

智能感官分析技术在食品风味中的研究进展

王铁龙¹, 许凌云¹, 杨冠山², 王蓓³, 陈冬东^{1*}

(1. 中国检验检疫科学研究院, 北京 100176; 2. 山东省滕州市市场监督管理局, 滕州 277500;
3. 北京工商大学食品与健康学院, 北京 100048)

摘要: 食品风味是决定食品品质的关键指标, 也是影响消费者购买意向的重要属性。传统的食品风味评价方法依赖于人工感官、智能感官、仪器分析等。仪器分析技术可以定性定量检测食品中特征风味物质, 但无法展示食品的味觉和嗅觉等感官信息, 不能实现综合评价食品风味品质; 人工感官分析可靠性高, 但易受主观性影响且再现性差; 智能感官分析技术则基于人类感官仿生技术开发, 将传感器阵列与数据处理单元以及模式识别系统结合, 从而对食品风味进行检测、评价, 具有快速检测、操作简便、精密度高、再现性好等优势, 备受研究者青睐。本文在简要介绍电子鼻、电子舌和电子眼等智能感官技术概况的基础上, 综述了智能感官技术在食品风味品质评价、食品新鲜度检测、食品真实性鉴别、产地溯源检测及其他检测方面的研究现状, 探讨了智能感官技术结合仪器分析技术、数据分析方法的研究进展, 并讨论了现有研究的局限性及未来研究发展方向, 以为智能感官分析技术在食品风味评价的应用及深入研究提供理论依据和数据支撑。

关键词: 电子鼻; 电子舌; 电子眼; 智能感官分析技术; 食品风味

Progress in research on intelligent sensory analysis for studies on food flavor

WANG Tie-Long¹, XU Ling-Yun¹, YANG Guan-Shan², WANG Bei³, CHEN Dong-Dong^{1*}

(1. Chinese Academy of Inspection and Quarantine, Beijing 100176, China; 2. Tengzhou Market Supervision and Administration Bureau of Shandong Province, Tengzhou 277500, China; 3. School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

ABSTRACT: Food flavor is a key indicator to determine the quality of food, and also an important attribute to affect consumers' purchase intention. Traditional food flavor evaluation methods rely on artificial sensory, intelligent sensory, and instrumental analysis. Instrumental analysis technology can qualitatively and quantitatively detect characteristic flavor substances in food, but it cannot display sensory information such as taste and smell, and cannot achieve comprehensive evaluation of food flavor quality; artificial sensory analysis has high reliability, but is susceptible to subjectivity and poor reproducibility; intelligent sensory analysis technology is developed based on human sensory bionics technology, combining sensor arrays with data processing units and pattern recognition systems to provide a new method for detecting and evaluating food flavors. It has the advantages of rapid detection, simple operation, high precision, and good reproducibility, and is favored by researchers. Based on a brief introduction of intelligent sensory

基金项目: 河北省重点研发计划项目(20327113D、21327117D)、中国检科院基本科研业务费项目(2022JK19)、河北省社科基金项目(HB22GL020)

Fund: Supported by the Key Research and Development Projects in Hebei Province (20327113D, 21327117D), the Basic Research Projects of Chinese Academy of Inspection and Quarantine (2022JK19), and the Hebei Province Social Science Fund (HB22GL020)

***通信作者:** 陈冬东, 研究员, 主要研究方向为食品安全快检评价与认证。E-mail: chendd@acas.com.cn

***Corresponding author:** CHEN Dong-Dong, Professor, Chinese Academy of Inspection and Quarantine, 11 Ronghua South Road, Yizhuang Economic and Technology Development Zone, Beijing 100176, China. E-mail: chendd@acas.com.cn

technology such as electronic nose, electronic tongue, electronic eye, this paper summarized the research status of intelligent sensory technology in food flavor quality evaluation, food freshness detection, food authenticity identification, origin traceability detection and other detection, explored the research progress of intelligent sensory technology combined with instrument analysis technology and data analysis methods, and discussed the limitations of existing research and future research development direction, it is expected to provide theoretical basis and data support for the application and further research of intelligent sensory technology in food flavor evaluation.

KEY WORDS: electronic nose; electronic tongue; electronic eye; intelligent sensory analysis; food flavor

0 引言

食品风味是决定食品品质的关键指标,也是影响消费者购买意向的重要属性^[1]。随着《健康中国行动(2019—2030年)》中减盐、减油、减糖“三减”等合理膳食专项行动深入人心^[2],国民愈发重视食品品质,如何在实现“三减”目标的同时尽量保证食品风味品质至关重要^[3]。食品风味是人味觉、嗅觉和三甲神经的一种综合感觉^[4],是通过气味与滋味物质刺激人体嗅觉和味觉蛋白受体使大脑产生相应感觉的过程^[5]。食品中风味的主要呈现形式为挥发性风味化合物,常见的挥发性风味化合物包括醛类、醇类、脂肪酸类、酮类、酯类和含硫化合物等^[6]。随着消费者对食品品质的日益重视,具有良好风味的食品更易激起消费者的购买欲望。

