

现代近红外光谱分析技术在农业研究中的应用

曹 干

(广东省农科院作物研究所, 广东 广州 510640)

摘 要:简述了近红外光谱分析技术的发展历史、应用原理和技术特点,对该项技术在作物品质育种、品种资源的鉴定与分类、生物样品的非破坏性测定、作物施肥与土壤养分测定、作物抗虫性鉴定等方面的应用进行了综述。

关键词:近红外光谱技术; 作物育种; 品质分析

中图分类号:S123 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-874X(2004)07-0026-06

近红外谱区是指从可见光谱区到中红外谱区之间的电磁波,波长范围为 $0.75 \sim 2.5 \mu\text{m}$,波数范围为 $13\,330 \sim 4\,000 \text{ cm}^{-1}$ 。近红外谱区是在 1800 年由 Herschel 发现的,是人类认识最早的非可见光光谱区^[1]。如今,现代近红外光谱分析技术已经成为发展最快、最引人注目的光谱分析技术。近红外光谱分析技术与计算机技术和化学计量学的有机结合,仪器测量信号的数字化和分析过程的绿色化程度的不断提高,使该项技术具有典型和鲜明的时代特征^[2]。

1 发展历史

1.1 技术的发展

近红外光谱技术的发展大体上可分为 5 个阶段。在近红外谱区被发现后的一个半世纪中,受技术水平的限制,无法将光谱信息充分提取出来,其应用受到了很大的限制。直到 20 世纪 50 年代以后,随着近红外光谱仪器的进步和 Norris 等所做的大量研究工作,近红外光谱分析技术首先在农产品品质快速分析的研究中得到了广泛应用。到 60 年代中期,经典近红外光谱分析存在灵敏度低、抗干扰性差的弱点,而当时的技术水平无法克服这些弱点,使该项技术的研究和应用进入了一个沉默时期。在此期间,由于美国农业部研究部门在农产品和食品品质分析上大力推广近红外光谱分析专用仪器,使近红外光谱分析的研究和应用得以维持和延续。80 年代以后,随着现代计算机硬件和软件技术的飞速发展,带动了分析仪器的数字化和化学计量学(Chemometrics)学科的发展,很好地解决了近红外谱区谱峰重叠、提取光谱信息困难和背景干扰的问题,使以弱信号和多元信息处理为基本特征的近红外光谱分析获得了坚实的技术支持。在该时期近红外光谱分析技术在各个领域中的应用研究陆续展开。进入 90 年代,近红外光谱分析技术步入一个快速发展时期。在该时期计算机软硬件技术日益成熟,数字化的光谱仪器与化学计量学方法有机结合,形成了现

代近红外光谱技术。近红外光谱仪器数字化程度亦在不断提高,并配备有功能强大的计算机和化学计量学分析软件,使其应用更为广泛。在欧美等发达国家中近红外光谱仪已被视为品管实验中必备的仪器。目前在石油、纺织、制药、食品、饲料等行业中,近红外光谱分析技术被广泛应用于复杂物质的定量和定性分析、生产流程中品质的实时监控和在线分析等方面。在农业生产和科研中,近红外光谱分析技术的应用也极为广泛。

1.2 仪器的发展

近红外光谱分析技术的发展与仪器的发展密切相关。在长期的发展过程中近红外光谱仪器结构和技术水平也发生了很大的变化。近红外光谱仪器已由传统的滤光片型和光栅色散型,发展到现在的主流产品傅立叶变换型。90 年代初出现一种新仪器类型,即声光可调滤光器(AOTF),但因价格昂贵,目前还未成为应用的主流仪器。

近红外光谱仪主要由光源、测样部件、光色散元件和检测器 4 个部分组成。不同类型仪器在结构上有很大差别。滤光片型近红外光谱仪是从光源发出的光先经过样品池,再过滤光片,最后进入检测器。扫描式光栅型近红外光谱仪,通常采用光栅分光,通过光栅的转动,使得到的单色光在不同时间依次通过样品池后,最后进入检测器被检测。傅立叶变换近红外光谱仪的主要光学元件是干涉仪,从光源发出的光,先经过干涉仪产生干涉光,干涉光通过样品池后被检测器检测。

