

基于人工神经网络算法的电子鼻系统在食品无损检测中的应用

ANN-based electronic nose system in the application of food nondestructive testing

万赐晖^{1,2,3,4} 贾文坤^{2,3,4} 王纪华^{1,2,3,4} 吴楠京^{2,3,4}

WAN Ci-hui^{1,2,3,4} JIA Wen-shen^{2,3,4} WANG Ji-hua^{1,2,3,4} WU Nan-jing^{2,3,4}

(1. 三峡大学计算机与信息学院,湖北 宜昌 443002; 2. 北京农业质量标准与检测技术研究中心,北京 100097;

3. 农业部农产品质量安全风险评估实验室(北京),北京 100097; 4. 北京信息科技大学自动化学院,北京 100192)

(1. College of Computer and Information Technology, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

2. Department of Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Science, Beijing 100097, China; 3. Department of Risk Assessment Lab for Agro-products(Beijing), Ministry of Agriculture.P.R.China, Beijing 100097, China; 4. College of Automation,

Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

摘要:电子鼻技术是一门新兴的气体分析技术,因其具有响应速度快、检测时间短等优点而被广泛应用于医疗诊断、环境监测、农副产品与食品的检测中。文章首先介绍了几种常用神经网络算法的,并比较了不同算法的优缺点,然后重点介绍了基于人工神经网络算法的电子鼻系统在水果检测鉴别、肉制品检测、茶叶品质鉴定、乳制品、酒类等食品检测方面的应用,最后对电子鼻技术、ANN算法目前存在问题及发展趋势进行了阐述。

关键词:电子鼻;神经网络算法;应用;无损检测

Abstract: Electronic nose technique is a kind of emerging technology in gas analysis and has been widely applied in agricultural products and food testing, due to the advantages of its rapid response in a short time. In this paper, a number of ANN algorithm were illuminated, and the applications of ANN-based electronic nose system in destructive testing of fruit, meal, tea, milk and wine etc. were reviewed. Finally, the shortcomings of electronic nose technique and ANN algorithm and the development trend of them were also discussed.

Keywords: electronic nose; neural network algorithm; application; nondestructive testing

从 20 世纪 50 年代电子鼻的概念被提出^[1],发展到当今能实现多种用途的电子鼻,在这短短几十年的时间里,电子鼻展现出了良好的市场前景。其已被应用于医疗诊断^[2]、环境监测^[3]、农产品检测^[4]以及食品检测^[5-6]等多个领域。如商品化电子鼻检测仪器,智能鼻 Fox4000、PEN3 型电子鼻、香味扫描仪 Aromascan 等。这些电子鼻仪器已经被用于食品、农作物等的品质检测中。

电子鼻模拟生物嗅觉^[7-8],其系统主要由气敏传感器阵列、信号预处理单元和模式识别单元三部分组成^[9]。气敏传感器阵列位于进气室,采集气体信号^[10]。传感器阵列将采集到的信号传输给信号与处理单元。模式识别单元运用指定的模式识别算法对预处理过的信号进行处理,以实现对气体信号的定性或定量分析^[11]。

电子鼻系统的工作流程见图 1。在电子鼻系统中,模式识别算法是核心部分,目前被广泛应用的模式识别算法主要有两大类^[12]:一类是基于统计理论的线性分类算法,如主成分分析(PCA)、线性判别分析(LDA)、支持向量机(SVM)等;另一类基于神经网络的非线性算法(ANN)。线性分类算法因其模型简单而被广泛应用^[13],虽然抗干扰能力差;相比较之下,神经网络算法则具有初步的自适应与自组织能力,对



图 1 电子鼻系统工作流程

Figure 1 The working process of electronic nose

基金项目:北京市农林科学院青年基金(编号:QNJJ201630)

作者简介:万赐晖,男,三峡大学在读硕士研究生。

通讯作者:王纪华(1958—),男,北京农业质量标准与检测技术研究中心研究员,博士。E-mail: jiaws@brcast.org.cn

收稿日期:2016-09-18

噪声的抗干扰能力强、在一定环境下预测的准确度相对较高等优点,因此神经网络算法目前被更为广泛地应用^[14-15]。但是,采用何种模式识别算法对测定信号进行处理可以得到最准确的结果仍存在争议,也成为科研工作者争论的焦点。

