

Research progress of spectral technology application in food testing

Fengfeng Zhao Qinghua Yao

Linyi Inspection and Testing Center, Linyi, Shandong, 276000, China

Abstract

As an innovative detection technology, spectroscopy has gained widespread application in food testing due to its advantages of high sensitivity, rapid analysis, non-destructive testing, and multi-parameter detection. To continuously enhance food testing capabilities and maximize the performance advantages of spectroscopy, this paper employs literature review methods to summarize the main types of spectroscopy technologies, outline their fundamental characteristics, draw on past successful experiences, adopt systematic thinking, innovate application strategies, refine implementation processes, and explore future development trends. The aim is to provide theoretical support for the promotion and application of spectroscopy in food testing, thereby advancing the standardization and perfection of food safety assurance systems.

Keywords

food testing; spectral technology; application path; research progress

食品检测中的光谱技术应用研究进展

赵峰峰 姚庆华

临沂市检验检测中心, 中国·山东 临沂 276000

摘要

光谱技术作为一种新型检测技术, 凭借高灵敏度、快速分析、无损检测及多参数检测等优势, 在食品检测领域得到了广泛应用。为持续提升食品检测能力, 发挥光谱技术的性能优势, 文章运用文献资料研究等方法, 总结光谱技术的主要类型, 概括技术的基本特点, 借鉴过往有益经验, 坚持系统性思维, 创新技术应用举措, 完善技术应用流程, 探索技术发展趋势, 旨在为光谱技术在食品检测中的推广与应用提供理论支撑, 推动食品安全保障体系的规范化与完备化。

关键词

食品检测; 光谱技术; 应用路径; 研究进展

1 引言

光谱技术作为成熟的工艺方案, 能够基于物质对不同波长光的吸收、发射或散射等特性, 准确检测分析食品成分、污染物、品质等关键指标^[1]。近些年来, 国内外学者围绕光谱技术在食品检测中的应用开展了大量研究, 在技术优化、应用场景拓展及与其他技术融合等方面取得了诸多成果。文章总结借鉴现有研究成果, 深入分析其在食品检测中的应用价值与应用路径, 并对未来发展趋势进行展望, 推动光谱技术在食品检测领域的持续发展。

2 光谱技术概述

2.1 光谱技术的主要类型

2.1.1 吸收光谱技术

吸收光谱技术以物质对特定波长光的选择性吸收为核

心原理, 凭借对有机化合物特征官能团的识别能力, 借助定量分析, 能够精准检测食品中的人工色素与防腐剂, 将检测误差控制在 3% 以内。在食品重金属元素检测环节, 将样品消解为原子蒸汽, 利用重金属原子对特征谱线的吸收特性, 实现对铅、汞、镉等元素的痕量检测, 检测限度可以达到 0.001mg/kg。

2.1.2 发射光谱技术

发射光谱技术基于物质受激发后释放特征光谱的特性, 通过电感耦合等离子体激发源, 同时检测食品中的钙、铁、锌等 20 余种微量元素, 检测效率较传统单元素检测技术提升 10 倍以上, 为食品营养成分的全面评估提供高效技术支撑。例如在蜂蜜检测中, 依托发射光谱技术能够准确识别蜂蜜是否添加荧光增白剂, 检测灵敏度可以达到纳克级别, 且无需复杂样品预处理, 检测耗时仅需要 5 分钟。

2.1.3 散射光谱技术

散射光谱技术借助检测分子振动散射光, 实现食品中农药残留的原位检测, 例如, 在果蔬检测中, 不需要清洗或

【作者简介】赵峰峰 (1986-), 男, 中国山东临沂人, 本科, 从事食品检验检测研究。

破坏样品,直接通过激光照射即可识别表面的有机磷农药残留,检测时间控制在1分钟内,快速区分不同种类农药的特征光谱^[2]。针对谷物类食品的品质检测,通过分析光的散射强度与颗粒大小、水分含量的关联,实现对小麦容重、玉米霉变程度的快速评估,为粮食收购与储存环节的质量管控提供实时技术支持。

