

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80229

脱乙酰魔芋葡甘聚糖特性及在食品领域中的应用研究进展

刘 凯¹ 张 玲² 王 菁¹

(1. 许昌职业技术学院园林与食品工程学院, 河南 许昌 461000; 2. 河南水产科学研究院, 河南 郑州 450040)

摘要: 魔芋葡甘聚糖(konjac glucomannan, KGM)是一种具有安全性、可生物降解性、可食用的天然可溶性膳食纤维,被广泛应用于食品与生物医药领域。KGM的可塑性差、稳定性低,通常需要通过共混改性、物理改性、化学改性来满足其生产需求,其中脱乙酰改性是目前KGM改性研究最为广泛的方法。目前,脱乙酰魔芋葡甘聚糖(DKGM)在食品领域主要用于食品添加剂、食品保鲜剂以及保健食品等方面。文章阐明了KGM在不同程度脱乙酰前后的特性变化以及脱乙酰后在食品工业中的应用进展和研究现状,并对其在食品中的未来发展趋势进行了展望。

关键词: 魔芋葡甘聚糖; 脱乙酰; 食品; 特性

Properties and research progress of deacetylated konjac glucomannan in food applications

LIU Kai¹ ZHANG Ling² WANG Jing¹

(1. School of Landscape and Food Engineering, Xuchang Vocational Technical College, Xuchang, Henan 461000, China;

2. Henan Academy of Fishery Sciences, Zhengzhou, Henan 450040, China)

Abstract: Konjac glucomannan (KGM) is a natural soluble dietary fiber that is safe, biodegradable, and edible, with wide application in food and biomedicine. However, due to low plasticity and stability, KGM usually requires blending, physical, and chemical modification for production. Currently, deacetylated konjac glucomannan (DKGM) is used in food mainly as a food additive, food preservative, and health food. This review elucidates the KGM property changes before and after different deacetylation degrees, as well as the application progress and research status of DKGM in the food industry, with prospects for its development trends.

Keywords: konjac glucomannan; deacetylation; food; property

魔芋是一种广泛分布于亚洲区域的植物,因其良好的口感和味道而被广泛应用^[1],也是生产魔芋葡甘聚糖(konjac glucomannan, KGM)的主要来源。KGM是一种由魔芋植物根茎中分离获得的天然高分子亲水多糖,作为一种安全的含有热量的膳食纤维,目前被广泛应用于减脂、改善肠道微生物功能以及改善体内胆固醇含量等方面^[2]。此外,因KGM具有良好的凝胶性、溶解性、结晶性、增稠性、成膜性、生物相容性、可生物降解性和安全性等优点^[3],在生物、医药、食品等领域均有很好的发展前

景^[4]。目前,KGM在食品工业领域方面主要作为动物、植物性食品中的添加剂,制备混合可食用膜以及生产魔芋食品。由于天然KGM存在疏水性较差、凝胶弹性低、析水率高和赋色难等缺点,极大限制了其在食品工业中的应用^[5]。此外,KGM的热敏性、高溶解性及低稳定性等问题,进一步限制了其食品工业化应用^[6]。

KGM是一种由比例约为1.6:1的甘露糖和葡萄糖,经 β -1,4糖苷键连接而成的线性多糖^[7]。此外,多糖链C-6位置连接着取代率约为5%~10%决定KGM吸湿性和凝胶性

基金项目:河南省精品在线开放课程《食品微生物学》(编号:2022360208)

通信作者:刘凯(1979—),女,许昌职业技术学院副教授,硕士。E-mail:liukai7904@163.com

收稿日期:2025-03-27 改回日期:2025-10-31

引用格式:刘凯,张玲,王菁. 脱乙酰魔芋葡甘聚糖特性及在食品领域中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2026, 42(2): 234-239.

Citation: LIU Kai, ZHANG Ling, WANG Jing. Properties and research progress of deacetylated konjac glucomannan in food applications [J]. Food & Machinery, 2026, 42(2): 234-239.

