

## 农产品内部异物检测方法研究进展

张成龙<sup>1,2</sup>, 朱大洲<sup>1,2\*</sup>, 王瑶瑶<sup>2</sup>, 卢林纲<sup>2</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 陈争光<sup>1</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学电气与信息学院, 黑龙江大庆 163319; 2. 农业部食物与营养发展研究所, 北京 100081)

**摘要** 概述了可见光成像、近红外成像、热红外成像、高光谱成像、X射线成像、超声波成像、核磁共振成像、太赫兹成像等技术在农产品内部异物探测方面的应用情况, 介绍了上述成像方法的检测原理和研究进展, 并总结了各方法的优势和不足, 最后对农产品内部异物检测方法的发展趋势进行了展望。

**关键词** 农产品; 内部异物; 无损检测; 光谱; 成像

**中图分类号** S123 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)16-0030-05

### Research Progress of Detection Methods of Internal Foreign Bodies in Agricultural Products

ZHANG Cheng-long<sup>1,2</sup>, ZHU Da-zhou<sup>1,2</sup>, WANG Yao-yao<sup>2</sup> et al (1. College of Electrical and Information, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319; 2. Institute of Food and Nutrition Development, Ministry of Agriculture, Beijing 100081)

**Abstract** This review introduced the current situation of different techniques that be applied to detect these foreign bodies, including visible light imaging, near infrared imaging, thermal infrared imaging, hyperspectral imaging, X-ray imaging, ultrasonic imaging, nuclear magnetic resonance imaging, and terahertz imaging. Detection principle and research progress was introduced, and the advantages and disadvantages of each technique were also summed up then. On the basis of these work, we present future outlook for the detection methods of foreign bodies in agricultural products.

**Key words** Agricultural products; Foreign-body detection; Non-destructive detection; Spectra; Imaging

农产品质量安全问题越来越受到人们关注, 特别是近些年有关农产品内部异物问题的频繁出现, 使得农产品内部品质检测显得愈发重要。欧盟食品饲料快速预警系统数据显示, 在过去 20 年, 有关异物污染的事件至少 1 446 起, 发现异物的主要食物类型有水果、蔬菜、坚果、烘焙产品等, 发现的异物中前 3 名是害虫、玻璃和金属<sup>[1]</sup>。我国农产品消费占食品消费总量的 70%, 加强农产品品质质量把控, 提高农产品内部异物的检测水平刻不容缓。农产品内部异物的检测不同于农产品表面检测, 大部分待识别异物存在于农产品内部, 这种情况下肉眼不可见, 对检测技术手段和仪器要求较高。

传统的农产品内部异物检测方式主要有人工检测、化学分析测量和机械剔除等, 这些方式有很大的局限性, 难以满足实际生产需求。人工检测方法主要适用于透光性较好的农产品, 不仅费时费力, 在检测中也存在一定的主观性, 检测精度难以保证。化学分析测量通常需要在实验室中进行, 这种方法检测时间较长, 而且成本高, 有一定的破坏性, 难以实现现场快速检测。机械剔除法主要是根据农产品和异物的质量差异进行检测剔除, 不适用于质量等物理性质相似的农产品异物的检测<sup>[2]</sup>。传统异物检测方式不能满足社会对农产品安全的需求, 农产品检测加工环节迫切需要稳定、快速和高效的无损检测技术。可见光成像、近红外成像、热红外成像、高光谱成像、X射线成像、超声波成像、核磁共振成像和太赫兹成像等技术在生物医学、生物组织检测方面取得了

成功, 在农产品内部异物检测方面具有较大潜力, 引起了研究者的广泛关注。这些方法对农产品不具有破坏性, 可以实时、快速地实现检测的目的。笔者重点介绍这些无损检测方法的原理、研究现状及其优缺点, 以期对农产品内部异物检测研究提供参考。

### 1 可见光成像技术

可见光成像技术在模拟人类视觉对农产品内部异物检测识别中应用最为广泛, 通过单 CCD、双 CCD 或 3CCD 镜头分别采集农产品的反射图像或透射, 结合图像处理算法, 实现农产品无损检测。其中, 光源为散射光源或透射光源。

