

# L-阿拉伯糖生理活性研究进展

王立, 王雨, 李言, 钱海峰

(江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** L-阿拉伯糖是植物中特有的五碳醛糖,具有良好的理化性质和健康功能,可广泛应用于食品、化工、医药等各个领域。L-阿拉伯糖具有抑制蔗糖吸收、改善胰岛素抵抗、降低血清甘油三酯、减少脂肪生成和改善肠道环境等方面的生理活性。作者综述了近年来 L-阿拉伯糖生理活性的研究进展及作用机制,为 L-阿拉伯糖进一步开发利用提供依据。

**关键词:** L-阿拉伯糖;调节血糖;糖脂代谢;肠道菌群

中图分类号:Q 539 文章编号:1673-1689(2021)01-0020-08 DOI:10.3969/j.issn. 1673-1689.2021.01.003

## Research Progress of Physiological Activities of L-Arabinose

WANG Li, WANG Yu, LI Yan, QIAN Haifeng

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** L-arabinose is a unique five-carbon aldose with good physicochemical properties and physiological activities, widely applied in various fields such as food, chemical and pharmaceutical industries. It can inhibit sucrose absorption, improve insulin resistance, reduce serum triglyceride, reduce fat production, and improve intestinal environment. The recent research progress and mechanism of L-arabinose-related physiological activities were summarized in this paper, providing a basis for the further development and utilization of L-arabinose.

**Keywords:** L-arabinose, regulating blood glucose, glycolipid metabolism, intestinal flora

L-阿拉伯糖是一种植物中特有的五碳醛糖,作为半纤维素、果胶和树胶等生物聚合物的基本组成单元广泛存在于自然界<sup>[1-3]</sup>。L-阿拉伯糖有两种环状结构:L-阿拉伯呋喃糖和 L-阿拉伯吡喃糖,在水溶液中以 L-阿拉伯吡喃糖为主,因为这种形式更稳定;但在细胞壁多糖和糖蛋白/蛋白多糖等天然存在的多糖中,L-阿拉伯呋喃糖残基含量要高一些<sup>[4]</sup>。

L-阿拉伯糖主要是从植物中分离提取获得,如甜菜浆、玉米皮、玉米芯、麦糠和甘蔗渣等<sup>[5-6]</sup>。制备

方法主要有酸碱水解法、酶法、微生物及化学合成法<sup>[7-8]</sup>。传统的提取方法是用酸碱水解植物纤维后经过滤、超滤、离子交换、浓缩结晶等精制工艺纯化后获得<sup>[9-11]</sup>,此方法工艺较为成熟,但纯化步骤较为复杂,且生产过程中会使用大量的酸碱,易造成环境污染。酶法和微生物法具有后续处理简单、反应条件温和、成本低、污染小等优点<sup>[12-14]</sup>,而且只要能够获得高效的酶制剂或筛选得到高水解能力的菌株,就很容易实现工业化生产。近年来,也有报道制备

收稿日期:2019-02-14

基金项目:国家自然科学基金项目(31671617)。

作者简介:王立(1978—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事功能因子及健康食品研究。E-mail:w10519@163.com

L-阿拉伯糖的新方法<sup>[15]</sup>,主要是利用木质纤维素的副产品、纯化多糖和含糖残基,以酸水解、酶解或酵母介导的生物法为基础,结合不同方法的优点提取L-阿拉伯糖。

高糖饮食会增加肥胖<sup>[16]</sup>、糖尿病<sup>[17]</sup>和心血管疾病<sup>[18]</sup>等慢性疾病的发生风险,限制饮食中糖分的含量及开发降低能量的新型甜味剂是解决这些问题的有效途径。L-阿拉伯糖是一种具有甜味的功能性糖,在肠道中吸收率低<sup>[19]</sup>,且具有多种生理作用,其中研究较多的是对餐后血糖的控制,可能的作用机制是L-阿拉伯糖非竞争性地抑制肠道蔗糖酶的活性<sup>[19-20]</sup>,从而抑制蔗糖的分解代谢,降低餐后血糖水平<sup>[21]</sup>。此外,L-阿拉伯糖在改善胰岛素抵抗<sup>[22]</sup>、降低血脂水平<sup>[23]</sup>、减少脂肪生成<sup>[24]</sup>、改善肠道环境以及促进肠道有益菌增殖<sup>[25]</sup>等方面具有独特的作用。

基于其对人体的多种健康作用,L-阿拉伯糖可广泛由应用于食品、化工和医药等各个领域,如替代部分蔗糖添加到饮料、烘焙食品、乳制品等中,改善因摄入较多蔗糖带来的健康隐患<sup>[26-28]</sup>。L-阿拉伯糖也是一种重要的医药中间体,可以用来合成一些核苷类药物如L-核糖、D-核糖等<sup>[29-30]</sup>,也可以作为核苷类抗病毒药物开发的前体物质<sup>[31]</sup>及合成氨基酸的前体物质<sup>[32-33]</sup>,L-阿拉伯糖还可以作为生产非离子型表面活性剂的原料<sup>[34-35]</sup>。从现有的研究报道来看,L-阿拉伯糖生理活性相关方面的研究主要是在动物实验和细胞实验中测定相关的生理活性指标并对其作用机制进行推测,但一些生理活性的机制尚不明确。作者综述了近年来L-阿拉伯糖在调节血糖、脂代谢以及促进肠道益生菌增殖等生理活性方面的研究进展。

