

• 专 论 •

以药性为导向的中药传统汤剂煎法数智化发展策略

张雨恬^{1,2}, 伍振峰¹, 于慧铖¹, 鱼欢欢¹, 张 娜¹, 孙冬妍¹, 张佳莹¹, 骆维亮¹, 杨 明¹, 张国龙^{1*},
张 群^{1,2*}

1. 江西中医药大学, 江西 南昌 330006

2. 江西中医药大学附属医院, 江西 南昌 330046

摘要: 中药传统汤剂的药性与煎药方法及工艺密切相关, 查证中药汤剂不同时期发展的特点、厘清煎法及其对汤剂药性形成的影响, 对中药传统汤剂煎法的现代化具有重要意义。传统汤剂的煎煮不仅是将中药化学成分悉数转移至汤中, 还伴随着物化属性的传变, 形成汤剂的药性, 最终实现防病治病的目的。目前中药传统汤剂发展过程中面临传统工艺传承困难、中药产品智能制造不足、制造效率不高、过程控制技术薄弱等挑战, 对此从中药传统汤剂煎法的发展历史及特点出发, 通过中药传统汤剂的科学内涵、工艺传承、设备现代化以及过程质量评价等角度综述中药传统汤剂煎法现代化发展研究进展, 以期为中药传统汤剂的煎法工艺研究及阐释提供理论的支持, 推动中药汤剂的未来数智化发展研究。

关键词: 中药汤剂; 煎煮工艺; 煎药设备; 数智化; 中药药性

中图分类号: R285 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253 - 2670(2025)24 - 8869 - 12

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.24.001

Development strategy for digitalization and intelligence of traditional Chinese herbal decoction methods guided by pharmacological properties

ZHANG Yutian^{1,2}, WU Zhenfeng¹, YU Huicheng¹, YU Huanhuan¹, ZHANG Na¹, SUN Dongyan¹, ZHANG Jiaying¹, LUO Weiliang¹, YANG Ming¹, ZHANG Guolong¹, ZHANG Qun^{1,2}

1. Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330006, China

2. Affiliated Hospital of Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330046, China

Abstract: The pharmacological properties of traditional Chinese herbal decoctions are closely related to the methods and processes of decoction. Investigating the characteristics of the development of Chinese herbal decoctions at different stages, and clarifying the methods of decoction and their impact on the formation of pharmacological properties, are of great significance for the modernization of the decoction methods of traditional Chinese herbal decoctions. The decoction of traditional herbal decoctions is not only a process of transferring all the chemical components of Chinese herbal medicine into the liquid but also involves the transformation of physicochemical properties, thereby forming the pharmacological properties of the decoction and ultimately achieving the goal of preventing and treating diseases. Currently, the development of traditional Chinese herbal decoctions faces challenges such as difficulties in inheriting traditional processes, insufficient intelligent manufacturing of Chinese medicine products, low manufacturing efficiency, and weak process control technology. This paper, starting from the development history and characteristics of the decoction methods of traditional Chinese herbal decoctions, reviews the research progress of the modernization of the decoction methods of traditional Chinese herbal decoctions from the perspectives of scientific connotation, process inheritance, equipment modernization,

收稿日期: 2025-09-09

基金项目: 江西省自然科学基金项目 (20224BAB216103); 中国医药会计学会数智财务分会 2025 年度课题 (2025SZCWY13); 中药科研实践创新训练项目 (24KYCX-YB030, 24KYCX-YB062); 景德镇市重大科技研发专项“揭榜挂帅”项目 (景财科指 [2022] 41 号); 技术开发委托合同 (53523807)

作者简介: 张雨恬, 博士, 副教授, 从事中药炮制及中药制剂现代化研究。E-mail: zhangyutian@jxutm.edu.cn

*通信作者: 张国龙, 讲师, 从事生物医学信息检测与分析。E-mail: 20070941@jxutm.edu.cn

张 群, 高级会计师, 事中医药信息数据分析与挖掘研究。E-mail: zhangqun@jxutm.edu.cn

and process quality evaluation. It aims to provide theoretical support for the research and elucidation of the decoction methods of traditional Chinese herbal decoctions and to promote the future digital and intelligent development research of Chinese herbal decoctions.

Key words: traditional Chinese medicinal decoction; decoction process; decoction equipment; digitalization and intelligence; pharmacological properties of Chinese medicinal materials

中药汤剂是中医药应用最广泛的剂型之一^[1]，自古以来，中药传统汤剂以“工艺-药性-疗效”为核纽带，药性理论作为其科学基石，不仅凝聚了中医药千年实践经验，更是中药发挥治疗作用的本质所在。经传统中医药基础理论指导，对中药复方按煎煮理论和经验制得，具有吸收利用率高、个体化鲜明、可随证加减等特点。中药汤剂的药性理论作为和品质与临床疗效直接相关，古往今来，医家对煎煮工艺影响药性的认知一脉相承，《伤寒论》《本草纲目拾遗》等典籍在记载方剂时必附煎煮法，重点规范加水量、时长、器具等关键参数^[2]；李时珍在《本草纲目》中警示“煎药者鲁莽造次，水火不良，火候失度，则药亦无功”，徐灵胎在《医学源流论》中强调“药专以之治病”，煎煮之法“载于古方之末者种种各殊”，二者均揭示工艺精准性对药性表达的决定性作用。正如贾天柱教授所言：“性之所存，药之固有；性之所现，功用相托；性之根本，物质所在；性之不同，其质迥异”^[3]，深刻阐明药性是中药内在物质与外在功效的统一体。

现代药学虽通过《医疗机构中药煎药室管理规范》《药品生产质量管理规范》等标准体系，显著提升了汤剂得率、效率与稳定性，但在药性传承维度仍面临三重矛盾：传统技艺断层导致药性调控经验流失，智能制造不足制约药性标准化实现，过程控制薄弱难以保障药性一致性。因此，如何以“药性形成机制”为科学导向，将传统煎煮工艺中的药性调控智慧转化为现代数智化语言成为中药煎药现代化的关键命题。本文通过系统梳理古代典籍与近现代研究，从煎法历史演进、当前瓶颈问题切入，重点剖析“药性导向”的传统煎法精髓，提出通过构建数字化信息数据库、物联网管控系统、在线药性检测平台等关键路径，以期为中药汤剂煎煮工艺的现代转型提供理论支撑，为中药传统汤剂煎煮工艺的现代数智化转型提供参考。

1 中药传统汤剂煎法的发展历史及特点

1.1 殷商时期

《史记·殷本纪》记载：“伊尹以滋味说汤，致于

王道。”殷商时期伊尹将烹饪技术与药物加工相结合，制出汤剂，开创中药煎煮的先河，其所著《汤液经法》为中药方剂学的基础，王好古《汤液本草》记载“殷之伊尹宗之，倍于神农，得立法之要，则不害为汤液”，《黄帝内经·素问·汤液醪醴论·第十四》描述：“帝曰：上古圣人作汤液醪醴，为而不用何也？岐伯曰：自古圣人之作汤液醪醴者，以为备耳！夫上古作汤液，故为而弗服也。”汤液最初采用酒作为溶剂，其质地稀薄，另一种质地为稠浊甘甜的为醪醴。然酒性热，味辛甘，入心肝经。若过量饮用或久用会诱发更多疾病，因此后期逐渐将水作为溶剂进行煎煮^[4]。说明此时已经开始出现中药汤剂，并开始考虑对其中的溶剂种类进行选择。

