

编者按:面对新一轮科技革命和产业变革,科学与技术的日益交叉融合,坚持科技创新,加强基础研究,突破关键核心技术,是实现高水平科技自立自强的关键所在。食品科技已进入“大食物观”时代,我国由食品大国向食品强国迈进,尚需解决技术“卡点”、产业“痛点”、体制机制“难点”问题,畅通创新链、产业链、供应链的利益链条,实现重要产业“自由可控”、重点技术“并跑领跑”、重大产品“特色优势”。为共享食品科技的最新研究成果与研究进展,本刊特约专栏将连续刊载有关文章(出自中国食品科学技术学会第十九届年会“2022 食品科学前沿热点问题论坛”及 2022 中国食品科技十大进展)。

(本刊主编:中国工程院院士陈坚教授。本栏目得到福州日兴水产食品有限公司的支持。)

膳食纤维黏度的食欲调节作用及其研究进展

李 斌¹, 徐晨凤², 商龙臣^{1,2*}

(¹华中农业大学食品科技学院 武汉 430070

²湖北民族大学生物与食品工程学院 湖北恩施 445000)

摘要 膳食纤维在调节机体能量摄入及稳定餐后血糖等方面发挥着潜在作用。黏度为可溶性膳食纤维重要的物性主体,也是其营养效应的关键贡献者。当前,基于膳食纤维物性的营养效应备受研究者关注,而黏度对食欲的调控作用已成为物性营养学研究的重要切入点。本文总结基于膳食纤维物化性质的促健康作用,重点综述进食过程中膳食纤维黏度介导的食欲干预作用及其机制,以期对饱感强化食品的开发和应用提供思路与借鉴,为后续系统探究膳食黏度对人体健康的影响奠定一定的理论基础。

关键词 膳食纤维; 膳食黏度; 饱感; 胃肠消化; 食欲响应

文章编号 1009-7848(2023)04-0001-11 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2023.04.001

当前,肥胖(体重指数,Body mass index, BMI ≥ 30 kg/m²)和超重(BMI ≥ 25 kg/m²)人口已首次超过体重不足人口数^[1]。超重和肥胖不仅会显著增加个体患慢性非传染性疾病,如心血管疾病、II-型糖尿病、癌症等疾病的风险,也与许多心理疾病如自卑、抑郁症的发生高度正相关^[2]。如何有效解决这一问题已成为众多营养学家和食品科学家关注的热点。毋庸置疑,手术和药物治疗在抗击肥胖方面已取得不同程度的成功,然而,这些“权宜之计”往往也伴随着高昂的经济成本和难以避免的副作用,使得广大消费者对这些措施存在一定的质疑和抵触心理^[3]。而且,即使采用医学手段

减重,患者后期持续的体重管理仍离不开精心设计的长期膳食干预。通过调整饮食习惯、改善生活方式的减重策略更为消费者所接受。

随着人们对膳食纤维(Dietary fiber, DF)研究的不断深入,关于膳食纤维黏度对人体健康的益处有了更多的认识。作为植物细胞的重要质构因子,可溶性膳食纤维广泛存在于各类植物性食品中。近年来,众多研究揭示了高黏度膳食纤维在延缓胃排空^[4],减少食物摄入,稳定餐后血糖和激素调节^[5]等方面的积极作用,膳食纤维的黏度特性用于食欲干预被寄予厚望。基于此,本文总结黏度的不同测定方法,综述膳食黏度对进食和消化过程中饱感信号及激素水平等的影响,旨在为探究食品物性的食欲调控机制提供一定的理论借鉴,也有望为以体重管理为导向的饱感强化食品(Satiety-enhancing food, SEF)的设计和开发提供新思路。

收稿日期: 2023-04-10

基金项目: 湖北省教育厅科学研究计划项目(D20221902)

第一作者: 李斌,男,博士,教授

通信作者: 商龙臣 E-mail: 2021021@hbmzu.edu.cn

1 基于膳食纤维物性的促健康作用

DF广泛存在于各类天然食物,如水果、蔬菜和谷物中,是食品工业中用于调整产品质构特性的重要食品配料^[6]。关于DF的营养效应,最初的研究重点多集中于其剂量的营养效应。人们往往注重于研究DF的摄入量对健康产生的作用,而忽略了不同结构和物化性质对其营养效应的影响。然而,越来越多结合体外试验、动物实验和人群试验的综合性研究,从细胞水平到个体水平探究了DF的急性作用和长期干预效果,使人们逐渐认识到不同来源的DF因不同的物化性质而可能具有不同代谢和生理效应^[7]。黏度是DF的重要物性主体,也是其营养效应的关键贡献者。例如,

研究认为黏性膳食纤维可延缓胃排空,增强饱腹感,并有助于抑制脂肪的过度积累。此外,DF可改善胰岛素耐受,同时具有良好的葡萄糖吸附能力,因而被认为可预防肥胖、缓解糖尿病症状^[8]。

如表1所示,DF与人体健康密切相关的重要物性主要有持水力(Water holding capacity, WHC)、膨胀力(Swelling capacity, SC)、持油力(Oil holding capacity, OHC)、葡萄糖吸附力(Glucose adsorption capacity, GAC)、胆固醇吸附力(Cholesterol adsorption capacity, CAC)和黏度(Viscosity)。随着人们对DF持续不断的研究,DF的物性(Physical properties)对人体健康的积极作用被越来越多的研究所证实。

