

• 专 论 •

中药固体废弃物的能源化发展——“双碳”经济转型中的机遇与挑战

龙 旭, 卢莹磊, 王珂莹, 刘靖丽, 张严磊, 郭 惠, 唐于平*

陕西中医药大学, 陕西省中医药管理局中药配伍重点研究室, 陕西 咸阳 712046

摘要: 打破深度依存化石能源的“高碳”发展模式, 优化能源结构, 开发独具行业特色的中药固体废弃物能源, 是实现“双碳”战略目标和废弃物资源循环利用的前提和保障。针对制药行业低碳发展和能源转型的需求, 结合中药固体废弃物排放和处理不当导致资源浪费和环境污染的棘手问题, 明确能源结构转型对制药行业实现“双碳”目标的重要性。通过探讨中药固体废弃物来源、资源成分和资源再利用技术的优缺点, 阐明中药固体废弃物能源化利用在实现制药行业可再生能源开发和废弃物无害化、资源化利用中的重要作用。此外, 从政策法规、技术、市场需求和成本效益等方面对中药固体废弃物能源化的机遇和挑战进行深入分析, 为中药行业低碳能源化发展提供参考。

关键词: 中药固体废弃物; 能源; 循环利用; 碳中和; 低碳发展

中图分类号: R286 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2025)06-1877-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.06.001

Energy development of traditional Chinese medicine solid waste: Opportunities and challenges in transformation of “dual carbon” economy

LONG Xu, LU Yinglei, WANG Keying, LIU Jingli, ZHANG Yanlei, GUO Hui, TANG Yuping

Key Laboratory of Shaanxi Administration of Traditional Chinese Medicine for TCM Compatibility, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712046, China

Abstract: In order to achieve the goals of the “dual carbon” strategy and resource recycling and utilization of traditional Chinese medicine (TCM) wastes, it is necessary to break the high-carbon development model of deep dependence on fossil energy, optimize the energy structure, and develop energy from TCM solid wastes with industrial characteristics. Therefore, this paper addresses the demand for low-carbon development and energy transformation in the pharmaceutical industry, as well as the challenges of resource waste and environmental pollution caused by improper disposal of TCM solid waste. It highlights the importance of energy structure transformation in achieving the dual-carbon goal of the pharmaceutical industry. It also thoroughly discusses the sources of TCM wastes, their resource components, and the pros and cons of resource reuse technologies. The paper highlights the importance of utilizing TCM solid wastes to promote renewable energy development and ensure harmless and resourceful waste management in the pharmaceutical industry. It also provides an in-depth analysis of the opportunities and challenges of the energy conversion of TCM solid wastes from policies and regulations, technology, market demand, and cost-effectiveness. This study aims to provide a reference for developing low-carbon energy in the traditional TCM industry.

Key words: traditional Chinese medicine solid waste; energy; cyclic utilization; carbon neutrality; low carbon development

中药是中国传统医药体系的核心组成部分, 已发展数千年。作为预防、缓解和治疗疾病的重要资源, 中药在保障医药产业和健康服务业发展中具有

不可替代的关键作用^[1]。随着全球对中医药行业的逐步认可, 中医药事业得到迅猛发展, 导致中药需求量逐年递增^[2]。近年来, 全国中药材种植面积已

收稿日期: 2024-08-03

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(82104333); 秦创原中医药产业创新聚集区项目(L2024-QCY-ZYYJJQ-X55); 陕西省重点研发计划项目(2022SF-481)

作者简介: 龙 旭, 副教授, 硕士生导师, 从事中药废弃物能源化利用研究。E-mail: longxu@sntcm.edu.cn

*通信作者: 唐于平, 教授, 博士生导师, 从事中药废弃物资源利用研究。E-mail: yupingtang@sntcm.edu.cn

超过 $2.40 \times 10^6 \text{ hm}^2$ [3-4]。但是, 中药生产和加工过程中产生的固体废弃物量也呈递增趋势, 全国年产非药用部位废弃物总量约 7 500 万 t, 药渣总量为 3 000 万~7 000 万 t [5-6]。基于中药固体废弃物富含糖类、黄酮类、生物碱类、皂苷类等资源物质及微量元素, 若对其采用堆放、焚烧和填埋等粗放型处理方式, 必然会造成资源浪费, 并引发土壤、水体和空气污染等问题 [5-7]。因此, 遵循生态效益、经济效益和社会效益统一发展原则, 如何提高中药固体废弃物的资源综合利用效益, 推动中药行业的可持续与低碳发展, 已成为当前亟待解决的重要研究课题。

基于中药固体废弃物所含资源型物质的理化性质和潜在资源化价值, 其利用模式包括有效成分再提取、肥料化、基质化和饲料化等 [6, 8]。这些方法需对中药固体废弃物预先进行分级、分类管理, 再根据其特性进行资源化处理 [9]。虽然在一定程度上可回收利用中药固体废弃物, 但仍存在成分复杂、分离困难、利用率低和易产生二次污染等诸多问题 [6, 10-12]。与之相比, 中药固体废弃物资源化利用模式, 尤其是热解技术, 无需分类处理即可直接转化为能源或化学品, 是中药制药行业实现能源结构转型、开发利用可再生能源及推广低碳发展技术的重要途径。

社会发展对化石能源的深度依存, 导致温室气体——二氧化碳排放量激增, 引发极端天气、海冰退缩、沙尘野火、季节变化等系列气候灾害, 严重威胁地球生态系统的稳定性 [13-16]。为履行国际碳减排任务、构建和谐国际关系, 并推动社会经济健康、协调与可持续发展, 中国承诺力争 2030 年实现碳达峰并于 2060 年实现碳中和 [13-16]。与需要 40~60 年实现碳中和的欧美等发达国家相比, 仅需 30 年实现“双碳”目标的中国面临时间紧、任务重、难度大的挑战 [17-22]。为了打破现有的“高碳”发展模式, 碳减排是实现碳中和的关键途径, 能源结构转型是实现碳中和的重要基础。因此, 开发利用可再生能源、研发推广低碳关键技术、建立健全碳交易制度等, 成为中国长期碳中和发展的关键研究方向 [19]。在此背景下, 将制约制药行业发展的中药固体废弃物高附加值处理、转化、再利用, 是推动中药产业低碳转型发展的重要战略议题。本文分析了中药固体废弃物的来源, 总结了其富含资源性物质的特性, 评述了固体废弃物资源再利用方式及其不足之处, 阐明了面对“双碳”目标和制药行业能源转型的需求, 中药固体废弃物资源化利用的现状、机遇

和挑战, 以期为零碳背景下中药固体废弃物资源化循环利用提供理论支撑。

1 中药固体废弃物

1.1 中药固体废弃物的来源

中药主要由植物药、动物药和矿物药组成, 其中植物类药材占 87% 以上 [3]。根据植物类药材药效部位的不同, 分为花、茎、叶、果实和根等 [23-24]。如菊花、红花、金银花、合欢花等以花朵作为药效部位; 艾叶、薄荷、穿心莲、金钱草、益母草、马齿苋等以茎叶作为治疗疾病的药效部位; 大枣、枸杞、女贞子、五味子、苦杏仁、山楂等以果实作为入药部位; 人参、黄芪、丹参、板蓝根、葛根等以根入药 [23-24]。其他非药用部位在种植、田间管理、采收、制药加工过程中, 因药用价值低、种类繁多、储运收集成本高、带有毒性、易腐烂变质等原因而作为废物丢弃。这不仅产生了大量的非药用部位 (年产约 7 500 万 t)、下脚料及药渣等 (总量逾亿 t) 废弃物, 同时这些废弃物的潜在资源价值未被有效开发, 造成资源浪费 [4, 8]。

