

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2024.10.028

# 番石榴多糖化学与生物活性研究进展

许凯博<sup>1</sup>, 梁钰婵<sup>1</sup>, 黄小帅<sup>1</sup>, 芦昕蒂<sup>1</sup>, 秦赫婕<sup>1</sup>, 李莉娅<sup>1,2\*</sup>

(1. 东北大学 生命科学与健康学院, 辽宁 沈阳 110169; 2. 辽宁省生物资源开发利用重点实验室, 辽宁 沈阳 110169)

**摘要:** 番石榴(*Psidium guajava*)为桃金娘科植物,在全球热带及亚热带地区广泛种植。番石榴具有良好的食用和药用价值,长期被用于腹泻、糖尿病等疾病的辅助治疗。多糖是番石榴中的重要活性成分,具有抗氧化、抗肿瘤、抗炎、调节免疫、降血糖、改善肠道微生态等作用。该文对已报道的番石榴多糖提取方法、结构表征及生物活性相关研究进行梳理与总结,以期对番石榴及其多糖类成分在食品及医药领域的进一步开发利用提供参考和借鉴。

**关键词:** 番石榴;多糖;提取工艺;结构表征;生物活性

## Research Progress on Chemical and Biological Activity of *Psidium guajava* Polysaccharides

XU Kaibo<sup>1</sup>, LIANG Yuchan<sup>1</sup>, HUANG Xiaoshuai<sup>1</sup>, LU Xindi<sup>1</sup>, QIN Hejie<sup>1</sup>, LI Liya<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Life and Health Sciences, Northeastern University, Shenyang 110169, Liaoning, China; 2. Key Laboratory of Bioresource Research and Development of Liaoning Province, Shenyang 110169, Liaoning, China)

**Abstract:** *Psidium guajava*, a type of fruit tree belonging to the Myrtaceae Family, is widely grown in tropical and subtropical area in the world. In addition to its good edible value, *P. guajava* is valued for its nutritional and medicinal properties and has been traditionally used as a supportive treatment for multiple diseases such as diarrhea and diabetes. Polysaccharides are major bioactive constituents of *P. guajava* and have antioxidant, anti-tumor, anti-inflammatory, immunoregulatory, hypoglycemic, and improving gut microbial dysbiosis effects. This review summarizes reported extraction method, structural characterization and biological activities of polysaccharides from *P. guajava* are reviewed and summarized. The aim is to provide a reference for the further development and utilization of *P. guajava* and its polysaccharides in food and pharmaceutical industry.

**Key words:** *Psidium guajava*; polysaccharides; extraction process; structural characterization; biological activity

引文格式:

许凯博, 梁钰婵, 黄小帅, 等. 番石榴多糖化学与生物活性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(10): 209-216.

XU Kaibo, LIANG Yuchan, HUANG Xiaoshuai, et al. Research Progress on Chemical and Biological Activity of *Psidium guajava* Polysaccharides[J]. Food Research and Development, 2024, 45(10): 209-216.

番石榴(*Psidium guajava*)为桃金娘科(Myrtaceae)重要果树植物资源,原产自美洲秘鲁以及墨西哥一带,目前在全球热带及亚热带地区均有种植<sup>[1]</sup>。在我国,广东、广西、海南为番石榴的主产区<sup>[2]</sup>。番石榴果实又名芭乐,含有蛋白质、膳食纤维、维生素以及多种微量元素,尤其是维生素C含量丰富。番石榴果实在食品工业有广泛应用,被加工成果汁、果冻、酒、果酱等<sup>[3-4]</sup>。除果实可食外,番石榴的其它部位也被发现富含多种

营养成分和活性物质。番石榴籽多糖和蛋白质含量高,并且蕴含大量的不饱和脂肪酸<sup>[5]</sup>;番石榴叶具有三萜<sup>[6]</sup>、黄酮<sup>[7-8]</sup>、杂源萜<sup>[9]</sup>、原花青素<sup>[10]</sup>等多种类型的植物次生代谢产物,长期以来被用于腹泻以及糖尿病等疾病的辅助治疗<sup>[11]</sup>;而番石榴叶制成的保健茶由于具有调节血糖的功效也已在日本被批准上市<sup>[12]</sup>。随着番石榴抗肿瘤、抗菌、改善代谢综合征等功效不断被挖掘,番石榴作为功能性食品潜力也吸引了众多科研人员

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划资助项目(202210145116); 中央高校基本科研业务专项资金(N2224001); 辽宁省重点实验室(2022JH13/10200026)

作者简介: 许凯博(2002—),男(汉),本科在读,研究方向: 生物工程。

\*通信作者: 李莉娅(1980—),女(汉),副教授,研究方向: 天然产物与健康。

和企业的关注<sup>[13]</sup>。

多糖是由十个及以上同种或异种单糖以糖苷键连接而成的高分子聚合物。天然多糖来源广泛,在动物、植物、藻类、真菌、细菌中均有存在<sup>[14-15]</sup>。天然多糖在糖尿病、非酒精性脂肪性肝病、肿瘤、神经退行性疾病、炎症相关性肠病以及免疫相关性疾病预防中的作用持续受到关注<sup>[16]</sup>。番石榴果实、籽以及叶中均含有多糖类成分,但对其研究主要集中在2010年以后<sup>[4,17]</sup>。本文基于PubMed Central、Web of Science、中国知网等数据库,对番石榴多糖提取工艺、结构表征及生物活性等方面的研究进展进行梳理与总结,以期对番石榴及其多糖成分的深入研究及综合利用提供参考。

## 1 番石榴多糖化学研究进展

### 1.1 番石榴多糖提取方法

多糖分子量大,可溶于水,不易溶于有机溶剂。多糖提取溶剂以水为主,包括中性水以及不同pH值的酸水、碱水;近年来利用低共熔溶剂以及双水相系统进行多糖提取的报道也逐渐增加<sup>[18]</sup>。多糖提取方法多样,除传统的热水浸提法外,酶辅助提取、超声辅助提取、微波辅助提取以及超高压提取等技术也广泛应用于多糖提取中<sup>[19]</sup>。

热水浸提法能够较好地保留多糖的分子结构和生理活性,具有成本低、可大规模生产的优势,在番石榴多糖提取中被广泛应用<sup>[4,19]</sup>。多项研究通过考察料液比、提取时间、提取温度以及提取次数对多糖得率的影响,从而确定热水浸提番石榴多糖的最佳提取工艺(表1)。如李珊等<sup>[20]</sup>利用响应面法优化番石榴果实多糖热水浸提工艺,发现提取次数对番石榴果实多糖得率影响较弱,而提取温度、提取时间以及料液比影响较为显著,从而确定番石榴果实多糖热水浸提的最佳工艺条件为提取温度67℃、料液比1:49(g/mL)、提取时间59 min、提取2次,该工艺的多糖得率为7.03%。在番石榴叶多糖提取中,杜阳吉等<sup>[21]</sup>发现影响粗多糖提取率因素的强弱顺序依次为提取时间>提取温度>料液比。在80℃、质量比1:30(g:g)条件下提取3 h为最佳工艺,提取率可达到5.32%。也有研究尝试改变提取溶剂从而提高番石榴多糖的提取效率。龚英等<sup>[22]</sup>发现在水中加入表面活性剂十二烷基磺酸钠(sodium dodecyl sulfonate, SDS)可以提高番石榴幼果中多糖的提取率。当SDS浓度达到0.2%时,多糖提取率增加43.7%。但SDS浓度增加到0.4%后,继续提高浓度对番石榴多糖提取率影响不显著。同时改变pH也会影响番石榴多糖提取效率,pH值为5的水溶液提取率高于碱性水(pH9),中性水的提取率最低。

