

• 综述 •

中药材仓储过程质量监测与评价研究进展

张尧^{1,5}, 闫明宇², 胡云飞³, 金若钺³, 吴皖慧³, 章顺楠^{4*}, 李文龙^{1,5*}

1. 天津中医药大学中药制药工程学院, 天津 301617
2. 亳州职业技术学院 安徽省华佗中医药研究院, 安徽 亳州 236800
3. 亳州学院中药学院, 安徽 亳州 236800
4. 天士力医药集团股份有限公司 中药先进制造技术国家地方联合工程实验室, 天津 300410
5. 现代中药创制全国重点实验室, 天津 301617

摘要: 中药材在仓储过程中易受环境因素的影响, 导致性状劣变、成分降解和微生物污染等, 进而影响药效及用药安全。为了保障中药材在仓储过程的质量, 构建科学的质控体系至关重要。系统梳理了中药材储存期间质量的变化规律, 剖析了传统仓储质量控制模式的局限性, 并提出构建基于过程监测理念的质量控制新体系, 探讨中药材仓储质量控制的未来发展趋势与研究方向。旨在构建科学、合理的仓储质量控制体系, 提升中药材在仓储阶段的质量稳定性与安全性。

关键词: 中药材; 储存; 过程监测; 质量评价; 人工智能

中图分类号: R282 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2025)19-7200-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.19.029

Research progress on quality monitoring and evaluation of traditional Chinese medicinal materials during storage

ZHANG Yao^{1,5}, YAN Mingyu², HU Yunfei³, JIN Ruofan³, WU Wanhui³, ZHANG Shunnan⁴, LI Wenlong^{1,5}

1. College of Pharmaceutical Engineering of Traditional Chinese Medicine, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China
2. Anhui Huatuo Academy of Traditional Chinese Medicine, Bozhou Vocational and Technical College, Bozhou 236800, China
3. School of Chinese Medicine, Bozhou University, Bozhou 236800, China
4. National & Local United Engineering Laboratory for TCM Advanced Manufacturing Technology Tasly Pharmaceutical Group Co., Ltd., Tianjin 300410, China
5. National Key Laboratory of Modern Chinese Medicine Development, Tianjin 301617, China

Abstract: Chinese medicinal materials are susceptible to environmental influences during storage, which may result in morphological deterioration, degradation of chemical constituents, and microbial contamination, thereby compromising their therapeutic efficacy and medication safety. To ensure quality throughout the storage process, it is essential to establish a scientific and effective quality control system. This review systematically summarizes the quality variation patterns of Chinese medicinal materials during storage, analyzes the limitations of traditional warehouse-based quality control models, and proposes a novel quality control system based on the concept of process monitoring. It further explores future development trends and research directions in storage quality control, aiming to construct a scientific and rational system to enhance the stability and safety of Chinese medicinal materials during storage.

Key words: Chinese medicinal materials; storage; process monitoring; quality evaluation; artificial intelligence

收稿日期: 2025-06-07

基金项目: 安徽省华佗中医药研究院科技重大专项 (BZKZ2416); 安徽省高校自然科学重点研究项目 (2023AH052272); 山西省中医药科研课题项目 (2024ZY2C118); 安徽省首批省级科技特派团项目 (2023tpt014); 亳州市重点研发计划项目 (bzze2023031)

作者简介: 张尧, 男, 硕士研究生, 研究方向为中药质量控制。E-mail: zhangyaotjutcm@163.com

*通信作者: 章顺楠, 男, 研究员, 从事中药国际化与智能制造研究。E-mail: zsn@tasly.com

李文龙, 男, 研究员, 博士生导师, 从事中药质量控制研究。E-mail: wshlwl@tjutcm.edu.cn

中药材作为中医药产业的源头，其质量直接关系到整个产业链的发展。其中仓储作为链接产地采收、加工与临床应用的关键环节，对保障中药材的质量具有重要影响。然而长期以来，由于认知不足和监管缺失，中药材的仓储环节常被忽视，普遍存在设施简陋、管理体系不完善、储存与养护水平参差不齐等问题，导致中药材在仓储期间的质量难以保证。随着人民生活水平的提升与健康意识的增强，公众对中药质量的关注日益增强，对中药材仓储过程中的质量控制提出了更高要求。近年来，中药仓储相关研究受到国内外研究者的广泛关注，研究表明，不当的储存管理易导致中药材性状劣变、活性成分降解及微生物污染，严重影响其临床疗效与用药安全^[1]。

基于此，本文首先聚焦中药材在仓储过程中的质量变化，系统梳理当前研究中关于外观性状、理化指标、安全性指标及化学成分等的变化，分析其产生变化的物质基础及影响机制；其次阐述当前中药材仓储质量控制体系的不足，并提出构建基于“过程监测”理念的中药材仓储过程质量监测与评价体系。在此基础上，归纳分析未来中药材仓储过程质量控制体系的发展趋势与研究重点，为中药材仓储环节全过程质量监测与科学管理提供系统性理论支撑和实践参考，助力中医药产业的高质量可持续发展。

1 中药材储存过程中各类指标的变化

中药材来源广泛，种类繁多，包括植物、动物及矿物等多种类型。在储存过程中常表现出多样的变质现象与质量变化规律，影响其质量稳定性与临床疗效。常见中药材储存过程中的变质现象见表1，常见的指标变化见图1。

1.1 外观性状的变化

中药材的外观性状是最直观的质量表现形式，主要包括颜色、气味、质地等。其变化不仅影响药材的感官品质，而且反映其内部活性成分的降解或转化过程，因此常作为药材质量劣变的重要判断指标^[12]。

1.1.1 颜色变化 颜色变化是中药材储存期间最常见的性状变化之一，主要表现为色泽加深、褪色和变色现象，由氧化反应、美拉德反应、酶促反应及光敏成分降解等因素导致^[13-14]。富含还原性成分如多酚类的药材易发生氧化反应导致颜色变化。李倩^[15]发现大黄在储存过程中儿茶素等鞣质类成分

表1 常见中药材储存过程中的变质现象

Table 1 Common deterioration phenomena during storage of Chinese medicinal materials

药材	变化类型	变化现象	文献
牡丹皮	变色	颜色亮度降低，呈现暗红色	2
枸杞	变色、走油	褶皱增多、返软、发黏、颜色暗红发黑	3
薄荷	变味	精油挥发，气味减淡	4
金银花	变色	明显褪色，颜色由绿白色变为黄白色	5
菊花	变色、变味	颜色褪色或变暗、气味减淡	6-7
苦杏仁	变色、变味、走油	种皮、子叶及表面颜色加深，产生酸败味	8
柏子仁	走油、虫蛀、霉变	泛油、发黏、生虫、出现霉点霉斑	9
硼砂	风化	风化成白色粉末	10
芒硝	潮解	结晶吸水受潮	11

