

电子感官技术在中药质量辨识及炮制的应用概况

尚超凡¹, 周巧^{2,3}, 朱娟娟^{2,3}, 曲珍妮^{2,3}, 卢琪^{2,3}, 戴衍朋^{2,3}, 崔智峰^{4*}, 石典花^{2,3*}

1. 山东中医药大学, 山东 济南 250355

2. 山东省中医药研究院, 山东 济南 250014

3. 国家中医药管理局中药蜜制和制炭炮制技术与原理重点研究室, 山东 济南 250014

4. 滨州市中医医院, 山东 滨州 256600

摘要: 电子感官技术是一种模拟人类的感官功能的仿生技术, 随着该技术不断完善与发展, 在中药领域逐渐得到广泛应用。以电子感官技术中的电子眼、电子鼻、电子舌 3 种技术为主, 查阅并总结电子感官技术在中药质量辨识及炮制中的应用概况, 梳理电子感官技术在上述领域取得的主要进展, 分析存在的主要问题, 以期为进一步促进电子感官技术在中药领域的应用提供参考。

关键词: 电子感官技术; 电子眼; 电子鼻; 电子舌; 中药质量辨识; 中药炮制

中图分类号: R283 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2024)24-8654-10

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2024.24.032

Application overview of electronic sensory technology in quality identification and processing of traditional Chinese medicine

SHANG Chaofan¹, ZHO Qiao^{2,3}, ZHU Juanjuan^{2,3}, QU Zhenni^{2,3}, LU Qi^{2,3}, DAI Yanpeng^{2,3}, CUI Zhifeng⁴, SHI Dianhua^{2,3}

1. Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, China

2. Shandong Academy of Chinese Medicine, Jinan 250014, China

3. Key Unit for Research of technique and principle of Honeyprocessing and Carbonizing of SATCM, Jinan 250014, China

4. Binzhou Hospital of Traditional Chinese Medicine, Binzhou 256600, China

Abstract: Electronic sensory technology is a bionic technology that can simulate human sensory functions. With the continuous improvement and development of this technology, it has gradually been applied in the field of traditional Chinese medicine (TCM). In this article the electronic eye, electronic nose and electronic tongue of electronic sensory technology are focused on. The application overview of electronic sensory technology in the quality identification and processing of TCM is reviewed and summarized. The main progress of electronic sensory technology in the above fields has been sorted out, and the main problems are analyzed. It is hoped that these findings will provide a reference for further promoting the application of electronic sensory technology in the field of TCM.

Key words: electronic sensory technology; electronic eye; electronic nose; electronic tongue; quality identification of traditional Chinese medicine; processing of traditional Chinese medicine

中药是中医临床防病、治病的重要武器, 其质量直接关系到临床治疗和患者用药安全, 但目前由于中药来源复杂及产业链较长等问题, 使得中药质量参差不齐, 加之现有中药质量评价方法在实际应

收稿日期: 2024-07-20

基金项目: 国家中医药综合改革示范区中医药科技共建项目 (GZY-KJS-SD-2023-053); 山东省自然科学基金项目 (ZR2023MH114); 鲁甘科技协作项目 (YDZX2021096); 国家中医药管理局全国老药工传承工作室 (国中医药人教函[2024]255 号); 山东省中医药科技项目 (Z-2022086T, Q-2022085, Q-2022086, Q-2023188, Q-2023199); 国家中医药管理局中药炮制技术传承基地建设项目 (国中医药办规财函[2022]185 号); 第七批全国老中医药专家学术经验传承项目 (国中医药人教函[2022]76 号); 国家中医药管理局高水平重点学科建设项目 (ZYYZDXK-2023121)

作者简介: 尚超凡 (2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为中药炮制。E-mail: 1417144008@qq.com

***通信作者:** 石典花 (1981—), 女, 博士, 研究员, 硕士生导师, 从事中药炮制研究。E-mail: shidianhua81@163.com

用中存在一定局限性,使得中药质量稳定性和一致性较差,影响其临床疗效,甚至影响中药现代化及国际化进程。为改善中药质量现状,推动中药事业高质量发展,《“十四五”中医药发展规划》中指出加强中药安全监管,提升药品检验机构的中药质量评价能力,建立健全中药质量全链条安全监管机制。因此探寻科学有效、可操作性强的中药质量评价方法和技术手段是亟待解决的问题^[1]。

目前,中药质量评价方法主要分为传统经验鉴别和现代分析鉴别。随着现代分析技术发展,中药质量评价方法和手段日趋完善,从单一成分检测发展到多成分检测。但中药成分复杂,整体性较高,这种“唯成分论”能否代表中药质量,尚存有一定异议,且在实际应用中存在着实验周期长、操作复杂、成本较高等问题。传统经验鉴别是中药领域长期以来对中药真伪优劣鉴别实践经验总结。到目前为止,传统经验鉴别仍是评价中药质量的重要方式,经验丰富的中药工作者往往会依据中药材及饮片的形、色、气、味进行质量鉴别,但这种人为主观经验判断往往因个体差异存在不确定性,并且传统经验鉴别传承出现断层,能够基于外观质量准确评价中药质量的高水平从业者日益稀缺。

电子感官技术可模仿人类器官对所观察对象进行较为客观的评价,一般以电子眼、电子鼻、电子舌为主,其中数据处理、分析及模型的建立是该技术实现感官评价的重要环节。数据处理中常用到数据标准化和数据白化处理,以消除数据之间量纲影响或降低数据冗余性。常用数据分析方法有主成分

分析(principal component analysis, PCA)、偏最小二乘判别分析(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)、正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)、线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)、负荷加载分析(load loading analysis, Loadings)、判别因子分析(discriminant factor analysis, DFA)、判别分析(discriminant analysis, DA)等。数据模型建立多依托于机器学习,主要通过计算从数据中产生“学习算法”,进而通过经验数据建立模型,实现对未知样品的判断。该技术多用于食品、水产、农业等,近年来逐渐应用于中药领域,尤其在中药质量辨识与评价及炮制的应用中,既保留了传统经验鉴别的优点,又克服了其具有较强主观性的缺点。此外,电子感官技术还可与多种现代仪器联用,通过多信息融合,从多角度、多层面来对“辨状论质”进行诠释^[2]。本文通过对电子感官技术在中药质量辨识及炮制的应用情况进行概述,梳理总结存在的主要问题及应用现状,并进行展望,以期对中药质量控制和炮制质量提升提供参考。

