

# 农业生物质高值转化及其物料特性光谱速测技术与装备研究进展

杨增玲<sup>1</sup> 马永正<sup>1</sup> 薛俊杰<sup>2</sup> 戴嘉伟<sup>1</sup> 韩鲁佳<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 华北电力大学新能源学院, 北京 102206)

**摘要:** 农业生物质资源化利用与高值转化事关农民增收、农业增效和农村环境治理,是国家推动农业绿色发展、落实乡村振兴与“双碳”战略的重要内容。农业生物质组成复杂、性质波动明显,单一转化技术存在能量利用效率低、组分利用不充分和产物附加值有限等问题。针对上述瓶颈,本文围绕农业生物质高值化耦合炼制与过程监测,重点综述了“光-热-储”与“光-生-热-储”两类耦合炼制技术体系及其装备发展,并从原料适应性、能量转换效率、系统复杂度及技术成熟度等维度对光-热-储4条技术路线进行了横向对比,明确了不同耦合路径的适用场景与瓶颈。在光谱速测方面,系统总结了近红外光谱、中红外光谱、拉曼光谱、激光诱导击穿光谱及光谱成像技术在原料评价、过程监测和产品质控等环节的应用进展,梳理了光谱设备由实验室向便携式现场设备及工业在线检测系统演进的发展现状,并分析了复杂工程环境下的基质与工况干扰问题。在此基础上,重点探讨了光谱速测与耦合炼制过程的融合路径,提出了“硬件抑制—光谱校正—模型迁移—状态监测”的协同干扰消除策略,以及极端工况专用装备研发、机理与数据融合驱动建模、光谱数据与多能流系统智能闭环调控3个未来重点方向。最后,针对耦合炼制系统的多能流协同、光谱在线感知及装备集成等关键问题提出发展展望。

**关键词:** 农业生物质; 高值化; 耦合炼制技术; 光谱检测; 光谱成像; 速测设备

**中图分类号:** S816.17      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2026)21-0001-23      **OSID:** 

## Research Progress on High-value Conversion of Agricultural Biomass and Its Characteristic Spectral Rapid Measurement Technology and Equipment

Yang Zengling<sup>1</sup> Ma Yongzheng<sup>1</sup> Xue Junjie<sup>2</sup> Dai Jiawei<sup>1</sup> Han Lujia<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of New Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The resource utilization and high-value conversion of agricultural biomass are crucial to increasing farmers' incomes, enhancing agricultural efficiency, and improving rural environmental management. They are key components of the nation's efforts to promote green agricultural development and implement the rural revitalization strategy and the “dual carbon” strategy. Agricultural biomass has a complex composition and exhibits significant variations in properties; relying on a single conversion technology leads to issues such as low energy utilization efficiency, insufficient utilization of components, and limited added value of the products. To address these bottlenecks, focusing on high-value coupled refining of agricultural biomass and precise process monitoring, and the high-value-added coupled pyrolysis of agricultural biomass and precise process monitoring. It provided a comprehensive review of the development of two types of coupled pyrolysis technology systems “photo – thermal – storage” and “photo – biological – thermal – storage”, and their associated equipment. Furthermore, it conducted a horizontal comparison of the four “photo – thermal – storage” technology routes based on dimensions such as feedstock adaptability, energy conversion efficiency, system complexity, and technological maturity, thereby clarifying the applicable scenarios and bottlenecks of different coupling pathways. Regarding rapid spectroscopic analysis, the application progress of near-infrared spectroscopy, mid-infrared

spectroscopy, Raman spectroscopy, laser-induced breakdown spectroscopy, and spectral imaging technologies in feedstock evaluation, process monitoring, and product quality control were systematically summarized. It outlined the current state of development in the evolution of spectroscopic equipment from laboratory-based systems to portable field devices and industrial online detection systems, and analyzed issues related to matrix and operating condition interference in complex engineering environments. Building on this foundation, focusing on exploring pathways for integrating rapid spectroscopic analysis with coupled refining processes. It proposed a collaborative interference-elimination strategy comprising “hardware suppression—spectral calibration—model transfer—condition monitoring” and identified three key future research directions: the development of specialized equipment for extreme operating conditions; modeling driven by the integration of mechanisms and data; and intelligent closed-loop control of spectral data and multi-energy-flow systems. Finally, development prospects were proposed for key issues such as multi-energy-flow coordination, online spectral sensing, and equipment integration in coupled refining systems, with the aim of providing guidance for the high-value utilization and engineering applications of agricultural biomass.

**Key words:** agricultural biomass; value-added processing; coupling refining technology; spectroscopy analysis; spectral imaging; rapid testing equipment

## 0 引言

农业生物质是重要的可再生碳资源,主要包括能源作物、农作物秸秆、畜禽粪污和农业加工废弃物等类型<sup>[1-3]</sup>。我国农业生物质资源丰富,但不同来源原料在水分、灰分、纤维组成及元素含量等方面存在显著差异。现有资源化利用方式已覆盖能源、饲料、肥料、材料和化学品等多个方向,但单一转化技术普遍存在能量梯级利用不足、组分利用不充分和产品附加值有限等问题<sup>[4-5]</sup>。因此,通过热化学、生物转化及太阳能等多种能量与转化过程的耦合集成,提高原料全组分利用效率和系统能效,成为农业生物质高值化利用的重要发展方向。

此外,与质量可控的工业原料形成鲜明对比,农业生物质展现出显著的复杂性与变异性。由于来源、品种、生长条件及储存方式的差异,都会导致生物质组成成分的剧烈波动。以玉米秸秆为例,其纤维素含量可在 32%~45% 之间变化,木质素含量则在 12%~22% 范围内波动,这种不确定性直接影响了后续转化工艺的选择与产物收率的稳定性<sup>[6]</sup>。畜禽粪污的情况更为复杂,其有机质含量、无机营养元素、重金属含量等参数随饲养方式、清粪工艺和储存时间呈现出极大的差异性<sup>[7]</sup>。这种原料端的“黑箱”特性,已成为制约农业生物质定向转化与高值化利用的关键瓶颈之一。与原料端的组分波动相呼应,生物质向高值化产品转化的全过程中同样存在一系列亟需实时捕捉的动态参数。预处理阶段,木质素脱除率随反应条件剧烈变化<sup>[8]</sup>;酶解发酵过程中,还原糖、乙醇及挥发性脂肪酸等关键代谢产物浓度实时演变,直接决定转化效率与产物收率<sup>[9-11]</sup>;热化学转化中,合成气组分与热解挥发分逸出特性

亦随温度和气氛动态响应<sup>[12-13]</sup>。以厌氧发酵为例,挥发性脂肪酸若未及时监测,其过量积累将使系统 pH 值迅速下降,最终导致产甲烷菌失活、发酵失败<sup>[14-15]</sup>。与工业过程的相对可控不同,农业生物质转化因原料异质性、微生物代谢非线性及热化学反应多步耦合,呈现出更为复杂的动态演变特征<sup>[16-17]</sup>。传统离线分析耗时数小时至数天,当结果反馈时,反应进程早已偏离最佳窗口<sup>[18]</sup>。这种监测能力的缺失,已成为制约生物质高值化从“经验操作”迈向“精准控制”的核心瓶颈。以近红外、中红外<sup>[19-20]</sup>、拉曼<sup>[21]</sup>、激光诱导击穿光谱(Laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS)及光谱成像为代表的速测技术,凭借快速响应、无需前处理、多组分同步监测及光纤探头原位测量的优势,为突破上述瓶颈提供了可行路径<sup>[22-23]</sup>。

因此,本文重点阐述技术路径较成熟、工业化应用潜力较大的农业生物质“光-热-储”与“光-生-热-储”两种高值化耦合炼制技术。并系统综述近红外、中红外、拉曼、激光诱导击穿光谱及光谱成像技术在农业生物质物料特性速测中的应用。探讨当前面临的挑战与未来发展方向,以期为深入挖掘农业生物质资源潜力,加快推动高值化进程以及推动相关技术的工程化应用提供参考。

## 1 农业生物质资源及其转化路径

农业生物质泛指农业生产中通过光合作用直接或间接形成的各类有机物质,主要包括能源作物<sup>[24-25]</sup>、农作物秸秆<sup>[26-27]</sup>、农业加工废弃物<sup>[28-29]</sup>及畜禽粪污<sup>[30-31]</sup>等,农业生物质转化路径按照最终产物类型,可归纳为饲料化、肥料化、能源化、材料化及基料化 5 种主要路径<sup>[32]</sup>,如图 1 所示。



图 1 农业生物质资源类型、特征及高值化转化途径与应用示意图

Fig. 1 Types and characteristics of agricultural biomass resources, as well as pathways and applications for their high-value conversion

饲料化利用是农业生物质资源高效利用的重要方式,其核心是通过物理、化学或生物处理改善原料适口性和营养价值,为畜牧业提供可持续饲料来源。农作物秸秆经青贮、氨化或微生物发酵后,可提高粗蛋白含量和纤维消化率,制成反刍动物粗饲料<sup>[33-35]</sup>;棉籽粕、菜籽粕及酒糟等农业加工副产物经脱毒或发酵处理后,亦可作为优质蛋白饲料<sup>[36]</sup>。

肥料化利用是实现农业养分循环和绿色农业发展的重要途径。畜禽粪污、秸秆及农业加工废弃物经好氧堆肥、厌氧发酵或腐殖化处理,可制备有机肥、生物有机肥及腐殖酸肥料,实现有机质和氮、磷、钾等养分资源化利用<sup>[37-38]</sup>。厌氧发酵产生的沼液、沼渣富含速效养分和有机质,可作为液体有机肥或土壤改良剂,提高土壤肥力和作物产量<sup>[39-40]</sup>。同时,生物炭与有机肥协同施用能够改善土壤结构、增强养分保持能力,并减少温室气体排放,是当前农业生物质肥料化利用的重要发展方向。

能源化利用除了直接燃烧供热或发电之外,还有生化和热化学转化两条路线。生化转化中,秸秆经预处理、酶解生产燃料乙醇<sup>[41-42]</sup>;畜禽粪便厌氧发酵产沼气,提纯后可得生物天然气<sup>[43-44]</sup>;含油种子或微藻经酯交换生成生物柴油。热化学转化则通过限氧热解产生生物油和热解气等<sup>[45-46]</sup>。

材料化利用主要是制备具有更高附加值的生物质材料与化学品等。纤维素经水解发酵可生产聚乳酸等可降解塑料,或经化学改性制备纤维素酯、醚,应用于食品、医药和日化<sup>[47-48]</sup>;木质素作为天然芳

香聚合物,可替代苯酚制备酚醛树脂,或解聚为芳香族单体<sup>[49]</sup>;半纤维素水解产物木糖加氢可得功能性甜味剂木糖醇;半纤维素在酸性条件下脱水生成糠醛,是重要溶剂和化工中间体<sup>[50]</sup>;纤维素在高温高压下转化为乙酰丙酸,可衍生多种高值化合物<sup>[51-52]</sup>。

基料化利用也是农业生物质资源转化的重要方向之一。农作物秸秆、稻壳、蔗渣、椰糠及木屑等富含木质纤维成分、具有良好的孔隙结构和保水透气性能,经粉碎、堆肥、发酵或改性处理后,可用作食用菌基料、育苗基质和栽培基质<sup>[53-54]</sup>。此外,酒糟、糖蜜及部分农业加工副产物富含碳源和营养物质,可作为微生物发酵培养基,用于生产酶制剂、有机酸、微生物菌剂等产品。

2 农业生物质高值化耦合炼制技术与装备

单一转化技术存在能量利用效率低、原料组分利用不充分、单一产物附加值低等固有缺陷,难以支撑农业生物质高值化利用产业化发展。耦合炼制技术通过将不同能量形式、不同转化技术进行耦合集成,可以实现能量的梯级利用与转化效率的协同提升,显著提高产业竞争力。当前,技术路径较为成熟、工业化应用进展较快的耦合炼制技术可总结为“光-热-储高值化耦合炼制技术”与“光-生-热-储高值化耦合炼制技术”两大核心体系。

2.1 光-热-储高值化耦合炼制技术

光-热-储高值化耦合技术是聚光太阳能集热装

置、储热单元与生物质热解/气化反应器的深度集成系统(图2),其借助抛物面槽式聚光器或塔式集热场,将分散的太阳辐射能转化为高品质热能,直接作为生物质热解或气化过程的核心热源。通过双罐熔盐储热或固体颗粒热载体蓄热等储热单元,可将日

间富余的太阳能以显热或潜热形式存储,在夜间或辐照不足时段释放供热,从而有效平抑聚光辐照的间歇性与波动性,保障气化炉工作温度的稳定性与反应持续时长。根据作用机制与原料类型的不同分为4条主要技术路线。

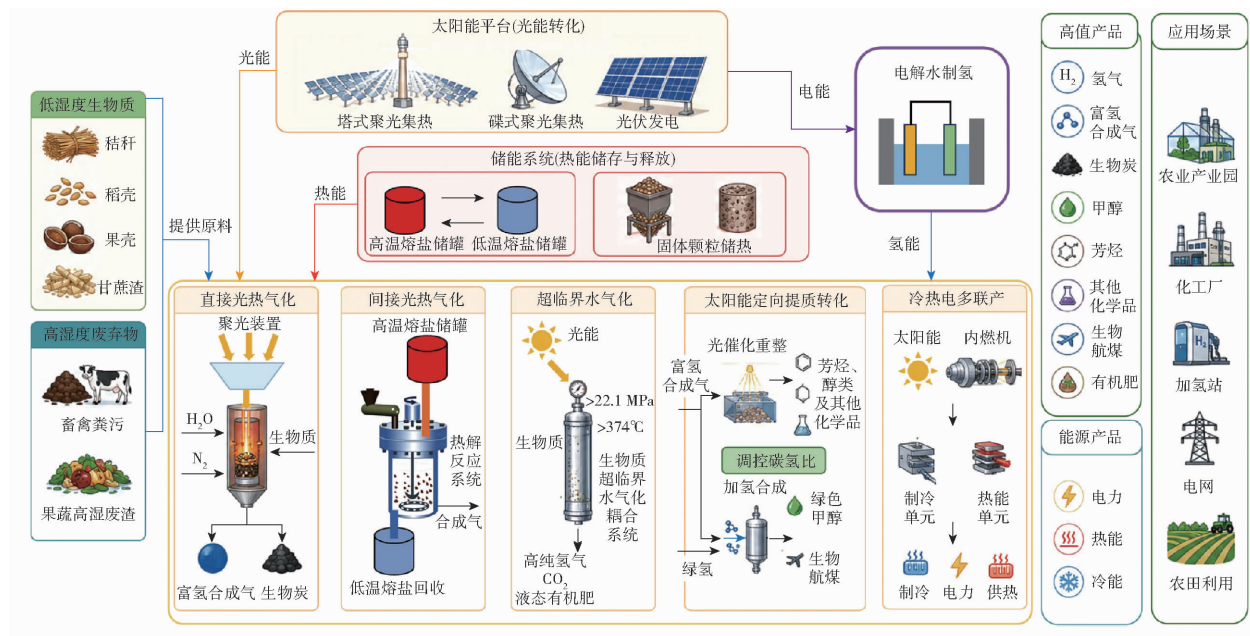


图2 农业生物质光-热-储高值化耦合炼制技术路线图

Fig. 2 Diagram of coupled refining technology for high-value utilization of agricultural biomass via light, heat, and storage

