

# 电子鼻在食品微生物污染快速检测中的应用

蒋雪松<sup>1,2</sup>, 陈卉卉<sup>1</sup>, 胡立挺<sup>1</sup>, 王维琴<sup>1</sup>, 许林云<sup>2</sup>

(1. 宁波海通食品科技有限公司, 浙江慈溪 315300;

2. 南京林业大学机械电子工程学院, 江苏南京 210037)

**摘要:** 世界上大部分的消费食品都受到微生物污染的影响。常用的微生物检测和鉴别方法存在一些缺点, 不适用于食品的快速筛查。近年来, 电子鼻为包括微生物污染诊断在内的食品品质与安全分析提供了有价值的分析手段。本文介绍了电子鼻的三个组成部分(气体采样单元、气敏传感器阵列、信号处理与模式识别系统), 综述了电子鼻对食品中常见的细菌、霉菌、酵母和毒素等四种微生物污染类型的检测, 最后对电子鼻的发展趋势和前景进行了展望。

**关键词:** 电子鼻, 食品微生物, 细菌, 霉菌, 有机挥发物

## Application of electronics noses for the rapid detection of microbial contaminations in foodstuffs

JIANG Xue-song<sup>1,2</sup>, CHEN Hui-hui<sup>1</sup>, HU Li-ting<sup>1</sup>, WANG Wei-qin<sup>1</sup>, XU Lin-yun<sup>2</sup>

(1. Ningbo Haitong Food Science and Technology Co., Ltd., Cixi 315300, China;

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** Microbial contamination affected most of foodstuffs consumed in the world. Microbial detection and identification methods currently used had some typical drawbacks which made them unsuitable for routine rapid screening in foodstuffs. Electronic noses (E-noses) had recently emerged as valuable candidates in various areas of food quality and safety control, including microbial contamination diagnosis. The three components of e-noses, including sample handling system, detection system and data processing and pattern recognition system, were described in this paper. Diagnosis cases of four kinds of microbial contamination based on e-noses in foodstuffs were presented: (a) bacteria, (b) moulds, (c) yeasts, and (d) toxins. Finally, recent trends and future directions of e-noses were illustrated.

**Key words:** electronic nose; food microorganisms; bacteria; moulds; volatile organic compounds

中图分类号: TS207.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2017)06-0376-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2017.06.063

食品微生物是与食品有关的微生物的总称, 包括生产型食品微生物(食品发酵微生物)、食品腐败微生物和食源性病原微生物。微生物污染是影响食品卫生和安全的重要因素之一, 不仅改变了食材的口感和味道, 而且往往会对消费者的健康产生危害。微生物的检测通常包括传统的平板计数法、理化方法(气相液相色谱、质谱、光谱技术)和聚合酶链反应法。这些方法尽管有效、准确, 但也存在着仪器费用高、分析时间长、低样本量、需要专门的技术人员等缺点。因此需要一种快速、可靠而且操作简单的分析方法来保障消费者安全。近年来, 电子鼻技术作为一种新颖的检测复杂气味的仪器, 具有检测速度快、灵敏度高、操作简单等特点, 在微生物检测方面受到广泛关注。它主要是通过通过对食品储藏过程中微

生物代谢产生的挥发性有机物质(VOC)的分析, 达到分析检测的目的。

### 1 电子鼻技术概述

1964年, Wilkens和Hatman利用气体在电极上的氧化还原反应对嗅觉过程进行了电子模拟, 这是关于电子鼻的最早报道。电子鼻技术也被称为智能仿生嗅觉系统, 它是通过模拟生物嗅觉功能来实现对检测对象的评价, 在过去的20年中发展很快。其应用涉及环境监测<sup>[1-2]</sup>、医疗健康<sup>[3-5]</sup>、食品检测<sup>[6-7]</sup>等。

#### 1.1 电子鼻的原理和组成部件

电子鼻模拟了哺乳动物的嗅觉器官, 利用传感器阵列结合数据处理分析系统对气味进行感知、分析和判断。电子鼻的最早报道始于上世纪60年代

收稿日期: 2016-09-02

作者简介: 蒋雪松(1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品安全检测技术与装备, E-mail: xsjiang@126.com。