1 电子眼技术在中药质量辨识和炮制中的应用

电子眼是用于分析样品颜色、颜色分布等视觉参数的仪器,由图像摄取装置、图像处理系统、储存器及输出单元构成,见图1。电子眼可模拟人类眼睛对样品进行感知,具有简单、快速、无需前处理特点,在食品、农产品、环境等行业已广泛运用,电子眼技术为中药质量辨识与评价提供了一种新思路^[3]。

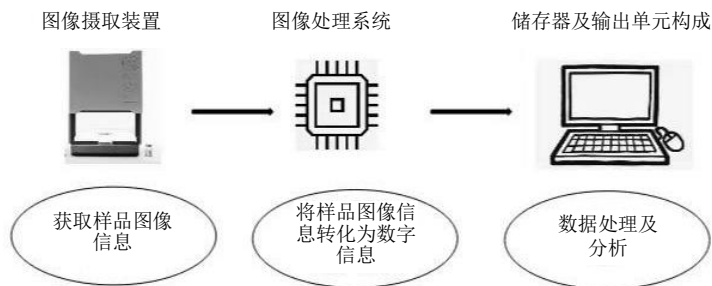


图1 电子眼工作原理

Fig. 1 Working principle of electronic eye

1.1 在中药质量辨识与评价中的应用

中药颜色是传统经验鉴别的重要指标之一,基于电子眼的色度识别在中药质量辨识中应用广泛。刘瑞新等^[4]基于电子眼技术并结合化学计量学建立

了川贝母真伪辨识模型,实现了对川贝母真伪快速辨识。侯富国等^[5]基于智能视觉技术建立白及真伪二分类和四分类多种辨识模型,经留一法交互验证,在二分类中均以K-近邻算法(K-nearest neighbor,

KNN) 模型为最优辨识模型, 在四分类中分别以最小二乘支持向量机 (least squares support vector machine, LS-SVM) 模型为最优辨识模型, 此外结合多源信息融合技术将 2 类智能视觉信息融合, 建立白及真伪辨识模型, 该研究所建立的最优辨识模型正判率均大于 97%, 实现了对白及真伪快速鉴别。

饮片颜色与内在有效成分具有一定相关性, 在一定程度上代表了质量优劣。饮片颜色作为传统经验鉴别中比较直观的指标, 常依赖于感官判断, 主观性较强, 缺乏客观量化指标, 对中药质量评价具有潜在影响^[6]。一些学者从“辨状论质”角度入手, 利用电子眼可量化饮片颜色的功能, 结合现代分析手段实现对中药饮片质量评价。张晓等^[3]利用电子眼技术得到穿心莲的色度空间系统参数 (L^* 、 a^* 、 b^*), 并与有效成分进行相关性分析, 结果显示穿心莲中二萜内酯类成分与亮度值 (L^*) 呈极显著负相关, 提出可将 $L^* < 69.5$ 作为快速评价穿心莲符合标准的参考。薛淑娟等^[6]在颜色与地黄指标性成分关联分析的同时, 探讨颜色与其主要药理活性的关系, 从成分、活性 2 个层面进行综合评价, 明确了地黄成分与颜色间的相关性, 还根据活性测定结果, 得出地黄断面颜色越黑, 抗氧化和降血糖作用越强。此外, 牛膝^[7]、五味子^[8]、山茱萸^[9]等均利用电子眼技术实现了外观色泽的量化, 且颜色与有效成分存在相关性, 为其质量评价提供了新方法, 并为中药饮片“辨状论质”提供了理论基础。

1.2 在中药炮制中的应用

电子眼技术在中药炮制领域也有所应用^[10]。于淼等^[11]将电子眼技术应用到炮制研究, 通过对古代经典九蒸九晒炮制过程中何首乌饮片主要化

学成分及颜色特征的动态变化规律研究, 探讨二者变化的相关性, 成功建立了颜色与指标成分相关性模型, 并总结了九蒸九晒炮制过程中何首乌饮片物质基础与颜色特征的总体变化规律, 实现了对何首乌炮制程度的判断及质量评价。武旭等^[12]采用气相色谱-离子迁移色谱法 (gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS) 结合电子眼技术比较不同胆汁及其发酵炮制的胆南星中挥发性成分气味和颜色量化值的影响, 使用 GC-IMS 检测不同胆汁炮制胆南星的挥发性物质成分, 电子眼检测不同胆南星颜色, 并进行相关性分析, 结果亮度值 (L^*) 和黄蓝度值 (b^*) 与氨、二甲基硫醚等呈显著负相关, 红绿色度 (a^*) 与酯类和醇类呈显著正相关, 阐明不同胆汁对其经发酵所制胆南星 (颜色和气味) 的影响, 为胆南星鉴别及质量控制提供数据支撑。

2 电子鼻技术在中药质量辨识和炮制中的应用

电子鼻的工作原理为模仿人类对气味的识别, 该电子仪器由 3 个部分组成: (1) 接受气味分子的传感器, 气味分子被人工嗅觉系统中传感器阵列吸附, 并产生信号, 模拟人嗅觉细胞表面受体蛋白与气味分子结合的过程。(2) 信号处理系统, 生成的信号经过各种方法加工处理与传输, 模拟气味分子所产生的信号被嗅觉细胞神经网络和嗅球进一步加工放大的过程。(3) 模式判别系统, 将处理后的信号由模式识别系统做出判断, 模拟大脑对气味做出判断的过程, 其中传感器阵列与模式判别系统是电子鼻工作的核心部分^[13], 见图 2。与传统气味分析方法相比, 电子鼻具有样品预处理简单、无损、评估检测相对快速、气味操作范围广、对被测气味样

