

# 电子鼻技术在果蔬检测中的应用

贾文坤<sup>1</sup>, 李孟楠<sup>2</sup>, 王亚雷<sup>3</sup>, 梁刚<sup>1</sup>, 满燕<sup>1</sup>, 潘立刚<sup>1\*</sup>

(1. 北京农业质量标准与检测技术研究中心, 农业部农产品质量安全风险评估实验室(北京), 农产品产地环境监测北京市重点实验室, 北京 100097; 2. 北京信息科技大学, 北京 100192; 3. 三峡大学计算机与信息学院, 宜昌 443002)

**摘要:** 电子鼻技术作为一种新兴的智能仿生技术, 在工业和农业方面都得到了广泛的研究与应用, 具有样品处理简单、检测速度快、识别效果好、实时、无损的优点。由于电子鼻具有满足农产品品质无损检测要求等优点, 电子鼻系统正在被越来越多地运用到农业研究之中。本文介绍了电子鼻的发展史和一些常见的电子鼻型号, 其中典型的有 PEN3 型和 FOX4000 等。分析了电子鼻系统的组成构造, 介绍了电子鼻系统的工作原理。其中重点阐述了电子鼻技术在水果与蔬菜中的研究与应用。在农业生产过程中, 电子鼻在对区分果蔬的不同类型与品种、合理地制定与调整果蔬的贮藏时间和条件以及鉴别与评价果蔬品质等方面有着很大的帮助。最后, 主要针对电子鼻技术在农业中的应用, 从多个方面对电子鼻技术存在的问题及其发展趋势进行了探讨。

**关键词:** 气敏传感器; 电子鼻; 无损检测; 水果; 蔬菜

## Application of electronic nose technology on the detection of fruits and vegetables

JIA Wen-Shen<sup>1</sup>, LI Meng-Nan<sup>2</sup>, WANG Ya-Lei<sup>3</sup>, LIANG Gang<sup>1</sup>,  
MAN Yan<sup>1</sup>, PAN Li-Gang<sup>1\*</sup>

(1. Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Risk Assessment Lab for Agro-products (Beijing), Ministry of Agriculture, Beijing Municipal Key Laboratory of Agriculture Environment Monitoring, Beijing 100097, China; 2. Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 3. College of Computer and Information Technology, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**ABSTRACT:** Electronic nose technology, as a new intelligent bionic technology in terms of industry and agriculture, has been studied and applied widely, and it has some advantages such as samples on processing simply, fast testing velocity, good recognition effect, real-time and nondestructive. Because the advantages of electronic nose can meet the requirements of quality nondestructive testing of agricultural products, the electronic nose system are being increasingly applied to agricultural research. Firstly the development history of the electronic nose system and different models of electronic nose were introduced in this paper, including the typical PEN3 and FOX4000, etc. Then the structure and composition principle of the electronic nose system was explained. The research and application of electronic nose technology in fruits and vegetables were expounded as the major content. Electronic nose had great effects on the processing agriculture production. The

基金项目: 国家 863 计划(2013AA10230202)、北京市留学人员科技活动择优资助项目

**Fund:** Supported by the National Hi-Tech Research and Development Program of China (2013AA10230202) and Technology Foundation for Selected Overseas Chinese Scholar of Beijing City

\*通讯作者: 潘立刚, 博士, 研究员, 主要研究方向为农产品质量安全。E-mail: panlg@nrcita.org.cn

\*Corresponding author: PAN Li-Gang, Ph.D., Professor, Department of Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Science, Beijing 100097, China. E-mail: panlg@nrcita.org.cn

aspects could be summarized by the distinction about the varieties of the fruits and vegetables, the reasonable formulation and adjustment of fruit and vegetable storage time and conditions and the evaluation of quality of fruits and vegetables. Finally, in view of the electronic nose technology were used in agricultural products, this paper discussed the problems of electronic nose technology and its development trend from several aspects.

**KEY WORDS:** gas sensor; electronic nose; nondestructive testing; fruits; vegetables

## 1 引言

农产品是食品的主要来源, 食品安全关系到人民的身体健康和生命安全, 近年来, 食品安全问题越来越令人担忧, 因此农产品质量引起了人们的高度重视。食品生产者、政府监管机构和消费者对农产品品质的分析手段的要求向着实时、快速、无损的方向在转变, 在这一背景下, 新型、快捷、高效、实时的检测技术及仪器设备成为了市场的重大科技需求。目前农产品常用的检测方法主要有感官评价和仪器分析。感官评价受外界因素影响较大, 主观性较强, 评审结果因评审人而异, 重复性差; 传统仪器分析方法, 对样品前处理要求高、检测耗时长、设备用材昂贵、技术成本高。这两种检测方法都难以满足农产品品质检测的快速、无损的要求。

电子鼻也称智能仿生嗅觉系统, 是通过模拟生物嗅觉功能来实现对检测对象的评价。它和生物嗅觉系统一样, 主要由 3 部分组成, 即气敏传感器阵列、信号处理和模式识别, 分别对应于人的嗅觉膜、嗅泡和嗅觉中枢, 通过获取的气味指纹信息对气体或挥发性成分做定性或定量的检测, 满足了市场对农产品检测的快速、实时、无损、便捷的要求<sup>[1]</sup>。

## 2 电子鼻技术概述

### 2.1 电子鼻技术发展简史

电子鼻技术是一项无损检测技术。无损检测技术是在

不破坏被检测对象的前提下, 运用各种物理学的方法如声、光、电、磁等对被测物进行检测分析的一种技术<sup>[2]</sup>。国外对电子鼻的研究异常活跃, 主要是对酒类、茶叶、鱼和肉等食品的挥发气味的识别、分类, 以对其进行质量分级和新鲜度判别。1964 年, Wilkens 和 Hatman 提出对嗅觉过程的电子模拟, 这是有关电子鼻的最早报道<sup>[3]</sup>。1967 年, Figaro 公司率先将 SnO<sub>2</sub> 金属氧化物气体传感器商品化。1982 年, 英国 Warwick 大学的 Persaud 和 Dodd 提出了电子鼻的概念, 他们的电子鼻系统包括气敏传感器阵列和模式识别系统两部分<sup>[4]</sup>。1991 年, 北大西洋公约研究组织召开第一次电子鼻专题会议, 此后电子鼻研究得到了快速发展。1994 年英国 Warwick 大学的 Gardner 和 Southampton 大学的 Bartlett 给电子鼻下了定义, 即“电子鼻是一种由具有部分选择性的化学传感器阵列和适当的模式识别系统组成, 能够识别简单或复杂气味的仪器”<sup>[5]</sup>, 标志着电子鼻技术进入了成熟、发展阶段。进入 20 世纪 90 年代后, 国际上对仿生嗅觉的研究发展非常迅速, 特别是欧美地区, 1995 年开始出现了商品化的电子鼻仪器, 目前常用的商品化电子鼻如美国宾夕法尼亚大学研发的 Cyranose320、德国 Airsense 公司研发的 PEN3、法国 Alpha MOS 公司研发的 FOX4000 等, 报价一般在 10~100 万不等, 一些商品化的电子鼻如表 1 所示。

