

农畜产品品质安全光学无损检测技术的 进展和趋势

彭彦昆*, 张雷蕾

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 本文综述了国内外农畜产品品质安全无损检测技术的研究状况和发展趋势。在农畜产品检测领域, 发现近红外光谱技术、高光谱成像技术、激光拉曼光谱法和 X 射线荧光光谱法等主要的光学无损检测技术和方法有广泛的研究和应用状况, 它们在果蔬的品质成分分析、农药残留检测与在线分级分拣; 生鲜肉肉品品质检测、品种鉴别与安全评定; 乳品、茶叶等特种农产品的成分分析、品种分类等方面具有重要作用。农畜产品无损检测技术具有广阔的发展前景和应用潜力。

关键词: 农畜产品; 品质安全; 无损检测; 近红外光谱技术; 高光谱成像技术

Advancement and trend of non-destructive detection technology for assessing agro-products quality and safety

PENG Yan-Kun*, ZHANG Lei-Lei

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The paper reviewed the advancement and trend on non-destructive detection technology of agricultural products quality and safety. The major technologies were spectroscopy non-destructive detection methods, including the near-infrared spectroscopy (NIRS), hyperspectral imaging technology, Raman spectroscopy and X-ray fluorescence spectrometry (XFR). The applications of the spectral technologies were wide, including detection of the nutritional components analysis, detection of pesticides residue, online grading of fruits and vegetables based on their qualities; detection of meat quality, variety discrimination and safety evaluation of fresh meat; the conventional components analysis, cultivar classification and safety evaluation of special agricultural products. Non-destructive detection technology has an extremely large potential for future development and application prospect to detect agro-products quality and safety.

KEY WORDS: agricultural products; quality and safety; non-destructive detection; near-infrared spectroscopy; hyperspectral imaging technology

1 引言

农畜产品质量安全是当前人们最为关注的重大民生问题, 它直接关系到消费者的身体健康, 关系到上游企业的食品安全, 关系到整个社会的稳定发展。

近年来, 国内食品安全问题频频发生, 很大程度上是由于初级农畜产品源头污染严重以及流通过程中监管控制力度不到位所造成的, 所以迫切需要全面提升农畜产品质量安全保障措施。其中, 农产品质量控制和安全检测是保障农畜产品质量安全的关键环节,

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201003008)

*通讯作者: 彭彦昆, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 农畜产品品质安全无损检测关键技术与装备。E-mail: ypeng@cau.edu.cn

为了进一步提高农畜产品质量安全水平,需要切实加强农畜产品质量安全监管。因此,如何实现农畜产品品质的快速检测和安全评价有着重要的现实意义。

传统检测农畜产品品质安全方法,如质谱分析法、高压液相色谱法、理化检验和微生物检验等,存在检测效率低、所需时间长、产品破坏大等问题。所以,现代的农畜产品质量安全检测技术正朝着快速、准确、无损的方向发展。农畜产品品质无损检测技术是近年来发展起来的一项新技术,在不破坏被检农产品的情况下,应用一定的检测技术和分析方法对其内在品质和外在品质进行测定,并按一定的标准对其作出评价^[1]。根据无损检测原理的不同,可分为基于声学特性的超声波检测技术、基于电磁学特性的核磁共振波谱法检测技术、基于气味原理的电子舌和电子鼻、基于图像分析的机器视觉检测技术、基于光学特性的无损检测技术等^[2]。超声波检测技术在农产品加工及安全检测领域有一定应用,但是该技术只能检测某部位的化学成分,且易受超声波频率、测量部位、被测物组织分布均匀性等因素影响。核磁共振检测技术在品质分析中起到较好的作用,然而在实际应用中仍然存在不少问题。电子鼻和电子舌在一定程度上解决了食品品质评价对工业自动化的制约,却受到敏感材料、制造工艺、数据处理等制约。机器视觉有效地实现了农产品检测的智能化,但在识别速度和准确度上有待进一步提高。基于光学特性的无损检测技术主要有近红外光谱技术、高光谱成像技术、激光拉曼光谱法和X射线荧光光谱法,由于其检测速度快、精度高、易于实现自动化,适于大规模产业化生产的在线检测,特别是在农畜产品品质安全检测方面有独到的优势,具有很大的实用和推广价值^[3-5]。

近年来,光学技术在农畜产品品质无损检测中的应用研究进展较快,主要包括果蔬、粮油等种植业产品的品质成分分析、农药残留检测与在线分级分拣;畜禽、水产等养殖业产品的肉品品质检测、品种鉴别与安全评定;乳品、茶叶等特种农产品的成分分析、品种分类与食用安全性评定等。本文介绍了利用光学技术在主要农畜产品品质检测和安全评定上的研究进展,并对今后的发展趋势和应用前景进行展望。