表1 概述DF物化性质及其功能

Table 1 Overview of physicochemical properties and functions of DF

产品分类	制品	膳食纤维来源	物化性质	功能	参考文献
饮料、果酱类	饮料和保健产品	卷心菜	WHC、OHC、GAC、CAC、黏度	益生元和降低血糖、血脂	[9]
	膳食纤维酸奶	小麦、燕麦纤维	WHC、SC	增加纤维含量,强化营养,改善口感和风味	[10]
肉类	熟肉制品	水果皮	WHC、OHC	降低水分活度,稳定耐热乳酸菌	[11]
	维也纳香肠	杨桃	WHC、SC、OHC、GAC	改善物理和感官特性	[12]
	波洛尼亚香肠	柑橘类	WHC、SC、OHC、GAC	提高纤维含量,降低亚硝酸盐残留水平,抑制微生物生长	[13]
烘焙类	牛肉汉堡	小麦	WHC、SC、OHC、GAC	替代脂肪,改善质构	[14]
	饼干	麦麸	WHC、OHC、GAC、CAC	降低总胆固醇和甘油三酯含量	[15]
	纤维饼干	瓜尔胶	WHC、SC	提高纤维含量,降低硬度,提高可接受性	[16]
	苹果渣面包	苹果	WHC、SC	提高纤维含量,改善面筋吸湿性,降低面团伸长性	[17]
	豌豆纤维蛋糕	豌豆	WHC、SC、OHC	改善制品质构,提高其可接受性	[18]
其他类	食用凝胶	番茄皮	WHC、SC	增加WHC、SC以及冻融稳定性	[19]
	淀粉制品	豆渣	WHC、SC	改善性能,降低断裂伸长率	[20]
	可食性包装纸 (Edible paper)	白菜	WHC、SC、OHC	改善包装表面光滑度、柔软性、透明度及包装性能	[21]
	功能性食品配料	葡萄渣	黏度、WHC、SC、GAC、CAC	提高产品的营养价值,改善产品的贮藏性,延长货架期	[22]
	膳食纤维分离物	椰子片	GAC、CAC	调节血糖和血脂水平	[23]

2 黏度的意义及其测量方法

膳食纤维的黏度特性是其发挥生理功能,具有重要物性的基础。然而,众多研究关于黏度的理解和测量方面存在着一定的偏差,往往导致研究者在探讨纤维性物的食欲调控规律方面难以形成共识。鉴于食品黏度重要的生理意义,在揭示膳食纤维黏度的食欲调节机制时,有必要准确理解各种黏度测定方法。

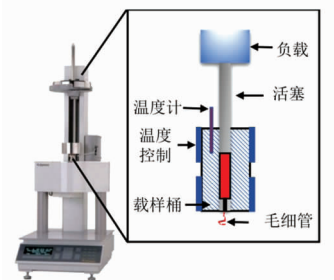

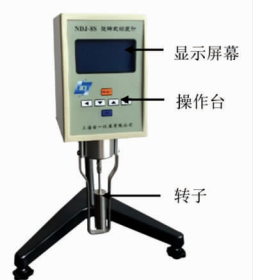
黏度可被视为流体对其流动的抵抗程度。牛顿最早将黏度描述为流体的流动与流体上所受力之间的比例关系^[24]。简言之,当剪切应力作用于流体时,流体发生移动所产生的抵抗流动的内摩擦就是流体的黏度。黏度在数值上是剪切应力与剪切速率之比,其中剪切应力是施加在流体平面上的切向力,其国际单位为帕斯卡(Pa)或牛顿每平方米(N/m²);剪切速率是因剪切应力的施加而在流体中产生的速度梯度,其单位为秒的倒数(s⁻¹)^[25]。

使用频率较高的黏度概念主要有运动黏度、绝对黏度、相对黏度和表观黏度。其中,运动黏度被定义为绝对黏度与流体密度的比值,单位为平方米秒(m²·s)。由于各类流体食物的密度差异巨大,因此导致该概念在营养学中鲜有应用。绝对黏度被定义为流体以 1 m/s 的速度流动时,施加在每平方米流体上的切向力大小,一般用 η 表示,单位为毫帕斯卡秒(mPa·s)或厘泊(cP)。而相对黏度(也称为黏度比)被定义为流体黏度与纯溶剂黏度的比值,受溶剂纯度影响,其适用范围在一定程度上受到限制。此外,表观黏度被定义为在一定速度梯度下,所施加的剪切应力与剪切速率之比,是描述食品体系流变特性最常用的术语^[26]。



随着科技的迅猛发展,黏度测量仪器逐渐向数字化、智能化方向转变,黏度的检测也因此变得更加便捷和精准。现将食品体系中常用的黏度测定仪器种类、适用范围和功能特性总结于表 2。

表 2 食品体系常用的黏度测定仪器

Table 2 Viscosity measuring instruments commonly used in food systems

仪器	应用	特点	相关研究	机械配置
毛细管流变仪	热塑性及热固性材料的表观黏度	适用范围广,操作简便,精确度高	Gibouin 等 ^[27] 利用毛细管流变仪探究谷类食物的流变特性;Beck 等 ^[28] 利用其分离豌豆蛋白,并探究加热和剪切速率对该蛋白的结构变化	
毛细管黏度计	牛顿流体和非牛顿流体的黏度	操作简单,便携,精确度高	Lee 等 ^[29] 研发一种便携式毛细管黏度计,用于分析不同剪切速率条件下的牛顿流体;Fakunle 等 ^[30] 利用该黏度计探究番茄的最佳成熟阶段及最高营养价值	
数字式黏度计	半固体食物的表观黏度	精确度高,不能剧烈搅拌,非高压操作	熊文飞等 ^[31] 利用该黏度计研究鲢鱼鱼鳞胶原蛋白的流变特性;Agusman 等 ^[32] 用其测量鱼胶黏度并探究其灵敏度	

