DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260320001
引用格式: 彭珍华, 马雪涛, 赵胤丞, 等. 咖啡产业绿色转型视角下发酵液生物质资源化利用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(17): 279–288.
Peng Zhenhua, Ma Xuetao, Zhao Yincheng, et al. Research progress of biomass resource utilization of fermentation broth under the perspective of green transformation of coffee industry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(17): 279–288. (in Chinese with English abstract).

咖啡产业绿色转型视角下发酵液生物质资源化利用研究进展

彭珍华, 马雪涛, 赵胤丞, 陈明瑶, 谭建林*
(云南省产品质量监督检验研究院, 国家热带农副产品质量检验检测中心, 昆明 650223)

摘 要: 随着我国咖啡消费市场的高速扩容, 中国已跻身全球咖啡消费增长速率最快的市场梯队。咖啡初加工环节会伴生咖啡果皮、发酵液等大量副产物, 其中水洗法加工工艺产生的咖啡发酵液排放量最大(占总废水排放量 80%以上), 是污染物浓度最高的特征废水。该发酵液富集多糖、酚类活性物质、蛋白质及矿物质等可回收利用成分, 若未经资源化处理直接排放, 不仅造成生物质资源的浪费, 还会引发严峻的生态环境风险。本文系统梳理了国内外咖啡发酵液资源化利用的研究成果, 重点阐述其有效成分的组成特征、主流提取分离技术及高值化产品开发方向, 结合国内核心产区的实地调研数据与研究进展, 剖析当前技术应用面临的瓶颈问题, 展望未来发展趋势, 为咖啡发酵液的高效资源化利用提供理论支撑与技术参考, 助力咖啡产业构建绿色可持续发展模式。

关键词: 咖啡发酵液; 生物质资源; 提取分离技术; 高值化转化; 绿色低碳利用
中图分类号: TS273 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)17–0279–10

Research progress of biomass resource utilization of fermentation broth under the perspective of green transformation of coffee industry

PENG Zhen-Hua, MA Xue-Tao, ZHAO Yin-Cheng, CHEN Ming-Yao, TAN Jian-Lin*
(*Yunnan Institute of Product Quality Supervision and Inspection*, *National Tropical Agricultural By-products Quality Inspection and Testing Center*, *Kunming* 650223, *China*)

ABSTRACT: With the rapid expansion of China's coffee consumption market, China has entered the ranks of the markets with the fastest growth rate in coffee consumption globally. During the initial processing of coffee, a large amount of by-products such as coffee peels and fermentation liquid are produced. Among them, the coffee fermentation liquid generated by the water-washing processing technology has the largest discharge volume (accounting for more

收稿日期: 2026-03-20
基金项目: 云南省市场监督管理局科技计划项目(2025YSJK14)
第一作者: 彭珍华(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全质量检测。E-mail: 179653767@qq.com
***通信作者:** 谭建林(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全。E-mail: ynzjtg@126.com

than 80% of the total wastewater discharge) and it is the characteristic wastewater with the highest pollutant concentration. This fermentation broth is rich in recyclable components such as polysaccharides, phenolic active substances, proteins and minerals. If it is directly discharged without resource utilization treatment, it will not only cause a waste of biomass resources, but also trigger serious ecological and environmental risks. This paper combed through research findings on the resource utilization of coffee fermentation broth both in domestic and international contexts, focused on the compositional characteristics of its effective components, mainstream extraction and separation technologies, and the development direction of high-value products, meanwhile, referred to the field survey data and research progress in domestical core coffee-producing regions, and analyzed the bottleneck problems currently faced by the application of technology, looked forward to the future development trends, so as to provide theoretical support and technical references for the efficient resource utilization of coffee fermentation liquid, and help the coffee industry build a green and sustainable development model.

KEY WORDS: coffee fermentation broth; biomass resources; extraction and separation technology; high-value conversion; green and low-carbon utilization

0 引 言

咖啡作为全球消费量居首的饮品之一，其初加工工艺主要分为水洗法、日晒法及蜜处理法 3 大类，其中水洗法因能显著提升咖啡生豆的品质均一性与风味稳定性，已成为全球主导的初加工技术路径[1]。水洗咖啡豆加工流程中，去皮脱胶是决定生豆品质的核心工序，该工序通过机械或人工去皮、水洗发酵脱胶或酶解脱胶等方式[2]，去除咖啡鲜果的外果皮、果肉组织及果胶层，在此过程中会产生大量高浓度有机废水，即咖啡发酵液。在传统处理模式中，这类废水多采用直接排放或简易处理后排放的方式，对云南主要咖啡种植区 11 家具有代表性的咖啡初加工企业进行了加工废水排放情况调查[3]，结果表明咖啡发酵液具有高化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)(最高可达 7400 mg/L，超过 GB 8978—1996《综合污水排放标准》近 50 倍)、高五日生化需氧量(5-day biochemical oxygen demand, BOD5)(最高可达 901 mg/L，超过 GB 8978—1996 近 30 倍)、强酸性(pH 为 4~5)及高黏度的典型特征，且蕴含多种具有回收价值的生物活性成分，直接排放不仅造成生物质资源的流失，还会对土壤、水体生态系统造成不可逆的破坏。

云南作为我国咖啡核心产区，水洗法加工占比超90%，咖啡发酵液排放量呈逐年递增态势，其资源化利用已成为推动云南咖啡产业绿色转型、实现“双碳”目标的关键抓手[4]。实地调研数据显示，云南咖啡初加工企业以中小型规模为主，约 70%的企业仍沿用传统直排或简易沉淀工艺处理发酵液，资源回收利用率不足 10%[3]，既导致有效成分的大量流失，也给产区生态环境带来沉重压力。针对咖啡发酵液的污染特性与资源化难点，国内科研团队创新开发了三维电芬顿、微生物燃料电池耦合光芬顿等高级氧化预处理技术，为高浓度、高黏度咖啡发酵液的深度净化与成分提取提供了全新技术路径[5−6]。

近年来，全球咖啡产业绿色转型的需求日益迫切，把整个咖啡果实(含发酵液)视为一个完整的生物经济体系，通过循环经济实现环境减负、农民增收、产业升级三重价值[7]。咖啡发酵液的资源化利用已成为国内外跨学科研究热点，研究重心已从传统的末端治理模式逐步转向“有效成分精准提取—高值产品定向开发—全链条循环利用”的可持续发展模式。国内外学者围绕该类废水的成分解析、提取工艺优化、高值化产品开发等方向开展了大量系统性研究，取得了一系列阶段性成果，但目前仍面临成分体系复杂导致分离难度大、实验室技术难以规模化推广、产业链条不完善等突出问题[8]。基于此，本文系统分析国内外相关研究报道，全面总结咖啡发酵液的有效成分特征、提取分离技术进展、高值化产品开发路径及应用前景，为咖啡发酵液的高效资源化利用提供全方位的理论参考与实践指导。