1.2 秦汉时期

方剂在此期间愈加盛行，涌现出了大量的经典方剂。汉代张仲景所著《伤寒论》把方剂命名为大小青龙汤、白虎汤，玄武汤、朱雀汤等^[5]，该时期还出现先煎、后下、烊化、冲服等特殊煎法；《伤寒论》中详细描述了煎药用水种类^[6]、煎药时间、煎药次数、加水量等制剂工艺关键点^[7]，如“水煎取汁，去渣温服”；根据不同的药性和病情需要，提出了对应的煎煮工艺，如“麻黄汤，先煮麻黄，掠去上沫，再入余药”，这些工艺关键点在后世中药煎煮工艺的发展中奠定了理论和实践基础。

1.3 魏晋南北朝时期

在煎煮方法上，医家们更注重工艺带来的药性变化，《肘后备急方》中记载：“煎药宜用微火，令小沸，勿令大沸，大沸则药力散失”，其中煎煮时间和火候被认为是关键的工艺要素，此外，根据药物性质和病情的需要，还出现特殊的煎煮方法，如“酒煎法”“蜜煎法”等，目的是更好地发挥药性。

1.4 隋唐时期

出现包括煎煮时间、煎煮火候影响药效及用药安全的煎药系统理论，并提出对煎煮器皿进行选择的要求。在政府的推动下编撰出第一部官修本草《唐本草》，《备急千金要方·卷一》“论和合”中对中药煎煮理论有了更为细致描述，“凡煮汤，当取井华

水，极令净洁，升斗分量勿使多少，煮之调和，候火用心，一如炼法。凡煮汤，用微火，令小沸，其水数根据方多少，大略二十两药用水一斗，煮取四升，以此为率……少水而多取汁者，为病须快利，是以少水而多取汁。”其中初步描述了煎煮用水、火候、加水量、煎药次数等工艺要点，并认为不同药性的中药需采用不同的煎煮方法。唐代孙思邈在《备急千金要方》中首创“煮散”工艺^[8]：在方剂配伍保持不变的前提下，通过改变煎煮方式，使汤剂转变为散剂。其中以煮散作为方法的方剂有13首，包括丹参煮散、独活煮散、防风煮散等。

1.5 宋元时期

中药的煎煮在煎煮方法、煎药火候和时间、度量单位进行了发展。从煎煮方法来看，宋代官方主持编撰的成药标准《太平惠民和剂局方》记载有方788首，其中煮散方237首，占29.5%，包含有藿香正气散、消风散、逍遥散等。同时期还有玉屏风散、防风通圣散、当归和血散等煮散名方，以及《圣济总录》《济生方》《小儿药证直诀》等书也记载有煮散方，这些典籍都反映这时期对煮散剂的推崇。为提升方剂药性，医家开始强调煎药期间对火候及煎煮时间的掌握，元代医学家危亦林《世医得效方》中记载有“表、汗、下之药，每服煎至八分，对病药煎至七分，滋补煎至六分”的说法；在对度量单位的规定上也更为清晰，如加水量、煮水量采用“杯”“碗”“盏”等为度量单位。《太平惠民和剂局方》中对大防风汤煎煮方法描述为“每服五钱，水一盏半，入姜钱七片，大枣一枚，同煎八分，去滓”。

1.6 明清时期

药材的供应量提升，期间对中药饮片的品质也提出了更高的要求，修治上重视质地、品种、工具等。如黄宫绣《本草求真》卷四·泻火部中描述“石膏以莹净如云母、白洁细纹者为真，色黯含杂质者禁用”，说明医家在饮片品质的关注升高。《本草纲目》记载：“凡药有宜水煎者，有宜酒煎者，有宜醋煎者，有宜蜜煎者，有宜姜汁煎者，有宜童便煎者”，强调了煎煮介质对药性的影响；《本草纲目拾遗》中对药物的煎煮用水、煎煮器具等进行了深入研究，提出了更为科学合理的煎煮理论。赵学敏所著《本草纲目拾遗》在《本草纲目》的基础上，对中药煎煮工艺进行了进一步补充和完善，并对药物的煎煮方法和注意事项进行了详细说明，如“煎药宜用微火，令小沸，勿令大沸，大沸则药力散失”，这些记

载为后世中药煎煮工艺的发展提供了重要的参考。

1.7 近现代

随着西方医学的传入和科技的发展，中药煎煮方法在传统的基础上也出现了现代化的改进。一方面，现代中医药学者开始尝试对中药煎煮过程中的一些物理和化学现象进行研究，以更好地理解药物有效成分的溶出和变化规律^[9]；另一方面，20世纪90年代起，新型煎药器具与自动化设备逐步推广至临床^[10]，这一技术革新显著提升了中药汤剂的生产效率与使用便捷性，在一定程度上缓解了临床对中药煎剂的供需矛盾；同时，煎煮全程在相对封闭状态下进行，延长了中药煎剂的效期；煎药机从每个环节需要人工控制的半自动煎煮，逐步转变为可调式微电脑控制的全自动煎煮，在传统煎药工艺加水量、煎煮时间、煎煮次数等参数的基础上，针对煎药机扩展了压力、温度指标^[11]，使得现代中药煎剂的煎煮过程高效快捷卫生，改善了传统人工煎药过程中可能存在的微生物繁殖和质量不稳定的问题^[12]。随着中医药现代化发展，中药汤剂的使用形式逐渐扩展为中药颗粒剂与代煎服务，二者在保留传统药性核心的同时，通过工艺革新实现了便捷性与标准化的平衡，但其对药性表达的影响需结合技术特点深入研究。

综上所述，中医药在从古至今的发展历程中，传统煎药方法依托中医基础理论，根据具体疾病进行辨证施治，并通过把控煎煮方式、器具、火候、特殊煎法等传统煎煮方式关键点，不断完善煎煮工艺，并逐步将中药饮片的药性借助通过物化属性的转变，更好地融入传统汤剂，从而发挥临床疗效。各时期的发展特点见图1。

2 中药传统汤剂工艺的现代发展挑战

2.1 中药传统煎煮技术的科学内涵研究不足

中药药性是中医药理论体系中用以概括药物作用性质与特征的核心概念，其内涵包括四气五味、升降浮沉、归经及毒性等，是对药物功效与临床应用规律的高度凝练。药性不等同于药物有效性：后者多通过现代药理学指标（如有效成分含量、药理活性）衡量，而药性包括中医辨证论治中指导用药的整体属性，强调药物与机体的动态适配关系。

中药汤剂的传统工艺正是基于上述药性理论构建的技术体系，其核心在于通过煎煮参数实现药性的人为定向转化或传递。中药传统汤剂的工艺与药性相辅相成，合理的工艺能够保证药物的药性稳



