

· 综述 ·

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[△]

史亚博, 李铭轩, 傅饶, 郭强, 万欣, 苏联麟, 李林, 梅茜, 毛春芹, 季德*, 陆兔林*

南京中医药大学 药学院, 江苏 南京 210023

[摘要] 中药饮片产业是中药产业三大支柱之一, 保证饮片的质量和安全性一直是重中之重的工作。传统的中药质量控制方法存在周期长、效率低、主观性强等问题, 无法适应产业的快速发展。在线检测技术通过在线监测系统实时采集、处理和分析样品数据, 能够更快速、准确地得到产品质量信息, 对中药饮片的智能化生产和质量控制具有重要意义。从国家政策导向阐明中药智能化生产对中药饮片质量控制的重要性, 对在线检测关键技术研究及其在饮片生产全过程中的应用进行综述, 归纳当前在线检测技术在中药产业应用中存在的问题, 为加快在线检测技术与饮片产业融合发展提供建议, 以期为提高饮片生产效率及质量、促进饮片产业高质量发展提供参考。

[关键词] 中药饮片; 在线检测技术; 智能化生产; 炮制过程; 质量控制

[中图分类号] R282 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-4890(2024)05-0881-08

doi:10.13313/j.issn.1673-4890.20230529001

Research Status and Prospect of Online Detection Technologies in Intelligent Production and Quality Control of Chinese Herbal Pieces

SHI Ya-bo, LI Ming-xuan, FU Rao, GUO Qiang, WAN Xin, SU Lian-lin, LI Lin, MEI Xi, MAO Chun-qin, JI De*, LU Tu-lin*

School of Pharmacy, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, China

[Abstract] The Chinese herbal pieces industry is one of the three main pillars of the traditional Chinese medicine (TCM) sector, and ensuring the quality and safety of these herbal pieces has always been paramount. Traditional methods for TCM quality control are plagued by long cycles, low efficiency, and high subjectivity, which fail to meet the rapid development of the industry. Modern online detection technologies enable fast and accurate acquisition of product quality information by collecting, processing, and analyzing sample data in real time through an online monitoring system. These technologies are vital for the intelligent production and quality control of Chinese herbal pieces. This paper elucidated the significance of intelligent TCM production for the quality control of Chinese herbal pieces from the perspective of national policy directives. It reviewed the research on key online detection technologies and their applications throughout the entire production process of Chinese herbal pieces. The paper also summarized the current challenges in applying online detection technologies in the TCM industry and offered suggestions for accelerating the integration of online detection technologies with the Chinese herbal pieces industry. The aim was to enhance the production efficiency and quality of Chinese herbal pieces, and to promote the high-quality development of the industry.

[Keywords] Chinese herbal pieces; online detection technologies; intelligent production; processing process; quality control

中药饮片是中药的重要组成部分, 既可以供中医临床使用, 也可以用于中成药生产, 其质量关乎人民群众用药安全。传统中药饮片生产主要包括炮

制、包装等过程, 加工环节多、成分复杂, 饮片质量难以把控, 饮片炮制不规范^[1]、掺伪掺杂^[2-3]、染色及增重^[4-6]、过度硫熏^[7-8]等问题时有发生。尽管《中

[△] **[基金项目]** 国家重点研发计划项目 (2018YFC1707000, 2023YFC3504200)

* **[通信作者]** 陆兔林, 教授, 博士生导师, 研究方向: 中药炮制及中药饮片质量标准; E-mail: ltl2021@njucm.edu.cn
季德, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 中药炮制; E-mail: jide1982@126.com

华人民共和国药典》及各省级炮制规范初步构建了中药饮片质量检验及控制体系，提高了中药饮片的质量，但在当前强调智能制造的整体环境下，现有分析技术仍难以满足中药饮片产业化发展的需求，亟须提升中药生产过程质量控制水平，从而保障饮片生产水平及质量。

近年来，随着中药生产智能制造的快速发展、自动化及数字化的在线检测技术的应用，中药饮片生产水平大大提高^[9-10]。在线检测技术（包括光谱技术、电子传感技术、生物信息表征技术等）已广泛应用于在线检测中，通过直接安装在生产线上的过程分析仪器实时检测中药饮片关键质量属性（如色泽、片型、水分、药效成分等），结合自动化智能设备反馈控制，实现中药饮片生产过程关键工序的监测，提升了中药饮片智能化工艺装备过程质量控制能力，提高了饮片质量与生产效率。本文综述中药饮片智能化生产政策背景、在线检测技术的顶层设计及其在饮片生产全过程中的应用，并为推进在线检测技术“武装”饮片产业提供建议，以期为提高饮片生产效率及饮片质量、促进饮片产业高质量发展提供参考。