## 1 L-阿拉伯糖的生理活性

### 1.1 调节血糖

L-阿拉伯糖属于难消化性糖,在小肠中消化吸收率低,进入大肠后被微生物发酵产生短链脂肪酸,因此其摄入后不会导致血糖的升高,且相关的动物实验结果和临床试验表明,L-阿拉伯糖能够通过抑制肠道蔗糖酶的活性有效降低餐后血糖水平和胰岛素水平,提高糖耐量、缓解胰岛素抵抗。

**1.1.1 对血糖的调节作用** 在小肠内L-阿拉伯糖消化吸收率低,可以维持生化稳定性及有效作用浓度,并通过抑制蔗糖酶的活性抑制小鼠负荷蔗糖后

血糖和胰岛素水平的升高。Seri等<sup>[19]</sup>研究发现L-阿拉伯糖能够通过抑制肠道蔗糖酶的活性来显著抑制大鼠摄入蔗糖后血糖和胰岛素的升高,但对肠道中其他消化酶(麦芽糖酶、异麦芽糖酶、葡萄糖淀粉酶及胰淀粉酶)的活性影响较小,并且阿拉伯糖的低吸收率能够使其在肠道中更好地发挥蔗糖酶抑制作用。L-阿拉伯糖回肠消化率及尿排泄率与使用剂量相关<sup>[36]</sup>,并且在动物实验中发现L-阿拉伯糖能显著提高盲肠长度和质量<sup>[37]</sup>。

在人体试验中L-阿拉伯糖也具有相同的功效。与单独摄入蔗糖相比,受试者血液中的葡萄糖浓度能减少18%~31%,连续服用该制剂4周后,胰岛素循环浓度下降了28%,且受试者无不良反应,表明使用该配方能安全降低血液中的葡萄糖和胰岛素水平<sup>[22]</sup>。与其他调节血糖的功能因子妥善配合使用以强化L-阿拉伯糖功效也将会是今后研究的重点内容之一。蔗糖饮料中添加L-阿拉伯糖可以降低健康男性餐后血糖水平、胰岛素水平,并且不会对胃肠道产生不良影响<sup>[38]</sup>,这表明L-阿拉伯糖与蔗糖共同摄入时,由于肠道中蔗糖消化延迟、葡萄糖吸收减慢,引起血糖和胰岛素反应的延迟和降低。与此相比,Halschou-Jensen等<sup>[39]</sup>将L-阿拉伯糖添加到含有小麦淀粉的固体或半固体混合膳食中并没有明显观察到L-阿拉伯糖降低餐后血糖、胰岛素水平的作用。

已有较多的研究证实了L-阿拉伯糖可以抑制蔗糖摄入引起的血糖水平升高,但淀粉是饮食中提供葡萄糖的主要来源,饮食中淀粉的摄入量高于蔗糖,因此L-阿拉伯糖能否调节淀粉摄入后的血糖水平显得尤为重要。在观察天然酶抑制剂木槿、豆类提取物和L-阿拉伯糖对大鼠淀粉和蔗糖吸收的抑制作用的实验中,Preuss等<sup>[40]</sup>发现L-阿拉伯糖可以几乎完全抑制大鼠摄取蔗糖后的血糖升高,但对摄取大米淀粉后的血糖影响不显著。但Jurgon等<sup>[41]</sup>研究发现,与喂食蔗糖相比,灌胃L-阿拉伯糖5 min后喂食淀粉,大鼠餐后血糖的升高受到更为明显抑制,说明L-阿拉伯糖不仅能够抑制蔗糖酶活性还能够抑制淀粉消化过程中所涉及的酶的活性(淀粉酶、麦芽酶)。对L-阿拉伯糖能否调节淀粉摄入后的血糖水平,Preuss等<sup>[40]</sup>和Jurgon等<sup>[41]</sup>所得实验结果不相同,这有可能是两者使用的研究方法及L-阿拉伯糖用量不一致所导致。Preuss等在大鼠摄入大米

淀粉前半小时和摄入淀粉时都灌胃 0.5 g L-阿拉伯糖, 每只成年大鼠共摄入 1 g L-阿拉伯糖, 淀粉摄入量为 2 g, 而 Jurgon 等是灌胃 L-阿拉伯糖 5 min 后喂食淀粉, 平均每只成年大鼠使用 9.8 mg 的 L-阿拉伯糖。关于 L-阿拉伯糖的最佳用量、使用方法及 L-阿拉伯糖能否调节淀粉摄入后的血糖水平有待进行深入研究。

**1.1.2 调节血糖的作用机制** 一般来说, 天然活性成分调节血糖水平主要是从以下几个方面实现: 抑制  $\alpha$  糖苷酶活性, 减少糖分摄入量; 修复受损的胰岛  $\beta$  细胞, 促进胰岛  $\beta$  细胞分泌胰岛素或拟胰岛素作用; 增加胰岛素受体敏感性或增加胰岛素受体数量; 抗氧化剂作用, 清除自由基等<sup>[42-43]</sup>。研究表明: L-阿拉伯糖降低餐后血糖最可能的作用机制是其通过形成酶-抑制剂-底物复合物而非竞争性地抑制肠道蔗糖酶活性, 抑制膳食中蔗糖的分解代谢, 进而降低对葡萄糖的吸收、降低血糖水平, 并通过降低循环血糖改善胰岛素抵抗, 增强糖耐量<sup>[19-20]</sup>。也有研究表明, L-阿拉伯糖能够抑制蔗糖酶活性和抑制淀粉消化过程中所涉及的酶的活性 (淀粉酶、麦芽酶)<sup>[40-41]</sup>。

