

综述(239~248)

电子传感技术在中药材及农产品分析领域的应用研究进展

冯绘敏^{1,2}, 侯一哲^{1,2}, 黄天赐³, 李元祥⁴, 李正^{1,2}, 李文龙^{1,2}

1. 天津中医药大学中药制药工程学院, 天津 300193;
2. 省部共建组分中药国家重点实验室, 天津 301617;
3. 湖北金贵中药饮片有限公司, 湖北 武汉 430051;
4. 怀化学院 化学与材料工程学院, 湖南 怀化 418008)

摘要: 电子传感技术以其信号易于获得、信息丰富、能够从整体上表征样品性质等优势,近年来在中药材及农产品分析领域得到日益广泛的应用。对常用的电子传感技术电子眼、电子鼻、电子舌等进行介绍,对上述技术在中药、烟叶、食品、饮料等领域的应用报道进行综述,并对其相关的多变量数据分析技术、多源数据融合技术、品牌保护技术及未来仪器研发进行展望,以期电子传感技术在中药材及农产品领域的推广应用提供借鉴。

关键词: 电子传感技术; 中药材; 农产品; 多源数据融合技术; 品牌保护技术

中图分类号: O657.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-3757(2020)04-0239-10

DOI: 10.16495/j.1006-3757.2020.04.003

Application and Research Progress in Electronic Sensing Technology in Traditional Chinese Medicine and Agricultural Products

FENG Hui-min^{1,2}, HOU Yi-zhe^{1,2}, HUANG Tian-ci³, LI Yuan-xiang⁴, LI Zheng^{1,2}, LI Wen-long^{1,2}

1. College of Traditional Chinese Medicine and Pharmaceutical Engineering, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 300193, China;
2. State Key Laboratory of Component-Based Chinese Medicine, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China;
3. Hubei Jingui Chinese Herbal Medicine Co. Ltd., Wuhan 430051, China;
4. College of Chemistry and Materials Engineering, Huaihua University, Huaihua 418008, China)

Abstract: Electronic sensing technology has been widely used in the field of traditional Chinese medicine and agricultural products in recent years because of its advantages such as easy access to signal, rich information and overall characterization of sample properties. In this paper, the commonly used electronic sensing technologies, such as electronic eye, electronic nose and electronic tongue, are introduced. The application reports of the above mentioned technologies in the fields of natural products, such as traditional Chinese medicine, tobacco, food and beverage, are reviewed. The related multivariate data analysis, multi-source data fusion technology, brand protection technology and future instrument research

收稿日期: 2020-11-20; 修订日期: 2020-12-17.

基金项目: 武汉市科技计划项目(2018060402011258) 天津市科技计划项目(20ZYJJC00090) 资助

作者简介: 冯绘敏(1996-) 女 硕士研究生,主要从事中药质量标准制定方法研究

通信作者: 李文龙(1980-) 男 副研究员,博士生导师,主要从事中药质量控制技术研究 E-mail: wshlwl@tjutc.edu.cn.

and development are prospected. The purpose is to provide reference for the application of electronic sensing technology in the field of natural products analysis.

Key words: electronic sensing technology; traditional Chinese medicine; agricultural products; multi-source data fusion technology; brand protection technology

电子传感技术是指利用不同物质在不同电化学反应中所获得的不同信号对其进行分析的一类技术,常用的电子传感技术包括电子眼、电子鼻、电子舌、电子耳以及电子皮肤等^[1]。相对于传统的电化分析技术而言,这类技术可对多种形态的样品进行多种模式的检测,可同时采用多种电极对样品的颜色、气味、味道、触觉等性质进行全面地反映。该类技术模仿人的感官系统,对人体所接触物质的感受进行数字化表征并进行多变量数据分析,从而对样品的真伪优劣、加工工艺、地域属性等特点进行整体分析,是一类仿生分析技术,尤其适合中药材及农产品的分析。

中药材及农产品一般具有成分复杂的特点,采用个别或多个化学成分的含量难以对其整体质量进行客观评价,并形成饱受争议的“唯成分论”。相关科学工作者为弥补基于化学成分定量分析的质量控制技术体系的不足,尝试采用多种基于整体性质的描述方法对中药材及农产品样品进行全面表征,最为常用的是光谱及其成像技术,包括近红外光谱^[2-3]、中红外光谱^[4-5]、太赫兹^[6-7]、拉曼光谱^[8-9]及其成像技术等。这类光谱技术具有操作方便、信息丰富等优势,但数据的可解释性相对较差,往往难以对其分析结果进行验证和阐释。核磁共振谱^[10-11]、质谱^[12-13]及其成像技术相对于上述光谱分析技术而言,具有较好的可解释性,但又因其价格昂贵、操作复杂等原因,推广应用受到限制。而电子传感技术则可有效弥补上述技术的不足,兼具了信息丰富和可解释性强的优点,非常适合中药材及农产品的分析。

近年来,电子传感技术受到了相关科研工作者越来越多的关注,在中药、烟叶、茶叶、饮料、食品等领域得到了日益增多的推广应用,但在仪器研发、数据分析、应用场景等方面仍存在着一些亟待解决的问题。本文对电子传感技术的技术原理及其在中药材及农产品分析领域的应用报道进行综述,对这类技术存在的问题及其应用前景进行分析展望,以期相关的研究提供参考,从而推动这类技术在中药材及农产品分析领域的广泛应用。

1 常用电子传感技术及其分析原理

1.1 电子眼

电子眼(E-eye)属于一种视觉分析仪。该技术通过模拟人眼对样品的感知,分析样品的整体颜色,提供稳定的图像攫取环境,保证图像在相同条件下进行分析,使样品信息具有可比性且简单快速、无需预处理^[14]。该技术尤其适合以色泽作为评价标准的研究对象,近年来,在水果成熟度鉴别、肉类新鲜度评价、中药材真伪鉴定、质量等级区分、以及中药炮制等领域得到探索性应用。目前市场上电子眼装置主要有色密度计、色度计、分光光度计、视频、Vitapan 3D-Master 比色板和电脑比色仪等^[15]。

