

人工智能驱动的中药质量控制研究进展

田淑峰, 麦尔比艳姆·赛买提, 范婧怡, 王成莹, 杨珍*, 李遇伯*

(天津中医药大学 中药学院, 天津 301617)

摘要: 中药安全性和临床治疗效果与其质量密切相关, 但药材基原复杂、道地性差异显著等因素导致中药质量参差不齐, 传统质量控制方法已难以满足质量评估的复杂性和多变性要求。人工智能(AI)凭借其强大的数据处理能力、精准的模式识别与智能决策优势, 与现代分析技术相结合, 为中药质量检测的标准化、快速化与智能化提供了新的技术路径。该文重点关注AI驱动下的中药智能检测技术和应用场景, 介绍常见的现代分析技术与AI核心算法, 从真伪鉴别、质量等级评估和有害物质筛查等方面概述AI在中药全产业链质量控制中的具体应用, 并分析AI在质量控制领域面临的问题和挑战, 以期为构建全流程智能化的中药质控体系, 助力中药产业高质量发展提供参考。

关键词: 中药; 质量控制; 人工智能; 机器学习; 深度学习; 数据处理

中图分类号: O615.45; TP181 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2026)06-0001-08

Research Progress on Quality Control of Traditional Chinese Medicine Driven by Artificial Intelligence

TIAN Shu-feng, Samat Marbyam, FAN Jing-yi, WANG Cheng-ying, YANG Zhen*, LI Yu-bo*

(School of Chinese Materia Medica, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617)

Abstract: The safety and clinical efficacy of traditional Chinese medicine (TCM) are closely related to their quality. However, the complex origin of herbs and significant differences in geo-authenticity lead to the uneven quality of TCM, and the traditional quality control methods have been difficult to meet the complexity and variability of quality assessment. Artificial intelligence (AI), with its powerful data processing ability, accurate pattern recognition and intelligent decision-making advantages, combined with modern analysis technology, provides a new technical path for the standardization, speed and intelligence of TCM quality testing. This review focuses on AI-driven intelligent detection technology and application scenarios of TCM, introduces common modern analytical techniques and AI core algorithms, outlines the specific application of AI in the quality control of the whole industry chain of TCM from the aspects of authenticity identification, quality grade assessment and harmful substance screening, and analyzes the problems and challenges faced by AI in the field of quality control. In order to provide a reference for the construction of a whole-process intelligent quality control system of traditional Chinese medicine and the high-quality development of traditional Chinese medicine industry.

Key words: traditional Chinese medicine; quality control; artificial intelligence; machine learning; deep learning; data processing

中医药历史悠久, 药效独特, 在临床诊治中应用广泛。近年来, 国家先后出台多项政策, 全面支持中医药产业振兴发展, 已形成覆盖上游中药材种植、中游中药饮片与制剂加工、下游消费市场的完整产业链, 成为我国医药产业体系中不可或缺的核心组成部分^[1]。然而, 中药质量与疗效仍存在一定的不稳定性, 主要原因包括药材来源广泛、成分复杂、缺乏统一质量控制标准等。传统中药质控主要通过感官和简单理化检测, 主观性强、鉴别准确度不足且检测效率较低, 不利于中药质量等级标准体系的建立和完善, 也无法满足现代快速精准鉴别的实际需求^[2]。同时, 其应用范围多局限于产业链上

收稿日期: 2026-01-24; **修回日期:** 2026-03-17

基金项目: 国家中医药管理局青年岐黄学者支持项目; 天津市科技局重大专项与工程计划项(25ZXSWY00410)

* **通讯作者:** 李遇伯, 博士, 教授, 研究方向: 代谢组学和毒性评价方面的研究, E-mail: yuboli1@163.com;

杨珍, 博士, 高级实验师, 研究方向: 中药信息学方面研究, E-mail: yzwygh@126.com

游,以中药材及饮片的事后检验鉴别为主,对中下游生产、流通过程缺乏实时质量监控,难以实现全产业链的智能化管控^[3]。

人工智能(AI)作为一门融合计算机、数学、逻辑学、生物医学的交叉前沿技术,包括模拟、感知、推理、学习与决策等智能行为,已广泛应用于疾病诊断、药物研发、中药质量控制等医疗健康领域^[4]。在中药质量控制方面,AI凭借其强大的数据处理、模式识别和决策能力,为构建覆盖全产业链的智能质控体系提供了全新解决方案。机器学习(ML)作为AI的重要分支,可结合强大的数据处理能力,实现中药全产业链的精准把控:智能检测与调控药材种植环境^[5];结合图像采集与光谱联合分析技术,可实现药材真伪的快速鉴别、内在成分的同步分析及产地溯源^[6];基于模式识别与智能控制方法实现生产工艺的精准控制与质量一致性提升^[7];此外,基于多数据融合,AI还能进行关键成分含量预估与质量风险预警,从而实现从种植、生产到流通的全方位、标准化质量管理^[8]。