(续表 2)

仪器	应用	特点	相关研究	机械配置
旋转流变仪	液体食物的流变特性	精确度高, 样品量少, 剪切速率范围广	张家璇等 ^[33] 利用该流变仪探究魔芋葡甘聚糖凝胶的流变特性; Yunoki等 ^[34] 利用该流变仪测定明胶溶液的黏度	 <p>升降台 转子 帕尔贴板 控制面板 底座</p>
转矩流变仪	热塑性食品剪切稳定性	操作简单, 便于控制, 数据处理时效性较高	Feng等 ^[35] 通过调整优化流变仪测量参数来探究符合材料的流变特性及加工挤压性能; Xie等 ^[36] 通过转矩流变仪模拟混配过程, 以探究熔体黏度与聚合物分子量之间的关系	 <p>进样漏斗 内部混合器 扭矩传感器 紧急制动</p>
光学法微流变仪	软物质在微米尺度的黏弹性	静止状态下非接触式检测, 可进行微观结构分析	姚云平等 ^[37] 通过光学微流变仪研究米糠蜡-大豆油复合凝胶油的微流变特性, 并对比分析其它种类油脂的流变特性; Bai等 ^[38] 利用该流变仪研究添加干酪乳杆菌对酸奶流变特性、稳定性和微观结构的影响	 <p>探测器 样品 激光</p>

3 进食前膳食纤维黏度介导的食欲调节作用

预期饱腹感(Expected satiation)定义为食物被摄入前因其质构性质所引起的机体主观食欲感受, 被认为是调控食物摄入量的决定性因素之一^[39]。研究表明, 受试者进食前对食物黏度、质构等性质的主观感受会触发其对食物饱腹性能的联想, 包括食物可能会有多强的饱腹能力, 或者摄入食物后可能在多大程度上抵抗饥饿感^[40]。除了食物本身的风味特征, 食品包括其黏度在内的质构特性被认为是决定食物预期饱腹感强、弱的关键因素。例如, 有研究证实, 在能量密度相同的条件下, 固体和半固体食物能够比流体食物提供更强的饱腹感^[41]。McCrickerd等^[42]招募 24 名受试者, 采用三因素进食问卷法研究不同黏度的卡拉胶饮料对预期饱腹感的影响。研究结果显示, 由黏性卡拉

胶赋予饮料的浓稠外观, 对预期饱腹感有较大影响。在能量密度相同的条件下, 高黏度卡拉胶饮料比低黏度饮料更能抑制饥饿感。Stribițaia等^[43]招募 211 名受试者观看倒饮料的演示视频, 并要求受试者假想自身饮用这些饮料后的期望饱腹感强度。其研究结果显示, 与观看倾倒低黏度饮料视频的志愿者相比, 观看中/高黏度饮料倾倒视频的志愿者具有更强的即时期望饱腹感(观看视频后立即反馈的主观饱腹感)。2 h 后再次要求志愿者回顾演示视频并反馈其饱腹感, 仍得到相同的研究结果。该研究还认为, 视觉上所感知到有关食品的顺滑度(Smoothness)、浓稠度(Thickness)、奶油感(Creaminess)和稀薄多水(Watery)等性状是影响期望饱腹感的重要因素, 奶油感越重或黏度越高的饮料往往触发更强的期望饱腹感。

4 口腔加工过程中膳食纤维黏度介导的食欲调节作用

研究认为,增加口腔暴露(口腔与食物的接触)的时间或强度,可促进饱腹感信号的产生并有助于控制后续的能量摄入。口腔暴露(Oral exposure)程度受食品质构特性的影响,而黏度是其中不能被忽略的重要物性之一。有研究发现^[44],食品的黏度对口腔加工过程有显著影响。富含膳食纤维的高黏度食品可以促进咀嚼(咀嚼力度和咀嚼速率),延长口腔暴露时间,并增加吞咽前的咀嚼周期。此外,摄入口腔的食物,其质构特性,如流体食品的黏度对口腔产生的机械性刺激以及其风味成分(滋味物质和香味物质)产生的化学性刺激,可促进口腔唾液的分泌,有助于强化机体的饱腹感^[45]。

Wanders 等^[46]对 121 名受试者进行一项随机交叉试验,探究黏性膳食纤维对饱腹感的影响。受试者被要求可随意摄入含纤维素、瓜尔胶和藻酸盐的饼干,结果显示,与对照组相比,进食含 5% 藻酸盐的饼干,最终可降低受试者 22% 的能量摄入量,而添加瓜尔胶和纤维素的饼干对受试者随意餐能量摄入量无显著影响。此外,含有藻酸盐的饼干使口服暴露时间增加了 48%,而这被认为是降低受试者能量摄入量的关键原因。

5 进食后膳食纤维黏度介导的食欲调节作用

如图 2 所示,DF 的黏度特性对胃肠消化过程的干预,是其调控机体食欲响应的关键。简而言之,黏性膳食纤维增加了胃肠道内容物的黏度,从而延长食物在胃肠道中输送和消化过程。通过这种方式,DF 的黏度特性有助于钝化机体的胰岛素响应,稳定其餐后血糖水平。此外,黏性膳食纤维对肠道内食糜的滞留作用,可强化营养物质与肠道内黏膜化学感受器如 I-细胞和 L-细胞的接触,促进食欲相关激素如胰高血糖素样肽 1 (Glucagon-like peptide 1, GLP-1)、酪酪肽(PPY)和胆囊收缩素(Cholecystokinin, CCK)等的分泌。GLP-1、PPY、CCK 被认为是最重要的饱感激素,可通过脑肠轴作用于大脑,从而提升机体的饱腹感^[47]。此外,可溶性 DF 可在结肠中发酵,产生的短链脂肪酸

