

编者按:营养、健康和美味的食品一直是人类永恒的追求。优质美味的食品,可使人们获得更多的愉悦感和满足感,享受生活带来的美好感受。人类对食物的感知,包括视觉、味觉、嗅觉、触觉、听觉 5 个方面。食品感知科学与技术是一门系统研究人类感官与食物相互作用形式与规律的交叉学科,涉及物理学、生理学、心理学及大脑神经科学等。其从科学的角度帮助解决人们对食物感官的更高层次需求。本刊开设“食品感知技术”特约专栏,连续刊载有关文章。

(本刊编辑部。本栏目得到嘉兴未来食品研究院的支持。客座编辑:江南大学食品学院钟芳教授。)

食品智能感知技术的发展与前沿探索

田师一¹, 姜国新¹, 毛岳忠¹, 秦玉梅², 石双妮¹, 曹艳芸², 秦子涵¹, 韩剑众², 程时文^{2*}

¹浙江工商大学食品生物工程学院 杭州 310018

²浙江省食品安全重点实验室 杭州 310012)

摘要 智能感知技术是一种利用传感器模拟人类感觉器官捕捉样品各种感官属性信息,再结合智能识别算法信号处理,实现食品等样品品质拟人化综合评价的前沿仿生技术。智能感知技术作为传统感官评价技术的现代化延伸和补充,具有检测速度快,样品无需前处理,操作简便,实时在线分析等技术特性,是深度感知食品感官品质的强有力的工具。本文综述食品领域中几种主要的智能感知技术,如模拟味觉的电子舌技术,模拟嗅觉的电子鼻技术,模拟触觉的质构分析仪和仿生视觉系统的电子眼等。另外,文章还归纳总结了智能感知技术在食品品质评价方面的应用研究进展,展望智能感知技术在静态感官、动态感官和情绪感知表征等方面的技术发展可能性。随着生物学、材料学、计算机科学等交叉学科的快速发展,智能感知技术有望从样品整体感官特性的区分、识别应用,提升至食品嗜好和情绪的检测表征,为食品产业的发展提供新的动力。

关键词 智能感知技术; 电子舌; 电子鼻; 电子眼; 质构分析仪; 静态感官; 动态感官

文章编号 1009-7848(2024)06-0001-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.06.001

食品感官评价是食品科学中不可或缺的一环,也是人们直观感知和评判食品品质的重要手段。然而,传统的人工感官评价方法存在着诸多挑战,如高昂的品评人员训练成本、主观因素的影响以及无法精确量化等问题^[1]。为了应对这些挑战,人们开始积极探索智能感知技术。智能感知技术是一种以食品等样品为检测对象,利用传感器获取样品各种感官属性信息,再结合智能识别算法信号处理,实现食品等样品品质拟人化综合评价

的一项前沿的仿生探索技术。智能感知技术通常由传感器阵列、信号采集系统和智能识别算法三大部分构成。传感器阵列模拟人体感觉器官,负责感知被测样品的感官属性信息;信号采集系统模仿人体神经系统的功能,负责传输和预处理传感器产生的响应信号;智能识别算法则类似于人体大脑,对处理过的信号数据进行分析,最终给出样品品质的拟人综合判断^[2]。在食品领域中,典型的智能感知技术有模拟味觉感知的电子舌,模拟嗅觉感知的电子鼻,模拟口感感知的质构分析仪,以及模拟视觉感知的电子眼等,这些仪器通过模拟人类的味觉、嗅觉、触觉和视觉等功能,全面捕捉食品的各种风味特征,实现食品风味的智能感官评价。与传统检测方法相比,智能感知技术具有检测速度快,灵敏度高,操作简便,能够部分甚至完

收稿日期: 2024-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(32102124);浙江省自然科学基金项目(LTGN23C200006)

第一作者: 田师一,男,博士,教授

通信作者: 程时文 E-mail: chengshiwen9007@126.com

全替代人工感官评价表征食品产品感官品质特征等特点。

本文综述智能感知技术的发展历程,归纳总结其在食品领域中的广泛应用和研究进展,并展望其未来发展方向,旨在为智能感知技术的创新发展提供新的启示。

1 智能感知检测技术

1.1 电子舌技术

电子舌(Electronic tongue, E-tongue)是20世纪90年代初兴起的一种模仿人类味觉感受的智能感知检测技术。其一般通过低选择性、非特异

性、交互敏感的多传感器阵列对未知液体样品的综合特征信号进行感测,再利用多元统计分析方法进行模式识别和定性定量分析,从而实现对液体样品整体质量信息的辨识和分类^[3]。电子舌的设计理念源自于生物味觉感受系统(见图1),其中多通道传感器阵列扮演着味细胞及味神经的角色,能够感知可溶性味物质的刺激并将其采集和传输至电脑系统。信号采集系统类似于味觉神经感觉系统,负责将感测到的信号传输至电脑模式识别系统。模式识别系统则模拟了大脑的功能,负责对信号进行特征提取和模式识别,以便区分和辨识不同样品^[4]。