能的乙酰基^[8]。为扩大KGM在食品中的使用效果和范围,可通过共混、物理或化学改性手段调控KGM分子结构^[9]。共混改性通常是将KGM与其他多糖分子或蛋白质类进行混合复配,通过分子间的相互作用达到改变特性的目的。物理改性是通过物理手段,如高压、超声、微波等改变KGM的形态和性质。化学改性是通过化学方式,如脱乙酰基、氧化、接枝、交联等改变材料的形态和性质。不同改性方法均存在一定的缺点,共混改性的改性效果差,物理改性的成本高、效率低,化学改性后材质构化不均,可能存在化学污染的缺点。在对KGM进行加碱热处理以去除乙酰基的过程中,会出现构化不均的问题,若在反应期间持续对材料进行搅拌或震荡,能够减弱这种现象。此外,选用安全且易于除去的碱溶液,如氢氧化钠溶液、碳酸钠溶液,后续可用乙醇溶液洗涤的方式去除残留碱液,从而有效规避化学污染。因该方法产出率高、成本低、安全性高等优点,成为目前KGM改性应用研究的最广泛的手段。KGM通过加碱热处理来去除乙酰基,制得性质发生变化且结构几乎在所有温度均不可逆的脱乙酰魔芋葡甘聚糖(DKGM)凝胶^[10]。目前,DKGM在食品领域主要作为动植物产品的添加剂、食品保鲜工艺中的可食用膜,以及作为产品食用来达到保健的效果。

文章拟总结魔芋葡甘聚糖进行脱乙酰改性后的特性变化,以及脱乙酰魔芋葡甘聚糖在食品工业应用中的研究进展和现状,为实现脱乙酰魔芋葡甘聚糖在食品工业的推广应用提供参考,也为推动DKGM的进一步研究提供依据。

1 魔芋葡甘聚糖脱乙酰后特性变化

1.1 分子结构变化

KGM分子链上存在的乙酰基团是决定其理化性质和分子结构的重要因素,不同的脱乙酰度对KGM分子结构影响不同。随着脱乙酰度的增加,KGM的相对分子质量不断降低^[11],分子链由半柔性的状态不断转化为具有弹性的球体状态。这是因为高碱性环境破坏了敏感的主链键,导致KGM分子构象发生改变,双螺旋结构不断分解,分解后的分子链发生纠缠并聚集交联^[12]。

1.2 溶解度和持水率变化

亲水胶体的溶解度和持水率是影响其功能特性的关键指标。天然KGM具有良好的溶解性和持水率,但随着脱乙酰程度的增加,KGM的溶解度和持水率不断降低,在脱乙酰度达到最高时,溶解度和持水率达到最低^[11]。这是因为乙酰基的存在引起了空间位阻,阻碍了KGM分子间氢键的形成,空洞的双螺旋结构赋予胶体良好的溶解度与持水率^[13]。随着乙酰基的去除,KGM分子间相互作用力增强,分子链相互纠缠交联,所以溶解度和持水率不断下降。

1.3 粒度变化

粉末物质的粒径变化通常会导致其特定面积和延展性变化,并进一步影响其物理和化学性质,如溶解度、分

散性和生物活性等^[14]。随着脱乙酰程度的增加,KGM的粒径不断减小。KGM粒径的改变源于乙酰基的消除,这促进了分子间缔合。因此,乙酰基阻碍了KGM分子在水溶液中的溶解,降低了分子链的拉伸程度。这一现象反过来又有助于颗粒尺寸的减少^[15]。

1.4 热稳定性变化

热稳定性是胶体热诱导变性的一个重要指标,一定程度上反映了胶体分子持水能力和稳定性的强弱。随着脱乙酰程度的增加,KGM的变性温度逐渐向更低的温度变化且热重损失更少。这是因为KGM具有大量羟基,与水分相互作用较强,普通的干燥手段难以去除所有水分。去除乙酰基后,KGM持水率下降,与水分的相互作用减弱,所以变性温度较低。此外,DKGM的分子链缠绕得更加紧密,所以质量损失更少,稳定性更高。但是样品的干燥方式和脱水程度会在一定程度上影响胶体的持水能力和状态,进而影响热稳定性的变化趋势^[16]。

1.5 流变特性变化

流变特性是样品黏弹性特征的重要指标,可以反映样品的状态。随着脱乙酰程度的增加,KGM凝胶的储能模量和损耗模量不断上升。说明KGM分子去除乙酰基后,双螺旋结构被破坏并交联形成的状态更加紧密,分子间相互作用强度增加。此外,在频率范围内,凝胶的黏弹性随着频率的增加而增加。这种现象意味着DKGM形成的凝胶具有频率依赖性,由低频的类液体行为向高频的类固体行为转化^[11]。

1.6 微观特性变化

微观结构是影响多糖功能特性的重要因素^[17],可以反映多糖改性前后的物理结构变化。天然KGM颗粒表面相对光滑,呈现较为规则的沟壑状,结构相对有序。随着脱乙酰程度的增加,KGM表面变得更粗糙、不规则,并出现了一些孔洞和裂缝^[18]。DKGM微观结构的变化可能是由乙酰基去除后,双螺旋结构分解交联成的微球形结构引起的。