滤光片型仪器是早期的主要仪器,在农产品分析中应用较多。滤光片型仪器的构造简单、价格便宜,易于维修。但波长准确性差,扫描谱区极为有限,无法任意选择波长范围,对不太复杂的物质体系,如能选择适合的谱区范围也可获得较好的结果。由于其光分辨能力较差,光谱信息的提取能力受到限制,不适合复杂物质体系分析。对定量分析而言,很难建立理想的分析数学模型。主要用于专用分析仪器,如粮食水分测定仪、油分专用分析仪。

光栅色散型仪器是 70~80 年代最常用的仪器类型,其采用全息光栅分光、PbS 或其他光敏元件作检测

收稿日期:2004-12-21

作者简介:曹干(1959-),男,博士,研究员

器,可连续扫描光谱,有较高的信噪比,但波长准确度仍不够高,数学模型仍不能传递。数学模型可因仪器关键部件的更换或仪器的报废而不能再用。仪器中可动部分可能磨损,影响光谱采集的可靠性,不适合应用于在线分析。

傅立叶变换近红外光谱仪是目前近红外光谱仪器的主导产品,在90年代以后逐渐发展成熟,其较传统的滤光片型和光栅色散型近红外光谱仪有更为明显的优点。表现为波长准确度和分辨率更高、辐射通量大、扫描速度更快、不受自然散光影响、检出限量高等^[3]。建立的近红外定量分析数学模型在同类仪器间转移成为可能,数学模型具有继承性。

现代近红外光谱仪器的另一典型特征是有各种不同的测定附件相匹配,诸如积分球、漫反射探头、透射探头等测定附件的推出,使该项技术在应用上更为灵活方便。如近红外光导纤维探头的出现,使待测样品不需进入样品暗室,样品的形态可以是固体、粉末状、颗粒状或液体等,可远离主机提取样品光谱信息。这些配套技术的出现和发展,大大拓宽了近红外光谱分析的应用范围。

2 近红外光谱分析的原理

近红外光谱分析的应用对象主要是针对以含氢基团为主的有机化合物。近红外谱区的谱带主要是有机分子的倍频和合频振动引起。这些分子中各种基团(如C=C, N=C, O=C, O=H, N=H)的伸缩、振动、弯曲等运动都有它固定的振动频率。在红外光的照射下有机分子受激发而产生共振,同时近红外光的能量一部分被吸收,测量被吸收后的近红外光,可以得到复杂的近红外光谱图。有机物质在近红外谱区有丰富的吸收光谱,每种物质成分都有特定的吸收特征,这就为近红外光谱定量分析或定性分析提供了基础。

与中红外光谱一样,近红外谱区不但可以得到有机分子的结构、组成状态的信息,还可以得到有机样品的密度、粒度、高分子聚合度和纤维直径等信息。有机分子中含氢基团吸收频率的特征性强,受分子内部和外部环境因素影响小,在近红外谱区中有稳定的光谱吸收特性。

近红外光谱信息处理必须依靠现代化学计量学方法。由于倍频和合频的吸收谱带比基频吸收谱带宽得多,使多成分复杂样品在近红外光谱中不同组分的谱带、同一组分中不同基团的谱带,以及同一基团不同形式的倍频和合频谱带发生严重重叠,造成近红外光谱的图谱解析异常困难。严重的谱峰重叠,使近红外光谱分析不同于经典的光学分析,必须依靠现代化学计量学和计算机技术,利用近红外光谱全谱区的信息,才

能实现复杂物质的定性鉴定和定量分析。

近红外谱区适合采用漫反射方式进行光谱分析,可以得到较高的信噪比和较宽的线性范围。利用光导纤维传输技术,可以很方便地收集样品的近红外漫反射光谱,克服样品透光能力差、物质状态差异的障碍。