1 政策法规助推中药饮片生产创新发展

科技创新是促进中医药传承创新发展的关键要素，是推动中医药事业和中医药产业高质量发展的核心要点之一。2015年发布的《中国制造2025》指出：“着力发展智能装备和智能产品，推进生产过程智能化”^[11]；2019年10月发布的《中共中央 国务院关于促进中医药传承创新发展的意见》提出：“促进现代信息技术在中药生产中的应用，提高智能制造水平”^[12]；《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》指出：“深入实施智能制造和绿色制造工程，发展服务型制造新模式，推动制造业高端化、智能化、绿色化”^[13]；《“健康中国2030”规划纲要》中也明确提

出要“提升质量控制技术”^[14]。由此可见，国家已明确将“加快推进智能制造，注重信息化、智能化与工业化的融合”列为主攻方向。

随着中医药事业在国家战略布局中地位的逐渐提高、利好政策的不断发布、大众健康意识的逐渐提高及中医药知识的逐渐普及，中药饮片市场需求不断扩大。为了满足市场需求，中药饮片生产企业不断进行技术创新和质量提升，中药饮片生产、检测工艺正在发生变革，中药生产自动化、智能化、信息化已逐渐成为业界共识^[15]。在智能制造持续推进的背景下，计算机与自动化技术融合组态技术、传感器技术、射频识别等物联网技术，在线控制饮片炮制工艺参数，并将人工智能大数据算法用于中药饮片生产及质量控制中，实时采集质量检验数据、在线优化炮制工艺参数，这对实现中药炮制生产规范化、过程控制客观化、生产过程可视化具有重要意义。

2 在线检测关键技术

在线检测技术是指在生产线或现场采集样品后，通过快速、准确、自动化的分析方法对样品进行实时检测和监测的技术。在线检测体系具有多样化、自动化程度高、数据分析能力强、样品处理流程精简等特点，能够有效地提高检测的效率和准确性，从而满足饮片的快速检测需求。不同的检测技术特点和适用性有差异（表1），从技术本身进行剖析，以期为在线检测技术更好地应用于中药饮片质量检测提供参考。

2.1 光谱技术

光谱技术是一种重要的在线检测技术，通过分析饮片光谱信息可以判断样品的成分和质量，主要包括红外光谱、近红外光谱、拉曼光谱等技术。

红外光谱基于物质分子在不同波长下吸收红外线的强度和频率，通过对吸收带的强度和位置进行定量分析可以确定物质的组成和结构信息。中药饮

表1 不同类型在线检测技术的特点及适用性

类型	在线检测技术	特点	适用性	
光谱	红外光谱	高效、无损、准确、快速、光谱信息丰富	化学、生物特征不明晰，成分复杂的饮片、动物类饮片	
	近红外光谱			
	拉曼光谱			
电子传感	机器视觉	快速、高效、自动化水平高、准确、稳定、性状特征强	颜色特征强、炮制前后色泽变化明显的饮片	
	电子鼻			挥发性成分丰富、气味特征强的饮片
	电子舌			具有特异性味道的饮片

片种类繁多,每种饮片的特征都可以通过红外光谱进行分析。因此,红外光谱常用于中药饮片真伪鉴别^[16-17]、产地鉴别^[18-19]等。

近红外光谱是指在红外辐射波段中,波长为800~2500 nm的光谱,其主要用于测定含有C-H、O-H、N-H基团的有机化合物,具有非破坏性、快速、准确等优点。目前,已经通过近红外光谱建立了黄柏、知母、红景天等^[20-21]的水分快速测定模型,模型精度与预测结果均较好;在药效成分上,近红外光谱与化学计量学相结合,可以快速检测总多糖^[22-23]、总黄酮^[24-26]、浸出物^[27-29]等类成分,也可以对不同饮片指标成分进行定量检测^[30-32],从而对中药饮片整体性和专属性质量进行控制。

拉曼光谱是指将样品所散射的光与入射的激光光源进行分析的技术,具有非破坏性、快速、准确、光谱信息丰富等优点,可以用于物质的结构分析、成分检测等研究领域。目前,其已用于测定石膏中二水硫酸钙的含量,操作过程简便、分析快速、重复性好、结果准确,可应用于饮片生产全过程的质量控制^[33]。此外,还可通过建立中药饮片拉曼指纹图谱分析饮片整体光谱信息差异,实现中药饮片产地、基原及不同炮制品的区分^[34-35]。

2.2 电子传感技术

电子传感技术主要包括机器视觉、电子鼻、电子舌等,将传感器、信号转换器、通信技术等相结合,用于饮片质量快速检测、监控等。电子传感技术在中药饮片的生产和质量控制中扮演着重要的角色,有助于提高饮片品质和市场竞争力。

机器视觉是一种基于图像识别的智能化技术,包括图像预处理、特征提取、模式识别等相关内容,通过摄像头和相关算法实现对图像和视频的处理与解读。其核心是通过数字影像处理技术和人工智能算法,使计算机能像人类一样识别、分析、检测、跟踪图像、视频等。在中药生产领域,机器视觉结合人工智能算法可以快速区分不同炮制程度的饮片^[36-37],并可对饮片表面色泽进行客观量化^[38],将其应用于生产设备中,还可根据颜色对饮片进行智能分级^[39],保证饮片质量的均一性,实现饮片炮制过程中的质量快速检测。

