

# 电子鼻技术在肉类品质应用中快速分析初探

王亚雷<sup>1,2</sup>, 贾文坤<sup>1</sup>, 潘立刚<sup>1,2\*</sup>, 任东<sup>2</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. 三峡大学计算机与信息学院, 宜昌 443002)

**摘要:** 电子鼻技术是近年发展起来的一种新型仿生嗅觉检测技术, 因其具备快速、无损等优点被广泛应用于食品品质检测领域。电子鼻通常包括两部分: 硬件部分——多个性能彼此重叠的气体传感器; 软件部分——恰当的模式识别技术对采集信号的分析、处理。本文主要综述了近年来国内外电子鼻技术在肉类品质分析中的应用。首先阐述了电子鼻技术工作原理、数据处理方法, 随后重点讨论了电子鼻技术在肉类新鲜度评定、肉与肉制品品质区分、肉类有害成分监测、肉类掺假检测等4个方面的应用进展, 最后对电子鼻技术目前存在的问题及未来发展趋势进行了简要探讨。

**关键词:** 电子鼻; 肉类; 无损检测; 品质鉴定

## Application of electronic nose technology in the rapid assessment of meat quality

WANG Ya-Lei<sup>1,2</sup>, JIA Wen-Shen<sup>1</sup>, PAN Li-Gang<sup>1,2\*</sup>, REN Dong<sup>2</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. College of Computer and Information Technology, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**ABSTRACT:** Electronic nose is a kind of novel bionic olfactory detection technology developed in recent years, which has been widely applied for food quality testing due to its rapid, non-destructive advantages. In general, the electronic nose includes two parts: the hardware part—an array of gas sensors to obtain the signals of different smell; the software part—the appropriate pattern recognition technology for analyzing and processing the measured signals. This paper focused on the current development of electronic nose technology for the analysis of meat quality at home and abroad, briefly introduced the working principle and data processing of the electronic nose, and discussed the applications of electronic nose in predicting the meat freshness, testing the quality of meat, monitoring the harmful compounds in meat and detecting the adulterated meat. At last, the existing problems and the future development of the electronic nose were discussed briefly.

基金项目: 北京农业质量标准与检测技术研究中心开放课题项目(ZBZXKFKT201511)、北京市留学人员科技活动择优资助项目、农产品品质劣变在线探测技术与设备项目(2013BAD19B02)

**Fund:** Supported by the Open Project of Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing (ZBZXKFKT201511), Technology Foundation for Selected Overseas Chinese Scholar of Beijing City and the On-line Detection Technology and Equipment of Quality Deterioration of Agricultural Products (2013BAD19B02)

\*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, Professor, Ph.D., Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Science, Haidian District, Shuguang Garden Middle Road, No.9, Beijing 100097, China. E-mail: panlg@nrcita.org.cn

**KEY WORDS:** electronic nose; meat; non-destructive testing; quality identification

## 1 引言

肉类及其制品是人类获得蛋白质、维生素和矿物质等营养成分的重要来源之一,但在加工及贮藏过程中由于微生物、酶以及自身脂肪氧化等作用,肉与肉制品易发生腐败变质,在降低肉制品营养价值的同时还会产生有毒有害物质,影响食品安全。随着社会的进步和经济的发展,人们对肉及肉制品的摄入量及品质要求越来越高,对肉及肉制品品质评定、新鲜度检测及肉制品掺假等问题都需要一个方便快捷、重现性好的检测方法。目前,常用的实验室的化学方法因为设备昂贵、检测效率低而不能普及应用,感官评价方法主观性强、重复性差、个体差异大、没有统一标准,从多个方面影响分析结果,而电子鼻由于具有评价方法客观、重现性好、不易疲劳、操作简单、检测速度快等优点促使人们运用电子鼻技术对肉类品质及检测方法进行了广泛的研究<sup>[1,2]</sup>。