表 1 几种商品化的电子鼻  
Table 1 Several commercial electronic noses

公司名称	产地	型号	核心元件
Cyrano Sciences	美国	Cyranose320	32 个导电聚合物传感器
Electronic Sensor Technology	美国	zNose 系列	声表面波与气相色谱联用
Alpha MOS	法国	FOX4000	6~18 个 MOS 型传感器
Airsense	德国	PEN3	10 个 MOS 型传感器
SYSCA	德国	ARTINOS	38 个 MOS(氧化钨掺杂)传感器
Scensive Tech	英国	Bloodhound ST214	14 个导电聚合物传感器
Aroma Scan	英国	AromaScan A32S	32 个导电聚合物传感器
Smart nose	瑞士	Smart nose	质谱
Technobiochip	意大利	LibraNose	8 个石英微天平
新宇宙电机株式会社	日本	XP-329 系列	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 半导体和 ZnO 半导体
松下	日本	口腔监测仪	TGS550 MOS 传感器

相比国外,国内对电子鼻的研究大概起步于 20 世纪 90 年代初,绝大多数还处在实验室阶段,国内的研究大致可分为 2 种:一是采用国外的电子鼻系统进行后继研究和实验,二是自主研发电子鼻系统,目前主要集中在第一种上,在电子鼻的应用、信号预处理、特征提取、模式识别算法、结构设计等方面取得了较大进展,研究单位主要有中科院半导体所、浙江大学、江苏大学等,主要面向食品、农产品、环境、医疗、有毒气体的检测。国内对电子鼻的研究大多集中在电子鼻系统的某个环节上,很少有成熟完整的商品化电子鼻系统。上海瑞玢国际贸易有限公司研发的智鼻(iNose)是为数不多的国产电子鼻商品之一,该产品的核心元件为 14 种不同性质的金属氧化物半导体传感器所构成的交互敏感传感器阵列。

## 2.2 电子鼻的工作原理

电子鼻系统包括采样系统(气体传输)、传感器阵列、信号预处理、模式识别和气味表达 5 部分,电子鼻系统和生物嗅觉系统对比如图 1 所示。当气体处于敏感材料测试环境中时,与敏感材料产生化学作用,随后传感器将化学变化的输入转化为了电信号。阵列预处理单元对电信号进行一系列处理,如消除噪声、特征提取、信号放大等操作,然后采用合适的模式识别算法对处理后的数据进行分析。从理论而言,不同的气体与敏感材料发生反应时,具有自己的特征响应谱,因此,对于定性测试,可以根据特征响应谱的不同范围来区分各种气体<sup>[6]</sup>,还可利用气体传感器的阵列化及多种气体的交叉敏感特性进行气体的定量测量。

气敏传感器及其阵列是电子鼻的重要组成部分,农

产品气味的组成成分较复杂,单个气敏传感器无法评定,需用阵列化的传感器来评定。目前常用的气敏传感器有金属氧化物型,原理是被测气体与气敏元件发生氧化还原反应导致电导率、电阻值发生变化<sup>[7]</sup>;导电聚合物型,原理是吸附气体后导致聚合物链发生溶胀反应,影响了聚合物分子链的电子密度,从而导致其电导率产生变化<sup>[8]</sup>;质量敏感型分为石英晶体微天平传感器(quartz crystal microbalance, QCM)和声表面波传感器(surface acoustic wave, SAW),QCM 原理是因聚合物涂层吸附到了气体分子导致石英盘质量增加,引起谐振特征频率发生变化,SAW 原理是吸附气体分子的晶体表面声波的频率、相速和幅值发生变化<sup>[9]</sup>;场效应管型是基于气体与敏感膜接触发生反应,导致 MOSFET 的阈值电压或电流发生变化<sup>[10]</sup>。

## 3 电子鼻在果蔬品质检测中的应用研究

近些年来,电子鼻主要应用在食品、工业、环境检测、医学等领域,且在在这些领域研究较早,应用相对成熟,如工业中有毒气体的检测、发酵过程控制,食品中食品生产原料的在线检测、食品品质分类鉴别、食品生产条件控制等。电子鼻在农产品中研究较晚,应用还不成熟,而我国是农业大国,农产品资源丰富,农产品在贮藏和运输以及加工过程中都会释放一定的特征气体如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{NO}_2$  等,气体浓度的不同都与农产品自身的成熟、衰老以及品质的变化密切相关,电子鼻可以快速、实时监测这些特征气体及其浓度,弥补了人为评定和理化分析的缺点,为农产品安全提供一个理想的检测手段。

