

低聚木糖的生理活性研究进展

王立, 薛腊梅, 李言, 钱海峰, 张晖, 齐希光, 吴港城

(江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 低聚木糖属于功能性低聚糖, 近年来受到国内外学者的广泛关注。因其具有良好的理化性质, 在食品、医药、农业、饲料方面都有广泛的应用。低聚木糖有许多重要的生理活性, 尤其是在调节血糖、降低血脂以及改善宿主肠道菌群结构等方面有重要意义。作者主要针对低聚木糖一些重要的生理活性以及国内外在这些方面的研究进展进行阐述, 为低聚木糖的进一步开发利用提供依据。

关键词: 低聚木糖; 调节血糖; 降血脂; 肠道菌群

中图分类号: 文献标志码: A 文章编号: 1673-1689(2018)06-0561-11

Research Progress of Physiological Activities of Xylooligosaccharide

WANG Li, XUE Lamei, LI Yan, QIAN Haifeng, ZHANG Hui, QI Xiguang, WU Gangcheng
(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Xylooligosaccharide belongs to functional oligosaccharide, which has been widely used in food, medicine, and feedstuff for its physicochemical property. Furthermore, it has attracted the worldwide concerned for its healthy function. Some physiological functions of xylooligosaccharide have reported, including hypoglycemic activity, antihyperlipidemic effect, and ameliorating alvine path bacterium group. These healthy functions and their mechanisms were summarized in this paper. And we also made suggestions for the further study, which was helpful to its development and utilization.

Keywords: xylooligosaccharides, regulating blood glucose, reducing plasma fat, intestinal flora

低聚木糖, 又称木寡糖, 是一种功能性低聚糖^[1], 由 2~10 个木糖分子通过 β -1,4 糖苷键连接而成, 相对分子质量一般在 200~300 左右^[2]。低聚木糖具有良好的理化性质, 如具有较高的耐热和耐酸性^[3-5]; 甜度约为蔗糖的 40%~50%, 可作为食品甜味剂^[6]; 粘度比其他低聚糖低, 可降低水分活度^[7]; 在水

溶液中可以形成螺旋状结构, 增大持水能力, 改善食品流变学特性^[8-10]; 有良好的抗冻性能, 可解决食品不耐冻藏的问题^[11]。

低聚木糖一般是由木聚糖水解而得^[12], 常见的制备原料有小麦、甘蔗等农作物秸秆以及玉米芯、稻壳等加工副产物^[13]。目前, 国内低聚木糖的生产大

收稿日期: 2018-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31471617, 31471679)。

作者简介: 王立(1978—), 男, 江苏溧阳人, 工学博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事功能因子及健康食品方面的研究。

E-mail: wl0519@163.com

引用本文: 王立, 薛腊梅, 李言, 等. 低聚木糖的生理活性研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(06): 561-571.

多以玉米芯为主要原料,其次是小麦麸皮^[14]。低聚木糖的制备一般包括三个步骤:木聚糖的提取、木聚糖的水解、低聚木糖的分离和纯化^[15]。提取方法有化学法和酶法两种^[16-18],目前基本以两种方法结合的提取方式为主^[19-20]。

低聚木糖除了具有较好的理化性质外,其作为益生元所表现的生理活性也是各界学者研究热点之一^[21]。大量的动物实验证明了低聚木糖在抗龋齿^[22]、调节血糖^[23]、降血脂^[24]、降胆固醇^[25]、调节肠道菌群结构^[19]、抗癌症^[26]、抗炎症^[27]、提高免疫^[28]、抗氧化^[29]、促进钙吸收^[30]等方面的健康作用,另外,也有较多报道其能够有效预防肥胖、心血管疾病、动脉粥样硬化以及肠道疾病^[31-32]。由于其有效摄入量比其常见功能性低聚糖低得多,低聚木糖也被称为“超强双歧因子”^[33]。关于低聚木糖的慢性毒理学研究显示,其在人、狗以及大鼠等动物中无任何毒性表现,LD₅₀值大于32 g/kg^[34],NOAEL值超过3 000 mg/kg,说明低聚木糖几乎无毒^[35-36]。

从已有的大量报道看,围绕低聚木糖生理活性方面的研究主要集中在动物实验等一些数据指标方面,虽然对其作用机制有一些推测,但很不明确,部分甚至还存在着争议,还有待进一步研究。作者综述了近年来低聚木糖生理活性的相关研究工作,并分析了其中存在的问题,以期低聚木糖的进一步开发应用提供依据。

1 调节血糖

低聚木糖在动物的胃或肠道中不被消化吸收,因此,低聚木糖的摄入不会导致血糖的升高,摄入的低聚木糖大多到达大肠部位,在大肠中被部分微生物发酵利用。已有较多研究结果证实其在降血糖方面的功能性,并从胰岛素、生长素、饥饿素、短链脂肪酸以及与脂肪组织的关系等方面解释其调节血糖的机制。但是也有一些报道称低聚木糖的摄入对机体血糖变化不明显,甚至有报道称低聚木糖在哺乳动物和啮齿类动物、患有糖尿病等高血糖人群和健康人群之间产生不同的作用^[37]。

1.1 低聚木糖对血糖的调节作用

虽然普遍认为低聚糖等益生元能改善血糖水平,但对于低聚木糖能否改善高血糖患者或调解健康人群的血糖水平,有不同的报道结果。Sheu 等人^[38]研究发现,2 型糖尿病患者摄入低聚木糖 8 周后能

显著降低血糖水平;Wang 等人^[39]发现,摄入 5%的低聚木糖能显著降低肥胖小鼠的血糖;邬敏辰等人^[40]发现,玉米芯制备的低聚木糖有助于降低四氧嘧啶引发糖尿病小鼠血糖水平;Broekaert 等人^[41]研究发现,谷物来源的阿拉伯-木糖-低聚糖、低聚木糖和阿拉伯木聚糖均能有效改善哺乳动物的血糖水平;Siddhartha 等人^[42]发现阿拉伯木聚糖不能改善高血糖肥胖小鼠的血糖水平,但是能改善其葡萄糖耐量。

对健康人群来说,大量研究结果表明,低聚糖对血糖水平的影响不显著^[37]。Kevin C^[43]研究麦麸阿拉伯糖-木糖-低聚糖益生作用时发现,健康人群分别摄入 2.2、4.8 g/d 剂量的阿拉伯糖-木糖-低聚糖 3 周后,血糖和胰岛素水平比空白组有所降低,但没有显著性差异;同样,Wang 等人^[39]也发现在健康小鼠膳食中加入 5%的低聚木糖 6 周后,血糖水平较正常膳食的健康小鼠没有显著性降低;Chung 等人^[44]在健康老年人体实验中发现,连续摄入 4 g/d 的低聚木糖 8 周,空腹血糖水平没有变化。在其他动物实验中也有类似现象,Paula Enes 等人^[45]发现,低聚木糖对欧洲鲈鱼的葡萄糖耐量和血浆葡萄糖水平没有显著影响;Hoseinifar 等人^[46]也得到了相似的结果,低聚果糖和菊粉对幼年白鲸的血浆葡萄糖水平没有影响。但也有研究^[47]称摄入高剂量的阿拉伯木聚糖能够改善健康人群、2 型糖尿病患者、葡萄糖耐受量受损人群以及糖尿病大鼠的血糖水平。