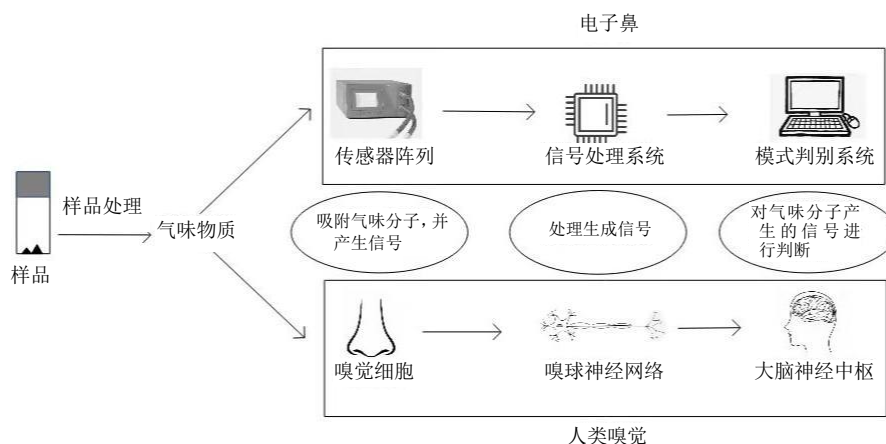


图 2 电子鼻工作原理

Fig. 2 Working principle of electronic nose

品具有较高的灵敏度和选择性等特点^[14]，在中药领域有良好的应用前景。目前电子鼻主要有传感器型电子鼻和超快速气相电子鼻 2 种，二者差异主要包括：一是超快速气相电子鼻拥有分离系统，可将挥发性成分分离，提高样品分析速度；二是信号采集装置有所差异，传感器型电子鼻为传感器阵列，超快速气相电子鼻为频率干扰鉴别器（frequency interference discriminator, FID）；三是超快速气相电子鼻除了拥有通用数据处理系统外，还配有数据库，可实现挥发性成分初步定性。

2.1 在中药质量辨识与评价中的应用

在中药传统经验鉴别中，气味是重要的评价指标。由于电子鼻能较全面、完整地反映中药的整体气味特征，有学者利用电子鼻技术与多元统计分析技术结合，成功建立中药的不同辨识模型，实现了对不同产地、品种、基原、品质中药材或饮片的快速辨识。由表 1 可见，电子鼻可通过结合多种数据分析方法实现中药的快速辨识。

有些学者将电子鼻应用到中药质量评价中。与生物活性结合层面，曹光昭等^[41]研究苦杏仁气味与止咳药效的相关性，实现了根据气味数字化信息推断止咳作用，用于苦杏仁质量评价。张逸婷等^[42]使用超快速气相电子鼻建立了臭灵丹草气味指纹图谱，并结合抗氧化活性测定结果，得到了 3 个与抗氧化能力相关性较大的成分。与化学成分结合层面，王晓宇等^[43]明确了电子鼻传感器响应值与姜黄素类成分的相关性，为川姜黄质量的快速评价提供依据。刘阿静等^[44]基于电子鼻结合高效液相色谱探究当归有效成分阿魏酸、藁本内酯与当归气味的相关性，结果显示电子鼻传感器 W1S 与 W2W 的响应值与两者含量呈极显著负相关，提示可通过电子鼻判断当归内在品质，实现质量评价。此外白术^[45]、防风^[46]等中药的气味数字检测方法也成功建立。

2.2 在中药炮制中的应用

电子鼻可捕捉中药炮制前后气味变化，因此在中药炮制领域亦多有应用，如炮制过程研究、生制品以及不同炮制品区分、炮制工艺优化、炮制辅料研究等。刘涛涛等^[47]利用电子鼻对大黄九蒸九晒炮制过程中的气味进行分析，结果显示以蒸晒 6 次为分界点，可将蒸晒大黄分为 2 类，并初步揭示了大黄蒸晒过程中气味动态变化规律。钱怡洁等^[48]建立了酒蒸山茱萸气味的动态变化监测方法，明确了乙醇、异丙醇等 8 个气味成分可作为监测指标的气味

成分。白术麸炒^[49]、麦芽炒制^[50]、黄精蒸制^[51]等过程的气味成分变化均通过电子鼻技术得到揭示，为炮制过程研究提供了新方法。电子鼻还可明确气味标志物，为质量控制提供实验依据，五味子^[52]、枳壳^[53]、半夏^[54]、温郁金^[55]、九香虫^[56]、山楂^[57]等均通过电子鼻明确不同炮制品之间的气味差异标志物。电子鼻技术还可与其他现代分析技术联用，优选炮制方法，基于此技术发现焯法、炒法为苦杏仁^[58]最适宜的炮制方法，明确了烘法炮制焦山楂^[59]的最佳工艺。此外，电子鼻技术也被应用到醋^[60]、胆汁^[61]等炮制辅料的研究中，推动了炮制辅料质量识别的发展。

3 电子舌技术在中药质量辨识和炮制中的应用

电子舌是一种具有非特异性、低选择性、高稳定性和对溶液中不同样品交叉敏感的化学传感器阵列的分析仪器^[62]，由味觉传感器阵列、信号采集器和模式识别系统 3 部分组成，见图 3。电子舌根据传感器的工作原理不同，可分为电位分析传感器、伏安分析传感器、阻抗谱型传感器，目前多以伏安型和电位型电子舌居多，如法国 Alpha M.O.S 公司的 ASTREE 电子舌和日本 INSENT 公司的 TS-5000Z 型电子舌、SA-402B 型电子舌。其能将味觉信息转化为客观性、可视化的数字信息，可获得多种味觉数值，具有重复性好、可标准化控制、检测反应快的优点，广泛应用于中药领域^[63]。

3.1 在中药质量辨识与评价中的应用

“入口则知味，入腹则知性”，中药都具有特征滋味。电子舌利用中药味道差异实现区分，达到快速区分不同产地、来源的中药及辨别真伪的目的。倪诗婷等^[64]用电子舌量化三七味觉特征，以 20、40、60 头三七为例建立不同头数三七的分类识别模型，该模型可为识别不同头数三七及质量等级分类提供依据。陈栋杰等^[65]利用电子舌研究不同产地枸杞子“味”的不同，以此建立了不同产地枸杞子的判别分析方法，为不同产地枸杞子的区分提供一种快速、便捷的技术手段。不同产地龙胆^[66]、不同来源广枣^[67]、不同产地多花黄精^[68]均可使用电子舌进行快速区分。此外，电子舌技术还可用于中药真伪的检测。张慧杰等^[69]基于电子舌技术成功建立了川贝母真伪及商品规格辨识模型。李媛媛等^[70]利用电子舌技术实现了对白及及其近似饮片的快速辨识。

电子舌技术为中药质量评价提供了新思路，将中药味觉与有效成分含量联系起来，从味觉角度来

表 1 电子鼻在中药辨识中的应用

Table 1 Application of electronic nose in identification of traditional Chinese medicines

