

· 中药核酸检测技术体系的应用专题 ·

[编者按] 稳定可靠、高通量、低成本的模块化中药核酸检测技术体系,可保障中药材“种的好”、中药生产“投料准”、中药质量“可传递”。本专题展示了中药核酸检测技术体系在种子真伪鉴定、种质纯度鉴定、药材和饮片鉴定、配方颗粒鉴定中的应用,并针对种子检测技术薄弱问题,对目前科研和生产中应用的种子鉴别技术进行系统总结,对不同技术的原理、适用范围和优缺点进行比较,对未来种子鉴别技术的发展前景进行展望,以期中药材种子鉴别及质量评价提供参考。

中药材种子鉴别技术研究进展

刘志浩^{1,2}, 查良平³, 罗丽⁴, 赵玉洋¹, 李晓琳^{1*}, 袁媛^{1*}

- (1. 中国中医科学院中药资源中心, 道地药材品质保障与资源持续利用全国重点实验室, 北京 100700;
2. 中国药科大学中药学院, 南京 211198; 3. 安徽中医药大学药学院, 合肥 230012;
4. 广东药科大学中药学院, 广州 510006)

[摘要] 种子是中药材生产的源头。中药材种子的真伪、优劣直接影响到药材的有效性和安全性。中药材种子质量参差不齐,存在种源混杂、真伪混淆、陈种新卖、成熟度和净度低等问题。为保证中药产业高质量、可持续发展,亟需对中药材种子进行鉴别和质量评价,对中药材种子市场进行规范。种子鉴别的方法包括性状鉴别、显微鉴别、微性状鉴别、化学指纹图谱鉴别、分子鉴别及电子鼻、X射线衍射法、电化学指纹图谱鉴别、光谱成像与人工智能识别技术等新兴技术。各类鉴别方法的应用范围及其优缺点各有不同,根据中药材种子品种不同、检测场所要求不同,可选择合适的鉴别方法,以实现鉴别准确、时间和经济成本降低的目标。未来中药材种子鉴别技术发展的方向应基于各项快速发展的新兴技术,开展学科交叉融合,朝着智能化、无损化、单粒检测的方向发展,以满足现代中药产业的需求。该文对目前科研和生产中应用的种子鉴别技术进行系统总结,对不同技术的原理、适用范围和优缺点进行比较,同时对未来种子鉴别技术的发展前景进行展望,以期中药材种子鉴别及质量评价提供参考。

[关键词] 中药材种子; 传统鉴别; 分子鉴别; 化学指纹图谱; 电子鼻; 光谱鉴别; 人工智能

[中图分类号] R284.2; R289; R287; R22; R2-031 [文献标识码] A [文章编号] 1005-9903(2024)04-0001-11

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.20231219

[网络出版地址] <https://link.cnki.net/urlid/11.3495.R.20231007.1121.001>

[网络出版日期] 2023-10-07 18:42:28

Methods for Identifying Seeds of Chinese Medicinal Materials: A Review

LIU Zhihao^{1,2}, ZHA Liangping³, LUO Li⁴, ZHAO Yuyang¹, LI Xiaolin^{1*}, YUAN Yuan^{1*}

- (1. National Key Laboratory for Quality Ensurance and Sustainable Use of Dao-di Herbs, National Resource Center for Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China;
2. School of Traditional Chinese Pharmacy, China Pharmaceutical University, Nanjing 211198, China;
3. School of Pharmacy, Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230012, China;
4. School of Traditional Chinese Medicine, Guangdong Pharmaceutical University, Guangzhou 510006, China)

[收稿日期] 2023-07-08

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2020YFE0205100);中国中医科学院科技创新工程重大攻关项目(C12021A041);国家科技性基础资源调查项目(2018FY100800);青年岐黄学者项目;中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(ZZXT202001)

[第一作者] 刘志浩,在读硕士,从事中药资源与鉴定研究,E-mail:lzh_zykh@163.com

[通信作者] *袁媛,研究员,博士生导师,从事中药鉴定与分子药理学研究,Tel:010-64087649,E-mail:y_yuan0732@163.com;

*李晓琳,副研究员,从事中药资源及育种研究,E-mail:water_in_sky@163.com

[Abstract] Seeds are the source for the production of Chinese medicinal materials. The seed authenticity and quality of directly affect the effectiveness and safety of Chinese medicinal materials. The seed quality is faced with the problems such as mixed sources, existence of adulterants and seeds stocked for years, low maturity, and low purity. To ensure the high-quality and sustainable development of the Chinese medicinal material industry, it is urgent to standardize the seed market and identify and evaluate the quality of the seeds circulating in the market. Seed identification methods include visual inspection, microscopic observation, micro-character identification, chemical fingerprinting, molecular identification, electronic nose, X-ray diffraction, electrochemical fingerprinting, spectral imaging, and artificial intelligence. These methods have different application scopes and unique advantages and disadvantages. According to the different species of Chinese herbal medicines and different requirements of testing sites, suitable methods can be selected to achieve rapid and accurate identification with low costs. In the future, the seed identification methods should be developed based on emerging technologies with interdisciplinary knowledge, and intelligent, nondestructive, and single-grain detection methods are needed for the modern Chinese medicinal material industry. This paper introduces the seed identification technologies currently applied in research and production, compares the principles, applicability, advantages, and disadvantages of different technologies, and provides an outlook on the future development of seed identification technologies, aiming to provide a reference for the identification and quality evaluation of seeds of Chinese medicinal material.

[Keywords] seeds of Chinese medicinal materials; conventional identification; molecular identification; chemical fingerprinting; electronic nose; spectral imaging; artificial intelligence

中药产业进入高质量发展阶段,中药材种子是中药产业体系中重要的生产资料,其真伪优劣对中药材的产量与质量具有重要影响。与作物种子相比,除人参、三七等品种外,大多数中药材种子驯化和栽培的历史较短,种子生产没有实现规范化、标准化、流程化,市场上流通的一些中药材种子还依赖于野生资源。因此,中药材种子的质量参差不齐,存在种源混杂、真伪混淆、陈种新卖、成熟度和净度低等问题,亟需对市场上流通的中药材种子进行鉴别和质量评价,规范中药材种子市场,从源头保证中药材质量,促进中药材产业的高质量发展。

近年来,中药材种子的鉴别技术不断发展。在传统本草学和植物分类学的支持下,性状鉴别因其快速简便的特点,目前仍是中药材种子最常用的快速鉴别手段,见图1。随着对于中药材种子微观结构及理化特点的深入了解,显微鉴别和理化鉴别方法的建立大大提高了中药材种子鉴别的准确度;而基于遗传物质DNA多态性的分子鉴别技术应用进一步提高了中药材种子鉴别的准确度。同时,为了满足现代中药产业对种子生产环节的需要,种子品质无损快速检测技术的研究也成为当前的热点。因此,本文对不同中药材种子鉴别技术的原理、优缺点、发展现状、应用情况、发展前景进行了综述,以期对中药材种子鉴别研究和标准化鉴别体系的