1 咖啡发酵液的有效成分特征分析

咖啡发酵液的有效成分主要源于咖啡鲜果的果皮、果肉及果胶层，成分体系复杂且存在显著差异。加工工艺、产地品种及储存条件对监测咖啡发酵液风味、有效成分的含量与活性影响显著[9−10]：传统发酵脱胶过程中，受微生物代谢作用影响，果胶降解率达 20%~30%，酚类物质因氧化损失 15%~25%，而酶解脱胶工艺则可保留 80%以上的绿原酸，咖啡因含量还能保持基本稳定[11]，另有分别添加发酵黏液乳杆菌、酿酒酵母及植物乳杆菌至咖啡提取液中，均能提高咖啡提取液中总酚、咖啡因含量和抗氧化能力[12]；阿拉比卡咖啡发酵液的总酚含量(6~8 g GAE/L)显著高于罗布斯塔咖啡(2~4 g GAE/L)[13−14]，咖啡发酵液在常温下

储存超过 48 h, 可溶性糖降解率可达 30%以上, 酚类物质因氧化含量下降 12%~15%, 因此需在 4~8 ℃低温环境下密封储存以保持其活性[13–14]。咖啡发酵液的核心成分可分为多糖类物质、酚类活性物质、蛋白质与氨基酸、矿物质与微量元素 4 大类, 各类成分的组成结构、含量范围及功能特性如下。

1.1　多糖类物质

多糖类物质是咖啡发酵液的主要组成成分, 包括果胶、可溶性糖及其他碳水化合物, 是导致其高黏度、高 COD 的主要诱因[15]。其中, 果胶含量最高, 采用咔唑—硫酸比色法、果胶酶水解—还原糖法进行定量检测[16], 以水溶性果胶为主, 这类物质属于天然高分子化合物, 由半乳糖醛酸、半乳糖、阿拉伯糖等单糖单元聚合而成, 具有良好的乳化、增稠及凝胶特性, 在食品、化妆品等领域应用前景广阔。可溶性糖主要包括葡萄糖、果糖, 采用高效液相色谱法检测[16], 含量为 5~15 g/L, 可直接作为生物转化的底物, 用于生物能源或高值化学品的制备[17]。此外, 咖啡发酵液中还含有少量甘露糖、木糖等碳水化合物, 通过定向水解可转化为单糖, 进一步提高生物质资源的利用效率[18]。值得注意的是, 在咖啡发酵阶段, 微生物代谢产生的酶会适度分解发酵液中果胶长链, 暴露出大量羟基、羧基等活性基团。果胶以氢键为主要结合力, 辅以疏水作用与静电作用, 与发酵液内绿原酸、咖啡酸等多酚物质相互结合, 形成稳定性较强的复合物[19]。辅以物理屏障隔绝氧气, 络合铁、铜等金属离子, 抑制金属离子诱发的自由基氧化反应, 同时提高发酵液黏度、维持体系弱酸环境, 进一步减缓多酚氧化速率, 提升抗氧化稳定性, 但高浓度果胶会增加发酵液黏度, 阻碍酚类、咖啡因等目标成分的提取, 导致提取率下降 5%~10%[20]。

1.2　酚类活性物质

酚类物质是咖啡发酵液中最具高值化利用潜力的核心成分, 主要包括绿原酸、咖啡酸、单宁、黄酮类化合物及咖啡因等, 总酚含量采用 Folin-Ciocalteu 比色法检测[16], 可达 50~200 mg/L。其中, 绿原酸为主要活性成分, 采用高效液相色谱法精准定量[21], 含量可达 20~80 mg/L, 且以 5-O-咖啡酰奎宁酸为主, 具有较强的抗氧化、抗菌、抗炎等生理功能, 在食品保鲜、化妆品研发、生物医药等领域应用前景广阔。咖啡因采用高效液相色谱法检测[16], 含量为 0.5~2.0 g/L, 兼具中枢兴奋、抗氧化及抑菌活性, 是食品、医药行业不可或缺的原料[22]。此外, 咖啡酸、单宁、黄酮类化合物等含量虽相对较低, 但协同作用可显著增强提取物的抗氧化、抗菌性能, 相关研究显示, 咖啡酸采用高效液相色谱法检测[16], 含量为 0.1~0.5 g/L, 单宁采用香草醛—盐酸法检测[23], 黄酮类化合物采用 $NaNO_2$-$Al(NO)_3$ 比色法或高效液相色谱法检测[24]。同时, 酚类物质可与蛋白质通过非共价键结合形成复合物, 使抑菌率提升 10%~15%, 但这类物质易受矿物质中铁离子催化发生氧化反应, 导致生物活性降低[25]。

1.3　蛋白质与氨基酸

咖啡发酵液中含有一定量的蛋白质与氨基酸, 粗蛋白含量采用凯氏定氮法检测[16], 含量为 0.5~2.0 g/L, 氨基酸采用高效液相色谱法和液相色谱-质谱技术检测[26], 含量为 0.2~0.7 g/L, 包含亮氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸等多种人体及动物必需氨基酸。这些蛋白质主要来自咖啡鲜果的果肉细胞, 在脱胶过程中溶解于水相体系, 通过提取、精制工艺可制备蛋白饲料、生物表面活性剂等产品, 实现生物质资源的高值化转化[22]。云南农业大学热带作物学院的相关研究表明[27], 采用微纳米气泡技术处理的去皮脱胶废水, 可实现蛋白质的高效回收, 回收率达 75%以上, 回收的蛋白质经改性处理后可用于饲料添加剂制备[27]。蛋白质与酚类物质的协同作用虽能增强抗菌活性, 但也会增加成分分离难度, 给后续提取纯化工艺带来挑战[25]。

1.4　矿物质与微量元素

咖啡发酵液中富含矿物质与微量元素, 采用电感耦合等离子体发射光谱法进行定性定量分析, 主要包括钾、钙、镁、磷、铁、氮等, 其中常量元素含量范围为: 钾 500~1500 mg/L、钙 50~200 mg/L、镁 30~100 mg/L; 微量元素含量范围为: 铁 1~5 mg/L、锌 0.5~2.0 mg/L、锰 0.2~1.0 mg/L[28]。这些矿物质均为植物生长发育所需的营养元素, 是制备生物有机肥的优质原料, 可用于土壤改良, 提升咖啡及其他农作物的产量与品质。此外, 咖啡发酵液经分离提纯后, 其矿物质成分可应用于食品、饲料添加剂领域, 进一步拓展资源化利用路径[18]。需要注意的是, 矿物质中的铁离子会催化酚类物质发生氧化反应, 降低其生物活性, 而氮、磷的存在也会增加废水处理难度, 影响提取工艺的选择与优化[6]。同时, 检测数据显示, 咖啡发酵液中的重金属(铅、镉、汞)含量均低于 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》规定的限值, 提取的有效成分可安全应用于食品、化妆品等领域[29]。

