

专题——中药饮片质量研究

电子鼻技术的研究进展及其在中药行业中的应用

费程浩¹ 戴 辉¹ 苏 杭¹ 李 林^{1,2} 陆兔林^{1,2} 李伟东^{1,2} 蔡宝昌^{1,2} 殷放宙^{1,2}

(1 南京中医药大学药学院,南京,210023; 2 江苏省中药炮制重点实验室,南京,210023)

摘要 21 世纪仿生技术的飞速发展使得“气味”能够被客观量化,打破了传统经验鉴别的局限,因其整体性的特点被广泛用于中药的质量控制。该文详细介绍了电子鼻技术的概念、原理及特点,系统归纳并总结了其近年来在中药领域中的应用现状及存在的问题。随着电子鼻技术的进步,其必将为中药气味的客观化评价以及外在性状与内在质量的关联性的深入研究提供新的契机。

关键词 电子鼻;嗅觉传感技术;中药;客观化评价;质量控制;应用进展

Advances of Electronic Nose Technology and Its Application in Chinese Medicine IndustryFei Chenghao¹, Dai Hui¹, Su Hang¹, Li Lin^{1,2}, Lu Tulin^{1,2}, Li Weidong^{1,2}, Cai Baochang^{1,2}, Yin Fangzhou^{1,2}

(1 College of Pharmacy, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, China; 2 Key Research Laboratory of Chinese medicine processing of Jiangsu Province, Nanjing 210023, China)

Abstract With the rapid development of bionic technology in 21st Century, the “odor” can be objectively quantified, which breaks the limitation of traditional experiential identification and is widely used in the quality control of traditional Chinese medicine because of its integrity. In this paper, the concept, principles and characteristics of electronic nose technology are introduced in detail, and its application status and the existing problems in the field of Chinese medicine are summarized systematically in recent years. With the progress of electronic nose technology, it will provide a new opportunity for the objective evaluation of traditional Chinese medicine and in-depth study of correlation between exterior character and internal quality on traditional Chinese medicine.

Key Words Electronic nose; Olfactory sensor technology; Chinese medicine; Application progress

中图分类号:R282.5 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1673-7202.2019.02.001

近年来随着人们日益对自然的崇尚,中药在国内甚至在国际上的地位越发显得重要。然而,与此同时中药的质量出现也出现了令人堪忧的各种问题。如银杏叶事件^[1],部分企业私自改变银杏叶提取工艺以达到降低成本的目的,其产品按现版药典的标准检验却显示合格;又如化学染色剂金胺 O 事件^[2],在黄柏中非法添加非食用染色剂达到增色的目的,受技术影响,按照目前的法定标准则无法检测。这些事件均说明现阶段仍缺少可有效控制中药质量的完整评价体系,其严重阻碍了中药的现代化、国际化。中药品质评价是中药研究、生产及应用至关重要的一步,建立快速、精准的质量评价方法来保证中药安全有效,已成为将中药推向世界市场的当务之急。

目前,中药质量的评价以主观和客观评价 2 种模式并存。主观化评价即是传统的经验评价,其依

据中药外观性状所表现出来的特征对其进行判别,即“辨状论质”^[3];客观化评价则是借助先进的仪器对中药所含的内在成分或成分群进行准确定量。长久以来,客观化评价借助其数据的客观性占据了主导地位,但是这种只以中药中一种或某几种成分的含量作为品质评判标准的方法,不仅不够全面,而且耗时耗力^[4]。传统的经验鉴别就是从中药整体入手,经验化的评价手段因其简便、快速、直观,极具特色,是几千年来丰富经验的积累与总结,在中药的品质评价中仍应据有重要的地位。

而在中药传统的经验评价中,气味又是其中一个十分重要的评价指标,这是由于每味中药均有其特殊的气味,或浓或淡,中药的真伪及质量程度的高低从一定程度上决定了气味的特质及其强烈程度;另一方面,中药的气味与其所含的化学成分直接相关,能反映药物的内在本质,成为中药外在质量表现

基金项目:江苏省高校自然科学研究重大项目(13KJA360003);国家自然科学基金项目(81873002,81573604,30701108,31071250,81473293);南京中医药大学预研基金项目(12XY06)

