

脑电图技术在食品感官领域中的应用进展

李文斌^{1,2} 侯小艺^{1,2} 邓娜^{1,2} 冷拓¹ 付浩华¹ 王建辉^{1,2,3}

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省预制菜工程技术研究中心, 湖南 长沙 410114; 3. 湖南省湘味餐调智造与质量安全工程技术研究中心, 湖南 长沙 410023)

摘要:传统的食品感官评价受主观性等因素影响,存在明显的局限性。脑电图因高时间分辨率、非侵入性和实时动态监测等优势,为解决这一问题提供了客观的神经生理学视角与解析,有效推动了食品科学研究从主观描述向客观神经解码方向转变。文章系统梳理了脑电图在食品风味识别与预测、食品品质客观评价、食品营养与消费行为解析等方面的应用,并结合当前技术发展现状,提出通过多模态技术融合与机器学习赋能来优化脑电图在食品领域的应用,旨在为脑电图在食品领域深入应用研究提供系统的理论参考。

关键词:脑电图;食品风味;感官评价;食品营养;机器学习

Advances in the application of electroencephalography in food sensory science

LI Wenbin^{1,2} HOU Xiaoyi^{1,2} DENG Na^{1,2} LENG Tuo¹ FU Haohua¹ WANG Jianhui^{1,2,3}

(1. School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center of Prepared Dishes, Changsha, Hunan 410114, China; 3. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center of Intelligent Manufacturing and Quality Safety of Xiang Flavored Compound Seasoning for Chain Catering, Changsha, Hunan 410023, China)

Abstract: Traditional sensory evaluation of food is affected by subjectivity and other factors, resulting in significant limitations. Electroencephalography (EEG), owing to its advantages of high temporal resolution, non-invasiveness, and real-time dynamic monitoring, offers an objective neurophysiological perspective and analytical approach to address this issue, effectively advancing food science research from subjective descriptions to objective neural decoding. This paper systematically reviews the applications of EEG in food flavor recognition and prediction, objective evaluation of food quality, and analysis of food nutrition and consumer behavior. In light of the current state of technological development, it is proposed that multimodal technology integration and machine learning empowerment can be leveraged to optimize the application of EEG in the food domain, aiming to provide a systematic theoretical reference for further in-depth application research of EEG in the food field.

Keywords: electroencephalography; food flavor; sensory evaluation; food nutrition; machine learning

在食品消费日益强调体验感的今天,食品的感官特征已成为影响食品接受度的重要因素,其科学评价体系的构建与解析一直是食品科学领域的重要研究方向^[1]。传统的食品风味研究多依赖感官评价小组和仪器分析技

术,但这些方法存在明显的局限性,难以满足当前食品风味研究的需求。其中,感官评价由于受到评价人员的主观经验、情绪状态等因素影响,导致评价结果出现偏差、重复性差^[2];仪器分析虽能定性定量测定食品中风味化合

基金项目:湖南省科技创新领军人才项目(编号:2023RC1056);湖南省重点领域研发计划项目(编号:2024JK2154);湖南省预制菜工程技术研究中心(编号:2023TP2214);湖南省岳麓山工业创新中心洞庭实验室培育项目(编号:2024-DTPY-006)

通信作者:王建辉(1980—),男,长沙理工大学教授,博士。E-mail: wangjh0909@csust.edu.cn

收稿日期:2026-03-25 **改回日期:**2026-04-29

引用格式:李文斌,侯小艺,邓娜,等. 脑电图技术在食品感官领域中的应用进展[J]. 食品与机械, 2026, 42(6): 179-189.

Citation: LI Wenbin, HOU Xiaoyi, DENG Na, et al. Advances in the application of electroencephalography in food sensory science[J]. Food & Machinery, 2026, 42(6): 179-189.

物组成和含量,却无法反映消费者对食品风味的感知,这使得传统方法在当前食品风味品质的动态评估上面临重大挑战^[3]。在此背景下,神经成像技术的引入有效弥补了传统风味研究方法的不足。脑电图(EEG)因具有非侵入性、毫秒级时间分辨率以及能够实时记录和反映大脑神经电活动等优势^[4],成为解析食品风味感知的神经机制、连接客观检测与主观体验的有力工具。

近年来,脑电图在食品领域的研究日益增多,相关研究多围绕咖啡、酒和茶叶等典型饮品进行分析。例如在—项研究中,Hong 等^[5]发现咖啡的嗅觉感知与实际饮用在不同性别群体中会激活不同脑区活动。Robertson 等^[6]在酒类研究中发现了显性评价与潜意识反应之间的显著差别。杨伯垚等^[7]在茶叶研究中通过分析受试者饮用白芽奇兰茶后的生理特征,成功筛选出消费者喜好程度最优的冲泡参数。文章拟系统梳理近年来脑电图在食品领域的研究进展,并对未来的发展进行展望,以期脑电图在食品领域的进一步推广应用提供参考。

1 脑电图基本原理

1.1 脑电图基本原理与采集方法

脑电图是一种无创神经影像技术,其原理是通过在

头皮表面放置电极阵列,记录和放大由大脑皮层神经元群体性、同步性突触后电位(PSPs)所产生的生物电信号^[8]。在食品感官评价中,受试者对风味的主观评价往往滞后于神经反应,脑电图凭借其毫秒级的时间分辨率,能够捕捉到食品消费过程中的快速感官整合与即时情感波动,揭示这些潜意识层面的神经加工。然而,脑电图的空间分辨率相对较低,难以精确定位深部脑区如丘脑等的微小活动^[9]。

脑电图研究系统主要由电极帽、信号采集设备以及信号预处理与分析工具三部分组成。脑电试验的流程如图 1 所示。电极布置作为脑电研究的起点,其布置方式直接影响脑电信号质量。目前的电极布置方式普遍采用国际 10-20 系统标准^[10],该标准能够有效确保不同受试者之间、不同研究之间结果的可比性。信号采集环节采用便携式脑电采集系统,可实时捕捉食品刺激过程中受试者的脑电信号。但是采集到的原始脑电信号可能混杂着各种生理伪迹和环境噪声,严重影响后续分析准确性^[11]。因此在进行数据分析前,必须对原始信号进行预处理。在预处理完成后,可以采用多种分析方法对脑电信号进行特征提取并进行深入分析,最后结合试验目的对分析结果进行科学解释。

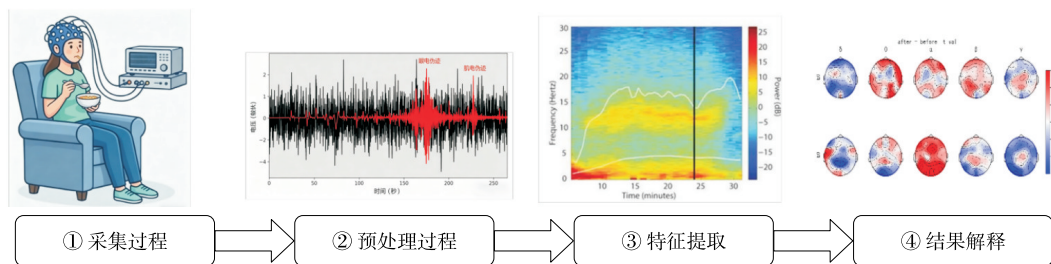


图 1 脑电图试验研究流程图

Figure 1 Flowchart of experimental research on electroencephalography

1.2 脑电信号预处理与特征分析

1.2.1 脑电信号预处理 脑电信号的预处理旨在去除其他干扰成分以提高脑电信号质量,因此预处理方法的选择会显著影响后续分析结果的准确性。滤波是预处理中的重要步骤,用于限制信号带宽和消除与神经活动无关的频率成分。滤波器设计需重点考虑相位响应和边缘陡度从而避免引入伪迹,其中零相位 FIR 滤波器因其能最小化相位失真受到青睐^[12]。