应用	电子鼻型号	数据分析方法	药材或饮片	结果	文献	
产地 区分	Pen3 型	LDA、PCA、Loadings	秦艽	LDA 比 PCA 更好区分秦艽产地, Loadings 分析得秦艽中芳香类成分和氮氧化合物含量较高, 与化学鉴定结果一致	15	
	自研	CNN、LSTM	茯苓	优化后 CNN-LSTM 模型对不同产地茯苓的识别准确率达 88.9%	16	
	Pen3 型	LDA、PCA、Loadings	半夏	PCA 对四川、湖北两地区分度低, LDA 能较好区分不同产地半夏药材	17	
	PEN 型	LDA、PCA、Loadings	牡丹皮	可较好区分亳州、铜陵、重庆 3 个主产地的牡丹皮	18	
	Alpha Mosα-Fox 3000 型	PCA、DFA	太子参	DFA 分析方法对不同产地太子参区分效果显著, 回判率达 100%	19	
	isenso iNose	PCA、DFA	秦艽	DFA 分析方法可对不同产地秦艽进行区分, 正确率达到 80%	20	
	Alpha Mosα-Fox 3000 型	PCA、SVM	当归	支持向量机判别模型正判率均大于 86%, 可准确鉴别不同产地当归	21	
	Pen3 型	Loadings PCA、LDA、DFA	当归	建立 DFA 分析方法, 可准确鉴别不同产地当归, 判别率达到 100%	22	
	Heracles NEO300-G 超快速气相	ROAV、PCA、DFA	西洋参	明确了主要差异化合物, 建立的 PCA、DFA 分析方法均能较好地区分不同产地西洋参	23	
	α-Fox3000 型味指纹分析仪	PCA、LDA	柴胡	PCA+LDA 可以将不同产地柴胡进行区分, 区分度达 99.93%	24	
真伪 区分	Pen3 型	LDA、LLE+SMA	木香	LLE+SMA 算法判别效果极显著, 可完全把 8 个不同产地木香区分开	25	
	Airsense-PEN3 便携式	PCA、DFA	枸杞子	PCA 可有效区分不同产地、不同采收期、不同处理方法的枸杞子	26	
	SuperNose-14	PCA、DFA	金银花	DFA 分析方法可清晰地区分金银花真品与混淆品, 优于 PCA	27	
	α-FOX4000	PCA-DA、PLS-DA、SVM、LS-SVM、BP-NN	白及	二分类中以 PLS-DA 分析方法最优, 正确率为 97.01%, 四分类中以 PCA-DA 分析方法最优, 正确率为 91.04%	28	
	α-FOX4000	PCA、Loadings	麝香	PCA 可有效鉴别真假麝香, 传感器 2、3、5、12、15 和 17 能较好地	29	
	Pen3 型	DA、LS-SVM、PCA-DA、LS-DA、	川贝母	真伪鉴别中以 PCA-DA 与 PLS-DA 最优, 正确率均达 95%。	30	
	品种 区分	α-FOX3000 型	PCA、Loading	郁金	PCA 主成分区分贡献率达 99.2%, 对不同基原郁金区分效果显著	31
	FOX 3000 型	人工神经网络技术	沉香、沉香曲	电子鼻与人工神经网络技术结合可有效区分沉香与沉香曲	32	
	Pen3 型	PCA、LDA、Fisher、MLP	红景天	LDA 可将 4 个品种完全区分, 优于 PCA; Fisher 和 MLP 判别均可用于红景天品种的判别区分	33	
	PEN3 型	PCA、LDA、Loadings	鹿茸	PCA 与 LDA 结果均表明不同品种与规格鹿茸饮片, 气味差异比较明显	34	
品质 区分	Heracles II 超快速气相	PCA、DFA、PLS	金银花	实现了掺入完全开花金银花比例的快速识别及粉末质量分级	35	
	PEN3 型	SVM、LS-SVM	三七	GWO-IRIV-LSSVM 模型可对不同部位三七粉进行有效区分, 准确率为 97.5%	36	
	Heracles Neo 超快速气相	PCA、DFA、CA	黄芪	不同产地、生长年限黄芪药材可被区分开	37	
	PEN3 型	PCA、LDA、Loadings	天麻	PCA 与 LDA 分析结果表明电子鼻可对不同采收期天麻进行区分	38	
	变质 区分	α-FOX3000 型	逐步判别分析、PCA、聚类分析、PLS-DA	黄精	建立多种分析方法, 在整体气味的角度实现黄精霉变的鉴定	39
α-FOX3000 型	PCA	肉豆蔻	PCA 分析并结合 HS-GC-MS 对不同样品中挥发性成分进行检测, 实现了对霉变肉豆蔻快速检测	40		

LLE-局部线性嵌入算法; SVM 支持向量机; BP-NN 反向传播神经网络; HS-GC-MS-顶空-气质联用技术; ROAV-相对气味活度值法; CNN-LSTM-卷积神经网络-长短期记忆网络模型; MLP-多层感知器。

LLE-local linear embedding algorithms; SVM-support vector machines; BP-NN-backpropagation neural networks; HS-GC-MS-headspace-GC/MS technology; ROAV-relative odor activity value method; CNN-LSTM-convolutional neural networks-long short-term memory networks; MLP-multi-layer perceptrons.

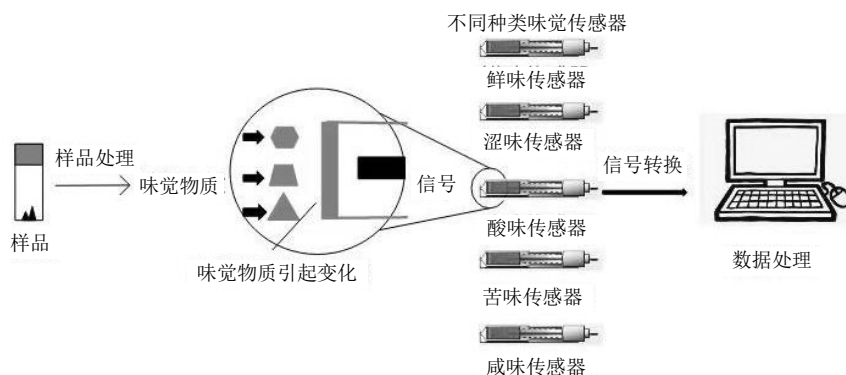


图 3 电子舌工作原理

Fig. 3 Working principle of the electronic tongue

诠释“辨状论质”科学内涵。楚越等^[71]采用 HPLC 法同时测定生、焦栀子中主要有效成分含量，采用 TS-5000Z 味觉分析系统进行生、焦栀子 5 种味觉及回味的数字化表征，建立了一种栀子化学成分与味觉关联分析的新方法，确定了饮片味觉变化与内在成分相关性。王晓宇等^[72]基于电子舌技术，对川芎药材味觉信息与 6 种主要化学成分含量的相关性进行研究，实现了通过味觉信息对川芎有效成分含量的初判。包丽媛等^[73]利用电子舌技术实现了草乌麻味的量化，建立了双酯型生物碱含量的预测模型，实现了电子舌对草乌中双酯型生物碱的定量分析。荆文光等^[74]通过电子舌和多成分分析技术探究厚朴的“苦味”的物质基础，结果显示厚朴酚与和厚朴酚为厚朴“苦味”药性物质基础，且二者含量与苦味、苦味回味传感器测定值呈正相关。

