



· 综 述 ·

种子活力无损检测方法研究进展

李孝凡^{1,2}, 王 成^{2,3}, 宋 鹏^{2,3}, 赵 燕¹, 徐子森³, 张 晗^{2,3}

(1. 武汉理工大学机电工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097;

3. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097)

Progress in Research on Non-destructive Testing Methods for Seed Vigor

LI Xiaofan^{1,2}, WANG Cheng^{2,3}, SONG Peng^{2,3}, ZHAO Yan¹, XU Zisen³, ZHANG Han^{2,3}

摘 要:种子活力作为衡量种子质量的一个重要指标,对农业经济的发展有着重要影响。传统的种子活力检测方法因其检测时间长会对种子造成不可恢复性的损伤等缺点,难以满足现代种子快速、无损生产的新要求。而新型种子活力无损检测技术采用非接触式检测,不会对种子造成物理或化学损伤,且检测效率高,是未来种子活力检测的主要方法。本文针对目前种子活力检测现状,总结了近年来应用于种子活力检测的无损检测技术,并对种子活力检测技术的未来发展趋势及方向进行了展望。

关键词: 种子; 种子活力; 检测技术

DOI 编码: 10.16590/j.cnki.1001-4705.2019.06.061

中图分类号: S 330.3⁺¹ **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4705(2019)06-0061-05

种业是农业的芯片^[1],农产品的生产产量和品质与农田播种种子的质量息息相关。据统计,每年我国因作物种子不适造成的农产品减产在 10%~20% 之间^[2]。为保证播种种子质量,种子质量检测是种子销售前必不可少的环节。种子活力作为衡量种子质量的重要指标之一,在种子生产加工过程中常常未能受到重视。高活力的种子在田间发芽速度快、出苗整齐、抵抗逆境环境生长的能力强;低活力的种子在田间发芽速度较慢、出苗不规整,很容易受到生长环境的影响而造成农产品减产。因此研究种子活力的检测技术,对保障农业经济的稳定发展有着重要意义。

1 种子活力

种子活力的概念首次提出是 1950 年在国际种子协会(ISTA)上。1981 年,郑光华^[3]撰写的《积极开展

种子活力研究的建议》一文,将国际上最热门的研究领域介绍到国内,并第一次将“Vigor”译为“活力”,在《种子》杂志上将这个种子学中最新颖而又非常重要的概念正式刊发,并由此推动了我国这一领域的研究发展。2003 国际种子检验规程规定:种子活力是指种子批在广泛环境条件下,所测定活性和有关性能的总和^[4]。种子活力主要特性包括:种子发芽、幼苗生长速率和整齐度;种子在不利环境条件下的出苗能力;储藏后保持发芽的能力。常见的传统检测种子活力的方法有多种。例如四唑(TTC)染色法,它主要依据种胚中与种子活力相关联的过氧化氢酶发生化学反应变成红色。根据染色的位置和深浅可以确定种子活力水平,一般情况下,红色越深,说明种子活力水平越高;幼苗生长测定法是根据种子出苗生长速度、幼苗根长和芽长、鲜重或干重等种子生长特性来判断种子活力状况。高活力种子一般出苗生长速度快、根长和芽长较长、鲜重值或干重值较高,低活力种子在这些特性上则表现相对弱势;加速老化法是依据老化处理后的种子发芽情况进行判断,高活力种子能正常出苗生长,而低活力种子则易生长为不正常幼苗或者不生长。除上述几种方法,还有一些传统种子活力检测方法如抗冷测定法、电导率法、砖砾法等。传统种子活力检测方法对种子活力情况的评定结果科学性强,是国家标准种子活力检测方法,但也存在对实验工作人员的专业能力要求较高、实验周期长、容易对种子造成损伤等缺点,不能满足现代农业生产对种子快速、准确、无损检测的新要求^[5]。随着现代科学技术的发展,诸如机器视觉、近红外光谱、软 X 射线、电子鼻等新型检测技术逐渐应用到种子活力检测领域中,给种子质量检测行业注入了新力量。

