

多糖与蛋白质相互作用及其复合物的功能特性

姜迎迎¹, 钱磊², 蒋崇怡¹, 张平平¹, 张志军^{3*}, 张业尼^{1*}

(1.天津农学院 食品科学与生物工程学院, 天津 300392; 2.天津市天寿食用菌科技有限公司, 天津 300384; 3.国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津), 农业农村部农产品贮藏保鲜重点实验室, 天津 300384)

摘要:多糖和蛋白质是食品中共存的生物大分子, 营养丰富, 两者相互作用可以改善食品的品质, 因此成为研究的热点内容。该文对国内外有关多糖与蛋白质相互作用的研究进行综述, 介绍多糖与蛋白质相互作用的类型、影响因素和复合物的制备方法、功能特性, 并对其在食品中的应用进行展望, 以期有多糖-蛋白质复合物的进一步研究与应用提供理论参考。

关键词:多糖; 蛋白质; 相互作用; 复合物; 功能特性

Interaction between Polysaccharides and Proteins and Functional Properties of Their Complexes

JIANG Ying-ying¹, QIAN Lei², JIANG Chong-yi¹, ZHANG Ping-ping¹, ZHANG Zhi-jun^{3*}, ZHANG Ye-ni^{1*}

(1. College of Food Science and Biotechnology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China; 2. Tianjin Tianshou Edible Fungi Technology Co., Ltd., Tianjin 300384, China; 3. National Engineering Technology Research Center for Preservation of Agricultural Products (Tianjin), Key Laboratory of Storage of Agricultural Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300384, China)

Abstract: Polysaccharides and proteins are coexisting biological macromolecules in food, which are rich in nutrition, and since their interaction can improve the quality of food, they have become a research hotspot. This paper summarized the studies on the interaction between polysaccharides and proteins in China and abroad and discussed the interaction types, influencing factors, preparation methods and functional properties of their complexes, and prospects for their applications in food, to provide theoretical references for the further research and applications of polysaccharide-protein complexes.

Key words: polysaccharide; protein; interaction; complexes; functional characteristics

引文格式:

姜迎迎, 钱磊, 蒋崇怡, 等. 多糖与蛋白质相互作用及其复合物的功能特性[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(10): 220-224.

JIANG Yingying, QIAN Lei, JIANG Chongyi, et al. Interaction between Polysaccharides and Proteins and Functional Properties of Their Complexes[J]. Food Research and Development, 2023, 44(10): 220-224.

多糖和蛋白质是食品原料中常见的天然生物高分子物质, 营养价值丰富, 具有不同的功能特性。多糖因具有良好的流变学特性、凝胶性、增稠性, 常被用作改良剂以改善食品的品质。蛋白质易被消化吸收, 具有两亲性、乳化性、发泡性、成膜性、持水性等多种特

性^[1], 常作为稳定剂、乳化剂应用于食品中。在食品体系中两种生物高分子往往共存, 产生相互作用, 从而改善产品的品质、提高产品的功能特性。本文从多糖与蛋白质间的相互作用出发, 描述了多糖-蛋白质复合物的制备方法, 同时介绍了多糖-蛋白质复合物的

作者简介: 姜迎迎(1999—), 女(汉), 在读硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全。

* 通信作者: 张志军(1969—), 男, 研究员, 学士, 研究方向: 食用菌的保鲜与加工; 张业尼(1984—), 女, 讲师, 博士, 研究方向: 食用菌大分子活性成分的开发与研究。

功能特性及其在食品中的应用,旨在为多糖-蛋白质复合物的深度研究和开发提供新思路。

1 多糖与蛋白质相互作用

多糖和蛋白质是食品中共存的高分子物质,是影响产品口感及稳定性的重要因素。蛋白质一般被用作乳化剂,多糖常被用作改良剂以改善食品的品质。研究表明,当两者共存时,产生相互作用形成的复合物比两者单一使用所形成的效果更佳,且可以改善产品的品质及功能特性^[2]。目前,发达国家对天然高分子物质间相互作用的研究成果较多。

1.1 作用类型

多糖和蛋白质分子间相互作用主要分为两种。一为共价作用,主要是指多糖分子和蛋白质分子在一定条件下,发生羰基缩合作用,形成稳定的糖基化产物,可以增强蛋白质的功能特性^[3]。二为非共价作用,主要包括静电相互作用、疏水相互作用、氢键、空间排斥效应等,这些作用力在一定条件下会促进多糖-蛋白质复合物的形成,从而产生更强的相互作用^[4]。

