

功能性寡糖的生物学效应与制备技术研究进展

张梦婷^{1,2}, 李兆新², 段蕊^{1*}, 张俊杰¹, 邢丽红², 孙伟红², 郑旭颖², 朱盼盼²

(1. 江苏海洋大学, 江苏 连云港 222005; 2. 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 山东 青岛 266071)

摘要:功能性寡糖因其卓越的生理特性受到国内外研究者的广泛关注,其开发利用成为近年的研究热点。该文对几种常见功能性寡糖的种类、来源、功能特性进行归纳总结,概述其在动物饲料、农作物、食品、医药领域的应用和生物学效应以及目前主要的制备方法、特点,并对功能性寡糖的发展前景提出展望,旨在为进一步研究功能性寡糖和拓宽其应用范围提供一定理论参考。

关键词:功能性寡糖;功能性;制备;应用;生物学效应

Biological Effects and Preparation of Functional Oligosaccharides: A Review

ZHANG Meng-ting^{1,2}, LI Zhao-xin², DUAN Rui^{1*}, ZHANG Jun-jie¹, XING Li-hong², SUN Wei-hong²,
ZHENG Xu-ying², ZHU Pan-pan²

(1. Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu, China; 2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract: Functional oligosaccharides have attracted the interest of researchers in China and abroad owing to the outstanding physiological characteristics, and the development and utilization has become a research hotspot in recent years. In this study, the types, sources, and functional characteristics of several common functional oligosaccharides were summarized. The biological effects in animal feed, crops, food, and medicine, and the main preparation methods, characteristics, and applications were reviewed. Furthermore, the development prospect of them was summarized. This study was expected to provide theoretical reference for further study and broadening the application of functional oligosaccharides.

Key words: functional oligosaccharides; functionality; preparation; application; biological effect

引文格式:

张梦婷, 李兆新, 段蕊, 等. 功能性寡糖的生物学效应与制备技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(8): 209-215.

ZHANG Mengting, LI Zhaoxin, DUAN Rui, et al. Biological Effects and Preparation of Functional Oligosaccharides: A Review [J]. Food Research and Development, 2022, 43(8): 209-215.

寡糖是由2个~10个单糖通过糖苷键聚合形成的,分为普通寡糖和功能性寡糖。功能性寡糖不被胃酸及消化道分泌的酶所水解,不易被机体消化而直接进入大肠,在肠道中能够选择性促进乳酸菌、双歧杆菌等有益菌增殖,并被有益菌利用,抑制有害菌生长,维持人体肠道健康,已作为膳食纤维和益生元被添加

到食品中^[1]。在结肠中功能性寡糖可被内源性细菌发酵,形成乳酸和短链脂肪酸等产物,改善肠道环境。

1 功能性寡糖的概述

寡糖最早受到欧洲、日本研究者的关注,逐渐进入市场,我国研究者对功能性寡糖的研究起步较晚,

作者简介:张梦婷(1996—),女(汉),硕士在读,研究方向:食品加工与安全。

*通信作者:段蕊(1972—),女(汉),教授,研究方向:水产品加工与利用。

但进展较快。大量研究表明,功能性寡糖具有抗菌抗病毒、提高机体免疫功能、调节生理机能、抵抗炎症反应、降血压血脂等多种功效,而且能有效刺激肠道蠕动,增加粪便湿润度,减少便秘、腹泻^[1]。结构、来源不同的功能性寡糖在生理功能上也存在较大差异^[2]。半乳糖寡糖、木寡糖、果寡糖、异麦芽寡糖、大豆寡糖、壳寡糖、褐藻寡糖、甘露寡糖等是最常见的功能性寡糖。

1.1 半乳糖寡糖

半乳糖寡糖是在乳糖的半乳糖基一侧由糖苷键连接半乳糖形成的杂合低聚糖,其构成单糖为半乳糖和葡萄糖,以半乳糖为主。天然半乳糖寡糖存在于动物乳汁中。半乳糖寡糖具有极佳的保水力和酸热稳定性;不但利于B族维生素、烟酸和叶酸的生成,还能够促进有毒代谢产物的排出,利于肠道对钙、镁和钾等矿物元素的吸收^[3],防止骨质疏松,因而半乳糖寡糖已经成为一种非常优质的食品和饮料加工业的食品添加剂。

