代良超, 乌日娜, 陶冬冰, 等. 智能仿生在食品发酵中的应用及研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(19): 14−21. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120273

DAI Liangchao, WU Rina, TAO Dongbing, et al. Application and Research Progress of Intelligent Bionics in Food Fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(19): 14−21. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120273

·未来食品·

# 智能仿生在食品发酵中的应用及研究进展

代良超[1], 乌日娜[1], 陶冬冰[1], 张　良[2], 臧　健[3], 武俊瑞[1,*]

（1.沈阳农业大学食品学院, 沈阳市微生物发酵技术创新重点实验室, 辽宁省食品发酵技术工程研究中心, 辽宁沈阳 110866;
2.沈阳农业大学生物科学技术学院, 辽宁沈阳 110866;
3.沈阳农业大学分析测试中心, 辽宁沈阳 110866）

**摘　要:** 食品加工制造从传统手工走向智能化，在食品营养与安全的前提下，进一步提高食品制造效率，提升感官品质。现代智能仿生集仿生传感和机器学习的优势于一体，同时，有单一分析及联合分析等方式，可对目标进行感官定性定量分析，其应用范围和检测阈值大大超过了传统方式可以达到的程度。此外，利用智能仿生对发酵食品的色、香、味、形、发酵过程、分类筛选等方面进行快速定性定量分析，能显著改善发酵食品的质量分级、综合评价的准确性。该文以发酵食品为例，系统阐明了视觉仿生、嗅觉仿生、触觉仿生、味觉仿生等智能仿生传感技术的作用机制及研究现状，同时对未来的研究方向进行了综述，以期为发酵食品的控制、检测和开发等方面提供清晰的理论参考和研究思路。

**关键词:** 仿生传感, 发酵食品, 智能控制, 质量评价, 检测

**中图分类号:** TS207.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2022)19−0014−08

**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2021120273

本文网刊:

# Application and Research Progress of Intelligent Bionics in Food Fermentation

**DAI Liangchao[1], WU Rina[1], TAO Dongbing[1], ZHANG Liang[2], ZANG Jian[3], WU Junrui[1,*]**

（1.College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Key Laboratory of Microbial Fermentation Technology Innovation, Engineering Research Center of Food Fermentation Technology, Shenyang 110866, China;
2.College of Bioscience and Biotechnology, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;
3.Testing and Analysis Center, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China）

**Abstract:** With the development of science and technology, food processing and manufacturing have become more intelligent. Under the premise of food nutrition and safety, it is necessary to improve food manufacturing efficiency and sensory quality. Modern intelligent bionics integrates the advantages of bionic sensing and machine learning. At the same time, there are methods such as single analysis and joint analysis to perform sensory qualitative and quantitative analysis of the target. Its application range and detection threshold greatly exceed the level that can be achieved by traditional methods. In addition, the use of intelligent bionics can quickly locate and quantitatively analyze fermented foods, including color, aroma, taste, shape, fermentation process, classification and screening, etc. And it can significantly improve the accuracy of fermented food's quality classification and comprehensive evaluation. This paper takes fermented food as an example. The mechanism and research status of intelligent bionic sensing technologies such as visual bionic, olfactory bionic, tactile bionic and gustatory bionic are systematically expounded. At the same time, the future research direction was summarized,

**收稿日期:** 2021−12−27

**基金项目:** 宁夏自治区重点研发计划农业农村领域项目（2022BBF03021）; 沈阳市科技创新平台项目（21-104-0-28, 21-103-0-14）; 沈阳市中青年科技创新领军人才项目（RC200495）。

**作者简介:** 代良超（1996−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品微生物, E-mail: SYNY8244@163.com。

*** 通信作者:** 武俊瑞（1977−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品微生物, E-mail: junruiwu@126.com。

in order to provide a clear theoretical reference and research ideas for the control, detection and development of fermented food.

**Key words**: bionic sensing; fermented food; intelligent control; quality evaluation; detection

人工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的影响，如地域性、风俗习惯、性别年龄差异等，可能导致评价结果难以复现。同时，感官评价员对大量样品的评价会因其感官疲劳使得评价准确性降低。而利用智能仿生在一定程度上代替人工感官评价，其出发点是仿人的智能识别和应对各种复杂不确定的问题[1]，可以对食品品质的色、香、味、形等进行客观反映，能为食品品质的优劣及品质变化过程提供科学依据。

智能仿生技术是指研究生物系统结构、功能并以此来改造产品的系统科学，它强调对人类和其他生物智能行为的模仿并研究其中有益的原理和规律[2]。智能仿生技术集生物学、计算机科学、材料科学、机械工程及电子技术等多学科的相互渗透，在农业、医学及人工智能等方面应用广泛。利用智能仿生部分或全部代替人类活动，能有效提高工作效率，减少人工成本，加速工业化进程。发酵食品的种类繁多，发酵过程较复杂，且通常含有多样化的中间产物，与产品品质变化直接相关。同时，发酵产品品质主要受到工艺条件和人文差异的影响[3]，使得产品感官质量参差不齐，包括产品颜色[4]、质构[5]、风味、滋味等[6]。因此，进行更加标准化的对发酵食品颜色、风味、滋味及基本理化指标的检测或监测是发酵过程控制和产品品质精确评价的关键[7]。现代的智能感官评定的优势已逐步上升到了分子水平，不仅包括对样品的定性定量区分，能极大程度地有效替代传统控制。此外，智能仿生技术可以为发酵食品的某些在线控制过程、掺假制假物质的鉴定、同一类产品的区别及分类等食品感官控制方面的各种复杂性和不确定因素提供合适的解决途径。本文以嗅觉仿生、视觉仿生、味觉仿生、触觉仿生等智能仿生技术在食品发酵和检测中的研究进展及未来发展趋势进行综述，阐述了智能仿生在发酵制品质量控制、快速检测等方面的积极应用前景。