3.2 在中药炮制中的应用

中药炮制前后，其滋味往往会发生变化。电子舌可将这种滋味变化客观数字化，从而应用于炮制领域。曹林等^[75]利用电子舌技术研究黄精“九蒸九晒”的炮制过程，将黄精生品、一蒸一晒至九蒸九晒“味”的变化进行了客观数字化表达，得出一定规律，多花黄精味道主要以甜味和苦味为主，且随着蒸晒次数增加，其味觉值呈逐渐下降趋势，为多花黄精质量标准提供依据。蒋姗等^[76]使用电子舌检测汤洗次数对吴茱萸味觉值的影响，结果汤洗 1、3 次可能是吴茱萸汤洗炮制工艺中汤洗的关键节点，为吴茱萸汤洗炮制工艺优化提供参考依据。

4 电子感官技术串联应用在中药质量辨识和炮制中的应用

数据融合技术是将多传感器信息源的数据加以联合，从而实现对待测物质的综合评价。电子感官

技术联合数据融合技术可将中药整体的外观性状量化，把握中药“整体性”特征，使中药质量评价与辨识更为全面、立体。在对中药产地快速鉴别研究中，李建军等^[77]利用电子眼、电子鼻、电子舌实现了对不同产地地黄的有效区分。还将电子眼、电子鼻和电子舌数据进行拟合分析，也实现了有效区分。任玲慧等^[78]将电子鼻和电子舌数据融合为一个特征集，用于综合分析不同产地三七气味的特征，结果显示基于融合感官信息建立的判别模型对不同产地三七的识别率高于独立的电子鼻和电子舌信息。金鑫宁等^[79]建立 MobileNetv 3 网络模型可区分不同产地的黄芪，在将电子眼、电子舌所采集的数据进行融合分析后，发现相较于单独使用电子舌或者电子眼，数据融合后具有更高的识别准确率。在中药种类鉴定方面，Gui 等^[80]构建了电子感官三源融合模型和智能感官与近红外光谱四源融合模型，在对川贝母种类鉴定中融合模型准确率优于单源模型。在中药质量评价方面，程亚茹等^[81]利用多元统计方法综合分析颜色、气味与当归挥发油成分含量相关性，结果显示蒽烯、Z-藁本内酯等指标成分与颜色、气味均呈现相关性，为建立当归质量评价方法提供参考。在对中药炮制程度研究中，吴鑫雨等^[82]基于电子感官与多源信息融合技术建立了更为准确的香附炮制程度辨识模型，为其他中药炮制程度研究提供参考。

5 结语与展望

电子感官技术在中药质量评价研究中已经广泛运用，弥补了人类对中药性状特征感官描述的模糊性、主观性、不精确性的缺点，基于电子感官技术建立的不同中药产地、品种、基原、品质的辨别模型，极大地提高了中药的辨识效率，也为中药的质

量评价提供了有效的方法。同时该技术在中药炮制领域也被广泛应用,尤其是在中药炮制过程研究、生制品以及不同炮制品区分、炮制工艺优化研究中发挥一定作用。随着该技术的不断发展,电子感官技术也被应用到中药其他领域,一些研究学者将电子感官技术应用到动物药矫味矫臭研究。田连起等^[83]利用电子鼻探寻蕲蛇炮制矫臭的科学依据,结果显示二甲基硫醚可能为蕲蛇特异气味的主要物质基础,二硫化碳、己醛可能为蕲蛇腥味等不良气味的物质基础,为蕲蛇的矫臭技术研究提供了研究基础,也为其他动物药的矫味矫臭研究提供新思路。在中药掩味与矫味研究中,闫景辉等^[84]将电子舌应用到 β -环糊精包合荷叶提取物的矫味工艺中,可快速预判矫味终点。电子感官技术还被应用于中药安慰剂的质量分析与评价,汤若晗等^[85]探索了加味二妙颗粒安慰剂的模拟效果评价方法,其中电子舌和电子鼻的客观化评价提高了人工评价结果的科学性,实现了其性状评价的客观量化。中药材种子对中药产业高质量、可持续发展有着不可忽略的影响,基于电子鼻技术还可实现对中药材种子的鉴别,且无需破坏样品就可以检测,契合中药材种子鉴别技术发展方向^[86]。

目前,电子感官技术在应用中尚存在一定问题。首先是设备方面,一是电子眼在应用中多是将中药粉碎后进行观测,在一定程度上破坏了中药的整体性,因此电子眼的图像识别及分析功能亟需提高,以期实现对中药的无损观测;二是电子鼻与电子舌在使用时对周围环境要求较高,湿度、温度以及气味均会对检测结果产生影响,稳定性不高,因此设备的稳定性、敏感性等特性亟需改进;三是电子鼻、电子舌多为国外进口设备,其在研发传感器时,往往是针对某类物质,难以应对气味复杂的中药,因此在中药领域中的应用存在专属性、特异性差的问题,由此亟需开发适用于中药研究的传感器阵列。其次在实际应用过程尚存在 3 个方面主要问题:(1)不同学者基于电子感官技术建立了不同的辨识模型,实现了对不同产地、品种、基原中药的区分,但不同厂家及不同型号电子感官设备测定结果尚存在一定差异。以枸杞子产地区分的研究为例,应用超快速气相电子鼻或 PEN3 便携式电子鼻虽均可实现不同产地枸杞子的区分,但二者研究结果提示的气味差异物质有所不同,超快速气相电子鼻测定结果提示区分不同产地枸杞子的气味差异物质主要是