电子鼻类似于人类嗅觉器官,在感知气体分子时能够根据颗粒物的质量、形态、相对分子质量等属性来分辨不同气味。电子鼻系统通常由各式传感

器构成,其能够识别、测量、记录、分析和模拟气味、挥发性有机物等化学物质的质量和数量。中药在炮制过程中往往会产生气味,许多中药饮片本身由于具有挥发性成分也具有特异的气味,通过电子鼻监测饮片炮制过程中气味的变化,可客观识别饮片炮制终点^[40]。饮片生产大多需要加入辅料,不同的辅料具有不同的气味,通过电子鼻也可对炮制前后饮片气味进行识别区分,找出炮制辅料的特异成分,从气味差异上精确控制饮片质量^[41]。

电子舌主要由传感器、计算机软件和数据记录仪等部分组成,可以用来分辨和分析不同溶液的化学成分和质量,其原理类似于人类的味觉感受能力。电子舌可以检测出中药中的甜味、酸味、咸味、苦味等不同味道成分的含量占比^[42],从而更加精确地控制中药饮片炮制程度及成品质量。通过将味觉传感器信号与饮片内在化学成分相关联,寻找饮片不同味道的物质基础,也可促进中药炮制机制的研究^[43]。

2.3 其他技术

除了应用广泛的光谱技术及电子传感技术外,色谱-质谱法、生物传感等也可间接地用于中药饮片的在线检测。对于有效成分不明确、化学成分较复杂的饮片可采用色谱或色谱-质谱法对整体成分进行表征,结合多元统计分析方法,发现饮片炮制前后质量标志物,通过将质量标志物与表面颜色等可以反映饮片内在质量的指标有机关联,间接地对饮片进行质量控制^[44-45]。对于结构复杂、质量标志物不明确、理化检测方法不能测定其含量或反映其临床功效的饮片,可采用酶联免疫、生物效价等方法进行检测,通过与近红外光谱^[46]等快速质量评价方法相结合对饮片进行质量控制,从而保证临床用药的安全有效。

3 在线检测技术在饮片生产全过程质量控制中的应用现状

在线检测技术因其快速、实时性、高精度、非破坏性等优点,被广泛应用于环保、食品安全等诸多领域。随着中药产业智能化程度的不断提高,在饮片生产过程中也可以运用在线快速检测技术对其进行质量控制。

3.1 在线检测技术在饮片生产过程中的应用

《本草蒙筌》记载:“凡药炮制,贵在适中,不

及则功效难求, 太过则气味反失。”^[47]在传统中药炮制过程中, 炮制程度及炮制终点的判断主要根据气味、颜色及性状, 而气味、颜色及性状的描述较为主观, 不利于饮片的质量控制。通过在线检测技术可对饮片炮制生产过程关键参数进行数字化表征, 从而客观控制饮片质量。

中药饮片炮制过程中温度会发生非线性变化, 在线式非接触红外控温炒药机在中药饮片生产中具有较好的应用前景^[48]。同时, 红外在线测温控制炒药机可以实时监控炒制过程药物和滚筒各时间的温度变化, 尤其对麸炒“麦麸冒烟”、炒炭的“加水灭火星”等有明显温度变化的特征性操作, 能较好地把握炮制终点^[49]; 在干燥过程中, 魏惠珍等^[50]利用近红外光谱技术快速测定白芍烘干过程中的水分, 所建模型稳定可靠、预测结果准确, 为中药制药烘干过程的在线监测提供了实验依据; 在炮制火候识别方面, 解达帅等^[51]采用机器视觉技术对马钱子炮制“表面鼓起并显深棕色或棕褐色, 内部红褐色, 具有小泡点”等进行客观量化表达, 可实现对不同炮制火候马钱子饮片的鉴别区分; 此外, 钱怡洁等^[52]采用电子鼻建立山茱萸炮制过程中气味成分动态变化监测方法, 并快速识别乙醇等8个气味成分, 其可作为山茱萸炮制过程的监测指标。

3.2 在线检测技术在饮片质量控制中的应用

基于智能感官与光谱信息等的在线检测技术创新性地运用到中药饮片质量标准的提升完善中, 为中药饮片质量标准控制研究带来新思路与策略。

甄臻等^[53]采用色差法和显微成像技术获取生地黄与熟地黄粉末颜色信息和显微特征, 实现了生地黄与熟地黄显微特征颜色的数字化表达, 并通过Fisher实现对其的有效区分。钱丹丹等^[54]基于机器视觉技术和朴素贝叶斯分类模型构建中药饮片生产线快速检测与分级系统, 依据形状、颜色、表面缺陷等对大枣进行了质量分级。刘瑞新等^[55]利用电子眼采集川贝母的光谱数据并建立其真伪及商品规格辨识模型, 实现了对川贝母质量的快速辨识。电子鼻和电子舌能够快速准确分析气、味特征, 气、味特征识别对中药饮片质量控制具有重要意义^[56-57]。秦宇雯等^[41]为研究温郁金醋制前后气味的变化, 采用电子鼻捕集气味信息, 基于气味指纹图谱指认了18个色谱峰, 并得到3种气味差异标志物, 以便快速区