### 2.1.1 常压干基直接/间接光热气化

碟式/塔式聚光太阳能气化技术通过石英窗口将聚焦太阳辐射直接引入反应器,实现对物料的直接辐照加热,系统结构简洁,适用于秸秆、稻壳等低湿度农林废弃物的热化学转化。在该领域,颗粒载热间接气化已成为公认的主流工程路线,其核心思想是借助碳化硅(SiC)或石英砂颗粒作为循环热载体,将太阳能转化为颗粒显热后间接加热物料,从而规避光学窗口污染问题,并支持昼夜连续运行,产出富氢合成气与生物炭,下游可耦合发电、甲醇合成及炭基肥生产。

在基础热力学层面,研究人员<sup>[55-56]</sup>建立了塔式直接光热气化平衡模型,从理论上论证了太阳能替代自持燃烧在提升合成气品质、降低碳排放方面的显著优势,并给出了反应温度和水碳比(S/C)等关键基准参数。围绕直接辐照反应器的性能验证,后续研究<sup>[56-59]</sup>通过喷动床/填充床仿真及多联产(甲醇/天然气)系统模拟,进一步揭示了该路线的潜力,但均指出光学窗口积灰及由此导致的无法连续运行是制约其规模化应用的实质性障碍。针对这一瓶颈,研究人员<sup>[60-62]</sup>提出了SiC等颗粒载热间接气化方案。此外,研究人员<sup>[63]</sup>还将该技术理念拓展至高挥发分果壳、甘蔗渣等原料,提出了分级光热解工艺,进一步丰富了常压干基农林废弃物的适配场景。

### 2.1.2 太阳能超临界水气化

太阳能超临界水气化技术是处理高湿度有机废弃物的一个重要途径,尤其适用于畜禽粪污、果蔬废渣等高含水率生物质原料。该技术采用多碟式聚光系统提供超临界高温高压反应环境(温度大于374℃、压力大于22.1 MPa),原料无需前置干燥,反应过程无焦油生成,主产物为高纯氢气,同时可联产液态有机肥,具备分布式处理养殖废弃物的潜力。研究人员<sup>[64]</sup>系统综述了超临界水气化的热化学机理及反应器设计基础,为该技术的工程化奠定了理论支撑。基于中试规模的仿真与试验研究,完善了面向村镇分布式制氢的单机工艺参数与操作策略<sup>[65]</sup>。在此基础上,进一步拓展了工业应用场景<sup>[66]</sup>,提出了与电厂耦合的协同运行模式,从而形成了“村镇单独制氢”与“电厂协同消纳”两套具有明确落地路径的应用方案。

### 2.1.3 太阳能定向提质转化

太阳能定向提质转化是生物质高值化利用的终端环节,旨在将上游气化所得合成气进一步转化为高附加值燃料或化学品。根据转化路径的差异,该方向可分为两类细分技术:①光催化重整路线,以光催化过程将合成气转化为芳烃、醇类等平台化合物,主要依赖光非热效应在较低温度下驱动反应,产物侧重于精细化学品领域。研究人员<sup>[67]</sup>围绕该方向

开展了系统研究,侧重于光催化重整与小分子化学品合成工艺的优化。②光伏绿氢耦合气化加氢路线,依托光伏电解水制得绿氢,对生物质气化合成气进行加氢调变,定向合成绿色甲醇、生物航煤等高品质液体燃料。该路线强调多能耦合调控合成气碳氢配比,产物定位于交通燃料等高值能源产品<sup>[68]</sup>。总体来看,光催化重整路线凭借温和条件在化学品定向制备方面具有优势,而光伏绿氢耦合路线则依托多能互补在液体燃料生产方面展现出更强的产物调控能力。然而,两条路线均面临催化剂稳定性、光-氢-热多能流协同调控及系统能效提升等共性挑战,走向工业化应用尚需在催化材料开发与系统集成层面进一步突破。

2.1.4 太阳能冷热电联供系统(光-机-电-热一体化产业园路线)

太阳能冷热电联供系统是实现生物质太阳能气化技术园区化应用的综合解决方案。该系统以塔式聚光气化为核心,耦合燃气/蒸汽联合循环发电、溴化锂余热制冷等单元,同时由光伏系统供给全厂辅助动力,形成冷、热、电多能联产格局,适宜布局于县

域农业综合园区,并可与燃煤机组耦合调峰,增强系统的电网响应灵活性。在系统优化层面,研究人员<sup>[69]</sup>基于塔式单光热多联产系统,建立了基础热力学模型与改进正弦余弦算法多目标优化框架,从烟效率、经济成本与环境效益 3 个维度完成了系统综合性能的量化评估。在此基础上,针对国内应用场景,补充了光伏-光热双能互补的运行模式,提出了改进型智能优化算法,使系统设计更适配村镇及农业产业园分布式项目的规划需求<sup>[70]</sup>。总体而言,该路线通过光伏与光热的协同配置,以及燃气/蒸汽联合循环与余热制冷的梯级利用,实现了太阳能全时段、多品位的输出利用。然而,系统集成涉及高温气化、燃气轮机适配、多能流调度等多学科复杂耦合,其工程化推进仍面临变工况运行调控、核心装备国产化及多目标优化算法实用性验证等关键挑战。

2.1.5 光-热-储高值化耦合炼制技术对比

光-热-储高值化耦合炼制 4 条技术路线在原料适应性、能量转化效率、系统复杂度、经济性与技术成熟度上存在显著差异,各有其适用的场景与瓶颈(表 1)。

表 1 光-热-储高值化耦合炼制技术对比

Tab.1 Comparison of high-value coupled refining technologies combining solar, thermal, and storage elements

| 对比维度   | 常压干基直接/<br>间接光热气化       | 太阳能<br>超临界水气化               | 太阳能<br>定向提质转化           | 太阳能<br>冷热电联供系统          |
|--------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 适配原料   | 秸秆、稻壳等低湿度<br>农业生物质      | 畜禽粪污、果蔬废渣等<br>高湿度农业生物质      | 农业生物质气化<br>所得合成气        | 农业生物质气化<br>所得合成气        |
| 能量转换效率 | 中高                      | 较高                          | 中等                      | 高                       |
| 系统复杂度  | 中等                      | 高                           | 高                       | 中等                      |
| 经济性    | 中等                      | 高                           | 较高                      | 中等偏低                    |
| 技术成熟度  | 较高                      | 中低                          | 中                       | 较高                      |
| 固有瓶颈   | 干燥能耗高;气化产物<br>含焦油,需净化处理 | 设备投资与运行成本高;<br>材料腐蚀与盐沉积问题突出 | 催化剂失活与成本;<br>产物分离与纯化难度大 | 受沼气产量波动影响;<br>系统集成与调控复杂 |

(1) 适配原料的互补性

4 条路线在原料端形成了从干基到湿基的完整覆盖。常压干基光热气化主要面向秸秆、稻壳等低湿度农林废弃物,但干燥环节的能耗亦不容忽视。太阳能超临界水气化则专门针对畜禽粪污、果蔬废渣等高含水率有机废弃物,利用超临界水的特殊性省去了高能耗的干燥环节。定向提质转化与冷热电联供系统则不受特定原料类型的限制,前者以上游气化所得的合成气为处理对象,后者以气化产出的合成气为燃料来源,均可灵活适配多种生物质原料。

(2) 能量转换效率的梯度差异

从热力学视角看,四者的能量转换效率呈现梯度分布。常压干基气化与超临界水气化均以产出富

氢合成气或高纯氢气为目标,能量转换效率处于中等偏上水平。冷热电联供系统通过燃气/蒸汽联合循环发电与溴化锂余热制冷的梯级利用,实现了冷、热、电多能联产,综合能源利用率最高。定向提质转化则侧重于产物的高值化而非能量产出的最大化,光-氢-热多能流协同调控难度大,系统能效偏低。

(3) 系统复杂度与工程化挑战

系统复杂度方面,超临界水气化要求超高温高压反应环境(374℃ 以上、22.1 MPa 以上),对反应器材料与密封技术提出严苛要求,系统复杂度最高。定向提质转化涉及多步催化/光催化反应与产物分离提纯,复杂度次之。常压干基气化的直接辐照法结构最为简洁,但光学窗口积灰问题制约其连续运行;间接颗粒载热法则在规避窗口污染的同时增加

了热载体循环系统,复杂度有所提升。冷热电联供系统涉及高温气化、燃气轮机适配、溴化锂制冷及多能流调度等多学科耦合,系统集成复杂度亦较高。

#### (4) 经济性与技术成熟度的权衡

常压干基间接气化依托成熟的颗粒载热技术方案,技术成熟度(TRL)最高,已具备规模化工程应用条件。冷热电联供系统已有基础热力学模型与智能优化算法支撑,TRL 处于中高水平。超临界水气化中超高压设备投资大、材料腐蚀与盐沉积问题突出。定向提质转化整体仍处于催化材料开发与系统集成突破阶段,催化剂稳定性、光-氢-热多能流协同调控

及系统能效提升是其走向工业化的核心挑战,TRL 相对较低。

### 2.2 光-生-热-储高值化耦合炼制技术

光-生-热-储耦合炼制技术,是将聚光太阳能集热系统、生物转化过程(如厌氧发酵、光合制氢)、热化学转化过程(如热解、气化、催化合成)及储热单元进行深度集成的多能互补炼制模式,其核心在于充分发挥各项单元技术的比较优势、规避固有短板,实现太阳能、热能与生物质化学能的协同转化与梯级利用(图 3)。根据作用机制与原料类型的不同,分为两条主要技术路线。

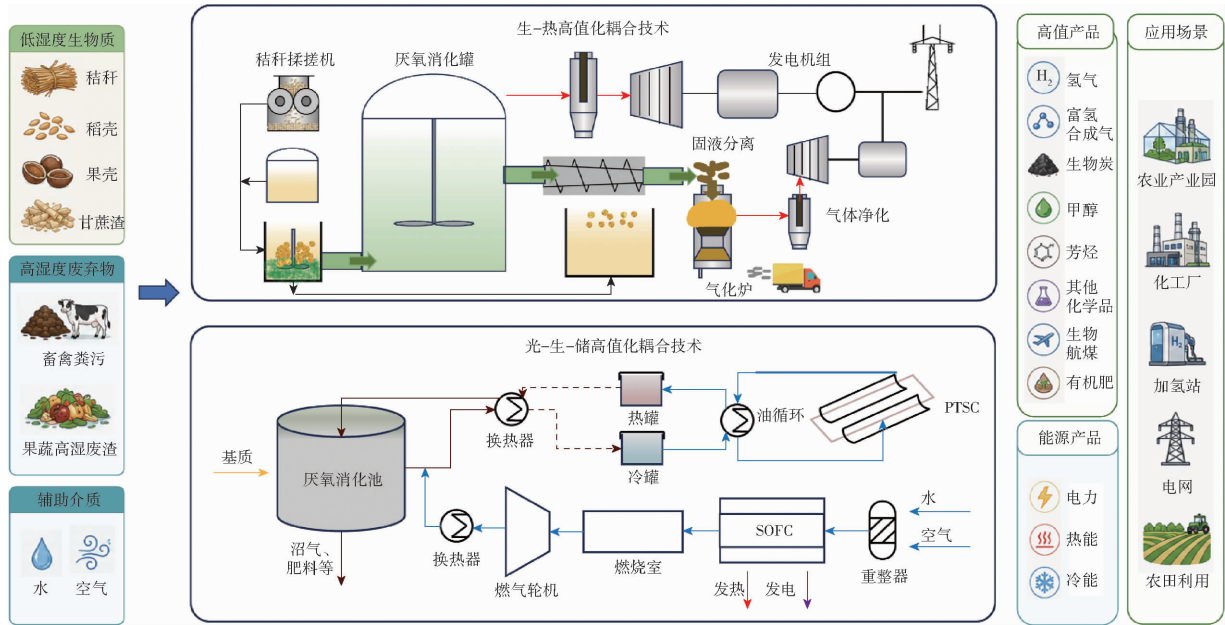


图 3 农业生物质光-生-热-储高值化耦合炼制技术路线图

Fig. 3 High-value coupled technology for agricultural biomass: light-generation-heat-storage

#### 2.2.1 生-热高值化耦合炼制技术

生-热耦合技术是一类针对木质纤维素类废弃物的高效梯级转化策略,其核心在于将生物转化过程的温和性与高选择性,同热化学转化过程的高效性与原料适应性进行有机整合,从而突破单一技术路径的产物限制,实现生物质全组分的分质利用与能源品位的梯级提升。

依据中间产物形态及终产物种类的差异,生-热耦合技术可归纳为两类主要路径。①厌氧消化-热化学转化耦合发电/供能路线,该路径以农业废弃物为原料,首先经厌氧消化产沼气,剩余沼渣与秸秆等木质纤维原料协同气化,所得合成气联合沼气用于发电或供热。依托生命周期评价与流程模拟工具,已有研究证实该耦合系统的碳足迹显著低于单一发酵或单一气化工艺<sup>[71-72]</sup>。然而,沼渣中灰分及水分含量偏高,增加了原料预处理环节的能耗与设备投入,是该路线工程化推广的主要制约因素。②分质梯级转化-液体燃料/化学品路线,该路径采取分质

梯级利用思路,将原料中的易降解组分(可溶性糖、半纤维素等)通过厌氧发酵转化为醇类、挥发性脂肪酸等小分子产物,剩余难降解木质残渣则经热解/气化提质,制备生物航煤、生物基平台化学品等高端产品。该路线可同步产出燃气、生物炭及液体燃料多类产品,依靠多元产物体系有效对冲单一产品的价格波动风险,增强了系统的经济韧性<sup>[73]</sup>。值得关注的是,发酵残渣经水热碳化(Hydrothermal carbonization, HTC)预处理后再进行热化学转化的AD-HTC闭环工艺<sup>[74]</sup>,为进一步提升能量回收效率和产物品质提供了新的技术路径。

#### 2.2.2 光-生-储高值化耦合炼制技术

光-生-储耦合技术是将太阳能光热转化、生物化学转化与能量储存进行系统集成的多能互补利用模式,其核心在于利用太阳能集热系统为生物转化过程提供热能供给,从而降低工艺外部能耗并提升整体能量利用效率。该技术主要包含两类典型路径。

第 1 类路径以厌氧发酵产物沼气为原料,依托太阳能集热系统供给重整及电解工序所需的热能,将沼气通过光热辅助重整转化为富氢合成气,继而供给固体氧化物燃料电池 (Solid oxide fuel cell, SOFC) 用于发电。已有研究表明,该路径的发电效率显著优于传统内燃机发电方式,显示出良好的热-电转换性能<sup>[75-76]</sup>。然而,该技术路线目前仍面临两项主要工程制约:沼气中杂质组分(如 H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub>、硅氧烷等)对 SOFC 阳极材料的毒化作用显著,对沼气提纯提出了较高要求,从而增加了预处理环节的投资与运行成本;SOFC 在高温工况下的材料耐久性 & 长期运行稳定性尚需进一步验证,导致系统整体成本偏高,制约了该路线的经济性竞争力。

第 2 类路径聚焦于太阳能供热厌氧发酵,即利用太阳能集热装置产生的热能直接为厌氧发酵罐提供热量,以维持发酵过程所需的中温(35 ~ 40℃)或高温(55 ~ 60℃)恒温条件,从而提升厌氧消化效率及沼气产率。该路径充分利用了太阳能光热转化的成熟技术,可有效降低发酵系统对化石能源供热或电加热的依赖,尤其适宜在太阳能资源丰富的地区推广应用<sup>[77]</sup>。该路径的集成方式相对简洁,与现有厌氧发酵设施的改造适配性较强,技术风险较低,但需妥善解决太阳能供热的间歇性与发酵过程连续运行需求之间的储能匹配问题。

