

崔华威,陶 飞,苗爱敏.种子发芽率无损检测方法研究进展[J].江苏农业科学,2019,47(20):9-12.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.20.003

种子发芽率无损检测方法研究进展

崔华威¹,陶 飞²,苗爱敏³

(1. 仲恺农业工程学院农业与生物学院,广东广州 510225; 2. 云南大学信息学院,云南昆明 650000;

3. 仲恺农业工程学院自动化学院,广东广州 510225)

摘要:种子发芽率是种子检验中的一个重要指标,无损、快速、准确地进行发芽率测定具有重要意义。综述了种子发芽率无损检测方法的研究进展,重点介绍了这些方法的原理、优点及在实际检测当中的应用效果,预测了发芽率无损检测发展方向,以期相关工作提供科学依据和参考。

关键词:种子发芽率;无损检测;研究进展

中图分类号: S330.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)20-0009-04

种子发芽率是种子检验中的重要指标,发芽率的高低与农业生产和种子经营有着密切的关系,在确定播种量以及种子生理研究方面具有重要的作用^[1]。目前,测定种子发芽率的主要方法有直接测定法和间接测定法,其中直接测定法是通过标准发芽试验来测定种子发芽率,而间接测定法则是通过测定种子物理、化学、生理特性等指标来间接估测发芽率^[2]。

直接测定法根据国家标准或相关规程规定的条件,在人工气候箱中进行试验,过程大多需要 1~2 周时间,检测结果准确,重复性好,在种子质量检验中被广泛应用。但是,该方法费时费力,不能迅速取得结果,特别是对于休眠期长的种子^[1]。另外,在大批量的种子采收、购销和调运中,往往因时间紧、任务重而来不及进行发芽试验。因此,选用间接测定法快速测定发芽率具有重要意义。

本文介绍种子发芽率间接测定方法,重点综述其中的无损检测方法,包括无损检测的原理、优点以及实际应用效果,并预测发芽率无损检测发展方向,以期相关工作提供科学依据和参考。

1 种子发芽率快速测定方法

传统的种子发芽率快速测定方法有染色法、电导率法、吸胀状态法、酶学方法等。其中,氯化三苯基四氮唑(TTC)染色法和酶学方法简便准确,应用广泛^[1]。

染色法为使用 TTC、刃天青和红墨水等对种子进行染色,观察不同活力种子染色效果的差异,探寻其与种子发芽率之间关联^[3-4]。电导率法基于不同裂变程度稻种膜结构完整性不同造成的电解质渗透差异,间接获取种子内部生化信息,然

后对发芽率进行预测^[5]。

种子在发芽吸胀初期的细胞膜重建和损伤修复能力影响电解质和可溶性物质外渗的程度,高活力种子细胞膜重建和损伤修复能力强,种子浸泡液的电导率低,电导率与发芽率呈明显的负相关关系,种子浸出液电导率测定曾被成功地应用于多种作物的种子发芽率测定^[6-7]。

吸胀状态法根据种子吸水后形态变化来判定种子活力及发芽率。有活力的种子浸入水中时,开始吸水比较缓慢,随后会趋于平衡;没活力的种子由于蛋白质变性,原生质体的透性提高,浸入水中后种子呈典型的水肿状态。据此可根据种子吸胀后的状态来判断种子发芽率的高低。史兆庆采用吸胀状态法成功测定了香椿种子发芽率^[8]。但该方法适用于自身比较干燥的种子,易受温度、种子质量、水质等因素影响,误差较大。

在种子储藏过程中,随着种子活力的降低,与呼吸有关的酶类(如过氧化氢酶、过氧化物酶以及谷氨酸脱羧酶等)活性降低。国内外大量研究表明,过氧化氢酶活性与种子发芽率具有极显著的相关性,可以通过过氧化氢酶活性大小预测种子发芽率^[1,9]。

上述发芽率间接测定方法虽然具有一定的适用性和准确性,但是会对种子造成破坏和损伤,检测过的种子发芽能力丧失,或贮藏性能明显降低。近年来,随着科技的不断发展,种子科学家们纷纷致力于研究无损的发芽率检验新技术,以期在不破坏种子结构及特性的前提下,更加准确、简便、快捷地评价种子质量和种用价值。