3 近红外光谱分析技术的特点

与传统的化学分析方法相比,近红外光谱技术有其独特之处,其主要技术特点是:(1)分析速度快。由于扫描速度快,可在很短时间内获得一个样品的全光谱图,扫描时间的长短可根据试验的需要自行设定,平均光谱扫描时间为1~60 s,将采集到的光谱输入建立好的数学模型就可迅速测定出样品的某种成分浓度。(2)多组分同时测定。通过一次全光谱扫描,即可获得样品中各种化学成分的光谱信息,再由相应的数学模型计算,就可得到样品多种化学成分的含量。(3)样品不需预处理。由于近红外光有较强的穿透能力和散射效应,可根据样品的物质状态和透光能力采用透射或漫反射测定方式,直接测定不经预处理的液态、固态或气态样品。(4)非破坏性分析。在测定光谱时不破坏或消耗样品,对样品的外观和内在结构都不产生影响。可直接对样品进行活体测定。该特点在生物学研究中对采样技术、试验设计有特别意义。(5)远距离测定和实时分析。具有远距离采集样品光谱和实时分析能力,特别适用于在线分析。利用光导纤维技术远离主机取样,将光谱信号实时传送回主机,可直接计算出样品成分的即时含量或确定样品的性质。(6)测定重现性好。光谱测定有很好的重现性,测试结果受人为干扰少,与常规的化学方法相比,近红外光谱分析一般可显示出更好的重现性和精确性。(7)低分析成本和操作简单。近红外光谱分析除需要电能外,不需要任何耗材,避免了有毒化学试剂的使用,是一种绿色的分析方法,测试费用可以大大降低。在操作上也不需要专门的技能和特别的训练,通过简单的培训即可操作。

近红外光谱分析技术虽然有上述许多独特的优点,但也有其固有的弱点。使用者仅拥有了近红外光谱仪是不能进行任何品质成分测定的。使用者必须为光谱仪安装相应的“软件”(定量分析或定性分析数学模型),才能进行特定成分分析测定。由于专业知识限制和科学研究的多样性,仪器商很少能为使用者提供可通用的数学模型。绝大多数情况下,使用者需要根据自身专业特点和应用目的自行建立特定的数学模型。往往由于使用者对近红外光谱分析技术的陌生或缺乏深入了解,限制了近红外光谱分析技术的应用。另外,数学模型的建立不是一项轻松的工作,尤其是用于天然复杂有机物质成分分析的数学模型,这也是限

制近红外光谱分析技术应用的另一个因素。

同时也要注意,近红外光谱分析技术是一种间接的分析技术,它必须依赖常规的化学分析方法测定出特定背景范围内多个标准样品成分的化学值或性质,利用化学计量学方法建立数学模型,并通过数学模型计算待测样品的成分含量或确定性质。数学模型的预测准确性与常规化学分析方法准确性、建模样品是否有代表性、数学模型的校正和使用是否合理等因素有很大的关系。另外,与常规化学分析相比,近红外光谱分析的测试灵敏度较低,待测样品的成分含量一般不少于0.1%。

4 在农业研究中的应用

80年代以前近红外光谱技术的研究应用领域仅限于农产品的品质分析,而目前其应用范围已迅速向农业和生物学的其他领域扩展。

4.1 作物的品质分析

60年代初,美国农业部仪器研究室 Norris 等^[4]首先利用近红外光谱技术测定谷物中的水分、蛋白质、脂肪等含量,并致力于近红外光谱技术在农牧产品品质分析中应用的研究。由于近红外光谱技术在分析复杂物质成分时具有操作简便、非破坏性测定、速度快,以及测定一次光谱可同时获得多种品质成分含量的独特优点,使该项技术在作物品质分析上的应用越来越广泛。国外研究者在该领域做了大量的研究工作,已非常成功地应用近红外光谱技术来分析测定多种农牧产品的品质成分。许多近红外光谱分析的实验方案和计算方法已成为 AOCA (Association of Official Analytical Chemists) 的标准方法^[1]。美国谷物化学协会于 1982 年 10 月批准了近红外方法用于小麦蛋白质的测定,国际谷物科学技术协会规定了近红外测定小麦及面粉蛋白质和水分含量的详细程序。以化学计量学为基础的定性与定量分析标准实用细则已陆续由美国 ASTM (American Society for Testing and Materials) 于 1995、1996 年公布。

在国内,近红外光谱技术在作物品质分析上的应用研究也十分活跃。严衍禄等^[5]基础理论到实践对傅立叶变换近红外漫反射光谱分析的应用基础作了系统的研究,其研究组应用近红外方法测定了谷子、玉米、小麦等作物的蛋白质、氨基酸、脂肪等 17 种成分,取得了很好的效果^[6~9]。李大群等^[10]利用近红外漫反射光谱分析技术测定大豆和小麦的蛋白质含量,分别使用了 35 个大豆品种和 77 个小麦品种作为定标样品建立预测模型,近红外测定值与实际值的相关系数分别达 0.967 和 0.984,标准偏差分别为 0.826 和 0.348。彭玉魁等^[11]用近红外方法对 124 个小麦品种

