

朱榕秋, 周熠玮, 陈维信, 朱孝扬, 李雪萍. 电子鼻在果蔬贮藏保鲜中应用的研究进展 [J]. 广东农业科学, 2024, 51 (1) : 51–62.
ZHU Rongqiu, ZHOU Yiwei, CHEN Weixin, ZHU Xiaoyang, LI Xueping. Research progress on the application of electronic nose in storage and preservation of fruits and vegetables [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2024, 51 (1) : 51–62.

电子鼻在果蔬贮藏保鲜中应用的研究进展

朱榕秋¹, 周熠玮², 陈维信¹, 朱孝扬¹, 李雪萍¹

(1. 华南农业大学园艺学院 / 广东省果蔬保鲜重点实验室 / 南方园艺产品保鲜教育部工程研究中心,
广东 广州 510642; 2. 广东省农业科学院环境园艺研究所, 广东 广州 510642)

摘要: 果蔬采后变化是一个复杂的生物学过程, 涉及成熟、衰老和死亡等多个阶段, 导致果蔬内部物质发生一系列生理、生化和微生物变化, 从而影响果蔬的品质和风味。气味是果蔬品质和风味的重要指标之一, 与果蔬品种、成熟度、新鲜度和采后病害等因素具有密切关系。传统的气味分析方法主要包括仪器分析(如气相色谱-质谱联用)和感官分析, 但这些方法存在局限性, 如气相色谱-质谱联用不能全面反映样品的整体风味, 且样品前处理复杂、检测耗时长、技术成本高等; 而感官分析受主观因素影响较大。电子鼻作为一种模拟生物嗅觉系统的仪器, 能够快速、客观和准确地检测和识别气味信号, 逐渐成为果蔬贮藏保鲜领域的研究热点。综述电子鼻在果蔬品种与产地鉴定、成熟度判断、新鲜度检测、采后病害监测、果蔬农药残留和品质评价等方面的应用进展, 并分析电子鼻在实际应用中面临的挑战和问题, 展望果蔬采后精准化检测的未来发展趋势, 以及提出了电子鼻向专一化、智能化、实用化方向改进的可能途径, 为实现果蔬品质精准化检测提供参考和技术支持。

关键词: 电子鼻; 果蔬; 贮藏保鲜; 品质监测; 精准化检测

中图分类号: S609.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X (2024) 01-0051-12

Research Progress on the Application of Electronic Nose in Storage and Preservation of Fruits and Vegetables

ZHU Rongqiu¹, ZHOU Yiwei², CHEN Weixin¹, ZHU Xiaoyang¹, LI Xueping¹

(1. College of Horticulture, South China Agricultural University / Guangdong Key Laboratory of Postharvest Science of Fruits and Vegetables / Engineering Research Center of Southern Horticultural Products Preservation, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China; 2. Institute of Environmental Horticulture, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Postharvest change in fruits and vegetables is a complex biological process that involves multiple stages such as maturity, senescence and death, leading to a series of physiological, biochemical and microbial changes in the internal substances of fruits and vegetables, thereby affecting their quality and flavor. Scent is one of the important indicators of fruit and vegetable quality and flavor, which is closely related to factors such as variety, maturity, freshness and postharvest diseases. Traditional flavor analysis methods mainly include instrumental analysis (such as gas chromatography-mass spectrometry, GC-

收稿日期: 2023-07-26

基金项目: 广东省自然科学基金面上项目(2023A1515010335); 国家自然科学基金(32172640); 广东省现代农业产业技术创新团队建设专项资金(2022KJ109); 广东省基础与应用基础研究基金项目区域联合基金-青年基金项目(2022A1515110757)

作者简介: 朱榕秋(1995—), 男, 在读硕士生, 研究方向为南方果蔬保鲜技术, E-mail: 764613808@qq.com

通信作者: 朱孝扬(1985—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为果蔬采后生理和分子生物学, E-mail: xiaoyang_zhu@scau.edu.cn

MS) 和感官分析, 然而, 这些方法有一些局限性。例如, GC-MS 不能完全反映样品的整体风味, 样品预处理复杂, 检测时间长且技术成本高。感官分析受主观因素影响很大。作为模拟生物嗅觉系统的仪器, 电子鼻可以快速、客观地检测和识别气味信号, 逐渐成为贮藏和保鲜领域中的研究热点。本文综述了电子鼻在水果和蔬菜品种识别、成熟度判断、新鲜度检测、采后病害监测、农药残留和品质评价等方面的应用进展, 分析了电子鼻在实际应用中面临的挑战和问题。它还为未来精确的采后检测提供了展望, 提出了改进电子鼻向着专业化、智能化和实用化的方向发展的可能途径, 为实现精确检测提供了理论参考和技术支持。

Key words: 电子鼻; 水果和蔬菜; 贮藏和保鲜; 品质监测; 精确检测

电子鼻是一种基于生物嗅觉的仿生仪器, 于 20 世纪 90 年代发展并逐渐被应用于诸多领域^[1]。关于电子鼻的研究最早可追溯到 20 世纪 60 年代, Wilkens 等^[2] 利用气体分子在电极上的氧化还原反应模拟嗅觉过程, 但随后研究热度并不高。直至 1987 年在第八届欧洲化学传感研究组织年会上, 以 Gardner 为首的研究团队提出并发表关于气体测量及模式识别研究的相关论文开始, 电子鼻逐渐引起学术界的关注。关于电子鼻的定义, Gardner 等^[3] 认为, 电子鼻是由一系列具有特异性的化学传感器和合适的模式识别系统组成, 并能识别简单或复杂气体的仪器。电子鼻系统主要由传感器阵列、信号处理系统、模式识别等部分组成^[4], 其工作原理与生物嗅觉类似, 气体分子与传感器阵列中的气敏元件接触后, 引起气敏元件的物理或化学变化并转化为电信号, 经由系统采集与信号预处理后, 借助模式识别而呈现出样品气味的整体信息。电子鼻与 GC-MS、光谱法(如红外光谱、拉曼光谱)的特点比较, 由于电子鼻具有快速、无损检测样品气体的功能, 经

“训练”后即能应对各种样品单一或复杂气味的检测, 进而对样品进行区分和鉴别, 因此被广泛应用于工业^[5]、食品^[6]、环境检测^[7]、医学^[8]等领域, 并取得了显著成效, 近年来电子鼻在果蔬贮藏保鲜行业也取得了广泛应用。

果蔬采后变化是一个有机体成熟、衰老和死亡的过程, 在此过程中果蔬内部物质的一系列变化可引起品质改变。气味是果蔬生理协同变化的外在重要客观反映, 与果蔬品种^[9-10]、成熟度^[11]、新鲜度^[12-13]和采后病害^[14]等密切相关。然而

目前常用的气味分析方法较难满足评价果蔬采后贮藏保鲜过程品质变化的实际应用需求。传统的仪器分析如气相色谱-质谱联用, 侧重于分析挥发性物质的成分与含量, 较难分析挥发性物质整体对样品风味的贡献, 且该技术对样品前处理要求较高、检测耗时长、技术成本高, 因此主要适用于实验室研究^[15-16]; 而感官分析则对品评人员要求较高, 分析结果受品评人的身体状况、情绪、文化程度等诸多主观因素影响, 难以作为科学严谨的分析方法在生产上推广应用^[17]。

近年来得益于人工智能技术的迅速发展, 电子鼻作为一种嗅觉仿生仪器, 具有检测快速、客观和准确的优点, 被用于果蔬新鲜度检测、品质评价、病害监测等方面。本文针对电子鼻在果蔬贮藏保鲜中的应用研究进展进行归纳概述, 并基于电子鼻实践应用中的难点进行分析, 旨在为实现果蔬采后品质精准化检测提供参考。

1 电子鼻在果蔬品种、产地鉴定中的应用

由于遗传和栽培因素的差异, 果蔬风味往往因其品种和产地的不同而呈现出差别, 通过电子鼻检测气味, 可实现对果蔬不同品种和产地的快速判断, 从而建立起果蔬品种和产地的气味指纹数据库, 为果蔬种质资源的进一步加工与利用提供理论基础。

电子鼻在果蔬品种和产地鉴定方面有着广泛的应用前景, 已有许多相关的研究报道(表 1)。这些研究涉及竹笋^[18]、荔枝^[19]、石榴^[20]、

表1 电子鼻在果蔬品种和产地鉴定中的应用

Table 1 Application of electronic nose in identification of fruit and vegetable varieties and origins

