

杨莉, 陈文宁, 郑娟霞, 等. 海藻多糖的提取、分离纯化及其在食品工业的应用 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 365–372. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2019110241

YANG Li, CHEN Wenning, ZHENG Juanxia, et al. Extraction, Isolation and Purification of Seaweed Polysaccharide and Its Application in Food Industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(9): 365–372. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2019110241

· 专题综述 ·

海藻多糖的提取、分离纯化及其在食品工业的应用

杨莉, 陈文宁, 郑娟霞, 月金玲, 王铮桦*

(江西科技师范大学生命科学学院, 江西南昌 330013)

摘要: 海藻多糖具有良好的保湿性、凝胶性、成膜性、增稠性和稳定性等物化性质, 同时具有抗氧化、抑菌、免疫调节、抗肿瘤、抗炎、抗衰老和降血糖血脂等生物活性, 在食品工业有着广泛应用。本文综述了海藻多糖的提取、分离、纯化方法, 及其在饮品、食品包装、肉制品、糖果和烘焙食品等工业上的应用, 以期对食品生产加工有一定作用。

关键词: 海藻多糖, 生物活性, 食品工业

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)09-0365-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2019110241

Extraction, Isolation and Purification of Seaweed Polysaccharide and Its Application in Food Industry

YANG Li, CHEN Wenning, ZHENG Juanxia, YUE Jinling, WANG Chengwei*

(College of Life Science, Jiangxi Normal University of Science and Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Seaweed polysaccharides have good physicochemical properties, such as moisture retention, gelation, film formation, thickening and stability, as well as biological activities, such as antioxidant activity, bacteriostasis, immune regulation, anti-tumor, anti-inflammatory, anti-aging, hypoglycemic and lipid lowering, which are widely used in the food industry. In this paper, the extraction, separation and purification of seaweed polysaccharides, as well as their applications in drinks, food packaging, meat products, confectionery and bakery products are reviewed, so as to make some contributions to food production and processing.

Key words: seaweed polysaccharides; biological activity; food industry

海藻(Algae)是海洋中藻类植物的总称, 其种类繁多, 大约超过 3 万种, 主要分为蓝藻、绿藻、红藻和褐藻四种^[1]。海藻内含有大量多糖、膳食纤维、蛋白质、微量元素和矿物质等营养物质, 食用价值很高。其中多糖是海藻的主要组成物质, 最高可占海藻干重的 76%^[2]。海藻多糖有着良好的生物活性, 且具有来源广泛、无残留和无生物耐受性等优点^[3], 已成为食品科学领域的研究热点, 尤其在绿色食品、功能食品和保健食品方面的应用受到广泛关注^[4-5]。为了更好的开发利用海藻多糖, 本文对海藻多糖的提取纯化以

及在食品工业上的价值做一简要概述, 以期对海藻多糖的合理应用提供一些参考。

1 海藻多糖概况

1.1 结构

海藻多糖是一类多组分混合物, 是由不同的单糖基通过糖苷键连接而成的高分子碳水化合物, 其分子量大、化学结构复杂。根据其来源大致可分为四种: 褐藻多糖、红藻多糖、绿藻多糖和蓝藻多糖, 它的种类不同, 结构相差较大^[6]。不同海藻多糖及其主要

收稿日期: 2019-11-26

基金项目: 江西省教育厅科研项目 (GJJ190595); 江西科技师范大学大学生科研项目。

作者简介: 杨莉 (2000-), 女, 本科, 研究方向: 食品科学, E-mail: 1909658078@qq.com。

* 通信作者: 王铮桦 (1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 动物营养, E-mail: 616051233@qq.com。

成分如表 1 所示。

大量研究发现多糖的活性与其化学结构密切相关,而多糖的结构、性质主要由组成多糖的单糖决定^[7-8]。目前对海藻多糖的化学结构及生物活性的研究多集中于对某种多糖的活性及其糖单元的单一研究。如 Byankina 等^[9]从红藻 *Tichocarpus* 中分离纯化获得 3 种由半乳糖和葡萄糖构成,其分子组成摩尔比分别为 25.7:1.9、19.2:23.0 和 30.4:4.9 的多糖组分 HT、AE 和 AM,其分子量分别为 376.0、468.0 和 5.8 kDa。

1.2 提取

研究发现,人体消化系统缺少分解海藻组织结构的酶,因此,当直接食用海藻时,人体所能摄取的营养物质和多糖极少。将海藻多糖提取利用,更利于人体吸收^[10-11]。海藻多糖的提取方法多种多样,目前,国内外常用的提取方法有溶剂萃取法、酶萃取法和辅助萃取法。近年来,出现了超滤法、合成萃取法、反复冻融法、高压脉冲电场萃取法等新的提取方法^[12],但由于对技术要求较高,仍没有得到广泛使用。几种海藻多糖常用提取方法的原理和特点如表 2 所示。

传统水提法成本低、易操作,适用于大规模工业

生产,但此法耗时长、得率低,将来可能会被取代;酸、碱提取法可得到酸、碱溶性等不同种类多糖,但由于其对多糖的结构和功能影响较大,常用于实验室研究;酶解提取多糖条件温和,得率和纯度高,是目前动植物活性成分首选之一,但其提取成本高,不适用于工业生产;微波提取、超声波提取等物理提取法都能快速得到多糖,但超声、微波等设备限制了物理提取法在多糖提取的发展;多种方法复合提取多糖可通过工艺优化达到最佳提取效果,有较好的发展前景。

1.3 分离

海藻中提取出的海藻多糖中含有蛋白质、色素和小分子物质等杂质,对多糖提取率及生物活性均有很大影响,对杂质进行分离去除十分重要。除蛋白质的方法多种多样,主要有 Sevag 法、三氟三氯乙烷法、三氯乙酸法、盐酸法、氢氧化钠法、鞣酸法、乙酸铅法、盐析法、反复冻融法、阴离子交换树脂法、酶解法和酿酒酵母发酵法等,具体分为化学法、物理法和生物法三大类。除色素的方法主要有吸附法、过氧化氢氧化法、大孔树脂吸附法和金属络合物法等。除小分子杂质相对较简单,主要有透析法和超滤法两种。杂质分离方法原理及其优缺点如表 3 所示。