脱乙酰度对KGM特性的影响见表1。

2 在食品添加剂中的应用

2.1 动物性食品

在肉制品生产运输过程中,由于材料本身或运输过程中的冻融循环会造成肉制品凝胶变质、持水性下降以

表1 脱乙酰度对KGM特性的影响

Table 1 Effects of deacetylation degrees on KGM properties

脱乙酰度/%	相对分子质量($\times 10^3$)	溶解度/%	持水率/%	平均粒径/ μm	变性温度/ $^{\circ}\text{C}$	热重损失/%
0	200~300	92.3	97.5	118.7	105	12.3
50	150~200	71.8	83.6	85.4	93	9.1
100	80~120	48.5	60.2	54.9	84	6.8

及汁液流失等现象。为了提高肉制品品质,可在肉糜中添加冷冻保护剂^[19],其中多糖的掺入可以显著提升蛋白质凝胶的品质与形成能力^[20]。

Xu等^[21]采用热碱去乙酰制得脱乙酰度为63.84%的DKGM,并与鱼类肌球蛋白交联混合形成复杂凝胶,在40℃下进行热诱导。DKGM的加入不仅显著增强了肌球蛋白的凝胶强度,而且随着DKGM添加量的增加,还提高了鱼类肌球蛋白的风味结合能力。对混合凝胶进行90℃的二次诱导发现,鱼类肌球蛋白的风味结合能力降低,说明DKGM对于鱼类肌球蛋白低温热诱导有改善作用,而对二次诱导或高温诱导的效果降低。Yuan等^[22]将高脱乙酰度(63.29%,94.50%)的DKGM加入鲢鱼鱼糜凝胶中发现,与KGM相比,DKGM降低了凝胶的持水能力,促进了蛋白质的疏水相互作用和聚集交联能力,使凝胶的网络结构更加致密,对于制作高品质淡水鱼鱼糜产品具有很好的应用前景。Zhang等^[23]将低、中、高脱乙酰度的DKGM添加到阿拉斯加鲑鱼鱼糜中,并经120℃高温处理,发现该多糖能有效维持蛋白质二级结构,抑制高温变性,显著提升凝胶网络的结构均匀性。于加美等^[24]的研究也证实,高脱乙酰度的DKGM可以促进鲢鱼鱼糜凝胶蛋白分子的交联和成胶能力,同时提高复合凝胶的弹性、黏性、咀嚼性和自由水含量。此外,Li等^[25]研究表明,在不同的高压情况下,添加DKGM可以提高金线鱼肌球蛋白品质,但更强的压力条件会逐渐破坏DKGM的改善效果。栗俊广等^[26]研究发现,在反复冻融肉糜凝胶中,添加DKGM复合凝胶的流变特性、质构特性及保水性均得到了显著提升,其凝胶网络结构也得到了明显改善。当DKGM添加量为1.5%时,复合凝胶的改善效果最佳,当DKGM添加量>1.5%时,猪肉糜凝胶网状结构反而被破坏,且重新聚集的变性蛋白导致凝胶强度和持水力下降^[27],说明添加量为DKGM对肉类凝胶起改善效果的决定性因素之一。此外,Xu等^[28]也发现,添加DKGM可以减少鸡肉糜在烹饪过程中的质量损失,并提高凝胶的强度。因此,DKGM可以作为动物性产品的替代凝胶增强剂和质量改良剂。

2.2 植物性食品

在植物性食品生产运输过程中,产品的内部结构和理化特性均会发生不可避免的恶化,导致最终的成品与新鲜产品发生显著差距^[29]。在原料中添加亲水胶体是目前改善植物性食品品质应用最广泛的方法。亲水胶体可以与淀粉和蛋白质发生相互作用,从而影响产品的结构和物化特性。

汪师帅等^[30]将不同脱乙酰度(20%,45%,70%,90%)的DKGM与马铃薯淀粉按质量比1:2进行复配后搅拌制备出复合体系。随着DKGM脱乙酰度的增加,马铃薯淀粉糊化温度上升,焓值下降,且复合凝胶体系稠度系数上升,流动系数下降。表明DKGM与马铃薯淀粉复配体系