图1 传统煎法的历史沿革及各时期发展特点

Fig. 1 Historical evolution and developmental characteristics of traditional decoction methods in different periods

定、有效成分充分转化释放，从而发挥良好的治疗效果^[13]；而根据药物的药性来选择和调整工艺，又能更好地发挥药物的疗效，减少不良反应。现代煎药过程中易忽视中药传统汤剂的药性传变，致使难以全面理解中药传统汤剂工艺的科学内涵。

在临床应用中，中药汤剂常需随证加减，这既凸显了其个体化治疗的优势，也增加了工艺控制的难度，需要临床医生和药师密切配合，不断探索和优化工艺，以确保汤剂药性稳定、疗效显著。在质量评价方面现有研究多聚焦成分含量测定，难以构建有效的中药汤剂药性评价体系；且多学科交叉研究不足，难以从多角度解析煎煮工艺与药性的关联性。

中药汤剂药性也受物理化学属性指标影响：前人在传统煎药发展过程中发现，中药会随着膨胀、

溶解、吸附等物理属性变化影响煎剂药性，为维持煎剂整体药性的稳定表达，提升煎剂的品质，总结出煎前浸泡、包煎、烊化、绞渣取汁等处理工艺^[14]；同时煎煮过程中的药效成分会随着时间、温度、溶剂^[15]等工艺参数的调整而发生动态变化，总结出如后下、大火、加辅料煎以及病势轻浅者宜短时间煎煮，病势深重者宜长时间煎煮等工艺理论^[16]，如调味承气汤为短时间煎煮，小承气汤为一般煎煮，而大承气汤则为长时间煎煮，病位居高者宜短时间煎煮，病位居下者宜长时间煎煮等；《伤寒论》中对含麻黄方剂的煎煮工艺有特殊要求^[17]。如桂枝麻黄各半汤“以水五升，先煮麻黄一二沸”，麻黄汤“以水九升，先煮麻黄减二升”，二者通过用水量差异控制煎煮时长，提示煎煮时间与麻黄发挥药性强度存在关联性。

科学实验推测出，中药煎煮的过程中不仅是化学成分的简单热提取过程，还伴随着汤剂有效成分含量和结构的动态变化，其产生因素可能为成分水解、降解、氧化等化学反应，或氢键、 π - π 堆积、范德华力等非共价键相互作用^[18-19]，最终形成中药汤剂中的复杂超分子集团或多相态体系^[20-22]，引发对中药汤剂的药性造成影响^[23]，进而体内对化学成分的吸收转运路径及药效。而目前对于这种动态变化过程的监测和分析手段还不够完善，对于这些物理化学属性变化之间的相互关系以及对药性的综合影响研究还不够深入，对药性如何设立相应的指标，如何量化，以及其发生机制、影响因素、如何控制等问题还缺乏系统的研究，导致对汤剂成分在煎煮过程中的真实变化情况了解有限，缺乏系统的规律总结^[24]。

2.2 传统煎煮工艺传承难，无现代标准化的煎煮方式

中药复方基于辨证施治原则，呈现“千人千方”的个体化特征，其煎煮方式也需随药方配伍动态调整——这既是传统煎煮技艺的精髓，也是现代传承发展的核心难点。北宋《太平圣惠方》明确强调“凡煮汤……其水数依方多少，不得参差”，从溶媒用量角度确立了“方药量效”的对应关系；李时珍在《本草纲目》中指出“剂多水少则药味不出，剂少水多又煎耗药力”，则从药物浓度与疗效的关联性出发，提示煎煮参数需与药方配伍精准匹配。这些记载表明，传统煎煮并非随意操作，而是在长期实践中形成的、兼具灵活性与规范性的技术体系。

然而当前传统煎煮体系面临三重困境：其一，因资深从业者锐减及理论体系断层，导致技艺失传、操作失范、工艺标准缺失，难以复现古法汤剂的药性特征^[25-27]；其二，门诊患者对特殊煎煮方法的认知水平显著不足，提示医疗机构需强化宣教指导^[28]；其三，核心矛盾在于国家级煎煮工艺参数标准的缺失，致使不同地域、医疗机构及操作者间的工艺差异显著，直接加剧了汤剂药性与品质的不稳定性^[29]。这种“传统技艺断层-患者认知不足-标准体系缺失”的叠加效应，构成了制约中药汤剂质量可控性的关键瓶颈。

中药代煎服务和配方颗粒作为现代中药煎剂的一种重要形式或替代品，虽在一定程度上提高了中药煎剂的便利性和标准化程度，但它们在模拟传统煎煮工艺、保证药性稳定等方面仍面临难以完全适应个体化的随证加减需求、难以精准控制每味药

的特殊煎煮要求；在复方应用时，配方颗粒间的相互作用与传统汤剂还可能存在差异，可能影响整体疗效等诸多难点。这些难点不仅影响了中药汤剂的临床疗效，也对中药现代化和标准化提出了新的挑战。

因此，如何在保留传统煎煮工艺精髓的基础上，结合现代技术手段，传承传统中药煎煮工艺，同时充分考虑中药药性的特点和变化规律，建立现代标准化的煎煮方式，是当前中药煎剂领域亟待解决的问题。

2.3 现代化煎煮工艺与设备的关联性不够，智能化水平不高

相比于机械制造、电子制造等数字化、智能化程度高的产业，中药制药行业整体数字化、智能化水平较低，但近年来，随着国家政策的支持和企业自身对转型升级的需求，传统中药制造产业逐步向信息化、数智化等现代化转型^[30]，并在传感器、人工智能取得了显著进展，呈现加速发展的态势。中药煎药产业也由简单工具的小规模手工操作到量产的煎药机，逐步向半智能及智能化中药汤剂制备产线发展。

“随证加减”是传统中医药临床治疗的重要原则，也是中药汤剂个性化治疗的核心体现。然而，这一原则的实施对煎煮工艺和设备提出了极高的要求。目前中药智能化煎煮生产线主要是实现对某个模块智能化或对某个参数进行自主控制，对煎煮全过程的智能化尚有升级的空间。大多数煎药机没有搭载可具备依据组方功效、中药种类属性和工艺参数进行自我决策的功能模块，难以依方自主选择合适的煎药工艺及其参数，制造效率较低，例如，在临床实践中，医生根据患者病情的变化随时调整药方，但现有的智能化煎煮设备难以实时响应这种变化，无法根据新的药方自动调整煎煮工艺和参数，导致煎煮的中药汤剂可能无法达到最佳的治疗效果。煎煮设备整体缺乏自主化的个性调控软件，未装载具有自动调整功能的煎煮工艺参数模块，难以实时反馈及控制参数，这在随证加减的情况下尤为明显，需煎药人员人工或半人工操作调整，这就难以保证每次调整的精准性和一致性，从而影响中药汤剂的质量和疗效^[31-32]；数字化煎煮信息库与现代煎煮设备智能化不足、关联性不强，尚未完全实现煎药信息数据库与煎煮设备智能硬件融为一体的系统设计方案，未能全面实现自动化、智能化的“千方百煎”“个性化自煎”生产线。