2 种子发芽率无损检测技术

种子发芽率无损检测方法是指在不破坏种子结构或特性的前提下,实现种子发芽率快速测定的方法,主要包括光谱技术、高光谱成像、质谱技术、软 X 射线造影、电子鼻、热成像、分色法、激光散斑技术和超微弱发光等。无损检测技术与传统测定方法的关系见表 1。

2.1 光谱技术

光谱学主要研究各种物质光谱的产生及其同物质之间的相互作用。光谱学技术(spectroscopy)主要包括近红外(NIR)、

收稿日期:2018-06-24

基金项目:云南省科技计划应用基础研究(编号:2017FB096);教育部重点实验室开放课题(编号:APCLI1606)。

作者简介:崔华威(1982—),男,河南西平人,博士,讲师,主要从事种子科学、种子信息学研究。E-mail: cuihuawei820303@163.com。

通信作者:苗爱敏,博士,副教授,主要从事自动化、农业信息学研究。

E-mail: am_miao@zju.edu.cn。

表 1 种子发芽率检测方法分类

检测方法	特点	方法与技术
直接测定法	—	标准发芽试验
间接测定法	破坏性方法	染色法、电导率法、吸胀状态法、酶学方法等
	无损检测方法	光谱技术、高光谱成像、质谱技术、软 X 射线造影、电子鼻、热成像、分色法、激光散斑技术和超微弱发光等

中红外 (MIR)、荧光 (fluorescence)、傅里叶变换红外 (FT-IR) 光谱技术以及拉曼光谱 (Raman spectra)、偏振光谱 (polarization spectra) 技术^[10], 在种子发芽率检测中常用的方法是近红外、偏振光谱技术。

近红外光谱 (NIRS) 技术利用近红外光照射样品, 依据某 1 种或多种化学成分在特定谱区的吸收特性来快速检测其在样品中的含量, 具有方便、快速、高效、准确、成本较低、不破坏样品、不消耗化学试剂、不污染环境等优点。当前使用 NIRS 技术来分析作物种子质量主要集中在水稻、玉米、燕麦、结缕草等作物上^[11-14]。

李毅念等提出一种基于近红外光谱技术的快速、无损测试杂交水稻种子发芽率的新方法, 发芽率预测值与真实值之间的相对误差在 4.2% 以内^[15]。另外 2 个针对稻种糙米的独立研究也表明, 可以建立基于近红外特征光谱的糙米发芽率预测模型, 模型在稻种糙米发芽率预测方面有较好的能力^[11,16]。此外, 研究显示, 结缕草种子的近红外光谱值与标准发芽率之间存在回归关系, 二者之间的相关系数达到 0.987^[14]。可见, 将近红外光谱技术应用于种子发芽率检验是可行的。

除了近红外光谱技术外, 还有学者利用偏振光谱技术预测稻种发芽率。偏振光谱技术是基于强度、偏振度及偏振角信息, 对目标成分进行非接触检测的新技术。程宇琼等提出基于连续偏振光谱技术实现稻种发芽率快速、无损检测的方法^[5], 利用获取的连续偏振光谱构建稻种发芽率预测模型, 结果显示, 模型预测精度较高 (相关系数为 0.976, 相对误差为 0.85%), 利用连续偏振光谱技术也能实现稻种发芽率的无损、快速检测。

2.2 高光谱成像

高光谱成像 (hyperspectral imaging) 是包含大量窄波段影像的成像技术, 结合了传统的成像和光谱学技术, 能够同时获得检测对象的空间和光谱信息, 在种子品种识别、种子成分检测、病虫害检测等方面具有很大的应用潜力^[17]。

李美凌等利用高光谱图像技术对水稻种子活力进行检测研究, 将老化 48 h 与未老化的稻种进行对比分析, 得出高光谱技术可以用于鉴定稻种活力的结论^[18]。于施森等将南粳 46 水稻作为研究对象, 利用高光谱成像技术预测稻种发芽率, 根据稻种不同区域特征波长的光谱数据建立预测模型并加以比较, 结果表明, 利用高光谱成像技术检测糙米发芽率是可行的^[2]。

