

科技新闻
·深度报道·

为美食“发电”：生理电信号如何
重塑食品感官与营养评价

文/王凡¹,程焕²,陈勇³,陆柏益⁴,徐恩波⁵

在传统食品研发与品质评价中,质构、风味、色泽及消化吸收效能的综合评价,高度依赖感官问卷和仪器测试。然而,主观问卷易受认知偏差、情绪及语言能力限制;而仪器无法复刻口腔加工环境,难以解构口腔生理与感官心理的动态反馈。因此,如何实现人体对食品感官感知反馈的精准、客观、连续动态捕捉,是现代食品品质评价领域的核心难题。

近年来,无创生物电传感技术提供了新路径。通过采集与分析人体在观察、品尝、咀嚼、吞咽及消化时产生的生理电信号,直接读取进食过程中的真实电生理反馈。脑电图(EEG)、肌电图(EMG)、胃电图(EGG)以及心电图(ECG)等技术,以高精度将人体对色、香、味、形的隐性认知与

代谢活动转化为可视化、可量化数据,形成一套覆盖风味辨析、质构感知和营养代谢的全维度客观评价体系。

1 色、香、味的“头脑风暴”：脑电信号客观判断食品感官

当对食物进行观察、嗅闻或品尝时,神经信号会在毫秒级传至大脑皮层。传统问卷需受试者思考后作答,难免混入认知加工与主观修饰。脑电图的介入,相当于在大脑与食物刺激之间搭建实时监测通道,可有效绕开主观认知干扰,精准捕捉瞬态神经活动响应(图1)。

在食品滋味评价中,脑电图已广泛用于评估喜爱度、购买意愿及细微风味辨别能力。例如,上海交通大学刘源团队研究发现,普通人难以仅凭主观品尝区分味精、鲜味肽和肌苷酸等鲜味物质,但脑电图显示这三者诱发的 α 波响应存在显著差异,且额顶叶和枕叶活动明显增强,表明大脑在早期味觉感知阶

段即能对这些鲜味特征进行分类识别,而非后期认知加工。在食品色泽评价上,脑电图同样显现强大洞察力。新西兰奥塔哥大学 Mei Peng 等人发现,受试者观看腐坏食品视频时,其大脑右半球的激活程度相较于观看正常食品时显著增加,这种神经反应远早于皱眉或按下“不喜欢”按钮。此外,在食品风味评估领域,脑电图潜力正被深挖,有望成为有力工具。北京工商大学孙宝国院士团队及南方科技大学等指出,利用事件相关电位和振荡活动特征,可精准测定食品香气的阈值和神经表征,并评估香气对健康、情绪和决策过程的影响。这种无意识测量方式,使企业能在研发阶段就筛选出契合消费者神经愉悦度的香精配方,从而开发出既健康又具吸引力的产品。

2 咀嚼的“运动节奏”：肌电图解码食品质构

咀嚼时,下颌的张合、舌头的翻转与吞咽,都依赖于面部和颈部肌肉的协同收缩。每次肌肉收

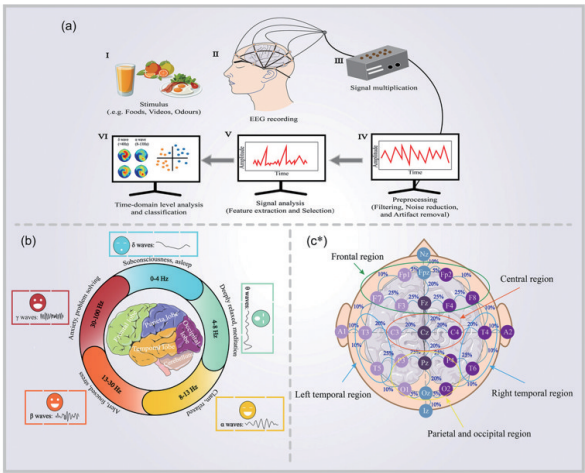


图1 用脑电图对食物刺激进行感官评价
(图片来源:《Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety》)

- 1. 华南理工大学食品科学与工程学院,副教授
- 2. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院,副研究员
- 3. 浙江工商大学食品与生物工程学院,副研究员
- 4. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院,教授
- 5. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院,研究员,《科技导报》青年编委