1.2 木寡糖

木寡糖由 β -1,4糖苷键连接2个~6个木糖形成,是以二糖、三糖为主的直链糖。牛奶、蜂蜜、部分果蔬中含有少量低聚木糖。木寡糖主要存在于植物细胞的细胞壁中,由木聚糖水解得到,不同物质中木聚糖含量、性质存在一定差异,主要存在于蔗渣、玉米芯、秸秆、麦麸中,此类木质纤维素类物质为提取木寡糖的优良原料。木寡糖还可利用富含纤维素的天然植物,经水解、分离提纯后得到。木寡糖具有良好的酸热稳定性,酸性条件下可降低水分活度,改善食品品质风味。相比于其他功能性寡糖,其具有独特的双歧杆菌增殖功能,难被机体吸收且有效用量小。

1.3 果寡糖

果寡糖是由1个~3个果糖基经 β -1,2糖苷键与蔗糖分子上的果糖基连接形成的,较多存在于小麦、菊苣、菊芋、香蕉、洋葱、大蒜等天然植物中。通过蔗糖或菊粉为原料制备可得到蔗糖低聚果糖和菊苣低聚果糖。

果寡糖可作为营养强化剂使用,具有超强双歧因子和水溶性膳食纤维双重生理学特性。其热值低,口感清爽;耐碱、耐高温,在中性pH值时较稳定,在酸性条件下受热易分解^[4]。果寡糖因其较好的赋型性、水溶性、保水性,在食品领域中的应用前景广阔,能改善肠道微生态系统,防止便秘,抑制致病菌^[6-7]。此外,果寡糖防霉性能佳,能防止饲料变质,延长饲料贮存期。

1.4 异麦芽寡糖

异麦芽寡糖是通过 α -1,6糖苷键连接葡萄糖的一种淀粉糖,淀粉及含淀粉的粮食为生产异麦芽寡糖的常用原料。异麦芽寡糖具有改善肠道微生态环境、

减少大肠杆菌、增殖双歧杆菌、防病抗病、延年益寿等特殊功效,其保水性较佳、耐酸耐热、低水分活度、防止淀粉类食品老化等特点扩大了其在食品中的应用。

1.5 大豆寡糖

大豆中可溶性糖总称为大豆寡糖,主要含聚合度为3~4的蔗糖、棉子糖和水苏糖等。工业上一般以脱脂大豆为原料,在提取蛋白质后所剩下的乳清中提取。大豆寡糖具有良好的耐酸性、耐热性,不易发霉。因其具有抗淀粉老化的特性而被应用到饲料中,以延长保质期,同时促进饲料消化吸收。

1.6 壳寡糖

壳寡糖是由2个~4个氨基葡萄糖经 β -1,4-糖苷键连接形成的水溶性低聚糖,一般含2个~20个单糖,可由甲壳素脱乙酰后得到的壳聚糖经降解后获得^[8]。作为目前发现的天然糖中唯一大量存在的碱性氨基寡糖,壳寡糖安全无毒、生物相容性好,应用范围广。在植物生长、果蔬保鲜、改善食品风味、提高机体免疫力方面具有明显功效。

1.7 褐藻寡糖

褐藻寡糖是褐藻酸钠降解产生的由甘露糖醛酸(M)和古洛糖醛酸(G)构成的一类阴离子寡糖^[9]。褐藻酸钠为水溶性多糖,又称褐藻胶,存在于褐藻类植物细胞壁中。褐藻寡糖安全无毒、稳定性好,具有促进植物生长、抗逆性、抗氧化等多种生物活性,还具有抗肿瘤、抗病毒、保护神经、促进双歧杆菌生长等生理药理功能^[10]。

2 功能性寡糖生物学效应

近年来,功能性寡糖作为新兴的活性物质被不断研究开发,并逐渐应用在营养保健、动植物生长、疾病预防与治疗等方面。

2.1 功能性寡糖在饲料中的生物学效应

抗生素造成的生物学效应的不良影响,使其在动物饲料中的应用受到限制。功能性寡糖由于其良好的安全性、稳定性,正引起人们的重视,已被添加到饲料中,在养殖业中前景良好。

水产动物饲料中添加功能性寡糖可提高营养吸收率,具有抑制病原菌、增殖有益菌、维持肠道健康的作用,从而促进生长,提高成活率。木寡糖、果寡糖、壳寡糖、甘露寡糖、大豆寡糖等被广泛应用到饲料中^[11]。壳寡糖因其具有促进鱼类生长、提高免疫力、抗病力等功能而被作为免疫增强剂应用到饲料中。司滨等^[12]在刺参饲料中添加壳寡糖,可丰富其肠壁微生物,改善肠壁菌群结构。孙梦洁^[13]以添加了壳寡糖的饲料对