2 光学技术在果蔬检测中的研究与应用

果蔬的品质检测和分级评定是果蔬在流通中的

重要环节,对于果蔬在产后加工、质量评判和运输贮藏等方面具有较高的应用价值。基于果蔬光学特性的无损检测在该领域取得了较大的进展,受到了国内外学者越来越广泛的关注。

针对果蔬内部品质无损检测,光学技术主要应用在营养成分分析、食用指标测定和成熟度判定分级等。20世纪70年代至今,近红外技术发展较为成熟,在果蔬内部品质无损检测中有较高的检测精度^[6]。2005年, Pedro等^[7]应用近红外光谱测定西红柿的总固形物、可溶性固形物、番茄红素和胡萝卜素含量,所建模型的相关系数均高于0.99。2009年, Camps等^[8]利用便携式近红外光谱分析法对杏的品质进行研究,通过检测可溶性固形物含量(SSC)、总酸度(TA)和坚实度三个指标,取得了满意的效果。高光谱成像技术在国外发展相对较早,20世纪90年代末开始应用于农产品品质无损检测。Lu和Peng^[9]两人采用高光谱散射方法建立桃子硬度的预测模型,获得了较好的预测结果。最近, Rajkumar^[10]等利用400~1000 nm的可见/近红外光谱成像技术对香蕉的可溶性固形物含量、含水率和坚实度进行测定,从而很好地判定了香蕉的成熟度。国内学者研究利用光学技术对果蔬内部品质进行无损检测较深入。其中中国农业大学韩东海教授团队在苹果褐腐病水心病鉴别、梨的糖度硬度检测等方面取得了较为丰硕的成果^[11,12]。此外浙江大学应义斌教授团队在水果成熟度、可溶性固形物等内部品质指标检测和尖椒、番茄蔬菜叶片的叶绿素含量测定等方面做了部分有价值的研究^[13-15]。

光学技术在果蔬外部品质方面的研究,主要集中在外部特征、表面缺陷及污染物的检测,其中高光谱成像技术在该领域显示了巨大的优越性^[16]。程国首等^[17]提取苹果高光谱图像中713、793、852 nm处的3个波长图像,采用波段比算法,有效地检测出新疆红富士苹果大小。果蔬表面缺陷和表面污染严重影响果蔬品质和附加值,尤其是轻微损伤、真菌感染、粪便污染以及早期冻伤等难以识别的情况,如何对其进行快速、无损检测已经成为国内外学者的研究热点。比利时学者 Xing等^[18-20]从2003年开始做了相关研究,利用可见/近红外高光谱成像检验苹果表面新瘀伤,准确率达到95%以上。2004年, Mehl等^[21]利用高空间分辨率(0.5~1.0 mm)高光谱成像系统检测四种不同种类苹果腐烂、擦伤、污斑、伤疤和土壤污染。2006年, Ariana^[22]等应用高光谱成像技术检测黄瓜采

摘时受到的机械损伤。2008年,西班牙的 Gomez-Sanchis 等^[23]利用高光谱计算机成像系统成功检测出由霉菌污染引起的柑橘腐败。国内学者也进行了许多努力,在果蔬缺陷等外部品质判定方面有深入研究。2009年,蔡建荣等^[24]利用高光谱图像技术结合两步主成分分析算法检测柑橘果锈,正确率达到90%,实现了光谱技术在柑橘外部品质的无损检测。2010年,李江波等^[25]基于高光谱成像技术从带有不同缺陷的柑橘类水果中快速识别出溃疡果。与此同时,单佳佳和郭俊先^[26,27]分别进行了苹果内外品质同时检测的研究,结果表明高光谱成像技术既可以准确预测果蔬内部品质,又可以实现外部品质的分级。

在果蔬食用安全性的识别和检测方面,光谱技术在果蔬农药残留检测中也有相应的研究。2008年,薛龙等^[28]以脐橙为研究对象,初步探讨了应用高光谱图像技术检测水果表面农药残留的方法。2009年,陈菁菁等^[29]利用近红外光谱技术实现了微量有机磷农药的定量检测。2010年,代芬等^[30]利用近红外反射光谱分析技术检测高残留农药敌百虫和敌敌畏在龙眼表面的残留。2012年,罗春生等^[31]利用近红外光谱法测定了乙酰甲胺磷和毒死蜱混合农药在芦柑表面的残留量。利用拉曼光谱检测果蔬表面农药残留对国内来说属于一个新的尝试。2004年,周小芳等^[32]发现运用近红外傅立叶变换拉曼光谱仪可以分辨果蔬表面的农药残留。2008年,王睿垠等^[33]应用拉曼光谱分析法在农药残留及复杂分子的结构分析中做了探索性尝试。2011年,孙云云等^[34]利用激光显微拉曼光谱技术对苹果表面毒死蜱农药进行检测,检测限为48 mg/kg。江南大学的 Liu^[35]应用表面增强的拉曼光谱检测和鉴定水果表面杀虫剂残留(硫代氨基甲酸酯和有机磷混合物)。中国农业大学的 Dhakal^[36]的研究证明,拉曼光谱检测水果表面是否残留农药是一种不必制样、非破坏性、快速方便的有效方法。上述研究表明高光谱成像技术在果蔬品质安全无损检测中有很大的应用潜力。

3 光学技术在生鲜肉检测中的研究与应用

生鲜肉品质的好坏,直接影响到消费者的生活质量和健康安全,受到了整个肉品行业的日益关注和重视。光学技术作为快速无损检测技术在生鲜肉品质检测和安全评定上得到广泛应用^[37,38],主要体现在生鲜肉的化学成分分析、食用品质评价、质量评估

