

近五年我国近红外光谱分析技术研究与应用进展

褚小立*, 史云颖, 陈 瀑, 李敬岩, 许育鹏

(石油化工科学研究院, 北京 100083)

摘 要: 评述了近五年来(2014~2018)我国近红外光谱分析技术的研究与应用进展, 内容涉及方法研究、软硬件研发、应用特点和趋势等方面, 并对今后我国近红外光谱技术的发展方向进行了展望。引用文献 97 篇。

关键词: 近红外光谱; 化学计量学; 便携式分析; 在线分析; 综述

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2019)05-0603-09

Research and Application Progresses of Near Infrared Spectroscopy Analytical Technique in China in Past Five Years

CHU Xiao-li*, SHI Yun-ying, CHEN Pu, LI Jing-yan, XU Yu-peng

(Research Institute of Petroleum Processing, Beijing 100083, China)

Abstract: The research and application progresses of near infrared spectroscopy (NIR) analytical technique in China in the past five years (2014–2018) are reviewed in this paper. It includes progresses on the methodology, research and development of hardware and software, characteristics and trends of NIR applications in typical fields, with 97 references cited. The development trends for near infrared spectroscopy technique in China in the near future are proposed and discussed.

Key words: near infrared spectroscopy; chemometrics; portable analysis; on-line analysis; review

近年来, 随着仪器制造水平的提升, 光谱化学计量学方法和软件的开发, 以及各种样品测定附件研制的不断进步, 近红外光谱分析技术作为现代过程分析技术主力军, 凭借其独特的技术优势, 在我国得到了迅猛的发展。

在学术方面, 2014 年迄今, 我国出版了十余本近红外光谱的专著, 涉及化工、食品、烟草、过程分析技术和化学计量学方法等^[1-16]。通过国家知识产权局门户网站和万方数据库查询, 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 300 余项, 在国内学术期刊发表的论文有 2 000 余篇, 硕士和博士学位论文也有 200 余篇。此外, 据不完全统计, 在国外期刊上发表的论文也有 300 篇左右。2014 年、2016 年、2018 年分别在北京、武汉、昆明举办了三届全国近红外光谱学术会议, 每次会议都超过 300 人, 2018 年在昆明举办了第六届亚洲近红外光谱会议。2017 年 6 月在丹麦举办的第 18 届国际近红外光谱学术大会上, 我国力压奥地利、加拿大成功取得 2021 年第 20 届国际近红外光谱学术大会主办权。

在实际应用方面, 近红外光谱分析技术被越来越多的应用企业所接受, 在实际工农业生产过程中发挥着重要作用。以颁布的近红外光谱标准方法为例, 2014 年迄今, 我国颁布的国家标准、行业标准和地方标准多达 20 余项, 涉及化工、食品、农业、纺织等领域, 包括国家标准《GB/T 36691-2018 甲基乙烯基硅橡胶 乙烯基含量的测定 近红外法》《GB/T 34406-2017 珍珠粉鉴别方法 近红外光谱法》; 农业行业标准《NY/T 3105-2017 植物油料含油量测定 近红外光谱法》、《NY/T 3297-2018 油菜籽中总酚、生育酚的测定 近红外光谱法》、《NY/T 3299-2018 植物油料中油酸、亚油酸的测定 近红外光谱法》、《NY/T 3295-2018 油菜籽中芥酸、硫代葡萄糖苷的测定 近红外光谱法》、《NY/T 2794-2015 花生仁中氨基酸含量测定 近红外法》、《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》、《NY/T 3298-2018 植物油料中粗蛋白质的测定 近红外光谱法》、《NY/T

收稿日期: 2019-01-25; 修回日期: 2019-02-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0306501)

* 通讯作者: 褚小立, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向: 分子光谱结合化学计量学方法在石油及其产品中的分析研究与应用, E-mail: cxlyuli@sina.com

2797-2015 肉中脂肪无损检测方法 近红外法》;商检行业标准《SN/T 3896.1-2014 进出口纺织品 纤维定量分析 近红外法 第1部分:聚酯纤维与棉的混合物》、《SN/T 3896.2-2015 进出口纺织品 纤维定量分析 近红外法 第2部分:聚酯纤维与聚氨酯弹性纤维的混合物》、《SN/T 3896.3-2015 进出口纺织品 纤维定量分析 近红外法 第3部分:聚酰胺纤维与聚氨酯弹性纤维的混合物》、《SN/T 3896.4-2015 进出口纺织品 纤维定量分析 近红外法 第4部分:棉与聚氨酯弹性纤维的混合物》、《SN/T 3896.5-2015 进出口纺织品 纤维定量分析 近红外法 第5部分:聚酯纤维与粘胶纤维的混合物》、《SN/T 3896.6-2017 进出口纺织品 纤维定量分析 近红外法 第6部分:聚酯纤维与羊毛的混合》;商业行业标准《SB/T 11149-2015 废塑料回收分选技术规范》;纺织行业标准《FZ/T 01144-2018 纺织品 纤维定量分析 近红外光谱法》;地方标准《DB22/T 1605-2012 人参中灰分、水分、水不溶性固形物、水饱和丁醇提取物的无损快速测定 近红外光谱法》、《DB43/T 1065-2015 饲料中氨基酸的测定 近红外法》、《DB21/T 2048-2012 饲料中粗蛋白、粗脂肪、粗纤维、水分、钙、总磷、粗灰分、水溶性氯化物、氨基酸的测定 近红外光谱法》、《DB15/T 1229-2017 山羊绒净绒率试验方法 近红外光谱法》、《DB34/T 2890-2017 茶叶中主要品质成分快速测定-近红外光谱法》、《DB22/T 1812-2013 人参中人参多糖的无损快速测定 近红外光谱法》《DB34/T 2561-2015 固态发酵酒酯常规指标的快速测定 近红外法》。

笔者曾于2006年、2014年分别综述了1996~2005年、2009~2013年我国近红外光谱分析技术的研究和应用进展^[17-18],本文是上述两篇论文的姊妹篇,引用97篇有代表性的文献,旨在概述2014年至今我国这一技术领域的发展情况。本评述侧重于引用近五年来在我国学术期刊上发表的论文,未引用专利和发表到国外期刊的文献。