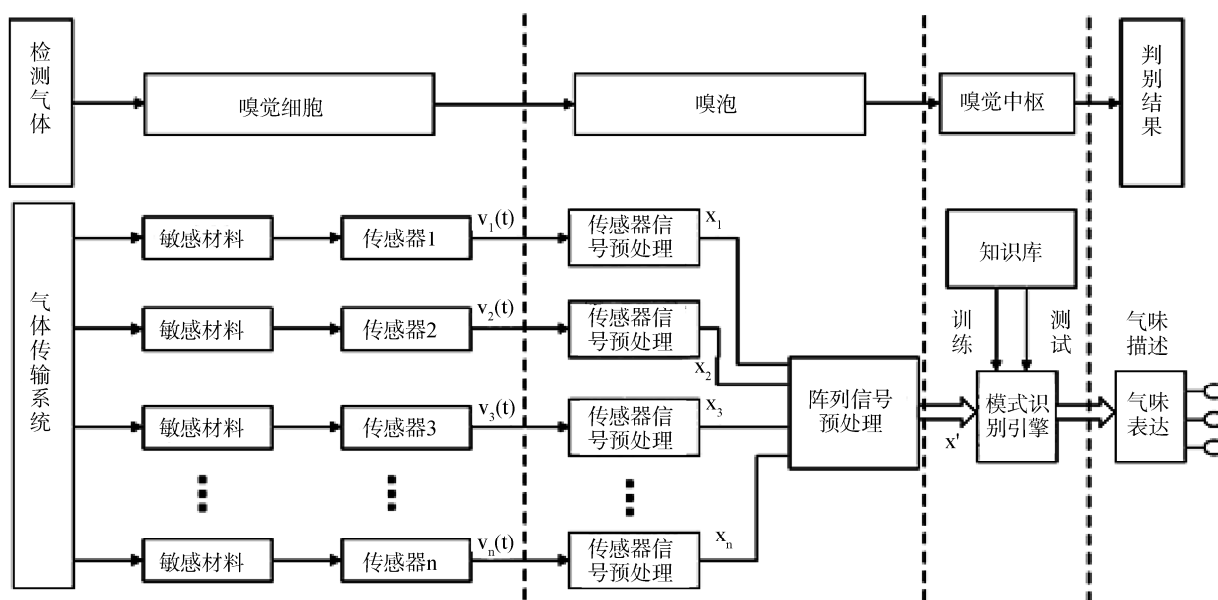


图 1 电子鼻系统和生物嗅觉系统对比示意图

Fig. 1 Contrast diagram of electronic nose system and biological olfaction system

### 3.1 电子鼻在水果方面的应用

电子鼻可以在区分不同品种或类型的水果中得到较好的应用。Hui 等<sup>[11]</sup>用 8 个金属氧化物气体传感器阵列组成的自制电子鼻, 预测富士苹果在室温条件下不同的储藏时间, 通过对数据进行主成分分析(principal component analysis, PCA)和随机共振信噪比图谱 2 个模型分析, 分析结果表明 PCA 不能很好地区分出所有的样品, 而随机共振信噪比图谱可以准确地区分出新鲜、半熟、过熟的苹果, 预测准确率为 84.62%。Ma 等<sup>[12]</sup>用 PEN3 电子鼻对区分猕猴桃的来源地的可行性和稳定性进行了研究, 差异性分析表明不同来源地的猕猴桃分别有其特有的香气成分指纹。通过对获取的数据进行线性判别式分析(linear discriminant analysis, LDA)和簇类独立软模式法(soft independent modeling of class analogy, SIMCA)模型分析, 分析结果表明这 2 种模型都可以成功地区分出不同猕猴桃的来源地, 但其区分的稳定性还需要进一步的提高。马勇等<sup>[13]</sup>利用 PEN3 便携式电子鼻分析榴莲果肉挥发性成分, 采用 PCA 和 Loadings 法对数据进行分析, 通过偏最小二乘回归(partial least squares, PLS)预测模型可以准确测定榴莲果肉臭味气体相对含量, 其线性拟合曲线的相关系数为 0.997, 结果表明 PEN3 电子鼻系统识别榴莲果肉气味可行。朱娜等<sup>[14]</sup>利用 PEN3 型便携式电子鼻检测施加了 1.1 J、2.2 J 碰撞能和没有施加碰撞能的硬溶质品种“中华寿桃”所造成的果实瘀伤, 在 24 °C, 相对湿度 85%条件下贮藏 24 h 后逐个提取电子鼻响应信号, 对其进行主成分分析, 结果表明不同瘀伤等级果实分离率为 100%, 总体准确率达到 95%。苏明申等<sup>[15]</sup>应用 FOX4000 电子鼻研究千曲、大久保和新凤等 19 个不同桃品种的香气差异, 结果表明电子鼻的 18 个金属氧化物传感器对不同样品的感应值存在差异, 应用判别因子分析(discriminate factor analysis, DFA)方法大致可以将果实样品分为 4 组, PCA 方法区分效果并不明显, 统计质量控制(statistical quality control, SQC)方法显示不同样品之间香气具有差异, 最后得出结论, DFA 和 SQC 方法可以较好呈现桃果实香气品质的差异。申济源等<sup>[16]</sup>应用 FOX4000 电子鼻对黄肉类型的“锦绣”和“锦园”以及白肉类型的“湖景蜜露”和“玉露”桃的成熟衰老进程进行测定, 电子鼻的 18 个金属氧化物传感器对不同成熟衰老进程样品的感应值均有差异, PCA 和 DFA 方法均可以实现不同成熟衰老进程样品的区分, 结果表明电子鼻技术在果实衰老进程评价方面具有潜力。苏明申等<sup>[17]</sup>应用 FOX4000 电子鼻评价 39 个桃和油桃品种果肉挥发性物质, 其中 11 个六月成熟的品种、12 个七月成熟的品种和 16 个八月和九月成熟的品种通过 DFA 方法可以有效地分离出来, 结果表明电子鼻在检测不同桃和油桃挥发性物质中可以发挥重要作用。李国鹏等<sup>[18]</sup>应用 FOX4000 电子鼻对“冬果梨”、“大香水”