俄罗斯鲟进行了养殖实验,评价了其免疫力、抗菌能力、肠道菌群等指标,为生产实践提供了依据。

功能性寡糖可调节肠道功能,丰富肠道乳酸杆菌等有益菌,抑制大肠杆菌等病原菌生长,王发明等^[14]在仔猪饲料中加入功能性寡糖,发现肠道中乳酸菌的数量、种类明显增加。Wang等^[15]发现果寡糖和大豆寡糖可提高猪源植物乳杆菌的存活率。

功能性寡糖调节动物体内氨的代谢,从而减少氨基酸分解产生的氨气,以去除粪臭,减轻水体污染情况。Liu等^[16]探究菊粉和大豆低聚糖对肉鸡粪臭素和肠道菌群的影响时发现,菊粉和大豆低聚糖显著降低了粪臭素的含量和L-色氨酸的降解率,也降低了微生物菌群密度,但无显著性差异。

功能性寡糖可提供吸附肠道病原菌的附着点,使病原菌与寡糖特异结合而无法附着到动物肠道,因寡糖具有不被胃酸、酶消化吸收的特点,病原菌可附着于寡糖并通过肠道,病原菌无法获得生长所需营养物质而难以致病^[17]。褐藻胶寡糖具有有效抑制多种有害菌的治病能力,可降低肠炎沙门氏菌感染率^[18]。

功能性寡糖具有增厚、增重肠道组织,增加肠绒毛高度,使肠壁黏膜变薄的作用,进而提高动物体内营养物质的消化利用能力。半乳甘露寡糖可增强动物对营养物质的吸收功能。

2.2 功能性寡糖在农业中的生物学效应

寡糖在农业生产中具有调节、增强可逆性、防治病害作用,通过调节光合作用、氮代谢、碳代谢、激素代谢以促进植物生长、提高质量,其安全环保、功能多样,前景广阔。

在种子萌发过程中,功能性寡糖可增强胚乳的 α -淀粉酶活性,加快淀粉水解,促进萌发,提高发芽率^[19]。在植物幼苗时期,功能性寡糖可提高幼苗叶片净光合速率、蒸腾速率,从而加快生长^[19]。褐藻胶寡糖具有促进植物根茎生长的作用,在大麦中的应用效果显著。寡糖可调节激素代谢、能量代谢,促进植物生长发育。寡聚半乳糖醛酸能诱导产生乙烯,促进果实成熟。寡糖衍生物可改善农作物品质、提高产量。植物经寡糖处理后,植物内蛋白质含量增加。

葡萄糖寡糖、壳寡糖等诱导能增强植物的抗逆性。功能性寡糖可作为抗性诱导剂应用到农药中,起到防治病害、非特异性保护作用。在水稻纹枯病、茼蒿霜霉病的爆发早期施用寡糖水溶液,病害可得到控制。壳寡糖有抑制真菌、调节生长,诱导植物抗病性等功能,常被添加到农药中,可有效防治芦笋茎枯病、棉花枯萎病、黄瓜枯萎病,水稻纹枯病。此外,壳寡糖、果

寡糖能有效诱导烟草抗花叶病。海藻糖能有效增强植物的抗逆性、抗病能力,还能通过改善气孔发育和气孔运动提高植物抗旱性^[20]。

2.3 功能性寡糖在食品中的生物学效应

功能性寡糖在食品中的应用较普遍,烘焙食品、乳制品、保健食品等多种食品都添加了功能性寡糖。功能性寡糖在大肠中被分解,产生一系列营养物质,如蛋白质、B族维生素、K族维生素、矿物质等,同时产生乳酸、丙酸、醋酸等能降低肠道pH值的有机酸类,能够促进钙、铁、镁离子的溶解、吸收,对人体健康有着不可忽视的作用。功能性寡糖被添加到配方奶粉中,可强化其营养功能,丰富婴幼儿的营养^[21]。半乳寡糖、果寡糖可帮助新生儿建立体内肠道菌群,常被添加到婴儿奶粉中,石良^[22]研究发现在婴幼儿配方食品中添加低聚糖能够保障婴幼儿肠道健康、维护免疫系统稳定。赵铭琪等^[23]通过试验得出半乳寡糖和果寡糖以8:2的质量比添加到乳粉中时,双歧杆菌和嗜酸乳杆菌活菌数均达到最大。同时得出添加 (5.5 ± 0.5) g/100g寡糖时,对小鼠粪便排泄、肠道蠕动的影响最佳。低聚异麦芽糖寡糖被添到中老年人和婴幼儿保健饮品中,通过增殖双歧杆菌改善肠道菌群、防治便秘^[24]。功能性寡糖不依赖胰岛素,研究发现果寡糖可有效改善糖尿病动物的餐后血糖值。方敏^[25]发现功能性寡糖具有保护胰岛细胞,改善胰岛素的敏感性功能,因此高血糖和糖尿病症患者可以适量食用。功能性寡糖促进肠道中双歧杆菌生长的过程中产生的代谢物可降低3-羟基-3-甲基戊二酰辅酶A还原酶的活性,控制胆固醇合成^[26-27]。