总体而言,光-生-储耦合技术通过太阳能与生物转化过程的深度互补,在沼气高值化利用与厌氧发酵过程增效方面展现出明显的技术潜力。上述两条路径分别从“产出端提质”和“反应端强化”两个方向拓展了光-生耦合的应用边界,前者追求更高的发电效率与产物品位,后者侧重发酵过程的低碳化与能源自给率提升。然而,两条路径均面临太阳能间歇供给与生物转化连续运行之间的时空匹配问题,尚需在储热系统优化、低温高效催化剂开发以及系统动态调控策略等方面开展深入研究,以降低工程化应用的附加成本,推动该技术的规模化推广。

### 3 高值化转化过程农业生物质物料特性光谱速测技术与装备

农业生物质高值化耦合炼制过程具有原料性质波动、多能流输入动态变化和产物组成易受工况影响等特点,仅依靠预设工艺参数难以实现全过程稳定运行。因此,原料特性快速感知、反应状态在线监测和产品品质实时评价,是实现光-热-储及光-生-热-储耦合炼制过程动态调控的重要基础。

不同耦合炼制技术对光谱速测的需求具有明显差异:常压光热气化重点关注原料水分、灰分和纤维

组成以及合成气品质;超临界水气化重点关注高含水原料组成、反应中间体及气液产物;定向提质转化重点关注合成气组成、氢碳比及终端燃料或化学品品质;冷热电联供则进一步要求将燃料品质和气化产物信息与太阳辐照、储热状态及冷热电负荷相结合。与此同时,生-热和光-生-储耦合过程还需要实时感知发酵底物、代谢产物和沼气品质。

因此,本节重点分析光谱技术在农业生物质原料评价、转化过程监测和产品质量控制中的适用性,并了解光谱装备的发展方向,以期作为高值化耦合炼制过程中“物料感知—过程监测—状态预测—反馈控制”闭环中的核心感知单元。

#### 3.1 光谱技术原理及其适用性

农业生物质高值化利用涉及原料品质评价、转化过程调控及产品质量控制等多个环节,对纤维组成、元素含量、官能团结构及空间分布等信息的快速获取提出了较高要求。依据光与物质相互作用机制的不同,农业生物质分析常用的光谱技术可分为分子光谱、原子光谱和光谱成像 3 类(图 4)。其中,近红外光谱<sup>[78]</sup>、中红外光谱和拉曼光谱属于分子光谱,主要反映分子组成及化学结构信息<sup>[79-81]</sup>;激光诱导击穿光谱<sup>[82]</sup>属于原子光谱,主要提供元素组成信息;高光谱成像<sup>[83]</sup>、红外光谱成像及拉曼光谱成像则进一步融合空间信息与光谱信息,实现农业生物质化学组成的原位可视化分析<sup>[84]</sup>。不同技术获取的信息具有明显互补性,共同构成农业生物质物料特性快速检测的重要技术体系。

##### 3.1.1 近红外光谱

近红外光谱基于 C—H、O—H 和 N—H 等含氢基团振动的倍频和合频吸收,可快速获取农业生物质中纤维素、半纤维素、木质素、水分、蛋白质、有机质及可溶性糖等有机组分信息。由于检测过程无需复杂样品前处理,具有无损、快速、多组分同步分析等特点,已成为农业生物质品质快速评价应用最广泛的技术之一。

近年来,近红外光谱结合化学计量学方法已广泛应用于能源作物<sup>[85-86]</sup>、农作物秸秆<sup>[87]</sup>、农业加工废弃物及畜禽粪污等农业生物质资源<sup>[88]</sup>的品质评价。研究内容涵盖木质纤维素组成、水分、灰分、热值、粗蛋白、可溶性糖及有机质、氮磷钾等养分组成等关键指标,并逐渐拓展至生物质能源原料评价、饲料品质分析及堆肥成熟度评价等领域。随着便携式近红外仪器、微小型传感器及人工智能建模技术的发展,近红外光谱正由实验室分析逐步向现场快速检测和在线动态监测发展,是农业生物质物料特性速测应用最成熟的光谱技术之一。

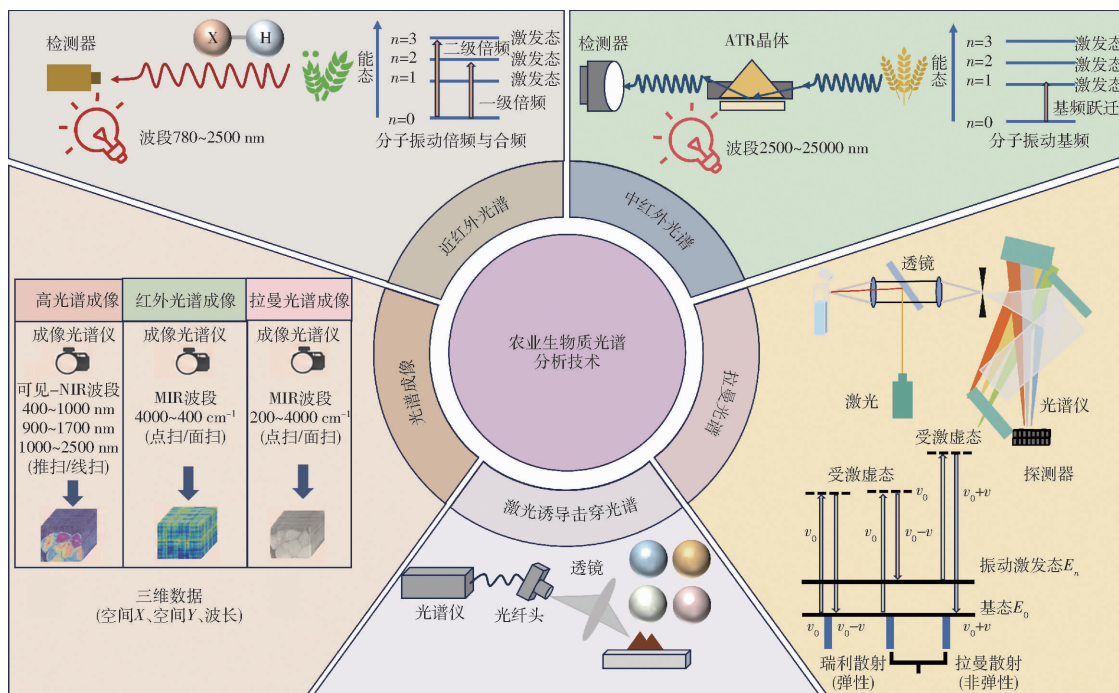


图4 农业生物质物料特性光谱分析技术框图

Fig. 4 Spectral analysis techniques for agricultural biomass characterization

### 3.1.2 中红外光谱

中红外光谱主要反映分子振动的基频吸收,可提供丰富的官能团“指纹”信息,在化学结构解析方面具有较高的特异性<sup>[89]</sup>。相比近红外光谱,中红外光谱能够更加准确地表征木质素、纤维素及半纤维素等木质纤维素组分的化学键变化,因此广泛应用于农业生物质结构组成分析和预处理机理研究。然而,由于水分在中红外区域具有较强吸收,其应用多以干燥样品为主。

目前,中红外光谱主要用于农业生物质木质纤维素组成分析、木质素结构表征以及酸碱预处理、蒸汽爆破和低共熔溶剂预处理过程中化学结构变化的监测。同时,中红外光谱结合化学计量学和机器学习算法,也逐渐应用于木质素含量预测、生物基材料结构表征及农业加工废弃物品质评价等研究,为揭示农业生物质高值化利用过程中的结构演变机制提供了重要支撑。

### 3.1.3 拉曼光谱

拉曼光谱基于分子极化率变化产生的非弹性散射效应,可提供分子振动和转动能级的特征信息。作为一种无损、非侵入性的振动光谱技术,拉曼光谱能够实现定性、结构信息和定量测量<sup>[90]</sup>。与红外光谱相比,拉曼光谱对水不敏感、样品制备要求低、可在原位状态下分析,使其在研究木质纤维素生物质化学组成方面具有独特优势——无需复杂前处理即可直接获取纤维素、半纤维素、木质素等组分的分子结构信息。此外,拉曼光谱还可用于生物炭石墨化

程度分析、生物质热解过程表征以及发酵过程在线监测,在农业生物质过程分析中具有一定优势。

### 3.1.4 激光诱导击穿光谱

激光诱导击穿光谱通过高能脉冲激光烧蚀样品形成等离子体,并依据原子或离子发射谱线实现元素组成分析。LIBS 主要获取农业生物质中元素组成信息,可同步检测 C、H、O、N 等主量元素以及 K、Ca、Mg、P 等营养元素和 Cd、Pb 等重金属元素,具有无需复杂前处理、检测速度快和多元素同步分析等优势。

近年来,LIBS 已广泛应用于农业生物质燃料品质评价、灰分组成分析、热值相关元素检测以及畜禽粪污养分和重金属监测等领域,为农业生物质资源化利用中的元素组成评价和环境安全监测提供了快速分析手段。受基体效应影响,LIBS 复杂样品定量分析精度仍有待进一步提升,目前主要通过信号增强、基体校正及机器学习建模等方法提高检测性能。

### 3.1.5 光谱成像

光谱成像技术融合二维图像与光谱信息,可同步获取农业生物质样品的空间位置和化学组成,实现由传统“点检测”向“面分析”的转变。根据检测原理和空间分辨率的不同,农业生物质领域主要采用高光谱成像、红外光谱成像和拉曼光谱成像 3 类技术。其中,高光谱成像空间分辨率在亚毫米(几百微米)尺度,红外光谱成像可达微米尺度(几个微米),而拉曼光谱成像结合共聚焦显微镜可达纳米尺度。

近年来,光谱成像技术已广泛应用于农业生物质原料品质评价、秸秆组织结构解析、木质纤维素空间分布分析以及预处理过程动态监测等研究,并逐渐拓展至原料在线分级、智能分选和工业质量控制等应用场景。随着高速成像、深度学习和多模态信息融合技术的发展,光谱成像正成为农业生物质物料特性表征的重要发展方向。

总体来看,近红外光谱、中红外光谱、拉曼光谱、LIBS 及光谱成像分别从有机组分、官能团结构、元素组成及空间分布等不同层面表征农业生物质特性,各技术之间具有显著的互补优势。

### 3.2 光谱技术在农业生物质高值化中的多元应用场景

光谱技术在农业生物质资源转化中的应用涉及原料评价、过程监测、产品质量控制等多个环节,覆盖了生物质资源利用的全过程(图 5)。

#### 3.2.1 原料特性快速评价

农业生物质原料特性直接影响后续资源化利用效率,因此建立快速、准确的原料特性评价方法是实现资源高值化利用的重要基础。

近红外光谱是目前原料特性评价应用最广泛的技术。在能源作物方面,已广泛应用于南荻、甜高粱、芒草、甘蔗及甘薯藤等成分分析,可实现水分、纤维素、半纤维素、木质素、可溶性糖、灰分及理论乙醇潜力等多项指标同步速测<sup>[85-86,88]</sup>。在农作物秸秆方面,近红外光谱已实现工业分析参数(水分、挥发分、灰分、固定碳)、元素组成(C、H、N、S、O)及热值的快速预测<sup>[91-92]</sup>,为能源化利用提供支撑。在饲料化利用中,近红外漫反射光谱已广泛用于粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维及可溶性糖等指标的快速测定<sup>[93]</sup>;在肥料化利用中,则可实现有机质、氮磷钾、总碳及碳氮比的快速预测。对于农业加工废弃物(稻壳、酒糟、果渣等),近红外光谱已成功应用于水分、粗蛋白、粗脂肪、纤维、多酚及灰分等指标的快速检测<sup>[94]</sup>。在畜禽粪污方面,近红外光谱结合化学计量学已广泛应用于猪粪、牛粪、鸡粪和粪水等的有机质、氮磷钾及速效养分的快速测定<sup>[14,95-97]</sup>。在分析过程中,除了目标成分外,原料的物理状态也存在较大影响,尤其是未经充分均质化的秸秆、粪污等非均质物料,其粒径分布和堆积密度等变化会改变光散射特性和有效采样体积,一般在进行定标时要充分考虑这些因素,将其变化尽量在定标样品中覆盖。同时,温湿度变化也会引起仪器响应漂移,同样值得关注。

中红外光谱和拉曼光谱则更多用于木质纤维素结构解析。傅里叶变换中红外光谱(FTIR)可解析

不同来源木质素中愈创木基(G)、紫丁香基(S)和对羟基苯基(H)单元的组成差异,为木质纤维原料分级及能源化利用提供结构依据<sup>[98]</sup>。拉曼光谱结合化学计量学可实现木质素含量的快速预测,Gao 等<sup>[99]</sup>通过迁移学习结合 XGBoost 算法,利用拉曼光谱实现了杉木木质素含量的高精度预测( $R^2 > 0.93$ )。LIBS 则补充了元素组成信息,可同步检测农业生物质原料中的 K、Ca、Mg、P 等中微量元素以及 Cd、Pb 等重金属元素,为燃料品质评价和粪污农用安全性评估提供技术手段和数据支撑<sup>[100]</sup>。

光谱成像技术进一步突破了传统点测量局限,高光谱成像和红外光谱成像可实现化学组成空间分布的可视化,服务于原料品质分级及非均质性分析。与前两类成像技术相比,共聚焦拉曼光谱成像具有更高的空间分辨率,可在细胞壁尺度实现木质素、纤维素和半纤维素等主要组分的原位定量成像。最新的研究显示基于共聚焦拉曼成像实现了禾本科植物细胞壁木质素、纤维素和半纤维素三大组分的同步可视化成像和定量<sup>[101-102]</sup>。

#### 3.2.2 生物质转化过程原位动态监测

农业生物质高值化利用涉及预处理、酶解、发酵、热解、燃烧及堆肥等复杂过程,传统离线检测难以实时反映体系内部化学组成变化,而光谱技术具有无损、快速和在线分析等优势,为生物质转化过程动态监测提供了重要技术手段。

近红外光谱已广泛应用于生物质预处理效果评价及发酵过程在线监测。研究表明,近红外光谱能够快速预测木质纤维素预处理后的糖释放效率,并实现乙醇发酵过程中乙醇、葡萄糖及还原糖等关键参数的实时检测。在厌氧消化过程中,近红外在线检测系统还可连续监测挥发性脂肪酸(Volatile fatty acids, VFAs)及有机酸浓度,为发酵稳定性调控和生化产甲烷潜力预测提供实时信息<sup>[103-104]</sup>。

拉曼光谱因水干扰小,在复杂液相体系中具有独特优势。在线拉曼光谱结合机器学习已成功应用于乙醇发酵过程葡萄糖和乙醇浓度的实时监测;拉曼镊子技术可实时监测单个酵母细胞对乙醇发酵的反应<sup>[105-106]</sup>。

LIBS 能够实时监测热解、燃烧等热化学转化过程中碱金属元素释放及灰分组成变化,为燃烧过程调控和设备结渣预测提供支持<sup>[107-108]</sup>。

近年来,高光谱成像和共聚焦拉曼成像<sup>[102]</sup>逐渐应用于生物质转化过程研究。高光谱成像可动态监测堆肥过程品质演变,通过同步获取化学组成及空间分布信息,实现了由传统点检测向动态可视化监测的发展,为深入揭示生物质转化机理提供了新

