

付琳, 王一红, 蔺子晗, 等. 生姜多糖的提纯工艺、结构及其功能活性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(1): 335–342. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120239

FU Lin, WANG Yihong, LIN Zihan, et al. Progress in Purification Technology, Structure and Functional Activity of Ginger Polysaccharide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(1): 335–342. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120239

· 专题综述 ·

生姜多糖的提纯工艺、结构及其功能活性研究进展

付琳, 王一红, 蔺子晗, 王思璿, 王漫, 龙丹凤*
(兰州大学公共卫生学院, 甘肃兰州 730030)

摘要: 生姜作为我国丰富的草本植物资源, 从古至今, 在食品、药品中扮演着重要角色, 也被称为药食同源植物, 具有良好的医用和营养价值。生姜多糖是生姜中重要的生物活性物质之一, 国内外研究发现其具有多种功能活性。本文系统回顾并比较了生姜多糖的提取工艺和纯化方法, 总结了生姜多糖的结构表征。同时对生姜多糖的抗氧化、调节免疫、抗肿瘤等功能活性进行了归纳分析, 以期后续生姜多糖的深入研究和产业应用提供参考。

关键词: 生姜多糖, 药食同源, 提取, 纯化, 结构表征, 功能活性

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)01-0335-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120239

本文网刊:



Progress in Purification Technology, Structure and Functional Activity of Ginger Polysaccharide

FU Lin, WANG Yihong, LIN Zihan, WANG Siying, WANG Man, LONG Danfeng*

(School of Public Health, Lanzhou University, Lanzhou 730030, China)

Abstract: Ginger, as a rich herb resource in China, has played an important role in food and medicine since ancient times. It is also known as a medicinal and edible homologous plant that possesses unique medical and nutritional values. Ginger polysaccharide is considered one of the most important bio-active components in ginger, which have attracted many attentions for various of bioactivities. In this review, the methods of extraction and purification of polysaccharide, as well as structural characteristics are discussed, what's more, functional properties including antioxidant, immunity regulatory, anti-tumor and their influencing factors are reviewed. It is expected to provide valuable reference for further research and industrial application of ginger polysaccharide.

Key words: ginger polysaccharide; homology of medicine and food; extract; purification; structural characteristics; functional activity

生姜(*Zingiber officinale* Roscoe)为姜科、姜属多年生草本宿根植物^[1], 是具有悠久历史的香辛调味料, 并兼具广泛的药理作用, 属于药食同源资源。我国是世界生姜种植面积最大、出口量最多的国家, 年产量高达 1000 万吨以上^[2]。生姜中含有多种生物活性物质, 例如生姜油、精油树脂、姜辣素、生姜多糖、膳食纤维等^[3], 其中生姜多糖是重要的功能成分

之一。研究发现, 其具有抗氧化^[4]、抗疲劳^[5]、调节免疫^[6]、抗肿瘤^[7]等作用。近年来, 生姜多糖在食品、药品、化妆品等方面的应用已逐渐成为研究热点。因此, 对于生姜多糖的深入开发及应用将有助于促进生姜产业的提质增效。而提取和纯化工艺是影响生姜多糖提取率、产品纯度及结构以及功能活性的重要因素, 所以方法与工艺的选择尤为关键。目前生姜

收稿日期: 2022-12-30

基金项目: 校企合作横向项目 (071100324)。

作者简介: 付琳 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 营养与食品卫生, E-mail: 18294408275@163.com。

* 通信作者: 龙丹凤 (1981-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 营养与食品卫生, E-mail: longdf@lzu.edu.cn。

多糖的提取方法主要包括热水浸提法、碱溶液提取法、微波/超声辅助提取法等,但提取率和难易程度有所差异,导致最终得率也不同,影响产品利用率。

综上,本文主要回顾了目前生姜多糖常用的提取与纯化方法,并对其优缺点进行了比较,以期为生姜多糖精深加工的工艺优化提供参考。同时,总结了现有生姜多糖的结构表征分析结果,对生姜多糖已有的功能活性及影响因素进行了归纳,旨在为后续功能产品的开发及应用提供依据。

1 生姜多糖的提取

近十年来,提取生姜多糖最常用的方法为热水浸提(Hot water extraction, HWE),也是较为传统的提取方法,主要以水作为溶剂,通过热力作用使细胞发生质壁分离,并将溶于水后的细胞内或细胞间物质通过扩散作用渗出^[8],其优点在于设备简单、操作简单、成本低等。而不同的计算方式对于提取率的结果可产生一定影响,如依据干重比计算,HWE法获得的生姜多糖提取率可达到20.43%^[9],若使用苯酚-硫酸法计算,测生姜多糖的提取率一般在10%以内(见表1)。干重比法较苯酚-硫酸法的缺点在于无法排除干物质中除多糖成分以外的其他物质干扰,虽然提取率较高,但纯度偏低。另外,HWE提取过程中的温度对生姜多糖的提取率也有显著影响,秦卫东等^[9]研究表明60℃为生姜多糖最佳提取温度,而

另有研究发现90℃左右更有利于生姜多糖的浸提^[10-11]。同时,料液比也可影响生姜多糖的提取率,正交研究发现,料液比越大,提取率越高,当比值为1:15时,提取率最高^[9-11],与孔得福等^[12]、赵文竹等^[13]通过响应面分析得到的结果一致。

随着研究的不断深入,生姜多糖的提取方法也在持续优化与更新。如使用碱溶液提取(Alkali solution extraction, ASE)、微波辅助提取(Microwave assisted extraction, MAE)、超声辅助提取(Ultrasonic assisted extraction, UAE)等。ASE能够在碱液的作用下使细胞壁充分吸水膨胀而破裂,从而使多糖游离出来,增加提取率^[14],其优点在于节省时间、操作简单等。Chen等^[15]发现ASE法最适用于提取生姜高纤维植物体的多糖物质,能够在保证较高提取率的同时,使其功能活性也表现良好。MAE是生姜及溶剂中的偶极分子在高频微波能的作用下,产生偶极涡流、离子传导和高频率摩擦,从而在短时间内产生大量的热量^[16]。偶极分子旋转导致的弱氢键断裂、离子迁移等加速了溶剂分子对生姜的渗透,生姜多糖溶剂化,使微波萃取时间显著缩短,提取率增加^[17],其优点在于能够节省时间、更好地保持多糖生物活性等。而微波功率对生姜多糖提取率也能够产生一定的影响,研究表明,功率为550 W时提取率最高^[18-19]。UAE法利用超声波振动的空化作用、机械作用、热