1.2 电子鼻

电子鼻(E-nose)技术模拟人的嗅觉器官,其工作原理与嗅觉形成相似,是人类嗅觉的延伸,具有人工智能的特点^[16]。E-nose 分析系统由气敏传感器、信号处理系统和模式识别系统 3 部分组成。所用的气敏传感器主要包括石英晶体微秤(quartz crystal microbalance, QCM)型、金属氧化物半导体(metal oxide semiconductor, MOS)电导型、表面声波(surface acoustic wave, SAW)型、导电聚合物(conductive polymer, CP)电导型、MOS 场效应晶体管(MOS field effect transistor, MOSFET)型等^[17]。电子鼻得到的信息代表了样品中全部挥发物的整体情况,能够充分反映样品的气味信息。世界第一台商业化电子鼻诞生于 1994 年,目前代表性电子鼻产品包括法国 Alpha-MOS 的桌面型 FOX 系统、美国加利福尼亚 Cyranosciences 公司的 Cyranose 系统等。目前主要应用于水果成熟度、肉类新鲜度、酒类特征气味表征以及酒龄鉴定、不同基源、产地、炮制加工方法的中药材的分类识别等领域^[18]。

1.3 电子舌

电子舌(E-tongue)是一类智能味觉仿生系统。该系统通过模拟人的舌头对待测样品进行分析、识别和判断,用多元统计方法对得到的数据进行处理,快速地反映出样品整体的质量信息,实现对样品的识别和分类^[19-21]。该技术采用同人类舌头味觉细胞

工作原理相类似的人工脂膜传感器技术,可以客观数字化的评价样品的苦味、涩味、酸味、咸味、鲜味、甜味等基本味觉感观指标,同时还可以分析苦、涩、鲜的回味等参数。主要由味觉传感器阵列、信号采集系统和模式识别系统3部分组成。信号采集系统模拟神经感觉系统采集,被激发的信号传递到电脑模式识别系统中。模式识别系统即发挥生物系统中大脑的作用对信号进行特征提取,建立模式识别模型,并对不同被测溶液进行区分辨识。味觉传感器阵列是电子舌系统的核心组成部分,由传感器阵列工作原理的不同可分为电位型、阻抗谱型、光寻址型、伏安型、物理型以及生物传感器型等多个种类。目前该技术主要应用于不同食品的味觉区分、水果成熟度的检测与区分、果蔬、奶制品、酒类、香精香料、肉制品等各类食品的等级品质评价、各类食品的掺假及腐败类型的研究与区别鉴定、各类食品加工工艺不同对味觉感官产生的影响研究、果蔬类食品不同产地的味觉区别研究、肉蛋禽类食品由于饲养方法、饲料成分不同等造成的食品味觉变化的研究、以及其他各种通过食品味觉来进行品质分析的研究试验,例如中药水煎液的掩味效果评价等方面。

事实上,上述电子传感设备经常联合使用,以期对中药材及农产品的色泽气味进行全面表征,有时还可以与光谱、质谱等信息进行融合,从而阐释中药材及农产品的色泽气味与具体物质组成的联系,发现特征呈示物质,从而确定质量标志物质,进行更为合理的质量控制^[22-24]。

2 应用对象

2.1 中药材及炮制研究

气、味是中药重要的性状特征,不同的中药也往往具有特殊的气、味,中药气味与所含化学成分相关,能直接反应药物内在本质^[25]。电子眼、电子鼻和电子舌技术是近年来兴起的快速分析技术,其中电子眼能够反映样品的色泽和颜色变化信息,电子鼻主要检测样品中易挥发成分,而电子舌则主要用于样品中呈味物质的检测。电子鼻技术模拟人类嗅觉对气味进行分析,该技术具客观、准确、快捷、重复性好的特点。而电子舌模拟人的5种基本味觉:酸、甜、苦、辣、咸,能对不同气味的药材进行有效的识别。电子鼻、电子舌的电子传感信号敏锐^[26-28],二者的结合能够充分体现中药“四气五味”的特点。

张晓等^[29]采用电子眼(视觉分析仪)分析技术,

基于穿心莲药材粉末颜色,探讨电子眼用于穿心莲药材质量评价的适用性。结果显示穿心莲内酯、脱水穿心莲内酯、1,4-去氧穿心莲内酯和新穿心莲内酯成分的总含量均与明度值呈极显著负相关,表明穿心莲的颜色在某种程度上与其中的化学成分含量具有相关性,可对不同商品规格的穿心莲药材质量进行评价。刘瑞新等^[30]收集了80批川贝母样品,进行了传统经验辨识和2015版《中国药典》规定检查项检测,再利用电子眼采集其光学数据并借助化学计量学方法建立了4种真伪及商品规格辨识模型。经留一法交叉验证真伪辨识模型准确率和商品规格辨识模型准确率大都在90%以上,因此电子眼技术可用于川贝母质量快速辨识。王学勇等^[31]研发了一种对鹿茸的真伪进行鉴别的电子鼻技术,可实现对市售马鹿、驯鹿、梅花鹿等不同类型鹿茸的有效、快速鉴别,并且可对药材、饮片、粉末等多种形态的样品进行准确识别。该方法客观、快速、无需复杂的样品前处理过程,可为其他类中药材的鉴定提供参考。杜瑞超等^[32]对22种常用中药的水煎液进行电子舌检测,并对检测数据进行主成分分析,结果表明:22种中药按照酸、苦、甜、咸的规律聚类分布,得到的4类味觉特征的雷达图形状存在较大差别,可以对不同的中药滋味特征进行精准辨识。段金芳等^[33]建立了山茱萸药材及饮片的quantitative analysis of multi-components by single marker(QAMS)测定方法,并将此法与电子眼和电子舌技术相结合,优选山茱萸最佳蒸制时间。研究采用QAMS法测定没食子酸、5-羟甲基糠醛(5-HMF)、莫诺苷、山茱萸新苷、马钱苷的含量,运用电子眼和电子舌技术进行颜色与滋味测定,所得数据进行主成分分析。综合分析了3种方法所得结果,对山茱萸最佳蒸制时间进行优选,为解决中药炮制工艺缺少合适的终点判断方法提供了一种新的技术。黄特辉等^[34]建立了太子参的电子鼻检测方法,对不同产地加工、不同产地的太子参气味进行检测,依据获得的客观化气味信息,结合多元统计分析方法对太子参样品进行区判别。结果表明,太子参烫干品与晒干品的气味差异较大,采用判别因子分析法可对不同产地的太子参进行准确区分,为中药材质量鉴定、中药的气味定量表征以及产地、加工方式区分提供一种新的技术手段。文献[35-37]报道了采用电子传感技术,结合相关的化学计量学算法,实现了亚洲人参、高丽参和西洋参的准确区分,为贵重药材的快速识别提供了一种新