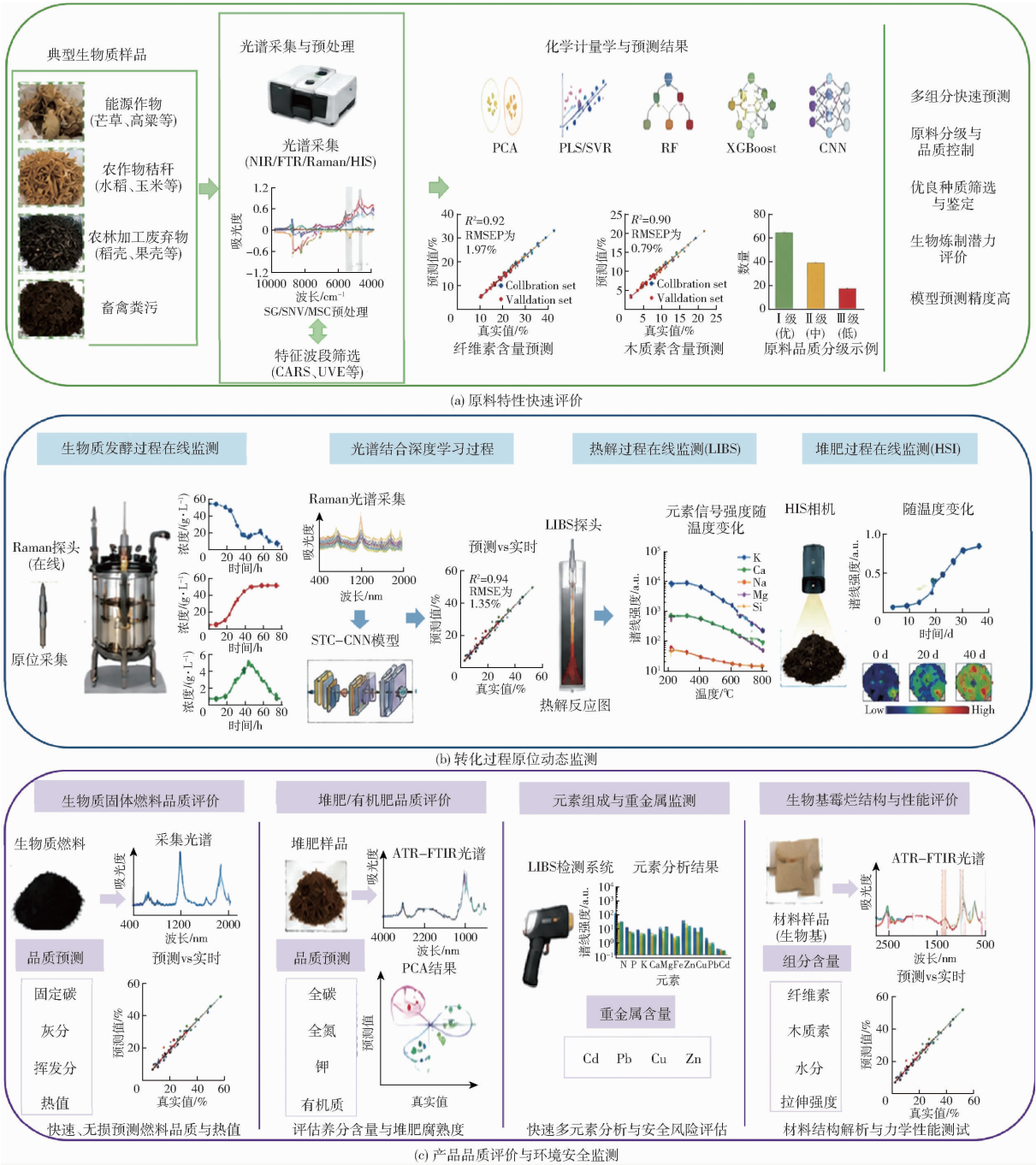


图 5 生物质高值化中的光谱技术应用场景

Fig. 5 Applications of spectroscopic techniques in value-added processing of biomass

的研究手段。基于共聚焦拉曼成像首次建立了秸秆在预处理过程中细胞尺度木质素脱除动力学模型，为揭示细胞壁顽抗机制及优化木质纤维生物质预处理工艺提供了重要依据<sup>[21,109-111]</sup>。

过程原位监测通常面临物料状态波动和环境条件变化的双重影响。发酵、厌氧消化及热化学转化过程中，温度、压力、流体流动状态、气泡、悬浮颗粒及反应产物浓度均处于动态变化状态，探头表面还可能发生沉积或污染，这些都会影响分析的可靠性和稳定性<sup>[112-115]</sup>。实际在线监测需要将稳定采样界面、探头防污染设计、过程参数同步记录以及动态模

型校正结合起来。

3.2.3 产品品质评价

农业生物质高值化利用不仅关注转化效率，还需对最终产品品质进行评价。光谱技术凭借快速、多指标同步检测的特点，在生物燃料、生物炭、有机肥及堆肥产品质量控制方面得到了广泛应用。

近红外光谱已用于快速评价生物质颗粒燃料、青贮饲料、堆肥及有机肥中的水分、有机质、总碳、总氮含量及碳氮比等指标，为产品质量控制或分级提供依据<sup>[116-117]</sup>。

拉曼光谱主要应用于生物炭及碳材料品质评

价,通过分析 D 峰与 G 峰等特征信号,可有效表征碳材料石墨化程度、芳香化水平及结构有序性,为热解工艺优化及碳材料性能评价提供依据<sup>[118-119]</sup>。中红外光谱则常用于生物基材料及木质纤维素衍生物官能团变化分析,为生物质材料改性及化学品制备提供理论支持。

LIBS 在产品质量控制和环境安全评价中具有独特优势。其不仅能够同步测定 N、P、K 等营养元素,还可同步快速检测 Cd、Pb、Cu、Zn 等重金属元素,广泛应用于畜禽粪污堆肥、有机肥及土壤改良材料的品质评价与环境风险监测<sup>[116]</sup>。

光谱成像能够实现生物质颗粒商品组成均匀性分析及缺陷识别,为产品智能分级和在线质量控制提供了新的技术支撑<sup>[120-122]</sup>。

总体来看,光谱技术已贯穿农业生物质高值化利用的原料特性评价、过程监测及产品品质检测全过程,并逐渐由单一指标检测向多源信息融合、多参数同步分析和智能决策支持发展,为农业生物质资源高效利用提供了重要技术保障。

### 3.2.4 耦合炼制过程中的光谱反馈与智能调控

在光-热-储及光-生-热-储耦合炼制过程中,光谱技术的价值不仅在于获得某一时刻的物料组成,更在于将物料状态转化为可用于过程控制的数字化信息。通过将光谱检测结果与温度、压力、太阳辐照度、储热状态、进料速率及产物负荷等过程变量进行融合,可构建面向多能流协同运行的状态感知与反馈控制体系。

然而,目前该方向的研究仍处于起步阶段。在原料端,光谱与机器学习结合可实现连续进料性质的快速识别。已有研究将 LIBS 与机器学习模型结合,在输送带动态条件下实时预测生物质及混合燃料的高位发热量、灰分、固定碳、硫及灰分氧化物等关键气化参数,并表现出接近实验室分析的预测能力<sup>[123]</sup>。基于 NIRS 技术,通过模块设计及开窗位置选择,已有研究开发了秸秆成分在线检测模块,嵌入已构建的秸秆成分预测模型,实现了对产线上秸秆炭化成分的在线检测<sup>[124]</sup>。该模式可根据原料品质变化提前调整进料比例和气化操作参数,为耦合炼制系统提供反馈控制信号。

在反应端,NIR 和 Raman 可用于关键中间产物及反应状态的在线监测。针对厌氧消化过程,有研究利用 NIR 对乙酸、丙酸和丁酸进行定量预测<sup>[125]</sup>;进一步在 3.3 m<sup>3</sup> 中试厌氧消化装置循环回路中开展 8 个月在线监测,实现了挥发性固体和 VFA 动态变化的连续表征<sup>[126]</sup>。对于超临界水气化过程,原位 Raman 已被用于高温高压条件下反应化学过程

监测,为反应路径解析和反应器优化提供了依据,但高温区定量测量及流通池长期稳定运行仍是工程应用的主要限制<sup>[127]</sup>。原位红外光谱技术通过实时监测反应过程中物质随反应条件的变化,跟踪反应体系结构和官能团的演变,深入研究了生物质热解、化学催化和电催化转化等方面的反应路线和反应机制<sup>[128]</sup>。这些研究表明,光谱可由“过程检测”进一步转化为反应器运行状态的反馈信号。

在产物端,光谱检测还可连接后续能源利用单元。已有生物质气化研究采用激光光谱在线分析 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 及焦油等组分,为气化过程调节以及微型燃气轮机、燃料电池等后续设备的稳定运行提供气体品质信息<sup>[129]</sup>。由此可形成从原料性质识别、反应状态监测到产物品质评价的全过程信息链。

总体而言,目前在“原料感知—反应监测—产物评价—动态调控”等方面都已有初步研究,对于光-热-储及光-生-热-储高值化耦合炼制系统,未来可进一步融合光谱传感、环境补偿和智能控制算法,构建“光谱感知—状态预测—能量调度—工艺控制”闭环,提高复杂变工况下系统运行的稳定性和能量利用效率。

## 3.3 光谱速测设备发展现状

随着农业生物质高值化利用由实验室研究向规模化、连续化和智能化生产发展,光谱检测装备也逐步由“实验室模型构建”向“现场状态感知”和“在线闭环控制”演进。其装备形态可划分为实验室光谱分析仪器、便携式现场速测设备和工业在线检测系统 3 个层次。3 类设备分别对应高值化炼制过程中的模型建立、原料现场评价和连续过程控制需求。

### 3.3.1 实验室光谱分析仪器

实验室光谱仪器具有波长范围宽、分辨率高、信噪比高和环境条件稳定等特点,是农业生物质光谱分析方法建立和定量模型开发的重要基础。目前,近红外光谱、傅里叶变换中红外光谱、拉曼光谱和激光诱导击穿光谱均已形成成熟的实验室分析平台。

近红外实验室仪器主要采用傅里叶变换或光栅分光结构,可配备积分球、漫反射附件及光纤探头,实现粉末、颗粒、液体及块状样品的高精度检测,是农业生物质组成分析和定量模型建立的主要平台<sup>[130-131]</sup>。LIBS 实验室系统通常配置高能激光器、高分辨率光谱仪和二维移动平台,可实现农业生物质中营养元素及重金属元素的快速定量分析<sup>[132]</sup>。

总体而言,实验室仪器具有检测精度高、光谱信息丰富和模型稳定性好的优势,是光谱技术方法开发、标准建立及模型迁移的重要基础,但设备成本较

高、体积较大,对检测环境要求严格,难以满足农业生产现场快速检测需求。

3.3.2 便携式现场速测设备

近年来,随着微型光谱器件、微机电系统(Micro-electro-mechanical systems, MEMS)技术和微型光机电系统的发展,便携式光谱设备已成为农业生物质现场快速检测的重要发展方向。相比实验室仪器,便携式设备具有体积小、重量轻、操作简单和检测速度快等特点,可直接应用于田间、原料堆场、养殖场及运输现场,实现农业生物质性质的即时评价,目前便携式设备主要以近红外光谱和拉曼光谱为主。

对于近红外光谱,除了将通用便携式近红外光谱仪用于秸秆、水果加工废弃物、畜禽粪污及堆肥产品中水分、有机质、纤维组成及养分指标的现场快速检测之外<sup>[133]</sup>,大量专用便携式近红外设备越来越受到关注,比如中国农业大学开发的“多场景养殖粪污(肥)全养分同步速测系统”,攻克了养殖粪污(肥)指纹信息微型近红外光谱传感器、光谱标准化和专用定标模型云共享等关键技术,可实现粪污(肥)现场实时、全养分同步快速分析(图6)<sup>[134]</sup>。此外,为降低便携式设备定标模型构建压力,研究者通过直接标准化(DS)、分段直接标准化(PDS)及典型相关分析(CCA)等模型迁移方法,实现了实验室模型向便携式设备的有效迁移,有利于便携式设备的推广应用<sup>[135]</sup>。



图6 多场景养殖粪污(肥)全养分同步速测系统  
Fig.6 Multi-scenario synchronous rapid testing system for total nutrient analysis of livestock manure (fertilizer)

便携式拉曼光谱仪近年来也逐渐应用于现场物质鉴别及发酵过程检测。由于拉曼光谱受水分干扰较小,在液态发酵体系和生物质液体样品分析中具有较好的应用潜力<sup>[136]</sup>。与此同时,手持式 LIBS 设

备能够实现全元素现场同步检测,为农业生物质环境安全评价及资源化利用提供技术手段<sup>[137]</sup>。

总体来看,便携式设备有效缩短了检测周期,提高了现场决策效率。然而,由于受光谱范围、分辨率及环境因素影响,其检测精度仍低于实验室仪器,模型迁移、环境补偿及智能校正仍是当前研究的重要方向。

3.3.3 在线检测系统

在线检测系统代表了农业生物质光谱检测技术产业化应用的发展方向。与离线检测相比,在线系统可将光谱传感器直接集成于输送带、反应器或发酵装置,实现关键质量指标的连续监测,并与工业控制系统联动,为生产过程优化提供实时数据支持。

目前,近红外在线检测技术发展最为成熟。在生物质发电领域,近红外在线系统已实现输送带上生物质燃料含水率、灰分含量、挥发分含量及热值等指标的实时预测,为燃料配比优化和锅炉稳定运行提供数据支持<sup>[138-139]</sup>;在生物燃料生产过程中,近红外在线分析仪结合浸入式光纤探头,可连续监测乙醇、葡萄糖、有机酸及挥发性脂肪酸等关键参数,实现发酵过程智能调控<sup>[140-141]</sup>。在堆肥及厌氧发酵过程中,在线近红外系统还能够实时评价腐熟度及含水率、碳氮比等关键发酵参数,提高生产过程控制水平<sup>[142]</sup>。

除近红外光谱外,高光谱成像在线检测系统近年来也逐渐应用于农业生物质智能分选和品质分级<sup>[143]</sup>。相比传统点检测,高光谱成像能够同步获取样品化学组成及空间分布信息,实现复杂非均质物料的在线识别与自动分选。在线拉曼光谱及 LIBS 检测技术也开始应用于生物质转化过程及元素组成实时分析,但由于设备成本较高、系统稳定性要求较高,目前仍主要处于实验研究和示范应用阶段<sup>[144-145]</sup>。

从工程应用角度看,工业在线系统通常需要配置防尘罩、保护窗口、气幕或压缩空气吹扫、恒温结构以及可维护的流通池或探头接口,并通过定期暗/白参考校准和光学状态监测降低长期漂移风险。

随着工业物联网、边缘计算及人工智能的发展,在线光谱检测系统正逐步由单一指标监测向多参数协同分析、自适应模型更新和智能决策支持发展<sup>[146-147]</sup>。

综上所述,农业生物质光谱速测设备已形成实验室分析仪器—便携式现场速测设备—工业在线检测系统三级技术体系。其中,实验室仪器支撑机理研究和模型建立,便携式设备满足现场快速检测需