分温郁金生品和炮制品。李虹等^[58]采用电子舌检测生、炒酸枣仁本身味道, 处理获取的各味道特征值, 分析酸枣仁炒制前后各味道的变化情况, 从数值上客观地体现炒制对酸枣仁滋味的影响, 可为生、炒酸枣仁滋味鉴别提供数据参考。此外, 近红外光谱作为一种无损检测技术, 在饮片在线质量控制方面也具有巨大潜力。本团队采用近红外光谱技术结合卷积神经网络等智能算法实现了对香附不同炮制品质量的快速评价, 可为在线检测应用提供参考^[59]。LI等^[60]采用近红外光谱和多元算法, 通过优化多种光谱预处理方法, 建立了酸枣仁及其2种常见掺伪品的无损判别。Zhang等^[61]基于近红外光谱和多元算法, 建立了天麻不同蒸制程度的判别模型, 客观量化了天麻蒸制终点。

3.3 在线检测技术在饮片包装仓储中的应用

中药饮片在包装贮存过程中的质量检测、稳定性监测与有效期制定, 一直是中药饮片质量控制领域里的盲点与难点, 也是制约中药饮片大流通顺利实施的一个重要因素^[62]。在线检测技术通常检测迅速、方便快捷。因此, 在饮片包装仓储中, 可以采用在线检测技术对饮片进行快速检测, 以保障饮片质量和安全性。

郭志明等^[63]开发设计了一种仓储环境物联网监测系统, 包括主机、副机、云服务器和移动终端, 可实时监测仓储环境内的温度、湿度和气体信息, 同时还开发了品质监测预警模型, 可判断仓储物品的腐败等级, 当超过预设值时, 该模型便会发出预警信息, 可为未来饮片产业的仓储环境远程监测和预警问题提供参考。顾可欣等^[64]设计了一种缺陷检测和外包装检测系统, 该系统基于Halcon软件检测生产中经常出现的物品缺陷、变形情况, 并进行包装识别。其中外观检测主要对残缺型、糊点型、凹凸型3种情况进行检测并分类。经测试, 该系统检测合格率达99.5%以上。董振华等^[65]利用拉曼光谱对包装材料上的生物污染物进行无损检测, 具有较高的精密度; 此外, X射线技术也广泛应用于食品的包装检测中, 能够对产品形状、尺寸、包装等进行快速无损的检测辨识^[66]。这也为中药饮片的包装质量控制提供了新的思路与方法。

结合机器视觉、电子传感及近红外光谱等现代智能传感分析技术, 将传统感官评价的“形、色、气、味、质”数字化、智能化, 可实现从炮制过程

对中药饮片进行质量控制,有效保证其质量。针对饮片内在质量评价的液相色谱-质谱法(LC-MS)、气相色谱-质谱法(GC-MS)等方法不能用于实时监测的缺点,使用近红外光谱结合多元算法与内在成分进行有机关联,可在线快速识别饮片炮制前后的质量差异,避免传统手工检测可能存在的人为误差,也为中药饮片质量标准控制提供了新思路、新策略。将在线检测技术应用于饮片生产、包装、运输和仓储环节,可实现质量稳定性实时监测,能够有效提高中药饮片的生产质量、加速生产进程、缩减成本,具有广阔的应用前景。

4 在线检测技术在中药饮片智能化生产中的应用思路

在线检测技术作为新兴前沿技术,可以实时监测炮制过程中饮片的关键参数和性能指标,能够快速发现问题并采取相应的措施,避免了传统离线检测的时间延迟,及时发现和纠正生产过程中的问题,进而优化生产流程和工艺,确保饮片符合质量标准,提高其质量和可靠性。此外,在线检测技术常结合现代人工智能技术,可以减少人力资源的投入、提高自动化程度、降低人工错误率,从而降低生产成本。通过传感、性状电子感官、化学分析和机器视觉等多种现代化技术可以实现中药饮片从原料到成品的质量控制及炮制终点客观判断(图1)。