中药制药过程中的提取、炮制、制剂和中成药生产等环节, 均会产生大量药渣。目前, 我国年产中药渣总量为 3 000 万~7 000 万 t [5-6, 25-27]。根据原料类型, 药渣可分为中药渣、生物制药药渣、抗生素类药渣等, 其中, 中成药生产产生的中药渣量占总量的 70%, 抗生素生产中产生的药渣约为总量的 96%~99%, 中药注射剂生产中的废弃物达总量的 90% [11, 25-28]。此外, 中药渣中约 40% 的有效成分未被充分利用。由于药渣初始含水率高于 70% 极易腐败, 且具有组分复杂、难筛选、黏结度高、异味重、药物成分残留且部分有毒等特点, 若处理不当, 不仅会导致资源浪费和增加企业生产成本, 还会引发环境污染问题 [5, 23]。

1.2 中药固体废弃物的资源性物质

植物类药材经富集和纯化等工艺处理可获得不同类型的资源产品, 但这些处理过程的原料利用率低于 30% [3, 9]。其余部分以废弃的花朵、枝叶、根茎、果实、种子、栓皮、药渣等形式成为中药固体废弃物 [3]。植物类中药固体废弃物的化学成分涵盖核酸、糖类、蛋白质、脂类等植物初生代谢产物, 以及黄酮类、生物碱类、酚酸类、酯类、甾体类等次生代谢产物 [8, 29]。

1.2.1 富含多糖类废弃物 中药废弃物中的多糖主要包括 2 类, 一类是增强植物细胞机械强度和稳

定性的结构多糖，如半纤维素、木质素、果胶等；另一类是植物中储存和供应能量的储藏多糖，如淀粉、菊糖、黏液质、植物胶等^[29]。纤维素类、半纤维素类和果胶类广泛存在于植物的根、茎、叶和果实等的细胞壁中，具有资源丰富、可再生、成本低廉、环境友好等优点，适用于制备烃类、葡萄糖、糖醛和苯酚等化工原料^[29-31]。中药固体废弃物中富含结构多糖的有：罗布麻、夏枯草、桑白皮、玄参、桂皮、连翘、板蓝根、黄芩、益母草、苦参、木通、知母、薄荷、甘草、柑橘类等^[8, 31-34]。储藏多糖如淀粉、菊糖、黏液质、植物胶等主要存在于植物的种子、根、茎和果实中，因其资源丰富、来源广泛、可再生，可用于制备食品、药丸、药膏、黏合剂和增稠剂等^[29]。中药废弃物中富含储藏多糖的包括贝母、黄姜、山药、葛根、板蓝根和莲子等^[31, 34-35]。

1.2.2 富含黄酮类废弃物 黄酮类化合物是一类具有含氧杂环的天然有机化学物，主要以游离态（苷元）和与糖结合的苷类2种形式存在于植物中，而在藻类和菌类中含量极少^[29]。中药中的芸香科、银杏科、豆科、唇形科、菊科和伞形科等植物中黄酮类化合物含量较高，具有显著的抗癌、抗HIV、抗氧化、抗辐射、抗炎、抗菌和抗病毒等活性^[36]。大量研究表明，中药制药过程中废弃的植株、茎叶、药渣等部分也富含黄酮类化合物，如甘草药渣、酸

枣肉、银杏叶、菊花茎叶、丹参药渣、葛根渣、淫羊藿药渣、枣树皮、姜茎叶、薄荷药渣、党参茎叶等^[9, 32-35, 37-40]。

1.2.3 富含生物碱类废弃物 生物碱是存在于中草药中碱性含氮有机化合物的统称，资源丰富、来源广泛^[36]。其具有显著的抗癌、抗菌、抗病毒、镇痛、抗炎、神经保护和免疫调节等作用^[36]。生物碱在诸如苦参、吴茱萸、附子、川乌、秋水仙、钩藤、雷公藤、平贝母、金钗石斛等中药中均有发现^[36]。此外，苦参种子、葛花、大枣叶、酸枣叶、大枣树皮、薄荷药渣和党参茎叶等中药固体废弃物中也含有生物碱成分^[35, 39-40]。图1以中药葛为例，详细分析了其不同废弃部位所富含的资源性物质。

1.2.4 富含皂苷类废弃物 皂苷是由糖和苷元（甾体和三萜类化合物）通过糖苷键连接形成的化合物，广泛存在于豆科、龙胆科、伞形科和木犀科植物中，具有抗炎、抗癌、抗菌、抗病毒、调血脂和降压等活性^[36, 41]。中药三七、柴胡、酸枣仁、人参、薯蓣、远志、白头翁、黄精、木瓜、百合和黄芩等均含有皂苷^[36-37, 41]。此外，酸枣果肉、大枣叶、酸枣叶、酸枣仁药渣、人参药渣、葛花、三七渣、党参茎叶和山楂叶等中药固体废弃物中也含有皂苷^[33-35, 40-41]。

1.2.5 富含挥发油废弃物 挥发油是植物中具有芳香气味和挥发性的油状液体的统称^[29, 36]。其主要

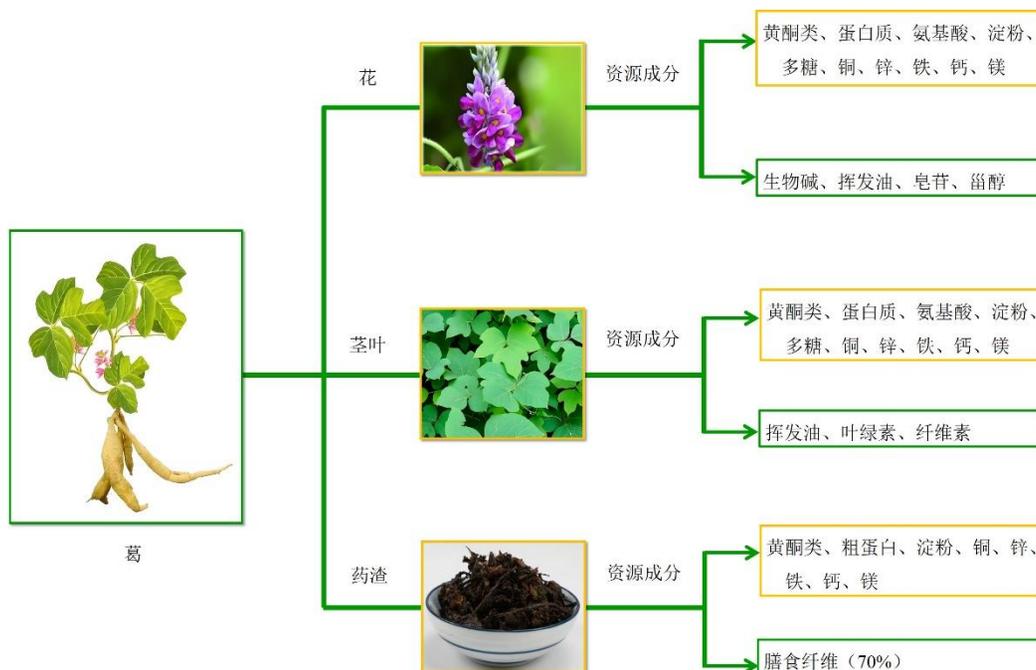


图1 中药葛废弃物部位的资源成分

Fig. 1 Resource components of waste parts of traditional Chinese medicine *Pueraria*

