

· 专论 ·

【编者按】 中药资源循环利用和绿色发展是国家实施生态文明建设的重要组成部分，而构建分级分类管理体系是中药废弃物及副产物资源化利用的重要前提和保障。近年来，随着我国中药产业规模的快速发展和增长，中药及天然药物资源需求量不断攀升，导致在中药资源全产业链产生的巨量废弃物及副产物未能得到充分利用而被大量浪费。然而，目前因中药废弃物及副产物分级分类管理系统尚未建立，也未形成有效的政策导向和激励机制，导致中药废弃物及副产物的处置普遍存在资源化水平与利用程度低、资源浪费与环境压力加剧、中药企业实施循环利用动力不足等问题。本刊特邀南京中医药大学段金廛教授团队撰文，基于资源循环经济学理论对中药资源全产业链废弃物及副产物分级分类管理的必要性、分级分类体系构建、分级分类资源化利用及循环经济产业布局等问题进行探讨，为实现中药废弃物及副产物的科学分级分类及精细化、高值化利用提供依据，为中药资源循环经济与绿色产业发展提供支撑。

段金廛（1956—），南京中医药大学教授，博士研究生导师，国际欧亚科学院院士。全国中医药杰出贡献奖获得者，全国优秀科技工作者，入选全国首届“岐黄学者”中医药领军人才工程，带领团队入选第二批“全国高校黄大年式教师团队”。现任中药资源产业化与方剂创新药物国家地方联合工程中心主任、国家中医药管理局中药资源循环利用重点研究室主任、江苏省中药资源产业化过程协同创新中心主任，兼任国家中医药管理局中药材产业扶贫行动技术指导专家组组长、中国自然资源学会中药及天然药物资源研究专业委员会主任委员、中国中药协会中药资源循环利用专业委员会主任委员等。



长期致力于中药资源化学及资源循环利用、方剂功效物质及中药配伍关系研究，作为国家“973”计划项目首席科学家，先后承担国家“973”计划、国家科技支撑计划、国家自然科学基金及省重大基础研究项目等20余项；在国内外发表学术论文560余篇，其中SCI收录260余篇；自2014年以来7次入选Elsevier中国高被引学者榜单。作为第一授奖人荣获国家科学技术进步二等奖2项、部省级科技一等奖6项。

中药资源全产业链废弃物及副产物 分级分类体系构建[△]

段金廛^{1*}，宿树兰¹，郭盛¹，唐志书²，王明耿³，朱华旭¹，刘峰⁴，郭兰萍⁵

1. 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研究室，江苏 南京 210023；

[△] [基金项目] 中央本级重大增减支项目（2060302）；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）；中医药传承与创新“百千万”人才工程（岐黄工程）岐黄学者项目（2019）

* [通信作者] 段金廛，教授，研究方向：中药资源化学研究及资源循环利用；E-mail: dja@njucm.edu.cn

2. 陕西中医药大学/陕西省中药资源产业化协同创新中心, 陕西 咸阳 712046;
3. 山东步长制药股份有限公司, 山东 菏泽 274009;
4. 陕西国际商贸学院, 陕西 咸阳 710061;
5. 中国中医科学院 中药资源中心, 北京 100700

[摘要] 实施分类管理是防治废弃物污染和实现废弃物减量化、资源化、无害化处置的前提和基础,但目前尚缺少对中药废弃物及副产物的科学分级分类管理体系。基于资源经济学理论对中药资源全产业链废弃物及副产物分级分类的必要性、分级分类体系构建、分级分类资源化利用及循环经济产业布局等问题进行探讨,提出中药资源全产业链废弃物及副产物的四级分类体系,可形成药用、食用、饲料化、肥料化及能源化处置的多途径资源化模式,为实现中药废弃物的科学分类和分级精细化、高值化利用提供支撑。进一步探讨中药废弃物及副产物循环利用的生态产业发展及多途径资源化利用产业链构建模式,以期对中药资源循环经济产业发展,中药农业、中药工业发展模式和经济增长方式的转变提供参考,为我国中药资源产业高质量、绿色发展做出贡献。

[关键词] 中药资源; 中药废弃物及副产物; 废弃物分类; 循环利用; 循环经济; 绿色发展

[中图分类号] R282 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-4890(2022)10-1830-10

doi: 10. 13313/j. issn. 1673-4890. 20220925001

Establishment of Classification System for Grade and Classification System of Wastes and By-products in Whole Industrial Chain of Chinese Medicine

DUAN Jin-ao^{1*}, SU Shu-lan¹, GUO Sheng¹, TANG Zhi-shu², WANG Ming-geng³, ZHU Hua-xu¹,
LIU Feng⁴, GUO Lan-ping⁵

1. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Chinese Medicinal Resources Industrialization, National and Local Collaborative Engineering Center of Chinese Medicinal Resources Industrialization and Formulae Innovative Medicine, Key Laboratory of Chinese Medicinal Resources Recycling Utilization, National Administration of Traditional Chinese Medicine, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, China;
2. Shaanxi Collaborative Innovation Center of Chinese Medicinal Resources Industrialization, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712046, China;
3. Shandong Buchang Pharmaceutical Co., Ltd., Heze 274009, China;
4. Shannxi Institute of International Trade and Commerce, Xianyang 710061, China;
5. National Resource Center for Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China

