

浓香型白酒感官风味品质评价的技术进展

黄建桂^{1,2,3}, 钟葵^{1,3}, 赵镭^{1,3}, 毛淑波⁴, 高海燕², 云振宇^{1,3}, 汪厚银^{1,3}, 吴春梅⁴, 秦臻², 项雅科^{1,3}, 王娜^{1,3},
王文欣^{1,3}, 史波林^{1,3*}

(1. 国家市场监督管理总局重点实验室(食品感官分析), 北京 102200)(2. 上海大学生命科学学院, 上海 200444)

(3. 中国标准化研究院农业与生物技术标准化研究所, 北京 100191)

(4. 江苏洋河酒厂股份有限公司, 江苏宿迁 223800)

摘要: 浓香型白酒占据中国白酒市场超50%份额, 深受消费者青睐。作为嗜好性产品, 其感官品质是决定产品价值和消费者认可的核心要素。因此, 各类感官风味品质分析技术已成为浓香型白酒品质提升的关键支撑。然而, 目前行业在感官风味品质分析领域具有多重痛点: 传统感官评价体系过于依赖专家经验, 与消费者认知脱节; 静态分析难以捕捉白酒风味感知的动态过程; 传统的消费者测试无法深入揭示真实情绪反应等。这些问题限制了浓香型白酒产品品质的精准控制、风味的科学解析和对消费者市场的有效反映。因此, 本文围绕浓香型白酒感官风味品质分析技术, 从风味分析到感官分析、从经典感官到仿生感官、从物质刺激到神经认知等角度展开分析。其中风味分析凸显了风味物质的研究重点演变; 而感官分析方法从传统评分到现代分析、从定性风味轮到定量描述分析、从基于生产端描述法到基于消费端描述法、从静态描述到动态描述等不同层次进行全面梳理; 智能感官分析与消费感知内隐测试, 体现了行业的研究热点、痛点和需求点。本研究通过全方位、多维度的梳理与解析, 全面呈现有关浓香型白酒感官风味品质分析技术的最新研究进展与应用, 旨在为浓香型白酒感官风味品质评价技术研究提供技术思路、理论支持与未来趋势。

关键词: 浓香型白酒; 品质; 感官分析; 智能感官; 风味分析

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.5.1541

Research Progress on the Assessment Technologies of Sensory and Flavor Quality in Strong-Aroma Baijiu

HUANG Jiangui^{1,2,3}, ZHONG Kui^{1,3}, ZHAO Lei^{1,3}, MAO Shubo⁴, GAO Haiyan², YUN Zhenyu^{1,3}, WANG Houyin^{1,3},
WU Chunmei⁴, QIN Zhen², XIANG Yake^{1,3}, WANG Na^{1,3}, WANG Wenxin^{1,3}, SHI Bolin^{1,3*}

(1.Key Laboratory of Food Sensory Analysis, State Administration for Market Regulation, Beijing 102200, China)

(2.School of Life Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China)(3.Division of Agriculture and Biotechnology Standardization, China National Institute of Standardization, Beijing 100191, China)

(4.Jiangsu Yanghe Distillery Co. Ltd., Suqian 223800, China)

Abstract: Strong-aroma Baijiu accounts for over 50% of the Chinese baijiu market and is highly favored by consumers. As a hedonic product, its sensory quality serves as a critical determinant of product value and consumer recognition. Therefore, various sensory flavor quality analysis techniques have become key support for improving the quality of strong-aroma baijiu. However, the field currently faces several critical challenges: the traditional sensory evaluation system relies heavily on expert experience, resulting in a disconnect from consumer cognition; static analysis fails to capture the dynamic evolution of flavor perception; and traditional consumer tests are limited in revealing authentic emotional responses. These limitations impede precise quality control, the scientific elucidation of flavor mechanisms, and responsiveness to consumer market demands. Therefore, this review systematically examines analysis techniques for the sensory and flavor quality of Strong-aroma Baijiu, covering perspectives from flavor analysis to sensory analysis, from classic to bionic sensory evaluation, and from material stimuli to neuro-cognitive perception. Specifically, regarding flavor analysis, the review highlights the evolution of research focus on flavor compounds; while sensory analysis methods are comprehensively reviewed across multiple dimensions: the evolution from traditional scoring to modern analytics, from qualitative flavor wheels to quantitative descriptive analysis (QDA), from production-oriented to consumer-oriented

收稿日期: 2025-10-31; 修回日期: 2026-06-07; 接受日期: 2026-06-08

基金项目: 中国标准化研究院自有资金研发项目(562025Z-13118)

作者简介: 黄建桂(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品感官与风味, E-mail: 2062948112@qq.com

通讯作者: 史波林(1981-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 感官分析与标准化, E-mail: shibl@cnis.ac.cn

descriptors, and from static to dynamic characterization. Furthermore, intelligent sensory analysis and implicit consumer perception testing are discussed to reflect the industry's research hotspots, pain points, and demands. Through a comprehensive and multi-dimensional review, this paper presents the state-of-the-art progress and applications of analysis techniques for the sensory and flavor quality of Strong-aroma Baijiu, aiming to provide methodological insights, theoretical support, and future perspectives for research in this field.

Key words: strong-aroma baijiu; quality; sensory analysis; intelligent sensory; flavor analysis

浓香型白酒是中国十二种香型白酒之一，因其泥窖发酵的工艺技术、窖香独具的风味特点和传承千年的文化底蕴深受广大消费者喜爱。浓香型白酒核心产区覆盖四川、江苏、安徽、山东、河南等地区，并从这些产区向周边辐射北到黑龙江、西到新疆、南到广东等全国 20 余省，是中国白酒中生产地域覆盖面最广、环境适应性最强的白酒香型。近年来，浓香型白酒在白酒市场中持续占据主导地位，消费活力强劲，其市场占有率达 50%左右^[1]。庞大的市场规模与产业集群拉动了各地的经济发展，创造了大量的就业岗位，形成了浓香型白酒产业健康发展的良性循环。受自然酿造环境和酿造工艺的影响，浓香型白酒风味特征大概分为三大流派：川派、江淮派和北方派，其感官描述及代表品牌见表 1^[2]。在同一流派内部，不同品牌间也会因为原料（单粮/多粮）、曲种（大曲/小曲）、窖池、工艺（原窖法、跑窖法和老五甑法及其改良工艺）、勾调等差异而呈现不同的风味特征。在品质评价分类上，依据国家标准 GB/T 10781.1-2021《白酒质量要求 第 1 部分：浓香型白酒》^[3]可分为优级和一级，其具体感官要求见表 2。

表 1 浓香型白酒不同流派感官品质传统描述及代表性品牌

Table 1 Traditional sensory descriptors and representative brands of different schools of Strong-aroma Baijiu		
派别	感官品质描述	代表性品牌
川派	窖香浓郁、绵甜甘冽、丰满醇厚、香味协调、余味悠长	五粮液、剑南春、泸州老窖等
江淮派	窖香优雅、绵甜柔和、醇和协调、爽净	今世缘、洋河大曲、古井贡酒等
北方派	窖香幽雅、绵甜爽净、酒体丰满、后味余长	河套王、伊力特等

表 2 GB/T 10781. 1-2021 中不同等级高度酒和低度酒的感官要求

Table 2 Sensory requirements for different grades of high-alcohol and low-alcohol content Strong-aroma Baijiu according to GB/T 10781.1-2021				
感官指标	高度酒		低度酒	
	优级	一级	优级	一级
色泽和外观	无色或微黄，清亮透明，无悬浮物，无沉淀		无色或微黄，清亮透明，无悬浮物，无沉淀	
香气	具有以浓郁窖香为主 的、舒适的复合香气	具有以较浓郁窖香为主的、舒适的 复合香气	具有较浓郁的己酸乙 酯为主体的复合香气	具有己酸乙酯为主体 的复合香气
口味 (口感)	绵甜醇厚，协调爽净、 余味悠长	较绵甜醇厚，协调爽净、余味悠长	酒体醇和谐调、绵甜 爽净、余味较长	酒体较醇和谐调、绵甜 爽净
风格	具有本品典型的风格	具有本品明显的风格	具有本品典型的风格	具有本品明显的风格

目前，浓香型白酒已经从追求产量进入到追求品质的高质量发展阶段，产品品质关系消费者认可度和市场竞争力，关乎品牌地位和酒企经营效益。浓香型白酒产业上游生产端的原料选择、工艺控制和勾调技术是产品品质保障的基础，而下游消费端的感官反馈驱动着品质的持续优化。感官及风味品质分析技术作为连接生产端和消费端的关键桥梁，在浓香型白酒的风味品质控制与优化中占据重要地位。随着食品感官科学与人工智能的快速发展，白酒感官风味品质分析技术也在不断进步。如大量的现代化感官分析技术应用到传统的白酒品评工作中，电子鼻^[4]和电子舌^[5]等智能感官设备实现风味品质的快速客观检测，风味化学推动与感官属性之间关联性研究，脑电（EEG）^[6]、面部表情识别^[7]等神经认知测试技术为真实消费场景下的感官体验提供新的研究角度。尽管以上相关技术在不同层面均有探索，但目前研究仍然较为分散。现有的浓香型白酒综述多聚焦于香气化学、微生物群落及传统工艺技术等单一维度，针对感官风味品质评价的系统性综述仍较为欠缺。且所涉及主题也往往将感官分析、风味化学、智能检测、消费者研究视为独立部分分别论述，缺乏对于其感官风味品质分析技术的系统性梳理与整合。

综上所述，本文系统梳理了浓香型白酒感官风味品质分析技术研究进展与应用现状，涵盖了风味物质、感官

分析、智能感官与认知规律四个维度，重点阐述风味物质研究的重点演变、感官分析技术的发展路径、智能感官技术的应用现状以及消费感知内隐测试技术的尝试效果，关键是洞察各技术的先进性、实用性与适用性，以及各技术发展哪个阶段，到底能解决行业哪些问题。在此基础上，总结分析了浓香型白酒感官风味品质分析技术的局限性及面临的挑战，并对未来的发展方向进行展望，以期浓香型白酒的品质评价提供理论依据与方法参考。

1 浓香型白酒风味物质研究进展

白酒中，水和乙醇占据主导地位，约占总成分的 98%~99%，其它微量化合物约占 1%~2%。微量成分含量虽少，但决定了白酒的风格特点与产品品质^[8]。有关白酒中风味物质的研究也是白酒品质分析的重要组成部分。

