食品物性学研究的挑战与展望

王鑫淼[1,2]，陈建设[*1,2]

（1. 浙江工商大学 食品与生物工程学院，浙江 杭州 310018；2. 浙江工商大学 浙江-英国食品感官科学联合实验室，浙江 杭州 310018）

摘要：食品物性学是关于食品物理性质的研究。几十年来，食品物性学随着食品科学和食品工艺研究的推进，以及评测仪器与设备的研发，取得了长足的进步，同时研究思路上也发生了一些转变。食品物性学研究从早期基于食品工艺的食品物性研究，正在逐渐过渡到食物与人体相互作用、基于消费者感官体验的新领域。作者主要介绍了食品物性学研究的沿革、近年来取得的主要进展，同时就食品物性学研究的未来发展提出了一些建议。

关键词：食品物理性质；质构研究；感官体验；食品口腔加工

中图分类号：TS 207.3　**文章编号：**1673-1689(2023)03-0001-11　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.03.001

Challenges and Prospects of Food Physical Property Research

WANG Xinmiao[1,2]，*CHEN Jianshe*[*1,2]

（1. School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang-UK Joint Laboratory of Food Sensory Science, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China）

Abstract: Food physics studies the physical properties of foods. During the past decades, with the advancement of food science and technology studies, as well as the development of evaluation equipment and devices, studies of food physical properties have made great progress. At the meanwhile, there is a transition in methodological approaches. Currently, the food physical properties studies are shifting from the previous food technology-based studies to the 'food-human interaction' and 'consumer sensory experience'-based scientific investigations. This review mainly introduces the history and evolution of food physical properties studies and the major progress made in recent years, proposing the possible future development directions of food physical property research.

Keywords: food physical properties, texture studies, sensory experience, food oral processing

1 食品物性学研究历史

食品物性学是关于食品物理性质的研究，被认为是并列于食品化学、营养生理学的食品科学与工程领域的基础学科[1]。食品物性学通过对食品材料及其组成的力学、热学、电学、光学、声学等物理性质进行解析，解释食品的感官特征、营养素的吸收特性、品质维持及变化特征，进一步对上游食品原料的获取、加工和贮藏提供了科学指导[2]。于1969年底创刊的 *Journal of Texture Studies* 是食品物性

收稿日期：2022-09-27

基金项目：国家自然科学基金项目(31871885)；浙江工商大学新锐计划项目(XRK22004)；浙江工商大学校级学科建设项目(3100JYN4118002G-508)。

*** 通信作者：**陈建设(1961—)，男，博士，教授，博士研究生导师，主要从事食品口腔加工方面的研究。E-mail：jschen@zjgsu.edu.cn

学相关领域最早创刊的科学研究期刊。随着科学探索进步以及仪器智能化迭代，在历任主编的带领下,该杂志不断完成新的期刊目标,并转变研究范围,期刊影响力在食品科学研究领域持续上升。在过去几十年的发展历程中,先后也有一系列关于食品物理性质研究的科学杂志，其中包括经历了创刊—停刊—再建刊的 *Food Structure*,杂志创刊伊始主要关注食品微结构,现在拓展到全面关注食品结构与功能性研究；也有 1998 年创办的年刊 *International Journal of Food Properties*，因其发行频率较低,期刊将关注范围主要放在测量方法、标准制定、食品性质及应用的数据分享,以及相关数据库的建立和人工智能在其中的应用等,旨在提供更持续、长远、偏政策性的指导和建议。

21 世纪初,在杂志 *International Journal of Food Properties* 的第 2 卷中,两位新西兰学者对食品的性质进行了详细的分类阐述(见表 1),并着重强调了食品的物理性质对品质特征起到的决定性作用。比如,干燥食品中孔隙度直接与复水速率相关,进一步与质构这一食品物性建立了关联[3]。然而由于翻译的问题，很多研究者将物理性质(physical properties)、结构(structure)和质构(texture)定义为相似的含义。事实上,物理性质的概念包括结构和质构。在食品研究领域中,结构更倾向于描述不同成分组成的整体，而食品质构的国际标准定义为——从食物入口直至完成吞咽的全过程中,通过运动和躯体受体,以及通过视觉和听觉受体所获得的,有关食物所有的机械、几何、表面和整体的性质[4]。这更倾向于描述食物入口前后与感官体验相关的特征。虽然食品的质构性质可能受到食品结构的影响,但这并不说明食品的结构和质构是因果/表里的逻辑关系,因应用场景、描述重点的不同,二者仍有很大差别。

2 基于食品新工艺的食品物性学研究进展

从食物作为一种材料的角度来讲,近年来关于食品物性学的研究总是伴随着食品工艺和检测评价技术的进展。其中主要包括:1)关于热加工对食品物性带来的改变;2)食品增材制造带来的食品物性改变。

微波(microwave)和射频(radiofrequency)是近年来研究较广的食品加工技术,两种技术主要是利用食品物料的介电性质(dielectric property)[5]。食品的介电性质反映了食物内部束缚电荷在电场、应力和温度等作用下的电极化及运动过程;频率、温度、食品中的水分含量和存在形态(自由水、结合水)等都会影响湿物料的介电性质。食品物料具有更高的介电常数(dielectric constant)代表其能存储更多的能量,而更高的介电损失因子(dielectric loss factor)则说明在该物料吸收的能量中有更多的能量被转化为了热能[6]。这些评价因素很大程度上取决于食物成分和结构,比如灰分含量越高,可用来极化的水越少;离子电导率越高,介电常数越低,介电损失因子也相应越高;类似地,在高盐环境中,由于较低的黏度和更强的离子移动性,介电损失因子也会相应增加[7]。从理论上来讲,微波加热是将高频的电磁波直接转化成热能的过程,不存在温度梯度,这使其在诸多热加工方式中脱颖而出[8]。微波加热主要使用的电磁波频段包括 896、915、2 450 MHz，由于应用频率和使用食品材料的不同,不同的微波加工方式(加热、烹饪、解冻、油炸、烤、灭菌等)对食品物理性质的改变存在很大差异，尤其体现在食品硬度、韧性、黏弹性、黏聚性、剪切力的改变等方面;利用微波进行油炸和烘烤时,研究人员也会额外关注食品的松脆(crispiness)、硬脆(crunchy)等与感官体验有强关联的质构特性(见表2)。