1.2 低聚木糖对血糖影响机制的研究

尽管目前对于低聚糖改善人和其他动物血糖水平的机制有很多争论,但大多数学者认为低聚糖调节血糖的机制与其在肠道中的发酵过程有关。Broekaert 等人^[39]认为,低聚木糖调节哺乳动物的血糖和血脂代谢取决于其在结肠中的发酵过程。也有一些研究认为低聚木糖通过降低血浆葡萄糖水平和增强胰岛素敏感性来改善葡萄糖耐量^[48]。邬敏辰等人^[40]推测低聚木糖降低糖尿病小鼠血糖水平可能与恢复胰岛功能有关。还有学者报道^[49],低聚木糖的摄入能够调节胰腺的胰岛素排泄。Delzenne 等人^[50]认为,哺乳动物摄入低聚木糖后,经肠道中有益菌发酵产生大量的丙酸能够刺激肠道的激素胰高血糖素样肽 1(GLP-1)的产生,从而刺激胰岛素的分泌进而增加肝脏糖原的合成以及降低血浆葡萄糖水平。

低聚木糖不能被动物胃肠道消化吸收,而是在大肠中被肠道中双歧杆菌等有益菌发酵利用并产生大量的短链脂肪酸等有机酸^[39]。Anderson 和 Bridges 等人^[51]认为短链脂肪酸除促进丙酮糖酵解外,也会通过抑制丙酮酸羧化酶降低糖异生,同时,他们也发现乙酸和丁酸等能够增加大鼠分离肝细胞中乳酸产生葡萄糖的量^[52],这些研究结果说明,低聚木糖能够间接影响血糖水平。Tina Skau Nielsen^[53]在研究阿拉伯木聚糖改善猪的血糖实验中发现,摄入膳食纤维可导致皮下脂肪细胞的大小以及分布面积发生变化,进而影响血糖的动态平衡。Rizkalla S 等人^[54]在对重度肥胖人群的研究中也发现,皮下脂肪组织形态(平均脂肪大小)与血浆胰岛素、血浆葡萄糖和胰岛素抗性呈正相关。同时,低聚木糖属于水溶性膳食纤维,被机体摄入后会延迟胃排空,增加饱腹感,因此会降低血糖和血脂反应^[55]。血浆生长素水平以及酰化生长素水平的相对浓度的变化在维持体重和能量平衡方面有一定影响^[56-57],且生长素还能降低血压以及改善内皮细胞功能^[58]。低聚木糖的摄入会对生长素和饥饿素水平产生影响,从而影响食欲,进而起调节血糖的作用。

从以上研究结果看,低聚木糖对血糖水平有一定的调节作用,对高血糖、糖尿病或者葡萄糖耐受受损人群来说,低聚木糖的摄入对降低血糖水平有积极作用,这也与大多数研究的结论一致。但是对于啮齿类动物来说,争论比较大,低聚木糖的摄入是否同样也能降低高血糖啮齿动物的血糖水平有待进一步验证。另外,对于健康人群来说,普遍的研究结果显示,低聚木糖的摄入对血糖水平稍有降低,但是并不显著。对于一些学者实验结果上的差异,可能是受低聚木糖的摄入量的不同、实验期不够长、甚至是蛋白质的摄入量等因素的影响^[59]。

2 降低血脂、血清胆固醇

对脂质代谢的调控是低聚木糖的重要生理作用之一^[39]。在研究低聚木糖在调节脂质代谢的具体作用时,一般通过甘油三酯、总胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇、白色脂肪组织质量或者与脂肪代谢相关的基因表达等指标进行评价^[38]。

2.1 低聚木糖对脂质代谢的影响

大量研究表明,低聚木糖能有效降低肥胖人群

的脂质水平,如 Sheu 等人^[38]称连续摄入 4 g/d 的低聚木糖 8 周后,2 型糖尿病患者的脂肪水平有显著性降低。Wang 等人^[39]发现低聚木糖能降低高脂肪膳食的肥胖小鼠的总胆固醇、低密度脂蛋白、甘油三酯水平,增加高密度脂蛋白水平。Wolever 等人^[60]称可溶性膳食纤维的摄入能够降低高胆固醇患者的胆固醇水平。同样,Siddhartha 等人^[40]在对高脂膳食小鼠分别饲喂 0.5、1.0 g/kg 剂量的阿拉伯木聚糖 10 周后,发现甘油三酯、总胆固醇、非酯化脂肪酸、低密度脂蛋白胆固醇以及总血脂水平都有所降低,并通过组织学观察和油红染色实验证实了阿拉伯低聚木糖的摄入能够降低小鼠的脂肪合成,但高密度脂蛋白胆固醇和动脉粥样硬化指数没有显著性变化。Garcia 等人^[61]称肥胖人群摄入 5 g/d 的阿拉伯木聚糖后,血清甘油三酯浓度显著性降低,但是非酯化脂肪酸水平没有显著性改变。Gunnness 等人^[62]在研究阿拉伯木聚糖对猪的脂质代谢影响中发现,甘油三酯水平显著性降低,但是总胆固醇、低密度脂蛋白和高密度脂蛋白水平没有变化。

从以上结果可以看出,低聚木糖对脂质代谢起到一定的调控作用,但是在不同的实验对象和摄入剂量条件下,血脂水平的变化有所不同。Cloetens 等人^[41]发现正常血脂的健康人群在摄入 10 g/d 的阿拉伯糖-木糖-低聚糖 3 周后,脂肪水平没有显著变化。

另外对于非哺乳动物,Paula Enes 等人^[63]在益生元对欧洲鲈鱼的血糖和血脂的代谢实验中发现,低聚木糖能降低苹果酸酶(ME)、脂肪酸合成酶(FAS)、葡萄糖-6-磷酸脱氢酶(G6PD)等脂肪合成酶的活性,从而降低脂肪合成。另有报道称功能性低聚糖有降低肉鸡脂肪水平的作用^[49]。

2.2 低聚木糖对血脂影响的机制

有大量关于低聚木糖对血脂代谢的研究报道,许多学者也从不同的角度解释了其作用机制,目前的研究主要是从生长素水平、短链脂肪酸水平、肝脏中与脂质代谢相关酶活性和基因的表达以及胆汁酸等方面来解释低聚木糖影响脂质代谢的。

低聚糖的摄入会降低总的生长素和酰化生长素水平,而酰化生长素水平的降低会降低食物的摄入量由此改善肥胖并控制代谢^[64]。Garcia 等人^[61]称餐后生长素水平不受胰岛素调控,反而受脂肪摄入的影响,小肠中长链甘油三酯的存在会抑制生长素的分泌,说明其调控机制也取决于营养负荷和接触营

