

无损检测技术在果蔬品质评价中应用的研究进展

邹攀^{1,2}, 白雪^{1,2}, 陈秋生^{1,2}, 李娜^{1,2}, 郭永泽^{1,2*}

(1. 天津市农业质量标准与检测技术研究所, 天津 300380; 2. 农业农村部农产品质量安全风险评估实验室(天津), 天津 300380)

摘要 果蔬是人体维生素、矿物质、蛋白质、碳水化合物等的重要来源, 含有多种功能性成分, 是维持人体生理活动和增进健康的重要食物。随着居民受教育程度和家庭收入的普遍提高, 消费者对于果蔬的消费观念发生了根本性改变, 关注点从价格转向品质。我国果蔬生产总量大、品种多, 但是果蔬产业供给侧结构性矛盾也逐渐凸显, 高品质果蔬供不应求, 而普通果蔬过剩滞销。目前, 果蔬采后品质分级评价仍靠人工、简单机械粗略检测, 或者采用破坏性抽检的方法, 从而衍生了多种简单、高效品质评价方法, 如近红外光谱、高光谱成像等无损检测技术。针对我国果蔬产业现状, 综述果蔬品质分析评价中所使用的无损检测技术及其应用情况, 为完善果蔬品质评价系统提供参考。

关键词 果蔬; 品质; 评价; 无损检测技术; 应用

中图分类号 TS 255.7 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)02-0001-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.02.001



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress on the Application of Non-destructive Testing Technology in Fruits and Vegetables Quality Evaluation

ZOU Pan^{1,2}, BAI Xue^{1,2}, CHEN Qiu-sheng^{1,2} et al (1. Tianjin Institute of Agricultural Quality Standard and Testing Technology, Tianjin 300380; 2. Lab of Agricultural Product Quality Safety Risk Assessment (Tianjin), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300380)

Abstract Fruits and vegetables are important sources to maintain physiological activity and to improve health, which contain various vitamins, minerals, proteins, carbohydrates, and other functional nutrients. With the general improvement of residents' education and household income, consumers' attitude towards fruits and vegetables has been changed, focusing on quality over price. The total amount of fruit and vegetable production in China is large and there are many varieties, but the structural contradictions on the supply side of the fruit and vegetable industry have gradually become prominent. The supply of high-quality fruits and vegetables is in short supply, while the surplus of ordinary fruits and vegetables are surplus. At present, the postharvest quality evaluation of fruits and vegetables still relies on manual, simple mechanical rough inspection, or destructive sampling methods, which has derived a variety of simple and efficient quality evaluation methods, such as near-infrared spectroscopy, hyperspectral imaging and other non-destructive inspection techniques. In view of the status quo of the fruit and vegetable industry in China, this study summarized the non-destructive testing technology used in the application of fruit and vegetable quality analysis and evaluation and its application, so as to provide references for perfecting the fruit and vegetable quality evaluation system.

Key words Fruits and vegetables; Quality; Evaluation; Non-destructive testing technology; Application

我国果蔬产量和销量均居世界首位,基本上满足了城乡居民对果蔬数量、品种的需要。随着果蔬的生产和消费正由产量规模型向质量效益型转变,消费者对于果蔬品质安全的要求越来越高。目前,我国农业生产中以分散种植、小农经营为特点,果蔬生产区域广、以家庭生产种植为主,因此,我国果蔬产品存在着品质差异大、商品率偏低、生产过程中化肥和农药等使用不规范等诸多弊端。随着消费者对于高品质果蔬的需求增多,果蔬进口量持续增长,特别是高端水果。与之相反,普通果蔬经常出现滞销的新闻,自2016年3月至2018年6月底,全国农产品滞销事件共发生319起,涉及区域范围广、品种多、数量大^[1]。因此,我国果蔬产业急需调整,以市场为导向,提升果蔬品质,发展品牌化道路,提高产品附加值。在提升果蔬品质的过程中,为果蔬品质评价系统提出了更高的要求,从而催生了多种果蔬品质评价技术,尤其是无损检测技术,不仅可以避免对果蔬样品造成破坏性测量,还能对样本进行跟踪分析和重复检测,适用于产业化生

