

左映平,孙国勇. 生物散斑激光技术及在生鲜农产品品质控制中的应用[J]. 江苏农业科学,2021,49(5):45-50.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.05.008

# 生物散斑激光技术及在生鲜农产品品质控制中的应用

左映平,孙国勇

(茂名职业技术学院化学工程系,广东茂名 525000)

**摘要:**生物散斑激光技术与 Fujii 法、绝对值差法、惯性矩法、广义差法等定性定量分析方法相结合,可用于判断果蔬瘀伤、果蔬成熟过程生化变化、肉类品质、种子活力和果蔬真菌菌落感染程度等,该方法快速、简便、经济,可以保证生鲜农产品的质量和安全。对生物散斑激光技术的原理、计算方法、在生鲜农产品品质控制中的应用及面临的挑战进行综述,以期生物散斑激光技术在生鲜农产品品质控制中的应用实践提供参考。

**关键词:**生物散斑激光技术;果蔬保鲜;生鲜农产品;品质控制

**中图分类号:** S123 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)05-0045-06

生鲜农产品包括生鲜果蔬及生鲜肉类,由于受到机械伤、呼吸作用或微生物污染等影响,生鲜果蔬在采摘、运输和加工处理过程中非常容易变质,从而丧失货架期<sup>[1]</sup>。若贮藏方式或加工方式不当,生鲜肉类的成熟反应和微生物生长就会加速,因此,对生鲜农产品从种植、养殖基地到餐桌期间的品质保障至关重要<sup>[2]</sup>。依据光学、超声、电学和声学特性原理,用于生鲜农产品无损检测的光学检测方法包括显微镜、激光散斑、功能化原子力显微镜、多普勒光谱、高光谱成像技术、振动光谱技术、图像分析等。这些方法可用于生鲜农产品品质、内部缺

陷、口感、含糖量等的检测<sup>[3]</sup>,几种适用于生鲜农产品的无损检测方法见表 1<sup>[4]</sup>。

生物散斑激光技术属于光学检测技术之一,近年来在生鲜农产品品质控制领域被广泛研究,包括鉴定果蔬机械伤、成熟度和成熟变化、肉类成熟、种子活力、真菌菌落感染等,该技术也被用于评估黏弹性食品的光学和动态性能<sup>[5]</sup>。

## 1 生物散斑激光技术原理

生物散斑激光技术原理见图 1<sup>[6]</sup>,其主要设备是激光器、电荷耦合器件 (CCD) 相机、计算机等。首先,激光器发射激光照射生鲜农产品样品的表面及内部,产生相干激光,由于受到背向散射光的干扰,在观测平面上产生散斑图。通过光的反射、透射等方式,CCD 相机获取到生物散斑图像后传输到

收稿日期:2020-07-01

作者简介:左映平(1981—),女,湖南双峰人,硕士研究生,讲师,主要从事农产品综合利用与深加工研究。E-mail: zuoyingping@aliyun.com。

[54] Liu S, Wu S, Pang C, et al. Microbial pretreatment of corn stovers by solid-state cultivation of *Phanerochaete chrysosporium* for biogas production[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2014, 172(3):1365-1376.

[55] Wu J G, Chen C Y, Zhang H Y, et al. Eco-friendly fiberboard production without binder using poplar wood shavings bio-pretreated by white rot fungi *Coriolus versicolor* [J]. Construction and Building Materials, 2020, 236:117620.

[56] Fang W, Zhang X, Zhang P, et al. Evaluation of white rot fungi pretreatment of mushroom residues for volatile fatty acid production by anaerobic fermentation: feedstock applicability and fungal function[J]. Bioresource Technology, 2020, 297:122447.

[57] 石亚攀,池玉杰,于存. 偏肿革菌菌产漆酶活性的诱导[J]. 林业科学, 2016, 52(12):150-155.

[58] Nurika I. The pattern of lignocellulose degradation from cacao pod

using the brown rot (*Serpula lacrymans*) and white rot (*Schizophyllum commune*) fungi [J]. Earth and Environmental Science, 2019, 230(1):12080.

