

电子鼻技术及其在茶叶中的应用研究

Electronic nose technology and its application on tea

潘玉成<sup>1</sup> 宋莉莉<sup>1,2</sup> 叶乃兴<sup>3</sup> 潘玉华<sup>4</sup>

PAN Yu-cheng<sup>1</sup> SONG Li-li<sup>1,2</sup> YE Nai-xing<sup>3</sup> PAN Yu-hua<sup>4</sup>

(1. 宁德职业技术学院机电工程系, 福建 福安 355000; 2. 福州大学材料科学与工程学院, 福建 福州 350108;  
3. 福建农林大学园艺学院, 福建 福州 350002; 4. 宁德职业技术学院农业科学系, 福建 福安 355000)

(1. Department of Mechanical and Electronic Engineering, Ningde Vocational and Technical College, Fuan, Fujian 355000, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;  
3. College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;  
4. Department of Agriculture Science, Ningde Vocational and Technical College, Fuan, Fujian 355000, China)

**摘要:**文章介绍了电子鼻的基本原理和结构组成,综述了电子鼻在茶叶品质评定、品种分类、成分检测等方面的应用,总结了电子鼻在茶叶应用中存在的问题,并展望了其未来的发展方向,以供深入研究参考。

**关键词:**电子鼻;茶叶;传感器阵列;特征提取;模式识别

**Abstract:** The basic principle and structure of the electronic nose was introduced in this paper. Moreover, the application of electronic nose in the quality evaluation of tea, the classification of varieties, the detection of components etc were also reviewed. Finally, it was summarized that the problems existed in the application of electronic nose in tea, and then the future development direction was prospected for its in-depth study.

**Keywords:** electronic nose; tea; sensor array; feature extraction; pattern recognition

人类对气味感官评价存在主观性强、重复性差等缺点,且人的鼻子对气味具有适应性,容易出现嗅觉疲劳而影响分析结果。电子鼻又称人工嗅觉分析系统,是 20 世纪 90 年代发展起来的一种用来分析、识别和检测气味的具有人工智能特点的仿生检测仪器,它与普通气体检测仪相比,能够实时地对各种气体进行在线检测分析,具有响应时间短、检测速度快、测定范围广、重复性好,能有效避免人为误差,且可用于检测一些不适合人鼻检测的气体,如毒气或一些刺激性气体<sup>[1]</sup>。近年来随着与电子鼻相关的传感技术、模式识别技术等不断发展,电子鼻广泛应用在食品行业<sup>[2-5]</sup>、环境监测<sup>[6-9]</sup>、医学<sup>[10-12]</sup>和安全保障<sup>[13-15]</sup>等方面,在茶叶领域研

究应用中,电子鼻也逐渐得到国内外学者的重视,显示出其广阔的发展前景。

1 电子鼻系统的结构和工作原理

人的嗅觉系统中存在着初级嗅觉神经元、二级神经元(嗅泡)和大脑嗅觉中枢三层结构,当鼻腔内嗅觉气泡吸附上有气味物质的分子时,会使细胞膜电位发生变化而产生不同的响应信号,并通过嗅泡处理后经神经系统被传送到大脑嗅觉中枢,再经过复杂思维判别出结果。电子鼻是模拟人的嗅觉系统,其基本结构与人的嗅觉系统的神经生理结构大致相同,由气体传感器阵列、信号预处理单元、模式识别单元三部分组成,其中气体传感器阵列相当于人的嗅觉细胞,信号预处理单元相当于嗅泡,模式识别单元如同大脑嗅觉中枢<sup>[16]</sup>,其工作原理为:首先气体传感器阵列利用其对多种气体交叉敏感性吸附气味分子产生响应,并将响应信号转换为电信号,从而得到了对该气味的广谱响应谱;再将生成的信号进行放大、滤波、特征提取等预处理;最后采用合适的模式识别分析方法对其进行处理的结果作出判断,见图 1。

1.1 气体传感器阵列

气体传感器阵列是将多个独立气体传感器组合构成的,它是电子鼻系统的基础,对提高整个系统的性能至关重要。在构造气体传感器阵列时,一般要求其具有广谱响应特性,通过选用不同敏感材料或不同工作温度同种传感器来实现

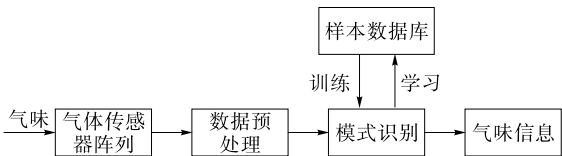


图 1 电子鼻系统工作流程图

Figure 1 Flowchart of an electronic nose

**基金项目:**教育部、财政部职业教育茶叶生产加工技术实训基地项目  
(编号:35133014101)

**作者简介:**潘玉成(1964—),男,宁德职业技术学院副教授。

E-mail:FAPYC@163.com

**收稿日期:**2016-05-06

交叉响应,也可以采用不同种类的传感器混杂使用来实现,并要求器件工作可靠、性能稳定、重复性好,同时器件的响应时间和恢复时间要短。表 1 列出了几种典型商品化的电子鼻所采用的传感器<sup>[17]</sup>。

1.1.1 金属氧化物气体传感器 金属氧化物气体传感器是目前电子鼻系统应用较为广泛的一种导电型传感器,其结构主要由电极、加热器和感应膜三部分组成。感应膜采用半导体金属氧化物薄膜(如 SnO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ZnO、TiO<sub>2</sub>等),金属氧化物在常温下是绝缘的,制成半导体后却显示气敏特性。为

