

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.02.018

刘璐, 庞杰. 魔芋葡甘聚糖复合凝胶网络结构的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(2): 129-134.

LIU L, PANG J. Research progress on material and composite structure of konjac glucomannan composite gel[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(2): 129-134.

魔芋葡甘聚糖复合凝胶网络结构的研究进展

刘璐, 庞杰✉

(福建农林大学 食品科学学院, 福建 福州 350007)

摘要: 凝胶是一种性质介于固体和液体之间的特殊分散体系, 魔芋葡甘聚糖(KGM)凝胶稳定性差、强度低, 物理共混能方便、快捷地改善其凝胶性质。主要综述 KGM 复合凝胶的网络结构变化, 并介绍不同复合凝胶在食品、医药、材料工程等领域的应用。分析表明, KGM 复合凝胶网络能通过氢键、席夫碱反应、形成多重网络结构和填充的方式改善其凝胶特性。

关键词: 魔芋葡甘聚糖; 复合凝胶; 物理共混; 氢键; 席夫碱反应

中图分类号: TS201.7 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)02-0129-06

Research Progress on Material and Composite Structure of Konjac Glucomannan Composite Gel

LIU Lu, PANG Jie✉

(Fujian Agriculture and Forestry University, College of Food Science, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract: Gel is a special dispersion system with properties between solid and liquid. Konjac glucomannan (KGM) gel has poor stability and low strength, and physical blending can improve its gel properties conveniently and quickly. This paper mainly reviewed the network structure changes of KGM composite gels, and introduced the application of different composite gels in food, medicine, material engineering and other fields. The analysis showed that KGM composite gel network could improve its gel properties by hydrogen bonding, schiff base reaction, formation of multiple network structures and filling.

Key words: Konjac glucomannan; composite gel; physical blending, hydrogen bond; schiff base reaction

凝胶是高分子物质通过氢键、物理缠结和共价键交联的一种分散体系, 根据原料不同, 可以分为天然凝胶和人工合成的凝胶, 它既有固体的

性质, 也有液体的性质^[1]。一些天然的高分子(如多糖, 蛋白质等)能通过氢键、疏水相互作用、离子键等形成三维凝胶网络, 但由于交联结构的存在会影响凝胶的溶胀行为和稳定性^[2]。

KGM 是一种天然的高分子多糖, 其独特的结构赋予它许多优良特性, 如凝胶性、成膜性、抗菌性等。但是由于其具有力学性能差、吸水性强等缺点, 由 KGM 制成的单一材料的凝胶弹性小、易碎、且易塌陷, 凝胶强度和稳定性较弱^[3]。为了改善单一 KGM 凝胶的缺陷, 许多人用了物理、

收稿日期: 2020-11-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31772045)

Supported by: National Nature Science Foundation of China (No. 31772045)

作者简介: 刘璐, 女, 1998 年出生, 在读硕士生, 研究方向为食品加工与安全。E-mail: liulu1496@qq.com.

通讯作者: 庞杰, 男, 1965 年出生, 研究员, 研究方向为膳食纤维功能多糖。E-mail: pang3721941@163.com.

化学和生物改性的方式, 来改变凝胶的结构, 但是化学改性存在化学试剂的残留、反应物需另外去除、操作过程麻烦的缺点, 生物改性存在操作条件严苛、产量低的缺点^[4], 因此, 可以选用物理改性的方法来改善凝胶特性。通过加入不同的复配材料, 改变 KGM 基凝胶网络, 以此达到协同增效的作用, 扩大其应用范围^[5], 比如能作为食品添加剂改善食品品质^[6]、制作仿生食品^[7]、作为药物载体控制药物的释放^[8]、制作环保型生物吸附材料^[9]等。复配材料的选择多种多样, 有多糖、蛋白质、无机材料等, 它们能与 KGM 相互交缠, 形成各种凝胶网络, 起到改善凝胶稳定性、凝胶强度、流变性能、凝胶结构等作用。

