

多酚-多糖相互作用对二者理化性质及功能活性影响的研究进展

邹萍^{1,2}, 王盼², 王丹², 秦培友², 赵文婷², 赵圆圆², 王宇滨², 赵晓燕^{1,2*}

(1. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866) (2. 北京市农林科学院农产品加工与营养研究所, 果蔬保鲜与加工农产品北京市重点实验室, 农业农村部蔬菜采后加工重点实验室, 北京 100097)

摘要: 植物多酚与多糖具有抗氧化、抗癌、降血糖和免疫调节等多种生物活性。然而, 多酚类物质在消化过程中, 普遍存在小肠吸收率低、生物利用度受限等瓶颈问题。近年研究发现, 多酚与多糖通过分子间相互作用可形成稳定复合物, 不仅能改善多酚的溶解特性及胃肠稳定性, 还可协同多糖增强其功能特性。该文系统解析了多酚-多糖复合物的形成机制(包括非共价和共价结合); 深入探讨了分子间相互作用对以下四方面的调控效应: 多酚生物利用度的提升(溶解性和稳定性); 多糖功能特性的改善(粘度、结晶度、流变特性、乳化特性和稳定性); 复合体系生物活性的协同增效(抗氧化、抗炎和糖脂代谢); 以及复合物对肠道稳态的影响(肠道菌群结构、菌群代谢物和肠屏障功能)。本研究为开发多酚-多糖分子互作的精准营养递送系统和功能性食品配料提供创新策略与理论依据。

关键词: 多酚; 多糖; 多酚-多糖复合物; 相互作用; 功能机制

文章编号: 1673-9078(2026)4-370-383

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0213

Research Progress on the Effects of Polyphenol-polysaccharide Interactions on Their Physicochemical Properties and Functional Activities

ZOU Ping^{1,2}, WANG Pan², WANG Dan², QIN Peiyu², ZHAO Wenting², ZHAO Yuanyuan²,
WANG Yubin², ZHAO Xiaoyan^{1,2*}

(1. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

(2. Institute of Agri-food Processing and Nutrition, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing Key Laboratory of Agricultural Products of Fruits and Vegetables Preservation and Processing, Key Laboratory of Vegetable Postharvest Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100097, China)

Abstract: Plant polyphenols and polysaccharides exhibit a range of biological activities, such as antioxidant, anticancer, hypoglycemic, and immunomodulatory effects. However, the bioavailability of polyphenols is often hindered by challenges during digestion, such as poor intestinal absorption and limited systemic availability. Recent research has shown that polyphenols can form stable complexes with polysaccharides through molecular interactions, which not only enhance the solubility and gastrointestinal stability of polyphenols but also improve their functional properties in combination with polysaccharides. This review systematically examines the mechanisms underlying the formation of polyphenol-polysaccharide complexes, focusing on both non-covalent and

引文格式:

邹萍,王盼,王丹,等.多酚-多糖相互作用对二者理化性质及功能活性影响的研究进展[J].现代食品科技,2026,42(4):370-383.

ZOU Ping, WANG Pan, WANG Dan, et al. Research progress on the effects of polyphenol-polysaccharide interactions on their physicochemical properties and functional activities [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 370-383.

收稿日期: 2025-02-18; 修回日期: 2025-04-24; 接受日期: 2025-05-01

基金项目: 北京市农林科学院优秀青年科学基金(YXQN202202-C); 北京市农林科学院协同创新中心(KJCX20240402; KJCX20240507)

作者简介: 邹萍(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 动物性食品科学, E-mail: 769428167@qq.com

通讯作者: 赵晓燕(1969-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: zxy_nercv@163.com

covalent binding interactions. The regulatory effects of these molecular interactions on the following four key areas have been thoroughly discussed: enhancement of polyphenol bioavailability (through improved solubility and stability); improvement of polysaccharide functional properties (including viscosity, crystallinity, rheological properties, emulsifying capacity, and stability); synergistic biological activities of the complex system (such as antioxidant and anti-inflammatory as well as regulation of glucose and lipid metabolism); and impact on gut homeostasis (including gut microbiota composition, microbiota-derived metabolites, and gut barrier integrity). This study provides a novel approach and theoretical framework for the development of precision nutrition delivery systems based on polyphenol-polysaccharide molecular interactions as well as the development of functional food ingredients.

Key words: polyphenols; polysaccharides; polyphenol-polysaccharide complex; interaction; functional mechanism

多糖是由 10 个以上单糖通过糖苷键连接形成的高分子聚合物^[1], 主要存在于动物、植物和微生物中。作为一种重要的生物活性物质, 多糖具有抗氧化、抗肿瘤、降血糖、免疫调节等多种生物活性^[2]。此外, 多糖还具有保水、乳化、增稠性、生物相容性和可生物降解等理化性质, 已被广泛用作增稠剂、胶凝剂和成膜剂^[3]。多酚作为植物中的一种次生代谢产物, 主要存在于谷物、水果和蔬菜中^[4]。多酚具有多种生物活性, 包括调节肠道菌群、抗炎、抗癌、抗糖尿病和抗氧化等, 已被广泛应用在癌症、心血管疾病、神经系统疾病和肝脏疾病的预防和治疗中^[5]。然而, 由于多酚中存在多个酚羟基, 导致其稳定性差、生物利用度低, 限制了多酚在食品工业的广泛应用。

近年来, 多糖与多酚的结合被认为是提高多糖功能和多酚生物活性的有效手段^[6]。在食品加工过程中, 多糖和多酚之间可以通过非共价与共价相互作用结合的方式, 改变多酚和多糖的结构功能和活性^[7]。当多酚多糖相互作用时, 多糖链的引入会增加酚羟基的亲水性, 提高多酚在食品加工、运输和储存过程中的稳定性; 而多酚的加入会改变多糖的理化特性, 如粘度、结晶度、流变特性、乳化特性及稳定性等。因此, 本文系统总结了多酚和多糖的生物活性、多酚-多糖复合物间的相互作用、多酚多糖对组分功能性质的影响、以及多酚-多糖复合物改善代谢的作用机制, 以期更好的理解复合物的生物活性和健康益处, 拓展多糖和多酚的应用范围, 并为相关产品开发提供重要理论参考。

1 多酚和多糖

多酚是一种芳香族次生代谢产物, 具有一个或多个羟基结构^[8], 按照生物活性分为类黄酮多酚、非类黄酮多酚和单宁。黄酮类化合物(C6-C3-C6 结构)被认为是促进健康和预防疾病的膳食补充剂。根据杂环结构的不同进一步分为黄烷醇、异黄酮、花青素、黄

烷酮、黄酮和黄酮醇六种^[9], 其代表性化合物包括: 槲皮素、芦丁、儿茶素和花青素^[10], 非类黄酮多酚包括酚酸、木脂素和芪类三大类。酚酸作为非黄酮类多酚的主要类型之一, 主要有两种类型, 一种是 C6-C1 结构的苯甲酸衍生物(如没食子酸、原儿茶酸), 另一种是 C6-C3 结构的肉桂酸衍生物(如绿原酸、阿魏酸、咖啡酸)^[11]。单宁是由几种多酚单体共价交联形成的酚类物质, 包括缩合单宁和水解单宁两大类。缩合单宁(1~30 kDa)即原花青素, 由多羟基黄烷-3-醇和多羟基黄烷基-4-醇亚基的聚合物和低聚物组成。而水解单宁(500~3 000 Da)是由葡萄糖和没食子酸或鞣花酸形成的聚酯化合物, 包括吡喃葡萄糖、没食子酸单宁、鞣花单宁及其衍生物^[12]。多酚的结构示意图见(图 1)。

多糖作为天然大分子化合物, 既可以作为动物和植物的外壳, 如壳聚糖和纤维素, 又可以作为常见的储能物质, 如糖原和淀粉^[13]。根据单糖组成单元, 多糖可分为均质多糖(糖原、淀粉和纤维素)和杂多糖(透明质酸、壳聚糖和果胶)(图 2)。

2 多酚与多糖间的相互作用

近年来, 膳食多酚在营养保健食品和功能食品中备受关注。然而, 摄入的多酚大部分在小肠中未被吸收, 直接进入大肠, 并被肠道菌群代谢成低分子量的酚类代谢物, 这些代谢物易于被吸收, 直接或间接影响宿主健康^[14]。大量的实验证明, 多酚与多糖通过共价或非共价相互作用结合后, 多糖能够影响肠道微生物对多酚的降解代谢过程, 进而影响多酚的生物利用度; 而多酚可以降低多糖表面游离羟基的数目, 提高多糖的疏水性, 从而表现出更好的乳化性^[15]。如图 3(以膳食纤维-多酚复合物为代表)和图 4(以壳聚糖-多酚复合物为代表)所示, 多酚和多糖之间的相互作用包括以下两种形式。