传统的食品风味评价方法依赖于感官评价技术和仪器分析技术^[7-8]。仪器分析技术通过仪器分析食品中挥发性风味物质,从而完成对食品风味的评价。常用的仪器分析方法包括气相色谱法(gas chromatography, GC)、气相色谱-闻香器法(gas chromatography olfactometry, GC-O)、气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、全二维气相色谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC×GC)和高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)等,用来分析食品中风味物质,如ZHANG等^[9]利用GC-MS分析评价了盒装酸奶中挥发性风味物质。虽然仪器分析技术可以实现食品中特征风味物质的定性定量检测,但无法展示食品的味觉和嗅觉等感官信息,也就不能实现对食品风味品质的综合评价^[10]。感官评价技术分为人工感官评价和智能感官评价。人工感官评价是指经过专业培训的人员对食品风味品质进行分析评价的一种方法^[11],但易受到感官评价者个体差异的影响,存在主观性差、再现性差等缺点^[12]。智能感官评价则依托电子鼻、电子舌和电子眼等智能感官仪器,通过模拟嗅觉、味觉和视觉系统的功能,基于多传感器获得目标风味物质特征信号,结合模式识别方法实现智能感官评价^[11]。智能感官评价技术具有多维的感官特征,有效避免了单一的智能感官技术数据不足以支撑食品风味评价分析的发生^[13]。有研究表明^[14],智能感官结果与人工感官结果相印证,且区

分效果优于人工感官,可部分替代人工感官和仪器分析技术实现食品等级与产地的快速鉴定与区分。

基于智能感官技术对食品风味开展评价已成为近年来国内外学者的研究热点。如解云等^[15]发现,电子鼻各传感器对不同品种红枣香气成分的差异显著,能够明显区分不同品种的红枣;李建军等^[16]发现,电子鼻、电子舌和电子眼等智能感官技术可以迅速区分不同品种、不同产地的生地黄,得出气味、滋味和颜色这3方面品质可以作为地黄花药材质量的评价依据;HAN等^[17]则依托新型电子鼻传感器融合技术和伏安电子舌的风味物质评价功能开发了一种有效识别不同产地、品牌和品种红酒的方法。由此可见,智能感官技术数据可以有效支撑食品风味评价分析。因此,本文旨在简明阐述智能感官技术概况,综述智能感官技术在食品风味品质评价、食品新鲜度检测、食品真实性鉴别和产地溯源检测等方面的研究现状,总结智能感官技术结合仪器分析技术、数据分析方法的研究进展,并对未来的研究方向进行展望,以期对智能感官分析技术在食品风味评价的应用提供参考。

1 智能感官技术简介

智能感官技术是基于人类感官仿生技术开发的智能检测系统,已广泛应用于食品风味物质分析与评价^[18],具有检测快速、操作简便、精密度高等优势。尽管智能感官设备的研究对象有所差异,但设备组成和工作原理具有一定的相似性,一般都包括了传感器阵列、数据处理单元和模式识别系统^[19]。传感器阵列模拟人类的嗅觉、味觉和视觉,并获取具有样本综合特征的响应信号;数据处理单元则通过处理外部刺激时模拟神经系统的复杂维度,并将处理结果传输到模式识别系统;模式识别系统在生物系统中充当“大脑”,区分不同的测量样本^[20-21]。常见的智能感官技术主要是电子鼻、电子舌和电子眼,通过获取的香气、滋味以及外观信号描述和表征检测对象的综合风味品质。

电子鼻,也称人工嗅觉系统,是基于人类嗅觉仿生技术开发的智能检测系统,其工作原理是:电子鼻将传感器探测到的气味物质强度转换成数据,再结合化学计量学等方法,最终形成能够反映样品总体气味轮廓的图谱从而区分样品。电子鼻收集的数据是复杂气味的混合数据,

可以实现对混合气味的定性或定量分析^[22]。

电子舌, 也称人工味觉识别技术, 是基于生物味觉感受机制设计而成, 其工作原理是: 当被测样品发出的呈味物质吸附到电子舌的人工膜脂表面时, 呈味物质之间的静电作用或者疏水性相互作用产生膜电势变化, 并将膜电势变化作为输出信号传输到“大脑”进行分析, 从而认知样品味强度及味特征^[23]。

电子眼, 是基于人类视觉仿生技术开发的智能检测系统^[24], 其工作原理是: 通过模拟人眼对样品的感知, 提供稳定的图像采集环境, 保证样品分析条件一致性的同时, 利用计算机软件对样品的颜色、形状等视觉参数进行相关评价, 从而对检测对象的外观纹理、颜色信息等品质做出相应的判别评价结果^[25]。

2 智能感官技术在食品风味评价中的研究进展

智能感官技术通过模拟哺乳动物的嗅觉、味觉和视觉器官来获取挥发性风味物质、液体呈味物质以及外观纹理、颜色等食品风味品质信息。目前, 智能感官技术主要应用于食品风味品质评价、食品新鲜度检测、食品真实性鉴别和产地溯源检测及其他检测等方面。

