苹果霉心病无损检测研究进展

张建超[1]，张鹏[2]，田世平[3]，薛友林[1]，李江阔[2]
（1.辽宁大学 轻型产业学院，沈阳，110036；2.国家农产品保鲜工程技术研究中心（天津），天津 300384；
3.中国科学院植物研究所资源植物重点实验室，北京 100093）

摘要：目的 介绍几种常用的苹果霉心病无损检测技术及建模方法，为苹果及其他水果病害的无损检测提供新的思路和依据。**方法** 综述苹果霉心病无损检测技术和建模方法的原理，以及国内外的研究进展。**结果** 在苹果霉心病的无损检测中，光谱检测技术应用较广泛，生物电阻抗特性、各种成像检测技术和机器智能感官仿生检测技术逐渐得到发展，融合多源信息的霉心病检测技术也越来越受到研究者的青睐。**结论** 苹果霉心病无损检测的研究还处于初级阶段，许多检测技术和建模方法的参数还需要进一步优化。随着研究的深入，无损检测技术不仅可以应用于水果病害的检测，还可以应用于其他食品工业，具有广阔的研究前景。

关键词：苹果；霉心病；无损检测
中图分类号：TS255.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2020)01-0023-08
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.01.004

Research Progress in Nondestructive Detection Technology of Apple Core Rot

ZHANG Jian-chao[1], *ZHANG Peng*[2], *TIAN Shi-ping*[3], *XUE You-lin*[1], *LI Jiang-kuo*[2]
(1.School of Light Industry, Liaoning University, Shenyang 110036, China; 2.National Engineering and Technology Research Center for Preservation of Agricultural Products (Tianjin), Tianjin 300384, China; 3.Key Laboratory of Plant Resources, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

ABSTRACT: The work aims to introduce several common nondestructive detection technologies (NDT) and modeling methods in NDT of apple core rot, so as to provide new ideas and basis for NDT of apple and other fruit diseases. The principle of NDT and the modeling methods in NDT of apple core rot and the research progress at home and abroad were reviewed. In NDT of apple core rot disease, spectral detection was widely used, the electrical impedance, various imaging detection techniques and bionics sensing intelligent sensor detection technology were gradually developed, and the detection technology based on multi-source information was also increasingly favored by researchers. The research on NDT of apple core rot is still in its infancy, and the parameters of many detection techniques and modeling methods need to be further optimized. With the deepening of research, NDT can not only be applied to detect fruit diseases but also have a broad research prospect in other food industries.

KEY WORDS: apple; core rot; nondestructive technology

收稿日期：2019-10-21
基金项目：“十三五”国家重点研发计划（2016YFD0400903）；兵团科技攻关项目（2019AB024）；辽宁省“兴辽英才计划”（XLYC1807270）
作者简介：张建超（1994—），男，辽宁大学硕士生，主攻食品工程。
通信作者：李江阔（1974—），男，博士后，国家农产品保鲜工程技术研究中心（天津）研究员，主要研究方向为农产品安全与果蔬贮运保鲜新技术。

苹果富含矿物质和维生素，也是我国生产的主要水果品种之一[1]。优质果和精品果较少是制约我国苹果产业快速发展的突出因素，也是导致我国苹果出口率低的重要原因[2—3]。霉心病是影响苹果内部品质和产量的主要病害，针对此病害的报道覆盖于我国的各个主产区[4]。霉心病的发病特征是病原菌从果实中心往外病变，果肉逐渐腐烂[5—6]，且在病变初期苹果外表完好无损，没有表现出任何的病害症状[7]。目前，因我国对霉心病害缺乏有效的无损检测技术及其应用，影响了苹果的品质控制和销售市场[8]。

无损检测技术是在尽可能不破坏水果原始的物理状态、化学性质等前提下，获取待测物品质有关的性质或成分等理化信息所采取的检测方法[9]。其中，近红外光谱技术（Near infrared spectroscopic technique, NIST）、生物电阻抗检测技术（Bioelectrical impedance technique, BIT）、高光谱成像技术（Hyperspectral imaging, HI）及电子计算机断层扫描（Computed tomography, CT）等无损检测技术越来越多地被应用于农产品的品质和各种缺陷的检测，并成为研究的热点[10]。文中对近 10 年来苹果霉心病无损检测的应用及研究进展进行总结，以期为苹果霉心病和其他果蔬的快速无损检测的研究与应用提供相关的参考。