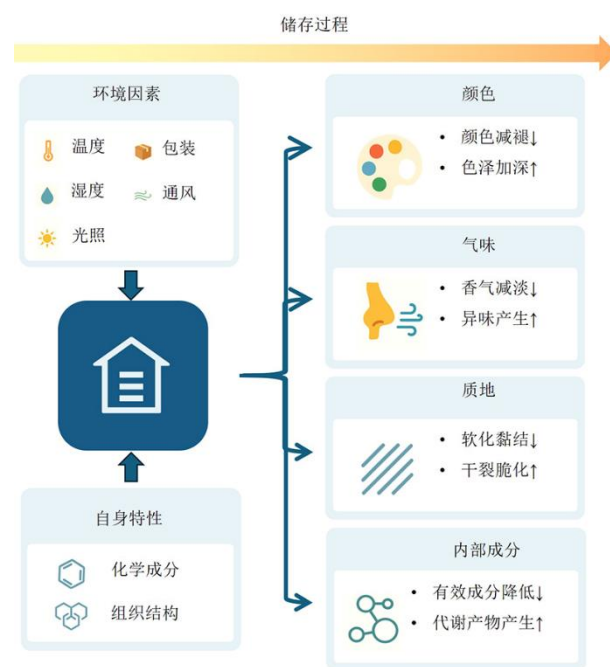


图1 中药材储存过程常见的指标变化

Fig. 1 Common indicator changes during storage of Chinese medicinal materials

氧化生成深色聚合物，蒽酚类氧化为蒽醌，导致色泽由浅黄转变为深棕色。含糖与氨基酸的药材易发生美拉德反应，通过羰基与氨基的缩合与聚合生成类黑色素等物质。Kędzierska-Matysek 等^[16]发现蜂蜜会在储存中发生此反应并生成 5-羟甲基糠醛等产物，导致颜色加深。此外，药材中的某些酶在储存期间可能仍然活跃，朱玉芸^[17]发现菊花含有的多酚氧化酶和过氧化物酶会催化内部酚类化合物如绿原酸、槲皮素等聚合生成褐色醌类化合物，影响

其外观品质。光敏成分的降解也会导致药材颜色发生变化。花青素和类胡萝卜素等植物色素长时间暴露在紫外线或强光下时易发生降解反应,使药材逐渐褪色^[18]。

1.1.2 气味变化 中药材的气味变化通常与其挥发性成分的变化密切相关。含挥发油类的中药材在储存过程中,其挥发油会逐渐逸散,导致香气逐渐减弱。李蓓等^[19]与郑海等^[20]研究表明,砂仁的乙酸龙脑酯及广藿香的广藿香酮、广藿香醇等挥发油成分含量均会随着储存时间的延长发生不同程度的下降。此外,药材储存过程中还可能通过化学反应和微生物污染产生异味。富含脂肪的中药材如苦杏仁、柏子仁等易发生氧化反应,生成醛酮类和游离脂肪酸,产生刺激性气味^[21]。微生物污染方面,霉菌感染会产生明显霉味,含糖类中药材易发酵产生酒酸味,而动物类中药材则易腐败分解生成氨气、胺类等恶臭物质,均会显著影响药材品质^[22]。

1.1.3 质地变化 中药材储存过程中的质地变化常由水分含量变化引发,并其自身成分与结构特性密切相关^[23]。富含多糖、黏液质的中药材在高湿下易膨胀变软^[24],而过于干燥的环境会使中药材组织收缩、干裂、脆化^[25]。此外,某些矿物类中药材因其特殊理化性质在储存中会发生特异地质地变化,如硼砂易因失去结晶水而风化成粉末,芒硝则因强吸湿性易潮解结块甚至液化。虫害侵蚀也是影响中药材质地的重要因素,常见于含糖或淀粉丰富的中药材,虫蛀可使其出现虫眼、空洞及粉屑,严重影响药材质量^[26]。

1.2 一般性检查项(理化指标)的变化

1.2.1 水分含量 中药材储存期间水分变化主要受环境湿度、温度及自身理化特性影响。水分变化本质上是由药材与环境之间的蒸气压差驱动^[27],表现为高湿环境中吸湿增水,低湿环境下解吸失水^[28];温度变化通过影响水的蒸气压,影响吸湿与解吸的速率与动态平衡^[29]。中药材的组织结构、化学成分等自身特性决定了其水分吸收能力,如富含亲水基团和组织结构疏松的药材吸湿能力较强^[30-31]。

中药材中的水分包括结合水与自由水,自由水游离于细胞间隙和孔隙中,迁移性强、易挥发,是水分波动和品质劣变的主要因素;结合水以氢键等形式与极性基团结合,稳定性较好,但中药材过于干燥时也可能被破坏,导致组织结构破坏^[32]。因此控制水分含量在适宜范围内,是确保中药材储存质

量稳定的关键。

1.2.2 灰分含量 灰分是评价中药材纯净度和杂质含量的重要指标^[33]。其主要由中药材自身不挥发的无机成分及表面附着的无机成分组成,在储存过程中通常相对稳定。但灰分含量可能因外来杂质的混入而升高,储存环境多尘或包装不严,会导致泥沙灰土附着于中药材表面,从而使灰分增加^[34]。黄群等^[35]指出当中药材所处的储存环境中无机颗粒物浓度较高时,这些物质易被吸附或混入中药材,导致灰分含量偏高。因此合理控制仓储环境的洁净度和密闭性,是确保灰分含量符合质量标准的关键。

1.3 安全性检查项的变化

1.3.1 霉菌毒素 霉菌毒素是由霉菌产生的一类次级代谢产物,是评价中药材储存安全控制的关键外源性指标之一^[36]。霉菌毒素在药材储存初期通常不存在或浓度极低,但一旦储存条件控制不当,霉菌毒素会迅速生长繁殖并产生黄曲霉毒素、赭曲霉毒素、伏马毒素等毒性强烈的真菌毒素。其中黄曲霉毒素 B₁ 具有极高的致癌性,已被国际癌症研究机构列为 I 类致癌物。Gonda 等^[37]研究表明黄曲霉毒素 B₁ 的形成在高湿高温条件下尤为迅速,可在 6 d 内达到最大毒性剂量水平。赭曲霉毒素 A 对肾脏具有高度靶向毒性,张太等^[38]指出该毒素在中药材中的污染现象不容忽视,在 30 批甘草样品中的检出率高达 100%。因此,中药材储存管理中应严格控制环境条件,建立长期监控机制,防范霉菌毒素污染风险。

1.3.2 重金属 中药材在生长过程中易富集土壤、大气和水源中的砷、汞、铅、铜、镉等元素发生重金属污染^[39],此类元素稳定性强、难降解,污染具有长期性和累积性^[40]。重金属污染的形成还可能与种植过程中施用的农药、化肥不合格,及炮制环节中容器或辅料的不当使用有关^[41]。目前关于储存环节中重金属再污染的研究报道较少,但理论上若药材长期暴露于污染环境或包装密封性不足,仍可能存在外源性重金属吸附或迁移的风险。该问题的潜在危害及其在仓储中的影响机制有待进一步系统研究与关注。