1.2 存在状态

多糖-蛋白质复合物可能具有3种存在状态。第一种是相分离,多糖和蛋白质共存于同一体系时,两个生物大分子间存在较强的静电引力或静电斥力而产生相分离现象,即缔合相分离和离散相分离^[5]。缔合相分离是指多糖和蛋白质之间具有较强的吸引力,彼此相互缔合形成大分子复合凝聚物质或沉淀,通常发生在样液浓度(3%~4%)和离子强度(<0.4 mol/L)较低、溶液中2种高分子带有不同种电荷的情况下。离散相分离是指多糖和蛋白质之间具有较强的斥力,形成两相溶液即多糖富集相和蛋白富集相。第二种是共溶体系,当多糖与蛋白质浓度较高时,其体系稳定。随多糖与蛋白质浓度增加,其体系更难保持平衡。因此,共溶体系较为少见。第三种是携带相反电荷的多糖与蛋白质发生复凝聚的过程,依据静电作用发生的位置和强弱可以将其形成的复合物分为2种,即可溶性复合物和不溶性复合物,前者可形成共溶体系,后者则可形成不溶性复合物,发生相分离现象。

1.3 影响因素

多糖和蛋白质产生相互作用的机理复杂多样,影响多糖与蛋白质间相互作用的因素有很多,主要有pH值、盐离子浓度、混合体系质量比、温度及剪切速率等。

1.3.1 pH值的影响

蛋白质是具有两性电荷特性的生物聚合物,大多数蛋白质的等电点(isoelectric points, pI)在5.0左右。一般情况下,多糖和蛋白质在pH值高于等电点(pI)的情况下混合时,由于这2种聚合物携带相同的负电

荷,不会发生静电吸引。一旦其pH值降低到蛋白质的pI以下,静电吸引足够强时,会导致多糖与蛋白质复合物的形成。贾润红^[6]通过研究糖基化花生蛋白在不同pH值(3.0~8.0)下乳化特性的变化,发现当pH值在蛋白质等电点(pI)附近时,蛋白质凝聚,乳化性降低。Li等^[7]通过研究发现大豆分离蛋白-壳聚糖(soy protein isolate-chitosan, SPI-CS)凝聚物(pH7.0)和大豆分离蛋白-羧甲基纤维素(soy protein isolate-carboxymethyl cellulose, SPI-CMC)凝聚物(pH3.0)均表现出明显的凝胶型流变行为,表明大豆分离蛋白和多糖没有形成复杂凝聚体,而是形成聚合物间复合物。Behrouzain等^[8]通过对3种不同pH值下罗勒籽胶和乳清分离蛋白的相互作用进行研究,结果发现,在pH5.0时罗勒籽胶和乳清分离蛋白间相互作用最大,在pH6.0时可溶性络合物逐渐形成,在pH7.0时热力学不相容相互作用开始形成。

1.3.2 盐离子浓度的影响

添加盐对多糖-蛋白质复合物的形成也有重要影响,主要包括两个方面,第一,添加盐可以屏蔽2种生物大分子携带的电荷,进而减少复合物与其他复合物相互作用的数量。第二,当盐浓度增加时,凝结在生物复合物上的反离子具有更好的静电屏蔽能力,解离也更加困难,因此抑制多糖-蛋白质复合物的凝聚^[9]。此外,在添加盐之后,溶液的介电常数发生变化,不利于复合物的形成。

1.3.3 混合体系质量比的影响

当pH值和盐离子浓度确定时,混合体系的质量比会影响多糖和蛋白质混合体系的电荷平衡,从而影响复合物的形成^[10]。张予心等^[11]发现,当乳清蛋白/海藻酸钠的质量比为5:1时,其复合物具有良好的凝胶质构特性,当减少海藻酸钠添加量时,其持水性增加,结果表明,混合体系质量比的不同,不仅影响复合物的形成,也使复合物的功能性存在一定差异。

1.3.4 温度的影响

温度影响多糖与蛋白质之间的络合和凝聚,降低温度可以促进多糖与蛋白质间的相互作用。其中,氢键、疏水相互作用等受温度影响较大。低温有利于氢键形成,高温有利于疏水相互作用。张莎莎等^[12]研究不同温度(4、30、60℃)下,复合物所产生的影响。研究表明,温度越高,木糖-甘氨酸美拉德反应进程越快,木糖-甘氨酸美拉德反应产生特征性颜色的时间越短;同时低温条件下,木糖-甘氨酸美拉德反应进程较慢,木糖-甘氨酸美拉德反应产生的特征性颜色越鲜亮。