本文介绍并比较了基于不同人工神经网络算法的电子鼻系统在水果、肉制品、茶叶、乳制品、酒类等食品检测方面的应用,并对目前基于 ANN 算法的电子鼻技术未来发展趋势进行了展望。

1 神经网络算法

1.1 神经网络算法简介

神经网络算法模拟生物神经网络,起源于脑神经元学说,是一类模式匹配算法,用于解决分类和回归问题^[16]。神经网络算法是机器学习的一个庞大分支,有几百种不同的算法。例如:模糊神经网络、广义回归网络、反向传播人工神经网络、概率神经网络等。大量结构简单的神经元组合在一起构成人工神经网络,其可以对人脑的一些基本功能进行模拟。人工神经网络算法不按给定步骤执行运算,而是不断地适应、调整,最后完成某种运算或识别。目前已有不少科研人员^[17-18]将神经网络算法应用到了电子鼻系统中。

1.2 常用的神经网络算法

1.2.1 BP神经网络算法 BP神经网络(BPNN),是一种误差反向传播算法的学习过程,这个过程由信息的正向传播和误差的反向传播组成。输出层的直接前导层的误差由输出后的误差来估计,并以此计算更前一层层的误差,如此层层递进,最后判断网络误差是否满足要求。

1.2.2 广义回归神经网络 广义回归神经网络(GRNN)是径向基函数神经网络的一种特殊形式,它的网络结构相对简单,除了输入和输出层外,一般只有两个隐藏层,模式层和求和层。而模式中隐藏单元的个数,与训练样本的个数是相同的,当样本通过隐藏层的同时,它的训练也已经完成,具有训练时间少,计算成本低和易优化的特点。同时,GRNN的最后结果是全局收敛的而非局部收敛。

1.2.3 概率神经网络 概率神经网络(PNN)常用于模式分类。它在分类功能上与最优 Bayes 分类器等价,是基于统计原理的神经网络模型。其实质是基于贝叶斯最小风险准则发展而来的一种并行算法,同时是完全前向的计算过程而不像传统的多层前向网络进行反向计算。它的优点是训练时间短、不易产生局部最优,而且它的分类正确率较高。在有足够多的训练数据条件下,无论多复杂的问题,都可以保证获得贝叶斯准则下的最优解。

1.2.4 模糊神经网络 模糊神经网络(FNN)将模糊系统和神经网络互补结合,将逻辑推理、语言计算、非线性动力学集于一体,具有强大的学习和信息处理功能。在模糊神经网络中,神经网络的输入、输出节点用来表示模糊系统的输入、输出信号,神经网络的隐含节点用来表示隶属函数和模糊规则,利用神经网络的并行处理能力使得模糊系统的推理能力大大提高。

不同的神经网络算法优劣不同,其具体比较见表 1。

表 1 常用神经网络算法性能比较

Table 1 Commonly used neural network algorithm

算法	特点	缺点
BP 神经网络算法	具有非线性映射能力,适合于求解内部机制复杂的问题,其容错能力和泛化能力使得全局训练结果不易出现较大错误,能将学习成果应用于新知识	收敛速度较慢,具有局部极小化和样本依赖性的问题
广义回归神经网络	网络结构相对简单,训练简单,网络计算结果具有全局收敛性。适用于样本数据较少的场景	训练样本多时会导致网络结构过于庞大和冗余,影响效率。无法满足动态建模过程中系统模型更新的要求
概率神经网络	训练快速,无论分类问题多么复杂,只要有足够多的训练数据,就可以保证获得贝叶斯准则下的最优解	需要花费较多的时间来计算分类,网络拓扑结构复杂性和样本数成正比,易发生“维数灾难”
模糊神经网络	网络中各节点和参数都具有明显的物理意义,收敛后的网络能满足系统要求的输入输出关系,具有强大的自学习能力和控制效果	建立模糊规则会带来一些冗余规则,导致从输入到输出较为耗时,影响整体网络的性能和效率

2 神经网络算法在电子鼻上的应用

2.1 水果及果制品检测

水果中含有丰富的维生素、水分和膳食纤维等,对人的身体有很多的益处。但是,病变腐败的水果却会给人带来不可估量的危害,因此,需要一种快速的检测方法对水果进行检测^[19]。水果的芳香物质是影响人们购买的主要因素,也是对其品质进行判定的重要依据^[20]。因此,可以用电子鼻对其进行检测从而判定水果质量^[21]。