存在于唇形科、菊科、芸香科、樟科、蔷薇科、檀香科和松科等植物中,化学成分包括萜类、芳香族类、脂肪族类和含硫化合物等,具有止咳、平喘、祛痰、抗菌、抗病毒、强心、抗炎、抗氧化、降压、镇痛和精神调节等药理作用^[29]。中药龙脑、薄荷、艾叶、川穹、荆芥、佩兰、青蒿、牛黄、石菖蒲、丁香、紫苏、桂皮、鱼腥草、香附、当归和陈皮等均含有挥发油^[8,29,36]。此外,薄荷药渣、菊花茎叶、菊花药渣、姜黄药渣、金银花药渣、姜茎叶、党参茎叶、紫苏药渣和白芷药渣等也含有挥发油^[9,39-40]。

1.3 中药固体废弃物资源利用方式及不足

中药固体废弃物含有丰富的资源性物质,如多糖、黄酮、生物碱、蛋白质、皂苷和挥发油等有机成分和 N、P、K 等无机元素。若采用简单的焚烧、填埋和堆放等处理方法,不仅会造成资源浪费,还会造成地下水和空气污染等环境问题^[5,23]。因此,针对中药固体废弃物种类繁多和组分复杂的特点,进行精准分析,实施分级和分类处理,能显著提高中药的资源利用率^[9]。

1.3.1 药效成分再提取 中草药在种植、加工和制药过程中,除传统的药效部位外,花、茎、叶、果实、根等非药用部位通常作为废弃物被丢弃。然而,这些非药用部位也含有与药用部位相似的化学成分和药理作用^[23]。如黄芩的花、茎叶和种子中含有 13 种化合物,黄酮含量较高^[42]。金银花的花、茎和叶具有相似的生物活性,主要成分为黄酮和咖啡酰奎宁酸^[43]。此外,不同提取技术(微波提取、亚临界水提取和超声提取)对芍药茎叶中芍药苷的提取率影响不大^[44]。黄芪茎叶的总黄酮表现出良好的抗氧化和抗菌性能^[45]。因此,针对中药固体废弃物中大量的药效成分,采用再提取技术可实现废弃物的资源二次利用并降低废弃物对环境的影响^[24,37]。

药效成分再提取技术是提高中药固体废弃物资源利用率和获取药效成分的重要手段之一,但目前仍面临以下的几个关键挑战:首先,中药废弃物种类繁多、有效成分含量不均、理化性质差异大等缺点,导致分离与纯化过程复杂,增加工艺难度从而限制其产业化发展。其次,传统的水提、醇提等药效成分提取方法和萃取、沉淀等分离纯化技术存在效率低、过程复杂、有机溶剂污染大、产品纯度低等问题。尽管超声、微波等新型提取技术和分离纯化技术(如高效液相色谱、超临界流体萃取)在效果上有所提升,但设备成本高、工艺稳定性差、

处理量有限等问题仍限制了其规模化应用的潜力。第三,废弃物中的药效成分含量通常较低,且在提取分离过程中损失较大,导致产率偏低^[6]。同时,提取分离中较高的能耗、溶剂消耗、设备投资等都会增加企业生产成本。尽管废弃物再提取技术能进一步获取药效成分,若不改进现有的提取、分离、纯化技术,仍会产生大量的二次药渣亟待处理。因此,未来药效成分再提取领域发展的关键是研发具备效率高、成本低、稳定性好、污染少和处理量大的新技术^[11]。

1.3.2 肥料化 中药渣因其高含水率和复杂组分,导致其药效成分再提取面临挑战。然而,基于中药渣富含有机质、多种无机元素、少量维生素、低重金属含量、适宜 pH 值、结构疏松和无致病菌等优势,将其转化为有机肥料以替代工业化肥,有望解决土壤板结、水质污染和土质退化等问题^[10-12,37,46-47]。

堆肥是利用微生物将中药渣等有机废弃物转化为小分子的腐殖质,其转化效率受温度、pH、C/N 比、微生物和粒径等因素影响^[23]。根据微生物对氧气的的需求,堆肥技术可分为厌氧堆肥和好氧堆肥(图 2),其中好氧堆肥应用广泛^[23]。微生物在厌氧条件下依次通过产酸阶段和产甲烷阶段,将大部分有机碳转化为甲烷进行厌氧堆肥。好氧堆肥,又称高温堆肥,能在 50~65 °C 的高温下根除病原体并迅速分解有机物质^[23]。Tian 等^[48]对中药材秸秆堆肥中真菌群落演变进行了研究。Chen 等^[49]考察了中药渣堆肥过程中蚯蚓接种密度对肥料稳定性的影响。Das 等^[50]系统研究了生姜和姜黄废弃物堆肥过程中,蚯蚓堆肥对土壤 pH、电导率、总有机碳、C/N 比和 C/P 比的影响。

中药固体废弃物肥料化利用在资源循环和环境保护等方面具有较大潜力,但其实际应用中存在如下问题。首先,原料种类多样且成分复杂,导致原料管理难度大,并影响肥料的稳定性和肥效。当前肥料化技术主要依赖堆肥和腐熟等传统工艺,存在发酵周期长、稳定性差、控制条件不精准等问题,致使肥料产品质量和肥效不稳定。同时,部分中药成分可能抑制微生物活性,从而降低肥料化效率。其次,资源利用率低和次生废弃物处理问题较突出。中药废弃物中部分有机物难以转化为植物可吸收的营养成分,导致资源利用率不足^[6]。部分未完全分解的有机物可能产生有害物质,会限制肥料化利用。同时,肥料化过程会产生发酵残渣和废液等