1.3.5 剪切速率的影响

除温度外,剪切速率也会影响凝聚现象,由于界面不稳定,多糖与蛋白质所形成的凝聚体可以在较高

的剪切速率下被搅拌分解,从而导致凝聚体破碎成更小的凝聚体颗粒,但在大多数情况下,其对多糖-蛋白质复合物的形成没有明显影响。

2 多糖-蛋白质复合物的制备方法

目前,多糖-蛋白质复合物制备方法主要有干热法、湿热法、超声法及微波法等^[13]。其中,干热法和湿热法是制备多糖-蛋白质复合物的主要方法,随着科学技术的发展,超声法和微波法也逐渐成为制备多糖-蛋白质复合物的方法。由于不同的制备方法具有不同特点,因此需综合考虑,具体如表1所示。

表1 多糖-蛋白质复合物制备方法比较
Table 1 Comparison of methods for the preparation of polysaccharide-protein complexes

制备方法	优点	缺点	参考文献
干热法	反应条件温和	反应速率较慢,反应周期较长,反应效率降低	[14]
湿热法	反应持续时间较短,反应速度较快	反应温度较高,容易造成蛋白质快速变性	[15]
超声法	能够加速美拉德反应进程,缩短反应时间	产业化实现难度较大	[16]
微波法	加热均匀,缩短反应时间,改善多糖与蛋白质复合物的功能性	实现规模化和产业化具有较大的难度	[17]

3 多糖-蛋白质复合物的功能特性

多糖和蛋白质是食品中的重要组成成分,两者相互作用形成复合物,其功能特性是以蛋白质为基础,加入多糖使蛋白质改性或强化蛋白质的功能,进而提高产品功能特性,使产品更稳定。

3.1 乳化特性

在食品体系中,多糖和蛋白质均具有稳定乳化液的能力,但蛋白质的乳化特性易受pH值、温度、离子强度等环境的影响,使其在食品加工应用中受到限制。有研究发现,在乳液体系中加入多糖可以增强乳液的流变学特性,从而提高乳化特性。Soltani等^[18]制备了甜菜果胶-玉米醇溶蛋白复合物,由于 ζ -电位测量的空间斥力和静电斥力的增强,明显提高了乳液的稳定性。多糖-蛋白质复合物的乳化特性在较高盐离子浓度、高温、低pH值环境下的影响较小,但易受多糖分子量、多糖含量、多糖结构、反应时间以及赖氨酸含量的影响^[19]。Chen等^[20]制备了卵黄磷蛋白-葡聚糖共价复合物,通过研究不同pH值条件下,卵黄磷蛋白、卵黄磷蛋白-葡聚糖混合物、卵黄磷蛋白-葡聚糖共价复合物的溶解度、 ζ -电位、界面厚度发现,当pH4.0时,卵黄磷蛋白-葡聚糖共价复合物的溶解度从53.0%增加到79.3%;当pH值从7.0降至4.0时, ζ -电位有所下

降。当pH4.0时,乳胶颗粒吸附的卵黄磷蛋白与葡聚糖偶联可明显增加其界面厚度。卵黄磷蛋白-葡聚糖共价复合物的乳化液稳定性指数最高,平均直径波动较小,说明卵黄磷蛋白与葡聚糖偶联是提高其乳状液在不利pH值环境下稳定性的有效方法。Mengibar等^[21]用不同分子质量(1.3 kDa~56.0 kDa)的可溶性壳聚糖和 β -乳球蛋白进行美拉德反应,研究产物及其功能特性,结果表明,分子质量为56.0 kDa的壳聚糖与 β -乳球蛋白反应后得到的偶联物的乳化性能得到改善,且随着反应时间的延长,偶联物的乳化特性逐渐下降。Klinchongkon等^[22]为改善乳清分离蛋白的乳化特性,在80℃、相对湿度79%的反应条件下将乳清分离蛋白与果胶反应6h,结果发现,果胶和乳清分离蛋白复合物的乳化特性最佳,但随着反应时间的延长,复合物的乳化特性呈现下降的趋势。