2 新型种子活力检测方法

2.1 机器视觉技术

机器视觉技术是一门涉及到计算机技术、图像处

收稿日期:2019-01-26

基金项目:国家重点研发计划(2017 YFD 0701205)。

作者简介:李孝凡(1995—),男,湖南浏阳人;硕士研究生,主要从事种子活力无损检测方向;E-mail:479948293@qq.com。

通讯作者:宋 鹏(1986—),男,湖北黄冈人;博士,高级工程师,研究方向:作物信息获取技术及装备研究;E-mail:songp@nercita.org.cn。

理、模式识别等多个领域的智能技术^[6],在食品安全检测、生产制造和交通监控等行业有着广泛的应用^[7],并取得了巨大的经济和社会效益。近年来在种子活力检测领域,研究人员发现种子活力不仅与种子的遗传特性有关,与种子大小、颜色等物理性状也有密切关系^[8]。应用机器视觉技术来检测种子活力,主要通过图像传感器获取种子图像,然后将图像转化为数字图像导入计算机中,运用诸如图像预处理、边缘检测、图像分割等图像处理技术进行分析处理,提取种子大小、颜色等信息,最终结合数据分析方法对种子活力状况进行评价。在国外,Kiratiratanapruk 等^[9]通过图像处理相关技术,建立了基于玉米种子颜色和纹理特征的支持向量机(SVM)分类器,实现了对有十多种缺陷特征(发霉、虫蛀等)的玉米种子分类,最终判断正常种子的准确率为 95.6%,有缺陷的种子准确率为 80.6%。Hoffmaster 等^[10]利用图像扫描仪获取大豆幼苗图像,结合图像处理技术,开发了能实现对大豆种子批的活力水平评定的系统。Granitto 等^[11]利用机器视觉技术获取种子形态、颜色和纹理的特征信息,建立贝叶斯分类模型,实现对 57 种杂草种子的自动分类。在国内,彭江南等^[12]利用中国农业大学自主研发的 Seed Identification 软件提取棉籽图像中单粒棉籽的 RGB、Lab、HSB、灰度以及长、宽等特征信息,确定了棉种活力与 R、S、B(HSB)、b、宽度、长度和投影面积存在显著或极显著的相关性,最终当 R 小于 90 进行精选,棉种的发芽率由 89% 提高到 96.1%。叶凤林等^[13]同样利用 Seed Identification 软件对黄芩进行研究,发现黄芩幼苗苗长、鲜重与种子 H 值、宽度、长度、投影面积呈极显著相关。李振等^[14]基于图像处理技术,开发了辣椒种子活力指数检测系统,活力指数检测准确率高达 92% 以上。王应彪等^[15]通过 OpenCV 对优质和含有损伤、霉变种子的 HSV 颜色空间进行分析,将种子分成优质、一般、劣质三类,其中优质种子判断正确率为 90.5%,一般种子正确率为 82.3%,劣质种子正确率为 92.3%。上述研究表明,运用机器视觉技术不仅在种子质量检测 and 分级上有着很好的应用成效,而且在实现种子活力的快速、准确、无损检测上也有着良好的应用前景。

2.2 近红外光谱技术

近红外光(NIR)是一种介于可见光(VIS)和中红外光(MIR)的电磁波,波长为 780~2 526 nm^[15]。从 20 世纪 80 年代后期一直发展到现在,近红外光已经在农业、食品、石油、化工等领域取得了很多应用成效^[17]。在种子活力检测领域,由于种子活力的基础是

种子成熟过程中贮藏物质不断积累而逐渐形成^[18],而近红外光谱区与有机分子含氢基团(OH、NH、CH)振动的合频和各级倍频的吸收区一致,因此,可利用光谱信息来反映种子组成成分信息,进而可以分析种子的活力状况。近年来,国内外研究学者运用该技术在有关种子活力检测的研究中取得了许多进展。Soltani 等^[19]利用近红外光谱技术对单粒山毛榉坚果有无活力进行鉴别,精确度达到 100%。Min 等^[20]通过采集普通玉米种子和人工老化玉米种子的近红外光谱,分析并建立原始光谱、一阶导数光谱和二阶导数光谱偏最小二乘法(PLS 2)模型,实现对未知正常种子预测准确率分别为 88%、100%和 97%,未知老化种子预测准确率分别为 100%。时伟芳等^[16]利用近红外光谱技术鉴定单粒春小麦种子活力,通过偏最小二乘分析方法建立种子活力定性分析模型,模型的建模集和检验集的鉴别率分别为 86.36%和 91.3%。韩亮亮等^[21]利用近红外光谱结合主成分马氏距离模式识别方法鉴别了 3 种不同活力的燕麦种子,鉴别率达到 100%。白京等^[22]通过应用可见近红外光谱技术测定玉米种子的光谱信息,并结合红墨水染色法判断种子生活力的有无,同时利用将主成分分析(PCA)和支持向量机(SVM)结合的方法建立判别模型,最终校正集和预测集判别正确率分别为 95.56%和 86.67%。李武等^[23]通过采集不同老化天数 8 个甜玉米品种种子的近红外光谱,结合偏最小回归(PLSR)方法建立了甜玉米种子活力相关指标的定量模型。由上述研究结果可知,近红外光谱检测技术具有检测效率高、无污染、非破坏等特点,在种子活力检测的应用上成果显著。随着科学技术的发展,近红外光谱技术将有可能大大改善种子活力检测工作量大、时间长等工作现状,推动种子活力检测向批量化和产业化的方向发展。