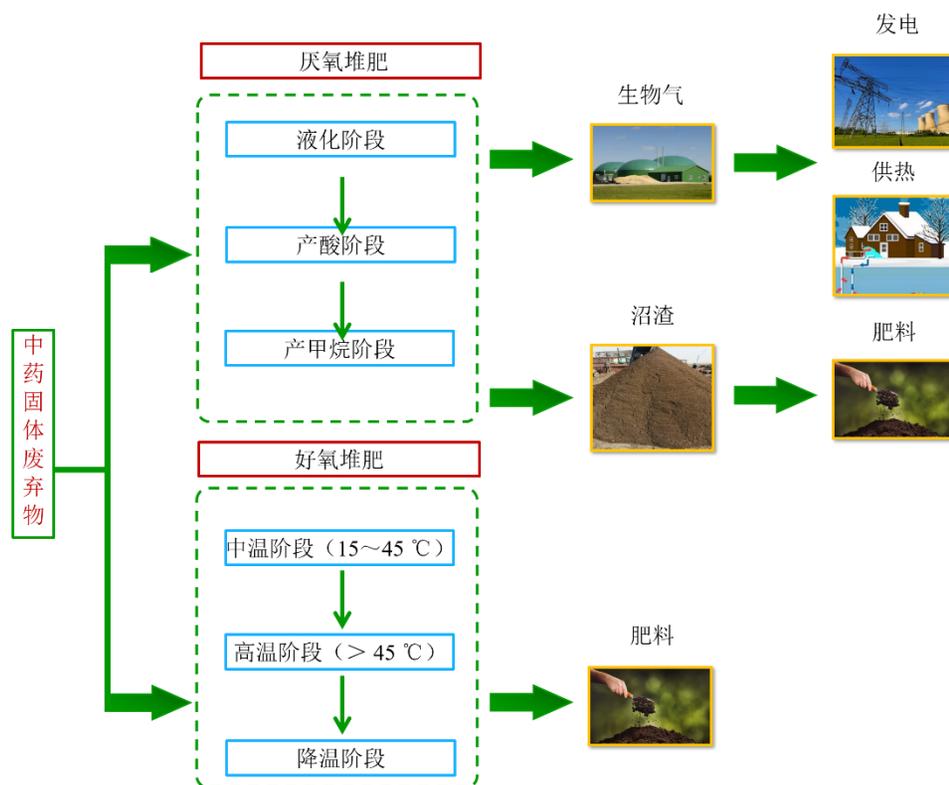


图2 中药固体废弃物堆肥处理工艺流程

Fig. 2 Process flow of composting of traditional Chinese medicine solid waste

次生废弃物，若处理不当可能造成二次污染。第三，肥料化过程中对原料进行收集分类、设备建设维护及发酵控制优化等需要大量人力、物力和时间投入，导致成本较高。此外，肥料化过程中易产生 NH_3 和 H_2S 等有害气体和渗滤液，会对环境、土壤和地下水造成污染。为实现中药固体废弃物高效、环保和可持续肥料化利用，应优化工艺流程，减少污染排放，降低成本，提升肥料产品的质量和稳定性。

1.3.3 基质化 中药渣中富含多糖、氨基酸、蛋白质、纤维素和矿物元素等成分可作为基质用于食用菌栽培^[6, 11, 37]。其中，纤维素、木质素和半纤维素是食用菌生长繁殖的主要碳源，蛋白质经蛋白水解酶分解后生成氨基酸可供食用菌利用，矿物元素则提供其生长发育所需的微量元素^[47]。但是，中药中的生物碱类、萜类等成分可能降低部分食用菌细胞活性，通常需预先去除。傅滢等^[51]以藿香正气水、金钱草、急支糖浆等6种中药渣作为基质培育姬菇，结果显示，中药渣基质栽培的姬菇其营养成分显著高于棉籽壳基质。谭雪明等^[52]将中药渣与粉碎稻草混合作为基质培育秧苗，实验结果表明，中药渣比例越高，秧苗的高度、叶片和根系发育越佳。

近年来，研究人员对中药固体废弃物基质化利用的关注度逐年提升^[6, 11]。然而，该技术的推广和应用仍面临诸多限制。首先，废弃物中重金属及毒性残留对产品安全性构成威胁^[6]。其次，由于废弃物中有效成分和营养成分含量较低，难以获得显著的经济效益。此外，分级分类及前处理过程复杂，导致投资成本上升。同时，废弃物腐殖化过程产生的废气、废水等二次污染物处理问题亟待解决。上述因素均制约了中药固体废弃物基质化利用技术的进一步发展。

1.3.4 饲料化和添加剂 中药提取后的药渣中仍残留约40%的药效成分，其中包括皂苷、黄酮类、粗脂肪、粗蛋白、粗多糖和萜类等物质，经简单处理后可作为动物饲料或饲料添加剂，以促进动物生长、增强动物免疫力、调节机体代谢、改善肉质^[11-12, 25, 46]。中药药效成分常被添加至禽畜饲料中，起到生长促进剂、消化促进剂、泌乳剂、抗菌剂和抗氧化剂等作用^[23]。例如，单味中药中的姜黄、生姜、茴香、薄荷等能促进胆汁酸的合成，增强动物消化和脂质吸收；牛至叶、鼠尾草叶、茴香籽、迷迭香等作为动物生长促进剂；茴香、罗勒、紫丁香、马鞭草、孜然等作为催乳剂增加动物乳汁分泌；

黑胡椒、丁香、天竺葵、肉豆蔻、牛至等具有显著的抑菌性，可保护禽畜免受疾病；为提高肉制品的抗氧化性能，可将迷迭香、鼠尾草、百里香、肉桂、姜等作为添加剂使用^[53-57]。然而，大多数药渣为复方中药废弃物，因其组分复杂、成分差异大且可能有毒，不适合作为饲料或添加剂使用^[10]。

在中药废弃物资源循环利用的研究中，将其转化为动物饲料或添加剂的技术虽取得一定进展，但仍面临诸多挑战^[6, 10]。首先，原料成分的差异导致产品在稳定性、均匀性及营养价值上难以控制，从而影响饲料或添加剂的质量和功效。其次，制备技术尚不成熟，难以全面高效地提取和保留药效成分。此外，高温和发酵过程可能会破坏或转化部分药效成分为无效成分，而动物的消化系统对某些成分的吸收和利用率较低，这限制了饲料的实际功效。同时，饲料化过程通常需要专用设备和高能耗，以完成复杂的前处理和加工工艺，其处理成本高于常规饲料，且发酵过程中可能产生废水或有害气体，造成二次污染。因此，针对这些挑战，需通过技术创新和标准化生产流程来提高资源利用率和产品稳定性。同时，政策支持和标准完善也是确保饲料化及添加剂技术安全性和市场竞争力的关键因素。

对中药固体废弃物进行药效物质再提取、肥料化、基质化、饲料化和添加剂等利用方式能实现资源再利用，但这些方法各有缺陷^[11, 25]。药效物质再提取面临无法实现药渣零排放、二次污染、提取率低、溶剂处理困难、设备要求高和毒性残留等问题。肥料化、基质化和饲料化的中药废弃物则因成分复杂、交叉污染大、品质不稳定、毒性残留、环境污染、处理工艺复杂、营养不均衡及市场接受度低等因素而受到限制^[11]。此外，这些方法较为单一，难以实现药渣零排放，缺乏全面、深层次、最大化挖掘中药固体废弃物资源价值的技术^[11, 25]。

2 “双碳”视域下中药固体废弃物能源化现状、机遇及挑战

2.1 中药固体废弃物能源化利用现状

生物质是自然界唯一可再生的碳源，具有资源丰富、数量大、环境友好和 CO₂ 零排放的优点^[23, 58]。在能源危机背景下，生物质作为全球第四大能源，可通过直接燃烧等方式释放能量，也可利用生物转化技术或热化学转化技术生产二次能源^[25, 58]。在制药行业中，中药固体废弃物作为一类典型的生物质，可通过物理、生物和热化学转化技术生成高附加值能源和化工产品（图 3）^[7]。

