

电子鼻技术在果蔬病害检测中的研究进展

Research progress of electronic nose in fruit and vegetable disease detection

吴嘉雯 刘智昊 庞林江 成纪予

WU Jia-wen LIU Zhi-hao PANG Lin-jiang CHENG Ji-yu

(浙江农林大学食品与健康学院, 浙江 杭州 311300)

(College of Food and Health, Zhejiang A & F University, Hangzhou, Zhejiang 311300, China)

摘要:归纳和总结了近年来电子鼻技术在果蔬采后单种和多种病原菌侵染检测中的最新研究成果,分析了当前电子鼻技术存在的缺点,预测了电子鼻技术在果蔬病害检测中的发展方向。

关键词:果蔬;电子鼻;传感器;挥发性有机化合物;病原菌侵染

Abstract: This paper summarized the latest research progress and achievements of electronic nose technology in fruits and vegetables postharvest diseases, including single pathogen infection and multiple pathogens infection. The shortcomings of current E-nose were analyzed, and the development direction of E-nose in fruit and vegetable disease was predicted.

Keywords: fruits and vegetables; electronic nose; sensors; volatile organic compounds; pathogens infection

病害是造成果蔬损耗的主要原因。例如,感染黄龙病菌的茶枝柑果皮中倍半萜类物质和脂肪酸类物质含量显著下降,烷烃类和酯类物质含量显著增加^[1];感染软腐病菌的洋葱球茎中酯类、酮类、烷烃类和含硫化合物含量大量升高^[2];感染果胶杆菌和腐霉菌的马铃薯酮类、烯类和有机胺类等含量明显增加^[3]。传统的果蔬病害识别方法大多依赖人工,效率低下且易受主观因素的影响。不同果蔬具有各自独特的风味,在受到病菌侵染后,果蔬的正常生理代谢受到干扰,会造成挥发性有机化合物(VOCs)的种类及含量发生明显的变化^[4]。而 VOCs 在一定条件下可被检测,因此可以通过检测 VOCs 的变化反映果蔬病变情况,及时预警和防治病害。

常用的 VOCs 检测技术主要有气相色谱(GC)^[5]、气相色谱—质谱联用(GC-MS)^[6]、气相色谱—离子迁移谱(GC-IMS)^[7]、气相色谱—嗅闻联用(GC-O)^[8]等。但这些技术需要较高昂的运营成本和较多专业技术人员,同时仪器升温过程及高温可能会导致相关物质的结构发生变化^[9],且不能实现实时在线检测^[10]。电子鼻作为一种 VOCs 检测技术,兼容人类嗅觉系统和传统的感官分析^[11],具有无损、快速、灵敏、实时、操作简单等优点,已被广泛应用于食品、农业、医学等行业。在食品行业中,随着气体传感器技术的发展及其种类的不断增多,电子鼻技术越来越多地被用于品种的鉴别^[12],新鲜度的检测^[13],果蔬成熟度的鉴定^[14],货架期的预测^[15],肉制品掺假^[16]及农药残留的检测^[17]等方面。

随着社会的发展,人们对健康的认识在逐渐改变,对食用果蔬的新鲜度、营养价值及安全性要求越来越高。在果蔬采后病害检测中,电子鼻技术能够高效和准确地识别病原菌种类和病害程度,为果蔬的新鲜度评价、过程监测和质量控制等提供快速、准确的信息反馈。研究拟归纳总结电子鼻技术用于果蔬采后病害检测的最新研究进展,旨在为其实际应用提供参考与借鉴。

1 电子鼻的构成及算法应用

1.1 电子鼻的构成

电子鼻由硬件系统和软件系统两大部分组成,其中,硬件系统由气体传感器阵列和数据采集系统组成,软件系统由信号预处理和模式识别系统等部分组成^[18]。电子鼻的工作原理与人类嗅觉系统相似,其气体传感器阵列先对收集的 VOCs 进行响应,然后模数转换器将捕获的化学信号转化为可计量的电信号,最后通过模式识别算法作出决策。

果蔬的 VOCs 复杂多样,在采后病害检测中,检测的准确度不仅受传感器种类的影响,同时也受到传感器数

基金项目:国家甘薯产业技术体系项目(编号:CARS-10);浙江省自然科学基金(编号:LY19C200015)

