

食药同源植物多糖调控肠道稳态的研究进展

李焱¹, 林泳峰¹, 刘文美^{2,3,4}, 邹泽华^{2,3,4}, 刘红¹, 刘光明¹, 刘庆梅^{1*}

(1. 集美大学海洋食品与生物工程学院, 福建省海洋功能食品工程技术研究中心, 厦门 361021;

2. 厦门和美科盛生物技术有限公司, 厦门 361026; 3. 三明市明八味产业研究院,

三明 353000; 4. 长汀县绿色经济生态健康产业研究院, 长汀 366300)

摘要: 食药同源理念在我国有上千年的发展历史, 现代研究发现从食药同源植物里提取的多糖成分能够影响肠道免疫和肠道微生态组成, 从而发挥调控肠道稳态并改善机体病症的作用。随着植物多糖活性研究的深入, 食药同源植物多糖的生物活性及其作用机制得到越来越多的关注, 根据理论研究利用食药同源植物多糖研发出有益于人体健康的食品及医药产品具有广阔前景。本文基于机体中肠道免疫与肠道菌群的关系, 重点分析了食药同源植物多糖可通过保护肠道黏膜、抑制肠道内炎症因子、维持肠道菌群平衡、改善肠道菌群代谢产物, 发挥修复肠道黏膜、改善肠道炎症、预防肠道肿瘤等多种作用; 论述了食药同源植物多糖研究现状的不足之处; 展望了食药同源植物多糖在食品行业、医药行业的应用前景, 以期为该类多糖的研究和利用提供参考。

关键词: 食药同源; 植物多糖; 肠道免疫; 肠道菌群; 肠道稳态

Research progress on regulating intestinal steady-state of polysaccharides from food-medicine homologous plants

LI Yan¹, LIN Yong-Feng¹, LIU Wen-Mei^{2,3,4}, ZOU Ze-Hua^{2,3,4}, LIU Hong¹,
LIU Guang-Ming¹, LIU Qing-Mei^{1*}

(1. College of Ocean Food and Biological Engineering, Jimei University, Marine Functional Food Engineering Technology Research Center of Fujian Province, Xiamen 361021, China; 2. Xiamen SCI-PLUS Biotech Co., Ltd., Xiamen 361026, China; 3. San Ming MING BAWEI Industry Research Institute, Sanming 353000, China; 4. Changting County Green Economy Ecological Health Industry Research Institute, Changting 366300, China)

ABSTRACT: The concept of food-medicine homologous has a history of thousands of years in China. Modern research has found that polysaccharides extracted from plants with the same origin of food and medicine can affect intestinal immunity and intestinal microecological composition, thus playing a role in regulating intestinal homeostasis and improving body diseases. With the further study on the activity of plant polysaccharides, more and more attention has been paid to the biological activities and action mechanism of polysaccharides from food-medicine homologous plants. According to the theoretical research, it has a broad prospect to develop food and medical products beneficial to human health by using polysaccharides from food-medicine homologous plants. This paper, based on the body of the intestinal immune and the relationship between the intestinal flora, analyzed the food-medicine homologous polysaccharide could protect the intestinal mucosa, intestinal inflammatory factor, to

基金项目: 国家自然科学基金项目(32001695、32072336、31871720)、福建省科技计划项目(2021L3013)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32001695, 32072336, 31871720), and the Science and Technology Program of Fujian Province (2021L3013)

***通信作者:** 刘庆梅, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品营养与安全。E-mail: liuqingmei@jmu.edu.cn

***Corresponding author:** LIU Qing-Mei, Ph.D, Lecturer, College of Ocean Food and Biological Engineering, Jimei University, No.43, Yindou Road, Jimei District, Xiamen 361021, China. E-mail: liuqingmei@jmu.edu.cn

maintain intestinal flora balance and improve the intestinal flora metabolites play to repair the intestinal mucosa, improve the intestinal inflammation, prevent intestinal tumor and so on many kinds of biological activity, discussed the deficiencies of the research on polysaccharides from food-medicine homologous plants, and prospected the application prospect of polysaccharides from edible and pharmaceutical homologous plants in food industry and pharmaceutical industry, in order to provide reference for the research and utilization of this kind of polysaccharides.

KEY WORDS: food-medicine homologous; plant polysaccharides; intestinal immunity; intestinal flora; intestinal steady-state

0 引言

食药同源物质指既是药品又是食品的中药^[1]。目前,国家卫生健康委员会共公布了 110 种食药同源物质,植物来源的有 104 种,详见表 1^[2-3]。现代研究发现食药同源植物能够发挥降血压、降血脂、改善肠道稳态等作用^[4-6]。其中,研究较多的具有改善肠道稳态功能的食药同源植物有黄芪、山药、枸杞、山楂等^[7-8]。多糖作为食药同源植物的主要活性成分之一,能够通过影响肠道稳态发挥降血糖、免疫调节、抗炎等多种功效^[9]。目前尚缺乏关于食药同源植物多糖影响肠道稳态的系统总结,故本文根据国内外相关研究,对有助于改善肠道稳态的食药同源植物多糖进行了归纳,重点就相关多糖对肠道免疫功能及肠道菌群的影响进行了综述,旨在为食药同源植物多糖的肠道稳态相关研究提供理论依据。

1 肠道免疫与肠道菌群

肠道免疫系统包括肠黏膜免疫屏障、天然免疫系统与

适应性免疫系统^[10]。肠黏膜免疫屏障主要指肠道黏液层、肠上皮细胞层及固有层肠道黏液层,可防止致病菌进入肠上皮,并有润滑作用^[10]。肠上皮细胞具有摄取和释放分泌型免疫球蛋白 A (secretory immunoglobulin A, sIgA)、提呈抗原、分泌细胞因子等免疫功能^[11]。固有层中 B 细胞主要通过分泌 sIgA 发挥免疫效应, T 细胞则通过分泌白细胞介素-10 (interleukin, IL-10)、转化生长因子- β (transforming growth factor- β , TGF- β)等细胞因子或影响 B 细胞分泌 sIgA 起到免疫调节作用^[12]。固有免疫系统中的抗原识别细胞感知到肠道内致病菌及其代谢产物后,会快速诱导效应细胞产生抗菌肽和炎症因子,并招募和激活免疫细胞发挥免疫效应^[10]。适应性免疫是指机体后天获得的抗感染能力,对病原体具有特异性和免疫记忆性。主要通过派尔氏结中的淋巴小结相关上皮细胞快速摄取肠腔内的抗原物质或大分子,然后迅速转运至抗原呈递细胞,进而诱发免疫反应^[11-12]。最近的研究发现,肠道免疫系统被激活后会通过影响肠道菌群改变短链脂肪酸(short-chain fatty acids, SCFAs)等菌群代谢产物^[13]。