## 1　嗅觉仿生在发酵食品中的应用

### 1.1　电子鼻技术在发酵食品中的应用

电子鼻又称仿生嗅觉[8]。上世纪 60 年代，Wilkens 及 Hatman 提出了电子模拟嗅觉的相关报道[9]。而在 1994 年，Cardner 等[10] 提出了电子鼻的观点。在早期，电子鼻的传感装置为偏振微电极，具备一定程度的嗅觉仿生功能[4]。从 2010~2020 年，具有先进功效的新型传感器已经用创新的纳米粒子材料开发出来，这些纳米粒子材料具有更优灵敏度和选择性[11]。原理上，电子鼻通过将所研究基质的现有挥发物转换成来自传感器阵列的电子信号来工作[12]，所得的数字输出然后经过数据处理单元以提取相应的结果。因此，传感器是电子鼻的核心部分，主要包含金属氧化物半导体传感器、金属氧化物半导体场效应晶体管传感器、质量敏感传感器、导电有机聚合物、固体电解质传感器和光纤传感器的传感器[13]。

在发酵工业中，1993 年，Pearce 等[14] 开创了烘焙啤酒鉴别。此后，电子鼻技术开始应用到酒类识别鉴定中[15−16]。Aleixandre 等[17] 利用电子鼻和人体面板鉴定 4 种红葡萄和 2 种白葡萄酒的二元混合物，结果显示：这两种技术都能够量化测试的混合物，但重要的是，电子鼻技术比人体面板更快、更简单、更客观。随着电子鼻传感阵列的材料先进化和多样化，电子鼻在发酵工业中应用趋向成熟。近几年，电子鼻技术在发酵的过程控制中有了更多成熟的应用，如发酵过程中乳制品的成熟度的预测，挥发性香气成分的实时检测。同时，由于分析方法的先进性，多方法结合的融合分析在数据分析中不断成功应用。此外，电子鼻监测系统开始向便捷式、小体积、低成本等方面发展。管彬彬等[18] 利用可视化嗅觉对 56 个不同发酵床的种子乙醇脱氢酶的活性及不挥发性酸和总酸进行检测，结合误差反向传播人工神经网络进行数据分析，结果表明：将二者进行结合可对醋酸发酵过程进行有效的在线检测和过程预测。武斌等[19] 利用电子鼻对多个品种的食醋进行检测，结合因子分析和线性判别分析进行品质分类。Kovacs 等[20] 对不同发酵时间点（0、4、11 d）的益生菌、适度益生菌和非益生菌进行了区分，建立了不同菌群和时间点的分类模型，并监测了发酵过程中芳香族化合物的生成。吴慧琳等[21] 对四种发酵酸肉进行风味评价，利用灰色关联分析了不同热加工条件下电子鼻响应值的关联系数，建立了电子鼻关联系数与感官评价间的回归模型，构建了酸肉的风味评价构建的有效方法。朱锦[22] 研发了一套低成本、小体积及高效率的电子鼻系统，可以对白酒种类进行定性检测，但尚且无法对白酒的挥发性风味物质进行定量，同时不能进行同一品种不同档次白酒的区分。

电子鼻技术主要应用于挥发性风味物质的研究与开发，在检测、识别、分类等中，识别模型的建立上已应用广泛。电子鼻技术可用于同类发酵中的检测、分类，例如不同品种红酒鉴品及分类、食醋挥发性物质的识别及真伪鉴别等；乳制品成熟度的预测和在线控制等。电子鼻技术也存在不足和局限，常用的电子鼻系统大多体积庞大，主要受到传感器数量的限制，而小型的电子鼻则难以满足对广泛的应用要求且精确度不足。此外，电子鼻系统中不同的传感器会对挥发性物质的识别存在差异，从而造成计算误差。在

数据分析上主要采用主成分分析、判别分析、聚类分析、多元线性回归、神经网络等方式。电子鼻成本昂贵，检测精度有待提高，成为现在需要克服的问题。同时，有待探索一些数据处理方式，如深度信念网络（Deep belief networks, DBNs）、卷积神经网络（Convolutional neural network, CNN）[23]。

### 1.2 电子鼻-GC-MS 联用在发酵食品中的应用

电子鼻从气味特征的整体风味进行分析，具有一定的局限性。GC-MS 为气-质联用，综合了气相色谱对样品的分离性强，质谱的鉴别性强等特性[24]。电子鼻与 GC-MS 两种分析技术的配合能够从宏观和微观上研究食品风味，是目前食品检测的主要手段。对于同一种物质，电子鼻技术可用于食品风味检测，多品种的区分以及真伪鉴定等。GC-MS 鉴定出样品中的具体物质并进行分类，可在电子鼻检测结果的基础上进一步明确该样品的的定性和定量结果，实现具有到物质分子程度的可视化研究结果。近年来，葛东颖等[25] 以籼糯米、大米和粳糯米为单一变量，探究酿造黄酒的最佳原料，结果显示：传感器 W1C 和 W3C 对粳糯米为主要原料时的成品敏感程度最高，利用 GC-MS 得出粳糯米为主要原料产品的乙酸乙酯和己酸乙酯最高，可以得出黄酒酿造主要原料以粳糯米为最佳。Gao 等[26] 利用气相色谱-质谱联用（GC-MS）结合顶空-固相微萃取和电子鼻（E-nose）对多种不同生产工艺的酱油的挥发性物质的相关特征进行鉴别，并进行了半定量比较，得出了总挥发物的分布；GC-MS 定量识别出对酱油风味影响较大的关键挥发性化合物。