寡糖具有与糖醇相似的功能性甜味,在烘焙食品中的应用逐渐广泛^[28]。寡糖类大多水溶性好,黏度低,但难被人体消化吸收,甜度比蔗糖低。因此可被应用于低热量食品、减肥产品等特殊食品中,高纯度寡糖可被添加到糖尿病人的食品及预防龋齿的功能性食品中。异麦芽寡糖作为甜味剂使用,还可被添加到保健食品中。

功能性寡糖因其良好的抗氧化、抗真菌和抑制细菌能力被用作天然食品稳定剂、保鲜剂。褐藻胶寡糖具有优良的乳化、保水性能,具有作为冷冻水产品保水剂和抗冻剂的优势。范素琴等^[29]发现褐藻酸钠和氯化钙的成膜性,可抑制微生物生长和脂肪氧化,保持水产品的鲜度。果寡糖主要用于饮品、火腿、糕点、糖果等食品中以防止淀粉老化,维持水分。酸性饮料中添加木寡糖可提高产品稳定性,如酸奶、乳酸菌饮料和碳酸饮料等。

2.4 功能性寡糖在医药中的生物学效应

功能性寡糖具有增殖有益菌、预防腹泻和便秘、激活免疫系统、抗病等功能,从而被应用到医药中。功能性寡糖可作为益生元加入到胶原蛋白饮料中,增殖益生菌,调节肠道菌群,减少便秘,清除体内毒素。寡糖发酵导致环境呈酸性,钙化合物溶解加快,促进钙吸收,异麦芽寡糖常作为钙的吸收剂,还具有调节肠道菌群、抗肿瘤功能。水苏糖能高速增殖双歧杆菌,维持肠道稳定,可用于治疗肠道疾病。水苏糖的优良稳定性、吸水力、高黏度使其作为赋形剂添加在药物中。同时,水苏糖能降低细胞中弹性蛋白酶含量,减少弹性蛋白水解,维持皮肤弹性,可应用于抗衰老药品中。Pawar等^[30]发现半乳甘露聚糖用于卡托普利胶囊制备。壳寡糖因其广谱抗菌能力被广泛应用于各类医药中,还可控制癌细胞转移,在抗癌药物中有巨大潜力^[31]。

3 功能性寡糖的制备

功能性寡糖因其具有出色的理化和生物性能,成为国内外众多研究者研究的热点,如何针对不同需求和基于经济考量来选择合适的制取方法亦成为一个研究热点,功能性寡糖的制备主要有酶法、化学法、物理法3种方式。

3.1 酶法

酶法合成是目前采用制备功能性寡糖最为广泛的方法, β -半乳糖苷酶是常用的酶。主要方法根据糖种类的不同可以有两类:高聚合度糖的水解和单糖的聚合。

高聚合度糖的水解主要使用微生物产生的酶降解多糖获得高纯度的寡糖,如木寡糖、麦芽寡糖等。木寡糖可由内切纤维素酶降解半纤维素生成木聚糖,再经水解制得。来源于芽孢杆菌的木聚糖酶可水解玉米芯,生成以木二糖和木三糖为主的木寡糖^[3]。酶法制备异麦芽寡糖多采用 α -淀粉酶将淀粉液化生产高浓度葡萄糖浆,经 α -葡萄糖转苷酶转化,将葡萄糖去除后得高浓度产品。 α -葡萄糖苷酶可来自米曲霉、黑曲霉,其转苷能力因来源不同而不同。异麦芽寡糖也可利用蔗糖葡萄糖基转移酶和葡聚糖酶作用于蔗糖合成。

单糖的聚合多以淀粉、蔗糖、乳糖为底物,采用转移酶、水解酶的糖基转移来合成寡糖,如半乳寡糖、果寡糖、异麦芽寡糖等。蔗糖基果寡糖的制备常以蔗糖原料, β -果糖转移酶转移果糖苷得到。 β -果糖转移酶主要由真菌等微生物发酵所得,也可从植物中获得。其反应过程难以控制,纯度较低,其中含有葡萄糖和果糖及未转化的蔗糖,其生理功效大大下降,应用受