作者简介:费程浩(1993.01—),男,硕士研究生,研究方向:中药炮制学,E-mail:feichenghao108@163.com

通信作者:殷放宙(1976.07—),女,博士,高级实验师,研究方向:中药炮制工艺及质量标准研究,E-mail:yfz2003@163.com

与内在物质基础的关联点^[5]。但不可否认的是,气味如借助人体感官评价,其检测结果将受到感官差异和检测环境的影响,客观性与准确性难以保证,在实际应用和长期推广中受到限制,需要借助更为先进的技术来完善。

进入 21 世纪以来,现代仿生技术飞速发展,人类对嗅觉的产生过程有了更为深入的理解,借助传感器技术的更新,电子鼻技术被迅速而广泛地运用于食品、农业、日用化工品及公共安全等诸多领域。该文从电子鼻技术的发展及其重点在中药行业的应用现状进行了综述。

1 电子鼻技术的概述

1.1 起源与发展 对于电子鼻的起源,最早可以追溯到 20 世纪 60 年代初。1961 年 Moncrieff^[6] 制造了一种机械式的气味检测装置。随后 1962 年在瑞典的斯德哥尔摩举行国际上最早的嗅觉和味觉学术交流会^[7],推动了对人工嗅觉技术的研究。1964 年, Wilkens 和 Hatman^[8] 依据气味分子在电极上发生氧化还原反应的原理,建立了第一个人工嗅觉模拟系统。1965 年, Buck 等^[9] 利用金属和半导体电导的变化对气体进行了测量,同年 Dravieks 等^[10] 利用接触电位变化也实现了对气体的测量。然而,“电子鼻”这一概念直到 20 世纪 80 年代才首次出现。1984 年,美国的 Zaromb 和 Stetter^[11] 率先探讨了气体传感器阵列的理论基础,并将这一阵列用于检测易燃、有毒的气体。同期,由英国 Persand^[12] 等人提出了作为气体分类用的智能化学传感器阵列概念,其制造的电子模型嗅觉系统包括了 3 个气味探测器所组成的传感器阵列和模式识别系统,这一简单的系统可分辨按树脑、玫瑰油、丁香牙油等挥发性化学物质。接着于 1987 年,在英国 Warwick 大学召开的第八届欧洲化学传感研究组织年会上,人们正式认可并使用了电子鼻(Electronic Nose)这一术语,且以 Gardner 为首的 Warwick 大学气敏传感研究小组正式提出了模式识别的概念^[13],引起了学术界广泛的兴趣。1989 年,北大西洋公约组织(NATO)召开了关于人工嗅觉系统的化学传感器信息处理会议^[14],进一步明确了人工嗅觉系统的设计^[15]。紧接着,1990 年在德国柏林举行了第一届电子鼻国际学术会议^[16],该会议是真正意义上的针对电子鼻的专题会议。然而“电子鼻”的完整定义直到 1994 年 Gardner 和 Bartle^[17] 发表了关于电子鼻的综述性文章时才被给出:“An electronic nose is an instrument, which comprises an array of electronic chemical sensors with

partial specificity and an appropriate pattern recognition system, capable of recognizing simple or complex odors”。

1.2 基本结构与工作原理 电子鼻,又被称作人工嗅觉系统,其工作原理模仿了人类对气味的识别机制^[18],该电子仪器由 3 个部分组成:1) 气味分子被人工嗅觉系统中的传感器阵列吸附,并产生信号,模拟气味分子与人嗅觉细胞表面受体蛋白结合的过程;2) 生成的信号经过各种方法加工处理与传输,模拟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) 将处理后的信号由模式识别系统做出判断,模拟人大脑对气味做出判断的过程。见图 1。其中传感器阵列、模式判别系统是决定电子鼻工作效率的核心要素^[19]。

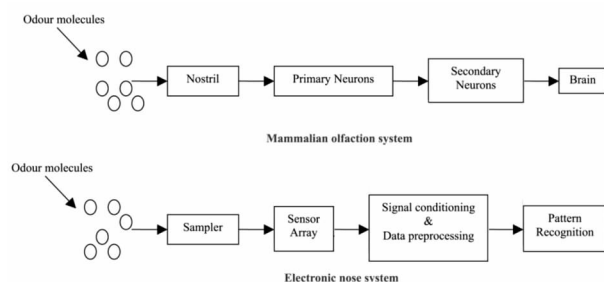


图 1 人鼻嗅觉系统和电子鼻系统的比较^[19]

