

无损检测技术在种子质量检验上的应用研究进展

孙群^{1*} 王庆¹ 薛卫青¹ 马晗煦¹ 孙宝启¹ 谢宗铭²

(1. 中国农业大学 农学与生物技术学院/农业部基因组学与遗传改良重点实验室/

北京市作物遗传改良重点实验室,北京 100193;

2. 新疆农垦科学院 分子农业技术育种中心,新疆 石河子 832000)

摘要 无损检测技术是近年来兴起的有别于有损检测方法的高新技术,因具备不破坏被检样品、检测速度更快、少污染、自动化等优势得到了快速的发展,并且已广泛应用于农牧、食品、化工、石化、制药、烟草等诸多领域,随着我国农作物育种单位的不断扩张、育成品种数目不断剧增,种子质量检验工作也愈发复杂和繁重,无损检测技术就成为目前种子质量检验的一个重要发展趋势。本文分别综述了种子质量的几种无损检测方法的技术原理、研究现状和发展趋势,在此基础上对各种检测技术的应用前景进行了展望和预测。

关键词 种子; 质量检测; 无损检测技术

中图分类号 S 339.3

文章编号 1007-4333(2012)03-0001-06

文献标志码 A

Advances in nondestructive detection of seed quality

SUN Qun^{1*}, WANG Qing¹, XUE Wei-qing¹, MA Han-xu¹, SUN Bao-qi¹, XIE Zong-ming²

(1. College of Agronomy and Biotechnology/Key Laboratory of Crop Genomics and Genetic Improvement of Ministry of Agriculture/

Beijing Key Laboratory of Crop Genetics Improvement, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Center for Molecular Agrobiotechnology and Breeding,

Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China)

Abstract Nondestructive detection technology is a new developing method with many advantages such as the rapid and simultaneous nondestructive analysis in recent years. It is distinguished from traditional destructive detection and has been widely used in agriculture, food, chemical industry and so on. With the booming of our breeding units and the increasing of varieties we have bred, seed quality testing work also increasingly complex and onerous. So nondestructive detection technology becomes a development trend of seed quality testing. In this paper, we reviewed the usage and theories of each method and the research status as well as development trend of them.

Key words seed; quality detection; nondestructive detection technology

自从2000年《种子法》颁布和2001年我国加入世贸组织之后,我国种业市场化和对外开放步伐加快。国外公司凭借其先进的科技,雄厚的资金,丰富的市场运作经验大举进军我国种子市场,在不到10年的时间里已控制了我国高端蔬菜种子50%以上的市场份额,几乎涉及到所有蔬菜作物。目前,在我国注册的外资(含合资)种子企业已超过70家,主要从事蔬菜和花卉业务。在基本控制和稳定中国蔬菜

和花卉市场之后,最近几年国外大公司又开始进军我国大田作物种子市场。如美国先锋公司的“先玉335”玉米品种,在2009年已占全国玉米播种面积的5%。在吉林省和黑龙江省南部已有超过“郑单958”市场份额的趋势。在争夺世界种子市场份额的激烈竞争中,我国目前处于劣势,而要提高我国的种业市场竞争力,种子质量是关键。种子是作物生产最基本的生产资料,种子质量的高低直接影响农作

收稿日期: 2011-11-14

基金项目: 新疆生产建设兵团“十二五”项目(2012BB046);教育部青年教师科研项目(2510JS052);北京市海淀科委项目(K20100068)

第一作者: 孙群,副教授,博士,主要从事种子科学研究, E-mail: sunqun@cau.edu.cn

物的产量和品质。

2000年国家颁布种子法后,尽管我国的种子质量包括种子纯度、发芽率等有了明显的改善,且种子质量(净度、含水量、发芽率、纯度、活力、病虫害、生活力等)的检验已具有相应的标准检测方法。传统的质量检验方法主要有标准发芽试验、种子形态鉴定、幼苗鉴别、田间小区试验、以生化指纹为依据的电泳谱带鉴定法和以DNA分子多态性为依据的分子标记鉴定法等。但种子质量检验方法目前多由种子检验员手工进行操作,由于主观因素,结果差异较大,并且费时、费事,无法满足当前种业市场快速发展的需求。当前我国玉米、蔬菜育种单位数目庞大,育成品种数目剧增,因此种子质量检验工作也越来越复杂和繁重。种子质量控制技术与手段的落后已成为限制我国种子产业快速发展的瓶颈,寻求更快、更新的检测方法是目前种子质量检验的发展趋势。其中快速无损种子质量检验技术有助于在种子贸易中正确评定种子质量,防止假、劣种子流通,全面提高我国种业市场的监管力度。