产和储藏保鲜的在线检测^[2]。

1 果蔬的品质概述

品质是指物品的质量,是产品能够满足一定需求的特性的总和。对于果蔬来说,品质包括其商品品质、营养品质和安全品质、贮藏加工品质^[3]。商品品质指果蔬的色泽、形状、口感、质地、风味等,是影响消费者购买欲的直接因素,决定了果蔬的商品价值。营养品质包括其所含碳水化合物、矿物质、维生素、蛋白质等营养成分的含量,决定了果蔬的营养价值。安全品质是指果蔬中的生物污染、化学污染等。贮藏加工品质指果蔬的耐储存性和适用于各种用途的属性。其中,营养品质和安全品质与人们的营养和健康息息相关^[4],受到了广大消费者和食品专家的重视。

2 果蔬品质常规评价方法

2.1 感官评价 果蔬的感官品质对于消费者来说非常重要,在无法快速、准确地了解某种果蔬营养价值和安全品质的情况下,果蔬的商品品质决定着消费者的购买欲望^[5]。感官评价是通过人的视觉、嗅觉、味觉、触觉和听觉来反映食品的外观、气味、滋味、质构等特性的一种评价方法。经过专业培训的评定人,通过其感官的感知,按照一定的评分标准,对果蔬的形态、颜色、气味、味道等商品品质做出判断。虽然感官评定不依赖于精密的仪器设备,但对评定人员的专业水平要求较高,且评定结果容易受到品评人的专业水平和品评环境的影响^[6],导致评价等级缺乏一致性和稳定性。

基金项目 天津市2020年部门预算项目“紫玉米种养殖及深加工综合利用技术中试示范”;天津市农业质量标准与检测技术研究所科研创新基金(ZBS-2001);天津市农业科技成果转化与推广项目(201901040);天津市蔬菜产业体系-蔬菜质量安全岗位团队(ITTVRS2017021)。

作者简介 邹攀(1988—),女,河北保定人,助理研究员,博士,从事农产品品质及天然活性产物研究。*通信作者,研究员,硕士,从事农产品质量与安全研究。

收稿日期 2020-06-03; **修回日期** 2020-07-02

2.2 理化检测 果蔬品质的理化检测分析是指通过物理检验、化学分析、仪器分析、微生物分析、酶分析和免疫学分析等手段来测定果蔬中的成分、性能、微观结构等^[7]。理化检测一般可以测定果蔬的营养品质和安全品质。常见的理化检测品质指标包括叶绿素、含糖量、可溶性固形物、维生素C、总酸度、粗纤维、农兽药残留、微生物污染情况等。理化检测的技术较为成熟,结果客观可行,但是需要专业的实验人员操作,检测前还需要对样品进行前处理,会破坏样品,且检测过程操作繁琐,耗费时间长^[8]。

3 果蔬品质的无损检测

随着人们对食品营养和安全问题的日益关注,如何寻找一种简便、快速且能现场实时监测、无损的果蔬品质检测方法,对于指导果蔬产业发展有很大的实用价值。无损检测是一门新兴的综合应用学科,在不损坏被检测物品的前提下,利用各种物理学方法,如热、声、光、电、磁等手段来获取待测物品品质有关的内容、性质或成分。

3.1 高光谱成像技术(hyperspectral imaging system) 高光谱成像技术可以同时获取研究对象的光谱及空间信息,是一种光谱及图像融合技术,可以捕获目标物在特定波长下的空间值,而不是测定单点的光谱数据。当入射光照射于目标物表面时,除去少数镜面反射损失外,剩余的光能量进入目标物的细胞组织并在其内部发生光吸收和漫反射现象^[9]。光吸收主要取决于待测物的化学组成,如糖分等,而漫反射则与待测物的结构和物理特性(如密度、粒子大小等)紧密相关。

光谱数据可以分析物体内部物理结构及化学成分,而图像数据又能将果蔬的外部特征、斑点或表面缺陷反映出来,因此,高光谱成像技术在果蔬品质评价中的应用研究越来越多。通过高光谱成像技术获取不同果蔬相应的品质指标的光谱特征,运用化学计量方法建立各指标含量的预测模型,再结合图像分析,就能够对果蔬品质进行准确快速的评价^[10]。Itoh等^[11]采用近红外高光谱成像技术测定了叶菜的硝酸盐分布情况;通过对叶片高精度图像分析估算硝酸盐浓度,结果可以提示叶片内部硝酸盐浓度变化情况。高光谱激光成像技术还可用于测定果蔬内部品质的检测,如可溶性固形物^[12]、土豆中糖含量^[13]、葡萄中花青素含量^[14]和灵武长枣蔗糖含量^[15],以及外部品质的评价,包括苹果的瘀伤^[16]、黄瓜冻伤损伤^[17]和草莓的硬度^[18]等。

