

功能性寡糖研究及其在食品中的应用进展

滕超^{1,2}, 查沛娜¹, 曲玲玉¹, 肖林³, 焦章君¹, 李秀婷^{1,2*}

(1. 北京工商大学 食品质量与安全北京实验室, 北京 100048; 2. 北京工商大学 北京市食品添加剂工程技术研究中心, 北京 100048; 3. 山东龙力生物科技股份有限公司, 禹城 251022)

摘要: 功能性寡糖是一种新型低热值甜味剂及功能性食品重要的添加剂, 具有多种有益人体健康的生理功能。本文介绍了食品中应用较多的几类功能性寡糖——低聚木糖、低聚果糖、低聚半乳糖、低聚异麦芽糖、几丁寡糖等的理化性质及生理功能, 详细综述了其制备、检测方法及其近年来在食品中的应用和未来的开发前景。

关键词: 功能性寡糖; 进展; 食品工业

Progress of research and application in food industry of functional oligosaccharides

TENG Chao^{1,2}, ZHA Pei-Na¹, QU Ling-Yu¹, XIAO Lin³, JIAO Zhang-Jun¹, LI Xiu-Ting^{1,2*}

(1. *Beijing Laboratory of Food Quality and Safety, Beijing Technology & Business University, Beijing 100048, China;* 2. *Beijing Engineering and Technology Research Center of Food Additives, Beijing Technology & Business University, Beijing 100048, China;* 3. *Shandong Longlive Bio-technology Co., LTD., Yucheng 251200, China*)

ABSTRACT: Functional oligosaccharide is a new low-calorie sweetener, which has a variety of physiological functions beneficial to human health. This paper described the physicochemical properties and physiological function of several types of functional oligosaccharides, which had a lot of applications in food, such as xylooligosaccharides, fructooligosaccharides, galactooligosaccharides, somaltooligosaccharide, and chitin oligosaccharides. Their preparation, detection methods, applications in food industry and future development prospects were also reviewed in this paper.

KEY WORDS: functional oligosaccharides; development; food industry

功能性寡糖(functional oligosaccharides)或称功能性低聚糖, 是指具有特殊的生理学功能, 不被人和动物肠道分泌的消化酶消化, 并可促进双歧杆菌的增殖, 有益于人和动物健康的一类寡糖。功能性寡糖一般是由 2~10 个单糖通过糖苷键连接形成直链或支链的低聚合度糖, 是一类双歧因子或益生元型的物

质, 被称为化学益生菌^[1]。现在研究认为功能性寡糖包括水苏糖、棉籽糖、乳果糖、乳酮糖、异麦芽酮糖、低聚木糖、低聚果糖、低聚半乳糖、低聚麦芽糖、低聚异麦芽糖、低聚异麦芽酮糖、大豆低聚糖、几丁寡糖、甘露寡糖、半乳甘露寡糖、低聚龙胆糖、耦合糖等。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371723)、国家自然科学基金青年科学基金项目(31201449)、国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA021502)。

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31371723), the National Natural Science Foundation of China (31201449) and the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) Project (2012AA021502).

*通讯作者: 李秀婷, 博士, 教授, 主要研究方向为食品微生物与酶工程。E-mail: lixt@th.btbu.edu.cn

*Corresponding author: LI Xiu-Ting, Ph.D, Professor, College of Food, Beijing Technology & Business University, No.11, Fucheng Road, Haidian District, Beijing 100048, China. E-mail: lixt@th.btbu.edu.cn

在新型寡糖研究开发及应用方面,日本位居世界前列。日本自20世纪70年代开始开发寡糖,80年代初批量生产低聚异麦芽糖及低聚果糖,到20世纪90年代开发出70余种功能性寡糖,达数百个产品,产值近3亿美元。目前,日本国内的寡糖在产量、价格优势、消费量及出口量等方面均居世界领先地位^[2]。我国从20世纪80年代开始研制功能性寡糖,近年来在国家大力扶持和推广下,其被列入了国家轻工行业标准QB/T2492-2000。其中许多产品被国家公众营养与发展中心推荐为“营养健康倡导产品”。2012年,我国功能性寡糖的产能约12万吨,品种主要以低聚木糖、低聚果糖、低聚异麦芽糖为主,3种合计占到低聚糖市场份额的70%左右^[3]。功能性寡糖因其独特的生理功能而成为重要的功能性食品基料,已引起全世界广泛关注,是近年来市场增长最快的健康食品配料。迄今为止,已知的功能性低聚糖有1000多种,国际上已研究开发成功的低聚糖有70多种。在日本和欧洲,以功能性低聚糖开发的食品多达四五百种^[4]。我国功能性低聚糖已形成一定规模,市场逐步扩大,成为功能性食品重要的添加剂。随着消费者生活水平的提高和对功能性寡糖的认识,产品市场前景极为广阔。

