

Research Progress of Electronic Nose in Apple Quality Testing

Qinghang Ding, Dongjie Zhao, Jun Liu, Cheng Xue

School of Information, Beijing Wuzi University, Beijing
Email: graceding1@163.com, zdj_bj@163.com

Received: Mar. 21st, 2018; accepted: Apr. 6th, 2018; published: Apr. 13th, 2018

Abstract

As a non-destructive testing technology, the electronic nose is through the detection of apple gas components (esters, alcohols, etc.) to monitor changes in fruit quality. Electronic nose technology is mainly composed of three parts: gas sensor array, signal preprocessing circuit and computer pattern recognition system. In appraisal of apple variety, electronic nose can distinguish about 8 kinds of apple varieties. With the increasing of the number of varieties, the differentiation degree of electronic nose began to decrease. And the distinction of electronic nose on whole fruit is better than that of fruit juice. The accuracy of electronic nose in the detection of apple maturity and shelf life is mainly affected by pattern recognition technology, PCA and LDA application is better. The use of electronic nose can predict the storage period of the apple, and the electronic nose has a good distinction on the quality of the apple during storage.

Keywords

Electronic Nose, Apple Quality, Quality Detection, Variety Identification

电子鼻在苹果检测中应用的研究进展

丁庆行, 赵东杰, 刘 军, 薛 程

北京物资学院, 信息学院, 北京
Email: graceding1@163.com, zdj_bj@163.com

收稿日期: 2018年3月21日; 录用日期: 2018年4月6日; 发布日期: 2018年4月13日

摘 要

电子鼻作为一种无损检测技术, 通过检测苹果的气体成分(酯类、醇类等)变化来监测果实品质变化。电

子鼻技术主要有三部分构成：气体传感器阵列、信号预处理电路和计算机模式识别系统。在苹果品种鉴定方面，电子鼻对苹果品种的区分能力约为8种；随着品种数量的增加，电子鼻的区分度开始下降；电子鼻对完整果实的区分效果优于对果汁的区分效果。电子鼻在苹果成熟度和货架期的检测方面的精度主要受模式识别技术的影响，PCA和LDA应用效果较好。电子鼻可以对苹果贮藏期进行预测，同时电子鼻对贮藏期间苹果好坏质量方面有很好的区分度。

关键词

电子鼻，苹果品质，品质检测，品种鉴定

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国是水果生产大国，长期以来，我国果品种植面积和产量一直处于世界前列，其中苹果的产量更是远超他国，据国家统计局资料显示 2014 年我国苹果产量高达 4092.32 万吨，2015 年苹果产量达 3849 万吨，2016 年苹果产量达 4261.3 万吨。但是，由于存储不当、易腐烂等特性，每年有大量的水果浪费，造成了巨大的经济损失和环境污染，同时，由于我国在水果分级检测能力方面与发达国家有很大差距，造成出口量和加工率较低，大部分水果都需要通过贮藏进行销售[1]，极大的降低了经济效益。因此，研究苹果的品质检测对促进水果产业的发展有重要意义。

苹果品质的基本要求是果实完整良好，新鲜洁净，无异常气味或滋味，不带不正常的外来水分，充分发育，具有本品种固有的特征和风味以及适合市场或贮存要求的成熟度[2]。传统的品质检测方法主要是化学分析法，不仅检测过程繁琐，还需要破坏果实本身，对苹果品质检测意义不大。因此，发展快速准确无损的检测技术对提高我国苹果的品质以及分级检测能力具有重要的促进作用。

本文简述了国内外学者在苹果品质检测方面运用到的技术，综述了电子鼻作为无损检测技术在苹果品质检测方面的应用，为电子鼻技术在苹果品质检测和分级的进一步研究提供一定的参考。