[59] Vrsanska M, Buresova A, Damborsky P, et al. Influence of different inducers on ligninolytic enzyme activities [J]. Journal of Metallomics and Nanotechnologies, 2015, 3:64-70.

[60] 焦有宙,高赞,李刚,等. 不同土著菌及其复合菌对玉米秸秆降解的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23):201-207.

[61] de Lima B M J, Jiménez D J, Cortes-Tolalpa L, et al. Soil-derived microbial consortia enriched with different plant biomass reveal distinct players acting in lignocellulose degradation [J]. Microbial Ecology, 2016, 71(3):616-627.

[62] 路强强,赵叶子,陈智坤,等. 城市园林废弃物中纤维素高效降解微生物菌系的构建[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(6):272-277.

表 1 无损检测方法

无损检测方法 <sup>[4]</sup>	可检测的农产品	检测项目
衰减全反射傅里叶变换红外光谱(FT-IR-ATR)	肉和肉制品	脂肪酸含量
傅里叶变换近红外反射光谱法(FT-NIRS)	宠物食品	水分含量
激光光谱	稻谷	蛋白质含量
	绿豆	蛋白质、脂肪、碳水化合物
	稻谷	直链淀粉含量
	苹果	新鲜水果中的含氧量
磁共振成像(MRI)	黄瓜	硬度、pH 值和可溶性固形物含量

计算机中,经计算机内特定软件进行分析,获取生鲜农产品的生理生化信息。生鲜农产品样本的散斑图像一般有静态图像和动态图像 2 种。静态图像是生物组织的固定粒子,动态图像来自生物组织的粒子运动。其中,动态散斑图案是生物材料的 1 个显著特征,被称为生物散斑,激光(波长在 600 nm 以上)可用于生物散斑仪的照明过程。

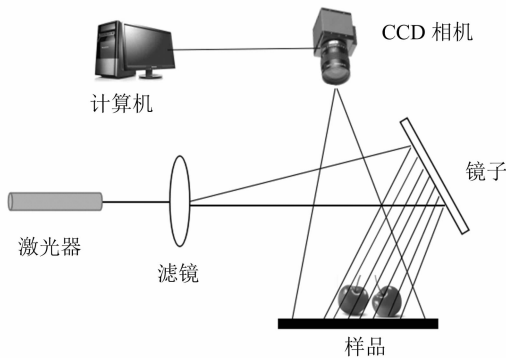


图1 生物散斑激光技术原理

2 生物散斑图像计算方法

利用 Fujii 法、加权广义差(WGD)、广义差(GD)法、惯性矩(IM)法和绝对值差(AVD)法可以建立激光辐照度与散斑活性的函数关系,对生物散斑活性进行分析。其中,AVD 法、互相关法和 IM 法主要应用于定量分析,而 Fujii 法、时间差分法(TD)、激光散斑时间对比分析(LASTCA)、激光散斑对比分析(LASCA)和广义差法常被用于定性分析<sup>[6]</sup>。

2.1 Fujii 方法

Fujii 方法由 Nohira、Yamamoto、Ikawa 和 Ohura 于 1987 年提出,该方法最初用于测量血流量,目前被广泛用于生物散斑分析。该方法基于计算连续图像帧之间灰度绝对差的加权和,其中每个帧取加权平均值<sup>[7]</sup>。Fujii 方法的计算公式如下:

$$F(x,y)=\sum_{k=1}^n\left|\frac{I_k(x,y)-I_{k+1}(x,y)}{I_k(x,x)+I_{k+1}(x,y)}\right|。(1)$$

式中: $k$  是序列  $\{1,\cdots,N\}$  的图像索引; $I_k$  是一个具有  $x,y$  坐标的像素的强度。

然而,Fujii 法有一定的局限性,在描绘图像的生物散斑活动的较暗区域时会产生假动作,纠正方法是利用小波变换完成频率分解。

2.2 广义差分法(GD)