籽粒品质成分进行了比较测定,表明用近红外光谱分析技术测得小麦样品的水分、粗蛋白、粗纤维、赖氨酸含量与常规方法测定结果之间有较高的相关程度。王成^[12]利用傅立叶变换近红外漫反射光谱测定大麦籽粒粗蛋白含量,以 40 个大麦样品建立预测数学模型,预测值和实测值的相关系数为 0.989;对 40 个独立样品进行预测,预测值和测定值的相关系数为 0.969,证实所建立的模型有较好的预测准确度。水稻种子的直链淀粉和支链淀粉含量的测定,大豆、油菜脂肪成分的测定,以及水果蔬菜中维生素、糖类的测定都成功地应用了近红外光谱分析技术^[13~16]。

对植物中成分含量较低的次生代谢物质,诸如类胡萝卜素、茴香脑、草嵩脑、柠檬油精、石碳酸和单宁酸等,利用近红外光谱分析技术测定其含量亦取得较好的结果^[17,18]。

在国外近红外光谱分析技术在甘蔗品质分析上应用的研究也很多,不仅在糖厂原料蔗的品质管理上应用,在甘蔗选育种无性系的品质分析上也有应用^[19~23]。巴西等许多产糖国已将近红外光谱技术作为糖料作物按质论价的关键技术。美国佛州甘蔗种植者协会与佛州的克里思吐尔斯企业合作,采用近红外光谱分析方法作为蔗汁品质分析的标准方法^[24]。在日本甘蔗糖厂是按重量来收购甘蔗的,因而不能合理估算甘蔗的蔗糖分。为改善甘蔗的品质和提高蔗农的生产积极性,日本政府在 1989 年引入了甘蔗品质检测系统,以近红外方法快速测定蔗汁转光度,并以此来确定原料蔗的价格,从而实现了原料蔗的按质论价^[25]。

4.2 快速和非破坏性测定在作物育种中的应用

利用近红外光谱分析不破坏样品、测定速度快的特点,在作物品质育种中检测完整单粒种子的品质成分。Delwiche^[26]研究了近红外方法非破坏性测定小麦单粒种子蛋白含量的可行性。Velasco 等^[27~29]应用近红外反射分析技术非破坏性测定了向日葵单粒完整瘦果的脂肪酸组分、油菜单粒种子的含油量、脂肪组分和蛋白质含量,认为近红外非破坏性分析可得到可靠的结果。张晔晖等^[30]利用近傅立叶红外光谱技术无损伤测定完整单粒玉米种子的油分,获得了肯定性的结果,认为测定结果的准确性完全可以满足育种和资源评价的要求。

在苜蓿的育种策略中,提高中性洗涤溶性纤维 (NDSF) 含量可改良牧草的质量,但测定 NDSF 的常规方法十分费时繁琐,致使在育种上无法对 NDSF 性状进行筛选。Fonseca 等^[31]应用近红外光谱分析技术,由多元线性回归方法建立 NDSF 含量的预测模型,从而能简便快速测定出大量苜蓿育种材料的 NDSF 含量。认为通过近红外方法来选择高 NDSF 含

量的亲本可以改良后代的草料质量。

在小麦育种中,需要快速和非破坏性地将高或低蛋白含量的小麦单粒种子从大量的育种材料中分开。利用近红外光谱技术,根据小麦种子的颜色和玻璃质体的差异进行分类,可将高或低蛋白含量的个体分开^[32]。

4.3 在土壤养分测定和作物施肥上的应用

Morra 等^[33]研究了近红外方法预测较为均质土壤的有机碳和总氮的能力。Den-Dor 等^[34]发现有机质含量分别为 0~4% 和 4%~14% 的两组土壤样本间,近红外预测结果存在着明显的偏差;认为通过分析土壤有机质的 C/N 比率来了解土壤有机质的分解阶段,从而改进 NIRS 预测土壤有机质的准确度。Ehsani 等^[35]应用近红外方法快速分析土壤中的矿物氮含量。Confalonieri 等^[36]用近红外反射测定方法测定不同土壤中的总有机碳、总氮、可交换钾和有效磷,认为近红外方法可以准确测定土壤中的氮和碳含量,可以代替常规的化学分析方法。Reeves 等^[37]研究了近红外光导纤维技术测定农业土壤中多种组分的有效性,认为用光导纤维技术获得的近红外光谱数据可以成功测定出土壤中的各种组分含量。Kenichiro 等^[38]采用近红外反射测定方式测定发酵堆肥中的氮和碳含量,认为在堆肥发酵过程控制中近红外光谱技术是一种有用的方法。彭玉魁等^[39]应用近红外光谱分析技术对我国黄土区土壤水分、有机质和总氮含量进行了研究,认为我国黄土区土壤水分、有机质和总氮含量的近红外测定值与化学法测定值之间有显著相关性,可以用于黄土区土壤有关养分含量的快速测定。于飞健等^[40]应用近红外光谱技术测定土壤中的全氮、有机质和碱解氮 3 个参数,结果表明近红外光谱与土壤有机质、全氮、碱解氮具有良好的相关性,用近红外光谱法测定土壤有机质、全氮、碱解氮的含量是可行的。

