

• 专 论 •

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

段金廛, 宿树兰, 郭 盛, 钱大玮, 尚尔鑫, 周 卫, 刘 培, 唐于平, 吴启南, 丁安伟

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, 江苏 南京 210023

摘 要: 中药废弃物资源化是一个涉及经济、环境、社会效益等多个目标的连续过程, 在其资源化过程中经济效益目标和环境效益目标之间的权衡及其动态演变特性与资源化模式密切相关。在对中药废弃物的产生、分类及其特点论述的基础上, 探索性提出了“三大利用策略”, 即传统“非药用部位”多途径利用策略、药材与饮片加工过程废弃物回收利用策略、中药资源深加工过程废弃物回收利用策略; “三类资源化模式”, 即粗放低值资源化模式、转化增效资源化模式及精细高值资源化模式, 以期为推动我国中药资源产业化过程废弃物的资源化利用提供引导和借鉴, 为中药及天然药物资源领域推进和逐步实现资源节约型、环境友好型、低碳型循环经济发展做出应有的贡献。

关键词: 中药资源; 中药资源化学; 中药废弃物; 利用策略; 资源化模式

中图分类号: R282.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2013)20-2787-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2013.20.001

Production of castoff from process in Chinese materia medica resources industrialization as well as resource utilization strategies and modes

DUAN Jin-ao, SU Shu-lan, GUO Sheng, QIAN Da-wei, SHANG Er-xin, ZHOU Wei, LIU Pei, TANG Yu-ping, WU Qi-nan, DING An-wei

Collaborative Innovation Center of Chinese Medicinal Resources Industrialization of Jiangsu Province, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, China

Abstract: The resources utilization of castoff from Chinese materia medica (CMM) industrialization is a successive process involving economy, environment, social benefits, and other multiple goals. The balance and dynamic evolution characteristics between the economic benefit goals and environment benefit objectives closely relate to the resource models. Based on the thoughts and methods of resources chemistry of CMM, and through analyzing the generation, classification, and characteristics of castoff from CMM industrialization, this article proposed the “three utilization strategies” and “three types of resource modes” of castoff from CMM industrialization. The three utilization strategies are the traditional “non-medicinal parts” with multi-channel utilization (1), castoff recycling and utilizing in pieces processing (2), and in resources deep processing (3) of CMM. The three types of resources modes are extensive low resource mode, conversion efficiency of resources mode, and fine high value resources mode. These strategies and modes would provide the references for promoting the resources utilization of castoff from CMM industrialization and contribute to the realization of a resource-saving and environment-friendly recycling economy development of CMM and natural medicine resources.

Key words: resources of Chinese materia medica; resources chemistry of Chinese materia medica; castoff from Chinese materia medica industrialization; resource utilization strategy; resource modes

中药资源是国家重要的战略物资, 是保障国民健康、发展民族医药产业的物质基础。中药资源的高效利用是实现资源节约型、环境友好型循环经济

发展理念, 保障中医药事业健康可持续发展的重大战略问题。然而, 随着中药资源产业链的不断延伸, 以消耗药用生物资源为标志的中药资源产业迅猛发

收稿日期: 2013-09-10

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2010BAI04B 03); 江苏高校中药资源产业化过程协同创新中心建设专项(2013); 江苏省“333高层次人才培养对象资助项目(2013)

作者简介: 段金廛, 教授, 博士生导师, 南京中医药大学副校长; 中国自然资源学会中药及天然药物资源专业委员会主任委员; 国家“973”计划首席科学家。Tel: (025)85811116 E-mail: dja@njutcm.edu.cn

展^[1-2]。据报道^[3]，近年来我国中药及天然药用生物资源生产面积已超过 $2.40 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，药材产量可达 $5.40 \times 10^6 \text{ t}$ ，而废弃的植物根系、地上茎叶等组织器官生物量高达 $1.1 \times 10^7 \sim 1.6 \times 10^7 \text{ t}$ ，造成严重的资源浪费和环境污染。据初步统计，以中药制药为主体的中药资源产业化过程中每年消耗植物类药材约 $7.0 \times 10^5 \text{ t}$ ，产生的废弃组织器官、废渣等高达数百万吨，废渣、废水、废气的排放和处理已成为行业发展面临的棘手问题，给生态环境带来了巨大的压力。因此，在中药资源产业化过程中按照循环经济理念，遵循经济效益、生态效益和社会效益相统一的发展原则，提高资源综合利用效率，延伸资源经济产业链，是培育具有资源产业优势的重要源泉和途径。

本文基于前期研究工作^[4-9]，在阐述我国中药资源产业化过程废弃物的产生、分类及其特点等基础上，探索性地提出和构建了中药废弃物的“三大利用策略”和“三类资源化模式”，并通过实例加以阐述，以期为推进中药废弃物的资源化利用，逐步实现中药资源及其产业化领域的健康可持续发展提供借鉴与引导。

1 中药资源产业化过程废弃物的产生与概念

1.1 中药废弃物的产生

中药废弃物的产生源于药材原料生产、药材初加工与饮片加工、中药制剂以及含中药的健康产品等资源性产品制造过程，主要包括：（1）药材栽培（养殖）生产过程产生的传统“非药用部位”；（2）药材产地加工与饮片炮制加工过程产生的“下脚料”及破碎组织、碎屑粉渣等；（3）在中药制药等资源性产品制造过程中产生的废渣、废水、废气等；（4）以中药制药为主体的资源性产品制造过程中，由于提取和精制过程资源性物质的转化与利用效率偏低而造成部分可利用物质重新回到自然环境；（5）对中药多元功效物质基础的科学认知和精细化利用水平滞后，中药资源的利用大多尚处于“总提取物”、“部位（群）”等粗放式利用状态，致使资源性化学成分の利用价值或潜在利用价值未能得到有效挖掘和充分利用等。

1.2 相关概念

1.2.1 中药资源产业化过程（Chinese medicinal resources industrialization）是指以利用中药资源为目的的中药材种植（养殖）、产地加工及饮片加工过程、中药提取物以及以消耗中药及天然药用生物

资源为特征的资源性产品制造过程等。

1.2.2 中药废弃物（castoff from Chinese materia medica (CMM) industrialization）是指在药材及饮片生产过程、中药提取物制备过程或中药配方颗粒生产过程，以及以消耗中药及天然药用生物资源为特征的资源性产品制造过程中产生的未被开发利用的中药资源生物体废弃组织器官、未被利用的可利用物质以及中药废渣、废水、废气等。

1.2.3 废弃物的资源化（castoff resources）是指通过回收富集、加工转化、产品开发等实现循环利用，使废弃物成为再生资源，属于国际上资源循环利用或资源再生利用的范畴。废弃物的资源化主要包括：废弃物处理并从中回收资源性物质；制取新的资源性物质开发资源性产品；经过加工转化获得新用途；从废弃物中回收能量等。