广义差分法是对 Fujii 法的补充<sup>[8]</sup>。广义差分法去掉了加权步骤,特征是所有图像之间像素强度差异的绝对估计值的累积总和,GD 法计算公式如下:

$$GD(x,y)=\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{l=k+1}^N|I_k(x,y)-I_l(x,y)|。(2)$$

式中: $l,k$  为帧的下标; $I_k$  为坐标  $(x,y)$  下像素的强度。

GD 值是分组中每个像素强度的所有可能的生物散斑图像集合之间对比度的总值,对排列中的第 1 个图像轮廓和渐进图像轮廓之间的相关性进行处理,并考虑中点。与 Fujii 法相比,活动图上分析材料的图像不太明显。此外,GD 计算是一种比较耗时的计算方法,这项技术的另一种变体是用平方值代替绝对值,此测量值表示为  $GD^*$ <sup>[9]</sup>,其计算公式如下:

$$GD^*(x,y)=\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{l=k+1}^N[I_k(x,y)-I_l(x,y)]^2。(3)$$

与 GD 相比, $GD^*$  的生物斑点图像显示出更高的对比度。

而在加权广义差分法(WGD)的计算中引入了 1 个附加的权值,其值随时间序列的每次求和而变化<sup>[8]</sup>,以避免丢失瞬时数据。WGD 计算公式如下:

$$WGD(x,y)=\sum_{k=1}^{N-1}\sum_{l=k+1}^N|I_k(x,y)-I_l(x,y)|W_p。(4)$$

式中: $p=l-k$ ,表示参考帧  $k$  的时间距离。随着时

间距离  $p$  改变,权重也改变,可以用来指示散斑强度的变化速度。GD、Fujii 法可以解释分析过程中散斑图的完整活动,但未能描述活动的演变<sup>[10]</sup>。

## 2.3 时间序列散斑图 (THSP)

基于二维图像时间序列散斑图是一个由动态生物散斑的各种渐进图片组成的矩阵。其中,行表示空间剖面,列表示在时间序列上的生物散斑图像。THSP 是通过使用从每张图片中删除的相似片段并将其放在一起而生成的。段按顺序依次排列,THSP 的宽度等于使用的图片数,表示生物散斑的时间尺度。THSP 图像利用共同事件矩阵 IM 将每个 THSP 像素的变化量与邻近变化量联系起来<sup>[11]</sup>。THSP 的计算公式如下:

$$\xi = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^{N-1} (\mu_{t,t+1} - \mu_t)^2}}{\mu_t} \quad (5)$$

## 2.4 绝对值差 (AVD)

绝对值差是一阶统计矩,可以代替惯性矩法<sup>[12]</sup>。在某些情况下,AVD 法表现出更好的生物散斑活性分析,特别是当 THSP 矩阵不包含高频数据时。AVD 的计算公式如下:

$$AVD = \sum_{ij} \{ COM[ij] \times |i-j| \} \quad (6)$$

## 2.5 激光散斑时间对比分析 (LASTCA)

LASTCA 技术依赖于空间或时间对比度的估计,确定时间序列中每个帧像素的平均值和标准差的比值。动态散斑的序列特征可以用来揭示暗的次表层项<sup>[13]</sup>。LASTCA 的计算公式如下:

$$K_t(x, y) = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \{ \sum_{n=1}^N [I_{x,y}(n) - I_{x,y_t}]^2 \}}}{I_{xy_t}} \quad (7)$$

## 2.6 激光散斑对比度分析 (LASCA)

激光散斑对比度分析是一种在线处理技术,它通过检测颗粒模糊程度,使用 1 幅图像来分析样品的活性,是一种快速、经济的在线检测方法。LASCA 的计算公式如下:

$$K_x = \frac{\sigma_x}{I_x} \quad (8)$$

## 2.7 运动历史图像 (MHI)

运动历史图像法能够及时识别 1 组运动中的图像,可以作为可行的在线工具被用于动态散斑分析中<sup>[14]</sup>。MHI 通过给每个像素  $(x, y)$  分配 1 个时间标记 (ms、s、min、h) 来形成最终图像,如果在规定

