

低聚糖拮抗食源性致病菌的研究及应用进展

李卓思, 高彬茹, 吴梦洁, 鲁新新, 刘阳泰, 马悦, 杨朔, 董庆利*

(上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093)

摘要: 食源性致病菌导致的食品安全问题已成为世界上重要的公共卫生问题之一, 寻找高效且安全的天然抑菌剂引起人们的关注。目前有研究表明低聚糖类物质如果胶低聚糖、低聚壳聚糖、褐藻胶低聚糖等具有较好的抑菌效果, 并且低聚糖大多来源于植物胶、甲壳动物, 天然海藻多糖等自然物质, 对环境污染较小; 因此低聚糖能够作为潜在天然抑菌剂被广泛应用在食品行业中, 具有一定的研究意义和应用前景, 已经逐渐成为食品行业新的研究热点。该研究综述了几种低聚糖对食源性致病菌的抑菌作用, 并分析总结了其抑菌机制: 一是低聚糖破坏细菌细胞壁和细胞膜, 二是渗入细胞内部破坏蛋白质和核酸物质; 同时展望了低聚糖在涂膜保鲜和作为食品添加剂两方面的应用, 以期为进一步深入研究低聚糖的作用和在食品行业的应用提供理论参考。

关键词: 低聚糖; 抑菌机理; 天然抑菌剂; 食源性致病菌; 食品应用

文章编号: 1673-9078(2022)12-394-401

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.12.0191

Research and Application Progress of Oligosaccharides against Foodborne Pathogens

LI Zhuosi, GAO Binru, WU Mengjie, LU Xinxin, LIU Yangtai, MA Yue, YANG Shuo, DONG Qingli*

(School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Food safety issues caused by foodborne pathogenic bacteria have become important global public health concerns. In this context, efficient and safe natural antibacterial agents have attracted attention. Latest research has shown that oligosaccharides, such as pectin, chitosan, and alginate oligosaccharides, produce excellent bacteriostatic effects, and most of these oligosaccharides are natural, such as those in plant gums and resins and polysaccharides derived from seaweeds, causing negligible environmental pollution. Therefore, oligosaccharides can be widely applied as natural antibacterial agents in the food industry, have certain research significance and application prospects, and have therefore gradually emerged a novel research hotspot in the food industry. In this review, the antibacterial effects of several oligosaccharides on foodborne pathogenic bacteria are summarized and the underlying antibacterial mechanisms are explored. First, oligosaccharides destroy bacterial cell walls and membranes; thereafter, they penetrate into the bacterial cells to damage proteins and nucleic acids. In addition, the applications of oligosaccharides as coating preservatives and food additives are introduced to further investigate their roles and provide a theoretical basis for their application in the food industry.

Key words: oligosaccharide; antibacterial mechanism; natural antibacterial agent; foodborne pathogens; food application

引文格式:

李卓思,高彬茹,吴梦洁,等.低聚糖拮抗食源性致病菌的研究及应用进展[J].现代食品科技,2022,38(12):394-401

LI Zhuosi, GAO Binru, WU Mengjie, et al. Research and application progress of oligosaccharides against foodborne pathogens [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(12): 394-401

低聚糖, 又称寡聚糖或寡糖, 是指由 2~10 个单糖分子, 通过一种或几种糖苷键连接而成的低度聚合糖

收稿日期: 2022-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32102095; 32200078)

作者简介: 李卓思 (1986-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 预测微生物学及风险评估, E-mail: lizhuosi@usst.edu.cn; 共同第一作者: 高彬茹 (2001-), 女, 本科生, 研究方向: 预测微生物学及风险评估, E-mail: gao_binru@163.com
通讯作者: 董庆利 (1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 预测微生物学及风险评估, E-mail: qdong@usst.edu.cn

的总称, 包括普通低聚糖和功能性低聚糖两类^[1]。普通型低聚糖 (如: 乳糖、蔗糖、麦芽糖等) 能被机体消化吸收; 功能型低聚糖由 2~10 个单糖分子脱水通过 α 、 β 型等糖苷键连接形成带有支链或直链的低度聚合糖, 主要包括果胶低聚糖, 低聚壳聚糖, 褐藻胶低聚糖等, 进入人体后不会直接被消化吸收, 而是直接进入大肠内被有益菌所利用, 并抑制致病菌的增殖^[2]。另外低聚糖大多来源于自然界, 一般由农业生产的废弃物, 如植物胶、甲壳动物, 天然海藻多糖等通过物理方法、