[Abstract] The implementation of classified management is the premise and basis for preventing and controlling waste pollution and realizing waste reduction, resource utilization, and innocuous treatment. At present, there is still a lack of scientific classified management and resource utilization measures for the wastes of Chinese medicine. Based on the theory of resource economics, this paper discussed the necessity of the classification of wastes and by-products in the whole industry chain of Chinese medicine resources, the construction of the classification and classification system, the utilization of the classified resources and the industrial layout of circular economy. The four-level classification system of wastes and by-products was put forward, which can form a multi-way resource recovery mode for medicinal, edible, feed, fertilizer and energy disposal, so as to provide support for the scientific classification and refined high-value utilization of Chinese medicine waste. Furthermore, the ecological industry development mode of Chinese medicine waste and by-product recycling and the construction of multi-way resource recycling industry chain was discussed. In order to provide reference for the development of the circular economy industry of Chinese medicine resources, for the transformation of the development mode and economic growth mode of Chinese medicine agriculture and Chinese medicine industry, and to contribute to the high-quality development and green development of China's Chinese medicine resource industry.

[Keywords] Chinese medicine resources; wastes and by-products of Chinese medicine; classification of wastes; cyclic utilization; circular economy; green development

2030碳达峰和2060碳中和(简称“双碳”目标)将使中国经济结构和经济社会运转方式产生深刻变革,环境规制的范围将进一步从高污染行业扩大到高排放行业,在未来40年极大促进我国产业链的清洁化和绿色化。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中明确提出:“推动绿色发展,促进人与自然和谐共生”^[1]。中华人民共和国国家发展和改革委员会联合中华人民共和国科学技术部等部委印发了《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》,将提高大宗固废资源利用效率、推进大宗固废综合利用和绿色发展、推动大宗固废综合利用创新发展三个方面作为我国新的发展阶段产业高质量发展的重点任务^[2]。因此,开展资源综合利用是全面提高资源利用效率和效益、建立健全绿色低碳循环经济体、促进经济产业链转型升级的切实需要,是我国深入实施可持续发展战略和高质量推进生态文明建设的重要内容与目标愿景。

中药废弃物及副产物是在中药材生产和深加工制造过程产生的一类特殊“垃圾”^[3],其分类更为复杂,对该类废弃物的处置要求更高、更严格。近年来,我国以消耗中药及天然药物资源为特征的资源经济产业得到了快速发展,社会贡献率不断攀升,中药产业贡献率已占全国医药产业总额的1/3。从而拉动了中药农业蓬勃发展,药材种植生产和抚育更新面积逾亿亩(1亩≈666.67 m²),在药材生产的同时也有逾亿吨的“非药用部位”沦为废弃物,大多被丢弃于田间地头任其自然腐烂散布。殊不知,药用植物与一般的粮食蔬菜作物不同,其具有多种多样的“生物活性”,如此粗放的生产方式不仅造成生态环境的严重污染,也是导致土地“连作障碍”的重要因素,同时导致占用大量的生产力要素生产出的药用资源未能得到充分利用而被大量浪费。

中药材作为中药制药工业、中药大健康产业等深加工制造产业的原料,经水提、醇提或其他方式进行功效物质的富集纯化等工艺环节,最后制备形成中药提取物、中药配方颗粒、中成药、功能性保健食品、饲料添加剂、中兽药、生物农药等各类资源性产品,其药材原料的利用率平均低于30%。同样,逾亿吨的中药深加工过程产生的固体废弃物及废水未被有效利用而被排放或填埋,造成了严重的资源浪费和环境污染。目前,已探索性开展了中

药资源全产业链过程的资源循环利用研究与实践,形成中药资源循环经济绿色发展的理论基础,构建了中药农业、中药工业生产过程废弃物及副产物的资源价值发现及多途径利用策略和技术体系,针对中药资源产业上、中、下游产生的不同类型废弃物,以大品种为代表开展资源化利用系统研究和产业转化,产生了良好社会、经济和生态效益,为中药资源产业提质增效和绿色发展开创出一条新路。然而,目前尚未建立起中药废弃物及副产物分级分类处理系统,尚未形成有效的政策导向和激励机制,导致中药废弃物及副产物的处置普遍存在资源化水平与利用程度低、资源浪费与环境压力加剧、中药企业缺乏实施循环利用的动力等问题^[4-7]。

因此,为了适应国家资源环境保护和行业战略发展新要求,以碳达峰、碳中和为牵引的产业绿色低碳循环发展目标。本文基于资源经济学理论对中药资源全产业链废弃物及副产物科学分类的必要性和重要性、废弃物的分类管理及资源再生利用等问题进行探讨,提出基于资源利用效率和效益提升、资源最优配置、资源可持续利用的中药废弃物分类系统,并结合现代智能化识别技术探讨中药废弃物及副产物再生利用的循环经济产业布局等问题。以期对中药资源产业领域构建和实施资源节约型和环境友好型循环经济发展体系提供借鉴,为政府研究制定转变中药农业和中药工业发展模式和经济增长方式的政策法规提供参考,为我国中药资源产业高质量发展和碳达峰与碳中和目标实现做出贡献。