电子鼻用于鉴别出挥发性物质的总体特征并在不同样品中具有相互区别的作用，而 GC-MS 能够对挥发性风味物质的组成进行分析和比较，其应用更加广泛。首先，GC-MS 可对挥发性风味成分进行分析，峰面积归一化后可得各物质的相对含量，再对嗅觉阈值进行对照可计算得出气味活度值，进一步确定样品中的关键香味化合物[27]。其次，GC-MS 可对单一物质或特定的一类物质进行检测，能弥补人类嗅觉无法对单一类物质识别的缺点，同时，能够对可能有害有毒物质进行检测，如氨基甲酸乙酯[28]。最后，在发酵食品中，其能用于不同种类或者品种间的相互比较，品质评价以及掺假制假的检测。总体而言，电子鼻-GC-MS 联用主要用于酒类和酱油等液体的酒精度、品牌、香型、产地等分类。在数据分析中常用的是主成分、聚类、判别等方式。

## 2 视觉仿生在发酵食品中的应用

仿生学的研究开始于上世纪中期。1970 年以来，Robinson 等[29] 以猴子视觉神经为对象开创了先河。1996 年，Berthouze 等[30] 设计了摄像机收集物体成像的特点，基本实现了人眼模糊的特征。视觉仿生是指模仿人眼成像的特点对外物进行测量和分析。视觉仿生研究利用成像部件和数据处理器来模仿人眼及大脑的功能对分析对象进行信息提取，从而进行信息加工和理解后应用于现实测量[31]。现在，视觉仿生传感器通过对监测对象的位置信息、轮廓大小、明暗程度、色度、运动轨迹准确捕获，从而实现具备人眼睛的功能和特征：定位和引导、测量、识别和检测[32]。其不仅可以用于静态物质的检测，也能在一个连续化过程进行控制，实现每一个步骤的可视化精准把控[33]。同时，具备工作效率高，能在恶劣环境下工作，不污染样品且可对已包装好的样品进行快速检测的功能。周博文[34] 设计了一款视觉仿生机器人，应用保健酒检测。该款机器人以多传感及光学成像信息融合为核心，可对保健酒中的气泡、杂质、外观的缺失进行智能鉴别，并将劣质产品从优质产品中进行分离。在发酵食品中，高清摄像、近红外光谱技术是视觉仿生中常用的成像技术，以此为例进行简要阐述[35−36]。

### 2.1 高清摄像技术在发酵食品中的应用

高清摄像技术起源于上世纪 60 年代，起初主要应用到影视中，后逐渐应用到金融银行、大型商超，到目前的自动驾驶、虚拟现实等方面[37]。在发酵食品方面的应用成为目前的研究热点。高清摄像技术以高清数字摄像机为主要图形采集系统，能获取多帧连续图像，且清晰度高，克服了传统工艺视觉中获取单帧图像的缺陷[38]。邵志敏等[39] 为了检测白酒是否含有杂质，利用高清摄像机将瓶装白酒的视频分割成小序列，判断出可能存在的小气泡和杂质形态从而对白酒的外观品质进行分类。为确保对白酒发酵过程中的每一个步骤都能进行及时把控，因此需要对每一个因素都进行监控。目前，高清摄像的方式可对均匀的样品进行杂质检测和外观破损检查，主要在白酒中进行应用，在其它发酵食品中应用较少。高清摄像技术因其灵敏的图像捕捉可对于发酵食品的状态变化具有优良的判别，但是其对检测方式的要求较高，如背景光源、照明方式等，后端显示设备的成本昂贵。

### 2.2 近红外光谱技术在发酵食品中的应用

Davies 等[40] 在 1800 年发现了近红外能量，这标志着一个新的实验时代的开始。近红外光谱是一种介于可见光和辐射光间的辐射波，具备“光”的性质，近红外光谱仪一般包括光源、检测器、光源分析软件及漫反射附件等[41]。在常用的分析技术上把近红外光谱分为透射和漫反射两种形式。透射检测适用于稳定且均质的真液体或者固体样的测定，分析光的投射具有一定的确定性，可用于白酒、酸奶等的检测。在测量时，把样品放到光源和光检测器之间，检测器采集到的分析光装载了样品的基本信息。而漫反射检测是光源进入样品后一部分光被样品分子吸收，另一部分经过不断的反射、衍射及折射等复杂的过程后返回样品表面，因此漫反射的光线包含了样品中有关物质信息。近红外光谱的漫反射的应用比透射更广，可以测量糊状、纤维等非均质的样品。

目前，设备小型化和先进的数据传输技术相结合，使在过程分析中更加快捷方便[42]。近红外光谱是一种介于可见光和辐射光间的辐射波[41]，具有检测速度快，不污染样品等优点。在发酵食品的检验中，传统的检测包括理化、卫生、人工感官检测三个基本指标，每一个检测步骤都费时费力。在发酵过程中，可以利用红外光谱进行快速在线监测，如酸度鉴定，发酵过程中原料状态的变化。蔡伟源等[43]利用近红外光谱对多种不同来源的食醋进行探究，能够对理化指标进行快速检测，但在检测以前需要先建立合适的光谱预测模型。Oscar 等[44]使用光纤传感器的近红外光反向散射被用于监测酸奶的培养。其研究结果强调了光谱变化和样品酸碱度之间的相关性($R^2$>0.99)，表明在酸奶培养过程中，近红外可在线监测酸性的变化。包春芳[45]利用近红外光谱技术对黄酒、酱油及红酒的主要指标进行无损质量检测，利用偏最小二乘法进行结果分析，解决液体发酵食品组成复杂、分析繁杂的弊端，同时，还可以有效降低噪声，对相关的检测指标进行定量预测。总体而言，该方法主要有两种应用方式，一是离线检测，即在实验室利用该方式对样品进行投射；二是在线检测，即投入到工业中在线使用。近红外光谱技术对产品的检测频率快，效率高，但是同样存在亟待解决的不足，例如产品状态非均质的条件下，不同的液体可能会对红外光谱产生不同的吸收，产生检测误差，这就需要对产品质量进行预评估。同时，其检测光谱较宽，特征性吸收峰的识别需要进一步提高。目前，主要利用不同的化学计量方式（如主成分分析及偏最小二乘法）进行分析可以有效降低实验误差。