1 功能性寡糖的理化性质及生理功能

1.1 理化性质

功能性寡糖的熔点随聚合度及种类的不同而变化,因此无法确定功能性寡糖的熔点。比如,对于低聚木糖来说,木二糖的熔点为155.5~156.0℃,木三糖的熔点为109.0~110.0℃^[5]。几类主要功能性寡糖的摄入量、味觉和其他物理性质^[3,6]见表1。

1.2 生理功能

功能性寡糖是典型的益生元,不但具有糖醇类似的功能,如预防龋齿、控血糖等,同时具有增殖双歧杆菌的功能,经常食用可以增强免疫力,这是大多数糖醇所不具备的^[7]。

1.2.1 调节肠道菌群

功能性寡糖对肠道菌群的调节主要是增殖有益菌(尤其是双歧杆菌),抑制有害菌。对双歧杆菌增殖的机制在于它不只是充当碳源或营养物质,而且还可能参与了双歧杆菌的生长调节和黏附作用。Fanaro等^[8]的研究表明,婴儿食物中添加酸性果胶和中性寡糖,可以使其肠道中双歧杆菌和乳酸杆菌的数量显著增加,改善肠道菌群。

表1 功能性寡糖的摄入量、味觉和物理性质
Table 1 Intake, taste and physical properties of functional oligosaccharides

功能性寡糖种类	低聚木糖	低聚果糖	低聚半乳糖	低聚异麦芽糖	几丁寡糖
最小有效剂量(g/d)	0.7	3	2	10	-
日常摄入量(g/d)	0.7~1.4	5~20	8~10	15~20	0.3~0.7
最大无作用量(g/d)	-	36	18	90	-
甜度(以蔗糖作100计)	50	30~60	20~40	30~50	30~35
甜味性质	纯正,类似蔗糖	清爽,不带任何后味	纯正	温和	爽口
热值	3.4 kcal/g	1.5 kcal/g	1.7 kcal/g	-	几乎不产热量
酸热稳定性	很稳定	pH=3的条件下,高于70 极易分解	中性条件下耐热性较好	较强	稳定
着色性	较蔗糖稍弱,与氨基酸共存加热时比蔗糖好	非着色性	着色性高	易着色	-
黏度	所有寡糖中最低	较蔗糖高	较低	与蔗糖接近	较壳聚糖大大降低
水分活度	比蔗糖低	略高于蔗糖	与蔗糖相似	与蔗糖相似	-
保湿性	良好	很好	极强	优良	优于蔗糖

1.2.2 降低血脂血压和血清胆固醇

目前对降血脂功能的研究多集中于中性寡糖, 主要有低聚果糖、低聚木糖、低聚异麦芽糖、大豆低聚糖等。Wang 等^[9]将低聚异麦芽糖应用于人体降血脂试验, 结果表明低聚异麦芽糖可以显著降低血液透析病人总胆固醇和甘油三酯含量, 并且可以增加高密度脂蛋白胆固醇的含量, 对改善心脑血管疾病有重要意义。

1.2.3 促进营养物质的消化吸收

Wang 等^[10]研究发现, 以小鼠为实验模型饲料中添加 2.5 g/kg 的低聚果糖可以增加盲肠内短链脂肪酸、醋酸盐、丙酸盐和丁酸盐的含量, 提高钙、镁和铁的表现消化率, 促进小鼠对钙、镁和铁的消化和利用。此外, 双歧杆菌在肠道内能合成多种 B 族维生素、烟酸、叶酸以及某些人体必需氨基酸, 有重要的营养作用。由于双歧杆菌的存在, 能加强胃肠消化系统的适应性, 延长氮在肠道的停留时间, 提高营养利用率^[11]。

1.2.4 抗氧化

Ngo 等^[12]实验结果表明, 几丁寡糖也可以抑制蛋白质的氧化, 当几丁寡糖浓度为 5 $\mu\text{g/mL}$ 时膜蛋白氧化的抑制率超过 50%。此外, 几丁寡糖还可以抑制小鼠巨噬细胞 DNA 的氧化, 在 DNA 损伤测试中, 几丁寡糖在不同试验浓度(1 $\mu\text{g/mL}$ 、5 $\mu\text{g/mL}$ 、10 $\mu\text{g/mL}$) 下均表现出约 80% 的抑制作用。

2 功能性寡糖的制备

2.1 低聚木糖方法

目前, 低聚木糖的制备方法主要有酸水解法、热水抽提法、蒸汽爆破法、微波降解法和酶水解法。其中, 酸水解法应用较为广泛, 但反应过程不易控制(容易直接水解为木糖), 另外, 酸的使用会伴随有害物质的生成, 其对环境造成极大压力。热水抽提法和蒸汽爆破法由于目标产物得率偏低, 一般作为酶水解或化学水解的前处理方式。微波降解法则仍处于实验室研究水平。酶水解法充分利用木聚糖酶反应条件温和、效率高及特异性好的特点高效制备低聚木糖, 成为当前最主要的制备方法。