2.1 食品风味品质评价

智能感官技术通过测量食品风味信息实现对食品风味品质评价的目的。如侯冉等^[26]利用电子鼻技术测定得出丁酸梭菌组小尾寒羊肉中烷烃类、氢过氧化物和氮氧化物等风味物质含量更加丰富; CHEN 等^[27]利用电子舌技术探明了老青砖茶中关键化合物的变化规律; 吴仕敏等^[28]依托电子舌和人工感官评价结论验证得出捻揉频率 45 r/min 制得工夫红茶滋味品质较佳, 制得的工夫红茶中茶红素、糖类等含量较高, 而有机酸、酚酸和茶褐素等含量相对较低; 陈晓旭等^[29]则利用电子眼技术从外观角度测定陈皮和蒸陈皮的色度, 通过明度、黄蓝值、红绿值和总色值指标客观表征了陈皮和蒸陈皮质量品质上的差异。除了利用电子鼻、电子舌和电子眼等单源智能信息表征评价食品风味品质外, 相关研究多采用多源信息融合技术分析评价食品风味品质, 如 LIU 等^[30]使用电子鼻联合电子舌技术分析评估了镇远道菜样品在不同储存时间下挥发性风味化合物的变化对食品品质的影响情况; ZHENG 等^[31]发现使用人类神经系统的联觉模型可以通过电子鼻和电子舌有效识别食品风味品质; 陈佳瑜等^[32]则依托电子鼻、电子舌、电子眼多源信息融合技术结合多元统计分析, 实现了对滇红功夫茶汤综合品质的定性和定量评价。智能感官技术不仅可以静态评价食品风味品质, 还可以依托风味化合物的变化情况动态监测食品发酵过程中品质的变化, 如 ZHOU 等^[33]利用电子眼视觉系统的图像信息和电子鼻技术的气味特征值, 科学、客观且有效地实现了监控红茶发酵过程中品质

的变化情况。由此可见, 智能感官技术通过测量食品风味信息, 不仅可以实现单源或多源信息融合技术表征评价食品风味品质, 还可以静态或动态监测食品发酵过程中风味品质的变化情况, 从而实现对食品风味品质的评价。

2.2 食品新鲜度检测

智能感官技术依托传感器阵列和模式识别系统, 可以快速检测被测食品的整体气味信息^[34], 进一步实现分析评价和预测食品新鲜度的目的^[35]。如 GUNEY 等^[36]利用具有 8 个金属氧化物传感器阵列的电子鼻探究竹荚鱼贮藏过程中的新鲜度变化, 发现基于二叉决策树的电子鼻可以很好地实现竹荚鱼新鲜度预测; 张欣等^[34]发现电子鼻技术结合多元统计分析可作为一种无损、简便和快速检测鱼糕新鲜度的方法, 其中电子鼻响应信号能很好地区分鱼糕样品的新鲜度, 基于电子鼻检测数据建立的多元线性回归预测模型的 R^2 均大于 0.9325, 预测集样品的预测均方根误差均小于 1.22; 韩剑众等^[37]发现伏安电子舌不仅可以识别不同部位、不同品种、不同储藏条件下肉的品质, 还能表征其新鲜度的变化, 具有样品预处理简单、操作方便、重现性好等优势; BANWARI 等^[38]则利用分割鱼眼图像开发了一种基于计算机视觉技术预测鱼的新鲜度。实验结果表明: 该技术是一种有效的无损检测鱼类新鲜度的方法, 新鲜度检测的高精度和低计算时间使得该项非破坏性技术在鱼类行业 and 市场的实际应用中非常有效。除了使用单源智能信息分析评价和预测食品新鲜度, 智能感官技术还可以融合使用实现食品新鲜度的快速准确检测。如李玉花等^[39]基于电子鼻和电子眼数据融合设计了一种一体化检测装置, 该装置通过获取不同新鲜鸡肉样本的气味和图像信息, 结合主成分分析和支持向量机建立了鸡肉新鲜度分级模型, 准确率可达 98.7%, 具有准确率高、便携和稳定性强等优势; SHI 等^[40]则证明了电子鼻和电子舌等融合技术可以综合评价罗非鱼片新鲜度, 并通过主成分分析和径向基函数神经网络准确预测贮藏于 0~10°C 下罗非鱼的新鲜度。综上所述: 智能感官技术不仅可以通过检测食品整体气味信息实现分析评价和预测食品新鲜度, 还可以结合主成分分析、信息增益等特征选择以及偏最小二乘法等建模实现快速准确预测食品新鲜度。

2.3 食品真实性鉴别

食品真实性鉴别是缓解假冒伪劣食品问题、保护公众健康的有力手段^[41], 由多个传感器阵列组成的智能感官技术也被广泛应用于食品真实性的鉴别。如张春娟等^[42]应用电子鼻技术实现了羊肉中掺入不同比例鸭肉样品的有效鉴别, 电子鼻通过判别不同组不同比例羊肉鸭肉样品间的气味差异, 可以有效鉴别羊肉中掺入不同比例鸭肉样品, 为羊肉真实性的快速无损鉴别提供了技术支撑; ROY 等^[43]开发了基于金属氧化物半导体气体传感器的电子鼻系统检

测酥油掺伪氢化植物油, 真实性鉴别率达 90.96%; 范文教等^[44]则利用电子舌采集掺杂不同比例鸡肉的猪肉肠的传感器信息, 结合主成分分析、判别因子分析等特征降维及偏最小二乘法建模技术进行定量分析, 有效实现了电子舌对猪肉肠掺杂鸡肉的真实性鉴别; SURANYI 等^[45]利用电子舌结合方差分析、主成分分析等多元统计分析区分牛肉混合物中具体牛品种, 有效解决了同一畜种不同品种肉品真实性鉴别的问题; DUAN 等^[46]认为智能感官技术测量的风味物质可用于区分不同地理来源的沙门氏菌, 从而为食品安全和真实性鉴别提供了新维度。综上可知: 智能感官技术作为食品真实性鉴别的重要手段, 可以通过不同样品间气味的差异有效鉴别其真实性。同食品新鲜度检测一样, 智能感官技术结合特征选择及建模技术也可以实现准确鉴别食品真实性。