凝胶的微观结构在很大程度上决定了凝胶的性能^[10], 且不同共混体系下的 KGM 复合凝胶在微观结构上存在着很大的差异^[11]。在近年复配材料的选择上, 存在着稳定性差、成本较高的问题, 所以选择一种能显著提高 KGM 稳定性且价格低廉的复配材料是我们的研究目标。根据“相似性原理”可知, 结构相似的化合物也会具有相似的功能活性, 但是能与 KGM 复配的化合物多种多样, 而通过试验一个个尝试将会耗费大量的时间。本文整理了近年来 KGM 复合凝胶的研究, 重点描述了 KGM 复合凝胶中的网络结构变化, KGM 复合凝胶网络能通过氢键、席夫碱反应、形成多重网络结构和填充的方式改善其凝胶特性 (见图

1), 为 KGM 复合凝胶复配材料的选择提供了理论依据。



图 1 KGM 基复合凝胶网络
Fig.1 KGM-based composite gel network

1 KGM 中的活性基团

KGM 是 D-葡萄糖和 D-甘露糖以 β -1,4 和 β -1,3 糖苷键连接而成的可溶性杂多糖^[12], 其摩尔比约为 1:1.6, 乙酰基随机附着在 C-6 位置上^[13], 乙酰基的存在能够维持 KGM 的构象, 使 KGM 呈空隙的双螺旋网络结构, 能保持大量水分, 使 KGM 拥有较好的溶解性和溶胀倍数^[15]。乙酰基能提供 2 个氢键供体或是 4 个氢键受体, 在物质相互作用过程中提供氢键^[14]。KGM 结构中含有大量的羟基, 使 KGM 具有良好的水溶性, 也能通过与复合材料中的官能团交联, 形成氢键^[16]。KGM 结构如图 2。

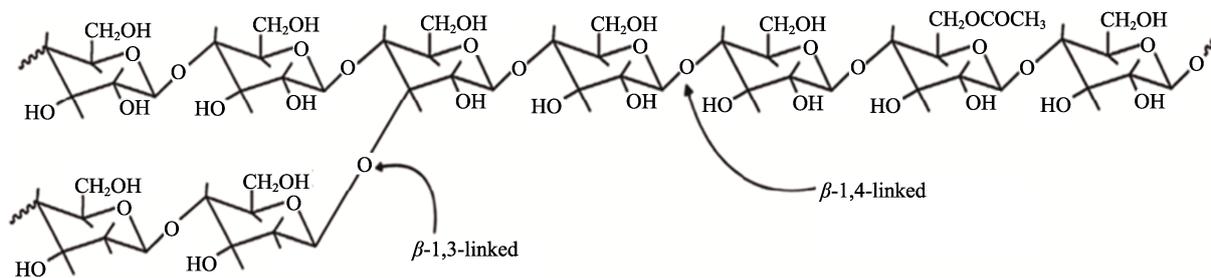


图 2 KGM 结构中存在羟基和乙酰基^[16]
Fig.2 The KGM structure contains hydroxyl and acetyl groups

2 KGM 复合凝胶网络结构

2.1 形成氢键

KGM 分子链中存在羟基, 能与复合材料中的官能团形成氢键, 能形成比单一 KGM 凝胶更加紧凑的网络结构, 出现更致密的结构和相互连通的孔, 能增强凝胶的稳定性和凝胶强度。形成氢

键的复合机理如表 1 所示。

2.2 席夫碱反应

KGM 在改性后会和多糖发生席夫碱反应, 形成动态交联网络, 主要应用于医药领域, 其网络形成机制如图 3 所示。Jiang 等^[24]和 Chen 等^[25]发现氧化魔芋葡甘聚糖 (OKGM) 中的醛基