脑电信号极易受到伪迹的污染,伪迹处理是预处理中最具挑战性的环节,这是由于伪迹与脑电信号在时域或频域上存在重叠,难以通过简单的预处理方法实现有效分离。伪迹主要分为生理性伪迹和环境伪迹两大类^[13],生理性伪迹包括眼电、肌电和心电等,环境伪迹则主要包括工频干扰和电极移动等。在食品科学研究中常

见的伪迹与食品摄入相关,主要包括咀嚼肌电伪迹、舌动伪迹和吞咽肌电伪迹等。咀嚼肌电伪迹是进食脑电研究中最主要的干扰来源。咀嚼肌活动产生的肌电信号在时域上以波形与脑电信号重叠,在频域上则与脑电信号中的 β 波和 γ 波形成重叠^[14]。舌动伪迹是食品摄入中另一类伪迹类型。舌头作为电偶极子,舌尖相对于舌根部存在负性电荷,舌头的运动会在脑电图上产生间歇性或反复性的慢波^[15]。而吞咽动作涉及舌肌、咽肌和颈部肌肉的协调收缩^[16],其产生的肌电干扰与咀嚼伪迹类似。

目前常用的伪影去除方法主要有回归法、小波变换、经验模态分解及盲源分离等^[17]。相较于前几种方法,盲源分离(BSS)是基于信号之间的统计特性来分离伪迹和脑电信号,主要包括独立成分分析(ICA)和典型相关分析(CCA),其中 ICA 是目前应用最广泛的伪迹校正方法之

一。然而传统的ICA在移除伪迹的同时也可能移除部分神经信号,甚至人为放大事件相关电位和功能连接的效应量,并导致源定位估计的偏倚。为解决这一问题,有学者^[18]提出RELAX预处理流程,能够针对眼动成分的伪迹时段和肌电成分的伪迹频率进行针对性清理,在有效去

除伪迹的同时更好地保留神经信号。

1.2.2 脑电特征分析 预处理后的脑电信号需经特征提取转化为定量指标,才能揭示食品刺激诱发的神经活动模式,为食品风味识别和品质评价提供量化依据。表1总结了食品领域中脑电图研究常用的分析方法。

表1 脑电图分析方法
Table 1 EEG analysis methods

分析方法	核心维度	关键指标	主要作用	在食品中的应用
频域分析	频率	δ 波、 θ 波、 α 波、 β 波、 γ 波	解码大脑在处理味觉和嗅觉刺激时的振荡模式,反映其唤醒度、注意力和情绪状态	程焕等 ^[19] 通过不同柑橘风味诱发的 δ 波、 θ 波、 α 波、 β 波的能量变化来判断消费者可接受度
事件相关电位分析	时间	N1波、P2波、P300波、晚期正电位LPP	捕捉刺激呈现后毫秒级的早期认知加工过程与晚期加工过程,如注意分配、记忆更新和情绪效应评估	Schwab等 ^[20] 通过事件相关电位反映苦味对早期注意力增强与对食物情感价值降低作用,为风味调控进食提供了依据
源定位分析	空间	电流密度、三维坐标	估算头皮脑电活动的神经起源,将信号映射至特定脑区,辅助识别风味加工的相关皮层区域	Iannilli等 ^[21] 通过对比食物相关气味与非食物气味的脑电信号的源定位分析揭示了食物气味与奖赏脑区的特异性关联
微状态分析	时空	头皮电位空间构型	将复杂的脑电活动简化为有限几个稳定的全局功能状态,揭示大脑在信息加工过程中的宏观状态转移和动态变化	Wang等 ^[22] 通过微状态分析证明酒精通过动态脑状态转换同时调控感官与认知加工,为理解消费者体验、优化产品设计提供了重要的神经生理学依据
功能连接分析	网络	相位同步、相干性、格兰杰因果	揭示不同脑区在食品风味加工过程中的协同工作模式和信息流向,构建大脑功能网络	Lim等 ^[23] 揭示了奖赏系统与认知控制系统之间的功能连接与食品喜好形成关联,为优化食品的视觉呈现以提高产品接受度

2 在食品风味识别与预测中的应用

2.1 味觉分析与预测

味觉作为食品感官评价的基础维度,主要包括酸、甜、苦、咸、鲜5种基本味觉。味觉的神经机制始于口腔内味觉受体细胞对食物中呈味物质的特异性识别,不同味觉类型主要由三类功能分化的味觉细胞来感知^[24]。咸味由I型细胞上的上皮钠通道(ENaC)介导,钠离子直接进入细胞引起去极化。甜味、鲜味和苦味由II型细胞感知,其中甜味、鲜味和苦味受体都是G蛋白偶联受体(GPCR)。配体结合G蛋白后会进一步激活磷脂酶C β 2(PLC β 2)促使三磷酸肌醇(IP3)升高释放细胞内钙离子,并通过CALHM1离子通道释放ATP作为神经递质引起细胞去极化。酸味主要由III型细胞通过OTOP1质子通道介导。当pH下降时,OTOP1通道开放使得H⁺内流导致细胞去极化。不同味觉受体细胞在接收味觉刺激后产生味觉信号,通过面神经(CN VII)和舌咽神经(CN IX)汇集到脑干的孤束核。之后经过丘脑腹后内侧核(VPM)并最终传导至岛叶的味觉皮层和眶额皮质等形成味觉感知^[25]。

通过对味觉刺激相关脑电信号的特征分析,可实现对味觉类型的精确区分和强度的客观量化,这是脑电图在食品研究中基础的应用方向。不同类型的味觉刺激

会在大脑中诱发差异化的脑电反应。Pereira等^[26]发现5种基本味型的脑电活动存在显著差异,其中 β 波在甜味与鲜味、咸味与鲜味之间, γ 波在甜味与鲜味、甜味与苦味之间表现出显著差异,可作为区分不同味觉类型的关键指标。Xu等^[27]发现五大基本味型与无味刺激的脑电信号也存在明显差异,其中 α 波(8~13 Hz)中的 α 1波(8~10 Hz)和 α 2(10~13 Hz)波对味觉刺激最敏感,且刺激发生后1~3 s时味觉刺激与无味刺激的脑电响应差异显著,此时波段呈现双驼峰反应,颞叶、枕叶和中央叶的差异表现更为明显,并证实 α 2波在味觉加工过程中发挥更重要作用,为味觉类型的精准识别提供了新的神经指标。