鉴此,无损检测技术应运而生。无损检测又称非破坏检测,是一种在不破坏待测物原来状态、化学性质等前提下获取与待测物相关的内容、性质或成分等物理、化学信息的检测方法^[1]。无损检测技术具有不破坏被检样品、检测速度更快、少污染、可实现自动化等优势^[2]。目前对种子质量进行无损检测所利用的主要技术有:针对种子的光学特性、化学特性、机器视觉特性、电学特性等众多性质进行的各种检测技术。

1 基于光学特性的种子质量无损检测技术

种子的光学特性是指种子对光的吸收特性、反射特性和透射特性因其内部成分和外部特征不同,在不同的波长光线照射时会出现不同的吸收或反射特性,种子的分光反射率或吸收率在某一波长会出现峰值,这一峰值的变化可以与种子内部生理指标相联系,因此利用种子的这些光学特性进行无损检测是可行的^[3-4]。这其中,以近红外光谱技术发展最快。

近红外光谱(NIR)分析技术是20世纪80年代发展起来的一项可以实现无损检测的测试技术。在近红外光波长范围内,特定的原子群(如水分、脂肪、蛋白质等)均有其相应的特征吸收波长而且符合比尔定律。因此,可以通过测定样品对某一特殊波长

光的吸收值,来计算对应的原子群(成分)的聚集度(百分含量)。20世纪60年代Karl Norris最早使用近红外光谱和多元线性回归分析测定出了谷物的水分、蛋白质和脂肪含量^[5]。1978年美国 and 加拿大就采用近红外法作为分析小麦蛋白质的标准方法,1998年美国材料试验学会制订了用近红外光谱测定多元醇(聚亚安酯原材料)中羟值含量的ASTM D6342标准方法。2003年,我国也正式实施了用近红外光谱方法测定饲料中水分、粗蛋白质、粗纤维、粗脂肪、赖氨酸、蛋氨酸的国家标准GB/T 18868—2002。近几年,随着化学计量学、光纤和计算机技术的发展,在线近红外光谱分析技术正以惊人的速度应用于包括农牧、食品、化工、石化、制药、烟草等在内的诸多领域^[6]。

在品种和纯度鉴定方面,有学者研究利用可见/近红外光谱技术区别咖啡品种^[7]、道地山药^[8]、苹果品种^[9]、水稻品种^[10]、辣椒品种^[11]、红景天品种^[12]和桑白皮与易混淆品种^[13]、杨梅^[14]等。程存归等^[15]利用近红外光谱技术对紫苏子及其伪品进行了直接鉴定,发现其红外光谱的吸收位置和强度均有明显差异。陈建等^[16]采用近红外光谱技术与人工神经网络相结合的分析方法鉴别玉米的4个品种,建模集鉴别率为100%,预测集为95%。苏谦^[17]对7个玉米品种共140个样本的近红外光谱进行了归一化处理,然后采用主成分分析(PCA)和仿生模式结合识别方法建立了玉米品种的鉴别模型,平均识别率94.3%。邬文锦^[18]采用主成分分析(PCA)和仿生模式识别(BPR)方法建立了37个玉米品种鉴别模型,平均正确识别率为94.3%。梁亮等^[19]通过人为加入其他普通稻谷,配置纯度为90%~99%的稻种样本90份,采用PCA结合BP-ANN对杂交稻种宜香725纯度进行了近红外建模分析,建模集决定系数与检验集决定系数分别为98.84%与92.27%。Tigabu等^[20]应用近红外检测技术对温带和热带的树木种子进行了快速和无损种子质量特性检测试验研究,结果表明,利用近红外检测技术可以将欧洲赤松种子来源、父本和母本区分开来,其鉴定准确率分别达到100%、93%和71%。近红外光谱还能很好的识别小麦、林木种子的害虫和干瘪种子^[21-24]。孙群等^[25-26]采用近红外光谱分析技术结合定性偏最小二乘法建立了乌拉尔甘草种子硬实特性的鉴定模型,校正集、检验集、预测集样本的鉴别率分别为95.53%、95.94%和94.53%,硬