1 方法学研究 with 软硬件研发

1.1 方法学研究

随着人工智能方法的快速发展,尤其是深度学习在特征提取方面展现出的巨大优势,越来越多的深度学习算法被用于近红外光谱数据处理。伏为峰等利用深度信念网络(DBN)对高维特征向量强大的分析和提取能力,以及随机森林(RFS)良好的分类性能,将DBN-RFS用于药品的近红外光谱鉴别,表现出优异的学习能力^[19]。郑年年等将弹性网络(Elastic net)用于近红外光谱定量模型的建立,采用弹性网络对自变量数目进行适当程度的压缩,并选出了对响应变量有显著影响的重要自变量,建立了解释性能较好的分析模型,且具有较高的预测精度^[20]。Tuan等利用深度学习的卷积神经网络(CNN)提取光谱特征,并采用极限学习机(ELM)算法对光谱数据建立分类模型,实验结果表明,与主成分分析(PCA)特征提取方法相比,CNN网络能够更好地提取光谱特征,CNN-ELM分类模型有良好的分类效果^[21]。李浩光等利用栈式自编码神经网络(SAE)与softmax分类器构建近红外光谱定性分析模型,实验结果表明,与支持向量机(SVM)等分类方法比较,SAE网络对光谱噪声具有较强的抗干扰能力^[22]。

近些年,在多个领域(例如油品、药物、饲料、土壤和烟草等)逐步建立了近红外光谱数据库,光谱库检索算法越来越受到关注^[23-24]。与无监督和有监督的模式识别方法相比,光谱库检索方法具有操作简便、信息直观和库维护方便等诸多优点,在实际应用中发挥着重要的作用。李敬岩等采用光谱库自动检索算法,针对某企业的实际待测样本,从大型汽油近红外光谱数据库中选取相似性高的同一类样本建立定量分析模型,提高了模型预测准确性,且建模效率显著提升^[25]。鄢悦等以待测样本光谱与校正样本光谱间的光谱信息散度作为样本相似性判据,选取一定数量与待测样本最相似的校正样本组成局部校正子集,建立了局部偏最小二乘模型,结果证明了其有效性^[26]。

近红外光谱技术的深入应用使模型传递算法越来越多地受到重视。罗峻等将典型相关分析方法(CCA)用于纺织品快速无损检测校正模型的转移与共享,获得了令人的满意效果^[27]。倪力军等通过筛选出仪器间光谱信号一致性好且稳定的波长建立近红外光谱定标模型,实现了无标样近红外模型的传递^[28-29]。王安冬等基于正交信号回归法实现了近红外定量模型在不同来源原料药样本之间的模型传递,增强了模型应对原料药批次间变动的能力^[30]。杨浩等采用一元线性回归直接标准化(SLRDS)实现

了苹果可溶性固形物含量模型在便携式仪器上的传递^[31]。徐惠荣等利用平均光谱差值校正(MSSC)结合直接校正算法(DS)对皇冠梨糖度的近红外光谱在线检测模型进行了传递^[32]。吴进芝等利用光谱空间转换法(SST)将烟叶粉末化学组分的离线模型传递为烟丝化学组分的在线模型,实现了烟丝烟碱和总糖的在线监测^[33]。

由于水分子的结构特点,使其近红外光谱易受到“扰动”因素(温度、浓度、溶质变化等)的影响。当水分子的环境改变时,其近红外光谱将发生变化。因此,在水溶液中,水的近红外光谱包含着溶质的大量信息。2006年,Tsenkova教授在研究了不同质量牛奶制品近红外光谱特征的基础上首次提出了“水光谱组学(Aquaphotomics)”^[34]。我国邵学广教授团队在这一方法学领域开展了系列的研究工作,通过水的光谱信息及其随“扰动因素”的变化建立了溶液体系(包括实际体系及生物体系等)的定量、定性分析方法,利用水的光谱信息探测和理解水在化学和生物过程中作用与功能^[35]。孙翠迎等采用广义最小二乘加权法(GLSW)和外部参数正交化方法(EPO)较好地解决了温度变化对葡萄糖水溶液近红外光谱的影响,有望降低因复杂的外部环境变化带来的定量和定性建模难度^[36]。

1.2 软硬件研发

小型、微型化、快速和专用型仪器的研制一直是近红外光谱仪器的重点发展趋势之一,微型近红外光谱仪一直朝着宽光谱范围、高分辨率、高信噪比、高集成度、小体积、低成本、快速检测等方向发展。何文馨等针对石油勘探过程中油藏井温度高、空间局促等苛刻环境条件,研制了一种能够在高温环境中连续稳定工作的实用化微型近红外光谱分析仪,体积为154 mm×66.5 mm×38 mm,光谱范围1 550~1 890 nm,分辨率优于4.8 nm,波长准确性±1.1 nm,信噪比1 202:1^[37]。张晴等提出了一种采用齿轮传动结构代替传统丝杆传动结构的波长扫描方案,研制了光栅型高速扫描近红外光谱仪。该仪器光谱扫描速度达到240 nm/s,光谱分辨率6 nm^[38]。为满足果蔬加工过程快速检测和质量控制的实际需求,郭志明等研发了低成本、实用化、小型化的果蔬品质手持式检测系统^[39]。郭亚等则开发出了一种便携式苹果糖度无损检测仪^[40]。针对土壤中水、有机质、氮和无机元素等物质的检测,辛琦等提出了一种有效的近红外光谱仪光学设计方案^[41]。针对番茄独特的囊室结构及整体成熟度不均等问题,王凡等基于可见/近红外全透射光谱研发了便携式番茄内外品质快速无损实时检测装置,可以快速测定番茄颜色、硬度、总酸、总糖含量^[42]。王文秀等研制出了便携式猪肉营养组分无损检测近红外光谱仪,可以实现对猪肉脂肪、蛋白质等营养组分的无损、快速检测^[43]。刘志伟等开发了一种鱼雷燃料组分专用近红外分析系统,该系统与便携箱共同组成一个小型的测试平台,可以直接在仓库或舰艇上随取随测^[44]。张恩阳等基于可调法珀腔开发了一款微型智能近红外光谱仪,光谱仪采用智能手机控制,可将光谱数据通过移动网络上传到光谱云平台进行分析处理^[45]。

