基于可视化知识图谱分析人工智能赋能中药智能制造的研究现状和发展趋势

杨轶舜[1]，徐　鹏[2]，马丽亚[1]，康　萍[1*]，张　彤[1*]

1. 上海中医药大学，上海　201203
2. 华东理工大学 信息化与数据管理中心，上海　200237

摘　要：目的　基于文献计量学与可视化知识图谱，系统分析人工智能（artificial intelligence，AI）赋能中药智能制造的研究现状、热点和发展趋势，为后续研究提供参考。**方法**　检索中国知网、万方、维普、SinoMed、Web of Science 和 PubMed 等数据库中相关文献。经去重筛选后，用 VOSviewer 和 CiteSpace 软件对发文趋势、作者、机构、期刊、关键词等进行可视化分析。**结果**　共纳入中文文献 803 篇、英文文献 247 篇，整体发文量逐年上升。中英文文献发文量最多的作者分别为乔延江和 Ren Xiaoliang。中英文文献发文量最多的机构分别为北京中医药大学和天津中医药大学，各研究团队内部合作紧密，但团队间合作较少。发文量最多的中英文期刊分别为《中国中药杂志》和 *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*。当前研究热点主要为机器学习、深度学习、卷积神经网络等 AI 技术在中药识别、质量评价、工艺优化与质量控制等场景中的应用。技术路径经历了从“浅层模型＋单模态”到“深度学习＋多模态融合”的演进过程。**结论**　近年来 AI 赋能中药智能制造领域发展迅速，AI 已逐渐成为驱动中药智能制造转型升级的重要力量。未来需加强多模态数据建设与共享，推进可解释 AI 建模与全过程智能化，强化跨学科和跨团队合作，健全标准化监管体系，以推动中药工业高质量发展。

关键词：人工智能；中药；智能制造；CiteSpace；VOSviewer；知识图谱；文献计量学；可视化分析

中图分类号：R282　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0253 - 2670(2026)22 - 9048 - 17

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.22.019

Research status and development trends of artificial intelligence-empowered intelligent manufacturing of traditional Chinese medicine based on visualized knowledge graphs

YANG Yishun[1], XU Peng[2], MA Liya[1], KANG Ping[1], ZHANG Tong[1]

1. Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203, China
2. Informationization and Data Management Center, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

Abstract: Objective　To systematically analyze the current research landscape, hotspots, and development trends in the field of artificial intelligence (AI)-empowered intelligent manufacturing of traditional Chinese medicine (TCM) based on bibliometrics and visualized knowledge graphs, providing a reference for subsequent research in this field. **Methods**　Relevant articles were retrieved from the China National Knowledge Infrastructure (CNKI), Wanfang, VIP, SinoMed, Web of Science, and PubMed databases. After deduplication and screening, VOSviewer and CiteSpace software were employed for visual analysis of publication trends, authors, institutions, journals, keywords, etc. **Results**　A total of 803 Chinese literature and 247 English literature were included. Overall publication volume showed a year-on-year upward trend. The authors with the highest numbers of publications in the Chinese and English literature were Qiao Yanjiang and Ren Xiaoliang, respectively, while the institutions with the highest numbers of publications were Beijing University of Chinese Medicine and Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, respectively. Intra-team collaboration was close among individual research groups, whereas inter-team connections remained relatively limited. The Chinese

收稿日期：2026-06-23

基金项目：国家科技重大专项（2026ZD1806400）；上海市领军人才计划项目（SHLJ2019100）；上海中医药大学科技发展项目（标准化专项）（24BZH16）

作者简介：杨轶舜，博士，高级实验师，研究方向为中药制药与制剂技术。E-mail: becky105@163.com

***通信作者：**张　彤，博士，教授，研究方向为中药制药及中药分析技术。E-mail: zhangtdmj@hotmail.com

康　萍，硕士，副研究员，研究方向为中药制药技术分析及高教研究。E-mail: konnie1984@163.com

and English journals with the highest numbers of publications were the *China Journal of Chinese Materia Medica* and *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, respectively. The current research hotspots mainly lie in the application of AI technologies such as machine learning, deep learning, and convolutional neural network in scenarios such as the identification, quality evaluation, process optimization, and quality control of TCM. The technical path has undergone an evolution process from "shallow model + single modality" to "deep learning + multi-modal fusion". **Conclusion** In recent years, the field of AI-empowered intelligent manufacturing of TCM has developed rapidly, with AI progressively emerging as a core driving force behind the transformation and upgrading of TCM intelligent manufacturing. Future efforts should focus on strengthening multi-modality data construction and sharing, promoting explainable AI modeling and entire process intelligence, enhancing interdisciplinary and cross-team collaboration, and improving standardized supervision system, with the aim of advancing high-quality development of the TCM industry.

Key words: artificial intelligence; traditional Chinese medicine; intelligent manufacturing; CiteSpace; VOSviewer; knowledge graph; bibliometrics; visual analysis

中医药是中华文明的瑰宝，中药工业是中医药现代化发展的重要支撑。近年来，《中共中央 国务院关于促进中医药传承创新发展的意见》[1]、《"十四五"中医药科技创新专项规划》[2]、《中医药标准化行动计划（2024—2026 年）》[3]等政策的颁布，为中药生产的数字化、智能化与标准化提供了方向和助力。中药生产具有原料和过程较为复杂、工程机理模糊的特点，长期存在依据经验判断、过程可预测和可控性差、质量一致性较差等痛点[4]。人工智能、大数据、过程分析技术（process analytical technology，PAT）等技术的发展为中药产业由经验驱动向数据与模型驱动转型发展提供了新动力。"十五五"规划纲要提出"提升数智化发展水平"的规划，并明确要全面实施"人工智能＋"行动，全方位赋能千行百业[5]。人工智能已成为驱动经济社会转型的核心引擎。《关于促进和规范"人工智能＋医疗卫生"应用发展的实施意见》[6]中明确深化了"人工智能＋中医药"的重点应用方向，并提出了"加强中药全周期智能管理"和"推进中医药装备智能升级"等具体任务。

近年来，人工智能技术在中药智能制造中的应用逐渐成为研究热点。机器学习、深度学习、计算机视觉、大语言模型等人工智能技术被应用于中药材真伪鉴别、在线监测、工艺优化等方面[7]，在提升质量一致性、缩短工艺研发周期等方面显现出优势[8]。然而，人工智能赋能中药智能制造处于快速发展期，文献数量增长快，系统梳理该领域研究现状与发展趋势、研究其热点与演化路径有助于识别其中的瓶颈问题，明确未来攻关方向。文献计量学结合知识图谱可视化能够定量化呈现文献分布结构、合作关系与前沿热点的变化趋势。CiteSpace 和 VOSviewer 是常用的可视化工具，广泛应用于中医药等领域的热点趋势研究[9]。智能制造是基于先进制造技术与新一代信息技术深度融合，贯穿产品全生命周期，具有自感知、自决策、自执行、自适应、自学习等智能特征的先进生产方式，其标准体系涵盖智能装备、智能工厂和智慧供应链等关键技术[10]。《中药智能制造技术通则》[11]根据中药生产特点，提出推进药材质量评估、投料、提取和制剂等生产环节的自动化。相关中药产业政策强调提升中药制造数智化水平，尤其是生产、质控和检验等核心环节[12]，以及提升中药生产全过程质量控制能力[13]。据此，本研究聚焦于人工智能技术在中药生产制造全过程中的应用，以实现原料质量评估与控制、生产过程感知与监测、工艺优化、过程和产品质量预测与控制等环节的智能化，采用 VOSviewer 和 CiteSpace 软件对人工智能赋能中药智能制造相关中英文文献进行系统分析，总结该领域研究现状、热点和趋势，以期为人工智能在中药智能制造中的研究与应用提供参考。

1 资料与方法

1.1 数据来源与检索策略

中文文献来源于中国知网（CNKI）、万方（Wangfang）、维普（VIP）、SinoMed 数据库，英文文献来源于 Web of Science（WOS）核心合集和 PubMed 数据库。检索时段为建库至 2026 年 3 月 31 日。

检索策略由人工智能技术、中药研究对象、制造过程 3 组检索词构成，各组内部使用"OR"连接，组间使用"AND"连接，并根据不同数据库的字段设置和检索规则对检索式进行调整。中文检索策略为题名/关键词/摘要＝（"人工智能"OR"AI"OR"大语言模型"OR"机器学习"OR"深度学习"OR"图像识别"OR"神经网络"OR"强化学习"OR"自然语言处理"）AND（"中药"OR"中草药"OR"中成药"

OR“饮片”）AND（“智能制造”OR“数智”OR“数字化”OR“生产”OR“制造”OR“制药”OR“自动化”OR“工业”OR“产业”OR“质量控制”OR“工艺”OR“优化”OR“参数预测”OR“过程分析”OR“过程控制”OR“资源”OR“鉴定”OR“识别”OR“提取”OR“浓缩”OR“干燥”OR“炮制”）；文献类型限定为研究论文和综述，语种限定为中文。英文检索策略为主题/题名/摘要＝（“artificial intelligence”OR“AI”OR“large language model”OR“machine learning”OR“deep learning”OR“image recognition”OR“neural network”OR“reinforcement learning”OR“natural language processing”）AND（“Chinese medicine”OR“TCM”OR“Chinese herb”OR“Chinese herbal medicine”OR“Chinese materia medica”OR“Chinese medicinal materials”OR“decoction pieces”）AND（“intelligent manufacture*”OR“digital intelligence”OR“smart manufacture*”OR“production”OR“industr*”OR“industry 4.0”OR“digitalization”OR“manufacturing”OR“manufacture”OR“automation”OR“quality control”OR“process optimization”OR“parameter prediction”OR“process optimization”OR“process control”OR“process analysis”OR“identification”OR“extraction”OR“drying”OR“prepare”OR“processing”）；文献类型限定为 article 和 review，语种限定为英文。

1.2 纳入标准

（1）符合上述检索策略并正式发表的文献；（2）文献类型为期刊论文，包括综述、研究类文献等；（3）中文文献语种为中文，英文文献语种为英文；（4）文献主题应涉及人工智能技术在中药智能制造中的应用，包括中药质量属性智能辨识与评价，工艺优化以及生产过程分析、参数预测与控制等环节。