2. 苹果品质检测方法

参考国家鲜苹果标准，传统苹果品质一般通过果型、果面缺陷、果径、光洁度、硬度和可溶性固物含量来评价，各评价等级指标如表 1 所示。

随着检测技术的不断发展，新的检测手段层出不穷。在传统品质检测的基础上，许多学者又分别从不同角度和不同的技术进行了研究。樊丽和刘玉莲[3] [4]各自运用固相微萃取技术(SPME)和气相色谱-质谱联用法(GC-MS)测定了苹果在采后贮藏期间果实香气成分的变化，其香气成分主要为酯类和醛类。许宝峰等[5]用同样的方法，测定了冷藏对“王林”苹果香气成分的影响，测试结果显示：醇类、酯类物质在冷藏条件下含量上升，醛类物质相对百分含量下降。王艳颖等[6]利用便携式速显糖度计、果实硬度计、气相色谱仪、紫外可见分光光度计研究了富士苹果受到机械损伤后在 5℃ 和 18℃ 2 种贮藏温度下呼吸强度、可溶性固形物、乙烯释放量、果肉硬度等含量的变化。结果表明：机械损伤后呼吸强度和乙烯释放量显著增加，可溶性固形物含量和果实硬度随着温度的升高迅速下降。孙成正和张伟莲[7] [8]分别从苹果的介电特性出发，研究了苹果品质与介电特性的关系，结果显示：苹果的阻抗与施加信号的频率有关，

Table 1. Apple quality evaluation index
表 1. 苹果品质评价指标

| 指标 | 优等品 | 一等品 | 二等品 |
|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 果形 | 无缺陷 | 允许果形有轻微缺点 | 有缺点, 无畸形果 |
| 果面缺陷 | 无缺陷 | 无明显缺陷 | 有轻微缺陷, 对果肉无明显伤害 |
| 果径(mm) | 大型果 ≥ 70 | 大型果 ≥ 70 | 大型果 ≥ 65 |
| | 中小型果 ≥ 60 | 中小型果 ≥ 60 | 中小型果 ≥ 55 |
| 着色率(%) | 红色品种着色率 ≥ 70 | 红色品种着色率 ≥ 60 | 红色品种着色率 ≥ 50 |
| 硬度(N/cm ²) | ≥ 5.5 | ≥ 5.5 | ≥ 5.5 |

相对介电常数与苹果的品质识别程度有很大的相关性, 可用于评价苹果的内部品质。此外, 赵杰文和张京平[9] [10]还通过图像处理技术对苹果的品质进行了检测。

3. 电子鼻简介

电子鼻(E-nose)作为一种无损检测技术, 近年来发展较为迅速, 其主要通过检测水果的气体成分来监测果实品质, 具有客观、快速、准确的特点, 现已成功用于番茄、桃和梨等水果的品质评价。由于苹果品质与其散发的气味密切相关, 因此电子鼻技术在苹果品质检测上有着广阔的应用前景。

电子鼻, 又称人工嗅觉系统, 是指能够人工模拟生物嗅觉系统的功能, 具有智能识别能力的气敏传感器系统; 是由气敏传感器技术与近年兴起的人工智能技术相结合, 对生物嗅觉系统进行建模而形成的一项新技术。成熟的电子鼻技术主要有三部分构成: 气敏传感器阵列、信号预处理电路和计算机模式识别系统[11]。其工作原理是由气敏传感器阵列与被测气体产生化学、物理反应并产生与气体浓度成正比的电信号, 然后将产生的电信号经过放大、滤波、A/D 转换传输至计算机, 最后由计算机通过相关算法进行模式识别[11]。其结构框图如图 1 所示。

气体传感器阵列是由一定数量性能不同的气体传感器组成或集成制造的。气体传感器的气敏性能相差越大、数目越多, 选择性越强, 电子鼻性能越好。但是阵列中传感器数目过多会增大系统体积, 并增加系统数据采集、传输和处理的难度, 提高系统的开发成本。因而, 选择合适类型及数目的传感器组成阵列是电子鼻技术应用中的一个关键问题。

传感器响应气体产生电阻变化, 通过信号采集电路及 A/D 转换产生时间域的信号。气体分析前的一个重要步骤是从该时间域信号中提取有用信息, 也就是从传感器的响应信号中选择特定的参数作为特征, 替代响应曲线用于后续的数据处理。这个过程称为特征参数提取。提取的特征参数再经过降维、归一化等处理送入模式识别器进行分析。因而, 特征参数提取决定了气体传感器信息提取的好坏和模式识别系统处理的基本信息量, 是最为重要和必不可少的一部分。