在软件研发方面,随着大数据、物联网和云计算的发展,构建“云+网+端”的网络化软件系统是近红外光谱分析技术研发的另一个趋势^[46]。宋艳等基于物联网技术和近红外分析技术的农业土壤养分实时监测系统,实现了对土壤有机质、全氮、全磷和全钾,以及有效氮、磷、钾含量的实时监测,实现了肥料的精准供给,可智能化控制、精准化运行,有助于农产品高产且节能环保^[47]。欧阳爱国等则基于物联网综合管理平台 and 近红外光谱技术开发了赣南脐橙水肥管理系统,通过果园肥力快速评估得出土壤养分特征统计值,进而形成土壤对氮、磷、钾养分需求图,从而制定科学的施肥方案^[48]。张后兵等搭建了近红外纤维成分无损检测共享数据库,实现了不同近红外检测设备纤维成分谱图数据的综合利用,有助于突破单一实验室近红外纤维成分谱图资源少、种类少、开发谱图资源难度大的应用瓶颈问题,为近红外纤维成分无损检测的普及应用提供了一种便捷途径^[49]。窦刚等基于近红外光谱开发出了快速的木材树种分类识别系统,有望建成大数据平台,应用于海关植检等部门^[50]。为了使近红外珍稀木材检测设备更加方便携带外出作业,洪胜杰等开发出了基于Android手机的移动近红外木材鉴别云服务系统^[51]。曾仲大等开发了商品化的ChemDataSolution化学计量学软件,能实现多种数据类型、多个变化因素综合影响下的海量数据快速载入,以及文件夹数据批载入,并可按照用户需求构建含有多个算法的批处理流程,实现快速高效的数据分析,从而达致一键数据处理与多模型分析的目的^[52]。

2 应用特点与趋势

近些年,近红外光谱技术的应用开发和趋势具有以下四方面的特点。

(1)应用研究更突出近红外光谱技术的实用性,越来越多的应用企业和质检等部门参与分析模型的开发,分析项目也逐渐向细分方向发展,并在生产中得到实际使用。

在饲料应用领域,新希望六和自主建立了近红外定标数据库,模型涵盖大宗饲料原料、维生素、药物、饲料成品,预测项目包括常规营养指标、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、淀粉、赖氨酸、蛋氨酸等多种组分,并已经将近红外检测技术应用于110余家分子公司^[53]。

在农业领域,中国科学院半导体研究所为解决玉米单倍体工程化育种需高通量鉴别单倍体籽粒的难题,建立了快速鉴别玉米单倍体籽粒的近红外模型,促单倍体分拣速度提高了3~5倍^[54]。中国农业大学与北京金色农华种业科技有限公司建立的玉米种子品种真实性鉴别模型,可有效鉴定带种衣剂玉米种子品种^[55]。

在炼油和化工领域,中石化石油化工科学研究院建立了快速测定催化裂化轻循环油及其加氢产物分子组成的近红外分析模型,可以同时得到链烷烃、环烷烃、茚满或四氢萘、双环烷基苯 C_nH_{2n-10} 类化合物、萘类、单环芳烃、双环芳烃、三环芳烃等组成的百分含量,为控制加氢深度快速提供分析数据^[56]。合盛硅业股份有限公司将近红外光谱用于甲基乙烯基硅橡胶相对分子质量和乙烯基含量的快速测定,能大幅度提高检测质量,有效地指导生产^[57]。万华化学(宁波)有限公司将近红外光谱用于水性树脂预聚体中异氰酸酯基(NCO)含量测定,提高了生产过程中的可控性^[58]。广州天赐高新材料股份有限公司建立了阳离子瓜尔胶样品氮含量的近红外光谱预测模型,相比凯氏定氮法具有快速、无损的优点^[59]。

在质检领域,深圳市计量质量检测研究院基于482个十余种常见的食用植物油样品,建立了近红外快速测定食用植物油碘值的模型^[60]。青岛市食品药品检验研究院针对青岛口岸进口的13种药品,为各厂家药品建立了近红外一致性快速检验模型,达到了快速筛查药品真伪、优劣的目的^[61]。中山出入境检验检疫局建立了棉/聚酯、棉/氨纶、粘胶/聚酯等十几个快速测试纺织品定量分析模型,经反复验证和完善,已用于多个出入境检验检疫局的日常检测工作^[62]。公安部天津消防研究所为解决防火涂料产品质量监督检验的难题,建立了不同企业防火涂料的近红外光谱快速识别模型^[63]。

在军工领域,西安近代化学研究所利用近红外光谱建立了快速测定奥克托今(HMX)炸药中 α -HMX杂质晶型含量的方法^[64]。南京理工大学与泸州北方化学工业有限公司采用近红外光谱法快速测定单基发射药中钝感剂(樟脑)组分含量,能满足单基药连续化生产过程中樟脑含量的快速检测^[65]需求。

(2)微型、便携式近红外光谱分析技术日益受到重视,其方便、快速的优点及广阔的应用前景,使之与智能手机相结合正在走近人们的日常生活。

李学娇等采用便携式近红外光谱仪对废旧涤/棉混纺织物中涤含量进行快速检测,是现场快速鉴别废旧纺织品及成分预测的有效技术^[66]。张妍茵等使用便携式微型近红外光谱仪对四种红木家具进行鉴别,结果证明了其可行性^[67]。江明珠等使用便携式近红外光谱仪成功鉴别了霍山石斛枫斗和河南石斛枫斗^[68]。郝勇等基于便携式近红外光谱仪对六类食品接触性塑料进行鉴别,为食品接触性塑料制品的现场快速无损鉴别提供了一种有效方法^[69]。王春峰等利用自行研制的微型近红外光谱仪对油菜籽中粗脂肪与粗蛋白含量进行预测分析,验证了微型近红外光谱仪现场分析的实用性^[70]。程萌等基于微型光谱学传感器预测冬小麦叶片中的叶绿素含量,可用于田间冬小麦抽穗期作物的营养诊断^[71]。

(3)在线近红外光谱分析技术方兴未艾,与过程控制结合可给企业带来可观的经济和社会效益^[72]。

近红外光谱技术的优势之一是可用于果品内部品质的在线筛选。我国在水果智能分拣方面做了大量的研发工作,刘燕德等采用近红外漫透射光谱在线分选黑心病鸭梨^[73],李龙等开发了苹果内外品质在线无损检测分级系统^[74],郭成等则用近红外漫透射光谱在线检测无花果中可溶性固形物含量^[75]。