了提高感应膜对某些气体成分的选择性和灵敏度,有时还掺入催化剂如钌、铂、银等,对其进行催化金属掺杂处理。这种传感器是通过感应膜对待测气体的吸附作用,在一定温度条件下产生化学反应引起金属氧化物薄膜导电率的改变,使两电极之间的电阻值产生变化来检测气体的<sup>[18]</sup>。金属氧化物气体传感器的缺点是工作温度较高,响应基准值在长时间工作之后易产生漂移,且对气体混合物中所含的硫化物产生“中毒”反应,其优点是灵敏度高,能实现 10<sup>-6</sup> 级的精度,是电子鼻中最常采用的传感器。

表 1 几种典型商品化电子鼻中的传感器

Table 1 Several sensors of typical commercialization electronic nose

| 名称                | 传感器阵列类型             | 传感器数量 | 应用对象                        | 生产厂商            |
|-------------------|---------------------|-------|-----------------------------|-----------------|
| PEN3 型电子鼻         | 金属氧化物半导体            | 10    | 食品、原材料、药品、环境监测              | 德国 Airsense 公司  |
| 智能鼻 FOX4000       | 金属氧化物半导体            | 18    | 产品研发、评价和对比、原材料与产品的质量检验、过程监测 | 法国 Alpha MOS 公司 |
| 便携式气味指纹分析仪 T-Nose | 金属氧化物半导体            | 10    | 烟草、水果、肉品、牛奶                 | 上海昂申智能科技有限公司    |
| LabStation 型电子鼻   | 导电聚合物               | 32    | 食品、化妆品、包装材料                 | 英国 AromaScan 公司 |
| 模块式传感器系统 MOSES11  | 导电聚合物、金属氧化物半导体、石英晶振 | 24    | 橄榄油、有机气体、塑料、咖啡              | 德国 Tubingen 大学  |
| 气味警犬 BH114        | 导电聚合物、金属氧化物半导体      | 16    | 一般可燃性气体                     | 英国 Leeds 大学     |

1.1.2 导电聚合物气体传感器 导电聚合物气体传感器一般由硅基底、金电极和用单体吡咯、苯胺、噻吩等合成的导电聚合物组成,其工作原理也是基于导电聚合物吸附被测气体前后其电阻的变化来感知气体。当聚合物材料与待测气体分子相互接触时会发生电离或共价作用,由于这种相互作用结果使电子沿聚合物链的传输受影响而改变了其导电性,通过这种导电率的变化来测试待测气体分子存在的信息<sup>[19]</sup>。这种传感器比金属氧化物气体传感器灵敏度更高,可达到 10<sup>-7</sup> 级的精度,且可在常温或较低环境温度下使用而无需加热,选择性高、检测速度快,但对环境的湿度敏感,与气体接触响应时存在飘移现象等缺点,适合在便携式仪器中应用。

1.1.3 红外线气体传感器 红外线气体传感器是属于光学式气体传感器的一种。不同波长的红外线在大气中传播时,大气层对其存在不同的吸收带,红外线气体传感器就是利用被测气体的红外吸收光谱特征或热效应来检测气体浓度和辨别气体的种类,光谱范围常在 1~25 μm,主要有 DIR 色散红外线式和 NDIR 非色散红外线式两种类型<sup>[20]</sup>。其优点是可靠性很高、选择性好、精度也高、寿命比较长,受到环境的影响较小,适用于监测各种易燃易爆气体,但其制造的成本比较高,技术还不够成熟,这些缺点使它在市场上的应用受到一定的限制<sup>[21]</sup>。

1.1.4 光纤气体传感器 光纤是一种新型材料,光在光纤中传输时,光特性如振幅、相位、偏振态等随检测气体发生变化

而相应变化。光从光纤射出时,光的特性得到调制,通过对调制光的检测便能感知气体的信息,这便是光纤气体传感器的基本原理。按工作原理光纤气体传感器可分为功能型(或称传感型)和非功能型(或称传光型)两大类。功能型光纤传感器中光纤作为敏感元件,利用光纤在外界因素作用下其传光特性产生变化来检测气体,且光纤在这过程中还起传光的作用;非功能型光纤传感器中采用其它敏感元件感受待测气体,光纤仅作为传光媒介来传输光信号<sup>[22-23]</sup>。光纤气体传感器是一种新型传感器,具有很强的环境适应性和抗电磁干扰能力,响应速度快,且灵敏度高、动态范围广等特点,其应用和发展前景十分广阔。

1.2 信号预处理单元

在电子鼻系统中气体传感器阵列输出的信号是随时间变化且含有噪声的多维动态响应信号,要通过预处理完成响应信号的滤波、放大、A/D 转换、特征提取与选择,其中特征提取是在尽量不丢失有用信息前提下的一种降维的数据预处理方法,通过变换将样品高维空间映射到低维空间,以便在低维空间中提取有用信息和降低原始样品空间中的噪音,为后续模式识别选取合适数量的数据和表达方式,从而有效地减少数据计算量并提高模式识别的效率<sup>[24]</sup>,特征选择基本流程见图 2<sup>[25]</sup>。特征提取有多种选择方法,主要是根据数据的特点、模式识别的方式和识别任务,既可在原始响应曲