1.2.4 中药资源性产品（resource products of CMM）是指以消耗中药及天然药用生物资源为主的医药原料、中间体及其制剂产品，保健食品与功能性产品，精细化工原料、中间体及其日用健康产品等。

1.2.5 中药废弃物利用策略（utilization strategy of castoff from CMM industrialization）依据中药废弃物产生的不同阶段，废弃物不同理化性质，对其利用途径、利用方式、利用价值的体现等所依据的指导思想和采取的措施等。可归纳为：传统“非药用部位”多途径利用策略；药材加工过程废弃物回收利用策略；中药资源深加工过程废弃物回收利用策略。

1.2.6 中药废弃物资源化模式（resources modes of castoff from CMM industrialization）是指针对中药废弃物的资源化潜力、所含资源性物质的利用价值大小等而采取的粗放低值资源化模式、转化增效资源化模式、精细高值资源化模式等。

1.2.7 中药资源性物质（resource materials）是指源于中药资源的药材、饮片、提取物制品，以及资源产业化过程产生的废弃物中可利用的化学物质以及转化产物等。

1.2.8 低值化利用（low value utilization）是指资源性价值较低或开发利用水平较为初级的中药废弃物，可作为投入成本低的有机肥料、菌质材料、燃料以及饲料添加剂等。

1.2.9 高值化利用（high value utilization）是指资源性价值或潜在利用价值较高的中药废弃物，采用有效的科学技术，使其资源性物质得到充分释放、

转化和利用, 开发具有高附加值的资源性产品等。

1.2.10 资源化潜力 (resources potential) 是指中药废弃物的资源化开发潜力, 可通过资源量、经济性、社会效益、生态效益等对资源化潜力进行评估。

2 中药废弃物的分类及其特点

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, 是一种可转化的、有待开发的资源。中药废弃物依据其产生的不同阶段或理化性质不同可有多种分类方法, 主要包括以下几种类型。

2.1 按药材生产与加工过程产生的废弃物分类

2.1.1 源于资源生物生长过程中产生的废弃物 是指药用生物在其生长过程中产生的未被有效利用的废弃组织器官、分泌物等。例如: 柑橘属 *Citrus* L. 多种药用植物在生长过程中会产生大量的落花、落果等; 忍冬属 *Lonicera* L.、五味子属 *Schisandra* Michx. 植物, 连翘 *Forsythia suspense* (Thunb.) Vahl 等藤本或木本药用植物规范化栽培生产过程中需在冬春两季疏枝、打顶等管理措施产生大量的废弃枝条等^[7]。

2.1.2 源于药材采收过程产生的废弃物 是指在采收药材过程中废弃的传统“非药用部位”。例如: 当归 *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels 在药材生产过程中仅利用了当归根部, 其地上茎叶的生物产量约为根部的 1.5 倍, 未被利用全部废弃; 菊 *Chrysanthemum morifolium* Ramat. 在采摘花蕾或开放的头状花序时其株高可达 1 m 左右, 废弃的植株生物产量约 10 余倍于花序产量。

2.1.3 源于药材与饮片加工过程产生的废弃物 是指药材产地加工、饮片炮制加工过程中产生的根头、尾梢、栓皮、果核等“下脚料”及破碎组织、碎屑粉渣等废弃物。例如: 大黄属 *Rheum* L.、白芍 *Paeonia lactiflora* Pall. 等药材产地加工过程中去除的大量的根头、根皮、支根及须根等; 山茱萸 *Cornus officinalis* Sieb. et Zucc. 产地加工去核过程中导致部分果肉及可利用物质流失浪费等。饮片加工过程中产生的碎屑和不合格废弃物以及切片前药材浸润造成水溶性成分流失等。

2.2 按中药资源深加工产业化过程产生的废弃物分类

2.2.1 源于中药资源深加工产业化过程产生的固体废弃物 是指在中药提取物制备过程中或以消耗中药及天然药用生物资源为特征的资源性产品制造过程中产生的废渣、沉淀物等, 或获取某一类或某几类资源性物质后废弃的其他类型可利用物质等。例

如: 从甘草属 *Glycyrrhiza* Linn. 药用植物根中提取甘草酸类资源性化学物质后, 废渣中尚含有丰富的甘草黄酮类、木质素类、多糖类等可利用物质; 生脉注射液是由人参、麦冬、五味子 3 味药组方, 经水提、精制等工艺制成注射剂制剂, 在其制备过程中产生的药渣、沉淀物、过滤固形物等被废弃, 经分析其中含有丰富的多糖类、纤维素及半纤维素类、木质素类、脂肪酸类等, 可用于制备家畜家禽的免疫调节剂、饲料添加剂等。

中药配方饮片颗粒的产量增长快速, 消耗大量的药材和中药饮片, 在其以水提工艺为主的制备过程中产生的废弃药渣, 保留了丰富的次生小分子脂溶性成分和大分子初生产物等可利用物质, 值得进一步开发利用。

2.2.2 源于中药资源深加工产业化过程产生的液态废弃物 主要来源于中药原料提取、精制过程中产生的液态废弃物。其中含有丰富的有机酸类、多酚类、氨基酸类、肽类、水溶性蛋白及多糖类, 以及生产过程产生的水解产物、氧化聚合产物等。还有, 目前工业化生产中常采用的大孔吸附树脂、聚酰胺、离子交换树脂等分离材料和以陶瓷膜、有机膜等超滤材料进行中药水提物精制处理过程形成的大量洗脱废水等。这些制药废水多呈现水量小、有机浓度高、色度高、冲击负荷大、成分复杂的特性。

2.2.3 源于中药资源性产品制造过程产生的气体废弃物 中药资源产业化过程挥发或升华的单萜、倍半萜等小分子混合物, 未回收利用形成的废弃物。富含易挥发化学成分的芳香全草类药材有薄荷、荆芥、佩兰、青蒿等; 花类药材有辛夷、金银花、玫瑰花、丁香等; 果实种子类药材有小茴香、豆蔻、砂仁、葫芦巴等, 这些药材在水提取过程中易产生气态废弃物。此外, 大黄、羊蹄等富含蒽醌类物质药材及饮片干燥加工过程的升华产物等。

2.3 按废弃物理化性质分类

依中药废弃物的理化性质和特点可分为: 富含纤维素类物质的废弃物; 富含脂(烃)类物质的废弃物; 富含生物大分子类物质的废弃物等。按废弃物的材料特性不同可分为: 草本类、木本类、菌类废弃物等; 按废弃物所属组织器官不同可分为: 根及根茎类、全草类、茎木类、果实种子类、真菌子实体类、动物体或组织类等废弃物; 按废弃物材料的功用特性不同可分为: 补益类、活血类、有毒类等废弃物。

2.3.1 富含纤维素类资源性物质的废弃物 在药材种植生产与产地加工过程中产生的废弃植株、茎叶、栓皮、木心等,以及资源性产品制造过程中根及根茎类、全草类、茎木类等废渣中多富含纤维素类物质。