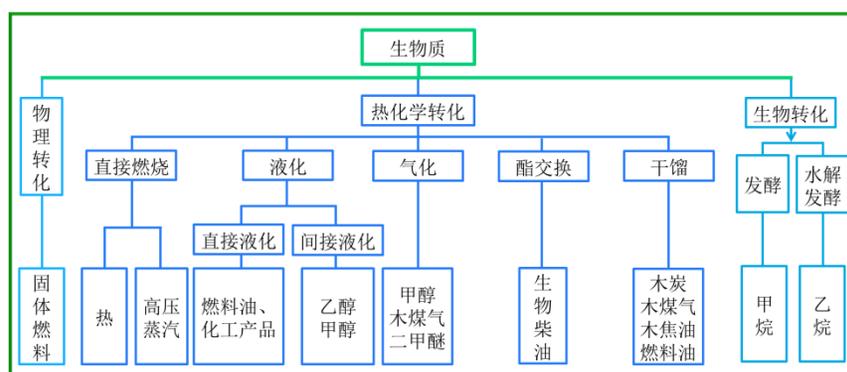


图 3 生物质能源转换技术及产品

Fig. 3 Biomass energy conversion technology and products

2.1.1 物理转化技术 生物质，特别是中药固体废弃物，直接作为能源燃料使用存在含水量大、能量密度低、形状不规则和燃烧稳定性差等缺陷^[59]。最便捷的燃料制备方法是采用常温湿压成型和热压成型技术，将废弃物压制成固体成型燃料^[59-60]。农业废弃物（如秸秆、稻壳、甘蔗渣等）、中药废弃物（如茎叶、药渣、果壳等）以及天然材料（如落叶、树木、树皮等）和植物类餐厨垃圾经过干燥、粉碎、成型和炭化等步骤可转化为固体成型燃料^[59-60]。固

体成型燃料具有热值高、耐用性好、密度大、灰分少、储运方便、着火点低和 NO_x 排放少等优点，主要用于发电、工业供热和民用供暖^[59-60]。生物质废弃物转化为致密的固体成型燃料受原料粒径、种类、预处理工艺、成型温度和成型压力等因素影响^[59-60]。尽管固体成型燃料能够提高生物质废弃物的资源利用率，但仍面临环境污染严重、能耗高、成型设备易磨损、资源利用效率低、生产效率低、市场化程度不足和标准不健全等问题^[59-60]。

2.1.2 生物转化技术 中药固体废弃物等生物质的生物转化技术涉及通过物理、化学、生物预处理方法破坏纤维素的晶体结构,随后利用特定微生物借助酶解和发酵等工艺将其转化为氢气、沼气、乙醇、丙醇、丁醇及有机酸等生物燃料或生化产品^[1,61-63]。物理预处理利用超声、挤压和微波等技术增加木质纤维素的接触面积^[62]。化学预处理通过酸法、碱法、有机溶剂和离子液体法等方法,解聚和降解原料中的纤维素结晶结构^[62,64]。生物预处理则使用真菌等去除木质素^[62,64]。当前的生物转化主要分为微生物发酵和酶催化2类^[63]。微生物发酵利用微生物的代谢途径将生物质转化为酒精和乙酸等生物燃料和生化产品,而酶催化则通过特定酶降解生物质中的复杂化合物,生成中间产物^[63]。生物转化的核心在于多种酶的协同作用,如木质素分解酶(包括漆酶、木质素过氧化物酶、多功能氧化物酶等),纤维素水解酶(包括内切葡聚糖酶、外切葡聚糖酶和 β -葡萄糖苷酶等)及半纤维素水解酶(包括内切木聚糖酶、阿拉伯糖醛酸苷酶和 β -木糖苷酶等)共同降解木质纤维素生物质^[64]。与其他转化技术相比,生物转化技术具有操作条件温和、清洁和高效等优势,但其在预处理时间、方法复杂性、操作稳定性、环境影响以及原料利用率等方面仍存在一定的缺陷^[65]。

2.1.3 热化学转化技术 热化学转化技术通过直接燃烧、气化、热解和液化等方法,将生物质转化为生物炭、生物油和生物燃气等高品质能源^[66-68]。相比其他生物质转化技术,热化学转化技术具有能耗低、转化率高、易于工业化、时间短和微残留等优势^[66-67]。

直接燃烧是最传统的生物质能利用技术,通过将生物质作为燃料替代燃煤,用于供热、发电和工业生产^[66,68]。但是,该技术存在资源利用率低、烟尘排放高、储运成本高、环境污染和热值低等缺陷,限制其推广应用^[66,68]。

生物质气化是指在 600~1 300 °C下,借助气化剂(如空气、氧气和水蒸气等)使成型原料发生热解、氧化、还原和重整反应,生成富含 H₂、CO、CO₂、CH₄ 和碳氢化物等的气态产物^[65-69]。气化过程受原料、温度、停留时间、压力、升温速率、气化炉类型、气化剂和催化剂的影响显著^[5]。气化技术因其设备紧凑、热效率高、占地面积小和清洁高效等优点,可用于发电、供热及制备生物燃料、甲烷、氢气等化学品^[66,69]。然而,燃气中高含量的焦油成

为限制气化技术推广的主要因素^[66]。

生物质热解是指在 300~700 °C高温和缺氧或少量氧化剂(如空气、氧气和水蒸气等)条件下,将生物质转化为生物炭、生物油和生物燃气(H₂、CH₄、CO 和 CO₂)^[5,65,67,69]。根据升温速率将热解分为闪速热解、快速热解和慢速热解3种^[65,69]。固定床、流化床、循环床、旋转反应器和混合式反应器是研究广泛的热解反应器类型。此外,热解产物的分布、类型和产率受温度、热解速率、停留时间和催化剂等因素影响^[68]。与直接燃烧和气化技术相比,热解具有产品多样(气、液、固)、热效率高、装置简单、投资少和操作简便等优点,易于推广^[23]。

生物质液化在溶剂(如水、乙醇、丙酮、甘油和酚类等)中,于较低温度(200~600 °C)和高压(5~25 MPa)下,将生物质分解成小分子碎片,随后重新聚合生成大量的生物油和少量的生物炭及燃气^[65,67-69]。产物的组成及性质取决于生物质类型、反应温度、压力、停留时间、溶剂和催化剂等工艺参数^[68]。与热解技术相比,虽然液化技术反应温度和压力更低,但仍面临反应器成本高、风险大和进料复杂等挑战^[67-68]。

液化和热解技术更适用于生产生物油,而气化技术更适用于生产合成气。中药固体废弃物热化学转化技术虽存在一定的缺陷,但与肥料化、基质化、饲料化等低值化技术相比,具有残余少、无毒性残留、经济价值高、工艺简单、产品种类丰富和市场接受度高等优势,是中药固体废弃物资源化利用的优选途径。