2　咖啡发酵液有效成分的提取分离技术

咖啡发酵液有效成分的提取分离是其资源化利用的核心环节, 国内外科研团队根据该废水的理化特性与成分特征, 开发了物理提取、生物提取、高级氧化耦合提取及集成提取等系列技术, 国内研究侧重低成本、易工业化的工艺研发, 国外则聚焦绿色溶剂与高效分离技术创新, 各类技术的作用原理、优缺点及应用进展如下。

2.1 国内提取分离技术研究进展

国内研究以“低成本、易工业化、高回收率”为核心目标，重点研发物理提取、生物提取及集成化工艺，部分技术已在云南、海南等咖啡主产区实现中试或小规模产业化应用[30–31]。国内在该领域的技术创新亮点是率先探索高级氧化技术与资源化提取工艺的耦合路径，为高浓度、高黏度咖啡发酵液的预处理提供了技术支撑。

2.1.1 物理提取技术

膜分离技术、超声/微波辅助水提技术是国内目前应用最广泛的物理提取技术。膜分离技术(超滤/纳滤/反渗透)依据有效成分的分子质量差异实现精准分离，对果胶、蛋白质、多糖的截留率可达 90%以上，其中超滤膜主要用于截留果胶、蛋白质等大分子物质，纳滤膜用于分离可溶性糖、小分子酚类化合物，反渗透膜则用于废水深度处理与水资源回收。杜华波等[29]创新采用微纳米气泡物理脱胶技术处理咖啡发酵液，果胶回收率达 92%，处理后的废水可直接用于农田灌溉，实现水资源循环利用。膜分离技术能够最大程度保留咖啡发酵液中多酚、香气物质等热敏性有效成分，避免高温造成的氧化降解。但由于发酵液中大分子的果胶、蛋白等胶体物质易附着膜表面，造成膜污染与堵塞，持续降低过滤及分离效率。同时单一膜孔径难以实现多组分精准分级，对小分子有机酸、微量风味物质截留选择性有限。超声/微波辅助水提技术凭借低温、高效、无溶剂残留的优势，已成为酚类物质、咖啡因的主流提取技术，提取温度控制在 45~85 ℃，提取率较传统水提法提高 30%~50%，目前已在云南普洱等地的咖啡加工厂开展中试应用[30–32]。微波提取造成局部高温、超声机械剪切力会破坏部分热敏性风味物质，提取液杂质溶出量大，蛋白、果胶等杂质混杂度高，提取液浑浊、后期稳定性差，能耗高。此外，真空精密过滤技术可有效分离废水中的大分子果胶、果皮碎屑等悬浮固体，降低后续提取工艺的处理负荷，提高整体提取效率[27]。

2.1.2 生物提取技术

酶解技术[27]是国内生物提取领域的研究热点，主要采用果胶酶、纤维素酶等复合酶制剂，在 40~50 ℃、pH 为 4.5~6.0 的温和条件下破坏细胞结构，释放有效成分，该技术不仅能显著提高提取率，还可避免化学提取工艺带来的二次污染。在咖啡湿法加工环节采用生物酶脱胶可降低污水排放量，并从源头显著改善废水水质，陈云兰等[33]研究表明，以商品果胶酶(Pectinex Ultra SP-L)进行生物酶脱胶替代传统自然发酵脱胶，脱胶废水较自然发酵脱胶，发酵速率提高 73.9%，清洗废水排放减少 33%，pH 降低 1.2 个单位，悬浮颗粒物(suspended particle, SS)、COD、总氮值分别降低 28%、61.5%、38.5%，且豆品质量稳定。酶解可降解悬浮胶体杂质，降低发酵液黏度，保留咖啡原有风味特征。但是酶制剂成本偏高，且酶活性易受温度、pH、底物浓度影响，对反应环境要求严格，反应过程很难控制，若过度酶解会彻底破坏果胶结构，失去多糖吸附屏蔽作用，更易发生氧化褐变。同时酶解反应产物复杂，降解产生的小分子还原糖、酸性杂质会混入提取液，增加后期分离难度。此外，厌氧发酵技术全程隔绝氧气，可最大程度抑制咖啡发酵液中多酚的氧化降解，有效保留绿原酸等功能性活性成分。可将废水中的多糖、蛋白质等有机物质转化为沼气，同时实现氮、磷等营养元素的回收，国内云南部分咖啡厂已示范运行该技术，1 m^3 去皮脱胶废水可产 0.3~0.4 m^3 沼气，用于发电、供热，实现能源自给[25]。厌氧发酵周期较长，发酵耗时远高于物理提取技术，生产效率偏低，且对发酵温度、密闭环境、菌种活性要求严苛，易出现杂菌污染。

2.1.3 高级氧化提取技术

三维电芬顿法能高效降解咖啡发酵液中的难降解有机物，在优化工艺参数条件下，COD、表征芳香类溶解性有机物的 254 nm 紫外吸光度(UV_{254})、色度的去除率分别可达 69.29%、72.92%和 96.69%[5]。显著降低废水黏度，改善发酵液色泽与风味纯净度，为后续果胶、酚类等有效成分的提取创造有利条件。微生物燃料电池耦合光芬顿技术融合微生物电化学与光芬顿氧化机制，实现了咖啡发酵液处理“去污+产电”的双重目标，黄建洪等[6]的相关专利设计了三维电极-电芬顿耦合装置，利用电极原位产铁与过氧化氢，结合二元粒子电极强化反应效能，对咖啡初加工废水具有良好的净化效果，可实现咖啡初加工废水 COD、色度与芳香类有机物高效去除，并显著提升废水可生化性，为该类废水预处理提供了新型一体化设备。这类电化学高级氧化技术可作为咖啡发酵液资源化提取的预处理环节，有效解决传统工艺提取效率低、杂质干扰大的问题。高级氧化技术缺点是氧化选择性差，强氧化作用在降解杂质的同时极易破坏绿原酸、咖啡酸等不饱和多酚活性物质，造成功能性成分损耗。此外，这类技术中三维电芬顿设备能耗较高，电极易发生损耗钝化；而微生物燃料电池耦合光芬顿技术体系更为复杂，对光照条件、微生物菌群活性、电极材料要求严苛，微生物容易失活，氧化处理效果波动较大，不适用于简易粗放的加工生产。