基金项目: 江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研修项目(苏教办师[2015]7号); 南京林业大学青年科技创新基金项目(CX2015010); 中国博士后基金(2014M561737)。

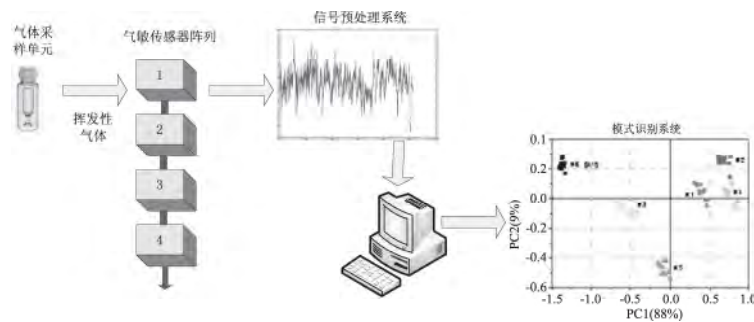


图1 电子鼻的系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of electronic nose

表1 电子鼻气体采样方法的原理及特点

Table 1 Principles and characteristic of sampling method of electronics nose

采样方法	工作原理	优点	缺点
开放式	环境气味的直接敞开放式监测与分析	直观、简单快速	灵敏度低
静态顶空	将待测样品放入密闭容器中平衡一段时间,然后检测顶空部分的气体样	操作相对简单	物理参数需严格控制、灵敏度不高
动态顶空	将待测样品放入具有进气口和出气口的密封容器平衡一段时间,进气口不带压或带正压,出气口接电子鼻采样口,带负压	数据结果相对稳定可靠	抽气气体的流量和顶部空间的清洗时间需优化
吸附浓缩	将吸附浓缩的气态分子经过加热解吸附后由载气带入电子鼻的检测系统	检出限和灵敏度高	易出现不可逆转的吸附,检测时间长

并发展于80年代,而到了90年代才开始出现了商品化的仪器。如图1所示,它主要由气体采样单元、气敏传感器阵列、信号预处理与模式识别系统等几部分组成。

电子鼻检测的对象是VOC,而样品采集单元主要是负责VOC检测前从非挥发性基质(检测样品)中的分离或浓缩。气体采样的方法主要有开放式直接进样、静态顶空进样、动态顶空进样和吸附浓缩进样等。其中吸附浓缩进样包括热解析浓缩、固相微萃取(SPME)、吹扫捕集等。在实际应用中,要根据不同的要求及分析对象来进行选择。电子鼻气体采样方法的原理及特点如表1所示。

气敏传感器阵列是电子鼻的核心部件,由低选择性的、对多种气味敏感的多种调谐(非特异性)传感器组成。一种气味刺激只会在传感器阵列中产生一种特征指纹,每种传感器对被测气体的气体成分有不同的灵敏度。电子鼻常用的气敏传感器的种类可分为金属氧化半导体(MOS)、导电聚合物(CP)、石英晶体微天平(QCM)、声表面波(BAW)、金属氧化半导体场效应管型(MOSFET)和光纤型等。

### 1.2 电子鼻的数据处理方法

电子鼻的检测数据一般要通过多变量统计与化学计量学方法进行处理。化学计量学是瑞典科学家沃尔德在1971年首先提出,是数学、化学、统计学与计算机科学的结合,在实验设计、数据处理、信号解析、化学分类的决策及预报方面有着重要的作用。电子鼻常用的化学计量学方法包括主成分分析(PCA)、判别因子分析(DFA)、线性判别分析(LDA)、二次判别分析(QDA)、最小线性回归分析(PLS)、人工神经网络分析(ANN)等。PCA是利用降维的思想,对原始的多指标信息进行数据转换,并

对降维后的特征向量进行线性分类,用代表性的较少变量去解释样品的原始信息<sup>[8]</sup>。DFA在充分保存现有信息的前提下,使不同组间的重心距离最大的同时,使同类数据间的差异性尽量缩小<sup>[9]</sup>。LDA将样品信号数据通过运算法则投影到某一方面,可以使投影后模式样本的类间散布矩阵最大,而组内数据聚集,注重响应值的空间分布状态及彼此间的投影距离<sup>[10]</sup>。QDA是另外一种线性判别分析算法,当不同分类样本的协方差矩阵相同时,使用LDA;当不同分类样本的协方差矩阵不同时,则应该使用QDA。PLS目的是建立一个可以用来预测未知样本的定量信息曲线。ANN具有强大的信息存储能力,能实现复杂的非线性映射,具有较强的自适应性、自组织性和容纳性,从而准确地建立模型<sup>[11]</sup>。