1 苹果霉心病检测方法研究

1.1 近红外光谱检测技术及研究进展

近年来，近红外无损检测技术迅速发展，国内外学者对其进行了大量的研究。其原理是水果内部分子与化学键相结合的各种基团的自身振动具有固定频率，在近红外光照射下水果吸收近红外光谱区特定波长的光线，可以获取该物质的特征光谱。然后将特征峰值与水果的品质参数结合起来建立两者的相关关系，进而检测水果的品质[11—12]。不同近红外光谱检测技术对苹果霉心病的判别情况见表 1，包括了检测方式、研究内容、波长范围、判别方法以及判别率等。涉及的检测方式主要有透射、漫反射以及果实直径与透射结合，采用不同的波长范围和判别方法。除漫反射所建立模型的判别率低于 90%外，其他的判别模型的判别率均高于 90%，判别效果较为理想。说明与漫反射相比，利用透射光谱建立苹果霉心病的判别模型具有更好的效果。另外，Shenderey C 等[13]所建立的判别模型对腐烂程度在 30%以上的霉心病果的判别率为 100%，由此可以看出霉心病的病变程度对建立苹果霉心病的判别模型也具有较大的影响。苹果果实直径的大小也是影响霉心病判别的另一重要因素，

表 1 近红外光谱无损检测技术对苹果霉心病的判别分析

Tab.1 Discriminant analysis of NIRS to apple core rot

检测方式	研究内容	波长范围/nm	建模方法	模型评价	参考文献
漫反射光谱	探讨傅里叶变换近红外漫反射光技术判别富士苹果霉心病的可行性	833~2500	PCA 和 Fisher 函数	建模集和检验集的判别率分别为：89.9%和 87.8%	李顺峰等[14—15]
	采用近红外光谱仪对含有内部褐变障碍褐心病的布瑞本苹果进行检测	700~900	MLR、独立检验集回归和 PLS	模型的判别率在 0.69~0.91 之间	Clark[16]和 Glone[17]
透射光谱	采集富士苹果的可见/近红外透射光谱，并提取特征光谱建立苹果褐变的无损检测模型	650～900	线性判别函数	模型判别率为 95.65%	韩东海等[18]
	采用宽波段钨卤素灯与光谱仪相结合的苹果霉心病检测系统	400~1000	PLSR	健康果的判别率为 92%，腐烂程度在 30%以上的判别率为 100%	Shenderey C 等[13]
	透射光谱检测技术结合光敏元件与窄带 LED 光源	690~730	单片机结合 BP 神经网络	设备的判别率为 95.83%	张海辉等[19]
直径和透射光谱结合	融合多波段透射光谱与苹果直径，构建苹果霉心病判别模型	200~1025	PCA 和 Fisher 函数	总体判别率为 93.1%，仅采用透射光谱的模型判别率为 91.37%	苏东等[20]
	基于果实大小的光谱校正方法	400~1100	BP-ANN 和 SVM	训练集的判别率为 98.04%，测试集的判别率为 90.20%	Tian 等[21]

将果实直径与光谱数据相结合的方法能够提高苹果霉心病的判别效果。同样的，例如果实的质量、密度、成熟度等都可能成为影响光谱建模的因素。将光谱数据与果实的特征参数相结合可以提高苹果霉心病的判别效果，为多因子融合的苹果霉心病无损检测开辟新的思路和方法。

1.2　核磁共振检测技术及研究进展

核磁共振（Nuclear magnetic resonance, NMR）及其成像技术是一种对样品相关组织中氢质子信息进行分析的无损检测技术[22—24]。果蔬腐败和机械损伤的部位会产生较强的 NMR 信号，并且果实变质的组织会出现信号削弱或者信号消失的情况，据此实现对水果品质的检测[25]。利用 MRI 技术建立相关模型来监测不同贮藏期富士苹果内部褐变的动态变化，能够明显地看到 3 个不同的区域：正常、浅棕色和深棕色组织[26]。Chayaprasert W 等[27]利用安装有高速传感器的低频（5.55 MHz）磁共振对苹果霉心病进行无损检测。结果表明，该方法的判别率大于 88%，但是判别率会因传输速度的增加而相应减小。利用核磁共振技术建立苹果霉心病无损检测模型能够更加直观地看到苹果内部病变程度，具有不错的判别效果。由于该技术存在测定条件和分析过程复杂、检测费用高等问题，因此难以实现快速在线检测。

1.3　生物电阻抗特性检测技术及研究进展

生物电阻抗特性是由生物体内相关物质的成分及其结构所决定的，是生物体的固有属性，在不干扰生物正常代谢的电场中对其进行无损检测[28—29]。已有报道显示，苹果的红点病、霉变、物理损伤以及水心病等病害可以通过特征阻抗参数的变化被检测出来[30—31]。李芳等[32]在频率 100 Hz～3.98 MHz 下，使用 LCR 测试仪测定了富士苹果的阻抗参数以及理化品质指标的变化规律，用支持向量机（Support vector machine, SVM）作为分类器，判别苹果是否患有霉心病，判别率可达 94%，并得出苹果密度等理化指标的变化是霉心病果阻抗特性改变的理化基础。该报道说明苹果发生霉心病病害后其密度会发生相应的改变，同时也为利用生物阻抗特性建立了苹果霉心病检测模型提供了理论基础与指导。张立彬等[33]结合计算机和非接触式无损检测技术建立苹果霉心病无损检测模型。结果表明，当频率为 5～100 kHz 时，病害果的阻抗低于健康果；当频率为 33～100 kHz 时，病害果的阻抗大于健康果，且介电常数随着频率的变化基本不变。说明频率的大小会影响健康果和霉心果的介电常数，在建模时需要找到临界频率，以减少霉心病果的建模误差。利用相对介电常数建立苹果霉心病检测模型是可行的，且具有较好的效果，但该方法暂时处于研究阶段，且没有明显的规律，需要进一步的研究与优化。

