doi：10.12452/j.fxcsxb.25052501

近红外光谱分析技术在中国石油化工领域的应用

许育鹏，刘　丹，陈　瀑，李敬岩，褚小立*

（中石化石油化工科学研究院有限公司，北京　100083）

摘　要：近红外光谱分析技术作为分子光谱技术中一种重要的智能感知手段，其与化学计量学方法相结合已广泛应用于农业、石化、烟草、制药、食品和饲料等多个行业领域。该文对近红外光谱分析技术在中国石油化工领域近30年来的诸多应用进行综述，涵盖原油快速评价、石脑油烃组成分析、汽油辛烷值在线检测、柴油十六烷值预测、重油性质分析、聚烯烃产品质量控制，以及近年随着智能工厂建设的推进，近红外光谱分析技术与先进过程控制(APC)、实时优化(RTO)系统在多个石化装置的深度融合应用，并对未来近红外光谱分析技术在石化领域的应用发展趋势做了展望。

关键词：近红外光谱分析技术；化学计量学；智能工厂；石油化工

中图分类号：O657.3；G353.11　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1004-4957(2025)10-2026-08

Application of Near Infrared Spectroscopy Analytical Technology in China's Petrochemical Industry

XU Yu-peng，LIU Dan，CHEN Pu，LI Jing-yan，CHU Xiao-li*

（SINOPEC，Research Institute of Petroleum Processing Co. Ltd.，Beijing　100083，China）

Abstract：Near infrared spectroscopy analytical technology，as an important intelligent sensing method in molecular spectroscopy technology，combined with chemometrics methods，has been widely applied in various fields such as agriculture，petrochemicals，tobacco，pharmaceuticals，food，and feed. This article provides an overview of the application of near infrared spectroscopy analytical technology in petrochemical industry in China over the past three decades，covering crude oil rapid assay，naphtha hydrocarbon composition analysis，gasoline octane number on-line detection，diesel cetane number prediction，heavy oil property analysis，polyolefin product quality control，and the deep integration of near infrared spectroscopy analytical technology with advanced process control(APC) and real-time optimization(RTO) systems in multiple petrochemical units，which has been promoted with the advancement of smart factory construction in recent years. Additionally，application and development trends of near infrared spectroscopy analytical technology in petrochemical industry in future are also proposed.

Key words：near infrared spectroscopy analytical technology；chemometrics；smart factory；petrochemical industry

自20世纪90年代以来，近红外光谱分析技术逐渐应用于农业、石化、烟草、制药、食品和饲料等多个领域[1-2]，它可以快速高效地测定样品的化学组成和物理化学性质，已成为一种不可或缺的分析手段，服务于多个行业的实验室及工业现场应用。

石油化工是国民经济最重要的支柱产业之一。石化工业主要通过对石油精炼得到不同用途的油品，如石脑油、汽煤柴、润滑油以及乙烯、丙烯和三苯类等基础化学品，后续还包括基于各类基础化学品生产有机化工产品及塑料、纤维和橡胶等合成材料。

石油化工领域的石油产品和化工品的种类繁多，但多以碳氢化合物为主，这些化合物中含氢基团振动吸收光谱的倍频及组合频正好位于近红外光谱范围(700~2 500 nm)内。由于石化产品的近红外光谱包含丰富化学结构信息，可与对应组成与物性关联，因此近红外光谱分析技术联用化学计量学方法可建立相应分析模型以快速测定其化学组成和物性，还可对产品的质量等级进行定性鉴别分析。

收稿日期：2025-05-25；**修回日期：**2025-06-23
基金项目：中国石化有限公司资助项目(124065)
*通讯作者：褚小立，博士，教授级高工，研究方向：分子光谱及化学计量学在石化领域应用研究，E-mail：chuxl.ripp@sinopec.com
网络首发时间：2025-08-11

石化领域近红外光谱分析应用涉及的化学计量学方法除了多元校正技术，即基于样品全谱或多个波长区间光谱信息，结合多元校正方法建立定量分析模型来测定样品理化指标，还经常用到数据库定量技术，即利用“样品组成相似-光谱相似-性质相似”原理，从光谱数据库中选择与待测样品光谱相近的样品拟合计算待测样品的性质参数。常用的化学计量学定量分析方法包括偏最小二乘回归(PLSR)、人工神经网络回归(ANNR)、支持向量机回归(SVR)和库光谱拟合等。

近年来，随着智能制造大发展，石化企业也在大力推进“智能工厂”建设，先进过程控制(APC)和实时优化(RTO)控制技术在多个装置得到实施，对在线分析技术及时可靠地提供原料和成品质量信息提出了迫切需求。石化装置物料和分析项目比较多，传统实验室分析方法大多耗时较长、不利于提供实时分析数据。近红外光谱分析技术可测量物态多，可直接测量、操作方便、分析速度快、分析效率高，还可以通过光纤方式实现多性质、多流路同时在线测量，非常适合在石化领域应用。

目前，近红外光谱分析技术已广泛应用于石化领域中的各个工艺环节对原料和产物进行分析，尤其是对多种装置的原料和产物进行中间控制分析[3]，见图1。近红外光谱分析技术在中国经过近30年的发展历程，从最初化验室的汽柴油分析到现今多个装置实时优化中的物料在线分析，其在石油化工领域的多家炼厂得到了越来越广泛的应用，产生了可观的经济效益和社会效益。本文对近30年来近红外光谱分析技术在中国石油化工领域的典型应用进行总结。