在中药生产企业,越来越多的在线近红外光谱技术被用于生产过程的质量控制,包括中药材有效成分的提取、纯化、浓缩和药品混合均匀度的监控等。张淹等以复方阿胶浆生产中4味药材(党参、红参、熟地黄及山楂)的混合提取过程为对象,在线分析总皂苷、总黄酮、总糖及可溶性固形物等的质控指标含量,并用多变量统计过程控制(Multivariate statistical process control, MSPC)手段建立了复方阿胶

浆沉淀过程的故障监测模型,可实现过程异常状况预警^[76]。李晶晶等将在线近红外光谱用于监测中草药口服液的多糖含量、可溶性固形物含量及 pH 值,增强了生产过程的可控性,有助于提高不同批次产品之间的质量一致性^[77]。徐敏等将在线近红外光谱与多变量数据分析技术相结合,建立了药材五味子提取过程的在线监测方法,并将所建立的 MSPC 模型应用到实际生产中,可实时反映生产过程中物料属性的变化^[78]。杨越等基于在线近红外光谱建立了金银花提取过程多变量统计过程控制(MSPC)模型,对金银花提取过程进行在线监控^[79]。苏婷等利用在线近红外光谱判断精芪双参胶囊的混合终点,并能够实时测定混合终点样品中黄芪甲苷的含量,提高了混合过程的质量控制水平^[80]。

此外,在线近红外光谱技术还用于饲料工业生产^[81]、肥料^[82]、烟叶^[83]和肉^[84]的品质分析,以及蚕蛹的雌雄自动识别^[85]等领域。尤其是朱志强等研制的蚕蛹雌雄智能高速分拣设备得到批量应用,其分拣速度可以达到每秒 10 个以上,正确率可以达到 98%,使传统的劳动密集型桑蚕制种行业走向智能化^[86]。王路等则利用在线近红外监测 1,3-丙二醇发酵过程中的生物量变化,用于对发酵过程的调控优化^[87]。李超等搭建了对废旧冰箱塑料主要成分 ABS、PS 与 PP 进行鉴别的在线近红外分选平台,准确率可以达到 98% 以上^[88]。

(4)近红外光谱成像技术融合了光谱和图像信息,在农业和物证鉴别等领域受到关注,但尚未得到较大范围的实际应用。

在农产品检测方面,马艳等利用近红外高光谱成像对番茄虫眼及霉变进行检测^[89],孙世鹏和曹晓峰等分别利用近红外高光谱成像对冬枣损伤和成熟度进行检测^[90-91]。俞浩等将近红外高光谱成像与图像结合对油菜角果蚜虫的侵染进行定位识别研究^[92],孙旭东等通过近红外高光谱成像对缺素和黄龙病柑桔叶片进行快速诊断^[93]。杨增玲则采用近红外显微成像鉴别豆粕和不同种类抗生素菌渣,结果表明,该技术能够获取样品在微区上的信息,具备对样品内部异质组分的分析能力^[94]。

在物证检测领域,齐敏珺等采用自主研发的便携式近红外光谱成像仪对血迹、火药、毛发、隐藏和覆盖文字等进行了实验,结果表明该技术在现场快速搜索发现物证方面具有可行性^[95]。刘猛等用近红外高光谱成像技术成功识别了 6 种激光打印墨粉^[96],黄立贤等研制了基于液晶可调滤光片的近红外光谱成像系统,可对易燃易爆液体进行快速甄别^[97]。

3 结束语

近些年,近红外光谱技术以其独特的优势在多个领域得到了日益广泛的应用,并已逐渐得到用户的普遍接受和官方的认可。相对于其它各类广泛应用的光谱、色谱和质谱等分析技术,近红外光谱技术尚处在应用初期,任何一个应用点都潜在着巨大的研究课题和推广市场。微型便携式仪器在人们日常生活中的应用研究已初显端倪,各种先进微纳技术的发展势必会给微型近红外光谱仪的发展提供有力的技术支撑,而且随着对微型近红外光谱仪的二次开发和应用领域的拓宽,近红外光谱与人类生产生活的联系将会更加密切。在线近红外光谱技术在大型流程工业中的应用大幕刚刚拉开,随着大数据、物联网和云计算的发展,它将会为智能工厂提供更快、更准、更有用的化学感知信息,与过程控制技术结合,会给企业带来可观的经济和社会效益。

经过二十余年的发展,我国近红外光谱技术在硬件、化学计量学方法及软件、行业数据库开发等方面都有了一定的基础,取得了可喜的应用效果。结合目前国内外研发和应用现状,在未来一段时期,我国近红外光谱关键技术研发建议围绕以下开展:(1)在光谱仪硬件方面,一方面要研发以傅立叶变换类型为主的通用型高端产品,设计研制新型高性能的迈克尔干涉仪,开发真正意义上的拥有自主知识产权的近红外光谱仪器;另一方面要基于先进微纳技术研发小型化、高性价比的专用型仪器,同时也要注意高效专用测量附件和在线光纤附件的开发。(2)在化学计量学方法和软件研发方面,要研究模型数据库维护更为方便的多元定量和定性校正方法,尝试将现代人工智能的深度学习算法用于大光谱数据集的关联,进一步提高模型的预测准确性和稳健性。研究开发更简便、通用性更强的模型传递算法。在此基础上开发基于网络平台的建模工具,以实现近红外光谱模型数据库的共享。(3)在近红外光谱模型数据库开发方面,应集中行业科研院所、大型应用企业和仪器制造商等多方面的力量,根据各个应用行业的特点,以应用市场需求为导向,开发建立各领域的商业化、权威性的近红外光谱模型数据库,避免同一领域多种数据库低水平重复开发。同时形成近红外光谱数据库定期升级维护的工

作机制, 保证模型数据库的持续更新, 不断提高模型数据库的适用范围和利用效率。

参考文献:

- [1] Chu X L. *Practical Handbook for Near Infrared Spectroscopy Analysis Technology*. Beijing: China Machine Press(褚小立. 近红外光谱分析技术实用手册. 北京: 机械工业出版社), **2016**.
- [2] Zhang Z F, Fu Q J. *Near Infrared Spectroscopy Analysis Technology of Tobacco*. Beijing: China Agricultural Science and Technology(张忠锋, 付秋娟. 烟草近红外光谱分析技术. 北京: 中国农业科学技术出版社), **2016**.
- [3] Liu C L, Wu J Z, Sun X R. *Study on Near Infrared Spectroscopy in Food Quality Detection*. Beijing: China Machine Press(刘翠玲, 吴静珠, 孙晓荣. 近红外光谱技术在食品品质检测方法中的研究. 北京: 机械工业出版社), **2015**.
- [4] Ren D, Zhai F F, Lu A X. *Near Infrared Spectroscopy Analysis Technology and Its Application*. Beijing: Science Press(任东, 瞿芳芳, 陆安祥. 近红外光谱分析技术与应用. 北京: 科学出版社), **2016**.
- [5] Liu C L, Sun X R, Wu J Z, Yu C C. *Research on Measurement Techniques and Data Analysis Methods of Spectral Used for Food Quality Detection*. Beijing: China Machine Press(刘翠玲, 孙晓荣, 吴静珠, 于重重. 多光谱食品品质检测技术与信息处理研究. 北京: 机械工业出版社), **2018**.
- [6] Chu X L, Zhang L, Yan Z C. *Modern Process Analysis Technology: Current Status and Future Prospects*. Beijing: China Machine Press(褚小立, 张莉, 燕泽程. 现代过程分析技术交叉学科: 发展前沿与展望. 北京: 机械工业出版社), **2016**.
- [7] Bakeev K A. *Process Analytical Technology: Spectroscopic Tools and Implementation Strategies for the Chemical and Pharmaceutical Industries*. 2nd ed. Yao Z X, Chu X L, Li H, transl. Beijing: China Machine Press(巴克 K A. 过程分析技术: 针对化学和制药工业的光谱方法和实施策略. 2版. 姚志湘, 褚小立, 栗晖, 译. 北京: 机械工业出版社), **2014**.
- [8] Pomerantsev A L. *Chemometrics in Excel*. Jiao L, transl. Beijing: Chemical Industry Press(波莫兰采夫 A L. Excel 中的化学计量学. 焦龙, 译. 北京: 化学工业出版社), **2018**.
- [9] Donnell C P O, Pagan C, Cullen P J. *Process Analytical Technology for the Food Industry*. Yao Z X, Yuan H F, Li H, transl. Beijing: Chemical Industry Press(奥唐纳 C P O, 费根 C, 卡伦 P J. 食品工业中的过程分析技术. 姚志湘, 袁洪福, 栗晖, 译. 北京: 化学工业出版社), **2016**.
- [10] Liang Y Z, Wu H L, Yu R Q. *Handbook of Analytical Chemistry 10. Chemometrics*. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press(梁逸曾, 吴海龙, 俞汝勤. 分析化学手册 10. 化学计量学(第三版). 北京: 化学工业出版社), **2016**.
- [11] He H J, Mo H Z. *Rapid Evaluation of Fish Meat Quality: By Visible/Near-infrared Hyperspectral Image*. Beijing: China Light Industry Press(何鸿举, 莫海珍. 可见/近红外高光谱成像技术快速评估鱼肉品质. 北京: 中国轻工业出版社), **2018**.
- [12] Sun D W, Cheng J H. *Hyperspectral Image for Meat Quality and Safety Detection*. Beijing: Science Press(孙大文, 成军虎. 肉品品质安全高光谱成像检测新技术及应用. 北京: 科学出版社), **2018**.
- [13] Li M, Lei M. *Theory and Application of Intelligent Analysis of Coal by Near Infrared Spectroscopy*. Beijing: Science Press(李明, 雷萌. 煤质近红外光谱智能分析理论与应用. 北京: 科学出版社), **2018**.
- [14] Sun J. *Research on Nondestructive Detection of Agricultural Products and Crops based on Spectroscopy Technology*. Nanjing: Southeast University Press(孙俊. 光谱技术在农作物/农产品信息无损检测中的应用. 南京: 东南大学出版社), **2017**.
- [15] Liu Y D. *Application of Spectroscopy Diagnostic Technology on Quality Detection of Agricultural Products*. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press(刘燕德. 光谱诊断技术在农产品品质检测中的应用. 武汉: 华中科技大学出版社), **2017**.
- [16] He Y, Liu F, Li X L, Shao Y N. *Spectroscopy and Imaging Technology in Agriculture*. Beijing: Science Press(何勇, 刘飞, 李晓丽, 邵咏妮. 光谱及成像技术在农业中的应用. 北京: 科学出版社), **2016**.
- [17] Chu X L, Yuan H F, Lu W Z. *Anal. Instrum.* (褚小立, 袁洪福, 陆婉珍. 分析仪器), **2006**, (2): 1-10.
- [18] Chu X L, Lu W Z. *Spectrosc. Spectral Anal.* (褚小立, 陆婉珍. 光谱学与光谱分析), **2014**, 34(10): 2595-2605.
- [19] Fu W F, Yang H H, Liu Z B, Feng Y C. *Comput. Simul.* (伏为峰, 杨辉华, 刘振丙, 冯艳春. 计算机仿真), **2018**, 35(4): 325-330.
- [20] Zheng N N, Luan X L, Liu F. *Spectrosc. Spectral Anal.* (郑年年, 栾小丽, 刘飞. 光谱学与光谱分析), **2018**, 38(10): 3096-3100.
- [21] Tuan L B, Xiao D, Mao Y C, Song L, He D K, Liu S J. *Spectrosc. Spectral Anal.* (Tuan L B, 肖冬, 毛亚纯, 宋亮, 何大阔, 刘善军. 光谱学与光谱分析), **2018**, 38(7): 2107-2112.
- [22] Li H G, Li W J, Qin H, Yu L N, Yu Y H, Pang Y. *Trans. Chin. Soc. Agric. Mach.* (李浩光, 李卫军, 覃鸿, 于丽娜, 于云华, 逢燕. 农业机械学报), **2017**, 48(S1): 422-428.
- [23] Chu X L, Li J Y, Chen P, Xu Y P. *Chin. J. Anal. Chem.* (褚小立, 李敬岩, 陈瀑, 许育鹏. 分析化学), **2014**, 42(9): 1379-1386.

