

“双碳”背景下中药药渣高值化利用技术与途径

方悦悦, 陈诺, 肖平*, 张森, 刘海峰, 宿树兰, 郭盛, 段金廛*

(南京中医药大学 江苏省中药资源产业化过程协同创新中心 中药资源产业化与方剂创新药物国家
地方联合工程研究中心 国家中医药管理局中药资源循环利用重点实验室, 江苏 南京 210023)

[摘要] 近年来中药产业迅猛发展, 导致中药资源产业化制造过程中产生大量的中药药渣。目前对中药药渣的处理方式以堆积、填埋、焚烧为主, 这些粗放低值化利用方式造成巨大的资源浪费及潜在的环境污染。“碳达峰”“碳中和”(“双碳”)已成为国家战略目标, 在“双碳”的大背景之下, 中药产业正迎来新一轮“低碳”风潮, 中药药渣高值化利用成为中药行业践行低碳经济的突破口。该文在低碳经济视角下, 通过查阅国内外相关文献, 对中药药渣的微生物转化技术、酶转化技术、生物质热解、气化、水热液化等高值化利用技术进行归纳总结。对中药药渣在饲料添加剂、生物有机肥、食用菌栽培基质、制备活性炭处理废水、新能源电池等方面的应用进行综述。结合中药药渣的资源利用现状, 提出切实可行的资源化开发利用策略和建议, 以期对中药资源产业链提质增效与绿色发展, 推动实现碳达峰、碳中和目标提供研究思路 and 理论依据。

[关键词] 中药药渣; 资源循环利用; 碳中和; 节能减排; 高值化利用

High-value utilization technology and approach of Chinese medicinal residues under background of "Dual Carbon"

FANG Yue-yue, CHEN Nuo, XIAO Ping*, ZHANG Sen, LIU Hai-feng, SU Shu-lan, GUO Sheng, DUAN Jin-ao*

(Key Laboratory of Chinese Medicinal Resources Recycling Utilization, National Administration of Traditional Chinese Medicine, National and Local Collaborative Engineering Center of Chinese Medicinal Resources Industrialization and Formulae Innovative Medicine, Jiangsu Collaborative Innovation Center of Chinese Medicinal Resources Industrialization, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, China)

[Abstract] In recent years, the traditional Chinese medicine (TCM) industry has experienced rapid development, resulting in a significant amount of Chinese medicinal residues generated during the industrial manufacturing process. Currently, the main methods of handling Chinese medicinal residues include stacking, landfilling, and incineration, which lead to substantial resource waste and potential environmental pollution. With "carbon peak" and "carbon neutrality" ("Dual Carbon") becoming national strategic goals, the TCM industry is ushering in a new wave of "low-carbon" trends, and the high-value utilization of Chinese medicinal residues has become a breakthrough for implementing a low-carbon economy in the TCM sector. From the perspective of a low-carbon economy, this article reviewed literature in China and abroad to summarize the microbial transformation technology, enzymatic conversion technology, biomass pyrolysis, gasification, hydrothermal liquefaction, and other high-value utilization technologies for Chinese medicinal residues. It also overviewed the applications of Chinese medicinal residue in feed additives, organic fertilizers, edible mushroom cultivation substrates, preparation of activated carbon for wastewater treatment, and new energy batteries. Considering the current status of resource utilization of Chinese medicinal residues, feasible strategies and suggestions for resource development and utilization were proposed to improve the quality and efficiency of the Chinese medicinal resource industry chain and promote green development, thereby providing

[收稿日期] 2023-04-26

[基金项目] 江苏省中医药科技发展计划项目 (MS2021004); 江苏省中药资源产业化过程协同创新中心重点项目 (ZDXM-2022-06); 国家自然科学基金项目 (81703642); 南京中医药大学自然科学基金青年项目 (NZY81703642); 国家中医药管理局中医药创新团队及人才支持计划项目 (ZYYCXTD-D-202005); 山东省重点研发计划项目 (2021SFRC1203)

[通信作者] * 肖平, 博士, 副教授, 主要从事中药资源化学与中药药效物质基础研究, E-mail: xiaoping@njucm.edu.cn; * 段金廛, 教授, 博士生导师, 主要从事中药资源化学及资源循环利用研究, E-mail: dja@njucm.edu.cn

research ideas and theoretical basis for achieving carbon peak and carbon neutrality goals.

[Key words] Chinese medicinal residues; resource recycling utilization; carbon neutrality; energy conservation and emission reduction; high-value utilization

DOI:10.19540/j.cnki.cjcm.20230609.101

在大力提倡低碳经济、循环经济的背景下,实现中药药渣资源的健康和可持续发展,需要得到行业和社会的共同关注^[1]。发展低碳经济是实现企业节能减排,解决能源安全问题,提高经济效益的重中之重。以消耗中药及天然药物资源为特征的产业不断发展,对社会的贡献率逐渐提高,中药产业贡献率占全国医药产业总额的1/3^[2]。中药材作为中药制药产业的原料,药材原料的利用率较低,中药药渣中仍残留大量的有效成分。目前对中药药渣的处理主要采用传统的焚烧、填埋、堆放,导致巨大的资源浪费和潜在的环境污染,与现阶段国家积极倡导的低碳环保理念背道而驰。

我国中药资源生产与深加工全产业链过程中仍存在资源利用效率低下、资源浪费严重、生态环境压力不断加剧等社会、经济和生态问题^[3],如何实现中药资源最有效利用,保护生态环境已成为我国中药产业发展过程中亟须解决的问题。为应对全球气候变化问题,我国提出“碳达峰”“碳中和”(“双碳”)目标,在推动高质量发展中促进经济社会发展全面绿色转型^[4]。本团队多年来致力于中药资源副产物及废弃物资源化利用研究,紧扣碳中和的时代主题,系统构建了中药资源循环利用模式及技术体系。本文在中药资源循环利用理论体系的指引下,以低碳经济为切入点,对中药药渣高值化利用技术与途径进行系统归纳总结。以期对中药药渣高值化利用,促进中药药渣循环利用与价值提升,实现“双碳”目标提供一定的参考依据。

1 中药药渣处理现状及迫切需求

1.1 中药药渣处理现状 “健康中国”已上升为国家战略,中药产业发展迎来天时、地利、人和的大好时机^[5]。近年来,随着中医药在国际认可度的不断提高^[6]以及我国政府支持力度的加大^[7],中药产业快速增长、产值稳步提高^[8]。据不完全统计,目前我国中药材种植面积为240余万hm²,药材年产量为7000万吨。产生的中药药渣等废弃物高达3500万吨^[9]。中医药事业快速发展,中药及中成药的市场需求逐渐加大,医药企业数量也随之剧增。中药制药企业一般对其产生的中药药渣进行直接排放或简单的低附加值转化,中药药渣的资源价值未得到有效释放^[10]。中药药渣传统的粗放低值化处理方式不仅投入大量资金,而且导致生物资源的浪费以及生态环境的潜在污染^[11],同时可能会造成二次污染,如土壤、大气、水资源污染,最终危害人类健康并阻碍中药资源产业绿色可持续发展。中医药事业的可持续发展有赖于中药资源的高效利用和可持续发展,有赖于药用生物资源可利用物质、潜在利用价值的发现技术和手段^[12]。因此,亟须通过行之有效的方法对中药药渣进行高值化利用,秉承“低

