

## 食品胶体的健康干预新策略:靶向菌群的研究及应用

聂少平, 谭惠子

(南昌大学 食品科学与技术国家重点实验室

中国-加拿大食品科学与技术联合实验室 江西省生物活性多糖重点实验室 南昌 330047)

**摘要** 食品胶体资源丰富,其中复杂多糖类胶体更是天然来源的水溶性膳食纤维,是具有高营养附加值的食品添加剂。大量研究表明,不同类型的食品胶体会富集不同种属的关键菌,通过肠-肝轴、肠脑轴等发挥关联调节作用。建立“食品胶体-肠道菌群-人体健康”的互作网络,对个性化膳食开发具有重要的创新意义。本文系统归纳了复杂多糖类胶体的理化性质及功能活性,重点阐述以肠道微生物为导向的食品胶体研究及开发策略,为未来健康干预提供理论依据。

**关键词** 食品胶体; 复杂多糖; 食品添加剂; 菌群靶向; 个性化应用

文章编号 1009-7848(2022)11-0001-13 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2022.11.001

随着物质的极大丰富和科技的不断进步,现代人生活方式、生态环境等的改变对人们健康的影响逐步显现。国家卫生健康委员会疾病预防控制局发布的《2020 中国居民营养与慢性病状况报告》显示,过半成年居民有超重、肥胖问题,高血压、糖尿病、高胆固醇血症和癌症等慢性病患者率持续上升,其中心脑血管病、癌症、慢性呼吸系统疾病死亡比例占 80.7%,已成为重大公共卫生问题和社会问题。

唐代名医孙思邈所著之书《千金食治》是我国古代重要食疗专著<sup>[1]</sup>,其中说到:“洞晓病源,知其所犯,以食治之;食疗不愈,然后命药。”我们的祖先本着“未病先防”“既病防变”的思想,通过总结日常膳食对疾病治疗的规律,指导有针对性地疗养。多项最新前瞻性队列研究均表明,精制的高 GI 碳水化合物、超加工食品等低质量膳食可能诱发心脑血管疾病、糖尿病、肥胖、炎症性肠病、肝细胞癌等慢性疾病<sup>[2-4]</sup>。因此,通过一系列科学研究,建立合理的膳食策略,符合国家大健康战略的需求,是中国“食药同源”传统文化的传承,也同时降

低医疗成本,减轻经济负担。

“三聚氰胺事件”使食品添加剂被广泛妖魔化,引起消费者对食品添加剂的抵触。最新研究指出,聚山梨酯 80 等添加剂可能具有引起慢性系统性炎症、肠道通透性增加、细菌易位等副作用<sup>[5]</sup>,加深了人们对食品添加剂安全性的担忧。系统研究安全且有益生功能的添加剂如食品胶,能够为健康食品的开发提供理论依据,对保证国民合理膳食,提升健康指数尤为重要。

### 1 食品胶体的资源及分类

食品胶体的主要成分是多糖类或蛋白质的大分子物质,是一类具有长链骨架的复杂聚合物,在一定条件下,其分子中的羧基、羟基、氨基或羧酸根等亲水基团可以通过水合作用形成润滑、黏稠的胶冻液或凝胶。食品胶体资源丰富<sup>[6]</sup>,如植物种子来源的瓜尔胶、槐豆胶等,植物浸出物来源的阿拉伯胶、刺云实胶等,以及提取物来源的果胶、落叶松胶等。其它天然来源还有动物中的明胶,海藻中的卡拉胶、海藻酸盐等,微生物产的黄原胶、结冷胶。除此之外,通过醚化反应生成的亲水性羧甲基或羟丙基取代的纤维素,可溶于水形成凝胶,这种人工合成的食品胶体能够满足加工过程中多样化需求。其中,复杂多糖类胶体更是天然来源的水溶性膳食纤维,能够发挥多种益生作用,如调节代谢紊乱,缓解炎症等,具有高营养附加值。

收稿日期: 2022-07-31

基金项目: 国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究项目(3211001046);国家自然科学基金青年科学基金项目(32001651);江西省生物活性多糖重点实验室项目(20212BCD42016)

第一作者: 聂少平,男,博士,教授

E-mail: spnie@ncu.edu.cn

## 2 功能性食品胶在食品加工中的应用

食品添加剂是辅助增强食品感官特性的关键成分,其中的胶体在食品加工中的功能作用包括增稠或形成凝胶,稳定、乳化、悬浮食品颗粒,赋予口感等。我国《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》GB 2760-2014中批准了31种可作为食品添加剂的复杂多糖类胶体(表1),其中绝大部分与美国食品药品监督管理局(FDA, <https://www.fda.gov>)及欧盟食品安全局(EFSA, <https://www.efsa.europa.eu/en>)批准添加的胶体相同。而FDA批准的胶体添加剂清单中的印度树胶(Ghatti gum)、黄芪胶(Tragacanth gum)以及燕麦胶(Oat gum)未出现在我国标准许可中。据统计,2021年全球食品胶体的市场成交额达102.4亿美元,预计5年内增长至133.6亿美元<sup>[21]</sup>。其中,用于生产食品及饮料的占比超过75%,成交量最大的复杂多糖类胶体依次为果胶、羧甲基纤维素、瓜尔胶、卡拉胶、微晶纤维素、黄原胶等。

### 2.1 凝胶作用

胶体通过吸水保水性形成特定的凝胶结构。例如,可得然胶具有易加热成凝胶的能力,可分为低热可逆凝胶和高热不可逆凝胶两种类型<sup>[22]</sup>。结构特征与凝胶特性密切相关<sup>[23]</sup>,从红藻中获得的 $\kappa$ 型和 $\iota$ 型卡拉胶是目前应用最广泛的胶凝剂<sup>[24]</sup>。 $\lambda$ 型卡拉胶虽不能凝胶化,但可减少脂肪球大小,增加喷雾干燥奶粉的黏度<sup>[25]</sup>。

### 2.2 乳化、稳定作用

胶体能在蛋白质粒子表面形成亲水性被膜,形成包裹在蛋白质粒子上的保护胶体,减慢蛋白质分子的运动,降低蛋白颗粒因重力作用而沉降的速度,防止凝集沉淀,起到分散、稳定作用<sup>[26]</sup>。与果胶相比,阿拉伯胶与蛋白质组成的复合结构使其可以在更宽的pH值范围内形成稳定的乳化体系<sup>[27]</sup>。黄原胶虽不是表面活性剂型乳化剂,但可与蛋白质相互作用,降低表面张力,从而促进蛋白质基泡沫的稳定性<sup>[28]</sup>。