1.3 传感器阵列 国际电工委员会(International Electrotechnical Commission)对传感器的定义是“The sensor is the primary part of a measuring chain which converts the input variable into a signal suitable for measurement”^[20]。国家标准 GB/T7665-2005 对传感器的定义是:“能感受被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成”^[21]。虽然传感器的种类(温度、湿度等)很多,但在药学领域主要以化学传感器为主。

国际电子鼻研究学会对化学传感器的标准定义是:“A chemical sensor is a device that transforms a device that transforms chemical information, ranging from the concentration of a specific sample component to total composition analysis, into an analytically useful signal. The chemical information, mentioned above, may originate from a chemical reaction of the analyte or from a physical property of the system investigated”^[22]。单一传感器对气体的响应程度可用强度来表示,而由多个传感器组成的阵列,除了具有多个响应值外,其整体组成的多维空间数据还会呈现一定的响应模式^[23],根据不同的响应模式而采用相应的模式识别方法,能确定气味的类别和强度,显示被测样品整体

信息。由此可见,所以单个传感器与传感器阵列在特性上有着本质的区别。

传感器阵列具有广谱响应性、交叉敏感性等特征,与人类的鼻子类似,闻到的是样品的总体气味。根据材料类型,常见气体传感器及其阵列可以分为 3 大类^[24-25]:1)金属氧化物型半导体传感器及其阵列(Metal Oxide Semiconductor, MOS),如 SnO₂、ZnO、WO₃ 等,当其吸附某种气体时会导致该氧化物的电阻发生变化,由此产生强弱不同的信号。优点是其生产工艺稳定,灵敏度较高,可建立长期模型,已实现同机模型转移,基准响应的漂移可在一定程度上得到校正。2)导电聚合物传感器及其阵列(Conducting Polymers, CP),如吡咯、苯胺、吡啶、噻吩等碱性有机物的聚合物及衍生物,当其与带气味的物质接触、反应后,会引起电阻的增加产生正向信号,但这一电聚合化的过程不但困难而且耗时。此类传感器生产工艺重复性差,对湿度较敏感,响应会随时间漂移且校正困难。3)质量传感器及其阵列(Quartz Crystal Microbalance, QCM; Surface Acoustic Wave, SAW),当其吸附气味分子时会引起振动频率的改变,从而产生信号,优点是灵敏度高,缺点是需要更为复杂的电子学,且生产重复性差、需频率检出器、寿命短,共振频率会随着活性薄膜的老化而漂移且校正困难。

因为制作工艺及信号漂移校正困难等问题,后 2 种传感器多已被淘汰, MOS 传感器成为商用电子鼻传感器的主流。

1.4 模式判别 模式识别方法分为无监督和有监督的方法。无监督的模式用来探索完全未知的数据特征,其根据样本特性对原始数据的信息进行归类,最后运用可视化技术将归类直观地呈现;有监督的模式是在已有先验知识和假设的基础上,建立不同的信息组,并利用所建立的组对未知数据进行辨识、归类甚至预测^[26]。

主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)是典型的无监督方法。它是一种线性特征提取技术,通过提取变量中的主元变量从而降低数据的维数,尽可能的保留并展示原始数据中所包含的信息。其他的无监督识别模式还有聚类分析(Cluster Analysis, CA)等。

有监督模式识别方法较多,包括线性判别分析(Linear Discriminant Analysis, LDA)、K 邻近方法(The K-Nearest Neighbors, KNN)、偏最小二乘法(Partial Least Squares, PLS)、分类模拟独立模型(Soft

Independent Modeling of Class Analogy, SIMCA)、分类回归树(Classification And Regression Trees, CART)、小等分布分类(Unequal Dispersed Classes, INEQ)、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)、人工神经网络(Artificial neural networks, ANN)等。在这些方法中,ANN 通常被人们认为比较有前途。该方法是模仿脑细胞结构和功能、脑神经结构以及思维处理问题等脑功能的新型信息处理系统^[27],它能对一组特定的包含正确的输入与输出的信息构建网络结构参数,并在环境产生变化时,重新对网络结构进行自主训练与调整,使得对给定输入产生期望的输出。因其高度的非线性、良好的容错性和计算的非精确性,在处理噪声和漂移方面比传统的统计方法要好,使之在智能控制、组合优化、预测等领域得到成功应用。其特点不仅由其结构特征和基本处理单元的特性决定,还与其学习的算法有关。目前常用的算法有 BP 神经网络^[28](Back Propagation Trained Neural Network)、概率神经网络^[29](Probabilistic Neural Network)、径向基神经网络^[30](Radial Basis Function Neural Network)、自组织网络^[31](Self-Organizing Network)、模糊神经网络^[32](Fuzzy Neural Network)等。