2.2 光谱技术的基本特点

2.2.1 高灵敏度特性

相较于传统化学分析法,光谱技术可以实现对痕量有害物质与微量营养成分的精准捕获,例如原子荧光光谱技术对食品中砷元素的检测限低至0.0001mg/kg,可以有效识别水产品中因环境污染导致的微量砷超标;荧光光谱技术对食品中维生素B12的检测灵敏度可以达到0.1ng/mL,能够满足婴幼儿食品中微量维生素的检测需求,为食品营养强化与安全风险管控提供精准数据支撑。

2.2.2 快速分析特性

传统检测技术完成一份食品样品的成分分析需要2-4小时,而光谱技术通过简化预处理流程,大幅缩短检测周期。近红外光谱技术对食用油酸价与过氧化值的检测仅需要3分钟,可以实现生产流水线的实时检测,拉曼光谱技术对乳制品中三聚氰胺的快速筛查耗时不超过2分钟,能够在乳制品生产出厂环节形成高效质量把关,避免不合格产品流入市场。

2.2.3 无损检测特性

在进口红酒品质鉴定、名贵中药材等高端食品检测过程中,光谱技术可以在不破坏样品完整性的前提下完成检测,例如利用近红外光谱技术检测红酒的酒精度、总糖含量时,仅需将检测探头贴近酒瓶即可以获取数据,检测后红酒仍可以正常销售与饮用。在水果品质分级中,近红外光谱技术通过非接触式检测,实现对苹果糖度、酸度的快速分析,同时保障水果外观完好,提升商品价值。

2.2.4 多参数同步检测特性

传统检测技术需针对不同指标开展多次检测,光谱技术通过一次检测获取食品的多项关键指标。例如,近红外光谱技术对奶粉的检测,可以同步完成蛋白质、脂肪、水分、乳糖含量的定量分析,检测效率较传统方法提升4-6倍。

3 光谱技术在食品检测中的应用价值

3.1 提升食品检测的高效性

光谱技术通过重构检测流程、优化技术衔接,实现食品检测效率的跨越式提升,为食品生产、流通、监管等环节的高效运转提供技术保障。具体来看,光谱技术构建了实时采样-快速分析-即时反馈的闭环检测模式。以乳制品生产为例,传统原料奶检测需将样品送至实验室,历经样品预处理、仪器分析等流程,耗时超过2小时,近红外光谱在线检测系统可以直接安装于原料奶输送管道,通过实时采集光谱数据,5分钟内完成脂肪、蛋白质、体细胞数等指标的分析,

如果检测结果超标,系统可以自动触发报警并切断原料奶输送,避免不合格原料进入生产环节,大幅提升生产效率与产品质量稳定性^[4]。在食品流通领域的批量检测中,光谱技术解决了传统检测“效率低、耗时长”的痛点。在大型农产品批发市场,拉曼光谱便携检测设备可以实现对果蔬农药残留的快速筛查,检测人员每小时可以完成30-40份样品检测,较传统气相色谱法效率提升30倍以上。在粮食收购环节,近红外光谱检测设备可以实现对粮食的快速抽检,10分钟内完成水分、杂质、不完善粒等指标的分析,单日可以完成500吨以上粮食的检测任务,为粮食收购的高效推进提供技术支撑。在食品安全应急检测中,光谱技术可以快速响应突发安全事件。当发生疑似食品污染事件时,如蔬菜农药残留超标、饮料非法添加等,光谱技术可以在现场完成快速检测,例如利用便携式拉曼光谱仪,30分钟内即可以确定食品中是否存在违禁添加物,为监管部门快速决策、及时控制风险提供关键技术支持,避免污染食品扩散引发更大安全事故。

