

近五年我国近红外光谱分析技术研究与应用进展

褚小立, 陆婉珍

石油化工科学研究院, 北京 100083

摘要 评述了我国近五年来(2009年—2013年)近红外光谱分析技术的研究与应用进展, 内容涉及软硬件研发、方法研究、以及诸多领域的应用开发等方面, 并对今后我国近红外光谱技术的发展方向提出了建议。
引用文献 209 篇。

关键词 近红外光谱; 分析仪器; 化学计量学; 软件开发; 应用

中图分类号: O657.3 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2014)10-2595-11

引言

国际上, 近红外光谱经过近半个世纪的发展, 已走过了所谓的概念炒作期, 进入了稳步发展的平台期。实践证明, 以近红外光谱为主力军的过程分析技术为发达国家的工业信息化与自动化的深度融合起到了决定性的作用, 它所提供的快速、实时测量信息可使工农业生产过程保持最优化的控制, 在显著提高产品质量的同时, 降低生产成本和资源消耗, 从而优化资源配置, 给企业和社会带来了丰厚的经济回报。这也是近红外光谱技术之所以生生不息的生命力所在。

我国从20世纪80年代开始进行近红外光谱的研究和应用工作, 90年代后期以产业链的方式逐渐应用于农业、石化、制药和食品等多个领域, 在工农业生产和科研中逐渐发挥着越来越重要的作用。2006年10月28日—30日, “全国第一届近红外光谱学术会议”在北京西郊宾馆会议中心成功召开, 这次会议增进了我国近红外光谱科技工作者之间的交流与合作, 是我国近红外光谱技术发展过程中的一个重要里程碑。至今已先后在长沙(2008年)、上海(2010年)和桂林(2012年)举办了四届, 并逐渐形成了严谨务实、简朴高效的独特会风, 对促进我国近红外光谱技术的研发和应用起到了积极的推动作用。2010年我国还成功举办了亚洲第三届近红外光谱学术会议。

在我国近红外光谱技术发展史上的另一件大事是, 2009年6月6日成立了近红外光谱专业委员会(China Council of NIRS)。该学术组织成立后, 组织了大量的学术活动, 其中值得一提的是, 2012年11月27日—29日成功组织召开了主题为“我国近红外光谱分析关键技术问题、应用与发展战

略”的第446次香山科学会议。这次会议提炼出了当前我国近红外光谱分析技术需要优先发展的科学问题和工程技术问题, 为制定我国科技发展规划, 提供了科学依据, 其带来的深远影响可会在以后若干年中逐渐显现出来。

2009年迄今, 我国已经出版了近十本近红外光谱专著, 涉及方法学、仪器、药物、农产品和食品等多个领域。与之密切相关的化学计量学, 也有多本专著出版^[1-11]。通过国家知识产权局门户网站、万方数据库和CNKI数据库查询, 这期间我国申请和授权的与近红外光谱直接相关的专利有400余项, 在国内学术期刊发表的论文有2000余篇, 硕士和博士学位论文也有300余篇。此外, 据不完全统计, 在国外期刊上发表的论文也有500篇左右。近红外光谱在我国的研究和应用呈现蓬勃发展的局面, 大有星火燎原之势。

近几年, 值得注意的一个发展动向是, 颁布了越来越多的近红外光谱标准方法^[12], 包括国家标准:《GB/T 29858—2013 分子光谱多元校正定量分析通则》、《GB/T 12008.3—2009 塑料聚醚多元醇 第3部分: 羟值的测定》、《GB/T 24895—2010 粮油检验 近红外分析定标模型验证和网络管理与维护通用规则》等十余项, 以及诸多行业标准:《NY/T 1423 鱼粉和反刍动物精料补充料中肉骨粉快速定性检测—近红外反射光谱法》、《NY/T 1841—2010 苹果中可溶性固形物、可滴定酸无损伤快速测定 近红外光谱法》、《LY/T 2053—2012 木材的近红外光谱定性分析方法》、《LY/T 2151—2013 木材综纤维素和酸不溶木质素含量测定近红外光谱法》、《DB53/T 498—2013 烟草及烟草制品 主要化学成分指标的测定 近红外漫反射光谱法》和《DB53/T 497—2013 烟草及烟草制品 主要化学成分指标 近红外校正模型建立与验证导则》等。

收稿日期: 2014-05-05, 修订日期: 2014-07-18

基金项目: 中国石化科研项目(112154)资助

作者简介: 褚小立, 1974年生, 石油化工科学研究院教授级高级工程师 e-mail: cxlyuli@sina.com

为筹办 2006 年全国第一届近红外光谱学术会议,笔者曾引用 200 篇文献,综述了 1996 年—2005 年期间我国近红外光谱分析技术的研究和应用进展^[13]。本文是该论文的姊妹篇,引用 209 篇有代表性的文献,旨在概述 2007 年至今我国这一技术领域的发展情况,本评述更侧重于引用近五年来(2009 年以后)在弦国学术期刊上发表的论文,没有引用专利和发表到国外期刊的文献。

1 软硬件研发

研制小型、微型化和专用型仪器是近些年分析仪器领域的主要发展趋势,我国近红外光谱仪器的研制也明显呈现出这一特点。国内已有多家单位基于 MEMS 技术研制出了多种分光类型的小型或微型近红外光谱仪器实验样机^[14]。在专用仪器方面更是日新月异,安徽农业大学等研制出俗称“生茶报价仪”的茶叶品质分析仪,可以快速划分出鲜叶茶的等级。中国计量学院等单位基于干涉滤光片研制了茶叶成分检测仪。中国农业大学研制出快速测定土壤中有机质和氮含量的便携式仪器,并在开发车载式土壤肥力实时分析仪^[17]。江苏大学研制了以半导体激光器为光源的农产品水分近红外检测仪,能满足一般生产和流通行业对农产品和食品的水分快速检测的需要^[18]。上海交通大学开发了一套退役车用塑料近红外识别试验系统,初步试验结果表明对车用塑料的识别准确率超过 95%^[19]。暨南大学利用多个不同中心波长的近红外 LED 组成阵列光源,设计了用于检测输油管道中油品界面的专用仪器^[20]。中国科学院半导体研究所与相关单位合作研制出了农作物种子的近红外光谱分析鉴别系统,并在玉米种子上得到了初步的推广应用。西安交通大学等设计构建了测定烷烃类气体的硬件系统平台,给出了可喜的实验结果。

在线近红外分析仪器,尤其是用于水果筛选的仪器一直是研究的热点,我国有多家单位研制出水果在线分选装置样机,并对过程测量参数进行了深入研究^[21-23]。用于固体颗粒的在线仪器陆续研制成功,例如石油化工科学研究院研制出测定聚丙烯多种物化参数的专用在线分析仪,中国科学院合肥物质科学研究院研制出尿素产品质量在线检测装置,陕西省电力科学研究院等单位研制出了煤质在线分析仪,并都在工业上进行了应用试验^[24, 25],这些在线仪器稍作改动便可应用于其他类型的固体样品分析。广西大学也联合相关单位持续多年研制用于白糖实时分析的在线近红外分析仪器^[26]。

在软件编制方面,中南大学开发出 ChemoSolvTM 分子光谱化学计量学软件,中国农业大学开发出复方中药专用近红外质量控制分析软件和近红外烟叶质量控制与配方设计专用软件^[27],石油化工科学研究院开发出 RIPP 化学计量学光谱分析软件 3.0 版本^[28],中国计量学院开发出基于独立分量分析方法(ICA)的近红外光谱分析软件^[29]。北京航空航天大学设计开发了一套集近红外光谱采集与数据处理为一体的软件,用于研究生开放性实验的教学平台^[30, 31]。江苏大学则开发出基于安卓系统掌上设备的近红外光谱分析与检测软件^[32]。