1.5 仪器 国外对电子鼻系统的开发相对成熟,目前已经出现了部分商业化的电子鼻^[33],使用范围均涉及食品、医药、环境和化妆品等领域。代表性的公司及其产品见表 1。国内大多数电子鼻的研究还处在实验室研究阶段。

表 1 国外电子鼻系统代表^[34]

名称	厂商	传感器种类	型式
Fox 系列	Alpha-MOS(法国)	MOS	台式
PEN3	Airsense Analytics(德国)	MOS	便携式
Cyrano 320	Cyrano Science Inc.(美国)	CP	便携式
AromaScanner	AromaScan(英国)	CP	台式
ZNose 系列	Electronic Sensor Technology(美国)	SAW	台式

2 电子鼻在中药行业中的应用

相比于传统的嗅觉检测方法,电子鼻具有自己独特的优势。其检测速度快,响应迅速,评估范围广,能有效避免由人为因素产生的误差,被集中应用于食品^[35]、农业^[36]、医疗^[37]、环境科学^[38]等领域。在国外电子鼻运用在药学领域的研究比较少,可能因为在国外占主导地位的西药大多气味特征不明显。反观国内电子鼻在中药领域的应用,由于中药本身大多有特异气味,所以近年来电子鼻在中药行业的应用正呈现爆发式的增长。

2.1 电子鼻在中药材中的应用 中药所具有的特殊气味是从古至今真伪及产地鉴别的重要依据。电子鼻能够识别并客观化地呈现中药气味的整体信息,现已初步被应用于中药质量的控制,包括中药真伪、产地、采收期、贮藏期等的判断。

由各个传感器响应值得最大值所组成的图谱被称为中药的气味指纹图谱,不同中药的指纹图谱各异,据此可以实现对中药的快速鉴别,同时也为气味的客观化、标准化提供了新思路。电子鼻技术在气味浓郁的中药中运用较多。Zheng^[39]等和 Liu^[40]等分别运用电子鼻并结合多种识别模式成功区分了不同产地的当归。邹慧琴等^[41]引入电子鼻建立中药砂仁的气味指纹图谱,采用不同的分类器建立其“品与质”的判别模型,并采用盲样回判的方法对模型进行验证。人参和西洋参有着相似的外表,仅从外表看较难区分。Cui^[42]等采用电子鼻对两者的气味提取,运用 PCA 对两者进行了良好区分,同时采用 GC-MS 技术分离并鉴定了 2 种参的特异成分,发现其成分在 PCA 上的分布与气味特征值的 PCA 得分图呈现了相似的趋势,部分传感器的响应值与烯帖类和醇类高度相关,最后根据传感器响应值用 PLS 预测了参中的成分。任智宇^[43]利用电子鼻获取菊花气味的整体信息,运用 PCA 和 DFA 对其品种进行了良好的区分。此外,在“气微”的中药中也有应用。张超等^[44]采用电子鼻技术获取半夏及其不同种类与比例的掺伪样品气味指纹图谱,根据气味指纹特征快速鉴别半夏及其伪品。Zhou 等^[45]使用电子鼻建立针对硫熏半夏的鉴别模型,研究结果显示该法能对半夏含硫量的等级进行划分。李羿等^[46]采用电子鼻采集多个基原郁金的气味特征参数,通过主成分分析和辨别因子分析实现了不同基原郁金的快速准确鉴定。李阳^[47]对来自不同产地、不同规格的厚朴进行气味特征值提取,经过 PCA、LDA、DFA 分析后,结果显示该方法能对厚朴的产地和等级进行良好的判定。