本综述聚焦于AI驱动的中药智能检测技术,围绕其技术体系构建与全产业链应用展开论述。首先介绍支撑智能检测的现代分析技术与AI核心算法;之后系统阐述AI赋能在中药原料端、生产端及流通端质量控制中的应用实例;最后深入分析AI在质量控制领域面临的问题和挑战,并系统提出解决方案与发展展望,以期构建全流程智能化的中药质控体系、推动中药产业高质量发展提供参考。

1 中药智能检测的技术体系与核心支撑

中药智能检测技术体系的构建,需以现代分析技术作为技术支撑、AI算法作为核心决策内核、数据处理作为关键衔接桥梁,三者深度融合实现中药快速识别、精准鉴定与质量综合评价,推动中药质量控制体系的智能化转型。

1.1 现代分析技术

1.1.1 光谱技术 光谱技术通过分析物质与光相互作用后产生的特征光谱来确定物质化学组成和结构,具有操作简单、灵敏度高、分析快速等优势,广泛应用于生物医药、食品安全与环境监测等领域^[9]。目前常见的光谱技术包括近红外光谱(NIRS)、拉曼光谱(RS)荧光光谱(FS)和高光谱成像(HSI)技术等。其中,NIRS凭借对化学键振动信息的灵敏识别能力,适用于中药品种区分与有效成分含量检测等^[10];RS基于拉曼散射效应,具有高特异性、非破坏性、所需样本量少等检测特性,尤为适用于珍贵中药材的真伪鉴定^[11];FS借助光物理特性,具有高灵敏度和选择性,在中药产地溯源及活性成分检测中应用广泛^[12];HSI具备“图谱合一”的优势,可在获取图像信息的同时得到每个图像对应的光谱信息,通过光谱数据分析或图谱建模分类,实现中药材年限的快速无损鉴别与产地溯源^[13-14]。

1.1.2 色谱技术 色谱技术是基于各组分在固定相与流动相之间的分配及相互作用差异而实现高效分离的分析方法^[15-16]。高效液相色谱技术(HPLC)适用于高沸点、热不稳定、非挥发性和大分子成分的分离与定量^[17];气相色谱(GC)适用于挥发性及热稳定性良好的化合物分析,主要用于检测挥发油、农药残留及气体组成等^[18]。此外,色谱与质谱技术联用后,可结合色谱的高分离能力与质谱的强大结构鉴定功能,实现对中药复杂样品中多组分的精准识别与含量测定^[19]。

1.1.3 成像技术 成像技术主要包括高分辨率成像与显微成像技术,可捕获中药宏观形态与微观结构特征,为中药质量控制提供直观依据^[20]。高分辨率成像技术能清晰呈现出药材及饮片的外观形态、纹理与颜色等特征,可快速区分药材真伪及易混品种^[21]。显微成像技术能穿透中药表层,提供其组织结构、细胞形态和内含物分布等显微特征,是基源鉴别的重要手段^[22]。电子眼、电子鼻与电子舌等电子传感技术是基于仿生学原理开发的智能传感技术,可分别模拟人类视觉、嗅觉与味觉功能;电子眼基于比色法、分光光度法模拟人类视觉感知,实现颜色的客观评估;电子鼻通过气体传感器阵列对挥发性物质产生响应,将气味信息转化为电信号;电子舌则借助多通道味觉传感器,检测液体样品中的化学成分。三者均具有快速、客观、可重复及非破坏性等优势^[23]。此外,与化学计量学方法结合,可实现对药材产地、等级、真伪及炮制程度的快速区分与综合评价,弥补了传统感官评价与单一成分检测的不足^[24]。

1.2 AI核心算法与数据处理技术

机器学习(ML)是AI的核心技术,模型结构清晰、易于解释、计算效率高,在小样本、非线性和

高维数据处理中具有明显优势，在中药智能检测领域得到广泛应用^[25]。常用AI算法见表1。

表1 中药质量控制领域常用AI算法的对比与应用

Table 1 Comparison and application of common AI algorithms in the field of TCM quality control

Algorithm type	Representative algorithm	Data processing capability	Applicable scenarios	Advantage	Disadvantage
监督学习	SVM、RF、KNN	高维分类与回归	成分鉴定、真伪鉴别、等级划分、产地溯源	模型解释性强、适合小样本	对标注数据依赖高
无监督学习	PCA、聚类分析	降维与模式识别	成分差异分析、组方规律挖掘	无需标签、适合探索性分析	难以量化评价
强化学习	DQN	动态决策优化	制药工艺的智能优化	自适应性强、适合过程优化	训练复杂、需模拟环境
深度学习	CNN、RNN、TCN、DNN、LLM、Transformer	图像、时序、语言建模	图谱识别、掺假预测、风险建模	高准确率、适合复杂任务	可解释性差、数据需求高