建立提供参考。

1 传统鉴别

1.1 性状鉴别 性状鉴别是通过眼观、手摸、鼻闻、口尝、水试和火试等感官评价的方法来鉴别中药材种子真伪的方法,是最简便、迅速和有效的鉴别方法,其鉴别内容包括种子形状、大小、颜色、表面及附属物、种皮特化结构、切面特征、质地和气味等。中药性状鉴别法的应用历史悠久,目前在中药材种子的生产与销售中也作为一种很常见的鉴别方法^[1]。杨帆^[2]对收集的野生防风、栽培防风和地方习用品防风种子的性状特征进行了描述,并比较分析了不同批次种子的长度、宽度及厚度,明确了可用于不同种源防风种子的质量鉴别方法、建立了关防风种子的质量标准,为提升道地药材防风的质量提供种源保障。韦颖^[3]对105种药用植物种子的形状、大小、颜色及表面纹理等进行了观察,总结了上述种子的性状鉴别特征,并提供了可视化的结果,为中药材种子的真伪鉴别提供了科学依据。目前2020年版《中华人民共和国药典》(以下简称《中国药典》)共收录了47个种子类药材,覆盖了33个科63个基原,各项下均记载了详细的性状鉴别特征,可为中药材种子的性状鉴别提供参考。性状鉴别的优势在于其具有简便、快速、实用性强的特点,但存在准确率较低、缺乏完整鉴别标准及对鉴别人员

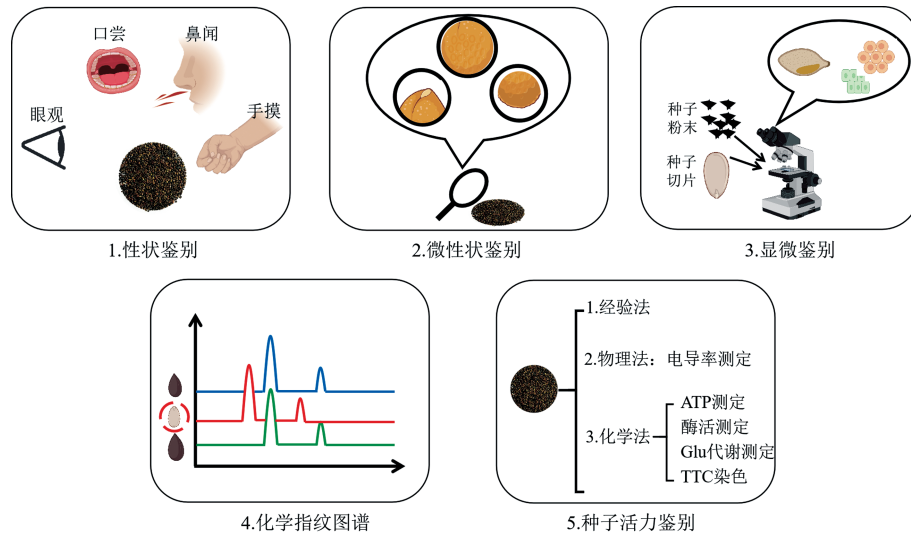


图1 中药材种子传统鉴别的常用方法

Fig. 1 Common methods for traditional identification of seeds of Chinese medicinal materials

专业素养要求较高等问题,因此应尽快完善中药材种子性状特征,并建立相应的质量评价体系。

1.2 显微鉴别 显微鉴别是指利用显微镜对中药材种子切片、粉末、表面、解离组织或磨片制片,以及含有饮片粉末的制剂观察,并根据组织、细胞或内含物等特征进行相应药材鉴别的一种方法。显微鉴别分为组织鉴别和粉末鉴别,其中组织鉴别主要通过观察种子的切片或磨片以鉴别其组织构造特征,适用于完整的种子或粉末特征相似的同属药用植物种子的鉴别。粉末鉴别是通过观察种子的粉末制片或解离片鉴别其细胞结构及内含物的特征,适用于破碎、细小种子的鉴别^[4]。种皮显微特征包括种皮表皮细胞、种皮栅状细胞、油细胞、色素细胞、石细胞、薄壁细胞的形态、细胞内含物和各层的分布,以及表皮附属物的特征及分布。胚乳和胚细胞的显微特征主要包括石细胞形态、细胞壁厚度及细胞内容物。细胞内含物包括菊糖、淀粉粒、糊粉粒、挥发油、晶体、脂肪油等^[5]。

显微鉴别可用于常见中药材种子及其伪品的鉴别,如天仙子与南天仙子是2种大小和形状等方面极其相似的种子类药材,极易混淆,且成分功效截然不同,因此需要进行准确鉴别。显微鉴别结果发现,天仙子与南天仙子的种皮细胞形态、子叶细胞内容物具有明显差异,可作为两种药材的关键鉴别特征^[6]。同时,显微鉴别也适用于中药材种子的多基原鉴别,如刘家水等^[7]采用显微鉴别的方法比较菟丝子与南方菟丝子的显微特征,发现利用种皮表皮细胞断面的形状和内列种皮栅状细胞的径向长度不同可区别菟丝子与南方菟丝子。中药材种

子显微鉴别虽然简单便捷且成本低,但目前尚缺乏相对完善的显微鉴别标准。

1.3 微性状鉴别 “微性状”鉴别是一种介于性状鉴别和显微鉴别之间的方法,可借助体式显微镜、放大镜、扫描仪、扫描电镜等设备观察中药材种子细微的外观性状,如种皮的表面纹饰特征、种皮表皮附属物的特征等,但无法观察到细胞形态,仍属于“性状鉴别”范畴,既具有简便、迅速的特点,又可以捕获到更为细致的特征^[8]。

种子类药材相较于其他类型的药材,主要关注的微性状包括种子大小、表面性状和种脐特征等。如刘爱朋等^[9]采用体式显微镜观察了包括紫苏子、菟丝子和天仙子等10种子类药材及其混伪品的微性状,结果显示各种药材与其混伪品之间的微性状存在明显差异,可用于上述药材及其混伪品的鉴别,高飞燕^[10]使用微性状鉴别方法对38种中药材种子的微性状进行比较,并重点研究了石竹科11个属16种植物的种子特征,结果表明可根据微性状特征鉴别种子的真伪。微性状鉴别法还可用于炮制前后的种子类药材鉴别,如对炮制前后的车前子微性状进行比较,发现炒香者种脐存在不同程度的开裂,表面可见起泡现象,而生品则无上述特征^[11]。在明确中药材种子微性状特征的基础上,微性状鉴别可提高中药材种子的检验质量和效率,无需借助复杂仪器设备,且方便快捷,适用于基层种子鉴别工作。