电子鼻技术是随着传感器技术、纳米、MEMS 等技术的发展而产生的一种高效、快速、无损、实时、绿色环保的无损检测技术,广泛应用于食品<sup>[3]</sup>、环境<sup>[4]</sup>、医疗<sup>[5]</sup>、有毒有害气体检测等领域<sup>[6]</sup>。这项技术在国外已经出现了商品化的电子鼻仪器,例如具有代表性的德国 Airsense 公司的 PEN3 电子鼻、法国 Alpha MOS 公司的 FOX 系列电子鼻,但是我国对这项技术的研究起步较晚,还处在实验室阶段,因此具有很广阔的研究意义。

## 2 电子鼻系统工作原理

电子鼻系统是一种仿生嗅觉系统,该系统包括气体传输/采样系统、传感器阵列、信号预处理、模式识别和气味表达五部分,当目标气体处于传感器中的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对应于人的嗅觉细胞。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、信号放大等操作如同人的嗅觉神经网络,然后采用合适的模式识别算法对处理后的数据进行分析就像人类的大脑。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,可以根据特征响应谱的不同范围来区分各种气体,实现目标气体的定性分析。此外,阵列化传感器具有高通量检测的优势,因此,将不同的敏感材料修饰于电极表面,制备对多种不同气体具有特异性响应的阵列化传感器是电子

鼻技术发展的一个趋势,有望实现对多种气体同时开展定性、定量分析<sup>[7-9]</sup>。

## 3 电子鼻系统数据处理分析

应用电子鼻系统对待测定样品进行检测时,需对采集到的数据进行分析处理,该过程主要包括两步:数据预处理及模式识别处理分析。

第一步是数据的预处理。该过程是通过信号调节和 AD 采样实现的,前者把气体传感器的响应转化为可测量的电信号,后者是将模拟信号转化为模式识别环节所需的数字信号,只有两者良好的配合才能充分发挥信号预处理的作用,常用的信号调节电路有:分压电路、直流电桥、反向放大器和五级式放大器等。AD 采样部分对应于生物鼻的嗅泡功能,是后继数据分析的关键所在,该子系统的主要作用是对阵列传感器的输出信号进行滤波、交换、特征提取,从而简化原始数据,提取有效数据,提高模式识别环节的效率和准确率。其中特征提取是获取有效数据的关键,即去除响应中的时间变量,取出响应曲线中有代表性的瞬态响应,常用的特征提取方法有:取平均值、稳定后的峰值、均方值等<sup>[10-13]</sup>。

第二步是模式识别处理。主要是指将第一步预处理后得到的有效数据再通过恰当的模式识别算法进行二次处理,并将检测结果进行输出。模式识别算法对电子鼻系统的识别与分类起很大作用,目前常用的识别算法分 2 类,分别为基于统计及人工神经网络的识别算法,比较常用的有 PCA、LDA、PLS、BP-ANN、SVM 等<sup>[14,15]</sup>。

## 4 电子鼻技术在肉类中的应用

肉类评定法有感官评定和理化分析这 2 种,感官评定法主观性强、重复性差,而理化分析法一般包括 TVBN 法、PH 值法、过氧化氢酶法、硫化氢检验法及气相色谱-质谱法等,这些传统的方法在分析肉类样品时,存在分析时间长、需对样品前处理及检测成本高等缺点,难以满足快速、无损、实时检测的要求<sup>[16]</sup>。

### 4.1 电子鼻技术在检测肉类新鲜度中的应用

肉的新鲜度会在储藏过程中随着时间的延长而下降,主要是因为是在储藏过程中微生物和酶的作用下,肉中蛋白质、脂肪和碳水化合物发生分解而腐败变质,生成了胺类等难闻的、挥发性气体。基于此,研究人员研发了可以特异性识别该气体电子鼻系统,从而可以实现对肉类新鲜度的评价<sup>[17]</sup>。

Tian 等<sup>[18]</sup>用金属氧化物气体传感器阵列组成的自制电子鼻对贮藏 5、10 和 15 °C 下的带鱼和猪肉的新鲜度进行了研究,以 TVB-N(挥发性盐基氮)和菌落总数作为对比