属于非牛顿流体,呈现出弱凝胶性质。高脱乙酰度DKGM对马铃薯淀粉的老化起到了最好的效果,且对复合体系的凝胶强度贡献最为显著。杨悦等^[31]将不同脱乙酰度(21.30%,36.28%,62.85%,87.88%)的DKGM与TG酶凝固大豆分离蛋白复配并制作手磨豆干。研究结果表明,添加DKGM可显著提升大豆分离蛋白凝胶的强度和质构特性,提高了凝胶的白度和保水性,增强了凝胶的热稳定性,且使蛋白质复合物网络结构变得更加致密有序。此外,添加DKGM可降低大豆分离蛋白凝胶的蒸煮损失,且制备的手磨豆干的硬度、咀嚼性和黏着性均有不同程度的改善,其中脱乙酰度为62.58%的DKGM的改善效果最好。葛珍珠等^[18]将不同添加量(0%,0.5%,1.0%,2.0%,3.0%)脱乙酰度为72.70%的DKGM加入凉皮中,发现适量的DKGM可以抑制凉皮中的淀粉水解,且提高了凉皮的质构和口感。当凉皮中DKGM添加量逐渐上升时,凉皮的口感、弹性和黏聚性均呈下降趋势,说明适量添加DKGM对凉皮品质具有很好的改善作用,但关于脱乙酰度对凉皮品质的影响有待进一步研究。Ge等^[32]将不同脱乙酰度(48.23%,54.72%,72.70%)的DKGM与小麦淀粉进行混合,发现DKGM可以抑制小麦淀粉的水解和溶胀,增强小麦淀粉在糊化过程中的热稳定性和抗凝变性,抑制小麦淀粉的凝沉,且对小麦淀粉凝沉的抑制作用与脱乙酰度密不可分。综上,DKGM在植物性食品中的应用研究主要集中在淀粉方面且种类较少,对植物蛋白和植物原料之间的研究还需进一步加深,有关DKGM的添加量和脱乙酰度对产品的影响也需进一步探索。

3 在食品保鲜可食用复合膜中的应用

可食用膜因其安全、可生物降解、来源广、成本低、可再生等优点,逐渐在食品保鲜方面代替塑料制品,成为研究热点之一。可食用膜的主要成分为多糖、蛋白质和脂类,可根据不同食品的保鲜要求(控制气体、抑制代谢、抗氧化和抗菌等)进行复配制造复合膜。与单一可食用膜相比,可食用复合膜既可以提供保鲜功能,又可对食物物理特性进行优化,如韧性和亲水性^[33]。脱乙酰魔芋葡甘聚糖因其良好的吸水性、成膜性和生物相容性,也成为与其他物质复配制造可食用复合膜的选择之一。

黄团康^[34]以DKGM作为基材,采用溶液浇筑法与果胶混合,以Ca²⁺作为交联剂,制备出脱乙酰魔芋葡甘聚糖/果胶复合膜(DKGM/Ca-PEC),并以羧甲基壳聚糖代替果胶,制备出脱乙酰魔芋葡甘聚糖/羧甲基壳聚糖复合膜(DKGM/Ca-CMCS)。结果表明,与KGM/Ca-PEC复合膜相比,DKGM/Ca-PEC复合膜的厚度更薄,抗拉强度增加,溶胀度和水溶性下降,水蒸气透过率降低。随着果胶含量的增加,复合膜疏水性提高,性能提升,当果胶含量为40%时,复合膜性能达到最优。与KGM/Ca-CMCS复合膜相比,随着CMCS含量的增加,DKGM/Ca-CMCS复合