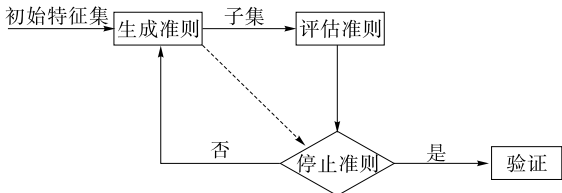


图 2 特征选择流程

Figure 2 Feature selection process

线上实现特征提取,也可通过曲线拟合的方法实现特征提取,或采用变换域的方式实现特征提取。常见的方法主要有相对法、差分法、对数法和归一法等。相对法可补偿传感器敏感性所带来的影响;部分差分模型可补偿传感器敏感性和使传感器电阻与浓度参数依赖关系线性化;对数法可使信号与浓度之间的高度非线性依赖关系线性化;归一法可减小传感器的计量误差,并能满足人工神经网络输入数据的要求<sup>[26]</sup>。

1.3 模式识别单元

在电子鼻系统中模式识别占有举足轻重的地位,它运用一定的算法对气体进行定性或定量分析。电子鼻中被广泛应用的模式识别算法有两大类:统计模式识别和人工神经网络。统计模式识别采用经典的多变量统计分类方法对来自气体传感器阵列的信息进行处理,主要包括 k 近邻法(k—NN)、主成分分析(PCA)、线性判别法(LDA)、聚类分析(CA)、偏最小二乘法(PLS)等<sup>[27]</sup>。人工神经网络(ANN)是一种模仿人脑神经系统处理信息的由大量节点(或称神经元)相互之间以不同形式组成的运算模型,是人工智能领域研究的一个热点。利用人工神经网络仅借助训练样本而不必建立相关的数学模型即可实现对复杂信息的处理、存储且可得到其内部隐含的规律,它具有分布存储、并行处理、自学习、自组织和自适应等特点<sup>[28]</sup>。目前常见的人工神经网络包括误差反向传播人工神经网络、学习向量量化网络、径向基神经网络、模糊神经网络、基于遗传算法的人工神经网络以及自组织网络等。同传统的模式识别方法相比,人工神经网络具有良好的容错性和很强的非线性处理能力,网络经过学习训练后,可以利用自身强大的学习功能寻找出样本的内在规律来分析识别同类事物。

2 电子鼻技术在茶叶中的应用

茶叶香气是茶鲜叶在制茶过程中进行复杂的生化反应而产生的,不同茶树品种、栽培条件、生态环境、加工工艺和包装储藏等都会对茶叶的香气产生影响。茶叶香气是茶叶“色、香、味、形”四大品质指标之一,在茶叶感官审评评分中占有 25%~35% 的权重比例<sup>[29]</sup>,且其与“滋味”又有着一定关系,历来受到人们的重视。茶叶香气的组成非常复杂,任何一种茶叶香气都是其所含的不同芳香物质以不同浓度和种类组合的综合表现,目前从各种茶叶中已分离鉴定出 700 多种香气物质,这些物质含量低、易挥发、不稳定,在提取过程中由于受外界条件的影响,容易发生氧化、缩合、聚合、基团转移等各种复杂的化学反应<sup>[30]</sup>,从而影响提取的香气物

质不能很好地反映茶叶本身的香气特征。因此采用传统提取方法难以做到对茶叶香气客观准确的分析测定,电子鼻技术的出现使得茶叶香气整体信息提取的复杂过程得以实现,为茶叶香气评价提供了新的技术手段。近几年来电子鼻技术在茶叶中的应用受到一定的重视,越来越多的学者开展了这方面的研究,其主要研究成果见表 2。

2.1 电子鼻技术用于茶叶品质的评定

茶叶感官审评是通过人的感觉器官对茶叶的形状、色泽、香气和滋味进行鉴定来判别茶叶品质等级高低的一种方法,是目前国内外茶叶界公认的茶叶品质评定的主要方法,但评定结果易受评茶人员主观因素和客观条件等的影响,存在一定的误差。茶叶理化审评是从理化的角度寻求评定茶叶品质的方法,虽经多年的研究取得了一些成果,但由于存在众多问题至今没有得到应用。为了弥补感官审评的不足,茶叶科研工作者一直以来都在不断探索一种借助于仪器设备来客观、快捷量化评价茶叶品质的新方法。目前一些新技术在茶叶品质评定中逐渐得到应用,国内外已有学者运用电子鼻检测茶叶挥发性成分整体信息再结合模式识别方法来评价茶叶品质优劣,为科学评定茶叶质量寻找一种新思路。于慧春等<sup>[32]</sup>利用电子鼻对 5 个等级西湖龙井炒青绿茶样品的茶叶、茶水和茶底挥发性成分进行检测,对采集到的初始数据进行主成分分析来压缩数据维数,并提取前 5 个主成分的特征值作为模式识别的输入,达到优化特征向量的目的,然后采用线性判别和 BP 神经网络的方法判别茶叶的品质等级。结果表明,两种判别方法得到的判别结果比较一致,以茶水作为研究对象时判别结果最好,并且神经网络方法与线性判别分析方法相比识别精确率要稍好一点;陈哲等<sup>[33]</sup>采用自制的电子鼻,其传感器阵列由 12 个厚膜金属氧化锡传感器组成,经试验对比筛选了 9 个对茶叶香气敏感的传感器,从茶水、茶底气味两方面对碧螺春茶 3 等级样本进行检测,并融合所采集的茶水和茶底数据的最大值、最小值和平均值作为特征变量,在进行主成分分析对数据空间降维后,建立 k—NN 和 BP 神经网络预测模型。结果显示,融合茶水和茶底的特征信息可较好地反映碧螺春茶的品质特点,k—NN 模型对碧螺春茶预测集的识别率为 83.3%,BP 神经网络模型的识别率则达到 100%;薛大为等<sup>[34]</sup>采用德国 Airsense 公司生产的 PEN2 型电子鼻,以 4 种不同等级黄山毛峰茶为样本,通过分析电子鼻传感器阵列(由 10 个金属氧化物气敏传感器组成)对不同品质茶叶气味响应曲线的变化特点,选取传感器响应的最大值和稳态值作为特征变量,并对特征变量进行归一化处理。以这些变量作为 BP 神经网络的输入信号,BP 神经网络结构设计为 20—12—4,采用了改进的附加动量项的学习算法,经过多次试验比较最终学习率和动量因子确定为 0.08,0.50,从而构建了 BP 神经网络黄山毛峰茶品质评定的预测模型。结果表明所建立的预测模型具有较好的识别能力,对训练样本和测试样本的识别准确率分别为 100%,89.3%,也证明了电子鼻技术应用于判别茶叶品质的可行性。