作者简介:吴嘉雯,女,浙江农林大学在读硕士研究生。

通信作者:成纪予(1979—),女,浙江农林大学副教授,博士。

E-mail: jy_ch@163.com

收稿日期:2022-05-25 **改回日期:**2022-09-20

量的影响,各类传感器在果蔬病害检测中的应用见表 1。目前,PEN 3 是果蔬行业中应用最为广泛的电子鼻,由 10 个金属氧化物(MOS)传感器组成,Fox 3000 由 12 个 MOS 传感器组成,而其他自制的传感器则可根据试验需要搭建传感器阵列。不同的果蔬病害所产生的 VOCs 种类各不相同,因此由多个传感器组成的传感器阵列能够综合、全面、准确地检测果蔬病害。

1.2 算法的应用

通过气体传感器阵列采集的 VOCs 响应信号,需要结合各种化学计量学算法进行分析和建模,以进一步确

定电子鼻的适用性。目前,在果蔬采后病害检测中,常用的分析算法及其优缺点见表 2。其中,主成分分析(PCA)、线性判别分析(LDA)、偏最小二乘—判别分析(PLS-DA)和 K-最邻近(KNN)等是应用最为广泛的传统方法。支持向量机(SVM)、分类回归树(CART)和随机森林(RF)等作为新型方法相比于传统方法能够使分类结果更加客观,同时降低了分析复杂性和数据处理的时间。如 SVM 相比于 PLS-DA 不受样本类分布的影响^[27],CART 能够根据决策树图直观地做出决策分类、提取知识规则^[28],RF能够对预测变量之间的复杂相互作用进行

表 1 不同种类传感器在果蔬病害检测中的应用

Table 1 Application of different sensors in fruit and vegetable disease detection

厂家	型号	应用	敏感传感器	文献
德国 Airsense 公司	PEN 3	火龙果桃吉尔霉感染	W1W(硫化物)、W2W(芳香成分和有机硫化物)	[19]
日本 Figaro 公司	—	洋葱佰克霍尔德菌感染	TGS826(氨气)、SB-AQ8(VOCs)	[20]
日本 Fis 公司	—	石榴链格孢菌感染	MQ-131(臭氧、Cl ₂ 、NO ₂)和 MQ-135(氨、硫化物、苯蒸气)	[21]
河南汉威电子公司	—	草莓灰葡萄孢菌感染	W5S(氮氧化物)、W1W(硫化物)、W2W(芳香族化合物和有机硫化物)	[22]
德国 Airsense 公司	PEN 3	桃子灰葡萄孢菌、褐腐病菌和匍枝根霉感染	W1C(苯和芳香族化合物)、W1W(硫化物)和 W2W(芳香族化合物和有机硫化物)	[23]
河南汉威电子公司	—	大蒜尖孢镰刀菌交链孢菌和灰霉菌感染	MQ-2(烷烃、乙醇)、MQ-3(乙醇)、MQ-7(一氧化碳)、MQ-4(甲烷、天然气)、MQ-5(天然气、异丁烷、丙烷)、MQ-8(氢气)、MQ-9(一氧化碳、燃料气体)、MQ-135(氨、硫化物、苯蒸气)、MQ-6(异丁烷、丙烷)	[24]
法国 Alpha MOS 公司	Fox 3000	双孢蘑菇黄曲霉、烟曲霉、赭曲霉感染	LY2/AA(酮类)、LY2/g CT(醇类)、P10/1(胺类)、LY2/GH(有机胺类)、LY2/g CTL(硫类化合物)	[25]
德国 Airsense 公司	PEN 3	苹果扩展青霉和黑曲霉感染	W1S(甲烷)、W2S(醇类和芳香族化合物)、W5S(氮氧化物)、W1W(硫化物)和 W2W(芳香族化合物和有机硫化物)	[26]

