

近红外光谱技术在糖业的应用及进展

张 森¹, 张双虹¹, 赵金力², 李绪国², 吴子毅¹, 王 宝^{1,2}, 赵抒娜^{1,2*}

(1. 中粮营养健康研究院有限公司, 老年营养食品研究北京市工程实验室, 营养健康与食品安全北京市重点实验室, 北京 102209; 2. 中粮屯河糖业股份有限公司, 农业部糖料与番茄质量安全控制重点实验室, 昌吉 831100)

摘 要: 近红外光谱技术是一种快速、高效的分析技术, 具有无损检测、无污染、操作简单、分析快速、可在线实时监测、稳定性和重现性好、节约人力成本和试剂费用且易于维护等特点, 并在很多领域得到应用。近年来, 已有许多国内外学者对近红外技术在传统制糖工业应用的可行性进行研究。我国作为世界蔗糖生产大国, 企业应对新技术加以重视和应用。本文从糖料甘蔗和甜菜的收购、作物快速育种、制糖中间制品检测应用和成品糖检测等几个方面重点介绍国内外近红外分析技术在制糖工业上应用的研究, 分析了近红外技术在制糖企业应用的优势和不足, 并对该技术在糖业应用的发展前景和方向进行展望, 为企业和科研院所应用研究、在线检测、过程控制和结果分析提供帮助。

关键词: 近红外光谱法; 制糖; 在线监测

Application and progress of near infrared reflectance spectroscopy in sugar industry

ZHANG Sen¹, ZHANG Shuang-Hong¹, ZHAO Jin-Li², LI Xu-Guo², WU Zi-Yi¹,
WANG Bao^{1,2}, ZHAO Shu-Na^{1,2*}

(1. COFCO Nutrition and Health Research Institute Co., Ltd., Beijing Engineering Laboratory of Geriatric Nutrition & Foods, Beijing Key Laboratory of Nutrition & Health and Food Safety, Beijing 102209, China; 2. COFCO Sugar Co., Ltd., Key Laboratory of Quality & Safety Control for Sugar Crops and Tomato, Ministry of Agriculture of the PRC, Changji 831100, China)

ABSTRACT: Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) is a fast and efficient analytical technology, which has the characteristics of nondestructive testing, no pollution, simple operation, fast analysis, on-line real-time monitoring, good stability and reproducibility, saving labor cost and reagent cost, and easy maintenance, etc., and has been applied in many fields. In recent years, many scholars at home and abroad have studied the feasibility of the application of near infrared technology in the traditional sugar industry. As a big sugar producer in the world, Chinese enterprises should pay more importance and apply new technologies. This paper mainly introduced the application of NIRS analysis technology in sugar industry at home and abroad from several aspects, such as the acquisition of sugar

基金项目: 新疆昌吉自治州协同创新(科技支疆)项目(2019C03)、2016 年新疆自治区高层次人才引进工程计划项目、中国博士后科学基金 61 批面上自主“西部地区博士后人才资助计划”项目(2017M613312XB)、特殊保障食品制造关键技术研究及新产品创制项目(2017YFD0400500)

Fund: Supported by Changji Collaborative Innovation Project in Xinjiang Uygur Autonomous Region (2019C03), 2016 High Level Talents of Xinjiang Uygur Autonomous Region, General Financial Grant from the China Postdoctoral Science Foundation (2017M613312XB), and National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2017YFD0400500)

*通讯作者: 赵抒娜, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为天然产物分离纯化。E-mail: zhaoshuna@cofco.com

*Corresponding author: ZHAO Shu-Na, Ph.D, Senior Engineer, COFCO Nutrition and Health Research Institute, No.4 Road, Future Science and Technology Park, South Beiqijia, Changping District, Beijing 102209, China. E-mail: zhaoshuna@cofco.com

cane and beet, rapid crop breeding, detection and application of sugar intermediate products and detection of finished products, analyzed the advantages and disadvantages of the application of NIRS technology in sugar enterprises, and forecasted the development prospect and direction of the application of NIRS technology in sugar industry, so as to provide assistance for enterprises and research institutes in applied research, online testing, process control and result analysis.

KEY WORDS: near infrared reflectance spectroscopy; sugar industry; online detection

1 引言

近红外光谱分析技术是分析化学领域的一种新型分析技术,其波长范围 780~2526 nm,是介于可见光和中红外光之间的电磁波^[1]。近红外光谱属于分子振动光谱的倍频和主频吸收光谱,其原理是对含氢基团 X-H(X=C、N、O)振动的倍频和合频吸收^[2,3]。近红外技术通常采用主成分分析、偏最小二乘法和人工神经网络等化学计量学手段,并结合光谱测试、数据处理等技术,建立物质成分光谱与相应的待测成分含量之间的回归模型,基于相关系数较高的预测模型,采集待测物质的近红外光谱信息进行预测,可实现定性和定量分析^[4-8]。与传统分析技术相比,近红外光谱分析技术具有无损检测、无污染、操作简单、分析快速、稳定性和重现性好、节约人力成本和试剂费用且易于维护的特点^[3]。近年来近红外技术在国内外发展迅速,并应用到许多领域,如酒、蔬菜、食用油等食品成分监测,肉类、蜂蜜等食品掺假鉴别,食品等级和品质评定,农产品和饲料品质、土壤监测等相关农业分析,药学及医学的应用^[4-8]。