Sevag 法、三氟三氯乙烷法和三氯乙酸法作为

表 1 不同海藻多糖及其主要成分

Table 1 Main components of polysaccharides from different species of seaweed

分类	主要成分	结构组成	分子式
褐藻多糖	褐藻胶(海藻酸钠)	β -D-甘露糖醛酸与 α -L-古罗糖醛酸两种单体通过1,4-糖苷键相连接	$C_6H_7NaO_6$
	褐藻淀粉(海带淀粉)	β -D-吡喃葡萄糖多聚物组成,由1,3糖苷键连接	$(C_6H_{10}O_7S)_n$
	岩藻聚糖(褐藻糖胶)	硫酸化的 α -L-吡喃葡萄糖残基构成	$C_{18}H_{32}O_{16}$
红藻多糖	卡拉胶	半乳糖和3,6-脱水半乳糖通过 α -1,3糖苷键和 β -1,4糖苷键交替连接而成	$(C_{12}H_{18}O_9)_n$
	琼脂糖	琼脂糖由D-半乳糖和3,6-脱水-L-半乳糖组成的直链,其直链通过氢键相互作用形成双螺旋结构	$C_{10}H_{15}N_3O_3$
绿藻多糖	硫酸杂多糖	木糖-阿拉伯糖-半乳糖聚合物	$(C_{12}H_{16}O_{14}S)_n$
		葡萄糖醛酸-木糖-鼠李糖聚合物	$(C_{12}H_{18}O_{15}S_2)_n$
蓝藻多糖	酸性杂多糖	葡萄糖、半乳糖和甘露糖	$C_6H_{12}O_6$
		鼠李糖和盐藻糖	$C_6H_{15}O_5$

表 2 海藻多糖提取的常见方法、原理及其优缺点

Table 2 Common methods, principles, advantages and disadvantages of seaweed polysaccharide extraction

提取方法	原理	优点	缺点
水提法	海藻多糖溶于水且相对稳定,高温作用使细胞发生质壁分离,水渗入细胞溶解多糖并扩散于外部	经济便捷,操作简单,较好保存分子结构	耗时长,需高温,得率低
酸提法	细胞在酶的作用下吸水膨胀破裂,多糖流出	得率高,耗时短	会破坏多糖结构中糖苷键,使多糖降解为低分子量多糖片段
碱提法	碱液可使多糖转化为可溶于水的钙盐溶解出来	得率高,耗时短	杂质较多,多糖可能降解,活性损失较大
醇提法	醇通过降低水溶液中介电常数使多糖脱水产生沉淀,离心分离	耗时短,活性损失小	成本高,操作复杂,得率低
微波辅助法	细胞通过微波吸收能量使海藻极性分子产生摩擦,细胞壁破裂,内容物流出	操作简单,多糖得率较高,时间短,节约资源,无污染	耗电量较大,易破坏多糖活性,不适用于大规模提取 ^[13]
超声波提取法	超声波高频振动产生空化作用、机械效应及热效应作用于细胞壁,形成高温高压从而使细胞壁破裂 ^[14]	多糖活性损失小,节能,时间短,得率高	条件苛刻,可能导致多糖结构发生变化 ^[15]
酶解法	酶通过改变细胞壁的通透性,使其软化、膨胀、破裂,从而使内容物流出	反应条件温和,多糖活性高,时间短,环保无污染	对技术、设备等条件要求高只能用于小规模生产
复合提取法	结合多种提取方法提取多糖	加速多糖溶出,提取效果更好 ^[16]	操作较复杂

表 3 多糖除杂质的方法、原理及其优缺点
Table 3 Methods, principles, advantages and disadvantages of polysaccharide in removing impurities

杂质种类	方法	原理	优点	缺点
蛋白质	Sevag法	将正丁醇、氯仿混合溶液与粗多糖溶液混合振荡使分层 ^[17]	条件温和, 提取效果好	操作繁琐, 效率低, 重复使用有毒物质氯仿污染环境, 多糖损失大 ^[18]
	三氟三氯乙烷法	三氟三氯乙烷使蛋白质变性产生沉淀, 离心去除沉淀	效率高, 蛋白质含量高	溶剂易挥发, 损耗大, 不适合大规模生产
	三氯乙酸法	有机酸可使蛋白质变性形成胶状沉淀, 离心去除沉淀	现象明显, 操作简单	可能破坏多糖活性, 得率低, 脱蛋白后多糖的复溶性明显减弱 ^[19]
	盐酸法	酸性蛋白在强酸作用下沉淀	蛋白质去除效果较好	多糖可能水解, 实验条件需严格控制, 多糖损失率高
	氢氧化钠法	强碱会裂解多糖与蛋白质之间的连接键, 且碱性蛋白在碱液中溶解度低可析出	多糖得率高, 蛋白去除效果好	实验条件需严格控制, 否则破坏多糖活性
	鞣酸法	碱在酸性条件下与蛋白质结合, 生成蛋白质-盐复合物沉淀	条件温和, 操作简单	鞣酸中含有色素, 导致多糖被污染
	乙酸铅法	重金属盐类与蛋白质在碱性溶液中结合生成不溶性重金属-蛋白质复合物	操作简单, 现象明显	容易引起重金属污染, 破坏多糖结构
	盐析法	无机盐破坏蛋白质的水化膜, 同时通过中和蛋白质的电荷破坏双电层结构, 分子疏水性增加, 从而使蛋白质析出	操作简单, 的率高, 多糖损失较小	可能与多糖形成共沉淀带来新杂质
	反复冻融法	对粗多糖进行反复冰冻、解冻, 细胞内的冰晶通过机械作用使细胞破裂多糖溶出 ^[20]	操作简单、环保, 有利于保护多糖结构	除蛋白效果较差, 多次冻融耗时间
	阴离子交换树脂法	可调节溶液pH使蛋白质形成阴离子吸附阴离子交换树脂	去除效果好, 条件温和, 成本低, 可循环利用, 操作简便 ^[21]	离子交换树脂难制备
生物法	酿酒酵母发酵法	酿酒酵母在发酵后产生蛋白酶, 催化水解多糖中的蛋白	环保, 节约资源, 条件温和	蛋白酶影响多糖纯度
	酶解法	利用酶的专一性对蛋白质进行降解	条件温和, 操作简单, 多糖损失少	酶也是蛋白质, 可能增加多糖内蛋白质含量
	活性炭吸附法	通过活性炭的吸附能力对粗多糖中色素进行吸附	操作简单, 成本低	活性炭会吸附大量多糖, 导致多糖得率低, 同时污染多糖
	过氧化氢氧化法	一定浓度过氧化氢溶液可对色素进行氧化分解	脱色效果较好	实验条件需严格控制, 否则会降解多糖活性
色素	大孔树脂吸附法	大孔树脂是一种分离材料, 可用一定溶剂洗脱大孔树脂上的不同分子量的多糖溶液	运行成本低, 去除效果好	适合分离小分子物质, 分离多糖易使多糖活性降低
	乙醇洗涤法	多糖分子经乙醇洗涤后产生沉淀	操作简单	适用于色素含量少的多糖
小分子杂质	透析法	利用透析袋分子截留作用截留小分子杂质在透析袋内	多糖损失率低, 操作简单易行	过滤效果较差
	超滤法	超滤膜截取小分子杂质, 膜两侧压力差使其分离	效率高, 产量大	成本高, 时间长