表 1 食药同源物质名单
Table 1 List of food-medicine homologous substances

来源	名称
植物 (104 种)	丁香、八角、茴香、刀豆、小茴香、小薊、山药、山楂、马齿苋、乌梅、木瓜、火麻仁、代代花、玉竹、甘草、白芷、白果、白扁豆、白扁豆花、龙眼肉(桂圆)、决明子、百合、肉豆蔻、肉桂、余甘子、佛手、杏仁、沙棘、芡实、花椒、红小豆、麦芽、昆布、枣(大枣、黑枣、酸枣)、罗汉果、郁李仁、金银花、青果、鱼腥草、姜(生姜、干姜)、枳子、枸杞子、栀子、砂仁、胖大海、茯苓、香橼、香薷、桃仁、桑叶、桑葚、桔红、桔梗、益智仁、荷叶、莱菔子、莲子、高良姜、淡竹叶、菊花、菊苣、黄芥子、黄精、紫苏、紫苏籽、葛根、黑芝麻、黑胡椒、槐米、槐花、蒲公英、榧子、酸枣仁、鲜白茅根、鲜芦根、橘皮、薄荷、薏苡仁、薤白、覆盆子、藿香、人参、山银花、芫荽、玫瑰花、松花粉、粉葛、布渣叶、夏枯草、当归、山奈、番红花、草果、姜黄、萹苈、党参、肉苁蓉、铁皮石斛、西洋参、黄芪、灵芝、天麻、山茱萸、杜仲叶
动物(3 种)	乌梢蛇、鸡内金、蝮蛇
其他(3 种)	阿胶、淡豆豉、蜂蜜

注: 党参、肉苁蓉、铁皮石斛、西洋参、黄芪、灵芝、天麻、山茱萸、杜仲叶这 9 种仍在试点。

肠道菌群指胃肠道中高度复杂的微生物群落,它们能够参与机体的物质代谢、营养物质的吸收合成,并促进生长发育,维持人体正常的生理活动^[14]。越来越多的证据表明,肠道菌群失衡在肠炎、肠癌等多种疾病的发展机制中起着重要作用^[14-15]。研究发现,植物多糖可通过调节肠道菌群结构、影响肠道菌群代谢进而改善肠道疾病,也能通过维持肠道屏障完整性改善肠道免疫^[16]。机体免疫系统与肠道菌群间的相互作用也是近年来的研究热点。肠道菌群可通过激发杯状细胞分泌黏蛋白,保障肠道黏液层结构的完整,从而发挥屏障作用^[17]。肠道菌群产生的蛋白能够通过中性粒细胞起到消炎、杀菌的作用^[18]。肠道菌群也能够通过影响B细胞的发育、促进sIgA的分泌及产生代谢产物作为B细胞的调节剂参与免疫调节^[19]。另外,肠道菌群可通过调节T细胞向不同亚群分化,实现细菌耐受与免疫的平衡^[20]。因此,肠道微生物对宿主免疫系统的发育有促进作用。

2 食药同源植物活性成分对肠道功能的影响

“食药同源”思想起源于《黄帝内经》,自古以来,人们广泛地将其用于药膳、食疗、食养等方面^[21-22]。食药同源植物在消化代谢过程中必经胃肠道,所以其生物学功能的发挥与肠道微生态关系密切。传统中医学中无“肠道微生态”“肠道菌群”的概念,但其强调整体观念、阴阳平衡,这和肠道菌群平衡与人体健康密切相关有相似之处^[23]。食药同源植物大多性味平和,具有良好的安全性,现代研究分析了众多食药同源植物的活性成分,并发现其在调理胃肠相关病症方面具有极大优势^[6,23]。食药同源植物中的活性物质主要有:黄酮、皂苷、多糖等^[6]。

黄酮类化合物广泛存在于天然植物中,可通过调节肠道菌群比例及其多样性、促进菌群产生SCFAs等有益代谢产物来发挥抗炎、抗肿瘤、免疫调节等作用^[24]。YUE等^[25]通过细胞实验和小鼠实验,发现生姜黄酮可促进姜黄素在肠细胞中的积累,从而减轻小鼠的肿瘤负荷。苏颖等^[26]发现蒲公英黄酮可以显著改善小鼠的肠黏膜损伤,修复肠黏膜结构,降低小鼠肠黏膜通透性。LI等^[27]通过体外细胞实验发现,来源于黄芪的黄酮增加了HT22细胞的活力,并能在CaCO₂单层细胞层中维持肠道屏障完整性。

皂苷作为中药的有效成分具有降血脂、抗菌、抗病毒、消炎、增强免疫力、抗氧化等多种生理功能^[28]。研究发现人参皂苷的干预可以通过调节肠道菌群的多种代谢途径,从而改善溃疡性结肠炎模型小鼠的肠道屏障,缓解结肠炎症^[29]。HU等^[30]的研究表明,西洋参皂苷干预可通过降低炎症因子水平、减少细胞凋亡来改善小鼠的肠道损伤。王敬等^[31]的研究表明,甘草总皂苷治疗可以提高肝损伤大鼠的肠道乳酸杆菌属和杆菌门S24-7科菌群的相对丰度并改善大鼠的慢性肝损伤。

植物多糖是由葡萄糖、果糖、半乳糖等单糖以 α -或 β -糖苷键聚合而成的高分子碳水化合物^[16],通常经水提醇沉、热水提取、超声/微波辅助提取得到。植物多糖在机体中难以被消化吸收,但能够作为肠道菌群的碳源,在大肠中被发酵,通过影响肠道菌群的结构及菌群代谢产物发挥抗炎、保护肠道黏膜、调节肠道免疫等作用^[32-33]。研究发现,从山楂、马齿苋、党参等食药同源植物中提取到的多糖可通过影响肠道稳态发挥改善疾病的作用^[34-36]。例如,山楂果胶可通过上调乳酸杆菌、双歧杆菌等耐酸有益菌比例,下调肠杆菌、肠球菌比例起到润肠通便的作用^[34]。马齿苋多糖可通过调节肠道微生物群及其代谢物起到降低衰老大鼠血脂水平的作用^[35]。党参多糖能够明显改善复方地芬诺酯引起的大鼠便秘症状,并促进小鼠的小肠推动作用^[36]。植物多糖与肠道菌群的相互作用已成为近年来的研究热点,食药同源植物多糖调控肠道稳态的作用机制也受到越来越多的关注。

3 食药同源植物多糖对肠道免疫的影响

肠道是人体最大的免疫器官,肠道稳态异常会引起腹泻、肠炎、肥胖、肿瘤等多种疾病。食药同源植物多糖可以通过保护肠道黏膜及抑制肠道炎症因子的方式参与肠道免疫调节。肠道黏膜屏障可以使肠道菌群与细菌共存,并阻止肠腔内的致病微生物和抗原等进入血液循环以保护宿主免受传染性病原体的侵袭^[37-38]。ZHOU等^[39]发现西洋参多糖和人参皂苷的协同作用可以恢复小鼠的肠道微生物群组成,并通过增加各种有益的黏膜相关细菌,起到保护肠道黏膜屏障的作用。ZHOU等^[40]通过体外共培养Caco-2细胞和RAW264.7细胞及糖尿病小鼠模型验证了枸杞子多糖可通过修复肠道屏障来发挥抗糖尿病作用。姜多糖可通过维持肠道屏障完整性及调节肠道微生物群来缓解小鼠的溃疡性结肠炎^[41]。茯苓多糖可通过抑制小肠巨噬细胞凋亡,保护肠道屏障完整性^[42]。人参多糖通过影响Ca²⁺相关调节因子促进肠上皮细胞迁移进而防止叫咪美辛引起的大鼠肠黏膜损伤^[43]。黄芪多糖可以通过调节多胺介导的钙离子信号通路治疗胃肠道黏膜损伤^[44]。马齿苋多糖可通过抑制Toll样受体-4(toll-like receptor 4, TLR4)/核转录因子-kappa B(nuclear factor-kappa B, NF-kappa B)通路、激活表皮生长因子(epidermal growth factor, EGF)/表皮生长因子受体(epidermal growth factor receptor, EGFR)通路,减轻炎症反应,维持肠上皮屏障功能^[45]。另外,肠道黏液层具有润滑功能,可促进肠道蠕动,确保粪便及时排出机体,避免肠道内有害物质的积聚^[23];肠道蠕动异常会引起便秘、消化不良、肠梗阻等症状。由茯苓、山药、莲子、甘草、山楂、麦芽、泽泻制成的水提取物能够显著增强胃排空及小肠的推进功能进而有效治疗非溃疡性消化不良^[46]。