### 2.3 成膜作用、包装材料

胶体形成的水凝胶膜,可作为食品包装材料或包埋药物制剂中的功能分子,例如CMC<sup>[29]</sup>。然而,有研究表明,瓜尔胶包埋的酚类化合物胶囊经喷雾干燥后其抗氧化活性优于阿拉伯胶<sup>[30]</sup>,黄原

胶比CMC和果胶具有更好的黏性和弹性,因此黄原胶成本虽相对较高,但其需求量仍然较大<sup>[31]</sup>。

### 2.4 脂肪替代

胶体依靠凝胶性截留并且稳定部分水分来产生一定的流动性,使其具有类似脂肪的润滑性以及感官属性,胶体类型脂肪替代物的安全性在所有脂肪替代物中最高<sup>[32]</sup>。研究表明,采用0.5%黄原胶替代50%脂肪,可使羊肉糜中脂肪含量降低7.87%,羰基含量降低34%<sup>[33]</sup>。将抗性淀粉加入低脂饼干中,可以替代12.5%的面粉,获得与全脂饼干接近的产品品质<sup>[34]</sup>。

### 2.5 抑制美拉德反应

胶体的持水性和凝胶性使其适合用于涂料,可以抑制有害美拉德反应产物的形成,减少油炸过程中的油吸收,用于食品预处理<sup>[35]</sup>。然而,不同的胶体在不同的杂环胺体系下的量效关系不同。例如,低剂量的胶体对以肌酐和苯丙氨酸为前体物质的生成PhIP模拟体系有较好的抑制作用,而高剂量对以肌酐、甘氨酸和葡萄糖为前体物质的生成MeIQ<sub>x</sub>模拟体系有较好的抑制作用<sup>[36]</sup>。CMC、 $\kappa$ -卡拉胶、海藻酸和果胶能够有效减少PhIP的形成,而 $\kappa$ -卡拉胶的抑制效果最好,这可能与肌酐酰残基、PhIP中间产物、苯乙醛和醛缩产物的减少有关<sup>[37]</sup>。

## 3 食品胶体的功能活性研究

### 3.1 缓解代谢紊乱

最新动物实验及临床数据均表明复杂多糖类食品胶体对代谢紊乱有显著缓解作用。葡甘露聚糖结构的魔芋胶、芦荟胶及铁皮石斛多糖可有效控制链脲霉素诱导的II型糖尿病大鼠的糖化血清蛋白水平和体质量增长<sup>[38]</sup>。阿拉伯胶及瓜尔胶能够显著改善成年糖尿病患者体重、血脂等指标异常<sup>[39-40]</sup>。复杂多糖类胶体调节代谢紊乱涉及一系列的信号通路,比如能够激活棕色脂肪细胞线粒体中的UCP1,促进细胞呼吸作用,从而上调能量代谢途径;还能够抑制胰岛素受体,阻断AMPK通路,从而改善胰岛素抵抗症状<sup>[41]</sup>。胆汁酸、肉碱、溶血磷脂、甘油酯、鞘脂和类固醇等代谢物的变化被预测为胶体多糖调节代谢的关键标志<sup>[42]</sup>。

表1 GB 2760-2014中可作为食品添加剂的复杂多糖类胶体  
Table 1 Overview of complex polysaccharide-type hydrocolloids approved as food additives according to GB 2760-2014

序号	中文名	英文名	中国编 国际编码		来源	结构特征	功能	FDA 批准 <sup>a</sup>
			码系统 (CNS)	系统 (INS)				
1	阿拉伯胶	Arabic gum	20.008	414	植物	阿拉伯半乳糖 <sup>[6]</sup>	增稠剂	是
2	刺梧桐胶	Karaya gum	18.010	416	植物	鼠李糖-半乳糖醛酸主链 <sup>[7]</sup>	稳定剂	是
3	刺云实胶	Tara gum	20.041	417	植物	半乳糖聚糖 <sup>[8]</sup>	增稠剂	否
4	瓜尔胶	Guar gum	20.025	412	植物	半乳糖聚糖 <sup>[9]</sup>	增稠剂	是
5	果胶	Pectin	20.006	440	植物	半乳糖醛酸 <sup>[9]</sup>	乳化剂	是
							稳定剂	
6	海萝胶	Furoran ( <i>Gloiopeltis furcata</i> )	20.040	-	海藻	硫酸化琼脂糖或卡拉胶型结构 <sup>[9]</sup>	增稠剂	否
7	海藻酸钙 <sup>b</sup> (又名褐藻酸钙)	Calcium alginate	-	-	海藻	$\beta$ -甘露糖醛酸和 $\alpha$ -古罗糖醛酸聚糖 <sup>[10]</sup>	增稠剂	是
							稳定剂	
8	海藻酸钾(又名褐藻酸钾)	Potassium alginate	20.005	402	海藻		凝固剂	是
9	海藻酸钠(又名褐藻酸钠)	Sodium alginate	20.004	401	海藻		增稠剂	是
10	槐豆胶(又名刺槐豆胶)	Carob bean gum	20.023	410	植物	半乳糖聚糖 <sup>[11]</sup>	增稠剂	是
11	黄原胶(又名汉生胶)	Xanthan gum	20.045	427	微生物	纤维素型葡聚糖主链、甘露糖及葡萄糖醛酸支链 <sup>[11]</sup>	增稠剂	是
12	结冷胶	Gellan gum	20.027	418	微生物	具有D-葡萄糖、D-葡萄糖醛酸、D-葡萄糖和L-鼠李糖重复四糖单元的杂多糖 <sup>[12]</sup>	增稠剂	是
13	卡拉胶	Carrageenan	20.007	407	海藻	线性硫酸化D-半乳糖和D-无水半乳糖主链 <sup>[6]</sup>	乳化剂	是
							稳定剂	
14	可得然胶	Curdlan	20.042	424	微生物	葡聚糖 <sup>[13]</sup>	增稠剂	是
15	罗望子多糖胶	Tamarind polysaccharide gum	20.011	-	植物	半乳糖木葡聚糖 <sup>[14]</sup>	稳定剂	否 <sup>c</sup>
							凝固剂	
16	琼脂	Agar	20.001	406	海藻	硫酸化半乳糖 <sup>[15]</sup>	增稠剂	是

(续表 1)