2.3.2 富含脂(烃)类资源性物质的废弃物 采用水提工艺生产的中药配方颗粒、资源性产品深加工制造过程中,均可产生富含烃类、油脂类等可利用物质的废弃物。例如:杏仁、桃仁、郁李仁、紫苏子、牛蒡子、补骨脂、沙苑子、五味子、莱菔子、红花籽等果实、种子类的废弃物。

2.3.3 富含生物大分子物质的废弃物 在白芍、山药、藕、麦冬、白果、郁金、莪术、茯苓等药材采收与产地加工过程中产生的废弃栓皮、外皮层及粉屑等,以及中药资源性产品制造过程产生的根及根茎类、果实类、种子类、动物体或组织类废渣等,多富含多糖、蛋白质类物质。

2.3.4 富含具有生物活性小分子化学物质的废弃物 以银杏外种皮为原料的生物农药、多糖活性部位等产品群。丹参药材的水提醇沉物中含有丰富的水苏糖(stachyose)是重要的制药原料,具有促进肠道功能等作用,又可作为制药、食品工业中优良的赋形剂和填充剂的原料;根及地上部分含有的迷迭香酸(rosmarinic acid)等有机酸类成分尚可作为抗氧化、保护血管、延缓衰老等功能性产品开发利用。

研究表明,当归地上部分中含有丰富的酚酸类化学组分,具有抗凝血,抑制大肠杆菌、枯草杆菌,抑制马铃薯腐烂线虫等活性^[10]。通过资源化利用可将其开发成防治牛乳房炎、鸡鸭等菌痢的畜禽兽药和用于植保的生物农药等产品。大枣及酸枣叶和果肉中均富含具抑制肿瘤细胞增殖作用的三萜类资源性成分。从菊的废弃茎叶中获得具有抗病毒、抗菌、抗肿瘤活性价值的黄酮类及倍半萜类资源性化学成分^[11-12]。

3 中药废弃物利用策略和资源化模式的提出与构建

中药废弃物的资源化利用既是中药资源化学研究思想的具体体现,又是中药资源领域实现资源节约、循环利用、提升利用效率的重要内容之一。围绕中药资源产业化过程中产生的中药废弃物开展资源化利用研究,推动该行业形成节约资源、保护环境,发展绿色产业的良好局面。根据目前中药资源产业领域的客观现实和中药废弃物的资源化利用水平,本文探索性提出和构建了中药废弃物的“三大利用策略”和“三类资源化模式”(图1)。

3.1 中药废弃物的“三大利用策略”

依据中药资源产业化不同阶段,废弃物形成的产业背景、利用现状、资源化潜力、生态环境压力等因素,以及不同类型废弃物所具有的理化性质、可利用价值、资源化程度等特点,提出中药废弃物的“三大利用策略”,即传统“非药用部位”多途径

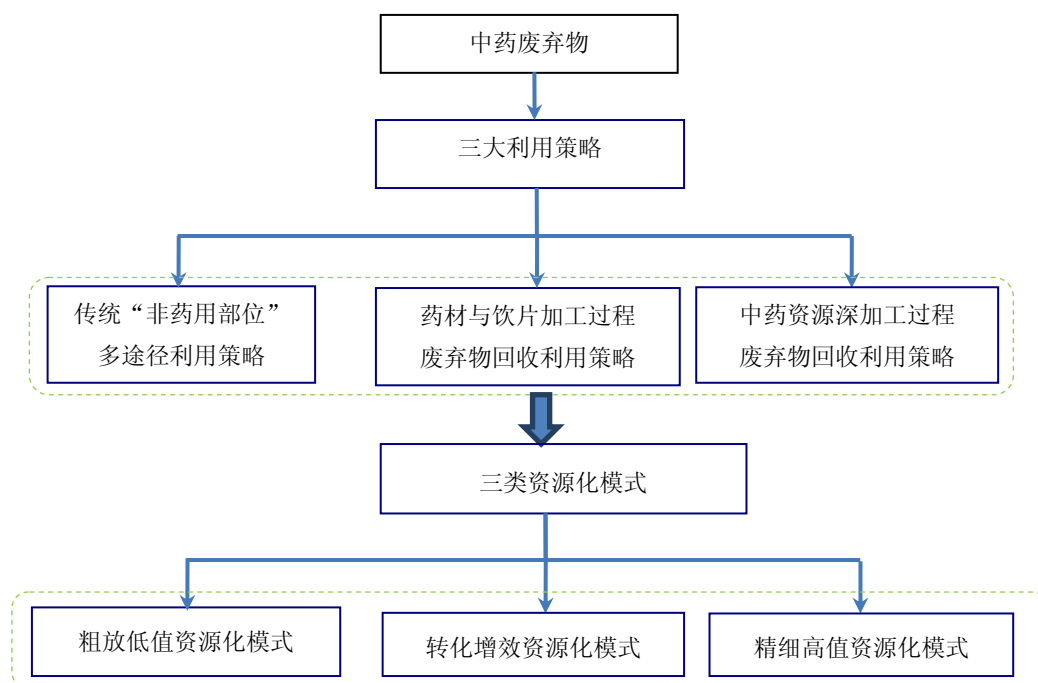


图1 中药废弃物“三大利用策略”与“三类资源化模式”框架图

Fig. 1 Framework of three utilization strategies and three types of resources modes for castoff from CMM industrialization

利用策略；药材及饮片加工过程废弃物回收利用策略；中药资源深加工过程废弃物回收利用策略。

3.1.1 传统“非药用部位”多途径利用策略 面对药材的生产已从采集于自然资源以满足行医者需要发展至大面积规模化栽培生产和养殖，并延伸形成庞大的中药资源经济产业链。在此过程中产生大量的“非药用部位”被废弃而导致巨大浪费和环境压力，针对性地提出了传统非药用部位多途径利用策略。

3.1.2 药材及饮片加工过程废弃物回收利用策略 针对药材产地加工（初加工）和饮片加工（炮制加工）过程产生的大量“下脚料”被废弃或未得到有效利用的现状，结合其中含有丰富的各类初生和次生资源性化学物质，提出药材及饮片加工过程废弃物回收利用策略。

3.1.3 中药资源深加工过程废弃物回收利用策略 中药资源深加工过程中产生的大量废渣、废水、废气等废弃物，通过多学科、多领域适宜技术，尤其是生物工程技术的集成应用，将有效促进中药废弃物中资源性物质的转化与转移，提升资源利用效率，延伸资源经济产业链。

3.2 中药废弃物的“三类资源化模式”

中药废弃物的资源化可看作一个涉及经济、环境、社会效益等多个目标的连续过程，在其资源化过程中经济效益目标和环境效益目标之间的权衡及其动态演变特性决定着资源化模式及其合理性。依据中药废弃物所含资源性物质的不同理化性质与资源化潜力、不同利用价值等，在利用策略的指引下，构建了“三类资源化模式”，即粗放低值资源化模式；转化增效资源化模式；精细高值资源化模式。其中包含多元中药废弃物资源化方式：燃烧热转化、热解气化、热/压裂解转化、高值转化、富集与转移、微生物转化、酶转化、材料化、固体燃料化等。