的替代技术。

2.2 特色农产品

由于原料产地差异和加工工艺的不同,世界范围内产生了很多具有地域特色的农产品,如烟叶、茶叶、蜂蜜、咖啡、葡萄酒等,这类产品难以用单一指标进行质量优劣评价和真伪鉴定,一般需要综合采用基于整体性质的现代分析技术对其进行全面表征,电子传感器模拟人类的视觉、嗅觉、味觉等多种感官体验,对于这类产品的分析具有独特的优势,近年来也得到日益增多的应用。

Brudzewski 等^[38]采用电子鼻技术对 11 个品牌的烟草进行信息采集,采用支持向量机算法建立了判别分析模型,可实现对烟草品牌的准确识别。Zhang 等^[39]提出了一种基于近红外光谱和电子鼻融合数据的烟叶年份判别的支向量机分类模型。利用遗传算法来进行了变量选择,所得到的烟叶判别模型在训练集和独立测试集上都具有较高的准确率。建立的烟叶判别分析模型的建模准确率达到 100%,留一法准确率达到 98.55%,对未知样本的预报准确率为 95%。颜色和花源是影响蜂蜜市场价格的关键因素。Sousa 等^[40]采用电子舌技术对 6 种花源的蜂蜜 (Castanea sp., Echium sp., Erica sp., Lavandula sp., Prunus sp., Rubus sp.) 进行了准确鉴定,留一法交叉验证准确率可达 100%,表明电子鼻技术可作为一种蜂蜜质量鉴别的实验室技术进行推广应用。Oroian 等^[41]采用基于伏安法原理的电子舌技术对蜂蜜的 5 种花源 (acacia, sunflower, tilia, honeydew, polyfloral) 进行鉴定,采用主成分分析 (principal component analysis, PCA)、线性判别分析 (linear discriminant analysis, LDA) 等化学计量学算法进行判别分析,结果表明,金银电极相对于玻璃电极而言,结果更为准确,电化学数据与蜂蜜的 pH 值、游离酸度和电导率等理化性质具有较好的相关性是花源鉴定的物理依据。

在这类产品中,茶叶相关的研究较多,主要原因是茶叶的品质综合体现在所谓的“色香味”上,而电子传感技术可以以一种较为直观的方式将人的感官体验数字化。吴瑞梅等^[42]综合采用化学分析、近红外光谱、电子舌、机器视觉技术对江苏名茶“碧螺春”的外形、香气、滋味进行全面表征,结果表明,计算机视觉系统能够较好地表征叶底感官品质,电子舌则能够更好地表征绿茶滋味的感官品质。吕海鹏等^[43]分别采用电子鼻和电子舌技术对普洱茶的香

味成分和滋味成分进行分析,结果表明,电子鼻技术能够在一定程度上将不同香气感官品质得分的普洱茶样品进行分类,普洱茶样品在主成分散点图上呈现一定的规律性。电子舌技术则有效地将不同滋味品质得分的普洱茶样品加以区分,也能较好地区分不同茶厂生产的普洱茶,但对不同等级的样品分辨能力尚待提高。Chosh 等^[44]采用电子鼻技术结合相关的化学计量学算法,建立定量校正模型,实现了黑茶中茶黄素含量的快速测定。Banerjee 等^[45]研究发现,相对于单独使用一种电子传感器所得到的分析结果而言,综合采用电子鼻和电子舌技术可以对黑茶品质进行更为准确地评价。Yang 等^[46]采用电子鼻技术对富含香豆素的日本绿茶进行鉴别,并对其特征香味进行表征,为特色绿茶的鉴别表征提供了一种新的思路。

2.3 水果

电子传感技术在水果成熟度的快速鉴别方面的应用报道相对较多,也有一些根据气味特色进行产地鉴别方面的报道。Zhang 等^[47]采用电子鼻和气相色谱-质谱联用技术,对葡萄培养基上培养的 3 株碳曲霉中赭曲霉毒素 A 的识别和预测进行了研究,并结合偏最小二乘判别分析 (partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA) 和偏最小二乘回归 (partial least squares regression, PLSR) 分析。这些结果表明,电子鼻技术是葡萄培养基鉴别和预测碳青霉属菌株遗传转化的一种可靠方法。Orlandi 等^[48-49]利用电子眼和电子舌技术,通过使用不同数据融合策略的环境工程和环境工程传感系统获得的补充信息,以开发一种能够快速且容易地量化用于评估葡萄成熟度的物理化学参数的集成设备。Centonze 等^[50]建立了一种基于质谱联用化学计量学的顶空固相微萃取-电子鼻 (headspace-solid phase microextraction/mass spectrometry-E-nose, HS-SPME/MS-E-nose) 非靶向方法,用于鉴别 3 个产地 (意大利、南非和西班牙) 的柑橘。该方法结合多元统计分析提供了一个有效的和快速的工具,以鉴定柑橘的地理来源。惠国华等^[51-52]建立了利用电子鼻检测芒果新鲜度和番荔枝成熟度的方法,该方法简便、迅速、准确度较高。