表 1　食品性质的分类[3]

Table 1　Classified food properties[3]

主要性质	性质分类
物理和物理化学性质	机械学性质(声学性质、质量/体积/面积相关性质、形态学性质、流变学性质、表面性质)
	热学性质
	热动力学性质
	传质性质
	电磁性质
	物理化学常数
动力学性质	质量动力学常数
	微生物生长、消退和死亡动力学常数
感官性质	触觉性质、质构性质、颜色和外形、味道、气味、声音
健康性质	积极健康性质(营养组成、医学性质、功能性质)
	消极健康性质(任何浓度下的毒性、关键浓度水平以上的毒性、过量或不均衡摄入的毒性)

欧姆加热是另一种研究和应用十分广泛的食品热加工方法[27]。不同于微波加热,欧姆加热是利用低频的交流电在目标食物内产生能量。欧姆加热不存在微波加热中经常出现的穿透深度的问题,因此也更适合需要连续加热的工艺过程,尤其是在高黏度和/或非均相的食品体系中[28]。在加热/烹调、商业灭菌、渗透脱水、解冻和成胶、烘焙等不同需求下,欧姆加热可以调整的参数范围很广,这使其成为一种理想的电物理加热及杀菌方法[29-32]。同时,欧姆加热也常被用于果蔬、肉类、海产品以及谷物等食品

表 2 微波油炸对食品质构的影响

Table 2 Effect of microwave frying on food texture

食物材料	微波油炸参数	主要研究结果	参考文献
薯片	功率:1 000 W	用氯化钠进行渗透脱水预处理并利用 CMC-Na 进行覆盖,提高了微波油炸薯片的质构性质	[9]
		相比于传统油炸的薯片脆性更高	[10]
	功率:12、16、20 W/g 油炸时间:2、4、6、8、10 min	随油炸时间从 4 min 延长至 10 min,断裂力降低	[11]
	功率:600、800、1 000 W 油炸时间:120、240、360 s	随微波功率和油炸时间的增加,薯片脆性线性下降	[12]
牛肉饼	最大功率的 50%和 70% 油炸时间:2 min	与传统油炸肉饼相比,微波油炸肉饼更硬,且更高的功率水平下肉饼具有更硬的质构性质	[13]
香蕉片	功率:1 000 W 油炸时间:5、10 min	与市售传统油炸香蕉片相比,微波真空油炸香蕉片的脆性没有显著差异	[14]
苹果切片	功率:800、1 000 W 超声功率:600 W 油炸时间:6、8、10、12、14、16 min	超声和微波的协同作用导致苹果切片的脆性提升	[15]
毛豆	功率:1 000 W 超声功率:600 W 油炸温度:80、90、100 ℃ 油炸时间:3、6、9、15、18 min	在微波真空油炸的毛豆中,使用超声显著降低了断裂力	[16]
山药	功率:1 800、2 400、3 000 W 超声功率:300、600 W	随着微波和超声的功率增加,切片的硬度降低	[17]
鱼柳	功率:800、900、1 000 W	与真空油炸鱼柳相比,微波辅助真空油炸鱼柳硬度更低,微波辅助真空油炸鱼柳的硬度从 5 min 至 20 min 时表现为增加,随后从 25 min 至 26 min 表现为降低	[18]
蘑菇片	功率:800、900、1 000 W 油炸时间:2、4、6、8、10、12、14 min	随微波功率和油炸时间增加断裂力降低,切片更脆,利用超声结合微波油炸处理进一步提高了切片脆性	[19]
红薯片	功率:800 W 超声功率:150、300、450 W 持续 20 min,300 W 持续 10、20、30 min	在微波真空油炸中使用超声处理使红薯片更脆,切片的脆性与超声功率和处理时间呈线性相关	[20]
紫薯	功率:0、600、800 W 超声功率:0、300、600 W	随微波和超声功率增加,断裂力下降	[10]
南瓜切片	功率:600、800、1 000 W 超声功率:0、300、600 W	利用超声处理提高了微波真空油炸南瓜切片的脆性,尤其是在 600 W 和 800 W 微波功率下	[21]
薯条	功率:315、430、600 W	相比于传统油炸薯条,微波油炸薯条更脆	[22]
	功率:10、15、20 W/g	随微波功率增加薯条硬度降低	[23]
榴莲片	功率:582、824、1 085 W	与传统油炸榴莲切片相比硬度相近	[24]
面糊裹鸡肉	功率:365 W 油炸时间:1.5 min	与传统油炸相比,微波油炸鸡肉的硬度相近或更低,用鹰嘴豆面糊处理硬度最低,其次分别是大豆糊和稻米糊	[25]
面糊裹鱼块	功率:2 400 W 和 2 500 W	与传统油炸鱼块相比,酥皮质量和质构性质相近	[26]

的质构软化(texture softening)[33],以评价其硬度、弹性、脆性、黏聚性等质构性质的改变[34-36]。值得注意的是,热加工和非热加工技术都可能带来食品结构和功能上的改变,如淀粉的凝胶化、蛋白质的变性等,此时需要综合考察不同工艺流程带来的复合效应。在非热加工操作中,经常会利用栅栏效应(hurdle effect)来更有效地减少温度升高对食品物料带来的负面影响,类似地,也可以考虑综合使用不同热加工方式来保障和优化食品品质。比如已有研究发现,利用微波和超声处理相结合的方式,可以提高果蔬切片的脆性[15],在保证食品安全的同时,提高了产品带来的感官体验,无疑是一个很好的尝试。