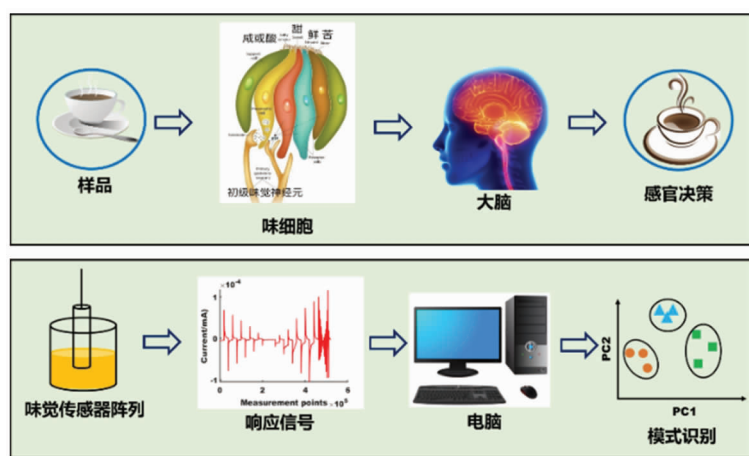


图1 生物味觉系统和电子舌系统的机制比较

Fig.1 Comparison between biological taste system and electronic nose system in terms of perception mechanism

根据电子舌的工作原理,电子舌系统的结构主要包括味觉传感器阵列、信号采集系统和模式识别系统3个部分。在电子舌系统中,味觉传感器阵列的研究与设计是关键部分。根据传感器感知机理的不同,电子舌系统可分为多种类型(如表1所示),包括电位型、伏安型、阻抗谱型、表面声波型和光寻址型等^[5]。其中电位型和伏安型是两种最为常见的电子舌系统。

1.2 电子鼻技术

电子鼻(Electronic nose, E-Nose),又称“气味扫描仪”,是一种模拟人类嗅觉系统的智能仿生感知技术,旨在通过气敏传感器阵列捕捉气味特征,并结合模式识别算法进行信号分析处理,实现对气味的区分和辨别^[13]。电子鼻的发展源于对生

物嗅觉系统的探索与理解,因此在感知和辨别气味的原理上,两者具有相似之处。如图2所示,电子鼻通常由气敏传感器阵列、信号激发和采集系统以及模式识别算法3个部分组成。气敏传感器阵列类似于嗅觉感受器细胞,用于感知气味化学刺激。信号激发和采集系统则相当于嗅球,其功能是对传感器测量到的电信号进行处理和特征提取。模式识别算法则相当于大脑,主要负责进行特征的模式识别,从而实现气味的区分和识别^[14]。电子鼻不仅能够全面评估样品的整体气味信息,无需繁琐的前处理步骤,操作简便,响应快速,还能对于人鼻难以检测的气体,如毒气或刺激性等气体进行拟人的评价。正是凭借这些突出的技术特点,电子鼻成为人工感官评价技术和传统化学分

表1 电子舌的类型和特点

Table 1 Types and features of electronic tongues		课程组	
电子舌类型	原理	传感器	优缺点
电位型	测量脂类膜修饰传感器两侧形成的电势,随后对这些电势差进行多元统计分析,实现对样品的检测工作	脂类膜修饰传感器	数据输出量较少,能够直接反馈酸、甜、苦、咸和鲜5种味觉特性。缺点在于溶液成分容易吸附在膜上,干扰膜两端电势的测量,传感器无法获取样品基本味觉之外的感官特性信息
伏安型	将传感器阵列置于待测溶液中,通过在工作电极施加不同的脉冲阶跃电势,激发样品中的化学反应,产生特定的极化电流响应信号。随后,再结合模式识别方法对响应信号进行处理,最终定性和定量分析样品的整体质量特性	硫属玻璃修饰传感器 非修饰的惰性贵金属 裸电极或修饰电极	可以制作成微型化的薄膜传感器,离子选择性高。传感器只能检测特定的物质,对于弱电解质物质或非电质物质的响应较差,信噪比低 传感器阵列使用非修饰的贵金属传感器,加工简单,稳定性好,适用面更广;采用大幅脉冲伏安法,信号背景噪音较小,信噪比更高。采集的信息量丰富,但同时包含大量非线性信息,一般需要配合复杂的统计分析方法,才能找到样品的感官属性与原始数据之间的相关性
阻抗谱型	通过测量修饰电极表面与溶液味觉物质组分相互作用引起的阻抗变化,实现对未知样品整体特性的定性和定量分析	Langmuir-Blodgett膜 修饰传感器	灵敏度高,限制是电极修饰膜的制作工艺复杂、重复性和稳定性差、使用寿命低
表面声波型	通过测量表面声波传感器与味觉物质相互作用时的物理相位变化和频率变化,来区分不同种味觉物质的差异	表面声波传感器	结构简单,能耗低,坚固耐用,然而检测精度和灵敏度有所不足
光寻址型	利用调制的红外光,从正面或反面对电解质溶液-绝缘体-半导体结构进行光照寻址,然后检测敏感膜表面不同光照部位的电势变化,从而实现特定离子浓度的检测	光寻址电势传感器	高灵敏度、稳定性好和可寻址能力容易实现高集成度等优点,然而传感器只能检测某些特定成分,使用受到一定的限制

日本 Kyushu 大学 Kiyoshi ToKo 教授^[6]

俄罗斯 Saint Petersburg 大学的 A. Legin 团队^[7]

瑞典 Linköping 大学的 Winquist 教授^[8]
中国浙江工商大学笔笔者研究团队^[9]

巴西 Riul 教授^[10]

英国华威大学的 Cole 教授^[11]