- [24] Zhao C H, Tian M H, Li J W. *J. Harbin Eng. Univ.* (赵春晖, 田明华, 李佳伟. 哈尔滨工程大学学报), **2017**, 38(8): 1179–1189.
- [25] Li J Y, Chu X L, Chen P, Tian S B. *Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section)* (李敬岩, 褚小立, 陈瀑, 田松柏. 石油学报(石油加工)), **2017**, 33(1): 131–137.
- [26] Yan Y, Zhang H G, Lu J G, Shi Y Z, Chen J S. *Comput. Appl. Chem.* (鄢悦, 张红光, 卢建刚, 施英姿, 陈金水. 计算机与应用化学), **2017**, 34(5): 351–355.
- [27] Luo J, Nie F M, Wu S H, Fan W. *China Fiber Inspection* (罗峻, 聂凤明, 吴淑焕, 范伟. 中国纤检), **2016**, (1): 79–81.
- [28] Ni L J, Han M Y, Zhang L G, Luan S R. *Chin. J. Anal. Chem.* (倪力军, 韩明月, 张立国, 栾绍嵘. 分析化学), **2018**, 46(10): 1660–1668.
- [29] Ni L J, Xiao L X, Zhang L G, Luan S R. *J. Instrum. Anal.* (倪力军, 肖丽霞, 张立国, 栾绍嵘. 分析测试学报), **2018**, 37(5): 539–546.
- [30] Wang A D, Wu Z S, Jia Y F, Zhang Y Y, Zhan X Y, Ma C H. *Spectrosc. Spectral Anal.* (王安冬, 吴志生, 贾一飞, 张盈盈, 詹雪艳, 马长华. 光谱学与光谱分析), **2018**, 38(4): 1082–1088.
- [31] Yang H, Xiong Z X, Chen T. *Chin. J. Anal. Lab.* (杨浩, 熊智新, 陈通. 分析实验室), **2018**, 37(2): 163–167.
- [32] Xu H R, Li Q Q. *Trans. Chin. Soc. Agric. Mach.* (徐惠荣, 李青青. 农业机械学报), **2017**, 48(9): 312–317.
- [33] Wu J Z, Li J, Du W, Peng S M, Wang Z G. *Tobacco Sci. Technol.* (吴进芝, 李军, 杜文, 彭圣明, 王治国. 烟草科技), **2017**, 50(10): 69–73.
- [34] Fan M L, Zhao Y, Liu Y, Cai W S, Shao X G. *Prog. Chem.* (樊梦丽, 赵越, 刘言, 蔡文生, 邵学广. 化学进展), **2015**, 27(2/3): 242–250.
- [35] Zhu X W, Cui X Y, Cai W S, Shao X G. *Acta Chim. Sinica* (朱雪薇, 崔晓宇, 蔡文生, 邵学广. 化学学报), **2018**, 76(4): 298–302.
- [36] Sun C Y, Han T S, Guo C, Sheng W N, Liu J. *Spectrosc. Spectral Anal.* (孙翠迎, 韩同帅, 郭超, 盛伟楠, 刘瑾. 光谱学与光谱分析), **2017**, 37(11): 3391–3398.
- [37] He W X, Wen Z Y, Zhou Y. *Laser Optoelectron. Prog.* (何文馨, 温志渝, 周颖. 激光与光电子学进展), **2018**, 54(6): 316–323.
- [38] Zhang Q, Cai G M, Chen B, Lu D L. *Anal. Instrum.* (张晴, 蔡贵民, 陈斌, 陆道礼. 分析仪器), **2018**, (3): 29–34.
- [39] Guo Z M, Chen Q S, Zhang B, Wang Q Y, Ouyang Q, Zhao J W. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.* (郭志明, 陈全胜, 张彬, 王庆艳, 欧阳琴, 赵杰文. 农业工程学报), **2017**, 33(8): 245–250.
- [40] Guo Y, Cheng L, Qin B. *J. Anhui Agric. Sci.* (郭亚, 程亮, 秦斌. 安徽农业科学), **2017**, 45(14): 191–198.
- [41] Xin Q, An Y, Dong K Y, Li X H, Xu Y Y. *J. Changchun Univ. Sci. Technol. : Nat. Sci. Ed.* (辛琦, 安岩, 董科研, 李欣航, 许燚. 长春理工大学学报: 自然科学版), **2018**, 41(5): 8–12.
- [42] Wang F, Li Y Y, Peng Y K, Li L. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.* (王凡, 李永玉, 彭彦昆, 李龙. 农业工程学报), **2017**, 33(19): 295–300.
- [43] Wang W X, Peng Y K, Zheng X C, Sun H W, Tian F, Bai J. *Trans. Chin. Soc. Agric. Mach.* (王文秀, 彭彦昆, 郑晓春, 孙宏伟, 田芳, 白京. 农业机械学报), **2017**, 48(9): 303–311.
- [44] Liu Z W, Wang J N, Bi B J, Chen M, Yan R, Tu J. *Control Instrum. Chem. Ind.* (刘志伟, 王婧娜, 毕宝杰, 陈曼, 严蕊, 涂健. 化工自动化及仪表), **2018**, 45(2): 124–127.
- [45] Zhang E Y, Yan X J, Xia W G. *Autom. Instrum.* (张恩阳, 闫晓剑, 夏维高. 自动化与仪器仪表), **2017**, (10): 207–209.
- [46] Liu Y, Cai W S, Shao X G. *Chin. Sci. Bull.* (刘言, 蔡文生, 邵学广. 科学通报), **2015**, 60(8): 704–713.
- [47] Song Y, Huang L S. *J. Agric. Mech. Res.* (宋艳, 黄留锁. 农机化研究), **2017**, 39(7): 189–191.
- [48] Ouyang A G, Li X, Zhang W, Wu Z J, Hu J, Ouyang Y P. *J. Henan Agric. Sci.* (欧阳爱国, 李雄, 张伟, 吴至境, 胡军, 欧阳玉平. 河南农业科学), **2017**, 46(4): 156–160.
- [49] Zhang H B, Tu H Y, Chen L H, Liu Y H, Li X L, Wang G M. *Adv. Text. Technol.* (张后兵, 涂红雨, 陈丽华, 刘永海, 李贤良, 王国民. 现代纺织技术), **2018**, (6): 1–6.
- [50] Dou G, Chen G S, Zhao P. *Spectrosc. Spectral Anal.* (窦刚, 陈广胜, 赵鹏. 光谱学与光谱分析), **2016**, 36(8): 2425–2429.
- [51] Hong S J, Gu Y Q, Shou G Z. *Comp. Appl. Softw.* (洪胜杰, 顾玉琦, 寿国忠. 计算机应用与软件), **2017**, 34(1): 214–217.
- [52] Zeng Z D, Chen A M, Liang Y Z, Xu G W. *Comp. Appl. Chem.* (曾仲大, 陈爱明, 梁逸曾, 许国旺. 计算机与应用化学), **2017**, 34(1): 35–39.
- [53] Sui L, Guo T J, Yang H W, Jiang H L, Guo J Y. *Chin. J. Anim. Sci.* (隋莉, 郭团结, 杨红伟, 江海兰, 郭吉原. 中国畜牧杂志), **2017**, 53(11): 108–113.
- [54] Liu W J, Li W J, Li H G, Qin H, Ning X. *Spectrosc. Spectral Anal.* (刘文杰, 李卫军, 李浩光, 覃鸿, 宁欣. 光谱学与光谱分析), **2017**, 37(7): 2024–2027.