和“库尔勒香梨”等 8 种不同栽培系统的梨品种果实挥发性物质进行检测分析, 电子鼻的 18 个金属氧化物传感器对不同栽培系统的梨品种挥发性成分组产生不同的反应值, PCA 方法可以将检测的 8 个品种分为两大类, DFA 方法可以将 8 个种类的品种根据产地和种类进行区分, 因此应用电子鼻系统结合一定数学分析能对不同栽培系统的梨品种进行区分。颜廷才等<sup>[19]</sup>利用 PEN3 型电子鼻对 4 个品种葡萄成熟果实的香气成分进行分析, 结果表明主成分分析和线性判别分析, 可以将 4 个品种葡萄完全区分开。朱娜等<sup>[20]</sup>利用 PEN3 电子鼻检测八成熟“红颜”草莓的霉菌感染, 对草莓果实分别接种灰霉、扩展青霉和根霉三种主要病原菌, 以无菌水处理为对照组, 采取草莓气味, 通过 PCA 方法能够正确区分正常果实与病害果实, 通过 Fisher 判别建立的回归函数对 3 种病原菌灰霉、扩展青霉和根霉以及对照组的判别正确率分别为 100%、93.3%、86.7%和 100%。刘玉革等<sup>[21]</sup>利用 PEN3 型便携式电子鼻区分 10 °C 贮藏条件下的贮藏 1 d 和 9 d 的“台农 6 号”菠萝果实, 在贮藏过程中, 菠萝果实的不同部位的香气成分含量和数量均随时间下降, 通过 PCA 法分析结果表明电子鼻可以区分不同贮藏时间的菠萝果实, 区分值达到 82.1%。胡桂仙等<sup>[22]</sup>利用 PEN2 型电子鼻对保鲜袋中储藏和纸箱储藏两种不同储藏方式与不同储藏时间的甜橘芳香成分进行检测分析, 实验通过电子鼻采集甜橘芳香成分的响应值, 再利用 PCA、LDA 等模式识别方法进行数据分析, 结果表明利用电子鼻能够无损检测区分不同新鲜度的甜橘。徐赛等<sup>[23]</sup>利用 PEN3 型电子鼻对无损伤、轻度机械损伤和重度机械损伤的番石榴进行采样, 运用 PCA 和 LDA 方法对采样结果进行分析, 电子鼻识别番石榴机械损伤的正确率为 82.05%, 此外通过高光谱与电子鼻相结合的识别方法的准确率达到 97.44%。

电子鼻可以帮助对水果在不同处理时间或条件下的成熟过程或贮藏效果进行评价。张鹏等<sup>[24]</sup>采用 PEN3 电子鼻采集经过 1-甲基环丙烯(1-MCP)处理的苹果的挥发性成分, 并获得电子鼻的响应值, 使用 PCA 和 LDA 模式判别方法进行数据分析, Loadings 分析表明, 电子鼻可以实现对苹果常温不同处理时间的判别区分, 且 LDA 方法优于 PCA 方法。李莹等<sup>[25]</sup>利用 PEN3 型电子鼻监测苹果的硬度、可溶性固形物含量与可滴定酸含量等主要品质指标, 建立多层感知神经网络模型对苹果贮藏时间进行预测的准确率为 92.0%, 利用偏最小二乘法和 BP 神经网络所建立预测模型的决定系数均大于 0.9300, 最后得出结论, 利用电子鼻的快速无损检测功能可以实现对苹果低温贮藏时间及品质的预测。周斌等<sup>[26]</sup>通过 PEN3 电子鼻分析经过 1-甲基环丙烯(1-MCP)处理的甜柿的贮藏品质, 在货架 15 d 时其可溶性固形物含量为 14.79%, 实验结果表明 1-MCP 可以有效延缓果皮  $L^*$  和  $b^*$  的下降, 减轻果实冷害症状, 同时抑制果实质地的下降。实验表明 PEN3 电子鼻可以有效区分不同

贮藏/货架期间的甜柿,但电子鼻仅能对贮后货架期的不同处理甜柿进行区分,对常温货架期和低温贮藏期的不同处理甜柿区分效果不理想。Sanaeifar等<sup>[27]</sup>用金属氧化物气体传感器阵列组成的自制电子鼻通过实时监测方法研究香蕉在成熟过程中的挥发性气体的变化,运用PCA、LDA、SIMCA和支持向量机法(support vector machine, SVM)等分析模型对数据进行分析,分析结果表明SVM模型优于其他分析模型,且对样品的分类准确性达到了98.66%。徐赛等<sup>[28]</sup>采用PEN3电子鼻获取挂果约25 d到果实成熟过程中6个成熟阶段荔枝样本的仿生嗅觉信息并同步获取了各成熟阶段荔枝的果实直径、果实质量与果实可溶性固形物含量等3项物理特征,通过FCM(fuzzy c means clustering)、KNN(k nearest neighbor)和PNN(probabilistic neural network)进行模式识别,研究表明FCM对果园荔枝成熟阶段识别的正确率为81.97%,KNN与PNN识别模型对训练集的回判正确率均为100%,对测试集的识别率为96.67%,证明采用电子鼻进行果园荔枝成熟度的监测可行。赵梦田等<sup>[29]</sup>利用浙江工商大学自制的电子鼻检测系统连续在9 d时间检测库尔勒香梨样品,以PCA方法分析数据,电子鼻可以较好地地区分不同贮藏时间的香梨样品,并且适合于香梨品质的现场快速检测。惠国华等<sup>[30]</sup>利用浙江工商大学自主研发的电子鼻系统检测不同储藏时间的香蕉样品,PCA方法可以很好地地区分不同储藏时间的香蕉样品,对储藏时间预测的最大误差为9.5%。陈辰等<sup>[31]</sup>运用PEN3型便携式电子鼻与顶空固相微萃取/气相质谱联用技术(headspace solid phase micro-extraction/gas phase chromatography coupled techniques, HS-SPME/GC-MS)对玫瑰香葡萄低温冷藏下货架期香气成分进行鉴别和检测,PCA方法可以将不同货架时间的葡萄样品有效地区分开,前两个成分贡献率达98.23%、99.23%,LDA方法第一、第二判别式总贡献率为93.73%、93.04%,其香气成分的种类与相对含量变化及电子鼻分析结果基本保持一致。张鹏等<sup>[32]</sup>利用PEN3型电子鼻对15 d、30 d、45 d和60 d等4种不同冷藏期的出库后常温货架葡萄果实进行判别分析,并运用顶空固相微萃取/气相质谱联用技术(HS-SPME/GC-MS)检测冷藏15 d、45 d常温货架期间(0 d、3 d、6 d)挥发性成分的变化,通过LDA法可以有效区分不同贮藏期的葡萄,贮后货架期间,除冷藏15 d的0 d、3 d货架重叠外,其他冷藏期货架期间结果均不重叠,因此电子鼻结合顶空固相微萃取/气相质谱联用技术(HS-SPME/GC-MS)对葡萄冷藏时间对贮后货架期的芳香物质判别具有可行性。

电子鼻可以用来评价或检测不同种类水果的品质。邹小波等<sup>[33]</sup>用费加罗公司生产的金属氧化锡传感器阵列构成的自制电子鼻并应用遗传算法优化的RBF神经网络模型搭建了一个电子鼻系统,利用该系统对在超市购买的苹

