



智能感官技术在水果检测中的应用进展及趋势

冯建英, 李鑫, 原变鱼, 穆维松*

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要:对水果新鲜度、成熟度和质地等属性指标的快速、无损、准确检测,能显著改善水果质量分级、品质评价的准确性和工作效率,智能感官技术由于具有操作简便、检测速度快等优点,已逐渐应用于水果检测领域。文章分别综述电子鼻技术、电子舌技术和质构分析技术这三类典型智能感官技术的工作原理,及其在检测水果新鲜度、成熟度、病虫害侵染状况、品种鉴别、品质感知和质地分析等领域的代表性研究思路、方法及成果,并根据智能感官技术的发展和水果检测业务需求的变化,提出该领域的发展趋势,即智能感官技术将与传统感官分析相结合,智能感官分析仪器将向便携化方向发展,多种智能感官技术将趋向于联合应用。

关键词: 智能感官技术; 电子鼻; 电子舌; 质构仪; 水果检测

中图分类号: S126

文献标志码: A

文章编号: 2095-1191(2020)03-0636-09

Progress and trend of fruit detection by intelligent sensory technology

FENG Jian-ying, LI Xin, YUAN Bian-yu, MU Wei-song*

(College of Information and Electrical Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract: Rapid, non-destructive and accurate detection of fruit freshness, maturity, texture and other attributes can significantly improve fruit quality classification, quality evaluation accuracy and work efficiency. Intelligent sensory technology has been applied in fruit testing due to its advantages of easy operation and fast detection speed. This paper reviewed the principles of three typical types of intelligent sensory technology (electronic nose technology, electronic tongue technology and texture analysis technology) and their application in fruit detection, including the representative research ideas, methods and findings in the detection of fruit freshness, maturity, pest and disease infection status, as well as variety identification, quality perception and texture analysis, respectively. Finally, according to the development of intelligent sensory technology and the changes in the demand for fruit testing business, this paper proposed the development trend in this field: intelligent sensory technology would be combined with traditional sensory analysis, intelligent sensory analysis instruments would develop towards portability, and multiple intelligence sensory technologies would tend to be applied in combination.

Key words: intelligent sensory technology; electronic nose; electronic tongue; texture analyzer; fruit detection

Foundation item: Project of National Modern Agricultural Industrial Technology System Construction(CARS-29)

0 引言

水果含有人类生存所必需的碳水化合物、维生素及无机盐等营养物质,是人们日常生活中营养来源的有益补充。对水果各类属性,如新鲜度、成熟度、质地和病虫害侵染程度等的检测关乎消费者的食用安全及水果的商品价值,目前对这些属性的检测与评价主要采用感官评价或气相色谱等仪器测

定。感官评价是一种主观评价方法,主观性较强,重复性差,会受到评价员的身体状况、情绪及外部环境等多方面因素影响(Hempel et al., 2013);此外,感官评价员对大量样品的评价通常会因其感官疲劳使得评价准确性降低。而大型仪器的测量,例如气相色谱法、液相色谱法等需经过复杂的前处理,不仅造价高,还需要专业技术人员操作(张鑫等, 2012),影响

收稿日期: 2019-06-12

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-29)

作者简介: *为通讯作者,穆维松(1967-),教授,博士生导师,主要从事农业系统工程与信息化研究工作, E-mail: wsmu@cau.edu.cn。冯建英(1982-),副教授,主要从事农业系统评估与建模研究工作, E-mail: fjying@cau.edu.cn

其应用和普及。随着传感技术的发展,一类使用传感器模拟人类感官的智能感官技术应运而生,这种智能感官技术操作简单快速、分析高效准确(姜燕等,2018),能有效克服感官评价和仪器测量的不足,因而受到关注和欢迎,目前国内外已有较多研究探索将智能感官技术用于水果检测,主要应用的智能感官技术有电子鼻、电子舌和质构分析技术,研究内容包括检测水果新鲜度、检测水果成熟度以确定合适的收获时期和研究水果采后的质地变化规律等。本文将系统综述这3种智能感官技术在检测水果新鲜度、成熟度、品质和质地等方面的研究进展,并分析智能感官技术的发展趋势,以期为水果检测及智能感官技术的发展方向提供参考依据。

1 电子鼻技术

电子鼻的工作原理是通过气体传感器阵列来模拟人的嗅觉器官,对气味进行感知和分析,由传感器、信号处理系统和模式识别系统3部分构成,通过传感器及模式识别系统获得被测样品的整体信息(于勇等,2003)。在水果检测领域,电子鼻主要用于检测和判断水果的贮藏期、新鲜度、成熟度及是否受到病虫害感染。

1.1 检测水果的贮藏期与新鲜度

由于消费升级和对食品安全的关注,消费者对水果质量的要求也在逐渐提高,新鲜和高品质的水果逐渐成为消费者的首选,与此相关的一系列农业和食品技术相继出现,其中,保鲜贮藏是保障新鲜水果周年供应的一项重要技术。大多数水果在贮藏初期与贮藏一段时间后的外观并无明显区别,因而判断水果已经历的贮藏时间或剩余货架期对于消费者和商家而言都十分困难,导致消费者对贮藏后水果的新鲜度和品质时常心存疑虑。电子鼻技术可通过水果采后贮藏期间气味的变化,判断水果的贮藏时间与新鲜程度,为解决这一难题提供了新思路。

分析国内外相关文献发现,虽然使用的电子鼻系统不尽相同,但一般均以金属氧化物电导型气敏传感器(MOS)作为设计基础。MOS的优点在于制备相对简单、价格较便宜、灵敏度高,因而成为电子鼻系统最常用的传感器(王俊等,2013)。傅均等(2017)开发了一种基于MOS的嵌入式、便携式电子鼻系统,并通过对巨峰葡萄储存时间的检测验证了该系统的有效性,结果表明该系统识别率在80%以上。Feng等(2018)利用美国ISENSO公司生产的MOS电子鼻系统确定了冷藏期间樱桃番茄的4种新鲜度(新鲜、可接受、不新鲜和非常不新鲜)。目前国