1 中药废弃物及副产物分级分类的必要性

“垃圾”分类是一项系统工程,生活垃圾处理包括了前端的分类,中端的收集、运输和末端的处置,末端处置方式决定了前端分类方式,而前端分类结果又直接影响着末端的处置效果,环环相扣、步步相连,因此需要建立系统的运行机制^[8]。然而,中药废弃物及副产物具有类型多样、组成复杂、潜在利用价值多样化、资源化利用途径多元化等特点,其有效转化为资源性再生产品,延伸中药资源全产业链循环经济的过程十分复杂。因此,中药废弃物及副产物的分类及管理对于更好地利用资源、开发再生产品、发展再生产业具有重要意义和产业前景。

中药废弃物及副产物的产生源于药材原料生产、药材初加工与中药饮片加工、中药制药过程及大健康产品生产制造过程,大多属于湿垃圾,主要包括5个方面:中药材生产过程产生的非药用部位;药材产地加工与饮片加工过程产生的下脚料及破碎组织、碎屑、粉渣等;中药制药过程产生的废渣、沉淀物、废液、废气等;中药大健康产品制造过程中产生的废弃的可利用资源性物质、液态废弃物和气态废弃物,如废水、废气等。将其进行科学合理分类,并构建系统的管理流程,进而依据其资源化特点、资源潜在价值和资源化利用途径等进行再生产品创制,从而发展形成再生产业链。

2 基于资源经济学评价方法构建中药废弃物及副产物分级分类体系

中药废弃物及副产物的分类研究与管理相对比较薄弱,尚未形成系统的分类管理流程。中药废弃物分类管理面临的难点在于:中药生产企业较为分散,不利于集中收集、分类和预处理等过程的实施;中药废弃物种类多种多样,既包含根及根茎类、花果实种子类,又包含动物药或有毒中药等,不利于细化分类和资源化利用;中药废弃物高值化、无害化处置水平低;废弃物处理费用较高,整体效益较差。

资源经济学的基本内容由三大主题和4个方面构成,三大主题是指效率、最优和可持续性;4个方面内容是指生产、分配、利用、保护与管理^[9]。在以资源经济学评价方法为主的前提下,对中药废弃物的潜在利用价值、利用效率进行理性分析,探讨其科学分类、资源化利用途径、产业经济效益与环境资源系统的关联机制,重视环境资源对中药废弃物资源化利用所起的重要作用,实现环境、经济、社会三者可持续发展。由此,依据资源经济学原理结合现代智能化识别技术探讨中药废弃物及副产物的科学分类系统,以期更好地再生利用^[10]。

2.1 基于资源利用效率和效益提升的中药废弃物及副产物分级分类系统

从资源经济学角度看,中药废弃物是某种物质和能量的载体,是一种可转化利用的资源,其主体为可再生物质,尤其是废弃的植物组织器官、废渣、废水等,是一类可转化利用的生物质原料。通过科

学分类与监管,进而实现其有效转化及资源化利用,提升资源价值、发现潜在利用价值,切实提高中药资源利用效率和效益^[11]。

针对不同类型的中药废弃物及副产物的理化性质、潜在资源价值及资源化潜力等特点,可将中药资源产业化过程中产生的废弃物分为四级分类体系:一级分类单元可分为中药材生产过程中产生的废弃物和中药深加工制造过程产生的废弃物;二级分类体系可分为中药材生产过程产生的废弃组织器官,包括地上茎和叶、花和落花、果实和种子、根和根茎,以及加工下脚料;中药深加工过程产生的废弃物,包括单味药提取固体废弃物、复合提取固体废弃物、水提醇沉沉淀物、废液及废气;三级分类体系依据废弃物的潜在资源价值,可分为富含药用资源性物质的废弃物、富含食用功能物质的废弃物、富含轻化工基础原料的废弃物、经生物/化学转化可获得资源性物质的废弃物、经物理转化可获得资源性物质的废弃物;四级分类体系则依据其资源化途径分为可开发新资源药材/医药产品或原料、可开发新食品资源/功能食品原料、可获得天然产物原料、可供饲料化、可供肥料化、可供能源化及可供材料化的废弃物(图1)。这四级分类系统可依据社会需求、行业及区域经济发展水平,选择适宜的多层级利用技术,形成可供药用、食用、饲料化、肥料化及能源化处置的多途径资源化模式,以此严格规划实施与开发,从而实现中药废弃物的科学分类和分级精细化高值化利用,提升中药资源利用效率和效益。

2.2 基于资源最优配置的中药废弃物及副产物分级分类系统

作为国民经济有机体的资源产业,是以提供资源供社会消费来发挥其社会功能。为此,分析资源的优化配置,从实物量和价值量两个方面对资源进行核算,分析自然系统的经济服务承载力是至关重要的。因此,对于中药废弃物及副产物应本着最小最优化、分门别类处理的原则,使其发挥资源的最优配置和最有效利用。

首先将中药农业生产过程产生的废弃物(非药用部位、药材加工下脚料等)、中药工业生产过程产生的废弃物(中药渣固体废弃物、沉淀物、废水、废气等),根据废弃物的类型、性质及资源化程度进行收集、分类、运输及预处理,严禁混入生活垃圾