表 2 常见不同算法的优缺点

Table 2 The advantages and disadvantages of common different algorithms

算法种类	优点	缺点
分类回归树	不受异常值或非线性关系的影响	样本类别较多而训练集较少时,性能较差
支持向量机	能够区分边界复杂的样本	模型开发较为困难,需要大量信息学数据
朴素贝叶斯	分类效率稳定,所需参数少,对缺失值不敏感	变量较多或者变量之间相关性较大时,分类效果不好
K-最邻近	易于实现,无需估计参数	类别的偏态分布可能导致分类错误
随机森林	能够处理高维度数据,模型泛化能力强	在某些噪音较大的分类或回归问题上可能产生过拟合
偏最小二乘—判别分析	能够处理变量间的多重共线性问题	不同类别样本区域之间的分离不够,可能会导致分类错误
深度学习	学习能力强,适应性好	无法对数据量较小的数据的规律进行无偏差估计,模型设计复杂
K-均值聚类	对大规模数据集的聚类效果较好	聚类结果可能收敛于局部最优而非全局最优解
主成分分析	能够快速显示样本之间的差异性与相似性	不适用于区分不同的样本类
线性判别分析	在降维过程中可以使用类别的先验知识经验	不适用于非高斯分布的样本

建模^[29]等。在实际应用中,各种识别算法具有不同的适用性,为了更好地检测果蔬病害,通常采用多种算法来处理大量复杂的试验数据。如 PCA、LDA 和载荷分析(LA)被用于红香梨腐烂检测^[30];LDA、多层感知器神经网络(MLPNN)和径向基函数神经网络(RBFNN)被用于苹果霉心病检测^[31],KNN 和反向传播神经网络(BPNN)被用于马铃薯真菌性腐烂检测^[32]等。随着人工智能领域的快速发展,深度学习(DL)在电子鼻中也有了部分应用,如电子鼻结合卷积神经网络(CNN)判别普洱茶的贮藏时间^[33];电子鼻结合修正卷积神经网络(IMCNN)判别牛肉的新鲜度^[34]等,日后也将逐渐被应用于果蔬病害的检测。

2 电子鼻在果蔬病害检测中的应用

果蔬采后贮藏和运输各环节中很容易受到割伤、切伤、擦伤、压伤等机械损伤,病原菌容易从果蔬表皮的伤口入侵而导致病变。侵染性病害以真菌和细菌侵染为主,是引起果蔬采后腐烂变质的主要病害。例如,葡萄、草莓等灰霉病的发生由灰葡萄孢菌^[35]引起,番茄、辣椒等黑斑病的发生由互隔交链孢霉^[36]引起,甜菜细菌性斑点病的发生由丁香假单胞菌^[37]引起,黄瓜细菌性角斑病的发生由丁香假单胞菌和胡萝卜软腐果胶杆菌^[38]引起。侵染性病害在果蔬采后贮藏期间具有较强的传染性,若不能及时剔除染菌果蔬,容易引起大规模的病变。

2.1 单种病原菌的检测和识别

病原菌对果蔬的侵染包括入侵、潜伏和病变 3 个阶段,当病原菌侵入后,会诱导 VOCs 相关生物合成酶活性升高,促进萜类、脂肪酸和氨基酸等底物转化为 VOCs,随着侵染的进程,VOCs 的种类和含量均会发生明显的变化。例如,粉红单端孢菌侵染甜瓜早期会产生大量的醇类和醛类^[39],指状青霉侵染柑橘中晚期会产生大量 LOX-衍生酯类^[40]等。电子鼻可以有效地判别健康果蔬与染菌果蔬。在识别由桃吉尔霉引起的火龙果采后病害中,传感器阵列采集的健康火龙果和染菌火龙果的 VOCs 差异显著,结合 PCA、LDA 及 LA 分析响应信号,得出 PCA 和 LDA 算法能准确地判别出染病的火龙果^[19]。在检测洋葱伯克霍尔德菌(*Burkholderia cepacia*)感染引起的酸皮病害中,感染 4~7 d 后,染菌洋葱 VOCs 信号较健康洋葱有明显的变化,再采取相对响应特征结合相对基线校正的方法提取特征响应信号,并利用 SVM 算法区分健康洋葱和染菌洋葱,准确率达 85%^[20]。

当果蔬受到病原菌侵染后,在不同的感染时期产生的 VOCs 各不相同,电子鼻可用于判别不同病变程度的果蔬,为果蔬产业采后病害的分级提供理论依据。如马铃薯易受到胡萝卜软腐欧文氏菌(*Euclidean coli*)侵染而引起软腐病,Chang 等^[41]通过自主设计和优化的仿生电子鼻气室和采样装置,采用 RBFNN 和 SVM 算法区分新