肠道内炎症因子失调会导致肠道免疫紊乱、减少有益菌定植、影响肠道微生态平衡^[23,47]。XIE 等^[48]发现,从铁皮石斛茎中提取的多糖组分可以通过改变肠黏膜结构、促进派尔氏结和肠系膜淋巴结分泌细胞因子以及增加 sIgA 的生成,有效调节肠黏膜免疫活性。枸杞多糖可通过增加小鼠血清中 TGF- β 和 IL-6 的浓度以及结肠中 sIgA 的浓度,改善小鼠的胸腺指数和脾脏指数,发挥免疫调节作用^[49]。CHEN 等^[50]的研究表明,桑叶多糖可以修复小鼠受损的肠道屏障,下调炎性细胞因子水平,通过改变肠道菌群的空间结构和 SCFAs 的产生来调节肠道免疫反应。黄芪多糖的干预可回调病毒感染的番鸭体内 IL-15、肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor, TNF- α)和干扰素 γ 的水平,增加 sIgA 的水平,并显著改善番鸭的肠道损伤^[51]。茯苓多糖可通过抑制抑制半乳糖凝集素 3 (galectin-3, Gal-3)/NOD 样受体热蛋白结构域 3 (NOD-like receptor thermoprotein domain 3, NLRP3)炎症信号通路以改善小鼠溃疡性结肠炎^[52]。灵芝多糖可通过上调回肠中 sIgA 的表达,显著提高干扰素 γ 、IL-2 和 IL-4 的表达以改善肠道的免疫屏障功能^[53]。综上所述,食药同源植物多糖改善肠道免疫主要通过保护肠道屏障、下调肠道炎症因子这两种途径来实现。

4 食药同源植物多糖对肠道菌群平衡的维持

如上所述,肠道菌群能够参与机体免疫调节并维持肠道健康,近年来关于食药同源植物多糖调节肠道菌群的研究越来越多。CHEN 等^[54]发现葛根多糖能够缓解抗生素相关性腹泻引起的结肠病理变化和肠道菌群失调。山楂多糖因其降低人体肠道埃希氏杆菌属-志贺氏杆菌、梭形杆菌属等有害菌群的丰度,上调肠道氨基酸球菌属、巨球形菌属等有益菌的比例的作用,有望应用于膳食补充剂^[55]。枸杞多糖的干预增加了大鼠肠道内乳酸杆菌、杜氏菌和粪杆菌的丰度,降低了毛螺菌和瘤胃球菌的丰度^[56]。来源于铁皮

石斛的多糖可以通过促进结肠运动起到通便作用^[57],也能通过调控小鼠肠道微生态平衡及相关酶的活性,优化肠道微环境,增强机体免疫力进而改善小鼠脾虚便秘症状^[58-59]。另外,甘草多糖、生姜多糖、天麻多糖等也具有肠道菌群的调节作用^[41,60-61]。

食药同源植物多糖作为生物大分子可被肠道微生物代谢并产生 SCFAs、吲哚衍生物、多胺等一系列产物,进而直接调节肠道内稳态和疾病进展^[62]。其中,SCFAs 因具有肠道能量供应、维持肠黏膜屏障、调节肠道动力、免疫调节及抗肿瘤效应等生理功能而受到广泛关注^[63]。LIU 等^[64]发现黄芪多糖治疗可降低大鼠粪便中乙酸盐、丁酸盐和丙酸盐的水平,并调节了糖酵解/糖异生代谢和丙酮酸代谢,以减缓大鼠的便秘症状。YANG 等^[65]发现姜黄多糖给药可以极大改善结肠炎小鼠的病理表型、肠道屏障破坏和结肠炎症,并增加盲肠色氨酸分解代谢物吲哚-3-乙酸及其配体芳烃受体的水平。FU 等^[66]的研究表明,马齿苋多糖干预通过降低老龄大鼠肠道中厚壁菌/拟杆菌的比率、梭杆菌的相对丰度,改善肠道菌群代谢产物以改善大鼠的血脂异常。枸杞多糖可以作为一种益生元,通过调节肠道菌群的组成及 SCFAs 的代谢来改善肥胖^[67]。BAI 等^[68]研究了山药多糖在模拟胃肠消化和粪便发酵过程中的特征变化,以及山药多糖的肠道抗炎作用;发现粪便发酵 24 h 后,山药多糖释放的游离葡萄糖和甘露糖被肠道菌群利用,SCFAs 的产生增加;同时,山药多糖还促进了双歧杆菌和巨球菌的生长。

总的来说,食药同源植物多糖大都通过下调肠道炎症因子、保护肠道黏膜、促进有益菌生长、抑制致病菌增殖、调整有益菌丰度等途径来调控肠道稳态进而改善与之相关的疾病。本文对能够通过改善肠道免疫、维持肠道微生态平衡发挥生物活性的食药同源植物多糖及其作用机制进行了总结,见表 2,食药同源植物多糖对肠道的作用机制如图 1 所示。

表 2 食药同源植物多糖的生物活性及作用机制

Table 2 Biological activities and action mechanism of polysaccharides from food-medicine homologous plants

多糖来源	生物活性	作用机制	文献
山药	改善非溃疡性消化不良	增强小肠推进功能	[46]
	肠道抗炎作用	促进肠道益生菌生长,改善肠道代谢产物	[68]
山楂	润肠通便	提高耐酸有益菌比例	[34]
	改善非溃疡性消化不良	增强小肠推进功能	[46]
	改善机体免疫力	诱导腹腔巨噬细胞的吞噬作用	[69]
马齿苋	降血脂	影响肠道菌群及其代谢产物	[35,66]
	维持肠上皮屏障功能	抑制炎症反应信号通路激活	[45]
甘草	发挥抗肿瘤作用	影响肠道菌群组成	[60]
枣	预防和治疗结肠直肠癌	改善肠道菌群,发挥益生元作用	[70]
	改善外周免疫和肠屏障功能	促进淋巴细胞增殖,调节细胞因子水平	[71]
生姜	缓解小鼠的溃疡性结肠炎	维持肠道屏障完整性,调节肠道菌群	[41]
	抗肿瘤	抑制结肠癌细胞群落形成	[72]

表 2(续)

