

电子鼻在食品掺假鉴定中的应用研究进展

Research progress of electronic nose on identification of food adulteration

张桂云¹ 谢建华¹ 杨伟强²

ZHANG Gui-yun¹ XIE Jian-hua¹ YANG Wei-qiang²

(1. 漳州职业技术学院, 福建 漳州 363000; 2. 闽南师范大学化学化工与环境学院, 福建 漳州 363000)

(1. Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou, Fujian 363000, China; 2. College of Chemistry, Chemical Engineering and Environment, Minnan Normal University, Zhangzhou, Fujian 363000, China)

摘要: 研究简要介绍了电子鼻的工作原理, 包括气体传感阵列和信号处理两个关键要素; 综述了电子鼻在食用油、乳制品、饮料、肉类、香料等多种食品中掺假鉴别和品质分析方面的应用; 阐明了电子鼻在食品掺假鉴定的使用方法和分析原理; 剖析了电子鼻在该领域应用的成功案例及不足。

关键词: 电子鼻; 食品风味; 气体传感; 识别模式; 掺假鉴别; 品质分析

Abstract: This paper introduces the working principle of electronic nose via two key elements including gas sensor array and signal processing. The applications of electronic nose in adulteration identification and quality analysis of edible oil, dairy products, beverage, meat, spices, and other foods are reviewed. The operations and analytical principle of electronic nose for food adulteration are clarified, and the successful applications of electronic nose as well as the shortcomings are discussed.

Keywords: E-nose; food odor; gas sensing; recognition pattern; adulteration identification; quality analysis

食品掺假是指人为地向食品中加入一些非固有成分, 以增加其重量或体积; 或用便宜的原料替代昂贵的配料。各个国家和安全监管机构大多针对食品中的有毒有害物质制定了限量标准, 保障了加工食品的安全; 但对食品质量水平、品质等级的管控还处于监管盲区, 这有赖于食品掺假鉴定手段的发展和成熟^[1]。感官分析是鉴定食品掺假原始而有效的方法, 主要通过眼、鼻、舌等感官来

鉴定食品的风味特征, 并区分掺假、劣质产品, 具有方便快捷的优点, 而个人对食品风味的感受不一, 存在人为误差、嗅觉疲劳、评价结果不客观等缺点, 且感官分析通常需要经过一定的培训, 因此这种方法难以成为一种普适性强、应用广泛的技术手段。化学检测方法可以分析食品中的各种成分和含量, 能够准确、有效地区分掺假食品, 但这种分析需要复杂繁琐的前处理过程, 也依赖于各种贵重的仪器设备以及专业的操作技术, 无法满足现场、快速的监管检测^[2]。

电子鼻(Electronic nose, E-nose)是一种模拟嗅觉的电子系统, 主要由一组交叉敏感的气体传感阵列和适当的模式识别系统组成, 可识别简单或复杂的气体成分, 可用于区分食品的品质、产地和工艺, 鉴定食品的等级及贮藏时间, 检测食品的成熟度和新鲜度。20 世纪 80 年代, Persuad 等^[3]用电子鼻对多种有机挥发气体进行了类别分析, 开创了电子鼻研究的先河; 1990 年, 第一届电子鼻专题学术会议召开, 此后关于电子鼻的设计标准和相关技术研究日益广泛^[4]。经过数十年的发展, 电子鼻技术日趋成熟, 已开发出多款集成化、便携式的商用仪器; 通过分析目标物的气味特征来进行鉴别, 具有响应速度快、易于使用、预处理简单等优点。目前, 电子鼻技术已在农产品质量评估^[5]、医药卫生监管^[6]、公共安全^[7]等领域展现出良好的应用前景; 尤其是对于复杂体系的快速分析。研究拟从电子鼻的技术原理出发, 综述电子鼻在食品掺假鉴定中的应用, 剖析电子鼻在该领域应用的成功案例及不足, 提出新的研究方向及思路, 以为食品质量监管和产业升级发展提供依据。

1 电子鼻工作原理

食品在生产过程中会产生多种类型的挥发性化合物, 包括醇类、酚类、酯类、氨基酸、倍半萜等化学成分, 这些挥发性化合物构成了食品特有的气味, 并被认为可用于评价食品质量的特征参数。掺假后的食品由于成分

基金项目: 福建省自然科学基金(编号: 2020J01132, 2020J05163); 漳州市自然科学基金(编号: ZZ2020J26); 漳州市食品产业技术研究院开放课题(编号: ZSY2020201)

作者简介: 张桂云, 女, 漳州职业技术学院讲师, 硕士。

通信作者: 杨伟强(1986—), 男, 闽南师范大学副教授, 博士。

E-mail: yangwq1@163.com

收稿日期: 2022-08-15 **改回日期:** 2023-01-18

改变、气味特征也会发生细微的变化,据此可以通过食品气味来鉴定食品品质^[8]。

电子鼻是一种模拟人的嗅觉系统的气体传感器阵列检测系统,对检测对象特定挥发性成分或气体提供气味指纹图谱,通过模式识别进行定性或定量的分析识别和检测,实现品质评价。主要包括 3 个部分:① 气敏传感器阵