3.2 增强食品检测的精准性

光谱技术通过优化检测原理、融合先进数据处理方法,显著提升食品检测结果的准确性与可靠性,为食品安全风险评估与质量判定提供科学依据。在复杂食品基质检测中,光谱技术有效克服了基质干扰问题。食品基质的复杂性是传统检测技术的主要误差来源,而光谱技术通过特异性检测机制与先进校正方法,提升检测精准度。例如,在酱油中苯甲酸钠检测中,紫外-可见吸收光谱技术通过选择特征吸收波长,结合多元散射校正算法,有效排除酱油中色素与蛋白质的干扰,检测相对标准偏差(RSD)控制在2.5%以内。在肉类重金属检测中,原子吸收光谱技术通过加入基体改进剂,消除脂肪与蛋白质对重金属原子化的影响,检测结果与标准方法的吻合度达98%以上。在痕量污染物检测中,光谱技术实现了低浓度目标物的精准定量。随着食品安全标准的不断严格,对食品中痕量污染物的检测要求日益提高,光谱技术通过技术创新满足这一需求。例如,在饮用水中微囊藻毒素检测中,荧光光谱技术结合免疫亲和柱富集技术,检测限低至0.01μg/L,可精准识别饮用水中因蓝藻污染产生的微量毒素。在茶叶中重金属铅检测中,石墨炉原子吸收光谱技术通过程序升温控制,实现铅元素的高效原子化,检测限可达0.005mg/kg,满足欧盟食品安全标准对茶叶铅含量的严苛要求。

4 光谱技术在食品检测中的应用路径

4.1 做好技术应用流程的完善

4.1.1 样品前处理流程优化

针对不同食品基质特性,制定差异化预处理方案,引入智能化预处理设备。对于固体食品,开发低温粉碎-均匀取样-在线输送的一体化预处理系统,通过-10℃至-5℃的低温粉碎,避免样品成分因高温发生变化,同时利用自动取样装置确保样品代表性,取样误差控制在1%以内。对于液

体食品,设计在线过滤-自动稀释-恒温控制的预处理体系,通过精密过滤膜去除杂质干扰,自动稀释系统根据样品浓度精准调节稀释比例,($25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$)的恒温环境下,保证样品物理性质稳定,预处理效率较传统手工操作提升3-5倍。

4.1.2 仪器设备操作流程标准化

建立全流程操作规范,并融入数字化管理系统。制定涵盖仪器开机校准、样品检测、数据输出、关机维护的标准化操作手册(SOP),明确各环节操作参数与时间节点。开发仪器操作数字化管理平台,实现操作过程的实时监控与数据追溯,平台可自动记录操作人员、操作时间、设备参数等信息,如果出现操作偏差,系统实时报警并提示纠正措施,避免人为操作误差影响检测结果。

4.1.3 检测质量控制流程强化

构建“三级质量控制”体系,确保检测结果可靠。一级质控要求每批次样品需加入空白样品与标准样品,空白样品用于扣除背景干扰,标准样品用于验证检测准确性。二级质控需要定期开展仪器性能验证,包括检测限、精密度、准确度验证,例如每月对原子吸收光谱仪进行检测限验证,确保满足检测要求。三级质控建立检测数据审核机制,由专业技术人员对检测数据进行逻辑性与准确性审核,审核通过率需达到100%,没有通过审核的数据需重新检测,形成完整的质量控制闭环。

4.2 做好光谱数据的科学处理

结合食品检测需求,引入机器学习与深度学习算法,提升数据分析能力。在定量分析中,将传统偏最小二乘回归算法与随机森林算法融合,构建“偏最小二乘-随机森林”混合模型,利用偏最小二乘回归提取光谱特征变量,随机森林算法提升模型泛化能力,例如在奶粉蛋白质含量检测中,混合模型的预测均方根误差(RMSEP)较传统偏最小二乘回归模型降低15%-20%。在定性分析中,引入卷积神经网络(CNN)算法,通过构建多层卷积与池化层,自动提取光谱特征,实现对农药残留、非法添加剂的精准识别,识别准确率可达95%以上,较传统主成分分析-判别分析模型提升10%-15%^[5]。建立标准化数据存储与共享平台,实现数据的高效利用。设计光谱数据库架构,涵盖样品信息、仪器参数、光谱数据、检测结果等核心字段,采用分布式存储技术确保数据安全与快速访问。