2.4 饮料及食品

电子传感技术在饮料及食品领域应用报道也较为常见,其中最为重要的领域是酒类特征参数的评估及肉类新鲜度鉴别,因为这些性质直接和气味相

关,采用电子传感技术所得到的分析结果也可以专家评价的方式得以验证,近年来已成为研究的热点。

Kang 等^[53]应用电子舌数据结合 partial least squares regression (PLSR) 算法建立了感官评价和液相色谱-质谱/质谱预测模型,对9种不同氨基酸和脂肪酸组成的大米酿造的韩国米酒进行了鉴别。结果表明,除了苦味,电子舌可以很好地预测大多数感官属性。Rodriguez-Mendez 等^[54]利用电子鼻和电子舌评估红酒的氧暴露水平和多酚含量,提供了关于红酒气相和液相化学成分的信息。Cetó 等^[55]研究了电子舌在葡萄酒成熟过程中使用的桶类型的识别应用,分类率为100%,这一补充信息提高了预测氧相关参数、酚含量和颜色参数值的能力。Šuklje^[56]等采用 headspace - solid phase microextraction - gas chromatography×gas chromatography - time - of - flight - mass spectrometry (HS-SPME-GC×GC-TOFMS) 研究了葡萄成熟度对葡萄酒挥发性的影响,研究证明了 Shiraz 葡萄挥发性成分在相同的中期气候中的共同变化。但在葡萄的后熟阶段,没有观察到糖浓度和葡萄酒挥发性成分变化之间的直接联系。Cetó 等^[57]通过伏安生物电子舌对 rosé cava 酒中酚类化合物进行了分析,在(生物)传感器响应和与总酚含量相关的3个不同经典指标(即 I_{280} 、 I_{320} 和 Folin - Ciocalteu 指标)以及与其他特定酚特征相关的两个其他指标(即总鞣质和花青素含量)之间建立了相关性。

Huang 等^[58]利用集成近红外光谱(integrated near infrared spectroscopy, NIRS)、计算机视觉(computer vision, CV)和电子鼻技术对猪肉中的 total volatile basic nitrogen (TVB-N) 含量进行了测定,采用主成分分析法对3个不同传感器数据的特征变量进行数据融合,结果证明,多种技术的数据融合可以显著提高 TVB-N 的预测性能。Kilgannon 等^[59]通过 SPME-GC-MS (solid phase microextraction - gas chromatography - mass spectrometry) 比较了经过不同处理的烤牛肉样品中的挥发性有机化合物,研究发现,合适的温度可以加快牛肉的老化速度。沈立荣等^[60]建立了一种基于电子鼻技术对金华火腿进行分级与鉴别的方法,该方法操作方便,结果准确客观,可替代传统感官分级。周宇芳等^[61]采用电子鼻检测带鱼新鲜度,操作简便、测量结果可靠、测量过程中传感器基线稳定。

3 研究展望

3.1 数据分析方法

目前,电子传感数据的分析方法与光谱分析类似,主要包括定性分析和定量分析两类。其中定性分析主要包括无监督的聚类分析算法和有监督的判别分析算法,以及指纹图谱相似度评价算法用于评价样品的批次一致性。定量算法主要包括多源线性回归(multiple source linear regression, MLR)、主成分回归(principal component regression, PCR)、PLSR、人工神经网络(artificial neural network, ANN)、支持向量机回归(support vector machine regression, SVR)等算法,利用电子传感器所获取的多元数据对特定理化性质和生物活性值进行回归。相对于光谱、质谱数据而言,电子传感数据变量数相对较少,但各变量之间相互独立,互补性很强,需要针对这一特点,研发更为合适的多变量数据分析技术。机器学习和深度学习技术有望在此领域得到广泛应用^[62]。

3.2 多源数据融合技术

所谓多源数据融合技术,是指对来自多种分析仪器的信号进行多级别、多方面、多层次的处理,在一定准则下加以分析、综合,产生新的有意义的信息,弥补单一来源分析信号信息量不足的缺点,进而完成所需的决策和评估任务而进行的信息处理技术。数据融合方法可分为高、中、低3个水平。高水平数据融合对不同数据矩阵分别分析,得到结果后将结果进行融合,属于决策水平的融合方法。中水平和低水平数据融合属于变量水平的融合方法。其中低水平数据融合(low-level data fusion, LLDF)将原始数据矩阵进行组合,属于像素级的融合方法。中水平数据融合(mid-level data fusion, MLDF)将不同来源的数据矩阵分别进行合适的预处理,以便减弱不同非目标因素的影响,再将经预处理后的数据矩阵进行组合。联合使用电子传感技术,充分利用各仪器的优势,通过对不同产地不同品种及真伪样品的信号采集,采用多源数据融合技术分别建立产地识别、种属识别和真伪识别模型,可实现中药材及农产品的快速鉴定。近年来,多源数据融合技术得到了不断发展,其中化学计量学方法更是发展迅速,很多算法被开发成软件应用,大大简化了分析的过程。尤其是在中药领域,相比其他鉴定方法,多源数据融合技术有着显著的优点,如鉴定结果可行度高、

快速、易行、专属性强、不破坏样品、无污染等。该技术不仅可以鉴别中药真伪和判别中药产地来源,同时还可以评价中药质量。鉴于多源数据融合技术的优点,对于基源问题突出的中药材可建立专属数据库,通过不断更新完善样品数据,不断提高鉴别模型的预测能力,有助于提高中药基源鉴定的准确性^[63-66]。

