

阴离子多糖的结构特性及其在高水分组织化植物蛋白中应用的研究进展

安红周^{1,2}, 任静文^{1,2}, 郭益廷², 李盘欣³, 黄亚男³

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 小麦和玉米深加工国家工程研究中心, 郑州 450001;

3. 河南省南街村(集团)有限公司, 河南 漯河 462600)

摘要:高水分组织化植物蛋白(HMTVP)具有高蛋白、低脂肪和低胆固醇等优点,已成为代替动物肉的一种优良选择,但其组织结构和口感与动物肉仍存在一定的差距。阴离子多糖与蛋白质之间的相互作用能改变蛋白质的功能特性,从而使产品质构特性和口感得以改善。旨在为阴离子多糖在HMTVP中的应用提供参考,概述了典型阴离子多糖(海藻酸钠、卡拉胶、黄原胶、羧甲基纤维素钠)的结构特性,总结了阴离子多糖与植物蛋白的相互作用,重点阐述了阴离子多糖在HMTVP中的应用,并对今后的研究方向进行了展望。阴离子多糖通过与蛋白质之间的相互作用改变蛋白质的二级结构,从而改善HMTVP的质构特性和纤维结构等,提高产品品质。今后可进一步深入对多糖、蛋白质的基础研究,并探索复配阴离子多糖在HMTVP中的应用。

关键词:阴离子多糖;组织化植物蛋白;结构特性

中图分类号:TS201;O629.12 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)04-0033-07

Research progress on the structural characteristics of anionic polysaccharides and their application in high-moisture textured vegetable protein

AN Hongzhou^{1,2}, REN Jingwen^{1,2}, GUO Yiting², LI Panxin³, HUANG Yanan³

(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. National Engineering Research Center for Wheat and Corn Further Processing, Zhengzhou 450001, China;

3. Henan Nanjiecun Group Ltd., Luohe 462600, Henan, China)

Abstract: High-moisture textured vegetable protein(HMTVP) has become an excellent choice to replace animal meat with the advantages of high protein, low fat and low cholesterol, but there is still a certain gap in its tissue structure and taste compared with animal meat. The interaction between anionic polysaccharides and proteins can alter the functional characteristics of proteins, thereby improving its texture and taste. In order to provide reference for the application of anionic polysaccharides in HMTVP, the structure properties of some typical anionic polysaccharides (sodium alginate, carrageenan, xanthan gum, sodium carboxymethyl cellulose) were described, and the interaction between anionic polysaccharides and vegetable proteins was briefly summarized. The application of anionic polysaccharides in HMTVP production was reviewed, and future research directions were prospected. Anionic polysaccharides alter

the secondary structure of proteins through interactions with them, thereby improving the texture property and fiber structure of HMTVP and enhancing product quality. In the future, further research on polysaccharides and proteins can be conducted, and the application of complex anionic polysaccharides in HMTVP can be explored.

Key words: anionic polysaccharides; textured vegetable protein; structure property

收稿日期:2023-10-31;修回日期:2024-11-11

基金项目:河南工业大学高层次人才科研启动基金项目(2021BS038);小麦和玉米深加工国家工程研究中心开放课题(NL2022014)

作者简介:安红周(1968),男,教授,博士生导师,博士,研究方向为植物蛋白及挤压技术(E-mail) anhongzhou@163.com。

通信作者:郭益廷,讲师,硕士生导师,博士(E-mail) yitinguo1992@163.com。

随着经济水平的提升和城镇化进程的推进,人们对优质蛋白,尤其是动物肉制品的需求不断增加,导致畜牧业扩张,给土地资源的使用带来压力,同时对空气、水等环境也产生负面影响。以肉类类似物(又称人造肉)代替动物蛋白是缓解动物肉资源不足的科学、有效的方法^[1]。肉类类似物主要分为两大类,一类是细胞培养肉,另一类是组织化植物蛋白(又称植物蛋白肉)^[1-2]。植物蛋白肉是植物蛋白、淀粉等植物基原料经特定工艺加工,制成的具有与肉类相似的纤维结构和质地的食品^[3]。与细胞培养肉相比,植物蛋白肉的生产具有技术简单、成本低、易于工业化的优点,因此植物蛋白肉可作为动物肉的良好替代品^[1,4],其中,高水分组织化植物蛋白(High-moisture textured vegetable protein, HMTVP)(水分含量在50%~75%)因具有更高的纤维结构和类似肉的口感,受到广泛关注。