实和非硬实种子的预测准确性分别为 92.5% 和 96.56%, 随后又结合定量偏最小二乘法建立了乌拉尔甘草种子硬实率的鉴定模型, 校正集和检验集的决定系数分别为 90.85% 和 91.51%, 建模效果好。黄艳艳等^[27-28]采用近红外光谱分析技术结合定性偏最小二乘法对农大 108 玉米杂交种的纯度进行了鉴别研究, 建立了纯度鉴别模型, 所建模型建模集和检验集鉴别率均达到了 100%, 随之又结合定量偏最小二乘法进行了定量测定, 建模集和检验集内部交叉验证决定系数分别为 96.61% 和 97.67%, 进一步证明了模型的稳定性。

在生活力和活力方面, Soltani^[29]应用近红外检测技术对山毛榉树种子进行了鉴别, 结果表明, 近红外光谱技术在鉴定单粒种子是否有活力方面的精确度达到 100%。Tigabu^[30-31]利用近红外光谱法对马尾松的种子进行逐粒分析, 所建立的偏最小二乘法模型识别好种子的准确率达到 96%, 识别空壳种子的准确率达到 88%。Tigabu^[32]利用近红外透射光谱技术结合 SIMCA 及 PLS-DA 分析方法, 对未老化和人工老化的马尾松种子进行了定性分析, 发现老化和未老化种子的鉴别率为 100%, 老化 3 d 和老化 7 到 9 d 的种子的鉴别率为 80%, 为从大批种子中分离劣变种子提供了可能。韩亮亮^[33]利用近红外光谱结合主成分分析与马氏距离模式的识别方法对不同活力水平的燕麦种子进行了定性分析, 确定 4 种不同活力水平种子的谱区范围、处理方法及主成分个数, 为利用近红外光谱技术快速准确无损测定种子活力提供了一条新途径。康月琼^[34]利用傅里叶变换近红外光谱法检测玉米、水稻种子水分和生活力, 建立玉米、水稻种子水分、生活力的近红外光谱分析模型。徐荣等^[35]采用傅里叶变换红外光谱法(FTIR), 分析研究了肉苁蓉种子的光谱特征和成分差异, 发现不同部位及不同处理肉苁蓉种子的活力可以通过蛋白质与脂类的峰高比来衡量。阴佳鸿等^[36]以不同含水量的燕麦种子为材料, 将近红外光谱技术与主成分—马氏距离识别方法相结合, 研究比较了经控制劣变处理后燕麦种子的活力差异, 主成分 8 时, 对校正样本和预测样本的鉴别率均可达到 100%。朱丽伟等^[37]利用傅里叶变换近红外漫反射光谱法测定了自然状态下单粒苦豆子和决明子种子的光谱, 并结合定性偏最小二乘法对着两种种子的生活力进行了鉴别研究, 结果采用不同样品进行建模时, 苦豆子和决明

子的鉴别率均在 90% 以上。

此外, 基于光学特性的无损检测技术还包括 X 射线检测技术和叶绿素荧光分析技术。X 射线技术是利用穿透能力较弱的 X 射线作为光源进行透视探查的技术, 与四唑染色法、标准发芽实验相比较, 该技术具有速度快、准确、方便、不受种子休眠期限限制、不破坏种子的优点。应用 X 射线技术可以观察种子的内部构造以及其生活力。根据种子胚的结构可以判断种子的生活力。Aquila^[38]利用 X 射线技术和计算机辅助图像分析技术进行了甜辣椒种子的发芽评估, 通过计算机辅助图像分析技术检测种子吸胀过程来确定一个图像指标作为筛选和评价高发芽率种子的一个高质量标记, 通过研究甜辣椒种子发现, X 射线筛选的种子与对照相比, 发芽率和平均发芽时间差异不大; 软 X 射线技术对于扁平性的种子检测效果较好, 但检测效率低, 需要检验人员具备丰富的识别经验。Jalink 等^[39]对甘蓝种子进行了叶绿素荧光照射, 将种子分为 5 个等级, 结果表明种子的叶绿素含量与种子质量呈反比, 并将种子批中 13% 的高叶绿素含量种子剔除后的发芽率达到了 90% 以上。叶绿素荧光技术已经运用在生产中, Satake 美国公司已生产了叶绿素荧光技术种子分选机(The SeedScan series)。