化学方法或生物方法等合成^[2]。因此如能将低聚糖作为天然抑菌剂应用在食品中,以此完全或部分替代化学抑菌剂,未来进一步开发为优良的绿色抑菌制剂。

由食源性致病菌引起的食源性疾病已成为各国公共卫生热点,食源性致病菌是一类以食品为媒介传播并引起食物中毒的致病性细菌,包括:金黄色葡萄球菌、大肠埃希氏菌、单增李斯特菌和沙门氏菌属等。这些食源性致病菌在原料加工、储存和运输过程中易污染食品,影响人类健康,细菌感染生物体后可能导致各种疾病,如胃肠道炎症、脑膜炎、化脓性淋巴结炎等,甚至导致死亡^[3]。为了有效延长食品保藏期,降低致病菌污染食品风险,同时提高食品安全质量,食品工业中通常使用巴氏杀菌、热处理、超声波、消毒剂以及冷等离子体等控制食源性致病菌^[4]。但是这些方法可能导致不良副产物形成(如致癌化合物),进一步造成更多抗药性微生物产生,影响人体健康^[4]。近年,天然绿色温和的杀菌方式引起人们的关注。已有研究证明低聚糖既可以破坏细菌细胞壁和细胞膜抑制细菌生长^[5,6],也可以直接渗入细菌内部破坏细菌内部结构达到抑菌作用^[7]。因此低聚糖能够作为天然抑菌剂应用在食品工业中。目前已有研究证明的应用方法包括:对食物进行涂膜保鲜^[8]和作为食品添加剂^[9]等,提高食品质量的同时也保证了其安全性。因此,本文着重对几种在食源性致病菌方面产生抑制作用的低聚糖进行介绍,就低聚糖体内体外拮抗食源性致病菌产生的作用、低聚糖抑菌机理、低聚糖在食品方面的应用等方面的研究进展进行了探讨,并对食品加工业中应用低聚糖作为抑菌措施的研究方向进行了展望,以期在未来更广泛的应用低聚糖作为食品抑菌剂提供理论参考和依据,为保障食品工艺化生产质量提供理论基础。

1 低聚糖拮抗食源性致病菌作用

1.1 果胶低聚糖

果胶低聚糖是果胶发生解聚作用后的低分子质量寡糖产物,可通过物理法、化学法或酶法对果胶进行解聚^[10]。果胶低聚糖在促进人体健康方面发挥重要作用,例如:改善肠道菌群、调节脂质代谢、降低血糖反应和血胆固醇水平、抗癌、抗菌、抗氧化和免疫等特性^[11]。如表1所示,李学红等^[12]发现果胶被解聚到一定程度能产生抑菌有效成分-低聚半乳糖醛酸,对食品中一些常见腐败细菌(假单胞杆菌属、醋酸杆菌属、产碱杆菌属等)显示出良好的抑菌活性。在细菌调节作用方面,果胶低聚糖促进有益菌双歧杆菌和乳杆菌

的生长^[13]。另果胶低聚糖对食源性致病菌具有良好的抑菌活性,Xue等^[14]指出利用固定化酶水解芒果皮果胶制备出的果胶低聚糖对常见致病菌如大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌和鼠伤寒沙门氏菌的抑菌活性与市售防腐剂(苯甲酸钠、山梨酸钾、乳酸链球菌素)相当,这表明浓度适宜的果胶低聚糖可以代替化学防腐剂来抑制食源性致病菌的生长。而章银军等^[15]发现不同酶解条件下(初始pH值和水解时间)制备的柑橘果胶低聚糖对沙门氏菌和枯草芽孢杆菌具有较高的抑制活性并通过杯碟法得出当果胶低聚糖质量浓度为2.52 mg/mL时,其抑菌效果已超过几种食品防腐剂(苯甲酸钠及硝酸盐等),但聚合度相同的果胶低聚糖对不同菌株的抑制活性存在明显差异。Foti等^[16]通过同样的方法证明柑橘果胶低聚糖对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有显著的抑菌作用。这进一步说明果胶低聚糖具有抗菌和调节微生物的能力,未来可能是一种性能优良的抑菌制剂。此外,俞敏等^[9]通过酶解法制备果胶低聚糖液与市售化学防腐剂进行复配,复配后溶液抑菌活性显著增强,并且抑菌活性超过单独使用抑菌剂时的效果。以上研究都表明了果胶低聚糖既可以单独作为抑菌剂添加在食品中,降低化学防腐剂对生物体的有害作用,也可以和化学防腐剂同时添加,减少化学防腐剂用量的同时也降低了单独使用天然防腐剂时的成本。果胶低聚糖作为食品添加剂虽然已经取得了一定的进展,但不能仅停留在研究抑菌强度上,更应加强对果胶低聚糖抑菌产生的有效成分以及果胶低聚糖抗菌的分子模式进行进一步研究,以期提高食品质量及其安全性。

1.2 低聚壳聚糖

低聚壳聚糖是甲壳素和壳聚糖的降解产物,是由甲壳素经部分或完全脱乙酰基制备而成的一种天然高分子阳离子聚合物,分子之间以 β -(1,4)糖苷键连接^[17]。低聚壳聚糖分子量小、聚合度低、水溶性优,这些性能均优于甲壳素和壳聚糖,已广泛应用于生物医学、食品、化妆品、农业、畜牧业等多个领域^[18]。并且,低聚壳聚糖对于食源性致病菌也具有显著的抑制作用,能够作为抑菌剂应用于食品工业中。郭新颖等^[19]测定了使用低聚壳聚糖保鲜液处理后的冷鲜牛肉,发现低聚壳聚糖能够减少该食品中的菌落总数。黄海波等^[20]选取不同相对分子质量的水溶性低聚壳聚糖对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和黑曲霉菌三种常见致病菌进行抑菌实验,发现不同相对分子质量的水溶性低聚壳聚糖均具有一定的抑菌活性,但无特定的抑菌变化规律,对金黄色葡萄球菌的抑菌活性最好,对