内用于检测水果贮藏期和新鲜度的电子鼻系统大多为德国AIRSENSE公司制造的基于MOS的PEN3型便携式电子鼻系统,陈辰等(2015)利用PEN3电子鼻系统有效区分了不同贮藏期的玫瑰香葡萄,应用判别函数分析对未知样品的判别正确率高达95%;郑秀艳等(2016)应用PEN3电子鼻系统检测蓝莓果实贮藏期间气味的变化,分析结果与感官评价和理化检测结果一致;黎新荣(2018)利用PEN3电子鼻系统获取了不同贮藏时间沃柑的气味特征值,采用主成分分析法(PCA)和线性判别分析法(LDA)对气味特征值进行分析并建立预测模型,表明采用PCA无法对贮藏间隔5 d的沃柑进行区分,而应用LDA能很好地区分不同贮藏时间的沃柑,可应用于沃柑贮藏时间的快速判断。

综上所述,电子鼻技术具有的检测速度快、可实现无损检测、检测准确率高等优点,使其在水果新鲜度检测方面具有良好的应用前景。利用电子鼻技术检测水果贮藏期和新鲜度的研究很多,水果品种涉及苹果(潘胤飞等,2004;张晓华等,2007;张鹏等,2015)、柑橘(Gómez et al., 2007)、水蜜桃(江琳琳等,2010;马淑凤等,2010)、香蕉(惠国华等,2012)、芒果(尹芳缘等,2012)和草莓(赵秀洁等,2014)等。此外,利用电子鼻对水果新鲜度的评估通常与各类算法密切结合,判别的准确率均在80%以上(表1)。

1.2 检测水果的成熟度

在适当采收期进行采收是保证水果品质的重要手段之一。采收太早会导致水果产量低、果实风味不佳,采收过晚又会出现水果储运困难、货架期较短的问题,因此,正确判断水果的成熟度以确定合适采收期十分必要。以往确定水果采收期大多通过感官对果实的外观、色泽和硬度进行判断,或通过实验手段对水果的内在品质进行检测,检测时间较长,可能需要对水果进行破坏,且需要专业人员操作。现阶段,已有一些研究人员将电子鼻技术应用于水果成熟度的检测,主要根据水果在不同成熟度下挥发性香气物质的变化,分析水果在不同时期挥发性物质的变化规律,从而达到判断水果成熟度的目的。

利用电子鼻技术检测水果成熟度使用的传感器大多基于MOS。Benedetti等(2008)利用AIRSENSE公司制造的PEN2电子鼻可实现对3种成熟度(不成熟、成熟和过熟)的桃进行准确区分;张鑫等(2012)利用Alpha MOS公司生产基于MOS的FOX4000电子鼻系统对不同成熟度锦绣黄桃进行检测,较好地地区分了转色期、成熟期和完熟期果实;王贵平和王金政(2015)的研究结果表明,可通过PEN3电子鼻区分不

表 1 检测水果贮藏期与新鲜度的电子鼻系统及算法类型

Table 1 Electronic nose system and algorithm type for detecting fruit storage and freshness

水果种类 Fruit type	水果品种 Fruit variety	传感器类型 Sensor type	算法类型 Algorithm type	准确度(%) Accuracy	参考文献 Literature
柑橘 Citrus	沃柑	MOS	LDA	98.23	黎新荣, 2018
	萨摩柑橘	MOS	LDA		Gómez et al., 2007
蓝莓 Blueberry	赤兔蓝莓	MOS	极限学习机(ELM)	83.30	郑秀艳等, 2016
番茄 Tomato	樱桃番茄	MOS			Feng et al., 2018
葡萄 Grape	巨峰葡萄	MOS	PCA	95.00	傅均等, 2017
	玫瑰香葡萄	MOS	判别函数		陈辰等, 2015
草莓 Strawberry	红颜草莓	MOS	Fisher判别	97.50	赵秀洁等, 2014
桃 Peach	朝晖水蜜桃	MOS	LDA	87.50	马淑凤等, 2010
	久保水蜜桃	MOS	相关系数极大值		江琳琳等, 2010
芒果 Mango	大台农芒果	MOS	RBF神经网络	96.40	尹芳缘等, 2012
香蕉 Banana	香蕉	MOS			LDA
苹果 Apple	富士苹果	MOS	LDA	96.40	潘胤飞等, 2004
	红星苹果	MOS			张鹏等, 2015
	富士苹果	MOS			张鹏等, 2015

同采收期的嘎拉苹果气味变化。除MOS外,有机聚合物膜气敏传感器因其较高的灵敏度在食品检测上也得到推广应用。Oshita等(2000)采用英国AromaScan公司的电子鼻系统对不同成熟度梨的气味进行检测,结果表明该系统采用的有机聚合物膜气敏传感器可较好地将3种成熟度(不成熟、成熟和过熟)的梨样品进行区分。

1.3 检测水果的病虫害侵染状况

大多数水果在采摘过程中易受损而形成伤口,这些伤口极易被病原菌或害虫等侵染,造成果实采后腐烂损伤,因此快速、精确、无损地检测水果是否受到侵染是当前的研究热点之一。由于不同病虫害对水果采后挥发性物质的影响不同,利用电子鼻技术对水果采后挥发性物质进行检测分析可确定水果采后是否受到病虫害侵染,并能进一步确定感染的病虫害种类及数量。

利用电子鼻技术,通过MOS对水果采后挥发性物质进行检测分析,可有效区分出受到侵染的水果。Ezhilan等(2018)自制了包含6个现成传感器阵列的电子鼻系统用来区分新鲜、半污染和完全污染的皇家美味苹果样本;Wen等(2019)开发了一种全面的电子鼻系统用于检测柑橘类水果中早期感染桔小实蝇[*Bactrocera dorsalis*(Hendel)]的情况,并通过LDA模型可区分未受侵染和已受侵染的柑橘,正确率达98.21%。