己醛、糠醛、二甘醇单乙醚、硝基苯及正庚基丙烯酸酯 5 个成分,而 PEN3 便携式电子鼻测定结果提示区分不同产地枸杞子气味差异物质主要为小分子氮氧化合物和甲烷等短链烷烃类物质^[26,87]。在三七品质研究中,有学者均使用 PEN3 便携式电子鼻对三七气味进行测定,通过对比发现,检测结果在 S7 传感器的响应上存在明显差异^[36,88]。因此应加强减少不同厂家及不同型号电子感官设备间的差异研究,还要开展同一感官设备基于数据测定、处理分析及所建模型的重现性与准确性相关研究,以进一步提升研究结果科学性和可信性。(2)基于电子感官技术建立了简便快捷的中药质量评价方法,但大部分研究仅针对对中药的指标性成分或某类成分进行相关性分析,尚无法表征中药的整体质量。由此,可将经验评价、生物评价、化学评价与电子感官技术有机结合,使中药内在质量与中药性状联系更加紧密,建立基于电子感官技术的多层面、多角度、全面立体的中药质量评价方法。(3)在中药炮制过程研究中,多利用电子感官技术实现炮制过程的“后检测”研究,尚未实现实时在线监测及炮制质量过程控制。目前已有学者基于电子鼻技术实现了对红茶发酵过程在线监测^[89],还有学者基于光谱技术实现对中药甘青青兰提取全过程监测^[90],均为电子感官技术在炮制过程研究提供新思路。

此外,当前中药质量评价的主要方式为性状鉴别和化学成分检测,但最终还是以中药临床疗效为主。目前有研究发现不同走油程度苦杏仁气味与止咳药效的相关性,通过气味推断苦杏仁止咳作用的变化趋势^[41]。说明电子感官技术用于中药药效关联的品质评价是完全可行性的。相信随着电子感官技术的不断发展,该技术将在整个中药产业链得到更为广泛运用。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 秦宇雯,费程浩,毛春芹,等. 基于“性状-质量标志物-生物效应”的饮片质量整体识别研究思路 [J]. 中草药, 2022, 53(5): 1294-1302.
- [2] 谢宗万. 中药品种传统经验鉴别“辨状论质”论 [J]. 时珍国药研究, 1994, 5(3): 19.
- [3] 张晓,吴宏伟,于现阔,等. 基于电子眼技术的穿心莲质量评价 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2019, 25(1): 189-195.
- [4] 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.
- [5] 侯富国, 桂新景, 王艳丽, 等. 基于智能视觉技术的白及饮片真伪快速辨识方法研究 [J]. 中草药, 2023, 54(2): 509-519.
- [6] 薛淑娟, 车奇涛, 陈随清. 基于“成分-颜色”关联分析地黄药材的质量及体外活性评价 [J]. 时珍国医国药, 2023, 34(11): 2791-2796.
- [7] 马美杰, 刘孟祥, 薛淑娟, 等. 加速实验过程牛膝成分含量与颜色值相关性研究 [J]. 中药材, 2022, 45(3): 579-585.
- [8] 吴亚楠, 问思华, 杨凯, 等. HPLC 结合电子眼技术评价柞水五味子药材质量 [J]. 中华中医药杂志, 2023, 38(6): 2868-2873.
- [9] Cui Y X, Liu R X, Lin Z Z, *et al.* Quality evaluation based on color grading: Quality discrimination of the Chinese medicine *Corni Fructus* by an E-eye [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 17006.
- [10] 范星辰, 祁玉芳, 张科卫, 等. 基于 Box-Behnken 设计-响应面法和电子眼的栀子姜炙工艺研究 [J]. 中草药, 2024, 55(7): 2175-2182
- [11] 于淼, 代悦, 刘涛涛, 等. 古代经典九蒸九晒炮制过程中何首乌饮片物质基础与颜色特征的相关性分析 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2023, 29(16): 178-187.
- [12] 武旭, 钟恋, 王晶, 等. 基于气相色谱-离子迁移色谱法结合分光测色仪技术分析不同胆汁及其所制胆南星的差异性 [J]. 中华中医药杂志, 2023, 38(12): 5700-5708.
- [13] 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.
- [14] Zhou H Y, Luo D H, GholamHosseini H, *et al.* Identification of Chinese herbal medicines with electronic nose technology: Applications and challenges [J]. *Sensors*, 2017, 17(5): 1073.
- [15] 林丽, 高素芳, 晋玲, 等. 基于气味分析系统的不同产地秦艽的区分及相关性研究 [J]. 中国现代中药, 2023, 25(9): 1895-1902.
- [16] 徐昊, 章检明, 王中鹏, 等. 基于电子鼻的深度卷积神经网络茯苓产地分类方法 [J]. 传感器与微系统, 2023, 42(12): 138-141.
- [17] 王俊斐, 张露平, 张运民, 等. 基于电子鼻技术鉴别不同产地半夏药材 [J]. 现代中药研究与实践, 2021, 35(1): 1-3.
- [18] 夏成凯, 宋芊芊, 方成武. 基于电子鼻技术区分不同产地的牡丹皮药材 [J]. 中国现代应用药学, 2019, 36(21): 2633-2637.
- [19] 黄特辉, 张志杰, 郭媛媛, 等. 基于电子鼻技术的太子参产地及产地加工方法鉴别 [J]. 中国药学杂志, 2020, 55(10): 811-816.
- [20] 刘立轩, 冷晓红, 郭鸿雁, 等. 基于电子鼻技术的秦艽药材产地鉴别 [J]. 时珍国医国药, 2020, 31(3): 617-619.
- [21] 拱健婷, 邹慧琴, 王佳宇, 等. 基于电子鼻技术的不同产地当归快速鉴别研究 [J]. 中国医药导报, 2019, 16(28): 39-43.
- [22] 刘阿静, 王娟, 王波, 等. 基于电子鼻与多元统计分析鉴别当归产地的研究 [J]. 质量与安全与检验检测, 2022, 32(1): 1-5.
- [23] 查圣华, 王俊亮, 周舒扬, 等. 基于 Heracles 超快速气相电子鼻对不同产地西洋参快速鉴别研究 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 284-291.
- [24] 轩菲洋, 姜丹, 申小莹, 等. 基于电子鼻和顶空气质联用技术的不同产地北柴胡气味差异分析 [J]. 中国现代中药, 2022, 24(11): 2141-2149.
- [25] 徐珍珍, 史星星. 基于电子鼻技术的 LLE+SMA 算法对木香的定性鉴别研究 [J]. 中草药, 2019, 50(24): 6114-6119.
- [26] 崔治家, 夏鹏飞, 张启立, 等. 电子鼻技术区分不同产地不同采收时间不同处理方法的枸杞子研究 [J]. 时珍国医国药, 2019, 30(9): 2163-2166.
- [27] 刘鹏, 白上圆, 张维瑞, 等. 电子鼻技术鉴别金银花真伪、产地、贮藏年份 [J]. 中成药, 2021, 43(7): 1960-1963.
- [28] 桂新景, 李涵, 王艳丽, 等. 基于人工智能嗅觉技术和化学计量学的白及饮片真伪鉴别 [J]. 医药导报, 2024, 43(3): 441-451.
- [29] Ye T, Jin C, Zhou J, *et al.* Can odors of TCM be captured by electronic nose? The novel quality control method for musk by electronic nose coupled with chemometrics [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2011, 55(5): 1239-1244.
- [30] 冯文豪, 田亮玉, 施钧瀚, 等. 电子鼻技术应用于川贝母真伪及规格辨识的可行性分析 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(13): 108-118.
- [31] 王佳宇, 拱健婷, 王月珍, 等. 多基原郁金的性状、显微及气味差异性研究 [J]. 世界科学技术—中医药现代化, 2020, 22(2): 338-345.
- [32] 李志远, 舒涵, 靳梦亚, 等. 基于电子鼻和人工神经网络的沉香与沉香曲鉴别 [J]. 中国现代中药, 2021, 23(2): 286-289.
- [33] 王丽萍, 任卫合, 罗龙龙, 等. 基于电子鼻气味信息区分 4 个品种红景天 [J]. 粮食与油脂, 2023, 36(2): 154-157.
- [34] 龚伟, 任聪, 马姗姗, 等. 基于电子鼻技术的不同品质鹿茸饮片气味特征分析 [J]. 中国现代中药, 2023, 25(8): 1707-1711.
- [35] 武文奇, 毛怡宁, 李虹, 等. Heracles II 超快速气相电子