养物质的肠道的长度^[65]。实验发现,生长素水平的变化与甘油三酯的变化一致,说明阿拉伯木聚糖能通过调节生长素来间接调控血脂和脂肪的消化^[61]。

Ooi 等人^[66]称肠道中微生物发酵低聚木糖产生的短链脂肪酸影响胆固醇的代谢,其中丙酸被肠道吸收后进入血液中通过门静脉到达肝脏,进而在肝脏中降低胆固醇的合成以及改善胰岛素的敏感,从而调节机体脂质代谢。低聚木糖被肠道微生物发酵后产生的短链脂肪酸乙酸和丙酸对脂质代谢的影响机制是相反的,因为两者是竞争性进入肝细胞^[67]。但肠道微生物发酵低聚糖等益生元的模式和到达肝脏中的乙酸和丙酸的相对量是否与益生元调节脂肪代谢的能力有关有待进一步研究证明。

Siddhartha 等人^[40]认为,小鼠胆固醇的降低既与肝脏中 HMG CoA 还原酶 (β -羟- β -甲基戊二酸单酰辅酶 A 还原酶) 的表达降低有关,也与丙酸含量的增加有关。他们发现小鼠在高脂膳食后,与肝脂质代谢的相关基因 FASN、ACC、SREBP-1c 和 HMGCoA-R 等的表达会增加,而阿拉伯木聚糖摄入后会降低这些基因的表达,并降低与内脏白色脂肪组织脂肪细胞肥大相关的 PPAR- γ 和 C/EBP- α 的表达。

另外,也有研究从胆汁酸角度解释低聚木糖降低血脂的机制。Wolever 等人^[62]认为,低聚木糖等益生元的摄入降低高胆固醇患者的胆固醇水平的机制是胆汁酸的过量排泄,但也有研究显示,排泄物中过量的胆汁酸只是在短期的干预(2 d 或 24 h)中出现^[67-68]。Gunness 等人^[62]发现,阿拉伯木聚糖能降低血浆甘油三酯的水平,并给出 3 种可能的解释:1)可能通过降低胆汁酸数量来降低甘油三酯消化率;2)可能通过限制甘油三酯的乳化而降低其消化率;3)阿拉伯木聚糖可能通过影响法尼基衍生物 X 受体(FXR)活性来结合胆汁酸,进而影响甘油三酯吸收。另外他们还发现阿拉伯木聚糖的摄入能够显著增加猪的熊去氧胆酸含量,预防胆固醇型胆结石。

3 优化肠道菌群、预防肠道疾病

一直以来摄入膳食纤维的健康作用被认为与大肠中微生物对其发酵有密切关系^[69]。低聚木糖在大肠中被有益菌利用,过程中产生的短链脂肪酸对机体健康有重要意义,不仅对肠道健康有影响,更重要的是还影响低聚木糖发挥其他生理功能^[39]。

3.1 低聚木糖对肠道菌群的调节作用

张军华^[70]研究发现,低聚木糖的生理活性主要是来源于平均聚合度较小的组分,且木三糖的体外增殖双歧杆菌的效果要高于木二糖、木五糖和木六糖以及混合的低聚木糖。有报道称^[71]决定增殖双歧杆菌能力大小的主要因素是碳源的种类,而不是碳源的浓度。研究发现^[72],低聚木糖在肠道中对双歧杆菌的增殖效果和葡萄糖接近,所不同的是其仅能够增殖双歧杆菌等有益菌。另外,低聚木糖对双歧杆菌的增殖效果大约是其其他功能性低聚糖的 20 倍,且选择性更高^[73]。

Manuel 等人^[74]发现,桦木来源的低聚木糖体外发酵能显著增殖双歧杆菌的数量,且能增殖葡萄球菌尤其是 *Staphylococcus hominis*, 这种葡萄球菌能够产生抑菌素,抑制相应的致病菌如金黄色葡萄球菌和幽门螺杆菌。Chen 等人^[75]发现巨芽来源的低聚木糖能增加双歧杆菌、乳酸杆菌和大肠杆菌的数量,而不影响产气荚膜梭菌等病原菌的数量。Hald 等人^[76]发现摄入阿拉伯木聚糖后,粪便中的双歧杆菌数量显著增加,而乳杆菌、梭状芽胞杆菌和嗜黏蛋白阿克曼氏菌的量没有明显变化。Buruiana 等人^[77]从玉米秸秆中提取的低聚木糖对乳酸杆菌和拟杆菌增殖也非常显著。Kevin 等人^[42]发现,低聚木糖的摄入能够显著增加人体肠道中双歧杆菌的数量,但是对乳酸杆菌、拟杆菌和梭菌属的数量影响并不明显。

不同学者研究低聚木糖对肠道中微生物种类和数量上的影响有不同的结果,可能是因为所用方法的差异^[78]。实验周期长短也是影响因素之一^[77],黄思思^[79]在研究木聚糖在大鼠肠道的代谢特性研究中发现,鼠便中木聚糖酶的活性在饲喂木聚糖 6 周后才趋于稳定。因此,我们认为在评价低聚木糖对肠道微生态系统调节作用时,动物实验周期最好要连续 6~8 周,而在以人为实验对象的研究中,更要注意长期的膳食干预。另外,也要考虑肠道中的微生物种群结构的变化与低聚木糖的来源、生产方式、纯度以及宿主肠道中原来的微生物种群构成等多方面因素有关^[78]。

3.2 低聚木糖促进肠道健康的机制

低聚木糖在肠道中选择性增殖双歧杆菌等有益菌被认为与维生素的产生、免疫刺激和降低肠道运转时间以及降低胆固醇等多方面有关^[80],肠道中

双歧杆菌的增殖也会抑制病原菌的生长繁殖,产生某些消化性的酶,并帮助机体重建肠道菌群^[81]。低聚木糖对肠道健康的作用还表现在有机酸的大量产生,如乙酸、丙酸和丁酸等短链脂肪酸^[82],以及其他的有机酸如乳酸、琥珀酸、甲酸、异丁酸、戊酸、己酸和异己酸等^[83],这些有机酸在预防各种肠道疾病中发挥重要作用。Aachary 和 Prapulla^[84]认为,由摄入低聚木糖引发的双歧杆菌增殖是维护肠道健康、预防肠道疾病的重要原因。研究发现^[88],摄入低聚木糖后,肠杆菌、产气荚膜梭菌等数量有明显降低,进而有效降低这些有害菌群引起的防肠道疾病发生几率^[85]。

Manuel 等人^[82]研究发现,低聚木糖能大幅度增加有机酸含量。Kevin 等人^[42]也发现,摄入阿拉伯糖-木糖-低聚糖后乙酸浓度的增加特别显著。但也有相反的实验结果,Soleimani 等人^[86]发现摄入低聚木糖后,实验组粪便中乙酸、丙酸、乳酸的浓度与对照组之间没有显著性区别。但也可能是由于低聚木糖产生的短链脂肪酸被肠道粘膜吸收至血液中,导致 pH 和粪便中的短链脂肪酸浓度快速变化^[86]。