蔗糖是生活中最普遍的甜味剂,应用广泛,主要以甘蔗和甜菜为原料进行生产,其中甘蔗产糖占目前糖产量的 80%以上^[9]。2019 年中国糖量为 10890 万吨,位居全球第 5,在国际糖业界具有举足轻重的地位^[10]。目前我国制糖工业与国外相比总体技术相对落后,机械自动化水平低、产品质量稳定性差、检测水平低、分析速度慢,因此通过改进检测手段来提高分析速度和产品质量迫在眉睫^[11]。自 1998 年国际制糖技术协会将近红外光谱技术列为 21 世纪热门研究课题之一开始,国内外已开展了基于近红外光谱分析技术在制糖工业的相关研究,且国外企业已经开始应用此项技术,但目前近红外技术在国内外制糖企业的应用处于起步阶段,距离大规模应用还有一定的距离^[12-17]。鉴于此,本文对国内外近红外技术在制糖工业的研究进展进行综合介绍,分析其特点,为科研机构和制糖企业对近红外技术在制糖工业的糖料作物育种、原料收购检测、中间制品定量检测及成品质量分析等方面提供支持。

2 近红外检测技术在原料收购和糖料作物育种方面的应用

国外主产糖国家原料甘蔗和甜菜收购实行按质定价原

则,国内制糖行业因甘蔗和甜菜质量参差不齐、标准制订、仪器配置、技术能力等因素,情况复杂,故甘蔗和甜菜收购普遍采用按量定价模式^[18-21]。目前新疆和广西仅部分地区开始采用按质定价策略,主要利用传统的化学检测技术检测蔗糖分含量,但传统分析方法具有一定的局限性,操作步骤繁琐,检测工作量大,耗时长。近红外技术的发展为建立按质定价的原料收购体系提供了重要的技术支撑。

2.1 近红外技术在甘蔗品质检测的应用

甘蔗含糖量决定甘蔗品质,在实际生产中,对甘蔗含糖量的检测一般将甘蔗榨成汁液后用测糖仪进行测量。这种方法较为传统,需要对甘蔗进行榨压处理,耗时耗力,相对于入榨甘蔗量,样本量非常小,不具备代表性,且不方便对甘蔗的生长过程含糖量变化进行快速检测。Phetpan 等^[22]建立了利用可见光与近红外光谱技术测定甘蔗可溶性固形物含量的在线检测系统。该系统主要由 2 部分组成:(1)甘蔗运输机,采用 2 m/s 的运输速度进行甘蔗输送;(2)光谱采集装置,波长为 350~1100 nm,采用 4 个 50 W 卤钨灯作为光源,结合可见光与近红外光谱仪进行光谱采集。使用偏最小二乘回归将光谱与实验测定的可溶性固形物相关联,建立独立的定量预测数学模型。该模型相关系数 r^2 为 0.785,预测均方根误差为 0.30。该系统预测模型的误差较小,适用于甘蔗可溶性固形物的在线测量。高俊峰等^[23]选取 240 个甘蔗节为研究对象,对近红外高光谱成像技术预测甘蔗内部可溶性固形物的可行性进行研究。利用高光谱成像系统获取甘蔗节的近红外光谱信息和图像信息,采用最小二乘回归,最小二乘支持向量及主成分回归的建模方法构建甘蔗可溶性固形物的预测模型。模型相关系数为 0.879,均方根误差分别为 0.644。Mat 等^[24]采用可见短波近红外光谱在黑箱条件下直接扫描甘蔗节间样品的表皮,对甘蔗的锤度、纤维含量和水分含量进行了测定,结果表明,预测模型对于甘蔗糖分含量、纤维分、水分的预测相关系数分别为 0.88、0.93 和 0.90。研究结果表明,近红外光谱技术是一种性能优良的甘蔗品质评价方法。

宁方尧^[25]利用近红外光谱技术,结合液相法蔗糖测定结果,采用偏最小二乘法建立甘蔗汁糖分数学模型。结果表明,建立的模型校正相关系数、校正均方根误差分别为 0.9617 和 0.237,预测相对误差<5%。南宁糖业有限公司将波通公司近红外线快速检测仪设置在蔗料传送线的位置,

