

〈综述与评论〉

近红外光谱技术在种子硬实检测中的研究进展

陈玲玲^{1,2}, 夏方山¹, 毛培胜¹, 朱艳乔¹

(1.中国农业大学草业科学系草业科学北京市重点实验室, 北京 100193;

2.赤峰市农牧科学研究院草原研究所, 内蒙古 赤峰 024031)

摘要: 近红外光谱分析技术由于其独特的技术优势在许多领域中已得到广泛应用。简要阐述了近红外光谱分析技术的概念及其在无损检测中的应用情况, 综述了近红外光谱技术在种子硬实测定中的应用情况, 在此基础上介绍了利用近红外光谱分析技术测定种子硬实率的方法, 并提出了存在的问题及发展方向。

关键词: 近红外光谱; 硬实率; 硬实特性; 无损检测

中图分类号: TN219 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2015)09-0793-06

Application of Near Infrared Spectroscopy (NIR) Technique in Hard Seed Testing Research

CHEN Ling-ling^{1,2}, XIA Fang-shan¹, MAO Pei-sheng¹, ZHU Yan-qiao¹

(1. Department of Grassland Science, China Agricultural University, Beijing Key Laboratory of Grassland Science, Beijing 100193, China;

2. Chifeng Academy of Agricultural and Animal Sciences, Institute of Grassland Research, Chifeng 024031, China)

Abstract: Near infrared spectroscopy(NIR) has been used widely in many research areas because of its unique technical advantages. In this paper, the NIR technique's concept and its application situation in non-destructive testing were briefly illustrated, and the method for determination of the hard seed percentage with NIR were introduced in detail on the basis of reviewing the application of NIR on qualitative identification of the hard seed percentage. Also, the existing problems and research direction were issued. The aim of this paper was to provide assistance in researching on the non-destructive testing method for hard seed percentage. It will be meaningful to help the future researches on the traits of hard seeds.

Key word: near infrared spectroscopy, hard seed percentage, hard-seededness, non-destructive testing

0 引言

硬实是一种种子休眠形式, 广泛存在于植物种子中, 豆科、茄科、藜科、苋科等栽培作物及杂草种子中常见^[1], 其中豆科植物种子中最多见^[2]。硬实产生的原因是由于种皮致密、不透水或透水性差, 从而不能吸胀发芽, 也被称为不透水或石种子^[3]。在实际生产中, 硬实率高的种子, 由于其渗透性能差, 导致播种出苗率低, 出苗不整齐, 给生产带来诸多不便。然而, 相关研究表明, 硬实种子的发芽势、发芽指数、活力指数以及抗逆能力显著高于非硬实种子^[4-5]; 在贮藏过程中, 硬实种子的种皮限制水分和氧气的进入,

收稿日期: 2015-04-04; 修订日期: 2015-05-16。

作者简介: 陈玲玲 (1982-), 女, 蒙古族, 内蒙古赤峰人, 博士生, 主要从事牧草种子生产与生理研究。E-mail: chenlingling001@126.com。

通讯作者: 毛培胜 (1970-), 男, 博士, 教授, 主要从事牧草种子生理与良种扩繁研究。E-mail: maops@cau.edu.cn。

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题, 编号: 2011BAD17B01-02; 中央高校基本科研业务费专项资金资助: 2014JD025。

防止微生物的侵染, 能有效地保护种子的活力, 有利于延缓种子劣变。因此, 研究硬实种子和非硬实种子的种皮结构, 进一步探索硬实机理, 对种质保存具有特别重要的意义。但由于硬实种子和非硬实种子没有外部形态上的差异, 到目前为止还没有有效的无损鉴别和分离方法。目前仍然采用浸种法测定种子的硬实率^[6], 这种方法费时, 而且浸泡后的非硬实种子的种皮结构和化学成分会发生不同程度的改变, 不利于研究硬实机理。近几年, 国内广泛采用近红外光谱分析技术鉴别种子硬实特性^[7-9], 为植物种子硬实特性的无损判定提供了一种可能。本文针对近红外光谱技术无损检测技术的应用情况进行简要介绍, 并详细阐述种