超声辅助提取可以利用超声的空化效应提高植物有效成分的浸出率,具有提取时间短、效率高、节约能

源、操作简便等优势,在番石榴多糖提取中应用较多<sup>[23]</sup>。提取温度过高、超声功率过强以及时间过长均会破坏多糖结构,因而已报道的番石榴多糖超声辅助提取法重点考察了上述因素对多糖得率的影响,部分研究利用响应面法优化了相关提取参数。曾昭智等<sup>[24]</sup>利用响应面法优化番石榴叶多糖提取工艺参数,发现料液比对番石榴叶多糖提取率影响并不显著,并得出了最佳提取工艺为温度60℃,提取30 min,超声功率240 W。另一项研究表明料液比1:25(g/mL)、提取温度55℃、提取30 min、超声功率240 W条件下番石榴叶多糖得率为0.49%<sup>[25]</sup>。番石榴果实中含有丰富的果胶成分,杨明等<sup>[26]</sup>利用单因素实验以及正交实验发现提取液pH对果胶的得率影响最大,其次是料液比>超声功率>提取温度,并确定最佳提取工艺条件为pH2、料液比1:30(g/mL)、提取温度50℃、超声功率30 kHz。吕冰冰等<sup>[27]</sup>研究得出了类似结论,发现在pH2.5条件下利用超声辅助提取番石榴果皮和果肉中的果胶,产率可以达到7.88%和6.32%。

与超声辅助提取法类似,微波辅助提取法同样具有提取率高、耗时短、溶剂需求量小的优点,但微波加热容易产生局部高温,可导致多糖结构发生改变<sup>[19]</sup>。目前微波提取法在番石榴多糖提取中的应用相对较少。印度学者曾以多糖得率为指标,利用响应面法确定了微波提取番石榴果实多糖的最佳工艺条件为料液比1:3(g/mL)、微波功率200 W、pH4.5、提取时间20 min,该工艺制备的番石榴多糖得率为6.82%。同时发现当微波功率超过200 W、提取时间超过20 min会降低多糖提取率,推测与微波加热破坏多糖结构有关<sup>[28]</sup>。

以获得的多糖水提取物占植物原料的质量百分率为指标进行工艺优化,尽管简便易操作,但是面临多糖水提液杂质较多、不能真正反映多糖提取效率的问题。部分研究者转向以活性为指标进行工艺优化。例如以抗糖基化活性为指标,基于响应面法优化超声提取番石榴果实多糖的工艺。结果发现,超声功率、超声时间以及温度均影响提取的番石榴果实多糖的抗糖基化活性。超声功率以及提取温度增加到一定范围后,继续提高功率或提取温度可导致所制备的番石榴果实多糖活性下降。最终发现在提取温度37℃,提取10 min,超声功率200 W条件下制备的番石榴果实多糖的抗糖基化活性最好<sup>[29]</sup>。已报道的番石榴多糖提取工艺汇总见表1。

### 1.2 番石榴多糖分离纯化

以水为溶剂提取的番石榴粗多糖通常含有蛋白、单糖、低聚糖、色素、小分子化合物等杂质,通常需要经过进一步醇沉、脱蛋白、透析等处理得到精制的多糖提取物。在提取多糖之前对植物原料进行乙醇回流或低极性有机溶剂浸渍可去除大量脂溶性物质,减少

表1 番石榴多糖提取工艺

Table 1 Extraction methods of polysaccharides from *Psidium guajava*

部位	提取方法	前处理方法	工艺参数	水提液处理方法	得率	文献
果肉	热水浸提	果肉→烘干→打粉	料液比 1:49 <sup>a</sup> , 67 °C, 59 min, 提取 2 次	活性炭脱色→Sevag 法脱蛋白	7.03%	[20]
果肉	超声辅助提取	果肉→烘干→打粉	料液比 1:25 <sup>a</sup> , 超声功率 280 W, 45 °C, 30 min	NA	2.28%	[23]
果肉	微波辅助提取	果肉→切片→研磨	料液比 1:3 <sup>a</sup> , 微波功率 200 W, pH 4.5, 20 min	75% 丙酮沉淀	6.82%	[28]
果肉	超声辅助提取	果肉→95 °C灭酶 3 min→烘干→打粉→80% 热乙醇洗涤	料液比 1:40 <sup>a</sup> , 超声功率 90 W, 80 °C, pH 2.5, 30 min。	80% 乙醇沉淀→丙酮洗涤→透析	6.32%	[27]
果皮	超声辅助提取	果皮→95 °C灭酶 3 min→烘干→打粉→80% 热乙醇洗涤	料液比 1:40 <sup>a</sup> , 超声功率 90 W, 80 °C, pH 2.5, 30 min。	80% 乙醇沉淀→丙酮洗涤→透析	7.88%	[27]
果实	回流提取法	果实→切片→50 °C烘干→颗粒	质量比 1:8 <sup>b</sup> , 时间 50 min, 提取 2 次	NA	NA	[30]
果实	热水浸提	果实→切块→晾干	质量比 1:12 <sup>b</sup> , 45 °C, pH 5, SDS 浓度 0.4%, 提取 3 次	NA	28.9%	[22]
果实	超声辅助提取	果实→切片→烘干→粉碎→100 °C灭酶 3 min	料液比 1:30 <sup>a</sup> , 50 °C, pH 2, 超声频率 90 W, 30 min	NA	19.5%	[26]
果实	超声辅助提取	果实→切片→75 °C烘干→切块	料液比 1:16 <sup>a</sup> , 超声功率 200 W, 37 °C, 10 min	75% 乙醇沉淀	NA	[29]
果实	超声辅助提取	果实→切片→自然风干→打粉	料液比 1:27 <sup>a</sup> , 超声功率 320 W, 73 °C, 21 min	NA	NA	[31]
叶	热水浸提	叶→粉碎	质量比 1:30 <sup>b</sup> , 80 °C, 3 h, 提取 3 次	NA	5.32%	[21]
叶	热水浸提	叶→90 °C烘干→粉碎→石油醚回流 2 h→80% 乙醇回流 2 h	料液比 1:15 <sup>a</sup> , 90 °C, 1 h	0.1% 活性炭脱色→80% 乙醇沉淀→乙醇洗涤→丙酮洗涤	15.3%	[32]
叶	超声辅助提取	叶→70 °C烘干→打粉	料液比 1:35 <sup>a</sup> , 超声功率 240 W, 60 °C, 30 min	NA	5.41%	[24]
叶	超声辅助提取	叶→60 °C烘干→打粉	料液比 1:25 <sup>a</sup> , 超声功率 240 W, 55 °C, 30 min	80% 乙醇沉淀	0.49%	[25]
叶	超声辅助提取	叶→65 °C烘干→打粉	料液比 1:14 <sup>a</sup> , 超声功率 140 W, 80 °C, 16 min	90% 乙醇沉淀	2.00%	[33]