到了限制,只能以食品配料添加于一般的食品行业和饲料添加剂添加于饲料行业。高浓度乳糖或乳清常作为制备半乳糖寡糖的主要原料,经 β -半乳糖苷酶催化得到半乳糖寡糖。 β -半乳糖苷酶一方面能降解乳糖为葡萄糖和半乳糖,另一方面利用转半乳糖苷合成低聚半乳糖。这两种反应间的平衡决定了合成产率。 β -半乳糖苷酶可来自植物、微生物和动物肠道。

酶的来源广泛安全,不会造成环境污染,生产成本低,相对节约能源。利用酶法合成,条件温和,生产过程易控制、副产物少、得率高、生产周期短。酶水解法中产物产量取决于酶的种类、活力、数量,多种酶进行复合相比于单一酶提取效果佳。

不少研究者对游离酶法、非水相酶法、固定化酶连续法在生产制备功能性寡糖中的应用进行了研究。陈兴都等^[32]以菊芋菊粉液为原料,采用2.5 U/g内切型菊粉酶,在60℃、pH6条件下酶解6h,果寡糖转化率可达96.27%。傅亮等^[33]以0.5%瓜尔胶为原料,用20 IU/g β -甘露聚糖酶在50℃、pH6.0下反应8h,得到平均聚合度为4.13的半乳甘露低聚糖。

非水相酶法通过控制水相和有机相的比例,降低了反应体系中水的含量,抑制糖的水解反应,增加初始糖浓度,从而能够提高其得率。Shin等^[34]在60℃、pH6条件下,分别在95%环己烷-5%水的反应体系中,制备半乳寡糖的最大浓度为45%,而在水介质中的最高浓度为38%。

固定化酶连续法是将固定化酶固定在非水溶性的载体上,使底物易被酶降解。与游离酶相比,固定化酶虽然对与底物的接触有一定影响,但可以在不影响低聚糖得率的情况下重复使用,节约成本。刘鑫龙等^[35]以50%乳糖为底物,加入2 mmol/L的 Mg^{2+} ,640 g/L固定化的半乳糖苷酶,在40℃、pH6.5的条件下,反应4h,低聚半乳糖的产率为71.5%。

3.2 化学法

3.2.1 化学合成

化学合成法是以单糖分子为底物,在一定条件下发生一系列化学反应来获得目标产物的方法。此方法通常应用到复杂的反应体系及大量有毒易残留的化学试剂中,存在工艺复杂繁琐,生产成本低,得率低,合成所用试剂毒性大易残留,环境污染、副产品得率高和分离纯化难度大等问题,因此不适合食品级功能性寡糖的生产,主要用于实验室研究。乳糖的制备方法是利用乳糖在碱性条件下加热,使部分葡萄糖异构化,后经去离子、脱色、浓缩得上清液,即异构化乳糖糖浆^[36]。

3.2.2 化学降解

化学降解法是使用具有切割糖苷键能力的酸、碱对高聚合度的多糖进行水解,从而获得不同结构寡糖的方法。该方法价格低廉、简单快速,可得到分子量分布较广的功能性寡糖,但其水解物中糖类组分复杂,副反应较多,增加了产品后续纯化的难度,难以获得具有特定结构的功能性寡糖,且产率低、专一性差,不易获得高纯度产品,因此不能用于规模化生产。

酸的浓度和水解的时间决定目标产物的得率,常利用的酸为盐酸、乙酸、磷酸。马永香^[37]采用酸沉法和絮凝法生产大豆糖蜜上清液,比较了总糖损失率、大

豆寡糖糖损失率以及脱色率等指标。吴胜军^[38]以荸荠多糖为底物,经双氧水降解得到抗氧化能力较好的寡糖。

3.3 物理法

目前常用的物理方法有热水抽提法、辐射降解法、超声波法、微波法等。严玲^[39]以豆腐黄浆为原料,通过超滤膜工艺,提取、纯化获得含72.1%大豆寡糖的糖溶液。宋春丽等^[40]采用微波法和超声波辅助法提取豆粕中大豆寡糖,两种方法最佳提取条件下大豆寡糖的得率分别为12.56%、12.03%,微波法要优于超声波法。常见几种物理制备方法见表1。

