

• 研究构想(Conceptual Framework) •

多感官线索助推健康价值决策的计算和神经机制*

黄建平^{1,2} 陈纯纯¹ 刘梦颖³

(¹ 苏州大学心理学系; ² 江苏学校美育研究中心, 苏州 215123)

(³ 清华大学心理与认知科学系, 北京 100084)

摘要 环境中的视觉、听觉、嗅觉等单感官信息会通过多感官加工形成多感官线索, 从而影响消费者对食物的享乐预期, 并指导其饮食决策。人们依赖多感官线索形成食物享乐价值的统一表征, 因此对多感官线索的操纵可成为助推健康饮食决策的有效手段。本研究运用脑电图(electroencephalography, EEG)和功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)技术并结合计算建模方法, 关注多感官线索组合如何增强食物的奖赏表征, 进而提高健康价值决策的流畅性。首先, 探讨多感官线索组合与健康饮食选择和体验的因果联系; 其次, 探究多感官组合影响饮食决策的计算机制与神经基础; 最后, 研究如何利用多感官组合促进个体对健康食物的价值学习。研究将揭示多感官组合如何为消费者提供超加性的健康饮食享乐体验, 为理解多感官组合的内在积极影响提供系统性的理论解释; 此外, 还将探讨多感官组合重复暴露与意象训练在提升消费者健康饮食乐趣以及建立长期健康饮食习惯的重要作用。

关键词 多感官线索, 助推, 健康饮食, 价值决策, 价值学习

分类号 B842

1 问题提出

随着经济的快速发展和生活方式的改变, 如何有效的助推个体的健康饮食行为成为公共卫生领域亟待解决的重大问题。根据世界卫生组织(WHO)的报告, 全球范围内的非传染性疾病(NCDs)如心血管疾病、肥胖和糖尿病等已成为主要的死亡原因, 导致每年超过 4100 万人死亡, 占全球死亡人数的 71%。在中国, 健康问题的现状同样严峻。根据国家卫生健康委员会统计, 慢性病已成为我国居民的主要死亡原因, 约占总死亡人数的 86%。这些疾病的高发与不健康的饮食习惯密切相关, 例如高糖、高盐和高脂肪的饮食模式。研究表明, 饮食结构的变化, 尤其是快餐文化的兴起, 导致了人们对高热量、低营养价值食物的依赖, 不仅增加了肥胖和相关疾病的风险

(Koehlmoos et al., 2011), 同时也给国家医疗体系和社会经济带来了沉重负担。一系列旨在促进健康饮食的公共卫生战略却收效甚微, 许多指标显示出人们的饮食习惯与健康标准之间存在显著差距。根据世界卫生组织的报告, 全球约有 2.5 亿人未能达到推荐的水果和蔬菜摄入量, 导致营养不良和慢性疾病的风险增加(Mann et al., 2015)。《中国居民膳食指南科学研究报告(2021)》的数据也表明, 仅不到 20% 的成人报告每日摄入 50 g 以上的全谷物, 蔬菜和水果摄入也远低于标准水平。

一般而言, 健康食物是指高营养、低脂肪、低热量和低糖的食物(Hagen, 2021)。相比于高热量、不健康食物, 健康食物往往与相对较次的口感、更低的美味体验与享乐价值挂钩, 即人们存在“健康=不美味”的直觉(Raghunathan et al., 2006; Zhang et al., 2023)。然而, 对食物享乐价值的评估是消费者饮食选择和短期消费的关键驱动因素, 人们通常更多地选择和食用自己喜欢的食物(McCrickerd & Forde, 2016)。因此, 改善健康食物的风味感知并促进与其相关的享乐价值预期对于

收稿日期: 2025-02-13

* 国家自然科学基金项目(32471128)。

通信作者: 黄建平, E-mail: jphuang@suda.edu.cn

改善后续的食物选择行为至关重要。食物风味是一种多感官体验,是由视觉、听觉、味觉、嗅觉以及体感信息整合而成的食物感知属性,而不是单个感官属性的集合(Spence, 2021)。我们在食物知觉和价值决策中不是对单通道信息(如,视觉、听觉)做出反应,而是对由多感觉信号合成的风味预期做出选择反应(Spence, 2015; Bschaden et al., 2020)。研究者已证明多感官信号能够增强饮食过程的情感体验,提高食物的吸引力和消费者的愉悦感(Kantono et al., 2016; Piqueras-Fiszman & Spence, 2014)。同时,这种愉悦可能会降低饱腹或进食限制等其他食物选择标准的相对重要性,从而改善随后的食物选择和饮食渴望,例如,选择更小的食物份量(Cornil & Chandon, 2016a),以及降低对放纵性食物的实际消费欲望(Biswas et al., 2019)。因此,感官线索对于唤起饮食享乐价值预期以及健康食物选择至关重要。

2 研究现状及发展动态分析

2.1 感官线索影响健康价值决策

感官线索是指通过视觉、听觉、嗅觉、触觉以及味觉等感官通道获得的信息输入,大脑通过来自外界的多种感官线索以此来形成对外部环境整体的感知、判断和行为选择(Ernst & Bühlhoff, 2004; Stein & Stanford, 2008)。也就是说,我们大脑将来自环境中多种感官线索进行多感官组合,从而形成统一的价值表征(Shadlen & Shohamy, 2016)。因此,在多感官的饮食环境中,进食也不仅仅与味觉相关,来自触觉、听觉、嗅觉、视觉和味觉的多种感官信息都会进行组合,从而形成整体的饮食体验(Schifferstein, 2021)。根据感官线索的作用阶段不同,可将其划分为内感官线索和外感官线索。其中,外感官线索是在我们进食前提供信息,因而在饮食决策过程中占主导地位(Spence, 2012)。近年来,单感官线索对饮食享乐价值的影响已得到充分考察。例如,美观的食物呈现(例如,食物各个元素在视觉上均匀分布的对称性与在整体比例和色彩上的平衡性)能够通过提高健康感知来增加人们对健康食物的购买意愿和偏好(刘梦颖等, 2024); 积极情绪的背景音乐可以显著提高人们对于巧克力的甜味感知(Xu et al., 2023); 令人愉悦的食物气味(如烘焙饼干的气味)可以刺激唾液分泌(Engelen et al., 2003),提

升人们对相应食物的食欲和预期消费(Ferriday & Brunstrom, 2011)。Kraak 等人(2017)指出,助推框架(Nudge Framework)能够通过微妙的环境调整或提示,引导人们做出更符合自身利益的决策。基于这一框架,近年来的研究已经开始关注感官信息对健康饮食选择行为的作用,并将感官线索操纵作为一种新兴的助推策略,来提升消费者对健康食物的反应积极性,进而促进长期的健康饮食习惯(Cornil & Chandon, 2016b; Liu et al., 2023; Marty et al., 2018; Petit et al., 2016)。

然而人类日常生活环境不仅限于单一感官,大脑会根据当前少量感官线索,搜索已存储的最佳情境模型来预测尚未出现的其他感官信息或构建整体环境意义(Hohwy, 2007)。在这一基础上衍生的预测编码理论(Predictive Coding Theory, PCT)被认为是解释复杂多感官环境中的大脑认知处理过程的有效框架(Piqueras-Fiszman & Spence, 2015; Schröger et al., 2015),并将编码的流畅性和确定性作为感官信息处理过程的两个重要维度。该理论认为,当多感官输入符合先前的经验或期望时,预测误差较小,感知体验更为流畅(Clark, 2013)。基于多种感官系统均能提供同一感官对象的独立估计值,那么将这些估计值结合起来可以减少噪音和不确定性,从而提高对感官对象的意义构建以及预测的精度(Ernst & Bühlhoff, 2004)。并且,整合各种感官的输入信息能够减少感知不确定性,大脑更容易形成稳定的奖励表征,使大脑能够更准确地对食物的奖赏价值进行编码(Guo et al., 2024),从而增强其选择倾向(Chandrasekaran, 2017)。在旨在最大化提升饮食愉悦感的理论建构文献中,研究也强调了通过视觉、听觉、嗅觉等多模态感官体验的协同作用向消费者传递审美意义的重要性(Cornil & Chandon, 2016b)。从这一角度来看,相比于通过单一通道信息来提升健康食物的选择价值,多通道一致的感官信息能够通过大脑的编码被捆绑结合为一个整体信息,使大脑形成更稳定的食物奖赏表征,从而改善人们对健康食物的态度和选择行为。

虽然已有研究发现多感官组合能够提升饮食享乐体验,但在饮食决策领域,多感官线索组合对食物价值提升的影响研究仍然较少,并且大多停留在行为层面,尚未深入探讨多感官信息是如何影响健康食品的价值评估和选择(Fondberg

et al., 2018; Togawa et al., 2019)。因此, 基于复杂语境背景下多感官线索的奖赏预期, 本研究在预测编码理论框架内探讨多感官组合与食物选择价值关系, 并且重点关注解决多感官组合信息如何提高健康食物奖赏表征的编码流畅性和确定性, 进而对健康食物选择的过程及其结果有所增益。