碳经济”理念,应用先进的生产技术,减少废弃中药药渣对环境造成的污染,实现资源节约、循环利用目标,为中药产业提质增效注入新动能。

1.2 中药企业节能减排、践行低碳环保理念迫在眉睫 当前,中药药渣科学处置与循环利用成为行业亟待解决的关键问题^[13-14]。有效地综合利用中药药渣,减少其对生态环境的污染破坏是医药工作者必须思考并予以解决的问题^[15]。中药药渣资源化是一个涉及经济、环境、社会效益等多方面的连续过程^[16]。当前中药药渣已被用作饲料添加剂、食用菌栽培基质、制备活性炭、造纸原料等^[17],部分实现其资源化利用。但这仅是对中药药渣的粗放低值转化,且尚停留在初级阶段,未充分挖掘其潜在的资源利用价值。目前,由于对能源的需求不断增加,人们正在寻找廉价、环保、可再生且能替代化石燃料的能源。研究表明,中药药渣含有纤维素、半纤维素、木质素等生物质能高分子^[18]。生物质经过热解、气化、水热液化等技术可产生燃气、生物燃油、煤焦油等。因此,中药制药企业可采取各项生物质转化技术,将中药药渣中的生物质能转化成清洁能源供企业常规生产用能,替代部分煤炭。这样既能实现中药药渣资源的循环利用、节约生产成本、提高经济效益,又能实现低碳排放,助推低碳节能减排。

2 低碳经济视角下中药药渣的开发利用技术

2.1 微生物发酵技术 微生物发酵作为一种通过真菌生产各种产品的技术,已被广泛应用^[19]。中药药渣的微生物发酵是一种双向转化技术,一方面微生物需要依靠中药药渣中残留的营养成分进行生长、繁殖、代谢,另一方面微生物产生的各种酶能破坏中药药渣细胞壁的完整性和致密性,提高药渣中有效成分的提取效率。中药药渣经过各种微生物进行分解之后可用于菌种栽培,作为生物有机肥,动物饲料添加剂,用于生物能源以及环境污染治理等领域。在农业领域,中药药渣经过微生物发酵后纤维孔隙率提高,易于菌丝体着生和繁殖,能将其作为优良的培养基质用于各种食用菌的栽培;在畜牧业领域,利用微生物尤其是益生菌发酵中药药渣,可以促进关键营养成分的转变,提高蛋白含量,制成动物饲料添加剂,促进动物生长发育;在生物能源领域,富含淀粉、半纤维素和纤维素等碳水化合物的中药药渣经过微生物发酵后得到发酵糖,发酵糖可用作制备乙醇、沼气和生物油等生物能源的原料;在环保领域,利用微生物发酵对中药药渣进行改性处理,使其比表面积增大,制备成生物絮凝剂,能够对废水混悬溶液起到有效的絮凝作用,见图1。

微生物作为自然界的“清道夫”,在中药药渣的绿色转化

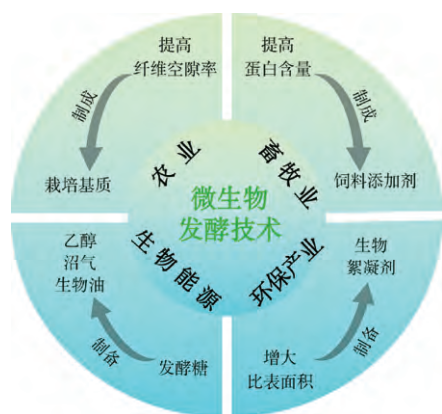


图 1 微生物发酵技术在中药药渣高值化利用中的应用

Fig. 1 Application of microbial fermentation technology in high-value utilization of Chinese medicinal residues

表 1 中药药渣的微生物发酵

Table 1 Microbial fermentation of Chinese medicinal residues

种类	菌种	作用	参考文献
混合中药药渣	白腐菌	发酵中药药渣的纤维素含量降低,蛋白质和氨基酸含量显著提高	[22]
红芪药渣	白腐菌和产朊假丝酵母混合菌	发酵产物中蛋白含量提高了 101.16%,粗纤维素含量降低了 34.79%	[23]
青蒿叶药渣	乳杆菌、酵母菌等	青蒿叶药渣中粗蛋白、双氢青蒿酸和青蒿乙素功效成分含量大幅提高	[24]
感冒清热颗粒药渣	多孔菌科真菌(灵芝)	感冒清热颗粒药渣中多糖和灵芝酸含量显著提高	[25]
大豆渣	多孔菌科真菌(灵芝)	在 C/N 为 80 的培养基实体的灰分、多糖、粗蛋白含量较高	[26]
混合中药药渣	枯草芽孢杆菌、产朊假丝酵母、黑曲霉	发酵底物中蛋白含量提高了 47.3%,多糖含量提高了 1.4%	[27]
三七药渣	康宁木霉	三七药渣蛋白质量分数提高至 19.40%、粗纤维质量分数降低至 11.91%	[28]
生脉饮药渣	康宁木霉、产朊假丝酵母、黑曲霉	发酵产物中真蛋白含量增加 86.96%、粗纤维含量降低 20.09%	[29]
菊花药渣	小球藻、热带假丝酵母菌、解淀粉芽孢杆菌	提高了风味氨基酸含量,改善蛋白的氨基酸组成	[30]
双黄连药渣	复合菌剂	药渣中连翘苷含量提高了 116.26%、蛋白含量提高了 33.27%	[31]

注:药渣种类详见各自参与文献(表 2~4 同)。

成分进行生物转化。中药药渣发酵过程需要微生物的参与,微生物会分泌纤维素分解酶、半纤维素分解酶和木质素分解酶分解木质纤维素^[32-33]。中药药渣因为存在植物细胞壁,直接用于饲料添加剂、食用菌栽培等残留的有效成分无法全部释放,经过微生物发酵产生的大量酶系可破坏中药药渣细胞壁的完整性和致密性,极大提高活性成分的转化和释放。中药药渣的酶转化技术在减少环境污染、提高经济效益等方面具有应用潜力。

曾飞等^[34]筛选可有效降解甘草药渣的菌株并优化其纤维素酶生产工艺。结果表明,草酸青霉 G 液体发酵甘草药渣可以产生活力较高的纤维素酶,该酶可使甘草药渣糖化,提高其有效成分的提取率。研究表明灵芝药渣在发酵过程中可以产生β-葡萄糖苷酶转化人参皂苷,显著提高人参皂苷的含量^[35]。通过酶转化技术对中药药渣进行转化,可以再次提取和挖掘其残留的有效成分,提升中药药渣的利用价值,实现中药药渣资源高值化利用目标。