用于生产 HMTVP 的原料有豆类蛋白、谷类蛋白、薯类蛋白、油料蛋白等,目前应用较多的植物蛋白主要是大豆蛋白、小麦面筋、花生蛋白和豌豆蛋白等^[4]。然而,植物蛋白的功能特性如溶解性、起泡性、乳化性和凝胶性相对较差,通常表现为连接性较弱、持水性低、挤压的产品不连续,且产品的质构特性(硬度、弹性、咀嚼性、多汁性)和纤维结构与动物肉及肉制品之间仍存在一定差距^[5-6],此外植物蛋白不像动物蛋白那样以纤维状排列,所以应使用合适的添加剂改变其功能特性,从而实现生产的连续性和产品特性的改善^[7-8]。研究表明,多糖-蛋白质相互作用是改善植物蛋白特性的一种绿色且实用的方法^[9]。

多糖的种类繁多,存在范围广,具有多种活性功能,常作为添加剂用于食品加工,其中离子多糖可以通过改变蛋白质的二级结构来改善其功能特性。离子多糖与蛋白质的络合作用安全、有效,在食品工业

中具有广泛的应用前景^[10]。阴离子多糖增稠、凝胶、流变特性以及结合水的能力可以用来改善 HMTVP 的品质^[6],近年来已经有不少这方面的研究。本文从阴离子多糖的结构特性、与蛋白质分子的相互作用及其在 HMTVP 中的应用等方面进行综述,以期阴离子多糖在 HMTVP 中的应用提供参考。

1 阴离子多糖的结构特性

1.1 海藻酸钠

海藻酸盐属于羧基线性阴离子杂多糖,主要来源于褐藻外细胞壁。其中海藻酸钠(Sodium alginate, SA)应用最为广泛,其结构如图1所示。

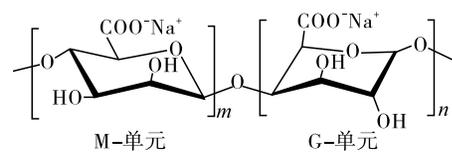


图1 海藻酸钠分子结构示意图

Fig. 1 Molecular structure diagram of sodium alginate

海藻酸钠由 β -D-甘露糖醛酸(β -D-mannuronic, M)和 α -L-古洛糖醛酸(α -L-guluronic, G)2种不同的单糖通过1,4-糖苷键交替连接组成,并由不同占比的片段(GM、MM、GG)共聚形成线性高分子,不同类型单糖的含量会影响其流变和凝胶性能^[11-13]。海藻酸钠可溶于水,不溶于有机溶剂,其溶液易与阳离子结合形成凝胶,主要是通过海藻酸钠分子中带负电的羧基与带正电的阳离子之间的静电相互作用形成多电解质复合物,这方面的研究最为广泛和成熟,该凝胶化机制被称为“蛋盒模型”^[11]。

1.2 卡拉胶

卡拉胶(Carrageenan, CA)属于硫酸化阴离子多糖,根据硫酸基团数量和位置的不同分为7种主要类型,在生产中使用较多的是 κ -型、 ι -型、 λ -型^[14-15],其结构如图2所示。

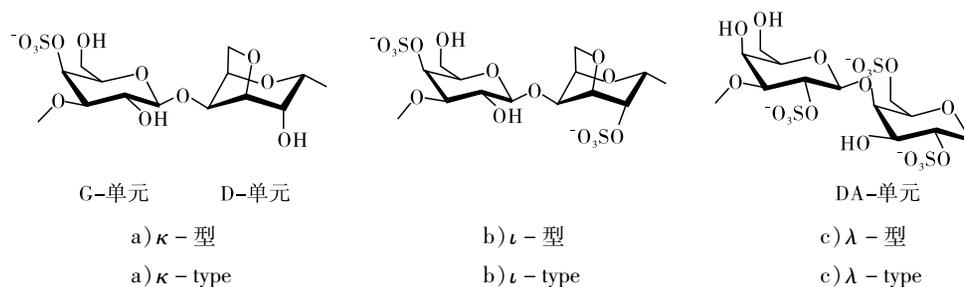


图2 κ -型、 ι -型、 λ -型卡拉胶分子结构示意图

Fig. 2 Molecular structure diagram of κ -type, ι -type and λ -type carrageenan

卡拉胶可溶于水,难溶于甲醇、乙醇等大部分有机溶剂,其功能特性因种类和结构组成的差异而不

同。如图2所示, κ -型卡拉胶(κ -CA)每个双糖重复单位中含有1个硫酸基团, ι -型卡拉胶(ι -

CA) 和 λ -型卡拉胶(λ -CA) 分别含有 2 个和 3 个硫酸基团^[14,16], 这就导致 κ -CA 黏度低, ι -CA 黏度高。在一定条件下 κ -CA 能够形成热可逆凝胶, 而 λ -CA 几乎不形成凝胶, 常作为增稠剂使用^[14,17]。几乎所有碱金属阳离子都能诱导卡拉胶形成凝胶^[14], 碱金属阳离子的促凝胶化能力顺序为 $\text{Rb}^+ > \text{Cs}^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$ ^[12]。