1.4 化学指纹图谱鉴别法 基于色谱、光谱等化学分析手段,通过获得中药材的化学指纹谱图信息特征,可达到对中药真伪鉴别和质量控制的目的^[12]。

各类中药材种子的化学成分同样具有特异性,因此可通过化学指纹图谱特征对其真伪与优劣进行鉴别^[13],建立中材药种子的“化学指纹”。如王瑜婷等^[14]采用相似度评价、主成分分析和正交偏最小二乘判别分析等对不同产地的24批菟丝子高效液相色谱法(HPLC)指纹图谱进行比较,结果显示24批菟丝子的相似度均 >0.9 ,并可分为4类,分类结果与产地一致。姬蕾等^[15]运用超高效液相色谱法(UPLC)测定了28批不同地区的决明子,初步建立了决明子UPLC指纹图谱,其相似度在0.827~0.99。同时,化学指纹图谱在中药材种子的混伪品鉴别中也发挥重要作用。谭新宁^[16]采用HPLC获取青箱子及其混伪品的化学指纹图谱,并对不同比例(5%~20%)的掺伪样品进行识别,阐明了青箱子与其混伪品化学成分轮廓的差异,能够对青箱子及其混伪品进行有效区分。化学指纹图谱鉴别法具有灵敏度高、重现性好和应用范围广等特点;且随着各类新型色谱和光谱仪器的发展及更深层次的学科融合,化学指纹图谱法在中药材种子鉴别领域展现出广阔的开发前景。但目前中药材种子化学指纹图谱信息仍不成系统,缺乏综合性数据库,无法进行整合比较,仍需开展系统和全面的工作,建立完整的中药材种子化学指纹图谱鉴别体系。

1.5 种子活力鉴别 种子活力是种子质量的重要指标,活力的高低直接影响其田间播种时出苗率的高低,与作物产量和品质密切相关。对于种子活力鉴别,常用的传统方法主要包括经验法、物理法和化学法。经验法常因人为因素影响大和准确率低而无法适应现代种业市场,因而准确率更高的诸多物理法和化学法逐渐被研究人员所开发^[17]。电导

率法是一种常见测定种子活力的物理法,不同活力的种子在吸胀过程中内含物的释放量不同,通过测定种子浸出液的电导率可判断种子活力。目前电导率法已被广泛应用于多种中药材种子^[18]、作物种子^[19]和牧草种子^[20]等的活力检测,如许静远等^[21]采用电导率法测定了半枝莲种子的活力,结果显示电导率法相较于其他种子活力测定方法更加稳定可靠。除此之外,腺嘌呤核苷三磷酸(ATP)含量测定法、酶活性测定法、葡萄糖代谢测定法和红四氮唑(TTC)法等测定种子活力的化学方法也被广泛应用于种子种苗的生产中^[22]。上述多种方法目前已被收录于国际种子活力检验规程中,但这些传统的种子活力鉴别方法仍面临着重复性差、损坏种子等问题,因此无损、快速、准确的种子活力鉴别方法仍是未来主要的研究方向。

2 分子鉴别

由于不同中药材种子的形态及理化性质差异较小,传统的鉴别方法存在鉴定准确率较低的问题,且缺乏相关鉴别标准^[23]。分子鉴别是指通过直接分析遗传物质DNA的多态性来推断物种内在的遗传变异而实现物种鉴别的方法^[24],具有准确性高和灵敏度好等特点。自20世纪80年代以来,生物技术被运用到中药质量控制,在中药材种子的物种、品种和种质纯度鉴别中表现出极大优势^[25],具有广泛的应用前景。目前常用的分子标记包括限制性片段长度多态性标记技术(RFLP)、随机性扩增DNA多态性标记技术(RAPD)、扩增酶切片多态性标记技术(AFLP)、简单重复序列区间标记技术(ISSR)、相关序列扩增多态性(SRAP)和单核苷酸多态性标记技术(SNP)等10余种,见图2、表1。

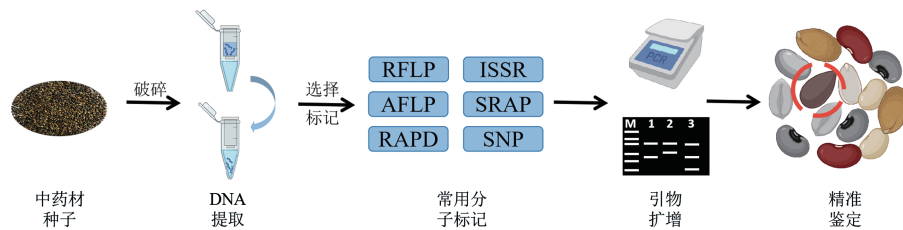


图2 中药材种子分子鉴别的常规流程

Fig. 2 Routine process of molecular identification of Chinese medicinal materials

2.1 限制性片段长度多态性(RFLP) RFLP是1980年被提出的一种用于构建遗传图谱的标记,是应用最早的分子标记技术之一,主要包括标准RFLP标记和PCR-RFLP标记。其中PCR-RFLP是基于聚合酶链式反应(PCR)扩增得到决定等位特异性的DNA片段,再将产物经内切酶消化后进行电泳

分离,观察特征谱带^[26],目前已被2020年版《中国药典》记载^[27]。采用PCR-RFLP可对天南星、半夏和覆盆子^[28-29]等种子进行真伪鉴别,如翟会锋等^[30]对苘麻和胡氏苘麻的ITS区进行PCR扩增和RFLP分析,筛选获得了可用于苘麻和胡氏苘麻种子鉴别的限制性内切酶。采用PCR-RFLP也可对中药材种质

表1 各类中药材种子鉴别方法的应用范围、优点和缺点

Table 1 Application scope, advantages and disadvantages of various Chinese medicinal materials seed identification methods

No.	类型	应用范围	优点	缺点
1	性状鉴别	外观完整种子材料	方便、快捷、易行且成本低	适用范围窄, 试验人员需较高专业素养
2	显微鉴别	外观性状相近, 破碎或呈粉末状	方便快捷, 成本低, 能够在细胞层面上表征鉴别特征	制片要求高, 特异性较差
3	微性状鉴别	外观完整种子材料	简单、易行, 较性状鉴别更为准确	适用范围较窄, 试验人员需较高专业素养
4	化学指纹图谱	不受外观性状影响, 仅与化学成分有关	灵敏度高、重复性较好, 应用范围较广	缺少综合性指纹图谱数据库, 对仪器设备要求较高
5	种子活力鉴别	外观完整种子材料	操作简单, 能够准确鉴定种子活力	需对种子进行不可逆的破坏
6	RFLP	能够提取DNA的种子材料	数量多, 呈共显性遗传, 具有适用范围广、可靠性高和重复性好	操作复杂、耗时耗力、试验涉及有毒化学品, 限制性内切酶要求严格
	RAPD		程序简单、操作容易、速度快、灵敏度高	受DNA模板浓度、退火温度和退火时间等影响较大
	AFLP		标记信息量大、灵敏度高, 且高效、稳定; 能够检测亲缘关系较近材料	对DNA模板纯度要求较高
	SSR		扩增产物片段长度稳定, 分析结果准确度高, 重复性好	技术操作相对复杂, 需引物库的支持
	ISSR		价格低、重复性高且操作简单, 无需预先知道DNA序列信息	PCR扩增条件需进行优化, 计算杂合度和父系分析等效果不佳
	SRAP		简单、高效, 高共显性, 重复性好, 易测序	对基因组着丝粒附近及端粒的扩增较少, 可结合SSR标记进行扩增
	SNP		位点丰富, 分布范围广, 分型简单, 分辨率高且简单, 高遗传稳定性	分析混合样品效果较差
7	光谱成像与人工智能	外观完整种子材料	快速, 无损	仪器设备要求价高, 模型不稳定
8	电子鼻	具有气味差异的中药材种子	响应时间短, 检测速度快, 重复性和安全性好	受环境温度、湿度和气体浓度等影响
9	X射线衍射法	外观相对完整的种子材料	简单, 快速, 无损	对于结构相似种子专属性较差
10	电化学指纹图谱	不受外观性状影响, 仅与化学成分有关	操作便捷、分析速度快、灵敏度高、重复性好	对混合样品鉴别效果较差