与分级、品种鉴定与判断等方面。

生鲜肉中的各种营养成分对肉的品质有重大的影响。基于光学技术的肉品成分分析的研究主要集中在水分、蛋白质、脂肪、维生素、矿物质和碳水化合物等指标上,对不同种类的生鲜肉均有相关的应用实例。早在1998年,美国食品安全实验室已经将光学技术应用于禽肉品质的研究。刘炜等^[39,40]应用傅立叶变换近红外光谱法检测肌内脂肪、蛋白质和水分含量,分别在鲜猪肉和鲜鸡肉中建立了良好的模型。Qiao 等^[41]利用430~1000 nm 光谱范围的高光谱成像技术对猪肉的滴水损失、pH值、颜色等质量进行了检测。2011年,Gjerlaug-Enger 等^[42]应用近红外光谱法检测育种猪肌内脂肪酸和水分含量,脂肪酸预测相关系数 $R^2=0.98$ 。2012年,Kamruzzaman 等^[43]发现结合多元分析的近红外高光谱成像能对羊肉的品质属性进行有效评定。近几年来,国内外有许多学者^[44-46]利用可见/近红外反射光谱技术成功预测并评价了生鲜猪肉的营养品质。利用拉曼光谱技术同样也可以获取与肉类营养成分相关信息,如肉品中蛋白质、脂肪成分的相对浓度和分布情况。Dorthe 等^[47]采用红外吸收和拉曼散射相结合的技术,成功反映出屠宰后短期内猪肉水分含量的情况。Afseth^[48]等在一个复杂的食品成分中通过拉曼光谱检测的方法对脂肪酸进行分类和测定。随着计算机处理技术和光谱分析技术的不断发展,世界上有许多国家已近开发出相应的仪器设备并运用于实际生产中。如丹麦 Foss 公司的近红外反射光谱系统,在猪肉、鲜鸡肉肉糜的蛋白质、渗透性脂肪、干物质等预测中取得了很好的效果。美国的 Silver Spring 近红外光谱对兔肉的脂肪酸有较好的预测。

食用品质是肉品最重要的品质指标之一,包括嫩度、持水力、大理石花纹、新鲜度等指标,直接影响生鲜肉的商品价值。嫩度是指肉在食用时口感的老嫩,反映了肉的质地,是消费者评判肉质优劣的最常用指标。Park^[49,50]经过几年的研究,应用近红外光谱技术很好地评价了牛肉背最长肌(LD)的嫩度,并建立预测牛肉嫩度的良好模型。2008年,Naganathan 等^[51]采用高光谱成像技术分别对牛肉嫩度进行测定,取得了满意的结果。近年来,我国在这一领域研究也取得了快速的发展。其中,中国农业大学彭彦昆等^[52]研发了一种生鲜肉嫩度高光谱无损检测的新方法。在此基础上,吴建虎等^[53,54]开发出一组高光谱散射成

像系统,获取新鲜牛肉400~1100 nm波长范围的高光谱散射图像,利用VIR/NIR光谱散射特征对牛肉嫩度进行预测和分级的准确率高达91%。随后,吴建虎等^[55]又利用光谱散射特性对牛肉的pH值、嫩度和颜色(L*、a*、b*)等多指标品质参数进行预测,取得了较理想的研究成果。大理石花纹是确定肉类尤其是牛肉质量等级的主要指标。Qiao等^[56]通过测量猪肉样品和猪肉大理石花纹标准的光谱,后经主成分分析生成5、10、20个主成分,再用人工神经网络分类,其中用10个主要成分分类的准确率达到85%。高晓东等^[57]通过提取530 nm特征波段处的牛肉大理石花纹的特征参数并进行建模分析,发现将高光谱成像技术对牛肉等级评定是可行的。以上研究为牛肉品质无损检测奠定了良好的发展基础。色泽给人以第一印象,新鲜度是反映肉品卫生质量的重要指标。2009年,蔡健荣^[58]等应用近红外光谱法测定猪肉新鲜度重要指标挥发性盐基氮(TVB-N)的含量。2011年,Grau等^[59]利用可见/短波近红外光谱法预测了鸡胸肉的水分、pH、TVB-N、适温细菌等参数,实现了新鲜度的评定。2012年,张雷蕾等^[60]提取高光谱中的反射光谱,通过TVB-N和pH值两个重要新鲜度参数,较好地实现了对猪肉新鲜度快速无损检测。这项技术的应用为检测肉品新鲜度开辟了新的道路。

在生鲜肉的安全性指标的评价上,包括肉的表面污染、微生物腐败变质、毒素药物残留及掺假掺水肉等。针对禽肉表面污染物,国外学者进行了大量相关的试验研究^[61,62]。Park等^[63,64]从多光谱到高光谱进行了不断的尝试,利用主成分分析法研究排泄物和摄取食物对禽肉的污染问题,检测准确率高达96.2%。在生鲜肉微生物腐败检测和安全评定方面,光学技术显示出潜在广阔的应用前景。Ellis^[65]通过傅立叶变换红外光谱技术和机器视觉相结合的技术,测定了牛肉的微生物腐败程度。2011年,Panagou等^[66]利用傅里叶变换红外光谱建立牛肉表面细菌总数的预测模型,从而实现对牛肉安全评定。Alexandrakis等^[67]利用化学计量法和近红外光谱法成功地区分了新鲜和受到微生物污染的鸡胸肉。中国农业大学彭彦昆教授研究团队开创了基于高光谱技术进行肉类细菌总数无损检测的先河。Peng等^[68,69]研发了一种基于高光谱成像的畜肉细菌总数快速无损检测方法,在牛肉腐败细菌和猪肉活菌总数检测方面均取得满意的结果。2010年,王伟等^[70]验证了高