1.3.3 农药残留 为防控病虫害,中药材在种植过程中通常需要施用农药。部分农药毒性大、稳定性强、难降解,易在环境中长期残留并在药材中富集,对人体健康构成严重威胁^[40,42]。《中国药典》2025 年版已全面禁止 47 种高毒、难降解农药的使用,但中

药材农药残留问题仍时有发生^[43]。

在中药储存过程中,农药残留会因环境变化表现出不同的降解特性,部分农药在温湿度升高的条件下降解速率显著加快。Ding等^[44]指出在温度为30℃时,相对湿度从50%升高至80%,三唑磷的半衰期由10.62 d缩短至8.04 d;而在相对湿度为50%条件下,温度从20℃提高至40℃,其半衰期则由13.53 d缩短至6.59 d。在中药材仓储过程中,应评估农药的降解趋势与残留风险,确保药材安全性。

1.3.4 植物生长调节剂 (plant growth regulators, PGRs) PGRs是一类能够调节植物生长发育、提高产量的化学物质,已被广泛用于中药材种植^[45]。然而,部分PGRs及其代谢产物可能具有生殖毒性、发育毒性等潜在风险。如6-苄腺嘌呤可在斑马鱼胚胎中诱导细胞凋亡并干扰心脏发育^[46]。不同类型的PGRs在储存过程中的稳定性差异显著。史雪琴^[47]研究发现赤霉素的降解速率受温度影响较大,其在20℃储存25 d时的消解率可达44.44%~59.46%,显著高于4℃储存55 d时的33.33%~50.10%;而氯吡脲在相同条件下降解速率显著较低,具有更强的稳定性和长期残留的风险。PGRs污染主要来源于种植阶段的施用残留,储存过程中不会自发产生,因此,储存管理的重点应放在入库前检测,确保符合安全标准^[48]。

1.4 化学成分(群)的变化

1.4.1 皂苷类 皂苷类化合物是许多中药材的重要活性成分,在储存过程中容易发生降解和转化。Chung等^[49]指出经过1年贮藏后,不同类型人参的总人参皂苷含量下降至20%~80%。韩喜桃等^[50]将党参置于不同条件下储存,发现其总皂苷含量随储藏温度、湿度、氧含量的升高而降低,其中湿度的影响最为显著。储存过程中,皂苷的构型也可能发生变化,进而影响其生物活性。如人参皂苷Rb₂在高温条件下,去除葡萄糖分子后形成了人参皂苷Rd,随后经过单分子亲核取代反应的异构化后还会转化为20(S)-人参皂苷Rg₃和20(R)-人参皂苷Rg₃^[51]。

1.4.2 黄酮类 黄酮类化合物广泛存在于植物中,包括黄酮、黄酮醇、异黄酮和花青素类型。储存过程中,这些成分受多因素影响,其含量和结构均会发生变化。黄酮和黄酮醇类含有多个酚羟基,易被氧化或光照降解。Šarić等^[52]表明在蜂蜜中的黄酮类储存期间会逐渐下降,尤其在高温环境下更易降解。异黄酮同样稳定性较差,李强等^[53]发现不

同产地黄芪的毛蕊异黄酮葡萄糖苷在储藏前后含量均有不同程度的下降。花色素类则最为不稳定,极易因光照、氧化或pH值变化而降解,导致颜色褪变^[54]。值得注意的是,陈皮等“越陈越好”的药材会表现出特殊的变化规律,其含有的黄酮类如橙皮苷、柚皮苷在储存初期会逐渐发生水解、氧化,但随着储存时间进一步增加,多甲氧基黄酮如川陈皮素、橘皮素等显著升高,值得进一步探索与研究^[55-56]。

1.4.3 生物碱类 生物碱大体可分为游离型与结合型2类,二者在储存过程中的变化各不相同。游离型生物碱结构中羟基、胺基或不饱和键易受到氧、热、光和水分的协同作用而发生氧化、光降解或水解等反应。嵇书霞等^[57]表明钩藤代煎液中生物碱在低温条件下稳定性较好,而在高温储存28 d后,其总含量下降至初始浓度的76.08%。周文菊^[58]将槟榔储存12个月后发现高温高湿条件下,槟榔外观颜色加深,槟榔碱、槟榔次碱和去甲基槟榔次碱的含量显著降低。结合型生物碱通常以酯键或苷键与糖、酸等基团结合,这些键合位点在储存中可能在酸催化、酶促或高湿环境下发生水解生成新的结构,如附子的双酯型乌头碱会被逐步水解为单酯型生物碱^[59]。

1.4.4 蒽醌类 蒽醌类成分主要以游离型和结合型2种形式存在,其储存稳定性差异较大。结合型蒽醌如番泻苷、蒽醌苷相对稳定,但久贮后仍然会缓慢降解;游离蒽醌如大黄素、芦荟大黄素较易分解或氧化。陈晨等^[60]考察了常温贮藏2年的唐古特大黄中主要活性成分含量的变化,发现常温下属于游离蒽醌的大黄素、芦荟大黄素损失率为21.43%、33.33%,而双蒽酮苷类番泻苷A、番泻苷B的损失率为17.56%、9.26%。

1.4.5 挥发油类 挥发油成分如萜类、芳香醛类在储存中极不稳定。由于其化学结构中含有不饱和键和易氧化基团,极易发生氧化、异构化、光环加成及分解等反应,从而导致成分损失和香气劣变^[61]。黄梅等^[62]对不同储存时间草果挥发性成分进行分析,发现储存2.5年后的草果挥发油含量显著下降。同时,高温会极大程度加剧挥发油的流失,邵佳等^[63]发现姜黄挥发油表现出明显的热不稳定性,随着温度升高和加热时间延长,其挥发性成分发生了显著变化,进一步加剧了有效成分的流失。

1.4.6 脂肪油类 脂肪油类中药材因富含不饱和

脂肪酸，储藏期间极易发生氧化与水解反应，生成游离脂肪酸及短链醛、酮等挥发物，并导致脂肪油外溢与过氧化值和酸值的升高，最终产生刺激性的酸败异味。颜继忠等^[64]发现瓜蒌子饮片中的不饱和脂肪酸如亚油酸和瓜蒌酸，随着储存时间的延长，其含量逐渐降低，且氧化产物如 2,4-癸二烯醛和 9-氧代壬酸等含量逐渐增加，产生刺鼻的“哈喇味”。程云霞^[65]研究了苦杏仁在储存过程中走油变质的机制，发现高温、高湿环境会加速苦杏仁脂肪油的外溢，进而引发酸败味的产生。Liu 等^[66]采用 HS-SPME-GC-MS 技术分析变质酸枣仁中的挥发性化合物，发现短链有机酸的含量显著增加，这些酸被认为是异味产生的主要来源。