近十年关于食品增材制造(3D 打印)的研究也为构建更多的新食品结构提供了可能。按照设定的模型,通过数字化控制物料的挤出过程(挤出型食品 3D 打印)或将粉末逐层凝结(粉体凝结型食品 3D 打印),3D 打印可以获得完整的具有三维结构的目标食物[37]。通过调控食品物料的性质和 3D 打印过程中的机械参数,来完成具有不同营养、不同外观、不同质构和结构分布的食物,3D 打印对精准化食物设计具有很强的实践指导意义[38]。目前,更多研究仍在"自上而下"的探索打印所需物料(蛋白质、水凝胶、淀粉、脂肪等)的物理化学性质以及打印过程的工艺参数[39-43],而对"自下而上"的基于目标食物质构反溯物料选择和工艺设计的研究并不多见。挤出型食品 3D 打印是目前应用最广泛、商业化程度最高的食品增材制造技术,在这个过程中,食品物料具有假塑性才是理想的"墨水",才能有更强的"可打印性",因此目前很多研究仍然将重心放在物料的选择优化上,以达到"物料以较高的速度通过较窄喷嘴且被挤出后仍可保持预定形状和尺寸"的目标,主要考察流动指数、稠度系数、黏度,甚至是成形后涉及的屈服应力、储能模量等一系列的参数。这些参数对反映物料从喷嘴中挤出的难易程度、黏附在腔体内壁甚至堵塞喷嘴的可能性、打印成品的形状保持能力以及打印精度等都具有直接意义[44-47]。

十多年前就有学者发现滋味物质的强度脉冲呈递会影响消费者对滋味的感知[48-49],这为"减盐不减咸、减糖不减甜"的食物设计提供了新的技术可能。从风味物质的释放这一角度来看,3D 打印食品具有得天独厚的优势:通过改变食物中不同食物层的物料组成和物理性质,即可获得食物入口后消费者不同的口腔行为,并由此改变风味物质的释放过程,达到获得最佳感官体验的同时减少摄入不必要的钠离子、能量等目的。事实上,目前已有学者认为,食品 3D 打印的研究切入点,可以拓展至从原材料到成品的全工艺过程[50]。在配方设计阶段,需要在营养设计的基础上考虑到不同组分相互之间可能存在的物理及化学作用;在模型设计和建立阶段,需要考虑组分在打印过程中(及打印完成后)因温度改变、机械作用等发生的可能变化并在系统组分的构建方向/结构/密度等方面进行相应地预估和调整;在 3D 打印阶段,需要对环境条件进行实时监控和评测;在后期处理阶段,需要对打印产品做短时(温度的再次改变)和长时(贮藏等环境因素的持续变化)的品质评价,并进一步进行消费者接受度和感官评价的广泛测试。值得注意的是,虽然目前已有很多对食品的物理性质进行实时评估和测试的方法,但这些仪器测试结果的感官代表性仍需更多的研究进行确认。

3 基于物理性质评价的食品物性学研究进展

从食品物理性质评价的角度来讲,近年来的研究进展主要集中在利用模型仿真对食品物理性质进行客观评价,并与感官体验进行客观关联。

随着计算能力的飞速提升,在涉及电磁、结构、声学、流体流动、传质、传热等不同场景的多物理场-化学耦合过程时,对不同工艺条件下食品物性和品质评估都可以进行更丰富也更真实的数值仿真,如不同温度场特性仿真及其对食品物理性质和品质的影响、低酸食品热杀菌过程模拟和优化、食物颗粒机械碰撞过程中的力学特征仿真,乃至多相态、多结构、多尺度、多界面的复杂物理化学建模仿真等[51-56],更进一步,对食物在体内的过程进行体外模拟,实时、在线考察食物在口腔中的机械破碎和食团形成、食团在咽喉和食道受到的挤压和拉伸、在胃肠腔体中经过不同的生理运动后发生的化学和生物化学改变。这些需要涉及生理解剖结构的获取、组织材料的模拟和体外再生、不同物理机械运动的动力学分析和重构、模拟过程自动化控制和人工操作等。在这些方面,目前发展相对完善的是模

拟食物在口腔中的破碎行为及胃肠道中的消化行为，很多研究团队也先后搭建了各具特色的体外模拟咀嚼机器和胃肠蠕动消化模型等[57-61]。但是，对于口腔内食团形成和摆布（尤其是舌在这一过程中起到的机械运动作用，及其自身的表面物理化学性质等）、不同质构性质的食团在吞咽过程中的力和频率信息、不同刺激下（生理、心理和食物）唾液在口腔内的全时空分布、吞咽时食团与咽喉食道的接触形变、在全长度尺度（supra-molecular to continuum scale）的数值模拟和对应物理原理的探究等，都需更广泛且深入的研究。正如 Lavergne 等的观点，理解食品与人体相互作用的维度可以有很多，如全生命周期的消费者角度（见图 1）、全食物体系角度（食物矩阵、食物相态、食物结构等），但这些都要从具体的研究目标（感官体验认知、饮食行为偏好、营养摄入吸收等）出发[62]。

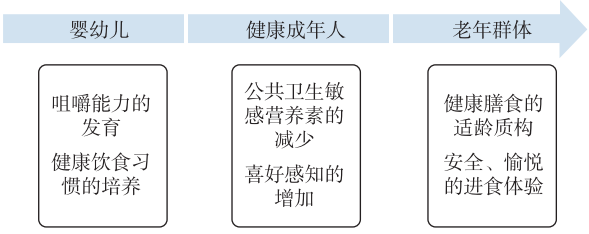


图 1　全生命周期的消费者角度

Fig. 1　Full life-span consumer perspective

从客观描述与感官体验相关的食品物理性质上来讲，正是因为有了更精密的测试仪器，才使“将消费者反馈的简单、主观的感官词汇进行科学描述”成为可能。例如全球首个吞咽障碍膳食质构国际标准（International Dysphagia Diet Standardisation Initiative，IDDSI），使用了相对容易的定性方法，对软固体和流体食品进行分级评价和分类[63]。在实践过程中，也发现了无法对“10 s 后针筒中剩余流体量”“用餐叉下压食物后指盖现白”等主观描述进行有效定量划分的问题。基于此，作者所在实验室分别对 IDDSI 中不同食物等级的质构性质进行了以食品物理性质的仪器定量评价为主的划分定级，并进一步分析了这些质构性质的物理学意义及其与感官感知的关联。比如建立了基于最大拉伸黏度以及拉伸形变过程中做功和应变量的感官内聚性评价体系，以这些客观物理指标来描述黏聚、流动的食团在口腔内和吞咽时的感官体验，并对现有食品进一步判定分级[64]。此外，也有研究者发现了与口腔黏膜层相关的感官描述（如拉丝性、黏滞性等）同拉伸形变、摩擦润滑等物理性质之间的关联[65]。然而，目前仍然没有深入地将这些感官体验与大脑神经响应的关联机制进行挖掘，这需进一步通过多学科交叉进行探索。另外，近年来逐渐兴起了利用原子力显微成像技术等从更微观的视角评价食品材料物理性质（刚度、弹性、形变）的方法[66-67]，虽然很有科学价值，但仍需较多的探索，包括待测食品物料的选取和处理、应用数学模型的选择和修正、测量参数的应用和运行条件等。