图1 中药废弃物及副产物分级分类体系

或随意丢弃。其次,将中药废弃物进行分门别类的处理,采用统一的分类管理方式进行存储和运输。依据中药废弃物的形态可分为固体废弃物、液态废弃物、气态废弃物处理模式;固体废弃物又可分为不含有毒物质的中药非药用部位、中药渣、沉淀物,这些可参照垃圾分类中的湿垃圾,其处理模式可分为高值化处理、转化增值处理、低值化处理;含有毒物质的中药渣、废水、废气则属于有害垃圾,需经无害化处置后再行资源化^[12-14]。

以菊花药材生产过程产生的废弃物为例,探讨其不同层面废弃物的分类及资源化利用途径。菊花药材生产过程产生大量茎叶、根等非药用部位,其富含挥发油、黄酮、三萜酸、糖等类资源性化学成分,属于高值化废弃物;在其资源化利用过程中应遵循资源最优处置原则,采用绿色提取分离技术,提取高附加值的菊茎叶精油、菊茎叶黄酮/酚酸、菊多糖等作为医药原料、日用化妆品原料、饲料添加剂等;剩余残渣可进一步作为生产纤维素酶、生物燃料、生物有机肥等的原料进行资源化利用,实现转化增值利用而进入生态循环系统。

中药资源产业化过程中,将一个企业的废弃物或副产物作为另一个关联企业的生产原料,通过废弃物交换和再生利用将不同企业联系在一起,形成

“自然资源-产品-资源再生利用”的物质循环过程,使生产和消费过程中投入的自然资源最少,将人类生产和生活活动对环境的危害或破坏降到最低程度。依据中药资源及其废弃物的特点,实现资源的多途径、多层次利用,促进中药资源产业化过程由传统线性生产方式向循环经济生态发展方式的根本性转变,实现废弃物及副产物资源化、废弃物产品化、废热废气能源化,形成多层次闭路循环、无废排放、无污染的生态型工业体系,形成中药资源-产品-废弃物-再生资源-再生利用-再生产业的循环经济产业发展模式^[15]。其分类模式及废弃物再生产链中的传递链见图2。

2.3 基于资源可持续利用的中药废弃物及副产物分级分类系统

废弃物的分类处置与资源化利用是资源环境可持续利用的重大问题^[16],结合中药废弃物的研究现状,借鉴世界上发达国家对废弃物处置与资源化的成功案例,以循环经济为契机构建系统、科学、切实可行的中药废弃物分类体系,进而实现中药废弃物的资源化利用及循环利用的目标。依据中药废弃物是否能被回收利用分为可回收中药废弃物、不可回收废弃物;依据废弃物存在的安全性可分为不含有毒中药的废弃物、含毒中药的废弃物。中药废