2.2 健康价值决策的计算模型解释

人们的饮食决定大多基于偏好, 这使得饮食遵循基于价值(即偏好)决策的基本计算(Krajch et al., 2015)。顺序采样模型(sequential-sampling models, SSMs)认为, 动物的决策是由神经系统中类似于扩散的顺序采样和整合到阈值的过程驱动的(Gold & Shadlen, 2007; Ratcliff & Smith, 2004)。以奖赏价值或证据信号形式输入的信息被采样并整合为不断累积的决策信号, 这些信号在达到阈值时会激活相应的执行信号, 从而选择行动。漂移扩散模型(drift-diffusion model, DDM)是当前最流行和最有影响力的 SSM, 它将决策的认知过程分解为 4 个关键参数——起始点(starting point/bias, z)、漂移率(drift rate, v)、阈值(boundary, a)以及非决策时间(non-decision time, t), 为在存在噪声信息的情况下有效比较和决定各种价值选项提供了一个标准的计算模型(刘逸康, 胡传鹏, 2023)。

漂移扩散模型(Drift-Diffusion Model, DDM)在推动我们对饮食决策背后认知过程的理解方面发挥了重要作用。近期的研究已将 DDM 应用于探讨个体如何评估并选择健康与不健康的食物选项, 从而为证据积累的动态过程以及影响这些选择的因素提供了深刻的见解。Sullivan 和 Huettel (2021)采用了一种多属性、时间依赖型的 DDM (multi-attribute, time-dependent drift diffusion model, mtDDM), 以研究口味和健康考量对饮食决策的影响。他们的研究表明, 这些属性独立地影响证据积累的速度(即漂移率)以及信息处理的延迟。具体而言, 参与者的个体偏好调节了他们积累支持特定食物选择证据的速度与强度。此外, 在实践应用方面, 饮食干预措施亦被证明可以改变 DDM 的参数, 从而有效促进健康食品的选择。例如, Ju 等人(2024)考察了调节渴望训练(Regulation of Craving-Training, ROC-T)干预措施在压力情境下支持健康食物选择的有效性。他们采用了分层漂移扩散模型(Hierarchical Drift-Diffusion Model, HDDM), 发现 ROC-T 干预措施在压力和非压力

条件下均增加了健康食物的选择。HDDM 分析显示非决策时间和初始偏见存在显著的交互作用, 这表明该干预措施有效地调节了与食物渴望相关的认知过程, 从而促进了更健康的饮食行为。除此之外, 个体特征和状态也会影响饮食决策过程。Garlasco 等人(2019)利用分层漂移扩散模型探讨了饥饿、食物热量密度和主观喜好对食物选择的影响。他们的研究表明, 饥饿和主观喜好显著影响漂移率, 表明在饥饿状态下, 对偏好的食物证据积累速度更快。此外, 食物的热量密度也影响了边界分离, 参与者在选择高热量食物时需要的证据更少, 反映出对能量密集型食物的固有偏见。

这些研究凸显了 DDM 在剖析影响饮食决策的复杂因素相互作用中的实用性, DDM 对决策认知过程的参数化表示, 允许研究者们探究不同因素对个体饮食决策过程的影响, 如热量、消费者特征、食物感官线索等(Huseynov & Palma, 2021; Garlasco et al., 2019)。不仅如此, 由于 DDM 能够在亚秒级别上预测决策过程的时间进程, 因此可以通过将漂移扩散模型 (DDM) 与脑电图 (electroencephalography, EEG) 技术相结合, 以高时间分辨率的神经信息探究决策过程中的计算参数与具体生理特征的联系。例如, 研究发现决策中的证据积累(漂移率)与额顶叶网络的神经元以及中央顶叶正波(centroparietal positivity, CPP)的振幅变化呈正相关(Frömer et al., 2024; Quiles Marcos et al., 2013)。最为重要的是, 为了适应不同的决策类型, 当前研究者们已经发展出了不同的 DDM 变式从而更深刻地理解特定类型的决策过程。例如, HDDM 引入贝叶斯分层算法, 可以更有效地估计个体差异和群体水平的参数(Wiecki et al., 2013), 并可以通过 HDDM 的多属性版本来探究影响饮食决策过程的多个属性(例如, 健康、美味、价格等)的证据独立累积的过程; 多属性漂移扩散模型(mtDDM)则基于选项的多属性特征, 在多个属性的证据累积过程中考虑了决策的时间依赖性, 即不同属性的证据会有不同的证据累积速率和决策延迟(Sullivan & Huettel, 2021)。因此, 基于 DDM 及其变式的优良特性, 可以通过使用该模型及其各种变式来分解多感官组合中饮食决策的认知过程, 结合 EEG 记录的神经电位信息, 包括表征视觉线索的左前额叶 P2 波、表征听觉线

索的右前额叶 ERAN 波以及表征一致且积极的视听线索的 LPC (顶叶晚期正成分), 对多感官组合助推的健康饮食决策过程做出神经模型上的计算表征, 并探索基于神经计算的健康饮食干预方法。

2.3 健康助推策略的相关研究

除了对甜味和咸味的先天偏好以及对酸味和苦味的先天排斥以外, 人类的偏好几乎都是随时间推移和经验积累形成的, 是后天学习的结果 (Birch, 1999)。加之饮食偏好并非是固化的, 而是终身学习的过程, 成人依然能够从环境线索和进食体验中习得对新食物的积极反应 (Birch, 1999; Boesveldt et al., 2018)。因此, 许多研究关注不同类型的学习策略在形成健康饮食偏好方面的作用 (Ahern et al., 2014; Nekitsing et al., 2018; Nicklaus, 2016)。在过去十多年中, 一些研究已探讨通过认知助推策略来促进健康饮食。例如, 提供卡路里计数或其他营养信息的描述性营养标签 (Auchincloss et al., 2013; Tandon et al., 2011; Vasiljevic et al., 2015), 区分健康或非健康食物的标记信息 (Cawley et al., 2015; Mazza et al., 2018), 鼓励人们合理膳食的口号倡导 (Greene et al., 2017; Hanks et al., 2013), 提高健康食物消费便利性的选择架构设计 (Rozin et al., 2011; Wilson et al., 2017) 等。这些措施在一定程度激励了部分消费者购买更健康的食物, 但总体上对消费者饮食选择的改善有限 (Cadario & Chandon, 2020)。认知助推策略通过强调健康的长期益处, 鼓励人们通过自上而下的认知控制来避免基于食物感官享乐线索的直觉选择 (Bédard et al., 2020)。

但如果在饮食决策过程中不考虑感官愉悦, 人们可能会面临自我监管资源耗竭的风险, 从而阻碍健康饮食行为的选择及维持 (Huang & Wu, 2016; Petit et al., 2016)。事实上, 利用行为决策助推饮食健康已被证实是行之有效的方法 (何贵兵等, 2018)。具体而言, 助推策略通过感官优化来提高健康食物的奖赏价值, 进而促进健康决策的流畅性 (Kraak et al., 2017)。因此, 近年来, 研究者开始关注感官信息对健康饮食选择行为的影响, 并致力于开发基于感官优化的助推策略, 以增强健康食物的吸引力和长期接受度 (Cornil & Chandon, 2016b; Liu et al., 2023; Marty et al., 2018; Petit et al., 2016)。例如, 通过操纵听觉音乐线索和视觉

包装颜色线索的情绪效价, 探讨不同感觉通道信息如何交互影响人们对于奶茶的甜味预期和实际品尝感知, 结果发现, 相比于不一致的情况, 音乐和包装颜色的情绪效价一致时, 人们会显著地认为奶茶更甜 (Lin et al., 2024)。虽然不当饮食所诱发的健康问题在中国成人间普遍存在, 但目前仍缺少有效的策略来调整不合理的饮食结构、转变对健康食物的态度, 从而促进全民饮食健康。因此, 本研究进一步将多感官线索的助推策略与计算模型相结合, 探讨多感官组合对健康食物选择价值的提升作用, 并为饮食行为干预提供更加精准的理论和技术支持。

3 研究构想

如图 1 所示, 本研究从现象分析出发, 首先探究多感官线索组合对健康食物预期体验提升的积极效用, 并通过多项实验室实验确认该效用的稳健性, 从而为后续项目研究奠定现实基础和前提。随后, 立足于上述作用的内在神经机制探讨, 在预期编码理论框架内, 采用多项无创神经生理技术如 EEG、fMRI 来探究一致的多感官线索组合如何提升决策价值。研究重点探讨多感官组合中感官线索的奖赏预测性如何影响该线索的价值编码权重, 从而在更深层次讨论多感官线索作用的内在机制。最后, 基于如何利用多感官组合帮助成人学习健康食物的享乐价值, 并检验多感官重复暴露策略和多感官意象训练的学习效果, 以在更大范围内拓展研究的现实效用。

3.1 研究 1: 多感官组合对健康食物选择的影响

在研究 1 中, 拟使用感官描述和心理想象来检验多感官组合对饮食享乐体验和健康食物选择价值提升的作用。利用感官描述和心理想象诱导被试对健康食物多感官线索的关注, 检验多感官组合能否有效提升被试对健康食物享乐价值的预期, 因而确立多感官组合与健康食物选择价值的因果关系。

食物概念的形成是一个自上而下的过程, 人们对食物健康属性的认知存在差异 (Werle et al., 2013), 即不同个体可能对同一种食物存在健康和 unhealthy 两种完全不同的感知。因此, 采用自我报告的方法来区分食物的健康/unhealthy, 能够将个体对食物的认知差异考虑在内。以往研究表明, 与健康的食物概念相比, unhealthy 的食物概念与多种