高光谱成像技术分析样品的效率高、速度快,操作简便,样品无需复杂的前处理,实现无损检测,可同时对多个样品进行定性和定量分析。此外,在检测过程中无需使用化学试剂,安全环保、无污染。但是前期建模过程需要代表性样本数量大^[19],并且需要测定研究对象中某项品质指标实际含量,因此在小批量样品品质评价应用不大;获取光谱数据过程容易受到环境和仪器等因素的影响,具有一定的局限性^[20]。随着实验设备的不断改善及光谱分辨率的不断提高,高光谱成像能够记录越来越丰富的农产品品质信息,将会是实现果蔬品质快速、无损检测的重要工具。

3.2 机器视觉检测技术(machine vision) 机器视觉是融合

了人工智能、神经生物学、心理物理学、计算机科学、图像处理、模式识别等多学科的交叉学科^[21]。机器视觉是用相机替代人眼对目标进行图像采集,并运用计算机进行图像处理,对图像中的目标区域进行分析,完成待测物某品质指标的测定、识别等任务^[22],具有非接触性、速度快、精度高等特点,在食品质量与安全领域得到逐步的应用推广,尤其是果蔬的形状分类、缺陷检测及质量分级^[23]。

新鲜度是影响菠菜食用品质和商品品质的重要因素,基于机器视觉技术搭建了适用菠菜图像采集的机器视觉硬件系统,建立基于菠菜图像信息的新鲜度等级判别模型和叶绿素定量预测模型,判别准确率在85%以上,实现了图像信息对菠菜叶绿素含量的预测^[24]。Gongal等^[25]利用3D机器视觉系统评价树冠上苹果大小,根据三维坐标主轴的判断精度为69.1%,而基于像素大小判断苹果尺寸的精度提高至84.8%,表明在室外环境下利用3D机器视觉系统来评估水果大小具有一定的应用潜力。Rashidi等^[26]对猕猴桃果实形状的算法进行了定量分类,该法结果与排水计算体积法无显著性差异,为估算猕猴桃体积提供了一种准确、简单、快速、无创的方法,可方便地用于监测各种管理措施下猕猴桃的生长发育情况,以及在收获后的加工过程中对猕猴桃进行分选。Alfatni等^[27]使用RGB颜色模型开发了一种油棕果实自动分级系统,以区分油棕果实的3种不同类别,结果表明,基于RGB强度,果实的成熟度可以在不同种类的果实之间进行区分。

果蔬分级是采后加工的关键环节,一般按照大小、形态、新鲜程度等方面对其进行外部品质分级。国内普遍采用的人工分级受主观鉴别能力等因素的影响,往往偏差较大,工作效率低;机械分级虽然生产效率高,但是精度不够,适应性较差,且仪器设备容易对果蔬造成损伤。与之相反,机器视觉技术可以广泛应用于农业和园艺,使劳动密集型转化为自动化操作。机器视觉技术在食品行业中的普及程度不断提高,并指出其发展也为食品行业提供了一个强有力的水平和具有竞争力的价格。然而,计算机视觉精确度受图像质量的影响。由于典型农业环境的非结构化和其中植物的生物变异,在这些应用程序中进行对象识别要困难得多。如果在昏暗或夜间条件下进行研究或操作,还需要人工照明^[28]。

3.3 电子鼻(electronic nose) 同一果蔬在不同生长阶段的气味也不完全相同。这是因为果蔬中的风味物质是由不同挥发性成分组成的混合物,包括醇类、醛类、酯类、酮类、含硫化合物等。果蔬的香气可以客观体现成熟程度和风味特点,是评价果蔬风味品质的重要指标^[29-30]。果蔬的风味物质是影响其香气的重要因素,目前对于果蔬的风味物质组成的研究较少,缺少对果蔬风味品质的评价标准。充分了解果蔬香气形成机理,不仅可以了解果蔬生长过程生理变化,而且能够发掘影响果蔬感官品质的主要因素,对于提高果蔬商品率具有重要意义。分析食品风味物质组成的常用方法为顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用法^[31],该法能够对样品进行高效的提取和分析,但是需要破坏样品,无法实现无损在线监测。