求,而在线检测系统推动农业生物质高值化利用向连续化、智能化方向发展。未来,随着微型光谱器件、多模态信息融合、人工智能等技术的发展,光谱检测装备将为农业生物质资源高效利用提供更加精准、高效的技术支撑。

## 4 当前挑战与未来展望

### 4.1 农业生物质高值化耦合炼制技术与装备

我国农业生物质高值化利用技术经多年研发和工程化验证,在耦合炼制、多联产等领域已取得系列突破,产业化规模持续扩大。然而,整体技术成熟度仍与产业化需求不匹配,加上经济性、政策保障及基础设施等方面的瓶颈,关键环节的技术短板已成为制约大规模产业升级的核心障碍。

#### 4.1.1 农业生物质高值化耦合炼制技术的挑战

##### (1) 耦合炼制系统的集成与调控难度大

耦合炼制系统的核心,是实现不同能量形式、不同转化技术路径之间的高效协同匹配,但国内现有技术路径在集成度、精准调控度两个层面,仍存在明显短板。首先,多能流耦合的匹配性不足。当前主流的“光-热-储耦合技术”与“光-生-化-储耦合炼制”系统,在能量梯级利用的匹配性、精准性上仍存在明显不足。太阳能等可再生能源存在波动性、间歇性特征,难以持续稳定地提供生物质转化所需的高品质能量,导致部分工艺的反应温度、反应压力的稳定性控制不足,直接降低了转化效率;而目前的技术方案,通常采用补充化石能源的方式来满足能量缺口,变相增加了项目的碳排放量,降低了项目的环保效益。其次,多相反应过程的调控精度不足。生-化耦合炼制技术的核心难点,是实现生物转化过程与热化学转化过程的高效衔接、条件优化,以及反应过程中的物质流、能量流的动态精准匹配。生物转化通常在常温、常压的温和条件下进行,热化学转化则需要高温、高压的苛刻环境下进行,二者的反应参数差异巨大,导致两个环节之间的衔接效率偏低;同时,耦合系统的整体反应机制和转化过程,存在多相共存、多反应耦合的复杂特性,现有技术手段对反应过程中物质流、能量流的动态精准匹配能力不足,往往会导致副产物增加、产物收率降低。最后,多联产系统的灵活性不足。当前国内的耦合炼制技术,大多是针对单一原料品种、固定产物设计的,存在明显的原料依赖性、产物路线刚性问题。当原料的来源、种类发生变化,或市场对产物品种的需求发生改变时,部分产业项目难以在低成本下快速调整工艺参数或生产流程,难以实现产物的灵活切换,抗风险能力偏弱。

##### (2) 原料预处理及专用装备技术短板明显

农业生物质原料具有分布分散、季节性供应、物理形态差异大、成分复杂多变的固有特征,其收集、运输、存储及预处理成本占项目总生产成本的比例较高,这一行业共性难题,缺少技术层面的有效破解方案,成为制约产业发展的关键障碍。首先,原料预处理技术成熟度不足。生物质原料的预处理效果,直接决定了后续转化过程的效率和产物收率。目前国内部分技术路径,在预处理环节仍存在明显短板。例如,在秸秆类生物质原料的热解/气化工艺中,传统的机械筛分、水洗等去杂预处理技术效果有限,原料中含有的氯、钠等微量元素,以及泥沙、碎石等机械杂质,难以被有效脱除;在热化学转化过程中,这些杂质容易在反应器内的高温金属壁表面发生黏结、腐蚀,或在后续的合成气净化环节中沉积,导致设备使用寿命缩短,增加了项目的运行维护成本。其次,核心装备的工程化能力不足。尽管已经突破了大部分耦合炼制技术的瓶颈,但部分核心装备,仍缺乏专门针对生物质原料特性的大型化、长周期、高可靠性的工业级应用验证,难以支撑大规模产业化项目的建设。以热解/气化反应器为例:现有流化床反应器的内部高温防结焦、防堵塞结构设计,缺少长期运行的可靠性验证;合成气净化环节的高温除尘、焦油裂解核心部件,制造精度、耐磨耐高温性能与进口装备相比存在差距,连续运行时间普遍较短,故障发生率较高;部分项目采用的耦合炼制装备,集成度相对较低,造成整个工艺路线的热能损失较大,转化效率偏低。最后,装备的适配性不足。现有产业装备的设计制造,通常针对特定种类的原料进行定制化开发,缺少适配多种类、多组分原料的标准化、模块化设计方案。当原料来源、组分特征出现一定波动时,往往需要对设备的运行参数甚至核心结构进行针对性调整,才能匹配工艺要求,这直接增加了项目的运行难度和运维成本。

##### (3) 高值化产物转化效率与品质有待提升

目前在农业生物质高值化产物的生产技术领域,普遍存在转化效率低、产物品质差、附加值低的短板,难以支撑产业的经济性提升。首先,生物转化环节的效率偏低。以厌氧发酵制备生物天然气为例:国内现有工程应用水平的技术路径,整体工艺的原料转化效率普遍偏低,通常 1 t 秸秆的生物天然气产率,仅能达到约 200 m<sup>3</sup>。但放大到工业化项目中,受原料预处理效果、反应器内温度分布、搅拌均匀程度等因素的影响,产气率会出现显著衰减,难以在工程端实现。其次,热化学转化环节的选择性和稳定性不足。以生物质气化制合成气为例:国内现有工

业级技术路径,产出的合成气中有效成分的体积分数普遍偏低,不足 70%;而 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等非有效成分的占比较高,导致后续合成环节的原料消耗显著增加;另外,合成气中的焦油含量波动较大,容易在后续的净化、合成环节中沉积,造成管道堵塞、合成催化剂快速失活等问题,增加了运行维护成本。最后,高值化产物的附加值不足。国内生物质高值化利用的产物布局,以传统的燃料、肥料、少量材料化产物为主,这类产物的附加值普遍偏低,难以覆盖全产业链成本;而高附加值的高端碳材料、精细化学品、高端平台化合物类产物,由于技术成熟度不足,整体占比极小;同时,部分高值产物的生产提纯流程过长,需要经过多步催化、分离、提纯环节,导致综合加工成本居高不下,产业经济效益难以保障。

4.1.2 农业生物质高值化耦合炼制技术未来展望

农业生物质高值化利用是一项复杂的系统工程,对于我国能源转型、双碳目标实现、乡村振兴循环农业发展具有不可替代的作用。针对当前产业发展面临的突出瓶颈,需从耦合炼制技术集成、核心装备国产化优化、转化效率提升 3 个维度发力,构建具备中国特色的产业技术体系。

首先,统筹耦合炼制技术路线的系统集成优化。面向产业规模化长期发展的重大技术需求,依托国内头部企业、优势科研院所及高校的创新资源,建立长期稳定的产学研用协同创新机制,集中行业优质研发资源,重点突破耦合炼制、多联产工艺的系统化集成技术,以及物质流、能量流的精准匹配技术,实现光、机、电、热等不同能量形式的协同互补利用,以及生物转化与热化学转化过程的高效衔接、条件优化,强化对转化过程中物质流和能量流的动态精准匹配能力,最大化提升全产业链的能量利用效率。同时,重点开发能够灵活适配不同原料、不同产物需求的柔性耦合工艺技术路线,通过模块化组合设计,实现工艺参数的快速调整,提升多联产系统的抗风险能力,适应市场的动态变化需求。

其次,加快核心装备的国产化研发与工程化放大。以产业化项目的实际应用场景为标准,重点开发适配大规模、多组分原料预处理需求的专业化装备,以及高效、低成本、耐腐蚀的热化学转化反应器及合成气净化等核心装备;优化装备内部的流场、温度场和应力场分布,提升核心装备的通用性、适配性和运行可靠性,降低核心装备的制造及运行成本;充分利用 3D 打印、数字孪生、人工智能等新一代数字化技术,对装备的运行参数、工作状态进行实时数字化监控,实现工艺运行的优化调整,提升装备的整体工艺技术水平 and 运行稳定性。在这一过程中,要同

步建立工程化验证平台,对核心装备开展长周期、高负荷的工业化验证,确保装备在实际工程场景中能够实现稳定运行。

最后,着力提升全流程转化技术效率和产物选择性。重点突破高效催化、精准转化、产物定向分离和提纯等技术细节,优化耦合炼制工艺的反应参数,提升生物转化、热化学转化环节的反应速率和原料转化率;开发高选择性、高活性、长寿命、抗中毒的新型催化剂及专用发酵菌株,提升转化过程对目标产物的定向转化效率;优化反应工艺参数,抑制副反应的发生,提升高值产物的收率和品质,显著提升产物的附加值。

4.2 高值化转化过程农业生物质特性光谱速测技术与装备

高值化转化过程农业生物质特性光谱速测技术与装备面临的挑战与展望如图 7 所示。

4.2.1 通用模型的建立

农业生物质光谱速测因农业生物质类型(作物品种、产地、收获期)多样、样品制备不统一(粉碎粒度、含水率)、光谱采集设备繁多且参数设置多样等因素的影响,模型的通用性面临巨大挑战。此外,光谱速测是一项间接测量技术,其检测精度除了受技术本身的影响之外,用于赋值的传统实验室分析方法的重复性、重现性精度也至关重要。

为了解决上述问题,协作数据生态系统的构建至关重要。这需要建立以共识为基础的最低报告标准,包括原料种源与处理信息、传感器校准协议和严格的模型验证方案,以及开发涵盖不同作物种类、不同地域和不同储存条件的开放获取基准光谱-组成数据集。这种协调将把目前分散的研究转变为互联的知识网络,推动稳健、可推广的生物质光谱分析方法的形成。

4.2.2 复杂基质与复杂环境干扰的协同消除

农业生物质现场及在线光谱检测面临的干扰并非单一来源,而是物料基质与工程环境共同作用的结果。水分、颗粒大小、堆积密度和组织结构差异会改变光的吸收、散射及有效采样体积;温度、湿度波动可引起样品光谱特征及仪器响应漂移;输送带粉尘、反应器沉积物及生物膜则可能污染光学窗口,导致光强衰减和基线偏移。尤其对于未经充分均质化的秸秆、颗粒燃料和粪污等非均质物料,局部采样难以代表整体物料特性。

现有干扰校正方法各具适用边界。针对温度和水分变化,可采用外部参数正交化(EPO)、直接标准化(DS)、分段直接标准化(PDS)及环境变量显式建模等方法,其中 EPO 已被用于同时削弱生物质温度

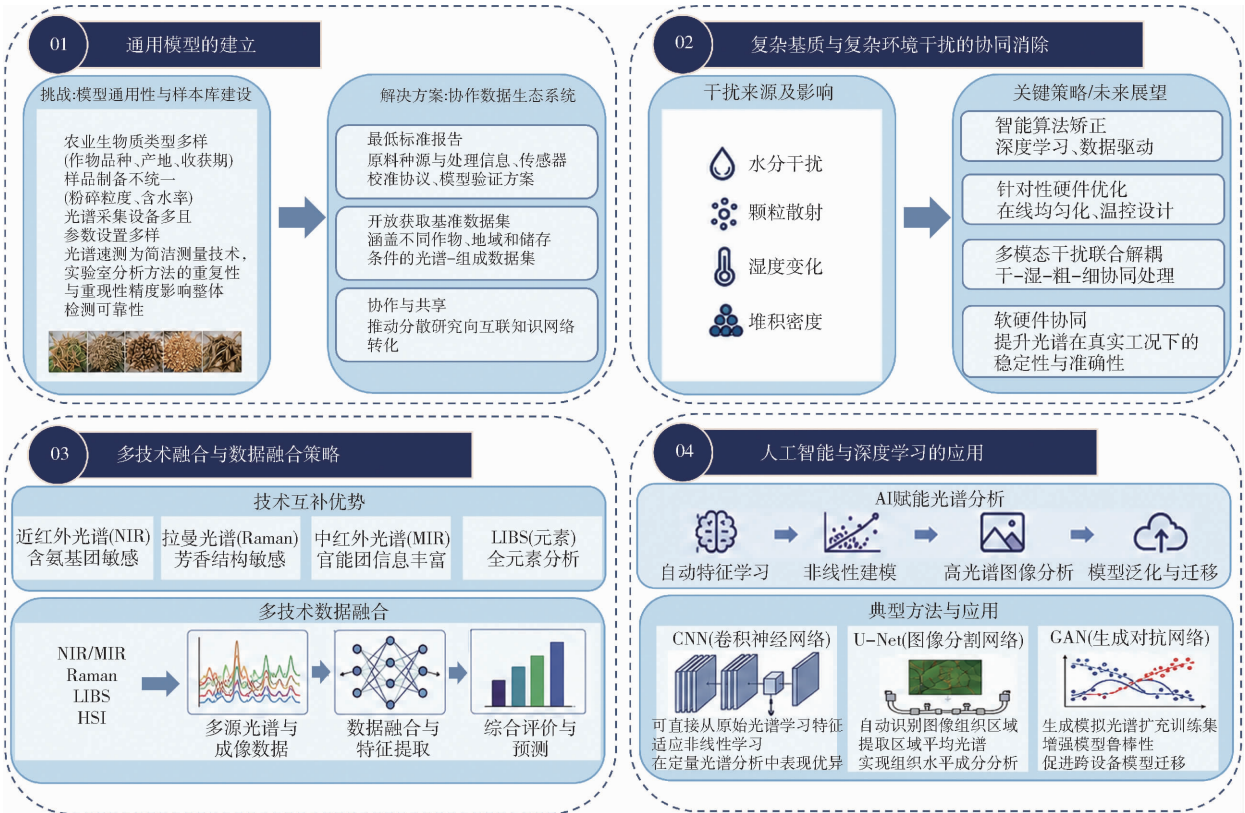


图 7 生物质高值化中光谱技术挑战与展望图示

Fig. 7 Illustration of spectroscopic technology challenges and prospects in high-value utilization of biomass

和水分变化对热值 NIR 预测模型的影响。针对颗粒散射和粒径差异, MSC、SNV 及导数等光谱预处理能够在一定程度上削弱散射效应, 但面对多峰粒径分布、堆积密度变化及物料空间非均质性时, 其校正能力仍存在明显局限。因此, 应在定标阶段尽量覆盖不同含水率、粒径、温度和物料状态。

在硬件层面, 应从“减少干扰进入”出发设计检测接口, 而非单纯“补偿干扰”。输送带检测可通过遮光结构、防尘罩、压缩空气吹扫及定期参比校准降低粉尘和环境光影响; 反应器在线检测则可采用恒温流通池、可更换保护窗口及自清洁探头, 降低沉积和污染造成的测量漂移。已有研究表明, 探头和窗口污染会直接造成光谱偏差, 因此自清洁结构、合理探头布局及污染状态识别均是长期在线运行的重要保障。

在算法层面, 研究重点正由传统光谱预处理转向校准迁移、域适应和动态模型更新。针对不同仪器、温度及现场环境造成的光谱分布变化, 引入半监督学习、对抗域适应及生成式光谱增强等方法, 以降低目标域标注样本需求并提高跨设备、跨环境的预测能力。

综上, 未来农业生物质光谱速测应建立“硬件抑制—光谱校正—模型迁移—状态监测”的协同机制: 通过采样接口和干扰控制降低干扰源, 通过光谱

预处理和外部参数校正消除系统偏差, 通过迁移学习和域适应应对跨设备及跨工况分布变化, 并结合不确定度评估实现模型健康监测。只有将传感器工程设计与数据驱动算法协同起来, 才能提高光谱模型在真实工况下的长期稳定性和可维护性, 推动光谱速测由实验室“可测”走向工业现场“可用”。