中药原料质量是保证饮片质量的源头,由于中药质量与其形状、大小、化学成分含量密切相关,

因此可以利用机器视觉、电子鼻等在线检测技术,在药材净制筛选过程中快速获取其形状、纹理等信息,通过人工智能算法与化学成分相关联,实现基于“辨状论质”的中药质量等级划分,从而保证中药饮片原料质量的稳定性。中药饮片炮制过程中表面颜色和气味会发生明显变化,电子感官技术作为对传统经验判别的数字化量化手段,可以对中药饮片的外观、气味、口感等指标进行综合评估,不仅能够快速、准确地判断中药饮片的质量和炮制效果,还能提高炮制效率、优化饮片的品质。而炮制过程中复杂的温度、湿度也可通过近红外等在线传感装置进行实时监测。使用LC-MS、GC-MS等分析技术可以对中药炮制前后内在化学成分进行定量及定性分析,保证饮片质量。运用机器视觉精准捕捉中药饮片炮制过程中外观性状变化,从而客观判断炮制终点,既可以提高炮制效率,还可以改善炮制生产的可持续性。利用嵌入式系统和智能算法来控制中药炮制过程,不仅可以通过实时监测和反馈来调整炮制参数,还可以根据差异化的特征自动调整炮制参数,从而生产高品质的中药饮片。针对从饮片原料到成品的不同阶段选择合适的技术,将显著提高中药饮片炮制的效率、质量与稳定性,并获得更好的临床治疗效果。

5 在线检测技术与饮片产业融合发展建议

当前,我国的在线检测技术体系顶层设计虽已逐渐明晰,但大部分技术仍仅处于实验室研究阶段,

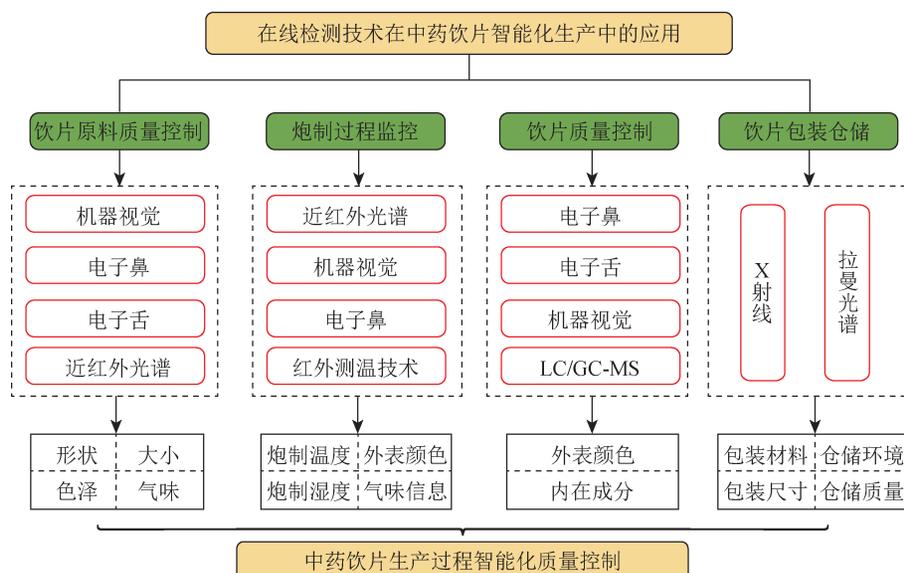


图1 在线检测技术在中药饮片智能化生产中的应用

中药饮片企业在利用计算机进行饮片生产过程控制、检测和管理等方面仍处于起步阶段。分析原因：首先，在线检测技术属于前沿技术，目前我国并没有成熟的技术规范供企业参考，且相关法律法规在中药饮片领域尚处于空白，这在一定程度上影响了企业的发展；其次，在线检测设备研究需要中药炮制、工程机械与人工智能多学科相结合，其造价颇高，而中药饮片附加值较低，企业的投入与产出未能较好平衡，可持续发展后劲不足；同时，在线智能联动生产线对员工技术要求高，生产模式与传统方式存在观念冲突，现有员工配置与生产模式不相适应，难以激发企业积极性；另外，其他如中药饮片企业长期沿用传统工艺和操作方式缺乏运用现代技术手段的意识和积极性等因素导致在线检测技术与饮片产业不能有效地结合。加快在线检测技术“武装”饮片产业需要群策群力，可以从国家、企业、科研团队等多方面开展落实。

5.1 完善法律法规，推进监管体系落实

国家应出台相关政策，支持在线快速检测技术的研发和应用，鼓励企业建立在线检测技术平台，为饮片生产企业提供在线检测、数据分析等技术服务，促进行业内部的合作和资源共享。药品监管部门应尽快建立科学、有效、合理的中药在线检测法律法规，鼓励并监督企业起草建立相应技术应用规范，为在线检测技术的实施提供应用标准。此外，需要规定并加强检测机构的资质要求，建立相应的监管机制，要求严格参照国家相关的质量标准进行检测，确保检测结果的准确性和可靠性。