3.2.1 粗放低值资源化模式与研究实践 经过简单加工处理，使之成为可利用资源的模式。例如：以废弃药渣为原料，经与其他物料复配和加工制成的肥料、菌质等，有益于植物、菌物生长发育和改善土壤结构及有机质组成；将有益于家禽、家畜及其他经济动物生长发育和健康的废弃药渣，经简单饲料化加工可作为饲料添加剂和营养补充剂等；将废弃药渣经干燥处理后，可用作燃料直接燃烧转化为能源等（图2）。

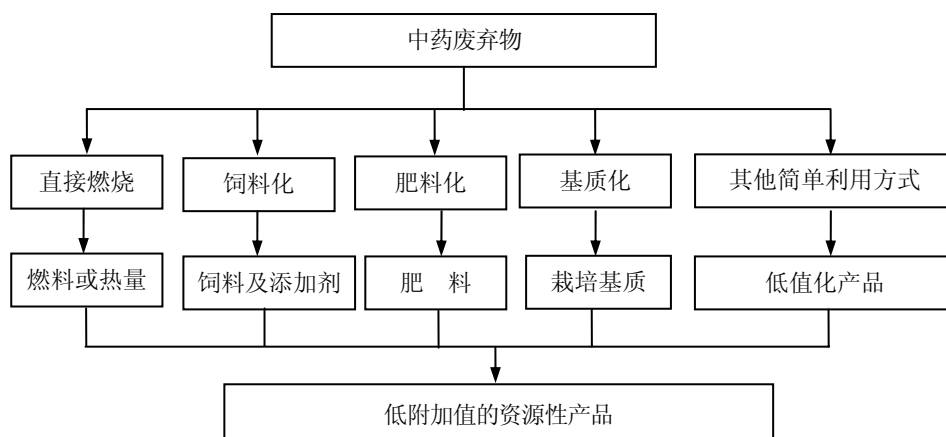


图2 中药废弃物粗放低值资源化模式图

Fig. 2 Resource mode pattern on low value utilization of castoff from CMM industrialization

（1）中药废弃物中粗蛋白、粗脂肪、糖类资源性物质的粗放低值化利用：药材生产与加工过程中产生的废弃根、茎、叶、花、果实、种子等，富含粗蛋白、粗脂肪、多糖类物质，是良好的牲畜、家禽、渔业饲料或饲料添加剂。例如：柑橘加工废料含有丰富的多糖类、维生素类、氨基酸类和矿物质营养成分^[13]。对其进行青贮处理后，可作为适口性好的优质饲料添加剂。甘草经配方颗粒生产后的

废渣量约占原料甘草的75%，其中约含5%~10%的混合还原糖、少量果胶、色素、氨基酸及蛋白质、纤维素，可用于食品添加剂或饲料添加剂等。

采用0.6~1.5倍体积的水充分浸泡根茎类中药废渣，并进行蒸气爆破预处理，对获得产物进一步经酶解后，进行发酵，可作为生物饲料或饲料添加剂。例如：十全大补酒的药渣经上述方法处理后可作为育肥猪饲料添加剂，具有改善其生长、胴体特

性和肉质的效果^[14]。

中药药渣经腐熟处理后,作为蔬菜、食用真菌、树苗等的栽培基质,充分利用了药渣所含有的营养成分,避免了土壤中重金属、农药等有毒物质污染。例如:利用生产脉络宁注射剂的药渣研究开发出一种育苗和栽培基质,进行瓜果无土栽培取得成功,并获得国家发明专利^[15]。

中药制药过程中产生的废水可通过吸附、膜过滤及生物工程等方法处理达到工业或生活用水标准,实现清洁生产和对废弃水资源进行再利用的目的^[16]。例如,某中药制药企业在生产清热解毒口服液、小儿热咳口服液等中药口服液药品时产生大量液态废弃物。采用生物工程技术对该废水资源进行处理后,使其达到了工业用水标准,实现了水资源的循环利用,同时富集获得的多糖类、蛋白质类成分经发酵处理后可用于菌体蛋白饲料或肥料应用^[17]。

(2) 中药废弃物中纤维素类、半纤维素类等资源性物质的粗放低值化利用:中药资源产业化过程产生的废弃植株、枝条、茎叶、栓皮、果核、木心、

须根等废弃组织器官及废弃药渣多富含纤维素类、半纤维素类或木质素类物质,是一种具有发展潜力的生物资源。例如:罗布麻、薄荷、桑白皮、黄芪、甘草等药用植物在药材生产过程中产生的非药用部位,以及加工“下脚料”均富含纤维素、半纤维素及木质素类资源性化学成分。通过简单加工处理,可作为生产纸浆的原料,其出浆率高于一般木材,是一种高产优质的造纸原料^[18],亦可通过氨化处理作为反刍动物的良好饲料。

3.2.2 转化增效资源化模式与研究实践 转化增效资源化模式是针对具有一定资源化潜力的中药废弃物,可通过微生物、细胞、酶等生物转化,发酵转化技术等;或可采用提取富集、化学转化等适宜技术加工处理,使其转化为利用价值较高的资源性物质,以提高产品附加值,充分挖掘中药废弃物的资源化潜力;或通过技术革新或技术集成,提升资源性物质的利用效率(图3)。该模式是实现节约资源、循环经济的重要途径,为逐步推进中药废弃物资源化及资源产业链的延伸提供重要支撑。