1.1 白酒成分鉴定

浓香型白酒原料多样、工艺复杂、微量成分丰富。截止目前，在浓香型白酒中累计检测出 1 870 多种风味化合物，其中 861 种微量成分，主要由酯类、酸类、醇类、醛类、酮类等化合物构成^[9]。浓香型白酒成分鉴定主要采用液液萃取（LLE）、固相微萃取（SPME）、搅拌棒吸附萃取（SBSE）等前处理方法结合气相色谱法（GC）、气相色谱-质谱联用法（GC-MS）和全二维气相色谱/飞行时间质谱（GC×GC/TOFMS）等色谱技术为主。表 3 列举了部分国内学者的典型研究内容。

表 3 浓香型白酒成分典型研究列举
Table 3 Typical Studies on Components of Strong-aroma Baijiu

年份	前处理方法	检测手段	检测成果	文献
2012	搅拌棒吸附萃取（SBSE）	全二维气相色谱-飞行时间质谱（GC×GC-TOFMS）	检测剑南春白酒中化合物 1 870 种，定性鉴定 1 227 种化合物，并表明延长发酵期可以提高基础酒质量。	[10]
2020	液液萃取（LLE）	全二维气相色谱-飞行时间质谱（GC×GC-TOFMS）	分析 58 款浓香型白酒，检测出 350 种挥发性化合物，证实“地域”对品质风格的影响，为白酒鉴真与溯源提供数据。	[11]
2023	液液萃取（LLE）	二维气相色谱-质谱联用（2D-GC-MS）	研究 8 种琅琊台基酒，检测出 344 种化合物，其中 69 种为浓香型白酒首次检出的成分，并发现双轮底发酵基酒含较多短链酯脂肪酸，香气更典型。	[12]
2025	双模式固相微萃取（DMU-SPME）	气相色谱-质谱联用法（GC-MS）	检测出 103 种化合物，相较于 HS-SPME 和 DI-SPME，有效捕捉白酒中更多的低挥发性化合物。	[13]
2025	固相微萃取（SPME）	气相色谱-质谱联用法（GC-MS）	检测出 84 种挥发性化合物，并发现四川地区较江淮地区酯类含量更高，果香与酯类物质相关，特别是丁酸异戊酯和庚酸乙酯，醇香与 1-丙醇呈正相关。	[14]

1.2 浓香型白酒关键风味物质的鉴定与分析

2000 年之前，浓香型白酒的研究重点主要在于检测白酒中的挥发性成分，但是无法确定哪些成分对酒体风味有重要影响。随着分析技术的进步和成分认知的深入，开始提出以“风味为导向”的研究理念^[15]。借助感官科学与风味化学知识，系统筛选对浓香型白酒风味起关键作用的物质，推动行业研究从单纯的成分检测向风味机制探究转变。浓香型白酒关键性风味物质的筛选主要采用气相色谱-嗅闻技术（Gas Chromatography-Olfactometry, GC-O），具体方法（见表 4）包括检测频率法（Frequency Detection Methods）、稀释阈值法（Dilution to Threshold Methods）和直接强度法（Direct Intensity Methods），其中最常用的是稀释阈值法中的香气提取物稀释分析（Aroma Extract Dilution Analysis, AEDA）和直接强度法中的嗅觉强度测定法（Osme）法。2005 到 2006 年期间，Fan 等^[16]围绕浓香型白酒香气成分展开一系列研究。先运用顶空固相微萃取（HS-SPME）结合气相色谱-嗅闻稀释分析技术，确定酯类为洋河大曲酒重要香气物质，其中己酸乙酯等风味稀释值（FD）值较高；次年，通过 GC-O-Osme 技术进一步证实，酯类与酸类是洋河大曲香气的关键组分，分别赋予果香与酸味层次感。同期，还采用 GC-O-AEDA 检测剑南春和五粮液后发现，丁酸乙酯等多种酯类及己酸和 1,1-二乙氧基-3-甲基丁烷是其核心香气来源，且五粮液中吡嗪化合物 FD 值更高，呈现出更浓郁的烘焙及坚果香气^[17]。到目前为止，已明确鉴定出浓香型白酒中的主要香气化合物 141 种^[9]，其种类和数量见图 1。

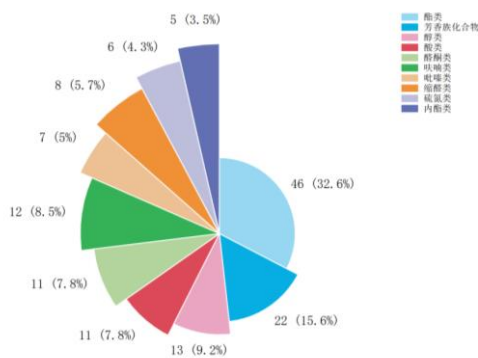


图 1 主要化合物种类和数量

Fig.1 Types and numbers of major compounds

表 4 香气物质感官活性定量分析方法比较

Table 4 Comparison of Quantitative Analysis Methods for Sensory Activity of Aroma Compounds				
维度	检测频率法	稀释阈值法	直接强度法	文献
原理	评价员独立嗅闻同一样品，记录在特定保留时间下感知到气味的评估员比例，频率越高表明化合物气味活性越强。	将样品提取物按几何级数稀释，直至评估者无法嗅闻到气味。最高稀释值（FD 值）即代表化合物气味强度，FD 值越高贡献越大。	评估员使用量化尺度（如 0~10 分）实时记录气味强度。	[18,19]
应用	中高浓度香气物质（酯类）、筛选主要香气物质	低浓度成分、异味物质（硫化物、醛类等）	主体香气成分、异味物质、分析酸酯比对绵甜感的影响	[20]
优势	多人统计，客观性高效率适中，单次运行适合大规模样本	基于阈值，客观性极高 适应性广	单一属性，避免多属性同时评价干扰定量标度，数据具有可比性	
缺点	无法量化强度差异	半挥发性成分回收率低	评价员要求稍高，主观性较强	[21]

由于气相色谱-嗅闻技术（GC-O）结合 AEDA 和 Osme 所捕捉到的香气，仅体现了该化合物是香气活性物质，但无法准确反映其在白酒复杂体系中的实际风味贡献或活性程度。为此，科研人员引入了香气活性值（Odor Activity Value, OAV）这一指标来表征风味物质的重要性，该指标为化合物在白酒中的浓度与阈值之比。一般认为，当某香气化合物的 OAV 值大于 1 时，表示对白酒整体香气特征形成有显著贡献^[22]。2011 年，范文来等^[23]按照国家标准规定的环境条件和美国国家标准规定的阈值测定方法对 79 种白酒挥发性化合物嗅觉阈值进行测定，并给出了感官描述词，如烯醇呈青草味和尘土味，脂肪酸在低度白酒中呈现臭味、酸臭和窖泥臭等。2014 年，Wang 等^[24]采用 GC-MS-O 对习酒的浓香型白酒进行检测，结果表明，OAV 值>10 的有 22 种香气化合物，包括己酸乙酯、辛酸乙酯、丁酸、3-甲基丁酸、己酸、二甲基二硫醚等，其中己酸乙酯的 OAV 值超过 60 000。2021 年，Hong 等^[20]采用 GC-MS-O 和 AEDA 对三种不同地域的浓香型白酒进行检测，分别鉴定出 50、41 和 35 种香气化合物，其中有 18 种香气化合物具有较高的 OAV 值，因此被确认为重要香气化合物。2023 年，陈禹锴等^[25]利用气相色谱对刘伶醉酒进行雷达图绘制和层次聚类分析等方法，结果表明 6 款样品可以分为 4 类不同品质白酒，并且其中 OAV 均大于 1 的风味化合物有正丙醇、正丁醇、乙酸乙酯、丁酸等 15 种。

利用 OAV 初步筛选出重要的挥发性香气化合物之后，采用香气重组实验和香气缺失实验对其关键香气化合物做进一步筛选与验证^[26]，是目前浓香型白酒风味物质研究领域较为常用的方法，已从单纯的成分还原转向低阈值、低含量和交互作用研究。如 Zhou^[27]等采用重组与缺失实验表明，非挥发性物质在构建浓香型白酒主体风味中发挥着关键作用并且发现一元酸对风味具有显著的调节作用，而二元酸未表现出明显的感官贡献。Li 等^[28]通过香气缺失实验弥补 OAV 筛选的局限，证实 4-甲基-2-甲氧基苯酚、含硫化合物等 6 种痕量元素化合物是陈年浓香型白酒的关键香气成分。未来，可以结合机器学习^[29]与客观的生理测试技术（脑电、皮肤电等）等，解析痕量物质与基质成分在白酒感官中的交互作用，提升浓香型白酒风味解析深度，提供产品品质优化方向。

目前,对于浓香型白酒挥发性和关键化合物的研究已相对成熟,但是对于非挥发性化合物的研究较少,缺乏深入认识。白酒中非挥发性物质主要包括多糖类、有机酸、氨基酸、多元醇及酚类物质,对白酒的口味口感有显著影响^[30],其中主要集中在有机酸的研究。Zhou等^[27]鉴定出了59种非挥发性化合物,并发现非挥发性化合物对香气化合物的感知有显著增强作用。范文来等^[31]对不同香型白酒进行检测,发现浓香型白酒中氨基酸含量最高,对甜味、酸味、苦味和鲜味有影响。张婷等^[32]通过超高效液相色谱-电雾式检测器(UPLC-CAD)法在20款样品中共检测出8种多元醇,如丙三醇、赤藓糖醇、甜醇等,并对酒体甜味和醇厚有影响。Fan等^[33]采用超高效液相色谱-高分辨质谱联用仪(UHPLC-HRMS)分析来自江苏地区24个浓香型白酒样品,共鉴定出647种非挥发性化合物。基于正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)和VIP值,筛选出110种关键非挥发性化合物,可以区分高低酒精度样品。未来将从对非挥发型化合物单一成分分析向多组分协同分析发展,如非挥发性化合物与挥发性成分的协同作用、年份鉴别、真实性鉴别等。

1.3 与感官评价的关联性研究

浓香型白酒独特的感官风味体现是多种复杂的化学成分总体作用于人体感官系统的综合表现。除了上面所述的鉴定关键风味物质的GC-O、香气重组和缺失实验等,还可将大量样品化学成分数据与感官分析数据深度融合,通过统计建模、机器学习及大模型分析等手段寻找关联与规律。