表1 生姜多糖不同提取方法的优缺点比较

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of different extraction methods of ginger polysaccharides

提取方法	优点	缺点	提取率测定方法	提取率(%)	参考文献
热水浸提(HWE)	a.设备简单 b.操作简单 c.成本低,适用于大规模的产业生产 ^[26]	a.耗时长 b.劳动强度大 c.提取效率低 d.多糖是热敏性物质,长时间高温可能影响其生物活性	苯酚-硫酸	7.28	[27]
				3.13	[13]
				5.82	[10]
				7.58	[11]
				4.62	[12]
碱溶液提取(ASE)	a.节省时间 b.操作简单	稀碱浓度难以控制,易使部分多糖发生水解,从而破坏多糖的活性结构,减少多糖得率	称量干重比	20.43	[9]
				11.38	[15]
微波辅助提取(MAE)	a.能够提高提取速度,缩短提取时间,多糖提取率高 b.选择性、安全性较高,易操作 c.能够保持多糖的生物活性和功能特性 d.可获得高粘度和溶解度、更多构型变化以及小分子量的多糖 ^[28]	a.可能存在加热不均匀的问题 b.设备维护成本较高	苯酚-硫酸	18.93	[19]
				20.46	[18]
				1.81	[29]
超声辅助提取(UAE)	a.提高原料与溶剂混合均匀度 b.能够降低提取温度,提高提取速度,缩短提取时间 c.可防止提取活性成分在长时间、高温条件下发生酶解、降解等变化	设备维护成本较高	苯酚-硫酸	2.89	[30]
				6.87	[13]
			-	11.32	[5]
			称量干重比	10.50	[15]
				18.06	[31]
酶辅助提取(EAE)	a.提高多糖的得率 b.反应温度较低 c.提取时间较短	a.酶的价格较高 b.容易失活,实验过程中温度控制要求严格 c.多糖的高级结构可能因酶的作用而改变	硫酸-蒽酮	22.53	[18]
				22.18	[22]
				19.03	[32]
超声微波协同萃取(UMAE)	a.操作简单 b.降低能耗 c.提取时间较短 ^[33]	设备维护成本较高	苯酚-硫酸	23.65	[24]
超声波辅助醇碱提取法(UAAE)	a.显著提高多糖提取率 b.提取时间短	设备维护成本较高	硫酸-蒽酮	33.06	[25]

注:提取率计算方法:a.苯酚-硫酸法、硫酸-蒽酮法:生姜多糖含量(%)=标准曲线查得糖的量(μg)×提取液体积(mL)×稀释倍数/[测定用样品液的体积(mL)×样品重量(g)×10⁶]×100;b.称量干重比法:生姜多糖含量(%)=粗多糖重量(mg)/样品总干重(mg)×100。

效应等破坏细胞壁,从而快速将生姜多糖溶出^[20],具有提高原料与溶剂混合均匀度、降低提取温度等优点。另外,通过该方法获得的生姜粗多糖冷冻干燥后的成品色泽、质地、水溶性均表现良好^[18]。

近年来,在实际生产和实验室多糖提取中发现,采用复合酶以及两种或两种以上方法联合的形式对于多糖的提取效率高于单一方法的应用。其中,酶辅助提取(Enzyme assisted extraction, EAE)、超声微波协同萃取(Ultrasonic-microwave synergistic extraction, UMSE)、超声波辅助醇碱提取法(Ultrasonic assisted alkaloid extraction, UAEE)等方法应用较多,上述方法的优点在于节省时间、提取率高等,但成本也普遍偏高。EAE 法主要利用酶的高度专一性,降解细胞组织,提高生姜多糖提取率^[21]。李守鹏^[22]采用 4 种酶复合法提取生姜多糖,使提取率升高 3%~7%。在上述基础上,采用两种方法联合的形式对生姜多糖进行提取的研究发现,将超声波与微波有机结合的 UMSE 法,能够充分利用微波的高能作用和超声波的空化作用,将超声波的振动能和通过波导管引出的微波能直接或定向聚焦于样品^[23]。刘全得等^[24]采用了 UMSE 法提取生姜多糖,并利用响应曲面法获得最优工艺参数,使提取率达到 20% 以上。另外,将超声波与醇碱溶液结合的 UAEE 提取法,通过双重效应能够加剧样品析出,能够使生姜多糖提取率达到 33.06%^[25],但目前对于该方法的研究较少。

值得注意的是,每种方法的提取率计算方式有所不同,尚不能明确某一种方法的提取率最高,但根据实际研究需要或实际生产条件,仍可选择最适的生姜多糖提取方式,并为其实用化提供更多的参考和研究思路。各种生姜多糖提取方法优缺点及提取率见表 1。

2 生姜多糖纯化工艺

采用上述不同方法提取的生姜粗多糖,其中还含有很多大分子和其他杂质,对其后续的研究和生产应用会产生一定影响,故在此基础上,还需进一步分离纯化。多糖除杂一般需要对粗多糖进行脱脂、脱蛋白、脱色素、乙醇沉淀等步骤^[34]。生姜根茎中含有少量脂质,在多糖提取过程中会阻碍水溶液渗透到内部,使多糖提取率下降,因此在提取前有必要进行脱脂处理,进而降低脂质干扰^[35]。目前应用较多的脱脂方法主要为石油醚脱脂法和乙醇脱脂法^[35],石油醚脱脂法效率最高,但其沸点及安全性较乙醇脱脂法低。生姜多糖溶液中若含蛋白质和核酸,也会对实验结果造成干扰,因而需对提取液进行脱蛋白处理^[9]。秦卫东等^[9]以蛋白质含量为指标探究三氯乙酸法、鞣酸法、Sevag 法的脱蛋白效果,结果发现,Sevag 法蛋白去除率最高,但使用试剂为有毒物质,易残留且影响生姜多糖活性,多糖损失率高,而鞣酸法多糖损失率最低且安全性最高。另外,生姜粗多糖提取后多为棕色,也可能影响研究工作,因此需进行脱色素处理。