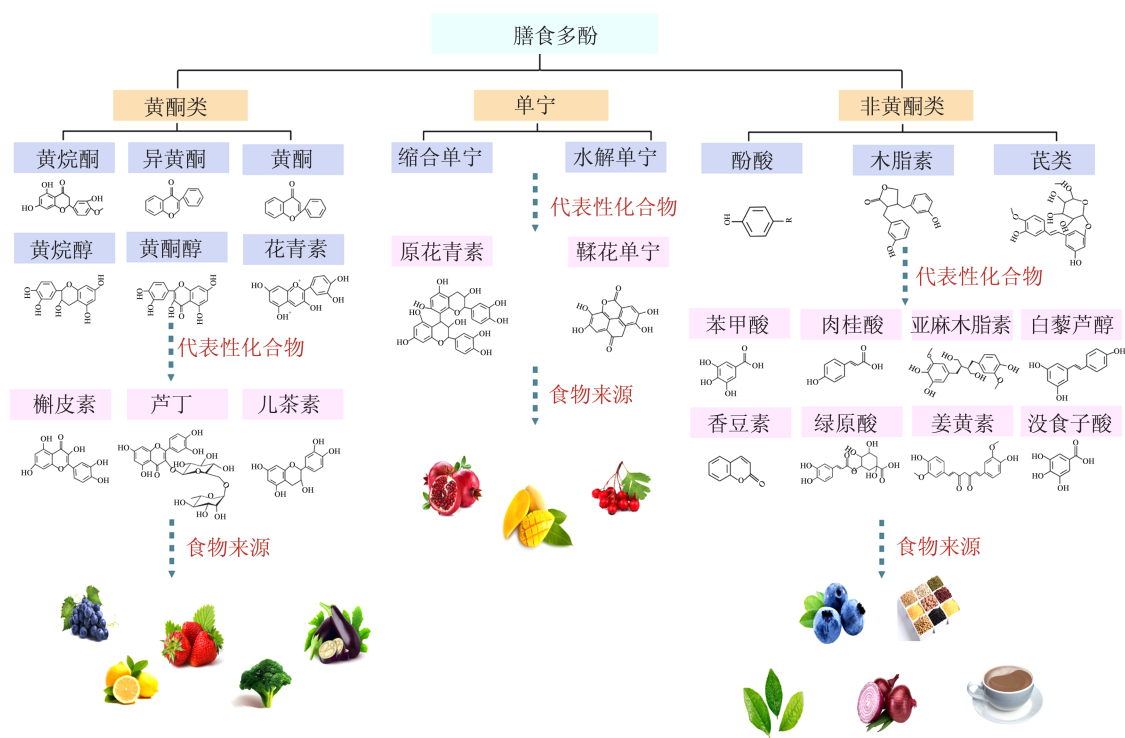


图 1 多酚结构示意图

Fig.1 The structure of polyphenol

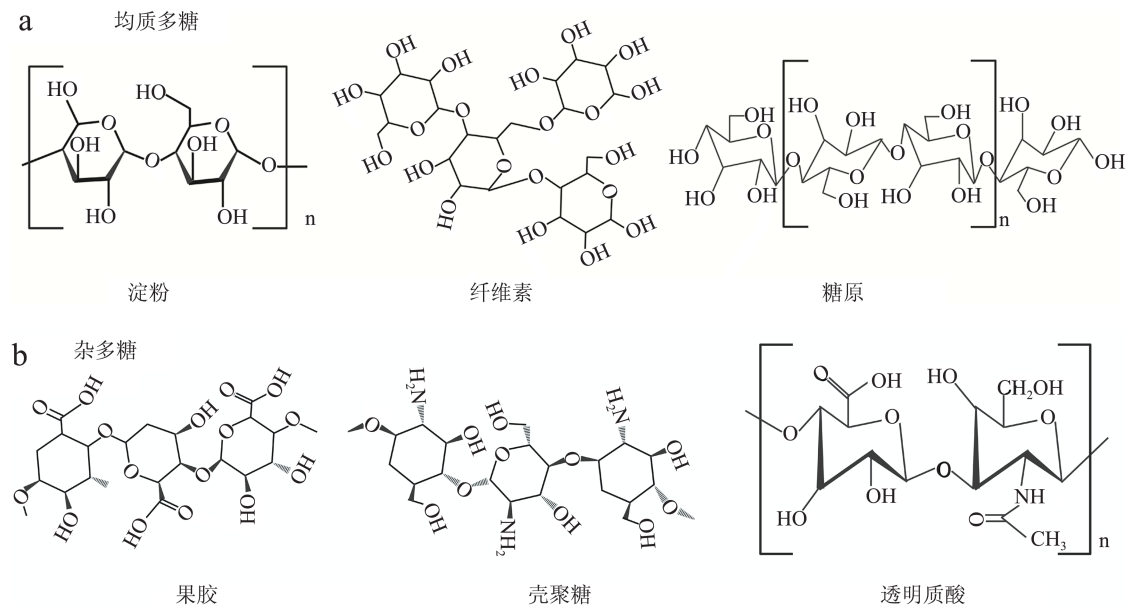


图 2 多糖结构示意图

Fig.2 The structure of polysaccharide

2.1 多酚与多糖的非共价相互作用

食品中的多酚-多糖主要以非共价相互作用形式（氢键、疏水相互作用和离子相互作用）结合，形成具有很强特异性和可逆性的复合物^[16]。疏水作用和氢键被认为是多酚多糖结合的主要驱动力^[17]，而芳香环、羟基数量以及茶多酚表面电荷是形成氢键和疏水相互

作用的重要因素^[18]。例如，花青素 B 环上的羟基容易与果胶形成分子间氢键，增强了花青素的稳定性和抗氧化活性^[19]。除了氢键，不溶性或低溶解度的多酚和多糖还可通过疏水相互作用结合。疏水相互作用主要是发生在疏水空腔或空隙的结构中，这些结构给多酚物质提供嵌入位点，方便形成复合物^[20]。例如， β -环糊精的亲水基团和疏水基团（C-H 和 C-O-C）形成

“内疏水外亲水”的特殊结构^[21],在疏水作用下,破坏多酚的相平衡,使 β -环糊精处于外高能内低能的状态^[22],当多酚进入低能疏水腔并达到相平衡时, β -环糊精在氢键作用下将亲脂性多酚包裹形成多酚-多糖复合物,从而提高多酚的溶解度和生物活性^[23]。离子相互作用是由分子中正负电荷之间的相互作用产生的。已有研究发现^[24],花青素中的黄酮阳离子与游离果胶羧基的阴离子形成的离子相互作用力,是果胶-花青素复合物结合的主要力量。此外,通过离子相互作用形成的复合物还有壳聚糖-花青素^[25]和葡甘露聚糖-花青素^[26]。综上所述,多酚和多糖可以通过非共价作用紧密结合,其相互作用类型和强度与多糖的结构、类型有关^[23]。未来需要进一步阐明多酚和多糖相互作用的具体机制,为复合物的开发利用提供指导。

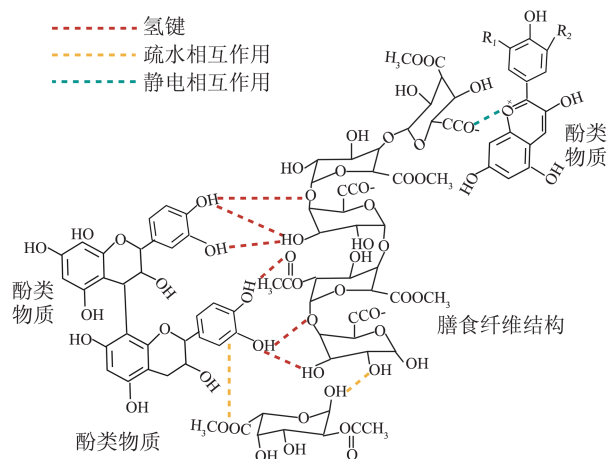


图3 多酚-膳食纤维非共价相互作用图

Fig.3 Polyphenol-dietary fiber noncovalent interaction diagram

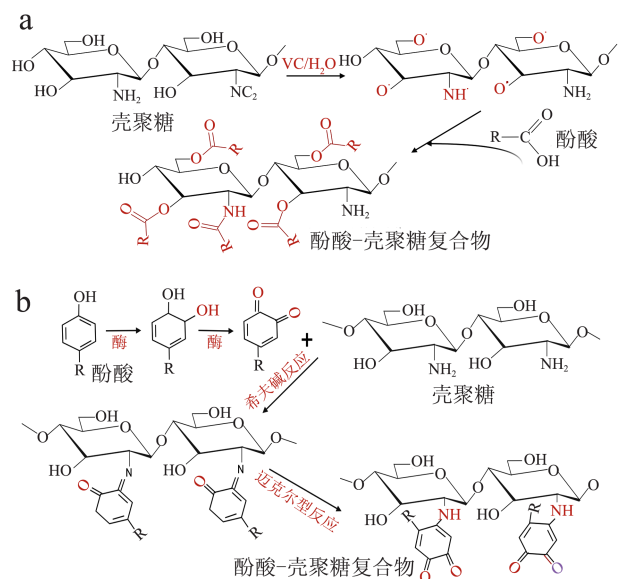


图4 多酚-壳聚糖共价相互作用图

Fig.4 Polyphenol-chitosan covalent interaction diagram

注:(a) 自由基法;(b) 酶法;(c) EDC/NHS 介导法。

2.2 多酚与多糖的共价相互作用

多酚与多糖之间的共价作用是一种不可逆的化学结合方式,通常伴随着新的化学键形成,包括碳氮键、碳碳键、醚键和酯键等。这种共价结合可以通过自由基诱导^[27]、碳二亚胺偶联^[28]、酶法^[29]及酸催化的缩合反应^[30]等相互作用形成。原因是多酚的二酚部分很容易被酶(如漆酶、酪氨酸酶、辣根过氧化物酶和氯过氧化物酶等)氧化或自由基诱导氧化为邻醌,进一步与氨基或巯基氧化形成C-N或C-S共价键,至二聚体(或聚合物),再生成氧化醌^[31],氧化醌与多糖通过希夫碱反应或迈克尔加成反应产生C=N和C-N共价键,在此共价相互作用下生成多酚-多糖复合物^[16]。自由基(Vc、H₂O₂、硝酸铈铵和过硫酸钾)也可以诱导多酚多糖形成羟基自由基,进一步与多糖敏感基团中的氢原子反应,产生多糖大自由基,然后和多酚上的受体位点反应形成共价键(C=C),在共价键的作用下形成复合物^[32]。例如,抗坏血酸和过氧化氢反应生成羟基自由基,该自由基和淀粉反应生成淀粉大自由基,与儿茶素上的受体位点结合形成C=C共价键,随后形成菊粉-儿茶素复合物^[33]。此外,化学偶联剂(如EDC/NHS)能与多酚的羧酸基团反应,形成具有高度反应活性的中间体,然后促进多糖分子中羟基的酯化,使多酚交联,产生多酚多糖复合物^[34]。例如,没食子酸的羧基可以与壳聚糖吡喃环上的C-2、C-3和C-6形成酰胺键或酯键,形成壳聚糖-没食子酸复合物^[35]。在食品工业中,绿色安全的非共价相互作用方法可能更受欢迎,而在需要高稳定性和功能性的应用中,共价相互作用方法可能更为合适。多酚和多糖的非共价和共价结合将成为未来结构和功能修饰的创新策略。