和利用方面具有一定的优势^[20]。微生物发酵技术与其他处理技术相比,其具有绿色环保、成本低廉、操作简单等优点。中药药渣作为中药材生产加工过程中产生的废弃物,其以环保的方式转化为可用于生产增值产品的新资源^[21]。中药药渣含有粗蛋白、粗纤维、粗脂肪等营养成分,直接作为动物饲料蛋白含量低、适口性较差。经微生物发酵转化的中药药渣蛋白质含量显著提高,用于制备蛋白饲料可改善饲喂动物的肉质品质、繁殖性能。利用微生物发酵技术生产蛋白饲料,可为养殖业提供高蛋白饲料,解决传统饲料无法满足饲料短缺的矛盾,使中药药渣成为新型蛋白饲料资源,实现中药药渣资源的循环利用。中药药渣经固态发酵后可显著增加蛋白质、多糖、药效成分的含量,同时降低纤维素含量,见表 1。

2.2 酶转化技术 中药药渣的酶转化技术是利用微生物在代谢过程中产生的酶对中药药渣中残留的营养成分或活性

2.3 生物质热裂解技术 生物质热解是一种高温无氧过程,温度范围为 300~1 000 ℃^[36]。中药药渣是一种典型的废弃生物质,其含有的纤维素和半纤维素热解产生挥发分,木质素热解产生焦炭。研究发现,生物质热解可以产生不同产量和不同质量的生物燃气、生物油和生物炭^[37]。生物质热解可产生生物燃气、生物油以及固体生物炭。生物燃气可直接进行发电转化为液体燃油,为居民生活及企业加工生产供电;生物油可转化为绿色化学品;固体生物炭可加工成吸附剂、活性炭等,用于废水处理、化工和冶炼等领域。对中药药渣进行热裂解,变废为宝的同时大大减少了中药制药企业产生的固体废弃物的量,同时减少了企业对化石燃料的依赖,践行“低碳环保、经济节约”理念,具有经济、环境和社会 3 个方面的综合效益。

王攀等^[38]研究丹参药渣催化热解制取生物燃油的可行性,考察热解温度对产物的影响。结果显示,在温度为 445 ℃时,液体产物生物油产率最高为 39%。张锐等^[39]从美洲

大蠟药渣中提取残油,对得到的残油进一步制备生物柴油。研究发现生物柴油的转化率可达 94.37%。孟小燕等^[40]采用沸石分子筛、介孔分子筛、 Al_2O_3 研究中药药渣催化裂解资源化技术。通过实验得出,燃油产率最高为 34.26%,催化裂解技术将成为中药行业发展低碳经济的重要途径。

2.4 生物质气化技术 生物质气化是在 1 100 ℃ 下将固体废弃物转化为合成气的热化学过程^[41]。中药药渣气化产生的燃气可为中药制药企业生产供能,降低企业对煤炭、石油、天然气等不可再生能源的依赖,降低大气中温室气体的排放量,保护生态环境的同时实现中药药渣资源化循环利用,有利于中药产业绿色发展。中药药渣气化发电技术的应用见图 2,中药药渣作为一种废弃生物质经过脱水、高温干燥、粉碎等处理后进入循环流化床气化炉,在气化炉内进行燃烧、氧化、还原反应。中药药渣中的纤维素、半纤维素经过不完全燃烧、氧化、还原成燃料气体。燃气在发电机的作用下将产生的热能转化成机械能,再被转化成电能。发电机产生的热能可用于中药药渣的干燥环节,电能可为工业生产、居民生活等供电。

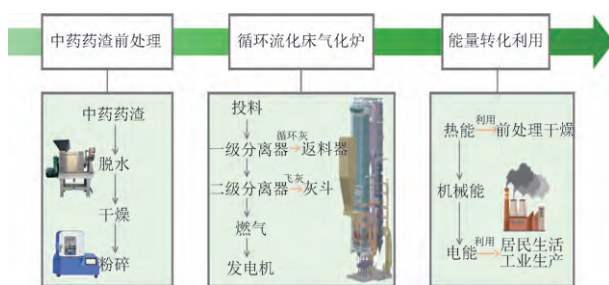


图2 中药药渣气化发电技术

Fig. 2 Gasification power generation technology of Chinese medicinal residues

洗萍等^[42]分析两面针药渣的热解气化特征,发现可通过热解气化技术从木质中药药渣中制取洁净燃气。郭飞强等^[43]以玉米秸秆作为比较,对枸菊地黄丸、六味地黄丸、香砂养胃丸 3 种药渣进行气化实验。结果显示 3 种中药药渣热解气化均可产生较多的焦油,燃气热值均达到 $5\ 300\ \text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上。范鹏飞等^[44]在双回路循环流化床设备中,以感冒清颗粒药渣为原料进行热解气化实验。研究发现,在特定的实验条件下,感冒清颗粒药渣的气化效率较高,具有较好的气化特性。张彤辉等^[45]研究空气当量比对六味地黄丸药渣气化特性的影响。研究表明,在水蒸气配比为 0.4 时,六味地黄丸药渣燃气热值可达 $6\ 100\ \text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2.5 生物质水热液化技术 生物质热解、气化、液化都属于热化学加工,但三者在操作方法上有所不同。生物质热解、气化需要对原材料进行干燥并且在较高的温度下进行反应,生物质水热液化不需要干燥。生物质水热液化处理技术是

指加工过的生物质转化为压缩的热水的热化学过程^[46],可直接利用湿质原料,实现原料全组分转化,具有较强的应用潜力。

生物质水热液化过程中会产生生物油、水相产物、固体残渣和气体^[47]。在 4 种产物中,生物油可用作燃料或生产高附加值产品,减少企业对石油的消耗;水相产物可用于藻类培养,通过厌氧发酵生产甲烷等;固体残渣进一步处理可作生物炭;气相产物可作为温室的气体燃料。比起中药药渣传统的处理方式,生物质水热液化可实现中药药渣资源的循环再利用,减少自身产生的环境污染、为企业生产供能,减少温室气体的排放量,有助于实现“碳达峰”“碳中和”目标。丁文冉^[48]以当归药渣为原料,开展水热液化制取生物油研究。结果表明,水热液化技术能有效脱除当归药渣中的氧元素,富集碳元素至生物油。丁世磊等^[49]以水为反应介质,以粉防己药渣作为原料,研究粉防己药渣直接低温液化制备生物油的工艺条件。结果表明,适当提高反应温度,有助于液化效率的提高。

3 中药药渣高值化利用途径

中药药渣主要来源于中成药原料生产、配方颗粒生产、医院制剂加工与煎药等。中药药渣通过固态发酵进行转化,原料中蛋白质含量明显增加,可作为饲料添加剂喂饲畜禽,畜禽产生的粪便等回归于农田用于药材种植基地,见图 3。中药药渣中的营养成分和活性成分在微生物转化过程中被极大释放与转化,其有效成分的提取效率明显提高,发酵后的药渣可作为生物有机肥回归于药材种植基地,为土壤提供养分。中药药渣中含有大量的生物质能,通过热裂解、气化、液化技术可将生物质能转化成生物燃油、可燃气、乙醇等能源物质为企业供能、供电、供热,在企业内部实现中药药渣资源化利用,变废为宝的同时减少各环节产生的温室气体的量,为早日实现“双碳”目标作出贡献。