在甘蔗破碎之后压榨之前在线检测蔗丝的含糖分、还原糖分、蔗汁锤度、甘蔗纯度等指标,并初步提出了利用快速测量数据指导及监督管理按质论价的构想^[26]。

2.2 近红外在甜菜糖度及块根质量检测上的应用

甜菜糖度是甜菜定等分级的一个重要指标,应用近红外技术检测甜菜原料的质量也有部分研究^[27]。为了实现甜菜含糖量定等分级,甜菜收购环节的按质论价,促进甜菜制糖行业的良好健康发展,杨勇等^[28]应用近红外光谱技术对甜菜糖度的快速检测进行了系统研究,选取 28 个甜菜品种,820 个甜菜样品作为校正集,70 个样品作为预测集,采用一阶导数和标准正态变量变换对光谱进行预处理并结合偏最小二乘法建立了定量预测数学模型,相关系数为 0.9083,误差为 0.3767,表明该方法可以满足甜菜糖含量测定的需要,实现甜菜收购环节的定等分级和按质论价^[29]。Pan 等^[30,31]利用 2 种便携式近红外光谱仪,波长分别在 400~1100 nm 和 900~1600 nm 的范围内,对完整甜菜块根和甜菜切片的水分、可溶性固形物、蔗糖含量等进行了测定,获得了可见光谱和近红外光谱,建立了完整甜菜块根和切片甜菜的蔗糖分预测模型,并对模型进行了验证。结果表明甜菜片所测指标的预测模型相关系数为 0.89~0.95,标准预测误差为 0.60~0.85,标准偏差为 2.13~2.83。完整甜菜块根的预测模型相关系数为 0.75~0.85,标准预测误差为 0.88~1.23,标准偏差为 1.50~1.86。该技术将有助于优良甜菜品种的选育和生产用甜菜综合品质的评价。Babak 等^[32]研究了甜菜尺寸、果皮和果肉的不同位置的光谱记录数据对蔗糖含量测定的影响,选取 66 个甜菜块根,分为小(<615 g)、中(655~990 g)和大(>1000 g)3 种分类,纵向切成 2 部分,一半用旋光法测定蔗糖,另一半用光谱法(942~1576 nm)分别从果皮和果肉 4 个方位测定蔗糖分含量,并建立数学模型。结果表明,波长为 1393 nm,模型相关系数为 0.999,均方根误差为 1.045,且与甜菜尺寸和 4 个方位的光谱记录点无显著相关性,但与果皮或果肉光谱扫描有显著相关性。近红外技术在甘蔗和甜菜原料按质论价方面的推广应用,将为我国制糖企业降低吨糖耗成本,提高企业竞争力提供重要技术支撑^[33,34]。

2.3 近红外技术在育种方面的应用

国内外学者利用近红外技术在甘蔗和甜菜育种方面做了一定研究。Piyanan 等^[35]开展了利用短波近红外光谱技术,在波长 570~1031 nm 范围内测量甘蔗秆的固体密度研究。采用无损检测的方法跟踪甘蔗茎秆个体重量的变化,甘蔗茎秆的重量可以用固体密度与体积相乘计算,采用最小二乘回归等方法建立模型。此研究充分考虑了样品蜡质覆盖物、不同的波长范围以及各种预处理技术的影响。结果表明,由于蜡质的影响,数据模型的性能较差,当无蜡质覆盖时,数学模型较好,并在一定条件下获得最佳模

型。这表明在甘蔗育种过程中,育种家可以在甘蔗存活期间测量甘蔗的重量和生长速度,有利于缩短育种时间,降低育种成本。Phuphaphud 等^[36]利用便携式可见短波近红外,波长范围 570~1031 nm,用于评估甘蔗茎的纤维含量。选用 3 个样本段(即甘蔗茎底部、中部和顶部),用不同的积分时间(200、300 和 400 ms),并使用不同的预处理技术对光谱进行预处理。利用偏最小二乘法回归建立了数学模型,结果表明,积分时间为 300 ms,模型表现最好。该模型可作为预测甘蔗纤维含量的快速方法,对育种人员在监测甘蔗茎秆中的纤维含量、实现无损检测具有重要意义。

3 近红外技术在制糖生产中的中间制品检测的应用

制糖工艺过程各工序会产生不同浓度的糖汁、糖浆、糖膏和糖蜜的中间制品。中间制品质量检测分析是制糖过程的重要环节,中间制品中锤度、糖度及色值等指标的测定是糖厂质量监测的重要数据,也是衡量工艺效果的重要指标^[37,38]。

3.1 近红外技术在甜菜糖厂中间制品检测的研究现状

目前国内糖厂主要采用传统的化学分析方法进行中间制品分析,此方法耗时较长,不能及时指导生产,随着近红外技术的发展,此技术在中间制品的质量检测应用会极大提高检测和生产效率,降低不同检验人员之间手工操作的误差^[39]。Iván 等^[40]和 Chen 等^[41]对制糖企业的近红外模型进行优化,着重对锤度和蔗糖分指标优化,将近红外光谱测量和数据分析相结合。与之前模型相比,新的模型对验证集样品的预测效果更优良,可对糖生产过程中的中间产品进行更准确的质量监测和评估。Mohammad 等^[42]研究了采用近红外光谱与多元化学计量相结合的方法,在波长 860~1800 nm 采集样品光谱数据,采用偏最小二乘回归法建立预测模型对甜菜汁的锤度、糖度、纯度和 pH 值指标进行预测,对各指标预测的相关系数分别为糖度 0.969,锤度 0.984,纯度 0.921 和 pH 值 0.671,结果表明近红外技术在甜菜糖厂中间制品监测方面具有适用、快速的特点。