表 1 多酚-多糖相互作用对组分的影响
Table 1 Effects of polyphenol-polysaccharide interaction on components

组分类型	复合物名称	对组分的影响	参考文献
黄酮类多酚	3-葡萄糖苷-果胶	提高生物利用度	[44]
	花青素-膳食纤维	提高生物利用率	[45]
	花青素-果胶	稳定性增强、生物利用度增加	[46]
	儿茶素-葡聚糖	抗神经肿瘤能力提高	[47]
	儿茶素-银耳多糖	抗氧化能力显著增强	[48]
	绿茶多酚-麦芽糊精	提高心血管疾病预防能力	[49]
	乌龙茶多糖-多酚	增强抗氧化活性和免疫功能	[50]
	云雾茶多酚-多糖	提高抗氧化能力	[51]
	红茶多酚-淀粉	抑制淀粉回生	[52,53]
	茶树菇多糖-多酚	提高抗菌能力	[54]
	茶多酚-果胶	提高 DPPH 自由基清除率和总抗氧化能力	[55]
	多糖-橙皮苷	提高生物利用度	[56]
	白藜芦醇-大米淀粉	提高生物利用率	[57]
	白藜芦醇-花菇多糖	提高稳定性和利用率	[42]
	酚酸-结冷胶 / 瓜尔胶 / 刺槐豆胶	提高了生物利用度	[58]
	姜黄素-果胶单宁酸	提高溶解度和生物利用度, 显著缓解高脂血症	[40]
	咖啡酸-壳聚糖	提高肿瘤凋亡能力	[59]
	咖啡酸-β-葡聚糖	提高糖脂代谢能力	[60]
非黄酮类多酚	没食子酸-多糖	增强物质活性、DPPH 自由基清除能力和抗氧化活性	[61,62]
	没食子酸-莲藕多糖	提高莲藕多糖的抗炎能力	[63]
	没食子酸-淀粉	抑制淀粉消化	[57]
	绿原酸-莲藕多糖	提高平均分子量、DPPH 和 FRAP 的值, 增强抗氧化能力	[64]
	绿原酸-海藻酸钠	提高抗炎活性	[65]
	绿原酸-L.barbarum 多糖	改变了 L.barbarum 多糖的溶液性质	[66]
	阿魏酸-果胶	增强了热稳定性、溶解性和抗氧化能力	[67]
单宁	原花青素-多糖	提高稳定性	[68-71]
	柿子单宁-菊粉	提高糖脂代谢能力	[72]

3 多酚-多糖相互作用对组分功能性质的影响

近年来, 多酚类化合物因其较高的生物活性受到广泛关注。然而, 多酚类化合物溶解性低、容易在上消化道和肝脏中快速分解代谢, 导致其生物利用度差^[36]。大量研究表明, 多酚-多糖的相互作用能改变

多酚的代谢过程、提高多酚的生物利用度。因此, 本文重点总结了多酚-多糖相互作用对多酚和多糖功能特性的影响(表 1)。

3.1 多酚-多糖相互作用对多酚生物利用度的影响

多糖-多酚复合物已在分子水平和各种食品系统中被证明能影响酚类的营养性质^[37]和物理特性^[38]。从分子间相互作用的角度来看, 当多糖与多酚相互作用时, 多糖分子中的羟基、羧基等极性基团能与多酚分子中的酚羟基通过氢键相互结合。这种结合使得酚羟基周围的电子云分布发生改变, 增加了酚羟基的亲水性, 促进多酚在极性溶剂(如水)中溶解, 进而提高多酚的生物利用度^[39]。例如, Zhang 等^[40]利用雄性 Sprague Dawley 大鼠进行药代动力学研究, 发现与纯姜黄素相比, 果胶单宁酸纳米颗粒包被姜黄素后溶解度提高了 132 倍, 姜黄素在胃肠道的吸附和浓度也显著增加, 导致姜黄素的生物利用度显著提高。这是因为果胶单宁酸纳米颗粒中的多糖成分与姜黄素分子相互作用, 改善了姜黄素的亲水性, 使得姜黄素在胃肠道中的存在形式更有利于其吸附和扩散, 进而显著增加了姜黄素在胃肠道的吸附量和浓度, 最终导致姜黄素的生物利用度显著提高。此外, 多糖在肠道微生物的作用下会发生发酵等代谢过程, 这一过程也会对多酚的生物利用度产生重要影响。例如, Zou 等^[41]通过人体消化和结肠发酵模拟模型, 研究了桑叶多酚、桑叶多糖、以及桑叶多酚-多糖复合物的消化特性, 研究发现, 多糖本身在发酵后能够选择性地促进特定细菌群落的生长和繁殖。这些细菌群落可能会分泌特定的酶, 这些酶作用于多酚-多糖复合物, 使其结构发生改变, 释放出更多游离的多酚分子, 从而更有利于多酚的吸收, 提高多酚的生物利用度。

从稳定性的角度分析, 多酚与多糖的相互作用对多酚稳定性的影响是提高其生物利用度的另一个重要机制。例如, Liu 等^[42]通过测定不同 pH 值、离子强度和温度条件下白藜芦醇-花菇多糖的粒径、PDI 和 Zeta 电位变化, 并结合体外消化实验评估白藜芦醇的生物利用度。结果表明, 白藜芦醇与花菇多糖纳米颗粒相互作用后, 白藜芦醇的 pH 稳定性、离子强度稳定性、温度稳定性以及胃消化稳定性均得到有效增强。因为花菇多糖纳米颗粒能够在白藜芦醇分子周围形成一层保护性的“屏障”, 减少外界环境因素(如胃酸、金属离子等)对多酚分子的破坏。同时, 这种相互作用使得白藜芦醇在胃肠道中的存在形态更加稳定, 更易于转运到小肠进行消化、吸收和利用, 为提高其生

物利用度奠定了坚实基础。类似地,花青素与果胶通过氢键结合后,果胶分子能够包裹花青素分子,减少其与外界环境的直接接触,从而降低了花青素被氧化或降解的可能性。随着胃肠道消化的进行,果胶分子逐渐被分解,缓慢释放出花青素分子,使得花青素在胃肠道中的释放量增加,进而提高了其生物利用度^[43]。综上所述,多酚与多糖的相互作用主要是通过改变多酚的亲水性、影响肠道微生物群落以及增强多酚的稳定性等多种机制,对多酚的生物利用度产生了显著的提升作用。深入理解这些机制,对于开发富含多酚的功能性食品以及提高多酚在营养保健和医药领域的应用具有重要的理论指导意义。

3.2 多酚-多糖相互作用对多糖理化特性的影响

现有研究常集中于多酚多糖互作对多酚性质的影响,其相互作用对多糖理化特性的研究较少。近年来的证据表明,多酚-多糖的相互作用可改变多糖的理化特性,如粘度、结晶度、流变特性、乳化特性及稳定性等。Tudorache等^[73]的研究表明,多酚与多糖(β -葡聚糖、瓜尔豆胶和黄原胶)的相互作用可显著导致多糖溶液粘度下降、假塑性行为降低。类似的,Guo等^[32]的研究表明,阿拉伯木糖-儿茶素复合物的粘度低于阿拉伯木糖,原因可能是由于复合物形成是通过自由基作用介导,而自由基对多糖链具有降解作用,儿茶素增加了糖链的分子间摩擦力,多酚多糖之间的缩合反应降低了复合物的粘度。在结晶度方面,Liu等^[33]利用X射线衍射法测量各物质的结晶度,结果发现儿茶素-菊粉复合物的结晶度比单独使用菊粉时更高。同样的,与单独N. physalodes多糖相比,茶多酚的加入增加了多糖的结晶度^[74]。在其它理化特性方面,Pantidos等^[75]发现海藻多酚与淀粉的相互作用会改变淀粉网络结构,形成不稳定的淀粉-多酚V型络合物。Zhao等^[76]证明了咖啡酸的-OH基团与莲子淀粉/马铃薯淀粉之间通过氢键相互作用,降低了两种淀粉凝胶的粘弹性、凝胶化能力和质构特性。花青素与马铃薯淀粉结合后阻碍马铃薯淀粉凝胶三维结构的形成、降低其消化速率、促进淀粉回生,以及改变淀粉的糊化温度等热力学理化特性^[77]。已有研究证明多糖-多酚复合物具有更好的乳化性质和稳定性^[78]。Patel等^[79]利用等温量热滴定法对甲基纤维素-单宁酸复合物进行表征,发现单宁酸降低了胶凝温度,增强甲基纤维素的稳定性。Tang等^[80]用花青素与壳聚糖和海藻酸钠形成Pickering乳液,并对其进行结构表征。研究发现花青素能增强乳液的稳定性,其原理是随着花青素浓度的增加乳液粒径和界面张力减少,而小颗粒更有利于