3.1 饲料及添加剂 目前,中药药渣在猪、牛、羊、鸡等经济畜禽生产中应用广泛。由于生产工艺等原因,中药材经提取加工后仍残留一定的营养成分和生物活性物质,但因为植物细胞壁的存在,中药药渣中很多营养成分难以被非草食性动物吸收利用。通过对中药药渣进行微生物发酵,分解中药药渣中含有的纤维素类物质产生低聚糖等功能性次级代谢产物。将发酵中药药渣用作畜禽饲料,不仅能够促进动物生长发育、改善肉质,亦能提高动物机体免疫力、调节代谢,见表 2。因此,将中药药渣用作饲料添加剂在避免其本身堆放产生的环境污染、降低企业养殖成本和推动实现“双碳”目标等方面具有应用潜力。

3.2 作为生物有机肥 普通化肥易造成土壤板结、盐渍化程度高。寻找兼顾土壤理化性质和提高中药材质量及品质的有机肥料成为研究热点。中药药渣木质素含量高,腐殖化速度快,可用于堆肥育苗^[62]。中药药渣含有大量氮、磷、钾等微量元素,在适宜的温度和 pH 条件下,经过微生物发酵且

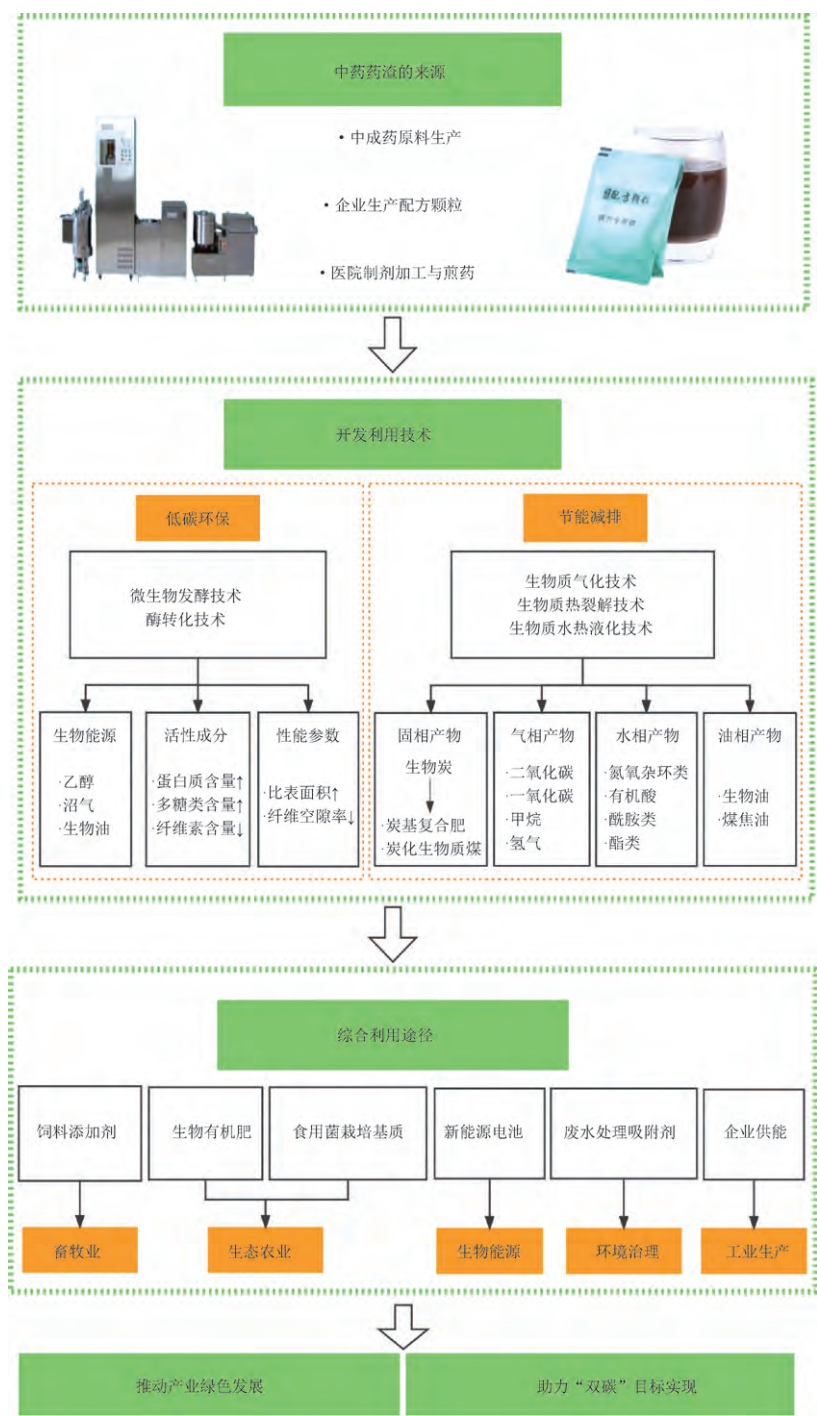


图 3 中药药渣高值化利用技术与途径

Fig. 3 High-value utilization technology and approach of Chinese medicinal residues

腐熟以后,能满足植物苗期所需养分,是一种优质的有机肥料和栽培基质,见表 3。将中药药渣作为生物有机肥用于中药生态农业领域,对生态系统的平衡和可持续发展具有显著效果^[63]。中药药渣残留营养成分高,可作为生物有机肥用于农业生产,替代化学合成的肥料,实现中药药渣的循环利用,减少废弃物的产生,对生态环境破坏较小。

3.3 作为食用菌栽培基质 棉籽壳、杂木屑、玉米芯、稻草等是食用菌常用的栽培基质。近年来,由于木屑价格的不断上涨以及棉籽壳存在安全问题,亟需寻找可替代的栽培基质。研究发现,中药药渣含有大量益于食用菌生长的营养成分,能为微生物的生长提供碳源、氮源、无机盐等营养物质,可用于栽培食用菌。相比于棉籽壳、玉米芯等传统栽培基

表 2 中药药渣在畜禽生产中的应用

Table 2 Application of Chinese medicinal residues in livestock and poultry production

种类	作用	参考文献
甘草药渣	提高生长育肥猪的生长性能、增加眼肌面积和肌肉中不饱和脂肪酸的含量、改善肉质	[50]
“十全大补”中药药渣	改善肥猪生长、胴体特性和肉质	[51]
黄芪、当归、益母草和金银花等药渣	改善妊娠母猪肠道微生物菌群平衡,增加短链脂肪酸含量,有利于妊娠母猪繁殖性能的提高	[52]
“十全大补”中药药渣	改善肥育猪的生长、胴体特征和肉质	[53]
黄芪药渣	提高贵州黑山羊的生长性能及免疫力	[54]
混合中药药渣	提高湖羊肌肉眼肌面积、改善血清抗氧化酶活性	[55]
青贮药渣	改善湖羊生长性能、促进机体生长发育	[56]
姜黄药渣	提高鸡蛋合格率、降低蛋黄中丙二醛和胆固醇含量	[57]
壶瓶碎米荠药渣	显著改善鸡蛋品质,提高蛋黄颜色、蛋壳厚度和鸡蛋形状指数	[58]
红景天药渣	改善血液理化参数、增强肉鸡的抗病能力、提高存活率	[59]
人参药渣	提高黑羽乌鸡的日增重、采食量、脾脏指数、胸腺指数、法式囊指数	[60]
发酵中药药渣	草原红牛生长性能提高,在促进蛋白质和葡萄糖代谢方面作用明显	[61]