序号	中文名	英文名	中国编码系统 (CNS)	国际编码系统 (INS)	来源	结构特征	功能	FDA 批准 <sup>a</sup>
17	沙蒿胶	Rtemisia gum (sa-hao seed gum)	20.037	-	植物	低分子质量多糖;主链由 $\beta$ -D-吡喃甘露糖和吡喃葡萄糖组成;高分子质量多糖;主链为木聚糖,支链为阿拉伯糖和糖醛酸 <sup>[16]</sup>	增稠剂	否
18	田菁胶	Sesbania gum	20.021	-	植物	半乳糖聚糖 <sup>[17]</sup>	增稠剂	否
19	亚麻籽胶(又名富兰克胶)	Linseed gum (flaxseed gum)	20.020	-	植物	低分子质量多糖;鼠李半乳糖醛酸聚糖;高分子质量多糖;阿拉伯木聚糖 <sup>[18]</sup>	增稠剂	否
20	皂荚糖胶	<i>Gleditsia sinensis lam</i> gum	20.029	-	植物	半乳糖聚糖 <sup>[19]</sup>	增稠剂	否
21	醋酸酯淀粉	Starch acetate	20.039	1420	人工改性	葡聚糖-抗性淀粉 IV <sup>[20]</sup>	增稠剂	是
22	磷酸酯双淀粉	Distarch phosphate	20.034	1412			增稠剂	是
23	磷酸化二淀粉磷酸酯	Phosphated distarch phosphate	20.017	1413			增稠剂	是
24	羟丙基淀粉	Hydroxypropyl starch	20.014	1440			增稠剂	是
25	羟丙基二淀粉磷酸酯	Hydroxypropyl distarch phosphate	20.016	1442			膨松剂 乳化剂 稳定剂 增稠剂	是
26	酸处理淀粉	Acid-treated starch	20.032	1401			增稠剂	是
27	辛烯基琥珀酸淀粉钠	Sodium starch octenyl succinate	10.030	1450			乳化剂	是
28	乙酰化二淀粉磷酸酯	Acetylated distarch phosphate	20.015	1414			增稠剂	是
29	乙酐化双淀粉己二酸酯	Acetylated distarch adipate	20.031	1422			增稠剂	是
30	羟丙基甲基纤维素	Hydroxypropyl methylcellulose (HPMC)	20.028	464	人工改性	葡聚糖 <sup>[6]</sup>	增稠剂	是
31	羧甲基纤维素钠	Sodium carboxymethylcellulose (CMC)	20.003	466			稳定剂	是
32	微晶纤维素	Microcrystalline cellulose	02.005	460i			稳定剂	是

注:<sup>a</sup> <https://www.fda.gov/food/food-additives-petitions/food-additive-status-list>; 参照原中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,2016年第8号文件《关于海藻酸钙等食品添加剂新品种的公告》,以及国家标准 GB 1888.308-2020《食品添加剂 海藻酸钙(又名褐藻酸钙)》;<sup>b</sup> FDA 将罗望子(Tamarind)整体认定为安全(Generally recognized as safe, GRAS),可作为食品添加剂。

### 3.2 调节炎症与肿瘤

食物胶体因具有抗氧化和抗炎能力而在改善急性结肠炎以及结肠炎相关结肠癌中起着重要作用。从铁皮石斛、魔芋和芦荟中提取的具有葡甘露聚糖主链结构的胶体分子,能够通过增加隐窝深度和肠壁厚度,缓解溃疡性结肠炎小鼠的肠道形态损伤<sup>[43]</sup>。茶叶、苹果渣和地木耳中的果胶多糖能有效降低结肠癌小鼠肠道中肿瘤的发生率和数量<sup>[44-46]</sup>。类似以上的复杂多糖类胶体对结肠稳态的维持作用可能与 TLR2、GPR41、GPR43 和 GPR109a 等肠上皮受体的激活有关,通过免疫通路传导增强黏液层,修复结肠形态<sup>[47-48]</sup>。不仅如此,阿拉伯胶对水烟雾诱导的肺损伤<sup>[49]</sup>,腺碱诱导的慢性肾功能衰竭<sup>[50]</sup>和衰老<sup>[51]</sup>相关的炎症也表现出调节作用。

### 3.3 免疫调节

铁皮石斛多糖可增强 RAW264.7 巨噬细胞的增殖和吞噬能力,产生 TNF- $\alpha$  和 IL-1 $\beta$ <sup>[52-53]</sup>。此外,芦荟胶可提高免疫缺陷型小鼠的体重和血清 IgM 水平,上调 CD4 T 淋巴细胞产生 IL-2 和 IFN- $\gamma$ ,恢复脾脏组织 T-bet/GATA-3 比例,增强免疫系统<sup>[54]</sup>。多项研究表明,TLR4 和瘦素受体可能是识别复杂多糖类胶体的关键受体,而 MAPK、STAT1/3 和 NF- $\kappa$ B 可能是免疫调节过程中的主要信号通路<sup>[55]</sup>。

### 3.4 其它研究

由于生活节奏的加快,疲劳已成为危害人类健康的主要因素。秋葵茎中提取的果胶可有效延长小鼠力竭游泳时间,显著诱导血糖和糖原升高,降低乳酸和血清尿素氮水平,比传统草药西洋参更有利于提高机体能量储存能力和生理疲劳下的肾功能<sup>[56]</sup>。研究发现昼夜节律的生物学改变与代谢紊乱的发生有关,燕麦多糖改善高脂饮食引起的小鼠肥胖、血脂水平异常及胰岛素抵抗的同时,缓解了肝时钟基因相关的昼夜节律蛋白表达紊乱<sup>[57]</sup>。此外,添加黄原胶的食物能够抑制致病菌艰难梭菌(*Clostridioides difficile*)的定植,从而促进肠道微生物生态系统的平衡<sup>[58]</sup>。

### 3.5 功能争议

然而,近十年来关于卡拉胶生理功能的报道不尽相同。例如, $\lambda$ - $\kappa$  型卡拉胶摄入导致健康小鼠的葡萄糖耐受不良和肝脏炎症<sup>[59]</sup>,然而, $\iota$  型卡拉

胶对高碳水化合物和高脂肪饮食引起的大鼠血脂指标紊乱以及炎症细胞数量异常均有改善作用<sup>[24]</sup>。食品胶生理功能的不确定性并不完全是由结构因素决定的。以饮用水的方式摄入  $\kappa$  型卡拉胶,比添加到饲料中更有可能造成小鼠结肠炎症<sup>[60]</sup>。不仅如此,Chassaing<sup>[15,61]</sup>团队发表了系列动物实验成果,CMC 可能造成肠道屏障的破坏,从而导致细菌在上皮细胞上的移位,促进结肠炎症,已引起广泛关注。FDA 的科学家紧急重新评估了 7 种乳化剂的安全性,并宣布论文中使用的 CMC 的相应暴露剂量不太可能在日常饮食中达到,官方建议的每日允许摄入量(ADI)在人体中出现不良影响的几率很小<sup>[62]</sup>。

