

粮油加工过程品质控制的近红外智能检测装备现状与趋势

徐 斌¹, 高天慧¹, 王宏平², 林 颖¹, 程 力³, 陈中伟¹

¹ 江苏大学食品与生物工程学院 江苏镇江 212013

² 中储粮镇江粮油有限公司 江苏镇江 212006

³ 江南大学食品学院 食品科学与资源挖掘全国重点实验室 江苏无锡 214122)

摘要 粮油加工作为食品工业的核心领域,其智能化转型亟需高效、精准的品质检测技术支持。可见/近红外光谱技术凭借快速、无损、多指标同步检测的优势,已成为粮油加工过程品质监控的核心手段。本文系统梳理近红外光谱检测技术原理、智能装备研发及光谱数据处理方法的创新进展,即:硬件层面,便携式与在线监测装备突破小型化与抗干扰技术瓶颈,实现从实验室到工业场景的跨越;算法层面,光谱预处理、变量筛选与智能建模技术的融合,显著提升了检测精度与鲁棒性;应用层面,该技术已渗透至谷物加工链水分调控、油脂精炼氧化监测等关键环节,推动质控模式向数据驱动转型。然而,模型泛化能力不足、复杂工况适应性弱及标准化体系缺失仍是当前主要的技术瓶颈。未来需通过深度迁移学习、多源信息融合与边缘计算等技术优化“算法-设备-标准”协同创新体系,以实现粮油加工全链条实时质量调控与智能化升级。

关键词 近红外光谱; 粮油加工; 智能检测装备; 数据处理; 品质监控; 智能化转型

文章编号 1009-7848(2025)02-0015-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2025.02.002

食品制造业作为国民经济的支柱产业,在保障民生和促进经济发展中发挥着关键作用^[1]。虽然食品产业规模持续扩大,但是传统高耗能、低效的粗放加工模式仍制约着行业的转型升级,其中品质监控技术滞后问题尤为突出。当前智能传感与大数据等技术的突破,正加速推动食品工业向智能化方向转型。在此过程中,无损检测技术凭借快速响应、低成本运营和易在线集成的优势,成为突破行业瓶颈的核心创新引擎。该技术凭借绿色、高效的优点,为食品质量管控提供了强有力的科技支撑,驱动食品产业向信息化、智能化方向纵深发展。大宗粮油加工作为食品工业的重要组成领域,正面临产业数字化与智能化转型的迫切需求。可见/近红外光谱检测技术作为典型代表,融合了光学、化学、计算机科学和信息科学等多学科技术,凭借其高效性、便捷性、准确性以及快速、无损的检测特性,实现对粮油产品中脂肪、蛋白质、淀粉、水分等核心品质指标的精准检测。值得关注的是,

该技术的应用领域已从实验室检测阶段跨越至加工过程现场实时监测,并衍生出适配不同场景的智能化装备与系统。本文聚焦我国大宗粮油加工过程品质的光谱快检技术及智能装备的现状,系统梳理可见/近红外光谱领域的技术创新、装备研发、数据处理与建模方法革新等关键进展,深入分析该技术在粮油加工中的实际应用案例与发展趋势,旨在为推进大宗粮油加工过程品质监测技术及装备的智能化转型提供理论依据与实践参考。

1 粮油加工智能化检测技术需求分析

1.1 粮油产业规模与结构演变

我国作为全球粮油生产与消费大国,拥有夯实的粮油产业基础。国家统计局数据表明,2024年全国粮食总产量达7 065亿kg^[2],实现连续9年稳定在6 500亿kg以上产能规模;2023—2024年度食用植物油消费量约3760万t^[3]。在粮油产品体系构建中,多元化发展特征显著:粮食作物方面,稻谷、小麦、大豆、玉米等主粮除保障基础膳食供给外,其深加工制品(谷物粉、玉米粉、小麦粉等)既作为面制品的核心原料,又作为功能性食品添加剂来提升产品品质;食用油产业方面,传统品类(大豆油、菜籽油、玉米油、葵花籽油)通过纯化工工艺升级,在提高营养保留率的同时强化健康功能

收稿日期: 2025-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(32472429);自治区区域协同创新专项(科技援疆计划)(2022E02094)

第一作者: 徐斌,男,博士,教授

E-mail: food_oil@126.com

属性,如稻米油(米糠油)等特种油脂加速向消费端渗透,有效拓展了膳食选择空间。值得注意的是,当前粮油精深加工正向生物活性成分开发延伸。对这些成分作为保健品功效成分以及生物基材料的应用研究,正推动行业从基础农产品加工向高附加值领域跨越式发展,凸显粮油产业在民生保障与科技创新中的双重战略价值。

1.2 检测技术迭代需求分析

在消费者对粮油质量安全诉求持续升级的背景下,快速检测技术正成为保障加工品质的核心支撑。市场对高端快检装备的需求呈现显著增长态势,其高效精准的检测能力与时效性优势,正重塑粮油加工业的质量控制范式。在政策层面,国家粮食和物资储备局相继出台《粮食工程“六大提升行动”方案》(2021年)与《“十四五”粮食和物资储备科技和人才发展规划》(2022年),明确要求推动智能检测装备研发,重点突破近红外快速组网定标、现场定等定级检测等关键技术。行业实践层面,通过集成光谱检测、智能传感与大数据分析技术,我国正加速构建“藏粮于技”的智能化加工体系,实现从传统经验判断向数据驱动的精准质控模式转型,为粮食装备制造业的竞争力提升注入创新动能。

1.3 光谱快检技术原理突破

近红外光谱(NIR, 780~2 526 nm)作为电磁波谱中特定波段,其光谱特征源于物质分子振动态跃迁引发的含氢基团(X-H)倍频与合频吸收效应。具体到粮油检测领域,水分、蛋白质、淀粉等品质关键组分中的C-H、O-H、N-H等化学键在近红外区形成特征吸收峰,通过解析这些分子振动模式的光谱响应,可实现多指标同步无损检测^[4-7]。特别值得关注的是,可见光(380~780 nm)与近红外的协同检测体系已突破单一光谱局限,其中可见光谱精准捕捉油脂色泽等表观特征,近红外则深度解析分子结构信息,二者融合形成多维品质评价模型^[8],该技术组合现已成为粮油加工过程监控的创新范式。在当前粮油产业升级背景下,近红外光谱凭借其实时在线、零试剂消耗的技术优势,正从实验室辅助工具转型为智能化加工系统的核心感知单元,推动粮油品质控制从经验判断向数据驱动模式演进。