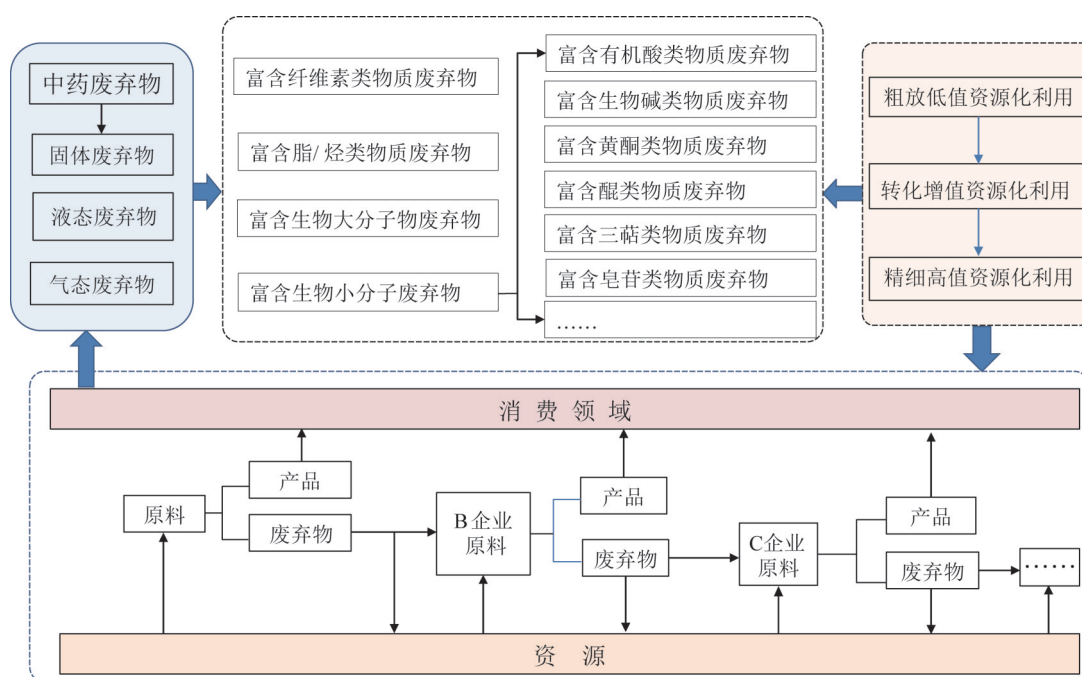


图2 基于资源最优配置的中药废弃物分级资源化利用模式

弃物大多为可回收利用的废弃物，部分含有毒中药的废弃物或发霉变质、存在安全风险的废弃物需经无害化处置后再行资源化。

以丹参药材生产与深加工产业化过程不同类型废弃物的分类利用模式为例，探讨中药废弃物分类利用、资源可持续利用与绿色发展的产业发展趋势。丹参药材生产过程产生的大量茎叶类非药用部位，富含酚酸、黄酮、糖等类资源性化学成分，属于高值化废弃物。在其资源化利用过程中遵循循环经济理念，应用绿色提取分离技术，每一环节产生的低值化废弃物（如茎叶提取资源性成分后的残渣）可进一步作为生产纤维素酶、生物燃料、生物有机肥等的原料进行资源化利用，实现转化增值利用；再剩余的残渣亦可作为肥料化的原料，从而进入生态循环系统。丹参药材深加工过程产生的大量丹参药渣尚富含丹参酮类资源性成分且药用价值较高，亦属于高值化废弃物，进一步利用丹参药渣高效制备的丹参酮可作为医药、化工、日用品的原料；其剩余低值化的二次残渣亦遵循循环经济理念，应用生物转化技术生产高品质纤维素酶、低聚木糖等，亦可作为生物燃料、生物有机肥等的原料进行资源化利用，从而进入生态循环系统^[17-19]。该模式的推广有助于资源的循环利用和可持续性发展。

2.4 基于计算机视觉识别技术的中药废弃物及副产物分类监控系统

与其他废弃物不同，中药废弃物及副产物的形态、成分、性质等由于原料和生产工艺不同差别较大，其回收利用方式也相应地各有不同。对回收处理过程来说，准确的中药废弃物类型及状态判别是关系到生产安全、效率等方面的重要环节。而部分中药废弃物的外观形态相对接近，如非药用部位的茎、叶等，复方生产后的药渣，其颜色、性状有时靠肉眼难以分辨，实验室检测又耗时较长。因此，基于先进的计算机视觉技术，结合多种光谱检测，可实现对中药废弃物及副产物原料的快速在线识别处理。一方面，保证待处理原料在物理、化学性质上与处理工艺相匹配；另一方面也可对原料中的有效成分含量、种类等指标的稳定性做出快速检测，共同保证回收处理过程安全有效开展。

计算机视觉是指利用计算机技术实现人的视觉功能，即实现对客观世界的三维场景的感知、识别和理解^[20]。计算机视觉与研究人类或动物的视觉不同，其借助于几何、物理和学习技术来构筑模型，用统计学方法处理数据。计算机视觉技术识别中药废弃物及副产物的过程可分为图片处理、特征提取、模式识别、统计处理等环节。在对中药废弃物及副产物的回收利用过程中，借助计算机视觉技术有望

进一步保证原料状态的稳定性,提高回收利用效率。

3 中药废弃物及副产物的分级分类资源化利用及循环经济产业布局

中药资源产业化过程中废弃物的资源化利用,既可从根本上转变中药农业和中药工业的经济增长方式,推进废弃物资源再生利用的产业发展,又能改变中药产业“高投入、高消耗、高排放、低产出”的线性经济发展模式和生产方式,推进资源节约型和环境友好型中药资源循环经济产业发展^[21-22]。

3.1 中药废弃物及副产物循环利用的生态产业发展模式

中药生态发展模式的发展要求在中药废弃物转化为原料的同时,实现2个或2个以上生产体系或环节之间的耦合,实现物质和能量的多级利用,实现循环生产、集约经营管理的生态型产业体系。在中药生态产业系统中各利用环节通过物流、能流和信息流互相关联,一个生产过程中的废弃物可作为另一个过程的原料加以利用。使生态产业系统中从原料、中间产物、废物到产品的物质循环,达到资源、能源、投资的最优利用。这一发展模式符合工业生态学的原理,从经济活动主体规模分析,中药循环经济发展模式则主要表现为企业自身发展模式、区域生态工业园模式和社会层面的循环发展模式^[23]。

在生产企业内部的循环发展特征主要表现为推行绿色生产、资源和能源的循环利用、减少废弃物排放或废弃物零排放,最大限度地利用中药资源,同时提高中药资源利用效率及产品的品质等,实现中药生产企业内部的资源循环利用^[24];区域生态工业园模式的基本特征为通过中药及其生物医药领域企业间的物质集成、能量集成和信息集成与交换,形成产业间的代谢和共生耦合关系,使一家中药产品相关企业生产的废渣、废液成为另一家企业的原料和能源,建立共生产业群;社会层面的循环发展模式则表现为构建中药废弃物的回收再利用体系和社会循环经济体系,以实现消费过程中和消费后物质与能量的循环,提高中药资源利用效率,减少废弃物的排放量。