大肠杆菌的抑菌活性最差。对于革兰氏阳性菌及革兰氏阴性菌, Thunnop 等^[21]发现乙酰化壳聚糖生产的低聚壳聚糖对典型革兰氏阳性致病菌金黄色葡萄球菌和典型革兰氏阴性致病菌大肠杆菌具有抑菌效果, 天然低聚壳聚糖对金黄色葡萄球菌的抑制作用高于实验中任何分子量的低聚壳聚糖; 而对于大肠杆菌, 相对分子量较小的低聚壳聚糖抑制效果更好。此外, 王瑞秀等^[22]测定低聚壳聚糖在 $\varphi=0.5\%$ 醋酸溶液和水溶液中对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和沙门氏菌的抑菌情况, 证明了在溶液 pH 值较低时低聚壳聚糖也是一种优良的抑菌剂。低聚壳聚糖对食源性致病菌具有多种抗菌途径, 不同来源的低聚壳聚糖具有不同抑菌效果。例如, 由于致病菌细胞壁的特性不同, 低聚壳聚糖对革兰氏阴性或革兰氏阳性致病菌具有不同的抗菌特性。但这并不影响低聚壳聚糖能够作为一种优良的食品抑菌剂应用于食品工业中。此外, 低聚壳聚糖对于细菌的抑制效果受到相对分子质量、溶液 pH 值等的影响, 但其抑菌机制以及变化规律却没有较好的阐述。因此低聚壳聚糖未来的研究中, 应对低聚壳聚糖抑菌效果的影响因素进行深入的研究, 为低聚壳聚糖应用于食品工业中提升可信度。

1.3 褐藻胶低聚糖

褐藻胶低聚糖是由海藻酸盐解聚形成的一种酸性多糖, 由 β -D-甘露糖醛酸(M)和 α -L-古罗糖醛酸(G)两种单体通过 α -1,4糖苷键链接聚合而成^[23]。褐藻胶是从海洋褐藻中提取的天然海藻多糖, 藻类多糖有着和褐藻胶低聚糖相似的用途, 但藻类多糖分子量大、粘度高、溶解度低, 影响了其在食品、医药、农业等领域的应用, 因此有必要将藻类多糖降解为褐藻胶低聚糖^[24], 降解方法包括: 酶降解、酸水解和氧化降解^[25]。由于褐藻胶低聚糖生物活性广泛(如抗肿瘤、调节免疫反应、促进抗菌活性、细胞增殖以及调节植物生长等)在农业、食品和医药工业中得到广泛应用^[23]。褐藻胶低聚糖对致病菌的抑菌机制主要有两种: 一是褐藻胶低聚糖抑制致病性病菌的运动和增殖, 如表1所示, 虞铭霞等^[26]证明褐藻胶低聚糖对微生物的繁殖具有抑制作用; Hu等^[27]研究褐藻胶低聚糖对19株细菌的抑制效果, 结果表明11株革兰氏阴性和3株革兰氏阳性菌株均受到抑制作用; Yan等^[28]发现褐藻胶低聚糖添加至饲料中能够减少家禽感染沙门氏菌; 吴国锋等^[29]在啤酒也发现褐藻胶低聚糖对细菌及真菌具有相似的抑菌作用。二是褐藻胶低聚糖影响群体感应基因的表达, He等^[30]发现酶促产生的褐藻胶低聚糖可以与抗生素阿奇霉素联合抑制野生型抗生素耐药铜绿

假单胞菌的生长以及群体感应控制的毒力因子和生物膜的形成。尽管褐藻胶低聚糖的抗菌活性已经得到了很好的研究, 但仍需探索褐藻胶低聚糖对食源性致病菌的抗菌活性, 以扩大其在食品保存中的应用。并且目前褐藻胶低聚糖对于致病菌抑制周期以及作用机制尚不明确, 故在未来的开发与研究中, 应注重分析食源性致病菌与褐藻胶低聚糖相关性能之间的关系, 以期食品工业发展提供理论基础。

1.4 其他低聚糖

除了上述几种低聚糖外, 同样有研究表明其他的功能性低聚糖对于致病菌有一定的抑制作用。据报道, 与褐藻胶低聚糖同样来自海洋的琼胶低聚糖, 能够作为一种新型益生元在人体肠道内抑制腐败微生物的增殖并促进益生菌的生长^[31]。梁家铭等^[32]证实了利用酶解法制得的琼胶低聚糖对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌具有不同程度的抑菌作用, 并且表明抑菌效果与底物浓度、反应时间及琼胶低聚糖的含量呈正相关关系。黄原胶是野油菜黄单胞菌分泌产生的一种胞外多糖^[1], 通过物理和化学方法降解得到的黄原胶低聚糖也被证明能抑制野油菜黄单胞菌的生长, 且有研究证明黄原胶低聚糖具有潜在的防治油菜茎腐病能力^[33]。随着研究的深入, 近年的研究表明黄原胶低聚糖对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌等常见食源性致病菌也表现出明显的抑制作用^[34]。低聚木糖具有稳定性强, 耐酸, 耐热的特性, 能够通过促进肠道有益微生物生长或活动并抑制致病菌的生长从而维持宿主健康状态^[35]。范程瑞等^[36]验证了低聚木糖在模拟食品中对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和沙门氏菌三种常见致病菌均有抑制效果。杜喜忠等^[37]发现日粮中添加一定比例的低聚木糖、甘露低聚糖和低聚壳聚糖对蛋鸭盲肠中的大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌等致病菌均有一定抑制作用。