1.4　成像检测技术及研究进展

X 射线具有超强的穿透力，利用 X 射线成像能够直观地反应检测样本的结构缺陷和变化 [34—35]。康丽奎等[36]采用 X 射线建立苹果霉心病等内部腐烂症状的无损检测机制，但获取的图像通常比较模糊，因此康丽奎等采用几种不同的小波，通过加强低频、弱化高频的方法对所得图像进行强化处理。研究结果表明，采用 dmey 小波进行强化处理的效果要好于常规的图像增强技术，并且该方法的去噪效果显著。另外，采用机器视觉分析与 X 射线成像相结合的方法构建多传感器融合的苹果霉心病检测系统，不仅检测耗时短（< 0.1 s/个），而且对霉心病苹果的判别率达 92%，可以用于苹果霉心病的实时检测[37]。说明采用 X 射线获取的图像需要经过强化处理后再进行分析建模。另外，将获得的图像经处理后与机器视觉相结合构建苹果霉心病的检测模型，也具有较好的效果。

由于计算机技术以及大数据的不断发展，在 X 成像技术与计算机技术相结合的基础上研发出了 X 射线电子计算机断层摄影技术，即 CT 技术。X 射线透过待测物的某个层断面组织，经过处理后得到相应图像，并获得相应点的 CT 值，从而建立目标待测值与 CT 值之间的数学模型，达到无损检测的目的[38]。运用灰度分割法建立苹果中心剖面果肉区 CT 均值与苹果整体品质及含水量的模型，能提高模型稳定性，且误差较小[39]。张京平等[40]利用傅里叶变换对苹果的 CT 扫描灰度图像进行处理，并结合苹果的质量品质，采用 PCA 和 PLS 方法建立预测苹果内部品质的模型，取得了较好的效果。由此，在实践中可通过苹果 CT 断层扫描图，快速无损地判别苹果的内部品质。目前，利用 CT 技术建立苹果霉心病的相关报道较少，有待进一步的研究。另外， CT 技术也面临着设备成本高、潜在危险系数高等问题。

1.5　机器智能感官仿生检测技术及研究进展

计算机视觉技术也称机器视觉技术，通过采集包括果品形状、颜色、缺陷等图像进行分析，并建立相关模型定性判定。苹果霉心病的检测和霉变病斑的面积有很大关系，霉变的程度会使苹果的吸收和反射光谱发生变化。一般霉心病的霉变病斑区域形状不规则，而且果心存在褐变、霉烂以及布满灰色或粉红色霉状区域等情况，一些常规的病变检测方法难以实现对霉心病苹果病变区域的精确检测。鉴于上述原因，采用计算机视觉技术对霉变病斑面积进行精确测量，可以为研究病变程度与光谱数据间的规律提供依据[41—42]。杨亮亮[37]利用机器视觉采集相关信息，分

析苹果 X-射线透视图，经杂交小波变换图像去噪、强化，采用边缘检测方法实时检测苹果霉心病，判别率达 92%。张卫园[43]采用机器视觉技术和数字图像处理技术相结合的方法，获得了苹果质量和体积数据，找出了健康苹果与霉心果之间的密度临界值；然后采用 Matlab 软件研发出结合密度特征的苹果霉心病无损检测系统。另外，王富春等[44]设计了一种利用计算机视觉判别苹果病变程度的方法：基于最大类间方差法（Otsu）提取病斑面积,并计算出病变区域的比例，从而得到病变程度。该方法的判别率为 91.13%，能够有效地判别霉心病果的病变程度。利用机器视觉结合 X 射线和光谱检测来建立苹果霉心病无损模型能够有效地判别霉心病病果，同时也为利用该技术建立苹果霉心病病变程度的检测提供了理论基础和检测案例，是未来发展的的趋势与研究的热点。同时，该技术也存在要求全面、分析过程复杂和耗时长等缺点。

1.6 其他检测技术

近年来，由于苹果霉心病存在难以检测或者检测稳定性和准确率不高等问题，部分研究者设计了多因子和多源信息融合的霉心病无损检测方法。在研究苹果霉心病检测原理的基础上，张海辉等[45—46]结合可见/近红外光谱数据和苹果的直径(光程)，提出了解决果实直径对苹果霉心病透射光谱信息影响的难题。研究结果显示，修正后的模型对测试集和训练集的判别率分别提高了 5.89%和 7.84%。另外，在对苹果霉心病病害机理分析的基础上，获取霉心病在线检测的关联因子，然后建立霉心病无损检测模型，能提高模型的判别精度[47]。霉心病果实的密度以及其他生理特性会随着病害的产生而发生相应的变化，这既是霉心病无损检测的重点和难点，也是进行无损检测的切入点。