3.2 中药资源全产业链废弃物及副产物多途径资源化利用产业链构建

在中药农业生产领域,通过对大宗常用中药材

生产区域的科学规划和基地建设,实施机械化、规模化生产,有效提高生产力水平,真正改变目前千家万户、千差万别的生产方式和产品质量,以提升资源的生产效率,节约宝贵的土地空间。同时,在中药材种植生产、田间管理和采收过程中,因间苗、疏枝、疏果产生的废弃植株、枝条、茎叶、幼果等大量非药用部位,以及在药材初加工过程中因去栓皮、去核、去木心等产生的大量栓皮、果核、木心等废弃组织器官,尚具有多方面的应用价值和潜在利用价值。对其进行开发利用可减少资源消耗、减少排放、节约土地空间和减轻生态负担。

在中药工业制造过程中不可避免地产生大量的固体、液态和气态废弃物。中药固体废弃物以药渣为主体,尚包含固形沉淀物等。中药药渣的产生主要源于中药提取物、中药制剂、中药配方颗粒及其他含中药的资源性产品等的制造过程,其中以中药制剂生产带来的废渣量最大,约占废弃药渣总量的70%。中药产品制造过程中产生大量的液态废弃物主要组成为水溶性的糖类、氨基酸、肽类及蛋白质、无机盐等营养性物质和糖苷类、生物碱类等次生代谢产物,以及分离纯化过程中的各种有机溶剂等。中药深加工产品生产过程中的气态废弃物主要涉及芳香全草类药材挥发产生的单萜、倍半萜等小分子混合物,果实种子类药材挥发逸出的气态废弃物,以及富含蒽醌类等物质的药材及饮片干燥加工或处置过程产生的升华产物等。中药产品商业流通和消费过程中所产生的废弃物亦可将其进行回收利用或无害化处理,以减少资源浪费和造成环境的污染。

再生资源是生态产业的物质基础^[25],以节约资源、清洁生产和废弃物多层次循环利用等为特征,以现代科学技术为依托,运用生态和经济规律及系统工程的方法经营和管理,促进中药废弃物及副产物的资源化利用。加快推广应用先进适宜的再生资源回收利用技术和装备,以生态工业理念为指导构建中药废弃物再生资源行业生态产业链,创新资源再生利用模式,创建资源再生利用关键技术,创新中药废弃物的资源管理方式等,从而构建资源循环利用体系,全面提高资源利用效率,以实现中药废弃物及副产物多元资源性产品的开发与利用,是我国中药资源可持续、健康发展的重要途径和措施。中药废弃物资源循环利用产业链见图3。

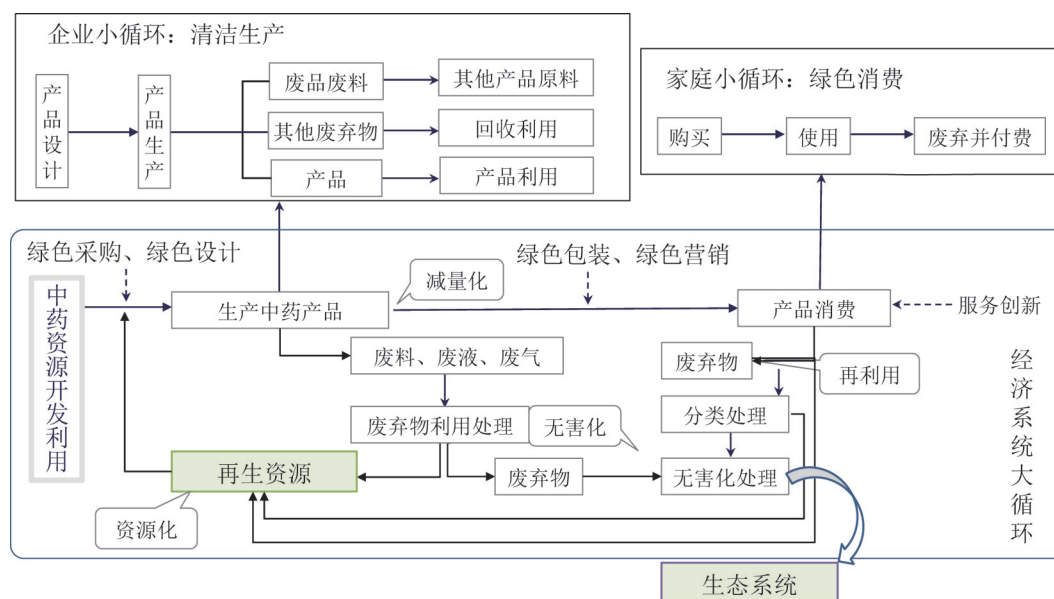


图3 中药废弃物资源循环利用产业链示意图

4 中药废弃物及废弃物分级分类资源化利用的可行性分析

4.1 管理可行性分析

随着垃圾分类处理系统、垃圾处置技术及垃圾分类管理水平的不断提高,为中药废弃物的分类和管理提供了丰富的管理经验与方法参考,使得分类后的中药废弃物更好地得到资源化利用,为实现废弃物的资源化和无害化处置提供更为可行的管理保障,避免中药废弃物的丢弃带来的资源浪费和环境污染。在废弃物分类处理过程中,构建绿色发展政策体系,制定相应的收集、分类和管理规章制度,汇集必要的原始信息数据,使中药废弃物的处置有章可循^[11, 26-27]。