通常在模式识别前, 将提取的过多的特征参数通过特定的降维算法将其线性映射到低维的特征数据空间, 并保留样本的大部分信息。再把数据进行归化以使特征线性映射到[0,1]之间, 其目的是为了减少化学计量识别中的计算误差, 使每一个特征处于同一数量级, 并为模式识别器的输入空间准备合适的模式识别是对特征提取后得到的信息进行再处理, 以获得混合气体的组成成分和浓度等信息。目前的模式识别方法有很多。统计模式识别、遗传算法、人工神经网络及模糊推理等是常用的模式识别方法。

气敏传感器阵列作为电子鼻的核心部分, 根据材料的不同, 气敏传感器的分类如表 2 所示。在果蔬类气味检测中使用最多的是金属氧化物半导体(MOS)气敏传感器, 而且不同种类的 MOS 传感器对气味的识别效果不同, 同一传感器的响应是多种气体共同作用的结果。因此, 模式识别技术的选取, 对气敏传

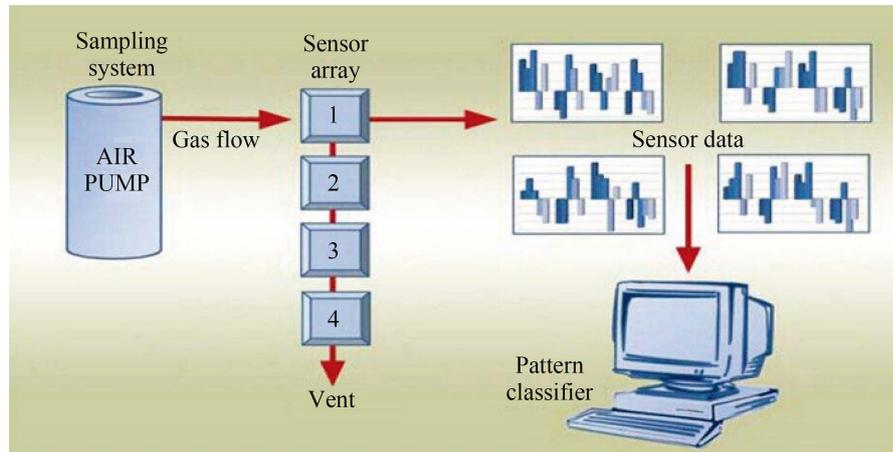


Figure 1. Electronic nose structure diagram
图 1. 电子鼻结构框图

Table 2. Different types of gas sensor features [12]
表 2. 不同类型气敏传感器的特点[12]

| 作用机理 | 测量方法 | 制备方法 | 优点 | 缺点 |
|------------|---------|-----------|---------------|-----------------|
| 金属氧化物气敏传感器 | 电导率 | 喷涂 | 响应速度快, 稳定 | 高温下工作 |
| 机聚合物气敏传感器 | 电导率, 电容 | 电镀, 丝网印刷 | 常温工作 | 对湿度敏感 |
| 电势气敏传感器 | 电压, 电流 | 微加工 | 集成度高 | 气体响应程度需要达到肖特基门限 |
| 质量敏感型气敏传感器 | 频率 | 电镀, 丝网印刷, | 灵敏度高 | 制作较为复杂 |
| 光学气敏传感器 | 光谱吸收 | 电镀, 丝网印刷, | 屏蔽噪声能力强, 适应性强 | 价格昂贵 |

传感器数分析的结果也有很大影响。在果蔬检测中应用最广泛的模式识别方法有主成份分析(PCA)、线性判别分析(LDA)、人工神经网络(ANN)等方法。PCA 和 LDA 都是用于数据降维的方法, 区别在于前者属于无监督降维技术, 后者属于监督学习的降维技术, 对于传感器采集到的多指标数据集, PCA 将数据投影到一个更低维的数据空间, 并且保证原始数据在整个空间上的方差最大化; 而 LDA 通过降维找到使数据具有差异的维度, 使得原始数据在这些维度上投影后, 保证数据类间方差最大化, 而类内方差最小化。因此, LDA 和 PCA 需要进行进一步的特征提取从而完成模式识别。ANN 因能够处理非线性数据, 对传感器自身漂移和测量误差有较强的容错能力, 适用与参数复杂的非线性系统, 因而被用于电子鼻模式识别中。