电子鼻是一种用于分析、识别、检测复杂气味和大多数挥发性成分的新型智能仿生仪器,通过模拟人和动物的鼻子,获取样品中挥发性成分的数据信息^[32]。Raigar 等^[33]采用无损电子鼻与模糊逻辑相结合的方法对去壳花生的贮藏品质进行评价,利用电子鼻所得数据估算气味指数,结果表明电子鼻数据可以准确预测花生贮藏时间与化学酸败指数的关系。Rocchi 等^[34]比较了同位素比率质谱、气相色谱质谱及电子鼻对藏红花来源、加工及年限的区别作用,结果表明电子鼻作为一种替代的快速、无损工具可以表征复杂的香气组成,并鉴别藏红花样品的真实性。基于电子鼻技术,优化电子传感器阵列,建立菠菜新鲜度等级判别模型,对于训练集和测试集的判别正确率分别为 84% 和 75%,表明电子鼻技术可以实现菠菜储藏期新鲜度的高效判别^[24]。梨果在运输过程中容易出现内部腐败变质,即便专家也很难分辨其内部果肉的好坏,因此,赵策等^[35]利用电子鼻技术对皇冠梨的腐败等级进行分类,准确率均在 73% 以上,为皇冠梨品质无损检测提供了新方法。Xu 等^[36]采用 PEN3 电子鼻评价不同贮藏环境中荔枝的品质,分析荔枝贮藏时间及硬度与风味的关系。

随着电子鼻的深入推广,越来越多的研究人员不再局限于固定传感器阵列的商业电子鼻,而是根据待测物品的特性,设计相应的传感器阵列,从而获得更好的分析结果。但是电子鼻的传感器只针对果蔬的气味,所获得果蔬品质的指标信息具有一定的局限性。

3.4 近红外光谱技术 (near infrared spectroscopy) 近红外光谱介于可见光和中红外光谱之间,波长为 780~2 526 nm,是吸收光谱中的第一个非可见光区。果蔬中化合物组成不同,其所含基团(C=C、N=C、O=C、N=C 等)运动在红外线照射下产生共振,在近红外区域形成不同的光谱信息,从而基于光谱信息和组分特征可以实现果蔬中部分化合物的定性或定量分析^[37]。近红外光谱技术需要利用定标样品集的理化测定数据与近红外光谱信息建立定标,再选取未知样品利用化学计量学的多变量统计模型预测未知样品集的理化指标,因此该技术属于间接分析方法。

近红外光谱技术在农业领域的应用非常广泛,从植物品种鉴别到果蔬谷物品质、营养成分测定等多个方面均有涉及。近红外光谱技术已经广泛地用于果蔬的无损品质评价中,如可溶性固形物^[38-39]、酸度、可滴定酸^[40]、水分、干物质^[41-42]、硬度^[43]以及纤维、蛋白、脂肪、维生素 C^[44]、灰分等含量的快速筛查。王丹^[45]通过建立不同品种及不同贮藏期柿子的近红外无损鉴别模型,不同品种的鉴别准确率达 98%,不同贮藏期的准确率为 88.9% 以上,这说明近红外光谱技术可以应用于柿子品种及贮藏期的快速判别中。肖慧等^[46]开发了便携式葡萄专用可见-近红外光谱检测仪器,用于“美人指”和“白玉霓”2 种葡萄中可溶性固形物和总多酚含量的测定,建模效果较好,可以满足不同品种葡萄多个理化指标的建模预测。

近红外光谱渗透性高,几乎用于所有含氢基团化合物的

分析中,且不需要前处理,分析效率高,可以实现多组分同时检测,适用于多种状态的分析对象,能够在线、无损分析^[47]。但是由于近红外光谱区的吸收较弱,光谱信噪比低,因此不适用于水分含量高于 80% 的果蔬^[48];此外近红外光谱技术的模型需要不断修正和维护,而建模工作难度大,需要专业技术人员和代表性的样品^[49]。