2 方法研究

用于近红外光谱分析的化学计量学方法研究被广泛关注^[33],主要集中在四个方面:光谱预处理和变量筛选、多元定量校正方法、模式识别方法、模型传递方法。

在光谱预处理和变量筛选方面,多元散射校正、正交信号校正、净分析信号、小波变换、模拟退火算法、遗传算法、粒子群算法、连续投影算法、蒙特卡罗无信息变量等方法及其他之间的组合尝试在已发表的论文中层出不穷^[34-39]。梁逸曾教授团队提出的用于筛选波长变量的竞争性自适应重加权算法(CARS)得到了较多验证,被证明是一种十分有效的变量选择方法^[40, 41]。类似的,将变量筛选与回归方法结合,还提出了一些新的方法^[42-44]。

在多元定量校正方法中,最小二乘支持向量回归机(LS~SVM)是近些年倍受推崇的一种非线性建模方法,表现出较好的回归和预测性能^[39, 41],针对 LS~SVM 还提出了一些改进的算法^[45]。其他一些非线性校正算法,例如高斯过程回归(GPR)和贝叶斯神经网络(BANN)等,也引起了关注。集成(或共识)的建模策略(Ensemble or Consensus strategy)由于多次使用训练集中不同子集样本的信息,降低了预测结果对某一(或某些)样本的依赖性,从而可提高模型的预测稳定性。依据不同的抽样方式和模型融合方式,提出了多种实现集成建模策略的具体方法^[46, 47]。若校正模型数量多或校正样本数量巨大,回归计算量大,尤其在光谱预处理和波长变量选择等参数进行反复优化时,传统单线程回归运算十分缓慢,此时采用大规模并行计算策略,则可大幅提高建模速度^[48]。

在近红外光谱分析的定性技术中,越来越多地采用有监督的模式识别方法。例如,许多的应用研究表明,PLS~DA 的判别准确度明显优于经典的主成分分析(PCA)方法^[49]。支持向量机、人工神经网络、以及基于 Fisher 准则的典型变量分析方法(Canonical variates analysis, CVA)在烟草、果品和药物的近红外光谱模式识别的应用研究中也表现出较好的性能^[50-52]。对于药品、烟草和油品等大型近红外光谱数据库,基于光谱残差、标准偏差和相关系数等参数建立的库光谱搜索方法被认为是非常有效的识别方式,一些方法已得到了实际应用^[53-56]。

尽管大家都一致认可,近红外分析模型在相同型号仪器上的通用性最终依赖于硬件制造技术,国外有关模型传递算法的研究工作也明显减少,目前多数使用近红外光谱技术的国际大型集团公司都尽可能采用相同型号的仪器。尽管如此,模型传递算法的研究仍存有一定必要性^[57-60],而且随着仪器硬件技术指标的提高,不同型号甚至不同分光类型仪器之间的模型传递算法也将会变得更简单和实用。

近红外光谱分析技术的方法学研究范畴除包括化学计量学外,还涵盖实验方法,涉及到光谱采集方式及附件、光谱采集参数(光程、分辨率、扫描次数、温度二维相关参数等)、样品预处理与表达方式、以及基础数据获取方式等内容,实验方法是近红外光谱技术链条中极其关键的一个环节,其目

标是在兼顾测试速度和成本的前提下,尽可能得到信息丰富、重复性好、信噪比高、线性范围宽的光谱。值得欣喜的是,我国有越来越多的研究者开始重视近红外光谱实验方法的研究^[61-67],这是近红外光谱技术发展较高程度的重要标志,是该技术真正走向实际应用的一个必经发展阶段。

近红外光谱化学成像是近年来快速发展起来的一种新的分析手段,尤其在化学成分分析和污染物的空间分布测定方面,具有其他技术无可比拟的优点。我国科研工作者在光谱成像方面做了不少的可行性研究工作,研究论文大量涌现,是当前一个研究热点,涉及果蔬内外部综合品质分析、肉品质及污染检测、农作物信息诊断(农作物种子成分、品种和病虫害检测;田间植株长势监测和病虫害检测)、饲料检测等^[68,69]。

3 应用开发

3.1 食品

生活水平的提高使消费者更加关注食品的品质,从而对食品品质快速检测技术提出了更高的要求。近红外光谱应用开发人员也已不满足于对肉、奶、饮料、果蔬和食用油等大宗食品中的常规化学成分进行快速分析,近红外光谱被用于越来越多类型食品的更多品质参数的快速或在线分析,食品真伪和产地的快速鉴别尤其引人关注^[70,71]。

在肉、水产品及其制品应用研究中,近几年我国近红外光谱技术的热点集中在肉品感官品质(如嫩度、肉色及新鲜度等)评价,以及肉品的产地和品种的快速鉴定等方向^[72,73]。例如,程旋和谢雯雯等分别采用近红外光谱建立了鱼肉新鲜度的评价方法^[41,74],孙淑敏等利用近红外光谱建立了快速鉴别我国五个牧区和农区羊肉产地的判别模型,刘晓晔采用近红外光谱成功鉴别了同一品种普通公牛和淘汰母牛肉^[75],陶琳等利用近红外光谱快速识别出 4 个不同产地的海参样品^[76]。在蛋类快速检测中,近红外光谱不仅用于鸡蛋和蛋壳品质的分析,还用于鸡蛋种类的鉴别以及孵化前种蛋中无精和受精蛋的检测^[77-79]。

在食用油方面,快速鉴别油脂的真伪、掺杂是当前我国食用油市场监管的重要难题之一。薛雅琳等采集全国不同地区四种食用植物油(芝麻油、大豆油、花生油和菜籽油)713 个样品建立了植物油近红外光谱库,为食用植物油的掺伪快速鉴别奠定了基础^[80]。张菊华等基于 163 个样本对茶油真伪进行了成功鉴别分析^[81],温珍才等则用近红外光谱方法区分压榨和浸出两种加工方法制取的茶油,得到了满意的识别结果^[82]。在奶及乳制品掺伪鉴别方面,张鑫等基于 287 份生鲜乳和 526 份掺假生鲜乳构建了生鲜乳和掺假生鲜乳近红外光谱库,建立了快速鉴别掺假生鲜乳的算法流程^[83]。彭攀等对近红外快速鉴别奶粉中同时存有多种掺假物质的情况进行了可行性研究,初步结果较为满意^[84]。

在常见的苹果、梨、桃和柑橘类水果内、外部品质和产地的近红外检测方面,我国的应用研究水平已达到较高的程度^[85],无论是便携式还是在线式的测量应用,较大规模的推广翘首可待。如今,果蔬的近红外应用研究已扩展到猕猴桃、香蕉、枣、李子、柿子、板栗等^[51,86-88],还出现了一些更具有实际应用意义的检测项目,例如干辣椒的辣度、莲藕的淀粉含量、马铃薯加工品质指标等^[89-91]。也许不久的将来,可以基于上述这些应用研究研制出价格合理的专用型分析仪器。在谷物和果蔬农残与微生物污染检测方面,也有一些相关的研究报道^[92]。

在酒和调味品领域,越来越多的生产企业开始关注和使用近红外光谱技术^[93-96],例如,绍兴黄酒集团有限公司快速测定黄酒中酒精度、总酸和氨基酸态氮等多项理化指标,海天调味食品股份有限公司快速测定黄豆原料的蛋白质含量和酱油的全氮含量,江苏恒顺醋业股份有限公司快速鉴别食醋品牌和贮藏年份,丹尼斯克杰能科无锡工厂快速测定发酵液中乙醇含量。一些质检部门也开始尝试采用近红外光谱方法快速筛选市场上不合格的产品,例如白酒中的乙醇、总酸、总酯和己酸乙酯含量等关键指标^[97]。

我国利用近红外技术对蜂蜜主要成分含量分析、产地和植物源判别、真伪鉴别做了大量的应用研究工作,所测蜂蜜的成分包括水、果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、还原糖和可溶性固形物等^[98,99]。在茶叶及茶制品方面,近红外光谱除了成品茶叶的常规化学成分的快速分析外,目前的应用研究热点主要集中在茶鲜叶成分的快速分析、茶叶加工过程中的品质检测、以及茶叶种类识别、产地和真伪鉴别等^[15,100-103],例如,中国农业科学院茶叶研究所基于近红外光谱开发出龙井茶的产区、品种溯源识别技术,对茶叶产地与品种的定标集识别准确率分别达到了 98.4% 和 90.3%,验证集准确率达到 96.8% 和 83.5%。