因此, 在运用电子鼻技术对苹果品质进行检测的过程中, 根据被测对象的类别和要求选择合适的传感器类型和模式识别技术, 构成适合的电子鼻系统, 对提高系统的精度至关重要。

4. 电子鼻在苹果品质检测中的应用现状

苹果因品种、成熟度和贮藏时间的不同, 所释放的气味也各不相同, 这是由其自身芳香物质所决定的。在贮藏的过程中, 因成熟度的变化, 其芳香物质的含量和种类也在发生变化, 并且, 苹果属于呼吸跃变型水果, 在呼吸跃变期间呼吸强度显著提高, 二氧化碳和芳香物质含量明显升高, 呼吸高峰过后, 芳香物质含量逐渐下降, 品质不断变差。电子鼻可以根据对这些挥发性气体成分响应实现对苹果品质的检测。

4.1. 电子鼻对苹果品种鉴定的应用现状

不同品种的苹果存在一定的差异,尤其是香气物质存在差别,但这种差异大多时候用肉眼难以识别,而电子鼻可以反映不同品种气味的差异,帮助人们对苹果品种进行鉴定。

Calu M 等[13] [14] [15]使用带有 18 个金属氧化物的 FOX 4000 E-nose 对来自不同地区的 7 个品种的苹果进行了检测,通过 PCA、判别因子分析(DFA)和统计质量控制(SQC)分析所得的电子鼻数据,所得结果表明,电子鼻可以区分苹果的品种(识别率接近 100%)。Marrazzo W N [16]等利用电子鼻对 McIntosh (Buhr)、Delicious 和 Gala 三种苹果及其提取液挥发性气体成分进行了检测,然后运用 PCA 对数据进行分析,结果显示:电子鼻可以区分三种品种的完整果实,而对不同品种的提取液区分度不够明显。H Wu 等[17]利用包含 10 个金属氧化物半导体型化学传感器组成的电子鼻来区分 8 种苹果汁。首先采用传统的方差分析法、loading 分析法和 Wilks 统计法,选择对芳香化合物敏感的传感器,对传感器阵列进行优化,获得三个优化的传感器组;进而使用 PCA, k-means 聚类和支持向量机(SVM)分析原始和优化的传感器信号, k-means 聚类分析结果证明了使用 Wilks 统计法对传感器阵列进行优化的可行性,同时,与 PCA 相比, SVM 对不同品种的苹果汁的识别率更高。

曾辉[18]选取了我国主栽的 38 个苹果品种作为研究对象,首先采用 SPME-GC-MS 定量的检测了不同品种苹果呈香的核心物质,主要为酯类、醇类和醛类,还有少量的酮类物质等;然后利用电子鼻定性的检测不同种类的苹果,对其响应曲线进行分析,结果表明:不同类型的传感器对不同品种的苹果灵敏度有很大差异,传感器数据结果分析显示,各个品种间重叠严重。邹小波等[19] [20]提出了一种用电子鼻来区分富士、花牛、姬娜 3 种不同品种苹果气味的方法。用小波去噪和 SVM 回归模型对检测数据进行模式识别。其识别率在 90%以上。

在苹果品种鉴定方面,同一电子鼻对苹果品种的区分能力有限,一般可区分 3~8 种,且种类越少,区分精度越高,随着品种数量的增加,电子鼻的区分度开始下降。而且电子鼻对不同品种完整果实的区分效果优于对果汁的区分效果。

4.2. 电子鼻对苹果成熟度的监测

苹果的成熟度决定着苹果的一些品质指标,如硬度、酸度、果皮色泽以及香味等,根据苹果的成熟度来选择合适的采收期有助于延长苹果的货架期。而现有的一些评价成熟度的方法,诸如测定糖酸比、果实硬度等大多都会破坏果实,不符合无损检测的要求。由于苹果在呼吸跃变期香气成分与含量都会发生剧烈的变化,电子鼻能够很好地检测到这种变化,这为电子鼻监控苹果的成熟过程提供了可行性。