除了抑制肠道中相关消化酶的活性外, L-阿拉伯糖对胰岛  $\beta$  细胞也有保护作用, 长期高糖膳食迫使大鼠胰岛  $\beta$  细胞长期高负荷分泌胰岛素来平衡血糖, 导致胰岛细胞受损, 胰岛素分泌功能下降, 而 L-阿拉伯糖干预后大鼠的胰岛细胞受损程度降低, 有利于胰岛素的分泌、稳定血糖, 从而提高 2 型糖尿病大鼠的糖耐量、降低胰岛素抵抗<sup>[44]</sup>。葡萄糖利用的限速步骤是葡萄糖转运蛋白协助葡萄糖跨膜转运, 敲除小鼠肌肉中 *GLUT4* 基因可导致胰岛素抵抗和糖耐量下降<sup>[45]</sup>。有研究表明, L-阿拉伯糖能促使代谢综合征大鼠 *GLUT4* 水平正常化, 促进葡萄糖摄取和利用, 这也可能是 L-阿拉伯糖降低血糖、减轻胰岛素抵抗的重要原因之一<sup>[46]</sup>。长期高水平的游离脂肪酸能抑制胰岛素分泌、损害胰岛  $\beta$  细胞功能<sup>[47-48]</sup>, L-阿拉伯糖干预治疗使代谢综合征大鼠血清中高游离脂肪酸水平趋于正常, 减轻脂质毒性、改善脂代谢紊乱, 并减轻胰岛素抵抗, 促进葡萄糖的利用<sup>[49]</sup>。基于其良好的理化性质和生理活性, L-阿拉伯糖抑制餐后血糖的作用可用于功能性食品添加剂和糖尿病的治疗。

## 1.2 调节脂代谢

L-阿拉伯糖除了能降低餐后血糖水平, 还具有调节脂代谢的作用。有报道显示 L-阿拉伯糖能有效降低血清中总甘油三酯含量和低密度脂蛋白水平, 提高高密度脂蛋白水平, 并且能有效抑制脂肪堆积、控制体质量。

**1.2.1 对脂代谢的调节作用** L-阿拉伯糖可以改善肥胖模型的血脂情况, 刘秋晨<sup>[50]</sup>、吴汉洲<sup>[51]</sup>和何丽<sup>[52]</sup> 等通过喂养高糖高脂饲料分别建立昆明小鼠、新西兰大白兔和 Wistar 大鼠肥胖模型, 同时进行 L-阿拉伯糖干预, 结果显示 L-阿拉伯糖剂量依赖性地降低血清中总甘油三酯水平并提高高密度脂蛋白水平, 同时有效抑制脂肪堆积和控制体质量。

高糖膳食引起的高血糖水平会提高脂肪合成酶活性和血清甘油三酯的水平, 过量摄入的糖转化为脂肪, 造成体内脂肪增加。Osaki 等<sup>[24]</sup>研究发现饲料中添加 L-阿拉伯糖能有效降低由于高蔗糖饮食引起的大鼠肝脏中甘油三酯浓度的升高和脂肪合成酶 (乙酰辅酶 A 羧化酶、脂肪酸合酶和 ATP 柠檬酸裂合酶) 活性的增加, 能降低血清中甘油三酯和胰岛素浓度。Fujii 等<sup>[25]</sup>发现同时摄入 L-阿拉伯糖和蔗糖, 大鼠体质量明显下降, 大鼠血清中甘油三酯水平和脂肪组织质量也降低, 具有很强的量效关系。

以上研究表明: 在不同的动物模型中, L-阿拉伯糖均能有效改善血脂情况、抑制脂肪堆积, 但不同动物模型中改善情况有所不同, 并且 L-阿拉伯糖对脂代谢的调节作用与膳食类型及其摄入方式密切相关。因此, 有必要围绕膳食协同及摄入方式等方面开展研究。

**1.2.2 调节脂代谢的作用机制** 通常以甘油三酯、总胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇、脂肪组织质量及与脂肪代谢相关的酶活性等相关指标来评价 L-阿拉伯糖对脂代谢的调节作用, 并且从短链脂肪酸水平、益生菌对胆汁酸的调节及肝脏中与脂质代谢相关酶的基因表达水平等方面解释其作用机制。

Lei 等<sup>[46]</sup>研究 L-阿拉伯糖对高碳水化合物、高脂肪饮食诱导的代谢综合征大鼠的健康作用时发现, 代谢综合征大鼠经喂食 L-阿拉伯糖 6 周后, 体质量、甘油三酯、总胆固醇、瘦素含量明显降低, 从脂肪酸代谢相关基因的表达水平看出, L-阿拉伯糖治疗后显著增加了肝脏组织中 *CPT-1a* 和 *PDK4*

mRNA 的表达水平,降低了肝脏组织中 *ACCa* mRNA 的表达水平。脂肪生成转录因子(adipogenic transcription factor, SREBP-1c) 调控脂质代谢中许多重要基因的转录,热量摄取过多会诱导其过表达,L-阿拉伯糖可能是通过下调 *SREBP-1c* 及其靶基因 *ACC* 和 *FAS* 的表达,降低脂肪生成<sup>[53-54]</sup>。李凯<sup>[49]</sup>也报道阿拉伯糖可以通过上调肝脏组织中 *CPT-1a* 和 *PDK4* 的表达量、下调 *ACCa* mRNA 的表达量来改善糖脂代谢紊乱。