列,如同人的嗅觉细胞,气味分子被电子鼻中的气体传感阵列吸附并产生信号;② 信号处理系统,如同人的嗅觉神经网络,对生成的信号经过加工处理与传输;③ 模式识别系统,如同人的大脑对气味做出判断,对采集到的信号数据经模式识别系统做出判断。电子鼻与嗅觉评价原理对比如图 1 所示。

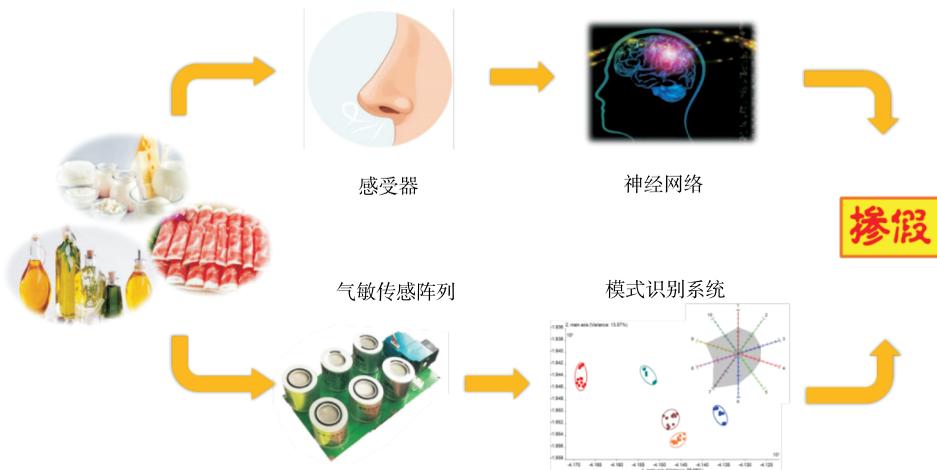


图 1 电子鼻与人类嗅觉评价原理对比图

Figure 1 Working principle of electronic noses in comparison with human olfactory sensation

在分析检测过程中,通常需要将样品置于密闭顶空瓶中,利用气流将待测样品的挥发气体带入气体传感阵列腔中并产生响应信号,这些信号经过滤波、特征提取等处理后形成样品的气味指纹图谱,再利用化学计量的方法进行各种分析并最终做出判断。因此,传感阵列的设计构造、响应灵敏度,以及恰当的模式识别算法是电子鼻的核心要素。

1.1 气敏传感器阵列

气敏传感器阵列是电子鼻检测系统的基础部件,由多个具有交叉敏感特性的气敏传感器组成,传感器的类型和数量是决定电子鼻适用性的重要因素之一。气体分子在传感器表面吸附并产生特定的信号,气敏传感器根据敏感材料的组成和工作原理的不同可分为:金属氧化物半导体传感器、导电聚合物传感器、金属氧化物场效应管传感器、石英晶体微天平传感器、表面声波传感器、光

学气敏传感器等^[9]。其中,金属氧化物半导体(MOS)和导电聚合物(CP)传感器是电子鼻使用的主流传感器。金属氧化物半导体气敏传感器以 SnO₂ 等金属氧化物作为敏感膜,在吸附气体分子后会引发其电导率等伏安特性变化,从而产生检测信号。MOS 具有气体响应灵敏度高,结构简单、易集成,生产工艺成熟、成本低等优势,是电子鼻中运用最为广泛的气敏传感器。导电聚合物气敏传感器主要以聚吡咯、聚噻吩、聚苯胺等有机物聚合物作为敏感膜,当气体分子与聚合物的导电骨架相结合时,能够引起电阻的增大而产生检测信号。导电聚合物传感器最大的优点是能在常温下工作、灵敏度较高,缺点是对湿度敏感、响应会随时间漂移,且该材料的电聚合过程较为困难和费时、生产工艺重复性差。历经数十年的发展,不同的公司已开发出多款集成化、便携式的电子鼻系统并商用(见表 1)。

表 1 一些常见的电子鼻及传感参数

Table 1 Some common electronic noses and the sensing parameters

型号	制造商	产地	传感类型	传感器个数	流速/(mL·min ⁻¹)	采集时间/s	检出浓度/(mg·m ⁻³)	参考文献
PEN2、PEN3	Airsense analysis GmbH	德国	MOS	10	400	120	1	[10-13]
FOX、Heracles	Alpha MOS	法国	MOS	6~24	150	120	1	[14-15]
BH114、ST214	Bloodhound Sensors	英国	CP	14	200	120	0.1	[6]
Cyranose 320	Smiths Detection Group	美国	CP	32	120	120	0.1	[16-17]
E-nose I	浙江大学	中国	MOS	12	300	80	1	[5]