2.1.4 集成耦合提取工艺

为实现多成分的同步高效回收，国内科研团队提出“混凝沉淀-膜分离-活性炭吸附”耦合工艺，先通过混凝沉淀去除废水中的悬浮物与部分大分子杂质，再采用膜分离技术回收多糖、蛋白质，最后通过活性炭吸附回收酚类、咖啡因，实现生物质资源的最大化利用[18,34]。昆明理工大学黄建洪等[35]提出“采用斜筛-气浮酶解除果胶-A/O-MBR”的生化主线，可同步回收果胶、绿原酸及蛋白质，处理后废水达到 GB 8978—2002《污水综合排放标准》一级排放

标准, 可用于咖啡种植园灌溉, 构建“废水-灌溉-种植”的循环模式。集成耦合提取能够弥补单一工艺存在的技术短板可协同实现破壁溶出、除杂纯化、活性保留多重效果, 既可以借助外力手段破除果胶束缚、提升多酚得率, 又能温和去除杂质、减少活性成分氧化损耗。耦合提取工艺流程烦琐, 设备串联布置复杂, 生产线初期投入成本远高于单一技术。同时增加工艺控制变量, 长时间提取会累积有效活性成分的氧化风险。

2.2　国外提取分离技术研究进展

国外研究以“绿色化、高效化、高纯度”为核心导向, 重点开发绿色溶剂提取技术与先进分离技术, 目前已形成多项实验室创新成果, 部分技术已实现产业化应用。

2.2.1　绿色溶剂提取技术

天然低共熔溶剂(natural deep eutectic solvents, NADES)、超分子溶剂(supramolecular solvents, SUPRAS)是国外主流的绿色提取溶剂, 可替代传统有机溶剂, 具有生物相容性好、可循环使用、目标成分提取率高的优势[36]。研究表明, 采用氯化胆碱-脯氨酸型 NADES 提取咖啡副产物中的酚类物质, 提取率可达 10.07 mg GAE/g[37], 显著高于传统水提、有机溶剂提取法。该溶剂黏度高于纯水, 自然萃取速率慢, 通常需要搭配超声辅助才能提升提取效率。溶剂水溶性极强, 难以依靠简单分液实现溶剂与水相分离, 后期溶剂回收再生难度大、提纯成本偏高。溶剂对糖类、胶体杂质同样具有溶解性, 萃取过程会同步富集废水内可溶性杂糖与大分子胶体, 造成提取液杂质偏高, 增加后续脱色精制工序压力。亚临界水提取技术也是国外研究的热点, 在 100~180 ℃、高压条件下, 可快速溶出酚类物质与咖啡因, 提取时间仅为 10~30 min, 提取率较传统水提法提高 60%以上[38], 且无溶剂残留, 符合绿色化工发展趋势。亚临界水提取技术需要成本昂贵的高压密闭反应耐压耐高温设备。长时间亚临界高温处理容易破坏咖啡中热敏性香气物质, 加速不稳定多酚发生氧化降解, 降低活性物质保留率。水体在高温高压下极易催化糖类、氨基酸发生美拉德反应, 使提取液色泽加深、产生焦糊异味。

2.2.2　先进分离技术

固相萃取技术(solid phase extraction, SPE)、分子印迹技术(molecular imprinting technology, MIT)可实现有效成分的高选择性富集与分离, 其中分子印迹技术能特异性识别绿原酸、咖啡因等目标成分, 提取纯度可达 95%以上[39], 适用于高附加值产品制备。分子印迹材料制备工艺烦琐, 材料聚合过程易出现孔道堵塞、识别位点包埋等缺陷, 印迹模板多为单一目标物质, 通用性差, 仅能识别特定目标物, 无法同时富集发酵液内多种活性成分。Pishro 等[40]采用固相萃取技术从去皮脱胶废水中提取咖啡因, 回收率达 90%以上, 纯度可达 98%, 该技术已实现规模化生产, 成为咖啡主产国咖啡因提取的主流工艺。此外, 发酵-提取耦合技术在国外应用广泛, 哥伦比亚、埃塞俄比亚等咖啡主产国, 采用厌氧发酵技术处理去皮脱胶废水, 在产生沼气实现能源回收的同时, 回收有机酸、多糖等有效成分[41], 进一步提高资源利用效率。固相萃取吸附填料存在饱和上限, 反复使用后吸附能力下降, 再生难度大, 适合实验室精制, 难以实现大批量工业化连续生产。同时填料极性固定, 对不同种类多酚物质吸附选择性单一, 难以同步分离极性差异较大的多种活性成分。

2.3　提取分离技术对比与展望

综合国内外咖啡发酵液提取分离技术, 风味与有效成分保留方面, 厌氧发酵提取技术最佳, 适合加工高品质风味咖啡液; 提纯精度方面, 优先考虑 MIT、SPE、耦合提取技术, 适合实验室单一有效成分高纯度制备; 经济性与工业化应用上, 优先考虑综合成本低、操作简便的膜分离技术、超声/微波辅助水提技术, 最容易实现工业化应用; 溶出富集能力突出的为绿色溶剂与亚临界水提取, 适合废水回收与低值多酚富集; 高级氧化技术, 多酚保留率与风味评分最低, 适用于脱色除杂、降低废水有机物浓度。

国内提取分离技术以低成本、易工业化为核心优势, 适用于大规模废水处理与基础资源回收, 且率先研发了三维电芬顿、微生物燃料电池耦合光芬顿等高级氧化预处理技术, 有效解决了高浓度咖啡发酵液的提取难题[5–6], 但在提取纯度与产品附加值方面还有提升空间; 国外提取技术以绿色化、高效化为显著特征, 提取纯度高, 适合高附加值产品开发, 但成本较高, 难以大规模推广应用。目前, 国内外提取技术均朝着“绿色化、高效化、集成化”的方向发展, 未来研究将重点放在低成本、高纯度集成提取工艺的研发上, 实现国内外技术的优势互补与协同创新。

3　咖啡发酵液的高值化产品开发路径

基于咖啡发酵液的有效成分特性与功能优势, 国内外科研团队与企业已开发出食品与保健品、化妆品与生物医药、农业与环境、能源与材料 4 大类高值化产品, 部分产品已实现产业化示范或商业化应用, 成功实现了废水的资源化与高值化转化。咖啡发酵液的资源化利用是咖啡废弃物综合利用体系的核心组成部分, 将其与咖啡果皮、咖啡渣等副产物协同利用[42], 可构建咖啡加工全产业链的资源循环模式, 推动产业绿色低碳发展。

3.1　食品与保健品领域

食品与保健品领域是咖啡发酵液有效成分高值化利用的核心方向, 主要依托酚类活性物质、多糖、咖啡因等成分的功能特性开发相关产品。酚类提取物(绿原酸、咖啡酸等)具有较强的抗氧化活性, 可作为天然食品防腐剂、保鲜剂及功能饮料添加剂, 既能延长食品保质期, 又能发挥保健功效, 满足消费者对天然健康食品的需求。