综上所述, 目前研究者已经证实多数低聚糖均对常见致病菌有一定的抑制作用, 表1总结了几种低聚糖对常见致病菌的抑制效果, 除此之外, 研究者对其进行复配也得到了较好的抑菌效果, 能够较好的作为天然抑菌剂应用于食品行业中, 从而符合人们绿色、健康的生活理念。但除了果胶低聚糖、低聚壳聚糖和褐藻胶低聚糖外, 对于其他种类低聚糖的研究还尚且较少, 并且对于其在抑菌方面的研究大多数还仅仅处于对菌体抑菌效果方面, 未曾深入研究。因此, 应扩大对低聚糖类的研究范围, 并加强对新型低聚糖的开发与研究, 以期其在食品行业的应用与发展提供更加坚实的基础。

表1 低聚糖对常见致病菌的抑菌效果

Table 1 Oligosaccharides to antibacterial effects of common pathogenic bacteria

比较角度	低聚糖种类	低聚糖浓度/分子量	抑制致病菌种类	抑菌效果	参考文献
低聚糖浓度	芒果果胶低聚糖	2.00 mg/mL	大肠杆菌	抑菌圈直径 18.20 mm	[14]
			金黄色葡萄球菌	抑菌圈直径 21.10 mm	
			枯草芽孢杆菌	抑菌圈直径 18.60 mm	
			鼠伤寒沙门氏菌	抑菌圈直径 18.00 mm	
	柑橘果胶低聚糖	2.52 mg/mL	大肠杆菌	抑菌圈直径 2.10 cm	[15]
			金黄色葡萄球菌	抑菌圈直径 2.21 cm	
	低聚壳聚糖	0.10 mg/mL	大肠杆菌	最小抑菌浓度 0.10 mg/mL	[22]
			金黄色葡萄球菌	最小抑菌浓度 0.50 mg/mL	
			沙门氏菌	最小抑菌浓度 1.00 mg/mL	
	琼胶低聚糖	2.00 g/mL	金黄色葡萄球菌	抑菌圈出现频率 0.63	[32]
大肠杆菌			抑菌圈出现频率 0.93		
黄原胶低聚糖	10.00 mg/mL	枯草芽孢杆菌	抑菌圈出现频率 0.60	[34]	
		大肠杆菌	抑菌圈直径 18.42 mm		
		金黄色葡萄球菌	抑菌圈直径 33.51 mm		
低聚木糖	17.50 mg/mL	金黄色葡萄球菌	16 h 吸光度与对照组比减小 1.00	[36]	
	20.00 mg/mL	大肠杆菌	16 h 吸光度与对照组比减小 1.40		
	25.00 mg/mL	沙门氏菌	16 h 吸光度与对照组比减小 1.20		
低聚糖分子量	柑橘果胶低聚糖	30.00 ku	大肠杆菌	抑菌圈直径 13.00 mm	[16]
			金黄色葡萄球菌	抑菌圈直径 10.00 mm	
	不饱和果胶低聚糖	1.00~3.00 ku	大肠杆菌	抑菌圈直径 1.37 cm	[9]
			金黄色葡萄球菌	抑菌圈直径 1.21 cm	
			枯草芽孢杆菌	抑菌圈直径 1.38 cm	
	低聚壳聚糖	2.00 ku	金黄色葡萄球菌	抑菌率为 57%	[20]
			黑曲霉菌	抑菌率为 57%	
	低聚壳聚糖	5.10 ku	大肠杆菌	抑菌率为 57%	[21]
			大肠杆菌	最小抑菌浓度 16.00 μg/mL	
			鼠伤寒沙门氏菌	最小抑菌浓度 16.00 μg/mL	
肠炎沙门氏菌			最小抑菌浓度 32.00 μg/mL		
褐藻胶低聚糖	4.24 ku	金黄色葡萄球菌	最小抑菌浓度 32.00 μg/mL	[27]	
		金黄色葡萄球菌	抑菌圈直径 13.00 mm		
		大肠杆菌	抑菌圈直径 30.00 mm		
			枯草芽孢杆菌	抑菌圈直径 17.00 mm	

注：由于测试菌种及样品差异等导致评价结果有差异。

2 低聚糖抗菌作用机制

低聚糖抗菌机制的研究，主要是对直接与低聚糖结合或相互作用的受体、酶或其他生化物质等方面的研究^[5]。随着研究的深入，研究者发现低聚糖既可以与革兰氏阳性菌细胞壁上的蛋白多糖结合（如图1中a处所示），也可以与革兰氏阴性菌细胞壁表面的脂多糖