J. Brezmes 等[21]利用氧化锡电化学传感器阵列组成的电子鼻和基于 ANN 的模式识别技术,对苹果、桃子和梨的成熟度进行了检测。系统能够以较高的准确度将水果样本分成三种不同的成熟状态(半熟,成熟和过熟)。其中桃子和梨的成功率在 92%以上,而苹果的准确度稍差。随后, J. Brezmes 等[22] [23]又利用电子鼻对 pinklady 苹果货架期的成熟度进行评估,结果显示:利用 PCA 对苹果成熟度的区分效果不太理性,而利用模糊神经网络则有很好的区分效果。然后,对电子鼻的响应信号与果实的理化参数包括硬度、淀粉指数和酸度进行了比较,获得了良好的相关系数,清楚地表明电子鼻信号与苹果的成熟过程有关。Pathangea L P 等[24]根据淀粉指数、穿刺强度等成熟度指标将“嘎啦”苹果分成三个成熟度,然后利用电子鼻对“嘎啦”苹果的成熟度进行判别,对测的电子鼻传感器数据进行 LDA 分析,可以有效地将“嘎啦”苹果分类到不同的成熟组中。Hui Guohua 等[25]使用自制的电子鼻对室温下“富士”苹果进行了检测,使用 PCA 和随机共振信噪比图谱两种模型对数据进行了分析,结果表明,PCA 可以区分出过熟苹果,但无法区分新鲜苹果和半熟苹果,而随机共振信噪比图谱可以准确地区分出新鲜、半熟和过熟的苹果。

由于果实成熟期间最重要的变化发生在货架期,因此国内部分学者利用电子鼻来检测苹果货架期的

质量。张鹏等[26]利用电子鼻对货架期内的“富士”苹果挥发性成分进行了检测,分别利用 PCA 和 LDA 对数据进行分析,结果表明:两种方法均可对常温下不同货架期的苹果进行判断,并且,与 PCA 相比, LDA 可以更加准确的对不同贮藏环境下苹果货架寿命进行判别。张晓华[27]等利用商业电子鼻对“红星”苹果采后的货架期质量进行了研究,测定了果实在室温下采后 40 天内香气的变化,预测“红星”苹果的货架期为 20 以内,然后,将预测结果与传统的理化检测方法得到的结果进行比较,证明了电子鼻预测苹果货架期的准确性。

电子鼻在苹果成熟度和货架期的检测方面效果突出,但其区分的精度主要受模式识别技术的影响,与 PCA 相比, LDA 的识别效果更好,与 ANN 相比, LDA 也更为简。

4.3. 电子鼻在苹果贮藏中的应用

贮藏的主要目的是为了延长苹果的食用周期,苹果香气的好坏是评价贮藏质量的一个重要标准。在贮藏的过程中,由于后熟、呼吸作用、侵染性病害等因素,导致苹果的香气成分发生变化。因此可以利用电子鼻系统对苹果香气成分的变化进行监测,从而对苹果的货架期进行判断和对苹果质量进行监控。

Natale 等[28]用电子鼻对收获后桔子和苹果的质量进行了评价。结果表明,电子鼻对不同品种的桔子和苹果反应敏感,有较强的区分能力,能预测出苹果的各种缺陷和桔子的储藏时间。Saevels 等人[29]用电子鼻和基于质谱仪的电子鼻(MSE-nose)两种电子鼻对散装苹果的气味进行了研究。用 PCA 对数据进行分析,结果发现 MSE-nose 的检测结果要优于电子鼻的检测结果,但两者检测出苹果储藏期间硬度变化与预测结果都有很大的相关性。Saevels 等人[30]还用电子鼻对预测苹果的最佳收获期进行了研究,结果表明用电子鼻预测水果最佳收获期是可行的。