3 种传统的脱蛋白法, 具有成本低、效果好的优点, 是脱蛋白的常用方法, 但其经过多次操作, 可能破坏多糖结构、污染环境, 不适用于工业生产; 盐酸和氢氧化钠法脱蛋白则利用强酸强碱, 易导致多糖水解, 且需严格控制反应条件。鞣酸法、乙酸铅法和盐析法等利用蛋白沉淀脱除蛋白容易带来新杂质, 污染多糖; 化学法脱蛋白在应用上均存在一定限制, 而反复冻融法和阴离子交换树脂法等物理法条件温和、成本低, 是去除蛋白的较好方法; 酶解法和酿酒酵母发酵法以其安全高效的优点受到研究学者的青睐, 但其成本较高, 不适于工业生产。脱色素主要有 4 种方法, 目前应用不同树脂吸附的技术使用范围最广, 可反复再生使用。

1.4 纯化

分离除杂后的多糖是分子量不同的高分子化合物, 需对其进行纯化得到单一的多糖物质。常见的纯化方法有分级沉淀法、柱层析法、超滤法、季铵盐沉

淀法、盐析法、金属络合物法和电泳法等。多糖主要纯化方法特点如表 4 所示。

分级沉淀法操作简单成本低, 可用于大规模工业生产, 但可能破坏多糖活性; 季铵盐沉淀法是较为经典的纯化法, 至今仍被广泛使用; 柱层析法是现阶段多糖分离纯化中应用较多也是最有效的方法; 超滤法是近年来较常用的高效分离技术, 设备简单、产量大; 盐析法和金属络合物法操作简单, 但纯化效果一般, 应用范围不大; 电泳法分离量小、操作复杂适用于研究学者进行微量分析。

2 海藻多糖的生物活性

2.1 抗氧化性

海藻多糖能有效抑制活性氧自由基的形成, 同时通过提高超氧化物歧化酶的活性来降低脂质过氧化物的含量^[24]。海藻多糖作为天然无污染抗氧化物质常被用作自由基抑制剂或清除剂和主要抗氧化剂, 具有很强的应用前景^[25]。Mohsind 等^[26]研究了硫酸

表 4 多糖纯化方法、原理及其优缺点

Table 4 Purification methods, principles, advantages and disadvantages of polysaccharides

方法	原理	优点	缺点
分级纯化法	分子量不同的多糖在有机溶剂中溶解度不同, 改变有机溶剂的浓度从而使多糖分级沉淀 ^[22]	操作方便, 可大量处理	可能改变多糖结构和活性
离子交换柱层析法	离子交换层内离子可与带电的溶质分子交换离子, 利用电荷间的相互作用和电荷间的差异进行分离	分辨率高, 可大量处理, 多糖纯度高, 操作简单	流速慢, 稳定性差, 使用寿命短
凝胶柱层析法	凝胶柱可通过带孔隙的凝胶颗粒分离不同分子量的多糖, 使不同分子量多糖以不同速率流出 ^[23]	多糖纯度高	流速慢
纤维素柱层析法	多糖全部沉淀于惰性纤维素, 依次用不同浓度乙醇溶液析出	流出液的纯度高	流速慢, 纯化周期长
亲和柱层析法	和配基具有亲和力的多糖分子结合而被吸附, 其他多糖则流出柱外	效率高, 操作简单, 分离浓度较小的多糖溶液时一次可浓缩几百次	很难找到理想配基
超滤法	超滤膜可截取不同分子量的多糖分子, 膜两侧压力差使不同分子量多糖分离	多糖活性损失小, 效率高, 产量大, 设备简单	超滤速度很慢, 周期很长, 多糖易变质
季铵盐沉淀法	季铵盐可与酸性多糖形成在低浓度水溶液不溶解的络合物, 沉淀析出	沉淀效果好	pH 应小于 9, 否则中性多糖也能沉淀出来
盐析法	多糖在不同浓度的盐溶液中溶解度不同, 可用不同浓度盐溶液沉淀多糖	成本低, 操作方便	效率低, 可能形成共沉淀
金属络合物法	部分多糖可与金属离子发生反应产生沉淀	可同时除多糖中蛋白质和色素	易引起重金属污染, 多糖活性造成影响
电泳法	带有不同电荷的多糖在电场中迁移速率不同, 从而分离多糖	分离效果好可进行多个的样品微量分析	时间较长, 分离量小

含量对褐藻多糖的抗氧化性的影响, 对 4 种硫酸含量不同的多糖片段进行自由基清除实验, 结果表明, 自由基清除的能力与硫酸根含量成正相关。Lu 等^[27]对海带多糖的氧自由基吸收能力(ORAC)、2, 2-联氨-二铵盐(ABTS)自由基清除能力和还原能力进行分析, 发现海带多糖具有显著的抗氧化能力。在实际应用中, 海藻多糖的抗氧化活性对延缓果蔬被采摘后的衰老变色有一定抑制作用, 还可以降低过氧化脂质含量, 减少肉类、家禽和鱼虾类食品的脂肪氧化。

2.2 抑菌性

抗生素被广泛应用于治疗微生物细菌感染, 然而细菌的耐药性问题变得越发严重, 开发天然抗菌药物十分必要。研究表明海藻多糖具有抑菌活性, 可能是海藻在长期的进化过程中对各种微生物产生了具有抗菌活性的萜烯、含硫杂环化合物和酚类化合物等物质, 抵抗外来生物的入侵^[28]。Liu 等^[29]研究发现解聚后的岩藻多糖可破坏细胞膜以及细胞膜上的膜蛋白, 从而改变细胞膜的流动性或激活自噬细胞, 能有效抑制大肠杆菌和金黄色葡萄球菌。Seo 等^[30]研究发现海藻酸钠与纳米银溶液混合制备复合海绵抑菌抗炎性能良好, 能有效抑制金黄色葡萄球菌和肺炎克雷伯菌, 此外, 还可起到降低杀菌温度、缩短食品的杀菌时间的作用。