1.2 识别模式

电子鼻对分析结果的优劣与信号处理的方法密切相关。首先,系统需要对传感器产生的信号进行滤波、交换和特征提取,其中特征提取是关键步骤,经常采用的方法包括差分法、归一法和相对法。对信号进行预处理后,便需要通过模式识别过程对获得的信息进行分析,以获得混合气体的组成成分和浓度信息。模式识别过程一般分为学习和应用两个阶段,即通过一个样本集来训练电子鼻使其明确被测气体的特征,然后通过模式识别对新样本进行辨识。模式识别的方法多种多样,且不同场景下的应用效果不同,表 2 列出了电子鼻检测系统中常用的模式识别算法原理及应用举例^[5]。这些识别模式的具体算法各不相同,但整体思路都是根据测得数据的特征对样本进行分类,从而发现远离大多数样本的离群点,并以点群等直观的方式进行体现。

2 电子鼻在食品掺假鉴定中的应用

2.1 食用油

食用油在食品烹饪、配方和保鲜方面使用广泛,非法的食用油掺假严重危害人体健康;品质好、营养价值高的油品具有更高的市场价格,不法商贩通常在高品质的油品中掺入便宜的油、脂肪或固醇类化合物来谋取利润。电子鼻对挥发性气体具有高度敏感性,通过简单地加热油品并对其挥发气体成分进行分析,可用于多种食用油纯度和掺假情况的分析。殷志康等^[10]用 PEN3 电子鼻对

掺入不同比例餐厨废弃油脂的花生油进行分析,发现掺假油样中硫化物、氮氧化物、甲烷、乙醇 4 类气体的响应值与纯花生油存在明显差异;采用 PCA 和 LDA 方法均能较好地鉴别出掺假油品,可为“地沟油”的食品安全监管提供强有力的技术支持。Karami 等^[33]装配了 8 种 MOS 传感器(对乙醇、有机溶剂、二氧化硫、一氧化碳、烷烃、氨/苯、硫化氢/甲苯、乙醇/有机溶剂混合物响应)的电子鼻系统来研究食用油的氧化变质过程,并比较 PCA、LDA、ANN 几种识别模式判别出氧化油品的能力,其中 ANN 的准确率最高,可作为一种快速分析油品中过氧化值的有效方法。采用类似的电子鼻系统对橄榄油中掺假煎炸油的情况进行分析,结果表明在识别模式中引入超声特征维度的信号可以进一步提高分类结果的准确度^[37]。

“以次充好”也是一种常见的掺假情况,用 PEN2 电子鼻可以区分茶籽油、芝麻油中掺假玉米油的情况,且研究结果表明 LDA 的分析结果优于 PCA,其对掺假茶籽油和芝麻油的鉴定准确率分别达 83.6% 和 94.5%^[21]。牡丹籽油、大豆油、玉米油、葵花籽油、菜籽油含有不同类型和营养价值的脂肪酸,其中牡丹籽油含有较多的 α -亚麻酸而具有较高的价值;传统的碘量法无法区别出掺假了其他油品的牡丹籽油,但使用 PEN3 电子鼻传感检测(60 s),利用 LDA 方法能很好地鉴别纯品牡丹籽油和其他掺假油品^[38]。酥油具有丰富的香气特征和营养价值,在烹饪中起重要作用;Mrinmoy 等^[18]用电子鼻研究了大

表 2 常用算法的识别原理及应用

Table 2 Principle and application of the frequently used statistical analysis methods

识别模式	算法原理	参考文献
主成分分析 (PCA)	将原来众多具有一定相关性的变量通过正交变换重新组合成几个新的、互相无关的综合变量,并最大限度地保留原始信息。选取两个主成分并得到样本在二维平面上的分布情况,对样本进行分类、发现远离大多数样本的离群点	[10-11, 15, 18-20]
线性判别分析 (LDA)	一种经典的线性学习方法,需要一定的样本容量。对给定的样本训练集,设法将其投影到一条直线上,使得同类样本尽可能接近,异类样本尽可能远离;再根据新样本投影点距离该直线的远近,判别新样本是否异类	[21-26]
偏最小二乘回归 (PLS)	使用最小二乘回归方法建立多因变量与多自变量之间的关系模型,具有预测的功能。为有监督模式识别,即结合已知样本的真实信息,注意在 PCA 中被忽略的自变量对因变量的解释问题。也适用于样本点数少于自变量个数的情况	[27-29]
支持向量机 (SVM)	对数据进行二元分类的广义线性分类器,创建一个最优的超平面,可以很好地区分属于相反类别的数据,且与两个不同类别的数据点具有最大间隔。用一组已知类别的样本可以训练 SVM,从而用于新样本的分类,属于有监督的学习模型	[12, 30-32]
人工神经网络 (ANN)	模拟生物体内神经网络的结构和功能,进行分布式并行信息处理的数学模型。由大量的节点相互连接构成,每个节点代表一种特定的输出函数,连接线代表该信号的权值,具有一定的拓扑结构。通过分析、掌握输入-输出数据之间潜在的规律,调整内部节点之间相互连接的关系达到处理信息的目的;具有很强的自主学习和对对象适应能力	[13, 33-36]