由于对中药废弃物资源价值认识的局限性、经济利益的驱使等因素,以往对中药废弃物的重视度不够。随着科学技术的不断进步和对生态环境保护意识的提高,形成中药废弃物的分类管理、分类利用及循环利用模式的良性机制,制定有利于中药废弃物资源化、无害化处置的系统管理方法成为可能。

4.2 技术可行性分析

基于计算机智能化技术、“互联网+”、物联网等现代化信息技术手段,构建中药废弃物分类体系管理和公共信息服务,加强中药废弃物产生、回收、转移、利用和处置等环节的信息采集和远程监管,规范回收利用渠道,提升中药废弃物分类管理的信

息化水平^[20]。

针对中药废弃物的特性和产生的不同环节,加强对有毒、有害废弃物和可回收废弃物在收集、贮存与运输过程中的管理,采取必要的污染防控措施。建立中药废弃物产生、收集、贮存、运输、回收利用等处理及处置环节的管理台账,建立健全中药废弃物资源化利用过程中的污染控制标准体系,强化废弃物产生环节污染控制技术要求,制定污染防治措施和应急预案。

依据不同类型中药废弃物的分类资源化利用,采用清洁生产工艺技术和装备及各种综合利用措施,实现其资源化,最大限度地减少废弃物排放。首先,研发中药固体废弃物分类资源化利用关键共性技术和重点装备,高效提取、生物质转化利用,包括固体废弃物饲料化、肥料化、能源化、工业基料化利用等已成为可能。其次,创新技术的推广应用,建设重大试点示范工程;完善资源再生产品质量标准体系,推动产品顺利进入市场已势在必行。最后,逐步构建中药废弃物分类资源化循环体系,实现资源能源消耗最小化、资源利用最大化,最终实现中药产业“零排放”的长远目标^[28-29]。同时,加强完善中药废弃物资源化利用标准体系,推动上下游产业间标准衔接。鼓励企业积极开展中药废弃物资源化利用,引导企业提高资源综合利用产品质量。

5 前景展望

5.1 循环利用绿色发展已成为推动我国中药产业高质量发展的重要引擎

2016年12月,在原中央财经领导小组第十四次会议上习近平就提出“普遍推行垃圾分类制度关系到13亿多人的生活环境改善,关系垃圾能不能减量化、资源化、无害化处理。要加快建立分类投放、分类收集、分类运输、分类处理的垃圾处理系统,形成以法治为基础、政府推动、全民参与、城乡统筹、因地制宜的垃圾分类制度,努力提高垃圾分类制度覆盖范围”。实施分类管理是防治固体废弃物污染和实现固体废弃物减量化、资源化、无害化处理的前提和基础^[30-31]。中药废弃物资源化不仅可减少原料资源消耗和浪费、缓解资源短缺的压力,还可解决处置不当带来的生态环境污染,且能够拉动投资、带动就业、增加收入、增加税收等,具有显著的生态效益、社会效益和经济效益。

5.2 科学的分类管理体系,是实现中药废弃物精细化利用的必要前提

2019年7月1日,上海正式步入垃圾分类强制时代,46个重点城市也在加快垃圾分类各环节建设,采取的是政府主导的城市生活垃圾分类模式。从垃圾分类类型来看,生活垃圾一般分为可回收垃圾、有害垃圾、湿垃圾、干垃圾和其他垃圾等。中药废弃物及副产物的科学分类及处理系统的构建有助于中药废弃物的精细化利用,有助于提高中药废弃物资源化利用效率和效益,是实现中药资源循环经济产业发展的必由之路。中药资源循环经济产业链的构建与发展是一复杂系统工程,既涉及中医药领域,又涉及农业、工业、服务业等行业。基于系统化的思维对整个中药产业与资源生态系统进行分析,明确产业经济与生态经济的关系,延伸生产责任制度,并通过立法等约束手段强调生产者的责任,刺激生产责任方改变生产工艺、改进产品设计,采取绿色生产和循环利用的生态型经济发展模式,大力开发环境低负荷的产品,延伸资源经济产业链,产生新的经济增长点。

5.3 中药废弃物及副产物的分级分类及资源化利用蕴含着巨大的潜能

纵观现代工业国家和自然资源产业领域,以减

量化、再利用、循环发展为主线的循环经济模式已替代传统工业高投入、高消耗、高排放、低产出的线性经济发展方式,通过对资源产业生产过程副产物及废弃物的分级分类和精细化利用,走出资源节约型、环境友好型的循环经济绿色发展之路。国际上生态工业的研究是在清洁生产研究之后,作为其升华和补充,在20世纪80年代末迅速发展起来的,而中国则起步较晚。生态工业园是生态工业的重要载体,是实现物质闭路循环和能量多次利用的区域综合体,从而达到向系统外零排放的目的。当今世界各个国家都在大力发展生态工业园,并取得了相当的成绩。美国、德国、法国、加拿大等建成了具有一定规模的生态工业园;亚洲的日本、泰国、印度、印度尼西亚、菲律宾等国家也已经有较多成型的生态工业园。此外,非洲国家也正在大力发展生态工业园区,如南非等国正在积极兴建生态工业园。