目前,对于风味物质与感官评价的关联性研究报道还不多。2012年,邵燕等^[34]采用气相色谱技术对基础酒得到的24种化合物含量与感官评价数据进行相关性分析和回归模型建立,其相关性接近于1,并且建立基础酒等级正确率接近100%的多元回归模型。2018年,刘超等^[35]将采用气相色谱得到的浓香型白酒微量成分含量进行主成分分析(PCA),将得到的各档次白酒综合得分与样品饮后舒适度评价得分建立四次方程($R^2=0.9999$),经验证能够较为准确的对白酒进行档次分级。2019年,胡景辉等^[36]选用13款浓香型原酒为研究对象,经判别分析证实不同感官类别的样品在风味含量上存在显著差异的基础上,以绵甜感的感官评分为因变量,风味构成作为自变量,采用多元回归分析建立多元线性回归模型,结果表明乳己比和酸酯比对白酒的绵甜感具有正向作用。2023年,刘鑫等^[37]选用100多款成品浓香型白酒的GC-MS测定的24种共同风味物质含量和感官品评数据为基础,对酸、酯、醇、羟基与呋喃化合物分别采用AdaBoost、GBDT、Bagging、Stacking机器学习模型,所得到的拟合度较好,分别为0.97、0.96、0.87、0.91。2025年,Wang等^[14]通过Pearson相关性分析56种微量化合物与感官属性、味觉喜好度间的关系。结果表明,果香和甜味与酯类化合物有关;非挥发性有机酸通过影响化合物的挥发性来影响酒体香气;1-戊醇和戊二醇与喜好度呈正相关,而辛酸乙酯、癸酸乙酯及3-苯丙酸乙酯则呈负相关,揭示了非挥发性化合物(尤其是有机酸)在浓香型白酒中的区域分布特征、对香气-滋味的双向调控机制及其与消费者偏好的内在联系,进一步强调了非挥发性物质在白酒风味品质形成中的重要作用。同年,曹晓念等^[38]结合电子舌与感官评价,探究了非挥发性L-茶氨酸在浓香型白酒中的滋味表达。结果表明,L-茶氨酸不仅能显著提升酒体鲜味,还能通过味觉交互作用强化酸、甜、咸感知。且高浓度乙醇(42%~52% vol)基质会显著抑制其酸味并放大鲜、咸感知,证实了非挥发性物质与酒体在风味评价中的协同效应。

目前针对浓香型白酒风味物质与感官评价关联性的研究多依赖于传统的多元统计分析(PLSR、Pearson相关性、PCA等),但这些方法难以有效处理复杂风味物质和感官评价数据,且多数研究的样本量也较少,无法覆盖浓香型白酒的多样性而影响模型普适性等。因此,需要引入更先进的机器学习算法,利用其较强的拟合非线性映射关系、增强小样本数据的普适性和抗干扰能力等,更精准地揭示两者之间复杂的关联性。并且,现有研究主要以分析挥发性物质为主导。非挥发性物质虽也在逐步深入研究,但相较于挥发性物质,其感官风味关联建模中的作用机制研究仍相对滞后。已有研究表明,非挥发性化合物在浓香型白酒中对香气和滋味具有调控作用。因此,未来研究需打破二者分割的局限,向多模态风味协同建模转型,使非挥发性物质真正转变为风味调控的关键点。主要体现在两个方面:一非挥发性物质(如糖类、酸类、肽类)可通过调节嗅觉受体对挥发性物质(如酯类、醇类)的敏感度,从而影响果香、花香等香气属性的表达强度^[39];二是非挥发性物质作为白酒味觉品质的重要构成基础,其组成与含量差异(如脂质、脂肪酸、氨基酸及肽类等)不仅直接贡献于口感的丰满感、柔和度与余味持久性等,还通过改变挥发性化合物的溶解行为与基质效应,间接参与整体风味的平衡与协调。

1.4 浓香型白酒异嗅味与功能成分研究

从“缺酒喝”的供需失衡时代，到“有酒喝”的产能扩张阶段，再到当下“选酒喝”的品质消费升级阶段，白酒市场的竞争点已经从单纯的产量保障、品类丰富发展到注重高品质发展和个性化表达，因此无异味已成了品质的基础，而白酒风味的化学分析已经不再局限于关键风味成分的探索，逐渐深入研究带有独特气味特征的正负向风味化合物，如异嗅味等。2009 年，杜海^[40]首次对老白干香型白酒中的异嗅味-土霉味进行测定，为后续白酒的异嗅味研究奠定了基础，这也侧面表明提升白酒品质的重要性日益凸显，科研重点也从“有酒可饮”转移到“优酒可选”。与此同时，健康白酒已成为白酒制造业的发展趋势，因此白酒的功能性成分研究也逐渐得到关注，如酚类物质等。Zhao 等^[41,42]采用多种方法证明古井贡酒的抗氧化性与白酒中香兰素、4-甲基愈创木酚、4-乙基愈创木酚的含量呈正相关关系，但其健康功效还需要进一步研究。未来对于白酒健康性成分的研究有助于消费者更准确、更科学和更全面地认识白酒，但不是为过量饮酒提供借口。

2 浓香型白酒感官分析技术发展

2.1 传统感官评分体系构建

上个世纪，浓香型白酒的感官品评主要依赖于酿酒师傅们的经验总结，通过口传心授来传承发展。随着新中国成立后持续五届全国评酒大会的举办，其品评方法逐渐走向科学化和标准化。尤其在 1979 年第三届全国评酒会上，正式构建了色（占 10 分）、香（占 25 分）、味（占 50 分）、格（占 15 分）四个维度的百分制评酒体系，确定了各白酒香型的风格特点，统一了评分标准。1990~1991 年改造了原有的百分制品评法，创立了“ABC 分级评比法”^[43]，增加了交叉抽样、盲评回避和当场定级等要求，为白酒企业的质量管理向更加有效的方向引导。2000 年创建的 LCX-白酒品评方法，在保持原百分制评分表概念和量值框架的前提下^[44]，在品评方式、打分与记录方式、评价指标细化程度、评委考核及数据处理等方面有了很大的优化，其最大变化是采用了人机交互的品评过程及结果统计，让品评操作兼顾科学与高效。

2.2 定量描述分析 (QDA) 研究

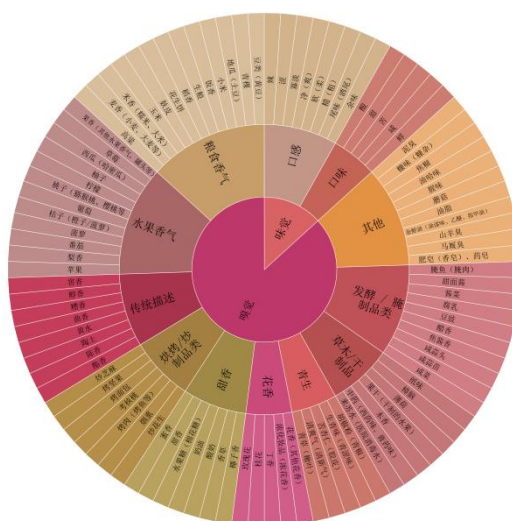


图 2 浓香型白酒风味轮

Fig.2 Flavor Wheel of Strong-aroma Baijiu

表5 风味轮对照体系

Table 5 Flavor Wheel Comparison System

传统术语	关键化合物	感官特征	国际化类比词汇	文献
窖香	己酸乙酯、己酸丙酯	发酵和泥土气息	菠萝香、水果香	[20,50,51]
曲香	2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	烘烤小麦/芝麻的焦香	坚果焙烤香、焦香	[52,53]

随着浓香型白酒酿酒技术的不断提高及其工艺对生产区域的广泛适应,在全国范围内出现了明显的产区差异化和流派多元化发展格局,导致原有感官评分体系跟不上行业快速发展和消费认知需求。主要表现为:①描述词

高度凝练、专业但不通俗（如醛香、酯香），有时还很抽象（如幽雅、协调），普通消费者几乎难以准确把握其对应的真正感受，也非常不利于白酒的国际化传播；②很多词形相似的四字表述组合随意（如绵甜净爽、醇甜爽净），难以轻易分辨相互间的概念差异；③各感官属性档级区分不标准、不统一（如不同标准在对窖香强度划分时分别采用4档、9档等不同档级），不利于不同品牌不同渠道酒样间的品质比对。

为解决以上问题，国内科研工作者引入国际酒类感官评价体系，经过收集、梳理、解析、归类、整理^[45]后，逐步形成具象化、标准化的感官描述语，提高对浓香型白酒的品质认知^[46]。早在2013年，周维君等^[47]就初步建立了浓香型白酒风味轮（见图2），包括87个嗅觉和13个味觉描述词，还定义了19个核心描述语（如窖香、粮香、陈香）。2016年白酒风味轮首次在国家标准GB/T 33405-2016《白酒感官品评术语》^[11]中出现。笔者认为未来还可以按照“传统术语→关键化合物→感官特征→国际化类比词汇^[47-49]”的框架（举例见表5）进一步扩充、细分、迭代和完善，推动白酒风味表达向更科学化、更国际化的方向迈进。

定量描述分析法（Quantitative Descriptive Analysis, QDA）是基于风味轮对酒样各感官品质进行量化的评价方法，在白酒中常用5点（详见表6）、7点和9点标度等。其核心在于感官评价小组成员经过感官敏感度的严格筛选，再对各感官描述词的统一理解及各强度的一致感知开展培训^[54]，并达到规定的重复性与一致性要求后才能开展正式的QDA实验。

表6 白酒感官定量评分表

Table 6 Quantitative Scoring Table for Liquor Sensory Evaluation						
分值	0	1	2	3	4	5
程度	无	弱	稍微	中等	稍强	强

2.3 快速感官分析技术研究

白酒属于嗜好品，其品质好坏最终由消费者来评判，而专业评酒师的专业品评结果无法全面直观反映消费者的真实需求。同时专业评酒人员培养时间长、成本高，很难完全满足市场快速变化的新品开发与迭代。由此，面向消费者的快速描述分析方法脱颖而出，并逐渐成为白酒品评领域很有潜力的评价方法。主要适用于产品开发初期的筛选、市场竞品对比研究和小企业感官评估应用。当前在酒类中的应用主要集中在葡萄酒、威士忌等，白酒领域应用较少。根据方法原理和研究目的，实验组织者可以有针对性的采用不同快速感官评价方法，主要分为基于语言描述、感官相似、参比样品的快速描述分析方法。