3.2 农业

在谷物及经济作物方面,我国已尝试采用近红外网络对小麦的品质进行监测,用于小麦的品质区划、品种鉴别及种植省份识别方面^[104]。近些年,近红外光谱主要应用研究方向之一是农作物种子品质的分析,涉及到玉米、小麦、水稻、大豆、西瓜、以及草类种子等,分析内容包括种子品种鉴定、种子纯度鉴定、种子发芽率和生活力测定等^[105-108],有些应用研究成果已陆续开始推广。人们甚至已经开始利用近红外快速分析的特点,对成千上万份种质资源进行统计评价^[109]。在商品谷物品质分析上,更注重食味品质的直接关联预测,例如稻米的品尝评分值等^[110-112]。在农作物生长监测方面,近红外光谱可早期诊断病虫害,进而有望及时指导农户进行植物病害防治^[113,114]。

近红外光谱技术不仅能够分析土壤有机成分,还可分析土壤矿质成分、预测土壤性质(如质地和 pH 值等),逐渐成为土壤定位管理和数字土壤信息中海量数据获取的重要技术^[17]。近些年我国对近红外光谱快速检测土壤的应用研究更加具有实用性,建立了针对特定地域土壤(如苹果栽培区和脐橙果园土壤等)的近红外光谱分析模型,有关单位正在研发便携式和车载式农田土壤实时分析仪^[115]。基于近红外光谱分析数据,已经尝试开展了土壤有机质的空间制图工作。此外,近红外光谱还被用来快速测定以禽粪便为原料的有机肥的总养分含量、复合化肥中主要成分的含量^[116]、以及农药中有效成分的含量^[117,118],不仅可以用于生产过程的

控制分析,还可为合理施肥施药提供帮助。

我国在近红外光谱检测饲料方面做了大量又系统的应用研究与推广工作,建立了丰富且较为完善的饲料模型数据库,近红外光谱不仅能用于饲料原料及产品中常量成分(例如水分、粗蛋白、粗脂肪、粗纤维、粗灰分和淀粉等)的分析,还能用于低含量成分(如氨基酸和维生素等)的分析,同时能用于饲料营养价值的快速评定,为饲料生产过程的质量控制提供了一种行之有效的技术^[119]。我国大型的饲料集团公司几乎都采用近红外光谱快速或者在线分析手段,一方面对饲料原料按照其品质进行按质论价收购,另一方面在保证饲料产品合格的前提下调整配方,显著降低生产成本,从而获取可观的经济效益^[120]。

近红外光谱在我国烟草行业的应用已相对成熟,尤其是在烟草常规化学成分测定方面,近红外光谱模型库越来越丰富,预测准确性也越来越高,在配方设计和质量监控中发挥着重要作用^[121,122]。在烟草品种、烟叶部位、等级的识别以及卷烟制品真伪鉴别方面,应用研究结果也较为丰硕^[123]。近些年的应用研究已扩展到卷烟辅料品质的检测,例如烟用白乳胶、卷烟糖料、香料和烟用接装纸等^[124-126],以及将近红外光谱直接用于配方过程设计和生产的过程质量控制,以保证卷烟品质的稳定性和均匀性。此外,近红外在线分析技术在烟草领域的应用研究与实施也逐步深入^[127,128]。

3.3 药物

近年来,近红外光谱在我国药物尤其是中药分析方面取得了较快的发展。对上百种中药材的可行性应用研究表明,近红外光谱能够简便、快速、准确地鉴别中药材的种类、产地和真伪,并且能够快速测定中药材中有效成分的含量以及中药辅料(如蜂蜜)的品质^[129-132]。我国有不少中药企业将在线近红外光谱用于中药生产的提取、纯化、浓缩和混合等过程,为中药生产过程的质量控制提供有效的分析技术^[133-138]。值得一提的是,徐冰等基于近红外在线分析结果建立了检测金银花醇沉加醇过程终点的多变量过程控制模型^[139]。在中成药检测方面,近红外光谱可以快速测定中成药中有效成分的含量,以及鉴别中成药的生产厂家等,例如,白新涛等建立了快速测定黄芪注射液黄芪甲苷和总固体量的近红外分析模型^[140],史会齐等采用近红外光谱快速识别出不同厂家的六味地黄丸^[141]。

相对于复杂的中药体系,近红外光谱对西药的定性和定量分析更为容易。近些年,在西药分析上,我国的近红外应用研究主要集中在原辅料的真伪鉴别和成品药中的有效成分含量测定等方面,例如,李臣贵等利用近红外光谱建立快速无损鉴别头孢类原料药的方法^[142],孟昱等采用近红外光谱法对 41 种常用药用辅料进行了快速鉴别^[143],这些方法适用于制药企业在原料进厂时逐桶定性鉴别和车间投料的过程控制。王海敏等采用近红外光谱在不破坏样品包装情况下快速预测头孢丙烯原料药中的水分含量^[144],陈久艳等测定氯沙坦钾氢氯噻嗪片中两种有效成分的含量^[145],冯艳春等则尝试采用近红外光谱快速测定药物标准品分装及存储过程中的水分含量^[146]。

在药物流通领域,中国食品药品检验检定院以近红外光

谱为核心技术研制出了药品检测车,从 2007 年起在全国各地市装备,目前已装备有 400 余辆,在基层实现了现场对药品质量的快速筛查,提高了药品监管工作的效率和质量^[147,148]。在此平台上,不少地方药检部门建立了地区级的真伪药鉴别模型,发挥了很有效的作用^[149,150],例如,广州市药品检验所建立了鉴别消渴丸真伪的识别模型,宁波市药品检验所建立了硫酸亚铁片的一致性检验模型。

3.4 炼油与化工

近些年,近红外光谱技术在我国炼油领域的应用取得了较大进展^[151],例如,在线近红外在汽油、柴油调合管道自动工艺中几乎成为必选的一种分析手段^[152]。石油化工科学研究院自 2006 年开始,迄今已经建立了相对完善的汽油和柴油近红外光谱数据库,可以有效支撑这项技术在我国持续推广应用。随着进口原油比例的增大,炼油企业加工的原油种类越来越多,近红外原油快速评价技术日益受到炼油厂的重视,石油化工科学研究院目前已基于 500 多种我国常加工的国内外原油种类,建立了拥有自主知识产权的原油近红外光谱数据库,并在一些炼油厂进行了工业应用试验,能快速预测出单种类原油和混兑原油的基本性质数据,以及馏分油的关键性质数据^[54]。

近红外光谱在生物燃料快速检测分析方面,也引起我国相关研究和应用人员的关注,石油化工科学研究院建立了近红外光谱快速测定生物柴油主要成分(脂肪酸甲酯、单甘酯、二甘酯、三甘酯和甘油)的分析模型,适用于生物柴油生产过程的中间控制分析^[182]。淡图南、欧阳爱国和段敏伟等分别采用近红外光谱建立了快速测定甲醇汽油中甲醇比例、乙醇汽油中乙醇比例、以及生物柴油调合产品中生物柴油比例的方法^[183-185]。

在化工领域,近红外光谱的应用范围更广。张彦君和张雪梅等将近红外光谱用于聚丙烯物性参数的快速分析,在工业上能够及时指导工艺修改和调整技术参数,减少过渡料的产生^[157,158]。近红外光谱通过光纤探头可实时监测聚合物整个反应过程,对反应动力学和机理进行研究^[159]。在精细化工产品快速分析方面,近红外光谱大有用武之地,例如,秦庆伟等快速测定聚乙烯醇的醇解度,任静等快速测定脂肪酐乙二醇胺中甘油含量,胡爱琴等快速测定干粉灭火剂有效成分含量等^[160-161]。

近红外光谱在我国军工和航天等特殊化学品领域有较为广泛的应用研究。例如,李定明等快速测定了核燃料后处理水相料液中的硝酸浓度^[162],邹权等快速测定了硝酸推进剂中主要固体组分黑索金和硝化棉的含量,李伟等快速测定鱼雷动力燃料中的主要组分含量^[163],该燃料主要由 1,2-丙二醇二硝酸酯、2-硝基二苯胺和癸二酸二丁酯三种成分组成,目前该方法已装备质量监测单位用于鱼雷燃料的定期检查,取得了较好的应用效果^[164]。