李莹等^[22]用 PEN3 型电子鼻对富士苹果的贮藏时间进行检测,检测不同贮藏时间苹果的硬度、可滴定酸度和可溶性固性物。分别用 PLS 和 BPNN 方法建模,结果显示,PLS 法预测的相关系数为 0.90,而 BPNN 法预测的相关系数为 0.93,预测效果好于 PLS 模型。证明了用电子鼻对苹果进行贮藏时间检测是可行的,且采用 BPNN 建模能提高预测的正确率。为了比较 BPNN 算法与常规线性算法结合使用后的效果,王宇菲等^[23]用自制电子鼻对热带水果进行实时检测,判断其在仓储、运输中出现的品质改变问题。使用 PCA 和 LDA 进行数据降维,并结合 BP 神经网络算法进行数据分析,结果显示,用 LDA + BP 算法时系统判别准确率可达 100%。结果说明,用电子鼻对热带水果的品质检测是可行的,且用 LDA 算法降维,BPNN 算法建模得到的准确率很高。为了检测应用 BPNN 算法对水果检测的准确率,Zhang Hong-mei 等^[24]采用两种品牌共 8 个 MOS 型传感器自制电子鼻,用以对桃进行检测。使用了多元线性回归(MLR)、二次多项式逐步回归(QPST)和 BPNN 3 种方法建模对桃的糖

度和 pH 进行预测。在统计分析时将传感器收集的信号和质量参数结合分析,采用 PCA 和 LDA 的方法提取主成份。结果显示,MLR 模型的相关系数只有 0.8,而 QPST 和 BPNN 方法建立的模型相关系数能达到 0.9。结果说明,电子鼻有潜力成为一种可靠的工具用于检测桃的品质,且使用 BPNN 算法建模得到的正确率较高。由此说明,电子鼻系统应用 BPNN 算法对水果进行检测可得到较高的准确率。

Z. Haddi 等^[25]用 5 种 MOS 型传感器自制电子鼻对多种果汁进行检测,用 PCA 算法建模检测后发现,有几种果汁不能被准确地区分,而使用 FNN 算法建模检测,能 100%地鉴别所有不同的果汁。证明了用电子鼻鉴别不同品种的果汁是可行的,且使用 FNN 算法建模比使用 PCA 算法建模更优。

由此可知,用电子鼻对水果进行检测是可行的,不同算法对于不同水果之间体现了较大适用性差异,选择合适的算法可以使其检测准确率得到提高。

2.2 肉制品检测

随着人们对肉制品的需要越来越多,市场上出现的肉制品越来越参差不齐。肉制品保存不当极易造成腐败变质,对人体造成危害。传统的肉制品检测方法^[26]已经不能满足市场需求。因此,用电子鼻进行快速无损检测意义重大^[27]。目前在肉制品新鲜度检测、肉制品品质的判定和肉品掺假检测等方面以得到广泛应用^[28-29]。

洪雪珍等^[30]用 PEN2 型电子鼻对不同冷藏牛肉的贮藏天数进行检测,运用主成分分析和线性判别分析对其新鲜度进行检测,结果表明,采用此两种方法,对贮藏时间 0~5 d 的牛肉无法很好地鉴别。而采用 BPNN 和 GRNN 建立的模型误差较小,能很好地区分不同贮藏天数的牛肉。且 GRNN 对冷藏时间、挥发性盐基氮、微生物总数的预测效果均十分理想。证明用电子鼻对不用贮藏天数的牛肉进行鉴别完全是可行的,且使用 BPNN 和 GRNN 建模的效果良好,优于 PCA 和 LDA。

Garcia 等^[31]使用薄膜传感器制作电子鼻对不同品质的火腿进行区分,采用 PCA 进行特征提取,PNN 进行识别,最后的识别结果能达到 100%,完全区分不同品质的火腿。证明采用 PNN 建模的电子鼻系统能很好地区别不同品质的火腿。

Li Huan-huan 等^[32]采用可视传感器阵列对猪肉的新鲜度进行评价,用 LDA 和 BPNN 分别建模,BPNN 的最佳识别率能达到 100%,而 LDA 的最佳识别率为 97.5%。结果说明用电子鼻来对猪肉新鲜度进行实时检测是可行的,且 BP 神经网络算法的性能优于线性判别分析。与此同时,洪雪珍等^[33]用 PEN2 型电子鼻对猪肉储藏时间进行快速检测,用 BP 神经网络算法对猪肉储藏时间进行预测时,训练集的准确率达到 94.17%,预测集的准确率达到 93.75%,此结果说明用电子鼻区分新鲜度不同的猪肉是可行的,且 BP 神经网络建立的模型预测效果良好。