4 食品物性学研究方向展望

1991 年中国科学技术出版社出版了我国第一本食品物性学专著[68]。该专著的前言中写道：“食品品质的好坏，不但视其各种营养素的种类和含量，是否有益于消费者的健康，而且也取决于其气味、滋味、外观、组织状态以及人们对食品的嗜好程度”。时至今日，这段关于食品物性学研究的描述对接下来关于食品物性的科学研究仍有很强的借鉴和指导意义。

4.1 基于食品载体性质的营养素递送和吸收

当前，主流的食品营养研究仍以食品的化学组成作为主要关注对象，如每种营养素的特性、不同加工工艺和贮藏条件下营养素的变化、消化和吸收方式的异同等。然而，在关注单一营养素及不同营养素间相互作用的同时，更需要注意食品区别于药品的一个重要特征，就是不同的营养素都具有一个“载体”，这个载体就是摄入的食物，营养素经由载体在不同的体内环境中被释放和吸收[69]。正因如此，营养素的营养功效与其存在的食物载体性质紧密相连。例如“吃苹果”和“喝压榨苹果汁”时，载体物理形态、结构性质不同，改变的不仅是由于进食方式差异而产生的感官愉悦程度差异，更影响了食物在口腔内的分解、消化液分泌、胃肠消化道物理状态改变的速率和营养素所滞留的时间[70]，进而产生了不同的营养功效。“减盐不减咸”的例子也同样说明，对于具有相同滋味、气味的物质，由于食品载体物理性质的不同会显著影响滋味、气味释放和消费者感官体验。这也就涉及到食品研究中亟须重新审视的另一个问题，即食物与人体之间的相互作用。

4.2 饮食过程中食品与人体之间的相互作用

食品只有进入人体之后，才从一种可食用的材

料变成了提供能量、营养、感官愉悦性的食物，从这一角度讲，以材料学方法对食物进行研究存在一定的误区。食材入口后，先后通过口腔和胃肠消化道，经历了物理、化学等方面的改变，这些改变的发生和发展都受到食物的最终受体——人的主要参与和极大影响。从食品物性学的角度来讲，食品的质构和结构性质在食物与人体相互作用的过程中具有重要的作用。摄入固体食物后，牙齿对其进行破碎，唾液对破碎颗粒进行水解，舌在牙齿和颊部肌肉的辅助下将破碎颗粒黏聚形成食团，并重复破碎–食团形成这一过程，直至完成吞咽[71-72]。摄入流体食物时，虽然没有破碎和食团形成的过程，但由于唾液的介入，也可能带来物理性质和相态上的改变，例如淀粉增稠流体被唾液淀粉酶水解后发生的剪切黏度急速下降，富含单宁的红酒与唾液富辅蛋白结合发生聚集沉淀带来口腔摩擦行为的改变[73]，对于相同浓度的柠檬酸，得出“更不酸”感官体验的往往是唾液缓冲能力更强的受试者[74]等。这些物理、化学性质的转变，影响消费者对入口食物质构、结构、风味的感知，也决定了后续营养素的释放和吸收。

在尚未达温饱的年代，食物产品设计主要关注于保证能量和营养素足够。随着人们生活和医疗水平的整体提高，人口老龄化逐渐成为社会关注热点。最近的人口普查数据显示，“十四五”时期，我国60岁及以上老年人口总量将突破3亿(占总人口比例超20%)，进入中度老龄化阶段；在2035年左右，预计将突破4亿，占总人口比例超过30%，进入重度老龄化阶段。但目前的产品设计对特殊人群的食物质构设计覆盖极少[75]，还停留在政策建议层面，如中国营养学会编著的《中国居民膳食指南2022》中，才首次加入了高龄老人(80岁以上)的膳食推荐。中高龄老年人普遍存在饮食能力不足以及不同程度的咀嚼、吞咽障碍问题，从食物与人体相互作用的角度出发，为达到预期的能量补充和营养素补充目标，对中高龄老年人食品的质构设计变得尤为重要。年长者的舌肌压力更低（无法处理更硬的食物）、牙齿咬合能力和咀嚼效率较弱、唾液平均分泌流率下降严重、肌肉(面颊、咽部、气管)协调能力也变差[76-78]，这些都对食品的安全咀嚼和吞咽设计提出了挑战。对于高龄老年人的食物质构设计，需要恰当的流体黏度、较低的食物硬度、不易松散的结构组成（以及避免异相夹杂）、均匀顺滑的食物密度，来降低咀嚼和吞咽困难的老年人群的进食风险[79]。设计和开发与饮食能力相匹配的食品质构，是当今食品科学家和工业界需要共同解决的问题。