检测, 对数据运用 PCA 算法及其补偿方法进行分析, 结果表明电子鼻可以准确地分辨出带鱼和猪肉的不同货架期, 其准确率分别为 87.5% 和 91.7%。Li 等<sup>[19]</sup>用比色传感器阵列组成的自制电子鼻对猪肉新鲜度的快速无损测量技术进行研究, 运用 LDA 模型和 BPNN 模型对数据进行分析, 分析表明 BPNN 模型优于 LDA 模型且在训练集和预测集中正确率分别达到了 100% 和 97.5%。顾赛麒等<sup>[20]</sup>用 FOX4000 电子鼻对贮藏在不同温度下的冷冻猪肉的新鲜度进行研究, 对在不同温度条件下的实验数据进行 PCA、货架期模拟和拟合感官评分的偏最小二乘回归分析, 结果表明不同温度下和不同时间肉样挥发性差异显著 ( $r^2=0.99$ )。洪雪珍等<sup>[21]</sup>用 PEN2 电子鼻作为检测工具对贮藏在不同条件下不同时间的牛肉进行了研究, 再运用 PCA、LDA、BP、SLDA 和 GRNN 模型进行分析, 结果表明 SLDA 模型最优, 其判别准确率达到 96.19%。颜明月等<sup>[22]</sup>采用 PEN3 电子鼻对经不同臭氧水处理的罗非鱼鱼片进行检测, 通过传感器相关性和 Loading 分析, 对传感器阵列进行优化, 对获得的数据进行 PCA 结合 TVB-N、硫代巴比妥酸反应物(TBARS)值综合评价臭氧水处理对罗非鱼鱼片的新鲜度的影响, 结果表明利用电子鼻技术得到的贮藏品质区分结果与 TVB-N 值、TBARS 值 0 级动力学分析结果基本一致, 5 mg/L 臭氧水处理 10 min 能明显地减缓罗非鱼鱼片的新鲜度下降速率。

上述结果表明, 虽然不同的肉类采用的数据处理方法不同, 但是电子鼻技术在肉类新鲜度检测中的准确率均在 90% 以上, 证明电子鼻技术可用于肉类新鲜度的检测。

#### 4.2 电子鼻技术在检测肉及肉制品品质区分中的应用

由于原料、成分、处理方法的不同可导致同一种产品其品质也良莠不齐, 因此对肉品的区分很重要, 气味是一项重要的评定指标, 电子鼻可以很好的完成对气味的区分达到分级的目的。

王曼等<sup>[23]</sup>分别对免疫去势、手术去势和完全公猪原料猪肉进行电子鼻检测, 并采用主成分分析、线性判别分析和交互验证判别分析分别对电子鼻 15、30 和 60 s 响应值进行统计处理, 结果表明, 主成分分析效果不好, 采用 15 s 响应值时线性判别式分析的区分效果及聚类效果最好, 交互验证判别分析的总体正确率依次为 90.0%、83.3%, 说明电子鼻可以实现不同去势方法对原料猪肉区分和识别。辛松林等<sup>[24]</sup>利用电子鼻检测黑胡椒鸭胸肉调理产品在贮藏期的品质变化, 并结合感官指标、微生物指标和挥发性盐基氮指标, 对检测结果进行比较分析, 结果表明电子鼻分析结果和感官评价、微生物和挥发性盐基氮指标分析结果大体一致, 说明电子鼻可以作为一种快速、有效的检测手段应用于肉制品的品质鉴别中。Garcia 等<sup>[25]</sup>采用金属氧化物传感器阵列组成的电子鼻区分 4 种不同饲养方式的猪

肉制火腿, 通过 PCA 和概率神经网络分析, 发现电子鼻能够准确区分不同的火腿样品, 说明猪的不同养殖方式对其制成的火腿肉品质具有显著影响。孙天利等<sup>[26]</sup>用 PEN3 电子鼻对区分贮藏在不同温度下的牛肉贮藏时间进行研究, 牛肉新鲜度的检测指标为菌落总数、TVB-N、感官色泽和感官气味。对电子鼻获取的数据分别用 PCA 和 LDA 分析, 并用 PLS 分析结果进行预测, 分析结果表明这 2 种模型的预测值与实测值 TVB-N 值、菌落总数、感官色泽评分和感官气味评分的相关系数分别为 0.999、0.988、0.928 和 0.940, 说明电子鼻可用于区分牛肉的货架期。宋雪等<sup>[27]</sup>采用电子鼻及定量描述分析法(QDA)对不同等级与年份的金华、宣威火腿香气进行检测, 并将感官评定与电子鼻分析结果进行相关性分析, PCA 分析结果表明, 各火腿香气区分显著, 与感官评价结果存在一定的相关性, 采用软独立建模分析类法(SIMCA)分别建立火腿等级与产地鉴别模型, 结果表明, 宣威火腿等级鉴别模型和金华火腿产地鉴别模型区分效果较好, 拒绝率基本达到 100%。