3.5 其他领域

近红外光谱在我国临床医学上的应用研究始终没有中断过,涉及无创血糖的测量、癌症的早期诊断、慢性疾病的快速筛查、血液中化学成分的分析等方面^[165,166]。此外,临床医学上的功能近红外光谱技术越来越受到关注^[167],可以进

行脑部血流动力学和氧代谢的无创监测,应用于神经内、外科、新生儿科、麻醉科的脑监护以及认知科学领域的研究中。

近红外光谱在我国林业的应用研究也取得了较丰硕的成果,在快速预测木材化学组成、物理力学性质(密度、抗弯弹性模量及抗弯强度)、解剖性质(纤维素结晶度、微纤丝角及纤维形态特征)、腐朽性质以及木材分类与加工等方面都有收获^[168,169]。在造纸业中,刘雪云等将近红外光谱用于快速鉴别制造成品纸的纸浆原料种类,宋舒苹等建立了相思树未漂硫酸盐浆纸张物理强度及纸张白度的近红外预测模型,俞霁川等则快速预测新闻纸厂脱墨浆中胶黏物含量^[170-172]。

在纺织领域,近红外光谱能快速对纺织纤维及其制品的种类进行鉴别以及成分预测,例如,袁洪福等对 12 种纺织纤维共 214 个样品进行了成功鉴别,王京力等采用近红外光谱快速预测锦氨混纺织物中锦纶的含量,黄珺等用近红外漫反射光谱法快速测定天然纤维素清洁浆料 α -纤维素含量^[173]。另据报道,中山检验检疫局在应用近红外光谱快速测定纺织纤维含量的研究上已取得了阶段性进展,针对聚酯与棉混纺、棉与氨纶、棉与丝、聚酯与粘胶、聚酯与氨纶 5 种混纺产品,已制成标准样品 500 余个。

4 结束语

纵观国内外的状况,不难看出近红外光谱技术的应用前景十分广阔,目前的这些应用只是冰山一角而已,任何一个应用点都潜在着巨大的研究课题和推广市场。但是也应

清晰认识到,该技术的应用实施复杂而繁琐,属于典型的系统工程,涉及诸多专业,需要多方面配合,要实现满意的应用效果,不仅要打“攻坚战”,还要打“持久战”。在过去的 5 年—10 年中,我国近红外光谱分析技术无论在研发还是应用方面都取得了长足进展,方法和应用研究向更深层次和更广领域推进,在一些应用场合尤其是饲料、药品检测、烟草、炼油和化工等行业获得了可观的经济和社会效益。

“效益”是近红外技术生存和兴旺的根源和保证,几乎所有的研究和应用都应围绕着如何取得“效益”展开。国际上,为了取得“效益”,近红外光谱技术的发展已实现了两次握手,第一次握手是光谱仪器制造商、方法开发部门与应用企业之间的联合,另一次握手是以近红外光谱为核心的现代过程分析与过程控制的联合,这两方面的密切结合也将是我国今后近红外光谱技术发展的大势所趋。

无论是便携式还是在线式分析,制约近红外技术大规模推广应用的主要瓶颈在于模型数据库的建立与维护。因此,我国在近红外技术领域的另一个发展趋势是组建行业的建模中心,这需要围绕仪器选型、实验方法优化与规范化(有可能包含专用附件的研制)、建模算法与策略、网络化运行等方面做扎实的基础研究和系统的技术开发等工作。

尽管目前在大多数应用场合,近红外光谱技术还不是一种必须的分析手段,但可以预期的是,随着我国生产力水平的不断提高,将会有越来越多的行业离不开这种技术。相信未来的 5 年—10 年,近红外光谱分析技术一定能够在我国信息化与工业化深度融合的发展进程中发挥应有的作用。

References

- [1] BAI Yan(白雁). The Application of Modern Near Infrared Spectroscopy in Medicine and Food Quality Evaluation System(现代近红外光谱分析技术在药品及食品品质评价系统中的应用). Beijing: Higher Education Press(北京:高等教育出版社), 2009.
- [2] Jerry Workman Jr, Lois Weyer. Practical Guide To Interpretive Near-infrared Spectroscopy(近红外光谱解析实用指南). Translated by CHU Xiao-li, XU Yu-peng, TIAN Gao-you(褚小立, 许育鹏, 田高友译). Beijing: Chemical Industry Press(北京:化学工业出版社), 2009.
- [3] LU Wan-zhen, YUAN Hong-fu, CHU Xiao-li(陆婉珍, 袁洪福, 褚小立). Near Infrared Spectroscopy Instrument(近红外光谱仪器). Beijing: Chemical Industry Press(北京:化学工业出版社), 2010.
- [4] HU Chang-qin, FENG Yan-chun(胡昌勤, 冯艳春). Rapid Analysis of Drugs by Near Infrared Spectroscopy(近红外光谱法快速分析药品). Beijing: Chemical Industry Press(北京:化学工业出版社), 2010.
- [5] ZHANG Xiao-chao, WU Jing-zhu, XU Yun(张小超, 吴静珠, 徐云). Near Infrared Spectral Analysis Technology and Its Application in Modern Agriculture(近红外光谱分析技术及其在现代农业中的应用). Beijing: Publishing House of Electronics Industry(北京:电子工业出版社), 2012.
- [6] CHEN Lan-zhen, YE Zhi-hua, ZHAO Jing(陈兰珍, 叶志华, 赵静). The Analysis of Honey by Near Infrared Spectroscopy(蜂蜜近红外光谱检测技术). Beijing: China Light Industry Press(北京:中国轻工业出版社), 2012.
- [7] SONG Hai-yan(宋海燕). The Analysis of Honey by Near Infrared Spectroscopy(土壤近红外光谱检测). Beijing: Chemical Industry Press(北京:化学工业出版社), 2013.
- [8] YAN Yan-lu, CHEN Bin, ZHU Da-zhou(严衍禄, 陈斌, 朱大洲, 等). The Principle, Technology and Application of Near Infrared Spectroscopy analysis(近红外光谱分析的原理、技术与应用). Beijing: China Light Industry Press(北京:中国轻工业出版社), 2013.
- [9] CHU Xiao-li(褚小立). Molecular Spectroscopy Analytical Technology Combined with Chemometrics and its Applications(化学计量学方法与分子光谱分析技术). Beijing: Chemical Industry Press(北京:化学工业出版社), 2011.
- [10] Paul J. Gemperline. Practical Guide to Chemometrics(化学计量学实用指南). Translated by WU Hai-long, KANG Chao(吴海龙, 康超, 等译). Beijing: Science Press(北京:科学出版社), 2012.
- [11] LIANG Yi-zeng, XU Qing-song(梁逸曾, 许青松). Analysis of Complex Instrument System—Grey, Black and White Analysis System