L-阿拉伯糖被认为是一种益生元,可以促进肠道菌群中双歧杆菌和乳酸菌等益生菌增殖,进而通过调节胆汁酸代谢提高粪便中胆固醇排泄、降低胆固醇吸收及其选择性发酵产生短链脂肪酸(Short-chain fatty acids, SCFAs) 调节人和动物的胆固醇水平<sup>[55-56]</sup>。SCFAs 可以通过增加脂肪氧化促进能量消耗,过氧化物酶体增殖物激活受体  $\gamma$  (peroxisome proliferator-activated receptor, PPAR $\gamma$ ) 是脂肪代谢的关键调控因子,SCFAs 能诱导肝脏中 PPAR $\gamma$  减少,进一步降低肝脏中甘油三酯浓度、减少脂肪组织质量<sup>[57]</sup>。还有研究结果表明 SCFAs 可以通过 SCFAs 受体 G 蛋白偶联受体 43 (G protein-coupled receptors, GPCR43) 激活瘦素的表达来调节脂肪代谢<sup>[58-60]</sup>。

未被消化吸收的蔗糖及低吸收率的 L-阿拉伯糖被肠道菌群发酵,益生菌及发酵产生的短链脂肪酸参与脂代谢的调节。L-阿拉伯糖也能促进脂肪细胞中甘油三酯的代谢,使其分解为脂肪酸和甘油,影响组织细胞对葡萄糖的摄取和利用<sup>[61-62]</sup>,促进组织细胞利用脂肪酸供能。此外,L-阿拉伯糖非竞争性地抑制肠道蔗糖酶的活性,抑制蔗糖的分解代谢,减少葡萄糖的吸收量,降低新脂肪的合成,达到调节脂质代谢、控制体质量的目的。益生菌及 SCFAs 在 L-阿拉伯糖调节脂肪代谢中发挥的作用还有待进一步研究,L-阿拉伯糖如何调控糖脂代谢相关基因的表达也将成为后续研究的方向。

### 1.3 调节肠道菌群

膳食是影响肠道菌群组成和代谢活动的主要因素之一,摄入不可消化碳水化合物有利于维持肠道健康,L-阿拉伯糖属于难消化性糖,可以促进肠道菌群中双歧杆菌和乳酸菌等益生菌的增殖<sup>[63]</sup>。

**1.3.1 对肠道调节的作用** L-阿拉伯糖能有效缓解便秘模型小鼠的便秘症状,与便秘组相比,不同

剂量的 L-阿拉伯糖(1.5、3.0、4.5 g/kg)<sup>[64]</sup>及 L-阿拉伯糖和蔗糖不同比例的复配物<sup>[65]</sup>均能明显提高小肠内容物的推进率、增加排便次数和粪便质量、软化小鼠粪便及缩短小鼠首次排便时间等,且剂量效应明显。刘秋晨等<sup>[66]</sup>用 L-阿拉伯糖灌胃便秘型小鼠 15 d 同样发现 L-阿拉伯糖有较好的润肠通便效果,可以明显促进小鼠小肠运动、增加排便质量及缩短小鼠首次排便时间。

L-阿拉伯糖与蔗糖的共同摄入能有效增加盲肠中短链脂肪酸的含量并调节肠道菌群的组成及代谢活动,进而影响其他物质的代谢。将质量分数 1.0% 和 2.5% 的 L-阿拉伯糖添加到含质量分数 20% 蔗糖的饲料中,饲喂大鼠 30 d,结果表明 L-阿拉伯糖与蔗糖共同摄入能有效增加盲肠质量和盲肠中短链脂肪酸含量,如乙酸、乳酸盐、丙酸和琥珀酸等,而在没有蔗糖的饲料中上述现象不明显<sup>[25]</sup>。按质量分数 0.5%、1.0% 的比例将 L-阿拉伯糖加入含蔗糖的饲料中,饲养 70 d,大鼠盲肠 pH 值明显降低,同样若饲料中无蔗糖会降低大鼠盲肠的酸化效果<sup>[24]</sup>。用质量分数 0.05% 大豆昔元和 2.5% L-阿拉伯糖喂食雄性小鼠 28 d,研究 L-阿拉伯糖对小鼠肠道菌群和大豆昔元代谢的影响,发现喂食 L-阿拉伯糖的小鼠粪便中脂质含量较高,肠道菌群中拟杆菌和双歧杆菌的占比高,而对照组中乳酸菌和普氏菌的占比高<sup>[67]</sup>,这表明不同的肠道菌对 L-阿拉伯糖的利用度不同,L-阿拉伯糖通过改变肠道菌群的代谢活性,进一步影响肠道菌群对其他物质的代谢。

**1.3.2 促进肠道健康的机制** L-阿拉伯糖在小肠中消化吸收率低,稳定性好,属于难消化性糖<sup>[68]</sup>,难消化性糖及膳食纤维在肠道内被微生物发酵产生短链脂肪酸,不同纤维源产生的短链脂肪酸种类和产量不同,影响肠道环境及肠道菌群的组成<sup>[69-70]</sup>。有研究表明,猪肠道中微生物降解 L-阿拉伯糖,显著增加了猪回肠中总挥发性脂肪酸的生成速率<sup>[71]</sup>。Sanai 等<sup>[72]</sup>通过观察 <sup>14</sup>C 标记蔗糖在大鼠胃肠道中消化和吸收情况发现,在 L-阿拉伯糖干预组的大鼠盲肠内,可见大量未消化的 <sup>14</sup>C 标记蔗糖及其代谢产物。L-阿拉伯糖干预能抑制肠道蔗糖酶的活性,未被消化吸收的蔗糖及低吸收率的 L-阿拉伯糖进入大肠被肠道菌群发酵,产生的短链脂肪酸降低了肠道 pH 值,而酸性肠道环境有助于双歧杆菌、乳酸菌等益生菌的生长和增殖,抑制对 pH 敏感的致病菌