5.2 构建饮片在线检测及智能化生产体系

目前，大多数在线检测技术仅在实验室内小规模应用，为了适应饮片实际生产大通量、多批次的特点，生产企业应当联合工程制造等领域龙头企业，围绕在线检测技术自身的特点，研发可应用于生产线上实时提取饮片质量信息的新型传感元件，以便及时监控炮制过程中的各个环节，实现中药饮片的实时信息收集和记录。同时，还应联合人工智能领域专业人才，搭建可对饮片质量信息进行实时解析的边缘侧人工智能轻量化计算平台，优化信息处理系统，企业可通过大数据系统建设有效管理生产环节中的多种数据，从而实现对生产质量和效率的综合管理。随着人工智能、大数据和信息技术的快速

发展，多学科融合将助力中药炮制智能化生产体系的发展，从而进一步推动中药炮制的现代化发展。

5.3 加强多学科交叉人才队伍建设，强化人才培养机制

中药饮片智能化生产与在线检测技术应用离不开专业的人才队伍。在基础教育领域增设中药在线检测技术理论课程的同时为学生提供在线检测仪器的实际操作培训，从源头确保人才队伍的高质量建设，并依托校内实验平台开展在线检测、人工智能等理论传授与专项实训等，由企业、高校、科研院所共同组建“产学研创新联盟”，组建中药炮制、工程机械、智能制造等多学科交叉创新团队，充分体现“企业主体，联合高校，协同攻关”的良好产学研结合模式，培养人员的在线检测设备实践操作能力及在生产实训中发现问题、解决问题的思维、意识，共同培养在线检测技术人才，为中药饮片的高质量发展提供人才支撑。

6 总结与展望

传统的中药生产过程存在工艺繁琐、周期长、易受环境影响等问题，随着现代科学技术的发展，中药饮片质量控制水平正在不断提升，应运而生的是中药饮片智能化生产和质量控制技术体系的不断升级。在线检测技术因其快速、准确、无损、操作简便等优势，已成为中药饮片生产和质量控制领域的重要手段，从传统的手工检测方式到现代在线检测技术，检测的精确度、效率得到极大提高，中药饮片生产企业能够对饮片进行快速、准确和有效的检测，提高饮片的质量和生产效率。

在线检测技术在中药饮片智能化生产与质量控制中的应用，不仅能够提高中药饮片的质量和生产效率，还能够为中药行业的兴起和发展带来新的机遇和挑战。未来，通过不断地技术改进和创新，以及与人工智能技术的结合，将能够进一步提升中药饮片的品质和生产效率，推动中药产业的发展。同时，也需要政府和企业积极推动技术研发和应用，建立更完善的检测标准和流程，保障中药饮片的质量和安