鲜和 5 种不同病变程度的马铃薯。结果显示,SVM 算法对腐烂的马铃薯判别准确率最高为 89.7%,RBFNN 算法的判别准确率最高为 87.5%,SVM 算法的识别准确率优于 RBFNN 算法。甘薯长喙壳菌(*Ceratocystis fimbriata*)侵染引起的黑斑病是造成甘薯采后损失的主要病害,病原菌侵染过程中,会引起酮类、醇醚类物质的增加,烷烃类、烯烃类物质的减少,张小琼等^[42]利用电子鼻对 3 种不同病变程度的甘薯进行判别,比较 PCA、PLS-DA、正交偏最小二乘法—判别分析(OPLS-DA)和 SVM 算法的区分效果,得出 SVM 算法的判别效果最好,训练集和测试集准确率分别为 97%和 96%。

若病原菌在果蔬生长早期侵入并潜伏于果蔬内部,随着果蔬的发育成熟,病原菌会在果蔬内部生长繁殖而引起病变。在病害的早期,果蔬表面观察不到明显的病变症状,依靠传统的人工无法及时发现病变。目前,电子鼻技术的应用可以实现果蔬表面肉眼不可见病害的早期识别。Nouri 等^[21]研究表明,电子鼻可以快速诊断石榴内部链格孢菌(*Alternaria* spp.)侵染引起的黑心病,利用 PCA 筛选高性能传感器,再通过 LDA、BPNN、SVM 算法对染病石榴建立判别模型进行对比分析,其中 BPNN 算法对不同病害程度石榴的分类精度最高,准确率可达 100%。表明电子鼻在果蔬病害表面无症状感染的识别效果较好,在果蔬病害检测中较传统方法具有更大的优越性和应用前景。

电子鼻技术还可用于预测病害果蔬中病原菌的数量。病原菌的繁殖和代谢活动会显著影响果蔬 VOCs 的变化,通过对病原菌生长进程的监测,可以间接反映果蔬的病变程度。Liu 等^[22]利用电子鼻捕捉草莓受到灰葡萄孢菌(*Botrytis cinerea*)侵染后释放的特征气味,高光谱成像(HSI)获取草莓表面的光谱信息,结合菌落总数测定结果,采用 PCA 提取电子鼻和 HSI 的响应特征值,融合电子鼻和 HSI 的特征值后建立菌落总数 SVM 预测模型,结果显示在侵染期间 VOCs 和光谱信息的变化与菌落总数具有较高的相关性和较低的误差, R^2 为 0.925, RMSEP 为 0.38,预测性能较好。同时,Liu 等^[23]在预测桃子匍枝根霉(*Rhizopus stolonifer*)感染时,采用了偏最小二乘回归(PLSR)算法预测菌落总数, R_p^2 为 0.905, RMSEP 为 0.301,也取得了较好的预测效果。

2.2 不同病原菌的检测和识别

在日常的贮运过程中,果蔬通常会受到多种病原菌的交叉感染。而即使是同一种果蔬受到不同种类的病原菌侵染后,发生的生理生化反应与合成的代谢产物各不相同,导致产生的 VOCs 具有特异性,即独特的气味指纹信息。如苹果感染扩展青霉后产生癸酸乙酯、2-苯基乙酸乙酯和碳酸二乙酯等,感染葡萄座腔菌后产生 3-己烯-1-醇、2-苯基乙醛和 α -萜烯等,感染链格孢菌后产生 2-乙基