纯度进行评估, 如谢莹等^[31]利用PCR-RFLP标记技术建立一种快速筛选高纯度天麻种质材料的方法, 为其纯系育种和杂交育种奠定基础。RFLP标记数量多, 且呈共显性遗传, 具有适用范围广、可靠性高和重复性好等特点, 在中药材种子鉴别和种质纯度评估领域展现出独特优势。

2.2 随机性扩增DNA多态性(RAPD) RAPD是建立在PCR基础之上的一种标记^[34], 其利用人工合成的片段作为引物, 对目标基因组DNA进行随机扩增, 基于扩增产物片段长度差异可用于不同样品的鉴别^[32]。目前基于RAPD建立的鉴别方法可用于多种中药材种子的真伪鉴别, 如高立霞等^[33]采用RAPD构建了酸枣仁与枳椇子的DNA指纹图谱, 并筛选出三对引物可用于酸枣仁和枳椇子的准确鉴别。RAPD还可用于多种中药材种质^[34-37]的鉴别,

如史辉等^[38]采用RAPD准确鉴别了不同产地太子参种质, 将不同产地的10个太子参种质分为4类; 吕菲菲等^[39]筛选了10条用于奇楠种质鉴别的RAPD引物, 可快速有效地鉴别3个奇楠种质。因此, 在开展中药材种质资源遗传评价、品种鉴定以及谱系分析时, 可选择RAPD标记开展研究。

2.3 扩增酶切片段多态性(AFLP) AFLP是在RFLP基础上建立起的分子标记技术, 其采用了PCR替代了Southern杂交, 更加可靠、高效^[40]。通过对基因组DNA限制性酶切片段进行选择性的扩增, 因扩增产物的长度不同而产生多态性, 目前AFLP已广泛应用于中药材银杏^[41]、红花^[42]、红花绿绒蒿^[43]、广藿香^[44]、木槿^[45]、石斛^[46]、山药^[47]等药用植物的种质资源分类和品种鉴定等。如苏增一等^[48]采用AFLP从64对引物中筛选获得4对引物可用于不同

产地益智种质资源的鉴别。杨成龙等^[49]基于 AFLP 对 24 份薏苡种质的遗传多样性和亲缘关系进行了分析,并将薏苡种质分为了 4 大类。李秀诗等^[50]进一步区分了不同产地的薏苡种质,将 141 份薏苡种质分为 2 个大类群和 6 个亚群。

2.4 简单重复序列(SSR)和 ISSR SSR 是由几个核苷酸为重复单位组成的串联重复序列,不同基因型的 SSR 序列重复数目不同,形成多个位点的多态性,因而可对亲缘关系较近的物种进行鉴别^[51]。其中表达序列标签 SSR(EST-SSR)相较于基因组 SSR(G-SSR),具有信息量大、通用性强和便于开发等特点,已应用于高良姜^[52]、野山参^[53]、西洋参和三七^[54]等中药材种子的鉴别。基于 SSR 标记开发了 SSR-HRM^[55]、AmpSeq-SSR、Target-SSR^[56]和荧光 SSR 标记^[57-58]等技术,在中药材种子真伪鉴别和种质资源分类中展现出独特优势。未来可将 SSR 标记扩增产物多态性转化为数字信息,构建中药材种子的分子身份证^[59-60]。

ISSR 是在 SSR 的基础上设计引物,通过扩增过程中特定位点发生退火反应形成的扩增产物多态性,实现不同样品的鉴别^[61-62]。目前 ISSR 在中药材及其种子的基源鉴别、品种鉴别和杂交品种鉴别中广泛应用。如王梦圆等^[63]筛选获得了一条可用于准确鉴别砂仁和益智仁的 ISSR 鉴别引物 UBC80;刘冲等^[64]筛选出 2 个高多态性的 ISSR 引物,其中单独使用引物 844 即可准确鉴别 8 种甘蓝植物种子;王庆军等^[65]也筛选获得了 2 条良种石榴鉴别的 ISSR 引物,实现了石榴种质的鉴别。ISSR 标记虽相较于其他标记更简单高效,但在研究中进行父系分析和计算杂合度时效果不佳。

2.5 相关序列扩增多态性(SRAP) SRAP 是一种基于 PCR 技术的标记系统,通过设计两套引物分别对基因的外显子区域和启动子区域进行特异性扩增,因不同物种内含子、启动子与间隔区长度的不同而产生多态性,具有简便高效和高共显性的特点,广泛应用于白及^[66]、石斛^[67]、太子参^[68]和莲^[69]等药用植物种质鉴别,如李亚萍等^[70]基于 SRAP 标记将 47 份黄精种质分为了 4 个类群;王岚等^[71]利用 SRAP 引物构建了辛夷种质 DNA 指纹图谱,将 34 份辛夷种质分为 6 个类群。在 SRAP 标记技术的基础上,可结合 SSR 标记技术对基因组着丝粒附近及端粒进行扩增,以构建覆盖面更广的基因组连锁图。

2.6 单核苷酸多态性(SNP) SNP 被认为是第三代分子标记^[72],是由基因组 DNA 序列中单个核苷

酸的突变而引起的多态性,包括单个碱基的缺失、插入和替换^[73]。SNP 具有位点数量丰富、分布范围广、分型简单、分辨率高及高遗传稳定性等特点^[74],广泛应用于中药材种子的真伪鉴别、种质资源遗传图谱构建和分子标记辅助选择等方面^[75-79]。如李柯帆等^[80]基于酸枣仁及其伪品 ITS 区的 SNP 位点设计了酸枣仁特异性鉴别引物,所建立的方法能够准确鉴别酸枣仁及其伪品。焦文静等^[81]比较了砂仁 3 个基原物种的 ITS2 序列,开发了 2 个 SNP 位点可快速准确地鉴别砂仁药材的不同基源。随着 SNP 检测技术的日益完善,检测难度的不断降低,也将开发出更多基于 SNP 的鉴别新技术和育种新工具。