2.3 免疫调节及抗肿瘤性

免疫调节可保护人体不受外来病原体侵害, 预防疾病。海藻多糖可通过对免疫器官和免疫细胞的调节、刺激巨噬细胞分泌免疫因子、促进淋巴细胞增殖分化等功能调节机体免疫^[31]。常静瑶等^[32]研究发现螺旋藻多糖能调节小鼠细胞免疫作用, 其机制可能是通过调节肠黏膜系统刺激免疫细胞产生免疫因子, 从而调节小鼠免疫作用。海藻多糖的抗肿瘤作用与

免疫调节密切相关。海藻多糖通过调节免疫系统抑制肿瘤细胞增长, 同时还可通过结合细胞外基质减少肿瘤细胞的植入^[2]。谢好贵等^[33]研究发现, 3 种红藻多糖以一定比例配比时对宫颈癌细胞抑制作用显著, 添加 1000 $\mu\text{g}/\text{mg}$ 复合多糖抑制率可达 76.9%。

2.4 抗炎性

炎症是机体抵抗外来病原体的应激反应, 是人体的自我修复和保护, 然而, 长期炎症会引起机体产生疾病, 损伤人体^[34]。研究表明, 海藻多糖通过能抑制一氧化氮(NO)和前列腺素 E2(PGE2)的产生、恢复细胞因子的平衡、调节炎症诱导蛋白通道等抑制炎症^[35]。Jiang 等^[36]研究发现条斑紫菜多糖能有效抑制小鼠细胞释放一系列的炎症因子, 条斑紫菜多糖通过抑制巨噬细胞(RAW264.7)细胞核转录因子 k 基因结合核因子(NF-KB)活化从而抑制炎症。Nicolau 等^[37]对江蓠硫酸多糖的抗炎和镇痛进行研究, 结果显示, 江蓠硫酸多糖可通过减少中性粒细胞迁移以及降低细胞因子浓度来降低小鼠的炎症反应和痛觉过敏。

2.5 抗病毒性

病毒是一种非细胞生命, 结构简单, 通过利用宿主细胞的营养物质大量繁殖, 危害人体健康。已有研究发现, 海藻多糖可通过硫酸基团干扰病毒对宿主细胞的黏附来达到抗病毒作用, 其抗病毒能力主要取决于硫酸基团的含量。Hayashi 等^[38]研究发现岩藻多糖有着抗单纯疱疹(HSV)病毒的作用, 其机理可能是通过直接抑制病毒复制, 增强免疫防御功能来抵御 HSV 病毒的感染。Ermerk 等^[39]研究表明卡拉胶多糖在人体内外均能抑制革兰氏阳性菌产生的毒素, 防止感染。

2.6 抗衰老

过多的自由基产生脂质过氧化物和细胞免疫功能低下是导致衰老的重要原因。脂质过氧化物(LPO)会分解生成丙二醛(MDA),MDA 是多种生化毒性反应的催化剂,使人体生成老年斑、脂褐素等,造成机体衰老。胡晨熙^[40]通过对羊栖菜多糖(SFPS)的抗氧化性、其对果蝇的寿命的影响和对小鼠肠道菌落的作用进行研究,结果表明 SFPS 具有良好的抗氧化性,能明显延长果蝇寿命同时可有效调节小鼠肠道菌落,可能是 SFPS 通过抑制自由基产生和调节肠道菌群结构来延缓衰老。魏丹^[41]研究了胶球藻多糖(CGD)对不同饮食条件下小鼠的抗衰老作用,结果表明,CGD 对不同饮食条件下老龄小鼠的状态和代谢水平有显著的调节效果。

2.7 降血糖、血脂性

高血压、肥胖症和糖尿病及其并发症的发病率的快速增长对人类健康产生了重要威胁,开发天然、无毒副作用药品对治疗、预防高血压、血脂具有重要意义。海藻多糖具有很强的吸水性,可使肠道中的粪便扩张发酵,加快其运转速度,减少脂质物质和胆固醇被小肠吸收,降低血脂。有大量研究发现海藻酸盐可以减少食物在肠道中的通过时间,从而减少脂肪、糖和胆盐的吸收,降低血清胆固醇、血甘油三酯和血糖^[42]。Jin 等^[43]研究发现条斑紫菜能有效降低高血脂小鼠的甘油三酯和总胆固醇水平,从而降低血脂。Yang 等^[44]研究发现,石花菜多糖具有良好的降血糖、血脂功能,可能与其含有水溶性纤维有关。

3 海藻多糖在食品工业的应用

3.1 在饮品中的应用

3.1.1 饮料制作 海藻多糖具有降血糖、降血脂、调节免疫、抗肿瘤、抗突变、抗病毒等多种生理活性,且海藻多糖中含有藻聚糖、海藻酸等物质,可覆盖胃黏膜,降低茶中生物碱对胃的侵害^[45]。因此,将其添加到饮料配方中,可起到良好的保健作用。陈达妙等^[46]以浒苔多糖为主要原料,以山楂、枸杞等辅料为辅,开发出能量饮料,具有降血糖、降血脂的功效。吴晓青等^[47]将复合酶法提取的海带多糖浓缩液与铁观音茶粉和甘草混合,并确定了最佳海藻茶配方,采用喷雾揉法制成茶包。

3.1.2 澄清剂 澄清处理是酒液生产过程中的重要部分,主要除去酒中沉淀的不稳定性胶体杂质,保证酒的品质^[48]。海藻多糖作为天然高分子化合物,且具有亲水性、高黏性、絮凝性等特点是一种很好的澄清剂。孙永林等^[49]以自制香菇葡萄酒为原料,研究不同植物型澄清剂的澄清效果,结果显示海藻酸钠可作为香菇葡萄酒的澄清剂。黄达明等^[50]研究发现海藻酸钠可稳定啤酒中泡沫,从而增加啤酒的透光率和稳定性,延长保质期。此外海藻酸钠作为澄清剂加入果汁、香槟等酒类可有效去除酒中含氮物。