子硬实率的测定步骤和应用现状,以期为近红外光谱技术应用于硬实种子无损检测提供参考。

1 近红外光谱无损检测技术

近红外光谱是指位于可见光谱区(380~780 nm)与红外光谱区(2600~25000 nm)之间的一段电磁波谱,即波长介于780~2526 nm的光区^[10]。近红外光谱分析技术(Near infrared spectroscopy,简称NIR)是20世纪80年代后期迅速兴起的一种快速检测技术^[11],它具有测试简单、速度快、效率高、测量范围广、测试过程无污染、检测成本低、对样品无损伤等特点^[12]。在农业领域中主要应用于果蔬、谷物、饲料、牧草、种子、土壤等的无损检测。在果蔬中主要测定品质、糖度、酸度、含水量、叶绿素含量、水果坚实度以及农药残留度等^[13-17];在农作物中主要检测谷物品质、硬度、病害、转基因作物等^[18-22];在饲料检测中主要对玉米、甜菜、豆粕、鱼粉、肉骨粉等饲料原料进行品质分析或者对饲料中的蛋白质、粗脂肪、粗纤维、维生素、矿物质以及有效能等进行检测^[23-26];在牧草中主要用于牧草营养成分含量测定、病虫害预测、抗性鉴定、品种鉴定、草坪草质量鉴定、茎叶比和产草量的测定等^[27-30];在种子检测中主要用于种子纯度、活力、含水率、发芽率等质量检测以及品种、硬实率、品质性状等的检测^[31-33];在土壤中主要用于检测土壤氮、磷、钾等养分含量、碳含量、含水量的测定以及对不同粒级的土壤进行检测分类等^[34-36]。近红外光谱检测技术由最初的检测谷物养分含量发展到果蔬、土壤、牧草等的微量元素、有害成分及氨基酸含量的分析,从基础研究发展到田间检测,应用范围越来越广。相信,随着科技的进步,研究的不断深入,近红外光谱无损技术势必会开辟更多的应用领域。

2 近红外光谱技术在种子硬实测定中的应用

硬实常见于豆科作物,常见的有大豆、豌豆、紫花苜蓿、扁蓿豆、胡枝子、黄芪、草木樨、三叶草、红豆草、甘草、决明子等。硬实是种子处于逆境时的一种自我保护状态,但在实际生产中,硬实并非人们所需。目前,近红外光谱技术在种子硬实方面的应用比较少,在乌拉尔甘草、大豆、苦豆子、决明子与紫花苜蓿种子硬实测定中有相关报道^[7-8,33-37]。

2.1 乌拉尔甘草种子硬实特性的检测

在国内,孙群等^[7]于2009年首次利用近红外光谱技术对乌拉尔甘草单粒种子的硬实性进行了鉴别研究。在该研究中,作者选择244粒种子,其中硬实和非硬实种子比例为1:1,采用定性偏最小二乘法,在波

数4000~8000 cm⁻¹光谱区范围,建立了单粒种子的硬实特性定性分析模型,结果表明,所建立的硬实种子和非硬实种子预测模型准确率分别为92.5%和96.56%,模型较为稳定,误判的情况很大部分是由于种子的硬实率与非硬实率较为接近产生的。在该研究中硬实和非硬实种子的近红外光谱的吸收峰完全一样,仅通过吸收峰无法区分硬实种子和非硬实种子。次年,作者对不同产地、不同年份的112份乌拉尔甘草种子的硬实率进行了定量鉴别分析,模型的相关系数在90%以上,建模标准差与预测标准差在10左右,该模型与之前模型效果相当^[33]。但是,该模型对硬实率较低(<5%)的样品,其预测结果相对较差。考虑到硬实率测定方法的差异,作者采用24 h浸泡法和5 d浸泡法分别建立预测模型,结果表明,采用5 d浸泡法所建立的模型预测效果显著高于24 h浸泡法所建立的模型。在该研究中,所选样品的硬实率分布在0.3%~99.3%,覆盖了所有样品的硬实率,其适用性高,为建立其它作物种子硬实率快速检测模型奠定了基础。