多糖来源	生物活性	作用机制	文献
枸杞	抗糖尿病功能	修复肠道屏障; 改善肠道菌群比例	[40]
	免疫调节作用	增加血清 TGF- β 、IL-6 及结肠 sIgA 浓度	[49]
	改善肥胖	作为益生元调节肠道菌群	[67]
茯苓	保护肠道屏障完整性	抑制小肠巨噬细胞凋亡	[42]
	改善溃疡性结肠炎	抑制 Gal-3/NLRP3 炎症信号通路	[52]
桑叶	免疫调节作用	影响肠道菌群及其代谢产物	[50]
	改善肥胖	改善脂肪组织活性及肠道菌群比例	[73]
桑葚	改善结肠炎	影响肠道菌群及促炎因子比例	[74]
黄精	改善肠道运动	影响肠道菌群及其代谢产物	[75]
葛根	缓解结肠病理变化	改善肠道菌群	[54]
人参	改善肠黏膜损伤	影响 Ca ²⁺ 相关调节因子	[43]
	预防肠道肿瘤	降低炎症因子水平, 抑制癌细胞增殖	[76]
铁皮石斛	通便	改善肠道微生态平衡及相关酶的活性	[57-59]
西洋参	改善肠黏膜免疫	改变肠黏膜结构, 调节细胞因子水平	[48]
	保护肠道黏膜屏障	增加各种有益的黏膜相关细菌	[39]
黄芪	治疗胃肠道黏膜损伤	调节多胺介导的钙离子信号通路	[44]
	改善便秘	改善肠道菌群代谢产物	[64]
灵芝	改善小鼠结肠炎	活化芳烃受体、上调异戊酸和丁酸酯	[77]
	上调 sIgA、IL4 的表达, 改善肠道菌群丰度	降低肠道通透性, 改善肠道免疫功能	[53]

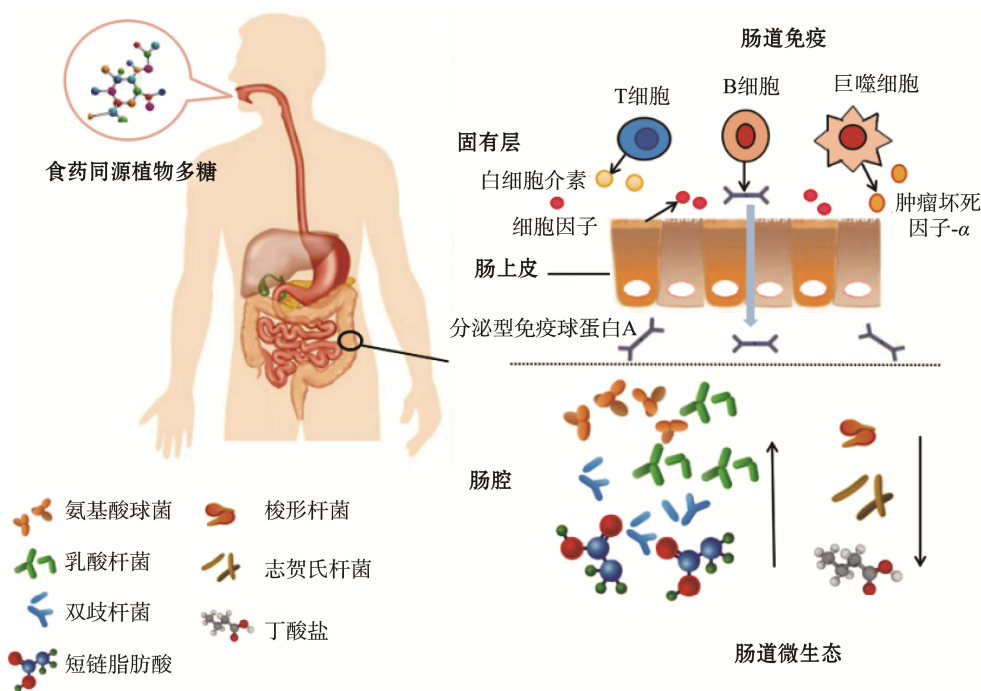


图 1 食药同源植物多糖的肠道作用机制

Fig.1 Intestinal action mechanism of polysaccharides from food-medicine homologous plants

5 食药同源植物多糖在食品/医药中的应用

来源于食药同源植物的多糖具有免疫调节、抗肿瘤、抗氧化、抗衰老、降血糖等多种生物活性, 因此在现代食品、生物医药行业中得到越来越多的关注^[78]。

食药同源植物多糖在食品行业中主要被用于饮料和功能性食品的开发。张岚^[79]利用马齿苋多糖制作了一种运动功能饮料, 并通过小鼠负重游泳实验证明了该功能饮料的抗运动性疲劳作用和提高运动耐力的作用。秦楠等^[80]将党参多糖水溶液与荞麦醋、蜂蜜配制了一种口感酸甜柔和、风

味独特的醋饮料。黄精是福建省“三明市明八味产业研究院”的重点研究对象,目前黄精多糖作为膳食补充剂已实现从专利到生产和销售的转化,如饮料、泡腾片和饼干等,它们具有调节机体免疫力的作用^[81]。龙眼、枸杞、红枣均是食药同源植物,周文君^[82]通过水提醇沉法制备了龙眼多糖、枸杞多糖和红枣多糖并制成了冲调性好、稳定性强、营养均衡的龙眼-枸杞-红枣营养餐粉。经体外模拟醉解模型验证发现该营养餐粉具有调节肠道菌群增殖的功效。赵其达拉吐等^[83]制备了富含大枣多糖的营养棒并发现这种营养棒对运动员由于长期训练产生的运动性疲劳有明显的缓解作用。

目前,来源于各种植物的活性多糖已在医药行业中被用作抗肿瘤药物、疫苗、调节剂、抗凝剂等^[84];以黄芪多糖、灵芝多糖、人参多糖为原料所制的药品在我国已获批上市^[85]。20世纪90年代初,山西省中医研究所用黄芪多糖研制了一种静脉注射液,用于提高癌症化疗患者的白细胞水平,增强免疫功能。迄今为止,黄芪多糖已在结肠癌、肝癌、乳腺癌、胃癌、食管癌等疾病的临床辅助治疗中得到有效应用^[86-87]。类似地,茯苓多糖、灵芝多糖也因对癌细胞有很强的抑制作用而被广泛应用于临床^[85]。我国对人参多糖的研究始于1982年,如今人参多糖已在临床上被用于治疗肿瘤、糖尿病、病毒性肝炎及脓毒症^[88]。纳米硒具有毒性低、吸收率高、生物活性高等优点;多糖类物质的羟基,可以通过氢键作用与纳米硒结合,阻碍纳米硒的凝集,减少纳米硒粒子间的相互作用,提高其生物活性。此外,多糖具有的多种功能性基团和多支化学结构,对纳米硒粒子的制备、稳定及其功能特性均具有调节作用^[89]。现在已有学者研制出枸杞多糖-纳米硒、茯苓多糖-纳米硒、桑葚多糖-纳米硒等,它们的主要作用体现在抗疲劳、抗肿瘤、抗炎等方面^[90-92]。