表 2 电子鼻技术在茶叶中的主要应用研究成果

Table 2 Main application and research results of electronic nose technology in tea

| 样品                 | 电子鼻(传感器)                      | 研究内容               | 模式识别方法            | 研究者                                |
|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|------------------------------------|
| 西湖龙井炒青绿茶           | 德国 Aisense 公司 PEN2 型电子鼻       | 茶叶品质等级和贮藏时间的判别与预测  | PCA、LDA、BP—ANN    | 于慧春等 <sup>[31-32]</sup>            |
| 碧螺春茶               | 12 个厚膜金属氧化锡传感器                | 碧螺春茶品质等级判别         | k—NN、BP—ANN       | 陈哲等 <sup>[33]</sup>                |
| 黄山毛峰茶              | 德国 Aisense 公司 PEN2 型电子鼻       | 黄山毛峰茶品质等级评定        | BP—ANN            | 薛大为等 <sup>[34]</sup>               |
| 信阳毛尖茶              | 10 个金属氧化物传感器                  | 茶多酚、氨基酸、咖啡碱含量检测    | MLR、QPSR、BP—ANN   | 张红梅等 <sup>[35-37]</sup>            |
| 有机和普通正山小种红茶        | 法国 Alpha MOS 公司 FOX4000 型电子鼻  | 有机茶和普通茶分类          | CA、PCA、DFA        | 王帅等 <sup>[38]</sup>                |
| 5 种不同加工工艺的茶叶       | 金属氧化物传感器                      | 不同加工工艺茶叶的判别        | PCA、FCM、RBF 神经网络  | Dutta 等 <sup>[39-40]</sup>         |
| 红茶                 | 法国 Alpha MOS 公司 FOX 2000 型电子鼻 | 无性系茶树品种的分类         | PCA               | Nabarun 等 <sup>[41]</sup>          |
| 铁观音、兰贵人、玉针、碧螺春和云雾茶 | 英国 AromaScan 公司 A32 型电子鼻      | 茶叶香味化学成分的分析        | SPME、GC—MS、PCA    | 黄海涛等 <sup>[42]</sup>               |
| 印度红茶               | 金属氧化物传感器                      | 红茶发酵过程监测和最佳发酵时间的确定 | PCA、马氏距离          | Bhattacharyya 等 <sup>[43-44]</sup> |
| 印度红茶               | 金属氧化物传感器                      | 红茶等级分类             | 增量学习 RBF 神经网络     | Tudu 等 <sup>[45-46]</sup>          |
| 信阳毛尖茶              | 金属氧化物传感器                      | 信阳毛尖茶等级判别          | PCA、CA、LDA        | 张红梅等 <sup>[47]</sup>               |
| 不同产地和等级的龙井茶        | 法国 Alpha MOS 公司 FOX4000 型电子鼻  | 茶叶香气质量分类判别         | PCA、DFA GC—MS、PLS | 敖存 <sup>[48]</sup>                 |
| 5 种不同品牌的绿茶         | 8 个 MOS 型气敏传感器                | 绿茶品种的识别            | K Ⅲ 嗅觉神经网络、BP—ANN | 傅均等 <sup>[49]</sup>                |
| 西湖龙井茶              | 法国 Alpha MOS 公司 FOX 4000 型电子鼻 | 西湖龙井茶等级、树种和产地判别    | PCA、SIMCA、GAs     | Shi Bo-lin 等 <sup>[50]</sup>       |
| 云南红茶、龙井绿茶          | 法国 Alpha MOS 公司 FOX4000 型电子鼻  | 云南红茶、龙井绿茶品质等级判别    | GC—MS、PLS         | Qin Zi-han 等 <sup>[51]</sup>       |
| 信阳毛尖茶              | 法国 Alpha MOS 公司 GC-Flash 型电子鼻 | 信阳毛尖茶品质等级预测        | PCA、PLS           | 甘芝霖等 <sup>[52]</sup>               |
| 工夫红茶               | 法国 Alpha MOS 公司 FOX 4000 型电子鼻 | 不同工艺处理的工夫红茶香气的归类鉴别 | PCA、DFA           | 周颖等 <sup>[53]</sup>                |
| 红茶                 | 8 个石英晶体微天平(QCM)传感器            | 红茶发酵过程监控           | PCA               | Sharma 等 <sup>[54]</sup>           |
| 西湖龙井茶              | 法国 Alpha MOS 公司 FOX4000 型电子鼻  | 西湖龙井茶等级判别          | PCA、k—NN、KFDA     | 戴悦雯等 <sup>[55]</sup>               |
| 印度红茶               | 日本 Figaro 公司 MOS 型半导体气体传感器    | 红茶品质等级评价           | 增量式 FCM           | Tudu <sup>[56]</sup>               |
| 黄山毛峰茶              | 德国 Aisense 公司 PEN3 型电子鼻       | 黄山毛峰茶贮藏时间预测        | PCA、BP—ANN        | 杨春兰 <sup>[57]</sup>                |