针对不同病原菌给水果挥发性物质带来的影响差异,许多研究人员开始利用电子鼻技术区分果实采后所感染的病原菌。Li等(2010)利用导电聚合物传感器组成的电子鼻系统对蓝莓果实采后常见的灰霉菌(*Botrytis cinerea*)、炭疽菌(*Colletotrichum gloeosporioides*)和链格孢菌(*Alternaria* sp.)进行检

测,证明了电子鼻系统及导电聚合物传感器应用在水果病虫害检测的可行性。基于MOS的电子鼻同以样可区分果实采后所感染的病原菌,朱娜等(2013)、李敏等(2014)分别利用PEN3电子鼻系统成功区分了草莓和芒果感染的病原菌;Liu等(2018)利用PEN3电子鼻系统识别了桃子中的灰霉菌、桃褐腐病菌(*Monilinia fructicola*)和桃软腐病菌(*Rhizopus stolonifer*)3种真菌污染物,并通过偏最小二乘回归(PLSR)可有效预测桃样品中的真菌菌落数。

2 电子舌技术

电子舌系统也被称为智能味觉仿生系统,包括传感器、信号处理系统和模式识别系统3部分(裘姗姗, 2016)。首先用电子传感器阵列检测和采集物体的味道特征,味道信号经信号处理系统的特征提取和转换后再传递到模式识别系统,对不同味道进行辨识。电子舌的检测对象一般是液体,所以早期电子舌在饮料中的应用较多,例如将电子舌应用在啤酒(李阳等, 2008)和葡萄酒(Garcia-Hernandez et al., 2018)等酒类、草莓汁(高利萍等, 2012)和柑橘汁(赵娜等, 2015)等果汁及红茶(姜莎等, 2009)等茶饮品的判别分析。目前已有研究人员开展了将电子舌系统应用于水果检测的试验研究。

2.1 鉴别水果品种

电子舌技术对水果品种的鉴别主要是基于电位化学传感器,利用不同传感器对不同味道进行吸附从而获得样品的整体味觉信息。由于不同品种的水果在味觉上存在一定差异,电子舌技术还可实现对同类水果不同品种的区分。Rudnitskaya等(2006)通过试验证明由圣彼得堡大学化学传感器实验室开发包含15个电位化学传感器的电子舌系统可应用于

苹果品种区分,并将电子舌系统获得的数据与高效液相色谱法(HPLC)测量得到的苹果有机酸浓度进行比较,证明电子舌系统还可用于测定苹果中的有机酸含量;Beullens等(2008)比较了圣彼得堡大学开发由18个电位传感器组成的电子舌系统与法国Alpha MOS公司开发由7个传感器构成的Astree电子舌系统在分析番茄味道上的差异,结果表明两种电子舌均可根据味觉特征对番茄品种进行良好区分;黎量等(2015)利用 α Astree电子舌系统对不同基源的山

楂进行区分,通过PCA和DEA模型均能判别山楂和山里红这两类基源的山楂样本;Xu等(2018)利用Alpha MOS Astree II电子舌系统不仅区分了4个番茄品种,还区分了番茄的6种不同成熟度;张浩等(2018)通过一系列研究证明利用电子舌系统并结合PCA可将金芒、青芒、红玉及贵妃4种芒果进行很好区分,且发现青芒与红玉、贵妃与金芒具有更相近的味觉特征。目前研究中应用电子舌系统区分的主要水果种类及所使用的电子舌系统类型如表2所示。

表 2 区分水果种类电子舌系统类型

Table 2 Type of electronic tongue system that distinguishes fruit types

水果种类 Fruit variety	电子舌系统 Electronic tongue system	传感器类型 Sensor type	参考文献 Literature
苹果 Apple	圣彼得堡大学开发	电位化学传感器	Rudnitskaya et al., 2006
番茄 Tomato	圣彼得堡大学开发	电位化学传感器	Beullens et al., 2006, 2008
	法国Alpha MOS公司的Astree II电子舌	电位化学传感器	Xu et al., 2018
杏 Apricot	法国Alpha MOS公司的 α Astree I电子舌	电位化学传感器	Kantor et al., 2008
山楂 Chinese hawthorn	法国Alpha MOS公司的 α Astree电子舌	电位化学传感器	黎量等, 2015
芒果 Mango	法国Alpha MOS公司的 α Astree电子舌	电位化学传感器	张浩等, 2018

2.2 感知水果的味觉强度

利用电子舌系统除了能鉴别不同的水果品种外,还可用于感知和检测水果的味觉强度。陈多多等(2016)比较了化学沉淀法、凝胶电泳法及电子舌法与单宁涩味感官评价的相关性,虽然这3种方法均与感官评价的相关性较高,但化学沉淀法和凝胶电泳法均为化学方法,操作较繁琐且重复性差,而电子舌法操作简单、重复性好,所以选择基于电子舌法建立涩味模型。由于不同质量浓度的单宁酸对电子舌不同传感器的反应强度不同,选择响应值与单宁酸涩味显著相关的传感器,建立涩味评价与电子舌传感器响应值的回归方程;以相同质量浓度柿单宁及微胶囊柿单宁为样品验证了模型的可行性,结果表明预测值与实际感官评价基本吻合,进一步证实电子舌可作为检测涩味强度的方法。

目前,利用电子舌系统对水果味觉强度感知的研究还相对较少,主要集中在对蔬菜(如食用菌)鲜味强度(邴芳玲等,2016)和茶叶涩味强度(薛长风等,2018)的感知。因此,利用电子舌感知水果的味觉强度可作为今后研究的重点,完善水果风味的评价方法。

2.3 检测水果的成熟度

水果在成熟期间的物质成分会发生明显变化,且酸度、糖含量等物质的变化会引起不同电极上电流响应的电化学变化。利用上述原理可通过电子舌技术对水果成熟度进行检测,且可预测一些物质含量。检测水果成熟度的电子舌系统大多利用伏安型传感器,其灵敏度高、操作简便。Campos等(2013)