低聚木糖能够选择性增殖有益菌可能有以下 3 个方面的原因:1)为有益菌提供能源物质^[86]。低聚木糖几乎全部能到达后肠,被双歧杆菌、乳酸菌等有益菌选择性利用,尤其是木二糖和木三糖对青春双歧杆菌、长双歧杆菌和婴儿双歧杆菌有很高的增殖活性,而肠杆菌、沙门氏菌、梭菌属等有害菌对低聚木糖的利用率很低,有的几乎不能利用^[62]。2)增殖的有益菌形成微生物屏障,阻止病原菌定植。有益菌大量增殖后,快速占据肠上皮粘膜表面通菌细胞壁的磷壁酸与肠上皮细胞结合并保持共生关系,形成微生物屏障,阻止外来致病菌的定植;同时,有益菌代谢过程分泌的抑菌素以及过氧化氢、有机酸等抑菌物质对细菌、霉菌病毒等有较强的拮抗作用^[87];另外,低聚木糖与肠道细胞中糖脂或蛋白质受体部分结构相似,从而与病原菌的几丁质结构结合,使致病菌无法在肠道中增殖^[88]。3)低聚木糖在肠道中被双歧杆菌等微生物发酵利用后产生的有机酸降低肠道的 pH,而大多致病菌适宜生长在中性环境中,从而抑制病原微生物生长繁殖^[89],且致病菌多为兼性厌氧菌,一般存在肠腔中,有益菌发酵产生的有机酸进一步促进肠道的蠕动使病原菌排出体外^[88]。

4 预防癌症

低聚木聚糖等益生元在预防疾病方面的作用已被大量的研究所证实^[90]。低聚木糖除了调节血糖、预防糖尿病以及降低心血管疾病、动脉粥样硬化等疾病的发生几率外,还具有预防癌症的作用^[91]。低聚木糖在肠道中发酵产生的短链脂肪酸等有机酸有一定的预防肿瘤作用^[39],以及其对机体的免疫调节^[92]等都是其发挥预防癌症的重要手段。

4.1 抗炎症、抗肿瘤、增强免疫、保护肝脏

低聚木糖能增殖肠道中的有益微生物,能够抑制细胞培养物和小鼠体内的炎性细胞因子的分泌^[93]。血浆中 C-反应蛋白水平的增加是最终发展为结直肠癌的炎症标志^[94],而膳食纤维的摄入能够有效降低 C-反应蛋白和促炎细胞因子 IL-6 和 TNF- α 的水平^[95]。许多报道称^[96]添加低聚糖或其他膳食纤维能够降低结肠中 TNF- α (肿瘤坏死因子)和 NF- κ B (促炎细胞核转录因子蛋白)的表达。Siddhartha 等人^[40]发现,摄入阿拉伯木聚糖 10 周能显著降低高脂饮食小鼠相关炎症基因 (F4/80, TNF- α , MCP-1, MIP1 α , IL-6 以及 NF- κ B) 的表达。Cao 等人^[97]发现从小麦木聚糖在小鼠体内表现出良好的抗炎症效果。Mendis 等人^[98]也验证了小麦阿拉伯低聚糖的抗炎症活性。

低聚木糖能够显著增加荷瘤小鼠体内的 T 细胞和 B 细胞的激活潜力以及体液和细胞介质中的免疫能力,进而起到抗肿瘤的作用^[99]。Akhtar 等人^[100]发现,麦麸中提取的阿拉伯木聚糖有促进鸡的抗体介导的免疫应答。Cao 等人^[101]也报道了麦麸中阿拉伯木聚糖对小鼠免疫反应的作用。但也有不同的实验结果,Nielsen 等人^[53]认为阿拉伯木聚糖对 NF- κ B 和与炎症反应相关基因 (MCP1、TNF α) 的表达没有显著降低作用,同样对肠道 PPAR γ 基因的表达也没有显著影响。

当肝细胞受损时,血液中的谷草转氨酶 (GOT) 和谷丙转氨酶 (GPT) 就会增加,因此 GOT 和 GPT 的水平可用于判断肝损伤和疾病的敏感指标。高脂肪膳食会显著增加 GOT 和 GPT^[39],但高脂膳食小鼠摄入低聚木糖后与正常小鼠 GOT 和 GPT 的水平没有显著差异,说明低聚木糖的摄入在一定程度上对肝脏起到了保护作用。Yamatoya 等人^[102]也发现水解的木聚糖能够降低高脂肪膳食小鼠的 GOT 活性

(33.5%),但是 Sheu 等人^[38]认为低聚木糖的摄入并不能改变 2 型糖尿病患者的 GOT 和 GPT 活性。

4.2 预防癌症的作用机理研究

普遍认为低聚糖对机体的抗炎症等作用与短链脂肪酸有很大关系,尤其是丁酸^[85]。因此,相关研究也主要从有益菌和短链脂肪酸方面来解释其抗炎症、抗肿瘤和增强免疫的作用机制^[106]。

低聚木糖通过增殖双歧杆菌而增加机体的免疫功能^[111]。双歧杆菌能够增加外周白细胞数量和 NK 细胞数量,同时,低聚木糖能够提高血液单核细胞数、血清碱性磷酸酶活性、溶菌酶活性,且双歧杆菌作为免疫佐剂,有识别 PP 淋巴结的功能,可以激活肠道淋巴结,诱导淋巴细胞通过淋巴管外流,机体的免疫系统通过淋巴循环而被活化^[55];低聚木糖还可以作为外来抗原对机体免疫系统产生有效持久的刺激,促进免疫器官细胞分裂和发育^[103]。

有益菌利用低聚木糖过程中产生的有机酸能够调节免疫因子和抗体,从而提高机体的免疫功能^[104]。短链脂肪酸能够结合并激活过氧化物酶体增殖物激活受体(PPAR γ),而 PPAR γ 能拮抗 NF- κ B 信号的转导^[105],从而在机体的肠道中起到抗炎症的作用,PPAR γ 的表达与包括小鼠^[106]、猪^[107]和人^[108]的炎症性肠道疾病等多种疾病的病理有关。另外,肠道微生物产生的挥发性脂肪酸可以调节淋巴细胞与单核细胞的增殖和程序性死亡过程,进而抑制 B 细胞(NF- κ B)中核转录因子的活性,NF- κ B 与机体多种炎症和免疫基因的表达有关^[108]。研究报道^[90]丁酸具有调节抗原呈递细胞活性的功能,乙酸有促进淋巴细胞增殖的作用,被广泛应用于抗肿瘤制剂。静脉注射乙酸溶液能提高 NK 细胞的细胞毒作用,提高机体对病原体的杀伤力^[109]。另外,低聚糖直接与免疫细胞表面的糖受体结合,刺激免疫细胞分化,增加活性^[111]。研究发现低聚糖直接与 NK 表面的凝集素受体结合而提高 NK 的细胞毒作用^[110]。

5 其他

低聚木糖除了上述的生理作用外,还有很好的抗氧化活性^[111]。其抗氧化性主要体现在增加非酶抗氧化物质含量和提高抗氧化酶的活性及水平^[38]。研究发现^[39],低聚木糖能显著性降低高脂肪膳食小鼠和正常小鼠的血清、心脏和肝脏中的氧化型谷胱甘肽(GSSH)水平、丙二醛(MDA)水平,增加还原型谷