生长,维持益生菌的菌群优势<sup>[73-74]</sup>。同时,产生的短链脂肪酸及 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub> 等气体还会升高肠道内渗透压、增强肠蠕动、湿润软化粪便等,有利于润肠通便,缓解便秘。韩澄等<sup>[75]</sup>从对神经递质水平的调节方面阐释了 L-阿拉伯糖的润肠通便作用,胃肠动力障碍与特定的胃肠激素、神经递质水平异常有关,而 L-阿拉伯糖可以促进便秘型小鼠神经递质 5-羟色胺、血浆 P 物质、胃动素分泌,降低一氧化氮分泌,起到润肠通便、防治便秘的功效。目前,有关 L-阿拉伯糖对肠道功能和肠道微生物群的影响及其相关机制的了解还较少,有待进一步研究。

#### 1.4 其他功能

除以上生理活性之外,L-阿拉伯糖在护肝、改变骨骼肌纤维的组成、抗氧化及抗炎症等方面的生理活性也有相关的研究报道,但研究较少,相关机理尚不明确,还需进一步研究。

L-阿拉伯糖具有护肝的作用。当肝脏组织发生病变时,丙氨酸转氨酶和天冬氨酸转氨酶就会从肝细胞释放到血清中,血清中转氨酶水平迅速升高。吕晓玲等<sup>[76]</sup>发现阿拉伯糖可以缓解 2 型糖尿病大鼠肝脏组织的损伤。周克夫等<sup>[77]</sup>也表明阿拉伯糖可有效地改善高糖高脂饮食饲喂小鼠的肝损伤情况。L-阿拉伯糖能够促进肝脏内乙醛脱氢酶的分泌,加快乙醛分解为乙酸的速度,达到抑制醉酒和酒后快速醒酒的效果,有效缓解酒精对肝脏和肠胃的损伤<sup>[78]</sup>。L-阿拉伯糖对特定条件下诱导的高尿酸血症小鼠

的尿酸水平也具有调节作用<sup>[79]</sup>。

L-阿拉伯糖能改变骨骼肌纤维的组成,增加腹直肌中 1 型纤维的数量、抑制腹部脂肪组织的累积<sup>[80]</sup>,1 型肌纤维摄取葡萄糖的能力大于 2 型肌纤维,增加其比例可以改善糖尿病患者的胰岛素抵抗症状<sup>[81]</sup>。

L-阿拉伯糖对氧化应激有抑制作用。L-阿拉伯糖显著抑制高糖诱导的细胞毒性和脂质过氧化,并抑制一氧化氮的形成。L-阿拉伯糖还能缓解乳糖不耐症,向纯奶和配方奶粉中添加 L-阿拉伯糖,不仅能促进肠道内益生菌增殖,同时能产生乳糖酶,促使乳糖不耐症人群对乳糖等营养成分的分解。

## 2 展望

围绕 L-阿拉伯糖在调节餐后血糖、改善血脂、改善肠道环境以及促进肠道益生菌增殖等生理活性方面已开展了较多的研究,并取得了一些研究结果。但对于 L-阿拉伯糖的具体作用机制,以及如何有效应用方面的研究仍不够充分。建议后续可以围绕以下几个方面开展研究:1)围绕膳食协同及摄入方式等方面开展研究,明确 L-阿拉伯糖与膳食纤维以及其他功能因子的协同作用;2)深入研究 L-阿拉伯糖对糖脂代谢和肠道菌群的作用机制,将其用于相关产品开发;3)开展人体实验,明确 L-阿拉伯糖在人体内的代谢机制,开发健康食品。

## 参考文献:

- [1] MIN L, MIN H, ZHI Z, et al. Determination and correlation of the solubility of L-arabinose and D-galactose in binary solvent mixtures from 278.15 to 333.15K[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2018, 35(10): 2043-2051.
- [2] 孟庆佳,李颂,董志忠. L-阿拉伯糖的功效研究进展[J]. *食品与发酵科技*, 2017, 53(5): 76-79.
- [3] 苏会波,林海龙. 新资源食品 L-阿拉伯糖的制备、功能、应用和市场现状[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(7): 368-372.
- [4] KOTAKE T, YAMANASHI Y, IMAIZUMI C, et al. Metabolism of L-arabinose in plants[J]. *Journal of Plant Research*, 2016, 129(5): 1-12.
- [5] AGUED O, MARI O, VANDERGHE M, et al. Fast and high yield recovery of arabinose from destarched wheat bran[J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 43(5): 318-325.
- [6] YVONNE W, STEFAN K, PIETER D W, et al. Branched arabino-oligosaccharides isolated from sugar beet arabinan[J]. *Carbohydrate Research*, 2010, 345(9): 1180-1189.
- [7] 李明泽,程雅韵,郑琳,等. 酸解法提取玉米芯中 L-阿拉伯糖的研究[J]. *河南农业大学学报*, 2017, 51(2): 207-211.
- [8] AHMED Z, SHIMONISHI T, BHUIYAN S H, et al. Biochemical preparation of L-Ribose and L-Arabinose from ribitol; a new approach[J]. *Journal of Bioscience Bioengineering*, 1999, 88(4): 444-448.
- [9] YU N, ZHU Z Y, LIU Y, et al. Chromatographic analysis and preparation of L-arabinose from corncob by acid hydrolysis[J]. *Indu-*