Arango-Agudelo 等[43]从咖啡发酵液中提取的酚类提取物，已成功应用于果汁、糕点等食品的保鲜，可使食品保质期延长 3~5 d，且无化学防腐剂的副作用。咖啡因经高纯度提取后，可用于能量饮料、医药中间体生产，巴西、越南等咖啡主产国已实现咖啡因的规模化提取，年产能达万吨级，形成了成熟的产业链条[31,41]。印度的研究表明，湿法加工咖啡浆果时产生的粘液中可提取高品质果胶，这类果胶是食品、美容和医药工业的重要原料，市场前景广阔[44]。此外，咖啡发酵液还可用于咖啡果酒生产，通过菌种筛选与外源物质调控，优化发酵过程，提升果酒的风味、品质、稳定性及生产效率[45]。

3.2 化妆品与生物医药领域

酚类提取物的抗氧化、抗衰、抗炎等功能特性，使其在化妆品领域应用前景广泛，葡萄牙、意大利等国已将其应用于面霜、精华液等护肤品研发，能有效改善皮肤暗沉、延缓皮肤衰老，满足消费者对天然护肤品的需求[46]。2022 年，六方氮化硼咖啡因眼霜以云南小粒咖啡豆为原料[47]，创新采用咖啡发酵液替代纯水，通过混合菌株发酵技术，充分利用其中多肽、多酚、多糖等成分的抗氧化和去水肿功效，显著改善眼周肌肤问题，成为化妆品领域资源化利用的典型案例。咖啡发酵液提取物对真菌、细菌的抑制率可达 80%以上，可用于制备天然防腐剂、伤口护理材料，替代化学防腐剂，减少皮肤刺激与过敏风险[48]。此外，绿原酸提取物可用于制备抗炎、抗氧化类药物，目前相关研究多处于实验室阶段，未来有望实现产业化应用，为生物医药领域提供新的天然活性原料[49]。

3.3 农业与环境领域

农业与环境领域的高值化利用主要依托咖啡发酵液中的矿物质、蛋白质及多糖成分，开发生物肥料、生物饲料及水处理剂，其中生物肥料是目前应用最广泛的产品。哥伦比亚、埃塞俄比亚等咖啡主产国，将咖啡发酵液经腐熟、氮磷回收处理后，制成液体/固体有机肥，应用于咖啡种植，可有效改良土壤结构、提升咖啡产量 10%~15%，实现“以废治废”的循环农业模式[50]。研究表明[51]，酸化茶园土壤中施用高浓度乙酸镁溶液浸渍(1.5 mol/L)改性生物炭具备优良的土壤改良与养分调控性能，将处理达标后的咖啡发酵液与该改性炭材料复配，可制备咖啡种植专用土壤改良剂，能够优化咖啡园土壤理化性状、改善根际生长环境，对提升咖啡豆产量与品质具有显著促进效果。目前该种养耦合资源化技术仍处于研究探索阶段，暂无公开新闻报道与文献成果。生物饲料方面，将咖啡发酵液中的蛋白质、多糖经发酵处理后，用于反刍动物饲料生产，可降低养殖成本，提升饲料的营养价值与消化吸收率[52]。此外，多酚、果胶经改性处理后，可作为重金属吸附剂、絮凝剂，用于工业废水处理，重金属去除率可达 75%以上[53]，为环境修复提供了新的技术路径。

云南产区已探索出“咖啡发酵液制肥+咖啡渣制生物炭”的协同利用路径，实现咖啡加工副产物的全量回收与高效利用，助力咖啡种植与加工的闭环循环[4]，为咖啡产业全链条绿色发展提供了本土化的实践方案。

3.4 能源与材料领域

能源化利用是咖啡发酵液资源化的重要方向，厌氧发酵技术可将咖啡发酵液中的有机质转化为沼气(甲烷含量 55%~65%)，1 m^3 废水可产 0.3~0.4 m^3 沼气，主要用于加工厂供热发电、取暖、替代化石燃料减碳，同时副产有机肥，实现能源与资源双重回收[54]。以阿拉比卡咖啡湿法加工废水为对象，用于生产高附加值酒精制品，实现资源化利用[55]。生物基材料方面，果胶、多糖可用于制备可降解膜、包装材料，替代传统塑料，减少白色污染，采用复合酶解-乙醇沉淀工艺制备食品级果胶，实现咖啡副产物的资源化与高值化，为云南咖啡产业绿色升级及可降解生物基材料开发提供了关键技术支撑[56]。

4 现存挑战与高值化利用展望

4.1 现存挑战

尽管国内外在咖啡发酵液资源化利用方面取得了显著进展，但目前仍面临不少亟待解决的技术瓶颈与产业问题。首先，咖啡发酵液中的多糖、酚类、蛋白质、有机酸等成分相互作用形成复杂的复合体系，有机酸分子量小，采用膜分离时，易透过超滤、微滤膜，还会改变发酵液 pH，影响酚类氧化、蛋白质絮凝、胶体稳定性；酚类与蛋白、果胶多糖形成酚-蛋白、酚-多糖复合物，多糖与有机酸络合，被胶体包裹锁定，常规过滤难以分离；微生物菌体微粒会物理吸附酚类、有机酸等目标组分，随废渣一同被去除；常规加热浓缩、真空处理时，低沸点香气组分(酯类、醇类、醛类、呋喃类)大量挥发流失，造成有效成分损失。咖啡发酵液成分体系复杂导致分离难度大，高纯度分离成本较高，难以实现多成分的同步高效回收。其次，规模化应用面临突出瓶颈，实验室小试阶段的技术效果良好，但在工业放大过程中，存在能耗高、污染控制难度大、工艺稳定性差等问题，且设备投资成本较高，中小咖啡企业难以承担，导致技术转化率低。再次，产业链体系不完善，目前缺乏统一的有效成分提取标准与产品质量规范，高值化产品的市场认可度不足，产品附加值还有提升空间，制约了产业的可持续发展。最后，政策支持力度不足，部分咖啡主产国缺乏针对性的扶持政策与激励机制，产学研协同创新的紧密性不够，技术成果的转化效率较低。

从国内核心产区的发展现状来看，云南咖啡加工企业以中小型为主，资金与技术实力有限，难以独立承担资

源化提取设备的投入, 且产区缺乏统一的咖啡发酵液收集与集中处理体系[3], 分散式排放导致资源化利用成本高、效率低。同时, 咖啡发酵液资源化利用技术仍以实验室研究和小试为主, 与工业规模化应用的衔接不够, 成熟的产业化技术成果较少, 制约了产区咖啡发酵液的资源回收利用率[4]。此外, 传统水洗脱胶工艺耗水量大, 虽已研发微水脱胶、无水脱胶等节水技术, 但尚未全面推广, 废水产生量仍处于较高水平, 给资源化利用带来较大压力。