胱甘肽(GSH)水平。研究还发现^[112],摄入低聚木糖后能够显著增加高脂膳食小鼠心脏中 SOD(超氧化物歧化酶)、CAT(过氧化氢酶)和 GSH-Px(谷胱甘肽过氧化物酶)等抗氧化酶的活性和水平,且与正常小鼠无显著性差异。研究报道^[113]机体的抗氧化能力与血脂代谢密切相关,因此提高机体的抗氧化能力为预防和治疗动脉粥样硬化以及心脑血管疾病提供了新途径。同时,低聚木糖还有预防龋齿的作用^[78],低聚木糖不能被口腔内变异链球菌等细菌分解,与蔗糖同时使用时还能防止蔗糖被龋齿病原菌作用而生成不溶于水的高分子葡聚糖形成牙垢^[114-115]。另外,低聚木糖与其他营养物质有良好的配伍性,可增加钙、镁以及矿物质元素的吸收^[14],低聚木糖与钙同时摄入时能显著增加钙的吸收率^[31]。低聚木糖能够促进机体对矿物质的吸收,原因是低聚木糖促进肠道有益菌的增殖,有益菌分泌的酶如植酸酶能促进肠道中矿物质离子的解离,提高肠道对该矿物质的吸收率。另外,有益菌对低聚木糖的发酵降低肠道的 pH 值,使钙镁的溶解度升高,促进这些元素的吸收,低聚木糖还能通过对结肠膜细胞的刺激作用,提高肠道对矿物质的吸收。因此,低聚木糖可作为儿童、孕妇、老年人等特殊群体的食物的添加剂^[120]。

6 展望

围绕低聚木糖在血糖、血脂、胆固醇、肠道菌群、肠道疾病、癌症、免疫等方面已开展较多的研究,并取得了一些研究结果,但仍存在着一些问题需要进行深入研究。1)不同原料来源的低聚木糖在结构上会有所不同,进而导致生理活性的不同,有效结构或者功能基团有待进一步研究明确;2)制备方法的不同也会造成最终产品中带入取代基的不同,如阿魏酸,这些基团对于低聚木糖生理活性的影响还没有彻底解释清楚;3)虽然通过动物实验得到了这些生理活性指标,但其机制尚未清晰,大多还处于推测阶段;4)现有生理活性研究基本以动物实验或者细胞实验为主,人体实验结果如何还有待进一步验证。因此,在今后的研究中,可以从以下几个方面开展针对性研究:1)比较不同来源的低聚木糖,通过对其结构的深入分析,明确有效结构或基团;2)以保留活性结构或基团为指标,优化制备工艺;3)进一步深入研究这些生理活性的作用机制,在此基础上开展人体相关的研究。

参考文献

- [1] CHAPLA D, PANDIT P, SHAH A. Production of xylooligosaccharides from corncob xylan by fungal xylanase and their utilization by probiotics[J]. **Bioresource Technology**, 2012, 115: 215-221.
- [2] YANG H, WANG K, SONG X, et al. Production of xylooligosaccharides by xylanase from *Pichiastipitis* based on xylan preparation from *Triploid poplastomentosa*[J]. **Bioresource Technology**, 2011, 102: 7171-7176.
- [3] SUN Yuanlin, YI Xin, LI Yunlong, et al. Isolation and composition analysis of functional oligosaccharides from black-grain wheat [J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2017, 32(5): 7-11. (in Chinese)
- [4] BOUXIN F, MARINKOVIC S, ESTRINE B, et al. Direct conversion of xylan into alkyl pentosides[J]. **Carbohydr Res**, 2010, 345: 2469-2473.
- [5] 张国真. 麦麸膳食纤维、低聚木糖制备及物化特性研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2015.
- [6] 杨书艳. 玉米芯酸酶法制备低聚木糖及其生理功能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007.
- [7] SAMANTA A K, SENANI S, KOLTE A P, et al. Production and in vitro evaluation of xylooligosaccharides generated from corncobs[J]. **Food and Bioproducts Processing**, 2012, 90: 466-474.
- [8] HU Biao, LIU Fang, QUAN Liang. Progress in research on the property and application of xylooligosaccharides[J]. **Hubei Agricultural Sciences**, 2010, 49(2): 479-482. (in Chinese)
- [9] 周迎春. 小麦麸皮低聚木糖生产工艺优化及其功能特性研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.
- [10] PENG P, PENG F, BIAN J, et al. Studies on the starch and hemicelluloses fractionated by graded ethanol precipitation from bamboo *Phyllostachys bambusoides* f. shouzhui Yi[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2011, 59(6): 2680-2688.
- [11] 沈芮. 木聚糖酶法和酸法水解生成低聚木糖的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
- [12] AKPINAR O, ERDOGAN K, BOSTANCI S. Enzymatic production of xylooligosaccharide from selected agricultural wastes[J]. **Food and Bioproducts Processing**, 2009, 87: 145-151.
- [13] WANG J, SUN B, CAO Y, et al. In vitro fermentation of xylooligosaccharides from wheat bran insoluble dietary fiber by *Bifidobacteria*[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2010, 82: 419-423.
- [14] XIE Quanxi, XU Haiyan, CHEN Jing, et al. Research progress on xylooligosaccharide[J]. **Animal Husbandry and Feed Science**, 2012, 33(5-6): 30-34. (in Chinese)
- [15] VERMA D, KANAGARAJ A, JIN S, et al. Chloroplast-derived enzyme cocktails hydrolyse lignocellulosic biomass and release fermentable sugars[J]. **Plant Biotechnol Journal**, 2010, 8: 332-350.
- [16] JAYAPAL N, SAMANTA A K, KOLTE A, et al. Value addition to sugarcane bagasse: xylan extraction and its process optimization for xylooligosaccharides production[J]. **Industrial Crops and Products**, 2013, 42: 14-24.
- [17] TERRASAN C R F, TEMER B, DUARTE M C T, et al. Production of xylanolytic enzymes by *Penicillium janczewskii* [J]. **Bioresource Technology**, 2010, 101(11): 4139-4143.
- [18] MILLER P S, BLUM P H. Extremophile-inspired strategies for enzymatic biomass saccharification[J]. **Environ Technol**, 2010, 31: 1005-1015.
- [19] OCHS M, MUZARD M, PLANTIER R R, et al. Enzymatic synthesis of alkyl-beta-D-xylosides and oligoxylosides from xylans and from hydrothermally pretreated wheat bran[J]. **Green Chem**, 2011, 13: 2380-2388.
- [20] ALMEIDA J R M, RUNQUIST D, NOGUE V S I, et al. Stress-related challenges in pentose fermentation to ethanol by the yeast *Saccharomyces cerevisiae*[J]. **Biotechnol Journal**, 2011, 6: 286-299.
- [21] SAMANTA A K, JAYAPAL N, KOLTE A P, et al. Enzymatic production of xylooligosaccharides from alkali solubilized xylan of natural grass (*Sehimanervosum*) [J]. **Bioresource Technology**, 2012, 112: 199-205.
- [22] OTIENO D O, AHRING B K. The potential for oligosaccharide production from the hemicellulose fraction of biomasses through pretreatment processes: Xylooligosaccharides (XOS), arabinoooligosaccharides (AOS), and mannoooligosaccharides (MOS) [J]. **Carbohydrate Research**, 2012, 360: 84-92.
- [23] AKPINAR O, ERDOGAN K, BAKIR U, et al. Comparison of acid and enzymatic hydrolysis of tobacco stalk for preparation of xylo-oligosaccharides[J]. **Food Science and Technology**, 2010, 43: 119-125.
- [24] AHMED S, RIAZ S, JAMIL A. Molecular cloning of fungal xylanases: an overview[J]. **Appl Microbiol Biotechnol**, 2009, 84: 19-35.