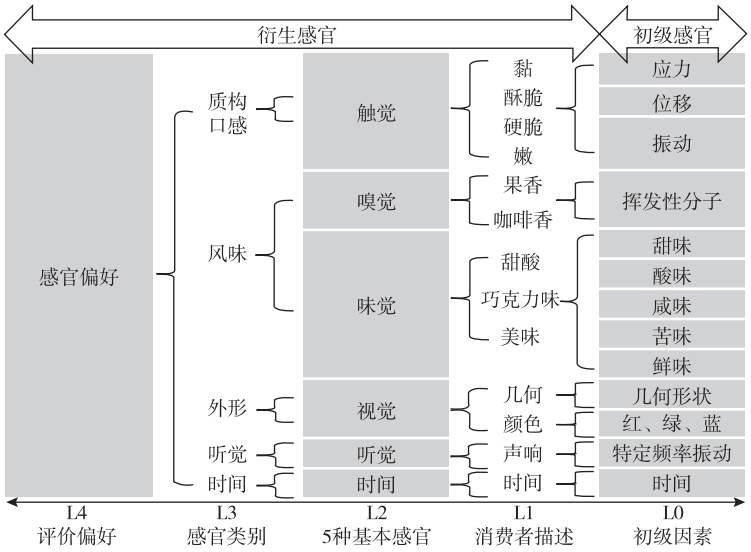
食品物性在食品与人体相互作用中的另一个重要体现则是在口腔摩擦与润滑上。食品科研人员近几年才开始重视入口食物与人体相互作用过程中一个非常重要的“界面”，即口腔内的唾液薄层[80]。覆盖在口腔内组织和器官表面的唾液薄层具有独特的界面性质和胶体性质，同时也因其覆盖的组织和器官表面的拓扑形态差异，流体在流动时会呈现出不同的流动状态。从风味感知的角度来讲，呈味剂到达味觉受体发生溶解和迁移的过程中，以及小分子芳香物质到达嗅觉受体发生扩散的过程中，唾液薄层都起到十分重要的作用[81]。唾液薄层对质构感知的影响则更直接。作者所在实验室通过自制体外摩擦仪证实，一直被认为是单纯化学感知的涩感，其实是一种质构感知，这种隶属于质构感知范畴的触觉感知则来源于唾液中沉淀的蛋白质引发的口腔内表面的部分甚至全部暴露，而缺少了润滑层的状态改变了受试者的触觉感知[82]。后续的口腔原位摩擦实验也再次证实了这一发现[83]。利用体外模拟生物组织及接触面的润滑研究仍存在较大的知识缺口，包括接触材料的选择、模拟唾液薄层的制备、摩擦行为的复刻等[84]，而有关其他食物与人体相互作用的“界面”研究也需要进一步推进。

4.3 人体感官感知与仪器表征的食品物性之间的有效关联

虽然已有文献将感官性质与食品的物理、化学性质等并列，但作者对感官性质是一种食品性质持慎重意见。食品的物理、化学等性质是食品作为一种可食用材料的材料学性质，是带有一定数值和量纲且可被重复准确测量的性质，具有实际客观意义。比如荞麦面条的断裂强度和维生素P含量，婴儿乳粉中的水分含量和体外模拟消化特性等。然而感官性质是消费者经过外界环境刺激后，综合自身过往经验而产生的对食品/食物作为一种“材料”的认知和体验，因消费者自身生理条件和心理认知的差异，这种认知和体验具有极强的个体依赖性。正因如此，这种综合性的感知输入与输出，被称为“感官体验”可能更合适[85]。对于感官体验的研究综合地考察了从受体到大脑的全过程，包括受到的外界刺

激、激活的神经通路、响应的大脑脑区、信息处理的方式,以及言语和/或文字形式的表达过程等。而利用仪器表征则只是针对一种,至多几种不同的物理、化学、生物及(微)结构性质的简单加和,这与感官体验大相径庭[86]。

感官体验层级示意图见图 2。以质构感官体验为例,主要的 3 个物理刺激是应力、位移和振动[87]。这些物理刺激均可被准确测量,并体现在感官体验上,如应力带来重量感、硬度、坚实度,位移带来粗糙感,振动带来麻刺感等。从流体力学角度讲,在仪器测试黏度时,是以应力和单位时间的位移作为主要的测量物理量,也就是说,如果想要将受试者对黏度的感官体验进行量化,可以拆解的参数是应力、位移和时间 3 个变量,因此可以通过评价皮下组织的机械受体与接触面间隙的流体运动/形变速率,结合受试者对接触面的阻力感知来演化出黏度的感官体验机制。类似地,在涉及触觉、嗅觉、视觉、听觉等方面时,如何更有效地将感官感知用更为客观直接的物理性质进行描述,需要研究人员仔细思考。



L0 水平表示受到对应的物理刺激后产生的直接感官体验;衍生感官则通过不同物理刺激的组合后衍生而成,分列在 L1(消费者描述)至 L4(评价偏好)的不同水平。

图 2 感官体验层级示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the hierarchy of sensory perception

例如,同样一瓶可乐,摇晃之后二氧化碳随之释放,消费者喝下后甜味感知显著上升。仪器测试获得的是相同的甜度,改变的只是气泡带来的口腔感觉差异。二氧化碳气泡在一定程度上因其固有的“麻刺感”分散了大脑的注意力,同时也因其转化为碳酸时诱发舌面痛觉受体带来了一定的刺激性感知[88]。但气泡带来的远不止三叉神经感觉的变化,更体现在口腔摩擦学上的显著变化。舌面与二氧化碳的相互作用使摩擦体系的水动力层和边界层的润滑成分减少,唾液薄层发生移除,摩擦系数增加;薄层流体物理、化学性质的变化进一步改变了流体的流动行为,影响甜味剂到达味觉受体的扩散过程[89](见图 3)。这是味觉感知、鼻后嗅觉感知、质地感知、三叉神经感知以及心理学综合作用带来的感官体

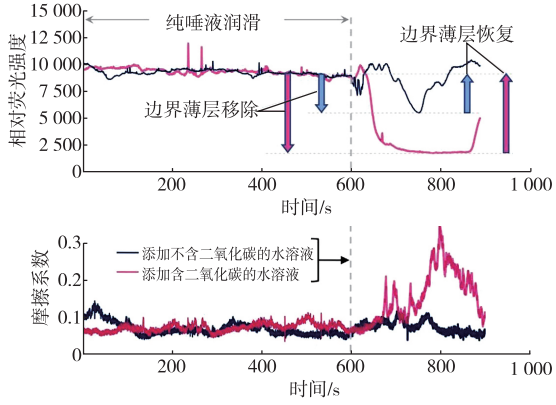


图 3 染色的唾液润滑接触面的相对荧光强度及摩擦系数随时间和环境调整的变化

Fig. 3 In-contact relative fluorescence intensity and friction versus time for dye-tagged saliva lubricated contact under different environment