2.3.1 基于语言描述的快速描述分析方法

CATA（Check-All-That-Apply）^[54,55]方法适用于通过产品感官属性来区分不同产地、工艺、品质的浓香型白酒，但它只提供该样品有无某感官属性的二元数据，且对样品间细微差异的评价精度不高。为了弥补CATA方法的精度不足，RATA（Rate-All-That-Apply）^[56]方法在CATA基础上引入强度评分（例如3点、5点或7点标度），能有效评估如不同批次、不同存储条件白酒在各感官属性上的强度差异，为感官品质快速分析提供更为精确的数据。

2.3.2 基于感官相似的快速描述分析方法

Napping^[57,58]方法根据样品间整体风味的相似程度，在平面空间中将感官品质相似样摆放在距离相近处，反之摆放的空间距离间隔较远^[59]。该方法适用于对整体风味的综合评估，比如白酒基酒整体品质分类，但考虑到感官疲劳问题，一次实验的样品数量有限且无法量化各感官属性的强度。

2.3.3 基于参比样品的快速描述分析方法

PSP（Polarized Sensory Positioning）^[60,61]方法能够量化待测样品与参考样本之间的相似性和差异性，适用于白酒的感官特征分析、工艺稳定性测定以及产品配方优化，但其结果高度依赖于参考样品的代表性。PPM^[62]（Polarized Projective Mapping）方法结合了Napping的空间映射和PSP的参考样品比较的优点，通过待测样品与多个参考样品进行对比，弥补了Napping无法量化和PSP高度依赖唯一参考样的问题，特别适用于白酒产品感官特征分析、工艺评估及质量控制等领域。

Pivot Profile^[63,64]方法通过样品间的差异比对，并对所存在差异进行词汇描述（无需提前预设描述词），可高效捕捉白酒风味差异，打破传统白酒风味描述方法的局限性，适合于快速收集描述词并进行产地、派别和工艺的区分，一次评价的样品数量多但文本分析复杂度较高。Pivot-CATA^[65,66]方法结合了CATA与Pivot Profile的优点，也

弥补了 RATA 中不同消费者对同数值强度的不同理解，适用于竞品分析和感官差异对比，一次评价的样品数量多但需要事先提供描述词表。

综上，快速描述分析方法在理论上具有显著优势，其应用潜力巨大，可以快速直接获得消费者感知语言与品质感受数据，弥补专家评价员在消费者视角的不足，缩短感官评价周期，降低对专业品酒师的依赖等。但是在浓香型白酒行业中的推广与应用仍然具有一定挑战：一方面数据易受消费者的感知能力、表述能力以及认真态度等影响；另一方面，也依赖感官分析师的现场控场能力、培训实施效果以及数据处理规范性水平等因素。此外，方法的适用性选择以及标准化应用、消费者语言与专业评价体系之间的对接等问题也限制了其结果的重复性、可比性和可解释性等。

2.4 动态感官分析技术研究

在感官评价体系中，静态感官分析认为白酒感官属性存在于时间轴上的固定点，通过单次感官品评得到感官属性的平均强度或者最大强度，该类方法凭借操作简单、结果稳定易分析等优势长期占据主导地位。但随着研究者对白酒感官描述性分析的认知愈发深刻，如在白酒感官品评中涩口感、柔和度、生津感等风味感知的动态变化尤为明显^[32]，这些变化使静态感官分析技术无法表征。表 7 对比了两类感官分析方法的差异。

表 7 静态分析法和动态分析法的比较

Table 7 Comparison between Static and Dynamic Analysis Methods			
维度	静态分析法	动态分析法	文献
时间维度	提供单一时间点的整体评估（无时间演进信息）	追踪感官特征随时间的动态变化	[31]
属性覆盖	可同时评价多属性，但无动态关联	可以区分感官属性的子属性及其时间关联和交互作用	[19,33,34]
数据形式	提供整体强度或频率，离散评分数据	连续时间序列曲线（如 TI 曲线、TDS 主导率时间轴）	[19,35]
适用场景	快速筛查白酒基础风味	研究苦味、刺激感等随时间演变的复杂特征	[34,35]
局限性	无法捕捉感官动态，遗漏关键信息（如“辛辣味峰值强度”与“持续时间”的关联）	数据采集成本高、分析复杂	[34]

近年，动态感官分析技术在风味感知（质地和三叉神经感觉^[64]）应用上已经取得了重大的进展，且涉及了多种动态感官描述分析方法，如实时适合项全选法（Temporal Check-All-That-Apply, TCATA）、时间强度法（Time Intensity, TI）、动态主导感官属性测试法（Temporal Dominance of Sensations, TDS）和时间序列排序（Temporal Ranking, TR）等，它们既可以独立使用来揭示白酒风味的动态特征，也可以结合静态描述分析方法起到互补作用。在辛辣味方面，He 等^[67]通过 TI 和 TDS 系统评估不同陈酿时间白酒“辛辣味”的动态时间特征；TI 通过方差分析结果表明，白酒辛辣味的时间特征与陈酿时间呈显著相关性（ $P<0.05$ ），陈酿可延缓辛辣味的峰值出现并降低刺激强度；而 TDS 结果反映陈酿可能改变了辛辣刺激的时间序列。在苦味方面，谢静茹^[68]采用 QDA 确定滋味描述词，结合 TCATA、TI 和 TDS 对四款绍兴黄酒的滋味特征进行动态评估，全面揭示苦味在绍兴酒中的作用。Rovai 等^[69]通过对比 TDS、TCATA 和 TR 方法，揭示了金酒风味的时间动态变化规律。这些研究拓展了白酒感官评价的维度，特别在口感方面，为白酒品质的精准把控提供依据，也标志着白酒感官评价正在从传统静态评估向动态评估转变，为白酒产业的高质量发展提供新方法。在浓香型白酒领域，动态感官分析法虽应用较少，但是对于解析其风味属性的时间演变规律具有不可替代的作用。

2.5 消费者喜好度与情绪分析研究

传统感官评价技术可以精准构建产品的风味剖面，但是却难以预估产品在市场端的表现，因此分析消费者的情绪体验与喜好度驱动因素至关重要。

2.5.1 消费者喜好度测量

九点喜好标度（9-point Hedonic Scale）是消费者喜好度测量中最常用的方法，可以直接获得消费者对产品的喜好程度，但只有喜好度得分难以反映让消费者喜欢的原因。因此该方法常与描述性分析方法结合，如与 CATA 方法结合可以初步得到驱动消费者喜好的因素，但消费者未经专业训练，在感官描述的精准度、一致性上存在局

限。于是引入外部偏好图(External Preference Mapping, EPM),将消费者的主观喜好度数据映射到由专业评价员得到的 QDA 数据构建的感官空间中,能够准确识别出驱动消费者喜好的关键感官属性。付玉等^[70]研究浓香型白酒与基本味觉相互搭配的喜好度,运用方差分析与相关性分析,发现浓香型白酒与酸味、甜味、鲜味搭配的喜好度较高。Huang 等^[71]通过测定时序喜好度和总体喜好度来研究在白酒中加入 N-琥珀酰-L-苯丙氨酸(N-Suc-Phe)对消费者偏好的影响,结果表明添加不同浓度 N-Suc-Phe(2、4、6 mg/L)的白酒样品,其消费者喜好度均显著高于未添加的对照组,其中 4 mg/L 浓度组表现最优。

2.5.2 消费者情绪分析

浓香型白酒的风味感知伴随着消费者复杂的心理与情绪体验。近年来,开始研究情绪词汇在白酒评价中的应用,特别是饮后舒适度的研究。通过“愉悦的”、“舒适的”、“刺激的”、“适口的”等有别于传统的“窖香”、“陈香”等词汇,来反应消费者感知。目前,研究多采用 CATA 问卷结合 EsSense Profile 量表或李克特量表(Likert Scale)对情绪强度进行量化,采用主成分分析(PCA)等数据处理方法确定关键情绪词,利用多元回归分析构建情绪得分与关键风味物质的关联模型,探究风味物质对情绪的驱动影响。温银萍等^[72]采用问卷调查法让消费者在饮酒 1h 后填写正负情绪量表。结果表明,饮酒后症状为嗜睡、头晕、心悸、注意力不集中、疲倦、心跳加速问题;并结合 PCA 分析建立舒适度评价模型,三次方回归方程($R^2>0.8$)能较好说明舒适度与白酒挥发性风味成分之间的函数关系。Fu 等^[73]采用正负情绪量表结合协方差分析(ANCOVA),发现先饮酱香型白酒,后饮清雅型白酒的正情绪显著性更高($P<0.05$),负情绪无显著性差异($P>0.05$)。

目前,针对消费者喜好度研究与情绪分析研究主要采用问卷量表结合外部偏好图和情绪词汇的方法,利用感官数据来解释消费者主观喜好并揭示驱动消费者喜好的关键因素,为白酒风味优化提供依据。但是,基于问卷和量表的方法也存在一定的局限性,其喜好度和情绪分析为消费者主观认知结果,容易受到心理预期、品牌知名度等干扰,并且情绪量表多源于外文翻译,可能会导致国内消费者理解偏差。未来应研究更符合浓香型白酒的情绪词库,提高描述精确度;同时,打破问卷和情绪量表这种显性测量的限制,通过测定生理指标(脑电、面部表情等)等客观的隐形指标来进行互补验证,从而全面了解消费者的真实喜好和情绪变化。

3 浓香型白酒智能感官技术现状

智能感官分析是通过模拟人类感官系统(嗅觉、味觉和视觉等)的仿生传感器,获得待测物质的信息并结合智能算法将高维传感器信号降维并转化为感官特征信息。现阶段,基于电子仿生感官评价技术(如电子舌、电子鼻、电子眼等)在浓香型白酒感官品质分析中得到示范应用,探索了感官与仪器表征相结合的技术途径。在白酒中最常用的是电子舌(Electronic Tongue, ET)和电子鼻(Electronic Nose, EN),能够对白酒的风味品质进行快速、客观的检测,且相比人工感官评价,避免了主观因素的干扰。2015 年前后,随着电子舌、电子鼻和电子眼等智能技术的应用,感官评价迈入了智能感官技术阶段,为浓香型白酒感官评价提供了更客观、更高效的手段。