### 1.3 电子鼻的商业化产品

在国外电子鼻已经实现了商业化,在国内不少研究机构也自制了样机。目前,比较成熟的电子鼻系统有:法国Alpha MOS公司的FOX4000、美国Sensigent公司的Cyranose 320、德国Airsense公司的PEN3等,报价一般在几万至几十万美元不等。表2列出了几种商业化的电子鼻。

## 2 电子鼻技术在食品微生物污染检测中的应用现状

食品微生物污染是指食品及原料在加工、运输、储藏、销售过程中被微生物及其毒素的污染。与食品卫生和安全密切相关的微生物包括腐败微生物和病原微生物,主要涉及细菌、酵母菌、霉菌及相关的微生物毒素。

### 2.1 细菌

细菌是污染食品 and 引起食品腐败变质的主要微

表2 几种商品化的电子鼻

Table 2 Some examples of commercial electronics noses

产地	公司名称	电子鼻型号	气体传感器
法国	Alpha MOS	FOX/GEMINI/HERACLES	金属氧化物/快速气相
美国	Sensigent	Cyranose 320	导电聚合物
德国	Airsense	PEN3	金属氧化物
英国	RoboScientific	Model 307	有机半导体
美国	Isenso	iNose	金属氧化物
意大利	Soatec srl	ISENose 2000	金属氧化物
意大利	SACMI IMOLA	EOS <sup>835</sup>	金属氧化物
瑞典	Applied Sensor	NST3320	MOSFET + MOS

生物类群。菌落总数和大肠菌群是评价食品卫生质量的重要指标。戴娟<sup>[12]</sup>等利用电子鼻对不同贮藏温度和时间的虾酱进行检测。研究发现,贮藏温度和时间的变化对虾酱罐头菌落总数和挥发性物质的影响较大,虾酱内部挥发性成分的种类和含量随之发生显著变化。可以利用电子鼻快速区分不同贮藏条件下虾酱挥发性成分的差异,建立菌落总数与挥发性物质变化的关联性。

王丹凤<sup>[13]</sup>利用电子鼻技术检测猪肉在4℃和20℃保存不同天数的挥发性成分,同步进行细菌总数的测定,通过PLS预测了电子鼻输出信号与微生物数量之间的对应关系,线性关系较好。惠国华<sup>[14]</sup>用电子鼻系统结合PCA检测了不同储存过程时间的香蕉品种,同时研究了其微生物指标(包括细菌总数和霉菌数)与电子鼻响应之间的相关关系,发现样品中的第一主成分下降可能与微生物繁殖有关。

肠杆菌科细菌属于革兰氏阴性无芽孢杆菌,容易进入食物链引发食品安全问题,在易腐烂食品和加工食品中需要特别的重视。Gobbi<sup>[15]</sup>等人用电子鼻对蔬菜汤中感染的霍氏肠杆菌和大肠埃希氏菌进行了早期监测。研究表明,两种肠杆菌在分别接种21h和18h后,能实现显著判别。在24h后,其电子鼻检测阈值分别为8 cells/100 mL和3 cells/100 mL,两种不同的肠杆菌的LDA区分准确率可达98%。在长达14个月的时间内,电子鼻仍保持着良好的重复性和可靠性。

Abdallah<sup>[16]</sup>等采用Cyranose 320电子鼻检测了牛肉和香肠样本中的几种食源性细菌(大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏杆菌、金黄色葡萄球菌和绿脓杆菌)。结果显示,电子鼻能对不同样品中的总菌落数进行测量,并且能对50~350 ppb浓度范围内的挥发性有机化合物进行定量,四种细菌感染样本前后的气体浓度与单种细菌高度相关( $p < 0.005$ )。陈丽萍等<sup>[17]</sup>利用PEN3型电子鼻传感器分析了金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、粪链球菌、单增李斯特菌4种食源性致病菌产生的挥发性代谢产物,用PCA和LDA方法实现了4种致病菌株在较低浓度下的区分。