表1 常见几种物理制备方法

Table 1 Common several physical preparation methods

方法	提取机理	特点
热水抽提法	木聚糖结构分子上的乙酰基在高温高压下,脱落形成乙酸,降低体系pH值,木聚糖主链上的 β -1,4糖苷键水解断裂,饱和蒸汽作用于木聚糖分子,提取木聚糖来制备低聚木糖	对设备无损坏,无污染,安全系数高;所需设备要求较高,精制工艺较为繁琐,操作过程难控制,产物得率低
超声波法	超声波的振动产生巨大剪切力,高温能使物料中的大分子物质化学键断裂,发生降解;同时对表面结构的破坏有利于原料与酶结合、与化学试剂作用,从而改变反应性能,提高后续的反应活性及酶解率,促进反应进行	用时短、效率高、不损坏提取物
微波降解法	将多聚糖通过微波加热处理,使多聚糖分子化,从而得到低聚糖	环境污染较小、操作方便简单、效率高,不适用于工业化生产

4 展望

目前,功能性寡糖在世界各国广泛生产和使用,其产品在国内外的市场上的比重逐渐增长,在食品行业、医学用途、饲料及养殖业前景广阔。随着市场的推动发展及人们对功能性寡糖研究工作的深入,将有越来越多的功能性寡糖被开发和利用,必将在各个领域发挥越来越大的作用。未来,功能性寡糖的制备生产还有待深入研究,扩大生产规模、提高生产效率,与生态环境协调是当前生产技术需要解决的问题。

参考文献:

[1] 杜晨红, 杨东吉, 朱随亮, 等. 不同功能性寡糖对细菌增殖与黏附性影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(5): 2378-2387.
DU Chenhong, YANG Dongji, ZHU Suiliang, et al. Effects of different functional oligosaccharides on bacteria proliferation and adhesion[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(5): 2378-2387.

[2] LIU X Q, LIU Y, JIANG Z Q, et al. Biochemical characterization of a novel xylanase from *Paenibacillus barengoltzii* and its application in xylooligosaccharides production from corncoobs[J]. Food Chemistry, 2018, 264: 310-318.

[3] 杨绍青, 刘学强, 刘瑜, 等. 酶法制备几种功能性低聚糖的研究进展[J]. 生物产业技术, 2019(4): 16-25.
YANG Shaoqing, LIU Xueqiang, LIU Yu, et al. Advance in enzymatic production of several functional oligosaccharides[J]. Biotechnology & Business, 2019(4): 16-25.

[4] LI P H, ZHANG C C, XU D G. Molecular dynamics investigations of cello-oligosaccharide recognition by Cel9G-CBM3c from *Clostridium cellulovorans*[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2018, 20(7): 5235-5245.

[5] BHARATHIRAJA S, BUI N Q, MANIVASAGAN P, et al. Multi-modal tumor-homing chitosan oligosaccharide-coated biocompatible palladium nanoparticles for photo-based imaging and therapy[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 500.

[6] MAKI Y, MIMA T, OKAMOTO R, et al. Semisynthesis of complex-type biantennary oligosaccharides containing lactosamine repeating units from a biantennary oligosaccharide isolated from a natural source[J]. The Journal of Organic Chemistry, 2018, 83(1): 443-451.

[7] KAWEE-AI A, RITTHIBUT N, MANASSA A, et al. Optimization of simultaneously enzymatic fructo- and inulo-oligosaccharide production using co-substrates of sucrose and inulin from Jerusalem artichoke[J]. Preparative Biochemistry & Biotechnology, 2018, 48(2): 194-201.

[8] 余劲聪, 何舒雅, 林克明. 基于专利的我国壳寡糖种植业领域技术发展态势分析[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(6): 1-9.
YU Jincong, HE Shuya, LIN Keming. Development situation analysis of Chinese chitosan oligosaccharide in planting field based on patent[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(6): 1-9.

[9] 刘美思. 几种海洋寡糖免疫调控作用初探[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2016.
LIU Meisi. Investigations on immune regulations of several marine oligosaccharides[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2016.