中国浙江大学王平教授^[12]

析仪器的强有力补充。

基于气敏传感器敏感机制的不同,电子鼻可以分为多种类型(如表2所示),包括金属氧化物半导体传感器电子鼻(MOS-Nose)、导电聚合物传感器电子鼻(CP-Nose)、石英晶体微量天平传感器电子鼻(QCM-Nose)和表面声波传感器电子鼻

(SAW-Nose)等^[15]。

1.3 电子眼技术

电子眼技术(Electronic eye, E-eye)最初由马尔于1982年提出,是一种集机械、光学仪器、电磁传感以及数字视频和图像处理技术于一体,模拟人眼功能对食品进行整体视觉感知检测的计算

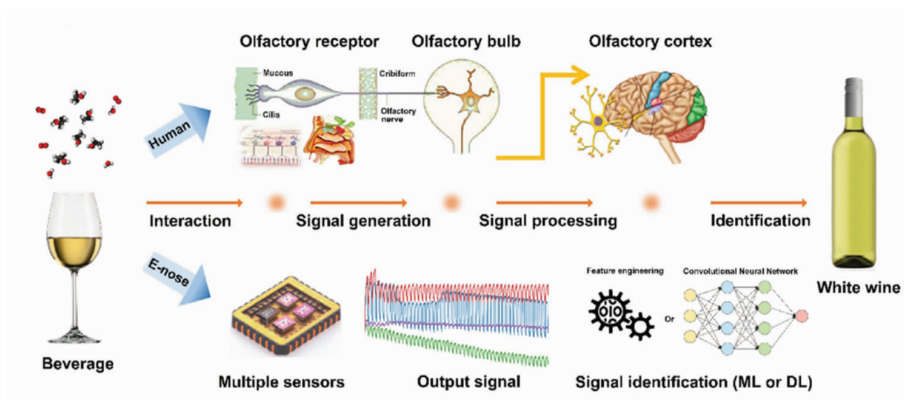


图2 生物嗅觉系统与电子鼻系统的机制比较^[14]

Fig.2 Comparison between biological olfactory system and electronic nose system in terms of perception mechanisms^[14]

表2 电子鼻的类型和特点

Table 2 Types and features of electronic noses

电子鼻类型	原理	优缺点
MOS型电子鼻	当金属氧化物半导体传感器与目标气体特定组分相互作用时,导致传感器的电阻值发生改变。通过测量电路将这种电阻值的变化转换为电压响应信号输出,实现目标气体的检测和识别	结构简单,制造成本低廉以及适用范围广泛。对挥发性物质浓度响应呈对数关系,导致在高浓度可检测物质存在时灵敏度会下降,工作温度较高以及可能出现信号漂移和“硫化物中毒”等 ^[16]
CP型电子鼻	当导电聚合物膜传感器暴露于目标气体时,聚合物与气体相互作用,改变了传感器电阻值的变化。这种变化通过测量电路转换成电压响应信号输出,实现目标气体的检测和识别	对挥发性有机物的灵敏度可达 0.1×10^{-6} 水平,导电聚合物易于合成,具有良好的机械性能和耐久性,并具备一定的抗中毒能力 ^[17] 。对湿度非常敏感,传感器恢复时间长;使用寿命通常为9~18个月,且不同批次间的可重复性较差
QCM型电子鼻	通过施加10~30 MHz的AC电压信号激励压电石英晶体材料,产生一个三维声波。当目标气体接触晶体表面膜时,会被吸附在晶体表面,导致晶体质量增加,改变石英晶体的谐振频率,实现目标气味的检测 ^[18]	响应速度快,通常为10 s。其缺点是制造工艺复杂,接口电路复杂,信噪比性能受表面干扰和晶体尺寸影响,以及批次间重现性差,传感器损坏更换困难等 ^[17]
SAW型电子鼻	施加AC电压在两叉指电极上的压电材料会产生一个频率为100~400 MHz的二维声波。该声波沿着材料表面传播,并与检测气体相互作用。当气体分子吸附在传感器表面时,会改变声波的传播速度和频率,从而改变传感器的电特性,这种变化被转换为电信号输出,用于表征不同样品之间的差异	能够有效集中信号于基片表面,其高工作频率赋予其较高的精度和灵敏度,实现了实时信息检测的功能。此外,它还具备微型化、集成化、低功耗和频率信号直接输出等诸多优点。长期稳定性差和易受湿度影响 ^[19]

机视觉技术。其起源可追溯到 20 世纪 60 年代,早期主要用于解决信息处理和物体跟踪等问题。随着技术的发展,电子眼技术逐渐被广泛应用于工业领域,特别是食品工业。其基本原理是通过光学传感技术来模拟人体视觉,采集被检测物质的数字图像,然后利用图像处理技术提取与食品的形状、大小、颜色、质地和纹理等质量特性相关的图像特征信息,再结合模式识别方法对所获取的图像信息进行分类和识别,最终实现对产品整体质量的判断^[20]。电子眼系统主要由图像采集模块、传输模块和图像处理模块构成。其中图像采集模块使用电子目镜和补光设备,模拟人类的眼睛拍摄待测物体外观,获取电子图像信号;传输模块模拟人类的视觉神经,负责传输视觉信号;图像处理模块则对应人类大脑的视觉中枢,通过图像识别算法对进行模式识别^[21]。电子眼技术的无接触式测量和评估,可保持食品的原始状态并避免传统方法可能带来的污染风险。配备高分辨率相机和先进图像处理软件,能够快速、准确地处理大量图像数据。通过提供客观、可重复的测量结果,保证食品的质量评估不受人为因素的影响,有助于确保评估结果的一致性和准确性。灵活性强,可对整个