1.3 黄原胶

黄原胶(Xanthan gum, XG)属于高分子微生物多糖, 主要来源于红藻细胞壁基质, 其结构如图 3 所示。

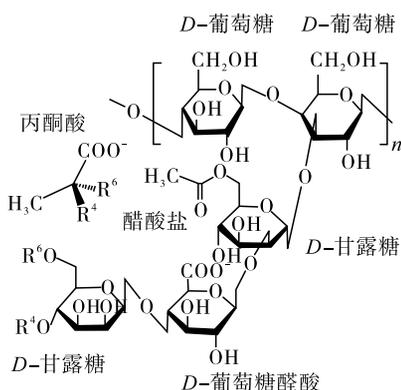


图 3 黄原胶分子结构示意图

Fig. 3 Molecular structure diagram of xanthan gum

黄原胶能在低浓度下形成高黏度溶液, 其黏度随温度和 pH 的变化不大, 稳定性较好^[18]。黄原胶的线性主链是由 β -1,4 糖苷键连接的 D-葡萄糖单元组成, 结构类似于纤维素; 黄原胶具有带电荷的三糖侧链, 侧链与主链紧密排列, 形成单螺旋、双螺旋或三螺旋的刚性链, 并通过非共价相互作用稳定整体构象^[19-21]。黄原胶可溶于水, 难溶于甲醇、乙醇等大部分有机溶剂, 其独特的构象使其对剪切更敏感, 在低剪切速率下具有高黏度, 有明显的剪切变稀性, 其剪切变稀行为比瓜尔胶和其他多糖更强^[18,22]。

1.4 羧甲基纤维素钠

羧甲基纤维素钠(Sodium carboxymethyl cellulose, CMC)是对纤维素进行碱化和醚化处理后应用最为广泛的一种改性纤维素醚, 其结构如图 4 所示。

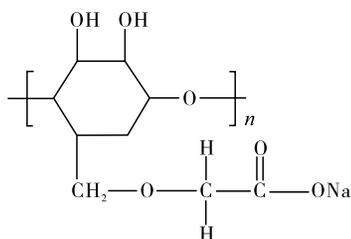


图 4 羧甲基纤维素钠分子结构示意图

Fig. 4 Molecular structure diagram of sodium carboxymethyl cellulose

由图 4 可知, 羧甲基纤维素钠是一种线性阴离子多糖, 主链由 β -1,4 糖苷键连接的葡萄糖单元组成, 其含有许多羧基和羟基, 易溶于水, 不溶于乙醇、氯仿等有机溶剂, 其水溶性随着溶剂中阳离子盐价数的增加而降低, 在 pH 3 ~ 10 下具有良好的机械稳定性^[23-25]。

2 阴离子多糖与植物蛋白相互作用

多糖与蛋白质之间存在共价(糖基化反应、美拉德反应等)和非共价(静电相互作用、疏水相互作用、范德华力等)相互作用, 而非共价相互作用可分为分子间的吸引力和排斥力^[26]。此外, 多糖-蛋白质的非共价相互作用主要受 pH、离子强度、分子构象、电荷密度和浓度、温度的影响, 而共价相互作用主要受多糖长度和蛋白质类型的影响^[26-27]。溶液中多糖-蛋白质非共价相互作用如图 5 所示。

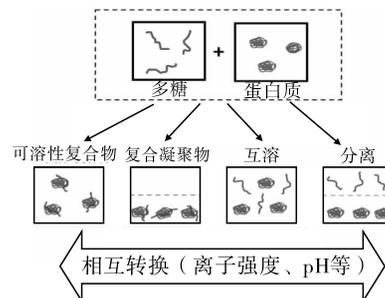


图 5 溶液中多糖-蛋白质非共价相互作用示意图

Fig. 5 Schematic diagram of polysaccharide-protein non-covalent interaction in solution