除了区分不同味型,脑电图还能区分同一味型中不同化学物质的差异。例如,Wang等^[28]发现,蔗糖、甜菊糖苷和阿斯巴甜在主观甜度相同时会诱发不同模式的脑电信号,表明大脑对甜味的编码包含了对呈味物质结构的精细区分。Wu等^[29]通过对比谷氨酸钠、琥珀酸二钠和肌苷酸二钠等物质的味觉感知发现,尽管三者在感官评价上具有等鲜味强度,但仍能通过脑电信号的差异来区分这3种鲜味物质。此外,脑电图能够捕捉不同浓度味觉物质引发的脑电响应差异,实现味觉强度的客观量化。一项关于酒精浓度对大脑感知影响的研究^[30]发现,大脑能够有效区分不同浓度的酒精刺激,且随着酒精浓度的升

高脑电信号强度显著增强。此外,脑电图结合机器学习使得味觉物质浓度量化更迅捷。Romeo-Arroyo等^[31]采用决策树算法对甜味刺激下的脑电特征进行分类,通过筛选相关的脑电信号特征构建模型,对低、中、高3种甜味强度的分类准确率达89.7%,为甜味感知强度的快速量化提供了算法支撑。

近年来,基于深度学习的方法进一步提升了味觉识别与预测的精度,推动脑电图在食品味觉研究中的应用向智能化转型。Yang等^[32]开发的MHASNet模型通过引入双重注意力机制,能够自动识别对味觉分类最重要的空间脑区和时间片段,为甜味等基本味觉的神经加工时空动态提供了数据驱动的解答。Wang等^[33]提出的EFCC-Net深度学习网络通过多分支结构同时捕捉脑电信号的局部细节和全局关联模式,成功实现了对甜度浓度细微差异的精准识别。以上研究共同表明,基于深度学习的脑电图正推动味觉感知研究从依赖人工特征提取向数据驱动的时空动态建模转变,为建立高分辨率的味觉神经量化体系提供了关键技术支持。

2.2 嗅觉识别与量化

嗅觉是食品风味感知的重要组成部分。嗅觉感受器神经元(ORNs)位于鼻腔嗅上皮细胞中,通过嗅觉受体(ORs)和痕量胺相关受体(TAARs)来识别空气中的挥发性分子。食品中的香气分子首先与ORs或TAARs结合,导致腺苷酸环化酶III(ACIII)活化并生成环磷酸腺苷(cAMP),cAMP随后直接打开环核苷酸门控(CNG)阳离子通道,引起钙离子和钠离子内流导致细胞去极化。嗅球是嗅觉信息的第一个中继站,所有ORNs的轴突汇聚到嗅球中并与僧帽细胞和房饰细胞的树突形成突触连接,嗅球中产生的电信号便是通过这两种细胞投射到梨状皮层等相关区域,最后信号进一步传递至眶额皮层等脑区进行气味的特征识别^[34]。相较于味觉等,嗅觉通路是唯一不经过丘脑直接投射至皮层的感觉系统,这一特性使得嗅觉信号能够更快速、更直接地影响情绪和记忆^[35]。

目前,脑电图在食品嗅觉评价中的应用主要集中在香气识别、香气强度量化及香气诱发的情绪变化探究等方面。在香气识别层面,Guo等^[36]揭示了不同气味分子诱发的细微神经模式差异,并观察到中央额叶区域在特定气味加工中呈现选择性激活。在香气强度量化中,Chen等^[37]探究了不同浓度的3-甲基丁醛对嗅觉感知的影响发现,该化合物在中等浓度下能显著提升香肠的香气品质,同时诱发更强的 α 波活动和前额叶、眶额皮层等脑区的激活。香气物质还会诱发人的情绪变化,而脑电图揭示了这一神经机制。Ke等^[38]研究发现,左额颞叶的 α 波、 β 波和 γ 波的频段功率与香气愉悦感主观评分存在显

著相关性,为香气化合物的情绪调节作用提供了客观评估手段。此外,食品中不同香气物质之间存在协同、拮抗等相互作用,影响消费者的嗅觉感知,而脑电图能够解析香气互作对大脑动态活动的影响。Wang等^[39]探究了辛酸乙酯和乙酸乙酯及其混合物对大脑动态活动的影响发现,辛酸乙酯诱导脑状态趋于稳定放松,乙酸乙酯引发神经资源从内向外部分配的转移,而两者混合则激活更复杂的神经网络协同,为食品香气的搭配组合提供了神经生理学参考。

近期研究拓展了嗅觉得解码的技术路径,通过融合机器学习提升脑电图在食品嗅觉研究中的应用价值。Shen等^[40]通过将脑电图与气相色谱—离子迁移谱技术相结合开发了EEG-MambaFusionNet框架,在解码烤羊肉串香气感知同时实现了大脑神经活动与香气化合物之间的有效关联,使其不仅能够识别香气类型,还能精准匹配引发特定神经响应的香气化合物,为食品香气的精准优化和品质控制提供了更全面的技术支撑。以上研究共同表明,脑电图在香气感知的评估中具有独特的技术优势,能够为食品气味研究提供从感官属性到情绪响应的客观神经指标,可作为指导食品风味优化的重要工具。

2.3 视觉影响与预期

除了味觉与嗅觉,视觉也是食品感官评价的重要维度。视觉的感知主要依赖视网膜感光细胞如视杆细胞和视锥细胞上的视紫红质、长波敏感视蛋白(OPN1LW)和中波敏感视蛋白(OPN1MW)来捕获光子并启动视觉信号传导^[41]。之后视觉信号经视神经传导至外侧膝状体核,再投射至初级视皮层及更高皮层最终形成视觉。食品的视觉特征如颜色或形态等会直接影响消费者对食品的接受度以及后续感官体验。这种影响往往发生在潜意识层面,而脑电图能够实时记录消费者在视觉加工食品视觉特征时的脑电活动变化,揭示视觉加工对食品风味预期的调控机制。

视觉信息能够塑造大脑对食品风味的预期,并通过调节情绪与神经活动持续影响后续的味觉加工过程。Ucuk等^[42]研究证实了这一机制,他们发现同一餐食采用不同的视觉呈现方式,会显著影响消费者的喜好程度和情绪反应。即使参与者品尝到的是相同食物,大脑对视觉美感的反应仍会调节后续的味觉处理过程,这为食品的视觉呈现优化提供了神经依据。此外,视觉与味觉的不一致可能会通过制造感官冲突来影响食品的感官评价。Peng等^[43]研究发现,当食品的颜色与风味不一致时会在大脑顶叶区域诱发更强的 α 波功率,表明大脑需要调动更多的认知资源来整合冲突的感官信息的影响。以上研究为客观评估食品信息的匹配程度提供了可靠的神经指标,可用于指导食品视觉与风味的协同设计。

2.4 多感官协同作用

在真实进食情境中,食品的味觉、嗅觉、视觉等多感官信息会同时或先后到达大脑,在眶额皮质中被整合为整体风味感知(图2)。这种多感官协同作用是食品风味感知的核心机制,也是食品风味优化的关键切入点。借助脑电图技术,研究者能够解析不同感官的交互来验证多感官协同作用的神经响应机制。

气味物质诱导味觉增强(OITE)是多感官协同作用中最常见形式,相关研究通过脑电图技术精准揭示了其神经机制。Nie等^[45]以油炸双孢蘑菇为研究对象探究了3-甲硫基丙醛和1-辛烯-3-酮等关键香气化合物增强咸味感知的机制,脑电图结果显示,添加上述香气物质后 γ 波显著增强,此外1-辛烯-3-酮同时诱发了 β 波的显著增强。