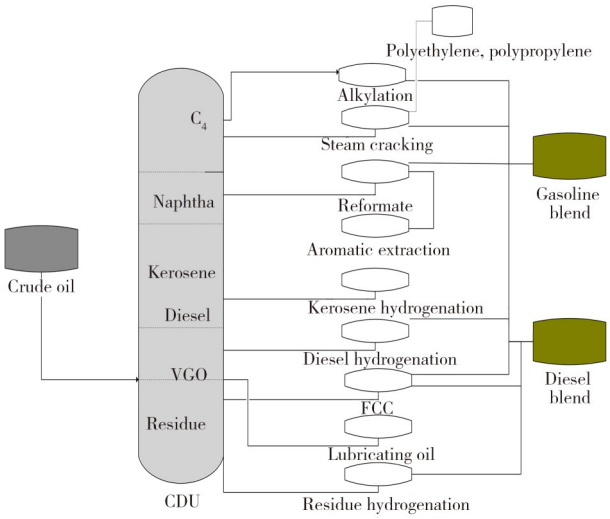


图1　近红外光谱分析技术在石油化工装置的应用

Fig. 1　Application of near infrared spectroscopy technology in petrochemical units

1　近红外光谱分析技术在中国石油化工领域的应用

1.1　石油炼制

1.1.1　原　油　原油性质千差万别，原油贸易和原油加工环节均需通过原油评价了解原油性质，常规的原油评价方法耗时耗力，时效性不足，以近红外光谱为分析工具的原油快评方法便随即发展起来。

2012年，中国石化石油化工科学研究院(石科院)[4]基于500余种涵盖国内外油源代表性原油的近红外光谱，利用移动窗口相关系数识别和库光谱拟合两种非传统化学计量学专利方法，开发了近红外原油快评系统。该系统可在5 min内得出原油密度、残炭、酸值、硫含量、氮含量、蜡含量、胶质含量、沥青质含量、实沸点蒸馏曲线(TBP)共9个基本性质，结合对应的中国石化原油详细评价数据库，可给出原油宽馏分详评数据，形成了国产化的一整套原油快速详评技术，随后又开发了基于网络实现原油快评的网络版原油快评系统，已在多个炼厂投入工业应用[5]。

大连石化和金陵石化等企业也于2010年前后引进TOPNIR公司的原油快评成套技术[6]并进行应用。该技术基于拓扑法的Intertek原油近红外光谱和原油评价数据库，可在30 min内对原油进行快速评价，给出原油馏分的收率及相关性质数据。广西石化[7]也基于该近红外原油快速评价技术，结合H/CAMS软件，采用原油近红外光谱结合拓扑法建立了原油常减压蒸馏装置侧线收率的预测模型。

近红外原油快评最重要的应用是原油调合过程中对组分原油和调合原油进行性质监测。盛虹石化[8]基于近红外原油快评系统快速分析储罐混原油性质，及时检测参与调合的组分原油性质，为原油优化调合提供了基础分析数据，确保了炼厂常减压装置原油进料性质的稳定，为后续二次加工装置的优化提供了有力支撑。

1.1.2　石脑油　石脑油由原油蒸馏或石油二次加工切割相应馏分而得，主要成分是C_5~C_{11}的链烷、环烷或芳烃。石脑油是管式炉裂解制取乙烯、丙烯，催化重整生产高辛烷值汽油组分以及制取苯、甲苯和二甲苯的重要原料，也可用于生产溶剂油或直接作为汽油产品的调合组分。

炼化一体化企业中，石脑油的利用原则是“宜油则油，宜烯则烯，宜芳则芳”，因用途不同石脑油有各种不同的质量指标要求，其中石脑油的烃组成(*n*-烷烃、*iso*-烷烃、环烷烃、烯烃和芳烃)族组成无论对哪种加工工艺均是十分重要的指标。传统的烃组成分析采用气相色谱方法，由于分析时间较长，无法满足过程控制尤其是先进控制和优化系统的需要。因此，现代炼厂均将在线近红外光谱技术用于作为裂解原料和重整原料的石脑油的烃组成实时分析，在线近红外可在几十秒内为先进控制和优化系统提供原料的组成数据，对于优化装置工艺操作参数、保证装置高负荷平稳运行具有重要的作用。

2009年，燕山石化[9]乙烯装置在国内首次采用了国产在线近红外光谱分析系统对石脑油进行在线分析，该系统可测量的石脑油物性主要包括：密度、初馏点、10%馏出温度、30%馏出温度、50%馏出温度、70%馏出温度、90%馏出温度、终馏点以及*n*-烷烃、*iso*-烷烃、烯烃、芳烃和环烷烃相关指标，检测周期为1 min。随后，茂名石化、扬子石化和兰州石化[10-12]等企业也陆续在乙烯装置上采用近红外光谱技术，实时检测石脑油的多项物性参数。

除对石脑油的烃组成进行分析之外，随着各类分子级模型的开发，对石脑油实现快速单体烃级别的分析也很必要。已有文献报道采用近红外光谱结合样本增强方法，利用偏最小二乘方法和k-近邻回归法(KNR)分别建立了石脑油烃组成和单体烃分布比例的预测模型，将近红外光谱对石脑油组成的预测扩展到单体烃层级[13]。

