

2016—2020 年我国中药资源学学科建设及科学研究进展与展望

段金廛*, 宿树兰, 严 辉, 郭 盛, 刘 睿, 刘圣金, 赵 明, 吴启南

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

摘 要: 中药资源学学科建设主要包涵中药资源学相关专业建设、教材体系建设、人才团队建设, 以及中药资源学理论与方法技术创新、成果转化及服务社会等方面。中药资源领域的科学研究主要涉及中药资源调查研究、中药材规范化生产、中药资源有效利用、中药资源保护、中药资源产业发展等方面。在以往连续报道的基础上, 对 2016—2020 年我国中药资源学学科建设及科学研究进展等进行归纳整理, 基本反映了本领域的发展概况和广大科技工作者、企业家及管理者的代表性贡献, 以期与中药与天然药物资源领域的学科建设、人才培养、科学研究、社会服务及中药产业发展起到相互借鉴的作用, 共同致力于我国中医药事业和中药资源产业的高质量发展。

关键词: 中药资源; 中药资源学科; 学科建设与人才培养; 科技创新; 中药资源产业

中图分类号: R28; R286 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2021)17-5151-15

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2021.17.005

Discipline development and research progress of Chinese medicinal material resources from 2016 to 2020

DUAN Jin-ao, SU Shu-lan, YAN Hui, GUO Sheng, LIU rui, LIU Sheng-jin, ZHAO Ming, WU Qi-nan

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

Abstract: The discipline construction of Chinese medicine resources mainly covers the construction of Chinese medicine resources related majors, teaching material system construction, talent team construction, as well as the theory and method of Chinese medicine resources technology innovation, achievement transformation and serving the society. Scientific research in the field of traditional Chinese medicine resources mainly involves the investigation and research of traditional Chinese medicine resources, standardized production of traditional Chinese medicine materials, effective utilization of TCM resources, protection of TCM resources, and development of traditional Chinese medicine resources industry, etc. Based on the basis of the past, this paper summarizes the progress of scientific research of Chinese medicine resources from 2016 to 2020. These basically reflects the development situation of the field and the representative contributions of scientific and technological workers, entrepreneurs and managers. In order to play a mutual reference role for the discipline construction, talent training, scientific research, social services and TCM industry development in the field of traditional Chinese medicine and natural Chinese medicine resources, and jointly committed to the high-quality development of traditional Chinese medicine industry and traditional Chinese medicine resource industry in China.

Key words: Chinese medicine resources; Chinese medicine resources discipline; discipline construction and talent training; scientific and technological innovation; Chinese medicine resource industry

收稿日期: 2021-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (81673533); 国家自然科学基金资助项目 (81603273); 江苏省中药资源产业化过程协同创新中心建设专项 (2021); 江苏省科技计划项目 (社会发展) (BE2019722); 中国中医科学院中药资源中心开放课题 (ZYZY2020-01); 国家中医药多学科交叉创新团队 (道地药材生态化与资源可持续利用) 支持计划 (2021)

***通信作者:** 段金廛, 男, 沈阳药科大学 43 期药系校友。教授, 博士生导师, 国际欧亚科学院院士, 国家“973”计划项目首席科学家; 主要从事中药资源化学研究及资源循环利用。兼任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。E-mail: dja@njucm.edu.cn

中药资源是国家战略资源,是中医药事业和中药产业发展的物质基础。近年来,国家高度重视中药资源保护及其可持续利用,中药资源领域在学科建设、科学研究、人才培养以及中药材产业精准扶贫等方面均得到了长足发展,促进了中药资源全产业链的提质增效与绿色发展^[1]。然而,随着我国中药大健康产业的兴起和快速发展,国内外市场对中药及天然药物资源的需求量日益剧增,开发利用资源与节约资源、保护资源之间的矛盾也日益突出^[2]。因此,中药资源产业得到迅猛发展的同时,中药资源科学生产、合理利用以及生态保护也成为社会和行业关注的重大问题。

本文在以往每 2 年对中药资源领域诸方面进展进行归纳整理的基础上^[3],对 2016—2020 年我国中药资源学学科建设及科学研究进展等进行归纳整理,整体展示了本领域的发展概况和广大科技工作者、企业家及管理者的代表性贡献,以期与中药与天然药物资源领域的学科建设、人才培养、科学研究、社会服务及中药产业发展起到相互借鉴的作用,共同致力于我国中医药事业和中药资源产业的高质量发展。

1 中药资源学学科建设概况

1.1 学科及专业建设得到快速发展

为了满足国家及相关领域对中药资源学高层次人才的需要,我国中药资源学奠基人周荣汉教授等专家提出开办中药资源学专业的建议,并于 1987 年 8 月得到国家教委正式批准在部分高等医药院校试办中药资源学专业。广州中医药大学、黑龙江中医药大学率先开办中药资源学本科专业并招收本科生,1991 年中国药科大学招收中药资源学专业方向研究生。1993 年,周荣汉教授作为主编,联合我国从事药用生物资源、中药材及生药学、中药及天然产物化学等相关领域的老一辈科学家创编出版了《中药资源学》专著,这也为中药资源学专业本科生及研究生的教育教学提供了第一本教材。

为了适应中药资源学学科建设与人才培养的需要,2001 年起由中国药科大学率先获批开办中药资源与开发专业。在 2012 年 9 月国家教育部公布的《普通高等学校本科专业目录(2012 年)》中,中药资源与开发专业由原来的目录外专业(专业代码:100806W)正式成为目录内专业(专业代码:100802),为中药类下属 2 个专业之一,中草药栽培与鉴定专业由原来的目录外专业(专业代码:100806W)正式成为目录内特设专业(专业代码:

100806T)。迄今,在我国一代又一代中药资源学人的不懈努力和开拓创新下,现已发展成为包括医药院校、农业院校、综合性大学在内的 52 所大专院校开设了中药资源学学科及其相关专业,展现出中药资源学学科的发展活力和社会需求。

图 1 表明,近 10 年来全国高校新增设中药资源与开发专业 25 个,中草药栽培与鉴定专业 9 个。在全国 23 个设置中医药大学的省(市、自治区)中,有 22 家开设了中药资源相关专业,其中河北、辽宁、山东、贵州、甘肃省的 5 所中医药大学开设了中药资源与开发及中草药栽培与鉴定 2 个不同专业;江西中医药大学申办了不同年制(四年制及二年制第二专业)的中药资源与开发专业。在首批 6 所中药学“国家一流学科”建设高校中,有 5 所开设有中药资源与开发相关专业。由图 2 可知,设置该专业的高校以华东、西南、东北等地区为主要分布。中药资源学学科及专业方向已成为中药学一级学科门类的重要组成部分和充满活力和社会需求的高层次人才培养高地。

1.2 人才培养及团队建设成效显著

以国家战略与行业需求为导向,创新中药资源现代人才教育理念,强化中药资源人才的科研素养

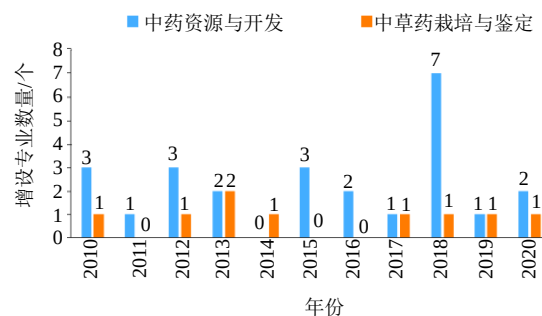


图 1 10 年来我国中药资源学及相关专业申办获批情况
Fig. 1 Approval status of traditional Chinese medicine resources and related majors in the past 10 years

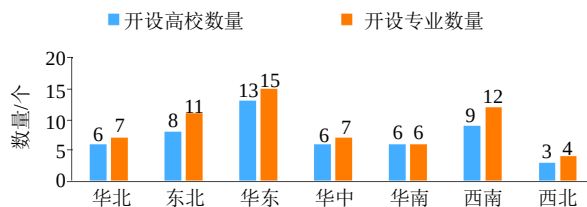


图 2 全国各地区中药资源相关专业开办情况
Fig. 2 Establishment of traditional Chinese medicine resources related majors in all regions of China

与专业技能, 打造形成中药资源领域一批专业化团队, 有力支撑了国家基础性任务和产业发展需求。国家启动的第四次全国中药资源普查工作历时 10 年, 既是摸清我国中药资源家底的国家基础性任务, 又是中药资源学科建设和专门性人才队伍得到培育壮大的 10 年。据初步统计, 全国普查工作为中药资源领域培育中药资源专业技术人员达 4 万余人, 数千名研究生及青年教师参与中药资源普查工作, 为该领域储备了一批高层次专业人才。其中, 由黄璐琦院士主持、中国中医科学院中药资源中心组织实施的“国家中医药管理局中药资源管理人才研修班”已举办 4 期, 来自全国中医药院校、科研院所等相关领域的数百名青年学者接受了培养和能力的提升。通过中药材大品种的种子种苗基地建设、道地药材规范化及生态化种植等专项实施, 以及新技术新方法的培训与示教, 指导建立了一批大宗地产药材的中药材生产质量管理规范(GAP)种植基地, 服务于地方经济发展和中药材产业扶贫富民国家工程。

创新发展了中药资源学科及相关专业人才培养实践体系, 进一步彰显传承与创新特色优势。中药资源普查技术培训、野外普查、腊叶标本制作等学生全程参与, 完善了中药资源专业人才培养实践体系; 培养绘画、摄影、植物标本制作等专门人才。将普查过程中的科学问题转化为科研项目, 学生参与大学生创新创业训练计划项目、植物标本制作技术大赛、大学生创新创业大赛等, 提高了学生解决中药资源生产过程问题的能力。