2.2 电子鼻技术用于茶叶成分的检测

茶叶的组成成分非常复杂,其中主要品质成分为茶多酚、咖啡碱、氨基酸和水分,它们对茶色、茶香和茶味的影响较大。传统的茶叶成分测定方法种类繁多,如用于咖啡碱含量测定的碘量法、重量法、紫外分光光度法等,用于茶多酚含

量测定的高锰酸钾滴定法、酒石酸铁比色法等。这些方法在测定过程中需要繁琐的化学处理,时间长、成本高、结果差异大,且具有破坏性、易产生污染,因此研究一种快速、准确测定茶叶成分的方法具有重要的现实意义。电子鼻技术在食品成分检测分析中有着较为广泛的应用,但在茶叶成分检测

的应用研究报道相对还比较少。张红梅等<sup>[35]</sup>为快速检测茶叶中茶多酚含量,以 3 种不同等级信阳毛尖茶为样本,采用由金属氧化物传感器构成的电子鼻对茶叶气味进行采集,经试验选择 60 s 时刻的响应信号用于数据分析,并以响应曲线的稳定值作为特征值,分别采用多元线性回归(MLR)、二次多项式逐步回归分析(QPSR)和 BP 神经网络方法来建立茶多酚含量的预测模型,并用测试集样本对 3 种预测模型进行了检验。结果表明,3 种预测模型对茶多酚含量的预测都取得较好的结果,BP 神经网络模型在 3 种预测模型中预测标准误差 SEP 和相对误差百分比 ERR 最小,且相关系数 R 最大。该作者还对信阳毛尖茶氨基酸、咖啡碱含量进行研究,运用主成分回归(PCR)、MLR 和 QPSR 方法分别建立信阳毛尖茶氨基酸、咖啡碱含量的预测模型,并用预测集对模型进行验证和比较,结果显示所建的预测模型都是有效的,具有很高的预测能力<sup>[36-37]</sup>。这些研究结果说明了应用电子鼻技术可为茶叶理化成分的快速检测提供一种新的方法。

### 2.3 电子鼻技术用于茶叶品种的判别和分类

茶叶种类繁多,对不同产地的不同茶类,一般其外形和颜色均有较大差异,可比较容易进行区别。而对外形、颜色比较相似的同一茶类不同品种茶叶,有时采用感官审评难以做到准确识别。随着新技术研究的深入与推广,对茶叶品种鉴别的新方法也在不断探索研究中,目前已有学者利用电子鼻通过检测茶叶香气的综合信息特征来判别不同种类茶叶,为茶叶品种的快速、准确、无损检测提供了一种新的途径。王帅等<sup>[38]</sup>利用法国 Alpha MOS 公司 FOX4000 型电子鼻,以有机一级正山小种红茶、普通一级正山小种红茶 1 号、普通二级正山小种红茶 2 号为样本,采用主成分分析(PCA)、判别因子分析(DFA)和聚类分析(CA)方法对样本香气进行分析比较。结果表明,电子鼻都可以成功区分有机正山小种红茶和普通正山小种红茶,并能正确识别 2 种不同品质等级的普通正山小种红茶,这说明应用电子鼻技术可以很好地对有机茶和普通茶进行分类; Dutta 等<sup>[39-40]</sup>应用金属氧化物传感器阵列来检测 5 种不同加工工艺得到的茶叶样本香气,分别采用 PCA、模糊 C 均值聚类(FCM)和 RBF 神经网络方法对采集到的信号进行模式识别,试验表明经过训练的 RBF 神经网络对 5 种不同加工工艺的茶叶识别率为 100%; Nabarun 等<sup>[41]</sup>采用法国 Alpha MOS 公司 FOX2000 型电子鼻对红茶样本的香气进行检测,结果表明所建立的模型可正确对无性系茶树品种进行分类; Katayama 等<sup>[58]</sup>利用电子鼻检测不同品种绿茶的香气,结合相关的模式识别方法,也成功地把不同品种的绿茶区分开来。

## 3 存在问题与展望

电子鼻技术是世界科技界几十年来多学科研究的结晶,作为近年来一个研究热点,在茶叶领域也有初步的应用,主要集中在茶叶品质等级判别、品种分类、成分检测以及红茶发酵过程中品质的检测控制等方面,这些研究成果说明了电子鼻技术在茶叶上应用的可行性,但都还处于实验室研