注: NA 无报告; a 为原料质量与溶剂体积比(g/mL); b 为原料与溶剂质量比(g:g)。

对多糖纯度的干扰,该方法在部分番石榴多糖提取中被应用<sup>[27,34]</sup>。此外,杜阳吉等<sup>[21]</sup>曾利用 Diaion HP-20 型大孔树脂结合醇沉法对番石榴水提液中的多糖进一步纯化,发现 Diaion HP-20 型大孔树脂对番石榴多糖的吸附率可达到 50 g/L,利用 0~50% 的乙醇洗脱能有效保留多糖成分,去除色素和中低极性杂质,所制备的多糖纯度在 95% 以上。分级醇沉法是多糖进行柱色谱分离纯化之前所使用的比较便捷的初步分离

手段。有研究表明,可以依次利用 50%、70% 以及 90% 乙醇对番石榴果实水提液中的多糖成分进行分步沉淀,而后再经柱色谱进一步分离纯化,得到分子量较为均一的多糖成分<sup>[35-38]</sup>。在已报道的番石榴多糖分离纯化过程中,常用到的色谱填料包括离子交换纤维素 DEAE-52、丙烯葡聚糖凝胶 Sepharacryl S100、葡聚糖凝胶 Sephadex G-75 以及琼脂糖凝胶 Sepharose 6B 等。番石榴多糖制备纯化方法及结构表征总结见表 2。

表2 番石榴多糖结构表征及生物活性

Table 2 Structure characterization and biological activities of polysaccharides from *Psidium guajava*

部位	名称	制备方法	分子量/kDa	单糖组成	单糖比例	生物活性	模型	文献
果皮	PEP	95 °C灭酶→80% 乙醇除黄酮→pH 2.5 柠檬酸水溶液 80 °C, 2 h →90 W 超声 30 min→80% 乙醇沉淀→丙酮洗涤→透析	618.4(43.4%) 93.9(56.6%)	Rha:Fuc:Ara, Xyl:Man:Glc:Gal	0.58:0.02:88.48: 0.78:0.07:0.40:9.68 <sup>a</sup> Gal A 60.4% <sup>b</sup>	降脂	脂肪、胆固醇胶束、胆酸盐模型	[27]
果肉	PUP	95 °C灭酶→80% 乙醇除黄酮→pH 2.5 柠檬酸水溶液 80 °C, 2 h →90 W 超声 30 min→80% 乙醇沉淀→丙酮洗涤→透析	1168(11.0%) 120.3(53.9%) 64.9(35.1%)	Rha:Fuc:Ara, Xyl:Man:Glc:Gal	0.47:0.03:83.86: 0.76:0.08:0.43: 14.37 <sup>a</sup> Gal A 60.4% <sup>b</sup>	降脂	脂肪、胆固醇胶束、胆酸盐模型	[27]
果实	GP-1	热水提取→分级醇沉→50% 乙醇沉淀→透析	NA	Man:Rha:Gal:Glc: :Ara:GalA	1.01:4.69:7.68:3.34: 22.46:27.69 <sup>a</sup>	降血糖 保肝	STZ+HFD 糖尿病大鼠	[35]
果实	GP-2	热水提取→分级醇沉→70% 乙醇沉淀→透析	NA	Rha:GlcA:GalA: Gal:Ara	3.42:2.04:1.01: 15.55:21.09 <sup>a</sup>	降空腹 血糖	STZ+HFD 诱导糖尿病大鼠	[35]
果实	GP-3	热水提取→分级醇沉→90% 乙醇沉淀→透析	NA	Man:GlcA:Glc: Gal:Fuc:Ara	1.02:1.01:5.02:3.59: 3.23:10.50 <sup>a</sup>	降血糖 保肝	STZ+HFD 糖尿病大鼠	[35]
果实	GP-4	0.5 mol/L NaOH 提取→75% 乙醇沉淀→透析	NA	Man:Rha:GlcA: Glc:Gal:Ara	3.14:6.98:6.03: 10.62:31.29:25.75 <sup>a</sup>	降血糖 保肝	STZ+HFD 糖尿病大鼠	[35]



续表2 番石榴多糖结构表征及生物活性

Continue table 2 Structure characterization and biological activities of polysaccharides from *Psidium guajava*

部位	名称	制备方法	分子量/kDa	单糖组成	单糖比例	生物活性	模型	文献
果实	PS-I	100 °C水提取→80%乙醇沉淀→透析→1%乙酸加热溶解→80%乙醇沉淀→透析→Sepharos 6B	163	2-O-methyl-L-Ara: 2-O-acetyl-D-Gal: D-methyl-GalA	1:1:1 <sup>a</sup>	NA	NA	[39]
果实	GP70-2	80 °C水提取→70%乙醇沉淀→透析→DEAE-52,0.1 M NaCl→Sephadex G-75	74	Ara:Gal	1:1 <sup>a</sup>	抗氧化	自由基清除	[36]
果实	GP70-3	80 °C水提取→70%乙醇沉淀→透析→DEAE-52,0.1 M NaCl→Sephacryl S-100	106	Rha:GlcA:GalA: Gal:Ara	3.42:2.04:1.01: 14.53:20.08 <sup>a</sup>	降血糖	α-葡萄糖苷酶	[37]
果实	GP90-1B	80 °C水提取→90%乙醇沉淀→透析→DEAE-52,0.1 M NaCl→Sephadex G-75	16	Glc:Ara	9.92:84.06 <sup>a</sup>	降血糖 抗氧化	α-葡萄糖苷酶;自 由基清除	[38]
果实	GP	60 °C水提取→70%乙醇沉淀→Sevag法脱蛋白	NA	GalA:Gal:Ara	3:1:6 <sup>a</sup>	调节肠道菌群改善肥胖	高脂饲喂小鼠	[40]
果实	番石榴多糖 I	热水提取→乙醇沉淀→Sevag法脱蛋白→乙醇洗涤→丙酮洗涤	NA	NA	NA	降血糖增强 免疫抗氧化	四氧嘧啶诱导糖 尿病小鼠	[41-43]
果实	番石榴多糖 II	热水提取→超滤(10 kDa超滤膜)→Sevag法脱蛋白	NA	NA	NA	降血糖增强 免疫抗氧化	四氧嘧啶诱导糖 尿病小鼠	[41-43]
果实	PPG	超声提取→70%乙醇沉淀	NA	NA	NA	抗糖基化抗 氧化	牛血清白蛋白-葡 萄糖;自由基清除	[29]
果实	PPG	热水提取→乙醇沉淀	NA	NA	NA	保肝	对乙酰氨基酚肝 损伤大鼠	[44]
叶	F1	热水提取→80%乙醇沉淀→淀粉酶处理→醋酸铜	156	Ara:Gal:Rha:Glc	64:23:8:5 <sup>a</sup> ; 8% GalA <sup>b</sup>	止咳	柠檬酸刺激豚鼠 模型	[45]
叶	GLP	95%乙醇回流脱脂→60 °C, 400 W超声20 min→Sevag法脱蛋白→70%乙醇沉淀→透析	957.1(23.3%) 288.4(7.6%) 127.4(3.0%) 3.34(66.1%)	NA	糖醛酸 7.59% <sup>b</sup>	抗氧化 降血糖	自由基清除;STZ+ 高脂饮食糖尿病 小鼠	[46]
叶	PS-PGL	室温水提→70%乙醇沉淀→硫酸多糖	NA	Fuc:Rha:Ara:Gal :Glc:Man:Xyl	1.44:3.88:22.6: 29.41:33.79:0.59: 7.71 <sup>b</sup>	抗氧化	Veo细胞;斑马鱼	[47]
籽	GSPS	室温水提→75%乙醇沉淀	NA	NA	NA	抗炎 抗肿瘤 免疫调节	原代胸腺细胞; 原代腹腔巨噬细 胞;MCF-7细胞	[34,48- 49]
籽	GSF-3	室温水提→75%乙醇沉淀→Sepharos 6B	3.4	GlcA:GalA:Gal: Man:Glc:Ara: Rib:Xyl:Fuc:Rha	3.28:28.13:14.88: 3.96:22.99:7.31:1.55: 14.81:1.68:1.43 <sup>b</sup>	抗炎 免疫调节	MCF-7细胞;原代 胸腺细胞;原代腹 腔巨噬细胞	[49-50]