团队和平台建设有力地支撑了中药资源学科建设与人才培养。由中国中医科学院中药资源中心郭兰萍主任牵头的“道地药材生态化与资源可持续利用”国家中医药多学科交叉创新团队获得支持。南京中医药大学段金廛教授牵头创立了第一个全国中药资源循环利用学术团体和全国中药产业资源循环利用发展联盟、创建了我国第一个行业中药资源循环利用重点研究室、编撰出版了第一套中药资源循环利用学术专著、培训了全国第一批中药资源循环利用高层次人才。

团队建设中涌现出了诸如山东中医药大学中药资源团队入选教育部首批“全国高校黄大年式教师团队”、研究成果“培养中药学专业创新创业型人才, 助推中医药健康产业发展”获得山东省教学成果一等奖。南京中医药大学中药资源团队申报的“研融于教, 面向国家战略的中药资源人才培养体系的构

建与实践”教学成果获得江苏省教学成果奖, 依托本学科的本科“中药资源与开发专业”为国家特色专业建设点, 中药资源学科建设与发展为学校中药学“国家一流学科”和“高水平建设高校”提供了有力支撑。

1.3 教材体系建设日臻完善

继 2012 年段金廛教授领衔创编《中药资源与开发专业》系列行业规划教材(12 本), 填补了该专业系列教材空白以来, 黄璐琦院士、段金廛教授共同作为“十三五”全国高等院校中药资源与开发等 3 个专业国家卫生计生委系列规划教材建设指导委员会主任委员, 总主编负责系列规划教材的整体设计和学术指导, 组织编写“十三五”系列规划教材, 共计 36 门课程教材, 反映了中药资源学学科及专业教材体系不断丰富并日臻完善。

1.4 中药资源学理论不断丰富

1.4.1 中药资源化学新兴交叉学科的创建 段金廛团队依据社会、行业发展需求及区域社会经济发展水平, 以科学地生产中药资源, 合理地利用中药资源的学科发展总目标, 将药用生物资源学与天然产物化学交叉融合创立中药资源化学新兴交叉学科^[4], 该学科应用多学科知识与方法技术, 以药用植物、菌物、动物、矿物等再生和非再生资源为研究对象, 揭示其资源性化学成分的性质、分布、积累与消长规律, 服务于药材生产加工全过程; 以药材生产过产生的传统非药用部位及中药制药等深加工产业化过程产生的固体及液体废弃物及副产物为研究对象, 多途径挖掘其多元化潜在利用价值, 努力提高资源的利用效率和经济效益, 推动中药资源产业的绿色发展。中药资源化学学科的创立及其理论基础的日臻完善, 进一步丰富了我国中药资源学理论体系和学科体系的创新发展, 推动了药材规范化生产与品质提升、促进中药资源全产业链的提质增效和绿色发展。该新兴交叉学科现已建设成为国家中医药管理局重点学科。

1.4.2 分子生药学新兴学科不断创新发展 黄璐琦教授创立的分子生药学新兴学科, 是一门从分子水平上研究中药的鉴定、品质形成、资源保护与生产的交叉学科^[5]。近年来在中药分子鉴定、道地药材成因、中药活性成分生物合成等方面取得重要研究进展。构建了中药核酸检测技术体系并且在中药质量控制中发挥的重要作用; 提出道地药材具有优形、优质、优效特征, 拓宽了传统药材辨状的范畴, 其

核心思想是通过获取高质量、可重复的性状数据,进而量化分析基因型和环境互作效应及其对中药质量的影响,为中药材现代化质量控制体系建立奠定基础。

分子生药学科明确了中药分子鉴定是基础、道地药材成因是特色、合成生物学生产是前沿的三大研究任务。道地药材研究方面,凝练形成优型、优质、优效的道地药材系统评价体系。随着分子生物学技术和合成生物学技术的发展,中药活性成分生物合成途径解析及调控、中药活性成分合成生物学生产发展迅速,在人参皂苷^[6]、丹参酮^[7-8]、雷公藤内酯^[9]等的生物合成调控及合成生物学研究取得突破进展,从而利用合成生物学与组合生物学相结合,产生一些结构衍生新化合物,推动了中药生物智造新资源的创制。

1.4.3 中药资源生态学与中药品质生态学研究理论与方法技术体系的创建 黄璐琦、郭兰萍团队将中药资源学和现代生态学交叉融合,形成了中药资源生态学研究理论与方法技术体系。中药资源生态学主要研究内容包括中药资源自身的生态学理论与方法、中药资源品质形成的生态学研究、中药资源生产的生态学研究、中药资源保护与生态修复。在中药资源生态学研究理论框架构建的基础上,进一步深入分析中药生态农业现有理论与实践成果,提炼出中药生态农业的 4 方面原理、存在的 4 方面问题及今后发展的 5 点建议^[10]。为了深入阐释中药品质及与生态环境关系及机制,提出了中药品质生态学研究方向^[11],中药品质生态学研究内容包括中药品质形成的生物学成因、药用生物分布、产地与生态因子的关系、优质药材产地生态适宜性与区划、生态系统调控对中药品质的影响等。

1.4.4 药用植物保育学研究理论与方法技术体系的提出与创新实践 缪建华团队根据药用植物保护的现状与需要,在进行药用植物引种驯化与保护实践的基础上,总结凝练和提升形成药用植物保育学研究理论与方法技术体系^[12]。从遗传机制、生态机制、驯化机制和经济学机制等方面总结了以药效为基础的药用植物保育策略和成效评价模型。这一理论的提出及探索实践,拓展了保护生物学理论基础,丰富了中药资源学理论体系,为药用植物资源的保护与利用及中药资源的生产提供了理论创新与技术支撑。

1.4.5 药用植物保护学研究理论和方法技术体系在实践中不断丰富完善 陈君团队是在长期从事药用

植物病虫害科学防治实践的基础上,融合多学科知识创新发展形成药用植物保护学理论与方法技术体系^[13]。该研究方向的建立与不断探索发展,必将形成保护药用植物免受病、虫等有害生物为害的有效防治体系,直接服务于中药资源的绿色生产,保证中药材的收获与品质。药用植物保护学与农业、林业领域及其作物病虫害防治保护学科不同的是始终遵循以药材质量为核心的防治理念,既要保证药材的产量,更要注重药材的品质,从源头保证用药的安全有效与产业的健康发展。

1.4.6 中药资源循环经济理论的提出与实践 段金廪团队将中药资源化学与循环经济发展理念相融合,在不断实践的基础上逐渐形成并系统提出中药资源循环经济理论基础^[14-15]。创建的中药资源循环利用研究体系,并推广应用于药材生产与深加工产业过程废弃物及副产物的资源化利用,其理论核心是以中药资源循环经济产业体系的构建和可持续发展为目标,通过集成多学科知识与技术交叉融合,按照循环经济的发展理念,以资源循环利用为引导,推进中药资源经济产业发展模式和生产方式的变革,改变中药产业“高投入、高消耗、高排放、低产出”的线性经济发展方式,推进资源节约型和环境友好型中药资源循环经济体系建设,为中药资源产业的可持续发展提供科技支撑和驱动力。服务于中药产业的节能减排、碳达峰与碳中和目标的实现。

2 中药资源领域科学研究进展

2.1 全国中药资源调查研究取得重大进展

2.1.1 基本摸清了中药资源家底,取得一批标志性成果 自 2011 年启动全国第四次中药资源普查试点工作以来^[16],至 2020 年底中药资源调查已累计启动 31 个省近 2800 个县开展中药资源调查,获取了 200 多万条调查记录,汇总了 1.3 万余种中药资源的种类和分布等信息,发现新物种 79 种,其中 60% 以上的物种具有潜在的药用价值。组织编撰出版《中国中药资源大典》系列、《新编中国药材学》等上百本专著。按年度编制发布《中药资源发展报告》《中国中药材种业发展报告》《全中国中药材生产统计报告》,为国家有关部门的政策制定提供了一手本底资料。

2021 年全国中药资源普查工作的收官之年,各省普查工作进入成果梳理和整理验收阶段^[17-18]。吉林、海南等省在全面完成中药资源普查工作的基础上,已申报并获得了省级科技成果一等奖。为了

鼓励和表彰在普查工作中取得阶段性成果的团队,中国中医科学院首次设立了中药资源普查科学技术奖,由南京中医药大学牵头联合我国沿海 6 省共同申报的“适宜于我国东部沿海地区的水生、耐盐药用生物资源调查技术和方法体系的创建和应用”“基于第四次全国中药资源普查的秦药产业发展体系构建”“第四次全国中药资源普查甘肃省中药资源数据平台与优质陇药原料创新保障服务体系构建”“我国傣药资源和传统知识调查、种质保存及数字化共享平台建设”“安徽药用植物新类群的发现及其分子系统学研究”等多项成果获奖。

全国中药资源普查进展汇总表明,在国家中医药管理局精心组织实施下、在以黄璐琦院士牵头的全国中药资源普查技术专家组的具体指导下、在全国中药资源人的通力合作下,前后 10 年的坚持与努力基本摸清了我国中药资源家底,提出了覆盖全国不同生态区域的中药资源区划等,这些成果必将为各级政府研究制定中药资源保护与利用发展战略、因地制宜制定区域性中药资源产业发展规划和优化农村产业结构调整等提供重要支撑和科学依据。