- [10] 陈淑琼, 李晓月, 吴晨烁, 等. 酶解制备褐藻寡糖工艺优化及活性研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(13): 51-56.
CHEN Shuqiong, LI Xiaoyue, WU Chenshuo, et al. Optimization of process conditions and activity for enzymatic hydrolysis of sodium alginate[J]. Food Research and Development, 2019, 40(13): 51-56.
- [11] 乔宇, 田丹丹, 徐小轻, 等. 功能性寡糖在动物健康养殖中的应用研究进展及现状[J]. 生物产业技术, 2018(6): 35-39.
QIAO Yu, TIAN Dandan, XU Xiaoqing, et al. Research progress and application on functional oligosaccharides in animal healthy breeding[J]. Biotechnology & Business, 2018(6): 35-39.
- [12] 司滨, 王轶南, 刘海映, 等. 饲料中添加壳寡糖对刺参肠壁菌群的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2017, 32(2): 167-171.
SI Bin, WANG Yinan, LIU Haiying, et al. Effect of dietary chitosan oligosaccharide on bacterial community in intestinal wall of sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2017, 32(2): 167-171.
- [13] 孙梦洁. 壳寡糖对鱼类免疫、肠道菌群及外周血白细胞转录组的影响[D]. 青岛: 青岛大学, 2019.
SUN Mengjie. Effects of chitosan oligosaccharides on immunity, intestinal bacterial flora and transcriptome in peripheral blood leukocyte of fishes[D]. Qingdao: Qingdao University, 2019.
- [14] 王发明, 朝克图, 侯璐. 益生菌及寡糖对猪肠道乳酸菌群多样性的影响[J]. 畜牧与饲料科学, 2015, 36(3): 3-7.
WANG Faming, CHAOKETU, HOU Lu. Effect of probiotics and oligosaccharides on the diversity of lactic acid bacteria flora in piglets intestinal tract[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2015, 36(3): 3-7.
- [15] WANG J, WANG S X, LIU H, et al. Effects of oligosaccharides on the growth and stress tolerance of *Lactobacillus plantarum* ZLP001 *in vitro*, and the potential synbiotic effects of *L. plantarum* ZLP001 and fructo-oligosaccharide in post-weaning piglets[J]. Journal of Animal Science, 2019, 97(11): 4588-4597.
- [16] LIU H Y, HOU R, YANG G Q, et al. *In vitro* effects of inulin and soya bean oligosaccharide on skatole production and the intestinal microbiota in broilers[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2018, 102(3): 706-716.
- [17] 任红立, 汪晶晶, 宋建楼, 等. 功能性低聚糖的研究进展[J]. 饲料博览, 2016(4): 35-39.
REN Hongli, WANG Jingjing, SONG Jianlou, et al. Research progress of functional oligosaccharides[J]. Feed Review, 2016(4): 35-39.
- [18] 吴哲, 任丹丹, 梁馨元, 等. 褐藻胶寡糖的制备分离及生物活性[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(1): 1-7.
WU Zhe, REN Dandan, LIANG Xinyuan, et al. Preparation, separation and biological activities of alginate oligosaccharides[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(1): 1-7.
- [19] 陈薇薇. 木寡糖促进小白菜生长及抗盐胁迫效应研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
CHEN Weiwei. Effects of xylo-oligosaccharides on the growth promotion and salt stress resistance of Chinese cabbage[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.
- [20] 王楠, 高静, 张岁岐, 等. 基于海藻糖的生物节水抗逆农业研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 202-209.
WANG Nan, GAO Jing, ZHANG Suiqi, et al. Biological water saving and stress resistance in agriculture through trehalose[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(3): 202-209.
- [21] 操然. 低聚糖在乳品中的应用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(26): 356-357, 375.
CAO Ran. Research progress in the application of oligosaccharides in the dairy products[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(26): 356-357, 375.
- [22] 石良. 低聚糖和益生菌在婴幼儿配方食品中的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(10): 284-286.
SHI Liang. Research progress of oligosaccharide and probiotics in infant foods[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(10): 284-286.
- [23] 赵铭琪, 张宏达, 王立娜, 等. 婴儿配方乳粉中低聚糖添加量对肠道益生功能的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(1): 63-67.
ZHAO Mingqi, ZHANG Hongda, WANG Lina, et al. Effect of oligosaccharide addition on intestinal probiotic function in infant formula milk powder[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(1): 63-67.
- [24] 刘重慧, 张静, 范誉川, 等. 低聚异麦芽糖调节肠道菌群及润肠通便作用的研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(7): 298-302.
LIU Chonghui, ZHANG Jing, FAN Yuchuan, et al. Studies on the effects of isomaltooligosaccharides regulating intestinal microbial flora proliferation and relieving constipated function[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(7): 298-302.
- [25] 方敏. 甲壳低聚糖硒对2型糖尿病大鼠胰岛素指标及胰腺组织的影响[J]. 中国生化药物杂志, 2012, 33(5): 615-618.
FANG Min. Effect of chitooligosaccharides-selenium on insulin index and pancreas tissue in type 2 diabetes rats[J]. Chinese Journal of Biochemical Pharmaceutics, 2012, 33(5): 615-618.
- [26] 毕云枫, 徐琳琳, 姜珊, 等. 低聚糖在功能性食品中的应用及研究进展[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(1): 5-8.
BI Yunfeng, XU Linlin, JIANG Shan, et al. Application and research progress of oligosaccharides in functional food[J]. Cereals & Oils, 2017, 30(1): 5-8.
- [27] 程明辉. 基于低聚糖在功能性食品中的研究进展[J]. 农产品加工, 2018(13): 47-48, 51.
CHENG Minghui. Research progress in functional food based on oligosaccharide[J]. Farm Products Processing, 2018(13): 47-48, 51.
- [28] 滕超, 鹿发展, 范光森, 等. 木聚糖酶的研究进展及其在食品领域的应用[J]. 生物产业技术, 2019(4): 34-41.
TENG Chao, LU Fazhan, FAN Guangsen, et al. Advances in xyylanase and its application in food industry[J]. Biotechnology & Business, 2019(4): 34-41.
- [29] 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制品中的应用研究进展[J]. 肉类工业, 2019(3): 49-52.
FAN Suqin, CHEN Xinbing, DAI Zengying, et al. Biological activity