利用伏安电子舌获得的电化学数据、通过PLSR构建用于预测总酸和糖度的模型,结果表明可使用电子舌监测葡萄成熟度,从而预测合适的收获时间;Pigani等(2018)开发了一种由2个伏安传感器组成的电子舌系统以检测葡萄的成熟度,并构建了估计pH、总酸度、糖含量和花色苷含量的预测模型;Orlandi等(2019)将基于伏安型传感器电子舌系统的物质浓度数据与电子眼系统的颜色特征数据进行融合以判断葡萄成熟度,结果发现融合方法较单独使用一种技术的检测准确度更高,表明不同检测手段和方法的结合也是今后检测技术的发展方向。

3 质构分析技术

质构是评价水果品质的关键指标之一,质构仪是通过模拟人的触觉来检测样品硬度、脆性、弹性和胶黏性等物理特征的一种仪器(贺丽霞等,2011),其原理是通过仪器得到食品的力学特征,然后将获取的信息与质构参数建立联系,从而得到食品的质构特性。目前,研究所使用的质构仪大多由英国Stable Micro Systems公司生产,型号主要有TA-XT2i型和TA.XT Plus型等。

3.1 优化水果的测试条件

当前,质构分析技术在水果产品检测方面的研究热点之一是聚焦于分析不同测试条件对水果质地属性的影响,并最终实现质构仪的标准化应用。马庆华等(2011)利用TA.XT Plus型质构仪,通过试验确定了一套适合冬枣的质地检测方法,主要试验参数为采用直径2 mm的P/2n针状探头,设测前速度

5 mm/s、贯入速度1 mm/s及测后速度5 mm/s,最小感知力5 g,感应力阈值2 g;刘翔等(2015)使用TA.XT Plus型质构仪对2个甜瓜品种进行质地分析,结果显示,压缩速度对果实质构参数影响较小,应将压缩速度设为1 mm/s,压缩程度设为30%以更好地测试甜瓜质构,优化了甜瓜质构评价的测试条件;何全光等(2016)为探索芒果果肉质构测定结果与压缩率、测试速率等测试条件的关系,设计了系列应用TA.XT2i型质构仪的试验,结果显示,为更好地反映芒果果肉质构特性,应采用1 mm/s的测试和测后速率及20%~30%的压缩率作为测试条件;赵爱玲等(2018)的研究结果表明,TA.XT Plus型质构仪的P/2探头、贯入速度2 mm/s、在果实中部进行穿刺更适合于鉴定鲜枣质地。上述文献均通过试验确定其研究对象的最佳质地测试条件,说明不同水果所需的试验参数不尽相同。由于质构分析技术所得到的产品各类参数与产品外形尺寸、探头选取、测试速度等多方面因素均有关系,所以实现某种水果标准化、统一化的质地评价方法将是未来研究的重点。

3.2 检测果实发育期间的质地变化规律

质构仪可用来检测果实发育期间某些质地参数的变化规律。Muskovics等(2006)利用TA.XT2型质构仪在果实发育期间测量了3个甜樱桃品种的硬度变化,结果表明甜樱桃果实的发展可根据硬度值分为3个阶段:在初始开发期(阶段1)中检测到典型的硬度增加,随后是硬度降低(阶段2),直至达到实际恒定的最小值(阶段3);Giongo等(2013)利用TA.XT Plus型质构仪测定蓝莓在发育期间的硬度变化,根据BBCH标度选择8个基本阶段来定义蓝莓果实发育,结果表明其硬度随果实发育而逐渐降低直到恒定的最低值;许玲等(2018)同样利用TA.XT Plus型质构仪对3组不同成熟度[七成熟(皮深绿色)、九成熟(皮黄绿色)和完熟(皮黄白色)]的毛叶枣果皮及果肉质地进行了测量,结果表明,随着果实的逐渐成熟,果皮强度、脆性及果肉硬度均逐渐下降;七成熟时果实风味较差,九成熟时风味较浓,完熟期虽果实甜度足但质地已绵软,影响口感。基于质构分析技术的果实发育期间质地变化规律研究,为确定水果的最佳采收期、保证适宜的货架期提供了理论依据。

3.3 检测果实采后的质地变化规律

对果实采后和储藏期间质地差异及变化规律的检测与评价是质构仪的另一重要应用领域,许多研究人员通过质构仪检测掌握了果实采后的质地变

化规律,如水蜜桃(姜松和陈巧林,2006)、葡萄(张昆明等,2011)、香蕉(李志刚等,2016)等。从应用的质构仪型号来分,姜松等(2007)、Billy等(2008)采用TA.XT2i型质构仪分别检测了黄瓜和苹果不同品种在不同贮藏条件下质地的变化特点与规律;徐志斌等(2009)、宋肖琴等(2010)利用TA.XT型质构仪探索了采摘后杨梅果实和枇杷果实的果肉质地变化规律;吴旻丹等(2010)利用英国CNS FARNELL企业的QTS-25质构仪分析了猕猴桃果肉在储藏时间的变化规律。

由于果实品质在采后及贮藏期间会发生一定变化,因此利用质构仪能量化果实的品质变化,更清晰地显示其变化规律。相较于感官评价方法,质构仪的测试时间短、准确度高,结果也更客观可靠。果实采后及贮藏期间质地变化规律的代表性研究见表3。从表3可看出,不同种水果随着贮藏时间的延长,其质地参数的变化不同;同种水果在不同贮藏条件下,质地参数随贮藏时间延长的变化也各不相同。通过研究水果采后在不同贮藏条件下的质地变化规律,可确定水果的最佳贮藏条件,延长水果的货架期。

4 展望

电子鼻、电子舌和质构仪等智能感官技术由于操作简便、实验成本低、检测速度快、检测准确度高优点,已逐步应用于水果各类指标的检测,并取得了大量研究成果。随着智能感官技术的发展和水果检测业务需求的提高,未来研究将呈现以下发展趋势:

4.1 智能感官分析技术与传统感官分析的关联

虽然已有研究探索了智能感官分析技术与传统感官分析技术间的差异,但对于二者间的关联性研究还不够深入。未来应进一步探究二者的差异与关联度,完善水果感官指标检测与评价的方法和技术体系,提高检测的准确度。

4.2 智能感官分析仪器的便携化发展

现有的智能感官分析仪器大多基于PC平台,体积大、使用不够方便灵活,为使其更好地适应于当前水果检测的需求,应探索研制便携式智能感官分析仪器,便于实时实地对水果进行测定分析,提高检测的便捷性。

4.3 多种智能感官分析技术的联合应用

水果的品质包括气味、口味及质地等多个方面,而单一的仪器或设备只能检测某一种品质指标,无法进行综合分析,影响了检测和评价的准确度。

表 3 果实采后及贮藏期间的质地变化规律

Table 3 Changes in texture of fruit after harvest and during storage

水果种类 Fruit variety	贮藏温度(°C) Storage temperature	硬度 Hardness	咀嚼性 Chewability	弹性 Resilience	参考文献 Literature
水蜜桃 Peach	0 20	下降 下降	下降 先降后升	下降 先降后升	姜松和陈巧林,2006 范霞和陈荣顺,2019
葡萄 Grape	-0.3	下降	下降		张昆明等,2011
香蕉 Banana	6	增加	增加	不变	李志刚等,2016
猕猴桃 Kiwi fruit	室温	下降	下降		吴旻丹等,2010
枇杷 Loquat	0	增加	增加	增加	宋肖琴等,2010
杨梅 Chinese red bayberry	25	下降	下降		徐志斌等,2009

今后可探索将电子鼻、电子舌与质构分析等多种智能感官分析技术进行结合,从而全面检测和识别水果的各类感官指标,实现更准确、更高效地检测与评价。

参考文献:

- 邴芳玲,冯涛,杨焱,庄海宁,李晓贝,谢克林,高林林. 2016. 食用菌鲜味味觉定性定量方法的电子舌研究[J]. 现代食品科技,32(8):317-321. [Bing F L, Feng T, Yang Y, Zhuang H N, Li X B, Xie K L, Gao L L. 2016. Quantification of the umami taste of edible fungi using electronic tongue[J]. Modern Food Science and Technology, 32(8): 317-321.]
- 陈辰,鲁晓翔,张鹏,陈绍惠,李江阔. 2015. 基于电子鼻技术的玫瑰香葡萄贮藏期快速判别[J]. 食品与机械,31(6):137-141. [Chen C, Lu X X, Zhang P, Chen S H, Li J K. 2015. Quick discrimination of storage periods for muscat grape based on electronic nose[J]. Food & Machinery, 31(6): 137-141.]
- 陈多多,孔慧,彭进明,李春美. 2016. 基于电子舌技术的柿单宁制品涩味评价模型建立[J]. 食品科学,37(23):89-94. [Chen D D, Kong H, Peng J M, Li C M. 2016. Development of a model for astringency estimation of persimmon tannin products based on electronic tongue[J]. Food Science, 37(23): 89-94.]
- 范霞,陈荣顺. 2019. 水蜜桃采后贮藏期间风味物质及质构特性的研究[J]. 食品科技,44(4):30-35. [Fan X, Chen R S. 2019. Changes on flavor substances and the texture properties of peach during postharvest storage[J]. Food Science and Technology, 44(4): 30-35.]
- 傅均,黄灿钦,章铁飞. 2017. 便携式智能电子鼻系统及其葡萄货架期评价研究[J]. 传感技术学报,30(5):782-788. [Fu J, Huang C Q, Zhang T F. 2017. A portable intelligent electronic nose system and its application in grape shelf life evaluation[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 30(5): 782-788.]
- 高利萍,王俊,崔绍庆. 2012. 不同成熟度草莓鲜榨果汁的电子鼻和电子舌检测[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),38(6):715-724. [Gao L P, Wang J, Cui S Q. 2012. Evaluation of fresh juice of strawberries at different de-

grees of ripeness using electronic nose and electronic tongue[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture & Life Sciences), 38(6):715-724.]

- 贺丽霞,王敏,黄忠民. 2011. 质构仪在我国食品品质评价中的应用综述[J]. 食品工业科技,32(9):446-449. [He L X, Wang M, Huang Z M. 2011. The application of texture analyzer on food quality evaluation in China[J]. Science and Technology of Food Industry, 32(9): 446-449.]
- 何全光,黄梅华,张娥珍,辛明,黄茂康,覃仁源,黄振勇. 2016. 芒果TPA质构测定优化及不同成熟度芒果质构特性分析[J]. 食品工业科技,37(18):122-126. [He Q G, Huang M H, Zhang E Z, Xin M, Huang M K, Qin R Y, Huang Z Y. 2016. Optimization for mango texture profile analysis and characterization of texture to different maturity of mango[J]. Science and Technology of Food Industry, 37(18): 122-126.]
- 惠国华,吴玉玲,陈裕泉. 2012. 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,25(5):566-570. [Hui G H, Wu Y L, Chen Y Q. 2012. Investigation of banana storage time discriminating method using electronic nose[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 25(5): 566-570.]
- 江琳琳,潘磊庆,屠康,杨虹贤,钱钊,韩东海. 2010. 基于电子鼻对水蜜桃货架期评价的研究[J]. 食品科学,31(12):229-232. [Jiang L L, Pan L Q, Tu K, Yang H X, Qian Z, Han D H. 2010. Freshness evaluation of juicy peach by electronic nose[J]. Food Science, 31(12): 229-232.]
- 姜莎,陈芹芹,胡雪芳,杨阳,倪元颖. 2009. 电子舌在红茶饮料区分辨中的应用[J]. 农业工程学报,25(11):345-349. [Jiang S, Chen Q Q, Hu X F, Yang Y, Ni Y Y. 2009. Application of electronic tongue on black tea beverage discrimination[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 25(11): 345-349.]
- 姜松,陈巧林. 2006. 水蜜桃在贮藏期间的质地变化规律的研究[J]. 食品研究与开发,27(5):4-5. [Jiang S, Chen Q L. 2006. Researches on the changing rule of juicy peaches texture during storage[J]. Food Research and Development, 27(5): 4-5.]
- 姜松,何莹,赵杰文. 2007. 水果黄瓜在贮藏过程中力学品质变化的研究[J]. 食品科学,28(2):322-326. [Jiang S, He Y, Zhao J W. 2007. Study on changes of mini-cucumber mechanical properties during storage[J]. Food Science, 28