油-水界面的吸附,进一步稳定较大的界面面积,从而提高其乳液稳定性。

3.3 多酚-多糖相互作用对二者活性的影响

多酚具有一定的生物活性,但由于其水溶性差、生物利用度低,以及在胃肠道的损失,导致其活性发挥存在局限性。这些问题可通过与多糖结合来缓解,增强其功能活性,如抗氧化、抗炎、糖脂代谢。而多糖的功能活性多体现在菌群调节及免疫提升,与多酚互作结合可显著提升多糖的功能特性。在抗氧化方面:多酚结构中含有羟基,具有清除自由基的能力,当多酚与多糖结合时,其抗氧化活性可能因结合位点的不同而存在差异。例如,儿茶素的A环和B环中有许多供电子基团,使其具备强大的捕获自由基能力,当与银耳多糖结合后,银耳多糖的抗氧化能力显著增强^[48]。类似的,与壳聚糖相比,没食子酸-壳聚糖复合物的DPPH自由基清除能力显著提高^[81]。此外,Huang等^[82]发现茶渣膳食纤维-多酚复合物显著降低ROS和MDA的水平,上调了SOD和GSH-Px的水平,比单独使用多酚时表现出更强的抗氧化活性。这是因为多糖与多酚结合后,多糖可能通过空间位阻等作用,保护多酚的活性位点,减少其在环境中的氧化损失,同时改变多酚周围微环境,影响其电子云分布,进而提升抗氧化活性。总体而言,多酚-多糖复合物的抗氧化活性主要来自于多酚,多糖主要用于提高稳定性、减少多酚损失、提高多酚生物利用度,实现协同抗氧化的功能。在抗炎功能方面:多酚与多糖本身具有抗炎活性,通过静电相互作用、氢键形成等方式增强复合物的稳定性,从而提高其在抗炎中的效果。例如,与海藻酸钠相比,绿原酸-海藻酸钠复合物显著降低RAW 264.7炎症细胞模型中的NO和IL-6水平,增强海藻酸钠在炎症性肠病中的治疗效果^[65]。类似的,莲藕多糖-没食子酸/表儿茶素复合物形成后,改变了与炎症相关信号通路关键蛋白的结合亲和力,影响抗炎细胞因子IL10的信号转导,从而增强抗炎效果^[63]。这种优于或增强基础成分的抗炎效果,为炎症性疾病的治疗提供了潜在的有效手段。在糖脂代谢方面:多酚与多糖相互作用在一定程度上可改变多糖或多酚的调控糖脂代谢的功能,现有研究对于复合物的协同增效作用存在争议。例如,单独给予 β -葡聚糖时,C57BL/6J肥胖小鼠的降脂效果不明显,而给予 β -葡聚糖-咖啡酸复合物后,显著降低了血生化指标(TC、LDL-C、TNF- α)、肝脏指数和脂肪细胞的大小,增强了肥胖小鼠的糖脂代谢能力^[60]。Zhu等^[83]也研究了壳聚糖、儿茶素、壳聚糖-儿茶素的抗糖尿病活性,结

果发现复合物对 α -葡萄糖苷酶的抑制率高达 72.45%，降糖活性更强于壳聚糖。然而，部分研究证明多酚与多糖的结合也可能降低多酚或多糖的功能，例如 Filipa 等^[84]研究表明，与葡萄渣中的游离花青素相比，其复合物对糖尿病的改善效果更弱。由于研究的互作类型及强弱判定标准不统一，难以进行横向比较。此外，在体内研究中，动物模型的饮食结构、遗传背景等因素可能干扰实验结果，导致结论不一致。因此，多酚与多糖互作不一定总具有协同增效功能，其复合物对糖脂代谢的调控作用，可能与多酚、多糖的种类及互作类型、强弱有关。

4 多酚多糖复合物改善代谢的功能机制

4.1 改善肠道稳态的作用机制

肠道稳态对于防御病原体 and 维持菌群稳态至关重要，不仅涉及消化和营养吸收，还涉及肠道屏障的完整性、菌群稳态和炎症调节^[85]。基于多酚的代谢特点，摄入后，多酚可在肠道持续存在，且大部分多酚以未被上消化道充分代谢的形式到达结肠，进行肠道微生物发酵。同样的，大部分多糖不能被人体直接消化吸收，但可以被肠道菌群分解成具有活性的小分子代谢物，这些代谢物反过来影响肠道菌群结构，维持肠道稳态。因此，多酚-多糖复合物的一个重要功能之一就是对肠道稳态的调控作用。

4.1.1 调节肠道菌群结构

肠道微生物在维持肠道乃至机体健康方面扮演着至关重要的角色。大量研究证实，多酚-多糖复合物能有效调节肠道微生物群的组成及其多样性，从而对肠道乃至机体健康产生深远影响。

在菌群 α 多样性的调控方面，研究结果呈现出一定的争议性。与 DSS 结肠炎模型组相比，红豆膳食纤维对 Shannon 指数没有显著影响，而红豆膳食纤维-多酚复合物显著降低 Shannon 指数，进而导致菌群多样性下降^[86]。然而，在 Liang 等^[87]的实验中，与对照组相比，桃花多酚、膳食纤维和膳食纤维-多酚复合物均显著降低 Simpson 指数，且膳食纤维-多酚复合物组的 Simpson 指数显著低于另外两组，这表明膳食纤维-多酚复合物显著提高了菌群多样性。这种差异可能与多酚、多糖的种类以及二者的结合形式密切相关。

在菌群物种种类上，多酚-多糖复合物展现出了协同增效的作用。以桃花多酚、膳食纤维及其复合物为例，与对照组相比，桃花多酚组 *Bifidobacterium* 的

相对丰度显著提高，*Lactibacillus* 的相对丰度显著降低；桃花膳食纤维组 *Prevotellaceae-UCG-001* 相对丰度显著提高，*Escherichia-Shigella* 丰度显著降低；经桃花多酚-膳食纤维复合物干预后，*Bifidobacterium* 和 *Prevotellaceae-UCG-001* 的相对丰度显著升高，*Lactibacillus* 和 *Escherichia-Shigella* 相对丰度显著下降^[87]。类似的，在体外发酵实验（发酵 36 h）中，与对照组相比，琼脂糖组显著增加了 *Lachnoclostridium* 的相对丰度，显著降低了 *Parabacteroides* 和 *Sutterella* 的相对丰度；琼脂糖-茶多酚复合物干预后，不仅显著增加了 *Lachnoclostridium*、*Clostridium_sensu_stricto_1* 和 *Bacteroides* 的相对丰度，还显著降低了 *Parabacteroides*、*Sutterella*、*Lactococcus* 和 *Escherichia-Shigella* 的相对丰度^[88]。这些结果表明，多酚与多糖的结合能够更有效地调节肠道菌群中特定物种的丰度，使其朝着有利于肠道健康的方向发展。

在菌群物种丰度上，多酚-多糖复合物能够富集有益菌并减少有害菌。例如，与对照组相比，桃花多酚显著提高 *Akkermansia* 和 *Bacteroidota* 的丰度，而桃花多酚-膳食纤维复合物对这两种有益菌丰度的提升效果更为显著，说明桃花多酚-多糖复合物有利于有益菌的富集^[87]。在体外发酵实验（24 h）中，与对照组相比，桑叶多酚、桑叶多糖和桑叶多酚多糖复合物均显著降低 *Lachnospiraceae* 和 *Lactobacillus* 的相对丰度，显著提高 *Fusobacterium* 的相对丰度，且桑叶多酚多糖复合物的效果显著优于桑叶多酚和多糖^[41]。此外，其它研究也表明，与对照组相比（发酵 36 h），*l*-卡拉胶提高了 *Bacteroides* 的相对丰度；而 *l*-卡拉胶-茶多酚复合物对 *Bacteroides* 丰度的提升效果更佳^[88]；凝结多糖组的 *Prevotella* 丰度显著高于对照组，且凝结多糖-槲皮素复合物对 *Prevotella* 丰度的提高更为显著^[89]。这些结果进一步证实了多酚-多糖复合物在调节菌群物种丰度方面的积极作用。

综上所述，多酚和多糖对于菌群 α 多样性、物种种类以及物种丰度的调控作用并非总是协同增效的，其具体效果受到多种因素的影响。目前关于多酚-多糖复合物调节肠道菌群的研究仍相对有限，未来可以从分子机制、体内外模型验证等多个层面，深入探究多酚-多糖复合物与肠道微生物之间的相互作用机制，为基于多酚-多糖复合物的功能性食品开发以及肠道健康精准干预策略的制定，提供更为坚实可靠的理论依据与实践指导。

4.1.2 调节菌群代谢物

多酚、多糖在肠道微生物群的作用下产生多种代

谢物,维持肠道稳态,直接或间接的改善宿主代谢,其中短链脂肪酸(乙酸、丙酸、丁酸、异丁酸和戊酸等)是肠道微生物的主要代谢产物^[90]。Shen 等^[88]使用 RAW264.7 细胞模型和体外升-横-降结肠发酵系统,探究了茶多酚-多糖(琼脂糖和 ι -角叉菜胶)复合物对肠道菌群的调节作用。结果显示,相较于琼脂糖组,琼脂糖-茶多酚复合物组的乙酸、丙酸、丁酸和异丁酸含量显著降低;而茶多酚- ι -角叉菜胶复合物组的异丁酸、总 SCFA 含量显著高于 ι -角叉菜胶组。这一现象源于茶多酚与 ι -角叉菜胶的协同作用增加了有益菌 *Bifidobacterium* 和 *Bacteroidetes* 的丰度。*Bifidobacterium* 和 *Bacteroidetes* 能通过自身代谢活动,利用肠道内的底物发酵产生包括异丁酸在内的 SCFA,从而促进肠道健康及代谢平衡。此外,Zheng 等^[91]运用 MiSeq 测序技术结合生物信息学手段,深入探究了槲皮素与低聚果糖对大鼠肠道微生物群的综合效应。研究结果显示,低聚果糖-槲皮素复合物组的乙酸、丙酸、丁酸和总 SCFA 含量显著高于低聚果糖组。原因可能是低聚果糖与槲皮素的相互作用抑制了潜在致病菌 *Proteobacteria* 的丰度,减少了其对肠道微生态的不良影响;同时促进了有益菌 *Lactobacteria* 的生长,*Lactobacteria* 的增殖不仅增强了肠道屏障功能,还能通过代谢活动产生更多的 SCFA,进而促进肠道健康与整体代谢平衡。类似的,在体外发酵 24 h 后,凝结多糖-槲皮素复合物组的总 SCFA 和丙酸含量也显著高于低聚果糖组、且复合物组的效果显著强于单独多酚组^[89]。通过 Spearman 相关性分析发现,*Prevotella*、*Muribaculaceae* 和 *Eubacterium_ventriosum_group* 的丰度与丙酸和丁酸呈正相关,而凝结多糖-槲皮素可促进 *Prevotella*、*Muribaculaceae* 和 *Eubacterium_ventriosum_group* 的生长。这意味着凝结多糖和槲皮素相互作用可增加产 SCFA 菌的相对丰度,从而促进丙酸的生成。综上所述,多酚-多糖复合物在菌群代谢物调控作用方面存在一定争议。这种差异可能与多酚和多糖的结构特性密切相关,不同的结构均可能影响复合物在肠道内的降解速率、微生物对其利用程度以及与微生物受体的结合能力,进而导致对菌群代谢物调控效果的不同。