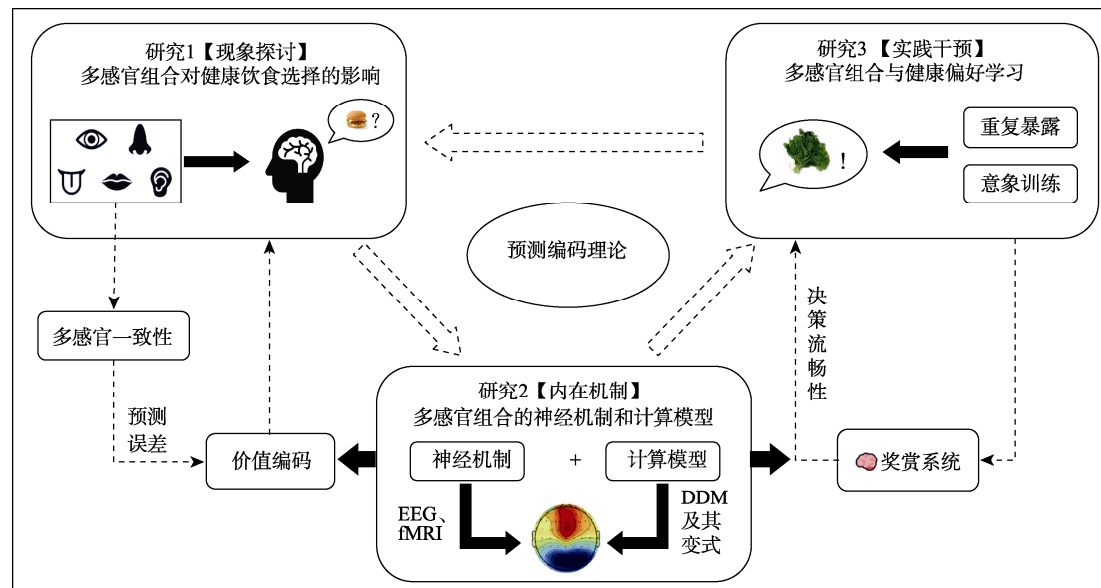


图1 整体研究框架

感觉通道心理意象的关联更强,而且这些关联在健康与吸引力之间起到中介作用,表明多感官体验是人们认为不健康食物比健康食物更有吸引力的基础(Speed et al., 2023);而在其它产品消费体验中,也发现消费者评价中使用的多感官积极描述数量与其体验质量呈正相关(Mehraliyev et al., 2020)。那么,通过诱导人们关注健康食物的多感官线索,能否提升健康食物的享乐预期?换言之,多感官组合与健康食物选项价值之间是否存在因果关联?此外,对食物的多感官描述也能显著提升消费者的食物选择价值,Jürkenbeck 和 Spiller (2021)使用离散选择任务表明多感官描述对食物选择的重要性高于价格、产品品种、产地信息等属性;此外,研究发现多感官线索暴露能够有效逆转个体的食物偏好,事件相关电位(event-related potential, ERP)分析进一步表明,这种偏好逆转是通过降低对不喜欢食物的抑制性控制(即顶叶 N200 和中顶叶 P300 振幅减弱)来实现的(Chatterjee et al., 2023)。不仅是食物本身的感官线索,与食物呈现相关的所有外在感官线索均已被证明能够整合为食物奖赏表征,例如,食物的审美特征、就餐环境的声音和气味线索,共同形成了消费者的饮食愉悦和享乐反应(Spence, 2020)。我们据此推测,上述研究是否意味着多感官组合能够提高健康食物质量和享乐体验预期?因此,

研究假设多感官线索能够显著提升消费者对健康食物的享乐评价。与单感官线索相比,当被试被提供健康食物的多感官描述或进行多感官想象时,预期的饮食愉悦将显著提升。

3.2 研究 2: 多感官组合对健康价值决策的作用机制

研究 2 侧重于机制解释,主要包括神经和计算两方面。研究 2a 通过 EEG 和 fMRI 技术,探究大脑能否通过对分布在多脑区不同感官价值信号的分层整合来形成综合奖赏表征,进而确定多感官线索价值整合的神经基础。研究 2b 基于价值决策存在多个认知处理阶段,通过对 EEG 和 fMRI 数据的分析,确认多感官价值整合发生在决策处理的哪个阶段。最后,研究 2c 通过 DDM 计算建模进行进一步的因果分析,探究多感官组合中不同感官线索对食物奖赏的预测可靠性如何影响决策中的证据积累权重。

3.2.1 研究 2a: 多感官价值整合的神经基础

大脑使用预测编码来估计即将发生的感官事件,预测表征一般是通过先前的知识和经验所获得,旨在为应对复杂的感官环境提供感知优势(Summerfield & Egner, 2009)。研究表明,当不同感官线索均能预测奖赏价值时,视听线索之间的价值一致性(vs. 不一致)能够增强刺激对象的整体显著性(Cheng et al., 2020)。基于上述结论,在

不考虑负效价感官线索(例如,腐烂、恶臭、噪声)的情况下,当感官线索能够指向特定食物奖赏时,个体应能据此形成与该食物整体价值相关的预期模板,而当不同感官线索对食物奖赏的预测方向一致,并能提供互补的感官信息时,食物整体价值表征应当更清晰。当产品的感知特征清晰呈现时,仅仅接触该产品就可以增加对产品的愉悦感和喜爱度,并减少选择延迟(Novemsky et al., 2007)。这一现象可以用处理流畅性解释,即当目标对象的价值特征变得易于识别时,感知流畅性就会增强,而流畅性又能通过激活与愉悦相关的大脑区域来增加对目标对象的喜好(Winkielman & Cacioppo, 2001)。我们据此推测,能够预测饮食愉悦的多感官线索都具有一定的奖赏价值标记,当这些具有内在奖赏一致性的多感官线索同时出现时,能够增强人们对预期食物整体价值表征的清晰度,并随后提升人们对食物价值计算的流畅度,最终唤起人们对预期食物在主观评价方面更高的美味评价和愉悦反应,以及在客观指标上更快的反应时、漂移率和更高效的神经信号特征(如增强的 OFC 激活与更强的 CPP 振幅)。换言之,同时出现的具有奖赏预测价值的多感官线索能够被整合成统一且相对更积极的价值表征,即多个感官通道的信息通过认知捆绑机制加强了整体价值的评估。因此,研究通过使用 EEG 技术,探究食物的视觉审美线索和作为背景音乐呈现的听觉审美线索如何进行价值整合,并影响其感官联想和心理预期。

以往研究表明,具有高奖赏联想(vs.无奖赏联想)的听觉刺激能够提高视觉刺激处理效率(Vakhrushev et al., 2023),其内在神经基础为听觉奖赏线索对初级视觉皮层的跨通道激活(Pooremaeil et al., 2014),表明多感官价值整合可以首先发生在初级视觉皮层中。此外,由于食物是一种多感官构成的风味系统(Spence, 2020),多感觉线索共同参与食物风味编码,最终影响整个味觉神经轴的反应活动(Di Lorenzo, 2021)。食物标签所引起的味觉预期主要反映为脑岛(insula)的激活水平,当味觉预期奖励更高(vs.较低)时,左脑岛和右脑岛激活水平将显著提升(Huang et al., 2021)。因此预测,食物的多感官价值整合也会反映为脑岛的激活模式,尤其关注前脑岛的初级味觉皮层的活动状况。以往研究认为,眶额皮层(orbitofrontal

cortex, OFC)表征选项的预期价值或效用(Rich & Wallis, 2016),其中内侧 OFC 编码食物整体的主观价值,与特定来源的属性价值无关(McNamee et al., 2013)。我们据此推测,多感官线索的价值整合能够延伸到内侧 OFC 的反应模式上,通过利用 fMRI 的高空间分辨特性,采用与先前 EEG 研究中相同的实验刺激和范式,探究食物的视觉和听觉审美线索的价值整合是否表征为多层级的皮层活动。

3.2.2 研究 2b: 多感官价值整合的决策过程

神经经济学的决策理论认为,价值决策由多种不同的计算过程构成,包括属性构建(attribute construction, AC)和证据积累(evidence accumulation, EA) (Rangel et al., 2008)。例如,在决定午餐选择时,人们可能会考虑食物的美味或健康程度、节食目标、当前饥饿水平等,其中每一种属性都能构成接受或拒绝某食物的证据。根据个人的短期目标,不同属性会被赋予不同的权重,而在决策过程中,这些属性证据的嘈杂神经表征可能作为 EA 过程的输入,随后被整合为不断累积的决策信号,当该信号达到积累阈值时作出选择(Forstmann et al., 2016)。当前,一些研究已经区分了 AC 与 EA 的神经发生过程和脑区,表明两者可能涉及不同的神经计算。例如,在感知决策领域,EEG 研究表明, α (9~12 Hz)和 θ (4~8 Hz)振荡的功率降低与 EA 的预测增加相关(Van Honk et al., 2012)。ERPs 分析也表明,奇异刺激在听觉和视觉范式中引发的 P300 成分满足 EA 信号特征(O'Connell et al., 2012; Twomey et al., 2015)。在价值决策领域,EEG 和脑磁图(Magnetoencephalography, MEG)研究发现,关于决策过程中 EA 时间动态的模型预测与顶叶、额叶 θ 以及 α 频带活动相关,还与 β (18~20 Hz)和 γ (40~80 Hz)振荡相关(Polanía et al., 2014);在多属性价值决策中的 EEG 研究还发现,饮食决策中与食物健康和美味属性表征相关的神经信号大约在 516~570 ms 处达到峰值,而与 EA 相关的神经信号则在 630~660 ms 处达到峰值,表现为额叶和枕叶 α 波功率抑制(HajiHosseini & Hutcherson, 2021)。鉴于价值决策涉及多种认知和计算过程,并涉及不同脑区之间的沟通(Polanía et al., 2014),上述多样化的结果或许并不奇怪。然而,由于以往研究中不同属性存在正交关系,两种属性的价值编码互不干扰,这就引发了一些重

要问题——这些 EEG 动态所代表的决策信号计算和整合能否适用于人们对相关联的食物多感官线索的精确处理? 人们在 AC 过程中是分别编码不同感官线索的价值还是同时编码多感官线索的整合价值? 由于 EA 过程涉及决策信号的整合, 那么多感官价值整合是否也同样会被整合为一个统一的决策信号?