缩前,生物电信号沿肌纤维传导,被捕获为肌电图信号(图2)。几十年来,食品科研人员一直尝试将面部肌电图作为评估食品质构特征的工具。俄亥俄东北医科大学 Vinyard 教授、西班牙 IATA-CSIC 研究员 Fiszman 等人研究表明,肌电图已成为研究食物质构与口腔加工的重要工具。肌电图不仅能测量肌肉活跃的时刻和持续时间,更能反映不同质构食物对肌肉募集水平的影响。例如,在咀嚼贝果面包、牛排等较硬或纤维感较强的食物时,肌电信号的振幅和积分值会显著升高。此外,肌电图可作为一种生物学质构测量,可反馈实际咀嚼力度调整,弥补物理仪器单纯测量物理压力的不足。当然,受肌肉长度、收缩速度等制约,肌电信号仅代表运动单位相对激活水平与时间节律,非绝对收缩力。然而,它在反映咀嚼循环频率、吞咽时间及个体差异上具有不可替代的作用。如今,通过提取咀嚼周期肌电信号特征,可优化质构设计,开发适合老年人及吞咽困难患者的专属产品。

3 胃部的“静默监听”:胃电信号监测食品摄入与消化节律

食物进入消化道后,评价重点从感官体验转向营养摄入与消

化代谢。在此阶段,精准监测个体进食发生、摄入量和胃肠蠕动规律,是应对饮食健康问题的关键。近年来,穿戴式胃电传感与机器学习融合为此提供了新策略。胃电图通过腹部电极非侵入记录

胃平滑肌慢波电活动(图3)。不同种类、体积和温度的食物入胃后,会打破基础电节律,引发胃动过速或胃动过缓等特征变化。通过持续监测胃电信号,可推断胃内排空速度并评估个体对特定营养成分的消化耐受度。此外,胃电信号与人工智能融合正重塑代谢疾病管理方式。例如,约翰斯·霍普金斯大学 Heremans 等人将胃电图特征与机器学习结合,实现进食事件的自动化高精度检测。这一突破在肥胖症、糖尿病的数字疗法中展现出巨大临床价值:系统可实时监测摄入行为,并在检测到过度进食时通过神经调节发出干预指令。总之,胃部不再是被动容器。胃电图的静默监听不仅能窥见胃腔对食物的机械反应,更能揭示化学成分对胃肠动力的刺激模式,为未来精准营养干预与个性化饮食设计打下坚实基础数据基础。

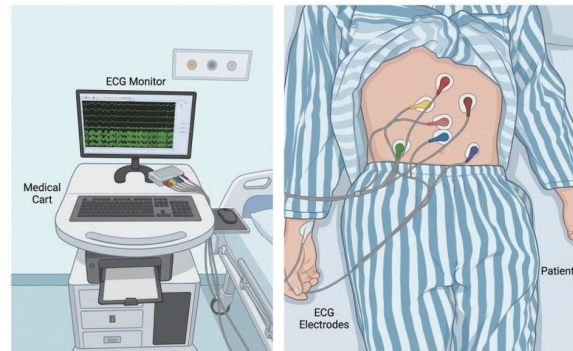


图3 胃电测试示意

(图片来源:作者团队)

日常饮食摄入可引起心血管系统的显著急性反应。健康男性摄入标准化测试餐后,心率增加约10次/min,持续至少3 h,收缩压一过性升高;且T波形态大小剧变,胸前导联T波即刻变得扁平、双相或倒置,需4~5 h恢复基线(图4)。这一发现提醒研究者须将食物摄入视为引发心脏交感兴奋和心电图变异的独立因素。

此外,心电图作为心脏电活动的黄金标准,在功能性食品功效评价中发挥作用重要。日本静冈大学 Ryota Akai 等人的研究中指出,地中海饮食、复合维生素及富含 γ -氨基丁酸等功能性食品能有效提升心率变异性,意味着它们具有舒缓神经、抗压放松的潜力。然而,心率变异性评估自主神经活性时极易受呼吸伪影干扰。为此,Akai 等人进一步引入心电衍生呼吸算法,可从单一心电信号剥离并重构呼吸节律。这一突破意味着,科研人员使用简便单导联心电贴,即可在不干扰进食体验下精准滤除呼吸干扰,获得高保真的自主神经活动数据。这为科学评估各种促眠、解压、提神类功能性食品的神经生理学效果,提供了一个精巧的工具。

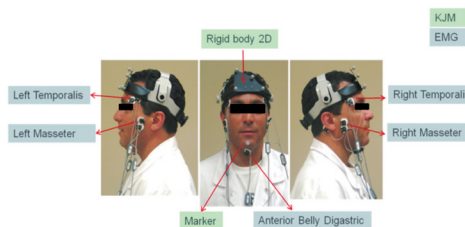


图2 用肌电图对食物质构进行评价示意

(图片来源:《Physiology & Behavior》)