豆油掺假酥油油品的气味特征,PCA 模型可准确区分不同掺假水平的酥油,表明电子鼻可作为酥油掺假的快速筛选技术。为验证电子鼻鉴定结果的可靠性,通常采用气相色谱/质谱等方法进行结果比对;如在橄榄油中掺假榛果油,电子鼻分析方法和固相微萃取-气相色谱/质谱法的结果吻合度好,且省时省力^[39]。综上,电子鼻在食用油纯度以及掺假鉴定中,具有简便、高效、准确等优点,结合多元分析模式是食用油掺假检测的强有力手段。

2.2 乳制品

乳制品的市场销量大、价格高,容易通过添加其他廉价物质或减少重要营养成分而掺假,如牛奶可以掺入便宜的替代品,以增加蛋白质、脂肪含量,并延长保质期,而这类掺假难以用常规的检测方法予以鉴别。用水稀释脱脂牛奶或者加入复方奶粉是常见的掺假手段,通过电子鼻分析样本的气味轮廓特征,运用 PCA、LDA 等模型即可将 4 d 内的纯牛奶和掺假牛奶区分开,无需繁琐的检测^[22]。利用电子鼻还可以研究不同贮藏温度下的品质变化,建立样品货架期预测模型,为市场监管提供有效的监测手段^[14]。酸度是衡量牛奶新鲜度的指标之一,加入碳酸钠等酸性中和剂可掩盖原料奶在贮藏和运输过程中的酸化变质;Tian 等^[40]将快速气相色谱与电子鼻结合,构建了判别原料奶真实性的有效模型,准确率在 94.7% 以上。Tohidi 等^[30]用电子鼻研究了原料奶中微量抗菌剂的掺假情况,结果显示单独的 LDA 方法不能很好地区分掺假样,而结合了 SVM 的 PCA 方法能够将掺假抗菌剂鉴定的准确率提高至 90%。

电子鼻也能较好地区分其他类型奶样的掺假情况。贾茹等^[11]在羊奶粉中掺入植物蛋白粉、动物蛋白粉、大豆蛋白粉、乳清蛋白粉、尿素来制备掺假奶样,使用 PEN3 电子鼻对各奶液样本进行分析,结果表明 PCA 和 LDA 模式均能够较好地区分不同类别的掺假羊奶。在骆驼乳的气味特征研究^[27]中,PEN3 电子鼻的 PLS 模型能够很好地鉴别驼乳和掺假驼乳样品,且对驼乳中牛乳掺假的最低检测限为 1%。奶酪具有独特的香气特征,也可用电子鼻对掺假奶酪进行鉴别。在几种识别模式中,PCA 的分类率较低,只有纯奶酪形成单独的簇而掺假奶酪很难区分;LDA 能够正确区分纯奶酪和掺假奶酪,且任意两种掺假奶酪之间较少重叠;SVM 对所有样本的分类正确率达 97.9%^[31]。Ayari 等^[34]开发装配了 8 个 MOS 传感器的电子鼻系统,用于人造奶油掺假牛酥油的研究,结果表明 PCA 方法能较好地解释掺假导致的气味成分变化,而 ANN 模型对真伪样品的分类准确率可达 97.2%。综上,分析模型对样本具有一定的适用性,对于不同的分析样本及目标需要采用不同的分析模型。

2.3 饮品类

酒精饮品存在着严重的非法掺假行为,如稀释酒精、添加色素和调味剂、使用廉价替代品等一系列问题^[41],电

子鼻可以很好地对酒的掺假情况进行鉴别,包括检测掺假浓度以及品质评价。Penza 等^[35]研发含金属催化剂的薄膜阵列传感器,组成高灵敏的电子鼻系统,用于意大利葡萄酒中掺假情况的研究;ANN 模型对葡萄酒及掺假样本的聚类准确率达 93% 以上,对掺假样中甲醇、乙醇含量也具有很好的预测精度。Peng 等^[15]使用 Heracles 电子鼻对中国铜山高粱酒进行了分析,考察了不同产地以及掺假白酒的挥发性香气的差异,并利用 PCA 和判别因子分析建立了判别模型,分类正确率达 93%。Cyranose 320 电子鼻具有较低的检出浓度,用其对果汁-酒精的复杂混合物进行分析、分类,结果表明对于不同果汁(如苹果、柠檬、橙汁等)与酒精(如伏特加、威士忌等)的组合,仍需配合使用不同的识别模式(如 LDA、ANN、SVM 等)才能获得较好的区分效果^[16]。乔森等^[42]通过 LightGBM 算法建立了一种新的葡萄酒品种鉴别模型,对 7 种葡萄酒的判别准确率达到 96.6%。

果汁掺假鉴别也是一个重要的研究领域,检测的准确性依赖于各种仪器类型和模式识别算法。Rozanska 等^[43]利用 Heracles 电子鼻对橙汁中混合不同比例的苹果汁进行了分类鉴别,准确性可达 100%。Shen 等^[23]使用 FOX 3000 电子鼻对新鲜橙汁中掺假浓缩橙汁粉进行了检测,由于新鲜橙汁和掺假橙汁的化学成分基本一致,采用改进的 LDA 方法聚类效果远好于 PCA。Rasekh 等^[36]从传感器的特征响应性能出发,筛选出对新鲜和加工后果汁区分能力强的传感器并搭建电子鼻传感系统,结合 ANN 模型可以对橘子、柠檬、草莓、芒果 4 种果汁的真实性进行高效、快速的鉴别。Hong 等^[12]使用 PEN2 电子鼻鉴别掺有熟番茄汁的新鲜樱桃番茄汁,PCA 对纯果汁和掺假果汁的区分方差在 90% 以上,SVM 对所有掺假样本的鉴别准确率均为 100%;研究还显示,在区分樱桃番茄果汁掺假时,电子鼻和电子舌融合模式的识别方法效果更好。