1.4.7 多糖、蛋白质类 多糖与蛋白质同属大分子物质，在储存过程中易受到外界环境影响而发生变质。二者分子结构中均富含大量亲水性基团，如羟基、氨基和羧基等，易在储存过程中吸湿，导致药材表面出现黏结、软化等现象，进而引发水解、氧化或美拉德反应后发生变质^[67]。同时，由于多糖与蛋白质本身属于营养类物质，是微生物生长的物质基础，因此在不当地储存条件下更易诱发细菌、霉菌等繁殖^[68]。

2 中药材仓储过程监测与质量评价体系

2.1 传统检测模式的局限性

长期以来，中药材仓储期间的质量评价多依赖于静态、被动式的检测方法，即在其采收加工完成后、入库前、出库时或特定周期通过感官鉴别、微生物限度检测及化学指标测定等方法进行单点抽样分析^[69]。虽然这类检测方式能够在一定程度上反映特定时间点的中药材质量状况，但也存在着显著的局限性。

传统的感官评价高度依赖经验丰富的鉴定人员，主观性强，缺乏稳定性与可重复性，中药材性状细微差异如色泽深浅、质地变化、气味强弱等难以实现精准定量描述^[70]。传统的微生物和理化指标检测的操作流程繁琐复杂，成本较高。此外，传统检测方式仅反映特定时刻的药材质量状态，无法动态监测储存过程中的变化趋势，缺乏主动预警与干预能力，质量问题一旦发生往往只能废弃处理，造成巨大的经济损失。在保质期预测方面，传统经验公式如阿伦尼乌斯方程通常假设储存环境条件恒定，以便推算药材的劣变速率。但实际仓储环境会受季节、昼夜及设施的影响产生波动，导致模型预

测准确性降低^[71]。

2.2 基于“过程监测”理念的质量控制体系

随着中药材仓储质量保障要求的不断提升，以静态、被动检测为主的传统质控模式已难以满足全过程质量控制的需求。而现代制药业已广泛使用过程分析技术（process analytical technology, PAT）^[72]建立起基于实时数据的动态质量管理体系。PAT 通过采集高频数据，实时监测关键工艺参数和关键质量属性并加以控制和调整，有效提高了药品的一致性与可控性。

借鉴这一成功经验，本文提出将“过程监测”理念引入中药材仓储质量控制体系。该体系通过在仓库内布设在线传感器，实时采集中药材及环境的多模态信息，并借助物联网等数据传输技术传送到云端平台。云端平台借助各类先进算法对数据进行处理与分析后，可进行风险识别并主动决策与干预。与传统单点检测模式不同，该体系能够全面反映中药材在仓储期内的质量劣变趋势并通过大数据驱动决策，促进仓储质量管理由“静态、被动检测”向“动态、主动干预”模式的转型^[73]。“过程监测”强调的是一种动态跟踪和实时干预的质量控制思路，图 2 展示了基于这一理念构建的中药材仓储质量控制体系框架。

2.3 “过程监测”的实现路径

基于“过程监测”的中药材仓储质量控制体系的核心在于构建“信息采集-数据传输-分析决策”的闭环，通过多源感知、高效传输与数据驱动决策的协同作用，以实现中药材仓储的全程质量控制。信息采集是实现“过程监测”体系的基础环节；需具备实时、无损、连续和自动化特征，感知范围应涵盖饮片外观性状、成分特征及温湿度、光照等环境参数，实现多模态、多时点的全面感知^[74]。数据传输是信息传递的桥梁，传输系统需适应数据多源、高频与强时序性的特点，结合 5G 与物联网技术，确保在干扰环境下的数据稳定、高效传输^[75]。分析决策是实现“过程监测”体系的核心环节，应基于多源数据评估药材在仓储周期内的质量变化趋势，统筹安全性与有效性，构建微生物生长模型进行污染风险预警，同时关注质量标志物的动态变化^[76]。为避免传统检测中“以偏概全”的局限性，可引用白钢等^[77]提出的质量综合评价指数，整合环境参数、活性成分及微生物指标，构建综合质量评价模型。图 3 展示了该体系中的 3 个关键模块。

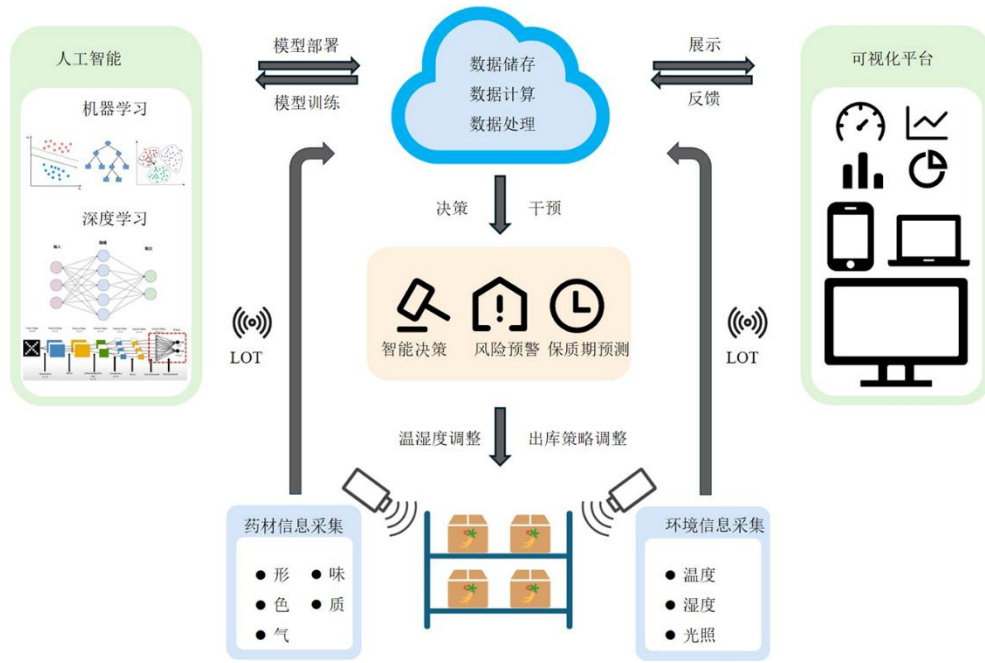


图2 基于“过程监测”的中药材仓储质量控制体系框架

Fig. 2 Framework of process monitoring-based quality control system for Chinese medicinal materials storage