2 近红外光谱检测技术与智能装备

2.1 关键品质参数光谱特征解析

粮油产品种类丰富,其品质特征可通过多维度指标进行表征。在关键共性指标检测方面,粮油制品的色泽、水分、脂肪、碳水化合物及蛋白质含量等重要参数,在可见/近红外光谱区域均存在显著特征吸收。值得注意的是,该技术还可拓展应用于直链淀粉检测及黄曲霉毒素污染筛查。表1系统整理了近年来的相关研究案例,明确标注了各检测指标对应的特征波长区间。需特别说明的是,特征波长的确定高度依赖于变量筛选算法(如SPA、CARS等),因研究者采用的方法论差异,故导致文献报道的特征波长区间存在显著离散性。然而,现有研究已形成部分共识:1 450 nm与1 950 nm附近的特征峰在粮油品质检测中表现出较高灵敏度,这可能与C-H、O-H等化学键的倍频吸收特性密切相关。

2.2 便携智能检测装备

在数字化技术深度赋能的背景下,便携式近红外光谱仪于粮油加工检测领域实现突破性发展,其检测精度显著提升并形成独特应用优势。相较于传统实验室的光谱仪,该设备通过光栅模式(图1a)实现小型化设计,兼具高性价比与可定制化特性,其灵活适配性尤其满足粮油加工过程对快速品质监测的迫切需求。国际技术路线呈现差异化发展,如:美国近红外厂商基于数字光处理(DLP)技术(图1b)开发的微型设备(900~1 700 nm),通过集成BLE模块实现移动端无线操控与数据传输。欧美企业推出的轻量化便携式装备(图1c)则突破实验室与工业场景的物理边界。国内科研团队则聚焦技术纵深突破,国产设备(图1d)已实现多指标快速无损检测,如江苏大学(图1e)、中国农业大学等高校研制手持式设备,将检测维度延伸至脂肪酸值等深层参数,标志着本土技术正向精密检测领域纵深推进。

值得关注的是,随着智能手机生态的蓬勃发展,便携式近红外光谱仪与移动终端的深度融合,正推动粮油品质检测向现场化、即时化方向加速演进。国内产学研机构已成功研发多款适配该场景的微型化设备,逐步构建起覆盖粮油全产业链的快速检测技术体系。

表 1 粮油作物主要加工品质指标光谱特征区间

Table 1 Spectral characteristic range of main processing quality indexes of grain and oil crops

作物种类	品质指标	主要特征波长区间/nm	参考文献
稻谷	水分	1 950~1 980	黄蕾等 ^[9]
		1 940	路辉等 ^[10]
		1 665	刘文丽等 ^[11]
	蛋白质、水分	1 960, 2 325	王慧心等 ^[12]
		直链淀粉	932~1 455
玉米	黄曲霉素	1 000~2 499	李树朋等 ^[14]
		1 215~1 460	张瀚文等 ^[15]
	水分	1 410	Zheng 等 ^[16]
		蛋白质	2 100
	脂质	1 938~2 058	Chen 等 ^[18]
小麦	水分	1 170~1 735	沈广辉等 ^[19]
		1 450, 1 940	李莉楠 ^[20]
	蛋白质	700~1 000	毛立宇等 ^[21]
		2 148~2 200	Shi 等 ^[22]
	淀粉	1 470~1 860	Zhang 等 ^[23]
不完善粒	1 221~1 460, 1 701~1 940	马洪娟等 ^[24]	
大豆	水分	980~1 001, 1 450	Shi 等 ^[25]
		1 450, 1 490	金诚谦等 ^[26]
		2 000~2 222	余新金等 ^[27]
	蛋白质、脂肪	1 500~1 700	王翠秀等 ^[28]
		脂肪酸	1 785~2 000

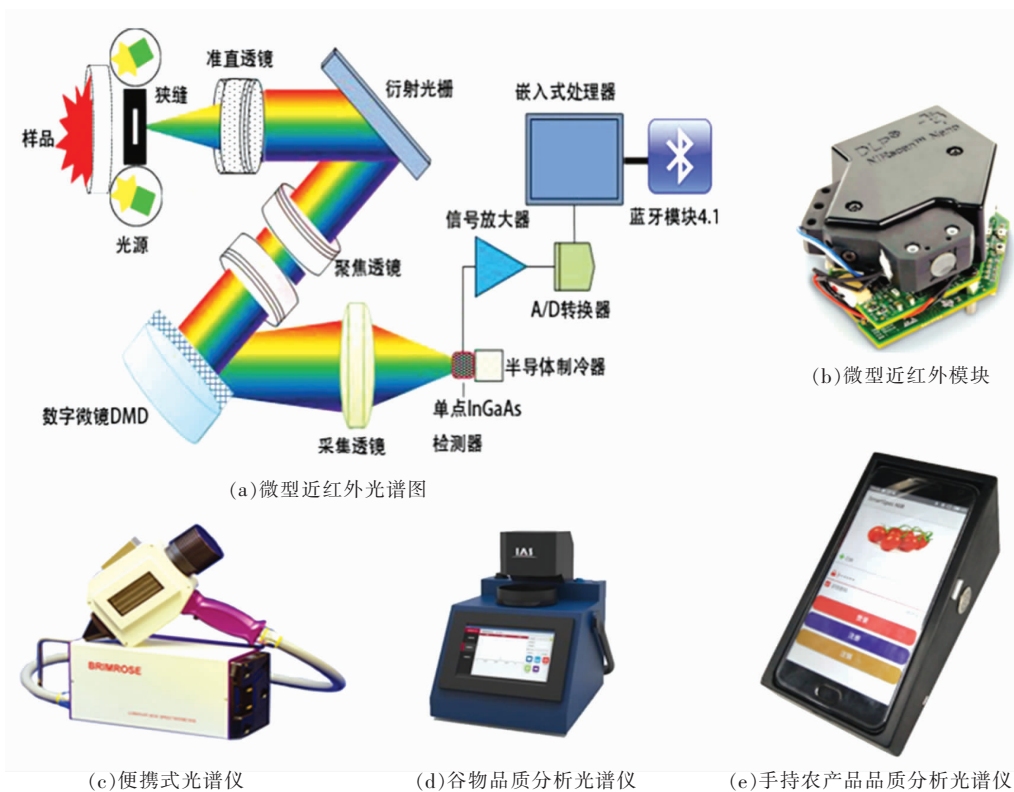


图 1 粮油加工过程中使用的便携式品质监控光谱仪^[30-31]

Fig.1 Portable quality monitoring spectrometer for grain and oil processing^[30-31]

