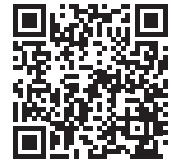


基于人工智能感官技术的中药质量控制方法研究进展



江如蓝¹, 雷结语¹, 陈文礼², 徐新军¹

1. 中山大学药学院 (广州 510006)
2. 中山大学附属第五医院药学部 (广东珠海 519000)

【摘要】为深入推进和实现中医药现代化, 建立一种既尊重中医理论又顺应时代发展的中药材质量控制体系尤为重要。自古以来, 中药材的色、气、味等外观性状是用于辨别其真伪及质量好坏的重要标准之一。目前对中药外观性状的研究逐渐从主观的“辨状论质”转向了能够提供客观数据支持的人工智能感官技术, 根据模拟感官的不同, 智能感官技术又可以分为电子眼、电子鼻、电子舌、电子耳和电子皮肤等。本文梳理了5种人工智能感官技术的原理以及在中药质量评价中的应用, 介绍了基于智能感官的中药质量控制体系的研究现状和未来发展趋势, 以期为中药材质量控制体系的升级和现代化发展提供参考。

【关键词】智能感官; 外观性状; 辨状论质; 质量控制; 品质评价; 中药识别; 成分检测; 深度学习; 多源信息融合; 图像识别技术; 人工智能

【中图分类号】 R284 **【文献标识码】** A

Research progress on quality control methods of traditional Chinese medicine based on artificial intelligence sense technology

JIANG Rulan¹, LEI Jieyu¹, CHEN Wenli², XU Xinjun¹

1. School of Pharmaceutical Science, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China
 2. Department of Pharmacy, The Fifth Affiliated Hospital of Sun Yat-sen University, Zhuhai 519000, Guangdong Province, China
- Corresponding authors: XU Xinjun, Email: xxj2702@sina.com; CHEN Wenli, Email: chenwenl@mail3.sysu.edu.cn

【Abstract】In order to further promote and achieve the modernization of traditional Chinese medicine, it is particularly important to establish a quality control system of traditional Chinese medicine which not only respects the theory of traditional Chinese medicine but also conforms to the development of the times. Since ancient times, the appearance character of traditional Chinese medicine, such as color, gas and taste, is one of the important criteria to distinguish its authenticity and quality. At present, the research on the appearance of traditional Chinese medicine has gradually shifted from subjective "evaluation of quality from appearance traits" to artificial intelligence sensory technology which can provide objective data support. According to the different simulated senses, intelligent sensory technology can be divided into

DOI: 10.12173/j.issn.2097-4922.202409004

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目——乡村产业共性关键技术研发与集成应用 (2023YFD1601400)

通信作者: 徐新军, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, Email: xxj2702@sina.com

陈文礼, 博士, 副主任药师, Email: chenwenl@mail3.sysu.edu.cn

electronic eyes, electronic nose, electronic tongue, electronic ear and electronic skin. This paper combs the principles of five kinds of artificial intelligence sensory technology and their application in the quality evaluation of traditional Chinese medicine, introduces the research status and future development trend of the quality control system of traditional Chinese medicine based on intelligent sense, in order to provide a reference for the upgrade and modern development of the quality control system of traditional Chinese medicine.

【Keywords】 Intelligence sense; Appearance character; Quality evaluation through character identification; Quality control; Quality evaluation; Identification of Chinese traditional medicine; Component detection; Deep learning; Multi-source information fusion; Image recognition technology; Artificial intelligence

随着生活水平的提高，人们对健康的需求上升至一个新的台阶，与此同时，中国人民对传统文化的认可度也不断提高，中医药在国民健康领域发挥着越来越重要的作用。2023 年，全国中医类医疗卫生机构总诊疗人次比上年增长 25.3%^[1]。为推动中医药事业的高质量发展，需要推动中医药现代化、产业化，并且建立适应中医药高质量发展需要、结构合理的标准体系。在讨论如何建立合理的中医药标准体系时，如何选择合适的技术对中药的质量进行系统评价是一个重要课题，随着现代科学技术的发展，这个问题也有了许多的新答案。