3.1.3 增稠稳定剂 饮料制作过程中易出现物质悬浮、分层、沉淀等现象,因此,保持饮料稳定性是饮料

制作的重要步骤,目前在制作过程中添加亲水胶体改善饮料稳定性较为常见^[51]。海藻多糖是一种天然亲水胶体且具有较好乳化性、增稠悬浮性,它能改变连续相的黏度,从而增加体系中的颗粒沉降速度,同时还可改善蛋白质的网状结构和界面吸附性能,显著提高浊液体系的稳定性,对饮料的结构、口感和稳定性起着重要作用^[52]。在可可奶和水果酸奶中添加一定量的海藻酸钠,可起到增加浓稠感、防止颗粒下沉的作用。李锦利^[53]研究了多种多糖作为花生乳增稠剂的效果,通过单因素实验发现黄原胶、卡拉胶、海藻酸钠的稳定效果最好。梁杰^[54]发现增稠剂和乳化剂的添加量决定了固体饮料溶解度,并确定了最佳用量为增稠剂(卡拉胶、黄原胶)0.2%、乳化剂(单甘脂、蔗糖酯)0.4%,得到具有最佳速溶性的固体饮料。

3.2 在食品包装上的应用

3.2.1 可食性薄膜 可食用膜是以天然高分子材料为主要材料,通过分子间作用力形成的薄膜^[55]。可食用膜不仅能保护食品,还可延长食品保质期,减少食品损耗,将来可能会代替塑料薄膜^[56]。海藻多糖具有良好的成膜性,可用于制作可食用膜。贾晓云等^[57]制备了一种具有抗菌能力的普鲁兰多糖-海藻酸钠复合抗菌膜,可有效延长生鲜肉保质期至 16 d。海藻多糖可食性膜还可以降低油炸食品的含油量,使其更加健康。万娟等^[58]用琼脂对煎盐水鱼进行涂覆,发现琼脂能使盐水鱼的含油量降低 12%。吴慧玲等^[59]研究发现,在可食性薄膜中添加纳米材料可以增强膜与基体的粘结程度,改善膜的密封性,从而提高薄膜的抗菌、抗氧化性能。

3.2.2 涂膜保鲜 涂膜保鲜是一种新兴的高效环保的化学保存法,可在产品表面形成一层膜,抑制微生物感染,有效降低氧气含量防止氧化褐变,延长货架期^[60]。海藻多糖是亲水胶体,但其可与金属离子交联形成网状结构,限制高分子结构的自由运动同时抑制水分流动,从而降低海藻膜的水溶性,广泛应用于涂膜保鲜。赵珊等^[61]研究发现以苯乳酸-海藻酸钠食用涂膜为甜樱桃保鲜包装材料可减少甜樱桃水分和营养物质的流失,延长储存时间。Jiang 等^[62]采用海藻酸钠/纳米银包膜对香菇进行保鲜,其保鲜效果良好。不同多糖复合涂膜可通过高分子作用改善膜的透明性、透气性及保水性,更利于涂膜保鲜。

3.2.3 食品微胶囊 胶囊化技术是将所需物质包埋到微胶囊中,并将其转化为固体颗粒。将所需物质包埋在微胶囊中,不影响使用效果的同时还增强其对外界环境的抵抗力^[63]。海藻多糖因具有良好的生物相容性和生物降解性,在食品微胶囊化和缓释制剂方面有广泛应用^[64]。Erik 等^[65]制备出以海藻酸钠为壁材的微胶囊,研究发现,微胶囊化可以在食品检测中控制胶体颗粒的释放。何亚婷等^[66]以海藻酸钠和酪蛋白酸钠为壁材,采用二次乳化法制备出微胶囊焦磷酸铁,有效提高了营养包的氧化稳定性,从而提高营养包质量,延长保质期。

3.3 在肉制品上的应用

3.3.1 保水剂 肉制品的持水力是影响肉制品的重要因素,它不仅影响肉制品的品质、口感和风味,在经济效益方面也起着重要作用。研究表明海藻多糖可用作保水剂添加于肉制品中,有效防止水分流失,降低成本,提高经济效益。宋蕾等^[67]研究发现海藻糖复合抗冻剂可有效提高冷冻鸡肉丸保水性。在海藻多糖中添加金属离子可有效提高其凝胶性能,形成的海藻酸钙凝胶与肉蛋白结合可形成致密的三维网状结构,更好地防止肉中的水分流失。王其东等^[68]以铜藻为主要原料配合磷酸盐制作鲑鱼糜保水剂,其质构特性比传统海带海藻酸钠鲑鱼糜保水剂更优。

3.3.2 脂肪替代品 肉制品是人们摄取营养物质的重要食品,但其中的高脂肪、高胆固醇对健康有害。海藻多糖具有良好的降血糖、血脂等生物活性,能阻碍人体对胆固醇的吸收,因此可用于制作健康、低脂的脂肪替代品。范素琴等^[69]研究了不同海藻酸钠复合凝胶剂对脂肪替代品质构的影响,通过实验确定制作工艺的最佳配方,研制出了工艺简单、效果优良的脂肪替代品。谭文英等^[70]以蔗糖聚酯和海藻酸钠为主要原料制备了一种持水性、持油性、乳化稳定性等性能优良的功能性复合脂肪替代品。

3.3.3 粘结剂 粘结剂在肉制品中使用广泛,可有效改善肉制品的品质、口感,延长保质期。海藻多糖凝胶性能良好,将其加入肉制品中可改变其结构,增加黏性改善肉制品口感。在重组肉制作工艺中加入海藻多糖,利用其形成凝胶结构连接碎肉,从而改变肉类的肌肉组织、脂肪组织和结缔组织分布,使其口感更佳^[71]。此外,海藻多糖对罐头肉类也有着粘结作用,可增强肉类在罐头中成型能力和高温杀菌后保持稳定的固化能力,从而提高罐头食品的品质。

3.4 在糖果业的应用

3.4.1 凝胶软糖 凝胶软糖主要由食品胶和淀粉糖浆为原料通过特定工艺制成。海藻多糖因具有凝胶特性可用于制作凝胶软糖,是软糖的主要辅料之一。凝胶软糖的性能主要取决于胶体的种类,由海藻多糖为辅料的软糖脆而透明、含水量高、保质期长,优于淀粉凝胶软糖。田其英^[72]在以琼脂为凝固剂的软糖配方中加入琼脂糖粉,研制出一种口感适中且咀嚼性更好的新型软糖产品。但在高温条件下,海藻多糖在酸性环境中容易被破坏。实际生产中,可对各种胶体进行复配,提高软糖的品质和口感。柏旭^[73]使用琼脂和角叉菜胶复合制作出姜橙皮软糖,产品具有独特的风味,口感顺滑。