常用的脱色方法主要有离子交换法、吸附法、大孔树脂法和氧化法等^[36]。研究表明,大孔树脂脱色效果显著,多糖含量相对损失较少,但有成本较高,易带入有机残留物^[37]。

生姜多糖除杂后,仍需对其进一步纯化,得到更为纯净、均一性好的生姜多糖为后续研究其结构等做基础,其中纯化分离的方式主要有离子交换层析法、凝胶柱层析法和大孔树脂柱层析等^[38]。凝胶柱层析法根据被分离组分尺寸大小与凝胶的孔径关系实现分离,类似于分子筛的作用;离子交换层析法中,研究者多用阴离子交换柱对多糖进行初步纯化;大孔树脂柱层析利用大孔树脂的选择性吸附作用和分子筛作用纯化多糖^[39]。一般先经过阴离子交换柱纯化,再采用凝胶柱进一步纯化。采用阴离子交换 DEAE-52 纤维素柱层析和 Sephadex G-200 分子筛层析法对生姜粗多糖进行纯化,能够得到 3~5 种多糖组分^[15,31]。Wang 等^[7]采用 S-8 大孔树脂柱和阴离子交换 DEAE-52 纤维素柱纯化得到 2 种生姜多糖组分。

生姜多糖的纯度与其生物活性及其应用效果密切相关,高纯度的生姜多糖具有更强的抗氧化、抗炎、抗肿瘤、降血糖等生物活性,对于药物、保健品等的开发具有重要影响,因此,对于生姜多糖纯化尤为重要。

3 生姜及其副产品多糖类型与结构的研究进展

目前,研究较多的生姜多糖主要来源为生姜根茎(GP),还有少量学者关注其副产品多糖^[40]:如生姜渣多糖(GPPs)^[41]、生姜茎叶多糖(GSLP)^[15]、生姜皮多糖(GE)^[27]。

生姜多糖为高分子聚合物,结构复杂多样,并与其性质密切相关^[42]。Liao 等^[31]研究发现,生姜多糖的分子质量分布在 11.81~1831.75 kDa 之间,范围较广。其单糖组成主要为葡萄糖和甘露糖,还含有少量的鼠李糖、半乳糖、木糖、阿拉伯糖等,因多糖种类不同各种单糖的含量也有所差异。生姜多糖的糖苷键连接方式略有不同^[31],但均为 α 型-吡喃糖,其结构中含有 α -(1 $\rightarrow$ 4)-D-Glpc 及 α -(1 $\rightarrow$ 4)-D-Manp 糖苷键的概率较大。在空间构象上,现有研究表明,不同类型的生姜多糖均具有相似的三螺旋结构,但孔径大小有所差异^[15]。

同类型生姜多糖受不同提取方式的影响,结构也有所差异^[27,30]。Liao 等^[31]研究发现,采用蒸馏水、生理盐水洗脱生姜多糖后单糖组分不同,主要包含 4 种(甘露糖、葡萄糖、半乳糖和阿拉伯糖)或 6 种单糖(甘露糖、鼠李糖、葡萄糖、半乳糖、木糖和阿拉伯糖)。对其进行纵向对比,不同类型的生姜及其副产品多糖在糖苷键、空间构象方面相似,分子量主要因提取方式的不同而产生差异,从而形成不同大小的多糖分子^[31]。另外,不同结构的生姜多糖其功能活性是否存在显著差异仍有待进一步探索。生姜及其副产品多糖结构表征见表 2。

表 2 生姜及其副产品多糖的结构表征

Table 2 Structural characterization of ginger and its by-product polysaccharides

类型	分子量(kDa)	单糖组成	总糖含量(%)	低级结构	高级结构
GP ^[31]	11.81~1831.75	葡萄糖、鼠李糖、甘露糖、半乳糖、阿拉伯糖	98.00	O-H、C-H、C-O、 α -糖苷键、 β -糖苷键	三螺旋结构
GPPs ^[41]	40.6~939.8	甘露糖、鼠李糖、葡萄糖/半乳糖、木糖、阿拉伯糖	95.00	O-H、C-H、X-H、S-O、C-O、C-O-C、C-O-H键、 α -糖苷键、 β -糖苷键	-
GSLP ^[15]	5~81	甘露糖、鼠李糖、葡萄糖、木糖、半乳糖和阿拉伯糖	85.95	C=O、C-H、C-O、C-O-C、C-O-H、O-H、S=O、C-O-S、 α -糖苷键	三螺旋构象
GE ^[27]	194~462	甘露糖、葡萄糖、半乳糖、木糖、阿拉伯糖、岩藻糖	97.79	O-H、C-H、C-H、C≡N、O-H、 α -糖苷键、 β -糖苷键	-

4 生姜多糖的功能活性

4.1 抗氧化活性

生姜多糖具有较强的抗氧化活性,可以保护机体免受氧化应激损伤。其中,对自由基的清除能力、金属螯合能力是评价其抗氧化活性的重要依据。研究发现,生姜多糖对 $\bullet$ OH 和 DPPH $\bullet$ 两种自由基^[10,26]以及 Fe²⁺^[13]均具有清除能力,且清除效果随浓度增加而增强^[4],其金属螯合能力的 IC₅₀ 值达到 4.21 μ g/mL。宋琳琳等^[30]通过动物实验探索了生姜多糖的摄入对雄性大鼠组织抗氧化活性的影响,结果显示,生姜多糖能够显著提高血清、大脑中的 SOD 活性、降低 MDA 含量及 NO 的含量。生姜多糖的抗氧化作用主要通过提高抗氧化酶活性,从而减少活性氧和自由基的生成,并可以释放羟基上的活泼氢捕捉自由基,阻断其链式反应^[41]。生姜多糖主要通过消除自由基、高金属螯合力而降低与多种疾病有关的 Fenton 反应发生机率,该反应由于产生强氧化性自由基而对人体造成损害,可以引起 DNA、蛋白质和脂质氧化,从而导致多种慢性疾病的发生^[42]。而生姜多糖的抗氧化性可以帮助中和这些自由基,并减少其对人体的伤害^[43]。因此,在未来的食品和医药领域,生姜多糖具有广阔的应用潜力。