种类 Variety	应用领域 Application field	数据分析方法 Data analysis method	研究结果 Research result	参考文献 Reference
竹笋 Bamboo shoot	品种鉴定	PCA、LDA、HCA	成功区分不同品种竹笋气味, 存在明显差异	[18]
荔枝 Lichi	品种鉴定	PNN、SVM	通过优化特征值选取和模式识别方法, 成功识别荔枝品种	[19]
石榴 Pomegranate	品种鉴定	PCA、LDA	通过 PCA 和 LDA 分析区分 3 种石榴品种	[20]
红洋葱 Red onion	品种鉴定	DFA	通过 DFA 成功实现红洋葱品种气味间的划分, 正确分类率达到 97.5%	[21]
大蒜 Garlic	品种鉴定	PCA	成功鉴别 4 个泰国大蒜品种	[22]
葡萄风信子 <i>Muscaria botryoides</i>	品种鉴定	PCA、HCA	对不同品种葡萄风信子花香进行分类	[23]
黑木耳 <i>Auricularia auricula</i>	品种鉴定	PCA、LDA	对 25 个黑木耳品种进行有效区分	[24]
花椒 Sichuan pepper	品种鉴定	PCA	将 34 个花椒品种分为 3 类	[25]
北柴胡 Honewort	产地鉴定	PCA、LDA	通过 PCA 和 LDA 有效区分不同地区的柴胡	[26]
大白菜 Chinese cabbage	产地鉴定	PCA、DFA	有效鉴别中国与韩国的大白菜	[27]
甜樱桃 Sweet cherry	产地鉴定	LDA	区分甜樱桃的地理来源	[28]
猕猴桃 Kiwi fruit	产地鉴定	PCA、SLDA、SIMCA	对不同产地的猕猴桃有较高的预测准确率	[29]
橙子 Orange	产地鉴定	SELECT/LDA	对不同产地的橙子表现出优秀的区分能力	[30]
枸杞子 Wolfberry	产地鉴定	DFA、CNN、PCA、PLS-DA	有效区分不同产地的枸杞子	[31]
辣椒 Pepper	产地鉴定	PCA	区分不同种植地区地理标志性辣椒及不同辣椒品种	[32]

注: PCA: 主成分分析; LDA: 线性判别分析层次聚类分析; HCA: 层次聚类分析; PNN: 概率神经网络; SVM: 支持向量机; DFA: 判别函数分析; SLDA: 逐步线性判别分析; SIMCA: 类比的软独立建模; CNN: 卷积神经网络; PLS-DA: 偏最小二乘判别分析。

Note: PCA: Principal component analysis; LDA: Linear discriminant analysis hierarchical cluster analysis; HCA: Hierarchical cluster analysis; PNN: Probabilistic neural network; SVM: Support vector machine; DFA: Discriminant function analysis; SLDA: Stepwise linear discriminant analysis; SIMCA: Soft independent modeling of analogies; CNN: Convolutional neural networks; PLS-DA: Partial least-squares discriminant analysis.

红洋葱^[21]、大蒜^[22]、葡萄^[23]、黑木耳^[24]、花椒^[25]等多种果蔬品种, 以及柴胡^[26]、大白菜^[27]、甜樱桃^[28]、猕猴桃^[29]、橙子^[30]、枸杞子^[31]、辣椒^[32]等多种果蔬产地。这些研究说明, 电子鼻在果蔬品种和产地鉴定方面具有很大的应用潜力。为了实现果蔬产地的精准化检测, 还需要进一步收集和整合果蔬的气味信息, 建立起相应的气味数据库, 同时优化和改进电子鼻的系统设计、信号处理方法和模式识别算法, 以提高电子鼻的性能和效率。

2 电子鼻在果蔬成熟度判断中的应用

成熟度是决定果蔬品质的重要因素之一, 但其判断主要依赖于生产者的经验, 缺乏科学准确的研判。果蔬香气的形成与其发育阶段密切相关, 这种“阶段性”特征为电子鼻应用于果蔬成熟度判断提供可能。电子鼻在果蔬成熟度研究方

面有着广泛的应用前景, 已有许多相关的研究报道(表2)。这些研究涉及柑橘^[33]、黄桃^[34]、荔枝^[35]、菠萝^[36]、葡萄^[37]、苹果^[38]、芒果^[39]、香蕉^[40-41]、猕猴桃^[42]、番茄^[43]等多种果蔬, 以及不同的信号处理方法和模式识别算法。研究表明, 电子鼻能够利用不同的特征值和分类模型, 有效地区分不同采摘期或采后阶段的果蔬气味特征, 达到较高的分类准确率。然而, 这些研究也存在一些局限性和挑战, 如样本量较小、品种范围较窄、实验条件受限等。因此, 在实际应用中, 还需要考虑更多影响因素, 如贮藏时间、贮藏条件等, 以及如何优化电子鼻传感器阵列、信号处理方法和模式识别算法等, 以提高电子鼻在果蔬成熟度判断方面的稳定性和可靠性。

电子鼻能够实现对果蔬成熟度的快速无损识别, 不需要对果蔬进行切割或损伤, 其能够结合多种信号处理和模式识别技术, 提高对果蔬成

表 2 电子鼻在果蔬成熟度判断中的应用

Table 2 Application of electronic nose in judging the maturity of fruits and vegetables

种类 Variety	应用领域 Application field	数据分析方法 Data analysis method	研究结果 Research result	参考文献 Reference
柑橘 Orange	采收成熟度判断	PCA、LDA	对不同采摘期的柑橘进行成熟度分类	[33]
黄桃 Peach	采收成熟度判断	PCA、DFA	电子鼻数据比品质和乙烯释放速率能更准确地区分不同成熟度的黄桃	[34]
荔枝 Lichi	采收成熟度判断	PCA、LDA、BPNN、SCA、CCA	理化指标和电子鼻均能有效区分不同成熟度的荔枝,且电子鼻响应信号与部分理化指标显著相关	[35]
菠萝 Pineapple	采收成熟度判断	PCA	成功区分不同成熟度的菠萝	[36]
葡萄 Grape	采收成熟度判断	CDA	电子鼻对葡萄成熟度分类的准确度比理化指标更高	[37]
苹果 Apple	采收成熟度判断	PCA、LDA	快速无损检测苹果的成熟度	[38]
芒果 Mango	采后成熟度判断	PLSR	成功构建芒果采后成熟度评判的分段指数模型	[39]
香蕉 Banana	采后成熟度判断	SVM	对香蕉采后成熟度进行高效分类	[40]
香蕉 Banana	采后成熟度判断	SELECT/LDA	通过复合系统和监督特征选择算法识别了不同采后成熟阶段的香蕉	[41]
猕猴桃 Kiwi fruit	采后成熟度判断	RF	预测猕猴桃的采后成熟度	[42]
番茄 Tomato	采后成熟度判断	SVM、KNN	预测番茄的成熟度	[43]

注: PCA: 主成分分析; LDA: 线性判别分析; BPNN: 反向传播神经网络; SCA: 简单相关分析; CCA: 典型相关分析; CDA: 典型判别分析; DFA: 判别分析; SVM: 支持向量机; RF: 随机森林; PLSR: 偏最小二乘回归; KNN: K-近邻模型。

Note: PCA: Principal component analysis; LDA: Linear discriminant analysis; BPNN: Backpropagation neural network; SCA: Simple correlation analysis; CCA: Canonical correlation analysis; CDA: Canonical discriminant analysis; DFA: Discriminant analysis; SVM: Support vector machine; RF: Random forest; PLSR: partial least-squares regression; KNN: K-nearest neighbor model.