2.2 中药固体废弃物能源化的机遇

2.2.1 政策部署为中药固体废弃物资源化提供保障 中国在 2030 年实现碳达峰后,仅 30 年(2060 年)实现碳中和目标将面临碳排放总量大、时间紧、任务重、产业转型难度大等复杂挑战^[17-22]。打破传统高能源强度和高碳密度的化石能源利用模式,构建清洁、低碳、零碳、负碳、安全、高效和可持续发展的能源新体系,是实现“双碳”目标并推动经济快速发展的重要途径。为贯彻落实“双碳”目标并树立节能降碳理念,推行中药行业绿色发展模式,国家出台了多项法律和政策,旨在引导和支持中药固体废弃物资源化利用^[1]。为应对能源结构转型,国家先后颁布了《节能法》《可再生能源法》和《环境保护法》等相关法律,并发布了《“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》《中药工业污染防

治技术政策》《资源综合利用管理办法》《生物质能产业发展规划》和《“十四五”可再生能源发展规划》《中国的能源转型》等文件^[9]。这些政策鼓励采用高效、低耗的先进技术(包括绿色工艺、可再生资源、清洁能源和生物质能等),以减少中药废弃物的产生,并实现资源的循环利用,推动废弃生物质能的规模化、专业化和多元化的低碳可持续健康发展。

2.2.2 技术突破为中药固体废弃物资源化提供保障 科技进步是中药固体废弃物资源化发展的核心驱动力。当前,该领域的技术突破主要体现在以下几方面:首先,能源转化技术的创新。随着研究人员对中药废弃物气化、热解等化学转化技术的深入探索,通过优化反应体系和反应条件,显著提升了气化效率并降低了焦油和灰分的生成。这些技术成果已实现产业化应用。如2022年,中国科学院广州能源研究所与山东某制药厂合作,将药渣热解气转化为可燃气供给药厂生产,年处理药渣9.6万t^[7]。河南省宛西制药股份有限公司将药渣热解气转化为燃气,年减排CO₂约3350t,创收254.5万元,年处理药渣2万t。山东步长制药股份有限公司将药渣热解转化为燃气,年处理药渣10.2万t,经济效益1680万元。南京中医药大学段金廛团队通过炭-液-气联产技术,将山楂药材废弃种子转化为生物炭和热解气,既实现了企业能源自给,又延伸了产品链。其次,智能化技术的广泛应用。自动化和智能化技术的普及,显著提升了中药固体废弃物的分级分类处理效率及资源回收率。同时,智能控制系统能实时精准监控资源化过程中的关键参数,进而优化转化效率、降低企业运营成本并提升经济收益。第三,催化剂的研发与优化。在中药固体废弃物的化学转化过程中,催化剂的作用至关重要。为提高催化剂的选择性、转化率、使用寿命和环保性能等,研究人员通过纳米技术、结构设计、功能修饰、催化剂复合等手段,开发出适用于不同反应条件的新型催化剂,以满足多样化的工业需求。通过上述技术的不断突破和创新,中药固体废弃物的资源化利用正逐步实现高效、环保和经济效益的多重提升。

2.2.3 市场需求为中药固体废弃物资源化提供保障 市场需求是推动中药废弃物资源化技术商业化的重要动力。首先,传统化石能源使用限制及对清洁能源需求的增长,促使中药固体废弃物转化为燃料的技术具备广泛的应用前景,能为工业和民用

领域提供能源供应。其次,公众对健康和环境保护的关注日益增加,中药产业也逐渐认识到环保生产和可持续发展的重要性。中药制药企业面临的环保压力和日益严格的废弃物处理要求,促使其对废弃物资源化技术的需求不断提升,以实现资源的循环利用和生产模式的优化。此外,消费者对可持续、绿色产品的认知提升,药品和保健品行业开始转向绿色制造。通过应用资源化技术减少中药生产中的碳排放,企业不仅能获得社会认可,还能提升品牌形象,从而增强市场竞争力。

2.3 中药固体废弃物资源化的挑战

2.3.1 健全生物质能政策法规 在能源结构转型的背景下,生物质能正处于加速发展阶段,而中药固体废弃物资源化尚处于起步阶段,面临的首要挑战是政策法规不完善、标准不统一和监管体系复杂的问题,制约其进一步发展。中药固体废弃物资源化涉及环境保护、废弃物收集管理、资源分级与分类、资源化技术等多个交叉领域,但目前各领域相关法律法规不完善,缺乏针对资源化利用技术的细化政策,使企业在实际操作中缺乏明确的法律依据。其次,行业内尚未建立统一的技术和产品质量标准,应用技术的差异性导致资源化产品质量不稳定,进而增加市场准入难度和不确定性。此外,资源化过程涉及多个监管部门,其职能交叉和监管要求的复杂性增加了企业在申请审批及获取相关许可证时的程序和合规成本。

2.3.2 技术方面存在的挑战 中药固体废弃物具有来源广泛、种类繁多、残留活性组分复杂、理化性质差异大等特点,这些特性在资源化利用过程中对现有技术提出诸多挑战。首先,由于不同类型废弃物的资源化反应机制和工艺条件存在显著差异,单一路径难以实现全面资源化,导致技术适配性差异大。同时,复杂多样的原料使现有技术难以精准控制反应条件,进而影响产物的稳定性和能量转化效率,造成不同批次资源化产品质量波动,难以满足市场和工业需求。其次,中药废弃物的多样性加剧了资源化工艺流程的复杂性,导致流程冗长、设备需求多样、工艺集成难度大,进而限制了产品大规模推广的可行性和经济性。此外,现有资源化设备主要针对农林废弃物或城市垃圾设计,在处理中药废弃物时容易出现堵塞和磨损等问题,导致设备适配度低,设备改良成本高且规模化生产受限。

2.3.3 成本效益方面存在的挑战 中药固体废弃

物在能源化利用过程中面临诸多成本效益问题。首先,初始投资成本高。能源化利用所需的技术设备和基础设施,如气化炉、发酵装置等先进设备的投资成本较高。同时,处理工艺复杂,需要高水平技术人员的操作和维护,提升了运营成本。其次,尽管中药废弃物可通过能源化转化为沼气、热能或电能,但由于其供应存在季节性、区域性和批次差异,资源供应的不稳定性限制了能源化利用的连续性。这种不稳定性不仅增加了原料收集、运输和储存的成本,还削弱了其经济效益。最后,中药废弃物能源化生成的生物质燃料、气体和液体燃料等产品的质量稳定性不佳,市场认可度低,价值波动频繁,难以与煤、天然气等传统能源形成有效竞争。