1.3 排除标准

（1）重复发表的文献；（2）会议摘要、专利、新闻报道、广告等类型文献；（3）作者、年份、期刊等题录信息缺失的文献；（4）与本研究主题无关的文献，包括药理机制、临床诊疗、临床决策、处方筛选与推荐等。

1.4 数据整理与筛选

将检索获得的文献题录信息导入 NoteExpress 4.1.0 软件，分别建立中英文数据库并进行去重。根据纳排标准人工筛选并剔除不符合要求的文献。中英文文献分别进行数据清洗，统一和规范作者、期刊、机构名称和关键词等字段，统一大小写、缩写、全称、拼写变体，并合并同义关键词等。最终纳入 803 篇中文文献和 247 篇英文文献，发表于 1989—2026 年。

1.5 数据分析

利用 NoteExpress 4.1.0 软件对文献数据进行管理，并进行频次统计。采用 Excel 2016 统计年度发文量并绘制发文趋势图。运用 VOSviewer 1.6.20 软件对作者合作关系和关键词共现网络进行可视化分析，参数设置：Type of analysis 为 co-authorship 或 co-occurrence；unit of analysis 为 authors 或 keywords；counting method 为 full counting；normalization method 为 association strength。采用 CiteSpace 6.4.R2 软件构建机构合作关系网络图、关键词聚类图谱、聚类时间线图和突现图谱，参数设置：time slicing 为 1989 年 1 月—2026 年 3 月；years per slice 为 2 年；term source 设为 title、abstract、author keywords；node types 分别选 institution 及 keyword 等作为分析维度；selection criteria 设定 Top N＝50，数据抽取阈值采用 g-index 算法，k＝15；网络裁剪方法使用 Pathfinder 算法。

2 结果与分析

2.1 年度发文量与发文趋势

本研究共检索到人工智能赋能中药智能制造相关文献 1 050 篇，其中中文文献 803 篇（占比 76.48%），英文文献 247 篇（占比 23.52%）。如图 1 所示，1989—2026 年该领域相关文献的年度发文量整体呈上升趋势。根据发文量趋势，该领域发展可分为 4 个阶段：（1）萌芽阶段（1989—2001 年），年均发文量仅 1.5 篇，研究主要为人工智能在中药质量属性智能辨识中的初步应用。该时期人工智能技术尚处于发展初期，受算力、数据和仪器等条件限制，发展较为缓慢。（2）传统机器学习应用阶段（2002—2011 年），年均发文量为 15.6 篇，较前一阶段明显增加。2002 年发布的《中药现代化发展纲要（2002 至 2010 年）》，将中药材和饮片、中成药的生产、工艺和质量控制研究作为重点任务，并指出扩大指纹图谱等检测方法的应用。人工智能技术逐渐与指纹图谱等检测方法结合，研究虽然停留于离线检测与优化的中药智能制造技术初级阶段[14]，但为中药质量评价和生产过程建模奠定了基础。（3）方法转型与应用拓展期（2012—2021 年），年均发文量增至 22.4 篇，呈波动上升趋势。2012 年 AlexNet 模型显著提高了深度学习的视觉识别能力[15]；2016

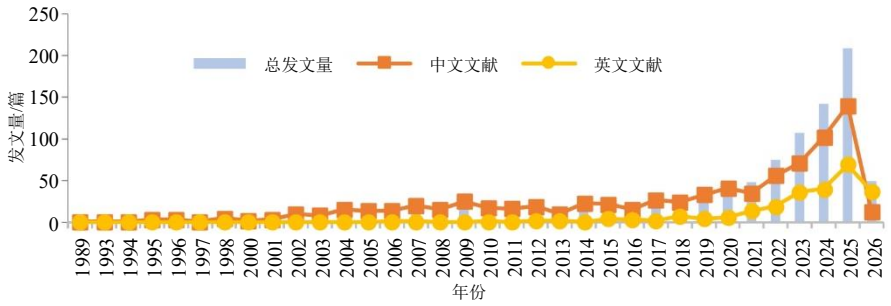


图 1　1989—2026 年相关文献年度发文量

Fig. 1　Annual publication volume of relevant literature from 1989 to 2026

年 AlphaGo 将深度神经网络、强化学习和蒙特卡洛树搜索结合起来，决策能力显著提高[16]。2015 年发布的《中国制造 2025》提出加快新一代信息技术与制造业深度融合，以推进智能制造为主攻方向；2016 年《中医药发展战略规划纲要（2016—2030 年）》提出推进中药工业智能化建设，提升中药装备制造水平，加速中药生产工艺及流程的标准化、现代化，推动中医药文化国际传播。在政策和技术发展的推动下，计算机视觉[17]和智能感知[18]研究开始出现并逐渐增加，研究范围也开始由离线检测向生产过程监测[19]和预测[20]等方面拓展。（4）2022—2026 年进入多技术融合期，发文量快速增长，共发文 582 篇，占纳入文献的 55.43%。2022 年底，ChatGPT 等生成式人工智能（generative artificial intelligence，GenAI）模型的出现显著提升了人工智能领域的社会关注度和产业投入，进一步推动了图形处理器（graphics processing unit，GPU）算力基础设施、人工智能算法以及模型架构的快速发展。《“十四五”中医药信息化发展规划》《关于促进数字中医药发展的若干意见》等相关政策相继发布，人工智能赋能中药智能制造领域已进入“政策驱动-技术突破-产业牵引”共同推动的高速发展期，研究进一步拓展至生产过程监测[21]与预测[22]，并开始向自主决策等过程控制方向发展[4]。尤其是 2025 年，在《医药工业数智化转型实施方案（2025—2030 年）》《关于促进和规范“人工智能＋医疗卫生”应用发展的实施意见》《“人工智能＋制造”专项行动实施意见》等多项政策促进下，该领域发文量达到峰值（209 篇）。

与中文文献相比，英文文献起步较晚，早期发文量很少，2006 年才开始出现零星的英文文献，2015 年前每年只有 1～2 篇，2015—2020 年每年仅 4.3 篇。《中医药“一带一路”发展规划（2016—2020 年）》（2016 年）、《推进中医药高质量融入共建“一带一路”发展规划（2021—2025 年）》（2021 年）提出提升中医药国际影响力、推动中医药文化国际传播、加强中医药领域国际科技合作。在此政策背景下，近年来英文文献发文量增长迅速，2021 年后每年发文量大于 10 篇，2025 年达 69 篇，表明该领域国际学术传播力和影响力正逐步提升。

2.2　来源期刊

人工智能赋能中药智能制造相关中文文献来源较广泛，共来源于 326 种期刊，其中《中国中药杂志》发文量最多（67 篇），《中草药》《光谱学与光谱分析》《中国实验方剂学杂志》次之，发文量均大于 20 篇，见表 1。发文量排名前 10 的中文期刊 90%被《中国科学引文数据库》（CSCD）或《中文核心期刊要目总览》（北大核心）收录，表明该领域在国内已有较高的学术质量和影响力。英文文献来源于 120 种期刊，*Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 发文量最多（19 篇），其次为 *Microchemical Journal* 和 *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*，发文量均大于 10 篇。发文量排名前 10 的英文期刊 70%为期刊引证报告（Journal Citation Reports，JCR）Q1 分区的核心期刊，影响因子 5.0 以上的占 60%，表明该领域也已具备一定的国际学术影响力。

发文量排名前 10 的中英文期刊发文量分别为 263 篇和 88 篇。其中，中文期刊的选题覆盖范围较广，涉及中药鉴别、饮片炮制、提取浓缩、制剂生产、过程控制和产业数字化等多个环节；英文期刊的发文则主要集中于光谱、色谱及多源数据融合支持的中药鉴别和质量评价等方面。其中，英文期刊光谱类研究占 51.1%，深度学习与多模态融合研究占 30.7%，高于中文期刊的 27.1%和 9.9%；中文期刊中在线监测、过程控制相关研究占 8.4%，高于

表 1　排名前 10 的中英文文献来源期刊

Table 1　Top 10 journals for Chinese and English literature sources

序号	中文文献		英文文献		
	期刊名称	发文量/篇	期刊名称	JCR 影响因子/分区	发文量/篇
1	中国中药杂志*#	67	*Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*△	4.8/Q1	19
2	中草药*#	57	*Microchemical Journal*△	5.2/Q1	17
3	光谱学与光谱分析*#△	31	*Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*△	3.4/Q2	12
4	中国实验方剂学杂志*#	23	*Frontiers in Pharmacology*△	5.4/Q1	8
5	时珍国医国药*#	18	*Industrial Crops and Products*△	6.4/Q1	7
6	中药材*#	18	*Journal of Ethnopharmacology*△	6.8/Q1	5
7	中成药*#	14	*Frontiers in Plant Science*△	5.9/Q1	5
8	中华中医药学刊*#	12	*Analytical Methods*△	3.0/Q2	5
9	中国现代中药*	12	*Phytochemical Analysis*△	2.9/Q2	5
10	计算机与应用化学	11	*Journal of Food Composition and Analysis*△	5.3/Q1	5

*表示被 CSCD 收录，#表示被北大核心收录，△表示被 SCI 收录。

*indicates indexing by CSCD; #indicates indexing by Peking University Core Journals; △indicates indexing by SCI.

英文期刊的 4.5%。该差异可能与期刊定位和成果表达方式有关，中文期刊主要聚集于中药研究与生产实践，对炮制、提取、制剂等中药特色问题关注较多；英文期刊更倾向于刊载数据标准化程度较高、便于比较模型性能的分析检测类研究，工艺研究较少。

2.3　机构发文与合作

采用 CiteSpace 软件对人工智能赋能中药智能制造相关中英文文献的发文机构进行可视化分析，结果见图 2。图谱中节点代表发文机构，节点越大表明其发文量越多；连线表示机构合作关系，线条越粗说明机构间合作发文次数越多。中文文献涉及的发文机构共 286 个，共形成 293 条连线；英文文献涉及的发文机构共 143 个，共形成 125 条连线。根据机构所在国家划分，中国机构独立完成的文献 1 030 篇，占 98.1%；中外合作 17 篇，占 1.6%；外国机构独立完成仅 3 篇，占 0.3%。其中，中国机构参与的文献共 1 047 篇，占 99.7%，表明中国研究团队是该领域研究的绝对主体。247 篇英文文献中，229 篇（92.7%）由中国机构独立完成，15 篇（6.1%）为中外合作，外国机构独立完成仅 3 篇（1.2%），说明英文文献不能直接等同于外国机构发文。

中文文献发文量排名前 10 的机构包括北京中医药大学（49 篇）、中国中医科学院（42 篇）、南京



A-中文文献；B-英文文献。

A-Chinese literature; B-English literature.