熟度的分类或回归准确率。例如,PCA、LDA、CCA等降维方法可以有效提取电子鼻数据中的主要信息,消除冗余和噪声;SVM、BPNN、RF等机器学习方法可以有效建立电子鼻数据与果蔬成熟度之间的非线性关系,提高预测性能。电子鼻能够与其他传感器或仪器进行复合或融合,进一步提高对果蔬成熟度的识别效果。例如,电子鼻与相机、光谱仪、质谱仪等可以相互补充信息,实现对果蔬成熟度的多角度评价。

3 电子鼻在果蔬新鲜度和品质检测中的应用

新鲜度是消费者选择果蔬产品的重要考量因素之一,但大多数果蔬难以从外观上准确判断其贮藏时间的长短或货架期限,一定程度上限制了采购商或者消费者对果蔬新鲜度的溯源。在果蔬成熟与衰老的过程中,风味变化必然随时间经历从形成到流失的过程,因此通过气味表征实现果蔬新鲜度的检测被认为是可行的办法。目前,在利用电子鼻检测果蔬新鲜度和品质方面已有较多报道(表3)。在果蔬新鲜度判断研究方面,电

子鼻已经被广泛应用在苹果^[44]、甜橙^[45]、沃柑^[46]、西兰花^[47]、木瓜^[48]、菠菜^[49]、芹菜^[50]、番茄^[51]、甜柿^[52]、水蜜桃^[53]、猕猴桃^[54-55]、香蕉^[56]、葡萄^[57]、冬枣^[58]等多种果蔬,是果蔬新鲜度判断的高效技术。

此外,电子鼻可预测果蔬内部品质指标,多种预测模型已被用于建立电子鼻传感器信号与果蔬品质参数之间的关系,如PLS、MLR、BP神经网络、Boltzmann模型和随机森林算法等^[59-63]。在猕猴桃、苹果、红心李、温州蜜柑、番茄、黄瓜、草莓和大头菜等果蔬品质检测中均有研究报道。目前电子鼻在品质评价中的应用主要集中于硬度、可溶性固形物、可滴定酸等常见理化参数的预测上,这些理化参数的检测方法操作简单、耗时短,即使构建出相关预测模型也无法充分发挥出电子鼻快速、准确、操作简单的优点。因此,电子鼻在果蔬品质评价中的应用,应该更加注重检测耗时长且操作繁琐的理化指标,如淀粉含量、糖酸比、抗氧化能力等,这些指标能够更好地反映果蔬的风味和营养价值。例如,香蕉、马铃薯等淀粉含量高的果蔬,其淀粉检测方法一般为酶水解法、碘显色法等,步骤繁多、耗时较长。如

表3 电子鼻在果蔬新鲜度和品质检测中的应用

Table 3 Application of electronic nose in freshness and quality testing of fruits and vegetables

种类 Variety	应用领域 Application field	数据分析方法 Data analysis method	研究结果 Research result	参考文献 Reference
苹果 Apple	新鲜度判断	LDA、PCA	有效区分常温货架期或贮后货架期不同贮藏时长的苹果	[44]
甜橙 Orange	新鲜度判断	LR	预测甜橙的贮藏期	[45]
沃柑 Orah	新鲜度判断	PCA、LDA	平均识别率高达 98.23%，能应用于沃柑新鲜度的快速判断	[46]
西兰花 Broccoli	新鲜度判断	CDA、PCA、HCA	预测鲜切西兰花的新鲜度	[47]
木瓜 Papaya	新鲜度判断	PCA	预测 3 种木瓜果实产品的 freshness	[48]
菠菜 Spinach	新鲜度判断	SVM、BPNN	改进的电子鼻传感器阵列具有较高的识别能力	[49]
芹菜 Celery	新鲜度判断	PCA	有效地区分不同贮藏时间的芹菜叶片的气味特征	[50]
樱桃番茄 Cherry tomato	新鲜度判断	PLS	区分不同新鲜程度（新鲜、可接受和腐败）的樱桃番茄	[51]
甜柿 Sweet persimmon	新鲜度判断	PCA、LDA	有效区分常温和贮后不同货架期的甜柿	[52]
水蜜桃 Honey peach	新鲜度判断	PCA、LDA	将不同贮藏时间的水蜜桃分为 3 个阶段	[53]
猕猴桃 Kiwi fruit	新鲜度判断	LDA、ED、SVM	电子鼻与物理特征融合可更好识别猕猴桃贮藏时间	[54]
猕猴桃 Kiwi fruit	新鲜度判断	PCA、SR	电子鼻与 SAWR 相结合可更好预测猕猴桃贮藏时间	[55]
香蕉 Banana	新鲜度判断	PCA	区分不同储存时间的香蕉样本	[56]
葡萄 Grape	新鲜度判断	PCA、LDA	有效区分不同贮藏期的葡萄样品	[57]
冬枣 Winter jujube	新鲜度判断	PCA、SR、DCSSR、MVR	成功区分不同贮藏时间的大枣	[58]
猕猴桃 Kiwi fruit	品质检测	MLR、PLS、BP	预测猕猴桃的香气品质	[59]
苹果 Apple	品质检测	PLS、BPNN	预测冷藏苹果的硬度、可滴定酸含量和可溶性固形物含量	[60]
红心李 Red-heart plum	品质检测	Boltzmann machine	预测红心李可溶性固形物含量	[61]
温州蜜柑 Satsuma mandarin	品质检测	Two-way MANOVA、RF	预测维生素 C、总可溶性固形物、总酸含量	[62]
番茄 Tomato	品质检测	PCA、LDA、CA、KNN	判别冷藏和热处理的番茄品质差异	[63]
黄瓜 Cucumber	品质检测	PLS、SVM	预测黄瓜的硬度、pH、可溶性固形物含量和总色差	[64]
草莓 Strawberry	品质检测	PCA、FDA	成功建立草莓品质等级的判别模型	[65]
大头菜 Turnip	品质检测	PCA、CCA、CA	评价不同地区生产腌制大头菜的整体风味品质	[68]

注: LDA: 线性判别分析; PCA: 主成分分析; LR: 逻辑回归; CDA: 典型判别分析; HCA: 层次聚类分析; SVM: 支持向量机; BPNN: 反向传播神经网络; PLS: 偏最小二乘法; ED: 强制执行局; SR: 随机共振; DCSSR: 双层级联串联随机共振; MVR: 多变量回归; MLR: 多元线性回归; Boltzmann machine: 玻尔兹曼机器; Two-way MANOVA: 双因素多元方差分析; RF: 随机森林; CA: 对应分析; KNN: K 近邻算法; FDA: Fisher 判别分析; CCA: 典型相关分析。

Note: LDA: Linear discriminant analysis; PCA: Principal component analysis; LR: Logistic regression; CDA: Canonical discriminant analysis; HCA: Hierarchical cluster analysis; SVM: Support vector machine; BPNN: Backpropagation neural network; PLS: partial least-squares method; ED: Enforcement Bureau; SR: Stochastic resonance; DCSSR: Double-layer cascade series stochastic resonance; MVR: Multivariate regression; MLR: Multiple linear regression; Boltzmann machine; Two-way MANOVA: Two-factor multivariate analysis of variance; RF: Random forest; CA: Correspondence analysis; KNN: K-nearest neighbor algorithm; FDA: Fisher discriminant analysis; CCA: Canonical correlation analysis.

果能够利用电子鼻传感器信号与淀粉含量之间的相关性构建有效的预测模型，就可以实现淀粉含量的快速检测。

在果实品质无损检测方面，徐赛等^[66]指出，利用电子鼻优势，通过对芳香物质的鉴定，可以基于已有的数据库信息比较，对果实各种品质包括糖度、硬度、成熟度等进行判定。基于电子鼻在农产品中的广泛应用，刘鹏等^[67]系统总结了电子鼻在农产品风味评价、新鲜度检测、掺假鉴别、病害监控、理化指标检测等方面的安全快速

检测应用。

4 电子鼻在果蔬采后病害监测中的应用

采后病害的发生是果蔬贮藏保鲜中最常见的问题之一，根据其成因可分为生理性病害与侵染性病害，均会导致产品经济价值的下降甚至丧失。传统的病害检测和识别基本依赖人工，其辨别和监测效率低下、准确率低、检测滞后且易受诸多因素影响。伴随着衰败过程的推进，果蔬紊乱的生理状态或病原菌自身都会释放出特定的气

味“信号”，这为利用电子鼻实现采后病害的监测提供依据。通过对果蔬挥发物的变化监测果蔬病变的情况，可以及时预警和防止果蔬病害发生。

电子鼻在采后病害监测大多都集中在侵染性病和机械损伤识别的研究上，在草莓^[69]、桃子^[70]、苹果^[71]、蓝莓^[72]、石榴^[73]、猕猴桃^[74]等多种果实采后病害早期识别方面均有报道（表 4）。吴嘉雯等^[75]综述了电子鼻在病害检测中

的研究进展，特别是电子鼻可以鉴别单种病菌及预测发病果树病原菌的数量，也可以检测和识别不同病原菌的交叉感染。电子鼻在侵染性病害的早期识别中起着重要作用，其中机械伤的存在是果蔬侵染性病害发生的重要原因，对其识别有利于提前分拣出潜在发病产品，降低侵染性病害发生的可能性。在机械损伤病害检测中，电子鼻已被应用于番石榴^[76]、草莓^[77]、桃^[78]、苹果^[79]、