目前应用较多的是烟叶、棉花和茶叶中异物检测。烟叶中的异物主要有麻绳、纸箱板、塑料和虫蛹等, 而麻绳和纸箱板等异物与烟叶颜色特征极其相似, 为异物识别与剔除工作增加了很大难度。对此, 张绍堂等<sup>[3-4]</sup>首先设计了基于可见光成像技术的异物剔除系统, 利用正常物料和典型异物分别建立标准颜色库和典型异物库, 从准色库中去除异物库中颜色数据, 得到最终标准物料颜色库用以比对实际待测物料颜色, 实现异物检测剔除; 现场试验结果表明, 此异物识别方法的异物剔除率为 85% 以上, 烟叶带出率小于 1%; 在此系统基础上, 通过颜色表可视化的研究, 更新维护颜色库的数据并提高异物剔除准确率。冯志新等<sup>[5]</sup>研究发现, 在棉花中棉梗、树叶、棉籽等异物检测中, 由于光源不稳定, 采集图像光照不均; 对此, 采用 Grammar 校正函数使图像光照均匀, 其中  $\Gamma = 0.8$ ; 将处理后的 3 个通道图像融合得到高对比度的图像, 利用 Otsu 算法对图像精确分割, 误检率达 5%。为了识别茶叶中石块、树棍、杂草等异物, 陈培俊<sup>[6]</sup>根据棍棒类异物相比于茶叶有明显的直线特征, 而球状类杂质与茶叶的形状特征相差很大, 分别利用优化后的霍夫直线变换算法和支持向量机分类器进行识别, 识别准确率高于 90%。

可见光成像技术具有检测便利、操作简单和成本低廉等

**基金项目** 国家重点研发计划子课题(2017YFD0400403); 北京市科技计划项目子课题(D171100000417001-3); 农业部农业技术试验示范项目子课题(161721301064071002-2)。

**作者简介** 张成龙(1992—), 男, 黑龙江大庆人, 硕士研究生, 研究方向: 机器视觉技术。\* 通讯作者, 副研究员, 博士, 硕士生导师, 从事农产品检测评价研究。

**收稿日期** 2018-03-16

优点,但在农产品内部品质检测中局限性很大。基于透射图像的可见光成像技术可以对有一定透光性的农产品内部特征进行检测识别,然而大部分农产品组织较厚,对可见光的透过性比较弱,成为可见光成像技术在农产品内部异物检测应用中最大的瓶颈<sup>[7-8]</sup>。

## 2 近红外成像技术

近红外光的波段在 780~2 500 nm,近红外光能反映含氢化合物的反射和吸收情况,在同一波长近红外光线的照射下,不同物质或同一物质的不同特征部分拥有不同的反射或吸收特性。根据分光反射率的不同,选取特定波长的近红外光线使得这种差异最大化,在转换成的可视图片中,可以达到增强不同特征部位或不同物质的灰度对比的目的,再结合图像处理技术进行异物检测。

近红外成像检测技术在棉花、饲料、绿豆和小麦异物检测中具有较大潜力。鲁德浩<sup>[9]</sup>通过筛选确定最优检测波段为 940 nm,在此波段获得的图像检测结果与实际一致,为棉花中异物检测提供了新思路。光谱分析与显微成像技术的结合扩展了近红外成像技术的应用范围。Pavino 等<sup>[10]</sup>检测了混有肉类和骨片(MBM)的饲料,结果表明,显微近红外对 MBM 饲料中非饲料成分检测的灵敏度为 100%,特异性为 96.30%。Kaliramesh 等<sup>[11]</sup>检测了绿豆中四纹豆象虫,研究通过近红外成像系统获得了不同阶段四纹豆象虫侵染的绿豆图像,并选取最大值、最小值、平均值、中位数、标准差、方差和 10 个直方图特征设计了非参数统计分类器,对正常绿豆和被侵染绿豆的分类精度分别达到 85%和 82%以上。Ravikanth 等<sup>[12]</sup>结合标准正态变量(SNV)光谱技术和最近 K 值邻域分类器,检测小麦中常见污染异物;异物对象主要有大麦、黑麦和大豆类杂质,谷壳和石头类异物,鹿和兔子排泄物;检测系统分类精度在 92%以上,该研究还设立了 2 个独立试验,完成了对小麦中异物的定性和定量描述。

尽管近红外成像检测技术可以弥补常规图像检测方法的不足,但仍然存在瓶颈等待突破。随着农产品内部品质检测的不断深入,不同农产品或同一农产品不同生长阶段的近红外吸收特性的基础信息需要积累,相关信息数据库的建设成为必然,是农产品内部品质检测实现应用的基础<sup>[13-15]</sup>。

## 3 热红外成像技术

热红外成像技术早期主要用于军事、电力等行业。不同物质或同一物质不同特征部位的热辐射有一定的差异性,通过热红外阵列探测器将这种差异转换为可视化图像,结合待测物质在环境温度变化时的反应情况,可实现异物检测。