2 苹果霉心病无损检测建模方法的相关研究

2.1 线性分析方法相关研究

无损检测建模的常用线性判别方法有线性判别分析(Linear discriminant analysis, LDA)、偏最小二乘判别分析(Partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)和 MLR 等方法。LDA 的中心思想是降维，是利用投影把多维数据样本点投影到同一条直线上，从而简化数据，便于分析。投影后样本组间的分布距离最大，组内的分布距离最小，它常被用于电子鼻等多元大数据的处理[48]。张鹏等[49]利用 LDA 和 PCA 对所采集的富士苹果的电子鼻气味进行分析，与 PCA 相比，LDA 方法可以更好地对不同贮后货架期的苹果进行判别。PLS-DA 是针对所研究的问题建立 2 个变量之间的关系，其中一个变量用某些相关关系最大的另一个变量的线性组合来表示，从而找到 2 个变量之间的根本联系[50]，根据此方法可以找到霉心病苹果的扫描光谱与苹果内部品质之间的联系，从而建立苹果霉心病的检测模型。MLR 是由多个变量的最优组合共同来预测或估计因变量的，比只用一个自变量进行预测或估计更有效，更精确，也更符合实际[51]。

2.2 非线性分析方法相关研究

近年来，例如神经网络(neural network，NN)、深度信念网络(deep belief net， DBN)和 SVM 等一些非线性建模方法已被许多研究者应用于光谱分析建模。在这些建模方法中，针对反向传播网络(BP-NN, back propagation neural networks)的相关报道较多[52]。在多维光谱数据的分析中，BP-NN 具有很好的区分和容错能力，因此取得了较好的分析结果[53]。曾祥媛等[54]采用 PCA 方法提取了不同贮藏期苹果近红外光谱的特征光谱，并采用神经网络来建立苹果的光谱检测模型，模型的判别率为 99.24%，均方根误差为 0.01082%。冯自鹏等[55]为了监测苹果从生长发育到采后贮藏过程中霉心病等果实病害的情况，采用 BP 神经网络分析方法建立了苹果霉心病的判别模型，从而实现了实时监测的目的。人工神经网络特有的非线性适应性信息处理能力，克服了传统人工智能方法对于直觉，如模式、非结构化信息处理方面的缺陷，在苹果霉心病的建模中取得了不错的效果。由于神经网络无法解释推理过程和推理依据，因此理论和学习算法还有待进一步完善和提高。

SVM 是由 CORTES 等[56]基于统计学习理论提出的原理性方法,可以应用于模式分类与非线性映射问题的解答[57]。李芳等[32]利用生物阻抗特性分析比较了富士苹果健康果和患病果的阻抗参数和品质指标的变化规律，使用稀疏主元分析-支持向量机联合运算(sparseprincipal component analysis-support vector machine，SPCA-SVM) 和稀疏主元分析-人工神经网络联合运算(sparse principal component analysis-artificial neuralnetwork，SPCA-ANN)构建了苹果霉心病的数据分析模型。结果显示，SVM 模型对霉心病的识别效果更好。雷雨等[58]基于可见/近红外透射光谱数据建立了 SVM、BP-ANN 和 PLS 判别模型。结果表明，PCA-SVM 模型具有较高的精度，其对测试集和训练集的判别率分别达到了 99.3%和 96.7%。目前这一检测方法的研究和在水果无损检测领域的应用正处于快速发展的阶段，在苹果霉心病无损检测领域具有深远的意义和潜能。

DBN 是学习数据样本的内在规律和表示层次，通过识别霉心病苹果的光谱信息，实现了对霉心病苹果的判别[59]。周兆永等[60]在 200～1025 nm 波长范围内获得了 225 个苹果的透射光谱数据，然后利用特征

光谱数据建立 DBN 和 PLS 模型，以及 BP 神经网络和 SVM 模型来判别霉心病病害程度，并比较了各种模型的判别效果。结果表明，DBN 所建立的模型判别效果最佳，判别率达 88.00%。Park 等[61]使用 DBN 减小高光谱数据的维度而进行分类，研究证明，使用 DBN 网络进行分类时，其精度优于 RGB 图像。深度学习是计算机自动学习模式特征的方法，并将特征学习融入到了建立模型的过程中，从而减少了人为设计特征造成的不完备性。同时该方法使得光谱频带减少而获得有效的多光谱传感器系统，其意义在于仅选择几个基本光谱带，从而可以降低光谱图像中涉及的复杂性，可以更准确地监测果实的缺陷和病害。利用深度学习建模需要大数据支撑才能达到很好的精度，从而使得算法的时间复杂度急剧提升。为了保证算法的实时性，需要更高的并行编程技巧和更好的硬件支持。