3.2 溶解特性

蛋白质来源广泛、价格低廉,但在水中溶解度较差,因此在食品工业中的应用受到限制。多糖-蛋白质复合物中由于多糖链的引入,多羟基的亲水特点使蛋白质分子的溶解性明显增强,甚至使蛋白质在其等电点处的溶解特性改变,从而扩大了蛋白质在食品工业中的应用。Kasran等^[23]在干燥条件(60℃、相对湿度75%,3d)下,制备了大豆乳清分离蛋白(soy whey protein isolate, SWPI)-香豆胶复合物,研究在温度22℃、pH3~8时,大豆乳清分离蛋白(SWPI)、大豆乳清分离蛋白(SWPI)-香豆胶混合物、大豆乳清分离蛋白(SWPI)-香豆胶复合物的溶解性及乳化特性。结果发现,大豆乳清分离蛋白(SWPI)-香豆胶复合物在蛋白质等电点处的溶解性高于大豆乳清分离蛋白(SWPI)、大豆乳清分离蛋白(SWPI)-香豆胶混合物。

3.3 热稳定特性

蛋白质的缺点是具有热不稳定性,非常容易受到热诱导的变性和聚合的影响,从而导致其溶解性和功能性的降低,将多糖加入到富含蛋白质的产品中可以提高产品的稳定性^[24]。Álvarez等^[25]研究了天然蛋白质和猪血分离蛋白-葡聚糖共价复合物在pH4.0和pH7.0条件下的热稳定特性,结果发现,猪血分离蛋白-葡聚糖共价复合物的热稳定性比天然蛋白质高出40%以上,能够更好地抵抗热处理带来的聚结和沉淀,最终保护蛋白质原本的结构。

4 多糖-蛋白质复合物在食品中的应用

食品是由水、碳水化合物、蛋白质等按一定的质量比研究生产出来的,这些组分之间产生相互作用,不仅赋予食品独特的风味,改善食品的质构,还为新产品的开发与应用提供途径,拓宽道路。

4.1 新型食品

近年来,随着人们营养观念的转变和对营养要求的提高,更多的食品企业倾向于低脂产品的开发,多糖-蛋白质复合物由于具有优良的乳化特性、表面活性和黏性,可以降低部分食品中的脂肪含量,因此受到食品企业的广泛关注。Zhang等^[26]发现将银耳多糖-肌原纤维蛋白复合物添加到食品中,不仅降低了食品中脂肪的含量,其硬度、弹性和持水性也明显增加。Liu等^[27]将大豆蛋白水解物(SPH)及其与黄原胶复合物(SPH/XG)作为脂肪替代品用于生产低脂冰淇淋,结果发现,使用大豆蛋白水解物-黄原胶复合物虽然降低了冰淇淋中的脂肪含量,但外观、口感和质地变化微乎其微,因此其可在低脂冰淇淋的生产中应用。

4.2 复合膜材料

多糖和蛋白质复合膜与单体膜相比,光、水蒸气透过率、机械性能、吸水性和疏水性更好,并且可被降解^[28]。曾丽萍等^[29]在壳聚糖/酪蛋白酸钠质量比为4:1、pH4.5、甘油质量分数为0.75%的条件下,制备出机械性能和阻水性能良好的可食性复合膜。Poverenov等^[30]首次研究壳聚糖-明胶(chitosan-gelatin, CH-GL)复合涂层对辣椒果实品质和耐贮性的影响,结果发现,利用复合涂层技术,在不影响果实品质的前提下,辣椒冷藏贮藏期成功延长至3周,货架贮藏期延长至14 d。陈洪彬等^[31]研究鱼皮明胶-壳聚糖涂膜处理对西番莲果实品质的影响,发现使用鱼皮明胶-壳聚糖复合涂膜后的西番莲果实的外观色泽、失重率等均优于单体涂膜所得到的效果。Esparvarini等^[32]将明胶-淀粉(gelatin-starch, GS)复合膜应用于超滤奶酪,对比了覆膜和未覆膜的超滤奶酪在储存56 d的物理、化学和微生物的变化,结果发现,覆膜奶酪在水分、脂质氧化、pH值和可滴定酸度等方面均比未覆膜奶酪更稳定。