- [55] Jia S Q, Guo T T, Liu Z, Yan Y L, An D, Gu J C, Li S M, Zhang X D, Zhu D H. *Spectrosc. Spectral Anal.* (贾仕强, 郭婷婷, 刘哲, 严衍禄, 安冬, 顾建成, 李绍明, 张晓东, 朱德海. 光谱学与光谱分析), **2014**, 34(11): 2984–2988.
- [56] Chen P, Zhu X Y, Li J Y, Chu X L. *China Petrol. Process. Petrochem. Technol.* (陈瀑, 祝馨怡, 李敬岩, 褚小立. 石油炼制与化工), **2017**, 48(7): 98–102.
- [57] Nie C H, Fang H C, Tan J, Zeng S H, Guan L J. *Chem. Prod. Technol.* (聂长虹, 方红承, 谭军, 曾松华, 管丽娟. 化工生产与技术), **2016**, 23(4): 37–39.
- [58] Liu X, Li J, Chen Y L. *Guangzhou Chem. Ind.* (刘翔, 李键, 陈艳玲. 广州化工), **2016**, 44(13): 128–130.
- [59] Liu P, Luo H Y, Chen L, Zhao J W, Guo J, Zhang Z Y. *Guangzhou Chem. Ind.* (刘佩, 罗海英, 陈磊, 赵经纬, 郭娟, 张政宇. 广州化工), **2018**, 46(7): 80–83.
- [60] Zhu Y T, Li J C, Gao S J, Luo Z J, Huang Y Q, He M X, Zheng Y Y. *China Oils and Fats* (朱雨田, 李锦才, 高素君, 罗兆基, 黄勇旗, 何美霞, 郑燕燕. 中国油脂), **2017**, 42(9): 133–135.
- [61] Zhang L, Ding D Z, Yang L H, Li H Q, Yu Y, Luan C Z. *Chin. Pharm. Aff.* (张磊, 丁大中, 杨龙华, 李会轻, 于毓, 栾成章. 中国药事), **2018**, 32(1): 59–66.
- [62] Huang H X, Wang J L, Zhao Z Y. *China Sci. Technol. Achievem.* (黄海欣, 王京力, 赵珍玉. 中国科技成果), **2018**, 19(13): 42–44.
- [63] Song W Q, Xue G, Tao P Y. *Fire Sci. Technol.* (宋文琦, 薛岗, 陶鹏宇. 消防科学与技术), **2018**, 37(6): 823–825.
- [64] Wang Y Y, Deng G D, Xu J, Wang Z Q, Gu Q, Zeng J. *Chin. J. Explos. Propell.* (王云云, 邓国栋, 徐君, 王志强, 谷强, 曾建. 火炸药学报), **2018**, 41(4): 408–413.
- [65] Wen X Y, Qiao J, Liu H N, Su P F, Shi Q, Hu L. *Chin. J. Expl. Propell.* (温晓燕, 譙娟, 刘红妮, 苏鹏飞, 石强, 胡岚. 火炸药学报), **2016**, 39(3): 61–65.
- [66] Li X J, Li W X, Li S R, Zhao G L. *J. Anal. Sci.* (李学娇, 李文霞, 李书润, 赵国樑. 分析科学学报), **2016**, 32(6): 800–804.
- [67] Zhang Y Y, Gu Y Q, Zhang W Y. *J. Anhui Agric. Sci.* (张妍茵, 顾玉琦, 张雯雅. 安徽农业科学), **2017**, 45(22): 26–27.
- [68] Jiang M Z, Han B X, Yan H, Jia J Q, Tu J, Ma Y K. *Chem. Ind. Forest Prod.* (江明珠, 韩邦兴, 颜辉, 贾俊强, 屠洁, 马永昆. 林产化学与工业), **2017**, 37(5): 101–106.
- [69] Hao Y, Wen Q, Hua R M, Chen B. *Food Mach.* (郝勇, 温钦, 华饶敏, 陈斌. 食品与机械), **2018**, 34(4): 124–127.
- [70] Wang C F, Bai Z J, Sun W J, Guo L, Xiong Y, Lu D L, Chen B. *J. Anhui Agric. Univ.* (王春峰, 白志杰, 孙武坚, 郭丽, 熊颖, 陆道礼, 陈斌. 安徽农业大学学报), **2017**, 44(3): 541–545.
- [71] Cheng M, Zhang J Y, Li M Z, Liu H J, Sun H, Zheng T. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.* (程萌, 张俊逸, 李民赞, 刘豪杰, 孙红, 郑涛. 农业工程学报), **2017**, 33(Z1): 157–163.
- [72] Chen X S, Su M, Jiang L M. *Meas. Control Technol.* (陈夕松, 苏曼, 蒋立沫. 测控技术), **2018**, 37(9): 5–9.
- [73] Liu Y D, Li Y F, Gong Z Y, Sun X D. *Spectrosc. Spectral Anal.* (刘燕德, 李轶凡, 龚志远, 孙旭东. 光谱学与光谱分析), **2017**, 37(12): 3714–3718.
- [74] Li L, Peng Y K, Li Y Y. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.* (李龙, 彭彦昆, 李永玉. 农业工程学报), **2018**, 34(9): 267–275.
- [75] Guo C, Liang M X, Jiang M Z, Jia J Q, Wu Q Y, Yan H. *J. Jiangsu Univ. Sci. Technol. : Nat. Sci. Ed.* (郭成, 梁梦醒, 江明珠, 贾俊强, 吴琼英, 颜辉. 江苏科技大学学报: 自然科学版), **2018**, 32(2): 285–290.
- [76] Zhang Y, Zhang L, Tian S S, Zhou X S, Li W L, Zhai H B. *China J. Chin. Mater. Med.* (张淹, 张路, 田守生, 周祥山, 李文龙, 瞿海斌. 中国中药杂志), **2016**, 41(19): 3574–3578.
- [77] Li J J, Zhou Z L, Huang S Q, Lu L, Huang Y S, Tian S H, Falola A A, Li X, Li J, Shu Y D, Wang X C. *Chem. Ind. Eng. Prog.* (李晶晶, 周昭露, 黄生权, 鲁亮, 黄延盛, 田淑华, Falola Akinola A, 李璇, 李杰, 舒逸聘, 王学重. 化工进展), **2018**, 37(5): 1923–1932.
- [78] Xu M, Zhang L, Yue H S, Pang H W, Ye Z L, Ding L. *China J. Chin. Mater. Med.* (徐敏, 张磊, 岳洪水, 庞洪伟, 叶正良, 丁黎. 中国中药杂志), **2017**, 42(20): 68–73.
- [79] Yang Y, Wang L, Liu X S, Wu Y J, Bi Y A, Xiao W, Chen Y. *Chin. Tradit. Herb. Drugs* (杨越, 王磊, 刘雪松, 吴永江, 毕宇安, 萧伟, 陈勇. 中草药), **2017**, 48(17): 50–57.
- [80] Su T, Jiang W Y, Li Y D, Ren X H, Ma Z J, Qi M X, Cui X L, Gao L. *China Pharm.* (苏婷, 姜文月, 李亚东, 任绪华, 马子君, 齐美欣, 崔宪利, 高陆. 中国药房), **2018**, 29(12): 1616–1620.
- [81] Wang L, Shi Y G, Li Y, Wei W. *China Oils and Fats* (王乐, 史永革, 李勇, 魏巍. 中国油脂), **2015**, 40(1): 91–94.
- [82] Lin Y Q, Hu P Q, Liu J, Fan S, Xu Z P, Wang Q, Zhao L P, Wu Y J. *Comp. Appl. Softw.* (林晏清, 胡澍芃, 刘晶, 范爽, 徐琢频, 王琦, 赵莉萍, 吴跃进. 计算机应用与软件), **2017**, 34(12): 8–12.