3.1 电子鼻技术在浓香型白酒中的应用

电子鼻是模仿人类嗅觉系统,通过检测和分析挥发性化合物来识别和分类气味,从而实现品质评价,相较于传统复杂、昂贵的现代分析仪器,电子鼻具有便携性好、灵敏度高、快速及成本低的优势^[74,75]。在浓香型白酒中可用于产品差异分析^[4]、质量分级、年份鉴定^[17]、真伪鉴别与产地溯源^[76]及储存过程管理^[77]等方面。

例如,刘芳等^[4]通过电子鼻和气质联用(GC-MS)技术分析了 7 种不同品牌的浓香型白酒;结果表明,基于 S2、S6、S7、S9 传感器的 PCA 分析(PC1 和 PC2 累积贡献率达 98.02%)可实现品牌间的有效鉴别。曹玉发等^[78]通过电子鼻结合线性判别分析(LDA),成功区分了 2 年、3 年及 5 年陈酿的浓香型白酒,并结合 GC-TOFMS 进一步表明,酯类、醇类和芳香类化合物含量随着陈酿时间而增加。He 等^[76]采用基于 GC 的电子鼻技术,分析涵盖 6 种香型和不同产地的 65 个白酒样品的挥发性化合物指纹图谱,采用 OPLS-DA 和 PLS-DA 分别建立香型与产地分类模型,其正确率为 91.53%与 93.94%。Huang 等^[77]采用 PEN3 便携式电子鼻设备对无麸皮白酒样品进行主成分分析(PCA)分析,前两个主成分累积贡献率达 95.68%,实现了对不同酒龄样品的有效区分。并发现随贮存时间的增加,样品中挥发性物质(如氮氧化物、无机硫化物及乙醇类物质等)浓度减少,酯类与缩醛类化合物浓度上升,从而提升了白酒的香气与口感。

3.2 电子舌技术在浓香型白酒中的应用

电子舌是模拟人类味觉的仿生系统,通过电化学传感器阵列来感知和分析液体样品中的化学成分,实现味觉数字化。对于浓香型白酒检测,电子舌可以直接量化酸、甜、苦、咸和涩味^[5] 5种关键口味口感指标,提供更加全面和准确的味觉评估。并且对微量添加剂的敏感度达到 ppm 级别,能够精确地检测出白酒中极低浓度的成分,这使得电子舌在风味检测中具有重要的应用价值。

相较于人工感官分析法,它具有快速、灵敏和自动化程度高的优势,适用于香型区分和年份鉴别^[79]、酒精勾兑识别^[80]和质量鉴别、非法添加剂检测和口感平衡与优化^[81]等方面。贾春祺^[5]利用电子舌结合 PCA 分析(PC1 和 PC2 累积贡献率 94.09%),有效区分清香、浓香及酱香型白酒的味觉特征。彭厚博^[79]利用电子舌结合 PCA (PC1 和 PC2 累积贡献率 73%)与 LDA 构建浓香型基酒年份判别模型,经 SMICA 和 DFA 双重验证模型可靠,对年份可以有效鉴别。李付丽等^[80]通过电子舌对不同比例的酱香型纯粮酒与食用酒精溶液混合物检测,所得数据进行 PCA (PC1 和 PC2 累积贡献率 95.6%)和 PLS ($r=0.978$)分析,能有效区分纯粮酒与添加酒精的白酒。

3.3 智能感官技术面临的挑战与未来展望

智能感官技术在浓香型白酒风味解析中具有巨大潜力,但在实际应用中面临着浓香型白酒成分复杂、高酒精浓度干扰^[82]和部分微量元素阈值极低^[77]等问题。目前已有研究正在尝试解决这些问题,如采用方波温度调制(Temperature Modulation)^[83]和特异性传感器阵列研制^[84]。在消除高浓度乙醇掩蔽效应方面,方波温度调制技术展现出动力学机制优势。传统的金属氧化物半导体(MOS)传感器在恒温模式下,极易被高浓度乙醇分子的稳态吸附所饱和,导致微量物质的信号被淹没。方波温度调制通过对传感器加热电极施加周期性的高低温度交替脉冲,迫使传感器表面始终处于“吸附-脱附-反应”的非平衡瞬态,利用温度快速升降带来的动力学差异,打破恒温下的信号饱和与重叠。Liu 等^[83]的研究清晰地揭示了这一机制:由于不同目标气体(如酒体中的甲醇与高浓度乙醇背景)的分子结构和氧化活化能存在固有差异,在温度骤变(如加热到冷却的阶段)时,它们在 MOS 传感器表面的扩散及催化氧化动力学速率截然不同。这种微观的动力学差异,使得物质的动态响应曲线表现出特异性波形——例如在相同的调制周期下,甲醇为一步快速氧化,电阻响应呈单峰;乙醇因空间位阻较大、氧化存在多步中间过程,响应呈双峰。该技术成功将重叠的一维静态阻值信号,转化为包含丰富波形特征(特征峰数量、响应时间等)的二维动态响应,通过模式识别算法即可有效剥离高浓度乙醇的背景干扰,为复杂酒体中微量物质的解析提供了新路径。

特异性传感器阵列的研制则为规避复杂基质干扰提供了基于化学靶向的另一种思路。相比于传统电子鼻的广谱性物理吸附,该技术利用特定的化学反应实现精准识别。Zhang 等^[85]基于芬顿试剂(Fenton reagent)与显色剂(如苯酚/苯胺类化合物)的氧化显色反应,构建了一种对有机酸具有高度特异性响应的视觉传感器阵列。其机制为芬顿试剂反应产生的强氧化性羟基自由基会氧化显色剂产生明显的颜色变化,而白酒中含有不同结构特征的有机酸,这些有机酸会通过络合 Fe^{2+} 或清除自由基等方式,对该氧化反应过程产生差异化的调控与干扰,进而形成独一无二的颜色演变指纹。由于该体系的响应基元严格依赖于有机酸与芬顿试剂之间的特异性化学相互作用,而高浓度的乙醇等成分几乎不参与或不影响此特定的自由基反应链,因此该技术从物理化学的底层逻辑上隔绝了高浓度乙醇及其他挥发物的干扰,实现了对白酒中关键有机酸风味物质的精准检测,为智能感官技术在白酒品质分析中的靶向应用提供了多元技术支撑。

同时随着人工智能算法优化^[86],可以有效改善这些问题的干扰。但该技术从实验室放大到产业化场景又是一项技术挑战。在生产过程中可能存在温湿度波动大、在线监测实时性要求高等问题,需进一步解决设备的密封性、在线实时取样稳定性等难题。当这些挑战解决后,智能感官技术有望在智能化窖池管理、消费端便携设备^[43](鉴真和溯源)和勾调自动化系统^[44]等方向得到更好发展。

4 浓香型白酒消费感知内隐测试技术尝试

传统的消费者测试或情绪测试主要是评估消费者的喜好度和情绪反应,如喜好标度、恰好标度等,但只能得到显性情绪测量结果且属于静态评估,无法反应消费者的隐性情绪(如面部表情)波动,导致心理与生理对应研究脱节,同时通过显性的消费者测试结果会存在主观性偏差。为突破传统问卷的表达局限,白酒消费者测试正通过结合生理学、心理学和神经科学技术,来客观、深入地分析消费者的情绪反应和行为模式(如图3所示),比如脑电(EEG)^[71,72]、面部表情分析、皮肤电(GSR)^[87]、呼吸(RSP)和体温(T)等。

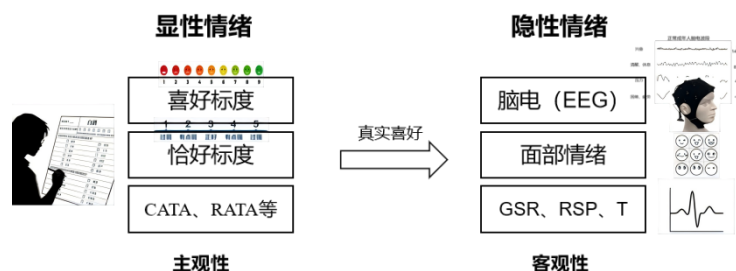


图3 消费者感官评价方法的发展

Fig.3 Evolution of consumer sensory evaluation methods

4.1 脑电（EEG）分析

脑电图（EEG）是通过放置在头皮上的电极检测大脑神经元活动所产生的微小电流^[88]，从而反应大脑的电生理活动，是一种研究心理和情绪状态的非侵入性技术。脑电图具有高时间分辨且可以准确、可靠和客观地揭示个体的情绪活动^[89,90]。主要应用在浓香型白酒感官属性的客观性评价、消费者偏好性预测^[91]与市场定位、消费场景个性化优化和神经机制解析等方向，其实验过程如图4所示。

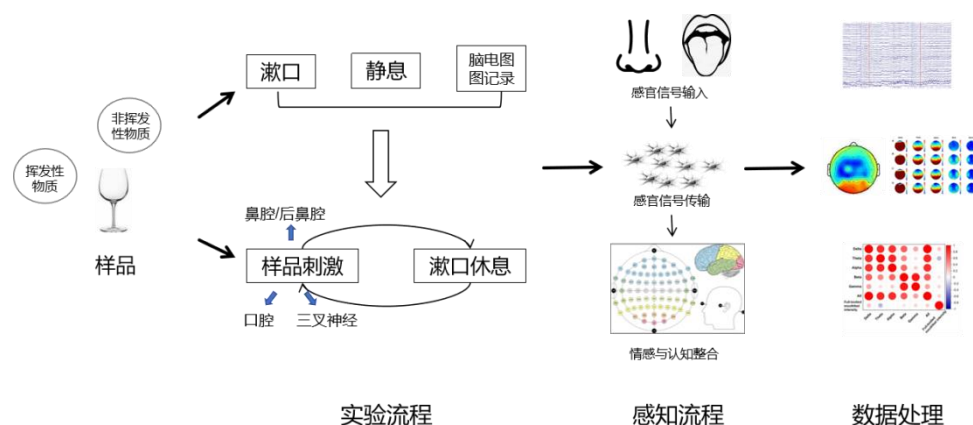


图4 脑电实验过程

Fig.4 EEG experimental procedure

Aliya 等^[92]采用脑电图（EEG）和表面肌电图（sEMG）技术对3款感官差异显著的浓香型白酒进行感知评估，发现 δ 和 β 波段功率变化与醇厚度显著相关。Wang^[90]通过EEG技术评估清香型白酒不同香气刺激对大脑活动的影响，且特别关注 α 波段的变化；结果表明，不同香气刺激引起的脑电活动在 α 波段表现出显著差异，同时EEG可以有效反映嗅觉感知的强度和特征相似性。李德超等^[6]将脑电情绪感知等多种技术构建舒适度指标，验证了智能检测技术在区分消费者对食品细微感官差异方面的有效性，为食品企业的产品研发和质量控制提供支持。刘加楠等^[93]探究不同餐酒搭配中白酒的消费者喜好度，以及喜好度与脑电波的相关性，验证智能消费者测试技术在白酒消费者喜好度研究中的可行性。Chen 等^[88]首次将脑电图（EEG）技术应用于白酒全身口感感知研究，发现顶叶和枕叶区域的 δ （1~4 Hz）与 θ （4~8 Hz）频段功率响应与白酒感官评分显著相关（ $P<0.05$ ），可有效区分不同品质等级的白酒，为风味预测与感官评价标准化提供了神经科学基础。Li 等^[94]采用斯特鲁普色词任务结合脑电图（EEG）技术，验证了基于EEG的行为指标可客观量化白酒饮后注意力变化，发现EEG中的P200成分值对不同香气类型白酒的认知影响具有区分能力，为白酒饮后舒适度的客观评估提供了新的依据。