(Short-chain fatty acids, SCFA) 不仅能够降低结肠 pH 值,改善肠道菌群结构,部分 SCFA 可刺激 L-细胞对饱感激素 GLP-1 和 PYY 的分泌,有助于诱导机体的饱足感^[48-49]。

5.1 胃消化过程中膳食纤维黏度介导的食欲调节作用

胃排空是与机体饱腹感信号产生有关的重要生理现象,是胃将其内容物排入小肠十二指肠以进行消化和吸收的复杂而缓慢的消化过程^[51]。食物的胃排空过程与食糜的能量密度、流变特性和物理状态(液体/固体)密切相关^[52]。图 2 展示胃对其内容物的排空模式。

胃部因食品机械刺激而产生的饱腹感,往往先于小肠因化学成分刺激而产生的饱足感。因此,食物的胃排空特性对于饱腹感的产生具有决定性的影响。进入胃内的黏性膳食纤维与胃酸及唾液混合后形成的高黏基质可增加胃张力,由此触发迷走神经向大脑传入饱腹感信号^[53]。可溶性纤维在胃内的持续水化可增加胃内容物的黏度,由此延缓了胃的排空,在较短的时间内抑制机体的进食欲望,而长期干预导致食物摄入量减少,有利于体重减轻^[54]。

近年来,基于食欲干预的减重策略日渐备受青睐,黏性膳食纤维对胃排空的影响也因此引起众多学者的关注^[55-56]。Shang 等^[55]借助体外动态胃肠系统研究了不同黏度的魔芋膳食纤维对胃排空的影响,研究结果显示,随着黏度的增加,测试餐在胃内的停留时间明显延长。低黏度和中黏度样品经过 90 min 可被完全排空,而高黏度组样品则需要超过 125 min。该研究认为,导致此现象的主要原因是高黏膳食纤维赋予食糜体系以较大的流动阻力,使其在通过幽门时更有可能抵抗来自于十二指肠的挤压以及胃内壁施加的机械力。此外,该研究认为,利用黏性膳食纤维适度提高膳食黏度,将有助于体重管理人群遵从其减重意愿。

5.2 小肠消化过程中膳食纤维黏度介导的食欲调节作用

相比于胃内源于机械性刺激产生的饱腹感,小肠产生的饱足感信号往往依赖于营养物质的化学刺激。随着胃的排空和胃张力的减弱,逐渐进入肠道的食物成分与黏膜内分泌细胞受体结合,刺

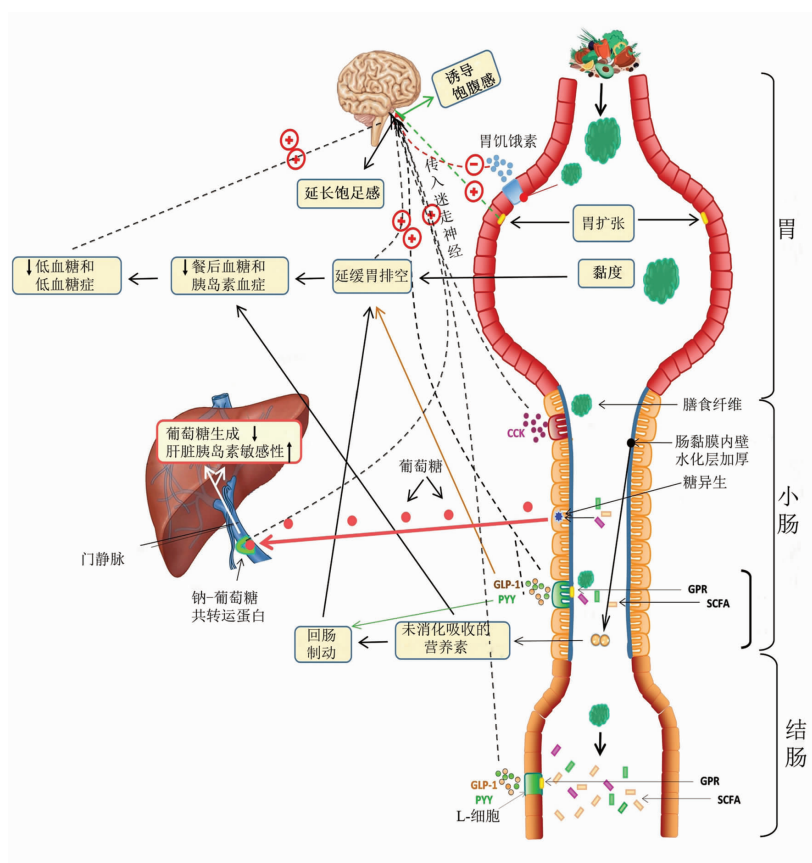


图1 黏性膳食纤维的食欲调控机制示意图^[50]

Fig.1 Schematic diagram showing the effect of viscous dietary fiber in regulating the appetite response^[50]