- (2):322-326.]
- 姜燕,郭海南,于润美,刘方哲. 2018. 智能感官技术在大米及米酒感官品质分析中的应用[J]. 食品研究与开发, 39(18): 32-37. [Jiang Y, Guo H N, Yu R M, Liu F Z. 2018. Application of intelligent sensory instruments in sensory quality analysis of rice and rice wine[J]. Food Research and Development, 39(18): 32-37.]
- 黎量,杨诗龙,胥敏,钟恋,汪云伟,艾莉. 2015. 基于电子鼻、电子舌技术的山楂气、味鉴别[J]. 中国实验方剂学杂志, 21(5): 99-102. [Li L, Yang S L, Xu M, Zhong L, Wang Y W, Ai L. 2015. Odor and taste discrimination of Chinese hawthorn based on electronic nose and electronic tongue[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 21(5): 99-102.]
- 黎新荣. 2018. 电子鼻在沃柑贮藏时间识别中的应用[J]. 南方农业学报, 49(9): 1827-1832. [Li X R. 2018. Application of electronic nose in identification for storage time of Orah[J]. Journal of Southern Agriculture, 49(9): 1827-1832.]
- 李敏,胡美姣,张正科,梁秋南,杨冬平,陈亮,郑淑英,高兆银. 2014. 电子鼻在芒果采后病原菌种类判别中的应用研究[J]. 热带作物学报, 35(12): 2455-2458. [Li M, Hu M J, Zhang Z K, Liang Q N, Yang D P, Chen L, Zheng S Y, Gao Z Y. 2014. The use of electronic nose to classify the postharvest diseases pathogens of mango fruit[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 35(12): 2455-2458.]
- 李阳,陈芹芹,胡雪芳,姜莎,刘远方,冯高迁,李景明,倪元颖. 2008. 电子舌技术在啤酒口感评价中的应用[J]. 食品研究与开发, 29(11): 122-127. [Li Y, Chen Q Q, Hu X F, Jiang S, Liu Y F, Feng G Q, Li J M, Ni Y Y. 2008. Application of electronic tongue technique on sensory value of beer[J]. Food Research and Development, 29(11): 122-127.]
- 李志刚,陈文冰,郝利平,石建春. 2016. 香蕉果实冷害过程中质构特性变化研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 36(6): 450-456. [Li Z G, Chen W B, Hao L P, Shi J C. 2016. Changes of textural characteristic of banana fruit during chilling injury[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 36(6): 450-456.]
- 刘翔,张平,徐伟欣,张绍慧,高星,刘莉. 2015. TPA测试条件对甜瓜质构参数的影响[J]. 中国蔬菜, (3): 38-44. [Liu X, Zhang P, Xu W X, Zhang S H, Gao X, Liu L. 2015. Effect of experimental conditions in TPA test on melon textural property[J]. China Vegetables, (3): 38-44.]
- 马庆华,王贵禧,梁丽松. 2011. 质构仪穿刺试验检测冬枣质地品质方法的建立[J]. 中国农业科学, 44(6): 1210-1217. [Ma Q H, Wang G X, Liang L S. 2011. Establishment of the detecting method on the fruit texture of dongzao by puncture test[J]. Scientia Agricultura Sinica, 44(6): 1210-1217.]
- 马淑凤,王周平,丁占生,王利强,徐化能. 2010. 应用电子鼻技术对水蜜桃储藏期内品质变化的研究[J]. 食品与生物技术学报, 29(3): 390-394. [Ma S F, Wang Z P, Ding Z S, Wang L Q, Xu H N. 2010. Study on the quality of juicy peaches during store using an electronic nose[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 29(3): 390-394.]
- 潘胤飞,赵杰文,邹小波,刘木华. 2004. 电子鼻技术在苹果质量评定中的应用[J]. 农机化研究, (3): 179-182. [Pan Y F, Zhao J W, Zou X B, Liu M H. 2004. Using electronic nose qualifying apples based on GA-RBF network[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, (3): 179-182.]
- 裘姗姗. 2016. 基于电子鼻、电子舌及其融合技术对柑橘品质的检测[D]. 杭州:浙江大学. [Qiu S S. 2016. Quality determination of citrus fruit using electronic nose, electronic tongue and fusion system[D]. Hangzhou: Zhejiang University.]
- 宋肖琴,张波,徐昌杰,张九凯,李鲜,陈昆松. 2010. 采后枇杷果实的质构变化研究[J]. 果树学报, 27(3): 379-384. [Song X Q, Zhang B, Xu C J, Zhang J K, Li X, Chen K S. 2010. Texture profile analysis of postharvest loquat fruit[J]. Journal of Fruit Science, 27(3): 379-384.]
- 王贵平,王金政. 2015. 基于电子鼻技术的不同采收期‘嘎拉’苹果气味变化分析[J]. 中国园艺文摘, 31(8): 12-14. [Wang G P, Wang J Z. 2015. Analysis on aromatic compounds of Gala apple at different harvest times by electronic nose technique[J]. Chinese Horticulture Abstracts, 31(8): 12-14.]
- 王俊,崔绍庆,陈新伟,洪雪珍,裘姗姗. 2013. 电子鼻传感技术与应用研究进展[J]. 农业机械学报, 44(11): 160-167. [Wang J, Cui S Q, Chen X W, Hong X Z, Qiu S S. 2013. Advanced technology and new application in electronic nose[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 44(11): 160-167.]
- 吴旻丹,陈瑜,金邦荃. 2010. 储藏期猕猴桃质构变化的研究及人工咀嚼的建立[J]. 食品工业科技, 31(12): 146-148. [Wu M D, Chen Y, Jin B Q. 2010. Detection of texture properties of kiwi fruits by texture profile analysis and simulation of manual chewing[J]. Science and Technology of Food Industry, 31(12): 146-148.]
- 许玲,魏秀清,章希娟,许家辉. 2018. 质构仪整果穿刺法评价3个毛叶枣品种果实质地参数[J]. 福建农业学报, 33(6): 621-625. [Xu L, Wei X Q, Zhang X J, Xu J H. 2018. Instrumental measurements and texture evaluation on fruits from three varieties of *Zizyphus mauririana*[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 33(6): 621-625.]
- 徐志斌,励建荣,陈青. 2009. 杨梅果实采摘后品质变化规律的TPA表征[J]. 食品研究与开发, 30(2): 114-117. [Xu Z B, Li J R, Chen Q. 2009. Study on textual properties of post-harvested Chinese red bayberry by using TPA[J]. Food Research and Development, 30(2): 114-117.]
- 薛长风,裴志胜,文攀,徐云升. 2018. 基于电子舌的茶叶滋味与特征成分相关性分析[J]. 食品科技, 43(7): 316-321. [Xue C F, Pei Z S, Wen P, Xu Y S. 2018. Analysis of flavor and characteristic component correlation of tea based on electronic tongue[J]. Food Science and Tech-