1.2.1 监督学习 监督学习(SL)主要利用已标注的数据训练模型，解决完成分类与回归问题。其中，支持向量机(SVM)通过核函数将原始数据映射至高维特征空间，构建出最优分类超平面，实现对非线性数据的精准分类与回归，可有效分析中药材复杂的化学成分数据，适用于不同产地中药材的精准区分与鉴定^[26]。随机森林(RF)是基于决策树的集成学习方法，由多个独立决策树组成，能有效抑制过拟合问题，可大幅提升模型的分类精度和模型稳定性，常用于中药产地溯源、中药药性模式识别及成分含量鉴定等^[27-28]。K-最近邻算法(KNN)是一种基于距离的分类算法，逻辑简单、易于理解，可用于中药快速分类和药材真伪的快速辨识，为中药品质的精准鉴别提供参考^[29]。

1.2.2 无监督学习 无监督学习(UL)无需预先定义目标值，通过分析数据分布与关联，实现模式识别与特征提取，主要包括聚类、降维及关联规则学习等^[30]。聚类分析可通过测量高维空间中各样本间的距离，识别并确定数据集中隐藏结构的相似性；关联规则分析则可通过支持度、置信度、提升度等从数据中发现事物间的联系，二者结合可分析不同中药间的联系和组方规律^[31]；主成分分析(PCA)可对数据进行降维，简化模型，抵消原始数据成分之间的相互影响，并揭示数据中最显著的变异方向，基于此特性可快速发现不同批次、产地中药材的内在差异，为后续质量评价提供依据^[32]。

1.2.3 强化学习 强化学习(RL)是通过智能体与动态环境的持续交互实现决策优化：智能体根据当前环境状态执行相应动作，环境则对该动作做出反馈，并对积极的动作施加奖励，智能体做出最大奖励值对应动作则达成预设的训练目标。深度Q网络(DQN)作为强化学习的经典算法，可用于开发甘草真空带式干燥工艺的强化学习模型，通过将含水率、加热温度、传送带速度等关键工艺参数输入模型进行训练，能够实现干燥过程参数的自主决策与动态优化，可为中药制药工艺的智能优化提供有效方法^[33]。

1.2.4 深度学习 深度学习(DL)是机器学习的重要分支，其算法利用多层神经网络结构，自主挖掘数据内在模式与规律，可在复杂任务中实现更优的分类效果和准确率^[34]。其中，卷积神经网络(CNN)适用于图像与序列数据处理，在基于外观和光谱特征的药材分类中效果显著^[35]；循环神经网络(RNN)能精准捕捉数据时序信息，用于中药色谱峰序列分析、光谱时序数据解析等^[36]；时序卷积神经网络(TCN)基于因果卷积与扩张卷积处理序列数据，具有高分类性能，在中药材来源的高效无损追溯方面具有实际应用潜力^[37]；深度神经网络(DNN)利用多层神经元结构处理各组复杂数据，可用于中药成分风险预测^[38]；大语言模型(LLM)是一种基于深度学习的自然语言处理技术，可借助神经网络模拟人类语言生成过程，该模型以Transformer架构为核心，凭借其自注意力机制，可高效捕获长距离依赖关系，适用于鉴别中药材真伪，并预测其掺假浓度^[39]。

1.2.5 数据处理技术 经典化学计量学方法与数据处理是解析复杂的化学测量数据与提取有效信息的关键^[40-41]。偏最小二乘判别分析(PLS-DA)常用于有监督的模式识别与分类，广泛应用于物质真伪鉴别和产地溯源等领域^[42]；偏最小二乘回归(PLSR)可有效克服自变量间的多重共线性问题，适用于物质成分快速定量、物质真伪鉴别及活性指标的预测^[43]；软独立建模分类法(SIMCA)则可对各类样本独立建立主成分模型，实现对未知样本等级的快速判定^[44]。

2 AI驱动的中药质量控制应用场景

中药质量受种植、炮制、生产及流通等多环节影响,仅利用传统单一的分析方法在效率、准确性等方面难以满足需求。AI技术凭借出色的数据解析与智能研判能力,可在上游原料端提升质量保证、中游生产端保障加工工艺标准化与产品质量一致性、下游流通端实现质量实时监测与异常预警,通过整合全链条数据再反向指导上下游,形成中药质量智能化检测闭环,为中药质量控制从“事后检验”向“全程预判”的转变提供了新突破口,如图1所示。