光谱成像技术结合最小二乘支持向量机(LS-SVM)的建模方法可以有效地预测生鲜猪肉中细菌总数(TVC)。陶斐斐等^[71]通过实验证明利用高光谱技术可以较好地定量分析冷却猪肉表面的菌落总数。以上研究成果的取得,为今后研制出一种快速、非破坏检测生鲜猪肉细菌总数的高光谱检测仪器打下坚实的基础。此外,注水肉、注胶肉、原料肉掺假等肉品安全问题也有相应的研究^[72-74]。

4 光学技术在特种农产品检测中的研究与应用

乳品含有丰富的营养价值,实现乳品品质安全的快速无损检测,对提高乳品质量、保障消费者权益具有重要的应用前景。基于光学技术的无损检测主要体现在乳品营养成分检测、品种识别与鉴定以及食用安全性能评定等方面。2004年,王丽杰等^[75]采用红外漫反射光谱(1000~1700 nm)分析牛奶中蛋白质、脂肪等成分含量,实现了牛奶营养成分含量的快速无损检测。2007年,郑丽敏等^[76]探讨了近红外光谱分析技术应用于驴奶成分分析的可行性。近年来,国内外研究学者将光学技术应用于乳品品种识别和鉴定,取得了一定的成绩。2008年,Pappas等^[77]基于漫反射红外傅里叶变换谱对山羊奶和绵羊奶进行鉴别。2011年,Soyeurt等^[78]利用中红外光谱技术(mid-infrared spectrometry, MIR)检测了来自三个国家不同品种的牛奶中所含的脂肪酸。同年,中国科学院遥感应用研究所的黄长平等利用自主研发的地面成像光谱辐射测量系统,有针对性地实现了牛奶品种鉴别^[79]。在乳品安全评定上,光学技术也发挥了重要的作用。2011年,杨仁杰等^[80]采用中红外光谱检测牛奶中掺杂的尿素。2012年,张露等^[81]利用可见/近红外光谱技术对牛奶中不同浓度的三聚氰胺进行检测。

茶叶是我国重要的经济作物,为了保障茶叶原材料的质量安全,需要全面提升茶叶品质的检测精度和检测能力。随着光学技术的蓬勃发展,茶叶品质安全检测能力实现了一个新的跨越。基于光学技术的茶叶无损检测研究,主要包括茶叶成分检测、品种分类及鉴别、重金属污染测定等方面。在茶叶成分检测方面,国内外学者先后利用近红外光谱法分析了茶叶中茶多酚、茶多糖、氨基酸及咖啡碱等^[82-84]。2004年,Zhang等^[85]利用近红外光谱结合多元分析法测定了绿茶的抗氧化能力。在茶叶鉴别和分类方面,江苏

大学的赵文杰研究团队是相对研究较早的,做了大量有意义的工作^[86,87]。随后,陈孝敬等^[88]提出了一种利用多光谱图像——暗色特征进行茶叶分类的新方法,对两种颜色相近茶叶的识别率达到了100%。2009年,饶秀勤等^[89]根据茶叶中重金属含量的差异,利用X射线荧光技术结合模式识别技术进行茶叶产地鉴别。2011年Li等^[90]采用多光谱成像结合小波变换和支持向量机分析方法,对国内著名的茶品种进行分类,取得了有效的研究结果。

在粮油作物的品质分析方面,光学技术广泛应用于常规成分测定、品质鉴定评价以及储藏过程中的安全控制等。在常规成分检测上,近红外光谱技术在谷物、油籽、豆类等有较高的检测精度,主要包括蛋白质、淀粉、氨基酸等成分指标^[91,92]。2010年,Choung等^[93]利用近红外反射光谱快速准确地测定大豆中的蔗糖含量。在品种快速鉴别上,基于光学技术的无损检测取得了良好的进展。2008年,陈建等^[94]采用1000~2632 nm的近红外光谱技术对玉米品种进行鉴别,预测集的准确率为95%。2009年,梁亮等^[95]应用可见/近红外光谱技术鉴别了5种不同稻谷品种与真伪。近年来,粮油作物的掺假、病虫害、农药残留等安全问题引起了研究者的关注。2006年,Marina等^[96]通过近红外光谱结合定标运算方法鉴别出掺假面粉。2004年,Perez-Mendoza等^[97]利用近红外光谱技术检测了谷物储藏中三种不同的害虫。2012年,张洪涛等^[98]开发了900~1700 nm的近红外高光谱成像系统,正确识别了仓储小麦的活虫和死虫样本。