2.3 高光谱技术

高光谱技术与近红外光谱技术不同之处在于,近红外光谱只能获取待检测物体的光谱信息,不能获得其空间信息。高光谱技术融合了图像技术和光谱技术^[24],不仅能够获取其反应内部成分的光谱信息,而且能够获取待测物体的空间信息。高光谱图像光源的波谱范围可以在紫外波段(200~400 nm)、可见光波段(400~760 nm)近红外波段(760~2 560 nm)以及波长大于 2 560 nm 的波段获取大量窄波段连续光谱图像数据,为每个像素提供一条完整并连续的光谱曲线^[25]。近年来,高光谱技术在军事、地质、农业领域都有广泛的应用^[26]。在农业种子活力检测上,高光谱技术作为物质检测分析的有力工具,帮助国内外研究学

者取得了很多研究成果。Ambrose 等^[27]利用高光谱成像技术,采集正常玉米种子和经微波加热老化处理的玉米种子在 400~2 500 nm 波段的光谱图像,结合偏最小二乘判别分析方法(PLS-DA)建立模型,对 2 种玉米判断结果,预测集准确率为 95.6%。Kandpal 等^[28]利用高光谱技术获取不同老化程度的甜瓜种子在 948~2 494 nm 波段的光谱图像,并采用不同的变量选择方法分别建立了几种 PLSDA 模型来判断甜瓜种子活力,其中用 PLSDA-SR 方法建立的模型对甜瓜种子活力的预测准确率可达 94.6%。李美凌等^[29]通过高光谱成像仪采集了 3 个水稻品种种子在 400~1 000 nm 范围的光谱数据,采用主成分分析支持向量机(PCA-SVM)模式识别方法建立水稻种子活力鉴别模型,最终预测集的判别率接近 100%。彭彦昆等^[30]利用高光谱的成像技术,采用连续投影算法(SPA)提取得到与番茄种子活力相关特征波长,当选取特征波长在 713 nm 时,并且番茄种子图像的面积平均值、圆形度平均值及灰度平均值的阈值分别选取为 51.6 像素、0.96 和 92 时,其验证集的识别正确率最高可达 90.48%。综上所述,高光谱波段范围广,种子信息获取更加全面,作为一项高效、无损检测技术,能很好的应用于种子活力检测分析上。

2.4 激光散斑技术

激光散斑现象最早被发现于 1960 年^[31],它是指当激光照射在相对粗糙(与光的波长相比)物体表面时形成的随机干涉的图样。当粗糙物体表面随时间发生动态变化,如微小位移、粒子随机运动时,则产生的散斑图也随时间动态变化,称为动态激光散斑^[32]。动态激光散斑具有非接触、无创伤、高精度、高灵敏度、抗干扰能力强和操作简单等优点,在医学、生物、食品、农林业上均有应用^[33-37]。在种子活力检测领域的应用上,王凤鹏等通过研究发现,主观激光散斑和客观激光散斑均可以用于大豆活力的检测^[32]。王佩斯等^[38]利用激光散斑技术得到了玉米种子内部粒子活跃区域,同时利用四唑染色法验证了该区域便是种子的活力区域,为激光散斑在种子活力的应用上做出了初步的探索。由于目前激光散斑技术在种子活力检测的应用上,尚处在实验室研究阶段,相关性的研究成果较少,但从上述研究结果可以看出,运用激光散斑技术对种子活力进行无损检测具有很大的潜力。