3.2 利用近红外光谱法检测蔗渣和糖蜜制品

黎庆涛等^[43,44]研究了应用近红外光谱法分别快速测定甘蔗制糖生产中甲糖膏和甲糖蜜的锤度和蔗糖分指标。采用 NIRSystems 6500 型近红外分析仪,扫描波长为 400~2500 nm,对采自生产线的甲糖膏甲糖蜜进行光谱扫描和测定。蔗糖和锤度模型的光谱预处理方法采用改进的偏最小二乘法。甲糖膏蔗糖分模型的标准偏差为 0.576,相关系数为 0.94,锤度模型的标准误差为 0.522,相关系数为

0.96。甲糖蜜蔗糖分模型的标准偏差为 1.37, 相关系数为 0.95, 锤度模型的标准误差为 1.08, 相关系数为 0.98, 表明应用近红外光谱法快速测定甲糖膏的锤度和甘蔗糖分是可行的。王远辉等^[45]利用透射近红外光谱技术结合最小二乘法测定甘蔗制糖生产中废蜜的锤度、蔗糖分和还原糖分。结果表明, 模型的锤度、蔗糖分和还原糖分的预测相关系数分别为 0.934、0.917、0.891, 预测标准偏差分别为 0.692、0.837、0.204, 测定结果准确可靠, 近红外技术可较好地用于废蜜锤度、蔗糖分和还原糖分的快速测定。杨才誉等^[46]应用近红外技术测定清汁和糖浆的锤度和糖度指标, 其中清汁锤度和糖度的相关系数为 0.936 和 0.933, 糖浆锤度和糖度的相关系数为 0.959 和 0.936, 与传统的化学分析结果较为吻合, 可代替传统化学方法检测在制品的锤度及糖度, 检测效率高。Schumann 等^[47]利用近红外技术在线测定糖样品的蔗糖分和水分等指标, 结果表明蔗糖分和水分模型相关系数为 0.94 和 0.98, 预测标准偏差为 1.052% 和 0.676%。Ursula-Fabiola 等^[48]把近红外技术应用到蔗渣化学成分的快速分析检测中, 实现同时对蔗渣中纤维素、半纤维素、木质素的快速检测, 并且发现近红外模型具有较好的预测能力。张翠等^[49]探讨了近红外光谱法快速测定甘蔗渣水分和糖分含量的可行性。选取 20 个水分和糖分不同含量的甘蔗渣样品, 用近红外光谱仪采集相应样品的光谱, 利用化学计量学软件建立样品水分和糖分含量与光谱数据之间的相关性模型。结果表明, 用偏最小二乘法和完全交互验证方式建立的校正模型的相关系数分别为 0.9886 和 0.9793, 交互验证均方差分别为 2.18 和 0.463。结果表明该方法操作简单、准确性好, 适用于生产过程中对甘蔗渣水分和糖分含量的快速测定。

在中间制品检测方面, 制糖生产企业主要关注加工过程中锤度和糖度的指标, 制糖的最终目的是提取糖分, 因而糖度和纯度显得十分重要。在糖蜜的检测方面, 糖蜜通常作为产品出售给下游客户用于生产酒精以及添加到饲料中, 因而糖蜜的蔗糖分和还原糖分是主要的关注指标。目前文献报道的对中间制品的糖度、纯度、锤度建立的预测模型相关性较好, 预测标准偏差较低, 预测结果准确可靠。

4 近红外技术在白砂糖检测的应用

目前中国制糖企业绝大部分采用亚硫酸法和碳酸法生产白砂糖。国标 GB/T 317-2018《白砂糖》^[50]规定了白砂糖的试验方法和检验规则, 包括感官要求、理化要求及卫生要求, 并作为成品糖的仲裁法。成品糖的检测涉及蔗糖分、还原糖分、灰分、浑浊度、二氧化硫等多个指标, 工厂的包装入库需要检测员快速反馈检测结果, 近红外技术具有无损、能同时检测多个指标的特点, 为近红外技术在白砂糖检测的应用提供了可行性。

黎庆涛等^[51,52]采用国产近红外在线分析系统, 对糖厂的白砂糖色值^[51]、二氧化硫^[52]和粒度^[53]进行了在线检测研究。采用 SupNIR-4000 型近红外在线分析仪, 直接对成品传送带上的白砂糖进行扫描获得光谱数据, 结果显示, 模型的校正集相关系数和标准偏差分别为 0.921 和 5.19, 预测集相关系数和标准偏差分别为 0.677 和 9.304^[51]。白砂糖二氧化硫的含量校正集的相关系数为 0.966, 校正标准偏差为 1.086, 预测均方根偏差为 2.519。以人工神经网络法建立的白砂糖粒度模型校正均方根误差为 2.971, 预测标准误差为 3.524。虽结果与化学法测定值存在一定偏差, 但此法为近红外在制糖行业在线应用提供技术支持。冯红年等^[54]采用近红外在线分析结合漫反射光谱分析技术, 在白砂糖产品传送带上扫描白砂糖获取漫反射吸收光谱, 建立的数学模型色值的预测值和实测值间的相关系数为 0.885, 标准校正偏差为 4.300, 浊度预测值和实测值间的相关系数为 0.909, 标准校正偏差为 2.308。后续将色值和浊度模型嵌入分析主机对白砂糖进行实时监测, 结果表明色值和浊度的预测误差能够满足糖厂的要求。近红外光谱技术在白砂糖质量在线监控的应用, 可以及时反映生产情况、指导生产, 提高糖厂的生产管理水平和生产效率, 从而提高产品质量和经济效益。