5 光学技术无损检测的发展趋势和前景

综上所述,近红外光谱技术、高光谱成像技术、激光拉曼光谱法和X射线荧光光谱法等基于光学特性的无损检测技术,在农畜产品品质安全检测中得到广泛的应用,体现出巨大的潜在应用价值。

从发展前景来看,在技术上,光学无损检测技术正从农畜产品的单一参数检测向多参数同时检测、从外部品质检测向内外部品质安全参数同时检测、从静态检测向动态检测方向发展。在实际应用上,光学技术农畜产品无损检测的研究重点主要在于几个方面:其一,将光学技术与其他新型无损检测技术有机融合,集成优化现有检测手段,充分利用多元信息,提高品质安全的检测精度、广度和准确度,对农畜产品进行全面综合评价;其二,研发集品质检测、安全

评定、质量分级一体化的新型实用装置,开发出用于生产线的在线检测装备,并将其投入到农畜产品检测的实际运用中;其三,建立我国特色农畜产品优质生产和快速检测技术规范 and 标准,实现从生产到供给全过程中品质安全的实时在线检测和综合信息评价体系。

参考文献

- [1] 李静, 操庆国. 无损检测技术在农产品品质检验中的应用[J]. 中国科技信息, 2010, (21): 79-80.
- [2] 韩明, 苗长云. 无损检测技术及应用研究[J]. 天津科技, 2011, 38(1): 75-77.
- [3] Wang WB, Paliwal J, *et al.* Near-infrared spectroscopy and imaging in food quality and safety [J]. *Sens Instrumen Food Qual*, 2007, 4(1): 193-207.
- [4] Jiang YL, Zhang RY, Yu J, *et al.* Applications of visible and near-infrared hyperspectral imaging for non-destructive detection of the agricultural products [C]. *Equipment Manufacturing Technology and Automation Part 2*, 2011: 909-914.
- [5] 刘燕德, 刘涛, 孙旭东, 等. 拉曼光谱技术在食品质量安全检测中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(11): 3007-3012.
- [6] 杨春梅, 李宁, 赵学珏, 等. 用于果蔬内部品质无损检测的NIRS技术新进展[J]. *激光与红外*, 2009, 39(11): 1137-1141.
- [7] Pedro AMK, Ferreira MMC. Nondestructive de-termination of solids and carotenoids in tomato products by near-infrared spectroscopy and multivariate calibration [J]. *Anal Chem*, 2005, 77 (08): 2505-2511.
- [8] Camps C, Christen D. Non-destructive assessment of apricot fruit quality by portable visible-near infrared spectroscopy [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2009, 42(6): 1125-1131.
- [9] Lu RF, Peng YK. Hyperspectral Scattering for assessing Peach Fruit Firmness [J]. *Biosyst Eng*, 2006, 93(2): 161-171.
- [10] Rajkumar P, Wang N, Elmasry G, *et al.* Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging [J]. *J Food Eng*, 2012, 108(1): 194-200.
- [11] 王加华, 孙旭东, 潘璐, 等. 基于可见/近红外能量光谱的苹果褐腐病和水心鉴别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(9): 2098-2102.
- [12] 潘璐, 王加华, 李鹏飞, 等. 砂梨糖度近红外光谱波段遗传算法优化[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(5): 1246-1250.
- [13] 马广, 傅霞萍, 周莹, 等. 大白桃糖度的近红外漫反射光谱无损检测试验研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(5): 907-910.
- [14] 徐惠荣, 陈晓伟, 应义斌, 等. 基于多元校正法的香梨糖度可见/近红外光谱检测[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(12): 126-129, 147.
- [15] 蒋焕煜, 应义斌. 尖椒叶片叶绿素含量的近红外检测分析实