图 2　机构合作关系网络

Fig. 2　Cooperative relationship networks of institutions

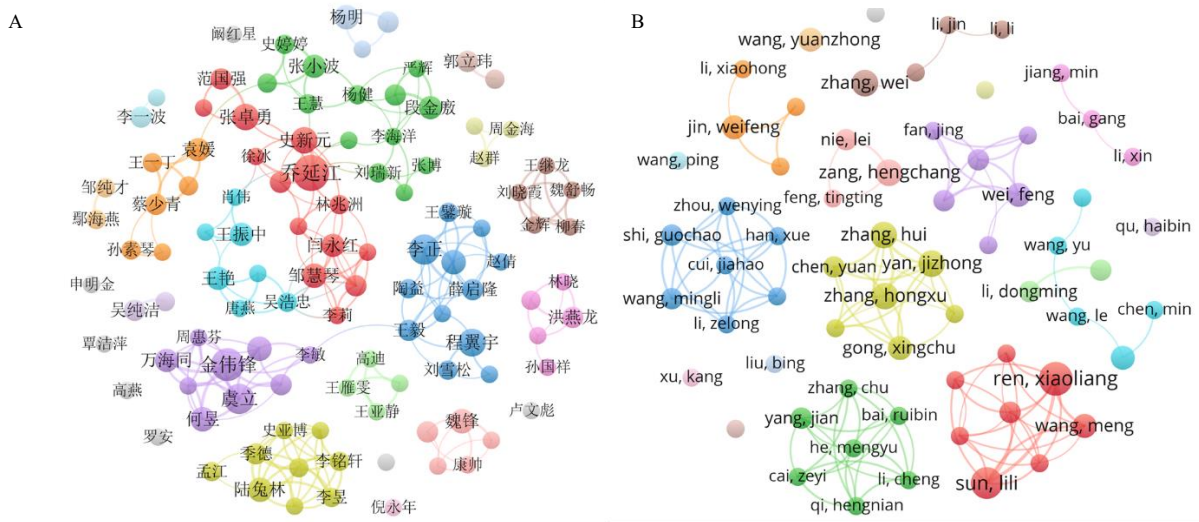
中医药大学（40 篇）、天津中医药大学（36 篇）、浙江中医药大学（25 篇）、山东中医药大学（24 篇）、成都中医药大学（22 篇）、中国药科大学（21 篇）、江西中医药大学（18 篇）、中国食品药品检定研究院（15 篇），主要为中医药高校和科研院所，表明该领域研究具有鲜明的中医药学科依托特点，研究内容多围绕中药鉴别、炮制质量评价、生产工艺优化等方面。英文文献发文量排名前 10 的机构包括 Tianjin University of Traditional Chinese Medicine（天津中医药大学，13 篇）、Zhejiang University（浙江大学，10 篇）、Chengdu University of Traditional Chinese Medicine（成都中医药大学，10 篇）、China Academy of Chinese Medical Sciences（中国中医科学院，10 篇）、Chinese Academy of Sciences（中国科学院，10 篇）、Zhejiang Chinese Medical University（浙江中医药大学，9 篇）、Zhejiang University of Technology（浙江工业大学，8 篇）、Nanjing University of Chinese Medicine（南京中医药大学，7 篇）、Shandong University（山东大学，7 篇）、Beijing University of Chinese Medicine（北京中医药大学，6 篇），不仅有中医药院校，还有综合或理工类高校和科研院所。北京中医药大学、中国中医科学院、天津中医药大学、南京中医药大学、浙江中医药大学、成都中医药大学 6 家机构在中英文文献研究中均位居前列，是该领域研究的核心力量。然而，中英文文献的合作网络都较为松散，其中一些机构在中英文网络中均呈现“重产出、轻合作”的孤岛化倾向；英文文献网络中，外国机构稀少且节点孤立，国际合作仍有待加强。中文文献高产机构的研究范围较广，覆盖中药鉴别、产地识别、饮片炮制、工艺优化、在线监测和质量控制等环节；而英文文献高产机构的研究则主要集中于光谱、色谱、化学计量学和多源传感支持的中药质量属性辨识及质量评价等方面，工艺优化、在线监测等方面的研究及合作较少。

高产机构的研究方向与其学科基础和职能定位有关。中医药院校在中药质量评价、饮片炮制和复方制剂等方面专业知识较强，研究主要围绕中药鉴别、产地识别、炮制过程、复方制剂及工艺优化等方面，注重将“辨色论质”和炮制程度等主观传统经验转化为颜色、气味、化学成分等客观检测指标，具有较强的中药专业和生产应用特点。综合或理工类高校则依托计算机、自动化和仪器分析等学科优势，更关注算法改进、高光谱与多模态分析、快速无损检测及在线预测等，在方法和技术创新方面较为突出。科研院所兼具资源研究和技术支撑特点：中医药科研院所（中国中医科学院、中国食品药品检定研究院）偏重中药资源数字化、智能质量评价和监管应用方面的研究，综合科研院所（中国科学院）更侧重分析检测与技术方法方面的研究。总体而言，中医药院校侧重于解决中药专业和生产问题，综合高校重算法与工程技术创新，科研院所更关注资源评价、分析方法及监管应用，3 类机构的研究方向具有较强互补性。不同机构在英文文献发表中通常选择数据标准化程度较高、模型性能便于比较的研究成果，因而光谱分析、机器视觉和多模态融合等主题较为突出。

2.4 作者发文与合作

利用 VOSviewer 软件对人工智能赋能中药智能制造相关中英文文献作者合作网络进行可视化分析，结果见图 3。该领域中文文献和英文文献分别涉及 2 936 和 1 405 位作者，中文文献作者合作网络中共有 111 个节点和 225 条连线（阈值＝4）；英文文献作者合作网络中有 64 个节点和 117 条连线（阈值＝3）。高产中文文献作者主要包括乔延江（17 篇）、金伟锋（14 篇）、李正（13 篇）、虞立（12 篇）、程翼宇（10 篇）、张卓勇（9 篇）、史新元（9 篇）等（均≥9 篇），发文量较高的英文文献作者为 Ren Xiaoliang（9 篇）、Sun Lili（8 篇）、Zhang Hongxu（6 篇）、Zhang Hui（6 篇）、Yan Jizhong（6 篇）、Zang Hengchang（6 篇）、Zhang Wei（6 篇）等（均≥6 篇）。中英文作者合作网络均呈现出典型的“多核心、多团簇、局部合作紧密”的特征，由多个规模不等、相对独立的合作群体构成，群体内联系较为紧密，但群体间联系相对有限，说明跨团队合作仍有不足。中文作者合作网络中，合作群体较多，节点分布分散，说明中文文献高产作者较多，并已形成多个稳定团队。其中，乔延江、金伟锋、虞立、陆兔林、李正、程翼宇等作者发文量较高，合作较紧密。英文文献网络也呈现明显聚类结构，但规模小于中文文献网络，合作关系多局限于团队内部。其中，Ren Xiaoliang、Sun Lili、Zang Hengchang、Yan Jizhong、Zhang Hui 等作者所在节点或合作簇较为突出。

中文文献方面，北京中医药大学乔延江、史新元团队主要开展中药质量评价、中药材及制剂中间体快速鉴别等方面的研究，是最早将人工神经网络、



A-中文文献；B-英文文献。

A-Chinese literature; B-English literature.

图 3　作者合作关系网络

Fig. 3　Cooperative relationship networks of authors

支持向量机等化学计量学方法引入中药质量评价的团队之一，先后建立了基于近红外/紫外光谱与机器视觉的中药中间体快速鉴别、饮片切面纹理辨识[23]及中药“辨色论质”的评价方法[24]，系统提出了“中药质量源于设计”的方法并探索其应用[25]。浙江大学程翼宇团队侧重于中药制药过程分析与质量控制研究，创立了融合近红外光谱（near-infrared spectroscopy，NIR）、人工神经网络中药质量快速检测和基于组效关系的中药药效预测模型，进而提出“组分中药智能创制技术方法学”[26]。浙江中医药大学金伟锋、虞立团队主要运用遗传神经网络和支持向量机等方法优化中药提取工艺[27-28]。南京中医药大学陆兔林团队以中药饮片炮制和质量控制为主要研究方向，侧重中药炮制的数智化转型[29]，注重运用电子感官、机器视觉与 NIR 结合机器学习，实现中药饮片及炮制品的快速识别与分类[30]、产地快速鉴别[31]。首都师范大学的张卓勇团队主要采用光谱结合模式识别技术对中药材及制剂中间体进行检测[32]。相较而言，天津中医药大学李正团队的研究与生产制造过程结合较为紧密，涉及工艺建模、过程控制和生产决策等方面，提出了基于深度强化学习的自主优化决策[33]以及数字孪生与多智能体协同的“AI 驱动的中药最佳生产模式”[4]，并与程翼宇团队共同提出了“工业感知智能＋AI 制药机器人”的智能制造范式[34]，重视推进中药智能制造的工程化落地。总体而言，上述团队的研究呈现出从早期化学计量学模式识别，经生产过程在线监测与工艺优化，向数字孪生、深度学习与大语言模型驱动的中药智能制造与智能质控演进的共同趋势。

英文文献方面，天津中医药大学 Ren Xiaoliang（任晓亮）、Sun Lili（孙立丽）团队侧重运用色谱指纹图谱结合人工神经网络开展中药质量评价[35]、真伪鉴别[36]与炮制[37]方面的研究。浙江工业大学 Yan Jizhong（颜继忠）、Zhang Hui（张慧）团队侧重机器学习结合高光谱成像和多源数据融合技术进行中药材快速无损检测研究[38]。山东大学 Zang Hengchang（臧恒昌）团队则主要开展中药提取过程关键成分和质量标志物（quality marker，Q-Marker）的在线监测研究，例如以 NIR 结合人工神经网络/深度学习实现提取过程关键质量属性在线检测[39-40]，研究的智能化程度较高。3 个团队形成色谱/质谱、高光谱、NIR 3 条与人工智能深度结合的互补技术路线。