1.1.3 汽 油 汽油是用量最大的轻质石油产品之一，主要成分为C_5~C_{12}的烃类混合物。催化裂化、加氢裂化、催化重整和延迟焦化等炼油装置均生产汽油组分，这些汽油组分通常按一定比例调合成车用汽油。

辛烷值是车用汽油最重要的质量指标，用于表征汽油的抗爆性。常用的是研究法辛烷值(RON)，车用汽油牌号按RON等级划分，例如92号、95号，92号汽油表示其RON不低于92。传统的台架试验测定辛烷值方法不仅速度慢，分析成本高，所需测试样品量大，噪声和有害挥发物质污染大，而且不适合在线分析。

20世纪90年代，国际上以在线近红外光谱分析技术作为核心组成的汽油优化调合系统出现。1997年，国内兰州石化[14]对该技术进行了引进，其利用美国Model 310近红外分析仪，在线分析4种组分汽油和2种成品汽油的辛烷值。2003年，大连石化[15]等炼厂也对类似的汽油调合技术进行了引进，其核心是利用Guidewave的近红外分析仪对组分汽油和调和汽油的辛烷值及组成进行在线分析。

1997年，石科院组建团队开始研制近红外光谱仪，随后开发了以电荷耦合器件(CCD)检测器为基础的近红外光谱仪[16]及配套的基于化学计量学方法的分析软件，并在多家炼油厂用于汽油辛烷值及族组成[17-18]的快速测定。

2004年，石科院和兰化自动化研究院研制了一种新型CCD在线近红外光谱分析仪[19]，包含光谱仪硬件、电源电路与控制、防爆机柜、光纤附件、流通检测池、样品预处理系统、界外样品采样、实时光谱采集软件和配套的化学计量学分析软件等，并将该在线近红外光谱分析仪应用于兰州石化联合重整装置对汽油辛烷值进行了准确测定。2005年，石科院采用我国自行研制的NIR-6000型多通道在线近红外光谱分析仪同时检测了8套催化重整中型试验装置，对重整生成油的RON和芳烃含量等5项质量指标进行实时检测[20]。2007年，中国石化广州分公司[21]在国内首次将在线近红外光谱分析技术应用于重整装置APC系统，在线近红外光谱分析技术可以实时、准确和完整地为APC提供所需的分析数据。

对汽油分析而言，近红外光谱分析技术最重要的一个应用场景是汽油调合。2007年，基于国产在线近红外光谱分析技术的自主知识产权的汽油优化调合系统[22]在广州石化正式投产运行，其中在线近红外光谱技术对成品汽油及调和组分油的RON、马达法辛烷值(MON)、烯烃含量、芳烃含量、苯含量、氧含量、蒸气压(RVP)和密度等的预测结果与标准方法之间无显著性差别，稳定性满足要求。近年来，以在线近红外光谱分析技术为重要组成部分的汽油调合技术在青岛石化[23]、天津石化[24]、惠州石化[25]、延炼[26]和扬子石化[27]等多家炼厂得到应用。

1.1.4 喷气燃料分析 喷气燃料(航空煤油)是一种重要的石油产品，主要由直馏航煤馏分、加氢裂化航煤和加氢精制航煤等组分及一些添加剂调合而成，广泛用于各种喷气式飞机。烃族组成和冰点是喷气燃料的重要质量指标，传统方法操作较为繁琐，分析时间长，重复性较差。

1998 年，石科院开始在自行研制的国产 CCD 近红外光谱仪上开展对喷气燃料性质的快速研究工作，建立了近红外光谱快速测定 3 号喷气燃料芳烃含量、冰点、密度和馏程的分析模型[28]。在这一时期，后勤工程学院与北京分析仪器厂联合研制了喷气燃料质量指标测定仪[29]。在此基础上，随后我国总后油料所、海军航空工程学院和第二炮兵工程学院等单位针对我国的军用喷气燃料开展了近红外光谱快速分析方法开发，涉及的评价指标包括馏程、冰点、密度、黏度和闪点等[30-31]。

1.1.5　柴油分析　柴油分轻柴油和重柴油两种，轻柴油主要用作车用柴油内燃机和多种高速柴油机的燃料，重柴油主要用作船舶燃机以及用于发电的各种中速和低速柴油机的燃料。近红外光谱分析技术在车用柴油中的应用较多。车用柴油主要由直馏柴油、催化柴油及焦化柴油等原料经过加氢精制处理后按一定比例调配而成，主要由 C_{10}~C_{24}的烃类化合物组成。

十六烷值是车用柴油的重要指标，传统的十六烷值发动机台架试验机价格昂贵、分析时间长，且使用和维护费用高。除十六烷值之外，柴油组成也是一个非常关键的指标。国内外车用柴油的质量规范均对芳烃尤其是多环芳烃含量作了严格限制，我国 GB 19147-2016 车用柴油(Ⅳ)要求多环芳烃的含量不大于 11%(质量分数)[32]。柴油烃组成需使用固相萃取柱结合气相色谱-质谱(GC-MS)法进行测定，过程费时费力。基于以上因素，近红外光谱分析技术非常适合于柴油的实验室快速分析和工业在线分析。