如图 5 所示: 在分子间相互吸引的情况下, 根据化学结构和混合条件的不同, 多糖与蛋白质形成可溶或不可溶的复合物; 当分子间相互吸引力较弱或不存在时, 在低浓度下, 二者以均一相存在, 在高浓度下, 它们发生相分离形成两个液相, 每个相都富集在一种聚合物中, 多糖和蛋白质最终会分离成两个孤立的层^[26-27]。多糖-蛋白质混合物的形成是由热力学驱动的, 取决于总吉布斯自由能(G)的变化。如果 G 减小(即 $\Delta G < 0$), 则多糖与蛋白质之间可以自发地发生络合。由于阴离子多糖与蛋白质的混合熵较低, 在多数情况下二者的混合物是不相容的^[27]。

在 HMTVP 制备过程中, 通过挤压, 蛋白质经历高温、高压、剪切的作用, 维持蛋白质结构的作用力如氢键、二硫键、疏水作用力等被破坏, 隐藏的活性位点暴露出来, 使阴离子多糖与蛋白质之间更容易发生相互作用^[28]。HMTVP 中纤维形成的机制是基于多种原辅料混合形成多相共混物的排列, 多相体系的各向异性有利于纤维结构的形成^[29]。阴离子

多糖与蛋白质属于热力学不相容的生物大分子,二者混合能增加体系的各向异性,且它们分子间的相互作用会改变蛋白质的流变和凝胶等特性,从而改善 HMTVP 的质构和纤维结构^[30-31]。

静电吸引力在阴离子多糖与低于等电点的蛋白质(聚阳离子)混合物中占主导地位,从而形成强静电复合物,且蛋白质所带正电荷的密度越大,静电作用越强,硫酸化多糖(卡拉胶)比羧基多糖(海藻酸钠)的静电作用强^[31-33]。因此,添加不同的阴离子多糖对植物蛋白质分子产生的作用效果不同,反之,不同的蛋白原料添加相同的阴离子多糖的作用效果也不同。Zhang 等^[34]研究表明,添加 0.1% 的卡拉

胶或海藻酸钠均可以促进蛋白质分子链的拉伸,将 α -螺旋结构转化为 β -螺旋结构和无规卷曲结构,其中卡拉胶能增强挤出物蛋白质结构中氢键与二硫键的相互作用,而海藻酸钠则减弱了它们的相互作用。

3 阴离子多糖在 HMTVP 中的应用

阴离子多糖的加入可以从质构特性、纤维结构、色泽等方面影响 HMTVP 的品质,但由于阴离子多糖结构上的差异,不同的阴离子多糖在 HMTVP 中起到的作用不同。表 1 总结了阴离子多糖在 HMTVP 中的应用研究。

表 1 阴离子多糖在 HMTVP 中的应用研究

Table 1 Application of anionic polysaccharides in HMTVP

阴离子多糖	原料	多糖添加量/%	对 HMTVP 的影响	参考文献
SA	SPC	6	结构致密,吸水率增大, L^* 提升,咀嚼性增强	[35]
SA	花生蛋白	0.1	纤维度、弹性、抗拉力提高	[34]
SA	SPC	6	纤维结构显著提升,蛋白质消化率高	[36]
CA	花生蛋白	0.1	蛋白质网络结构致密,抗拉力提升,纤维取向性变差	[34]
ι -CA	SPC	1.5	硬度、弹性、剪切力提升,持水性高,熟制后多汁,感官评分最高	[16]
ι -CA	PPI、谷朊粉	2	纤维结构紧密,褐变指数、持水能力、拉伸应力和气泡数均增加	[37]
CA	PPI	0.4	纤维结构更加致密,硬度和咀嚼性增加	[38]
XG	SPI、大豆粕、谷朊粉	1.5	亮度增大,组织化度达到最大,持水性增大	[39]
CMC	PPP	4	硬度提高,促进二硫键的形成,凝胶网络结构形成,亮度增加	[40]
CMC	PPP	4.17	改变蛋白质二级结构,增强分子间相互作用,组织化度和热稳定性增加,促进凝胶网络形成	[41]
CMC	SPC	6	纤维结构最高,颜色最明亮	[36]

注:SPC. 大豆浓缩蛋白;PPI. 豌豆分离蛋白;SPI. 大豆分离蛋白;PPP. 豌豆蛋白

Note: SPC. Soybean protein concentrate; PPI. Pea protein isolate; SPI. Soybean protein isolate; PPP. Pea protein