由此可见,用电子鼻对肉和肉制品进行不同贮藏天数的鉴别完全可行,通过比较不难发现,使用神经网络算法建模取得的效果良好,优于 PCA 和 LDA 算法。

2.3 茶叶检测

长久以来,人们用感官对茶叶进行评定,评定过程中主

观因素太多,评定结果难以准确。因此,急需一种能快速而且准确的检测方法^[34]。而电子鼻恰好可以满足这些需求且无损待检测样品^[35]。

Ritaban Duttaa 等^[36]最早用 MOS 型传感器自制电子鼻对 5 种不同工艺加工的红茶进行电子鼻检测,采用 PNN 和径向基函数(RBF)神经网络对数据进行分类和预测。这两种神经网络算法都能区分出不同加工的红茶,其中 PNN 正确率为 94%,RBF 网络的正确率为 100%。充分说明用电子鼻可以代替传统工艺对茶叶进行评价且使用神经网络算法正确率较高。为了验证其他神经网络算法的准确率,傅均等^[37]用 8 个 MOS 型传感器自制的电子鼻对 5 种品牌的绿茶进行检测,采用 K Ⅲ嗅觉神经网络,发现 K Ⅲ网络这种输入驱动联想记忆分类器对学习次数要求很低,经过 4~7 次训练,K Ⅲ网络对 5 种绿茶的识别率平均值都能达到 97%以上。为了比较使用 PCA 算法特征提取后神经网络算法建模的模型准确率,Yu Hui-chun 等^[38]对 5 种不同品牌的绿茶用 PEN2 型电子鼻进行检测,使用 PCA 进行特征提取,然后使用 BPNN 和 PNN 算法进行数据分析,结果显示,两种算法的识别率分别达到 100%和 98.7%,此结果表明使用神经网络算法进行识别的电子鼻能很好地区分出不同的茶叶且使用神经网络算法建模效果良好。

张红梅等^[39]使用 PEN2 型电子鼻对茶叶中茶多酚的含量进行快速检测,分别用多元线性回归、二次多项式逐步回归分析和 BP 神经网络建立预测模型,结果表明,3 种模型茶多酚含量预测值与实测值之间的相关系数分别为 0.86、0.90 和 0.92。结果说明,使用电子鼻对茶叶茶多酚含量的检测是可行的,且采用 BP 神经网络算法得到的准确率最高。陈哲等^[40]用 12 个 MOS 传感器自制电子鼻对碧螺春茶叶品质等级进行检测。对比了 K 最临近(KNN)算法和 BPNN 算法来区分不同等级的茶叶,提取了茶水和茶底的特征融合信息。结果显示,KNN 模型的判别率为 83.33%,BPNN 模型对茶叶样本判别率则达到了 100%。结果表明,采用电子鼻收集信号再用 BPNN 模型进行分析,能达到预期的效果。证明电子鼻对茶叶品质检测是可行的。

由此可见,电子鼻可以应用于茶叶检测的多个方面,由上述试验结果不难看出,使用神经网络算法建模对茶叶检测,能取得较好的试验效果,得到的结果更为准确。

2.4 乳制品检测

乳制品已经是日常生活中不可或缺的一部分,它不但是提供钙元素的好食品,而且含大量的蛋白质、维生素和矿物质,对人的身体健康十分有益。但乳制品的保质期普遍较短,新鲜的乳制品往往只有几天的保存时间,且在贮藏期间乳制品含有的挥发性成分每天都在发生变化。所以,采用电子鼻系统对乳制品进行快速、准确的测定,从而保证乳制品的质量意义重大^[41]。

张虹艳等^[42]使用 PEN3 型电子鼻,采用 4 层 BP 神经网络进行模式识别。对室温及冷藏条件下不同贮藏时间羊奶用电子鼻进行检测,并与 LM-BP 神经网络方法和遗传算法优化的神经网络(GANN)方法进行对比。结果表明 LM-BP 神经网络方法的判别率为 86.67%,遗传优化神经网络的判