的时间段后保持静止,则图像将被移除。在 MHI 图中,较高密度的点表示高活性区域,而较小密度的点表示低活性区域<sup>[15]</sup>。在检查有机和无机样品时,MHI 与 LASCA 均有良好的结果。此外,MHI 还提供与 GD 和 Fujii 类似的离线检测数据输出。MHI 法的计算公式如下:

$$MHI(x, y) = \sum_{j=1}^n T_j K_j \quad (9)$$

## 2.8 惯性矩 (IM)

惯性矩是一种常用的数值计算方法,基于 THSP 矩阵建立,是作为中间图像的共现矩阵 (COM)<sup>[16]</sup>,此二阶矩称为矩阵的惯性矩。该方法由 Arizaga 等通过模拟创建,得到 97% ~ 98% 范围内的可靠结果<sup>[8]</sup>。IM 公式:

$$IM = \sum_{ij} M_{ij} (i-j)^2 \quad (10)$$

# 3 生物散斑激光技术在生鲜农产品中的应用

## 3.1 检测园艺产品的机械损伤

新鲜农产品遭受机械损伤后,游离水被排出,酚类化合物氧化,导致受损组织褐变,最终导致农产品质量下降。果蔬组织受到损害后,生物活性也随之改变,且生物活性的变化可以被绘制成图<sup>[17]</sup>,应用生物散斑法可以检测出果蔬表面、内部的损伤。

Passoni 等将生物散斑激光技术与 GD 法、Fujii 法和 LASTCA 法相结合,识别并分析苹果的机械伤,发现惯性矩法在苹果新鲜区和损伤区的生物散斑活性差异最大,而灰色共生矩阵 (GLCM)、BA 值 2 个参数更有利于区分苹果的新鲜度和损伤;苹果在受到撞击后,受损区的生物散斑活性减弱,初步建立了图像参数与苹果内部品质指标 (硬度和可溶性固形物含量) 的拟合模型 ( $R^2 \geq 0.8$ )<sup>[18-23]</sup>。Samuel 等将动态激光散斑成像系统与交叉处理法、时间序列散斑图结合并用其评估橙子、芒果、苹果、番石榴和黄瓜的性质<sup>[24]</sup>。Rethesh 等通过研究证实,运动历史图 (MHI) 作为一种有效的在线损伤检测工具,可被用于分析绿橙果实疤痕<sup>[15]</sup>。刘家玮等利用 He-Ne 激光照射无损枣和损伤枣表面发现,随着贮藏时间的变化,枣的生物散斑活性有较大变化,且无损枣与损伤枣的变化趋势不同<sup>[25]</sup>。刘海彬等通过比较 Fujii 法和加权广义差分法 (WGD 法) 区分皇冠梨缺陷 (腐烂) 部位及完好部位 (花萼/果梗,无缺陷部位) 的效果,发现 WGD 法识别缺陷的效果好,建模和预测准确率均达到 97.5%<sup>[26-27]</sup>。

## 3.2 生鲜农产品成熟度的检测

### 3.2.1 肉类成熟的检测 结合惯性矩和绝对差的

生物散斑法是分析、量化肉成熟过程中生物活性变化的有效工具,尤其是在牛肉品质的评价方面。利用激光生物散斑技术可以检测牛肉成熟过程中的生物变化<sup>[28]</sup>,灰度模板匹配法、小波变换融合、对比度调制融合法可以对牛肉硬度及咀嚼性进行预测<sup>[29-30]</sup>,此外,生物散斑技术还可用于牛肉掺腐检测<sup>[31]</sup>,也可用于猪肉、鸡肉的品质评价<sup>[32-33]</sup>。