由于中药大多源于植物，其外观性状常因种属、光照、加工方式和采收时间的不同而存在较大的差异^[2]，因此传统中药的质量判断常从药材的“形、色、气、味”出发，使用人的感官，用看、闻、摸、尝等方法结合人的经验积累来对具体的药材进行真伪判断或品质分辨，谢宗万^[3]将这个过程中总结为“辨状论质”。该方法虽然简便且准确度较高，但受描述主观性影响大^[4]，且效率并不能满足要求，近年来出现的人工智能感官技术可以为“辨状论质”提供客观证据。人工智能感官技术是一种使用各种传感器模拟人体感官的仿生技术，传感器通过检测药材的形状、气味等特征以转化得到数据，再结合计算机数据分析技术，从而实现对中药及中药饮片的快速、准确识别和分析^[5]，客观地得到“量化”的药材外观性状信息。

本文主要梳理了以人工智能感官技术为主导的“外在性状”质量控制体系，并且探讨了将人工智能感官技术应用于中药材质量的可行性和局限性，以期更符合中医药理论体系的中药质量控制体系的建立提供参考（图 1）。

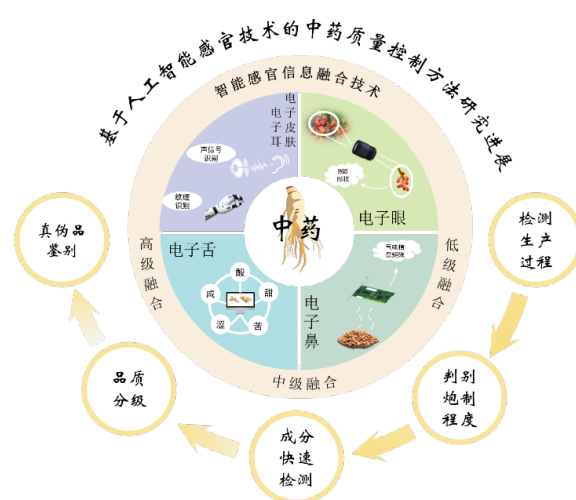


图 1 基于人工智能感官技术的中药质量控制方法研究进展

Figure 1. Research progress on quality control methods of traditional Chinese medicine based on artificial intelligence sense technology

1 人工智能感官技术概述

人体感知是通过人的感觉器官包括眼、鼻、舌、皮肤等对外界环境产生感知，并将信息传入大脑生成信号。人工智能感官技术使用了不同的传感器模拟人的器官，对环境或物体的颜色、气味、形状等作出反应，根据模拟的感觉器官可以分为：电子眼、电子鼻、电子舌、电子耳和电子皮肤等。

1.1 电子眼技术的原理及应用

电子眼技术，也被称为图像识别技术，可以通过相机等设备获取物体的图像数据，从中提取物体的特征，再利用计算机的数据处理方法，对物体的颜色、纹理、形状等信息进行处理和分类，从而建立可用于特征识别的数据库或数据模型^[6]。

在这个图像识别系统中，入射光通过配备多个镜头的物体成像系统聚焦在图像传感器上，传感器捕获光线信息形成大量图像数据，根据形成数据的方式可以将传感器分为互补金属氧化物半导体传感器和电荷耦合器件传感器^[7]。随后信息被传入数据处理系统，在数据处理系统中使用较频繁的技术包括模式识别、深度学习和智能控制等^[8-9]。