目前，EEG技术在精准性和客观性方面具有优势，但是其从实验室研究转向产业常规应用还存在较多挑战。专业的EEG设备成本高昂，操作技术和数据分析的专业性要求高；在实验过程中被试者通常要求静止，与真实饮酒场景差距较大，可能会影响实验结果的有效性，仍需结合自评量表（如视觉模拟量表、普卢奇克情感圆周量表等）进行补充；EEG信号噪声较大，其数据具有较高的时间分辨率（毫秒级）^[95]，分析流程复杂，需要较强的专业知识进行解读；传统EEG设备便携性差，难以在大规模消费者和真实场景下研究应用；消费者的隐私和伦理问题等也较为重要。因此，当前EEG技术更适合于小规模、高价值的深度研究或作为传统方法的补充。

4.2 面部表情分析

饮酒会触发愉悦、兴奋或悲伤等情绪，它通过面部肌肉进行无意识的收缩并表现为表情，特别是白酒的高乙醇含量和糠醛等刺激性风味物质刺激三叉神经而引起生理性表情。面部表情分析技术是一种通过量化面部动作和表情来识别和评估情绪的方法，可以快速提供面部表情变化信息。主要包括表情特征提取、表情分类方法、表情单元识别和表情强度识别 4 个方面^[91,96-98]，其主要应用在酒体的感官评价、消费者偏好预测等方面。在面部表情技术中，卷积神经网络（Convolutional Neural Networks, CNN）通过局部感受野与权重共享机制，能够自动学习面部图像中的层次化特征。因其对饮酒引发的细微肌肉运动模式具有出色的特征捕捉能力，选用 CNN 进行面部表情特征提取是一种科学有效的方法。基于 CNN 的有监督面部情绪识别具体流程如图 5 所示^[99]。

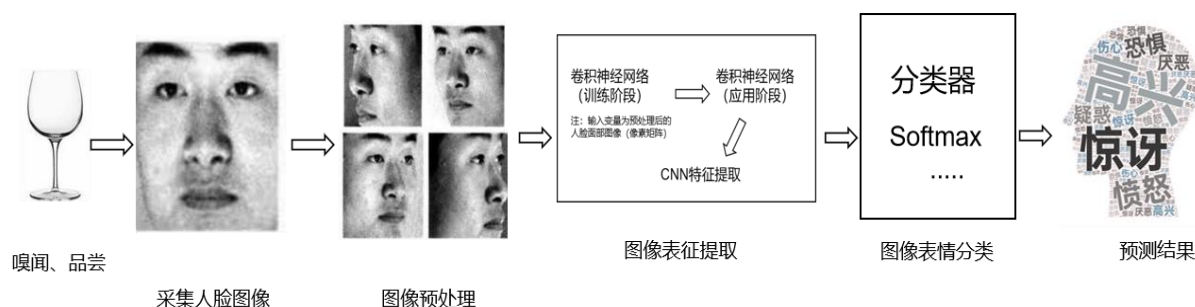


图 5 基于卷积神经网络的有监督面部情绪识别流程

Fig.5 Workflow of supervised facial expression recognition based on convolutional neural networks

黄翠等^[100]以新疆葡萄酒为研究对象，结合传统感官和面部表情分析建立回归模型，并将得到的关键情绪维度与关键香气物质作相关性分析，发现乙酸乙酯、异戊醇等物质与饮用舒适度相关。李德超等^[6]采用面部表情识别技术研究纯生啤酒的饮中喜好度，结果表明饮中的正向情绪与饮后舒适度具有较高的一致性。冯婧等^[101]将面部表情技术与传统感官评价相结合，探究消费者对不同含糖量露酒品评时的面部表情变化、产品感官评价和接受度之间的相关性；结果表明，高含糖量样品可以让消费者正向表情更强，且产品甜味、口感绵柔及果香特征与接受度高度相关，构建了露酒消费者接受度的新型评价方法。相较于 EEG 技术，面部表情分析技术在白酒中的应用仍然非常少，但是在消费者偏好预测和情绪捕捉方面具有较大的优势^[102,103]，是未来白酒消费者感官科学研究的重要发展方向。

面部表情是一种隐性的、客观的测量手段，它弥补了传统问卷的主观局限性；相较于 EEG，面部表情分析不需要接触皮肤，更接近自然的饮用状态。但是面对浓香型白酒这种比较复杂的样品时，同样存在一定的挑战。首先，酒精刺激可能会掩盖真实的情绪^[102]：特别是高度酒具有强烈的刺激性，会引起皱眉、眯眼等生理反映，容易误判为“厌恶”或“痛苦”。其次，环境和动作影响：该方法对光照、面部角度、遮挡（如眼镜、刘海）非常敏感^[104]，要求严格控制实验室环境，限制了在真实餐饮场景中的应用；最后，目前针对白酒的研究样本量通常较小，且存在性别比例失衡（大多数为男性），限制了机器学习模型的能力和鲁棒性。

4.3 内隐测试技术展望

目前，针对浓香型白酒的消费感知内隐测试技术主要聚焦于脑电（EEG）和面部表情分析，而皮肤电反应（GSR）、呼吸频率（RSP）、体温（T）等技术的应用仍相对较少。但这些技术能够通过直接捕捉消费者的自主神经系统反应，为感官评价提供更加客观、实时的生理指标补充。具体而言，皮肤电反应（GSR）作为反映自主神经系统唤醒水平的核心指标，已被广泛应用于测量消费者对食品饮料（如味觉、嗅觉刺激）的情绪唤醒程度^[105]；呼吸频率（RSP）和体温（T）作为基础生理指标，在白酒消费者测试中则主要用于评估其整体的生理唤醒状态与饮用舒适度^[106]。这些在跨品类研究中积累的丰硕成果，为未来浓香型白酒开展多维度生理情绪测评提供了重要的理论与实践参考。

未来，针对浓香型白酒本身的特性，可以将脑电（EEG）、面部表情、皮肤电（GSR）等一系列技术结合，全面解析复杂的白酒感官体验；深入研究具体风味物质与面部情绪（微表情变化）的关系，为酒体设计提供情绪依据；结合机器学习，开发针对不同人群（性别、年龄、地域等）的浓香型白酒个性化系统；引入虚拟现实（VR）

技术模拟真实餐饮饮酒场景,提高感官数据的真实性。

5 浓香型白酒感官风味研究总结与展望

目前在白酒传统行业也已全面迎接新技术、开展新探索,让酿酒、品酒、调酒、讲酒得到技术升级。不但让传统品评升级为现代感官科学,又在风味物质层面不断深入探索微观世界;同时,结合仿生传感器(智能感官),尝试克服品评中强酒精刺激带来的感官疲劳,引导主观品评走上客观测量的道路;并且随着多学科交叉应用,结合神经电生理技术,洞察主观品评背后的认知机制与客观依据。基于对浓香型白酒在风味物质研究重点、感官分析技术发展、智能感官应用以及消费感知内隐测试技术四个维度的综合分析,得出相应阶段性总结及未来研究展望。

在风味物质研究方面,研究已从单纯的成分检测深入到关键风味化合物的筛选与重组。针对当前复杂数据关联性难以处理、负向风味研究较少等局限,未来可基于分子感官组学结合机器学习建立关联模型(如正负向风味指纹图谱)。在勾调工艺上,应聚焦微量调味酒在复杂基质中触发的风味协同放大或遮盖作用,为酒体靶向与精细化设计提供依据。在感官分析技术方面,研究正呈现从静态向动态感知的发展趋势。针对目前动态感官分析主要集中在辛辣和苦味、关键属性时间特征研究缺失的问题,未来应进一步拓展至甜味、醇厚感等更多感官维度。同时,应将快速感官分析、动态分析与传统定量描述技术相融合,获取更全面细致的数据,并结合消费者偏好实现大规模生产下的个性化定制。在智能感官技术(电子鼻/舌)方面,目前在实际应用中仍面临高酒精度掩蔽效应与传感器漂移等难点。面向产业化落地,未来需聚焦工程实施路径:一方面集成微型分压传感器并交叉测量,构建动态补偿模型以去除乙醇干扰,另一方面开发传感器漂移自校准算法提升长期稳定性,并深度融合人工智能技术以增强复杂样本的识别能力。在消费感知内隐测试方面,脑电(EEG)和面部表情等技术仍受限于环境噪声抑制与设备门槛。未来可引入虚拟现实(VR)还原真实消费场景,并将脑电、面部表情、皮肤电等多项生理信号统一建模形成多模态框架,以准确预测喜好度。此外,可依托反馈数据构建数字口味画像反向驱动专属酒体定制,并结合智能穿戴设备提供健康干预等。

总的来说,浓香型白酒品质分析技术已逐渐向多技术融合发展,联通了物质端与感知端、生产端与消费端。未来,随着人工智能、大数据和现代仪器分析技术的不断突破,该技术体系将持续优化,为白酒品质控制和产品创新提供更多科学依据。