己烷-1-醇和苯乙酮^[43]等;草莓感染灰葡萄孢菌后产生乙酸辛酯、5-羟甲基糠醛和辛酸等,感染青霉菌后产生肉桂酸甲酯和苯并环丁烯等,感染匍枝根霉后产生 γ -十二内酯和 α -法尼烯^[44]等。电子鼻可以准确地识别果蔬受到不同病原菌侵染后而引起的各种病害,该技术的应用可为病害的精准防控提供强有力的依据。大蒜易受到尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum* f. sp. *Cepae*)、交链孢菌(*Alternaria bellisia*)和灰霉菌(*Botrytis allii*)感染引发不同病害,Makarichian 等^[24]根据不同病菌侵染时释放的特征 VOCs,先采用 PCA 筛选对染菌大蒜敏感的传感器,再结合 LDA、SVM 和 BPNN 分析电子鼻响应信号,3 种算法均可有效区分不同病原菌感染的大蒜,准确率分别为 97.5%,92.5%,92.5%。在判别双孢蘑菇受到黄曲霉(*Aspergillus flavus*)、烟曲霉(*Aspergillus fumigatus*)和赭曲霉(*Aspergillus ochraceus*)侵染时,将电子鼻响应信号结合 PLS-DA 算法,可以很好地区分真菌种类,判别准确率达 97.0%,同时对不同侵染时间的识别准确率高达 98.3%^[25]。苹果在采后易受到扩展青霉(*Penicillium expansum*)和黑曲霉(*Aspergillus niger*)的侵染,Jia 等^[26]利用电子鼻采集不同病原菌侵染苹果后的 VOCs 响应信号,筛选和优化了与染菌苹果 VOCs 信息相关性较高的特征气体传感器,再采用 LDA、BPNN、SVM 和 RBFNN 算法进行判别,其中 BPNN 算法构建的模型判别效果最好,准确率为 72.0%。

电子鼻技术与其他风味检测技术的联合分析,可以校验电子鼻检测结果的可靠性,同时可以提高对多种病原菌判别的准确性和客观性。Liu 等^[23]利用电子鼻结合 GC-MS 检测桃子褐腐病菌(*Monilinia fructicola*)、匍枝根霉和灰葡萄孢菌侵染引起的 VOCs 变化,GC-MS 的结果显示正己醛、E-2-己烯醛、乙酸己酯、Z-2-己烯-1-醇、芳樟醇、 γ -十八内酯、 γ -癸内酯和 β -月桂烯 8 种物质是影响桃子风味特征的主要 VOCs,同时也是引起传感器响应变化的主要物质。再将电子鼻响应信号结合 PLS-DA 算法对不同病原菌侵染的桃子进行判别,结果表明电子鼻在 48 h 后即可有效区分由 3 种真菌侵染引起的灰霉病、褐腐病和软腐病,判别准确率分别为 86.67%,86.67%,100.00%。Ezhilan 等^[45]采用电子鼻技术结合 GC-MS 对受到葡萄球菌(*Staphylococcus*)、沙门氏菌(*Salmonella*)和志贺菌(*Shigella*)感染的西兰花样品进行评价。将菌落总数、GC-MS 与西兰花的新鲜度进行相关性分析,确定西兰花新鲜度评判标准,最后利用电子鼻对不同新鲜度的西兰花进行判别。结果表明,西兰花感染 3 种细菌后产生的乙酸、己酸和壬醇等标志性 VOCs 为电子鼻的判别提供了物质基础;电子鼻结合 PCA 和中心链接聚类分析(CA)可以定量区分新鲜(0 CFU/mL)、半污染(10^6 CFU/mL)和完全污染(10^7 CFU/mL)的西兰花。表

明电子鼻在果蔬中多种病原菌侵染的检测方面也有很好的应用前景。

综上,电子鼻技术无需复杂的样品前处理,采集顶空气体后即可实时获取 VOCs 的响应信息,结合适当的化学计量学方法可实现果蔬采后病害实时、准确的判别。同时,电子鼻技术结合 HSI 和微生物、理化指标测定等方法可以使电子鼻定量预测病害果蔬中的病原菌含量或其他生理指标。其次,电子鼻技术联合 GC-MS 等其他风味检测技术可以从不同角度捕获更全面、更综合的 VOCs 信息,多源信息的融合使得果蔬侵染性病害的检测结果更为准确和可靠。

3 总结与展望

电子鼻技术能够检测果蔬肉眼可见和不可见的病害,具有快速、无损、操作简便、批量检测等优点,在果蔬采后病害检测中具有较好的应用可行性和发展前景。但目前电子鼻技术仍存在部分缺点,如传感器稳定性较差,容易受到噪声的影响产生漂移;测量的高精度性和高重复性需要严格控制样品制备和采样环境,使得电子鼻在田间或者运输过程中使用困难。因此,电子鼻技术落地到实际农业应用推广中还有很多工作需要研究和完善。