表 3 中药药渣作为生物有机肥的应用

Table 3 Application of Chinese medicinal residues as biological organic fertilizers

种类	作物	效果	参考文献
夏枯草药渣	白菜	出苗率高达 90% 以上,幼苗整齐度高、壮苗指数高、生长良好	[64]
混合中药药渣	黄瓜	添加 70% 中药药渣可促进黄瓜幼苗各项参数的提高,提高壮苗指数	[65]
大黄、蛇床子、薄荷、苦参 4 种药渣	番茄	提高番茄产量、降低发病率,部分可改善番茄品质,其中以蛇床子处理效果最佳	[66]
混合中药药渣	稻秧苗	育秧出苗率和成秧率在 90% 以上,药渣基质成分占 50%~60%,出苗率最高	[67]
板蓝根药渣	瓜蒌	瓜蒌的农艺性状、经济性状、质量均较好	[68]
混合中药药渣	番茄	中药药渣-牛粪 5:1 作为栽培基质番茄每株产量高达 3 425 g,保证果实产量及果实品质,改善果实的保健功效	[69]
复方千金片药渣	半夏	促进半夏出芽、健壮生长,对半夏地下总质量及单株质量增重效果显著	[70]
丹参、麦芽、连翘、白术、牡丹皮药渣	紫苏	能促进紫苏生长、提高紫苏酚类物质的积累量,其中丹参药渣作用效果最好	[71]

质,中药药渣具有纤维孔隙率高,易于菌丝着生和繁殖等特点^[72],培育的食用菌生产周期短、产量高、生长状态良好、营养成分含量高,见表 4。因此,中药药渣与食用菌产业结合是可持续发展绿色农业的必然趋势,不仅实现中药药渣的资

表 4 中药药渣作为食用菌栽培基质的应用

Table 4 Application of Chinese medicinal residues as edible mushroom cultivation substrates

种类	食用菌	效果	参考文献
黄芪药渣	猴头菇	产量高、生物学效率高、蛋白营养丰富	[73]
虎杖药渣	杏鲍菇	菌丝生长良好、生物学转化率高	[74]
补肾益寿胶囊药渣	鲍菇、姬菇	菌丝生长速度快、长势好、产量高	[75]
补肾益寿胶囊药渣	鲍鱼菇	40% 的药渣配比其他基质,菌丝生长速率较快,投入产出比、生物学效率均较高	[76]
急支糖浆药渣	金针菇	菌丝生长速度快、菌丝性状好、生长势强、培养料添加 13.5% 的药渣,金针菇生物学效率达 104.20%	[77]
混合中药药渣	草菇	草菇子实体产量提高、70% 中药药渣+30% 废棉渣混合栽培,草菇生物转化率为 23.8%	[78]

3.4 制备吸附材料处理废水 活性炭具有较强的吸附功能,主要是由含碳的原材料经过热解、活化加工制备而成。废弃中药药渣中含有大量碳,可用于制备活性炭。于颖等^[79]以 Na₂CO₃ 为活化剂,香橼、桂枝、板蓝根 3 种药渣为原料,制备活性炭。扫描电子显微镜结果显示,制备的活性炭存在大量的孔结构,具有较好的吸附性。葛晓利等^[80]以磷酸为活化剂,大黄药渣为原料,制备超级活性炭。结果表明,用 60% 的磷酸浸渍,在 600 ℃ 下活化 60 min,产生的活性炭的表面积为 2 413 cm²·g⁻¹,具有较好的吸附性能。YANG J 等^[81]在真空条件下以 ZnCl₂ 为活化剂,以中药药渣作为原料,制备活性炭。结果表明,在真空条件下,从碱浸渍过的中药药渣中获得的活性炭吸附性能较好,其表面积增加 125.3%、总孔体积增加 64.9%。

重金属废水排放量大、来源广、危害大。当前,由于钢铁及有色金属的冶炼、矿山开采等行业的快速发展,水源中重金属含量严重超标,危害人类及水生生物的生命健康。中药

药渣用于重金属废水处理具有成本低、环境友好、吸附力强等优点。中药药渣通过气化、热解、水热液化等技术将其所含的生物质能转化成燃料气体,燃气在发电机的作用下发电为污水预处理、生物处理、深度处理等环节供电,中药药渣经

过微生物转化制备的活性炭、生物絮凝剂可吸附废水中的重金属离子,减少废水生物处理环节外加剂的使用,见图 4。经过处理的再生水资源可用于居民生活、工业生产、生态补水等,减少水资源的浪费。