参考文献

- [1] MA Y, RAN X L, ZHAO D, et al. Aroma characterization and reconstitution of strong-aroma baijiu: Insights into sensory profiles and key odor-active compounds from Chinese core production areas [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2025, 147: 108076.
- [2] 王霞,郭逸臻.“河套王”系列酒与“江淮派”、“川派”酒的差异分析[J].*酿酒科技*,2008,11:75-79.
- [3] GB/T 10781.1-2021.国家标准 白酒质量要求 第1部分:浓香型白酒[S].
- [4] 刘芳,杨康卓,张建敏,等.基于电子鼻和气质联用技术的浓香型白酒分类[J].*食品与发酵工业*,2020,2:73-78.
- [5] 贾春琪,杜艳红,聂建光,等.基于电子舌对不同类型白酒味觉的研究[J].*酿酒科技*,2022,6:105-108.
- [6] 李德超,丁小燕,张万伯,等.基于智能感官设备饮中喜好度及饮后舒适度的纯生啤酒的可饮性研究[J].*食品与发酵工业*,2025,51(13):144-149..
- [7] GUO X, ZHANG Y D, LU S Y, et al. Facial expression recognition: a review [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2023, 83(8): 23689-23735.
- [8] LIU H, SUN B. Effect of fermentation processing on the flavor of Baijiu [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(22): 5425-5432.
- [9] WANG J S, CHEN H, WU Y S, et al. Uncover the flavor code of strong-aroma baijiu: Research progress on the revelation of aroma compounds in strong-aroma baijiu by means of modern separation technology and molecular sensory evaluation [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 109: 104499.
- [10] 徐占成,陈勇,王双.利用 SBSE 和全二维气质联用(GC×GC-TOFMS)新技术解析白酒香味物质的研究[J].*酿酒科技*,2012,7:50-51.
- [11] SONG X B, SI J, LIN Z, et al. Untargeted and targeted metabolomics strategy for the classification of strong aroma-type baijiu (liquor) according to geographical origin using comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry [J]. *Food*

- Chemistry, 2020, 314: 126098.
- [12] 杜静怡,徐建春,张文迪,等.琅琊台浓香型白酒大茬与双轮底基酒挥发性成分分析[J].食品与发酵工业,2023,1:260-266.
- [13] WANG X, XU X B, ZHANG L, et al. DMU-SPME variable temperature extraction: Revealing the flavor characteristics of strong-aroma baijiu by volatilomics [J]. Food Chemistry, 2025, 493: 145681.
- [14] WANG Y H, ZHENG J, ZHANG D N, et al. Flavoromic exploration of regional variations, consumer preferences, and the role of volatile and nonvolatile compounds in Strong-Aroma Baijiu [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(28): 17888-17900.
- [15] 侯雅馨,王俊山,武亚帅,等.浓香型白酒微量成分的研究进展[J].食品研究与开发,2022,20:194-205.
- [16] FAN W L, QIAN W D. Headspace solid phase microextraction and Gas Chromatography–Olfactometry Dilution analysis of young and aged Chinese “Yanghe Daqu” liquors [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(20): 7931-7938.
- [17] FAN W L, QIAN M C. Characterization of aroma compounds of Chinese “Wuliangye” and “Jiannanchun” liquors by aroma extract dilution Analysis [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(7): 2695-2704.
- [18] CHEN, H, WU YS, WANG J S, et al. Uncover the flavor code of roasted sesame for sesame flavor Baijiu: advance on the revelation of aroma compounds in sesame flavor Baijiu by means of modern separation technology and molecular sensory evaluation [J]. Foods, 2022, 11(7): 998.
- [19] BRATTOLI M, CISTERNINO E, DAMBRUOSO P, et al. Gas chromatography analysis with olfactometric detection (GC-O) as a useful methodology for chemical characterization of odorous compounds [J]. Sensors, 2013, 13(12): 16759-16800.
- [20] HONG J X, WANG J S, ZHANG C S, et al. Unraveling variation on the profile aroma compounds of strong aroma type of Baijiu in different regions by molecular matrix analysis and olfactory analysis [J]. RSC ADVANCES, 2021, 11(54): 34262.
- [21] ZHU W Q, CADWALLADER R K. Streamlined approach for careful and exhaustive aroma characterization of aged distilled liquors [J]. Food Chemistry: X, 2019, 3: 100038.
- [22] NIE R T, ZHANG C J, LIU H, et al. Characterization of key aroma compounds in roasted chicken using SPME, SAFE, GC-O, GC-MS, AEDA, OAV, recombination-omission tests, and sensory evaluation [J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101167.
- [23] 范文来,徐岩.白酒 79 个风味化合物嗅觉阈值测定[J].酿酒,2011,4:80-84.
- [24] WANG X X, FAN W L, XU Y. Comparison on aroma compounds in Chinese soy sauce and strong aroma type liquors by gas chromatography–olfactometry, chemical quantitative and odor activity values analysis [J]. European Food Research and Technology, 2014, 239(5): 813-825.
- [25] 陈禹锜,杨将,赵文梅,等.不同质量等级浓香型白酒刘伶醉酒体感官与风味差异解析[J].中国酿造,2023,6:52-58.
- [26] JIANG H, CHEN Q, XIN J, et al. The effects of gamma irradiation and natural aging on the composition of Nong xiangxing baijiu [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(12): e17146.
- [27] ZHOU Y Q, WANG Y H, ZHENGJ, et al. Influences of Non-Volatile components on the aroma of Strong-Aroma Baijiu by gas Chromatography-Olfactometry and Recombination-Omission Test [J]. Foods, 2025, 14(14): 2490.
- [28] LI P Q, LING Y T, SHEN X M, et al. Characterization of key aroma compounds in aged Chinese Nong xiangxing Baijiu based on sensory and quantitative analysis: emphasis on the contribution of trace compounds [J]. Molecules, 2025, 30(14): 2963.
- [29] ZHU M, WANG M Y, GU J F, et al. Machine learning-assisted aroma profile prediction in Jiang-flavor baijiu [J]. Food Chemistry, 2025, 47(8): 143661.
- [30] 骆茂香,邱树毅,徐兴江,等.白酒中非挥发性风味成分检测分析研究进展[J].中国酿造,2023,42(9): 19-25.
- [31] 范文来.白酒及其发酵过程中内源产生的不挥发性有机化合物综述[J].酿酒,2020,47(6):4-14.
- [32] 张婷,胡来丽,何世兴,等.UPLC-CAD 法测定浓香型白酒中 8 种多元醇及分布规律研究[J].酿酒科技,2024,10:17-21.
- [33] FAN Y, QIU C, CHEN P, et al. Differential Non-Volatile Metabolomics in High-and Low-Alcohol Strong-Flavor Baijiu by Non-Targeted Approach [J]. Foods, 2025, 15(1): 37.
- [34] 邵燕,张宿义,祝成,等.浓香型白酒风味物质与感官评定相关性研究[J].中国酿造,2012,8:92-95.
- [35] 刘超,田鹏,刘莎,等.浓香型白酒饮用舒适度与白酒中微量成分相关性分析[J].食品工业科技,2018,12:255-260.
- [36] 胡景辉,常强,蒋超,等.浓香白酒绵甜感官与风味构成相关性研究[J].食品与发酵工业,2019,21:68-72+78.
- [37] 刘鑫,韩强,李陈杰,等.基于模型融合的浓香型白酒感官与风味成分质量关系模型研究[J].食品研究与开发,2023,13:53-61.
- [38] 曹晓念,吕杨俊,刘青青,等.L-茶氨酸在浓香型白酒中滋味表达及稳定性研究[J].中国酿造,2025,44(8):63-68.

- [39] WANG G N, JING S, WANG X L, et al. Evaluation of the perceptual interaction among ester odorants and nonvolatile organic acids in Baijiu by GC-MS, GC-O, odor threshold, and sensory analysis [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(43): 13987-13995.
- [40] 杜海.中国白酒中一种土霉味物质的发现及其成因研究[D].无锡,江南大学,2009.
- [41] ZHAO D R, SUN J Y, SUN B G, et al. Intracellular Antioxidant Effect of Vanillin, 4-methylguaiacol and 4-ethylguaiacol: Three Components in Chinese Baijiu [J]. *RSC Advance*, 2017, 7(73): 46395-46405.
- [42] 赵东瑞.古井贡酒风味物质及酚类风味物质的抗氧化性和抗炎性的研究[D].广州,华南理工大学,2019.
- [43] 栗永清.中国白酒感官品评方法的的诞生、完善与进步[J].*酿酒*,2018,45(6):4-7.
- [44] 栗永清,季树太.白酒品评方法的创新——LCX 白酒品评系统研制成功[J].*酿酒*,2000,5:19-20.
- [45] NIU J, YANG Y, ZHAO L, et al. Sensory Lexicon construction and quantitative descriptive analysis of Jiang-Flavor Baijiu [J]. *Food Science & Nutrition*, 2025, 13(2): e4652.
- [46] LOUREIRO V, BRASIL R, MALFEITO-FERREIRA M. A new wine tasting approach based on emotional responses to rapidly recognize classic European wine styles [J]. *Beverages*, 2016, 2(1): 6.
- [47] 周维军,左文霞,吴建峰,等.浓香型白酒风味轮的建立及其对感官评价的研究[J].*酿酒*,2013,6:31-36.
- [48] GB/T 33405-2016.国家标准 白酒感官品评术语[S].
- [49] ZHANG B H, YANG Y B, SONG F H, et al. Decoding Baijiu flavor complexity: integrating dynamic sensory analysis, high-resolution metabolomics, and advanced mass spectrometry [J]. *Food Research International*, 2025, 221: 117371.
- [50] 胡晓龙,田瑞杰,樊建辉,等.浓香型白酒挥发性化合物香气贡献及其地域特征研究进展[J].*轻工学报*,2022,2:1-14.
- [51] 于单.中国不同香型白酒香气物质的鉴定研究[D].上海,上海应用技术学院,2015.
- [52] WANG Z, WANG S, LIAO P F, et al. HS-SPME combined with GC-MS/O to analyze the flavor of strong aroma baijiu da qu [J]. *Foods*, 2022, 11(1): 116.
- [53] 何佳欢.中温大曲曲香物质分析及重构研究[D].无锡,江南大学,2022.
- [54] WANG J Y, WANG J, QIAO L N, et al. From traditional to intelligent, a review of application and progress of sensory analysis in alcoholic beverage industry [J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 23: 101542.
- [55] 宋先闯,张娇娇,任义平,等.饮用温度对无忧酱香型白酒感官品质的影响[J].*中国酿造*,2025,4: 49-55.
- [56] 相里冉,曾勇,周若陶,等.宜宾产区浓香型白酒成品酒风味特征剖析[J].*食品与发酵工业*,2025,11(14): 1-13.
- [57] MARTINA D, FRANCES J, IRENE B, et al. Comparison of three approaches to assess the flavour characteristics of scotch whisky spirit [J]. *Applied Sciences*, 2021,11(4): 1410.
- [58] ANGELICA I, ELIZABETH T. Adapting polarized projective mapping to investigate fruitiness aroma perception of white wines from oregon [J]. *Beverages*, 2021, 7(3): 46.
- [59] REINBACH H C, GIACALONE D, RIBEIRO L M, et al. Comparison of three sensory profiling methods based on consumer perception: CATA, CATA with intensity and Napping® [J]. *Food Quality and Preference*, 2014,32: 160-166.
- [60] LEZAETA A, BORDUE E, TORMOD N, et al. Exploration of consumer perception of Sauvignon Blanc wines with enhanced aroma properties using two different descriptive methods [J]. *Food Research International*, 2017, 99: 186-197.
- [61] JEONGAE H, SOOK S K, MIRAN K, et al. Comparison of sensory profiling by descriptive analysis, free-choice profiling, and polarized sensory positioning on bottled water. [J]. *Foods (Basel, Switzerland)*, 2023, 12(8): 2304-8158
- [62] WANG JY, WANG J, QIAO L N, et al. From traditional to intelligent, a review of application and progress of sensory analysis in alcoholic beverage industry [J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 23: 101542.
- [63] 陈亦新.山楂酒香气感官词典建立及主要香气成分研究[D].北京,北京林业大学,2022.
- [64] YANG Y B, NIU J J, SHI B L, et al. Study on the differentiation of sensory quality of mainstream Jiang-flavor baijiu in the Chinese market based on Pivot Profile [J]. *Journal of Food Science*, 2024, 89(11): 7958-7975.
- [65] NOUGAREDE S, DIOT A, et al. Comparison of Check-All-That-Apply and Adapted-Pivot-Test methods for wine sensory characterization with a panel of untrained students [J]. *Journal of Sensory Studies*, 2023, 38(5): e12862.
- [66] WANG S Q, CHEN X L, WANG E Z, et al. Comparison of Pivot Profile (PP), Rate-All-That-Apply (RATA), and Pivot-CATA for the sensory profiling of commercial Chinese tea products [J]. *Food Research International*, 2023, 173: 113419.