注:番石榴果皮果胶(guava peel pectin, PEP);番石榴果肉果胶(guava pulp pectin, PUP);番石榴果实多糖(guava polysaccharide, GP);番石榴多糖(polysaccharide from *Psidium guajava*, PPG);番石榴叶多糖(guava leaves polysaccharide, GLP);番石榴叶子多糖(polysaccharide from *Psidium guajava* leaves, PS-PGL);番石榴种子多糖(guava seed polysaccharides, GSPS);番石榴种子多糖组分-3(guava seed polysaccharide fraction-3, GSF-3);Rha 鼠李糖;Ara 阿拉伯糖;Fuc 岩藻糖;Gal 半乳糖;GalA 半乳糖醛酸;Glc 葡萄糖;GlcA 葡萄糖醛酸;Man 甘露糖;Rib 核糖;Xyl 木糖;a 为物质的量之比;b 为质量百分比;NA 无报告;STZ 链脲佐菌素;HFD 高脂饲料。

### 1.3 番石榴多糖结构表征

多糖的生物活性与其结构密切相关。解析多糖结构与其生物活性的关系是当前多糖研究领域的焦点,也是天然多糖深入开发利用的关键<sup>[52]</sup>。多糖的结构表征既包括分子量、单糖组成、糖苷键类型和连接方式等基本信息,又包括多糖的空间构象、分子表面拓扑结构、形态特征等高级结构<sup>[53]</sup>。然而多糖分子量大,结构

中有大量重复单元,糖苷键连接方式多样;对于支链多糖,不但包含主链,还有众多分枝链,核磁谱数据重叠严重;此外多糖具有灵活的空间构象,高级结构复杂,因而多糖结构表征是多糖研究领域的一个难点。近年来随着色谱填料和分离手段、各种谱学技术的快速发展以及扫描电子显微镜、原子力显微镜等在高分子结构研究中的应用,越来越多的多糖结构被揭示<sup>[52]</sup>。

到目前为止,番石榴中确定分子量和单糖组成的多糖有17个。梳理文献可知,番石榴中绝大多数为酸性多糖,糖醛酸类型主要为半乳糖醛酸(GalA),中性单糖以半乳糖(Gal)、阿拉伯糖(Ara)、葡萄糖(Glc)为主。值得注意的是从番石榴果实热水浸提液中获得一个可溶于1%醋酸的水溶性多糖PS-I,其单糖由2-O-Me- $\alpha$ -L-Arap、2-O-Ac- $\alpha$ -D-Gal和D-methyl-GalA组成,且Ara为吡喃型<sup>[39]</sup>。已报道的番石榴多糖分子量、单糖组成及比例等汇总见表2。番石榴不同部位的多糖在结构上存在区别。研究发现泰国番石榴叶、果渣、果汁多糖中Gal:Ara:Glc:GalA的比例分别为1:1.4:0.9:1.2,1:2:0.4:2,1:0.7:0.4:0.3,果渣中GalA的含量最高,果汁中主要是Gal,而且番石榴果渣中还发现含有木糖(Xyl)<sup>[54]</sup>。曾有研究比较了红心番石榴的果肉及果皮中果胶成分,发现二者半乳糖醛酸含量、中性糖组成、热稳定性及流变学特性相近,但二者的酯化度、黏度、微观结构有区别。果肉果胶酯化度(48.57%)低于果皮果胶(56.29%),但黏度更高;扫描电子显微镜显示果肉果胶和果皮果胶均为片状,但是果肉果胶的皱褶更深,而果皮果胶边缘有触角状细丝<sup>[27]</sup>。

目前有5种来源于番石榴的均一多糖确定了糖苷键的类型和连接顺序以及主要重复结构单元<sup>[36-39,45]</sup>。研究者利用水提醇沉结合醋酸铜沉淀的方法从番石榴叶中获得一个分子量为156 kDa的支链多糖F1。通过Smith降解、过碘酸氧化等分析认为F-1为鼠李半乳糖醛酸聚糖(RG I)型。其重复结构单元包括(1 $\rightarrow$ 5)-Araf、(1 $\rightarrow$ 3,5)-Araf、(1 $\rightarrow$ 6)-Gal、(1 $\rightarrow$ 3)-Gal、(1 $\rightarrow$ 3,6)-Gal、(1 $\rightarrow$ 2)-Rha、(1 $\rightarrow$ 2,4)-Rha和(1 $\rightarrow$ 4)-GalA等8种糖残基<sup>[45]</sup>。番石榴果实中分离的多糖PS-I,重复结构单元由(1 $\rightarrow$ 4)-2-O-Me- $\alpha$ -L-Arap、(1 $\rightarrow$ 4)-2-O-Ac- $\alpha$ -D-Gal和(1 $\rightarrow$ 2)- $\alpha$ -D-GalA6Me组成<sup>[39]</sup>。此外,我国学者从番石榴果实水提液的70%以及90%乙醇沉淀部分获得了3个均一多糖GP70-2<sup>[36]</sup>、GP-70-3<sup>[37]</sup>和GP90-1B<sup>[38]</sup>。其中GP70-2和GP90-1B均为只有两种单糖组成的中性多糖,而GP-70-3是由5种单糖组成的具有高度分支结构的水溶性酸性多糖。GP70-2为阿拉伯半乳糖,主链由(1 $\rightarrow$ 3)- $\alpha$ -L-Araf和(1 $\rightarrow$ 3,6)- $\beta$ -D-Gal组成,侧链由(1 $\rightarrow$ 6)- $\beta$ -D-Gal组成,末端糖为 $\beta$ -D-Gal<sup>[36]</sup>。GP90-1B主链由(1 $\rightarrow$ 5)- $\alpha$ -L-Araf、(1 $\rightarrow$ 2,3,5)- $\alpha$ -L-Araf以及(1 $\rightarrow$ 3)- $\alpha$ -L-Araf组成。侧链包括(1 $\rightarrow$ 6)- $\alpha$ -D-Glc、(1 $\rightarrow$ )- $\alpha$ -D-Glc和(1 $\rightarrow$ )- $\alpha$ -L-Araf<sup>[38]</sup>。GP70-3主链由(1 $\rightarrow$ 3,6)- $\beta$ -D-Gal、(1 $\rightarrow$ 6)- $\beta$ -D-Gal、(1 $\rightarrow$ 3)- $\beta$ -D-Gal、(1 $\rightarrow$ 5)- $\alpha$ -L-Araf 4种糖残基组成,侧链由(1 $\rightarrow$ 2,3,5)- $\alpha$ -L-Araf、(1 $\rightarrow$ 3)- $\alpha$ -L-Araf、(1 $\rightarrow$ 3)- $\alpha$ -L-Rha、(1 $\rightarrow$ 3)- $\beta$ -D-GlcA、(1 $\rightarrow$ 3)- $\beta$ -D-GalA 5种糖残基组成,末端糖为 $\beta$ -D-Gal。在鉴定分子量以及重复结构单元的结构基础上,利用扫描电子显微镜、原子力显微