4 营养的“心动瞬间”:心电信号反馈食品功能性

进食的意义远不止于果腹,更潜移默化地影响全身生理机能。瑞典乌普萨拉大学医院 Widerlöv 等人研究发现,

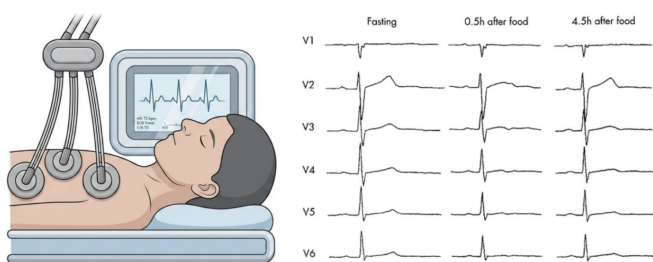


图4 心电测试示意图及受试者在进食后0.5小时和4.5小时时的胸前导联心电图

(图片来源:《European Journal of Clinical Pharmacology》)

5 基于生理电信号的评价工具助力未来食品研制

随着柔性电子皮肤、可穿戴传感器和深度学习算法的迭代,生理电信号在食品科学的应用正从单一走向多模态融合与自主高效化。未来,传统感官评价小组或不再是唯一标准。消费者佩戴轻便智能装置试吃时,大脑对风味的愉悦度、口腔对质地的力学反馈、心脏自主神经对功能成分的代谢反应、胃肠对营养素的排空节律,均将转化为高维客观数据实时同步云端。研发人员借此实现食品深度洞察。这一范式大

幅缩短开发周期、降低试错成本,有望在提升膳食健康与生命质量中发挥无可替代作用。

总体而言,脑电图解码了风味的神经中枢映射,肌电图刻画了质构的物理咀嚼动态,胃电图监测了营养的摄入与消化,而心电图评估了食物对生理节律的影响。生理电信号技术以人体为精密“传感器集群”,数字化改写感官与营养评价蓝图,不仅看清食物在口中消散的物理过程,更读懂食物与生命律动的生电对话。随着解码能力提升,未来每餐都将更精准、健康且富有情感共鸣。

利用物理特性实现存内计算

嵌入存储芯片的人工神经网络可实时、高精度重建人类大脑皮层

文/Xin Zheng¹, Ilia Valov^{1,2}

计算机预测物理过程,通常要先把物理规律写成数学方程,再通过数值近似计算一段时间内各变量的变化,并为不同特征赋予相应权重。计算模拟虽然能够逼真再现某种现象,但完成全部

计算所需的时间,往往长于现象本身的演化时间。若要重建人类大脑皮层表面,这种延迟尤其棘手。大脑皮层是布满褶皱的最外层神经组织,电脉冲以数十毫秒的时间尺度传递信息。在6806期《Science》中,Cai等将一种动力学学习模型集成到存内计算系统中,让数据直接在存储硬件内部接受处理,而不再在存储器与独

立处理器之间往返传输。该平台能以毫秒级延迟完成高保真计算,为临床成像、机器人和具身智能中的实时计算开辟了道路。

神经动力系统是一种利用人工神经网络规定“运动规律”、模拟表面如何随时间连续演化的计算框架。与残差神经网络等离散时间模型不同,后者只能在一系列时间点逐步更新状态,难以再现物理系统平滑的时间演化;神经动力系统则嵌入一个固定的、预先训练好的人工神经网络——其权重值储存在存储单元中——并调整每轮迭代的时间步,也就是每一步计算向前推进的时间长度,从而描述连续的动力学过程。

在数学上,这种连续框架可使系统状态沿流形表面平滑演化。例如,属0表面是没有贯穿孔洞、能够连续变形成球面的表面;在演化过程中,它不会出现撕裂、合并等拓扑变化。保持这种拓扑一致性,既有助于使模拟动力学符合真实物理规律,也能提高计算的保真度和可预测性。

然而,在传统冯·诺依曼架构上运行神经动力系统,延迟往往达到数百毫秒。在这种架构中,存储单元与处理单元彼此分离,指令和数据必须通过数据总线来回传输。神经动力系统的自适应时间步迭代需要大量读取、临时存储、乘法和写入操作;嵌入式神经网络还要为不同数据赋予权重,而仅权重数据在存储单元与处理单元之间的传输,就约占总处理延迟的1/4。这些低效的数据搬运,使神经动力系统难以达到实时模拟所需的10 ms以下延迟。

1. 德国于利希,于利希研究中心 PGI-7 电子材料研究所

2. 保加利亚索菲亚,保加利亚科学院,电化学与能源系统研究所