上述研究结果表明, 不同肉及肉制品采用不同传感器和不同的分类方法在品质区分的检测中都得到了较好的实验结果, 说明电子鼻技术可以应用于肉及肉制品的品质区分。

#### 4.3 电子鼻技术在检测肉类有害成分的应用

肉类产品在储藏过程中随着时间的延长, 品质会发生劣变, 散发出相应的特征气体, 通过这些气体的检测, 达到快速分辨肉类是否存在有害成分的目的。

Wang 等<sup>[28]</sup>通过电子鼻监测了冷却肉在 4 °C 条件下存储 10 d 内活菌总数变化规律, 从而判断肉的新鲜度, 并采用主成分分析法分析电子鼻的检测结果, 采用 PLS 和 SVM 对电子鼻的响应信号和平板计数结果进行分析均获得较好的相关性, 验证了电子鼻在快速预测猪肉中菌落数的可行性。王丹凤等<sup>[29]</sup>采用电子鼻监测猪肉在不同温度条件下挥发性成分的气味变化, 并与其微生物数量变化相结合, 发现主成分分析可以区分不同贮藏时间的猪肉样品且电子鼻信号与细菌总数之间具有较好的线性相关关系, 可以实现猪肉中有害微生物的检测。以上研究结果表明, 电子鼻技术在肉类有害成分的检测方面, 理论上和实施中均具有可行性。

#### 4.4 电子鼻技术在检测肉类掺假中的应用

在肉品生产和加工过程中, 经常会出现以低价值肉品冒充高价值肉品, 或者是将低价值成分添加到高价值的肉品中的现象, 不同肉类挥发性成分组成有所不同。

Tian 等<sup>[30]</sup>用德国 Airsense 公司的 PEN2 电子鼻对羊肉中掺杂的猪肉进行探测并用传统检测方法(PH 和色彩评估)进行分析结果对比, 分别运用 CDA、PLS、MLR 和 BPNN 对数据进行分析, 分析结果表明 BPNN 明显优于其他分析

方法其准确率为 97%。李芳等<sup>[31]</sup>用电子鼻探究加热温度与鸡肉、鸭肉、和鹅肉挥发性物质之间的关系并建立识别模型,采用 LDA 和 DFA 分析未加热, 80、100、120 和 150 °C 条件下的样品,结果表明,电子鼻能够区分不同种类以及不同加热温度的禽类肉,模型的验证结果准确率通常在 95% 以上。贾洪锋等<sup>[32]</sup>利用电子鼻分别对牦牛肉、牛肉和猪肉样品进行分析以探究电子鼻对肉类掺假识别的可行性,对获取的数据进行了 PCA、DFA 和 PLS 分析,结果表明不同肉有不同的特征响应图谱,电子鼻响应信号和猪肉馅掺入比例之间相关性达到 0.976,证明电子鼻可用于肉类的鉴别。Stantos 等<sup>[33]</sup>利用电子鼻技术对利比亚火腿中已确定的几十种风味物质中的一些特性物质进行分析,并采用 PCA 和人工神经网络方法分析数据,结果表明电子鼻可以区分利比亚火腿的原料肉种类和成熟时间。Nurjuliana 等<sup>[34]</sup>采用电子鼻检测清真香肠中是否掺有猪肉,试验中检测猪肉、牛肉、羊肉、鸡肉为原料的香肠并从中挑出掺有猪肉的香肠,并将其检测结果与气相色谱检测结果比较,结果表明电子鼻可以检测出掺有猪肉的香肠。田晓静等<sup>[35]</sup>采用电子鼻定性和定量分析混入鸡肉中的掺假羊肉糜,实验结果发现采用 PCA 时,掺入鸡肉的比例随 PCA 降低而增大,但相邻比例有重叠现象,难以有效区分,采用判别分析时,混入不同比例的鸡肉的羊肉糜样品能有效区分开,采用主成分回归分析和偏最小二乘回归分析建立的定量预测模型 ( $r^2 > 0.95$ ),表明这种方法可以有效预测混入的鸡肉的比例,证明电子鼻在混入鸡肉的掺假羊肉鉴别中具有可行性。