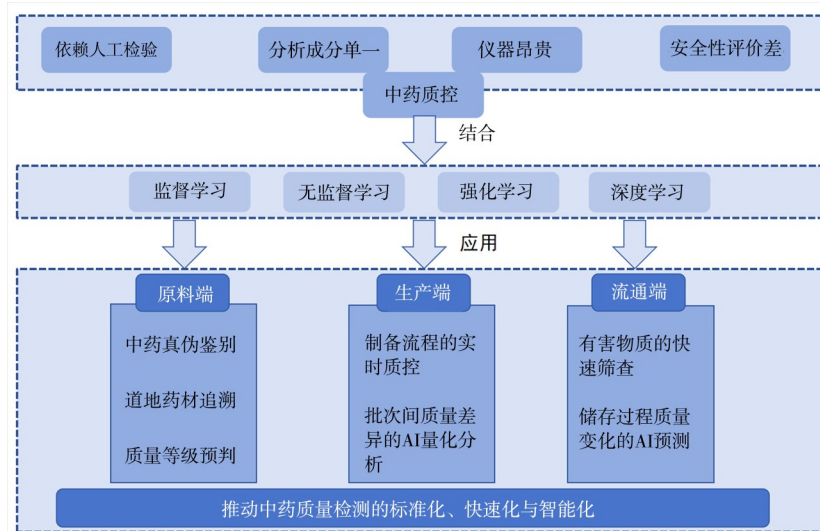


图1 AI赋能中药质量控制的应用场景

Fig. 1 Application scenarios of TCM quality control empowered by AI

2.1 AI在中药原料端质量控制中的应用

2.1.1 中药真伪鉴别 中药材市场假冒伪劣问题是中药临床疗效与用药安全的重要威胁因素。传统中药鉴别方法依赖经验,主观性较强,不能准确辨别中药真伪。而AI结合NIRS、液质联用等现代分析技术可形成“快速鉴别-多模态精准分析-化学指纹图谱确证”的鉴别体系。例如,利用中红外(MIR)和近红外(NIR)光谱数据,结合PLS-DA模型可成功区分半夏及其各类掺假品,并有效鉴别黑胡椒的真伪及其掺假物^[45-46];利用多重显微新技术观察冬虫夏草的表面观和横切面观,通过聚类分析和二维聚类分析可评估不同样品之间的相似性与差异性,同时,基于PCA还可解释无机元素与样品的关联,最终实现冬虫夏草的真伪鉴别与质量评价^[47]。

2.1.2 道地药材追溯 中药品种、产地及生长环境差异直接影响药材质量,决定临床治疗效果。早期虽采用荧光光谱结合化学计量学方法等传统技术进行中药材产地溯源,但效率低下,难以满足快速鉴别的实际需求^[47]。AI的持续发展,已形成从稳定鉴别方法、精细化深度学习模型到多模态融合的智能分析模式,显著降低了中药材道地性与生长方式的鉴别难度,提升了鉴别效率。例如,光谱技术与CNN联用使用,可实现三七产地的快速、无损、精准鉴定^[48];ML与环境电离质谱技术结合可实现冬虫夏草“真伪-生长方式”多属性的一次性鉴别^[49]。NIRS结合竞争性自适应重加权采样(CVRS)-PLS算法可实现铁皮石斛多糖、多酚等品质指标的快速定量检测;结合PLS-DA和支持向量分类算法可实现铁皮石斛不同地理产地的精准鉴别^[47]。

2.1.3 质量等级预判 中药材质量存在客观差异,等级划分是衡量其优劣、提升临床应用价值的关键,《中国药典》2020年版规定了中药材及饮片的质量标准,包括大部分中药水分、有效成分、重金属、有害元素以及农药残留等指标含量,但未规定其等级优劣,导致中药材质量参差不齐。现有研究思路逐渐从依赖HPLC等传统方法,转向AI算法结合现代分析技术的快速无损预测^[50]。例如,NIRS结合PCA-DA、PLS-DA、最小二乘支持向量机(LS-SVM)等不同化学计量学方法,能够建立川贝母的真伪和商品等级辨识模型,并能定量分析三七的内部成分进行等级预判完成3种掺假物的100%分类鉴别,可为建立标准的中药材质量评价体系提供可靠的方法学依据^[51-52]。

2.2 AI在中药生产端的应用

2.2.1 制备流程的实时质控 中药生产过程实时质控是保障中药生产标准化、产品质量及工艺稳定性的关键，而传统质控方法多在终点取样、离线检测，结果存在滞后性，无法及时反馈工艺过程中的动态变化。AI和光谱传感等技术融合使得质控方式从“事后检验”转变为“过程实时调控”，可提高过程控制的标准化与可视化。在提取、浓缩等重要制备环节，多成分同步定量是实现实时质控的重要手段。例如，采用NIR技术结合PLSR实现了单叶返魂草提取过程中6种活性成分的快速定量分析；移动块标准偏差法(MBSD)实时判定提取终点，约90 min后偏差值趋于稳定，与HPLC测得的各成分浓度平台期一致；之后基于PCA的多变量统计过程控制(MSPC)模型，通过主成分得分、Hotelling T²和平方预测误差值的均值及控制限，实时监控药材种属、固液比、浸泡时间、加热温度等提取过程中异常工艺参数^[53]；HSI、RS融合PLSR、SVR和PCA既可分析单味药亚麻子中油脂、蛋白质、亚油酸等含量，作为评估亚麻籽质量的重要手段；又可实现制药过程中微小活性药物成分浓度精确的实时监测和控制，确保产品质量的稳定性和均一性^[54-55]。