- ① 新型传感材料的研发方面,开发高灵敏度和选择性的无漂移传感器,利用新型纳米材料或在材料中添加元素或多种催化剂提高响应,减少响应时间;
- ② 不断开发新的模式识别算法,不仅要提高样品的分类准确率和适用性,还要能够对传感器的更换、漂移补偿、稳定性和可靠性进行数据处理;
- ③ 开发微型电子鼻结合嵌入式技术设备如 GSM、GPS,一旦检测到目标气体即可产生报警信号并显示目标样品实时定位;
- ④ 将电子鼻技术应用于病变果蔬中毒素的检测,如番茄链格孢菌侵染产生的链格孢毒素、葡萄赭曲霉和黑曲霉侵染产生的赭曲霉毒素,苹果扩展青霉侵染产生的展青霉素等。总的来说,电子鼻技术在果蔬病害中的应用,使得检测结果更加客观、准确和高效,能够实现果蔬采后病害的动态监测和早期预警。

参考文献

- [1] 石莹,刘园,陈嘉景,等.黄龙病病菌侵染对茶枝柑果实类黄酮和挥发性物质的影响[J].华中农业大学学报,2020,39(1): 24-33.
- SHI Y, LIU Y, CHEN J J, et al. Effect of Huanglongbing infection on profiles of flavonoids and volatiles in fruits of *Citrus reticulata* cv. *chachiensis* [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(1): 24-33.
- [2] TIWARI S, GOSWAMI U, KATE A, et al. Biological relevance of VOCs emanating from red onions infected with *Erwinia* (*Pectobacterium*) *carotovora* under different storage conditions[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 184: 111761.
- [3] SANGJAN W, MARZOUGUI A, MATTINSON D S, et al.