2.4 产地溯源检测

近年来, 包括农产品等在内的食品产品以次充好、以假乱真等问题日益突出, 社会愈发重视以地域特征为主要标识的食品产地溯源问题^[47]。智能感官技术作为基于人类感官仿生技术开发的智能检测系统, 其能够结合模式识别系统, 借助传感器阵列实现对样本“指纹图谱”的检测, 具有精确度高、检测速度快、操作简单、成本低等优势^[48], 可以用于以地域特征为主要标识的食品产地溯源检测。如何珊等^[49]发现利用电子鼻建立的线性判别分析结合雷达图表征的中华绒螯蟹风味特性及产地追踪是切实可行的, 同时建立的气味指纹模型及特征风味雷达图准确灵敏, 可为蟹类产品的溯源提供理论参考; 陈立同等^[50]开发了一种基于电子舌结合元学习-卷积神经网络组合模型实现对大豆产地溯源的快速检测方法, 高继勇等^[48]则依托电子舌与生成对抗网络-卷积降噪自编码器-极限学习机组合模型相结合的方法实现了对咖啡产地的快速溯源检测, 但存在电子舌信号数据量不足, 原始电子舌信号维度高、噪音多等劣势。综上可知: 智能感官技术可以切实可靠地实现对食品产地的溯源检测。同食品新鲜度和真实性鉴别一样, 结合特征选择及建模技术则可以实现对产品产地的快速溯源检测。

2.5 其他检测

智能感官技术除了用于食品风味品质评价、新鲜度检测、真实性鉴别及产地溯源检测外, 还可以用于食品等级判定、类别及基原鉴别、成熟度鉴别和生产过程监控、货架期预测等, 如黄慧清等^[51]发现, 电子鼻传感器 S1、S2、S6、S7 和 S10 可以有效区分乌龙茶等级, 传感器阵列对应性能中的含氮化合物和碳氢化合物是主要区分手段; 李铭轩等^[52]则利用 Heracles Neo 超快速气相电子鼻分析不同基原都金饮片的气味特征进而实现了快速准确地对饮片基原进行鉴别, 还可用于饮片生产的在线检测等质量监控环节; ORLANADI 等^[53-54]不仅开发了电子眼和电子舌用于分析

监测葡萄成熟度, 还开发了一种用于快速简单地评估葡萄酚类成熟度的电子眼技术。此外, STEFANIKOVA 等^[55]还发现, 电子鼻和电子眼可以用于监控奶酪生产过程质量; 毋思敏等^[56]也依托电子鼻、电子舌技术有效监测牛奶保质期加速实验过程中品质的变化, 从而为牛奶货架期的判定提供了新思路。

3 智能感官技术结合其他技术的应用

3.1 仪器分析技术

仪器分析技术作为传统食品风味评价的重要手段, 将其与智能感官技术相结合, 可以更好地解释食品风味、化学成分与感官体验之间的关系, 从而了解香气物质作用机制^[57]。常用的仪器分析方法包括 GC、GC-O、GC-MS 等, 用于分析食品中风味物质, 如杨亚浩等^[58]利用电子鼻、电子舌等智能感官技术和 GC-MS 探究干燥方式对乌梅风味物质的影响时发现, 智能感官技术可以从风味和滋味品质的差异区分不同干燥方式处理的乌梅, 而 GC-MS 则可以从酯类和酚类物质的检测结果上解释差异的来源, 因此 GC-MS 结合电子鼻、电子舌等智能感官技术可以很好地区分不同干燥方式处理的乌梅; 于淼等^[59]则发现, 经 HPLC 测定的何首乌饮片 6 种主要物质含量与电子眼表征得到的颜色特征的总体变化具有一定规律, 通过建立颜色与指标成分相关性模型, 可以实现对其炮制程度的判断及质量评价。综上可知: 智能感官技术结合仪器分析技术可以很好地用于检测和分析食品中风味物质, 其中电子鼻可以感知食品在香气上的差异, 而 GC-MS、HPLC 等仪器方法的结果可以在一定程度上解释该差异来源, 电子舌作为滋味补充、电子眼则作为视觉参数补充, 四者从整体上相互印证、相互补充, 为分析食品风味物质提供理论依据和技术参考。

3.2 数据分析方法

随着计算机和传感器技术的高速发展, 电子鼻、电子舌和电子眼等智能感官仿生技术相继出现。这些智能感官技术通过与特征选择以及建模方法结合使用, 可以将客观物体的嗅觉、味觉和视觉等信息特征数字化, 抽取物体的特征参数并实现对目标对象的客观化鉴定或评价^[60]。如张欣等^[34]基于电子鼻检测数据, 结合主成分分析和层次聚类分析等特征选择及偏最小二乘判别分析和逐步多元线性回归分析等建模方法建立了鱼糕新鲜度的判别和预测模型; LU 等^[61]基于多金属传感器阵列的电子舌数据, 结合信息熵构建了多维交互矩阵, 建立了卷积神经网络模型、BP 神经网络模型和联邦模型, 结果表明电子舌传感器阵列的联合模型和多维交互矩阵的组合可以作为大米质量量化的有效方法。李建军等^[62]也利用电子鼻、电子舌等智能感官技术数据进行主成分分析和判别因子分析等特征选择, 发现