4.2 免疫调节作用

研究表明,多糖具有免疫调节功能,可通过激活 T 细胞、B 细胞、巨噬细胞、自然杀伤细胞及淋巴因子激活的杀伤细胞等免疫细胞,促进干扰素、白细胞介素等细胞因子生成、活化补体,诱导多种免疫细胞反应,从进而改善人体的免疫功能^[44]。生姜多糖同样具有免疫调节活性,Yang 等^[45]研究发现,生姜多糖在体外对 RAW264.7 细胞可显著增强巨噬细胞的增殖而无细胞毒性,并促进 NO、TNF- α 、IL-1 β 和 IL-6 等免疫物质的产生。溃疡性结肠炎(UC)是一种发生在结肠与直肠的炎性自身免疫性肠病,研究表明,生姜多糖可以减轻 UC 患者的症状并发挥抗炎和免疫调节作用。Qian 等^[6]研究显示,生姜多糖对人结肠癌细胞的生长具有抑制作用,同时能够产生免疫调节效应,使人体抑癌基因 *p53* 的表达以及 Bax/Bcl-2 比值增加,并促进免疫物质 TNF- α 、IL-2、IL-6 的分泌。因此,生姜多糖可以通过增强免疫细胞的吞噬能力、促进细胞因子的产生等,参与调节机体的炎症反应和免疫反应,达到调节免疫的作用。

4.3 抗肿瘤活性

多项研究显示,生姜多糖可以有效抑制肿瘤细胞的生长繁殖,且具有较低的细胞毒性。Wang 等^[7]研究发现生姜多糖可以促进肝癌 HepG2 细胞凋亡,使细胞停滞在 G₀~G₁ 期,通过实时荧光定量和蛋白质印迹法显示生姜多糖可以上调 *Bax*、*Fas*、*FasL*、*caspase-3*、*p21* 和 *p53* 免疫基因的表达,下调 *Bcl-2* 的表达,而这些免疫基因的表达水平与其抗肿瘤活性密切相关。Qian 等^[6]也发现类似结果,生姜多糖在无胸腺裸鼠体内可诱导肝癌 HepG2 细胞周期停滞和凋亡,并能够促进 Bax 和 p53 蛋白的表达,抑制 Bcl-2 蛋白的表达,同时激活下游蛋白 *caspase-9* 和 *caspase-3* 的表达,从而发挥抗肿瘤作用。另外,生姜多糖的结构也可能影响其抗肿瘤活性,生姜多糖具有 - β -D-Galp-(1 $\rightarrow$ 6)-的特殊结构,其中 β -D-吡喃半乳糖与人结肠癌细胞的抗肿瘤活性有关^[31]。近年来研究表明,肠道菌群与人体的免疫系统、代谢和包括肿瘤在内的多种疾病的发生密切相关,而生姜多糖具有调节肠道菌群的作用,可发挥抗肿瘤活性。研究发现,生姜多糖可以通过影响厚壁菌门和拟杆菌门 (*Firmicutes/Bacteroidetes*, F/B) 比值以及变形菌门的丰度来改善结肠癌的症状。生姜多糖可促进肠道中有益菌的生长和繁殖,如双歧杆菌和乳酸杆菌等,同时抑制有害菌如变形菌门中病原菌的生长和繁殖,这些有益菌能够产生有机酸、过氧化氢、丁二酮和短链脂肪酸等物质,调节它们之间的相互作用,增加肠道黏膜屏障的完整性,从而降低肠道的炎症反应和氧化应激,减少癌细胞的发生和扩散^[46]。此外,生姜多糖还可以通过增强机体免疫力发挥抗肿瘤活性,如通过抑制转化 TGF- β 和 bFGF 生长因子的分泌,抑制肿瘤血管、肉芽组织等生成,改善肿瘤免疫微环境,抑制肿瘤生长^[46]。生姜多糖可以通过诱导肿瘤细胞凋亡、调节免疫基因表达、调节肠道菌群等抑制癌细胞的生长,为今后生姜多糖在肿瘤治疗、预防等方面中的应用提供了理论依据。

4.4 降血糖作用

已有研究表明,生姜多糖具有降血糖和调节血脂的作用。Chen 等^[15]将生姜多糖通过口服作用于糖尿病患者,结果表明,其对 α -葡萄糖苷酶的抑制活性随多糖浓度升高而增加。汪妮等^[47]采用生姜多糖对 2 型糖尿病模型小鼠进行灌胃,并测定小鼠空腹

血糖浓度及糖化血清蛋白水平,结果显示,生姜多糖能有效降低小鼠血糖浓度,使其恢复至正常水平。生姜多糖经肠道菌群分解后产生短链脂肪酸等代谢物,可通过调节胰岛素受体底物和葡萄糖转运载体,增加机体胰岛素敏感性,同时,还可通过抑制促炎因子等改善葡萄糖水平稳态,从而降低胰岛素抵抗和血糖水平^[15]。