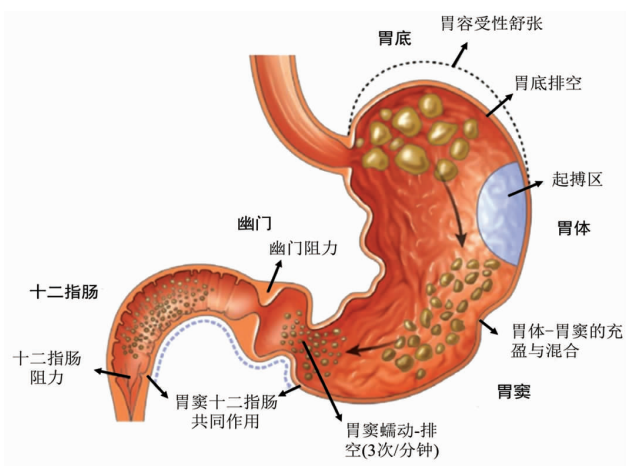


图2 腔体内容物混合和研磨的胃运动机制^[57]

Fig.2 Gastric motility mechanism of mixing and grinding of antrum contents^[57]

激肠道激素的分泌以调节食欲和随后的能量摄入量。这其中，胰高血糖素样肽-1 (Glucagon-like peptide 1, GLP-1)、酪酪肽 (PYY)、饥饿素和胆囊收缩素 (Cholecystokinin, CCK) 等是在食欲调节方

面发挥重要作用的胃肠激素。GLP-1 由肠黏膜 L-细胞所分泌,参与机体血糖稳态调节,也是目前研究最多的一种食欲生物标记物。L-细胞位于小肠的远端,不仅对营养素如糖类和蛋白质的刺激敏感,也能响应食物量的刺激,其被激活后释放的 GLP-1 可通过回肠制动与胃排空机制在短期内抑制机体进食;PYY 也由 L-细胞所分泌,该激素介导回肠和结肠制动,减缓胃排空,促进营养素的消化吸收,参与蛋白质介导的饱腹感信号机制,减少机体的食物摄入;CKK 则由小肠近端的十二指肠和空肠的黏膜 I-细胞分泌,可通过强化饱腹感以减少机体进食^[58]。

营养学及食品科学研究者普遍认为,高黏度膳食纤维对胃肠道内营养物质的生物利用度有重要影响^[59]。相关研究也证实,增加肠道内容物的黏度可减缓营养物质的吸收,有利于营养素向小肠远端组织的输送,并延长营养素与肠内黏膜化学感受器的接触。黏性膳食纤维因此被认为有助于维持机体的饱足感^[59]。例如,Ratanpaul 等^[60]和Benton

等^[61]研究证实,当食糜到达回肠末端,其内部的营养素可刺激黏膜细胞释放 GLP-1,抑制胃排空,减少肠道蠕动,从而有助于控制进食欲望,减轻体重。Xu 等^[62]采用具有不同黏度、持水力和膨胀力的部分降解魔芋葡甘聚糖饲料喂养大鼠,研究其物性对大鼠食欲反应的调节作用,结果显示,高黏度食糜显著延长了小肠内容物的保留时间,从而导致血浆中 CCK-8、GLP-1 和 PPY 水平的增加,延长了大鼠的饱足感。该研究认为,膳食纤维的黏度特性与动物食欲响应高度相关,是开发饱感强化食品的重要物性支撑。Chen 等^[63]研究了不同黏度的黄原胶和瓜尔胶对大鼠餐后食物摄入和营养代谢的影响,研究结果显示,高黏度的黄原胶组显著降低了大鼠的随意餐食物摄入量 and 餐后血糖水平。此外,该研究结果显示,长期摄入 SDF 可增加小肠长度,抑制体重过度增长,降低肥胖/超重及糖尿病等疾病发生的风险。

5.3 结肠微生物发酵过程中膳食纤维黏度介导的食欲调节作用

DF 在小肠中几乎不被消化酶降解,最终会进入结肠,被肠道微生物部分或完全发酵,进而发挥生理作用。黏性膳食纤维是肠道菌群发酵产生 SCFA 的重要前体物质,SCFA 具有众多的生理功能。其中,某些 SCFA 可刺激回肠 L-细胞释放 PYY 和 GLP-1,因而具有一定的食欲干预作用。另一方面,有研究证实基于膳食纤维黏度特性的菌群调节作用。例如,Tamargo 等^[64]以不被人体肠道微生物降解的琼脂来调节培养基的黏度,通过体外厌氧共培养来探究黏度对肠道微生物的影响。其研究结果显示,一定黏度的肠道内容物有利于总厌氧菌和梭菌的生长,而好氧菌和肠球菌属微生物的生长则与黏度的增加呈负相关性。该研究还认为,肠腔内黏度的变化可选择性地改变微生物群的组成,表明黏度是制约肠道菌群构成的重要因素。因此,以菌群调节为桥梁,黏性膳食纤维在结肠的发酵过程中也能发挥一定的食欲调节作用。