3 光谱成像及人工智能识别

为了解决传统鉴别方法对样品不可逆破坏的问题,种子无损快速检测技术研究成为当前亟待解决的难题。将光谱技术与成像技术相结合形成的高光谱成像技术,不仅能够获得待测样品的光谱信息,还可以获取样品的空间分布信息及图像特征,在种子的无损快速检测中展现出独特优势^[82],见图 3。其中,光谱成像技术在中药材种子的产地鉴别和真伪鉴别中发挥了重要作用,张璐等^[83]基于近红外高光谱成像技术对不同产地的酸枣仁样品进行了鉴别;郑洁等^[84]利用近红外高光谱成像技术建立了一种快速无损鉴别不同产地苦杏仁、桃仁药材的评价方法。XU 等^[85]采用机器视觉结合高光谱成像技术建立了一种黄芪种子真伪鉴别的方法,对黄芪种子及其伪品的区分度可达到 99% 以上。同时,光谱成像与人工智能识别等技术在种子活力检测中也展现出独特优势,丁子予等^[86]利用机器学习和深度学习算法结合高光谱成像技术建立了 3 个玉米种子活力检测模型,验证结果显示 3 种模型对不同活力的玉米的检测准确率均能达到 90% 以上。因此,光谱成像与人工智能识别技术的发展极大满足了现代农业对种子生产环节的需要,同时在昂贵中药材种子和稀缺中药材种质资源的无损检测中也具有重要应用价值^[87]。

4 其他鉴别新技术

随着计算机技术、显微技术及仿生学技术的不断进步,在中药材种子的鉴别中引入了三维图像鉴别方法、电子显微镜鉴别方法、仿生识别方法等,X 射线、味觉仿生技术、视觉仿生技术和嗅觉仿生技术等技术的应用极大地拓展了现有的鉴别手段,见图 4。

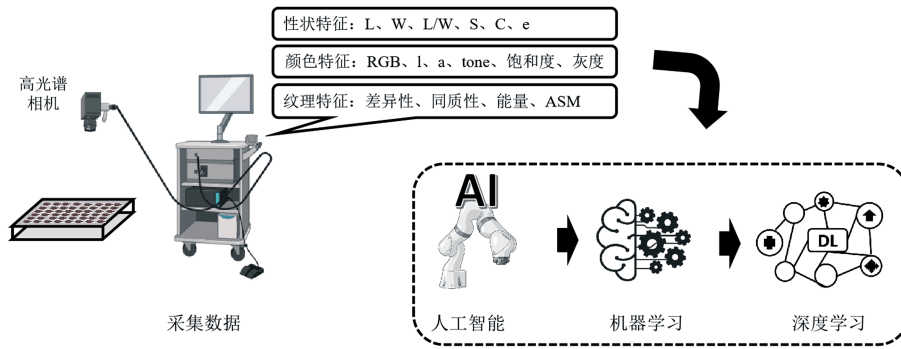


图3 基于高光谱和人工智能识别的中药材种子鉴别方法

Fig. 3 Seed identification of Chinese medicinal materials based on hyperspectral and artificial intelligence recognition

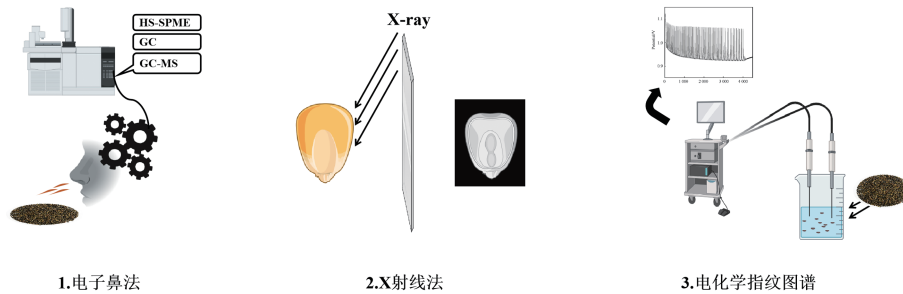


图4 其他新兴的中药材种子鉴别技术

Fig. 4 Other emerging seed identification techniques for Chinese medicinal materials

4.1 电子鼻法 电子鼻是采用多级气味传感器阵列模拟生物体嗅觉细胞功能的仿生技术,近年来在中药材及其种子鉴别领域得到广泛的应用。“气味”是中药材种子的重要特征属性之一,中药材种子的真伪及质量在一定程度上与其气味的特质及强烈程度有关。利用电子鼻可实现中药材种子“气味”的数字化和可视化^[88-89],如杨瑞琦^[90]采用电子鼻技术对霉变过程的肉豆蔻品质进行评价,实现霉变的早期识别。将电子鼻与色谱或质谱技术等结合,可将中药材种子气味与其成分相关联,从而提高种子鉴别和质量评价的可信度。刘梦楚等^[91]采用电子鼻与顶空气相质谱联用技术比较了不同产地砂仁的香气轮廓和成分组成,可对5个产地的砂仁进行区分,识别指数为83.90%;刘震营等^[92]采用电子鼻结合顶空固相微萃取-气相质谱联用(HS-SPME/GC-MS)对正常、虫蛀、氧化酸败和水解酸败4种类型柏子仁的气味和挥发性成分进行比较,为柏子仁贮藏过程的质量控制提供参考。电子鼻法无需破坏样品即可进行检测,具有无损绿色的特点,符合未来中药材种子鉴别技术发展方向,未来应对模型进行优化,设备进行简化,以满足中药材生产需要。

4.2 X射线衍射法 X射线衍射法是一种基于X射线的无损检测技术,X射线在待测物分子或晶体结构中发生衍射形成清晰的图谱^[93],既能反映待测物

整体固有的结构特征,又能表现来自其局部变化的图谱化与数值化^[94]。基于X射线衍射法建立的指纹图谱具有快速、准确、图片信息量大和指纹性强等特点,已应用于白芍、赤芍和牡丹皮^[95]等植物药,全蝎和僵蚕^[96-97]等动物药,炉甘石、滑石粉、和麦饭石^[98-100]等矿物药;蒙脱石散和宁心宝胶囊^[101-102]等中成药鉴别。X射线衍射法还可用于通过无损检查种胚形态对种子发育状态、活力及是否遭受虫害等情况进行判断^[103],具有极大的开发价值。目前X射线衍射法与机器视觉技术相结合,已应用于毛茛种子的质量监测^[104]。