电子眼技术因其操作简单、耗时短且无需预处理的特点，可应用于中药材的资源调查分析、快速鉴定、品质分级和生产过程控制^[10-14]。在山茱萸的众多外观性状中，颜色是其最突出的特征之一，Cui等^[12]使用IRIS VA400 E-eye测试了58批山茱萸果实样品，并根据光学数据和相应的类别建立了4个质量判别模型。经过交叉评价，最终选择了主成分分析-判别分析法建立山茱萸果实分类或品质判别的模型，其准确率可达到91.38%。与其他检测方法比较时，电子眼技术也具有较大优势，刘瑞新等^[13]使用电子眼技术对川贝母的真伪及规格进行辨识时，发现基于电子眼技术的川贝母辨识模型的准确率与传统经验辨识法和现代药典检测法相比无显著性差异，并且明显快于现代药典检测法。除此之外，根据中药材与杂质的颜色差异可以在生产过程中通过色选机进行净选操作，不仅可以弥补人工质检的不足，还能显著提高生产效率^[14]。

1.2 电子鼻技术的原理及应用

早在20世纪80年代，就出现了机器嗅觉的概念，即基于一种半导体传感器使机器拥有类似人类嗅觉系统辨识气体的能力^[15]。电子鼻系统主要由气体传感器阵列、搭载模式识别方法的信息处理系统以及用于参考的特征数据库组成。气体传感器阵列可以通过气敏性物理材料与气体的吸附和反应或是通过生物功能部件（如细胞或受体蛋白），以实现针对不同气体分子的响应^[16]。电子鼻系统识别气体的过程可以概括为：①传感器阵列获取样品气体信息；②信号转换与预处理；③特征信号提取及模式识别；④参考数据库与判别。

对中药来说，辨别气味一直是区分中药种类和品质好坏的重要标准之一。以苦杏仁为例，其中含有丰富的油脂，易产生“走油”的变质现象，“走油”时伴有“哈喇味”的气味变化。拱健婷等^[17]利用支持向量机（support vector machine, SVM）的电子鼻系统对苦杏仁的炮制品种类以及

变质程度进行判断，12根金属氧化物传感器阵列从90批苦杏仁样品中采集到了175组未走油苦杏仁气味信息、105组轻微走油苦杏仁气味信息和245组走油气味信息，随机选取其中70%的数据信息结合SVM算法和网络搜索方法进行特征提取和识别，剩余30%用于模型验证，最终建立了高准确率的苦杏仁走油程度判别模型。结合传感器的性能成分分析结果，苦杏仁炮制品和走油程度相关的气味成分包括有机胺类、硫化物等。除对中药炮制品的种类分辨外，电子鼻系统还可应用于中药饮片炮制生产过程的监测，如判断山楂^[8]、香附^[18]、薏苡仁^[19]等药材的炮制程度。在中药材的种植环节上，电子鼻系统可以通过分析黄芪在不同产地、生长年限及采收期的影响下产生气味信息，得到最佳产地、生长年限及采收期，为黄芪的种植与采收提供科学依据^[20]。作为一种快速、非破坏性且具有高灵敏度的检测手段，电子鼻技术在中药的快速辨识及生产贮藏领域具有广阔的应用前景。

1.3 电子舌技术的原理及应用

Kaoru等^[21]在上世纪90年代发现了一种经化学成分修饰后的脂质膜能产生类似味蕾细胞形成味觉的作用，基于这一原理开展了味觉传感器的研发，并逐渐形成了电子舌技术的雏形。电子舌系统的基本结构与电子鼻系统相似，包括传感器阵列、信息处理系统和特征数据库。根据传感器材料的不同，电子舌传感器可分为电位传感器、伏安传感器和阻抗谱传感器等，这些传感器通过检测电极电位的变化产生的电流来实现对不同味觉的检测和识别^[22]。目前的味觉传感器可以实现对苦、甜、酸、涩、咸等味觉的识别^[23]。

口尝是“辨状论质”过程中的重要环节之一，电子舌系统可以对中药材的鉴定和剂型开发提供客观的味道评价指标和判断依据，其在中药的快速辨识领域有较大优势。李媛媛等^[24]在对白及其近似饮片天麻、玉竹和黄花白及进行分类辨别时，结合酸、苦、涩、咸等8种味觉信息，采用主成分分析-判别分析法和偏最小二乘-判别分析法建立了二分类和四分类辨识模型，以传统辨识法和HPLC指纹图谱辨识法作为依据，辨识模型的正判率可达到98.51%以上且明显快于传统方法。除此之外，电子舌技术还可用于检测制剂不良味道的掩盖程度^[25]，结合中药常携带