## 2.2 霉菌

霉菌在自然界分布很广,同时由于其可形成各种微小的孢子,因而很容易污染食品。为了实现电子鼻对草莓贮藏期常见霉菌感染的早期检测,朱

娜<sup>[18]</sup>等采用电子鼻获取3种霉菌侵染的草莓果实的气味响应值,利用PCA确定基于电子鼻识别草莓感染病原菌的种类,并利用Fisher判别建立了基于气味的草莓果实病害的回归函数并进行验证,总体准确率达95%以上,他们通过载荷分析及气质联用进一步确定了感染霉菌后产生的挥发性气体成分,为草莓采后病原微生物的感染的无损快速检测提供了参考。

张红梅<sup>[19]</sup>对电子鼻传感器阵列数据的BP神经网络训练,建立霉变玉米菌落总数的预测模型,训练级和测试集,预测值和测试值的相关系数分别为0.97和0.93。黄星奕<sup>[20]</sup>等使用自主研发的电子鼻系统,研究了烟丝霉变的无损检测新方法。针对非霉变、轻微霉变、中等霉变、严重霉变的四种样本,通过PCA方法进行特征参数的处理,结果显示,不同霉变程度的烟丝样本间挥发的气味指纹信息存在一定的差异。他们进一步采用BP神经网络表征传感器的响应值与所测气味成分之间的映射关系,对霉变的识别正确率达到90%,表明电子鼻技术可客观、可靠的控制烟丝质量。

郑飞翔<sup>[21]</sup>建立了一种电子鼻系统分析黄豆与白芸豆霉变状态。依据豆类霉变的特征气体,用电子鼻检测不同霉变程度的豆类样品,采取PCA法分析电子鼻检测数据,并采用随机共振方法提取样品的霉变特征,经非线性拟合,构建黄豆和白芸豆霉变的预测模型,实现了两种豆类样品霉变状态的快速表征。

指状青霉菌会引起柑橘类水果在储藏过程中的病变。Pallottino<sup>[22]</sup>等采用电子鼻结合多元分类技术、偏最小二乘法判别分析(PLS-DA)检测了受到指状青霉菌低水平感染的柑橘,正确分辨率达到100%。

电子鼻信号不同特征组合的表征对霉变玉米鉴别结果的影响较大。殷勇<sup>[23]</sup>等研究了积分值、平均微分值、相对稳态平均值的不同特征组合来构建电子鼻响应信息的表征模式。结果表明,基于多特征融合模式的电子鼻对于检测玉米霉变的检测优于单特征性和两两特征组合,判别正确率在96%以上。

## 2.3 酵母菌

一些酵母菌可以在含高浓度糖的基质上生长繁殖、造成食品污染。鲁氏接合酵母属真菌类生物,活力较强,耐高渗透压,是高糖食品及饮料的重要污染源<sup>[24]</sup>。为了对苹果汁中鲁氏接合酵母早期污染进

表3 电子鼻在各种食品基质中的微生物污染物检测

Table 3 Applications of e-noses for the detection of microbiological contaminations in foodstuffs

品种	电子鼻型号	污染物名称	数据处理方法	参考文献
玉米	EOS 835	伏马菌素	PCA, PLS	[30]
洋葱	Smith Detection	伯克霍尔德菌	PCA	[31]
果汁	EOS507	脂环酸芽孢杆菌	PCA, PLS	[32]
牛肉条	Cyranose-320	沙门氏菌	LDA, QDA	[33]
鸡肉	EOS 835	乳酸菌	PCA	[34]
猪肉	FOX4000	菌落总数	PCA, PLS, SVC	[35]
果汁	NST3320	酸热脂环酸芽孢杆菌	PCA, LDA	[36]

行识别,王虎玄<sup>[25]</sup>等利用 LDA 研究了电子鼻对不同污染时间苹果汁的区分能力,发现能够识别酵母菌浓度小于 200 CFU/mL(污染 12 h)的苹果汁。他们还利用载荷分析方法研究了各传感器在电子鼻早期识别鲁氏接合酵母污染的贡献。为了进行定量检测,采用偏 PLS 方法对数据进行拟合,表明苹果汁中酵母浓度与电子鼻响应信号之间具有良好的线性关系。