别率为94.44%，4层神经网络的判别率为98.89%。由试验结果可以看出，多一层隐藏层的神经网络，对信号的处理能力更强，使得正确率更高。除此之外，张虹艳等^[43]还采用了BP神经网络和线性判别分析对羊奶储存时间进行鉴别，结果表明BP神经网络能区分不同储存时间的羊奶，说明用电子鼻进行羊奶检测是可行的。

肖涛等^[44]采用MOS传感器自制电子鼻对百利包、利乐枕和利乐包3种包装方式的纯牛奶用电子鼻进行检测，分别使用了Fisher判别分析(FDA)和BPNN，结果表明人工神经网络模式识别能够识别出不同质量的纯牛奶，并根据此判断不同的包装方式。姜天纬等^[45]对多种品牌、不同新鲜程度的牛奶进行检测，并对比了PCA算法的检测结果。结果表明，PCA更适用于广普操作，而ANN则更适用于高精度要求的针对性操作，其自适应调整的特性可以减少牛奶中其他成分来带的干扰。

由此可见，电子鼻对乳制品的检测是可行的，将神经网络算法应用到乳制品中，可以较为准确的检测出不同储藏时间和不同种类的乳制品。

2.5 酒类检测

中国是酒的故乡，也是酒文化的发源地，是世界上酿酒最早的国家之一。风味是所有酒类最重要的分级标准^[46]，目前市场充斥着各种以次充好，以新充陈的假酒劣酒。传统的感官检测已经无法满足客观需求。目前近红外光谱技术、色谱/质谱技术、电子鼻技术等已经开始展现其优势^[47]，其中电子鼻因其操作简单、价格适中、灵敏度高特性越来越受到重视。

周红标等^[48]用5个MOS型传感器自制电子鼻对4种品牌的白酒进行检测。采用遗传小波神经网络(GA-WNN)，对4种品牌白酒的识别率均在97.0%以上，其收敛速度和诊断精度较之其他算法有明显的优势。周红标等^[49]还采用了自适应概率神经网络(DE-PNN)的模型对白酒品牌进行检测，其识别率达到97.5%，对比RBF和SVM模型的结果，发现DE-PNN的方法具有更好的分类效果和较快的收敛速度。证明用电子鼻检测不同白酒是可行的，使用DE-PNN建模的效果优于RBF和SVM。为了验证不同的神经网络算法的准确性，秦树基等^[50]用4个MOS型传感器自制电子鼻对4种品牌的白酒进行检测。采用了3种神经网络算法，分别是BPNN、LVQ和PNN。试验结果显示，BPNN网络可达到的最大识别率为92.5%，LVQ网络可达到的最大识别率为95.0%，PNN网络可达到的最大识别率为92.5%。说明用电子鼻检测酒类品牌完全是可行的，且用神经网络算法建模能获得较高的识别率。

M.Aleixandre等^[51]用自制便携式电子鼻对4种不同的葡萄酒进行检测。他们分别用PCA和PNN算法建模，结果显示，PCA的处理结果无法准确地区分4个品种的葡萄酒，会有部分信息重叠，而PNN能以100%的正确率辨别这些葡萄酒。结果表明电子鼻可以对不同的葡萄酒进行区分，且PNN算法建模效果优于PCA。

由此可见，用电子鼻对白酒和葡萄酒进行品牌区分是可行的，且神经网络算法建立的模型性能要优于PCA、SVM，

得到的准确率更高。然而，乙醇和水蒸气对电子鼻有着较大的影响，使其难以准确把握酒类的风味特征，此问题有待进一步解决。

3 结论与展望

电子鼻的研究是对仿生嗅觉的研究，有着巨大的发展潜力，其快速、简便、成本低、重复率好、无损检测等特点，为检测工作带来了极大的便利，在各个领域已经开始了应用。但不可否认的是，电子鼻技术还处在不断完善进步的过程，受材料、工艺、数据处理方法等方面的限制，电子鼻的检测与识别范围与人们的期望还存在差距。

神经网络算法由于具有很强的非线性处理能力及模式识别能力而得到了广泛的应用。神经网络算法通过学习，自动掌握隐藏在传感器响应强度和气味类型之间的、难以用明确的数学模型表示的对应关系。但是人工神经网络并不能满足所有情况下的精度需求，所以许多统计技术常常与ANN联合使用以得到一组比用单个技术得到的数据更加全面的分类和聚类。