特殊气味的特点,可将电子舌应用于为中药制剂的剂型开发。

1.4 电子耳技术的原理及应用

电子耳系统大致包括声学传感器阵列模块和信息处理识别模块。声学传感器的核心工作原理是将声波转化为电信号或者其他形式的能量,以便进行下一步的处理和分析,根据其工作原理和应用领域的不同,声学传感器可以分为多种类型,包括麦克风传感器^[26]、压电传感器^[27]、超声波传感器^[28]和声纳传感器^[29]等,其广泛应用于物体定位、食品安全检测、疾病诊断等领域。麦克风传感器是最常见的声学传感器,采用电磁或电容原理,当声波使振膜产生振动时会引起电容变化,进而最终产生电压或电流信号^[26]。

电子耳技术在中药质量控制中的应用较少,但有研究发现使用压电传感器可以建立传感器谐振频率变化与药物分配系数(油水分配系数)的联系,并测定了 10 种药物的亲油性^[30]。此外,可将电子耳系统应用于中药制剂制备过程中。通过将声波传感器安装在流化床体上,收集声信号数据并建立多变量统计过程监测模型,可实现对流化床中传统中药颗粒制备过程的监测^[31]。

1.5 电子皮肤技术的原理及应用

电子皮肤技术是一种具备类似真实皮肤感知和反应能力的新型仿生技术,其是柔性电子器件和触觉传感器阵列的集成,能实时感知和响应外界环境的压力、温度、湿度等信号。触觉传感器根据工作原理可分为压阻式、电容式、压电式、电感式和光学式传感器。电子皮肤在医疗健康监测、仿生机器人、虚拟现实等多个领域有广泛应用^[32-33]。

由于炮制方式、采收时间等的影响,中药表面的纹理会呈现出不同的变化。在传统的“辨状论质”中,常常通过触摸的方式对中药的类别及品质进行判断。目前对物体纹理进行识别的电子皮肤大多处于研发阶段^[34-35],可以期待未来具有纹理识别功能的电子皮肤应用于中药材的识别。

1.6 智能感官信息融合技术

“辨状论质”是多种感官信息综合得到的结果,因此将智能感官技术应用于实际场景时,需要考虑将多种感官技术进行信息融合和综合分析。对于成分复杂的中药来说,智能感官技术的综合应用更具有全面性和整体性。

智能感官技术的综合应用主要集中在电子眼、电子鼻和电子舌这 3 种技术。如运用电子鼻技术获得茯苓皮供试品的气味,结合电子舌技术检测茯苓皮的滋味,可以客观且详细地得到茯苓皮丰富的五味属性,再利用主成分分析法和 R 型系统聚类法就可以对不同产地的茯苓皮进行有效的鉴别分类^[36]。由于各智能感官技术使用的传感器对特征变量的响应度有差异,并且各个感知技术对判别模型的贡献值也不同,因此在对多种来源数据进行系统性归纳和总结时需要使用到数据融合技术,根据融合方式的不同可以分为低级、中级和高级融合^[37],选择合适的融合方式可以提高辨识模型的准确性。Gui 等^[38]使用了电子眼、电子鼻、电子舌和近红外光谱方法得到了 4 种来源的相关数据,在对这四源数据使用中级数据融合策略处理后,与单源数据得到的模型相比,四源数据融合可以提高模型对川贝母的真伪识别性能。

2 总结与展望

近年来,随着中医基础理论“整体观念”与现代科技发展的结合,中药材的质量评价已逐渐向非单一化合物的多维整体评价体系发展,其中人工智能感官技术能够通过整合多个传感器的信息形成综合感知和理解的特点与“整体观念”相呼应,有望为中药的多维整体质量评价体系提供思路。