结合（如图2中e处所示）从而破坏细菌细胞壁来抑制细菌生长；同时也能够影响细菌细胞膜（如图1中b，图2中f处所示）或直接渗入细菌内部破坏细菌内部结构（如图1中c，图2中g处所示）达到抑菌作用^[7,40,41]。因此，本文对低聚糖破坏细胞壁和细胞膜、阻止蛋白质的合成及破坏DNA复制等方面展开综述。

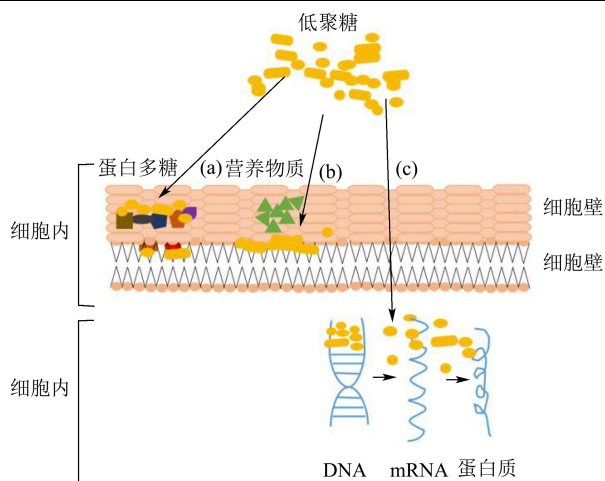


图1 低聚糖对革兰氏阳性菌作用机制

Fig.1 Mechanism of action of oligosaccharides on gram-positive bacteria

注：(a) 低聚糖分子破坏细胞壁和细胞膜；(b) 低聚糖分子吸附在细菌细胞膜表面，阻止营养物质的运输；(c) 小分子低聚糖渗入细胞内部破坏蛋白质和核酸物质的生理功能。

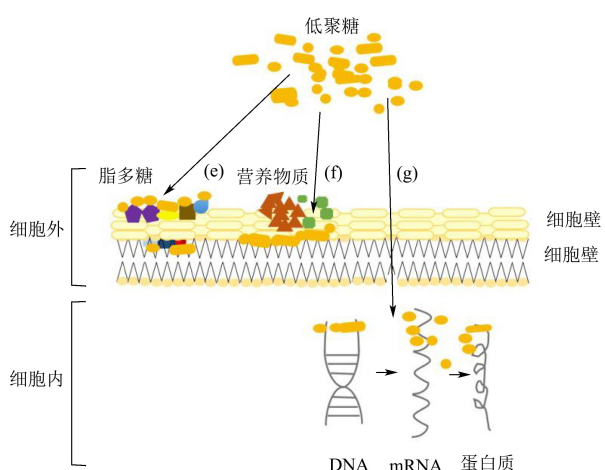


图2 低聚糖对革兰氏阴性菌作用机制

Fig.2 Mechanism of action of oligosaccharides on gram-negative bacteria

注：(e) 低聚糖分子破坏细胞壁和细胞膜；(f) 低聚糖分子吸附在细菌细胞膜表面，阻止营养物质的运输；(g) 小分子低聚糖渗入细胞内部破坏蛋白质和核酸物质的生理功能。

2.1 影响细菌细胞膜和细胞壁

低聚糖主要从两方面影响细胞壁和细胞膜：一是低聚糖分子与细菌细胞膜之间产生静电作用，吸附在细菌细胞膜表面，阻止营养物质的运输，抑制细菌的生长甚至导致细菌死亡^[39]；二是低聚糖分子能够与细菌表面细胞壁或细胞膜的酸性物质结合，形成高分子电解质，破坏细胞壁，改变细胞膜的选择通透性，造成膜功能紊乱，使细胞内容物外泄，起到杀菌作用^[5,6,38]。

低聚糖作用于细菌细胞壁时，能够使细胞壁的肽聚糖发生水解，从而破坏细胞壁结构，造成细胞内电解质渗漏细胞处于低渗环境，进而导致细菌发生裂解死亡^[6]；作用于细胞膜，能够破坏菌膜的完整性，导致核酸释放，从而影响致病菌的代谢系统，致使菌体死亡^[5]。Aluk 等^[38]指出低聚壳聚糖与大肠杆菌细胞表面的阴离子结合，改变细胞膜的选择透过性，使细胞内容物外泄，从而阻止大肠杆菌的生长和传播。此外，Muanprasat 等^[42]在研究中表明低聚壳聚糖对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌的抗菌作用机制不同，但均影响细胞壁达到抑菌效果；对革兰氏阳性菌，如图1中a处所示，带正电荷的低聚壳聚糖与细菌细胞壁上带负电的蛋白多糖相互作用，导致细菌变形和渗漏，随后渗透性休克导致细菌死亡；对革兰氏阴性菌，如图2中e处所示，低聚壳聚糖与细菌细胞壁上脂多糖带负电的O抗原结合，导致营养液流动受阻和细菌死亡。