6 结束语

越来越多的研究发现,从食药同源植物中提取的多糖可以通过上调肠道有益菌群的比例或丰度、抑制肠道有害菌的增殖、调节肠道菌群代谢产物来发挥肠道抗炎、润肠通便、抗肿瘤等作用,也能通过降低肠道炎症因子水平、抑制炎症信号通路的激活等途径恢复肠道屏障功能、改善结肠炎,提高肠道免疫力。现代研究虽发现来源于食药同源植物的多糖具有多种肠道相关生物活性,但与之对应的食品及医药产品仍然十分有限;食药同源多糖在食品中的应用存在不符合食品标准的问题,在医药方面的应用面临从实验向临床或产品转化的困难。

随着“健康中国”理念的提出,人们的养生观念不断提高。在“健康中国”的浪潮之下,“食药同源”产品的开发和利用具有广阔的前景。目前的研究不仅发现食药同源植物多糖具有多种肠道相关生物活性,还证明了植物多糖具有易形成凝胶、高渗透压、高黏度和高吸水率等理化性质^[78,92];因此,食药同源植物多糖未来的发展方向可考虑理化性质

与生物活性的综合应用。例如,在食品行业中的发展方向有:膳食补充剂、肠道相关功能性食品、益生元产品等;在医药方面的发展方向有:肠道菌群调节剂、肠黏膜修复剂、肠道免疫增强剂等。

参考文献

- [1] 薛立英,高丽,秦雪梅,等. 药食同源中药抗衰老研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 302-309.
XUE LY, GAO L, QIN XM, et al. A review of recent literature on anti-aging activity of medicinal and edible traditional Chinese herbs [J]. Food Sci, 2017, 38(15): 302-309.
- [2] 予辑. 药食同源原料目录(2017版)[J]. 口腔护理用品工业, 2017, 27(6): 24-28.
YU J. Catalogue of medicinal and edible homologous raw materials (2017 edition) [J]. Oral Care Ind, 2017, 27(6): 24-28.
- [3] 食品安全标准与监测评估司. 关于对党参等9种物质开展按照传统既是食品又是中药材的物质管理试点工作的通知[EB/OL]. [2020-01-06]. <http://www.nhc.gov.cn/sps/s7885/202001/1ec2cca04146450d9b14acc2499d854f.shtml> [2022-10-12].
Department of Food Safety Standards and Monitoring and Evaluation. Notice on the pilot work of the material management of *Radix codonopsis* and other nine substances in accordance with the traditional Chinese medicine and food [EB/OL]. [2020-01-06]. <http://www.nhc.gov.cn/sps/s7885/202001/1ec2cca04146450d9b14acc2499d854f.shtml> [2022-10-12].
- [4] 何嘉敏,于新,刘学云,等. 10种降压药药食同源原料研究进展及展望[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2020, 33(1): 66-71.
HE JM, YU X, LIU XY, et al. Research progress and prospect of 10 blood pressure lowering and medicinal homologous raw materials [J]. J Zhongkai Univ Agric Eng, 2020, 33(1): 66-71.
- [5] 刘嘉宁,国旭祺,李明哲,等. 基于药食同源的复方制剂抗疲劳效果评价[J]. 营养学报, 2022, 44(4): 326-331.
LIU JN, GUO XQ, LI MZ, et al. Evaluation of anti-fatigue action of compound preparations based on the principle of medicine and food homology [J]. Acta Nutr Sin, 2022, 44(4): 326-331.
- [6] 李铜,肖玥玥,陈振华,等. 药食两用中药降脂作用及有效成分研究进展[J]. 海峡药学, 2020, 32(9): 42-46.
LI T, XIAO YY, CHEN ZH, et al. Research progress on lipid-lowering effect of medicinal and edible Chinese medicine and its active ingredients [J]. Strait Pharm J, 2020, 32(9): 42-46.
- [7] 陈丽华,单雅慧,管咏梅,等. 药食同源物质改善胃肠道功能作用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 12(27): 1-12.
CHEN LH, SHAN YH, GUAN YM, et al. Research progress on the effect of medicinal and edible substances on improving gastrointestinal tract function [J]. Sci Technol Food Ind, 2022, 12(27): 1-12.
- [8] 穆锐,夏蕴实,张燕婷,等. 食药同源植物膳食纤维的化学成分和肠道菌群调节作用研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 493-500.
MU R, XIA YS, ZHANG YT, et al. Research progress on the chemical composition and intestinal flora regulation of dietary fiber from the edible and medicinal plants [J]. Sci Technol Food Ind, 2022, 43(18): 493-500.
- [9] 刘荣瑜,王昊,张子依,等. 多糖与肠道菌群相互作用的研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(5): 363-373.
LIU RY, WANG H, ZHANG ZY, et al. Progress in understanding interaction of polysaccharides with intestinal flora [J]. Food Sci, 2022, 43(5): 363-373.
- [10] 解文放,左玉,李庆伟,等. 动物肠道菌群与宿主肠道免疫系统相互作用的研究进展[J]. 中国细胞生物学学报, 2017, 39(11): 1467-1472.