[利益冲突] 本文不存在任何利益冲突。

参考文献

- [1] 王红玉,赵京红. 中药饮片炮制不规范现象分析及管理

- 对策[J]. 中国卫生产业, 2019, 16(20): 185-186.
- [2] 魏锋, 刘薇, 严华, 等. 我国中药材及饮片的质量情况及有关问题分析[J]. 中国药理学杂志, 2015, 50(4): 277-283.
- [3] 陈娟红, 叶捷, 肖建平. 浅析中药饮片的掺假现象[J]. 海峡药学, 2020, 32(1): 45-47.
- [4] 符江, 荆文光, 章军, 等. 中药中非法添加问题研究现状与分析[J]. 中草药, 2014, 45(3): 437-442.
- [5] 赵宇, 孙睿婷, 崔晓懿. 市售红花增重问题研究[J]. 黑龙江医药, 2014, 27(1): 85-86.
- [6] 陈文慧, 朱仁愿, 张喜萍, 等. 兰州市中药材市场存在的问题及监管对策[J]. 甘肃科技, 2021, 37(10): 1-3.
- [7] 许玮仪, 于江勇, 金红宇, 等. 我国2013—2017年中药材及饮片硫熏情况调查以及二氧化硫残留量限度标准建议[J]. 中国药房, 2019, 30(24): 3330-3336.
- [8] 康传志, 杨婉珍, 莫歌, 等. 中药材二氧化硫限量标准及残留现状探讨[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(2): 242-247.
- [9] 冷胡峰, 龙勇涛, 万小伟. 中药智能提取在线检测技术的应用[J]. 机电信息, 2022(2): 63-65.
- [10] 倪力军, 史晓浩, 高秀蛟, 等. NIR在线检测、分析技术在丹参水提过程质量监控中的应用[J]. 中国药理学杂志, 2004, 39(8): 628-630.
- [11] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院关于印发《中国制造2025》的通知[EB/OL]. (2015-05-19)[2023-04-03]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2015/05/19/content_9784.htm.
- [12] 中华人民共和国中央人民政府. 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)[2023-04-03]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5449644.htm.
- [13] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13)[2023-04-03]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [14] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央国务院印发《“健康中国2030”规划纲要》[EB/OL]. (2016-10-25)[2023-04-03]. https://www.gov.cn/xinwen/2016-10/25/content_5124174.htm.
- [15] 朱颖, 宋佩林, 周海伦, 等. 从1.0到4.0的中药炮制技术发展现状评析及展望[J]. 中国实验方剂学杂志, 2024, 30(1): 276-285.
- [16] 王宜祥, 程存归, 李冰岚. 肉豆蔻及其混淆品长形肉豆蔻的FTIR直接鉴别[J]. 中药材, 2003, 26(1): 14-15.
- [17] 许良, 苏日塔拉图, 席海山, 等. 蒙药材珍珠杆及其伪品的紫外/荧光/红外光谱法鉴别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(3): 448-451.
- [18] 李美睢, 刘叶, 尚军, 等. 青海不同产地羌活红外光谱分析[J]. 青海草业, 2021, 30(2): 14-19.
- [19] 杨兰芬, 孙素琴, 周群, 等. 三种紫苏子的红外光谱分析与鉴定[J]. 现代仪器与医疗, 2018, 24(1): 88-91.
- [20] 时博, 谢惠英, 雷敬卫, 等. 近红外光谱法在知母和黄柏饮片水分分析中的应用[J]. 中华中医药学刊, 2017, 35(3): 669-672.
- [21] 牟倩倩, 贺敬霞, 张建琪, 等. 近红外漫反射光谱法结合PLS法快速测定红景天药材中水分和红景天苷的含量[J]. 中国药房, 2017, 28(30): 4260-4264.
- [22] 杨唯瀚, 郝经文, 黄和平, 等. 近红外漫反射光谱法快速测定蕨菜多糖含量的研究[J]. 中国现代应用药学, 2023, 40(5): 597-602.
- [23] 刘雪松, 李梦茹, 王致远, 等. 基于近红外光谱的驴胶补血颗粒浓缩过程研究[J]. 中草药, 2016, 47(22): 3997-4002.
- [24] 冯昱龙, 彭娟, 贺小刚, 等. 基于近红外光谱快速测定雪菊的总黄酮含量[J]. 化学试剂, 2022, 44(2): 279-284.
- [25] 胡小莉, 白雁, 雷敬卫, 等. NIRS快速测定不同产地野菊花中总黄酮含量[J]. 药物分析杂志, 2016, 36(3): 547-553.
- [26] 黄倩倩, 潘瑞乐, 魏建和, 等. 近红外漫反射光谱法测定黄芩中总黄酮及黄芩苷的含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(9): 2425-2428.
- [27] 乔璐, 吕芳, 王若晨, 等. 近红外光谱技术对香附及其炮制品醇溶性浸出物的快速测定[J]. 现代中药研究与实践, 2021, 35(2): 39-43.
- [28] 吴晓燕, 侯晓琳, 宿莹, 等. 便携式近红外测定龙胆中水溶性浸出物及龙胆苦苷含量[J]. 天然产物研究与开发, 2020, 32(8): 1363-1369.
- [29] 周雨枫, 杨哲莹, 董林毅, 等. 近红外光谱技术快速测定三七水分和醇溶性浸出物[J]. 药物评价研究, 2018, 41(11): 1994-1999.
- [30] 祁梅, 顾志荣, 李芹, 等. 近红外漫反射光谱法快速测定麦冬多指标成分含量[J]. 中国中医药信息杂志, 2023, 30(3): 114-120.
- [31] 张德德, 王德勤, 朱晶晶, 等. 近红外测定丹参提取浓缩过程中的丹参酮类的含量[J]. 人参研究, 2021, 33(3): 15-20.
- [32] ZHANG J B, LI Y, WANG B, et al. Rapid evaluation of Radix Paeoniae Alba and its processed products by near-infrared spectroscopy combined with multivariate algorithms[J]. Anal Bioanal Chem, 2023, 415(9): 1719-1732.
- [33] 彭艳, 张丽颖, 金阳, 等. 拉曼光谱法快速测定矿物药石膏中二水硫酸钙的含量[J]. 药物分析杂志, 2021, 41(7): 1266-1271.
- [34] 王文霞. 三七及其伪品的激光拉曼光谱法鉴别技术[J].