3.1 海藻酸钠在 HMTVP 中的应用

海藻酸钠溶液易与阳离子结合形成凝胶,主要是通过海藻酸钠分子中带负电的羧基与带正电的阳离子之间的静电相互作用形成多电解质复合物^[11]。海藻酸钠可以促进纤维结构的形成,可能是因为其分子中含有较多的羟基,溶于水与蛋白质形成聚合物网络并提供凝聚力。在 HMTVP 挤压过程中,海藻酸钠分子中含有的羟基与蛋白质反应形成氢键,同时海藻酸钠中带有负电荷的羧基与蛋白质中带正电荷的氨基酸残基之间会产生静电吸引,促进多糖与蛋白质的聚合物网络形成,所形成的聚合物网络能维持挤压产品的内聚性和弹性。窦薇等^[35]研究表明,海藻酸钠能促进 HMTVP 纤维结构的形成,得到的产品结构更加致密、吸水率增大、 L^* 提升,同时咀嚼性增强。Zhang 等^[34]以花生蛋白为原料制备 HMTVP,通过对挤压机“突然停机(Dead-stop)”操作研究添加不同含量多糖对各区段物料的影响,

结果表明,在花生蛋白中添加 0.1% 的海藻酸钠有利于纤维取向,能显著提高产品的纤维度、弹性和抗拉力。

3.2 卡拉胶在 HMTVP 中的应用

卡拉胶上的半硫酸酯基团(Hemisulfate groups)与蛋白质分子的长链相互作用,可增加植物蛋白肉的弹性和剪切力,使其蛋白质网络结构更致密,但几乎没有纤维结构的形成^[38,42],挤压后的产品因水分子难以渗透导致蒸煮得率降低。Zhang 等^[34]研究表明,添加 0.1% 的卡拉胶能显著提高 HMTVP 的抗拉力,但不利于纤维取向,挤出物结构致密,但很难发现纤维结构。刘艳香等^[42]研究发现,卡拉胶的添加不利于 HMTVP 纤维结构的形成,且 HMTVP 的硬度和咀嚼性也降低。即便如此,适量的卡拉胶对植物蛋白肉的综合改变仍是积极的。Palanisamy 等^[16]研究了 ι -CA 对植物蛋白肉及其熟制后的影响,结果表明, ι -CA 的最适添加量为 1.5%,有助于提高

产品的持水能力,使其蛋白质的网络结构更加致密,弹性和剪切力等性能显著提高,产品熟制后依然保持较高的弹性和多汁性,提高了熟制产品的可接受度。同样,Taghian Dinani 等^[37]的研究也证实 ι -CA 的加入能增加蛋白质混合物的持水能力,且认为卡拉胶的添加顺序以及是否先将卡拉胶水化,对产品质量无明显影响。Fu 等^[38]研究表明,卡拉胶的添加使 HMTVP 网络结构更加致密,显著提升其硬度和咀嚼性,但卡拉胶中的基团与极性水分子相互作用填充蛋白质网络,不利于纤维结构的形成。

3.3 黄原胶在 HMTVP 中的应用

黄原胶具有较好的流变特性,从而易于改善植物蛋白的特性并促进蛋白质形成凝胶。黄原胶独特的构象使其对剪切更敏感,有明显的剪切变稀现象,在低剪切速率下具有高黏度,可有效改善植物蛋白的流变特性,提升产品的感官品质,且具有潜在的抗氧化作用^[18,22,43]。

Bi 等^[31]探究了黄原胶对大豆分离蛋白流变学的影响,结果表明,黄原胶可促进蛋白质凝胶结构的形成,增加了蛋白质聚合物的相对密度,使大豆分离蛋白-黄原胶混合体系的剪切变稀性能更明显,抗应变能力得到增强,随着黄原胶浓度的增加,混合体系黏度急剧增加。Yu 等^[44]以大豆分离蛋白为原料制备 3D 打印油墨,结果发现,黄原胶增强了油墨的流动性,使印刷性提升,增加了 3D 打印产品的硬度,且高浓度的黄原胶可增强油墨的网络结构,提升机械强度,但柔韧性稍差。Nanta 等^[45]研究表明,黄原胶的加入能增强原料剪切变稀的特性,其长串状分子与水分子有较好的相互作用,低浓度下可以提升蛋白质混合物的硬度,但高浓度下则使硬度、弹性、黏性等质构特性降低,这可能是因为黄原胶与水的相互作用使氢键的吸水率增加,产品质地变柔软。刘莹^[39]研究表明,黄原胶提高了 HMTVP 的亮度,使产品颜色变浅,且在 0.5%~2.5% 添加量范围内使产品的组织化度提高,纤维感增强。