热红外成像技术在坚果、仓储粮食和饼干异物检测方面得到关注。Meinlschmidt 等<sup>[16-17]</sup>应用脉冲热成像技术,根据热导率差异检测了樱桃、浆果、葡萄干和杏仁中的茎、叶、花梗、木棍和小石子等异物;在此基础上,利用改进的热成像系统对榛子中果壳和小石子等异物进行了进一步详细研究,通过闪光灯加热提高了榛子与异物的图像对比度,并展示了灰度检测、统计分析和形态学处理技术的优缺点。Warmann

等<sup>[18]</sup>通过阈值处理、纹理分析和模糊逻辑法 3 种方法分别检测榛子杂质,结果表明,前 2 种方法适用于流水线上大量榛子内混杂的榛子果壳和小石子等异物的检测,准确率较高;第 3 种方法适用于榛子单体检测。Manickavasagan 等<sup>[19]</sup>使用热成像仪检测麦粒中的锈赤扁谷盗仓储害虫,识别麦粒状态包括 4 类幼虫侵染阶段、1 类虫蛹侵染和 1 类成虫侵染阶段,结果表明,正常籽粒和受害籽粒的二次函数识别准确率分别为 77.7%和 83.5%,线性识别准确率为 83.0%和 77.6%,但是对于内部害虫所处周期的识别效果不佳。Senni 等<sup>[20]</sup>根据 FLIR A-315 热像仪提供的热红外图像,比较分析饼干和异物的热发射率衰减曲线,实现对饼干中小石子、金属颗粒、玻璃和木屑等异物的检测,并利用生产线的时序热成像图完成在线测试。

热红外成像技术具有非破坏、非接触检测的特点,但同时也存在缺点与局限性。首先,红外成像仪比同级别的可见光摄像头的价格要贵;其次,热成像检测易受到环境温度的影响,对温度不稳定的物质的检测能力较弱。此外,热红外成像仪的图像分辨率较低,可将热红外成像技术与其他成像技术相结合,提高像素分辨率,从而提高检测精度,相应配套软件的开发也应受到重视<sup>[21-24]</sup>。

## 4 高光谱成像技术

高光谱成像技术发展自遥感探测领域,并迅速扩展到农业、医学等地面应用领域。在不同波段范围内物体吸收率(反射率)的敏感程度是不同的,根据这一特性,在多个光谱通道中选择最佳波长范围,使不同物质或同一物质的不同部位的对比如最高。在此基础上,通过光谱成像的方式采集待测物体的特征参数,结合光谱分析和成像技术实现农产品内部异物的检测。

高光谱成像技术在猪肉、鱼肉、毛豆和棉花内部害虫等异物检测中得到关注。为了验证利用近红外高光谱成像技术检测猪肉中金属、害虫、碎骨和聚乙烯材料等异物的可行性,Díaz 等<sup>[25]</sup>研究发现,从数据集获得的图像中,猪肉和这些异物的对比度较高,可以实现检测。Sivertsen 等<sup>[26]</sup>使用高光谱成像系统,通过本地校正的方法将光谱数据量降低至 89.6%,可检测到 60%的含线虫鱼肉,高斯最大似然分类器分别检测到 70.8%的黑线虫和 60.3%的乳白色线虫。马亚楠等<sup>[27]</sup>以 225 例毛豆为研究对象,识别豆类内部的豆荚螟;识别特征参数为波长 400~1 000 nm 获得的能量信息,结合支持向量机分类器建立害虫检测分类模型;在验证集中,含虫样本和正常样本的分类精度分别为 75%和 100%。颜色透明的地膜是棉花中主要的异物杂质之一,易附着于棉花,检测识别难度大。张航<sup>[28]</sup>利用地膜的 Gabor 变换的能量均值、不变矩特征和灰度共生矩阵特征组成一个 53 维特征集,使用改进的最小冗余最大相关法选出 5 个特征,并进行分类验证,检测准确率为 97.71%。

“图谱合一”是高光谱成像技术的最大特点,利用图像信息和光谱信息分别可以实现农产品外部特征和内部特征的检测。但高光谱成像技术获取的三维数据量很大,数据处理

耗时长,只有基于少量光谱带的光谱成像系统符合快速检测的要求。为此,需要寻求新的统计分析技术和高效的数据降维方法。当前大多数研究都是在实验室进行的,为进一步将高光谱成像技术应用到实际生产中,尚需要更深入的研究<sup>[29-32]</sup>。

## 5 X射线成像技术

利用X射线辐射待测农产品,不同农产品内部各物质的密度和厚度不同,得到的透射X射线的数量就不同。通过对透射后的X射线量进行多种方式的采集与分析,可以得到待测农产品内部质构信息,如孔洞、害虫和异物等。