以上研究结果表明,电子鼻技术已经在肉类掺假的检测中得到了广泛研究,检测准确率较高,说明电子鼻技术在检测肉类掺假方面具有广阔的应用前景。

## 5 电子鼻技术未来的发展趋势

电子鼻技术对检测肉类具有快速、无损的特点,但该技术仍然处在发展阶段,运用环境并不成熟,其检测灵敏度、识别率、稳定性等都还有待提高,其主要原因是电子鼻的硬件结构如敏感材料、传感器工艺,如传感器阵列专属性及稳定性差,易受温度、湿度、振动等环境影响,数据处理方法如数据预处理、识别算法等,多维的信息综合分析等与仿生特性存在较大的差距<sup>[36]</sup>。

针对以上出现的问题,电子鼻技术未来的发展趋势可以从硬件水平、软件优化、多信息融合和信息网络化 4 个方面加以解决,硬件方面如新型气敏材料、MEMS 工艺、纳米技术、电子鼻系统网络化等可以提高气体传感器的性能、电子鼻系统的集成度和复杂信息处理能力;软件方面如新的特征提取算法和可以完成复杂映射的人工神经网络及模糊理论等模拟人类思维的信号处理方法<sup>[37]</sup>;多信息融合方面如电子鼻、电子舌<sup>[38-40]</sup>、计算机视觉<sup>[41,42]</sup>、气相色谱质谱联用等<sup>[43,44]</sup>利用信息的互补性提高待测信息的可靠

性及精度;信息化如基于 GPRS 的远程检测无线电子鼻系统<sup>[45,46]</sup>、基于 ZigBee 技术的无线电子鼻系统<sup>[47,48]</sup>、生产线上连续检测<sup>[49]</sup>、监控室内环境气体<sup>[50]</sup>、监测物流中的农产品质量变化<sup>[51]</sup>等。

肉类及肉制品生产、消费量大,且存在易腐败、变质、掺假等问题。电子鼻作为一种新兴的仿生技术,成功用于肉类及肉制品品质的分析,有望将来替代人类的感官分析,从而为肉类及肉制品安全预警体系的建立提供了一种快速、准确的新方法。

## 参考文献

- 王智凝, 郑丽敏, 方雄武, 等. 电子鼻传感器阵列优化对猪肉新鲜度法的检测[J]. 肉类研究, 2015, 29(5): 27-30.  
Wang ZZ, Zheng LM, Fang XW, *et al.* Pork freshness detection using optimized electronic nose sensor array [J]. Meat Res, 2015, 29(5): 27-30.
- 吴升刚, 张玉华, 孟一, 等. 鸡肉品质劣变的电子鼻分析[J]. 食品工业科技, 2015, 36(14): 53-56.  
Wu SG, Zhang YH, Meng Y, *et al.* Analysis of chicken quality deterioration by electronic nose [J]. Food Sci Technol Int, 2015, 36(14): 53-56.
- Shi ZB, Tong YY, Chen DH, *et al.* Identification of beef freshness with electronic nose [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2009, 40(11): 184-188.
- 张良谊, 温丽菁, 周峰, 等. 用于测定空气中甲醛的电子鼻[J]. 高等学校化学学报, 2003, 24(8): 1381-1384.  
Zhang LY, Wen LJ, Zhou F, *et al.* Electronic nose for the determination of formaldehyde in air [J]. Chem J Chin Univ, 2003, 24(8): 184-188.
- Bady R, Cabezas M, Castro E, *et al.* Quality control of medicinal plants with an electronic nose [J]. Sens Actuat B-Chem, 2005, 106 (1): 24-28.
- 张红梅. 基于气体传感器阵列的几种农产品品质检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.  
Zhang HM. Quality detection of several kinds of agricultural products based on gas sensor array [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- 殷勇. 嗅觉模拟技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.  
Yin Y. The sensor of smell simulation technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- 蔡贝贝. 气体传感器阵列模式识别算法及硬件实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.  
Cai BB. Gas sensor array pattern recognition algorithms and hardware implementation [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- Loutfi A, Coradeschi S, Mani GK, *et al.* Electronic noses for food quality: a review [J]. J Food Eng, 2015, 144: 103-111.
- 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.
- 李华曜. 电子鼻硬件系统及其评价[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.  
Li HY. Research and evaluation on the hardware of electronic nose [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008.
- 邹小波, 赵杰文. 电子鼻数据的预处理技术与应用[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 83-86.  
Zou XB, Zhao JW. Electronic nose preprocessing and its application [J].