智能感官技术能模仿人的感官,为“辨状论质”提供客观的量化辨识数据。其中电子眼、电子鼻和电子舌技术在中药的种类识别、品质判定、生产监测等方面得到了广泛应用,而电子耳和电子皮肤技术在中药方面的应用较少,但仍具有较大的应用潜力。

此外,根据现有的技术特点,基于人工智能感官技术的质量控制体系仍面临一些问题,需要未来不断发展加以完善:

①智能感官技术使用的设备仍需不断革新。一方面,不同传感器对不同药材的响应不同,不具备通用性的同时在分析过程中易产生损耗,因此需要加强传感器的开发或改良,使其具备经济性;另一方面,传感器识别的信号经过数据处理后与人类的感官感知结果的相关性有待考证,这也是仿生技术发展的必经之路。

②强化样本选择。中药常受到产地、采收时间等影响而导致质量参差不齐，选择具有代表性的样本是建立辨识模型的关键。进行样本选择时可以综合考虑目标药材的地理分布和道地产区、临床使用的经验积累以及药效成分的含量等因素。

③考虑数据处理导致的“失真”。从数据采集到数据分析，再到建立模型的数据处理过程中，难以保证数据的真实性和完整性。有时数据采集过程中的微小偏差也可能导致模型构建失败。随着人工智能技术的进一步发展，引入深度学习等智能化技术将有助于提高辨识模型的准确性和效率。

④顺应“内外结合”趋势。随着现代科学技术的发展，中药质量评价越来越趋于将外观性状与内在成分相结合进行评价。这种“内外结合”的评价方法一方面能够更全面且客观地揭示中药的质量特征，另一方面有利于中药的药理机制和成分变化的进一步研究，提高中药的质量认证及国际市场认可度。

综上所述，基于人工智能感官的质量控制体系符合当今对中药的“整体化”评价需求，能够更加客观、准确、高效地给予中药评价结果。随着研究的进一步推进，可以期待人工智能感官技术给中药行业带来的巨大发展机遇，助力中药现代化。

参考文献

- 1 国家卫生健康委. 《2023年我国卫生健康事业发展统计公报》[EB/OL]. (2024-08-29) [2024-09-01]. <http://www.nhc.gov.cn/guihuaxxs/s3585u/202408/6c037610b3a54f6c8535c515844fae96.shtml>.
- 2 刘天睿, 金艳, 孟虎彪, 等. 论中药“辨状论质”之辨色泽与品质评价的生物学内涵研究[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(19): 4545-4554. [Liu TR, Jin Y, Meng HB, et al. Research on the biological connotation of "distinguishing the appearance and quality" of traditional Chinese medicine[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2020, 45(19): 4545-4554.] DOI: [10.19540/j.cnki.cjmm.20200726.102](https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjmm.20200726.102).
- 3 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, (3): 19-21. <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/Ch9QZXJpb2RyY2FsQ0hJTmV3UzIwMjJkMTA1MTcxMzA0Eg9zemd5Z3kxOTk0MDMwMTYx>

CHNtaWRkcnp.