20 世纪 90 年代中后期，我国开始研究和应用近红外光谱技术快速测定柴油的十六烷值，石科院基于自行研制的 CCD 近红外光谱仪，在国内炼厂分类建立了快速测定柴油调合组分和成品柴油的分析模型，对柴油十六烷值、烃组成和多项物性数据进行测定，得到了较好的应用效果[33-37]。后来又拓展到对催化裂化劣质柴油轻循环油转化为高辛烷值汽油或轻质芳烃工艺(LTAG)中的加氢单元原料和产品组成进行快速分析[38]。

在炼厂，上海石化[39]建立了柴油密度和凝点的近红外分析模型，并将其应用于柴油馏出口分析。同汽油调合类似，出于减少柴油质量过剩和降低生产成本考虑，广西石化[40]在柴油调合过程中应用柴油在线优化调合系统，通过使用在线近红外光谱分析仪在线测量关键调合柴油的组分信息。应用柴油在线优化调合系统后，调合成品柴油的十六烷值平均降低了 0.5 个单位，保证质量的同时减少了柴油质量过剩，有效缓解了炼厂储罐紧张，减轻了车用柴油产品的出厂调合压力。

1.1.6　重油分析　重油通常是指原油经蒸馏提取汽油、煤油、柴油馏分后剩下的馏分，包括减压馏分油(VGO)、渣油和沥青等，其中，VGO 最重要的用途是生产润滑油基础油。

21 世纪初，石科院将近红外光谱分析技术用于对润滑油基础油黏度、烃组成和沥青蜡含量进行分析[41-43]。后续又采用近红外光谱与库光谱拟合方法、随机森林方法相结合，对 VGO、加氢裂化尾油和加氢润滑油基础油烃类组成和减压馏分油 VGO 黏度指数进行预测[44-45]。随着国内外对润滑油产品质量的要求不断提升，使得对高端基础油的需求增加，而高端基础油的生产工艺复杂，生产过程中需要及时获取润滑油加氢装置中各项物料(VGO、加氢尾油和加氢基础油)的组成、倾点和黏度指数分析数据，以指导工艺参数的调整，保证生产合格率。为实现近红外光谱快速分析基础油原料与产物，石科院开发了基于近红外光谱预测加氢裂化尾油和基础油性质和组成的成套分析技术，并在工业装置上得到实际应用[46]。

乌鲁木齐石化[47]用近红外光谱分析方法对北疆稠油混合料进行了评价，发现其渣油非常适合生产重交通道路沥青，与用作焦化原料相比(生产时间 4 d)，整体经济效益可提高 400 余万元。独山子石化[48]也将近红外光谱分析技术用于快速分析多种重质馏分油品的密度和馏程，以及中控分析，减少常规分析频次。除了对重油组成和物性进行分析外，近红外光谱还被用于研究原油及重油中的沥青质絮凝动力学和机理、温度等外部条件对絮凝的影响，以及絮凝对重质燃料油稳定性的影响[49]。

1.2　化学品

现今炼化一体化形势下，石油化工除了燃料油生产之外，还衍生出两个很大的化学品产业链。其一围绕着以乙烯为主的聚烯烃产品链展开，聚烯烃产品链中，以石脑油和加氢尾油为主要原料生产乙烯、丙烯、丁二烯，进而生产聚乙烯、聚丙烯和其他衍生聚合物。其二是围绕着芳烃生产的芳烃产业链，芳烃是关键的有机化工基础原料，主要包含苯、甲苯和二甲苯，可通过芳烃抽提从重整生成油和

裂解汽油中分类出来。二甲苯中的对二甲苯可用于生产精对苯二甲酸，进而生产聚酯，构成了二甲苯-对苯二甲酸-聚对苯二甲酸乙二醇酯(PX-PTA-PET)芳烃产业链。近红外光谱分析已在石化领域用于多种聚烯烃及衍生化学品的分析。

1.2.1 聚烯烃 2008年，石科院基于固定光路技术，结合大光斑、动态样品池和铟镓砷(InGaAs)阵列检测器研制了一台聚丙烯专用分析仪样机，对聚丙烯树脂粒料样品的乙烯含量、熔体流动速率和拉伸屈服强度3个指标采用分类判别后进行定量分析，实现了聚丙烯样品的快速分析[50]。2011年，在该样机基础上，开发出聚丙烯在线分析系统。该系统能够从聚丙烯生产装置的粉料输送管线内自动取出气固混相的粉末样品，通过固体样品流通池采集光谱并分析得到等规度、熔融指数、乙烯含量和堆积密度指标，然后将聚丙烯粉末样品返回取样管线，实现聚丙烯装置产品质量的无损在线监测[51]。济南炼化[52]、广州石化[53]、中海壳牌[54]等采用近红外光谱分析方法测定了聚丙烯树脂粉料和粒料的平均相对分子质量、等规度、熔融指数、乙烯含量。

1.2.2 芳烃及其他化学品 天津石化[55]将近红外光谱技术用于测定重整抽提装置二甲苯塔顶油组成，对重整工艺进行中间控制分析，指导重整工艺生产。四川维尼纶[56]采用近红外光谱法测定醇解度以监控聚醋酸乙烯酯生产聚乙烯醇产品的质量。万华化学[57]将近红外光谱分析技术用于聚氨酯生产中聚氨酯原料异氰酸酯基(NCO)含量、羟值、酸值、水分以及环氧乙环(EO)含量相关指标的快速检测。在环氧丙烷与苯乙烯通过共氧化法制备环氧丙烷工艺中，大沽化工[58]采用近红外光谱分析方法监测共氧化法环氧丙烷工艺的中间产物乙苯氢过氧化物(EBHP)和副产物苯甲醇(MBA)、苯乙酮(ACP)。