### 3.6 食品胶发挥功能活性的关键媒介

膳食纤维能够调节肠道菌群组成。比如,膳食纤维干预能够明显改变糖尿病人肠道菌群组成<sup>[63]</sup>,还能明显提高长期住院老年人的肠道中副拟杆菌、布劳特氏菌、梭状杆菌等的丰度<sup>[64]</sup>。随着培养方法和测序技术的发展,最新研究指出,菊粉会引起肠道菌群快速改变,某些细菌在菊粉作用下显著增加,然后逐渐稳定,该动力学依赖基线菌群组成<sup>[65]</sup>。Wastyk 等<sup>[66]</sup>发现,短期高纤维膳食对菌群调节作用有限,而发酵后的食品能够改善菌群多样性,重塑菌群功能,降低炎症标志物水平。这意味着,人体在没有降解特定食物组分的肠道菌时,该种食物组分的干预效果虽会明显减弱,但仍可通过长时间的食物干预培育出特定的肠道菌。

事实上,不同肠道菌对碳水化合物的降解机制存在显著的差异。肠道菌群能够合成多种参与碳水化合物降解的酶,其中拟杆菌降解碳水化合物的主要体系是淀粉利用系统(Starch-utilization system, sus),其基因序列高度同源保守。以多形拟杆菌(*Bacteroides thetaiotaomicron*)为例,它具有超过 80 个 sus 类型的基因体系参与调控降解宿主黏膜及膳食多糖,能够基于目标糖苷的结构、种类相应调动 200 多个编码糖苷水解酶、转移酶的基因,同时形成动态的细胞表面结构,促进与宿主免疫系统的互作平衡,产生多种代谢产物,为宿主提供能量<sup>[67]</sup>。厚壁菌的相关序列差异分化较大,因而在全生命周期内的稳定性表现较拟杆菌差<sup>[68]</sup>。说明肠道菌群对营养物质的差异化降解机制,也

为其在胃肠道生态位竞争中提供优势。

已有大量数据说明不同类型食品胶会富集不同种属的关键菌<sup>[6]</sup>。比如阿拉伯胶与乳杆菌、双歧杆菌、拟杆菌的相对丰度呈正相关,抗性淀粉与副拟杆菌和真杆菌的相对丰度呈正相关,还有与果胶降解相关而尚未被深入研究的 *Monoglobus pectinilyticus* 及 *Lachnospira pectinoschiza* 等。这些与食品胶相关的肠道菌及其代谢产物能够在肠-肝轴、肠脑轴、心血管及骨骼中发挥关联调节作用。从绿茶中提取的果胶类多糖,能够改善大鼠 II 型糖尿病,提高毛螺菌、罗氏菌等种属的丰度,并改善支链氨基酸、芳香类氨基酸、精氨酸和脯氨酸、苯丙氨酸的代谢通路<sup>[69]</sup>。从青钱柳提取的果胶类多糖,在改善大鼠 II 型糖尿病的同时,提高了瘤胃球菌属 UCG-005 的丰度,并且与机体营养及能量代谢相关通路的改善显著相关<sup>[70]</sup>。说明肠道菌群是包括食品胶在内的膳食组分发挥功能活性的关键媒介,挖掘食品胶体的菌群靶点能够实现食品胶体功能活性差异的解析。

菌群导向性膳食的开发已成为当今的研究热点。Gordon 团队发现复合膳食纤维零食对菌群编

码碳水化合物降解基因具有更广泛的影响,更有助于培育健康的肠道菌群,并显著调节与健康相关的血液蛋白质组<sup>[71]</sup>。他们还设计了一种能够促进关键细菌生长的食物,相比常规膳食干预,更能显著改善营养不良患儿的骨生长、神经发育及炎症水平,并修复肠道菌群<sup>[72]</sup>。

#### 4 食品胶体靶向菌群的健康干预策略

靶向肠道菌群的个性化营养的理想目标,在于能够在特定的生理状态下产生有益于宿主的微生物群特征。特定的生理状态可能包括各个年龄阶段的肠道、肝脏、心血管、骨骼和中枢神经系统的疾病、代谢综合征和癌症。为了实现这一目标,在不断深入研究食物多糖理化、生理特性的基础上,还应该充分研究个人的生理数据,并将遗传变异、运动强度、伦理和法律方面的因素也考虑在内。结合个人偏好,将能够通过重塑肠道菌群稳态并产生有益代谢产物,进而将有针对性地缓解宿主生理功能紊乱的食品胶作为膳食补充/添加剂,有效调节机体功能,维护健康,预防和控制整个生命周期疾病的发生和发展(图 1)。



图 1 食品胶体靶向菌群的健康干预策略

Fig.1 Microbiota-oriented health intervention strategies of dietary hydrocolloids

##### 4.1 挖掘食品胶体干预健康的物质基础

多糖精细结构解析及多组学技术联用,是食品胶应用于未来个性化营养的关键技术。通过完善卡拉胶、黄原胶、结冷胶等新兴胶体的功效研究,建立特征基团及宿主生理标志物的关联,从而

促进优化分子修饰后的水胶体应用的多样化创新,解析肠道微生物群以个体或共生形式及其代谢物在食品胶体中发挥活性作用的精确机制,最终建立完整的功能性食品胶与人体健康的互作网络关系。

大量前期研究基于“部分降解-甲基化-NMR”的结构解析技术体系,解析了多种植物来源的胶体结构,包括以阿拉伯木聚糖为主链的车前子多糖<sup>[73]</sup>,HG型或RG-I型果胶结构的茶多糖<sup>[74]</sup>及秋葵多糖<sup>[75]</sup>,高度支化和乙酰化果胶结构的马齿苋多糖<sup>[76]</sup>,高甲氧基果胶结构的柚囊多糖<sup>[77]</sup>,低酯化度果胶结构的山药多糖<sup>[78]</sup>,以葡甘露聚糖为主链的魔芋、芦荟及铁皮石斛多糖<sup>[79]</sup>等。同时,针对天然来源的复杂多糖类食品胶,全面研究来源对精细结构的影响,充分解释加工过程中的精确变化,结合分子修饰技术阐述其构效关系,推动有针对性的功能研究和应用。例如,石斛多糖中的乙酰基团与其抗肿瘤、免疫调节等活性功效密切相关<sup>[80]</sup>;海藻多糖如石莼胶聚糖中的硫酸基团与其缓解高血脂等生理活性相关<sup>[15]</sup>。