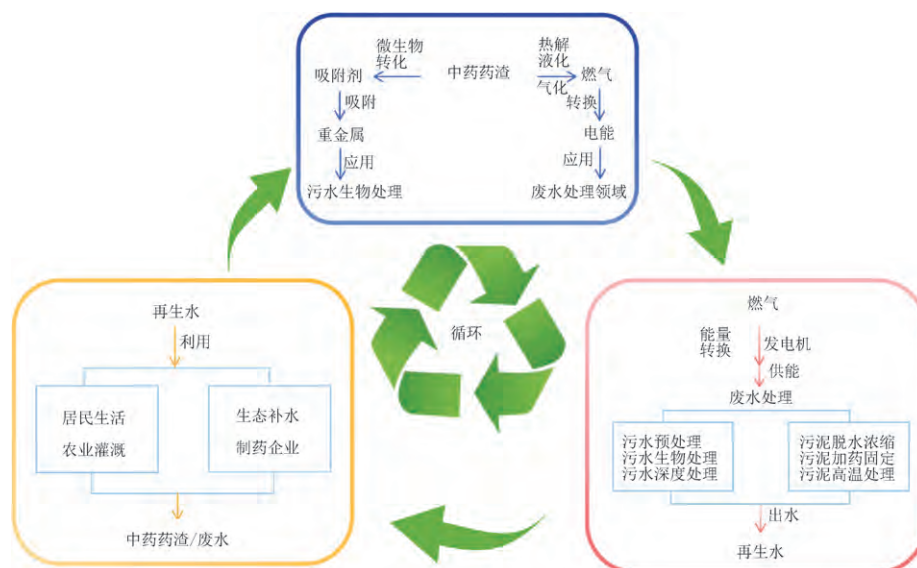


图 4 中药药渣用于废水处理

Fig. 4 Chinese medicinal residues used for wastewater treatment

CHEN X 等^[82]用磷酸二氢钾对鸡粪和中药药渣进行改性,热解以获得在水溶液中处理 Pb(II) 的改性材料(PBC)。根据 Langmuir 模型分析,PBC 对 Pb(II) 的最大吸附量为 $599.4 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$,可以作为废水中 Pb(II) 的有效吸附剂。曹阳等^[83]以鸡血藤药渣为生物吸附剂,吸附废水中的 Cu^{2+} 。结果表明,鸡血藤药渣对 Cu^{2+} 有较好的吸附处理作用。陈月芳等^[84]研究发现中药药渣和麦麸对模拟矿山酸性废水中的 Cu^{2+} 具有吸附作用。ZHANG L 等^[85]以 KOH 为活化剂,中药药渣为碳源,采用碳化及活化的方法制备高比表面积介孔碳材料。结果表明,制备的介孔碳材料吸附功能较强,可吸附大分子和自由基。LIU Y W 等^[86]研究胖大海药渣作为吸附剂对铬和铅的吸附行为。胖大海对铅和铬有较好的吸附性能,是一种良好的天然吸附剂。ZHAO S 等^[87]研究表明丹参残渣可作为污水中亚甲基蓝的有效生物吸附剂,其最大单层生物吸附量为 $100.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。综上所述,中药药渣可以被资源化利用处理重金属废水,达到“以废治废”的效果,为推动环境与中药产业绿色可持续发展助力。

3.5 制备新能源电池 在“双碳”的大背景之下,与新能源相关的产业正在飞速发展。然而太阳能、水能、风能等新能源面临着随机性和严重的气候依赖性问题,难以实现稳定的高效利用。研究大规模稳定的能源储存系统势在必行。锂电池和超级电容器是目前应用广泛、发展迅速的 2 种储能方式。查阅相关文献发现,中药药渣可通过活化制备成活性

炭用于锂电池或超级电容材料。

LIANG J F 等^[88]利用刺五加废弃根制备富含微孔和氮掺杂的多孔碳框架,其优良的蜂窝状结构有利于电解质的渗透和 Li^+ 向电极材料的渗透,该电极材料的优异性在促进锂电池的发展方面有一定潜力。赵悦等^[89]以废弃生物质中药药渣为原料, ZnCl_2 为活化剂,制备生物炭碳基氧还原电催化剂。结果表明,其具有出色的长期稳定性。张庆武等^[90]以土茯苓药渣制备含铁、硫化物等多孔炭材料。该材料含有的中孔结构和较大的比表面积为离子传输提供了良好的通道。

中药产业的健康发展依赖于中药资源的高效利用和可持续发展。中药药渣循环利用无疑也是中药资源高效利用的方式之一。综上所述,无论是将废弃中药药渣作为经济畜禽的饲料添加剂、生物有机肥、食用菌栽培基质、吸附材料处理废水还是制备成新能源电池,都实现了中药药渣的高值化与循环利用,可有效降低碳排放,为早日实现“双碳”目标献计献策。

4 总结与展望

对中药药渣进行资源化利用,有利于中药产业绿色可持续发展。中药药渣经过微生物转化,蛋白质含量明显提高,可用作生产蛋白饲料、食用菌栽培基质。中药药渣中含有氮、磷、钾、有机质等物质,是生物有机肥的潜在原料。中药药渣的热裂解、生物质气化、液化技术可制备生物燃油、乙

醇、燃气等清洁能源,用于制药企业生产供能。

中药药渣的综合、高效、循环利用是一项复杂且艰巨的任务,当前我国中药药渣的综合利用尚且停留在初级阶段,尚未形成完整的中药药渣资源循环利用体系。首先,中药药渣综合利用率偏低是其面临的最主要的问题。中药药渣是重要的生物质资源,传统的处理方式造成极大的资源浪费及环境污染,作为生物有机肥、菌种栽培基质等处理技术亦存在一定的弊端。中药药渣资源化利用技术仍处于理论研究阶段,并未实现产业化规模,无法彻底解决中药药渣引起的环境污染和资源浪费问题。其次,中药资源产业涉及面广,产生的中药药渣来源复杂、成分多样、理化性质不一。目前,中药制药企业、中医医院产生的中药药渣,通常采用混合收集、混合运输、混合处理,没有实行源头分类处理。最后,中药药渣回流市场的现象时有发生,国家已明确规定,经煎煮提取有效成分的中药药渣禁止再次流入市场,但不法分子铤而走险,回收中药药渣,经过简单处理之后再次销售,扰乱市场秩序。

中药药渣资源化处理不仅取决于科学技术的发展程度,与政府相关政策法规的建立也密切相关。首先,政府应该建立中药药渣统计制度,对中药制药企业及中医院等产生的中药药渣进行统计分类,摸清底数,为后续中药药渣的处理、利用提供依据。其次,政府与企业应齐心协力,共同参与中药药渣资源化处理这项任务中来。可引导有条件的企业或机构构建中药药渣资源化利用中心,力争在中药药渣发酵生产蛋白饲料、生物质燃料、食用菌栽培基质等方面实现技术的重大突破。最后,建立能够防范提取有效成分的中药药渣回流市场的处置管理制度,严防中药药渣被不法分子回收利用。中药药渣资源化利用处理成本高、耗时长,短期内无法为企业带来利润,企业难以一直坚持。因此,中药药渣资源化处理亟须政府、企业共同倡导,基于低碳环保理念,采用相关技术手段,对中药药渣进行资源化处理,以实现中药产业绿色健康发展。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 段金廛,郭盛,唐志书,等. 中药资源循环利用模式构建及产业化示范[J]. 江苏中医药,2019,51(3):1.
- [4] 习近平. 继往开来,开启全球应对气候变化新征程:在气候雄心峰会上的讲话[J]. 中国环境监察,2020,58(12):9.
- [5] 曾慧婷,戴迪,何小群,等. 大健康背景下药食两用药渣的资源化利用研究实践与策略[J]. 中国中药杂志,2022,47(14):3968.
- [6] CYRANOSKI D. Why Chinese medicine is heading for clinics around the world[J]. Nature,2018,561(7724):448.
- [7] CYRANOSKI D. China to roll back regulations for traditional medicine despite safety concerns[J]. Nature,2017,551(7682):552.
- [8] HUMPHREYS G. New drugs from ancient texts[J]. Bull World Health Organ,2012,90(8):562.
- [9] 王明威,周林,刘顺会,等. 中药渣资源化利用探讨[J]. 广东药科大学学报,2017,33(1):140.
- [10] 段金廛,张伯礼,宿树兰,等. 基于循环经济理论的中药资源循环利用策略与模式探讨[J]. 中草药,2015,46(12):1715.
- [11] MA J, CHEN Y, ZHAO Y, et al. Effects of traditional Chinese medicine residue on plant growth and soil properties: a case study with maize (*Zea mays* L.) [J]. Environ Sci Pollut Res,2019,26(32):32880.
- [12] 段金廛,宿树兰,郭盛,等. 中药资源化学研究与资源循环利用途径及目标任务[J]. 中国中药杂志,2015,40(17):3395.
- [13] 王引权,FRANK S,安培坤,等. 中药渣堆肥与化肥配合施用对当归产量与品质的影响[J]. 甘肃中医学院学报,2012,29(5):51.
- [14] 李明江,魏练平,蒋立科. 对中药渣栽培食用菌的刍议[J]. 中国微生物学杂志,2011,23(7):667.
- [15] 李芳蓉,陈鑫,张建军. 红芪药渣固态发酵生产蛋白饲料的探讨[J]. 中央民族大学学报(自然科学版),2019,28(1):47.
- [16] 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.
- [17] GUO F, DONG Y, DONG L, et al. An innovative example of herb residues recycling by gasification in a fluidized bed [J]. Waste Manage,2013,33(4):825.
- [18] DENG Q, LI A J, WU Y W, et al. Life cycle assessment of bio-char preparation of Chinese traditional medicine residue by low-temperature pyrolysis[J]. E3S Web of Conferences,2022,doi:10.1051/e3sconf/202235003005.
- [19] KARGI F, CURME J A, SHEEHAN J J. Solid-state fermentation of sweet sorghum to ethanol [J]. Biotechnol Bioeng,1985,27(1):34.
- [20] 孔文平,黄勇,段燕文,等. 基于微生物转化的中药渣再利用研究进展[J]. 生物加工过程,2021,19(2):150.
- [21] KUMLA J, SUWANNARACH N, SUJARIT K, et al. Cultivation of mushrooms and their lignocellulolytic enzyme production through the utilization of agro-industrial waste [J]. Molecules,2020,25(12):2811.
- [22] 王兵,王向东,秦岭,等. 中药渣固态发酵生产蛋白饲料[J]. 食品与生物技术学报,2007,115(4):77.
- [23] 陈鑫,李芳蓉,张建军,等. 红芪药渣固态发酵生产蛋白饲料工艺条件优化[J]. 中国酿造,2019,38(6):176.
- [24] 丁嘉伟,苏新尧,马婷玉,等. 11类菌种固态发酵对青蒿叶渣功效成分的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2020,40(6):114.
- [25] 张庆明,徐云燕,陈美惠,等. 灵芝菌固体发酵感冒清热颗粒药渣的主要活性物质变化研究[J]. 东南国防医药,2019,21