- [67] HE Y X, CHEN S, TANG K, et al. Sensory characterization of Baijiu pungency by combined time-intensity (TI) and temporal dominance of sensations (TDS) [J]. Food Research International, 2021, 147: 110493
- [68] 谢静茹.传统绍兴酒关键苦味物质及其影响因素研究[D].上海,上海应用技术大学,2021.
- [69] ROVAI D, KEEFER M H, CASTURE C J, et al. Comparison of gins using Temporal Dominance of Sensations (TDS), Temporal Check-All-That-Apply (TCATA), and Temporal Ranking (TR) [J]. Journal of Sensory Studies, 2025, 40(2): e70017.
- [70] 付玉,葛向阳,刘加楠,等.消费者味觉和白酒搭配喜好度研究[J].食品与发酵工业,2024,50(22): 54-59+66.
- [71] HUANG P M, LIU L, LI Y Y, et al. Preparation of N-succinyl-L-phenylalanine: exploring its taste-modulating effects and mechanisms on baijiu via multisensory evaluation and molecular simulation [J]. Food chemistry: X. 2025, 31: 103164..
- [72] 温银萍,皇甫洁,张根林,等.米香白酒舒适度量表分析及舒适度与挥发性风味成分相关性研究[J].中国酿造,2024,43(8): 80-85.
- [73] FU Y, LIU J N, HE G L, et al. Sequential consumption of sauce- and elegant-flavor baijiu enhances post-drinking comfort: a randomized crossover study in Guangdong, China [J]. Applied Food Research, 2025, 5(2): 101104.
- [74] WILSON A. Diverse Applications of Electronic-Nose technologies in agriculture and forestry [J]. Sensors, 2013,13(2): 2295-2348
- [75] LI Y Z, YANG K Z, HE Z G, 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.
- [76] HE X, HE Y G, GORSKA-HORCZYK E, et al. Rapid analysis of Baijiu volatile compounds fingerprint for their aroma and regional origin authenticity assessment [J]. Food Chemistry, 2021, 337: 128002.
- [77] HUANG Q, LIU Y, TIAN L, et al. Effects of storage time on flavor characteristics of bran-free fermented Baijiu by using electronic sensory, descriptive sensory analysis, GC×GC-MS, and ICP-MS [J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101667.
- [78] 曹玉发,孙怡辰,魏轩,等.3 个年份浓香型白酒香气成分比较研究[J].食品安全质量检测学报,2021,2:769-779.
- [79] 彭厚博,李丽,吴健航,等.基于电子舌技术的浓香型白酒基酒年份分类方法[J].中国酿造,2022,41(3):158-162.
- [80] 李付丽,吴鑫颖,陈仁远,等.电子舌和测色仪在酱香型白酒质量检测方面的应用[J].酿酒科技,2015,3:77-80.
- [81] ALIYA, LIU S, ZHANG D, et al. Research on the evaluation of Baijiu flavor quality based on intelligent sensory technology combined with machine learning [J]. Chemosensors, 2024, 12 (7): 125.
- [82] ZHENG Z C, LIU K W, ZHOU Y W, et al. A comprehensive overview of the principles and advances in electronic noses for the detection of alcoholic beverages [J]. Trends in Food Science & Technology, 2025, 156: 104862.
- [83] LIU H B, WU R J, GUO Q Y, et al. Electronic nose based on temperature modulation of MOS sensors for recognition of excessive methanol in liquors [J]. Acs Omega, 2021, 6(45): 30598-30606.
- [84] HU T, GUO Z K, LI F S, et al. Rapid detection of traditional Chinese Baijiu with edible alcohol by an electronic nose with MS1D CNN-TE hybrid model [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2026, 150: 108854.
- [85] ZHANG L, LIU Y Q, CAI Z L, et al. Organic-Acid-Sensitive visual sensor array based on fenton Reagent-Phenol/Aniline for the rapid species and adulteration assessment of Baijiu [J]. Foods, 2024, 13(13): 2139.
- [86] RABEHI A, HELAL H, ZAPPA D, et al. Advancements and prospects of electronic nose in various applications: a comprehensive review [J]. Applied Sciences, 2024, 14(11): 4506.
- [87] AMNDA S, JAN W, HONGJUN Y, et al. Neuroergonomic assessment of hot Beverage preparation and consumption: An EEG and EDA Study [J]. Frontiers in Human Neuroscience, 2020, 14: 175.
- [88] CHEN P, YANG Y B, SUN J Y, et al. Electroencephalography (EEG) design for flavor perception of Baijiu: An investigation into the influence of full-bodied mouthfeel on brain rhythms [J]. Food chemistry, 2025, 493(3): 145864.
- [89] MAHBOOBEH J, AFSHIN S, MARJANE K, et al. Emotion recognition in EEG signals using deep learning methods: A review [J]. Computers in Biology and Medicine, 2023, 165: 107450.
- [90] WANG G N, WANG X L, CHENG H, et al. Application of electroencephalogram (EEG) in the study of the influence of different contents of alcohol and Baijiu on brain perception [J]. Food chemistry, 2024, 462 140969.
- [91] WANG G N, WANG X L, ZHANG T Y, et al. Advancing flavor perception research with EEG microstate analysis: A dynamic approach to understanding brain responses to alcoholic stimuli [J]. Food chemistry, 2025, 482: 144218.
- [92] ALIYA, JIANG S, JIANG X, et al. Evaluation of flavor perception of Strong-aroma Baijiu based on Electroencephalography (EEG) and Surface Electromyography (EMG) techniques [J]. Food Chemistry. 2025, 472: 142893.

- [93] 刘加楠,范绍辉,付玉,等.餐酒搭配中的白酒消费者喜好度研究[J].食品与发酵工业,2025,51(11):90-97.
- [94] LI J, WANG C, PEI S, et al. Comparison of Post-Consumption attention between two different aroma types of baijiu using the stroop task [J]. Foods, 2025, 14 (13): 2352.
- [95] ANDREA B, SILVIO R, LEOPOLDO T, et al. Is EEG suitable for marketing research? A Systematic Review [J]. Frontiers in Neuroscience, 2020, 14: 594566.
- [96] 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.
- [97] JAYASWAL R, ANSAR A M, DIXIT M, et al. Advances in facial expression recognition technologies for emotion analysis [J]. Discover Computing, 2025, 28(1): 203.
- [98] SO J, HAN Y. Facial Landmark-Driven key point feature extraction for robust facial expression recognition [J]. Sensors, 2025, 25(12): 3762.
- [99] 陈香敏.人脸表情识别方法及其在康复机器人中的应用研究[D].沈阳,沈阳工业大学,2025.
- [100] 黄翠,武运,薛洁,等.基于面部表情分析技术的葡萄酒中关键香气与饮用舒适度相关性评价[J].食品与发酵工业,2024,50(8):146-157.
- [101] 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,2022,6:257-262.
- [102] FU Y, WANG C, HE G L, et al. Neurophysiological and multimodal sensory evaluation of baijiu and food pairing liking [J]. Food Research International, 2025, 221: 117451.
- [103] WANG Z, HUANG M Q, CHANG X C, et al. Study of the interaction mechanism of aroma components in Baijiu and associated brain response microstates. [J]. Food chemistry, 2025, 494: 146149.
- [104] DANNER L, HAINDL S, JOECHL M, et al. Facial expressions and autonomous nervous system responses elicited by tasting different juices [J]. Food Research International, 2014, 64: 81-90.
- [105] SADIKZADE R, THURHAN K N. From Arousal to acceptance: A review of EDA/GSR and BVP applications in food consumer research[C]//IEEE Medical Technologies Congress (TIPTEKNO). Gazi Magusa, Turkiye. IEEE, 2025: 1-4.
- [106] LARENTI R, BARBIERI R, CERINA L, et al. Analysis of physiological and non-contact signals for the assessment of emotional components in consumer preference[C]//IEEE Conference of the European Study Group on Cardiovascular Oscillations (ESGCO). Pisa, Italy. IEEE, 2020: 1-2.