2.1.2 新技术新方法不断涌现,服务于中药资源调查研究与中药资源生产 基于地理信息技术构建了中药资源生产区划分析技术方法^[19],并对中药材生产区划分析的关键技术进行了分析模型构建,在此基础上研发了中药生产区划分析地理信息系统(CMRPRGIS),为国家和省一级中药资源生产区划划分和产业布局规划提供了新的技术手段。在广东省岭南药材资源调查整理的基础上,综合分析了省内各地区自然环境条件和社会经济条件、中药资源种类和分布、药材生产实际等情况。遵循中药资源区划基本原则,将广东省中药资源区划分为 4 个一级中药区和 12 个二级中药区的二级区划系统;同时制定了广东省栽培类药材品种的生产规划,提出各地县市适宜发展的药材种类,为广东省中药材产业发展方向、布局以及区域发展重点的框架设计提供了基本依据。在对四川省地理环境、生态因子(海拔、气候、土壤)等研究的基础上^[20-21],将四川省道地药材划分为 4 个区:四川盆地药材生产区,盆地边缘山地药材生产区,攀西药材生产区,川西高原高山峡谷药材生产区。通过遥感与地理信息系统(geographic information systems, GIS)技术研究,确定 86 种川产道地药材适宜区与最适宜区,为四川省中药材生产的合理布局与药材品质的提升奠定了基础。

提出将“互联网+”信息技术与中药农业生产融合,其融合路径包括中药资源宏观管理、建立中药材智能种植体系、建立中药材全过程质量追溯系统、建立中药材生产信息平台 4 个方面,助力中药农业转型升级^[22]。从中药“种质”内涵的遗传物质角度,围绕国家中药种质资源库开展资源保护研究的 4 个核心环节,即资源收集、保存、创新与综合评价,分析了基因组学在其中的应用原理与技术等^[23]。

2.1.3 构建覆盖全国的中药资源动态检测信息和技术服务体系 在开展第四次全国中药资源普查工作的同时,建成包含 1 个中心平台为核心、28 个省级中心、65 个监测站的中药资源动态检测信息和技术服务体系^[24],日常开展 190 种药材交易价格、交易量的信息上报和监测,初步形成了持续的动态监测能力。在全国 31 个省(市、自治区)建设了药用植物重点物种保存圃,建成 28 个中药材种子种苗繁育基地,总面积约 4667 hm²,可实现 120 种药材(包含珍稀濒危药材 28 种,道地药材 34 种,大宗常用药材 58 种)的种子种苗供应。在此基础上成立了全国中药材种子种苗科技联盟,建立了全国性的种子种苗经营公司,对提升我国中药材产业的良种化水平,推动我国中药资源产业的可持续发展奠定了坚实的基础。

2.2 中药材生产步入重视道地性、推行生态化发展新阶段

自 1998 年我国起草并实施 GAP 以来,截至 2016 年 2 月,我国已有 129 家企业 167 种中药材通过国家药品监督管理局的 GAP 认证^[25]。2016 年 2 月 15 日,国家食品药品监督管理总局(CFDA)官网消息显示,国务院印发《关于取消 13 项国务院部门行政许可事项的决定》(国发【2016】10 号),国家药品监督管理局将 GAP 认证事权下放至今。随着 2017 年《中华人民共和国中医药法》颁布实施,国家农业农村部、国家林草局等部门大力倡导和推进发展道地药材生产、中药材生态种植系列工作^[26]。作为提升药材品质的重要抓手,应用生态系统的整体、协调、循环、再生原理,结合系统工程方法设计,综合考虑社会、经济和生态效益,充分应用能量的多级利用和物质的循环再生,实现生态与经济良性循环的生态农业种植方式^[27]。

2.2.1 道地药材科技创新与平台建设引领中药资源事业高质量发展 依托中国中医科学院创建的“道地药材国家重点实验室”培育基地是我国第一个聚

焦道地药材研究的国家级科技创新平台。该实验室在黄璐琦院士引领下以道地药材可持续利用与发展为主轴,紧密围绕道地药材基础理论与成果转化应用开展研究,凝练形成道地药材鉴别与评价、生态遗传规律及形成机制、保护模式 3 个研究方向,开展了道地药材鉴别与质量评价、有效成分合成途径解析与合成生物学、分子谱系地理学、生态种植等相关基础理论与关键技术研究。揭示了天麻与蜜环菌的共生机制等一批科学问题,取得了国家科技进步二等奖为代表的一批标志性成果。依托成都中医药大学建设的省部共建西南特色中药资源国家重点实验室于被科技部正式批准,标志着道地药材研究日益受到政府和地方的高度重视和大力支持。

围绕道地药材形成过程中遗传成因、环境成因、物质基础和中药道地性与其药效相关性 4 大关键科学问题,在生物学、生态学、化学、药理学和医学等多个层面,结合现代科学研究方法开展多学科交叉研究,从揭示中药道地性成因入手,明确中药材道地性的遗传、环境及其交互作用机制,阐释道地药材临床优效性的独特化学成分形成机理,揭示中药材道地性的物质基础及其形成的科学内涵。

自 2017 年 12 月,首个中药材国际标准《ISO 20409: 2017 中医药—三七药材》发布后,陆续有《ISO 21315: 2018 中医药-灵芝》《ISO 21370: 2019 中医药-铁皮石斛》《ISO 22584: 2019 中医药-当归药材》等国际标准获批准发布。由中国中医科学院中药资源中心牵头组织全国 40 多家科研院所、高校及企业共同起草完成了 157 项《道地药材》团体标准,并于 2020 年 10 月“全国中药材大会”期间正式发布。

2.2.2 生态种植已成为提升药材品质和产业绿色发展的重要抓手与模式 基于全国 8 大生态区域形成的药材生态种植模式,诸如东北地区的人参林下种植模式、华北地区的连翘仿野生种植模式、华东地区的浙贝母-水稻轮作栽培模式、华中地区的黄精林下仿野生种植模式、华南地区的阳春砂林下种植模式、西南地区的川芎-水稻水旱轮作模式、西北地区的甘草野生抚育种植模式以及青藏地区唐古特大黄仿野生种植模式等^[28]。京津冀地区形成了以黄芩、金莲花、连翘、酸枣仁等道地药材品种为主,中药材生态观光模式、立体种养殖模式和野生抚育模式为特色的中药材生态种植产业^[29]。此外,探讨黄柏间套作药用植物种植模式^[30]、金钗石斛拟境栽培技

术、天麻种植生产的生态循环利用模式^[31]、霍山石斛拟境栽培模式^[32]、经济林下白及-食用菌生态轮作,以及半夏的一种多收生态种植模式、重楼林下种植模式、黄芪-马铃薯-畜牧业生态种养模式、西红花-水稻水旱轮作模式等^[5]。这些宝贵的探索发现和总结,必将为全国发展道地药材和推广拟生态种植和养殖生产高品质绿色有机药材提供示范和借鉴。

通过各地中药资源人不断探索尚形成了多种因地制宜拟生态种植模式。例如,药-粮间套作种植模式、药-粮(水-旱)轮作种植模式、林-药套种共生生产模式、野生抚育-人工种植结合模式、景观-生态种植模式等。

2.2.3 中药资源保护与可持续发展已成为国家发展战略 中药资源保护是中医药事业健康可持续发展的根本问题。因此,加强对中药资源的保护与合理利用,促进中药资源的可持续发展具有重大的战略意义。中药资源保护是一项系统工程,通过完善相关法律法规、行政管理、技术措施、经济措施等各方面协调统一,才能更好地实现中药资源保护和中医药产业的健康可持续发展。

目前已形成一系列应对之策^[33-34]:积极开展依赖于野生资源的中药资源专项调查,摸清其资源蕴藏量,揭示其导致种群衰退的生态因素和人为干预,提出恢复种群和修复环境的有效策略;通过对活体生物种群的就地或迁地保护,提供良好的生态生活条件,切实有效的加强珍稀濒危药用植物、药用动物种质资源保护;采取积极的寻找替代和资源补偿策略,聚焦药用价值大、资源供给难的中药材品种,采用行之有效的多元化手段,切实解决保障供给问题;健全中药资源保护立法,协调处理好资源保护与利用的关系,实现保护中药资源的生物多样性、保持生态平衡和保护药用生物赖以生存发展的环境等;加强野生中药资源产业的保护与利用规划,因地制宜制定合理的封采结合、轮采轮育、抚育更新科学机制,禁止滥采滥挖、破坏野生药用植物生长环境等。

也提出了对中药资源迁地保护现状进行分析发现^[35-36],中药资源保护方式涉及就地保护和迁地保护,并提出构建包括中药资源引种园、中药资源离体保存库和中药资源生物信息共享平台为一体的全国中药资源迁地保护体系,合理布局中药资源迁地保护机构,对接迁地保护与中药材品种选育,培育

中药材种子种苗市场等建议。

中药材种子种苗繁育技术和规模不断提升。培育质量优良的种子是实现中药材优质高产的重要保障,目前我国中药材种业处于培育发展的初级阶段,随着中药材种植面积大幅增长,种子种苗需求量也不断增加,因此发展前景十分广阔^[37],优良种质选择影响中药材品质和产量的关键因素。分子标记辅助育种技术是培育中药材优良种质的重要方法之一,在中药材分子标记辅助育种研究中主要采用 DNA 分子标记为 SCoT、ISSR、SSR、SNP 等,其育种的主要目标是使中药材的生物学性状稳定、产量和药用成分可控,所生产的药材具有“优形、优质、优效”特征。近年来研究较为深入的品种有白木香、白术、石斛、丹参、桔梗、莪术、香附、伊贝母、珠子参、栀子等^[37]。