- and the Methods of Multivariate Analysis(复杂体系仪器分析—白、灰、黑分析体系及其多变量解析方法). Beijing: Chemical Industry Press(北京: 化学工业出版社), 2012.
- [12] YUAN Tian-jun, WANG Jia-jun, ZHE Wei, et al(袁天军, 王家俊, 者 为, 等). Chinese Agricultural Science Bulletin(中国农学通报), 2013, (20): 190.
- [13] CHU Xiao-li, YUAN Hong-fu, LU Wan-zhen(褚小立, 袁洪福, 陆婉珍). Analytical Instrumentation(分析仪器), 2006, (2): 1.
- [14] HU Fang-qiang, LI Sheng(胡方强, 李 晟). Instrumentation Technology(仪表技术), 2012, (12): 21.
- [15] WANG Sheng-peng, WAN Xiao-chun, LIN Mao-xian(王胜鹏, 宛晓春, 林茂先). Journal of Tea Science(茶叶科学), 2011, 31(1): 66.
- [16] LÜ Jin, SHI Yang, LIU Hui-jun, et al(吕 进, 施 秧, 刘辉军, 等). Opto-Electronic Engineering(光电工程), 2010, 37(1): 82.
- [17] LI Min-zan, ZHENG Li-hua, AN Xiao-fei, et al(李民赞, 郑立华, 安晓飞, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2013, 44(3): 73.
- [18] HU Jing-fang, CHEN Bin, LU Dao-li, et al(胡静芳, 陈 斌, 陆道理, 等). Spectral Instrument and Analysis(光谱仪器与分析), 2011, (Z1): 68.
- [19] ZHANG Hong-shen, CHEN Ming(张洪申, 陈 铭). Engineering Plastics Application(工程塑料应用), 2013, (6): 69.
- [20] YU Qian, ZHANG Jun, CHEN Zhe, et al(余 谦, 张 军, 陈 哲, 等). Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory(光谱实验室), 2010, 27(3): 1213.
- [21] OUYANG Si-yi, XIE Xiao-qiang, LIU Yan-de, et al(欧阳思怡, 谢小强, 刘燕德, 等). Hubei Agricultural Sciences(湖北农业科学), 2013, 52(10): 2242.
- [22] SUN Li, ZHANG Shi-qing, LIN Hao, et al(孙 力, 张世庆, 林 颢, 等). Food Science and Technology(食品科技), 2010, 35(7): 267.
- [23] JIANG Sheng-nan, QI Shu-ye, HAN Dong-hai(蒋圣楠, 戚淑叶, 韩东海). Journal of Food Safety and Quality(食品安全质量检测学报), 2012, 3(5): 467.
- [24] SUN Yan-feng, LI Zhuo-yue, ZHONG Yang, et al(孙岩峰, 李卓越, 钟 洋, 等). Modern Scientific Instruments(现代科学仪器), 2011, (1): 60.
- [25] GUAN Wei-xin, WU Shu-di, GUAN Ye, et al(管维新, 吴曙笛, 管 晔, 等). Thermal Power Generation(热力发电), 2011, 40(6): 89.
- [26] FENG Hong-nian, LI Qing-tao, LU Jia-jiong, et al(冯红年, 黎庆涛, 卢家炯, 等). Journal of Instrumental Analysis(分析测试学报), 2009, 28(12): 1460.
- [27] LI Jun-hui, CHEN Bin, MA Xiang, et al(李军会, 陈 斌, 马 翔, 等). Modern Scientific Instruments(现代科学仪器), 2008, (4): 35.
- [28] CHU Xiao-li, WANG Yan-bin, XU Yu-peng, et al(褚小立, 王艳斌, 许育鹏, 等). Modern Scientific Instruments(现代科学仪器), 2009, (4): 6.
- [29] FANG Li-min, LIN Min(方利民, 林 敏). Journal of China Jiliang University(中国计量学院学报), 2010, 21(1): 42.
- [30] LI Qing-bo, YAN Hou-lai, ZHANG Qian-xuan, et al(李庆波, 阎侯赖, 张倩喧, 等). Experimental Technology and Management(实验技术与管理), 2010, 27(5): 105.
- [31] FENG Bang, CHEN Bin, YAN Hui(冯 帮, 陈 斌, 颜 辉). Modern Instruments and Medical Treatment(现代仪器与医疗), 2014, 20(2): 12.
- [32] CHU Xiao-li, XU Yu-peng, LU Wan-zhen(褚小立, 许育鹏, 陆婉珍). Chinese Journal of Analytical Chemistry(分析化学), 2008, 8(5): 702.
- [33] CHEN Hua-zhou, PAN Tao, CHEN Jie-mei, et al(陈华舟, 潘 涛, 陈洁梅, 等). Computers and Applied Chemistry(计算机与应用化学), 2011, 28(5): 518.
- [34] SHI Ji-yong, ZOU Xiao-bo, ZHAO Jie-wen, et al(石吉勇, 邹小波, 赵杰文, 等). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2011, 30(5): 458.
- [35] ZHANG Xian, YUAN Hong-fu, GUO Zheng, et al(张 娴, 袁洪福, 郭 峥, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2011, 31(6): 1688.
- [36] GAO Hong-zhi, LU Qi-peng, DING Hai-quan, et al(高洪智, 卢启鹏, 丁海泉, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2013, 21(8): 1974.
- [37] HUANG Zhuang-rong, SHA Sha, RONG Zheng-qin, et al(黄庄荣, 沙 莎, 荣正勤, 等). Food Science and Technology(食品科技), 2013, 41(6): 922.
- [38] LIANG Xiu-ying, LI Xiao-yu(梁秀英, 李小昱). Chinese Journal of Structural Chemistry(传感技术学报), 2011, 27(8): 1228.
- [39] JIN Ye, YANG Kai, WU Yong-jiang, et al(金 叶, 杨 凯, 吴永江, 等). Food Science and Technology(食品科技), 2012, 40(6): 925.
- [40] ZHANG Hua-xiu, LI Xiao-ning, FAN Wei, et al(张华秀, 李晓宁, 范 伟, 等). Journal of Instrumental Analysis(分析测试学报), 2010, 29(5): 430.
- [41] CHENG Ni, LI Xiao-yu, ZHAO Si-ming, et al(程 旆, 李小昱, 赵思明, 等). Journal of Food Safety and Quality(食品安全质量检测

- 学报), 2013, (2): 427.
- [42] ZHANG Ming-jin, DU Yi-peng, ZHANG Shi-zhi, et al(张明锦, 杜一平, 张世芝, 等). Computers and Applied Chemistry(计算机与应用化学), 2012, 29(3): 335.
- [43] CHEN Xin, LIU Fei(陈鑫, 刘飞). Computers and Applied Chemistry(计算机与应用化学), 2012, 29(7): 812.
- [44] DAN Tu-nan, DAI Lian-kui(淡图南, 戴连奎). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2009, 29(2): 351.
- [45] HUANG Chang-yi, FAN Hai-bin, LIU Fei, et al(黄常毅, 范海滨, 刘飞, 等). Journal of Instrumental Analysis(分析测试学报), 2014, 33(1): 13.
- [46] TAN Chao, QIN Xin, LI Meng-long, et al(谭超, 覃鑫, 李梦龙, 等). Computers and Applied Chemistry(计算机与应用化学), 2010, 27(5): 623.
- [47] ZHANG Hua-xiu, LI Xiao-ning, FAN Wei, et al(张华秀, 李晓宁, 范伟, 等). Computers and Applied Chemistry(计算机与应用化学), 2010, 27(9): 1197.
- [48] YANG Hui-hua, TANG Tian-biao, LI Ling-qiao, et al(杨辉华, 唐天彪, 李灵巧, 等). Journal of Instrumental Analysis(分析测试学报), 2012, 31(7): 771.
- [49] TANG Guo, TIAN Kuang-da, LI Zu-hong, et al(唐果, 田旷达, 李祖红, 等). Tobacco Science & Technology(烟草科技), 2013, (4): 60.
- [50] NIU Xiao-ying, SHAO Li-min, ZHAO Zhi-lei, et al(牛晓颖, 邵利敏, 赵志磊, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2012, 32(8): 2095.
- [51] ZHOU Zhu, LI Xiao-yu, LI Pei-wu, et al(周竹, 李小昱, 李培武, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2011, 27(3): 331.
- [52] BU Xi-bin, WU Bin, JIA Hong-wen, et al(卜锡滨, 武斌, 贾红雯, 等). Computer Engineering and Applications(计算机工程与应用), 2013, 49(2): 170.
- [53] FENG Yan-chun, YANG Xiao-li, YANG Zhi-hai, et al(冯艳春, 杨晓莉, 杨智海, 等). Chinese Journal of Pharmaceutical Sciences(药物分析杂志), 2011, 20(3): 290.
- [54] CHU Xiao-li, TIAN Song-bai, XU Yu-peng, et al(褚小立, 田松柏, 许育鹏, 等). Petroleum Processing and Petrochemicals(石油炼制与化工), 2012, 43(1): 72.
- [55] ZHOU Wan-huai, XIE Li-juan, YING Yi-bin(周万怀, 谢丽娟, 应义斌). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2013, 29(19): 285.
- [56] GUO Zheng-fei, DAI Lian-kui(郭正飞, 戴连奎). Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory(光谱实验室), 2013, 30(5): 2418.
- [57] LIU Xian, DONG Su-xiao, HAN Lu-jia, et al(刘贤, 董苏晓, 韩鲁佳, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2009, 40(5): 153.
- [58] HU Rui-wen, XIA Jun-fang(胡润文, 夏俊芳). Journal of Food Science(食品科学), 2012, 33(3): 28.
- [59] YANG Kai, LIU Peng, WANG Wei-miao, et al(杨凯, 刘鹏, 王维妙, 等). Acta Tabacaria Sinica(中国烟草学报), 2012, 18(6): 27.
- [60] LEI De-qing, HU Chang-qin, FENG Yan-chun, et al(雷德卿, 胡昌勤, 冯艳春, 等). Acta Pharmaceutica Sinica(药学报), 2010, 45(11): 1421.
- [61] SHAO Xue-guang, NING Yu, LIU Feng-xia, et al(邵学广, 宁宇, 刘凤霞, 等). Acta Chimica Sinica(化学学报), 2012, 70(20): 2109.
- [62] CHEN Gui-ping, TONG Pei-jin, GENG Jin-pei, et al(陈贵平, 童佩瑾, 耿金培, 等). Journal of Instrumental Analysis(分析测试学报), 2012, 31(5): 605.
- [63] LU Qi-peng(卢启鹏). OME Information(光机电信息), 2010, 27(12): 44.
- [64] ZHOU Zhi-qin, CHEN Bin, YAN Hui, et al(周志琴, 陈斌, 颜辉, 等). Chinese Cereals and Oils Association(中国粮油学报), 2011, 26(9): 115.
- [65] LI Gong, ZHAO Zhe, LIU Rui, et al(李刚, 赵喆, 刘蕊, 等). Food Science and Technology(食品科技), 2011, 39(4): 588.
- [66] WANG Jing-li, GUI Jia-xiang, GENG Xiang, et al(王京力, 桂家祥, 耿响, 等). Shanghai Textile Science & Technology(上海纺织科技), 2013, 41(9): 51.
- [67] HAN Dong-hai, CHANG Dong, SONG Shu-hui, et al(韩东海, 常冬, 宋曙辉, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2013, 44(7): 174.
- [68] HAN Xiao-zhen, XIN Shi-hua(韩小珍, 辛世华). Ningxia Engineering Technology(宁夏工程技术), 2013, 12(4): 379.
- [69] JIANG Xun-peng, YANG Zeng-ling, LIU Xian, et al(姜训鹏, 杨增玲, 刘贤, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2012, 43(7): 141.
- [70] SONG Zhi-qiang, ZHANG Heng, ZHENG Xiao, et al(宋志强, 张恒, 郑晓, 等). Journal of Wuhan Polytechnic University(武汉工业学院学报), 2013, (2): 1.
- [71] LI Liang, DING Wu(李亮, 丁武). China Dairy Cattle(中国奶牛), 2009, (3): 46.
- [72] PENG Yan-kun, ZHANG Lei-lei(彭彦昆, 张雷蕾). Journal of Food Safety and Quality(食品安全质量检测技术), 2010, 27(2): 62.