4.5 其他

除上述作用外,生姜多糖还具有其他方面的活性功能,如减轻脑组织损伤、止咳、保护肝脏、抗疲劳等。宋琳琳等^[30]通过生姜粗多糖对大鼠进行干预,发现生姜多糖可提高脑缺血再灌注大鼠脑组织的超氧化物歧化酶活性来抑制自由基的产生,促进脂质过氧化反应,减少丙二醛生成,进而减轻脑组织损伤。另外,有研究表明,生姜多糖与磷酸可待因具有相似的止咳作用。Bera 等^[48]发现,口服生姜多糖可显著抑制经干预后豚鼠的咳嗽症状,且无明显毒副作用,具有成为现有止咳药物成分替代品的潜力。还有研究表明,生姜多糖可以对物理疲劳和运动疲劳产生积极的影响,可能与其具有的抗氧化、抗炎和免疫调节等多种生物学活性有关。夏树林等^[5]以两栖类蟾蜍作为试验动物,测定了动物离体腓肠肌中乳酸、丙二醛含量,结果表明随着生姜多糖浓度的不断增加,乳酸、丙二醛含量逐渐减少,在其浓度为 2.7 mg/mL 时,抗疲劳作用显著高于药物新斯的明组。此外,生姜多糖对肠道菌群也具有一定的调节作用^[47],如增加有益菌颤螺菌属(*Oscillospira*)、阿德勒克氏菌属(*Adlercreutzia*)、阿克曼菌属(*Akkermansia*)和乳酸

杆菌属(*Lactobacillus*)的丰度,降低有害菌普雷沃氏菌属(*Prevotella*)的丰度等。现有生姜多糖的功能活性及主要作用机制见图 1。

5 影响生姜多糖功能活性的因素

5.1 内部因素

5.1.1 分子量 研究表明,分子量小于 500 kDa 的生姜多糖通常具有较高的生物活性,主要由于分子量较小的多糖更容易透过生物膜而更有效地发挥作用,且不激发免疫应激反应^[15]。如在抗氧化活性方面^[49],低分子量的生姜多糖表现更佳,主要由于在相同的质量基础上,低分子量的多糖含有更多的还原性羟基末端来接受和消除自由基^[50]。而分子量较大的生姜多糖有更好的流变性,以及较好的葡萄糖包封率和 α -葡萄糖苷酶抑制活性^[50]。

5.1.2 化学成分 多糖中的单糖、总糖、糖醛酸等化学成分在不同程度上可影响其功能活性^[50],其中糖醛酸、硫酸盐含量^[50]被认为是影响生姜多糖抗氧化活性的一个重要指标。多糖由于其电子或氢供体能力而发挥自由基清除活性,存在于多糖中的糖醛酸基团可以与异头碳的氢原子相互作用^[51]。因此,糖醛酸含量越高,多糖的抗氧化活性越强^[51]。生姜多糖的 α -葡萄糖苷酶抑制活性,也与电荷供应能力有关,再次说明糖醛酸、硫酸盐等带负电荷的化学物质会影响其功能活性^[50]。Zhang 等^[49]研究表明,抗氧化活性有差异的不同生姜多糖中,葡萄糖是主要糖形式,其次为木糖和阿拉伯糖,以及其他不同种类的单糖,表明单糖组成可能对抗氧化活性产生影响。

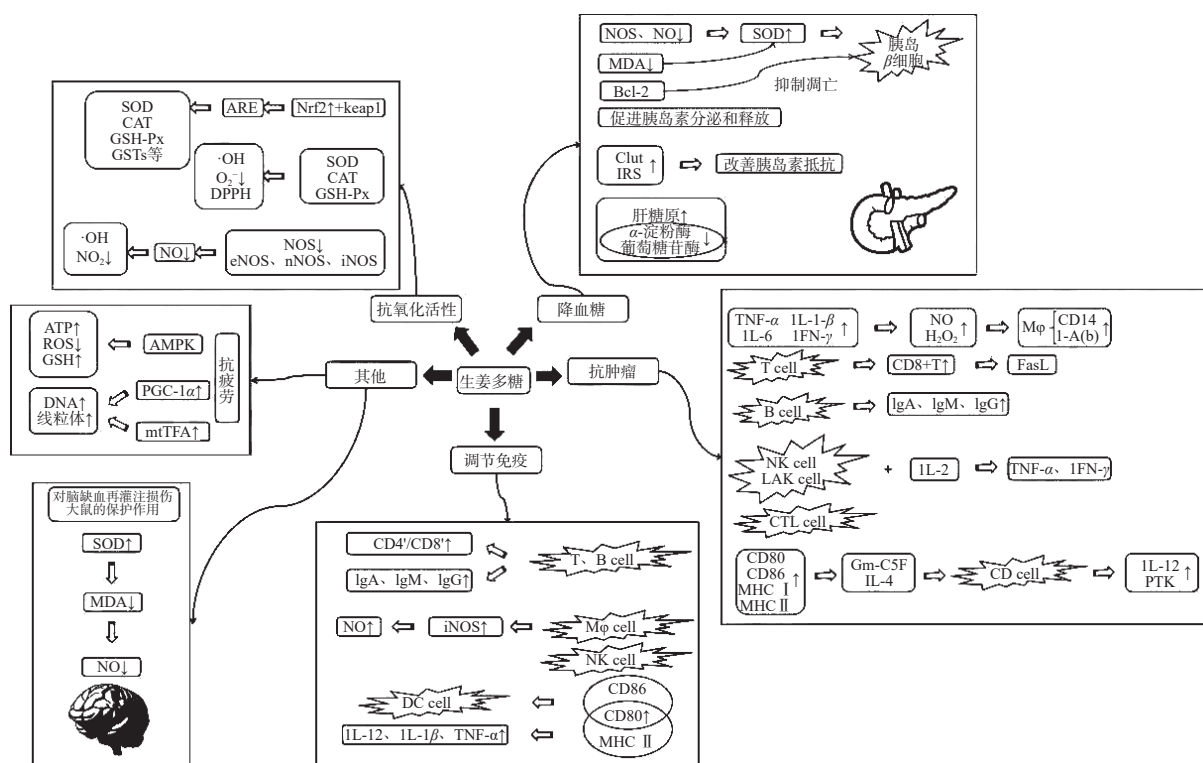


图 1 生姜多糖功能活性的作用机制

Fig.1 Mechanism of action of the functional activity of ginger polysaccharide

5.1.3 高级构型 多糖的空间构型与其生物活性有关。立体结构比平面结构的多糖表现出更优越的生物活性。多糖的螺旋构象也可影响其生物活性,例如抗癌活性和抗炎活性^[15]。Wang等^[7]发现生姜多糖具有三重螺旋结构,并能够发挥抗肿瘤活性。Chen等^[15]研究表明,不同的提取方法获得的生姜多糖物理微观结构特性均有所差异,由此可能赋予多糖不同的物理性质,例如粘度,可以决定它们在化妆品和医学中的应用。另外,生姜多糖具有硫酸基团的特征性吸收峰,凝血酶激活后,可迅速促进血液凝固,而具有硫酸基团的多糖存在则可减缓这一过程的发生,表明其可能具有抗凝血作用^[7]。