2.2.4 药用动物资源研究与珍稀动物药替代研究取得一定进展 动物药资源是我国中医药体系的重要组成部分,动物药在我国有着悠久的历史,由于其临床疗效显著,为历代医药学家推崇,为民族健康与发展做出了独特贡献。近年来动物药研究与开发备受中药产业的关注,其科学研究逐渐走向深入和系统。驯化养殖和类效物质替代是解决动物药资源供给的有效策略,是解决野生动物资源保护和用药需求矛盾的根本途径。人工养殖方面不仅已经实现养殖梅花鹿与马鹿生产鹿茸、养熊引流取胆汁生产熊胆粉、人工培植牛黄、养麝活体取香等实现产业化。蜈蚣、蟾蜍、水蛭、地鳖虫、地龙等药用动物的人工驯化养殖逐步满足临床和中药产业发展的需求^[38]。

动物类中药临床疗效独特,但基础研究薄弱。类效资源替代方面,人工牛黄、人工麝香已是成功的典范。揭示其功效物质基础与作用机制,是类效物质替代策略的关键环节,也是替代产品创制的基础和前提。围绕珍稀角类动物性药材的功效物质及其替代性研究取得了一定的进展。基于“物质基础-生物效应-体内过程”开展牦牛角、山羊角、水牛角替代羚羊角应用基础研究、基于活性肽组释放与类效性评价牦牛角、山羊角替代资源、基于蛋白质组的水牛角、山羊角替代羚羊角类效性研究、基于“蛋白质/肽组-修饰组”研究策略建立动物药质控新模式等,为珍稀动物药替代资源发现进行不懈地探索^[39-40]。

麋鹿的茸、角、血、肉、骨皆为我国传统珍贵中药,入药已逾千年^[41]。然而,世事变迁,随着麋

鹿资源在我国本土的消失而最终无药可用。近年来,麋鹿的引种和人工养殖获得了巨大成功,麋鹿大量繁育,其茸自然变角,继而自然脱落,麋鹿角的拾取量呈逐年递增趋势。研究发现^[42],麋鹿角可通过环磷酸腺苷(cAMP)和细胞外调节蛋白激酶(extracellular regulated protein kinases, ERK)依赖途径改善小鼠的抑郁样行为,增加小鼠原代星形胶质细胞神经营养因子的表达。

目前,动物类中药人工养殖过程缺少统一的技术操作规范,多以经验为主,导致动物药材质量的差异。据统计^[43],《中国药典》2015 年版一部收载 52 种动物药材涉及 106 种药用动物中仅有 22 种(除家畜家禽外)拥有现行选育、养殖相关标准,共 211 项,其中国家标准 7 项,行业标准 11 项(均为农业、水产生产标准),其余均为地方标准,其养殖目的多为食用,远远落后于同类型农业标准化进程,亟需对常见动物药材蟾酥、水蛭、全蝎等建立包括基础标准、产品标准、工艺过程标准、安全标准、环境保护标准、管理标准、工作标准在内的动物药材生产及产地加工技术标准体系,补充产业空白,从源头把控动物药材、动物类中药饮片及含有动物性成分中药产品质量。

2.2.5 药用矿物资源调查研究与基础研究不断深入 矿物药资源是中药资源的重要组成部分,其独特的疗效和深厚的应用历史,特别是在蒙、藏等民族医药体系中占有重要地位。在全国第四次中药资源普查过程中十分重视矿物药资源的调查工作,专门成立了由内蒙古民族大学牵头,依照行政区划设立若干子课题,建立了适宜的调查方法和技术,联合多家高等院校、科研院所等对全国矿物药资源进行了较为系统调查,基本摸清了我国矿物药资源种类及分布概况。

通过文献研究与实地调查,证实江苏药用矿物资源种类近 70 种^[44]。构建了药用矿物资源适宜的调查方法^[45],分别规范了药用矿物资源调查目标、任务、调查方法、技术要点等,为充分挖掘江苏省药用矿产资源的药用价值和和发展地质经济做出了示范性贡献。

近年来,矿物药研究已从本草研究逐步深入到采用现代分析检测技术手段矿种鉴定、炮制加工、质量控制及药效物质及作用机制研究等。例如偏光显微技术、电子探针技术、X-射线衍射技术、电感耦合等离子体-质谱、热分析技术等应用与药材生产

与品质评价过程。金属组学、代谢组学、蛋白组学等组学方法应用于矿物药物物质基础与作用机制研究。

2.3 中药资源化学与资源循环利用研究取得阶段性成果

针对中药资源生产与利用过程中的关键问题：如何从源头保证中药制剂原料及中间体的质量稳定可控？如何有效提高药用生物资源的利用效率？基于中药资源化学研究思路和方法，持续开展不同生态环境、不同采收时期、不同加工方式等诸因素对中药材品质的影响研究依然是中药资源研究领域的热点，发表论文数量居于该领域研究前列。对于如何提升中药资源利用效率和效益，近年来围绕中药资源全产业链废弃物及副产物的资源价值挖掘和多途径、精细化循环利用等方面取得了一系列代表性成果，为中药资源产业的提质增效和绿色发展做出了应有的贡献。

2.3.1 生态因子与药材品质形成关联机制研究方兴未艾 药材品质与生态环境关系密切，生态环境诸因子作为影响中药材品质的重要因素，历来受到中医药人的重视。生态气候因子通过影响药材生长发育及代谢进而影响药材中功效物质的生成与积累，从而影响其品质。近年来，对大宗常用中药品种西洋参^[46]、板蓝根^[47]、枸杞子^[48]、细辛^[49]等进行了生态诸因子对其药材品质的影响研究。

例如，基于遗传-化学-生态策略，运用转录组学技术、HPLC 技术，并进行西洋参转录组数据、人参皂苷含量及环境气候生态因子的相关性分析，结果为阐释西洋参 2 大生态型品质变异的形成机制提供了科学依据^[46]。研究结果显示，影响枸杞子适宜性分布的主要生态因子为土壤 pH、土壤亚类、植被类型和 8 月平均气温等 4 个生态因子，这与枸杞子喜干燥凉爽气候，较耐寒，耐干旱、耐碱性土壤，适宜于分布在北温带平原的生活习性基本一致^[48]。通过建立可体现枸杞子多元功效物质特征与品质评价的方法技术，用于区分药用与食用枸杞子的质量标准建立，以引导我国不同产区枸杞产业各展优势、差异化发展，形成有序竞争。研究结果表明，药用枸杞子适宜区主要集中在宁夏、甘肃中部和西北部地区，其成因是独特的黄河流域生态条件有利于枸杞子功效物质的生成与积累。食用枸杞子适宜区主要分布在青海西北部、甘肃西北部 and 新疆部分地区，其成因是由于该地区高海拔、强辐射、长日照及昼夜温差大等生态条件，有利于单糖和寡聚糖的糖分

积累，高糖度适宜于食用和作为发酵工业原料^[50]。

通过实地采样全国板蓝根主产区 89 个样点信息，利用 Maxent 模型结合生态因子数据预测板蓝根全国生境适宜性分布，运用 R 语言建立药材指标成分含量与生态环境因子之间的关系模型，使用 ArcGIS 栅格计算方法对药材品质进行区划^[47]，结果表明影响板蓝根分布的主要生态因子为最干季节降雨量、年平均温度和最湿季节均温；适合板蓝根种植的地区主要集中在我国北部，其中新疆地区的板蓝根药效成分含量最高。

2.3.2 药材采收加工过程资源性化学成分动态变化规律逐步揭示 中药材适宜采收期、产地初加工方式是影响中药材品质的重要环节。近年来，相关研究品种不断增多、研究方法手段多样化，逐步阐明了药材采收和产地初加工过程成分变化规律以及与药材品质的相关性。经中国知网(CNKI)2016—2020 年间以“药材采收期”“药材加工”“动态变化”“干燥方法”为主题词进行检索，共检索到 198 篇文献，每年发表论文数量相当。其中，有关不同干燥方法、不同加工方法对药材品质影响的研究论文 147 篇，占比 74.24%；不同采收期对药材品质影响的研究论文 45 篇，占比 22.73%；其他（包括不同产地、不同品种、不同规格对药材品质的影响）6 篇。见图 3。

2.3.3 中药资源循环利用已成为中药产业提质增效与绿色发展的新动能 针对我国中药资源生产与深加工全产业链存在的资源利用效率低下、资源浪费严重、生态环境压力不断加剧等重大经济、社会和生态问题，在创新中药资源循环利用基本理论的基

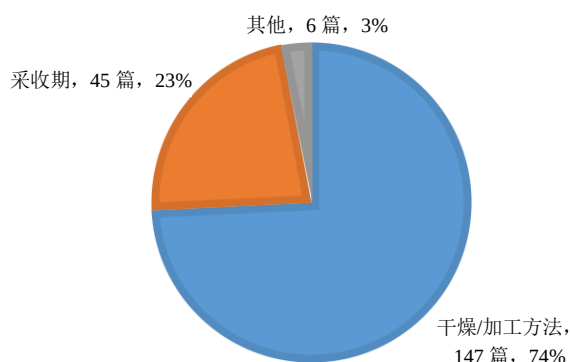


图 3 2016—2021 年药材采收加工与品质评价学术论文数量及趋势

Fig. 3 Number and trend of academic papers on harvesting, processing and quality evaluation of medicinal materials from 2016 to 2021

基础上,依据中药废弃物及副产物的独特理化特性与资源化潜力,集成生物转化、化学转化、物理转化等适宜技术,系统创建了 5 类中药资源循环利用模式,释放了产业新动能,推动中药产业向循环经济模式转变。将中药农业生产过程产生的非药用部位转化为新医药及健康产品原料等,形成多层次综合利用模式,实现了从源头节约资源、减少浪费,环境友好的目的^[14-15]。针对珍稀濒危的补益类中药肉苁蓉创建了濒危中药全产业链创新发展新模式^[51]。服务于我国中药资源全产业链的提质增效与绿色发展,为中药资源全产业链树立了“一增一减”的提质增效样板,引领我国中药产业绿色发展^[52]。课题组段金廛教授主持完成的“中药资源产业化过程循环利用模式与适宜技术体系创建及其推广应用”获得国家科技进步奖二等奖和中国循环经济协会科技创新一等奖。