- Trans Chin Soc Agric Mach, 2006, 37(5): 83–86.
- [13] 陈静, 孙宇, 沈丽. 电子鼻在农产品品质检测中的应用进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(3): 364–366.  
Chen J, Sun Y, Shen L. Application of electronic nose in detecting the quality of agriculture products [J]. J Anhui Agric Sci, 2015, 43(3): 364–366.
- [14] 高晓勤, 沈小林. 电子鼻模式识别算法的研究与实现[J]. 科技创新, 2015, 132(2): 173–182.  
Gao XQ, Shen XL. Research and implementation of electronic nose pattern recognition algorithm [J]. Sci Technol Innov, 2015, 132(2): 173–182.
- [15] 石志标. 智能仿生鼻及其应用研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2004.  
Shi ZB. Study on intelligent bionic nose system and its application [D]. Jilin: Jilin University, 2004.
- [16] 常志勇. 基于仿生电子鼻的肉品新鲜度多信息融合识别技术[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.  
Chang ZY. Study on the multi-intelligence fusion technology for the meat freshness identification based on bionic nose [D]. Jilin: Jilin University, 2013.
- [17] 雷力. 肉的新鲜度检测方法的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2011.  
Lei L. Study on detection methods freshness of meat [D]. Jilin: Jilin University, 2011.
- [18] Tian XY, Cai Q, Zhang YM. Rapid classification of hairtail fish and pork freshness using an electronic nose based on the PCA method [J]. Sensors, 2012, 12(1): 260–277.
- [19] Li HH, Chen QS, Zhao JW, *et al.* Non-destructive evaluation of pork freshness using a portable electronic nose (e-nose) based on a colorimetric sensor array [J]. Anal Methods, 2014, 6(16): 6271–6277.
- [20] 顾赛麒, 王锡昌, 刘源, 等. 电子鼻检测不同贮藏温度下猪肉新鲜度变化[J]. 食品科学, 2010, 31(6): 172–176.  
Gu SQ, Wang XC, Liu Y, *et al.* Electronic nose for measurement of freshness change of chilled pork during storage at different temperatures [J]. Food Sci Technol, 2010, 31(6): 172–176.
- [21] 洪雪珍, 韦真博, 海掙, 等. 基于电子鼻和神经网络的牛肉新鲜度的检测[J]. 现代食品科技, 2014, 30(4): 279–285.  
Hong XZ, Wei ZB, Hai Z, *et al.* Application of electronic nose and neural network in beef freshness [J]. Mod Food Sci Technol, 2014, 30(4): 279–285.
- [22] 颜明月, 陆玉芹, 陈德慰. 电子鼻技术研究臭氧水处理对罗非鱼鱼片的新鲜度的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(20): 265–269.  
Yan MY, Lu YQ, Chen DW. Application of electronic nose in freshness evaluation of tilapia fillets as affected by ozone treatment [J]. Food Sci Technol, 2015, 36(20): 265–269.
- [23] 王曼, 王振宇, 马长伟. 基于电子鼻的不同去势猪肉风味品质评价[J]. 肉类研究, 2009, 23(12): 45–49.  
Wang M, Wang ZY, Ma CW. Evaluation of aroma quality of pork from different castrated pigs using an electronic nose [J]. Meat Res, 2009, 23(12): 45–49.
- [24] 辛松林, 李诚, 肖岚, 等. 基于电子鼻的黑胡椒鸭胸肉调理产品品质评价[J]. 食品科学, 2012, 33(08): 191–194.  
Xin SL, Li C, Xiao L, *et al.* Quality evaluation of black pepper duck breast by electronic nose [J]. Food Sci, 2012, 33(08): 191–194.
- [25] Garcia M, Aleixandre M, Gutierrez J, *et al.* Electronic nose for ham discrimination [J]. Sens Actuat B-Chem, 2006, 114(1): 418–422.