4.3 做好光谱数据模型有效搭建

采用特征选择-模型训练-参数优化的一体化构建策略。在特征选择阶段,引入递归特征消除算法(RFE)与竞争自适应重加权采样算法(CARS),筛选与检测目标高度相关的光谱特征变量,减少冗余变量对模型的干扰,例如在食用油过氧化值检测中,通过CARS算法筛选出20-30个特征波长,较全光谱模型计算效率提升5-8倍。在模型训练阶段,针对不同检测类型选择适配算法,定量检测采用梯度提升回归树(GBRT)算法,定性检测采用支持向量机(SVM)算

法。在参数优化阶段,利用粒子群优化算法(PSO)对模型参数进行全局优化,例如对SVM模型的惩罚因子与核函数参数进行优化,提升模型分类准确率。建立多维度验证指标与动态验证机制,确保模型可靠性。制定涵盖预测均方根误差(RMSEP)、决定系数(R^2)、相对分析误差(RPD)的定量模型验证指标体系,其中 $\text{RPD} > 2.5$ 表示模型性能优良,可满足实际检测需求。定性模型验证采用准确率、召回率、F1分数作为核心指标,准确率 $> 95\%$ 为合格标准。

5 食品检测领域光谱技术发展趋势

5.1 与在线检测技术的融合

通过将光谱检测模块与食品生产流水线深度集成,结合自动化控制技术与数据分析算法,构建“实时采样-光谱分析-数据反馈-工艺调整”的智能化在线检测系统。在饮料生产中,在线近红外光谱检测系统可安装于饮料灌装前的输送管道,实时采集饮料的光谱数据,通过建立的定量模型快速分析饮料的糖分、酸度、添加剂含量等指标,分析结果实时传输至生产控制系统,

5.2 与便携检测设备的融合

通过采用微机电系统(MEMS)技术、微型光谱芯片与集成化光学设计,实现便携式光谱检测设备的体积缩小与重量减轻,同时保障检测精度。在微型光谱芯片研发方面,基于互补金属氧化物半导体(CMOS)技术的微型近红外光谱芯片,体积可缩小至几平方毫米,重量不足1克,集成于便携式设备中,可实现食品中水分、蛋白质等成分的快速检测,在设备集成化方面,开发“光谱检测模块-数据处理模块-结果显示模块”一体化便携式设备。

6 结语

光谱技术凭借高灵敏度、快速分析、无损检测与多参数同步检测的核心优势,在提升食品检测高效性、增强检测精准性与降低检测成本方面发挥重要作用,为食品安全保障提供了关键技术支撑。文章通过完善技术应用流程、科学处理光谱数据与有效搭建数据模型,进一步释放光谱技术的应用效能,推动其在食品生产、流通与监管环节的广泛应用。

参考文献

- [1] 史谢飞.食品检测中近红外光谱分析技术的应用研究[J].当代化工研究,2024(4):124-126.
- [2] 吴丹虹,黄荣博,朱晓霞等.红外光谱技术在食品检测中的运用研究[J].中外食品工业:下,2024(16):72-74.
- [3] 张红涛,王龙杰,谭联等.太赫兹光谱技术在食品污染检测中的研究进展[J].光谱学与光谱分析,2024(8):2120-2126.
- [4] 李坚,姚智恩,王金花等.高光谱成像技术在食品品质检测中的研究进展[J].食品工业科技,2025.
- [5] 吴远浪.食品检测中近红外光谱分析技术的应用[J].粮油与饲料科技,2024(4):207-209.