膜中水蒸气渗透率显著降低,溶胀度和水溶性也不断降低,在CMCS含量为50%时,复合膜的综合性能达到最佳。分别将两种最佳性能的复合膜用于草莓保鲜,发现两种复合膜对草莓的呼吸作用起到了明显的抑制作用,且通过减少水分蒸腾作用达到减少营养物质流失的效果。与最佳性能的DKGM/Ca-PEC复合膜相比,最佳性能的DKGM/Ca-CMCS复合膜的拉伸强度略低,但水溶性和水蒸气渗透性明显降低,对果蔬保鲜效果也更好,所以在实际应用中应针对不同情况选择复合膜或者将多种原材料复配进行探究。胡燕等^[35]以不同脱乙酰度DKGM与κ-卡拉胶为基础原料,甘油作为增塑剂,制备复合膜。结果表明,随着DKGM脱乙酰度的上升,复合膜的断裂伸长率呈增大后减小趋势,水蒸气透过系数呈减小趋势,硬度呈增大趋势。当DKGM脱乙酰度为26.13%时,复合膜的断裂伸长率达到最大值,但水蒸气透过系数减小得较少,且随着DKGM添加量的增加,可食性复合膜断裂伸长率和水蒸气透过系数均逐渐增大。表明DKGM的脱乙酰度和添加量对复合膜的韧性和保鲜能力有显著影响,但具有高强度和韧性的复合膜具有较差的保鲜能力,具有较好保鲜能力的复合膜的特性较差,不能够充分融合两个优点。陈瑞瑞等^[36]探究了脱乙酰改性对魔芋葡甘聚糖/黑米膳食纤维复合膜(KGM/BRDF)特性的影响。在最优配方下,KGM/BRDF和Da-KGM/BRDF复合膜的拉伸强度分别为11.20,12.67 MPa。与KGM/BRDF复合膜相比,DKGM/BRDF复合膜的抗拉强度提高了13%,断裂伸长率降低了17%,溶水率降低了12%,水蒸气透过系数降低了41%,且复合膜孔隙率降低,网状结构也更加有序致密,说明脱乙酰改性对KGM/BRDF复合膜具有显著的提升作用,在提升复合膜保鲜能力的同时还提高了特性,使其具有广阔的发展前景。Li等^[37]探究了钙交联脱乙酰法制备海藻酸钙/脱乙酰魔芋葡甘聚糖复合膜(Ca-SA/DKGM)。结果表明,Ca-SA/KGM复合膜具有更高的热稳定性,表面粗糙度增加。KGM的脱乙酰化可以显著提高Ca-SA/DKGM复合膜的疏水性和拉伸强度,而断裂伸长率降低。与其他研究不同的是,该研究是将已制成的Ca-SA/KGM复合膜放置于碱溶液中进行加热脱乙酰,而不是对混合原料中的DKGM进行脱乙酰,所以对KGM可食性复合膜直接进行改性也是未来研究的一个方向。总的来说,KGM可食用复合膜脱乙酰改善了其溶解性、持水性、拉伸强度、断裂伸长率和水蒸气透过系数等性能,这不仅与聚合物的相容性有关,还与DKGM的结晶过程有关^[38]。此外,DKGM复合膜具有较为完美的三维网络和良好的实际性能,可以通过调节DKGM的脱乙酰度和添加量来达到理想的实际效果^[39]。

4 在保健食品中的应用

4.1 调节肠道微生物群

在消化系统中,高分子多糖通过消化道时几乎不会被

消化酶分解,而是直接到达肠道。肠道的微生物通过活性酶对多糖进行生物酵解,代谢生成的脂肪酸又可以反过来调节微生物的酶活,抑制病原菌的增殖,促进益生菌的生长^[40],调节肠道益生菌的构成。不同的多糖因其结构和理化特性不同,对肠道微生物菌群和发酵的影响也不同^[41]。

李美英等^[42]采用高通量测序技术对比了KGM与不同脱乙酰度DKGM对小鼠肠道菌群的影响。结果表明,KGM、低脱乙酰度DKGM和中脱乙酰度DKGM可以显著提升小鼠肠道菌群多样性,提高拟杆菌门/厚壁菌门的比例,还可以促进双歧杆菌及乳杆菌等有益菌数目的增加。但高脱乙酰度DKGM对小鼠肠道菌群的改善效果不显著,甚至出现抑制现象。Ouyang等^[43]也证实了以上结果,并发现KGM、低脱乙酰度和中脱乙酰度的DKGM促进了微生物代谢,而高脱乙酰度则显示出较低的微生物代谢产物,并在一定程度上影响其调节微生物群结构的能力。综上,KGM在具有调节功能的产品中要严格控制其脱乙酰度,防止较高脱乙酰度DKGM抑制肠道有益菌的存在。

4.2 降脂功效

可溶性膳食纤维因其良好的脂类结合能力成为优良的减肥降脂食品^[44]。魔芋产品的生产过程均在碱性条件下进行,会导致一部分KGM的乙酰基脱落形成DKGM。冯观萍等^[45]采用体外模拟研究发现,DKGM具有脂肪及胆固醇吸附能力,但其降脂功效明显低于KGM。李美英^[2]也证实了DKGM的减重、降脂、调节血脂及肝脂能力明显低于KGM的改善效果,所以在针对高脂人群的KGM产品生产过程中,需尽量控制产品生产过程中的pH值,防止KGM过度脱乙酰而影响其实际减肥降脂效果。