- 验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(3): 499-502.
- [16] 李江波, 饶秀勤, 应义斌, 等. 农产品外部品质无损检测中高光谱成像技术的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(8): 2021-2026.
- [17] 程国首, 郭俊先, 肉孜·阿木提, 等. 基于高光谱图像技术预测苹果大小[J]. 农机化研究, 2012, 34(6): 108-112.
- [18] Xing J, Landahl S, Lammertyn J, *et al.* Effects of bruise type on discrimination of bruised and non-bruised 'Golden Delicious' apples by VIS/NIR spectroscopy [J]. *Postharvest Biol Tec*, 2003, 30(3): 249-258.
- [19] Xing J, Baerdemaeker J. Bruise detection on 'Jonagold' apples using hyperspectral imaging [J]. *Postharvest Biol Tec*, 2005, 37(2): 152-162.
- [20] Xing J, Baerdemaeker J. Fresh bruise detection by predicting softening index of apple tissue using VIS/NIR spectroscopy [J]. *Postharvest Biol Tec*, 2007, 45(2): 176-183.
- [21] Ariana DP, Lu RF, Guyer DE, *et al.* Near-infrared hyperspectral reflectance imaging for detection of bruises on pickling cucumbers [J]. *Comput Electron in Agric*, 2006, 53(1): 60-70.
- [22] Mehl PM, Chen YR, Kim MS, *et al.* Development of hyperspectral imaging technique for the detection of apple surface defects and contaminations [J]. *J Food Eng*, 2004, 61(1): 67-81.
- [23] Gomez-Sanchis J, Gomez-Chova L, Aleixos N, *et al.* Hyperspectral system for early detection of rottenness caused by *Penicillium digitatum* in mandarins [J]. *J Food Eng*, 2008, 89(1): 80-86.
- [24] 蔡健荣, 王建黑, 黄星奕, 等. 高光谱图像技术检测柑橘果锈[J]. 光电工程, 2009, 36(6): 26-30.
- [25] 李江波, 饶秀勤, 应义斌, 等. 基于高光谱成像技术检测脐橙溃疡[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 222-228.
- [26] 单佳佳, 彭彦昆, 王伟, 等. 基于高光谱成像技术的苹果内外品质同时检测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 140-144.
- [27] 郭俊先, 饶秀勤, 程国首, 等. 基于高光谱成像技术的新疆冰糖心红富士苹果分级和糖度预测研究[J]. 新疆农业大学学报, 2012, 35(1): 78-86.
- [28] 薛龙, 黎静, 刘木华, 等. 基于高光谱图像技术的水果表面农药残留检测试验研究[J]. 光学学报, 2008, 28(12): 2277-2280.
- [29] 陈菁菁, 李永玉, 吴建虎, 等. 基于近红外光谱技术的微量有机磷农药的快速检测[J]. 食品安全质量检测技术, 2009, 1(1): 45-50.
- [30] 代芬, 张昆, 洪添胜, 等. 龙眼表面农药残留的无损检测研究-基于近红外光谱分析[J]. 农机化研究, 2010, 32(10): 111-114.
- [31] 罗春生, 薛龙, 刘木华, 等. 基于近红外光谱法无损检测芦柑表面多种农药残留研究[J]. 中国农机化, 2012, (2): 128-131, 135.
- [32] 周小芳, 方炎, 张鹏翔, 等. 水果表面残留农药的拉曼光谱研究[J]. 光散射学报, 2004, 16(1): 11-14.
- [33] 王睿垠, 白士刚, 金长江, 等. 激光拉曼光谱分析技术及其在农药残留检测中的试验研究[J]. 河北农业科学, 2008, 12(7): 166-167.
- [34] 孙云云, 李永玉, 彭彦昆, 等. 基于拉曼光谱技术检测苹果农药残留的研究[C]. 中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集, 2011.
- [35] Liu B, Han G, Zhang Z, *et al.* Shell Thickness-Dependent Raman Enhancement for Rapid Identification and Detection of Pesticide Residues at Fruit Peels [J]. *Anal Chem*, 2012, 84 (1): 255-261.
- [36] Dhakal S, Li YY, Peng YK, *et al.* System Development for Detection of Pesticide in Apple [C]. 2012 ASABE Annual International Meeting, 2012.
- [37] 彭彦昆, 张雷蕾. 光谱技术在生鲜肉品质安全快速检测的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2010, 27(2): 62-72.
- [38] Narsaiah K, Jha SN. Nondestructive methods for quality evaluation of livestock products [J]. *Food Sci Technol*, 2012, 49(3): 342-348.
- [39] 刘炜, 俞湘麟, 孙东东, 等. 傅立叶变换近红外光谱法快速检测鲜猪肉中肌内脂肪、蛋白质和水分含量[J]. 养猪, 2005, (3): 47-50.
- [40] 刘炜, 吴昊旻, 孙东东, 等. 近红外光谱分析技术在鲜鸡肉快速检测分析中的应用研究[J]. 中国家禽, 2009, 31(2): 8-11.
- [41] Qiao J, Wang N, Ngadi MO, *et al.* Prediction of drip-loss, pH, and color for pork using a hyperspectral imaging technique [J]. *Meat Sci*, 2007, 76(1): 1-8.
- [42] Gjerlaug-Enger E, Kongsro J, Aass L, *et al.* Prediction of fat quality in pig carcasses by near-infrared spectroscopy [J]. *Animal*, 2011, 5(11): 1829-1841.
- [43] Kamruzzaman M, ElMasry G, Sun DW, *et al.* Prediction of some quality attributes of lamb meat using near-infrared hyperspectral imaging and multivariate analysis [J]. *Anal Chim Acta*, 2012, 714: 57-67.
- [44] Savenije B, Geesink GH, Vander Palen JG, *et al.* Prediction of pork quality using visible/near-infrared reflectance spectroscopy [J]. *Meat Sci*, 2006, 73: 181-184.
- [45] Hoving-Bolink AH, Vedder HW, Merks JWM, *et al.* Perspective of NIRS measurements early post mortem for prediction of pork quality [J]. *Meat Sci*, 2009, 69(3): 417-423.
- [46] 刘魁武, 成芳, 林宏建, 等. 可见/近红外光谱检测冷鲜猪肉中的脂肪、蛋白质和水分含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(1): 102-105.
- [47] Pedersen DK, Morel S, Andersen HJ, *et al.* Early prediction of water-holding capacity in meat by multivariate vibrational spectroscopy [J]. *Meat Sci*, 2003, 65(1): 581-592.
- [48] Afseth NK, Segtnan VH, Marquardt BJ, *et al.* Raman and Near-Infrared Spectroscopy for Quantification of Fat Composition in a Complex Food Model System [J]. *Appl Spectrosc*, 2005,