表 4 电子鼻在果蔬采后病害监测中的应用

Table 4 Application of electronic nose in postharvest disease monitoring of fruits and vegetables

种类 Variety	应用领域 Application field	数据分析方法 Data analysis method	研究结果 Research result	参考文献 Reference
草莓 Strawberry	采后侵染性病害	PCA	实现健康草莓与不同类型霉菌侵染草莓的早期识别	[69]
桃子 Peach	采后侵染性病害	PCA、PLSR	被浸染桃子的真菌类型检测	[70]
苹果 Apple	采后侵染性病害	LDA、BPNN、SVM、RBFNN	反向神经网络可以更准确地识别出苹果病害的发生情况	[71]
蓝莓 Blueberry	采后侵染性病害	PCA、HCA	线性贝叶斯分类器能有效区分不同类型真菌侵染的蓝莓	[72]
石榴 Pomegranate	采后侵染性病害	LDA、BPNN、SVM	石榴链格孢菌侵染的检测	[73]
猕猴桃 Kiwi fruit	采后侵染性病害	PCA	对猕猴桃真菌性病害的检测	[74]
番石榴 Guava	机械损伤病害	PCA、LDA、ED、FCM	高光谱与电子鼻融合技术比单一技术更有利于番石榴机械损伤的识别	[76]
草莓 Strawberry	机械损伤病害	SVM	研发出专用于草莓损伤检测的电子鼻系统，对损伤果与正常果识别准确率高	[77]
桃子 Peach	机械损伤病害	PCA、MLR	有效判别桃瘀伤等级	[78]
苹果 Apple	机械损伤病害	PCA、LDA、SDA、BPNF、MLPN	有效区分不同高度掉落的损伤苹果	[79]
杏 Apricot	机械损伤病害	PLS-DA	有效区分出正常果与损伤果	[80]
桃 Peach	生理性病害	FDA、MLR、PCA	冷害预测	[81]
橙 Orange	生理性病害	CDA	冻害预测	[82]

注：PCA：主成分分析；PLSR：偏最小二乘回归；LDA：线性判别分析；BPNN：反向传播神经网络；SVM：支持向量机；RBFNN：径向基函数神经网络；HCA：层次聚类分析；ED：欧氏距离；FCM：模糊 C 均值聚类；MLR：多元线性回归；SDA：尺度差异分析；BPNF：反向传播神经网络；MLPN：多层次感知器神经网络；PLS-DA：偏最小二乘判别分析；FDA：Fisher 判别分析；CDA：典型判别分析。

Note: PCA: Principal component analysis; PLSR: Partial least-squares regression; LDA: Linear discriminant analysis; BPNN: Backpropagation neural network; SVM: Support vector machine; RBFNN: Radial basis function neural network; HCA: Hierarchical cluster analysis; ED: Euclidean distance; FCM: Fuzzy C-means clustering; MLR: Multiple linear regression; SDA: Scale difference analysis; BPNF: Backpropagation neural network; MLPN: Multi-layer perceptron neural network; PLS-DA: Partial least-squares discriminant analysis; FDA: Fisher discriminant analysis; CDA: Canonical discriminant analysis.

杏^[80]等多种果实的检测。

此外，有少量关于电子鼻对生理性病害监测的应用研究。朱娜等^[81]建立基于电子鼻的 Fisher 判别模型用于桃冷害程度的预测，准确率达 91.7%。Tan 等^[82]则应用电子鼻对受冻害的橙进行监测，但识别准确度并不高。笔者认为生理性病害的电子鼻应用研究热度低主要有以下两个原因：一方面生理性病害不具有传染性，在采后过程中的危害低于侵染性病害；另一方面，生

理性病害研究难度远高于侵染性病害，如柑橘枯水病、菠萝黑心病等病害引起的果实气味变化与果蔬自身由于环境成熟度不同引起的气味变化相似，较难区分，使用电子鼻进行无损检测的难度大、可操作性低。

5 电子鼻在果蔬农药残留检测中的应用

食品安全是生产中的核心问题之一，尤其是随着生活水平的提高，人们对食品安全的需求

也在不断增加。其中,果蔬的安全问题主要体现在农药残留上。近年来,电子鼻开发为农药残留的快速准确检测提供了新手段和新思路^[83]。电子鼻在果蔬等农药残留检测中的应用具有广阔前景和潜力。电子鼻能与其他检测技术相结合,提高农药残留检测的灵敏度和精确度,目前在苹果^[84]、茶叶^[85-86]、草莓^[87]、黑莓^[87]、灯笼果^[87]和红辣椒^[88]等果蔬中的农药残留检测方面已取得一些成果(表5)。研究表明电子鼻在果蔬农药残留检测中能提供快速、准确的农药残留检测

结果,为未来农药残留检测技术的发展提供了宝贵的参考。然而仍有许多果蔬和相关农药还未建立电子鼻快速检测体系,需要进一步开发更多适用于其他果蔬产品农药残留的快速检测方法,以满足绿色果蔬产品生产的需求。此外,由于不同农药残留物的安全要求标准不一,而且许多农药残留物含量极低,这就要求提升电子鼻传感器的稳定性、选择性和可重复性,以及数据处理和模型构建的复杂性。因此,未来还需要进一步优化电子鼻系统的设计和性能,提高其在农药残留检

表5 电子鼻在果蔬农药残留检测中的应用

Table 5 Application of electronic nose in pesticide residue detection in fruits and vegetables

种类 Variety	应用领域 Application field	数据分析方法 Data analysis method	研究结果 Research result	参考文献 Reference
苹果 Apple	农药残留	PSO-SVM、ELM、RF、NBM	电子鼻与高光谱成像技术相结合能实现对苹果表面不同农药残留量的检测	[84]
茶叶 Tea	农药残留	PCA	应用在茶叶原料农药残留的快速检测	[85]
	农药残留	PLSR、SVM、ANN	电子鼻联合共聚焦拉曼显微光谱法预测茶叶中的农药残留污染	[86]
草莓、黑莓、灯笼果 Strawberry, blackberry, cape gooseberry	农药残留	PCA	有效区分含有不同有机氯化合物的果蔬	[87]
红辣椒 Red pepper	农药残留	PCA、FCM	精准检测红辣椒中溴丙磷农药的浓度	[88]

注: PSO-SVM: 粒子群优化支持向量机; ELM: 极限学习机; RF: 随机森林 78; NBM: 朴素贝叶斯; PCA: 主成分分析; PLSR: 偏最小二乘回归; SVM: 支持向量机; ANN: 人工神经网络; FCM: 模糊 C 均值聚类。

Note: PSO-SVM: Particle swarm optimization support vector machine; ELM: Extreme learning machine; RF: Random Forest 78; NBM: Naive Bayes; PCA: Principal component analysis; PLSR: partial least-squares regression; SVM: Support vector machine; ANN: Artificial neural network; FCM: Fuzzy C-means clustering.

测中的适应性和可靠性。

6 结语与展望

采后作为农业生产链的最后一环,对实现精准化农业战略具有至关重要的作用,为此,需要发展适宜的采后精准化检测技术。电子鼻作为一种嗅觉仿生仪器,能够利用果蔬香气的变化,结合多种统计分析方法,实现对果蔬采后品质的无损、在线、综合评价。目前电子鼻已在很多领域有较多报道,具有广阔的应用前景,但在生理学病害和农药残留物检测方面仍存在一些问题和挑战,如传感器技术、数据处理方法和多技术融合检测等方面仍需要继续优化。为了提高电子鼻的检测效果和应用范围,建议在以下几个方面进行改进和创新:

(1) 传感器技术。传感器是电子鼻的核心

部件,其性能直接影响电子鼻的检测效果。目前电子鼻使用的传感器大多基于金属氧化物或导电高分子等材料,这些材料存在漂移、稳定性差、选择性低等缺点,导致电子鼻的响应信号不稳定、不可靠。因此,需要研发新型传感器材料,如纳米材料、生物分子、DNA等,以提高传感器的灵敏度和选择性。

(2) 数据处理方法。数据处理是电子鼻的重要环节,其目的是从复杂的响应信号中提取有效的信息,实现对果蔬采后品质的分类和回归。目前电子鼻使用的数据处理方法大多基于统计学或机器学习等理论,这些方法存在建模复杂、参数调节困难、泛化能力低等缺点,导致电子鼻的识别率和预测精度不高。因此,需要发展新型数据处理方法,如深度学习、神经网络等,以提高数据处理的效率和准确度。