Wei等^[46]发现, β -紫罗兰酮可通过鼻前和鼻后通路增强根皮苷的甜味,其中鼻后通路下 β -紫罗兰酮与根皮苷组合显著激活大脑中央区域,鼻前通路下还会额外激活与积极情绪相关的左颞叶区域。香气对味觉的增强是建立在气味和味道复合的基础上的,当两者不一致时,气味物质则会降低味觉感知。例如,一项研究^[47]探究了参试者在闻到巧克力味或大蒜味的条件下食用巧克力时的脑电特征发现,当嗅觉与味觉信息不匹配时大脑 θ 波活动显著增强,同时主观甜味感明显下降。这表明,嗅觉与味觉信息的不匹配会引发大脑的感知冲突, θ 波的增强可能反映了大脑对这种冲突的加工过程,进而导致了味觉感知减弱,这一研究为理解感官信息不一致时的感知重构提供了重要论据。

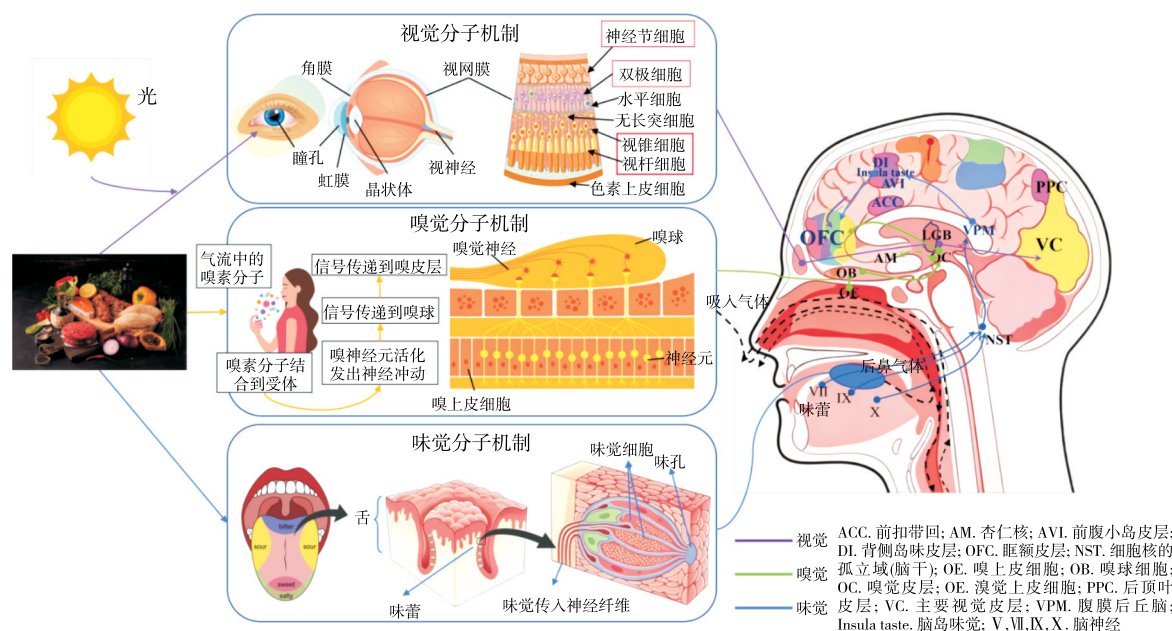


图2 食品多感官风味信息整合的神经加工机制^[44]

Figure 2 Neural processing mechanisms of food multisensory flavor information integration

在多感官协同研究中,多模态技术融合的策略日益受到重视。多模态技术融合能够突破单一脑电图的局限,更全面地解析多感官协同的生理机制。Aliya等^[48]将脑电图与表面肌电技术相结合评价了浓香型白酒的风味感知,发现两种模态的联合分析能够更全面地反映感官体验的神经与生理响应,弥补了脑电图技术无法捕捉口腔肌肉活动的不足。Fu等^[49]采用脑电图结合面部表情分析、眼动追踪等多模态手段研究了白酒与食物搭配的喜好度,证实了多模态数据在解析复杂感官偏好方面的独特优势。De Wijk等^[50]的研究也表明,将脑电图与面部表情分析相结合能够更准确地捕捉沉浸式消费情境下食物诱发的情绪变化。值得指出的是,当前多模态融合策略

多将脑电图与外周生理或行为相结合,虽能拓展观测维度,却未能触及多感官整合的核心即大脑内部跨脑区信息的时空协同加工。因此研究人员开始探索脑电图与功能性磁共振成像(fMRI)、功能性近红外光谱(fNIRS)等神经影像技术的融合路径。例如,Ataci等^[51]采用同步记录的EEG-fMRI技术对大脑的味觉皮层区域在进行食品选择中的作用,揭示了味觉处理相关的脑区不仅是感受味道,还直接参与到了决策的神经计算。Ramirez等^[52]使用脑电图并结合fNIRS来研究不同零食如何改变消费者偏好,充分展示了如何用融合技术来客观测量消费者对食品的潜意识反应。

3 脑电图在食品品质评价中的应用

食品品质是食品产业的核心竞争力,传统上依赖理化指标检测,但理化指标难以反映消费者对品质的主观感知。脑电图可通过捕捉不同品质的食品刺激引发的脑电响应从而揭示消费者对食品品质的神经机制^[53],为食品品质优化和安全监测提供神经生理学依据。

3.1 食品品质与偏好评价

在食品品质偏好的神经解析中,脑电特征频段的功率变化能够客观反映消费者对食品品质的主观偏好和情绪响应。研究者通过脑电图技术在不同食品体系中揭示了多频段、多脑区协同响应的复杂机制,为食品品质优化和偏好预测提供了客观依据。在柑橘类食品研究中,Zhao 等^[54]探究了消费者对 4 种柑橘精油及其浓缩形式和 D-柠檬烯的感知差异,结果发现 δ 波和 α 波在前额叶区域活动占主导,其中 α 波功率偏侧化与柑橘风味可接受度呈负相关,前额叶 δ 波功率能有效反映甜橙和柠檬精油的可接受度,为柑橘风味食品的品质优化提供了客观神经依据。在白酒品质评价中,Chen 等^[55]探究了不同质量等级的白酒对大脑神经活动的影响,发现不同醇厚感等级的白酒会引发顶枕叶区域差异化脑电响应,其中 δ 波和 θ 波功率与白酒醇厚感等级显著相关,最终实现了不同质量等级的白酒品质区分。此外,脑电图还可解析食品加工过程中品质变化引发的偏好差异。Yang 等^[56]研究发现,高温烹饪的牛肉在 α 波、 β 波和 γ 波上诱发更强脑电活动,表明高温烹饪更能提升卤牛肉的风味品质和消费者偏好,为肉类食品烹饪工艺优化提供了客观神经生理依据。以上研究表明,基于脑电特征频段的神经生理指标在不同食品体系的品质偏好解析中具有广泛适用性,能够为解析食品品质评价与消费者偏好预测提供客观、量化的科学依据。