5 结论与展望

文章阐述了脱乙酰魔芋葡甘聚糖脱乙酰改性前后的特性变化及其在食品工业中的研究现状与进展。脱乙酰魔芋葡甘聚糖因其优异的热稳定性、增稠性和吸水性,使其作为食品添加剂和食品保鲜可食用膜时发挥了积极作用,然而在保健功能方面的改善效果要明显低于魔芋葡甘聚糖。目前,关于脱乙酰魔芋葡甘聚糖在食品添加剂方面的使用范围较小,研究方向不够广泛。在制备脱乙酰魔芋葡甘聚糖可食用性复合膜方面虽具有良好反响,但在实际保鲜效果方面的研究较少,且未探究其工业化制备工艺。在保健功能方面,脱乙酰魔芋葡甘聚糖的效果虽然不如魔芋葡甘聚糖,但可以根据食品目标受众群体的需求,探究合适的脱乙酰魔芋葡甘聚糖脱乙酰度,在满足要求的前提下最大限度发挥保健作用。

参考文献

- [1] 黄明发,张盛林.魔芋葡甘聚糖的增稠特性及其在食品中的应用[J].中国食品添加剂,2008(6):127-131.
- HUANG M F, ZHANG S L. The thickening characteristics of konjac glucomanan and its application in food industry[J].

- China Food Additives, 2008(6): 127-131.
- [2] 李美英. 魔芋葡甘聚糖脱乙酰前后降脂功效评价及机制研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017: 5.
LI M Y. Study on lipid lowering effect and mechanism of konjac glucomannan before and after deacetylation[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017: 5.
- [3] YANG D, YUAN Y, WANG L, et al. A review on konjac glucomannan gels: microstructure and application[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18(11): 2 250.
- [4] 谭燕, 刘曦, 袁芳. 魔芋葡甘聚糖的结构、性质及其在食品中的应用[J]. 中国调味品, 2019, 44(2): 168-174, 178.
TAN Y, LIU X, YUAN F. Structure properties of konjac glucomannan and its application in food industry[J]. China Condiment, 2019, 44(2): 168-174, 178.
- [5] 刘毅, 朱晶玉, 程宇航, 等. 干燥条件对魔芋葡甘聚糖基乳液膜成膜过程、膜结构与膜性能的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 248-256.
LIU Y, ZHU J Y, CHENG Y H, et al. Effects of drying conditions on the forming process, structure, and properties of konjac glucomannan-based emulsion films[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 248-256.
- [6] 何洋, 黄雨洋, 朱秀清. 魔芋葡甘聚糖基物理共混改性复合膜研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 379-389.
HE Y, HUANG Y Y, ZHU X Q. Research progress on konjac glucomannan-based physically modified composite films[J]. Food Science, 2023, 44(11): 379-389.
- [7] KATO K, WATANABE T, MATSUDA K. Studies on the chemical structure of konjac mannan[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1970, 34(4): 532-539.
- [8] WANG L X, ZHUANG Y H, LI J L, et al. The textural properties and microstructure of konjac glucomannan - tungsten gels induced by DC electric fields[J]. Food Chemistry, 2016, 212: 256-263.
- [9] 张单皓, 张晓寒, 薛兆轩, 等. 魔芋葡甘聚糖改性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(24): 8 389-8 398.
ZHANG D H, ZHANG X H, XUE Z X, et al. Advances on modification technology of konjac glucomannan[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(24): 8 389-8 398.
- [10] NISHINARI K, ZHANG H. Recent advances in the understanding of heat set gelling polysaccharides[J]. Trends in Food Science & Technology, 2004, 15(6): 305-312.
- [11] DU X Z, LI J, CHEN J, et al. Effect of degree of deacetylation on physicochemical and gelation properties of konjac glucomannan [J]. Food Research International, 2012, 46(1): 270-278.
- [12] 李斌, 谢笔钧. 脱乙酰基对天然魔芋葡甘聚糖分子形貌的影响[J]. 功能高分子学报, 2002, 15(4): 447-450.
LI B, XIE B J. Effect of deacetylate on the structure morphology of natural konjac glucomannan[J]. Journal of Functional Polymers, 2002, 15(4): 447-450.