- [25] HETTRICH K, FANTER C. Novel xylan gels prepared from oat spelts[J]. **Utilization of Lignocellulosic Materials**, 2010, 294: 141-150.
- [26] BRIENZO M, CARVALHO W, MILAGRES A M. Xylooligosaccharides production from alkali-pretreated sugarcane bagasse using xylanases from *Thermoascus aurantiacus*[J]. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, 2010, 162(4): 1195-1120.
- [27] NABARLATZ D, TORRAS C, MONTANE D. Purification of xylo-oligosaccharides from almond shells by ultrafiltration[J]. **Sep Purif Technol**, 2007, 53: 235-243.
- [28] OTIENO D O, AHRING B K. A thermochemical pretreatment process to produce xylooligosaccharides (XOS), arabinooligosaccharides (AOS) and mannoooligosaccharides (MOS) from lignocellulosic biomasses[J]. **Bioresource Technology**, 2012, 112: 285-292.
- [29] LIN Y S, TSENG M J, LEE W C. Production of xylooligosaccharides using immobilized endo-xylanase of *Bacillus halodurans* [J]. **Process Biochemistry**, 2011, 46: 2117-2121.
- [30] BARBOSA A M, DEKKER R F H, GIESE E C. Bioactive oligosaccharides: production, biological functions and potential commercial applications[M]. New York: Nova Science Publishers Inc, 2010.
- [31] NABARLATZ D, MONTANE D, KARDOSOVA A, et al. Almond shell xylo-oligosaccharides exhibiting immunostimulatory activity[J]. **Carbohydr Res**, 2007, 342: 1122-1128.
- [32] ZHOU S, LIU X, GUO Y, et al. Comparison of the immunological activities of arabinoxylans from wheat bran with alkali and xylanase-aided extraction[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2010, 81: 784-789.
- [33] 王远. 利用麦麸制备低聚木糖及其阿魏酸酯的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2010.
- [34] YU X, YIN J, LI L, et al. Prebiotic potential of Xylooligosaccharides derived from corn cobs and their in vitro antioxidant activity when combined with Lactobacillus[J]. **Journal of Microbiology Biotechnology**, 2015, 25: 1084-1092.
- [35] GAO Y, ZHANG S, LI C, et al. Acute and subchronic toxicity of xylooligosaccharides in mice and rats[J]. **Toxicology Mechanisms and Methods**, 2012, 22: 605-610.
- [36] OKU T, NAKAMURA A. Digestion, absorption, fermentation, and metabolism of functional sugar substitutes and their available energy[J]. **Pure Appl Chem**, 2002, 74: 1253-1261.
- [37] CLOETENS L, BROEKAERT W F, DELAEDT Y, et al. Tolerance of arabinoxylan-oligosaccharides and their prebiotic activity in healthy subjects: a randomised, placebo-controlled cross-over study[J]. **British Journal of Nutrition**, 2010, 103: 703-713.
- [38] SHEU W, LEE I T, CHEN W, et al. Effects of xylooligosaccharides in type 2 diabetes mellitus[J]. **Journal of Nutritional Science and Vitaminology**, 2008, 54: 396-401.
- [39] WANG J. Wheat bran xylooligosaccharides improve blood lipid metabolism and antioxidant status in rats fed a high-fat diet[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2011, 86(3): 1192-1197.
- [40] 杨书艳. 玉米芯酸酶法制备低聚木糖及其生理功能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007.
- [41] BROEKAERT W F, COURTIN C M, VERBEKE K, et al. Prebiotic and other health-related effects of cereal-derived arabinoxylans, arabinoxylan-oligosaccharides, and xylooligosaccharides[J]. **Crit Rev Food Sci Nutr**, 2011, 51: 178-194.
- [42] SARMA S M. Finger millet arabinoxylan protects mice from high-fat diet induced lipid derangements, inflammation, endotoxemia and gut bacterial dysbiosis[J]. **Int J Biol Macromol**, 2018, 106: 994-1003.
- [43] MAKI KC. Digestive and physiologic effects of a wheat bran extract, arabino-xylan-oligosaccharide, in breakfast cereal [J]. **Nutrition**, 2012, 28(11-12): 1115-1121.
- [44] CHUNG Y C, HSU C K, KO C Y, et al. Dietary intake of xylooligosaccharides improve the intestinal microbiota, fecal moisture and pH value in the elderly[J]. **Nutrition Research**, 2007, 27: 756-761.
- [45] GUERREIRO I, AOliva-Teles, P Enes. Improved glucose and lipid metabolism in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fed short-chain fructooligosaccharides and xylooligosaccharides[J]. **Aquaculture**, 2015, 441: 57-63.
- [46] HOSEINIFAR S H, MIRVAGHEFI. The study of some haematological and serum biochemical parameters of *Juvenile beluga* (*Husohuso*) fed oligofructose[J]. **Fish Physiol Biochem**, 2011, 37: 91-96.
- [47] SWENNEN K, DORNEZ E, MARZORATI M, et al. Structurally different wheat-derived arabinoxylo oligosaccharides have different prebiotic and fermentation properties in rats[J]. **J Nutr**, 2008, 138: 2348-2355.
- [48] STRADER A D, WOODS S C. Gastrointestinal hormones and food intake[J]. **Gastroenterology**, 2005, 128: 175-191.