- of alginate oligosaccharides and its application and research progress in aquatic products[J]. Meat Industry, 2019(3): 49-52.
- [30] PAWAR H A, LALITHA K G, RUCKMANI K. Alginate beads of Captopril using galactomannan containing *Senna tora* gum, guar gum and locust bean gum[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 76: 119-131.
- [31] 原旭冰, 刘洪涛, 杜昱光. 壳寡糖的制备及其在医学和农业生产中的应用[J]. 生物技术进展, 2018, 8(6): 461-468, 553.
YUAN Xubing, LIU Hongtao, DU Yuguang. Preparation of chitosan oligosaccharide and its application in medicine and agricultural production[J]. Current Biotechnology, 2018, 8(6): 461-468, 553.
- [32] 陈兴都, 翟丹云, 陈庆安, 等. 基于菊芋低聚果糖的酶解工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(11): 109-114.
CHEN Xingdu, ZHAI Danyun, CHEN Qingan, et al. Study on enzymatic hydrolysis processing of fructo-oligosaccharide from Jerusalem artichoke[J]. Food Research and Development, 2017, 38(11): 109-114.
- [33] 傅亮, 何紫姣, 李存芝, 等. 酶法制备瓜尔胶半乳甘露低聚糖的研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(5): 122-124.
FU Liang, HE Zijiao, LI Cunzhi, et al. Enzymatic preparation of galacto-mannan-oligosaccharides from guar gum[J]. Food & Machinery, 2010, 26(5): 122-124.
- [34] SHIN H J, YANG J W. Galacto-oligosaccharide production by β -galactosidase in hydrophobic organic media [J]. Biotechnology Letters, 1994, 16(11): 1157-1162.
- [35] 刘鑫龙, 王立晖, 汤卫华, 等. 固定化半乳糖苷酶催化合成低聚半乳糖的研究[J]. 食品工程, 2016(1): 20-22, 39.
LIU Xinlong, WANG Lihui, TANG Weihua, et al. Study on immobilized galactosidase enzymatic synthesis of galactooligosaccharides [J]. Food Engineering, 2016(1): 20-22, 39.
- [36] 徐铮, 张倩, 李克文, 等. 乳果糖制备方法的研究进展[J]. 乳业科学与技术, 2020, 43(4): 34-40.
XU Zheng, ZHANG Qian, LI Kewen, et al. Recent advances in the development of methods for the production of lactulose[J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2020, 43(4): 34-40.
- [37] 马永香. 利用吸附、包埋及离子交换法制备大豆低聚糖浓缩糖浆的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013: 1-71.
MA Yongxiang. Study on the preparation of soybean oligosaccharide syrup by adsorption, inclusion and ion exchange[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013: 1-71.
- [38] 吴胜军. 普鲁兰的发酵及改性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 1-78.
WU Shengjun. The studies on fermentation and modification of pullulan[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009: 1-78.
- [39] 严玲. 豆腐黄浆水制备大豆低聚糖的工艺研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2015: 1-56.
YAN Ling. Research on preparation process of soybean oligosaccharide from tofu yellow slurry water[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2015: 1-56.
- [40] 宋春丽, 王文侠, 曾风彩, 等. 超声波和微波辅助提取大豆低聚糖的工艺比较[J]. 食品与机械, 2011, 27(2): 47-50.
SONG Chunli, WANG Wenxia, ZENG Fengcai, et al. Comparison of ultrasonic-assisted and microwave-assisted extraction of oligosaccharides from high denatured soybean meal[J]. Food & Machinery, 2011, 27(2): 47-50.

加工编辑:王艳

收稿日期:2021-04-21