3.2 食品安全与质量感知

食品的安全感知直接影响消费者的购买决策,变质、掺假和存在异味的食品会引发消费者的回避动机,其神经响应主要表现为大脑特定频段的功率变化及事件相关电位的异常,反映了对异常食品刺激的认知冲突与负性情绪。脑电图通过捕捉这些特异性神经响应实现食品安全的客观检测。在食品异味感知研究中,Wang 等^[57]探究了鲑鱼不同强度酸味异味对大脑感知的影响,结果发现不同强度的酸味异味会引发显著不同的脑电响应,其中 δ 波和 α 波活动尤为突出,在刺激后 0~200, 950~1 500 ms 两个时段可有效区分异味强度,且前额叶皮层和右颞叶激活明显,中等强度酸味异味诱发的神经响应最强。在食品变质检测研究中,Li 等^[58]发现,变质杏仁与未变质杏仁的嗅觉刺激会引发不同脑电响应,其中变质杏仁会使左

颞叶 δ 波功率和顶枕叶 β 波功率显著增强,且 β 波频率及 FP2、FZ、C3 电极是关键鉴别特征。以上研究表明,脑电图相比传统理化检测,具有快速、无创和贴合消费者感知的优势。

综上,脑电图通过捕捉消费者在感知食品品质及安全性时产生的特异性脑电响应,精准区分不同品质等级、加工方式及安全状态食品引发的神经活动,为食品品质分级及变质检测提供了可靠的神经生理支撑。

4 脑电图在食品营养与消费行为中的应用

4.1 食品营养与功能评价

随着健康意识的增强,消费者对低钠、低糖、低脂等健康食品的需求日益增加,食品的营养与健康属性正逐渐成为影响消费者购买决策的重要因素。脑电图可揭示消费者对食品健康营养属性的内隐认知与偏好倾向,为健康食品的研发与评价提供客观依据。

消费者对健康食品的偏好存在明显的神经响应特征,其中,前额叶 α 波不对称性是评估接近或回避动机的重要指标。神经生理学研究^[59]表明,左侧前额叶皮层的相对激活增强反映了趋近系统和奖赏环路的活跃,与积极情绪、渴望和消费意愿相关联。当消费者感知到低热量、高营养的健康食物线索时,会激活以伏隔核、腹侧被盖区为核心的奖赏系统并通过多巴胺通路投射至前额叶皮层,在脑电上即表现为左侧前额叶 α 波功率的下降。而高热量、高糖、高脂的非健康食品则会引发 θ 波功率降低,反映大脑认知控制网络的冲突控制与内隐回避。Liu 等^[60]的研究为这一机制提供了证据,他们发现高热量食物线索会损害受试者的冲突控制能力,表现为反应时间延长和准确率下降,同时伴随 N2 波幅和 θ 波功率显著降低。N2 是事件相关电位中反映早期注意分配与冲突监测的负向波,其波幅下降表明大脑对高热量食物线索的注意捕获占用了有限的认知资源,进而削弱了对后续无关任务中冲突的监测能力^[61]。而 θ 波功率反映冲突监测与认知控制强度的神经生理指标,其功率降低表明高热量食物线索诱发的奖赏系统过度激活占用了冲突监测网络的神经资源,进而削弱了个体对任务冲突的控制能力^[62]。综上,前额叶 α 波不对称性、颞叶 θ 波功率与 N2 波幅,共同构成了从奖赏期待、认知控制到后续行为决策的神经电生理链条,为客观解析消费者对食品营养属性的内隐认知与偏好提供了多维度的量化依据。

不同个体对健康食品的偏好与消费者的个人特性与饮食态度等因素密切相关。在个人特性方面,食物恐新症指对尝试新食物感到犹豫的一种行为^[63],是推行植物基饮食的重要障碍。研究^[64]发现,重度食物恐新症个体

在品尝植物基食品时表现出更高的认知负荷和更低的接近动机,其前额叶脑电活动显著区别于轻度恐新症个体,且这种内隐神经响应无法通过自我报告问卷描述出来,揭示了个体对新奇食品的回避倾向及其神经基础,为健康食品在不同群体的推广提供了参考。在饮食态度方面,消费者的限制性饮食倾向、健康意识及营养知识水平等因素会显著影响其对健康食品的神经加工模式。Saffiera等^[65]发现,具有健康饮食习惯的个体在观看健康食品图片时的顶叶和枕叶区域的P300波幅显著高于不健康饮食者,表明饮食态度通过调节注意加工阶段的神经活动影响食物偏好,为健康饮食宣传提供了神经生理依据。

食品除了提供营养外,还能调节人体生理活动。功能性食品中活性成分对人体生理功能的调节与大脑神经系统的功能变化密切相关,主要包括认知功能改善、情绪调节与睡眠质量提升等多个维度,脑电图在功能性食品

的功效验证中能够发挥重要作用。认知功能改善是功能性食品的重要研发方向,在脑电频域特征中, β 波功率升高是大脑皮层觉醒度提升、认知加工活跃的核心指标^[66], θ 波与 γ 波的协同变化则与记忆力的编码和提取密切相关^[67],脑电图可通过这些指标的变化,直接验证功能性食品对认知功能的改善效应。情绪调节与睡眠质量提升也是功能性食品的重要研发方向,其作用机制多与大脑内抑制性神经递质 γ -氨基丁酸(GABA)的释放调控相关^[68]。脑电图可通过动态监测相关指标实现对功能性食品情绪与睡眠调节功效的精准验证,并揭示其作用的神经通路。近年来,肠道微生物与大脑之间的双向通信即肠脑轴被证实是膳食成分影响情绪与压力的关键通路^[69],脑电图可通过捕捉大脑神经电活动的变化,间接验证功能性食品通过肠脑轴调节情绪的机制。表2汇总了脑电图在功能性食品功效评价中的应用。

表2 脑电图在功能性食品功效评价中的应用

Table 2 Application of electroencephalography in efficacy evaluation of functional foods

功能方向	研究案例/食品成分	关键脑电指标	神经生理意义/功效验证结论
认知功能改善	生育三烯酚 ^[70]	前额叶区域 α 波和低 β 波功率整体呈降低趋势,尤其是静息态AF4通道	脑电活动降低被认为是神经效率的提升,表明大脑能以更低能耗实现更好认知表现
	黑胡萝卜花青素提取物 ^[71]	α 波、 β 波、 γ 波的脑电功能连接性显著增强;熵值与分形维度等非线性指标变化	表明功能性成分对神经损伤有改善效应,增强大脑不同区域间的协同工作能力
情绪与压力调节	米糠代糖饼干 ^[72]	多个脑区的 α 波及慢 α 波功率显著增加; θ 波在部分脑区呈增加趋势,源定位显示激活额上回	α 波功率增加与放松状态密切相关,表明膳食纤维可能通过调节大脑电活动影响情绪
	功能性可可软糖 ^[73] (含多酚、黄酮类)	全脑多数区域 α 波功率显著升高;所有记录脑区 θ 波功率显著降低	这种 α 波升高、 θ 波降低的模式符合放松且保持警觉的心理状态,验证了缓解压力的功效
	益生菌 ^[74]	影响与深度放松及早期睡眠相关的 θ 波功率;维持慢波睡眠比例	从客观电生理层面证实了益生菌对情绪与睡眠的双重调节作用
睡眠质量提升	莴苣提取物 ^[75]	显著增强 δ 波活动;增加非快速眼动睡眠时间	证实其助眠作用与GABA能通路的激活密切相关
	乳酸菌发酵枣籽水提取物 ^[76]	非快速眼动睡眠期间的 δ 波时间明显增加	证实其通过GABA _A 受体机制发挥助眠作用