2.2.2 批次间质量差异的AI量化分析 中药产品质量的一致性保障，关键在于精准识别和量化批次间的质量差异，原料产地各异、生产工艺波动、储存期间成分变化等因素均会导致中药质量改变。AI支持的量化分析方法，已逐步形成从源头到终端、由异常识别到精准调控全生产过程的批次质量差异分析技术闭环。如利用UHPLC-QQQ-MS/MS可精准定量中药药酒35种化学成分，基于这35种分析物含量变化构建OPLS-DA模型开展多变量统计分析，可进一步可视化样本间差异，从而有效区分不同生产年份的中药药酒^[56]。这一实例表明OPLS-DA模型可精准定位中药质量波动根源，为中药生产过程的一致性和稳定性提供量化支持。

2.3 AI在中药流通端的应用

2.3.1 有害物质的快速筛查 在中药流通环节，AI构建了覆盖化学成分、生物污染、储存稳定性及药材安全等多维快速筛查体系，驱动中药流通安全筛查向快速、无损与智能化方向实现系统性变革。在有害物质快速筛查方面，NIRS、RS等检测技术与DL模型结合可应用于农药残留的快速定量分析与非法添加化学药物的现场快速筛查^[57]；计算毒理学与ML算法联用，能精准预测中药成分的内源性安全风险，实现海量化合物的毒性快速初筛^[58]；计算机视觉中病害识别模型应用于中药材检测，可实现霉变、虫蛀等外观缺陷的高通量智能监测^[59]。

2.3.2 储存过程质量变化的AI预测 中药储存条件与产地、药性、化学成分与炮制方法有关，若储存不当易导致物理性状改变、化学成分转化以及生物或外来污染等，影响药性功效。传统质量检测无法有效预测和量化中药质量变化，而通过整合多源信息和构建ML模型，能够实现不同存储条件下重要成分含量、外观形态及感官特征等的无损监测。例如，比色计可观察莪术加工后的整体颜色变化，电子鼻则可评估莪术与炮制莪术在挥发性成分上的差异，NIR用来研究样品中所有化学成分的变化，三者相互结合，通过特征提取和数据融合，可实现莪术炮制过程的判别、阶段划分^[60]；也有文献利用NIRS技术结合RF、PLS等机器学习实现了多品种蜜炙饮片在储存过程的水分含量的动态检测^[61]。

3 AI在中药质量控制中的关键挑战与解决方案

3.1 数据质量问题

高质量、大规模数据集是机器学习算法的基础。中药种类繁多、成分复杂，作用机制不明，加之产地不一、加工工艺不同等因素，导致中药成分存在显著差异；NIRS、HPLC等现代分析方法检测数据有限且分布不均，导致多数研究样本量难以满足模型训练数据的要求。数据来源异质性强与数据匮乏，使得模型在跨数据集验证方面的泛化能力差，影响结果的准确性。未来需整合不同来源的数据资源，建立严格规范的数据质量控制体系，加强数据清洗、验证和标准化工作，提高数据的一致性；针对名贵稀缺药材数据集稀缺的现状，引入域自适应、度量学习、元学习等小样本学习技术，可降低模型对大量数据的依赖，提升模型泛化能力。

3.2 标准化体系问题

传统中药质量鉴定依赖性状鉴定、显微观察及理化分析等方法，费时费力、资源投入大且主观性

强；而 AI 模型要求标准规范、量化的输入与评价指标，二者在标准体系上存在本质性差异，导致直接适配难度大。未来需从数据源头着手，整合中药来源、性状、显微结构、理化性质、化学成分及药效等信息，建立高质量和高标准的中药检测数据共享平台；在此基础上，还可将 AI 技术与传统质量控制标准相结合，制定涵盖全产业链的中药质量控制统一标准与管理规范。

3.3 模型可解释性问题

AI 模型复杂，深度学习模型存在明显“黑箱”特性，决策逻辑和内部机制不清晰，导致其可解释性差，无法完全解释中药复杂的内部活性成分及相互作用机制，难以保障中药在实际应用的安全性和有效性。未来需加大对 AI 在中药质量控制领域的研发投入，重点突破核心算法，收集高质量多模态数据，增强模型对中医药的理解表达能力，并加入可解释性技术，从而增强 AI 建模的透明度、准确性和稳健性。

3.4 人才储备与法规体系问题

AI 赋能的中药质量控制是多学科交叉融合的复杂工程，目前既精通中医药理论又掌握 AI 前沿技术的复合型人才稀少，难以兼顾中药剂量和制备方法等因素对中药方剂兼容性的影响，而且 AI 发展速度快，应用场景广，针对其在中药领域的应用尚未形成完善的法律法规与评估体系，监管系统不健全，难以保障 AI 应用的合规性、安全性与有效性。未来需加速培养兼具中药学与信息科学背景的复合型人才，加强产业、学术、研究协同合作，发挥不同学科优势，提升模型可解释性。最后相关部门还需制定专门针对中药质量控制领域 AI 应用的数据管理条例和法律法规，在保障中药安全有效的前提下，鼓励技术创新，推动行业智能化发展。