果的好坏分别进行了检测。分析结果表明PCA可以较好地好坏苹果区分开,而经过遗传算法改进的RBF神经网络更优,对测试集的测试正确率达到了96.4%。李静等<sup>[34]</sup>通过zNose电子鼻系统比较了3种不同的苹果恒温微波干燥方案,80℃恒温干燥时,白变指数为55.36,褐变程度最高,60℃恒温干燥时,耗时长,干燥能力弱于70℃时,进而设计了线性温度控制方案,阶段A为1~90 min时,温度从75℃线性降低到65℃,阶段B为91~120 min,温度水平维持在65℃,进而更好地提升了苹果的生产品质。宋小青等<sup>[35]</sup>用PEN3电子鼻对低温贮藏猕猴桃的品质进行了研究,对电子鼻获得的数据采用多元线性回归(multiple linear regression, MLR)、偏最小二乘法(partial least squares regressions, PLS)和BP(back-propagation)网络3种分析方法建立了评价低温贮藏猕猴桃的可溶性固形物含量pH值和硬度的数学模型,以模型 $R^2$ 、RMSEC和RMSEP作为评价模型性能的指标,分析结果表明MLR、PLS和BP网络3种分析方法都能较好地预测低温贮藏猕猴桃的品质,但相比之下BP网络的分析精度最高,其可溶性固形物含量、pH值、硬度的预测值的 $R^2$ 分别为0.93、0.90、0.90,相应的RMSEP分别为0.48、2.15、0.08。赵秀洁等<sup>[36]</sup>用PEN3电子鼻对采后的草莓在常温和低温条件下的品质变化进行研究,首先对草莓通过感官评价,测定质量损失率和硬度以确定其品质等级,分为一级、二级和腐败级,对获取的数据用PCA和Fisher判别分析模型进行分析,分析结果表明Fisher判别分析对草莓常温和低温的分类准确率分别为97.5%和93.3%,均好于PCA分析模型。

由此可知,电子鼻应用在了水果检测的多个方面,不同算法对于不同水果之间体现了较大适用性差异,当选择恰当的分析算法时,其检测准确率可以得到大幅度地提升。

### 3.2 电子鼻在蔬菜方面的应用

王光芒等<sup>[37]</sup>用13个TGS-8系列的金属氧化物气体传感器组成的自制电子鼻对喷洒同种农药但不同浓度的蔬菜进行定量识别,对获得的数据运用BP神经网络进行分析,分析结果表明该系统可以较好地地区分不同浓度农药残留的蔬菜区分正确率为100%。Goncina等<sup>[38]</sup>用不同微生物接种在灌装去皮的番茄中,并用意大利EOS835电子鼻检测其中的挥发性物质,运用PCA模型对数据进行分析,分析结果表明该电子鼻系统可以检测变质的番茄且检测正确率为83%。Russo等<sup>[39]</sup>用ISE Nose 2000电子鼻对红皮洋葱的品种分类进行研究,对获得的数据用DFA模型进行分析,分析结果表明该电子鼻对不同品种红皮洋葱的分类准确率达97.5%。Biondi等<sup>[40]</sup>用PEN3电子鼻对马铃薯常见的环腐病和褐腐病进行探测,通过对获得的数据运用PCA和LDA进行分析,分析结果表明LDA优于PCA,其对鉴定马铃薯是否患这两种病的正确率为81.3%。周亦斌等<sup>[41]</sup>用

PEN2 电子鼻对不同成熟度的番茄在储藏过程中的气味变化和番茄的坚实度进行探测, 对获得的数据进行 PCA、LDA 分析, 分析结果表明, 当按气味变化区分时这两种模型都可以较好地地区分不同成熟期的番茄, 当按坚实度指标区分时 PCA 模型的区分准确率达到了 100%。程绍明等<sup>[42]</sup>用 PEN2 电子鼻对感染早疫病病害的番茄苗进行研究, 实验样本为接种 1 叶片、2 叶片、4 叶片和对照番茄苗。通过 PCA、LDA、SLDA 和 BP 神经网络模型分别对获取的数据进行分析, 分析结果表明用 PCA 时样本间均有重叠, LDA 基本可以分开, SLDA 和 BP 神经网络对测试样本的准确率分别为 50% 和 87.5%。

肖岚等<sup>[43]</sup>利用 FOX4000 电子鼻分析四川雅安、四川凉山和陕西韩城等不同产区生产的不同采收时间和不同贮藏时间的干花椒和鲜花椒气味的变化, 采用多元统计方法对所得的数据进行 PCA、DFA 分析, 结果表明电子鼻能够判断出不同产地、采收时间和贮藏时间的干鲜花椒的气味变化。刘大群等<sup>[44]</sup>基于 FOX3000 电子鼻和 HS-SPME/GC-MS 技术对风脱水工艺和盐脱水工艺的萝卜干的挥发性物质进行分析, 通过对所得数据进行 PCA 分析, 结果表明不同方式脱水的萝卜干中挥发性物质差异明显。周春丽等<sup>[45]</sup>利用 HERACLES 电子鼻系统对采用 HS-SPME/GC-MS 技术检测出的中国南瓜、印度南瓜和美洲南瓜的不同挥发性香气物质进行分析, 通过主成分分析法(PCA)对不同品种南瓜香气进行比较, 结果表明电子鼻可以显著区分 3 种不同类型的南瓜。潘冰燕等<sup>[46]</sup>利用 PEN3 型电子鼻结合 HS-SPME/GC-MS 技术, 对 10 °C 贮藏 15 d 后进行常温货架期间线椒的挥发性物质进行检测分析, 并讨论无包装、10 μm PE 和 20 μm PE 不同包装与不同货架期对挥发性成分的影响, 结果表明电子鼻整体对线椒气味特征进行判别具有可行性。郭婧敏等<sup>[47]</sup>利用 PEN3 型电子鼻对薇菜的软包装水煮工艺及品质进行分析, 通过 PCA 法分析设计冷水浸泡、热水-热水-冷水、热水-冷水-热水-冷水(70 °C)和热水-冷水-热水-冷水(80 °C)4 种方案的薇菜口感, 结果表明热水-冷水-热水-冷水(80 °C)时方案设计最好。由此可知, 在蔬菜的检测上主要以成熟商用电子鼻为主, 部分检测准确率高达 100%。