3.3 品牌保护技术

对于中药材及农产品而言,大多数情况下,难以用个别指标评价其质量优劣。一个优质品牌的形成往往依赖于长期的消费体验。一些名优农产品或中药材,如果缺少必要的品牌保护技术,在市场上经常会出现伪品泛滥、质价脱钩的现象。在此背景下,相关科学工作者探讨研发相关的品牌保护技术,对名优特产、道地药材、地理标志农产品等品牌进行特征性鉴定。电子传感技术模拟人类感知系统,能以最为接近人类感官体验的方式,对这些名优品牌农产品或加工产品的特征信息进行全面反映,从而与同类竞品进行区分,起到品牌保护的目的。可以预计,在市场竞争日益激烈的情况下,这种品牌保护技术必将得到更为广泛的推广应用^[67]。

3.4 仪器研发

毋庸讳言,当前电子传感技术距离人类感知系统尚有很大差距,上市仪器也往往存在着受环境影响大、灵敏度低、重现性差、数据分析困难等缺陷。这一问题的解决,需要研发更为精密的仪器和计算功能更为强大的专用数据分析软件。仪器研发方面,需要探寻更为灵敏的传感电极,以及更为稳定的检测器,以及形成标准化的信号采集程序,确保能在相同条件下得到更具可比性的样品信号。数据分析软件的研发,则需要结合具体电子传感技术的特点,集成变量选择、信号预处理、模型优化与验证以及模型的更新、转移与共享等功能,减少复杂耗时的数据分析环节,更加方便用户的操作使用,给出更为明确的分析结果,从而实现现场分析、快速分析、远程分析等功能。

4 结论

电子传感技术因其测试方便、信息丰富、结果直观、可解释性强等优势,近年来在中药材及农产品分析领域受到了广大科研工作者的关注,该技术在特色农产品的产地鉴别、水果成熟度判别、肉类新鲜度判别、中药材真伪产地鉴别等领域得到广泛应

用,但尚需解决仪器不够稳定、缺少符合电子传感数据特点的化学计量学算法、专用设备研发等关键技术问题,可以预见,随着上述瓶颈问题的解决,电子传感技术必将在中药材及农产品分析领域得到更为广泛的应用。

参考文献:

- [1] 刘瑞新,陈鹏举,李学林,吴子丹,高晓洁,陈小菲,张璐,王青晓,李振国. 人工智能感官: 药学领域的新技术[J]. 药物分析杂志, 2017, 37(4): 559-567. [Liu Rui-xin, Chen Peng-ju, Li Xue-lin, Wu Zi-dan, Gao Xiao-jie, Chen Xiao-fei, Zhang Lu, Wang Qing-xiao, Li Zhen-guo. Artificial intelligence senses: new technology in pharmaceutical field [J]. Journal of Pharmaceutical Analysis, 2017, 37(4): 559-567.]
- [2] Pasquini C. Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives - a review [J]. Analytica Chimica Acta, 2018, 1026: 1-29.
- [3] Nie P, Zhang J, Feng X, Yu C. Classification of hybrid seeds using near-infrared hyperspectral imaging technology combined with deep learning [J]. Sensors & Actuators: B Chemical, 2019, 296: 1-12.
- [4] Sun W J, Zhang X, Zhang Z Y, Zhu R H. Data fusion of near-infrared and mid-infrared spectra for identification of rhubarb [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2017, 171: 72-79.
- [5] Mandrile L, Barbosa-Pereira L, Sorensen K M, Giovannozzi A M, Zeppa G, Engelsen S B, Rossi A M. Authentication of cocoa bean shells by near- and mid-infrared spectroscopy and inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2019, 292: 47-57.
- [6] 蒋玉英,葛宏义,廉飞宇,张元,夏善红. 基于 THz 技术的农产品品质无损检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(8): 2047-2052. [Jiang Yu-ying, Ge Hong-yi, Lian Fei-yu, Zhang Yuan, Xia Shan-hong. Study on nondestructive detection of agricultural product quality based on THz technology [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(8): 2047-2052.]
- [7] Gowen A A, O'Sullivan C, O'Donnell C P. Terahertz time domain spectroscopy and imaging: Emerging techniques for food process monitoring and quality control [J]. Trends in Food Science & Technology,