以上这些模型大多采用光谱检测技术和建模理论相结合的方法来建立无损检测模型，并取得了较好的效果，具有广阔的前景，同时也为霉心病及其他病害的无损检测提供了可靠的参考。非线性模型（如 BP-NN、SVM 模型等）在选择相关参数时大多根据人们的经验而定，在今后的研究中需要对模型参数进行更深入的研究与优化。另外，利用深度学习建立苹果霉心病病害检测模型的报道尚少，但在水果其他病害的无损检测中有较多的研究。运用深度学习理论建立苹果霉心病无损检测模型以及在建模过程中对深层结构优化的难题值得深入的研究。

3　结语

近年来，无损检测技术因其快速、便捷和无损等优势得到了迅速发展，但霉心病的检测受到单一技术的局限和多因素的影响。在进行无损检测时，苹果的品种、个体差异、贮藏时间、测定部位以及霉心病的发病程度都会影响数据模型的建立和检测的精度。光谱检测技术是目前应用最为普遍和广泛的霉心病检测技术，取得了较好的成果，但光谱技术也存在信息量大、特征波谱重叠多且复杂等缺点。在生物电阻抗技术中，不同品种的苹果内部组分差异较大，这要求阻抗特性参数的选择需要具有代表性且多元化。X 射线、高光谱成像、CT 扫描图像以及核磁共振等新型检测技术虽取得了较好的效果，但是这些技术由于设备复杂，成本高而不利于推广和应用。解决苹果霉心病无损检测问题需要从检测仪器和建模技术两方面着手。一是不断提高无损检测仪器对果实内部品质的检测精度，以及实现仪器的便携化；二是利用计算机技术和大数据分析处理来融合多源信息建立苹果霉心病无损检测模型。另外，这些无损检测技术及建模方法也可以应用到除霉心病以外的其他果实病害，且具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 陈学森, 毛志泉, 沈向, 等. 我国苹果产业节本增效关键技术 I：易着色功能型苹果新品种培育及无袋化栽培技术[J]. 中国果树, 2017(1): 1—5.
CHEN Xue-sen, MAO Zhi-quan, SHEN Xiang, et al. The Breeding of New Variety of Easy Colouring Functional Apple and Non-bag CultivationTechnology[J]. China Fruits, 2017(1): 1—5.

[2] 李瑾, 仇焕广, 蔡亚庆, 等. 中国苹果产品出口现状、制约因素及其对策分析[J]. 世界农业, 2012(5): 73—78.
LI Jin, QIU Huan-guang, CAI Ya-qing, et al. China Apple Products Export Status, Constraints and Countermeasures Analysis[J]. World Agriculture, 2012 (5): 73—78.

[3] 张党利. 陕西苹果产业的现状、问题与发展对策[J]. 广东农业科学, 2010, 37(6): 371—373.
ZHANG Dang-li. The Present Situation, Problems and Development Countermeasures of Shaanxi Apple Industry[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, 37(6): 371—373.

[4] JONES A L, ALDWINCKLE H S. Compendium of Apple and Pear Diseases[J]. Mycologia, 1990, 82(6): 802.

[5] NTASIOU P, MYRESIOTIS C, KONSTANTINOU S. Identification, Characterization and Mycotoxigenic Ability of Alternaria Spp.Causing Core Rot of Apple Fruit in Greece[J]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 197: 9—22.

[6] LEVIN A G, YERMIYAHU U, DORON I, et al. The Role of Calcium Concentration in the Endocarp Wall of Apple Fruit in the Development of Core Rot[J]. Crop Protection, 2019, 120: 67—74.

[7] SHTIENBERG D . Effects of Host Physiology on the Development of Core Rot, Caused by Alternaria Alternata, in Red Delicious Apples[J]. Phytopathology, 2012, 102(8): 769—778.

[8] 苏东. 基于透射光谱的苹果霉心病多因子耦合判别模型研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2016: 1—7.
SU Dong. Research on Multi-factor Coupled Discriminant Model of Moldy Core in Apples Based on Transimitted Spectrum[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2016: 1—7.

[9] LU Y, LU R. Non-Destructive Defect Detection of Apples by Spectroscopic and Imaging Technologies: A Review[J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(5): 1765—1790.

[10] LI Z X, NIE J Y. Nondestructive Testing Technologies and its Application in Fruit Quality and Safety Determination[J]. Journal of Agricultural Science and

Technology, 2013, 15(4): 31—35.

[11] 贺艳楠, 魏永胜, 郑颖. 水果成熟度无损检测技术研究进展[J]. 北方园艺, 2010(3): 208—212.
HE Yan-nan, WEI Yong-sheng, ZHENG Ying. Research Advanced of Nondestructive Detection of Maturity in Fruits[J]. Nonrthern Horticulture, 2010(3): 208—212.

[12] 徐广通, 袁洪福, 陆婉珍. 现代近红外光谱技术及应用进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2000, 20(2): 134—142.
XU Guang-tong, YUAN Hong-fu, LU Wan-zhen. Development of Modern Near Infrared Spectroscopic Techniques and Its Applications[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2000, 20(2): 134—142.