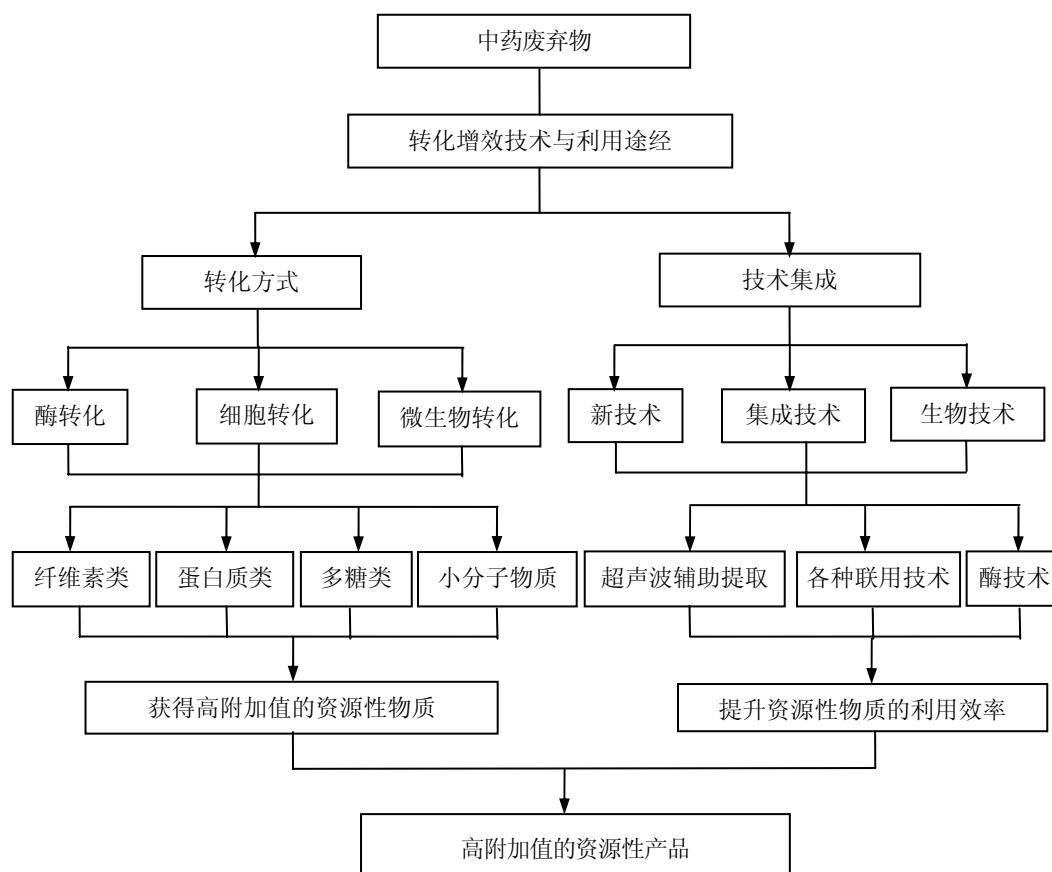


图3 中药废弃物转化增效资源化模式图

Fig. 3 Resource mode pattern on conversion efficiency of castoff from CMM industrialization

(1) 中药废弃物中纤维素类资源性物质的转化增效利用: 纤维素类物质经酶解转化为可吸收利用的糖类或蛋白质类物质, 提高其利用价值。利用微生物发酵技术或固定化细胞技术可将来源于植物半纤维素的木糖转化为木糖醇, 而酵母菌是最高效的木糖醇生产菌, 尤其是假丝酵母属微生物转化能力较强。如三七废渣通过微生物转化获得木糖醇等^[19]。利用工业纤维素酶使中药药渣中纤维素类物质酶解为 β -葡萄糖等^[20]。

以药用植物茎枝或木质化根部为原料制取微晶纤维素, 通过溶出其中的木质素、半纤维素等杂质, 采用全无氯的臭氧及过氧化氢漂白工艺对粗纤维素进行漂白, 然后通过盐酸水解和稀碱处理制备得到微晶纤维素^[21]。例如: 从甘草药渣中提取得到的纤维素类物质可替代棉、麻进行化学转化获得羧甲基纤维素, 作为医药品的混悬剂、黏合剂等^[22]。

利用能源化转化技术可将木质废弃物转化成为代替化石资源的能源, 如生物燃料、化工原料等^[23-24]。通过生物质热解技术可将该类废弃物降解形成焦炭、生物质油、生物质醋液和生物质燃气等, 促使长链挥发性产物向小分子气体烃转变。例如: 以两面针药渣为代表的木质中药渣可通过热解气化法制取洁净燃气^[25-26]。

(2) 中药废弃物中多糖类资源性物质的转化增效利用: 采用分子筛、选择性酶切技术, 对中药废弃物中所含有的生物大分子有针对性地水解或酶解, 制备不同相对分子质量段的部位^[27]。通过功能性评价实验, 表明中药废弃物中经酶解的功能性物质(三七多糖、当归多糖等)保持了良好活性。

薯蓣皂苷元是生产甾体激素类药物的重要原料, 在其提取制备过程中产生大量废水, 含有糖类、变性蛋白、多肽类、纤维素类、氨基酸类等物质。经对该废水中补充一定量的淀粉原料, 在强酸及高温加压条件下使淀粉水解达到酒精发酵所需条件, 再接种酵母菌, 经发酵蒸馏得到工业酒精, 取得明显的经济效益和生态环境效益^[28]。

海洋药用低值贝类加工过程中产生的废弃软体部分, 以及甲壳动物的外壳中多富含壳多糖, 经脱乙酰作用而得到的一种氨基多糖, 工业上用浓碱加热或酶解壳多糖可脱除乙酰基得到有药用价值的壳聚糖(chitosan)原料。

(3) 中药废弃物中次生小分子物质的转化增效利用: 利用从人参总皂苷中提取的人参二醇系皂苷

为底物, 以人参皂苷 β -葡萄糖苷酶为生物催化剂, 获得人参皂苷 Rh_2 , 其收率比红参中直接提取提高500倍^[29], 副产物为 GRg_3 、 GRh_1 等。采用果胶酶对人参皂苷进行转化获得 compound K, 与以往方法相比具有明显优势, 可用于大规模产业化生产^[30-31]。

应用从种植人参的土壤中分离筛选的活性菌株甘蔗镰孢 *Fusarium sacchari* 对三七茎叶中主要有效成分三七叶苷进行转化, 获得稀有抗肿瘤活性成分人参皂苷 CK、CMx 和 G-Mc, 为三七茎叶资源化利用提供转化增效的方法, 提升了废弃三七茎叶的资源利用价值^[32]。从新疆野生甘草的土壤中分离获得能够水解甘草酸产生甘草次酸的菌株, 转化率达到90%以上。可将甘草中不足0.1%的甘草次酸提高20倍以上^[33]。利用莎门氏菌 B31 转化八角 *Illicium verum* Hook. f. 提取后的废渣以获得莽草酸, 为获得莽草酸提供新的途径和替代资源^[34]。

对从薯蓣科植物盾叶薯蓣 *Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright 的根茎提取薯蓣皂苷元的废水进行分析, 发现含有一定量的含氮有机化合物, 对其进行中和处理后的废液, 经絮凝沉降、膜过滤、树脂吸附等将废液中影响发酵的成分去除, 最终发酵转化为谷胱甘肽和 S-腺苷甲硫氨酸, 用于药品或食品原料, 实现了薯蓣皂苷元生产中废水的转化增效^[28]。

3.2.3 精细高值资源化模式与研究实践 精细高值资源化模式是基于对废弃物中资源性物质的深化认识, 利用化学分离技术获得具有潜在开发价值的资源性化学成分; 利用现代生物技术将廉价废弃物转化为具有生物功能的资源性物质等(图4)。例如: 将廉价蛋白及营养蛋白转化为多肽或寡肽, 或改善蛋白质的营养特性和物理性状; 将纤维素转化为二糖或葡萄糖等。该类资源化模式适宜于在科技水平较发达区域, 依据社会需求、行业发展水平以及当地对资源利用技术和水平而实施的资源化模式。