药用植物在不同的生长发育期间,其内含的有效成分含量是不断变化的。利用电子鼻监测不同生长期中药材中挥发性成分的变化,鉴别不同采收期的药材,能为中药资源的合理利用提供保障。蔡泳等^[48]对中药金樱子不同采收期的气味指纹进行分析,经 PCA 和 DFA 分析均明显分为 2 类,以 10 月下旬采收时间为界。韩邦兴等^[49]运用电子鼻检测了开花前后 2 种前胡样品气味,结果表明电子鼻可以完全区分开花前后的前胡。Cui 等^[50]运用电子鼻和

GC-MS 技术分别对不同生长年限的人参的气味进行了定量和定性分析,结果表明,两项技术结合识别模式均能对人参的年限做良好区分,且使用了 BP 神经网络的电子鼻数据较 GC-MS 数据有着更高的预测正确率。杨庆珍等^[51]运用电子鼻技术,结合超高效液相对不同生长年限黄芪样品进行鉴别分析,研究发现黄芪有效成分含量与生长年限有关,电子鼻测定结果不仅能够区分不同生长年限的黄芪,也为黄芪的采收时限提供了参考。

电子鼻亦可用于区分不同贮藏期的中药材。贮藏时间对中药质量影响较大,特别是含挥发性成分的中药,其随着储藏时间的增加,气味逐渐丧失,最终可能导致药效的丧失。Xiong 等^[52]采用电子鼻成功区分了不同贮藏期的金银花,并建立了相应的质控方法。邹慧琴等^[53]利用电子鼻技术对不同贮藏时间(1 年、3 年)的西洋参进行气味检测,并结合多层感知器网络识别技术建立判别模型。结果表明,该模型对不同贮藏时间西洋参的回判正确率达到 100%,能对不同贮藏时间的西洋参进行有效的鉴别。此外,韩玉等^[54]运用电子鼻对不同贮藏时间的苍术也进行了良好的区分,并对气味特征值的变化与成分的变化进行了关联性分析。

2.2 电子鼻在中药饮片中的应用 长久以来,中药饮片的炮制过程都由一些经验丰富的老药工把握,这一感官评价方式存在其局限性,如药典中对“气清香”“焦香气”等的描述,过于主观和模糊,而电子鼻可以较好地将中药炮制过程中的“气味”进行量化表达。Lee 等^[55]同时运用电子鼻、气相色谱技术、人工评价 3 种方法综合分析了红参、鲜品人参及清蒸人参的气味特点,并追踪了红参在制作过程中的香气特征的变化。杨诗龙^[56]运用电子鼻技术快速、准确地鉴别了姜黄连、酒黄连、萸黄连,经 LDA 判别,识别率高达 96.4%。卢一^[57]采用电子鼻对 2015 年版《中华人民共和国药典》收录的 8 味酒制中药炮制前后的气味进行采集分析,将不同炮制品的气味差异数据化、可视化,所建立的判别模型经检验正判率达到 96.7%。汪云伟等^[58]成功运用电子鼻技术区分了益智仁生品及其炮炙品(清水炒、盐炙)。既然诸多研究表明电子鼻能够识别同一品种不同炮制品之间的“气味”差异,那么炮制品“气味”与“内在成分”之间的相关性研究势必成为下一阶段的热点。黎量等^[59]对同一批山楂样品进行不同时间的炒制,采用电子鼻获取其气味传感器响应值,发现山楂炮制过程中气味的变化与 5-HMF 含量的变化有关,并

推断糖降解反应及美拉德反应可能是山楂炮制过程气味变化的作用机制之一,该研究从饮片炮制过程中引起气味变化的物质基础出发,从新的角度为解释炮制机理奠定了基础。由此可见,中药炮制“火候”的客观量化研究,不仅有助于完善与质量相关的性状指标以及炮制辅料的检查与测定,而且有助于建立适合中药饮片的质量标准,即填补药典的空白。

2.3 电子鼻在中成药及中间品中的应用 Shafiqul Islama 等^[60]利用电子鼻收集了东革阿里提取物的气味特征值,并将其与提取物的挥发油成分相关联,结果显示挥发油中某些成分与电子鼻响应信号呈现高度的相关性。庄家俊^[61]等采用便携式电子鼻对 4 组不同生产批次的中成药(百草油)进行检测,并对采样得到的数据进行分析,实现了对不同批次百草油的鉴别和分类,经检验有 87.9% 的正判率。这对实现中成药及其中间品的在线监控提供了新的模式。以上研究表明,电子鼻在实现中成药及其中间品的鉴别分类,甚至在其质量评判分析、产品监控领域的应用潜力。