表 1 复合凝胶形成氢键
Table 1 The composite gel forms hydrogen bonds

复合材料	制备方法	复合机理	应用	参考文献
微晶纤维素 (MCC)	将 MCC 浸入多巴胺溶液中使其功能化, 再将一定量的功能化 MCC 分散在 KGM 溶液中, 水浴加热后冷却。	将功能化后的 MCC 引入 KGM 凝胶中, 两分子中的羟基生成了较强的氢键, 形成了更加紧凑的相互连通的多孔结构, 提高其稳定性和自愈能力。	药物储存、药物载体	[17]
刺云实胶 (TG)	混合 KGM 和 TG 粉末, 溶于水, 水浴加热后冷却。	TG 中的半乳糖支链中含有较多的羟基, 能与 KGM 复配产生分子间氢键, 其交缠点的结构紧密, 形成的拓扑网络对水分子有包埋作用, 使凝胶稳定性上升。	增稠剂、胶凝剂	[18]
羧甲基化纤维素 (CCNC)	混合 KGM 与 CCNC 粉末, 溶于水中, 水浴加热后冷却。	添加 CCNC 后形成的氢键, 能减少 KGM 凝胶的结构断层和空洞, 提高结构的紧密程度和稳定性。大分子之间的缠结形成了交联空间的网状结构, 能抵抗一定的外力破坏作用。	药物缓释、吸附重金属	[19]
黄耆胶 (GT)	KGM 粉和 GT 粉分别溶解于去离子水, 并混合成溶液。混合溶液置于 4 °C 储存形成水凝胶。	KGM 中的羟基和乙酰基与 GT 中的羟基形成氢键, 形成三维网络。网络中有大量游离的羟基、羧基等功能残基, 能加强分子内和分子间联系, 使水填充大分子之间的空间, 改善了复合凝胶的固体性能。		[20]
氧化石墨烯 (GO)	一步溶胶-凝胶法	脱乙酰后的 KGM 与 GO 生成的气凝胶有很强的氢键相互作用, 并限制了 KGM 分子的迁移率, 形成了丰富的多孔结构, 显著提高了复合气凝胶的力学性能和稳定性。	支撑载体	[21]
壳聚糖/富里酸纳米颗粒 (CFMP)	不同浓度的 KGM 和 CFMP 溶液混合, 水浴加热后冷却。	CFMP 中的羧基与 KGM 中的羟基反应形成了氢键, 纳米颗粒具有填充的作用, 复合凝胶形成了致密的结构和相互连通的孔, 改善了凝胶的网络结构。	药物释放	[22]
酪蛋白	将 KGM 粉末加入分散后的酪蛋白溶液中, 冷却后置于不同静电电压环境下进行加工。	在静高压的条件下, 主链的官能团结构不变, 非共价键作用被修饰, 在适当的压力下, 体系相互靠近且增强了其氢键, 形成了多孔的网状结构。	食用膜、化妆品、洗涤剂等领域	[23]

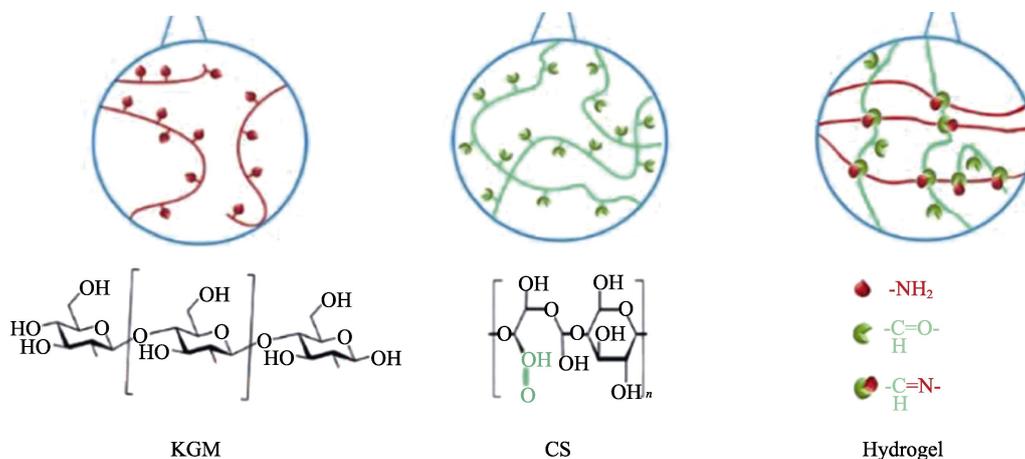


图 3 席夫碱反应形成凝胶机制^[25]
Fig.3 The reaction of Schiff base forms gel mechanism

(-CHO) 会与壳聚糖 (CS) 中的氨基 (-NH₂) 发生席夫碱反应, 生成的席夫碱连接 OKGM 和 CMCS 形成动态凝胶网络, 形成了大孔隙。且在动态平衡中, 亚胺键能频繁断裂、再生, 使其拥有良好的自动愈合能力, 可以在生物医疗领域得到应用。但是席夫碱反应过程中会消耗氨基, 降低凝胶的抗菌性能, 所以该凝胶还有再改善的空间。苏扬^[26]将 OKGM 与改性后的羟丙基甲壳素