- [13] LI J, YE T, WU X F, et al. Preparation and characterization of heterogeneous deacetylated konjac glucomannan[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 40: 9-15.
- [14] 李光辉, 王军, 高雪丽, 等. 花豇豆全粉超微粉碎对其物化特性和抗氧化性的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(2): 99-103.
LI G H, WANG J, GAO X L, et al. Influence of superfine grinding on the physicochemical properties and antioxidant activities of whole flower cowpea powder[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(2): 99-103.
- [15] 欧阳冬梅. 不同脱乙酰度魔芋葡甘聚糖的体外发酵代谢特性及对肠道菌群的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2020: 7.
OUYANG D M. In vitro metabolic characteristics of konjac glucomannan with different degrees of deacetylation and its effect on gut microbiota[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020: 7.
- [16] 龚静妮. 魔芋葡甘聚糖/黄耆胶凝胶的制备及其在食品递送体系中的应用[D]. 福州: 福建农林大学, 2019: 6.
GONG J N. Preparation of konjac glucomannan/gum tragacanth gel and their application in food deliver systems[D]. Fujian: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019: 6.
- [17] RAZAVI M, NYAMATHULLA S, KARIMIAN H, et al. Novel swellable polymer of Orchidaceae family for gastroretentive drug delivery of famotidine[J]. Drug Design, Development and Therapy, 2014, 8: 1 315-1 329.
- [18] 葛珍珍, 许明月, 靳学远, 等. 脱乙酰基魔芋葡甘聚糖理化性质及其对凉皮质构和体外消化的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 85-90.
GE Z Z, XU M Y, JIN X Y, et al. Physicochemical properties of deacetylated konjac glucomannan and its effects on the quality and *in vitro* digestion characteristics of cold noodles[J]. Food Science, 2023, 44(4): 85-90.
- [19] ZHANG B, CAO H J, LIN H M, et al. Insights into ice-growth inhibition by trehalose and alginate oligosaccharides in peeled Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during frozen storage[J]. Food Chemistry, 2019, 278: 482-490.
- [20] 李红艳, 徐明磊, 翟赛亚. 植物提取物在肉制品保鲜中的作用研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(9): 236-240.
LI H Y, XU M L, ZE S Y. Research progress of plant extracts in preservation of meat products[J]. Food & Machinery, 2024, 40(9): 236-240.
- [21] XU Y X, YIN Y M, WANG R, et al. Effect of deacetylated konjac glucomannan on heat-induced structural changes and flavor binding ability of fish myosin[J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130540.
- [22] YUAN L, YU J M, MU J L, et al. Effects of deacetylation of konjac glucomannan on the physico-chemical properties of surimi gels from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J]. RSC Advances, 2019, 9(34): 19 828-19 836.
- [23] ZHANG T, XUE Y, LI Z J, et al. Effects of deacetylation of konjac glucomannan on Alaska Pollock surimi gels subjected to high-temperature (120 °C) treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 125-131.
- [24] 于加美, 高瑞昌, 石彤, 等. 高脱乙酰度魔芋葡甘聚糖对鲢鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(8): 48-54.
YU J M, GAO R C, SHI T, et al. Effects of konjac