3.5 其他无损检测技术 上述无损检测技术是根据果蔬品质指标与其光学特性、声学特性的相关性建立模型,从而在不损坏研究对象的前提下探测果蔬的品质。根据植物色素产生的叶绿素荧光获得植物信息,建立叶绿素荧光检测技术。叶绿素荧光检测技术结合化学计量方法建立生菜叶片硝酸盐含量的快速无损检测模型,总体评价准确率为 93.33%,实现了生菜硝酸盐安全品质的合理评价^[50]。简讯等^[51]基于智能手机光谱系统建立蔬菜叶绿素和含水量反演模型,该系统结合网络云端服务和实时数据反馈的特点,实现了蔬菜品质和新度指标的智能检测。利用果蔬的电学特性,研究人员发现介电常数随着果蔬种类而不同,但在某段频率范围内,所测得果蔬的介电常数和介质损耗随频率的增加而减少^[45]。利用果蔬的声波振动特性,建立坚硬系数与声波频率的相关性,来检测西瓜^[52]和哈密瓜^[53]的成熟度。通过自行研制的禽蛋裂纹检测装置,采集并分析敲击鸡蛋产生的响应信号,检测鸡蛋裂纹,判别的准确率均高于 72%^[54]。

4 展望

果蔬的品质对于人类健康意义重大,但是由于种类繁多,品质成分复杂,缺乏果蔬品质评价的科学性、系统性,因此,应该制定全面的果蔬品质评价体系,对果蔬的品质进行全面综合评价;在评价过程中,确定各个指标对品质影响的权重系数;同时开展不同产地、不同品种、不同茬口、不同施肥条件、不同种植环境间果蔬的品质评价,为优质果蔬品种选育、栽种提供指导,实现农业生态环境的可持续发展,并满足人们对于健康生活品质的需求。此外,部分果蔬还含有其独特的功能性营养因子,如番茄红素、大蒜素、异硫氰酸盐、类胡萝卜素、槲皮素、白藜芦醇、类黄酮等成分,这些功能性成分也是引起消费者购买欲的重要影响因素,因此,可考虑在品质评价中引入功能性营养因子这一指标,有助于果蔬品牌的建设,提高其在国内外的知名度和品牌影响力。

无损检测是近年来发展的高新技术之一,为果蔬品质的检测提供了极大的便利,但是无损检测技术均具有各自的优劣势,只能单独评价一项或几项品质指标,不能实现果蔬品质的系统性评价。随着无损检测技术的广泛应用,检测方法由外部质量向内部质量转变,由单一指标向综合指标转变。同时,测试设备正在向便携、数字化、智能化方向发展。

参考文献

- [1] 窦晓博,邵娜.消费升级背景下中国蔬果生产发展策略[J].农业展望, 2018,14(11):47-51.
- [2] ABOONAJMI M, FARIDI H. Nondestructive quality assessment of Agro-food products[C]//Proceedings of the 3rd Iranian international NDT conference. Tehran, Iran: [s.n.], 2016:1-9.
- [3] CHAUHAN O P, LAKSHMI S, PANDEY A K, et al. Non-destructive quality