5.2 外部因素

生姜多糖提取过程中使用的工作设备和工艺参数不同,导致产出的生姜多糖物理性质、化学结构不同,进而影响其功能活性。Chen等^[15]研究表明 ASE法提取的生姜多糖中性糖和糖醛酸含量最高,而HWE法得到的总糖量最低,表明碱性条件可能会增强糖和糖醛酸的渗出。另外,ASE法提取生姜多糖的蛋白质含量较高^[15],蛋白质与酰胺键产生化学偶联,并且通过碱液将这些键水解,供应电荷关系改变。以上差异均强调了生姜多糖的功能活性可受到提取工艺的显著影响。Chen等^[41]研究表明,与HWE法提取出的生姜多糖相比,UAE法获得的生姜多糖具有更低的相对分子质量和更强的DPPH自由基清除活性。另外,有研究证实三频超声提取的生姜多糖分子量低于两频超声提取,具有更强的抗氧化活性^[50]。

此外,内部因素中,植物多糖的功能活性还受其单糖序列、分子链、电荷供应能力、官能团等影响^[52],但有关生姜多糖的影响因素仍需深入挖掘。因此,在已知的植物多糖功能活性影响因素基础上,可以继续深度验证生姜多糖的影响因素。外部因素中,目前研究仅限于提取工艺对生姜多糖的影响,而其他外部因素与其功能活性的相关性鲜有报道,后续可进一步深入探索。

6 结论与展望

目前,我国对各类多糖的研究已逐步深入,但对于生姜多糖的深入研究较少。现有生姜多糖的提取和纯化方法效率低且复杂,需要联合不同的技术增加提取效率。由于生姜原料和制备方法的不同使得生姜多糖产品的化学结构和生物活性存在差异。因此,建立生姜多糖的标准化制备工艺,以保证产品的一致性和可重复性,对于产品质量控制具有重要意义。同时,生姜多糖的功能活性及其作用机制仍需深入挖掘,可结合临床验证增加其可靠性,提高应用价值。

综上所述,现有研究为生姜多糖在功能性食品、保健品、药物治疗等方面的潜在应用奠定了一定基础。尽管如此,仍需要不断努力建立具有发展潜力的制备方法,提供精确的结构信息,保证生姜多糖的产品质量,进一步阐明构效关系和潜在的分子机制。同

时拓宽生姜多糖的研究方向,扩大其市场应用领域,推进生姜等药食同源资源的产业化发展,助力未来功能食品创新发展。

参考文献

- [1] 吴嘉澜,王笑园,王坤立,等.生姜营养价值及药理作用研究进展[J].食品工业,2019,40(2):237-240. [WU J L, WANG X Y, WANG K L, et al. Research progress on nutritional value and pharmacological action of ginger[J]. Food Industry, 2019, 40(2): 237-240.]
- [2] 杨雪.我国生姜价格波动因素分析及发展建议[J].农业与技术,2022,42(8):163-166. [YANG X. Analysis of price fluctuation factors and development suggestions of ginger in China[J]. Agriculture and Technology, 2022, 42(8): 163-166.]
- [3] 强姝婷,国慧,熊浩荣,等.生姜多类型化学物质与药理作用及药食同源研究进展[J].江苏农业学报,2021,37(1):259-266. [QIANG S T, GUO H, XIONG H R, et al. Research progress of chemical compounds, pharmacological effects and homology of medicine and food in ginger[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(1): 259-266.]
- [4] 马利华,秦卫东.生姜多糖抗氧化性及其组分的研究[J].食品工业科技,2010,31(7):120-124. [MA L H, QIN W D. Study on antioxidant activity and components of ginger polysaccharide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(7): 120-124.]
- [5] 夏树林,吴庆松.生姜多糖的提取及其抗疲劳作用[J].江苏农业科学,2014,42(4):240-242. [XIA S L, WU Q S. Extraction and fatigue resistance of polysaccharide from ginger[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(4): 240-242.]
- [6] QIAN Y, SHI C, CHENG C, et al. Ginger polysaccharide UGP1 suppressed human colon cancer growth via p53, Bax/Bcl-2, caspase-3 pathways and immunomodulation[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(2): 467-476.
- [7] WANG Y, WANG S, SONG R, et al. Ginger polysaccharides induced cell cycle arrest and apoptosis in human hepatocellular carcinoma HepG2 cells[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 123: 81-90.
- [8] 林英,曹松屹,曹冬煦,等.海带多糖提取方法研究进展[J].水产科技情报,2008(4):168-170. [LIN Y, CAO S Y, CAO D X, et al. Research progress on extraction methods of polysaccharides from Kelp[J]. Fisheries Science and Technology Information, 2008(4): 168-170.]
- [9] 秦卫东,马利华,陈学红,等.生姜多糖的提取及脱蛋白研究[J].食品科学,2008(4):218-220. [QIN W D, MA L H, CHEN X H, et al. Study on extraction and deproteinization of polysaccharide from ginger[J]. Food Science, 2008(4): 218-220.]
- [10] 邓胜国,尹爱武,陈铁壁.生姜多糖的提取工艺及其抗氧化活性研究[J].湖南科技学院学报,2013,34(4):66-70,73. [DENG S G, YIN A W, CHEN T B. Extraction technology and antioxidant activity of ginger polysaccharide[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology, 2013, 34(4): 66-70,73.]
- [11] 王晓梅,张忠山,郑卫红,等.生姜多糖的提取纯化工艺及鉴定[J].中国调味品,2011,36(5):44-46,51. [WANG X M, ZHANG Z S, ZHENG W H, et al. Extraction, purification and identification of polysaccharide from ginger[J]. Chinese Condiments, 2011, 36(5): 44-46,51.]
- [12] 孔得福,吕凤娇.响应面法优化生姜多糖的提取工艺研究[J].海峡药学,2016,28(2):32-36. [KONG D F, LÜ F J. Optimization of extraction process of polysaccharide from ginger by response surface method[J]. Straits Pharmacy, 2016, 28(2): 32-36.]

