

综述

近五年电子鼻技术在食品安全的应用进展

李晶晶¹, 胡颖菲³, 丁晓², 李敏仪², 古结雯², 黄雄俊², 郑璇²(1. 国家知识产权局, 北京 100088; 2. 广州海关技术中心, 广东 广州 510623;
3. 全国海关信息中心广东分中心, 广东 广州 510623)

摘要: 电子鼻因快速、无损、便捷的特点,已在食品安全保障发挥积极作用。本文综述了近五年电子鼻在新鲜度监控及货架期预测、农残检测、致病微生物及毒素检测、掺假及鉴别检测、过敏原识别的应用,对比了其他检测手段,展示了与其他技术融合的情况,分析了存在问题,并展望了发展趋势。

关键词: 电子鼻; 仿生嗅觉系统; 食品安全; 检测

中图分类号: R155 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-8456(2023)05-0789-06

DOI: 10.13590/j.cjfh.2023.05.026

Application of electronic nose technology in food safety in the past five years

LI Jingjing¹, HU Yingfei³, DING Xiao², LI Minyi², GU Jiewen², HUANG Xiongjun², ZHENG Xuan²

(1. China National Intellectual Property Administration, Beijing 100088, China; 2. Guangzhou Customs Technology Center Food Testing Lab., Guangdong Guangzhou 510623, China; 3. Guangdong branch of National Customs Information Center, Guangdong Guangzhou 510623, China)

Abstract: Electronic nose has played an active role in food safety because of its fast, nondestructive, and convenient features. This paper reviews the application of electronic nose technology in food safety control in the past five years, including freshness monitoring and shelf life prediction, pesticide residue detection, pathogenic microorganism and toxin detection, adulteration and counterfeiting detection, as well as allergen identification. The integration of other detection methods is compared, existing problems are analyzed, and the development trend is prospected.

Key words: Electronic nose; bionic olfactory system; food safety; detection

电子鼻(Electronic nose)是一种融合了传感器技术、模式识别算法的智能仿生嗅觉系统。其工作原理为样品挥发性气体与传感器反应产生电信号,经模式识别算法对比数据后完成检测或鉴别。作为一种无需预处理、实时快速的无损检测技术,从1994年 Gardner 首次提出概念至今,电子鼻在农业、食品、环境等的应用取得了长足进展^[1-4]。

民以食为天,食以安为先。在加工、流通与消费中,食品安全可能受到生物因素(微生物、寄生虫)、化学因素(重金属、农药等)、物理因素(辐射)的影响^[5]。电子鼻所提供的食品整体气体信息,为保障食品安全提供有力的技术支撑。本文概述了近五年国

内外电子鼻技术在食品安全的代表性应用,探讨了现存问题及展望了今后的发展方向。

1 电子鼻技术在食品安全的应用

1.1 肉类及果蔬的新鲜度监控及货架期预测

肉蛋、果蔬制品富含水分、蛋白质、碳水化合物,在加工及储存中若操作不当或运输保存条件不符合要求,易滋生病菌致人腹泻、呕吐,甚至会危及生命。利用电子鼻开展实时新鲜度检测及货架期预测是保障食品安全的有效举措。

GAILIUS 等^[6]以电子鼻采集腐烂肉产品所生成氨、甲烷等,能在 2 min 内(最短 10~20 s)快速测定气体浓度的最大值,实时判断肉制品的鲜度,大幅提高检测效率。王建辉等^[7]采用 PEN 3 型电子鼻测定酸价、过氧化值、硫代巴比妥酸值的变化,可快速预测肉制品脂肪氧化程度。中国标准化研究所研究团队以电子鼻采集烤鸭制品香气信号后,结合偏最小二乘回归算法(Partial least square analysis, PLS)建立货架期预测模型;利用贝叶斯算法