在酶法制备中, 木聚糖酶是关键因素, 不同来源的木聚糖酶其水解产物也不尽相同。如 *Trichoderma longibarchiatum* 产的木聚糖酶降解木聚糖, 产物中含量最高的是单糖, 其次是二糖、三糖和

四糖, 而 *Aspergillus niger* 产的木聚糖酶的降解产物则是二糖最多, 其次是三糖、四糖和五糖, 单糖的含量很少^[13]。通过酶解制备低聚木糖一般采取“纤维质材料中木聚糖分离→木聚糖水解”的两段式制备方法。例如 Teng 等^[14]利用 *Paecilomyces thermophilia* J18 产的耐热木聚糖酶水解玉米芯蒸煮喷爆渣, 低聚木糖得率为 28.6%, 其中二糖和三糖的含量超过了 90%。除了可通过降解木聚糖得到低聚木糖外, 也有利用 β -木糖苷酶的转糖苷功能合成低聚木糖的报道, 但此种方法得率低, 并不适合工业生产^[15]。在生物法制备中也有通过微生物采用边产酶边水解的方式制备低聚木糖, 此种方法耗时, 效率低。

2.2 低聚果糖方法

低聚果糖可以通过蔗糖或菊粉为底物制备得到。以蔗糖为底物制备低聚果糖主要使用 β -D-果糖基转移酶或 β -呋喃果糖苷酶。最常用的产酶菌种有 *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae*, *Aureobasidium pullulans* 和 *Aspergillus japonicus*。目前, 黑曲霉产的果糖基转移酶已被广泛应用, 低聚果糖的最大产率可达 55%~60%(质量分数)。不同来源的 β -D-果糖基转移酶的转苷能力相差并不大, 以 55% 的蔗糖为底物时, 采用 *Aspergillus oryzae* CFR202 产的 β -D-果糖基转移酶, 低聚果糖的得率为 54%, 而采用 *Aspergillus pullulans* CFR 77 产的 β -D-果糖基转移酶, 低聚果糖的得率为 56%^[16]。

以菊粉为底物制备低聚果糖主要采用内切菊粉酶。在内切菊粉酶水解菊粉的过程中, 酶的纯度对低聚果糖的得率和组成有较大影响。采用纯化酶可使菊粉的水解率达到 75%, 低聚果糖得率为 70%, 产物聚合度以 2~8 为主, 而部分纯化的酶由于其中含有少量外切酶使得低聚果糖的得率仅有 50%, 聚合度只有 2~4^[17]。大多数研究通常只使用一种来源的内切菊粉酶, 有研究显示使用来自于 *Xanthomonas sp.* 和 *Pseudomonas sp.* 的双内切酶系统能够获得更高的低聚糖得率^[18]。

2.3 低聚半乳糖方法

在低聚半乳糖的制备中, 主要以高浓度乳糖或乳清为原料, 采用微生物来源的 β -半乳糖苷酶进行催化。 β -半乳糖苷酶除能将乳糖水解为半乳糖和葡萄糖外, 还能通过转半乳糖苷合成低聚半乳糖。来自 *Sulfolobus solfataricus* 的 β -半乳糖苷酶在 80 $^{\circ}\text{C}$ 的半

衰期可以达到 72 h, 以 600 g/L 的乳糖为底物能在 56 h 内获得 315 g/L 的低聚半乳糖, 得率达 52.5%^[19]。有研究采用细胞发酵的方法, 将 5 mL 细胞悬浮液接种于 45 mL 培养基中 (乳糖 40%, pH 6.0), 30 °C 下往复振荡器上无菌培养 60 h, 产生 232 mg/mL 的低聚半乳糖, 产率高达 64%, 这是目前所报道的低聚半乳糖得率的最高水平^[20]。

2.4 低聚异麦芽糖方法

目前, 国内外低聚异麦芽糖的工业化生产主要是采用耐高温 α -淀粉酶和真菌 α -淀粉酶生产高麦芽糖浆, 再利用 α -葡萄糖转苷酶进行转化生成低聚异麦芽糖, 将葡萄糖去除后便成为高浓度的产品。在此过程中, 可以使用具有转苷能力的 α -葡萄糖苷酶, 也可以采用专门的葡萄糖转苷酶。不同来源的 α -葡萄糖苷酶的转苷能力差异较大, 例如, 来自 *Xanthophyllomyces dendrorhous* 的 α -葡萄糖苷酶以 200 g/L 的麦芽糖为底物可以获得 53.8 g/L 的低聚异麦芽糖, 其转苷能力是来源于 *Saccharomyces cerevisiae* 的 α -葡萄糖苷酶的 3.6 倍^[21]。