4.2　高值化利用展望

随着咖啡产业绿色转型的持续推进与“双碳”目标的深入实施, 咖啡发酵液的资源化利用将朝着“全链条循环、绿色化主导、多产品联产、智能化规模化”的方向发展。(1)构建“废水-成分提取-产品生产-废渣/母液再利用”的闭环循环模式, 实现零废弃、高收益, 比如将提取后的母液用于发酵产沼气, 废渣用于制备生物肥料, 形成完整的资源循环体系, 提升整体经济效益与环境效益。(2)绿色技术逐步替代传统溶剂与工艺, NADES、酶解、膜分离等绿色技术将进一步优化, 降低应用成本, 实现规模化推广, 同时微纳米气泡、无水脱皮脱胶等新技术将逐步普及, 减少废水产生量, 从源头降低资源化利用压力。(3)多产品联产模式成为主流, 从同一咖啡发酵液中同时提取多酚、多糖、蛋白质、咖啡因等多种有效成分, 同步回收氮磷等营养元素, 最大化挖掘资源价值, 提升经济效益; 同时拓展高附加值应用领域, 重点开发医药级绿原酸、生物基功能材料、高端化妆品原料等产品, 提升产品附加值, 完善产业链体系。(4)强化政策支持与产学研协同创新, 建立咖啡发酵液资源化利用的标准体系与质量规范, 加大政策扶持力度, 鼓励企业与科研机构开展深度合作, 建设产业化示范工程, 推动技术的规模化应用; 将智能化技术与规模化生产相结合, 利用人工智能技术优化提取工艺参数, 建设万吨级处理生产线, 降低单位处理成本, 深化产学研协同, 提高技术成果转化效率。

针对云南等核心产区, 未来应依托政策扶持构建咖啡发酵液集中收集与处理体系, 推动中小型咖啡加工企业抱团发展, 通过集约化处理降低资源化利用成本[4]。同时, 加强三维电芬顿、微生物燃料电池等新型处理技术与资源化提取工艺的耦合研发, 开发适合国内产区的低成本、易工业化的集成技术, 并建立咖啡发酵液资源化利用的地方标准与行业规范, 完善从有效成分提取到产品开发的全产业链体系, 助力咖啡产业实现绿色可持续发展。

5　结束语

咖啡在云南省农产品出口体系中, 稳居创汇规模第 4 位, 具备突出的外向型经济拉动作用, 已成为全省实施农业“走出去”战略的重点培育产业[57]。咖啡发酵液作为咖啡初加工过程中产生的核心废水, 富含多糖、酚类活性物质、蛋白质、矿物质等多种具有高值化利用潜力的有效成分, 是一种重要的生物质资源。国内外研究已明确其有效成分的组成与含量特征, 开发了物理、化学、生物及集成提取等系列技术, 为高浓度咖啡发酵液的资源化利用开辟了新路径。目前已成功开发出食品与保健品、化妆品与生物医药、农业与环境、能源与材料 4 大类高值化产品, 部分产品实现产业化示范或商业化应用, 初步实现了环境效益与经济效益的双赢。

然而, 咖啡发酵液的资源化利用仍面临成分分离难度大、规模化应用不足、产业链不完善等突出挑战, 云南等核心产区还存在中小型企业占比高、资源回收利用率低、技术产业化衔接不足等问题[3–4]。咖啡发酵液的资源化利用需融入咖啡废弃物综合利用体系, 形成协同效应, 未来需以“绿色化、高值化、规模化、循环化”为核心目标, 加强低成本集成提取技术的研发与创新, 拓展高附加值产品的应用场景, 推动产学研协同创新与政策支持, 完善相关标准体系, 推广微水、无水脱胶等节水技术。同时, 针对核心产区构建咖啡发酵液集中收集与处理体系, 推动高级氧化预处理技术与资源化提取工艺的耦合应用, 构建咖啡加工全产业链的资源循环模式, 助力咖啡产业实现绿色可持续发展, 为全球农产品加工副产物的资源化利用提供中国方案。

参考文献

[1] 肖克, 翟慧楠, 胡荣锁, 等. 不同初加工方法对咖啡豆风味化合物和感官特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 22–32.
Xiao Ke, Zhai Huinan, Hu Rongsuo, et al. Effect of different primary processing methods on flavor compounds and sensory characteristics of coffee beans [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 22–32.

[2] 董文江, 张丰, 赵建平, 等. 云南不同地区生咖啡豆的风味前体物质研究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(1): 290–296.
Dong Wenjiang, Zhang Feng, Zhao Jianping, et al. Flavor precursor compounds of green coffee beans from different geographical origins in Yunnan Province [J]. Modern Food Science & Technology, 2016, 32(1): 290–296.

[3] 匡钰, 肖兵, 张洪波, 等. 云南咖啡初加工废弃物利用及排放情况调查[J]. 中国热带农业, 2018(5): 31–36.
Kuang Yu, Xiao Bing, Zhang Hongbo, et al. Investigation on utilization and discharge of coffee primary processing wastes in Yunnan Province [J]. China Tropical Agriculture, 2018(5): 31–36.

[4] 段毅, 王淑娟. 创新赋动能 云咖更香醇[N]. 云南日报, 2024-06-17 (1).
Duan Yi, Wang Shujuan. Innovation drives momentum for more fragrant Yunnan coffee [N]. Yunnan Daily, 2024-06-17 (1).

[5] 黄建洪, 张亘, 赵世民, 等. 基于三维电芬顿法的咖啡初加工废水有机物去除特性分析[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2024, 49(3):

239–249.
Huang Jianhong, Zhang Gen, Zhao Shimin, et al. Analysis of organic properties of coffee processing wastewater based on three-dimensional electro fenton method [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2024, 49(3): 239–249.

[6] 黄建洪, 张亘, 朱彬, 等. 一种三维电极—电芬顿耦合处理咖啡初加工废水的装置: CN2023102889230 [P]. 2023-05-23: 3–6
Huang Jianhong, Zhang Geng, Zhu Bin, et al. A device for treating primary coffee-processing wastewater by coupled three-dimensional electrode-electro-fenton technology: CN2023102889230 [P]. 2023-05-23: 3–6.

[7] International Coffee Organization. Beyond coffee: towards a circular coffee economy: 2022-23 [R/OL]. (2022-01-31) [2026-03-20]. https: //www. Icocoffee.org/documents/cy2024.

[8] Taiwo K J, Ogundipe S O, Kerr W L, et al. Sustainable management of simulated coffee processing wastewater using micro-aeration enhanced anaerobic digestion: a long-term technical evaluation[J]. Frontiers in Sustainability, 2025, 6: 1681014.

[9] Dong Wenjiang, Zhao Jianping, Hu Rongsuo, et al. Differentiation of Chinese robusta coffees according to species, using a combined electronic nose and tongue, with the aid of chemometrics [J]. Food Chemistry, 2017, 229: 743–751.