收稿日期:2022-03-03

作者简介:李晶晶 女 副处长 研究方向为食品及保健品知识产权政策研究及专利申请审查 E-mail: wangyiyouxianljj@126.com

通信作者:郑璇 女 高级工程师 研究方向为食品合规性审查 E-mail: 88038915@qq.com

(Bayesian algorithm)计算样品归属各货架类别的概率,选择概率最大的货架类别为货架终点;根据主成分分析(Principal component analysis, PCA)算法比较相同储存温度下不同储存时间的信号差异突变点,准确预测货架期终点^[8-10]。YIMENU等^[11]在电子鼻中联合设置PCA和函数判别分析(Functional discrimination analysis, DFA)的定性传感器、PLS算法的定量传感器,准确预测了20℃下储存1~20 d的多批次鸡蛋的货架期。张懋等^[12]研究团队将电子鼻和低场核磁联用,通过建立电子鼻响应值和水含量的联合动力学模型,为鲜切果蔬提供货架期预测依据。然而,食品腐败初期挥发气体浓度较少,电子鼻系统灵敏度较低,KUCHMENKO等^[13]在传感器电极上固定对不同气体敏感的吸附剂以提高其响应精度。

1.2 茶叶及果蔬的农药残留检测

为提高农产品产量,需找出不科学和不合理地使用农药的问题。长期摄入带农残的食品,会降低人体免疫力,诱发长期慢性疾病^[5]。利用电子鼻进行快速、准确的农残检测,为食品安全监控提供了新思路。

肖文敏等^[14]以茶鲜叶为材料,喷施菊酯类杀虫剂和广谱除草剂类,电子鼻结合PCA算法建立单一农药不同浓度预测模型,农药浓度预测值与实测值的准确率高85%。SANAEIFAR等^[15]基于毒死蜱的浓度基准,电子鼻和拉曼光谱结合PLS算法获取互补融合数据集,关联农残标准值后,通过人工神经网络模型得出最佳预测值。乔琦^[16]以喷洒4种浓度多菌灵农药的“阿克苏”苹果为对象,基于高光谱-电子鼻融合构建农残检测模型,其检测精度从83.33%提高到98.33%,有望扩展到农产品生产线的在线检测。

1.3 粮食及调味料等中致病微生物及毒素检测

稻米是我国人民的主要粮食之一,粮食霉变引起的谷物损失巨大,且微生物污染的谷物会引发中毒或诱发癌症。目前,电子鼻技术已应用于谷物病原微生物的预测及评估。浙江大学研究团队在经紫外灭菌后大米上接种曲霉属真菌,PEN 2型电子鼻对不同贮藏时间的样品检测,用PCA算法得到曲霉属真菌生长模拟曲线,有效预测亮白曲霉、烟曲霉的生长状况;采用PLS优化算法建立菌落数预测模型,电子鼻可准确预测菌落数^[17-19]。

Aryballe technologie、Yeda Research and Development Co. Ltd在葡萄酒、调味品等风味食品及香精香料领域,亲疏水 α -氨基酸受体传感器优化的电子鼻可快速检测微生物污染后产生的不良挥发性气体硫化

氢和氨,动态判断产品是否中毒^[20-22]。EZHILAN等^[23]利用电子鼻可预测西蓝花是否受葡萄球菌、沙门氏菌、志贺菌污染,识别新鲜、半污染、全污染样品。黄晓辰^[24]发现杀菌后的苹果汁如存有耐酸、耐热的脂环酸芽孢杆菌,会产生愈疮木酚等异味物质。电子鼻和电子舌联用可在24 h内识别被该菌早期污染的果汁。

1.4 食用油及肉制品等的掺假或鉴别检测

地沟油含有超标的重金属和毒素。消费者仅从外观和感官上难以分辨掺假的食用油,而电子鼻技术则为快速检测地沟油提供了选择。地沟油含有大量杂质,受热后会产生不同于合格食用油的物质。食用油加热汽化后收集气味信息,深圳市赛亿科技开发有限公司研究团队通过电子鼻将其与标准参数对比,可识别出掺入地沟油的食用油^[25]。