(3) 多技术融合检测。多技术融合检测是指将电子鼻与其他检测手段结合起来, 实现对果蔬采后品质的全面评价。目前电子鼻作为嗅觉仿生仪器, 只能利用果蔬香气作为检测对象, 这难以反映果蔬采后品质的多方面特征。因此, 需要发展多技术融合检测系统, 如将电子鼻与光谱技术、视觉成像等结合起来, 以实现对果蔬采后品质的多维度、多层次、多参数的检测。

随着传感器技术、仿生材料及人工智能技术的大力发展, 相信在不久的将来, 专一化、智能化、实用化的新型电子鼻将真正应用到实际生产中, 以满足果蔬采后品质精准化检测的需求。

参考文献 (References) :

- [1] 洪雪珍. 基于电子鼻和电子舌的樱桃番茄汁品质检测方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- HONG X Z. Study of quality detection approaches for cheery tomato juices based on electronic nose and electronic tongue [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [2] WILKENS W F, HARTMAN J D. An electronic analog for the olfactory processes [J]. *Journal of Food Science*, 1964, 29(3): 372–378. DOI:10.1111/j.1749-6632.1964.tb45092.x.
- [3] GARDNER J W, BARTLETT P N. A brief history of electronic noses [J]. *Sensors and Actuators. B*, 1994, 18(1/3): 210–211. DOI:10.1016/0925-4005(94)87085-3.
- [4] 任二芳, 牛德宝, 温立香, 刘功德, 谢朝敏, 程三红. 电子鼻和电子舌在水果检测中的应用进展 [J]. 食品工业, 2019, 40(10): 261–264.
- REN E F, NIU D B, WEN L X, LIU G D, XIE C M, CHENG S H. Application research progress of electronic nose and electronic tongue in fruits detections [J]. *The Food Industry*, 2019, 40(10): 261–264.
- [5] 董士霞, 耿奥博. 电子鼻技术应用进展及在环境检测中的应用展望 [J]. 山东化工, 2020, 49(1): 48–49, 51. DOI:10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2020.01.021.
- DONG S X, GENG A B. Application progress of electronic nose technology and its prospect in environmental detection [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2020, 49(1): 48–49, 51. DOI:10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2020.01.021.
- [6] LOUTIFI A, CORADESCHI S, MANI G K, SHANKAR P, RAYAPPAN J B B. Electronic noses for food quality: A review [J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 144: 103–111. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.07.019.
- [7] 方向生, 施汉昌, 何苗, 蔡强. 电子鼻在环境监测中的应用与进展 [J]. 环境科学与技术, 2011, 34(10): 112–117. DOI:10.3969/j.issn.1003-6504.2011.10.024.
- FANG X S, SHI H C, HE M, CAI Q. Application and progress of electronic nose in environmental monitoring [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(10): 112–117. DOI:10.3969/j.issn.1003-6504.2011.10.024.
- [8] 郑哲洲, 林雪娟. 电子鼻在医学诊断中的应用研究 [J]. 世界科学技术(中医药现代化), 2012, 14(6): 2115–2119. DOI:10.3969/j.issn.1674-3849.2012.06.002.
- ZHEN Z Z, LIN X J. Study on application of medical diagnosis by electronic nose [J]. *Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica-World Science and Technology*, 2012, 14(6): 2115–2119. DOI:10.3969/j.issn.1674-3849.2012.06.002.
- [9] 秦召, 吴月娇, 谷令彪, 刘华敏, 庞会利, 田海英, 何保江, 屈展, 秦广雍. 大枣香气成分研究进展 [J]. 香料香精化妆品, 2015(5): 63–67.
- QIN Z, WU Y J, GU L B, LIU H M, PANG H L, TIAN H Y, HE B J, QU Z, QIN G Y. The research progress on jujube aroma components [J]. *Flavour Fragrance Cosmetics*, 2015(5): 63–67.
- [10] 李泰山, 韩卫娟, 杜改改, 刁松峰, 冯延芝, 杨绍彬, 岳华峰, 李芳东, 傅建敏. 杏李不同品种果实香气成分分析 [J]. 林业科学, 2017, 53(9): 123–132. DOI:10.11707/j.1001-7488.20170915.
- LIT S, HAN W J, DU G G, DIAO S F, FENG Y Z, YANG Z B, YUE H F, LI F D, FU J M. Volatile characteristics of different *Prunus domestica* × *armeniaca* cultivars evaluated by HS-SPME with GC-MS [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, 53(9): 123–132. DOI:10.11707/j.1001-7488.20170915.
- [11] 庄楷杏, 李妙清, 刘尊烈. 红心木瓜不同成熟度果肉及汁的香气分析 // 2017 年广东省食品学会年会 [C]. 广州: 广东省食品学会, 2017: 227–231.
- ZHUANG K X, LI M Q, LIU Z L. Aroma analysis of pulp and juice of papaya with different maturity//2017 Academic annual meeting of Food Society of Guangdong [C]. Guangzhou: Food Society of Guangdong, 2017: 227–231.
- [12] 牛远洋, 罗安伟, 刘焕军, 姚婕, 李琛, 李志成, 岳田利, 白连社. 番茄新鲜度与其挥发性成分的关系研究 [J]. 现代食品科技, 2016, 32(5): 322–331. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.5.048.
- NIU Y Y, LUO A W, LIU H J, YAO J, LI C, LI Z C, YUE T L, BAI L S. HS-SPME-GC-MS study on the relationship between the freshness of tomato and its volatile components [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(5): 322–331. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.5.048.
- [13] 刘焕军, 罗安伟, 牛远洋, 姚婕, 李琛, 李志成. 梨新鲜度与其挥发性成分的关系研究 [J]. 北方园艺, 2016(8): 121–126. DOI:10.11937/bfyy.201608034.
- LIU H J, LUO A W, NIU Y Y, YAO J, LI C, LI Z C. Research on the relationship between freshness of the pear and its volatile components [J]. *Northern Horticulture*, 2016(8): 121–126. DOI:10.11937/bfyy.201608034.
- [14] 唐会周. 品种、成熟度和病害对柑橘果实香气成分的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- TANG H Z. Effect of cultivar, maturity and infection on aroma component of citrus fruit [D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [15] 黄业传, 李凤, 黄甜, 孙娟. 利用电子鼻和气质联用研究腊肉挥发性风味物质的形成规律 [J]. 食品工业科技, 2014, 35(6): 73–77. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2014.06.016.
- HUANG Y C, LI F, HUANG T, SUN J. Study on formation law of volatile flavor compounds in bacon using electronic nose and GC-MS [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(6): 73–77. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2014.06.016.