3.4 羧甲基纤维素钠在 HMTVP 中的应用

羧甲基纤维素钠与蛋白质相互作用形成的混合物在 pH 和离子强度变化下都很稳定,并具有良好的乳化稳定性和热稳定性^[23]。肖志刚等^[40]以豌豆蛋白为主要原料制备 HMTVP,结果表明,添加 4% 羧甲基纤维素钠可以促进植物蛋白中二硫键的形成,二级结构中的无规卷曲含量增加,产物的硬度提高,凝胶网络结构增强,且表面光滑完整,明亮度增加。Yu 等^[41]通过“突然停机”操作收集挤出过程不同区域的样品,研究了羧甲基纤维素钠对豌豆蛋白

在高水分挤出过程中构象演变的影响,结果表明,羧甲基纤维素钠与豌豆蛋白之间通过氢键和疏水相互作用,使蛋白质的二级结构发生改变,能增强蛋白质分子间的氢键、二硫键和疏水相互作用,促进蛋白质重排和凝胶网络结构的形成,且蛋白质分子中的氨基与羧甲基纤维素钠上的还原羰基末端反应增加了混合物的接枝度和热稳定性。Dou 等^[36]使用大豆浓缩蛋白添加 3 种多糖制备 HMTVP,结果表明:添加羧甲基纤维素钠的挤出物有良好的纤维结构,但横截面存在分层现象;与添加 6% 的海藻酸钠和 ι -CA 相比,添加 6% 的羧甲基纤维素钠挤压出的植物蛋白肉颜色最浅,可能是因为颜色的改变程度不仅与阴离子多糖引起的美拉德反应程度有关,也与黏度变化导致物料停留时间不同以及挤压生产过程采用的温度不同有关^[38]。

4 结论与展望

植物蛋白肉,尤其是 HMTVP 有巨大的市场潜力,为了弥补其相对于动物肉的不足,改善其品质仍是当前热门研究方向。阴离子多糖的添加对提升植物蛋白肉品质具有重要意义,其通过与蛋白质之间的相互作用改变蛋白质的二级结构,从而改善产品的质构特性和纤维结构等,提高产品的可接受程度。目前,有关阴离子多糖结构的研究还不够深入,尤其是在“构效关系”的微观解释方面,还需进一步阐明其作用机制。此外,除了选用单一阴离子多糖外,将两种或两种以上的阴离子多糖进行复配用于生产植物蛋白肉的研究相对较少。今后可以对多糖结构、多糖与蛋白质和多糖与多糖之间的相互作用进行更深入的研究,并利用两种及两种以上阴离子多糖之间的协同作用探索复配阴离子多糖对 HMTVP 品质的影响。

参考文献:

- [1] WANG Y, CAI W, LI L, et al. Recent advances in the processing and manufacturing of plant-based meat [J]. *J Agric Food Chem*, 2023, 71(3): 1276-1290.
- [2] ZHANG Z, ZHANG L, HE S, et al. High-moisture extrusion technology application in the processing of textured plant protein meat analogues: A review [J]. *Food Rev Int*, 2023, 39(8): 4873-4908.
- [3] XIAO X, ZOU P R, HU F, et al. Updates on plant-based protein products as an alternative to animal protein: Technology, properties, and their health benefits [J/OL]. *Molecules*, 2023, 28(10): 4016 [2023-10-31]. <https://doi.org/10.3390/molecules28104016>.
- [4] SUN C, GE J, HE J, et al. Processing, quality, safety, and acceptance of meat analogue products [J].