(1) 中药废弃物中纤维素类资源性物质的精细高值化利用: 纤维素是由3 000~5 000分子的D-葡萄糖通过 $1\beta \rightarrow 4$ 苷键以反向连接聚合而成的直链葡聚糖, 分子结构直线状, 不易被稀酸或碱水解。纤维素不能被人类或食肉动物消化利用, 因体内没有可水解纤维素的酶存在。纤维素经弱酸水解可得到纤维二糖; 在浓硫酸(低温)或稀硫酸(高温、高压)下水解木质废渣能产生约20%的葡萄糖。废弃的药用植物茎秆中纤维素常和半纤维素及木质素

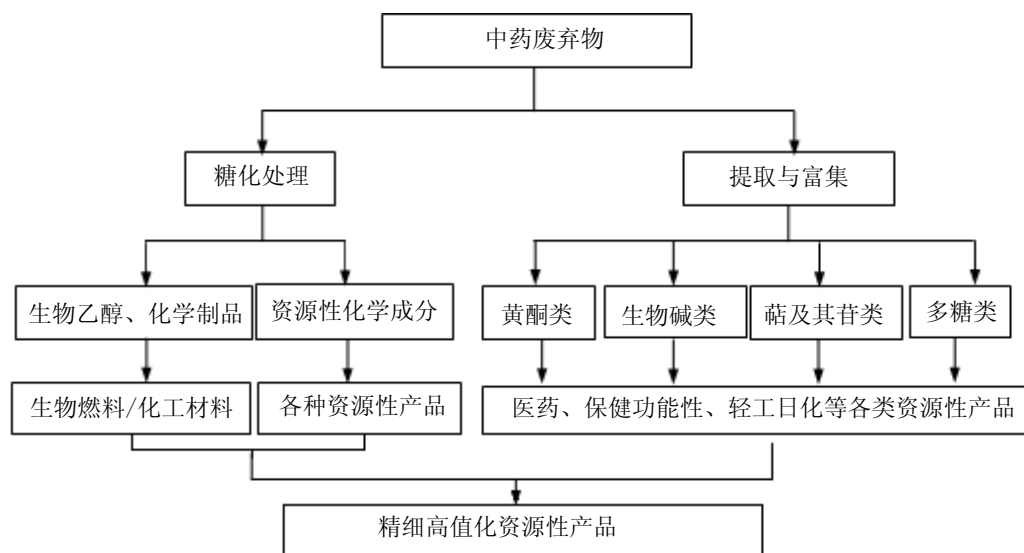


图4 中药废弃物精细高值资源化模式图

Fig. 4 Resource mode pattern on fine high value of castoff from CMM industrialization

结合存在,采用煮沸的1% NaOH处理,然后加入亚硫酸及亚硫酸氢钠,除去木质素,获得纤维素,再进一步采用纤维素酶进行酶解,获得纤维二糖或葡萄糖^[35]。

利用中药废渣中丰富的纤维素原料代替粮食生产酒精的过程,是将纤维原料经预处理后,通过同步糖化发酵获得乳酸,其转化率可达到理论值的90%^[36]。采用 *Klebsiella oxytoca* ZU-03 发酵玉米秸秆水解液生产2,3-丁二醇,实现纤维素和半纤维素的共利用,是可再生植物纤维资源生物转化的有效途径,具有良好的实际应用前景^[37]。

(2) 中药废弃物中糖类资源性物质的精细高值化利用:研究表明,丹参水提醇沉物中富含大量糖类物质,通过加水溶解,调pH值,离心或滤过使药液澄清,再通过除杂脱色,药液减压浓缩、喷雾干燥即得水苏糖固体粉末,可获得质量分数为70%~95%的水苏糖,具有良好开发潜力^[38]。

脉络宁注射液由牛膝、玄参、石斛、金银花制备而成,在其制备过程中,药材经水提、醇沉、醋酸乙酯精制等多步工艺后,尚具有免疫调节作用的活性成分丢失,造成资源浪费。有专利^[10]已公开利用脉络宁注射液制备过程中的废弃物制备免疫调节剂,用于预防和治疗免疫性疾病。

(3) 中药废弃物中三萜及其苷类资源性物质的精细高值化利用:人参 *Panax ginseng* C. A. Mey. 和三七 *P. pseudo-ginseng* Wall. var. *notoginseng* (Burkill)

Hoo et Tseng 的传统药用部位为其根部,在其种植采收过程中造成地上部分的资源浪费。经现代研究^[39-40]表明其花序、果实、茎叶、须根等部位也含有较高量的可利用的人参皂苷类化学成分等,现已利用其地上茎叶开发出治疗心血管疾病的产品。

废弃的酸枣 *Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow 果肉中富含活性产物三萜及皂苷类、脂肪酸(醇)类、有机酸(酯)类、甾体类、黄酮类、脑苷类及糖类等可利用物质^[11]。活性筛选显示其具有抗炎、抑制肿瘤细胞增殖、预防化学性肝损伤、调节免疫等多重活性,具有潜在的药用和保健功能。另外,废弃的大枣 *Z. jujube* Mill.、酸枣叶中均富含三萜类成分,具有甜味抑制、降血糖、抗炎、抗氧化、抑制肿瘤细胞增殖、预防化学性肝损伤等多种生物活性^[12]。

薄荷 *Mentha haplocalyx* Briq. 地上部分提油后的残草废弃物中富含蒙花苷、香叶木素苷等黄酮类、熊果酸、齐墩果酸等三萜类化合物,具有良好的免疫调节和抗肿瘤等作用^[41]。

(4) 中药废弃物中黄酮类资源性物质的精细高值化利用:银杏叶为银杏 *Ginkgo biloba* L. 的干燥叶,在银杏栽培过程中叶片变黄脱落的落叶数量巨大,造成资源的浪费。研究表明,银杏落叶中富含黄酮类、银杏内酯类、核苷类、氨基酸类、微量元素等可利用物质,具有良好的潜在利用价值^[42-43]。

川芎 *Ligusticum chuanxiong* Hort. 地上废弃茎叶

中富含黄酮类、甾醇类、酚酸类及神经酰胺类等资源性化学成分^[44]，具有抑菌、抗氧化等多种生物活性。

(5) 中药废弃物中有机酸类资源性物质的精细高值化利用：柑橘类果实在加工过程产生大量的果皮和废渣，除含有丰富的纤维素类、木质素类外，尚含有可利用的精油、果胶、色素和类黄酮等生物活性物质，其综合利用价值极高。如采用提取果胶后的果渣继续加工制取柠檬酸，每 100 kg 柑橘废渣可生产 215 g 柠檬酸^[13]。

从当归地上废弃茎叶中分得 16 个倍半萜及酚酸类等资源性成分，活性筛选显示其具抗凝血、抑制大肠杆菌、枯草杆菌、杀灭马铃薯线虫活性等活性，可用于牛乳房炎、鸡鸭等畜禽菌痢的治疗^[10,45-46]。