- strial Crops and Products**, 2017, 95:163-169.
- [10] 张泽生,徐梦莹,孙明哲,等. 酸性电解水水解玉米皮提取 L-阿拉伯糖的工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2017(4):141-146.
- [11] BRAVO C, GARCÉS D, FABA L, et al. Selective arabinose extraction from *Pinus* sp. sawdust by two-step soft acid hydrolysis[J]. **Industrial Crops and Products**, 2017, 104:229-236.
- [12] KURAKAKE M, TAKAO J, ASANO O, et al. Production of L-arabinose from corn hull arabinoxylan by *Arthrobacter aurescens* MK5 $\alpha$ -L-Arabinofuranosidase[J]. **Journal of Food Science**, 2011, 76(2):231-235.
- [13] CHENG H, WANG H, LV J, et al. A novel method to prepare L-Arabinose from xylose mother liquor by yeast-mediated biopurification[J]. **Microbial Cell Factories**, 2011, 10(1):43.
- [14] FEHÉR C, GÁL B, FEHÉR A, et al. Investigation of commercial enzyme preparations for selective release of arabinose from corn fibre[J]. **Journal of Chemical Technology Biotechnology**, 2015, 90(7):1329-1337.
- [15] FEHÉR C. Novel approaches for biotechnological production and application of L-arabinose [J]. **Journal of Carbohydrate Chemistry**, 2018, 37(5):251-84.
- [16] MEDINAREMÓN A, KIRWAN R, LAMUELARAVENTÓS R M, et al. Dietary patterns and the risk of obesity, type 2 diabetes mellitus, cardiovascular diseases, asthma, and neurodegenerative diseases [J]. **Critical Reviews in Food Science**, 2018, 58(2):262-296.
- [17] HE B, LONG W, LI X, et al. Sugar-sweetened beverages consumption positively associated with the risks of obesity and hypertriglyceridemia among children aged 7-18 years in south China [J]. **Journal of Atherosclerosis & Thrombosis**, 2018, 25(1):81-89.
- [18] YUAN S, LI X, JIN Y, et al. Chocolate consumption and risk of coronary heart disease, stroke, and diabetes: a meta-analysis of prospective studies[J]. **Nutrients**, 2017, 9(7):688.
- [19] SERI K, SANAI K, MATSUO N, et al. L-Arabinose selectively inhibits intestinal sucrase in an uncompetitive manner and suppresses glycemic response after sucrose ingestion in animals[J]. **Metabolism—clinical Experimental**, 1996, 45(11):1368-1374.
- [20] SHIBANUMA K, HOUDA K J. Determination of the transient period of the EIS complex and investigation of the suppression of blood glucose levels by L-arabinose in healthy adults[J]. **European Journal of Nutrition**, 2011, 50(6):447-453.
- [21] INOUE S, SANAI K, SERI K. Effect of L-arabinose on blood glucose level after ingestion of sucrose-containing food in human [J]. **Nipponyo Shokuryo Gakkaishi**, 2000, 53(6):243-247.
- [22] KAATS G R, KEITH S C, KEITH P L, et al. A combination of L-arabinose and chromium lowers circulating glucose and insulin levels after an acute oral sucrose challenge[J]. **Nutrition Journal**, 2011, 10(1):42-47.
- [23] OOI L G, LIONG M T. Cholesterol-Lowering effects of probiotics and prebiotics: a review of *in vivo* and *in vitro* findings[J]. **International Journal of Molecular Sciences**, 2010, 11(6):2499-2522.
- [24] OSAKI S, KIMURA T, SUGIMOTO T, et al. L-arabinose feeding prevents increases due to dietary sucrose in lipogenic enzymes and triacylglycerol levels in rats[J]. **Journal of Nutrition**, 2001, 131(3):796-799.
- [25] FUJII M, HOU D, SANADA H, et al. Effects of L-Arabinose on serum neutral lipid, weights of fat pads and cecum, and on organic acids in cecum in rats[J]. **J Apple Glycosci**, 2000, 47(3):355-361.
- [26] 刘伟,孙晗,周雅琳,等. 一种含水溶性膳食纤维和 L-阿拉伯糖的营养配方粉对饲喂高脂饲料大鼠血糖及血脂的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(8):95-103.
- [27] 王梓山. L-阿拉伯糖在巧克力和蛋糕中的应用前景[N]. 中国食品报, 2012-01-18(8).
- [28] 李玉邯,王维坚,陈宇飞,等. L-阿拉伯糖在曲奇饼干中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(6):100-103.
- [29] CHELAIN E, FLOCH O, CZERNECKI S. New synthesis of L-Ribofuranose derivatives from L-Xylose [J]. **Journal of Carbohydrate Chemistry**, 1995, 14(8):1251-1256.
- [30] TIEN-KIEU N, MOON-GI H, PAHN-SHICK C, et al. Biochemical properties of L-arabinose isomerase from *Clostridium hylemonae* to produce D-tagatose as a functional sweetener[J]. **PLOS ONE**, 2018, 13(4):196-199.
- [31] DU J, CHOI Y, LEE K, et al. A practical synthesis of L-FMAU from L-arabinose [J]. **Nucleosides Nucleotides**, 1999, 18(2):187-195.
- [32] GOPINATH V, MEISWINKEL T M, WENDISCH V F, et al. Amino acid production from rice straw and wheat bran hydrolysates