[13] SHENDEREY C, SHMULEVICH I, ALCHANATIS V. NIRS Detection of Moldy Core in Apples[J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 3(1): 79—86.

[14] 李顺峰, 张丽华, 刘兴华. 基于主成分分析的苹果霉心病近红外漫反射光谱判别[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 158—161.
LI Shun-feng, ZHANG Li-hua, LIU Xing-hua. Near-infrared Diffuse Reflectance Spectrum Discrimination of Apple Mould Heart Disease Based on Principal Component Analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 158—161.

[15] 李顺峰. 苹果霉心病果肉生理及其近红外无损检测研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012: 49—56.
LI Shun-feng. Physiological Properties of Moldy Core Apple Fruits Flesh and Nondestructive Detection Using Near Infraed Spectroscopy[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2012: 49—56.

[16] CLARK C J, MCGLONE V A, JORDAN R B. Detection of Brownheart in 'Braeburn' Apple by Transmission NIR Spectroscopy[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 28(1): 87—96.

[17] GLONE V A, MARTINSEN P J, CLARK C J, et al. On-line Detection of Brown heart in Breaburn Apples Using Near Infrared Transmission Measurements[J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 37(2): 142—151.

[18] 韩东海, 刘新鑫, 鲁超. 苹果内部褐变的光学无损伤检测研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 86—88.
HAN Dong-hai, LIU Xin-xing, LU Chao. Study on Optical-nondestructive Detection of Breakdown Apples[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 86—88.

[19] 张海辉, 陈克涛, 苏东. 基于特征光谱的苹果霉心病无损检测设备设计[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 255—262.
ZHANG Hai-hui, CHEN Ke-tao, SU Dong. Design of Nondestructive Detection Device for Moldy Core in Apples Based on Characteristic Spectrum[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2016, 32(18): 255—262.

[20] 苏东, 张海辉, 陈克涛, 等. 基于透射光谱的苹果霉心病多因子无损检测[J]. 食品科学, 2016, 37(8): 207—211.
SU Dong, ZHANG Hai-hui, CHEN Ke-tao, et al. Multiple-factor Nondestructive Detection of Moldy Core in Apples Based on Transmission Spectra[J]. Food Science, 2016, 37(8): 207—211.

[21] TIAN S J, ZHANG J H, ZHAO J, et al. Effective Modification Through Transmission Vis/NIR Spectra Affected by Fruit Size to Improve the Prediction of Moldy Apple Core, Infrared Physics and Technology 2019,100: 117—124.

[22] 王梦娇, 杨菊梅, 王松磊. 基于低场核磁共振技术冷鲜羊肉品质快速无损检测研究[J]. 宁夏工程技术, 2017, 16(1): 10—14.
WANG Meng-jiao, YANG Ju-mei, WANG Song-lei. Rapid and Non-destructive Detection of Chilled Fresh Mutton Based on Low-field NMR Technology[J]. Ningxia Engineering Technology, 2017, 16(1): 10—14.

[23] HENRIK T P, LARS M. Low-Field 1H Nuclear Magnetic Resonance and Chemo Metrics Combined for Simultaneous Determination of Water, Oil and Protein Contents in Oilseeds[J]. JAOCS, 2000, 77(10): 1069—1077.

[24] HUSSAIN A, PU H, SUN D W. Innovative Nondestructive Imaging Techniques for Ripening and Maturity of Fruits – A Review of Recent Applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 72: 144—152.

[25] 庞林江, 王允祥, 何志平. 核磁共振技术在水果品质检测中的应用[J]. 农机化研究, 2006, 8(1): 176—180.
PANG Lin-jiang, WANG Yun-xiang, HE Zhi-ping. Application of NMR in Fruit Quality Detection[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, 8(1): 176—180.

[26] GONZALEZ J J, VALLE R C, BOBROFF S. Detection and Monitoring of Internal Browning Developmentin Fuji Apples Using MRI[J]. Postharvest Biology and Technology, 2001, 22: 179—183.

[27] CHAYAPRASERT W, STROSHINE R. Rapid Sensing of Internal Browning in Whole Apples Using a Low-cost, Low-field Proton Magnetic Resonance Sensor[J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 36(3): 291—301.

[28] 王文艇, 钟季康, 马骏. 生物阻抗技术概述[J]. 上海针灸杂志, 2005, 24(11): 40—44.
WANG Wen-ting, ZHONG Ji-kang, MA Jun. An Overview of the Bioimpedance Technologies[J]. Shanghai Journal of Biomedical Engineering, 2005, 24(11): 40—44.

[29] 郭文川, 郭康权, 朱新华. 介电特性在番茄和苹果品种识别中的应用[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 130—132.
GUO Wen-chuan, GUO Kang-quan, ZHU Xin-hua.

Application of Dielectric Properties in Identifying Species of Tomatoes and Apples[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(8): 130—132.