产品或特定部分进行评估,适用于不同类型和规模的生产过程。能够存储大量图像数据,通过与数据库比较实现产品的可追溯性,为质量管理提供数据支持。

色差仪和分光光度计可以视为最初级的电子眼,主要可以用于颜色分析。色差仪由光源、单色滤光片和检测器组成,以模拟人眼对光谱的感知,通常以 CIELAB 坐标表示结果。分光光度计能够记录样品在可见光范围内的整个光谱,并通过数学变换计算样品的颜色坐标,包括 L^* 、 a^* 、 b^* 值。这两种设备在测量大面积样品或不均匀样品的颜色变化时效率会受到限制^[22]。除此之外,计算机视觉系统可以视为更为高级的电子眼。一般由照明系统、数字 RGB 相机、样品架以及用于图像采集和处理的硬件和软件组成^[23]。RGB 相机采用电荷耦合器件 (CCD) 或互补金属氧化物半导体 (CMOS) 传感器,能够将入射光的强度转换为电信号,并生成 RGB 图像。图中每个像素包含 3 个整数值 (范围 0~255),分别代表红、绿、蓝通道的强度。通过分析 RGB 图像,计算机视觉系统能够实现对食品颜色特性的客观评估。图 3 为 3 种电子眼的示意图。

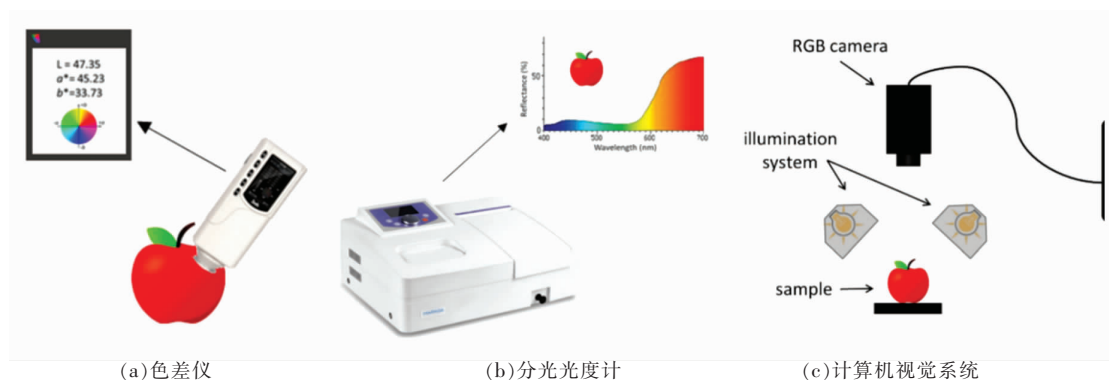


图 3 用于电子眼系统中的 3 种颜色分析工具^[22]

Fig.3 Three different color analysis tools used in the E-eye systems^[22]

1.4 质构分析仪

质构分析仪 (texture analyzer), 又称为物性测试仪, 是一种典型的模拟人类牙齿咀嚼过程, 专门用于感知食品质地特性的智能感知装备。其原理是通过一个机械装置施加力量于食品上, 通过特定探头来感应收集目标样品的一系列力学特性

(如硬度、凝聚性、黏附性、咀嚼性)、几何特性(形状、方向、尺寸)和多汁性、湿润度等信息, 经由专用软件处理后, 这些物性信息能够实现对食品整体品质或是质地特性的识别和检测^[24]。最初, 质构分析仪主要用于胶体稳定特性的测定。其构造主要包括机械自动装置、探头、容器和记录系统。其

中,机械自动装置可以控制施加在样品上的力量大小。探头则与可垂直上下移动的机械臂相连接,并与放置测试样品的底盘相对应(见图4)。探头有300种不同形状和大小的类型,可适用于各种样品的测定。记录系统主要用于记录测试过程中的时间、作用力和位移等数据^[25]。此外,质构分析仪还具备多种运行模式,如挤压、穿刺、质地剖面分析(TPA)、剪切、弯曲断裂和拉伸等,可获取不同的质构参数^[26]。因此,在实际测量过程中,需要

根据样品的特性和测试需求选择合适的探头和运行模式,以获得全面的物性参数。质构分析仪可以通过量化的指标来全面评价食品的质地特性,具有较高的客观性和灵敏性,避免了人为因素对食品品质评价结果的主观影响。还可以通过多种运行模式和探头设计相结合,能够满足不同类型样品的测试需求^[26]。另外,还可以通过SVM、BP神经网络等算法进行样品的分类预测。