组学技术及数据分析已广泛应用于健康领域研究,包括能够表征定量生物体所有基因的基因组学,解析生物体基因转录调控规律的转录组学,阐述蛋白质表达、修饰、相互作用的蛋白质组学以及定量分析所有代谢产物的代谢组学。通过多组学技术联用,建立遗传调控及物质表达的关联平衡网络,开发针对个体多样性的多因素预测模型,能够有效弥补单一组学数据的片面性,并从基因水平、蛋白水平结合无菌动物进行验证。例如,科学家们通过对 106 名受试者开展 4 年的跟踪研究,基于血液样本中的转录因子、蛋白质分子信息,建立了前驱糖尿病的庞大数据库<sup>[81]</sup>;基于对 159 例乙肝病毒阳性的肝癌和癌旁样本的基因和蛋白质数据进行扫描挖掘,建立了乙型肝炎相关肝癌数据库,发现代谢相关的蛋白质变化是肝癌组织和非肝癌组织最大的差异<sup>[82]</sup>,为疾病有效治疗提供新思路。

#### 4.2 基于食品胶体定制健康食品的感官品质

合成生物学是指生物利用可再生资源如淀粉、纤维素和二氧化碳合成化合物的过程,例如油菜黄单胞菌(*Xanthomonas campestris*)能够合成大量的黄原胶<sup>[83]</sup>。同时,基于生物工程、物理、化学和计算机等技术手段,对生物体进行有目标的设计、改造乃至重新合成,构建食品胶体天然细胞工厂,能够定向提高食品胶体的产量,例如利用酵母细

胞生产的卵白蛋白<sup>[84]</sup>。生物合成技术的大规模应用,减轻了工业经济对生态环境的副作用,保持了能源的可持续性。同时,基于多糖的结构特性及特征连接方式,修饰或合成新的、多样化的多糖分子,有效增强多糖的生物学特性<sup>[85]</sup>。

通过不同胶体复配,例如魔芋葡甘聚糖和卡拉胶、黄原胶之间的协同增效作用,可以提高胶体的凝胶强度,发挥不同食品胶的功效,同时减少原料用量<sup>[86]</sup>。不仅如此,利用阿拉伯胶的黏液穿透能力,能够实现酸奶饮料及蛋黄酱减盐 30%的目标;通过阿拉伯木聚糖与小麦粉不同混合方式实现盐在面包基质中的空间不均匀分布,从而达到减盐的目的;柑橘纤维可实现减盐 20%,同时保持植物肉的咸味感知<sup>[87]</sup>。

3D 打印一种新型的食品制造技术,可以实现消费者对营养定制和感官品质的特定诉求,简化供应链,还能使用昆虫等非传统食品材料来拓宽食品原料。3D 打印物料的类型特性或者成型固化,是 3D 打印食品质量的重要因素。胶体形成的网络结构能够提升不同类型食品的打印特性。例如,在新鲜蔬菜以及食品打印油墨中添加胶体如黄原胶、 $\kappa$ 型卡拉胶和刺槐豆胶后,减少了渗水性,增加了微结构的致密性<sup>[88]</sup>,并且可以代替冻干食品,保持蔬菜原本的风味和营养。淀粉-芒果或淀粉-阿拉伯木聚糖混合物可作为高度理想的挤压材料,具有凝胶状结构、高触变性和不变形的网状微观结构,非常适用于 3D 食品打印<sup>[89]</sup>。

老龄化是当今社会发展的一大趋势。吞咽困难在老年人和患有衰弱疾病的病人中普遍存在,需要改变其硬度,减缓流动速度,确保安全吞咽。同时由于器官功能减退、合成代谢小于分解代谢等生理原因,易出现营养不良、便秘等健康问题。2012 年,欧盟启动了“PERFORMANCE”项目,采用 3D 打印设计开发能够保持原有感官特性的易吞咽食品,添加特定营养素,满足营养需求<sup>[90]</sup>。最新研究发现,黄原胶及瓜尔胶能够降低 3D 打印熟猪肉制品的硬度、咀嚼性和黏合性,呈现出具有不同大小的腔体网络结构,在国际吞咽困难饮食标准化倡议(IDDSI)中可被归类为潜在的过渡食品<sup>[91]</sup>。未来 3D 打印可能替代医院和养老院的厨房。

## 5 展望

在未来个性化食品中,功能性食品胶以单一或复合的形式替代乳化剂、稳定剂、增稠剂、防腐剂等化学合成添加剂,发挥其缓解炎症,调节代谢,增强免疫力,改善睡眠等活性功效,在开发有机、绿色、清洁的普通、功能及特需食品方面具有广阔的应用创新前景。然而,仍需做大量的工作来揭示食品胶体通过肠道微生物群和宿主互作的机制,从而进一步有针对性地应用开发。

### 参 考 文 献

- [1] 卞雅莉, 范崇峰. “食疗”名考[J]. 中国中医基础医学杂志, 2018, 24(7): 881-883.  
BIAN Y L, FAN C F. Study of the names of ‘diet therapy’ [J]. Journal of Basic Chinese Medicine, 2018, 24(7): 881-883.
- [2] KATAGIRI R, GOTO A, SAWADA N, et al. Dietary fiber intake and total and cause-specific mortality: The Japan public health center-based prospective study[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2020, 111(5): 1027-1035.
- [3] REYNOLDS A, MANN J, CUMMINGS J, et al. Carbohydrate quality and human health: A series of systematic reviews and meta-analyses[J]. The Lancet, 2019, 393(10170): 434-445.
- [4] LO C H, KHANDPUR N, ROSSATO S L, et al. Ultra-processed foods and risk of Crohn’s disease and ulcerative colitis: A prospective cohort study[J]. Clinical Gastroenterology and Hepatology, 2022, 20(6): e1323-e1337.
- [5] CHASSAING B, VAN DE WIELE T, DE BODT J, et al. Dietary emulsifiers directly alter human microbiota composition and gene expression *ex vivo* potentiating intestinal inflammation[J]. Gut, 2017, 66(8): 1414-1427.
- [6] TAN H Z, NIE S P. Functional hydrocolloids, gut microbiota and health: Picking food additives for personalized nutrition [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2021, 45(4): fuaa065.
- [7] RAJ V, LEE J H, SHIM J J, et al. Recent findings and future directions of grafted gum karaya polysaccharides and their various applications: A review[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 258: 117687.
- [8] RUTZ J K, ZAMBAZI R C, BORGES C D, et al. Microencapsulation of purple Brazilian cherry juice in xanthan, tara gums and xanthan-tara hydrogel matrixes[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 98(2): 1256-1265.
- [9] PRIYAN SHANURA FERNANDO I, KIM K N, KIM D, et al. Algal polysaccharides: Potential bioactive substances for cosmeceutical applications[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2019, 39(1): 99-113.
- [10] OKOLIE C L, MASON B, MOHAN A, et al. Extraction technology impacts on the structure-function relationship between sodium alginate extracts and their *in vitro* prebiotic activity[J]. Food Bioscience, 2020, 37: 100672.
- [11] PETITJEAN M, ISASI J R. Chitosan, xanthan and locust bean gum matrices crosslinked with  $\beta$ -cyclodextrin as green sorbents of aromatic compounds [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 180: 570-577.
- [12] FIORICA C, PITARRESI G, PALUMBO F S, et al. Production and physicochemical characterization of a new amine derivative of gellan gum and rheological study of derived hydrogels [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 236: 116033.
- [13] CAI Z X, ZHANG H B. Recent progress on curd-lan provided by functionalization strategies [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 68: 128-135.
- [14] XIE F, ZHANG H, NIE C Q, et al. Structural characteristics of tamarind seed polysaccharides treated by high-pressure homogenization and their effects on physicochemical properties of corn starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 262: 117661.
- [15] HUANG W Q, TAN H Z, NIE S P. Beneficial effects of seaweed-derived dietary fiber: Highlights of the sulfated polysaccharides [J]. Food Chemistry, 2022, 373(Pt B): 131608.
- [16] 张静. 沙蒿胶多糖对免疫细胞以及 HFA 小鼠生理及肠道菌群的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.  
ZHANG J. The effect of *Artemisia sphaerocephala* Krasch polysaccharide on the immunological cells and on physiology and gut microbiota in human flora-associated mice[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2015.