李莹等[1]利用电子鼻对苹果低温贮藏时间及品质进行了研究,对检测数据进行 PCA 分析,建立了苹果低温贮藏品质的偏最小二乘预测模型、BP 神经网络预测模型和贮藏时间的多层感知器预测模型,并对预测效果进行了比较。结果显示,PCA 能够较好地地区分苹果的贮藏品质,建立的多层感知器预测模型对苹果贮藏时间有较好的预测效果。樊丽等[31]首先以“嘎啦”苹果为对象,采用电子鼻技术研究了其在 20℃贮藏期间芳香品质的变化情况,结果表明, LDA 的方法能较好地将苹果的不同贮藏期区分。随后,樊丽等[32]以电子鼻检测了“嘎啦”和“蜜脆”苹果贮藏期间挥发性物质的变化,结果显示:PCA 不能区分不同贮藏期以及同一贮藏期的苹果,而 LDA 可以区分。

苹果成熟以后从采摘、运输到贮藏的过程中由于生理性病害、侵染性病害和物理性伤害很容易引起果肉的腐烂变质,因此,国内外有许多学者对苹果贮藏过程中的好坏质量进行了检测。Li C 等[33] [34]利用电子鼻和表面声波传感器(Z-noseTM)开发了一种快速经济的苹果缺陷检测系统,利用 PCA 对电子鼻和 Z-noseTM 数据进行分析,实验表明,电子鼻和 Z-noseTM 都能够检测健康苹果和受损苹果之间的挥发性差异。而且,随着时间的,两种电子鼻的检测正确率均增加到了 100%。随后, Li C 等[35]又建立了基于 ANN 的电子鼻和 Z-noseTM 系统,建立并比较了不同的 ANN 模型:反向传播网络(BP),概率神经网络(PNN)和学习矢量量化网络(LVQ)。对于电子鼻数据, BP 和 PNN 分类率分别为 85.3%和 85.1%,优于分类率为 73.7%的 LVQ;对于 Z-noseTM 数据,三个 ANN 模型具有相似的性能,分类率分别为 77%, 76.8%和 74.3%,比电子鼻有所下降。

邹小波和潘胤飞等[11] [36]研制了一套适合苹果气味检测的电子鼻系统。对好坏苹果进行了检测。用 PCA 和遗传 RBF 网络对所测的样本进行分析,分析结果显示:PCA 可以区分的好坏苹果但有部分重叠的地方,遗传 RBF 网络的区分争取率在 96%以上。为了研究水果腐败过程的表征方法,惠国华等[37]利用电子鼻研究了苹果、梨、桃子、李子、葡萄 5 种水果的腐败过程,采用非线性随机共振技术提取水果霉变程度特征信息,实验结果表明,苹果在腐败过程中挥发特征气体量不断上升,而桃子、李子和葡萄

的腐败过程比较类似,其挥发气体量先达到最大值后下降,梨在腐败初期,特征气体有一个突变的过程,然后持续一段时间开始急剧下降。因此,电子鼻可以对水果腐败过程进行表征。

利用电子鼻可以对苹果贮藏期进行预测,各个学者建立了多种预测模型;而且在贮藏期间苹果好坏质量检测方面,诸多模式识别技术普遍具有良好的识别效果,而且随着贮藏时间的增加,识别率会进一步提升。

5. 总结与展望

人们运用电子鼻通过检测苹果的气味可以区分其品种、成熟度、预测贮藏的货架期以及质量的好坏。在苹果品种鉴定方面,同一电子鼻对苹果品种的区分能力是有限的;随着品种数量的增加,电子鼻的区分度开始下降。而且电子鼻对完整果实的区分效果优于对果汁的区分效果。电子鼻在苹果成熟度和货架期的检测方面区分的精度主要受模式识别技术的影响,常用的模式识别技主要有 PCA、LDA 和 ANN 等,与 PCA 相比, LDA 的识别效果更好,与 ANN 相比, LDA 也更为简单。总体来看,电子鼻在苹果的品种鉴定,成熟度监测和贮藏中的应用都取得了很好的进展,尤其是电子鼻在贮藏中的应用最为成熟,运用到了多种模式识别技术和数学模型,可以很好的对苹果的不同贮藏期进行区分以及对货架期进行预测,而且,电子鼻可以比较准确的对贮藏期间苹果质量好坏进行区分。