4 结语与展望

AI 在中药质量控制中的应用日益广泛。现代分析技术与 AI 核心算法结合为实现中药质量从种植、加工到流通的全产业链智能化、精准化监管提供了强大技术动力。目前该应用已在药材真伪鉴定、产地溯源、过程监控及安全筛查等方面取得显著成效。但中药来源复杂、数据存在异质性、AI 与传统质量控制标准体系不兼容、模型可解释性差、复合型人才缺少与法规体系不健全等问题，影响了中药质量的真实性和可靠性。未来研究中，必需不断优化模型结构，提升数据集质量，通过产学研协同开发创新更科学、更合理的适应于中药复杂体系且具有良好可解释性的新型 AI 模型，依托国家中医药管理部门牵头构建更加权威、开放、高质量的中药多模态数据库，同时加快制定 AI 在中药质控领域的应用标准，培养擅长 AI 与中药学的复合型人才，相关部门还需制定相关法律法规，保证中药的安全性、有效性。

综上所述，AI 技术已取得长足进步，在中药质量控制中的应用更加深入和广泛，二者结合将有望实现中药质量控制的标准化与智能化，确保中药质量的安全性和有效性，助力该产业的现代化发展，提升中药的质量标准化。

参考文献：

- [1] Li L, Zhang T. *Chin. Tradit. Pat. Med.* (李玲, 张彤. 中成药), **2024**, 46(10): 3540-3544.
- [2] Xie W X, Zhang Z X, Liu Y, Qiu F, Ding L Q. *Chin. Tradit. Herb. Drugs*(解文欣, 张紫萱, 刘越, 邱峰, 丁丽琴. 中草药), **2025**, 56(15): 5616-5631.
- [3] Wang C C, Zhang X C, Gu Z C, Wang J. *Strateg. Stud. CAE*(王超超, 张先超, 谷正昌, 王阶. 中国工程科学), **2024**, 26(02): 245-254.
- [4] Zhou E, Shen Q, Hou Y. *Front. Pharmacol.*, **2024**, 15: 1181183.
- [5] Meng Y, Yang Y, Hu M, Zhang Z, Zhou X. *Semin. Cancer Biol.*, **2023**, 95: 75-87.
- [6] Wang M, Wang Y, He L, Huang J, Tan Y, Zhang W, Mei Z, Xiong H. *Comput. Biol. Med.*, **2024**, 180: 108985.
- [7] Pan Y, Wang S, Ming K, Liu X, Yu H, Du Q, Deng C, Chi Q, Liu X, Wang C, Xu K. *Comput. Biol. Med.*, **2025**, 184: 109408.
- [8] Zhu H, Guo S, Yan H, Su S L, Duan J A, Xiao P. *China J. Chin. Mater. Med.* (朱浩, 郭盛, 严辉, 宿树兰, 段金赓, 肖平. 中国中药杂志), **2025**, 50(10): 2888-2904.
- [9] Shi S, Zhang K, Tian N, Jin Z, Liu K, Huang L, Tian X, Cao C, Zhang Y, Jiang Y. *Food Res. Int.*, **2025**, 211: 116459.