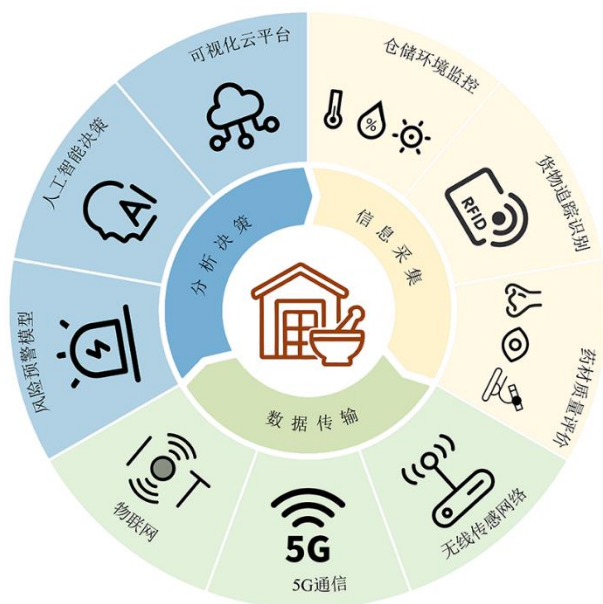


图3 中药材仓储“过程监测”体系的关键模块

Fig. 3 Key modules of process monitoring system for Chinese medicinal materials storage

2.4 人工智能 (artificial intelligence, AI) 在“过程监测”中的应用

AI是实现中药材仓储“过程监测”体系从数据采集到智能决策全流程的技术基石。通过深度学习算法和多模态数据融合技术, AI能够整合来自不同传感器的多维数据如图像、气味、光谱、环境参数

等, 实现更为全面的质量评估^[78]。而通过学习历史数据中的质量劣变规律, AI能够识别环境参数微小波动、成分含量细微变化等早期风险信号, 在变质问题显现前发出预警, 突破传统“问题发生后再处理”的被动模式。基于预警信息, AI系统可自主执行分析决策, 如自动调节温湿度、启动通风除湿等环境控制措施, 或根据不同中药材特性和储存状态, 动态优化出入库调度策略^[79]。

3 中药材仓储过程质量控制体系的发展趋势与研究重点

3.1 现场分析与便携检测的软硬件技术发展

当前, 中药材的分析检测技术正逐步从传统实验室依赖的分析设备与操作流程转向现场可部署、快速响应的软硬件技术。近年来, 包括电子鼻、便携式光谱、便携式质谱、机器视觉等技术设备被广泛应用并搭载于移动平台、手持终端或嵌入式系统中, 具备小型化、低功耗、非破坏性等特征, 可实现药材性状与成分的快速识别与监测。与此同时, 结合化学计量学与嵌入式算法优化, 支持数据在设备端的快速处理与初步判断, 显著提升了检测效率。部分检测技术在中药材分析的应用见表2, 体现了其在中药材仓储过程质量控制体系的广阔前景。

3.2 数据驱动的质量模型化与保质期预测

中药材仓储质量控制正经历从经验驱动向数

表2 中药材仓储质量评价技术的应用

Table 2 Applications of quality evaluation techniques for Chinese medicinal materials storage

评价技术	中药材	应用场景	文献
电子鼻	金银花	建立金银花的电子鼻质量判别模型	80
机器视觉	三七	建立三七分拣的视觉技术融合框架	81
气相色谱-质谱、电子鼻、电子舌	柏子仁	分析变质柏子仁在贮藏中的品质变化	82
色差仪、电子鼻、气相色谱-质谱	苦杏仁	建立基于颜色气味数字化融合信息的苦杏仁走油程度判别分析和内在质量预测模型	83
电子鼻、气相色谱-质谱	肉豆蔻	快速判断肉豆蔻霉变程度	84
自建便携式光谱系统	党参	使用便携式光谱系统快速判别党参变质	85
便携式近红外光谱仪	厚朴	使用便携式近红外光谱仪进行厚朴快速质量评价	86
便携式质谱	蜂蜜	使用小型便携质谱快速识别蜂蜜中的农药残留	87
荧光条免疫传感器	莲子	开发基于量子点纳米珠的荧光条免疫传感器以快速检测黄曲霉毒素 AFB ₁	88
激光诱导击穿光谱	马尾藻	定量分析马尾藻中的重金属	89
电感耦合等离子体-质谱	柴胡	测定柴胡中的重金属和元素转移	90
定量核磁、傅里叶红外光谱、气相色谱-质谱	沙棘	对沙棘油脂进行定量分析比较	91

据驱动的转变，传统上依靠老药工“看、闻、尝、摸”等感官经验判断药材优劣的方式，如今可以通过现代传感技术和数据分析方法实现标准化和数字化。通过分析大量历史数据，运用统计学和机器学习方法，可以建立反映药材质量劣变规律的数学模型，揭示储存时间、环境条件与质量指标之间的关系^[92]。在此基础上，保质期预测技术正向动态化、智能化方向快速发展。深度学习模型特别是 Transformer 架构和长短期记忆网络，擅长捕捉质量变化中的长程依赖关系并处理时序数据的动态特征。更重要的是，数据驱动模型具有持续优化能力，随着数据积累不断提升预测精度，真正实现从静态估算到动态预测的技术跨越，为中药材的精准库存管理和质量风险防控提供了有力支撑^[93]。

3.3 针对药材特点的个性化储存策略

与普通货物不同，中药材来源广泛、种类繁多，不同药材在成分组成、物理性质及变质机制上差异显著。在仓储管理中，难以通过统一标准实现全品种的质量保障。因此在储存时应充分考虑药材的自

身特性并构建“分品类、分指标、分策略”的个性化储存体系，同时针对不同药材开展系统稳定性实验，采集多维度数据，构建专属的质量劣变模型，最终形成覆盖多品种、多场景的智能决策数据库，实现“一药一策”的精准化仓储管理^[94]。部分中药材的个性化储存策略见表3。

3.4 法规体系与标准规范的构建完善

近年来，随着中药材仓储在质量控制体系中的重要性日益凸显，国家监管层面亦逐步强化对相关环节的政策引导与规范制定。2014年，商务部办公厅便推出《关于加快推进中药材现代物流体系建设指导意见的通知》，旨在提升中药材仓储管理水平，推动现代物流体系建设；2021年印发《关于“十四五”时期促进药品流通行业高质量发展的指导意见》，要求加快发展现代仓储物流，提升药品流通能级；2023年国家药品监督管理局相继发布《中药饮片标签管理规定》《中药饮片保质期研究确定技术指导原则（试行）》，明确要求企业自2025年8月1日起，中药饮片必须标注保质期，并鼓励企业使用

表3 不同品类中药材的储存策略

Table 3 Storage strategies for different categories of Chinese medicinal materials

中药材含主要成分类型	核心监测指标方向	个性化储存策略
挥发油、易挥发性成分	特征香气、挥发油含量	密封、低温、避光
脂肪油	酸价、过氧化值、特征气味	密封、低温、避光
黄酮、酚酸	有效成分含量、抗氧化活性	低温、避光
生物碱、苷类	有效成分含量、pH值	低温、避光
多糖、蛋白质、淀粉	水分含量、霉菌毒素、虫害	干燥、通风、防虫

现代质量评价指标制定保质期; 2025年国务院办公厅印发《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》, 要求加强中药材流通和储备体系建设, 提升中药材储备和供应保障能力。这些政策文件的出台, 标志着我国在中药材仓储质量控制方面的法规体系日益完善, 为行业的规范发展提供了有力支撑。