知觉决策研究表明, 多感官整合与感知决策同时进行; 进一步的 EEG 分析表明, 在感官编码和决策形成过程中, 相比于单感官线索, 被试对多感官线索组合的计算速度更快。换言之, 感觉编码和决策形成过程中神经动态的加速都与多感官整合直接相关(Mercier & Cappe, 2020)。这一研究为多感官价值整合能够同时发生在 AC 和 EA 过程中提供了初步证据。基于上述分析, 拟对 EEG 数据进行有监督学习, 首先根据神经特征差异确定 AC 和 EA 的处理阶段, 并通过 HDDM 和 mtDDM 来进行模型拟合, 从而确定饮食决策中多感官价值整合对决策不同阶段的影响。

此外, 前额叶皮层在价值决策中的重要作用已被广泛证实(Farvrik et al., 2015; Suzuki, 2022), 研究表明, 眶额叶 (OFC) 和腹内侧前额叶 (ventromedial prefrontal, VMPFC) 皮层在一个共同的价值尺度上计算不同刺激的预期价值, 随后 VMPFC 第 10 区的吸引子网络(attractor networks) 执行分类决策过程, 将价值信号转化为价值之间的选择, 从而指导行动(Grabenhorst & Rolls, 2011)。以往研究表明, 来自视觉、听觉、味觉、嗅觉和体感系统的感觉输入主要通过眼眶外侧部分进入 OFC。因此, 外侧 OFC 表征食物属性价值, 即以特定于元素或类别的方式编码食物价值信号(Öngür & Price, 2000; Suzuki et al., 2017), 而 VMPFC 则编码决策的行动价值, 直接影响决策形成(Grabenhorst & Rolls, 2011)。如果多感官价值整合能够同时参与决策处理的上述两阶段, 那么这种价值整合也能够同时发生在外侧 OFC 和 VMPFC 中。多体素模式分析(multi-voxel pattern analysis, MVPA)是将多个体素的信号看作一个多维变量, 该方法能够处理复杂的神经活动模式, 适用于分析多个脑区在决策过程中如何协调工作(Haxby, 2012)。因此, 通过 fMRI 利用多体素模式分析(MVPA), 探究多感官价值及其整合项如何在表征决策过程的不同脑区被编码。

3.2.3 研究 2c: 多感官价值的编码依据

大脑遵循贝叶斯最佳概率推理来解决输入的多感觉信息能否被整合的问题(Shams & Beierholm, 2011)。具体而言, 贝叶斯方法为输入的感官信息所代表的属性(如颜色、柔软度、重量等)赋予一个概率值, 用于表示观察者对属性推理的信心。在假设存在一个共同来源的情况下, 贝叶斯推理通过按比例权衡每个输入的可靠性来预测由两种感官组合产生的整体多感觉估计(Kersten et al., 2004)。并且, 在感觉输入稳定的情况下, 感官线索的可靠性计算主要受先验知识或预期的影响(即, 基于过去的经验评估接收到的感官信息对解释感知对象的重要性), 这些信息有助于以自上而下的方式填补其他缺失的感官信号(如信号的物理性缺失或信噪比较低的感觉输入), 并解决感知模糊性(Summerfield & Koechlin, 2008)。基于预测在心理活动中的核心地位, 具有预测价值的联想信息(vs. 普通中性信息)具有更高的奖励特性, 这种奖励特性能够鼓励人们主动寻找可预测的信息, 从而提升我们所处环境的确信性和稳定性(Trapp et al., 2015)。从这一角度来看, 大脑可能会尤其重视那些具有高奖赏预测性的信息, 并以此为依据计算多感官整合中每种感官线索的权重。综上所述, 在对食物进行价值估计时, 感官线索的编码权重可能也会依赖于线索对食物整体价值的预测性。在这里, 我们采用基于价值的饮食决策任务来探究人们如何依赖不同感官线索的奖赏预测性来编码各感官价值权重。

如前所述, 多属性漂移扩散模型(mtDDM)允许不同属性的决策证据积累独立进行, 不同感官线索(属性)的决策价值可以被分别计算, 并同时考虑不同感官线索证据积累的开始时间, 尤其适用于二元决策任务。前人研究表明, 人们的饮食决策数据(选择模式与反应时)也可以由 HDDM 良好拟合及预测, 其中决策证据积累(即价值信号采样)可以被描述为不同属性(健康和美味)价值的线性加权组合。通过比较不同属性权重大小, 可以确定不同属性对证据积累的相对影响, 而且 HDDM 能够与神经电生理学数据结合, 允许考察决策参数与神经电数据的共变关系。总而言之, mtDDM 与 HDDM 能够反映决策过程的不同方面, 将两种计算模型和神经电生理数据结合可促进我们对多感官组合中饮食决策过程的深刻理解。因

此,本研究拟通过两项实验,利用 mtDDM 以及 HDDM + EEG 技术,探究食物价值信号构建过程中不同感官线索的预测价值能否直接影响其权重编码;同时关注当某一感官线索预测价值降低时,被试能否通过对另一感官线索的额外证据采样来补偿从而确保决策准确性。

3.3 研究 3: 多感官组合与健康偏好学习

研究 3 从应用出发,研究如何利用多感官组合来促进健康偏好学习,两项研究检验了两种不同的学习方式对健康选项整体价值提升的有效性及其迁移效果。首先,研究 3a 通过结合虚拟现实(virtual reality, VR)以及 EEG 技术,探究健康食物的多感官重复暴露对人们的健康食物态度的改善作用。此外,研究 3b 通过 fMRI 技术,研究食物的多感官意象训练对健康食物饮食乐趣提升的持续影响,检验食物意象训练与真实感官体验对大脑活动模式影响的重叠性,并探讨多感官意象训练能否提升健康食物的整体价值估计。

3.3.1 研究 3a: 多感官重复暴露诱导健康食物态度学习

重复暴露(RE)是提升儿童对新奇或中性喜欢蔬菜的接受度以及选择意愿的有效策略(Ahern et al., 2014; Laureati et al., 2014)。以往研究指出,重复暴露不仅可以提升儿童对反复接触的新食物的喜欢程度,而且这种积极影响可以泛化到相似的新奇刺激中,促使儿童对其它新食物的接受(Birch et al., 1987),特别是当他们反复频繁地接触各种新食物和新口味时(Maier et al., 2008)。重复暴露策略对健康食物态度改善的有效性在于“习得安全”。人类在进化过程中会对新刺激产生戒备心理,即使这些刺激并不一定具备威胁性,而当反复暴露(且不伴随负强化)于这些新奇刺激时,人们将习得该刺激的安全性,从而改善对奇异刺激的态度(Zajonc, 1968)。然而,重复暴露对于成人健康食物态度转变的影响却是有限的。一项荟萃分析研究表明,重复暴露对提升蔬菜喜好的影响效应随被试年龄的增加而减弱(Appleton et al., 2018)。这可能是由于成人主要使用启发法引导饮食选择(耿晓伟等, 2018),而其从长期经验中获得的“健康=不美味”的联想(Raghunathan et al., 2006)将导致健康食物的反复暴露伴随着“不美味”的负面预期,从而抵消习得安全的积极影响。再加之国人对食物的决策偏好中,感性成

分更大,这更为干预我国国民健康饮食行为增加了难度(李佳洁, 于彤彤, 2020)。从这一角度来看,将食物奖励(如享乐预期)与重复暴露结合起来可能是诱导成人健康食物态度学习的有效方法。事实上,刺激与奖赏的重复共现是态度联想学习的基本形式之一(Corneille & Stahl, 2019)。其效应通常通过评价性条件反射(evaluative conditioning, EC)范式研究(Hofmann et al., 2010),即利用态度对象(条件刺激, conditioned stimulus, CS)与无条件引起态度反应(无条件刺激, unconditioned stimulus, US)的刺激配对,并假设这种反复配对(共现)会影响人们对 CS 的评价反应,使 CS 获得与配对 US 相似的价值,从而实现态度联想学习。与经典条件反射相反,在上述价值学习阶段后单独呈现 CS 并不会消除之前习得的情绪,表明 EC 效应应具有一定的抗消退性(Blechert et al., 2008; Díaz et al., 2005)。不仅如此,大量证据表明 EC 效应能够在 CS 对象的相似性基础上进行泛化(Halbeisen et al., 2021; Högden et al., 2019),泛化对象包括相同颜色的不同刺激(Bierley et al., 1985)、CS 对象所属的社会群体(Glaser & Kuchenbrandt, 2017)以及 CS 的其它派生关系对象(Bui & Fazio, 2016)。据此我们推断,利用 EC 范式的态度联想学习具有良好的预后效果。