X射线成像技术对肉类、乳饮和水果中异物的检测有着巨大的潜力。McFarlane等<sup>[33]</sup>针对待测样本厚度不均匀对X射线传统检测法的制约问题,利用插入锁骨碎片的聚苯乙烯与插入锁骨碎片的胸脯肉对比检测,得到10~40 keV能量下的鸡肉与碎骨对比度比传统信息图像得到的对比度高2倍、40~90 keV能量下对比度近似相同的研究结果。针对鱼肉中鱼骨的检测,Mery等<sup>[34]</sup>通过对获取的X射线图像预处理与分割,提取了三文鱼鱼肉图像279个强度特征,选取24个并分析;对典型的三文鱼鱼肉样本进行测试,检测准确率达99%,后期试验表明,检测方法同样适用于鲑鳟鱼鱼肉的检测。Nielsen等<sup>[35]</sup>通过搭建配有光栅干涉的X射线成像仪,改善了现有X射线成像检测方式;利用X射线暗场成像,以测量噪声比的方式成功检测了碎牛肉中的玻璃、折叠为8层的纸条和瓢虫,以及酸奶中的果蝇、烟头和折叠为4层的纸条。Chuang等<sup>[36]</sup>开发了一套基于X射线的农产品内部害虫自动化检测装置,主要检测目标为桃子、番石榴等水果,结果表明该设备可以对水果内部害虫进行准确定位,定位精度达到94%。

X射线成像的优点在于该技术凭借其对物质极强的穿透力可以获得高质量的农产品内部质构信息,但是农产品形状的复杂性和不规则性严重制约着X射线检测的效果,针对这一问题需要开展进一步研究<sup>[37]</sup>。同时,检测装置的稳定性、一体化、便捷性、易操作性和智能化水平也有待提高。X射线检测技术在农产品内部害虫等杂质检测中已开始实践应用,国外针对X射线检测法在入境农产品内部潜隐性害虫检测中的应用开展了深入研究。相比之下,国内研究较少,急需开展这方面研究,为我国现场检验检疫工作提供新方向<sup>[38-39]</sup>。

## 6 超声波成像技术

基于声学特性的超声波成像检测技术,在医学中得到了广泛应用。超声波在不同待测样品介质中的动态传播特性是不同的,利用这种差异,间接对各类非声学量及其动态情况进行检测或测绘成像,根据同一发射源反射能量的差异性可实现对农产品内部异物的检测。

超声波成像技术在肉类农产品、奶酪和巧克力等食品异物检测中得到关注。Correia等<sup>[40]</sup>设计了一种基于脉冲回拨技术的活塞与气缸装置,利用蒸馏水样品校正检验之后,测量鸡胸脯肉的密度、传导速度、阻抗和振幅比;根据振幅比可

以成功区分未切割鸡胸脯肉样本、已切割样本和含有鸡骨碎片投影区域在6~16 mm<sup>2</sup>的已切割鸡胸脯肉样本。Vincent等<sup>[41]</sup>通过使用脉冲信号和编码脉冲信号对半软奶酪中的异物实现了检测,检测原理是测量信号发射时间并比较不同样本接收信号时间,如果待测样本中没有异物,信号接收时间是有异物样本的2倍;研究结果表明,2种信号的检测方法可以实现半软奶酪中异物的检测,检测准确率达90%。Pallav等<sup>[42]</sup>利用空气耦合式超声检测法,根据选定的声学特性,对食品中的添加剂和异物进行检测,实现了对奶酪中的异物和冷冻面团产品的测量。Cho等<sup>[43]</sup>利用超声波技术对奶酪与家禽中的异物进行了检测。然而,国内超声波技术的研究更多集中于农产品加工领域中的强化分离、杀菌、洗涤、成分萃取和干燥脱水等,部分研究为建材、工程的现场检测,在农产品内部异物检测方面较少。

超声波的优点是穿透能力强、易激发、方向性好、能量不易分散,对检测环境以及工作人员的要求低。由于这种弹性波在介质中传播会受到一定程度的衰减,超声与待测样品之间的介质成为研究者关注的焦点。近年来检测介质与待测对象必须接触的局限性得以突破,空气耦合式超声波检测系统成为新方向。超声波的空化效应、机械作用和热效应对检测对象的未知影响,是实现绿色无损检测的潜在威胁。虽然超声波技术在农产品内部异物检测中潜力巨大,但国内相关研究需要进一步深入,将新型检测技术在我国推广开来<sup>[2,44]</sup>。