2.2 大豆、苦豆子和决明子种子硬实特性的检测

在前人的研究基础上,朱丽伟等^[8]选择不同光谱范围和不同光谱预处理方法建立了大豆、苦豆子和决明子单粒种子的硬实特性定性鉴别模型,比较了3种豆科作物种子的建模效果,鉴定了近红外光谱技术在种子硬实率检测中的普遍性。结果表明,大豆种子选择4000~5000 cm⁻¹光谱区范围,采用矢量校正方法预处理光谱,用偏最小二乘法建立硬实率预测模型,其鉴别率在86%以上;决明子种子选择4000~8000 cm⁻¹光谱区范围,采用一阶导数法预处理光谱,用偏最小二乘法建立硬实率预测模型,其鉴别率在90%左右,苦豆子种子选择4000~8000 cm⁻¹光谱区范围,采用二阶导数法预处理光谱,用偏最小二乘法建立硬实率预测模型,其鉴别率在95%以上,表明所建模型稳定、可靠,可以很好地应用于单粒种子硬实率的检测。

以上研究主要关注硬实和非硬实种子的定性分类或者种子硬实率的定量检测,没有对种子的硬实程度予以关注。

2.3 紫花苜蓿种子硬实特性的检测

王昕洵^[37]利用近红外光谱分析技术分别针对种子硬实率和硬实程度建立了紫花苜蓿种子硬实率预测模型和硬实程度分析模型。在建立硬实率预测模型时,选取不同产地、不同品种和不同年份的紫花苜蓿种子样品共121份,硬实率范围分布在0.2%~33.6%,用24 h浸泡后的硬实比率作为自然状态下的硬实比率,采用偏最小二乘法,一阶导数预处理,在全光谱范围内建立预测模型。所建模型的建模相关系数为

92%，说明模型的拟合效果较好，而相对标准误差为1.9，未能 >2.5 ，较低的相对标准误差值说明模型的预测能力较差。为获得较为准确、可靠的预测模型，扩大了样品覆盖范围，人工调整了不同梯度硬实率的紫花苜蓿种子样品，硬实率分布范围为20%~80%，间隔为2%，共31份样品。最终获得的光谱模型的建模相关系数为98.16%，相对标准误差为3.58，模型的预测能力相对增强，能够粗略地估测苜蓿种子硬实率；在建立硬实程度分析模型时，利用分步浸种法分别浸泡1~5天，获得了5个不同硬实程度的种子($H_1 \sim H_5$)，采用主成分分析法和马氏距离法，对不同硬实程度的紫花苜蓿种子进行鉴别分析。结果表明，5个类别不同硬实程度种子的预测模型，误判率为25%，判别率为75%，实际应用的意义不大。考虑到建模样品本身或者建模光谱存在信息混杂或者重叠，对误判的样品进行归属类别并进行分析。分析结果表明，在5个不同硬实程度样品中， H_2 、 H_3 、 H_4 的误判数最多，而 H_1 和 H_5 只出现了1个误判。因此，选择 H_1 和 H_5 的共38个样品重新建立紫花苜蓿种子硬实程度预测模型，结果表明，2个类别不同硬实程度种子的模型预测能力有所提高，误判率为5%，判别率为95%，所建模型能较好地判别两种类别的不同硬实程度的种子。如果进一步修正模型，并且增加样品数量和信息覆盖量，能有助于提升模型的预测能力。

3 近红外光谱技术检测种子硬实率的流程

利用近红外光谱技术检测种子硬实率包括以下几个步骤：①样品的选择；②光谱的采集；③浸泡法测定种子的硬实率；④光谱的预处理；⑤光谱范围的选择；⑥样品集的划分；⑦模型的建立；⑧模型的检验与评价。