2.5　关键词热点分析

2.5.1　关键词共现分析　采用 VOSviewer 软件进行关键词共现分析。中文文献共 2 014 个关键词，设定频次阈值为 6，其共现网络由 75 个节点和 491 条连线组成；英文文献共 818 个关键词，设定频次阈值为 3 次，其共现网络由 47 个节点和 154 条连线组成。排名前 10 的高频关键词见表 2。中文高频关键词主要有中药、人工智能、人工神经网络、深

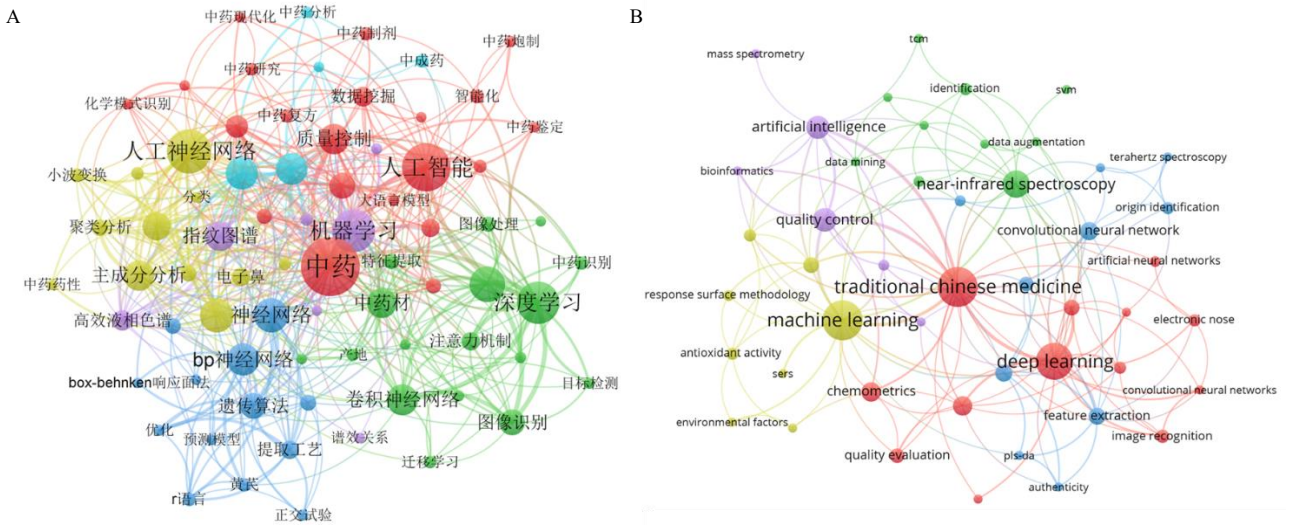
表 2 中英文文献高频关键词 (排名前 10)

Table 2 High-frequency key words in Chinese and English literature (top 10)

序号	中文文献		英文文献	
	中关键词	频次	关键词	频次
1	中药	86	machine learning	40
2	人工智能	78	traditional Chinese medicine	39
3	人工神经网络	67	deep learning	35
4	深度学习	62	quality control	16
5	机器学习	58	artificial intelligence	15
6	中药饮片	46	near-infrared spectroscopy	12
7	神经网络	44	chemometrics	11
8	支持向量机	43	hyperspectral imaging technology	11
9	反向传播神经网络	39	feature extraction	10
10	模式识别	38	convolutional neural network	10

度学习、机器学习等，主要为人工智能算法和术语。从关键词共现网络可以看出（图 4），中文文献主要聚焦于中药鉴别/识别、质量控制、中药分析、工艺优化及生产过程智能化等方面，整体网络结构较紧凑、跨群联系明显，呈现出以中药研究为基础、人工智能算法为手段、智能制造和质量控制为应用场景的交叉融合特征。英文文献高频关键词主要有 traditional Chinese medicine、machine learning、deep learning、quality control、artificial intelligence、near-infrared spectroscopy 等。英文文献更侧重于人工智能算法、光谱分析和智能识别技术在中药质量评价中的应用，相关研究主要围绕 NIR、电子鼻/舌、图像识别、卷积神经网络、特征提取和分类鉴别等方面展开。总体来看，中英文关键词共现网络均反映出该领域正由传统经验型生产和质量评价模式向数字化、智能化和精准化方向发展的趋势。

2.5.2 关键词聚类分析 利用 CiteSpace 软件，采用对数似然比（log-likelihood ratio，LLR）算法分别对人工智能赋能中药智能制造相关中英文文献的关键词进行聚类分析，结果见图 5。中文文献得到 12 个聚类（#0～#11），模块聚类值（Q）=0.618 3，平均轮廓值（S）=0.817 6；英文文献得到 10 个聚类（#0～#9），Q=0.727 9，S=0.907 8。两组聚类的 Q 值均大于 0.3、S 值均大于 0.7，表明聚类结构显著、内部一致性高，结果可信。中文文献聚类包括 #0 提取工艺、#1 径向基函数神经网络、#2 深度学习、#3 指纹图谱、#4 中药、#5 反向传播神经网络（BP 神经网络）、#6 人工神经网络、#7 人工智能、#8 支持向量机、#9 模式识别、#10 电子鼻、#11 机器学习；英文文献聚类包括 #0 artificial neural network、#1 deep learning、#2 machine learning、#3 near-infrared spectroscopy、#4 quality evaluation、#5 support vector machine、#6 traditional Chinese medicine、#7 artificial intelligence、#8 hyperspectral imaging technology、#9 geographical origin，聚类信息见表 3、4。人工神经网络、深度学习、机器学习、支持向量机及人工智能等核心聚类在中英文文献中均处于中心位置，说明这些方法已成为中药智能制造研究的常用算法工具。

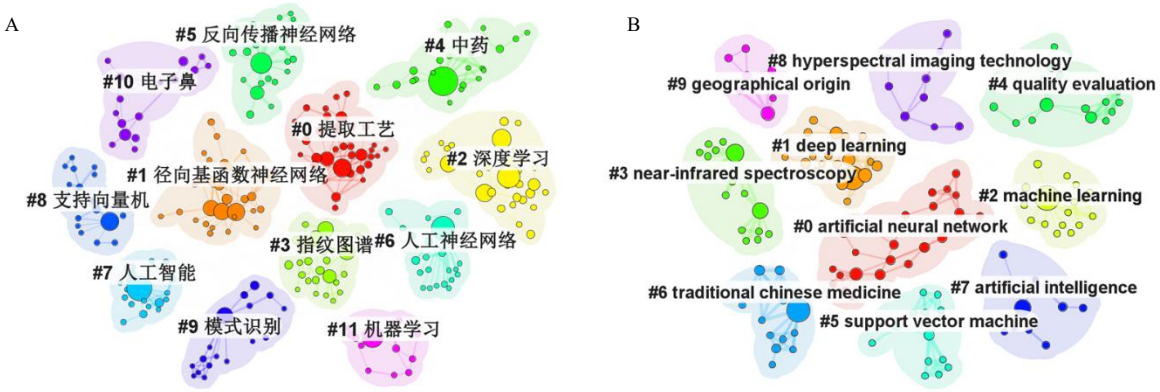


A-中文文献；B-英文文献。

A-Chinese literature; B-English literature.

图 4 关键词共现网络

Fig. 4 Co-occurrence networks of key words



A-中文文献；B-英文文献。

A-Chinese literature; B-English literature.

图 5　关键词聚类图谱

Fig. 5　Clustering graphs of key words

表 3　中文文献关键词聚类信息

Table 3　Key words clustering information of Chinese literature

聚类名称	节点数	*S* 值	年份	主要关键词
#0 提取工艺	36	0.850	2012	神经网络、遗传算法、数据挖掘、智能制造、提取工艺
#1 径向基函数神经网络	34	0.832	2011	近红外光谱、主成分分析、红外光谱、径向基函数神经网络、产地鉴别
#2 深度学习	32	0.886	2017	深度学习、中药饮片、卷积神经网络、中药材、图像识别
#3 指纹图谱	30	0.745	2013	质量控制、指纹图谱、质量评价、化学计量学、高效液相色谱
#4 中药	26	0.850	2008	中药、拉曼光谱、知识库、随机森林、标准化
#5 反向传播神经网络	25	0.862	2013	反向传播神经网络、中医药、Box-Behnken 响应面法、大语言模型、黄芪
#6 人工神经网络	23	0.810	2006	人工神经网络、小波变换、化学模式识别、中药质量评价、过程控制
#7 人工智能	20	0.862	2007	人工智能、大数据、聚类分析、中药产业、中医药现代化
#8 支持向量机	18	0.805	2010	支持向量机、中药药性、中药方剂、太赫兹时域光谱、定量分析
#9 模式识别	17	0.750	2002	模式识别、中成药、模糊神经网络、图像分析、挥发油
#10 电子鼻	17	0.660	2021	电子鼻、数字化、机器视觉、电子舌、数字孪生
#11 机器学习	13	0.834	2022	机器学习、产地、产地溯源、贝叶斯优化、山楂