- by recombinant pentose-utilizing *Corynebacterium glutamicum*[J]. **Applied Microbiology Biotechnology Letters**, 2011, 92(5): 985-996.
- [33] SCHNEIDER J, NIERMANN K, WENDISCH V. Production of the amino acids L-glutamate, L-lysine, L-ornithine and L-arginine from arabinose by recombinant *Corynebacterium glutamicum*[J]. **Journal of Biotechnology**, 2011, 154(2): 191-198.
- [34] MÉLINE T, MUZARD M, DELEU M, et al. D-Xylose and L-arabinose laurate esters; enzymatic synthesis, characterization and physico-chemical properties[J]. **Enzyme and Microbial Technology**, 2018, 112: 14-21.
- [35] BOUQUILLON S. D-Xylose and L-Arabinose-based surfactants; synthesis, reactivity and physico-chemical properties [J]. **Comptes Rendus Chimie**, 2011, 14(7-8): 716-725.
- [36] SCHUTTE J B, VAN L P, LICHTENDONK W J. Ileal digestibility and urinary excretion of D-xylose and L-arabinose in ileostomized adult roosters[J]. **Poultry Science**, 1991, 70(4): 884-891.
- [37] SCHUTTE J B. Nutritional implications and metabolizable energy value of D-xylose and L-arabinose in chicks [J]. **Poultry Science**, 1990, 69(10): 1724-1730.
- [38] INGER K M, OLE H, INGE T, et al. The effects of L-arabinose on intestinal sucrase activity; dose-response studies *in vitro* and in humans[J]. **American Journal of Clinical Nutrition**, 2011, 94(2): 472-478.
- [39] HALSCHOU-JENSEN K, KNUDSEN K E, NIELSEN S, et al. A mixed diet supplemented with L-arabinose does not alter glycaemic or insulinaemic responses in healthy human subjects[J]. **British Journal of Nutrition**, 2015, 113(1): 82-88.
- [40] PREUSS H G, ECHARD B, BAGCHI D, et al. Inhibition by natural dietary substances of gastrointestinal absorption of starch and sucrose in rats and pigs: 1. acute studies[J]. **International Journal of Medical Sciences**, 2007, 4(4): 196-202.
- [41] JURGON A, KROTKIEWSKI M, JUSKIEWICZ J, et al. Suppression of postprandial glycaemia by L-arabinose in rats is more associated with starch than sucrose ingestion - a short report [J]. **Polish Journal of Food and Nutrition Sciences**, 2015, 65(1): 57-60.
- [42] JAYARAMAN R, SUBRAMANI S, SHEIK ABDULLAH S H, et al. Antihyperglycemic effect of hesperetin, a citrus flavonoid, extenuates hyperglycemia and exploring the potential role in antioxidant and antihyperlipidemic in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, 2018, 97: 98-106.
- [43] LACROIX I M E, LI-CHAN E C Y. Overview of food products and dietary constituents with antidiabetic properties and their putative mechanisms of action; a natural approach to complement pharmacotherapy in the management of diabetes[J]. **Molecular Nutrition & Food Research**, 2014, 58(1): 61-78.
- [44] WANG X, YAO X, YING Y, et al. Effect of L-arabinose on glucose and lipid metabolism in type 2 diabetic rats [J]. **Journal of Hygiene Research**, 2012, 41(2): 260-259.
- [45] ZISMAN A, PERONI O D, ABEL E D, et al. Targeted disruption of the glucose transporter 4 selectively in muscle causes insulin resistance and glucose intolerance[J]. **Nature Medicine**, 2000, 6(8): 924-928.
- [46] LEI H, LU X, SUN M, et al. Protective effects of L-arabinose in high-carbohydrate, high-fat diet-induced metabolic syndrome in rats[J]. **Food Nutrition Research**, 2015, 59(1): 28886.
- [47] RODEN M, PRICE T B, PERSEGHIN G, et al. Mechanism of free fatty acid-induced insulin resistance in humans[J]. **Journal of Clinical Investigation**, 1996, 97(12): 2859-2865.
- [48] CHEN J W, KONG Z L, TSAI M L, et al. Tetrahydrocurcumin ameliorates free fatty acid-induced hepatic steatosis and improves insulin resistance in HepG2 cells[J]. **Journal of Food and Drug Analysis**, 2018, 26(3): 1075-1085.
- [49] 李凯. L-阿拉伯糖对MS大鼠糖脂代谢的干预作用[D]. 天津:天津科技大学, 2014.
- [50] 刘秋晨. L-阿拉伯糖降低血糖和体重以及缓解便秘的功能研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2013.
- [51] 吴汉洲, 韩伟, 谢予朋, 等. L-阿拉伯糖对喂养高糖高脂饲料的新西兰大白兔血糖代谢的影响[J]. **中国医药导刊**, 2009, 11(7): 1165-1167.
- [52] 何丽, 满青青, 仇芝林, 等. L-阿拉伯糖对正常及高糖高脂喂养大鼠生长及糖脂代谢的影响[J]. **中国食品卫生杂志**, 2009, 21(5): 406-409.
- [53] PAYNE V A, WOSHING A U, LOWE C E, et al. C/EBP transcription factors regulate SREBP1c gene expression during adipogenesis[J]. **Biochemical Journal**, 2010, 425(1): 215-223.
- [54] LEE I, KIM J, RYOO I, et al. Lanostane triterpenes from *Ganoderma lucidum* suppress the adipogenesis in 3T3-L1 cells through down-regulation of SREBP-1c[J]. **Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters**, 2010; 20(18): 5577-5581.