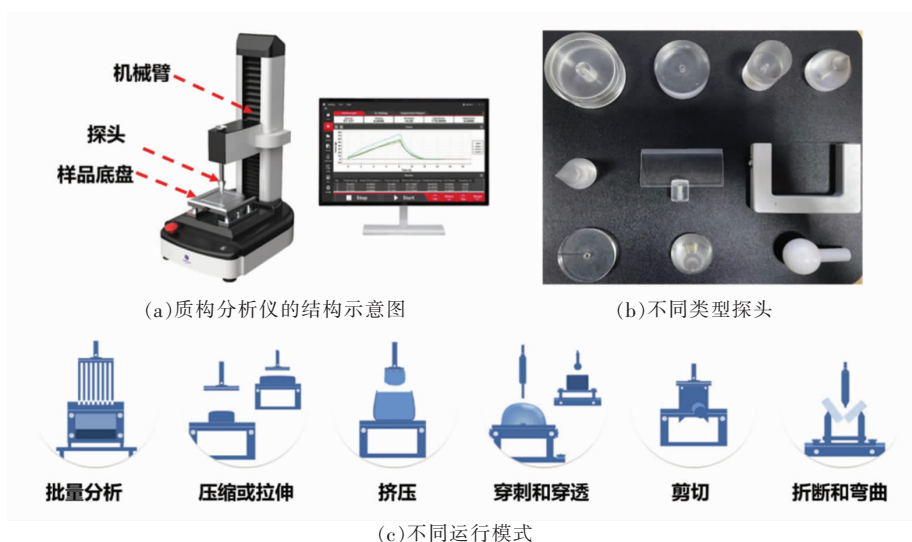


图4 质构分析仪的组成和功能特性

Fig.4 Components and functional characteristics of a texture analyzer

2 智能感知技术在食品领域中的应用

智能感知技术的出现,为解决食品品质评估带来新的机遇。特别是检测成本低,检测速度快等特点,使得食品生产、运输、存储到销售的产业链全过程各个环节中的智能感知技术应用成为可能。尤其是食品品质等级区分、生产过程控制、感官风味属性评估、真伪/掺假鉴别、新鲜度/货架期评估和原产地溯源追踪等方面,体现了智能感知技术强大的应用潜力。图5和表3总结了智能感知技术在食品领域中的部分应用研究。

3 食品智能感知技术未来发展

智能感知技术是传统感官评价技术的现代化延伸和补充,由于其需要集成传感器、人工智能和现代分析技术等多种科技手段来实现对人类感官



图5 智能感知技术在食品领域中的应用研究
Fig.5 Research on the application of intelligent perception technologies in the food fields

表 3 智能感知技术在食品领域中的部分应用

Table 3 Some applications of intelligent perception technologies in the food fields

应用场景	智能感知技术	样品	数据处理方法	参考文献
食味品质等级区分	流动注射伏安型电子舌	大米	SFFS-BO-SVM	[27]
真伪/掺假鉴别	伏安型电子舌	蜂蜜	PCA 和 PLS	[28]
感官风味属性评估	TS-5000Z 电位型电子舌	韩牛	PCA	[29]
	XT Plus 质构分析仪	苹果	ANOVA	[30]
	自主研发电子鼻	堆肥厂	GASF 和 CNN	[31]
	电子鼻、电子舌、计算机视觉和质构分析仪	羊肉烤肉串	GSADF -BP、GA -BP -SVM、ALIGN 和 TFT	[32]
原产地溯源追踪	阻抗谱型电子舌	红茶	PLS-DA 和 PLSR	[33]
	PEN3 电子鼻	大豆	AKCA 和 CNN	[34]
新鲜度/货架期评估	自主研发电子鼻	鱼粉	RFRFE 和 LSSVM	[35]
	电子眼	葡萄	PCA、PLS 和 iPLS	[36]
	TA.XTPlus 质构分析仪	蓝莓	LASSO 和 RR	[37]
	PEN2 电子鼻、味觉传感系统 SA 402B 和 V-650 分光光度计	橄榄油	PCA 和 KNN	[38]
生产过程控制	Fox6000 电子鼻、Astree 电子舌和 ZE6000 色度计	银耳	LDA、DT、RF、SVC 和 SVR	[39]

系统功能的模拟表征,因此意味着此项技术研究的难度特别大。目前,虽然在食品各个环节的品质评价与控制中呈现强大的应用潜力,但是对于传统感官评价方法的完全替代还存在一定差距。不过,随着传感器技术的发展,现代分析技术理论的研究,感官生物学机制的揭示以及人工智能的进步,今后智能感知技术在人工感官评价的静态感官特性表征和动态感官特性表征,以及嗜好与情绪的感知表征等方面应该具有巨大的发展潜力。

3.1 食品静态感官特性智能感知技术表征

静态感官特性的表征通常是指借助人体感觉器官对食品外观、味道、气味、颜色和质地等属性整体特征的感知和评价过程。在智能感知技术中,目前普遍做法是采用传感器技术将食品的物理化学组分信息转换为传感器响应信号,然后再结合特定的数学公式,或是智能模式识别算法进行信号处理,计算出食品特定感官属性值,或是样品整体品质的区分和识别。未来,智能感知技术可以根据生物感受机制,选择亦或是模拟真正的生物受体细胞作为传感元件,构建相应的高仿生的生物传感器,从而使得仪器能够直接给出拟人的判定结果。例如,Wei 等^[40]以猪味蕾组织作为传感元件,

将“三明治式”的传感膜固定在玻璃碳电极上,成功开发出一种苦味生物传感器,并进行苦味受体动力学研究。另外,Sung 等^[41]将大肠杆菌中表达的嗅觉受体蛋白 ODR-10 涂敷在石英晶体微天平(QCM)的表面,制备一种能够检测 2,3-丁二酮的压电生物传感器。笔者研究团队,前期还利用味觉受体异源表达技术构建了甜、酸、苦、咸、鲜基本味觉细胞,通过甜感细胞的研究结果表明了甜味细胞信号与人感官评价小组量化评价结果的一致性,证明了甜味细胞作为传感元件,替代人工评价小组的可行性^[42]。