验结果，如何利用合适仪器对其进行量化和评价具有很重要的意义。

生物传感器很可能是解决综合感官体验评测的有效方法之一。目前已有一些初步研究发现，适当条件下基于味觉受体而制备的生物传感器可以在短时间内呈现与人体真实感知具有较高一致性的数据特征[90-91]，但目前生物传感器的应用成熟度仍然较低，需要解决体外稳定性差、使用周期短、信号获取和分析难、检测范围狭窄等一系列“卡脖子”问题。更为广泛且客观的感官体验数据库应该会对传感器后端的数学建模和自主训练学习提供强大的数据支撑。只有对这些基本、单一的感官体验有较为明晰的理解，才能进行多重、复合的性质叠加和组合。

作者对食品物性学研究进行了回顾，阐述了目前主要的挑战和问题，以期对这些问题的分析和思考，可以阐明食品物性学在理论研究和技术应用层面的已有成果和可能突破，为将来的学科发展方向提供借鉴，共同推动我国食品物性学研究的蓬勃发展。

参考文献：

[1] 李里特. 食品物性学[M]. 北京：中国农业出版社，1998.

[2] 陈建设. 食品科学研究新方向：从“工业”到“感觉”从“物”转向“人”[N]. 中国食品报，2017-11-27(2).

[3] RAHMAN M, MCCARTHY O. A classification of food properties[J]. **International Journal of Food Properties**, 1999, 2(2): 93-99.

[4] International Organization for Standardization. Sensory analysis-vocabulary: ISO 5492: 2008[S/OL].[2022-09-26]. https://www.iso.org/standard/38051.html.

[5] 夏天雨，江昊，苟敏，等. 马铃薯淀粉介电处理理化性质研究[J]. 食品与生物技术学报，2019，38(8)：24-31.

[6] FARUQ A, ZHANG M, BHANDARI B, et al. New understandings of how dielectric properties of fruits and vegetables are affected by heat-induced dehydration: a review[J]. **Drying Technology**, 2019, 37(14): 1780-1792.

[7] KUTLU N, PANDISELVAM R, SAKA I, et al. Impact of different microwave treatments on food texture[J]. **Journal of Texture Studies**, 2021, 53(6): 1-28.

[8] 耿敬章，仇农学. 电物理加热技术及其在食品工业中的应用[J]. 粮油食品科技，2006，14(1)：60-61.

[9] SU Y, ZHANG M, CHITRAKAR B, et al. Reduction of oil uptake with osmotic dehydration and coating pre-treatment in microwave-assisted vacuum fried potato chips[J]. **Food Bioscience**, 2021, 39: 1-9.

[10] SU Y, ZHANG M, ADHIKARI B, et al. Improving the energy efficiency and the quality of fried products using a novel vacuum frying assisted by combined ultrasound and microwave technology[J]. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 2018, 50: 148-159.

[11] SU Y, ZHANG M, ZHANG W, et al. Application of novel microwave-assisted vacuum frying to reduce the oil uptake and improve the quality of potato chips[J]. **LWT–Food Science and Technology**, 2016, 73: 490-497.

[12] QUAN X, ZHANG M, ZHANG W, et al. Effect of microwave-assisted vacuum frying on the quality of potato chips[J]. **Drying Technology**, 2014, 32(15): 1812-1819.

[13] NOOR H R, NURUL N I, NORAZATUL H M R. Comparison of conventional frying and microwave frying of beef patty: effect on oil absorption, texture, physical and chemical properties[J]. **Food Research**, 2021, 5(3): 399-405.

[14] JUMRAS B, INPRASIT C, SUWANNAPUM N. Effect of microwave-assisted vacuum frying on the quality of banana chips[J]. **Songklanakarin Journal of Science and Technology**, 2020, 42(1): 203-212.

[15] FARUQ A, ZHANG M, ADHIKARI B. A novel vacuum frying technology of apple slices combined with ultrasound and microwave[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2019, 52: 522-529.

[16] ISLAM M, ZHANG M, BHANDARI B, et al. A hybrid vacuum frying process assisted by ultrasound and microwave to enhance the kinetics of moisture loss and quality of fried edamame[J]. **Food and Bioproducts Processing**, 2019, 118: 326-335.

[17] CHITRAKAR B, ZHANG M, FAN D. The synergistic effect of ultrasound and microwave on the physical, chemical, textural, and microstructural properties of vacuum fried Chinese yam (*Dioscorea polystachya*)[J]. **Journal of Food Processing and Preservation**,

2019,43(9):1-12.

[18] SHI H,ZHANG M,YANG C. Effect of low-temperature vacuum frying assisted by microwave on the property of fish fillets (*Aristichthys nobilis*)[J]. **Journal of Food Process Engineering**,2019,42(4):1-8.

[19] DEVI S,ZHANG M,LAW C. Effect of ultrasound and microwave assisted vacuum frying on mushroom (*Agaricus bisporus*) chips quality[J]. **Food Bioscience**,2018,25:111-117.

[20] QIU L,ZHANG M,WANG Y,et al. Effects of ultrasound pretreatments on the quality of fried sweet potato (*Ipomea batatas*) chips during microwave-assisted vacuum frying[J]. **Journal of Food Process Engineering**,2018,41(8):1-10.

[21] HUANG M,ZHANG M,BHANDARI B. Synergistic effects of ultrasound and microwave on the pumpkin slices qualities during ultrasound-assisted microwave vacuum frying[J]. **Journal of Food Process Engineering**,2018,41(6):1-8.

[22] SANSANO M,DE LOS REYES R,ANDRES A,et al. Effect of microwave frying on acrylamide generation,mass transfer,color,and texture in French fries[J]. **Food and Bioprocess Technology**,2018,11(10):1934-1939.

[23] QUAN X,ZHANG M,FANG Z,et al. Low oil French fries produced by combined pre-frying and pulsed-spouted microwave vacuum drying method[J]. **Food and Bioproducts Processing**,2016,99:109-115.

[24] BAINGEW S,THERDTHAI N,DHAMVITHEE P. Characterization of microwave vacuum-dried durian chips[J]. **Journal of Food Engineering**,2011,104(1):114-122.