Concina<sup>[26]</sup>用三种细菌和三种真菌接种在去皮西红柿上,用含有六个薄膜传感器的电子鼻进行微生物早期的监测。当微生物变质产生的化学气体和传感器起作用时,传感器表面发生氧化还原反应引起薄膜的电导率发生变化。他们用 PCA 进行多维数据的可视化和特征提取,用 K 最近邻(KNN)算法进行分类。研究发现,对于特定的污染物,如大肠杆菌和酵母菌,可以在接种后的 48 h 后识别出来,而其他几种微生物(炭黑曲霉、阴沟肠杆、植物乳杆菌和软毛青霉菌)因为较低的代谢速率,需要在接种 1 周后才能测出。

#### 2.4 微生物毒素

微生物毒素是微生物的次级代谢产物,在较低剂量时即对其他生物产生毒性,主要包括霉菌毒素、细菌毒素和藻类毒素等。

脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)是由镰刀菌产生的,是谷物中最常见的一类污染性霉菌毒素。Lippolis<sup>[27]</sup>等用电子鼻对硬质小麦中的 DON 进行快速检测,通过 DFA 进行建模,校正集对受到自然污染的完整籽粒和麦粉的平均识别率分别达到 69.3% 和 86.7%,麦粉验证集的平均识别率为 82.1%,剔除异常样本后可达到 90.1%,错判率为 4%。黄曲霉毒素在霉菌毒素中毒性最大,对人类健康危害极为突出。有学者利用电子鼻对谷物中的黄曲霉毒素进行了成功的分析<sup>[28]</sup>。食品中常见的细菌毒素有金黄色葡萄球菌肠毒素、肉毒毒素和大肠杆菌肠毒素等,电子鼻也可以对其进行分析<sup>[29]</sup>。

综上,电子鼻可以广泛用于不同食品基质中的微生物污染物的检测,包括加工食品-半成品和未加工食品等。电子鼻用于部分食品基质的检测应用见表 3。

### 3 结论与展望

与传统的分析技术相比,电子鼻有着快速、实时、无损、便捷的优点。目前的电子鼻技术研究虽然

取得了较大的进展,但仍然存在问题,主要表现在:作为电子鼻核心部件的气体传感器在灵敏度、稳定性、可靠性和鲁棒性方面有待提高。例如,如果其中的传感器一旦损坏,就很难找到一个完全相同的传感器去替换,而且会影响到已有的数据库的精确性;虽然经过训练的电子鼻最快可以在几秒钟内即可得出检测结果,但电子鼻的训练过程时间较长,这在一定程度上限制了它的应用;电子鼻在长期漂移、背景干扰、个体差异等问题还没有得到妥善解决。

根据电子鼻的结构特点可以从以下几个方面进行电子鼻总体性能进行优化。第一,气体采样方法的多样化。气体采样器是电子鼻的输入系统,现有的几种气体采集方法各有优缺点,在今后可以针对不同的应用,开发更为有效的方法提高其输入性能。第二,传感器阵列灵敏材料的选择。可以采用混合型的气体传感器阵列取代单一种类传感器,目前有些公司已将 MOS、MOSFET 和 QCM 等各种类型的传感器混合使用,从而可以集合各种传感器的优点,从硬件上提高气体传感器的性能。第三,特征提取及选择方法的优化。理想的特征提取方法对传感器性能的提高非常重要。特征提取主要来源于传感器的原始反应曲线、曲线拟合参数、变换域(如傅立叶变换和波长变换)、相空间等,除此以外可以设计一些新的特征提取方法增加数据量以获取更多信息。第四,模式识别方法的选择和优化。考虑到电子鼻系统所获得的海量数据的复杂性以及与目标分析物的关联性,选择和设计一种行之有效的机器学习算法是电子鼻进行成功检测的先决条件。此外,未来电子鼻应该在小型化、集成化和多功能化方面取得突破,应能更方便的其他仪器联用,如气相色谱-质谱联用仪、电子舌、电子眼和红外光谱等。随着电子、计算机、机械、材料、化工、模式识别等技术的发展,电子鼻在将得到更为广泛的应用。