## 7 核磁共振成像技术

核磁共振成像技术是一种生物组织内部结构特征直观透视研究的高效手段。在外加的磁场中,生物体中的氢原子核受到电磁波的辐射作用时会产生核磁共振现象。如果在外加磁场上加入线性磁场梯度,质子运动频率就会反映出其所在的位置信息。探测器采集核磁共振信号并传入处理软件,根据形成的高度比度样本图像进行识别检测。

核磁共振成像中所释放的能量在农产品内部不同结构中衰减情况是不同的,在苹果内部害虫等异物的检测中表现突出。Ihara等<sup>[45]</sup>利用1-Tesla专用磁共振成像仪观察直径小于30 mm小苹果中的果蛾,在成像系统中检测到1.5~2.0 mm长的幼虫和小坑,还观察到排泄物;该检测系统尺寸较小,仅适用于直径小于30 mm的小苹果,对于市场上常见的成熟的苹果不适用。针对这一点,Haishi等<sup>[46]</sup>使用配备110 mm大线圈的0.2-Tesla紧凑型核磁共振成像仪,对成熟苹果中的果蛾进行检测,利用3D自旋回波法,在侵染的空洞中检测到成熟幼虫和排泄物,但仅在少数样本中检测到果蛾幼虫。尽管测量时间较长,但为苹果内部果蛾的生命周期研究提供了新思路。Koizumi等<sup>[47]</sup>利用1-Tesla小型专用微型核磁共振成像仪对幼果内部果蛾周期生理活动特征进行了观察,通过3D梯度回波方法、2D和3D自旋回波方法获取了幼虫的生命周期活动,主要为从1.8 mm的果蛾幼虫到成虫离开苹果过程中的活动特征,并进一步证明此方法有望成为成熟苹果内害虫检测的重要基础。

核磁共振成像技术对农产品内部异物可以进行任意方向的切层,且不具有辐射危害。常见的核磁共振成像技术是基于氢原子核的共振,此外,基于碳、氧和氮原子的共振技术也在研究中。核磁共振图像比 CT 图像有更精确的检测结果,但由于仪器成本高,使其应用范围受限。在农产品内部异物检测中,核磁共振成像技术还是一个较新的方向。随着低成本、低场强、高速度和高精度的核磁共振设备的研发,核磁共振成像技术在农产品领域的应用将得到进一步加强<sup>[48-50]</sup>。

## 8 太赫兹成像技术

太赫兹成像是内部品质检测的新兴手段。如果作为辐射源的太赫兹波形已知,在其对样品反射辐射或透射辐射之后,样品相关的复介电常数信息将从反射谱或透射谱中包含的振幅和相位信息中获得。太赫兹成像系统根据探测器采集到的振幅和相位信息进行分析处理,得到样品的特征太赫兹图像。

高距离分辨率的太赫兹波在传播、吸收等方面的显著优势成为众多研究的热点,在农产品检测方面也进行了一定探索。Lee 等<sup>[51]</sup>通过连续波太赫兹成像与 X 射线成像的对比试验,检测常见食物中异物;检测异物包括铝和花岗石类高密度异物,蝇蛆和蟋蟀类低密度异物;食物样本为韩式即食面条,并用搅拌机磨为细粉;结果表明,太赫兹连续波成像技术对于食物内部高密度和低密度的异物都有很好的检测能力。Ok 等<sup>[52]</sup>使用 210 GHz 高分辨率光栅扫描成像系统,对比透射扫描与反射扫描成像 2 种方法,结果显示,奶粉中昆虫和塑料异物在透射图像中对比度高于反射扫描成像,并进一步证明了太赫兹成像技术在食物异物检测中的巨大潜力。Shin 等<sup>[53]</sup>使用太赫兹时域光谱仪,在频率 0.2~1.3 THz 获得多种食物样本(如谷类和鱼类等)和粉虫异物的光学特性;从这些光学特性获得样品的二维复合折射图显示,食物和粉虫特征在 0.5 THz 时差异较大,可以实现检测。

太赫兹成像技术对于低密度样品检测成像的清晰度高于 X 射线成像,与超声成像检测相比也拥有更高的空间分辨率。图像中包含的信息十分丰富,通过脉冲成像和连续波成像 2 种成像方式可分别获得样品的光谱信息和强度信息。太赫兹成像检测技术的优点是抗干扰能力强、穿透力高,而且可以实现非电离辐射的安全检测,但此技术处于研究阶段,设备价格昂贵。随着对太赫兹波传播过程的精准分析、太赫兹波与待测样品相互作用机理研究的不断深入和硬件成本的降低,太赫兹波成像技术在农产品内部品质检测中将更具潜力<sup>[54-59]</sup>。