3 小结与展望

电子鼻技术作为一种现代仿生技术,相较于人的感官评价,可有效避免人为差异,其优势是数据化结果的客观性、重复性好;而相较于其他仪器,如气相色谱、高效液相色谱等需要对试样进行复杂的预处理过程,其的优势是响应时间短、检测速度快。同时还能用于检测一些人类嗅觉不适宜评价的气体,如毒气或一些刺激性气体。电子鼻对中药的气味的分析,具有模糊性、整体性的特点,得到的是样品中与气味相关联成分的整体信息,相比 GC-MS 技术有着不可替代的优势,近年来正逐步受到中药领域研究人员的青睐。在中药材规范化种植、中药鉴定、中药炮制、中药制剂生产等研究领域中有广阔的应用前景。

虽然电子鼻技术已显示出其广泛的用途,但在实际应用中其对环境的要求很高,空气中湿度、异味都会对其数据造成波动,仪器稳定性还需进一步提高^[62]。此外,国外在研发电子鼻传感器时,因多是针对某一类物质如烃类、醇类等^[63],所以将此类传感器直接运用于中药研究中,其专属性、特异性较弱,难以应对气味极其复杂的中药。因此,应加紧开发与中药气味、成分相适宜的传感器阵列,另外,对传感器的敏感性、选择性等特性也需要改进。总言之,通过电子鼻建立中药的气味指纹图谱,能实现气味的客观化表达,使气味成为可以量化的指标。未

来,通过将电子鼻数据与气质数据的联合分析,中药“品与质”的内在关联将完美诠释,同时,在结合模式识别方法后,气味完全可以成为控制中药质量的一个新的量化指标,为中药的深入研究提供新的契机,从而提高中药产业的整体水平,推动中药现代化。

参考文献

- [1] 杨扬,周斌,赵文杰.“银杏叶事件”的分析与思考[J]. 中草药, 2016, 47(14): 2397-2407.
- [2] 北京商报记者吴颖实习记者郭秀娟. 中药产品为何频频涉事[N]. 北京商报, 2015-11-12(D1).
- [3] 彭华胜,张贺廷,彭代银,等. 黄芩道地药材辨状论质观的演变及其特点[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(9): 1646-1651.
- [4] 刘占京. 论中药质量控制与评价模式的创新与发展[J]. 中医临床研究, 2014, 11(1): 127-128.
- [5] 杨诗龙,吴娜,袁星,等. 中药“气味”鉴别的现状与思考[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2014, 16(9): 1876-1879.
- [6] 殷勇. 嗅觉模拟技术[M]. 北京:北京化学工业出版社, 2005: 12-13.
- [7] Gardner J W, Bartlett P N. Electronic Noses. Principles and Applications[J]. Meas Sci Technol, 2000, 11(7): 1087.
- [8] Wilkens W F, Hartman J D. An Electronic Analog for the Olfactory Processes[J]. J Food Sci, 1964, 29(3): 372-378.
- [9] Buck T M, Allen F G, Dalton J V. Detection of chemical species by surface effects on metals and semiconductors[M]. Bell Telephone Laboratories, 1965.
- [10] Dravnieks A, Trotter P J. Polar vapour detector based on thermal modulation of contact potential[J]. J Sci Instrum, 1965, 42(8): 624.
- [11] Zaromb S, Stetter J R. Theoretical basis for identification and measurement of air contaminants using an array of sensors having partly overlapping selectivities[J]. Sens Actuators, 1984, 6(4): 225-243.
- [12] Persaud K, Dodd G. Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose[J]. Nature, 1982, 299(5881): 352-355.
- [13] Gardner J W, Bartlett P N, Dodd G H. Pattern recognition in the Warwick electronic nose[C]. 8th Int. Congress of the European Chemoreception Research Organisation, 1988: 9.
- [14] Schild D. Chemosensory information processing[M]. Springer Science & Business Media, 2013.
- [15] Gardner J W, Bartlett P N, Dodd G H, et al. The design of an artificial olfactory system[M]. Springer, 1990, 131-173.
- [16] Brezmes J, Ferreras B, Llobet E, et al. Neural network based electronic nose for the classification of aromatic species[J]. Anal Chim Acta, 1997, 348(1): 503-509.
- [17] Gardner J W, Bartlett P N. A brief history of electronic noses[J]. Sens Actuators B, 1994, 18(1): 210-211.
- [18] Kurup P U. An electronic nose for detecting hazardous chemicals and explosives[C]. Technologies for Homeland Security, 2008 IEEE Conference on. IEEE, 2008: 144-149.
- [19] Arshak K, Moore E, Lyons G M, et al. A review of gas sensors employed in electronic nose applications[J]. Sensor Review, 2004, 24(2): 181-198.
- [20] Committee I E. Terms and Definitions in Industrial Process Measure-