如前所述,多感官线索组合能够提升健康食物的预期享乐和主观价值(Biswas et al., 2021; Cornil & Chandon, 2016b),这种积极影响如果证明是通过多感官线索增强食物的奖赏价值表征而实现的,那么多感官线索之间的一致性也能够通过增加信息处理的内在协调性而被赋予奖赏价值。考虑到多感官线索组合的上述奖赏特性,利用多感官组合的重复暴露来帮助人们对健康食物进行积极的态度联想学习可能是一种可行的方式,即学习食物的多感官愉悦体验,并使健康食物的单感官暴露能够激活其它感官愉悦线索的内在联想,从而改变健康食物的整体价值。研究已证明人们在 VR 中对食物对象的处理与现实基本一致(Huang et al., 2019),并且由于虚拟现实(VR)在多感官体验提供方面的独特优势,已广泛应用于感官营销科学研究。因此,我们通过使用 VR 来创设多感官组合重复暴露的学习环境,从行为以及神经电生理学角度结合 EEG 技术,并提出如下假设:多感官重复暴露能够显著改善被试对健康食

物的态度,且这一积极效应能够泛化到同一类别的(如蔬菜、水果)的其它健康食物中,表现为与对照组相比,多感官重复暴露组对视觉呈现的健康食物的喜欢程度以及内在愉悦感显著增加。

3.3.2 研究 3b: 多感官意象训练提升健康食物享乐价值

如前所述,对食物多感官线索的关注能够提升饮食愉悦,并降低饥饿感和热量信息对食物选择影响的相对权重(Cornil & Chandon, 2016b; Pelchat et al., 2004);当不存在多感官线索时,对食物多感官线索的心理表征,即心理意象,能有类似的积极影响(Spence & Deroy, 2013)。自主的心理意象涉及从记忆中检索对象的多感官信息,并将其以不同形式结合起来(Pearson, 2019)。在没有实际感官信息输入的情况下,根据提示信息在脑海中自愿、有意识地模拟真实对象的感官体验是一种重要的心理想象能力,这使人们能够摆脱现实世界的限制,在虚拟想象中进行感知与学习(Rademaker & Pearson, 2012)。以往研究认为,心理意象能够激活大脑的早期感觉区域,表明心理意象能够作为一种弱感知形式,使人们能够在没有直接外部刺激的情况下对感官信息做出表征和体验模拟(Albers et al., 2013; Ishai, 2010; Pearson et al., 2015)。不仅如此,学习也可以通过训练心理意象来完成。例如,重复想象中心线的位置,就能在垂直线分割任务中提高感知敏感性(Tartaglia et al., 2009);同样,心理练习可以通过增强大脑的神经可塑性来提高运动技能,包括通过想象运动来改善运动技巧(Avanzino et al., 2015);此外,心理意象训练在减少负面情绪和病态担忧上表现良好,表明通过反复练习对积极场景的心理想象能够帮助个体在面对负性事件时使用积极心理意象来提高心理抵御力(Holmes et al., 2006; Skodzik et al., 2018)。

鉴于心理想象是对物理现实的感知表征,我们认为当个体被鼓励创造涵盖视觉、听觉、触觉、味觉和嗅觉的生动、详细的食物心理意象时,他们能够以接近真实感官体验的方式关注到食物的多感官线索,从而提升健康食物的多感官愉悦。更重要的是,考虑到重复心理意象是一种有效的学习行为,我们认为当个体被反复训练对食物的多感官想象后,他们随后能够主动通过感官心理意象来补充食物未直接感知的部分,从而使其从

多感官线索中获得对健康食物的饮食乐趣。此外,在考虑上述训练效果的同时,本研究通过普利茅斯感官意象问卷(Plymouth Sensory Imagery Questionnaire, Psi-Q)评估在个体层面上的心理想象能力在不同感官上的高低(Andrade et al., 2014),从而将心理想象能力的个体差异考虑在内。因此,本研究通过行为实验,探究不同心理想象能力的被试在受到健康食物多感官线索想象鼓励后,对健康食物享乐预期的差异;同时,利用fMRI技术,考察短期心理意象训练前后,被试对健康食物图像的神经反应变化。我们提出如下假设:相比于心理意象力更弱的被试,心理意象力更强的被试在被鼓励想象健康食物的多感官线索时能够对健康食物有更高的享乐体验预期;此外,在短期的食物多感官意象训练后(vs. 非食物意象训练),健康食物图像所诱发的初级感觉皮层(如,听觉皮层、脑岛)活动显著增加,表征食物奖赏价值的眶额叶皮层活动显著增加。

4 理论建构

人们在日常生活中时刻都在接受来自多个感觉通道的信息,运用感官信息助推健康饮食决策逐渐也受到研究者们的关注。Piqueras-Fiszman和Spence (2015)指出,感官线索对食物选择的影响需要在预测编码的理论框架内解释,即人们通过长期经验建立不同感官线索与食物奖赏的联结。因此,一种感官线索的出现会激活关于饮食体验的记忆编码,并诱导人们选择高预期奖赏的食物刺激。一般来说,对多感官组合的研究主要包含两种探索路径,其一是多感官线索能否提供比单感官线索更丰富的预测信息,其二是线索间的一致性对流畅的刺激物心理表征形成的作用。本研究将结合这两条探索路径,讨论基于一致性配对原则,多感官组合对健康食物选择的预测效能。在多感官线索的营销应用领域,Spence (2023)指出,以往研究主要关注哪些多感官线索配对能够提升饮食体验,鲜少研究探索这些组合线索对食物选择影响的心理过程及其内在机制、各线索对食物选择结果的预测权重及其调节因子。事实上,多感官营销领域内的大多数研究主要依赖问卷实验或自我报告,然而这样的研究工具对客观心理过程的度量效度有限,且高度依赖被试的内省意识。神经科学研究工具,如 EEG 和 fMRI,为解

决上述自我报告偏差提供了有效路径,通过捕捉刺激诱发的心理活动动态变化以及相关大脑功能区激活情况,这些工具能够为理解饮食决策中多感官线索作用的认知神经机制奠定方法学基础。此外,在过去50年里,计算建模方法的发展也为理解人类选择的实时变化提供了新的洞见(Ratcliff et al., 2016)。计算模型提供了一个强大框架以将认知过程转化为计算参数,允许研究人员对选择做出预测的同时分辨影响最终决策的中间计算阶段。更重要的是,计算模型与EEG以及fMRI等无创神经生理技术结合使用能够进一步帮助检查计算参数在神经和算法层面的时序和实施(Harris & Hutcherson, 2022)。此外,在对文献进行综合分析之后也发现,目前针对成人进行饮食偏好学习的策略研究较少,大多集中在儿童期健康饮食偏好和习惯的培养上。然而,考虑到不当饮食诱发的健康问题在中国成人间的广泛性和普遍性,探究成人饮食偏好的塑造和改善对于启动和维持健康行为改变至关重要。因此,本研究也将从多感官组合出发,将这一助推策略与已被广泛证实有效性的重复暴露和联想学习策略结合起来,探究上述策略能否助力成人健康饮食习惯的培养和持续的健康饮食选择。总而言之,本研究尤其关注如何为成人提供健康福祉,关注多感官线索组合如何在保证人们饮食享乐的前提下最大程度地促进其长期健康饮食选择。

首先,本研究探讨多感官线索对当前消费者饮食体验的影响,选题对健康行为助推具有重要理论意义。对健康心理学而言,人们的饮食行为不仅受到生物学因素的影响,还受到心理因素的调节和影响。多感官线索作为触发消费者饮食决策的重要因素之一,对于塑造个体的饮食偏好、行为习惯以及身体健康具有重要影响。本研究通过行为实验进行交互验证,建立健康行为领域“宏观+微观”的研究新范式。本研究的研究整合影响饮食决策行为的外部环境因素和个体心理过程,成果不仅可以验证实际生活中哪些感官线索组合能为人们选择健康饮食时提供更强的预期驱动力,也将通过揭示感官因素对健康饮食的影响机制来推动“助推”理论的发展。

其次,本研究结合计算建模和认知神经科学技术,采用多种漂移扩散模型量化估计感官线索的预测价值对饮食决策中证据加权的影响。同时

探究多感官线索价值整合的神经表征,揭示大脑对于不同感官线索是否进行分层整合进而建构综合价值信号。本研究将多感官知觉决策研究逻辑拓展到价值决策领域中,探讨人们如何感知外部环境中的多通道信息以及如何在基于价值的决策中整合这些不同感觉通道的价值信号。研究结果不仅有助于拓宽认知决策领域中对于价值来源的理解,也将加深人们对于认知心理学中的关键科学问题“认知捆绑问题”和“因果推理问题”的理解。

最后,本研究采用多感官价值学习这种新形式对健康饮食行为干预领域具有重要的应用价值,通过探究多感官组合将如何促进个体对于健康食物的价值学习,有助于拓展应用和健康心理学领域对于饮食行为干预的方法和手段。本研究将检验不同学习方式(多感官重复暴露和多感官意象训练)对健康食物整体价值提升的有效性以及学习的迁移效果,结合虚拟现实、认知神经科学技术以行为和神经生理证据检验上述策略的学习效果,为设计和实施更加精准、有效的饮食行为干预措施提供理论和技术支持。这将为解决当前社会面临的肥胖、糖尿病等国民健康问题提供新的干预手段,打破“健康=不美味”的负面联想,从而促进健康饮食行为的形成,为预防肥胖和相关慢性疾病的早期发生具有重要的社会意义和实践价值。