**3.2.2 果蔬成熟度的检测** 将生物散斑激光技术与 THSP 图像、惯性矩相结合,可用于猕猴桃、梨、苹果、番茄、柠檬、甘蔗、芒果等果蔬的成熟度检测。生物散斑活性分析结果表明,猕猴桃过熟果实和优质果实间存在显著差异<sup>[34]</sup>,梨比苹果、番茄具有更高的生物散斑活性,随着农产品成熟,生物散斑作用减弱<sup>[35]</sup>,柠檬的动态散斑测量值随着果实品质的下降而变化<sup>[36]</sup>。此外,芒果、番茄、甘蔗的成熟度也被研究<sup>[37-40]</sup>。

### 3.3 微生物污染检测

生物散斑激光技术可以检测微生物的生长进程,是快速确定食品中病原体感染的有效方法,因此可用于污染检测。目前,生物散斑激光技术已被用于分析铜绿假单胞菌<sup>[41]</sup>、大肠杆菌<sup>[42]</sup>、念珠菌病<sup>[43]</sup>、黄曲霉<sup>[44]</sup>、尖孢镰刀菌<sup>[45]</sup>等真菌感染情况。

### 3.4 生化过程

生物散斑活性可以反映生鲜农产品的生物活性。在果实成熟的过程中,细胞器运动、细胞质流动、细胞生长和分裂等过程以及细胞内发生的生化反应是引起生物散斑活性变化的主要原因。生物散斑活性测定可作为确定水果组织细胞内新陈代谢和生化变化的方法。生物散斑活性随着温度下降而降低的特征可用 Q10 系数来衡量<sup>[46]</sup>。在苹果采前阶段,生物散斑活性增强,可溶性固形物含量增加,有机酸、淀粉含量略有下降<sup>[47]</sup>,苹果中叶绿素含量与生物散斑活性呈线性相关,叶绿素含量的增加会导致生物散斑活性呈线性下降。

将激光散斑对比分析法(LASCA)、广义差分法(GD)、Fujii 法、时间对比法(TC)、转动惯量法(IM)与生物散斑激光技术相结合,可用于检测种子的活性、含水量等参量,是一种在农业和生物医学领域能发挥重要作用的新型检测手段<sup>[48]</sup>。门森利用红外热成像技术和激光散斑技术,提出基于多参数信息融合的豌豆种子和栓皮栎种子活力检测方法,准确率分别可达 95.33% 和 94.67%<sup>[49]</sup>。Sutton 等研究发现,利用生物散斑激光分析技术可以有效地识

别发芽受损核,可用于控制小麦种子萌发和休眠过程<sup>[50]</sup>。此外,生物散斑激光技术也被应用在马铃薯、玉米种子活力检测中<sup>[51-55]</sup>。

## 4 生物散斑激光技术的挑战

目前,生物散斑激光技术的推广应用障碍主要包括 2 个方面:一是缺乏相关技术标准。用于生物散斑图像分析的计算公式、方法较多,但相关方法的比较和优劣性大多尚未被研究清楚,计算方法不同,输出的图形或数值也不同。为了收集和标准化这些方法,Braga 开发了 1 个开放数据库,该数据库可免费访问生物散斑激光技术的大量原始数据<sup>[56]</sup>,但标准方法的制订仍然大大限制了生物激光散斑技术在生鲜农产品中的应用。二是缺乏用于测量生鲜农产品散斑活性的仪器设备。例如,氦氖激光最大的局限性在于难以从光学实验室转移到其他地方。生物散斑激光设备只有克服机械噪声和外部光源的干扰,才能够在室外使用。生物脉冲激光(波长为 632.8 nm)对生物样品的穿透较浅也限制了其应用。例如,苹果皮穿透深度仅为 2 mm 左右,仅可从皮下组织获得生物脉冲信息,很难获得果实中心的生物脉冲活性<sup>[57]</sup>。