2.2 破坏蛋白质和核酸物质

低聚壳聚糖是壳聚糖的小分子产物，虽然大多数的功能与壳聚糖一样，但由于低聚壳聚糖分子比壳聚糖小，这使得低聚壳聚糖功能更全面^[18]。小分子的低聚壳聚糖直接通过渗透作用进入细菌细胞内部，与细胞内的蛋白和核酸物质结合，破坏蛋白质和核酸物质正常的生理功能，影响细菌的生长繁殖^[7,40,41]。

大多数的研究已经证实，低聚糖直接穿透细胞壁和细胞膜，作用于细胞内部，导致细菌死亡。Fernandes 等^[7]发现低聚壳聚糖能够穿透大肠杆菌的细胞壁，并在细胞内抑制DNA转录达到抑菌效果。李小芳等^[40]指明低聚壳聚糖与DNA的相互作用能够抑制大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的生长繁殖，且发现抑菌活性与低聚壳聚糖分子上的胺基有关，低聚壳聚糖的胺基与细胞内带负电的核酸之间通过静电作用结合形成新的复合物，致使DNA的双螺旋结构被破坏，影响DNA复制功能，抑制细菌的繁殖。王琼等^[41]发现低聚壳聚糖抑制金黄色葡萄球菌携带的肠毒素基因转录，证明了低聚壳聚糖影响核酸物质正常的生理功能。低聚壳聚糖进入细菌细胞内除了能够扰乱DNA复制外，还能同时选择性地和一些对微生物生长起关键作用的金属离子螯合，从而抑制微生物的生长和繁殖^[43]。

3 低聚糖在食品工业中的应用

低聚糖在食源性致病菌方面的应用主要为食品的抑菌与保鲜，如新鲜水果、肉类、蔬菜和加工食品等^[18,44]。低聚糖除了抑制食品中有害微生物的生长与繁殖之外，还有分子量小、聚合度低、水溶性好等特性^[45]，

造就了它以多种多样的方式应用于食品的生产、加工与贮藏中。文中将从食品包装以及添加剂使用方面综述低聚糖在食品工业中的应用。

3.1 作为食品包装

在对食品中食源性致病菌进行监测时,金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、单增李斯特氏菌等致病菌在新鲜的果蔬、肉类等食品中均有检出,食品在生产、储藏及运输过程中可能会受到食源性致病菌的污染^[46],因此采取措施来控制食源性致病菌的污染是非常有必要的。有研究表明低聚壳聚糖溶液能够在水果、蔬菜、肉类等食品表面进行涂膜,达到抑菌目的。郭新颖等^[49]发现对冷鲜牛肉使用低聚壳聚糖溶液进行涂膜处理能够使其表面细菌的菌落总数减少;而 Bouaziz 等^[8]也发现低分子量低聚糖能抑制牛肉中大肠杆菌和沙门氏菌的生长,同时也减少了牛肉的脂质氧化,因此可以使用含有低聚糖的溶液对牛肉进行涂膜从而达到良好的抑菌保鲜效果。而对于果蔬来说,Wu 等^[47]在研究中发现低聚糖涂层能有效降低圣女果的营养损失,延长货架期。此外有研究表明低聚壳聚糖溶液对番茄^[48]也有较好的抑菌且具有保鲜效果。因此,使用低聚糖类涂膜液处理食品具有一定杀菌效果,减少食源性致病菌的污染的同时可以延长食品的货架期,具有广泛开发前景。

3.2 作为食品添加剂

化学防腐剂是常用的食品添加剂,然而,一些化学防腐剂被长期食用后可能对人体产生危害。在食品生产过程中,低聚糖的多种特性使其成为化学合成添加剂的可靠替代品,并且,低聚糖添加至食品中可以减轻化学防腐剂对人体的危害^[9]。吴国锋等^[29]指出低聚糖中的褐藻胶低聚糖能够抑制啤酒污染菌的生长,并且提高了啤酒的澄清度和透明度。俞敏等^[9]在研究中表明果胶低聚糖溶液对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌均有一定的抑制效果,并且与化学防腐剂复配使用后抑菌效果增强。而黄玉琴^[49]等使用低聚壳聚糖代替化学防腐剂添加至腌制萝卜,探究其对枯草芽孢杆菌、苏云金芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌、嗜气芽孢杆菌与短小芽孢杆菌等5种细菌的影响,发现低聚壳聚糖浓度达到400 μg/mL时完全抑制这5种菌生长,由此可见,低聚壳聚糖可以作为食品中的抑菌剂来抑制食品中致病微生物的生长,且符合当下健康食品概念。