3 结语

对化石能源的深度依赖导致环境污染、气候恶化、水资源匮乏和生态系统破坏等问题频发。打破“高碳”经济发展模式,优化能源结构,开发绿色可再生能源,并实施碳中和是解决上述棘手问题的关键措施。基于中国实现“双碳”目标的紧迫现状,中药制药产业采取优化能源结构和开发使用可再生能源是低碳、可持续发展的重要途径之一。本文深入分析了中药固体废弃物的资源特性,明确其资源循环利用的模式,探讨了其能源化利用的机遇与挑战。相较于其他低值化资源利用模式,中药固体废弃物能源化利用具有残余少、无毒性残留、经济价值高和市场接受度高等显著优势。尽管该模式目前仍面临挑战,但其在替代传统能源供给制药生产,实现制药行业资源循环利用和能源结构转型等方面具有广阔的应用前景。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 段金廛,宿树兰,郭盛,等. 面向“双碳”目标的中药资源全产业链废弃物及副产物循环利用与循环经济产业发展策略 [J]. 中国中药杂志, 2023, 48(17): 4545-4551.
- [2] Zhang R, Zhang M X, Chen Y, *et al.* Future development of Good Agricultural Practice in China under globalization of traditional herbal medicine trade [J]. *Chin Herb Med*, 2021, 13(4): 472-479.
- [3] 龙旭,郭惠,靳如意,等. 中药废弃物的能源化利用策略 [J]. 中草药, 2019, 50(7): 1505-1514.
- [4] 段金廛,郭盛,严辉,等. 药材生产过程副产物的价值发现和资源化利用是中药材产业扶贫的重要途径 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(2): 285-289.
- [5] 龙旭,郭惠,靳如意,等. 中药固体废弃物的热解气化技术利用策略 [J]. 中国中药杂志, 2021, 46(19): 4891-4897.
- [6] 高静静,庄新辉,谭雪松,等. 中药渣资源化利用研究进展 [J]. 中成药, 2024, 46(2): 536-541.
- [7] 吕永兴,胡双清,姜维,等. 中药渣能源化的现状与展望 [J]. 新能源进展, 2023, 11(3): 264-272.
- [8] 段金廛,宿树兰,郭盛,等. 中药资源产业化过程废弃物的产生及其利用策略与资源化模式 [J]. 中草药, 2013, 44(20): 2787-2797.
- [9] 段金廛,宿树兰,郭盛,等. 中药资源全产业链废弃物及副产物分级分类体系构建 [J]. 中国现代中药, 2022, 24(10): 1830-1839.
- [10] 张威龙,帖靖玺. 中药渣资源化利用研究进展 [J]. 信阳农林学院学报, 2020, 30(3): 80-83.
- [11] 卿馨文. 中药渣综合利用研究现状及展望 [J]. 现代农业科技, 2024, 7: 116-123.
- [12] 曾昭君,鲁云,刘燎原,等. 丹参药渣资源化利用研究进展 [J]. 中国现代中药, 2020, 22(12): 2115-2121.
- [13] Raza S, Ghasali E, Raza M, *et al.* Advances in technology and utilization of natural resources for achieving carbon neutrality and a sustainable solution to neutral environment [J]. *Environ Res*, 2023, 220: 115135.
- [14] Zhao X, Ma X W, Chen B Y, *et al.* Challenges toward carbon neutrality in China: Strategies and countermeasures [J]. *Resour Conserv Recycl*, 2022, 176: 105959.
- [15] Zhang Y L. Analysis of China's energy efficiency and influencing factors under carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. *J Clean Prod*, 2022, 370: 133604.
- [16] Zhong Z Q, Chen Y Q, Fu M Y, *et al.* Role of CO₂ geological storage in China's pledge to carbon peak by 2030 and carbon neutrality by 2060 [J]. *Energy*, 2023, 272: 127165.
- [17] Li P Y, Sun W, Zhang Z Z, *et al.* Forecast of renewable energy penetration potential in the goal of carbon peaking and carbon neutrality in China [J]. *Sustain Prod Consum*, 2022, 34: 541-551.
- [18] Yang P J, Peng S, Benani N, *et al.* An integrated evaluation on China's provincial carbon peak and carbon neutrality [J]. *J Clean Prod*, 2022, 377: 134497.
- [19] Hou Z M, Xiong Y, Luo J S, *et al.* International experience of carbon neutrality and prospects of key technologies: Lessons for China [J]. *Petrol Sci*, 2023, 20(2): 893-909.
- [20] Zhang Q, Yin Z C, Lu X, *et al.* Synergetic roadmap of carbon neutrality and clean air for China [J]. *Environ Sci Ecotechnol*, 2023, 16: 100280.
- [21] Wang Y, Guo C, Chen X, *et al.* Carbon Peak and Carbon Neutrality in China: Goals, implementation path, and