低聚异麦芽糖不仅能够以淀粉为底物得到, 也可通过蔗糖合成, 这需要使用蔗糖-6-葡萄糖基转移酶和葡聚糖酶。例如, 采用固定化的蔗糖-6-葡萄糖基转移酶作用于 10% 的蔗糖, 可获得 90% 的转化率, 最终产物中含有 55%~60% 的异麦芽糖、20% 葡萄糖、10% 异麦芽三糖、15% 四糖和微量珠菌二糖^[22]。

2.5 几丁寡糖方法

酸水解法是制备几丁寡糖的传统方法, 最常用的是浓盐酸法^[23]。酸水解法虽然工艺简单, 但其降解度难以控制, 且产物转化率低。另外, 也有用微波、辐射、超声等物理方法制备几丁寡糖的报道。目前研究的热点是酶解法。

酶解法制备几丁寡糖所用的酶, 分为专一性酶和非专一性酶。专一性酶包括几丁质酶、葡聚糖酶、部分蛋白酶等; 非专一性酶包括脂肪酶、溶菌酶、果胶酶、木瓜蛋白酶等。其中几丁质酶分内切酶和外切酶两种, 内切酶从链内部随机降解, 水解产物是二糖、寡糖及低聚糖分子; 外切酶从非还原端依次切下得到单糖, 水解速度较慢^[24]。而许多非专一性酶对几丁质有部分或完全水解作用, 如纤维素酶、蛋白酶、脂肪酶等三十多种酶, 来源广泛, 作用机制目前还不清楚, 但有些酶的水解作用比专一性酶更加有效^[23]。

2.6 其他寡糖(低聚糖)方法

其他重要功能性寡糖包括大豆低聚糖, 主要指大豆中可溶性糖质的总称。主要成分是指单糖数为 3~4 的蔗糖(双糖)、棉子糖(三糖)和水苏糖(四糖)等。工业上一般以脱脂大豆为原料, 在提取蛋白质后剩下的乳清中提取。而在海藻糖的制备中, 可以通过抽提富含海藻糖的酵母或真菌、微生物发酵, 或是以葡萄糖、蔗糖、麦芽糖为底物采用磷酸化酶催化获得, 但这些方法都存在效率低、成本高的问题, 因而缺乏实际应用前景。目前制备海藻糖主要是以麦芽糖或淀粉为原料生产, 涉及到 α -葡萄糖苷酶、 α -淀粉酶、海藻糖合成酶等^[19]。

目前, 大部分功能性寡糖主要采用酶法制备, 主要方法根据糖种类的不同可以有两类: 大分子糖的水解和小分子糖(单糖)的聚合。前者主要使用微生物来源的水解酶(或辅以磷酸化酶、异构酶)结合特定的工艺生产高含量的寡糖。目前能够用此法大规模生产的寡糖种类主要有低聚麦芽糖和低聚木糖等。后者主要使用三大类合成酶: 糖基转移酶、糖苷水解酶及磷酸化酶。用来合成寡糖的原料主要为淀粉类、蔗糖、乳糖等。这些原料来源充足, 价格低廉, 并且可以综合利用。例如低聚果糖、低聚半乳糖、低聚异麦芽糖、低聚异麦芽酮糖、甘露寡糖、海藻糖等均可以用酶法合成得到。

2.7 寡糖的纯化

目前寡糖的分离纯化主要采用的方法包括: (1) 色谱柱分离法, 其优点在于可实现连续循环操作, 但由于该法初期投资较高、操作相对复杂, 因此生产成本较高, 进而限制其应用。(2) 膜分离法, 主要依据滤膜孔径的大小达到物质分离的目的, 在实际生产中可以根据寡糖本身分子量大小及对产品规格定位对膜类型进行选择。(3) 酶法, 该法原理是利用酶制剂将低聚糖混合物中的某一或某些组分专一性地除去。(4) 微生物发酵法, 该法利用多数功能性低聚糖的难发酵性, 选择适当的微生物将非功能性低聚糖成分通过发酵的方法除去。例如, 酿酒酵母可以将功能性低聚糖混合物中的葡萄糖选择性地发酵为酒精除去^[25]。尽管国内外学者对糖类混合物的分离纯化工作进行了许多有益的研究和探讨, 特别是单糖生产中的果糖和葡萄糖分离已实现工业化。但功能性低聚糖组成相对复杂, 目前尚没有既经济又有效的分离纯