- 鼻对金银花粉质量的鉴别研究 [J]. 中国中药杂志, 2019, 44(23): 5129-5133.
- [36] 李丽霞, 张浩, 林宇浩, 等. 电子鼻结合 GC-MS 鉴别不同部位的三七粉 [J]. 食品科学, 2023, 44(20): 321-329.
- [37] 余亦婷, 赵乙萌, 袁曦, 等. Heracles Neo 超快速气相电子鼻对不同产地、生长年限及采收期黄芪药材品质评价研究 [J]. 中草药, 2022, 53(5): 1328-1337.
- [38] 曹森, 赵成飞, 马凤伟, 等. 基于电子鼻和 GC-MS 评价不同采收期天麻的芳香品质 [J]. 北方园艺, 2019(19): 87-94.
- [39] 拱健婷, 关佳莉, 李莉, 等. 基于电子鼻技术的黄精霉变快速无损鉴别研究 [J]. 现代中药研究与实践, 2023, 37(2): 17-22.
- [40] 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.
- [41] 曹光昭, 陈慧荣, 刘玢清, 等. 不同走油程度苦杏仁“电子鼻”气味与止咳药效的相关性分析 [J]. 中成药, 2020, 42(5): 1249-1254.
- [42] 张逸婷, 李争艳, 余晓玲, 等. 基于电子鼻技术的臭灵丹草指纹图谱建立及谱效关系研究 [J]. 中药材, 2024, 47(2): 383-389.
- [43] 王晓宇, 赵军宁, 吴萍, 等. 基于电子鼻技术对川姜黄整体气味与主要化学成分相关性的初步研究 [J]. 中药材, 2019, 42(12): 2850-2855.
- [44] 刘阿静, 王娟, 王新潮, 等. 基于电子鼻技术对当归整体气味与其主要化学成分相关性的分析研究 [J]. 质量安全与检验检测, 2022, 32(0): 5-8.
- [45] 梅桂林, 陈娜, 姚洁, 等. 基于电子鼻技术的白术气味与内酯类成分的相关性研究 [J]. 皖西学院学报, 2020, 36(5): 81-85.
- [46] 魏丽红, 常福瑞, 闫爽, 等. 防风气味与化学成分相关性研究 [J]. 中成药, 2024, 46(1): 324-329.
- [47] 刘涛涛, 代悦, 于淼, 等. 基于智能感官分析技术的九蒸九晒大黄饮片气味表征 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(20): 116-121.
- [48] 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.
- [49] 李亚飞, 汤璐, 赵明方, 等. 基于 Heracles NEO 超快速气相电子鼻麸炒白术炮制全过程气味变化识别研究 [J]. 中草药, 2023, 54(15): 4812-4822.
- [50] 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.
- [51] 关佳莉, 李莉, 丛悦, 等. 基于超快速气相电子鼻的黄精蒸制过程气味成分变化规律研究 [J]. 现代中药研究与实践, 2023, 37(6): 5-10.
- [52] 李昱, 宫静雯, 费程浩, 等. 快速气相电子鼻结合人工神经网络对 3 种五味子饮片快速识别及气味差异标志物研究 [J]. 中草药, 2022, 53(5): 1303-1312.
- [53] 梅茜, 许金国, 苏联麟, 等. 基于 Heracles NEO 超快速气相电子鼻对枳壳麸炒前后气味差异标志物的快速识别研究 [J]. 中草药, 2023, 54(16): 5165-5171.
- [54] 杨靖涵, 高杰, 孙立丽, 等. 基于电子鼻技术结合网络药理学分析半夏不同炮制品的气味差异标志物 [J]. 中南药学, 2024, 22(2): 383-391.
- [55] 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.
- [56] 张思聪, 张振秋, 李峰. 基于电子鼻技术分析生、制九香虫药材“气”特征 [J]. 中华中医药学刊, 2021, 39(6): 145-147.
- [57] Fei C H, Ren C C, Wang Y L, *et al.* Identification of the raw and processed *Crataegi Fructus* based on the electronic nose coupled with chemometric methods [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 1849.
- [58] 刘立轩, 李吉宁, 陈海燕, 等. 基于 HPLC 法及电子鼻技术的苦杏仁药材不同炮制方法研究 [J]. 沈阳药科大学学报, 2023, 40(4): 494-500.
- [59] 蒋昊. 基于电子鼻和 HPLC 多成分含量分析的焦山楂烘制工艺研究 [J]. 天津中医药, 2022, 39(5): 668-674.
- [60] 李昱. 炮制辅料醋质量控制标准及识别技术研究 [D]. 南京: 南京中医药大学, 2022.
- [61] Tan C Q, Xie D S, Liu Y J, *et al.* Identification of different bile species and fermentation times of bile *Arisaema* based on an intelligent electronic nose and least squares support vector machine [J]. *Anal Chem*, 2018, 90(5): 3460-3466.
- [62] Lin Z Z, Zhang Q, Liu R X, *et al.* Evaluation of the bitterness of traditional Chinese medicines using an E-tongue coupled with a robust partial least squares regression method [J]. *Sensors*, 2016, 16(2): 151.
- [63] 符海邨, 张倩睿, 吴方建. 现代分析技术用于中药质量控制研究进展 [J]. 中国药业, 2019, 28(22): 96-99.
- [64] 倪诗婷, 杨天歌, 高旭华, 等. ASTREEII 电子舌在不同头数三七分类识别中的应用 [J]. 北京中医药, 2022, 41(10): 1164-1167.
- [65] 陈栋杰, 郭盛, 卢有媛, 等. 基于电子舌技术的不同产地枸杞子鉴别研究 [J]. 南京中医药大学学报, 2020, 36(5): 615-622.
- [66] 赵童瑶, 尹海波, 李旭, 等. 基于电子舌技术对不同来源龙胆的苦味与品质相关性研究 [J]. 中国现代中药, 2018, 20(9): 1068-1073.
- [67] 张雪妮, 王凯, 贾鑫, 等. 基于电子舌技术的不同来源广枣味觉信息研究 [J]. 中华中医药杂志, 2023, 38(1):