4.2.3 多技术融合与数据融合策略

单一光谱技术的信息有限, 难以全面表征生物质的复杂组成和结构。例如, 近红外光谱对含氨基团敏感, 拉曼光谱对芳香结构敏感, LIBS 可对全元素进行分析, 而成像则可以呈现空间结构信息。将多种光谱及成像技术融合可获取更全面的生物质信息, 比如: 近红外与中红外光谱的融合, 中红外光谱提供的官能团信息可补充近红外光谱的不足; 将拉曼光谱与激光诱导击穿光谱相结合可同时获取生物质的分子指纹信息和全元素信息, 有利于全面评估生物质的组成和潜在环境风险。

然而, 在多模式传感技术的有效集成方面仍面临重大挑战, 尤其是在硬件同步与数据对齐层面。融合光谱的互补信息虽理论上具有优势, 但不同传感器以各异的分辨率与采集速率运行, 在异质数据流的时间和空间配准上存在实际障碍, 现有融合策略往往难以充分应对。未来的硬件发展应优先研发具备本机同步能力的集成传感器阵列, 算法研究则

需聚焦于能够容忍模态间不完全对齐或部分缺失的自适应融合架构。

#### 4.2.4 人工智能与深度学习的应用

近年来,以深度学习为代表的人工智能技术在光谱分析领域展现出强大的潜力。深度学习算法可直接从原始光谱中自动学习特征,避免了传统化学计量学中繁琐的预处理和特征筛选步骤,且在处理非线性关系和复杂体系时往往表现出更好的性能。

卷积神经网络(Convolutional neural network, CNN)是最常用的深度学习模型之一。研究表明, CNN 在近红外光谱定量分析中的表现可与偏最小二乘回归相媲美甚至更优,尤其在处理非线性光谱响应和大样本数据时优势明显,可有效提取光谱特征。对于光谱图像数据, U-Net 等图像分割网络可用于自动识别图像中的不同组织区域,并提取各区域的平均光谱,实现生物质组织水平的成分分析。例如,利用 U-Net 可自动分割玉米秸秆横切面图像中的维管束、厚壁组织和薄壁组织区域,分别提取各区域的光谱,研究不同组织的化学成分差异,为理解生物质的组织特异性转化行为提供依据。

此外,在数据增强和模型迁移方面,深度学习也展现出独特价值,如生成对抗网络算法。通过生成不同条件下的模拟光谱,可有效扩充训练集,增强模型对现场环境波动的鲁棒性。基于对抗性域自适应的模型转移技术,无需标准样品即可消除不同仪器间的光谱差异,为便携式设备共享实验室高精度模型提供了新思路。未来深度学习的发展重点不是简单提升预测精度,而是解决跨区域、跨季节和跨设备条件下模型泛化能力和增加模型的可解释性。

#### 4.2.5 面向农业生物质高值化耦合炼制的光谱速测技术

光谱速测技术可有效适配农业生物质高值化耦合炼制工艺流程,能够在原料预处理、反应器原位反应、产物品质管控等关键节点实现实时检测与反馈调控,为生物质高值化转化过程优化提供重要技术支撑。但从工程应用与产业化实践来看,光谱检测

技术与耦合炼制工艺的深度融合仍处于发展阶段,极端工况适配性、预测模型通用性、工艺智能耦合度等方面仍存在显著短板。结合农业生物质高值化转化技术的智能化、集成化、产业化发展趋势,未来光谱速测技术与耦合炼制工艺的融合创新,应主要聚焦专用装备研发、模型算法优化、智能调控升级等方向。

(1)研发极端工况适配的专用光谱检测装备,提升设备工业服役稳定性。针对超临界水气化等高温、高压、高污染工况,重点开发耐高温高压、耐腐蚀、抗污染的创新型光学窗口材料与自清洁涂层,优化内嵌式光谱探头与一体化光路结构设计,实现检测模块长周期免维护连续运行。推进光谱检测单元与反应器、输送系统、储能设备的模块化集成,开发小型化、标准化、低成本的工业级专属装备,适配规模化工程应用需求。

(2)构建机理驱动的多模态光谱预测模型,提升算法通用性与可解释性。将生物质热转化、气化反应的热力学与动力学机理引入光谱解析过程,建立“机理约束+数据赋能”的耦合预测模型,降低模型对海量标注样本的依赖,提升对多品类生物质、多工况场景的适应性与迁移能力。搭建标准化多模态光谱融合算法体系,统一近红外、拉曼、原位红外光谱数据的降噪、配准、校正与特征融合规则,实现原料物性、反应中间体与终端产物的全组分、全进程精准检测。

(3)深化光谱数据与多能流系统耦合,实现全流程智能闭环调控。依托数字孪生、人工智能与强化学习技术,构建基于实时光谱检测数据的动态调控平台,利用光谱信号实时感知原料物性波动、工况偏移与产物品质变化,实现运行状态实时诊断与趋势预判。建立“检测-分析-调控-反馈”全链路协同机制,将光谱数据深度嵌入光-热-储等多能流调度系统,动态优化进料速率、反应温压、光热输入、储释能配比等核心参数,实现多能量流高效协同与转化工艺全局最优控制。

### 参 考 文 献

[1] El-azazy M, Bashir S, Liu J L, et al. Lignin and lignocellulosic materials: a glance on the current opportunities for energy and sustainability[M/OL]//Advances in sustainable energy: policy, materials and devices. Cham: Springer International Publishing, 2021: 621 - 652. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-74406-9-22>.

[2] 吴何来,李汪繁. 碳定价背景下燃煤掺烧能源植物技术经济性分析[J]. 能源工程, 2025, 45(6): 92 - 98.  
Wu Helai, Li Wangfan. Techno-economic analysis of co-firing for coal and energy crops under the background of carbon pricing [J]. Energy Engineering, 2025, 45(6): 92 - 98. (in Chinese)

[3] 马荣辉,杨武杰,于蕾,等. 山东省作物秸秆和畜禽粪尿有机肥资源现状及替代化肥潜力分析[J]. 中国农业科学, 2024, 57(4): 721 - 739.  
Ma Ronghui, Yang Wujie, Yu Lei, et al. Current status of organic fertilizer resources from crop straw and livestock manure and their potential for replacing chemical fertilizers[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(4): 721 - 739. (in Chinese)

- [4] 张晓庆,王梓凡,参木友,等. 中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析[J]. 中国农业大学学报,2021,26(9):30–41.  
Zhang Xiaoqing, Wang Zifan, Can Muyou, et al. Output and comprehensive utilization status of crop straws in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2021,26(9):30–41. (in Chinese)
- [5] 王汀凯. 农业废弃物生物质高值化转化技术研究[J]. 能源与节能,2025(增刊1):67–70.  
Wang Dingkai. Research on high-value conversion technology of agricultural waste biomass[J]. Energy and Energy Conservation, 2025(S1):67–70. (in Chinese)
- [6] 牛文娟. 主要农作物秸秆组成成分和能源利用潜力[D]. 北京:中国农业大学,2015.  
Niu Wenjuan. Composition and energy utilization potential of major crop straws[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [7] 吕腾腾,徐鹏飞,朱小玲,等. 鸡粪罐式好氧堆肥过程对重金属有效性的影响[J]. 齐鲁工业大学学报,2022,36(3):1–7.  
Lv Tengting, Xu Pengfei, Zhu Xiaoling, et al. Effects of tank aerobic composting of chicken manure on heavy metal availability[J]. Journal of Qilu University of Technology, 2022,36(3):1–7. (in Chinese)
- [8] 卢思,陈晓丽,梁正,等. 原位红外光谱技术在生物质转化研究中的应用[J]. 光谱学与光谱分析,2025,45(10):2701–2710.  
Lu Si, Chen Xiaoli, Liang Zheng, et al. Application of in-situ infrared spectroscopy in biomass conversion research[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2025,45(10):2701–2710. (in Chinese)
- [9] Skvaril J, Kyprianidis K G, Dahlquist E. Applications of near-infrared spectroscopy (NIRS) in biomass energy conversion processes: a review[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2017,52(8):675–728.
- [10] Ewanick S M, Thompson W J, Marquardt B J, et al. Real-time understanding of lignocellulosic bioethanol fermentation by raman spectroscopy[J]. Biotechnology for Biofuels, 2013,6:28.
- [11] Klaverdijk M, Ottens M, Klijn M E. Single compound data supplementation to enhance transferability of fermentation specific raman spectroscopy models[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2025,417:1873–1884.
- [12] Sepman A, Wennebro J, Fernberg J, et al. Following fuel conversion during biomass gasification using tunable diode laser absorption spectroscopy diagnostics[J]. Fuel, 2024,374:132374.
- [13] 周程程,赵立欣,孟海波,等. 生物质热解产物在线监测技术研究进展及发展方向[J]. 沈阳农业大学学报,2017,48(4):505–512.  
Zhou Chengcheng, Zhao Lixin, Meng Haibo, et al. Research progress and development trend of online monitoring technology for biomass pyrolysis products[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017,48(4):505–512. (in Chinese)
- [14] 梁浩,黄圆萍,沈广辉,等. 在线旁路近红外实时监测粪污厌氧发酵挥发性脂肪酸含量[J]. 农业工程学报,2020,36(10):220–226.  
Liang Hao, Huang Yuanping, Shen Guanghui, et al. Real-time online bypass near infrared monitoring of volatile fatty acid content in anaerobic fermentation of manure[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(10):220–226. (in Chinese)
- [15] 刘金明,郭坤林,甄峰,等. 基于近红外光谱的沼液挥发性脂肪酸含量快速检测[J]. 农业工程学报,2020,36(18):188–196.  
Liu Jinming, Guo Kunlin, Zhen Feng, et al. Rapid detection of volatile fatty acid content in biogas slurry based on near infrared spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(18):188–196. (in Chinese)
- [16] Putra L A, Kostler M, Grundwurm M, et al. State estimation of a biogas plant based on spectral analysis using a combination of machine learning and metaheuristic algorithms[J]. Applied Energy, 2025,377:124762.
- [17] Dhal S B, Kar D, Capareda S. Intelligent valorization: integrating AI, imaging, and sustainability for next-generation biofuel systems[J]. Global Energy Interconnection, 2026.
- [18] Del Hierro A G, Checa-barrera J L, Moreno-cid J A, et al. Real-time biomass estimation in high-density yeast fermentations using soft sensor modeling[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2026,123:2389–2405.
- [19] Ahmed M W, Singh V, Kamruzzaman M. Near-infrared spectroscopy as a green analytical tool for sustainable biomass characterization for biofuels and bioproducts: an overview[J]. Bioresource Technology, 2025,433:132722.
- [20] 杜娟,安东,夏田,等. 近红外光谱技术检测植物木质素纤维素研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(12):3207–3211.  
Du Juan, An Dong, Xia Tian, et al. Research progress on detection of plant lignin and cellulose by near infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013,33(12):3207–3211. (in Chinese)
- [21] 陈夫山,王高敏,吴越,等. 共聚焦显微拉曼光谱在木质纤维细胞壁预处理中的应用进展[J]. 光谱学与光谱分析,2022,42(1):15–19.  
Chen Fushan, Wang Gaomin, Wu Yue, et al. Application progress of confocal micro-raman spectroscopy in pretreatment of lignocellulosic cell walls[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022,42(1):15–19. (in Chinese)
- [22] 霍学松,陈瀑,戴嘉伟,等. 微小型近红外光谱仪的应用进展与展望[J]. 分析测试学报,2022,41(9):1301–1313.  
Huo Xuesong, Chen Pu, Dai Jiawei, et al. Application progress and prospect of miniature near infrared spectrometers[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2022,41(9):1301–1313. (in Chinese)
- [23] Bai J, Dong D. Observing and analyzing living plants using handheld and miniaturized raman spectrometers: a review[J].

- TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2025,193: 118437.
- [24] Punia P, Kumar S. A critical review on enhanced bioethanol production from sweet sorghum using nanotechnology[J]. Energy Nexus, 2025,17: 100339.
- [25] Ahmad Dar R, Ahmad Dar E, Kaur A, et al. Sweet sorghum: a promising alternative feedstock for biofuel production[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018,82: 4070 – 4090.
- [26] 李梦扬,张涛,项钰洲,等. 玉米秸秆不同部位化学组成及纤维形态分析[J]. 中国造纸学报,2023,38(2):92 – 97.  
Li Mengyang, Zhang Tao, Xiang Yuzhou, et al. Chemical composition and fiber morphology analysis of different parts of corn straw[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2023,38(2):92 – 97. (in Chinese)
- [27] 赵文霞,杨朝旭,刘帅,等. 典型农作物秸秆组成及燃烧动力学分析[J]. 农业环境科学学报,2019,38(4):921 – 927.  
Zhao Wenxia, Yang Chaoxu, Liu Shuai, et al. Composition and combustion kinetic analysis of typical crop straws[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019,38(4):921 – 927. (in Chinese)
- [28] Bhardwaj A K, Thakur B, Tripathi S K, et al. Recent advances in valorizing agricultural waste: a sustainable approach[J]. Waste and Biomass Valorization, 2026,17: 6429 – 6456.
- [29] Nezafat Z, Dong Y, Nasrollahzadeh M, et al. Recent progress in energy conversion and storage of agricultural waste-derived (carbon/nano)materials: a review[J]. Green Chemistry, 2024,26(21): 10687 – 10717.
- [30] 梁爽,李斌,朱君,等. 光谱分析技术用于畜禽养殖粪污成分检测的研究进展[J]. 中国奶牛,2024(3):50 – 55.  
Liang Shuang, Li Bin, Zhu Jun, et al. Research progress on spectral analysis technology for component detection of livestock breeding manure[J]. China Dairy Cattle, 2024(3):50 – 55. (in Chinese)
- [31] 单英杰,章明奎. 不同来源畜禽粪的养分和污染物组成[J]. 中国生态农业学报,2012,20(1):80 – 86.  
Shan Yingjie, Zhang Mingkui. Nutrient and pollutant composition of livestock manures from different sources[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012,20(1):80 – 86. (in Chinese)
- [32] 吴少博,邢力元,王进朝,等. 农业废弃物资源化利用的国内外研究热点和发展趋势分析[J]. 中国农学通报,2024,40(8):148 – 156.  
Wu Shaobo, Xing Liyuan, Wang Jinchao, et al. Analysis of domestic and international research hotspots and development trends of agricultural waste resource utilization[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024,40(8):148 – 156. (in Chinese)
- [33] 刘贤,韩鲁佳,杨增玲,等. 近红外光谱快速分析青贮饲料 pH 值和发酵产物[J]. 分析化学,2007(9):1285 – 1289.  
Liu Xian, Han Lujia, Yang Zengling, et al. Rapid analysis of pH and fermentation products of silage by near infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2007(9):1285 – 1289. (in Chinese)
- [34] 邵书静,张仁和,史俊通,等. 近红外光谱法测定玉米秸秆饲用品质[J]. 农业工程学报,2009,25(12):151 – 155.  
Tai Shujing, Zhang Renhe, Shi Juntong, et al. Determination of feeding quality of corn straw by near infrared spectroscopy [J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(12):151 – 155. (in Chinese)
- [35] 薛俊杰,韩鲁佳,杨增玲,等. 玉米秸秆饲料营养成分 NIRS 在线检测[J]. 农业机械学报,2016,47(7):216 – 223.  
Xue Junjie, Han Lujia, Yang Zengling, et al. Online detection of nutritional components in corn straw feed by nirs [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(7):216 – 223. (in Chinese)
- [36] 胡杰,李军涛,隋莉,等. 9 种常用饲料原料生长猪有效能近红外定标模型的构建[J]. 动物营养学报,2023,35(7):4643 – 4658.  
Hu Jie, Li Juntao, Sui Li, et al. Construction of near infrared calibration models for effective energy of 9 common feed ingredients for growing pigs[J]. Acta Animal Nutrition Sinica, 2023,35(7):4643 – 4658. (in Chinese)
- [37] 骆立,孙绘琪,史苏安,等. 基于 NIRS 的农业废弃物堆肥检测研究进展[J]. 中国农业大学学报,2024,29(8):179 – 189.  
Luo Li, Sun Huiqi, Shi Suan, et al. Research progress on agricultural waste compost detection based on NIRS[J]. Journal of China Agricultural University, 2024,29(8):179 – 189. (in Chinese)
- [38] 王晓燕,黄光群,韩鲁佳. 鸡粪工厂化堆肥主要营养成分含量近红外光谱分析研究[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(3):677 – 680.  
Wang Xiaoyan, Huang Guangqun, Han Lujia. Near infrared spectral analysis of main nutrient contents in industrial chicken manure compost[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010,30(3):677 – 680. (in Chinese)
- [39] 李佳芮,钟元,李悦,等. 基于 PLSR 的近红外光谱沼液主要营养成分实时在线检测方法研究[J]. 化学研究与应用, 2023,35(5):1089 – 1094.  
Li Jiarui, Zhong Yuan, Li Yue, et al. Real-time online detection method of main nutrients in biogas slurry by near infrared spectroscopy based on PLSR[J]. Chemical Research and Application, 2023,35(5):1089 – 1094. (in Chinese)
- [40] 李佳芮. 沼液和粪水中养分快速检测方法分析研究[D]. 北京:中国农业科学院,2023.  
Li Jiarui. Study on rapid detection methods of nutrients in biogas slurry and manure wastewater[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023. (in Chinese)
- [41] Wozniak A, Kuligowski K, Świerczek L, et al. Review of lignocellulosic biomass pretreatment using physical, thermal and chemical methods for higher yields in bioethanol production[J]. Sustainability,2025,17(1): 287.
- [42] 陈彦君,戴杰,单军强,等. 我国纤维素乙醇的研究进展和发展趋势[J]. 化工进展,2025,44(5):2541 – 2562.