## 3　味觉仿生在发酵食品中的应用

味觉仿生系统以味觉感知为核心，可以对物质的基本味觉进行感知分辨[46]。目前，味觉仿生的应用领域已远不仅在食品中，同时，其灵敏感知程度已经超过了人类本身。在发酵制品中，应用最广泛的属电子舌。Norris 等[47]在 1985 年首次提出在阵列中应用液体传感器来分析不同的液体样品。几年后，Hayashi 等[48]在 1990 年提出了味觉传感器的开创性概念。根据定义，电子舌是一种“分析仪器”，包括对不同溶液成分具有部分特异性的非选择性化学传感器阵列和适当的模式识别仪器[49]。近几年，电子舌集人工智能开始向便捷式发展。在电子舌使用时，传感器的阵列已根据目标样本，通过遵循不同的操作模式进行定制。其中，最突出的是基于电化学、酶、光学和质量而相互作用的[50]，如伏安电子舌、阻抗电子舌、质量电子舌等，在发酵食品中，常用的是伏安电子舌。

电子舌对酸甜苦辣咸鲜等进行有效识别，具有检测速度快、检测阈值低、效率高等优点[51−52]。在现代的味觉仿生研究中，开始进一步向专一化、精确化方向发展。以发酵食品为例：应用最为成熟和广泛的是对基本味的判别。马佳佳等[53]利用主成分、聚类、冗余分析等方法对猕猴桃果酒发酵过程中的滋味指标变化进行判别，结果显示：可将发酵阶段划分为三个阶段，最佳的发酵时间不宜高于 16 d。电子舌也普遍用于白酒的检测，但传统的感应传感阵列极易被乙醇所干扰，具有一定的缺陷。王洪彬[54]利用指示剂和卟啉为感应源构建了新型的味觉仿生传感器，可以有效避免乙醇带来的干扰，同时，通过实验验证，实现了对 4 种浓香型白酒的鉴定，且效果良好。Wei 等[55]研究了通过利用伏安电子舌在发酵、成熟和储存期间监测酸奶样品质量属性的能力，结果表明，电子舌能对酸奶的成熟状态跟踪和样品酸度、粘度、发酵时间进行预测。

电子舌具有快速测定溶解非挥发性食物成分及通过直接测量步骤和最少样品制备进行精确测量分类等优点。发酵食品中，电子舌在样品分类、掺假制假、品质评价以及发酵过程进行在线控制研究广泛，但是对于样品处理方式需要根据实际情况进行选择使用。同时，样品温度及其波动和某些成分的吸附作用会对结果产生严重的干扰。目前，多机器学习技术被广泛研究、开发并集成到特征物质提取、建模和传感器漂移补偿中，可以有效减少外界因素的噪声影响同时保持原始信号中模式信息的鲁棒性。除此之外，电子舌无法区分具有相似结构的化学物质，因为它的感知机制是基于化学相互作用的，更好的方式是依靠液相色谱质谱仪。

## 4　触觉仿生在发酵食品中的应用

触觉仿生装置，是皮肤“仿生”的一种电子系统或元件，能够感知外界的温度、压力等刺激[56]。早在 1974 年，仿生触觉传感器首次公开亮相，并对食品质构的客观评价代替人工评价展开尝试[57]。触觉仿生的原理是仿人的触感，根据不同的感触接收点划分一系列不同的力学传感探头，再将力学感受元传送到计算机显示屏上而得出一系列的图形。使用仿生传感技术对食品的触觉品质进行评价具有重要意义，可以得到更立体、更接近人类感受的触感，并得以表征更多传统方法无法测定的食品质构特征。仿生触觉发展迅速，研究出了包括仿生皮肤[58]、仿生手[59]、仿生神经[60]等，主要应用于在机器人感知、人类假肢、特殊领域的仿生触觉传感器，如生物医学工程、汗液传感等领域[61−62]。目前，在发酵食品的应用研究主要是质构仪。传感探头可划分为锥形、柱形、针形、球形、盘形、咀嚼性探头等[63]，质构特性包括硬度、咀嚼性、粘附性、粘度及稠度等。不同物质需要根据实际情况选择获取不同的质构特性，因此需要选择多样的测试模式，如穿刺实验、挤压实验、剪切实验等。

食品的食用品质与质构特性密切相关。系统化的质构特性主要依靠质构进行，人工评价无法对物体质构进行深入测试，只能停留在物体表面，且没有统一的判断标准。冯月玲等[64]利用质构仪对发酵青菜进行硬度穿刺测试，分别对下、中、上不同部位进行