化方法。其中利用某些微生物或特定酶类对特定杂质实现分解或转化的纯化方法实施简单、成本相对低廉, 虽然前期研究周期较长, 但从长远来看在将是未来功能性低聚糖分离纯化的重要方法之一。

3 功能性寡糖的检测方法

3.1 高压液相色谱法

目前检测功能性寡糖的方法很多, 高压液相色谱法(HPLC)相对多些, 其主要是利用寡糖的易溶特性, 因此, 在糖柱、氨基柱、凝胶柱上能达到较好的分离效果。与糖柱相比, 虽然氨基柱的分离效果不如糖柱好, 但是氨基柱价格低, 易保养, 且适合分离大分子的糖, 在精密度和回收率要求不是特别高时也可达到要求。高压液相色谱法一般采用示差折光检测器进行检测。随着技术的进步, Antonopoulos 等^[26]用蒸发光散射检测器检测低聚糖, 研究发现蒸发光散射检测器比示差折光检测器检出限高 1~2 个数量级, 具有比较好的应用前景。HPLC 也在不断的发展和完善的, 例如 Hirota 等^[27]将单糖和低聚糖进行荧光素衍生后, 利用 HPLC 法检测取得了较好的效果, 也有人称之为高压液相柱前衍生法^[28]。

HPLC 操作简便, 易于掌握, 测定结果准确, 重复性和再现性良好, 适用于复杂食品基质中寡糖含量的测定。例如, 傅博强等^[29]用该法将三种低聚果糖(蔗果三糖、蔗果四糖、蔗果五糖)与复杂食品中的干扰成分如葡萄糖、蔗糖、乳糖、低聚异麦芽糖等糖类和其他杂质在色谱柱上实现有效分离。也有研究用该法测定低聚半乳糖和低聚异麦芽糖, 均获得了良好的分离效果。该法可以满足食品生产企业质量控制和质检部门进行市场监管的需求。形成的检测国家标准将为食品营养标签中功能性寡糖含量的标示提供检测依据。

3.2 气相色谱法

随着气相色谱法和衍生技术的发展, 也有人采用气相色谱分离检测低聚糖, 该法具有高效、快速、灵敏度高、样品用量小等优点^[30]。但因气相色谱用气体做流动相, 被分析样品必须汽化后才能在柱上进行分析。低聚糖没有足够的挥发性, 测定时要预先将其制备成易挥发、对热稳定的衍生物。进样口的高温有时会使其衍生物分解, 甚至可被留在进样口上的残留物催化。因此, 气相色谱法在检测功能性低聚

糖时有一定的限制^[30]。

3.3 薄层层析法

薄层层析法成本低, 速度快, 不受试样挥发性和热稳定性局限, 但使用薄层色谱做糖的分离鉴定只有在负荷量很小的条件下才能达到满意效果。一般负荷量 0.5 μL , 最大为 5 μL , 与高压液相色谱和气相色谱相比, 它的测定误差较大, 不易进行定量分析, 只适用于低聚糖生产或试验研究的常规分析^[30]。例如, 陈金玲等^[31]研究建立了快速鉴定大蒜低聚果糖的薄层层析法, 展开系统为正丁醇:异丙醇:水:乙酸=7:5:4:2, 显色剂为 α -萘酚-硫酸, 点样量为 0.4 μL , 室温下进行 4 次展开, 可把单糖至低聚七糖甚至八糖等各组分开, 斑点清晰, 无拖尾, 分离效果较好。

3.4 离子色谱法

离子色谱法检测功能性寡糖是比较新的技术, 具有灵敏度高、分离效率好等特点^[32]。它是美国 AOAC 官方首先公布的检测低聚半乳糖的标准方法, 其他关于离子色谱法检测低聚半乳糖的研究主要是对 AOAC 标准方法的改进研究。

随着技术的发展, 也有将多种方法进行结合检测低聚糖的研究。例如 Broberg^[33]用高压液相色谱串联离子阱质谱进行了低聚糖的分析。还有 Dreisewerd 等^[34]采用薄层色谱板分离生牛乳中的低聚糖, 然后用基质辅助激光解吸电离飞行时间质谱完成分析, 也取得了较好的结果。

4 功能性寡糖在食品中的应用

4.1 食品甜味剂

随着食品工业的迅速发展, 甜味剂的需求量越来越大, 而低糖、低脂、低热值的食品也越来越受到人们的欢迎。功能性寡糖作为低热值甜味剂在食品中广泛地应用于乳制品、酒类产品、饮料、糖果、糕点、冰淇淋、巧克力、调味品等。功能性寡糖不只是作为甜味剂, 同时也具有其他功能。比如在发酵乳制品中添加功能性寡糖, 其作为乳酸菌良好的增殖因子, 有利于提高乳酸菌的数量及活力, 增进乳酸发酵食品的风味, 缩短发酵周期。在酒类产品中添加低聚果糖, 可以防止酒中内溶物沉淀, 改善澄清度, 提高酒的风味, 使其口感更醇厚、更清爽; 在果味饮料和茶饮料中添加低聚果糖, 可以使产品口味更细腻柔和、更清