智能感官技术能够准确地鉴别不同类型的金银花酒样品。由此可见: 智能感官技术通过与特征选择、建模等数据分析方法结合使用, 不仅可以判别分析食品品质特性, 还可以建模预测食品品质量化发展。

4 总结与展望

智能感官技术作为检测食品风味的高科技技术装置, 其通过模拟哺乳动物的嗅觉、味觉和视觉器官获得风味物质、呈味物质以及外观纹理、颜色等食品风味品质信息, 已经被广泛应用于食品风味品质评价、食品新鲜度检测、食品真实性鉴别、产地溯源检测等领域。智能感官技术结合仪器分析技术及特征选择、降维和建模等数据分析方法, 则可以将客观物体的嗅觉、味觉和视觉等信息特征数字化, 进而更好地解释食品风味、化学成分与感官体验之间的关系。然而现阶段电子鼻存在对环境要求程度高、价格昂贵, 电子舌存在传感器寿命较短、使用的参比溶液受样品影响且不同实验室不同型号的智能感官设备数据不能合并分析等不足, 针对这些不足, 智能感官技术需要提高设备检测能力, 降低设备使用门槛, 进一步提升传感器耐受度和敏感性, 保证测量精确度的同时延长使用寿命。比如研发新型传感器来降低设备对工作环境的要求, 依托微机电技术的发展以及敏感材料性能的提升研发实用型设备。此外, 随着神经网络算法和大数据等技术的快速发展, 智能感官技术应加强与支持向量机、卷积神经网络和 BP 神经网络等结合, 从而为智能感官技术发展提供新的思路和方法。

参考文献

- [1] 田怀香, 熊娟娟, 于海燕, 等. 果酒中香气化合物的生物转化与调控机制研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(19): 36–47.
TIAN HX, XIONG JJ, YU HY, *et al.* Biotransformation and biological regulation mechanism of aroma compounds in fruit wine: A review [J]. Food Sci, 2022, 43(19): 36–47.
- [2] 邹淑娟, 邵常亮. “三减”主题倡导下的中国居民全民健康生活方式行为效果的 Meta 分析[J]. 临床医药实践, 2022, 31(10): 734–739.
KUI SJ, SHAO CL. Meta-analysis of the behavioral effects of national healthy lifestyle actions among Chinese residents advocated by the theme of ‘three reductions’ [J]. Proef Clin Med, 2022, 31(10): 734–739.
- [3] 李永杰, 唐月, 李慧瑶, 等. 基于智能感官和气相色谱-质谱联用技术研究食盐添加量对风干肠风味特征的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 1–7.
LI YJ, TANG Y, LI HY, *et al.* Effect of salt content on the flavor profile of air-dried sausages as determined by instrumental sensory technologies and gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Sci, 2022, 43(4): 1–7.
- [4] 刘源, 陈艳萍. 食品风味研究动态[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(15): 4830–4831.
LIU Y, CHEN YP. Research trend of food flavor in China [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(15): 4830–4831.
- [5] SON M, PARK TH. The bioelectronic nose and tongue using olfactory and

- taste receptors: Analytical tools for food quality and safety assessment [J]. Biotechnol Adv, 2018, 36(2): 371–379.
- [6] 王蓓, 韩兆盛, 杨智杰, 等. 6 类常见食品中含硫化合物风味特征及形成机理研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(6): 13–25.
WANG B, HAN ZS, YANG ZJ, *et al.* Research progress on flavor characteristics and formation mechanism of sulfur compounds in six common foods [J]. J Food Sci Technol, 2022, 40(6): 13–25.
- [7] AL-DALALI S, LI C, XU B. Insight into the effect of frozen storage on the changes in volatile aldehydes and alcohols of marinated roasted beef meat: Potential mechanisms of their formation [J]. Food Chem, 2022, 385: 132629.
- [8] WANG LH, QIAO KN, DUAN W, *et al.* Comparison of taste components in stewed beef broth under different conditions by means of chemical analyzed [J]. Food Sci Nutr, 2020, 8(2): 955–964.
- [9] ZHANG YC, LIN QB, ZHONG HN, *et al.* Identification and source analysis of volatile flavor compounds in paper packaged yogurt by headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Packag Shelf Life, 2022, 34: 100947–100955.
- [10] 朱焯, 陈晓婷, 乔琨, 等. 气相色谱及其联用技术在食品风味中的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(6): 200–210.
ZHU Y, CHEN XT, QIAO K, *et al.* Progress in research on gas chromatography and hyphenated technology for studies on food flavor [J]. Food Res Dev, 2022, 43(6): 200–210.
- [11] 郭程琳, 樊玉霞, 陈高乐, 等. 细胞生物传感器在食品风味评价中的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 268–276.
GUO CL, FAN YX, CHEN GL, *et al.* Research progress of cell-based biosensors in food flavor evaluation [J]. Food Sci, 2023, 44(1): 268–276.
- [12] JIANG S, ZHU YW, PENG JY, *et al.* Characterization of stewed beef by sensory evaluation and multiple intelligent sensory technologies combined with chemometrics methods [J]. Food Chem, 2023, 408: 135193.
- [13] DI RAR, LEONE F, CHELI F, *et al.* Fusion of electronic nose, electronic tongue and computer vision for animal source food authentication and quality assessment-A review [J]. J Food Eng, 2017, 210: 62–75.
- [14] 彭金月, 姜水, 高韶婷, 等. 基于智能感官与人工感官评价的中国三大干腌火腿风味特性分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(17): 231–236.
PENG JY, JIANG S, GAO ST, *et al.* Flavor characterization of three major dry-cured hams in China based on intelligent sensory evaluation and artificial sensory analysis [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(17): 231–236.
- [15] 解云, 陈邵德罡, 蔡文超, 等. 基于电子鼻和电子舌技术对不同品种红枣香气和滋味的差异分析[J]. 中国酿造, 2022, 41(12): 178–182.
XIE Y, CHEN SDG, CAI WC, *et al.* Aroma and taste differences analysis of different varieties of jujubes based on electronic nose and electronic tongue technology [J]. China Brew, 2022, 41(12): 178–182.
- [16] 李建军, 常筱沛, 马静潇, 等. 电子眼、电子鼻和电子舌鉴别不同品种、不同产地生地黄[J]. 中成药, 2022, 44(11): 3549–3554.
LI JJ, CHANG XP, MA JX, *et al.* Discrimination of different cultivars and habitats of raw *Rehmannia glutinosa* with electronic eyes, electronic nose and electronic tongue [J]. Chin Tradit Pat Med, 2022, 44(11): 3549–3554.
- [17] HAN FK, ZHANG DJ, AHETO JH, *et al.* Integration of a low-cost electronic nose and a voltammetric electronic tongue for red wines identification [J]. Food Sci Nutr, 2020, 8: 4330–4339.
- [18] BANERJEE R, TUDU B, BANDYOPADHYAY R, *et al.* A review on