综上所述, 电子鼻在果蔬类农产品检测中准确率基本在 85%~100% 之间, 且以商用电子鼻为主, 多数自制电子鼻是针对某种农产品而研究的专用仪器, 检测准确度通常较高, 但稳定性有待进一步提高, 具有自学习功能的人工神经网络分析效果大多优于传统分析方法, 由此可见电子鼻在农产品中的应用中具有很大的潜力。

## 4 问题与讨论

电子鼻技术是一个系统、复杂的技术融合体, 涉及到很多领域, 如生物、材料、计算机、传感器、应用数学、

通信技术等<sup>[48]</sup>, 目前对于电子鼻的研究仍然存在很多问题, 如气体传感器的选择性、稳定性、重复性有待改进, 针对电子鼻系统的仿生设计研究较少, 气体的采集难以避免环境因素的影响; 信号预处理技术不成熟, 响应数据干扰较大; 目前电子鼻体积较大, 很多还是在实验室环境下, 难以满足便携化要求; 电子鼻在农业中的应用拓展不足, 受限于检测的环境; 目前国内对农产品挥发性气体的检测大多停留在感官评判、气相色谱分析和利用成熟的商用电子鼻做阵列优化、算法和应用方面的研究, 对电子鼻的设计制造研究较少。

针对以上问题, 需要新技术和新方法来作为解决问题的有效途径。

(1) 新型气敏材料的应用。气体传感器的关键部分就是气敏材料, 近年来半导体、陶瓷、高分子材料以及纳米材料等技术发展迅速, 使电子鼻的各项性能得到了大幅度的提高。

(2) 新型传感器工艺的应用。微电子机械(MEMS)技术可以将传感器与集成电路高度集成, 使其体积小、重量轻、准确度高、功耗低、方便全自动量产等<sup>[49]</sup>, 可以使电子鼻系统高度集成化、便携化。利用现代医学的先进设备, 深入研究动物嗅觉分析的过程, 应用仿生原理优化传感器阵列, 特别是从生物嗅觉结构出发设计电子鼻系统。

(3) 信息处理方法的改进。采集的信息量大多有噪声, 特征提取、传感器温湿度补偿、基线校准、抗干扰等方法能达到数据优化的目的, 人工神经网络及模糊理论等识别算法能够完成信息从输入到输出的复杂映射<sup>[50]</sup>, 因此深入应用模拟人类思维的信号快速处理方法将是电子鼻更加智能化、精准化的关键所在。

(4) 电子鼻与其他分析技术的融合。数据融合是一种新兴的交叉学科, 是人工神经网络、模式识别、人工智能、传感器技术和模糊理论等相互交叉形成的<sup>[51]</sup>, 该技术可以结合各个传感器的优势, 通过其具有的信息互补性来提高待测量信息的可靠性及精度, 如电子鼻与电子舌、电子鼻与近红外光谱或机器视觉的融合使用等。

(5) 电子鼻系统的网络化。将电子鼻技术与现代无线通信技术相结合如基于 ZigBee 的无线电子鼻系统<sup>[52]</sup>, 把复杂数据分析的功能交给处理能力强大的服务器端完成, 开发出更加节能、轻便、移动性好、分析功能强大、适于远程监控的分布式无线电子鼻系统<sup>[53]</sup>。

## 5 总结与展望

随着传感器技术、纳米、新型气敏材料、MEMS 工艺等技术的进步, 电子鼻的体积越做越小、成本逐步降低。由于现在对检测精度的要求不断提高, 电子鼻开始出现了与其他分析仪器的融合应用、电子鼻与现代无线通信技术相结合的发展趋势。

总体而言,随着生物计算机的出现、仿生材料研究的进步、MEMS技术的成熟、纳米技术的应用、网络通信技术的提高,电子鼻将能够独立进行分析判断及学习能力,可以独立完成远程控制、图像识别、特征提取、高维、有毒气体检测等复杂任务,且随着我国生物芯片、生物技术和集成化技术的提高及一些纳米材料的应用,电子鼻技术在农产品品质检测的应用将会有更为广阔的前景。