4.3 电化学指纹图谱法 电化学指纹图谱法是利用待测物质在溶液体系的电化学性质进行仪器分析的方法,可对中药材样品复杂的化学成分集群进行表征和鉴别^[105],具有灵敏度高、准确度高、选择性好、可自动化等特点^[106]。如徐明亮等^[107]以硫酸-硫酸锰-丙酮-KBrO₃作为振荡体系建立了决明子电化学指纹图谱,可准确鉴别不同产地的决明子及其伪品。王惠民等^[108]采用Belousov-Zhabotinski(B-Z)化学振荡反应体系建立了不同产地砂仁的电化学指纹图谱,可用于砂仁产地鉴别。目前的电化学指纹图谱法仍需对检测信息进行丰富,更加全面反映溶液体系的物性变化;同时也需大力开发图谱信息处理的算法与软件,以提高图谱信息的清晰度与鉴

别结果的准确度。

5 总结

中药材种子鉴别研究的发展大概分3个阶段,各类鉴别方法的应用范围及其优缺点各有不同,见表1。第一阶段,主要采用传统的性状鉴别、显微鉴别和理化鉴别等方法,此类鉴别方法操作简单、省时省力,但对研究人员的专业素养要求较高且鉴定准确度较低;第二阶段,分子鉴别方法的建立与发展极大丰富了中药材种子的鉴别手段,鉴定准确度显著提高,但也存在成本高、耗时长和操作复杂等问题;第三阶段,无损快速检测技术蓬勃发展,多光谱与人工智能识别、X射线衍射、电子鼻等新兴技术被应用于中药材种子鉴别,但目前存在对仪器设备要求较高和模型不稳定等问题,仍需要大量的试验研究进行不断完善。

综上所述,建立和完善中药材种子真伪鉴别与质量评价体系具有重要意义,根据中药材种子品种不同、检测场所要求不同,选择合适的鉴别方法,以实现鉴别准确、时间和经济成本降低的目标。随着科学技术加速发展和学科交叉融合,未来中药材种子鉴别技术应与人工智能等信息技术相结合,满足智能化、无损化、单粒检测的需求,为中药产业高质量发展奠定基础。

[参考文献]

[1] 李春华,陶静雨,李玉虹,等.常用中药材鉴别方法的研究进展[J].云南化工,2022,49(11):11-16.
[2] 杨帆.防风种子质量鉴别与评价[D].长春:吉林农业大学,2022.
[3] 韦颖.105种常用药用植物果实、种子性状与显微鉴别特征研究[D].北京:中国中医科学院,2012.
[4] 王珺,张南平.中药显微鉴别研究与应用进展[J].中国药事,2018,32(8):1051-1057.
[5] 赵莎,郑司浩,曾燕,等.中药材种子种苗真实性鉴定技术研究进展[J].中国现代中药,2021,23(10):1831-1836.
[6] 陈连庚,冯陈波,杨燕云,等.天仙子和南天仙子两种药材显微鉴别研究[J].中华中医药学刊,2015,33(2):322-323.
[7] 刘家水,鲁轮,张丹雁,等.中药菟丝子与其混伪品的鉴定[J].安徽农业科学,2017,45(3):145-149.
[8] 张南平,康帅,连超杰,等.我国药用种子鉴定与分类研究进展[J].中国药事,2020,34(1):71-76.
[9] 刘爱朋,张树旺,王世信,等.10种细小果实种子类药材的显微性状鉴别[J].中成药,2022,44(6):1869-1874.

[10] 高飞燕.种子类中药微性状鉴定法研究[D].合肥:安徽中医药大学,2013.
[11] 郑玉光,郑倩,张丽丽,等.孙宝惠老师“微性状”鉴别中药材学术经验总结[J].中国现代中药,2015(9):988-992.
[12] 李强,杜思邈,张忠亮,等.中药指纹图谱技术进展及未来发展方向展望[J].中草药,2013,44(22):3095-3104.
[13] 白瑞,王真真.指纹图谱在中药质量控制中的应用进展[J].安徽医药,2009,13(12):1458-1462.
[14] 王瑜婷,汪梅,何荣荣,等.基于HPLC指纹图谱和含量测定的菟丝子药材质量评价研究[J].中国药师,2022,25(10):1723-1728.
[15] 姬蕾,杨冉冉,乔艺涵,等.决明子超高效液相色谱指纹图谱研究[J].环球中医药,2019,12(5):691-696.
[16] 谭新宁.细小果实种子类中药青箱子鉴定方法的系统研究[D].广州:广州中医药大学,2021.
[17] 瞿志杰,贾良权,祁亨年,等.种子活力无损检测方法研究进展[J].浙江农林大学学报,2020,37(2):382-390.
[18] 刘英波,潘年松,冯华,等.苗药辣蓼及其同科易混品丛枝蓼种子质量分级标准研究[J].中药材,2018,41(12):2757-2760.
[19] 向莹莹,李浩卓,张婷婷,等.电导率法早期检测玉米和小麦种子活力[J].中国农业大学学报,2020,25(6):12-19.
[20] 陶奇波,鄯西虎,张倩,等.牧草种子活力评价方法研究进展[J].草业学报,2023,32(10):200-225.
[21] 许静远,黄冬婷,孙含章,等.半枝莲种子质量检验方法的研究[J].现代中药研究与实践,2021,35(6):4-8.
[22] 李孝凡,王成,宋鹏等.种子活力无损检测方法研究进展[J].种子,2019,38(6):61-65.
[23] 刘志浩,陈梓媛,李晓琳,等.蒿属外来药用资源中亚苦蒿的特异性PCR鉴别[J].中国实验方剂学杂志,2022,28(17):127-132.
[24] BOEHME P, AMENDT J, DISNEY R H, et al. Molecular identification of carrion-breeding scuttle flies (Diptera: Phoridae) using COI barcodes[J]. Int J Legal Med, 2010, 124(6):577-581.
[25] 黄璐琦.展望分子生物技术在生药学中的应用[J].中国中药杂志,1995(11):643-645,702.
[26] 黄璐琦,胡之璧.中药鉴定新技术新方法及其应用[M].北京:人民卫生出版社,2010.
[27] 国家药典委员会.中华人民共和国药典:一部[M].北京:中国医药科技出版社,2015:388.
[28] 肖建才,闫滨滨,杨健,等.天南星、半夏的PCR-RFLP鉴别[J].中国实验方剂学杂志,2023,29(6):