- [73] REN Rui-juan, CHAI Chun-xiang, LU Xiao-xiang, et al(任瑞娟, 柴春祥, 鲁晓翔, 等). Science and Technology of Food Industry(食品工业科技), 2013, 34(2): 361.
- [74] XIE Wen-wen, LI Jun-jie, LIU Ru, et al(谢雯雯, 李俊杰, 刘茹, 等). Freshwater Fisheries(淡水渔业), 2013, 43(4): 85.
- [75] LIU Xiao-ye, TANG Xiao-yan, SUN Bao-zhong, et al(刘晓晔, 汤晓艳, 孙宝忠, 等). Journal of Food Science(食品科学), 2012, 33(24): 244.
- [76] TAO Lin, WU Zhong-chen, ZHANG Peng-yan, et al(陶琳, 武中臣, 张鹏彦, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2011, 27(5): 364.
- [77] LIU Yan-de, ZHOU Yan-rui, PENG Yan-ying, et al(刘燕德, 周延睿, 彭彦颖, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2013, 21(1): 40.
- [78] XIONG Huan, XU Hui-rong, ZHOU Wan-huai, et al(熊欢, 徐惠荣, 周万怀, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2013, 29(S1): 264.
- [79] TANG Dan-ming, SUN Bin, LIU Hui-jun, et al(汤丹明, 孙斌, 刘辉军, 等). Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory(光谱实验室), 2012, 29(5): 2699.
- [80] XUE Ya-lin, WANG Xue-lian, ZHANG Rui, et al(薛雅琳, 王雪莲, 张蕊, 等). Chinese Cereals and Oils Association(中国粮油学报), 2010, 25(10): 116.
- [81] ZHANG Ju-hua, ZHU Xiang-rong, LI Gao-yang, et al(张菊华, 朱向荣, 李高阳, 等). Food Science and Technology(食品科技), 2011, 39(5): 748.
- [82] WEN Zhen-cai, SUN Tong, GENG Xiang, et al(温珍才, 孙通, 耿响, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2013, 33(9): 2354.
- [83] ZHANG Xin, GU Xin, NI Li-jun, et al(张鑫, 顾欣, 倪力军, 等). China Dairy Cattle(中国奶牛), 2012, (13): 53.
- [84] PENG Pan, LIN Hui, DU Ru-xu, et al(彭攀, 林慧, 杜如虚, 等). Computers and Applied Chemistry(计算机与应用化学), 2011, 28(3): 307.
- [85] SU Dong-lin, LI Gao-yang, HE Jian-xin, et al(苏东林, 李高阳, 何建新, 等). Science and Technology of Food Industry(食品工业科技), 2012, 33(6): 460.
- [86] HU Yao-hua, LIU Cong, XIONG Lai-yi, et al(胡耀华, 刘聪, 熊来怡, 等). Journal of Agricultural Mechanization Research(农机化研究), 2011, 33(9): 169.
- [87] ZHANG Peng, LI Jiang-kuo, MENG Xian-jun, et al(张鹏, 李江阔, 孟宪军, 等). Journal of Food Science(食品科学), 2011, 32(6): 191.
- [88] ZHOU Zhu, LI Xiao-yu, LI Pei-wu, et al(周竹, 李小昱, 李培武, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2011, 27(3): 331.
- [89] LI Yan-fei, HU Yu, TU Da-wei, et al(李沿飞, 胡羽, 屠大伟, 等). Food Science and Technology(食品科技), 2013, 38(1): 314.
- [90] TU Jing, ZHANG Min, HUANG Min, et al(涂静, 张慙, 黄敏, 等). Journal of Food and Biological Technology(食品与生物技术学报), 2013, 32(9): 972.
- [91] ZHANG Xiao-yan, LIU Wei, XING Li, et al(张小燕, 刘威, 兴丽, 等). Infrared(红外), 2012, 33(12): 33.
- [92] SUN Lu-ping, WANG Ju-tao(孙露萍, 王举涛). GuangZhou Chemical Industry and Technology(广州化工), 2013, 41(15): 12.
- [93] XIE Guang-fa, XU Rong, FAN A-ping, et al(谢广发, 徐榕, 樊阿萍, 等). China Brewing(中国酿造), 2011, (11): 182.
- [94] WU Jun(吴俊). Modern Food Science and Technology(现代食品科技), 2011, 27(7): 870.
- [95] LI Yan-ping, XU Hong-xian, QIAN Ying, et al(李燕萍, 许宏贤, 钱莹, 等). Food and Fermentation Industries(食品与发酵工业), 2008, 34(7): 136.
- [96] XIA Rong, HAO Yong(夏蓉, 郝勇). China Brewing(中国酿造), 2012, 31(11): 27.
- [97] CHEN Yan, HU Hui, WANG Feng-zu, et al(陈妍, 胡慧, 汪凤祖, 等). Liquor-Making Science & Technology(酿酒科技), 2010, (11): 90.
- [98] SU Dong-lin, ZHANG Xin, LI Gao-yang, et al(苏东林, 张欣, 李高阳, 等). Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology(中国食品学报), 2013, 13(10): 213.
- [99] ZHONG Yan-ping, ZHONG Zhen-sheng, CHEN Lan-zhen, et al(钟艳萍, 钟振声, 陈兰珍, 等). Modern Food Science and Technology(现代食品科技), 2010, 26(11): 1280.
- [100] YANG Dan, LIU Xin, WANG Chuan-pei, et al(杨丹, 刘新, 王川丕, 等). Journal of Zhejiang Agricultural Sciences(浙江农业科学), 2012, (9): 1290.
- [101] REN Guang-xin, NING Jing-ming, WU Wei-guo, et al(任广鑫, 宁井铭, 吴卫国, 等). Journal of Anhui Agricultural University(安徽农业大学学报), 2013, 40(1): 124.
- [102] YUAN Xin, TAN Hong, YANG Hong-bo, et al(袁鑫, 谭红, 杨鸿波, 等). Chinese Agricultural Science Bulletin(中国农学通报), 2013, 29(3): 215.
- [103] NING Jing-ming, WAN Xiao-chun, ZHANG Zheng-zhu, et al(宁井铭, 宛晓春, 张正竹, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2013, (11): 255.