(1) 药材生产过程传统非药用部位的资源价值发现研究呈现快速增长:通过 CNKI 检索 2016—2020 年间发表关于中药“非药用部位”“中药废弃物及副产物”等为检索主题词的论文,共检索 271 篇,论文发表数量呈递增趋势,尤其是近年来增长迅速,如图 4 所示。其研究较为系统深入或实现产业化的品种主要有人参茎叶、三七茎叶、黄芩茎叶、丹参茎叶、菊茎叶、山楂核等非药用部位的资源化利用与产业化开发。其涉及的资源化利用途径主要包括药用(新资源药材或医药产品)、食用(茶饮及保健食品)、栽培食用菌的原料以及肥料化利用等方面。

通过 CNKI 检索 2010—2021 年期间申请关于中药“非药用部位”“副产物”“茎叶”“地上部分”主题的知识产权,共检索 222 件,申请数量呈递增趋势,尤其是近年来增长较为迅速,如图 5 所示。其中发明专利 201 项、实用新型 21 项;研究数量较多

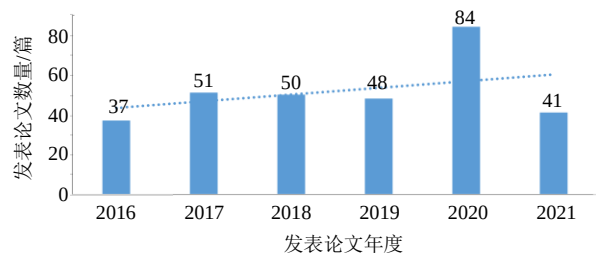


图 4 2016—2021 年中药非药用部位资源化利用学术论文数量及趋势

Fig. 4 Number and trend of academic papers on resource utilization of non-medicinal parts of TCM from 2016 to 2021

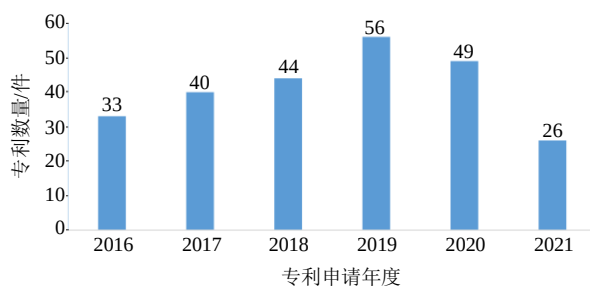


图 5 2016—2021 年申请中药生产过程副产物资源化利用相关专利数量及趋势

Fig. 5 Number and trend of applied patents related to resource utilization of by-products in TCM production process from 2016 to 2021

的品种主要有人参茎叶、西洋参茎叶、三七茎叶、黄芩茎叶、丹参(茎)叶、菊茎叶等非药用部位的资源化利用与产品研发相关的知识产权。专利申请主要内容涉及多元资源性化学成分及其提取制备方法、资源价值及利用途径、工艺标准研究及产品开发、实用新型(设备或装置)。

中药材生产过程传统非药用部位作为新药材资源原料的开发。将中药农业生产过程产生的非药用部位转化为新医药及健康产品原料等,形成多层次综合利用模式,实现了从源头节约资源、减少浪费,环境友好的目的。

研究发现,丹参茎叶酚酸类、黄酮类物质,具有显著改善心血管疾病和调节糖尿病并发心肌病变、糖尿病肾病及调节肠道微生态等生物活性^[53-56]。为实现丹参地上资源的开发利用,提升丹参资源利用率和效益,研究建立了丹参带花嫩茎叶药材质量标准,并作为新资源药材被收录于《陕西省药材标准》(2016 年版),为丹参茎叶资源化及产品开放奠定了坚实基础。

地黄叶已于 1988 年被正式收录于《北京市中药材标准》,其具有清热活血、补气养阴、补肾的功效。地黄叶总苷主要活性成分是从地黄叶中提取的苯乙醇苷类,并已被开发为国家二类新药地黄叶总苷胶囊。研究表明,地黄叶总苷可通过增加肾小球通透性并减少肾小球超滤,从而减少蛋白尿的产生和改善肾功能损伤^[57-59]。地黄叶总苷为地黄叶中提取的苯乙醇苷类成分,其中毛蕊花糖苷为其主要成分。毛蕊花糖苷已被证明可能通过抗氧化、清除活性氧和对谷胱甘肽转移酶(glutathione transferase, GST)活性诱导的作用,促进皮肤修复和改善皮肤炎症。

兴安升麻地上部分具有良好的细胞毒性、抗肿瘤

和自由基清除能力等活性,与其根茎部分具有相似的生物功能,从其地上部分的正丁醇萃取物中分离得到 11 个化合物,其中降倍半萜苷类 4 个、色原酮类 3 个、苯乙醇类 2 个、醌类 1 个以及酚酸类 1 个^[60]。

中药材生产过程传统非药用部位作为茶饮及保健食品新资源原料的开发。例如,黄芪花中中性多糖和酸性多糖的质量分数基本相近,分别为 (23.24 ± 1.98) 、 (23.68 ± 0.57) mg/g,具有免疫调节、抗衰老等作用,在食品工业中可作为功能性甜味剂,适用于糖尿病患者^[61]。针对宁夏枸杞叶、枸杞花等开展了较为系统的化学成分分析评价,研究发现枸杞叶富含甜菜碱、枸杞色素、黄酮类、亚脲胺类、糖类成分及氨基酸、核苷类成分等,其中,糖类包括多糖、果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖等,总糖含量可达 40%^[62]。生物活性评价表明,枸杞叶具有显著的抗氧化、神经保护以及通过胰岛素受体转导通路以及花生四烯酸代谢通路改善 2 型糖尿病大鼠血糖水平等作用^[63];枸杞花还具有抗氧化及神经保护活性等^[63]。这些研究结果将为枸杞资源的系统利用和产业化开发提供有益的借鉴^[64]。

研究表明,大枣及酸枣叶中富含三萜皂苷类资源性化学成分,该类成分能够抑制葡萄糖、果糖、甜菊苷、甘氨酸、糖精钠、阿斯巴甜、柚苷、二氢查耳酮所产生的甜味,改善食品甜腻味感。大枣果皮富含红色色素物质,其色泽鲜艳,经提取分离后可制备天然红色素。酸枣果肉副产物主要含有葡萄糖、果糖等糖类,以及小分子有机酸类、五环三萜类等资源性化学成分。酸枣果肉可制备果酒、果醋等饮品以及枣果葡糖浆、多糖铁络合物及用作天然矫味剂。此外,酸枣果皮及果肉中存在大量的纤维素,可用于制作酸枣膳食纤维。酸枣、大枣核壳可经干馏或酸解制备活性炭、糠醛、木糖等医药化工原料等^[65-67]。

目前,以生产瓜蒌子为目的的栝楼生产面积近百万亩,产地加工过程中产生大量的果瓢和果皮,造成严重的资源浪费和生态环境污染,引起社会的普遍关注。分析表明,瓜蒌瓢中果糖约 20%,葡萄糖约 30%,果葡糖浆发酵性能好,用于酵母发酵的食品加工方面优于蔗糖,同时富集获得天然叶黄素和玉米黄质及其衍生物等^[68-69]。

中药材生产过程传统非药用部位作为功能性饲料添加剂新资源原料的开发。以往的动物饲养过程不可避免的需要使用抗菌素,造成了抗菌素在畜禽-人群-环境中的传播与蓄积,导致系统性健康损害,

引起社会的极大关注。令人欣慰的是,《中华人民共和国农业农村部 194 号公告》发布,自 2020 年 1 月 1 日起,退出除中药外的所有生长类药物饲料添加剂品种^[70]。由此源于中药资源的中兽药和饲料添加剂成为替抗减抗、解决肉类食品安全的必然选择。在此背景下,我国畜牧养殖业对饲用替抗产品有着重大需求,饲用植物提取物及其开发的产品应运而生。基于博落回植物良好的生物活性,目前已开发以血根碱、白屈菜红碱为主要有效成分的博落回散和以原阿片碱、别隐品碱为主要有效成分的博普总碱散 2 个二类新兽药,分别用于促生长和治疗鸡大肠杆菌病引起的腹泻^[71]。

研究发现,黄芩茎叶对金黄色葡萄球菌、痢疾杆菌具有较强的抑菌作用,最小抑菌浓度分别为 1、4 mg/mL,且对金黄色葡萄球菌致小鼠细菌性炎症的多脏器损伤、脂多糖致小鼠全身性炎症损伤、葡聚糖硫酸酯致小鼠炎症性肠病模型均具有较好的防治作用。黄芩茎叶与忍冬藤联合应用对金黄色葡萄球菌致乳腺炎小鼠具有抑菌抗炎、保护乳腺组织作用,且两药合作用大于单药应用^[72-73]。研究结果提示,黄芩药材生产过程产生的茎叶非药用部位具有确切的抑菌抗炎作用^[74-75],有望作为具有预防菌群感染功能的饲用抗生素替代产品,用于畜禽养殖过程健康维护和提高产品风味及品质。

针对菊花采收过程中其非药用部位茎叶及根被丢弃为废弃物,仅有极少数的菊花茎叶被用作畜禽的饲料。研究表明,菊非药用部位所含有的活性成分及其药理作用与花序极为相似,具有显著的生物活性^[76-77]。菊茎叶中含有丰富的总黄酮、总酚、可溶性总多糖、果糖和葡萄糖等资源性化学成分,为系统利用我国近 34 000 hm² 的菊花产业提质增效和绿色发展提供了科学指引^[78]。