2.3 在线智能监测系统

在粮油加工过程中,各工序关键物化指标(如水分、酸价、色泽等)的动态变化需持续监控,相关工艺参数需依据指标变化动态调整。然而,原料品

种差异、季节波动及环境变量等因素导致加工批次间存在显著差异性。为实现产品质量一致性控制,必须对核心品质参数实施实时监测。

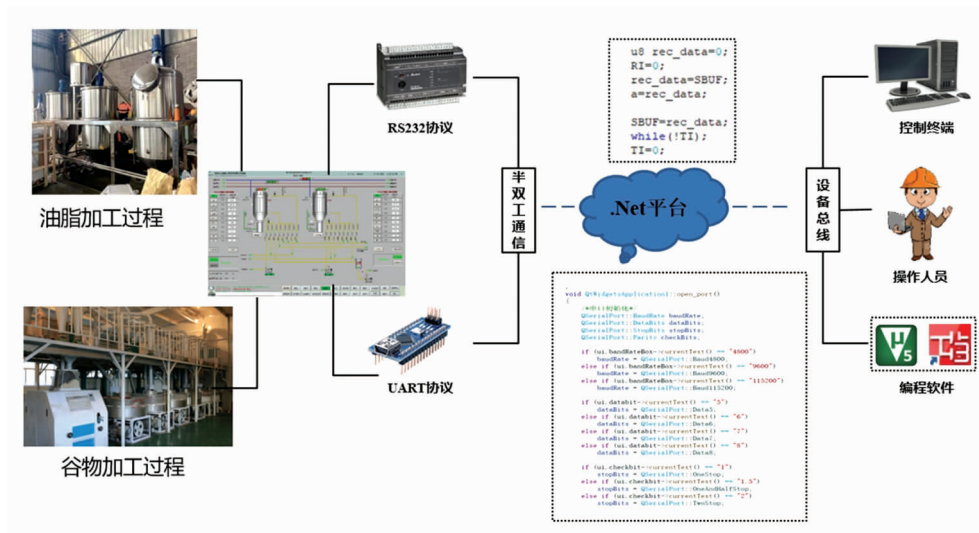


图 2 粮油加工可见/近红外光谱在线监控系统

Fig.2 Visible/Near-infrared spectroscopy online monitoring system for grain and oil processing

当前,近红外光谱技术已实现从实验室研发向工业化应用的跨越。国际应用层面,日本自 20 世纪 80 年代末率先开发非破坏式在线检测装置,可无损获取糖酸度等关键参数;德国、美国、瑞士等国开发的工业级近红外系统通过多检测点光纤阵列,已在饲料加工在线监测中形成成熟应用方案。国内技术进展方面,本土企业研发的近红外在线监测系统,通过集成 PLC 控制、通信协议及中控平台,构建了涵盖色泽、酸价、水分等指标的实时监控体系(图 2),该系统可同步获取油脂过氧化值、谷物面筋含量等多元参数,有效支撑加工过程精准调控。

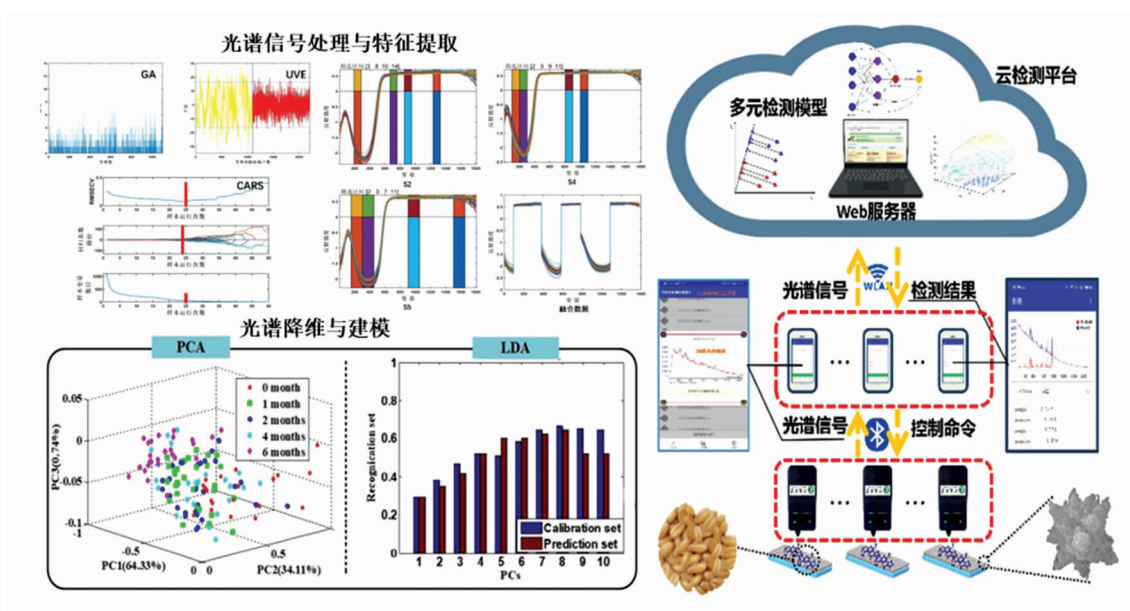
3 光谱大数据处理与智能分析平台

随着近红外光谱检测精度的持续提升,数据采集维度与规模的指数级增长对信息处理能力提出更高要求。当前研究焦点集中于构建高效数据处理范式,即:通过优化光谱预处理(降噪、基线校正)、特征波长优选(遗传算法、连续投影法)、模式识别(PLS、SVM)及定量建模(深度神经网络)等关键环节,实现海量数据中目标特征的精准提取与

鲁棒模型构建。与此同时,随着当代互联网与云计算技术的深度融合,云平台系统设计正经历革命性变革,基于 OPC-UA、MQTT 等工业协议的粮油光谱数据流架构(图 3)已实现云-边-端协同,推动检测系统向智能化、分布式方向演进。

3.1 光谱信号处理技术演进

3.1.1 光谱信号预处理 在实际近红外光谱数据采集,受高频随机噪声、基线漂移及光散射等干扰因素影响,原始光谱信噪比的降低会直接影响建模结果的准确性与稳健性。因此,在建立定量分析模型前,必须对原始光谱进行预处理优化^[33]。当前主流预处理方法可分为 4 类: 散射校正(SNV、MSC)、平滑降噪(SG 多项式)、导数变换(一阶/二阶导数)及基线校准。其中,标准正态变量变换(SNV)通过单条光谱的标准化处理,可有效消除固体颗粒尺寸、表面散射及光程差异带来的干扰,特别适用于粉末或颗粒状样本的光谱校正;多元散射校正(MSC)则基于参考光谱集进行整体校正,更适用于液态或均质样本。SG 平滑算法通过多项式拟合有效抑制光谱曲线的锯齿状波动,而导数处理通过数学微分运算不仅能消除基线平移