有研究者试图利用近红外光谱分析简便快速的技术特点,解决常规化学分析繁琐费时的问题。利用近红外方法快速测定作物植株的氮、磷、钾含量,与叶面诊断相结合来指导作物施肥。吉川年彦等^[41]应用近红外分光法测定水稻叶片的氮、磷、钾含量。Saranga 等^[42]用近红外方法测定棉花叶片的氮含量并以此来指导施肥。在南非的甘蔗栽培中,近红外方法被用于快速测定蔗区土壤和甘蔗植株中的氮状态,并以此作为指导蔗农施肥的依据,从而提高氮肥的施用效率^[21]。Chen 等^[43]试图用近红外方法快速测定甘蔗叶片中的磷含量,建立的模型显示了较好的预测准确度,有希望用于指导甘蔗大田生产的磷肥施用。

4.4 作物品种的鉴定和分类

不同品种种子之间的化学成分和组织结构有明显

的差异,这些差异在近红外光谱上可能有特殊的谱带。利用品种种子化学成分和组织结构特征与近红外光谱之间的关系建立近红外判别模型,就有可能对品种进行快速鉴定。也可以根据不同品种种子的近红外光谱特征的差异进行聚类分析,达到简便快速对品种进行分类的目的。

Kwon 等^[44]研究了利用近红外光谱技术鉴别稻米的品种和来源的可能性。近红外光谱能反映单粒水稻种子的内在品质特性,为品种的鉴别提供有用的信息,通过采用合适的光谱测定方法和应用主成分分析,可以提高鉴别的准确率。认为近红外光谱技术能够用来区分水稻品种,尽管鉴定的准确性有待改善和提高。

Osborne 等^[45]试图应用近红外透射分析将水稻 Basmati 品种与其他长粒型品种区分开来。由近红外光谱分析的前几位的主成分得分计算得出 Fisher 线性判别函数,并由函数建立品种判别标准。该近红外判别标准对 Basmati 品种的误判率为 8%,对其他品种的误判率为 14%。

Sándor 等^[46]以近红外光谱技术为基础,根据大豆籽粒中脂肪和蛋白质性状的差异,采用多变量分析方法,对不同大豆品种进行分类,从中选择脂肪/蛋白比适合于加工的类型。几年的研究结果表明所选类型的脂肪/蛋白比稳定,适合加工的要求。

黄宝康等^[47]应用近红外漫反射光谱技术和聚类分析方法对楮实子药材及其伪品进行研究,结果表明不同产地楮实子之间指纹图谱存在一定差异,认为近红外方法可用于楮实子药材的指纹图谱鉴定,方法快速简便。吴拥军等^[48]探讨了近红外漫反射光谱技术在前胡植物分类中应用的可能性,用聚类分析获得的分类结果与传统的植物学分类结果相近,认为近红外方法应用于前胡植物中三亚族的分类基本可行。

Kallenbach 等^[49]应用近红外漫反射光谱技术对苜蓿品种的秋季休眠性进行分类评价,将 11 个不同苜蓿品种的叶片烘干磨粉,测定叶片粉末的近红外漫反射光谱,由改良偏最小二乘法建立光谱与休眠性的多元回归数学模型,最佳数学模型的 R^2 为 0.90,标准误差为 7.93 ± 1.14 。由个体植株评估秋季休眠性的准确性与由品种群体分类的相当,认为近红外光谱法在苜蓿品种秋季休眠性的分类评价上有潜在的应用价值。