6 总结与展望

食欲感知的过程包括感官 (Sensory)、认知 (Cognitive)、后摄入 (Post-ingestive) 和后吸收

(Post-absorptive) 4 个阶段,而饱腹感 (Satiety) 和饱足感 (Satiety) 贯穿着机体食欲感知的全过程。饱腹感,也称为短期饱感、餐内饱感,主要产生于感官和认知阶段,与口腔加工和胃的消化过程密切相关;饱足感,也称为长期饱感、餐间饱感,其信号的产生与胃肠中营养素的吸收过程密切相关。而如前所述,膳食纤维的黏度特性对机体摄食前、口腔加工及胃肠消化的全部阶段均显示出一定的食欲干预效果。黏性膳食纤维因此已成为饱感强化食品中最重要的功能配料之一,且已有研究证实纤维黏度特性应用于食欲干预的可行性。然而,如何厘清食品纤维黏度对机体饱腹感和饱足感各自的调控机制与规律,目前仍未见有相关报道。在此基础上,膳食黏度与其食欲干预效应之间的精准数学关系也远未建立。此外,虽然流体黏度的检测手段日渐完善,但是,如何监测真实消化过程中食糜体系的黏度变化,目前仍存在诸多挑战。基于此,未来应用高仿真体外动态胃肠消化系统模拟真实的胃肠消化场景,结合动物实验,精准量化膳食黏度对机体食欲响应各阶段的干预效应,揭示膳食黏度与饱感响应的明确数学关系,如此将有望为饱感强化食品的定向设计提供理论支撑和思路借鉴,同时也可为食品物性营养学研究增添一个新的认知。

参 考 文 献

- [1] BLÜHER M. Obesity: global epidemiology and pathogenesis[J]. *Nature Reviews Endocrinology*, 2019, 15(5): 288-298.
- [2] VAN DER VALK E S, SAVAS M, VAN ROSSUM E F C. Stress and obesity: Are there more susceptible individuals?[J]. *Current Obesity Reports*, 2018, 7(2): 193-203.
- [3] JOYCE P, MEOLA T R, SCHULTZ H B, et al. Biomaterials that regulate fat digestion for the treatment of obesity[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 100: 235-245.
- [4] ARGYRAKOPOULOU G, SIMATI S, DIMITRIADIS G, et al. How important is eating rate in the physiological response to food intake, control of body weight, and glycemia?[J]. *Nutrients*, 2020, 12(6): 1734.

- [5] FABEK H, MESSERSCHMIDT S, BRULPORT V, et al. The effect of *in vitro* digestive processes on the viscosity of dietary fibres and their influence on glucose diffusion[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35: 718–726.
- [6] HE Y, WANG B, WEN L, et al. Effects of dietary fiber on human health[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(1): 1–10.
- [7] GILL S K, ROSSI M, BAJKA B, et al. Dietary fibre in gastrointestinal health and disease[J]. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 2021, 18(2): 101–116.
- [8] ULLAH I, YIN T, XIONG S, et al. Effects of thermal pre-treatment on physicochemical properties of nano-sized okara (soybean residue) insoluble dietary fiber prepared by wet media milling[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 237: 18–26.
- [9] PARK S Y, YOON K Y. Enzymatic production of soluble dietary fiber from the cellulose fraction of Chinese cabbage waste and potential use as a functional food source[J]. Food Science and Biotechnology, 2015, 24(2): 529–535.
- [10] TOMIC N, DOJNOV B, MIOCINOVIC J, et al. Enrichment of yoghurt with insoluble dietary fiber from triticale – A sensory perspective [J]. LWT, 2017, 80: 59–66.
- [11] DÍAZ-VELA J, TOTOSAUS A, PÉREZ-CHABELA M L. Integration of agroindustrial co-products as functional food ingredients: Cactus pear (*O. punctata*) flour and pineapple (*A. comosus*) peel flour as fiber source in cooked sausages inoculated with lactic acid bacteria: Fruit peels as functional ingredients in sausages[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 2630–2638.
- [12] VIVAR-VERA M DE LOS A, PÉREZ-SILVA A, RUIZ-LÓPEZ I I, et al. Chemical, physical and sensory properties of Vienna sausages formulated with a starfruit dietary fiber concentrate[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(8): 3303–3313.
- [13] FERNANDEZ-GINES J M, FERNANDEZ-LOPEZ J, SAYAS-BARBERA E, et al. Effect of storage conditions on quality characteristics of bologna sausages made with citrus fiber[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(2): 710–714.
- [14] CARVALHO L T, PIRES M A, BALDIN J C, et al. Partial replacement of meat and fat with hydrated wheat fiber in beef burgers decreases caloric value without reducing the feeling of satiety after consumption[J]. Meat Science, 2019, 147: 53–59.
- [15] HONG Y, WANG Z J, XIONG J, et al. Development of the dietary fiber functional food and studies on its toxicological and physiologic properties [J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(9): 3367–3374.
- [16] MUDGIL D, BARAK S, KHATKAR B S. Cookie texture, spread ratio and sensory acceptability of cookies as a function of soluble dietary fiber, baking time and different water levels[J]. LWT, 2017, 80: 537–542.
- [17] LU Q, LIU H, WANG Q, et al. Sensory and physical quality characteristics of bread fortified with apple pomace using fuzzy mathematical model[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(5): 1092–1100.
- [18] BELGHITH-FENDRI L, CHAARI F, KALLEL F, et al. Pea and broad bean pods as a natural source of dietary fiber: The impact on texture and sensory properties of cake [J]. Journal of Food Science, 2016, 81(10): C2360–C2366.
- [19] NIU Y, XIA Q, GU M, et al. Interpenetrating network gels composed of gelatin and soluble dietary fibers from tomato peels[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 95–99.
- [20] FU Z Q, WU M, HAN X Y, et al. Effect of okara dietary fiber on the properties of starch-based films: Effect of okara dietary fiber on the properties of starch-based films[J]. Starch-Stärke, 2017, 69(11/12): 1700053.
- [21] WANG T Y, MA Z S. A novel insoluble dietary fiber-based edible paper from Chinese cabbage[J]. Cellulose, 2017, 24(8): 3411–3419.
- [22] TSENG A Y. Development of antioxidant dietary fibers from wine grape pomace and their applications as functional food ingredients[D]. Oregon State: Oregon State University, 2013.
- [23] TRINIDAD T P, MALLILLIN A C, VALDEZ D H, et al. Dietary fiber from coconut flour: A functional food[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2006, 7(4): 309–317.
- [24] DIKEMAN C L, FAHEY G C. Viscosity as related