## 5 结论

生物散斑活性是基于生鲜农产品内部生物物质及其细胞内生化变化过程(如细胞器运动、细胞质流动、细胞生长和分裂)中生物散斑活性进行分析的,获得有意义的结果并对其进行解释。在定量分析中,常采用绝对值差(AVD)、互相关和惯性矩(IM)等方法。定性方法常采用 Fujii 法、时差法(TD)、激光散斑对比分析法(LASCA)、激光散斑时间对比分析法(LASTCA)和广义差分法(GD),生物脉冲方法具有非破坏、简单、低成本等特点,在医学、微生物学和农业等领域有广泛的应用<sup>[58-59]</sup>,包括监测新鲜农产品的成熟度和成熟过程及检测病害和缺陷等。

目前,生物散斑激光技术因一些技术难题尚未完全解决而无法实现工业化应用,如噪声干扰、制订标准化程序等,这些都需要进一步研究。另外,生物散斑激光技术在水果可食性涂膜厚度测量、农产品表面微生物种群鉴定及水果褐变、果实成熟度和种子活力测定等方面的应用仍有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] Ramos B, Miller F A, Brandão T R, et al. Fresh fruits and vegetables – an overview on applied methodologies to improve its quality and safety [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 20: 1 – 15.
- [2] Rizzolo A, Vanoli M, Spinelli L, et al. Sensory characteristics, quality and optical properties measured by time – resolved reflectance spectroscopy in stored apples [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2010, 58 (1): 1 – 12.
- [3] Lohumi S, Lee S, Lee H, et al. A review of vibrational spectroscopic techniques for the detection of food authenticity and adulteration [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 46 (1): 85 – 98.
- [4] Pandiselvam R, Thirupathi V, Striramasaarma M, et al. Development of PLS model for rapid estimation of protein content of rice using Fourier transform; near infrared spectroscopy [J]. *Poljoprivredna Tehnika*, 2015, 40 (4): 27 – 34.
- [5] 胡孟晗, 董庆利, 刘宝林, 等. 生物散斑技术在农产品品质分析中的应用 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29 (24): 284 – 292.
- [6] 邓博涵, 陈嘉豪, 胡孟晗, 等. 生物散斑技术在水果品质检测中的应用及图像处理算法进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56 (9): 1 – 14.
- [7] Ribeiro K M, Barreto B, Pasqual M, et al. Continuous, high – resolution biospeckle imaging reveals a discrete zone of activity at the root apex that responds to contact with obstacles [J]. *Annals of Botany*, 2013, 113 (3): 555 – 563.
- [8] Arizaga R A, Cap N L, Rabal H J, et al. Display of local activity using dynamical speckle patterns [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41 (2): 287 – 295.
- [9] Retheesh R, Samuel B, Mujeeb A. Numerical processing techniques for the detection and analysis of biospeckle activity [J]. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 2016, 5 (4): 1182 – 1186.
- [10] Martí – López L, Cabrera H, Martínez – Celorio, et al. Temporal difference method for processing dynamic speckle patterns [J]. *Optics Communications*, 2010, 283 (24): 4972 – 4977.
- [11] Retheesh R, Samuel B, Radhakrishnan P, et al. Use of laser biospeckle for the evaluation of fruit ripening [J]. *Journal of Pure Applied and Industrial Physics*, 2016, 6 (5): 65 – 70.
- [12] Braga R A, Nobre C M B, Costa A G, et al. Evaluation of activity through dynamic laser speckle using the absolute value of the differences [J]. *Optics Communications*, 2011, 284 (2): 646 – 650.
- [13] Ralph N, Gang Y. Imaging obscured subsurface inhomogeneity using laser speckle [J]. *Optics Express*, 2005, 13 (25): 10034 – 10039.