中药材生产过程传统非药用部位作为食用菌和药用菌基质材料的开发。例如,黄蜀葵茎秆、大黄茎秆、枸杞枝条、大枣果核等非药用部位具有丰富的碳源和氮源,粗蛋白含量高,粗纤维含量适中,能为药用和食用菌的生长提供相对平衡的营养成分,且生产的灵芝其药用成分和药用功效较常规原料菌材培育产品更具健康价值和特色优势^[79]。据此表明,在药材生产过程中产生的大量传统非药用部位的茎秆、枝条等木质化和纤维性强的下脚料,均具有拓展开发用作培育药用或食用菌物资源的潜力。

(2) 中药资源深加工过程废弃物及副产物的资

资源化利用逐步推进:针对中药提取物及中药制药等资源性产品制造过程中产生大量的固体废物及废水的资源化利用,建立了固体废弃物中资源性化学成分的现代分析集成技术、色谱分离富集技术、膜分离技术、糖化技术等,对银杏、丹参、人参、麦冬、枣等废渣中的黄酮类、丹参酮类、皂苷类、异黄酮类、三萜类、多糖类成分等可利用物质进行高效富集与制备。

例如,基于以单一药材有效部位利用的银杏内酯注射液生产过程中产生的废弃银杏叶药渣,对其中所含有的黄酮类、聚戊烯醇类等资源性化学物质进行回收利用^[80]。从提取甘草酸后的甘草渣中含甘草多糖 7.89%,甘草药渣经酶解后甘草总黄酮提取率明显升高。对甘草药渣降解菌的筛选以及对菌株的产酶工艺研究,旨在为合理利用甘草药渣以及生产成本低廉、性能优良的纤维素酶奠定基础^[81]。

丹参类注射液、丹参配方颗粒等制备过程主要采用水提醇沉工艺,致使脂溶性成分丹参酮类残留在药渣中未得到充分利用,导致丹参资源性化学物质的浪费^[82]。以丹参药渣为原料可制备获得高纯度的总丹参酮,可作为医药原料、化工原料或日化用品原料等。剩余固体废物再经产酶发酵、酶解糖化,转化形成纤维素酶、低聚糖、生物乙醇等资源性产品。同时,尚从丹参水提醇沉工艺的沉淀物中分离制备出高品质的水苏糖,作为医药和食品加工原料^[83-84]。由此延伸了丹参资源经济产业链,实现其产业化过程的提质增效与绿色发展。

中药复方固体废弃物的资源化利用是中药工业绿色发展的重大瓶颈。通过对丹红注射液生产过程产生的固体废物分析表明,丹参药渣中丹参酮类成分几乎未被有效转移利用,同时药渣中丹酚酸 A、原儿茶醛的含量却值得关注和加以利用。生脉注射液生产过程五味子药渣中富含木脂素类成分,五味子醇甲的提取利用率仅为 20.84%、五味子醇乙几乎未被利用而残留于药渣中;五味子甲素、五味子乙素、五味子丙素和五味子酯甲在药渣中的含量呈现出略高于原药材中的含量。五味子药渣中总蛋白质含量为 14.69%、中性多糖含量为 3.82%、酸性多糖的含量为 1.31%、粗纤维素类成分含量为 43.80%^[85]。以热毒宁注射液生产过程产生的栀子药渣、青蒿药渣、金银花药渣、以及醇沉物为研究对象,对其资源性化学物质、循环利用及其产业化进行研究,以创新资源价值,提升资源利用效率和实现绿色产业发展。

中药资源深加工过程中产生的废水具有组成不

稳定、有机污染物种类多,属于较难处理的高浓度有机废水之一。因此,中药产业化过程废水的资源化循环利用是综合防治水污染、净化水环境的重要研究内容。基于清洁生产的“一级处理-用于药效组分回收的二级处理-三级处理”的资源化循环利用基本思路,结合中药制药废水膜法处理研究中的应用实践,提出膜法“零排放”技术方案及其实现路径^[86]。以脉络宁生产废水为例,其废水中有大量如 β -蜕皮甾酮、绿原酸等药效物质^[87],研究发现中空纤维膜对这些小分子物质具有良好的渗透率,并对共性大分子有优良的截留效果,是一种可持续的、绿色资源化利用方式^[88]。

(3) 基于生物或化学转化方法创新,实现资源性物质的转化或提高目标产物收率:基于化学或生物(微生物、酶法等)方式,促进中药资源性化学物质的高效生成转化,可达到提质增效、促进资源利用的目的。丹酚酸 A 比丹酚酸 B 具有更高的药理活性,但丹参中丹酚酸 A 的含量较低。研究发现往丹参药材粗粉中加入磷酸缓冲液(液料比为 12:1, pH 6.0),于 140 °C 下加热 4 h 时,丹酚酸 B 可降解转化为丹酚酸 A,摩尔转化率达到 53.7%。从而提供了一种从丹参药材中直接制备丹酚酸 A 的方法^[89]。

甘草酸是来自于甘草的天然甜味剂,研究发现单葡萄糖醛酸甘草次酸的甜度约是甘草酸的 5 倍,甜度高且甜味的持久性长。利用猪小肠 β -葡萄糖醛酸苷酶对甘草酸生成单葡萄糖醛酸甘草次酸的工艺条件进行优化,发现在底物与酶的体积比为 4:1、反应温度 55 °C、反应时间 10 h 的反应条件下,最终可实现 58% 的单葡萄糖醛酸甘草次酸生成率^[90]。

市售原人参二醇型皂苷(PPD)中含有人参皂苷 Rb₁、Rd、Rb₂、Rc 和 4 种异构体的人参皂苷 Rg₃ 组,可利用 *Aspergillus* g.848 菌的粗酶进行酶促转化反应制备稀有人参皂苷 C-K、C-Mc、F₂ 单体和 4 种异构体的人参皂苷 Rh₂ 组皂苷。在 pH 5.0 的醋酸缓冲液-甲醇溶液中,45 °C 条件下反应时间为 1.5~2.0 h 时,产物以人参皂苷 F₂ 为主;反应时间为 24.0~30.0 h 时,产物以人参皂苷 C-K 为主;反应时间为 6.0~12.0 h 时,产物以人参皂苷 Rh₂ 组为主^[91]。

基于对桔梗中桔梗皂苷的酶促转化进行研究,发现来自黑曲霉的耐酸果胶酶,即细胞裂解酶 PCL5 分别在 12 h 内和 15 h 内将桔梗皂苷 E 和聚半乳糖苷 D₃ 转化为脱脂木糖桔梗皂苷 D 和脱脂木糖聚半乳糖苷 D,转化率分别达到 51.70、49.95 mg/L^[92]。

基于对桔梗中桔梗皂苷 E 和桔梗皂苷 D₃ 转化为桔梗皂苷 PD 进行研究,发现在 pH 5.5、温度 80 ℃、酶浓度 0.5 mg/mL 的条件下,利用 *Caldicellosiruptor Bescii* 产生的 β -葡萄糖苷酶能够将 1 mg/mL 的桔梗皂苷 E 和 0.04 mg/mL 的桔梗皂苷 D₃ 完全转化为 0.83 mg/mL 的桔梗皂苷 PD,摩尔产率为 100%,总产率为 361 mg/(L·h),比产率为 722 mg/(g·h)^[93]。桔梗提取液分别接种贝莱斯芽孢杆菌和库德里阿兹威毕赤酵母菌株进行发酵,发现发酵后的桔梗提取液中总黄酮(3.927、3.442 mg/mL)、总酚酸(5.871、5.709 mg/mL)的含量显著高于未发酵组(总黄酮 3.079 mg/mL、总酚酸 5.616 mg/mL),对 DPPH、羟自由基与超氧负离子清除能力显著提高,其中贝莱斯芽孢杆菌菌株发酵后的体外抗氧化能力最强^[94]。

基于食甲醇芽孢杆菌(J4-1)生物转化当归提取物对其挥发性成分的影响研究发现,当归提取物的挥发性香气物质中新生成了丁酸、香兰素、高香草醇等 28 种挥发性物质;糠醛、2,4-二甲基呋喃、辛醇、棕榈酸等挥发性成分相对含量有不同程度的提高;一些刺激性成分含量明显降低或消失^[95]。

3 展望

近些年来,随着现代科学技术进步的有利推动和大健康产业快速发展的强大牵引,我国中药资源领域的科学研究、学科建设、人才培养和产业化诸方面均得到了可喜的发展,为保障中医药事业可持续发展和国内外人口健康做出了应有的贡献。然而,面对日益增长的社会需求,保障中药资源的可持续供给和大健康产业的可持续发展,中药资源领域的政-产-学-研等相关方面尚需进一步凝心聚力开拓进取,进一步推动多学科交叉创新,以不断适应和满足健康中国的战略需要与高质量发展的历史机遇。

3.1 进一步推动中药资源学理论创新,服务于中医药事业和中药产业发展

中医药理论是中药资源学形成和发展的本源,中药资源学的创立是中医药事业可持续发展的必然需求。中药资源蕴含着丰富的科学性和社会性特征,具有经济性、生态性、系统性等开放性复杂科学内涵。通过多学科交叉创新,充分运用中医学、生态学、生物学、生物化学、生物工程、生物信息学等多学科知识,不断揭示和认知不同资源门类、多元资源价值、多维利用途径等,融合形成新的认识、新的理念、新的理论,不断丰富和发展中药资源学理论体系,服务于中医药事业和中药产业发展。

