胶和纤维素的工艺优化[J].贵州农业科学,2015,43(2):145-149.
- [39] 吴雨松,和智君,董高峰,等.碳化现象对微波膨胀烟梗质量影响的研究[J].食品工业,2017,38(11):170-173.
- [40] 范运涛,张碰元,马东萍,等.利用脲碱法处理烟梗提高造纸法再造烟叶的品质[J].云南大学学报(自然科学版),2010,32(S1):168-173.
- [41] MCMILLAN J D.Pretreatment of lignocellulosic biomass[M]//HIMMEL M E,BAKER J O,OVEREND R P.Enzymatic conversion of biomass for fuels production.Oxford:Oxford University Press,1998.
- [42] 杨淑蕙.植物纤维化学[M].北京:中国轻工业出版社,2009:195,231.
- [43] 谭海风,徐永建,金勇,等.钾盐预处理对烟梗成丝及烟气的影响[J].纸和造纸,2015,34(9):39-43.
- [44] VANETTER B T,JOHN JR B K,RICHER C W,et al.A reduced protein reconstituted tobacco and method of making same;AU2001274289[P].2004-08-05.
- [45] PATYK E P,DLEJSKI J O,EJNICZAK W.Improving tobacco stems and stalks by enzymatic treatment[J].Przemysl spozywczy,1983,7(5):224-226.
- [46] 郝辉,王高杰,许春平,等.再造烟叶中果胶降解条件优化及其应用研究[J].食品与机械,2016,32(4):201-206.
- [47] MUA J P,HAYES B L,BRADLEY K J.A process for reducing nitrogen containing and lignin in tobacco;EP1545249[P].2009-07-15.
- [48] SILBERMAN H C.Process for the treatment of tobacco stems;US3513857[P].1970-05-26.
- [49] 许春平,刘远上,郝辉,等.生物酶法降解烟梗末中果胶的研究[J].食品与生物技术学报,2017,36(2):194-199.
- [50] 于建军,魏登辉,田斌强,等.响应面法优化漆酶降解梗丝木质素的工艺[J].烟草科技,2017(3):57-64.
- [51] 李丹,刘熙.生物技术应用于造纸法再造烟叶生产的研究进展[J].现代食品科技,2013,29(6):1463-1466.
- [52] DENIER R F,LITZINGER E F,ALFORD E D.Process for forming flavor compounds in tobacco;US4825884[P].1989-05-02.
- [53] ADEDEJI J A method for making a reconstituted tobacco sheet using steam exploded tobacco;EP1039811[P].2002-03-27.
- [54] LI D L,DAI Y,FENG G L,et al.Method for improving tobacco steam quality through combing steam explosion and enzyme threathment technology;WO 2012019420 [P].2012-02-16.
- [55] 姜林峰.烟梗中木质素及蛋白质的脱除[D].广州:华南理工大学,2017:42-43,55.
- [56] HONEYCUTT R H,SADLE E S,LITZINGER E F,et al.Process for steam explosion of tobacco stem;EPW01997004673[P].1997-02-13.
- [57] HAN Y Y,LI J,WANG B,et al.Improved enzymatic hydrolysis of tobacco stalk by steam explosion and thread rolling pretreatments[J].Cellulose chemistry and technology,2015,49(2):181-185.

(上接第 16 页)

- [17] KRAMCHOTE S,NAKANO K,KANLAYANARAT S,et al.Rapid determination of cabbage quality using visible and near-infrared spectroscopy[J].LWT-Food Science and Technology,2014,59(2):695-700.
- [18] 金同铭,刘玲,唐晓伟,等.用近红外光谱法测定大白菜的营养成分[J].华北农学报,1994,9(4):104-110.
- [19] 王多加,林纯忠,钟娇娥.近红外光谱法非破坏快速检测生菜中硝酸盐含量[J].食品科学,2004,25(10):239-241.
- [20] 胡东.韭菜表面农药残留的可见-近红外光谱分析方法研究[D].西安:西安科技大学,2015.
- [21] CHEN X J,WU J G,ZHOU S J,et al.Application of near-infrared reflectance spectroscopy to evaluate the lutein and  $\beta$ -carotene in Chinese kale[J].Journal of food composition and analysis,2008,22(2):148-153.
- [22] SAHAMISHIRAZI S,ZIKELI S,FLECK M,et al.Development of a near-infrared spectroscopy method (NIRS) for fast analysis of total,indolic,aliphatic and individual glucosinolates in new bred open pollinating genotypes of broccoli (*Brassica oleracea* convar.*botrytis* var.*italica*) [J].Food chemistry,2017,232:272-277.
- [23] SIRISOMBOON P,TANAKA M,KOJIMA T,et al.Nondestructive estimation of maturity and textural properties on tomato 'Momotaro' by near infrared spectroscopy[J].Journal of food engineering,2012,112(3):218-226.
- [24] KAVDIR I,LU R,ARIANA D,et al.Visible and near-infrared spectroscopy for nondestructive quality assessment of pickling cucumbers[J].Post-harvest biology and technology,2007,44(2):165-174.
- [25] SÁNCHEZ M T,TORRES I,DE LA HABA M J,et al.First steps to predicting pulp colour in whole melons using near-infrared reflectance spectroscopy[J].Biosystems engineering,2014,123:12-18.
- [26] 王凡,李永玉,彭彦昆,等.基于漫透射光谱技术的番茄可溶性固形物及总糖含量的无损检测[J].光谱学与光谱分析,2016,36(10):3185-3189.
- [27] 马兰,夏俊芳,张战峰,等.近红外光谱法无损检测番茄可溶性固形物含量的研究[J].湖北农业科学,2008,47(4):467-470.
- [28] 刘燕德,周延睿,潘圆媛.基于最小二乘支持向量机的辣椒可溶性固形物和维生素 C 含量近红外光谱检测[J].光学精密工程,2014,22(2):281-288.