4.2 消费行为与包装设计

食品的消费趋势不仅受营养、风味等自身属性影响,还与包装等其他属性密切相关^[77]。脑电图可实时记录消费者对食品包装的脑电活动变化,清晰揭示不同包装引发消费者偏好的神经加工规律,为食品包装设计提供可靠的神经学参考。

食品包装的视觉元素、材质与标识等设计要素,会通过特定的神经加工过程影响消费者偏好与决策。Seo等^[78]系统比较了6种包装设计对消费者神经响应与偏好的影响发现,摄影图像可引发更高的前额叶 α 波不对称性和 θ 波活动,同时P300成分振幅显著增强,反映出消费者对该类包装的认知加工更顺畅、情绪参与度更高,为包装

视觉元素的优化设计提供了直接的神经生理依据。在包装材质的研究中,Peng等^[79]发现,光滑包装与健康食品的组合会引发消费者更正向的P300成分振幅和更负向的晚期负成分振幅,且消费者决策反应时更短。这表明消费者会将光滑包装与食品健康性关联,为健康食品的包装材质选择提供了重要的神经生理支撑。在包装标识的研究中,Berčik等^[80]发现包装正面的Nutri-Score营养标签比NutriInform标签更易被消费者理解,能更有效引导消费者选择营养更均衡的食品。这是由于添加Nutri-Score标签后,消费者对营养更优产品的情绪参与度显著提升,视觉注意力会向标签聚焦,为食品营养标签的优化设计提供了依据。以上研究表明了脑电图有效捕捉消费者在食品

包装感知过程中的神经活动变化,为食品包装设计优化提供了神经生理依据。

5 展望

脑电图技术开始逐步渗透到食品科学的多个研究领域,为人们理解复杂的食物与人交互提供了全新的客观视角。综述系统回顾了脑电图技术在食品风味识别、食品品质评价、食品营养与消费等方面的应用进展,脑电图能够识别不同感官的神经响应,实现了食品风味的识别以及食品品质与安全的鉴定,并为功能性食品的功效验证与食品包装设计等提供客观神经依据。

然而,脑电图在空间分辨率、抗干扰能力、个体差异和应用场景等方面仍然存在局限性,这是当前脑电图应用研究中必须面对的问题。具体而言,在空间分辨率上,脑电图难以精准定位深层脑结构,导致对食品感知神经源的精确定位能力不足;在抗干扰能力方面,咀嚼和吞咽肌电等生理伪迹会污染脑电信号,且真实进食环境中的电磁干扰难以完全屏蔽,严重制约了生态效度;在个体差异方面,不同饮食习惯和文化背景的消费者在同一食品的神经过度反应差异显著;在应用场景上,实验室内的简化刺激与真实饮食过程的感知体验存在较大差距,限制了研究结论向实际消费场景的迁移能力。

因此,为克服上述困难,未来的研究需要从技术融合、算法优化与试验模式创新 3 个方向深入突破。① 将脑电图与 fMRI 或 fNIRS 进行多模态融合,利用 fMRI 的高空间分辨率和借助 fNIRS 对前额叶皮层血氧变化的敏感性弥补脑电图的空间定位缺陷,从而构建食品感知过程中时间与空间的双重神经特征。② 引入机器学习与深度学习算法,通过卷积神经网络(CNN)或图卷积网络(GCN)对脑电信号进行端到端的特征学习与噪声剔除,开发跨个体和跨情境的脑电特征模型,逐步解决个体差异对模型泛化能力的制约。③ 通过设计更贴近真实饮食行为的试验,如采用可穿戴干电极脑电图设备在自然进食环境中采集数据,并结合眼动追踪、面部表情分析与自主报告等多维行为指标,构建从神经、行为和主观三位一体的食品偏好预测框架。

展望未来,脑电图技术将不再仅仅是实验室中的神经探测工具,而将成为连接食品风味化学与人类感知体验的核心桥梁。通过上述技术融合与方法创新,脑电图有望实现对食品风味的神经编码和个性化营养设计的神经反馈验证,以及食品开发中的神经感官评价,最终为食品科学领域提供从分子到大脑、从理化属性到主观体验的完整神经科学支撑。

参考文献

- [1] XU K L, GUO Y F, WANG Y D, et al. Applications of biosensing in assessing food flavor: advancements, challenges, and prospects[J]. *Food Chemistry*, 2025, 491: 145313.
- [2] CHEN B R, LIN X Y, LIANG Z T, et al. Advances in food flavor analysis and sensory evaluation techniques and applications: traditional vs emerging[J]. *Food Chemistry*, 2025, 494: 146235.
- [3] WANG J T, WANG S, LI D L, et al. From machine learning to neuroimaging: a comprehensive review of flavor prediction and recognition techniques[J]. *Food Research International*, 2026, 223: 117933.
- [4] WANG Z, CHANG X Y, ZHANG C Y, et al. Beyond aromas: exploring the development and potential applications of electroencephalography in olfactory research-from general scents to food flavor science frontiers[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2025, 16(1): 147-170.
- [5] HONG S J, YOON S, BAN Y, et al. Investigation of non-volatile and volatile compound profiles in arabica coffee extracts and neurophysiological effects of different chemosensory stimulation according to sex: insights from electronic sensors, EEG, and sLORETA approaches[J]. *Food Chemistry*, 2025, 467: 142211.
- [6] ROBERTSON J, FERREIRA C, REYNEKE M, et al. I think I like this: assessing conscious versus subconscious wine taste responses using neuroscientific techniques[J]. *International Journal of Wine Business Research*, 2022, 34(1): 37-51.
- [7] 杨伯岩, 申丽娟, 杨敬民. 基于生理信号和多元统计的白芽奇兰茶口感评价[J]. *食品与机械*, 2023, 39(7): 20-28, 171. YANG B K, SHEN L J, YANG J M. Taste evaluation of Chinese oolong tea "Baiyaqilan" based on physiological signals and multivariate statistics[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(7): 20-28, 171.
- [8] KHOSLA A, KHANDNOR P, CHAND T. A comparative analysis of signal processing and classification methods for different applications based on EEG signals[J]. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 2020, 40(2): 649-690.
- [9] PHILLIPS A R, VAKILNA Y S, EPMOGHADDAM D, et al. Inferring neural sources from electroencephalography: foundations and frontiers[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2026, 23(1): 011002.
- [10] SUN Y K, CHEN X G, LIU B C, et al. Signal acquisition of brain-computer interfaces: a medical-engineering crossover perspective review[J]. *Fundamental Research*, 2025, 5(1): 3-16.
- [11] AGOUNAD S, TARAHI O, MOUFASSIH M, et al. Advanced signal processing and machine/deep learning approaches on a preprocessing block for EEG artifact removal: a comprehensive review[J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2025, 44(5): 3 112-3 160.
- [12] MDLULI B, KHUMALO P, MASWANGANYI R C. Signal preprocessing, decomposition and feature extraction methods in EEG-based BCIs[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(22): 12075.