- ment and Control, (IEC-draft 65/84) [S]. Committee I E, 1982.
- [21] 宋洪烈. 基于蝎子缝感受器的仿生应变感知结构制造及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [22] Oliva S U. Smart Chemical Sensors: Concepts and Application [D]. Universitat de Barcelona, 2012.
- [23] Hierlemann A, Gutierrez-Osuna R. Higher-order chemical sensing [J]. Chem Rev, 2008, 108(2): 563-613.
- [24] Albert K J, Lewis N S, Schauer C L, et al. Cross-reactive chemical sensor arrays [J]. Chem Rev, 2000, 100(7): 2595-2626.
- [25] James D, Scott S M, Ali Z, et al. Chemical Sensors for Electronic Nose Systems [J]. Microchim Acta, 2005, 149(1): 1-17.
- [26] 吴君章, 孔浩辉, 郭伟清, 等. 电子鼻系统预处理方法和模式识别技术概述 [J]. 广东化工, 2016, 46(9): 141-144.
- [27] 彭驿茹. 人工神经网络发展历史与训练算法概述 [J]. 科技传播, 2018, 10(21): 129-130.
- [28] Fu J, Li G, Qin Y, et al. A pattern recognition method for electronic noses based on an olfactory neural network [J]. Sens Actuators B, 2007, 125(2): 489-497.
- [29] Dutta R, Hines E L, Gardner J W, et al. Tea quality prediction using a tin oxide-based electronic nose: an artificial intelligence approach [J]. Sens Actuators B, 2003, 94(2): 228-237.
- [30] Evans P, Persaud K C, Mcneish A S, et al. Evaluation of a radial basis function neural network for the determination of wheat quality from electronic nose data [J]. Sens Actuators B, 2000, 69(3): 348-358.
- [31] Gardner J W, Bartlett P N. Performance definition and standardization of electronic noses [J]. Sens Actuators B, 1996, 33(1): 60-67.
- [32] Llobet E, Hines E L, Gardner J W, et al. Fuzzy ARTMAP based electronic nose data analysis [J]. Sens Actuators B, 1999, 61(1): 183-190.
- [33] Röck F, Barsan N, Weimar U. Electronic Nose: Current Status and Future Trends [J]. Chem Rev, 2008, 108(2): 705-725.
- [34] 王亚雷, 贾文坤, 潘立刚, 等. 电子鼻技术在肉类品质应用中快速分析初探 [J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(2): 419-424.
- [35] Berna A. Metal Oxide Sensors for Electronic Noses and Their Application to Food Analysis [J]. Sensors, 2010, 10(4): 3882-3910.
- [36] Baietto M, Wilson A D. Electronic-Nose Applications for Fruit Identification, Ripeness and Quality Grading [J]. Sensors, 2015, 15(1): 899-931.
- [37] Capelli L, Taverna G, Bellini A, et al. Application and Uses of Electronic Noses for Clinical Diagnosis on Urine Samples: A Review [J]. Sensors, 2016, 16(10): 1708.
- [38] Capelli L, Sironi S, Del Rosso R. Electronic noses for environmental monitoring applications [J]. Sensors, 2014, 14(11): 19979-20007.
- [39] Zheng S, Ren W, Huang L. Geoherbalm evaluation of Radix Angelica sinensis based on electronic nose [J]. J Pharm Biomed Anal, 2015, 105: 101-106.
- [40] Liu J, Wang W, Yang Y, et al. A Rapid Discrimination of Authentic and Unauthentic Radix Angelicae Sinensis Growth Regions by Electronic Nose Coupled with Multivariate Statistical Analyses [J]. Sensors, 2014, 14(11): 20134-20148.