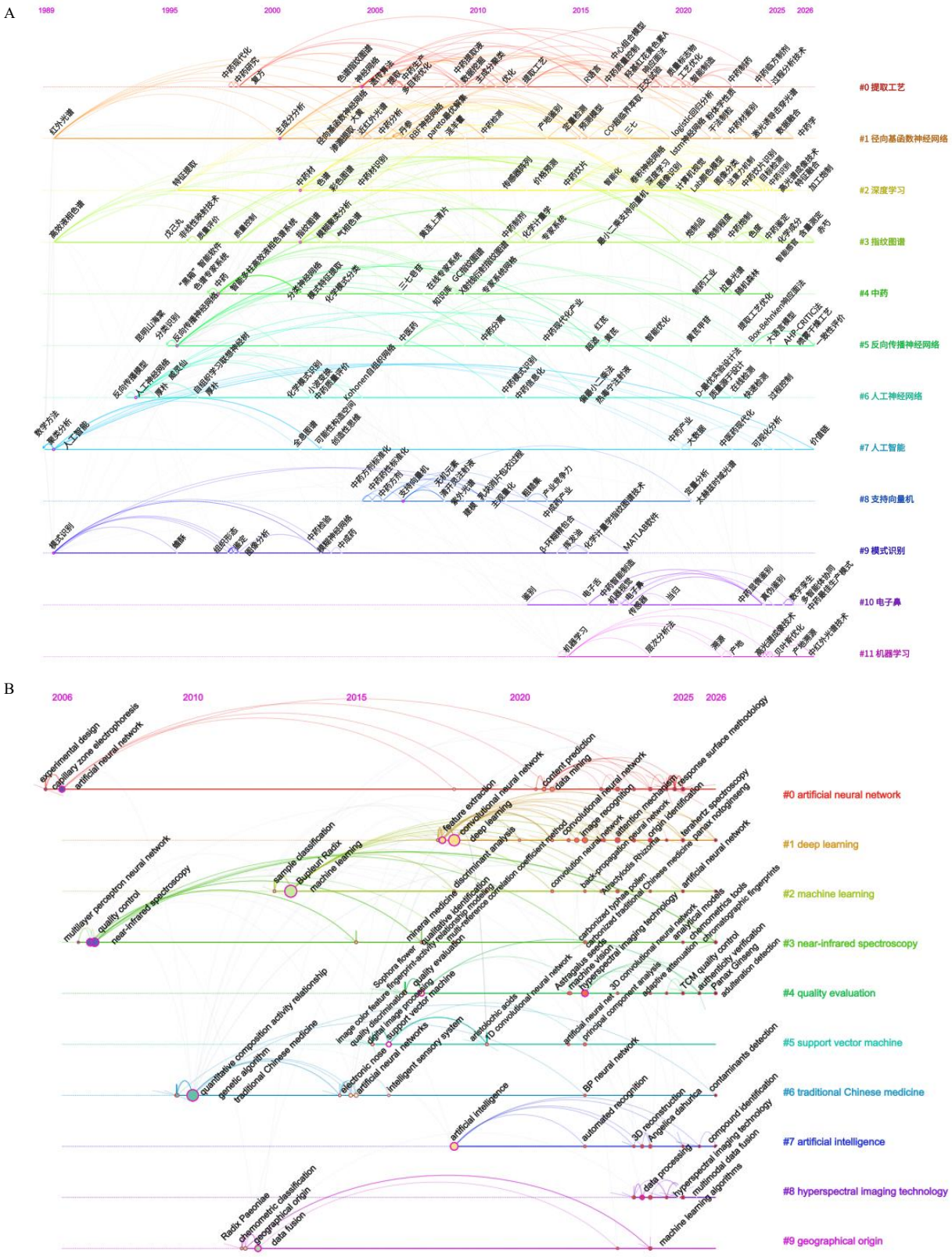
表 4　英文文献关键词聚类信息

Table 4　Key words clustering information of English literature

聚类名称	节点数	*S* 值	年份	主要关键词
#0 artificial neural network	24	0.953	2020	artificial neural network, antioxidant activity, network pharmacology, content prediction, data mining
#1 deep learning	23	0.795	2022	deep learning, convolutional neural network, feature extraction, attention mechanism, origin identification
#2 machine learning	17	0.694	2020	machine learning, Ag nanoparticles, *Atractylodis Rhizoma*, ^{1}H NMR, artificial neural network
#3 near-infrared spectroscopy	17	0.873	2018	near-infrared spectroscopy, quality control, *Acorus tatarinowii*, active component screening, analytical models
#4 quality evaluation	16	0.854	2022	hyperspectral imaging technology, quality evaluation, machine vision, *Panax ginseng*, quality control
#5 support vector machine	13	0.944	2018	support vector machine, principal component analysis, convolutional neural network, aristolochic acids, artificial neural network
#6 traditional Chinese medicine	12	0.875	2014	traditional Chinese medicine, artificial neural network, electronic nose, genetic algorithm, asteraceae family
#7 artificial intelligence	9	0.883	2024	artificial intelligence, data augmentation, *Angelica dahurica*, mass spectrometry, quality marker
#8 hyperspectral imaging technology	9	0.844	2025	Raman spectroscopy, hyperspectral imaging technology, American ginseng, data processing, multimodal data fusion
#9 geographical origin	8	0.958	2018	data fusion, geographical origin, laser-induced breakdown spectroscopy, machine learning algorithms, rapid identification

中文文献中，#1、#2、#5、#6、#8、#9 和#11 主要研究不同人工智能技术处理光谱、图像识别及多源数据整合，应用于中药质量评价、过程分析、参数优化和预测等方面；#3 侧重化学指纹结合人工智能技术在中药质量评价与控制中的应用；#0 主要研究神经网络、遗传算法等在提取、炮制及制剂等生产过程的工艺优化中的应用；#10 主要体现以电子鼻、电子舌和机器视觉为主的智能感官技术在中药质量评价、在线检测中的应用；#4 和#7 主要研究人工智能在中药产业数智化和智能制造中的综合应用。英文文献中，#0、#1、#2、#5 主要研究人工神经网络、深度学习、机器学习、支持向量机等人工智能技术在光谱和图像特征提取、成分含量预测和工艺优化中的应用；#3 和#8 主要研究 NIR、高光谱和机器视觉等分析检测技术与人工智能结合，应用于快速无损分析、成分预测及多模态质量评价等方面；#4 和#9 主要研究利用多源光谱和化学特征等进行药材综合质量评价和产地溯源；#6 和#7 主要研究人工智能技术在中药生产中的综合应用。然而，2 类文献在研究范式与应用导向上存在明显差异：中文文献以“生产驱动”为主，#0、#3、#9 和#10 等聚类体现了中药生产中的质量控制、工艺优化、传感检测等应用场景，表明中文文献研究倾向于将人工智能应用于中药提取等关键单元操作；英文文献则以“分析驱动”为主，#3、#4、#8 和#9 形成重要的方法学聚类，表明英文文献研究更侧重于将人工智能算法与光谱学、高光谱成像等无损分析技术相结合，研究聚焦于中药材产地溯源等质量评价过程。

2.5.3 关键词聚类时间线分析 运用 CiteSpace 和 Python 软件构建中英文文献关键词聚类时间线图谱，见图 6。结果显示，中英文文献研究热点演变与技术迭代及相关政策导向具有较明显的衔接关系。1989—2001 年，中文文献主要围绕红外光谱、高效液相色谱、数学方法、模式识别和人工神经网络展开研究。1986 年反向传播算法的提出及随后计算机数据处理能力的提高，为光谱、色谱信号的非线性建模提供了方法，因此这一阶段的研究主要为技术驱动。2002 年，《中药现代化发展纲要（2002 至 2010 年）》明确提出加强中药质量控制技术研究，并逐步扩大指纹图谱等方法的应用。与此后中文文献中指纹图谱、化学模式识别、中药质量评价和径向基函数神经网络等关键词的活跃相对应；同时，2006—2010 年英文文献出现 multilayer perceptron neural network、quality control、near-infrared spectroscopy 和 genetic algorithm 等节点，主要为光谱建模与质量控制的基础研究。2010 年修订的《药品生产质量管理规范》进一步强调全过程质量管理和质量风险管理，中药检测、提取工艺、中药制剂、中药饮片、化学计量学、机器学习、中药检测等关键词随之增多，研究开始转向中药生产过程质量评价。2012 年以后，卷积神经网络等深度学习技术快速发展，为图像识别和复杂特征提取提供了新的技术路径。2015—2017 年《中国制造 2025》《中医药发展战略规划纲要（2016—2030 年）》《新一代人工智能发展规划》相继发布。在技术进步与政策推动下，2012—2021 年中文文献中卷积神经网络、深度学习、计算机视觉、预测模型、工艺优化、电子舌、电子鼻等关键词明显增加，研究开始由传统检测分析转向图像识别、工艺优化和智能感知；英文文献中 convolutional neural network、feature extraction、electronic nose、data fusion、machine vision、attention mechanism、content prediction 等节点大量出现，体现了检测方法的进步及多源数据的融合，这些方法与技术主要应用于中药质量评价，后期还出现了参数预测等研究，与中文文献相对应。2022 年，ChatGPT 的发布与迅速走红，推动 GenAI 加速发展，为人工智能赋能中药智能制造提供了新的技术路径。2022—2025 年，《“十四五”中医药发展规划》《中医药振兴发展重大工程实施方案》《关于促进数字中医药发展的若干意见》《医药工业数智化转型实施方案（2025—2030 年）》相继发布，提出中药智能制造提升行动，推动人工智能赋能中药全产业链，提升中药生产数智化水平，开展中药品质智能辨识与生产过程控制装备等研究。在此背景下，中文文献中出现在线检测、过程控制、过程分析技术、数字孪生、高光谱成像、数据融合等关键词，表明研究进一步由离线检测向在线感知和过程控制延伸；英文文献中，image recognition、attention mechanism、hyperspectral imaging technology、principal component analysis、multimodal data fusion 等节点的密集出现，主要为高光谱、图像和化学成分等多模态智能感知和数据融合在中药检测和识别中的应用。中文文献时间线末端出现了大语言模型、贝叶斯优化、多智能体协同等前沿关键词，反映了大模型、智能决策和多智能体在该领域尚处于



A-中文文献；B-英文文献。

A-Chinese literature; B-English literature.