图3 粮油光谱数据处理与大数据平台^[32]Fig.3 Grain and oil spectral data processing and big data platform^[32]

(一阶导数)和旋转(二阶导数),还可增强光谱特征峰分辨能力。研究表明,合理选择预处理方法可显著提升模型性能。陈素彬^[34]在构建玉米粗蛋白含量模型时,采用MSC+SNV联合预处理使模型决定系数 R^2 提升至0.94以上,训练集与测试集的均方根误差(RMSE)稳定在0.12,相对分析误差(RPD)突破4.0阈值。杨学文^[35]针对南方稻谷蛋白质检测,通过一阶导数(5点平滑)结合偏最小二乘回归(PLSR)构建的预测模型,其交叉验证 R^2 达0.9132, RMSECV为0.3054,验证了预处理策略对复杂样本的适用性。

3.1.2 光谱变量筛选 在可见/近红外光谱检测粮油加工品质过程中,采集的海量光谱数据中不同变量对样品品质信息的贡献度存在显著差异:部分变量携带丰富特征信息,而另一些呈现弱相关性甚至冗余性。若直接采用全谱数据建模,则导致模型复杂度高,计算负荷大且鲁棒性降低。研究表明,通过变量筛选技术优选特征波长,可有效剔除噪声干扰并简化模型结构,从而构建预测性能优异且稳健的校正模型。

区间划分策略通过将光谱变量划分为若干区间并建立局部偏最小二乘模型(i-PLS),为波长优选提供了新范式。基于此衍生的联合区间法(Si-PLS)及前/后向区间法(Fi-PLS、Bi-PLS)凭借其高

效的特征波长区间提取能力,在光谱分析领域获得广泛应用。在此基础上,学者们持续拓展方法体系。有研究者将等距组合偏最小二乘法(EC-PLS)与波长逐步淘汰法(WSP-PLS)相结合,通过大范围初筛与精细剔除的双阶段策略优化稻谷品种检测模型^[36]。近年来,自适应加权采样(CARS)、蚁群优化(ACO)、无信息变量消除(UVE)等智能算法相继应用于粮油光谱分析,显著提升了波长筛选效率。值得关注的是,将区间划分法与随机搜索策略相结合,可突破传统算法的局部最优限制,实现更高效的全局特征波长寻优。随着计算方法的持续迭代,新型光谱数据处理算法不断推动粮油品质检测技术的精密化发展。

3.2 智能分析模型构建

3.2.1 定性判别模型 粮油品质定性判别(模式识别)是一种通过分析加工原料或阶段产品的特征参数实现分类、分级与合格判定的技术手段。其方法体系按分类函数特性可分为线性与非线性2类:线性判别以欧氏距离、马氏距离、费歇尔投影及K最近邻法为代表,非线性判别则涵盖人工神经网络(ANN)、支持向量机(SVM)及支持向量数据描述(SVDD)等算法。值得注意的是,机器学习与深度学习技术的融入显著提升了检测效能——SVM凭借优异的分类回归能力在食品掺伪检测

中表现突出;ANN通过非线性映射优势可处理复杂品质预测任务;而卷积神经网络(CNN)在背景干扰下的成分解析方面展现独特价值。研究案例显示,PLS-DA与SVM混合模型对鞣鞣荞麦5%~20%掺伪梯度实现92.5%分类准确率^[37];Shi等^[38]采用PLS-DA-SVM组合模型精准识别脂肪酸值>28 mg KOH/100 g的劣变稻米(准确率100%);宋嘉慧^[39]基于近红外光谱-BPNN模型同步检测稻谷霉变度[霉菌总数>3.5 lg(CFU/g)]与陈米掺伪量(掺伪率>8%),模型预测精度达 $R^2>0.99$ 。

3.2.2 定量分析模型 定量分析模型是通过建立近红外光谱与粮油品质指标间的数学关系实现精准预测的核心方法,其在粮油检测中的应用广度显著超越定性判别。该模型基于统计学原理构建数学函数,通过光谱特征解析反演目标成分的量化数值。传统方法中,线性回归(含一元/多元)作为基础算法率先被应用,而随着无损检测数据规模的指数级增长,主成分回归(PCR)及其衍生算法偏最小二乘回归(PLSR)凭借降维优势成为主流选择。吕都等^[40]采用PLSR构建的稻谷水分预测模型决定系数(R^2)均高于0.98,相对分析误差(RPD)达7.14;Zheng等^[41]通过梯度提升机(GBM)优化特征筛选后建立的玉米水分PLSR模型,其 $R^2\geq 0.96$ 、交叉验证均方根误差(RMSEV) ≤ 0.53 且 $RPD\geq 5.33$;苏鹏飞等^[42]开发的大麦与小麦水分检测模型 R^2 分别达0.99和0.9942,模型误差均控制在2%内。值得关注的是,人工神经网络回归、支持向量回归等原属定性领域的方法,经算法改良后已成功拓展至定量分析范畴,标志着非线性建模技术的突破性进展。

3.3 工业物联网系统集成

随着人工智能与物联网技术的快速发展,粮食产业智能化转型已成为全球行业升级的重要方向。美国爱荷华州立大学通过集成传感器网络、标识溯源与无线通信技术,构建了仓储供应链动态监测系统,显著提升了粮情信息共享与协同管控能力。欧盟食品安全局联合国际科研团队,基于物联网架构开发了覆盖原料溯源、加工过程监测及风险评估的多层级食品质量保障体系。加拿大则通过制定散粮收储运全链条标准化协议,建立了机械化作业与智能决策协同的仓储管理模式,有

效优化了散粮流通效率与过程可控性。近年来,我国学者在粮食光谱数据监测领域积极探索与大数据平台的深度融合,致力于推进光谱信息采集、云端存储与智能解析技术的协同创新。刘一鸣^[43]研发了便携式近红外谷物品质检测设备,其硬件部分以Arduino Nano作为控制板,设计光源驱动电路、光谱采集电路及辅助电路,并采用Arduino IDE作为控制系统开发环境,实现数据智能传输。邵小康等^[32]通过整合设计手持式检测设备并开发主要具有采集数据上传和获取反馈结果功能的操作APP,将此移动端系统作为中间媒介接入由Vue + Element UI + SpringBoot所构建的前、后端分离的Web形式光谱云端协同平台,实现不同新鲜度大米所对应的多类型数据(样本光谱、检测模型、检测结果)的云端海量存储和平台规范管理。