总之，尽管中药煎药产业在现代化转型中取得

了一定进展，但在随证加减这一核心需求面前，现有的智能化煎煮工艺和设备仍存在诸多不足。未来还需要进一步加强技术研发，提高煎煮设备的智能化水平，实现煎煮工艺与设备的深度融合，以更好地满足中医临床治疗的个性化需求，确保中药汤剂的质量和疗效。

2.4 缺乏对过程监控的中药煎剂质量评价技术

作为临床的重要组成部分，现代医院煎煮的中药汤剂药性与中医临床疗效直接相关^[33]。2009 年起，卫生部、国家中医药管理局接连印发《医疗机构药事管理规定》《医院中药饮片管理规范》《医疗机构中药煎药室管理规范》，推动了全国医院煎药室的建立及自动化煎药设备的普及应用。2021 年 6 月由中华中医药学会发布的《中药汤剂煎煮规范》团体标准（T/CACM 1366-2021）团体标准及各省发布的中药煎药质量管理相关规范，如上海中药行业协会 2024 年 9 月发布《中药煎药质量管理规范》团体标准（T/SHATCMI 0001-2024）、2022 年河北省医药行业协会《河北中药煎药质量管理规范》团体标准（T/HBYY 0006-2022）等，对中药煎煮过程中的质量管理提出了细致的规定^[34-35]，《上海市药品和医疗器械管理条例》（十六届）第四十七号自 2025 年 3 月正式施行，明确规定了中药饮片代煎服务的相关规范，对从事中药煎煮工作的专业人员有明确指导意义。

研究表明，传统的煎煮工艺不仅是最大程度转移出饮片中的有效成分，还存在物化属性的持续转变，然而，传统检测方式通常依赖于定期检查和抽样监测，或依靠人工经验判断，无法实现对生产过程的实时监控、难以对煎煮终点及时准确判断。这种监管方式存在质量检测滞后、无法及时识别并纠正操作中的错误等问题，难以保证终产品质量的均一性和有效性^[36]因此持续性的监测有助于理解煎煮过程中的药性变化、判断煎煮的终点，进而探索其科学内涵。目前中药生产过程中还缺乏有效的监测技术，如 TLC、HPLC 等实验室较常见的色谱分析技术，因其检测周期较长，导致结果滞后、时间物料成本高等问题，难以对中间体进行质量评价，从而实现对成品品质的预测和制药过程参数的控制。

3 以药性为导向的中药传统汤剂煎法现代化发展策略

面对中药传统汤剂产业现代化发展中出现的中药传统煎煮技术的科学内涵研究不足、传统煎煮工艺传承难，现代煎煮方式未全面标准化、现代化

煎煮工艺与设备的关联性不够，智能化水平不高、缺乏对过程监控的中药煎剂质量评价技术等挑战和问题，提出建立以药性为基础的中药传统煎煮的科学内涵研究、构建数智化传统煎煮工艺信息系统、数智化智能中药工艺设计体系的构建、以过程分析技术为基础建立中药煎剂质量管理体系该技术可进一步增强对中药煎剂生产过程的理解和最终产品的控制。

3.1 建立以药性为基础的中药传统煎煮的科学内涵研究

中药药性理论的演进根植于数千年临床实践的经验积淀，其理论体系涵盖药物的四气、五味、归经及毒性等。这一理论体系既是对中药内在属性与治疗效用的高度概括，也是中医临床组方用药的根本遵循准则^[37]。

3.1.1 挖掘煎药过程中形成汤剂药性的关键工艺因素 经典著作《伤寒论》《本草纲目拾遗》等中对其中药的药方附有煎煮工艺的记载，其重点多关注在加水量、煎煮时间、煎煮工具等方面。现代对汤剂的研究逐步加深，徐蓓蕾等^[38]对通过加水量、煎煮时间以及煎煮次数的调整对葛根芩连汤中总黄酮和总生物碱的溶出时间和含量进行研究，发现 2 个成分的含量出现先增加后减少的情况。王佳琳等^[39]对栀子柏皮汤进行研究，发现随着煎煮时间的增加和其药效组分含量也逐步增加并在 20 min 附近达到顶峰，之后降低。这说明煎煮的目的不仅是将中药中的成分提取至溶剂中，在汤剂的制备过程中，还伴随着化学变化和物理变化，并形成了中药汤剂中复杂的多相体系^[40]，从而影响中药汤剂的药性^[18-19]。物质基础的转变可以运用现代光谱及色谱等方法表征其物理结构，运用超分子化学原理^[41]表征中药材关键质量属性，如红外光谱、拉曼光谱^[42-43]、核磁共振、等温滴定量热法等，分析汤剂药性物质组成与形成规律^[44]，挖掘影响汤剂药性形成过程中的关键因素。

3.1.2 多手段研究中药汤剂的药性变化 在传统中药汤剂的药性研究中，通过客观量化物质基础及化学生物学、细胞生物学、物理特性、毒效关联等多维度科学表征解析中药药性的转变已成趋势^[45]。对于传统中药汤剂中出现的四气五味变化，研究者们采用了多种方式进行研究，如肖小河教授团队通过生物能量学表征四气^[46]，并采用冷热板差示法、微量量热法等方法，将药性转化为热功率、焓变等量化参数，并区别出左金丸与反左金丸、生晒参与

红参等方药的寒热属性。徐钦涌等^[47]还通过构建寒热属性判别模型对化学元素进行寒热的初步判断。而五味多通过感官进行描述,王小鹏等^[48]对近红外光谱技术应用于中药四类味觉分类辨识进行了可行性分析,电子舌、电子鼻等仪器量化味觉嗅觉强度并构建味觉模式识别模型。并通过定量一味觉印证苦的功效^[49],宁滢等^[50]还发现中红外光谱和拉曼光谱技术均可应用于中药饮片五味的辨识研究。

中药的归经反映在成分对人体脏腑经络的选择性上,研究者发现,氚标记的牛膝蜕皮甾酮在体内的脏腑选择性分布与其“归肝肾经”的传统记载高度吻合^[51];单归经药物多呈单峰响应谱,双归经药物则为双峰响应谱,波峰与归经数量一致,印证归经与生物光子能量特征的关联性^[52]。

部分中药含有有毒成分易引发毒性反应,传统多通过炮制、配伍等方式减毒增效。李瑞煜等^[53]基

于代谢组学方法对制附片煎煮过程成分变化规律及煎煮时限进行探讨,发现附子中单酯型生物碱的水解随着时间的延长而逐步发生转化,极毒的双酯型生物碱在温度的影响下水解为较小毒性的单酯型生物碱。段小花等^[54]在中药附子毒性研究中发现,随着药物剂量增大和煎煮时间延长,其毒性降低;同时特殊煎法也影响汤剂性质,《伤寒论》中记载的特殊煎法如先煎去沫、去滓再煎、与蜜同煎等方法对汤剂的毒性减轻有一定的效果^[55]。同时,煎药工具有可能对中药汤剂的药性造成影响,如铁锅煮的过程中释放出的 Fe³⁺对甘草多糖发挥增溶、促稳效果具有不良影响^[56]。另外,药性方面还可以关联代谢组^[53]、转录组^[57]等现代方法,多角度分析煎煮工艺与药性之间关联,建立起以药性为基础的中药传统煎煮的科学内涵研究。其研究内容见图 2。