- combined odor and taste sensor systems [J]. *J Food Eng*, 2016, 190: 10–21.
- [19] 邓森磊, 陈斯, 李磊, 等. 智能感官技术在储藏小麦品质评价中的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(6): 36–44.
DENG ML, CHEN S, LI L, *et al.* Research progress of intelligent sensory technology in quality evaluation of stored wheat [J]. *J Chin Cere Oils Assoc*, 2022, 37(6): 36–44.
- [20] APETREI IM, APETREI C. Voltammetric E-tongue for the quantification of total polyphenol content in olive oils [J]. *Food Res Int*, 2013, 54: 2075–2082.
- [21] BASKAR C, NESAKUMAR N, RAYAPPAN JBB, *et al.* A framework for analysing E-nose data based on fuzzy set multiple linear regression: Paddy quality assessment [J]. *Sens Actuators A: Phys*, 2017, 267: 200–209.
- [22] LU L, HU ZQ, HU XQ, *et al.* Electronic tongue and electronic nose for food quality and safety [J]. *Foods Res Int*, 2022, 162: 112214–112227.
- [23] LEON-MEDINA JX, ANAYA M, TIBADUIZA DA. Yogurt classification using an electronic tongue system and machine learning techniques [J]. *Intell System Appl*, 2022, 16: 200143–200151.
- [24] STEFANIKOVA J, MARTISOVA P, ARVAY J, *et al.* Comparison of electronic systems with sensory analysis for the quality evaluation of parnica cheese [J]. *Czech J Food Sci*, 2020, 38(5): 273–279.
- [25] VALKOVA V, DURANOVA H, STEFANIKOVA J, *et al.* Wheat bread with grape seeds micropowder: Impact on dough rheology and bread properties [J]. *Appl Rehol*, 2020, 30(1): 138–150.
- [26] 侯冉, 窦露, 任钦, 等. 丁酸梭菌对小尾寒羊宰后成熟过程中挥发性风味物质的影响及机理研究[J/OL]. *食品科学*: 1-16. [2023-01-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20221207.1723.048.html>
HOU R, DOU L, REN Q, *et al.* Effect and mechanism of clostridium butyricum on volatile flavor compounds of small tailed-han sheep during post-mortem aging and its mechanism [J/OL]. *Food Sci*: 1-16. [2023-01-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20221207.1723.048.html>
- [27] CHEN LZ, WANG YF, ZHANG JR, *et al.* Dynamic changes of metabolic profile and taste quality during the long-term aging of Qingzhan tea: The impact of storage age [J]. *Food Chem*, 2021, 359: 1–10.
- [28] 吴仕敏, 余勤艳, 朱佳依, 等. 基于电子舌和代谢组学分析揉捻频率对工夫红茶品质的影响[J/OL]. *食品科学*: 1-15. [2023-01-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220628.1538.032.html>
WU SM, YU QY, ZHU JY, *et al.* Analysis on the effect of different rolling frequencies on the congou black tea quality based on electronic tongue and metabolomics [J/OL]. *Food Sci*: 1-15. [2023-01-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220628.1538.032.html>
- [29] 陈晓旭, 刘聪, 王丽霞, 等. 基于电子眼技术和化学指纹图谱的陈皮与蒸陈皮质量差异分析[J/OL]. *中国实验方剂学杂志*: 1-8. [2023-02-01]. DOI: 10.13422/j.cnki.syfjx.20230248
CHEN XX, LIU C, WANG LX, *et al.* Quality difference analysis of raw and steamed products of *Citri reticulatae pericarpium* based on electronic eye technique and chemical fingerprint [J/OL]. *Chin J Exp Tradit Med*: 1-8. [2023-02-01]. DOI: 10.13422/j.cnki.syfjx.20230248
- [30] LIU XT, WANG XL, CHENG YW, *et al.* Variations in volatile organic compounds in Zhenyuan Daocai samples at different storage durations evaluated using E-nose, E-tongue, gas chromatography, and spectrometry [J]. *LWT*, 2023, 173: 114186.