- nology, 43(7):316-321.]
- 尹芳缘, 曾小燕, 徐薇薇, 惠国华, 陈裕泉. 2012. 基于电子鼻的芒果储存时间预测方法研究[J]. 传感技术学报, 25(9): 1199-1203. [Yin F Y, Zeng X Y, Xu W W, Hui G H, Chen Y Q. 2012. Study of mango storage time predicting method utilizing electronic nose[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 25(9): 1199-1203.]
- 于勇, 王俊, 周鸣. 2003. 电子鼻技术的研究进展及其在农产品加工中的应用[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 29(5): 111-116. [Yu Y, Wang J, Zhou M. 2003. Research developments of electronic nose and its application in processing of agriculture products[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture & Life Sciences), 29(5): 111-116.]
- 张浩, 安可婧, 徐玉娟, 余元善, 吴继军, 肖更生. 2018. 基于电子舌与SPME-GC-MS技术的芒果风味物质的比较分析[J]. 现代食品科技, 34(10): 1-11. [Zhang H, An K J, Xu Y J, Yu Y S, Wu J J, Xiao G S. 2018. The characteristic flavor compounds analysis of different cultivars of mango by electronic tongue and SPME-GC-MS[J]. Modern Food Science and Technology, 34(10): 1-11.]
- 张昆明, 张平, 李志文, 任朝辉, 农绍庄. 2011. 葡萄贮藏期间果肉质地参数变化规律的TPA表征[J]. 食品与生物技术学报, 30(3): 353-358. [Zhang K M, Zhang P, Li Z W, Ren Z H, Nong S Z. 2011. Study on the variation of grape berry texture properties during storage by texture profile analysis[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 30(3): 353-358.]
- 张鹏, 李江阔, 陈绍慧. 2015. 基于电子鼻判别富士苹果货架期的研究[J]. 食品工业科技, 36(5): 272-276. [Zhang P, Li J K, Chen S H. 2015. Discrimination of Fuji apples shelf life by electronic nose[J]. Science and Technology of Food Industry, 36(5): 272-276.]
- 张晓华, 常伟, 李景明, 张东星, 李阳, 刘远方, 李淑燕, 倪元颖. 2007. 电子鼻技术对苹果贮藏期的研究[J]. 现代科学仪器, (6): 120-123. [Zhang X H, Chang W, Li J M, Zhang D X, Li Y, Liu Y F, Li S Y, Ni Y Y. 2007. Study on apple storage by electronic nose technology[J]. Modern Scientific Instruments, (6): 120-123.]
- 张鑫, 齐玉洁, 杨夏, 贾惠娟. 2012. 利用电子鼻技术评价桃果实成熟度的研究[J]. 华南农业大学学报, 33(1): 23-27. [Zhang X, Qi Y J, Yang X, Jia H J. 2012. Evaluation of maturity of peach by electronic nose[J]. Journal of South China Agricultural University, 33(1): 23-27.]
- 赵爱玲, 薛晓芳, 王永康, 任海燕, 弓桂花, 焦晋华, 隋串玲, 李登科. 2018. 质构仪检测鲜枣果实质地品质的方法研究[J]. 果树学报, 35(5): 631-641. [Zhao A L, Xue X F, Wang Y K, Ren H Y, Gong G H, Jiao J H, Sui C L, Li D K. 2018. Measuring texture quality of fresh jujube fruit using texture analyser[J]. Journal of Fruit Science, 35(5): 631-641.]
- 赵娜, 许琦, 潘思轶, 徐晓云, 王鲁峰. 2015. 基于电子舌的温州蜜柑复合汁品质拟合与预测[J]. 食品工业科技, 36(5): 296-300. [Zhao N, Xu Q, Pan S Y, Xu X Y, Wang L F. 2015. Fitting and prediction of the quality of compounded satsuma mandarin juice based on electric tongue[J]. Science and Technology of Food Industry, 36(5): 296-300.]
- 赵秀洁, 吴海伦, 潘磊庆, 屠康. 2014. 基于电子鼻技术预测草莓采后品质[J]. 食品科学, 35(18): 105-109. [Zhao X J, Wu H L, Pan L Q, Tu K. 2014. Nondestructive prediction of postharvest strawberry quality by electronic nose[J]. Food Science, 35(18): 105-109.]
- 郑秀艳, 黄道梅, 孟繁博, 陈曦, 李国林, 李咏富, 林茂. 2016. 基于电子鼻技术的蓝莓果实品质变化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 7(9): 3642-3649. [Zheng X Y, Huang D M, Meng F B, Chen X, Li G L, Li Y F, Lin M. 2016. Quality changes analysis of blueberry fruits based on the electronic nose technology[J]. Journal of Food Safety and Quality, 7(9): 3642-3649.]
- 朱娜, 毛淑波, 潘磊庆, 袁丽佳, 屠康. 2013. 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, 29(5): 266-273. [Zhu N, Mao S B, Pan L Q, Yuan L J, Tu K. 2013. Early detection of fungal disease infection in strawberry fruits by e-nose during postharvest storage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 29(5): 266-273.]
- Benedetti S, Buratti S, Spinardi A, Mannino S, Mignani I. 2008. Electronic nose as a non-destructive tool to characterise peach cultivars and to monitor their ripening stage during shelf-life[J]. Postharvest Biology and Technology, 47(2): 181-188.
- Beullens K, Kirsanov D, Irudayaraj J, Rudnitskaya A, Legin A, Nicolai B M, Lammertyn J. 2006. The electronic tongue and ATR-FTIR for rapid detection of sugars and acids in tomatoes[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 116(1-2): 107-115.
- Beullens K, Mészáros P, Vermeir S, Kirsanov D, Legin A, Buysens S, Cap N, Nicolai B M, Lammertyn J. 2008. Analysis of tomato taste using two types of electronic tongues[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 131(1): 10-17.
- Billy L, Mehinagic E, Royer G, Renard C M G C, Arvisenet G, Prost C, Jourjon F. 2008. Relationship between texture and pectin composition of two apple cultivars during storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 47(3): 315-324.
- Campos I, Bataller R, Armero R, Gandia J M, Soto J, Martínez-Mañez R, Gil-Sánchez L. 2013. Monitoring grape ripeness using a voltammetric electronic tongue[J]. Food Research International, 54(2): 1369-1375.
- Ezhilan M, Nesakumar N, Jayanth Babu K, Srinandan C S, Rayappan J B B. 2018. An electronic nose for royal delicious apple quality assessment—A tri-layer approach[J]. Food Research International, 109: 44-51.
- Feng L, Zhang M, Bhandari B, Guo Z M. 2018. A novel method using MOS electronic nose and ELM for predicting postharvest quality of cherry tomato fruit treated with high pressure argon[J]. Computers and Electronics in Agricul-