蜂蜜中也容易用加掺入水、糖浆等,电子鼻可在一定程度上对其真伪样品进行区分。使用 PEN3 电子鼻对蜂蜜中不同果葡糖浆掺假水平进行研究,结果表明 PCA 和 LDA 均能区分掺假蜂蜜,LDA 还具有半定量鉴别的能力^[17]。Zakaria 等^[24]进一步联合电子鼻和电子舌技术,对 18 种蜂蜜、糖浆和掺假样品进行分类和鉴别;在区分纯蜂蜜和掺假蜂蜜上,LDA 比 PCA 具有更好的聚类性能,利用概率神经网络(PNN)区分样本的有效率达 92.59%。电子鼻对掺假蜂蜜的分类准确度还有待提高,联合光谱等其他手段可改善分析效果^[44]。

2.4 肉类

香气是肉以及肉制品的一个重要指标,不同肉类的挥发性成分组成不同^[45],用电子鼻进行肉类的掺假检测是完全可行的。Tian 等^[25]使用 PEN2 电子鼻,研究了羊肉中掺入不同水平猪肉的气味指纹,在使用的几种识别模式中,LDA 对纯羊肉和掺假羊肉的聚类效果最好;结合

电子舌的数据对样品进行分类,发现反向传播神经网络(BPNN)最适合识别羊肉中掺入猪肉的情况。Wang等^[28]利用固相微萃取对挥发性化合物进行提取,并用PEN3电子鼻分析了羊肉中掺假鸭肉的情况;结果显示,LDA分类方法的准确率达98.2%,多层感知器网络(MLPN)的准确率达96.5%,PLS回归分析的线性相关系数 >0.95 。结合气相色谱-质谱法可进一步厘清掺假成分对气味特征的改变情况,在烤羊肉掺入鸭肉的分析中,发现采用PCA方法能进行有效区分的种类差异主要是醇类,在PLS中可以找出5种关键的特征挥发性物质^[29]。许文娟等^[19]使用PEN3电子鼻对不同比例猪肉掺假的牛肉样品进行分析,采用PCA方法能有效地区分掺假牛肉,证明了电子鼻技术在掺假牛肉鉴别研究中的可行性。Huang等^[13]进一步利用电子鼻数据,建立了一种以卷积神经网络(CNN)为骨干、随机森林(RF)为回归函数的识别模型,由于RF具有较强的预测能力,提高了模型对牛肉中掺假猪肉定量检测的准确性。综上,电子鼻系统结合多元算法可以有效识别肉类掺假,对监管食品欺诈具有重要意义。

2.5 香料

电子鼻能快速检测香料中的气味成分变化,但香料成分更为复杂,需要更多的特征数据以获得可靠的分析模型。如Banach等^[26]用装配有38个MOS传感器的电子鼻,研究了香肠中掺有咖喱香料和大蒜香料的分类情况,并与离子迁移谱的检测数据结合;结果显示,PCA可以对混合香料的成分进行聚类,LDA能较好地地区分掺假其他成分的香料。联合使用其他分析技术也是获取多维数据的有效方法,如Tabri等^[46]结合电子鼻和电子舌系统,研究了不同产地以及掺杂了香菜的孜然粉,PCA结果可以区分不同的样本,但准确性仍有待提高。藏红花具有独特的香气指纹,是一种重要的香料;利用电子鼻对红花染料掺假的藏红花进行分类鉴别,结果显示PCA对所有样本的聚类效果都很好,分类准确率达100%,而ANN的分类准确率在86.87%以上^[20]。Kiani等^[32]进一步结合电子鼻和机器视觉技术,研究了藏红花中红花染料和黄花染料在10%~50%掺假水平的情况。PCA对红花染料掺假样本的分类准确率为95%,而对黄花染料掺假样本的分类准确率达到99%;使用SVM分类模型进行训练和验证,其中85%的数据集用于训练,得到了更高的区分准确率。综上,电子鼻系统中的PCA、LDA、ANN和SVM可作为鉴定香料真伪的有效方法。

3 总结与展望

综上,电子鼻具有成本较低、操作简便、快速灵敏、结果客观可靠、稳定性好以及可用于现场监测等优势,在多种食品的掺假鉴别和品质鉴定方面展现出较好的应用价值。研究人员不断地研发新的传感技术、完善仪器的构