爽^[35]。此外,菊糖是一种低聚果糖,其凝胶像奶油般柔滑,可用作脂肪替代物,具有预防龋齿、调节脂肪代谢、促进双歧杆菌增殖等功能。

4.2 功能性食品

随着人们对健康、营养、食品之间关系的了解,功能性食品越来越受到追捧。利用功能性寡糖的生理特性,广泛开发了各种功能性食品:婴幼儿食品、糖尿病患者食品、调节肠道功能保健食品、减肥食品、运动食品、冷冻食品和膳食补充剂等。对于糖尿病患者来说,膳食调理是最基本的治疗措施。糖尿病患者食品中甜味剂的选择尤其重要,由于功能性寡糖很难为人体消化,属于无能量或低能量甜味剂,可满足糖尿病患者的需要。山东省食品发酵工业研究设计院研制的含低聚木糖、维生素 C 和钙的保健食品——咪必克已经投放市场,研究表明,该产品具有显著的润肠通便及改善肠功能的功效^[36]。在高钙素等补钙产品添加功能性寡糖不但能够改善口味,而且可以促进钙吸收,提高保健性能。

4.3 辅助药品

高血脂患者连续食用低聚果糖,可降低胆固醇、中性脂肪、血糖值,并可抑制肠道内沙门氏菌及腐败菌的生长,改进肠道功能,增进人体健康。如低聚果糖可添加到肠胃药物中,对肠胃炎疗效显著^[37]。

5 展望

我国寡糖产业起步较晚,还有很多需要完善和进一步开展的工作,如制备方法的升级。目前,我国功能性寡糖生产效率较低,生产工艺方面与国外还有很大差距。此外,在功能性寡糖的粗产品中存在着一定量的单糖及未反应的底物,要获得高品质产品,还需要经济有效的提纯手段。

虽然很多技术都可以实现对功能性寡糖的定量检测,但主要都是针对功能性寡糖原料糖浆、转化糖产物等寡糖含量较高的样品,对于实际生产中形形色色的产品来说,没有通用的检测方法。另外,由于工业化生产使用的酶来源不同,各生产企业采用的生产工艺也存在一定的差别,造成了功能性寡糖组分种类和比例的复杂性,因此很有必要对检测方法进行规范。

在功能性验证方面,相关实验已经对功能性寡糖促进人体肠道有益菌增殖,调整肠道微生态,预防

肠道感染,改善排便,促进矿物元素吸收等方面已有比较充分的证据及结论。但对改善脂质代谢方面,例如降低胆固醇、降血糖、防高血压等,研究结论则不完全一致,而在抗肿瘤方面也只是处于动物试验阶段,缺少人体实验,其机制尚不明确^[38]。因此,功能性寡糖研究尚有大量课题有待进一步阐明。

参考文献

- [1] 闵力, 刘立恒, 许兰娇, 等. 功能性寡糖的研究进展[J]. 饲料研究, 2012, (9): 18-22.
Min L, Liu LH, Xu LJ, *et al.* Research progress of functional oligosaccharides [J]. Feed Res, 2012, (9): 18-22.
- [2] 倪红, 杨艳燕, 阎达中. 寡糖的开发现状及其应用研究进展[J]. 湖北大学学报, 2003, 25(2): 148-151.
Ni H, Yang YY, Yan DZ. Research progress of development and application of oligosaccharide [J]. J Hubei Univ, 2003, 25(2): 148-151.
- [3] 朱路甲, 贾克军, 王宝军. 我国功能糖产业的现状与发展前景[J]. 中国食品添加剂, 2010(1): 52-56.
Zhu LJ, Jia KJ, Wang BJ. The status and development prospects of functional sugar industry in China [J]. China Food Addit, 2010, (1): 52-56.
- [4] 邱伟芬. 功能性低聚糖的开发应用前景[J]. 食品科技, 2001, 3: 27-29, 31.
Qiu WF. The development and application of functional oligosaccharides [J]. Food Sci Technol, 2001, 3: 27-29, 31.
- [5] 胡彪, 刘芳, 全亮. 低聚木糖性质与应用研究进展[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(2): 479-482.
Hu B, Liu F, Quan L. Progress in research on the property and application of xylooligosaccharides [J]. Hubei Agr Sci, 2010, 49(2): 479-482.
- [6] 王良东. 低聚异麦芽糖性质、功能、生产和应用[J]. 粮食与油脂, 2008, (4): 43-47.
Wang LD. The properties functions, production and application of Isomaltooligosaccharide [J]. Grain Oil, 2008, (4): 43-47.
- [7] 董银萍, 李拖平. 寡糖的营养学研究进展[J]. 粮油食品科技, 2013, 21(3): 64-67.
Dong YP, Li TP. Research progress on nutrition of oligosaccharide [J]. Grain Oil Sci Tech, 2013, 21(3): 64-67.
- [8] Fanaro S, Jelinek J, Stahl B, *et al.* Acidic Oligosaccharides from pectin hydrolysate as new component for infant formulae: Effect on intestinal flora, stool characteristics, and pH [J]. J Pediatr Gastroenterol Nutr, 2005, 41: 186-190.
- [9] Wang H, Lim PS, Kao MD, *et al.* Use of isomaltoligosaccharide in the treatment of lipid profiles and constipation in hemodialysis