图 2 以药性为基础的中药传统煎煮的科学内涵研究

Fig. 2 Research on scientific connotation of traditional Chinese medicine decoction based on medicinal properties

3.2 构建数智化传统煎煮工艺信息系统

中药传统煎煮的工艺信息主要来源于基于中药基础理论的经方、名方、临床处方等,煎煮工艺及特殊煎法多附于药方中或药方后方,工艺参数不易筛选整理、表述信息多为文言文晦涩难懂、缺乏科学明晰的分类方法^[58],因此构建传统煎煮工艺信息系统的基础是建立结构化的数据资源^[59]。

张本俊等^[60]基于西南地区竹编工艺的数据构建出数字化平台,陈诺通过构建工艺数据库与工艺知识图谱之间的映射关系,实现对工艺数据结构化部分的数据提取^[61]。将目前报道的文献信息收集整

理获得以下步骤。①基于中药汤剂传统煎法的数据库:将文言文信息转换为现代化语言,规范相应名词计量单位,人工筛选关键信息并在数据库中录入,建立涵盖饮片基本信息、质量控制信息、传统煎煮工艺信息等的现代中药汤剂煎法结构化信息库数据库^[62];②基于传统煎煮工艺数据库构建煎药规则库:不同煎药工艺对应不同的功效,结合中医药理论指导下的中医辨证信息,分析其药性并出具个体的剂量设置和煎药工艺参数单^[63],并明确特殊煎煮规则,由于中医治疗强调辨证论治,随证加减是根据患者病情的变化随时调整药方的重要手段。

因此，煎药规则库不仅要包含固定方剂的煎煮规则，还需要能够根据药方的变化动态调整煎煮工艺参数，以确保每次煎煮的中药汤剂都能精准地反映药方的变化，发挥最佳的治疗效果；③推动现代化煎药软件的创建：收集现代中药汤剂煎煮规范的相关标准、煎药数据和煎药工艺规律等形成规范库，如煎药过程中的有效成分提取模型^[64-66]、药动学模型^[67]等，并从关键工艺参数、关键指标建模，通过算法模拟人类智能，实现数据处理、模式识别和决策自动化^[68]，由此开发兼具标准化和个体化的煎药软件，能够自动生成煎药工艺清单。在开发过程中，软件需要具备处理“随证加减”情况的能力，即当药方发生变化时，软件能够自动识别新增或减少的药物，根据其药性特点和煎煮要求，动态调整煎煮工艺参数，确保煎煮过程的科学性和合理性。参考以上步骤，可以构建一个高效、准确、易于使用的数字化传统煎煮工艺数据库，为中药煎煮的标准化和个性化提供有力支持。

3.3 数智化中药煎煮工艺体系的构建

医药工业的数智化离不开物联网技术的融合，如今物联网技术在数智医药领域有里程碑的进步^[69]，2025年国家发布了《医药工业数智化转型实施方案（2025—2030年）》的通知，明确提出“深入推进人工智能赋能新型工业化，推动新一代信息技术与医药产业链深度融合，加快推进医药工业数智化转型”的要求。构建数智化中药煎煮工艺体系的核心是将中药煎剂工艺参数的数字化系统与工艺设备相关联，在工艺及产品的数据信息库基础上，传感器在线反馈煎煮信息变化情况，并协同调整煎煮机的工艺参数，实现数据库与煎煮系统的共享和联动控制^[70]。

此外，在前期收集的中药大生产工艺信息库和知识库基础上，开展基于模型的物料、工艺和装备协同设计与优化，提高工艺放大和生产过程可靠性。将高质量的工艺和质量数据集结合数学建模方法或人工智能算法，实现数据增强，能辅助理解中药汤剂药性和关键物料属性（critical material attributes, CMA）和关键工艺参数（critical process parameters, CPP）之间的规律，从而实现数据和工艺之间的闭环控制。提升工艺模型可靠性和工艺参数的可调控性，维持生产过程的稳定性和可控性^[71-72]。为提升产品质量和生产效率，在获取每批次大生产

中的物料关键质量属性、煎煮工艺参数、设备的各项数据后，通过药性表征、原辅料分析、工艺建模、仿真优化和实验验证等过程，对煎煮生产线中涉及的科学内涵和药性形成的关键因素进行深入的分析，并应用机器学习、多物理场耦合与集成仿真等技术，逐步形成设备、产线、车间等数据孪生，实现生产全流程模拟。其工艺体系框架见图3。

参考徐建平^[73]设计的一款上甑工匠机器人，首先将手法和技艺建立相关数据库，并模仿人工进行结构设计和算法规划。此外，工匠机器人还集成传感器，可将感知的数据传送至云服务器，从而进行云计算处理和深度学习，取得了较理想的效果。

3.4 以过程分析技术为基础建立中药煎剂质量管理体系

在中药产业自动化程度不断提升的背景下，根据中药的特点，以提升中药产品药性及品质为目标，推动中药生产过程的连续化和质量可控性，成为当前中药制药分析的主要任务。2004年9月，美国FDA发布了关于过程分析检测技术指导草案^[74]，该草案建议在制药过程中探索在线分析技术的实施，在中药煎剂自动化程度不断提高的大环境下，根据中药煎剂产业化的质量控制的特点，过程分析技术（applying process analytical technology, PAT）赋予了极大的发展前景，熊皓舒等^[75]对中药制药PAT技术固有特点和现状分析，认为可将其应用在中药古法煎煮数字化工作中，并归纳了中药制药PAT研究的总体思路。

在中药煎剂生产过程中，可以将煎煮数字化信息系统与相关煎煮设备/模块的数据共享，并以中药煎煮过程中的各批次产品关键成分指标的在线监测为基础，通过数学建模、数据分析等技术，对煎煮设备或某个模块的操作过程建模，如CPP、挖掘关键物料属性、建立关键设备属性的关系模型，探索制剂工艺参数对药品质量的影响规律^[76]形成动态精准的过程监测和反馈模型，赖长江生探索出1种中药煎煮体系实时分析装置，具有无需预处理、高效、快速、简便的优点^[18]。并及时发现生产过程中出现的不寻常事件，并通过反馈机制迅速进行调整，减少该事件引发面积。扭转中药质量难以控制的局面^[77]后期还可建立工艺开发数据管理平台，将制备中物料、半成品到成品中的工艺设备、分析仪器的相关数据进行统一管理，保障工艺质量控制，