- (6):616.
- [26] HSIEH C, YANG F. Reusing soy residue for the solid-state fermentation of *Ganoderma lucidum* [J]. *Bioresour Technol*, 2004, 91(1):105.
- [27] 白海,高阳,刘丽敏,等. 中药渣固态发酵前后蛋白质和多糖含量的变化[J]. *山西大同大学学报(自然科学版)*, 2021, 37(1):84.
- [28] 刘凤梅,谭显东,羊依金,等. 三七渣固态发酵生产蛋白饲料[J]. *中国酿造*, 2011(2):67.
- [29] 秦岭,王向东,潘朝智,等. 多菌种混合发酵生脉饮药渣生产蛋白饲料工艺条件优化[J]. *食品与生物技术学报*, 2008(4):122.
- [30] CUI Y, PENG S, DENG D, et al. Solid-state fermentation improves the quality of *Chrysanthemum* waste as an alternative feed ingredient[J]. *J Environ Manage*, 2023, 330:117060.
- [31] 韩愈杰,郭立佳,李定刚. 双黄连药渣发酵菌筛选及发酵条件优化[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2016(21):205.
- [32] XU X, XU Z, SHI S, et al. Lignocellulose degradation patterns, structural changes, and enzyme secretion by *Inonotus obliquus* on straw biomass under submerged fermentation[J]. *Bioresour Technol*, 2017, 241:415.
- [33] BOUWS H, WATTENBERG A, ZORN H. Fungal secretomes-nature's toolbox for white biotechnology[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2008, 80(3):381.
- [34] 曾飞,张森,钱大玮,等. 甘草药渣降解菌的筛选及其产酶工艺研究[J]. *生物技术通报*, 2017, 33(12):125.
- [35] HSU B Y, LU T J, CHEN C H, et al. Biotransformation of ginsenoside Rd in the ginseng extraction residue by fermentation with *Lingzhi* (*Ganoderma lucidum*) [J]. *Food Chem*, 2013, 141(4):4186.
- [36] ZHANG W, CHEN Y P, ZHANG L, et al. Theophylline-regulated pyrolysis synthesis of nitrogen-doped carbon nanotubes with iron-cobalt nanoparticles for greatly boosting oxygen reduction reaction[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2022, 626:653.
- [37] KHEDULKAR A P, PANDIT B, DANG V D, et al. Agricultural waste to real worth biochar as a sustainable material for supercapacitor[J]. *Sci Total Environ*, 2023, 869:161441.
- [38] 王攀,展思辉,于宏兵,等. 废弃中药渣催化热解制取生物油的研究[J]. *环境污染与防治*, 2010, 32(5):14.
- [39] 张锐,刘建群,舒积成,等. 超声辅助提取美洲大蠊药渣残油及其制备生物柴油的研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2017, 29(1):114.
- [40] 孟小燕,于宏兵,王攀,等. 低碳经济视角下中药行业药渣催化裂解资源化研究[J]. *环境污染与防治*, 2010, 32(6):32.
- [41] AMIN N, ASLAM M, KHAN Z, et al. Municipal solid waste treatment for bioenergy and resource production: potential technologies, techno-economic-environmental aspects and implications of membrane-based recovery [J]. *Chemosphere*, 2023, 323:138196.
- [42] 洗萍,钟莉莹,王孝英. 两面针药渣的热解气化利用特性分析[J]. *可再生能源*, 2007(1):26.
- [43] 郭飞强,董玉平,董磊,等. 三种中药渣的热解气化特性[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(S1):125.
- [44] 范鹏飞,李景东,刘艳涛,等. 感冒清热颗粒中药渣中试规模循环流化床气化实验[J]. *化工进展*, 2014, 33(8):1979.
- [45] 张彤辉,张兆玲,李景东,等. 中药渣循环流化床热解气化试验[J]. *可再生能源*, 2014, 32(3):335.
- [46] 张林野,吉帝安,马志鹏,等. 生物质水热液化研究现状与展望[J]. *当代化工研究*, 2022(20):10.
- [47] 申瑞霞,赵立欣,冯晶,等. 生物质水热液化产物特性与利用研究进展[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(2):266.
- [48] 丁文冉. 中药渣水热液化制备生物油实验研究[D]. 济南:齐鲁工业大学, 2022.
- [49] 丁世磊,罗第梅,江宗蔚,等. 高压液化粉防己药渣制备生物油的工艺条件[J]. *精细石油化工*, 2022, 39(6):59.
- [50] 罗宗刚,王玲,杨远新,等. 甘草药渣对生长肥育猪生长性能、胴体性状和肉品质的影响[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(5):2397.
- [51] 李华磊,杨桂芬,任明晋,等. “十全大补”发酵中药渣饲用安全及应用效果的研究[J]. *饲料研究*, 2021, 44(17):18.
- [52] 李华伟,孔祥峰,祝倩,等. 围产期饲料添加发酵中药渣对母猪粪便微生物及其代谢产物的影响[J]. *天然产物研究与开发*, 2017, 29(4):658.
- [53] 李肖梁,余东游,钱娅,等. “十全大补”药渣对肥育猪生长、胴体特性和肉质的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2006, 32(4):433.
- [54] 韩昌权,王恩花,高明,等. 黄芪药渣对贵州黑山羊生长性能、免疫功能和肉品质的影响[J]. *中国饲料*, 2022(13):72.
- [55] 吴萍萍,江丽丽,江美莲. 中药渣对湖羊生长性能、肉质及抗氧化影响的研究[J]. *中国饲料*, 2022(10):113.
- [56] 圣平,何力,张志红,等. 饲喂中药渣对湖羊生长性能及肉质的影响[J]. *饲料研究*, 2019, 42(1):1.
- [57] 张旭,蒋桂韬,王向荣,等. 姜黄渣对蛋鸡生产性能、蛋品质及蛋黄胆固醇和丙二醛含量的影响[J]. *动物营养学报*, 2016, 28(9):2795.
- [58] YU F, YU X, LIU R, et al. Dregs of *Cardamine hupingshanensis* as a feed additive to improve the egg quality [J]. *Front Nutr*, 2022, 9:915865.
- [59] 丁保安,李转见,莫元春. 红景天药渣对肉鸡生长性能、营养物质代谢和血液指标的影响[J]. *中国家禽*, 2010, 32(3):16.
- [60] 郭嘉静,段红爽,韩雪,等. 人参渣对黑羽乌鸡生长性能及免疫器官指数的影响[J]. *中国饲料*, 2020(1):53.
- [61] 刘明远,李林,陈群,等. 发酵中药渣对草原红牛生长性能和血清生化指标的影响[J]. *饲料研究*, 2022, 45(17):1.
- [62] ZHOU Y, SELVAM A, WONG J W. Evaluation of humic substances during co-composting of food waste, sawdust and Chinese medicinal herbal residues [J]. *Bioresour Technol*, 2014, 168:229.
- [63] 郭兰萍,蒋靖怡,张小波,等. 中药生态农业服务碳达峰和碳中和的贡献及策略[J]. *中国中药杂志*, 2022, 47(1):1.