- [49] Frost, Brynes, Dhillon. The effects of fiber enrichment of pasta and fat content on gastric emptying, GLP-1, glucose, and insulin responses to a meal[J]. **European Journal of Clinical Nutrition**, 2003, 57: 293-298.
- [50] Delzenne, Cani, Neyrinck. Modulation of glucagon-like peptide 1 and energy metabolism by inulin and oligofructose: experimental data[J]. **J Nutr**, 2007, 137: 2547-2551.
- [51] ANDERSON J W, BRIDGES S R, et al. Short-chain fatty acid fermentation products of plant fiber affect glucose metabolism of isolated rat hepatocytes[J]. **Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine**, 1984, 177(2): 372-376.
- [52] CUMMINGS J H, GIBSON G R, MACFARLANE G T. Quantitative estimates of fermentation in the hind gut of man[J]. **Acta Vet Scand Suppl**, 1989, 86: 76-82.
- [53] NIELSEN T S. Effects of resistant starch and arabinoxylan on parameters related to large intestinal and metabolic health in pigs fed fat-rich diets[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2015, 63(48): 10418-10430.
- [54] Hoffstedt J, Arner E, Wahrenberg H, et al. Regional impact of adipose tissue morphology on the metabolic profile in morbid obesity[J]. **Diabetologia**, 2010, 53: 2496-2503.
- [55] LAVIN J H, READ N W. The effect on hunger and satiety of slowing the absorption of glucose: relationship with gastric emptying and postprandial blood glucose and insulin responses[J]. **Appetite**, 1995, 25: 89-96.
- [56] KORBONITS M, GOLDSTONE A P, GUEORGUIEV M, et al. Ghrelin-a hormone with multiple functions[J]. **Front Neuroendocrinol**, 2004, 25: 27-68.
- [57] ASAKAWA A, INUI A, FUJIMIYA M, et al. Stomach regulates energy balance via acylated ghrelin and desacylghrelin[J]. **Gut**, 2005, 54: 18-24.
- [58] PEETERS T L. Ghrelin: a new player in the control of gastrointestinal functions[J]. **Gut**, 2005, 54: 1638-1649.
- [59] HADRI Z. Fructo-oligosaccharides reduce energy intake but do not affect adiposity in rats fed a low-fat diet but increase energy intake and reduce fat mass in rats fed a high-fat diet[J]. **Physiology & Behavior**, 2017, 182: 114-120.
- [60] WOLEVER T M S, TOSH S M, GIBBS A L, et al. Physicochemical properties of oat beta-glucan influence its ability to reduce serum LDL cholesterol in humans: a randomized clinical trial[J]. **The American Journal of Clinical Nutrition**, 2010, 92: 723-732.
- [61] GARCIA A L, OTTO B, WEICKERT M O, et al. Arabinoxylan consumption decreases postprandial serum glucose, serum insulin and plasma total ghrelin response in subjects with impaired glucose tolerance[J]. **European Journal of Clinical Nutrition**, 2007, 61(3): 334-341.
- [62] GUNNESS P, WILLIAMS B A, GERRITS W J, et al. Circulating triglycerides and bile acids are reduced by a soluble wheat arabinoxylan via modulation of bile concentration and lipid digestion rates in a pig model[J]. **Molecular Nutrition & Food Research**, 2016, 60(3): 642-651.
- [63] RURANGWA E, LARANJA J L, DELAEDT Y, et al. Selected nondigestible carbohydrates and prebiotics support the growth of probiotic fish bacteria mono-cultures in vitro[J]. **J Appl Microbiol**, 2009, 106(3): 932-940.
- [64] FEINLE B C, PATTERSON M, GHATEI M A, et al. Fat digestion is required for the suppression of ghrelin and stimulation of peptide YY and pancreatic polypeptide secretion by intraduodenal lipid[J]. **Am J Physiol Endocrinol Metab**, 2005, 289(6): 948-953.
- [65] LU Z X, WALKER K Z, MUIR J G, et al. Arabinoxylan fiber, a byproduct of wheat flour processing, reduces the postprandial glucose response in normoglycemic subjects[J]. **Am J Clin Nutr**, 2000, 71(5): 1123-1128.
- [66] OOI L G, LIONG M T. Cholesterol-lowering effects of probiotics and prebiotics: a review of in vivo and in vitro findings[J]. **Int J Mol Sci**, 2010, 11: 2499-2522.
- [67] LIA A, ANDERSSON H, MEKKI N, et al. Postprandial lipemia in relation to sterol and fat excretion in ileostomy subjects given oat-bran and wheat test meals[J]. **Am J Clin Nutr**, 1997, 66: 357-365.
- [68] LIA A, HALLMANS G, SANDBERG A S, et al. Oat beta-glucan increases bile acid excretion and a fiber-rich barley fraction increases cholesterol excretion in ileostomy subjects[J]. **Am J Clin Nutr**, 1995, 62: 1245-1251.
- [69] SAULNIER D M, KOLIDA S, GIBSON G R. Microbiology of the human intestinal tract and approaches for its dietary modulation[J]. **Curr Pharm Des**, 2009, 15: 1403-1414.
- [70] 张军华. 低聚木糖单一组分的制备分离及其用于双歧杆菌的体外培养[D]. 南京: 南京林业大学, 2005.
- [71] MACFARLANE G T, GIBSON G R, CUMMINGS J H. Comparison of fermentation reactions in different regions of the human

- colon[J]. **J Appl Bacteriol**, 1992, 72: 57-64.
- [72] BIRD A R, CONLON M A, CHRISTOPHERSEN C T, et al. Resistant starch, large bowel fermentation and a broader perspective of prebiotics and probiotics[J]. **Benefic. Microbes**, 2010, 1: 423-431.
- [73] IIDA T, YAMADA T, HAYASHI N, et al. Reduction of abdominal fat accumulation in rats by 8-week ingestion of a newly developed sweetener made from high fructose corn syrup[J]. **Food Chemistry**, 2013, 138(2-3): 781-785.
- [74] NIETO D M, EUGENIO de LI, PLOU F J, et al. Prebiotic effect of xylooligosaccharides produced from birchwoodxylan by a novel fungal GH11 xylanase[J]. **Food Chemistry**, 2017, 232: 105-113.
- [75] CHEN M H, SWANSON K, FAHEY G, et al. In vitro fermentation of xylooligosaccharides produced from miscanthusxgiganteus by human fecal microbiota[J]. **J Agric Food Chem**, 2016, 64(1): 262-267.
- [76] HALD S, SCHIOLDAN A G, MOORE M E, et al. Effects of arabinoxylan and resistant starch on intestinal microbiota and short-chain fatty acids in subjects with metabolic syndrome: a randomised crossover study[J]. **PLoS ONE**, 2016, 11(7): 0159223.
- [77] BURUIANA C T, VIZIREANU C, GARROTE G, et al. Manufacture and evaluation of xylooligosaccharides from corn stover as emerging prebiotic candidates for human health[J]. **LWT-Food Science and Technology**, 2017, 77: 449-459.
- [78] ANTOV M G, DORDEVIC T R. Environmental-friendly technologies for the production of antioxidant xylooligosaccharides from wheat chaff[J]. **Food Chemistry**, 2017, 235: 175-180.
- [79] 黄思思. 木聚糖在大鼠肠道的代谢特性研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2011.
- [80] ROBERFROID M, GIBSON G R, HOYLES L, et al. Prebiotic effects: Metabolic and health benefits[J]. **British Journal of Nutrition**, 2010, 104: 1-62.
- [81] GROOTAERT C, VAN den Abbeele P, MARZORATI M, et al. Comparison of prebiotic effects of arabinoxylan oligosaccharides and inulin in a simulator of the human intestinal microbial ecosystem[J]. **FEMS Microbiology Ecology**, 2009, 69: 231-242.
- [82] GERAYLOU Z, SOUFFREAU C, RURANGWA E, et al. Effects of dietary arabinoxylan-oligosaccharides and endogenous probiotics on the growth performance, non-specific immunity and gut microbiota of juvenile Siberian sturgeon[J]. **Fish & Shellfish Immunology**, 2013, 35(3): 766-775.
- [83] LI Z, SUMMANEN P H, KOMORIYA T, et al. In vitro study of the prebiotic xylooligosaccharide (XOS) on the growth of *Bifidobacterium spp* and *Lactobacillus spp*[J]. **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, 2015, 66: 919-922.
- [84] AACHARY A A, PRAPULLA S G. Xylooligosaccharides (XOS) as an emerging prebiotic: microbial synthesis, utilization, structural characterization, bioactive properties, and applications[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety**, 2011, 10: 2-16.
- [85] CHENG L, ZHANG X, HONG Y, et al. Characterisation of physicochemical and functional properties of soluble dietary fibre from potato pulp obtained by enzyme-assisted extraction[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2017, 101: 1004-1011.
- [86] SOLEIMANI A, TAGHIZADEH M, BAHMANI F, et al. Metabolic response to omega-3 fatty acid supplementation in patients with diabetic nephropathy: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial[J]. **Clinical Nutrition**, 2017, 36(1): 79-84.
- [87] HAENEN D, SOUZA da Silva C, ZHANG J, et al. Resistant starch induces catabolic but suppresses immune and cell division pathways and changes the microbiome in proximal colon of male pigs[J]. **Journal of Nutrition**, 2013, 143: 1889-1898.
- [88] GIBSON G R, SCOTT K P, RASTALL R A, et al. Dietary prebiotics: current status and new definition[J]. **IFIS Functional Foods Bulletin**, 2010, 7: 1-19.
- [89] HUA C, LIU L J, ZHU J J, et al. Chemical composition analysis of soybean oligosaccharides and its effect on ATPase activities in hyperlipidemic rats[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2010, 46(2): 229-231.
- [90] LUO Feijun, NIE Ying. A review on anticancer function of dietary fiber and the molecular mechanism[J]. **Journal of Food Science and Technology**, 2015, (12): 1233-1238. (in Chinese)
- [91] SAMUELSEN A B, RIEDER A, GRIMMER S, et al. Immunomodulatory activity of dietary fiber: arabinoxylan and mixed-linked Beta-glucan isolated from barley show modest activities in vitro[J]. **International Journal of Molecular Sciences**, 2011, 12: 570-587.
- [92] HROMADKOVA Z, PAULSEN B S, POLOVKA M, et al. Structural features of two heteroxylan polysaccharide fractions from wheat bran with anti-complementary and antioxidant activities[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2012, 93: 22-30.