混合, 通过氨基和醛基的缩合反应形成席夫碱动态键制作水凝胶, 并在该水凝胶中载入纳米颗粒, 成功合成了一种成像和治疗一体化的纳米复合水凝胶, 推动了医学成像领域的发展。

通过席夫碱反应形成的凝胶还可以应用于组织工程领域, 由于形成的交联网络是动态的, 赋予了凝胶良好的自愈能力。王玉龙^[27]将带有活性醛基的 OKGM 与带有大量氨基的聚乙烯亚胺作

为原料,混合后使醛基和氨基反应形成席夫碱键,通过这种动态交联反应构建水凝胶,由于亚胺键的存在,这种水凝胶具有较好的 pH 敏感性和自愈性,还具有良好的生物 3D 打印适性。

2.3 形成多重交联网络

根据 KGM 凝胶力学性能差这一缺点,研究者们构建出了不同体系的凝胶,用一锅法或顺序法将已经形成的物理和化学网络交联起来,形成稳定的复合凝胶网络结构,极大地增强了凝胶的力学性能和抗拉强度。多重交联网络凝胶包括互穿网络凝胶、双网络凝胶、网格状凝胶,不仅存在氢键的作用,还有化学键的作用。交联方式如

图 4 和表 2 所示。

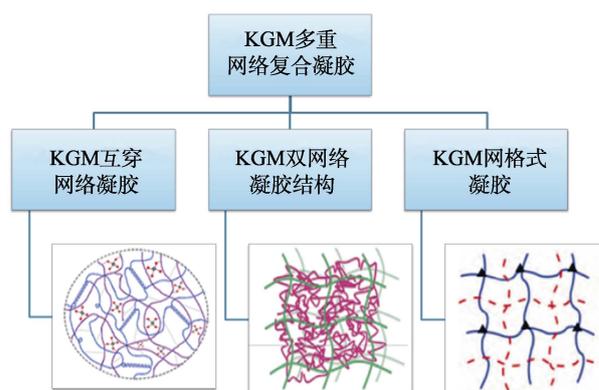


图 4 KGM 多重网络结构

Fig.4 KGM multiple network structure

表 2 复合凝胶的网络交联方式

Table 2 The network crosslinking method of composite gel

复合材料	制备方法	网络交联	应用	参考文献
k-卡拉胶 (KC)	先在 KGM 中加入硼砂, 构建凝胶网络, 再引入 KC。	通过硼酸酯键连接的 KGM 化学凝胶网络与通过氢键连接的 KC 物理凝胶网络交联形成互穿网络。		[28]
黄原胶 (XG)	在碱性条件下混合 KGM 和 XG, 并加热至 90 °C 后冷却。	碱性高温条件下, KGM 缓慢形成凝胶, 在冷却过程中, XG 与 KGM 凝胶在非共价键的作用下结合形成密集的双网络。	用于改善 KGM 凝胶的物理性质	[29]
可得然胶 (CUD)	直接混合 KGM 和 CUD 溶液, 并在 90 °C 下加热后冷却。	两者的凝胶网络都是通过分子间氢键和疏水相互作用形成的, 两分子链再经过纠缠, 形成互穿网络。	仿生食品	[30]
明胶	冷冻干燥法	蛋白质凝胶网络由氨基酸残基中的氢键连接, KGM 亦通过氢键形成凝胶网络。两者通过 KGM 中的羟基和蛋白质中的羰基形成的氢键交联而成。	植入人体的软骨组织工程支架	[31]
聚乙烯醇 (PVA)	冷冻干燥法	IPN 支架中存在氢键, 存在氢氧化铵物理交联网络的网络支架。	骨组织工程	[32]

2.4 填充作用

KGM 凝胶与蛋白质、纳米颗粒之间同时存在交联与填充作用。可能是蛋白质在凝胶中起填充作用, 提高凝胶强度, 也可能是经过改性后的 KGM 分子量变小, 填充在凝胶结构的孔隙间, 改变了凝胶的内部结构。