究阶段,距实际应用还有较大的差距,存在的问题主要表现在以下几个方面:① 气体传感器易受环境温湿度等影响,存在随时间而漂移的现象,如何提高其选择性、稳定性和重复性,降低对工作环境的要求,使得所构成的电子鼻能更加接近生物嗅觉系统。② 气体传感器阵列由于采用不同类型的气体传感器或者选择性不一样的气体传感器,提高了其广谱响应特性和交叉敏感特性,但茶叶种类繁多、成分极为复杂且不稳定,电子鼻中的传感器数量有限,无法与人类嗅觉神经元细胞数量相比,不可能涵盖茶叶气味的所有信息。因此需研究设计专用于茶叶气味检测的气体传感器阵列,以提高电子鼻的识别效果。③ 特征变量的选取对最终识别结果影响重大,在研究中往往侧重于某一方面的因子,缺乏特征变量的选取与识别结果之间相关性的科学论证,只有在正确选取与茶叶气味相关的特征变量基础上,再与相应的模式识别方法相结合,才有可能得到准确的识别结果。④ 选择合适的数据处理方法至关重要,人工神经网络虽能获取比较好的识别效果,但网络结构参数一般只能凭经验来确定而无一完整理论,存在一个最优解的问题;所采用的茶叶训练样本典型性不够强,样本的数量不够多,使得所建立的神经网络模型对盲样识别效果的准确性差,模型适用范围小。只有寻求更好的模式识别方法来模拟人的思维过程,电子鼻才能向着实用化的趋势不断发展。

目前多传感器信息融合(MSIF)已经成为智能系统领域的一个重要研究方向,它是将来自多个传感器的数据和相关信息进行组合从而获得比使用单一传感器更明确的结果,具有与人类通过各种感觉器官所得到认知事物的结果有更好的相似性<sup>[59]</sup>。在今后研究中若能将电子鼻与电子舌、机器视觉、近红外光谱、远红外光谱等进行融合采集茶叶信息,采用电子鼻对茶叶香气进行检测、机器视觉对茶叶外形和汤色进行检测及电子舌对茶叶滋味进行检测,并把采集信息数据进行融合处理,再将神经网络与模糊理论、遗传算法等结合起来,以达到更好模拟人的各种功能器官和思维方式,这将是未来在茶叶识别和检测中的一个重要发展方向。随着新型传感器技术的提高与模式识别方法的不断完善,及科技工作者不断深入地探讨与研究,电子鼻技术在茶叶领域中的应用将逐步从实验室走向实际应用,其应用前景会越来越广阔。

### 参考文献

[1] 高晓骞. 电子鼻模式识别算法的研究与实现[D]. 太原: 中北大学, 2015: 1-4.  
[2] 费雅君, 白雪, 康小红. LDA 优化电子鼻传感器阵列的研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 97-100.  
[3] 庞林江, 王允祥, 王俊, 等. 电子鼻技术在香菇甲醛识别中的应用[J]. 食品与机械, 2009, 25(3): 101-102.  
[4] 巨玉佳, 梁琪, 张炎, 等. 电子鼻联合 GC—MS 分析不同牦牛乳干酪中特征挥发性成分[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 14-17.  
[5] 张振, 李臻锋, 宋飞虎, 等. 电子鼻结合化学计量法用于检测黄酒酒龄[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 57-61.

[6] 张勇, 刘君华, 吴浩扬. 基于遗传神经网络的电子鼻在大气环境气体模式识别的应用[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(3): 225-227.

[7] LAMAGNA A, REICH S, RODRIGUEZ D, et al. The use of an electronic nose to characterize emissions from a highly polluted river[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2008, 131(1): 121-124.

[8] VITO SD, MASSERA E, PIGA M, et al. On field calibration of an electronic nose for benzene estimation in an urban pollution monitoring scenario[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2008, 129(2): 750-757.

[9] CESARE FD, PANTALEI S, ZAMPETTI E, et al. Electronic nose and SPME techniques to monitor phenanthrene biodegradation in soil[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2008, 131(1): 63-70.

[10] 何庆华, 王正国, 田逢春, 等. 电子鼻技术在医学中的应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2010, 27(5): 2 125-2 128.

[11] 喻勇新, 刘源, 孙晓红, 等. 基于电子鼻区分三种致病菌的研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(1): 11-15.

[12] AMICO AD, BONO R, PENNAZZA G, et al. Identification of melanoma with a gas sensor array[J]. Skin Research and Technology, 2008, 14(2): 226-236.

[13] 杨柳, 郭成海, 赵纪萍, 等. 电子鼻检测爆炸物的研究进展[J]. 传感器技术, 2005, 24(7): 1-3.

[14] 王玲, 桂阳海, 张顺平, 等. 电子鼻系统对危险爆炸物的识别研究[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(6): 54-57.

[15] 曾峰, 赵国强, 宋占魁. 智能电子鼻对煤矿火灾预报气味识别的研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(7): 21-24.

[16] 魏广芬, 余隽, 唐楨安. 电子鼻系统原理及技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 3-8.

[17] 樊尚春, 刘广玉, 李成. 现代传感技术[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2011: 186-189.

[18] 崔景慧, 李强, 夏金锋, 等. 半导体金属氧化物气体传感器灵敏性的研究进展[J]. 陶瓷学报, 2013, 34(3): 1-7.

[19] 罗利军, 谭学才, 邹小勇, 等. 导电聚合物传感器的研究进展[J]. 分析测试学报, 2015, 24(4): 122-127.