[30] 马海军, 宋长冰, 张继澍, 等. 电激励信号频率对红点病苹果采后电学特性影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 97—101.
MA Hai-jun, SONG Chang-bing, ZHANG Ji-shu, et al. Influence of Frequency of Electric Excitation Signal on Dielectric Property of Fuji Apples with Red-dot Disease[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 97—101.

[31] 马海军, 冯美, 张继澍. 100 Hz～3.98 MHz 下苹果虎皮病果实电特性研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 105—108.
MA Hai-jun, FENG Mei, ZHANG Ji-shu, et al. Dielectric Properties of Fuji Apple Superficial Scald in the 100 Hz～3.98 MHz Range[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 105—108.

[32] 李芳, 蔡骋, 马惠玲, 等. 基于生物阻抗特性分析的苹果霉心病无损检测[J]. 食品科学, 2013, 34(18): 197—202.
LI Fang, CAI Cheng, MA Hui-ling, et al. Nondestructive Detection of Apple Mouldy Core Based on Bioimpedance Properties[J]. Food Science, 2013, 34(18): 197—202.

[33] 张立彬, 胥芳, 贾灿纯, 等. 苹果内部品质的电特性无损检测研究[J]. 农业工程学报, 16(3): 104—106.
ZHANG Li-bin, XU Fang, JIA Can-chun, et al. Nondestructive Measurement of Internal Quality of Apples by Dielectric Properties[J]. Journal of Agricultural Engineering, 16(3): 104—106.

[34] KALNE A, KOTWALIWALE N, SINGH K. Non-destructive Inspection of Mango Fruit Using Digital Radio Graphy, Computed Tomography and Magnetic Resonance Imaging[J]. Indian Society of Agricultural Engineers, 2013, 49(4): 33—41.

[35] VELASCO LI, MEDINA C. Soft X-ray Imaging Fornon-destructive Detection of the Mango Pulp Weevil Sterno-chetus Frigidus (Fabr) Infestation in Fresh Green "Carabao" Mango Fruits[J]. Thesis-The University of Texas at Aus-tin, 2004, 44(4): 716—717.

[36] 康丽奎. 苹果霉心病的 X 射线图像增强和去噪方法的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009: 6—47.
KANG Li-kui. Study on Enhancing and Denosing Methods of Radiographic Image Base on Apple with Moldy Core[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2009: 6—47.

[37] 杨亮亮. 基于机器视觉和 X 射线的苹果霉心病检测方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009: 15—20.
YANG Liang-liang. Research on Detection Method of Apple Moldy Core Based on Machine Vision and X-ray[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2009: 15—20.

[38] 刘明涛, 刘亚, 郭俊先. 水果无损检测技术的研究与应用[J]. 农业科技与装备, 2017(6): 51—55.
LIU Ming-tao, LIU Ya, GUO Jun-xian. Research and Application on Fruit Nondestructive Detection Technology[J]. Agricultural Science and Technology and Equipment, 2017(6): 51—55.

[39] 黄滔滔, 孙腾, 张京平. 基于 CT 图像的苹果内部品质无损检测[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2013, 39(1): 92—97.
HUANG Tao-tao, SUN Teng, ZHANG Jing-ping. Non-destructive Detection of Internal Quality of Apple Based on CT Image[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2013, 39(1): 92—97.

[40] 张京平, 朱建锡, 孙腾. 苹果内部品质的 CT 成像结合傅里叶变换方法检测[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 197—204.
ZHANG Jing-ping, ZHU Jian-xi, SUN Teng. Detection of Apples' Internal Quality Using CT Imaging Technology and Fourier Transform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 197—204.

[41] 应义斌, 王剑平, 蒋焕煜. 水果直径和缺陷面积的机器视觉检测[J]. 农业工程学报, 2002, 18(5): 216—220.
YING Yi-bin, WANG Jian-ping, JIANG Huan-yu. Inspecting Diameter and Defect Area of Fruit With Machine Vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(5): 216—220.

[42] 冯斌, 汪懋华. 基于计算机视觉的水果大小检测方法[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 73—75.
FENG Bin, WANG Mao-hua. Detecting Method of Fruit Size Based on Computer Vision[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2003, 34(1): 73—75.

[43] 张卫园. 基于密度特征的苹果霉心病无损检测方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015: 23—39.
ZHANG Wei-yuan. Research on Nondenstructive Detection of Apple Mould Core Disease Based on Density Character[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2015: 23—39.

[44] 王富春, 李军, 张润浩. 基于计算机视觉的苹果霉心病病变程度测量方法[J]. 农机化研究, 2015(6): 189—193.
WANG Fu-chun, LI Jun, ZHANG Run-hao. Measurement of the Degree of Apple Mould Core Disease Based on Computer Vision[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(6): 189—193.