4 结语与展望

中药材在储存过程中易发生多种变质问题, 严重影响疗效与用药安全。本文系统分析了中药材仓储过程中的质量变化规律, 提出了基于“过程监测”理念的质量控制体系, 通过对仓储环境与药材状态的多维感知与动态追踪, 实现质量变化的预警与干预控制, 为提升仓储期间的药材质量稳定性提供了新的技术路径。

尽管当前中药材仓储质量控制体系取得了一定的进展, 但在实际应用过程中仍面临诸多挑战: (1) 虽然智能化技术已经开始在一些大型药材储存设施中得到应用, 但在中小型企业中, 这些技术的普及和应用仍然面临着成本、技术门槛等方面的挑战。(2) 中药材仓储受地域、气候、设备条件等多因素影响, 如何构建适应不同环境条件的智能监测与干预策略, 实现技术方案的本土化适配, 是亟需解决的关键问题。(3) 在确保药材质量的前提下, 如何实现节约能源与成本的目标, 开发既能保证质量又能降低能耗的仓储技术, 构建低碳绿色型的中药材储存体系, 仍需深入探索。

未来, 中药材仓储过程质量控制体系的升级, 将成为中医药产业现代化、国际化发展的重要支撑。通过持续技术创新与标准完善, 有望实现中药材仓储过程的全程可视化、质量可控化与风险可预警化, 为中药材的安全、有效提供有力保障, 助力中医药产业高质量可持续发展^[95]。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] 郭东晓, 许丽丽, 崔伟亮, 等. 关于构建中药材和饮片贮藏养护质量管理体系的思考 [J]. 中药材, 2021, 44(9): 2023-2027.

[2] 谢晋, 彭华胜, 张群林, 等. 基于颜色特征的牡丹皮贮藏年限鉴别及质量评价研究 [J]. 中药材, 2016, 39(6): 1232-1235.

[3] 张丽丽, 吴姗姗, 黄延盛, 等. 不同储存温度对青海枸杞品质的影响 [J]. 食品研究与开发, 2021, 42(12): 24-29.

[4] 白师茹, 唐璐, 范蓓, 等. 薄荷精油纳米乳液工艺优化及其稳定性研究 [J]. 食品科技, 2025, 50(1): 265-274.

[5] Liu Z Y, Cheng Y X, Chao Z M. Effects of light on the quality of honeysuckle during storage based on physico-chemical indicators and chemical composition [J]. *Arab J Chem*, 2024, 17(2): 105595.

[6] Cheng X F, Wang S H, Yang Z F, *et al.* Evaluation of surface structure, water sorption properties, water plasticizing effect, and color stability of dried chrysanthemums [J]. *J Stored Prod Res*, 2024, 108: 102367.

[7] Wu Y Z, Yu H T, Yu X Y, *et al.* Comparison of volatile compounds in *Chrysanthemum nankingense* during storage based on HS-SPME-GC-MS and E-nose [J]. *J Food Meas Charact*, 2023, 17(3): 3134-3148.

[8] 拱健婷. 易变质中药加速试验方法研究与质量预测模型的建立 [D]. 北京: 北京中医药大学, 2017.

[9] 田玥, 杨琦, 高琛, 等. 柏子仁贮存现状及质控研究 [J]. 中国医院用药评价与分析, 2022, 22(6): 765-768.

[10] 明晶. 几种矿物药的 X 射线衍射、拉曼光谱及近红外光谱法鉴别研究 [D]. 武汉: 湖北中医药大学, 2018.

[11] 赵文华, 韩向娜, 叶琳, 等. 文物中常见可溶盐精确鉴别方法 [J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(12): 3826-3831.

[12] 康廷国, 张慧, 李峰, 等. 论中药性状学 [J]. 中草药, 2024, 55(11): 3579-3587.

[13] 宫瑞泽, 霍晓慧, 张磊, 等. 美拉德反应对中药品质的影响及调控研究进展 [J]. 中草药, 2019, 50(1): 243-251.

[14] 杨莉萍, 郭旭东, 姬捷, 等. 百合色泽变化机制及控制的研究进展 [J]. 中草药, 2023, 54(6): 1978-1985.

[15] 李倩. 大黄贮藏过程中变色物质基础及影响因素研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2019.

[16] Kędzierska-Matysek M, Teter A, Daszkiewicz T, *et al.* Effect of temperature of two-year storage of varietal honeys on 5-hydroxymethylfurfural content, diastase number, and CIE color coordinates [J]. *Agriculture*, 2025, 15(6): 652.

[17] 朱玉芸. 酶促褐变对菊花品质的影响研究 [D]. 合肥: 安徽中医药大学, 2018.

[18] 王晓宇, 周静, 陈鸿平, 等. 枸杞子贮藏中“变色”的化学物质基础的初步阐释 [J]. 中成药, 2015, 37(1): 157-159.

[19] 李蓓, 黄亚威, 廖延武, 等. 药食同源中药饮片砂仁炮制品的贮藏条件研究 [J]. 中外食品工业, 2024(15): 71-73.