- [13] HILL A T, ENTICOTT P G, FITZGERALD P B, et al. RELAX-jr: an automated pre - processing pipeline for developmental EEG recordings[J]. *Human Brain Mapping*, 2024, 45(14): e70034.
- [14] KERSHNER I A, SINKIN M V, OBUKHOV Y V. Detection of epileptic seizures in EEG signals during long-term monitoring of patients after traumatic brain injury[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1 368(5): 052007.
- [15] BAYRAM A K, SPENCER D D, ALKAWADRI R. Tongue as a wire? glossokinetic artifact and insights from intracranial EEG[J]. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 2022, 39(6): 481-485.
- [16] SAITO N, OGAWA T, SHIRAISHI N, et al. Difference in the electromyographic behavior of the masticatory and swallowing muscles during cued versus spontaneous swallowing[J]. *Dysphagia*, 2024, 39(3): 398-406.
- [17] DHOLE P V, CHAUDHARY D G, DHANGAR V D, et al. A review of EEG artifact removal techniques for brain-computer interface[J]. *SN Computer Science*, 2025, 6(8): 1 026.
- [18] BAILEY N W, HILL A T, GODFREY K, et al. EEG is better when cleaning effectively targets artifacts[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2025, 180: 2111378.
- [19] 程焕, 赵前, 刘东红, 等. 基于脑电图(EEG)技术探究大脑对柑橘风味的感知反应[J]. *中国食品学报*, 2025, 25(3): 1-11.
CHENG H, ZHAO Q, LIU D H, et al. Exploring the brain's perceptual responses to citrus flavors using electroencephalography (EEG) [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2025, 25(3): 1-11.
- [20] SCHWAB D, GIRALDO M, SPIEGL B, et al. Disgust evoked by strong wormwood bitterness influences the processing of visual food cues in women: an ERP study[J]. *Appetite*, 2017, 108: 51-56.
- [21] IANNILLI E, SOROKOWSKA A, ZHIGANG Z, et al. Source localization of event-related brain activity elicited by food and nonfood odors[J]. *Neuroscience*, 2015, 289: 99-105.
- [22] 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.
- [23] LIM M, PARK S, LEE Y, et al. Brain responses and connectivity to visual meal compositions: an EEG investigation into food liking[J]. *Food Quality and Preference*, 2023, 112: 105029.
- [24] STOCKE S, SAMUELSEN C L. Multisensory integration underlies the distinct representation of odor-taste mixtures in the gustatory cortex of behaving rats[J]. *The Journal of Neuroscience*, 2024, 44(20): e0071242024.
- [25] CANNA A, CANTONE E, ROEFS A, et al. Functional MRI activation of the nucleus tractus solitarius after taste stimuli at ultra-high field: a proof-of-concept single-subject study[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10: 1173316.
- [26] PEREIRA D R, PEREIRA H R, SILVA M L, et al. Impact of five basic tastes perception on neurophysiological response: results from brain activity[J]. *Food Quality and Preference*, 2025, 131: 105572.
- [27] XU W X, ZHU Y Q, ZHOU Y S, et al. Exploring the differences between five basic tastes and tasteless stimuli on brain responses in young adult males utilizing scalp electroencephalography[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2026, 112: 108883.
- [28] WANG X L, WANG G N, LIU D H. EEG-based analysis of neural responses to sweeteners: effects of type and concentration[J]. *Foods*, 2025, 14(14): 2 460.
- [29] WU B, BLANK I, ZHANG Y, et al. Investigating the influence of different umami tastants on brain perception via scalp electroencephalogram[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(36): 11 344-11 352.
- [30] 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*, 2025, 462: 140969.
- [31] ROMEO-ARROYO E, SORIA J, MORA M, et al. Exploratory research on sweetness perception: decision trees to study electroencephalographic data and its relationship with the explicit response to sweet odor, taste, and flavor[J]. *Sensors*, 2022, 22(18): 6 787.
- [32] YANG T Y, XIAO Y Y, LI Z Y, et al. An EEG-based multi-scale hybrid attention and squeeze network for objective taste assessment[J]. *Future Foods*, 2026, 13: 100873.
- [33] WANG H, MEN H, SHI Y. Adaptive identification of food sweetness concentration: an electroencephalogram feature classification network under taste stimulation[J]. *Foods*, 2025, 14(22): 3 855.
- [34] LI Y Y, TAN Z, WANG J, et al. Responses of chemosensory perception to stimulation of the human brain[J]. *Annals of Neurology*, 2023, 93(1): 175-183.
- [35] QIU F H, SHAO J H, WEI Y X, et al. Decoding consumer food preferences via electroencephalography (EEG): neurophysiological mechanisms of sensory perception and therapeutic potential[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2026, 167: 105434.
- [36] GUO Y C, XIA X X, SHI Y, et al. Olfactory EEG induced by odor: used for food identification and pleasure analysis[J]. *Food Chemistry*, 2024, 455: 139816.
- [37] CHEN L, YANG T Y, LIU R, et al. Sensory and neural responses to flavor compound 3-Methylbutanal in dry fermented sausages: enhancing perceived overall aroma[J]. *Food Chemistry: X*, 2025, 29: 102769.
- [38] KE Q F, ZHANG J Z, HUANG T C, et al. Unveiling the neurocognitive impact of food aroma molecules on