3.1 样品的选择

样品的选择是一个重要的环节，直接影响到分析结果的准确与否，因此选择种子时尽可能多地搜集包含多种变异因素的样品，确保模型的适用性。可以选择不同地区、不同年份或者不同品种的种子，尽可能地包含那些分布在两端即最高、最低范围内的样品，但是尽量选择颗粒度大小、颜色以及含水量一致的种子。Willimas^[38]研究了谷物颗粒度大小对近红外光谱分析结果的影响，发现颗粒度大小是影响近红外光谱测试结果准确性的最重要的因素，颗粒度大，其吸光度大，波长长，表明样品粒度大小对近红外光谱测试结果有显著影响；之后，王文真^[39]研究粉碎粒度对近红外分析结果的影响，验证了这个结果；胡新中等^[40]研究麦粉含水量、粗细度和开机预热时间对NIR测定

结果的影响，发现样品含水量和粗细度对测定结果有极大影响。建模样品涵盖的信息要全面，但也不是越多越好，样品数量过大会有信息重叠和引入更多分析误差的问题，所以一般建模样品数应不小于50个，不宜超过300个^[41]。

3.2 光谱的采集

随机选取干净、完整、大小一致的种子，放入样品杯中，轻摇使表面平整，并使用漫反射光进行光谱采集。为了能尽量消除由装样紧实度不同和粒度差异带来的误差，每个样品重复扫描3次，将3次扫描的平均光谱作为样品的最终分析光谱，每次都进行重新装样和背景扫描^[42]。对于单粒种子，应分别采集种子正面和背面的不同位置的光谱，最后以平均值作为单粒种子的近红外光谱^[7]。

3.3 硬实率的测定

采用公认的浸泡法测定种子硬实率，即每个样品都随机选取完整饱满、大小一致的种子100粒，在25℃恒温下用蒸馏水浸泡24h后，统计未吸胀种子数，3次重复，最后取平均值，带入公式计算硬实率^[7,37]：

$$\text{硬实率} (\%) = (\text{平均未吸胀种子数}/100) \times 100$$

3.4 光谱预处理

光谱采集过程会受到环境、样品状态而引起噪声，导致光谱的不重复或者基线漂移。为了建立一个稳定、准确的校正模型，在建模前需对光谱进行预处理，滤除噪声，净化光谱信息。预处理方法主要有平滑处理、归一化和基线校正^[42]。平滑处理的目的在于消除高频噪声的干扰，提高信噪比。但此方法在平滑噪音的同时也平滑了分析信号，使信号失真，降低了光谱分辨率。归一化处理的目的是消除因样品的稀释或光程的变化而引起的对光谱产生的影响。基线校正常用的方法是对光谱进行导数处理。对光谱进行一阶导数处理能解决基线的偏移，进行二阶导数处理能消除基线的漂移^[11]。孙群^[7]研究不同预处理方法对乌拉尔甘草单粒种子硬实率鉴别模型预测结果的影响，发现光谱预处理与不处理无显著差异，可以直接选择4000~8000 cm⁻¹光谱范围建立硬实率预测模型。朱丽伟等^[8]研究不同预处理方法对大豆、决明子和苦豆子硬实特性的定性分析模型鉴别率的影响，发现中心化、导数处理等方法能提高模型的鉴别率，但效果不明显。因此，在预处理方法的选择上，应根据样品的特性选择不同的处理方法进行比较研究，选择最佳组合。

3.5 光谱范围的选择

在全谱区范围内，不同波长处所吸收的信息对建模的贡献不同。有些波长处，因干扰或者杂质等产生的吸收会存在测量误差，影响模型的准确度。因此，

为了避免这些谱区的误差影响模型的准确度和稳定性, 建模前, 需要对光谱区进行筛选, 找出最有效的光谱区域。通常采用方差处理的方法, 选择光谱变化最明显的区域, 即是最有效的光谱区域^[43]。相关研究表明, 对农作物种子硬实率的研究中, 最适合的光谱区范围为 4000~8000 cm⁻¹^[7-8]。