- XIE WF, ZUO Y, LI QW, *et al.* Recent advances in the interactions between animal gut microbiota and host intestinal immune system [J]. *Chin J Cell Biol*, 2017, 39(11): 1467–1472.
- [11] 李伟, 陈庆森. 肠道黏膜免疫屏障及其菌群与机体健康关系的研究进展[J]. *食品科学*, 2008, 29(10): 649–655.
- LI W, CHEN QS. Research progress of relationship of human health with intestinal mucosal immunity and microflora [J]. *Food Sci*, 2008, 29(10): 649–655.
- [12] 徐凯进, 李兰娟. 肠道正常菌群与肠道免疫[J]. *国际流行病学传染病学杂志*, 2005, 32(3): 181–183.
- XU KJ, LI LJ. Normal intestinal flora and intestinal immunity [J]. *Int J Epidemiol Infect Dis*, 2005, 32(3): 181–183.
- [13] GUO C. Immune activation kickstarts the gut microbiota [J]. *Cell Host Microbe*, 2021, 29(3): 318–320.
- [14] GUO H, GIBSON SA, TING JPY. Gut microbiota, NLR proteins, and intestinal homeostasis [J]. *J Exp Med*, 2020, 217(10): e20181832.
- [15] 周丽, 徐派的, 张红星. 肠道菌群与常见功能性胃肠病相关性的研究进展[J]. *华中科技大学学报(医学版)*, 2020, 49(6): 756–760.
- ZHOU L, XU PD, ZHANG HX. Relationship between gut microbiota and common functional gastrointestinal disorders [J]. *Acta Med Univ Sci Technol Huazhong*, 2020, 49(6): 756–760.
- [16] 李茜, 吴涛, 刘锐, 等. 植物多糖与肠道菌群互作及其对代谢综合征的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(21): 7649–7655.
- LI Q, WU T, LIU R, *et al.* Interaction between plant polysaccharide-intestinal microbiota interaction and its effect on metabolic syndrome [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(21): 7649–7655.
- [17] 王珊珊, 王佳莹, 刘建新. 肠道微生物对宿主免疫系统的调节及其可能机制[J]. *动物营养学报*, 2015, 27(2): 375–382.
- WANG SS, WANG JK, LIU JX. Regulation of host immune system by gut microbiota and its possible mechanisms [J]. *Chin J Anim Nutr*, 2015, 27(2): 375–382.
- [18] MURDOCH CC, ESPENSCHIED ST, MATTY MA, *et al.* Intestinal serum amyloid a suppresses systemic neutrophil activation and bactericidal activity in response to microbiota colonization [J]. *PLoS Pathog*, 2019, 15(3): e1007381.
- [19] ZOUALI M. B lymphocytes, the gastrointestinal tract and autoimmunity [J]. *Autoimmun Rev*, 2021, 20(4): 102777.
- [20] SPROUSE ML, BATES NA, FELIX KM, *et al.* Impact of gut microbiota on gut-distal autoimmunity: A focus on T cells [J]. *Immunology*, 2019, 156(4): 305–318.
- [21] 朱建平, 邓文祥, 吴彬才, 等. “药食同源”源流探讨[J]. *湖南中医药大学学报*, 2015, 35(12): 27–30.
- ZHU JP, DENG WX, WU BC, *et al.* Theoretical origination of medicine and food homology [J]. *J Hunan Univ Chin Med*, 2015, 35(12): 27–30.
- [22] 唐雪阳, 谢果珍, 周融融, 等. 药食同源的发展与应用概况[J]. *中国现代中药*, 2020, 22(9): 1428–1433.
- TANG XY, XIE GZ, ZHOU RR, *et al.* Development and application of “One root of medicine and food” [J]. *Mod Chin Med*, 2020, 22(9): 1428–1433.
- [23] 封慧, 朱欣轶, 王长松. 健脾中药对肠道微生态作用机制研究进展[J]. *中国中医药信息杂志*, 2018, 25(10): 137–140.
- FENG H, ZHU XY, WANG CS. Research progress in mechanism of strengthening spleen medicines for intestinal microecology [J]. *Chin J Inf Tradit Chin Med*, 2018, 25(10): 137–140.
- [24] 陈斌, 刘洁, 詹敏敏, 等. 黄酮类化合物与肠道菌群互作研究进展[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(6): 369–381.
- CHEN B, LIU J, ZHAN MM, *et al.* Research progress in the interaction between flavonoids and gut microbiota [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2022, 22(6): 369–381.
- [25] YUE GG, JIANG L, KWOK H, *et al.* Turmeric ethanolic extract possesses stronger inhibitory activities on colon tumour growth than curcumin-The importance of turmerones [J]. *J Funct Foods*, 2016, 22: 565–577.
- [26] 苏颖, 苗睿睿, 杨晨, 等. 蒲公英黄酮对小鼠 DSS 诱导性肠炎的功能恢复研究[J]. *山东化工*, 2021, 50(5): 143–144.
- SU Y, MIAO RR, YANG C, *et al.* Study on functional recovery of dandelion flavonoid in mice induced by DSS [J]. *Shandong Chem Ind*, 2021, 50(5): 143–144.
- [27] LI X, ZHAO T, GU J, *et al.* Intake of flavonoids from *Astragalus membranaceus* ameliorated brain impairment in diabetic mice via modulating brain-gut axis [J]. *Chin Med*, 2022, 17(1): 22.
- [28] 黄生辉, 李妍怡, 金华, 等. 中药有效成分皂苷对肠道微生态免疫相关作用研究进展[J]. *中华中医药杂志*, 2017, 32(8): 3606–3609.
- HUANG SH, LI YY, JIN H, *et al.* Research progress in relevant role of traditional Chinese medicine effective component saponins on intestinal microecological immunity [J]. *Chin J Tradit Chin Med Pharm*, 2017, 32(8): 3606–3609.
- [29] CHENG H, LIU J, ZHANG D, *et al.* Ginsenoside Rg1 alleviates acute ulcerative colitis by modulating gut microbiota and microbial tryptophan metabolism [J]. *Front Immunol*, 2022, 13: 817600.
- [30] HU J, YANG J, JIANG S, *et al.* *Panax quinquefolium* saponins protect against cisplatin evoked intestinal injury via ROS-mediated multiple mechanisms [J]. *Phytomedicine*, 2021, 82: 153446.
- [31] 王敬, 袁天杰, 陈乐天, 等. 甘草总皂苷及水提物对肝损伤大鼠肠道菌群的影响[J]. *中草药*, 2020, 51(1): 101–108.
- WANG J, YUAN TJ, CHEN LT, *et al.* Total saponins of glycyrrhiza inflata and its decoction on intestinal flora in rats with liver injury [J]. *Chin Tradit Herb Drug*, 2020, 51(1): 101–108.
- [32] HODO M, SEO YS, PARK H. Polysaccharides: Bowel health and gut microbiota [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2021, 61(7): 1212–1224.
- [33] 黄媛媛, 陈华国, 谢文, 等. 多糖与肠道菌群相互作用及其构效关系研究进展[J]. *微生物学通报*, 2022, 49(6): 2325–2346.
- HUANG YY, CHEN HG, XIE W, *et al.* Interaction between polysaccharide and intestinal flora and its structure-effect relationship: A review [J]. *Microbiol China*, 2022, 49(6): 2325–2346.
- [34] 刘田, 崔同, 高哲, 等. 山楂膳食纤维的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(6): 199–204.
- LIU T, CUI T, GAO Z, *et al.* Recent advances in dietary fiber of hawthorn [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(6): 199–204.
- [35] FU Q, HUANG H, DING A, *et al.* *Portulaca oleracea* polysaccharides reduce serum lipid levels in aging rats by modulating intestinal microbiota and metabolites [J]. *Front Nutr*, 2022, 9: 65653.
- [36] 马方励, 沈雪梅, 时军. 党参多糖对实验动物胃肠道功能的影响[J]. *安徽医药*, 2014, (9): 1626–1629, 1630.
- MA FL, SHEN XM, SHI J. Effect of codonopsis polysaccharide on gastrointestinal tract of experimental rats and mice [J]. *Anhui Med Pharm J*, 2014, (9): 1626–1629, 1630.
- [37] TOKUHARA D, KURASHIMA Y, KAMIOKA M, *et al.* A comprehensive understanding of the gut mucosal immune system in allergic inflammation [J]. *Allergol Int*, 2019, 68(1): 17–25.
- [38] 袁榴翼, 李小锦, 尹清晟, 等. 中药干预肠道菌群改善肠黏膜屏障功能的研究进展[J]. *中草药*, 2018, 49(8): 1932–1938.
- YUAN LY, LI XJ, YIN QS, *et al.* Research progress on Chinese materia medica intervening intestinal flora to improve intestinal mucosal barrier function [J]. *Chin Tradit Herb Drug*, 2018, 49(8): 1932–1938.
- [39] ZHOU R, HE D, XIE J, *et al.* The synergistic effects of polysaccharides and ginsenosides from American ginseng (*Panax quinquefolius* L.)