表 1 智能仿生在发酵食品应用中的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of intelligent bionics in fermented food application

| 检测类型 | 检测方法 | 优点 | 缺点 | 主要应用 | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|---|
| 嗅觉仿生 | 电子鼻技术 | 优质的灵敏性及选择性、操作简单 | 不同的检测对象需不同传感器 | 同类发酵挥发性风味的检测、分类和预测 | [19−21] |
| | 电子鼻-GC-MS联用 | 稳定性强、可重复性高 | 不能同时操作、连续性不足 | 鉴定风味差异并得出差异来源;品牌、产地等分类 | [25−27, 29] |
| 视觉仿生 | 高清摄像 | 清晰度高,可获得连续多帧图像或视频短序列 | 适宜的光照,对环境要求较高 | 形态、杂质检测、发酵过程精度控制 | [39−40] |
| | 近红外光谱技术 | 扫描快、不污染样品、适用范围广 | 对特征吸收峰的识别具有一定难度,分析中来自不同检测点的吸收峰重叠等 | 部分理化指标的快速检测、发酵在线检测、产品分级、缺陷鉴定 | [44−46] |
| 味觉仿生 | 电子舌技术 | 检测速度快、阈值低 | 温度波动及某些物质吸附作用的干扰产生实验误差 | 对基本味觉进行分类识别、样品的分类识别、发酵过程的在线控制 | [50, 52−56] |
| 触觉仿生 | 质构仪 | 灵敏性高、稳定性强、质构测试程序的选择范围多样 | 自动化程度不足、缺乏更加规范的检测标准、多维度的数据综合具有一定难度 | 质构特性的区别和分类;质构特性的动态描述 | [66] |

测试,以探究不用发酵条件下泡菜质地的变化趋势。质构仪在液体(如酒类)质构特性的研究较为少见,常见的研究方式是对发酵原料及发酵过程的中间产物进行质构检测,从而将发酵过程的物质质构特性变化与酒类酿造的品质进行关联性分析。李素萍等[65]对红谷、圆糯米、黍米等六种黄酒原料浸泡过后质构特性的动态变化进行检测,同时比较米浆中的氨基酸及有机酸成分,结果表明红谷最适宜发酵醪的下阶段微生物发酵。Qi 等[66]为分析淀粉结构对两种米酒(普通米酒(NRW)和糯米酒(WRW))质地的影响,对酒糟(发酵米粒)的质构特性进行检测,结果表明酒糟的粘性和咀嚼性与淀粉的结晶度呈正相关,与其颗粒直径呈负相关,较高的酒糟质构特性使得 WRW 的质地高于 NRW。

在发酵食品中,质构仪一般用于对对象的弹性、咀嚼性、粘附性、回复力等质构特性进行定性定量分析,精确度高、操作简便且可选择范围广,是品质评价的重要指标之一。目前,对产品客观的质构特性与感官评价仍然具有一定差距,主要原因是质构测试的选择模式较多样,缺乏统一的执行标准数据且难以进行多维度的综合测定,需要进一步规范同类产品的感官和质构物理指标的评价标准。同时,结合统计学方法探究感官的生理和物理特性与质构分析的关系,寻求仪器测试和主观评价的相关性测试方法。

## 5 结论与展望

近年来,仿生传感技术发展迅速,但应用特征均有所不同,见表 1。随着工业化生产的需要,感官指标测试、实时监控、数据分析等越来越向专一化、特性方向发展,且不断与智能计算机和现代分析仪器结合,呈现出仪器智能化、评价应用多元化的态势。发酵食品属于食品中的一个重要分支,不同种类发酵食品具有其独特的感官性质,不同地域也会呈现出不同的风格特点,同时,发酵是一个复杂过程,需要对其进行稳定控制。虽然智能仿生在发酵食品的控制或者监测中也应用广泛,但仍存在不足。

设备成本问题亟待解决。在视觉仿生中近红外光谱、高清摄像等发展成熟,已经实现低成本化。但是对于嗅觉仿生的电子鼻、GC-MS 及味觉仿生的电子舌等成本依然昂贵,其传感器适应性不强,而现代不断更新的传感阵列价格普遍偏高。数据处理技术还需进步和完善。仿生传感智能感官检测技术离不开现代先进的数据处理方法。目前,虽已有主成分、聚类、偏最小二乘法、人工神经网、遗传算法、证据理论等相对成熟的数据处理方法,但从检测精度、检测速度和效率来综合分析,这些算法并不一定是最好的,因此还有待开发新的数据处理方法。设备联用还尚待进一步完善。仿生传感技术是集味觉、嗅觉、视觉、听觉等一系列的融合信息处理。目前,对于仿生传感融合技术应用广泛,如电子舌-电子鼻联用、电子鼻与 GC-MS 联用等,但尚未多感官间联用的研究。

发酵食品种类繁多,经过发酵以后风味、色泽、质地等均会发生极大的改变,用单一的感官评价方式难以进行全面的品质评价,需要多种现代感官融合对其进行全面表征,以多元数据融合技术进行分析,如化学计量学方法。随着电子传感技术的发展,各类智能仿生将能展现其良好的应用价值。

## 参考文献

[1] 徐源, 王伟, 姜文娟, 等. 仿生智能传感技术在智能科学与技术本科教学中的专题讲解[J]. 教育现代化, 2018, 5(5): 270−271, 276. [XU Y, WANG W, JIANG W J, et al. Special lecture on bionic intelligent sensing technology in undergraduate teaching of intelligent science and technology[J]. Education Modernization, 2018, 5(5): 270−271, 276.]

[2] 贾梦伟, 张婕, 周顺风, 等. 环境响应水凝胶的非对称结构设计与智能仿生[J]. 材料导报, 2022, 36(12): 175−183. [JIA M W, ZHANG J, ZHOU S F, et al. Asymmetric structure design of dnvironmentally responsive hydrogels for intelligent biomimetic applications[J]. Materials Reports, 2022, 36(12): 175−183.]