大量的文献资料表明,电子鼻在食品微生物检测方面的理论研究已经相对比较成熟,但在实际应用上还存在这一些挑战,专用的电子鼻还没有进入商品化生产阶段。最主要是由于食品中的微生物检测还没有引起普通民众的足够重视,因此缺少已获得许可证的企业来生产推广,研发资金投入上也有一定的困难。另一方面,由于相关的专业检测人员的观念还局限于传统的检测方法,他们对于这一新技术的接受过程较慢。未来在专用仪器的研发阶段,研究人员和食品检验人员之间需要通力合作,进

行信息交换。另外,未来电子鼻还需要进一步深入的研究,如在短时间内对食品中的多种微生物污染物进行同时进行,以及如何提高检测结果的灵敏度、准确性和重复性等。一旦这些问题得到解决,相信不久的将来,像警用酒精检测仪的成功应用那样,电子鼻在食品微生物快速检测领域就会迅速进入大规模的市场应用阶段。

### 参考文献

- [1] Romain A C, Nicolas J. Long term stability of metal oxide-based gas sensors for e-nose environmental applications: An overview [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 146(2): 502-506.
- [2] Becher C, Kaul P, Mitrovics J, et al. The detection of evaporating hazardous material released from moving sources using a gas sensor network [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 146(2): 513-520.
- [3] Adiguzel Y, Kulah H. Breath sensors for lung cancer diagnosis [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2015, 65: 121-138.
- [4] Van Geffen W H, Bruins M, Kerstjens H A. Diagnosing viral and bacterial respiratory infections in acute COPD exacerbations by an electronic nose: a pilot study [J]. *J Breath Res*, 2016, 10(3): 36001.
- [5] Oh E H, Song H S, Park T H. Recent advances in electronic and bioelectronic noses and their biomedical applications [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2011, 48(6-7): 427-437.
- [6] Dai Y, Zhi R, Zhao L, et al. Longjing tea quality classification by fusion of features collected from E-nose [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2015, 144: 63-70.
- [7] Konduru T, Rains G C, Li C. Detecting sour skin infected onions using a customized gas sensor array [J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 160: 19-27.
- [8] 何计龙, 卢亭. 电子鼻对酿造食醋与配制食醋的区分辨识 [J]. *中国调味品*, 2016, 41(7): 132-133.
- [9] Hotelling H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components [J]. *Journal of Educational Psychology*, 1933, 24(6): 417-441.
- [10] Fisher R A. The use of multiple measurements in taxonomic problems [J]. *Annals of Eugenics*, 1936, 7(2): 179-188.
- [11] 高旭昇, 王平. 电子鼻信号处理方法的研究进展 [J]. *国外医学生物医学工程分册*, 2001, 24(1): 1-6.
- [12] 戴娟, 马莉, 李晔. 虾酱罐头在不同的贮藏温度和时间下菌落总数和挥发性物质的变化 [J]. *食品工业科技*, 2016, 37(9): 335-339.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Gobbi E, Falasconi M, Zambotti G, et al. Rapid diagnosis of Enterobacteriaceae in vegetable soups by a metal oxide sensor based electronic nose [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 207: 1104-1113.
- [16] Abdallah S A, Al-Shatti L A, Alhajraf A F, et al. The detection of foodborne bacteria on beef: the application of the electronic nose [J]. *Springerplus*, 2013, 2: 687.
- [17] 陈丽萍, 徐茂琴, 何红萍, 等. 应用 PE N3 型电子鼻传感器快速检测食源性致病菌 [J]. *食品科学*, 2014, 35(8): 187-192.
- [18] 朱娜, 毛淑波, 潘磊庆, 等. 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(5): 266-273.
- [19] 张红梅, 侯明涛, 王淼森, 等. 基于电子鼻技术的玉米气味品质检测研究 [J]. *河南农业大学学报*, 2016, 50(3): 336-340.
- [20] 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.
- [21] 郑飞翔, 李剑, 楼雄伟, 等. 基于电子鼻的霉变黄豆和白芸豆检测方法 [J]. *中国食品学报*, 2016, 16(3): 190-197.
- [22] Pallottino F, Costa C, Antonucci F, et al. Electronic nose application for determination of *Penicillium digitatum* in Valencia oranges [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, 92(9): 2008-2012.
- [23] 殷勇, 郝银凤, 于慧春. 基于多特征融合的电子鼻鉴别玉米霉变程度 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 254-260.
- [24] Vermeulen A, Marvig C L, Daelman J, et al. Strategies to increase the stability of intermediate moisture foods towards *Zygosaccharomyces rouxii*: The effect of temperature, ethanol, pH and water activity, with or without the influence of organic acids [J]. *Food Microbiology*, 2015, 45: 119-125.
- [25] 王虎玄, 胡仲秋, 龙芳羽, 等. 苹果汁中鲁氏接合酵母早期污染的电子鼻识别研究 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(1): 209-214.
- [26] 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.
- [27] Lippolis V, Pascale M, Cervellieri S, et al. Screening of deoxynivalenol contamination in durum wheat by MOS-based electronic nose and identification of the relevant pattern of volatile compounds [J]. *Food Control*, 2014, 37: 263-271.
- [28] Campagnoli A, Cheli F, Savoini G, et al. Application of an electronic nose to detection of aflatoxins in corn [J]. *Veterinary Research Communications*, 2009, 33(S1): 273-275.
- [29] Wilson A D, Baietto M. Advances in electronic-nose technologies developed for biomedical applications [J]. *Sensors*, 2011, 11(1): 1105-1176.
- [30] Gobbi E, Falasconi M, Torelli E, et al. Electronic nose predicts high and low fumonisin contamination in maize cultures [J]. *Food Research International*, 2011, 44(4): 992-999.
- [31] Li C, Schmidt N E, Gitaitis R. Detection of onion postharvest diseases by analyses of headspace volatiles using a gas sensor array and GC-MS [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(4): 1019-1025.
- [32] Cagnasso S, Falasconi M, Previdi M P, et al. Rapid screening of *Alicyclobacillus acidoterrestris* spoilage of fruit juices by electronic nose: a confirmation study [J]. *Journal of Sensors*, 2010, 2010: 1-9.
- [33] Balasubramanian S, Panigrahi S, Logue C M, et al. Identification of *Salmonella*-inoculated beef using a portable electronic nose system [J]. *Journal of Rapid Methods & Automation in Microbiology*, 2005, 13(2): 71-95.