- 376-381.
- [68] 赵丽蓉, 张虹, 方文韬, 等. 应用电子舌技术对多花黄精药材“味”的测定与分析 [J]. 现代中药研究与实践, 2019, 33(6): 5-9.
- [69] 张慧杰, 张璐, 冯文豪, 等. 电子舌用于川贝母真伪及商品规格快速辨识研究 [J]. 中成药, 2021, 43(6): 1531-1537.
- [70] 李媛媛, 王艳丽, 姚静, 等. 基于电子舌的白及其近似饮片的快速辨识研究 [J]. 世界科学技术—中医药现代化, 2021, 23(5): 1532-1539.
- [71] 楚越, 李焯, 雷婧萱, 等. 栀子炒焦前后 HPLC 多成分含量测定及性味数字化关联分析 [J]. 中华中医药杂志, 2022, 37(6): 3416-3422.
- [72] 王晓宇, 郭俊霞, 吴萍, 等. 基于电子舌技术的川芎味觉信息与主要化学成分相关性研究 [J]. 中药材, 2020, 43(1): 34-41.
- [73] 包丽媛, 刘芳, 唐雅楠, 等. 利用电子舌对草乌进行麻味评价及其双酯型生物碱定量预测 [J]. 中华中医药杂志, 2023, 38(7): 3049-3053.
- [74] 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.
- [75] 曹林, 刘福, 韩丽. 基于电子舌技术分析多花黄精炮制过程中“味”的变化 [J]. 中医药导报, 2023, 29(2): 50-53.
- [76] 蒋姗, 赵晓梅, 郭杰, 等. 基于有效成分及味觉变化规律的吴茱萸“汤洗”炮制工艺研究 [J]. 中国中药杂志, 2023, 48(13): 3485-3497.
- [77] 李建军, 常筱沛, 马静潇, 等. 电子眼、电子鼻和电子舌鉴别不同品种、不同产地生地黄 [J]. 中成药, 2022, 44(11): 3549-3554.
- [78] 任玲慧, 张诗焉, 郭宜欣, 等. 基于电子鼻和电子舌融合技术的三七产地鉴别 [J]. 现代中药研究与实践, 2024, 38(1): 1-6.
- [79] 金鑫宁, 刘铭, 桑恒亮, 等. 基于电子舌和电子眼结合改进 MobileNetv3 的黄芪快速溯源检测 [J]. 食品与机械, 2023, 39(6): 37-47.
- [80] Gui X J, Li H, Ma R, *et al.* Authenticity and species identification of *Fritillariae cirrhosae*: A data fusion method combining electronic nose, electronic tongue, electronic eye and near infrared spectroscopy [J]. *Front Chem*, 2023, 11: 1179039.
- [81] 程亚茹, 石秀佳, 龚焱婷, 等. 基于形性与化学指标关联分析的当归挥发油质量评价和当归产地鉴别 [J]. 中国现代中药, 2022, 24(4): 629-637.
- [82] 吴鑫雨, 邱丽媛, 王又迪, 等. 基于智能感官与多源信息融合技术的香附炮制程度快速辨识方法研究 [J]. 中草药, 2023, 54(21): 7007-7016.
- [83] 田连起, 乐智勇, 曹晖, 等. 基于电子鼻技术的中药蕲蛇饮片炮制矫味物质基础研究 [J]. 中医学报, 2019, 34(4): 785-789.
- [84] 闫景辉, 余银芳, 闫嘉, 等. 电子舌对 β -环糊精包合荷叶提取物的矫味工艺研究 [J]. 中成药, 2023, 45(6): 2086-2091.
- [85] 汤若晗, 黄胜良, 张肇锋, 等. 加味二妙颗粒安慰剂的制备工艺及模拟效果评价研究 [J]. 中国中药杂志, 2024, 49(1): 123-129.
- [86] 徐凯杰. 电子鼻技术及其在种子品质检测中的应用概况 [J]. 农业装备技术, 2022, 48(2): 4-6.
- [87] 赵秋龙, 江群艳, 严辉, 等. 基于超快速气相电子鼻对不同产地枸杞子快速识别及气味差异物质研究 [J]. 南京中医药大学学报, 2023, 39(6): 513-522.
- [88] 刘元林, 龙鸣, 张希, 等. 基于电子鼻与多元统计分析判别三七品质 [J]. 中成药, 2021, 43(3): 700-707.
- [89] 戴振华. 基于图像与气味融合监测的红茶发酵品质研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2023.
- [90] 张文婷, 王凯君, 路亚梅, 等. 中药甘青青兰提取过程的近红外及紫外可见双光谱在线监测 [J]. 分析测试学报, 2024, 43(5): 746-754.

[责任编辑 潘明佳]