- patients [J]. *J Ren Nutr*, 2001, 11(2):73–79.
- [10] Wang Y, Zeng T, Wang SE, *et al.* Fructo-oligosaccharides enhance the mineral absorption and counteract the adverse effects of phytic acid in mice [J]. *Basic Nutr Invest*, 2010, 26: 305–311.
- [11] 杨文凯. 低聚木糖的生理功能及其在食品中的应用[J]. *广西轻工业*, 2011, 10: 14–15.
Yang WK. The physiological function of xylooligosaccharides and its application in food [J]. *Guangxi Light Ind*, 2011, 10: 14–15.
- [12] Ngo DN, Kimb MM, Kim SK. Chitin oligo-saccharides inhibit oxidative stress in live cells [J]. *Carbohydr Polym*, 2008, 74: 228–234.
- [13] Ozlem A, Kader E, Seyda B. Enzymatic production of xylooligosaccharide from selected agricultural wastes [J]. *Food Bioprod Process*, 2009, 87: 145–151.
- [14] Teng C, Yan QJ, Jiang ZQ, *et al.* Production of xylooligosaccharides from the steam explosion liquor of corncobs coupled with enzymatic hydrolysis using a thermostable xylanase [J]. *Biores Technol*, 2010, 101: 7679–7682.
- [15] Mohamed G, Ines M, Ali G, *et al.* Catalytic properties of the immobilized *talaromyces thermophilus* β -xylosidase and its use for xylose and xylooligosaccharides production [J]. *J Mol Catal B: Enzym*, 2009, 57: 242–249.
- [16] Sangeeth PT, Ramesh MN, Prapull SG. Recent trends in the microbial production, analysis and application of fructooligosaccharides [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2005, 16: 442–457.
- [17] Cho YJ, Sinha J, Park JP, *et al.* Production of inulooligosaccharides from inulin by a dual endoinulinase system [J]. *Enzyme Microb Technol*, 2001, 29: 428–433.
- [18] Chen SX, Wei DZ, Hu ZH. Synthesis of galacto-oligo-saccharides in AOT/ isooctane reverse micelles by β -gal-actosidase [J]. *J Mol Catal B: Enzym*, 2001, 16: 109–114.
- [19] 张晓萍, 段钢. 功能性低聚糖酶法制备研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2011, 37(4): 159–165.
Zhang XP, Duan G. Recent progress on enzyme preparation of functional oligosaccharides [J]. *Food Ferment Ind*, 2011, 37(4): 159–165.
- [20] 薛雅莺, 张翼鹏, 杨海军. 低聚半乳糖的制备和应用进展[J]. *中国食品添加剂*, 2012, (s1): 93–95.
Xue YY, Zhang YP, Yang HJ. Advances in the synthesis and application of galactooligosaccharides [J]. *China Food Addit*, 2012, (s1): 93–95.
- [21] Lucfa FA, Dolores M, Aranzazu G, *et al.* Transformation of maltose into prebiotic isomaltooligosaccharides by a novel α -glucosidase from *Xanthophyllomyces dendrorhous* [J]. *Process Biochem*, 2007, 42: 1530–1536.
- [22] Kubik C, Sikora B, Bielecki S. Immobilization of dextran-sucrase and its use with soluble dextranase for synthesis [J]. *Enzyme Microb Tech*, 2004, (34): 555–560.
- [23] 姚婉生, 王雪, 侯海荣, 等. 几丁寡糖制备的研究进展[J]. *山东科学*, 2006, 19(3): 27–31.
Yao WS, Wang X, Hou RH, *et al.* Advances in preparation of chitooligosaccharides [J]. *Shandong Sci*, 2006, 19(3): 27–31.
- [24] Folders J, Algra J, Roelofs MS, *et al.* Characterization of *Pseudomonas Aeruginosa* Chitinase, a Gradually Secreted Protein [J]. *J Bacteriol*, 2001, 183(24): 7044–7052.
- [25] 岳振峰, 陈小霞, 彭志英, 等. 功能性低聚糖分离纯化方法概述[J]. *郑州工程学院学报*, 2001, 22(1): 89–92.
Yue ZF, Chen XX, Peng ZY, *et al.* An introduction to purification of functional oligosaccharide [J]. *J Zhengzhou Tech Inst*, 2001, 22(1): 89–92.
- [26] Antonopoulos A, Favetta P, Lafosse M, *et al.* Characterisation of io-ta-carrageenans oligosaccharides with high-performance liquid chromatography coupled with evaporative light scattering detection [J]. *Chromatogr A*, 2004, 1059(1/2): 83–87.
- [27] Hirota K, Hiroshi K, Katsuo K, *et al.* Simultaneous analysis of monosaccharides and oligosaccharides by high-performance liquid chromatography with postcolumn fluorescence derivatization [J]. *Chromatogr A*, 2002, 961(1): 77–82.
- [28] 李静芳, 彭美纯. 高效液相色谱法测定低聚半乳糖的含量[J]. *食品科技*, 2012, 37(7): 370–374.
Li JF, Peng MC. Determination of galactooligosaccharide by high performance liquid Chromatography [J]. *Food Sci Technol*, 2012, 37(7): 370–374.
- [29] 傅博强, 王晶, 王远兴, 等. 食品中低聚果糖高效液相色谱检测方法研究[J]. *食品工业科技*, 2010, (9): 370–374.
Fu BQ, Wang J, Wang YX, *et al.* Study on the high performance liquid chromatography method for the determination of fructooligosaccharides in food [J]. *Sci Tech Food Ind*, 2010, (9): 370–374.
- [30] 龚芳红, 张德纯. 功能性低聚糖及其检测方法研究的现状[J]. *中国微生态学杂志*, 2009, 21(2): 177–180.
Gong FH, Zhang DC. Research status of functional oligosaccharide and its detection method [J]. *Chin J Microecol*, 2009, 21(2): 177–180.
- [31] 陈金玲, 黄雪松. 薄层色谱法快速检测大蒜低聚果糖[J]. *广东农业科学*, 2012, 9(3): 103–105.
Chen JL, Huang XS. Determination of oligosaccharide from garlic by thin layer chromatography [J]. *Guangdong Agr Sci*, 2012, 9(3): 103–105.
- [32] 张志国. 低聚半乳糖检测方法研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(8): 115–119.