造设计、优化模式识别的算法,使得电子鼻技术在食品掺假鉴定中的应用逐步增加并不断取得新的进展。目前,电子鼻技术还存在一些问题:传感器的灵敏度和选择性有待进一步提高,基线漂移和稳定差的问题有待解决;后期的模式识别算法专业知识性强、建模需要大量数据,缺乏通用易懂的分析方法以及友好的人机互动界面。为此,可结合生物仿生技术、纳米材料等开发多功能、抗环境干扰的新型气体传感器;将电子鼻与电子舌、红外光谱、机器视觉等分析手段联合使用、优化识别模式,以便人们获得更多检测对象的信息,更准确地做出判断。随着新型传感技术、微细加工技术、先进信号处理算法等的快速发展,相信电子鼻技术将会在更广阔的领域大放异彩。

参考文献

- [1] CHOUDHARY A, GUPTA N, HAMEED F, et al. An overview of food adulteration: Concept, sources, impact, challenges and detection[J]. *International Journal of Chemical Studies*, 2020, 8(1): 2 564-2 573.
- [2] BANSAL S, SINGH A, MANGAL M, et al. Food adulteration: Sources, health risks, and detection methods[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(6): 1 174-1 189.
- [3] 许文娟, 赵晗, 王洪涛, 等. 电子鼻在食品安全检测领域的研究进展[J]. *食品工业*, 2022, 43(2): 255-259.
- [4] XU W J, ZHAO H, WANG H T, et al. Research progress of electronic nose in the field of food safety detection [J]. *Food Industry*, 2022, 43(2): 255-259.
- [5] AL-DAYYENI W S, AL-YOUSIF S, TAHER M M, et al. A Review on electronic nose: Coherent taxonomy, classification, motivations, challenges, recommendations and datasets[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 88 535-88 551.
- [6] JIA W, LIANG G, JIANG Z, et al. Advances in electronic nose development for application to agricultural products [J]. *Food Analytical Methods*, 2019, 12(10): 2 226-2 240.
- [7] WASILEWSKI T, MIGON D, GEBICKI J, et al. Critical review of electronic nose and tongue instruments prospects in pharmaceutical analysis[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2019, 1 077: 14-29.
- [8] BONAH E, HUANG X, AHETO J H, et al. Application of electronic nose as a non-invasive technique for odor fingerprinting and detection of bacterial foodborne pathogens: A review[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 57(6): 1 977-1 990.
- [9] ALI M M, HASHIM N, ABD AZIZ S, et al. Principles and recent advances in electronic nose for quality inspection of agricultural and food products[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 99: 1-10.
- [10] SANAEIFAR A, ZAKIDIZAJI H, JAFARI A, et al. Early detection of contamination and defect in foodstuffs by electronic nose: A review[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2017, 97: 257-271.
- [11] 殷志康, 笪丹丹, 赵迪, 等. 电子鼻在餐厨废弃油脂掺假判别中的应用[J]. *生物加工过程*, 2020, 18(4): 497-504.
- [12] YIN Z K, DA D D, ZHAO D, et al. Application of electronic nose