4.1.3 改善肠屏障

肠道屏障能将肠道微生物与宿主的免疫监控系统隔开,防止宿主的免疫系统对肠道共生微生物产生免疫应答^[92],常见的肠道屏障有物理屏障、生化屏障和免疫屏障。

物理屏障作为抵御外部环境的首道防线^[93],可以防止有害化合物进入循环系统并保持肠道通透性,这

一过程与紧密连接蛋白密切相关^[94]。众多研究表明,多酚多糖复合物在提升紧密连接蛋白 ZO-1 和 Occludin 的表达水平上表现出协同增效的效果,进而对物理屏障起到更为有效的改善作用。例如,Chen 等^[95]给 DSS 诱导的结肠炎小鼠饲喂了茶多酚、茶多糖和茶多酚多糖复合物,结果发现,与 DSS 组相比,干预组的 Claudin-1 和 Occludin 表达显著提高,其中复合物组的效果最好,显著高于茶多糖组。Wang 等^[96]给雄性 BALB/c 结肠炎小鼠灌胃姜黄素、复合多糖及姜黄素-多糖复合物,结果发现,姜黄素和复合多糖组的 ZO-1 蛋白水平与模型组没有显著差异,而姜黄素-多糖复合物组的 ZO-1 蛋白表达水平显著高于模型组。类似的,Chen 等^[97]给 UC 小鼠灌胃白藜芦醇和环糊精-金属有机框架制备的天然多糖-白藜芦醇复合物后,发现白藜芦醇和天然多糖-白藜芦醇复合物组的紧密连接蛋白 ZO-1、Occludin 和 Mucin-2 的表达显著高于 DSS 组,其中复合物组效果最好,显著高于白藜芦醇组。总的来说,多酚多糖复合物可以通过激活相关信号通路,促进紧密连接蛋白基因的转录与翻译,从而增加紧密连接蛋白的表达量,强化物理屏障功能。

化学屏障是肠道微生物群和小肠上皮分离的主要参与者,由粘蛋白(MUC2)、抗菌肽(AMP)和分泌型免疫球蛋白 A(SIgA)组成^[98]。少量研究表明,多酚-多糖复合物通过增强化学屏障功能维护肠道健康。例如,Li 等^[99]给 ICR 小鼠灌胃褐藻寡糖、矢车菊素-3-O-葡萄糖苷及其复合物,与对照组相比,褐藻寡糖、矢车菊素-3-O-葡萄糖苷和复合物均能显著提高 β -Defensin 和 SIgA 的表达,其中复合物组的 Defensin 和 SIgA 显著高于褐藻寡糖和矢车菊素-3-O-葡萄糖苷组,增强了化学屏障功能。这是因为多酚的抗氧化特性有助于减轻肠道内的氧化应激,维持肠道上皮细胞的正常功能,进而保障化学屏障相关物质的稳定产生;而多糖成分可以通过与肠道微生物相互作用,调节微生物群落结构,间接影响化学屏障相关物质的表达与分泌。

肠道免疫屏障由免疫细胞、免疫因子和肠道相关淋巴组织组成,可以保护肠道免受病原体和其他环境压力的侵害^[100]。有研究发现,给 DSS 大鼠灌胃葡聚糖、姜黄素和葡聚糖-姜黄素物理复合物后^[101],与对照组相比,单独使用葡聚糖和姜黄素对大鼠的免疫因子没有显著差异,使用葡聚糖-姜黄素物理复合物后却显著降低 TGF- β 1 的表达水平。TGF- β 1 水平降低会保护肠道屏障免受炎症干扰。类似的^[99],与对照相比,褐藻寡糖、矢车菊素-3-O-葡萄糖苷和它们的复合物都显著提高肠道免疫因子 IL-4、IL-10 和 IFN- γ 的含量,其

中复合物的效果最好, 几乎是对照组的 2 倍, 且显著高于褐藻寡糖和矢车菊素-3-O-葡萄糖苷组。因为复合物可以作用于 T 淋巴细胞, 调节其向 Th1、Th2 等不同亚群的分化, 从而改变 IL-4、IL-10 和 IFN- γ 等免疫因子的分泌水平。同时, 复合物中的多酚成分可以通过抑制炎症相关信号通路的激活, 减少炎症因子的产生, 进而间接调节免疫屏障功能。

以上结果皆可证明, 多糖和多酚复合物在调节物理屏障、化学屏障和免疫屏障等方面存在协同增效的作用, 可作为开发新型食品的功能成分来改善肠道稳态, 保护机体健康。

4.2 调节糖代谢的作用机制

糖代谢是指糖类物质在生物体内的消化、储存、分解和合成等一系列化学反应过程, 主要包括糖分解代谢(糖酵解、三羧酸循环和磷酸戊糖途径)与糖合成代谢(糖异生和糖原合成)两个途径^[102]。当下, 针对多酚多糖复合物对糖代谢的研究, 主要聚焦于抑制胰岛素抵抗、改善糖原合成以及促进葡萄糖摄取等方面。如图 5a, Yang 等^[103]、Thomas 等^[104]从绿茶中提取纯化出一种效果最好的多糖 P4M-TPS, 并与茶多酚按照 2:1 的比例制备复合物 P4M-TPS-TP, 对 T2DM 小鼠进行干预, 结果发现, 与单独多糖、多酚组相比, 复合物可显著提高 TGR5/cAMP/PKA/CREB 通路蛋白的表达。TGR5 作为一种 G 蛋白偶联受体, 被激活后可促使细胞内的 cAMP 水平升高, 进而激活 PKA, PKA 进一步磷酸化 CREB, 增强其转录活性。在此过程中, 复合物还显著增强了 GLP-1 的分泌, 以葡萄糖浓度依赖的方式促进胰岛素分泌, 同时抑制胰高血糖素分泌, 从而有效调节血糖水平。类似的, Basu 等^[105]发现多酚负载的海藻酸盐纳米颗粒通过激活 IR-GLU2 胰岛素信号通路的蛋白表达, 该通路的激活可促使胰岛素受体底物(IRS)磷酸化, 进而激活下游的 PI3K-Akt 等信号分子, 协同增强胰岛素敏感性, 并推动葡萄糖摄取, 最终实现对糖代谢的调节。糖异生是一种糖合成代谢途径, 会使肝脏从非碳水化合物中(如氨基酸和甘油)产生葡萄糖, 当糖异生相关酶 *PCK1* 和 *G6Pase* 活性上调后, 会导致肝脏产生葡萄糖增加, 并进一步加剧高血糖。有限的研究表明, 多酚多糖复合物可以通过抑制糖异生调节糖代谢。例如, Es-haghi 等^[106]通过 2 型糖尿病小鼠模型, 发现表没食子儿茶素-3-没食子酸酯/酪醇负载壳聚糖/卵磷脂纳米颗粒治疗降低了糖尿病小鼠的空腹血糖水平, 同时下调了糖异生相关基因 *PCK1* 和 *G6Pase* 的表达, 表现出抗糖尿病的潜力。这可能是由于该纳米颗粒进入体内后,

影响了相关转录因子与 *PCK1* 和 *G6Pase* 基因启动子区域的结合, 从而抑制了基因的转录和表达, 减少了糖异生过程中关键酶的合成, 最终实现对糖异生的抑制。然而, 关于多酚多糖复合物在糖分解代谢方面的研究几乎没有, 未来可从糖分解代谢途径中的关键酶活性调节、代谢中间产物变化以及相关信号通路的激活或抑制等角度, 深入探究其降糖机制, 为多酚多糖复合物的开发提供更为丰富的理论支撑。