## 9 展望

针对农产品内部异物的检测需求及使用场合,检测技术的选择至关重要,检测环境的控制也不容忽视。不同于一般工业产品,农产品种类繁多,图像特征的复杂性和不规则性十分明显。只有通过数据采集环境、采集条件的控制,将噪声污染降到最低,结合先进的图像处理技术,才能实现精准的异物检测。

农产品内部异物检测技术通常只能对农产品内部的一个特征或几个特征检测描述,这种局限性在一定程度上影响检测的准确性和稳定性。农产品内部特征参数是多方面的,单一某个技术难以对农产品内部品质进行全面检测,只有多传感器检测信息融合,才能保证异物检测的精度。检测技术的硬件结合和软件数据融合,对于农产品内部异物检测意义重大。

大部分农产品内部异物检测技术都是从军事、工业、医学等领域发展而来,检测手段和设备仪器需要根据农产品的需要进行定制开发。由于检测对象、研究领域的不同,部分移植而来的检测技术存在检测周期长的特点,不能满足农产品实时、高效和快速检测的需求。此外,部分检测设备成本很高,相比于种类繁多、价格普遍低廉的农产品,会产生“杀鸡用牛刀”的现象。随着农产品内部异物检测技术的不断发展,发展实时在线、高效快速的专用化农产品检测成为趋势。

## 参考文献

- [1] DJEKIC I, JANKOVIC D, RAJKOVIC A. Analysis of foreign bodies present in European food using data from Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF) [J]. *Food control*, 2017, 79: 143-149.
- [2] CHEN Q S, ZHANG C J, ZHAO J W, et al. Recent advances in emerging imaging techniques for non-destructive detection of food quality and safety [J]. *Trends in analytical chemistry*, 2013, 52: 261-274.
- [3] 张绍堂, 蒋作, 郑智捷. 机器视觉技术在烟草异物剔除系统中的应用 [J]. *云南民族大学学报(自然科学版)*, 2007, 16(2): 161-164.
- [4] 张绍堂. 烟草异物剔除系统中颜色表可视化研究 [J]. *中国科技信息*, 2011(11): 144.
- [5] 冯志新, 安浩平, 吴顺丽. 基于 RGB 颜色模型棉花杂质检测算法 [J]. *计算机与现代化*, 2013(4): 99-102.
- [6] 陈培俊. 基于图像处理 and 模式分类的茶叶杂质识别研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [7] 文韬, 洪添胜, 李震, 等. 基于机器视觉的橘小实蝇运动轨迹跟踪与数量检测 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(10): 137-141.
- [8] DOWLATI M, MOHTASEBI S S, DE LA GUARDIA M. Application of machine-vision techniques to fish-quality assessment [J]. *Trends in analytical chemistry*, 2012, 40(3/4): 168-179.
- [9] 鲁德浩. 基于近红外波长成像的异物检测新方法 [J]. *郑州大学学报(理学版)*, 2008, 40(3): 93-97.
- [10] PAVINO D, SQUADRONE S, COCCHI M, et al. Towards a routine application of vibrational spectroscopy to the detection of bone fragments in feeding stuffs: Use and validation of a NIR scanning microscopy method [J]. *Food chemistry*, 2010, 121(3): 826-831.
- [11] KALIRAMESH S, CHELLADURAI V, JAYAS D S, et al. Detection of infestation by *Callosobruchus maculatus* in mung bean using near-infrared hyperspectral imaging [J]. *Journal of stored products research*, 2013, 52(1): 107-111.
- [12] RAVIKANTH L, SINGH C B, JAYAS D S, et al. Performance evaluation of a model for the classification of contaminants from wheat using near-infrared hyperspectral imaging [J]. *Biosystems engineering*, 2016, 147: 248-258.
- [13] 周建民, 周其显, 刘燕德, 等. 红外成像技术在农产品加工自动化中的应用 [J]. *中国农机化*, 2010(6): 69-72.
- [14] SARANWONG S, HAFF R, THANAPASE W, et al. Short communication: A feasibility study using simplified near infrared imaging to detect fruit fly larvae in intact fruit [J]. *Journal of near infrared spectroscopy*, 2011, 19(1): 55.
- [15] WU D, SUN D W. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review-Part II: Applications [J]. *Innovative food science and emerging technologies*, 2013, 19(1): 15-28.
- [16] MEINLSCHMIDT P, MAERGNER V. Detection of foreign substances in food using thermography [C]//MALDAGUE X P, ROZLOSNIK A E. Proc. SPIE, Thermosense XXIV. Bellingham, WA: SPIE, 2002.
- [17] MEINLSCHMIDT P, MAERGNER V. Thermographic techniques and adapted algorithms for automatic detection of foreign bodies in food [C]//