- 2012, 25: 40-46.
- [8] Özbacı B , Boyacı I H , Topcu A , Kadılar C , Tamer U. Rapid analysis of sugars in honey by processing Raman spectrum using chemometric methods and artificial neural networks [J]. *Food Chemistry* , 2013 , 136: 1444-1452.
- [9] Strzemiński M , Wójcicki -Kosior M , Sowa I , Agacka -Moldoch M , Draczkowski P , Matusiuk D , Kurach L , Kocjan R , Dresler S. Application of Raman spectroscopy for direct analysis of *Carlina acanthifolia* subsp. *utzka* root essential oil [J]. *Talanta* , 2017 , 174: 633-637.
- [10] Dais P , Hatzakis E. Quality assessment and authentication of virgin olive oil by NMR spectroscopy: A critical review [J]. *Analytica Chimica Acta* , 2013 , 765: 1-27.
- [11] Freitas J V B , Filho E G A , Silva L M A , Zocolo G J , Brito E S D , Gramosa N V. Chemometric analysis of NMR and GC datasets for chemotype characterization of essential oils from different species of *Ocimum* [J]. *Talanta* , 2018 , 180: 329-336.
- [12] Yan B J , Chen T , Xu Z L , Qu H B. Rapid process development of chromatographic process using direct analysis in real time mass spectrometry as a process analytical technology tool [J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* , 2014 , 94: 106-110.
- [13] Wang L , Zeng S , Chen T , Qu H B. Direct analysis in real time mass spectrometry , a process analytical technology tool for real - time process monitoring in botanical drug manufacturing [J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* , 2014 , 91: 202-209.
- [14] Hwa H J , Jun P Y , Tae K H , Kyun O S. Identification of new , old and mixed brown rice using freshness and an electronic eye [J]. *Korean Journal of Crop Science* , 2018 , 63(2) : 98-105.
- [15] 张慧慧,孙灵根,黄学思,吴纯洁. “电子眼”在中药炮制中应用构想 [C]. 中华中医药学会四大怀药与地道药材研究论坛暨中药炮制分会第二届第五次学术会议与第三届会员代表大会论文集, 2007, 30-36. [Zhang Hui-hui, Sun Ling-gen, Huang Xue-si, Wu Chun-jie. The application of "electronic eye" in the processing of traditional Chinese medicine [C]. The Fifth Academic Conference and the Third Member Congress of the Fourth Huaiyao and Authentic Medicinal Materials Research Forum of the Chinese Society of Traditional Chinese Medicine, 2007, 30-36.]
- [16] Peris M , Escuder-Gilabert L. A 21st century technique for food control: Electronic noses [J]. *Analytica Chimica Acta* , 2009 , 638: 1-15.
- [17] Xiong Y , Xiao X , Yang X , Xiong Y , Xiao X H , Yang X Y , Yan D , Zhang C , Zou H Q , Lin H , Peng L , Xiao X , Yan Y H. Quality control of *Lonicera japonica* stored for different months by electronic nose [J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* , 2014 , 91: 68-72.
- [18] Campos I , Bataller R , Armero R , Gandia J M , Soto J , Martínez-Muñoz Ramón , Gil -Sánchez L. Monitoring grape ripeness using a voltammetric electronic tongue [J]. *Food Research International* , 2013 , 54: 1369-1375.
- [19] Cetó X , Pérez S. Voltammetric electronic tongue for vinegar fingerprinting [J]. *Talanta* , 2020 , 219: 1-8.
- [20] Rodrigues N , Marx Í M G , Casal S , Dias Luís G , Veloso Ana C A , Pereira José A , Peres António M. Application of an electronic tongue as a single-run tool for olive oils ' physicochemical and sensory simultaneous assessment [J]. *Talanta* , 2019 , 197: 363-373.
- [21] Morais de T C B , D R Rodrigues , Carvalho Polari Souto de U T , Lemos S G. A simple voltammetric electronic tongue for the analysis of coffee adulterations [J]. *Food Chemistry* , 2019 , 273: 31-38.
- [22] Xu M , Wang J , Zhu L. The qualitative and quantitative assessment of tea quality based on E-nose , E-tongue and E-eye combined with chemometrics [J]. *Food Chemistry* , 2019 , 289: 482-489.
- [23] Orlandi G , Calvini R , Foca G , Pigani L , Simone G V , Ulrici A. Data fusion of electronic eye and electronic tongue signals to monitor grape ripening [J]. *Talanta* , 2019 , 195: 181-189.
- [24] Haddi Z , Mabrouk S , Bougrini M , Tahri K , Sghaier K , Barhoumi H , Bari N E , Maaref A , Jaffrezic -Renault N , Bouchikhi B. E - nose and E - tongue combination for improved recognition of fruit juice samples [J]. *Food Chemistry* , 2014 , 150: 246-253.
- [25] 许舜军,杨柳,谢培山,林伟基. 中药气味鉴别的研究现状与展 [J]. *中药新药与临床药理* , 2011 , 22 (2) : 228-231. [Xu Shun-jun, Yang Liu, Xie Pei-shan, Lin Wei-ji. Research status and development of odor identification of traditional Chinese medicine [J]. *New Chinese Medicine and Clinical Pharmacology* , 2011 , 22 (2) : 228-231.]