5 总结及展望

综上,多糖和蛋白质具有较高的营养价值和功能特性,两者间的相互作用对食品行业有重要的影响。多糖和蛋白质的相互作用机理复杂多样,易受pH值、盐离子浓度、混合体系的质量比、温度及剪切速率的制约,且会引起其加工特性、营养价值、生物活性等方面的变化。通过两者的相互作用可以改善乳化性、溶解特性和热稳定性等,赋予其新的价值,从而拓宽多糖与蛋白质的应用领域。随着人们健康意识以及对食品添加剂要求的提高,多糖-蛋白质复合物作为一种天然食品添加剂成为热点研究内容,但目前还处于基础研究阶段,对多糖-蛋白质复合物的研究主要集中在其制备、影响因素上,对多糖-蛋白质相互作用的机理、作用类型和作用位点及混合体系微观结构等方面尚有

待进一步深入研究。因此应对其进行深入探索,使其更好地应用在食品中,更好地满足消费者的需要。

参考文献:

- [1] 王妍,陈雨春,王畅,等.乳清蛋白的功能特性及其在乳制品生产中的应用[J].食品安全导刊,2021(18):40-42.
WANG Yan, CHEN Yuchun, WANG Chang, et al. Functional characteristics of whey protein and its application in dairy production[J]. China Food Safety Magazine, 2021(18): 40-42.
- [2] GONZÁLEZ A, BARRERA G N, GALIMBERTI P I, et al. Development of edible films prepared by soy protein and the galactomannan fraction extracted from *Gleditsia triacanthos* (Fabaceae) seed[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97: 105227.
- [3] SHEN T, DUAN C, CHEN B D, et al. *Tremella fuciformis* polysaccharide suppresses hydrogen peroxide-triggered injury of human skin fibroblasts via upregulation of SIRT1[J]. Molecular Medicine Reports, 2017, 16(2): 1340-1346.
- [4] ZHENG Q W, HE B L, WANG J Y, et al. Structural analysis and antioxidant activity of extracellular polysaccharides extracted from culinary-medicinal white jelly mushroom *Tremella fuciformis* (tremellomycetes) conidium cells[J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2020, 22(5): 489-500.
- [5] 宗玉霞,马海燕,李群飞,等.岩藻多糖海藻酸钠-大豆分离蛋白体系的相互作用研究[J].中国食品添加剂,2021,32(9):113-120.
ZONG Yuxia, MA Haiyan, LI Qunfei, et al. Study on the interaction between fucoidan sodium alginate and soybean protein isolate[J]. China Food Additives, 2021, 32(9): 113-120.
- [6] 贾润红. pH对糖基化花生蛋白乳化特性的影响[J].粮食与油脂, 2021, 34(3): 107-110.
JIA Runhong. Effect of pH on emulsification of glycosylated peanut protein[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(3): 107-110.
- [7] LI G Y, CHEN Q H, SU C R, et al. Soy protein-polysaccharide complex coacervate under physical treatment: Effects of pH, ionic strength and polysaccharide type[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 68: 102612.
- [8] BEHROUZAIN F, RAZAVI S M A, JOYNER H. Mechanisms of whey protein isolate interaction with basil seed gum: Influence of pH and protein-polysaccharide ratio[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 232: 115775.
- [9] WAGONER T, VARDHANABHUTI B, FOEGEDING E A. Designing whey protein-polysaccharide particles for colloidal stability[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2016, 7: 93-116.
- [10] LI G, HUANG J Y, CHEN T, et al. Insight into the interaction between chitosan and bovine serum albumin[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 176: 75-82.
- [11] 张予心,蔡丹,宋秋梅,等.乳清蛋白与海藻酸钠复合物凝胶特性的影响因素[J].中国食品学报,2017,17(5):40-48.
ZHANG Yuxin, CAI Dan, SONG Qiumei, et al. Influence factors of characteristic of whey protein and alginate sodium compound gel[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(5): 40-48.
- [12] 张莎莎,景浩.不同温度对木糖-甘氨酸美拉德反应特征性颜色的影响[J].食品科技,2014,39(1):250-254,258.
ZHANG Shasha, JING Hao. Temperature effect on characteristic color formation and antioxidant activity in Xyl-Glycine Maillard reaction model system[J]. Food Science and Technology, 2014, 39(1): 250-254, 258.
- [13] 张涛.果胶(多糖)-蛋白质复合物制备研究进展[J].食品安全导