- to dietary fiber: A Review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2006, 46(8): 649-663.
- [25] BOURNE M. Food texture and viscosity: concept and measurement[M]. California: Academic Press, 2002: 63-66.
- [26] 蔡松铃, 刘琳, 战倩, 等. 膳食纤维的黏度特性及其生理功能研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(3): 224-231.
- CAI S L, LIU L, ZHAN Q, et al. Viscosity characteristics and physiological functions of dietary fiber: A Review[J]. *Food Science*, 2020, 41(3): 224-231.
- [27] GIBOUIN F, VAN DER SMAN R, BENEDITO J, et al. Rheological properties of artificial boluses of cereal foods enriched with legume proteins[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 122: 107096.
- [28] BECK S M, KNOERZER K, SELLAHEWA J, et al. Effect of different heat-treatment times and applied shear on secondary structure, molecular weight distribution, solubility and rheological properties of pea protein isolate as investigated by capillary rheometry[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 208: 66-76.
- [29] LEE E, KIM B, CHOI S Y. Hand-held, automatic capillary viscometer for analysis of Newtonian and non-Newtonian fluids[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 313: 112176.
- [30] FAKUNLE M A, AGBAJE W B, ANINKU E A. Evaluation of tomato (*Solanum lycopersicum*) quality at three different ripening stages using viscometry[J]. *Croatian Journal of food Science and Technology*, 2022, 14(2): 164-171.
- [31] 熊文飞, 陈日春, 蔡楠, 等. 鲢鱼鱼鳞胶原蛋白的流变特性[J]. *食品与发酵工业*, 2014, 40(1): 69-72.
- XIONG W F, CHEN R C, CAI N, et al. Rheological characterization of collagen from the scale of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2014, 40(1): 69-72.
- [32] AGUSMAN, SURYANTI, NURHAYATI, et al. Measurement of fish gelatin using rotational viscometer: An alternative to conventional pipette method[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 715(1): 012056.
- [33] 张佳璇, 韦翠萍, 童彩玲, 等. 甘蓝提取物对魔芋葡甘聚糖凝胶流变特性的影响[J/OL]. *食品研究与开发*. (2023-02-17)[2023-04-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1231.TS.20230217.1337.002.html>.
- ZHANG J X, WEI C P, TONG C L, et al. Effect of red cabbage extract on rheological properties of konjac glucomannan gel[J/OL]. *Food Research and Development*. (2023-02-17)[2023-04-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1231.TS.20230217.1337.002.html>.
- [34] YUNOKI S, SUGIMOTO K, OHYABU Y, et al. Accurate and precise viscosity measurements of gelatin solutions using a rotational rheometer[J]. *Food Science and Technology Research*, 2019, 25(2): 217-226.
- [35] FENG C, LI Z, WANG Z, et al. Optimizing torque rheometry parameters for assessing the rheological characteristics and extrusion processability of wood plastic composites[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2019, 32(1): 123-140.
- [36] XIE D, ZHAO Y, LI Y, et al. Rheological, thermal, and degradation properties of PLA/PPG blends[J]. *Materials*, 2019, 12(21): 3519.
- [37] 姚云平, 周航, 刘文韬, 等. 米糠蜡凝胶油的微流变特性研究[J]. *中国油脂*, 2019, 44(9): 41-46.
- YAO Y P, ZHOU H, LIU W T, et al. Microrheological properties of organogel formation by rice bran wax[J]. *China Oils and Fats*, 2019, 44(9): 41-46.
- [38] BAI M, HUANG T, GUO S, et al. Probiotic *Lactobacillus casei* Zhang improved the properties of stirred yogurt[J]. *Food Bioscience*, 2020, 37: 100718.
- [39] BRUNSTROM J M. Mind over platter: Pre-meal planning and the control of meal size in humans[J]. *International Journal of Obesity*, 2014, 38(1): S9-S12.
- [40] BRUNSTROM J M, SHAKESHAFT N G, SCOTT-SAMUEL N E. Measuring 'expected satiety' in a range of common foods using a method of constant stimuli[J]. *Appetite*, 2008, 51(3): 604-614.
- [41] HOGENKAMP P S, STAFLEU A, MARS M, et al. Texture, not flavor, determines expected satiation of dairy products[J]. *Appetite*, 2011, 57(3): 635-641.
- [42] MCCRICKERD K, CHAMBERS L, BRUNSTROM J M, et al. Subtle changes in the flavour and texture of a drink enhance expectations of satiety[J]. *Flavour*, 2012, 1(1): 20.
- [43] STRIBITCAIA E, BLUNDELL J, YOU K M, et al. Viscosity of food influences perceived satiety: A video based online survey[J]. *Food Quality and Pref-*