- [83] Hu Y, Liu N, Ji H W, Huang X J, Peng Q R, Shao X G. *J. Anhui Agric. Sci.* (胡芸, 刘娜, 姬厚伟, 黄锡娟, 彭黔荣, 邵学广. 安徽农业科学), **2017**, 45(19): 78–80.
- [84] Peng Y K, Yang Q H, Wang W X. *Trans. Chin. Soc. Agric. Mach.* (彭彦昆, 杨清华, 王文秀. 农业机械学报), **2018**, 49(3): 347–353.
- [85] Yan H, Liang M X, Guo C, Zhang Y S, Zhang G Z. *Sci. Seric.* (颜辉, 梁梦醒, 郭成, 张业顺, 张国政. 蚕业科学), **2018**, 44(2): 283–289.
- [86] Zhu Z Q. *On-line Detection of Solid Products and Curing Process of Epoxy Resin by Near infrared Spectroscopy*. Beijing: Beijing University of Chemical Technology(朱志强. 近红外光谱在线检测固体产物及环氧树脂固化过程关键方法研究. 北京: 北京化工大学), **2018**.
- [87] Wang L, Liu T, Chen Y, Sun Y Q, Xiu Z L. *Chin. J. Biotechnol.* (王路, 刘涛, 陈洋, 孙亚琴, 修志龙. 生物工程学报), **2017**, 33(1): 68–78.
- [88] Li C, Li J, Xu Z M. *Plastics*(李超, 李佳, 许振明. 塑料), **2017**, 46(5): 33–36.
- [89] Ma Y, Zhang R Y, Qi Y J. *Food Mach.* (马艳, 张若宇, 齐妍杰. 食品与机械), **2017**, 33(6): 135–138.
- [90] Sun S P, Peng J, Li R, Zhu Z L, Vázquez – Arellano M, Fu L S. *Food Sci.* (孙世鹏, 彭俊, 李瑞, 朱兆龙, Vázquez – Arellano Manuel, 傅隆生. 食品科学), **2017**, 38(2): 301–305.
- [91] Cao X F, Ren H R, Li X Z, Yu K Q, Su B F. *Spectrosc. Spectral Anal.* (曹晓峰, 任惠如, 李幸芝, 余克强, 苏宝峰. 光谱学与光谱分析), **2018**, 38(7): 2175–2182.
- [92] Yu H, Lv M Q, Liu L M, Yu G P, Zhao Y R, He Y. *Spectrosc. Spectral Anal.* (俞浩, 吕美巧, 刘丽敏, 余桂平, 赵艳茹, 何勇. 光谱学与光谱分析), **2017**, 37(10): 3193–3197.
- [93] Sun X D, Liu Y D, Xiao H C, Zhang Z C, Li Z M, Lv Q. *Spectrosc. Spectral Anal.* (孙旭东, 刘燕德, 肖怀春, 张智诚, 李泽敏, 吕强. 光谱学与光谱分析), **2017**, 37(2): 551–556.
- [94] Yang Z L, Lin Y F, Liang H, Li S X, Xiao Z M, Fan X. *Trans. Chin. Soc. Agric. Mach.* (杨增玲, 林玉飞, 梁浩, 李守学, 肖志明, 樊霞. 农业机械学报), **2017**, 48(12): 363–369.
- [95] Qi M J, Chen Y H, Wang X Q, Yu C R, Qi J Y. *Forensic Sci. Technol.* (齐敏珺, 陈奕桦, 王新全, 于翠荣, 戚君仪. 刑事技术), **2017**, 42(1): 15–20.
- [96] Liu M, Shen E, Wang N. *Chin. J. Lumin.* (刘猛, 申恩, 王楠. 发光学报), **2017**, 38(5): 663–669.
- [97] Huang L X, Li D P, Wu F, Shen Z X, Cao N X, Duan J Z, Wang H F. *High Power Laser and Particle Beams*(黄立贤, 李大鹏, 吴凡, 沈志学, 曹宁翔, 段佳著, 王海峰. 强激光与粒子束), **2018**, 30(1): 186–190.

(责任编辑: 盛文彦)