- glucomannan with a high degree of deacetylation on the gelling properties of silver carp surimi[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2019, 35(8): 48-54.
- [25] LI Z Y, WANG J Y, ZHENG B D, et al. Effects of high pressure processing on gelation properties and molecular forces of myosin containing deacetylated konjac glucomannan [J]. *Food Chemistry*, 2019, 291: 117-125.
- [26] 栗俊广, 张旭玥, 李冰洁, 等. 脱乙酰魔芋葡甘聚糖对反复冻融猪肉糜凝胶特性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(11): 1-6, 20.
- LI J G, ZHANG X Y, LI B J, et al. Effect of deacetylated konjac glucomannan on the gelatin properties of chopped pork during repeatedly freeze-thaw cycles[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(11): 1-6, 20.
- [27] 栗俊广, 张旭玥, 王昱, 等. 脱乙酰魔芋葡甘聚糖对猪肉肌原纤维蛋白结构及凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(2): 26-31.
- LI J G, ZHANG X Y, WANG Y, et al. Effect of deacetylated konjac glucomannan on the structure and gel properties of pork myofibrillar protein[J]. *Food Science*, 2023, 44(2): 26-31.
- [28] XU L L, WANG J, LV Y Q, et al. Influence of konjac glucomannan on the emulsion-filled/non-filled chicken gel: study on intermolecular forces, microstructure and gelling properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124: 107296.
- [29] YANG Z X, YU W J, XU D, et al. Impact of frozen storage on whole wheat starch and its A-Type and B-Type granules isolated from frozen dough[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 223: 115142.
- [30] 汪师帅, 邹慧, 王菁, 等. 脱乙酰魔芋葡甘聚糖对马铃薯淀粉糊化及流变性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(14): 74-77.
- WANG S S, ZHOU H, WANG J, et al. Effects of deacetylated konjac glucomannan on gelatinization and rheological properties of potato starch[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(14): 74-77.
- [31] 杨悦, 覃小丽, 赵琦, 等. 脱乙酰魔芋葡甘露聚糖对谷氨酰胺转氨酶凝固大豆分离蛋白凝胶品质特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(16): 278-284.
- TANG Y, TAN X L, ZHAO Q, et al. Effect of deacetylated konjac glucomannan on quality characteristics of transglutaminase cross-linking soybean protein isolate gels[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(16): 278-284.
- [32] GE Z Z, GAO S S, XU M Y, et al. Effects of deacetylated konjac glucomannan on the pasting, rheological and retrogradation properties of wheat starch[J]. *Food Bioscience*, 2023, 52: 102465.
- [33] 曾仪雯, 周思弛, 黄高瓴, 等. 可食性膜在食品保鲜中的应用现状及研究进展[J]. *保鲜与加工*, 2023, 23(4): 62-67.
- ZENG Y W, ZHOU E C, HUANG G L, et al. Application status and research progress of edible film in food preservation [J]. *Storage and Process*, 2023, 23(4): 62-67.
- [34] 黄团康. 交联脱乙酰魔芋葡甘聚糖基复合膜的制备与性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022: 5.
- HUANG T K. Preparation and properties of crosslinked deacetylated konjac glucomannan based composite films[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2025: 5.
- [35] 胡燕, 邹建, 袁晓晴. 响应面法优化脱乙酰魔芋葡甘聚糖/ κ -卡拉胶可食性膜的制备工艺[J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(4): 1 041-1 048.
- HU Y, ZOU J, YUAN X Q. Optimization of preparation technology of deacetylated konjac glucomannan/ κ -carrageenan edible films by response surface methodology[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36(4): 1 041-1 048.
- [36] 陈瑞瑞, 苗佳鑫, 关玉婷, 等. 脱乙酰改性对魔芋葡甘聚糖/黑米膳食纤维复合膜特性的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(8): 245-254.
- CHEN R R, MIAO J X, GUAN Y T, et al. Effect of deacetyl modification on the characteristics of konjac glucomannan/black rice dietary fiber composite films[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(8): 245-254.
- [37] LI J W, MA J W, CHEN S J, et al. Characterization of calcium alginate/deacetylated konjac glucomannan blend films prepared by Ca^{2+} crosslinking and deacetylation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 82: 363-369.
- [38] LIU J, LI B, ZHU B, et al. Study on properties and aggregation structures of deacetylated konjac glucomannan/chitosan hydrochloride absorbent blend gel films[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 115(3): 1 503-1 509.
- [39] HUANG Y C, CHU H W, HUANG C C, et al. Alkali-treated konjac glucomannan film as a novel wound dressing[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 117: 778-787.
- [40] XU X F, XU P P, MA C, et al. Gut microbiota, host health, and polysaccharides[J]. *Biotechnology Advances*, 2013, 31(2): 318-337.
- [41] MAKKI K, DEEHAN E C, WALTER J, et al. The impact of dietary fiber on gut microbiota in host health and disease[J]. *Cell Host & Microbe*, 2018, 23(6): 705-715.
- [42] 李美英, 冯观萍, 欧阳冬梅, 等. 脱乙酰对魔芋葡甘聚糖肠道益生性的影响研究[J]. *营养学报*, 2019, 41(4): 363-366, 373.
- LI M Y, FENG G P, OUYANG D M, et al. Effect of deacetylation of konjac glucomannan on gut microflora in mice fed high-fat diet[J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2019, 41(4): 363-366, 373.
- [43] OUYANG D M, DENG J, ZHOU K, et al. The effect of deacetylation degree of konjac glucomannan on microbial metabolites and gut microbiota *in vitro* fermentation[J]. *Journal of Functional Foods*, 2020, 66: 103796.
- [44] 龚雪, 解松峰, 夏曾润, 等. 魔芋精粉对鲜湿米粉品质的影响[J]. *食品与机械*, 2023, 39(7): 186-192.
- GONG X, XIE S F, XIA Z R, et al. Study on the effects of adding konjac refined flour on the quality of fresh wet rice noodle [J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(7): 186-192.
- [45] 冯观萍, 李美英, 林虹仪, 等. 脱乙酰魔芋葡甘聚糖性质及其脂类结合能力研究[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(2): 35-40, 60.
- FENG G P, LI M Y, LIN H Y, et al. Study on the physicochemical properties and lipid adsorption capacity of deacetylated konjac glucomannan[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2017, 33(2): 35-40, 60.