- [26] 孙天利, 岳喜庆, 张平, 等. 利用电子鼻技术预测冰温贮藏牛肉的新鲜度变化[J]. 食品与发酵工业, 2014, 4(40): 185–189.  
Sun TL, Yue XQ, Zhang P, *et al.* The Electronic nose usage in predicting the freshness of beef at freezing point storage [J]. Food Ferm Ind, 2014, 4(40): 185–189.
- [27] 宋雪, 高韶婷, 杭梦茜, 等. 基于电子鼻的金华和宣威火腿产地鉴别与品级评定[J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 114–118.  
Song X, Gao ST, Hang MX, *et al.* Application of electronic nose on origin identification and quality grade evaluation of Jinhua and Xuanwei ham [J]. Food Mach, 2015, 31(2): 114–118.
- [28] Wang DF, Wang XC, Liu TA, *et al.* Prediction of total viable counts on chilled pork using an electronic nose combined with support vector machine [J]. Meat Sci, 2012, 90(2): 373–377.
- [29] 王丹凤, 王锡昌, 刘源, 等. 电子鼻分析猪肉中负载的微生物数量研究[J]. 食品科学, 2010, 31(6): 148–150.  
Wang DF, Wang XC, Liu Y, *et al.* Estimation of total bacterial count in pork using electronic nose [J]. Food Sci, 2010, 31(6): 148–150.
- [30] Tian XJ, Wang J, Cui SQ. Analysis of pork adulteration in minced mutton using electronic nose of metal oxide sensors [J]. J Food Eng, 2013, 119(4): 744–749.
- [31] 李芳, 孙静, 黄沁怡, 等. 禽肉风味指纹和识别模型的建立[J]. 中国食品学报, 2014, 14(2): 255–260.  
Li F, Sun J, Huang QY, *et al.* Establish poultry meat detection and identification model with the electronic nose [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2014, 14(2): 255–260.
- [32] 贾洪锋, 卢一, 何江红, 等. 电子鼻在牦牛肉和牛肉猪肉识别中的应用[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 358–363.  
Ji HF, Lu Y, He JH, *et al.* Recognition of yak meat, beef and pork by electronic nose [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2011, 27(5): 358–363.
- [33] Santos JP, Garcia M, Aleixandre M, *et al.* Electronic nose for the identification of pig feeding and ripening time in iberian hams [J]. Meat Sci, 2004, 66(3): 727–732.
- [34] Nurjuliana M, Cheman YB, Mathashim D, *et al.* Rapid identification of pork for halal authentication using the electronic nose and gas chromatography mass spectrometer with headspace analyzer [J]. Meat Sci, 2011, 88(4): 638–644.
- [35] 田晓静, 王俊, 崔绍庆. 电子鼻快速检测区分羊肉中的掺杂鸡肉[J]. 现代食品科技, 2013, 29(12): 2997–3001.  
Tian XJ, Wang J, Cui SQ. Fast discriminating of chicken adulteration in minced mutton by electronic nose [J]. Mod Food Sci Technol, 2013, 29(12): 2997–3001.
- [36] 孙钦秀, 董福家, 陈倩, 等. 应用电子鼻技术检测肉与肉品质的风味和品质[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(12): 123–126.  
Sun QX, Dong FJ, Chen Q, *et al.* Application of electronic nose technique detect the flavor and quality of meat and meat products [J]. Food Res Dev, 2015, 36(12): 123–126.
- [37] 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. Pattern recognition algorithms in the test of agricultural products used e-nose [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2010.
- [38] 吴浩, 刘源, 顾赛麒, 等. 电子鼻、电子舌分析和感官评价在鱼糜种类区分中的应用[J]. 食品工业科技, 2013, 34(18): 80–83.