针对化工型甲基叔丁基醚(MTBE)工业生产中(甲醇/异丁烯)醇烯比在线监测这一技术难题，燕山石化[59]基于在线近红外光谱分析技术，通过对近红外光谱仪、在线分析软件和预处理单元的重新设计和改进，在国内外首次开发了在线近红外光谱醇烯比分析系统，对MTBE装置的醇烯比进行在线检测。巴陵石化[60]应用近红外光谱分析技术建立了聚己内酰胺切片相对黏度的定量分析模型，对聚己内酰胺切片的相对黏度进行快速分析。

1.3 近红外光谱分析与实时优化技术结合

随着工业4.0概念不断深入，石油化工行业越来越强调智能化。生产管控自动化是智能化炼厂的重要组成部分，主要指通过优化控制，提升装置自动化和实时优化水平[61]。实时优化技术离不开分钟级的物料实时分析数据支持[62]，由于传统的实验室分析难以满足时效性要求(如辛烷值测定，传统的马达机测定辛烷值需数十分钟)，通常通过过程分析技术获取。

在线近红外光谱分析技术是过程分析技术的典型代表，其作为智能炼厂中重要的智能感知手段，已广泛应用于原油调合、原油蒸馏、蒸汽裂解、催化裂化、催化重整、烷基化、汽油调合、柴油调合等整个生产环节。近年来在石化企业多个装置的实时优化实施中，在线近红外光谱分析技术已获得广泛应用(图2)。

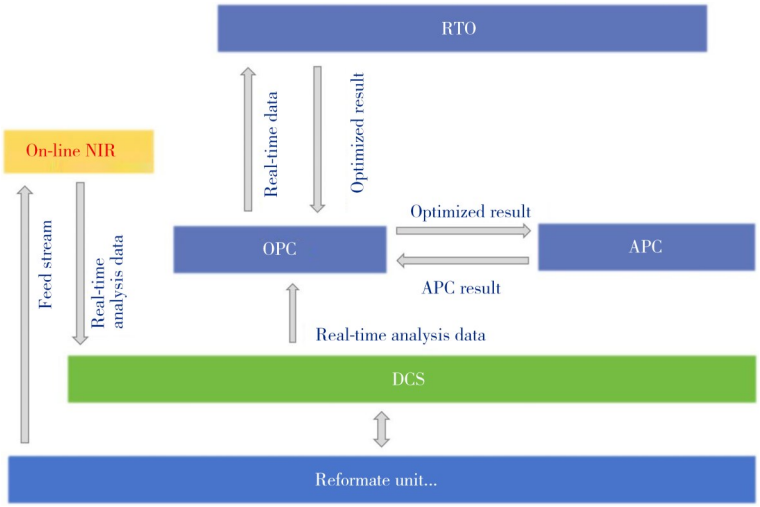


图2 在线近红外光谱在石化装置实时优化中的应用

Fig. 2 Application of on-line NIR in real-time optimization of petrochemical units

常减压装置实时优化除了应用于在线近红外光谱检测进料原油性质外，还对各个侧线石脑油的馏程、密度，常一线(航煤)的冰点、馏程、密度，常二线(柴油)的闪点、馏程及减三线(VGO)的凝点、馏程等进行在线分析[63]。乙烯装置实时优化过程中，应用在线近红外光谱对裂解原料石脑油和加氢裂化尾油密度、馏程及烃组成进行在线分析[64]，在线近红外光谱与实时优化相结合，可最大化APC和进料切换效率、节能且安全。重整装置实时优化应用在线近红外光谱对重整装置进料和重整生成油密度、辛烷值、馏程和不同碳数烃组成进行在线分析，在线近红外光谱分析和实时优化系统投用后，目标产品苯、甲苯和二甲苯的收率平均提高了0.58%，效益明显[65]。S Zorb装置实时优化应用在线近红外光谱对原料汽油和精制汽油的密度、辛烷值、馏程、饱和蒸气压以及碳数分布的烃组成进行在线分析[66]，通过与RTO系统集成，经济效果显著。在原料性质接近且不增加能耗剂耗，以及保证精制汽油脱硫(≤8 mg/kg)效果的前提下，RON辛烷值的损失平均降低0.46个单位，年经济效益约3 500万元。

2　结语与展望

近红外光谱分析技术凭借其快速、无损和多组分同时分析的优势，已成为中国石化行业质量控制与工艺优化的重要技术支撑。本文系统梳理了近30年来该技术在原油评价、馏分油分析、成品油调合及石化产品检测等方面的典型应用，展示了其在实际生产中的显著效益。随着智能工厂建设的深入推进，近红外光谱分析技术通过与先进过程控制系统和实时优化系统的深度集成，正在从单一的检测手段发展为贯穿生产全流程的智能感知核心。未来，该技术将朝着模型云端化、仪器便携化、多技术融合和标准化等方向发展，其应用深度和广度有望进一步拓展，为石化行业数字化转型和高质量发展提供更强大的技术保障。