3.2 食品动态感官特性智能感知技术表征

动态感官特性是食品感官品质的另一个重要特性,它反映人类感官对食品特征和属性随时间变化的感知全过程。在常规的感官评价中,动态感知方法已被应用于一些研究中。如时间强度法(TI)和感觉时间优势评价方法(TDS)等^[43-44]。未来的研究可以通过电子鼻传感器与气味分子之间的吸附和脱附反应模拟人体嗅闻的整个动态过程。Gaidamavichute 等^[45]使用一种镧基金属有机框架(La-BTC MOF)晶胞作为电子鼻的传感元件,研究人体呼出的挥发性有机化合物(VOCs)的选择

性吸附情况。此外,还可以通过质构仪探头与食物之间各种类型的相互作用来模拟人体咀嚼的动态过程。如,Liu等^[46]使用配备多挤压单元探头(TA/MEC)的质构分析仪模拟米饭口腔加工的动态。

3.3 食品嗜好与情绪的智能感知技术表征

嗜好与情绪作为一种更为复杂且更高层次的心理状态,与静态感官和动态感官有着显著的不同。它超越了对食品本身的味道、口感等属性强弱的简单考量,而是深入挖掘表征食品与消费者情感之间的关联,以实现消费者对情绪和偏好的感知和理解。在传统的人工感官评价中,一般利用CATA、JAR等进行嗜好评价,利用情绪时间优势法(TDE)^[47]等方法进行情绪评价研究。目前已出现诸如脑电技术、眼动仪、面部表情等研究情绪评价的一些先进前沿技术。例如,Saha等^[48]基于脑电图(EEG)和心电图信号(ECG)构建了一种新型的多模态情绪检测方法,为情绪感知提供了全新的视角。另外,冯婧等^[49]结合面部表情分析技术(FaceReader)与感官特性评分法,开发了一种多元因子分析模型(MFA),用于评估消费者在品评含糖量不同的露酒产品过程中面部表情情绪变化与产品感官评价、消费者接受度之间的相关性。然而,脑电、眼动等技术的研究对象为人体,目前尚未出现,以食品为对象,通过直接检测食品就能给出对消费者嗜好以及情绪影响结果的智能感知技术或是装备。未来,或许可以通过探索食品成分,亦或是传感器阵列响应信号与消费者嗜好情绪大数据关联模型,创制出一种能够通过检测食品就能给出消费嗜好的智能感知新技术。

4 结语

智能感知技术是一种最可能替代人工感官评价小组,实现食品产业链全过程感官品质监测与控制的创新技术。越来越多的研究者开始关注并投入到智能感知研究中。人工感官评价新方法的发展,以及脑电、核磁、面部表情等测试人嗜好与情感的新设备、新技术的出现,给智能感知技术提出了更高的要求,也指出了新的发展方向。味觉、嗅觉以及触觉细胞分子生物学机制的研究,材料加工、传感器构建、深度学习算法等交叉学科技术的不断进步,给智能感官技术的创新与发展提供

了无限可能。尤其是随着AI计算能力的不断提升,人们有理由期待在不远的将来,一种能够直接检测食品并精准反映消费者情感和偏好的智能感知技术将应运而生。

参 考 文 献

- [1] 孙江艳,刘义凤,刘磊,等.食品感官评价的技术手段与应用研究进展[J].食品工业科技,2023,44(24):359-366.
SUN J Y, LIU Y F, LIU L, et al. Analysis on the technical means and application status of food sensory evaluation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(24): 359-366.
- [2] 王铁龙,许凌云,杨冠山,等.智能感官分析技术在食品风味中的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2023,14(8):37-43.
WANG T L, XU LI Y, YANG G S, et al. Progress in research on intelligent sensory analysis for studies on food flavor[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(8): 37-43.
- [3] DI ROSA A R, LEONE F, CHIOFALO V. 7 - Electronic noses and tongues [M]//Chemical Analysis of Food. Second Edition. Cambridge: Academic Press, 2020: 353-389.
- [4] LU L, HU Z Q, HU X Q, et al. Electronic tongue and electronic nose for food quality and safety[J]. Food Research International, 2022, 162(Part B): 112214.
- [5] WANG W L, LIU Y. 3 - Electronic tongue for food sensory evaluation [M]//Evaluation Technologies for Food Quality. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019: 23-36.
- [6] KOBAYASHI Y, HABARA M, IKEZAZKI H, et al. Advanced taste sensors based on artificial lipids with global selectivity to basic taste qualities and high correlation to sensory scores[J]. Sensors, 2010, 10(4): 3411-3443.
- [7] KLOOCK J P, MOURZINA Y G, SCHUBERT J, et al. A first step towards a microfabricated thin-film sensor array on the basis of chalcogenide glass materials[J]. Sensors, 2002, 2(9): 356-365.
- [8] WINQUIST F, WIDE P, LUNDSTRÖM I. An electronic tongue based on voltammetry [J]. Analytica Chimica Acta, 1997, 357(1): 21-31.