- 4 王皓南, 田滢琦, 刘大会, 等. 中药“辨状论质”的历史、发展与应用[J]. 中药材, 2021, 44(3): 513-519. [Wang HN, Tian YQ, Liu DH, et al. The history, development and application of "distinguishing symptoms and discussing quality" of medicine[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2021, 44(3): 513-519.] DOI: [10.13863/j.issn10014454.2021.03.001](https://doi.org/10.13863/j.issn10014454.2021.03.001).
- 5 李海洋, 桂新景, 侯富国, 等. 中药材和中药饮片快速鉴定技术研究进展[J]. 分析测试学报, 2023, 42(8): 1026-1038. [Li HY, Gui XJ, Hou FG, et al. Research progress on rapid identification technology of Chinese medicinal materials and Chinese herbal pieces[J]. Journal of Instrument Analysis, 2023, 42(8): 1026-1038.] DOI: [10.19969/j.fxcxb.23051006](https://doi.org/10.19969/j.fxcxb.23051006).
- 6 谢树莹, 周明, 周金海. 基于OpenCV的中药饮片“辨色”识别研究[J]. 时珍国医国药, 2018, 29(2): 510-512. [Xie SY, Zhou M, Zhou JH. Research of OpenCV-based recognition system of herbal decoction pieces[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2018, 29(2): 510-512.] DOI: [10.3969/j.issn.1008-0805.2018.02.092](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-0805.2018.02.092).
- 7 Choi C, Lee GJ, Chang S, et al. Nanomaterial-based artificial vision systems: from bioinspired electronic eyes to in-sensor processing devices[J]. ACS Nano, 2024, 18(2): 1241-1256. DOI: [10.1021/acsnano.3c10181](https://doi.org/10.1021/acsnano.3c10181).
- 8 韦志强. 基于外观性状-内在成分-药效的山楂炮制机制研究[D]. 成都: 成都中医药大学, 2019. DOI: [10.26988/d.cnki.gcdzu.2019.000153](https://doi.org/10.26988/d.cnki.gcdzu.2019.000153).
- 9 薛静, 陈鹏, 朱魁, 等. 计算机图像处理和识别技术在中药研究中的应用进展[J]. 天津药学, 2023, 35(4): 69-73. [Xue J, Chen P, Zhu K, et al. Application progress of computer image processing and recognition technology in traditional Chinese medicine research[J]. Tianjin Pharmacy, 2023, 35(4): 69-73.] DOI: [10.3969/j.issn.1006-5687.2023.04.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-5687.2023.04.017).
- 10 赵贵萍, 邬洁, 陈佳颖, 等. 高光谱遥感技术在药用植物研究中的应用现状分析[J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(22): 239-248. [Zhao GP, Wu J, Chen JY, et al. Analysis of the current application status of hyperspectral remote sensing technology in medicinal plant research[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2022, 28(22): 239-248.] <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTOTAL-ZSFX202222031.htm>.