- [13] 赵文竹,李思慧,宋宝雯,等.生姜多糖类物质的提取及抗氧化活性研究[J].食品安全质量检测学报,2017,8(4):1357-1362. [ZHAO W Z, LI S H, SONG B W, et al. Extraction and antioxidant activity of polysaccharide from ginger[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2017, 8(4): 1357-1362.]
- [14] 蒋文明,李爱军,汪辉,等.微波辅助碱液提取仙草多糖[J].食品科学,2011,32(4):11-14. [JIANG W M, LI A J, WANG H, et al. Microwave-assisted lye extraction of polysaccharide from *Herba sinensis*[J]. Food Science, 2011, 32(4): 11-14.]
- [15] CHEN X, CHEN G, WANG Z, et al. A comparison of a polysaccharide extracted from ginger (*Zingiber officinale*) stems and leaves using different methods: Preparation, structure characteristics, and biological activities[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 151: 635-649.
- [16] 李强林,肖秀婵,高进长,等.中草药类天然染料的提取及其在真丝绸染色中的研究进展[J].纺织科学与工程学报,2020,37(4):59-65. [LI Q L, XIAO X C, GAO J C, et al. Extraction of natural dyes from Chinese Herbal medicine and research progress in dyeing silk[J]. *Journal of Textile Science and Engineering*, 2020, 37(4): 59-65.]
- [17] 李核,李攻科,张展霞.微波辅助萃取技术的进展[J].分析化学,2003(10):1261-1268. [LI H, LI G K, ZHANG Z X. Advances in microwave assisted extraction[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2003(10): 1261-1268.]
- [18] 韩冬屏,吴振,詹永,等.不同提取方式对生姜多糖化学组成及其抗氧化活性的影响[J].中国调味品,2014,39(8):12-15. [HAN D P, WU Z, ZHAN Y, et al. Effects of different extraction methods on the chemical composition and antioxidant activity of ginger polysaccharide[J]. *China Condiments*, 2014, 39(8): 12-15.]
- [19] 王颖,曾霞,周天,等.响应面法优化微波提取生姜多糖的工艺[J].食品研究与开发,2015,36(13):58-61. [WANG Y, ZENG X, ZHOU T, et al. Optimization of microwave extraction of ginger polysaccharide by response surface method[J]. *Food Research and Development*, 2015, 36(13): 58-61.]
- [20] 尹艳,高文宏,于淑娟.多糖提取技术的研究进展[J].食品工业科技,2007(2):248-250. [YIN Y, GAO W H, YU S J. Research progress of polysaccharide extraction technology[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2007(2): 248-250.]
- [21] 赵二劳,王明华,高子怡,等.玉米皮活性成分提取工艺研究进展[J].食品与机械,2017,33(12):203-207. [ZHAO E L, WANG M H, GAO Z Y, et al. Research progress on extraction technology of active ingredients from corn husk[J]. *Food & Machinery*, 2017, 33(12): 203-207.]
- [22] 李守鹏.生姜中抗氧化成分的提取及其抗痴呆效果的研究[D].泰安:山东农业大学,2015. [LI S P. Extraction of antioxidant components from ginger and study on its anti-dementia effect[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2015.]
- [23] 孟微微.超声微波协同萃取技术在植物挥发性成分中的应用研究[D].杭州:浙江工业大学,2013. [MENG W W. Application of ultrasonic microwave synergistic extraction technology in plant volatile components[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.]
- [24] 刘全德,唐仕荣,王卫东,等.响应曲面法优化超声波-微波协同萃取生姜多糖工艺[J].食品科学,2010,31(18):124-128. [LIU Q D, TANG S R, WANG W D, et al. Optimization of ultrasonic and microwave synergistic extraction of polysaccharide from ginger by response surface method[J]. *Food Science*, 2010, 31(18): 124-128.]
- [25] 李立恒,刘明新,胡超,等.超声波辅助醇碱提取法提取生姜多糖工艺研究[J].现代食品,2020(6):163-165,169. [LI L H, LIU M X, HU C, et al. Study on extraction technology of polysaccharide from ginger by ultrasonic assisted alkaloid extraction[J]. *Modern Food*, 2020(6): 163-165,169.]
- [26] 杨晓杰,王世佳,李旭业.温度对生姜多糖提取率及抗氧化活性的影响[J].中国调味品,2018,43(3):6-8. [YANG X J, WANG S J, LI X Y. Effects of temperature on extraction yield and antioxidant activity of ginger polysaccharide[J]. *Chinese Condiments*, 2018, 43(3): 6-8.]
- [27] 冯鑫,夏宇,陈贵堂,等.生姜皮多糖的分离纯化及其结构组成分析[J].食品科学,2017,38(6):185-190. [FENG X, XIA Y, CHEN G T, et al. Isolation, purification and structure analysis of polysaccharide from ginger peel[J]. *Food Science*, 2017, 38(6): 185-190.]
- [28] GHARIBZAHEDI S M T, MARTI-QUIJAL F J, BARBA F J, et al. Current emerging trends in antitumor activities of polysaccharides extracted by microwave- and ultrasound-assisted methods[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 202: 494-507.
- [29] 林敏,安红钢,吴冬青.响应面分析法优化超声提取生姜多糖的工艺[J].食品研究与开发,2013,34(10):42-44. [LIN M, AN H G, WU D Q. Optimization of ultrasonic extraction process of ginger polysaccharide by response surface analysis[J]. *Food Research and Development*, 2013, 34(10): 42-44.]
- [30] 宋琳琳,沙靖全,张磊,等.生姜粗多糖的提取及对脑缺血再灌注损伤大鼠的保护作用[J].辽宁中医杂志,2015,42(12):2433-2435. [SONG L L, SHA J Q, ZHANG L, et al. Extraction of crude polysaccharide from ginger and its protective effect on cerebral ischemia reperfusion injury in rats[J]. *Liaoning Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2015, 42(12): 2433-2435.]
- [31] LIAO D W, CHENG C, LIU J P, et al. Characterization and antitumor activities of polysaccharides obtained from ginger (*Zingiber officinale*) by different extraction methods[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 152: 894-903.
- [32] 马利华,秦卫东,贺菊萍,等.复合酶法提取生姜多糖[J].食品科学,2008(8):369-371. [MA L H, QIN W D, HE J P, et al. Extraction of polysaccharide from ginger by complex enzyme[J]. *Food Science*, 2008(8): 369-371.]
- [33] 李昕.超声微波协同萃取的应用研究[D].杭州:浙江工业大学,2015. [LI X. Application of ultrasonic microwave collaborative extraction[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015.]
- [34] 陆兔林,吴杨,季德,等.五味子多糖提取分离和药理作用研究进展[J].中国中药杂志,2014,39(4):751-754. [LU T L, WU Y, JI D, et al. Research progress on extraction, isolation and pharmacological effects of polysaccharides from *Schisandra chinensis*[J]. *Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2014, 39(4): 751-754.]
- [35] 韦媛媛,刘阳,龚帅,等.积雪草多糖的脱脂工艺研究[J].广西科技大学学报,2014,25(2):90-94. [WEI Y Y, LIU Y, GONG S, et al. Study on degreasing technology of *Centella asiatica* polysaccharide[J]. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*, 2014, 25(2): 90-94.]
- [36] 范媛媛,左绍远.植物多糖的分离纯化及抗肿瘤作用研究进展[J].安徽农业科学,2019,47(9):23-25. [FAN Y Y, ZUO S Y. Research progress on isolation, purification and antitumor effects of plant polysaccharides[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(9): 23-25.]
- [37] 吕磊.大枣多糖的提取分离与脱色研究[D].西安:西北大