- [17] LI R, JIA X, WANG Y Q, et al. The effects of extrusion processing on rheological and physicochemical properties of sesbania gum[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 90: 35–40.
- [18] NASRABADI M N, GOLI S A H, DOOST A S, et al. Characterization and enhanced functionality of nanoparticles based on linseed protein and linseed gum biocomplexes[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 151: 116–123.
- [19] LIU Y T, LEI F H, HE L, et al. Physicochemical characterization of galactomannans extracted from seeds of *Gleditsia sinensis Lam* and fenugreek. Comparison with commercial guar gum[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 158: 1047–1054.
- [20] 刘霞, 黄雅萍, 卢旭, 等. 抗性淀粉的结构性质与功能关系研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(18): 279–286.
- LIU X, HUANG Y P, LU X, et al. Advances in structural properties and its correlation with physiological functions of resistant starch[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(18): 279–286.
- [21] RIZVI S. Hydrocolloid market [R/OL]. (2021–11) [2022–07–31]. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/hydrocolloid-market-1231.html>.
- [22] 俞珊, 段孟霞, 童彩玲, 等. 可得然胶功能性质及其在食品中的应用研究进展 [J/OL]. *食品科学*, (2022–01–27) [2022–07–31]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=SPKX20220125002&uniplatform=NZKPT&v=sbig8z5V17zz3y2Ml0n1fMVUvSg9TeBG2ALdBbYAZkOqbwXjsTp4CICgpAq5LGA>.
- YU S, DUAN M X, TONG C L, et al. Research progress on functional properties of curdlan and its application in food[J]. *Food Science*, (2022–01–27) [2022–07–31]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=SPKX20220125002&uniplatform=NZKPT&v=sbig8z5V17zz3y2Ml0n1fMVUvSg9TeBG2ALdBbYAZkOqbwXjsTp4CICgpAq5LGA>.
- [23] LIEW S Q, CHIN N L, YUSOF Y A. Extraction and characterization of pectin from passion fruit peels[J]. *Agriculture and Agricultural Science Proceedings*, 2014, 2: 231–236.
- [24] DU PREEZ R, PAUL N, MOUATT P, et al. Carrageenans from the red seaweed *Sarconema filiforme* attenuate symptoms of diet-induced metabolic syndrome in rats[J]. *Marine Drugs*, 2020, 18(2): 97.
- [25] FOERSTER M, LIU C, GENGENBACH T, et al. Reduction of surface fat formation on spray-dried milk powders through emulsion stabilization with  $\lambda$ -carrageenan[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 70: 163–180.
- [26] DICKINSON E. Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems[J]. *Food Hydrocolloids*, 2003, 17(1): 25–39.
- [27] WEI Z H, HUANG Q R. Edible Pickering emulsions stabilized by ovotransferrin-gum arabic particles[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89: 590–601.
- [28] PTASZEK P, KABZIŃSKI M, KRUK J, et al. The effect of pectins and xanthan gum on physicochemical properties of egg white protein foams[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 144: 129–137.
- [29] ROY N, SAHA N, KITANO T, et al. Biodegradation of PVP-CMC hydrogel film: A useful food packaging material[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 89(2): 346–353.
- [30] KUCK L S, NOREÑA C P Z. Microencapsulation of grape (*Vitis labrusca* var. *Bordo*) skin phenolic extract using gum arabic, polydextrose, and partially hydrolyzed guar gum as encapsulating agents[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 569–576.
- [31] LAZARIDOU A, DUTA D, PAPAGEORGIOU M, et al. Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 79(3): 1033–1047.
- [32] 李君, 崔怀田, 刘瑞琦, 等. 脂肪替代物在低脂人造黄油中的应用研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(6): 173–180, 189.
- LI J, CUI H T, LIU R Q, et al. Research progress on application of fat substitute in low-fat margarine[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(6): 173–180, 189.
- [33] RATHER S A, MASOODI F A, AKHTER R, et al. Xanthan gum as a fat replacer in goshtaba—a traditional meat product of India: Effects on quality and oxidative stability[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(12): 8104–8112.
- [34] MORIANO M E, CAPPALÀ C, ALAMPRESE C. Reduced-fat soft-dough biscuits: Multivariate effects of polydextrose and resistant starch on dough rheology