(下转第 385 页)

[16] Blanquet - Diot S ,Soufi M ,Rambeau M ,et al. Digestive Stability of Xanthophylls Exceeds That of Carotenes As Studied in a Dynamic *in Vitro* Gastrointestinal System [J] . Journal of Nutrition 2009 ,139( 5) : 876-883.

[17] Martin A H ,De Jong G A. Enhancing the *in vitro* Fe(2+) bio-accessibility using ascorbate and cold-set whey protein gel particles [J]. Dairy Sci Technol 2012 ,92( 2) : 133-149.

[18] Villemejeane C ,Denis S ,Marsset - Baglieri A ,et al. *In vitro* digestion of short - dough biscuits enriched in proteins and/or fibres using a multi - compartmental and dynamic system ( 2) : Protein and starch hydrolyses [J] . Food Chem ,2016 ,190: 164-172.

[19] Picariello G , Mamone G , Nitride C , et al. Protein digestomics: Integrated platforms to study food - protein digestion and derived functional and active peptides [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry 2013 52: 120-134.

[20] Oomen A G ,Rompelberg C J M ,Bruil M A ,et al. Development of an *in vitro* digestion model for estimating the bioaccessibility of soil contaminants [J] . Archives of Environmental Contamination and Toxicology ,2003 ,44 ( 3) : 281-287.

[21] Versantvoort C H ,Oomen A G ,Van De Kamp E ,et al. Applicability of an *in vitro* digestion model in assessing the bioaccessibility of mycotoxins from food [J]. Food Chem Toxicol , 2005 43( 1) : 31-40.

[22] Moreno F J. Gastrointestinal digestion of food allergens: effect on their allergenicity [J]. Biomed Pharmacother ,2007 ,61 ( 1) : 50-60.