- ameliorating cyclophosphamide-induced intestinal immune disorders and gut barrier dysfunctions based on microbiome-metabolomics analysis [J]. *Front Immunol*, 2021, 12: 665901.
- [40] ZHOU W, YANG T, XU W, *et al.* The polysaccharides from the fruits of *Lycium barbarum* L. confer anti-diabetic effect by regulating gut microbiota and intestinal barrier [J]. *Carbohydr Polym*, 2022, 291: 119626.
- [41] HAO W, CHEN Z, YUAN Q, *et al.* Ginger polysaccharides relieve ulcerative colitis via maintaining intestinal barrier integrity and gut microbiota modulation [J]. *Int J Biol Macromol*, 2022, 219: 730–739.
- [42] YE H, MA S, QIU Z, *et al.* Poria cocos polysaccharides rescue pyroptosis-driven gut vascular barrier disruption in order to alleviate non-alcoholic steatohepatitis [J]. *J Ethnopharmacol*, 2022, 296: 115457.
- [43] ZHU H, CAO J, LIANG X, *et al.* Polysaccharides from *Panax ginseng* promote intestinal epithelial cell migration through affecting the Ca²⁺ related regulators [J]. *J Ginseng Res*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2022.05.010>
- [44] ZHANG D, ZHU Y, LI Z, *et al.* The role of *Astragalus* polysaccharides in promoting IEC-6 cell migration from polyamine-mediated Ca²⁺ regulation [J]. *Int J Biol Macromol*, 2022, 207: 179–192.
- [45] ZHUANG S, MING K, MA N, *et al.* *Portulaca oleracea* L. polysaccharide ameliorates lipopolysaccharide-induced inflammatory responses and barrier dysfunction in porcine intestinal epithelial monolayers [J]. *J Funct Foods*, 2022, 91: 104997.
- [46] 蔡爽. 人参苓酶素的制备及改善肠胃功能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- CAI S. Developing of renshenzhulingjiaosu and improving gastrointestinal function research [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [47] 顾秋平, 白爱平. 白介素-10 与炎症性肠病[J]. *世界华人消化杂志*, 2011, 19(1): 57–61.
- GU QP, BAI AIP. Interleukin-10 and inflammatory bowel disease [J]. *World Chin J Dig*, 2011, 19(1): 57–61.
- [48] XIE S, LIU B, ZAHNG D, *et al.* Intestinal immunomodulating activity and structural characterization of a new polysaccharide from stems of *Dendrobium officinale* [J]. *Food Funct*, 2016, 7(6): 2789–2799.
- [49] ZHU W, ZHOU S, LIU J, *et al.* Prebiotic, immuno-stimulating and gut microbiota-modulating effects of *Lycium barbarum* polysaccharide [J]. *Biomed Pharmacother*, 2020, 121: 109591.
- [50] CHEN X, CAI B, WANG J, *et al.* Mulberry leaf-derived polysaccharide modulates the immune response and gut microbiota composition in immunosuppressed mice [J]. *J Funct Foods*, 2021, 83: 104545.
- [51] LIAO L, LI J, LI J, *et al.* Effects of *Astragalus* polysaccharides on intestinal morphology and intestinal immune cells of Muscovy ducklings infected with Muscovy duck reovirus [J]. *Poult Sci*, 2021, 100(1): 64–72.
- [52] PAN X, WANG H, ZHENG Z, *et al.* Pectic polysaccharide from *Smilax china* L. ameliorated ulcerative colitis by inhibiting the galectin-3/NLRP3 inflammasome pathway [J]. *Carbohydr Polym*, 2022, 277: 118864.
- [53] JIN M, ZHU Y, SHAO D, *et al.* Effects of polysaccharide from mycelia of *Ganoderma lucidum* on intestinal barrier functions of rats [J]. *Int J Biol Macromol*, 2017, 94: 1–9.
- [54] CHEN R, LIU B, WANG X, *et al.* Effects of polysaccharide from *Pueraria lobata* on gut microbiota in mice [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 158: 740–749.
- [55] ZHOU K, ZHOU Q, HAN X, *et al.* *In vitro* digestion and fecal fermentation of polysaccharides from hawthorn and its impacts on human gut microbiota [J]. *Processes*, 2022, 10(10): 1922.
- [56] LAI W, WANG C, LAI R, *et al.* *Lycium barbarum* polysaccharide modulates gut microbiota to alleviate rheumatoid arthritis in a rat model [J]. *NPJ Sci Food*, 2022, 6(1): 34.
- [57] LUO D, QU C, LIN G, *et al.* Character and laxative activity of polysaccharides isolated from *Dendrobium officinale* [J]. *J Funct Foods*, 2017, 34: 106–117.
- [58] 龙承星, 贺璐, 郭艳芳, 等. 铁皮石斛多糖对脾虚便秘小鼠免疫、肠道微生物及酶活性的影响[J]. *天然产物研究与开发*, 2017, 29(6): 1020–1024.
- LONG CX, HE L, GUO YF, *et al.* Effects of dendrobium candidum polysaccharide on immunity, intestinal microbiota and enzyme activity in mice with spleen deficiency constipation [J]. *Nat Prod Res Dev*, 2017, 29(6): 1020–1024.
- [59] 邓陈哲. 铁皮石斛多糖对便秘小鼠肠道细菌多样性及相关酶活性的影响[J]. *中国临床药理学杂志*, 2018, 34(15): 1875–1877.
- DENG CZ. Effects of dendrobium polysaccharides on intestinal bacterial diversity and related enzyme activities in constipation mice [J]. *Chin J Clin Pharm*, 2018, 34(15): 1875–1877.
- [60] ZAHNG X, ZHAO S, SONG X, *et al.* Inhibition effect of glycyrrhiza polysaccharide (GCP) on tumor growth through regulation of the gut microbiota composition [J]. *J Pharmacol Sci*, 2018, 137(4): 324–332.
- [61] HUO J, LEI M, LI F, *et al.* Structural characterization of a polysaccharide from *gastrodiaelata* and its bioactivity on gut microbiota [J]. *Molecules*, 2021, 26(15): 4443.
- [62] 刘俊希, 王舒, 魏祯, 等. 中药有效成分通过调节肠道菌群及代谢物组成影响相关疾病治疗作用概述[J]. *中医药学报*, 2022, 50(2): 92–97.
- LIU JX, WANG S, WEI Z, *et al.* Therapeutic effects of active components of Chinese medicinal on related diseases by regulating intestinal flora and metabolite composition [J]. *Acta Chin Med Pharm*, 2022, 50(2): 92–97.
- [63] 蒙丹丽. 短链脂肪酸在肠道中的生理作用[J]. *中国临床新医学*, 2018, 11(2): 198–202.
- MENG DL. Physiological function of short-chain fatty acids in the intestine [J]. *Chin J New Clin Med*, 2018, 11(2): 198–202.
- [64] LIU X, LI M, JIAN C, *et al.* *Astragalus* polysaccharide alleviates constipation in the elderly via modification of gut microbiota and fecal metabolism [J]. *Rejuv Res*, 2022, 12: 0039.
- [65] YANG C, DU Y, REN D, *et al.* Gut microbiota-dependent catabolites of tryptophan play a predominant role in the protective effects of turmeric polysaccharides against DSS-induced ulcerative colitis [J]. *Food Funct*, 2021, 12(2): 9793–9987.
- [66] FU Q, HUANG H, DING A, *et al.* *Portulaca oleracea* polysaccharides reduce serum lipid levels in aging rats by modulating intestinal microbiota and metabolites [J]. *Front Nutr*, 2022, 9: 965653.
- [67] YANG Y, CHANG Y, WU Y, *et al.* A homogeneous polysaccharide from *Lycium barbarum*: Structural characterizations, anti-obesity effects and impacts on gut microbiota [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 183: 2074–2087.
- [68] BAI Y, ZHOU Y, ZHANG R, *et al.* Gut microbial fermentation promotes the intestinal anti-inflammatory activity of Chinese yam polysaccharides [J]. *Food Chem*, 2023, 402: 134003.
- [69] LI F, YUAN Q, RASHID F. Isolation, purification and immunobiological activity of a new water-soluble bee pollen polysaccharide from *Crataegus pinnatifida* Bge [J]. *Carbohydr Polym*, 2009, 78(1): 80–88.
- [70] JI X, HOU C, GAO Y, *et al.* Metagenomic analysis of gut microbiota modulatory effects of jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) polysaccharides in a colorectal cancer mouse model [J]. *Food Funct*, 2020, 11(1): 163–173.
- [71] HAN X, BAI B, ZHOU Q, *et al.* Dietary supplementation with polysaccharides from *Ziziphus Jujuba* cv. *Pozao* intervenes in immune response via regulating peripheral immunity and intestinal barrier function