[45] 张海辉, 田世杰, 马敏娟. 考虑直径影响的苹果霉心病透射光谱修正及检测[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 320—327.
ZHANG Hai-hui, TIAN Shi-jie, MA Min-juan. Detection Method of Moldy Core in Apples Using Modified Transmission Spectrum Based on Size of Fruit[J].

Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 320—327.

[46] 张海辉, 田世杰, 马敏娟. 基于单片机的 BP 神经网络苹果霉心病判别模型及其建立方法: 中国, 105069504A[P]. 2015-11-18.
ZHANG Hai-hui, TIAN Shi-jie, MA Min-juan. BP Neural Network Based on Single Chip Microcomputer to Discriminate Apple Mold Heart Disease and Its Establishment Method: China, 105069504A[P]. 2015-11-18.

[47] 吴辰星. 融合多源信息的苹果霉心病在线检测方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017: 9—27.
WU Chen-xing. Resarch on Online Inspection Method for Moldy Core in Apple Based on Multi-source Information[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2017: 9—27.

[48] QIU S, WANG J, GAO L. Qualification and Quantisation of Processed Strawberry Juice Based on Electronic Nose and Tongue[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(1), 115—123.

[49] 张鹏, 李江阔, 陈绍慧. 基于电子鼻判别富士苹果货架期的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(5): 272—276.
ZHANG Peng, LI Jiang-kuo, CHEN Shao-hui. Discrimination of Fuji Apples Shelf Life by Electronic Nose[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(5): 272—276.

[50] KAYA-CELIKER H, MALLIKARJUNAN P K, KAAYA A. Mid-infrared Spectroscopy for Discrimination and Classification of Aspergillus Spp Contamination in Peanuts[J]. Food Control, 2015, 52: 103—111.

[51] 冀荣华, 郑立华, 邓小蕾, 等. 基于反射光谱的苹果叶片不同生长时期的叶绿素和含水率预测模型[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 269—275.
JI Rong-hua, ZHEN Li-hua, DENG Xiao-lei, et al. Forecasting Chlorophyll Content and Moisture of Apple Leaves in Different Tree Growth Period Based on Spectral Reflectance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 269—275.

[52] LIU Y, LIAN J. Optical and Electrical Properties of Aluminum-doped Zn O Thin Films Grown by Pulsed Laser Deposition[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(7): 3727—3730.

[53] 栾郭宏, 贺凯迅, 程辉, 等. 基于神经网络的近红外光谱辛烷值模型的研究及应用[J]. 计算机与应用化学, 2014, 31(1): 63—68.
LUAN Guo-hong, HE Kai-xun, CHENG Hui, et al. Octane Model Based on Neural Network by Near-infrared Spectroscopy and Its Application[J]. Computers and Applied Chemistry, 2014, 31(1): 63—68.

[54] 曾祥媛, 赵武奇, 乔瑶瑶, 等. 高近红外光谱技术结合神经网络检测苹果咀嚼性[J]. 食品与机械, 2016, 32(6): 37—40.
ZENG Xiang-yuan, ZHAO Wu-qi, QIAO Yao-yao, et al. Detecting Chewiness of Apple by Near Infrared Spectroscopy Technology Combined Artificial Neural Network[J]. Food and Machinery, 2016, 32(6): 37—40.

[55] 冯自鹏. 夹持式苹果霉心病检测装置设计[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017: 35—44.
FENG Zi-peng. Clamping Device for Detection of Moldy Core in Apples[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2017: 35—44.

[56] CORTES C, VAPNIK V. Support-vector Networks[J]. Machine Learning, 1995, 20(3): 273—297.

[57] 祝志慧, 谢德君, 李婉清, 等. 基于光谱技术和多分类器融合的异物蛋检测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 312—318.
ZHU Zhi-hui, XIE De-jun, LI Wan-qing, et al. Abnormal Eggs Detection Based on Spectroscopy Technology and Multiple Classifier Fusion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2): 312—318.

[58] 雷雨, 何东健, 周兆永. 苹果霉心病可见/近红外透射能量光谱识别方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 193—200.
LEI Yu, HE Dong-jian, ZHOU Zhao-yong. Detection of Moldy Core of Apples Based on Visible/Near Infrared Transmission Energy Spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 193—200.

[59] BENGIO Y, DELALLEAU O. On the Expressive Power of Deeparchitectrues[C]// Proceedings of the 22nd International Conference on Algorithmic Learning Theory, 2011: 18—36.

[60] 周兆永, 何东健, 张海辉. 基于深度信念网络的苹果霉心病病害程度无损检测[J]. 食品科学, 2017(14): 304—310.
ZHOU Zhao-Yong, HE Dong-jian, ZHANG Hai-hui. Non-Destructive Detection of Moldy Core in Apple Fruit Based on Deep Belief Network[J]. Food Science, 2017(14): 304—310.

[61] PARK K, HONG Y K, KIM G H, et al. Classification of Apple Leaf Conditions in Hyper-spectral Images for Diagnosis of Marssonina, Blotch Using mRMR and Deep Neural Network[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 148: 179—187.