[23] Gianfrani C ,Camarca A ,Mazzarella G ,et al. Extensive *in vitro* gastrointestinal digestion markedly reduces the immune - toxicity of Triticum monococcum wheat: Implication for celiac disease [J]. Mol Nutr Food Res 2015 59(9) : 1844-1854.

[24] Bordoni A ,Laghi L ,Babini E ,et al. The foodomics approach for the evaluation of protein bioaccessibility in processed meat upon *in vitro* digestion [J] . Electrophoresis ,2014 ,35 ( 11) : 1607-1614.

[25] Blanquet - Diot S ,Denis S ,Chalancon S ,et al. Use of Artificial Digestive Systems to Investigate the Biopharmaceutical Factors Influencing the Survival of Probiotic Yeast During Gastrointestinal Transit in Humans [J]. Pharmaceutical Research , 2012 29( 6) : 1444-1453.

[26] Zhang S , Vardhanabuthi B. Effect of initial protein

concentration and pH on *in vitro* gastric digestion of heated whey proteins [J]. Food Chem 2014 ,145: 473-480.

[27] Picariello G ,Ferranti P ,Fierro O ,et al. Peptides surviving the simulated gastrointestinal digestion of milk proteins: biological and toxicological implications [J] . J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci 2010 878( 3-4) : 295-308.

[28] Mamone G ,Ferranti P ,Rossi M ,et al. Identification of a peptide from alpha - gliadin resistant to digestive enzymes: implications for celiac disease [J]. J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci 2007 855( 2) : 236-241.

[29] Mun S ,Decker E A ,McClements D J. Influence of emulsifier type on *in vitro* digestibility of lipid droplets by pancreatic lipase [J]. Food Research International 2007 40( 6) : 770-781.

[30] Porter C J H ,Kaukonen A M ,Taillardat - Bertschinger A ,et al. Use of *in vitro* lipid digestion data to explain the *in vivo* performance of triglyceride - based oral lipid formulations of poorly water - soluble drugs: Studies with halofantrine [J] . Journal of Pharmaceutical Sciences 2004 93( 5) : 1110-1121.

[31] Van Den Broeck H C ,Cordewener J H ,Nessen M A ,et al. Label free targeted detection and quantification of celiac disease immunogenic epitopes by mass spectrometry [J]. J Chromatogr A , 2015 ,1391: 60-71.

[32] Plundrich N J ,White B L ,Dean L L ,et al. Stability and immunogenicity of hypoallergenic peanut protein - polyphenol complexes during *in vitro* pepsin digestion [J]. Food Funct 2015 6( 7) : 2145-2154.

[33] He L ,Wu L ,Xu Z ,et al. Low - protein diets affect ileal amino acid digestibility and gene expression of digestive enzymes in growing and finishing pigs [J] . Amino Acids ,2016 ,48 ( 1) : 21-30.

[34] Abdel - Aal E S M. Effects of baking on protein digestibility of organic spelt products determined by two *in vitro* digestion methods [J] . Lwt - Food Science and Technology ,2008 41( 7) : 1282-1288.

[35] Prandi B ,Faccini A ,Tedeschi T ,et al. Qualitative and quantitative determination of peptides related to celiac disease in mixtures derived from different methods of simulated gastrointestinal digestion of wheat products [J] . Anal Bioanal Chem 2014 406( 19) : 4765-4775.

[36] Picariello G ,Miralles B ,Mamone G ,et al. Role of intestinal brush border peptidases in the simulated digestion of milk proteins [J]. Mol Nutr Food Res 2015 59( 5) : 948-956.

( 上接第 380 页)

[34] Sberveglieri V ,Carmona E N ,Comini E ,et al. A novel electronic nose as adaptable device to judge microbiological quality and safety in foodstuff [J] . Bio Med Research International 2014 2014: 1-6.

[35] Wang D F ,Wang X ,Liu T ,et al. Prediction of total viable counts on chilled pork using an electronic nose combined with

support vector machine [J] . Meat Science ,2012 ,90 ( 2) : 373-377.

[36] Hartyáni P ,Dalmadi I ,Knorr D. Electronic nose investigation of *Alicyclobacillus acidoterrestris* inoculated apple and orange juice treated by high hydrostatic pressure [J]. Food Control ,2013 32( 1) : 262-269.