3.4.2 糖果添加剂 糖果是一种日常消费品,但大量糖分容易引起血糖升高,在糖果的配料中加入具有降血糖作用的海藻多糖,在一定程度上能防止血糖升高。海藻多糖具有良好的凝胶性能,将其加入琼脂糖、无花果糖、棉花糖等产品中,还可以发挥稳定剂的作用,有效增强产品凝胶性能。陈香芝^[74]分别用复配胶和明胶制造奶糖,并分别对其性能进行研究,

结果表明复配胶奶糖的抗变形能力更好。此外,海藻多糖加入到一般硬糖中,可以使糖果均匀光滑,增加其口感。

3.5 在烘焙食品上的应用

3.5.1 营养强化剂 烘焙类食品是休闲食品的重要种类,具有食用方便、口感好、可贮存等优点,深受人们的喜爱,但由于烘焙类食品的升血糖指数过高让许多人望而却步。海藻多糖具有良好的降血糖活性,将其加入烘焙食品的生产工业中,可改变淀粉颗粒的结构,降低升糖指数。海藻多糖还可作为填充剂和膨松剂制作出低热能食品,用于代替淀粉制造麦片糊、无淀粉面包和餐后点心等。王庆佳^[75]以海带粉为原料,研发出口感优良、色泽可人的海带酥性饼干,有效降低了饼干的升糖指数。王芬等^[76]通过单因素实验确定了海藻糖紫米蛋糕的最佳配方,研制出品质优良、营养价值更高的紫米蛋糕。

3.5.2 品质改良剂 除营养价值和产品外观外,烘焙类食品的内在品质也是当今学者研究的重要内容。海藻多糖能显著改善面包质构,增加弹力同时降低其硬度和胶黏性,有效改善面包品质^[77]。黄林青等^[78]将卡拉胶与魔芋飞粉复配,研制出外观、香味和口感优良的魔芋果糕。海藻多糖对烘焙产品还有着显著的保鲜保湿和抗老化作用,可一定程度上保持产品水分,延长保质期^[79]。海藻多糖中加入金属离子可增强其凝胶性能,作为烘焙食品的粘结剂应用于饼干、蛋卷等食品的生产中,可有效减少其破碎率,改善品质。

3.6 在其他食品工业上的应用

海藻多糖还可用于咀嚼片、果冻、冰淇淋和蔬菜等食品的生产工业中。颜玉虾等^[80]以海带乳酸菌为原料制作出硬度适中、口感细腻的海带乳酸菌咀嚼片,并确定了其最佳配方。海藻多糖可作为果冻生产的主要胶体原料,王佳莹等^[81]用低熔点琼脂与其他食品胶体复合制作果冻,结果表明,低熔点琼脂制作出的果冻在感官和结构性能上均与工业果冻相似。海藻多糖用于冰淇淋生产中,可减少其冰晶析出,提高黏度和膨胀率,改善其口感和状态。海藻多糖还可作为农药残留降解剂运用于蔬菜生产中,能有效提高蔬菜生产的安全性。

4 结语

海藻多糖因其独特的物理化学性质和生物活性,在食品行业应用广泛,是食品行业研究热点之一。近年来关于海藻多糖在食品工业方面的研究已取得了丰富的成果。此外,关于海藻多糖的研究还可在以下几个方面有所加强:几种不同海藻多糖结构差异及其对活性的影响;海藻多糖作用于人体的具体机理;海藻多糖在食品工业中与其他增塑剂、抗菌剂、防腐剂等共同作用时对人体产生的影响;开发更适合食品行业的新型海藻多糖生物基复合材料。相信未来海藻多糖在食品工业将会有更广泛的应用。