- pleasantness perception: insights from EEG and key brain LFT activation[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2025, 40(1): 30-40.
- [39] WANG Z, HUANG M Q, CHANG X Y, et al. Study of the interaction mechanism of aroma components in Baijiu and associated brain response microstates[J]. *Food Chemistry*, 2025, 494: 146149.
- [40] SHEN C, QI W X, ZHANG Y, et al. Decoding aroma perception of grilled lamb skewers: an EEG-MambaFusionNet framework integrating TDS and GC-IMS[J]. *Food Chemistry*, 2026, 502: 147676.
- [41] NEITZ M, NEITZ J. Intermixing the OPN1LW and OPN1MW genes disrupts the exonic splicing code causing an array of vision disorders[J]. *Genes*, 2021, 12(8): 1 180.
- [42] UCUK C, PERCIN N S, CEVIK C, et al. Can the image of food mislead the brain? Neurogastronomy research with EEG and emotion recognition[J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2025, 39: 101097.
- [43] PENG Y B, SUN Y, WAN X A. Influence of the crossmodal congruency between color and flavor on product evaluations: evidence from behavioral and oscillatory brain responses[J]. *Food Quality and Preference*, 2022, 97: 104480.
- [44] SHEPHERD G M. Smell images and the flavour system in the human brain[J]. *Nature*, 2006, 444(7 117): 316-321.
- [45] NIE T J, GAO Y, GAO Y, et al. Potential effect of key aroma-active compounds identified from fried white mushrooms (*Agaricus bisporus* L.) on saltiness perception[J]. *Food Chemistry*, 2025, 490: 145155.
- [46] WEI F, WEN H T, SUN F W, et al. The mechanism of β -ionone enhancing the sweet taste of phloridzin[J]. *Food Chemistry*, 2025, 495: 146447.
- [47] MAEDA S, YOSHIMURA H. Enhancement of electroencephalogram activity in the theta-band range during unmatched olfactory-taste stimulation[J]. *The Journal of Physiological Sciences*, 2019, 69(4): 613-621.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] DE WIJK R A, KANEKO D, DIJKSTERHUIS G B, et al. A preliminary investigation on the effect of immersive consumption contexts on food-evoked emotions using facial expressions and subjective ratings[J]. *Food Quality and Preference*, 2022, 99: 104572.
- [51] ATAIE A, AMINI A, GHAZIZADEH A. Gustatory cortex is involved in evidence accumulation during food choice[J]. *Eneuro*, 2022, 9(3): ENEURO.0006-22.2022.
- [52] RAMIREZ M, KAHEH S, KHALIL M A, et al. Application of convolutional neural network for classification of consumer preference from hybrid EEG and FNIRS signals[C]// 2022 IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC). Las Vegas: IEEE, 2022: 1 024-1 028.
- [53] WALSH A M, DUNCAN S E, BELL M A, et al. Integrating implicit and explicit emotional assessment of food quality and safety concerns[J]. *Food Quality and Preference*, 2017, 56: 212-224.
- [54] ZHAO Q, YANG P L, WANG X L, et al. Unveiling brain response mechanisms of citrus flavor perception: an EEG-based study on sensory and cognitive responses[J]. *Food Research International*, 2025, 206: 116096.
- [55] CHEN P 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: 145864.
- [56] YANG T Y, JIANG W, LUO C C, et al. Multidimensional analysis of sensory perception and neurophysiological responses to marinated beef cooked by diverse methods[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2025, 103: 104058.
- [57] WANG J X, KE Z G, CHENG W W, et al. Effects of different sour off-flavor in jumbo squid (*Dosidicus gigas*) on brain perceptions via scalp electroencephalogram and the underlying mechanisms[J]. *Food Research International*, 2025, 221: 117575.
- [58] LI J X, HAN J H, CHEN S F, et al. Advancing olfactory perception research with EEG analysis: a dynamic approach of understanding brain responses to almond deterioration[J]. *Food Chemistry*, 2025, 497: 147037.
- [59] KIRSTEN H, SEIB-PFEIFER L E, GIBBONS H. Effects of the calorie content of visual food stimuli and simulated situations on event-related frontal alpha asymmetry and event-related potentials in the context of food choices[J]. *Appetite*, 2022, 169: 105805.
- [60] LIU Y, ZHAO J, ZHOU Y Z, et al. High-calorie food-cues impair conflict control: EEG evidence from a food-related stroop task[J]. *Nutrients*, 2022, 14(21): 4 593.
- [61] CARBINE K A, RODEBACK R, MODERSITZKI E, et al. The utility of event-related potentials (ERPs) in understanding food-related cognition: a systematic review and recommendations[J]. *Appetite*, 2018, 128: 58-78.
- [62] VAN DE VIJVER I, VAN SCHIE H T, VELING H, et al. Go/no-go training affects frontal midline theta and mu oscillations to passively observed food stimuli[J]. *Neuropsychologia*, 2018, 119: 280-291.
- [63] STULDREHER I V, KANEKO D, HIRAGUCHI H, et al. EEG measures of attention toward food-related stimuli vary with

- food neophobia[J]. *Food Quality and Preference*, 2023, 106: 104805.
- [64] INGUSCIO B M S, CARCATERRA G, CHERUBINO P, et al. Neuroscience meets food choice: implicit and explicit consumer responses to plant-based vs animal-based foods[J]. *Current Research in Food Science*, 2026, 12: 101288.
- [65] SAFFIERA C A, HASSAN R, ISMAIL A R. P300 ERP component on eating habits profiling using dynamic evolving spiking neural network (deSNN)[J]. *International Journal on Perceptive and Cognitive Computing*, 2020, 6(2): 29-35.
- [66] CHOWDHURY S, MUNIS ALANAZI A, TALAL ATTAR E. Caffeine on the mind: EEG and cardiovascular signatures of cortical arousal revealed by wearable sensors and machine learning: a pilot study on a male group[J]. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 2025, 19: 1611293.
- [67] SAINT AMOUR DI CHANAZ L, PÉREZ-BELLIDO A, WU X B, et al. Gamma amplitude is coupled to opposed hippocampal theta-phase states during the encoding and retrieval of episodic memories in humans[J]. *Current Biology*, 2023, 33(9): 1 836-1 843.
- [68] USHIDEE-RADZI M A, YEE C S, RAJA-RAZALI R B, et al. Advances in GABA-enriched yogurt and frozen yogurt: microbial biosynthesis, functional properties, and health perspectives: a comprehensive review[J]. *Foods*, 2025, 14(24): 4 254.
- [69] NIKDASTI A, KHODADADI E S, FERDOSI F, et al. Nutritional strategies in major depression disorder: from ketogenic diet to modulation of the microbiota-gut-brain axis [J]. *Molecular Neurobiology*, 2025, 62(3): 2 973-2 994.
- [70] PAR R Y X, TEO C W L, TAN J J K, et al. An open-label, single-arm pilot study of tocotrienols supplementation on improving memory and attention in healthy young adults[J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 92: 105055.
- [71] MUDUROGLU-KIRMIZIBEKMEZ A, ONDER A, OZDEMIR M Y, et al. Feeding the mind: preliminary insights into the effects of anthocyanin-rich extract from black carrots on brain activity and gut microbiota in patients with cognitive impairments[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 45450.
- [72] PARK H, BAN Y, HONG S J, et al. Elucidation of chemosensory and neurophysiological approaches of rice (*Oryza sativa* L.) bran foods with sugar substitutes through permutation and machine learning-assisted screening methods [J]. *Food Bioscience*, 2025, 71: 107090.
- [73] SANGPIMPA W, SRICHAN P, INCHAY C, et al. Utilization of cocoa powder in the development of chewy candy as a functional confectionery and its evaluation on stress-reducing activity using electroencephalography[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2025, 148: 108268.
- [74] HUTCHINSON A N, ANTONSSON A E, FORSGÅRD R A, et al. The effects of oral probiotic intervention on brain structure and function in human adults: a systematic review[J]. *Npj Biofilms and Microbiomes*, 2026, 12(1): 6.
- [75] AHN Y, LEE H H, KIM B H, et al. Heukharang lettuce (*Lactuca sativa* L.) leaf extract displays sleep-promoting effects through GABAA receptor[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2023, 314: 116602.
- [76] BAE G Y, AHN Y, HONG K B, et al. Sleep-enhancing effect of water extract from jujube (*Zizyphus jujuba* Mill.) seeds fermented by *Lactobacillus brevis* L32[J]. *Foods*, 2023, 12 (15): 2 864.
- [77] THEBEN A, GERARDS M, FOLKVORD F. The effect of packaging color and health claims on product attitude and buying intention[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(6): 1 991.
- [78] SEO Y, NAKAO T, NAKADA Y. An EEG study on visual imagery and consumer acceptance of uncycled food packaging [J]. *The Retail and Marketing Review*, 2025, 21(2): 69-86.
- [79] PENG M J, LIANG F N, YU L D, et al. Smooth or rough? The impact of food packaging design on product healthiness perception[J]. *Food Quality and Preference*, 2023, 111: 104970.
- [80] BERČÍK J, GÁLOVÁ J, RUSKOVÁ A, et al. The influence of front-of-pack labelling on consumer decision-making: a comprehensive study using electroencephalography and FaceReader[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2024, 75(8): 911-928.