- 194-201.
- [29] 郑诚,留钰秀,袁莉霞,等. 覆盆子及其近缘混淆品的PCR-RFLP鉴别研究[J]. 中国现代应用药学, 2022, 39(11): 1458-1463.
- [30] 翟会锋,化丽丹,季琴琴,等. PCR-RFLP鉴别胡氏苘麻和苘麻[J]. 植物检疫, 2019, 33(2): 30-33.
- [31] 谢莹,华中一,赵玉洋,等. 快速筛选高纯度天麻PCR-RFLP鉴定方法[J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(17): 113-118.
- [32] WILLIAMS J G, KUBELIK A R, LIVAK K J, et al. DNA polymorphisms amplified by arbitrary primers are useful as genetic markers[J]. *Nucleic Acids Res*, 1990, 18(22): 6531-6535.
- [33] 高立霞,李松涛,张丽君,等. 酸枣仁和枳椇子的RAPD分子鉴别[J]. 时珍国医国药, 2017, 28(10): 2435-2436.
- [34] 朱学鑫,陈锐敏,高承贤,等. 不同产地白及遗传多样性的RAPD分析[J]. 中国现代应用药学, 2019, 36(13): 1648-1651.
- [35] 徐昌艳,罗忠圣,曹旭林,等. 天门冬质量及RAPD遗传多样性研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(3): 180-184.
- [36] 杜亚楠,张敏,孙淑英,等. 基于ISSR与RAPD标记分析内蒙古赤芍的遗传多样性[J]. 西北植物学报, 2021, 41(6): 952-961.
- [37] 谢正万,宁德鲁,周军,等. 适于草果遗传多样性分析的RAPD引物筛选[J]. 西部林业科学, 2018, 47(4): 45-50.
- [38] 史辉,陈美霞,李萍萍,等. 基于ISSR和RAPD标记的太子参种质遗传多样性研究[J]. 河南农业科学, 2022, 51(8): 64-73.
- [39] 吕菲菲,刘培卫,纪宏亮,等. 利用RAPD分子标记快速鉴定3个奇楠种质[J]. 生物资源, 2021, 43(4): 388-394.
- [40] SHEEJA T E, KUMAR I, GIRIDHARI A, et al. Amplified fragment length polymorphism: Applications and recent developments [J]. *Methods Mol Biol*, 2021, 2222: 187-218.
- [41] 胡亚平,曹福亮,汪贵斌,等. 基于AFLP遗传多样性和叶片内含物的银杏特异种质资源分析[J]. 分子植物育种, 2020, 18(2): 466-472.
- [42] 胡尊红,王沛琦,杨谨,等. 利用AFLP标记分析云南红花优异种质资源的遗传多样性[J]. 山西农业科学, 2019, 47(10): 1756-1761.
- [43] 区智,严朋飞,张莹欣,等. 红花绿绒蒿AFLP反应体系的建立与优化[J]. 北方园艺, 2020(9): 131-139.
- [44] 刘晓莹,李嘉惠,杨钰婷,等. 基于AFLP分子标记的广藿香遗传多样性分析[J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(4): 152-158.
- [45] 窦霄,陈俊强,董章凯,等. 41份木槿种质资源的AFLP遗传多样性分析[J]. 山东林业科技, 2021, 51(4): 1-4.
- [46] 张萌,单玉莹,杨业波,等. 中国石斛属植物遗传资源的AFLP分析[J]. 园艺学报, 2022, 49(6): 1339-1350.
- [47] 赵圆,张艳芳,杨帆,等. 基于形态标记和AFLP标记的山药种质资源遗传多样性分析[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(6): 47-54.
- [48] 苏增一,张娉,王芳,等. 不同产地南药益智的AFLP分析[J]. 时珍国医国药, 2020, 31(5): 1231-1233.
- [49] 杨成龙,周明强,班秀文,等. 薏苡种质资源的AFLP遗传多样性分析[J]. 分子植物育种, 2020, 18(15): 5134-5142.
- [50] 李秀诗,周祥,李志芳,等. 基于AFLP标记的贵州及其邻省薏苡种质资源遗传多样性分析[J]. 南方农业学报, 2019, 50(9): 1931-1936.
- [51] 周骏辉,袁媛,黄璐琦. SSR标记在中药材分子身份证体系构建中的应用[J]. 中国现代中药, 2016, 18(10): 1233-1236.
- [52] 赵全杰,谢腾,胡雨晴,等. 基于EST-SSR分子标记技术的高良姜栽培类型的鉴别[J]. 分子植物育种, 2023, 21(2): 557-565.
- [53] 范馨元,王添琦,武伦鹏,等. 基于EST-SSR标记鉴别园参、林下参和野山参的研究[J]. 中药材, 2022, 45(2): 305-309.
- [54] 范馨元,王添琦,惠赫童,等. 基于EST-SSR标记鉴别人参、西洋参和三七的研究[J]. 药物分析杂志, 2022, 42(3): 394-401.
- [55] 陈媿颖,蒋超,袁媛,等. 基于DNA熔解曲线技术的金银花种质鉴定[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(24): 4572-4578.
- [56] 朱延松,张亚飞,程莉,等. 利用Target SSR-seq技术鉴定60份柑橘种质资源[J]. 中国农业科学, 2022, 55(22): 4458-4472.
- [57] 解华云,高崇敏,叶云峰,等. 基于TP-M13-SSR分子标记技术的133份薄皮甜瓜种质资源遗传多样性分析[J]. 南方农业学报, 2022, 53(9): 2547-2556.
- [58] 黄徐骏,李海波,陈友吾,等. 基于多重荧光SSR标记鉴别榉树品种(品系)[J]. 浙江林业科技, 2021, 41(6): 24-29.
- [59] 朱凤洁,张山山,袁媛,等. 金银花种质资源DNA身份证构建及遗传相似性分析[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(9): 1825-1831.
- [60] 张丹华,龚丽珍,庄洁旋,等. 广藿香基因组SSR分子标记开发与种质遗传多样性[J]. 基因组学与应用生物学, 2023, doi:45. 1369. q. 20230505. 1714. 002.