[10] Dong Wenjiang, Hu Rongsuo, Chu Zhong, et al. Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans [J]. Food Chemistry, 2017, 234: 121–130.

[11] 陈云兰, 李学玲, 蒋快乐, 等. 咖啡湿法发酵中使用果胶酶对脱胶时间与杯品质量的影响[J]. 热带作物学报, 2020, 41(2): 371–377.
Chen Yunlan, Li Xueling, Jiang Kuaile, et al. Effects of pectinase on pectin removing time and cup quality in wet fermentation of coffee [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(2): 371–377.

[12] 林琳, 刘颖, 张得香, 等. 咖啡豆发酵产物的抗氧化及抗炎活性[J]. 香料香精化妆品, 2025(5): 6–12, 30.
Lin Lin, Liu Ying, Zhang Dexiang, et al. Antioxidant and anti-inflammatory activities of coffee bean fermentation products [J]. Flavour Fragrance Cosmetics, 2025(5): 6–12, 30.

[13] Figueroa-Campos G A, Sagu S T, Saravia-Celis P, et al. Comparison of batch and continuous wet-processing of coffee: changes in the main compounds in beans, by-products and wastewater [J]. Foods, 2020, 9(8): 1135.

[14] Figueroa-Campos G A. Wet-coffee processing production wastes [D]. Potsdam: University of Potsdam, 2022: 1–86.

[15] Haile M, Kang W H. The role of microbes in coffee fermentation and their impact on coffee quality [J]. Journal of Food Quality, 2019, 2019: 4836709.

[16] Janne Carvalho Ferreira L, De Souza-Gomes M, Maciel de Oliveira L, et al. Coffee fermentation process: a review [J]. Food Research International, 2023, 169: 112793.

[17] Orrego D, Zapata-Zapata A D, Kim D. Optimization and scale-up of coffee mucilage fermentation for ethanol production [J]. Energies, 2018, 11(4): 786.

[18] Rodríguez J. Valorization of coffee cherry by-products: a comprehensive review [J]. Foods, 2021, 10(3): 683.

[19] 王丽颖, 李福香, 杨雅轩, 等. 多糖与多酚相互作用机制及其对多酚特性的影响研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(11): 276–282.
Wang Liying, Li Fuxiang, Yang Yaxuan, et al. Interaction mechanism between polyphenols and polysaccharides and effect on polyphenolic properties: a review [J]. Food Science, 2017, 38(11): 276–282.

[20] Manasa V, Padmanabhan A, Anu Appaiah K A. Utilization of coffee pulp waste for rapid recovery of pectin and polyphenols for sustainable material recycle [J]. Waste Management, 2021, 120: 762–771.

[21] Haile M, Kang W H. Antioxidant activity, total polyphenol, flavonoid and tannin contents of fermented green coffee beans with selected yeasts [J]. Fermentation, 2019, 5(1): 29.

[22] 李雄. 咖啡果皮水溶性膳食纤维的制备及特性研究[D]. 海口: 海南大学, 2018: 1–79.
Li Xiong. Preparation and characteristics of water-soluble dietary fiber from coffee peel [D]. Haikou: Hainan University, 2018: 1–79.

[23] 李春阳, 许时婴, 王璋. 香草醛-盐酸法测定葡萄籽、梗中原花青素含量的研究[J]. 食品科学, 2004, 25(2): 157–161.
Li Chunyang, Xu Shiying, Wang Zhang. Vanillin-HCl assay for the proanthocyanidins content of grape seed and stem [J]. Food Science, 2004, 25(2): 157–161.

[24] 付桂明, 万茵, 周建斌. 杜仲叶醇提液中黄酮测定方法的比较研究[J]. 中国食品学报, 2006, 6(1): 224–229.
Fu Guiming, Wan Yin, Zhou Jianbin. Comparison of methods of determining the content of flavonoids in extracts from *Evcommia vlmoides* Oliv. leaves [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2006, 6(1): 224–229.

[25] Wamuyu G W, Kang M, Kang Y. Effect of fermentation on phenolic compounds and antioxidant activity of coffee pulp [J]. Food Research International, 2017, 102: 447–454.

[26] 高子琪, 李泽林, 牛之瑞, 等. 不同初加工方式云南小粒咖啡游离氨基酸差异及其呈味机制[J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 22–31.
Gao Ziqi, Li Zelin, Niu Zhirui, et al. Difference of free amino acids in different primary processed Yunnan Arabica coffee and its taste forming mechanism [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 22–31.

[27] 中国热带作物学会. 微纳米技术咖啡果胶处理工艺成果发布会在普洱召开 [EB/OL]. (2024-01-16) [2026-03-20]. https://www.cstcs.org.cn/contents/174/4219. html.
Chinese Society for Tropical Crops. Achievement conference on micro-nano technology-based coffee pectin treatment process held in Pu'er [EB/OL]. (2024-01-16) [2026-03-20]. https: //www.cstcs.org.cn/contents/174/4219. html.

[28] Martin M, de Melo L R, Silva E M, et al. Mineral composition changes during coffee fermentation [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2019, 77: 10–16.

[29] 杜华波, 董亚明, 王娅玲, 等. 一种咖啡果胶原浆和纤维胶体的制备工艺: CN2024106810010 [P]. 2024-08-02: 3–8.
Du Huabo, Dong Yaming, Wangyaling, et al. A preparation process of raw coffee pectin slurry and fiber colloid: CN2024106810010 [P]. 2024-08-02: 3–8.

[30] 新华网. 云南农大发布首款“咖啡啤酒”[EB/OL]. (2025-05-14) [2026-03-20]. http://www.yn.xinhuanet.com/20250514/ce91b3560b5d4ad1a3b7a0077fe286da/c. html.
Xinhua Net. Yunnan Agricultural University launches the first “coffee beer” [EB/OL]. (2025-05-14) [2026-03-20]. http://www.yn.xinhuanet.com/20250514/ce91b3560b5d4ad1a3b7a0077fe286da/c. html.

[31] 杨静安, 蒋家顺, 付晓萍, 等. 咖啡副产物综合利用研究进展[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2025, 40(5): 178–186.
Yang Jing’an, Jiang Jiashun, Fu Xiaoping, et al. Research progress on comprehensive utilization of coffee by-products [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2025, 40(5): 178–186.

[32] 张贞珍. 一种咖啡初加工废水资源化处理方法及其系统: CN2022105191692 [P]. 2022-07-22: 3–8.
Zhang Zhenzhen. A method and system for resourceful treatment of coffee primary processing wastewater: CN2022105191692 [P]. 2022-07-22: 3–8.