- and biscuit quality[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 81: 171–178.
- [35] ZHANG N N, ZHOU Q, FAN D M, et al. Novel roles of hydrocolloids in foods: Inhibition of toxic maillard reaction products formation and attenuation of their harmful effects[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 111: 706–715.
- [36] ZHANG N N, ZHAO Y L, FAN D M, et al. Inhibitory effects of some hydrocolloids on the formation of heterocyclic amines in roast beef[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108: 106073.
- [37] YANG H M, JI Z W, WANG R, et al. Inhibitory effect of selected hydrocolloids on 2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-b] pyridine (PhIP) formation in chemical models and beef patties[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 402: 123486.
- [38] CHEN H H, NIE Q X, HU J L, et al. Glucomanans alleviated the progression of diabetic kidney disease by improving kidney metabolic disturbance[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2019, 63(12): 1801008.
- [39] BABIKER R, ELMUSHARAF K, KEOGH M B, et al. Effect of gum arabic (*Acacia senegal*) supplementation on visceral adiposity index (VAI) and blood pressure in patients with type 2 diabetes mellitus as indicators of cardiovascular disease (CVD): A randomized and placebo-controlled clinical trial[J]. *Lipids in Health and Disease*, 2018, 17(1): 56.
- [40] DALL'ALBA V, SILVA F M, ANTONIO J P, et al. Improvement of the metabolic syndrome profile by soluble fibre-guar gum-in patients with type 2 diabetes: A randomised clinical trial[J]. *British Journal of Nutrition*, 2013, 110(9): 1601–1610.
- [41] TAN H Z, NIE S P. Deciphering diet-gut microbiota-host interplay: Investigations of pectin[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 106: 171–181.
- [42] NIE Q X, XING M M, CHEN H H, et al. Metabolomics and lipidomics profiling reveals hypocholesterolemic and hypolipidemic effects of arabinoxylan on type 2 diabetic rats[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(38): 10614–10623.
- [43] ZHANG L J, HUANG X J, SHI X D, et al. Protective effect of three glucomannans from different plants against DSS induced colitis in female BALB/c mice[J]. *Food & Function*, 2019, 10(4): 1928–1939.
- [44] LIU L Q, NIE S P, SHEN M Y, et al. Tea polysaccharides inhibit colitis-associated colorectal cancer via interleukin-6/STAT3 pathway[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(17): 4384–4393.
- [45] GUO M, LI Z. Polysaccharides isolated from *Nostoc commune* Vaucher inhibit colitis-associated colon tumorigenesis in mice and modulate gut microbiota[J]. *Food & Function*, 2019, 10(10): 6873–6881.
- [46] SUN Y, DIAO F R, NIU Y B, et al. Apple polysaccharide prevents from colitis-associated carcinogenesis through regulating macrophage polarization[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 161: 704–711.
- [47] MARIA-FERREIRA D, NASCIMENTO A M, CIPRIANI T R, et al. Rhamnogalacturonan, a chemically-defined polysaccharide, improves intestinal barrier function in DSS-induced colitis in mice and human Caco-2 cells[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1–14.
- [48] SAHASRABUDHE N M, BEUKEMA M, TIAN L, et al. Dietary fiber pectin directly blocks toll-like receptor 2-1 and prevents doxorubicin-induced ileitis[J]. *Frontiers in Immunology*, 2018, 9: 383.
- [49] NEMMAR A, AL-SALAM S, BEEGAM S, et al. Waterpipe smoke exposure triggers lung injury and functional decline in mice: Protective effect of gum Arabic[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2019, 2019: 11.
- [50] ALI B H, AL-HUSSENI I, BEEGAM S, et al. Effect of gum arabic on oxidative stress and inflammation in adenine-induced chronic renal failure in rats[J]. *PLoS One*, 2013, 8(2): e55242.
- [51] USHIDA K, HATANAKA H, INOUE R, et al. Effect of long term ingestion of gum arabic on the adipose tissues of female mice[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(5): 1344–1349.
- [52] 李明智, 童微, 胡婕伦, 等. 铁皮石斛多糖不同级分的制备、性质分析及免疫调节活性比较[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(15): 10–14, 20.
- LI M Z, TONG W, HU J L, et al. Preparation and property analysis of polysaccharide fractions from *Dendrobium officinale* and comparison on their in vitro immunological activity[J]. *Science and Technol-*

- ogy of Food Industry, 2018, 39(15): 10–14, 20.
- [53] 童微, 余强, 李虎, 等. 铁皮石斛多糖化学修饰及其对免疫活性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(7): 155–160.
- TONG W, YU Q, LI H, et al. Chemical modification and immunoregulatory activity of polysaccharides from *Dendrobium officinale*[J]. Food Science, 2017, 38(7): 155–160.
- [54] LI M Z, HUANG X J, HU J L, et al. The protective effects against cyclophosphamide (CTX)-induced immunosuppression of three glucomannans [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105445.
- [55] WANG H, YU Q, DING X M, et al. RNA-seq based elucidation of mechanism underlying *Ganoderma atrum* polysaccharide induced immune activation of murine myeloid-derived dendritic cells[J]. Journal of Functional Foods, 2019, 55: 104–116.
- [56] LI Y, DENG Y, LI Z, et al. Composition, physicochemical properties, and anti-fatigue activity of water-soluble okra (*Abelmoschus esculentus*) stem pectins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 165(Pt B): 2630–2639.
- [57] HAN S F, GAO H, SONG R J, et al. Oat fiber modulates hepatic circadian clock via promoting gut microbiota-derived short chain fatty acids[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(51): 15624–15635.
- [58] SCHNIZLEIN M K, VENDROV K C, EDWARDS S J, et al. Dietary xanthan gum alters antibiotic efficacy against the murine gut microbiota and attenuates *Clostridioides difficile* colonization[J]. MSphere, 2020, 5(1): e00708–19.
- [59] BHATTACHARYYA S, KATYAL S, UNTERMAN T, et al. Exposure to the common food additive carrageenan leads to glucose intolerance, insulin resistance and inhibition of insulin signalling in HepG2 cells and C57BL/6J mice [J]. Diabetologia, 2012, 55(1): 194–203.
- [60] CHIN Y X, MI Y, CAO W X, et al. A pilot study on anti-obesity mechanisms of *Kappaphycus alvarezii*: The role of native  $\kappa$ -carrageenan and the leftover sans-carrageenan fraction[J]. Nutrients, 2019, 11(5): 1133.
- [61] CHASSAING B, KOREN O, GOODRICH J K, et al. Dietary emulsifiers impact the mouse gut microbiota promoting colitis and metabolic syndrome [J]. Nature, 2015, 519(7541): 92–96.
- [62] SHAH R, KOLANOS R, DINOVI M J, et al. Dietary exposures for the safety assessment of seven emulsifiers commonly added to foods in the United States and implications for safety[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2017, 34(6): 905–917.
- [63] ZHAO L P, ZHANG F, DING X Y, et al. Gut bacteria selectively promoted by dietary fibers alleviate type 2 diabetes[J]. Science, 2018, 359(6380): 1151–1156.
- [64] TRAN T T T, COUSIN F J, LYNCH D B, et al. Prebiotic supplementation in frail older people affects specific gut microbiota taxa but not global diversity [J]. Microbiome, 2019, 7(1): 1–17.
- [65] LIU H, LIAO C, WU L, et al. Ecological dynamics of the gut microbiome in response to dietary fiber[J]. The ISME Journal, 2022, 16(8): 2040–2055.
- [66] WASTYK H C, FRAGIADAKIS G K, PERELMAN D, et al. Gut-microbiota-targeted diets modulate human immune status [J]. Cell, 2021, 184(16): 4137–4153.
- [67] PORTER N T, LUIS A S, MARTENS E C. *Bacteroides thetaiotaomicron*[J]. Trends in Microbiology, 2018, 26(11): 966–967.
- [68] FAITH J J, GURUGE J L, CHARBONNEAU M, et al. The long-term stability of the human gut microbiota[J]. Science, 2013, 341(6141): 1237439.
- [69] LI H S, FANG Q Y, NIE Q X, et al. Hypoglycemic and hypolipidemic mechanism of tea polysaccharides on type 2 diabetic rats via gut microbiota and metabolism alteration[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(37): 10015–10028.
- [70] LI Q Q, HU J L, NIE Q X, et al. Hypoglycemic mechanism of polysaccharide from *Cyclocarya paliurus* leaves in type 2 diabetic rats by gut microbiota and host metabolism alteration[J]. Science China Life Sciences, 2021, 64(1): 117–132.
- [71] DELANNOY-BRUNO O, DESAI C, RAMAN A S, et al. Evaluating microbiome-directed fibre snacks in gnotobiotic mice and humans[J]. Nature, 2021, 595(7865): 91–95.
- [72] CHEN R Y, MOSTAFA I, HIBBERD M C, et al. A microbiota-directed food intervention for undernourished children[J]. New England Journal of