- [26] 黎量,杨诗龙,胥敏,钟恋,汪云伟,艾莉. 基于电子鼻、电子舌技术的山楂气、味鉴别[J]. 中国实验方剂学杂志, 2015, 21(5): 99-102. [Li Liang, Yang Shi-long, Xu Min, Zhong Lian, Wang Yun-wei, Ai Li. Gas and taste identification of Hawthorn based on electronic nose and tongue technology [J]. Chinese Journal of Experimental Prescription, 2015, 21(5): 99-102.]
- [27] 邹慧琴,刘勇,陶欧,林辉,苏玉贞,林相龙,闫永红. 电子鼻 MOS 传感器阵列优化及其在中药材快速鉴别中的应用[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(2): 161-166. [Zou Hui-qin, Liu Yong, Tao ou, Lin Hui, Su Yu-zhen, Lin Xiang-long, Yan Yong-hong. Optimization of electronic nose MOS sensor array and its application in rapid identification of traditional Chinese medicine [J]. Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine, 2013, 38(2): 161-166.]
- [28] 韩玉. 电子鼻在苍术质量评价中的应用研究[D]. 北京中医药大学, 2011. [Han Yu. Application of electronic nose in quality evaluation of *Atractylodes lancea* [D]. Beijing University of Traditional Chinese Medicine, 2011.]
- [29] 张晓,吴宏伟,于现阔,鲁亚奇,罗寒燕,杨洪军,许梦莹,郭日新,李志勇,唐力英,王祝举. 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. [Zhang Xiao, Wu Hong-wei, Yu Xian-kuo, Lu Ya-qi, Luo Han-yan, Yang Hong-jun, Xu Meng-ying, Guo Ri-xin, Li Zhi-yong, Tang Li-ying, Wang Zhu-ju. Quality evaluation of *Andrographis paniculata* based on electronic eye technology [J]. Chinese Journal of Experimental Prescription, 2019, 25(1): 189-195.]
- [30] 刘瑞新,郝小佳,张慧杰,张璐,桂新景,林兆洲,罗崇念,田亮玉,王艳丽,冯文豪,姚静,李学林. 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 Rui-xin, Hao Xiao-jia, Zhang Hui-jie, Zhang Lu, Gui Xin-jing, Lin Zhao-zhou, Luo Chong-nian, Tian Liang-yu, Wang Yan-li, Feng Wen-hao, Yao Jing, Li Xue-lin. Rapid identification of the authenticity and specification of *Fritillaria cirrhosa* based on electronic eye technology [J]. Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine, 2020, 45(14): 3441-3451.]
- [31] 王学勇,廖采丽,黄璐琦,吴浩忠,刘春生,杨瑶珺. 一种基于电子鼻技术的鹿茸“真伪”快速鉴定方法: CN104251873A [P]. 2014-12-31. [Wang Xue-yong, Liao Cai-li, Huang Lu-qi, Wu Hao-zhong, Liu Chun-sheng, Yang Yao-jun. A rapid identification method of velvet antler based on electronic nose technology: CN104251873A [P]. 2014-12-31.]
- [32] 杜瑞超,王俊杰,吴飞,冯怡,徐德生,洪燕龙,阮克锋. 电子舌对中药滋味的区分辨识[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(2): 154-160. [Du Rui-chao, Wang You-jie, Wu Fei, Feng Yi, Xu De-sheng, Hong Yan-long, Ruan Ke-feng. Identification of taste of traditional Chinese medicine by electronic tongue [J]. Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine, 2013, 38(2): 154-160.]
- [33] 段金芳,肖洋,刘影,宋洪伟,窦志英. 一测多评法与电子眼和电子舌相结合优化山茱萸蒸制时间[J]. 中草药, 2017, 48(6): 1108-1116. [Duan Jin-fang, Xiao Yang, Liu Ying, Song Hong-wei, Dou Zhi-ying. Optimization of steaming time of *Cornus officinalis* by combination of electronic eye and electronic tongue [J]. Chinese Herbal Medicine, 2017, 48(6): 1108-1116.]
- [34] 黄特辉,张志杰,郭媛媛,王苇,王添全,李佳怡,薛春苗,曹俊岭. 基于电子鼻技术的太子参产地及产地加工方法鉴别[J]. 中国药理学杂志, 2020, 55(10): 811-816. [Huang Te-hui, Zhang Zhi-jie, Guo Yuan-yuan, Wang Wei, Wang Tian-quan, Li Jia-yi, Xue Chun-miao, Cao Jun-ling. Identification of *Pseudostellaria heterophylla* producing area and processing method based on electronic nose technology [J]. Chinese Journal of Pharmacy, 2020, 55(10): 811-816.]
- [35] Cui S Q, Wu J F, Wang J, Wang X L. Discrimination of American ginseng and Asian ginseng using electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry coupled with chemometrics [J]. Journal of Ginseng Research, 2017, 41: 85-95.
- [36] Cui S, Wang J, Geng L. Determination of ginseng with different ages using a taste-sensing system [J]. Sensors and Materials, 2013, 25: 241-255.
- [37] Li S, Li X, Wang G, Nie L X, Yang Yao J, Wu H Z, Wei F, Zhang J, Tian J G, Lin R C. Rapid discrimination of Chinese red ginseng and Korean ginseng using an electronic nose coupled with chemometrics [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2012, 70: 605-608.
- [38] Brudzewski K, Osowski S, Golembiecka A. Differential electronic nose and support vector machine for fast recognition of tobacco [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39: 9886-9891.

- [39] Zhang H B , Liu T A , Shu R X , Yang K , Ye S , You J L , Ge J. Using EN-NIR with support vector machine for classification of producing year of Tobacco [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* , 2018 , 38 (5) : 1620-125.
- [40] Sousa Mara E B C , Dias Luís G , Veloso Ana C A , Estevinho Letícia , Peres António M , Machado Adélio A S C. Practical procedure for discriminating monofloral honey with a broad pollen profile variability using an electronic tongue [J]. *Talanta* , 2014 , 128 (1) : 284-292.
- [41] Oroian M , Ropciuc S. Romanian honey authentication using voltammetric electronic tongue Correlation of voltammetric data with physico-chemical parameters and phenolic compounds [J]. *Computers and Electronics in Agriculture* , 2019 , 157: 371-379
- [42] 吴瑞梅. 名优绿茶品质感官评价的仪器化表征研究 [D]. 江苏大学, 2012. [Wu Rui-meí. Instrumental characterization of sensory evaluation of famous green tea [D]. Jiangsu University , 2012.]
- [43] 吕海鹏. 普洱茶品质的仪器鉴定研究 [D]. 浙江大学, 2013. [Lu Hai-peng. Instrument identification of Pu'er tea [D]. Zhejiang University , 2013.]
- [44] Ghosh A , Tamuly P , Bhattacharyya N , Tudu B , Gogoi N , Bandyopadhyay Rajib. Estimation of theaflavin content in black tea using electronic tongue [J]. *Journal of Food Engineering* , 2012 , 110: 71-79.
- [45] Banerjee (Roy) R , Tudu B , Shaw L , Jana A , Bhattacharyya Nabarun , Bandyopadhyay Rajib. Instrumental testing of tea by combining the responses of electronic nose and tongue [J]. *Journal of Food Engineering* , 2012 , 110: 356-363.
- [46] Yang Z Y , Dong F , Shimizu K , Kinoshita O , Kanamori M , Morita A , Watanabe Naoharu. Identification of coumarin-enriched Japanese green teas and their particular flavor using electronic nose [J]. *Journal of Food Engineering* , 2009 , 92: 312-316.
- [47] Zhang X X , Li M H , Zhan C , Ma L Y , Zhao L L , Li J M. A comparison of electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry on discrimination and prediction of ochratoxin: A content in *Aspergillus carbonarius* cultured grape-based medium [J]. *Food Chemistry* , 2019 , 297: 124850.
- [48] Orlandi G , Calvini R , Foca G , Pigani L , Simone G V , Ulrici A. Data fusion of electronic eye and electronic tongue signals to monitor grape ripening [J]. *Talanta* , 2018 , 195: 181-189.
- [49] Orlandi G , Calvini R , Pigani L , Foca G , Vasile Simone G , Antonelli A , Ulrici A. Electronic eye for the prediction of parameters related to grape ripening [J]. *Talanta* , 2018 , 186: 381-388.
- [50] Centonze V , Lippolis V , Cervellieri S , Damascelli A , Casiello G , Pascale M , Logrieco A F , Longobardi F. Discrimination of geographical origin of oranges (*Citrus sinensis* L. Osbeck) by mass spectrometry - based electronic nose and characterization of volatile compounds [J]. *Food Chemistry* , 2018 , 277: 25-30.
- [51] 惠国华, 吴玉玲, 叶丹丹, 丁文雯. 一种利用电子鼻检测芒果新鲜度的方法: CN102621192A [P]. 2012-08-01. [Hui Guo-hua , Wu Yu-ling , Ye Dan-dan , Ding Wen - wen. A method for detecting mango freshness by electronic nose: CN102621192A [P]. 2012-08-01.]
- [52] 惠国华, 叶丹丹, 吴玉玲, 丁文雯, 王绿野. 一种用于检测番荔枝成熟度的电子鼻及其检测方法: CN102654495A [P]. 2012-09-05. [Hui Guo-hua , Ye Dan-dan , Wu Yu-ling , Ding Wen-wen , Wang Lu-ye. An electronic nose for detecting the maturity of *Annona squamosa* and its detection method: CN102654495A [P]. 2012-09-05.]
- [53] Kang B S , Lee J E , Park H J. Electronic tongue-based discrimination of Korean rice wines (makgeolli) including prediction of sensory evaluation and instrumental measurements [J]. *Food Chemistry* , 2014 , 151: 317-23.
- [54] Rodriguez-Mendez M L , Apetrei C , Gay M , Medina-Plaza C , Saja de J A , Vidal S , Aagaard O , Ugliano M , Wirth J , Cheynier V. Evaluation of oxygen exposure levels and polyphenolic content of red wines using an electronic panel formed by an electronic nose and an electronic tongue [J]. *Food Chemistry* , 2014 , 155: 91-97.
- [55] Cetó X , González-Calabuig A , Crespo N , Pérez S , Capdevila J , Puig-Pujol Anna , Valle M.del. Electronic tongues to assess wine sensory descriptors [J]. *Talanta* , 2017 , 162: 218-224.
- [56] Šuklje K , Carlin S , Stanstrup J , Antalick G , Blackman J W , Meeks C , Deloire A , Schmidtke L M , Vrhovsek U. Unravelling wine volatile evolution during Shiraz grape ripening by untargeted HS - SPME - GC × GC - TOFMS [J]. *Food Chemistry* , 2019 , 277: 753-765.
- [57] Cetó X , Capdevila J , Mínguez S , Valle M D. Voltammetric bioelectronic tongue for the analysis of phenolic compounds in rosé cava wines [J]. *Food*