- Engineering, 2021, 7(5): 674–678.
- [5] ZHANG J, CHEN Q, KAPLAN D L, et al. High – moisture extruded protein fiber formation toward plant – based meat substitutes applications: Science, technology, and prospect[J]. Trends Food Sci Technol, 2022, 128: 202–216.
- [6] SUN C, FU J, CHANG Y, et al. Structure design for improving the characteristic attributes of extruded plant – based meat analogues[J]. Food Biophys, 2022, 17(2): 137–149.
- [7] SIM S Y J, SRV A, CHIANG J H, et al. Plant proteins for future foods: A roadmap[J/OL]. Foods, 2021, 10(8): 1967 [2023 – 10 – 31]. <https://doi.org/10.3390/foods10081967>.
- [8] ZHANG X, ZHAO Y, ZHAO X, et al. The texture of plant protein – based meat analogs by high moisture extrusion: A review[J]. J Texture Stud, 2023, 54(3): 351–364.
- [9] LI Y, QI X, RONG L, et al. Effect of gellan gum on the rheology, gelling, and structural properties of thermally induced pea protein isolate gel [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2024, 147: 109379 [2023 – 10 – 31]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109379>.
- [10] YEKTA R, ASSADPOUR E, HOSSEINI H, et al. The influence of ionic polysaccharides on the physicochemical and techno – functional properties of soy proteins: A comprehensive review[J/OL]. Carbohydr Polym, 2023, 319: 121191 [2023 – 10 – 31]. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121191>.
- [11] HU C, LU W, MATA A, et al. Ions – induced gelation of alginate: Mechanisms and applications [J]. Int J Biol Macromol, 2021, 177: 578–588.
- [12] 杨镛, 臧一字, 吴鹏, 等. 多糖类食品胶体的功能特性及其在食品加工中的应用研究进展 [J]. 食品科学, 2024, 45(5): 283–292.
- [13] 陈芳芳, 胡猛, 张超, 等. 天然多糖微凝胶的制备与应用研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(1): 240–249.
- [14] GHANBARZADEH M, GOLMORADIZADEH A, HOMAEI A. Carrageenans and carrageenases: Versatile polysaccharides and promising marine enzymes [J]. Phytochem Rev, 2018, 17(3): 535–571.
- [15] PRAJAPATI V D, MAHERIYA P M, JANI G K, et al. Carrageenan: A natural seaweed polysaccharide and its applications[J]. Carbohydr Polym, 2014, 105: 97–112.
- [16] PALANISAMY M, TÖPFL S, AGANOVIC K, et al. Influence of *iota* carrageenan addition on the properties of soya protein meat analogues [J]. LWT – Food Sci Technol, 2018, 87: 546–552.
- [17] 卢伟丽. 卡拉胶和褐藻胶流变学特性及凝胶特性的研究[D]. 山东 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [18] RATHER S A, MASOODI F A, AKHTER R, et al. Application of guar – xanthan gum mixture as a partial fat replacer in meat emulsions [J]. J Food Sci Technol, 2016, 53(6): 2876–2886.
- [19] MOTA G P, PEREIRA R G. A comparison of the rheological behavior of xanthan gum and diutan gum aqueous solutions [J/OL]. J Braz Soc Mech Sci Eng, 2022, 44(4): 117 [2023 – 10 – 31]. <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03406-0>.
- [20] HABIBI H, KHOSRAVI – DARANI K. Effective variables on production and structure of xanthan gum and its food applications: A review [J]. Biocatal Agric Biotechnol, 2017, 10: 130–140.
- [21] CARMONA J A, LUCAS A, RAMÍREZ P, et al. Nonlinear and linear viscoelastic properties of a novel type of xanthan gum with industrial applications [J]. Rheol Acta, 2015, 54(11): 993–1001.
- [22] YADAV K, YADAV B S, YADAV R B, et al. Physicochemical, pasting and rheological properties of *Colocasia* starch as influenced by the addition of guar gum and xanthan gum [J]. J Food Meas Charact, 2018, 12(4): 2666–2676.
- [23] ZHAO Y, WANG X, LI D, et al. Effect of anionic polysaccharides on conformational changes and antioxidant properties of protein – polyphenol binary covalently – linked complexes [J]. Process Biochem, 2020, 89: 89–97.
- [24] 郝超月. 羧甲基纤维素钠基水凝胶的制备及其应用 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [25] ZENNIFER A, SENTHILVELAN P, SETHURAMAN S, et al. Key advances of carboxymethyl cellulose in tissue engineering & 3D bioprinting applications [J/OL]. Carbohydr Polym, 2021, 256: 117561 [2023 – 10 – 31]. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117561>.
- [26] WIJAYA W, PATEL A R, SETIOWATI A D, et al. Functional colloids from proteins and polysaccharides for food applications [J]. Trends Food Sci Technol, 2017, 68: 56–69.
- [27] YANG X, LI A, LI D, et al. Applications of mixed polysaccharide – protein systems in fabricating multi – structures of binary food gels: A review [J]. Trends Food Sci Technol, 2021, 109: 197–210.
- [28] 付晓航, 李赫, 曹金诺, 等. 挤压加工对植物组织蛋白功能性影响的研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2021, 42(6): 179–183.
- [29] KYRIAKOPOULOU K, KEPPLER J K, VAN DER GOOT A J. Functionality of ingredients and additives in plant – based meat analogues [J/OL]. Foods, 2021, 10(3): 600 [2023 – 10 – 31]. <https://doi.org/10.3390/foods10030600>.