- [9] TIAN S Y, DENG S P, CHEN Z X. Multifrequency large amplitude pulse voltammetry: A novel electrochemical method for electronic tongue [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, 123(2): 1049–1056.
- [10] RIUL A, GALLARDO SOTO A M, MELLO S V, et al. An electronic tongue using polypyrrole and polyaniline[J]. *Synthetic Metals*, 2003, 132(2): 109–116.
- [11] COLE M, SPULBER I, GARDNER J W. Surface acoustic wave electronic tongue for robust analysis of sensory components [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 207(Part B): 1147–1153.
- [12] WANG J, DU L P, KRAUSE S, et al. Surface modification and construction of LAPS towards biosensing applications[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 265: 161–173.
- [13] GARDNER J W, BARTLETT P N. A brief history of electronic noses [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1994, 18(1): 210–211.
- [14] PARICHENKO A, HUANG S R, PANG J B, et al. Recent advances in technologies toward the development of 2D materials –based electronic noses [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2023, 166(27): 117185.
- [15] LI Y Z, YANG K Z, HE Z L, et al. Can electronic nose replace human nose? —An investigation of e-nose sensor responses to volatile compounds in alcoholic beverages[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(18): 16356–16363.
- [16] STRIKE D J, MEIJERINK M G H, KOUDELKA-HEP M. Electronic noses – A mini-review[J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 1999, 364(6): 499–505.
- [17] SCHALLER E, BOSSET J O, ESCHER F. 'Electronic noses' and their application to food[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 1998, 31(4): 305–316.
- [18] HU W W, WAN L T, JIAN Y Y, et al. Electronic noses: From advanced materials to sensors aided with data processing[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(2): 1800488.
- [19] NAM J, LIM C S. A conductive liquid-based surface acoustic wave device[J]. *Lab on a Chip*, 2016, 16(19): 3750–3755.
- [20] XU C H. Electronic eye for food sensory evaluation [M]//*Evaluation Technologies for Food Quality*. Amsterdam: Elsevier, 2019: 37–59.
- [21] 王首程. 基于深度学习的多智能感官信息融合检测技术研究与应用[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023.
- WANG S C. Research and application of multi-intelligent sensory information fusion detection technology based on deep learning [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023.
- [22] CALVINI R, PIGANI L. Toward the development of combined artificial sensing systems for food quality evaluation: A review on the application of data fusion of electronic noses, electronic tongues and electronic eyes[J]. *Sensors*, 2022, 22(2): 577.
- [23] BROSNAN T, SUN D W. Improving quality inspection of food products by computer vision—a review [J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 61(1): 3–16.
- [24] 朱丹实, 李慧, 曹雪慧, 等. 质构仪器分析在生鲜食品品质评价中的研究进展[J]. *食品科学*, 2014, 35(7): 264–269.
- ZHU D S, LI H, CAO X H, et al. Research progress in quality evaluation of fresh foods by texture analyzers[J]. *Food Science*, 2014, 35(7): 264–269.
- [25] 林芳栋, 蒋珍菊, 廖珊, 等. 质构仪及其在食品品质评价中的应用综述[J]. *生命科学仪器*, 2009, 7(5): 61–63.
- LIN F D, JIANG Z J, LIAO S, et al. The summary of texture analyzer and its application in the evaluation for food quality [J]. *Life Science Instruments*, 2009, 7(5): 61–63.
- [26] LIU Y X, CAO M J, LIU G M. Texture analyzers for food quality evaluation [M]//*Evaluation Technologies for Food Quality*. Amsterdam: Elsevier, 2019: 441–463.
- [27] MAO Y Z, CHENG S W, QIN Y M, et al. Grade identification of rice eating quality via a novel flow-injection voltammetric electronic tongue combined with SFFS-BO-SVM[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2024, 411: 135700.
- [28] LOZANO-TORRES B, CARMEN MARTÍNEZ-BISBAL M, SOTO J, et al. Monofloral honey authentication by voltammetric electronic tongue: A comparison with ¹H NMR spectroscopy[J]. *Food Chemistry*, 2022, 383(3): 132460.
- [29] MIN J, LEE J W, BAE G S, et al. Evaluation of umami taste in Hanwoo with different feed sources