参考文献

- [1] Van Alstyne. The neoliberal turn in environmental governance

- in the detroit river area of concern[J]. *Environmental Sociology*, 2015, 1(3): 190–201.
- [2] Wijesinghe W A J P, You-Jin J. Biological activities and potential industrial applications of fucose rich sulfated polysaccharides and fucoidans isolated from brown seaweeds: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 88(1): 13–20.
- [3] Recalde M P, Dilsia J Canelón, Compagnone R S, et al. Carrageenan and agar structures from the red seaweed *Gymnogongrus tenuis*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 136: 1370.
- [4] Gomez-Guillen M C, Gimenez B, Lopez-Caballero M E, et al. Functional and bioactive properties of collagen and gelatin from alternative sources: A review[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(8): 1813–1827.
- [5] Gupta S, Abu-Ghannam N. Recent developments in the application of seaweeds or seaweed extracts as a means for enhancing the safety and quality attributes of foods[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2011, 12(4): 600–609.
- [6] Shan C, Tao L, Wang X, et al. Functional genomics analysis reveals the biosynthesis pathways of important cellular components (alginate and fucoidan) of saccharina[J]. *Curr Genet*, 2018, 64(1): 259–273.
- [7] Wang J L, Guo H Y, Zhang J, et al. Sulfated modification characterization and structure antioxidant relationships of *Artemisia sphaerocephala* polysaccharides[J]. *Carbohydr Polym*, 2010, 81: 897–905.
- [8] Ni L J, Wang Y Y, He W Y, et al. Monosaccharide composition, activity and their correlation analysis in eight polysaccharides[J]. *Tianjin Univ: Sci and Tech*, 2014, 47: 326–330.
- [9] Byankina O, Sokolova E V, Anastuyuk S D, et al. Polysaccharide structure of tetrasporic red seaweed *Tichocarpus crinitus*[J]. *Bohydrate Polymers*, 2013, 98 (1): 26–35.
- [10] 刘志新, 刘金富, 徐凤, 等. 超声波复合酶法提取海带活性多糖的工艺优化[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(20): 8467–8469.
- [11] 翟为, 张美双, 张莉霞, 等. 复合酶法提取海带多糖工艺优化[J]. *食品科学*, 2012, 33(18): 6–9.
- [12] 刘航, 冯立强, 刘兴江. 高压脉冲电场和传统热水法提取海带多糖的比较研究[J]. *现代化工*, 2016, 36(7): 75–78.
- [13] 刘欢, 陈胜军, 杨贤庆. 海藻多糖的提取、分离纯化与应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(12): 341–346.
- [14] 党甜甜. 坛紫菜多糖的降解及其产物的活性研究和结构解析[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [15] 宋伟康. 叶托马尾藻及海葡萄多糖的提取、结构、抗氧化性以及藻渣吸附性能研究[D]. 海口: 海南大学, 2018.
- [16] 张胜帮, 于萍, 曾小明. 超声波-酶解法和超声波法提取裙带菜多糖的比较研究[J]. *食品科学*, 2011, 32(16): 141–145.
- [17] 田鑫, 李秀霞, 吴科阳, 等. 海藻多糖提取纯化及生物活性的研究进展[J]. *食品与发酵科技*, 2015, 51(6): 81–85.
- [18] 延绥宏, 李稳宏, 蔡静, 等. 菊花多糖超声提取工艺及数学模拟[J]. *中国医药学杂志*, 2010, 30(3): 188–190.
- [19] 张奥. 海藻多糖提取、分离纯化及其结构分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- [20] 王珊, 黄胜阳. 植物多糖提取液脱蛋白方法的研究进展[J]. *食品科技*, 2012, 37(9): 188–191.
- [21] 温梓辰, 荣雪, 郭乃菲, 等. 反复冻融法对枸杞多糖溶出率的研究[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(19): 111–113.
- [22] 赵瑞希. 海藻多糖提取、纯化及其补体结合活性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [23] 高翠丽, 李传平, 李倩, 等. 海藻酸钠在食品保鲜中的应用研究[J]. *青岛大学学报(工程技术版)*, 2013, 28(1): 77–83.
- [24] Rodrigues J A G, Quindere A L G, Coura C O, et al. *In vivo* toxicological evaluation of crude sulfated polysaccharide from the seaweed *Caulerpa cupresso* var. *Lyc opodium* in Swiss mice[J]. *Acta Scientiarum Technology*, 2013, 35(4): 603–610.
- [25] Alves A, Sousa R A, Reis R L. *In vitro* cytotoxicity assessment of ulvan, a polysaccharide extracted from green algae[J]. *Phytotherapy Research*, 2019, 27(8): 1143–1148.
- [26] Mohsin S, Mahadevan R, Kurup G M. Free-radical-scavenging activity and antioxidant effect of ascopyllan from marine brown algae[J]. *Preventive Nutrition*, 2014, 4(1): 75–79.
- [27] Lu J, You L, Lin Z, et al. The antioxidant capacity of polysaccharide from *Laminaria japonica* by citric acid extraction[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2013, 48(7): 1352–1358.
- [28] Vo T S, Kim S K. Fucoidans as a natural bioactive ingredient for functional foods[J]. *Journal of Functional Foods*, 2013, 5(1): 6–27.
- [29] Liu M, Liu Y, Cao M J, et al. Antibacterial activity and mechanisms of depolymerized fucoidans isolated from *Laminaria japonica*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 172: 294–305.
- [30] Seo S Y, Lee G H, Jung Y, et al. Alginate-based composite sponge containing silver nanoparticles synthesized *in situ*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 90: 109–115.
- [31] 游金明, 郭晓波, 王自蕊, 等. 海藻多糖的免疫调节作用及其在畜禽生产中的应用[J]. *饲料工业*, 2017, 38(20): 1–5.
- [32] 常静瑶, 庞广昌, 李杨. 螺旋藻多糖通过腹腔黏膜对小鼠产生的免疫调节作用[J]. *食品科学*, 2010, 31(17): 281–285.
- [33] 谢好贵, 韦明钎, 陈美珍, 等. 3种多糖复合体外抗肿瘤协同增效作用[J]. *食品科学*, 2013, 34(15): 289–294.
- [34] Kang S-M, Kim K-N, Lee S-H, et al. Anti-inflammatory activity of polysaccharide purified from AMG-assistant extract of *Ecklonia cava* in LPS-stimulated RAW26 4.7 macrophages[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 85(1): 80–85.
- [35] 戴波, 魏丹, 孙鲁宁. 海藻多糖抗炎活性及其作用机制的研究进展[J]. *解剖科学进展*, 2018, 24(6): 656–659, 663.
- [36] Jiang Z, Hama Y, Yamaguchi K, et al. Inhibitory effect of sulfated polysaccharide porphyran on nitricoxide production in lipopolysaccharide (LPS) stimulated RAW 264.7 macrophages[J]. *Journal of Biochemistry*, 2012, 151(10): 65–74.
- [37] Nicolau L A D, Silva R O, Barros F C N, et al. Anti-inflammatory and antinociceptive effects in mice of a sulfated polysaccharide fraction extracted from the marine red algae *Gracilaria caudata* AU-Chaves, Luciano de Sousa[J]. *Immunopharmacology and Immunotoxicology*, 2013, 35(1): 93–100.
- [38] Hayashi K, Nakano T, Hashimoto M, et al. Defensive effects of a fucoidan from brownalga *Undaria pinnatifida* against herpes simplex virus infection[J]. *International Immunopharmacology*, 2008, 8(1): 109–116.
- [39] Ermerk I M, Barabanova A O, Kukarsikh T A, et al. Natural polysaccharide carrageenan inhibits toxic effect of Gram-negative bacterial endotoxins[J]. *Bull Exp Biol Med*, 2006, 141(2): 230–232.
- [40] 胡晨熙. 羊栖菜多糖 SFPS 抗氧化作用及对衰老作用的探讨[D].

温州:温州大学,2018.

[41] 魏丹. 胶球藻多糖对不同饮食条件下自然衰老小鼠模型的抗衰老作用及其机制[D]. 沈阳:中国医科大学,2018.

[42] 原泽知,程开明,黄文,等. 海带多糖的提取工艺及降血脂活性研究[J]. 中药材,2010,33(11): 1795-1798.

[43] Jin C, Wang S, Yao C, et al. Hypolipidemic effect of porphyrin extracted from *Pyropia yezoensis* in ICR mice with high fatty diet[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2016, 28(2): 1315-1322.

[44] Yang T-H, Yao H-T, Chiang M-T. Red algae (*Gelidium amansii*) reduces adiposity via activation of lipolysis in rats with diabetes induced by streptozotocin-nicotinamide[J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2015, 23(4): 758-765.

[45] 许金蓉, 阎柳娟, 孟陆丽, 等. 昆布复合饮料生产工艺的研究[J]. *食品研究与开发*, 2010, 31(11): 107-109.