但是, 目前近红外检测技术在白砂糖检测上的应用较少, 主要有两方面原因: (1) 白砂糖的检测以国家标准规定的检测方法为准, 在产品出厂检验、第三方检测认证、国家抽检方面, 均以国家标准方法为准, 而近红外方法作为一种快速检测方法, 尚未列入国家标准使用; (2) 近红外检测方法在国内制糖行业尚无相关的行业标准或团体标准, 近红外的检测原理是由于对基团振动的倍频和合频吸收而进行检测, 预测准确性和仪器本身的精确度也相关, 部分指标如浊度、灰分等误差较大, 难以满足国标要求, 从而限制了其应用。因而, 在白砂糖检测中, 需要收集足够的手工值和近红外检测值的数据, 进一步对检测指标的适用性进行评价, 建立相关性良好的预测模型应用于实际生产中。

5 展 望

目前近红外光谱技术大多限于实验室研究, 真正的应用处于初步阶段, 制糖企业习惯于传统的检测方法, 近红外的模型建立尚不完善。近红外定标建模工作, 需要更加专业的人才队伍, 要涵盖将来待测样品的变异范围和各种类型。鉴于我国国情和制糖行业的发展概况, 企业可大力发展近红外技术在按质定价和中间制品检测技术应用。

综上所述, 将近红外光谱技术应用于制糖行业和企业是可行的, 其应用前景是广阔的, 但仍需完善发展。近红外光谱技术的应用一方面依赖于基于准确的手工数据的收集, 将手工数据与仪器值进行关联, 建立准确的预测模

型,并持续进行模型的扩充与完善;另一方面,对于制糖企业来说,希望能在实际生产中应用成本低而准确性好的仪器,实现降本增效;制糖企业是延续多年的传统行业,生产加工时间短,加工流程需要化验人员及时提供参考数据进行工艺调整。因此,开发成本低、通用性强、便携或在线的近红外光谱仪器,推动近红外光谱技术在产业育种,按质定价和中间制品检测的应用,将对我国制糖工业的技术起到巨大的推动作用。