国内柠檬桉叶油的生产均为采用传统的水蒸气蒸馏法，该工艺一般只收取馏出液中油相部分用于精油产品开发，而溶于水相中的水溶性萜类含氧衍生物则未被利用。经采用盐析方法从制备柠檬桉叶油的废水中分离得到了 *p*-menthane-3, 8-diol，可用于蚊虫驱避剂的开发^[47]。

4 中药废弃物循环利用及其经济学评价

4.1 中药废弃物循环利用原则

循环经济起源于工业经济，其核心是工业物质的循环。循环经济是对物质闭环流动型经济的简称，本质上是一种生态经济，充分提高资源的利用效率。中药废弃物循环利用模式基于该理念，倡导建立在物质不断循环利用基础上的经济发展模式，按照自然生态系统的模式，改变“资源-产品-污染排放”的直线、单向流动的传统经济模式，使整个中药资源产业化过程不产生或尽可能少产生废弃物，从而在经济产业化过程中实现资源的综合利用和废弃物资源化，从而平衡生态环境与发展经济之间的矛盾，把经济、环境、社会三者的发展有机结合起来^[48-51]。废弃物循环利用的基本原则是减量化 (reduce)、再利用 (reuse)、资源化 (recycle)。废弃物循环利用产业链的形成是使资源以最低的投入达到最高效率的使用和最大限度的循环利用^[52-53]。

4.2 中药废弃物资源化的经济学评价

从数学规划角度，废弃物资源利用可表述为一个多指标的优化过程，其实施可表现为不同主体在市场上寻求最大经济效益的问题^[54]。对于废弃物产生或废弃物处理的企业，其目标是在市场上实现经济价值。假设废弃物的年产量为 W ，其获得价格为 P_1 ，则废弃物的购买成本为 $P_1 W$ 。在处理转化过程

中，仍然需要投入新的资源和成本，假设为 $P_2 W$ ， P_2 为单位废弃物的处理或转化成本^[55]。处理利用后会产生新的产品并在市场上出售获得效益，同时也会产生新的废弃物或污染，为了描述方便，将新产品和新废弃物的量仍折算为 W ，则企业的经济效益 (Q) 为： $Q=(P_3-P_1-P_2-P_4) W$ ，其中 P_3 为新产品价格， P_4 为新废弃物带来的污染或损失。通常情况下，废弃物价格 P_1 会比较低廉，但由于技术的原因处理转化成本 P_2 会较高，新产品的价格也很难有竞争力。因此经济效益 Q 经常为负值，难以调动企业的积极性。

对于政府来说，废弃物资源的利用还涉及到对环境的保护。因此，效益 (R) 计算应调整为： $R=(P_3+P_5+P_6-P_1-P_2-P_4) W$ ，其中新增的 P_5 代表原废弃物 W 所造成的环境污染或损失，经过再利用或处理后这部分损失应算作效益； P_6 则代表新的废弃物再利用产业所带来的税收、就业等，可看作社会效益。对于政府来说，只要 $R>0$ ，则废弃物的资源化利用即值得推进和发展。这里 Q 与 R 之间的差距在市场条件下需要通过政府补贴、政策法规引导等方法加以弥补，才能调动企业的积极性开展废弃物资源化利用。

废弃物资源化利用过程可以表示为以下的优化模型： $\text{Max: } Q=(P_3-P_1-P_2-P_4) W$ ； $\text{Max: } R=(P_3+P_5+P_6-P_1-P_2-P_4) W$ ； $\text{Min: } P_5+P_4$ ；约束条件 $P_i>0$ 。

5 结语

中药资源的有效利用是实现资源节约型、环境友好型循环经济发展理念，保障中医药事业健康可持续发展的重大战略问题。因此，围绕中药资源产业化过程废弃物的资源化利用，提出和构建了中药废弃物利用策略与资源化模式，以期推动社会和行业形成节约资源、保护环境、发展生态经济产业的良好局面。

中药废弃物资源化利用过程是一个复杂的系统工程，根据自然资源产业化过程中废弃物的产生和废弃物资源化理论，体现了资源的综合利用和多途径、多层次利用价值。中药废弃物的处理与资源化不仅关系到资源的再利用和环境生态，同时与中药资源的可持续发展和循环利用经济的建设密切相关。按照循环经济理论，以中药废弃物的循环利用为切入点连接农、林、牧、渔、轻化工、食品等各领域，对促进中医药事业发展具有特殊的现实意义和长远战略意义^[56]。