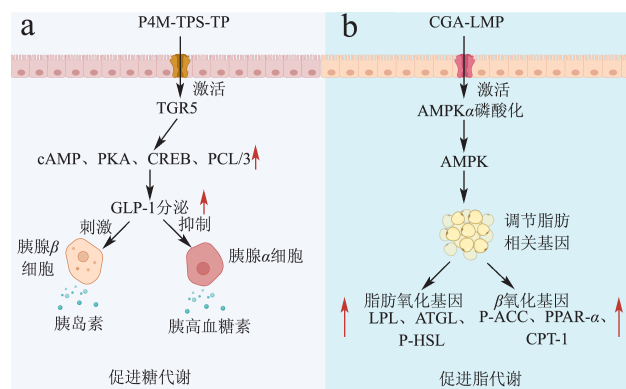


图 5 糖脂代谢机制

Fig.5 Mechanisms of glucose and lipid Metabolism

注: (a) 糖代谢; (b) 脂代谢。

4.3 调节脂代谢的作用机制

脂质代谢紊乱是指调节脂质代谢的酶、激素水平和活性异常, 伴有组织器官的生理和病理变化^[107], 脂代谢的主要机制包括脂质合成和脂肪氧化两大类。大量研究表明多酚多糖复合物在抑制脂肪合成方面具有协同作用。例如, 在高热量饮食诱导的 SD 肥胖大鼠中, 桑叶多酚多糖复合物对脂肪细胞大小和脂肪合成基因(*FAS*、*C/EBP-α* 和 *PPAR-γ*) 的抑制作用比多酚或多糖组的效果更好^[108]。这是因为 *FAS* 作为脂肪酸合成的关键限速酶, 其活性的抑制直接减少了脂肪酸的从头合成; *C/EBP-α* 和 *PPAR-γ* 则在脂肪细胞分化与脂质代谢调控网络中发挥核心作用, 复合物能够干扰它们的转录激活过程, 阻碍前脂肪细胞向成熟脂肪细胞的分化以及脂质的过度积累, 从而在脂质代谢调节方面发挥协同增效特性。同样的, Zou 等^[109]利用脂肪肝人肝细胞癌和人结直肠癌共培养模型, 研究了桑叶多酚和多糖的降脂作用, 结果发现, 桑叶多酚多糖复合物通过影响细胞内脂质转运蛋白的活性与定位, 干扰甘油三酯的组装与分泌, 进而减少细胞内脂滴的生成与储存, 表现出比桑叶多糖、多酚更好的抑制作用。此外, Li 等^[110]发现桑叶多糖与木犀草素结合后, 激活了 PI3K/SIRT-1/*FAS*/*CEBP-α* 信号通路。通过去乙酰化修饰调控下游 *FAS* 和 *CEBP-α* 等靶蛋白的活性与

稳定性,抑制肝脂滴的积累,最终实现脂质代谢的有效改善。仅有少数研究表明多酚多糖复合物可以通过脂肪氧化(LPL、ATGL、p-HSL、p-ACC1、PPAR- α 和CPT-1)机制调节脂代谢。如图5b, Tian等^[11]利用C57BL/6J肥胖小鼠模型研究绿原酸、低甲氧基果胶以及绿原酸-低甲氧基果胶复合物对肥胖小鼠的影响,结果发现与单独使用绿原酸或果胶相比,复合物能够激活AMPK信号通路。AMPK作为细胞内能量代谢的关键传感器,被激活后可通过磷酸化修饰一系列下游靶蛋白,如促进脂肪氧化基因(LPL、ATGL、p-HSL)和 β 氧化基因(p-ACC1、PPAR- α 和CPT-1)的表达,最终实现脂肪的高效氧化分解,改善机体的脂代谢紊乱状态。然而,目前关于多酚多糖复合物改善脂代谢的作用及机制研究仍十分有限,在复合物的结构与功能关系、体内代谢动力学以及对不同组织器官脂代谢的特异性调节等方面,均存在广阔的研究空间,亟待深入挖掘与探索。

5 挑战与未来方向

多酚和多糖具有良好的生物相容性和低毒性,可通过不同的方法组合。多酚与多糖形成的复合物在未来可广泛应用于食品、生物、化妆品和化学工业等领域,有利于增加跨学科方法的整合,从而扩大多酚与多糖相互作用的潜力。但多酚-多糖复合物的合成机理和动力学缺少研究,没有标准化的生产程序合成具有特定功能特性的复合物。其次,多酚-多糖复合物的详细结构特征,如多酚的连接位置和分布模式尚不清楚,严重阻碍了构效关系的建立。此外,多酚-多糖复合物大多数活性评估依赖于体外化学实验,缺乏系统的细胞及动物模型的评价体系,活性机制研究更是十分有限,限制了复合物在功能食品的靶向应用。如何在不损害食品质量的基础上,合理利用两者之间的相互作用,使多酚和多糖的功能特性得到充分利用,仍然是一个值得探讨的话题。

未来多酚类物质与多糖相互作用的研究将从以下几个方面展开:1)建立一套标准化程序来生产具有所需特性的多酚-多糖复合物;2)通过2D NMR等技术直观地解释复合物的构象;3)通过细胞和动物实验系统评价多酚-多糖复合物的作用效果及分子机制。

6 结论

综上所述,多酚-多糖复合物不仅具有两者的优点,而且可以产生协同效应,如增强的物理、化学和功能特性。因此,多酚与多糖之间的相互作用对其功能特性有着深远的影响,而多糖-多酚复合物的开发

和应用为提高多酚的生物利用度开辟了新的途径。未来的研究应侧重于探索新型多酚-多糖复合物并优化其功能特性,从而为消费者和制造商提供更多益处。

参考文献

- [1] XU Y, WU Y J, SUN P L, et al. Chemically modified polysaccharides: Synthesis, characterization, structure activity relationships of action [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132(12): 970-977.
- [2] WANG S, PENG Y, ZHUANG Y, et al. Purification, structural analysis and cardio-protective activity of polysaccharides from Radix Astragali [J]. Molecules, 2023, 28(10): 4167.
- [3] LIU J, WANG X, YONG H, et al. Recent advances in flavonoid-grafted polysaccharides: Synthesis, structural characterization, bioactivities and potential applications [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 116(11): 1011-1025.
- [4] IQBAL I, WILAIRATANA P, SAQIB F, et al. Plant polyphenols and their potential benefits on cardiovascular health: A review [J]. Molecules, 2023, 28(17): 6403.
- [5] CHENG Z, WANG Y, LI B. Dietary polyphenols alleviate autoimmune liver disease by mediating the intestinal microenvironment: Challenges and hopes [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(35): 10708-10737.
- [6] GUO Q, XIAO X, LU L, et al. Polyphenol-polysaccharide complex: Preparation, characterization, and potential utilization in food and health [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2022, 13(1): 59-87.
- [7] XUE H, DU X, FANG S, et al. The interaction of polyphenols-polysaccharides and their applications: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278(25): 134594.
- [8] WEN C, LIU G, REN J, et al. Current progress in the extraction, functional properties, interaction with polyphenols, and application of legume protein [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(4): 992-1002.
- [9] SHAH A, SMITH D L. Flavonoids in agriculture: Chemistry and roles in, biotic and abiotic stress responses, and microbial associations [J]. Agronomy, 2020, 10(8): 1209.
- [10] ZAINI N S, KARIM R, ABDULL RAZIS A F, et al. Utilizing nutritional and polyphenolic compounds in underutilized plant seeds for health application [J]. Molecules, 2022, 27(20): 6813.
- [11] LUCA S V, MACOVEI I, BUJOR A, et al. Bioactivity of dietary polyphenols: The role of metabolites [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(4): 626-659.
- [12] PIETRO B, PANAGIOTIS A, MARTA G, et al. Antimicrobial and antiviral activity of hydrolysable tannins [J]. Mini-Reviews in Medicinal Chemistry, 2008, 8(12): 1179-1187.
- [13] YI Y, XU W, WANG H X, et al. Natural polysaccharides experience physiochemical and functional changes during preparation: A review [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 234(8): 115896.
- [14] ZHANG X, SHAO J, CUI Q, et al. Bioactivities of dietary polyphenols and their effects on intestinal microbiota [J]. Mini-Reviews in Medicinal Chemistry, 2023, 23(3): 361-377.