- Identification of volatile biomarkers for high-throughput sensing of soft rot and *Pythium* leak diseases in stored potatoes [J]. Food Chemistry, 2022, 370: 130910.
- [4] WANG A, LUCA A, EDELENBOS M. Emission of volatile organic compounds from yellow onion (*Allium cepa* L.) bulbs during storage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(6): 2 940-2 948.
- [5] 汪素芳, 董淮晋, 孟甜, 等. 气相色谱法同时检测南极磷虾中 2 种 ω -3 脂肪酸含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(23): 9 006-9 012.
- WANG S F, DONG H J, MENG T, et al. Simultaneous determination of 2 kinds of ω -3 fatty acids in *Euphausia superba* by gas chromatography[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(23): 9 006-9 012.
- [6] PICO Y, ALFARHAN A H, BARCELO D. How recent innovations in gas chromatography-mass spectrometry have improved pesticide residue determination: An alternative technique to be in your radar[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2020, 122: 115720.
- [7] YIN J, WU M, LIN R, et al. Application and development trends of gas chromatography-ion mobility spectrometry for traditional Chinese medicine, clinical, food and environmental analysis [J]. Microchemical Journal, 2021, 168: 106527.
- [8] 陈臣, 刘政, 黄珂, 等. 基于 GC-MS、GC-O 及电子鼻评价不同加工方式对乳扇风味的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 108-117.
- CHEN C, LIU Z, HUANG K, et al. Effects of different processing methods on the flavor of dairy fan evaluated using GC-MS, GC-O and electronic nose[J]. Food Science, 2021, 42(16): 108-117.
- [9] 郭艳, 崔方让. 气相色谱法在农产品农药残留检测中的应用[J]. 现代农业科技, 2021(3): 229-230.
- GUO Y, CUI F R. Application of gas chromatography in the determination of pesticide residues in agricultural products [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2021(3): 229-230.
- [10] BARBOSA-PEREIRA L, ROJO-POVEDA O, FERROCINO I, et al. Assessment of volatile fingerprint by HS-SPME/GC-qMS and E-nose for the classification of cocoa bean shells using chemometrics[J]. Food Research International, 2019, 123: 684-696.
- [11] MOHD ALI 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.
- [12] 李国琴, 黄艳茹, 张强, 等. 基于电子鼻技术对不同类型洋葱提取液的识别 [J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(20): 8 034-8 440.
- LI G Q, HUANG Y R, ZHANG Q, et al. Identification of different types of onion extracts by electronic nose technology[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(20): 8 034-8 440.
- [13] 谢林君, 成果, 王海军, 等. 基于电子鼻及气相-离子迁移谱法分析阳光玫瑰葡萄贮藏期挥发性成分[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(7): 167-174.
- XIE L J, CHENG G, WANG H J, et al. Analysis of volatile components of shine muscat grapes during storage periods by electronic nose and GC-IMS[J]. Food Research and Development, 2022, 43(7): 167-174.
- [14] 王俊平, 徐刚. 机器视觉和电子鼻融合的番茄成熟度检测方法[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 148-152.
- WANG J P, XU G. Research on tomato maturity detection method based on machine vision and electronic nose fusion[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 148-152.
- [15] 毋思敏, 于森, 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. The establishment of shelf life prediction model of milk based on electronic nose and electronic tongue[J]. Food Science, 2022, 43(10): 302-307.
- [16] 周秀丽, 刘全, 查恩辉. 电子鼻在掺假牛肉馅识别中的应用[J]. 食品工业科技, 2017, 38(4): 73-76, 80.
- ZHOU X L, LIU Q, ZHA E H. The application of electronic nose in adulterated minced beef identification [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(4): 73-76, 80.
- [17] 李佩泽, 赵世舜, 翁小辉, 等. 基于多传感器优化的农药残留快速检测新方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(18): 1 951-1 956.
- LI P Z, ZHAO S S, WENG X H, et al. A new method for rapid detection of pesticide residues based on multi-sensor optimization [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(18): 1 951-1 956.
- [18] XU J, LIU K, ZHANG C. Electronic nose for volatile organic compounds analysis in rice aging[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 83-93.
- [19] 李国林, 孟繁博, 郑秀艳, 等. 红肉火龙果贮藏期间气味监测及桃吉尔霉对气味的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(18): 4 834-4 838.
- LI G L, MENG F F, ZHENG X Y, et al. Odor monitoring during storage of red pitaya and effect of *Gilbertella persicaria* odor[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(18): 4 834-4 838.
- [20] KONDURU T, RAINS G C, LI C. Detecting sour skin infected onions using a customized gas sensor array[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 160: 19-27.
- [21] NOURI B, MOHTASEBI S S, RAFIEE S. Quality detection of pomegranate fruit infected with fungal disease[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 9-21.
- [22] LIU Q, SUN K, ZHAO N, et al. Information fusion of hyperspectral imaging and electronic nose for evaluation of fungal contamination in strawberries during decay[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 153: 152-160.
- [23] LIU Q, ZHAO N, ZHOU D, et al. Discrimination and growth tracking of fungi contamination in peaches using electronic nose [J]. Food Chemistry, 2018, 262: 226-234.
- [24] MAKARICHIAN A, CHAYJAN R A, AHMADI E, et al. Early detection and classification of fungal infection in garlic (*A. sativum*) using electronic nose[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 106575.
- [25] WANG L, HU Q, PEI F, et al. Detection and identification of