- [41] 邹慧琴, 拱健婷, 赵雨莹, 等. 中药砂仁“品与质”电子鼻判别模型的建立 [J]. 国际药学研究杂志, 2015, 42(4): 513-518.
- [42] Cui S, Wu J, Wang J, et al. Discrimination of American ginseng and Asian ginseng using electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry coupled with chemometrics [J]. J Ginseng Res, 2017, 41(1): 85-95.
- [43] 任智宇. 电子鼻在菊花质量评价中的应用 [D]. 北京: 北京中医药大学, 2016.
- [44] 张超, 杨诗龙, 胥敏, 等. 基于气味指纹分析的半夏及其伪品鉴别研究 [J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2015, 17(11): 2300-2305.
- [45] Zhou X, Wan J, Chu L, et al. Identification of sulfur fumed Pinelliae Rhizoma using an electronic nose [J]. Pharmacogn Mag, 2012, 10(Suppl 1): S135-S140.
- [46] 李羿, 吴浩忠, 谭勇, 等. 电子鼻在多基原郁金鉴定中的应用 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2015, 21(1): 99-101.
- [47] 李阳. 基于电子鼻技术的厚朴商品规格等级标准研究 [D]. 北京: 北京中医药大学, 2018.
- [48] 蔡泳, 王盛, 黄孙娟, 等. 基于金属氧化物传感器阵列电子鼻技术的不同采收期金樱子气味分析 [J]. 中华中医药杂志, 2011, 26(6): 1433-1435.
- [49] 韩邦兴, 陈乃富, 周晓坤, 等. 基于电子鼻技术分析开花对前胡气味的影 响 [J]. 食品科学, 2010, 31(4): 132-134.
- [50] Cui S, Wang J, Yang L, et al. Qualitative and quantitative analysis on aroma characteristics of ginseng at different ages using E-nose and GC-MS combined with chemometrics [J]. 2015, 102: 64-77.
- [51] 杨庆珍, 郑司浩, 黄林芳, 等. 基于电子鼻技术和化学成分分析对不同生长年限黄芩的研究 [J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2015, 17(3): 723-728.
- [52] Xiong Y, Xiao X, Yang X, et al. Quality control of Lonicera japonica stored for different months by electronic nose [J]. J Pharm Biomed Anal, 2014, 91: 68-72.
- [53] 邹慧琴, 李硕, 邢姝, 等. 电子鼻技术结合 MLP 网络对不同贮藏时间西洋参的鉴别研究 [J]. 中华中医药学刊, 2013, 31(7): 1683-1685.
- [54] 韩玉. 电子鼻在苍术质量评价中的应用研究 [D]. 北京: 北京中医药大学, 2011.
- [55] Lee S K, Kim J H, Sohn H J, et al. Changes in aroma characteristics during the preparation of red ginseng estimated by electronic nose, sensory evaluation and gas chromatography/mass spectrometry [J]. Sens Actuators B, 2005, 106(1): 7-12.
- [56] 杨诗龙. 基于智能感官分析技术的贝母及黄连饮片鉴别研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2015.
- [57] 卢一. 基于“气味”信息分析的中药饮片快速鉴别研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2017.
- [58] 汪云伟, 杨诗龙, 钟恋, 等. 基于电子鼻技术区分益智仁的不同炮制品 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2014, 20(19): 12-14.
- [59] 黎量, 杨诗龙, 刘玉杰, 等. 基于相关性分析的山楂炮制过程气味变化机制研究 [J]. 中国中药杂志, 2014, 39(17): 3283-3286.
- [60] Shafiqul Islam A K M, Ismail Z, Saad B, et al. Correlation studies between electronic nose response and headspace volatiles of Eurycoma longifolia extracts [J]. Sens Actuators B, 2006, 120(1): 245-251.
- [61] 庄家俊, 骆德汉, 邹宇华. 百草油鉴别分类的电子鼻实现方法研究 [J]. 传感器与微系统, 2010, 29(7): 62-65.
- [62] Harper W J. The strengths and weaknesses of the electronic nose [M]. Springer, 2001: 59-71.
- [63] Zou H Q, Li S, Huang Y H, et al. Rapid Identification of Asteraceae Plants with Improved RBF-ANN Classification Models Based on MOS Sensor E-Nose [J]. Evid-Based Compl Alt, 2014, 2014: 425341.