镜以及圆二色谱进一步揭示了GP70-3的高级结构。研究结果显示GP70-3具有不规则的片状结构,与其高度分支的结构特点相吻合;而片状结构上大小不等的孔洞则被推测与GP70-3良好的水溶性密切相关;并且明确了GP70-3不具有三股螺旋构型,这也是目前对番石榴多糖结构表征中较为详尽的一项<sup>[37]</sup>。

## 2 番石榴多糖生物活性研究进展

### 2.1 抗氧化活性

氧化应激压力增加与大量代谢性疾病的发生发展密切相关,新型天然抗氧化剂的发现具有重要的实际应用价值<sup>[16]</sup>。研究发现番石榴叶粗多糖具有强的清除自由基能力,然而其还原力低于抗坏血酸<sup>[33]</sup>。其在体外清除1,1-二苯基-2-苦基肼(1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl, DPPH)自由基、羟基自由基以及2,2'-联氮基双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]自由基的IC<sub>50</sub>值分别为46.5、175.5  $\mu$ g/mL和102.8  $\mu$ g/mL,且能提高糖尿病小鼠肝脏超氧化物歧化酶水平并降低其丙二醛水平<sup>[46]</sup>。番石榴果实粗多糖也显示体外清除自由基的活性<sup>[20]</sup>,且可以恢复四氧嘧啶糖尿病小鼠肝脏的抗氧化水平<sup>[41]</sup>。番石榴叶多糖可以在细胞水平改善双氧水引起的Vero细胞活性氧生成增加,降低其脂质氧化水平,并可以缓解双氧水引起的斑马鱼胚胎死亡<sup>[47]</sup>。另外番石榴果实中分离纯化的多糖GP70-2具有体外清除DPPH自由基的活性,IC<sub>50</sub>值为10.8 mg/mL<sup>[36]</sup>。

### 2.2 调节糖脂代谢及保肝活性

番石榴长期用于糖尿病的辅助治疗,但其活性成分不明确<sup>[11,13]</sup>。研究发现,番石榴叶粗多糖GLP(100 mg/kg, 200 mg/kg)给予链脲佐菌素(streptozotocin, STZ)联合高脂饮食共同诱导的糖尿病小鼠4周,可明显降低小鼠空腹血糖、糖化血清蛋白以及血浆甘油三酯及胆固醇水平<sup>[46]</sup>。番石榴叶粗多糖体外具有弱的抑制蔗糖酶、麦芽糖酶以及 $\alpha$ -淀粉酶的活性,并且与番石榴中的黄酮提取物具有协同作用<sup>[55]</sup>。番石榴果实提取的粗多糖给予四氧嘧啶诱导的糖尿病小鼠10 d(300 mg/kg),可有效降低糖尿病小鼠的空腹血糖值,其降糖效果与阳性药格列本脲相当<sup>[42]</sup>。番石榴果实水提液分级醇沉获得的多糖分别给予STZ联合高脂饮食诱导的II型糖尿病大鼠5周(400 mg/kg),发现50%沉淀多糖(GP-1)、90%乙醇沉淀多糖(GP-3)以及碱水提取的粗多糖(GP-4)具有显著的降血糖以及降血脂活性,并且可以降低胰岛细胞损伤,改善II型糖尿病大鼠胰岛素抵抗并且提高其糖耐量,此活性与激活磷酸肌醇3-激酶/蛋白激酶B(phosphoinositide 3-kinase/protein kinase B, PI3K/AKT)信号通路相关。而

70%乙醇沉淀的多糖(GP-2)虽然可以降低糖尿病大鼠空腹血糖,但对糖耐量及胰岛素抵抗改善效果不显著<sup>[35]</sup>。番石榴果实水提液经90%乙醇沉淀获得的多糖GP90显示了优良的 $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制活性,IC<sub>50</sub>值为2.27  $\mu\text{g}/\text{mL}$ <sup>[38]</sup>;而番石榴果实中获得的均一水溶性多糖GP70-3抑制 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的EC<sub>50</sub>值为2.54  $\mu\text{mol}/\text{L}$ <sup>[37]</sup>,GP90和GP70-3体外抑制 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的活性均优于阳性药阿卡波糖。红心番石榴果实中的果胶类成分在体外活性筛选中表现出吸附脂肪的特性,可与胆固醇胶束以及胆酸盐结合,显示其具有降血脂的潜能<sup>[27]</sup>。此外,番石榴果实多糖(400 mg/kg)可以缓解对乙酰氨基酚造成的大鼠肝脏损伤,降低模型鼠肝脏谷草转氨酶、谷丙转氨酶以及炎症因子白介素6水平,提高大鼠肝脏超氧化物歧化酶以及谷胱甘肽水平,提示其具有保肝活性<sup>[44]</sup>。