- [31] ZHENG WB, SHI Y, YING YX, *et al.* Olfactory-taste synesthesia model: An integrated method for flavor responses of electronic nose and electronic tongue [J]. *Sens Actuators A*, 2023, 350: 114134.
- [32] 陈佳瑜, 袁海波, 沈帅, 等. 基于智能感官多源信息融合技术的滇红工夫茶汤综合感官品质评价[J]. *食品科学*, 2022, 43(16): 294–301.
CHEN JY, YUAN HB, SHEN S, *et al.* Comprehensive sensory quality evaluation of Dianhong Gongou tea infusions using intelligent sensory multi-source information fusion technology [J]. *Food Sci*, 2022, 43(16): 294–301.
- [33] ZHOU QY, DAI ZH, SONG FH, *et al.* Monitoring black tea fermentation quality by intelligent sensors: Comparison of image, E-nose and data fusion [J]. *Food Biosci*, 2023, 52: 102454.
- [34] 张欣, 陈双宜, 谷惠文, 等. 基于电子鼻技术的荆州鱼糕贮藏过程新鲜度预测[J]. *轻工学报*, 2022, 37(3): 17–25.
ZHANG X, CHEN SY, GU HW, *et al.* Prediction of freshness of Jingzhou fish cake during storage based on electronic nose technology [J]. *J Light Ind*, 2022, 37(3): 17–25.
- [35] ALI MM, HASHIM N, ABD AS, *et al.* Principles and recent advances in electronic nose for quality inspection of agricultural and food products [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 99: 1–10.
- [36] GUNAY S, ATASOY A. Freshness classification of horse mackerels with E-nose system using hybrid binary decision tree structure [J]. *Int J Pattern Recogn*, 2020, 34(3): 2050003.
- [37] 韩剑众, 黄丽娟, 顾振宇, 等. 基于电子舌的肉品品质及新鲜度评价研究[J]. *中国食品学报*, 2008, (3): 125–132.
HAN JZ, HUANG LJ, GU ZY, *et al.* Evaluation of meat quality and freshness based on the electronic tongue [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2008, (3): 125–132.
- [38] BANWARI A, JOSHI RC, SENGAR N, *et al.* Computer vision technique for freshness estimation from segmented eye of fish image [J]. *Ecol Inform*, 2022, 69: 101602.
- [39] 李玉花, 史翰卿, 熊赞葳, 等. 融合电子鼻和视觉技术的鸡肉新鲜度检测装置研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(11): 433–440.
LI YH, SHI HQ, XIONG YW, *et al.* Research of chicken freshness detection device based on electronic nose and vision technology [J]. *Transact Chin Soc Agric Mach*, 2022, 53(11): 433–440.
- [40] SHI C, YANG X, SHUAI H, *et al.* Nondestructive prediction of tilapia fillet freshness during storage at different temperatures by integrating an electronic nose and tongue with radial basis function neural networks [J]. *Food Bioproc Technol*, 2018, 11: 1840–1852.
- [41] 唐逸芸, 刘芮, 王璐, 等. 单类分类方法结合光谱分析在食品真实性鉴别中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(11): 3336–3344.
TANG YY, LIU R, WANG L, *et al.* Application of one-class classification combined with spectral analysis in food authenticity identification [J]. *Spectroscopy Spectral Anal*, 2022, 42(11): 3336–3344.
- [42] 张春娟, 郑晓春, 古明辉, 等. 基于电子鼻和可见/近红外光谱技术的羊肉真实性鉴别[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(12): 383–393.
ZHANG CJ, ZHENG XC, GU MH, *et al.* Authenticity identification of mutton based on electronic nose and visible/near infrared spectroscopy [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2022, 38(12): 383–393.
- [43] ROY M, HARIHARAN N, MANOJ D, *et al.* Development of metal oxide semiconductor gas sensor based electronic nose system for adulteration detection in ghee [J]. *Aki Nik Pub*, 2021, 10(4): 30–38.