参考文献

- [1] 段金廛, 周荣汉. 中药资源学 [M]. 北京: 中国中医药出版社, 2013.
- [2] 段金廛, 陈士林. 中药资源化学 [M]. 北京: 中国中医药出版社, 2013.
- [3] 段金廛, 周荣汉, 宿树兰, 等. 我国中药资源科学发展现状及展望 [J]. 自然资源学报, 2009, 24(3): 378-396.
- [4] 段金廛, 吴启南, 宿树兰, 等. 中药资源化学学科的建立与发展 [J]. 中草药, 2012, 43(9): 1665-1671.
- [5] 段金廛, 宿树兰, 钱大玮, 等. 中药资源化学研究思路方法与进展 [J]. 中国天然药物, 2009, 7(5): 333-340.
- [6] 段金廛. 中药资源化学研究技术体系的建立及其应用 [J]. 中国药科大学学报, 2012(4): 289-292.
- [7] 段金廛, 宿树兰, 吕洁丽, 等. 药材产地加工传统经验与现代科学认识 [J]. 中国中药杂志, 2009, 34(24): 3151-3157.
- [8] 段金廛, 宿树兰, 严 辉, 等. 药材初加工“发汗”过程及其酶促反应与化学转化机制探讨 [J]. 中草药, 2013, 44(10): 1219-1225.
- [9] 段金廛, 宿树兰, 严 辉, 等. 药材初加工“杀青”环节与药材品质形成的探讨 [J]. 中药材, 2011, 24(1): 1-6.
- [10] 段金廛, 严 辉, 钱大玮, 等. 一种具有抗菌活性的当归地上部分有效部位及其制备方法和其应用: 中国, 200910246420.7 [P]. 2011-05-18.
- [11] Guo S, Duan J A, Tang Y P, *et al.* Simultaneous qualitative and quantitative analysis of triterpenic acids, saponins and flavonoids in the leaves of two *Ziziphus* species by HPLC-PDA-MS/ELSD [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2011, 56(2): 264-270.
- [12] Guo S, Duan J A, Tang Y P, *et al.* Triterpenoids from the fruits of *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* [J]. *Biochem Syst Ecol*, 2011, 39: 880-882.
- [13] 温志英, 刘焕云. 柑橘加工废料综合利用现状及发展前景 [J]. 食品研究与开发, 2008, 29(11): 162-166.
- [14] 李肖梁, 余东游, 钱 娅. “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): 433-437.
- [15] 王兴旺, 徐向阳, 孙 晔, 等. 一种利用脉络宁注射液制备过程中的废弃物制备免疫调节剂及其在制药中的应用: 中国, CN 1491688 A [P]. 2004-04-28.
- [16] 刘 鹏, 张兰英, 刘莹莹, 等. 组合生物技术处理制药废水及其生物相 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(1): 169-175.
- [17] 曾常华, 林 波, 周百林. 内电解-两级生化法处理化工制药废水 [J]. 江西科学, 2006, 24(5): 337-339.
- [18] 张清照, 袁惠南. 综合开发与利用中药资源的研究 IV. 中药工业化生产中资源的综合利用研究 [J]. 山东省医药工业, 1991, 10(2): 27-28.
- [19] 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): 67-70.
- [20] 侯嵘娇, 孟宪纤, 徐育新. 以酶解法从中药及药渣制备 β -葡萄糖的研究 [J]. 沈阳药学院学报, 1994, 11(4): 289-294.
- [21] 张 云, 张美云, 李金宝, 等. 麦草秸秆微晶纤维素的制备工艺 [J]. 纸和造纸, 2011, 30(4): 35-37.
- [22] 吉媛媛. 利用甘草渣制备梭甲基纤维素 [J]. 山西化工, 1997(2): 43-44.
- [23] 周仁福, 周 强, 陶 然, 等. 农业废弃资源热解气化综合转化利用系统: 中国, CN 202415489U [P]. 2011-10-25.
- [24] 徐秀银, 陈学祥, 杨 静. 利用中药渣生产有机基质发酵条件研究 [J]. 江苏农业科学, 2010(3): 348-350.
- [25] 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): 32-35.
- [26] 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): 14-18.
- [27] 何 兰, 姜志宏. 天然产物资源化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [28] 朱靖博, 耿慧琴, 宋青楠, 等. 薯蓣皂素生产废水处理方法及联产 GSH 和 SAM 的新工艺: 中国, CN101993161 [P]. 2011-03-30.
- [29] 金凤燮, 鱼红闪, 赵立亚. 酶法生产稀有人参皂苷及其产物成分的分析 [J]. 大连轻工学院学报, 2002, 21(3): 112-115.
- [30] Kim B H, Lee S Y, Cho H J, *et al.* Biotransformation of Korean *Panax ginseng* by Pectinex [J]. *Biol Pharm Bull*, 2006, 29(12): 2472-2478.
- [31] Dong H J, Jiang B H, Han Y, *et al.* Transformation of compound K from saponins in leaves of *Panax notoginseng* by immobilized β -glucanase [J]. *Chin Herb Med*, 2010, 2(1): 41-47.
- [32] 韩 颖, 胡筱敏, 姜彬慧, 等. *Fusarium sacchari* 对三七茎叶中有效成分生物转化条件的优化 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2801-2806.
- [33] 何 晨. 甘草的微生物转化研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006.
- [34] 李 伟, 曹 庸, 雷 勇, 等. 八角茴香渣生物转化法制莽草酸的初步研究 [J]. 林产化学与工业, 2007, 27(增刊): 113-116.
- [35] Hideki B. Development of bioconversion of cellulosic wastes [J]. *Microb Technol*, 1993(11): 18-26.
- [36] 陈 明, 王周芳, 夏黎明. 固定化基因重组酵母发酵木糖产乙醇 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(2):

- 290-293.
- [37] 夏黎明. 植物纤维素原料的生物转化与利用 [J]. 现代化工, 2010, 30(1): 11-15.
- [38] 郑云枫, 程建明, 丁宁, 等. 一种从丹参水提醇沉物中制备水苏糖的方法: 中国, CA 201110122779 [P]. 2011-11-02.
- [39] 韩凌, 张翼菲, 赵余庆. 三七地上部分现代药学与生物活性研究 [J]. 亚太传统医药, 2007(6): 19-21.
- [40] 巍均娴, 杜元冲. 三七各部位的研究和开发利用 [J]. 天然产物研究与开发, 1992, 4(3): 93-95.
- [41] 彭蕴茹, 钱士辉, 石磊, 等. 薄荷非挥发性提取部位的药理活性研究 [J]. 中药材, 2008, 31(1): 104-107.
- [42] Yao X, Zhou G S, Tang Y P, *et al.* Comparative characterization of total flavonol glycosides, terpene lactones, biflavones, proanthocyanidins, and ginkgolic acids in *Ginkgo biloba* leaves from different fruit cultivars by ultra-high performance liquid chromatography coupled with triple quadrupole mass spectrometry [J]. *Int J Mol Sci*, 2012, 13(8): 10305-10315.
- [43] Yao X, Zhou G S, Tang Y P, *et al.* Direct determination of underivatized amino acids from *Ginkgo biloba* leaves by using hydrophilic interaction ultra-high performance liquid chromatography coupled with triple quadrupole mass spectrometry [J]. *J Sep Sci*, 2013, 36(17): 2878-2887.
- [44] 任东春, 杨念云, 钱士辉, 等. 川芎地上部分化学成分研究 [J]. 中国中药杂志, 2007, 32(14): 1418-1420.
- [45] Yang N Y, Zhou G S. Two new α -pinene derivatives from *Angelica sinensis* and their anticoagulative activities [J]. *Fitoterapia*, 2011, 82(4): 692-695.
- [46] 彭仁琇, 夏雪雁, 李颖, 等. 一种从制备当归注射液的废弃物中提取当归多糖的方法: 中国, CN 1434059 A [P]. 2003-08-06.
- [47] 田玉红. 利用柠檬桉叶油提取废液制备蚊子驱避剂的方法: 中国, CNIO2860303 [P]. 2013-01-09.
- [48] 张静波, 刘志峰. 基于循环经济的工业废弃物资源化模式的社会效益评价 [J]. 铜陵学院学报, 2006(6): 76-79.
- [49] 孙智君. 基于农业废弃物资源化利用的农业循环经济发展模式探讨 [J]. 生态经济: 学术版, 2008(1): 197-199.
- [50] 陈屹松, 陈百明, 张红旗. 农业自然资源利用模式的发展演化规律初探 [J]. 江西农业大学学报, 2005, 27(3): 321-327.
- [51] 宋成军, 张玉华, 李冰峰. 农业废弃物资源化利用技术综合评价指标体系与方法 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 289-293.
- [52] 杨磊, 夏禄华, 张衷华, 等. 植物提取生产中国形废弃物生态化利用的现状与发展趋势 [J]. 现代化工, 2008, 28(4): 14-18.
- [53] 龙文军. 农业资源利用方式及其与农业可持续发展的关系分析 [J]. 科技进步与对策, 2000, 17(11): 111-113.
- [54] 孙振钧, 孙永明. 我国农业废弃物资源化与农村生物质能源利用的现状与发展 [J]. 中国农业科技导报, 2006, 8(1): 6-13.
- [55] 刘爱民, 封志明, 李飞. 农业资源利用模式间的转换及案例分析 [J]. 自然资源学报, 1998, 13(3): 193-197.
- [56] 邓家刚. 农作物废弃物药用研究的战略意义与基本思路 [J]. 广西中医药, 2010, 33(1): 1-3.