[3] ZHUANG N , MA J, YANG L, et al. Rapid determination of sucrose and glucose in microbial fermentation and fruit juice samples using engineered multi-enzyme biosensing microchip[J]. Microchemical Journal, 2021, 164(129): 106075.

[4] 哈之才. 寒富苹果酒发酵过程中多酚变化规律研究 [D]. 沈

阳: 沈阳农业大学, 2017. ［HA Z C. Study on the change of polyphenols in the fermentation process of Hanfu apple wine[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.］
［5］SHIN J A, JEONG S H, JIA C H, et al. Comparison of antioxidant capacity of 4-vinylguaiacol with catechin and ferulic acid in oil-in-water emulsion[J]. Food Sci Bio Technol, 2018, 28(1): 35−41.
［6］LI H, LIN L, FENG Y, et al. Enrichment of antioxidants from soy sauce using macroporous resin and identification of 4-ethylguaiacol, catechol, daidzein, and 4-ethylphenol as key small molecule antioxidants in soy sauce[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 885−892.
［7］范琳琳, 陈启和. 传统发酵食品中的微生物及其代谢作用[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(4): 995−1001. ［FAN L L, CHEN Q H. Composition and its mechanism of microflora in traditional fermented foods[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2014, 5(4): 995−1001.］
［8］吴楠京, 贾文珅, 马洁, 等. 仿生嗅觉技术在微生物代谢产物气味检测中的应用研究进展[J]. 分析试验室, 2018, 37(3): 366−372. ［WU N J, JIA W K, MA J, et al. Advances in application of biomimetic olfactory technique to odor detection of microbial metabolites[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2018, 37(3): 366−372.］
［9］CHEN Y P, CAI D D, LI W Q, et al. Application of gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) and ultrafast gas chromatography electronic-nose (UF-GC E-nose) to distinguish four Chinese freshwater fishes at both raw and cooked status[J]. Journal of Food Biochemistry, 2021: e13840.
［10］GARDNER J W, BARTLETT P N. A brief history of electronic noses[J]. Sensors and Actuators B Chemical, 1994, 18−19(1−3): 210−211.
［11］AOUADI B, ZAUKUUJ L Z, VITALIS F, et al. Historical evolution and food control achievements of near infrared spectroscopy, electronic nose, and electronic tongue-critical overview[J]. Sensors, 2020, 20(19): 5479.
［12］ZHONG Y. Electronic nose for food sensory evaluation[J]. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019: 7−22.
［13］JIA W, LIANG G, JIANG Z, et al. Advances in electronic nose development for application to agricultural products[J]. Food Anal Methods, 2019, 12(10): 2226−2240.
［14］PEARCE T C, GARDNER J W, FRIEL S, et al. Electronic nose for monitoring the flavour of beers[J]. Analyst, 1993, 118(4): 371−377.
［15］彭祺, 王芳, 高芳艳, 等. 运用仿生嗅觉特征判别同山烧酒龄[J]. 酿酒科技, 2014(3): 50−52. ［PENG Q, WANG F, GAO F Y, et al. Discrimination of the age of Tongshan Durra wine by use of GC-flash electronic nose technology[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2014(3): 50−52.］
［16］鲁祥凯, 杨彪, 樊保民, 等. 白酒地域特征鉴别技术研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 278−284. ［LU X K, YANG B, FAN B M, et al. Advances in technologies for identification of geographical characteristics of Baijiu[J]. Food Science, 2021, 42(15): 278−284.］
［17］ALEIXANDRE M, CABELLOS J M, ARROYO T, et al. Quantification of wine mixtures with an electronic nose and a human panel[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2018, 12(6): 14.
［18］管彬彬, 赵杰文, 金鸿娟, 等. 基于嗅觉可视技术的醋醅理化指标分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 223−227, 244. ［GUAN B B, ZHAO J W, JIN H J, et al. Analysis of physicochemical index of vinegar substrate based on olfactory visualization technique[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 223−227, 244.］
［19］武斌, 王大智, 嵇港, 等. 基于正交线性判别分析和电子鼻技术的食醋分类[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(6): 263−268. ［WU B, WANG D Z, JI G, et al. Classification of vinegars based on orthogonal linear discriminant analysis and electronic nose technology[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(6): 263−268.］
［20］KOVACS Z, BADOR Z, ZINIA Z J, et al. Electronic nose for monitoring odor changes of *Lactobacillus* species during milk fermentation and rapid selection of probiotic candidates[J]. Foods (Basel, Switzerland), 2020, 9(11): 1539.
［21］吴慧琳, 李苗云, 朱瑶迪, 等. 基于灰色关联分析 4 种酸肉电子鼻与感官评分之间相关性[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(6): 1168−1175. ［WU H L, LI M Y, ZHU Y D, et al. The correlation analysis between electronic nose and sensory score of four types of sour meat based on grey correlation analysis[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2020, 61(6): 1168−1175.］
［22］朱锦. 白酒品种鉴别的电子鼻系统设计与研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2019. ［ZHU J. Design and research of electronic nose system for identification of liquor varieties[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.］
［23］李婷, 田佳乐, 刘洋, 等. 基于固相微萃取-气相色谱-质谱与电子鼻技术分析发酵乳中的挥发性风味物质[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(10): 233−241. ［LI T, TIAN J L, LIU Y, et al. Analysis of volatile flavor compounds in fermented milk by SPME-GC-MS and electronic nose technology[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(10): 233−241.］
［24］MISRA B B. Advances in high resolution GC-MS technology: A focus on the application of GC-Orbitrap-MS in metabolomics and exposomics for FAIR practices[J]. Analytical Methods: Advancing Methods and Applications, 2021, 13(20): 2265−2282.
［25］葛东颖, 龙旭霞, 杨成聪, 等. 基于电子鼻和 GC-MS 联用技术对不同原料酿造黄酒风味品质的比较研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(9): 137−142. ［GE D Y, LONG X X, YANG C C, et al. Comparative study on the flavor quality of yellow rice wine fermented by different raw materials based on electronic nose and GC-MS[J]. Food Research and Development, 2019, 40(9): 137−142.］
［26］GAO L H, LIU T, AN X J, et al. Analysis of volatile flavor compounds influencing Chinese-type soy sauces using GC-MS combined with HS-SPME and discrimination with electronic nose[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(1): 130−143.
［27］杨宇涵, 谢雯婷, 赵杰, 等. 本斯石斛花的香气成分及抗氧化活性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2021, 33(8): 1292−1300. ［YANG Y H, XIE W T, ZHAO J, et al. Study on aroma components and antioxidant activity of *Dendrobium bensoniae* Rchb[J]. Natural Product Research and Development, 2021, 33(8): 1292−1300.］
［28］吴天佩, 刘珊, 王宗义, 等. 盐辅助分散液液微萃取/GC-