参考文献

- [1] 杨雪萍,陈菲,倪奎奎,等.近红外光谱分析技术在青贮饲料营养品质检测评价上的研究进展[J].饲料工业,2020,(10):19–23.
Yang XP, Chen F, Ni KK, *et al.* Research progress of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) on silage [J]. Feed Ind, 2020, (10): 19–23.
- [2] 孙杰,沈义凯,陈雨佳,等.近红外荧光材料在医学影像诊断中的构建与应用[J].南京医科大学学报(自然科学版),2019,39(7):1071–1075.
Sun J, Shen YK, Chen YJ, *et al.* Construction and application of near-infrared fluorescent materials in medical imaging diagnosis [J]. J Nanjing Med Univ (Nat Sci), 2019, 39(7): 1071–1075.
- [3] 李鱼强,潘天红,李浩然,等.近红外光谱 LASSO 特征选择方法及其聚类分析应用研究[J].光谱学与光谱分析,2019,39(12):3809–3815.
Li YQ, Pan TH, Li HR, *et al.* NIRS spectral feature selection using LASSO method and its application in the classification analysis [J]. Spectrosc Spect Anal, 2019, 39(12): 3809–3815.
- [4] 刘妍,周新奇,俞晓峰,等.无损检测技术在果蔬品质检测中的应用研究进展[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2020,(1):27–37.
Liu Y, Zhou XQ, Yu XF, *et al.* Research progress of nondestructive testing techniques for fruit and vegetable quality [J]. J Zhejiang Univ (Agric Life Sci), 2020, (1): 27–37.
- [5] 杨晓丽,黄晓寒,杨秋艳.近三年国内近红外检测应用研究进展[J].云南化工,2018,45(6):1–3.
Yang XL, Huang XH, Yang QY. National research advances of NIR detection in nearly three years [J]. Yunnan Chem Technol, 2018, 45(6): 1–3.
- [6] 何鸿举,王魏,马汉军,等.近红外光谱技术在肉品掺假检测方面的研究进展[J].食品工业科技,2020,41(3):345–350,356.
He HJ, Wang W, Ma HJ, *et al.* Research progress on near-infrared spectroscopy for meat adulteration [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(3): 345–350, 356.
- [7] 丁家欣,张秋海,李树莉,等.应用近红外光谱法快速测定蜂蜜中葡萄糖和果糖含量[J].光谱学与光谱分析,2016,36(S1):197–198.
Ding JX, Zhang QH, Li SL, *et al.* Fast detection of glucose and fructose content in honey using NIR spectroscopy [J]. Spectrosc Spect Anal, 2016, 36(S1): 197–198.
- [8] 李玉鹏,李海花,朱琪,等.近红外光谱分析技术及其在饲料中的应用[J].中国饲料,2017,(4):22–26.
Li YP, Li HH, Zhu Q, *et al.* Application of near infrared reflectance spectroscopy in feed [J]. China Feed, 2017, (4): 22–26.
- [9] 李明,田洪春,黄智刚.我国甘蔗产业发展现状研究[J].中国糖料,2017,39(1):67–70.
Li M, Tian HC, Huang ZG. Research on the development status of sugarcane industry in China [J]. Sugar Crops China, 2017, 39(1): 67–70.
- [10] 李宏.云南现代农业甘蔗产业技术体系市场与信息第一百二十一期 [DB/OL]. [2020-5-11]. https://nync.yn.gov.cn/new_s7991/2_0200511/7055468.shtml.
Li H. Yunnan modern agricultural sugarcane industry technology system market and information 120th phase [DB/OL]. [2020-5-11]. https://nync.yn.gov.cn/new_s7991/20200511/7055468.shtml.
- [11] 陈刚,黎庆涛,卢家炯.现代制糖工业分析技术的发展-糖液的分析测定技术[J].广西轻工业,2010,26(10):24–25,43.
Chen G, Li QT, Lu JJ. Development of modern sugar industry analysis technology - analysis and determination technology of sugar liquid [J]. Guangxi J Light Ind, 2010, 26(10): 24–25, 43.
- [12] 卢家炯,黎庆涛.近红外光谱技术在制糖工业应用动态[J].广西蔗糖,2000,(1):37–40.
Lu JJ, Li QT. Application trend of near infrared spectroscopy in sugar industry [J]. Guangxi Sugar Canesugar, 2000, (1): 37–40.
- [13] 马莹,黄雪影,郭剑雄,等.仪器检测技术在制糖工业中的应用研究[J].现代食品,2016,(10):8–10.
Ma Y, Huang XY, Guo JX, *et al.* Application of instrument detection technology in the sugar industry [J]. Mod Food, 2016, (10): 8–10.
- [14] Harbeck C, Faurie R, Scheper T. Application of near-infrared spectroscopy in the sugar industry for the detection of betaine [J]. Anal Chim Acta, 2004, 501(2): 249–253.
- [15] 李震宇,李红,林金梅.国产近红外设备对糖厂在制品快速分析的初步应用[J].计算机与应用化学,2010,27(12):1694–1696.
Li ZY, Li H, Lin JM. Preliminary application of domestic near-infrared device in rapid analysis of in-process material in sugar mill [J]. Comp Appl Chem, 2010, 27(12): 1694–1696.
- [16] 曹干.现代近红外光谱分析在制糖和制药工业中的应用[J].热带农业工程,2003,27(2):8–12.
Cao G. Application of modern near infrared spectroscopy in sugar refining and pharmacy industries [J]. Trop Agric Eng, 2003, 27(2): 8–12.
- [17] 胡晓航.近红外光谱技术在制糖业中的应用[J].中国甜菜糖业,2007,(2):8–12.
Hu XH. Applications of near infrared spectroscopy on technique on sugar industry [J]. China Beet Sugar, 2007, (2): 8–12.
- [18] 戚荣.我国原料甘蔗收购按质论价现状及存在问题[J].甘蔗糖业,2003,(6):42–45.
Qi R. The present situation and problems of the raw material sugarcane acquisition [J]. Sugar Canesugar, 2003, (6): 42–45.
- [19] 张跃彬.我国蔗糖产业安全问题与发展对策[J].中国糖料,2019,41(1):66–68.
Zhang YB. Safety problems and development countermeasures of cane sugar industry in China [J]. Sugar Crops China, 2019, 41(1): 66–68.
- [20] 卢秉福,吴艳玲,张文彬,等.甜菜制糖产业发展分析[J].农学学报,2019,9(6):82–86.
Lu BF, Wu YL, Zhang WB, *et al.* Sugar beet industry development [J]. J Agric, 2019, 9(6): 82–86.
- [21] 黎庆涛,卢家炯.“按质论价”甘蔗收购系统简介[J].广西糖业,2014,(6):44–46.
Li QT, Lu JJ. Introduction to "Price according to quality" sugarcane purchasing system [J]. Guangxi Sugar Ind, 2014, (6): 44–46.
- [22] Phetpan K, Udompetaikul V, Sirisomboon P. An online visible and