- Research International ,2014 ,55: 455-461.
- [58] Huang L , Zhao J W , Chen Q S , Zhang Y H. Nondestructive measurement of total volatile basic nitrogen (TVB-N) in pork meat by integrating near infrared spectroscopy , computer vision and electronic nose techniques [J]. Food Chemistry ,2014 ,145: 228-236.
- [59] Kilgannon A K , Holman B W B , Frank D C , Mawson A J , Collins Damian , Hopkins D L. Temperature-time combination effects on aged beef volatile profiles and their relationship to sensory attributes [J]. Meat Science ,2020 ,168: 108193.
- [60] 沈立荣,裘正军,姚璐,丁亚明,马晓钟,郭如斌,尹中,王震. 基于电子鼻技术的金华火腿分级与鉴别方法: CN102692488A [P]. 2012-09-26. [Shen Li-rong , Qiu Zheng-jun , Yao Lu , Ding Ya-ming , Ma Xiao-zhong , Guo Ru-bin , Yin Zhong , Wang Zhen. Classification and identification method of Jinhua Ham based on electronic nose technology: CN102692488A [P]. 2012-09-26.]
- [61] 周宇芳,孟志娟,杨会成,廖妙飞,郑斌,钟明杰,肖金星. 一种利用电子鼻检测带鱼新鲜度的方法: CN103063709A [P]. 2013-04-24. [Zhou Yu-fang , Meng Zhi-juan , Yang Hui-cheng , Liao Miao-fei , Zheng Bin , Zhong Ming-jie , Xiao Jin-xing. A method for detecting the freshness of hairtail with electronic nose: CN103063709A [P]. 2013-04-24.]
- [62] Yaroshenko I , Kirsanov D , Kartsova L , Bhattacharyya N , Sarkar S , Legin A. On the application of simple matrix methods for electronic tonguedata processing: Case study with black tea samples [J]. Sensors and Actuators B ,2014 (191) : 67-74.
- [63] Dong W , Hu R , Long Y , Li H H , Zhang Y J , Zhu K , Chu Z. Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose , electronic tongue , and HS-SPME-GC-MS [J]. Food Chemistry ,2019 ,272: 723-731.
- [64] Vivone G , Chanussot J. Fusion of short-wave infrared and visible near - infrared world view - 3 data [J]. Information Fusion ,2020 , Available online , <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.03.012>.
- [65] Simjanoska M , Kochev S , Tanevski J , Bogdanova A M , Papa G , Eftimov T. Multi-level information fusion for learning a blood pressure predictive model using sensor data [J]. Information Fusion ,2020 ,58: 24-39.
- [66] Muzammal M , Talat R , Sodhro A H , Pirbhulal S. A multi-sensor data fusion enabled ensemble approach for medical data from body sensor networks [J]. Information Fusion ,2020 ,58: 155-164.
- [67] 李文龙. 中药标准化的模式分析及思考 [N]. 中国中医药报 ,2018 年 11 月 15 日第 5 版. [Li Wen-long. Analysis and reflection on the mode of standardization of traditional Chinese medicine [N]. China Journal of Traditional Chinese Medicine , November 15 , 2018 , 5th Edition.]