未来近红外光谱分析技术在石化领域的应用发展将集中在以下几个方面：

(1)随着《能源领域5G应用实施方案》对我国能源领域的数字化、网络化、智能化建设给出明确要求，具体到石化领域即在智能炼厂建设中布局一大批5G典型应用场景，便携式近红外光谱仪器和分析模型云端化部署是一个趋势。

(2)随着近红外光谱分析技术在石油化工多个场景得到深入应用，技术标准化是推广和使用该类技术的重要保障。借鉴国际标准制定基于近红外光谱快速分析的石油产品物性方法标准及近红外光谱在线分析指南非常必要。

(3)近红外光谱和原子光谱(如紫外荧光(XRF))融合可以完善对石油样品中金属元素的分析能力。目前多光谱融合已在煤炭分析方面有了大量应用，未来在石化领域也会有相应应用。

(4)随着量子计算、人工智能大模型的引入，以近红外光谱为代表的现代光谱分析技术有望实现分子级反应的实时动态解析，为绿色低碳工艺开发提供全新研究范式，成为石化行业智能化、可持续化发展的核心引擎之一。

参考文献：

[1] Ozaki Y，Huck C，Tsuchikawa S，Engelsen S B. *Near-infrared Spectroscopy：Theory，Spectral Analysis，Instrumentation and Applications*. Singapore：Springer Press，**2021**：331-335.

[2] Ciurczak E W，Igne B，Workman J，Burns D A. *Practical Spectroscopy Handbook of Near-infrared Analysis*. 4th ed. New York：CRC Press，**2021**：781-797.

[3] Chu X L，Chen P，Xu Y P，Li J Y. *Research and Application Practice of Near Infrared Spectroscopy in Petroleum Refinery and Chemical Industry*. Beijing：Chemical Industry Press(褚小立，陈瀑，许育鹏，李敬岩. 近红外光谱在炼油和化工领域的研究与应用实践. 北京：化学工业出版社)，**2024**：320-335.

[4] Chu X L，Tian S B，Xu Y P，Wang J. *Pet. Process. Petrochem.*(褚小立，田松柏，许育鹏，王京. 石油炼制与化工)，**2012**，43(1)：72-77.

[5] Li J Y，Chu X L，Liu D，Dong L J，Feng B J，Xu Y P，Chen P. *Acta Petrol. Sin.*：*Pet. Process. Sect.*(李敬岩，褚小立，刘丹，董力军，冯保杰，许育鹏，陈瀑. 石油学报：石油加工)，**2022**，38(3)：710-717.

[6] Li J H，Cui H W. *Mod. Sci. Instrum.*(李建华，崔鸿伟. 现代科学仪器)，**2011**，1(1)：123-125.

[7] Wang Y B，Hu Y Z，Li W L，Zhang W S，Zhou F，Luo Z. *Spectrosc. Spectral Anal.*(王艳斌，胡于中，李文乐，张巍松，周锋，罗智. 光谱学与光谱分析)，**2012**，34(10)：2612-2616.

[8] Zhou J Q，Mei Y X，Wang Y L. *Refin. Chem. Ind.*(周家庆，梅耀星，王悦林. 炼油与化工)，**2025**，36(1)：32-37.

[9] Liu F H，Wei Y E. *Ethylene Ind.*(刘丰合，魏月娥. 乙烯工业)，**2013**，25(3)：47-50.