- [61] 邱国俊,程敏,郭计华. ISSR分子标记技术在植物中的应用及其研究进展[J]. 兴义民族师范学院学报, 2020(1):117-120.
- [62] 任梦云,陈彦君,张盾,等. ISSR标记技术在药用植物资源中的研究进展及应用[J]. 生物技术通报, 2017, 33(4):63-69.
- [63] 王梦圆,王霞,张典,等. 砂仁及其混伪品益智仁的ISSR分子鉴别[J]. 分子植物育种, 2021, 19(2): 562-567.
- [64] 刘冲,葛才林,任云英,等. SRAP、ISSR技术的优化及在甘蓝类植物种子鉴别中的应用[J]. 生物工程学报, 2006, 22(4):657-661.
- [65] 王庆军,罗华,毕润霞,等. 3个石榴良种的ISSR分子鉴别[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(1):94-100.
- [66] 王洁,朱锡彭,王腾斐,等. 白及种质资源遗传多样性分析[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(2):321-329.
- [67] 张迎辉,凡莉莉,杜溶沁,等. 31种石斛属植物及金石斛遗传多样性SRAP分析及DNA指纹图谱研究[J]. 热带作物学报, 2022, 43(10):2030-2036.
- [68] 李萍萍,王泽榕,王丁,等. 基于DNA条形码和SRAP的太子参种质遗传多样性分析[J]. 热带作物学报, 2022, 43(10):2037-2046.
- [69] 毛立彦,龙凌云,黄秋伟,等. 基于SRAP分子标记的147份睡莲属植物遗传多样性分析[J]. 南方农业学报, 2023, 54(2):454-466.
- [70] 李亚萍,戴惠明,姜武,等. 基于SRAP标记的不同产区黄精的遗传多样性[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(3):658-664.
- [71] 王岚,郭晓琴,张宏,等. 南召辛夷SRAP遗传多样性分析及指纹图谱的构建[J]. 信阳师范学院学报:自然科学版, 2023, 36(2):249-254.
- [72] 邹喻苹,葛颂. 新一代分子标记-SNPs及其应用[J]. 生物多样性, 2003, 11(5):370-382.
- [73] 甘斌,田宇豪,熊兴耀,等. 单核苷酸多态性(SNP)及其在作物中的研究与应用[J]. 分子植物育种, 2023, doi:46. 1068. S. 20210928. 0145. 006.
- [74] 吴宇瑶. 基于烟草转录组的SNP标记开发及其初步应用[D]. 贵阳:贵州大学, 2020.
- [75] HUA Z, JIANG C, SONG S, et al. Accurate identification of taxon-specific molecular markers in plants based on DNA signature sequence[J]. Mol Ecol Resour, 2023, 23(1):106-117.
- [76] 陈梓媛,赵玉洋,谢旭桃,等. 多基原九里香药材的多重位点特异性PCR鉴别[J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(17):106-112.
- [77] 刘亚男,华中一,赵玉洋,等. 基于DSS标记特异性PCR鉴别冷背药材木槿皮基原植物及其混伪品[J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(17):133-139.
- [78] 李慧,钱润,田娜,等. 红天麻、乌天麻及其杂交天麻的PCR鉴别[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(15):3666-3671.
- [79] 罗宇琴,蒋超,袁媛,等. 多重位点特异性PCR鉴别霍山石斛、铁皮石斛与齿瓣石斛药材[J]. 药学学报, 2017, 52(6):998-1006.
- [80] 李柯帆,索晓雄,李晓兰,等. 多重位点特异性PCR同时鉴别酸枣仁及其掺伪品[J]. 中国实验方剂学杂志, 2023, 29(2):141-148.
- [81] 焦文静,张鹏,廖保生,等. 基于SNP位点鉴定砂仁药材物种[J]. 世界科学技术—中医药现代化, 2014, 16(2):295-300.
- [82] 李梦,李静,张小波. 高光谱成像技术的发展现状及其在中药领域中的应用前景[J]. 西部中医药, 2021, 34(10):149-153.
- [83] 张璐,茹晨雷,殷文俊,等. 基于近红外高光谱成像结合分水岭算法鉴别酸枣仁药材的产地[J]. 药物分析杂志, 2021, 41(4):726-734.
- [84] 郑洁,茹晨雷,张璐,等. 基于近红外高光谱成像技术对不同产地苦杏仁和桃仁药材的鉴别[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(10):2571-2577.
- [85] XU Y, WU W, CHEN Y, et al. Hyperspectral imaging with machine learning for non-destructive classification of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*, *Astragalus membranaceus*, and similar seeds[J]. Front Plant Sci, 2022, 13:1031849.
- [86] 丁子予,岳学军,曾凡国,等. 基于机器学习和深度学习的玉米种子活力光谱检测[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(3):230-240.
- [87] 李梦,张小波,刘绍波,等. 部分可解释机器学习方法的高光谱人参产地识别和分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(4):1217-1221.
- [88] 费程浩,戴辉,苏杭,等. 电子鼻技术的研究进展及其在中药行业中的应用[J]. 世界中医药, 2019, 14(2): 257-262.
- [89] 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, 封3-3封4.
- [90] 杨瑞琦. 基于电子鼻的易霉变中药质量快速评价[D]. 北京:北京中医药大学, 2019.
- [91] 刘梦楚,邹晓红,蓝伦礼,等. 基于电子鼻及顶空-气质联用技术结合化学计量学区分不同产地的砂仁[J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 23(6):35-42.
- [92] 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.
- [93] 黄必胜,明晶,陈科力. X射线衍射指纹图谱在矿物药中的研究进展[J]. 中南民族大学学报:自然科学

- 版,2015,34(4):45-49.
- [94] 董雯雯,刘小平,牡蛎,等. 中药的X射线衍射鉴定研究[J]. 中国医药导报,2007(18):186-187.
- [95] 路大勇,康帅,赵业卓,等. 毛茛科中药饮片的X射线衍射研究[J]. 中国中药杂志,2019,44(3):482-488.
- [96] 项太平,张进,路大勇,等. 基于粉末X射线衍射和电子自旋共振技术对全蝎的检测[J]. 吉林化工学院学报,2022,39(5):13-19.
- [97] 路大勇,康帅,王欣月,等. 僵蚕的X射线衍射和电子自旋共振研究[J]. 中药材,2019,42(7):1513-1516.
- [98] 张胜渠,于晶. 用X射线衍射法对市售的矿物药炉甘石进行物相分析的效果分析[J]. 当代医药论丛,2015,13(14):168-170.
- [99] 农以宁,曾令民. X射线衍射法测定药用滑石粉中石棉的研究[J]. 中国中药杂志,2002,27(7):524-527.
- [100] 吴思澄,马瑜璐,杨文国,等. 矿物药麦饭石偏光显微特征及其X射线衍射指纹图谱分析[J]. 中国实验方剂学杂志,2023,29(13):166-172.
- [101] 徐秀卉,宋远征,徐春玲,等. X射线衍射法测定蒙脱石散中方英石及其他杂质[J]. 海峡药学,2021,33(9):46-48.
- [102] 柳江红,刘岩峰,张鑫. 宁心宝胶囊的X射线衍射Fourier指纹图谱分析[J]. 中国药业,2014,23(4):39-40.
- [103] 袁俊,郑雯,祁亨年,等. 种子活力光学无损检测技术研究进展[J]. 作物杂志,2020(5):9-16.
- [104] XUE Q, MIAO P, MIAO K, et al. X-ray-based machine vision technique for detection of internal defects of sterculia seeds[J]. J Food Sci,2022,87(8):3386-3395.
- [105] 王晓玲,王子明,付艺萱,等. 现代仪器方法在中药分析检测中的应用进展[J]. 西南民族大学学报:自然科学版,2022,48(2):156-165.
- [106] 贾广成,王海霞,叶瑞平,等. 电化学振荡指纹图谱在中药质量控制中的应用进展[J]. 中草药,2019,50(20):5064-5070.
- [107] 徐明亮,孙长海,王瑜,等. 基于主成分分析的决明子电化学振荡指纹图谱的评价研究[J]. 时珍国医国药,2011,22(8):1858-1859.
- [108] 王惠民,曾瑜倩,翟晓敏,等. 中药砂仁的电化学指纹图谱研究[J]. 广州化工,2020,48(21):88-91.

[责任编辑 顾雪竹]