为了谋取利益,一些不良商家用平价或劣质肉冒充优质肉。电子鼻检测七种肉类混合物(100%纯牛肉、10%混猪肉、25%混猪肉、50%混猪肉、75%混猪肉、90%混猪肉和100%纯猪肉),SARNO等^[26]收集120 s的数据就可鉴别掺假牛肉,该方法还可用于肉类纯度鉴定、清真食品认证。KALINICHENKO等^[27]基于气味模式识别算法以及概率神经网络(Probabilistic neural network, PNN),电子鼻可快速识别掺入大豆蛋白的香肠。GÓRSKA-HORCZYK等^[28]将新鲜猪肉、解冻猪肉和变质肉混合制成肉制品,电子鼻结合PCA算法以及反向传播神经网络(Back propagation neural network, BPNN)建立了猪肉掺假检测模型,识别准确率达80%。王之莹等^[29]发现电子鼻可用于鲑鱼、鳕鱼、凤尾鱼的掺假鉴别;摆小琴等^[30]通过电子鼻有效区分新鲜花生、陈年花生与返鲜花生;马泽亮等^[31]通过电子鼻检测获得白酒“指纹数据”,掺假白酒识别正确率达100%。

1.5 坚果制品的过敏原识别

近年来,过敏已成为全球关注的食品安全和公共卫生问题。过敏者在食用上述制品后会出现功能障碍或组织损伤,严重时会造成过敏性休克。食品原料的复杂性和多样性导致易感人群难以真正做到饮食回避^[32],快速识别过敏原具有广阔的应用前景。AMIN等^[33]开发一种配有电子鼻和图像视频组件的移动无线通讯设备,电子鼻传感器装配嗅觉受体功能化的纳米结构晶体管,通过用户语音提问、图像识别、气味检测综合判花生酱、曲奇饼中是否存在坚果过敏原。

目前,GB 7718—2011《食品安全国家标准预包装食品标签通则》正在修订,致敏原信息拟将列入强

制标识范围^[34]。相对于上文四类安全检测,电子鼻在过敏原识别方面还处于起步阶段。以常见的免疫分析法所要求的“特异性强、检测限低、灵敏度高”为标准,对于精确度受限于传感器阵列、模式识别算法、检测环境等的电子鼻技术,要精确检出微量或痕量的单一过敏原,或避免混合过敏原的交叉反应,能否在过敏原检测中发挥作用,还需时日检验。

2 电子鼻与其他检测技术的应用比较和技术融合

与传统的化学检测方法相比,无损、快速、便捷、可重复、易于操作等是电子鼻在食品安全应用

的显著优势。然而,除了以电子鼻为代表的智能仿生检测方法,包括色/光谱法、生物学方法等各具特色的新型检测方法,也广泛应用食品安全或品质控制中。表 1 展示了不同类型检测方法的技术特点、优缺点及具体应用。通过与其他先进技术联合使用提高结果的精确度,或完善特定食品品类多风味物质气味指纹图谱,或提高传感器的抗干扰能力,电子鼻有望进一步扩大应用范围,具体参见表 2。

3 电子鼻技术在食品安全应用的问题及前景展望

在食品安全检测应用中,虽然电子鼻在快速检

表 1 不同类型检测方法的比较^[35-41]