3.6 样品集的划分

建模之前, 将样品的硬实率按从大到小依次排列, 以 2:1 的比例分为校正集 (Calibration set) 和验证集 (Validation set), 分集时尽可能使两个集合中样品的硬实率分布大致相同, 其最大值、最小值、平均值以及标准差分布一致, 使硬实和非硬实种子数的比值为 1:1^[37]。

3.7 模型的建立

采用化学计量学方法建立种子硬实率的近红外光谱校正模型。NIRS 分析方法中常用到的化学计量学方法为: 偏最小二乘法 (Partial Least Square, PLS), 主成分回归法 (Principle Component Regression, PCR) 和多元线性回归法 (Multivariate Linear Regression, MLR)。PCR 主要服务于定性分析, 而 PLS 主要用于定量分析^[11,43]。孙群^[7]选择 244 粒乌拉尔甘草种子, 采用定性偏最小二乘法 (DPLS), 建立了单粒种子的硬实特性定性分析模型, 模型的鉴别率为 95%, 预测效果准确; 之后, 选择 115 份甘草种子, 采用定量偏最小二乘法 (QPLS), 建立了种子硬实率的定量分析模型, 模型的预测准确率在 90% 以上^[33]。王昕洵^[37]在建立紫花苜蓿种子硬实率的预测模型时, 选择 PLS、PCR、SMLR 三种不同回归方法, 比较了模型的预测能力, 结果表明, 用 PLS 法所建模型预测能力最好; 而建立不同硬实程度紫花苜蓿种子的近红外分析模型时, 采用 PCR 法建立了定性分析模型。

3.8 模型的检验与评价

建立模型以后, 需对模型进行检验, 确定其可靠性, 再分析待测样品。一般利用校正集的样品建立校正模型, 进行检验。具体方法为: 从校正集中抽出一个或几个样品, 以剩余样品新建模型, 再利用该新建模型预测抽出样品, 通过比较预测值和真实值的相近程度来评价模型预测效果。模型准确性的评价指标有相关系数、预测残差平方和、建模标准差、预测标准差等。一个好的定标模型, 要有较高的相关系数, 低的建模标准差和预测标准差, 且预测标准差接近或略大于建模标准差为宜, 预测残差平方和越小越好^[37,43]。

4 问题与展望

目前, 普遍采用浸种法判断种子的硬实性, 在统

计硬实率时存在着不同的统计方法, 如浸泡 24 h 后统计硬实种子或者发芽结束后统计硬实种子。两种统计法所建立的预测模型效果有差异。近年来, 有学者尝试研究其它无损分离硬实种子和非硬实种子的新方法, 如液体比重法、冷冻胶体二氧化硅法等, 但是这些方法也存在着缺陷, 对有些作物种子上不适用。在建模时可以针对不同的作物种子选择不同的硬实率判别法, 比较不同判别法所建模型的预测能力。

近红外光谱技术在种子硬实特性方面的研究很少。近几年, 国内学者尝试建立了乌拉尔甘草、大豆、苦豆子、决明子和紫花苜蓿种子的硬实特性的预测模型, 为无损检测豆科作物种子的硬实特性提供了一种可能性。由于不同作物种子的硬实率和硬实程度不同, 近红外光谱检测技术对有些作物种子的硬实率预测效果好, 对有些作物则不理想。因此, 今后研究的一个重点是扩大样品范围和研究对象, 完善预测模型, 提高预测能力和适用范围, 得到准确、稳定、简单、快速的检测种子硬实率的方法, 并将其应用到实际生产中。

参考文献:

- [1] 杜建材, 王照兰, 赵丽丽, 等. 不同处理方法破除扁蓿豆品种 90-36 种子硬实的效果研究[J]. 种子, 2011, 30(4): 37-41.
Du Jiancai, Wang Zhaolan, Zhao Lili, et al. Study on breaking hard seed effect of different treatment methods for Melilotoides ruthenica strain 90-36[J]. Seed, 2011, 30(4): 37-41.
- [2] 赵相勇, 孟军江, 吴佳海. 不同处理方法对野生地八角硬实种子发芽率的影响[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(3): 40-50.
Zhao Xiangyong, Meng Junjiang, Wu Jiahai. Effect of different treatment methods on germination rate of hard seeds of wild Astragalus bhotanensis[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012, 40(3): 48-50.
- [3] 孙星邈, 王政, 李曙光, 等. 大豆硬实形成机制与破除技术的研究进展[J]. 大豆科技, 2014(3): 23-27.
Sun Xingmiao, Wang Zheng, Li Shuguang, et al. Progress on formation mechanism and breaking methods of hard seed in soybean[J]. Soybean Science and Technology, 2014(3): 23-27.
- [4] 曹帮华, 翟明普, 郭俊杰. 不同硬实程度的刺槐种子活力差异性研究[J]. 林业科学, 2005, 41(2): 42-47.
Cao Banghua, Zhai Mingpu, Guo Junjie. Study on vigor difference of seeds with different hard degree in Robinia pseudoacacia[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(2): 42-47.
- [5] 田娟, 孙群, 王建华, 等. 不同硬实程度乌拉尔甘草种子的活力差异[J]. 植物生理学通讯, 2007, 43(2): 235-240.
Tian Juan, Sun Qun, Wang Jianhua, et al. Differences of seed vigor among different levels of hard seeds of Glycyrrhiza uralensis Fisch[J]. Plant Physiology Communications, 2007, 43(2): 235-240.