- monitoring of fresh fruits and vegetables[J].Defence life science journal, 2017,2(2):103-110.
- [4] 李会合.蔬菜品质的研究进展[J].北方园艺,2006(4):55-56.
 - [5] 李会合,田秀英,季天姿.蔬菜品质评价方法研究进展[J].安徽农业科学,2009,37(13):5920-5922.
 - [6] 孟留伟,杨良,王静禹,等.基于高光谱成像技术对桑椹品质无损检测的研究进展[J].蚕桑通报,2017,48(3):9-14.
 - [7] 潘思慧.贮藏过程中番茄成熟度的智能化检测方法研究[D].镇江:江苏大学,2018:1-8.
 - [8] 陈慧芝.基于智能包装标签的典型生鲜配菜新鲜度无损检测的研究[D].无锡:江南大学,2019:1-2.
 - [9] PU H B, LIN L, SUN D W. Principles of hyperspectral microscope imaging techniques and their applications in food quality and safety detection: A review[J]. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2019, 18(4): 853-866.
 - [10] 王巧男.基于高光谱成像技术的蔬菜新鲜度快速检测方法研究[D].杭州:浙江大学,2015:5-9.
 - [11] ITOH H, KANDA S, MATSUURA H, et al. Measurement of nitrate concentration distribution in vegetables by near-infrared hyperspectral imaging[J]. Environment control in biology, 2010, 48(2): 37-49.
 - [12] MO C, KIM M S, KIM G, et al. Spatial assessment of soluble solid contents on apple slices using hyperspectral imaging[J]. Biosystems engineering, 2017, 159: 10-21.
 - [13] RADY A, GUYER D, LU R F. Evaluation of sugar content of potatoes using hyperspectral imaging[J]. Food and bioprocess technology, 2015, 8(5): 995-1010.
 - [14] GUTIÉRREZ S, TARDAGUILA J, FERNÁNDEZ-NOVALES J, et al. On-the-go hyperspectral imaging for the in-field estimation of grape berry soluble solids and anthocyanin concentration[J]. Australian journal of grape and wine research, 2019, 25(1): 127-133.
 - [15] 程丽娟,刘贵珊,何建国,等.灵武长枣蔗糖含量的高光谱无损检测[J].食品科学,2019,40(10):285-291.
 - [16] WANG N, ELMASRY G. Bruise detection of apples using hyperspectral imaging[M]//SUN D W. Hyperspectral imaging for food quality analysis and control. Amsterdam: Elsevier Press, 2010: 295-320.
 - [17] CEN H Y, LU R F, ZHU Q B, et al. Nondestructive detection of chilling injury in cucumber fruit using hyperspectral imaging with feature selection and supervised classification[J]. Postharvest biology and technology, 2016, 111: 352-361.
 - [18] ZHANG C, GUO C T, LIU F, et al. Hyperspectral imaging analysis for ripeness evaluation of strawberry with support vector machine[J]. Journal of food engineering, 2016, 179: 11-18.
 - [19] 欧阳爱国,吴建,刘燕德.高光谱成像在农产品无损检测中的应用[J].广东农业科学,2015,42(23):164-171.
 - [20] 卢娜,韩平,王纪华.高光谱成像技术在果蔬品质安全无损检测中的应用[J].食品安全质量检测学报,2017,8(12):4594-4601.
 - [21] 章炜.机器视觉技术发展及其工业应用[J].红外,2006,27(2):11-17.
 - [22] 商晋.柚子品质无损检测方法研究进展[J].现代食品,2018(2):60-62.
 - [23] EL-MESERY H, MAO H P, ABOMOHR A. Applications of non-destructive technologies for agricultural and food products quality inspection[J]. Sensors, 2019, 19(4): 846-869.
 - [24] 徐海霞.基于机器视觉和电子鼻技术的菠菜新鲜度无损检测研究[D].镇江:江苏大学,2016:17-40.
 - [25] GONGAL A, KARKEE M, AMATYA S. Apple fruit size estimation using a 3D machine vision system[J]. Information processing in agriculture, 2018, 5(4): 498-503.
 - [26] RASHIDI M, SEYFI K, GHOLAMI M. Determination of kiwifruit volume using image processing[J]. ARPN Journal of Agricultural and Biological Science, 2007, 2: 17-22.
 - [27] ALFATNI M S M, SHARIFF A R M, SHAFRI H Z M, et al. Oil palm fruit bunch grading system using red, green and blue digital number[J]. Journal of applied sciences, 2008, 8(8): 1444-1452.
 - [28] PATEL K K, KAR A, JHA S N, et al. Machine vision system: A tool for quality inspection of food and agricultural products[J]. Journal of food science and technology, 2012, 49: 123-141.
 - [29] 王建华,王汉忠.果蔬芳香物质的研究方法[J].山东农业大学学报(自然科学版),1996,27(2):219-226.