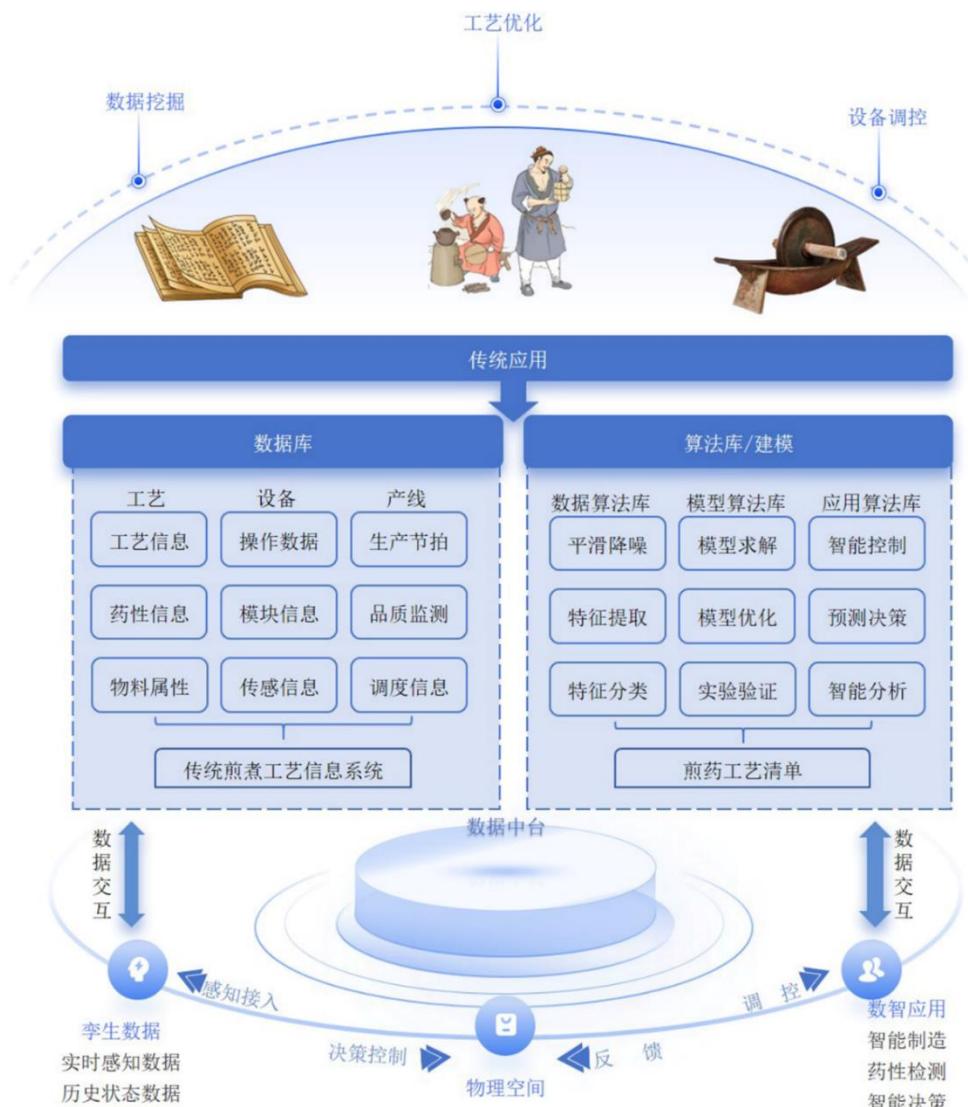


图 3 数智化中药煎煮工艺体系框架图

Fig. 3 Framework diagram of digital-intelligent traditional Chinese medicine decoction process system

提升工艺开发效率，实现工艺精准开发及质量控制。熊皓舒等通过于物性表征结合多变量统计分析多批次的复方丹参提取物^[78]。Wang 等^[79]展示了一个集成深度学习和机器视觉的实时系统，用于不规则形状的薄膜涂层平板的缺陷检测和涂层厚度测量，用于实时评估不规则形状片剂的质量，提高生产效率，优化质量控制。中药生产过程分析要求快速、简便，光谱法多为：光学成像技术^[80]，红外光谱、紫外-可见光谱动态光散射等；色谱及结构分析技术包括：气相色谱、质谱、核磁共振及 X 射线荧光等^[81]。其中近红外^[82]和拉曼光谱技术^[83]以其快速、无需样品预处理、测量信号可远距离传输等特点多用于 PAT 分析上。随着中药制药产业生产过程

研究的不断发展，PAT 在中药制剂生产过程也逐渐取得突破，可进一步增强对中药制剂生产过程的理解和最终产品的控制，PAT 将有可能成为药品生产过程智能化监测未来的发展方向。

4 结语与展望

随着科技进步与信息化水平的不断提高，中药生产各环节的数智化转型迫在眉睫^[61]。本文基于中药汤剂煎煮过程中的药性形成因素，对中药汤剂的发展历史、主流观点、工艺要素等信息进行调研，发现作为中医药剂生产中最为普遍和核心的环节之一，中药汤剂煎煮方法在现代化发展中仍存在一系列挑战，如科学内涵认识不足；工艺经验化，缺乏标准；现代化工艺与设备的关联度不够，智能化