- [104] ZHU Da-zhou, HUANG Wen-jiang, MA Zhi-hong, et al(朱大洲, 黄文江, 马智宏, 等). Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学), 2011, 44(9): 1806.
- [105] JIA Wan, MAO Pei-sheng(贾 婉, 毛培胜). Seed(种子), 2013, 32(11): 46.
- [106] LIANG Jian, LIU Bin-mei, TAO Liang-zhi(梁 剑, 刘斌美, 陶亮之). Chinese Journal of Light Scattering(光散射学报), 2013, 25(4): 423.
- [107] WANG Qing, XUE Wei-qing, MA Han-xu, et al(王 庆, 薛卫青, 马晗煦, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2012, 28(z2): 259.
- [108] ZHU Li-wei, HUANG Yan-yan, YANG Li-ming, et al(朱丽伟, 黄艳艳, 杨丽明, 等). Infrared(红外), 2011, 32(4): 35.
- [109] LU Meng, QIN Ya-ping(鲁 蒙, 秦亚平). Modern Business Trade Industry(现代商贸工业), 2010, 22(17): 387.
- [110] LIN Jia-yong, FAN Wei-yan, LU Hui, et al(林家永, 范维燕, 陆 晖, 等). Chinese Cereals and Oils Association(中国粮油学报), 2011, 26(9): 110.
- [111] MENG Qing-hong, LI Xia-hui, SANSHANG Long-si, et al(孟庆虹, 李霞辉, 三上隆司, 等). Chinese Cereals and Oils Association(中国粮油学报), 2010, 25(5): 90, 99.
- [112] LAI Sui-chun, HEYE Yuan-xin, WANG Zhi-dong, et al(赖穗春, 河野元信, 王志东, 等). Chinese Journal of Rice Science(中国水稻科学), 2011, 25(4): 435.
- [113] LI Xiao-long, MA Zhan-hong, ZHAO Long-lian, et al(李小龙, 马占鸿, 赵龙莲, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2013, 33(10): 2661.
- [114] FENG Lei, CHEN Shuang-shuang, FENG Bin, et al(冯 雷, 陈双双, 冯 斌, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2012, 28(1): 139.
- [115] LI Jie, ZHANG Xiao-chao, YUAN Yan-wei, et al(李 颖, 张小超, 苑严伟, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2012, 28(2): 176.
- [116] HUANG Guang-qun, WANG Xiao-yan, HAN Lu-jia, et al(黄光群, 王晓燕, 韩鲁佳, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2010, 41(2): 93.
- [117] WU Rui-mei, WANG Xiao, GUO Ping, et al(吴瑞梅, 王 晓, 郭 平, 等). Journal of Instrumental Analysis(分析测试学报), 2013, 32(11): 1359.
- [118] XIONG Yan-mei, TANG Guo, DUAN Jia, et al(熊艳梅, 唐 果, 段 佳, 等). Food Science and Technology(食品科技), 2012, 40(9): 1434.
- [119] YANG Jian-song, MENG Qing-xiang, REN Li-ping, et al(杨建松, 孟庆翔, 任丽萍, 等). Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis(理化检验: 化学分册), 2011, 47(5): 613.
- [120] DONG Juan-juan(董娟娟). Feed Industry(饲料工业), 2010, 31(11): 43.
- [121] LI Rui-li, ZHANG Bao-lin, WANG Jian-min, et al(李瑞丽, 张保林, 王建民, 等). Journal of Henan Agricultural Sciences(河南农业科学), 2013, 42(6): 1.
- [122] LUO Ding-qi, PAN Dan-li, LIU Qiang, et al(罗定棋, 潘旦利, 刘 强, 等). Anhui Agricultural Sciences(安徽农业科学), 2012, (36): 17731.
- [123] YUAN Da-lin, TANG Jian-guo, YANG Chen-long, et al(袁大林, 汤建国, 杨晨龙, 等). Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory(光谱实验室), 2013, 30(3): 1447.
- [124] LUO Qiong, ZHAO Ming, LI Qing, et al(罗 琼, 赵 明, 李 青, 等). Tobacco Science & Technology(烟草科技), 2013, (7): 55.
- [125] ZHANG Ding-fang, LIU Ze-chun, ZHANG Ting-gui, et al(张鼎方, 刘泽春, 张廷贵, 等). Tobacco Science & Technology(烟草科技), 2012, (10): 9.
- [126] CHEN Xing, WANG Wen-yuan, LIU Ya, et al(陈 兴, 王文元, 刘 亚, 等). Laser & Infrared(激光与红外), 2013, 43(1): 44.
- [127] YANG Kai, LIU Peng, WANG Wei-miao, et al(杨 凯, 刘 鹏, 王维妙, 等). Acta Tabacaria Sinica(中国烟草学报), 2012, 18(6): 27.
- [128] CUN Huan-ting, CHEN Wen, HE Hua, et al(寸焕廷, 陈 文, 何 华, 等). Tobacco Science & Technology(烟草科技), 2011, (6): 43.
- [129] YANG Zhe-xuan, ZHOU Li-hong, ZHANG Shun-nan, et al(杨哲萱, 周立红, 章顺楠, 等). Chinese Herbal Medicine(中草药), 2013, 44(10): 1342.
- [130] NIE Li-hang, LU Jing, LIN Rui-chao, et al(聂黎行, 鲁 静, 林瑞超, 等). Computers and Applied Chemistry(计算机与应用化学), 2011, 28(5): 540.
- [131] JIANG Shuang, YANG Hai-long, ZANG Heng-chang, et al(姜 爽, 杨海龙, 臧恒昌, 等). Food and Drug(食品与药品), 2013, (2): 135.
- [132] PAN Jian-chao, XUE Dong-sheng, LIU Shao-yong, et al(潘建超, 薛东升, 刘绍勇, 等). Guide of China Medicine(中国医药指南), 2011, 9(34): 54.
- [133] ZHANG Ai-jun, DAI Ning, ZHAO Guo-lei(张爱军, 戴 宁, 赵国磊). Chinese Herbal Medicine(中草药), 2010, 4(12): 238.
- [134] HUANG Hong-xia, LI Wen-long, QU Hai-bin, et al(黄红霞, 李文龙, 瞿海斌, 等). China Journal of Chinese Materia Medica(中国中