- Wu H, Liu Y, Gu SQ, *et al.* Category distinction of different surimis by electronic nose, electronic tongue and sensory evaluation [J]. *Food Sci Technol Int*, 2013, 34(18): 80–83.
- [39] 宁珂. 电子鼻与电子舌融合技术及其应用[D]. 吉林: 东北电力大学, 2014.
- Ning K. Fusion technique of electronic nose and electronic tongue and its application [D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2014.
- [40] 田晓静, 王俊, 裘姗姗, 等. 电子鼻和电子舌信号联用方法分析及其在食品品质检测中的应用[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(1): 386–389.
- Tian XJ, Wang J, Qiu SS, *et al.* Review of data fusion methods for electronic nose and electronic tongue signal and its application in food quality detection [J]. *Food Sci Technol Int*, 2015, 36(1): 386–389.
- [41] 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.
- [42] Huang L, Zhao JW, Chen QS, *et al.* Nondestructive measurement of total volatile basic nitrogen(TVB-N) in pork meat by integrating near infrared spectroscopy, computer vision and electronic nose techniques [J]. *Food Chem*, 2014, 145: 228–236.
- [43] Tian HX, Li FH, Qin L, *et al.* Quality evaluation of beef seasonings using gas chromatography-mass spectrometry and electronic nose: correlation with sensory attributes and classification according to grade level [J]. *Food Anal Meth*, 2015, 8(6): 1522–1534.
- [44] 荣建华, 熊诗, 张亮子, 等. 基于电子鼻和 SPME-GC-MS 联用分析脆肉鲩鱼肉的挥发性风味成分[J]. *食品科学*, 2015, 36(10): 124–128.
- Rong JH, Xiong S, Zhang LZ, *et al.* Analysis of volatile flavor components in crisp grass carp muscle by electronic nose and SPME-GC-MS [J]. *Food Sci Technol*, 2015, 36(10): 124–128.
- [45] 陈新伟, 王俊, 沈睿谦. 基于 GPRS 的远程检测无线电子鼻系统[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 238–245.
- Chen XW, Wang J, Shen RQ. Wireless electronic nose based on GPRS and its application on mangos [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2015, 46(4): 238–245.
- [46] Pan LL, Yang SX. An electronic nose network system for online monitoring of livestock farm odors: IEEE-ASME transactions on mechatronics [J]. *IEEE-Asme Trans Mech*, 2009, 14(3): 371–376.
- [47] 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. The develop of wireless electronic nose based on Zigbee [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [48] Eibarri N, Llobet E, Eibari N. Application of a portable electronic nose system to assess the freshness of moroccansardines [J]. *Mat Sci Eng A*, 2008, 28(5–6): 666–670.
- [49] Hansen T, Petersen MA, Byrne DV. Sensory based quality control utilizing an electronic nose and GC-MS analyses to predictend-product quality from raw materials [J]. *Food Control*, 2004, 17: 5–13.
- [50] Canhoto O, Pinzari F, Fanelli C, *et al.* Application of electronic nose technology for the detection of fungal contamination in library paper [J]. *Int Biodeter Biodegr*. 2004, 54: 303–309.
- [51] 刘寿春, 赵春江, 杨信廷, 等. 电子鼻系统在物流农产品质量安全判别与控制研究进展[J]. *食品科技*, 2015, 40(01): 306–309.
- Liu SC, Zhao CJ, Yang XT, *et al.* Progress of electronic nose system on agricultural products safety and quality identification and control in the logistics [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2015, 40(01): 306–309.

(责任编辑: 金延秋)

## 作者简介



王亚雷, 硕士, 主要研究方向为物联网技术与应用。

E-mail: wangyalei799@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@nrcita.org.cn