[20] 宋雪臣, 单振清. 传感器与检测技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012: 42-45.

[21] 王俊杰, 曹丽. 传感器与检测技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 141-143.

[22] 王化祥. 现代传感技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 26-33.

[23] 刘峰. 光纤气体传感器的研究[J]. 工程技术, 2015(5): 254-255.

[24] 余曠浩. 电子鼻技术研究进展[J]. 现代制造技术与装备, 2011(6): 8-12.

[25] DASH M, LIU H. Feature selection for classification[J]. Intelligent Data Analysis, 2010, 1(s1/4): 131-156.

[26] 刘辉, 牛智有. 电子鼻技术及其应用研究进展[J]. 中国测试, 2009, 35(3): 6-10.

[27] 冯敬伟. 电子鼻系统信号处理技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013: 21-30.

[28] 潘玉成. 人工神经网络在坦洋工夫红茶感官品质评定中的应用研究[J]. 茶叶科学, 2015, 35(5): 465-472.

[29] 龚淑英, 鲁成银, 刘栩, 等. GB/T 23776—2009 茶叶感官审评方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 8-15.

[30] 李明, 曾茜, 孙培冬, 等. HS—SPME/GC—MS 分析无锡绿茶香气成分[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 32-36.

[31] 于慧春. 基于电子鼻技术的茶叶品质检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 50-71.

[32] 于慧春, 王俊. 电子鼻技术在茶叶品质检测中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2008, 21(5): 748-752.

[33] 陈哲, 赵杰文. 基于电子鼻技术的碧螺春茶叶品质等级检测研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(11): 133-137.

[34] 薛大为, 杨春兰. 基于电子鼻技术的黄山毛峰茶品质检测方法[J]. 湖北工程学院学报, 2014, 34(3): 64-67.

[35] 张红梅, 田辉, 何玉静, 等. 茶叶中茶多酚含量电子鼻技术检测模型研究[J]. 河南农业大学学报, 2012, 46(3): 302-306.

[36] 张红梅, 何玉静, 李祥付. 信阳毛尖茶品质和化学成分快速检测方法[J]. 河南科学, 2014, 32(5): 746-751.

[37] 张红梅, 王俊, 余泳昌, 等. 基于电子鼻技术的信阳毛尖茶咖啡碱检测方法[J]. 传感技术学报, 2011, 24(8): 1 223-1 227.

[38] 王帅, 李文举, 韦丽华, 等. 基于电子鼻的有机正山小种红茶的检测[J]. 食品科技, 2015, 40(11): 292-295.

[39] DUTTA R, HINES EL, GARDNER JW, et al. Tea quality prediction using a tin oxide-based electronic nose: an artificial intelligence approach[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2003, 94(2): 228-237.

[40] DUTTA R, KASHWAN KM, HINES EL, et al. Electronic nose based tea quality standardization[J]. Neural Networks the Official Journal of the International Neural Network Society, 2003, 16(5/6): 847-853.

[41] NABARUN B, PAWAN K. Aroma characterization of black tea using electronic nose [C]// Proceedings of 2004 International Conference-CHA (tea) Culture and Science. Tokyo: Tencon IEEE Region 10 Conference, 2004: 117-120.

[42] 黄海涛, 陈章玉, 施红林, 等. 茶叶香味扫描和挥发性化学成分分析[J]. 分析化学研究简报, 2005, 33(8): 1 185-1 188.

[43] BHATTACHARYYA N, SETH S, TUDU B, et al. Monitoring of black tea fermentation process using electronic nose[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(4): 1 146-1 156.

[44] BHATTACHARYYA N, SETH S, TUDU B, et al. Detection of optimum fermentation time for black tea manufacturing using electronic nose[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2007, 122(2): 627-634.

[45] TUDU B, METLA A, DAS B, et al. Towards versatile electronic nose pattern classifier for black tea quality evaluation: an incremental fuzzy approach[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(9): 3 069-3 078.

[46] TUDU B, JANA A, METLA A, et al. Electronic nose for black tea quality evaluation by an incremental RBF network[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2009, 138(1): 90-95.

[47] 张红梅, 高献坤, 徐国强, 等. 基于气敏传感器阵列的茶叶等级检测方法研究[J]. 河南农业大学学报, 2010, 44(2): 177-179.

[48] 敖存. 龙井茶香气质量评价电子鼻辅助方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011: 26-44.

[49] 傅均, 邢建国. 嗅觉神经网络在电子鼻识别多品牌绿茶中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(3): 313-318.

8(1): 17-30.

[44] WANG Xi-wei, ZHAO Mao-cheng, JU Rong-hua, et al. Visualizing quantitatively the freshness of intact fresh pork using acousto-optical tunable filter-based visible/near-infrared spectral imagery[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 99(7): 41-53.

[45] BARBIN D F, ELMASRY G, SUN Da-wen, et al. Predicting quality and sensory attributes of pork using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Analytica Chimica Acta, 2012, 719(10): 30-42.

[46] CHEN Quan-sheng, ZHANG Yan-hua, ZHAO Jie-wen, et al. Nondestructive measurement of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in salted pork in jelly using a hyperspectral imaging technique combined with efficient hypercube processing algorithms[J]. Analytical Methods, 2013, 5(22): 6 382-6 388.

[47] HUANG Lin, ZHAO Jie-wen, CHEN Quan-sheng, et al. Non-destructive 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(7): 228-236.