- 药杂志), 2013, 38(11): 1663.
- [135] NIE Li-xing, WANG Gang-li, LI Zhi-meng, et al(聂黎行, 王钢力, 李志猛, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2009, 29(2): 541.
- [136] CHEN Xue-ying, CHEN Yong, WANG Long-hu, et al(陈雪英, 陈 勇, 王龙虎, 等). Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis(药物分析杂志), 2010, 30(11): 2086.
- [137] HU Hao-wu, GENG Zhao, LI Sheng-hua, et al(胡浩武, 耿 焰, 李胜华, 等). Applied chemical industry(应用化工), 2011, 40(4): 725.
- [138] JIN Ye, YANG Kai, CHEN Mu-zhou, et al(金 叶, 杨 凯, 陈木洲, 等). China Journal of Chinese Materia Medica(中国中药杂志), 2011, 36(21): 2963.
- [139] XU Bing, LUO Gan, LIN Zhao-zhou, et al(徐 冰, 罗 赣, 林兆洲, 等). Chemical Journal of Chinese Universities(高等学校化学学报), 2013, 34(10): 2284.
- [140] BAI Xin-tao, HUO Bao-jun, ZHANG Bo, et al(白新涛, 霍宝军, 张 博, 等). Chinese Herbal Medicine(中草药), 2012, 43(11): 2189.
- [141] SHI Hui-qi, BAI Yan, GONG Hai-yan, et al(史会齐, 白 雁, 龚海燕, 等). Experimental Technology and Management(实验技术与管理), 2011, 28(10): 32.
- [142] LI Chen-gui, HU Yu-zhu(李臣贵, 胡育筑). Progress in Pharmaceutical Sciences(药学进展), 2011, 35(1): 36.
- [143] MENG Yu, LI Yue-qing, CAI Rui, et al(孟 昱, 李悦青, 蔡 蕊, 等). Fine Chemicals(精细化工), 2013, 30(10): 1143.
- [144] WANG Hai-min, LI Wei, ZHAO Jian-long, et al(王海敏, 李 玮, 赵建龙, 等). Anhui Medical and Pharmaceutical Journal(安徽医药), 2012, 16(12): 1777.
- [145] CHEN Jiu-yan, XIE Hong-ping, YANG Hong, et al(陈久艳, 谢洪平, 杨 宏, 等). West China Journal of Pharmaceutical Sciences(华西药科学杂志), 2013, 28(4): 435.
- [146] FENG Yan-chun, CHANG Yan, YAO Shang-chen, et al(冯艳春, 常 艳, 姚尚辰, 等). Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis(药物分析杂志), 2010, 30(10): 1895.
- [147] HU Chang-qin, CHENG Shuang-hong, FENG Yan-chun, et al(胡昌勤, 成双红, 冯艳春, 等). Chinese Pharmaceutical Affairs(中国药事), 2008, 22(8): 641.
- [148] SHEN Lan-hui, GAO Guo-ying, WU Jian-wei, et al(申兰慧, 高国英, 吴建伟, 等). Chinese Pharmaceutical Affairs(中国药事), 2011, 25(6): 587.
- [149] HAN Ying, ZHANG Yong-yao, HOU Hui-chan, et al(韩 莹, 张永耀, 侯惠婵, 等). Academic Journal of Guangdong College of Pharmacy(广东药学院学报), 2010, 26(4): 348.
- [150] ZHOU Zheng, LUO Shu-qing, CHEN Zhong-yi, et al(周 征, 罗淑青, 陈仲益, 等). Progress in Pharmaceutical Sciences(药学进展), 2012, 36(7): 321.
- [151] CHU Xiao-li, LU Wan-zhen(褚小立, 陆婉珍). Instrumentation Customer(仪器仪表用户), 2013, 20(2): 11.
- [152] BIAN Wei-ying(边伟英). Petroleum & Petrochemical Today(当代石油化工), 2012, (9): 19.
- [153] KONG Cui-ping, CHU Xiao-li, DU Ze-xue, et al(孔翠萍, 褚小立, 杜泽学, 等). Chinese Journal of Analytical Chemistry(分析化学), 2010, 38(6): 805.
- [154] DAN Tu-nan, DAI Lian-kui(淡图南, 戴连奎). Computers and Applied Chemistry(计算机与应用化学), 2011, 28(3): 329.
- [155] OUYANG Ai-guo, LIU Jun, WANG Ya-ping, et al(欧阳爱国, 刘 军, 王亚平, 等). Laser & Infrared(激光与红外), 2012, 42(8): 901.
- [156] DUAN Min-wei, WANG Bai-hua, HUANG Hong-xing, et al(段敏伟, 王佰华, 黄宏星, 等). Food Science and Technology(食品科技), 2012, 40(2): 263.
- [157] ZHANG Yan-jun, CAI Lian-ting, DING Mei, et al(张彦君, 蔡莲婷, 丁 玫, 等). Contemporary Chemical Industry(当代化工), 2010, 39(1): 93.
- [158] ZHANG Xue-mei(张雪梅). Guangdong Chemical Industry(广东化工), 2011, 38(11): 126.
- [159] GAO Wen-ji, YUAN Hong-fu, QIU Teng, et al(高文骥, 袁洪福, 邱 藤, 等). Chemical Journal of Chinese Universities(高等学校化学学报), 2009, 30(7): 1293.
- [160] QIN Qing-wei(秦庆伟). Chemical Research and Application(化学研究与应用), 2012, 24(6): 1005.
- [161] REN Jing, GE Zan, ZHOU Da-peng, et al(任 静, 葛 赞, 周大鹏, 等). China Surfactant Detergent & Cosmetics(日用化学工业), 2013, 43(6): 474.
- [162] LI Ding-ming, WANG Ling, ZHANG Li-hua(李定明, 王 玲, 张丽华). Journal of Nuclear and Radiochemistry(核化学与放射化学), 2013, 35(2): 96.
- [163] ZOU Quan, DENG Guo-dong, GUO Xiao-de, et al(邹 权, 邓国栋, 郭效德, 等). Journal of Solid Rocket Technology(固体火箭技术), 2012, 35(6): 838.
- [164] LI Wei, YU Jun-jiang, DENG Peng(李 伟, 郁俊江, 邓 鹏). Torpedo Technology(鱼雷技术), 2012, 20(3): 206.
- [165] ZHANG Wan-jie, LIU Rong, XU Ke-xin, et al(张婉洁, 刘 蓉, 徐可欣, 等). Acta Chimica Sinica(化学学报), 2013, 71(9): 1281.
- [166] LI Gang, ZHAO Jing, LI Jia-xing, et al(李 刚, 赵 静, 李家星, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2011, 31(3): 1.

- [167] QIAN Zhi-yu, LI Wei-tao(钱志余, 李韪韬). Life Science Instruments(生命科学仪器), 2013, 11(3): 45.
- [168] HE Wen-ming, XUE Chong-yun, NIE Yi, et al(贺文明, 薛崇昀, 聂怡, 等). Transactions of China Pulp and Paper(中国造纸学报), 2010, 25(3): 9.
- [169] YU Shi-xing, YANG Jin-yong, LI Xue-chun, et al(于仕兴, 杨金勇, 李学春, 等). Journal of Northeast Forestry University(东北林业大学学报), 2013, (12): 132.
- [170] LIU Xue-yun, XIONG Zhi-xin, HU Mu-yi, et al(刘雪云, 熊智新, 胡慕伊, 等). China Pulp & Paper(中国造纸), 2011, 26(7): 20.
- [171] SONG Shu-ping, ZHANG Hao, ZHANG Jing, et al(宋舒苹, 张浩, 张静, 等). Transactions of China Pulp and Paper(中国造纸学报), 2011, 26(3): 17.
- [172] YU Ji-chuan, FU Shi-yu, ZENG Xi-ling, et al(俞霁川, 付时雨, 曾细玲, 等). Paper Science & Technology(造纸科学与技术), 2010, 29(4): 50.
- [173] WANG Jing-li, GENG Xiang, GUI Jia-xiang, et al(王京力, 耿响, 桂家祥, 等). Chemical Fiber & Textile Technology(化纤与纺织技术), 2013, 42(2): 42.

Research and Application Progress of Near Infrared Spectroscopy Analytical Technology in China in the Past Five Years

CHU Xiao-li, LU Wan-zhen

Research Institute of Petroleum Processing, Beijing 100083, China

Abstract In the past decade, near infrared spectroscopy (NIR) has expanded rapidly and been applied widely in many fields in China. The recent progress of the research and application of NIR analytical technology in China especially in the past five years has been reviewed. It includes hardware and software R&D, Chemometric algorithms and experimental methods research, and quantitative and qualitative applications in the typical fields such as food, agriculture, pharmaceuticals, petrochemicals, forestry, and medical diagnosis. 209 references are cited, which are mainly published in national journals, professional magazines, and book chapters. The developing trend of near infrared spectroscopy and the strategies to further promote its innovation and development in China in the near future are put forward and discussed.

Keywords NIR; Instrument; Chemometrics; Software; Application; China

(Received May 5, 2014; accepted Jul. 18, 2014)