- in cyclophosphamide-induced mice [J]. *Food Funct*, 2020, 11(7): 5992–6006.
- [72] LIAO D, CHENG C, LIU J, *et al.* Characterization and antitumor activities of polysaccharides obtained from ginger (*Zingiber officinale*) by different extraction methods [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 152: 894–903.
- [73] LI R, XUE Z, LI S, *et al.* Mulberry leaf polysaccharides ameliorate obesity through activation of brown adipose tissue and modulation of the gut microbiota in high-fat diet fed mice [J]. *Food Funct*, 2022, 13(2): 561–573.
- [74] FENG Z, PENG S, WU Z, *et al.* Ramulus mori polysaccharide-loaded PLGA nanoparticles and their anti-inflammatory effects *in vivo* [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 182: 2024–2036.
- [75] LI L, FENG X, TAO M, *et al.* Benefits of neutral polysaccharide from rhizomes of *Polygonatum sibiricum* to intestinal function of aged mice [J]. *Front Nutr*, 2022, 9: 992102.
- [76] WAN J, HUANG W, ZHENG W, *et al.* Multiple effects of ginseng berry polysaccharides: Plasma cholesterol level reduction and enteric neoplasm prevention [J]. *Am J Chin Med*, 2017, 45(6): 1293–1307.
- [77] TANG S, LIU W, ZHAO Q, *et al.* Combination of polysaccharides from *Astragalus membranaceus* and *Codonopsis pilosula* ameliorated mice colitis and underlying mechanisms [J]. *J Ethnopharmacol*, 2021, 264: 113280.
- [78] 刘思扬, 陆雅琦, 海日汉, 等. 功能性植物多糖及其应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(21): 444–453.
- LIU SY, LU YQ, HAI RH, *et al.* Research progress on plant functional polysaccharides and its application [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(21): 444–453.
- [79] 张岚. 马齿苋多糖运动功能饮料抗运动性疲劳及提高运动耐力的作用[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(7): 3948–3949.
- ZHANG L. Research on effects and mechanism about sport functional beverage of *Portulaca olerace* L. polysaccharide on anti-exercis-induced fatigue and raise exercise tolerance [J]. *Anhui Agric Sci*, 2011, 39(7): 3948–3949.
- [80] 秦楠, 崔政, 刘丽君, 等. 党参多糖提取工艺优化及其保健醋饮料的研制[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(12): 210–215.
- QIN N, CUI Z, LIU LJ, *et al.* Optimization of extraction process of *Codonopsis* polysaccharides and development of its health vinegar beverage [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(12): 210–215.
- [81] HE Y, CHEN Z, NIE X, *et al.* Recent advances in polysaccharides from edible and medicinal *Polygonati rhizoma*: From bench to market [J]. *Int J Biol Macromol*, 2022, 195: 102–116.
- [82] 周文君. 龙眼、枸杞、红枣多糖的益生活性及其营养餐粉研发[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2021.
- ZHOU WJ. Probiotic activity of polysaccharides from Longan, Goji and Jujube and development of nutritional meal powder [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2021.
- [83] 赵其达拉吐, 孙美艳. 富含大枣多糖食品对运动员缓解运动性疲劳的效果研究[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(18): 182–185.
- ZHAO QDLT, SUN MY. Study on relieve athlete sport fatigue of rich jujube polysaccharides food [J]. *Food Res Dev*, 2016, 37(18): 182–185.
- [84] DU Y, WAN H, HUANG P, *et al.* A critical review of *Astragalus* polysaccharides: From therapeutic mechanisms to pharmaceuticals [J]. *Biomed Pharmacother*, 2022, 147: 112654.
- [85] 白天凯, 田静, 闫滨. 7种国内上市多糖药物临床应用及作用机制研究进展[J]. *世界科学技术-中医药现代化*, 2021, 23(10): 3670–3680.
- BAI TK, TIAN J, YAN B. Research progress of clinical application and mechanism of action of seven domestic listed polysaccharide drugs [J]. *Mod Tradit Chin Med Mater Med-World Sci Technol*, 2021, 23(10): 3670–3680.
- [86] YU Y, SHEN M, SONG Q, *et al.* Biological activities and pharmaceutical applications of polysaccharide from natural resources: A review [J]. *Carbohydr Polym*, 2018, 183: 91–101.
- [87] 蔡莉, 朱江. 黄芪多糖研究现状与进展[J]. *中国肿瘤临床*, 2007, (15): 896–900.
- CAI L, ZHU J. Research status and development of *Astragalus* polysaccharide [J]. *Chin J Clin Oncol*, 2007, (15): 896–900.
- [88] 周树珊, 杨敏, 张奕珍, 等. 人參多糖注射液联合放化疗用于恶性肿瘤的系统评价[J]. *中国药房*, 2016, 27(3): 348–350.
- ZHOU SS, YANG M, ZHANG YZ, *et al.* Systematic review of *Ginseng polysaccharide* injection combined with radiotherapy or chemotherapy in the treatment of malignancies [J]. *Chin Pharm*, 2016, 27(3): 348–350.
- [89] 刘明珠, 魏凌峰, 蔡杰, 等. 多糖-纳米硒在食品包装中应用的研究进展[J]. *食品科技*, 2022, 47(3): 1–7.
- LIU MZ, WEI LF, CAI J, *et al.* Polysaccharide-selenium nanoparticles: A review of their application in food packaging [J]. *Food Sci Technol*, 2022, 47(3): 1–7.
- [90] GAO X, LI X, MU J, *et al.* Preparation, physicochemical characterization, and anti-proliferation of selenium nanoparticles stabilized by *Polyporus umbellatus* polysaccharide [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 152: 605–615.
- [91] 杨雪. 枸杞多糖纳米硒体外消化吸收特性及抗疲劳活性研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- YANG X. Study on simulated digestion and absorption *in vitro* and anti-fatigue activity of selenium nanoparticles stabilized by *Lycium barbarum* polysaccharide [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [92] 李静, 樊佳妮, 张龄芷, 等. 活性植物多糖在食品领域的应用综述[J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 50(2): 162–169.
- LI J, FAN JN, ZHANG LZ, *et al.* A review on the applications of bioactive plant polysaccharides in food [J]. *J Shanghai Norm Univ (Nat Sci)*, 2021, 50(2): 162–169.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

作者简介



李焱, 硕士研究生, 主要研究方向为食品科学。
E-mail: 676292470@qq.com



刘庆梅, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品营养与安全。
E-mail: liuqingmei@jmu.edu.cn