王良玉^[33]将辐照后的 KGM 与罗非鱼肌原纤维蛋白直接混合后发现, KGM 在辐照后分子量变小, 可以填充在蛋白质网络的空隙间, 使得复合网络中同时存在交联与填充两种连接方式, 使得复合网络对水的束缚力增大, 增强了凝胶的强度和持水能力。Ji^[34]等用微波加热的方式制备了 KGM/玉米蛋白凝胶, KGM 作为聚合物插入蛋白质凝胶网络的空隙中, 能有助于维持蛋白质的二级结构和分子数, 增强凝胶的强度和持水能力。

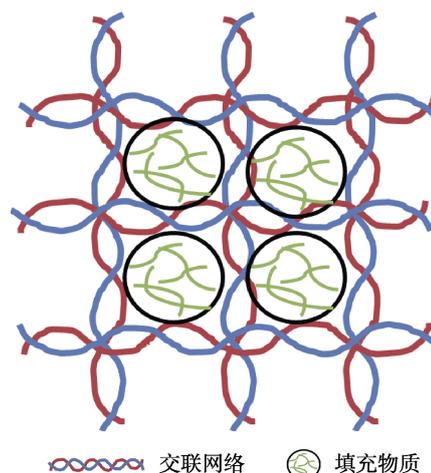


图 5 复合凝胶的填充作用

Fig.5 The filling action of compound gel

谢建华等^[35]混合了 KGM 与大黄鱼肌原纤维蛋白, 由于纤维蛋白在凝胶中起填充作用, 提高了凝胶强度。

Dai^[36]等制备了 KGM/k-卡拉胶凝胶, 并加入改性玉米淀粉颗粒来填充凝胶网络中的空隙, 形成了紧密相连的网络结构, 提高了凝胶的稳定性。Veerasubramanian 等^[37]制备的 KGM/人发蛋白 (KER) 凝胶结构中具有较大的孔隙, 加入燕麦乙醇提取物颗粒后, 颗粒插入孔隙, 降低孔隙率, 使凝胶具有良好的多孔性, 能促进气体、营养交换, 提供了良好的生物活性, 能应用于创面辅料中。

3 结论

综上所述, KGM 复合凝胶的性质可以通过外部环境的改变而改变, 在改善 KGM 凝胶性能的方法中, 物理共混是最方便、最快捷的方法之一, KGM 可以通过与多糖、蛋白质等物质复合来制备具有更佳凝胶性能的新型凝胶, 拓宽其应用领域, 其主要的凝胶机理是 KGM 上的活性基团与复配材料的官能团发生氢键交联、填充或是发生动态反应来改善凝胶网络。因此, KGM 复合凝胶的网络结构的研究对其在食品、医药、组织工程等领域的应用有很大的参考价值。

但是在复配材料的选择上, 还存在一定的研究空间, 物理共混凝胶还存在可逆性的缺陷。目前还需要筛选能与 KGM 交联形成更强氢键的物质, 寻找分子大小合适、与 KGM 有良好填充作用的复配材料来改善 KGM 凝胶性能; 在制备凝胶时, 选择更加合适的外部条件 (如: 温度、pH 值、压力等), 帮助 KGM 复合凝胶形成更加稳定的交联网络。

虽然目前对于 KGM 凝胶的研究有很多, 但是目前缺少一个平台对 KGM 复合凝胶体系进行分类与归纳, 无法从现有的复合凝胶中比较各个凝胶的差异, 构建 KGM 复合凝胶数据库来帮助实现凝胶性能的改善是今后 KGM 复合凝胶的一大研究方向。

参考文献:

[1] LI B, XIE B J. Mechanism of konjac glucomannan gel[J]. Chinese Agricultural Science, 2002(11): 1411-1415.
 [2] ABBASZADEH A, MACNAUGHTAN W, SWORN G, et al. New insights into xanthan synergistic interactions with konjac glucomannan: A novel interaction mechanism proposal[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 144: 168-177.
 [3] ZHOU Y, JIANG R S, PERKINS W S, et al. Morphology evolution