- prospects [J]. *China Geol*, 2021, 4: 1-27.
- [22] Qi Y, Liu T L, Jing L. China's energy transition towards carbon neutrality with minimum cost [J]. *J Clean Prod*, 2023, 388: 135904.
- [23] Long X, Lu Y L, Guo H, *et al.* Recent advances in solid residues resource utilization in traditional Chinese medicine [J]. *Chem Select*, 2023, 8(13): e202300383.
- [24] Huang C, Li Z X, Wu Y, *et al.* Treatment and bioresources utilization of traditional Chinese medicinal herb residues: Recent technological advances and industrial prospect [J]. *J Environ Manage*, 2021, 299: 113607.
- [25] 刘梦佳, 杨茂华, 刘新育, 等. 中药渣处理及其生命周期分析的研究进展 [J]. *时珍国医国药*, 2021, 32(7): 1714-1717.
- [26] 马丽娜, 陈静, 吴志伟, 等. 中药渣的生物学处理方式研究进展 [J]. *时珍国医国药*, 2016, 27(1): 194-196.
- [27] 杨绪勤, 袁博, 蒋继宏. 中药渣资源综合再利用研究进展 [J]. *江苏师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 33(3): 40-44.
- [28] 高昕玥, 翁君杰, 唐冠韬, 等. 抗生素药渣资源化处置技术研究进展 [J]. *煤炭与化工*, 2021, 44(6): 127-133.
- [29] 段金殿. 中药废弃物的资源化利用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [30] Han X W, Guo Y, Liu X H, *et al.* Catalytic conversion of lignocellulosic biomass into hydrocarbons: A mini review [J]. *Catal Today*, 2019, 319: 2-13.
- [31] Li Y Z, Xu T T, Lin C Q, *et al.* Determination of lignocellulosic components in traditional Chinese herb residues and its sugar-producing application [J]. *Waste Biomass Valorization*, 2023, 14(6): 1891-1903.
- [32] 张英. 中药药渣资源利用研究现状 [J]. *药物生物技术*, 2013, 20(3): 280-282.
- [33] Tao W Y, Jin J J, Zheng Y P, *et al.* Current advances of resource utilization of herbal extraction residues in China [J]. *Waste Biomass Valorization*, 2021, 12(11): 5853-5868.
- [34] Lu Q, Li C L. Comprehensive utilization of Chinese medicine residues for industry and environment protection: Turning waste into treasure [J]. *J Clean Prod*, 2021, 279: 123856.
- [35] 曾慧婷, 张媛媛, 宿树兰, 等. 葛采收加工过程及深加工过程废弃物的资源化利用现状与策略探讨 [J]. *中国现代中药*, 2019, 21(2): 158-163.
- [36] 王赛, 谢逸轩, 田硕, 等. 中药组分-药性-药效关系探讨 [J]. *中药药理与临床*, 2023, 39(4): 125-128.
- [37] 杨冰, 丁斐, 李伟东, 等. 中药渣综合利用研究进展及生态化综合利用模式 [J]. *中草药*, 2017, 48(2): 377-383.
- [38] 郭盛, 严辉, 钱大玮, 等. 枣属药用植物资源产业化过程副产物及废弃物的资源价值发现与循环利用策略构建 [J]. *南京中医药大学学报*, 2019, 35(5): 579-584.
- [39] Xiao L K, Zhao A Y, Qiu J, *et al.* Comprehensive reutilization of herbal waste: Coproduction of magnolol, honokiol, and β -amyrin from *Magnolia officinalis* residue [J]. *Green Energy Environ*, 2024, 9(2): 403-412.
- [40] Liang W, Sun J C, Bai G, *et al.* *Codonopsis* radix: A review of resource utilisation, postharvest processing, quality assessment, and its polysaccharide composition [J]. *Front Pharmacol*, 2024, 15: 1366556.
- [41] Abdallah A, Zhang P, Zhong Q Z, *et al.* Application of traditional Chinese herbal medicine by-products as dietary feed supplements and antibiotic replacements in animal production [J]. *Curr Drug Metab*, 2019, 20(1): 54-64.
- [42] Lekmine S, Boussekine S, Kadi K, *et al.* A comparative study on chemical profile and biological activities of aerial parts (stems, flowers, leaves, pods and seeds) of *Astragalus gombiformis* [J]. *Biocatal Agric Biotechnol*, 2020, 27: 101668.
- [43] Li Y K, Xie L, Liu K, *et al.* Bioactive components and beneficial bioactivities of flowers, stems, leaves of *Lonicera japonica* Thunberg: A review [J]. *Biochem Syst Ecol*, 2023, 106: 104570.
- [44] Wu Y C, Yu Y, Wang H P, *et al.* Preparation of paeoniflorin from the stems and leaves of *Paeonia lactiflora* Pall. 'Zhongjiang' through green efficient microwave-assisted extraction and subcritical water extraction [J]. *Ind Crops Prod*, 2021, 163: 113332.
- [45] Cui L Y, Ma Z N, Wang D F, *et al.* Ultrasound-assisted extraction, optimization, isolation, and antioxidant activity analysis of flavonoids from *Astragalus membranaceus* stems and leaves [J]. *Ultrason Sonochem*, 2022, 90: 106190.
- [46] 王锐, 申远. 基于外部性理论的中药废弃物资源化治理机制研究 [J]. *中国卫生事业管理*, 2016, 33(1): 45-47.
- [47] 谭显东, 王向东, 黄健盛, 等. 中药渣资源化技术研究进展 [J]. *中成药*, 2010, 32(5): 847-849.
- [48] Tian X P, Yang T, He J Z, *et al.* Fungal community and cellulose-degrading genes in the composting process of Chinese medicinal herbal residues [J]. *Bioresour Technol*, 2017, 241: 374-383.
- [49] Chen Y X, Chang S K C, Chen J, *et al.* Characterization of microbial community succession during vermicomposting of medicinal herbal residues [J]. *Bioresour Technol*, 2018, 249: 542-549.
- [50] Das D, Kalita N, Langthasa D, *et al.* *Eisenia fetida* for vermicomposting of waste biomass of medicinal herbs:

- Status of nutrients and stability parameters [J]. *Bioresour Technol*, 2022, 347: 126391.
- [51] 傅滢, 全健, 杨天建, 等. 6种中药渣安全性评价与利用潜力研究 [J]. *时珍国医国药*, 2022, 33(2): 459-463.
- [52] 谭雪明, 朱宁, 李木英, 等. 中药渣基质培育机插秧秧苗的效果研究 [J]. *江西农业大学学报*, 2019, 41(6): 1041-1047.
- [53] Dalle Zotte A, Celia C, Szendrő Z. Herbs and spices inclusion as feedstuff or additive in growing rabbit diets and as additive in rabbit meat: A review [J]. *Livest Sci*, 2016, 189: 82-90.
- [54] Kuralkar P, Kuralkar S V. Role of herbal products in animal production - An updated review [J]. *J Ethnopharmacol*, 2021, 278: 114246.
- [55] Ahmed S T, Mun H S, Islam M M, *et al*. Effects of dietary natural and fermented herb combination on growth performance, carcass traits and meat quality in grower-finisher pigs [J]. *Meat Sci*, 2016, 122: 7-15.
- [56] Huang F Q, Wang T W, Zhang J Q, *et al*. Exploring the bacterial community succession and metabolic profiles of *Lonicera japonica* Thunb. residues during anaerobic fermentation [J]. *Bioresour Technol*, 2023, 367: 128264.
- [57] Kholif A E, Matloup O H, Morsy T A, *et al*. Rosemary and lemongrass herbs as phyto-genic feed additives to improve efficient feed utilization, manipulate rumen fermentation and elevate milk production of Damascus goats [J]. *Livest Sci*, 2017, 204: 39-46.
- [58] Zhang C T, Zhang Z M, Zhang L J, *et al*. Pyrolysis of herb waste: Effects of extraction pretreatment on characteristics of bio-oil and biochar [J]. *Biomass Bioenergy*, 2020, 143: 105801.
- [59] 郭明辉, 李嘉兴, 唐宽勇. 生物质固体成型燃料研究进展 [J]. *林产工业*, 2023, 60(10): 40-44.
- [60] Bajwa D S, Peterson T, Sharma N, *et al*. A review of densified solid biomass for energy production [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2018, 96: 296-305.
- [61] Zhao B F, Song G, Zhou W H, *et al*. Catalytic pyrolysis of herb residues for the preparation of hydrogen-rich gas [J]. *Energy Fuels*, 2020, 34(2): 1131-1136.
- [62] Tian S Q, Zhao R Y, Chen Z C. Review of the pretreatment and bioconversion of lignocellulosic biomass from wheat straw materials [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2018, 91: 483-489.
- [63] Jiang Y F, Hu Z Q, Cheng L, *et al*. Linking biomass pyrolysis and biotransformation: A bibliometric review [J]. *J Energy Inst*, 2024, 114: 101592.
- [64] Saldarriaga-Hernández S, Velasco-Ayala C, Leal-Isla Flores P, *et al*. Biotransformation of lignocellulosic biomass into industrially relevant products with the aid of fungi-derived lignocellulolytic enzymes [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 161: 1099-1116.
- [65] Jha S, Okolie J, Nanda S, *et al*. A review of biomass resources and thermochemical conversion technologies [J]. *Chem Eng Technol*, 2022, 45(5): 791.
- [66] 田水泉, 张立科, 杨风岭, 等. 生物质能源化学转化技术与应用研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(3): 1645-1648.
- [67] Luo W, Dong H, Wang T, *et al*. Co-pyrolysis of Chinese herb residue and polypropylene over Ni, Fe, Co and Cu/AC: Co-production and formation mechanism of carbon nanomaterials, liquid oil and pyrolysis gas [J]. *Energy*, 2022, 244: 122634.
- [68] Wang Y Z, Wu J J. Thermochemical conversion of biomass: Potential future prospects [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2023, 187: 113754.
- [69] Jha S, Nanda S, Acharya B, *et al*. A review of thermochemical conversion of waste biomass to biofuels [J]. *Energies*, 2022, 15: 6352.

[责任编辑 王文倩]