- Chen Yanjun, Dai Jie, Shan Junqiang, et al. Research progress and development trend of cellulosic ethanol in China[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2025,44(5):2541–2562. (in Chinese)
- [43] Bose L, Chanukya C R, Prabha Lakra C S, et al. Anaerobic digestion of agro and agro-industrial waste for bio-methane production[J]. Journal of the Indian Chemical Society, 2025,102(10): 101966.
- [44] Mehdizadeh M, Omidi A, Matindike R, et al. Agri-waste valorization: pathways to sustainable bioenergy and biochemical innovation[J]. Circular Economy and Sustainability, 2025,5(6): 5247–5277.
- [45] El-Fawal E M, El Naggar A M A, El-Zahhar A A, et al. Biofuel production from waste residuals: comprehensive insights into biomass conversion technologies and engineered biochar applications[J]. RSC Advances, 2025,15(15): 11942–11974.
- [46] Saadon S Z A H, Abdullah N H, Patrick D O, et al. A review on oxidative pyrolysis and oxidative torrefaction: mechanisms, products, kinetics and future directions[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2026,195: 107609.
- [47] Raj T, Chandrasekhar K, Naresh Kumar A, et al. Lignocellulosic biomass as renewable feedstock for biodegradable and recyclable plastics production: a sustainable approach[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022,158: 112130.
- [48] 胡预龙,张如强,李文俊,等. 生物可降解食品包装材料的研究进展[J]. 精细化工,2025,42(6):1211–1220.  
Hu Yulong, Zhang Ruqiang, Li Wenjun, et al. Research progress of biodegradable food packaging materials[J]. Fine Chemicals, 2025,42(6):1211–1220. (in Chinese)
- [49] 杨铮,刘思明,邢磊. 我国生物燃料乙醇产业现状及发展展望[J]. 化学工业,2025,43(4):1–6.  
Yang Zheng, Liu Siming, Xing Lei. Current situation and development prospect of biofuel ethanol industry in China[J]. Chemical Industry, 2025,43(4):1–6. (in Chinese)
- [50] 庄雨婷,王建华,向智艳,等. 半纤维素及其衍生物转化为  $\gamma$ -戊内酯及其动力学研究进展[J]. 化工进展,2022,41(7): 3519–3533.  
Zhuang Yuting, Wang Jianhua, Xiang Zhiyan, et al. Research progress on conversion of hemicellulose and its derivatives to  $\gamma$ -valerolactone and its kinetics[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022,41(7):3519–3533. (in Chinese)
- [51] 高杨,张学鑫,余金生,等.  $\alpha$ -手性三级叠氮化合物的不对称催化合成新进展[J]. 化学学报,2023,81(11):1590–1608.  
Gao Yang, Zhang Xuexin, Yu Jinsheng, et al. Recent advances in asymmetric catalytic synthesis of  $\alpha$ -chiral tertiary azides [J]. Acta Chimica Sinica, 2023,81(11):1590–1608. (in Chinese)
- [52] 朱文卿,郭腾龙,张波. 生物质转化制备含氮化合物研究进展[J]. 中国科学:化学,2025,55(1):50–68.  
Zhu Wenqing, Guo Tenglong, Zhang Bo. Research progress on preparation of nitrogen-containing compounds via biomass conversion[J]. Science China Chemistry, 2025,55(1):50–68. (in Chinese)
- [53] Gonzalez C, Iocoli G A, Cuestas J M, et al. Rapid prediction of *pleurotus pulmonarius* cultivation performance from lignocellulosic spectral fingerprints using machine learning[J]. Biomass and Bioenergy, 2026,211: 109110.
- [54] Sharma H S S, Kilpatrick M, Burns L C. Determination of phase ii mushroom (*Agaricus bisporus*) compost quality parameters by near infrared spectroscopy[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2000,8: 11–19.
- [55] 宋杨,曾阔,杨海平,等. 聚光太阳能气化含碳物料驱动联合循环发电系统研究[J]. 太阳能学报,2020,41(4):243–248.  
Song Yang, Zeng Kuo, Yang Haiping, et al. Research on combined cycle power generation system driven by concentrated solar gasification of carbon-containing materials[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020,41(4):243–248. (in Chinese)
- [56] 白章,刘启斌,李洪强,等. 基于生物质-太阳能气化的多联产系统模拟及分析[J]. 中国电机工程学报,2015,35(1): 112–118.  
Bai Zhang, Liu Qibin, Li Hongqiang, et al. Simulation and analysis of polygeneration system based on biomass-solar gasification[J]. Proceedings of the CSEE, 2015,35(1):112–118. (in Chinese)
- [57] Yu J H, Wang S, Guo M Y, et al. New concept of solar-driven biomass gasification: an eulerian-lagrangian study[J]. Energy, 2025,318: 134876.
- [58] Soria J, Mazza G. Solar pyro-gasification of biomass: modelling the influence of moisture content and sample height[J]. Energy Conversion and Management, 2026,348: 120641.
- [59] 吴海峰,刘佳维,刘启斌. 太阳能驱动生物质气化多联产系统研究[J]. 太阳能学报,2022,43(1):465–470.  
Wu Haifeng, Liu Jiawei, Liu Qibin. Research on solar-driven biomass gasification polygeneration system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022,43(1):465–470. (in Chinese)
- [60] Zuo H Y, Zeng K, Lin M, et al. Design of an advanced packed bed reactor for solar-driven biomass gasification[J]. Energy, 2025,339: 139035.
- [61] Abdallah I, Dincer I. A solar thermal system integrated with biomass gasification for clean hydrogen production[J]. Renewable Energy, 2026,271: 125909.
- [62] 余晖. 熔盐辅助生物质热解/气化反应特性及机理研究[D]. 银川:宁夏大学,2025.  
She Hui. Study on reaction characteristics and mechanism of molten salt assisted biomass pyrolysis/gasification [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2025. (in Chinese)
- [63] Chuayboon S, Abanades S. Impact of different agricultural biomass residues on the performance of continuous solar-steam gasification[J]. Industrial Crops & Products, 2025,236: 122048.
- [64] 郭烈锦,陈敬炜. 太阳能聚焦供热的生物质超临界水热化学气化制氢研究进展[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):

38 – 46.

Guo Liejin, Chen Jingwei. Research progress of hydrogen production via biomass supercritical water thermochemical gasification with concentrated solar heat supply[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 38 – 46. (in Chinese)

- [65] 廖波, 郭烈锦, 吕友军, 等. 多碟太阳能聚热与生物质超临界水气化耦合制氢[J]. 太阳能学报, 2011, 32(5): 750 – 755.  
Liao Bo, Guo Liejin, Lv Youjun, et al. Hydrogen production coupled with multi-dish solar heat collection and biomass supercritical water gasification[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2011, 32(5): 750 – 755. (in Chinese)
- [66] 张婉琳, 辛宇, 陈付杰, 等. 太阳能与生物质超临界水气化耦合燃煤机组系统探析[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(11): 11 – 23.  
Zhang Wanlin, Xin Yu, Chen Fujie, et al. Analysis of coal-fired unit system coupled with solar energy and biomass supercritical water gasification[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(11): 11 – 23. (in Chinese)
- [67] Yao Y, Zhang J Q, Shi L, et al. Solar fuels production from plastics and biomass photoreforming[J]. Energy & Fuels, 2025, 39: 14455 – 14482.
- [68] Chen G Y, Fu C F, Zhang W H, et al. Solar-driven production of renewable chemicals via biomass hydrogenation with green methanol[J]. Nature Communications, 2025, 16: 665.
- [69] Wang L, Yaniv A, Alirahmi S M. Optimizing a dispatchable solar-biomass hybrid system for sustainable polygeneration[J]. Energy Conversion and Management: X, 2026, 31: 102002.
- [70] 王耀臣, 王锡, 刘琦, 等. 基于改进白鲸算法的太阳能与生物质互补 CCHP 系统多目标优化研究[J]. 动力工程学报, 2024, 44(5): 735 – 744.  
Wang Yaochen, Wang Xi, Liu Qi, et al. Multi-objective optimization of solar-biomass complementary CCHP system based on improved beluga whale algorithm[J]. Journal of Power Engineering, 2024, 44(5): 735 – 744. (in Chinese)
- [71] 高纬迪. 基于生命周期的生物质厌氧消化-气化耦合发电系统综合评价[D]. 天津: 天津大学, 2021.  
Gao Weidi. Comprehensive evaluation of biomass anaerobic digestion-gasification coupled power generation system based on life cycle assessment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021. (in Chinese)
- [72] 葛亚东, 袁壮, 张睿, 等. 生物质厌氧发酵-气化耦合处置过程模拟与碳效益评估[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(9): 122 – 130.  
Ge Yadong, Yuan Zhuang, Zhang Rui, et al. Process simulation and carbon benefit evaluation of biomass anaerobic fermentation – gasification coupled treatment[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(9): 122 – 130. (in Chinese)
- [73] 孙浩然. 生物质生物、化学、热化学及交叉耦合转化液体燃料路线的评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.  
Sun Haoran. Evaluation of liquid fuel routes via biological, chemical, thermochemical and cross-coupled conversion of biomass [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023. (in Chinese)
- [74] Fatokun V O, Inuwa A M, Tetteh E K, et al. Bioeconomy of integrated anaerobic digestion-hydrothermal carbonization for agricultural waste conversion[J]. Biomass and Bioenergy, 2026, 210: 109062.
- [75] 陈宇彤. 生物质制氢与 SOFC 耦合方案与热力特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.  
Chen Yutong. Research on coupling scheme and thermal characteristics of biomass hydrogen production and SOFC [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022. (in Chinese)
- [76] 徐越, 李桃, 肖睿. 生物质气化耦合固体氧化物燃料电池研究现状及前景分析[J]. 能源环境保护, 2023, 37(6): 1 – 11.  
Xu Yue, Li Tao, Xiao Rui. Research status and prospect analysis of biomass gasification coupled solid oxide fuel cell[J]. Energy and Environmental Protection, 2023, 37(6): 1 – 11. (in Chinese)
- [77] 杨雪梅, 张志萍, 王艳锦, 等. 多能互补型农业废弃物厌氧发酵系统能量流动过程研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(4): 936 – 941.  
Yang Xuemei, Zhang Zhiping, Wang Yanjin, et al. Energy flow process of multi-energy complementary anaerobic fermentation system for agricultural waste[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2019, 40(4): 936 – 941. (in Chinese)
- [78] Tsuchikawa S, Kobori H. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology[J]. Journal of Wood Science, 2015, 61(3): 213 – 220.
- [79] 王笑, 徐昌文, 钱虹萍, 等. 植物细胞壁参与免疫反应的机制及其原位非标记成像方法[J]. 植物学报, 2025, 60(5): 773 – 785.  
Wang Xiao, Xu Changwen, Qian Hongping, et al. Mechanism of plant cell walls involved in immune response and its in-situ label-free imaging method[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2025, 60(5): 773 – 785. (in Chinese)
- [80] Agarwal U P. 1064 nm ft-raman spectroscopy for investigations of plant cell walls and other biomass materials[J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 490.
- [81] Gierlinger N, Schwanninger M. The potential of raman microscopy and raman imaging in plant research[J]. Journal of Spectroscopy, 2007, 21: 498206.
- [82] Santos D, Nunes L C, De Carvalho G G A, et al. Laser-induced breakdown spectroscopy for analysis of plant materials: a review[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2012, 71 – 72: 3 – 13.
- [83] Mishra P, Asaari M S M, Herrero-Langreo A, et al. Close range hyperspectral imaging of plants: a review[J]. Biosystems Engineering, 2017, 164: 49 – 67.