参考文献

- 耿晓伟, 张峰, 王艳净, 范琳琳, 姚艳. (2018). 健康目标启动降低高热量食物消费. *心理学报*, 50(8), 840-847.
- 何贵兵, 李纾, 梁竹苑. (2018). 以小拨大: 行为决策助推社会发展. *心理学报*, 50(8), 803-813.
- 李佳洁, 于彤彤. (2020). 基于助推的健康饮食行为干预策略. *心理科学进展*, 28(12), 2052-2063.
- 刘梦颖, 蒋婧怡, 杨依琳, 江波, 黄建平. (2024). 古典美还是表现美: 摆盘美学影响健康饮食决策的计算与神经机制. *心理学报*, 56(8), 1061-1075.
- 刘逸康, 胡传鹏. (2023). 证据积累模型的行为与认知神经证据. *科学通报*, 69(8), 1068-1081.
- Ahern, S. M., Caton, S. J., Bouhlal, S., Hausner, H., Olsen, A., Nicklaus, S., ... Hetherington, M. M. (2014). Eating a rainbow. Introducing vegetables in the first years of life in 3 European countries. *Appetite*, 71, 48-56.
- Albers, A. M., Kok, P., Toni, I., Dijkerman, H. C., & De Lange, F. P. (2013). Shared representations for working memory and mental imagery in early visual cortex. *Current Biology*, 23(15), 1427-1431.

- Andrade, J., May, J., Deeprose, C., Baugh, S. J., & Ganis, G. (2014). Assessing vividness of mental imagery: The Plymouth sensory imagery questionnaire. *British Journal of Psychology*, 105(4), 547–563.
- Appleton, K. M., Hemingway, A., Rajska, J., & Hartwell, H. (2018). Repeated exposure and conditioning strategies for increasing vegetable liking and intake: Systematic review and meta-analyses of the published literature. *American Journal of Clinical Nutrition*, 108(4), 842–856.
- Auchincloss, A. H., Young, C., Davis, A. L., Wasson, S., Chilton, M., & Karamanian, V. (2013). Barriers and facilitators of consumer use of nutrition labels at sit-down restaurant chains. *Public Health Nutrition*, 16(12), 2138–2145.
- Avanzino, L., Gueugneau, N., Bisio, A., Ruggeri, P., Papaxanthis, C., & Bove, M. (2015). Motor cortical plasticity induced by motor learning through mental practice. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 9, 105.
- Bédard, A., Lamarche, P.-O., Grégoire, L.-M., Trudel-Guy, C., Provencher, V., Desroches, S., & Lemieux, S. (2020). Can eating pleasure be a lever for healthy eating? A systematic scoping review of eating pleasure and its links with dietary behaviors and health. *PLoS One*, 15(12), e0244292.
- Bierley, C., McSweeney, F. K., & Vannieuwkerk, R. (1985). Classical conditioning of preferences for stimuli. *Journal of Consumer Research*, 12(3), 316–323.
- Birch, L. L. (1999). Development of food preferences. *Annual Review of Nutrition*, 19, 41–62.
- Birch, L. L., McPhee, L., Shoba, B. C., Pirok, E., & Steinberg, L. (1987). What kind of exposure reduces children's food neophobia?: Looking vs. tasting. *Appetite*, 9(3), 171–178.
- Biswas, D., Labrecque, L. I., & Lehmann, D. R. (2021). Effects of sequential sensory cues on food taste perception: Cross-modal interplay between visual and olfactory stimuli. *Journal of Consumer Psychology*, 31(4), 746–764.
- Biswas, D., Lund, K., & Szocs, C. (2019). Sounds like a healthy retail atmospheric strategy: Effects of ambient music and background noise on food sales. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 47(1), 37–55.
- Blechert, J., Michael, T., Vriends, N., Margraf, J., & Wilhelm, F. H. (2008). Fear conditioning in posttraumatic stress disorder: Evidence for delayed extinction of autonomic, experiential, and behavioural responses. *Behaviour Research and Therapy*, 45(9), 2019–2033.
- Boesveldt, S., Bobowski, N., McCrickerd, K., Maître, I., Sulmont-Rossé, C., & Forde, C. G. (2018). The changing role of the senses in food choice and food intake across the lifespan. *Food Quality and Preference*, 68, 80–89.
- Bschaden, A., Dörsam, A. F., Cvetko, K., Kalamala, T., & Stroebele-Benschop, N. (2020). The impact of lighting and table linen as ambient factors on meal intake and taste perception. *Food Quality and Preference*, 79, 103797.
- Bui, E. T., & Fazio, R. H. (2016). Generalization of evaluative conditioning toward foods: Increasing sensitivity to health in eating intentions. *Health Psychology*, 35(8), 852–855.
- Cadario, R., & Chandon, P. (2020). Which healthy eating nudges work best? A meta-analysis of field experiments. *Marketing Science*, 39(3), 465–486.
- Cawley, J., Sweeney, M. J., Sobal, J., Just, D. R., Kaiser, H. M., Schulze, W. D., Wethington, E., & Wansink, B. (2015). The impact of a supermarket nutrition rating system on purchases of nutritious and less nutritious foods. *Public Health Nutrition*, 18(1), 8–14.
- Chandrasekaran, C. (2017). Computational principles and models of multisensory integration. *Current Opinion in Neurobiology*, 43, 25–34.
- Chatterjee, A., Mazumder, S., & Das, K. (2023). Reversing food preference through multisensory exposure. *PLoS One*, 18(7), e0288695.
- Cheng, F. P.-H., Saglam, A., André, S., & Pooremaeli, A. (2020). Cross-modal integration of reward value during oculomotor planning. *eNeuro*, 7(1), ENEURO.0381–19.2020.
- Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behavioral and Brain Sciences*, 36(3), 181–204.
- Cornille, O., & Stahl, C. (2019). Associative Attitude Learning: A Closer Look at Evidence and How It Relates to Attitude Models. *Personality and Social Psychology Review*, 23(2), 161–189.
- Cornil, Y., & Chandon, P. (2016a). Pleasure as an ally of healthy eating? Contrasting visceral and Epicurean eating pleasure and their association with portion size preference and wellbeing. *Appetite*, 104, 52–59.
- Cornil, Y., & Chandon, P. (2016b). Pleasure as a substitute for size: How multisensory imagery can make people happier with smaller food portions. *Journal of Marketing Research*, 53(5), 847–864.
- Di Lorenzo, P. M. (2021). Neural Coding of Food Is a Multisensory, Sensorimotor Function. *Nutrients*, 13(2), 398.
- Díaz, E., Ruiz, G., & Baeyens, F. (2005). Resistance to extinction of human evaluative conditioning using a between-subjects design. *Cognition and Emotion*, 19(2), 245–268.
- Engelen, L., de Wijk, R. A., Prinz, J. F., van der Bilt, A., & Bosman, F. (2003). The relation between saliva flow after different stimulations and the perception of flavor and texture attributes in custard desserts. *Physiology & Behavior*, 78(1), 165–169.
- Ernst, M. O., & Bühlhoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4), 162–169.
- Farovik, A., Place, R. J., McKenzie, S., Porter, B., Munro, C. E., & Eichenbaum, H. (2015). Orbitofrontal cortex encodes memories within value-based schemas and represents