2.5 软 X 射线技术

X 射线自 1895 年伦琴发现以来,其为医学、生物学事业做出了巨大贡献^[39]。在种子检测上,由于 X 射线技术具有检测速度快、检测准确、不破坏种子等优

点,该技术已广泛应用在林木种子质量检测上^[40]。X 射线的检测原理主要是依靠 X 射线对物质的穿透性,当用 X 射线照射种子样品时,能在摄影胶片、制版片或荧光屏上形成种子样品的射线图像,显出种子内部的完整结构,如种皮、胚、胚乳和裂纹等均能在 X 射线图像上体现出来。根据种子的内部结构进而可以判断种子的虫蛀、裂纹、品种等情况。Sood 等^[41]通过 X 射线技术获得芸豆种子的 X 射线图像,结合图像处理技术对其进行了阈值化和形态学操作,最终准确的区分有裂纹种子和无裂纹种子。Małgorzata 等^[42]利用 X 射线技术实现对 3 个不同品种小麦种子的进行鉴别判断。在种子活力检测上,赵晶明等^[39]利用 X 射线检验樟子松种子的结构,发现对 X 射线吸收良好的种子发芽率较高,反之则低。杨玉娟等^[43]运用水衬比剂射线测定法测定小桐子种子生活力,其实验结果发现,有生活力的种子,胚和胚乳之间界线模糊不清,胚隐约可见,胚乳较亮且亮度均匀。杨冬凤^[44]通过将软 X 射线技术与计算机智能识别相结合的方法,以种胚区椭圆短半轴及种胚区域渗钡像素比率和非种胚区域渗钡像素比率为输入特征,以标准发芽试验结果输出,建立 BP 神经网络单粒玉米种子活力识别模型,进行分组试验的平均准确率可达 95% 以上。随着未来 X 射线技术与计算机数字图像技术的不断发展,X 射线在种子活力无损检测上将占据重要的地位。

2.6 电子鼻技术

电子鼻是 20 世纪 90 年代发展起来的一种快速无损的气味检测仪器,具有能够无损、快速、准确感知和识别气体成分的特点^[45]。近年来,电子鼻在农业、食品加工及质量检测、医学诊断、环境检测等领域被广泛应用^[46]。在种子检测领域,电子鼻通过采集种子生理生化变化过程中产生的挥发性物质(像甲醇、乙醇等醇类物质和酸、酮等小分子羰基化合物以及烷烃类物),进而分析种子的生理状态并对种子的霉变、贮藏年限、品种类别、种子活力状况等作出判断。Evans 等^[47]利用电子鼻技术对发霉和未发霉的小麦种子所挥发的的气味信息采集和分析,结合径向基函数人工神经网络(RBFann)数据建模方法,实现了对发霉和未发霉的小麦种子鉴别。程绍明等^[48]利用电子鼻很好的区分了不同年份的番茄种子。电子鼻除了在种子的品种、年限鉴别有应用外,在种子活力检测上也有着很好的应用成果。张婷婷等^[45]利用电子鼻获取不同活力甜玉米种子的气味信息,结合主成分分析、线性判别分析和支持向量机分别建立甜玉米种子活力的分析模型,其

中主成分分析和线性判别分析建立的模型不能区分不同活力的甜玉米种子,而支持向量机建立的模型判别效果较好,预测集准确率可达96.67%。赵婧^[49]利用电子鼻技术结合BP神经网络建立小麦、大豆、油菜种子生活力的判断模型,模型预测准确率都达到98.3%以上,实现了对多个物种种子生活力的分类判别。电子鼻是种子活力检测领域中一项新颖的技术,具有无损、操作简单、对样品不需要预处理、不会产生嗅觉疲劳等优点,但在检测混合气体时或有干扰气体存在等情况下,难以得到较高的检测和识别精度。

3 讨论

现阶段由于种子品种繁多,其活力表现的形式都各有所异。传统种子活力的检测方法难以满足现如今对种子活力快速、无损、自动化的市场需求。当前主要使用的种子活力无损检测技术有机器视觉技术、近红外光谱技术、高光谱技术、激光散斑技术、软X射线技术和电子鼻技术,但由于不同技术检测原理存在差异,具有不同优缺点。机器视觉技术能快速准确的获取种子的可见光图像,通过对图像分析处理能得到种子颜色、形态和纹理特征信息,进而判断种子品种、破损以及活力状况,但并非所有种子活力均与种子外在颜色、形态等物理信息相关,此方法的应用具有一定局限性。近红外光谱和高光谱技术都是通过种子内部的组成成分光谱信息来建立种子内部成分信息与种子活力的关系,但是种子成分光谱有较多的冗余信息以及噪声,分析处理过程会比较复杂,不同种类种子检测时需重新建模,模型构建复杂,此外,光谱设备价格昂贵,难以大范围推广普及。激光散斑技术通过种子表面和内部散射粒子在激光照射下的动态变化情况来判断种子的活力状况。这一技术比较方便快捷,但检测过程中种子的轻微偏移都将影响最终的采集图像的效果,进而影响到最终的分析结果。X射线成像技术通过获取种子内部结构信息,分析种子活力状况,然种子内部结构并非反应其活性的唯一因素,因此该技术也具有局限性。电子鼻技术直接通过种子所挥发的气体分子进行采集从而分析种子的活力状况,检测速度快,也不会有嗅觉疲劳,但容易受到其他与种子活力不相关气体的干扰。综上分析,单一无损检测技术难以全面获取种子活力表征信息,且现有检测技术设备价格昂贵,难以进行商业化推广应用,为实现种子活力无损、快速、准确检测,探索多传感技术融合的对能适用于不同作物种子活力检测的方法是发展方向之一。此外,受限与光谱检测器件成本,基于低成本光谱检测器件的应用模型构建也是未来种子活力无损检测的主要方向。与此同时,