Zsolt 等^[50]应用近红外光谱技术检测不同瓜类基因型的杂种性和重要品种的种性,采用定性判别方法,通过比较分类敏感度的大小,可以从大量的甜瓜和西瓜基因型中辨别出不同品种,认为近红外方法可用于瓜类品种的鉴定和保护。

4.5 作物抗虫性株系的鉴定和筛选

在传统上作物抗虫株系的鉴定多采用田间自然感虫或人工接种法,存在鉴定周期长、耗时费工的问题。吴秀琴等^[51]以78个谷子品种作为定标样品,建立栗芒蝇抗性鉴定近红外定标方程,近红外鉴定结果与田间鉴定结果吻合率达94.7%;利用74份谷子品种建立玉米螟抗性鉴定近红外定标方程,近红外鉴定结果与田间鉴定结果的吻合率达82.7%。

Rutherford等^[52~54]根据甘蔗芽鳞中类黄酮物质和蜡质与抗鳞翅目螟虫(*Eldana Saccharina*)有关的原理,以甘蔗抗螟虫株系为定标样品,应用滤光片型近红外光谱仪对甘蔗的表面蜡粉和芽鳞抽提物进行扫描测定,建立了甘蔗抗螟虫鉴定的近红外模型,通过建立的模型快速筛选抗螟虫甘蔗无性系。该项研究有助于抗螟虫栽培品种的选育和育种计划中抗性亲本的选择。认为采用人工神经网络方法建立的模型可提高预测效果。近红外光谱技术有可能成为农作物抗虫鉴定的一种新方法。

5 结语

近红外光谱技术、化学计量学方法和计算机软硬件技术仍在不断改良和发展中。除了一般实验室通用的光谱仪外,各种能满足不同需要的专用近红外光谱测定仪和应用软件不断出现。在应用近红外光谱技术时,除需要对该项技术有全面的了解外,同时还需要应用者在特定领域内有丰富的专业知识相配合,这样才能将近红外光谱分析技术的特点发挥达到极至。有学者认为,近红外光谱分析技术如能为作物育种家、农学家所充分利用,将会给人类粮食生产和作物的品质改良带来极大好处^[55]。随着近红外光谱分析技术的不断发展和成熟,以及人们对近红外光谱分析技术特点和仪器性能有更深入的了解和认识,该项技术在作物品质分析、种质资源评价、品质育种,以及生物学研究中的应用前景将更为广阔。

参考文献:

[1] 罗苏秦,张世英.近红外光谱仪器之分析技术及其应用[J].科仪新知,1999,25(5):13-30.

[2] 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.

[3] 李长治编.分子光谱新技术[M].北京:科学出版社,1986.97-98.

[4] Norris K H, Barnes R F, Moore J E, et al. Prediction forage quality by near infrared reflectance spectroscopy[J]. Journal of Animal Science, 1976, 43(4): 899-897.

[5] 严衍禄,景茂,张录达,等.傅立叶变换近红外漫反射光谱分析测量误差的研究[J].北京农业大学学报,1990,16(增刊):37-48.

[6] 严衍禄,高文淑,张录达,等.付里叶变换近红外漫反射光谱分析测定谷物粗蛋白质的规范化方法[J].北京农业大学学报,1990,16(增刊):57-60.

[7] 高文淑,张录达,王万军.应用付里叶变换近红外漫反射光谱法测定几种谷物籽粒中蛋白质的含量[J].北京农业大学学报,1990,16(增刊):72-79.

[8] 高文淑,景茂,严衍禄.付里叶变换近红外漫反射光谱法测定谷子、玉米中多种氨基酸含量[J].北京农业大学学报,1990,16(增刊):88-93.

[9] 景茂,严衍禄,刘广田.付里叶变换近红外漫反射光谱法测定小麦单籽粒中蛋白质含量[J].光谱学与光谱分析,1991,11(3):20-22.

[10] 李大群,王文真,张玉良.近红外漫反射光谱法测定大豆和小麦中的蛋白质含量[J].分析仪器,1990(4):45-50.

[11] 彭玉魁,李菊英,祁振英.近红外光谱分析技术在小麦营养成分鉴定上的应用[J].麦类作物,1997,17(2):33-35.

[12] 王成.傅立叶变换近红外漫反射光谱法测定大麦粗蛋白含量[J].新疆农业科学,2000(2):68-70.