由此可见，无论是电子鼻技术还是神经网络算法都有着需要进一步研究发展的地方，但不可否认的是，随着电子鼻技术的发展，人们的“嗅觉”将会扩展到更远的地方。随着科研人员对算法的不断研究，将对算法程序不断优化，智能算法的结合使用已经成为今后的发展趋势。将智能算法应用到电子鼻中，将会提高电子鼻预测的正确率，使得电子鼻的性能得到提升。

参考文献

- [1] 刘婷利, 胡国清. 电子鼻的应用综述[J]. 传感器世界, 2007, 13(8): 6-10.
- [2] LI Dong, LEI Tao, ZHANG Shun-ping, et al. A novel headspace integrated E-nose and its application in discrimination of Chinese medical herbs [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 221(31): 556-563.
- [3] HERRERO J L, LOZANO J, SANTOS J P, et al. On-line classification of pollutants in water using wireless portable electronic noses[J]. Chemosphere, 2016, 152: 107-116.
- [4] 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.
- [5] 闫李慧, 王金水, 渠琛玲, 等. 仿生电子鼻及其在食品工业中的应用研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(6): 156-159.
- [6] 邱丹丹, 刘嘉, 徐春红, 等. 电子鼻及其在食品分析中应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2010(6): 36-38.
- [7] 邹慧琴, 刘勇, 林辉, 等. 电子鼻技术及应用研究进展[J]. 传感器世界, 2011, 17(11): 4-5.
- [8] VITO S D, MASSERA E, MIGLIETTA M, et al. Detection and quantification of composite surface contaminants with an e-nose for fast and reliable pre-bond quality assessment of aircraft components[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 222: 1 264-1 273.
- [9] 毛友安, 刘巍, 钟科军. 电子鼻技术应用研究进展[J]. 化学传感器, 2009, 29(2): 12-17.
- [10] 彭婧. 气敏传感器阵列优化应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008: 7-12.