Table 1 Comparison of different types of detection methods ^[35-41]					
类型	方法	技术特点/评价指标	优点	缺点	具体应用
传统检测	感官检测	颜色、气味、口味、质地	直观快速,操作简单,检出效率高,成本低	主观性影响结果准确性和稳定性	常规应用
	理化检测	pH、黏度、电阻、电容等	结果量化,可靠	样品有损,耗时复杂,结果滞后	
	微生物检测	菌落总数计数、特定菌群测定	结果可靠	耗时复杂,结果滞后,需无菌环境	
智能仿生检测	电子鼻	嗅觉仿生	无损,快速实时,定性效果较好,检测内部组分	定量分析灵敏度受环境影响;占地面积大,成本较高,产品通用性有待提高,商业化程度低	果蔬鲜度预测、腐烂或病害或损伤监测;食用油、肉制品掺假
	电子舌	味觉仿生	无损,高灵敏度,指标检测限低	环境影响传感器漂移;更适用于液体食品	酒类、乳品、肉品的品质控制
	机器视觉识别	视觉仿生	无损,快速,结果稳定	采集表面信息,需结合内部信息检测方法;图像受光照影响大	果蔬谷物杂质、表面缺陷或劣变检测;发酵过程品质监控
	智能质构仪/嫩度仪	触觉仿生	灵敏性高,稳定性强	自动化程度不足、缺乏规范检测标准、多维度的数据综合难	发酵酒品质控制;肉品贮藏品质监控
色谱学检测	气相色谱法、超临界流体色谱法、色谱-质谱法	组分分离能力的差异	快速,灵敏度高,应用范围较广	操作要求高,不便携,费用较高	茶鲜叶农残快速测定
光谱学检测	近红外光谱检测	750~2 500 nm 近红外光扫描	无损,可采集多组分的内部信息,结构可靠,快速准确,适用范围广	对温湿度敏感,光谱信息提取复杂,尚处于实验室阶段	酸奶、食醋、酱油、黄酒品质监测,食用油掺假鉴别
	核磁共振	建模分析检测靶标物质的相对含量	无损,高灵敏度,重现性高	对磁场均匀性和外部磁场强度要求高,价格昂贵	牛肉贮藏期鲜度变化
	拉曼光谱	拉曼散射	无损,快速	重叠峰现象明显,表征谱峰分辨率低	果蔬疾病诊断、致病菌识别和果蔬真菌毒素污染检测;食用油掺假鉴别
	高光谱成像	光谱技术和成像技术融合	光谱分辨率高,波长覆盖范围广,图谱合一的无损快速定性分析	数据庞大且定量分析困难;受硬件设备的制约	生鲜肉货架期预测
生物学检测	PCR 技术、基因组学、代谢学	菌群指标分析	特异性强,高灵敏度,高通量	样本采集与制备复杂、生物标志物的筛选难度高、方法通用性不强	果汁掺假鉴别

表 2 电子鼻与其他技术的融合联用

Table 2 Integration of electronic nose with other technologies		
联用技术	应用领域	检测效果
电子鼻、电子舌联用	多种不同品牌白酒的酒龄鉴别	数据分析全面,识别效果优秀 ^[42]
	工业酒精勾兑白酒鉴别	鉴别识别率 100% ^[43]
	全脂鲜奶货架期预测	两批样品与实际保质期的误差仅为 8.0% 和 4.7% ^[44]
电子鼻、色谱-质谱法联用	低温保存大菱鲆鱼肉和三文鱼片鲜度监测	确定表征鱼肉新鲜度的挥发性指示物以及鲜度拐点天数 ^[35]
	快速鉴别肉豆蔻霉变	未霉变样品、轻微霉变样品和霉变样品挥发性成分上差异明显 ^[45]
	茶叶鲜叶农残检测	菊酯类 4 种农残量检测准确度为 91.011%、86.159%、85.206% 和 86.384% ^[14]
电子鼻、近红外光谱联用	霉心苹果识别	识别正确率为 86.2% ^[16]
电子鼻、低场核磁联用	鲜切水果货架期预测	成功建模并预测货架期 ^[12]
电子鼻、拉曼光谱/高光谱	茶叶农残检测	检测精度从 83.33% 提高到 98.33% ^[16]

测使用较多,但目前还主要处于实验室阶段。为此,电子鼻技术需要提高其灵敏性、精确性、稳定性,实现真正走向市场,但其在传感器、信号预处理及识别计算方面仍面临着以下问题。