[13] 舒庆尧,吴殿星.稻米表观直链淀粉含量近红外光谱测定技术校正设置的优化[J].浙江大学学报,1999,25(4):343-346.

[14] 王文真,付翠真.利用近红外反射光谱快速测定大豆籽粒蛋白质脂肪和部分氨基酸含量[J].作物品种资源,1994(1):31-32.

[15] 张晔晖,赵龙莲,李晓薇.用傅里叶变换近红外光谱法测定完整油菜籽三种品质性状的初步研究[J].激光生物学报,1998,7(2):138-141.

[16] 金同铭.非破坏性评价西红柿的营养成分1.蔗糖、葡萄糖、果糖的近红外分析[J].仪器仪表与分析监测,1997(2):32-36.

[17] Schulz H, Drews H H, Quilitzsch R, et al. Application of near infrared spectroscopy for the quantification of quality parameters in selected vegetables and essential oil plants[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 1998(6): 125-130.

[18] Goodchild A V, Haraein F J, Moneim A, et al. Prediction of phenolics and tannins in forage legumes by near infrared reflectance[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 1998(6): 175-181.

[19] Heppner S, Thielecke K, Buchholz K, et al. Potential applications of NIR spectrometry in the sugar industry[J]. Zuckerindustrie, 2000, 125(5): 325-330.

[20] Meyer J H, Wood R A. Rapid analysis of cane juice by near infrared reflectance[J]. Proceedings of South African Sugar Technologist Association, 1988(62): 203-207.

[21] Meyer J H. Near infrared spectroscopy (NIRS) research in the South African sugar industry[J]. International Sugar Journal (Cane Sugar Edition), 1998, 100(1194): 279-286.

[22] Berding N, Brotherton G A. Near infrared reflectance spectroscopy for analysis of sugarcane from clonal evaluation trials: I. Fibrated cane[J]. Crop Science, 1991, 31(4): 1017-1023.

[23] Berding N, Brotherton G A. Near infrared reflectance spectroscopy for analysis of sugarcane from clonal evaluation trials: II. Expressed juice[J]. Crop Science, 1991, 31(4): 1024-1028.