- CRAMER K E, MALDAGUE X P. Proc. SPIE 5073, Thermosense XXV. Bellingham, WA; SPIE, 2003.
- [18] WARMANN C, MÄRGNER V. Quality control of hazel nuts using thermographic image processing[C]// Proceedings of the IAPR Conference on Machine Vision Applications (IAPR MVA 2005). Japan; Tsukuba Science City, 2005.
- [19] MANICKAVASAGAN A, JAYAS D S, WHITE N. Thermal imaging to detect infestation by *Cryptolestes ferrugineus* inside wheat kernels[J]. Journal of stored products research, 2008, 44(2): 186-192.
- [20] SENNI L, RICCI M, PALAZZI A, et al. On-line automatic detection of foreign bodies in biscuits by infrared thermography and image processing[J]. Journal of food engineering, 2014, 128: 146-156.
- [21] GOWENA A A, TIWARIA B K, CULLENB P J, et al. Applications of thermal imaging in food quality and safety assessment[J]. Trends in food science and technology, 2010, 21(4): 190-200.
- [22] 李小龙, 王库, 马占鸿, 等. 基于热红外成像技术的小麦病害早期检测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 183-189.
- [23] 王斐, 吴德军, 翟国锋, 等. 侧柏衰弱木和蛀干害虫受害木的热红外成像检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(12): 3410-3415.
- [24] GINESU G, GIUSTO D D, MARGNER V, et al. Detection of foreign bodies in food by thermal image processing[J]. Industrial Electronics IEEE Transactions on, 2004, 51(2): 480-490.
- [25] DÍAZ R, CERVERA L, FENOLLOSA S, et al. Hyperspectral system for the detection of foreign bodies in meat products[J]. Procedia engineering, 2011, 25(1): 313-316.
- [26] SIVERTSEN A H, HEIA K, HINDBERG K, et al. Automatic nematode detection in cod fillets (*Gadus morhua* L.) by hyperspectral imaging[J]. Journal of food engineering, 2012, 111(4): 675-681.
- [27] 马亚楠, 黄敏, 李艳华, 等. 基于能量信息的毛豆荚螟高光谱图像检测[J]. 食品工业科技, 2014, 35(14): 59-63.
- [28] 张航. 基于高光谱成像技术的皮棉中地膜识别方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [29] YOON S C, PARK B, LAWRENCE K C, et al. Line-scan hyperspectral imaging system for real-time inspection of poultry carcasses with fecal material and ingesta[J]. Computers and electronics in agriculture, 2011, 79(2): 159-168.
- [30] SIVERTSEN A H, HEIA K, STORMO S K, et al. Automatic nematode detection in cod fillets (*Gadus Morhua*) by transillumination hyperspectral imaging[J]. Journal of food science, 2011, 76(1): 77-83.
- [31] LU R F, ARIANA D P. Detection of fruit fly infestation in pickling cucumbers using a hyperspectral reflectance/transmittance imaging system[J]. Postharvest biology and technology, 2013, 81: 44-50.
- [32] RADY A, EKRAMIRAD N, ADEDEJI A A, et al. Hyperspectral imaging for detection of codling moth infestation in GoldRush apples[J]. Postharvest biology and technology, 2017, 129: 37-44.
- [33] MCFARLANE N J B, SPELLER R D, BULL C R, et al. Detection of bone fragments in chicken meat using X-ray backscatter[J]. Biosystems engineering, 2003, 85(2): 185-199.
- [34] MERY D, LILLO I, LOEBEL H, et al. Automated fish bone detection using X-ray imaging[J]. Journal of food engineering, 2011, 105(3): 485-492.
- [35] NIELSEN M S, LAURIDSEN T, CHRISTENSEN L B, et al. X-ray dark-field imaging for detection of foreign bodies in food[J]. Food control, 2013, 30(2): 531-535.
- [36] CHUANG C L, OUYANG C S, LIN T T, et al. Automatic X-ray quarantine scanner and pest infestation detector for agricultural products[J]. Computers and electronics in agriculture, 2011, 77(1): 41-59.
- [37] 洪冠, 赵茂程, 汪希伟, 等. 肉异物识别中肉厚度激光补偿试验系统的研制[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 274-280.
- [38] 韩平, 潘立刚, 马智宏, 等. X射线无损检测技术在农产品品质评价中的应用[J]. 农机化研究, 2009, 31(10): 6-10.