3.1 传感器漂移现象以及阵列数量

传感器及其阵列是电子鼻最核心、最关键的部件。然而,传感器受其材料的原因,受到检测环境的温湿度、气压、样品的状态及组分等的影响均会引起电子鼻传感器基线漂移,导致传感器的输出响应值发生改变,灵敏度不够。以应用广泛的金属半导体传感器为例,其受环境温湿度影响较大,当基线漂移明显时,对相似化合物的区分能力较弱,从而影响结果的可靠性;茶鲜叶样品挥发性物质种类多且离体后转化快,导致电子鼻采集气体信息受干扰^[13]。此外,为提高选择性,电子鼻通常含有多个气敏传感器以提供全面的响应信号。例如测定茶鲜叶农残的PEN3型通用传感器有10个对不同类型气体成分具有响应差异的传感器^[41]。然而,传感器阵列数量过多、数据维数过高等因素导致系统体积臃肿、电耗过大,不利于在市场推广。对此,有关提高传感器材料、功能以及阵列优化的相关研究不断展开。李超等^[46]基于空间外差光栅技术,优化传感器阵列有效缓解各种干扰,校正数据与标准数据的归一性相关系统从0.71提高到0.99;ZHAO等^[48]则针对SnO₂型广谱气敏传感器具有交叉灵敏度高、稳定性好、可逆性强、价格低、占地面积小的特点,将8个不同的SnO₂组成圆形阵列,成功构建了方便操作及携带的谷物虫害电子鼻监测系统。

3.2 混合气体的采集和识别模式算法的误差

在食品混放或混包的超市货柜或仓储环境,电子鼻由于多品类气体信息相互干扰,传统的模式识别算法影响电子鼻检测精度。在真实环境中,采集混合气数据对于电子鼻而言是很大的挑战。真实的混合气体数据杂乱而无规律,气体浓度呈现随机性,连续数据采集耗时长。此外,虽然目前已有PCA、DFA、PLS等相对成熟的算法,但电子鼻需要分析密闭环境的顶空气体,如何优化算法以克服多品类混合气体环境所带来的计算误差依旧值得期待。针对电子鼻在单一气体和混合气体两种不同情况下进行识别算法研究,重庆邮电大学研究团队以暴露在乙烯、甲烷、二氧化碳等的混合气体中的化学传感器阵列研究对象,连续12 h不中断采集气体信号,在对比了5种识别算法与真实气体曲线拟合度后,提出利用基于粒子群算法的长短时记忆神经网络算法(Particle Swarm Optimization Based Long Short-Term Memory, PSO-LSTM)能较有效实现

对混合气体的浓度预测^[47]。为提高气体识别采集能力以及数据优化处理,机器深度学习技术如深度卷积神经网络(Convolutional neural network, CNN)也被嵌入到电子鼻识别算法中^[48]。

随着消费者对食品安全的重视程度不断加强,以电子鼻为代表的智能仿生检测应用依旧前景广阔。未来将会出现更专业性、更具有针对性的电子鼻检测设备(如肉制品专用、水产专用)。而随着传感技术、新材料以及数字化信息技术等学科进一步交叉融合,实现电子鼻设备的小型化及集成化等综合手段,将会有助于扩大电子鼻技术的检测优势,使其进一步为食品安全保驾护航。

参考文献

- [1] BERNA A. Metal oxide sensors for electronic noses and their application to food analysis [J]. *Sensors*: Basel, Switzerland, 2010, 10(4): 3882-3910.
- [2] PERSAUD K, DODD G. Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose [J]. *Nature*, 1982, 299(5881): 352-355.
- [3] 刘洋, 贾文坤, 马洁, 等. 电子鼻技术在肉与肉制品检测中的研究进展和应用展望 [J]. *智慧农业(中英文)*, 2021, 3(4): 29-41.
LIU Y, JIA W S, MA J, et al. Research progress and application prospect of electronic nose technology in the detection of meat and meat products [J]. *Smart Agriculture*, 2021, 3(4): 29-41.
- [4] 李翠翠, 李永丽. 近五年来电子鼻在食品检测中的应用 [J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(11): 11-13.
LI C C, LI Y L. The application of electronic nose in food inspection during the last five years [J]. *Cereals & Oils*, 2020, 33(11): 11-13.
- [5] 张志健. 食品安全导论 [M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2015.
ZHANG Z J. Introduction to Food Safety [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [6] GAILIUS D, VINAUSKIENÉ R, ALE A, et al. Electronic nose for determination of meat freshness [P]. USA: US9696291, 2017-07-04.
- [7] 王建辉, 徐杰, 李招, 等. 一种基于电子鼻技术快速预测肉及其制品脂肪氧化程度的方法 [P]. 中国: CN106556680A, 2017-04-05.
WANG J H, XU J, LI Z, et al. Electronic nose technology-based method for rapidly predicating fat oxidation degree of meat and meat products [P]. China: CN106556680A, 2017-04-05.
- [8] 史波林, 汪厚银, 钟葵, 等. 电子鼻结合偏最小二乘回归预测烤鸭货架时间的方法 [P]. 中国: CN112036618A, 2020-12-04.
SHI B L, WANG H Y, ZHONG K, et al. Method for predicting shelf life of roast duck by combining electronic nose with partial least squares regression [P]. China: CN112036618A, 2020-12-04.