#### 参考文献

- [1] 吴文娟. 检测农产品挥发性气体的电子鼻研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2011.  
Wu WJ. Detection of volatile nose research of agricultural products [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2011.
- [2] 王自明. 无损检测综合知识[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
Wang ZM. Nondestructive testing comprehensive knowledge [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [3] Wilkens WF, Hartman JD. An electronic analog for the olfactory processes [J]. *J Food Sci*, 1964, 29(3): 278–372.
- [4] Persaud K, Dodd G. Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose [J]. *Nature*, 1982, 299(23): 352–355.
- [5] Gardner JW, Bartlett PN. A Brief history of electronic nose [J]. *Sens Act B-Chem*, 1994, (18–19): 211–220.
- [6] 殷勇. 嗅觉模拟技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.  
Yin Y. Olfactory analogue technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [7] 李洪涛. 基于农产品品质检测的专用电子鼻系统的设计与研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.  
Li HT. Special electronic nose system for agriculture products quality detection [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [8] 何国泉, 刘木华. 基于电子鼻的气敏传感器及其阵列[J]. *传感器世界*, 2008, 14(7): 6–9.  
He GQ, Liu MH. Based on the gas sensor and its array of electronic nose [J]. *Sensor World*, 2008, 14(7): 6–9.
- [9] 王俊, 崔绍庆, 陈新伟, 等. 电子鼻传感技术与应用研究进展[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(11): 160–167.  
Wang J, Cui SQ, Chen XW, *et al.* Advanced technology and new application in electronic nose [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2013, 44(11): 160–167.
- [10] 王胜权, 张劲, 刘小旭. 气体传感器的分类和应用[J]. *科技向导*, 2011, (20): 37–38.  
Wang SQ, Zhang J, Liu XX. The classification and application of gas sensor [J]. *Guide Sci-tech Mag*, 2011, (20): 37–38.
- [11] Hui GH, Wu YL, Ye DD, *et al.* Fuji apple storage time predictive method using electronic nose [J]. *Food Anal Methods*, 2013, 6(1): 82–88.
- [12] Ma YY, Guo BL, Wei YM, *et al.* The feasibility and stability of distinguishing the kiwi fruit geographical origin based on electronic nose analysis [J]. *Food Sci Technol Res*, 2014, 20(6): 1173–1181.
- [13] 马勇, 刘水琳, 汤轶伟, 等. 电子鼻测定榴莲果肉臭味气体的模型建立及应用[J]. *食品工业科技*, 2015, 7: 015.  
Ma Y, Liu SL, Tang YW, *et al.* Establishment and application of the model for detecting the odor of durian pulp [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 7: 015.
- [14] 朱娜, 潘磊庆, 毛淑波, 等. 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.  
Zhu N, Pan LQ, Mao SB, *et al.* Non-destructive detection of peach bruise by E-nose [J]. *J Nanjing Agric Univ*, 2013, 36(1): 137–141.
- [15] 苏明申, 张波, 叶正文, 等. 基于电子鼻无损检测技术的桃果实香气研究[J]. *果树学报*, 2012, 29(5): 809–813.  
Su MS, Zhang B, Ye ZW, *et al.* Non-destructive detection of peach (*Prunus persica*) fruit volatiles using an electronic nose [J]. *J Fruit Sci*, 2012, 29(5): 809–813.
- [16] 申济源, 张波, 葛毅强, 等. 利用电子鼻技术研究采后桃果实成熟衰老进程[J]. *园艺学报*, 2013, 40(S): 2589.  
Shen JY, Zhang B, Ge YQ, *et al.* Use of electronic nose technology research of postharvest taoguo real mature aging process [J]. *Acta Horticult Sin*, 2013, 40(S): 2589.
- [17] 苏明申. 油桃果实发育、桃和油桃果实脂肪酸与挥发物质的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.  
Su MS. Nectarine maturation, fatty acid composition and volatile substances of peaches and nectarines [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [18] 李国鹏. 中国梨果实挥发性物质鉴定及酯类物质生物合成相关基因表达的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
Li GP. Studies on volatiles in fruit of chinese pear cultivars and expression of ester biosynthesis related genes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [19] 颜廷才, 邵丹, 李江阔, 等. 基于电子鼻和 GC-MS 评价不同品种葡萄采后品质和挥发性物质的变化[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(11): 290–297, 270.  
Yan TC, Shao D, Li JK, *et al.* Changes in quality and volatile substances of different varieties of grapes as evaluated by electronic nose combined with GC-MS technology [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2015, 31(11): 290–297, 270.
- [20] 朱娜, 毛淑波, 朱磊庆, 等. 电子鼻对草莓贮藏早期霉菌感染的检测[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(5): 266–273.  
Zhu N, Mao SB, Zhu LQ, *et al.* Early detection of fungal disease infection in strawberry fruits by e-nose during postharvest storage [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2015, 6: 266–273.
- [21] 刘玉革, 徐金龙, 赵维峰, 等. 菠萝果实香气成分分析及电子鼻评价[J]. *广东农业科学*, 2012, (2): 97–100.  
Liu YG, Xu JL, Zhao WF, *et al.* Aroma volatile compounds of pineapple and evaluation by electronic nose [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2012, (2): 97–100.
- [22] 胡桂仙, 王俊, 海铮, 等. 不同储藏时间甜橘电子鼻检测研究[J]. *浙江农业学报*, 2006, 18(6): 458–461.  
Hu GX, Wang J, Hai Z, *et al.* Electronic nose monitoring the oranges stored for different times [J]. *Acta Agric Zhejiang*, 2006, 18(6): 458–461.
- [23] 徐赛, 陆华忠, 周志艳, 等. 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, (07). <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20150505.0919.001.html>  
Xu S, Lu HZ, Zhou ZY, *et al.* Combined hyper-spectrometer and electronic nose for guava mechanical damage identification [J]. *Transact Chin Soc Agric Mach*, 2015, (07). <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20150505.0919.001.html>