and gelation mechanism of alkali induced konjac glucomannan hydrogel[J]. Food chemistry, 2018, 269.
 [4] BEATRIZ H, CLARA A T, BEATRIZ SOLO-DE-ZALDÍVAR, et al. Effect of alkalis on konjac glucomannan gels for use as potential gelling agents in restructured seafood products[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 27(1): 145-153.
 [5] ZHU F. Modifications of konjac glucomannan for diverse applications[J]. Food Chemistry, 2018, 256(1): 419-426.
 [6] WANG Y, CHEN Y, ZHOU Y, et al. Effects of konjac glucomannan on heat-induced changes of wheat gluten structure[J]. Food Chemistry, 2017, 229(15): 409.
 [7] 王梅, 黄团, 陈恩发. 魔芋加工应用现状及其研究进展[J]. 农技服务, 2019, 36(2): 59-61+63.
 WANG M, HUANG T, CHEN E F. Current status and research progress of konjac processing and application[J]. Agricultural Technology Services, 2019, 36(2): 59-61+63.
 [8] WANG J, LIU C, SHUAI Y, et al. Controlled release of anticancer drug using graphene oxide as a drug-binding effector in konjac glucomannan/sodium alginate hydrogels[J]. Colloids & Surfaces B Biointerfaces, 2014, 113: 223-229.
 [9] LIU F, ZOU H, PENG J, et al. Removal of copper(II) using deacetylated konjac glucomannan conjugated soy protein isolate [J]. International journal of biological macromolecules, 2016, 86: 338-344.
 [10] JI L, XUE Y, ZHANG T, et al. The effects of microwave processing on the structure and various quality parameters of Alaska pollock surimi protein-polysaccharide gels[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63(2): 77-84.
 [11] MORENO H M, HERRANZ B, BORDERÍAS A J. Effect of high pressure treatment on the structural, mechanical and rheological properties of glucomannan gels[J]. Food Hydrocolloids, 2016: 437-444.
 [12] ABBASZADEH A, MACNAUGHTAN W, SWORN G, et al. New insights into xanthan synergistic interactions with konjac glucomannan: A novel interaction mechanism proposal[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 144: 168-177.
 [13] 王玉栋, 许东颖, 李张维, 等. 荧光法研究魔芋葡甘聚糖 (KGM) 水溶液的溶胶-凝胶转变机理[J]. 国际医药卫生导报, 2020, 26(10): 1333-1337.
 WANG Y D, XU Y Y, LI Z W, et al. Study on sol-gel transformation mechanism of Konjac Glucomannan (KGM) in aqueous solution by fluorescence spectrometry[J]. International Journal of Medicine and Health, 2020, 26(10): 1333-1337.
 [14] 袁毅, 王林, 庞杰, 等. A review of the development of properties and structures based on konjac glucomannan as functional materials[J]. 结构化学, 2017, 36(2): 346-360.
 YUAN Y, WANG L, PANG J, et al. A review of the development of properties and structures based on konjac glucomannan as functional materials[J]. Structural Chemistry, 2017, 36(2): 346-360.
 [15] GENEVRO G M, DE MORAES M A, BEPPU M M. Freezing influence on physical properties of glucomannan hydrogels[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 128:

- 401-405.
- [16] MUNEKATA P E S, DOMÍNGUEZ R, FRANCO D, et al. Effect of natural antioxidants in Spanish salchichón elaborated with encapsulated n-3 long chain fatty acids in konjac glucomannan matrix[J]. *Meat Sci*, 2017, 124: 54-60.
- [17] LIN W, YU D, YI Y, et al. Mussel-inspired fabrication of konjac glucomannan/microcrystalline cellulose intelligent hydrogel with pH-responsive sustained release behavior[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 113: 285-293.
- [18] 王晓珊, 吴先辉, 庞杰, 等. 刺云实胶对魔芋葡甘聚糖分子链拓扑缠结的分析[J]. *热带生物学报*, 2017, 8(3): 335-340.
WANG X S, WU X H, PANG J, et al. Effect of tara gum on the topological entanglement of konjac glucomannan molecular chain [J]. *Journal of Tropical Biology*, 2017, 8(3): 335-340.
- [19] 宁芊, 郭永辉, 吴春华, 等. 羧基化纤维素纳米晶须对魔芋葡甘聚糖复合凝胶性能的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2020(4): 87-93.
NING Q, GUO Y H, WU C H, et al. Effect on carboxyl cellulose nanocrystalline and konjac glucomannan composite hydrogel properties[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020(4): 87-93.
- [20] GONG J N, WANG L, WU J Y, et al. The rheological and physicochemical properties of a novel thermosensitive hydrogel based on konjac glucomannan/gum tragacanth[J]. *LWT*, 2019, 100.
- [21] YE S X, JIN W P, HUANG Q, et al. Da-KGM based GO-reinforced FMBO-loaded aerogels for efficient arsenic removal in aqueous solution[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 94.
- [22] 陈晓涵, 庞杰. 魔芋葡甘聚糖和壳聚糖/富里酸纳米颗粒组成的 pH 响应性水凝胶的制备(英文)[J/OL]. *食品科学*: 1-22.
CHEN X H, PANG J. Fabrication of pH-controlled release hydrogels composed of chitosan-fulvic acid microparticles and konjac glucomannan[J/OL]. *Food Science*: 1-22.
- [23] FU-SHENG Z, FANG M O, QIAO F, et al. Effect of high hydrostatic pressure processing on the structure and property of konjac glucomannan-casein mixture[J]. *Chinese Journal of Structural Chemistry*, 2018, 37(1): 55-64.
- [24] JIANG Y G, HUANG J J, WU X W, et al. Controlled release of silver ions from AgNPs using a hydrogel based on konjac glucomannan and chitosan for infected wounds[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 149: 148-157.
- [25] CHEN H L, CHENG J W, RAN L X, et al. An injectable self-healing hydrogel with adhesive and antibacterial properties effectively promotes wound healing[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 201.
- [26] 苏杨. 多聚赖氨酸修饰的钯碲纳米线在肿瘤光声成像和光热治疗中的应用[D]. 2019.
SU Y. The application of Poly-L-Lysine modified palladium tellurium nanowires in tumor photoacoustic imaging and photothermal therapy[D]. 2019.
- [27] 王玉龙. 基于席夫碱键的电活性水凝胶制备及其生物 3D 打印适应性研究[D]. 2019.
WANG Y L. Preparation and 3D bioprintability of electroactive hydrogels based on Schiff base bonds[D]. 2019.
- [28] CHEN Y, SONG C, LV Y, et al. Konjac glucomannan/kappa carrageenan interpenetrating network hydrogels with enhanced mechanical strength and excellent self-healing capability[J]. *Polymer*, 2019, 184.
- [29] YANG X, LI A, LI D, et al. Improved physical properties of konjac glucomannan gels by co-incubating composite konjac glucomannan/xanthan systems under alkaline conditions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020: 105870.
- [30] YE W, YAN B, PANG J, et al. A study of the synergistic interaction of konjac glucomannan/curdlan blend systems under alkaline conditions[J]. *Materials*, 2019, 12(21).
- [31] HU Y, LIANG H, XU W, et al. Synergistic effects of small amounts of konjac glucomannan on functional properties of egg white protein[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52.
- [32] A H K, B P T, A S C, et al. Design and evaluation of Konjac glucomannan-based bioactive interpenetrating network (IPN) scaffolds for engineering vascularized bone tissues[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 143: 30-40.
- [33] 王良玉. 魔芋葡甘聚糖与罗非鱼肌原纤维蛋白复合凝胶质构性质的研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(4): 36-41.
WANG L Y. Textural properties of konjac glucomannan-tilapia myofibrillar protein composite gels[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science)*, 2019, 41(4): 36-41.
- [34] JI L, XUE Y, ZHANG T, et al. The effects of microwave processing on the structure and various quality parameters of Alaska pollock surimi protein-polysaccharide gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63(2): 77-84.
- [35] 谢建华, 庞杰, 郑良燕. 大黄鱼肌原纤维蛋白-魔芋葡甘聚糖复合凝胶的凝胶质构研究[J]. *长春师范学院学报(自然科学版)*, 2019, 38(4): 75-78, 82.
XIE J H, PANG J, ZHENG L Y. Studies on texture characteristics of large yellow croaker myofibrillar protein-konjac glucomannan composite gel[J]. *Journal of Changchun Normal University (Natural Science)*, 2019, 38(4): 75-78, 82.
- [36] DAI J, DING M, CHEN J, et al. Optimization of gel mixture formulation based on weighted value using response surface methodology[J]. *CyTA - Journal of Food*, 2020, 18(1): 500-507.
- [37] VEERASUBRAMANIAN P K, PONRASU T, KANNAN R, et al. An investigation of konjac glucomannan-keratin hydrogel scaffold loaded with Avena sativa extracts for diabetic wound healing[J]. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 2018, 165: 92-102. ☞
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。