[10] Wang R, Xu H Y, Xing L C. *Mod. Chem. Ind.*(王瑞, 徐海燕, 邢龙春. 现代化工), **2013**, 33(4): 136-139.
[11] Han M. *Ind. Control Comput.*(韩旻. 工业控制计算机), **2008**, (10): 43-44.
[12] An X C, Feng X R, Li Y P. *Mod. Sci. Instrum.*(安晓春, 冯肖荣, 李弋鹏. 现代科学仪器), **2012**, (4): 155-158.
[13] Liu Q F, Chu X L, Chen P, Li J Y. *Pet. Process. Petrochem.*(刘秋芳, 褚小立, 陈瀑, 李敬岩. 石油炼制与化工), **2022**, 53(1): 86-92.
[14] Dong Z, Liang B C, Xia R A, Liu X M. *Control Instrum. Chem. Ind.*(董镇, 梁宝成, 夏荣安, 刘新民. 化工自动化及仪表), **1998**, 25(6): 46-48.
[15] Jiang F, He S B, Liu D S, Wang Y C. *Autom. Petrochem. Ind.*(蒋凡, 何盛宝, 刘东嵩, 王永长. 石油化工自动化), **2004**, (6): 39-41.
[16] Yuan H F, Long Y C, Xu G T, Lu W Z. *Chin. J. Anal. Chem.*(袁洪福, 龙义成, 徐广通, 陆婉珍. 分析化学), **1999**, 27(5): 608-613.
[17] Liu S, Zhu H, Chu X L, Yuan H F, Lu W Z. *J. Instrum. Anal.*(刘莎, 朱虹, 褚小立, 袁洪福, 陆婉珍. 分析测试学报), **2002**, 21(1): 40-43.
[18] Chu X L, Yuan H F, Ji C Q, Lu W Z. *Pet. Chem. Technol.*(褚小立, 袁洪福, 纪长青, 陆婉珍. 石油化工), **2001**, 30(11): 866-870.
[19] Yuan H F, Chu X L, Lu W Z, Chen W M, Guan X H, Cao W, Zhang C. *Chin. J. Anal. Chem.*(袁洪福, 褚小立, 陆婉珍, 陈卫民, 关新虎, 曹巍, 张传. 分析化学), **2004**, 32(2): 255-261.
[20] Yuan H F, Chu X L, Lu W Z. *Pet. Refiner Eng.*(袁洪福, 褚小立, 陆婉珍. 炼油技术与工程), **2005**, 35(4): 26-29.
[21] Wang J H, Chu X L, Yuan H F, Feng X G, Lu W Z. *Pet. Refiner Eng.*(王京华, 褚小立, 袁洪福, 冯新国, 陆婉珍. 炼油技术与工程), **2007**, 37(7): 24-28.
[22] Guo J B, Lu W Z, Liang Y C. *Proceedings of the 6th Academic Conference of the Department of Chemistry, Metallurgy and Materials Engineering, Chinese Academy of Engineering*(郭锦标, 陆婉珍, 梁永超. 中国工程院化工·冶金与材料工程学部第六届学术会议论文集), **2007**: 339-344.
[23] Shen H M, Wang J T. *Autom. Petrochem. Ind.*(沈惠明, 王俊涛. 石油化工自动化), **2009**, 45(5): 7-11.
[24] Wang X M, Tong X Y. *Autom. Instrum.*(王鑫民, 佟新宇. 自动化与仪表), **2010**, 25(5): 56-59.
[25] Liu H Y. *Instrum. Customer*(刘昊阳. 仪器仪表用户), **2012**, 1(6): 52-53.
[26] Xiao Q L. *China Chem. Trade*(肖庆丽. 中国化工贸易), **2019**, 11(30): 154.
[27] Yu J D. *Guangzhou Chem. Ind.*(余德健. 广州化工), **2025**, 53(7): 193-196.
[28] Yuan H F, Yue J Q, Lu W Z. *Chin. J. Anal. Chem.*(袁洪福, 岳俊奇, 陆婉珍. 分析化学), **1998**, 26(5): 603-606.
[29] Liu H Y, Lu C B, Wei R, Xiong C H, Liang A H. *Proceedings of the 11th Annual Meeting of the Fuel and Lubricant Branch of the Chinese Society of Automotive Engineers*(刘慧颖, 鲁长波, 韦锐, 熊春华, 梁爱和. 中国汽车工程学会燃料与润滑油分会第十一届年会论文集), **2004**: 354-360.
[30] Wei R, Zhang D Z. *Pet. Prod. Appl. Res.*(韦锐, 张德志. 石油商技), **2003**, 21(1): 48-51.
[31] Fan R J, Wang X J, Zhang Y Z, Liu X X. *Pet. Process. Petrochem.*(樊瑞君, 王煊军, 张有智, 刘祥萱. 石油炼制与化工), **2006**, 37(6): 57-62.
[32] GB 19147-2016. Automobile Diesel Fuels. National Standards of the People's Republic of China(车用柴油. 中华人民共和国国家标准).
[33] Xu G T, Lu W Z, Yuan H F. *Acta Petrol. Sin.: Pet. Process. Sect.*(徐广通, 陆婉珍, 袁洪福. 石油学报: 石油加工), **1999**, 15(4): 65-69.
[34] Xu G T, Yuan H F, Lu W Z. *Acta Petrol. Sin.: Pet. Process. Sect.*(徐广通, 袁洪福, 陆婉珍. 石油学报: 石油加工), **1999**, 15(5): 63-68.
[35] Xu G T, Lu W Z, Yuan H F, Fan Y R, Wu Y P, Tao J H. *Pet. Process. Petrochem.*(徐广通, 陆婉珍, 袁洪福, 范雨润, 吴艳萍, 陶敬华. 石油炼制与化工), **1999**, 30(9): 57-61.
[36] Xu G T, Liu Z L, Yang Y R, Shen S K, Lu W Z. *Acta Petrol. Sin.: Pet. Process. Sect.*(徐广通, 刘泽龙, 杨玉蕊, 沈师孔, 陆婉珍. 石油学报: 石油加工), **2002**, 18(4): 65-71.
[37] Xu G T, Yuan H F, Lu W Z. *Chin. J. Anal. Chem.*(徐广通, 袁洪福, 陆婉珍. 分析化学), **1999**, 27(1): 29-33.
[38] Chen P, Zhu X Y, Li J Y, Chu X L. *Pet. Process. Petrochem.*(陈瀑, 祝馨怡, 李敬岩, 褚小立. 石油炼制与化工), **2017**, 48(7): 98-102.
[39] Xu Y P. *Technol. Econ. Pet.*(徐樱萍. 石油化工技术与经济), **2018**, 34(4): 43-46.
[40] Cui W, Jia S C, Zhou X S, Zhao F, Yang H L. *Comput. Appl. Chem.*(崔巍, 贾舒晨, 周雪山, 赵峰, 杨华龙. 计算机与应用化学), **2013**, 30(11): 1347-1350.
[41] Wang Y B, Yuan H F, Lu W Z. *Lubr. Oils*(王艳斌, 袁洪福, 陆婉珍. 润滑油), **2001**, 16(6): 53-56.
[42] Wang Y B, Guo Q Z, Lu W Z, Yuan H F. *Pet. Chem. Technol.*(王艳斌, 郭庆洲, 陆婉珍, 袁洪福. 石油化工), **2001**, 30(3): 224-227.
[43] Wang Y B, Luo A L, Lu W Z, Yuan H F. *Acta Petrol. Sin.: Pet. Process. Sect.*(王艳斌, 罗爱兰, 陆婉珍, 袁洪福. 石油学报: 石油加工), **2001**, 17(3): 68-72.