- [44] 范文教, 易宇文, 徐培, 等. 猪肉肠掺杂鸡肉的电子舌识别研究[J]. 食品科技, 2017, 42(11): 295-299.
FAN WJ, YI YW, XU P, *et al.* The application of electronic tongue on the discrimination of the chicken adulteration of pork sausage [J]. Food Sci Technol, 2017, 42(11): 295-299.
- [45] SURANYI J, ZAUUU JLZ, FRIEDRICH L, *et al.* Electronic tongue as a correlative technique for modeling cattle meat quality and classification of breeds [J]. Foods, 2021, 10(10): 2283.
- [46] DUAN ZL, DONG SL, DONG YW, *et al.* Geographical origin identification of two salmonid species via flavor compound analysis using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with electronic nose and tongue [J]. Food Res Int, 2021, 145: 110385.
- [47] 洪赫阳, 田秀慧, 温丰功, 等. 利用稳定同位素进行农产品产地溯源和真伪鉴别研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(21): 6889-6897.
HONG HY, TIAN XH, WEN FG, *et al.* Research progress in origin traceability and authenticity identification of agricultural products using stable isotope [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(21): 6889-6897.
- [48] 高继勇, 王首程, 于雪莹, 等. 基于电子舌与 GAN-CDAE-ELM 模型的咖啡产地快速溯源检测[J]. 电子测量技术, 2021, 44(21): 36-43.
GAO JY, WANG SC, YU XY, *et al.* Rapid origin traceability detection of coffee based on electronic tongue and GAN-CDAE-ELM model [J]. Electronic Meas Technol, 2021, 44(21): 36-43.
- [49] 何珊, 蔺佳良, 张迪骏, 等. 基于风味的线性判别和雷达图的中华绒螯蟹溯源[J]. 中国食品学报, 2018, 18(7): 239-246.
HE S, LIN JL, ZHANG DJ, *et al.* Traceability of eriocheir sinensis based on flavor linear discriminant and radar chart [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2018, 18(7): 239-246.
- [50] 陈立同, 高文, 金鑫宇, 等. 基于电子舌与 MAML-CNN 模型的大豆产地溯源快速检测[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(12): 140-147.
CHEN LT, GAO W, JIN XN, *et al.* Rapid detection of soybean origin tracing based on electronic tongue and MAML-CNN model [J]. Fore Electronic Meas Technol, 2022, 41(12): 140-147.
- [51] 黄慧清, 杨云, 柳镇章, 等. 茶树新品系‘606’乌龙茶在不同季节的品质分析[J/OL]. 食品工业科技: 1-19. [2023-01-04]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080303
HUANG HQ, YANG Y, LIU ZZ, *et al.* Quality analysis of a new tea line ‘606’ Oolong tea in different seasons [J/OL]. Sci Technol Food Ind: 1-19. [2023-01-04]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080303
- [52] 李铭轩, 秦宇雯, 李昱, 等. 基于 Heracles Neo 超快速气相电子鼻对不同基原郁金饮片的快速识别及差异标志物研究[J]. 中国中药杂志, 2023, 48(6): 1518-1525.
LI MX, QIN YW, LI Y, *et al.* Rapid identification and differential markers of multi-sources radix curcuma decoction based on heracles neo ultra-fast gas phase electronic nose [J]. China J Chin Mater Med, 2023, 48(6): 1518-1525.
- [53] ORLANDI G, CALVINI R, FOCA G, *et al.* Data fusion of electronic eye and electronic tongue signals to monitor grape ripening [J]. Talanta, 2018, 195: 1-21.
- [54] ORLANDI G, CALVINI R, PIGANI L, *et al.* Electronic eye for the prediction of parameters related to grape ripening [J]. Talanta, 2018, 186: 381-388.
- [55] STEFANIKOVA J, MARTISOVA P, ARVAY J, *et al.* Comparison of electronic system with sensory analysis for the quality evaluation of parenica cheese [J]. Czech J Food Sci, 2020, 38(5): 273-279.
- [56] 毋思敏, 于森, 孙二娜, 等. 基于电子鼻与电子舌建立牛奶货架期预测模型[J]. 食品科学, 2022, 43(10): 302-307.
WU SM, YU M, SUN ERN, *et al.* Establishment of shelf life prediction model for milk using electronic nose and electronic tongue [J]. Food Sci, 2022, 43(10): 302-307.
- [57] SCHIEBERLE P. New developments in methods for analysis of volatile flavor compounds and their precursors [Z].
- [58] 杨亚焱, 吴瑞, 王瑞, 等. 基于电子感官技术和 GC-MS 分析不同干燥方式对乌梅风味的影响[J/OL]. 现代食品科技: 1-8. [2023-02-08]. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.5.0414
YANG YT, WU R, WANG R, *et al.* Effects of the different drying methods on the flavor of prunus mume based on electronic sensory techniques and GC-MS [J]. Mod Food Sci Technol: 1-8. [2023-02-08]. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.5.0414
- [59] 于森, 代悦, 刘涛涛, 等. 古代经典九蒸九晒炮制过程中何首乌饮片物质基础与颜色特征的相关性分析[J/OL]. 中国实验方剂学杂志: 1-10. [2023-02-20]. DOI: 10.13422/j.cnki.syfjx.20230661
YU M, DAI Y, LIU TT, *et al.* Correlation analysis between material basis and color characteristics of *Polygoni multiflori radix* Decoction Pieces during ancient classical nine-time repeating [J/OL]. Chin J Exp Tradit Med: 1-10. [2023-02-20]. DOI: 10.13422/j.cnki.syfjx.20230661
- [60] 侯富国, 桂新景, 王艳丽, 等. 基于智能视觉技术的白及饮片真伪快速辨识方法研究[J]. 中草药, 2023, 54(2): 509-519.
HOU FG, GUI XJ, WANG YL, *et al.* Authenticity rapid identification method of *Bletilla striata* decoction pieces based on intelligent vision technology [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2023, 54(2): 509-519.
- [61] LU L, HU Z, HU X, *et al.* Quantitative approach of multidimensional interactive sensing for rice quality using electronic tongue sensor array based on information entropy [J]. Sensor Actuat B-Chem, 2021, 329: 129254.
- [62] 李建军, 董倩倩, 赵一, 等. 基于电子鼻和电子舌技术对不同金银花酒的鉴别分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(11): 308-312.
LI JJ, DONG QQ, ZHAO Y, *et al.* Identification and analysis of different honeysuckle wines using electronic nose and tongue technology [J]. Mod Food Sci Technol, 2022, 38(11): 308-312.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



王铁龙, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为 HACCP 体系、食品热力杀菌、食品安全管理、认证认可等。
E-mail: 36924431@qq.com



陈冬东, 研究员, 主要研究方向为食品安全快检评价与认证。
E-mail: chendd@acas.com.cn