- 临床医药文献电子杂志,2019,6(39):1.
- [35] 董晶晶,戚雪勇,戈廷茹. 激光拉曼光谱快速测定中药姜黄[J]. 海峡药学,2016,28(12):55-58.
- [36] 杨添钧,杨诗龙,黎量,等. 基于电子鼻及机器视觉技术的山楂不同炮制品判别研究[J]. 时珍国医国药,2014,25(10):2399-2402.
- [37] 张一凡,周苏娟,孟江,等. 基于机器视觉系统的姜炭炮制程度判别及颜色-成分相关性分析[J]. 中国药房,2022,33(22):2712-2718.
- [38] 杨添钧. 基于机器视觉技术的药材及饮片“辨色”研究[D]. 成都:成都中医药大学,2014.
- [39] 徐曼菲. 中药红花辨色论质方法学研究[D]. 北京:北京中医药大学,2016.
- [40] 蒋孝峰,谢辉,陆兔林,等. 基于Heracles Neo超快速气相电子鼻技术的麦芽炒制过程气味变化物质基础研究[J]. 中草药,2022,53(1):41-50.
- [41] 秦宇雯,费程浩,苏联麟,等. 基于Heracles NEO超快速气相色谱电子鼻对温郁金醋制前后气味差异标志物的快速识别研究[J]. 中草药,2022,53(5):1313-1319.
- [42] 马文凤,许浚,韩彦琪,等. 仿生技术在中药五味辨识研究中的进展与实践[J]. 中草药,2018,49(5):993-1001.
- [43] 杨露萍,倪妮,洪燕龙,等. 基于电子舌表征和化学成分“谱味”相关性探究川芎辛味物质基础[J]. 中成药,2021,43(7):1805-1811.
- [44] 杨琳琳,辛洁萍,李千,等. 乌梅炭炮制过程中颜色与内在质量的相关性及其炮制终点研究[J]. 中国药房,2023,34(3):289-293.
- [45] 郑晓倩,徐超,金传山,等. 基于颜色变化的“九蒸九晒”黄精炮制火候及内外在质量的相关性研究[J]. 中草药,2022,53(6):1719-1729.
- [46] 张萍,牛明,谭鹏,等. 中药效应近红外谱的构建及应用:以大黄配方颗粒为例[J]. 药学学报,2019,54(12):2162-2168.
- [47] 陈嘉谟. 本草蒙筌[M]. 张印生,韩学杰,赵慧玲,校. 北京:中医古籍出版社,2009.
- [48] 艾莉,陈君程,张继良,等. 基于色彩色差计的川楝子炮制前后含量和颜色变化[J]. 成都中医药大学学报,2011,34(4):81-83.
- [49] 陈楚明. 非接触在线式红外测温技术在中药炒制中的应用研究[D]. 成都:成都中医药大学,2008.
- [50] 魏惠珍,方少敏,饶毅,等. 近红外光谱技术快速测定白芍药材烘干过程中水分[J]. 中草药,2011,42(10):1994-1997.
- [51] 解达帅,刘玉杰,杨诗龙,等. 基于“内外结合”分析马钱子的炮制火候[J]. 中国实验方剂学杂志,2016,22(8):1-5.
- [52] 钱怡洁,魏伟,朱广飞,等. 超快速气相电子鼻分析山茱萸炮制过程气味成分动态变化[J]. 中国药房,2022,33(18):2182-2186.
- [53] 甄臻,李慧芬,刘静,等. 基于粉末和显微特征颜色数字化的生地黄与熟地黄判别[J]. 中草药,2021,52(24):7438-7446.
- [54] 钱丹丹,周金海. 基于计算机视觉的中药饮片检测与分级研究[J]. 时珍国医国药,2019,30(1):203-205.
- [55] 刘瑞新,郝小佳,张慧杰,等. 基于电子眼技术的中药川贝母真伪及规格的快速辨识研究[J]. 中国中药杂志,2020,45(14):3441-3451.
- [56] 冷晓红,陈海燕,郭鸿雁. 电子鼻技术在中药领域的应用[J]. 西北药学杂志,2019,34(3):426-428.
- [57] 白杰,高利利,张志勤,等. 电子舌技术的原理及在中药领域的应用[J]. 中中药学,2021,19(1):78-84.
- [58] 李虹,黄晚欣,刘勇,等. 基于电子舌技术的生炒酸枣仁滋味比较[J]. 中国现代中药,2022,24(1):122-127.
- [59] 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(Pt 1):125266.
- [60] LI M X, SHI Y B, ZHANG J B, et al. Rapid evaluation of *Ziziphi Spinosae Semen* and its adulterants based on the combination of FT-NIR and multivariate algorithms[J]. Food Chem X, 2023, 20: 101022.
- [61] ZHANG J B, WANG B, ZHANG Y F, et al. E-eye and FT-NIR combined with multivariate algorithms to rapidly evaluate the dynamic changes in the quality of *Gastrodia elata* during steaming process [J]. Food Chem, 2024, 439: 138148.
- [62] 熊吟,赵婷,闫永红,等. 基于电子感官技术的中药贮存有效期评价方法探讨[J]. 现代中药研究与实践, 2013,27(1):69-70.
- [63] 郭志明,郭闯,邹小波,等. 一种果蔬仓储环境物联网监测系统及方法:CN112763002B[P]. 2022-09-13.
- [64] 顾可欣,毛丽民,许家麒. 一种食品外观品质及包装检测流水线设计[J]. 常熟理工学院学报,2022,36(2):61-65.
- [65] 董振华,朱晗昀. 拉曼光谱在食品包装和生物污染物快速检测中的运用[J]. 食品安全导刊,2021(23):163-164.
- [66] 李一兵. 包装检测仪 食品安全的保障之锁[J]. 食品安全导刊,2011(11):46-47.

(收稿日期:2023-05-29 编辑:王笑辉)