图 6　关键词聚类时间线图谱

Fig. 6　Key words clustering timeline graphs

初步探索阶段。

2.5.4 关键词突现分析 运用 CiteSpace 软件对人工智能赋能中药智能制造相关中英文文献进行关键词突现分析，主要根据关键词突现的起始时间、集中出现时段及技术演进特征进行阶段划分，部分关键词的突现时间存在跨阶段重叠，结果见图 7。中英文文献突现图谱呈现 3 个阶段演化特征。（1）早期阶段（1989—2011 年），人工神经网络（突现强度 12.94）为中文文献中最早出现且持续时间最长的突现关键词，表明浅层神经网络是早期研究的技术基础；支持向量机（9.75）与遗传算法（5.75）也于该阶段开始突现，并持续活跃至后续阶段，说明这些算法在早期即已成为重要方法，并具有较强的延续性。英文文献中，该阶段尚未出现突现关键词，artificial neural network 虽于 2006 年首次出现，但突现期为 2014—2021 年（1.50），说明早期英文文献的研究相对滞后性。2001 年后，指纹图谱（5.62）、红外光谱（6.92）、神经网络（5.70）、遗传算法（5.75）、小波变换（3.78）、BP 神经网络（3.77）、支持向量机（9.75）等关键词的突现，说明该阶段研究主要利用传统机器学习方法处理复杂的中药检测数据。中药行业存在中药材来源复杂、批次差异较大、人工经验鉴别效率低、主观性强等问题，因此迫切需要建立能反映中药整体质量的检测和评价方法。此外，中药成分复杂、非线性特征明显，传统单变量统计方法难以充分解释其光谱和色谱信息，由此推动了分析与人工智能技术的结合。因此，该阶段人工智能主要作为实验室离线分析工具，用于中药材真伪鉴别、产地识别和质量等级评价等方面。同时，《中药现代化发展纲要（2002 至 2010 年）》对中药质量控制和指纹图谱应用的倡导也发挥了政策引导作用。（2）中期阶段（2012—2019 年），多项关键词开始进入突现期，部分持续至后续阶段。中文文献中提取工艺（3.96）、化学计量学（3.79）、近红外光谱（4.27）、模式识别（3.78）相继开始突现，说明人工智能研究的重点从样品识别转向其解释和优化的过程，研究热点开始从中药质量评价向生产工艺优化扩展。英文文献中 artificial neural network（1.50）、electronic nose（1.47）、support vector machine（1.69）和 near-infrared spectroscopy（1.22）相继开始突现，反映了浅层建模与光谱、电子感官技术的结合。此时，中药生产规模扩大及质量一致性要求提高，使行业关注点从离线检测逐步转至提取、炮制等过程的参数预测与工艺优化。《中国制造 2025》《中医药发展战略规划纲要（2016—2030 年）》等相关政策的发布进一步促进了该阶段的技术融合与产业应用导向。（3）近期阶段（2020—2026 年），中英文文献共同进入深度学习驱动阶段。中文文献关键词人工智能（16.14）于 2024—2026 年进入显著突现期，突现强度最高且持续至 2026 年，表明近年来人工智能在中药智能制造领域研究中的关注度显著提升，并成为当前持续活跃的研究热点，当前前沿热点也从某种算法扩大为人工智能系统化赋能；突现强度较高的关键词包括机器学习（11.97）、深度学习（9.41），均持续至 2026 年，表明数据驱动方法仍是近期研究热点。质量控制（4.05）自 2022 年起持续突现至 2026 年，表明研究关注点正逐步向生产过程监测、质量预测和控制等方向延伸。随着支持向量机等传统机器学习方法突现减弱，卷积神经网络（7.86）、图像识别（5.66）和注意力机制（4.88）相继出现，研究逐步由浅层模型向深度学习及更复杂的网络架构拓展。其中，中文文献关键词卷积神经网络与图像识别于 2020—2023 年同步突现，反映卷积神经网络的集中应用，主要用于中药材鉴别、饮片分类和外观质量检测。同时期英文文献关键词 convolutional neural network（2.14）、image recognition（2.58）在 2018、2022 年相继突现，表明英文研究较早引入卷积神经网络，并逐步向中药图像识别及质量检测等具体应用拓展；其中，image recognition 突现强度最高，但持续时间较短，反映图像识别在短期内受到集中关注；convolutional neural network（2.14）和 feature extraction（2.13）突现强度分列第 2 和第 3 位，前者延续时间较长，后者与 deep learning（1.48）同步持续，表明研究由传统模型逐步转向深层特征学习；principal component analysis 和 machine vision（均为 1.02）短期突现，显示短期热点为数据降维和视觉检测；image classification 和 Raman spectroscopy（均为 1.0）最晚出现并持续至观察期末，说明图像分类与拉曼快速检测构成英文研究的最新前沿。该阶段，卷积神经网络、深度学习和特征提取等方法及 GPU 算力的发展提高了图像、光谱和传感数据的智能分析能力；在快速无损检测、质量评价和在线监测、过程控制等全过程质量控制的行业需求背景下，研究逐步向在线监测（计算机视觉、拉曼光谱无损检测等）、多源感知融合和过程控制拓展，

A

关键词	年份	强度	开始	结束	1989—2026
人工神经网络	1993	12.94	1993	2017	
指纹图谱	2001	5.62	2001	2015	
红外光谱	1989	6.92	2002	2017	
径向基函数神经网络	2002	5.11	2002	2009	
小波变换	2002	3.78	2002	2009	
遗传算法	2005	5.75	2005	2019	
神经网络	2004	5.70	2004	2013	
大黄	2004	4.38	2004	2009	
反向传播神经网络	1995	3.77	2006	2017	
支持向量机	2006	9.75	2008	2021	
数据挖掘	2009	3.80	2009	2011	
提取工艺	2012	3.96	2012	2019	
化学计量学	2012	3.79	2012	2021	
近红外光谱	2004	4.27	2014	2017	
R 语言	2015	3.79	2015	2019	
模式识别	1989	3.78	2014	2017	
深度学习	2018	9.41	2020	2026	
卷积神经网络	2018	7.86	2020	2023	
图像识别	2018	5.66	2020	2023	
机器学习	2014	11.97	2022	2026	
注意力机制	2022	4.88	2022	2025	
质量控制	1998	4.05	2022	2026	
人工智能	1989	16.14	2024	2026	

B

关键词	年份	强度	开始	结束	2006—2026
artificial neural network	2006	1.50	2014	2021	
electronic nose	2015	1.47	2015	2021	
support vector machine	2016	1.69	2016	2023	
near infrared spectroscopy	2007	1.22	2016	2019	
convolutional neural network	2018	2.14	2018	2023	
image recognition	2022	2.58	2022	2023	
feature extraction	2018	2.13	2022	2025	
deep learning	2018	1.48	2022	2025	
principal component analysis	2022	1.02	2022	2023	
machine vision	2022	1.02	2022	2023	
image classification	2024	1.09	2024	2026	
Raman spectroscopy	2024	1.09	2024	2026	

A-中文文献；B-英文文献。

A-Chinese literature; B-English literature.

图 7　关键词突现图谱

Fig. 7　Key words emergence graphs

“十四五”中医药和智能制造发展规划及医药工业数智化等相关政策的发布进一步强化了这一趋势。中英文研究在技术方向上具有较强一致性，但中文研究更强调生产工艺和质量控制，英文研究则更集中于计算机视觉、光谱分析等质量检测与评价方面的应用。

3　讨论

3.1　研究领域现状

基于对人工智能赋能中药智能制造领域相关中英文文献发文量及趋势的研究发现，该领域研究热度持续增长，发文量总体呈上升趋势，尤其是 2020 年以来明显增长。这主要得益于 GPU 算力、深度学习和多模态感知等技术的进步，以及中药产业智能化转型需求和中医药智能制造发展规划等相关政策的共同推动。期刊分布上，中英文文献分别集中于国内中医药核心期刊和国际分析化学、药学主流期刊，同时也折射出中英文文献在应用导向上的差异：中文文献偏重生产工艺与质量控制，英文文献更侧重光谱分析与质量评价。这一差异不仅与期刊学科属性有关，还反映了不同研究情境的需求导向：中文文献多发表于中医药期刊，侧重生产工艺优化、质量控制及行业应用，以适应中药生产智能化转型需求；英文文献则主要发表于国际化学和药学期刊，更关注光谱、色谱及电子感官与人工智能融合的检测性能和方法验证。

在发文机构和作者方面，中英文发文机构均以国内中医药高校和科研院所为主，已形成以北京中医药大学、中国中医科学院、天津中医药大学、南京中医药大学、浙江中医药大学等中医药院校为主的稳定集群。中文文献方面，乔延江、程翼宇、李正、金伟锋、虞立、陆兔林等学者团队长期深耕，研究了人工智能在中药质量控制与评价[23]、生产智能优化与决策[34]、提取工艺优化[27]等方面的应用，引领作用突出。英文文献方面，Ren Xiaoliang、Sun Lili、Zang Hengchang、Zhang Hongxu 等学者团队在国际主流期刊上发表了色谱/质谱[24,41]、高光谱[42]、近红外光谱[43]、电子鼻[44]等多模态识别和分析方面的成果，但外国合作机构较少、节点孤立，提示该领域研究的国际合作仍显不足。这可能与中药研究的地域性和专业性有关：中药资源、产业及科研力量主要集中在国内，因此发文以国内机构为主；国内外对中医药理论的理解以及质量标准和监管要求存在差异，这在一定程度上也制约了国际合作。在合作网络结构上，中英文文献呈现出高度一致的特征，均表现为“多核心、多团簇”的形态，但机构或团队之间联系明显不足，核心团队大多专注于单一方向，团队之间桥接节点较少。究其原因，不同品种和产地的中药数据差异较大，各团队采用的仪器设备、采集方法和数据标准也不统一，增加了跨机构/团队数据共享与合作的难度；公共数据集、

统一标注规范及验证体系尚不完善，研究团队往往依赖内部样本形成封闭的数据-模型循环，造成合作网络中出现孤岛化现象；企业数据受到保密和知识产权限制，进一步增加了产学研数据共享与验证的难度；人工智能、中药学、分析化学、工程学之间存在一定学科壁垒，长期合作平台和复合型人才不足，导致算法开发等研究与中药生产实际需求衔接不够紧密，限制了相关成果的转化和产业化应用。

总体而言，目前人工智能赋能中药智能制造领域研究主要集中在中药质量属性智能辨识、过程分析、工艺优化和质量控制等方面，过程智能控制方面的研究较少。原料验收、质量分级、来源追溯、均一化投料相关的研究，属于智能制造的上游质量感知与输入控制；而一般离线质量评价虽未直接嵌入生产系统，但可为质量属性数字化、模型构建及在线方法开发提供基础。

3.2 研究热点与趋势

综合关键词共现、聚类、时间线及突现分析结果发现，人工智能赋能中药智能制造的研究热点主要集中于智能识别、智能感知、智能优化与控制 3 个方向，技术路径总体呈现出从“单模态＋浅层模型”到“多模态融合＋深度学习”的演进过程。同时，开始出现以多智能体协同的“感知-决策-控制”一体化新兴探索。