MS/MS 检测腐乳、酸乳和面包中的氨基甲酸乙酯[J]. 食品科技, 2020, 45(10): 302−306. [WU T Y, LIU S, WANG Z Y, et al. Determination of ethyl carbamate in fermented bean curd, yogurt and bread by GC-MS/MS with salt assisted liquid microextraction[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(10): 302−306.]

[29] ROBINSON D A, CORDON J L, CORDON S E. A model of the smooth pursuit eye movement system[J]. Biological Cybernetics, 1986, 55(1): 43−57.

[30] BERTHOUZE L, BAKKER P. Institute of Electric and Electronic Engineer. Learning of oculo-motor control: A prelude to robotic imitation[C]. //Intelligent Robots and Systems '96, IROS 96, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on vol. 1.1996: 376-381.

[31] 刘翠翠, 杨涛. 机器视觉在智能制造中的应用与产业发展[J]. 机床与液压, 2021, 49(11): 172−178. [LIU C C, YANG T. Application and industry development of machine vision in intelligent manufacturing[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(11): 172−178.]

[32] 解万翠, 尹超, 宋琳, 等. 中国传统发酵食品微生物多样性及其代谢研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(10): 253−259. [XIE W C, YIN C, SONG L, et al. Research progress of microorganism and its metabolism in traditional fermentation food[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(10): 253−259.]

[33] 汤勃, 孔建益, 伍世虔. 机器视觉表面缺陷检测综述[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(12): 1640−1663. [TANG B, KONG J Y, WU S Q. Review of surface defect detection based on machine vision[J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(12): 1640−1663.]

[34] 周博文. 保健酒智能视觉检测机器人技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2012. [ZHOU B W. Vision-based intelligent inspection robot technology for health wine[D]. Changsha: Hunan University, 2012.]

[35] 郝超, 赵忠盖, 刘飞. 基于近红外光谱的柠檬酸发酵液化清液概率偏最小二乘法监控[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(20): 214−220. [HAO C, ZHAO Z G, LIU F, et al. Statistical process monitoring of clear liquefied solution for citric acid fermentation based on near infrared spectroscopy[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(20): 214−220.]

[36] 倪鸿飞, 张建平, 黄家鹏, 等. 近红外光谱技术快速检测黄酒的前发酵过程中总酸含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(20): 7298−7303. [NI H F, ZHANG J P, HUANG J P, et al. Rapid determination of total acid content in pre-fermentation process of rice wine by near infrared spectroscopy[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(20): 7298−7303.]

[37] 许春蕾. 显示技术及 8K 超高清视频呈现[J]. 现代电视技术, 2021(8): 136−140, 143. [XU C L. Display technology and 8K ultra HD video presentation[J]. Advanced Television Engineering, 2021(8): 136−140, 143.]

[38] 李子龙, 鲍蓉, 刘伟铭. 基于复模糊逻辑系统的运动目标检测方法[J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2017, 38(6): 677−681. [LI Z L, BAO R, LIU W M. Moving object detection method based on complex fuzzy logic system[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2017, 38(6): 677−681.]

[39] 邵志敏, 张意, 张卫华, 等. 基于机器视觉的瓶装白酒杂质检测[J]. 四川大学学报 (自然科学版), 2019, 56(2): 235−240. [SHAO Z M, ZHANG Y, ZHANG W H, et al. Bottled liquor impurities detecting based on machine-vision[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2019, 56(2): 235−240.]

[40] DAVIES A M C. William Herschel and the discovery of near infrared energy[J]. NIR News, 2000, 11(2): 3−5.

[41] CAFFERKY J, SWEEBEY T, ALLEN P, et al. Investigating the use of visible and near infrared spectroscopy to predict sensory and texture attributes of beef[J]. Meat Science, 2020, 159(3): 81−84.

[42] 王胜鹏, 郑鹏程, 桂安辉, 等. 近红外光谱技术的远安黄茶品质快速无损检测方法 [J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(1): 238-245. [WANG S P, ZHENG P C, GUI A H, et al. Fast and non-destructive quality evaluation of Yuan'an yellow tea based on near-infrared spectroscopy[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(1): 238-245.]

[43] 蔡伟源, 罗培余. 近红外光谱技术在醋品质分析中的应用[J]. 食品工业, 2018(10): 78−79. [CAI W Y, LUO P Y. Application of near infrared spectroscopy in quality analysis of vinegar[J]. Food Industry, 2018(10): 78−79.]