便携式种子活力无损检测仪器的研发会大大促进该技术的推广应用,是未来的种子活力检测的必然发展方向。

参考文献:

- [1]刘石.种子产业的价值空间[J].种子世界,2012(5):54.
- [2]王岳含.我国种子质量可追溯系统研究[D].中国农业科学院,2016.
- [3]郑光华.积极开展种子活力研究的建议[J].种子,1981(创刊号),(1):5.
- [4]郝楠,王建华,李宏飞,等.种子活力的发展及评价方法[J].种子,2015,34(5):44-45,49.
- [5]于征,方芳,彭祚登,等.基于新兴技术的种子活力检测方法研究[J].种子,2012,31(08):52-55.
- [6]成芳,应义斌.机器视觉技术在农作物种子质量检验中的应用研究进展[J].农业工程学报,2001(6):175-179.
- [7]李炳银.机器视觉及其在制造业中的应用分析[J].数字通信世界,2017(9):95.
- [8]时伟芳,贾佳,冯鹏飞,等.春小麦种子物理指标与种子活力关系的初步分析[J].中国农业大学学报,2016,21(7):1-12.
- [9]Kiratiratanapruk K, Sinthupinyo W. Color and texture for corn seed classification by machine vision[C]// International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems. IEEE, 2012: 1-5.
- [10]Hoffmaster A L, Fujimura K, McDonald M B, et al. An automated system for vigor testing three-day-old soybean seedlings[J]. Seed Science and Technology, 2003, 31(3): 701-713.
- [11]Granitto P M, Navone H D, Verdes P F, et al. Weed seeds identification by machine vision[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2002, 33(2): 91-103.
- [12]彭江南,谢宗铭,杨丽明,等.基于Seed Identification软件的棉籽机器视觉快速精选[J].农业工程学报,2013,29(23):147-152.
- [13]叶凤林,李琳,杨丽明,等.基于机器视觉的黄芩种子精选技术研究[J].种子,2016,35(11):100-104.
- [14]李振,廖同庆,冯青春,等.基于机器视觉的蔬菜种子活力指数检测算法研究及系统实现[J].浙江农业学报,2015,27(12):2218-2224.
- [15]王应彪,贾贺鹏,李明,等.基于OpenCV算法的玉米种子品质检测分级方法研究[J].林业机械与木工设备,2017,45(5):35-39.
- [16]时伟芳,谢宗铭,杨丽明,等.基于近红外光谱技术的春小麦单粒种子活力鉴定[J].麦类作物学报,2016,36(2):200-205.
- [17]朱丽伟,马文广,胡晋,等.近红外光谱技术检测种子质量的应用研究进展[J].光谱学与光谱分析,2015,35(2):346-