- 刊, 2021(28): 167, 169.
- ZHANG Tao. Research progress in preparation of pectin (polysaccharide)-protein complex[J]. China Food Safety Magazine, 2021(28): 167, 169.
- [14] BÜHLER J M, DEKKERS B L, BRUINS M E, et al. Modifying faba bean protein concentrate using dry heat to increase water holding capacity[J]. Foods (Basel, Switzerland), 2020, 9(8): 1077.
- [15] 杜沁岭, 周思懿, 吴岱泽, 等. 湿法糖基化处理大豆 11S 蛋白后的表面活性变化[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(1): 80-88.
- DU Qinling, ZHOU Siyi, WU Daize, et al. Changes in surface activity of soybean 11S protein treated by glycosylation by means of wet-heating[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(1): 80-88.
- [16] CHEN W J, MA X B, WANG W J, et al. Preparation of modified whey protein isolate with gum acacia by ultrasound Maillard reaction[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 298-307.
- [17] NAMLI S, SUMNU S G, OZTOP M H. Microwave glycation of soy protein isolate with rare sugar (D-allulose), fructose and glucose[J]. Food Bioscience, 2021, 40: 100897.
- [18] SOLTANI S, MADADLOU A. Two-step sequential cross-linking of sugar beet pectin for transforming zein nanoparticle-based Pickering emulsions to emulgels[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 136: 738-743.
- [19] ANAL A K, SHRESTHA S, SADIQ M B. Biopolymeric-based emulsions and their effects during processing, digestibility and bioaccessibility of bioactive compounds in food systems[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 691-702.
- [20] CHEN H Y, JIN Y M, DING X L, et al. Improved the emulsion stability of phosvitin from hen egg yolk against different pH by the covalent attachment with dextran[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 39: 104-112.
- [21] MENGÍBAR M, MIRALLES B, HERAS Á. Use of soluble chitosans in Maillard reaction products with β -lactoglobulin. Emulsifying and antioxidant properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 440-446.
- [22] KLINCHONGKON K, KHUWIJITJARU P, ADACHI S, et al. Emulsifying properties of conjugates formed between whey protein isolate and subcritical-water hydrolyzed pectin[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 91: 174-181.
- [23] KASRAN M, CUI S W, DOUGLAS GOFF H. Emulsifying properties of soy whey protein isolate-fenugreek gum conjugates in oil-in-water emulsion model system[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30(2): 691-697.
- [24] DIAH SETIOWATI A, WIJAYA W, VAN DER MEEREN P. Whey protein-polysaccharide conjugates obtained via dry heat treatment to improve the heat stability of whey protein stabilized emulsions[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 98: 150-161.
- [25] ÁLVAREZ C, GARCÍA V, RENDUELES M, et al. Functional properties of isolated porcine blood proteins modified by Maillard's reaction[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 28(2): 267-274.
- [26] ZHANG Y K, ZHANG Q, LU J, et al. Physicochemical properties of *Tremella fuciformis* polysaccharide and its interactions with myofibrillar protein[J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2017, 11: 18-25.
- [27] LIU R, WANG L G, LIU Y, et al. Fabricating soy protein hydrolysate/xanthan gum as fat replacer in ice cream by combined enzymatic and heat-shearing treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 39-47.
- [28] CONDÉS M C, AÑÓN M C, MAURI A N, et al. Amaranth protein films reinforced with maize starch nanocrystals[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 47: 146-157.
- [29] 曾丽萍, 樊爱萍, 闫伟. 响应面法优化壳聚糖/酪蛋白酸钠可食性膜的制备工艺[J]. 现代食品, 2021(21): 60-64, 71.
- ZENG Liping, FAN Aiping, YAN Wei. Optimization of preparation for chitosan/sodium caseinate edible film by response surface methodology[J]. Modern Food, 2021(21): 60-64, 71.
- [30] POVERENOV E, ZAITSEV Y, ARNON H, et al. Effects of a composite chitosan-gelatin edible coating on postharvest quality and storability of red bell peppers[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 96: 106-109.
- [31] 陈洪彬, 李书亮, 蒋璇靓, 等. 鱼皮明胶-壳聚糖复合涂膜对‘黄金’西番莲的保鲜效果[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(18): 134-141.
- CHEN Hongbin, LI Shuliang, JIANG Xuanjing, et al. Effects of fish skin gelatin-chitosan composite coating film on the preservation of passion (*Passiflora caerulea* L.) fruit[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(18): 134-141.
- [32] ESPARVARINI Z, BAZARGANI-GILANI B, PAJOHI-ALAMOTI M, et al. Gelatin-starch composite coating containing cucumber peel extract and cumin essential oil: Shelf life improvement of a cheese model[J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(3): 964-978.

加工编辑:张昱
收稿日期:2022-07-05