3.2.1 智能识别——从单模态走向多模态融合 中药材与饮片智能识别已成为该领域中最为密集的研究热点，中文文献关键词中药饮片、深度学习和英文文献关键词 quality evaluation、deep learning 相互呼应。从研究范式演进看，该方向最早以 BP 神经网络和支持向量机为代表，2018 年后随着卷积神经网络与注意力机制的成熟，研究范式发生根本性跃迁。胡晓燕等[45]基于 NIR 与深度学习构建了快速、准确鉴别滇黄精产地和干燥处理的方法。李若彤等[46]将高光谱成像与机器学习相结合，用于半夏不同炮制饮片的快速、无损鉴别，把识别维度从一维光谱拓展至二维空间-光谱特征域。Sun 等[47]提出了一种基于注意力融合的可见-近红外端到端高光谱成像的多模态融合策略，用于鹿角胶的鉴别，提高了检测的效率和准确率。Liu 等[40]提出了一种基于多源 NIR 数据的多源跨尺度注意力融合神经网络，用于血府逐瘀口服液提取过程中 Q-Marker 含量的在线检测，将“算法-传感-工艺”紧密结合，其检测性能明显优于单光谱模型。整体来看，该方向已由“单模态＋浅层算法”演进至“多模态融合＋深度学习”的阶段。

3.2.2 智能感官——经验数字化与算法创新并行 从电子鼻、near-infrared spectroscopy、hyperspectral imaging technology 等聚类及支持向量机、深度学习等关键词可以看出，智能感官是另一研究热点。姚秉韬等[48]基于电子鼻气味数据与机器学习构建了白芷“辨气论质”的定性识别模型，将中药“气味”辨识经验转化为可量化的质控指标。王嘉唯等[49]以电子舌筛选影响通关藤质量的差异味道，构建基于“味”的定性识别模型用于快速鉴别通关藤真伪，探讨通关藤的“辨味论质”机制。马景余等[50]通过电子舌与电子眼信息的中层融合结合深度学习，实现贝母品种的快速辨识。上述“智能感官＋人工智能”研究将中医学经验性认知转换为可量化、可重现的客观参数，是传统中医药智慧与现代人工智能技术结合的代表性方向。其中，中文文献侧重于经验的数字化，英文文献则更关注多传感器数据融合的算法创新，二者相互补充。该方向的未来突破点或许在于将“四气五味”“性味归经”等中医理论系统化嵌入建模过程，构建出具有中医药特色的可解释人工智能模型。

3.2.3 智能优化与控制——从静态优化迈向实时监控 工艺参数优化与过程控制是智能制造的核心问题，也是推动其从实验室研究走向工业化应用的关键转折环节。中文文献聚类提取工艺与高频关键词工艺优化、径向基函数神经网络、BP 神经网络共同反映了人工智能在生产单元参数优化中的渗透深度。李月婷等[51]采用层次分析-指标相关性权重确定的组合加权法（analytic hierarchy process-criteria importance through intercriteria correlation hybrid weighting method，AHP-CRITIC）与 BP 神经网络耦合优化归志方提取工艺，体现了多指标加权决策与神经网络回归的有机结合。安和等[52]运用 Box-Behnken 响应面法结合人工神经网络优化炒白芍炮制工艺，将人工智能应用思路从提取工艺向炮制工艺延伸。在过程控制方面，童枫等[22]将 NIR 和机器学习结合实现了热毒宁注射液金银花和青蒿萃取过程中固形物含量的在线监测，并用于萃取终点的智能判断，可有效提升萃取效率。程宇康等[53]进一步将动态矩阵控制（dynamic matrix control，DMC）应用于提取等中药制药过程，针对滞后大、扰动多的中药生产过程给出了系统化的过程控制

策略。整体来看，本场景的研究已从“静态工艺优化”向“实时过程控制”深度延伸，标志着人工智能赋能开始真正进入生产实操层面。

3.2.4 新兴探索——多智能体协同的“感知-决策-控制”一体化 2024—2026 年，大语言模型、多智能体、数字孪生等关键词开始出现，但均未形成独立聚类或突现热点。人工智能的角色也从单元参数优化与过程控制开始向多智能体协同的“感知-决策-控制”一体化系统的方向探索。在这种模式下，提取、浓缩等单元控制不再由单一模型独立完成，而是由多智能体相互协作，并以大语言模型为协调中枢统筹决策，大语言模型正逐步由独立的分析工具演变为整合多模态数据、领域知识与工程经验的协调中枢，推动中药制药从人工经验决策向数据驱动决策转变。Zhao 等[54]基于 Transformer 构建多模态在线监测系统，为数字孪生实时数据驱动提供支撑，可看作感知层智能体的雏形；李正等[4]提出“检测-建模-决策-执行”闭环的人工智能驱动中药生产新模式，将人工智能从工艺优化提升至生产模式重构层面，体现了系统层面的协同调度策略；沙鑫等[55]在血府逐瘀浸膏质量评价中集成物理指纹图谱、机器视觉与大语言模型，构建“感知-认知-决策”一体化评价体系，可快速完成分析并给出可操作的工艺建议，体现了多智能体在质量控制环节的协同作用。但目前多智能体协同的“感知-决策-控制”一体化还只有零星研究，没有形成热点和趋势，但从行业需求、政策导向及技术发展趋势来看，未来中药智能制造将以大语言模型为协调中枢、数字孪生为物理虚拟桥梁、PAT 与多模态感知为数据基础，通过多智能体系统协同决策，实现全过程闭环控制。

4 结论与展望

本研究采用文献计量学和知识图谱法对人工智能赋能中药智能制造的中英文文献进行了系统分析。结果表明，该领域近年来发展迅速，研究热点集中于中药材识别、质量评价、工艺优化与过程控制等场景，核心人工智能技术包括人工神经网络、支持向量机、深度学习、卷积神经网络、注意力机制等，并常与 NIR/拉曼光谱、高光谱成像、电子鼻/舌、机器视觉等感知手段结合。

尽管人工智能赋能中药智能制造领域研究已取得显著进展，但目前仍面临一些关键瓶颈和挑战。（1）数据基础是核心瓶颈：中药生产数据多源异构，但现有研究多为小样本、单环节、离线数据，缺少能共享、复用、追溯的数据集，亟需建立统一的行业数据标准与共享平台。（2）模型解释性和监管适配性不足：深度学习具有黑箱特性，又缺少领域知识支撑，部分模型预测虽较准确，却说不清关键特征、适用边界和失效原因，可信度存疑。（3）生产过程智能化不足：现有研究仍以中药质量评价和离线工艺优化为主，在线监测、质量预测、智能装备与过程控制（如智能决策、控制执行与反馈等）研究较少，且多限于少数品种和单一工序，离全过程智能化仍有明显差距。（4）生产验证、协同创新与成果转化不足：现有研究多停留在实验室样品和回顾性数据建模，缺少中试、生产线验证；跨学科、跨机构、跨区域和产学研用协作不够紧密，国家级、行业级联合攻关体系尚未形成，制约相关成果转化与工业应用。（5）复合型人才短缺：既懂中医药又兼具人工智能建模能力的人才很少，中医药院校人工智能课程体系不完善，工科院校则缺乏中药生产相关课程。

针对上述行业瓶颈，围绕“人工智能＋”国家战略和“十五五”规划的数智化发展要求，人工智能赋能中药智能制造的未来发展可重点聚焦以下 5 个方面：（1）围绕典型品种和关键工艺建设标准化数据集，明确数据采集规范、监管措施和共享机制，健全相关标准与监管体系；（2）发展可解释的中医药人工智能，通过知识图谱与大模型结合，将配伍规律、炮制机制、药效物质等知识嵌入模型，提升其可信度，并建立与质量管理和监管要求衔接的模型验证规范；（3）围绕中药生产关键工序，加强在线监测、质量预测与过程控制研究，推进智能装备、模型决策、控制执行及反馈调节研究与协同集成，构建“过程分析技术-数字孪生-人工智能”一体化的多智能体系统，实现生产策略动态调整与全过程智能化；（4）依托国家和地方平台，推动跨学科/机构/区域合作及产学研用协同攻关，推动数据共享与第 3 方验证，开展多批次、跨设备、中试及生产线验证，建设示范智能生产线与智能工厂，加快相关成果产业化；（5）加强复合型人才培养，推动中医药与工科院校联合培养，依托产教融合平台培育跨学科领军团队。

综上，人工智能正从辅助工具转变为推动中药智能制造转型升级的核心力量。要实现中药制药由经验型向智能型的转变，仍需在数据共享、可解释

建模、全过程智能化、跨界协同、标准建设和人才培养等方面持续推进，从而为中医药传承创新与中药工业高质量发展提供支撑。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] 中共中央, 国务院. 中共中央 国务院关于促进中医药传承创新发展的意见[EB/OL]. (2019-10-20) [2026-04-25]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-10/26/content_5445336.htm.

[2] 科技部, 国家中医药管理局. 科技部 国家中医药局关于印发《“十四五”中医药科技创新专项规划》的通知[EB/OL]. (2022-11-10) [2026-04-25]. https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzdgknr/fgzc/gfxwj/gfxwj2022/202301/t20230116_184238.html.

[3] 国家中医药管理局. 国家中医药管理局关于印发《中医药标准化行动计划（2024—2026 年）》的通知[EB/OL]. (2024-06-17) [2026-04-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202407/content_6965475.htm.

[4] 李正, 程宁涛, 赵筱萍, 等. 人工智能驱动的中药最佳生产模式及其工程化应用研究 [J]. 中国中药杂志, 2025, 50(12): 3197-3203.

[5] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要 [EB/OL]. (2026-03-13) [2026-04-25]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202603/content_7062633.htm.

[6] 国家卫生健康委办公厅. 关于促进和规范“人工智能＋医疗卫生”应用发展的实施意见 [EB/OL]. (2025-11-04) [2026-04-26]. https://www.nhc.gov.cn/guihuaxxs/c100133/202511/d1a42ae835c743b9b3e83ac0253c3e9f.shtml.

[7] 田淑峰, 麦尔比艳姆·赛买提, 范婧怡, 等. 人工智能驱动的中药质量控制研究进展 [J]. 分析测试学报, 2026, 45(6): 1204-1211.

[8] 史亚博, 李铭轩, 傅饶, 等. 在线检测技术在中药饮片智能化生产与质量控制中的研究现状与展望 [J]. 中国现代中药, 2024, 26(5): 881-888.

[9] 沈刚, 龚普阳, 鄢红书, 等. 基于 CiteSpace 和 VOSviewer 可视化知识图谱的竹节参研究动态与热点分析 [J]. 中草药, 2025, 56(13): 4752-4764.