随着我国经济快速发展,资源大量消耗,环境承受着巨大的压力,经济持续发展受到资源环境制约越来越明显,大力开发和利用再生资源是发展循环经济的基础和重要途径。再生资源产业是朝阳产业,与原生资源相比,可大量节约能源、减少污染物排放、有效保护生态环境,特别是在成本不断上升、资源价格逐渐攀升的情况下,回收利用再生资源可大大降低生产成本、节约资源能源、减少污染排放、保护生态环境、发展绿色经济^[31]。近年来,我国在生态工业园的发展建设上也取得一定成效,建成一批较有代表性的生态工业园,如贵州的贵港生态工业园区、浙江衢州沈家生态工业园等。综上所述,中药产业发展与资源永续利用要求从传统工业模式向循环经济、生态产业模式转变,中药废弃物及副产物的分级分类处理系统构建及分类资源化利用显得越来越迫切和必要。

参考文献

- [1] 中华人民共和国中央人民政府.中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL].(2021-03-13)[2022-09-01].http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见[EB/OL].(2021-03-18)[2022-09-01].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202103/t20210324_1270286_ext.html.

- [3] 段金廛. 中药废弃物的资源化利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [4] 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.
- [5] 段金廛. 中药资源化学——理论基础与资源循环利用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [6] 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): 1-5.
- [7] 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): 1715-1722.
- [8] 张德元. 构建资源循环利用体系, 推动“无废城市”建设[J]. 世界环境, 2019(2): 43-45.
- [9] 宋德勇, 白西欣. 论资源再生的宏观经济效应[J]. 统计研究, 2007, 24(6): 37-41.
- [10] 张晶. 基于循环经济的中小企业发展模式思考[J]. 经济研究导刊, 2018(28): 13-14, 24.
- [11] 隋文杰, 贾洪玉, 敬佩, 等. 中国果品加工固体废弃物资源化利用现状与分类管理研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(增1): 172-180.
- [12] 呼和涛力, 袁浩然, 刘晓凤, 等. 我国农村废弃物分类资源化利用战略研究[J]. 中国工程科学, 2017, 19(4): 103-108.
- [13] 王海梅. 城市生活垃圾分类经济社会效益分析与现状对策研究[J]. 中国国际财经(中英文), 2017(19): 280-281.
- [14] 孙乐岩. 中国城市生活垃圾分类现状分析及改进对策[J]. 世界环境, 2019(1): 64-67.
- [15] 赵国甫, 张凯. 我国再生资源循环利用研究综述[J]. 环境保护与循环经济, 2018, 38(10): 7-10.
- [16] 李傲群, 李学婷. 基于计划行为理论的农户农业废弃物循环利用意愿与行为研究——以农作物秸秆循环利用为例[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12): 33-40.
- [17] 申俊龙, 魏鲁霞, 汤莉娜, 等. 中药资源价值评估体系研究——基于价值链视角的分析[J]. 价格理论与实践, 2014(3): 112-114.
- [18] 段金廛, 宿树兰, 郭盛, 等. 中药废弃物的转化增效资源化模式及其研究与实践[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(23): 3991-3996.
- [19] 卢瑞嫦. 无害化处理与资源化利用的共存之路[J]. 现代农业装备, 2015(6): 21-22.
- [20] 韦晗, 张钟裕, 韦凌. 基于5W1H分析法的“互联网+高校电子废弃物回收处理模式”的可行性分析[J]. 科技风, 2019(11): 104-105.
- [21] 周咏馨, 程浩, 王立政. 垃圾处理业市场化运营的投资动力[J]. 开发研究, 2017(2): 53-56.
- [22] 张武晴, 卢明湘, 唐卓, 等. 农村废弃物资源化与再利用模式研究[J]. 农村经济与科技, 2016, 27(7): 39-41, 177.
- [23] ZHANG S, CHEN Y M, YANG Z L, et al. Computer vision based two-stage waste recognition-retrieval algorithm for waste classification [J]. Resour Conserv Recycl, 2021, 169: 105543.
- [24] 夏青. 循环经济生态工业园区建设与发展模式研究[J]. 中外企业家, 2014(22): 16-19.
- [25] 薛茹. 固体废弃物再生利用的有效运作方式探讨[J]. 山东工业技术, 2019(9): 226.
- [26] 柳建设, 郭耀广, 黄颖, 等. 我国城市生活废弃物的分类收集现状与减量管理对策——以发达国家的源头减量及资源化利用为参照[J]. 上海城市管理, 2016, 25(1): 27-32.
- [27] 林文锋. 我国固废资源化的技术及创新发展[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(8): 78-80.
- [28] 孙业华. 固体废弃物资源化的发展趋向分析[J]. 环境与发展, 2019, 31(4): 146, 148.
- [29] 汪莉丽. 固体废弃物的综合治理对策分析[J]. 智能城市, 2018, 4(12): 132-133.
- [30] 张琪. 城市固体废物无害化资源化处置途径[J]. 中国资源综合利用, 2012, 30(8): 26-29.
- [31] 戴宏民, 戴佩华. 废弃物处理的无害化、资源化和环境化[J]. 包装工程, 2003, 24(2): 3-5.

(收稿日期: 2022-09-25 编辑: 戴玮)