3.2 进一步加强中药资源领域的科学研究,服务于中药资源全产业链的高质量发展

中药资源领域的科学研究内容贯穿于中药资源生产与利用全过程。通过多学科交叉融合,进一步集成相关领域的现代科学技术与方法,服务于中药资源的科学生产与有效利用。中药资源循环利用和产业绿色发展已成为社会共识,整合科技创新诸要素,创建符合中药资源经济学理念和区域生态经济发展规划的特色经济小镇,不断为我国中药资源经济产业链的延伸、资源利用效率和经济效益的提升、资源性产品的品质提高等注入强劲动力,推动中药资源产业的提质增效和高质量发展。

3.3 进一步提升中药资源学学科建设水平,服务于中医药事业和中药产业对高层次人才的需求

随着中药资源作为国家战略资源地位越来越重要,以及以中药及天然药物资源为原料的资源产业链日益延伸,中药资源经济在国民经济和生物医药行业的地位日益凸显,国内外消费市场对于绿色产品的需求不断提高,该领域对专业人才需求日益高涨,必然要求中药资源学科建设应服务于该领域创新型、综合型高层次人才的培养,其主要内容仍集中于中药资源人才培养理念的更新与创新、中药资源人才培养教育教学改革、课程教材体系创新、新的教学模式、方法手段的应用等方面。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 程蒙, 杨光, 李颖, 等. 《中国中药资源发展报告》简述 [J]. 中国食品药品监管, 2020(1): 4-11.
- [2] 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.
- [3] 段金廛, 宿树兰, 郭盛, 等. 2014—2015 年我国中药及天然药物资源研究进展与学科建设 [J]. 中国现代中药, 2016, 18(10): 1237-1252.
- [4] 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: 9-11.
- [5] 黄璐琦, 刘昌孝. 分子生药学 [M]. 第 3 版. 北京: 科学出版社, 2015: 12.
- [6] Liu J, Chen T, Zhang J, et al. Ginsenosides regulate adventitious root formation in *Panax ginseng* via a CLE45-WOX11 regulatory module. [J]. *J Experimental Botany*, 2020, 71(20): 6396-6407.
- [7] Ma Y, Cui G, Chen T, et al. Expansion within the CYP71D subfamily drives the heterocyclization of

- tanshinones synthesis in *Salvia miltiorrhiza* [J]. *Nature Communication*, 2021, 12(1): 685-696.
- [8] Zheng H, Jing L, Jiang X, et al. The ERF-VII transcription factor SmERF73 coordinately regulates tanshinone biosynthesis in response to stress elicitors in *Salvia miltiorrhiza* [J]. *New Phytologist*, 2021, 231: 1940-1955.
- [9] Tu L, Su P, Zhang Z, et al. Genome of *Tripterygium wilfordii* and identification of cytochrome P450 involved in triptolide biosynthesis. [J]. *Nature Communication*. 2020, 11(1): 971-972.
- [10] 郭兰萍, 康传志, 周涛, 等. 中药生态农业最新进展及展望 [J]. 中国中药杂志, 2021, 46(8): 1851-1857.
- [11] 黄林芳, 陈士林. 中药品质生态学: 一个新兴交叉学科 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 23(1): 1-11.
- [12] 繆剑华, 肖培根, 黄璐琦. 药用植物保育学 [M]. 北京: 科学出版社, 2017, 1-3.
- [13] 陈君, 丁万隆, 程惠珍. 药用植物保护学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2019, 3-5.
- [14] 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.
- [15] 段金廛, 唐志书, 吴启南, 等. 中药资源产业化过程循环利用适宜技术体系创建及其推广应用 [J]. 中国现代中药, 2019, 21(1): 20-28.
- [16] 程蒙, 杨光, 黄璐琦. 《中国中药资源发展报告(2019)》综述: 中药资源发展七十年历程与展望 [J]. 中国食品药品监管, 2021(3): 16-27.
- [17] 张小波, 王慧, 景志贤, 等. 基于全国中药资源普查(试点)阶段成果的中药资源种类丰富度空间差异性分布特征研究 [J]. 中国中药杂志, 2017, 42(22): 4314-4318.
- [18] 于江泳, 袁媛, 金艳, 等. 基于全国中药资源普查中药材质量基本数据研究思路 [J]. 中国现代中药, 2016, 18(11): 1386-1389.
- [19] 孙成忠, 郝振国, 朱寿东, 等. 地理信息技术在中药资源生产区划研究中的应用 [J]. 测绘通报, 2016(12): 96-99,123.
- [20] 赵军宁, 田兴军, 彭成, 等. 川产道地药材资源保障与高质量发展策略 [J]. 世界中医药, 2020, 15(2): 181-190.
- [21] 张然, 丰志培, 彭代银. “互联网+”信息技术与中药农业的协同融合研究 [J]. 中药材, 2018, 41(8): 1775-1779.
- [22] 张恬, 李军德, 程蒙, 等. 基于 GIS 的中药资源动态监测填报系统的设计与实现 [J]. 中国中药杂志, 2017, 42(22): 4306-4309.
- [23] 高继海, 周罗静, 钟洪金, 等. 基因组学技术在国家中药种质资源库建设中的应用 [J]. 中药与临床, 2021, 12(3): 1-3.
- [24] 张恬, 李军德, 程蒙, 等. 基于 GIS 的中药资源动态监测填报系统的设计与实现 [J]. 中国中药杂志, 2017, 42(22): 4306-4309.
- [25] 杨光, 郭兰萍, 周修腾, 等. 中药材规范化种植(GAP)几个关键问题商榷 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41(7): 1173-1177.
- [26] 郭兰萍, 吕朝耕, 王红阳, 等. 中药生态农业与几种相关现代农业及 GAP 的关系 [J]. 中国现代中药, 2018, 20(10): 1179-1188.
- [27] 郭兰萍, 王铁霖, 杨婉珍, 等. 生态农业: 中药农业的必由之路 [J]. 中国中药杂志, 2017, 42(2): 231-238.
- [28] 康传志, 吕朝耕, 黄璐琦, 等. 基于区域分布的常见中药材生态种植模式 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(9): 1982-1989.
- [29] 王浩, 尚兴朴, 李鹏英, 等. 京津冀地区中药材生态种植现状调查分析 [J]. 中国现代中药, 2019, 21(11): 1524-1528.
- [30] 王艳红, 周涛, 郭兰萍, 等. 以生态农业指导理论为基础探讨黄柏间套作药用植物种植模式分析 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(9): 2046-2049.
- [31] 张进强, 周涛, 江维克, 等. 天麻种植生产的生态循环利用模式分析 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(9): 2036-2041.
- [32] 易善勇, 康传志, 王威, 等. 霍山石斛种植模式比较及拟境栽培的优势分析 [J]. 中国中药杂志, 2021, 46(8): 1864-1868.
- [33] 林义平, 田斌, 瞿孝兰, 等. 中药资源可持续发展现状分析及对策 [J]. 中药与临床, 2019, 10(Z2): 1-3,7.
- [34] 张立东, 贡济宇. 中药资源保护与可持续再利用 [J]. 世界最新医学信息文摘, 2016, 16(18): 203-204.
- [35] 权珍妮, 王东, 杨欢, 等. “健康中国”视角下的中药资源的法律保护探讨 [J]. 生物资源, 2019, 41(1): 82-86.
- [36] 阙灵, 杨光, 繆剑华, 等. 中药资源迁地保护的现状及展望 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41(20): 3703-3708.
- [37] 金钺, 杨成民, 魏建和. 国家药用植物种质资源库中期库贮存 7 种药用植物种子生活力监测 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41(9): 1592-1595.
- [38] 赵润怀, 贾海彬, 周永红, 等. 我国动物药资源供给现状及可持续发展的思考 [J]. 中国现代中药, 2020, 22(6): 835-839.
- [39] 杜延佳, 李志成, 刘侗, 等. 药用动物的养殖与可持续利用 [J]. 吉林中医药, 2017, 37(10): 1018-1021.
- [40] 李晶峰, 张辉, 孙佳明, 等. 我国药用动物资源近三年研究进展与展望 [J]. 中国现代中药, 2017, 19(5): 729-734.
- [41] 朱悦, 赵明, 钱大玮, 等. 麋鹿资源古代利用状况与现代研究进展 [J]. 中国现代中药, 2019, 21(9): 1157-1168.
- [42] Zhu Y, Liu M Q, Qu S C, et al. *Elaphuri davidiani Cornu*