- by chemical analysis, electronic tongue analysis, and sensory evaluation[J]. *Food Chemistry*, 2023, 20(4): 100889.
- [30] KIM M S, DUIZER L M, GRYORCZYK A. Application of a texture analyzer friction rig to evaluate complex texture attributes in apples[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 186: 111820.
- [31] XIONG L J, HE M, HU C, et al. Image presentation and effective classification of odor intensity levels using multi-channel electronic nose technology combined with GASF and CNN[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023, 395: 134492.
- [32] SHEN C, CAI G H, TIAN J Q, et al. Characterization of lamb shashliks with different roasting methods by intelligent sensory technologies and GC-MS to simulate human multi-sensation: Based on multimodal deep learning[J]. *Food Chemistry*, 2024, 440: 138265.
- [33] KANAGA RAJ D R, FERREIRA M V da S, BRAUNGER M L, et al. Exploration of an impedimetric electronic tongue and chemometrics for characterization of black tea from different origins[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 123: 105535.
- [34] SUN H X, HUA Z J, YIN C B, et al. Geographical traceability of soybean: An electronic nose coupled with an effective deep learning method[J]. *Food Chemistry*, 2024, 440(18): 138207.
- [35] LI P, NIU Z Y, SHAO K Y, et al. Quantitative analysis of fish meal freshness using an electronic nose combined with chemometric methods[J]. *Measurement*, 2021, 179: 109484.
- [36] ORLANDI G, CALVINI R, PIGANI L, et al. Electronic eye for the prediction of parameters related to grape ripening[J]. *Talanta*, 2018, 186(2): 381-388.
- [37] OH H, POTTORFF M, GIONGO L, et al. Exploring shelf-life predictability of appearance traits and fruit texture in blueberry[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, 208: 112643.
- [38] BURATTI S, MALEGORI C, BENEDETTI S, et al. E-nose, e-tongue and e-eye for edible olive oil characterization and shelf life assessment: A powerful data fusion approach[J]. *Talanta*, 2018, 182: 131-141.
- [39] ZHOU Y F, ZHANG Z L, HE Y, et al. Integration of electronic nose, electronic tongue, and colorimeter in combination with chemometrics for monitoring the fermentation process of *Tremella fuciformis* [J]. *Talanta*, 2024, 274: 126006.
- [40] WEI L H, QIAO L X, PANG G C, et al. A kinetic study of bitter taste receptor sensing using immobilized porcine taste bud tissues[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2017, 92: 74-80.
- [41] SUNG J H, KO H J, PARK T H. Piezoelectric biosensor using olfactory receptor protein expressed in *Escherichia coli*[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2006, 21(10): 1981-1986.
- [42] QIN Y M, ZHOU Y F, YAN X, et al. Establishment of a new cell-based assay to quantitatively evaluate the sweetness of sugar and sugar alcohol[J]. *Food Chemistry*, 2024, 434(2): 137436.
- [43] 陆小腾, 阮红倩, 童华荣. 感觉的时间优势评价方法及其应用[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(5): 396-399.
- LUXIAO T J, RUAN H Q, TONG H R. Temporal dominance of sensations method and its application[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(5): 396-399.
- [44] 张明成, 柴慧坤, 李铭, 等. 暂时性感官支配法及其在食品感官评价中的研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(15): 360-367.
- ZHANG M C, CHAI H K, LI M, et al. Research progress on temporary dominance of sensations and its application in food sensory evaluation[J]. *Food Science*, 2023, 44(15): 360-367.
- [45] GAIDAMAVICHUTE V, KNYAZEVA M, KHOZINA E, et al. A LA-BTC MOF as a sensor element of an electronic nose for selective adsorption of biomarkers of diseases: Molecular dynamics simulations of adsorption[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 38(9): 107787.
- [46] LIU G D, ZHANG C, ZHANG S H, et al. Simulated oral processing of cooked rice using texture analyzer equipped with multiple extrusion cell probe (TA/MEC)[J]. *LWT*, 2021, 138(3): 110731.
- [47] JAGER G, SCHLICH P, TIJSSSEN I, et al. Temporal dominance of emotions: Measuring dynamics of food-related emotions during consumption[J]. *Food Quality and Preference*, 2014, 37: 87-99.
- [48] SAHA P, ANSARUDDIN KUNJU A K, MAJID M

- E, et al. Novel multimodal emotion detection method using electroencephalogram and electrocardiogram signals[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2024, 92: 106002.
- [49] 冯婧, 皇甫洁, 董建辉, 等. 面部表情分析技术在露酒感官及消费者接受度评价的初步研究[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(6): 257–262.
- FENG J, HUNGFU J, DONG J H, et al. Sensory evaluation and consumer acceptance of Chinese Lujiu using facial expression analysis[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(6): 257–262.

Development and Frontier Exploration of Food Intelligent Perception Technology

Tian Shiyi¹, Jiang Guoxin¹, Mao Yuezhong¹, Qin Yumei², Shi Shuangni¹, Cao Yanyun²,
Qin Zihan¹, Han Jianzhong², Cheng Shiwen^{2*}

¹College of Food Bioengineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018

²Food Safety Key Laboratory of Zhejiang Province, Hangzhou 310012)

Abstract Intelligent perception technology is an advanced bionic technology that simulates human sensory organs using sensor technology to capture various sensory attributes of samples. By combining intelligent recognition algorithms and signal processing, it enables the comprehensive anthropomorphic evaluation of sample quality. As a modern extension and supplement to traditional sensory evaluation techniques, intelligent perception technology offers technical characteristics such as fast detection speed, no sample pretreatment, easy operation, and real-time online analysis, etc. It serves as a powerful tool for in-depth perception of sensory quality in food. This paper provides an overview of several key intelligent perception technologies in food industry, including electronic tongue technology for simulating taste, electronic nose technology for simulating smell, texture analyzers for simulating touch, and electronic vision systems for simulating sight. Additionally, the article summarizes the application and research progress of intelligent perception technology in food quality evaluation, while also discussing the potential development possibilities of intelligent sensing technology in static sensory, dynamic sensory, and emotional perception representation. With rapid advancements in interdisciplinary fields such as biology, materials science, and computer science, intelligent perception technology is expected to evolve from distinguishing and identifying the overall sensory characteristics of samples to detecting and representing food preferences and emotions, thereby providing new impetus for the development of the food industry.

Keywords intelligent perception technology; electronic tongue; electronic nose; electronic eye; texture analyzer; static sensory; dynamic sensory