- 11 丁常宏, 高鹏. 基于动态时间规整算法的药用植物叶片识别方法 [J]. 中医药导报, 2019, 25(11): 63–66. [Ding CH, Gao P. Leaf recognition method of medicinal plants based on dynamic time warping algorithm[J]. Guiding Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacology, 2019, 25(11): 63–66.] DOI: [10.13862/j.cnki.cn43-1446/r.2019.11.017](https://doi.org/10.13862/j.cnki.cn43-1446/r.2019.11.017).
- 12 Cui YX, Liu RX, Lin ZZ, 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. DOI: [10.1038/s41598-019-53210-5](https://doi.org/10.1038/s41598-019-53210-5).
- 13 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. [Liu RX, Hao XJ, Zhang HJ, et al. A rapid identification of authenticity and specifications of Chinese medicine Fritillariae cirrhosae bulbus based on E-eye technology[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2020, 45(14): 3441–3451.] DOI: [10.19540/j.cnki.cjcm.20200601.301](https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcm.20200601.301).
- 14 王君阳, 王吓长. 智能色选机在中药净选生产中的应用 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(6): 140–142. [Wang JY, Wang XC. Application of intelligent color sorter in traditional Chinese medicine impurity separation[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2022, 12(6): 140–142.] DOI: [10.16525/j.cnki.14-1362/n.2022.06.053](https://doi.org/10.16525/j.cnki.14-1362/n.2022.06.053).
- 15 Persaud K, Dodd G. Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose[J]. Nature, 1982, 299(5881): 352–355. DOI: [10.1038/299352a0](https://doi.org/10.1038/299352a0).
- 16 李艳, 谭畅舒, 杜进桥, 等. 仿生嗅觉系统研究进展 [J]. 功能材料与器件学报, 2022, 28(5): 401–408. [Li Y, Tan CS, Du JQ, et al. Progress in research on biomimetic olfactory system[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2022, 28(5): 401–408.] DOI: [10.20027/j.gncq.2022.0047](https://doi.org/10.20027/j.gncq.2022.0047).
- 17 拱健婷, 赵丽莹, 徐东, 等. 电子鼻联合支持向量机建立苦杏仁不同炮制品及走油程度快速判别模型 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(10): 2389–2394. [Gong JT, Zhao LY, Xu D, et al. Discrimination of Armeniacae Semen Amarum from different processed products and various rancidness degrees by electronic nose and support vector machine[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2020, 45(10): 2389–2394.] DOI: [10.19540/j.cnki.cjcm.20200221.302](https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcm.20200221.302).
- 18 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. [Wu XY, Qiu LY, Wang YD, et al. Research on a rapid identification method of processing degree of *Cyperus chinensis* based on intelligent sensory and multi-source information fusion technology[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2023, 54(21): 7007–7016.] DOI: [10.7501/j.issn.0253-2670.2023.21.009](https://doi.org/10.7501/j.issn.0253-2670.2023.21.009).
- 19 陈鹏, 肖晓燕, 梅茜, 等. 基于仿生技术对薏苡仁麸炒过程中色泽气味变化研究 [J]. 中草药, 2022, 53(14): 4285–4297. [Chen P, Xiao XY, Mei X, et al. Study on color and odor changes during frying of coix seed bran based on biomimetic technology[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53(14): 4285–4297.] https://www.nstl.gov.cn/paper_detail.html?id=b6d957708db34b943704cd8dc3d21ed1.
- 20 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. [Yu YT, Zhao YM, Yuan X, et al. Study on the quality evaluation of astragalus from different origins, growth years and harvest periods by Heracles Neo ultra-fast gas-phase electronic nose[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53(5): 1328–1337.] DOI: [10.7501/j.issn.0253-2670.2022.05.006](https://doi.org/10.7501/j.issn.0253-2670.2022.05.006).
- 21 Kaoru S, 山藤馨, Kiyoshi T, et al. Taste Sensor: 日本专利, JP 特開 2001–4583 (P2001–4583A) A[P]. 2001–01–12.
- 22 Lu L, Hu Z, Hu X, et al. Electronic tongue and electronic nose for food quality and safety[J]. Food Res Int, 2022, 162: 112214. DOI: [10.1016/j.foodres.2022.112214](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112214).
- 23 戚淑叶, 毛岳忠, 耿利华, 等. 现有电子舌设备的技术现状与发展趋势 [J]. 药学报, 2023, 58(11): 3165–3172. [Qi SY, Mao YZ, Geng LH, et al. Technical status and development trend of existing electronic tongue equipment[J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2023, 58(11): 3165–3172] DOI: [10.16438/j.0513-4870.2023-0781](https://doi.org/10.16438/j.0513-4870.2023-0781).
- 24 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. [Li YY, Wang YL, Yao J, et al. Research on rapid identification of *Bletilla striata* and its approximate pieces based on electronic tongue[J]. World Science and Technology-Modernization of Traditional