- [10] Zhao L L, Zhao W Q, Zhao Z Y, Xian R, Jia M Y, Jiang Y B, Li Z, Pan X L, Lan Z Q, Li M. *Spectrochim. Acta A*, **2024**, 321: 124618.
- [11] Liu Y, Wang X J, Liu L. *Strait Pharm. J.* (刘影, 汪晓娟, 刘龙. 海峡药学), **2020**, 32(8): 60–62.
- [12] Lu M H, Zhang F, Bao Y T, Wang Z J, Lei H Y, Wang X Y, Gao P H. *Spectrosc. Spectral Anal.* (逯美红, 张凡, 暴雅婷, 王志军, 雷海英, 王翔宇, 高鹏慧. 光谱学与光谱分析), **2025**, 45(1): 139–145.
- [13] Hu H Q, Wei Y P, Xu H X, Zhang L, Mao X B, Zhao Y P. *Spectrosc. Spectral Anal.* (胡会强, 位云朋, 徐华兴, 张蕾, 毛晓波, 赵宇平. 光谱学与光谱分析), **2023**, 43(6): 1953–1960.
- [14] Yin W J, Ru C L, Zheng J, Zhang L, Yan J Z, Zhang H. *China J. Chin. Mater. Med.* (殷文俊, 茹晨雷, 郑洁, 张璐, 颜继忠, 张慧. 中国中药杂志), **2021**, 46(4): 923–930.
- [15] Juszczak A M, Zovko–Končić M, Tomczyk M. *Biomolecules*, **2019**, 9(11): 731.
- [16] Kocak O F, Albayrak M, Yaman M E, Atila A, Kadioglu Y, Araz O. *J. Chromatogr. B*, **2022**, 1210: 123454.
- [17] Zheng Z Y, Zhang N, Hua Z, Liu L, Sun T, Xu X Y, Ma T X, Chen J L, Bian Z H, Lei X. *Tradit. Chin. Drug Res. Clin. Pharmacol.* (郑智洋, 张宁, 华臻, 刘雷, 孙婷, 许翔月, 马廷轩, 陈江龙, 卞振华, 雷霞. 中药新药与临床药理), **2025**, 36(12): 2160–2169.
- [18] Jin S, Zhu J Y, Cao W J. *Cereal Feed Ind.* (靳胜, 朱金艳, 曹文军. 粮食与饲料工业), **2025**, (6): 125–128.
- [19] Zhang Z C, He Y Y, He C J, Gu D L, Zhong L, Gou Y, Gao B X, Gen Z, Li X H, Chen S K. *Chin. Agric. Sci.* (张志淳, 何筱毅, 何成军, 辜冬琳, 钟恋, 苟琰, 高必兴, 耿昭, 李小红, 陈斯恺. 中国农业科学), **2025**, 58(23): 5057–5070.
- [20] Sun R, Lin X J, Xu S J, Yang Z H, Yang S B, Shi X F. *Lubr. Eng.* (孙冉, 林显军, 许士锦, 杨智宏, 杨双宾, 石新发. 润滑与密封), **2025**, 50(7): 190–198.
- [21] Zhao F, Yan Z R, Song H Y. *Spectrosc. Spectral Anal.* (赵凡, 闫昭如, 宋海燕. 光谱学与光谱分析), **2021**, 41(7): 2240–2244.
- [22] Calvini R, Pigani L. *Sensors*, **2022**, 22(2): 577.
- [23] Xiang C Q, Li X Y, Yu D H, Chen Q W, Lai J M, Wang L Q, Xiao X. *J. Instrum. Anal.* (向超群, 李欣怡, 余丹华, 陈启文, 赖嘉敏, 王乐琪, 肖雪. 分析测试学报), **2025**, 44(10): 2034–2043.
- [24] Qu Z N, Lv C, Bi Y, Feng J Y, Zhu J J, Zhou Q, Lu Q, Shi D H, Dai Y P. *Chin. Tradit. Herb. Drugs* (曲珍妮, 吕畅, 毕钰, 冯金鹰, 朱娟娟, 周巧, 卢琪, 石典花, 戴衍朋. 中草药), **2024**, 55(20): 6929–6939.
- [25] Chun Y, Hur J, Hwang J. *PLoS One*, **2024**, 19(4): e0301091.
- [26] Chen B J, Jiao L, Li H, Zhong H B, Lou J H, Shen R H. *Yunnan Chem. Technol.* (陈碧佳, 焦龙, 李红, 钟汉斌, 姜俊豪, 沈瑞华. 云南化工), **2024**, 51(4): 89–91.
- [27] Wang Y Q, Zhao H Q, Fang H, Wang T. *J. Instrum. Anal.* (王颖琦, 赵汉卿, 方焕, 王童. 分析测试学报), **2025**, 44(6): 1147–1153.
- [28] Fan F J, Xuan F L, Bai Y, Ji H F. *Spectrosc. Spectral Anal.* (樊凤杰, 轩凤来, 白洋, 纪会芳. 光谱学与光谱分析), **2020**, 40(6): 1763–1768.
- [29] Hou F G, Gui X J, Wang Y L, Li H Y, Fan X H, Li H, Shi J H, Liu R X, Li X L. *Chin. Tradit. Herb. Drugs* (侯富国, 桂新景, 王艳丽, 李海洋, 范雪花, 李涵, 施钧瀚, 刘瑞新, 李学林. 中草药), **2023**, 54(2): 509–519.
- [30] Fang Y, Hong Y L, Lin X, Shen L, Zhao L J. *Acta Pharm. Sin.* (房盈, 洪燕龙, 林晓, 沈岚, 赵立杰. 药学学报), **2025**, 60(2): 506–513.
- [31] Li Y, Liu Y R, Xu L F, Chen C, Shao Q F, Zhou S, Du S H. *J. New Chin. Med.* (李煜, 刘怡然, 许林峰, 陈澈, 邵芊枫, 周晟, 杜少辉. 新中医), **2025**, 57(14): 12–19.
- [32] Yin Y, Wang M, Yang Z Q, Wang Y N, Ma Y P, Gao H Y. *Chin. Tradit. Herb. Drugs* (尹燕, 王淼, 阳志强, 王延年, 马跃平, 高慧媛. 中草药), **2021**, 52(17): 5369–5377.
- [33] Xue Q L, Miao K H, Yu Y, Li Z. *China J. Chin. Mater. Med.* (薛启隆, 苗坤宏, 于洋, 李正. 中国中药杂志), **2023**, 48(2): 562–568.
- [34] Chen W, Sun Q, Chen X, Xie G, Wu H, Xu C. *Entropy*, **2021**, 23(6): 667.
- [35] Gao L, Zhong L, Feng T, Yue J, Lu Q, Li L, Wu A, Lin G, He Q, Liu K, Cao G, Meng Z, Nie L, Zang H. *Talanta*, **2025**, 287: 127627.
- [36] Huang J, Wang X, Xia R, Yang D, Liu J, Lv Q, Yu X, Meng J, Chen K, Song B, Wang Y. *Comput. Struct. Biotechnol. J.*, **2024**, 23: 3175–3185.
- [37] Gao S, Zhang H, Yang Z, Wu R, Chen M, Zhai D, Yang Y, Qin Y, Tao H, Li P. *Spectrochim. Acta A*, **2026**, 346: 126851.
- [38] Wei J, Dai J, Sun Y, Meng Z, Ma H, Zhou Y. *J. Ethnopharmacol.*, **2024**, 325: 117860.
- [39] Bai L, Zhang Z T, Guan H, Liu W, Chen L, Yuan D, Chen P, Xue M, Yan G. *Talanta*, **2024**, 275: 126098.
- [40] Moreira J, Silva B, Faria H, Santos R, Sousa A S P. *Sensors*, **2022**, 23(1): 205.
- [41] Zhao Y, Guo J, Mu Q, Liu R, Liu H, Xu Y, Li Y. *Phytochem. Anal.*, **2024**, 35(2): 321–335.
- [42] Wen Y, Li Z, Ning Y, Yan Y, Li Z, Wang N, Wang H. *Spectrochim. Acta A*, **2024**, 310: 123956.
- [43] Lin F, An Y L, Mei F, Xia T Y, Jiang H L, Peng L H, Qiao W L, Guo D A. *Biomed. Chromatogr.*, **2025**, 39(11): e70221.