[48] LI Huan-huan, CHEN Quan-sheng, ZHAO Jie-wen, et al. Nondestructive detection of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in pork meat by integrating hyperspectral imaging and colorimetric sensor combined with a nonlinear data fusion [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2015, 63(1): 268-274.

[49] FERGUSON B, ZHANG Xi-Cheng. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.

[50] 杨航, 赵红卫, 张建兵, 等. 生物组织脱水过程的太赫兹时域光谱[J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(3): 263-267.

[51] 刘畅, 岳凌月, 王新柯, 等. 利用太赫兹反射式时域光谱系统测量有机溶剂的光学参数[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(6): 1 471-1 475.

[52] MARKELZ A G, ROITBERG A, HEILWEIL E J. Pulsed terahertz spectroscopy of DNA, bovine serum albumin and collagen between 0. 1 and 2. 0 THz[J]. Chemical Physics Letters, 2000, 320(1/2): 42-48.

[53] 张希成, 许景周. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 238.

[54] SHEN Y C, UPADHYA P C, LINFIELD E H, et al. Temperature-dependent low-frequency vibrational spectra of purine and adenine[J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(14): 2 350-2 352.

(上接第 200 页)

[11] 刘加友, 王振斌. 微生物酵素食品研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(1): 273-276.

[12] 王小萱. 健康产业后起之秀-酵素产业可持续发展提速快行[N]. 中国食品报, 2015-12-11(001).

[13] 王晓宇, 杜国荣, 李华. 抗氧化能力的体外测定方法研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2012, 31(3): 248.

[14] 陆颖影, 胡国勇, 王兴鹏. 肠道菌群与相关代谢性及消化系统疾病的关系[J]. 国际消化病杂志, 2015, 35(2): 126-128.

[15] 董银卯, 何聪芬, 王领, 等. 火龙果酵素生物活性的初步研究[J]. 食品科技, 2009, 34(3): 192-196.

[16] 金寒冰, 方丽, 赖蓓蕾, 等. 苦苣多酚超声辅助提取及抗氧化研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 211-215.

[17] 朱晓宦, 吴向阳, 仰榴青, 等. 马齿苋粗多糖的提取及清除羟自由基活性作用[J]. 江苏大学学报: 医学版, 2007, 17(1): 57-60.

[18] 宋阳, 王亚琼, 赵丽恋, 等. 基于淀粉酶活性检测的麦芽质量评价方法[J]. 药学进展, 2010, 34(9): 411-417.

[19] 刘文信, 姜开荣. 发酵醪液中糖、有机酸、乙醇的 HPLC 分析[J]. 化学工程师, 2013(3): 27-28.

[20] KADER A A. Flavor quality of fruits and vegetables[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2008, 88(11): 1 863-1 868.

[21] 董霞. 啤酒中有机酸类物质的研究——啤酒有机酸与口感关系的初步研究[D]. 江苏: 江南大学, 2004: 3-4.

[22] 张旭晖, 王恬, 冀凤杰, 等. 有机酸化剂对断奶仔猪生长性能和肠道健康的影响[J]. 动物营养学报, 2012, 24(3): 507-514.

[23] BRUL S, COOTE P. Preservative agents in foods. Mode of action and microbial resistance mechanisms[J]. Int. J. Food Microbiol., 1999, 50(1/2): 1-17.

[24] 李志华. 泡菜中五种有机酸的高效液相色谱分离分析[D]. 湖南: 湖南师范大学, 2011: 9-13.

(上接第 218 页)

[50] SHI Bo-lin, ZHAO Lei, ZHI Rui-cong, et al. Optimization of electronic nose sensor array by genetic algorithms in Xihu-Longjing Tea quality analysis[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(3/4): 752-758.

[51] QIN Zi-han, PANG Xue-li, CHEN Dong, et al. Evaluation of Chinese tea by the electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry: Correlation with sensory properties and classification according to grade level[J]. Food Research International, 2013, 53(2): 864-874.

[52] 甘芝霖, 刘远方, 杨阳, 等. 基于电子鼻技术的信阳毛尖茶品质评价[J]. 食品工业科技, 2013, 34(2): 54-57.

[53] 周颖, 刘任, 谭婷, 等. 电子鼻对不同加工处理工夫红茶香气聚类的方法评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(5): 1 611-1 618.

[54] SHARMA P, GHOSHA A, TUDU B, et al. Monitoring the fermentation process of black tea using QCM sensor based electronic nose[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 219(5): 146-157.

[55] 戴悦雯, 支瑞聪, 赵镭, 等. 基于龙井茶香气风味特性的品质判定[J]. 食品科学, 2015, 36(10): 110-113.

[56] TUDU B, GHOSH S, BAG A K, et al. Incremental FCM technique for black tea quality evaluation using an electronic nose [J]. Fuzzy Information and Engineering, 2015, 7(3): 275-289.

[57] 杨春兰, 薛大为, 鲍俊宏. 黄山毛峰茶贮藏时间电子鼻检测方法研究[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(4): 676-681.

[58] KATAYAMA S, TAKEUCHI H, TANIGUCHI H, et al. Odor analysis of green tea by sensors[C]// Proceedings of 2004 International Conference-CHA (tea) Culture and Science. Tokyo: Tencon IEEE Region 10 Conference, 2004: 642-646.

[59] 王俊, 崔绍庆, 陈新伟, 等. 电子鼻传感技术与应用研究进展[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 160-167.