[46] 陈达妙. 浒苔多糖功能饮料及其调节2型糖尿病大鼠糖脂代谢的研究[D]. 福州:福建医科大学,2012.

[47] 吴晓青, 程伟青, 郭丹霞. 海带多糖降脂袋泡茶的研究[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(5): 70-72, 76.

[48] 张艳. 植物型澄清剂在山葡萄酒澄清处理中的应用研究[D]. 长春:吉林农业大学,2011.

[49] 孙永林, 汤尚文, 李玉奇, 等. 植源型澄清剂对香菇葡萄酒澄清效果及稳定性的影响[J]. *保鲜与加工*, 2017, 17(3): 64-68.

[50] 黄达明, 李聪, 张志才, 等. 海藻酸钠固定化啤酒酵母及应用的研究[J]. *食品科技*, 2013, 38(3): 31-34.

[51] Genovese D B, Lozano J E. The effect of hydrocolloids on the stability and viscosity of cloudy apple juices[J]. *Food Hydrocolloids*, 2001, 15(1): 1-7.

[52] Pallandre S, Decker E A, McClements D J. Improvement of stability of oil in water emulsions containing caseinate-coated droplets by addition of sodium alginate[J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72(9): 518-524.

[53] 李锦利. 花生乳干法生产工艺增稠剂稳定性研究[J]. *食品科技*, 2016, 41(9): 124-130.

[54] 梁杰. 冻干草莓粉固体饮料速溶性的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.

[55] Kang H J, Jo C, Kwon J H, et al. Effect of a pectin-based edible coating containing green tea powder on the quality of irradiated pork patty[J]. *Food Control*, 2007, 18(5): 430-435.

[56] Freile-Pelegrin Y, Madera-Santana T, Robledo D, et al. Degradation of agar films in a humid tropical climate: Thermal, mechanical, morphological and structural changes[J]. *Polymer Degradation & Stability*, 2007, 92(2): 244-252.

[57] 贾晓云, 张顺亮, 刘文营, 等. 乳酸链球菌素-普鲁兰多糖-海藻酸钠可食用抗菌共混膜的制备及其在生鲜肉保鲜中的应用[J]. *肉类研究*, 2017, 31(4): 17-22.

[58] 万娟, 张彪, 王拥军, 等. 油炸卤鱼货架期和含油率的研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2012, 31(2): 71-76.

[59] 吴慧玲, 张淑平. 海藻酸钠纳米复合材料的研究应用进展[J]. *化工进展*, 2014, 33(4): 954-959.

[60] Rojas Grau M A, Soliva-Fortuny R, Martin-Belloso O. Edible coatings to incorporate active ingredients to fresh cut fruits: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2009, 20(10):

438-447.

[61] 赵珊, 贡汉生, 田亚晨, 等. 苯乳酸-海藻酸钠涂膜保鲜剂的制备及其在甜樱桃保鲜中的应用[J]. *食品科学*, 2018, 39(11): 221-226.

[62] Jiang T J, Feng L F, Wang Y B. Effect of alginate/nano-Ag coating on microbial and physicochemical characteristics of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) during cold storage[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141: 954-960.

[63] Roessler B J, Bielinska A U, Janczak K, et al. Substituted beta-cyclodextrins interact with PAMAM dendrimer-DNA complexes and modify transfection efficiency[J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2001, 283(1): 124-129.

[64] Peng C W. The influence of operating parameters on the drug release and anti-bacterial performances of alginate wound dressings prepared by three-dimensional plotting[J]. *Materials Science and Engineering C*, 2012, 32: 2491-2500.

[65] Erik G D, Floirendo P F, William L K, et al. Characterization and *in vitro* bioavailability of β -carotene: Effects of microencapsulation method and food matrix[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 57(1): 42-48.

[66] 何亚婷, 姚晓琳, 李帅, 等. 微囊化焦磷酸铁的制备及对营养包稳定性的影响[J]. *食品科技*, 2018, 43(12): 287-292.

[67] 宋蕾, 高天, 马瑞雪, 等. 提高冷冻鸡肉丸食用品质的复合抗冻剂配方优化[J]. *食品科学*, 2016, 37(8): 13-17.

[68] 王其东, 付晓婷, 许加超, 等. 铜藻海藻酸钠复合鲮鱼糜保水剂的制作优化[J]. *中国渔业质量与标准*, 2018, 8(2): 9-16.

[69] 范素琴, 黄海燕, 王晓梅, 等. 复合凝胶剂对脂肪替代品质构的影响[J]. *肉类研究*, 2011, 25(9): 5-7.

[70] 谭文英, 吴颖, 胡勇. 复合脂肪替代品的制备及理化性质研究[J]. *中国油脂*, 2018, 43(2): 150-153.

[71] 柳春光, 马宗华, 盛本国, 等. 海藻酸钠的凝胶特性及其在肉制品中的应用[J]. *肉类工业*, 2014(10): 41-43.

[72] 田其英. 猴头菇琼脂软糖的工艺优化研究[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(10): 228-230, 245.

[73] 柏旭. 生姜橘皮软糖的研制[J]. *农产品加工*, 2015(22): 6-8.

[74] 陈香芝. 改善奶糖和软糖品质和功能性的配方及工艺研究[D]. 无锡:江南大学,2009.

[75] 王庆佳. 海带酥性饼干加工技术及其淀粉消化特性的研究[D]. 福州:福建农林大学,2016.

[76] 王芬, 张增帅, 乔冬. 海藻糖紫米蛋糕的研制[J]. *粮食与饲料工业*, 2018(10): 33-36.

[77] 张勇, 刘传富, 孙欣, 等. 海藻酸钠对面团特性及面包品质的影响[J]. *粮油食品科技*, 2018, 26(1): 49-52.

[78] 黄林青, 许圆, 余楚芬. 魔芋飞粉与卡拉胶共混凝胶特性及其应用[J]. *食品安全导刊*, 2017(21): 66.

[79] 吴津蓉. 海藻酸钠对海绵蛋糕品质的影响研究[J]. *食品安全导刊*, 2015(24): 39-40.

[80] 颜玉虾. 海带乳酸菌咀嚼片的研制[D]. 福州:福建农林大学,2016.

[81] 王佳莹, 洪鹏, 张珍珍, 等. 低熔点琼脂制备果冻的研究[J]. *中国食品添加剂*, 2017(12): 136-142.