- erence, 2022, 99: 104565.
- [44] SUN-WATERHOUSE D X, KANG W Y, MA C Y, et al. Towards human well-being through proper chewing and safe swallowing: Multidisciplinary empowerment of food design [J]. *Journal of Future Foods*, 2021, 1(1): 1-24.
- [45] MOSCA A C, CHEN J S. Food-saliva interactions: Mechanisms and implications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 66: 125-134.
- [46] WANDERS A J, JONATHAN M C, VAN DEN BORNE J J G C, et al. The effects of bulking, viscous and gel-forming dietary fibres on satiation[J]. *British Journal of Nutrition*, 2013, 109(7): 1330-1337.
- [47] ESMAEILI M, AJAMI M, BARATI M, et al. The significance and potential of functional food ingredients for control appetite and food intake [J]. *Food Science & Nutrition*, 2022, 10(5): 1602-1612.
- [48] KARAKI S, TAZOE H, HAYASHI H, et al. Expression of the short-chain fatty acid receptor, GPR43, in the human colon[J]. *Journal of Molecular Histology*, 2008, 39(2): 135-142.
- [49] TOLHURST G, HEFFRON H, LAM Y S, et al. Short-chain fatty acids stimulate blucagon-like peptide-1 secretion via the G-protein-coupled receptor FFAR2[J]. *Diabetes*, 2012, 61(2): 364-371.
- [50] AKHLAGHI M. The role of dietary fibers in regulating appetite, an overview of mechanisms and weight consequences[J/OL]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022: 1-12 (2022-10-04) [2023-04-10] <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2130160>.
- [51] GOYAL R K, GUO Y, MASHIMO H. Advances in the physiology of gastric emptying[J]. *Neurogastroenterology & Motility*, 2019, 31(4): e13546.
- [52] MÉNARD O, FAMELART M H, DEGLAIRE A, et al. Gastric emptying and dynamic *in vitro* digestion of drinkable yogurts: Effect of viscosity and composition[J]. *Nutrients*, 2018, 10(9): 1308.
- [53] SUTEHALL S, GALLOWAY S D R, BOSCH A, et al. Addition of an alginate hydrogel to a carbohydrate beverage enhances gastric emptying[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2020, 52(8): 1785-1792.
- [54] EFIMTSEVA E A, CHELPANOVA T I. Apples as a source of soluble and insoluble dietary fibers: Effect of dietary fibers on appetite[J]. *Human Physiology*, 2020, 46(2): 224-234.
- [55] SHANG L C, WANG Y, REN Y Y, et al. *In vitro* gastric emptying characteristics of konjac glucomannan with different viscosity and its effects on appetite regulation[J]. *Food & Function*, 2020, 11(9): 7596-7610.
- [56] WOLEVER T M S, TOSH S M, SPRUILL S E, et al. Increasing oat β -glucan viscosity in a breakfast meal slows gastric emptying and reduces glycemic and insulinemic responses but has no effect on appetite, food intake, or plasma ghrelin and PYY responses in healthy humans: A randomized, placebo-controlled, crossover trial[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2020, 111(2): 319-328.
- [57] BRANDSTAETER S, FUCHS S L, AYDIN R C, et al. Mechanics of the stomach: A review of an emerging field of biomechanics[J]. *GAMM-Mitteilungen*, 2019, 42(3): e201900001.
- [58] SANTOS-HERNÁNDEZ M, MIRALLES B, AMIGO L, et al. Intestinal signaling of proteins and digestion-derived products relevant to satiety[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(39): 10123-10131.
- [59] VUKSAN V, JENKINS A L, ROGOVIK A L, et al. Viscosity rather than quantity of dietary fibre predicts cholesterol-lowering effect in healthy individuals[J]. *British Journal of Nutrition*, 2011, 106(9): 1349-1352.
- [60] RATANPAUL V, WILLIAMS B A, BLACK J L, et al. Review: Effects of fibre, grain starch digestion rate and the ileal brake on voluntary feed intake in pigs[J]. *Animal*, 2019, 13(11): 2745-2754.
- [61] BENTON D, YOUNG H A. Reducing calorie intake may not help you lose body weight[J]. *Perspectives on Psychological Science*, 2017, 12(5): 703-714.
- [62] XU C F, YU C, YANG S Q, et al. Effects of physical properties of konjac glucomannan on appetite response of rats[J]. *Foods*, 2023, 12(4): 743.
- [63] CHEN M, GUO L, NSOR-ATINDANA J, et al. The effect of viscous soluble dietary fiber on nutrient digestion and metabolic responses II: *In vivo* digestion process[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 107: 105908.

- [64] TAMARGO A, CUEVA C, ÁLVAREZ M D, et al. microbiota[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 163–167.
Influence of viscosity on the growth of human gut

Research Progress in Appetite-regulating Effects of Dietary Fiber's Viscosity

Li Bin¹, Xu Chenfeng², Shang Longchen^{1,2*}

¹*College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070*

²*College of Biological and Food Engineering, Hubei Minzu University, Enshi 445000, Hubei*

Abstract Dietary fiber plays a potential role in regulating energy intake and stabilizing postprandial blood glucose. As an important physical property of soluble dietary fiber, viscosity is also a key contributor to its nutritional effect. Nowadays, the nutritional effect of dietary fiber based on its physical properties has attracted researchers' attention, and viscosity's regulating effect on appetite has become an important entry point for the study of physical nutrition. The present article summarizes the health-promoting effects of dietary fiber's main physical and chemical properties, while the intervention effect and mechanism of dietary fiber viscosity-mediated appetite during eating was discussed systematically. The paper is believed to provide some ideas for the development and application of satiety-enhancing foods. Also, it is expected to lay a certain theoretical foundation for further in-depth and systematic exploration that reveals the health-promoting effects of dietary fiber.

Keywords dietary fiber; dietary viscosity; satiety; gastrointestinal digestion; appetite response