- [24] 张鹏, 李江阔, 陈绍慧. 1-MCP 常温不同处理时间苹果的电子鼻判别分析[J]. 北方园艺, 2015, (12): 119–124.  
Zhang P, Li JK, Chen SH. 1-MCP room temperature different processing time apple electronic nose discriminant analysis [J]. Northern Horticulture, 2015, (12): 119–124.
- [25] 李莹, 任亚梅, 张爽, 等. 基于电子鼻的苹果低温贮藏时间及品质预测[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 111–119.  
Li Y, Ren YM, Zhang S, et al. Prediction of low-temperature storage time and quality of apples based on electronic nose [J]. J Northwest A F Univ (Nat Sci Ed), 2015, 43(5): 111–119.
- [26] 周斌, 张鹏, 李江阔, 等. 1-MCP 处理对甜柿贮藏品质的影响和电子鼻分析[J]. 食品工业科技, 2015, 36(18): 350–354.  
Zhou B, Zhang P, Li JK, et al. Effect of 1-MCP treatment on storage quality of sweet persimmons and discriminant analysis by electronic nose [J]. Sci Technol Food Ind, 2015, 36(18): 350–354.
- [27] Sanaeifar A, Mohtasebi SS, Ghasemi-Varnamkhasti M, et al. 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 J Food Sci, 2014, 32(6): 538–548.
- [28] 徐赛, 陆华忠, 周志艳, 等. 基于电子鼻的果园荔枝成熟阶段监测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 240–246.  
Xu S, Lu HZ, Zhou ZY, et al. Electronic nose monitoring mature stage of litchi in orchard [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2015, 31(18): 240–246.
- [29] 赵梦田, 杜佳苏, 黄洁, 等. 基于电子鼻的库尔勒香梨品质区分方法研究[J]. 食品工业科技, 2014, 14(3): 225–228.  
Zhao MT, Du JS, Huang J, et al. Korla fragrant pear quality distinguish method based on electronic nose [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2014, 14(3): 225–228.
- [30] 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): 566–670.  
Hui GH, Wu YL, Chen YQ. Investigation of banana storage time discriminate methods using electronic nose [J]. Chin J Sens Act, 2012, 25(5): 566–670.
- [31] 陈辰, 鲁晓翔, 张鹏. 玫瑰香葡萄贮藏后货架品质的电子鼻结合 GC-MS 检测[J]. 现代食品科技, 2015, 31(10).  
Chen C, Lu XX, Zhang P. Determination of Shelf Quality Storage of Muscat Grape by Electronic Nose Combined with GS-MS [J]. Mod Food Sci Technol, 2015, 31(10).
- [32] 张鹏, 邵丹, 李江阔, 等. 葡萄冷藏时间对贮藏后货架期芳香物质的影响[J]. 食品科学, 2015.  
Zhang P, Shao D, Li JK, et al. Effects of cold storage time on aroma components of grape during shelf life after storage [J]. Food Sci, 2015.
- [33] 邹小波, 赵杰文, 潘胤飞, 等. 基于遗传 RBF 网络的电子鼻对苹果质量的评定[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 61–64.  
Zou XB, Zhao JW, Pan YF, et al. Quality evaluation of apples using electronic nose based on GA-RBF network [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2005, 36(1): 61–64.
- [34] 李静, 宋飞虎, 蒲宏杰, 等. 基于电子鼻气味检测的苹果微波干燥方案优选[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 312–319.  
Li J, Song FH, Pu HJ, et al. Microwave drying apple based on electronic nose smell detection scheme optimization [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2015, 31(3): 312–319.
- [35] 宋小青, 任亚梅, 张艳宜, 等. 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.  
Song XQ, Ren YM, Zhang YY, et al. Prediction of kiwifruit quality during cold storage by electronic nose [J]. Food Sci, 2014, 35(20): 230–235.
- [36] 赵秀洁, 吴海伦, 潘磊庆, 等. 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.  
Zhao XJ, Wu HL, Pan LQ, et al. Nondestructive prediction of postharvest strawberry quality by electronic nose [J]. Food Sci, 2014, 35(18): 105–109.
- [37] 王光芒. 蔬菜农药残留电子鼻检测中特征提取方法研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2009.  
Wang GM. Vegetable pesticide residues in the electronic nose to detect feature extraction method [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2009.
- [38] Concina I, Falasconi M, Gobbi E, et al. Early detection of microbial contamination in processed tomatoes by electronic nose [J]. Food Control, 2009, 20(10): 873–880.
- [39] Russo M, di Sanzo R, Cafaly V, et al. Nondestructive flavor evaluation of red onion (*Allium cepa* L) ecotypes: An electronic-nose-based approach [J]. Food Chem, 2013, 141(2): 896–899.
- [40] Biondi E, Blasioli S, Galeone A, et al. Detection of potato brown rot and ring rot by electronic nose: from laboratory to real scale [J]. Talanta, 2014, 129: 422–430.
- [41] 周亦斌, 王俊. 基于电子鼻的番茄成熟度及贮藏时间评价的研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 113–117.  
Zhou YB, Wang J. Based on the electronic nose tomato maturity to the study of evaluation and storage time [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2005, 21(4): 113–117.
- [42] 程绍明, 王俊, 王永维, 等. 基于电子鼻技术的番茄苗早疫病病害快速检测研究[J]. 科技通报, 2013, 29(7): 68–77.  
Cheng SM, Wang J, Wang YW, et al. Based on electronic nose technology in the rapid detection of tomato seedlings early blight disease research [J]. Bull Sci Technol, 2013, 29(7): 68–77.
- [43] 肖岚, 孙俊秀, 谷学权, 等. 电子鼻在原料花椒验收中的应用研究[J]. 中国调味品, 2015, 40(8): 74–80.  
Xiao L, Sun JX, Gu XQ, et al. Application of electronic nose in checking and acceptance of sichuan pepper [J]. China Cond, 2015, 40(8): 74–80.
- [44] 刘大群, 华颖. 基于电子鼻与 HS-SPME/GC-MS 技术分析不同脱水方式下萧山萝卜干中的挥发性风味物质[J]. 现代食品科技, 2014, 30(2): 279–285.  
Liu DQ, Hua Y. Detection of volatile flavor compounds in different dehydrated xiaoshan pickled radish by HS-SPME/GC-MS and E-nose methods [J]. Mod Food Sci Technol, 2014, 30(2): 279–285.
- [45] 周春丽, 刘伟, 陈冬, 等. 基于电子鼻与 HS-SPME/GC-MS 法分析不同南瓜品种的挥发性风味物质[J]. 现代食品科技, 2015, (07). <http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1620.TS.20150605.1517.012.html>  
Zhou CL, Liu W, Chen D, et al. Application of electronic nose in different pumpkin species by HS-SPME/GC-MS and E-nose methods [J]. Mod Food Sci Technol, 2015, (07). <http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1620.TS.20150605.1517.012.html>
- [46] 潘冰燕, 鲁晓翔, 张鹏, 等. 气质联用与电子鼻对不同包装货架期线椒检测分析[J]. 食品工业科技, 2015, 16: 348–355.  
Pan BY, Lu XX, Zhang P, et al. Detection analysis of line pepper with different package at different shelf line by GS-MS and electronic nose [J].



- Sci Technol Food Ind, 2015, 16: 348–355.
- [47] 郭婧敏, 王翎羽, 杨华, 等. 软包装水煮蔬菜工艺及品质研究[J]. 食品工业科技, 2015, 6: 296–300.  
Guo JM, Wang LY, Yang H, *et al.* Study on technology and quality of the water-cooking *osmunda japonica* thumb with soft pack [J]. Sci Technol Food Ind, 2015, 6: 296–300.
- [48] 张覃轶. 电子鼻: 传感器阵列、系统及应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.  
Zhang TY. Electronic nose: Sensor array, system and application research [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [49] 井云鹏. 气体传感器研究进展[J]. 硅谷, 2013, (11): 11–13.  
Jing YP. Research progress of gas sensors[J]. Silicon Valley, 2013, (11): 11–13.
- [50] 王彦闯. 农产品检测电子鼻的模式识别算法和软件编程的实现[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2010.  
Wang YC. Agricultural products detection pattern recognition algorithm of electronic nose and the realization of the software programming [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2010.
- [51] 应义斌, 韩东海. 农产品无损检测技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.  
Ying YB, Han DH. Nondestructive testing technology of agricultural products [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [52] 胡莹. 基于 ZigBee 技术的无线电子鼻研制[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.  
Hu Y. Development of wireless electronic nose based on the technology of ZigBee [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [53] 尤文坚, 唐仕云. 现代新型传感器在农产品储藏中的应用[J]. 农机化研究, 2012, (8): 240–244.  
You WJ, Tang SY. Application of the modern new sensors in the agricultural products storage [J]. J Agric Mech Res, 2012, (8): 240–244.

(责任编辑: 杨翠娜)

## 作者简介



贾文坤, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品安全仪器研发。  
E-mail: jiawenshen@163.com



潘立刚, 博士, 研究员, 主要研究方向为农产品质量安全。  
E-mail: panlg@nercita.org.cn