 - [30] 冯蕾.基于电子鼻及低场核磁共振的黄瓜与樱桃番茄新鲜度智能检测研究[D].无锡:江南大学,2019:3-8.
 - [31] 刘瑶,徐冬颖,刘婧,等.基于电子鼻的运输振动蔬菜气味品质检测[J].北方园艺,2019(18):100-109.
 - [32] 曹玉栋,祁伟彦,李娟,等.苹果无损检测和品质分级技术研究进展及展望[J].智慧农业,2019,1(3):29-45.
 - [33] RAIGAR R K, UPADHYAY R, MISHRA H N. Storage quality assessment of shelled peanuts using non-destructive electronic nose combined with fuzzy logic approach[J]. Postharvest biology and technology, 2017, 132: 43-50.
 - [34] ROCCHI R, MASCINI M, FABERI A, et al. Comparison of IRMS, GC-MS and E-Nose data for the discrimination of saffron samples with different origin, process and age[J/OL]. Food control, 2019, 106[2020-03-05]. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106736. DOI: 10.1016/j.foodcont.2019.106736.
 - [35] 赵策,马飒飒,张磊,等.基于电子鼻技术的皇冠梨腐败等级分类研究[J].食品工业科技,2020,41(3):246-250,258.
 - [36] XU S, LÜ E, LU H Z, et al. Quality detection of litchi stored in different environments using an electronic nose[J]. Sensors, 2016, 16(6): 852-866.
 - [37] 郭志明,郭闯,王明明,等.果蔬品质安全近红外光谱无损检测研究进展[J].食品安全质量检测学报,2019,10(24):8280-8288.
 - [38] LI X N, HUANG J C, XIONG Y J, et al. Determination of soluble solid content in multi-origin 'Fuji' apples by using FT-NIR spectroscopy and an origin discriminant strategy[J]. Computers and electronics in agriculture, 2018, 155: 23-31.
 - [39] ZHANG D Y, XU X F, HUANG W Q, et al. Nondestructive measurement of soluble solids content in apple using near infrared hyperspectral imaging coupled with wavelength selection algorithm[J]. Infrared physics & technology, 2019, 98: 297-304.
 - [40] XIE L J, YE X Q, LIU D H, et al. Prediction of titratable acidity, malic acid, and citric acid in bayberry fruit by near-infrared spectroscopy[J]. Food research international, 2011, 44(7): 2198-2204.
 - [41] CLARK C J, MCGLOONE V A, DE SILVA H N, et al. Prediction of storage disorders of kiwifruit (*Actinidia chinensis*) based on visible-NIR spectral characteristics at harvest[J]. Postharvest biology and technology, 2004, 32(2): 147-158.
 - [42] SUN X D, SUBEDI P, WALSH K B. Achieving robustness to temperature change of a NIRS-PLSR model for intact mango fruit dry matter content[J/OL]. Postharvest biology and technology, 2020, 162[2020-03-25]. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111117.
 - [43] WEI X, HE J C, ZHENG S H, et al. Modeling for SSC and firmness detection of persimmon based on NIR hyperspectral imaging by sample partitioning and variables selection[J/OL]. Infrared physics & technology, 2020, 105[2020-03-25]. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103099.
 - [44] 李鸿强.基于高光谱分析的蔬菜品质检测方法研究[D].北京:中国农业大学,2019:49-62.
 - [45] 王丹.柿子采后品质近红外检测模型的研究[D].天津:天津商业大学,2014:13-23.
 - [46] 肖慧,孙柯,屠康,等.便携式葡萄专用可见-近红外光谱检测仪器开发与实验[J].食品科学,2019,40(8):300-305.
 - [47] 崔艳莉,冀晓磊,古丽菲娅,等.近红外光谱在果蔬品质无损检测中的研究进展[J].农产品加工(学刊),2007(7):84-86.
 - [48] JIMARÉ BENITO M T, BOSCH OJEDA C, SANCHEZ ROJAS F. Process analytical chemistry: Applications of near infrared spectrometry in environmental and food analysis: An overview[J]. Applied spectroscopy reviews, 2008, 43(5): 452-484.
 - [49] 向延菊,蒲云峰,王大伟.近红外光谱在果蔬品质定性分析中的应用研究进展[J].食品工业,2019,40(4):255-259.
 - [50] 赵红星.基于叶绿素荧光光谱分析的生菜叶片硝酸盐检测与评价[D].长春:吉林大学,2017:33-43.
 - [51] 简讯,孙立福,杨杭,等.智能手机的主要叶类蔬菜品质和新度指标的光谱检测[J].光谱学与光谱分析,2019,39(5):1524-1529.
 - [52] 王书茂,焦群英,籍俊杰.西瓜成熟度无损检测的冲击振动方法[J].农业工程学报,1999,15(3):241-245.
 - [53] 吕吉光,吴杰.基于智能手机声信号哈密瓜成熟度的快速检测[J].食品科学,2019,40(24):287-293.
 - [54] 秦炎炎.鸡蛋裂纹在线检测系统的研究与试验[D].武汉:华中农业大学,2018:8-20.