4 粮油工业化应用场景与技术验证

近红外光谱技术作为过程分析技术体系的核心组成,通过捕获C-H、O-H、N-H等特征基团的分子振动特征,耦合化学计量学算法构建多尺度检测模型,已在谷物加工过程监控中实现技术突破。该技术可同步解析原料形态学参数(水分、色泽)、功能组分(蛋白质、淀粉)及加工特性指标(酸价、面筋指数),形成覆盖原料筛选至成品质控的全流程无损监测方案。

4.1 谷物加工链质量监控体系

近红外光谱技术(NIRS)通过特征分子振动信息捕获能力,在谷物加工过程监控中展现出显著技术优势,其单次检测秒级响应的特性,支撑了从原料筛选到成品检验的全链条在线监测体系构建。自1970年以来,国际学界已建立以漫反射/透射光谱为核心的快速定量分析方法,重点针对稻谷等主粮的脂肪、蛋白质等关键组分开展检测研究。典型技术应用包括:1)基于980 nm/1 450 nm特征峰的水分动态监测,实现干燥工艺参数自适应调控^[44];2)面粉加工多指标同步检测,如闫李慧^[45]通过化学计量学融合策略实现了水分、灰分等5项品质参数的高精度解析;3)稻谷加工链直链淀粉控制,如李树朋等^[44]在1 000~2 499 nm光谱区建立的检测模型将误差控制在 $\pm 1\%$,有效评价大米质构;4)挂面水分在线监测,如何锦漪等^[46]

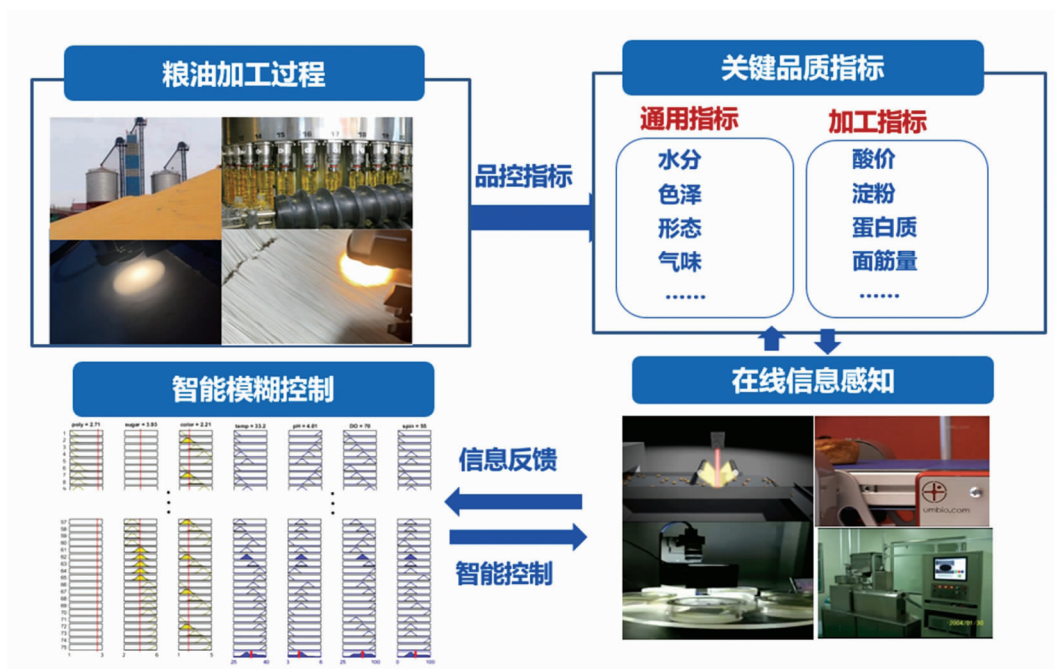


图 4 粮油加工过程品质监控示意图

Fig.4 Schematic diagram of quality control in grain and oil processing process

开发的温度补偿模型在复杂工况下实现 0.23% 检测精度,显著提升产品稳定性与经济效益;5)大豆功能组分分析,如 Amanah 等^[47]基于 FT-NIR 构建的异黄酮-寡糖预测模型,为饲料蛋白原料质量控制提供新方法。

4.2 油脂精炼过程质控系统

可见/近红外光谱技术在食用油脂加工多参数同步监测中形成系统化应用框架,其通过融合光谱特征与化学计量学算法,构建了涵盖氧化稳定性评估、精炼工艺优化及热加工安全判定的全流程质控体系。典型技术路径包括:1)氧化动力学监测,如 Wójcicki 等^[48]基于 MCR-ALS 算法解析 NIR 光谱特征,实现橄榄油等油脂氧化稳定性的无损评价,验证光谱法对传统化学方法的替代可行性;2)磷脂脱除工艺监控,如 Tonolini 等^[49]通过 NIR 定量二甘油酯(RMSE=0.06%)精准评估脱胶效率,在线监测误差控制在 0.07%;3)热加工安全阈值判定,如 Zhao 等^[50]采用 HCA-PCA-NIR 联用策略对 105 组废煎炸油进行分级,模型判别准确率达 96.3%;4)精炼过程动态调控,如王冬等^[51]开发在线 Vis-NIRS 系统,通过 AV、POV 及罗维朋色度多指标联测,结合现场环境校正模型实现脱

色油等工艺节点参数优化。

4.3 智能装备的产业化实践

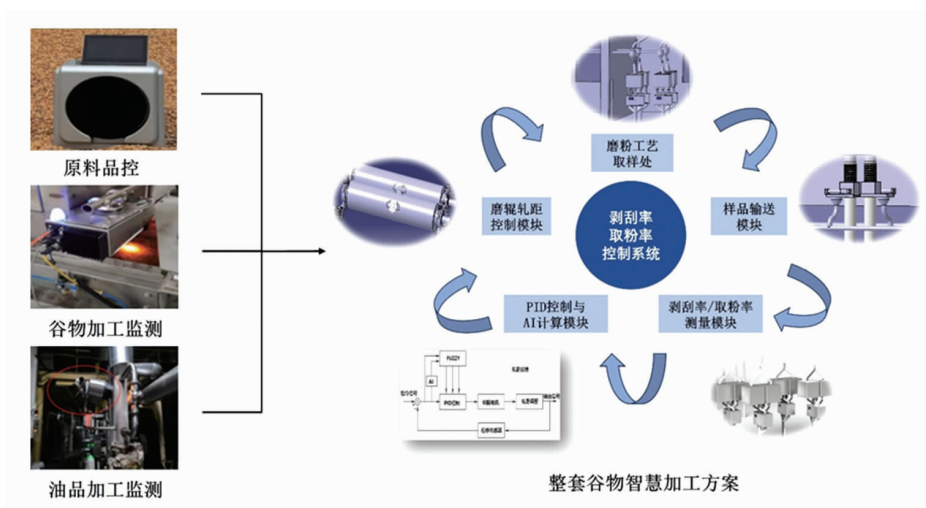
粮油食品工业品控标准的升级与近红外光谱技术性能的持续优化,共同驱动该技术向原料筛选、加工过程监控等核心环节深度渗透,逐步形成覆盖全流程的智能化解决方案集群,从而推动粮油加工行业向数字孪生模式转型。图 5 系统呈现的可见/近红外光谱技术工程化应用场景图谱表明,该技术体系已确立其在现代粮油智能制造中的核心技术支撑地位。