- Medicine, 2021, 384(16): 1517-1528.
- [73] 殷军艺. 大粒车前子多糖生物活性、结构和构象特征研究及多糖分离纯化新方法初探[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- YIN J Y. Bioactivities, structure and conformation properties of polysaccharide from the seeds of *Plantago asiatica* L. and preliminary study on new method of polysaccharide's purification [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.
- [74] HONG T, ZHAO J Y, YIN J Y, et al. Structural characterization of a low molecular weight HG-type pectin from Gougunao green tea[J/OL]. Frontiers in Nutrition, (2022-04-23)[2022-07-31]. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnut.2022.878249/full>.
- [75] 徐柔. 秋葵多糖基本结构和流变学特征及高压均质对其结构的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- XU R. Basic structural and rheological characteristics of polysaccharide from okara (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) and the effect of high pressure homogenization on its structure[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [76] TANG W, LIU D, LI Y, et al. Structural characteristics of a highly branched and acetylated pectin from *Portulaca oleracea* L. [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 116: 106659.
- [77] WANG X Y, XU R, WANG Y X, et al. Physicochemical and rheological properties of pomelo albedo pectin and its interaction with konjac glucomannan [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 151: 1205-1212.
- [78] TANG W, LIU D, WANG J Q, et al. Isolation and structure characterization of a low methyl-esterified pectin from the tuber of *Dioscorea opposita* Thunb[J]. Food Chemistry, 2021, 359: 129899.
- [79] 施晓丹. 不同来源葡甘露聚糖的结构特征、溶液性质及在小鼠肠道中的降解特征[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- SHI X D. Structural and conformational characteristics of glucomannans from different sources and their intestinal fermentation properties in mice[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [80] LI M Z, WEN J J, HUANG X J, et al. Interaction between polysaccharides and toll-like receptor 4: Primary structural role, immune balance perspective, and 3D interaction model hypothesis[J]. Food Chemistry, 2021, 374: 131586.
- [81] ZHOU W, SAILANI M R, CONTREPOIS K, et al. Longitudinal multi-omics of host-microbe dynamics in prediabetes[J]. Nature, 2019, 569(7758): 663-671.
- [82] GAO Q, ZHU H W, DONG L Q, et al. Integrated proteogenomic characterization of HBV-related hepatocellular carcinoma[J]. Cell, 2019, 179(2): 561-577.
- [83] KANG Y, LI P Y, ZENG X T, et al. Biosynthesis, structure and antioxidant activities of xanthan gum from *Xanthomonas campestris* with additional furfural[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 216: 369-375.
- [84] 陈坚. 中国食品科技: 从2020到2035[J]. 中国食品学报, 2019, 19(12): 1-5.
- CHEN J. Food science and technology in China: From 2020 to 2035[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(12): 1-5.
- [85] JOSEPH A A, PARDO-VARGAS A, SEEBERGER P H. Total synthesis of polysaccharides by automated glycan assembly[J]. Journal of the American Chemical Society, 2020, 142(19): 8561-8564.
- [86] 张鸥. 魔芋葡甘聚糖果冻制备及工厂设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- ZHANG O. Preparation of konjac glucomannan jelly and its factory design[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.
- [87] 李彦磊. 基于胶体结构构建的食品减盐策略及其机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- LI Y L. Salt reduction strategy and mechanism in food system based on food hydrocolloids [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [88] PANT A, LEE A Y, KARYAPPA R, et al. 3D food printing of fresh vegetables using food hydrocolloids for dysphagic patients [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 114: 106546.
- [89] MONTOYA J, MEDINA J, MOLINA A, et al. Impact of viscoelastic and structural properties from starch-mango and starch-arabinoxylans hydrocolloids in 3D food printing[J]. Additive Manufacturing, 2021, 39: 101891.
- [90] 赵子龙. 微波3D打印固化单元设计及打印鱼糜制品[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- ZHAO Z L. Design of curing unit of microwave 3D

- printing and study of printed surimi products quality [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [91] DICK A, BHANDARI B, DONG X, et al. Feasibility study of hydrocolloid incorporated 3D printed pork as dysphagia food[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 107: 105940.

## New Strategies for Health Intervention of Dietary Hydrocolloids: Microbiota-Oriented Research and Development

Nie Shaoping, Tan Huizi

(*Nanchang University, State Key Laboratory of Food Science and Technology, China-Canada Joint Laboratory of Food Science and Technology (Nanchang), Key Laboratory of Bioactive Polysaccharides of Jiangxi Province, Nanchang 330047*)

**Abstract** The resource of dietary hydrocolloids is abundance. Among them, complex polysaccharide-type hydrocolloids are natural sources of water-soluble dietary fiber, which are widely used food additives with additional high nutritional value. A large number of studies have shown that various types of dietary hydrocolloids can enrich differential bacteria species, thereby playing regulatory roles through the gut-liver axis and gut-brain axis. Therefore, establishing the interaction network of 'dietary hydrocolloids-gut microbiota-human health' has important innovative significance for the development of personalized diet. In this paper, the physicochemical properties and functional activities of complex polysaccharide-type hydrocolloids were systematically summarized, and the research and development of the microbiota-oriented strategies of dietary hydrocolloids were focused, thus provide theoretical references for future health intervention.

**Keywords** dietary hydrocolloids; complex polysaccharides; food additives; microbiota-oriented; personalized application