- 349.
- [18]蒋敏明.种子活力研究进展及展望[J].中国种业,2018(6):15-18.
- [19]Soltani A, Lestander T, Tigabu M, et al.Prediction of viability of oriental beechnuts,*Fagus orientalis*, using near infrared spectroscopy and partial least squares regression [J].*Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2003, 11(1): 357-364.
- [20]Min T G, Kang W S.Nondestructive Classification between Normal and Artificially Aged Corn (*Zea mays* L.) Seeds Using Near Infrared Spectroscopy[J].*Korean Journal of Crop Science*, 2008, 53(3): 314-319.
- [21]韩亮亮,毛培胜,王新国,等.近红外光谱技术在燕麦种子活力测定中的应用研究[J].红外与毫米波学报,2008(2): 86-90.
- [22]白京,彭彦昆,王文秀.基于可见近红外光谱玉米种子活力的无损检测方法[J].食品安全质量检测学报,2016,7(11): 4472-4477.
- [23]李武,李妍,李高科,等.高温老化下甜玉米种子活力近红外光谱检测技术研究[J].核农学报,2018,32(8): 1611-1618.
- [24]魏利峰,纪建伟.高光谱图像技术检测玉米种子真伪的研究进展[J].湖北农业科学,2016,55(21): 5445-5448,5478.
- [25]马本学,应义斌,饶秀勤,等.高光谱成像在水果内部品质无损检测中的研究进展[J].光谱学与光谱分析,2009,29(6): 1611-1615.
- [26]杨小玲.高光谱图像技术检测玉米种子品质研究[D].浙江大学,2016.
- [27]Ambrose A, Kandpal L M, Kim M S, et al.High speed measurement of corn seed viability using hyperspectral imaging[J].*Infrared Physics & Technology*, 2016, 75: 173-179.
- [28]Kandpal L M, Lohumi S, Kim M S, et al.Near-infrared hyperspectral imaging system coupled with multivariate methods to predict viability and vigor in muskmelon seeds [J].*Sensors & Actuators B Chemical*, 2016, 229: 534-544.
- [29]李美凌.基于高光谱的水稻种子活力检测技术研究[D].浙江农林大学,2014.
- [30]彭彦昆,赵芳,白京,等.基于图谱特征的番茄种子活力检测与分级[J].农业机械学报,2018,49(2): 327-333.
- [31]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.
- [32]王凤鹏,曾全荣,叶尚臣,等.基于激光散斑的大豆活力检测实验研究[J].应用激光,2013,33(4): 452-455.
- [33]Dunn A K, Bolay H, Moskowitz M A, et al.Dynamic imaging of cerebral blood flow using laser speckle[J].*Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism Official Journal of the International Society of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 2001, 21(3): 195-201.
- [34]Ivanov B, Shopova M, Sainov V.Dynamic laser speckle for non-destructive quality evaluation of bread[J].*Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2011, 7747: 77470L-77470L-8.
- [35]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.
- [36]Braga R A, Fabbro I M D, Borem F M, et al.Assessment of Seed Viability by Laser Speckle Techniques[J].*Biosystems Engineering*, 2003, 86(3): 287-294.
- [37]Moreira J, Cardoso R R, Braga R A.Quality test protocol to dynamic laser speckle analysis[J].*Optics & Lasers in Engineering*, 2014, 61(10): 8-13.
- [38]王佩斯,毕昆.基于激光散斑检测玉米种子活力方法的研究[J].应用激光,2011,31(6): 473-477.
- [39]赵晶明,姜良开.应用软 X 射线对林木种子生活力检验的探讨[J].高师理科学刊,2003,23(2): 50-51.
- [40]曹祥练,潘威,秦明松.种子无损分选新技术研究进展[J].种子,2016,35(01): 44-47.
- [41]Sood S, Mahajan S, Doegar A, et al.Internal crack detection in kidney bean seeds using X-ray imaging technique [C].*International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, IEEE*, 2016: 2258-2261.
- [42]Małgorzata Charytanowicz, Jerzy Niewczas, Piotr Kulczycki, et al. Discrimination of Wheat Grain Varieties Using X-Ray Images[M].*Information Technologies in Medicine*. Springer International Publishing, 2016.
- [43]杨玉娟,杨群辉,唐军荣,等.X 射线水衬比法测定小桐子种子生活力研究[J].林业调查规划,2008,33(4): 129-132.
- [44]杨冬风.基于软 X-射线造影和机器智能的玉米种子活力检测方法研究[J].作物杂志,2013(3): 136-140.
- [45]张婷婷,孙群,杨磊,等.基于电子鼻传感器阵列优化的甜玉米种子活力检测[J].农业工程学报,2017,33(21): 275-281.
- [46]唐向阳,张勇,丁锐,等.电子鼻技术的发展及展望[J].机电一体化,2006(4): 11-15.
- [47]Evans P, Persaud K C, Meneish A S, et al.Evaluation of a radial base function neural network for the determination of wheat quality from electronic nose data[J].*Sensors & Actuators B Chemical*, 2000, 69(3): 348-358.
- [48]程绍明,马杨琿,周博,等.基于电子鼻的番茄种子不同储藏时间的鉴别研究[J].传感技术学报,2011,24(7): 941-945.
- [49]赵婧.电子鼻在种子生活力检测和品种鉴别中的应用研究[D].内蒙古大学,2015.

(本栏目责任编辑:周介雄、戴 焱)