- Chinese Medicine and Materia Medica, 2021, 23(5): 1532–1539.] DOI: [10.11842/wst.20201106003](https://doi.org/10.11842/wst.20201106003).
- 25 Machado JC, Shimizu FM, Ortiz M, et al. Efficient praziquantel encapsulation into polymer microcapsules and taste masking evaluation using an electronic tongue[J]. Bull Chem Soc Jpn, 2018, 91(6): 865–874. DOI: [10.1246/bcsj.20180005](https://doi.org/10.1246/bcsj.20180005).
- 26 张驰. 基于声学传感器阵列的非视域声源目标探测与定位方法研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2022. DOI: [10.27135/d.cnki.ghudu.2021.003430](https://doi.org/10.27135/d.cnki.ghudu.2021.003430).
- 27 黄志浩. 利用压电效应进行水下声能量收集的研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(5): 638–646. [Huang ZH. Research on underwater acoustic energy collection using piezoelectric effect[J]. Digital Ocean and Underwater Warfare, 2023, 6(5): 638–646.] DOI: [10.19838/j.issn.2096-5753.2023.05.015](https://doi.org/10.19838/j.issn.2096-5753.2023.05.015).
- 28 任扬帆, 高国伟. 传感器在脉诊领域的研究与进展 [J]. 制造业自动化, 2023, 45(11): 50–56. [Ren YF, Gao GW. Research and progress of sensors in pulse diagnosis[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(11): 50–56.] DOI: [10.3969/j.issn.1009-0134.2023.11.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-0134.2023.11.011).
- 29 程紫云. 基于人工势场法的机器人路径规划研究 [D]. 河北廊坊: 燕山大学, 2017. DOI: [10.7666/d.D01111453](https://doi.org/10.7666/d.D01111453).
- 30 Xin Li, Li X, Li X, et al. Measurement of drug lipophilicity and pKa using acoustics[J]. Anal Chem, 2012, 84(6): 2609–2613. DOI: [10.1021/ac300087z](https://doi.org/10.1021/ac300087z).
- 31 瞿海斌, 赵洁. 一种流化床制粒过程状态监测系统和方法: 中国专利, CN202010733490.1[P]. 2020-07-27.
- 32 朱盛鼎, 陈冬冬, 雷静桃. 触觉传感器与电子皮肤研究进展 [J]. 电子机械工程, 2022, 38(4): 4–9. [Chen SD, Chen DD, Lei JT. Research progress on tactile sensors and electronic skin[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2022, 38(4): 4–9.] DOI: [10.19659/j.issn.1008-5300.2022.04.002](https://doi.org/10.19659/j.issn.1008-5300.2022.04.002).
- 33 徐娜, 王国栋, 陶亚楠. 柔性可穿戴压阻式压力传感器研究进展 [J]. 化工进展, 2023, 42(10): 5259–5271. [Xu N, Wang GD, Tao YN. Flexible wearable piezoresistive pressure sensors[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(10): 5259–5271.] DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2022-2228](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-2228).
- 34 张守胜, 庄滕飞, 方星星, 等. 条形状精细纹理的触觉感知深度识别阈值 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2024, 64(1): 135–145. [Zhang SS, Zhuang TF, Fang XX, et al. Depth recognition thresholds of tactile perception for fine stripe texture of bar shapes[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2024, 64(1): 135–145.] DOI: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2023.22.033](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2023.22.033).
- 35 李悦. 具有纹理识别功能的压电驻极体复合薄膜电子皮肤 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022. DOI: [10.27157/d.cnki.ghzku.2020.004160](https://doi.org/10.27157/d.cnki.ghzku.2020.004160).
- 36 程磊, 修慧迪, 王文全, 等. 基于智能感官分析技术对茯苓皮五味辨识及产地鉴别的研究 [J]. 辽宁中医药大学学报, 2024, 26(4): 12–16. [Cheng L, Xiu HD, Wang WQ, et al. Study on identifying the five tastes of fulingpi (Poriae cutis) from different producing areas based on intelligent sensory analytic technologies[J]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2024, 26(4): 12–16.] DOI: [10.13194/j.issn.1673-842x.2024.04.003](https://doi.org/10.13194/j.issn.1673-842x.2024.04.003).
- 37 李涵, 谢梦迪, 桂新景. 多源信息融合技术在中药质量评价中的应用研究进展 [J]. 药学学报, 2023, 58(10): 2835–2852. [Li H, Xie MD, Gui XJ. Research progress of multi-source information fusion technology in quality evaluation of traditional Chinese medicine[J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2023, 58(10): 2835–2852.] DOI: [10.16438/j.05134870.2023-0195](https://doi.org/10.16438/j.05134870.2023-0195).
- 38 Gui XJ, 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. DOI: [10.3389/fchem.2023.1179039](https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1179039).

收稿日期: 2024 年 09 月 02 日 修回日期: 2024 年 11 月 09 日

本文编辑: 钟巧妮 李 阳