[10] 工业和信息化部, 国家标准化管理委员会. 工业和信息化部 国家标准化管理委员会关于印发国家智能制造标准体系建设指南（2024 版）的通知 [EB/OL]. (2025-03-07) [2026-08-05]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202504/content_7020558.htm.

[11] 中华中医药学会. 中药智能制造技术通则: T/CACM 1605-2024 [S]. 2024.

[12] 工业和信息化部. 工业和信息化部等八部门关于印发《中药工业高质量发展实施方案（2026—2030 年）》的通知 [EB/OL]. (2026-01-30) [2026-04-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202602/content_7057174.htm.

[13] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于提升中药质量促进中医药产业高质量发展的意见 [EB/OL]. (2025-03-15) [2026-08-05]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202503/content_7014716.htm.

[14] 程翼宇, 李文龙. 中药智能制造科技导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2025: 5.

[15] Radanliev P. Artificial intelligence: Reflecting on the past and looking towards the next paradigm shift [J]. *J Exp Theor Artif Intell*, 2025, 37(7): 1045-1062.

[16] Silver D, Huang A, Maddison C J, *et al*. Mastering the game of go with deep neural networks and tree search [J]. *Nature*, 2016, 529(7587): 484-489.

[17] 谢树莹, 周明, 周金海. 基于 OpenCV 的中药饮片“辨色”识别研究 [J]. 时珍国医国药, 2018, 29(2): 510-512.

[18] 罗霄, 卢一, 杨小艳, 等. 基于电子鼻技术的酒制饮片快速鉴别研究 [J]. 中国医院用药评价与分析, 2018, 18(3): 381-383, 387.

[19] 段洪君, 相龙普, 孙建新, 等. 中药多糖醇沉过程自动控制系统 [J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(4): 38-41.

[20] 梁川, 曹乐. 基于 LSTM 的中药生产设备故障预测方法研究 [J]. 科学技术创新, 2020(31): 60-62.

[21] 张瀚, 王文哲, 胡小艳, 等. 基于现场通用模型的 3 种蜜炙饮片水分属性动态在线监测方法研究 [J]. 药学学报, 2023, 58(10): 2890-2899.

[22] 童枫, 徐芳芳, 闫逸伦, 等. 热毒宁注射液金银花和青蒿（金青）萃取过程中固形物含量近红外光谱在线监测模型的建立及萃取终点判断研究 [J]. 中草药, 2024, 55(19): 6555-6565.

[23] 陶欧, 张燕玲, 陈茜, 等. 基于灰度共生矩阵的中药饮片横切面图像纹理特征参数的提取 [J]. 世界科学技术—中医药现代化, 2014, 16(12): 2531-2537.

[24] 徐曼菲, 吴志生, 刘晓娜, 等. 从辨色论质谈中药质量评价方法 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41(2): 177-181.

[25] 于佳琦, 徐冰, 姚璐, 等. 中药质量源于设计方法和应用: 智能制造 [J]. 世界中医药, 2018, 13(3): 574-579.

[26] 程翼宇, 王毅, 刘雳, 等. 组分中药理论创新与实践范例: 冠心宁片创制研究 [J]. 中国中药杂志, 2022, 47(17): 4545-4550.

[27] Xu S C, Wan H T, Zhao X X, *et al*. Optimization of extraction and purification processes of six flavonoid components from *Radix Astragali* using BP neural network combined with particle swarm optimization and genetic algorithm [J]. *Ind Crops Prod*, 2022, 178: 114556.

[28] 冯琛, 万嘉洋, 姚玥, 等. 基于 D-S 证据理论的数学模型优化补阳还五汤中多目标有效成分提取工艺 [J]. 中国中医急症, 2019, 28(1): 3-7.

[29] 李林, 李伟东, 苏联麟, 等. “新质生产力”背景下的中药炮制智能化转型升级发展新路径探讨 [J]. 南京中医药大学学报, 2024, 40(7): 653-660.

[30] Shi Y B, He T Y, Zhong J J, *et al*. Classification and rapid non-destructive quality evaluation of different processed products of *Cyperus rotundus* based on near-infrared spectroscopy combined with deep learning [J]. *Talanta*,

2024, 268: 125266.

[31] 张云飞, 张玖捌, 陈鹏, 等. 基于性状电子检测技术结合机器学习的不同产地薏苡仁的快速鉴别 [J]. 中草药, 2024, 55(12): 4185-4193.

[32] 汪景荣, 张卓勇, 杨玉平, 等. 太赫兹时域光谱结合主成分分析线性判别和支持向量机用于大黄样品鉴定 [J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(5): 1606-1611.

[33] 薛启隆, 苗坤宏, 于洋, 等. 基于深度强化学习的中药制药过程自主优化决策方法研究 [J]. 中国中药杂志, 2023, 48(2): 562-568.

[34] Li Z, Xue Q L, Yu Y, *et al*. How to build new productive forces for traditional Chinese medicine industry: Industrial perception intelligence and AI-based pharmaceutical robot [J]. *Engineering*, 2025, 52: 244-255.

[35] Yin Y, Ma Z C, Wei X R, *et al*. Study on the quality evaluation of *Plantaginis* from different parts based on chemical fingerprinting and chemometrics methods [J]. *Microchem J*, 2026, 221: 116905.

[36] You G J, Hou F J, Niu L Y, *et al*. Identification of *Euphorbiae Pekinensis Radix* and its counterfeit and adulterated products based on DNA barcode, UPLC-Q-TOF-MS, UPLC fingerprint, and chemometrics [J]. *Biomed Chromatogr*, 2024, 38(10): e5978.

[37] Liu M Q, Yang Z J, Wen J L, *et al*. The effect of honey as an excipient in the processing of traditional Chinese medicine based on chemical profiling, artificial neural network, and virtual screening: *Cortex Mori* as an example [J]. *Arab J Chem*, 2024, 17(2): 105519.

[38] Liu B, Zhang H X, Zhu J Q, *et al*. Pixel-level recognition of trace mycotoxins in red ginseng based on hyperspectral imaging combined with ^{1}DCNN-residual-BiLSTM-attention model [J]. *Sensors*, 2024, 24(11): 3457.

[39] Zhang M Y, Lin B R, Ma X B, *et al*. Application of artificial intelligence combined with near infrared spectroscopy in the continuous counter-current extraction process of *Angelica dahurica* formula granules [J]. *Spectrochim Acta Part A Mol Biomol Spectrosc*, 2024, 322: 124748.

[40] Liu D L, Gao L L, Cui Z H, *et al*. Online detection of Q-marker concentrations in the Xuefu Zhuyu oral liquid extraction process using a multi-source cross-scale NIR attention fusion neural network [J]. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 2025, 339: 126293.

[41] Liu M Q, Zhao X R, Wen J L, *et al*. A multidimensional strategy for uncovering comprehensive quality markers of *Scutellariae Radix* based on UPLC-Q-TOF-MS analysis, artificial neural network, network pharmacology analysis, and molecular simulation [J]. *Front Plant Sci*, 2024, 15: 1423678.

[42] Zhang H, Zhu J Q, Shen T T, *et al*. Authenticity identification of *Pinellia ternata* based on hyperspectral imaging combined with spectral-texture multimodal data fusion strategy [J]. *Microchem J*, 2025, 218: 115133.

[43] Liang W T, Zhong R X, Ma Z G, *et al*. Intelligent sensory technologies, NIR spectroscopy and chemometrics combined with machine learning based on multi-source data fusion for comprehensive evaluation of *Sinapis Semen* in different processing degrees [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2026, 268: 117212.

[44] Pan Y J, Xiao Y, Zhu M L, *et al*. Impact of ginger juice processing on volatile compounds and sensory characteristics of *Eucommiae Cortex*: A GC × GC-TOF-MS, E-nose, and machine learning analysis [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2025, 265: 117052.

[45] 胡晓燕, 苏俊宇, 沈涛, 等. 基于近红外光谱技术结合深度学习快速鉴别滇黄精干燥方法和产地 [J]. 中草药, 2025, 56(18): 6761-6772.

[46] 李若彤, 胡会强, 曹诗宇, 等. 基于高光谱成像结合机器学习的半夏饮片鉴别 [J]. 光谱学与光谱分析, 2025, 45(5): 1236-1242.

[47] Sun T F, Zhang M Q, Chai J L, *et al*. End-to-end visible-NIR hyperspectral imaging with attention-based fusion for accurate *Cervi Cornu Colla* authentication [J]. *J Food Compos Anal*, 2025, 148: 108620.

[48] 姚秉韬, 周成惠, 吴志强, 等. 基于人工智能感官技术电子鼻的白芷“辨气论质”机制及其定性识别模型构建 [J]. 中南药学, 2025, 23(9): 2567-2574.

[49] 王嘉唯, 周成惠, 张冬月, 等. 通关藤真伪识别智能模型构建及其“辨味论质”机制研究 [J]. 中药新药与临床药理, 2026, 37(4): 737-747.

[50] 马景余, 孙涛, 王彦荣, 等. 基于电子舌和电子眼信息融合的贝母品种快速辨识方法 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(18): 9-18.

[51] 李月婷, 魏祖英, 王腾腾, 等. AHP-CRITIC 结合 BP-ANN 的归志方提取工艺优化研究 [J]. 分析测试学报, 2025, 44(11): 2256-2264.

[52] 安和, 彭红妍, 李沛森, 等. Box-Benhnken 设计-响应面法结合人工神经网络优化炒白芍的炮制工艺 [J]. 中草药, 2025, 56(21): 7762-7771.

[53] 程宇康, 于洋, 张发星, 等. 中药智能制造的变革: 动态矩阵控制在中药制药过程控制中的应用策略与案例分析 [J]. 上海中医药杂志, 2025, 59(2): 1-7.

[54] Zhao M T, Tang Z L, Zhou M Y, *et al*. Online monitoring of Chinese herbal medicine production process toward lean six sigma: Multimodal data fusion based on transformer architecture [J]. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 2026, 351: 127507.

[55] 沙鑫, 常淏, 宋纹, 等. 血府逐瘀浸膏质量智能评价体系构建: 基于物理指纹图谱、机器视觉与大语言模型的联合应用 [J]. 分析测试学报, 2026, 45(6): 1212-1220.

[责任编辑 潘明佳]