- in the fast discrimination of kitchen waste oil[J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2020, 18(4): 497-504.
- [11] 贾茹, 张娟, 王佳奕, 等. 电子鼻结合化学计量法对羊奶中蛋白质掺假的识别[J]. 食品科学, 2017, 38(8): 308-312.
JIA R, ZHANG J, WANG J Y, et al. Recognition of goat milk adulterated with proteins using electronic nose combined with chemometric methods[J]. Food Science, 2017, 38(8): 308-312.
- [12] HONG X, WANG J, QIU S. Authenticating cherry tomato juices: Discussion of different data standardization and fusion approaches based on electronic nose and tongue [J]. Food Research International, 2014, 60: 173-179.
- [13] HUANG C, GU Y. A machine learning method for the quantitative detection of adulterated meat using a MOS-based E-nose[J]. Foods, 2022, 11(4): 602.
- [14] 毋思敏, 于淼, 孙二娜, 等. 基于电子鼻与电子舌建立牛奶货架期预测模型[J]. 食品科学, 2022, 43(10): 302-307.
WU S M, YU M, SUN E N, et al. Establishment of shelf life prediction model for milk using electronic nose and electronic tongue[J]. Food Science, 2022, 43(10): 302-307.
- [15] PENG Q, TIAN R, CHEN F, et al. Discrimination of producing area of Chinese Tongshan kaoliang spirit using electronic nose sensing characteristics combined with the chemometrics methods [J]. Food Chemistry, 2015, 178: 301-305.
- [16] ORDUKAYA E, KARLIK B. Fruit juice-alcohol mixture analysis using machine learning and electronic nose[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2016, 11(S1): 171-176.
- [17] 陈芳, 黄玉坤, 苑阳阳, 等. 基于电子鼻无损鉴别掺假蜂蜜[J]. 西华大学学报, 2018, 37(5): 56-60.
CHEN F, HUANG Y K, YUAN Y Y, et al. Nondestructive identification of adulterated honey based on electronic nose [J]. Journal of Xihua University, 2018, 37(5): 56-60.
- [18] ROY M, MANOJ D, SHANMUGASUNDARAM S, et al. Detection of adulteration in ghee (Clarified butter fat) using electronic nose combined with multivariate analysis [J]. The Pharma Innovation Journal, 2021, 10(9): 36-43.
- [19] 许文娟, 韩芳, 赵晗, 等. 电子鼻结合主成分分析法快速鉴别掺假牛肉[J]. 肉类工业, 2021(10): 33-35.
XU W J, HAN F, ZHAO H, et al. Quick identification of adulterated beef by electronic nose and principal component analysis[J]. Meat Industry, 2021(10): 33-35.
- [20] HEIDARBEIGI K, MOHTASEBI S S, FOROUGHIRAD A, et al. Detection of adulteration in saffron samples using electronic nose[J]. International Journal of Food Properties, 2014, 18(7): 1 391-1 401.
- [21] HAI Z, WANG J. Detection of adulteration in camellia seed oil and sesame oil using an electronic nose[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2006, 108(2): 116-124.
- [22] YU H, WANG J, XU Y. Identification of adulterated milk using electronic nose[J]. Sensors and Materials, 2007, 19(5): 275-285.
- [23] SHEN F, WU Q, SU A, et al. Detection of adulteration in freshly squeezed orange juice by electronic nose and infrared spectroscopy [J]. Czech Journal of Food Sciences, 2016, 34(3): 224-232.
- [24] ZAKARIA A, SHAKAFF A Y M, MASNAN M J, et al. A biomimetic sensor for the classification of honeys of different floral origin and the detection of adulteration[J]. Sensors, 2011, 11(8): 7 799-7 822.
- [25] TIAN X, WANG J, MA Z, et al. Combination of an E-Nose and an E-Tongue for adulteration detection of minced mutton mixed with pork[J]. Journal of Food Quality, 2019, 2 019: 1-10.
- [26] BANACH U, TIEBE C, HÜBERT T. Multigas sensors for the quality control of spice mixtures[J]. Food Control, 2012, 26(1): 23-27.
- [27] 吴丹丹, 其布勒, 斯仁达来, 等. 电子鼻对驼乳中牛乳掺假的快速检测[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 263-267.
WU D D, QI B L, Sirendalai, et al. Rapid detection of adulteration in camel milk by electronic nose[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 263-267.
- [28] WANG Q, LI L, DING W, et al. Adulterant identification in mutton by electronic nose and gas chromatography-mass spectrometer[J]. Food Control, 2019, 98: 431-438.
- [29] 王永瑞, 柏霜, 罗瑞明, 等. 基于电子鼻、GC-MS 结合化学计量学方法鉴别烤羊肉掺假[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 291-297.
WANG Y R, BAI S, LUO R M, et al. Identification of adulteration of roast mutton using electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry combined with chemometric methods[J]. Food Science, 2022, 43(4): 291-297.
- [30] TOHIDI M, GHASEMI-VARNAMKHASTI M, GHAFARINIA V, et al. Identification of trace amounts of detergent powder in raw milk using a customized low-cost artificial olfactory system: A novel method[J]. Measurement, 2018, 124: 120-129.
- [31] MAJCHER M A, KACZMAREK A, KLENSPORF-PAWLIK D, et al. SPME-MS-based electronic nose as a tool for determination of authenticity of PDO cheese, oscypek[J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(9): 2 211-2 217.
- [32] KIANI S, MINAEI S, GHASEMI-VARNAMKHASTI M. Integration of computer vision and electronic nose as non-destructive systems for saffron adulteration detection [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 46-53.
- [33] KARAMI H, RASEKH M, MIRZAEI-GHALEH E. Application of the E-nose machine system to detect adulterations in mixed edible oils using chemometrics methods[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(9): e14696.
- [34] AYARI F, MIRZAEI-GHALEH E, RABBANI H, et al. Using an E-nose machine for detection the adulteration of margarine in cow ghee[J]. Journal of Food Process Engineering, 2018, 41(6): e12806.
- [35] PENZA M, CASSANO G. Recognition of adulteration of Italian wines by thin-film multisensor array and artificial neural networks [J]. Analytica Chimica Acta, 2004, 509(2): 159-177.
- [36] RASEKH M, KARAMI H. E-nose coupled with an artificial neural network to detection of fraud in pure and industrial fruit juices[J]. International Journal of Food Properties, 2021, 24(1): 592-602.

(下转第 240 页)