电子鼻在果蔬品质检测上还存一些问题。首先,电子鼻在使用之前需要收集大量的测试数据,建立训练集,选择数据处理方法和数学模型,构建一个合适的评价体系,并且针对检测对象的不同,其数据处理方法和数学模型存在一定的差异。其次,电子鼻的检测只针对气味这一单一指标,对整体品质的反映具有一定的局限性,多种检测技术的融合成为一种趋势,以电子鼻检测技术为基础,与其它图像处理方法相结合,使检测结果更加准确可靠。

电子鼻作为一种绿色、快速、无损的检测技术。随着微电子技术、传感器技术、纳米材料技术的进步以及算法的发展创新,其性能也会进一步完善,更加智能化的贴合生物嗅觉系统的电子鼻将会出现,在水果品质以及其他方面的应用也会愈加广泛。

基金项目

北京高校物流技术工程中心项目资助(BJLE2010);北京物资学院青年科研基金项目资助(2014XJQN15)。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 中华人民共和国卫生部.GB/T 10651-2008 鲜苹果[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [3] 樊丽,向春燕,任小林.“蜜脆”苹果采后贮藏期间香气成分的变化[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(12):160-166.
- [4] 刘玉莲,靳兰,毛娟,等.“新红星”和“长富 2 号”果实贮藏期间香气成分的变化[J].食品科学,2016,37(10):158-163.
- [5] 许宝峰,张鹤,李成,等.冷藏对“王林”苹果香气成分的影响[J].北方园艺,2014(22):132-136.
- [6] 王艳颖,胡文忠,庞坤,等.机械损伤对富士苹果生理生化变化的影响[J].食品与发酵工业,2007,33(7):58-62.
- [7] 孙成正,江谷传.低频电流激励下苹果电阻抗检测系统的研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2010,33(2):231-234.
- [8] 张伟莲.介电特性在苹果品种识别中应用的初步探究[J].电子测试,2013(9):209-210.
- [9] 赵杰文,刘剑华,陈全胜,Vittayapadung, S.利用高光谱图像技术检测水果轻微损伤[J].农业机械学报,2008,