- ture, 154:411-419.
- Garcia-Hernandez C, Salvo Comino C, Martín-Pedrosa F, Rodriguez-Mendez M L, Garcia-Cabezon C. 2018. Impedimetric electronic tongue based on nanocomposites for the analysis of red wines. Improving the variable selection method[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 277:365-372.
- Giongo L, Poncetta P, Loretto P, Costa F. 2013. Texture profiling of blueberries (*Vaccinium* spp.) during fruit development, ripening and storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 76:34-39.
- Gómez A H, Wang J, Hu G X, Pereira A G. 2007. Discrimination of storage shelf-life for mandarin by electronic nose technique[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 40(4): 681-689.
- Hempel A, O'Sullivan M G, Papkovsky D B, Kerry J P. 2013. Use of optical oxygen sensors to monitor residual oxygen in pre- and post-pasteurised bottled beer and its effect on sensory attributes and product acceptability during simulated commercial storage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 50(1):226-231.
- Kantor D B, Hitka G, Fekete A, Balla C. 2008. Electronic tongue for sensing taste changes with apricots during storage[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 131(1): 43-47.
- Li C Y, Krewer G W, Ji P S, Scherm H, Kays S J. 2010. Gas sensor array for blueberry fruit disease detection and classification[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 55(3): 144-149.
- Liu Q, Zhao N, Zhou D D, Sun Y, Sun K, Pan L Q, Tu K. 2018. Discrimination and growth tracking of fungi contamination in peaches using electronic nose[J]. *Food Chemistry*, 262(1):226-234.
- Muskovics G, Felföldi J, Kovács E, Perlaki R, Kállay T. 2006. Changes in physical properties during fruit ripening of Hungarian sweet cherry (*Prunus avium* L.) cultivars[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 40(1):56-63.
- Orlandi G, Calvini R, Foca G, Pigani L, Simone G V, Ulrici A. 2019. Data fusion of electronic eye and electronic tongue signals to monitor grape ripening[J]. *Talanta*, 195: 181-189.
- Oshita S, Shima K, Haruta T, Seo Y, Kawagoe Y, Nakayama S, Takahara H. 2000. Discrimination of odors emanating from 'La France' pear by semi-conducting polymer sensors [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26(2): 209-216.
- Pigani L, Vasile Simone G, Foca G, Ulrici A, Masino F, Cubilana-Aguilera L, Calvini R, Seeber R. 2018. Prediction of parameters related to grape ripening by multivariate calibration of voltammetric signals acquired by an electronic tongue[J]. *Talanta*, 178:178-187.
- Rudnitskaya A, Kirsanov D, Legin A, Beullens K, Lammertyn J, Nicolai B M, Irudayaraj J. 2006. Analysis of apples varieties—Comparison of electronic tongue with different analytical techniques[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 116(1-2):23-28.
- Wen T, Zheng L Z, Dong S, Gong Z L, Sang M X, Long X Z, Luo M, Peng H L. 2019. Rapid detection and classification of citrus fruits infestation by *Bactrocera dorsalis* (Hendel) based on electronic nose[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 147:156-165.
- Xu S, Li J, Baldwin E A, Plotto A, Roszkopf E, Hong J C, Bai J H. 2018. Electronic tongue discrimination of four tomato cultivars harvested at six maturities and exposed to blanching and refrigeration treatments[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 136:42-49.

(责任编辑 罗 丽)