- near-infrared spectroscopic technique for the real-time evaluation of the soluble solids content of sugarcane billets on an elevator conveyor [J]. *Comp Electron Agric*, 2018, 154: 460–466.
- [23] 高俊峰, 张初, 谢传奇, 等. 应用近红外高光谱成像技术预测甘蔗可溶性固形物含量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(8): 2154–2158.
- Gao JF, Zhang C, Xie CQ, *et al.* Prediction the soluble solid content in sugarcane by using near infrared hyperspectral imaging system [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2015, 35(8): 2154–2158.
- [24] Mat NN, Rowshon KM, Guangnan C, *et al.* Prediction of sugarcane quality parameters using visible-shortwave near infrared spectr radiometer [J]. *Agric Agric Sci Proc*, 2014, 2: 136–143.
- [25] 宁方尧. 近红外光谱仪快速检测甘蔗汁中蔗糖含量[J]. *农业工程*, 2018, 8(3): 76–78.
- Ning FY. Rapid determination of sucrose content in sugarcane juice by near infrared spectrometer [J]. *Agric Eng*, 2018, 8(3): 76–78.
- [26] 张彩霞, 唐新阳, 关荣远, 等. 近红外在线监测糖厂入榨甘蔗质量应用初探[J]. *甘蔗糖业*, 2019, (5): 29–36.
- Zhang CX, Tang XY, Guan RY, *et al.* Preliminary application of near infrared online monitoring on quality of pressing sugarcane in sugar factory [J]. *Sugar Canesugar*, 2019, (5): 29–36.
- [27] Garrigues JM, Akssira M, Rambla FJ, *et al.* Direct ATR-FTIR determination of sucrose in beet root [J]. *Talanta*, 2000, 51(2): 247–255.
- [28] 杨勇, 任健, 郑喜群, 等. 近红外光谱法的甜菜糖度快速测定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(10): 2728–2731.
- Yang Y, Ren J, Zheng XQ, *et al.* Rapid determination of beet sugar content using near infrared spectroscopy [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2014, 34(10): 2728–2731.
- [29] 李毛毛, 郑喜群, 任健, 等. 近红外光谱法快速检测甜菜糖度的模型优化[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(8): 3026–3029.
- Li MM, Zheng XQ, Ren J, *et al.* Model optimization on rapid detection of beet sugar content by near infrared spectroscopy [J]. *J Food Saf Qual*, 2015, 6(8): 3026–3029.
- [30] Pan LQ, Lu RF, Zhu QB, *et al.* Measurement of moisture, soluble solids, sucrose content and mechanical properties in sugar beet using portable visible and near-infrared spectroscopy [J]. *Postharv Biol Technol*, 2015, 102: 42–50.
- [31] Pan LQ, Zhu QB, Lu RF, *et al.* Determination of sucrose content in sugar beet by portable visible and near-infrared spectroscopy [J]. *Food Chem*, 2015, 167(15): 264–271.
- [32] Babak B, Mohamadreza K, Amir BG, *et al.* Effect of peeling and point of spectral recording on sucrose determination in sugar beet root using near infrared spectroscopy [J]. *Infrared Phys Technol*, 2019, 103: 103065.
- [33] 张琨, 周芹. 甜菜中糖类的测定方法及应用[J]. *中国糖料*, 2018, 40(6): 73–76.
- Zhang K, Zhou Q. Research progress on determination and utilization of carbohydrate in beet [J]. *Sugar Crops China*, 2018, 40(6): 73–76.
- [34] 李暄, 干宇军, 温韬, 等. 近红外光谱技术在甘蔗制糖产业中的应用研究进展[J]. *应用化工*, 2017, 46(10): 2023–2026.
- Li X, Gan NJ, Wen T, *et al.* Review of near infrared spectroscopy application in cane sugar manufacturing industry [J]. *Appl Chem Ind*, 2017, 46(10): 2023–2026.
- [35] Piyanan S, Lalita P, Khwantri S, *et al.* A portable near infrared spectrometer as a non-destructive tool for rapid screening of solid density stalk in a sugarcane breeding program [J]. *Sens Bio Sens Res*, 2018, 20: 34–40.
- [36] Phuphaphud A, Saengprachatanarug K, Posom J, *et al.* Prediction of the fibre content of sugarcane stalk by direct scanning using visible-shortwave near infrared spectroscopy [J]. *Vibrat Spectrosc*, 2019, 101: 71–80.
- [37] 白燕. 近红外分析技术在甘蔗制糖生产上的应用研究[D]. 南宁: 广西大学, 2007.
- Bai Y. Study on application of near-infrared spectroscopy in the cane sugar [D]. Nanning: Guangxi University, 2007.
- [38] 黄健泉, 潘玉强, 王斌. 应用近红外光谱分析技术快速测量蔗汁锤度[J]. *广西蔗糖*, 2006, (2): 29–32.
- Huang JQ, Pan YQ, Wang B. Brix test by using infrared ray spectrum analysis technology [J]. *Guangxi Sugar Canesugar*, 2006, (2): 29–32.
- [39] 卢家炯, 黎庆涛, 白燕. 近红外光谱分析技术在中国糖业上的研究应用[J]. *中国甜菜糖业*, 2009, (1): 4–8.
- Lu JJ, Li QT, Bai Y. Near infrared spectroscopy technology research and application on cane sugar industry in China [J]. *China Beet Sugar*, 2009, (1): 4–8.
- [40] Iván RM, Daniel R, Enrique FB, *et al.* Optimization of NIR calibration models for multiple processes in the sugar industry [J]. *Chemomet Intell Lab Syst*, 2016, 159: 45–57.
- [41] Chen HZ, Wen JB, Chen JC, *et al.* Near-infrared spectroscopic modeling optimization for quantitative determination of sugar Brix in sugarcane intital-pressure juice [Z]. 2014.
- [42] Mohammad EB, Masoud H, Keivan A, *et al.* Measurement of quality parameters of sugar beet juices using near-infrared spectroscopy and chemometrics [J]. *J Food Eng*, 2019, 271: 109775.
- [43] 黎庆涛, 王远辉, 陈刚. 近红外光谱法快速分析甲糖膏的应用研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(2): 60–63.
- Li QT, Wang YH, Chen G. Application and research of near infrared spectroscopy rapid analysis in A-massecuite [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2012, 33(2): 60–63.
- [44] 黎庆涛, 王远辉, 陈刚. 近红外光谱法快速分析甲糖蜜的应用[J]. *食品研究与开发*, 2012, 33(6): 142–146.
- Li QT, Wang YH, Chen G. Application of near infrared spectroscopy rapid analysis in A-molasses [J]. *Food Res Dev*, 2012, 33(6): 142–146.
- [45] 王远辉, 赵丹丹, 黎庆涛. 近红外光谱法快速分析制糖废蜜锤度、蔗糖分和还原糖分[J]. *食品科技*, 2014, 39(9): 284–288.
- Wang YH, Zhao DD, Li QT. Near infrared spectroscopy rapid analyses of Brix, sucrose and reducing sugar contents of molasses from sugar industry [J]. *Food Sci Technol*, 2014, 39(9): 284–288.
- [46] 杨才誉, 卢家炯, 黎庆涛. 近红外光谱法在糖厂中间制品测定中的应用[J]. *中国甜菜糖业*, 2005, (1): 8–11, 49.
- Yang CY, Lu JQ, Li QT. Application of near infrared spectroscopy in the determination of intermediate products in sugar mills [J]. *China Beet Sugar*, 2005, (1): 8–11, 49.
- [47] Schumann AW, Meyer JH. Progress with the implementation of a diode array near-infrared spectrometer for direct at-line analysis of sugarcane samples [J]. *Proc S Afr Sug Technol Ass*, 2000, 74: 122–123.
- [48] Ursula-Fabiola RZ, Cristiane SF, Renato LC, *et al.* Fast determination of the composition of pretreated sugarcane bagasse using near-infrared spectroscopy [J]. *Bioenerg Res*, 2014, 7(4): 1441–1453.
- [49] 张翠, 柴欣生. 近红外光谱法快速测定甘蔗渣水分和糖分含量[J]. 中