2 基于化学特性的种子质量无损检测技术

种子在储藏过程中会产生气味, 这些气味主要是一些羰基化合物(如醛类、酮类), 还有少量醇类和其他化合物。日本 Tohoku 大学的研究小组对种子在贮藏过程中释放出的气体组分进行了研究, 结果在水稻、大豆、大麦、小麦中共检测出乙醇、乙醛、乙炔等 24 种挥发性代谢物^[40]。1982 年, 英国 Warwick 大学的 Persaud 和 Dodd 教授模仿哺乳动物嗅觉系统的结构和机理, 对几种有机挥发气体进行识别, 提出了“电子鼻”的概念。电子鼻又叫气味扫描仪, 是 20 世纪 90 年代发展起来的一种快速检测仪器, 它能够感知和识别气体, 其原理是模拟人的嗅觉器官对气体进行感知、分析和判断, 主要由气敏传感器阵列、信号处理子系统和模式识别子系统等 3 大部分组成。伟利国等^[41]研制了一套能快速对小麦活性进行识别的电子鼻检测系统。系统通过分析小麦的气味, 对所测得小麦的活性程度进行 5 个等级的评判, 系统能快速、准确评判小麦的霉变情况, 网络正确识别率为 91%, 试验表明, 该系统对小麦

活性程度的检测是可行和有效的。电子鼻技术可以客观、准确、快捷的评判气味,具有重复性好的特点,因此对其研究和应用也较为广泛。但由于气敏传感器的选择性和限制性,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^[42]。

Q2 技术来源于荷兰 ASTEC 种子技术公司,是通过测量种子萌发过程中的氧气消耗情况来检测种子活力的一项新技术。陈能阜等^[43]利用 Q2 技术检测番茄种子引发处理后的活力,结合发芽试验结果表明利用 Q2 技术快速检测番茄种子引发后的活力是可行的。由于该技术在检测过程中种子需要经历短暂的萌发过程,因此检测结束后要立即进行恢复处理。

3 基于机器视觉特性的种子质量无损检测技术

机器视觉技术是以计算机和图像获取部分为工具,以图像处理技术、图像分析技术、模式识别技术、人工智能技术为依托,处理所获取的图像信号并从图像中获取某些特定信息。机器视觉不仅是人眼的延伸,也具有人脑的部分功能,所以广泛应用于诸多领域,具有快速、准确、无损等人工无法比拟的效果^[44]。机器视觉是一门涉及多个领域的交叉学科,随着人工智能技术,计算机科学的迅速发展,有力地促进了视觉技术的进步,目前在医疗诊断、智能机器人、军事、遥感等方面得到广泛应用。目前各国种子科学家都在致力于研究快速、可靠、更多信息的种子检验新技术^[45]。Zayas 等^[46]将图像分析技术与小麦硬度物理测量相结合,检测批量小麦样品昆虫,对多米尼克虫、一些草籽、杂物的检出率高于 90%。Majumdar 等^[47]利用谷物的 23 种形态特征来区分不同品种的麦粒,分级准确率分别为:小麦 98.9%,大麦 93.7%,燕麦 96.8%,黑麦 99.9%。另外美国衣阿华州立大学种子科学中心已开发出品种纯度检验的计算机图像分析系统,该系统将标准品种的种子、幼苗和植株形态特征以及电泳图谱摄入计算机,与标准图像比较后就可鉴定品种的纯度。赵新子等^[48]运用图像处理硬件系统、图像识别与处理技术对 2000—2002 年收获的 3 种玉米杂交种分别进行了种子活力检测,结果表明:计算机检测结果对四唑染色法人工测定结果平均准确度达 93.7% 以上。以上研究结果说明利用机器视觉技术进行农作物种子质量检测评价具有良好的适应性,能够达到快速、