- [6] 杨期和, 尹小娟, 叶万辉.硬实种子休眠的机制和解除方法[J].植物学通报, 2006, 23(1): 108-118.
Yang Qihe, Yin Xiaojuan, Ye Wanhui. Dormancy mechanism and breaking methods for hard seeds[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2006, 23(1): 108-118.
- [7] 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.
Sun Qun, Li Junhui, Wang Jianhua, et al. Identification of hardness of licorice single seed using near infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(10): 2669-2672.
- [8] Zhu Liwei, Huang Yanyan, Wang Qing, et al. Nondestructive identification of hard seeds of three legume plants using near infrared spectroscopy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(Sup2): 237-242.
- [9] Delwiche S R, Norris K H. Classification of hard red wheat by near-infrared diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Cereal Chemistry*, 1993, 70(1): 29-35.
- [10] 吴建国, 石春海, 张海珍. 构建整粒油菜籽脂肪酸成分近红外反射光谱分析模型的研究[J].光谱学与光谱分析, 2006, 26(2): 259-262.
Wu Jianguo, Shi Chunhai, Zhang Haizhen. Study on developing calibration models of fat acid composition in intact rapeseed by near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(2): 259-262.
- [11] 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.
Han Liangliang, Mao Peisheng, Wang Xinguo, et al. Study on vigour test of oat seeds with near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, 27(2): 86-90.
- [12] 毛莎莎, 曾明, 何绍兰, 等. 近红外光谱技术在水果成熟期预测中的应用[J]. 亚热带植物科学, 2010, 39(1): 82-87.
Mao Shasha, Zeng Ming, He Shaolan, et al. Application of near infrared spectra (NIRS) technology in prediction of maturity stage of fruit[J]. *Subtropical Plant Science*, 2010, 39(1): 82-87.
- [13] 赵杰文, 张海东, 刘木华. 利用近红外漫反射光谱技术进行苹果糖度无损检测的研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 162-165.
Zhao Jiewen, Zhang Haidong, Liu Muhua. Non-destructive determination of sugar contents of apples using near infrared diffuse reflectance[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(3): 162-165.
- [14] 毕卫红, 许峰, 吕超. 水果含糖量近红外检测系统及实验[J]. 红外技术, 2007, 29(11): 678-680.
Bi Weihong, Xu Feng, Lv chao. A measuring system for sugar content of fruits and related experiment based on NIRS technology[J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(11): 678-680.
- [15] 王敏, 付蓉, 赵秋菊, 等. 近红外光谱技术在果蔬品质无损检测中的应用[J]. 中国农学通报, 2010, 26(5): 174-178.
Wang Min, Fu Rong, Zhao Qiuju, et al. Application of near infrared reflectance spectroscopy in nondestructive detection of fruits and vegetables quality[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(5): 174-178.
- [16] Clark C J, McGlone V A, Jordan R B, et al. Detection of Brown heart in 'Braeburn' apple by transmission NIR spectroscopy[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 28(1): 87-96.
- [17] Jha S N, Matsuoka T. Non-destructive determination of acid-brix ratio of tomato juice using near infrared spectroscopy[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2004, 39(4): 425-430.
- [18] 周子立, 张瑜, 何勇, 等. 基于近红外光谱技术的大米品种快速鉴别方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 131-135.
Zhou Zili, Zhang Yu, He Yong, et al. Method for rapid discrimination of varieties of rice using visible NIR spectroscopy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(8): 131-135.
- [19] 李伟, 肖爱平, 冷鹃. 近红外光谱技术及其在农作物中的应用[J]. 中国农学通报, 2009, 25(3): 56-59.
Li Wei, Xiao Aiping, Leng Juan. Near-infrared spectroscopy and its applications in crops[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(3): 56-59.
- [20] 黄玉萍, 吴贵茹, 陈坤杰. 近红外光谱在转基因农产品检测中的研究进展[J]. 江西农业学报, 2010, 22(7): 107-110.
Huang Yuping, Wu Guiyu, Chen KunJie. Research advance in identification of transgenic agricultural products by using NIR-spectroscopy[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2010, 22(7): 107-110.
- [21] Campo L, Monteagudo A B, Salleres B, et al. NIRS determination of non-structural carbohydrates, water soluble carbohydrates and other nutritive quality traits in whole plant maize with wide range variability[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2013, 11(2): 463-471.
- [22] Manley M, du Toit G, Geladi P. Tracking diffusion of conditioning water in single wheat kernels of different hardnesses by near infrared hyperspectral imaging[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2011, 686(1-2): 64-75.
- [23] 邹书静, 张仁和, 史俊通, 等. 近红外光谱法测定玉米秸秆饲用品质[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 151-155.
Zou Shujing, Zhang Renhe, Shi Juntong, et al. Prediction of forage quality of maize stover by near infrared spectroscopy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12): 151-155.
- [24] Pavino D, Squadrone S, Cocchi M, et al. Towards a routine application of vibrational spectroscopy to the detection of bone fragments in feedingstuffs: Use and validation of a NIR scanning microscopy method[J]. *Food Chemistry*, 2010, 121(3): 826-831.
- [25] Decruyenaere V, Lecomte P, Demarquilly C, et al. Evaluation of green