- 39(1): 106-109.
- [10] 张京平, 朱建锡, 孙腾. 苹果内部品质的 CT 成像结合傅里叶变换方法检测[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 197-204.
- [11] 潘胤飞. 基于非线性模式识别的电子鼻技术在苹果分类中的应用[D]: [硕士或博士学位论文]. 江苏大学, 2003.
- [12] 方园, 詹诗画, 邹奉元. 电子鼻技术及其在服装领域的应用[J]. 现代纺织技术, 2017, 25(2): 76-80.
- [13] Calu, M., Pruteanu, E.M. and Alexe, P. (2010) Electronic Nose Discriminate Seven Types Apples, after Maturity Grade. *Scientific Papers, B Series*, **LIV**, 389-393.
- [14] Calu, M., Duta, D., Pruteanu, E.M. and Stoica, M. (2010) Electronic Nose and Sensorial Characterization Discrimination for Seven Apple Types Stored, 7 Months, in Refrigeration and Controlled Atmosphere Conditions. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, **16**, 376-381.
- [15] Pruteanu, E.M., Duta, D.E., Hincu, F.A., *et al.* (2009) Electronic Nose for Discrimination of Romanian Apples. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, **13**, 274-280.
- [16] Marrazzo, W.N., Heinemann, P.H., Crassweller, R.E., *et al.* (2005) Electronic Nose Chemical Sensor Feasibility Study for the Differentiation of Apple Cultivars. *Transactions of the ASAE*, **48**, 1995-2002. <https://doi.org/10.13031/2013.19992>
- [17] Wu, H., Yue, T.L., Xu, Z., *et al.* (2017) Sensor Array Optimization and Discrimination of Apple Juices According to Variety by an Electronic Nose. *Analytical Methods*, **9**, 921-928. <https://doi.org/10.1039/C6AY02610A>
- [18] 曾辉. 不同品种苹果特征香气的表征与识别[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
- [19] 邹小波, 赵杰文. 基于小波去噪和支持向量机的苹果品种识别法[J]. 仪器仪表学报, 2007(3): 534-538.
- [20] 邹小波, 赵杰文. 支持向量机在电子鼻区分不同品种苹果中的应用[J]. 农业工程学报, 2007(1): 146-149.
- [21] Brezmes, J., Llobet, E., Vilanova, X., *et al.* (2000) Fruit Ripeness Monitoring using an Electronic Nose. *Sensors & Actuators B Chemical*, **69**, 223-229. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(00\)00494-9](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(00)00494-9)
- [22] Brezmes, J., Llobet, E., Vilanova, X., *et al.* (2001) Correlation between Electronic Nose Signals and Fruit Quality Indicators on Shelf-Life Measurements with Pinkladyapples. *Sensors & Actuators B Chemical*, **80**, 41-50. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(01\)00867-X](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(01)00867-X)
- [23] Brezmes, J., Fructuoso, M.L.L., Llobet, E., *et al.* (2005) Evaluation of an Electronic Nose to Assess Fruit Ripeness. *IEEE Sensors Journal*, **5**, 97-108. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2004.837495>
- [24] Pathangea, L.P., Mallikarjunana, P., Marinib, R.P., *et al.* (2006) Non-Destructive Evaluation of Apple Maturity using an Electronic Nose System. *Journal of Food Engineering*, **77**, 1018-1023. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.034>
- [25] Hui, G.H., Wu, Y.L., Ye, D.D., *et al.* (2013) Fuji Apple Storage Time Predictive Method using Electronic Nose. *Food Anal Methods*, **6**, 82-88. <https://doi.org/10.1007/s12161-012-9414-6>
- [26] 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.
- [27] 张晓华, 张东星, 刘远方, 等. 电子鼻对苹果货架期质量的评价[J]. 食品与发酵工业, 2007(6): 20-23.
- [28] Natale, C.D., Macagnano, A., Martinelli, E., *et al.* (2001) Electronic Nose Based Investigation of the Sensorial Properties of Peaches and Nectarines. *Sensors & Actuators B Chemical*, **77**, 561-566. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(01\)00705-5](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(01)00705-5)
- [29] Saevels, S., Lammertyn, J., Berna, A.Z., *et al.* (2004) An Electronic Nose and a Mass Spectrometry-Based Electronic Nose for Assessing Apple Quality during Shelf Life. *Postharvest Biology & Technology*, **31**, 9-19. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(03\)00129-7](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(03)00129-7)
- [30] Saevels, S., Lammertyn, J., Berna, A.Z., *et al.* (2003) Electronic Nose as a Non-Destructive Tool to Evaluate the Optimal Harvest Date of Apples. *Postharvest Biology & Technology*, **30**, 3-14. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(03\)00059-0](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(03)00059-0)
- [31] 樊丽, 任小林, 向春燕, 等. 基于电子鼻和 GC-MS 评价嘎拉苹果采后芳香品质[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 164-168.
- [32] 樊丽. 苹果果实贮藏期间香气特性的研究[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [33] Li, C., Heinemann, P., Irudayaraj, J., *et al.* (2005) Detection of Apple Defects Using an Electronic Nose and zNose. *ASAE Annual Meeting*, Tampa, 17-20 July 2005, Article No. 056013.
- [34] Li, C., Heinemann, P. and Sherry, R. (2007) Neural Network and Bayesian Network Fusion Models to Fuse Electronic Nose and Surface Acoustic Wave Sensor Data for Apple Defect Detection. *Sensors & Actuators B Chemical*, **125**, 301-310. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.02.027>

-
- [35] Li, C. and Heinemann, P.H. (2007) ANN-Integrated Electronic Nose and zNose System for Apple Quality Evaluation. *ASABE*, **50**, 2285-2294. <https://doi.org/10.13031/2013.24081>
- [36] 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(1): 61-64.
- [37] 惠国华, 厉鹏, 吴玉玲, 等. 基于电子鼻系统的水果腐败过程表征方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 264-268.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2331-0235, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jsta@hanspub.org