[33] 陈云兰, 莫丽珍, 陈小龙, 等. 咖啡湿法加工中生物酶制剂脱胶污水指标测定[J]. 热带农业科学, 2019, 39(5): 81–84, 98.
Chen Yunlan, Mo Lizhen, Chen Xiaolong, et al. Determination of indicators of wastewater from biological degumming in wet processing of coffee [J]. Tropical Agricultural Science, 2019, 39(5): 81–84, 98.

[34] 杜华波, 董亚明, 陈治华, 等. 微纳米气泡技术强化咖啡去皮脱胶废水蛋白质回收及资源化利用研究[R]. 保山: 云南农业大学热带作物学院, 2024.
Du Huabo, Dong Yaming, Chen Zhihua, et al. Study on protein recovery and resource utilization of coffee peeling and degumming wastewater enhanced by micro-nano bubble technology [R]. Baoshan: College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, 2024.

[35] 黄建洪, 黄玥娜, 谢鑫, 等 一种咖啡初加工废水处理方法: CN2022116956804 [P]. 2023-04-14: 3–8.
Huang Jianhong, Huang Yuena, Xie Xin, et al. A method for treating coffee primary processing wastewater: CN2022116956804 [P]. 2023-04-14: 3–8.

[36] Dai Yuntao, van Spronsen J, Witkamp G J, et al. Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology [J]. Analytica Chimica Acta, 2013, 766: 61–68.

[37] Maimulyanti A, Nurhidayati I, Mellisani B, et al. Development of natural deep eutectic solvent (NADES) based on choline chloride as a green solvent to extract phenolic compound from coffee husk waste [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2023, 16(4): 104634.

[38] Strieder M M, Sanches V L, Rostagno M A. Simultaneous extraction, separation, and analysis of 5-caffeoylquinic acid and caffeine from coffee co-product by PLE-SPE×HPLC-PDA two-dimensional system [J]. Food Research International, 2024, 175: 113690.

[39] Theodoridis G, Manesiotis P. Selective solid-phase extraction sorbent for caffeine made by molecular imprinting [J]. Journal of Chromatography A, 2002, 948(1–2): 163–169.

[40] Pishro K A, Silva L S, Lamarca R S, et al. Exploring caffeine extraction using hydrophobic deep eutectic solvents: experimental and theoretical approaches [J]. ACS Omega, 2025, 10(38): 44218–44233.

[41] Campos R C, Pinto V R A, Melo L F, et al. New sustainable perspectives for “coffee wastewater” and other by-products: a critical review [J]. Future Foods, 2021, 4: 100058.

[42] 张京文, 黄家雄, 吕玉兰, 等. 咖啡废弃物利用研究初探[J]. 中国热带农业, 2018(5): 31–36.
Zhang Jingwen, Huang Jiaxiong, Lv Yulan, et al. Preliminary study on the utilization of coffee waste [J]. China Tropical Agriculture, 2018 (5): 31–36.

[43] Arango-Agudelo E, Rendón-Muñóz Y, Cadena-Chamorro E, et al. Evaluation of Colombian coffee waste to produce antioxidant extracts [J]. BioResources, 2023, 18(3): 5703–5723.

[44] Garcia R, Arriola D, De Arriola M C, et al. Characterization of coffee pectins [J]. Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie, 1991, 24: 125–129.

[45] 吴锐佳, 王雨辰, 黄先敏, 等. 咖啡果优良本土酵母菌筛选及发酵特性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(22): 202–211.
Wu Ruijia, Wang Yuchen, Huang Xianmin, et al. Screening and fermentation characterization of elite indigenous yeast strains for coffee pulp [J]. Food Research and Development, 2024, 45(22): 202–211.

[46] Pombo D, Silva C, Silva A M S, et al. Cosmetic applications of coffee by-products: a review [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 187: 115386.

[47] 探索咖啡发酵液奥秘, HBN 多方位提升产品功效[EB/OL]. (2023-11-30) [2026-03-20]. https: //news. tom. com/202311/4840652745. html.
Exploring the mystery of coffee fermentation broth, HBN improves product efficacy in multiple aspects [EB/OL]. (2023-11-30) [2026-03-20]. https: //news.tom.com/202311/4840652745.html.

[48] Calheiros D, Dias M I, Calhelha R C, et al. Antifungal activity of spent coffee ground extracts [J]. Microorganisms, 2023, 11(2): 242.

[49] 赵书琪, 张宇硕, 吴丽飞, 等. 绿原酸类化合物的种类、提取和生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(18): 435–445.
Zhao Shuqi, Zhang Yushuo, Wu Lifei, et al. Research progress on types, extraction and biological activity of chlorogenic acid compounds [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(18): 435–445.

[50] Trujillo-González J M, Jiménez-Ballesta R, Silva-Parra A, et al. A comprehensive review of composting from coffee waste: revalorisation of coffee residue in Colombia [J]. International Journal of Recycling Organic

Waste in Agriculture, 2024, 13(3): 1–12.

[51] 罗玉博，吕鑫航，刘文彬，等。镁改性生物炭对酸化茶园土壤的改良效果[J]. 江苏农业科学，2025, 53(6): 231–239.
Luo Yubo, Lv Xinhang, Liu Wenbin, et al. Improvement effects of magnesium-modified biochar on acidified tea garden soil [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2025, 53(6): 231–239.

[52] Munguía-Ameca G, Ortega-Cerrilla M E, Herrera-Haro J G, et al. Growth performance, rumen fermentation, *in vivo* digestibility, and meat quality of pelibuey lambs fed a diet with ensiled coffee pulp [J]. Animals, 2023, 13(22): 3462.

[53] Carvajal-Flórez E, Oakley S M. Coffee pulp characterization and treatment as adsorbent material for heavy metal removal from landfill leachates [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2023, 20(8): 8241–8260.

[54] Beyene A, Yemane D, Addis T, et al. Experimental evaluation of anaerobic digestion for coffee wastewater treatment and its biomethane recovery potential [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2014, 11(7): 1881–1886.

[55] Morales E, Chávez S, García L, et al. Variation in the alcohol components of *Coffea arabica* L. wastewater distillate fermented under different conditions [J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2022, 21(3): 1289–1295.

[56] 熊相人, 杨桂香, 山云辉, 等. 一种以咖啡加工副产品制备的果胶及其制备方法与应用: CN2018110135126 [P]. 2019-01-01: 3–5
Xiong Xiangren, Yang Guixiang, Shan Yunhui, et al. Pectin prepared from coffee-processing by-products and its preparation method and application: CN2018110135126 [P]. 2019-01-01: 3–5

[57] 李莲, 刘新月, 伍旭东, 等. 不同烘焙程度小粒种咖啡中主要化学成分动态演变探究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(9): 297–304.
Li Lian, Liu Xinyue, Wu Xudong, et al. Research on the dynamic changes of main chemical components in the Coffea arabica L. under different roasting degrees [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(9): 297–304.

(责任编辑：韩晓红 蔡世佳)