- forage intake and digestibility in ruminants using near infrared reflectance spectroscopy(NIRS): Developing a global calibration[J]. *Animal Feed Science And Technology*, 2009, **148**(2-4): 138-156.
- [26] 李晋华, 杨志良, 王召巴, 等. 近红外漫透射技术检测玉米成分[J]. 红外技术, 2013, **35**(11): 732-736.
Li Jinhua, Yang Zhiliang, Wang Zhaoba, et al. The corn content measurement with near infrared diffuse transmission[J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(11): 732-736.
- [27] 姜健, 杨宝灵, 夏彤, 等. 紫花苜蓿幼苗耐盐性的近红外光谱鉴定[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(12): 207-211.
Jiang Jian, Yang Baoling, Xia Tong, et al. Identification of alfalfa seedling salt tolerance by near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, **26**(12): 207-211.
- [28] 聂志东, 韩建国, 玉柱, 等. 近红外光谱技术(NIRS)在草地生态学研究中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, **27**(7): 691-696.
Nie Zhidong, Han Jianguo, Yu Zhu, et al. Applications of near infrared reflectance spectroscopy technique(NIRS) to grassland ecology research[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(7): 691-696.
- [29] Baloyi J J, Hamudikuwanda H, Berardo N, et al. Near infrared reflectance spectroscopy(NIRS) prediction of herbage quality from forage and browse legumes, and natural pasture grass grown in Zimbabwe[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2013, **8**(10): 868-871.
- [30] 李书英, 韩建国. 近红外光谱技术在高尔夫草坪管理中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, **28**(17): 1539-1543.
Li Shuying, Han Jianguo. Application of near-infrared spectroscopy in golf turfgrass management[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(17): 1539-1543.
- [31] 任卫波, 韩建国, 张蕴薇, 等. 近红外光谱分析技术及其在牧草种子质量监督检验上的应用前景[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, **28**(3): 555-558.
Ren Weibo, Han Jianguo, Zhang Yunwei, et al. The application of near infrared reflectance spectroscopy in seeds quality certification[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(3): 555-558.
- [32] Pande R, Mishra H N. Fourier transform near-infrared spectroscopy for rapid and simple determination of phytic acid content in green gram seeds(Vignaradiata)[J]. *Food Chemistry*, 2014, **172**: 880-884.
- [33] 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.
Sun Qun, Li Xin, Li Hang, et al. Determination of hard rate of licorice(*Glycyrrhiza uralensis F.*) seeds using near infrared reflectance spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(1): 70-73.
- [34] 张娟娟, 田永超, 姚霞, 等. 基于近红外光谱的土壤全氮含量估算模型[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(12): 183-188.
Zhang Juanjuan, Tian Yongchao, Yao Xia, et al. Estimating model of soil total nitrogen content based on near-infrared spectroscopy analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(12): 183-188.
- [35] Kim I, Pullanagari R R, Deurer M, et al. The use of visible and near-infrared spectroscopy for the analysis of soil water repellency[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, **65**(3): 360-368.
- [36] Debaene G, Pikula D, Niedzwiecki J. Use of VIS-NIRS for land management classification with a support vector machine and prediction of soil organic carbon and other soil properties[J]. *Ciencia E Investigacion Agraria*, 2014, **41**(1): 21-32.
- [37] 王昕润. 紫花苜蓿种子硬实比率的近红外光谱技术分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.
Wang Xinxun. Study of the rate of alfalfa hard seeds on near infrared reflectance spectroscopy technique[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013.
- [38] Williams P C. Application of near-infrared reflectance spectroscopy to analysis of cereal grains and oil seeds[J]. *Cereal Chemistry*, 1975, **52**(4): 561-576.
- [39] 王文真. 样品粒度对近红外分析结果的影响[J]. 分析仪器, 1993(2): 52-54.
Wang Wenzhen. Effect of sample size on near infrared analysis results[J]. *Analytical Instrumentation*, 1993(2): 52-54.
- [40] 胡新中, 魏益民, 张国权, 等. 近红外谷物品质分析仪工作稳定性研究[J]. 粮食与饲料工业, 2001(6): 46-47.
Hu Xinzong, Wei Yimin, Zhang Guoquan, et al. A study on the test stability of NIR analyzer[J]. *Cereal and Feed Industry*, 2001(6): 46-47.
- [41] 田锦兰. NIRS 定量分析羽衣甘蓝含油量、蛋白质含量和脂肪酸成分数学模型的建立[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
Tian Jinlan. Models of oil, protein and fatty-acid composition by NIRS analysis in *Brassica oleracea* var. acephala[D]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [42] 许瑞轩, 李东宁, 杨东海, 等. 近红外光谱法田间快速估测新鲜紫花苜蓿品质[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, **33**(11): 3010-3013.
Xu Ruixuan, Li Dongning, Yang Donghai, et al. Alfalfa quality evaluation in the field by near-infrared reflectance spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(11): 3010-3013.
- [43] 杨琼. 近红外光谱法定量分析及其应用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
Yang qiong. Study on near infrared spectrometry for quantitative analysis and its analytical application[D]. Chongqing: Southwest University, 2009.