国际近红外光谱监测装备领域已形成梯度化发展格局。高精度多通道在线系统在粮油加工在线监测领域具有技术引领地位,然而受限于硬件成本过高;中型装备制造通过优化检测性能与设备成本的平衡性,成功实现工业化规模应用。瑞士一家企业开发的 400~1 700 nm 宽谱检测系统,凭借对液态介质的独特适应性,在油脂品质监测领域展现出显著优势。相较而言,美国一些厂商的微型设备虽具备便携特性,但抗环境干扰能力薄弱,使其应用范围仍局限于离线检测场景。

我国近红外光谱装备研发虽起步较晚,但已实现关键技术突破与产业化跨越式发展。通过构

建覆盖水分、粗脂肪及面筋指数等关键参数的多维度数据库,成功开发出适配粮食、油脂加工的在线监测系统,其创新性地集成温、湿度智能补偿算法与多光谱融合技术,在智慧制粉工厂中原粮-净麦-面粉全链条水分动态监测环节以及智能配粉、

配麦系统取得突破。此外,我国企业研发的便携/在线双模设备通过强化抗干扰模型优化,显著提升了复杂工况下的检测稳定性,标志着国产装备已实现从实验室研发向工业化场景应用的关键跨越。



注:引自相关企业宣传册。

图5 粮油加工过程产业化应用场景和智慧加工方案

Fig.5 Industrial application scenarios and overall intelligent processing solutions for grain and oil processing processes

5 技术瓶颈与未来发展路径

在粮油加工过程品质检测中,近红外光谱技术展现出显著应用优势:其单次检测耗时仅需数秒,无需使用化学试剂的特性契合绿色生产理念。多维度品质指标(脂肪、蛋白质、水分等)同时检测大幅降低了综合检测成本,这些技术特征使其在现代粮油工业化体系中具有不可替代性。值得关注的是,该技术已完成从实验室研究到工业化应用的跨越式发展,当前在原料品质筛查、加工参数动态优化、成品质量闭环控制等关键环节形成规模化应用场景。然而,技术发展仍面临三重核心挑战:一是模型泛化能力不足,不同粮油品种、加工工艺及原料产区差异导致模型需重复构建,跨场景迁移中的光谱特征漂移问题尚未有效解决;二是工业环境适应性较弱,高温、高湿及机械振动等复杂工况易引起光谱信号失真,现有抗干扰算法与硬件防护体系仍需完善;三是标准化体系缺失,检测流程规范、数据接口协议及质量评价标准尚未统一,制约技术推广效率。

面向未来技术演进,构建“算法-设备-标准”

三位一体的创新体系成为突破方向。算法层面需融合深度迁移学习与自适应建模技术,结合机器视觉、电子鼻等多源信息融合策略提升系统鲁棒性。硬件开发应聚焦微型光谱仪与智能温控模块的集成创新,推动设备向便携化、低成本化升级。标准建设方面亟待建立覆盖光谱采集、模型构建、结果验证的全流程标准体系。值得期待的是,随着边缘计算与数字孪生技术的深度介入,近红外光谱将实现从离线检测向加工过程实时质量调控的范式转变,为构建粮油加工智能化生态系统提供关键技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 陈全胜, 林颖, 赵杰文. 食品质量安全快速无损检测技术及装备[M]. 北京: 科学出版社, 2023: 1-18. CHEN Q S, LIN H, ZHAO J W. Rapid non-destructive testing technology and equipment for food quality and safety[M]. Beijing: Science Press, 2023: 1-18.

- [2] 佚名. 全国粮食产量迈上新台阶[N]. 中国信息报, 2024-12-16(2).
Anon. The country's grain output has reached a new level[N]. China Information News, 2024-12-16(2).
- [3] 丁艳明. 近10年我国食用植物油消费特点及价格走势分析[J]. 粮食问题研究, 2024(6): 4-6.
DING Y M. Analysis of the consumption characteristics and price trend of edible vegetable oil in China in the past 10 years[J]. Grain Issues Research, 2024(6): 4-6.
- [4] 冯放. 现代近红外光谱分析技术及其应用[J]. 生命科学仪器, 2007, 5(10): 9-13.
FENG F. Modern near-infrared spectroscopy analysis techniques and their applications[J]. Life Science Instruments, 2007, 5(10): 9-13.
- [5] 高荣强, 范世福. 现代近红外光谱分析技术的原理及应用[J]. 分析仪器, 2002(3): 9-12.
GAO R Q, FAN S F. Principles and applications of modern near infrared spectroscopic techniques [J]. Analytical Instrumentation, 2002(3): 9-12.
- [6] COZZOLINO D. The ability of near infrared (NIR) spectroscopy to predict functional properties in foods: Challenges and opportunities [J]. Molecules, 2021, 26(22): 6981.
- [7] NIMBKAR S, AUDDY M, MANOJ I, et al. Novel techniques for quality evaluation of fish: A review [J]. Food Reviews International, 2023, 39(1): 639-662.
- [8] LIN X, SUN D W. Recent developments in vibrational spectroscopic techniques for tea quality and safety analyses[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 104: 163-76.
- [9] 黄蕾, 韦紫玉. 基于近红外光谱分析技术的大米水分含量快速检测研究 [J]. 农产品加工, 2022(13): 70-73.
HUANG L, WEI Z Y. Rapid detection of rice water content based on near infrared spectrometry[J]. Farm Products Processing, 2022(13): 70-73.
- [10] 路辉, 彭彬倩, 冯晓宇, 等. 大米直链淀粉、蛋白质、脂肪、水分含量的近红外光谱检测模型优化[J]. 中国稻米, 2020, 26(6): 55-59, 63.
LU H, PENG B Q, FENG X Y, et al. Model optimization for determination of amylose, protein, fat and moisture content in rice by near-infrared spectroscopy[J]. China Rice, 2020, 26(6): 55-59, 63.
- [11] 刘文丽, 严虞虞, 吴东慧, 等. 近红外光谱技术无损检测大米中蛋白质[J]. 食品工业, 2019, 40(1): 205-209.
LIU W L, YAN Y Y, WU D H, et al. Rapid and nondestructive detection of protein in rice by near infrared spectroscopy[J]. The Food Industry, 2019, 40(1): 205-209.
- [12] 王慧心, 王瑞荃, 李佳慧, 等. 基于近红外光谱技术的大米品质分析与鉴别 [J]. 山东化工, 2022, 51(10): 120-122.
WANG H X, WANG R Q, LI J H, et al. Analysis and identification of rice quality based on near infrared spectroscopy[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(10): 120-122.
- [13] BAGCHI T B, SHARMA S, CHATTOPADHYAY K. Development of NIRS models to predict protein and amylose content of brown rice and proximate compositions of rice bran[J]. Food Chemistry, 2016, 191: 21-27.
- [14] 李树朋, 王佳雅, 王丽. 基于近红外光谱技术的直链淀粉含量定标模型的构建与应用[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(12): 139-143.
LI S P, WANG J Y, WANG L. Construction and application of amylose content calibration model based on nearinfrared spectroscopy [J]. Cereals & Oils, 2023, 36(12): 139-143.
- [15] 张瀚文, 李野, 江晟, 等. 近红外高光谱大米典型特征提取分类识别 [J]. 吉林大学学报(理学版), 2022, 60(3): 655-663.
ZHANG H W, LI Y, JIANG S, et al. Typical feature extraction, classification and recognition of near infrared hyperspectral rice[J]. Journal of Jilin University(Science Edition), 2022, 60(3): 655-663.
- [16] ZHENG R, JIA Y, ULLAGADDI C, et al. Optimizing feature selection with gradient boosting machines in PLS regression for predicting moisture and protein in multi-country corn kernels via NIR spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2024, 456: 140062.
- [17] LIANG J, WANG B, XU X X, et al. Integrating portable NIR spectrometry with deep learning for accurate estimation of crude protein in corn feed[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2024, 314: 124203.
- [18] CHEN H Z, SONG Q Q, TANG G Q, et al. An optimization strategy for waveband selection in FT-NIR quantitative analysis of corn protein[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 60(3): 595-601.