- fungus growth on freeze-dried *Agaricus bisporus* using spectra and olfactory sensors [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(7): 3 136-3 146.
- [26] JIA W, LIANG G, TIAN H, et al. Electronic nose-based technique for rapid detection and recognition of moldy apples[J]. *Sensors*, 2019, 19(7): 1 526.
- [27] JIMÉNEZ-CARVELO A M, GONZÁLEZ-CASADO A, BAGUR-GONZÁLEZ M G, et al. Alternative data mining/machine learning methods for the analytical evaluation of food quality and authenticity: A review[J]. *Food Research International*, 2019, 122: 25-39.
- [28] 王伟, 黄宇星, 余鸿敏. 基于 CART 决策树的冲压成形仿真数据挖掘[J]. *工程科学学报*, 2018, 40(11): 1 373-1 379.
- WANG W, HUANG Y X, YU H M. Data mining of deep drawing simulation results based on CART decision tree theory[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40(11): 1 373-1 379.
- [29] CUTLER D R, EDWARDS JR T C, BEARD K H, et al. Random forests for classification in ecology[J]. *Ecology*, 2007, 88(11): 2 783-2 792.
- [30] 闫子茹, 张阳, 高聪聪, 等. 基于电子鼻检测香红梨腐烂程度[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(11): 4 529-4 535.
- YAN Z R, ZHANG Y, GAO C C, et al. Detection of decay degree of Xianghong pear based on electronic nose[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2021, 12(11): 4 529-4 535.
- [31] 张建超, 张鹏, 薛友林, 等. 基于电子鼻表征霉心病苹果特征气味及无损检测模型建立[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(2): 267-273.
- ZHANG J C, ZHANG P, XUE Y L, et al. Characterization of characteristic odor and establishment of nondestructive detection model of core rot apples based on electronic nose[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(2): 267-273.
- [32] 黄星奕, 孙兆燕, 田潇瑜, 等. 基于电子鼻技术的马铃薯真菌性腐烂病早期检测[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(24): 97-101.
- HUANG X Y, SUN Z Y, TIAN X Y, et al. Early detection of potato rot disease caused by fungus based on electronic nose technology [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(24): 97-101.
- [33] YANG Z, GAO J, WANG S, et al. Synergetic application of E-tongue and E-eye based on deep learning to discrimination of Pu-erh tea storage time[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 187: 106297.
- [34] LIU C, CHU Z, WENG S, et al. Fusion of electronic nose and hyperspectral imaging for mutton freshness detection using input-modified convolution neural network[J]. *Food Chemistry*, 2022, 385: 132651.
- [35] 高萍, 高士刚, 成玮, 等. 上海市草莓灰霉病菌对氟吡菌酰胺敏感性检测及抗性分子机制[J]. *植物保护*, 2021, 47(4): 215-220.
- GAO P, GAO S G, CHENG W, et al. Sensitivity and resistance molecular mechanism of *Botrytis cinerea* to fluopyram in strawberry in Shanghai[J]. *Plant Protection*, 2021, 47(4): 215-220.
- [36] VENTURA-AGUILAR R I, BAUTISTA-BAÑOS S, HERNÁNDEZ-LÓPEZ M, et al. Detection of *Alternaria alternata* in tomato juice and fresh fruit by the production of its biomass, respiration, and volatile compounds[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2021, 342: 109092.
- [37] 祁厚辰, 董轩瑜, 董刚刚, 等. 甜菜细菌性病害研究进展[J]. *中国糖料*, 2021, 43(4): 64-69.
- QI H C, DONG X Y, DONG G G, et al. Research progress on sugar beet bacterial diseases[J]. *Sugar Crops of China*, 2021, 43(4): 64-69.
- [38] 彭月, 顾兴芳, 张圣平, 等. 黄瓜细菌性角斑病研究进展[J]. *中国蔬菜*, 2021(3): 28-35.
- PENG Y, GU X F, ZHANG S P, et al. Research progress on angular leaf spot of cucumber [J]. *China Vegetables*, 2021(3): 28-35.
- [39] GONG D, BI Y, LI S, et al. *Trichothecium roseum* infection promotes ripening of harvested muskmelon fruits and induces the release of specific volatile compound [J]. *Journal of Plant Pathology*, 2019, 101(3): 529-538.
- [40] CHALUPOWICZ D, VELTMAN B, DROBY S, et al. Evaluating the use of biosensors for monitoring of *Penicillium digitatum* infection in citrus fruit[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 311: 127896.
- [41] CHANG Z, LU J, QI H, et al. Bacterial infection potato tuber soft rot disease detection based on electronic nose [J]. *Open Life Sciences*, 2017, 12(1): 379-385.
- [42] 张小琼, 庞林江, 陆国权, 等. 电子鼻技术对甘薯储藏中长喙壳菌感染病变程度判别[J]. *传感技术学报*, 2020, 33(11): 1 564-1 570.
- ZHANG X Q, PANG L J, LU G Q, et al. Discriminate of sweet potato storage disease infected by *Ceratocystis Fimbriata* on electronic nose technology[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2020, 33(11): 1 564-1 570.
- [43] KIM S M, LEE S M, SEO J A, et al. Changes in volatile compounds emitted by fungal pathogen spoilage of apples during decay[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 146: 51-59.
- [44] PAN L, ZHANG W, ZHU N, et al. Early detection and classification of pathogenic fungal disease in post-harvest strawberry fruit by electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Food Research International*, 2014, 62: 162-168.
- [45] EZHILAN M, NESAKUMAR N, BABU K J, et al. Freshness assessment of broccoli using electronic nose [J]. *Measurement*, 2019, 145: 735-743.