- QUAN Q, LIU W, ZUO M N, et al. Advances in the flavor of fruit and vegetable juices fermented by lactic acid bacteria[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(1): 315-323.
- [45] 母应春. 泡椒发酵微生物相关性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009: 43-49.
- MU Y C. Study on microbial correlation of pickled pepper fermentation[D]. Guiyang: Guizhou University, 2009: 43-49.
- [46] 那淑敏, 贾士芳, 陈秀珠, 等. 嗜酸乳杆菌发酵代谢产物分析[J]. 中国微生态学杂志, 1999(5): 12-14
- NA S M, JIA S F, CHEN X Z, et al. Analysis of fermentation products produced by *Lactobacillus acidophilus*[J]. Chinese Journal of Microecology, 1999(5): 12-14
- [47] OYLUM E, JAGER V C L D, MACIEJ S, et al. Multifactorial diversity sustains microbial community stability[J]. The ISME Journal, 2013, 7(11): 2 126-2 136.
- [48] 孙建光, 高俊莲. 乳酸菌对糖和糖醇的分解代谢及其致病性[J]. 口腔医学, 2007(7): 384-386.
- SUN J G, GAO J L. Catabolism of sugar and sugar alcohols by lactic acid bacteria and their cariogenic properties[J]. Stomatology, 2007(7): 384-386.
- [49] BARS D L, YVON M. Formation of diacetyl and acetoin by *Lactococcus lactis* via aspartate catabolism[J]. Journal of Applied Microbiology, 2007, 104(1): 171-177.
- [50] 徐云凤, 张欣, 褚泽军, 等. 一株具有高效抑菌活性乳酸菌的分离鉴定及生长特性研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(3): 12-14.
- XU Y F, ZHANG X, CHU Z J, et al. Isolation, identification and growth characteristics of a strain of lactic acid bacteria with efficient antimicrobial activity[J]. Food & Machinery, 2021, 37(3): 12-14.
- [51] 燕平梅, 薛文通. 乳酸菌与发酵蔬菜的风味[J]. 中国调味品, 2005(2): 12-15.
- YAN P M, XUE W T. Flavor of lactic acid bacteria and fermented vegetables[J]. China Condiment, 2005(2): 12-15.
- [52] POTHAKOS V, VUYST L D, ZHANG S J, et al. Temporal shotgun metagenomics of an Ecuadorian coffee fermentation process highlights the predominance of lactic acid bacteria[J]. Current Research in Biotechnology, 2020, 2: 14-33.
- [53] HANNIFFY S B, PELÁEZ C, MARTÍNEZ-BARTOLOMÉ M A, et al. Key enzymes involved in methionine catabolism by cheese lactic acid bacteria[J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 135(3): 223-230.
- [54] XIONG T, LI J B, LIANG F, et al. Effects of salt concentration on Chinese sauerkraut fermentation [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 69: 169-174.
- [55] LIU S P, CHEN Q L, ZOU H J, et al. A metagenomic analysis of the relationship between microorganisms and flavor development in Shaoxing mechanized huangjiu fermentation mashes [J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 303: 9-18.
- [56] LIU D Q, ZHANG C C, ZHANG J M, et al. Metagenomics reveals the formation mechanism of flavor metabolites during the spontaneous fermentation of potherb mustard (*Brassica juncea* var. *multiceps*) [J]. Food Research International, 2021, 148: 110622.
-
- (上接第 216 页)
- [37] ZAREZADEH M R, ABOONAJMI M, VARNAMKHAJASTI M G, et al. Olive oil classification and fraud detection using E-nose and ultrasonic system[J]. Food Analytical Methods, 2021, 14(10): 2 199-2 210.
- [38] WEI X, SHAO X, WEI Y, et al. Rapid detection of adulterated peony seed oil by electronic nose[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(6): 2 152-2 159.
- [39] MILDNER-SZKUDLARZ S, JELEN H H. The potential of different techniques for volatile compounds analysis coupled with PCA for the detection of the adulteration of olive oil with hazelnut oil[J]. Food Chemistry, 2008, 110(3): 751-761.
- [40] TIAN H, CHEN B, LOU X, et al. Rapid detection of acid neutralizers adulteration in raw milk using FGC E-nose and chemometrics [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16: 2 978-2 988.
- [41] SUN X, ZHANG F, GUTIÉRREZ-GAMBOA G, et al. Real wine or not? Protecting wine with traceability and authenticity for consumers: Chemical and technical basis, technique applications, challenge, and perspectives[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(24): 6 782-6 808.
- [42] 乔森, 张磊, 母芳林. 基于电子鼻与 LightGBM 算法判别葡萄酒品种的研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 76-79.
- QIAO M, ZHANG L, MU F L. Research on discriminating wine varieties based on electronic nose and LightGBM algorithm[J]. Food & Machinery, 2020, 36(5): 76-79.
- [43] RÓZANSKA A, DYMERSKI T, NAMIESNIK J. Novel analytical method for detection of orange juice adulteration based on ultra-fast gas chromatography [J]. Monatshefte für Chemie: Chemical Monthly, 2018, 149(9): 1 615-1 621.
- [44] 陈晓明, 初叶心, 乔江涛, 等. 蜂蜜品种识别和掺假鉴别的研究进展[J]. 食品工业, 2021, 41(2): 225-229.
- CHEN X M, CHU Y X, QIAO J T, et al. Research progress on variety identification and adulteration identification of honey[J]. Food Industry, 2021, 41(2): 225-229.
- [45] 李秀, 桑潘婷, ABIOLA D S, 等. 驴腿肉与其他畜腿肉挥发性风味物质差异研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(9): 50-54.
- LI X, SANG P T, ABIOLA D S, et al. Comparative study on volatile flavor among the leg meat from donkey and other livestock animals[J]. Food & Machinery, 2019, 35(9): 50-54.
- [46] TAHRI K, TIEBE C, BARI N E, et al. Geographical classification and adulteration detection of cumin by using electronic sensing coupled to multivariate analysis[J]. Procedia Technology, 2017, 27: 240-241.