- [55] CHEN X,DEVARAJ S. Gut microbiome in obesity, metabolic syndrome, and diabetes [J]. **Current Diabetes Reports**,2018,18(12):129.
- [56] MIREMADI F,SHERKAT F,STOJANOVSKA L. Hypocholesterolaemic effect and anti-hypertensive properties of probiotics and prebiotics :a review[J]. **Journal of Functional Foods**,2016,25:497-510.
- [57] GIJS D B,AYCHA B,ALBERT G,et al. Short-chain fatty acids protect against high-fat diet-induced obesity via a ppar $\gamma$  -dependent switch from lipogenesis to fat oxidation[J]. **Diabetes**,2015,64(7):2398-2408.
- [58] KOBAYASHI M,MIKAMI D,UWADA J,et al. A short-chain fatty acid, propionate, enhances the cytotoxic effect of cisplatin by modulating GPR41 signaling pathways in HepG2 cells[J]. **Oncotarget**,2018,9(59):31342-31354.
- [59] SOLIMAN M,KIMURA K,AHMED M,et al. Inverse regulation of leptin mRNA expression by short- and long-chain fatty acids in cultured bovine adipocytes[J]. **Domestic Animal Endocrinology**,2007,33(4):400-409.
- [60] YUMEI X,NORIMASA M,KENJI S,et al. Short-chain fatty acids stimulate leptin production in adipocytes through the G protein-coupled receptor GPR41 [J]. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**,2004,101(4):1045-1050.
- [61] GOSWAMI C,IWASAKI Y,YADA T. Short chain fatty acids suppress food intake by activating vagal afferent neurons [J]. **The Journal of Nutritional Biochemistry**,2018,57:130-135.
- [62] 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(6):561-571.
- [63] CLEMENTS S J,CARDING S R. Diet,the intestinal microbiota,and immune health in aging [J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**,2018,58(4):651-661.
- [64] 杨子明,董仲玺,吴建璋,等. L-阿拉伯糖润肠通便作用的研究[J]. **食品研究与开发**,2013,34(5):7-9.
- [65] 杨子明,董仲玺,吴建璋,等. L-阿拉伯糖和蔗糖复配物对便秘模型小鼠润肠通便作用的研究[J]. **食品工业科技**,2012,33(23):362-363.
- [66] 刘秋晨,单春乔,刘艳,等. L-阿拉伯糖缓解便秘作用的实验研究[J]. **黑龙江八一农垦大学学报**,2014,26(2):50-52.
- [67] MOTOI T,SACHIKO H. Effect of dietary l-arabinose on the intestinal microbiota and metabolism of dietary daidzein in adult mice[J]. **Food and Health**,2012,31(3):59-65.
- [68] VISHNUPRIYA G,MARIA S,DIDEM I,et al. Gastrointestinal tolerance and glycemic response of isomaltooligosaccharides in healthy adults[J]. **Nutrients**,2018,10(3):301.
- [69] GIJS D B,KAREN V E,GROEN A K,et al. The role of short-chain fatty acids in the interplay between diet, gut microbiota, and host energy metabolism[J]. **Journal of Lipid Research**,2013,54(9):2325-2340.
- [70] SASAKI D,SASAKI K,IKUTA N,et al. Low amounts of dietary fibre increase *in vitro* production of short-chain fatty acids without changing human colonic microbiota structure[J]. **Scientific Reports**,2018,8(1):435.
- [71] SCHUTTE J B,DE JONG J,VAN WEERDEN E J,et al. Nutritional implications of L-arabinose in pigs [J]. **British Journal of Nutrition**,1992,68(1):195-207.
- [72] SANAI K S K,INOUE S. Inhibition of sucrose digestion and absorption by L-arabinose in rats [J]. **Journal of Japanese Society of Nutrition and Food Science**,1997,50(2):133-137.
- [73] DAHIYA D K,RENUKA,MONICA P,et al. Gut microbiota modulation and its relationship with obesity using prebiotic fibers and probiotics :a review[J]. **Frontiers in Microbiology**,2017,8:563.
- [74] QING Q F,WEI D C,YAN D W. Gut microbiota :an integral moderator in health and disease [J]. **Frontiers in Microbiology**,2018,9:151.
- [75] 韩澄,蔡宋宋. L-阿拉伯糖对便秘小鼠神经递质水平的影响[J]. **食品与发酵科技**,2015,51:51-52.
- [76] 吕晓玲,张文娟,周艳华,等. L-阿拉伯糖对2型糖尿病大鼠肝损伤的干预作用[J]. **天津科技大学学报**,2013,28:1-4.
- [77] 周克夫,韩伟,张忠英,等. L-阿拉伯糖对高糖高脂喂养小鼠体重及耐糖量的影响[J]. **中国医药导刊**,2009,11(1):86-89.
- [78] 王成福,杜瑞峰,李林,等. L-阿拉伯糖解酒功能及机制[J]. **酿酒科技**,2018(6):138-142.
- [79] 杨子明,张利,陈月圆,等. L-阿拉伯糖对尿酸的调节作用[J]. **广西植物**,2017,37(12):1579-1585.
- [80] KIKUZAWA A,TANAKA N,ICHIKAWA M,et al. Effects of L-arabinose on skeletal muscle fiber composition[J]. **Nippon Eiyo Shokuryo Gakkaishi**,2005,58(2):51-57.
- [81] KEMMOCHI Y,OHTA T,MOTOHASHI Y,et al. Pathophysiological analyses of skeletal muscle in obese type 2 diabetes SDT, fatty rats[J]. **Journal of Toxicologic Pathology**,2018,31(2):113-123.