准确、无损等人工检测无法比拟的效果。

4 基于电学特性的种子质量无损检测技术

种子是一种吸湿性电介质,当种子含有较多水分(自由水)时,电阻率很小,种子呈导体或半导体性质,当种子经过干燥之后,它的电阻率很高,近似于电介质的性质。品种和籽粒质量相同的种子,介电常数愈大,其活力愈低,而介电常数小的种子则具有较高的活力^[49]。王庆惠等^[50]通过测定棉花、玉米、小麦和黄豆等农作物种子的介电常数,分析影响测试因素,得出种子品质与介电常数之间的关系,并用发芽试验验证了测试结果,得出种子品质与其介电常数成反比关系。米双山等^[51]通过对种子介电特性的研究,分析了影响种子介电特性的因素以及种子介电常数与种子活力之间的关系,利用自行研制的介电分选试验台将小麦种子分为 5 级,分别测试出各级种子的千粒质量、介电常数和活力指标,测试结果表明,高活力种子的介电常数较小,低活力介电常数较大。张敏华等^[52]及别传爽等^[53]认为种子介电常数越小,种子活力越高。这些研究结果表明,可以用介电常数变化对种子进行无损检测。

5 结 语

在现有的无损检测技术当中,近红外光谱技术的发展速度较快、应用范围最广、技术相对成熟,但由于近红外分析属于从复杂、重叠、变动的光谱中来提取弱信息的技术,因此需要结合化学计量的方法建立数学模型来解决上述困难。要想建立优秀的数学模型则需要有好的仪器、优秀的分析软件、经验丰富的建模人员和准确测定化学值的水平等。在机器视觉研究方面,应大力发展处理硬件,提高处理速度,以便为其在实际生产中进行种子质量检验创造条件。在电子鼻研究方面,受敏感膜材料、制造工艺、数据处理等因素的制约,电子鼻的使用范围与人们的期望还有些许差距,但若解决成本以及气敏传感器的灵敏度等问题,电子鼻技术便可逐步从实验室走向实际应用中。

我国有着巨大的种子市场。随着外资种业的加入,中国种业面临着愈发激烈的市场竞争。农作物种子质量检测是影响种植业经济和种子资源管理的重要环节。其中无损检测技术相对于传统的有损检测来说,由于其可以不破坏种子、对种子质量的检测更加科学、快捷和经济,对于要求大规模、效率高的

检测较为适合。现阶段的无损检测技术由于存在着成本高、运行复杂等不足,使得无损检测技术的全面应用具有很大的挑战性。目前大多数无损检测技术都处于探索阶段,我国虽已开展了一些相关研究但也取得了值得肯定的进展,但今后仍需加强研究,促进其在生产上的转化利用以适应国际种业市场竞争的需要。