水平尚浅；中药煎剂质量评价方式亟待更新等，并提出未来可以深入研究中药汤剂煎法对药性的影响机制，丰富中药汤剂煎法的科学内涵；深入开展中药汤剂的现代化煎药工艺研究，构建数智化、过程分析技术深度融合的中药煎剂工艺信息系统和质量管理体系，为日后中药煎煮工艺的数智化及相关中药制剂的现代化开发铺垫一定的理论基础。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 陈息明. 中药煎煮技术 [J]. 实用医技杂志, 1993, 6(2): 548-549.
- [2] 刘月, 罗云, 谭婷, 等. 《伤寒论》和《温病条辨》中汤剂煎煮终点的判断 [J]. 中草药, 2020, 51(24): 6405-6413.
- [3] 贾天柱. 中药炮制药性变化论 [J]. 中成药, 2019, 41(2): 470-471.
- [4] 王凤秀, 戴莹, 翟华强, 等. 中药煎煮历史源流与技术研究 [J]. 山东中医药大学学报, 2018, 42(2): 109-112.
- [5] 柯雪帆. 伤寒论选读 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996.
- [6] 张再重, 魏雅娜. 张仲景《伤寒杂病论》中煎药用水浅谈 [J]. 河北北方学院学报, 2005(3): 70-71.
- [7] 郑虎占, 魏宝忠, 刘迪谦. 《伤寒论》与《金匮要略》汤剂煎煮方法初探 // [A] 全国中药调剂与临床合理用药学术会议 [C]. 亳州: 中华中医药学会, 2011: 19-33.
- [8] 李睿, 翟华强, 田伟兰, 等. 中药煮散的历史源流及其与现代配方颗粒的对比性分析 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41(5): 965-969.
- [9] 王凤霞, 陈芳雯, 沈成英, 等. 中药汤剂煎法的科学内涵研究进展 [J]. 中国中药杂志, 2025, 50(4): 994-999.
- [10] 姜黎滨. 中药煎药机的应用及发展方向探讨 [J]. 现代中西医结合杂志, 2009, 18(18): 2177-2178.
- [11] 陈爱娟, 蒋斌, 朱慧, 等. 半夏厚朴汤的机器煎煮工艺研究 [J]. 当代医学, 2015, 21(32): 3-6.
- [12] 李睿, 翟华强, 田伟兰, 等. 基于煎药机参数分析的中药煎煮规范化思考 [J]. 山东中医杂志, 2016, 35(9): 826-828.
- [13] 杨蓉, 郑虎占. 中药煎煮法的现代研究概况 [J]. 中国医药科学, 2012, 2(17): 44-46.
- [14] 朱耀萱, 陈伟, 王振中, 等. 麻杏石甘汤抗菌活性的空间异质性及其物理结构基础 [J]. 药学学报, 2021, 56(8): 2112-2118.
- [15] 谭雯, 蔡明阳, 刘珍洪, 等. 从纳米气泡水的增溶特性理解甘澜水的煎药意义 [J]. 中国中医基础医学杂志, 2023, 29(8): 1303-1306.
- [16] 任红艳, 田永衍, 梁晶, 等. 《伤寒论》方药煎煮时间浅析 [J]. 光明中医, 2009, 24(5): 953-954.
- [17] 杨文华, 王莹, 潘霖, 等. 麻黄“先煮”“去沫”理论的历史演变规律与探讨 [J]. 中南药学, 2024, 22(8): 2206-2211.
- [18] 赖长江生, 陈泽炎, 邱子栋, 等. 中药煎煮的化学反应机制研究现状 [J]. 中国中药杂志, 2023, 48(4): 890-899.
- [19] 韦玉芳, 窦志英, 金传山, 等. 中药汤剂中的微粒研究进展 [J]. 药学学报, 2023, 58(2): 339-350.
- [20] 张瑶芝, 皮雯敏, 谭心如, 等. 基于中药超分子探究甘草配伍石膏与 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的汤剂相态、物质形态和晶型状态差异 [J]. 中国中药杂志, 2025, 50(2): 412-421.
- [21] 沈成英, 胡菲, 朱君君, 等. 中药自组装纳米粒的形成及应用研究进展 [J]. 中国中药杂志, 2021, 46(19): 4875-4880.
- [22] Gao Y, Dong YY, Guo Q, et al. Study on supramolecules in traditional Chinese medicine decoction [J]. Molecules, 2022, 27(10): 3268.
- [23] 窦金金, 张喜武, 王璐璇, 等. 以有效相态为视角的生脉饮有效迭代相态研究及药效学验证 [J]. 中草药, 2021, 52(4): 993-999.
- [24] 王琪, 郭小萌, 倪乾坤, 等. 中药水煎液自组装聚集体研究面临的问题初探 [J]. 药学学报, 2024, 59(1): 94-104.
- [25] 刘红, 陶学仁. 健康中国战略视角下中药代煎发展现状与策略 [J]. 江西中医药大学学报, 2024, 36(4): 106-109.
- [26] 张金良, 李国华, 邢忠, 等. 对标准重量经方溶媒/药物比值的研究探讨 [J]. 中国民族医药杂志, 2023, 29(7): 44-47.
- [27] 饶春梅. 煎药机与砂锅煎煮感冒清热方及乐脉方的实验药理学研究 [D]. 北京: 北京中医药大学, 2009.
- [28] 张文瑞, 薛静. 门诊患者中药煎煮掌握情况调查与分析 [J]. 临床合理用药杂志, 2022, 15(17): 147-150.
- [29] 李晖. 传统煎药与现代煎药机对于中药汤剂疗效发挥的比较研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2014.
- [30] Sarah Arden N, Fisher A C, Tyner K, et al. Industry 4.0 for pharmaceutical manufacturing: Preparing for the smart factories of the future [J]. Int J Pharm, 2021, 602: 120554.
- [31] 赖潇潇, 吴招娣, 袁鑫, 等. 麻黄汤机器煎煮与传统煎煮的等效性研究 [J]. 中药材, 2024, 47(12): 3088-3091.
- [32] 李雅静, 何洁, 王羽程, 等. 机器煎煮、传统煎煮所得中药汤剂质量比较 [J]. 中成药, 2024, 46(2): 552-555.
- [33] 黄晓巍, 刘玥欣, 徐岩, 等. 吉林省医疗机构中药煎药室标准化建设评价机制研究 [J]. 世界最新医学信息文摘, 2019, 19(92): 291.
- [34] 饶兰兰, 熊诗慧, 刘昀, 等. 中药煎药关键问题及其影响因素分析与规范化策略 [J]. 江西中医药大学学报, 2024, 53(1): 1-6.