董高利用高光谱成像技术进行单籽粒小麦发芽预测, 分析了单粒发芽与未发芽小麦籽粒之间的光谱差异, 建立发芽与未发芽籽粒预测模型, 二者的平均正确识别率能达到 72.5%^[17]。Matzrafi 等利用高光谱成像技术对长芒苋 (*Amaranthus palmeri*) 种子进行研究, 发芽种子和不发芽种子的区分准确度分别为 81.9% 和 76.4%^[19]。表明利用高光谱

成像技术进行单粒籽粒发芽预测存在一定可行性。

2.3 质谱方法

质谱法 (mass spectrometry) 是一种与光谱并列的谱学方法, 通过电场和磁场将物体运动的离子按质荷比分离并进行检测的方法。

表面解吸常压化学电离质谱 (DAPCI-MS) 是常使用的种子发芽率无损检测方法, 可在常温、常压和未经样品预处理的前提下对样品表面进行直接分析, 具有无损、快速、能分析复杂样品等优点。罗丽萍等采用 DAPCI-MS 结合化学计量学方法, 实现了新鲜和陈年莲子的快速鉴别^[20]。殷勤等对小粒咖啡种子进行人工老化处理, 得到发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数明显不同的 7 份种子样品, 采用 DAPCI-MS 获得咖啡种子表面的化学指纹图谱和质谱信息特征, 结果表明, DAPCI-MS 技术能有效区分 7 份咖啡种子^[21]。姜翠翠等利用 DAPCI-MS 技术测定萝卜种子中的芥子碱含量, 结果发现, 老化程度越高, 萝卜种子中芥子碱的含量越大, 萝卜种子的发芽率和发芽势相应的降低, 认为芥子碱可以作为种子质量标记物, 该方法无需样品预处理, 检测速度快, 可作为新型的种子发芽率无损检测方法^[22]。

此外, 质谱法可以和色谱技术联用, 结合质谱的高灵敏度、强鉴别能力和色谱的高分辨率, 例如目前较成熟的气相色谱-质谱联用 (GC-MS) 技术, 被广泛应用于复杂组分的分离与鉴定。李海燕等将 6 种观赏辣椒亲本及其组配的 3 种 F₁ 代种子作试验材料, 采用 GC-MS 技术对辣椒种子中的脂肪酸成分进行分析及鉴定, 发现种子发芽率与棕榈酸含量、硬脂酸含量存在极显著负相关性, 在辣椒生产栽培中可以通过检测脂肪酸含量快速测定种子发芽率^[23]。

2.4 软 X 射线造影

软 X 射线造影 (soft X-ray imaging) 是利用长波 X 射线的一种透视摄影, 具有射线能级弱、成像清晰、分辨力高等特点。随着 X 射线机的发展和造影技术的进步, 这一技术的应用越来越广泛, 如医学中对软组织肿瘤的诊断、轻薄金属及非金属的探伤以及文物考古等。20 世纪 60 年代以来, 种子科技领域开始引进并应用这一技术^[24]。

软 X 射线造影早期主要被用于查定空粒和虫害粒种子^[25], 之后开始被用于种子发芽率检测研究。顾德发通过小麦种子软 X 射线胶片判读出的发芽率与实际发芽率之间无显著差异^[24]。郑郁善等使用软 X 射线仪对壳斗科 14 个树种的 536 份种子进行研究, 结果表明, 各树种种子的 X 光胶片判读值与实际发芽率之间没有显著差异^[26]。此外, 针对甜椒种子、小桐子种子和油松种子的研究也表明, 可以根据 X 射线图像判读值来预测种子的发芽率^[25,27-28]。

2.5 电子鼻

电子鼻 (electronic nose) 技术是利用气体传感器阵列识别气味的电子系统, 它可以实时、连续地监测特定部位的气味

状况。与普通化学分析仪器不同,通过该技术得到的不是被测样品中某种或某几种成分的定性与定量结果,而是样品中挥发成分的整体信息,也称“指纹”数据^[29]。

Jonsson 等提出将电子鼻技术用于谷物品质检测的方法,通过对微生物活动时释放出的气味进行检测,实现了对谷物品质的预测^[30]。程绍明等利用电子鼻技术对发芽率分别为 90%、80%、70%、60%、50% 和 0 的 6 个番茄种子样品进行分析,结果表明,电子鼻技术可以很好地区分出番茄种子发芽率为 90%、80%、50%~70% 和不发芽 4 种情况;当种子发芽率为 70%、60%、50% 时,其图形信息部分重叠,利用电子鼻技术较难将其区分开^[31],表明该技术目前在种子发芽率预测方面还处于起步阶段,准确度还有待提高。