- [19] 沈广辉, 刘贤, 张月敬, 等. 基于在线近红外光谱快速检测玉米籽粒主要品质参数的研究 [J]. 中国畜牧杂志, 2017, 53(1): 105-109.
SHEN G H, LIU X, ZHANG Y J, et al. Research on rapid detection of main quality parameters of corn kernels based on online near-infrared spectroscopy [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2017, 53(1): 105-109.
- [20] 李莉楠. 基于近红外光谱技术快速无损检测小麦粉品质研究[J]. 粮油与饲料科技, 2024(6): 202-204.
LI L N. Research on rapid nondestructive detection of wheat flour quality based on near-infrared spectroscopy[J]. Grain, Oil and Feed Technology, 2024(6): 202-204.
- [21] 毛立宇, 宾斌, 张洪明, 等. 基于近红外光谱的小麦成分检测仪[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(10): 2768-2777.
MAO L Y, BIN B, ZHANG H M, et al. Development of wheat component detector based on near infrared spectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(10): 2768-2777.
- [22] SHI H T, YU P Q. Comparison of grating-based near-infrared (NIR) and fourier transform mid-infrared (ATR-FT/MIR) spectroscopy based on spectral preprocessing and wavelength selection for the determination of crude protein and moisture content in wheat[J]. Food Control, 2017, 82: 57-65.
- [23] ZHANG J, GUO Z, REN Z S, et al. Rapid determination of protein, starch and moisture content in wheat flour by near-infrared hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 117: 105134.
- [24] 马洪娟, 冀定磊, 赵殿仁, 等. 基于NIRS的小麦不完善粒精确快速评定方法研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(12): 195-200.
MA H J, JI D L, ZHAO D R, et al. A rapid and accurate identification method for unsound wheat kernels based on near infrared spectroscopy[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(12): 195-200.
- [25] SHI D, HANG J, NEUFELD J, et al. Estimation of crude protein and amino acid contents in whole, ground and defatted ground soybeans by different types of near-infrared (NIR) reflectance spectroscopy[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 111: 104601.
- [26] 金诚谦, 郭榛, 张静, 等. 大豆水分含量的高光谱无损检测及可视化研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(10): 3052-3057.
JIN C Q, GUO Z, ZHANG J, et al. Non-destructive detection and visualization of soybean moisture content using hyperspectral technique[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(10): 3052-3057.
- [27] 余新金, 熊倩, 甘蓓, 等. 有机与非有机大豆的营养成分分析及近红外鉴别[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(7): 139-147.
YU X J, XIONG Q, GAN B, et al. Nutrients analysis and near infrared identification of organic and non-organic soybeans[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(7): 139-147.
- [28] 王翠秀, 曹见飞, 顾振飞, 等. 基于近红外光谱大豆蛋白质、脂肪快速无损检测模型的优化构建[J]. 大豆科学, 2019, 38(6): 968-976.
WANG C X, CAO J F, GU Z F, et al. Rapid nondestructive test of soybean protein and fat by near infrared spectroscopy combined with different model methods[J]. Soybean Science, 2019, 38(6): 968-976.
- [29] FERREIRA D, GALÃO O, PALLONE J, et al. Comparison and application of near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopy for determination of quality parameters in soybean samples [J]. Food Control, 2014, 35(1): 227-232.
- [30] 张彬. 基于光学传感器技术的红茶通氧发酵过程在线监测研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
ZHANG B. On line monitoring the aerobic fermentation process of black tea based on optical sensor technology[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [31] 程武. 樱桃番茄内部品质近红外光谱检测方法研究及便携式装置研发[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
CHENG W. Study on detection method and portable device for testing the internal quality of cherry tomato by near infrared spectroscopy[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [32] 邵小康, 林颢, 王卓, 等. 便捷式智能化大米新鲜度检测系统设计与应用 [J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 45-52, 104.
SHAO X K, LIN H, WANG Z, et al. Design and application of portable intelligent rice freshness detection system [J]. Food & Machinery, 2023, 39(11): 45-52, 104.
- [33] 余梅, 李尚科, 杨菲, 等. 基于近红外光谱技术与