- [64] 何佳芳,陈龙,苟久兰,等. 不同药渣基质配比对小白菜种苗质量的影响研究[J]. 种子,2015,34(2):94.
- [65] 杜龙龙,马玉奎,陈飞,等. 以中药渣堆肥为肥源对黄瓜基质育苗的影响[J]. 北方园艺,2015(6):161.
- [66] 陈宏涛. 4种中药渣堆肥对番茄生长效果的研究[J]. 天津农业科学,2019,25(12):71.
- [67] 谭雪明,朱宁,李木英,等. 中药渣基质培育机插秧苗的效果研究[J]. 江西农业大学学报,2019,41(6):1041.
- [68] 秦梦,段绪红,何培,等. 板蓝根药渣生物有机肥对瓜蒌产量和品质的影响[J]. 北方园艺,2021(5):109.
- [69] 刘杰,吴国瑞,张金伟,等. 保健型中药渣基质对日光温室袋培番茄产量及品质的影响[J]. 核农学报,2021,35(7):1687.
- [70] 万燕,雨田,郭晓恒,等. 妇科千金片药渣发酵制备有机肥在半夏种植上的应用[J]. 成都大学学报(自然科学版),2017,36(1):39.
- [71] 陈美兰,申业,周修腾,等. 不同中药渣对紫苏生长及酚类物质的影响[J]. 中国中药杂志,2016,41(23):4350.
- [72] 程青海,方媛,郭相,等. 药渣栽培食用菌研究概述[J]. 中国食用菌,2018,37(1):1.
- [73] 李盛杰,江海涛,周峰,等. 黄芪药渣培养料对猴头菇产量和品质的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(23):152.
- [74] 朱杰,刘艺,黄苛,等. 利用虎杖药渣栽培杏鲍菇的培养基优化及菌糠再利用分析[J]. 中国农学通报,2013,29(13):182.
- [75] 刘达玉,王慧超,郑林用,等. 补肾益寿胶囊药渣栽培杏鲍菇和姬菇的研究[J]. 北方园艺,2014(13):145.
- [76] 陈今朝,谭永忠,王新惠,等. 补肾益寿胶囊药渣栽培鲍鱼菇及营养成分分析[J]. 西南农业学报,2012,25(2):740.
- [77] 陈今朝,王慧超,谭永忠. 急支糖浆药渣栽培金针菇试验[J]. 中国食用菌,2008(5):31.
- [78] 何焕清,肖自添. 中药渣栽培草菇试验[J]. 广东农业科学,2009,36(3):51.
- [79] 于颖,孙显涛,陈建秋,等. 中药渣基活性炭的制备及其对头孢拉定的吸附研究[J]. 生物质化学工程,2017,51(4):25.
- [80] 葛晓利,钟永科. 大黄药渣制备超级活性炭[J]. 炭素技术,2014,33(2):34.
- [81] YANG J, QIU K Q. Development of high surface area mesoporous activated carbons from herb residues[J]. Chem Eng J,2011,167(1):148.
- [82] CHEN X, ZHU X, FAN G, et al. Enhanced adsorption of Pb(II) by phosphorus-modified chicken manure and Chinese medicine residue co-pyrolysis biochar[J]. Microsc Res Tech,2022,85(11):3589.
- [83] 曹阳,杨燕,刘若琪,等. 鸡血藤药渣对废水中 Cu^{2+} 的吸附行为[J]. 农业资源与环境学报,2022,39(4):798.
- [84] 陈月芳,曹丽霞,林海,等. 中药渣和麦麸对模拟矿山酸性废水中 Cu^{2+} 的吸附[J]. 中国有色金属学报,2013,23(6):1775.
- [85] ZHANG L, ZHANG T D, GAO R, et al. Preparation and characterization of mesoporous carbon materials of Chinese medicine residue with high specific surface areas[J]. Chem Eng Trans,2016,55:79.
- [86] LIU Y W, CHANG X J, GUO Y, et al. Biosorption and preconcentration of lead and cadmium on waste Chinese herb Pang Da Hai[J]. J Hazard Mater,2006,135(1/3):389.
- [87] ZHAO S, ZHAO T. Biosorption of methylene blue from wastewater by an extraction residue of *Salvia miltiorrhiza* Bge[J]. Bioresour Technol,2016,219:330.
- [88] LIANG J F, XU Y Q, LI C, et al. Traditional Chinese medicine residue-derived micropore-rich porous carbon frameworks as efficient sulfur hosts for high-performance lithium-sulfur batteries[J]. Dalton Trans,2022,51(1):129.
- [89] 赵悦,李德念,阳济章,等. 中药渣生物炭活化制备碳基电催化剂及其氧还原反应催化性能研究[J]. 材料导报,2023,37(2):5.
- [90] 张庆武,沈鑫,胡梦杭,等. 土茯苓药渣制备超级电容器电极材料研究[J]. 甘肃科技,2022,38(23):52.

[责任编辑 吕冬梅]