- 学, 2003. [LÜ L. Study on extraction, separation and decolorization of polysaccharides from jujube[D]. Xi'an: Northwestern University, 2003.]
- [38] DONG C X, ZHANG L J, XU R, et al. Structural characterization and immunostimulating activity of a levan-type fructan from *Curcuma kwangsiensis*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 77: 99–104.
- [39] 李洙锐, 宋宝安, 胡德禹. 多糖分离纯化方法的研究进展[C]//中国化工学会农药专业委员会第十八届年会. 中国南宁: 2018. [LI Z R, SONG B A, HU D Y. Research progress of polysaccharides separation and purification methods[C]//The 18th Annual Meeting of Pesticide Committee of Chemical Society of China, Nanning, China; 2018.]
- [40] 陈涓慧. 生姜茎叶多糖的结构解析、体外消化降解和保肝活性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022. [CHEN X H. Study on structure analysis, *in vitro* digestion and liver protection activity of polysaccharide from stem and leaf of Ginger[D]. Chongqing: Southwest University, 2022.]
- [41] CHEN G T, YUAN B, WANG H X, et al. Characterization and antioxidant activity of polysaccharides obtained from ginger pomace using two different extraction processes[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 139: 801–809.
- [42] 刘志芳, 赵前程, 刘志东, 等. 贝类多糖研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(9): 299–306. [LIU Z F, ZHAO Q C, LIU Z D, et al. Research progress of polysaccharides from shellfish[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2021, 47(9): 299–306.]
- [43] 夏宇. 生姜皮多糖的分离纯化、结构分析及其抗氧化活性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016. [XIA Y. Isolation, purification, structure analysis and antioxidant activity of polysaccharide from Ginger peel[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.]
- [44] 聂伟, 张永祥. 多糖的免疫调节作用及其作用机制研究进展[J]. 中国药理学通报, 1999(6): 8–11. [NIE W, ZHANG Y X. Research progress on immunomodulatory effects of polysaccharide and its mechanism[J]. *Chinese Journal of Pharmacology*, 1999(6): 8–11.]
- [45] YANG X, WEI S, LU X, et al. A neutral polysaccharide with a triple helix structure from ginger: Characterization and immunomodulatory activity[J]. *Food Chemistry*, 2021, 350: 129261.
- [46] HAO W, CHEN Z, YUAN Q, et al. Ginger polysaccharides relieve ulcerative colitis via maintaining intestinal barrier integrity and gut microbiota modulation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 219: 730–739.
- [47] 汪妮, 陈梦霞, 孟凡强, 等. 生姜多糖的提取及其对糖尿病小鼠肠道菌群的调节作用[J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 278–286. [WANG N, CHEN M X, MENG F Q, et al. Extraction of ginger polysaccharide and its regulation effect on intestinal flora of diabetic mice[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(4): 278–286.]
- [48] BERA K, NOSALOVA G, SIVOVA V, et al. Structural elements and cough suppressing activity of polysaccharides from *Zingiber officinale* Rhizome[J]. *Phytotherapy Research*, 2016, 30(1): 105–111.
- [49] ZHANG Z, WANG X, ZHANG J, et al. Potential antioxidant activities *in vitro* of polysaccharides extracted from ginger (*Zingiber officinale*) [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 86(2): 448–452.
- [50] CHEN X, WANG Z, KAN J. Polysaccharides from ginger stems and leaves: Effects of dual and triple frequency ultrasound assisted extraction on structural characteristics and biological activities[J]. *Food Bioscience*, 2021, 42: 101166.
- [51] 康文艺, 蒙丽君, 王莉, 等. 花中多糖化学组成与生物活性研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(1): 1–13. [KANG W Y, MENG L J, WANG L, et al. Research progress on chemical composition and bioactivity of polysaccharides in flowers[J]. *Food Science*, 2022, 43(1): 1–13.]
- [52] 张恒. 应用生物化学[M]. 南京: 南京大学出版社, 2017. [ZHANG H. *Applied biochemistry*[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2017.]