- [9] 史波林, 钟葵, 汪厚银, 等. 电子鼻结合贝叶斯算法判别烤鸭是否超过货架终点的方法[P]. 中国: CN112036619A, 2020-12-04.
- SHI B L, ZHONG K, WANG H Y, et al. Method for judging whether roast duck exceeds shelf end point or not by combining electronic nose with Bayesian algorithm[P]. China: CN112036619 A, 2020-12-04.
- [10] 史波林, 张璐璐, 汪厚银, 等. 电子鼻结合主成分分析预测烤鸭货架终点的方法[P]. 中国: CN112070278A, 1970-01-19.
- SHI B L, ZHANG L L, WANG H Y, et al. Method for predicting roast duck shelf endpoint by combining electronic nose with principal component analysis[P]. China: CN112070278A, 1970-01-19.
- [11] YIMENU S M, KIM J Y, KIM B S. Prediction of egg freshness during storage using electronic nose[J]. Poultry Science, 2017, 96(10): 3733-3746.
- [12] 张魁, 徐继成, 陈镇, 等. 一种用低场核磁结合电子鼻确定柔性杀菌调理果蔬菜肴保质期的方法[P]. 中国: CN106290441A, 2017-01-04.
- ZHANG M, XU J C, CHEN Z, et al. Method for determining flexible sterilization conditioning fruit and vegetable dish expiration date by combining low field nuclear magnetism with electronic nose [P]. China: CN106290441A, 2017-01-04.
- [13] KUCHMENKO T A, UMARKHANOV R U, MATEYEVA A, et al. Electronic taster applied for identification of a rainbow trout spoilage specifics [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 640(3): 032047.
- [14] 肖文敏, 唐小燕, 任志红, 等. 基于电子鼻技术的茶鲜叶农残快速诊断[J]. 茶叶通讯, 2021, 48(3): 484-493.
- XIAO W M, TANG X Y, REN Z H, et al. Rapid diagnosis of pesticide residues in fresh tea leaves based on electronic nose technology[J]. Journal of Tea Communication, 2021, 48(3): 484-493.
- [15] SANAEIFAR A, LI X L, HE Y, et al. A data fusion approach on confocal Raman microspectroscopy and electronic nose for quantitative evaluation of pesticide residue in tea[J]. Biosystems Engineering, 2021, 210: 206-222.
- [16] 乔琦. 基于高光谱-电子鼻的苹果农残自动化检测研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.
- QIAO Q. Research on automatic detection of pesticide residues in apple based on hyperspectral and electronic nose [D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2021.
- [17] 王俊, 顾双. 基于电子鼻快速预测大米中曲霉属真菌生长状况的方法[P]. 中国: CN109486898A, 2019-03-19.
- WANG J, GU S. Method of quickly predicting growth condition of aspergillus fungi in rice based on electronic nose[P]. China: CN109486898A, 2019-03-19.
- [18] 王俊, 顾双. 基于电子鼻的大米受曲霉属真菌侵染程度的预测方法[P]. 中国: CN109666717A, 2019-04-23.
- WANG J, GU S. Method for predicting degree that rice is contaminated by aspergilli based on electronic nose[P]. China: CN109666717A, 2019-04-23.
- [19] 王俊, 顾双. 基于电子鼻快速预测稻米受曲霉属真菌侵染数量的方法[P]. 中国: CN109711603A, 2019-05-03.
- WANG J, GU S. A method for rapidly predicting the quantity of rice infected by aspergillus fungi based on an electronic nose [P]. China: CN109711603A, 2019-05-03.