4 结论与展望

目前,低聚糖对常见食源性致病菌的抑制研究取得了较大的进展,但在低聚糖类的提取、纯化、表征过程及抗菌机制等方面的研究仍不够深入。此外,低聚壳聚糖的研究多于其他种类的低聚糖。针对其他种类的低聚糖如低聚木糖、琼胶低聚糖、果胶低聚糖等应该对抗菌效果、抗菌机理、抗菌性能以及食品工业化应用方面有必要进行深入研究。未来应用低聚糖控制食源性致病菌的研究可关注:(1)更加深入地将各种低聚糖的抑菌机制进行系统化的研究,理论上阐释低聚糖抑菌能力,进一步指导抑菌低聚糖开发;(2)各种低聚糖间的复配抑菌性尚不明确,有待进一步研究;(3)以对人体有益为前提加大对低聚糖产品的研发力度,探索新型绿色能满足人类需求的低聚糖;(4)进一步了解肠道微生物如何通过不同的低聚糖类来维持肠道健康。阐明低聚糖类对肠道微生物的代谢产物、基因表达的影响并探究其潜在机制。此外,新型潜在益生元的鉴定和表征将是未来研究促进宿主健康的关键途径。

参考文献

- [1] 季堯虎, 奚华亭, 吴厚玖, 等. 低聚糖抗菌活性的研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(13): 237-242
- [2] 邹月, 黄金凤, 魏琴. 功能性低聚糖的研究进展及应用现状[J]. 中国调味品, 2021, 46(2): 180-185, 195
- [3] Vieira K, Silva H, Rocha I, et al. Foodborne pathogens in the omics era [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 8: 1-16
- [4] Kaavya R, Pandiselvam R, Abdullah S, et al. Emerging non-thermal technologies for decontamination of *Salmonella* in food [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 400-418
- [5] Chen P, Reiter I T, Huang B, et al. Prebiotic oligosaccharides potentiate host protective responses against *L. monocytogenes* infection [J]. Pathogens, 2017, 6(4): 68
- [6] El-Hack M, El-Saadony M T, Shafi M E, et al. Antimicrobial and antioxidant properties of chitosan and its derivatives and their applications: a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 2726-2744
- [7] Fernandes J C, Tavarina F K, Soares J C, et al. Antimicrobial effects of chitosans and chitoooligosaccharides, upon *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*, in food model systems [J]. Food Microbiology, 2008, 25(7): 922-928
- [8] Bouaziz F, Helbert C B, Romdhane M B, et al. Structural data and biological properties of almond gum oligosaccharide: application to beef meat preservation [J]. International Journal