- [44] Sun F, Chen Y, Wang K Y, Wang S M, Liang S W. *Anal. Lett.*, **2019**, 53(6): 937–959.
- [45] Wilde A S, Haughey S A, Galvin–King P, Elliott C T. *Food Control*, **2019**, 100: 1–7.
- [46] Kang S. *Herbalogical and Identification Study of Cordyceps*. Shijiazhuang: Hebei University of Chinese Medicine (康帅. 冬虫夏草的本草考证与鉴定研究. 石家庄: 河北中医药大学), **2023**.
- [47] He S, Long W, Hai C, Chen H, Tang C, Rong X, Yang J, Fu H. *Spectrochim. Acta A*, **2024**, 307: 123639.
- [48] Gu H, Wang S, Hu S, Wu X, Li Q, Zhang R, Zhang J, Zhang W, Peng Y. *Talanta*, **2024**, 274: 125968.
- [49] Ma W, Song M, Ji Z, Liu Y, Na P, Li Y, Nie Z. *Anal. Bioanal. Chem.*, **2025**, 417(9): 1935–1945.
- [50] Bai J, Yue P, Dong Q, Wang F, He C, Li Y, Guo J. *Sci. Rep.*, **2021**, 11(1): 5126.
- [51] Xie M D, Tian L Y, Gui X J, Shi J H, Wang J M, Yue Y S, Zhang L, Wang Y L, Yao J, Li X L, Liu R X. *Chin. Tradit. Herb. Drugs* (谢梦迪, 田亮玉, 桂新景, 施钧瀚, 王君明, 岳佑淞, 张璐, 王艳丽, 姚静, 李学林, 刘瑞新. 中草药), **2022**, 53(8): 2490–2498.
- [52] Liu P, Wang J, Li Q, Gao J, Tan X, Bian X. *Spectrochim. Acta A*, **2019**, 206: 23–30.
- [53] Chen G M, Li W L. *Chin. J. Inorg. Anal. Chem.* (周国铭, 李文龙. 中国无机分析化学, **2026**, 16(2): 270–280.
- [54] Zhu D, Han J, Liu C, Zhang J, Qi Y. *Front. Plant Sci.*, **2024**, 15: 1344143.
- [55] Ortega–Zúñiga C A, Román–Ospino A D, Gupta S, Omar T, Baranwal Y, Sanchez–Paternina A, Zhou Q, Jing J, Muzzio F J. *Int. J. Pharm.*, **2025**, 670: 125165.
- [56] Wang Y, Tan F. *Vibrational. Spectroscopy*, **2021**, 114: 103249.
- [57] Yang Y, Zheng K, Guo L P, Wang C X, Zhong D B, Shang L, Nian H J, Cui X M, Huang S J. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **2022**, 233: 113348.
- [58] Song Z, Chen G, Chen C Y. *Chem. Sci.*, **2024**, 23; 15(41): 1684416886.
- [59] Dai G, Fan J, Dewi C. *Comput. Electron. Agric.*, **2023**, 212: 108129.
- [60] Lan Z, Zhang Y, Sun Y, Ji D, Wang S, Lu T, Cao H, Meng J. *J. Pharm. Biomed. Anal.*, **2020**, 188: 113387.
- [61] Zhang H, Wang W Z, Hu X Y, Wang J, Han Y Y, Wang X M, Zhang X M, Guo X Y, Huan X Y, Zhao J, Li N, Wang Y F, Wu Z S. *Acta Pharm. Sin.* (张瀚, 王文哲, 胡小艳, 王静, 韩燕雨, 王晓萌, 张晓梦, 郭新雨, 郇星月, 赵静, 李楠, 王逸飞, 吴志生. 药学学报), **2023**, 58(10): 2890–2899.

(责任编辑: 盛文彦)