- [84] Raghav M, Dubey A, Singh J. Hyperspectral imaging for detection and classification of plant primary and secondary metabolites: a review[J]. *Phytochemical Analysis*, 2026,37(1): 4–27.
- [85] 李杰,李蒙,傅童成,等. 基于近红外光谱技术的南荻生物质品质快速分析[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2024,50(2):113–119.  
Li Jie, Li Meng, Fu Tongcheng, et al. Rapid analysis of miscanthus lutarioriparius biomass quality based on near infrared spectroscopy[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2024,50(2):113–119. (in Chinese)
- [86] Ahmed M W, Esquerre C A, Eilts K, et al. Rapid and high-throughput determination of sorghum(*sorghum bicolor*) biomass composition using near infrared spectroscopy and chemometrics[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2024,186: 107276.
- [87] Liu J, Jin S, Bao C, et al. Rapid determination of lignocellulose in corn stover based on near-infrared reflectance spectroscopy and chemometrics methods[J]. *Bioresource Technology*, 2021,321: 124449.
- [88] Tang C, Li M, Jiang B, et al. High-throughput profiling of sweet potato vine biomass for cellulosic ethanol production using near-infrared spectroscopy and chemometrics[J]. *Microchemical Journal*, 2025,213: 113679.
- [89] Kong D, Liang J, Ma Y, et al. Multi-target active component detection of panax notoginseng based on ATR–FTIR combined with machine learning[J]. *Industrial Crops and Products*, 2025,237: 122273.
- [90] Li J, Ma Y, Zhang J, et al. Rapid detection of fertilizer information based on raman spectroscopy and machine learning[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2025,324: 124985.
- [91] Zhao Y, Zhu Y, Li C, et al. Fast analysis of straw proximates based on partial least squares using near-infrared spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2024,309: 123855.
- [92] 熊先青,钱少平,盛奎川,等. 基于工业分析/元素分析和可见-近红外光谱预测农作物秸秆高位热值[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017,37(5):1609–1614.  
Xiong Xianqing, Qian Shaoping, Sheng Kuichuan, et al. Prediction of higher heating value of crop straw based on proximate/elemental analysis and visible-near infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017,37(5):1609–1614. (in Chinese)
- [93] 刘贤,韩鲁佳. 近红外漫反射光谱法快速测定秸秆青贮饲料成分含量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006,26(11):2016–2020.  
Liu Xian, Han Lujia. Rapid determination of components in straw silage by near-infrared diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006,26(11):2016–2020. (in Chinese)
- [94] Qaswar M, Mouazen A M. Precision application of combined manure, compost and nitrogen fertilizer in potato cultivation using online vis-nir and remote sensing data fusion[J]. *Smart Agricultural Technology*, 2025,12: 101328.
- [95] 孔源,韩鲁佳,贾贵儒,等. 近红外技术快速测定肉鸡粪便主要肥料成分含量[J]. *农业工程学报*, 2004,20(6):251–254.  
Kong Yuan, Han Lujia, Jia Guiru, et al. Rapid determination of main fertilizer components in broiler manure by near infrared spectroscopy[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004,20(6):251–254. (in Chinese)
- [96] Tangorra F M, Buio E, Finzi A, et al. Nutrient quantification of livestock slurry and digestate using a low-cost handheld NIR spectrometer and multi-biomass calibration models[J]. *Biosystems Engineering*, 2024,240: 100–106.
- [97] Panchbhai K G, Shetgaonkar S, Morajkar P P, et al. Artificial intelligence with wrapper multioutput regression to identify chemical contents of fresh and dried manure samples using NIR spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2025,330: 125697.
- [98] 杨增玲,梅佳琪,曹聪,等. 基于红外光谱的不同农作物秸秆磨木木质素差异表征[J]. *农业工程学报*, 2018,34(19): 219–224.  
Yang Zengling, Mei Jiaqi, Cao Cong, et al. Characterization of milled wood lignin differences of different crop straws based on infrared spectrum[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018,34(19):219–224. (in Chinese)
- [99] Gao W, Jiang Q, Guan Y, et al. Transfer learning improves predictions in lignin content of Chinese FIR based on Raman spectra[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024,269: 132147.
- [100] Li C, Lu Z, Chen J, et al. Determination of alkali metal elements in solid biomass fuel by laser-induced breakdown spectroscopy: analysis and reduction of chemical matrix effects[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2025,1337: 343568.
- [101] Huang Y, Yang Z, Ge C, et al. Quantitative approach for simultaneous in situ profiling of lignin, cellulose, and hemicellulose using confocal Raman microscopy[J]. *Analytical Chemistry*, 2026.
- [102] Huang Y, Yang Z, Ge C, et al. In-situ visual delignification and cell-scale kinetics modeling using confocal Raman microscopy[J]. *Bioresource Technology*, 2025,437: 133098.
- [103] Baum A, Agger J, Meyer A S, et al. Rapid near infrared spectroscopy for prediction of enzymatic hydrolysis of corn bran after various pretreatments[J]. *New Biotechnology*, 2012,29(3): 293–301.
- [104] 张航,刘国海,江辉,等. 基于近红外光谱技术的乙醇固态发酵过程参数定量检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(2):320–326.  
Zhang Hang, Liu Guohai, Jiang Hui, et al. Quantitative detection of ethanol solid-state fermentation process parameters based on near infrared spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017,54(2):320–326. (in Chinese)
- [105] Ji K, Yu X, Chen L, et al. Data-augmented deep learning algorithm for accurate control of bioethanol fermentation using an online raman analyzer[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2025,122: 2366–2376.

- [106] Ou H, Zhang P, Wang X, et al. Gaining insights into the responses of individual yeast cells to ethanol fermentation using Raman tweezers and chemometrics[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2024,319: 124584.
- [107] Bie N, Wang J, Lv P, et al. In-situ release characteristic of alkali metals during co-pyrolysis of coal and biomass in a visual fixed bed combined with laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Fuel*, 2023,331: 125868.
- [108] Viljanen J, Zhao H, Zhang Z, et al. Real-time release of Na, K and Ca during thermal conversion of biomass using quantitative microwave-assisted laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2018,149: 76 – 83.
- [109] Chen S, Zhang X, Xu F. Study on cell wall deconstruction of pinus massoniana during dilute acid pretreatment with confocal raman microscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018,38(7): 2136 – 2141.
- [110] Zou J, Tang S, Chen C, et al. Machine learning assisted-hyperspectral imaging for in-situ evaluation of compost maturity[J]. *Waste Management*, 2026,217:115496.
- [111] Rueda M P, Deryck A, Stevens F, et al. Pixel-wise assessment of industrial compost transformation by NIR hyperspectral imaging and chemometrics: an early-warning tool for process monitoring[J]. *Talanta*, 2027,311: 130201.
- [112] 田洪倩,薛俊杰,吴若玉,等. 利用 EPO 测定小麦秸秆含水量的抗温度干扰近红外光谱方法[J]. *农业工程学报*, 2026, 42(6):291 – 298.  
Tian Hongqian, Xue Junjie, Wu Ruoyu, et al. Anti-temperature-interference near-infrared spectroscopy method for determining the moisture content of wheat straw using EPO[J]. *Transactions of the CSAE*, 2026, 42(6): 291 – 298. (in Chinese)
- [113] 周禹,张睿加,袁伟东,等. 近红外光谱及成像检测影响因素与校正方法研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(4):39 – 48.  
Zhou Yu, Zhang Ruijia, Yuan Weidong, et al. Research progress on influencing factors and correction methods of near-infrared spectroscopy and imaging detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024,61(4):39 – 48. (in Chinese)
- [114] 朱礼强,郭建涛,杨增玲,等. 基于近红外光谱特征信号的秸秆粒径校正方法研究[J]. *农业机械学报*, 2025,56(12): 460 – 469.  
Zhu Liqiang, Guo Jiantao, Yang Zengling, et al. Research on straw particle size correction method based on characteristic signals of near-infrared spectrum[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025,56(12):460 – 469. (in Chinese)
- [115] Ahmed M W, Esquerre C A, Eilts K, et al. Influence of particle size on nir spectroscopic characterization of sorghum biomass for the biofuel industry[J]. *Results in Chemistry*, 2025, 13: 102016.
- [116] Feng X, Yu C, Liu X, et al. Rapid and non-destructive measurement of biofuel pellet quality indices based on two-dimensional near infrared spectroscopic imaging[J]. *Fuel*, 2018,228: 197 – 205.
- [117] Posom J, Maraphum K. Fast prediction of the combustion properties of biomass pellets using hyperspectral imaging[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2024,183: 107134.
- [118] 黄婷,张山,苏明雪,等. 污泥基生物炭结构的共焦显微技术应用[J]. *中国环境科学*, 2022,42(7):3210 – 3218.  
Huang Ting, Zhang Shan, Su Mingxue, et al. Application of confocal micro-raman technology on the structure of sludge-derived biochar[J]. *China Environmental Science*, 2022,42(7):3210 – 3218. (in Chinese)
- [119] Hu X, Chen D, Zhou S, et al. Interpretable machine learning prediction of biochar characteristics based on laser-Raman spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2026,351: 127474.
- [120] Prochazka D, Mazura M, Samek O, et al. Combination of laser-induced breakdown spectroscopy and raman spectroscopy for multivariate classification of bacteria[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2018,139: 6 – 12.
- [121] Pitak L, Laloon K, Wongpichet S, et al. Machine learning-based prediction of selected parameters of commercial biomass pellets using line scan near infrared-hyperspectral image[J]. *Processes*, 2021,9: 316.
- [122] Pitak L, Sirisomboon P, Saengprachanarug K, et al. Rapid elemental composition measurement of commercial pellets using line-scan hyperspectral imaging analysis[J]. *Energy*, 2021,220: 119698.
- [123] Karellas S, Karl J. Analysis of the product gas from biomass gasification by means of laser spectroscopy[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(9): 935 – 946.
- [124] 潘宇轩,李福朋,姜含露,等. 面向炭化产线的秸秆原料成分检测模块设计[J]. *农业机械学报*, 2024,55(增刊 2): 310 – 318.  
Pan Yuxuan, Li Fupeng, Jiang Hanlu, et al. Design of straw raw material component detection module for carbonization production line[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024,55(S2):310 – 318. (in Chinese)
- [125] Bao Z, Guo H, Li J, et al. Detection of volatile fatty acids in anaerobic digestion system by near infrared spectroscopy[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2023, 175: 106842.
- [126] Krapf L C, Heuwinkel H, Schmidhalter U, et al. The potential for online monitoring of short-term process dynamics in anaerobic digestion using near-infrared spectroscopy[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 48: 224 – 230.
- [127] Pinkard B R, Gorman D J, Tiwari K, et al. Supercritical water gasification: practical design strategies and operational

- challenges for lab-scale, continuous flow reactors[J]. *Heliyon*, 2019, 5(2): e01269.
- [128] Cheng H, Wu S B, Liu C. Study on the mechanism of the pyrolysis of a lignin monometric model compound by in situ FTIR [J]. *Bio Resources*, 2018,13(4):8246–8262.
- [129] Karadut O, Aliyev J, Romero C E, et al. Online libs-ml framework for dynamic characterization of heterogeneous waste-derived gasification feedstocks[J]. *ACS Omega*, 2026, 11(21): 31729–31743.
- [130] 王鑫磊,韩鲁佳,杨增玲,等. 预处理方法对异源近红外秸秆营养成分速测模型的影响[J]. *农业工程学报*,2025, 41(9):216–226.
- Wang Xinlei, Han Lujia, Yang Zengling, et al. Effects of pretreatment methods on heterogeneous NIRS rapid detection model for straw nutritional components[J]. *Transactions of the CSAE*, 2025,41(9):216–226. (in Chinese)
- [131] 丁大永,周霞,许凤. 红外显微光谱在木质纤维细胞壁研究中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*,2015,35(12):3393–3396.
- Ding Dayong, Zhou Xia, Xu Feng. Application of infrared microspectroscopy in lignocellulosic cell wall research [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015,35(12):3393–3396. (in Chinese)
- [132] Duan H W, Han L J, Huang G Q. Quantitative analysis of major metals in agricultural biochar using laser-induced breakdown spectroscopy with an adaboost artificial neural network algorithm[J]. *Molecules*, 2019,24(20): 3753.
- [133] Wang X, Yu L, Wang J, et al. Construction and optimization of rapid quantitative models for crop straw proximate compositions based on miniature portable nirs devices and machine learning[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2026,359: 127957.
- [134] 梁浩,史卓林,范雅彭,等. 基于定标模型云共享的奶牛粪水微型 NIR 现场速测[J]. *农业工程学报*,2022,38(10): 208–215.
- Liang Hao, Shi Zhuolin, Fan Yapeng, et al. On-site rapid detection system of dairy manure slurry based on cloud sharing of calibration model by miniature NIR spectrometer[J]. *Transactions of the CSAE*, 2022,38(10):208–215. (in Chinese)
- [135] 成晔,黄浩冉,汪莹,等. 基于 DS–PDS 联用的苹果可溶性固形物近红外模型传递方法[J]. *食品科学*,2025,46(8): 34–40.
- Cheng Ye, Huang Haoran, Wang Ying, et al. Near-infrared model transfer method for apple soluble solids based on combined DS–PDS algorithm[J]. *Food Science*, 2025,46(8):34–40. (in Chinese)
- [136] Shaw A D, Kaderbhai N, Jones A, et al. Noninvasive, on-line monitoring of the biotransformation by yeast of glucose to ethanol using dispersive raman spectroscopy and chemometrics[J]. *Applied Spectroscopy*, 1999,53(11): 1419–1428.
- [137] Lednev V N, Sdvizhenskii P A, Grishin M Y, et al. Improving the libs analysis of heavy metals in heterogeneous agricultural samples utilizing large laser spotting[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2022,37: 2563–2572.
- [138] Yan H, Dong C Q, Zhang J J, et al. Moisture prediction of biomass fuel based on near-infrared spectroscopy and deep learning algorithm[J]. *Energy & Fuels*, 2024, 38(7): 6062–6071.
- [139] Posom J, Phuphaphud A, Saengprachanarug K, et al. Real-time measuring energy characteristics of cane bagasse using NIR spectroscopy[J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2022,38: 100519.
- [140] Corro-Herrera V A, Gómez-Rodríguez J, Hayward-Jones P M, et al. In-situ monitoring of *saccharomyces cerevisiae* ITV01 bioethanol process using near-infrared spectroscopy NIRS and chemometrics[J]. *Biotechnology Progress*, 2016,32(2): 510–517.
- [141] 李文钊,郭翠,李红波,等. 酒精发酵液关键指标近红外预测模型的建立与评价[J]. *当代化工*,2023,52(9):2192–2195,2213.
- Li Wenzhao, Guo Cui, Li Hongbo, et al. Establishment and evaluation of near-infrared prediction model for key indicators of alcohol fermentation broth[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2023,52(9):2192–2195,2213. (in Chinese)
- [142] 杨增玲,黄圆萍,沈广辉,等. 基于在线近红外光谱的堆肥全过程关键参数快速检测[J]. *农业机械学报*,2019,50(5): 248–256.
- Yang Zengling, Huang Yuanping, Shen Guanghui, et al. Rapid detection of key parameters in whole composting process based on online near infrared spectroscopy[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019,50(5): 248–256. (in Chinese)
- [143] Lindström S W, Nilsson D, Nordwaeger M, et al. Quality assurance of torrefied biomass using RGB, visual and near infrared (hyper) spectral image data[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2014,22: 129–139.
- [144] Müller D H, Börger M, Thien J, et al. Bioprocess in-line monitoring and control using raman spectroscopy and indirect hard modeling (ihm) [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2024,121(7):2225–2233.
- [145] Huang T, Bi W, Song Y, et al. Dmc-libsas: a laser-induced breakdown spectroscopy analysis system with double-multi convolutional neural network for accurate traceability of chinese medicinal materials[J]. *Sensors*, 2025,25(7): 2104.
- [146] 刘鹏,李凯,曾立波,等. 阿达玛变换近红外光谱仪用于生物过程检测[J]. *光谱学与光谱分析*,2015,35(9):2654–2659.
- Liu Peng, Li Kai, Zeng Libo, et al. Hadamard transform near-infrared spectrometer for biological process detection [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015,35(9):2654–2659. (in Chinese)
- [147] 李浩源,马晓博,李连,等. 近红外光谱分析技术在发酵工程中的应用[J]. *生命的化学*,2024,44(7):1178–1183.
- Li Haoyuan, Ma Xiaobo, Li Lian, et al. Application of near infrared spectroscopy in fermentation engineering[J]. *Chemistry of Life*, 2024,44(7):1178–1183. (in Chinese)