- [20] LIVACHE T, HERRIER C, DUBREUIL R. Method for determining a potential poisoning of a sensor of an electronic nose by a volatile compound [P]. U. S. Patent Application 17/442201, 2022-06-16.
- [21] SOBEL N, AGRON S, SNITZ K, et al. Utilization of electronic nose-based analysis of odorants [P]. USA: US20200300829, 2020-09-24.
- [22] ARYBALLE TECHNOLOGIES. Detection system for an electronic nose allowing a physicochemical classification of odors and electronic nose comprising such a system [P]. USA: WO2021009440A1, 2021-01-21.
- [23] EZHILAN M, NESAKUMAR N, BABU K J, et al. Freshness assessment of broccoli using electronic nose [J]. Measurement, 2019, 145: 735-743.
- [24] 黄晓辰. 基于电子鼻和电子舌的苹果汁中脂环酸芽孢杆菌污染的快速检测方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- HUANG X C. Study of rapid detection of spoilage spawned by *Alicyclobacillus* spp. in apple juice using E-nose and E-tongue [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016.
- [25] 李光煌, 罗辉, 杜丽娟, 等. 一种基于电子鼻检测地沟油的装置[P]. 中国: CN207366488U, 2018-05-15.
- LI G H, LUO H, DU L J, et al. Device based on electron nose detects trench oil[P]. China: CN207366488U, 2018-05-15.
- [26] SARNO R, SABILLA S I, WIJAYA D R, et al. Electronic nose dataset for pork adulteration in beef [J]. Data in Brief, 2020, 32: 106139.
- [27] KALINICHENKO A, ARSENIYEVA L. Electronic nose combined with chemometric approaches to assess authenticity and adulteration of sausages by soy protein [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 303: 127250.
- [28] GÓRSKA-HORCZYCHAK E, HORCZYCHAK M, GUZEK D, et al. Chromatographic fingerprints supported by artificial neural network for differentiation of fresh and frozen pork [J]. Food Control, 2017, 73: 237-244.
- [29] 王之莹, 李婷婷, 张桂兰, 等. 鱼产品掺假鉴别技术研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 277-288.
- WANG Z Y, LI T T, ZHANG G L, et al. Recent advances in identification techniques for fish adulteration [J]. Food Science, 2019, 40(11): 277-288.
- [30] 摆小琴, 张娅俐, 洪晶, 等. 坚果品质检测方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(22): 8737-8744.
- BAI X Q, ZHANG Y L, HONG J, et al. Research progress on the quality detection methods for nuts [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(22): 8737-8744.
- [31] 马泽亮, 国婷婷, 殷廷家, 等. 基于电子鼻系统的白酒掺假检测方法[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(2): 190-195.
- MA Z L, GUO T T, YIN T J, et al. Detection of liquor adulteration based on the electronic nose system [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(2): 190-195.
- [32] 傅玲琳, 王彦波. 食物过敏: 从致敏机理到控制策略[J]. 食品