- [16] 贾文坤, 李孟楠, 王亚雷, 梁刚, 满燕, 潘立刚. 电子鼻技术在果蔬检测中的应用 [J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(2): 410–418. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956-ts,2016.02.004.
- JIA W S, LI M N, WANG Y L, LIANG G, MAN Y, PAN L G. Application of electronic nose technology on the detection of fruits and vegetables [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2016, 7(2): 410–418. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956-ts,2016.02.004.
- [17] 刘建, 张睿, 徐文科. 食品感官分析工作中存在问题及对策 [J]. 粮油食品科技, 2005(5): 41–43. DOI:10.16210/j.cnki.1007-7561.2005.05.018.
- LIU J, ZHANG R, XU W K. Problems and countermeasures in food sensory analysis [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2005(5): 41–43. DOI:10.16210/j.cnki.1007-7561.2005.05.018.
- [18] 潘雁红, 何秋中, 叶晓丹, 吴志庄. 电子鼻在竹笋种类识别中的应用 [J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(3): 495–499. DOI:10.11833/j.issn,2095-0756,2016.03.018.
- PAN Y H, HE Q Z, YE X D, WU Z Z. An electronic nose for bamboo shoot identification [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2016, 33(3): 495–499. DOI:10.11833/j.issn,2095-0756,2016.03.018.
- [19] XU S, LU H Z, LU E L, HOU K M. Nondestructive classification and recognition of litchi varieties using bionic electronic nose [J]. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2016, 12(6): 337–342. DOI:10.19026/ajfst.12,2970.
- [20] SANAEIFAR A, MOHTASEBI S S, Ghasemi-Varnamkhasti M, SHAFIE M M. Evaluation of an electronic nose system for characterization of pomegranate varieties [J]. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2016, 18(3): 317–323.
- [21] RUSSO M, DI SANZO R, CEFALY V, CARABETTA S, SERRA D, FUDA S. Non-destructive flavour evaluation of red onion (*Allium cepa* L.) Ecotypes: An electronic-nose-based approach [J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(2): 896–899. DOI:10.1016/j.foodchem,2013.03.052.
- [22] TRIRONGJITMOAH S, JUENGMUNKONG Z, SRIKULNATH K, SOMBOON P. Classification of garlic cultivars using an electronic nose [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 113: 148–153. DOI:10.1016/j.compag,2015.02.007.
- [23] 孙俊明, 田可新, 娄倩, 张杰, 陈红武. 葡萄风信子花香的电子鼻分析 [J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2023, 43(2): 9–16. DOI:10.13842/j.cnki.issn1671-8151,202212023.
- SUN J M, TIAN K X, LOU Q, ZHANG J, CHEN H W. Electronic nose analysis of the fragrance of grape hyacinth flowers [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2023, 43(2): 9–16. DOI: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151,202212023.
- [24] 黄静, 洪江, 向准, 和耀威, 刘忠玄, 李鹏, 汪建文. 基于电子鼻技术对不同黑木耳品种香气的差异性分析研究 [J]. 贵州科学, 2023, 41(3): 11–15.
- HUANG J, HONG J, XIANG Z, HE Y W, LIU Z X, LI P, WANG J W. Study on the differences of aroma of different *Auricularia heimuer* varieties based on electronic nose technology [J]. *Guizhou Science*, 2023, 41(3): 11–15.
- [25] 张正武, 王勃, 林云, 郭立新, 朱建朝, 任苗, 曹永红. 基于电子鼻技术的陇南花椒品种区分 [J]. 经济林研究, 2019, 37(4): 188–193.
- ZHANG Z W, WANG B, LIN Y, GUO L X, ZHU J C, REN M, CAO Y H. Identification of Longnan pepper cultivars based on electronic nose technology [J]. *Non-wood Forest Research*, 2019, 37(4): 188–193.
- [26] 轩菲洋, 姜丹, 申小营, 周娜, 任广喜, 刘春生. 基于电子鼻和顶空气质联用技术的不同产地北柴胡气味差异分析 [J]. 中国现代中药, 2022, 24(11): 2141–2149. DOI:10.13313/j.issn.1673-4890.20220331005.
- XUAN F Y, JIANG D, SHEN X Y, ZHOU N, REN G X, LIU C S. Odor Comparison of bupleurum chinense from different producing areas based on electronic nose and HS-GC-MS [J]. *Modern Chinese Medicine*, 2022, 24(11): 2141–2149. DOI:10.13313/j.issn.1673-4890.20220331005.
- [27] LEE W H, CHOI S, OH I N, SHIM J Y, LEE K S, AN G, PARK J T. Multivariate classification of the geographic origin of Chinese cabbage using an electronic nose-mass spectrometry [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2017, 26(3): 603–609. DOI:10.1007/s10068-017-0102-6.
- [28] LONGOBARDI F, CASIELLO G, VENTRELLA A, MAZZILLI V, NARDELLI A, SACCO D, CATUCCI L, AGOSTIANO A. Electronic nose and isotope ratio mass spectrometry in combination with chemometrics for the characterization of the geographical origin of Italian sweet cherries [J]. *Food Chemistry*, 2015, 170: 90–96. DOI:10.1016/j.foodchem,2014.08.057.
- [29] MA Y Y, GUO B L, WEI Y M, WEI S, ZHAO H Y. The Feasibility and stability of distinguishing the kiwi fruit geographical origin based on electronic nose analysis [J]. *Food Science and Technology Research*, 2014, 20(6): 1173–1181. DOI:10.3136/fstr,20.1173.
- [30] CENTONZE V, LIPPOLIS V, CERVELLIERI S, DAMASCELLI A, CASIELLO G, PASCALE M, LOGRIECO A F, LONGOBARDI F. Discrimination of geographical origin of oranges (*Citrus sinensis* L. Osbeck) by mass spectrometry-based electronic nose and characterization of volatile compounds [J]. *Food Chemistry*, 2019, 277: 25–30. DOI:10.1016/j.foodchem,2018.10.105.
- [31] 赵秋龙, 江群艳, 严辉, 瞿城, 郭盛, 樊欢, 包蓉蓉, 何润天, 康宏, 段金蕨. 基于超快速气相电子鼻对不同产地枸杞子快速识别及气味差异物质研究 [J]. 南京中医药大学学报, 2023(6): 513–522. DOI:10.14148/j.issn.1672-0482,2023.0513.
- ZHAO Q L, JIANG Q Y, YAN H, QU C, GUO S, FAN H, BAO R R, HE R T, KANG H J, DUAN J A. Rapid identification and odor differential markers of distinct origin-derived *Lycium barbarum* L. based on ultra-fast gas phase electronic nose [J]. *Journal of Nanjing University of Traditional Chinese Medicine*, 2023, 39(6): 513–522. DOI:10.14148/j.issn.1672-0482,2023.0513.
- [32] 蓬桂华, 陈菊, 殷勇, 李文馨, 何建文. 基于电子鼻技术的不同种植区域地理标志辣椒风味变化研究 [J]. 蔬菜, 2022(9): 10–15.
- PENG G H, CHEN J, YIN Y, LI W X, HE J W. Study on the flavor changes of pepper with geographical indication in different planting areas based on electronic nose [J]. *Vegetable*, 2022(9): 10–15.
- [33] 胡桂仙, Antihu Hernández Gómez, 王俊, 王小驷. 电子鼻无损检测柑橘成熟度的实验研究 [J]. 食品与发酵工业, 2005(8): 57–61.
- HU G X, GÓMEZ A H, WANG J, WANG X L. A research on monitoring the orange maturity with the electronic nose [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2005(8): 57–61.
- [34] 张鑫, 齐玉洁, 杨夏, 贾惠娟. 利用电子鼻技术评价桃果实成熟度的研究 [J]. 华南农业大学学报, 2012, 33(1): 23–27.
- ZHANG X, QI Y J, YANG X, JIA H J. Evaluation of maturity of