[25] BARUTCU I,SAHIN S,SUMNU G. Acrylamide formation in different batter formulations during microwave frying[J]. **LWT–Food Science and Technology**,2009,42(1):17-22.

[26] CHEN S,CHEN H,CHAO Y,et al. Effect of batter formula on qualities of deep-fat and microwave fried fish nuggets[J]. **Journal of Food Engineering**,2009,95(2):359-364.

[27] GAVAHIAN M,TIWARI B,CHU Y,et al. Food texture as affected by ohmic heating:mechanisms involved,recent findings,benefits,and limitations[J]. **Trends in Food Science and Technology**,2019,86:328-339.

[28] 邓力,金征宇. 欧姆杀菌装备及其最新进展[J]. 食品与机械,2004,22(2):61-63.

[29] TIAN X,WU W,YU Q,et al. Quality and proteome changes of beef *M. longissimus dorsi* cooked using a water bath and ohmic heating process[J]. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**,2016,34:259-266.

[30] JITTANIT W,KHUENPET K,KAEWSRI P,et al. Ohmic heating for cooking rice:electrical conductivity measurements,textural quality determination and energy analysis[J]. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**,2017,42:16-24.

[31] ICIER F,COKGEZME O,SABANCI S. Alternative thawing methods for the blanched/non-blanched potato cubes:microwave,ohmic,and carbon fiber plate assisted cabin thawing[J]. **Journal of Food Process Engineering**,2017,40(2):1-13.

[32] MOON J,YOON W,PARK J. Assessing the textural properties of Pacific whiting and Alaska pollock surimi gels prepared with carrot under various heating rates[J]. **Food Bioscience**,2017,20:12-18.

[33] PIETTE G,BUTEAU M,HALLEUX D,et al. Ohmic cooking of processed meats and its effects on product quality[J]. **Journal of Food Science**,2004,69(2):71-78.

[34] FARAHNAKY A,AZIZI R,GAVAHIAN M. Accelerated texture softening of some root vegetables by ohmic heating[J]. **Journal of Food Engineering**,2012,113(2):275-280.

[35] OLIVERA D,SALVADORI V,MARRA F. Ohmic treatment of fresh foods:effect on textural properties[J]. **International Food Research Journal**,2013,20(4):1617-1621.

[36] KAMALI E,FARAHNAKY A. Ohmic-assisted texture softening of cabbage,turnip,potato and radish in comparison with microwave and conventional heating[J]. **Journal of Texture Studies**,2015,46(1):12-21.

[37] 刘倩楠,张春江,张良,等. 食品 3D 打印技术的发展现状[J]. 农业工程学报,2018,34(16):265-273.

[38] 张玲莺,梁丽,曹锦轩,等. 3D 打印肉制品研究进展[J]. 未来食品科学,2021,1(4):86-99.

[39] DANKAR I,HADDARAH A,OMAR F,et al. Assessing the microstructural and rheological changes induced by food additives on potato puree[J]. **Food Chemistry**,2018,240:304-313.

[40] LIU Z,ZHANG M,BHANDARI B,et al. Impact of rheological properties of mashed potatoes on 3D printing[J]. **Journal of Food**

Engineering, 2018, 220: 76-82.

[41] RAPISARDA M, VALENTI G, CARBONE D, et al. Strength, fracture and compression properties of gelatins by a new 3D printed tool[J]. **Journal of Food Engineering**, 2018, 220: 38-48.

[42] SEVERINI C, DEROSSI A, CAPORIZZA R, et al. Printing a blend of fruit and vegetables. New advances on critical variables and shelf life of 3D edible objects[J]. **Journal of Food Engineering**, 2018, 220: 89-100.

[43] VANCAUWENBERGHE V, VERBOVEN P, LAMMERTYN J, et al. Development of a coaxial extrusion deposition for 3D printing of customizable pectin-based food simulant[J]. **Journal of Food Engineering**, 2018, 225: 42-52.

[44] FERNANDES V, MULLER A, SANDOVAL A. Thermal, structural and rheological characteristics of dark chocolate with different compositions[J]. **Journal of Food Engineering**, 2013, 116(1): 97-108.

[45] LI G, HU L, LIU J, et al. A review on 3D printable food materials: types and development trends[J]. **International Journal of Food Science and Technology**, 2022, 57(1): 164-172.

[46] WARNER E, NORTON I, MILLS T. Comparing the viscoelastic properties of gelatin and different concentrations of kappa-carrageenan mixtures for additive manufacturing applications[J]. **Journal of Food Engineering**, 2019, 246: 58-66.

[47] WILMS P, DAFFNER K, KERN C, et al. Formulation engineering of food systems for 3D-printing applications-a review[J]. **Food Research International**, 2021, 2: 1-21.

[48] MOSCA A, VAN DE VELDE F, BULT J, et al. Taste enhancement in food gels: effect of fracture properties on oral breakdown, bolus formation and sweetness intensity[J]. **Food Hydrocolloids**, 2015, 43: 794-802.

[49] HEINZERLING C, STIEGER M, BULT J, et al. Individually modified saliva delivery changes the perceived intensity of saltiness and sourness[J]. **Chemosensory Perception**, 2011, 4(4): 145-153.

[50] TEJADA-ORTIGOZA V, CUAN-URQUIZO E. Towards the developments of 3D-printed food: a rheological and mechanical approach[J]. **Foods**, 2022, 11(9): 1-21.

[51] 周建伟, 王亮, 卢山, 等. 罐头食品热杀菌工艺仿真平台设计与开发[J]. 中国食物与营养, 2014, 20(7): 39-41.

[52] 陈震, 徐凤英, 李长友, 等. 粒状食品红外线源辐射瞬态熟化温度场的仿真[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(1): 116-121.

[53] 李赫, 张志, 任源, 等. 基于 FLUENT 的菊花热风干燥流场特性仿真分析[J]. 贮运与保鲜, 2018, 34(10): 133-138.

[54] 刘东红, 徐恩波, 邹明明, 等. 复杂食品体系及食品加工过程的模型与分析: 现状及进展[J]. 中国食品学报, 2019, 19(10): 1-10.