- [15] WATRELOT A A, LE BOURVELLEC C, IMBERTY A, et al. Neutral sugar side chains of pectins limit interactions with procyanidins [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 99(1): 527-536.
- [16] ZHU J, ZHANG D, TANG H, et al. Structure relationship of non-covalent interactions between phenolic acids and arabinan-rich pectic polysaccharides from rapeseed meal [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120(15): 2597-2603.
- [17] SUN B, TIAN Y, CHEN L, et al. Linear dextrin as curcumin delivery system: Effect of degree of polymerization on the functional stability of curcumin [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77(4): 911-920.
- [18] ZHU F. Interactions between cell wall polysaccharides and polyphenols [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(11): 1808-1831.
- [19] FERNANDES A, BRÁS N F, MATEUS N, et al. Understanding the molecular mechanism of anthocyanin binding to pectin [J]. Langmuir, 2014, 30(28): 8516-8527.
- [20] ZHAO X, YANG C, LIU W, et al. Inhibition of insulin fibrillation by carboxyphenylboronic acid-modified chitosan oligosaccharide based on electrostatic interactions and hydrophobic interactions [J]. Biophysical Chemistry, 2024, 310(7): 107236.
- [21] CHODANKAR D, VORA A, KANHED A. β -cyclodextrin and its derivatives: application in wastewater treatment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(2): 1585-1604.
- [22] YU C, ZHANG J, WANG T. Star anise essential oil: chemical compounds, antifungal and antioxidant activities: A review [J]. Journal of Essential Oil Research, 2021, 33(1): 1-22.
- [23] SIEMIŃSKA-KUCZER A, SZYMAŃSKA-CHARGOT M, ZDUNEK A. Recent advances in interactions between polyphenols and plant cell wall polysaccharides as studied using an adsorption technique [J]. Food Chemistry, 2022, 373(8): 131487.
- [24] LIN Z, FISCHER J, WICKER L. Intermolecular binding of blueberry pectin-rich fractions and anthocyanin [J]. Food Chemistry, 2016, 194(5): 986-993.
- [25] GE J, YUE P, CHI J, et al. Formation and stability of anthocyanins-loaded nanocomplexes prepared with chitosan hydrochloride and carboxymethyl chitosan [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 74(1): 23-31.
- [26] LU M, LI Z, LIANG H, et al. Controlled release of anthocyanins from oxidized konjac glucomannan microspheres stabilized by chitosan oligosaccharides [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 51(9): 476-485.
- [27] YAN S, YAO Y, XIE X, et al. Comparison of the physical stabilities and oxidation of lipids and proteins in natural and polyphenol-modified soybean protein isolate-stabilized emulsions [J]. Food Research International, 2022, 162(12): 112066.
- [28] LI M, LI X, MCCLEMENTS D J, et al. Physicochemical and functional properties of lactoferrin-hyaluronic acid complexes: Effect of non-covalent and covalent interactions [J]. LWT, 2021, 151(17): 112121.
- [29] JIA W, ZHU J, WANG X, et al. Covalent or non-covalent binding of polyphenols, polysaccharides, metal ions and nanoparticles to beta-lactoglobulin and advanced processing techniques: Reduce allergenicity and regulate digestion of beta-lactoglobulin [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 129(11): 634-645.
- [30] ZHANG Q, ZHOU Y, YUE W, et al. Nanostructures of protein-polysaccharide complexes or conjugates for encapsulation of bioactive compounds [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109(3): 169-196.
- [31] KE Y, DENG L, DAI T, et al. Effects of cell wall polysaccharides on the bioaccessibility of carotenoids, polyphenols, and minerals: an overview [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(32): 11385-11398.
- [32] GUO Q, XIAO X, LI C, et al. Catechin-grafted arabinoxylan conjugate: Preparation, structural characterization and property investigation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 182(17): 796-805.
- [33] LIU J, LU J F, KAN J, et al. Synthesis, characterization and *in vitro* anti-diabetic activity of catechin grafted inulin [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 64(13): 76-83.
- [34] WANG D, MAO L, DAI L, et al. Characterization of chitosan-ferulic acid conjugates and their application in the design of β -carotene bilayer emulsions with propylene glycol alginate [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 80(7): 281-291.
- [35] CHEN T, XIE L, SHEN M, et al. Recent advances in Astragalus polysaccharides: Structural characterization, bioactivities and gut microbiota modulation effects [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 153(11): 104707.
- [36] PAINI M, ALIAKBARIAN B, CASAZZA A A, et al. Chitosan/dextran multilayer microcapsules for polyphenol co-delivery [J]. Materials Science and Engineering: C, 2015, 46(1): 374-380.
- [37] DRIDI W, BORDENAVE N. Influence of polysaccharide concentration on polyphenol-polysaccharide interactions [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 274(24): 118670.
- [38] TUDORACHE M, MCDONALD J L, BORDENAVE N. Gallic acid reduces the viscosity and water binding capacity of soluble dietary fibers [J]. Food & Function, 2020, 11(7): 5866-5874.
- [39] LIU H, HUANG Z, XIN T, et al. Effects of polysaccharides on colonic targeting and colonic fermentation of ovalbumin-ferulic acid based emulsion [J]. Food Chemistry, 2024, 453(24): 139630.
- [40] ZHANG Q, WANG H, FENG Z, et al. Preparation of pectin-tannic acid coated core-shell nanoparticle for enhanced bioavailability and antihyperlipidemic activity of curcumin [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 119(10): 106858.
- [41] ZOU Y, SHI Y, LIAO S, et al. The interaction between mulberry leaf polyphenols and polysaccharides during digestion and colon fermentation [J]. LWT, 2024, 196(6): 115830.
- [42] LIU K, LIU Y, LU J, et al. Nanoparticles prepared by polysaccharides extracted from biyang floral mushroom loaded with resveratrol: Characterization, bioactivity and release behavior under *in vitro* digestion [J]. Food Chemistry, 2023, 426(29): 136612.
- [43] SHI C, GUO C, WANG S, et al. The mechanism of pectin in improving anthocyanin stability and the application progress of their complexes: A review [J]. Food Chemistry: X, 2024, 24(4): 101955.
- [44] OLIVEIRA A, PINTADO M. *In vitro* evaluation of the effects of protein-polyphenol-polysaccharide interactions on (+)-catechin and cyanidin-3-glucoside bioaccessibility [J]. Food & Function, 2015, 6(11): 3444-3453.
- [45] KOH J, XU Z, WICKER L. Binding kinetics of blueberry pectin-

- anthocyanins and stabilization by non-covalent interactions [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99(2): 105354.
- [46] XING Y, WANG K, ZHANG M, et al. Pectin-interactions and the digestive stability of anthocyanins in thermal and non-thermal processed strawberry pulp [J]. Food Chemistry, 2023, 424(27): 136456.
- [47] VITTORIO O, LE GRAND M, MAKHARZA S A, et al. Doxorubicin synergism and resistance reversal in human neuroblastoma BE(2) C cell lines: An *in vitro* study with dextran-catechin nanohybrids [J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2018, 122(1): 176-185.
- [48] LEOPOLDINI M, MARINO T, RUSSO N, et al. Antioxidant properties of phenolic compounds: H-atom versus electron transfer mechanism [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2004, 108(22): 4916-4922.
- [49] PARVEZ S, AHMED WANI I, MASOODI F A. Nanoencapsulation of green tea extract using maltodextrin and its characterisation [J]. Food Chemistry, 2022, 384(19): 132579.
- [50] WANG J, LIU W, CHEN Z, et al. Physicochemical characterization of the oolong tea polysaccharides with high molecular weight and their synergistic effects in combination with polyphenols on hepatocellular carcinoma [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2017, 90(6): 160-170.
- [51] GUO L, GUO J, ZHU W, et al. Optimized synchronous extraction process of tea polyphenols and polysaccharides from Huaguoshan Yunwu tea and their antioxidant activities [J]. Food and Bioproducts Processing, 2016, 100(4): 303-310.
- [52] XIAO H, LIN Q, LIU G Q, et al. Evaluation of black tea polyphenol extract against the Retrogradation of starches from various plant sources [J]. Molecules, 2012, 17(7): 8147-8158.
- [53] CHENG J, TANG D, YANG H, et al. The effects of mulberry polyphenols on the digestibility and absorption properties of pork myofibrillar protein *in vitro* [J]. Meat Science, 2023, 202(8): 109205.
- [54] BAINS A, GOKSEN G, ALI N, et al. Exploration of Agrocybe aegerita mushroom polysaccharide-polyphenolic complex: Functional properties, binding efficiency, and biological activities [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 295(12): 139309.
- [55] YANG W, ZHANG S, FENG A, et al. Water-insoluble tea polyphenol nanoparticles as fillers and bioactive agents for pectin films to prepare active packaging for fruit preservation [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156(11): 110364.
- [56] WU J, SHEN S, CHENG H, et al. RG-I pectic polysaccharides and hesperidin synergistically modulate gut microbiota: An *in vitro* study targeting the proportional relationship [J]. Food Chemistry, 2025, 462(33): 141010.
- [57] YANG J, DONG M, FANG F, et al. Effects of varied preparation processes on polyphenol-rice starch complexes, *in vitro* starch digestion, and polyphenols release [J]. Food Chemistry, 2024, 450(21): 139330.
- [58] TOMAS M, GARCÍA-PÉREZ P, RIVERA-PÉREZ A, et al. The addition of polysaccharide gums to Aronia melanocarpa purees modulates the bioaccessibility of phenolic compounds and gut microbiota: A multiomics data fusion approach following *in vitro* digestion and fermentation [J]. Food Chemistry, 2024, 439(10): 138231.
- [59] TOUSIAN B, GHASEMI M H, KHOSRAVI A R. Targeted chitosan nanoparticles embedded into graphene oxide functionalized with caffeic acid as a potential drug delivery system: New insight into cancer therapy [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222(29): 295-304.
- [60] FANG W, JIN M, QI W, et al. Caffeic acid combined with arabinoxylan or β -glucan attenuates diet-induced obesity in mice via modulation of gut microbiota and metabolites [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 268(15): 131683.
- [61] LIU J, LU J F, KAN J, et al. Preparation, characterization and antioxidant activity of phenolic acids grafted carboxymethyl chitosan [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 62(11): 85-93.
- [62] JIAO W, SHU C, LI X, et al. Preparation of a chitosan-chlorogenic acid conjugate and its application as edible coating in postharvest preservation of peach fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 154(8): 129-136.
- [63] PENG K, LI Y, SUN Y, et al. Lotus root polysaccharide-phenol complexes: Interaction, structure, antioxidant, and anti-inflammatory activities [J]. Foods, 2023, 12(3): 577.
- [64] LIU Q, ZOU X, YI Y, et al. Physicochemical and functional changes in lotus root polysaccharide associated with noncovalent binding of polyphenols [J]. Foods, 2023, 12(5): 1049.
- [65] FARID M S, SHAFIQUE B, XU R, et al. Potential interventions and interactions of bioactive polyphenols and functional polysaccharides to alleviate inflammatory bowel disease-A review [J]. Food Chemistry, 2025, 462(1): 140951.
- [66] LIANG L, LIN L, ZHAO M. Combination of Lycium barbarum polysaccharide and chlorogenic acid: Characterization of solution property, interaction, and regulatory function on typical gut bacteroides and pathogens [J]. Food Chemistry, 2025, 471(10): 142779.
- [67] WANG C, CAI W D, YAO J, et al. Conjugation of ferulic acid onto pectin affected the physicochemical, functional and antioxidant properties [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(15): 5352-5362.
- [68] LIU X, RENARD C M G C, ROLLAND-SABATÉ A, et al. Exploring interactions between pectins and procyanidins: Structure-function relationships [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113(4): 106498.
- [69] JULLIAN C, MOYANO L, YAÑEZ C, et al. Complexation of quercetin with three kinds of cyclodextrins: An antioxidant study [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2007, 67(1): 230-234.
- [70] WANG J, CAO Y, SUN B, et al. Characterisation of inclusion complex of trans-ferulic acid and hydroxypropyl- β -cyclodextrin [J]. Food Chemistry, 2011, 124(3): 1069-1075.
- [71] LU Z, CHENG B, HU Y, et al. Complexation of resveratrol with cyclodextrins: Solubility and antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2009, 113(1): 17-20.
- [72] ZHANG Y, ZHU L, ZHAO M, et al. The effects of inulin on solubilizing and improving anti-obesity activity of high polymerization persimmon tannin [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 270(17): 132232.