参 考 文 献

- [1] 陈君.农产品品质的无损检测技术[M].长春工业大学学报:自然科学版,2006,27(3):262-266
- [2] 李敏,李宪华.无损检测技术在食品分析中的应用[J].检验检疫科学,2008,18(6):60-62
- [3] 贺艳楠,魏永胜.水果成熟度无损检测技术研究进展[J].北方园艺,2010(3):208-212
- [4] 李敏,李宪华,奚星林,等.无损检测技术在食品分析中的应用[J].检验检疫科学,2008,18(6):60-62
- [5] Norris K H, Barnes R F, Moore J E, et al. Prediction forage quality by NIRS[J]. Animal Science, 1976, 43(4): 899-897
- [6] Delwiche R. Protein content of single kernel of wheat by near-infrared reflectance spectroscopy[J]. Journal of Cereal Science, 1998, 27: 241-254
- [7] Esteban-Diez I, Gonzalez-Saiz J M, Pizarro C. Prediction of sensory properties of espresso from roasted coffee samples by near-infrared spectroscopy[J]. Analytica Chimica Acta, 2004, 525(2): 171-182
- [8] 孙素琴,汤俊明,袁子民,等.道地山药红外指纹图谱和聚类分析的鉴别研究[J].光谱学与光谱分析,2003,23(2):258-261
- [9] 何勇,李晓丽,邵咏妮,等.基于主成分分析和神经网络的近红外光谱苹果品种鉴别方法的研究[J].光谱学与光谱分析,2006,26(5):850-853
- [10] 李晓丽,唐月民,何勇,等.基于可见/近红外光谱的水稻品种快速鉴别研究[J].光谱学与光谱分析,2008,28(3):578-581
- [11] 俞蔚,雍克岚.辣椒素的荧光特性研究[J].食品科学,2003,24(11):105-108
- [12] 王思宏,尹起范,范艳玲,等.长白山地区几种红景天品种的傅里叶变换近红外光谱法鉴别研究[J].光谱学与光谱分析,2004,24(8):957-959
- [13] 孙静芸.桑白皮与易混淆品种红外光谱指纹谱的分析[J].中草药,2002,33(4):355-358
- [14] Li X L, He Y, Fang H. Non-destructive discrimination of Chinese bayberry varieties Vis/NIR spectroscopy[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81: 57-363
- [15] 程存归. FT-IR 直接鉴定紫苏子及其伪品的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2003, 23(2): 282-284
- [16] 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
- [17] 苏谦,邬文锦,王红武,等.基于近红外光谱和仿生模式识别玉米品种快速鉴别方法[J].光谱学与光谱分析,2009,29(9):2413-2416
- [18] 邬文锦,王红武,陈绍江,等.基于近红外光谱的商品玉米品种快速鉴别方法[J].光谱学与光谱分析,2010,30(5):1248-1251
- [19] 梁亮,杨敏华,刘志霄,等.杂交稻种宜香725纯度的可见-近红外反射光谱鉴定[J].光谱学与光谱分析,2009,(11):2962-2965
- [20] Tigabu M, Ode' n P C, Shen T Y. Application of near infrared spectroscopy for the detection of internal insect infestation in *Picea abies* seed lots[J]. Can J For Res, 2004, 34: 76-84
- [21] Maghirang E B, Dowell F E, Baker J E, et al. Automated detection of single wheat kernels containing live or dead insects using near-infrared reflectance spectroscopy [J]. T ASAE, 2003, 46(4): 1277-1282
- [22] Tigabu M, Fjellstrom J, Ode' n P C, et al. Germination of *Juniperus procera* seeds in response to stratification and smoke treatments, and detection of insect-damaged seeds with VIS+NIR spectroscopy[J]. New Forests, 2007, 33: 155-169
- [23] Tigabu M, Ode' n P C. Rapid and non-destructive analysis of vigor of *Pinus patula* seeds using single seed near infrared transmittance spectra and multivariate analysis [J]. Seed Sci Technol, 2004b, 32: 593-606
- [24] Tigabu M, Ode' n P C. Simultaneous detection of filled, empty and insect-infested seeds of three *Larix* species with single seed near infrared transmittance spectroscopy [J]. New Forests, 2004a, 27: 39-53
- [25] 孙群,李军会,王建华,等.乌拉尔甘草单粒种子硬实特性的近红外光谱分析[J].光谱学与光谱分析,2009,29(10):2669-2672
- [26] 孙群,李欣,李航,等.乌拉尔甘草种子硬实率的近红外光谱分析[J].光谱学与光谱分析,2010,30(1):70-73
- [27] 黄艳艳,朱丽伟,李军会,等.应用近红外光谱技术定性鉴别玉米纯度的研究[J].光谱学与光谱分析,2011,31(3):661-664
- [28] 黄艳艳,朱丽伟,马哈暗,等.应用近红外光谱技术定量分析玉米纯度的研究[J].光谱学与光谱分析,2011,31(10):2706-2710
- [29] Soltani A, Lestander T A, 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(5): 357-364
- [30] Tigabu M, Ode' n P C. Classification of viable and empty seeds of *Pinus patula* Schiede & Deppe with near-infrared spectroscopy and multivariate analysis [J]. New Forests, 2003a, 25: 163-176
- [31] Tigabu M, Ode' n P C. Near infrared spectroscopy-based method for separation of sound and insect-damaged seeds of *Albizia schimperiana*, a multipurpose legume [J]. Seed Sci Technol, 2003b, 31: 317-328
- [32] Tigabu M, Fjellstrom J, Ode' n P C, et al. Germination of *Juniperus procera* seeds in response to stratification and