- 2024, 36(6): 121-128.
- [35] 赵倩, 赵琳, 赵越, 等. 416 所医院煎药室质量管理现状调研与影响因素分析 [J]. 中国医院, 2025, 29(2): 21-24.
- [36] Chen W J, Xu Y C, Liu W G, et al. Discussion on the supervision mode of quality and safety risk of consumer products [J]. MATEC Web Conf, 2018, 228: 05016.
- [37] 肖小河. 中药药性研究概论 [J]. 中草药, 2008, 39(4): 481-484.
- [38] 徐蓓蕾, 韩晓宇, 刘晶晶, 等. 基于 Box-Behnken 设计响应面法与质量综合评价优化葛根芩连汤煎煮工艺 [J]. 中草药, 2022, 53(22): 7070-7081.
- [39] 王佳琳, 张贵君, 郭亚芳, 等. 煎煮时间对栀子柏皮汤药效组分的影响 [J]. 世界中医药, 2018, 13(9): 2300-2303.
- [40] 张则宽, 王琪, 郭小萌等. 基于相态变化探究煎煮方法与纯化工艺对经典名方吴茱萸汤药性传递的影响 [J]. 中草药, 2025, 56(2): 430-440.
- [41] 陈旺, 谢茹, 贺鹏, 等. 基于因子旋转法与超分子“印迹模板”的活血化瘀中药“物质单元”解析 [J]. 中草药, 2025, 56(17): 6159-6172.
- [42] 程虹, 梁浩, 李文妍, 等. 基于拉曼光谱的苦味中药药性辨识方法 [J]. 中华中医药杂志, 2023, 38(9): 4120-4124.
- [43] 刘淑明, 梁浩, 程虹, 等. 基于拉曼光谱的中药升降浮沉药性辨识方法研究 [J]. 中国中医药信息杂志, 2023, 30(10): 134-138.
- [44] 魏吉昌, 林晓钰, 张景怡, 等. 基于相态变化探讨煎煮方式对黄芩-黄连超分子物质基础及配伍“和合”机制的影响 [J]. 中草药, 2024, 55(24): 8366-8378.
- [45] 毛霞, 张彦琼, 徐颖, 等. 临床中药学视域下的中药药性理论现代研究——从科学表征到精准用药的转化与展望 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2025, 31(19): 71-80.
- [46] 肖小河, 王伽伯, 赵艳玲, 等. 药性热力学观及实践 [J]. 中国中药杂志, 2010, 35(16): 2207-2213.
- [47] 徐钦涌, 黄志帮, 姚思梦, 等. 基于化学元素的部分中药药性量化方法的比较研究 [J]. 中草药, 2024, 55(17): 5964-5971.
- [48] 王小鹏, 张璐, 陈鹏举, 等. 近红外光谱技术应用于中药四类味觉分类辨识的可行性分析 [J]. 中草药, 2023, 54(4): 1076-1086.
- [49] 荆文光, 赵小亮, 张权, 等. 基于电子舌和多成分定量技术的厚朴“苦味”药性物质基础研究 [J]. 中国现代中药, 2022, 24(2): 258-264.
- [50] 宁滢, 文有青, 颜月玲, 等. 基于中红外和拉曼光谱技术对中药饮片五味的辨识研究 [J]. 中成药, 2025, 47(2): 659-663.
- [51] 武密山, 赵素芝, 任立中, 等. ³H-牛膝蜕皮甾酮在小鼠体内组织定量分布与归经关系的研究 [J]. 中国中药杂志, 2011, 36(21): 3018-3022.
- [52] 马千里, 黄金昭, 庞靖祥, 等. 中药材延迟发光的激发频率响应与归经的关系初探 [J]. 中华中医药学刊, 2013, 31(12): 2619-2622.
- [53] 李瑞煜, 张定堃, 韩雪, 等. 基于代谢组学方法的制附片煎煮过程成分变化规律及煎煮时限探讨 [J]. 中草药, 2016, 47(1): 38-45.
- [54] 段小花, 马晓霞, 陈艳林, 等. 不同剂量和煎煮时间的附子煎剂对小鼠非特异性免疫和毒性的影响 [J]. 时珍国医国药, 2019, 30(2): 345-347.
- [55] 刘罗娜, 李小芳, 廖艳梅, 等. 《伤寒杂病论》中毒性中药特殊煎法的现代研究与思考 [J]. 中药与临床, 2019, 10(S2): 65-69.
- [56] 冯涛. 甘草多糖铁对 14 种中药单体成分及白芍有效成分溶解性和稳定性的影响研究 [D]. 天津: 天津中医药大学, 2020.
- [57] Van den Berg K, Perraudeau F, Soneson C, et al. Observation weights unlock bulk RNA-seq tools for zero inflation and single-cell applications [J]. Genome Biol, 2018, 19(1): 24.
- [58] 王莹, 肖莉, 陈伟, 等. 中药智能制造的发展与展望 [J]. 中医药导报, 2022, 28(3): 37-39.
- [59] Dai H J, Su C H, Lee Y Q, et al. Deep learning-based natural language processing for screening psychiatric patients [J]. Front Psychiatry, 2021, 11: 533949.
- [60] 张本俊, 吴菡晗. 西南地区竹编工艺数字化平台建构及创新应用研究 [J]. 包装工程, 2023, 44(2): 349-357.
- [61] 陈诺. 基于知识图谱表示学习的工艺相似性算法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- [62] Wang Y L, Shi X M, Li L, et al. The impact of artificial intelligence on traditional Chinese medicine [J]. Am J Chin Med, 2021, 49(6): 1297-1314.
- [63] Anzabi Zadeh S, Street W N, Thomas B W. Optimizing warfarin dosing using deep reinforcement learning [J]. J Biomed Inform, 2023, 137: 104267.
- [64] Zhang Y T, Liu W L, Tang Y, et al. A novel kinetic model for dissolution of herbal medicine [J]. Dissolution Technol, 2018, 25(4): 28-38.
- [65] Zhang Y T, Xiao M F, Deng K W, et al. Novel mathematic models for quantitative transitivity of quality-markers in extraction process of the Buyanghuanwu decoction [J]. Phytomedicine, 2018, 45: 68-75.
- [66] Zhang Y T, Xiao M F, Liao Q, et al. Application of TQSM polypharmacokinetics and its similarity approach to ascertain Q-marker by analyses of transitivity *in vivo* of five candidates in Buyanghuanwu injection [J]. Phytomedicine, 2018, 45: 18-25.

- [67] Iancu A, Leb I, Prokosch H U, et al. Machine learning in medication prescription: A systematic review [J]. *Int J Med Inform*, 2023, 180: 105241.
- [68] Arji G, Safdari R, Rezaeizadeh H, et al. A systematic literature review and classification of knowledge discovery in traditional medicine [J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2019, 168: 39-57.
- [69] Mavrogiorgou A, Kiourtis A, Perakis K, et al. IoT in healthcare: Achieving interoperability of high-quality data acquired by IoT medical devices [J]. *Sensors*, 2019, 19(9): 1978.
- [70] 刘容西, 唐培渝, 王一诺, 等. 基于古法的中药数字化煎药现状、问题和发展策略 [J]. 中草药, 2024, 55(24): 8311-8320.
- [71] 陈子任, 张硕, 徐从剑. 拉曼光谱结合机器学习算法分类中药药性的动物研究 [J]. 复旦学报: 医学版, 2024, 51(5): 795-799.
- [72] 贾荣浩, 魏国辉, 赵文华, 等. 基于K-近邻算法的中药化合物寒热平药性预测研究 [J]. 中华中医药杂志, 2023, 38(4): 1522-1525.
- [73] 徐建平. 工匠机器人: 科技让传统工艺更出彩 [J]. 机器人产业, 2019(2): 78-82.
- [74] Dziki W, Jiang Z, Radspinner DA, et al. The FDA process analytical technology (PAT) initiative—an alternative pharmaceutical manufacturing practice (aPMP) [J]. *Pharmacop Forum*, 2004, 30(6): 2254-2262.
- [75] 熊皓舒, 张娟, 章顺楠, 等. 中药制药过程分析技术方法研究与应用进展 [J]. 中国中药杂志, 2023, 48(1): 22-29.
- [76] 肖伟, 张欣, 徐芳芳, 等. 以功效物质为质量目标的中药生产过程质量控制研究与实践 [J]. 南京中医药大学学报, 2024, 40(10): 1030-1038.
- [77] 朱卫丰, 沈玉, 邓攀, 等. 过程分析技术在中药制造工业中的应用 [J]. 中国中药杂志, 2024, 49(9): 2299-2307.
- [78] 熊皓舒, 李瑶瑶, 张凯旋, 等. 基于物性表征结合多变量统计分析的复方丹参提取物批次质量控制研究 [J]. 中国中药杂志, 2022, 47(9): 2465-2473.
- [79] Wang Z Q, Tao Q, Zhong Z J, et al. Enhancing YOLOv8n with Mamba-like linear attention for defect detection and coating thickness analysis of irregular film tablet [J]. *Int J Pharm*, 2025, 678: 125704.
- [80] 万鑫浩, 陶青, 王子千, 等. 基于机器学习的中药制剂快速无损检测技术研究进展 [J]. 中国中药杂志, 2024, 49(24): 6541-6548.
- [81] 闵令圆, 杨美娜, 庞靖祥, 等. 基于栅藻延迟发光检测的不同产地黄芩药性研究 [J]. 中华中医药学刊, 2023, 41(9): 126-131.
- [82] 陈卡卡, 钟志坚, 蔡润发, 等. 采用近红外技术在线检测参灵草提取浓缩液和配制液指标 [J]. 中国科技信息, 2022(9): 85-86.
- [83] 李文妍, 梁浩, 程虹, 等. 基于拉曼光谱的中药辛味辨识方法研究 [J]. 世界中医药, 2024, 19(13): 1939-1945.

[责任编辑 王文倩]