[44] Li J Y，Chu X L，Liu D，Xu Y P，Chen P. *Microchem. J.*，**2024**，200：110265.
[45] Ren X T，Chu X L，Tian S B，Zhu X Y. *Pet. Process. Petrochem.*（任小甜，褚小立，田松柏，朱新宇. 石油炼制与化工），**2019**，50(1)：81-84.
[46] Xu Y P，Liu D，Chu X L，Zhang Q D，Chen P，Wu M. *Acta Petrol. Sin.*：*Pet. Process. Sect.*（许育鹏，刘丹，褚小立，章群丹，陈瀑，吴梅. 石油学报：石油加工），**2022**，38(3)：729-738.
[47] Liang Z Y，Sun J. *Pet. Chem. Equip.*（梁志勇，孙甲. 石油和化工设备），**2018**，21(9)：45-49.
[48] Xu F，Jiang M，Wang D Y，Pan Z Q. *Anal. Instrum.*（许峰，蒋敏，王定英，潘志强. 分析仪器），**2024**，(5)：37-43.
[49] Liang W. *Research on Stability Detection Technology of Heavy Oil Based on Near Infrared Transmittance Scanning*. Hangzhou：Zhejiang University(梁巍. 基于近红外透光度扫描的重油稳定性检测技术研究. 杭州：浙江大学），**2017**.
[50] Sun Y F，Lu W Z. *Mod. Sci. Instrum.*（孙岩峰，陆婉珍. 现代科学仪器），**2008**，(4)：46-49.
[51] Sun Y F，Li Z Y，Zhong Y，Zhang Y T，Cai L T，Lin W X，Shao B，Zhang Y J，Li Z S，Wang J H. *Mod. Sci. Instrum.*（孙岩峰，李卓越，钟洋，张英涛，蔡莲婷，林文雄，邵波，张彦君，李志松，王京华. 现代科学仪器），**2011**，(1)：60-62.
[52] Wu Y P，Yuan H F，Lu W Z，Li G L，Wang P. *Acta Petrol. Sin.*：*Pet. Process. Sect.*（吴艳萍，袁洪福，陆婉珍，李国梁，王萍. 石油学报：石油加工），**2003**，19(5)：86-91.
[53] Zhang Y J，Cai L T，Ding M，Shao B，Yang Z S. *Contemp. Chem. Ind.*（张彦君，蔡莲婷，丁玫，邵波，杨载松. 当代化工），**2010**，39(1)：93-97.
[54] Zhang X M. *Guangdong Chem. Ind.*（张雪梅. 广东化工），**2012**，39(6)：207-208.
[55] Qin Q W. *Chem. Res. Appl.*（秦庆伟. 化学研究与应用），**2012**，24(6)：1005-1008.
[56] Yuan W. *Int. Aid.*（袁维. 国际援助），**2021**，(32)：214-216.
[57] Li S J，Zhou Q，Zhang L L，Liu H R，Yu J M. *Polyureth. Ind.*（李淑杰，周青，张丽丽，刘海蓉，喻建明. 聚氨酯工业），**2016**，31(2)：42-46.
[58] Xie S H. *Tianjin Chem. Ind.*（谢士华. 天津化工），**2020**，34(4)：22-24.
[59] Luo X H，Yuan H F，Chu X L，Lu W Z，Hua W，Zheng G J. *Proceedings of the First National Near Infrared Spectroscopy Academic Conference*(骆献辉，袁洪福，褚小立，陆婉珍，华炜，郑国军. 全国第一届近红外光谱学术会议论文集），**2006**：612-619.
[60] Duan Q B，Sun Y F. *Chem. Ind. Eng. Prog.*（段青兵，孙岩峰. 化工进展），**2005**，24(5)：556-557.
[61] Wu Q. *Construction of Intelligent Refinery-From Digitalization to Smartization*. Beijing：China Petrochemical Press(吴青. 智能化炼厂建设—从数字化迈向智慧化. 北京：中国石化出版社），**2018**：15-20.
[62] Douglas C W. 2003 NPRA Annual Meeting，San Antonio，**2003**：1-21.
[63] Guo R S. *Guangzhou Chem. Ind.*（郭瑞生. 广州化工），**2022**，50(15)：141-146.
[64] Yang J C，Wang Z L. *Autom. Petrochem. Ind.*（杨金城，王振雷. 石油化工自动化），**2014**，5(4)：1-9.
[65] Xie Y Y，Fei Y R，Xie L L. *Pet. Refiner Eng.*（谢勇勇，费彦仁，谢六磊. 炼油技术与工程），**2021**，51(10)：59-64.
[66] Xu Y P，Liu T B，Wang S，Zhang R，Liu Y L，Lin K，Zhao Y W，Chu X L. *Pet. Process. Petrochem.*（许育鹏，刘天波，王硕，张蕊，刘玉亮，林坤，赵衍伟，褚小立. 石油炼制与化工），**2022**，53(10)：93-99.

（责任编辑：丁　岩）