- [39] CHELLADURAI V, KARUPPIAH K, JAYAS D S, et al. Detection of *Callosobruchus maculatus* (F.) infestation in soybean using soft X-ray and NIR hyperspectral imaging techniques[J]. Journal of stored products research, 2014, 57(4): 43-48.
- [40] CORREIA L R, MITTAL G S, BASIR O A. Ultrasonic detection of bone fragment in mechanically deboned chicken breasts[J]. Innovative food science and emerging technologies, 2008, 9(1): 109-115.
- [41] VINCENT L, MARIEFRANCE D. Ultrasonic internal defect detection in cheese[J]. Journal of food engineering, 2009, 90(3): 333-340.
- [42] PALLAV P, HUTCHINS D A, GAN T H. Air-coupled ultrasonic evaluation of food materials[J]. Ultrasonics, 2009, 49(2): 244-253.
- [43] CHO B K, IRUDAYARAJ J M K. Foreign object and internal disorder detection in food materials using noncontact ultrasound imaging[J]. Journal of food science, 2003, 68(3): 967-974.
- [44] 晋艳云. 玉米种子净度超声波检测方法及其装置研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [45] IHARA F, YAGINUMA K, ISHIDA N, et al. Non-destructive observation of peach fruit moth, *Carposina sasakii* Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae), in young apple fruits by MRI[J]. Japanese journal of applied entomology and zoology, 2008, 52(3): 123-128.
- [46] HAISHI T, KOIZUMI H, ARAI T, et al. Non-invasive observations of an infestation by the peach fruit moth, *Carposina sasakii* Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae) in apples using a 0.2-T compact MRI system[J]. Japanese journal of ecology, 2009, 59(3): 249-257.
- [47] KOIZUMI M, IHARA F, YAGINUMA K, et al. Observation of the peach fruit moth, *Carposina sasakii*, larvae in young apple fruit by dedicated micro-magnetic resonance imaging[J]. Journal of insect science, 2010, 10(145): 1-10.
- [48] KOIZUMI M, NAITO S, ISHIDA N, et al. A dedicated MRI for food science and agriculture[J]. Food science and technology research, 2008, 14(1): 74-82.
- [49] 周水琴, 应义斌, 商德胜. 基于形态学的香梨褐变核磁共振成像无损检测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(12): 2141-2145.
- [50] 段秀霞, 施文正, 汪之和. 低场核磁共振技术在水产品品质分析中的研究进展[J]. 渔业现代化, 2016, 43(5): 42-46.
- [51] LEE Y K, CHOI S W, HAN S T, et al. Detection of foreign bodies in foods using continuous wave terahertz imaging[J]. Journal of food protection, 2012, 75(1): 179-183.
- [52] OK G, KIM H J, CHUN H S, et al. Foreign-body detection in dry food using continuous sub-terahertz wave imaging[J]. Food control, 2014, 42(3): 284-289.
- [53] SHIN H J, CHOI S W, OK G. Qualitative identification of food materials by complex refractive index mapping in the terahertz range[J]. Food chemistry, 2018, 245: 282-288.
- [54] OK G, PARK K, LIM M C, et al. 140-GHz subwavelength transmission imaging for foreign body inspection in food products[J]. Journal of food engineering, 2017, 221: 124-131.
- [55] 张瑾, 王洁, 沈雁, 等. 小波图像融合在太赫兹无损检测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(12): 3683-3688.
- [56] OK G, CHOI S W, PARK K H, et al. Foreign object detection by sub-terahertz quasi-Bessel beam imaging[J]. Sensors, 2013, 13(1): 71-85.
- [57] GOWEN A A, O' SULLIVAN C, O'DONNELL C P. Terahertz time domain spectroscopy and imaging; Emerging techniques for food process monitoring and quality control[J]. Trends in food science and technology, 2012, 25(1): 40-46.
- [58] JEPSEN P U, COOKE D G, KOCH M. Terahertz spectroscopy and imaging; Modern techniques and applications[J]. Laser photonics reviews, 2011, 5(1): 124-166.
- [59] WANG K Q, SUN D W, PU H B. Emerging non-destructive terahertz spectroscopic imaging technique; Principle and applications in the agri-food industry[J]. Trends in food science and technology, 2017, 67: 93-105.

## 科技论文写作规范——讨论

着重于研究中新的发现和重要方面,以及从中得出的结论。不必重复在结果中已评述过的资料,也不要模棱两可的语言,或随意扩大范围,讨论与文中无多大关联的内容。