- [93] ESLINGER A J, ELLER L K, REIMER R A. Yellow pea fiber improves glycemia and reduces *Clostridium leptum* in diet-induced obese rats[J]. **Nutrition Research**, 2014, 34(8): 714-722.
- [94] EELINGER T P, PLATZ E A, RIFAI N, et al. C-Reactive protein and the risk of incident colorectal cancer[J]. **Journal of the American Medical Association**, 2004, 291: 585-590.
- [95] MA Y, HEBERT J R, LI W, et al. Association between dietary fiber and markers of systemic inflammation in the women's health initiative observational study[J]. **Nutrition**, 2008, 24: 941-949.
- [96] RODRIGUEZ C M E, GALVEZ J, LORENTE M D, et al. Dietary fiber down-regulates colonic tumor necrosis factor alpha and nitric oxide production in trinitrobenzenesulfonic acid-induced colitic rats[J]. **Journal of Nutrition**, 2002, 132: 3263-3271.
- [97] CAO L, LIU X, QIAN T, et al. Antitumor and immunomodulatory activity of arabinoxylans: a major constituent of wheat bran[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2011, 48: 160-164.
- [98] MENDIS M, SIMSEK S. Arabinoxylans and human health[J]. **Food Hydrocolloids**, 2014, 42: 239-243.
- [99] VOLMAN J J, RMAKERS J D, PLAT J. Dietary modulation of immune function by beta glucans[J]. **Physiology & Behavior**, 2008, 94: 276-284.
- [100] AKHTAR M, TARIQ A F, AWAIS M M, et al. Studies on wheat bran Arabinoxylan for its immunostimulatory and protective effects against avian coccidiosis[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2012, 90: 333-339.
- [101] CAO L, LIU X, QIAN T, et al. Antitumor and immunomodulatory activity of arabinoxylans: a major constituent of wheat bran [J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2011, 48: 160-164.
- [102] YAMATOYA K, SHIRAKAWA M, KUWANO K, et al. Effect of hydrolyzed xyloglucan on lipid metabolism in rats[J]. **Food Hydrocolloids**, 1996, 10: 369-372.
- [103] LICHT T R, EBERSBACH T, Frøkiær H. Prebiotics for prevention of gut infections[J]. **Trends in Food Science & Technology**, 2012, 23: 70-82.
- [104] ANNISON G, TOPPING D L. Nutritional role of resistant starch: chemical structure vs physiological function[J]. **Annual Review of Nutrition**, 1994, 14: 297-320.
- [105] ALEX S, LANGE K, AMOLO T, et al. Short-chain fatty acids stimulate angiopoietin-like 4 synthesis in human colon adenocarcinoma cells by activating peroxisome proliferator-activated receptor gamma[J]. **Molecular and Cellular Biology**, 2013, 33: 1303-1316.
- [106] HONTECILLAS R, BASSAGANYA R J. Peroxisome proliferator-activated receptor gamma is required for regulatory CD4+ T cell-mediated protection against colitis[J]. **The Journal of Immunology**, 2007, 178: 2940-2949.
- [107] BASSAGANYA R J, HONTECILLAS R. CLA and n-3 PUFA differentially modulate clinical activity and colonic PPAR-responsive gene expression in a pig model of experimental IBD[J]. **Clinical Nutrition**, 2006, 25: 454-465.
- [108] LEWIS J D, LICHTENSTEIN G R, DEREN J J, et al. Rosiglitazone for active ulcerative colitis: a randomized placebo-controlled trial[J]. **Gastroenterology**, 2008, 134: 688-695.
- [109] HOSONO A, OZAWA A, KATO R, et al. Dietary fructooligosaccharides induce immunoregulation of intestinal IgA secretion by murine Peyer's patch cells[J]. **Bioscience Biotechnology and Biochemistry**, 2003, 67: 758-764.
- [110] NAKAMURA Y, NOSAKA S, SUZUKI M, et al. Dietary fructooligosaccharides up-regulate immunoglobulin A response and polymeric immunoglobulin receptor expression in intestines of infant mice[J]. **Clinical and Experimental Immunology**, 2004, 137: 52-58.
- [111] GOBINATH D, MADHU A N, PRASHANT G, et al. Beneficial effect of xylo-oligosaccharides and fructo-oligosaccharides in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. **British Journal of Nutrition**, 2010, 104: 40-47.
- [112] VEENASHRI B R, MURALIKRISHNA G. In vitro antioxidant activity of xylooligosaccharides derived from cereal and millet bran-A comparative study[J]. **Food Chemistry**, 2011, 126: 1475-1481.
- [113] YEH C W, CHEN W J, CHIANG C T, et al. Suppression of fatty acid synthase in MCF-7 breast cancer cells by tea and tea polyphenols: a possible mechanism for their hypolipidemic effects[J]. **Pharmacogenomics Journal**, 2003, 3(5): 267-276.
- [114] ZHAO Xiaoping, PENG Zhen, LIU Bin, et al. Research on a method of xylan preparation from wheat bran[J]. **Journal of Food Science and Technology**, 2017(10): 1111-1115. (in Chinese)
- [115] ZHANG Xiaoi. The production and research development on application of xylooligosaccharide[J]. **China Food Additives**, 2009: 261-266. (in Chinese)