- [73] TUDORACHE M, BORDENAVE N. Phenolic compounds mediate aggregation of water-soluble polysaccharides and change their rheological properties: Effect of different phenolic compounds [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97(12): 105193.
- [74] MA Q Y, XU Q D, CHEN N, et al. Gel properties of *Nicandra physalodes* (Linn.) gaertn. seeds polysaccharides with tea polyphenols and its application [J]. Food Chemistry: X, 2024, 23(3): 101707.
- [75] PANTIDOS N, BOATH A, LUND V, et al. Phenolic-rich extracts from the edible seaweed, *ascophyllum nodosum*, inhibit α -amylase and α -glucosidase: Potential anti-hyperglycemic effects [J]. Journal of Functional Foods, 2014, 10(5): 201-209.
- [76] ZHAO R, YAO J, LI C, et al. Multi-scale structural influence of starch on their interaction of caffeic acid and starch after freeze-thaw: Taking potato starch and lotus seed starch as examples [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 284(1): 137997.
- [77] ZHOU H B, PENG S H, LIU Y M, et al. Structural changes of potato starch and activity inhibition of starch digestive enzymes by anthocyanin from lingonberry (*Vaccinium uliginosum* L.) retarded starch digestibility [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 281(28): 136673.
- [78] YU Y B, CAI W D, WANG Z W, et al. Emulsifying properties of a ferulic acid-grafted curdlan conjugate and its contribution to the chemical stability of β -carotene [J]. Food Chemistry, 2021, 339(6): 128053.
- [79] PATEL A R, SEIJEN TEN-HOORN J, HAZEKAMP J, et al. Colloidal complexation of a macromolecule with a small molecular weight natural polyphenol: implications in modulating polymer functionalities [J]. Soft Matter, 2013, 9(5): 1428-1436.
- [80] TANG H, YANG S, CHANG J, et al. Interfacial characterization of an oxidative pickering emulsion stabilized by polysaccharides/polyphenol complex nanogels via a multiscale study [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 660(5): 130791.
- [81] ZENG X, DU Z, DING X, et al. Preparation, characterization and *in vitro* hypoglycemic activity of banana condensed tannin-inulin conjugate [J]. Food & Function, 2020, 11(9): 7973-7986.
- [82] HUANG H, CHEN J, HU X, et al. Elucidation of the interaction effect between dietary fiber and bound polyphenol components on the anti-hyperglycemic activity of tea residue dietary fiber [J]. Food & Function, 2022, 13(5): 2710-2728.
- [83] ZHU W, ZHANG Z. Preparation and characterization of catechin-grafted chitosan with antioxidant and antidiabetic potential [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 70(8): 150-155.
- [84] CAMPOS F, PEIXOTO A F, FERNANDES P A R, et al. The antidiabetic effect of grape pomace polysaccharide-polyphenol complexes [J]. Nutrients, 2021, 13(12): 4495.
- [85] DI VINCENZO F, DEL GAUDIO A, PETITO V, et al. Gut microbiota, intestinal permeability, and systemic inflammation: a narrative review [J]. Internal and Emergency Medicine, 2023, 19(2): 275-293.
- [86] YIN W, LIU M, JIN Z, et al. Ameliorative effects of insoluble dietary fiber and its bound polyphenols from adzuki bean seed coat on acute murine colitis induced by DSS: The inflammatory response, intestinal barrier and gut microbiota [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 286(3): 138343.
- [87] LIANG S, HE Z, LIANG Z, et al. *Prunus persica* (L.) batsch blossom soluble dietary fiber synergia polyphenol improving loperamide-induced constipation in mice via regulating stem cell factor/C-kit, NF- κ B signaling pathway and gut microbiota [J]. Food Research International, 2024, 192: 114761.
- [88] SHEN S, YANG W, LI L, et al. *In vitro* fermentation of seaweed polysaccharides and tea polyphenol blends by human intestinal flora and their effects on intestinal inflammation [J]. Food & Function, 2023, 14(2): 1133-1147.
- [89] LI H, XU S, XIE Y, et al. Curdlan-polyphenol complexes prepared by pH-driven effectively enhanced their physicochemical stability, antioxidant and prebiotic activities [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267: 131579.
- [90] ORG E, BLUM Y, KASELA S, et al. Relationships between gut microbiota, plasma metabolites, and metabolic syndrome traits in the METSIM cohort [J]. Genome Biology, 2017, 18(1): 70.
- [91] ZHENG C J, LIU R, XUE B, et al. Impact and consequences of polyphenols and fructooligosaccharide interplay on gut microbiota in rats [J]. Food & Function, 2017, 8(5): 1925-1932.
- [92] OKUMURA R, TAKEDA K. Maintenance of intestinal homeostasis by mucosal barriers [J]. Inflammation and Regeneration, 2018, 38(1): 0063-z.
- [93] ALLAIRE J M, CROWLEY S M, LAW H T, et al. The intestinal epithelium: Central coordinator of mucosal immunity [J]. Trends in Immunology, 2018, 39(9): 677-696.
- [94] HUANG Z, WENG Y, SHEN Q, et al. Microplastic: A potential threat to human and animal health by interfering with the intestinal barrier function and changing the intestinal microenvironment [J]. Science of the Total Environment, 2021, 785(36): 147365.
- [95] CHEN C, WANG H, HONG T, et al. Effects of tea polysaccharides in combination with polyphenols on dextran sodium sulfate-induced colitis in mice [J]. Food Chemistry: X, 2022, 13(1): 100190.
- [96] WANG L, ZHENG W, MEN Q, et al. Curcumin-loaded polysaccharide microparticles alleviated DSS-induced ulcerative colitis by improving intestinal microecology and regulating MAPK/NF- κ B/Nrf2/NLRP3 pathways [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 281(28): 136687.
- [97] CHEN T, CHEN L, LUO F, et al. Efficient oral delivery of resveratrol-loaded cyclodextrin-metal organic framework for alleviation of ulcerative colitis [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2023, 646(17): 123496.
- [98] KURASHIMA Y, KIYONO H. Mucosal ecological network of epithelium and immune cells for gut homeostasis and tissue healing [J]. Annual Review of Immunology, 2017, 35(1): 119-147.
- [99] LI J, GUO Y, MA L, et al. Synergistic effects of alginate oligosaccharide and cyanidin-3-O-glucoside on the amelioration of intestinal barrier function in mice [J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(6): 2276-2285.
- [100] HAO W, HAO C, WU C, et al. Aluminum induced intestinal dysfunction via mechanical, immune, chemical and biological barriers [J]. Chemosphere, 2022, 288(3): 132556.
- [101] ROTREKL D, ŠALAMÚNOVÁ P, PARÁKOVÁ L, et al. Composites

- of yeast glucan particles and curcumin lead to improvement of dextran sulfate sodium-induced acute bowel inflammation in rats [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 252(2): 117142.
- [102] SALEH R O, ABOQADER AL-AOUADI R F, ALMUZAINI N A, et al. Glucose metabolism is controlled by non-coding RNAs in autoimmune diseases; a glimpse into immune system dysregulation [J]. Human Immunology, 2025, 86(3): 111269.
- [103] WEI Y, WANG S, LIANG Y, et al. Sequential extraction and characterization of tea cell wall polysaccharides: Exploring the synergistic hypoglycemic potential with tea polyphenols via TGR5/GLP-1 pathway [J]. Food Bioscience, 2025, 63(1): 105627.
- [104] THOMAS C, GIOIELLO A, NORIEGA L, et al. TGR5-mediated bile acid sensing controls glucose homeostasis [J]. Cell Metabolism, 2009, 10(3): 167-177.
- [105] BASU R, NOOR A. Alginate nanoparticles loaded with enriched polyphenols of *Desmodium gangeticum* alleviates diabetes induced oxidative and inflammatory stress in Rin-5F cells via GLUT2/IRS-1/NF- κ B pathway [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 305(22): 141325.
- [106] ES-HAGHI A, SOLTANI M, TABRIZI M H, et al. The effect of EGCG/tyrosol-loaded chitosan/lecithin nanoparticles on hyperglycemia and hepatic function in streptozotocin-induced diabetic mice [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267(14): 131496.
- [107] PARK Y H, LEE J J, SON H K, et al. Antiobesity effects of extract from *Spergularia marina* Griseb in adipocytes and high-fat diet-induced obese rats [J]. Nutrients, 2020, 12(2): 336.
- [108] LIAO S, LONG X, ZOU Y, et al. Mulberry leaf phenolics and fiber exert anti-obesity through the gut microbiota-host metabolism pathway [J]. Journal of Food Science, 2021, 86(4): 1432-1447.
- [109] ZOU Y, SHI Y, LIU F, et al. The synergistic lipogenesis inhibition and molecular mechanism of polyphenols and polysaccharides from mulberry leaf [J]. Food Bioscience, 2024, 57(1): 103522.
- [110] LI R, ZHOU J, ZHANG X, et al. Construction of the Gal-NH₂/mulberry leaf polysaccharides-lysozyme/luteolin nanoparticles and the amelioration effects on lipid accumulation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253(30): 126780.
- [111] TIAN D, LIU S, LU Y, et al. Low-methoxy-pectin and chlorogenic acid synergistically promote lipolysis and β -oxidation by regulating AMPK signaling pathway in obese mice [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280(27): 135552.