- peach by electronic nose [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2012, 33(1):23–27.
- [35] 徐赛, 陆华忠, 周志艳, 吕恩利, 姜焰鸣, 王亚娟. 基于理化指标和电子鼻的果园荔枝成熟度识别方法 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 226–232. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.030.
- XU S, LU H Z, ZHOU Z Y, LYU E L, JIANG Y M, WANG Y J. Identification of litchi's maturing stage in orchard based on physicochemical indexes and electronic nose [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 226–232. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.030.
- [36] 刘玉革, 徐金龙, 赵维峰, 吕玲玲, 魏长宾. 菠萝果实香气成分分析及电子鼻评价 [J]. 广东农业科学, 2012, 39(20):97–100. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874X.2012.20.008.
- LIU Y G, XU J L, ZHAO W F, LYU L L, WEI C B. Analysis of aroma components and electronic nose evaluation of pineapple fruit [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012, 39(20):97–100. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874X.2012.20.008.
- [37] ATHAMNEH A, ZOECKLEIN B W, MALLIKARJUNAN K. Electronic nose evaluation of cabernet sauvignon fruit maturity [J]. *Journal of Wine Research*, 2008, 19(1): 69–80. DOI:10.1080/09571260802164061.
- [38] 何近刚, 冯云霄, 程玉豆, 李楠, 王金萧, 张建军, 1-甲基环丙烯对红星苹果常温贮藏期间生理、品质和电子鼻特性的影响 [J]. 华北农学报, 2023, 38(1):134–143. DOI:10.7668/hbnxb,20193963.
- HE J G, FENG Y X, CHENG Y D, LI N, WANG J X, ZHANG J J. Effect of 1-Methylcyclopropene on the physiology, quality and electronic nose characteristic of starking delicious apple during ambient temperature storage [J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2023, 38(1):134–143. DOI: 10.7668/hbnxb,20193963.
- [39] 浦宏杰, 汪迪松, 王辉, 李臻峰. 基于 zNoseTM 电子鼻的芒果腐烂及成熟度检测 [J]. 现代食品科技, 2017, 33(3): 304–310. DOI:10.13982/j.mfst.1673–9078,2017.3.045.
- PU H J, WANG D S, WANG H, LI Z F. Detection of rot and ripeness of mango with zNoseTM electronic nose [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2017, 33(3): 304–310. DOI:10.13982/j.mfst.1673–9078,2017.3.045.
- [40] SANAEIFAR A, MOHTASEBI S S, GHASEMI VARNAMKHASTI M, AHMADI H, LOZANO J. Development and application of a new low cost electronic nose for the ripeness monitoring of banana using computational techniques (PCA, LDA, SIMCA and SVM) [J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2014, 32(6): 538–548. DOI:10.17221/113/2014-cjfs.
- [41] CHEN L Y, WU C C, CHOU T I, CHIU S W, TANG K T. Development of a dual MOS electronic nose/camera system for improving fruit ripeness classification [J]. *Sensors*, 2018, 18(10): 3256. DOI:10.3390/s18103256.
- [42] DU D D, WANG J, WANG B, WANG B, ZHU L Y, HONG X Z. Ripeness prediction of postharvest kiwifruit using a MOS E-Nose combined with chemometrics [J]. *Sensors*, 2019, 19(2): 419. DOI:10.3390/s19020419.
- [43] 潘思慧. 贮藏过程中番茄成熟度的智能化检测方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- PAN S H. Research on intelligent detection method for tomato maturity during storage [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [44] 张鹏, 李江阔, 陈绍慧. 基于电子鼻判别富士苹果货架期的研究 [J]. 食品工业科技, 2015, 36(5): 272–276. DOI:10.13386/j.issn1002-0306, 2015.05.049.
- ZHANG P, LI J K, CHEN S H. Discrimination of Fuji apples shelf life by electronic nose [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(5): 272–276. DOI:10.13386/j.issn1002-0306,2015.05.049.
- [45] 王敏敏, 赵梦田, 杜佳苏, 黄洁, 程思怡, 尹芳缘, 惠国华. 电子鼻结合 SAWR 判定甜橙储存时间方法研究 [J]. 核农学报, 2014, 28(4): 647–654. DOI:10.11869/j.issn.100-8551,2014.04.0647.
- WANG M M, ZHAO M T, DU J S, HUANG J, CHENG S Y, YIN F Y, HUI G H. Orange storage time determination based on electronic nose combined with surface acoustic wave resonator [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(4): 647–654. DOI:10.11869/j.issn.100-8551,2014.04.0647.
- [46] 黎新荣. 电子鼻在沃柑贮藏时间识别中的应用 [J]. 南方农业学报, 2018, 49(9): 1827–1832. DOI:10.3969/j.issn,2095-1191,2018.09.21.
- LI X R. Application of electronic nose in identification for storage time of Oran [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49(9): 1827–1832. DOI:10.3969/j.issn,2095-1191,2018.09.21.
- [47] CHEN H Z, ZHANG M, GUO Z M. Discrimination of fresh-cut broccoli freshness by volatiles using electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 148: 168–175. DOI:10.1016/j.postharvbio,2018.10.019.
- [48] ZHENG L, GAO Y Y, ZHANG J F, LI J, YU Y, HUI G H. Chinese quince (*Cydonia oblonga* Miller) freshness rapid determination method using surface acoustic wave resonator combined with electronic nose [J]. *International Journal of Food Properties*, 2016, 19(12): 2623–2634. DOI:10.1080/10942912.2016.1169285.
- [49] 徐海霞. 基于机器视觉和电子鼻技术的菠菜新鲜度无损检测研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- XU H X. Research on non-destructive testing of spinach freshness based on machine vision and electronic nose technology [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [50] 芦佳琪, 吴玉珍, 张瑞, 熊爱生, 郁志芳. 基于 HS-SPME-GC-MS 与电子鼻分析芹菜贮藏期间挥发性物质的变化 [J]. 食品工业科技, 2023:1–18. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2023040101.
- LU J Q, WU Y Z, ZHANG R, XIONG A S, YU Z F. Analysis of volatile matter changes in celery during storage based on HS-SPME-GC-MS and electronic nose [J]. *Food Industry Technology*, 2023:1–18. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2023040101.
- [51] 冯蕾. 基于电子鼻及低场核磁共振的黄瓜与樱桃番茄新鲜度智能检测研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2019.
- FENG L. Research on intelligent detection of freshness of cucumber and cherry tomatoes based on electronic nose and low field nuclear magnetic resonance [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [52] 张鹏, 李江阔, 陈绍慧. 电子鼻对不同贮藏 / 货架期甜柿判别分析 [J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(4): 390–395.
- ZHANG P, LI J K, CHEN S H. Electronic nose for discrimination of sweet persimmon within different shelf life [J]. *Journal of Food*

- Science and Biotechnology*, 2015, 34(4): 390–395.
- [53] 马淑凤, 王周平, 丁占生, 王利强, 徐化能. 应用电子鼻技术对水蜜桃储藏期内品质变化的研究 [J]. 食品与生物技术学报, 2010, 29(3): 390–394.
MA S F, WANG Z P, DING Z S, WANG L Q, XU H N. Study on the quality of juicy peaches during store using an electronic nose [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2010, 29(3): 390–394.
- [54] 徐赛, 陆华忠, 王亚娟, 周志艳, 姜焰鸣, 吕恩利. 基于电子鼻与物理特征融合的猕猴桃贮藏时间识别方法 [J]. 食品科技, 2016, 41(3): 291–297. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2016.03.058.
XU S, LU H Z, WANG Y J, ZHOU Z Y, JIANG Y M, LYU E L. Storage time identification of kiwi fruit based on electronic nose and physical characteristic combination [J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41(3): 291–297. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2016.03.058.
- [55] LIU W, HUI G H. Kiwi fruit (*Actinidia chinensis*) quality determination based on surface acoustic wave resonator combined with electronic nose [J]. *Bioengineered*, 2015, 6(1): 53–61. DOI:10.1080/21655979.2014.996430.
- [56] 惠国华, 吴玉玲, 陈裕泉. 基于电子鼻的香蕉储存时间鉴别方法研究 [J]. 传感技术学报, 2012, 25(5): 566–570. DOI:10.3969/j.issn.1004-1699.2012.05.002.
HUI G H, WU Y L, CHEN Y Q. Investigation of banana storage time discriminating method using electronic nose [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2012, 25(5): 566–570. DOI:10.3969/j.issn.1004-1699.2012.05.002.
- [57] 陈辰, 鲁晓翔, 张鹏, 陈绍慧, 李江阔. 基于电子鼻技术的玫瑰香葡萄贮藏期快速判别 [J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 137–141. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2015.06.033.
CHEN C, LU X X, ZHANG P, CHEN S H, LI J K. Quick discrimination of storage periods for muscat grape based on electronic nose [J]. *Food & Machinery*, 2015, 31(6): 137–141. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2015.06.033.
- [58] HUI G H, JIN J J, DENG S G, YE X, ZHAO M T, WANG M M, YE D D. Winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill.) quality forecasting method based on electronic nose [J]. *Food Chemistry*, 2015, 170: 484–491. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.08.009.
- [59] 宋小青, 任亚梅, 张艳宜, 李莹, 彭国勇, 马婷. 电子鼻对低温贮藏猕猴桃品质的预测 [J]. 食品科学, 2014, 35(20): 230–235. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201420046.
SONG X Q, REN Y M, ZHANG Y Y, LI Y, PENG G Y, MA T. Prediction of kiwifruit quality during cold storage by electronic nose [J]. *Food Science*, 2014, 35(20): 230–235. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201420046.
- [60] 李莹, 任亚梅, 张爽, 赵慧, 周龙安, 任小林. 基于电子鼻的苹果低温贮藏时间及品质预测 [J]. 西北农林科技大学报(自然科学版), 2015, 43(5): 183–191. DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.05.011.
LI Y, REN Y M, ZHANG S, ZHAO H, ZHOU L A, REN X L. Prediction of low-temperature storage time and quality of apples based on electronic nose [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(5): 183–191. DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.05.011.
- [61] 李剑, 郑乐, 林涵, 郑飞翔, 惠国华. 红心李总可溶性固形物含量的电子鼻预测方法研究 [J]. 核农学报, 2015, 29(12): 2360–2365.
DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2015.12.2360.
- [62] LI J, ZHENG L, LIN H, ZHENG F X, HUI G H. Study of red-heart plum total soluble solids content predicting method using electronic nose [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(12): 2360–2365. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2015.12.2360.
- [63] QIU S S, WANG J. Effects of storage temperature and time on internal quality of satsuma mandarin (*Citrus unshiu* marc.) by means of E-nose and E-tongue based on two-way MANOVA analysis and random forest [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2015, 31: 139–150. DOI:10.1016/j.ifset.2015.08.005.
- [64] XU S, SUN X X, LU H Z, YANG H, RUAN Q S, HUANG H, CHEN M L. Detecting and monitoring the flavor of tomato (*Solanum lycopersicum*) under the impact of postharvest handlings by physicochemical parameters and electronic nose [J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1847. DOI:10.3390/s18061847.
- [65] FENG L, ZHANG M, BHANDARI B, GUO Z M. Determination of postharvest quality of cucumbers using nuclear magnetic resonance and electronic nose combined with chemometric methods [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(12): 2142–2152. DOI:10.1007/s11947-018-2171-9.
- [66] 赵秀洁, 吴海伦, 潘磊庆, 屠康. 基于电子鼻技术预测草莓采后品质 [J]. 食品科学, 2014, 35(18): 105–109. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201418021.
ZHAO X J, WU H L, PAN L Q, TU K. Nondestructive prediction of postharvest strawberry quality by electronic nose [J]. *Food Science*, 2014, 35(18): 105–109. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201418021.
- [67] 徐赛, 陆华忠, 丘广俊, 王陈, 梁鑫. 水果品质无损检测研究进展及应用现状 [J]. 广东农业科学, 2020, 47(12): 229–236. DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2020.12.024.
- [68] XU S, LU H Z, QIU G J, WANG C, LIANG X. Research progress and application status of non-destructive testing of fruit quality [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020, 47(12): 229–236. DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2020.12.024.
- [69] 刘鹏, 蒋雪松, 卢利群, 陈卉卉, 郑丹丹, 许林云, 周宏平. 电子鼻在农产品品质安全检测中的应用研究 [J]. 广东农业科学, 2015, 42(22): 131–138. DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2015.22.023.
LIU P, JIANG X S, LU L Q, CHEN H H, ZHENG D D, XU L Y, ZHOU H P. Application of electronic nose in quality and safety testing of agricultural products [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015, 42(22): 131–138. DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2015.22.023.
- [70] 赵慧君, 王玉荣, 李昕沂, 赵楠, 郭壮. 基于电子鼻和GC-MS技术分析大头菜的挥发性风味物质 [J]. 中国调味品, 2018, 43(11): 17–22.
ZHAO H J, WANG Y R, LI X Y, ZHAO N, GUO Z. Analysis of volatile flavor compounds in turnip based on electronic nose and GC-MS technology [J]. *China Condiment*, 2018, 43 (11): 17–22.
- [71] 朱娜, 毛淑波, 潘磊庆, 袁丽佳, 屠康. 电子鼻对草莓采后贮藏早期霉菌感染的检测 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 266–273. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.05.035.
ZHU N, MAO S B, PAN L Q, YUAN L J, TU K. Early detection of fungal disease infection in strawberry fruits by e-nose during postharvest storage [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 2013, 29 (5): 266–273 DOI: 10.3969/