2.6 热成像

热成像(thermal imaging)又称红外热成像(简称 TIS),是指利用红外探测器和光学成像物镜获得物体表面红外热像图的技术,图像上不同颜色代表被测物体的不同温度。TIS 可以清晰、准确、直观地提取物体表面温度幅度与分布的微小变化,观察到人眼无法观测到的物体外形轮廓或表面热分布^[32]。

研究表明,种子萌发过程中产生的代谢热可以描述种子的新陈代谢水平,而新陈代谢水平的高低正是反映种子活力高低的重要指标^[33]。因此,种子温度的变化必然与种子的活力有着密切的联系,对种子温度信息的捕捉可以用来推测种子的活力水平。Kranter 等首先提出将红外热成像技术应用于种子活力检测,用红外热成像仪捕捉 5 种老化程度不同的豌豆种子在吸水萌发过程中的温度变化,证实了红外热成像技术在种子活力检测中的可行性^[33]。Fang 等基于稻种老化时间不同时的物理学和生理学差异,提出一种基于红外热成像技术无损检测稻种发芽率的方法,建立了稻种发芽率的红外热模型,结果表明,所建模型在稻种发芽率无损检测方面有较高的精度(相关系数和标准偏差分别为 0.900 3 和 4.101 2)^[34],证实采用红外热成像技术检测稻种发芽率是可行的。

2.7 其他技术

由于无损、快速测定种子发芽率的现实需要,除了上述技术外,研究人员纷纷致力于对其他技术的开发,目前已报道的有分色法、激光散斑技术(laser speckle)和超微弱发光(ultra-weak luminescence)等。

分色法根据种皮颜色预测种子发芽率。吴国平等根据比色卡将三叶芹种子按颜色分组,再将分组种子的百分比数分别与相应颜色的发芽率统计数据相乘之后求和,结果作为待测定三叶芹种子发芽率的预测值,经过和标准试验结果对比发现,分色法预测出的发芽率与实际发芽率之间无显著差异,可用作种子质量检验^[35]。

激光散斑是指当激光照射在相对粗糙物体表面上时形成的随机干涉图样,散斑特征可以反映种子内部粒子的活跃程度,指示种子的活力大小。李黔渝等通过激光散斑成像技术,利用栓皮栎种子内部散射粒子的动态变化与激光散斑变化的对应关系,通过图像处理技术分辨种子内部粒子的活跃程度,结果发现,其与种子发芽情况及种子活力具有较高的一致性,认为可以利用激光散斑技术对种子发芽情况进行快速测定^[36]。

超微弱发光是一种低水平的生物发光,反映了生物体细胞内和细胞间的新陈代谢、功能调解和信息交换,是生物体生长代谢的动态指标^[37]。研究表明,经过电磁辐射处理的大豆生活力比未处理的种子大大增强,而同时其超微弱发光值也显著增加;而当采用代谢抑制剂处理绿豆种子后,种子活性大大降低,其超微弱发光值也同时降低^[38]。王春芳等对贮藏 0~24 个月的稻谷和小麦种子进行了超弱发光分析,结果发现,贮藏期间稻谷的超弱发光值与其发芽率之间呈良好的非线性关系,而小麦的超弱发光值与其发芽率之间呈良好的线性关系,所获模型可以很好地通过稻谷和小麦的超弱发光值来预测其发芽率^[39]。

3 结论与展望

光谱学、高光谱成像和质谱法通过检测某种化学成分的光谱和质谱信息,间接计算出该化学成分在种子中的含量,进而探讨该成分与发芽率之间的相关性。软 X 射线法通过射线的穿透性,呈现种子内部完整结构,通过内部结构分析,寻找其与发芽率之间的关系。

电子鼻和热成像技术分别检测种子的挥发气味和表面热分布,探讨其与种子发芽率之间的关联。分色法、激光散斑技术和超微弱发光方法分别尝试从种子颜色、散斑特征和生物发光角度,建立检测结果与发芽率之间的关联,实现对发芽率的间接测定。