- 优化光谱预处理的陈皮产地鉴别研究[J]. 分析测试学报, 2021, 40(1): 65-71.
- YU M, LI S K, YANG F, et al. Identification on different origins of *Citri reticulatae* Pericarpium using near infrared spectroscopy combined with optimized spectral pretreatments [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2021, 40(1): 65-71.
- [34] 陈素彬. 饲用玉米质量检测的近红外光谱法与经典方法比较[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2021(7): 114-118, 157.
- CHEN S B. Comparison of near infrared spectroscopy and classical methods for quality detection of forage maize[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2021(7): 114-118, 157.
- [35] 杨学文. 近红外光谱分析法快速测定稻谷常规化学指标[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(5): 65-69.
- YANG X W. Rapid determination of rice conventional chemical index by near infrared spectroscopy [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2016, 24(5): 65-69.
- [36] ZHANG J, LI M L, PAN T, et al. Purity analysis of multi-grain rice seeds with non-destructive visible and near-infrared spectroscopy [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 164: 104882.
- [37] YU Y, CHAI Y H, YAN Y J, et al. Near-infrared spectroscopy combined with support vector machine for the identification of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn) adulteration using wavelength selection algorithms[J]. Food Chemistry, 2024, 463(Pt 4): 141548.
- [38] SHI S, FENG J, YANG L, et al. Combination of NIR spectroscopy and algorithms for rapid differentiation between one-year and two-year stored rice[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2023, 291: 122343.
- [39] 宋嘉慧. 基于近红外光谱技术结合化学计量学的稻米品质检测研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.
- SONG J H. Near infrared spectroscopy combined with chemometrics for rice quality detection [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023.
- [40] 吕都, 周帅, 陈中爱, 等. 稻谷水分近红外光谱预测模型特征波长筛选[J]. 食品工业, 2022, 43(7): 320-324.
- LÜ D, ZHOU S, CHEN Z A, et al. Characteristic wavelength selection of near infrared spectral prediction model of rice moisture[J]. The Food Industry, 2022, 43(7): 320-324.
- [41] ZHENG R, JIA Y, ULLAGADDI C, et al. Optimizing feature selection with gradient boosting machines in PLS regression for predicting moisture and protein in multi-country corn kernels via NIR spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2024, 456: 140062.
- [42] 苏鹏飞, 张攀峰, 张武岗, 等. 大麦、小麦和豌豆水分近红外快速分析模型的建立[J]. 酿酒科技, 2021(3): 31-34.
- SU P F, ZHANG P F, ZHANG W G, et al. Establishment of NIRS rapid analysis models of water content in barley, wheat and peas[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2021(3): 31-34.
- [43] 刘一鸣. 便携式近红外谷物品质检测设备的设计与研制[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- LIU Y M. Design and development of portable near infrared cereal grain quality detect equipment [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
- [44] 周显青, 赵希雷, 张玉荣, 等. 谷物水分检测技术现状与展望[J]. 粮食加工, 2015, 40(4): 29-34.
- ZHOU X Q, ZHAO X L, ZHANG Y R, et al. Present situation and expectation on moisture inspection technique of cereal [J]. Grain Processing, 2015, 40(4): 29-34.
- [45] 闫李慧. 基于近红外光谱技术的面粉品质研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2012.
- YAN L H. The study of the flour quality based on near infrared spectroscopy technology[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2012.
- [46] 何锦漪, 林颖, 齐雅静, 等. 复杂环境下基于近红外光谱的挂面生产过程水分快速检测方法研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(9): 205-212.
- HE J Y, LIN H, QI Y J, et al. Research on rapid moisture detection method in noodle production process based on near infrared spectroscopy under complex environment[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(9): 205-212.
- [47] AMANAH Z H, JOSHI R, MASITHOH E R, et al. Nondestructive measurement of anthocyanin in intact soybean seed using fourier transform near-infrared (FT-NIR) and fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy[J]. Infrared Physics and Technology, 2020, 111: 103477.
- [48] WÓJCICKI K, KHMELINSKII I, SIKORSKI M, et al. Near and mid infrared spectroscopy and multi-

- variate data analysis in studies of oxidation of edible oils[J]. *Food Chemistry*, 2015, 187: 416–423.
- [49] TONOLINI M, WAWRZYNCZYK J, NIELSEN P M, et al. On-line monitoring of enzymatic degumming of soybean oil using near-infrared spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy*, 2023, 77(12): 1333–1343.
- [50] ZHAO L L, ZHANG M, WANG H X, et al. Monitoring of free fatty acid content in mixed frying oils by means of LF-NMR and NIR combined with BP-ANN[J]. *Food Control*, 2022, 133: 108599.
- [51] 王冬, 王宏平, 高天慧, 等. 基于可见/近红外光谱的大豆油精炼环节色泽与酸价的实时监测系统研发[J]. *中国粮油学报*, (2024-12-03)[2025-02-26]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=LY10VaQjltz4SR0NDe-VWvlf9vZc_FTgISElkdrodkbmt5WK1XbW-cK4mLYD1vXVod6c88oDouCxeTfY10h2RvhBay5i6Skr3lxcFMFlmAp1UEHVSd5tYQIM2FPhjsIx2_LG_dvtFB2Gt4jrDKoNAcht5bgATPIcuho3WVpxxag6TlAu_Zc9yvyMF6rlyhuW&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

Status and Trends of Near-infrared Intelligent Detection Equipment for Quality Control in Grain and Oil Processing

XU Bin¹, GAO Tianhui¹, WANG Hongping², LIN Hao¹, CHENG Li³, CHEN Zhongwei¹

¹*School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu*

²*China Grain Reserves Corporation Zhenjiang Grain and Oil Co., Ltd, Zhenjiang 212006, Jiangsu*

³*State Key Laboratory of Food Science and Resources, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu*

Abstract As a core sector of the food industry, grain and oil processing urgently requires efficient and precise quality detection technologies to drive its intelligent transformation. Visible/Near-infrared (Vis/NIR) spectroscopy, with its advantages of rapid, non-destructive, and multi-parameter synchronous detection, has emerged as a pivotal tool for quality monitoring in grain and oil processing. This paper systematically reviewed the latest advancements in NIR detection principles, intelligent equipment development, and spectral data processing methodologies. At the hardware level, breakthroughs in miniaturization and anti-interference technologies had enabled portable and online monitoring devices to transition from laboratory research to industrial applications. Algorithmically, the integration of spectral preprocessing, variable selection, and intelligent modeling had significantly enhanced detection accuracy and robustness. In practical applications, the technology had been deployed across critical stages such as moisture regulation in grain processing chains and oxidation monitoring during oil refining, driving a shift toward data-driven quality control. However, challenges persist, including limited model generalization, weak adaptability to complex industrial environments, and the absence of standardized systems. Future advancements demanded collaborative innovation in ‘algorithm-equipment-standard’ systems through deep transfer learning, multi-source information fusion, and edge computing technologies to achieve real-time quality regulation and intelligent upgrades across the entire grain and oil processing chain.

Keywords near-infrared spectroscopy; grain and oil processing; intelligent detection equipment; data processing; quality monitoring; intelligent transformation