- j.issn.1002-6819,2013.05.035.
- [70] LIU Q, ZHAN N, ZHOU D D, SUN Y, PAN L Q, TU K. Discrimination and growth tracking of fungi contamination in peaches using electronic nose [J]. *Food Chemistry*, 2018, 262: 226–234. DOI:10.1016/j.foodchem,2018.04.100.
- [71] JIA W S, LIANG G, TIAN H, SUN J, WAN C H. Electronic nose-based technique for rapid detection and recognition of moldy apples[J]. *Sensors*, 2019, 19(7): 1526. DOI:10.3390/s19071526.
- [72] LI C Y, KREWER G W, JI P S, SCHERM H, KAYS S J. Gas sensor array for blueberry fruit disease detection and classification [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2010, 55(3): 144–149. DOI:10.1016/j.postharvbio,2009.11.004.
- [73] 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. DOI:10.1080/10942912,2019.1705851.
- [74] COSTA G, NOFERINI M, FIORI G, SPINELLI F. Innovative application of non-destructive techniques for fruit quality and disease diagnosis [J]. *Acta Horticulturae*, 2007, 753: 275–282. DOI:10.17660/ActaHortic,2007.753.34.
- [75] 吴嘉雯, 刘智昊, 庞林江, 成纪予. 电子鼻技术在果蔬病害检测中的研究进展 [J]. 食品与机械, 2023, 39(1): 228–233. DOI:10.13652/j.spzx.1003.5788,2022.80358.
- WU J W, LIU Z H, PANG L J, CHENG J Y. Research progress of electronic nose in fruit and vegetable disease detection [J]. *Food and Machinery*, 2023, 39(1): 228–233. DOI:10.13652/j.spzx.1003.5788,2022.80358.
- [76] 徐赛, 陆华忠, 周志艳, 吕恩利, 姜焰鸣. 基于高光谱与电子鼻融合的番石榴机械损伤识别方法 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 214–219. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298,2015.07.031.
- XU S, LU H Z, ZHOU Z Y, LYU E L, JIANG Y M. Identification for guava mechanical damage based on combined hyper-spectrometer and electronic nose [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 214–219. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298,2015.07.031.
- [77] 邢梦珂, 孙柯, 赵楠, 潘磊庆, 屠康. 基于电子鼻技术的草莓损伤检测系统的开发 [J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(3): 555–561. DOI:10.7685/jnau,201707022.
- XING M K, SUN K, ZHAO N, PAN L Q, TU K. Development of an electronic nose system to detect strawberry bruise [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2018, 41(3): 555–561. DOI:10.7685/jnau,201707022.
- [78] 朱娜, 潘磊庆, 毛淑波, 吴林蔚, 屠康. 基于电子鼻判别桃果实瘀伤的研究 [J]. 南京农业大学学报, 2013, 36(1): 137–141. DOI:10.7685/j.issn.1000-2030,2013.01.024.
- ZHU N, PAN L Q, MAO S B, WU L W, TU K. Non-destructive detection of peach bruise by E-nose [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2013, 36(1): 137–141. DOI:10.7685/j.issn.1000-2030,2013.01.024.
- [79] REN Y M, RAMASWAMY H S, LI Y, YUAN C L, REN X L. Classification of impact injury of apples using electronic nose coupled with multivariate statistical analyses [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2018, 41(5): e12698. DOI:10.1111/jfpe.12698.
- [80] DI NATALE C, FILIPPINI D, PENNAZZA G, SANTONICO M, PAOLESCHE R, BELLINCONTRO A, MENCARELLI F, D'AMICO A, LUNDSTRÖM I. Sorting of apricots with computer screen photoassisted spectral reflectance analysis and electronic nose [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, 119(1): 70–77. DOI:10.1016/j.snb,2005.11.067.
- [81] 朱娜, 潘磊庆, 邬慧颖, 张婧, 屠康, 尹方平, 赵吉宇, 谭学成. 基于电子鼻检测‘霞晖 5 号’桃果实的冷害 [J]. 食品科学, 2014, 35(4): 95–100. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201404020.
- ZHU N, PAN L Q, WU H Y, ZHANG Q, TU K, YIN F P, ZHAO J Y, TAN X C. Detection of chilling injury in ‘Xiahui No.5’ peach by electronic nose [J]. *Food Science*, 2014, 35(4): 95–100. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201404020.
- [82] TAN E S, SLAUGHTER D C, THOMPSON J F. Freeze damage detection in oranges using gas sensors [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 35(2): 177–182. DOI:10.1016/j.postharvbio,2004.07.008.
- [83] 李晶晶, 胡颖菲, 丁晓, 李敏仪, 古结雯, 黄雄俊, 郑璇. 近五年电子鼻技术在食品安全的应用进展 [J]. 中国食品卫生杂志, 2023(5): 1–13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3156.R,20230711.0909.002.html>.
- LI J J, HU Y F, DING X, LI M, GU J W, HUANG X J, ZHENG X. Application progress of electronic nose technology in food safety in recent five years [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2023(5): 1–13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3156.R,20230711.0909.002.html>.
- [84] 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 Electronic Power University, 2021.
- [85] 肖文敏, 唐小燕, 任志红, 吴焕焕, 张虹, 尚涛, 仇园, 孙海伟, 韩晓阳. 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, WU H H, ZHANG H, SHANG T, QIU Y, SUN H W, HAN X Y. Rapid diagnosis of pesticide residues in fresh tea leaves based on electronic nose technology [J]. *Journal of Tea Communication*, 2021, 48(3): 484–493.
- [86] SANAEIFAR A, LI X L, HE Y, HUANG Z X, ZHAN Z. 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. DOI:10.1016/j.biosystemseng,2021.08.016.
- [87] ORTIZ J, GUALDRON O, DURAN C. Detection of pesticide in fruits using an electronic nose [J]. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2016, 10(10): 107–113. DOI:10.1010/107-113.
- [88] TAN S L, TEO H S, GARCÍA-GUZMÁN J. E-nose Screening of pesticide residue on chilli and double-checked analysis through different data-recognition algorithms // 2010 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference [C]. 2010.

(责任编辑 崔建勋)