- Zhang ZG. Research Progress of the Analysis Methods on Galactooligosaccharides [J]. Food Res Dev, 2013, 34(8): 115–119.
- [33] Broberg A. High -performance liquid chromatography/ electrospray ionization ion -trap mass spectrometry for analysis of oligosaccharides derivatized by reductive amination and N, N-dimethylation [J]. Carbohydr Res, 2007, 342(11): 1462–1469
- [34] Dreisewerd K, Kalbl S, Peter -Katalinic J, *et al.* Analysis of native milk oligosaccharides directly from thin-layer chromatography plates by matrix-assisted laser desorption/ionization orthogonal-time-of-flight mass spectrometry with a glycerol matrix [J]. J Am Soc Mass Spectrom, 2006, 17(2): 139–150.
- [35] 吴祥庭. 功能性食品添加剂—低聚果糖应用的研究进展[J]. 食品科技, 2006, (12): 99–102.
- Wu XT. Recent research progress of application of fructooligosaccharides- a new functional food additive [J]. Food Sci Technol, 2006, (12): 99–102.
- [36] 凌沛学, 朱希强, 苏移山, 等. 低聚木糖功能与应用研究进展 [J]. 食品与药品, 2007, 9(09): 35–39.
- Ling PX, Zhu XQ, Su YS, *et al.* Progress in the functions and applications of xylo-oligosaccharides [J]. Food Drug, 2007, 9(09): 35–39.
- [37] 阳元娥, 罗发兴. 低聚果糖—一种新型的功能性食品基料[J]. 甘蔗糖业, 2002, (3): 35–39.
- Yang YE, Luo FX. Fructooligosaccharides-a sort of new fashioned basic material of functional foods [J]. Sugarcane Cane-sugar, 2002, (3): 35–39.
- [38] 胡学智, 伍剑锋. 低聚果糖的生理功能及生产、应用[J]. 中国食品添加剂, 2007, (6): 148–157.
- Hu XZ, Wu JF. The physiological functions, prepare methods and application of fructooligosaccharides [J]. China Food Addit, 2007, (6): 148–157.

(责任编辑: 张宏梁)

作者简介



滕超, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品微生物与酶工程。
E-mail: tc2076paper@163.com



李秀婷, 博士, 教授, 主要研究方向为食品微生物与酶工程。
E-mail: lixt@th.btbu.edu.cn