综上所述,上述发芽率无损检测方法通过分析种子的物理(光谱、质谱、热成像、X 光图像、种皮颜色及散斑)和化学(挥发气味)特征,探讨这些特征与发芽率之间的相关性,因此都是间接测定法。

由于种子发芽是一个动态过程,牵涉到诸多内部生理变化,而上述方法均从单一角度和指标进行发芽率检测,结果的精确性和准确性很难保证。因此归纳发芽率无损检测目前存在的问题。(1)间接性。以上发芽率无损检测方法通过分析种子的物理、化学特征,探讨该特征与发芽率之间的相关性,间接得出该特征与发芽率之间的相关关系。间接性带来了无损、快速等优点,但准确性却难以保证。(2)单一性。上述方法针对单一理化特征进行测定,而这一特征与发芽率之间只是存在一定相关性,造成结果的预测成分大于实际成分,因此,这些方法更准确地讲是发芽率预测方法而不是检测方法。(3)波动性。以上方法大多选定一个作物品种作试验材料,没有考虑该方法对不同品种、不同收获条件和贮藏时间种子进行检测时结果的波动性,方法的适用性、稳定性与可靠性还有待进一步研究。

基于以上分析认为,种子发芽率无损检测今后可以从以下方面开展。

(1)加强理论研究。重点研究种子萌发过程中内部生理生化指标变化,明确种子发芽率与种子活力及生活力的内在区别,基于有发芽能力和无发芽能力种子的生理差异,研发更具针对性的种子发芽率无损检测技术。(2)综合使用现有无损检测方法。针对具体作物筛选出 2~3 种有效方法同时使用,方法之间相互印证或弥补不足,使用多个测定结果综合预测具体发芽率数值,提高预测准确度。(3)加大样本种类和数量。加强数据收集,针对大量品种,尽可能多地收集不同收

获条件、不同贮藏状况种子样本,建立更具普适性的发芽率无损检测技术,从总体上明确该技术的适用范围及准确度。

参考文献:

- [1] 石亚萍,蔡静平. 玉米种子发芽率快速测定方法的研究[J]. 中国粮油学报,2008,5(6):181-183.
- [2] 于施森,卢伟,梁琨,等. 基于高光谱成像技术结合 PCA-GRNN 的糙米发芽率检测方法研究[J]. 激光与光电子学进展,2015,52(11):261-268.
- [3] 李双铃,袁美,任艳,等. 花生种子发芽率快速测定法[J]. 花生学报,2004,33(4):30-32.
- [4] Min T G, Kang W S. Simple, quick and nondestructive method for Brassicaceae seed viability measurement with single seed base using resazurin[J]. Horticulture Environment and Biotechnology,2011,52(3):240-245.
- [5] 程宇琼,卢伟,洪德林,等. 连续偏振光谱的稻种发芽率检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,2016,36(7):2200-2206.
- [6] Mavi K, Powell A A, Matthews S. Rate of radicle emergence and leakage of electrolytes provide quick predictions of percentage normal seedlings in standard germination tests of radish (*Raphanus sativus*) [J]. Seed Science and Technology,2016,44(2):393-409.
- [7] 李永刚,王正旭,杨民峰,等. 电导率法测定烟草种子发芽率的研究[J]. 安徽农业科学,2008,36(34):15052-15052,15058.
- [8] 史兆庆. 香椿种子发芽率测定方法的研究[J]. 山西林业科技,2002(1):9-11.
- [9] Ayşe A K, Yücel E, Sezgin A. Relationship between seed germination and catalase enzyme activity of *Abies taxa* from Turkey [J]. Kastamonu University Journal of Forestry Faculty, 2012, 12(3):185-188.
- [10] Rahman A, Cho B K. Assessment of seed quality using non-destructive measurement techniques; a review [J]. Seed Science Research,2016,26(4):285-305.
- [11] 卢伟,李欢欢,洪德林,等. 基于稻种糙米近红外光谱分析技术的发芽率检测方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2016,37(2):183-187.
- [12] 尹淑欣,杨冬风,汪秀志,等. 近红外光谱技术在玉米种子活力检测中的应用研究[J]. 现代农业科技,2015(13):20-21,23.
- [13] 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):86-90.
- [14] 戴子云,梁小红,张利娟,等. 近红外光谱技术的结缕草种子发芽率研究[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(10):2642-2645.
- [15] 李毅念,姜丹,刘璵璵,等. 基于近红外光谱的杂交水稻种子发芽率测试研究[J]. 光谱学与光谱分析,2014,34(6):1528-1532.
- [16] 李欢欢,卢伟,洪德林,等. 基于特征光谱和 GRNN 的糙米发芽率快速检测方法研究[J]. 激光与光电子学进展,2015,52(11):287-293.
- [17] 董高. 小麦发芽特性高光谱成像快速检测研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2015.
- [18] 李美凌,邓飞,刘颖,等. 基于高光谱图像的水稻种子活力检测技术研究[J]. 浙江农业学报,2015,27(1):1-6.
- [19] Matzrafi M, Hermann I, Nansen C, et al. Hyperspectral technologies for assessing seed germination and trifloxysulfuron-methyl response in *Amaranthus palmeri* (Palmer Amaranth) [J]. Frontiers in Plant Science,2017,8:47401-47413.
- [20] 罗丽萍,赵占锋,戴喜末,等. 表面解吸常压化学电离质谱结合人工神经网络鉴别新陈莲子[J]. 农业工程学报,2013,29(7):261-266.
- [21] 殷勤,罗火林,刘星星,等. 基于表面解吸常压化学电离质谱法快速评价咖啡种子活力[J]. 分析化学,2016,44(2):198-204.
- [22] 姜翠翠,胡斌,崔莎莎,等. 表面解吸常压化学电离质谱法快速测定萝卜种子活力[C]//全国质谱大会暨世界华人质谱研讨会,2010.
- [23] 李海燕,王家胜,陆波,等. 观赏辣椒种子中脂肪酸与萌发相关性的研究[J]. 种子,2015,34(4):79-82.
- [24] 顾德发. 应用软 X 射线仪快速检定小麦种子生活力[J]. 上海农业科技,1981(1):14-16.
- [25] 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.
- [26] 郑郁善,郑盛培. 格氏栲等树种种子发芽率的射线检验[J]. 福建林学院学报,1994(1):23-26.
- [27] Gagliardi B, Marcos-Filho J. Relationship between germination and bell pepper seed structure assessed by the X-ray test[J]. Scientia Agricola,2011,68(4):411-416.
- [28] 马秋月,许静洁,王添添,等. IDX 法测定油松种子生活力的研究[J]. 中南林业科技大学学报,2013,33(3):75-78.
- [29] 于慧春,王俊,张红梅,等. 龙井茶叶品质的电子鼻检测方法[J]. 农业机械学报,2007,38(7):103-106.
- [30] Jonsson A, Winquist F, Schnürer J, et al. Electronic nose for microbial quality classification of grains[J]. International Journal of Food Microbiology,1997,35(2):187-193.
- [31] 程绍明,王俊,马杨晖,等. 基于电子鼻的番茄种子发芽率检测[J]. 农业工程学报,2011,27(12):132-135.
- [32] 于征,方芳,彭抒登,等. 基于新兴技术的种子活力检测方法研究[J]. 种子,2012,31(8):52-55.
- [33] Kranner I, Kastberger G, Hartbauer M, et al. Noninvasive diagnosis of seed viability using infrared thermography[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2010,107(8):3912-3917.
- [34] Fang W H, Lu W, Xu H L, et al. Study on the detection of rice seed germination rate based on infrared thermal imaging technology combined with generalized regression neural network [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2016,36(8):2692-2697.
- [35] 吴国平,姚悦梅,戴忠良,等. 一种快速测定三叶芹种子发芽率的方法:CN201010163661.8[P]. 2010-09-15.
- [36] 李黔渝,康永祯,赵瑛琦. 基于激光散斑检测栓皮栎种子活力的研究实验[J]. 农业科技与信息,2016(19):104-106.
- [37] 张新华,杨洪强. 植物的超微弱发光[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2003,34(4):605-608.
- [38] 张仲伦. 微弱发光分析技术应用实例(四)[J]. 生物化学与生物物理进展,2000,27(1):101-103.
- [39] 王春芳,詹耀,胡菲菲,等. 基于超弱发光技术的稻谷和小麦种子发芽率检测[J]. 中国粮油学报,2013,28(2):105-109.