[20] 郑海, 王如意, 郑怡, 等. 干燥和储存方式对广藿香有效成分的影响 [J]. 安徽农业科学, 2024, 52(6): 170-

- 172.
- [21] Franklin L M, Mitchell A E. Review of the sensory and chemical characteristics of almond (*Prunus dulcis*) flavor [J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67(10): 2743-2753.
- [22] 梅南菊, 赖长江生, 刘锦芮, 等. 中药原料保质期研究进展 [J]. *中草药*, 2022, 53(20): 6611-6625.
- [23] 吴梦玫, 张英, 吴孟华, 等. 干燥动力学结合低场核磁共振和物性分析技术的地黄饮片干燥过程表征 [J]. *中草药*, 2022, 53(15): 4645-4652.
- [24] 李金洋, 胡婷婷, 李静, 等. 基于颜色-成分关联分析不同规格牛膝储藏过程中质量变化的规律研究 [J]. *山西中医药大学学报*, 2024, 25(9): 992-1004.
- [25] Vickers Z, Peck A, Labuza T, *et al.* Impact of almond form and moisture content on texture attributes and acceptability [J]. *J Food Sci*, 2014, 79(7): S1399-S1406.
- [26] 程云霞, 刘震营, 徐博, 等. 中药材贮藏期虫蛀现象的研究现状 [J]. *中国中药杂志*, 2023, 48(19): 5152-5161.
- [27] Al-Muhtaseb A H, McMinn W A M, Magee T R A. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review [J]. *Food Bioprod Process*, 2002, 80(2): 118-128.
- [28] Hay F R, Rezaei S, Buitink J. Seed moisture isotherms, sorption models, and longevity [J]. *Front Plant Sci*, 2022, 13: 891913.
- [29] Dong H, Han S, Mi K Q, *et al.* Asymmetric Janus composite films with superior humidity regulation capabilities for the efficient preservation of strawberry fruit [J]. *Food Chem*, 2025, 478: 143646.
- [30] Michalski P, Nur-A-Tomal M S, Crawford S, *et al.* Advancement in fruit drying through the analysis of moisture sorption isotherms: Processing effects on Australian native fruits in comparison to apple [J]. *J Food Eng*, 2025, 395: 112526.
- [31] 韩童童, 饶小勇, 漆红梅, 等. 基于水分活度和水分子流动性理论的梅花饮片安全储藏含水量分析 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2023, 29(13): 151-156.
- [32] 吴钦伟, 孟庆民, 张尧, 等. 基于水分活度和水分子流动性的全蝎饮片吸湿特点分析 [J]. *中草药*, 2025, 56(6): 1926-1934.
- [33] 赵林琳, 王皓南, 刘大会, 等. 中药常规检查的历史发展和应用意义 [J]. *世界中医药*, 2022, 17(20): 2973-2977.
- [34] 罗培和. 中药饮片不影响安全性及有效性问题研究 [J]. *中国市场监管研究*, 2022(9): 52-54.
- [35] 黄群, 巫晓霞, 谢燕螺, 等. 基于中药品质环境饰变论的环境因子对茯苓化学成分和药效的影响 [J]. *化学研究与应用*, 2024, 36(8): 1783-1790.
- [36] 王燕, 章红, 段和祥, 等. 14 种易霉变饮片微生物污染状况及其表面真菌多样性研究 [J]. *中国药学杂志*, 2024, 59(7): 571-578.
- [37] Gonda M, Rufo C, Gonzalez-Andujar J L, *et al.* Mitigating aflatoxin B1 in high-moisture *Sorghum* silage: *Aspergillus flavus* growth and aflatoxin B1 prediction [J]. *Front Microbiol*, 2024, 15: 1360343.
- [38] 张太, 毛丹, 王少敏, 等. 赭曲霉毒素 A 的研究进展 [J]. *分析科学学报*, 2021, 37(5): 699-705.
- [39] Chen Y G, He X L S, Huang J H, *et al.* Impacts of heavy metals and medicinal crops on ecological systems, environmental pollution, cultivation, and production processes in China [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2021, 219: 112336.
- [40] Kaur R, Choudhary D, Bali S, *et al.* Pesticides: An alarming detrimental to health and environment [J]. *Sci Total Environ*, 2024, 915: 170113.
- [41] 窦亚洁, 刘慧, 李晓萌, 等. 中药中外源性有害物的残留现状及风险评估的研究进展 [J]. *中草药*, 2023, 54(2): 396-407.
- [42] Tang F H M, Lenzen M, McBratney A, *et al.* Risk of pesticide pollution at the global scale [J]. *Nat Geosci*, 2021, 14: 206-210.
- [43] 中国药典 [S]. 一部. 2025.
- [44] Ding Z Q, Lin M R, Song X L, *et al.* Quantitative modeling of the degradation of pesticide residues in wheat flour supply chain [J]. *Foods*, 2023, 12(4): 788.
- [45] Qiu W Q, Chen J L, Hua Y Y, *et al.* Method development, multi-residue determination, and dietary exposure risk assessment of plant growth regulators in homologous materials of medicine and food [J]. *Environ Monit Assess*, 2024, 196(11): 1039.
- [46] Wang W X, Wang B R, Liu Z H, *et al.* Developmental toxicity and alteration of gene expression in zebrafish embryo exposed to 6-benzylaminopurine [J]. *Chemosphere*, 2019, 233: 336-346.
- [47] 史雪琴. 三种植物生长调节剂对蜂糖李贮藏期品质的影响及其残留分析 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [48] Sutcharitchan C, Miao S, Li W T, *et al.* High performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for residue determination of 39 plant growth regulators in root and rhizome Chinese herbs [J]. *Food Chem*, 2020, 322: 126766.
- [49] Chung I M, Kim J W, Seguin P, *et al.* Ginsenosides and phenolics in fresh and processed Korean ginseng (*Panax ginseng* C. A. Meyer): Effects of cultivation location, year, and storage period [J]. *Food Chem*, 2012, 130(1): 73-83.
- [50] 韩喜桃, 唐雅楠, 刘子琴, 等. 不同储藏条件对党参片质量的影响 [J]. *中草药*, 2022, 53(3): 858-867.