华纸业, 2011, 32(22): 55–58.

Zhang C, Chai XS. Rapid determination of moisture and sugar content of bagasse by NIR spectroscopy [J]. China Pulp Paper Ind, 2011, 32(22): 55–58.

[50] GB/T 317-2018 白砂糖[S].

GB/T 317-2018 White granulated sugar [S].

[51] 黎庆涛, 王远辉, 卢家炯. 近红外光谱技术在线测定白砂糖色值[J]. 食品科技, 2011, 36(1): 271–274.

Li QT, Wang YH, Lu JJ. Online determination of white granulated sugar color by near infrared spectroscopy technique [J]. Food Sci Technol, 2011, 36(1): 271–274.

[52] 黎庆涛, 王远辉, 潘路路, 等. 近红外光谱法在线测定白砂糖二氧化硫的研究[J]. 食品科技, 2010, 35(9): 324–327.

Li QT, Wang YH, Pan LL, *et al.* Study on determination of white granulated sugar SO₂ by on-line near infrared spectroscopy [J]. Food Sci Technol, 2010, 35(9): 324–327.

[53] 陈刚, 王远辉, 黎庆涛, 等. 人工神经网络-近红外光谱法在线测定白砂糖粒度[J]. 食品科技, 2011, 36(5): 268–271.

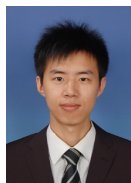
Chen G, Wang YH, Li QT, *et al.* On-line determination of white granulated sugar granularity by artificial neural network-near infrared spectroscopy [J]. Food Sci Technol, 2011, 36(5): 268–271.

[54] 冯红年, 黎庆涛, 卢家炯, 等. 近红外光谱技术用于白砂糖质量的实时监测研究[J]. 分析测试学报, 2009, 28(12): 1460–1463.

Feng HN, Li QT, Lu JJ, *et al.* Real-time monitoring the quality of granulated sugar by near infrared spectroscopic technique [J]. J Instrum Anal, 2009, 28(12): 1460–1463.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



张 森, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为食品质量安全。

E-mail: zhangsen@cofco.com



赵抒娜, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为天然产物分离纯化。

E-mail: zhaoshuna@cofco.com