- [24] Johnson T P. Cane juice analysis by near infrared to determine grower payment[J]. Sugar Cane, 2000(10): 14 - 18.
- [25] Sekiguchi Reiji. Simplified measurement of sugar content of sugarcane[J]. Farming Japan, 2000, 34(4): 38 - 44.
- [26] Delwiche S R. Protein content of single kernels of wheat by near infrared reflectance spectroscopy[J]. Journal of Cereal Science, 1998, 27(3): 241 - 254.
- [27] Velasco L, Prez - Vich B, Fernandez - Martinez J M. Nondestructive screening for oleic and linoleic acid in single sunflower achenes by near - infrared reflectance spectroscopy[J]. Crop Science, 1999, 39(1): 219 - 222.
- [28] Velasco L, Christian Mollers. Estimation of seed weight, oil content and fatty acid composition in intact single seeds of rapeseed (*Brassica napus* L.) by near - infrared reflectance spectroscopy[J]. Euphytica, 1999, 106(1): 79 - 85.
- [29] Velasco L, Christian Mollers. Nondestructive assessment of protein content in single seeds of rapeseed (*Brassica napus* L.) by near infrared reflectance spectroscopy[J]. Euphytica, 2002, 123(1): 89 - 93.
- [30] 张晔晖, 赵龙莲, 宋同明. 用付里叶变换近红外光谱法测定完整的单粒玉米中油分的含量[J]. 光谱和光谱分析, 1998, 18(4): 99 - 101.
- [31] Fonseca C E L, Hansen J L, Thomas E M, et al. Near infrared reflectance spectroscopy prediction and heritability of neutral detergent soluble fiber in alfalfa[J]. Crop Science, 1999, 39(5): 1265 - 1270.
- [32] Pasikatan M C, Dowell F E. High - speed nir segregation of high - and low - protein single wheat seeds[J]. Cereal Chemistry, 2004, 81(1): 145 - 150.
- [33] Morra M J, Hall M H, Freeborn L L. Carbon and nitrogen analysis of soil fractions using near infrared reflectance spectroscopy[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991(55): 288 - 291.
- [34] Den - Dor E, Banin A. Near Infrared Analysis as a Rapid method to simultaneously evaluate several soil properties [J]. Soil Sci. Soc. Am. J, 1995(59): 364 - 372.
- [35] Ehsani M R, Upadhyaya S K, Slaughter D, et al. A NIR technique for rapid determination of soil mineral nitrogen [J]. Precision Agriculture, 1999, 1(2): 217 - 234.
- [36] Confalonieri M, Fornasier F, Ursino A, et al. The potential of near infrared reflectance spectroscopy as a tool for the chemical characterization of agricultural soils[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2001(9): 123 - 131.
- [37] Reeves J B, McCartyc G W, Meisingerc J J. Near infrared reflectance spectroscopy for the determination of biological activity in agricultural soils[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2000(8): 161 - 170.
- [38] Kenichiro Suehara, Yasuhisa Nakano, Takuo Yano. Simultaneous measurement of carbon and nitrogen content of compost using near infrared spectroscopy[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2001(9): 35 - 41.
- [39] 彭玉魁, 张建新, 何绪生, 等. 土壤水分、有机质和总氮含量的近红外光谱分析研究[J]. 土壤学报, 1998, 35(4): 553 - 559.
- [40] 于飞健, 闵顺耕. 近红外光谱法分析土壤中的有机质和氮素[J]. 分析试验室, 2002, 21(3): 49 - 51.
- [41] 吉川年彦, 周宝库. 应用近红外分光法测定水稻叶片的氮镁钾[J]. 土壤学进展, 1992, 20(5): 53 - 54.
- [42] Saranga Y, Landa A, Shekel Y, et al. Near infrared analysis of cotton leaves as a guide for nitrogen fertilization[J]. Agronomy Journal, 1998, 90(1): 16 - 21.
- [43] Chen M, Gilbert R A, Daroub S H, et al. Near infrared spectroscopy calibration for P concentration in sugarcane leaves[J]. Soil and Crop Science Society of Florida, 2003, 62: 4 - 8.
- [44] Kwon Y K, Cho R K. Identification of rice variety using near infrared spectroscopy [J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 1998, 6: 67 - 73.
- [45] Osborne B G, Mertens B, Thompson M, et al. The authentication of Basmati rice using near infrared spectroscopy[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 1993 (1): 77 - 83.
- [46] Sándor Turza, Arpád I, Tóth, et al. Multivariate classification of different soyabean varieties[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 1998(6): 183 - 187.
- [47] 黄宝康, 朱斌. 不同产地楮实子及伪品的近红外漫反射指数图谱聚类分析[J]. 中药材, 2002, 25(12): 874 - 875.
- [48] 吴拥军, 舒璞. 光纤近红外漫反射光谱技术在前胡族植物分类中的应用探讨[J]. 计算机与应用化学, 2000, 17(1): 111 - 112.
- [49] Kallenbach R L, Roberts C A, Teuber L R, et al. Estimation of fall dormancy in alfalfa by near infrared reflectance spectroscopy[J]. Crop Science, 2001, 41(5): 774 - 777.
- [50] Zsolt Seregely, Tamas Deak, Gyorgy Denes Bisztray. Distinguishing melon genotypes using NIR spectroscopy[J]. Chemometrics and intelligent Laboratory System, 2004, 72(2): 195 - 203.
- [51] 吴秀琴, 金达生, 刘旭明. 近红外光谱分析技术在农作物抗虫性中应用研究[J]. 中国农业科学, 1995, 28(5): 92.
- [52] Rutherford R S, Staden J V. Towards a rapid near infrared technique for prediction of resistance to sugarcane borer *Eldana saccharina* walker (Lepidoptera: pyralidae) using stalk surface wax[J]. Journal of Chemical Ecology, 1996, 22(4): 681 - 694.
- [53] Rutherford R S, Coetzee N A, Keeping M G. Neural networking increases the effectiveness of near infrared predictive models for the selection of *Eldana saccharina* (Lepidoptera: Pyralidae) resistant sugarcane phenotypes [J]. Proceedings of the Annual Congress South African Sugar Technologists' Association, 1997(71): 62 - 66.
- [54] Rutherford R S. Prediction of resistance in sugarcane to stalk borer *Eldana saccharina* by near - infrared spectroscopy on crude budscale extracts: involvement of chlorogenates and flavonoids[J]. Journal of Chemical Ecology, 1998, 24(9): 1447 - 1463.
- [55] Graeme D, Batten. An appreciation of the contribution of NIR to agriculture[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 1998(6): 105 - 114.