- improves depressive-like behavior in mice and increases neurotrophic factor expression in mouse primary astrocytes via cAMP and ERK-dependent pathways [J]. *Front Pharmacol*, 2020, 11: 593993.
- [43] 张恬, 郭宇博, 李军德. 动物药材生产及产地加工技术标准体系建设 [J]. 中草药, 2019, 50(18): 4490-4494.
- [44] 刘圣金, 严辉, 段金廛, 等. 江苏药用矿物资源种类分布及其利用现状与展望 [J]. 中草药, 2020, 51(6): 1628-1640.
- [45] 严辉, 刘圣金, 张小波, 等. 我国药用矿物资源调查方法的探索与建议 [J]. 中国现代中药, 2019, 21(10): 1293-1299.
- [46] 孙晓, 钱秋玉, 郑司浩, 等. 基于遗传-化学-生态特征西洋参品质生态型研究 [J]. 药学报, 2019, 54(9): 1695-1705.
- [47] 赵文龙, 晋玲, 王惠珍, 等. 板蓝根药材品质区划研究 [J]. 中国中药杂志, 2017, 42(22): 4414-4418.
- [48] 王汉卿, 王庆, 马玲, 等. 枸杞子药材生产区划研究 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41(17): 3127-3131.
- [49] 沈亮, 吴杰, 李西文. 北细辛全球产地生态适宜性分析及品质生态学研究 [J]. 世界科学技术—中医药现代化, 2016, 18(8): 1295-1302.
- [50] 卢有媛, 郭盛, 严辉, 等. 生态因子与化学成分相关联的药用和食用枸杞子适宜生产区划研究 [J]. 药学报, 2020, 55(10): 2466-2477.
- [51] 屠鹏飞, 姜勇, 郭玉海, 等. 肉苁蓉全产业链发展模式的创建与应用 [J]. 中国现代中药, 2021, 23(3): 395-400.
- [52] 杨毅, 田侃, 田虹. 循环经济视角下中药资源外源性污染问题研究 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41(15): 2938-2941.
- [53] Peng K Y, Gu J F, Su S L, *et al.* *Salvia miltiorrhiza* stems and leaves total phenolic acids combination with tanshinone protect against DSS-induced ulcerative colitis through inhibiting TLR4/PI3K/AKT/mTOR signaling pathway in mice [J]. *J Ethnopharmacol*, 2021, 264: 113052.
- [54] 徐卓, 项想, 尚尔鑫, 等. 丹参茎叶总酚酸对 2 型糖尿病肾病小鼠肠道菌群和短链脂肪酸的调节作用 [J]. 药学报, 2021, 56(4): 1035-1048.
- [55] Sun C J, Su S L, Zhu Y, *et al.* *Salvia miltiorrhiza* stem-leaf active components of salvianolic acids and flavonoids improved the hemorheological disorder and vascular endothelial function on microcirculation dysfunction rats [J]. *Phytother Res*, 2020, 34(7): 1704-1720.
- [56] Xiang X, Cai H D, Su S L, *et al.* *Salvia miltiorrhiza* protects against diabetic nephropathy through metabolome regulation and wnt/ β -catenin and TGF- β signaling inhibition [J]. *Pharmacol Res*, 2019, 139: 26-40.
- [57] 戴新新, 蔡红蝶, 宿树兰, 等. 地黄叶对糖尿病肾病大鼠肠道菌群的调节作用 [J]. 药学报, 2017, 52(11): 1683-1691.
- [58] Xu Z, Dai X X, Zhang Q Y, *et al.* Protective effects and mechanisms of *Rehmannia glutinosa* leaves total glycoside on early kidney injury in db/db mice [J]. *Biomedicine Pharmacother*, 2020, 125: 109926.
- [59] Dai X X, Su S L, Cai H D, *et al.* Protective effects of total glycoside from *Rehmannia glutinosa* leaves on diabetic nephropathy rats via regulating the metabolic profiling and modulating the TGF- β 1 and wnt/ β -catenin signaling pathway [J]. *Front Pharmacol*, 2018, 9: 1012.
- [60] 郝依萌, 罗文, 姜冠泽, 等. 兴安升麻地上部分正丁醇萃取物化学成分分离与鉴定 [J]. 沈阳药科大学学报, 2019, 36(6): 482-486, 491.
- [61] 李园, 常相伟, 朱邵晴, 等. 黄芪花营养成分分析与资源价值评价 [J]. 中草药, 2018, 49(18): 4408-4416.
- [62] 赵雪琴. 宁夏枸杞叶及花的资源化学研究 [D]. 南京: 南京中医药大学, 2020.
- [63] Zhao X Q, Guo S, Yan H, *et al.* Analysis of phenolic acids and flavonoids in leaves of *Lycium barbarum* from different habitats by ultra-high-performance liquid chromatography coupled with triple quadrupole tandem mass spectrometry [J]. *Biomed Chromatogr*, 2019, 33(8): e4552.
- [64] 卢有媛, 郭盛, 张芳, 等. 枸杞属药用植物资源系统利用与产业化开发 [J]. 中国现代中药, 2019, 21(1): 29-36.
- [65] 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.
- [66] 刘世军, 王欢欢, 唐志书, 等. 大枣叶中甜味抑制剂的提取与纯化工艺 [J]. 中国食品添加剂, 2017(3): 74-79.
- [67] 施欢贤, 张严磊, 唐志书, 等. 酸枣核壳木糖制备工艺研究 [J]. 纤维素科学与技术, 2016, 24(1): 27-31.
- [68] 张黄琴, 刘培, 董玲, 等. 桔楼植物不同部位资源化利用策略与途径 [J]. 中国现代中药, 2019, 21(1): 45-53.
- [69] 李丹, 刘培, 张黄琴, 等. 不同产地不同品系瓜蒌皮中多类型资源性化学成分分析与品质评价研究 [J]. 南京中医药大学学报, 2020, 36(5): 607-614.
- [70] 刘凤华, 戴小枫, 段金廛, 等. 药食同源天然植物饲料原料与应用 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2021, 10.
- [71] 徐嘉欣, 刘梦婷, 张民达, 等. 博落回生物活性物质药理学研究进展 [J]. 饲料工业, 2021, 42(14): 59-64.
- [72] 赵明, 段金廛, 张森, 等. 基于中药资源产业化过程副

- 产物开发禽畜用药及饲料添加剂的策略与路径 [J]. 中国中药杂志, 2017, 42(18): 3628-3632.
- [73] 张琳. 黄芩茎叶抑菌抗炎活性及抗小鼠乳腺炎作用的研究 [D]. 南京: 南京中医药大学, 2019.
- [74] 严宝飞, 朱邵晴, 宿树兰, 等. 不同产地黄芩茎叶 UPLC 指纹图谱与化学模式识别研究 [J]. 南京中医药大学学报, 2017, 33(6): 633-638.
- [75] 严宝飞. 黄芩茎叶资源化学与新资源药材质量评价研究 [D]. 南京: 南京中医药大学, 2018.
- [76] 刘夏进, 李懿, 宿树兰, 等. 药用菊非药用部位的资源化利用现状与展望 [J]. 中草药, 2020, 51(15): 4075-4081.
- [77] 魏丹丹, 段金廛, 宿树兰, 等. 菊茎叶提取物改善肠功能失调的代谢组学研究 [J]. 中草药, 2019, 50(13): 3084-3093.
- [78] 魏丹丹, 常相伟, 郭盛, 等. 菊花及菊资源开发利用及资源价值发现策略 [J]. 中国现代中药, 2019, 21(1): 37-44.
- [79] 罗杨, 陈岗, 范俊安, 等. 桑枝、桔梗非药用部位培养基对银耳产量及营养安全性的影响 [J]. 食品研究与开发, 2021, 42(6): 12-16.
- [80] 闫精杨, 江曙, 刘培, 等. 银杏叶药渣中聚戊烯醇和总黄酮的综合提取工艺研究 [J]. 南京中医药大学学报, 2017, 33(1): 104-108.
- [81] 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): 125-131.
- [82] 戴新新, 沈飞, 宿树兰, 等. 丹参药渣中丹参酮类化学成分的综合提取富集研究及其利用途径分析 [J]. 中国现代中药, 2016, 18(12): 1578-1582.
- [83] 邱首哲. 以丹参等药渣为原料的产酶抗性菌株筛选及资源化利用 [D]. 南京: 南京中医药大学, 2020.
- [84] 邱首哲, 曾飞, 张森, 等. 丹参药渣等不同类型中药固废发酵产纤维素酶研究 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(4): 890-895.
- [85] 陶小芳, 沈飞, 宿树兰, 等. 生脉注射液生产过程五味子药渣中资源性物质的分析与循环利用途径探讨 [J]. 中草药, 2015, 46(18): 2712-2719.
- [86] 朱华旭, 唐志书, 段金廛, 等. 面向清洁生产的中药制药过程废水资源化循环利用基本思路及其关键技术 [J]. 中草药, 2017, 48(20): 4133-4138.
- [87] 聂林峰, 黄佳云, 何成华, 等. 膜技术富集脉络宁注射液生产废水中小分子药效成分的工艺优化研究 [J]. 中草药, 2019, 50(8): 1804-1810.
- [88] 李博, 李益群, 濮均文, 等. 基于资源化利用思路的陶瓷膜处理中药脉络宁生产废水的研究 [J]. 膜科学与技术, 2017, 37(6): 107-113.
- [89] 姜峰, 李飏, 张敏, 等. 丹参中丹酚酸 A 转化方法 [J]. 中成药, 2018, 40(9): 2091-2096.
- [90] 许怡. 酶转化法制备单葡萄糖醛酸甘草次酸 [D]. 天津: 天津科技大学, 2020.
- [91] 彭婕, 刘春莹, 陈双, 等. 原人参二醇类皂苷(PPD)在酶反应中转化动态及其产物稀有皂苷的制备 [J]. 中草药, 2017, 48(1): 85-94.
- [92] Shin K C, Kim D W, Woo H S, *et al.* Conversion of glycosylated platycoside E to deapirose-xylosylated platycodin D by cytolase PCL5 [J]. *Int J Mol Sci*, 2020, 21(4): E1207.
- [93] Kil T G, Kang S H, Kim T H, *et al.* Enzymatic biotransformation of balloon flower root saponins into bioactive platycodin D by deglycosylation with *Caldicellulosiruptor bescii* β -glucosidase [J]. *Int J Mol Sci*, 2019, 20(16): E3854.
- [94] 曾玲, 刘金熙, 朱爽, 等. 桔梗提取液经微生物发酵后抗氧化能力研究 [J]. 延边大学农学学报, 2020, 42(2): 7-13.
- [95] 罗诚浩, 陈义坤, 魏敏, 等. 生物转化对当归提取物挥发性成分的影响 [J]. 食品工业, 2017, 38(2): 307-310.

[责任编辑 王文倩]