- contexts that guide memory retrieval. *Journal of Neuroscience*, 35(21), 8333–8344.
- Ferriday, D., & Brunstrom, J.M. (2011). ‘I just can’t help myself’: Effects of food-cue exposure in overweight and lean individuals. *International Journal of Obesity*, 35(1), 142–149.
- Fondberg, R., Lundström, J. N., Blöchl, M., Olsson, M. J., & Seubert, J. (2018). Multisensory flavor perception: The relationship between congruency, pleasantness, and odor referral to the mouth. *Appetite*, 125, 244–252.
- Forstmann, B. U., Ratcliff, R., & Wagenmakers, E.-J. (2016). Sequential sampling models in cognitive neuroscience: Advantages, applications, and extensions. *Annual Review of Psychology*, 67(1), 641–666.
- Frömer, R., Nassar, M. R., Ehinger, B. V., & Shenhav, A. (2024). Common neural choice signals can emerge artefactually amid multiple distinct value signals. *Nature Human Behaviour*, 8(11), 2194–2208.
- Garlasco, P., Osimo, S. A., Rumiati, R. I., & Parma, V. (2019). A hierarchical-drift diffusion model of the roles of hunger, caloric density and valence in food selection. *Appetite*, 138, 52–59.
- Glaser, T., & Kuchenbrandt, D. (2017). Generalization effects in evaluative conditioning: Evidence for attitude transfer effects from single exemplars to social categories. *Frontiers in Psychology*, 8, 103.
- Gold, J. I., & Shadlen, M. N. (2007). The neural basis of decision making. *Annual Review of Neuroscience*, 30(1), 535–574.
- Grabenhorst, F., & Rolls, E. T. (2011). Value, pleasure and choice in the ventral prefrontal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(2), 56–67.
- Greene, K. N., Gabrielyan, G., Just, D. R., & Wansink, B. (2017). Fruit-promoting smarter lunchrooms interventions: Results from a cluster RCT. *American Journal of Preventive Medicine*, 52(4), 451–458.
- Guo, X., Huang, J., & Wan, X. (2024). Influence of exposure to novel food packaging on consumers’ adoption of innovative products. *Food Quality and Preference*, 119, 105230.
- Hagen, L. (2021). Pretty healthy food: How and when aesthetics enhance perceived healthiness. *Journal of Marketing*, 85(2), 129–145.
- HajiHosseini, A., & Hutcherson, C. A. (2021). Alpha oscillations and event-related potentials reflect distinct dynamics of attribute construction and evidence accumulation in dietary decision making. *eLife*, 10, e60874.
- Halbeisen, G., Schneider, M., & Walther, E. (2021). Liked for their looks: Evaluative conditioning and the generalisation of conditioned attitudes in early childhood. *Cognition and Emotion*, 35(4), 607–618.
- Hanks, A. S., Just, D. R., Smith, L. E., & Wansink, B. (2013). Healthy convenience: Nudging students toward healthier choices in the lunchroom. *Journal of Public Health*, 34(3), 370–376.
- Harris, A., & Hutcherson, C. A. (2022). Temporal dynamics of decision making: A synthesis of computational and neurophysiological approaches. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 13(3), e1586.
- Haxby, J. V. (2012). Multivariate pattern analysis of fMRI: The early beginnings. *Neuroimage*, 62(2), 852–855.
- Hofmann, W., De Houwer, J., Perugini, M., Baeyens, F., & Crombez, G. (2010). Evaluative conditioning in humans: A meta-analysis. *Psychological Bulletin*, 136(3), 390–421.
- Högden, F., Stahl, C., & Unkelbach, C. (2019). Similarity-based and rule-based generalisation in the acquisition of attitudes via evaluative conditioning. *Cognition and Emotion*, 34(1), 105–127.
- Hohwy, J. (2007). The Search for Neural Correlates of Consciousness. *Philosophy Compass*, 2(3), 461–474.
- Holmes, E. A., Mathews, A., Dalgleish, T., & Mackintosh, B. (2006). Positive interpretation training: Effects of mental imagery versus verbal training on positive mood. *Behavior Therapy*, 37(3), 237–247.
- Huang, F., Huang, J., & Wan, X. (2019). Influence of virtual color on taste: Multisensory integration between virtual and real worlds. *Computers in Human Behavior*, 95, 168–174.
- Huang, J., Zhao, P., & Wan, X. (2021). From brain variations to individual differences in the color-flavor incongruency effect: A combined virtual reality and resting-state fMRI study. *Journal of Business Research*, 123, 604–612.
- Huang, Y., & Wu, J. (2016). Food pleasure orientation diminishes the “healthy = less tasty” intuition. *Food Quality and Preference*, 54, 75–78.
- Huseynov, S., & Palma, M. A. (2021). Food decision-making under time pressure. *Food Quality and Preference*, 88, 104072.
- Ishai, A. (2010). Seeing faces and objects with the “mind’s eye”. *Archives Italiennes de Biologie*, 148(1), 1–9.
- Ju, Q., Wu, X., Li, B., Peng, H., Lippke, S., & Gan, Y. (2024). Regulation of craving training to support healthy food choices under stress: A randomized control trial employing the hierarchical drift-diffusion model. *Applied Psychology: Health and Well-Being*, 16(3), 1159–1177.
- Jürkenbeck, K., & Spiller, A. (2021). Importance of sensory quality signals in consumers’ food choice. *Food Quality and Preference*, 90, 104155.
- Kantono, K., Hamid, N., Shepherd, D., Yoo, M. J. Y., Carr, B. T., & Grazioli, G. (2016). The effect of background music on food pleasantness ratings. *Psychology of Music*, 44(5), 1111–1125.
- Kersten, D., Mamassian, P., & Yuille, A. (2004). Object perception as Bayesian inference. *Annual Review of Psychology*, 55, 271–304.
- Koehlmoos, T. P., Anwar, S., & Cravioto, A. (2011). Global health: Chronic diseases and other emergent issues in global health. *Infectious Disease Clinics of North America*,

- 25(3), 623–638.
- Kraak, V. I., Englund, T., Misyak, S., & Serrano, E. L. (2017). A novel marketing mix and choice architecture framework to nudge restaurant customers toward healthy food environments to reduce obesity in the United States. *Obesity Reviews*, 18(8), 852–868.
- Krajibich, I., Bartling, B., Hare, T., & Fehr, E. (2015). Rethinking fast and slow based on a critique of reaction-time reverse inference. *Nature Communications*, 6(1), 7455.
- Laureati, M., Bergamaschi, V., & Pagliarini, E. (2014). School-based intervention with children. Peer-modeling, reward and repeated exposure reduce food neophobia and increase liking of fruits and vegetables. *Appetite*, 83, 26–32.
- Lin, X., Liu, Y., & Huang, J. (2024). Reducing sweetness expectation in milk tea by crossmodal visuo-auditory interaction. *Appetite*, 192, 107107.
- Liu, M., Ji, S., Jiang, B., & Huang, J. (2023). Plating for health: A cross-cultural study of the influence of aesthetics characteristics on food evaluation. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 33, 100785.
- Maier, A., Chabanet, C., Schaal, B., Leathwood, P., & Issanchou, S. (2008). Breastfeeding and experience with variety early in weaning increase infants' acceptance of new foods for up to two months. *Clinical Nutrition*, 27(6), 849–857.
- Mann, K. D., Pearce, M. S., McKeivith, B., Thielecke, F., & Seal, C. J. (2015). Low whole grain intake in the UK: Results from the National Diet and Nutrition Survey rolling programme 2008–11. *British Journal of Nutrition*, 113(10), 1643–1651.
- Marty, L., Chabaron, S., Nicklaus, S., & Monnery-Patris, S. (2018). Learned pleasure from eating: An opportunity to promote healthy eating in children? *Appetite*, 120, 265–274.
- Mazza, M. C., Dynan, L., Siegel, R. M., & Tucker, A. L. (2018). Nudging healthier choices in a hospital cafeteria: Results from a field study. *Health Promotion Practice*, 19(6), 925–934.
- McCrickerd, K., & Forde, C. G. (2016). Sensory influences on food intake control: Moving beyond palatability. *Obesity Reviews*, 17(1), 18–29.
- McNamee, D., Rangel, A., & O'Doherty, J. P. (2013). Category-dependent and category-independent goal-value codes in human ventromedial prefrontal cortex. *Nature Neuroscience*, 16(4), 479–485.
- Mehraliyev, F., Kirilenko, A. P., & Choi, Y. (2020). From measurement scale to sentiment scale: Examining the effect of sensory experiences on online review rating behavior. *Tourism Management*, 79, 104096.
- Mercier, M. R., & Cappe, C. (2020). The interplay between multisensory integration and perceptual decision making. *NeuroImage*, 222, 116970.
- Nekitsing, C., Blundell-Birtill, P., Cockcroft, J. E., & Hetherington, M. M. (2018). Systematic review and meta-analysis of strategies to increase vegetable consumption in preschool children aged 2–5 years. *Appetite*, 127, 138–154.
- Nicklaus, S. (2016). The role of food experiences during early childhood in food pleasure learning. *Appetite*, 104, 3–9.
- Novemsky, N., Dhar, R., Schwarz, N., & Simonson, I. (2007). Preference fluency in choice. *Journal of Marketing Research*, 44(3), 347–356.
- O'Connell, R. G., Dockree, P. M., & Kelly, S. P. (2012). A supramodal accumulation-to-bound signal that determines perceptual decisions in humans. *Nature Neuroscience*, 15(12), 1729–1735.
- Öngür, D., & Price, J. L. (2000). The organization of networks within the orbital and medial prefrontal cortex of rats, monkeys and humans. *Cerebral Cortex*, 10(3), 206–219.
- Pearson, J. (2019). The human imagination: The cognitive neuroscience of visual mental imagery. *Nature Reviews Neuroscience*, 20(10), 624–634.
- Pearson, J., Naselaris, T., Holmes, E. A., & Kosslyn, S. M. (2015). Mental imagery: Functional mechanisms and clinical applications. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(10), 590–602.
- Pelchat, M. L., Johnson, A., Chan, R., Valdez, J., & Ragland, J. D. (2004). Images of desire: Food-craving activation during fMRI. *Neuroimage*, 23(4), 1486–1493.
- Petit, O., Basso, F., Merunka, D., Spence, C., Cheok, A. D., & Oullier, O. (2016). Pleasure and the control of food intake: An embodied cognition approach to consumer self-regulation. *Psychology & Marketing*, 33(8), 608–619.
- Piqueras-Fiszman, B., & Spence, C. (2014). Colour, pleasantness, and consumption behaviour within a meal. *Appetite*, 75, 165–172.
- Piqueras-Fiszman, B., & Spence, C. (2015). Sensory expectations based on product-extrinsic food cues: An interdisciplinary review of the empirical evidence and theoretical accounts. *Food Quality and Preference*, 40, 165–179.
- Polanía, R., Krajibich, I., Grueschow, M., & Ruff, C. C. (2014). Neural oscillations and synchronization differentially support evidence accumulation in perceptual and value-based decision making. *Neuron*, 82(3), 709–720.
- Pooremaeili, A., Poort, J., & Roelfsema, P. R. (2014). Simultaneous selection by object-based attention in visual and frontal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(17), 6467–6472.
- Quiles Marcos, Y., Quiles Sebastián, M. J., Pamies Aubalat, L., Botella Ausina, J., & Treasure, J. (2013). Peer and family influence in eating disorders: A meta-analysis. *European Psychiatry*, 28(4), 199–206.
- Rademaker, R. L., & Pearson, J. (2012). Training visual