[55] 曹宪周, 张超, 房凯文, 等. 糙米碰撞过程试验及仿真分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 80-90.

[56] 杨化宇, 张宇皓, 闫博文, 等. 液态食品连续化微波加热过程的仿真模拟[J]. 中国食品学报, 2021, 7: 170-178.

[57] KONG F, SINGH P. A human gastric simulator (HGS) to study food digestion in human stomach[J]. **Journal of Food Science**, 2010, 75(9): 627-635.

[58] MENARD O, CATTENOZ T, GUILLEMIN H, et al. Validation of a new *in vitro* dynamic system to simulate infant digestion[J]. **Food Chemistry**, 2014, 145: 1039-1045.

[59] STADING M, WAQAS M, HOLMBERG F, et al. A device that models human swallowing[J]. **Dysphagia**, 2019, 34(1): 1-12.

[60] 刘同占. 仿下颌运动机器人设计及仿生性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.

[61] 张啸峰, 陈勇, 陈建设. 基于口腔咀嚼原理的咀嚼模拟器研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 1-12.

[62] LAVERGNE D, YOUNG A, ENGMANN J, et al. Food oral processing-an industry perspective[J]. **Frontiers in Nutrition**, 2021, 8: 1-8.

[63]王如蜜, 陈建设, 郝建萍, 等. 国际吞咽障碍食物标准[M]. 北京: 科学技术出版社, 2018.

[64] HADDE E, CHEN W, CHEN J. Cohesiveness visual evaluation of thickened fluids[J]. **Food Hydrocolloids**, 2020, 101: 1-11.

[65] FUNAMI T, NAKAUMA M. Correlation of human perception in swallowing with extension rheological and tribological characteristics in comparison with shear rheology[J]. **Journal of Texture Studies**, 2022, 53(1): 60-71.

[66] CÉRDENAS-PÉREZ S, CHANONA-PÉREZ J, MÉNDEZ-MÉNDEZ J, et al. Recent advances in atomic force microscopy for assessing the nanomechanical properties of food materials[J]. **Trends in Food Science and Technology**, 2019, 87: 59-72.

[67] WEN Y,XU Z,LIU Y,et al. Investigation of food microstructure and texture using atomic force microscopy:a review[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**,2020,19(5):2357-2379.
[68] 金万浩. 食品物性学[M]. 北京:中国科学技术出版社,1991.
[69] 陈建设. 浅谈食品营养研究的误区[J]. 食品科学,2018,39(20):4-5.
[70] 陈建设,王鑫森. 食品口腔加工研究的发展与展望[J]. 中国食品学报,2018,18(9):1-7.
[71] CHEN J. Food oral processing-a review[J]. **Food Hydrocolloids**,2009,23(1):1-25.
[72] 陈建设,陈勇. 基于食品物理学的老年饮食能力评价与膳食质构等级评测[J]. 中华物理医学与康复杂志,2019,41(12):945-948.
[73] 蔡慧芳,陈建设. “口腔”摩擦学在食品质构感官研究中的应用[J]. 食品安全质量检测学报,2016,5:1969-1975.
[74] ZHANG D,JIANG H,CHEN J,et al. Buffering capacity of saliva influences the perception of acid-related sensory properties[J]. **Food Quality and Preference**,2022,97:1-13.
[75] CHEN J. From tastes good to mouth-feels good:a remark for the 50 years success of the *Journal of Texture Studies*[J]. **Journal of Texture Studies**,2020,51(1):5-6.
[76] CHEN J. Food for elderly:challenges and opportunities[J]. **Journal of Texture Studies**,2016,47(4):255-256.
[77] 陈建设,吕治宏. 老年饮食障碍与老年食品:食品工业的挑战与机遇[J]. 食品科学,2015,36(21):310-315.
[78] 吕治宏,苏明送,陈建设. 吞咽功能障碍患者食品质构的调整与标准化[J]. 中华物理医学与康复杂志,2015,37(12):952-954.
[79] 陈建设.特殊食品质构标准的口腔生理学和食品物理学依据[J]. 中国食品学报,2018,18(3):1-7.
[80] HE Y,WANG X,CHEN J. Current perspectives on food oral processing[J]. **Annual Review of Food Science and Technology**,2022,13:167-192.
[81] WANG X,CHEN J. Food oral processing:recent developments and challenges[J]. **Current Opinion in Colloid and Interface Science**,2017,28:22-30.
[82] BROSSARD N,CAI H,OSORIO F,et al. ‘Oral’ tribological study on the astringency sensation of red wines[J]. **Journal of Texture Studies**,2016,47(5):392-402.
[83] WANG X,CHEN J,WANG X. *In situ* oral lubrication and smoothness sensory perception influenced by tongue surface roughness[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**,2022,102(1):132-138.
[84] 汪琦,朱扬,陈建设. 口腔软摩擦理论与测量技术及其在食品感官感知研究中的应用[J]. 食品科学,2021,42(9):222-232.
[85] 陈建设,刘源,师锦刚. 食品感官科学研究:挑战与可能[J]. 食品科学,2022,43(19): 1-7.
[86] SAMUELSEN C,VINCIS R. Cortical hub for flavor sensation in rodents[J]. **Frontiers in Systems Neuroscience**,2021,15:1-12.
[87] CHEN J,TIAN S,WANG X,et al. The Stevens law and the derivation of sensory perception[J]. **Journal of Future Foods**,2021,1(1):82-87.
[88] CHANDRASHEKAR J,YARMOLINSKY D,VON BUCHHOLTZ L,et al. The taste of carbonation [J]. **Science**,2009,326(5951):443-444.
[89] VLADESCU S,BOZORGI S,HU S,et al. Effects of beverage carbonation on lubrication mechanisms and mouthfeel[J]. **Journal of Colloid and Interface Science**,2021,586:142-151.
[90] ROPER S,CHAUDHARI N. Taste buds:cells,signals and synapses[J]. **Nature Reviews Neuroscience**,2017,18(8):485-497.
[91] 郭程琳,樊玉霞,陈高乐,等. 细胞生物传感器在食品风味评价中的研究进展[J]. 食品科学,2022,44(1):268-276.