- 科学, 2021, 42(19): 1-19.
- FU L L, WANG Y B. Food allergy: From sensitization mechanism to control strategy[J]. Food Science, 2021, 42(19): 1-19.
- [33] AMIN A H, AMIN H S. Mobile communications device with electronic nose: US10254260[P]. 2019-04-09.
- [34] 国家卫生健康委员会. GB7718 征求意见稿与2011版对比表[Z/OL]. (2020-01-02) [2022-07-06]. <http://news.foodmate.net/2020/01/546069.html>.
- National Health Commission. GB7718 Comparison Table between the Draft for Soliciting Opinions and the 2011 Edition[Z/OL]. (2020-01-02) [2022-07-06]. <http://news.foodmate.net/2020/01/546069.html>.
- [35] 扶晓菲, 游春苹. 牛乳新鲜度评价及其检测方法的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(11): 4319-4325.
- FU X F, YOU C P. Research progress on evaluation and detection methods of milk freshness[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(11): 4319-4325.
- [36] 刘建华, 曾倩华, 徐霞, 等. 鱼体新鲜度新型检测方法的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(6): 281-289.
- LIU J H, ZENG Q H, XU X, et al. Research progress of novel detection methods of fish freshness[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(6): 281-289.
- [37] 王建强, 陈景华, 郝发义, 等. 冷链物流对鲜肉新鲜度的影响及智能检测[J]. 包装工程, 2022, 43(1): 148-157.
- WANG J Q, CHEN J H, HAO F Y, et al. Effects of cold chain logistics on meat freshness and intelligent detection[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(1): 148-157.
- [38] 李萍, 王秀峰, 岳桂贞, 等. 乳制品质量快速检测原理与技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(18): 7175-7183.
- LI P, WANG X F, YUE G Z, et al. Research progress on principle and technology of rapid detection of dairy products quality[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(18): 7175-7183.
- [39] 俞玥, 宋嘉慧, 鲁玉杰, 等. 食用植物油掺伪鉴别技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(13): 5153-5161.
- YU Y, SONG J H, LU Y J, et al. A review of the determination methods of edible vegetable oils adulteration[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(13): 5153-5161.
- [40] 代良超, 乌日娜, 陶冬冰, 等. 智能仿生在食品发酵中的应用及研究进展[J/OL]. 食品工业科技: 1-11 [2022-07-06]. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021120273.
- DAI L C, WU R N, TAO D B, et al. Application and research progress of intelligent bionics in food fermentation[J/OL]. Science and Technology of Food Industry: 1-11 [2022-07-06]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120273.
- [41] 张晋豪, 王浩东, 邵良婷, 等. 生鲜肉新鲜度快速新型表征技术研究进展[J/OL]. 食品科学: 1-11 [2022-07-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20210823.1548.005.html>.
- ZHANG J H, WANG H D, SHAO L T, et al. Research progress and trend of new characterization technology of fresh meat freshness: A Review[J/OL]. Food Science: 1-11 [2022-07-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20210823.1548.005.html>.
- [42] 刘鑫, 王耀, 度先国, 等. 白酒检测技术在生产中的应用研究进展[J]. 中国酿造, 2022, 41(3): 6-12.
- LIU X, WANG Y, TUO X G, et al. Research progress on application of Baijiu detection technology in the production[J]. China Brewing, 2022, 41(3): 6-12.
- [43] 巴特尔达赖, 王锡昌, 吴娜, 等. 电子舌技术在真假伊力老陈酒鉴别中的应用[J]. 食品工业科技, 2017, 38(9): 290-293.
- BATEERDALAI, WANG X C, WU N, et al. Application of E-tongue in genuine-fake Yi Lilaochen liquor recognition[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(9): 290-293.
- [44] 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.
- [45] 田弁玄, 杨瑞琦, 邹慧琴, 等. 电子鼻与HS-GC-MS技术快速鉴别肉豆蔻霉变过程中气味变化及其物质基础[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(22): 5853-5860.
- TIAN H X, YANG R Q, ZOU H Q, et al. High-speed identification of odor changes and substance basis of Myristicae Semen mildew by electronic nose and HS-GC-MS[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(22): 5853-5860.
- [46] 李超. 谷物虫害电子鼻检测系统的研制与分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- LI C. Development and analysis of electronic nose detection system for cereal pests[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
- [47] 王洁. 电子鼻系统中气体浓度预测算法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2021.
- WANG J. Study on Gas Concentration Prediction Algorithm in Electronic Nose System[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [48] ZHAO X J, WEN Z H, PAN X F, et al. Mixture gases classification based on multi-label one-dimensional deep convolutional neural network[J]. IEEE Access, 2019, 7: 12630-12637.