### 2.3 免疫调节及抗肿瘤活性

大量研究表明,天然多糖在调节免疫方面具有潜在的应用价值<sup>[14,18]</sup>。番石榴果实粗多糖给予四氧嘧啶诱导糖尿病小鼠,发现其可以提高模型小鼠的胸腺指数,提示其具有增强糖尿病小鼠免疫的功效<sup>[43]</sup>。细胞模型结果显示番石榴果实、果汁以及叶中提取的粗多糖均有免疫刺激活性,在100  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 浓度下可以促进T淋巴细胞的增殖<sup>[54]</sup>。番石榴籽提取的粗多糖GSPS被发现可以促进巨噬细胞的M1型极化,进而通过影响肿瘤细胞微环境而抑制前列腺癌细胞PC-3和乳腺癌细胞MCF-7的生长<sup>[34,48]</sup>。番石榴籽中分离纯化得到的低分子量多糖GSF-3为一种蛋白多糖,可以调节Th1/Th2平衡,促进小鼠胸腺中辅助性T细胞(Th细胞)向Th2型分化,增加Th2型细胞因子白介素10(IL-10)分泌<sup>[49]</sup>。进一步研究发现GSF3可以抑制抗凋亡基因B cell lymphoma-2(Bcl-2)表达,增强促凋亡基因Bcl-2 associated X protein(Bax)表达,抑制乳腺癌细胞MCF-7以及前列腺癌细胞PC-3的生长<sup>[50-51]</sup>。

### 2.4 改善肠道微生态

肠道菌群作为人体重要的微生物生态系统,在机体能量代谢、宿主免疫等方面发挥重要作用。多糖不易被人体直接消化吸收,但可被大肠中大量的肠道菌群所代谢,是肠道菌群重要的碳源。大量研究表明多糖可作为益生元调节肠道菌群的结构,维持肠道稳态,预防和改善代谢性疾病、肠道疾病等的发生<sup>[56]</sup>。番石榴果渣与人肠道菌共培养,具有促进双歧杆菌以及乳杆菌生长的功效,并且可以促进多种SCFAs生成,提示其具有益生元的功效<sup>[57]</sup>。番石榴果实多糖(guava polysaccharide, GP)可改善高脂饮食导致的小鼠体重增加,而给予抗生素处理的伪无菌小鼠则作用消失,表明GP是通过影响肠道菌群进而发挥生理活性。16s rRNA基因测序结果表明,GP可改善高脂饮食导致的

小鼠肠道厚壁菌门/拟杆菌门比例失调,促进有益菌如*Clostridium XIVa*、*Parvibacter*以及*Enterorhabdus*菌生长,降低有害菌*Mucispirillum*丰度,同时促进肥胖小鼠肠道菌代谢物丁酸盐的产生<sup>[40]</sup>。

### 2.5 其他

除上述活性外,番石榴叶多糖还被报道具有止咳功效。在柠檬酸诱导的豚鼠模型中,给予番石榴叶支链多糖F1(50 mg/kg)可显著降低豚鼠咳嗽频率,但不引起支气管扩张<sup>[45]</sup>。利用牛血清白蛋白-葡萄糖模型研究发现,番石榴果实粗多糖PPG具有抗糖基化活性,其在0.5 mg/mL浓度下抑制糖基化终产物产生的效率为25.9%<sup>[29]</sup>。此外,番石榴多糖可用于制备生物纳米材料。曾有研究人员利用番石榴叶粗多糖合成银纳米粒子PAgNP,该纳米粒具有强的清除DPPH自由基和ABTS<sup>+</sup>自由基活性,且对*Alcaligenes faecalis*和大肠杆菌表现良好的抑菌活性<sup>[58]</sup>。

## 3 总结

多糖具有多种健康促进功能以及生物可降解性和无毒性,在食品及生物医药领域具有广阔的应用前景。番石榴富含多糖成分,且在全球热带和亚热带地区种植广泛,植物资源丰富。尽管国内外对番石榴的化学及生物活性研究较多,但作为番石榴中的重要活性成分,番石榴多糖的研究尚处于起步阶段。目前番石榴多糖提取工艺的研究集中于果实和叶部位,以热水浸提法和超声辅助提取法为主。研究者利用单因素实验、正交试验以及响应面方法考察不同因素对番石榴多糖提取率的影响,优化番石榴不同部位多糖的提取工艺。但新兴的提取方法应用较少,工艺优化指标以粗多糖得率为主,提取方法与番石榴多糖生物活性的相关性有待进一步探索。在化学结构方面,从番石榴中分离鉴定的均一多糖数目较少,高级结构不明,因而对番石榴多糖结构的准确表征仍将是今后一段时期的研究重点。番石榴多糖显示出抗氧化、抗肿瘤、降血糖、降血脂、免疫调节、改善肠道微生态等多种生理功能,具有良好的应用开发前景。然而目前对番石榴多糖活性的研究多使用粗多糖或初步纯化的多糖组分,对均一多糖的研究相对较少,亟需进一步的作用机制及构-效关系研究。近年来关于番石榴多糖的研究报道逐渐增多,相信随着多糖分离和结构表征技术以及现代生物学研究手段的不断进步,番石榴多糖化学特征和生物活性将不断被揭示,也必将进一步推动番石榴及其多糖成分在生物医药和食品领域的高值化利用。

### 参考文献:

[1] GUTIÉRREZ R M P, MITCHELL S, SOLIS R V. *Psidium guajava*:



- A review of its traditional uses, phytochemistry and pharmacology [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2008, 117(1): 1-27.
- [2] 宁琳, 陈豪君, 潘祖健, 等. 我国亚热带地区番石榴种质资源保护现状[J]. *中国南方果树*, 2015, 44(5): 147-149.
- NING Lin, CHEN Haojun, PAN Zujian, et al. Protection status of guava germplasm resources in south subtropical region of China[J]. *South China Fruits*, 2015, 44(5): 147-149.
- [3] TOUSIF M I, NAZIR M, SALEEM M, et al. *Psidium guajava* L. an incalculable but underexplored food crop: Its phytochemistry, ethnopharmacology, and industrial applications[J]. *Molecules*, 2022, 27(20): 7016.
- [4] 叶小英, 谢煜敏, 曾聪彦. 番石榴多糖研究进展[J]. *今日药学*, 2022, 32(5): 331-337.
- YE Xiaoying, XIE Yumin, ZENG Congyan. Research progress on *Psidium guajava* L. polysaccharide[J]. *Pharmacy Today*, 2022, 32(5): 331-337.
- [5] KUMAR M, KAPOOR S, DHUMAL S, et al. Guava (*Psidium guajava* L.) seed: A low - volume, high - value byproduct for human health and the food industry[J]. *Food Chemistry*, 2022, 386: 132694.
- [6] LI Y Y, XU J L, LI D L, et al. Chemical characterization and hepatoprotective effects of a standardized triterpenoid - enriched guava leaf extract[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(12): 3626-3637.
- [7] LI Y Y, LI D L, AN Q, et al. New acylated phenolic glycosides with ROS-scavenging activity from *Psidium guajava* leaves[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(40): 11089-11098.
- [8] HUANG J W, LI C J, MA J, et al. Chemical constituents of *Psidium guajava* leaves and their antibacterial activity[J]. *Phytochemistry*, 2021, 186: 112746.
- [9] XIAO X F, ZHANG X R, YANG Z K, et al. Six unusual meroterpenoids from the leaves of *Psidium guajava* L. and their PTPIB inhibitory activities[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(13): 4000-4006.
- [10] DÍAZ-DE-CERIO E, PASINI F, VERARDO V, et al. *Psidium guajava* L. leaves as source of proanthocyanidins: Optimization of the extraction method by RSM and study of the degree of polymerization by NP-HPLC-FLD-ESI-MS[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2017, 133: 1-7.
- [11] KUMAR M, TOMAR M, AMAROWICZ R, et al. Guava (*Psidium guajava* L.) leaves: Nutritional composition, phytochemical profile, and health-promoting bioactivities[J]. *Foods*, 2021, 10(4): 752.
- [12] DÍAZ-DE-CERIO E, VERARDO V, GÓMEZ-CARAVACA A M, et al. Health effects of *Psidium guajava* L. leaves: An overview of the last decade[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18(4): 897.
- [13] JAMIESON S, WALLACE C E, DAS N, et al. Guava (*Psidium guajava* L.): A glorious plant with cancer preventive and therapeutic potential[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(2): 192-223.
- [14] 杨成鹏, 张国壮, 屈熙晨, 等. 酸浆属植物多糖化学与生物活性研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(21): 168-175.
- YANG Chengpeng, ZHANG Guozhuang, QU Xichen, et al. Research advances on chemical and biological properties of polysaccharides from the genus *Physalis*[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(21): 168-175.
- [15] 黄宇哲, 吴前震, 许腾龙, 等. 多糖对炎症性疾病及肠道菌群调控作用的研究进展[J]. *中国药理学通报*, 2022, 38(11): 1601-1606.
- HUANG Yuzhe, WU Qianzhen, XU Tengfei, et al. Advances in research of polysaccharides on inflammatory diseases and gut microbiota[J]. *Chinese Pharmacological Bulletin*, 2022, 38(11): 1601-1606.
- [16] YU Y, SHEN M Y, SONG Q Q, et al. Biological activities and pharmaceutical applications of polysaccharide from natural resources: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 183: 91-101.
- [17] LIU H, WEI S, SHI L, TAN H. Preparation, structural characterization, and bioactivities of polysaccharides from *Psidium guajava*: A review[J]. *Food Chemistry*, 2023, 411: 135423.
- [18] 王文丽, 张金玲, 魏亚宁, 等. 天然多糖提取、纯化及生物活性研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(22): 470-480.
- WANG Wenli, ZHANG Jinling, WEI Yanning, et al. Extraction, purification and bioactivity of natural polysaccharides: A review[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(22): 470-480.
- [19] MIRZADEH M, KESHAVARZ LELEKAMI A, KHEDMAT L. Plant/algal polysaccharides extracted by microwave: A review on hypoglycemic, hypolipidemic, prebiotic, and immune - stimulatory effect[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 266: 118134.
- [20] 李珊, 梁俭, 冯彬, 等. 番石榴多糖的提取工艺优化、纯化及其抗氧化活性测试[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(7): 68-73.
- LI Shan, LIANG Jian, FENG Bin, et al. Extraction process optimization, purification and antioxidant activity test of guava polysaccharides[J]. *Cereals & Oils*, 2020, 33(7): 68-73.
- [21] 杜阳吉, 王三永, 李春荣. 番石榴叶中多糖分离纯化工艺研究[J]. *中国食品添加剂*, 2011(1): 156-159.
- DU Yangji, WANG Sanyong, LI Chunrong. Study on the optimal extraction and purification technology for polysaccharides from the guava leaves[J]. *China Food Additives*, 2011(1): 156-159.
- [22] 龚英, 聂森, 谭雪, 等. 云南野生番石榴青果中多糖和多酚等活性成分的提取条件研究[J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(2): 47-55.
- GONG Ying, NIE Sen, TAN Xue, et al. The extraction of polysaccharides, polyphenols and flavonoids in the wild unripe *Psidium guajava* Linn. from Yunnan province[J]. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2022, 42(2): 47-55.
- [23] 孔繁晟, 明建斌, 黄志鹏, 等. 响应面分析法优选番石榴果实中多糖的超声提取工艺[J]. *中国药房*, 2014, 25(15): 1382-1385.
- KONG Fansheng, MING Jianbin, HUANG Zhipeng, et al. Optimization of ultrasonic extraction technology of polysaccharides from the fruit of *Psidium guajava* by response surface analysis[J]. *China Pharmacy*, 2014, 25(15): 1382-1385.
- [24] 曾昭智, 孔繁晟, 张锦红. 番石榴叶中多糖超声提取工艺优化[J]. *广东药学院学报*, 2013, 29(2): 134-137.
- ZENG Zhaozhi, KONG Fansheng, ZHANG Jinhong. Optimization of polysaccharides extraction technology from leaves of *Psidium guajava* by ultrasonic[J]. *Journal of Guangdong Pharmaceutical University*, 2013, 29(2): 134-137.
- [25] KONG F S, YU S J, FENG Z, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of antioxidant compounds from Guava (*Psidium guajava* L.) leaves using response surface methodology[J]. *Pharmacognosy Magazine*, 2015, 11(43): 463-469.
- [26] 杨明, 胡文娥, 黄剑波, 等. 超声波法提取番石榴果胶的工艺研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(31): 17796-17797.
- YANG Ming, HU Wene, HUANG Jianbo, et al. Study on extraction of pectin from guava by ultrasonic[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(31): 17796-17797.
- [27] 吕冰冰, 谢笔钧, 孙智达. 红肉番石榴果胶的理化特性及其体外降脂作用[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(20): 51-60.
- LV Bingbing, XIE Bijun, SUN Zhida. Physical and chemical properties of red-flesh guava pectin and its lipid-lowering effect *in vitro* [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(20): 51-60.
- [28] AMUTHA GNANA ARASI M A, GOPAL RAO M, BAGYALAKSHMI J. Optimization of microwave-assisted extraction of polysaccharide from *Psidium guajava* L. fruits[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 91: 227-232.
- [29] YAN C Y, LEE J S, KONG F S, et al. Anti-glycated activity prediction of polysaccharides from two guava fruits using artificial neural networks[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 98(1): 116-121.
- [30] 邱敏芳, 黎莉, 方继德, 等. 番石榴多糖提取工艺的优化[J]. *武汉工程大学学报*, 2011, 33(1): 22-24.
- QIU Minfang, LI Li, FANG Jide, et al. Study on optimization of polysaccharides extraction technology from *Psidium guajava* L.[J].