- [14] Godinho R P, Silva M M, Nozelaet J R, et al. Online biospeckle assessment without loss of definition and resolution by motion history image [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50 (3): 366 – 372.
- [15] Retheesh R, Ansari M Z, Radhakrishnan P, et al. Application of qualitative biospeckle methods for the identification of scar region in a green orange [J]. *Modern Physics Letters B*, 2018, 32 (9): 1850113.
- [16] Ansari M Z, Nirala A K. Assessment of biospeckle activity of lemon fruit [J]. *Agricultural Engineering International (CIGR Journal)*, 2016, 18 (2): 190 – 200.
- [17] Enes A M, Fracaroli J A, dal Fabbro I M, et al. Biospeckle supported ruit bruise detection [J]. *International Journal of Nutrition and Food Engineering*, 2012, 6 (10): 10 – 24.
- [18] Passoni I, Dai P A, Rabal H, et al. Dynamic speckle processing using wavelets based entropy [J]. *Optics Communications*, 2005, 246 (1/2/3): 219 – 228.
- [19] Kumari S, Nirala A K. Biospeckle technique for the non – destructive differentiation of bruised and fresh regions of an Indian apple using intensity – based algorithms [J]. *Laser Physics*, 2016, 26 (11): 115601.
- [20] Lei Y, Liu J, Men S. The biospeckle method for early damage detection of fruits [J]. *Modern Physics Letters B*, 2017, 31: 19 – 21.
- [21] Arefifi A, Moghaddam P A, Hassanpour A, et al. Non – destructive identification of mealy apples using biospeckle imaging [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 112: 266 – 276.
- [22] Abou N C, Tualle J M, Tinet E, et al. A new insight into biospeckle activity in apple tissues [J]. *Sensors*, 2019, 19 (3): 497.
- [23] 吴海伦. 基于生物散斑技术的苹果内部品质检测分级及仪器开发 [D]. 南京: 南京农业大学, 2015: 27 – 40.
- [24] Samuel B, Retheesh R, Ansari M Z, et al. Cross – correlation and time history analysis of laser dynamic specklegram imaging for quality evaluation and assessment of certain seasonal fruits and vegetables [J]. *Laser Physics*, 2017, 27 (10): 105601.
- [25] 刘家玮, 梁飞宇, 王益健. 基于生物散斑的青枣活性变化规律 [J]. *海南师范大学学报 (自然科学版)*, 2017, 30 (2): 150 – 153.
- [26] 刘海彬, 高迎旺, 卢劲竹, 等. 基于激光散斑的梨缺陷与果梗/花萼的识别 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31 (4): 319 – 324.
- [27] 刘海彬. 梨表面缺陷的激光散斑图像检测方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 42 – 59.
- [28] Isis C A, Braga R A, Ramos E M, et al. Application of biospeckle laser technique for determining biological phenomena related to beef aging [J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 119 (1): 135 – 139.
- [29] 董庆利, 金 曼, 胡孟晗, 等. 基于生物散斑技术的两部位牛肉质构特性预测模型改进 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47 (4): 209 – 214.
- [30] 金 曼, 董庆利, 刘宝林. 基于三维生物散斑技术的牛肉质构特性预测 [J]. *食品科学*, 2017, 38 (3): 26 – 31.
- [31] 贾桂锋, 陈 伟, 冯耀泽. 基于生物散斑图像和惯性矩谱分析的牛肉腌腐检测 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34 (16): 281 – 286.
- [32] Oleksandr P, Muravsky L I, Berezyuk M I. Application of biospeckles for assessment of structural and cellular changes in muscle tissue [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2015, 20 (9): 95006.
- [33] 蔡健荣, 刘梦雷, 孙 力, 等. 基于改进惯性矩算法的冷鲜猪肉新鲜度激光散斑图像检测 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33 (7): 268 – 274.