- foods10030600.
- [30] 张金闯. 高水分挤压过程中花生蛋白构象变化及品质调控[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [31] BI C, GAO F, ZHU Y, et al. Effects of xanthan gum on the rheological properties of soy protein dispersion[J]. *Int J Agric Biol Eng*, 2018, 11(2): 208–213.
- [32] 熊拯, 郭兴凤, 谈天. 蛋白质-阴离子多糖相互作用研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2006, 19(10): 15–17.
- [33] RODRÍGUEZ PATINO J M, PILOSO F A M R. Protein-polysaccharide interactions at fluid interfaces[J]. *Food Hydrocolloid*, 2011, 25(8): 1925–1937.
- [34] ZHANG J, LIU L, JIANG Y, et al. High-moisture extrusion of peanut protein-/carrageenan/sodium alginate/wheat starch mixtures: Effect of different exogenous polysaccharides on the process forming a fibrous structure[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 99: 105311 [2023-10-31]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105311>.
- [35] 窦薇, 张鑫, 赵煜, 等. 海藻酸钠添加对大豆浓缩蛋白植物肉特性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(12): 147–152.
- [36] DOU W, ZHANG X, ZHAO Y, et al. High moisture extrusion cooking on soy proteins: Importance influence of gums on promoting the fiber formation[J/OL]. *Food Res Int*, 2022, 156: 111189 [2023-10-31]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111189>.
- [37] TAGHIAN DINANI S, CHARLES CARRILLO M F, BOOM R, et al. Quality improvement of plant-based meat alternatives by addition of *iota* carrageenan to pea protein-wheat gluten blend[J]. *Eur Food Res Technol*, 2023, 249(6): 1637–1654.
- [38] FU J L, ZHENG Y X, GAO Y X, et al. Effect of different polysaccharides on the texture and fibrous structure of high-moisture extruded pea protein isolate[J]. *Food Biophys*, 2023, 18(4): 606–618.
- [39] 刘莹. 亲水胶体和挤压工艺用水对高水分组织化植物蛋白品质影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- [40] 肖志刚, 王海观, 江睿生, 等. 羧甲基纤维素钠对挤压豌豆蛋白素肉品质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(8): 118–123.
- [41] YU X, WANG H, YUAN Y, et al. Changes in physicochemical and structural properties of pea protein during the high moisture extrusion process: Effects of carboxymethylcellulose sodium and different extrusion zones[J/OL]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 251: 126350 [2023-10-31]. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126350>.
- [42] 刘艳香, 谭斌, 刘明, 等. 添加剂对高水分挤压组织化复合蛋白理化性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(1): 294–302.
- [43] ZHENG Y, SUN W, YANG W, et al. The influence of xanthan gum on rheological properties and *in vitro* digestibility of kudzu (*Pueraria lobata*) starch[J/OL]. *Starch Stärke*, 2020, 72(3/4): 00139 [2023-10-31]. <https://doi.org/10.1002/star.201900139>.
- [44] YU J, WANG X Y, LI D, et al. Development of soy protein isolate emulsion gels as extrusion-based 3D food printing inks: Effect of polysaccharides incorporation[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2022, 131: 107824 [2023-10-31]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107824>.
- [45] NANTA P, SKOLPAP W, KASEMWONG K. Influence of hydrocolloids on the rheological and textural attributes of a gluten-free meat analog based on soy protein isolate[J/OL]. *J Food Process Preserv*, 2021, 45(3): 15244 [2023-10-31]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15244>.
- 报, 2012, 33(6): 154–158.
- [20] YEBOAH S O, MITEI Y C, NGILA J C, et al. Compositional and structural studies of the oils from two edible seeds: Tiger nut, *Cyperus esculentum*, and asiato, *Pachira insignis*, from Ghana[J]. *Food Res Int*, 2012, 47(2): 259–266.
- [21] KOU BAA M, BARBA F J, MHEMDI H, et al. Gas assisted mechanical expression (GAME) as a promising technology for oil and phenolic compound recovery from tiger nuts[J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2015, 32: 172–180.

(上接第 21 页)

- [16] 赵丹, 汪学德, 张润阳, 等. 制油工艺对油脂品质的影响研究[J]. *中国油脂*, 2018, 43(6): 11–15.
- [17] WIJESUNDERA C, CECCATO C, FAGAN P, et al. Seed roasting improves the oxidative stability of canola (*B. napus*) and mustard (*B. juncea*) seed oils[J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2008, 110(4): 360–367.
- [18] RAI A, MOHANTY B, BHARGAVA R. Supercritical extraction of sunflower oil: A central composite design for extraction variables[J]. *Food Chem*, 2016, 192: 647–659.
- [19] 王心昕, 杨茜, 李媛, 等. 膳食脂肪酸摄入及构成与心脑血管疾病相关性的研究进展[J]. *昆明医科大学学*