[44] OSCAR A, ANTOAIO A J, MANUEL C. Inline control of yogurt fermentation process using a near infrared light back scatter sensor[J]. Food Eng, 2020, 277: 1−6.

[45] 包春芳. 近红外光谱技术在液态食品非破坏质量分析中的应用研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009. [BAO C F. Studies on non-destructive qualitative analysis of liquid food using NIR spectroscopy[D]. Changchun: Jilin University, 2009.]

[46] 李露芳, 苏国万, 张佳男, 等. 基于电子舌技术的酱油分析识别研究[J]. 中国食品学报, 2020, 20(9): 265−274. [LI L F, SU G W, ZHANG J N, et al. Studies on analysis and discrimination of soy sauce based on electronic tongue technology[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(9): 265−274.]

[47] NORRIS K H. Understanding and correcting the factors which affect diffuse transmittance spectra[J]. NIR News, 2001, 12: 6−9.

[48] HAYASHI K, YAMANAKA M, TAKO K, et al. Multichannel taste sensor using lipid membranes. Sens[J]. Actuators B Chem, 1990, 2: 205−213.

[49] VLASOV Y, ANDREY L. Non-selective chemical sensors in analytical chemistry: From “electronic nose” to “electronic tongue” [J]. Fresenius J Anal Chem, 1998, 361: 255−260.

[50] SARMA M, ROMERO N, CETO X, et al. Optimization of sensors to be used in a voltammetric electronic tongue based on clustering metrics[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(17): 4798.

[51] 王莉, 惠延波, 王瞧, 等. 电子舌系统结构及其检测技术的应用研究进展[J]. 河南工业大学学报 (自然科学版), 2012, 33(3): 85−90. [WANG L, HUI Y B, WANG Q, et al. Electronic tongue system and application research on detection technology thereof[J]. Journal of Henan University of Technologx (Natural Science Edition), 2012, 33(3): 85−90.]

[52] TIAN X, LI Z J, CHAO Y Z, et al. Evaluation by electronic tongue and headspace-GC-IMS analyses of the flavor compounds in dry-cured pork with different salt content[J]. Food Research International, 2020, 137: 109456.

［53］马佳佳, 李华佳, 魏冰倩, 等. 徐香猕猴桃果酒发酵过程中品质动态变化的研究[J]. 中国酿造, 2020, 39(4): 86−90. ［MA J J, LI H J, WEI B Q, et al. Dynamic changes of Xuxiang kiwifruit wine quality during fermentation process[J]. China Brewing, 2020, 39(4): 86−90.］

［54］王洪彬. 基于仿生味觉阵列传感器的白酒检测研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013. ［WANG H B. Study of liquor identification system based on biomimetic taste array sensor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.］

［55］WEI Z, ZHANG W, WANG Y, et al. Monitoring the fermentation, post-ripeness and storage processes of set yogurt using voltammetric electronic tongue[J]. J Food Eng, 2017, 203: 41−52.

［56］ESCUDER G L, PERIS M. Review: Highlights in recent applications of electronic tongues in food analysis[J]. Anal Chim Acta, 2010, 665(1): 15−25.

［57］张景, 马仲, 李晟, 等. 仿生触觉传感器研究进展[J]. 中国科学:技术科学, 2020, 50(1): 1−16. ［ZHANG J, MA Z, LI C, et al. Recent research progress in biomimetic tactile sensors[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2020, 50(1): 1−16.］

［58］曹建国, 程春福, 周建辉, 等. 机器人仿生电子皮肤阵列触觉传感器研究[J]. 中国测试, 2020, 46(12): 1−8, 59. ［CAO J G, CHENG C F, ZHOU J H, et al. Research on robot bionic E-skin array tactile sensor[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(12): 1−8, 59.］

［59］PARK S I, BRENNER D S, SHIN G, et al. Soft, stretchable, fully implantable miniaturized optoelectronic systems for wireless optogenetics[J]. Nat Biotechnol, 2015, 33: 1280−1286.

［60］PARK D W, SCHENDEL A A, MIKAEL S, et al. Graphene-based carbon-layered electrode array technology for neural imaging and optogenetic applications[J]. Nat Commun, 2011, 5: 5258.

［61］LIN M, HONG H L, YUAN X D, et al. Inverse kinematic analysis of bionic hands based on fish swarm algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1965(1): 361021.

［62］本刊讯. 柔性人造触觉神经[J]. 生物医学工程学进展, 2018, 39(2): 90. ［BEN K X. Flexible artificial tactile nerves[J]. Progress in Biomedical Engineering, 2018, 39(2): 90.］

［63］CHEN L, OPARA U L. Texture measurement approaches in fresh and processed foods-A review[J]. Food Research International, 2013, 51(2): 823.

［64］冯月玲, 邓冕. 乳酸菌剂发酵泡菜发酵条件研究与优化[J]. 中国调味品, 2012, 37(3): 41−45. ［FENG Y L, DENG M. Study on the characteristics and process parametersoptimizing of pickle by *Lactobacillus* preparation[J]. China Condiment, 2012, 37(3): 41−45.］

［65］李素萍, 马艳莉, 丁玉峰, 等. 预处理对六种黄酒酿造原料酿造特性的研究[J]. 中国酿造, 2021, 40(4): 38−44. ［LI S P, MA Y L, DING Y F, et al. Effect of pretreatment on brewing characteristics of six kinds of brewing materials of Huangjiu[J]. China Brewing, 2021, 40(4): 38−44.］

［66］LAI Q, LI Y H, WU Y W, et al. The quality of rice wine influenced by the crystal structure of rice starch[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(4): 1988−1996.