- [34] Laszlo B, Zude M. Analysis of laser light propagation in kiwifruit using backscattering imaging and Monte Carlo simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 69(1): 33–39.
- [35] Ansari M Z, Nirala A K. Biospeckle techniques in quality evaluation of Indian fruits[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2012, 6: 11–20.
- [36] Ansari M Z, Nirala A K. Assessment of biospeckle activity of lemon fruit[J]. Agricultural Engineering International, 2016, 18(2): 190–200.
- [37] Rethesh R, Samuel B, Radhakrishnan P, et al. Use of laser biospeckle for the evaluation of fruit ripening[J]. Journal of Pure Applied and Industrial Physics, 2016, 6(5): 65–70.
- [38] Costa A G, Pinto F A, Braga R A, et al. Relationship between biospeckle laser technique and firmness of *Acrocomia aculeata* fruits[J]. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2017, 21(1): 68–73.
- [39] Piotr M P, Nowacka M, Dadan M, et al. Postharvest monitoring of tomato ripening using the dynamic laser speckle[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1093.
- [40] Matheus S, Silva K G, Fujii A K, et al. Sugar cane (*Saccharum officinarum* L.) analysis through biospeckle and spectroscopy (NIR)[J]. Journal of Agriculture, Science and Technology, 2017, 7: 62–68.
- [41] Murialdo S E, Gonzalez J F, Passoni L I, et al. Discrimination of motile bacteria from filamentous fungi using dynamic speckle[J]. Journal of Biomedical Optics, 2012, 17(5): 056011.
- [42] Ramírez – Miquet E E, Martí – López L, Contreras – Alarcón O R. *Escherichia coli* activity characterization using a laser dynamic speckle technique[J]. Revista Cubana de Física, 2011, 28(1): 1–5.
- [43] Adamiak A, Zdunek A, Kurenda A, et al. Application of the biospeckle method for monitoring bull's eye rot development and quality changes of apples subjected to various storage methods—preliminary studies[J]. Sensors, 2012, 12(3): 3215–3227.
- [44] Rabelo G F, Enes A M, Junior R A, et al. Frequency response of biospeckle laser images of bean seeds contaminated by fungi[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(3): 297–301.
- [45] Braga R A, Rabelo G F, Granato L R, et al. Detection of fungi in beans by the laser biospeckle technique[J]. Biosystems Engineering, 2005, 91(4): 465–469.
- [46] Braga R A, Dupuy L, Pasqual M, et al. Live biospeckle laser imaging of root tissues[J]. European Biophysics Journal, 2009, 38(5): 679–686.
- [47] Szymanska – Charget M, Adamiak A, Zdunek A. Pre – harvest monitoring of apple fruits development with the use of biospeckle method[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 145: 23–28.
- [48] 赵瑛琦, 肖江. 基于时间对比分析法的散斑种子活力检测[J]. 南方农业, 2017, 11(24): 116, 120.
- [49] 门森. 基于多参数信息融合的种子活力检测方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017: 20.
- [50] Sutton D B, Punja Z K. Investigating biospeckle laser analysis as a diagnostic method to assess sprouting damage in wheat seeds[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 238–247.
- [51] 高迎旺. 马铃薯隐形损伤的生物散斑活性特征及检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [52] Sen M, Yan L, Qian H. Application of bio – speckle activity to assess seed viability[J]. Advance Journal of Food Science and Technology, 2015, 8(3): 214–218.
- [53] 唐学俊. 便携式激光散斑衬比成像系统及其应用的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011: 79–80.
- [54] 邱建军. 激光散斑衬比成像流速测量准确性改善方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010: 98–99.
- [55] 段怡婷. 生物散斑测量技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 44–45.
- [56] Braga R A. Challenges to apply the biospeckle laser technique in the field[J]. Chemical Engineering Transactions, 2017, 58: 577–582.
- [57] Mulone C, Budini N, Vincitorio F, et al. Biospeckle activity evolution of strawberries[J]. SOP Transactions on Applied Physics, 2014, 1(2): 65–73.
- [58] Pandiselvam R, Mayookha V P, Kothakota A, et al. Biospeckle laser technique—A novel non – destructive approach for food quality and safety detection[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 1–13.
- [59] 李赳赳, 赵月梅, 江爱华, 等. 激光散斑血流成像系统及其在生物医学工程专业实验教学中的应用[J]. 生命科学仪器, 2019, 17(4): 53–58.