- imagery: Improvements of metacognition, but not imagery strength. *Frontiers in Psychology*, 3, 224.
- Raghunathan, R., Naylor, R. W., & Hoyer, W. D. (2006). The unhealthy = tasty intuition and its effects on taste inferences, enjoyment, and choice of food products. *Journal of Marketing*, 70(4), 170–184.
- Rangel, A., Camerer, C., & Montague, P. R. (2008). A framework for studying the neurobiology of value-based decision making. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(7), 545–556.
- Ratcliff, R., & Smith, P. L. (2004). A comparison of sequential sampling models for two-choice reaction time. *Psychological Review*, 111(2), 333–367.
- Ratcliff, R., Smith, P. L., Brown, S. D., & McKoon, G. (2016). Diffusion decision model: Current issues and history. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(4), 260–281.
- Rich, E. L., & Wallis, J. D. (2016). Decoding subjective decisions from orbitofrontal cortex. *Nature Neuroscience*, 19(7), 973–980.
- Rozin, P., Scott, S., Dingley, M., Urbanek, J. K., Jiang, H., & Kaltenbach, M. (2011). Nudge to nobesity I: Minor changes in accessibility decrease food intake. *Judgment and Decision Making*, 6(4), 323–332.
- Schifferstein, H. N. (2021). Designing food experiences: a multisensory approach. In S. Massari (Ed.), *Transdisciplinary case studies on design for food and sustainability* (pp. 115–130). Woodhead Publishing.
- Schröger, E., Marzecová, A., & SanMiguel, I. (2015). Attention and prediction in human audition: A lesson from cognitive psychophysiology. *European Journal of Neuroscience*, 41(5), 641–664.
- Shadlen, M. N., & Shohamy, D. (2016). Decision making and sequential sampling from memory. *Neuron*, 90(5), 927–939.
- Shams, L., & Beierholm, U. (2011). Humans' multisensory perception, from integration to segregation, follows bayesian inference. In J. Trommershäuser, K. Kording, & M. S. Landy (Eds.), *Sensory cue integration* (pp. 251–262). Oxford University Press.
- Skodzik, T., Adelt, M. H., Nossek, V. A., Kuck, S. T., & Ehring, T. (2018). Does a novel training in mental imagery reduce pathological worry?. *Behaviour Research and Therapy*, 109, 56–67.
- Speed, L. J., Papies, E. K., & Majid, A. (2023). Mental simulation across sensory modalities predicts attractiveness of food concepts. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 29(3), 557–571.
- Spence, C. (2012). Auditory contributions to flavour perception and feeding behaviour. *Physiology & Behavior*, 107(4), 505–515.
- Spence, C. (2015). Multisensory flavor perception. *Cell*, 161(1), 24–35.
- Spence, C. (2020). Multisensory flavour perception: Blending, mixing, fusion, and pairing within and between the senses. *Foods*, 9(4), 407.
- Spence, C. (2021). The scent of attraction and the smell of success: Crossmodal influences on person perception. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 6(1), 46.
- Spence, C. (2023). Explaining visual shape–Taste crossmodal correspondences. *Multisensory Research*, 36(4), 313–345.
- Spence, C., & Deroy, O. (2013). Crossmodal mental imagery. In S. Lacey & R. Lawson (Eds.), *Multisensory imagery* (pp. 157–183). Springer.
- Stein, B. E., & Stanford, T. R. (2008). Multisensory integration: Current issues from the perspective of the single neuron. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4), 255–266.
- Sullivan, N. J., & Huettel, S. A. (2021). Healthful choices depend on the latency and rate of information accumulation. *Nature Human Behaviour*, 5(12), 1698–1706.
- Summerfield, C., & Egner, T. (2009). Expectation (and attention) in visual cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(9), 403–409.
- Summerfield, C., & Koechlin, E. (2008). A neural representation of prior information during perceptual inference. *Neuron*, 59(2), 336–347.
- Suzuki, S. (2022). Constructing value signals for food rewards: Determinants and the integration. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 46, 101178.
- Suzuki, S., Cross, L., & O'Doherty, J. P. (2017). Elucidating the underlying components of food valuation in the human orbitofrontal cortex. *Nature Neuroscience*, 20(12), 1780–1786.
- Tandon, P. S., Wright, J., Zhou, C., Rogers, C. B., & Christakis, D. A. (2011). Nutrition menu labeling may lead to lower-calorie restaurant meal choices for children. *Pediatrics*, 125(2), 244–248.
- Tartaglia, E. M., Bamert, L., Mast, F. W., & Herzog, M. H. (2009). Human perceptual learning by mental imagery. *Current Biology*, 19(24), 2081–2085.
- Togawa, M., Oktavianty, O., Haruyama, S., & Ishii, Y. (2019). Product architecture analysis of projector and strategy for gaining the competitive advantage. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 494(1), 012046.
- Trapp, S., Shenhav, A., Bitzer, S., & Bar, M. (2015). Human preferences are biased towards associative information. *Cognition and Emotion*, 29(6), 1054–1068.
- Twomey, D. M., Murphy, P. R., Kelly, S. P., & O'Connell, R. G. (2015). The classic P300 encodes a build-to-threshold decision variable. *European Journal of Neuroscience*, 42(1), 1636–1643.
- Vakhrushev, R., Cheng, F. P. H., Schacht, A., & Pooresmaeili, A. (2023). Differential effects of intra-modal and cross-modal reward value on perception: ERP evidence. *PLoS One*, 18(6), e0287900.
- Van Honk, J., Montoya, E. R., Bos, P. A., Van Vugt, M., & Terburg, D. (2012). New evidence on testosterone and

- cooperation. *Nature*, 485(7399), E4–E5.
- Vasiljevic, M., Pechey, R., & Marteau, T. M. (2015). Making food labels social: The impact of colour of nutritional labels and injunctive norms on perceptions and choice of snack foods. *Appetite*, 91, 56–63.
- Werle, C. O., Trendel, O., & Ardito, G. (2013). Unhealthy food is not tastier for everybody: The “healthy = tasty” French intuition. *Food Quality and Preference*, 28(1), 116–121.
- Wiecki, T., Sofer, I., & Frank, M. (2013). HDDM: Hierarchical Bayesian estimation of the drift-diffusion model in Python. *Frontiers in Neuroinformatics*, 7, 14.
- Wilson, A. L., Buckley, E., Buckley, J. D., & Bogomolova, S. (2017). Nudging healthier food and beverage choices through salience and priming. Evidence from a systematic review. *Food Quality and Preference*, 51, 47–64.
- Winkielman, P., & Cacioppo, J. T. (2001). Mind at ease puts a smile on the face: Psychophysiological evidence that processing facilitation elicits positive affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 81(6), 989–1000.
- Xu, J., Guo, X., Liu, M., Xu, H., & Huang, J. (2023). Self-construal priming modulates sonic seasoning. *Frontiers in Psychology*, 14, 1041202.
- Zajonc, R. B. (1968). Attitudinal effects of mere exposure. *Journal of Personality and Social Psychology*, 9(2, Pt.2), 1–27.
- Zhang, C., Han, J., Guo, X., & Huang, J. (2023). Influence of healthy brand and diagnosticity of brand name on subjective ratings of high- and low-calorie food. *Behavioral Sciences*, 13(1), 70.

Computational and neural mechanisms underlying healthy food decisions nudged by multisensory cues

HUANG Jianping^{1,2}, CHEN Chunchun¹, LIU Mengying³

(¹ Department of Psychology, University of Soochow, Suzhou 215123, China)

(² Jiangsu Research Center for Aesthetic Education in Schools, Suzhou 215123, China)

(³ Department of Psychological and Cognitive Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Sensory cues from the environment, such as visual, auditory, and olfactory information, are integrated through multisensory processing, which in turn shapes consumers’ hedonic expectations of food and guides their dietary decisions. Individuals rely on multisensory cues to form a unified representation of food enjoyment value, suggesting that modulating these cues can effectively promote healthier dietary decisions. This research integrates electroencephalography (EEG) and functional magnetic resonance imaging (fMRI) techniques, alongside computational modeling, to examine how multisensory cue integration enhances food reward representation and facilitates the fluency of health-related value-based decision-making. Specifically, the study first investigates the causal relationship between multisensory cue integration and healthy food choices and experiences. It then explores the computational mechanisms and neural basis underlying the influence of multisensory integration on dietary decision-making. Finally, the study examines how to leverage multisensory integration to facilitate individuals’ learning of the value of healthy foods. This study aims to reveal how multisensory integration provides a superadditive hedonic experience of healthy eating, offering a systematic theoretical framework for understanding its intrinsic benefits. Furthermore, this research explores how repeated exposure and mental imagery training enhance the enjoyment of healthy foods and promote long-term dietary habits.

Keywords: multisensory cues, nudging, healthy eating, value-based decision making, value-based learning