- [51] Kang K S, Kim H Y, Baek S H, *et al.* Study on the hydroxyl radical scavenging activity changes of ginseng and ginsenoside-Rb₂ by heat processing [J]. *Biol Pharm Bull*, 2007, 30(4): 724-728.
- [52] Šarić G, Vahčić N, Bursać Kovačević D, *et al.* The changes of flavonoids in honey during storage [J]. *Processes*, 2020, 8(8): 943.
- [53] 李强, 吴涛, 石榴花, 等. 不同产地黄芪质量及其储藏对成分的影响 [J]. *食品工业*, 2024, 45(1): 323-328.
- [54] Otto S, Krasowska M, MacWilliams S, *et al.* The solid-state stability of anthocyanins under various conditions and the implications for storage and shelf-life [J]. *Dyes Pigm*, 2024, 231: 112367.
- [55] Liang S J, Wen Z J, Tang T X, *et al.* Study on flavonoid and bioactivity features of the pericarp of *Citri Reticulatae* ‘Chachi’ during storage [J]. *Arab J Chem*, 2022, 15(3): 103653.
- [56] Li Y X, Zhao W H, Qian M, *et al.* Recent advances in the authentication (geographical origins, varieties and aging time) of tangerine peel (*Citri reticulatae pericarpium*): A review [J]. *Food Chem*, 2024, 442: 138531.
- [57] 嵇书霞, 陈奕灵, 钱跣, 等. 钩藤代煎液中 6 种生物碱的稳定性研究 [J]. *中国现代应用药学*, 2023, 40(24): 3411-3417.
- [58] 周文菊. 不同储藏环境和包装形式对槟榔等药材质量影响的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [59] 于阔, 杨欣鹏, 王蒙, 等. 炮制对附子成分与药理作用的影响及其历史沿革考证 [J]. *中医学报*, 2023, 51(7): 96-100.
- [60] 陈晨, 孙忠斌, 叶增荣, 等. 气调贮藏对唐古特大黄品质的影响 [J]. *亚太传统医药*, 2024, 20(10): 41-45.
- [61] 吴意, 万娜, 刘阳, 等. 中药挥发油稳定性影响因素、变化机制及保护策略 [J]. *中草药*, 2022, 53(21): 6900-6908.
- [62] 黄梅, 吴莲张, 廖方平, 等. 不同储存时间草果干果理化特性及挥发性成分分析 [J]. *热带农业科学*, 2025, 45(1): 45-54.
- [63] 邵佳, 邹俊波, 史亚军, 等. 姜黄挥发油热稳定性研究及其抗氧化剂筛选 [J]. *中国药学杂志*, 2019, 54(15): 1237-1244.
- [64] 颜继忠, 曾结林, 白芮, 等. 基于 GC-MS 结合化学模式识别辨析瓜蒌子变质过程中差异标志物 [J]. *浙江工业大学学报*, 2023, 51(4): 456-465.
- [65] 程云霞. 苦杏仁贮藏过程中走油机制研究及判别模型的建立 [D]. 济南: 山东中医药大学, 2021.
- [66] Liu Z Y, Xu L, Song P P, *et al.* Comprehensive quality evaluation for medicinal and edible *Ziziphi Spinosae Semen* before and after rancidity based on traditional sensory, physicochemical characteristics, and volatile compounds [J]. *Foods*, 2022, 11(15): 2320.
- [67] Fatchurrahman D, Amodio M L, Colelli G. Quality of goji berry fruit (*Lycium barbarum* L.) stored at different temperatures [J]. *Foods*, 2022, 11(22): 3700.
- [68] 王丹丹, 咎珂, 魏锋, 等. 动物类中药材使用情况及常见质量问题探讨 [J]. *中国药事*, 2020, 34(11): 1281-1298.
- [69] 先蕊, 郑雯, 赵文琪, 等. 中药饮片包装与贮藏养护技术的研究进展 [J]. *中国现代应用药学*, 2025, 42(4): 679-688.
- [70] 钱森华, 张晓勇, 朱斐, 等. 中药饮片等级量化评价方法研究进展与趋势 [J]. *中草药*, 2025, 56(2): 667-679.
- [71] 徐振娜, 刘思佳, 宋丽丽, 等. 有毒中药稳定性和有效期的研究进展 [J]. *中草药*, 2023, 54(7): 2301-2308.
- [72] Liu P W, Jin H, Chen Y, *et al.* Process analytical technologies and self-optimization algorithms in automated pharmaceutical continuous manufacturing [J]. *Chin Chem Lett*, 2024, 35(3): 108877.
- [73] 范文杰, 薛大力, 张晓哲. 中药制药工艺发展的瓶颈和方向 [J]. *中国医药工业杂志*, 2024, 55(5): 741.
- [74] 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.
- [75] 黄嫵亦, 施明毅. 物联网技术在中药溯源与质量监管中的应用研究 [J]. *电脑知识与技术*, 2024, 20(21): 129-131.
- [76] 江如蓝, 雷结语, 陈文礼, 等. 基于人工智能感官技术的中药质量控制方法研究进展 [J]. *药学前沿*, 2024, 27(11): 550-556.
- [77] 白钢, 刘昌孝, 张铁军, 等. 基于质量综合评价指数的药材品质快速评价 [J]. *中草药*, 2021, 52(2): 313-320.
- [78] Strani L, Durante C, Cocchi M, *et al.* Data fusion strategies for the integration of diverse non-destructive spectral sensors (NDSS) in food analysis [J]. *Trac Trends Anal Chem*, 2024, 180: 117957.
- [79] Yu W B, Ouyang Z W, Zhang Y F, *et al.* Research progress on the artificial intelligence applications in food safety and quality management [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2025, 156: 104855.
- [80] 姚月保, 杨晓芸, 彭莲, 等. 基于仿生识别系统对金银花颜色与“气”的鉴别研究 [J]. *世界科学技术—中医药现代化*, 2020, 22(4): 1270-1277.
- [81] Xing K Z, Wang S, Chen M F. A vision technology fusion framework for sorting *Panax notoginseng* [J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2024, 73: 2515612.
- [82] 刘震营, 徐靓, 吴翠, 等. 基于 HS-SPME/GC-MS 和电子感官技术考察柏子仁变质前后的品质变化 [J]. 中

- 国实验方剂学杂志, 2022, 28(21): 129-137.
- [83] Shao Y Y, Chen H R, Lin H X, *et al.* Exploration on varying patterns of morphological features and quality of *Armeniacae Semen Amarum* in rancid process based on colorimeter, electronic nose, and GC/MS coupled with human panel [J]. *Front Pharmacol*, 2022, 13: 599979.
- [84] 田卉玄, 杨瑞琦, 邹慧琴, 等. 电子鼻与 HS-GC-MS 技术快速鉴别肉豆蔻霉变过程中气味变化及其物质基础 [J]. 中国中药杂志, 2021, 46(22): 5853-5860.
- [85] Hou J, Guo H R, Qiang Z Z, *et al.* Qualitative differentiation of non-deteriorated and deteriorated *Codonopsis Radix* using a portable spectrometric system with a multispectral sensor chipset [J]. *J Food Eng*, 2025, 394: 112514.
- [86] 王江涛, 王雯爽, 翟珊珊, 等. 基于理气关键药效成分的厚朴药材质量的近红外快速评价 [J]. 药物评价研究, 2025, 48(4): 899-909.
- [87] Liu X, Wang B X, Luo H Y, *et al.* Portable miniature mass spectrometry for enhanced on-site detection of analytes in complex samples by integrating solid-phase microextraction and nano-electrospray ionization [J]. *Anal Chem*, 2024, 96(44): 17471-17475.
- [88] Jia B Y, Liao X F, Sun C N, *et al.* Development of a quantum dot nanobead-based fluorescent strip immunosensor for on-site detection of aflatoxin B₁ in *Lotus* seeds [J]. *Food Chem*, 2021, 356: 129614.
- [89] Su L J, Shi W, Chen X J, *et al.* Simultaneously and quantitatively analyze the heavy metals in *Sargassum fusiforme* by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Food Chem*, 2021, 338: 127797.
- [90] Li K L, Luo J Y, Ding T, *et al.* Multielements determination and metal transfer investigation in herb medicine *Bupleuri Radix* by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Food Sci Nutr*, 2018, 6(8): 2005-2014.
- [91] Dinkar Gore D, Ahmad F, Tikoo K, *et al.* Comparative quantitative analysis of fruit oil from *Hippophae rhamnoides* (seabuckthorn) by qNMR, FTIR and GC-MS [J]. *Chin Herb Med*, 2023, 15(4): 607-613.
- [92] Geng Z Q, Wang X T, Jiang Y G, *et al.* Novel IAPSO-LSTM neural network for risk analysis and early warning of food safety [J]. *Expert Syst Appl*, 2023, 230: 120747.
- [93] Goyal R, Singha P, Singh S K. Spectroscopic food adulteration detection using machine learning: Current challenges and future prospects [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2024, 146: 104377.
- [94] 熊素琴, 燕娜娜, 徐双美, 等. 中药贮藏期品质变化及评价指标探讨 [J]. 时珍国医国药, 2019, 30(4): 964-966.
- [95] Liu Z L, Yu X L, Liu N, *et al.* Integrating AI with detection methods, IoT, and blockchain to achieve food authenticity and traceability from farm-to-table [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2025, 158: 104925.

[责任编辑 赵慧亮]