- smoke treatments, and detection of insect-damaged seeds with VIS+NIR spectroscopy[J]. *New Forests*, 2007, 33: 155-169
- [33] 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, 27(2): 86-89
- [34] 康月琼, 郝风. 傅里叶变换近红外光谱法检测种子水分和生活力的研究[J]. *种子*, 2004, 23(7): 10-16
- [35] 徐荣, 孙素琴, 陈君, 等. 肉苁蓉种子成分及活力的红外光谱分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(1): 97-101
- [36] 阴佳鸿, 毛培胜, 黄莺, 等. 不同含水量劣变燕麦种子活力的近红外光谱分析[J]. *红外*, 2010, 31(7): 39-44
- [37] 朱丽伟, 黄艳艳, 杨丽明, 等. 用近红外光谱法快速无损检测苦豆子和决明子单粒种子生活力的研究[J]. *红外*, 2011, 32(4): 35-39
- [38] Aquila Dell. Pepper seed germination assessed by combined X-radiography and computer-aided imaging analysis[J]. *Biologica Plantarum*, 2007, 51(4): 777-781
- [39] Jalink H, Frandas A, Schoor R, et al. Chlorophyll fluorescence of the testa of *Brassica oleracea* seeds as an indicator of seed maturity and seed quality[J]. *Sci Agric Piracicaba*, 1998, 55: 88-93
- [40] Zhang M, Liu Y, Torn I, et al. Evolution of volatile compounds by seeds during storage periods[J]. *Seed Sci & Technol*, 1993, 221: 359-373
- [41] 伟利国, 张小超, 赵博, 等. 电子鼻技术及其在小麦活性检测中的应用[J]. *农机化研究*, 2010, 6: 150-152
- [42] Antihus H G, Wang J, Hu G X, et al. Electronic nose technique potential monitoring mandarin maturity [J]. *Sensors and Actuators B*, 2006, 113: 347-353
- [43] 陈能阜, 朱祝军. 利用 Q2 技术快速检测番茄种子引发后的活力[J]. *中国蔬菜*, 2010, 20: 47-51
- [44] 应义斌, 饶秀勤, 赵匀, 等. 机器视觉技术在农产品品质自动识别中的应用[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(1): 103-108
- [45] 成芳, 应义斌. 机器视觉技术在农作物种子质量检测中的应用进展[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(6): 175-179
- [46] Zayas I F, Flinn P W. Detection of insects in bulk wheat samples with machine vision[J]. *Trans of the ASAE*, 1998, 41(3): 883-888
- [47] Majumdar S D, Jayas S. Classification of cereal grains using machine vision: (I) Morphology models [J]. *Trans of the ASAE*, 2000, 43(6): 1669-1675
- [48] 赵新子, 吴巍. 玉米种子活力图像识别与处理技术研究[J]. *吉林农业大学学报*, 2004, 26(5): 572-576
- [49] 尤田束. 一个改进的农产品介电特性的测试系统[J]. *农业工程学报*, 1998, 14(2): 217-219
- [50] 王庆惠, 史建新, 巴寅亮, 等. 种子介电常数的测定及发芽试验[J]. *新疆农机化*, 2006, 4: 36-37
- [51] 米双山, 李百傲, 智慧. 基于种子介电特性的分选试验研究[J]. *中国农业大学学报*, 2003, 8(2): 15-17
- [52] 张敏华, 许乃章, 相士英, 等. 种子介电分选的主要参数与工作机理的研究[J]. *农业机械学报*, 1989(3): 44-50
- [53] 别传爽, 汪裕安. 种子的介电分选原理与装置研究[J]. *北京农业工程大学学报*, 1987, 7(3): 32-41

责任编辑: 袁文业