- [11] 韦彩虹. 基于电子鼻系统的混合气体的定性分析和定量估计[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 18-44.
- [12] 余炜, 万代立, 周娅, 等. 基于在线支持向量机的电子鼻模式识别算法[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2015, 45(1): 49-52.
- [13] 刘宁晶, 史波林, 赵镭, 等. 电子鼻检测技术研究进展[J]. 食品科技, 2012, 37(10): 248-252.
- [14] 黄星奕, 陈玮. 基于电子鼻技术的烟丝霉变检测[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 65-67.
- [15] ZHANG Lei, TIAN Feng-chun, DANG Li-jun, et al. A novel background interferences elimination method in electronic nose using pattern recognition[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 201(15): 254-263.
- [16] IGNATYEV D I, KHRABROV A N. Neural network modeling of unsteady aerodynamic characteristics at high angles of attack[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 41: 106-115.
- [17] OMATU S, YANO M. E-nose system by using neural networks[J]. *Neurocomputing*, 2016, 172(8): 394-398.
- [18] SARKAR S T, BHONDEKAR A P, MARTIN M. Towards biological plausibility of electronic noses: A spiking neural network based approach for tea odour classification[J]. *Neural Networks*, 2015, 71: 142-149.
- [19] RADI, CIPTOHADIJOYO S, LITANANDA W S, et al. Electronic nose based on partition column integrated with gas sensor for fruit identification and classification[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2016, 121: 429-435.
- [20] 唐会周. 电子鼻在水果品质评价体系中应用的研究进展[J]. 包装与食品机械, 2011, 29(1): 51-55.
- [21] BAIETTO M, WILSON A D. Electronic-nose applications for fruit identification, ripeness and quality grading[J]. *Sensors*, 2015, 15(1): 899-931.
- [22] 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): 183-191.
- [23] 王宇菲, 谭妹二, 许桂香. 基于电子鼻技术多算法检测热带水果品质的实验研究[J]. 软件, 2016, 37(3): 40-43.
- [24] ZHANG Hong-mei, CHANG Ming-xun, WANG Jun, et al. Evaluation of peach quality indices using an electronic nose by MLR, QPST and BP network[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, 134(1): 332-338.
- [25] HADDI Z, MABROUK S, BOUGRINI M, et al. E-Nose and e-Tongue combination for improved recognition of fruit juice samples[J]. *Food Chemistry*, 2014, 150(1): 246-253.
- [26] NICKY S, BRUNTON N P, LYNG J G, et al. Texture, colour and sensory evaluation of a conventionally and ohmically cooked meat emulsion batter[J]. *Journal of The Science of Food and Agriculture*, 2004, 84(14): 1 861-1 870.
- [27] 洪雪珍, 王俊, 周博, 等. 猪肉储藏时间的电子鼻区分方法[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2010, 36(5): 568-572.
- [28] 贾洪锋, 卢一, 何江红, 等. 肉类电子鼻识别模型的建立[J]. 食品与机械, 2011, 27(3): 96-97, 139.
- [29] TIKK K, HAUGEN J E, ANDERSEN H J. Monitoring of warmed-over flavour in pork using the electronic nose-correlation to sensory attributes and secondary lipid oxidation products[J]. *Meat Science*, 2008, 80(4): 1 254-1 263.
- [30] 洪雪珍, 韦真博, 海铮, 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.
- [31] GARCIA M, ALEIXANDRE M, GUTIERREZ J, et al. Electronic nose for ham discrimination[J]. *Sens Actuat B-Chem*, 2006, 114(1): 418-422.
- [32] LI Huan-huan, CHEN Quan-sheng, ZHAO Jie-wen, et al. Non-destructive evaluation of pork freshness using a portable electronic nose (E-nose) based on a colorimetric sensor array[J]. *Analytical Methods*, 2014, 6(16): 6 271-6 277.
- [33] 洪雪珍, 王俊. 基于逐步判别分析和 BP 神经网络的电子鼻猪肉储藏时间预测[J]. 传感技术学报, 2010, 23(10): 1 376-1 380.
- [34] 于慧春, 王俊. 电子鼻技术在茶叶品质检测中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2008, 21(5): 748-752
- [35] DAI Yue-wen, ZHI Rui-cong, ZHAO Lei, et al. Longjing tea quality classification by fusion of features collected from E-nose[J]. *Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems*, 2015, 144(15): 63-70.
- [36] DUTTA R, HINES E L, GARDNER J W, et al. Tea quality prediction using a tin oxide-based electronic nose: an artificial intelligence approach[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2003, 94(2): 228-237.
- [37] 傅均, 邢建国. 嗅觉神经网络在电子鼻识别多品牌绿茶中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(3): 313-318.
- [38] YU Hui-chun, WANG Jun, YAO Cong, et al. Quality grade identification of green tea using E-nose by CA and ANN[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, 41(7): 1 268-1 273.
- [39] 张红梅, 田辉, 何玉静, 等. 茶叶中茶多酚含量电子鼻技术检测模型研究[J]. 河南农业大学学报, 2012, 46(3): 302-306.
- [40] 陈哲, 赵杰文. 基于电子鼻技术的碧螺春茶叶品质等级检测研究[J]. 农机化研究, 2012, 11(1): 133-137.
- [41] 王宠, 梁琪, 甘伯中, 等. 电子鼻在干酪风味检测中的应用[J]. 食品与机械, 2012, 28(2): 250-253.
- [42] 张虹艳, 丁武. 基于 BP 神经网络的电子鼻羊奶贮藏时间的预测[J]. 食品工业科技, 2012, 33(6): 377-381.
- [43] 张虹艳, 丁武. 基于 fisher 线性判别和 BP 神经网络的电子鼻羊奶贮藏时间预测[J]. 中国食品学报, 2012, 12(6): 166-173.
- [44] 肖涛, 殷勇, 于慧春, 等. 不同包装纯牛奶的电子鼻检测[J]. 食品科学, 2011, 32(14): 307-310.
- [45] 姜天伟, 林然, 陈星, 等. 电子鼻牛奶质量检测的研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(8): 1 727-1 731.
- [46] 徐晚秀, 李臻峰, 张振, 等. 基于电子鼻的中国白酒酒龄检测[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(2): 144-149.
- [47] 张振, 李臻峰, 宋飞虎, 等. 电子鼻结合化学计量法用于检测黄酒酒龄[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 57-61, 118.
- [48] 周红标, 张新荣, 耿忠华. 基于遗传小波神经网络的白酒识别电子鼻[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(5): 254-257.
- [49] 周红标, 张宇林, 丁友威, 等. 自适应概率神经网络及其在白酒电子鼻中的应用[J]. 智能系统学报, 2013, 8(2): 177-182.
- [50] 秦树基, 徐春花, 王占山. 神经网络对电子鼻性能的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(6): 804-808.
- [51] ALEIXANDRE M, LOZANO J, GUTIÉRREZ J, et al. Portable e-nose to classify different kinds of wine[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, 131(1): 71-76.