- 59(11): 1324–1332.
- [49] Park B, Chen YR, Hruschka WR, *et al.* Near-infrared reflectance analysis for predicting beef longissimus tenderness [J]. *J Anim Sci*, 1998,76: 2115–2120.
- [50] Park B, Chen YR, Hruschka WR, *et al.* Near-infrared reflectance analysis for predicting beef longissimus tenderness [J]. *J Electron Packaging*, 2001, 44(3): 2115–2120.
- [51] Naganathan GK, Grimes LM, Subbiah J, *et al.* Visible/near-infrared hyperspectral imaging for beef tenderness prediction [J]. *Comput Electron Agric*, 2008, 64(2): 225–233.
- [52] 彭彦昆, 江发潮. 肉制品嫩度无损检测的超光谱成像系统及检测方法[P]. 中国专利: 101178356, 2008-05-14.
- [53] 吴建虎, 彭彦昆, 高晓东, 等. 基于 VIS/NIR 高光谱散射特征预测牛肉的嫩度[J]. *食品安全质量检测技术*, 2009, 1(1): 20–26.
- [54] 吴建虎, 彭彦昆, 江发潮, 等. 牛肉嫩度的高光谱法检测技术研究[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(12): 135–138.
- [55] 吴建虎, 彭彦昆, 陈菁菁, 等. 基于高光谱散射特征的牛肉品质参数的预测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(7): 1815–1819.
- [56] Qiao J, Ngadi MO, Wang N, *et al.* Pork quality and marbling level assessment using a hyperspectral imaging system [J]. *J Food Eng*, 2007, 83(1): 10–16 .
- [57] 高晓东, 吴建虎, 彭彦昆, 等. 基于高光谱成像技术的牛肉大理石花纹的评估[J]. *农产品加工·学刊*, 2009, (10): 33–37.
- [58] 蔡健荣, 万新民, 陈全胜. 近红外光谱法快速检测猪肉中挥发性盐基氮的含量[J]. *光学学报*, 2009, 29(10): 2808–2812.
- [59] Grau R, Sanchez AJ, Giron J, *et al.* Nondestructive assessment of freshness in packaged sliced chicken breasts using SW-NIR spectroscopy [J]. *Food Res Int*, 2011, 44(1): 331–337.
- [60] 张雷蕾, 李永玉, 彭彦昆, 等. 基于高光谱成像技术的猪肉新鲜度评价[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(7): 254–259.
- [61] Liu YL, Windham WR, Lawrence KC, *et al.* Simple Algorithms for the Classification of Visible/Near-Infrared and Hyperspectral Imaging Spectra of Chicken Skins, Feces, and Fecal Contaminated Skins [J]. *Appl Spectrosc*, 2003, 57(12): 1609–1612.
- [62] Chao K, Yang CC, Kim MS, *et al.* High throughput spectral imaging system for wholesomeness inspection of chicken [J]. *Appl Eng Agric*, 2008, 24(4): 475–485.
- [63] Park B, Lawrence KC, Windham WR, *et al.* Detection of cecal contaminants in visceral cavity of broiler carcasses using hyperspectral imaging [J]. *Appl Eng Agric*, 2005, 21(4): 627–635.
- [64] Park BS, Yoon SC, Windham WR, *et al.* Line-scan hyperspectral imaging for real-time in-line poultry fecal detection [J]. *Sens Instrum Food Qual Saf*, 2011, 5(1): 25–32.
- [65] Ellis DI, Broadhurst D, Goodacre R. Rapid and quantitative detection of the microbial spoilage of beef by Fourier transform infrared spectroscopy and machine learning [J]. *Anal Chim Acta*, 2004, (514): 193–201.
- [66] Panagou EZ, Mohareb FR, Argyri AA, *et al.* A comparison of artificial neural networks and partial least squares modelling for the rapid detection of the microbial spoilage of beef fillets based on Fourier transform infrared spectral fingerprints [J]. *Food Microbiol*, 2011, 28(4): 782–790.
- [67] Alexandrakis D, Downey G, Scannell AGM, *et al.* Detection and identification of selected bacteria, inoculated on chicken breast, using near infrared spectroscopy and chemometrics [J]. *Sens Instrum Food Qual Saf*, 2011, 5(2): 57–62.
- [68] Peng YK, Wang W. Prediction of pork meat total viable bacteria count using hyperspectral imaging system and support vector machines[C]. *Food processing automation conference*, 2008.
- [69] Peng YK, Jing Zhang J, Wang W, *et al.* Potential prediction of the microbial spoilage of beef using spatially resolved hyperspectral scattering profiles [J]. *J Food Eng*, 2011, 102(2): 163–169.
- [70] 王伟, 彭彦昆, 张晓莉, 等. 基于高光谱成像的生鲜猪肉细菌总数预测建模方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(2): 411–415.
- [71] 陶斐斐, 王伟, 李永玉, 等. 冷却猪肉表面菌落总数的快速无损检测方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(12): 3405–3409.
- [72] 杨红菊, 姜艳彬, 候东军, 等. 注胶肉的近红外光谱快速判别分析[J]. *肉类研究*, 2008, (11): 62–64.
- [73] 杨志敏, 丁武. 近红外光谱技术快速鉴别原料肉掺假的可行性研究[J]. *肉类研究*, 2011, 25(2): 25–28.
- [74] 杨志敏, 丁武, 张瑶, 等. 应用近红外技术快速鉴别原料肉注水的研究[J]. *食品研究与开发*, 2012, 33(5): 118–120, 128.
- [75] 王丽杰, 郭建英, 徐可欣, 等. 牛奶成分近红外光谱分析中系统漂移的补偿[J]. *激光与红外*, 2004, 34(3): 209–212.
- [76] 郑丽敏, 张录达, 郭慧媛, 等. 近红外光谱波段优化选择在驴奶成分分析中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(11): 2224–2227.
- [77] Soyeurt H, Dehareng F, Gengler N, *et al.* Mid-infrared prediction of bovine milk fatty acids across multiple breeds, production systems, and countries [J]. *J Dairy Sci*, 2011, 94(4): 1657–1667.
- [78] Pappas CS, Tarantilis PA, Moschopoulou E, *et al.* Identification and differentiation of goat and sheep milk based on diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy (DRIFTS) using cluster analysis [J]. *Food Chem*, 2008, 106(3): 1271–1277.
- [79] 黄长平, 张立福, 张晓红, 等. 基于 FISS 成像光谱数据牛奶品种识别研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(1): 214–218.
- [80] 杨仁杰, 刘蓉, 徐可欣, 等. 基于中红外光谱检测牛奶中掺杂的尿素[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(9): 2383–2385.
- [81] 张露, 薛龙, 刘木华, 等. 利用可见—近红外光谱无损检测牛奶中的三聚氰胺[J]. *中国农机化*, 2012, (2): 125–127, 124.