- of Biological Macromolecules, 2015, 72: 472-479
- [9] 俞敏,谢王玲,夏元丹,等.酶法制备饱和和果胶低聚糖及其抑菌活性研究[J].发酵科技通讯,2020,194(4):192-196
- [10] 黄林华,吴厚玖,马亚琴,等.果胶低聚糖的研究进展[J].食品科学,2015,36(19):277-281
- [11] Wandee Y, Uttapap D, Mischnick P, et al. Production of pectic-oligosaccharides from pomelo peel pectin by oxidative degradation with hydrogen peroxide [J]. Food Chemistry, 2021, 348: 129078
- [12] 李学红,马庆一,张昱,等.果胶酶解液抑菌性能的研究[J].食品工业科技,2003,1:51-53
- [13] Singh R P, Prakash S, Bhatia R, et al. Generation of structurally diverse pectin oligosaccharides having prebiotic attributes [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 105988
- [14] Xue L, Long J, Lu C, et al. Immobilization of polygalacturonase for the preparation of pectic oligosaccharides from mango peel wastes and assessment of their antibacterial activities [J]. Food Bioscience, 2021, 39: 100837
- [15] 章银军,程菲菲,郭跃平,等.柑橘果胶低聚糖抑菌活性的研究[J].发酵科技通讯,2018,47(1):1-5
- [16] Foti P, Ballistreri G, Timpanaro N, et al. Prebiotic effects of citrus pectic oligosaccharides [J]. Natural Product Research, 2021, 36(12): 3173-3176
- [17] Tao W J, Wang G, Wei J. The role of chitosan oligosaccharide in metabolic syndrome: a review of possible mechanisms [J]. Marine Drugs, 2021, 19(9): 501
- [18] Zhou J, Wen B, Xie H, et al. Advances in the preparation and assessment of the biological activities of chitosan oligosaccharides with different characteristics [J]. Food & Function, 2021: 926-951
- [19] 郭新颖,刘程惠,尤晓宏,等.壳寡糖对冷鲜牛肉保鲜效果的影响[J].食品与发酵工业,2016,42(10):204-209
- [20] 黄海波,姚进,曾广胜,等.水溶性壳低聚糖抑菌性能研究[J].包装学报,2019,11(4):10-15
- [21] Laokuldilok T, Potivas T, Kanha N, et al. Physicochemical, antioxidant, and antimicrobial properties of chitoooligosaccharides produced using three different enzyme treatments [J]. Food Bioscience, 2017, 18: 28-33
- [22] 王瑞秀,陈中卫,刘强,等.不同溶剂下低聚壳聚糖对3种常见鸭源性致病菌的体外抑菌效果的影响[J].饲料工业,2020,41(16):25-30
- [23] 范素琴,陈鑫炳,代增英,等.褐藻胶低聚糖的生物活性及其在水产产品中的应用研究进展[J].肉类工业,2019,3:49-52
- [24] Xie X T, Cheong K L. Recent advances in marine algae oligosaccharides: structure, analysis, and potential prebiotic activities [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62: 7703-7717
- [25] Guo J J, Ma L L, Shi H T, et al. Alginate oligosaccharide prevents acute doxorubicin cardiotoxicity by suppressing oxidative stress and endoplasmic reticulum-mediated apoptosis [J]. Marine Drugs, 2016, 14(12): 231
- [26] 虞铭霞,张怡,张宾.海藻糖和褐藻胶寡糖对冻藏紫贻贝品质的影响[J].现代食品科技,2019,35(9):163-169,95
- [27] Hu X, Jiang X, Gong J, et al. Antibacterial activity of lyase-depolymerized products of alginate [J]. Journal of Applied Phycology, 2005, 17(1): 57-60
- [28] Yan G L, Guo Y M, Yuan J M, et al. Sodium alginate oligosaccharides from brown algae inhibit *Salmonella enteritidis* colonization in broiler chickens [J]. Poultry Science, 2011, 90(7): 1441-1448
- [29] 吴国锋,秦燕霞,王伟,等.褐藻胶寡糖制备及其对啤酒污染菌抑制的研究[J].中国食品添加剂,2015,6:130-133
- [30] He X, Hwang H M, Aker W G, et al. Synergistic combination of marine oligosaccharides and azithromycin against *Pseudomonas aeruginosa* [J]. Microbiological Research, 2014, 169(9-10): 759-767
- [31] Hu B, Gong Q, Ye W, et al. Prebiotic effects of neoagaro-oligosaccharides prepared by enzymatic hydrolysis of agarose [J]. Anaerobe, 2006, 12(5-6): 260-266
- [32] 梁家铭,邱洁瑜,林文雄,等.酶解法制备琼胶寡糖的抑菌性证明[J].广州化工,2019,47(18):63-65,120
- [33] 何晓燕,张利英,白雪芳,等.黄原胶寡糖生物活性的研究[J].微生物学通报,2005,3:87-90
- [34] 王子朝,宁涛,张慧茹,等.黄原胶寡糖的抑菌活性研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2020,196(4):44-49
- [35] Chen Y, Xie Y, Zhong R, et al. Xylo-oligosaccharides, preparation and application to human and animal health: a review [J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 731930
- [36] 范程瑞,刘强,黎佳颖,等.不同粒度的低聚木糖对3种猪常见致病菌的体外抑菌效果[J].福建农林大学学报(自然科学版),2017,46(4):423-427
- [37] 杜喜忠,胡旭进,楼芳芳,等.寡糖种类及使用对鹌鹑产蛋性能和肠道菌群结构的影响[J].浙江畜牧兽医,2021,224(4): 10-12
- [38] Aluko K, Velayudhan D E, Khafipour E, et al. Combined effects of chitosan and microencapsulated *Enterococcus faecalis* CG1.0007 probiotic supplementation on performance and diarrhea incidences in enterotoxigenic *Escherichia coli* K88+ challenged piglets [J]. Animal Nutrition, 2017, 4:

- 366-371
- [39] 刘利萍,张捷,王素芳.降解壳聚糖对肉品保鲜效果的试验研究[J].中国食品学报,2012,12(5):130-136
- [40] 李小芳,冯小强,伏国庆,等.壳聚糖中胺基对其抑菌性能的影响及与 DNA 的作用[J].天然产物研究与开发,2010,22(3): 373-377,470
- [41] 王琼,唐俊妮,汤承,等.6 种食品防腐剂对金黄色葡萄球菌抑菌效果及肠毒素基因表达的影响[J].食品科学,2016,538(21): 151-156
- [42] Muanprasat C, Chatsudthipong V. Chitosan oligosaccharide: biological activities and potential therapeutic applications [J]. *Pharmacol Ther*, 2017, 170: 80-97
- [43] 韩永萍,李可意,杨宏伟,等.壳聚糖的抗菌机理及其化学改性研究[J].化学世界,2012,53(4):248-252
- [44] Bose S K, Howlader P, Wang W, et al. Oligosaccharide is a promising natural preservative for improving postharvest preservation of fruit: a review [J]. *Food Chemistry*, 2020, 341(2021): 128178
- [45] Zhang M, Qiao X, Han W, et al. Alginate-chitosan oligosaccharide-ZnO composite hydrogel for accelerating wound healing [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 266(21-22): 118100
- [46] 韦丽琴,黄佳慧,冉江娥,等.2011-2020 年广西天峨县食品中食源性致病菌污染监测结果分析[J].医学信息,2021,34(18): 148-151
- [47] Wu S, Lu M, Wang S. Effect of oligosaccharides derived from laminaria japonica-incorporated pullulan coatings on preservation of cherry tomatoes [J]. *Food Chemistry*, 2016, 199(MAY 15): 296-300
- [48] 周国春.壳寡糖对番茄保鲜机理的研究[D].天津:天津科技大学,2016
- [49] 黄玉琴.聚赖氨酸复配防腐剂对腌制萝卜防腐效应[D].杭州:浙江农林大学,2019