- Journal of Wuhan Institute of Technology, 2011, 33(1): 22-24.
- [31] 蒋顶云, 蒋长兴, 熊清平, 等. 响应面法优化番石榴多糖的超声提取工艺[J]. 食品科技, 2012, 37(12): 174-178.
- JIANG Dingyun, JIANG Changxing, XIANG Qingping, et al. Optimization of ultrasound - assisted extract polysaccharides from *Psidium guajava* L. by response surface methodology[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(12): 174-178.
- [32] 彭珊珊, 龙洁梅, 苏丽莹. 番石榴叶、番薯叶中多糖的提取和测定[J]. 食品科技, 2006, 31(9): 106-108.
- PENG Shanshan, LONG Jiemei, SU Liying. Extracting and determination of polysaccharides in sweet potato leaves and psidium guajava leaves[J]. Food Science and Technology, 2006, 31(9): 106-108.
- [33] 孙颖, 李宗泽, 徐晋, 等. 番石榴叶多糖超声波细胞粉碎辅助提取工艺及其体外抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(22): 106-112.
- SUN Ying, LI Zongze, XU Jin, et al. Ultrasonic cell crushing - assisted extraction and antioxidant activity *in vitro* of guava leaf polysaccharide[J]. Food Research and Development, 2022, 43(22): 106-112.
- [34] LIN H C, LIN J Y. Immune cell-conditioned media suppress prostate cancer PC-3 cell growth correlating with decreased proinflammatory/anti-inflammatory cytokine ratios in the media using 5 selected crude polysaccharides[J]. Integrative Cancer Therapies, 2016, 15(4): NP13-NP25.
- [35] JIAO Y K, ZHANG M L, WANG S M, et al. Consumption of guava may have beneficial effects in type 2 diabetes: A bioactive perspective[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 101: 543-552.
- [36] HUA D H, ZHANG D Z, HUANG B, et al. Structural characterization and DPPH radical scavenging activity of a polysaccharide from *Guara* fruits[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 103: 143-147.
- [37] JIAO Y K, HUA D H, HUANG D, et al. Characterization of a new heteropolysaccharide from green guava and its application as an  $\alpha$ -glucosidase inhibitor for the treatment of type II diabetes[J]. Food & Function, 2018, 9(7): 3997-4007.
- [38] ZHANG Z L, KONG F S, NI H, et al. Structural characterization,  $\alpha$ -glucosidase inhibitory and DPPH scavenging activities of polysaccharides from guava[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 144: 106-114.
- [39] MANDAL S, SARKAR R, PATRA P, et al. Structural studies of a heteropolysaccharide (PS-I) isolated from hot water extract of fruits of *Psidium guajava* (Guava)[J]. Carbohydrate Research, 2009, 344(11): 1365-1370.
- [40] LI Y Y, BAI D S, LU Y M, et al. The crude guava polysaccharides ameliorate high-fat diet-induced obesity in mice via reshaping gut microbiota[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 213: 234-246.
- [41] 吴建中, 欧仕益, 陈静, 等. 番石榴多糖对糖尿病小鼠的血糖及抗氧化能力的影响[J]. 中成药, 2007, 29(5): 668-671.
- WU Jianzhong, OU Shiyi, CHEN Jing, et al. Effects of guava polysaccharides on blood glucose level and antioxidant activity in diabetic mice[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2007, 29(5): 668-671.
- [42] 吴建中, 郭开平, 陈静, 等. 番石榴多糖的降血糖作用研究[J]. 食品与机械, 2006, 22(6): 80-82.
- WU Jianzhong, GUO Kaiping, CHEN Jing, et al. Study on hypoglycemic effect of polysaccharides from guava[J]. Food & Machinery, 2006, 22(6): 80-82.
- [43] 吴建中, 陈静, 郭开平, 等. 番石榴多糖对糖尿病小鼠的血糖及胸腺、脾指数的影响[J]. 天然产物研究与开发, 2007, 19(1): 84-87.
- WU Jianzhong, CHEN Jing, GUO Kaiping, et al. Effects on blood glucose level and index of *Thymus*, spleen of guava polysaccharides in diabetic mice[J]. Natural Product Research and Development, 2007, 19(1): 84-87.
- [44] ALIAS A, OTHMAN F, LI A R, et al. Supplementation of *Psidium guajava* (guava) fruit polysaccharide attenuates paracetamol - induced liver injury by enhancing the endogenous antioxidant activity [J]. Sains Malaysiana, 2015, 44(8): 1129-1136.
- [45] KHAWAS S, SIVOVÁ V, ANAND N, et al. Chemical profile of a polysaccharide from *Psidium guajava* leaves and its *in vivo* antitussive activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 109: 681-686.
- [46] LUO Y, PENG B, WEI W, et al. Antioxidant and anti-diabetic activities of polysaccharides from guava leaves[J]. Molecules, 2019, 24(7): 1343.
- [47] KIM S Y, KIM E A, KIM Y S, et al. Protective effects of polysaccharides from *Psidium guajava* leaves against oxidative stresses[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 91: 804-811.
- [48] LIN H C, LIN J Y. M1 polarization but anti-LPS-induced inflammation and anti-MCF-7 breast cancer cell growth effects of five selected polysaccharides[J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine: ECAM, 2020, 2020: 9450246.
- [49] LIN H C, LIN J Y. Characterization of guava (*Psidium guajava* Linn) seed polysaccharides with an immunomodulatory activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 154: 511-520.
- [50] LIN H C, LIN J Y. GSF3, a polysaccharide from guava (*Psidium guajava* L.) seeds, inhibits MCF-7 breast cancer cell growth via increasing Bax/Bcl-2 ratio or Fas mRNA expression levels[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 161: 1261-1271.
- [51] LIN H C, LIN J Y. Pharmacological effects of guava (*Psidium guajava* L.) seed polysaccharides: GSF3 inhibits PC-3 prostate cancer cell growth through immunotherapy *in vitro*[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(7): 3631.
- [52] WANG X Y, ZHANG D D, YIN J Y, et al. Recent developments in *Hericium erinaceus* polysaccharides: Extraction, purification, structural characteristics and biological activities[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(sup1): S96-S115.
- [53] 梁小飞, 张芳, 姜胤秀, 等. 枸杞多糖构-效关系研究进展与展望[J]. 中国中药杂志, 2023, 48(9): 2387-2395.
- LIANG Xiaofei, ZHANG Fang, JIANG Yinxiu, et al. Structure-activity relationship of *Lycium barbarum* polysaccharides[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2023, 48(9): 2387-2395.
- [54] BURANA-OSOT J, PATTANAPANYASAT K, SOONTHORNCHAREONNON N, et al. Characterisation and immuno-stimulating activity of polysaccharides from Thai medicinal plants[J]. Natural Product Research, 2010, 24(15): 1403-1412.
- [55] 杜阳吉, 王三永, 李春荣. 番石榴叶黄酮与多糖提取及其降血糖活性研究[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(10): 56-59.
- DU Yangji, WANG Sanyong, LI Chunrong. Study on the antidiabetic activities of flavonoids and polysaccharides from the guava leaves[J]. Food Research and Development, 2011, 32(10): 56-59.
- [56] 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 Yuanyuan, CHEN Huaguo, XIE Wen, et al. Interaction between polysaccharide and intestinal flora and its structure-effect relationship: A review[J]. Microbiology China, 2022, 49(6): 2325-2346.
- [57] MENEZES F N D D, DE MELO F H C, VIEIRA A R S, et al. *Acroela* (*Malpighia glabra* L.) and guava (*Psidium guajava* L.) industrial processing by-products stimulate probiotic *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* growth and induce beneficial changes in colonic microbiota[J]. Journal of Applied Microbiology, 2021, 130(4): 1323-1336.
- [58] WANG L, XIE J, HUANG T, et al. Characterization of silver nanoparticles biosynthesized using crude polysaccharides of *Psidium guajava* L. leaf and their bioactivities[J]. Materials Letters, 2017, 208: 126-129.