- [82] 罗一帆, 郭振飞, 朱振宇, 等. 近红外光谱测定茶叶中茶多酚和茶多糖的人工神经网络模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(8): 1230–1233.
- [83] 徐立恒, 吕进, 林敏, 等. 茶叶中 3 类主要组分的近红外光谱分析作为茶叶质量的快速评定方法[J]. 理化检验-化学分册, 2006, 42(5): 334–336.
- [84] Chen QS, Zhao JW, Chaitep S, *et al.* Simultaneous Analysis Of Main Catechins Contents In Green Tea (*Camellia Sinensis* (L)) By Fourier Transform Near Infrared Reflectance (ft-nir) Spectroscopy [J]. Food Chem, 2009, 113(4): 1272–1277.
- [85] Zhang MH, Luypaert J, Pierna AF, *et al.* Determination of total antioxidant capacity in green tea by near-infrared spectroscopy and multivariate calibration [J]. Talanta, 2004, 62 (1): 25–35.
- [86] 赵杰文, 陈全胜, 张海东, 等. 近红外光谱分析技术在茶叶鉴别中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(9): 1601–1604.
- [87] 陈全胜, 赵杰文, 张海东, 等. 基于支持向量机的近红外光谱鉴别茶叶的真伪[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 933–937.
- [88] 陈孝敬, 吴迪, 何勇, 等. 基于多光谱图像颜色特征的茶叶分类研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(11): 2527–2530.
- [89] 饶秀勤, 应义斌, 黄海波, 等. 基于 X 射线荧光技术的茶叶产地鉴别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(3): 837–839.
- [90] Li XL, Nie PC, Qiu ZJ, *et al.* Using wavelet transform and multi-class least square support vector machine in multi-spectral imaging classification of Chinese famous tea [J]. Expert Systems with Application, 2011, 38(9): 11149–11159.
- [91] Delwiche SR, Pordesimo LO, Panthee DR, *et al.* Assessing Glycinin (US) and beta Conglycinin (7S) Fractions of Soybean Storage Protein by Near-Infrared Spectroscopy [J]. J Am Oil Chem Soci, 2007, 84(12): 1107–1115.
- [92] 汤旭光, 宋开山, 刘殿伟, 等. 基于可见/近红外反射光谱的大豆叶绿素含量估算方法比较[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(2): 371–374.
- [93] Choung MG. Determination of Sucrose Content in Soybean Using Near-infrared Reflectance Spectroscopy [J]. J Korean Soc Appl Biol Chem, 2010, 53(4): 478–484.
- [94] 陈建, 陈晓, 李伟, 等. 基于近红外光谱技术和人工神经网络的玉米品种鉴别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(8): 1806–1809.
- [95] 梁亮, 刘志霄, 杨敏华, 等. 基于可见/近红外反射光谱的稻米品种与真伪鉴别[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(5): 353–356, 391.
- [96] Marina C, Caterina D. Durum wheat adulteration detection by NIR spectroscopy multivariate calibration [J]. Talanta, 2006, 68(5): 1505–1511 .
- [97] Perez-Mendoza J, Throne JE, Dowell FE, *et al.* Chronological age-grading of three species of stored-product beetles by using near-infrared spectroscopy [J]. J Econ Entomol, 2004, 97(3): 1159–1167.
- [98] 张红涛, 毛罕平, 韩绿化, 等. 近红外高光谱成像技术检测粮仓米象活虫[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 263–268.

(责任编辑: 赵静)

作者简介



彭彦昆, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 农畜产品品质安全无损检测技术与装备。
E-mail: ypeng@cau.edu.cn